

现代科技

综述

大辞典

上

现代科技

综述

大辞典

下

现代科技

综述

大辞典

上

《现代科技综述大辞典》编委会
北京出版社

现代科技 综述 大辞典

下

《现代科技综述大辞典》编委会
北京出版社

现代科技综述大辞典
XIANDAI KEJI ZONGSHU DA CIDIAN
《现代科技综述大辞典》编委会

北京出版社出版
(北京北三环中路6号)
邮政编码: 100011

北京出版社总发行
新华书店北京发行所经销
北京朝阳展望印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 186.25印张 10 000 000字

1998年1月第1版 1998年1月第1次印刷

ISBN 7-200-02556-9
Z·261 定价: 380.00元

《现代科技综述大辞典》学术委员会

(按姓氏笔画)

- 于福熹 中国科学院院士 (光学材料、非晶态物理)
- 马在田 中国科学院院士 (地球物理)
- 马宗晋 中国科学院院士 国家地震局地质所所长(地质构造、地震预报、地球动力学)
- 王泽农 中国茶叶学会名誉理事长 (茶叶)
- 王淦昌 中国科学院院士 (高能物理、宇宙线等离子体物理、受控热核反应)
- 王淀佐 中国科学院院士 中国工程院院士 中国有色金属研究总院院长 (矿物工程)
- 王德宝 中国科学院院士 (核酸生化)
- 文圣常 中国科学院院士 (物理海洋学)
- 方成 中国科学院院士 (天文学)
- 石钟慈 中国科学院院士 (计算数学)
- 卢良恕 中国工程院副院长 (小麦育种、栽培、农业与科技发展)
- 叶朝辉 中国科学院武汉物理所所长 (物理)
- 宁津生 中国工程院院士 (大地测量)
- 匡定波 中国科学院院士 (红外及遥感)
- 师昌绪 中国科学院院士 中国工程院副院长 (金属学、金属物理)
- 朱清时 中国科学院院士 (物理化学)
- 刘广钧 中国科学院院士 (原子能技术、同位素分离)
- 刘永坦 中国科学院院士 中国工程院院士 (雷达技术、制导技术、信号处理)
- 刘有成 中国科学院院士 (有机化学)
- 闵桂荣 中国科学院院士 中国工程院院士 (工程热物理、空间技术)
- 许根俊 中国科学院院士 (生物化学)
- 许智宏 中国科学院副院长 (植物生理)
- 孙枢 中国科学院院士 国家自然科学基金委员会副主任 (沉积学、地质学)
- 孙家栋 中国科学院院士 中国航天工业总公司科技委主任 (火箭和卫星总体技术)
- 孙殿卿 中国科学院院士 (地质力学、第四纪冰川)
- 李再光 华中理工大学激光所所长 (激光技术)
- 李成荃 安徽省农科院名誉院长 (育种)
- 李庆远 中国科学院院士 (农业化学)
- 李依依 中国科学院院士 (冶金与金属材料)
- 李振声 中国科学院院士 (植物遗传育种)
- 李德仁 中国科学院院士 中国工程院院士 (航测与遥感)

吴阶平	中国科学院院士	中国科协副主席	(泌尿外科)
吴祖泽	中国科学院院士		(实验血液学、细胞生的学)
吴德馨	中国科学院院士	中国科学院微电子中心主任	(半导体器件与集成电路)
邱励俭	中国科学院合肥分院院长		(固体物理)
何炳林	中国科学院院士		(高分子化学)
汪耕	中国科学院院士		(电机设计与制造)
沈志云	中国科学院院士	中国工程院院士	西南交通大学机车车辆所所长 (机车车辆)
汤鸿霄	中国工程院院士		(环境工程、给水排水)
阳含熙	中国科学院院士	中国生态学会名誉理事长	(森林生态、植物生态)
苗永瑞	中国科学院院士	中国科学院陕西天文台名誉台长	(天体测量及时间频率)
林尚安	中国科学院院士		(高分子化学)
林励吾	中国科学院院士		(物理化学)
杨纪珂	中国能源研究会会长		(能源、环境保护)
杨叔子	中国科学院院士	华中理工大学校长	(机械工程)
杨雄里	中国科学院院士	中国科学院上海生理所所长	(神经生理学)
杨福家	中国科学院院士		(原子核物理及原子物理)
欧阳予	中国科学院院士	中国核工业总公司科技委副主任	(核反应堆、核电工程)
欧阳自远	中国科学院院士	中国科学院资源环境科学局局长	(天体化学与地球化学)
周秀骥	中国科学院院士	中国气象学院院长	(大气物理与遥感)
陈可冀	中国科学院院士		(中医及中西医结合)
陈华癸	中国科学院院士		(微生物学、土壤微生物学)
陈运泰	中国科学院院士	国家地震局地球物理所所长	(地球物理学)
陈述彭	中国科学院院士	中国科学院遥感应用所所长	(自然地理、地图学、遥感技术应用)
陈国达	中国科学院院士		(大地构造)
陈俊武	中国科学院院士		(炼油工程)
陈家镛	中国科学院院士		(化工、冶金)
张仁和	中国科学院院士	声场声信息国家重点实验室主任	(声学、水声学)
张光斗	中国科学院院士	中国工程院院士	(水利及水力发电)
张伯声	中国科学院院士		(构造地质)
张宗祜	中国科学院院士		(水文地质、工程地质)
张淑仪	中国科学院院士		(声学、光声学)
张奠成	中国微机应用学会理事长		(微机应用)
赵其国	中国科学院院士		(土壤物理)
侯云德	中国工程院院士	中国预防医学院病毒所所长	(病毒基因工程)
钟香崇	中国科学院院士		(耐火材料)

俞汝勤	中国科学院院士 湖南大学校长 (化学、分析化学)
施立明	中国科学院院士 (细胞遗传学)
姚开泰	中国科学院院士 湖南医科大学肿瘤所所长 (病理生理学)
姚 熹	中国科学院院士 西安交大电子材料与器件所所长 (电子器材与器件)
洪国藩	分子生物学国家实验室副主任 (生物化学)
袁道先	中国科学院院士 (水文地质、工程地质、岩溶学)
袁隆平	中国工程院院士 (杂交育种)
徐克勤	中国科学院院士 (地质学、矿床学)
徐叔云	安徽医科大学校长 中国药理学会副理事长 (药理学)
徐祖耀	中国科学院院士 (材料学)
徐家福	中国计算机学会副理事长 (计算机)
徐冠仁	中国科学院院士 (遗传育种)
徐 僊	中国科学院院士 (高分子化学、高分子材料)
钱令希	中国科学院院士 (工程力学、结构力学)
钱临照	中国科学院院士 (金属物理)
高为炳	中国科学院院士 (自动控制理论及应用)
高兆兰	超快速激光光谱学国家实验室学术委员会主任 (光谱学)
高守一	中国工程院院士 (微生物学)
高景德	中国科学院院士 (电机及电力系统过渡过程)
唐有祺	中国科学院院士 国家教委科技委主任 (物理化学)
唐崇惕	中国科学院院士 (寄生虫学)
阎隆飞	中国科学院院士 (植物生理及生物化学)
谈家桢	中国科学院院士 (细胞遗传学)
郭景坤	中国科学院院士 中国科学院上海硅酸盐所所长 (结构陶瓷和材料科学)
黄荣辉	中国科学院院士 (气象学)
黄耀曾	中国科学院院士 (有机化学)
梁栋材	中国科学院院士 (生物大分子结构)
屠守锷	中国科学院院士 (火箭总体设计)
陶诗言	中国科学院院士 (天气学)
葛庭燧	中国科学院院士 中国科学院固体物理所名誉所长 (金属物理学)
蒋新松	中国工程院院士 中国科学院沈阳自动化所所长 (机器人、工业控制)
程民德	中国科学院院士 (函数论)
童宪章	中国科学院院士 (石油开发)
温诗铸	摩擦学国家重点实验室主任 (摩擦学)
曾士迈	中国工程院院士 (植物病理学)

谢联辉	中国科学院院士	(植物病理学)
谢毓元	中国科学院院士	(有机化学、药物化学)
路甬祥	中国科学院副院长	中国工程院院士 中国科协副主席 (流体传动及控制)
窦国仁	中国科学院院士	水利部、交通部、能源部南京水利学院院长 (泥沙及河流动力学)
蔡睿贤	中国科学院院士	中国科学院工程物理所所长 (工程热物理)
颜鸣皋	中国科学院院士	(材料科学)
翟中和	中国科学院院士	(细胞生物学)
潘家铮	中国科学院院士	中国工程院副院长 (土木工程、水力发电)
霍裕平	中国科学院院士	中国科学院等离子体所所长 (等离子体物理)
鞠 躬	中国科学院院士	第四军医大学神经科学所所长 (神经解剖学)

编 纂 委 员 会

主 编	朱永和									
副 主 编	姚士硕	祁家骥	郭书普							
编 委	王 刚	王蔚萱	方有忍	方徽聪	朱永和	朱怀玺	刘琼霞	祁家骥		
	许方庆	许绪荣	李小平	李立虎	李洪涛	吴兆祥	吴瑞炜	罗 芸		
	罗守进	尚玉耀	张焕玉	胡炳生	施 骏	姚士硕	夏家发	郭书若		
	郭书普	郭仲才	郭解云	梁曼君	彭克森	潘 鑫	薛 伟			

学科主编	数学	胡炳生	生物学	郭锦泰
	力学	朱永春	医药卫生	祁家骥
	物理学	方徽聪	农业科学	刘琼霞 罗 芸 郭书普
	化学	吴华强	工程技术	胡 毅 郭解云 高红霞
	天文学	王家庆	交通运输	卞少康
	地球物理学	夏家发	航空航天	罗守进
	气象学	曹淑华	环境科学	施 骏
	地质学	王浩青	系统论	冒晓斌
	海洋学	吕建平	体育基础科学	张焕玉 张 琴
	自然地理学	周秉根		

序 1

科学技术已成为现代社会发展最重要的资源和动力。科学旨在认识未知,是技术的基础,技术基于科学知识利用、改造、保护自然,形成新的发明与创造,是科学造福人类的桥梁。20世纪90年代和21世纪是科学技术跨学科创造性融合和快速转化的时代。现代科学与技术的结合形成了科学技术统一体系。

当代科学技术的发展主要有突破和融合两种形式。突破是以新的重大发现或发明为基础产生的,新的科技成果往往取代原有的科技成果;融合是集成已有的科技成果进行创新发展,而成新的技术。近十几年来,通过多学科交叉融合而促进科学技术发展的实例愈来愈多,从而导致新的科学研究方向的出现,甚至最终形成了具有特定的概念和方法的新学科,开辟出全新的研究领域。

厚积薄发,触类旁通,融会综合。现代科技工作者不仅要熟知本学科、本领域,也需了解其他学科的知识。北京出版社组织编纂这部科技综述辞典,颇具眼光。它提供了一个内容丰富、包容广泛的科技文献库。作为单篇文章,专家综述自己熟悉的领域中某一研究项目的过去、现状,展望未来发展前景,有相当的深度。作为整体,林林总总汇集了各行各业上千名专家的文章,涵盖了理工医农各个领域,反映了现代科学技术发展的多样性,有助于读者开拓视野,了解相邻分支和相关学科的研究现状和发展,获得新的启迪。无论是寻求基础性突破,还是进行集成创新,这著作将都能够有所帮助。当然,由于科学技术迅猛发展,作者和编者认识上不可避免的局限,文中偏颇和谬误之处也是自然难免,诚望读者批评并与作者切磋。

科学技术是第一生产力,现代社会的进步与科学技术的发展息息相关。在党中央号召学习现代科学技术知识的今天,我以为这部著作的出版,对传播众多科技工作者的科学思想和研究成果,普及科技知识,提倡科学精神与科学方法,是十分有益和适时的。

中国科学院院士、中国工程院院士
中国科学院常务副院长

褚圣麟

1997年4月26日

序 2

20世纪是科学技术高速发展、蔚为大观的时代。20世纪科学技术的研究和应用具有全方位、多层次,以及对象多学科性和学科多对象性的特征。在现代,任何科学都不能闭关自守。学科间的交叉重组、学科间的相互渗透、学科间的相互借鉴,比比皆是。不仅许多重大的科学发现和技术进步都是在前人突破的基础上,或前人的经验性发现或前人的初步概括的基础上取得的。即便是科学技术上的一些微小进步,也常常汇集了不同学科的知识。从这种意义上看,全面了解和认识科学技术及其研究发展现状和趋势十分重要。因此,这部聚集了近3000名专家智慧、采用综述方式概括反映自然科学和技术科学有关研究的历史、现状和近年研究热点、洋洋1000万字的著作,是广大科技工作者十分欢迎的。它的编辑出版,无疑是中国科学技术事业上一项具有深远意义的基础工程,是一个良好的开端。

《现代科技综述大辞典》是各行各业专家学者根据自己擅长的专业领域自选题目撰写的,就学科总体框架结构而言不是那么周正完满、体系完备;但另一方面,撰稿人介绍的是其熟悉和具有深入研究的内容,文稿有相当的深度,阐述精当,充满真知灼见,充分体现出权威性。相形之下,框架结构上的缺陷瑕不掩瑜。

孔子提倡“博学而守约”。“博学”须广泛涉猎,博采众长;“守约”要集中力量,突破难点。《现代科技综述大辞典》提供了理工医农各领域19个学科(门类)2800篇综述,知识面相当宽阔。总揽全书或精读相关学科有助于我们“博”,有助于积累知识,寻求启迪和借鉴。同时,每篇文章的专精以及在指点难点、要点、热点上的阐述,有助于科技工作者就某一内容集中精力钻研,追求突破性进展。我相信,无论是富有经验的专家学者,还是科学技术领域的初涉者,这部著作开卷有益。

中国工程院院士
中国工程院副院长

卢良恕

1997年5月10日

编写说明

《现代科技综述大辞典》是一部采用综述方式概括反映自然科学和技术科学有关研究的历史、现状和研究热点,以及10~20年发展前景的大型工具书。

当代科学朝着研究对象多学科性和学科多对象性方向发展,而技术进步也呈现出技术一体化、标准化、大型化、组合化、高速化、集约化、信息化的特征。因此,全面了解和认识科学技术及其研究的发展现状和趋势十分重要。1991~1996年,我们组织了全国近千家大专院校和科研单位的专家学者,着手编著这部旨在充分反映当代科技一些重要研究领域发展状况的书籍。经5年耕耘,两易其稿,终于完成了这项浩瀚的工程。

《现代科技综述大辞典》约收2800个条目,近1000万字。分19个学科(知识门类),以其活跃、具有影响力的题目立目。各学科具有相对的独立性。每个条目又是一个独立的知识主题。就单个条目来看,它是一篇凝炼的文献综述和研究热点介绍性文章,但许多这类文章汇集在一起,就组成了一个颇具规模的文献数据库,产生了很强的辞书效果。从某种意义上说,它既是一部采用工具书编纂方式去完成的、内容有一定深度和具有科技导向性的权威性文集,也是一部兼有科技简史和科技发展前景展望性质的著作。

《现代科技综述大辞典》以科技人员、科技部门的管理人员、大专院校的师生等为读者对象。它有助于读者开拓视野,了解相关学科或相邻分支的研究现状和发展;有助于读者迅速接触最新研究成果,发现课题,寻求启迪。

《现代科技综述大辞典》的编纂出版是中国科技事业的一项基本建设。编纂工作在100余名国内著名学者组成的学术委员会指导下,由全国2000多名对某学科有一定研究的高级专家撰稿,绝大多数稿件经过对所审定内容有深入研究的学术权威审阅。撰稿人或审稿人中不乏中国科学院和中国工程院院士。因此,本书具有权威性。

《现代科技综述大辞典》编纂过程中得到有关高等院校、科研单位及生产部门的大力支持,书后特排出参加编写人员所属单位名录以鸣谢。北京出版社在时下大型工具书发行大势欠佳之际,毅然投入巨资,为本书的出版做出了努力,在此谨致诚挚的谢忱。由于《现代科技综述大辞典》的条目由撰稿专家根据自己的特长提出,带有一定的随意性,以致框架结构上尚存缺陷,很难全面反映出某学科的整体发展。加之

我们对编纂这类大型书籍缺乏经验和水平有限,舛误难免。恳请读者指出,以便日后修订再版。

《现代科技综述大辞典》编辑委员会

1996年8月

凡 例

● 编排

1、本书分数学、力学、物理学、化学、天文学、地球物理学、气象学、地质学、海洋学、自然地理学、生物科学、医药卫生、农业科学、工程技术、交通运输、航空航天、环境科学、系统科学、体育基础科学共 19 个学科(知识门类),按《中国图书分类法》结合专业分合情况归属。

2、本书条目按学科结构分类排列。学科内有些设有小类和分支。

3、本书书前有学科索引和条目分类目次,书末有按汉语拼音顺序排列的条目索引、汉语关键词索引、英文关键词索引,供检索。

● 条目

4、本书收条目 2800 个,每个条目一般由条目名、释文、参考文献组成。

5、条目以研究内容设立,条目标题可以是一个词,如“敏捷性”、“系统工程”;也可以是一个词组,如“农药的微生物降解”、“树本年轮年代学及其在环境研究中的应用”。

6、多数条目标题附有外文名,纯属中国内容的条目标题一般不附外文名。

7、个别条目由不同的专家分别撰写,本书在条目标题后标 I、II 以区分。

● 释文

8、本书条目的释文使用规范的现代汉语。分以下层次介绍:①研究的意义;②以往重要研究概述;③近期和现阶段研究状况(取得的重大进展、当前采取的主要技术路线和存在的主要难题);④该领域 10~20 年内研究热点,可能取得的进展;⑤参考文献。

9、较长条目的释文设置层次标题,层次标题字体用楷体。以下须分层叙述的,依次用阿拉伯数字 1、2、3、……;阿拉伯数字(1)、(2)、(3)……;阿拉伯数字①、②、③……

10、释文中的科学技术名词以国家自然科学技术名词审定委员会审定的为正名,未经审定或审定而不习用的,以习用的为正名。

11、外国人名在条目中首次出现时,一般附有原文缩写或直接采用原文;地名一般不附原文;机构名酌情部分附有外文缩写名。

12、计量单位按照 1994 年 7 月 1 日实施的《国际单位制及其应用》等一系列中华人民共和国国家标准(GB3100~3102-93)书写。

13、数字按照 1996 年 6 月 1 日实施的中华人民共和国国家标准《出版物上数

字用法的规定》(GB/T 15835—1995)书写。

14、标点符号按照 1996 年 6 月 1 日实施的中华人民共和国国家标准《标点符号用法》(GB/T 15834—1995)书写。

15、汉语拼音按照 1996 年 7 月 1 日实施的中华人民共和国国家标准《汉语拼音正词法基本规则》(GB/T 16159—1996)书写。

16、地质年代和地层名称按照全国地层委员会《地层规范(草案)》书写。

● 参考文献

17、大多数条目列有参考文献。参考文献原则上按照 GB7714—87《文后参考文献著录规则》书写。考虑许多作者以往对参考文献书写的习惯不同,本书对著录项采取删节措施,并未强求一致。限于篇幅,一般每篇文章的参考文献不超过 10 篇。

● 其他

18、本书使用公元纪年,年代以 0~9 作为起迄,如 20 世纪 30 年代为 1930~1939 年。

19、本书 1994 年 10 月截稿,截稿后除实质性问题外,一般未作增补或修改。

20、本书作者头衔(一般为技术职称)根据本人意愿决定署或不署,未强求一致。

总目

编写说明	1~2
凡例	1~2
学科索引	1~2
分类目次	1~43
正文	1~2828
条目音序索引	2829~2856
汉语关键词索引	2857~2894
英文关键词索引	2895~2910
编写者单位名录	2911~2918

学科索引

(括号中的前一个数字为分类目次所在页码,后一个数字为正文所在页码)

- 数学** (1 · 1)
- 数理逻辑、数学基础 (1 · 1)
- 代数、数论、组合理论 (1 · 14)
- 数学分析 (1 · 34)
- 几何、拓扑 (2 · 75)
- 概率论、数理统计 (2 · 90)
- 运筹学 (2 · 104)
- 计算数学 (2 · 111)
- 应用数学 (2 · 121)
- 力学** (3 · 133)
- 理论力学 (3 · 133)
- 振动理论 (3 · 145)
- 固体力学 (3 · 148)
- 流体力学 (3 · 168)
- 流变学 (3 · 182)
- 物理学** (3 · 187)
- 理论物理学 (3 · 187)
- 声学 (4 · 195)
- 光学 (4 · 197)
- 电磁学 (4 · 228)
- 电子物理学 (4 · 233)
- 半导体物理学 (4 · 236)
- 固体物理学 (4 · 242)
- 高压物理学 (4 · 254)
- 原子核物理学 (5 · 255)
- 化学** (5 · 260)
- 无机化学 (5 · 279)
- 有机化学 (5 · 288)
- 高分子化学 (5 · 320)
- 物理化学、化学物理学 (6 · 357)
- 分析化学 (7 · 400)
- 天文学** (7 · 444)
- 天文观察设备与时间 (7 · 444)
- 天体力学 (7 · 447)
- 天体物理学 (7 · 450)
- 恒星天文学、星系天文学、宇宙学
 (8 · 464)
- 射电天文学 (8 · 483)
- 空间天文学 (8 · 485)
- 太阳系 (8 · 489)
- 地球物理学** (8 · 510)
- 气象学** (8 · 520)
- 一般气象理论 (8 · 520)
- 气象基本要素 (9 · 523)
- 动力气象学 (9 · 527)
- 天气预报 (9 · 536)
- 气候学 (9 · 539)
- 地质学** (9 · 558)
- 动力地质学 (9 · 558)
- 历史地质学、地层学 (9 · 562)
- 构造地质学 (9 · 570)
- 地质力学 (10 · 599)
- 矿物学 (10 · 607)
- 岩石学 (10 · 615)
- 矿床学 (10 · 621)
- 地质矿产普查与勘探
 (10 · 639)
- 水文地质学与工程地质学 (11 · 646)
- 宇宙矿物学 (11 · 659)
- 海洋学** (11 · 663)
- 海洋基础科学 (11 · 663)
- 海洋环境保护 (11 · 680)
- 自然地理学** (11 · 687)
- 数理地理学 (11 · 687)
- 古地理学 (11 · 691)
- 部门自然地理学 (11 · 699)
- 区域自然地理学 (12 · 738)

- 地图····· (12·763)
生物科学····· (12·768)
 普通生物学····· (12·768)
 细胞学····· (13·775)
 遗传学····· (13·792)
 生理学····· (13·811)
 生物化学····· (13·824)
 生物物理学····· (14·878)
 分子生物学····· (14·889)
 古生物学····· (15·929)
 微生物学····· (15·938)
 植物学····· (15·969)
 动物学····· (17·1058)
 昆虫学····· (17·1090)
 人类学····· (17·1102)
医药、卫生····· (17·1109)
 预防医学、卫生学····· (18·1113)
 中国医学····· (18·1164)
 基础医学····· (20·1273)
 临床医学····· (21·1357)
 内科学····· (22·1379)
 外科学····· (23·1465)
 妇产科学与儿科学····· (24·1518)
 肿瘤科学····· (24·1549)
 神经病学与精神病学·····
 ····· (24·1569)
 皮肤病学与性病学····· (25·1587)
 眼、口腔与耳鼻咽喉科学·····
 ····· (25·1589)
 放射医学····· (25·1612)
 药学····· (25·1620)
农业科学····· (26·1661)
 农业基础科学····· (26·1661)
 植物保护····· (27·1777)
 农作物····· (29·1899)
 园艺····· (31·2015)
 林业····· (31·2055)
 畜牧学····· (32·2091)
 兽医学····· (32·2120)
 蚕、蜂····· (33·2163)
 水产、渔业····· (33·2168)
工业技术····· (34·2215)
 一般工业技术····· (34·2215)
 矿业、石油工业····· (34·2242)
 冶金工业····· (35·2260)
 金属学、金属工艺····· (35·2296)
 机械、仪表工业····· (36·2341)
 武器工业····· (36·2363)
 动力工程····· (36·2376)
 电工技术····· (37·2399)
 无线电电子学、电信技术·····
 ····· (37·2439)
 自动化技术、计算技术·····
 ····· (38·2497)
 化学工业····· (39·2561)
 轻工业····· (40·2602)
 建筑科学····· (40·2611)
 水利工程····· (40·2626)
交通运输····· (40·2639)
 铁路运输····· (40·2639)
 公路运输····· (40·2643)
 水路运输····· (40·2648)
航空、航天····· (41·2658)
 航空····· (41·2658)
 航天····· (41·2671)
环境科学····· (41·2679)
 环境污染及其防治····· (41·2689)
 环境质量评价与环境监测·····
 ····· (42·2741)
系统论····· (42·2749)
体育基础科学····· (42·2762)
 运动生理学····· (42·2766)
 运动解剖学····· (42·2773)
 运动生物力学····· (43·2782)
 运动生物化学····· (43·2790)
 运动医学····· (43·2803)
 运动心理学····· (43·2821)

分 类 目 次

数 学

数理逻辑 数学基础

- 多项式时间度 郑锡忠撰(1)
- 空间周期解 张 棟 高占海撰(2)
- 格值模型论 沈云付撰;王世强审(3)
- 量词模态逻辑的代数语义学 高恒珊撰(4)
- 概括原则与悖论 毛宇光 林钧海撰(6)
- 中介逻辑演算 朱梧楨撰(7)
- 中介公理集合论 朱梧楨撰(7)
- 中介逻辑 朱梧楨撰(9)
- 实集和复集 孙桂秋撰(10)
- 广义凸集 梅家驹撰;李宗元审(11)
- 切锥 梅家驹撰;李宗元审(12)
- Pareto 有效点的存在性
..... 梅家驹撰;李宗元审(13)

代数 数论 组合理论

- 李代数 沈光宇撰(14)
- 泛代数 胡庆平撰(15)
- 路代数 惠昌常撰(16)
- BCI-代数 胡庆平撰(17)
- BCH-代数 胡庆平撰(18)
- BCK-代数的理想 孟杰撰(19)
- BCI, BCK 代数的扩张与分类 姜豪撰(20)
- 群表示论 张广祥撰(20)
- Fuzzy 正则半群 沈继忠撰;应明生审(21)
- Klein 群的有限性定理 王健撰(22)
- 半线性格 范先令撰(23)
- Morita 对偶 薛卫民撰;许永华审(23)
- Hadamard 矩阵猜想 黄国泰撰(24)
- Fuzzy 拟阵 莫智文撰(25)
- 图的度序列 李炯生撰(25)
- 竞赛图理论 李炯生撰(26)
- 计算组合学和计算图论 胡冠章撰(28)
- 图的点染色和边染色 杨骅飞撰;孙良审(28)
- 优美图、鲍丹狄克猜想 陈志增撰(30)
- 实数的有理逼近 袁进撰;潘承彪审(30)
- 数论函数值分布 邵品琮撰(31)
- 克莱姆法则的推广 王国荣撰(32)

费马大定理 曹珍富撰(32)

数学分析

- 临界点理论 吴绍平撰(34)
- 概周期线性系统 史金麟撰(35)
- 大系统的稳定性 王慕秋撰(36)
- 巴拿赫空间结构理论 赵俊峰撰(37)
- Banach 格与正算子 陈滋利撰(38)
- 可分解算子 邹承祖撰(39)
- 黎斯算子的分解 钟怀杰撰;林辰审(40)
- Orlicz-Sobolev 空间的逼近理论
..... 肖应昆撰(41)
- 自动连续性理论 曹怀信撰;路干亭审(41)
- 多重傅立叶级数的波赫讷-黎斯平均
..... 王昆扬撰(43)
- 6-备半序线性空间理论 顾心力撰(43)
- Bers 空间中之逼近 沈璧昌 肖杰撰(44)
- 弱化的 Hilbert 第 16 问题 李继彬撰(45)
- 多元奇异积分算子理论
..... 李登峰撰;施咸亮审(46)
- Chebyshev 中心 李冲撰;徐士英审(47)
- Chebyshev 集的太阳性和凸性
..... 徐士英撰(48)
- 太阳集和最佳逼近的特征 徐士英撰(49)
- 函数论中的极端点和支撑点理论
..... 张玉林撰;刘书琴审(50)
- 现代位势论 吴炯圻撰;高琪仁审(51)
- Stein 估计 谢民育撰;夏明远审(52)
- 弱 P 叶函数 何泳贤撰;高仕安审(53)
- 修正 L 逼近理论 史应光撰(55)
- 集函数的自连续性
..... 王震源 哈明虎 王熙照撰(55)
- 时滞微分不等式 斯力更 马万彪撰(56)
- 李雅普诺夫函数的构造 王联撰(57)
- 椭圆型方程弱解的有界性 梁逦廷撰(59)
- 超双曲型方程定性研究 凌岭撰(60)
- 常微分方程稳定性理论 朱思铭撰(61)
- 可近集与车贝雪夫集 潘文熙撰(62)
- 投影界及极小投影理论 潘文熙撰(63)
- 度量投影理论 潘文熙撰(64)
- 联合逼近 潘文熙撰(65)

- 算子逼近 潘文熙撰(66)
- 奥尔里奇空间及其几何 吴从新撰(67)
- 广义线性模型 郭大伟撰(68)
- 凸函数 刘三阳撰;游兆永审(68)
- 非凸函数 刘三阳撰;游兆永审(70)
- 随机幂级数及指数级数 余家荣撰(71)
- 数值积分法 丁树人撰(72)
- 变率配置法 丁树人撰(73)
- 非局部变分力学 戴天民撰(74)
- 共线性的诊断与评价
..... 戴伯新撰;项可风审(97)
- 逐步 Fisher 判别方法 郭福星撰(98)
- 非参数密度估计 柴根象撰(99)
- 概率度量空间 张石生 黄南京撰(100)
- 概率度量空间上的非线性分析
..... 张石生 黄南京撰(100)
- 回归分析 鲍祥霖撰(101)
- 最优回归设计 关颖男撰(102)
- 混料试验设计 关颖男撰(103)

几何 拓扑

- 分形 汪富泉撰;李后强审(75)
- 拓扑 Boole 格理论 董荣森 闵佑林撰(76)
- 拟常曲率流形 李中林撰;白正国审(77)
- 保圆几何 李中林撰;白正国审(78)
- δ -空间与 Σ -空间 高国士撰(79)
- M_n -空间 高国士撰(80)
- 圆(球)素几何学 黄树棠撰;杨淦审(81)
- 光滑映射芽的决定性理论 李养成撰(82)
- Fuzzy 度量空间和 Fuzzy 拓扑空间的度量化
..... 梁基华撰(83)
- Fuzzy 拓扑共生结构 莫智文撰(84)
- 不可约空间理论 高国士撰(84)
- 拓扑分子格理论 王国俊撰(85)
- 谱几何的正问题反问题
..... 马传渔撰;莫绍揆审(86)
- 黎曼流形的谱 马传渔撰;莫绍揆审(87)
- 黎曼流形特征值的估计
..... 马传渔撰;莫绍揆审(88)
- 黎曼流形与洛仑兹流形中的常平均曲率子流形
..... 成庆明撰(89)

概率论 数理统计

- 量子随机分析 黄志远撰(90)
- 渐近鞅理论 汪振鹏撰(91)
- 强极限理论 林正炎 陆传荣撰(92)
- 随机算子方程理论 丁协平撰(93)
- 随机差分方程的稳定性理论 王明文撰(94)
- Hilbert 空间中随机微分系统稳定性理论
..... 胡宣达撰(94)
- 循环序列相关系数的分布 朱世斌撰(95)
- 影响评价与数据诊断
..... 戴伯新撰;项可风审(96)

运筹学

- 运筹学 陶谦坎撰(104)
- 向量值最优化问题的对偶性
..... 刘三阳撰;游兆永审(104)
- 线性规划的单纯形方法 魏紫莹撰(106)
- 参数线性规划
..... 章祥荪 崔晋川撰;吴方审(107)
- 路径分析 古华民撰(107)
- 目标规划 宣家骥撰(108)
- 多目标最优化 胡毓达撰(110)
- 群体决策 胡毓达撰(110)

计算数学

- 多重网格方法 张林波撰(111)
- 厄密特-费叶插值理论 孙燮华撰(112)
- 同伦方法 王则柯撰(113)
- 数值方法计算复杂性理论 王则柯撰(114)
- 加权穆尔-彭罗斯广义逆 王国荣撰(115)
- 信赖域法 袁亚湘撰(115)
- 拟牛顿法 袁亚湘撰(116)
- 边界元方法 祝家麟撰(117)
- 边界元方法的数学分析 祝家麟撰(118)
- 数学机械化 王庚撰;胡炳生审(119)
- 例证法 王庚撰;胡炳生审(120)

应用数学

- Fuzzy 值函数的广义积分
..... 吴传生撰;蔡宏材审(121)
- 区间动力系统的强健稳定性 廖晓昕撰(122)
- 单纯不动点算法 王则柯撰(123)
- 基于滤波器方法的非线性系统的故障检测与诊断
..... 周东华撰(124)

模糊光学和计量学
 李祚泳撰;陈炳培 王柏钧审(125)
 模糊线性回归分析
 哈明虎 王熙照撰;吴从焯审(125)
 模糊可靠性 李廷杰 高和撰;李忠应审(126)
 奇异摄动理论 莫嘉琪撰(127)
 投入产出分析 鲍祥霖撰(128)
 生产函数 刘静撰;尹缙瑞审(129)
 电磁场数值计算及应用
 孙孝瑞 陈斌发撰(130)
 家电产品质量分级中的模糊数学概念
 乔五之撰(131)

力学

理论力学

计算力学非线性分析 武际可撰(133)
 欧拉和力学的变分原理 朱永春撰(134)
 力学中的分形 谢和平撰(135)
 系统动力学和动态数字试验技术
 徐铭陶撰(136)
 结构动力学修改重分析 吕振华撰(137)
 边界元若干基本概念 王嘉新撰(139)
 模态灵敏度分析 吕振华撰(141)
 陀螺力学 刘廷柱撰(143)
 广义连续介质力学 戴天民撰(144)
 物理力学 薛伟撰(144)

振动理论

随机振动 庄表中撰(145)
 非线性振动、分叉和混沌理论
 陈予恕撰(146)

固体力学

齿轮应力分析 程乃士 孙大乐撰(148)
 结构分析 孙焕纯撰(149)
 工程结构分析 陈树坚撰(150)
 并行计算结构力学 张汝清撰(151)
 不同模量弹性理论及其数值计算
 张允真撰(152)
 线性粘弹性问题 张恒撰;尹昌言审(153)
 塑性力学 徐秉业撰;姚振汉审(154)
 结构塑性极限分析
 徐秉业撰;姚振汉审(154)

结构塑性动力响应
 杨嘉陵 余同希 王仁撰(155)
 裂纹体弹性波散射
 章梓茂 陈英俊 马兴瑞 邹振祝撰(157)
 中国管状接头应力分析进展 陈铁云撰(159)
 断裂动力学 范天佑撰(160)
 中厚板理论 丁树人撰(161)
 疲劳与断裂 张培源撰(163)
 疲劳裂纹扩展逻辑框架 刘浩文撰(163)
 多轴非比例加载下低周疲劳寿命估测
 高庆 陈旭撰;孙训方审(165)
 本构型冰力学 沈梧撰(166)
 光力学 佚名撰(166)
 引力波检测 崔世治 胡恩科撰(168)

流体力学

大气中波与流的相互作用 高守亭撰(168)
 流体混合动力学 吴铨结撰(169)
 Weis-Fogh 机构 王献孚撰(170)
 帆空气—水动力学 王献孚撰(171)
 分层流体中混合流体团运动生成内波
 朱勇撰(172)
 海洋流体动力学 李玉成撰(174)
 工业空气动力学 朱孝业撰(175)
 煤尘飞散的空气动力学 王献孚撰(175)
 换热器流体结构动力学及异型压力容器
 钱頌文 洪锡纲撰(176)
 受限共轴射流 王献孚撰(177)
 涡旋运动与混沌 吴铨结撰(178)
 壁面射流 王献孚撰(180)
 气液两相流瞬变过程 杨建东撰(181)

流变学

工程结构流变问题 陈德坤撰(182)
 岩体流变学 陈德坤撰(183)
 高聚物流变学 陈德坤撰(185)

物理学

理论物理学

引力物理 崔世治 唐孟希撰(187)
 相似理论 徐挺撰(188)
 场论与粒子理论 郭硕鸿撰(188)
 分数统计与任意子 陈代森撰(190)

- 孤立子与生命活动 庞小峰撰(190)
 状态方程 胡望明撰; 吴兆立审(193)
 耗散结构和非平衡态热力学
 李和兴撰; 蒋萍初审(194)

声学

- 声学计量 焦浮平撰(195)
 声纳 朱厚卿撰(196)

光学

- 光学向光子学的开拓 张光寅撰(197)
 自适应光学 俞信撰(198)
 薄膜光学 顾培夫撰(200)
 光学与光电子学计量 张在宣撰(201)
 毫米波、亚毫米波准光学 李英撰(203)
 超辐射 李祥生 傅克德撰; 王天真审(204)
 红外目标辐射特性 魏平田撰(204)
 光压力 雷仕湛撰(205)
 光谱光度学 张在宣 张艺撰(206)
 导数分光光度法 杨合情 傅克德撰(209)
 瞬态相干光谱学 王应宗 傅克德撰(210)
 自由电子激光 赵小凤 杨福家撰(211)
 激光光谱学
 唐小玲 傅克德撰; 王天真审(213)
 激光参数的测量
 林晓莹 杨大让 胡志平撰(213)
 军用中小功率(能量)CO₂ 激光技术
 封鸿渊撰(214)
 光波和微波的相互作用 李英撰(215)
 光学元件列阵的赝相位共轭特性
 宋如华撰(216)
 透明晶体中缺陷的光学显微像
 葛传珍撰(217)
 表面增强喇曼散射
 傅克德 苗润才撰; 王天真审(218)
 目标激光散射特性 仇维礼撰(219)
 共振激光蒸发 郑荣儿撰(220)
 非线性光学产生 VUV/XUV 相干辐射
 孙陶亨 田测产撰(221)
 光子选通与频域存储
 丁汉泉撰; 张忠麟审(222)
 全息层析术 丁汉泉撰; 张忠麟审(223)
 X 射线激光全息术 彭惠民撰(225)

- 国外全息显示技术
 熊秉衡 杨齐民 郭定君撰(226)
 激光腔外的脉冲压缩
 翟华全 李宝其撰(227)

电磁学

- 磁学计量 陈竹年撰(228)
 谱域方法 方大纲撰(229)
 镜像理论 方大纲撰(230)
 电器电磁场 颜威利撰(231)
 电流变流体 吕崇耀 钱祥生撰(232)

电子物理学

- 电子计量 焦治平撰(233)
 光电子技术 李文冲撰(233)
 光电子成像 周立伟撰; 高雅允审(234)
 真空微电子学 过巴吉撰(235)

半导体物理学

- 半导体光催化 董庆华撰(236)
 非晶态半导体 彭少麒撰(238)
 P-N 结击穿电压蠕变
 郭维廉撰; 万良风审(239)
 MIS 隧道结器件 郭维廉撰; 万良风审(239)
 应变量子阱器件 刘式楠撰(241)

固体物理学

- 发光多孔硅 鲍希茂撰(242)
 团簇的结构和奇异性 王广厚撰(243)
 自旋回波(SEFT)
 ... 于富斌 张新怀 傅克德撰; 王天真审(245)
 超微颗粒的磁性 郝有为撰(246)
 核磁双共振
 ... 于富斌 张新怀 傅克德撰; 王天真审(247)
 位场波谱分析 程方道撰(248)
 介电谱研究 李景德撰(249)
 分子束外延 孔梅影撰(251)
 应变层超晶格 彭英才 范希武撰(252)
 穆斯堡尔效应 夏元复撰(253)

高压物理学

- 超导电性 章立源撰(254)
 高压熔解规律 严祖同撰(254)

原子核物理学

- 超核 厉光烈撰(255)
量子计量学 陈竹年撰(256)
中子计 刘圣康撰(257)
用于核素测量中的切连科夫计数技术
..... 郭景儒撰(258)

化 学

- 化学计量学 俞汝勤撰(260)
化学生态学 华湘翰撰(260)
农药化学 尚稚珍撰(261)
生物光化学 程极济撰(262)
生物电化学 吴辉煌撰(264)
声化学 林仲茂撰(265)
力化学 邝生鲁撰(266)
缺陷化学 江茂 张栋梁撰; 蔡文正审(266)
胶体化学与医药研究 曹宗顺撰(268)
生命科学与分析化学 程介克 王宗礼撰(269)
似晶格模型理论 温浩撰; 许志宏审(270)
非化学计量化合物 李言荣撰(271)
电荷密度的拓扑理论 曹维良 张敬畅撰(272)
体克-哈伯德方法 何福城撰(273)
气相电子衍射 金安定撰(274)
核磁共振波谱学 裴奉奎撰(275)
含时薛定谔方程在分子动态学中的应用
..... 江逢霖撰; 谢理审(276)
有机物合成路线的计算机辅助设计
..... 林少凡 张金培 乔圆圆撰(277)

无机化学

- 无机微孔物质骨架构型设计 徐翊华撰(279)
湿法磷酸精制技术 赵廷仁撰(280)
高铁酸盐 李志远 赵建国撰(281)
固体超强酸催化剂
..... 战永复撰; 徐书坤审(282)
氟的结合分布及剂量估算 吕慧敏撰(283)
过渡金属原子簇化学 石有茂 陆世雄撰(284)
镧系位移试剂
..... 张新怀 于富斌 傅克德撰(285)
铜系元素环境化学 林津基撰(286)
镓化学 杨健美撰(286)

有机化学

- 有机电化学 陈敏元撰(288)
食品颜色与分子结构的关系
..... 赵玉玲 王锡臣撰; 焦克芳审(289)
单电子转移反应 刘有成 郭庆祥撰(290)
自由基化学 刘有成 郭庆祥撰(291)
自由基离子 刘有成 郭庆祥撰(292)
有机磁体 张贵萍撰; 龚克成审(293)
有机体之间化学相互作用 宋启示撰(294)
味觉产生和食品味道与分子结构的关系
..... 赵玉玲 王锡臣撰; 焦克芳审(295)
气味与分子的结构的关系
..... 赵玉玲 王锡臣撰; 焦克芳审(296)
均相催化 钱延龙 黄吉玲撰; 黄耀曾审(297)
Sharpless 试剂 石根斌撰(298)
立体控制合成 蒋耀忠 杨桂树撰(299)
共结晶化 张正之撰(300)
硒羰基化合物合成
..... 徐思羽撰; 丁宏勋审(301)
光诱导的化学合成 张临阳撰(302)
小分子活化
..... 钱延龙 黄吉玲撰; 黄耀曾审(304)
甲脒化学及生物碱的不对称合成
..... 杜宝山撰; 戚慧心审(305)
固相肽合成中的接肽方法
..... 田少雷撰; 蔡孟深审(308)
三卤甲烷 王国新撰(309)
大环二萜类化合物
..... 李裕林 李瀛 李卫东撰(312)
金属有机化学
..... 钱延龙 黄吉玲撰; 黄耀曾审(313)
金属有机非线性光学晶体材料
..... 秦金贵 刘道玉撰(314)
金属有机导体、半导体和超导体
..... 刘道玉 秦金贵撰(315)
活泼有机硅中间体
..... 冯圣玉 冯大诚撰; 杜作栋审(316)
有机硒化学 徐思羽撰; 丁宏勋审(317)

高分子化学

- 高分子磁性材料 王德义撰(320)
黄原胶溶液 陈慎之撰; 王德润审(321)
聚烯烃结晶与相变 史观一撰(322)

- 嵌镶离子交换膜 梁良撰(323)
 具有包络辩识特性的功能高分子
 赵晓斌 何炳林撰(324)
 形状记忆高分子材料 张福强撰(325)
 聚合物结晶过程动力学
 刘结平 莫志深撰(326)
 聚合物的流变行为 陈家楠撰(329)
 高分子凝胶的体积相变 童真撰(331)
 聚合物的非晶态 莫志深撰(333)
 高分子固体电解质
 黄玉惠 汪传清撰, 丛广民审(334)
 高聚物固体电解质 方世壁撰(335)
 导电高聚物的光电化学行为 ... 穆绍林撰(337)
 高分子降解 刘景江撰(337)
 聚合物基复合材料的界面
 胡福增 王晓宾撰, 吴叙勤审(338)
 自由基活性聚合 张慰盛撰(339)
 高分子的交联 刘景江撰(341)
 基团转移聚合及其机理
 夏海平 丁马太撰(342)
 基团转移聚合 沈卫平撰(343)
 反相乳液聚合 李建宗 程时远 黄鹤撰(345)
 高分子负载硅氢加成配位催化剂
 陈远荫撰(348)
 凝胶渗透色谱(GPC)法的校准曲线
 钱永芳撰, 田炳寿审(349)
 聚合物磁体 张贵萍撰(350)
 纤维素及其衍生物液晶 黄勇撰(351)
 离子交换树脂及吸附树脂
 何炳林 孙君坦撰(352)
 有规立构聚苯乙烯的合成
 许光学 卢泽俭 林尚安撰(353)
 热可塑性共价交联聚合物 焦书科撰(354)
 芳杂环高分子分离膜 卢凤才撰(355)
 原位复合材料
 陈建定 李大芬撰, 吴叙勤审(356)
- 物理化学 化学物理学**
- 轻元素稳定同位素分离 杨国华撰(357)
 络合催化 杨振云撰(358)
 配位化合物中配体间相互作用
 刘祁涛撰(360)
 配位体间的芳环堆积作用 龚钰秋撰(361)
 碳立体化学 李恩殿撰(362)
- 化学振荡反应 李和兴撰, 邱志新审(363)
 化学反应体系的随机热力学 ... 罗久里撰(364)
 热化学动力学 罗渝然撰(365)
 吸附热化学 周立幸撰, 郑禄彬审(365)
 添加剂对阳极氧化过程动力学的影响
 金世雄撰, 糜天黄审(366)
 溶剂萃取动力学
 高自立 孙思修撰, 沈静兰审(368)
 MOCVD 法生长 II - V、I - VI 族化合物用新前
 体 陆大成撰(369)
 同位素的电磁分离 苏士俊撰(371)
 不对称催化 杨振云撰(371)
 负载型铂锡催化剂 杨维慎 林励吾撰(373)
 锰的催化动力学分析法 张振辉撰(374)
 二氧化碳作为聚合反应单体
 陈立班撰, 杨淑英审(375)
 新型薄层反应器 张涛撰, 徐竹生审(376)
 直流电弧放电中的高温化学反应
 胡斌 江祖成 廖振环 曹云鹤撰(376)
 光诱导电子转移 张宝文 吴世康撰(377)
 用占屯染料模拟光合作用 沈涛撰(378)
 螺螺啉类光致变色化合物
 李仲杰 马引民撰(379)
 光致变色的螺二氢吡啶
 马引民 H. Dürr 撰(380)
 光敏化 吴世康 张宝文撰(381)
 激光催化 郭广生撰(382)
 均分散颗粒体系 王光信撰, 陈宗淇审(383)
 电负性 孙家跃撰, 孙桂大审(384)
 电致化学发光 王伦撰, 严凤霞审(385)
 激发态分子的电荷分离过程
 白凤莲撰, 吴世康审(386)
 高温电化学氧传感器 罗瑞贤撰(386)
 热电导率 张挺芳 陆嘉星撰(388)
 光谱电化学 孙世刚撰(388)
 表面电化学 孙世刚撰(389)
 电化学催化 孙世刚撰(390)
 铅电极上氧化铅层的电学性质
 郭永柳撰(391)
 薄层电化学技术 吴宝璋撰(392)
 导电聚合物修饰电极
 陈衍珍撰, 林仲华审(393)
 磁化学 蒋秉植撰(394)

等离子体化学 李学丹撰(395)
膜分离及膜反应器 丁马太 夏海平撰(396)
界面张力 朱宪撰(397)
有机光导体的结构 黄颂羽撰(399)

分析化学

活化分析 柴之芳撰(400)
圆二色性 郭尧君撰(400)
元素的价态分析 江淑笑撰;袁有宪审(401)
离子选择电极分析中电脑数据处理的计量化学原理 王基镛撰;程伟基审(402)
示波极谱滴定法 战永复撰;徐书绅审(403)
用扩散管作为采集气态组分的工具
..... 李力争撰(404)
分析仪器与仪器分析 李欧撰(405)
分析仪器智能化 郭才陶撰;罗忠鉴审(406)
催化动力学分析法 李方撰;程书麟审(407)
吸附伏安法 金文睿撰(408)
电位溶出分析
..... 秦文华 罗晓芳 秦化敏撰(408)
仪器分析法测定金属材料中铋
..... 马聆聆 华菊如撰(409)
分光光度法测定锑的显色剂
..... 朱腾 戎斌撰;张静审(410)
单一稀土光度分析
..... 翟庆洲 邹本义 曲敏撰(411)
原子发射光谱分析
..... 沙传南 黄志荣 陈新坤撰(413)
激光光声光谱和光热光谱分析
..... 胡继明撰;曾云鹤审(416)
红外光谱基体隔离技术
..... 李来明 曾广赋撰;王文韵审(417)
紫外光—可见光—近红外光分光光度法
..... 郭尧君撰(418)
X 射线荧光光谱分析 吉昂撰(419)
荧光分光光度法 郭尧君撰(422)
旋光色散 郭尧君撰(423)
荧光钙探针试剂 陈震华撰(423)
激光电离光谱分析
..... 胡继明撰;曾云鹤审(424)
激光拉曼光谱分析
..... 胡继明撰;曾云鹤审(425)
激光诱导荧光光谱分析
..... 胡继明撰;曾云鹤审(426)

激光解吸质谱学 赵善楷撰(427)
同位素质谱和无机质谱分析 孟宪厚撰(427)
电感耦合等离子体原子发射光谱
..... 张展霞撰(429)
逆流色谱的基本关系式 杨福全撰(430)
色谱分离技术 李淑莲撰(431)
色谱的联用技术 黄威东撰;张乐洋审(431)
超临界流体色谱 周良模撰(433)
高效液相色谱法 黄红心 周良模撰(433)
气液色谱固定液 傅若农撰(434)
离子色谱法 沈定米撰(435)
离子色谱填料 沈定米撰(436)
氟的离子色谱测定法
..... 朱岩 徐素君 徐行达撰(437)
环糊精色谱固定相及其在手性化合物分离中的应用 黄天宝 龙远德 王红撰(437)
离子排斥色谱用于低分子羧酸分析
..... 严晋婴 施荫玉撰(438)
冠醚类试剂分离铷和铯 邵鲁安撰(439)
高效液相色谱检测技术 张叔良撰(440)
分子荧光分析法 许金钩撰;陈国珍审(441)
粒子激光 X 荧光分析 汤家镛撰(442)

天文学

天文观察设备与时间

天文光学望远镜
..... 蒋世仰 潘君骅撰;路声东审(444)
时间计量 萧耐园撰;张承志审(445)
时间频率计量 杨大豪撰(446)

天体力学

天体力学 易照华撰(447)
多体问题 易照华撰(448)
摄动理论 易照华撰(449)
小行星的空间分布与轨道共振
..... 刘林 廖新浩撰(450)

天体物理学

分子天体物理学 吴月芳撰;周体健审(450)
脉动理论进展 陈福生撰(451)
空间 γ 射线谱 王广厚撰(453)
 γ 射线暴 史天一撰(455)
恒星物理 黄润乾撰(456)

- 吸积盘 朱慈瑾撰(457)
- 新星 李竞撰(458)
- 超新星 李竞撰(459)
- 大麦哲伦云超新星 李竞撰(459)
- 白矮星 储宗元 王家骥撰(460)
- 脉冲星 王家庆撰(461)
- 黑洞 张镇九撰(463)
- 白洞 桂元星撰(464)

恒星天文学 星系天文学 宇宙学

- 深空天图 李竞撰(464)
- 赫罗图 李竞撰(465)
- X 射线双星 吴德金撰(466)
- 相接双星 刘清耀撰(468)
- 银河系结构 李竞撰(469)
- 球状星团 马耳撰(469)
- 疏散星团 赵君亮撰(470)
- 河外X 射线源 吴德金撰(471)
- 活动星系 许祿撰(472)
- 星系团 赵君亮撰(473)
- 暴涨宇宙 王家庆撰(474)
- 原始火球 李芝萍撰(475)
- 微波背景辐射 李芝萍撰(476)
- 宇宙弦 许祿撰(477)
- 星际分子 吴月芳 邢骏撰; 罗先汉审(478)
- 分子外向流 吴月芳撰; 胡景耀审(480)
- 量子宇宙学 沈有根撰(481)
- 宇宙背景辐射 许祿撰(481)
- 宇宙距离尺度 李竞撰(482)

射电天文学

- 射电参考系 须同祺撰; 金文敬审(483)
- 甚长基线射电干涉测量法 须同祺撰; 万同山审(484)

空间天文学

- 远红外天文观测 邹惠成撰(485)
- 紫外天文学 王挺贵撰(486)
- 紫外天文观测 邹惠成撰(486)
- 天文卫星 邹惠成撰(487)
- 弥散宇宙 γ 射线源 周大庄撰; 李杨砦审(488)

太阳系

- 太阳系起源与演化 胡中为撰(489)

- 太阳活动预报 张勤撰; 张柏荣审(490)
- 太阳活动 林元章撰(491)
- 太阳耀斑 刘炎撰(492)
- 太阳黑子 丁明德撰; 方成审(493)
- 太阳黑子磁场 张洪起撰(494)
- 太阳中微子之谜 王家庆撰(494)
- 日珥 胡菊撰; 王振一审(496)
- 日冕振荡 夏志国撰(497)
- 冕洞 徐永焯撰; 刘麟仲审(497)
- 太阳风 刘麟仲撰(498)
- 月球 张明昌撰; 宣焕灿审(499)
- 行星科学 胡中为撰(500)
- 行星的磁场和磁层 刘麟仲撰(501)
- 金星 刘金铭撰(502)
- 金星自转的动力学演化 张承志撰(504)
- 火星 刘金铭撰; 胡中为审(505)
- 彗星 胡中为撰(506)
- 流星观测 舒英发撰(507)
- 流星天文学 徐品新撰(508)

地球物理学

- 大地测量学 宁津生 晁定波撰; 金标仁审(510)
- 探地雷达技术 左峥嵘撰(511)
- 三维速度结构研究 刘福田撰(512)
- 强震地面运动的理论地震学研究 郑天愉 姚振兴撰(513)
- 卫星热红外异常 强祖基撰(514)
- 重磁勘探反演问题 曾华霖撰(515)
- 地电化学法 刘吉敏撰(517)
- 地热 廖志杰撰(517)
- 冰缘环境 王保来撰(518)

气象学

一般气象理论

- 热带气象学 梁必骥撰(520)
- 大气和地表的定量遥感理论 金亚秋撰(521)
- 高频率相控阵多普勒声雷达 潘乃先 陈诗闻撰(522)

气象基本要素

- 大气中 CO₂ 及其同位素组成 李兆兴 徐永昌撰(523)
- 臭氧洞 侯贻生撰(524)
- 云化学模式 刘小红撰(525)
- 燃烧 AgI 的丙酮溶液产生冰核气溶胶 鄧大雄撰(526)

动力气象学

- 大尺度大气动力学 陆维松 陈久康撰(527)
- 热量平衡 翁笃鸣撰; 缪启龙审(528)
- 海洋在 CO₂ 增暖事件中的作用 张学洪撰(529)
- 等熵位涡图的性质 赵其庚撰(530)
- 东亚大气环流和季风 朱抱真 丁一汇 罗会邦撰(532)
- 海洋碳循环模式 刘瑞芝 张学洪撰(534)
- 厄尔尼诺(ENSO)及热带海-气相互作用动力学 黄荣辉撰(535)

天气预报

- 1980~1989年中国数值天气预报进展 廖洞贤撰(536)
- 短期气候预报测试 袁重光撰(538)
- 月平均环流的长期数值预报 王绍武撰(539)

气候学

- 气候学 陆渝蓉撰(539)
- 世界气候计划与中国气候计划 陆渝蓉撰(541)
- 中生代的气候模式和极地森林的形成 魏仕俊撰(542)
- 气候变化 丁裕国撰; 屠其璞审(543)
- 气候突变 符淙斌 王强撰(544)
- 气候影响评价途径 黄朝迎撰(545)
- 气候影响评价 陈星撰(547)
- 核战争的气候效应 曹鸿兴 刘四臣撰(547)
- 季风 郑义亮撰; 郑树恒审(548)
- 辐射气候 翁笃鸣撰; 缪启龙审(549)
- 山地气候 翁笃鸣撰; 缪启龙审(550)
- 气候区划 缪启龙撰; 翁笃鸣审(551)
- 气候资源 缪启龙撰; 翁笃鸣审(552)

- 水分气候 陆渝蓉撰(553)
- 城市气候 虞静明撰; 陆渝蓉审(553)
- 温室效应及其对气候的影响 王绍武撰(554)
- 统计气候 丁裕国撰; 么枕生审(556)

地质学

动力地质学

- 现代地壳运动 刘光勋撰(558)
- 沉积作用 刘宝瑞 李文汉撰(559)
- 麻粒岩相区地质 李树勋 徐学纯 金巍撰(559)
- 弧后扩张作用 刘池洋撰(561)

历史地质学 地层学

- 地史学 杨式溥撰(562)
- 地层学 杨式溥撰(563)
- 地层的接触关系 杨式溥撰(564)
- 生物地层单位 杨式溥撰(565)
- 岩石地层单位 杨式溥撰(566)
- 古生代 左国朝撰; 杨式溥审(567)
- 第四纪地质 孙建中撰(567)
- 古水文地质 王文斌撰; 任天培审(569)
- 同位素地质学 罗修泉撰; 宋鹤彬审(569)

构造地质学

- 逆冲推覆构造 朱志澄撰(570)
- 接触应变作用 蔡学林撰; 徐开礼审(571)
- 深断裂 强祖基撰; 任纪舜审(573)
- 地震地质学 刘光勋撰(574)
- 造山运动 周祖翼撰; 劳秋元审(575)
- 底辟构造 刘湘培撰(576)
- 海沟 叶尚夫撰; 卢华夏审(577)
- 洋中脊 叶尚夫撰; 卢华夏审(578)
- 波浪状镶嵌构造说 张伯声 王战撰(580)
- 环太平洋构造波系 王战撰(581)
- 东亚镜像反映中轴带 王战撰(582)
- 特提斯构造波系 王战撰(583)
- 四大地壳波浪系统 王战撰(583)
- 吊筛式摆动 王战撰(584)
- 板块构造理论 金性春撰; 劳秋元审(585)
- 构造地层地体分析 劳秋元撰(586)
- 断块构造学说 钟嘉猷撰(587)
- 活动构造 刘光勋撰(588)

重力构造 索书田撰(589)

地槽—地台学说 陈国达撰(589)

地台活化、活化区及地洼区 陈国达撰(590)

地洼学说 陈国达撰(591)

地壳动定转化递进说 陈国达撰(592)

递进成矿理论 陈国达撰(593)

历史—因果论大地构造学 陈国达撰(594)

壳体构造 陈国达 陈世益撰(594)

构造地球化学 陈国达 黄瑞华撰(595)

成矿构造学 陈国达 陈世益撰(596)

双隆起—凹陷模型 胡晓猛撰(597)

祁连运动 金松桥撰(598)

海西运动 左国朝撰(598)

地质力学

地质力学 孙殿卿 高庆华撰(599)

构造体系 高庆华 孙殿卿撰(600)

构造序次 李东旭撰(601)

构造复合与联合 李东旭撰(602)

构造应力场 王维襄撰(602)

构造体系控矿 高庆华 苗培实撰(603)

海水进退规程与古生物迁移 徐炳川撰(604)

大陆车阀说 高庆华撰(605)

地质系统论 高庆华撰(606)

实验构造地质学 钟嘉猷撰(606)

矿物学

矿物学 施倪承撰(607)

白云鄂博矿物学 张培善撰(608)

矿物晶体结构分析 施倪承撰(609)

晶系 马哲生撰(609)

铀矿物 闵茂中撰(610)

二八面体绿泥石亚族矿物 杨雅秀撰(611)

粘土矿物与风化作用 张乃嫻撰(612)

石灰石化工制品碳酸钙 张乃嫻 马玉光撰(614)

岩石学

火成岩 林景仟撰(615)

岩浆作用 林景仟撰(616)

沉积岩 李文汉 刘宝瑞撰(617)

沉积相 刘宝瑞 李文汉撰(618)

孔兹岩系 姜继圣撰(618)

蛇绿岩 叶尚夫撰; 卢华复审(620)

矿床学

流体包裹体同位素年代学与放射成因同位素研究 鲁观清 卢焕章撰(621)

热液矿床中金的地球化学 陈丰撰(622)

矿床成矿模式 朱裕生撰(624)

海底喷流成矿作用 郑明华 刘建明撰(625)

萨布哈成矿作用 郑明华撰(626)

生物礁环境与成矿 郑明华撰(628)

交代成矿作用 赵一鸣撰(629)

热液对流循环系统 芮宗瑤 张洪涛撰(630)

热液蚀变分带 芮宗瑤 张洪涛撰(630)

中国非金属矿床成矿系列 陶维屏撰(631)

中国非金属矿床 陶维屏撰(632)

中国高岭土矿床 陶维屏撰(633)

长江中下游矿床系列 刘湘培撰(634)

微细浸染型金矿床 郑明华撰(635)

中国铁矿资源 赵一鸣撰(636)

中国稀土矿床成因 张培善撰(637)

斑岩矿床系列 芮宗瑤 张洪涛撰(637)

铜矿地质 王之田撰(638)

地质、矿产普查与勘探

综合信息矿产资源评价和预测 刘玲撰(639)

矿产勘查的植物学法 孔令韶撰; 姚士硕审(640)

点断平衡说 罗守进撰(641)

油气勘探 张长华撰(642)

石油地质学 张厚福撰(643)

塔里木地台 刘训撰(644)

孔隙水压力圆锥静力触探 张喜发撰(645)

海相硅岩沉积环境的有效指标 吉磊撰(645)

水文地质学与工程地质学

水文地质学 张人权撰(646)

地下水动力学 朱学愚撰(647)

地下水水质模型 朱学愚撰(648)

地下水资源评价 朱学愚撰(648)

地下水污染及水文地质地球化学 卢焕章 周永章撰(649)

沙地水分的研究进展 冯起 高前兆撰(650)

工程地质学 谭周地撰(651)

环境工程地质学 胡广福撰(652)

工程地质勘察 谭周地撰(652)

- 岩土结构 谭周地撰(653)
 动力滑坡学 胡广韬撰(654)
 水利水电岩溶工程地质 邹成杰撰(654)
 岩体工程地质力学 谭周地撰(656)
 黄土的显微结构 雷祥义撰(656)
 土体微观结构
 吴义祥 张宗祜 凌泽民撰(657)
 核分析技术在地质学中的最新应用
 李士 梁中兴撰(658)

宇宙矿物学

- 宇宙矿物学 张培善撰(659)
 古地磁学 王浩清撰(660)
 天文地质学 王浩清撰(661)

海洋学

海洋基础科学

- 古海洋学 王慧中撰; 劳秋元审(663)
 海洋地质学 谢继哲撰(664)
 南极和北极的海冰
 解思梅撰; 包澄澜审(665)
 规则波在淤泥质海床上的沿程衰减
 赵子丹撰(666)
 不规则波在淤泥质海床上的沿程衰减
 赵子丹撰(666)
 波浪与海工建筑物的相互作用
 邱大洪撰(667)
 不规则波及其与海工建筑物的相互作用
 俞幸修撰(668)
 海岸建筑物前的局部冲刷 赵子丹撰(669)
 海岸砂坝 李从先撰(670)
 热带海洋与全球大气计划 余志豪撰(670)
 厄尔尼诺与南方涛动 余志豪撰(671)
 化学海洋学的新领域 宋金明撰(672)
 海洋天然有机化学 郑其煌撰(673)
 海底热液活动和热液硫化物
 吴世迎撰; 李从先审(674)
 中国南海珊瑚化学 郑其煌撰(675)
 海洋环境中 Pu 的地球化学 李培泉撰(676)
 旁侧声纳图像镶嵌 李廷桓撰(677)
 海洋学中新生产力的研究
 焦念志 王荣撰(678)
 蒸溜法脱盐技术 张洪撰(679)

- 太阳能海水淡化技术 ... 朱世华 秦思昌撰(679)

海洋环境保护

- 海洋生态学 罗秉征 胡晓燕撰(680)
 海洋环境预报和海洋灾害警报
 包澄澜撰; 解思梅审(681)
 河口浑浊带成因
 时伟荣 沈煥庭 李九发撰(682)
 海洋环境中海—气与海—泥交换界面区腐蚀与
 防护 侯保荣 郭公玉 马士德撰(683)
 海洋沉积环境的基本参数和研究流程
 石学法撰(684)
 沉积物捕捉器
 詹滨秋 李鹏程 任建伟撰(685)
 治理赤潮的化学方法
 俞志明 邹景忠 马锡年撰(686)

自然地理学

数理地理学

- 地理信息 阎国年撰(687)
 地理信息系统 傅肃性撰(687)
 地理系统评价 黄叶芳撰; 沈建法审(688)
 地理专家系统 马蔼乃 周长发撰(689)
 计量地理学 查良松撰(690)

古地理学

- 古地理学 周秉根撰(691)
 古风化壳 景才瑞撰(692)
 古喀斯特 王飞燕撰(693)
 中国东部第四纪地理环境 黄培华撰(694)
 中国东部山地古冰川研究 杨达源撰(695)
 青藏高原第四纪大陆冰盖遗迹
 韩同林撰(696)
 黄土地层 赵景波撰(696)
 泥炭植物残体 郎惠卿撰(697)
 森林沼泽植物与泥炭间的营养物质交换
 郎惠卿撰(698)

部门自然地理学

- 地貌学 林钧枢撰; 尤联元审(699)
 构造地貌 傅毅撰(700)
 大地构造地貌 王心源撰(701)

- 不同大地构造单元的地貌表现 王心源撰(702)
- 地貌系统 尹国康撰;陈钦峦审(703)
- 分形地貌学 李后强撰;艾南山审(704)
- 气候地貌的多代性 郑本兴撰;任炳辉审(705)
- 地貌界限 尹国康撰;陈钦峦审(707)
- 中国地貌 陈志清撰;叶青超审(707)
- 喀斯特地貌 王飞燕撰(708)
- 喀斯特地貌类型 程久苗撰(709)
- 洞穴化学沉积物 俞锦标撰(710)
- 滴石沉积 俞锦标撰(711)
- 溶洞珍珠 俞锦标撰(712)
- 干旱气候地貌学 陈渭南 董光荣 王贵勇撰(712)
- 风沙物理学 邹学勇撰;董光荣审(714)
- 地貌灾害 傅毅撰(715)
- 雪线 苏珍撰;任炳辉审(716)
- 冰川形成条件 苏珍撰;任炳辉审(717)
- 中国冰雪水资源 杨针娘撰(718)
- 地球上水分循环 李慧珍撰;李增广审(719)
- 水量平衡 傅国斌撰(720)
- 应用水文学 周世术撰;孙毓飞审(721)
- 河流水文学 周世术撰;孙毓飞审(722)
- 地下水文学 周世术撰;孙毓飞审(722)
- 沼泽水文 周世术撰;孙毓飞审(723)
- 中国历史时期的水系变迁 陈桥驿 阙维民撰(724)
- 土地科学 张光生撰(725)
- 土地类型 申元村撰;陈传康审(726)
- 土地评价 张光生撰(727)
- 中国土地资源 申元村撰;赵松乔审(728)
- 土壤形成因素 彭补拙撰;龚子同审(729)
- 土壤形成过程 彭补拙撰;龚子同审(730)
- 植物区系地理 王荷生撰(731)
- 动物生态地理群 陈鹏撰;王宗英审(732)
- 动物区系区 陈鹏撰;王宗英审(733)
- 企业地理研究 费洪平撰(734)
- 旅游资源评价 楚义芳撰;鲍觉民审(736)
- 旅游容量 楚义芳撰;鲍觉民审(737)
- 旅游线路设计 楚义芳撰;鲍觉民审(737)
- 南极研究 朱诚撰;刘淑军审(739)
- 南极自然地理 朱诚撰;刘淑军审(740)
- 北冰洋自然地理 吴廷辉撰;林庸审(741)
- 印度洋自然地理 吴廷辉撰;林庸审(742)
- 世界海洋动物区系区 李恩庆撰(744)
- 欧洲自然地理 吴廷辉撰;林庸审(745)
- 中国自然地理 周秉根撰(746)
- 中国华南自然地理 郑芷青撰;韩渊丰审(747)
- 中国综合自然地理区划 蒋梅鑫撰;刘会庆审(748)
- 城镇体系规划 于凤兰撰;李恩庆审(748)
- 中国部门自然地理区划 蒋梅鑫撰;刘会庆审(749)
- 中国热带的问题 郑芷青撰;韩渊丰审(750)
- 中国山地 张理华撰(751)
- 中国名山 潘玲玲 周秉根撰(752)
- 中国湖泊信息系统 赵锐撰;黄杏元审(753)
- 历史自然地理学 陈桥驿 阙维民撰(754)
- 中国海洋动物区系区 李恩庆撰(754)
- 黄土高原 吴莉萍 周秉根撰(755)
- 中国黄土高原地区兽类生态地理 陈钧撰;张荣祖审(756)
- 青藏高原 周秉根撰(757)
- 青藏高原的自然地域分异 郑度撰;林振耀审(758)
- 东北平原 杨秉康撰(759)
- 四川盆地 杨宗干撰(759)
- 台湾岛 谢福林撰;吴郁文审(761)
- 海南岛 郑达生撰;吴郁文审(762)
- 地图**
- 普通地图 张文彩撰(763)
- 专题地图 钱复生撰(764)
- 遥感地图 张丽蝶撰(765)
- 光盘地图的研究与应用 田德森 冯壁华撰(766)
- 生物科学**
- 普通生物学**
- 生命的起源 郭华庆撰;彭奕欣审(768)
- 生物多样性 苏智光撰(769)
- 生态位 祝廷成 张玉勋撰(770)

区域自然地理学

- 地域自然综合体 杨青山撰(738)

- 生态位重叠 郑艳撰;陈璧辉审(770)
 食物网的结构与功能 吴进才撰(771)
 竞争 张玉勋 祝廷成撰(772)
 生物全息律 潘重光撰(773)
 海洋微型浮游生物 程兆第撰(774)

细胞学

- 细胞分类学 李树深撰(775)
 胞间连丝 王玮撰(776)
 核仁的类型 吕桂芝撰(777)
 细胞膜结构 秦德安撰;柯家康审(778)
 核孔复合体 胡明撰(779)
 空泡膜类型 $H^+ - ATPase$
 王廷枝 许献忠撰(780)
 溶酶体的细胞生物学 林邦和撰(781)
 贮脂细胞 杨永平撰;宋喜秀审(782)
 肺巨噬细胞 秦晓群 孙秀泓撰(783)
 胸腺 B 细胞 于士广 丛英姿撰(784)
 小鼠胚胎性干细胞 丛笑倩撰(785)
 辐射对天然杀伤细胞及其活性的影响
 王宜强 王珏撰;刘树铮审(786)
 AT 细胞对电离辐射敏感的原因
 郭学青 夏寿莹撰;郑秀龙审(787)
 流式细胞仪 奇云撰(789)
 电离辐射对淋巴细胞的效应 苏燎原撰(790)
 氟化物的亚细胞效应 王英彦撰(791)

遗传学

- 染色体进化与生物进化的关系
 姚世鸿撰;王景佐审(792)
 染色体超微结构
 郑高飞 邹良秀撰;廖玉兰审(793)
 染色体端粒 汪国顺 潘惟钧 翟中和撰(794)
 染色体显带机制 高明君撰(796)
 多线染色体 孙廷昌 邓守俭撰(797)
 补体 赵修竹 汪策撰(798)
 补体的遗传多态现象 赵修竹撰(800)
 基因资源的保存 安彩泰撰(801)
 基因文库 安彩泰撰(802)
 遗传密码 罗辽复撰(803)
 结瘤基因 洪国藩 倪福弟撰(804)
 抑癌基因 陈钦耀撰(805)
 动植物 DNA 指纹图 孟安明撰(806)
 人工细胞融合 吴伯骥撰(807)

- 辐射细胞遗传学 杨宝晨 蔡露撰(808)
 自然转化 沈萍 彭珍荣撰(808)
 衰老分子生物学 贺福初撰;夏寿莹审(809)

生理学

- 时间生理学 马孔琛撰(811)
 神经生理学 阮迪云撰(812)
 神经生长因子 李广木撰(813)
 内源性睡眠物质 毛海兵撰(814)
 松果腺的某些分泌功能 柳建昌撰(815)
 前列腺素对生育的调控 柳建昌撰(816)
 细胞因子对下丘脑—垂体—肾上腺皮质轴的调
 节作用 陈坤华撰(817)
 大脑动脉环 李维宙撰(818)
 循环系统内分泌功能 杨军 凌世长撰(819)
 肺循环的自身调节 倪蕙撰(820)
 呼吸节律的形成 刘建中 刘苍苍撰(821)
 气道内含肽神经 方理本 杨秋火撰(822)
 胃肠道神经递质与调节肽
 安书成撰;苏生珍审(822)

生物化学

- 生物化学 林其谁撰(824)
 Baker 酵母与合成手性氟化物
 黄锦霞 潘貽军撰(825)
 高灵敏度非放射免疫分析 陈震华撰(826)
 酶联免疫吸附法 胡昌勤撰(827)
 新化学发光免疫分析试剂
 张帆 庄惠生撰(828)
 胆碱酯酶催化反应
 苏忠民撰;王荣顺审(829)
 蛋白质的三维结构与功能
 常文瑞撰;梁栋材审(830)
 蛋白质晶体学 林政炯撰;毕汝昌审(831)
 CD4 抗原 王嘉玺撰(832)
 糖蛋白的结构与功能 赵永芳撰(833)
 糖化蛋白质 赫荣乔撰(834)
 红细胞膜血型糖蛋白 卢义钦撰(835)
 红细胞膜区带 3 蛋白
 王力飞撰;卢义钦审(836)
 蛋白质卷曲 石颖撰;许根俊审(837)
 螺旋—环区—螺旋蛋白质—DNA 结合蛋白的新
 类型 李建义 童坦君撰(838)
 膜锚蛋白 朱大树撰(839)

- 肝脏脂蛋白受体 方定志 刘秉文撰(840)
- 核糖核酸 RNA 金由辛撰(842)
- 转移核糖核酸 tRNA 金由辛撰(843)
- 三链 DNA 郭军 张平城 白春礼撰(844)
- DNA 的化学合成 胡勤学撰;胡康洪审(846)
- 三链 DNA 的制备与生物学应用
..... 方晔 张平城 白春礼撰(847)
- 核苷酸以及金属配合物 杜鸣撰(849)
- 核酸 王德宝撰(850)
- RNA 自拼接 张大卫 李荣撰(850)
- 反意 RNA 罗超权撰(851)
- (1—3)、(1—4)- β -D-葡聚糖 王林济撰(853)
- 寡糖素 王克夷撰(853)
- 甲壳质 奇云撰(854)
- 多胺 缪金明撰(855)
- 新辅基——吡咯啉醌
..... 王银善 赵永芳撰(856)
- 抗体酶 罗贵民撰(857)
- 漆酶 李立才撰(858)
- ATP 酶的结构与功能
..... 王延枝撰;马晓军审(859)
- 磷脂酰肌醇特异的磷脂酶 C
..... 彭愈生 马红撰;张乃忠审(860)
- 蛋白激酶 C 张庭芳 秦岭撰(862)
- P34^{cdc2} 激酶 蔡家新 童坦君撰(863)
- 单加氧酶及其化学模拟 李志贤撰(864)
- 细胞色素 P450 单加氧酶及其化学模拟
..... 黄锦汪撰;计亮年审(865)
- DNA 疫苗 王宾撰(866)
- 细胞色素 C 电子迁移过程中的促进剂
..... 吴华强撰(867)
- 黑色素 李立才撰(868)
- 褪黑激素 袁崇刚撰(869)
- 生长激素 刘焯撰;盛志廉审(870)
- 钙调素 奇云撰(871)
- 抑制素 龚守良撰(872)
- 金属离子与生物膜上膜脂的作用
..... 方一非撰(873)
- 硒的生物化学 徐思羽撰;丁宏勋审(874)
- 生物化学工程 杨守志撰;陈家镛审(875)
- 固定化生物催化剂
..... 曹淑桂撰;罗贵民审(876)
- 细胞固定化的方法及应用 严小军撰(877)

生物物理学

- 扫描隧道显微镜及其生物学应用
..... 严隽珏 任笑地撰(878)
- 蛋白质的荧光探针 赫荣乔撰(879)
- 免疫胶体金探针技术
..... 相宁 张成良撰;张作芳审(880)
- 光学实时监测神经元膜电位
..... 张人骥撰(881)
- 基体辅助激光脱附电离 郑伟杰撰(882)
- 电泳 郭尧君撰(883)
- 生物大分子印渍技术 李世昌撰(884)
- 生物磁学 奇云撰(884)
- 生物细胞冷冻蚀刻电镜技术
..... 应国华撰;李文镇审(886)
- 辐射生物物理学 丘冠英撰(887)
- 辐射生物剂量计 郑斯英撰(888)

分子生物学

- 分子生物学中两种不同学派和生物产业形成
..... 吴明撰(889)
- 交联法在分子生物学研究中的应用
..... 贺福初撰;夏寿萱审(890)
- 分子进化 李树深撰(891)
- 受体的分子生物学 蔡良婉撰(892)
- 细胞癌变分子机制 张玉琨撰(894)
- β -内酰胺酰化酶的分子生物学
..... 张其玖撰;门大鹏审(895)
- 磷-32 酶法标记核苷酸 仪明光撰(896)
- 基因表达调控 马润泉撰(896)
- 真核生物基因表达调控
..... 庞广昌撰;周希澄审(897)
- 原核细胞的基因表达调控
..... 庞广昌撰;周希澄审(898)
- 克隆 DNA 的体外定位诱变 陈乃用撰(900)
- 异源基因在酿酒酵母中表达 陈玉梅撰(901)
- 植物病毒的分类与进化 朱水方撰(902)
- 番木瓜环斑病毒外壳蛋白基因克隆与表达
..... 叶长明撰;范怀忠审(902)
- 细胞活性因子及其受体的分子进化规律
..... 贺福初撰;吴祖泽审(903)
- DNA 复制 陆长德撰(904)
- 外源蛋白在大肠杆菌中的分泌
..... 陈永青撰(905)

RNA 编接..... 陈丁丁撰(906)
 启动子..... 林志平撰(907)
 转录激活蛋白的分子结构.....
 张大军 冯博撰;皇甫永穆审(907)
 转座因子..... 许祖国撰(908)
 转化生长因子..... 施渭康撰(910)
 集落刺激因子..... 闻丹忆撰(911)
 表皮生长因子..... 黄平撰;卢义钦审(912)
 胰岛素样生长因子.....
 陈明雄 黄平撰;卢义钦审(912)
 α/β 干扰素受体..... 李洲 范启修撰(913)
 血型的分子基础..... 秦德安撰;柯家康审(915)
 基因治疗..... 李道群 方坤撰;姚士硕审(915)
 超声诱导基因转移.....
 陈乐政撰;章力建审(916)
 基因枪转基因技术.....
 陈乐政撰;姚山麟审(917)
 酶工程..... 郝军山撰(918)
 核酸分子杂交技术..... 戴启明撰(919)
 核酸杂交技术..... 杨英浩撰(920)
 单克隆抗体与杂交瘤技术..... 史良如撰(921)
 基因工程抗体..... 张玉砚撰(922)
 抗病毒植物基因工程..... 叶寅撰(923)
 逆转录病毒长末端重复序列的结构和功能.....
 童光志撰;卢景良审(924)
 水稻外源基因转化..... 葛扣麟撰(925)
 重组猪生长激素..... 齐顺章撰(926)
 鸚鵡衣原体的细胞外膜抗原特性.....
 段跃进 李英才 杨学礼撰(927)
 分子生物学在土壤微生物领域的应用.....
 叶定一 曹幼琴撰;朱洪文审(928)

古生物学

古孢粉学..... 高联达撰(929)
 疑源类..... 高联达撰(930)
 几丁虫..... 高联达撰(931)
 三叶虫..... 谭光弼撰(932)
 虫颚..... 高联达撰(933)
 牙形动物门..... 白志强撰(934)
 腹足动物口盖..... 王惠基撰(935)
 古生物学与人类自然观..... 白志强撰(935)
 古生态学..... 杨式溥 张建平 杨洪撰(936)

微生物学

微生物生理学..... 焦瑞身撰(938)

微生物生态学..... 王世荣撰(940)
 微生物降解.....
 曹幼琴 叶定一撰;朱洪文审(941)
 微生物固定金属及其应用.....
 黄淑慧撰;袁荣庆审(942)
 草原土壤微生物生态系.....
 李生撰;王国栋审(943)
 草原土壤微生物生态系——氮素生理群.....
 李生撰;王国栋审(944)
 植物微生物区系..... 王守正撰(945)
 水中微生物..... 李光忠撰(946)
 菌物资源..... 余永年撰(947)
 数值分类学在真菌分类中的应用.....
 郑传临撰(948)
 细菌分类中的核酸分析.....
 汪恩涛撰;杨苏声审(949)
 仓贮病原细菌..... 陈涛撰(950)
 大肠菌群研究进展..... 李光忠撰(951)
 发光细菌..... 吴自荣撰(952)
 钩端螺旋体..... 鲍朗撰;余叶蓉审(953)
 植物花螺原体..... 叶旭东撰(954)
 毛菌纲真菌..... 黄秀琴撰;吴治身审(954)
 核型多角体病毒..... 丁翠撰;蔡秀玉审(955)
 分枝杆菌质粒..... 张天民撰(956)
 细菌抗砷特性..... 徐海岩 顾望明撰(957)
 食线虫真菌..... 何世川 张克勤撰(959)
 地下大型真菌..... 余永年撰(960)
 单囊壳菌..... 袁自清撰(961)
 球壳孢目..... 白金铠撰(962)
 镰孢霉..... 黄秀琴撰;吴治身撰(963)
 水生丝孢菌..... 郭书普撰(964)
 新抗生素的研究..... 吴剑波撰(965)
 食品真菌学..... 贾珍珍撰(966)
 发酵工程..... 刘芝兰 张世炜撰(967)
 沼气发酵微生物..... 边文骅撰;张世炜审(968)

植物学

植物起源、进化及其分类的研究方法.....
 钟珍萍撰(969)
 蕨类植物的演化..... 张耀甲撰(971)
 苏铁植物的进化..... 朱家耕撰(971)
 北美红杉的起源和进化.....
 李林初 史美琪撰(972)

- 雌雄异株裸子植物的性染色体 管启良撰(973)
- 植物细胞大量培养 周立刚撰;郑光植审(974)
- 植物染色体工程 马继生撰(975)
- 高等植物 PEPCase 的基因克隆、表达与转移 吴晓东撰;孙昌璜审(976)
- 木本植物基因工程研究 程东升撰(977)
- 植物诱导抗病性研究 王守正撰(978)
- 植物的热激蛋白 邱德有朱激撰(980)
- 植物抗病基因工程的研究进展 刘进元 余荔华撰(981)
- 突变体在植物激素研究中的应用 韩碧文撰(983)
- 花粉发育的超微结构 尹增芳 樊汝汶撰(985)
- 植物花粉活体剥壁技术 兰盛银撰(987)
- 被子植物的双受精 张拯玉撰(988)
- 体细胞无性系变异 凌定厚撰(989)
- 植物体细胞无性系变异 张大卫撰(990)
- 植物体细胞胚胎发生及植物细胞全能性 周俊彦 郭扶兴撰(991)
- 植物组织培养的器官分化及其应用 李文安撰;罗士书审(991)
- 植物幼苗形态学 叶能干撰(993)
- 植物轴器官的异常结构 张泓撰;胡正海审(993)
- 根的形态解剖 汪矛撰;郑相如审(994)
- 形成层 崔克明撰(995)
- 木栓形成层 崔克明撰(996)
- 植物组织培养快速繁殖 王玉英撰(997)
- 难培养植物组织的培养方法 余素芹撰(998)
- 呼吸途径和能量对种子萌发的调节 彭幼芬撰(998)
- 植物的呼吸代谢 刘存德撰(999)
- 植物呼吸代谢的多样性 周阮宝撰(1001)
- 卡尔文循环 吴光耀撰(1002)
- C₄ 和 C₃-C₄ 植物 焦德茂撰;崔继林审(1003)
- 植物生长调节物质 郭奇珍撰(1004)
- 渗透调节 杨根平 高俊凤撰;荆家海审(1006)
- 植物的水分利用效率 赵立新 荆家海撰(1007)
- 植物体氮素的挥发损失 李生秀撰(1008)
- 光合作用调节酶 RubisCO 的研究 吴晓东撰;孙昌璜审(1009)
- 光呼吸作用及其生化特征 杨礼锐撰(1010)
- 光合细菌 P870 朱永和撰(1012)
- 植物细胞生物转化 周立刚撰;杨崇仁审(1013)
- 植物中的钙调素 李家旭撰(1014)
- 植物铁素营养 谷丽萍撰(1015)
- 韧皮部装载和卸载 杨雄撰(1016)
- 生长延缓剂 杨文钰撰;李尧权审(1017)
- 光周期与植物的雄性不育 毕学知撰;陈克成审(1018)
- 植物的准性生殖 李益健撰(1019)
- 植物它感作用 余叔文撰(1020)
- 植物的向性运动 张崇浩撰(1021)
- 伸展蛋白 李雄彪撰(1022)
- 植物激素在植物体细胞胚发生中的作用 周俊彦 郭扶兴撰(1023)
- 植物生长结合蛋白 张德頔撰(1024)
- 大麦醇溶蛋白 湛小燕撰(1025)
- 油菜甾醇内酯 王玉琴撰(1026)
- 大豆同工酶类 刘学军撰(1027)
- 植物的硝酸还原酶 周阮宝撰(1028)
- 植物几丁酶 裴炎撰(1029)
- 酶法分离胚囊 胡宝忠撰;桂明珠审(1030)
- 甜菜碱和碱合成酶 梁峥撰;刘存德审(1031)
- 植物细胞、组织培养中的甾体激素 徐成基撰(1032)
- 植物中的甾体激素及其功能 张劲松 曹宗巽撰(1033)
- 苯基脲衍生物的细胞分裂素活性 周俊彦 郭扶兴撰(1034)
- 茶多酚 杨贤强撰(1035)
- 月光花素 徐罕伦撰;黄厚哲审(1036)
- 脱落酸 刘祖祺撰;周燮审(1036)
- 果实成熟的生物化学和分子生物学研究 刘存德撰(1037)
- 果实完熟过程中的激素调控 丁长奎撰(1039)
- 植物表面温度 Tps 马友鑫撰(1040)
- 植物病毒株系间交互保护和遗传工程交互保护 罗守进撰(1041)
- 植物抗旱性 沈黎明撰(1042)
- 植物抗寒性 刘祖祺撰;张石城审(1043)

- 太阳紫外线辐射对植物的影响 陈树元撰(1044)
- 杉科的细胞分类学研究 李林初撰(1045)
- 松科的细胞分类学研究 李林初撰(1046)
- 聚金属元素植物 ... 孔令韶撰;李长复审(1047)
- 蓝藻的固氮作用 陈因撰(1048)
- 螺旋藻属 高树田撰(1050)
- 轮藻植物 李益健撰(1051)
- 硅藻 李家英撰(1051)
- 发菜 刘家琼 丘明新撰;王勋陵审(1052)
- 龙脑香植物 刘伦辉撰(1053)
- 当归属综合分类 ... 潘泽惠撰;余孟兰审(1054)
- 独活属的生物学与化学 薄发鼎撰(1055)
- 杜鹃花属植物 方明渊撰(1056)
- 山茶属植物的核型 李光涛 梁涛撰(1057)
- 甜味蛋白 张林维撰(1057)

动物学

- 脊椎动物起源地 ... 王金星撰;赵小凡审(1058)
- 孤雌生殖 谭景和 杨增明撰(1059)
- 动物多倍体的遗传和进化 吴敏撰(1060)
- 动物红细胞的免疫功能 张德成撰(1061)
- 脊椎动物多倍体 李树深撰(1062)
- 成熟促进因子 MPF 毛钟荣撰;严绍颐审(1063)
- 哺乳动物染色体高分辨显带研究 李来记撰;祖国庸审(1064)
- 白化动物 白寿昌 邹淑荃撰(1065)
- 动物杂交试验 潘玉春撰;盛志康审(1066)
- 动物的性别决定、性别控制 ... 张一玲撰(1067)
- 鸟类的原生殖细胞 张天荫撰(1068)
- 哺乳动物早期胚胎发育 韩贻仁撰(1069)
- 哺乳动物授(受)精 谭景和撰(1070)
- 哺乳动物体外发生 马玉斌撰(1071)
- 体外受精 谭景和 吴光明撰(1072)
- 精子获能 谭景和撰(1073)
- 透明带反应 谭景和撰(1074)
- 贝类神经内分泌学 王春德撰(1075)
- 以海洋动物为模型的神经生物学 陈楠生撰(1077)
- 脊椎动物小脑 EGL 的发育 阎玉芹撰;李健群审(1078)
- 内皮 方一心撰(1079)
- 亲缘识别 房继明撰;孙儒求审(1080)

- 小型哺乳动物种群调节 杨荷芳撰(1081)
- 兽类年龄鉴定 鲍毅新撰(1082)
- 蛋白质电泳在动物分类学中的应用 卢浩泉撰(1082)
- 土壤原生动物 崔振东撰(1084)
- 蛭类与医药 杨潼撰(1084)
- 扬子鳄 吴孝兵撰;陈璧辉审(1085)
- 鼠耳蝠染色体 张维道撰(1086)
- 喜马拉雅旱獭研究 黄孝龙撰;吴祥林审(1087)
- 大熊猫 黄万波 顾玉珉撰(1088)
- 猕猴的生殖生理 魏振年 莫铭祥撰(1089)

昆虫学

- 昆虫信息素 华湘瀚撰(1090)
- 鳞翅目性信息素化学 华湘瀚撰(1091)
- 昆虫种群空间格局 马占山 张执中撰(1092)
- 昆虫免疫 程振衡撰(1093)
- 中国常见蚤类生态学 肖柏林撰(1094)
- 秆蝇科系统分类 杨定撰(1096)
- 蜉蝣目 归鸿撰;尤大寿审(1096)
- 麦蛾科 李后魂撰(1097)
- 异脉筛麦蛾 李后魂撰(1098)
- 蜜蜂的记忆 高奔撰(1098)
- 中华虎凤蝶 胡萃撰(1099)
- 天蚕 叶恭银 胡萃撰(1100)
- 络网蛛及其生殖腺 徐亚君撰;宋大祥审(1101)

人类学

- 人类种族研究 郭常富撰(1102)
- 中国的猿人化石 顾玉珉 黄万波撰(1103)
- 中国的智人化石 顾玉珉 黄万波撰(1104)
- 人类进化 吴新智撰(1105)
- 体质人类学 关文明撰(1105)
- 人体测量学 陈昌富撰(1106)
- 优生学 余绍华撰(1107)

医药、卫生

- 医学美学 柯海龙撰(1109)
- 实验外科进展和展望 陈国钧撰(1110)
- 医学实验动物科学 张业彬撰(1111)
- 无菌动物和悉生动物 万邦元撰(1112)

预防医学、卫生学

- 行为医学与健康 梁浩材撰(1113)
- 环境医学展望 祁家骥撰(1115)
- 环境卫生学研究进展 祁家骥撰(1115)
- 氟与健康 魏赞道撰(1116)
- 空气污染与肺癌 王莉凝撰(1117)
- 中国高层楼房供水卫生研究
..... 李宝云撰;钱碧玉审(1118)
- 饮水消毒 罗启芳撰(1119)
- 矿泉水与健康 徐方陶勇撰(1120)
- 村镇规划卫生 匡颂尧撰(1121)
- 化工健康监护 孙维生撰(1122)
- 生物监测及其阈限值研究进展
..... 傅慰祖撰(1122)
- 中国乡镇企业中职业危害的防治研究
..... 胡坤元撰(1123)
- 职业性颈臂疾病 朱启星撰(1124)
- 焊接职业危害 乔赐彬撰(1125)
- 蛋白质与职业中毒 阿拉塔撰(1126)
- 砷中毒 陈洪城撰(1127)
- 急性氨中毒 吕淑秋撰;王世俊审(1127)
- 尘肺的防治——矽肺发病机理研究现状
..... 郭焱 刘保连撰(1129)
- 石棉肺 李洪洋撰;郑志仁审(1130)
- 支气管肺泡灌洗在矿山尘肺诊治中的应用
..... 郭焱 刘保连撰(1131)
- 农民肺 郑志仁撰;李洪洋审(1132)
- 职业癌 毕文芳撰(1133)
- 职业性皮肤病 王侠生撰(1134)
- 室内甲醛污染的健康效应研究进展
..... 风华 祁家骥撰(1135)
- 植酸的营养学研究 高永清撰(1136)
- 硒营养学 余庆春撰;李文杰审(1137)
- 辐照处理食品 张道做撰;陈科文审(1138)
- 辐照食品的卫生安全性
..... 张道做 王瑞淑撰(1139)
- 化妆品细菌污染 黄兰芳撰;卢月恒审(1140)
- 医院感染 薛国文撰(1141)
- 医学灭鼠 汪诚信撰;王美秀审(1142)
- 计划免疫 苏万年撰;章以浩审(1143)
- 城市异动儿童计划免疫管理
..... 刘意群撰;王长江审(1144)
- 狂犬病免疫预防及控制 聂彦萍撰(1144)
- 卫生法学 刘志诚撰(1145)
- 食品卫生法 刘本仁撰(1146)
- 传染病防治法 刘本仁撰(1147)
- 国境卫生检疫法 达庆东撰(1148)
- 药品管理法 达庆东撰(1149)
- 卫生服务研究 龚幼龙撰(1150)
- 卫生人力发展 严非 龚幼龙撰(1151)
- 卫生管理教育 毛磊撰(1152)
- 医学教育 陈刚撰;梅人朗审(1152)
- 毕业后医学教育 梅人朗撰(1153)
- 继续医学教育 梅人朗撰(1154)
- 医学教育测量与教育评价
..... 陈刚 梅人朗撰(1155)
- 社区医学教育 梅人朗撰(1156)
- 重症监护病房 韩培华撰(1158)
- ICU 与诊治 高玉华撰(1159)
- 医院护理管理 李从璞撰;马维通审(1161)
- 护理管理在冠心病监护病房的特殊地位
..... 丁佩玉撰;朱怀玺审(1162)
- 洁净手术室的建立和手术室无菌环境管理
..... 施亦文撰;王蔚莹审(1162)
- 中国卫生总费用研究 杜乐勋撰(1163)

中国医学

- 中医人工智能系统 杨培坤 杜清撰(1164)
- 医学考古与文物 高毓秋撰;郭天玲审(1165)
- 中医体质学 王琦 苏庆民撰(1166)
- 中医养生学 王健撰;李洪涛审(1167)
- 《内经》治则的近代研究
..... 陈农 周国琪撰(1168)
- 中西医结合对“肾”本质的研究
..... 沈自尹撰(1169)
- 攻邪学说 徐荣庆撰(1170)
- 命门的研究进展 张鑫华撰(1171)
- 精气神理论及其研究 刘承才 张庆祥撰(1172)
- 藏象学说 迟华基 魏凤琴撰(1173)
- 肾主生殖的研究 俞瑾撰(1174)
- 肾虚证研究 丁钰熊撰(1174)
- 脾虚证研究 丁钰熊撰(1175)
- 经络现象 许冠荪 陈向华撰(1176)
- 经络实质研究 许冠荪 许能贵撰(1177)
- 经穴—脏腑相关研究进展
..... 许冠荪 姜义平撰(1178)
- 气功偏差 吕广君 蔡俊撰(1179)

- 中医阴阳学说 吴华强撰(1180)
 天人相应学说 郭子光撰(1181)
 中医病理学 匡调元撰(1182)
 中医体质病理学 匡调元撰(1183)
 中药与免疫 池建淮 万毅撰(1184)
 病证参合诊治 ... 张笑平 纵横 王平法撰(1185)
 辨证论治 杨维益撰(1186)
 中医“证”的客观化研究
 沈绍功 刘小康撰(1187)
 中医证候规范 孙益鑫 王建青撰(1188)
 卫气营血证候实质 ... 马健撰;孟澍江审(1189)
 脉象图与脉诊客观化 徐洪文撰(1190)
 癌症患者青紫舌与舌脉异常
 陈健民撰(1191)
 舌诊 杨维益 梁嵘撰(1192)
 截断扭转疗法 张笑平撰(1193)
 解表法的临床与机理研究 赵章忠撰(1193)
 通里攻下法 周超凡 于智敏撰(1194)
 清热解毒法的临床与研究 赵章忠撰(1195)
 祛湿法的临床与实验研究 张国庆审(1196)
 养阴生津法的临床与实验研究
 赵坚撰;赵章忠审(1197)
 益气法的临床与实验研究
 张国庆撰;赵章忠审(1198)
 活血化瘀法 周超凡 刘艳芳撰(1199)
 中医治则 周超凡 于智敏撰(1200)
 按摩 陈惠德撰(1201)
 推拿按摩手法治疗颈椎病机理研究
 王广智撰(1202)
 针灸学 陈汉平撰(1203)
 针灸—免疫研究 陈汉平撰(1204)
 针灸对内分泌系统功能调节作用的研究进展 ...
 郑蕊田撰(1205)
 针灸仪器研究 杨华元撰(1206)
 针刺促排卵 俞瑾撰(1206)
 头针疗法的研究进展
 贾怀玉 王端义撰(1207)
 耳针疗法的研究进展
 蔡向红 陈利国撰(1208)
 眼针疗法研究进展 张彤撰(1209)
 气功镇痛 储维忠撰;张文彬审(1210)
 医案 黄煌撰(1210)
 岭南温病学说 彭胜权撰(1211)
 湿热病症的研究进展
 陆嘉瑜 赵章忠撰(1212)
 温病卫气营血 谷晓红撰;胡定邦审(1214)
 消渴的研究进展 ... 蔡丽慧撰;陈炳元审(1215)
 中医治疗震颤麻痹的研究进展
 王端义 陈利国 贾怀玉撰(1215)
 风湿肺热病 王成祥撰;杜怀棠审(1216)
 男性不育的辩证论治
 曲锡萍 林宏益撰(1217)
 中医治疗艾滋病 苏诚炼撰(1218)
 中医诊治冠心病的研究
 田芬兰 来丽萍撰(1219)
 中医药治疗心律失常的进展
 韩明向 李泽庚撰(1220)
 中西医结合治疗病毒性心肌炎
 阎会君撰;王朝宏审(1220)
 中西医结合治疗血栓闭塞性脉管炎
 陈荣荣撰(1221)
 中医治疗高脂血症研究进展
 周宜轩撰(1222)
 中医治疗再生障碍性贫血
 杨留 王天恩撰(1223)
 癌症血液高粘状态和活血化瘀研究
 陈健民撰(1224)
 中医治疗慢性支气管炎 钱天雷撰(1225)
 中医治疗胃下垂的研究进展
 杨炳初撰(1225)
 中医治疗慢性胃炎的研究进展
 蔡淦 程勇撰(1226)
 中医治疗慢性前列腺炎的研究进展
 杨永元撰(1227)
 中医治疗糖尿病的研究进展 林兰撰(1229)
 中西医结合治疗内毒素血症
 陈海龙撰(1229)
 中药治疗耐药金黄色葡萄球菌疾患
 文传 吕恣 钱允健撰(1230)
 中医治疗尿石症的研究进展
 杨永元撰(1231)
 中医治疗慢性肾功能衰竭的研究进展
 陈奕庆 廖圣宝 张景湖 张俊撰(1233)
 中西医结合治疗肾小球疾患
 施赛珠撰(1234)
 肾移植中的中医药应用
 马慧筠撰;张天审(1235)

- 中医治疗烧伤 唐汉钧撰(1236)
 中西医结合治疗毒蛇咬伤
 王炜撰; 周五朱审(1237)
 中西医结合治疗痔 张仁福撰(1237)
 中医治疗肛瘘 唐汉钧撰(1239)
 中医治疗放环后月经失调研究进展
 戴德英撰(1240)
 中西医结合治疗子宫肌瘤
 王清华撰; 刘熙政审(1241)
 中医药治疗子宫内膜异位症
 戴德英撰(1242)
 崩漏 蔡莲香撰(1243)
 中医治疗女性不孕症的研究进展
 蔡莲香撰(1244)
 中医男科学 王琦 秦国政撰(1245)
 活血化瘀研究与儿科临床 时毓民撰(1246)
 中西结合对婴幼儿轮状病毒性肠炎的研究
 卢志 韩裴撰(1247)
 腰椎间盘突出症手法治疗机理的研究进展
 王广智撰(1248)
 中医治疗髌骨软化症的进展
 李保泉撰(1249)
 中西医结合治疗职业性皮炎
 戴行贵撰(1249)
 金针拨障术的研究进展 高健生撰(1251)
 中医治疗牙周病 曹翠娥撰(1251)
 中药学 胡世林撰; 郑品清审(1252)
 中药复方的现代研究
 毛平撰; 朱华德审(1253)
 药用植物与生境 哈永年撰(1254)
 中药妊娠禁忌的现代研究 高晓山撰(1255)
 道地药材 胡世林撰; 张世臣审(1255)
 中药大黄的现代研究 高晓山撰(1256)
 绞股蓝的研究与利用 万毅 池建淮撰(1257)
 中药薤白新研究 姜肇庆撰(1258)
 黄连 王纪常撰; 李洪涛审(1259)
 何首乌 龚树生撰; 傅聪远审(1260)
 红毛五加 杨培全撰(1261)
 青蒿素及其衍生物治疗疟疾的研究进展
 郭兴伯撰; 李国桥审(1262)
 中药实验 凤良元撰(1263)
 药材微量元素 胡世林撰; 池群审(1264)
 中药鉴定 贾敏如撰(1265)
 中药十八反现代研究 高晓山撰(1266)
 中药性味 刘继林撰(1267)
 中药归经 刘继林撰(1268)
 中医方剂沿革及其现代化 李海日撰(1268)
 《金匱》方药研究进展 何永樟撰(1270)
 中药抗衰老研究 韩明向 张念志撰(1272)
- ### 基础医学
- 健康风险评价 汪晶撰(1273)
 病例对照研究 王建华撰(1273)
 随机对照临床试验(RCT) 王建华撰(1275)
 临床科研设计、衡量与评价 赵晓梅撰(1276)
 医学电子学 高上凯撰(1277)
 MUMPS 程序语言(M 语言)
 王继中撰(1278)
 医学图像 吕维雪撰(1278)
 超声医学 赵强撰(1279)
 超声诊断仪技术及其临床应用
 袁光华撰(1281)
 血液流变学的基本原理与休克
 陈柏钧撰(1282)
 生物信息的检测与诊断 杨福生撰(1284)
 医用形状记忆合金 薛森撰(1285)
 创面覆盖物——壳聚糖
 陈柏钧撰; 陈国钧审(1285)
 体外反搏 郑振声撰(1286)
 骨骼肌循环辅助 黄文美撰; 王天佑审(1287)
 儿童解剖学 陈以慈撰(1288)
 儿童少年骨骼发育 刘宝林撰(1289)
 骨盐含量 徐顺清撰(1290)
 肌肉收缩机制 刘京璋撰(1291)
 性别的决定与分化 邵桐荪撰(1292)
 计算神经科学 郭爱克撰(1293)
 神经元 姜艾琳撰(1294)
 淋巴细胞亚群的分离及其功能测定
 苏燎原撰(1295)
 支持细胞在生精过程中的作用
 余铭清撰(1296)
 肥大细胞 阮幼冰撰(1297)
 间皮细胞 李继承撰; 俞寿民审(1299)
 腹膜孔 李继承撰; 俞寿民审(1300)
 消化管壁内神经丛及其神经元
 茹立强撰(1301)
 脑薄片技术 汪萌芽撰; 蒋志根审(1302)
 视觉 吴乐正撰(1303)

- 视信息的传递和视觉形成 吴乐正撰(1304)
- 视觉对比敏感度测量技术 金成鹏撰(1305)
- 对比敏感度的客观测定 吴德正撰(1306)
- 色觉的客观测定 吴德正撰(1307)
- 平稳跟踪运动的客观测定 吴德正撰(1307)
- 红细胞生长素 黄秉仁撰(1308)
- 局部肾素—血管紧张素系统 杨焜撰(1309)
- 肾素血管紧张素系统 孙梅励撰(1310)
- 肺表面活性物质 罗自强 孙秀泓撰(1311)
- 甲状旁腺生理学 左萍萍撰; 郑永芳审(1312)
- 肝脏的解毒作用 张应玖撰(1313)
- 促性腺素释放激素的抗衰老作用
..... 汪桐撰(1314)
- 兴奋性氨基酸的神经毒作用
..... 沈行良 汪桐撰(1315)
- 人类硒生物学 陈培恩撰(1316)
- 线粒体质子漏 宋玲撰(1318)
- 热休克蛋白 奇云撰; 姚士硕审(1319)
- 心纳素 孙梅励撰(1320)
- 化学致癌 犹学筠撰(1321)
- 化学致癌作用 杜应秀 吴孟起撰(1322)
- 化学物质致突变作用 叶林 施荣山撰(1323)
- 苯并(a)芘致癌性 陈秉颜撰(1324)
- 药物等理化因素对人精子染色体的影响
..... 伏晓敏 乐俊仪撰(1325)
- 环境病毒学 宋长征撰(1326)
- 艾滋病毒 范中善 夏红栅 马伟仁撰(1327)
- 轮状病毒血清型 何孔旺撰(1328)
- 埃尔托型霍乱弧菌噬菌体—生物分型
..... 高守一撰(1329)
- 埃尔托型霍乱弧菌的流行株与非流行株
..... 高守一撰(1330)
- 流感嗜血杆菌及其菌苗研究的现状
..... 吴丽华撰(1331)
- 钩端螺旋体现状研究 梁兆祥撰(1332)
- 鼠疟原虫 黄家章撰(1334)
- 鼠疫耶尔森氏菌的毒力决定基因
..... 俞东征撰(1335)
- 放射免疫分析 马学严撰(1336)
- 红细胞免疫系统 郭峰撰(1337)
- 人和猴 T 淋巴细胞的 TRBC 受体
..... 贵昆龙 张文发撰(1338)
- 肿瘤抗原 全家玩撰; 江克觉审(1338)
- P-糖蛋白和肿瘤多药拮抗性
..... 赵跃然撰(1339)
- 精浆免疫抑制蛋白质的分离与功能研究
..... 曹永江撰; 朱寿民审(1340)
- 梅毒诊断试剂 许旭初撰(1341)
- 特异性 T 抑制(Ts)细胞与自身免疫病
..... 吴厚生撰(1342)
- 抗核抗体 吴厚生撰(1343)
- 干扰素拮抗因子——组织凝集素
..... 蒋鑫宏撰(1344)
- 抗 DNA 单克隆抗体
..... 张兴民撰; 蒋明审(1345)
- 抗精子抗体 胡承阅撰(1346)
- 抗精子免疫 贵昆龙撰(1346)
- 自由基与肿瘤 郑荣梁撰; 方允中审(1347)
- 细胞因子 赵武述撰(1348)
- 受精和着床中的血小板活化因子
..... 胡承阅撰(1349)
- 癌基因和抑癌基因 鲍家驹撰(1350)
- 细胞遗传学适应性反应
..... 蔡露 王献理撰(1352)
- 微生物学研究进展 范明远撰(1352)
- 人精子染色体 张树成撰(1354)
- 血型 秦德安撰; 柯家康审(1355)
- 环境与遗传 金永堂撰; 何兴舟审(1356)

临床医学

- 发热 余鑫之撰(1357)
- 多器官功能衰竭 王德生撰(1358)
- 二维超声诊断技术的临床应用
..... 赵强撰(1359)
- 核磁共振医学应用进展
..... 孟晓梅撰; 朱怀玺审(1361)
- 支气管肺泡灌洗 张安成撰(1362)
- 神经阻滞疗法 陈家骅撰(1363)
- 深低温疗法 徐志伟撰; 聂云章审(1364)
- 冷冻疗法 柯海龙撰(1365)
- 高压氧疗法 季一如撰; 张绪中审(1367)
- 作业疗法 祁信立撰(1368)
- 言语治疗 倪朝民撰(1369)
- 血液透析疗法 蔡嘉霖撰(1370)
- 成分输血 吴基撰(1371)
- 自血光量子疗法 吴基撰(1372)
- 血浆置换疗法 吴基撰(1373)

- 深静脉穿刺及置管技术 吴蓉蓉撰(1374)
- 肿瘤针吸细胞学 阎秀撰(1375)
- 骨髓移植 吴基撰(1375)
- 康复医学 王玉龙撰(1377)
- 颈椎病及其康复治疗 吴毅文撰(1377)
- 脑血管意外(CVA)后运动障碍的康复治疗
..... 燕铁斌撰(1378)
- 内科学**
- 呼吸道病毒感染的快速诊断
..... 傅文水撰(1379)
- 病毒性肝炎 余鑫之撰(1381)
- 输血后肝炎 尹德铭撰(1383)
- 病毒性心脏病的分子生物学研究
..... 杨英珍 徐岩撰(1384)
- 艾滋病 李旭 余鑫之撰(1386)
- 艾滋病及其口腔表现 耿正瑶撰(1387)
- 鼠疫与蚤类 丁学良撰;王定国审(1387)
- 青藏高原鼠疫自然疫源地研究进展
..... 李少春撰(1388)
- 登革热 崔君兆撰(1389)
- 森林脑炎 刘瑞璋撰(1390)
- 立克次体与立克次体病 范明远撰(1390)
- 结核杆菌的基因诊断技术 张安成撰(1392)
- 结核菌素试验 罗永艾撰(1393)
- 中国黑热病的地理流行病学 王捷撰(1394)
- 消灭淋巴丝虫病传染源防治方案的研究
..... 郑贤球撰(1395)
- 绦虫病与人体囊虫病 马云祥撰(1396)
- 囊虫病血清学诊断
..... 曹务春撰;王家英审(1397)
- 隐孢子虫病 黄国斌撰;韩范审(1398)
- 动态心电图 韩卫星 朱怀玺撰(1399)
- 多普勒超声心动图的诊断原理与临床应用
..... 赵强撰(1400)
- 超声心动图心功能测定 王荣仁撰(1401)
- 慢性心力衰竭 程时媛撰(1402)
- 快速室性心动过速诊治进展
..... 唐海沁撰;朱怀玺审(1403)
- 房室传导阻滞 陈曙光撰;朱怀玺审(1405)
- 心房颤动研究进展
..... 徐迎春撰;朱怀玺审(1407)
- 冠心病合并心肌梗塞的麻醉处理
..... 戴秀萍撰(1409)
- 麻醉期间心跳骤停的原因
..... 刘世民 万志强撰(1409)
- 导管消融治疗心律失常的进展 朱纯石撰(1410)
- 预激综合征 朱怀玺撰(1411)
- 急性心肌梗塞溶栓治疗进展
..... 李结华 朱怀玺撰(1413)
- 缺氧性肺动脉高压发生机制
..... 孙秉庸撰(1414)
- 克山病 关振中撰;夏德义审(1415)
- 克山病病因研究 夏奔明撰(1415)
- 弥散性血管内凝血 吴基撰(1416)
- 肺动脉高压的诊断 汤泰泰撰(1417)
- 胃静脉曲张 于东风撰(1419)
- 高血压病的遗传性升压易感性
..... 赵光胜撰(1419)
- 高血压病因流行病学 金昌吉撰(1420)
- 骨髓增生异常综合征 吴基撰(1421)
- 再生障碍性贫血 吴基撰(1422)
- 血友病 魏启珍撰(1423)
- 应用 PCR 技术检测急性淋巴细胞白血病患者体
内微小残留病 刘树茂撰;费洪宝审(1424)
- 胸膜疾病的 CT 诊断 吴国忠撰(1425)
- 气道高反应性 张安成撰(1426)
- 成人呼吸窘迫综合征研究进展
..... 刘秀文撰(1427)
- 成人呼吸窘迫综合征 张安成撰(1429)
- 纵隔病变的 CT 诊断 吴国忠撰(1430)
- 膈肌疲劳和治疗 杨秋火 方理本撰(1431)
- 食管粘膜剥脱症 周君琪撰(1432)
- 食管憩室 周君琪撰(1432)
- 消化道内镜 陈慎实撰(1433)
- 消化性溃疡治疗的进展
..... 浦琪 吴庆彬撰(1434)
- 慢性胃炎 陈慎实撰(1435)
- 上消化道出血的诊断 倪爱松撰(1436)
- 上消化出血治疗现状 王光升撰(1437)
- 下消化道出血诊断及处理的新进展
..... 倪爱松撰(1438)
- 感染性腹泻 江晓平撰;余鑫之审(1440)
- 慢性腹泻 李一如撰;左志诚审(1441)
- 肝功能衰竭 余鑫之撰(1443)
- 化脓性肝脓肿的治疗进展 王永征撰(1444)
- 体外冲击波碎石治疗胆石症
..... 耿小平撰(1445)

- 胆囊息肉样病变 王蔚莹撰(1446)
- 莨菪类药物治疗急性出血坏死型胰腺炎
..... 潘秀珍撰(1447)
- 内镜逆行胰胆管造影 王成友撰(1448)
- 术中内分泌疾病危象及处理
..... 蒋昭祥撰(1449)
- 甲状腺疾病治疗研究
..... 刘子太撰;高玉真审(1450)
- 甲状腺结节的诊断与治疗 俞士炳撰(1451)
- 弥漫性甲状腺肿伴机能亢进症研究进展
..... 杨明功撰(1453)
- 低 T₃ 综合征 张长乐撰;胡家骅审(1454)
- 糖尿病研究进展 杨明功撰(1455)
- 血液中碳氧血红蛋白(HbCO)的分析方法
..... 李美兰撰(1456)
- 微量元素与生殖 翁礼桐撰(1457)
- 硒缺乏与癌症 陈培恩撰;梅蔚德审(1458)
- 老年营养代谢 雷勇 汪恭恕撰(1459)
- 自身免疫病及其治疗
..... 孙宾撰;李晓玉审(1460)
- 遗传代谢病
..... 唐久来 杨正修撰;朱子杨审(1461)
- 溶酶体病 林邦和 朱舜丽撰(1462)
- 染色体畸变和先天性畸形
..... 唐久来 杨正修撰;朱子杨审(1464)
- 先天愚型 梁晏清撰(1464)
- 外科学**
- 外科学的发展与现状 王蔚莹撰(1465)
- 显微外科的发展与现状
..... 朱家恺 张自杰撰(1466)
- 麻醉期间高血压及高血压反应
..... 张健撰(1467)
- 嗜铬细胞瘤术中高血压的控制
..... 苏榆撰(1468)
- 器官移植 王蔚莹撰(1469)
- 颅面外科学 张滌生撰(1470)
- 眼部整形 吴邦安撰(1471)
- 感染性休克 苏菲 余鑫之撰(1472)
- 褥疮防治装置
..... 崔章信 盖玉荣 崔宴医撰(1474)
- 创伤性休克研究进展 陈国钧撰(1475)
- 烧伤救治与研究进展 陈国钧撰(1476)
- 烧伤后的多系统器官衰竭
..... 林洪远 盛志勇撰(1478)
- 神经外科学 杨次文撰(1479)
- 显微神经外科现状 李汉杰撰(1480)
- 脊髓损伤的实验研究 戴力扬撰(1481)
- 颅脑损伤研究进展
..... 李长元撰;杨次文审(1481)
- 立体定向及功能性神经外科学
..... 许建平撰(1483)
- 心肌保护 张铁山撰(1484)
- 血管内窥镜 孟翔凌撰(1485)
- 主动脉成形术 王建华撰(1486)
- 荧光引导的激光血管成形术
..... 王振亚 叶能昶 宁峰撰(1486)
- 经皮穿腔肾动脉成形术 王建华撰(1487)
- 下肢深静脉功能不全的观念更新
..... 宋海屏撰(1488)
- 淋巴管-静脉吻合术
..... 朱家恺 张自杰撰(1489)
- 食管癌的外科治疗
..... 于在诚撰;周久华审(1490)
- 腹部闭合性损伤诊断的进展
..... 王光升撰(1491)
- 壶腹部肿瘤影像学诊断的进展
..... 王蔚莹撰(1492)
- 超声导向经皮穿刺无水酒精治疗肝囊肿
..... 陈立武撰(1493)
- 布-加综合症的当代治疗 宋海屏撰(1494)
- 门脉高压症现代治疗进展 刘弋撰(1495)
- 胆道内窥镜 王震宗撰(1496)
- 经腹腔镜胆囊切除术
..... 刘弋撰;胡家骅审(1497)
- 性激素与胆囊结石的关系
..... 熊奇如撰;张宗耀 李祖蔚审(1498)
- 胰腺的外科疾病 王震宗撰(1498)
- 急性坏死性胰腺炎外科治疗的进展
..... 侯玉华撰;王蔚莹审(1499)
- 脾破裂外科治疗观念的更新
..... 戴传金撰;王蔚莹审(1500)
- 断肢(指)再植 朱家恺 张自杰撰(1501)
- 大骨节病研究 卢明俊撰(1501)
- 关节软骨损伤 田得祥撰(1503)
- 骨膜再生关节软骨的研究
..... 李奇撰;韩天英审(1504)

- 科雷氏骨折整复固定方法临床研究 王广智撰(1505)
- 尿路结石的成因与诊断 陈梓林撰(1507)
- 胆道结石的外科治疗 张振先 钱泽金撰(1508)
- 尿道下裂 孙广慈撰(1509)
- 抗利尿激素不适当分泌综合征 胡克恒 王德林撰(1510)
- 血尿 王辉林撰; 马永江审(1511)
- 性功能障碍 水厚地 杨绪斌撰(1512)
- 男子性功能障碍 江鱼撰(1513)
- 男性不育症流行病学研究 林宏益 曲锡萍撰(1514)
- 泌尿外科学的进展 田有年撰(1515)
- 肾移植后免疫抑制药物的应用 章咏裳撰(1516)
- 阴茎再造 孙广慈撰(1517)

妇产科学与儿科学

- 妇产科学 张缔华撰(1518)
- 闭经 邵敬于撰(1519)
- 绝经后出血 孙敏文撰(1520)
- 绝经后阴道流血 樊毓方撰(1521)
- 妇科宫腔镜检查 and 手术 冯缙冲撰(1523)
- 子宫肌瘤的诊断和治疗 常德安撰(1524)
- 女性生殖道畸形 常德安撰(1524)
- 阴道再造术 熊世文撰(1526)
- 不孕症与人工生殖 丛林撰(1527)
- 围产医学 杨正修撰; 朱子扬审(1528)
- 早孕因子研究进展 王家骥撰; 苏宝田审(1529)
- 妊娠高血压综合征 盖铭英撰(1530)
- 产前宫内诊断 樊毓方撰(1532)
- 宫外孕诊断和治疗的新进展 汪喜峰撰(1532)
- 胎儿窘迫的监测 夏兢莲撰(1533)
- 新生儿学 杨正修撰; 朱子扬审(1535)
- 儿科学 郝鹏飞撰; 杨正修审(1536)
- 小儿液体疗法 杨正修撰; 朱子扬审(1537)
- 小儿佝偻病 郝鹏飞 杨正修撰; 朱子扬审(1539)
- 小儿腺病毒感染 傅文永撰(1539)
- 小儿先天性心脏病 杨正修撰(1541)

- 小儿支气管哮喘 郝鹏飞 杨正修撰; 朱子扬审(1542)
- 小儿腹泻 杨正修撰(1543)
- 小儿惊厥 郝鹏飞 杨正修撰; 朱子扬审(1544)
- 先天性巨结肠 王德生撰(1545)
- 先天性肥厚性幽门狭窄 王德生撰(1545)
- 先天性胆管扩张症 王德生撰(1546)
- 儿童生长性颅骨骨折 杨维撰(1546)
- 小儿抽动综合征 刘芬撰(1547)
- 儿童保健 郝鹏飞 杨正修撰; 朱子扬审(1549)

肿瘤科学

- 肿瘤病学 程广源撰(1549)
- 肿瘤登记 金凡撰(1550)
- 肿瘤温热化学疗法 杨虎川 杨耀琴撰(1551)
- 肿瘤放射治疗学 程广源撰(1552)
- 恶性肿瘤的综合治疗 林本耀撰; 黄信孚审(1553)
- 白血病 王天恩 杨留撰(1554)
- 食管癌 周元方撰(1556)
- 胃癌腹膜播散与腹腔游离癌细胞的研究 朱化刚撰(1557)
- 胃癌与性激素关系研究现状 刘弋撰; 胡家骅审(1558)
- 胃泌素瘤 孟翔凌撰(1560)
- 大肠癌 江积瑞撰(1560)
- 肾上腺嗜铬细胞瘤 郑克立撰(1561)
- 胰岛素瘤 王蔚莹撰(1562)
- 肾肿瘤的影像学诊断 蒋云仙撰(1563)
- 卡介苗防治表浅膀胱癌 蒋云仙撰(1564)
- 胶质瘤的综合治疗 李汉杰撰(1565)
- 椎管内肿瘤 王远兴撰(1566)
- 眼眶肿瘤的诊断 陈爱全撰; 蔡人杰审(1567)
- 乳腺癌治疗进展 俞士炳撰(1568)
- 卵巢癌的腹腔化疗 李孟达撰(1569)

神经病学与精神病学

- 脑电图 尹世杰撰(1569)
- 脑诱发电位 尹世杰撰(1570)
- 脑电图的进展与睡眠疾患 徐敬琴撰(1571)
- 肌电图 尹世杰撰(1573)
- 癫痫 尹世杰撰(1574)
- 脑性瘫痪 叶露梅撰; 杨葆真审(1575)

脑积水..... 王远兴撰(1576)
 脑梗塞..... 尹世杰撰(1577)
 脑血管疾病..... 尹世杰撰(1577)
 脑血管疾病的外科治疗..... 杨次文撰(1578)
 脑出血..... 尹世杰撰(1579)
 短暂性脑缺血发作..... 尹世杰撰(1579)
 蛛网膜下腔出血..... 尹世杰撰(1579)
 重症肌无力与烟碱型乙酰胆碱受体和其抗体 ..
 程源深 陈怀红撰(1580)
 腰椎间盘突出症的诊断研究.....

..... 王广智撰(1581)
 精神病学..... 韩传美撰(1583)
 精神分裂症..... 韩传美撰(1583)
 阿耳茨海默病..... 程源深 胡兴越撰(1584)
 情感性障碍..... 韩传美撰(1585)
 智力低下... 唐久来 杨正修撰;朱子扬审(1586)

皮肤病学与性病学

鱼鳞病..... 方丽撰(1587)
 性传播疾病防治..... 陈书兴 李树藩撰(1588)

眼、口腔与耳鼻咽喉科学

眼科学..... 黄叔仁撰(1589)
 眼科影像诊断..... 魏文斌撰;陈积中审(1589)
 激光在眼科的应用..... 石锦辉撰(1590)
 先天性和幼儿期青光眼.....
 陈瑞英撰;刘家琦审(1591)
 原发性开角型青光眼..... 陈逸撰(1592)
 视网膜脱离..... 陈积中撰;宋汝庸审(1593)
 白瞳症..... 李一维撰(1594)
 单疱病毒角膜炎... 魏文斌撰;李志辉审(1595)
 眼库技术..... 魏文斌撰;李志辉审(1597)
 角膜移植..... 龚向明撰(1598)
 人工晶体及人工晶体植入手术.....
 张晓峰撰;黄叔仁审(1598)
 屈光不正的手术疗法..... 褚仁远撰(1599)
 角膜接触镜..... 宋汝庸撰;陈积中审(1600)
 简易斜视矫正术——肌肉边缘切开联合拮抗肌
 折叠..... 鲁莼葆撰(1601)
 儿童弱视的防治..... 鲁莼葆撰(1602)
 中国口腔医学的进展..... 李剑农撰(1603)
 口腔修复生物力学..... 赵云凤撰(1604)
 钛在口腔医学中的应用.....
 汪大林撰;徐君伍审(1606)

遗传性乳光牙本质的治疗与修复.....
 耿正璠撰(1607)
 错殆畸形和口腔正畸..... 傅民魁撰(1607)
 耳神经学..... 王博惕 王丽雯撰(1608)
 全耳再造..... 高学宏撰(1609)
 鼻腔粘膜交感神经与副交感神经失衡引起的鼻病
 宋昌湘撰;卜国铨审(1610)
 嗓音外科学..... 周继福撰(1611)

放射医学

电子计算机 X 线断层扫描..... 吴国忠撰(1612)
 电子计算机 X 线断层扫描的临床应用.....
 吴国忠撰(1613)
 电子计算机 X 线断层扫描在尘肺诊断上的应用
 吴国忠撰(1615)
 冠状动脉造影的临床应用..... 郭仰明撰(1616)
 放射免疫毒理效应..... 朱寿彭撰(1617)
 放射遗传毒理效应..... 朱寿彭撰(1618)

药 学

放射性药物标记..... 仪明光撰(1620)
 药物对映体的药物代谢动力学.....
 蔡卫民撰(1620)
 时间药物代谢动力学..... 马孔琛 徐峰撰(1621)
 体内药物分析..... 曾经泽撰(1622)
 药物设计..... 李仁利撰;刘维勤审(1623)
 定量构效关系..... 李仁利撰;刘维勤审(1625)
 药物手性、药理作用与新药开发.....
 华维一 许国友撰(1626)
 萜类化学研究概况及展望..... 杨峻山撰(1627)
 有机硒化合物的药理学.....
 徐思羽撰;丁宏勋审(1628)
 苯二氮草结合抑制物..... 陈玉珍撰(1630)
 Ca²⁺增敏剂——新型强心药.....
 范礼理撰;江明性审(1631)
 防治血栓形成的药物研究进展.....
 吴子明撰;于同乐审(1632)
 外科治疗中脂肪乳剂的应用及理论基础.....
 张长乐撰;王蔚莹审(1633)
 外科治疗中氨基酸的应用及理论基础.....
 张长乐撰;王蔚莹审(1634)
 花粉营养药理学作用研究.....
 钱伯初撰;秦国卫审(1636)
 云芝胞内多糖..... 楚廷撰(1637)

抗生素的临床应用 余鑫之撰(1638)
 围手术期抗生素的应用
 胡家骅 张长乐撰(1640)
 抗早孕药物 周美华撰(1641)
 女用甾体避孕药 周美华撰(1642)
 甾体避孕药的安全性
 曹路敏撰;吴熙瑞审(1643)
 米非司酮 RU₄₈₆ 奇云撰;姚士硕审(1644)
 干扰素 范中善 于国祥撰;杜平审(1645)
 免疫毒素 奇云撰;姚士硕审(1646)
 抗独特型抗体 奇云撰;姚士硕审(1647)
 疫苗 周正任撰(1648)
 卡介苗 刘纯谦撰(1649)
 乙脑灭活疫苗 丁志芬撰;王用楫审(1650)
 人用狂犬病疫苗 林放涛撰(1651)
 脑膜炎球菌苗 邱清韵撰;王立亚审(1652)
 甲脒类杀螨剂的神经毒理作用
 王淑洁撰(1653)
 麻痹性贝毒 尤仲杰撰(1654)
 遗传毒理 于永强撰(1655)
 免疫毒理 于永强撰(1656)
 生殖毒理 于永强撰(1657)
 雄性生殖毒理学 施荣山撰(1658)
 神经毒理学 阮迪云撰(1659)

农业科学

农业基础科学

方差组分估计 潘玉春撰;盛志廉审(1661)
 农产品所受撞击载荷的应用
 华云龙撰(1661)
 肥料¹⁵N示踪技术 蔡大同撰(1663)
 世界尿素生产和使用发展动态
 廖兴其撰(1664)
 磷肥 王少仁撰(1666)
 磷肥合理施用 涂书新撰(1667)
 硝酸磷肥的农业评价 吴荣贵 林葆撰(1668)
 土壤电化学 张宏撰(1669)
 土壤圈物质循环研究与土壤学
 赵其国撰(1670)
 土壤潜育化作用 董元华 徐琪撰(1670)
 土壤风蚀预报日程 吕悦来 李广毅撰(1671)
 土壤水分吸持 杨艳生撰(1673)

土壤磁学及其应用研究
 卢升高 俞劲炎撰(1673)
 生物量的消长与养分物循环
 张金云撰(1675)
 土壤背景值 杨国治撰;李诵六审(1675)
 磷酸盐在土壤中的吸附
 夏汉平 高子勤撰(1676)
 分形理论在土壤科学中的应用
 李保国撰(1677)
 化学动力学在土壤离子交换反应中的应用
 章钢姪 张放年撰(1680)
 灌溉水的碱害指标及其与土壤碱化的关系
 万洪富撰(1682)
 红壤物理性质 许绣云撰(1684)
 土壤中的钴及其对植物的影响
 刘雪华撰(1685)
 崩岗侵蚀 李定强 朱世清撰(1686)
 黄绵土 贾恒义撰(1687)
 灌淤土 贾恒义撰(1688)
 黑垆土磷素形态 周广业撰(1689)
 土壤磷素化学研究 鲁如坤撰(1690)
 土壤中的非代换铵 李生秀撰(1691)
 垆土中的固定态铵 孙艳撰(1692)
 土壤非交换性钾 王家玉撰(1693)
 土壤中锌营养元素 李鼎新撰(1695)
 土壤中的锌及其化学行为 虞锁富撰(1696)
 土壤酶 何念祖撰(1697)
 农业生态系统中的共生固氮研究
 张学江撰(1698)
 土壤生态学研究趋势 吴珊眉撰(1699)
 共生固氮放线菌 丁鉴撰(1700)
 根瘤菌生态学研究 葛诚 江木兰撰(1701)
 稻麦田生态系统中生物固氮 程翔撰(1702)
 水稻结瘤 王洪隆 荆玉祥撰(1703)
 豆科树种共生固氮 黄维南撰(1705)
 大豆的三类根瘤菌共生体 葛诚撰(1705)
 快生大豆根瘤菌研究 喻勇 葛诚撰(1706)
 田菁茎瘤菌自生固氮 姜无忌撰(1708)
 杨梅根瘤的结构及固氮特性
 王慧英撰(1708)
 根瘤菌与宿主分子识别 王洪隆撰(1709)
 VA菌根研究进展 郝文英撰(1710)
 作物根际环境 苏德纯撰(1712)

- 稻田排放甲烷机理及估算方法 吴海宝撰(1712)
- 土壤系统分类 龚子同撰(1713)
- 人为土壤分类 史成华撰;龚子同审(1714)
- 土属 周明枳撰(1715)
- 灰壤 袁国栋撰(1716)
- 砂姜黑土 张俊民撰(1717)
- 寒冻黏土 鲍新奎撰(1718)
- 水稻土 徐琪 董元华撰(1719)
- 土壤退化及其防治 赵其国撰(1720)
- 土壤盐渍化问题 尤文瑞 赵其国撰(1720)
- 强排强灌改良盐碱地 逢春浩撰(1721)
- 植物根系与土壤抗冲性 李勇撰(1723)
- 农业气候 卢其免撰(1724)
- 农业气象指标 陈志银撰(1724)
- 作物最大生产潜力 李德明 胡瑞瑞撰(1725)
- 作物正态回归模型 李德明 胡瑞瑞撰(1726)
- 旱农地区水分生产潜力 陶毓汾撰(1727)
- 水分利用效率 张岁岐 山仑撰(1728)
- 保水剂及其在农业上应用的研究 季元芳撰(1729)
- CO₂ 浓度增加对植物生长和农业生产的影响 王葆棠撰(1730)
- 农作物产量气象预报 李德撰(1731)
- 农业生态工程 张壬午 孙鸿良撰(1732)
- 胶茶人工群落 龙乙明撰;汪汇海审(1733)
- 串联式拖拉机 徐挺撰(1734)
- 喷灌 马文正 刘肇祯撰(1735)
- 作物模拟技术 黄耀撰(1736)
- 作物生长模拟 殷新佑撰;戚昌瀚审(1737)
- 作物营养诊断 张国平撰(1738)
- 作物营养的示踪动力学 龚荐撰(1739)
- 作物水分生产函数 袁宏源撰;刘肇祯审(1740)
- 作物耐盐性 刘友良撰(1741)
- 种质创新 马峰生撰(1742)
- 人工种子 张宪省撰(1743)
- 植物种质超低温保存 石思信撰(1743)
- 无性繁殖作物种质的离体保存 梁继霞撰(1745)
- 顽拗性种子脱水敏感性 宋松泉 傅家瑞撰(1746)
- 种子的发育及其调控 黄上志 傅家瑞撰(1747)
- 种子活力 傅家瑞撰(1748)
- 作物种子的植酸 张玉良 李文星撰(1749)
- 作物品种稳定性测度法 胡秉民撰(1750)
- 作物抗虫育种 俞晓平撰(1751)
- 作物化学杂交育种 刘景祥 黄铁城撰(1752)
- 农作物体细胞无性系 赵成章撰(1754)
- 植物多倍体及其利用 孔令让撰;王洪刚审(1755)
- 多倍体育种 邹道谦撰(1756)
- 物理诱变育种 邱竟撰(1756)
- 碳-14 的诱变效应 陈秋方撰;吕忆梅审(1758)
- 离子束对遗传物质的作用 鲁润龙撰(1759)
- 磁场处理农作物种子的生物学效应及其机制 卢升高 俞劲炎撰(1760)
- 花粉选择的研究 孟金陵撰(1761)
- 植物细胞育种 潘重光撰(1762)
- 作物体细胞杂交 汤圣祥撰(1763)
- 植物细胞组织培养技术在筛选抗病突变体中的应用 李社荣撰(1764)
- 植物原生质体培养理论与技术研究 夏镇澳撰(1765)
- 主要农作物原生质体研究 卫志明撰(1767)
- 植物原生质体培养和融合在育种上应用 颜昌敬 张玉华撰(1768)
- 根癌农杆菌介导的禾谷类作物的遗传转化 杨剑波 吴家道撰(1771)
- 植物分子育种 潘重光撰(1772)
- 全息定域选种 潘重光撰(1773)
- 种子处理的应用与进展 黎裕撰(1774)
- 耕作制度 刘翼浩撰(1776)
- 旱地聚土免耕耕作法 伍仁军撰(1776)
- 植物保护**
- 自然灾害与气候灾害 陆渝蓉撰(1777)
- 自然灾害系统 高庆华撰(1778)
- 减灾系统工程 马宗晋 高庆华撰(1779)
- 霜冻 冯玉香撰(1780)
- 低温冷害 何维勋撰(1781)
- 植物病毒 郑光宇撰(1782)

- 植物线虫传播植物病毒 王寿华撰;陈品三审(1782)
- 植物抗病毒侵染 李怀方撰(1784)
- 组织培养与脱病毒 王玉英撰(1785)
- 植物免疫 成浩撰(1786)
- 斑点免疫吸附试验 钱荣田撰(1787)
- 植物对病害的防御系统 林忠平撰(1788)
- 植物抗病突变体选择 姚庆葆撰(1789)
- 病原相关蛋白及其在植物抗病中的作用 杜良成 王钧撰(1790)
- 植物诱导抗病性(I) ... 李冠 欧阳光察撰(1791)
- 植物诱导抗病性(II) 程翔撰;王守正审(1792)
- 种传病原菌与种子质量 朱振东撰(1793)
- 植物病原细菌的类群 许志刚撰(1794)
- 植物细菌病害的诊断与鉴定 许志刚撰(1796)
- 根癌农杆菌的 Ti 质粒 陈钦耀撰(1797)
- 寄主专化性毒素 刘品贤 李久香撰(1798)
- 黄萎病菌毒素 章元寿撰(1798)
- 植物抗虫性 俞晓平 胡革撰(1799)
- 农业大害虫的择食行为机理 严福顺 杜永均撰(1800)
- 食叶害虫为害与作物产量损失的关系 盛承发撰(1801)
- 取食繁殖器官害虫危害与作物产量损失的关系 盛承发撰(1803)
- 粘虫 倪汉祥撰(1804)
- 粘虫防治 李世功 刘爱芝撰(1806)
- 朱砂叶螨 刘孝纯撰;刘芹轩审(1806)
- 无视异絨蟻 张慧杰撰(1808)
- 农田杂草生态学 吴万春 宁洁珍撰(1808)
- 杂草间的他感作用及其在杂草生物防治中的应用 马永清 刘德立撰(1809)
- 生物除草 苏少东撰(1810)
- 农田害鼠的生态控制及其预测预报 赵桂芝 袁宽林撰(1811)
- 禾谷类锈病组织病理学 张凤国撰(1812)
- 经济损害水平(EIL)与经济阈值(ET) 肖悦岩撰;曹士迈审(1813)
- 有害生物综合治理(I) 田际榕撰(1813)
- 有害生物综合治理(II) 范坤成撰;彭绍裘审(1814)
- 水稻阴害 李林撰;高亮之审(1816)
- 抗稻瘟病基因分析 凌忠专撰(1817)
- 稻瘟病菌小种变异性与品种抗性鉴定 曾令祥 周维佳撰(1818)
- 稻瘟病抗性诱导 高必达 陈寅撰;罗宽审(1818)
- 水稻纹枯病(I) ... 范坤成撰;彭绍裘审(1819)
- 水稻纹枯病(II) 何忠全撰;何明审(1820)
- 稻纹枯病菌致病力分化与品种抗性 曾令祥撰(1821)
- 水稻白叶枯病抗性遗传 章琦撰(1822)
- 稻白叶枯病抗性诱导 高必达撰;陈寅审(1824)
- 稻曲病 邓根生撰;陈嘉孚审(1825)
- 稻粒黑粉病 黄富撰(1826)
- 水稻恶苗病 叶琪明撰(1827)
- 水稻褐鞘病与螨类 李隆术撰(1828)
- 水稻害虫综合防治技术体系 黄志农撰(1829)
- 褐飞虱 巫国瑞撰(1830)
- 褐飞虱的化学防治 王荫长撰(1831)
- 稻田捕食性天敌捕食量及种间相互作用 吴进才撰(1832)
- 麦类作物花期冷害 李来胜 何立人撰;李正玮审(1833)
- 小麦类病毒病 刘汉文撰;王树权审(1834)
- 小麦白粉病 李隆业撰(1835)
- 小麦抗白粉病性遗传 李隆业撰(1836)
- 小麦锈病 谢水仙撰(1837)
- 小麦赤霉病防治的理论基础 徐康泰撰(1838)
- 大麦黄花叶病抗性遗传 朱睦元撰;俞志隆审(1839)
- 麦田生防 李世功 刘爱芝撰(1840)
- 麦田杂草 赵美琦撰(1841)
- 玉米大、小斑病 王铨茂撰(1842)
- 玉米小斑病 吴全安撰(1842)
- 玉米红叶病 吴尔福撰(1843)
- 亚洲玉米螟 王蕴生撰;李建平审(1844)
- 玉米铁甲虫 张永强 陆温撰(1846)
- 高粱病害防治 胡吉成撰(1847)
- 粟病虫害 王雅儒 金达生撰(1848)
- 粟病害防治 胡吉成撰(1849)
- 植物干旱胁迫 杨根平 荆家海撰;高俊凤审(1850)

马铃薯抗病毒基因工程 吕玉平撰(1851)
 地膜覆盖棉田草害 张慧杰撰(1852)
 棉花抗生物质 李玉奎撰;张无恩审(1853)
 棉花植物保卫素 章元寿撰(1854)
 棉花枯萎病 陈其焱撰;石磊岩审(1855)
 棉花黄萎病菌致萎毒素 甘莉撰(1856)
 棉花多虫复合危害 王瑞琪撰(1857)
 棉铃虫 吴坤君撰;丁岩钦审(1858)
 棉蚜 高宗仁撰(1859)
 棉红蜘蛛危害损失及测报技术
 王瑞琪撰(1860)
 大豆花叶病毒抗性遗传 胡蕴珠撰(1861)
 大豆灰斑病 廖林撰(1862)
 豆秆黑潜蝇 盖钧镒 崔章林撰(1863)
 花生病毒病 许泽永撰(1864)
 油菜菌核病 李丽丽撰(1865)
 向日葵病害 白金铨撰(1866)
 向日葵霜霉病菌生理小种
 李子钦 张建平撰(1867)
 人参病害 郝绍卿撰;赵曰锋审(1868)
 西洋参病害 张天宇撰(1869)
 茶树病害 陈雪芬撰(1870)
 烟草原生质体融合选育新品种
 龚明良 卜锅章撰(1871)
 烟草对花叶病的抗性诱导
 谈文撰;朱尊权审(1872)
 烟草细菌性青枯病及其防治
 张建华撰(1873)
 烟蚜 文礼章撰(1874)
 大白菜黑斑病 李明远撰(1875)
 大白菜干烧心病 安志信撰(1876)
 黄瓜枯萎病 黄振兴撰(1877)
 花卉害虫及其防治 司徒幼梅撰(1877)
 果树根癌病生物防治
 郑传临 梁亚杰撰(1878)
 苹果害螨防治 张蕴华撰(1879)
 桃小食心虫 张昌辉撰(1880)
 柑桔类病毒及类病毒病 欧阳立撰(1881)
 柑桔螨类 李隆术撰(1883)
 施药技术 李范撰(1884)
 农药行为与生物学效应 屠予钦撰(1884)
 杀虫剂抗性治理 沈晋良撰(1885)
 害虫抗药性遗传 沈晋良撰(1886)
 代森锰锌 王英杰 胡性之撰;李彬审(1887)

三环唑 李晓琬撰(1888)
 拟除虫菊脂 蒋木庚撰(1888)
 拟除虫菊酯筛选及分子设计
 涂君渊撰;李瑞雪审(1890)
 苦皮藤 吴文君撰(1892)
 除草剂 苏少泉撰(1892)
 含氟二苯醚类除草剂
 刘士忠 吴引儿撰(1894)
 苏云金素 林开春撰(1896)
 金龟子芽孢杆菌 张书芳撰(1897)
 单克隆抗体技术在昆虫病毒研究中的应用
 陆自强 胡广淦撰(1898)

农作物

中国作物栽培 李奇真撰(1899)
 水稻分子生物学研究 何祖华撰(1901)
 水稻开颖 王忠撰(1902)
 水稻的感光性 汤圣祥撰(1903)
 水稻株型和物质生产 王维金撰(1904)
 陆稻及早种水稻 邢祖頔撰(1906)
 水稻耐寒性 钟国瑞撰(1906)
 水稻高蛋白育种 扶惠华 杨学荣撰(1907)
 水稻品种抗螟性 谭荫初撰(1908)
 寒地抗稻瘟病育种 郑毓燮撰(1909)
 三系法籼粳亚种间杂种优势
 王才林撰(1910)
 水稻遗传转化 明毅强撰(1911)
 两系法杂交水稻研究 袁隆平撰(1911)
 广亲和性水稻 李平撰;周开达审(1912)
 离体细胞的内源性诱变原理及其在水稻生物技术
 中的应用 杨世湖撰(1913)
 水稻原生质体培养 颜秋生 张雪琴撰(1915)
 光敏核不育水稻的育性转换
 张自国撰;骆炳山审(1916)
 水稻无融合生殖研究
 刘向东 陈启锋撰(1917)
 水稻光(温)敏雄性核不育性及籼、粳亚种间杂种
 优势 刘贵富撰(1918)
 水稻花培育种 李梅芳撰(1919)
 诱发突变与水稻杂种优势利用
 郭光荣撰(1920)
 杂交水稻花培育种 朱德瑶 丁效华撰(1921)
 水稻高产栽培 应继锋撰;费穆林审(1922)
 水稻营养平衡 王伯伦撰;金耀青审(1923)

- 染色体重组导入外源基因 卢宝荣撰(1924)
- 小麦的近缘植物 郑殿升撰(1925)
- 小黑麦 马继生撰(1926)
- 小麦育种材料的抗旱性 胡荣海撰(1927)
- 冬小麦耐盐育种 吕金岭撰(1928)
- 小麦抗赤霉病性遗传改良 蒋国梁撰(1929)
- 小麦抗穗上发芽材料的筛选与抗性机制
..... 蔡士宾 曹昉 魏燮中撰(1931)
- 小麦品质育种 王宪泽撰(1932)
- 小麦品质遗传改良 吴兆苏撰(1932)
- 轮回选择在麦类作物改良中的应用
..... 蒋国梁撰(1934)
- 面筋蛋白质与小麦品质改良 傅宾才
王乐凯 王光瑞 于光华撰; 祁世雨审(1935)
- 硬粒小麦育种 周淑惠撰; 曹道孝审(1936)
- 小麦显性雄性不育基因 Ms₂(Tal) 及其易位系
..... 纪凤高撰(1937)
- 小麦雄性不育体系 何禧如 刘曙东撰(1937)
- 太谷核不育小麦研究(I) 双志福撰(1938)
- 太谷核不育小麦研究(II) 邓景扬撰(1939)
- 小麦细胞质雄性不育 李集临撰(1940)
- 利用显性不育基因的小麦轮回选择
..... 王振富撰; 双志福审(1941)
- 小麦核型雄性不育杂种优势利用
..... 黄寿松撰(1942)
- 小麦远缘杂交和外源基因导入
..... 叶兴国撰; 樊路审(1943)
- 普通小麦异代换系
..... 张学勇 陈淑阳 李振声撰(1944)
- 核质互作诱导小麦单倍体 刘庆法撰(1945)
- 小麦花粉植株的诱导 欧阳俊闻撰(1946)
- 小麦花药培养育种 胡道芬撰(1947)
- 麦棉两熟栽培
..... 黄滋康撰; 邓煜生 唐耀昇审(1948)
- 大麦染色体分带 张毓芳撰; 俞志隆审(1949)
- 无原花色素大麦突变体
..... 杨煜峰撰; 俞志隆审(1950)
- 大麦杂种优势利用 李承道 黄培忠撰(1951)
- 大麦早熟发育生理
..... 李米胜 何立人撰; 李正玮审(1952)
- 高油玉米 蒋钟怀撰; 宋同明审(1953)
- 高必需氨基酸玉米突变体
..... 缪树华 耿瑞双撰; 李子先审(1953)
- 高粱的雄性不育性研究
..... 乔春贵 陈学求撰(1954)
- 谷子显性核不育基因 胡洪凯撰(1955)
- 中国绿豆品种资源研究及应用
..... 程须珍撰; 林黎奋审(1957)
- 甘薯育种 李秀英 盛家康撰(1957)
- 甘薯栽培 马代夫撰(1959)
- 马铃薯退化现象及摒除方法
..... 杨洪祖撰; 程天庆审(1960)
- 马铃薯体细胞融合和杂交技术
..... 戴朝曦撰(1961)
- 马铃薯原生质体培养技术 戴朝曦撰(1962)
- 禾本科牧草对低磷的反应
..... 欧阳廷生撰; 蒋廷惠审(1964)
- 利用体细胞培养方法选育苜蓿抗旱品种
..... 林廷安 赵世绪撰(1964)
- 蓝花子 吴建华撰; 史华清审(1965)
- 棉铃发育 金桂红撰(1966)
- 棉纤维品质的遗传改良 周有耀撰(1967)
- 低酚棉育种 曲健木撰(1969)
- 棉花抗虫育种 鲁黄均撰(1970)
- 棉花抗鳞育种 王朝生撰(1971)
- 棉花的雄性不育系 张天真撰(1973)
- 棉花核雄性不育 黄观武撰(1973)
- 胞质雄性不育陆地棉三系 韦贞国撰(1975)
- 棉花体细胞胚发生和植株再生
..... 董合忠撰(1975)
- 棉花原生质体再生植株
..... 余建明撰; 吴光南审(1976)
- 人工棉纤维 张宝红撰(1977)
- 红麻高产栽培 黄培坤撰(1978)
- 大豆细胞工程研究 简玉瑜撰(1979)
- 大豆脂肪氧化酶缺失系
..... 金伦范撰; 胡明祥审(1980)
- 大豆耐盐性 邵桂花撰(1980)
- 大豆品种资源 常汝镇撰(1981)
- 大豆种子劣变 唐善德撰(1982)
- 大豆抗花叶病育种 廖林撰(1984)
- 花生野生种的研究利用
..... 宋忠学 牛振荣撰; 崔礼审(1985)
- 花生地膜覆盖栽培 毛兴文撰(1986)
- 花生胚胎培养
..... 中履五 邱庆树 王传堂撰(1986)
- 芸苔作物种间可交配性 孟金陵撰(1987)

- 黄籽油菜 戚存扣撰;傅寿仲审(1988)
- 野生油菜 钱秀珍撰(1989)
- 油菜生理 傅寿仲撰(1991)
- 油菜的抗性生理 王荣富撰(1992)
- 油菜品质育种 周永明撰(1993)
- 油菜无花瓣育种 傅寿仲撰(1994)
- 油菜CMS三系 李加纳撰;唐泽静审(1995)
- 油菜CMS育性 李加纳撰;唐泽静审(1996)
- 油菜机械化收获 冷锁虎 朱耕如撰(1997)
- 新油料植物诸葛菜
..... 罗鹏 范志忠撰;蓝永珍审(1998)
- 甘蔗杂种优势利用
..... 王鉴明撰;陈如凯审(1998)
- 甘蔗组织培养 王敬驹撰(1999)
- 甜菜抗盐生理研究
..... 吴晓雷 田自华 张家骅撰(2000)
- 甜菜杂交优势育种 孙以楚撰(2001)
- 甜菜生物工程 邵明文撰;张悦琴审(2002)
- 甜菜栽培 熊念曾撰(2005)
- 新型糖源植物甜菊
..... 陈睦传撰;洪维廉审(2006)
- 大黄有性生殖 王耀芝撰(2007)
- 贝母的组织培养 王仑山撰;丁惠宾审(2008)
- 人参栽培生理 张连学撰;郝绍卿审(2008)
- 茶树的结构与品质 严学成撰(2009)
- 茶树遗传 李素芳撰(2010)
- 烟草原生质体培养 卜锅章 丁昌敏
姚绍满 张历历撰;龚明良审(2011)
- 烟草种质资源 蒋予恩撰(2012)
- 烟草花培育种 佟道儒 贾兴华撰(2013)
- 烤烟烘烤 孙福山 谭经勋撰(2014)
- 园艺**
- 我国蔬菜原生质体培养 叶志彪撰(2015)
- 大蒜二次生长 陆恂一撰(2018)
- 生物技术在甘蓝育种上的应用
..... 雷建军 李成琼撰;刘佩璞审(2019)
- 结球甘蓝的杂种优势利用
..... 李成琼 雷建军撰;刘佩璞审(2020)
- 结球大白菜抗病育种 刘志荣撰(2021)
- 花椰菜 李家慎撰(2022)
- 番茄栽培 沈惠娟撰(2023)
- 番茄抗病毒病工程植物
..... 黄永芬撰;汪清胤审(2024)
- 辣椒抗病育种 巩振辉撰(2025)
- 瓜类蔬菜性别控制 叶自新撰(2026)
- 豇豆种子活力 陈祥友撰(2027)
- 石刁柏花药培养 张磊撰(2028)
- 茭白的生长与孕茭机理 叶自新撰(2029)
- 食用菌原生质体电融合 张鉴铭撰(2030)
- 香菇代料栽培 宋士良撰(2030)
- 竹荪 李昌荣撰;乔士义审(2031)
- 竹菌复合生态系统 李昌荣撰(2032)
- 草莓栽培 尹长山 孙淑媛撰;蔡秀华审(2033)
- 切花菊栽培 李鸿渐撰(2034)
- 兰花组织培养 孙安慈撰(2035)
- 多花水仙 吕柳新撰(2036)
- 唐菖蒲的转化 蔡文启撰;田颖川审(2037)
- 果树原生质体研究进展
..... 史永忠 邓秀新撰(2037)
- 苹果原生质体培养
..... 丁爱萍撰;孙勇如审(2040)
- 苹果矮化栽培 关鸿濂 王兴顺撰(2041)
- 桃遗传资源 李载龙撰(2042)
- 桃的主要性状遗传
..... 钟秀芬撰;吕增仁审(2043)
- 柑桔原生质培养与育种 邓秀新撰(2044)
- 柑桔对低温的生理生化适应性
..... 孙中海撰(2046)
- 柑桔相对异常高温的落花落果及其防治
..... 童昌华 李三五撰(2047)
- 葡萄的种质资源 戴洪义撰;孙敏审(2048)
- 葡萄砧木 杨美容撰(2049)
- 无核葡萄胚珠培养 孟新法撰(2049)
- 山葡萄家植 尹立荣撰(2050)
- 中华猕猴桃胚乳培养
..... 洪树荣撰;吴立廉审(2051)
- 黑穗醋栗 马凤桐撰;朱泉三审(2052)
- 牡丹 张赞平撰(2053)
- 月季育种 黄善武撰(2053)
- 林业**
- 社会林业 曾觉民撰(2055)
- 混农林业 薛建辉撰;熊文愈审(2055)
- 林农轮作制 曾觉民撰(2056)
- 林农复合经营体系 黄宝龙 向成华撰(2057)
- 林茶间作 唐荣南撰(2058)
- 森林生长模型 曹广侠撰(2059)

- 森林 CO₂ 交换模型 孙谷畴撰(2060)
- 立地分类与评价 罗伟祥撰(2060)
- 森林立地定量评价 张康健撰(2061)
- 热带雨林的研 究 黄全撰(2062)
- 山地云杉林 徐文铎 郑元润撰(2063)
- 沙地云杉林 郑元润 徐文铎撰(2064)
- 林木茎尖嫁接 马凤桐撰;朱庆麟审(2065)
- 林木原生质体培养 王影 黄每仁撰(2065)
- 影响林木花孕育的环境因子
..... 方升佐撰(2067)
- 森林生态系统结构与功能 蒋有绪撰(2068)
- 粗木质物残体生态研究
..... 陈华 徐振邦撰(2069)
- 森林土壤微生物 胡承彪撰(2070)
- 射线摄影与林木种子品质检验
..... 高捍东撰(2071)
- 杨树人工林 刘建伟撰;刘奉觉审(2072)
- 人工林鸟类资源的经营和管理
..... 楚国忠撰(2072)
- 杉木 吴中伦 盛炜彤撰(2073)
- 杉木杂交育种 傅远志撰(2074)
- 榿树属植物 汤仲坝撰(2075)
- 杨树杂种优势与材质遗传
..... 黄东森撰;柴修武审(2076)
- 裂叶榆育苗技术 邹学忠撰;李廷生审(2077)
- 槐树 孙禄 周兰荣撰(2077)
- 紫椴育苗技术 邹学忠 李廷生撰(2078)
- 针叶树苗越冬伤害机制
..... 新月华 陶大立撰(2079)
- 国外松枯梢病 苏开君撰(2080)
- 杨树溃疡病 杨俊秀撰(2081)
- 榆荷兰病 袁自清撰(2082)
- 泡桐丛枝病 林木兰撰;胡勤学审(2082)
- 高树松毛虫调查方法 毛超旭撰(2083)
- 松叶蜂 温秀军撰(2084)
- 杨树天牛 黄克芳 骆有庆撰(2084)
- 杨扇舟蛾危害预测和数量预测
..... 陈永学撰(2086)
- 楸蠹野螟 祁诚进撰(2086)
- 沙棘果实蝇 葛葆蔚撰(2087)
- 食虫鸟对森林害虫捕食作用的研究和利用
..... 楚国忠撰(2088)
- 黑卵蜂 梁细弟 胡萃撰(2089)
- 跳小蜂 时振亚撰(2090)
- 畜牧学**
- 草地生态 张明华撰;李德新审(2091)
- 草原动态演替 符义坤撰(2092)
- 草地退化 吕世海撰;刘起审(2092)
- 草地改良 马志广撰(2093)
- 羊草群体寿命
..... 刘庆长 杨允菲撰;祝定成审(2095)
- 大油芒群落 朱志诚撰(2095)
- 超数排卵和胚胎移植方案
..... 蒿迈道撰;常洪审(2096)
- 家畜杂种优势 吴凤春撰;邵桂芝审(2097)
- 哺乳动物的体外受精 张一玲撰(2098)
- 家畜胚胎工程 渊锡藩撰(2099)
- 胚胎移植的研究 马玉斌撰(2100)
- 胚胎性别鉴别 吴学清撰;胡明信审(2101)
- 哺乳动物胚胎的性别鉴定方法
..... 渊锡藩撰(2101)
- 线性鉴定 蒿迈道撰;常洪审(2102)
- 最佳线性无偏预测 王金良撰(2103)
- 生长激素促进畜生长的生理生化机制
..... 杨在清撰(2104)
- 中草药饲料添加剂 杨志强撰(2105)
- 群牧马 马任骥撰(2106)
- 舍饲马 马任骥撰(2107)
- 水牛遗传改良 肖永锋撰(2107)
- 奶牛体型 师守堃撰;刘忠贤审(2108)
- 奶牛标准产奶量校正系数
..... 陈德全 杨静华撰(2109)
- 奶牛的后裔测定 李勇撰;关崇学审(2110)
- 羊的育种 蒋英撰(2111)
- 绵羊品种资源 蒋英撰(2112)
- 山羊品种资源 蒋英撰(2113)
- 奶山羊胚胎工程 王光亚撰(2114)
- 藏山羊种质 王杰撰;欧阳熙审(2115)
- 野猪染色体的研究 柳万生撰(2116)
- 果子狸人工驯养与繁殖
..... 莫伟仁 陈萍君撰(2117)
- 禽品种 王瑞琦 马任骥撰(2117)
- 禽孵法 马任骥 王瑞琦撰(2118)
- 肉鸡腹脂 张芳撰(2119)
- 鸭的生理 陈思义撰(2119)
- 兽医学**
- 兽医血液动力流变学 钟伟熊撰(2120)

- 动物皮毛中的类固醇激素 刘显义撰(2121)
- 硒与其他元素的相互关系 刘宋平撰(2122)
- 动物对疾病的遗传易感性和抵抗力
..... 陈万芬撰(2123)
- 副结核病 郑淑琴撰(2124)
- 瘟病毒感染 彭发泉撰(2125)
- 猴艾滋病毒D型逆转录病毒
..... 郑永唐 贾昆龙撰(2127)
- 伪狂犬病研究进展 黄骏明撰(2128)
- 动物蓝舌病 胡玉玲撰;张念祖审(2129)
- 寄生虫种群生态 聂品撰(2131)
- 棘球蚴病 田广孚撰(2132)
- 细粒棘球蚴特异抗原成分
..... 田广孚撰;曹和洵审(2133)
- 旋毛虫感染的免疫预防 朱兴全撰(2134)
- 马传染性贫血病毒抗原变异及其保护性免疫机制
..... 王徽撰(2135)
- 牛免疫缺陷病毒 于力撰(2136)
- 牛传染性气管炎病毒的持续感染
..... 童光志撰(2137)
- 牛白血病病毒感染与淋巴肉瘤
..... 于力撰(2138)
- 乳牛血清维生素D及其活性代谢产物与骨营养
不良 金久善撰;夏兆飞审(2138)
- 鹿结核病 崔国印 李怀志撰(2140)
- 绵羊进行性肺炎
..... 邓普辉 简子健 刘君明撰(2141)
- 绵羊铜缺乏 何宝祥撰;潘登瀛审(2142)
- 仔猪轮状病毒肠炎
..... 丁再棟撰;吴纪棠审(2143)
- 猪白细胞介素2 于连撰(2144)
- 猪应激综合征 杨公社撰(2144)
- 兔出血症(I) 朱瑞良撰;张绍学审(2145)
- 兔出血症(II) 徐福南撰(2146)
- 水貂阿留申病 费荣梅撰;王金生审(2147)
- 禽类轮状病毒感染 章金钢撰(2148)
- 禽饲料的沙门氏菌 杨百亮撰(2149)
- 鸡胚免疫接种 罗函祿撰(2150)
- 新城疫 李慧皎撰(2150)
- 鸡毒支原体 闻人楚 郁明发撰(2151)
- 鸡传染性鼻炎 张培群撰(2153)
- 鸡传染性贫血病毒
..... 苑士祥 张树成撰;杨旭夫审(2153)
- 鸡白痢沙门氏菌病 陈福勇撰(2154)
- 鸡传染性生长障碍综合症
..... 郑明球 李刚 王成明撰(2155)
- 肉鸡腹水症 刘超撰;李续中审(2156)
- 产蛋鸡出血性脂肪肝综合症
..... 陈卿奎撰(2156)
- 雏鸭病毒性肝炎 范伟兴撰;陈溥言审(2157)
- 兽用炭疽疫苗 赵振亚撰;薛民权审(2158)
- 口蹄疫病毒疫苗的研究进展
..... 段小波撰(2159)
- 家畜血吸虫病疫苗 许绶泰撰(2161)
- 鸡马立克氏病疫苗
..... 崔玉苍撰;李凯伦审(2162)

蚕、蜂

- 家蚕生长发育的激素调控 庄大桓撰(2163)
- 家蚕抗病性遗传育种 林健荣撰(2164)
- 蚕无性繁殖系 黄君霆撰(2165)
- 柞蚕核型多角体病毒载体表达系统基因工程
..... 张春发撰(2166)
- 桑树砧木对茎尖嫁接效果的影响
..... 马凤桐撰;朱庆麟审(2167)
- 主要蜜源植物及其产蜜量预测预报方法
..... 梁诗魁撰(2167)

水产、渔业

- “家鱼”种质资源 李思发撰(2168)
- 激光在水产养殖与水产加工上的应用
..... 丁永良 陈秀斌撰(2169)
- 综合养鱼 胡保同撰(2170)
- 工业化养鱼 叶冀雄撰(2171)
- 渔业遥感 张玲撰;李继龙审(2172)
- 鱼类的洄游 成庆泰撰(2173)
- 鱼类生物能量学 崔奕波撰(2174)
- 鱼类下丘脑—垂体神经分泌系统功能
..... 李远友撰(2175)
- 鱼类生殖内分泌学 林浩然撰(2177)
- 中国淡水鱼类人工繁殖和育种
..... 施流章 欧阳海撰(2178)
- 鱼类受精 张天荫撰(2179)
- 鱼类精液冷冻保存 陈松林撰(2179)
- 鱼类的雌核发育 范兆廷撰(2180)
- 电场刺激鱼胚胎 陈家森撰(2181)
- 鱼类杂种优势利用 潘光碧撰(2182)
- 转基因鱼 蒋耀青撰(2183)

- 养殖鱼类的蛋白质需要量 王渊源撰;洪惠馨审(2184)
- 淡水鱼脂类脂肪酸 刘玉芳撰(2186)
- 鲤科鱼类 李思忠撰(2186)
- 淡水鲟 张中英撰(2187)
- 异育银鲫 楼允东撰(2188)
- 鳊鲴养殖 周恩华撰(2189)
- 长江鲟鱼资源评估与管理 詹秉义撰(2190)
- 江鳊产卵期 杨树勋撰(2191)
- 文昌鱼 方永强撰(2192)
- 淡水蟹虾 舒新亚撰(2193)
- 三倍体鱼贝类 张甬波撰(2193)
- 海洋浮游虾类 魏玉昌撰;何志辉审(2194)
- 虾类增养殖 陆忠康撰(2196)
- 虾类需要的脂肪营养 刘佳英撰;王渊源审(2197)
- 对虾类幼体及仔虾的分类学 刘恒 刘梦侠撰(2198)
- 对虾的营养 周洪琪撰(2199)
- 对虾配合饲料 欧阳海鹰撰(2200)
- 潮间带潜堤网拦养虾工程 常济民撰(2201)
- 海胆 高绪生 孙勉英撰(2202)
- 珍珠贝 金启增撰(2202)
- 珍珠养殖 谢玉坎撰(2203)
- 螯合剂 EDTA 袁有宪撰(2204)
- 辐对鱼类的生物学作用 富惠光撰(2205)
- 鱼类寄生虫种群生物学 廖翔华撰(2206)
- 中华鳖的抗病力 陈万芬撰(2208)
- 鱼类病毒病 江育林撰;伍惠生审(2208)
- 鱼类的粘孢子虫病 谢杏人撰(2210)
- 淡水养殖鱼类暴发性传染病 徐伯亥撰(2210)
- 草鱼出血病病毒 柯丽华撰(2211)
- 甲壳动物的体液免疫 王雷 李光友撰(2212)
- 对虾病毒病 陆忠康撰(2213)
- 罗非鱼 李思发撰(2213)
- 结构可靠性分析及其设计应用 郭昌捷撰;赵德有审(2218)
- 工程边界元法 王宗木撰(2219)
- 时间序列分析的工程应用 高济众撰(2220)
- 现代时间序列分析 邓自立撰;汤兵勇审(2220)
- 网络计划技术 林知炎撰(2221)
- 现代变形监测的动态优化设计 陶华学撰(2222)
- 现代变形监测数据的动态处理 陶华学撰(2223)
- 多层递阶方法 韩志刚撰(2224)
- 计算断裂力学 王志超撰;张理苏审(2225)
- 摩擦学研究 薛群基 党鸿辛撰(2226)
- 陶瓷摩擦学 魏建军 薛群基撰(2228)
- 稀土元素摩擦学 连亚峰 党鸿辛撰(2229)
- 塑料摩擦学 王承鹤撰(2230)
- 冲击疲劳(I) 朱金华撰(2231)
- 冲击疲劳(II) 于杰撰(2231)
- 有限变形情况下强化软化材料的裂纹尖端场 郝天护撰(2232)
- 残余应力对疲劳性能的影响 柯家文撰(2233)
- 多轴非比例加载下低周疲劳寿命估测 高庆 陈旭撰(2234)
- 炭材料 王茂章撰(2235)
- 金属基复合材料 杨遇春撰(2236)
- 钛基复合材料 董桑林撰(2237)
- 形状记忆材料 徐祖耀撰(2238)
- 铁基形状记忆合金 徐祖耀撰(2239)
- 粉末冶金减摩材料 周贤武撰(2240)
- 非金属腐蚀机理及耐蚀材料 李仲彰 杜玲仪 叶斌撰(2241)

矿业、石油工业

工业技术

一般工业技术

- 结构优化设计 王光远撰(2215)
- 结构优化设计的研究内容 孙焕纯撰(2216)
- 结构可靠度 赵国藩撰(2217)
- 模糊误差理论与矿山测量模糊数据处理 陶华学撰(2242)
- 通用爆破方法 胡峰撰(2243)
- 采矿工程中爆破技术 杨洪新撰(2245)
- 矿用起爆器材 胡峰 黄琦撰(2246)
- 矿用混合炸药 胡峰 黄琦撰(2248)
- 井巷围岩应力 华安增撰(2249)
- 井巷支护 华安增撰(2249)
- 井下涡轮钻具 符达良 唐惠柱撰(2250)

牙轮钻头 马德坤撰(2251)
 激光选矿 杨救撰(2252)
 选择性絮凝选矿 杨救撰(2253)
 硅藻土的选矿 石道民撰(2253)
 选煤 郭梦熊撰(2254)
 水平井完井工艺 孙保维撰(2255)
 游梁式抽油机 郭登明撰(2257)
 泡沫发生器结构设计 申瑞臣撰(2257)
 浆态床 FT 合成技术 赵玉龙撰(2258)
 石油储罐 孔昭瑞撰(2259)

冶金工业

火焰喷补技术 金培洪 韩晔 潘永才撰(2260)
 直接熔炼 陈国发撰(2261)
 复合矿综合利用直接还原 赵庆杰撰(2262)
 金属热还原 郭清富撰(2263)
 氯化冶金 金美惠撰(2264)
 融盐电解 姚广春撰(2264)
 金属水溶液电解 王德全撰(2265)
 盐浴渗金属工艺 张来启 孙希泰撰(2266)
 自蔓延高温合成 杨遇春撰(2267)
 燃烧合成与粉末冶金 张树格撰(2268)
 氨基气氛中材料的脱硫与氮吸收
 郭庚辰撰(2269)
 烧结新工艺 余琨撰(2270)
 微生物渗出稀有金属矿石 柯家俊撰(2271)
 钢铁工业用氧技术的进展 全国范撰(2272)
 高炉炼铁工艺理论
 王文忠撰;李传仁审(2274)
 高炉氧煤炼铁 李传仁撰;王文忠审(2275)
 吹氧化学法加热钢水技术
 赵荣玖 何国梁撰(2276)
 直流电弧炉技术 张孟亭撰(2277)
 连铸技术 姜永林撰(2278)
 连铸机 李纯忠 张笑秋撰(2279)
 金属的连续铸锭 洪伟撰(2280)
 原料场自动化 马竹梧撰(2281)
 飘悬熔炼 叶国瑞撰(2281)
 熔池熔炼 叶国瑞撰(2283)
 有色金属冶金 陈国发撰(2284)
 粉末冶金铝合金的研究 黄世民撰(2285)
 金银冶金 王德全撰(2286)
 难浸金矿焙烧处理 肖松文 梁经冬撰(2286)
 贵金属萃取 龚钰秋撰(2287)

溴化法提金工艺的研究及其前景
 张兴仁撰(2288)
 高纯稀有金属制取方法的进展
 钟俊辉撰(2289)
 稀土冶金 张成祥撰(2291)
 钢铁中稀土合金化内耗 戴景文撰(2292)
 稀土储氢合金的应用研究
 李永秀 魏坤 胡平贵撰(2293)
 铀同位素分离 肖啸菴撰;刘广均审(2295)

金属学、金属工艺

金属表面屈服强度的测量与研究
 李家宝撰(2296)
 组织对表面疲劳裂纹的萌生与扩展的影响
 何家文撰(2297)
 塑性加工理论 徐秉业撰;岑章志审(2297)
 金属塑性加工摩擦学 温景林 薛妍撰(2298)
 沉淀强化奥氏体合金的氢脆研究
 李依依 杨柯撰(2299)
 马氏体相变及形状记忆合金
 杨大智 陈骈骝撰(2300)
 高温钛合金 罗国珍撰(2301)
 铝合金气孔的形成与防止 邢俊德撰(2302)
 新型形状记忆合金的开发与应用
 赵连城撰(2303)
 锂应用的进展 钟俊辉撰(2304)
 钇的应用 刘世友撰(2305)
 铈及铈合金的应用 刘世友撰(2306)
 硬质合金热处理技术 李沐山撰(2307)
 硬质合金表面化学热处理技术
 李沐山撰(2309)
 磁场在热处理中的应用 郝喜海撰(2310)
 激光表面合金化技术发展中的问题
 刘江龙撰(2311)
 等离子体源离子注入 吴知非撰(2312)
 铸铁的激光热处理 沈利群撰(2313)
 铸造工艺 徐贵宝 高锡源撰(2314)
 冲天炉 陈方撰(2315)
 热作模具材料 司鹏程 叶伟江撰(2316)
 板料成形模拟技术
 李尚健 莫中华 肖景容撰(2317)
 熔模铸造 佟天夫撰(2317)
 球形容器整体无模成形技术
 张士宏 苑世剑 王仲仁撰(2318)

- 板形理论的研究 刘宏民撰(2319)
- 热轧板带钢边部减薄控制技术
..... 张芝香撰(2320)
- 调宽压力机——热轧板带调宽技术
..... 王昭东 王国栋 李辉撰(2321)
- 自紧技术 徐秉业撰;岑章志审(2322)
- 拉拔工艺学 丁桦撰;温景林审(2322)
- 挤压工艺学 温景林撰(2323)
- 焊接凝固结晶 陈晓凤撰(2324)
- 新型材料的开发与焊接技术的发展
..... 张文钺撰(2325)
- 焊接材料及焊接冶金研究的发展动态
..... 许祖泽撰(2326)
- 电弧焊接过程自动控制 蒋友襄撰(2327)
- 摩擦焊 郑恩贵撰(2328)
- 电渣焊 郑恩贵撰(2329)
- 扩散焊 郑恩贵撰(2330)
- 激光焊 郑恩贵撰(2331)
- 胶接的表面处理 徐修成撰(2332)
- 塑料滑动导轨 王承鹤 王颖撰(2332)
- 预应力加工 周泽华 胡华南撰(2333)
- 挤出切削 张发英撰(2334)
- 加热切削 叶邦彦撰(2334)
- 导电加热切削 叶邦彦撰(2335)
- 特种加工 刘晋春撰;赵万生审(2336)
- 电加工 刘晋春 赵万生撰(2337)
- 激光加工 邹至荣撰(2338)
- 激光切割与打孔 郑恩贵撰(2339)
- 爆炸加工 张凯撰(2339)

机械、仪表工业

- 系统科学和机械设计 吴琦 张东荣撰(2341)
- 机构平衡 曹龙华撰(2342)
- 机构结构及组成 曹惟庆撰(2343)
- 机械结构强度 张金根 韩国明撰(2344)
- 传动摩擦学和传动摩擦学设计
..... 韦云隆撰(2345)
- 涡轮机械流体力学理论 刘高联撰(2346)
- 工程机械润滑剂的选用 陈冠国撰(2347)
- 工厂自动化协议(MAP)
..... 杜芝君 匡鲁江撰(2349)
- 微型机器 钟先信撰(2350)
- 转子动力学 王正撰(2350)
- 特种齿轮传动 厉海洋撰;周劲南审(2351)

- 蜗杆凸轮机构 赵韩撰;丁爵曾审(2352)
- 空心圆柱滚子轴承及其磨损问题
..... 罗虹 刘家浚撰(2353)
- 液压系统状态监测与故障诊断
..... 方之良撰;舒惠平审(2354)
- 高水基介质 李壮云 钱祥生撰(2356)
- 低速大扭矩液压马达性能 甄少华撰(2356)
- 气压传动系统动力学 李建藩撰(2358)
- 气压系统的节能 李建藩撰(2359)
- 气体压缩机械 张超武撰(2359)
- 冷却塔风机 吴秉礼撰(2360)
- 玻璃的切削加工 周泽华 郑汉卿撰(2361)
- 瞬态流量计 钱祥生撰(2362)
- 传感器 冒晓斌撰(2363)

武器工业

- 爆炸逻辑网络 戴实之撰(2363)
- 爆炸威力测试 胡峰 黄琦撰(2364)
- 弹道学 郭锡福撰(2365)
- 榴弹炮、加农炮 孙远孝撰(2366)
- 无后坐炮 吴承镒撰(2367)
- 迫击炮 唐浴撰(2368)
- 引信可靠性 陈庆生撰(2369)
- 引信智能 陈庆生撰(2369)
- 无线电引信 朱启明撰(2370)
- 雷管 戴实之撰(2371)
- 烟火光电对抗技术 戴实之撰(2372)
- 红外成像导引头 苏启顺撰(2373)
- 弹体结构可靠性设计 周东生撰(2374)
- 反坦克导弹精确制导红外成像导引技术
..... 刘永昌 李保平撰(2374)
- 航空武器 戴成勋撰(2375)

动力工程

- 全球气候变化与中国能源发展
..... 朱斌撰(2376)
- 生物质转化 方真撰(2378)
- 动力机械热力过程分析与模拟
..... 解茂昭撰(2379)
- 动力装置运行工况优化节能与提高经济性的研究
..... 胡明勳 郭子成撰;唐育民审(2380)
- 高效换热器与流体诱导振动
..... 钱颂文撰;岑汉判审(2381)
- 列管式换热器与强化传热 邓先和撰(2382)

燃料炉热工技术 陈鸿复撰(2383)

热能制冷 侯曼西撰;刘宪英审(2384)

蒸汽锅炉 温龙 李军撰(2385)

工业汽轮机的现状和发展动向
..... 王中森撰(2386)

燃烧放热率 葛贤康撰(2388)

内燃机噪声 郭骅撰(2389)

复合材料在内燃发动机活塞上的应用
..... 朱秀荣撰(2390)

四气门汽油机 徐荣达撰(2390)

柴油机供油与燃烧 ... 许峰撰;张久成审(2391)

氢能柴油机(兼及氢能汽油机)
..... 徐挺撰(2393)

太阳能蓄热技术 杨积科撰(2393)

太阳能集热器材料 林文贤撰(2394)

地热能直接利用 廖志杰撰(2396)

地热发电 廖志杰撰(2397)

水轮机 彭泽元撰(2397)

电工技术

非线性电路与系统理论 丘水生撰(2399)

静电技术 王寿泰撰(2400)

绝缘材料 王寿泰撰(2401)

合成绝缘子 梁曦东撰(2402)

导电塑料 黄锐 刘劲松 张雄伟撰(2402)

电线电缆(光)缆 王寿泰撰(2404)

超导材料 曹烈兆撰(2405)

高 T_c 超导材料 王永忠撰;乔桂文审(2406)

高温超导陶瓷 李标荣撰(2407)

陶瓷高温超导材料的制备
..... 王世敏撰;邝安祥审(2408)

稀土永磁材料的结构与磁性
..... 孙校开撰(2409)

磁记录介质 郭保忠撰(2411)

磁性颗粒膜 都有为撰(2413)

纳米微晶磁性材料 都有为撰(2413)

电力电子学 许世廷撰(2414)

电子电机学 陶醒世撰(2415)

微机械电子学系统 孙彦卿 石广元撰(2416)

汽轮发电机组轴系扭振的研究
..... 陈珩撰(2417)

交流电机的矢量控制 陶醒世撰(2419)

双轴励磁同步发电机 王仁洲撰(2420)

低压异步电机保护装置
..... 黄宇盟 毛哲撰(2420)

低压交流电动机保护 沈玉琢撰(2421)

三自由度伺服电机 陶醒世撰(2422)

节能变压器 应百川撰(2423)

充 SF₆ 气体绝缘开关柜 赖颖撰(2423)

电控永磁式起重电磁铁
..... 赵光国 杨森撰(2424)

光伏继电器 王晓民撰(2425)

超导故障电流限制器 王金星撰(2426)

有源电力滤波器的研制
..... 潘艳 孙孝瑞撰(2427)

电力系统自动化(自动控制)
..... 韩贻祥撰(2428)

电力系统稳定性与控制
..... 刘取 倪以信撰(2429)

交流电机控制系统
..... 李发海 丁蕴石 李崇坚撰(2431)

串级调速 魏泽国撰(2432)

固体氧化物燃料电池
..... 马紫峰 林维明撰(2433)

单晶硅太阳电池 钱勇之撰(2433)

高压放电及强磁场对生态的影响
..... 杨保初撰(2435)

电力设备绝缘的在线诊断 王昌长撰(2436)

高效传热铜管在空调与制冷电器中的节能应用
..... 姚若浩 杨贵平 钟建华撰(2437)

电冰箱压缩机的噪声控制 乔五之撰(2438)

无线电电子学、电信技术

微波、毫米波传感器与非电量检测
..... 李英撰(2439)

扫描镜科学技术和应用 廖乾初撰(2440)

红外技术的空间应用 张钧屏撰(2441)

激光材料 廖延彪撰(2442)

垂直腔半导体激光器 杜宝勤撰(2443)

激光及光电测试技术 叶声华撰(2444)

声光材料 高希才撰(2445)

光纤材料 廖延彪撰(2446)

具有光纤神经系统的新颖复合材料结构
..... 向永江撰(2447)

特种光纤 廖延彪撰(2448)

光纤传感 廖延彪撰(2449)

光纤温度传感器 林应文撰(2450)

- 光纤传感技术和光纤传感系统 曾明撰(2450)
 光集成与光电子集成 梁春广 黄以明 方瑞禹撰(2451)
 全息显示 赖元树撰(2453)
 半导体硅材料的发展 宋大有撰(2453)
 非晶态半导体 毛友德撰(2454)
 Ge₂Si_{1-x}/Si 异质结器件 李秀清撰(2456)
 8~12μm 超晶格量子阱红外探测材料与器件 陈世达撰(2458)
 电力半导体晶闸管、整流管桥臂模块 吴济钧撰(2459)
 复合 PTC 热敏材料 丁马太 熊兆贤撰(2460)
 热敏 PTC 陶瓷 李标荣撰(2460)
 微电子技术 张开华 李肇基 谢孟贤 张庆中撰(2462)
 真空微电子学 苏世民撰(2463)
 多层金属布线技术 张沈军撰(2464)
 专用集成电路 CAT 技术 林争辉 秦建业 刘泽坚撰(2465)
 微波单片集成电路 陆懋权撰(2467)
 微波、毫米波集成电路 李英撰(2468)
 真空微电子器件 朱长纯撰(2469)
 模拟 IC 技术 苏万市撰(2469)
 2000 年的 IC 技术及其新产品的预测 李国祥撰(2470)
 SIMOX 技术及 CMOS/SIMOX 器件 王阳元 陈南翔 王忠烈撰(2471)
 电子线路计算机辅助设计 张佑生撰(2472)
 网络理论 刘家樞撰(2473)
 有源器件 刘家樞撰(2474)
 介质谐振器 李英撰(2475)
 噪声电路理论 罗涛 何振亚撰(2476)
 电波传播与天线 张寿广撰(2477)
 平面天线 郝世民撰(2478)
 微带天线技术 马明撰(2479)
 CRT 显示技术新进展 蒋庆全撰(2480)
 液晶显示 刘维民 田辉撰(2482)
 信源的特征、分类和识别 罗涛撰(2484)
 信息论与编码理论 吴伟陵撰(2484)
 数据压缩与编码理论 吴乐南撰(2485)
 通信调制理论 黄庚年撰(2486)
 信号处理及其应用 倪维桢撰(2487)
 自适应信号处理 尤肖虎撰 路鸣审(2488)
 数字信号处理及应用 褚维明撰(2489)
 电流模式模拟信号处理 焦李成撰(2490)
 DSP 与通信工程 李昌立 陈希清撰(2491)
 通信交换 陈锡生撰(2492)
 通信系统仿真 朱涛撰;程时昕审(2493)
 副载波复用光通信系统 宋海燕 顾晓仪撰;李国瑞审(2494)
 卫星通信系统 曾令儒撰(2495)
 雷达目标散射与测量 樊正芳撰;林桂森审(2495)
自动化技术、计算技术
 流行的专家系统开发工具 王宗军撰(2497)
 新一代专家系统 崔志明 董屏撰(2498)
 光电子智能信息处理系统技术 王汝笠撰(2499)
 智能信息处理 徐振耀撰(2500)
 人工神经网络 刁颀民撰(2501)
 闭路系统 朱翼隽撰(2502)
 离散事件动态系统 徐心和 王梅生撰(2503)
 自动控制理论及应用 涂植英撰(2504)
 大规模工业过程的稳态递阶控制 万百五撰(2504)
 新开关理论 胡谋撰(2506)
 复合材料固化传感器 余宏发撰(2507)
 半导体传感器 曾庆科撰;曾宪富审(2508)
 薄膜技术与压力传感器 白韶红撰(2509)
 传感功能材料 范坤泰撰(2510)
 国外传感器技术 高存贞撰(2511)
 现代无损检测技术 任吉林 武太峰撰(2512)
 光电检测 缪家鼎撰(2513)
 仿生机械与机器人机械学 彭商贤撰(2514)
 机电一体化电器 汪发华撰(2515)
 电液集成块 钱祥生撰(2516)
 制造过程的计算机控制 陈毓坚撰(2516)
 计算机综合制造系统(CIMS)可靠性 疏松桂撰(2517)
 软件可靠性模型 谭民撰(2518)
 办公室自动化 李春山撰(2519)
 人机交互 杜兴撰(2520)
 人机工程学 赖维铁撰(2521)
 并行处理 吴镇扬撰(2522)
 SOI 技术 陈军宁 童勤义撰(2522)
 故障检测与诊断技术 涂植英撰(2523)

- 容错计算..... 陈廷槐撰(2524)
- 计算机病毒..... 马明撰(2526)
- 计算机图形学..... 刘慎权 谭峻撰(2526)
- 计算机图形标准..... 张永明撰(2527)
- 计算机全息图... 郭敏贤撰; 金国藩审(2528)
- 自动编程..... 沈孟养撰(2529)
- 微机结构分析..... 袁明武撰(2530)
- 中文输入输出技术..... 张淞芝撰(2530)
- 磁盘存储技术..... 余晋岳 王昭英撰(2531)
- 半导体存储器..... 罗浩平撰(2533)
- 新型光信息存储材料及原理.....
..... 明阳福撰(2534)
- 数字全息存储器... 丁汉来撰; 张忠麟审(2535)
- 并行算法与并行系统体系结构.....
..... 茅一民撰(2536)
- 极度并行算法..... 陈毓屏撰(2537)
- 分布式计算机系统.....
..... 刘沁松 耿技 戴绍清撰(2538)
- 超级计算机..... 吴龙生撰(2540)
- 智能计算机..... 梁曼君撰(2540)
- 多媒体计算机技术..... 张永明撰(2542)
- 工业控制机..... 张永明撰(2543)
- 语音识别、合成与处理..... 陈永彬撰(2544)
- 数字图像处理与计算机视觉.....
..... 富煜清撰(2545)
- 图像分析..... 钱源诚撰(2546)
- 分维图形..... 齐东旭撰(2546)
- 模式识别..... 钱源诚撰(2547)
- 条形码自动识别技术..... 梁曼君撰(2548)
- 计算机辅助设计..... 张佑生撰(2549)
- 计算机辅助机械设计..... 刘永贤撰(2550)
- 液压系统计算机辅助设计.....
..... 张金撰; 钱祥生审(2551)
- 计算机辅助测量(CAG)与计算机辅助测试(CAT)..... 王富东撰(2552)
- 计算机辅助实时补偿控制加工误差.....
..... 宾鸿赞撰(2553)
- 计算机辅助生产管理..... 甘仞初撰(2554)
- 计算机集成制造..... 任守策撰(2555)
- 用户接口管理系统..... 蔡上杰撰(2555)
- 仿真..... 李伯虎 王锦撰(2556)
- 训练仿真器..... 熊光铸撰(2557)
- 流体逻辑..... 李建藩撰(2558)
- 探测与成像..... 张寿广撰(2559)
- 热经济学及其他节能新技术的理论及应用.....
..... 王加璇撰(2560)
- 化学工业**
- 声化工..... 卞生鲁撰; 梁启勇审(2561)
- 气浮分离技术... 朱锡海 任欣 陈卫国撰(2561)
- 悬浮液固液分离..... 徐继河撰(2562)
- 膜污超滤膜分离技术.....
..... 张赞红 施亚鞠撰(2563)
- 生物化工分离技术..... 朱自强 关怡新撰(2564)
- 催化功能分离膜... 俞贤达撰; 夏远椒审(2565)
- 液晶膜的制备及液体分离.....
..... 李新贵 杨涛臣撰(2567)
- 渗透汽化技术..... 陈燕淑撰(2568)
- 膜蒸馏..... 余立新撰; 刘茂林审(2569)
- 多孔金属涂层..... 郝彤撰; 白庚丰审(2569)
- 气液固三相反应器.....
..... 毛在砂 陈家铺撰; 杨守志审(2570)
- 金属膜反应器.....
..... 安纬珠撰; 郭填灿 陈义均审(2571)
- 膜生物反应器..... 方鹏 赵树杰撰(2572)
- 膜催化材料..... 陈庆龄撰(2574)
- 膜反应器催化技术..... 陈庆龄撰(2575)
- 超微粒子的化学制备技术..... 余家国撰(2575)
- 宽温区耐硫变换催化剂和中变串低变技术.....
..... 潘振玉撰; 赵学信审(2576)
- 液相法砒硝制碱..... 王久芬撰(2577)
- 无机盐工业..... 徐肇锡 韩立敏撰(2578)
- TiCl₄中钒杂质去除方法..... 邓国珠撰(2579)
- 钨系缓蚀剂..... 袁斌 吕松撰(2580)
- 有机电解合成..... 陈敏元撰(2581)
- 铝电解槽 TiB₂涂层阴极技术.....
..... 薛文林 祝仰光撰(2582)
- 电镀工业..... 吴水清撰(2582)
- 电泳涂后超滤与反渗透..... 刘娅莉撰(2583)
- 碳化硅粉末研制新技术..... 张战撰(2584)
- 氯氧镁水泥..... 夏树屏撰(2585)
- 聚代聚二乙炔..... 冯金生撰; 余从焯审(2586)
- 螯合树脂..... 徐羽梧撰(2587)
- 压电高分子材料..... 欧阳萌 龚克成撰(2588)
- 氯丁橡胶系列胶粘剂..... 李子东撰(2589)
- 橡胶胶粘剂..... 何道纲撰; 张开审(2590)
- 脲醛树脂的结构与形态——脲醛树脂胶体理论及其进展..... 孙振莺 吴书泓撰(2591)

- 大化肥透平压缩机组的发展趋势
 丁振亭撰(2593)
- 煤电化学氧化
 刘昭林 郭鹤桐撰; 苏小笛审(2594)
- 煤的生物转化 韩威撰(2595)
- 涂料工业 季沛铨撰(2596)
- 阻尼涂料 战凤昌撰(2596)
- 电泳涂料 吴观炎撰(2597)
- 防腐蚀涂料 季沛铨撰(2598)
- 无毒防污涂料 战凤昌撰(2599)
- 有机颜料表面处理 周春隆撰(2600)
- 聚合型色素的合成与应用
 吴致宁 赵德丰 杨锦宗撰(2601)

轻工业

- 蚕丝 张怀珠撰(2602)
- 制丝 刘冠峰撰(2602)
- 丝织 张友梅撰(2603)
- 丝织物 陈铭如撰(2604)
- 蔗糖及其衍生物化学与技术
 陈维钧撰(2605)
- 蔗糖提取与精制
 郭礼远 李琳撰; 陈树功审(2606)
- 高甜度甜味剂 周明霞撰(2607)
- 猪二层仿旧涂饰服装革
 任燕芬 杨颖 杨承杰撰(2607)
- 气刀涂布器 马伯龙 严杰撰(2609)
- 唐三彩与曜变三彩
 李青海 陈乃鸿撰; 褚振西审(2610)

建筑科学

- 工程结构优化设计 王宗木 沈鹏程撰(2611)
- 建筑结构中的微分方程 卢存恕撰(2612)
- 土建结构中的计算力学 江见鲸撰(2613)
- 钢筋混凝土结构基本理论
 赵国藩 宋玉普 黄承达撰(2614)
- 新型建筑材料 王立久撰(2615)
- 薄壳结构 赵惠麟 单建撰(2616)
- 砖石结构 罗福午撰; 郑金床审(2618)
- 加筋土结构 王永和撰; 华祖焜审(2619)
- 钢柱的稳定设计 王国周撰; 翟履谦审(2619)
- 预应力钢结构 范崇仁撰(2620)
- 岩土工程离心模拟技术 华祖焜撰(2621)
- 地基处理 曾国熙撰(2621)

- 高层建筑钢管砼结构 蔡绍怀撰(2623)
- 地下空间 童林旭撰(2624)
- 地下建筑与工地下工程 朱效嘉撰(2625)

水利工程

- 水锤分析 吴荣樵撰(2626)
- 泥沙运动力学 周耀庭撰(2627)
- 河床演变学 周耀庭撰(2627)
- 水资源开发利用 陈守煜撰(2628)
- 水利清淤机械 王京宇撰; 王继孝审(2628)
- 挡水坝 顾淦臣撰; 林益才审(2629)
- 碾压混凝土坝 陆述远撰(2631)
- 水坝抗震 林皋撰(2632)
- 岩基重力坝的抗滑稳定 陆述远撰(2633)
- 设垫层的坝内钢管 马善定撰(2634)
- 下游坝面管 马善定撰(2634)
- 水能利用与防洪 王本德撰(2635)
- 调压室水位波动稳定 吴荣樵撰(2636)
- 水电站(群)短期优化运行 董子敖撰(2636)
- 水电站水库群长期优化调度
 董子敖撰(2637)

交通运输

铁路运输

- 电气化铁路 李治 贺威俊撰(2639)
- 接触网和高速受流 千万聚撰(2640)
- 电力机车和电动车组 李治撰(2641)
- 电力机车运用与检修 李治撰(2642)

公路运输

- 桥梁体系 丁大钧 邵容光撰(2643)
- 汽车传动系扭振噪声的发生机理及控制方法
 吕振华 冯振东 程维娜 梁恩忠撰(2644)
- 汽车平面仪表盘显示技术 吴基安撰(2645)
- 汽车用薄板的发展 邓陟 王先进撰(2646)
- 汽车用镀层钢板 刘昌杞撰(2647)

水路运输

- 船舶管路程序系统 周继良撰(2648)
- 船舶CAD和专家系统
 纪卓尚 林焰撰(2648)
- 船舶推进轴最佳校中 周继良撰(2649)
- 桨舵组合体水动力性能 王德恂撰(2650)

船舶及海洋工程结构力学
 ... 杨平 吴卫国 翁长俭撰;王发祥审(2651)
 计算船舶结构力学 杨永谦撰(2652)
 全球卫星定位系统(GPS) 鄢天金撰(2653)
 船舶运动控制 贾欣乐撰(2654)
 船舶维修保养体系 周继良撰(2655)
 电子海图(ECDIS) 鄢天金撰(2655)
 风帆助航船 王献手撰(2656)

农业生态系统和大气间的温室效应气体交换 ...
 王敬国撰(2681)
 树木年轮年代学及其在环境研究中的应用
 夏冰 杨开红 兰涛撰(2682)
 土壤中有毒元素的环境质量基准
 王宏康撰(2684)
 环境毒物毒性鉴定 ... 林秀武撰;林栋审(2685)
 石油沥青的毒性研究 袁宗信撰(2687)
 钒的毒性及其环境卫生标准
 孙棉龄 张天宝撰;王子石审(2688)

航空、航天

航空

自适应壁风洞 贺家驹撰(2658)
 跨音速二元风洞 贺家驹撰(2659)
 涡轮喷气发动机 宋行健撰(2660)
 冲压喷气发动机 黄熙君撰(2660)
 涡轮螺旋桨发动机 张津撰(2661)
 涡轮轴发动机 宋行健撰(2662)
 涡轮风扇发动机 宋行健撰(2662)
 航空进气道 黄熙君撰(2662)
 飞机电源系统 严仰光撰(2663)
 飞机电力传动 严仰光撰(2664)
 飞机配电系统 严仰光撰(2665)
 航空发动机燃烧 张斌全撰(2666)
 航空发动机试验 毛熙昌撰(2668)
 航空发动机控制 ... 毛可久撰;高克苓审(2668)
 敏捷性 胡兆丰撰(2669)
 计算固体力学在航空航天工程中的应用
 龚尧南撰(2670)

航天

航天器计算结构动力学 邱吉宝撰(2671)
 液体火箭发动机 张中钦撰(2672)
 固体火箭发动机 张中钦撰(2673)
 目标特征信号与识别 ... 黄培康 许小剑撰(2674)
 航天器发射场 赵承庆撰(2675)
 卫星空间环境工程 黄本诚撰(2677)
 火箭导弹发射技术 赵承庆撰(2678)

环境科学

形态分析 戴树桂撰(2679)
 环境水化学 汤鸿霄撰(2680)

环境污染及其防治

大气污染及其防治技术
 秦涛撰;刘秀兰审(2689)
 光化学烟雾 方企圣撰(2690)
 中国大气污染物迁移转化规律的研究
 汪安璞撰(2691)
 中国大气颗粒(气溶胶)的表征研究
 汪安璞撰(2692)
 中国大气污染的化学模式研究
 汪安璞撰(2694)
 中国大气污染化学研究 汪安璞撰(2695)
 居室内空气化学污染 周世伟撰(2696)
 氡子体的危害及其防护研究
 夏云凤撰;曾新元审(2698)
 居室及地下空间氡污染的监测与卫生学评价 ...
 孟繁卿撰(2699)
 室内氡污染的控制方法 孟文斌撰(2701)
 海洋重金属污染 ... 邵秘华撰;鲍永恩审(2701)
 农药的吻合与结合态残留
 黄欣撰;樊德芳审(2702)
 免疫测定法在农药及其残留分析上的应用
 黄世乐 陈祖义撰(2703)
 酶免疫分析技术在农药分析领域的应用
 李治祥 张俊亭 王勇撰(2705)
 农药土壤光解 岳永德撰(2707)
 农药的微生物降解 郑重撰(2708)
 地膜覆盖农田的残膜污染 张慧杰撰(2709)
 农用降解塑料
 万书波 王传堂 郭锦明撰(2709)
 工业噪声卫生防护标准的制订
 蒋福清撰(2710)
 有源消声技术 郑念祖撰(2711)

- 工业污染环境所致健康危害 蔡诗文撰(2712)
- 饮水加氯有害副产物 周世伟撰(2713)
- 废水生物处理 罗启芳撰(2713)
- 固定化细胞技术在废水处理中的应用 黄霞 俞毓馨 王蕾撰(2715)
- 聚乙烯醇包埋微生物技术及其在废水处理中的应用 郑耀通 闵航 陈美慈撰(2717)
- 人工湿地的设计方法 诸惠昌 胡纪革撰(2718)
- 多功能水处理剂 肖锦撰(2720)
- 无机絮凝剂 苏威撰(2720)
- 固定混合器 沈耀良撰(2722)
- 含硫酸盐有机废水的厌氧生物处理 左剑悉 胡纪革撰(2723)
- 含油废水处理技术 徐根良 曾静 翁建庆撰(2725)
- 重金属废水处理技术 徐根良 肖大松 肖敏撰(2727)
- 含酚废水治理技术 林齐平撰(2729)
- 制革废水的土地处理法机理 李心宏撰(2731)
- 微生物降解洗涤剂直链烷基苯磺酸钠 张蔚文 张灼撰(2732)
- 活性污泥脱氮效率影响因素 申秀英 许晓路撰(2733)
- 活性污泥丝状菌膨胀的起因分析及控制措施 许晓路 申秀英撰(2735)
- 垃圾生态工程 高士嘉撰(2737)
- 低污染燃烧技术 张永照撰(2737)
- 有害废弃物焚烧技术 周炳炎 刘湘撰(2738)
- 有害废渣的处理及其防治 朱顺撰(2740)

环境质量评价与环境监测

- 环境质量现状评价与环境影响评价 王华东 毕军撰(2741)
- 荧光素酶基因(lux)在环境监测中的应用和研究 张蔚文撰(2742)
- 水环境中痕量有害有机物质的监测 施梅儿 胡振元撰(2743)
- 流动注射分析在水体有机物监测中的应用 王虹丹撰(2744)
- 氧及氢子体的特性与监测研究 夏云凤 曾新元撰(2746)

- 紫露草微核监测技术 李来玉撰(2747)
- 混凝剂 肖锦撰(2747)

系统论

- 系统科学及其应用研究 杨家本撰(2749)
- 大系统理论 李人厚撰(2749)
- 系统工程 汪应洛撰(2750)
- 系统工程理论与方法 杨家本撰(2752)
- 系统工程方法论 陶谦坎撰(2752)
- 控制系统可靠性评述 疏松桂撰(2753)
- 系统辨识 涂植英撰(2754)
- 多目标决策 夏洪胜撰(2755)
- 企业系统工程 陶谦坎撰(2756)
- 农业系统工程 席酉民撰(2757)
- 环境生态系统工程 席酉民撰(2758)
- 教育系统工程 汪应洛撰(2759)
- 人口系统工程 汪应洛撰(2760)
- 区域规划系统工程 席酉民撰(2760)

体育基础科学

- 广义信度理论 陈骏良撰(2762)
- 马太分析 陈骏良撰(2763)
- 体商 熊有正 杨揭武撰(2764)
- 运动训练周期 徐本力撰(2764)

运动生理学

- 运动与心脏 邓树勋撰(2766)
- 运动与心率 洪泰田撰(2767)
- 心肌对运动的适应 姜文凯撰;周士枋审(2767)
- 运动训练与心肌毛细血管 常芸撰;林福美审(2769)
- 运动训练与心肌超微结构 常芸撰;林福美审(2769)
- 过量运动与心肌功能 刘洪涛撰;李文选审(2770)
- 无氧试验 浦钧宗撰(2771)
- 高原训练 翁庆章撰(2772)

运动解剖学

- 运动解剖学 卢义锦撰;缪进昌审(2773)
- 运动形态学 谢雪峰撰(2775)

- 体型..... 邓沛玲撰(2775)
 皮纹与运动员选材.....
 徐本力撰;陈安槐审(2776)
 肌纤维类型与训练..... 高强撰(2777)
 骨骼肌组织检查技术及其应用.....
 吕丹云撰;高强审(2778)
 膝关节半月板的正常形态结构.....
 胡声宇撰(2779)
 髌骨..... 袁琼嘉 张世明撰(2780)
 骨龄..... 师静若撰;刘玉萍审(2781)
 扁平足..... 张月芳撰(2782)

运动生物力学

- 肌肉拉力作用线... 单大卯撰;魏文仪审(2782)
 骨骼肌的弹性成分与机械效率.....
 王步标撰(2783)
 骨力学..... 孙运志撰(2784)
 应力对骨重建的影响..... 葛隆祺撰(2785)
 最佳腾起角..... 葛隆祺撰(2786)
 游泳流体力学..... 袁晋纯撰(2786)
 运动行为网络系统..... 何捷撰(2787)
 生物力学中计算机模拟方法.....
 忻鼎亮撰;洪嘉振审(2788)
 人体运动的计算机仿真..... 葛隆祺撰(2789)

运动生物化学

- 运动生物化学..... 冯炜权撰(2790)
 运动后过量氧耗和氧债的研究.....
 杨锡让撰(2790)
 个体乳酸阈(ILAT)与无氧阈的研究.....
 杨锡让撰(2791)
 运动训练与 β -内啡肽.....
 刘洪涛撰;李文选审(2792)
 肌肉活动的激素反应..... 华明撰(2793)
 运动和骨骼肌还原状态的变化.....
 许豪文撰(2794)
 运动与自由基代谢..... 许豪文撰(2795)
 运动与钾代谢..... 许豪文撰(2796)
 运动与氮代谢..... 许豪文撰(2797)
 运动与肉毒碱代谢..... 许豪文撰(2798)
 高能磷酸盐的代谢与疲劳..... 许豪文撰(2799)
 外周多层次影响的疲劳理论.....
 殷劲 高兴撰(2800)

- 骨骼肌细胞膜与疲劳..... 许豪文撰(2801)
 疲劳时肌肉中的Ach量变.....
 殷劲 张卫东撰(2802)

运动医学

- 运动与免疫..... 许豪文撰(2803)
 合成类固醇对机体的影响.....
 徐晓阳撰;冯炜权审(2803)
 合成类固醇对运动员健康的影响.....
 王彤 严政撰(2804)
 最大摄氧量的测定与应用..... 浦钧宗撰(2805)
 体力活动对运动器官中结缔组织的影响.....
 缪进昌撰(2806)
 体育性心脏综合征.....
 燕纯伯 杨源烈撰;杜传礼审(2808)
 运动性贫血..... 于基国撰(2809)
 运动性酮症..... 杨邦 孙黎撰(2810)
 运动后蛋白尿..... 华明撰(2810)
 运动员经血量的某些特点..... 李国盛撰(2812)
 运动性闭经机理的研究.....
 丁菊红撰;倪雪漫审(2812)
 运动性月经失调..... 佟启良撰(2813)
 运动创伤病理解剖学.....
 左汝铎撰;沈时义审(2814)
 运动员上肢肘关节脱位和半脱位.....
 王永年撰;崔庆凌审(2815)
 髌股关节对合不良.....
 王永年撰;唐景清审(2816)
 膝关节半月板的损伤修复..... 胡声宇撰(2817)
 肌腱损伤的病因和治疗.....
 尹立撰;张世明审(2817)
 中医治疗运动创伤的研究..... 马健撰(2818)
 生物反馈疗法..... 郭锐撰;李洪滋审(2819)
 肌电图在体育中的应用..... 尹吟青撰(2820)

运动心理学

- 运动员的心理特征..... 邱宜钧 邱卓英撰(2821)
 运动员的心理选材..... 邱宜钧 邱卓英撰(2822)
 运动员心理诊断..... 邱宜钧 邱卓英撰(2823)
 运动竞赛焦虑..... 祝蓓里撰(2824)
 心因动作技能..... 祝蓓里撰(2825)
 表象演练与运动操作..... 林呈生撰(2826)
 运动技能学习..... 顾军撰;祝汉文审(2827)

数 学

数理逻辑 数学基础

多项式时间度 polynomial time degree 由多项式时间界化归性所导出的等价类,是递归论及计算复杂性理论研究的重要内容,也是探讨 $P=NP$ 问题的一个重要途径。

在文献中,有各种各样的多项式时间化归性(简称 p -化归性)被广泛讨论,其中的绝大多数是由对递归论中的化归性增加一个多项式时间界而导出的。然而,正如一般递归论中的情形一样,有两种化归性具有特别的重要性:第 1 种是由库克(S. A. Cook)在 1971 年首先引进的多项式时间图灵化归性(简称 $p-t$ 化归性),这是最一般的多项式时间化归性;另一种是由卡珀(R. M. Karp)在 1972 年定义的多项式时间多一化归性(简称 $p-m$ 化归性),这是一种限制极大的化归性,但对讨论大多数自然的问题来说已是足够的了。

p -化归性是作为证明某些问题之难解性的基本工具而引进的。比如说, C 是多项式时间可计算集类 P 的一个真扩张复杂性类,那么,我们只要证明某个问题是 C -完全的或 C -难的,那么,便可知该问题是非多项式时间可计算的。与此相关,对 NP -完全问题的研究被证明是十分有意义的。对 p -化归性本身的结构以及由它们导出的度(简称 p -度)结构的讨论也构成了一个十分有意义的研究内容。实际上,这些讨论是结构复杂性理论的主要内容之一。

对 p -度的讨论,其内容之一是讨论由 p -度所组成的代数结构。这种讨论首先是由拉得纳(R. E. Ladner)在 20 世纪 70 年代开创的。他首先引进了延迟对角线方法,该方法成为这个领域中的一种基本技巧。运用此法,他得到了许多有趣的结果(我们以 $p-r$ 兼指 $p-t$ 和 $p-m$);递归集的 $p-r$ 度之偏序结构 (REC_{p-r}, \leq) 是具最小元的上半格(即任何两个度都有上确界而多项式时间可计算集构成最小的度 0)并且是稠密的(即对 $a < b$, 存在 c 使 $a < c < b$);每个非 0 $p-r$ 度可分裂成两个不可比较度的上确界;另外,存在极小对,即两个不可比较的度以 0 为下确度。

此后,上述结果得到了各种形式的加强,例如,麦尔洪(K. Mehlhorn)证明了每个有穷偏序可以嵌入到每个 p -度区间中去;邱(P. Chew)、马希得(M. Machtey)以及朗特韦伯(L. H. Landweber)、利普顿(R. J. Lipton)、罗勃松(E. L. Robertson)等人在 80 年代初证明了对任何 $a < b$, 存在 $c_1, c_2 \leq b$ 使 $a = c_1 \cap c_2$, 从而每个非 0 度都界有极小对。在此基础上,安勃思-斯皮思(K. Ambos-Spies)引进了更一般的对角线方法证明更强的可嵌入性结果,例如,他证明了每个可数分配格可以在保持最大最小元的条件下嵌入到任一 p -度区间中去。这个结果可以推出上面所有结果。

上面这些结论强调了度结构的齐性和一致性,并且这些对全体度成立的结果限制到度区间上后仍成立。由此导出了齐性猜想: (REC_{p-r}, \leq) 的任两个区间都同构。但是,安勃思-斯皮思通过分析稀疏集之下 p -度的性质否定了这个猜想。并且他还证明了 (REC_{p-m}, \leq) 是分配的,而 (REC_{p-t}, \leq) 是非分配的,从而它们不同构。进而,肖尔(R. A. Shore)和斯莱曼(T. A. Slaman)在 1989 年证明了任何有穷非分配格都可嵌入到 (REC_{p-t}, \leq) 。

所有这些非齐性的结论都有一个共同的特点,即它们都需要延迟对角线之外的方法来证明,而要运用一种能行的有穷损伤方法来证明。这是一种非常有力的方法,其核心是所谓加速技巧。这种技巧在下面提到的所有全域性质证明中都用到。但是,这种加速技巧有一个明显的缺点,它所构造的集合是非常复杂的,实际上都不是初等递归的。当然,这种高复杂性的特点有时也是有用的。例如,安勃思-斯皮思利用这种技巧证明了关于递归集 p -度的一个结论,而它对初等递归集又不成立。

关于多项式度讨论的另一个内容是关于 p -度理论的讨论。上述的非齐性结论是讨论多项式度一阶理论 $Th((REC_{p-r}, \leq))$ 的可定义性问题的第一步。这种可定义性结果可用以把它理论编码到 p -度理论中去,从而得到不可判定性结论。这方面的第一个主要结论是希努达(J. Shinoda)和斯莱曼 1990 年证明的结果。他们证明了递归集的 $p-t$ 度一阶理论 $Th((REC_{p-t}, \leq))$ 是不可判定的,并且它递归等价于一阶算术。另一方面,肖尔和斯莱曼则在最近证明了 (REC_{p-t}, \leq) 的 Σ_2 - (或等价地, Π_2 -) 理论(即全体可在偏序语言 $L(\leq)$ 中用至多两个量词, $\forall \exists$ 或 $\exists \forall$ 一形的公式所能表示的定理集合)是可判定的。

这两个结果的证明用到了 $p-t$ 度结果的非可分配性,因此不能推到 $p-m$ 度上去。尽管安勃思-斯皮思在 1985 年就证明了理论 $Th((REC_{p-m}, \leq))$ 具有非标准模型,只是最近安勃思-斯皮思和尼思(A. Nies)才证明了这个理论也是不可判定的。然而,这个理论的度尚没被分类。到目前为止,其最好的可判定过程只能应用到 Σ_1 -理论。安勃思-斯皮思和勒曼(M. Lerman)目前正在研究把这个过程推广到 Σ_2 -理论。

在对 p -度的讨论中,下列两个问题是这个领域中研究的热点。

(1) 确定可以获得不可判定性结论的公式的逻辑复杂性,即找出恰好在哪一个量词水平上(对公式的前束范式而言), p -度的理论开始成为不可判定的。由于目前使用的关于 $p-t$ 和 $p-m$ 度理论的不可判定性证明都用到了非常复杂的编码技巧,因此,只是在很高的量词水平上才得到了不可判定性结果。
(2) 确定可以获得不可判定性结论的集合和度的计算复杂性。由于现有的不可判定性证明都用到了加速技巧,因而,只对一般递归集或原始递归集的 p -度理论才适用。但是尚不知初等递归集(或甚至是指数时间可计算的集合)的 $p-t$ 度或 $p-m$ 度理论是否是可判定的。

参考文献

- 1 Ladner R E. J ACM, 1975, 22: 155~171
- 2 Mehlhorn K. J. Comput System Sci, 1976, 12: 147~178
- 3 Chew P, Machtey M. J Comput System Sci, 1981, 22: 53~59
- 4 Landweber L H, Lipton R J, Robertson E L. Theor Comput Sci, 1981, 15: 103~123
- 5 Ambos-Spies K. Tech Rep, 1985, 206
- 6 Ambos-Spies K. Inform and Contral, 1985, 65: 63~84
- 7 Shore R A, Slaman T A. The $p-t$ -degrees of the recursive sets, lattice embeddings, extensions of embeddings and the two quantifier theory, to appear
- 8 Shinoda J, Slaman T A. On the structure of the polynomial degrees of the recursive sets, to appear
- 9 Ambos-Spies K, Nies A. The theory of the polynomial

many one degrees of recursive sets is undecidable, to appear (南京大学郑锡忠博士撰)

空间周期解 space periodic solution

微分方程

dx/dt = f(x), x ∈ R^n (1)

dx/dt = f(t, x), t ∈ R^1, x ∈ R^n (2)

其中 f(x) 是 R^n → R^n 的连续函数, f(t, x) 是 R^1 × R^n → R^n 的连续函数, 且 f(t+w, x) = f(t, x), w 为正常数。方程(1)称为自治系统, 方程(2)称为非自治系统。空间周期解是系统(1)和系统(2)当 n ≥ 3 时的周期解。

空间周期解是空间定性理论的一个重要方向, 是近 30 年来发展十分活跃的一个新分支。其研究的基本问题是周期解的存在性、不存在性、唯一性和稳定性。这项工作不仅有重要的理论意义, 而且有广泛的应用前景。高维(n ≥ 3)系统比二维(n = 2)系统的研究更复杂, 内容更丰富, 实际问题中又不断提出由高维系统所描述的数学模型, 而空间周期解往往对应着一种重要状态(例如耗散结构)。因此, 空间周期解是当前定性理论研究的热点之一。

二维情形, 对自治系统(1)建立的 Poincare-Bendixson 定理及其推论——环域原理; 对非自治系统(2)建立的 J. L. Massera 定理及其在此基础上的 J. L. Lassealle 定理, 是判断周期解存在性(唯一性)的主要依据。20 多年前, 人们一直试图将平面周期解理论推广到高维空间, 得到与平面周期解理论相应的空间周期解理论。但是, 对高维情形, 1950 年 J. L. Massera 对系统(2)构造的反例和 1974 年 P. A. Schweitzer 对系统(1)构造的反例说明, 尽管高维系统满足二维系统对应的条件, 但不能保证空间周期解的存在性。所以, 对空间周期解的研究必须寻求其它途径。

数学家们在实际问题的研究中, 经过不断的长期探索和总结, 借助 Brouwer 不动点定理, 对高维自治系统(1)周期解建立了一个重要原理——环区原理, 设系统(1)由环区 G 的边界 ∂G 出发的轨线当 t → ∞ 时, 进入 G 的内部。G 有一个(n-1)维“截面”S^{n-1}, 它是 t=0 时穿过它的一切轨线的局部横截面, 而且每一轨线 x(t, p), p ∈ S^{n-1}, 当 t = w(p) > 0 时, 返回 S^{n-1}, 即 x(w, p) ∈ S^{n-1}, 则 G 包含系统(1)的周期解。

多年来, 对高维自治系统(1)周期解的研究主要依靠环区原理。早在 1950 年以前, L. L. Rauch 通过构造正向不变环区和使轨线“转动”的方法研究了一个非线性振荡电路的三维自治系统:

dx/dt = 1/rc2 [f(x) - (1 + C2/C1)x - x]
dy/dt = -1/RC2 [f(x) - x - x]
dz/dt = -R/L (y + x)

运用环区原理的思想, 成功地解决了该系统非常数周期解的存在性问题。

应用环区原理的关键之一是保证系统(1)之轨线在环区中“转动”。1956 年, 前苏联数学家 Невчицк采用 Ляпунов 旋转函数法给出了系统(1)之轨线在环区内“转动”的充分条件。1960 年 Блиновский 提出了轨线在环区中“分段转”的思想。另一个关键是构造正向不变环区。1977 年 Grassman 应用 Brouwer 映射度理论, 通过构造正向不变球体找出一组系统(1)周期解存在的充分条件。

应用环区原理研究空间周期解是基本的, 也是困难的, 因而也发明了一些其他方法。例如, 1979 年张揀用泛函分析方法给出了系统(1)周期解存在的充分条件; 1980 年 R. A. Smith 利

用极限集方法给出了系统(1)周期解存在定理; 1980 年 J. G. Simai 和 E. B. Val 用逐次逼近法推导出了 Poincare 映射存在不动点的一个准则, 借助计算机, 可用此法则发现系统(1)的周期解; 1982 年张揀用 Hopf 分支法得到系统(1)在原点附近有渐近稳定的周期解。

截止目前, 对系统(1)周期解存在性的研究结果较多; 对于它的不存在性、唯一性和稳定性的研究结果比较少。1985 年党新益给出了当 n=3 时系统(1)周期解的不存在性定理。

对于非自治系统(2)周期解的研究主要应用泛函数分析方法, 把系统(2)的周期解的研究转化为某连续函数空间上的某算子的不动点的研究, 应用不动点理论证明空间周期解的存在性、唯一性。

1956 年 G. Sansone 和 R. Conti 研究了具有如下形式的系统:

dx/dt = A(t)x + g(t, x) (3)

其中 A(t) 是连续的 n × n 矩阵函数, 且

A(t+w) = A(t), g(t+w, x) = g(t, x).

首先, 对于线性系统

dx/dt = A(t)x + P(t) (4)

如果 dx/dt = A(t)x 无非平凡 w 周期解, 且 p(t+w) = p(t) 是连续函数, 则系统(4)有唯一 w 周期解。

其次, 由 [0, w] 上连续的向量函数 u(t) 具有范数:

||u|| = max_{0 ≤ t ≤ w} |u(t)|

构成 Banach 空间 C, 在 C 的子空间

B_w = {u(t); u(t) ∈ C 且 u(0) = u(w)}

中定义算子 T: B_w → B_w 如下:

对于任何 u(t) ∈ B_w, Tu(t) 定义为线性系统

dx/dt = A(t)x + g(t, u(t))

的唯一 w 周期解, 如果 T 有不动点 U_0(t), 则 U_0(t) 为系统(3)的 w 周期解。T 的具体表达式为

Tu(t) = ∫_0^w G(t, τ)g(τ, u(τ))dτ

其中 G(t, τ) 为由 dx/dt = A(t)x 的标准基解矩阵所决定的 Green 矩阵。

应用 Schauder 不动点定理有以下结果:

如果存在一个正数 R, 使得关系式:

r(R) = 0 ≤ max_{|t| ≤ R} |g(t, x)| ≤ R/wT,

Γ = max_{0 ≤ t, τ ≤ w} |G(t, τ)|

成立, 则系统(3)至少有一个 w 周期解。

1964 年 A. Lasota 和 Z. Opial 应用 Schouder 不动点定理研究了系统:

dx/dt = A(t, x)x + g(x, t) (5)

其中 A(t, x) 是 n × n 矩阵函数, 且

A(t+w, x) = A(t, x), g(t+w, x) = g(t, x), w > 0,

得到如下结论:

设(a), M* 是由矩阵 A(t) = A(t+w) 构成的一个有界弱紧集, 且对任何 A(t) ∈ M*, 系统 dx/dt = A(t)x 无非平凡 w 周期解; (b) 对任何 u(t) ∈ B_w, A[(t, u(t))] ∈ M*, 且有

lim_{λ → 0} 1/λ Sup_{|t| ≤ λ} |∫_0^λ A(t, x) dt| < λ

λ 为 M* 决定的正常数, 则系统(5)至少有一个 w 周期解。

1984 年张揀建立了系统(3)w 周期解存在的区域定理和环域定理。1985 年赵晓强应用 kakytani 集值映射不动定理, 建立了系统(5)w 周期解存在的一般性定理:

如果(a), g(t, x), A(t, x) 连续; (b) 存在 M > 0, 使得对任何

$u(t) \in S_M = \{u(t) \in B_w, \|u(t)\| \leq M\}$, 方程 $dx/dt = A(t, x)x + g(t, u(t))$ 在 S_M 中有 w 周期解, 则系统(5)至少有一个 w 周期解。

1986年王联、王燕秋研究了一个三阶线性周期变异的强迫振荡方程

$$\frac{d^3x}{dt^3} + a_1(t)\frac{d^2x}{dt^2} + a_2(t)\frac{dx}{dt} + a_3(t) = e(t)$$

其中 $a_i(t), e(t) (i=1, 2, 3)$ 为连续的以 $2\pi/w$ 为周期的可微函数。通过构造 Ляпунов 函数得到了 $2\pi/w$ 周期解存在、唯一、稳定的定理。

1989年 R. Campanini 研究了系统(2), 设系统(2)存在解 $x(t)$ 使得序列 $\{x(nw)\}$ 是有界的, 且 $x(t)$ 是 w 渐近稳定的, 则系统(2)存在 w 周期解。

1990年 S. A. Vavilov 研究了拟线性方程

$$\frac{dx}{dt} = A(t) + F(t) = \epsilon f(t, x)$$

其中 $A(t), F(t), f(t, x)$ 皆是关于 t 以 w 为周期的函数, ϵ 为小参数。将上述方程周期解的存在性问题化归成代数方程的可解性问题, 当 $|\epsilon| < \rho$ 时, (ρ 为充分小的正数), 给出了此方程 w 周期解存在的充分条件。

另外, R. Z. Reissing 曾建立了如下定理, 如果系统(2)有一个全局渐近稳定解, 则系统(2)至少有一个 w 周期解。A. Halanay 也曾证明这样的定理, 系统(2)存在一个 w 周期解的主要条件是它存在一个有界解 $x(t)$ 满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} |x(k+1)w, x_0 - x(kw, x_0)| = 0$$

目前, 由于计算机的迅猛发展, 近似计算和数字模拟在空间周期解的研究中引起了人们的重视, 并已成为空间周期解研究的热点之一。因此, 对系统(1)周期解的最小周期的估计具有非常重要的意义。1989年 S. Busenberg 对 Ligschitz 系统周期解的最小周期作出了较好的估计, 1991年高占海对三维核自旋器自治系统周期解的最小周期作出了较满意的估计。空间周期已在一些实际问题(例如生物学、化学等)中得到成功的应用, 近年来, 它在自动控制、非平衡统计物理学等方面的应用也渐见广泛。我们相信通过国内外有关专家和学者的共同努力, 空间周期解理论将会取得更大进展和日趋完善, 并将展示出其更加广泛的应用前景。

参考文献

- 1 Massera J L. Duke Math J, 1950, 17, 357~475
- 2 Nemytskii V V. Trudy Moskow Math Obsch, 1956, 5, 455~482
- 3 Blinchevskii V S. Math Sb, 1960, 50, 117~126
- 4 Schweitzer P A. Am Math, 1974, 100, 386~400
- 5 王联, 王燕秋. 西北大学学报, 1986, 1, 1~11
- 6 Zhang Di, Ann of Diff. Eqs, 1989, 5(4), 503~511
- 7 Vavilov S A. Soviet Math Dokl, 1990, 41(3), 486~489

(西北大学张楙教授、高占海副教授)

格值模型论 lattice valued model theory 模型论是数

理逻辑的重要分支, 它的系统阐述由塔斯基(A. Tarski)倡导于20世纪50年代初期, 而多值逻辑作为逻辑系统可追溯到20世纪20年代。这几十年来多值逻辑有了很大发展。近10~20年来, 由于公理集合论中布尔值模型的应用, 模糊数学中非布尔值逻辑的出现, 以及计算机科学中多值线路的探讨等, 使多值逻辑的研究有了更多的具体背景及客观需要。多值逻辑的理论和应用的迅猛发展, 促进了模型论的发展。70年代中、后期, 王世强开创性地研究了命题和谓词均取值于某个格上的模型论, 即格值模型论。

格值模型论涉及格和形式语言。格 L 对运算“ \cap ”、“ \cup ”完备且具有补运算“ $'$ ”, 有最大元1和最小元0。补运算“ $'$ ”一般只要求满足 $1' = 0, 0' = 1$, 且是 L 到 L 的一个对应。形式语言 \mathcal{L}

中, 逻辑符号仅限于 $\vee, \wedge, \rightarrow$ 和量词 \exists, \forall 共五个, 在讨论赋值时, 分别被解释为 L 中的运算 $\cap, \cup, ' ,$ 和 \sup (最小上界), \inf (最大下界)。现设 $L = \{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \dots\}, \lambda_0 = 0, \lambda_1 = 1$, 设 Σ 是形式语言 \mathcal{L} 上的任一非空句子集, $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots$ 为 Σ 的任一确定的分划(可有某些 Σ_i 为空集, 但分划常无 Σ_0 , 且对不同的 $\lambda_i, \lambda_j, \Sigma_i \cap \Sigma_j = \emptyset$)。将 Σ 连同这样一个分划称为分组句子集或理论。 \mathcal{L} 上的模型的定义跟二值时类似, 只是在有一集零元关系符号 $C_{\lambda_0}, C_{\lambda_1}, C_{\lambda_2}, \dots$ 时, C_{λ} 在 \mathcal{L} 的任何模型中恒取定值 λ 。如果对 Σ 的上述每个子集 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots$, 对 Σ_i 中的每个句子 ϕ , 均有 $\phi|_M = \lambda_i$, 那么称 M 满足 Σ , 也称 M 是 Σ 的模型(或实现), 记作 $M \models \Sigma$ 。

上述形式语言本质上还是一阶的。由于值格一般异于二值, 甚至可能不是布尔代数, 因此在这样的值格下, 多值狭义谓词演算系统一般是复杂的。因没有符号“ \leftrightarrow ”, 相应的公理需由其它性质来体现。1979年, 王世强和翁霖丰给出了一些多值狭义谓词演算中合式公式(即良构式)的前束标准形, 证明了当给值格的最小上界, 最大下界运算加上有限性条件 (F_1) 和 (F_2) 及对偶条件 (D_1) 时, 任意良构式 ϕ 都可有效地化为前束范式, 即 Σ_0 式, 或 Π_0 式, 这为判定问题和多值模型论的研究作了准备。在随后的几年时间里, 王世强等一直致力于格值模型论的研究。

1979年王世强和卢景波建立了格值模型的超积基本定理, 为格值模型论的研究开了先河。众所周知, 超积构造法不仅对数理逻辑的几个分支的研究是有力的工具, 而且对数论、代数、拓扑等学科也有应用。在他们证明的超积基本定理中“值格有限”是相当弱的条件, 而当值格未必有限, 但适合性质 (F_1) 和 (F_2) , 且 D 为下标集 I 上的 $|L|^+$ 完备的超滤时该定理仍有效。作为超积基本定理的推论, 王世强得到了有限值格时的紧致性定理, 即: 设 L 为有限值格, Σ 为 \mathcal{L} 上的一个分组句子集, 如果 Σ 的每个有限分组句子集都有模型, 那么 Σ 也有模型。多值逻辑中的和谐性概念的定义是不容易给出的, 一般地就用“有模型的理论”来说明“是和谐的理论”, 但这样一来就跟狭义谓词演算中的“和谐性”概念有差别, 尽管如此, 许多工作还是照样可以进行下去。紧致性定理和 LST 定理是二值模型论中极其重要的两个定理, 对格值模型论也不例外。为使二值模型论的许多结果易于推广到格值情形, 王世强引进了弱特征式和强特征式的概念。所谓特征式 $\Delta(p, q)$: 就是由命题变量 p, q 经 $\vee, \wedge, \rightarrow$ 组成的良构式, 如果对任何 $x, y \in L$, 当 $x=y$ 时 $\Delta(x, y) = 1$, 而当 $x \neq y$ 时, 有 $\Delta(x, y) \neq 1$, 就称 $\Delta(p, q)$ 是弱特征式; 如果当 $x \neq y$ 时恒有 $\Delta(x, y) = 0$, 那么就称 $\Delta(p, q)$ 为强特征式。同一年, 王世强用常量构作法证明了在值格有限且具有弱特征式时的紧致性定理, 同时顺便得到了 LST 定理; 也证明了在值格适合 $(F_1'), (F_2')$ 及紧致性定理, 并具有强特征式时, 如果语言 \mathcal{L} 可数且具有一集与值格相对应的零元关系符号且 \mathcal{L} 上有模型的理论 T 局部省略一个分组子集 Σ , 那么 T 必有一个模型省略 Σ (这就是省略型定理)。(注: 用 $(F_1), (F_2)$ 是高恒珊建议的)。

在值格满足一定条件时, 紧致性定理和 LST 定理都肯定了某种模型的存在性, 特别是 LST 定理指出了有意想不到的特别大的模型存在。构造模型常用的方法除上文提到的超积法, 常量构作法, 省略型定理, 紧致性定理和 LST 定理以外, 还有初等链法, 强升(或降) LST 定理和力迫法等。沈复兴在王世强等开始研究格值模型论后不久, 也加入到这项研究的行列, 在他们工作的基础上, 进一步把二值模型论的许多结果推广到格值情形, 并定义了许多新的概念。以下常假定语言含一集零元关系符号 $C_{\lambda}, \lambda \in L$, 且值格 L 适合紧致性定理, 弱有限性条件 $(F_1'), (F_2')$, 且有强特征式 $\Delta(p, q)$ 。在这些假定下, 沈复兴给出了初等子模型的等价条件, 并得到了强升 LST 定理, 即每个无限模型都有任意大的初等扩充, 以及强降 LST 定理。

为给出模型完备理论的等价条件,除值格满足上述条件外还应满足对偶性条件(D),对任意 $x, y \in L, (x \cup y)' = x' \cap y', (x \cap y)' = x' \cup y'$. 由此他得到了模型完备理论的其他几个等价条件,并由这些充要条件,使我们很容易导出在格值情形下一个理论是否完备的两个准则,即罗宾逊(A. Robinson)判别法:

- (1)模型完备的理论如果有一个素模型,那么该理论是完备的。
- (2)如果模型完备的理论的任何两个模型都可嵌入到它的第3个模型中,那么该理论是完备的。

理论 T 的完备性的另一个判别法是强升(或强降)LST 定理的很有成效的应用。该判别法说,只有无限模型的和谐理论 T ,如果对某个无限基数 $\alpha \geq |\mathcal{L}|$, T 是 α -范畴的(即, T 的任何两个基数为 α 的模型都同构),那么 T 是完备的(Los-Vaught 判别法)。

模型链概念特别是初等链的概念在格值模型论中也起了重要作用。通过模型链,沈复兴给出了格值模型完备理论的 Lindström 判别法,初等链定理,以及 Robinson 和谐定理及克瑞格(W. Craig)内插定理。

Craig 内插定理是说,设 L 有限, $L = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_m\}$, φ 和 ψ 是 \mathcal{L} 的两个句子。如果 $\models \Delta(\varphi, C_0) \vee \neg \Delta(\psi, C_0)$

那么存在句子 θ , θ 中出现的非逻辑符号除“ \equiv ”和“ C_{λ_i} ”外在 φ 和 ψ 中都有出现,使 $\models \Delta(\varphi, C_0) \vee \neg \Delta(\theta, C_0)$ 且 $\models \Delta(\theta, C_0) \vee \neg \Delta(\psi, C_0)$ 都成立。

应用初等链定理,沈复兴得到了格值模型论的3个保持性定理。正如 A. Robinson 把科恩(P. J. Cohen)的力迫法引进模型论中得出一些有趣的结果,沈复兴也把力迫法引进格值模型论中,分别给出了有限力迫和无限力迫的定义。他证明了在有限力迫下,当 $\mathcal{L}(C)$ 可数时,与 T 和谐的模型 M (即,有 N 使 $N \sqsupset M$, 且 $N \perp T$) 都有 generic 扩充, T -generic 模型类是模型完备的类,它在链并下封闭,且是归纳类,这个类中的模型都是 T 的存在完备模型;归纳理论 T 的任意 generic 模型都是 T 的存在闭模型。并得到了比王世强早先得到的条件要弱得多的省略型定理,在这里他只要求值格适合 $(F'_1), (F'_2)$ 和紧致性定理。可见有限力迫法对模型论的影响是深刻的,同样地,用无限力迫法,沈复兴得到了一些与有限力迫时相类似的结果,也有一些很深刻的结果。

关于可数语言中完备理论 T 的可数模型,早在 1979 和 1980 年时王世强就已研究过,并建立了涉及原子模型和可数饱和模型方面的一系列结果,其中有一个结果表明,正好有两个不同构可数模型的完备理论是不存在的。对于二值模型论而言,当 $n \geq 3$ 且为正整数时,某些完备理论恰有 n 个不同构的可数模型,但对一般的异于二值的模型论,这个结果是否正确尚属未知。尽管如此,二值模型论中 ω -范畴理论的刻画在格值情形仍然有效。

范畴性对一个理论的要求是太高了,因此考虑理论对某基数是范畴的在情理之中。在王世强、沈复兴等人工作的基础上,自 1986 年起沈云付开始研究格值模型论中完备理论的 α -范畴性; α -饱和性及 α -稳定性。在这之前卢景波在 α -饱和性方面已做了一些工作。沈云付建立了象 Skolem 函数和不可辨元, α -饱和和, α -稳定等方面的一系列概念和结果,最后证明了格值的莫莱(M. Morley)定理,即,设语言 \mathcal{L} 可数,在值格有限和有强特征式时,如果完备理论 T 对某 $\alpha > \aleph_0$ 是 α -范畴的,那么 T 对每个不可数基数范畴。张玉平从另一角度研究格值模型论。1992 年他通过把多值公式,多值模型及其它一些概念转化为相应的二值概念,给出了上述一些结果的新证法,导出了不具备 $(F'_1), (F'_2)$ 时的弱紧致性定理,以及关于完备理论不同构的模型个数的几个重要结果。涉及稳定性,有许多工作可做。

为了多值逻辑判定以及后来建立格值模型的需要,王世强和吴望名于 1964 年和 1981 年给出了可补格按恒 I 式集分类的一些结果。王世强后来又讨论了值格的同模性分类的充要条

件。1992 年王捍贫又研究了完备弱可补格的同模分类问题,给出了原子完备弱可补格与二元布尔代数同模的充要条件及一类关于分组格的结果。在格值模型论的研究中,应明生,别荣芳,宋要等人都做了相关的工作,应明生曾给出超积基本定理的另一种形式。

从基础工作而言,尽可能减弱对值格的要求,但又不失掉某些重要的结果才是比较理想的,但有一定的难度。如强特征式的要求确实太高,可否进一步减弱使它有较大的适用性。另外有限值格的要求可否放宽到无限?王世强、卢景波、沈云付等都给出过例子说明,当值格无限时,紧致性定理,超积基本定理, LST 定理等极其重要的定理是失效的。卢景波指出即使 ω -和谐也不能保证和谐性。尽管路是比较窄的,但也许会有突破性的进展。

对非一阶语言上的格值模型论的研究,工作仍然很多。沈复兴已经研究了 $\mathcal{L}_{\omega_1, \omega}$ 语言上的格值模型论的和谐性质,及 \mathcal{L}_{ω} 语言上格值模型力迫法以及其它一些语言上的模型论,并取得了许多好的结果。与计算机科学有关的有限模型论可能是很有前途的。由于格值模型论还在发展之中,迫切盼望这些研究能给数学本身带来新的结果,找到新的应用。

参考文献

- 1 王世强,卢景波. 科学通报,1981,26,71~74
- 2 王世强. 北京师范大学学报(自然科学版),1980,3-4,25~30
- 3 王世强. 数学进展,1981,10(2),144~146
- 4 王世强. 数学学报,1982,25(2),202~207
- 5 卢景波. 北京师范大学学报(自然科学版),1982,2,1~8
- 6 沈复兴. 科学通报,1982,27,264~266
- 7 沈复兴. 北京师范大学学报(自然科学版),1985,2,9~14
- 8 沈复兴. 数学年刊,1986,7A(1):46~54;7A(2):161~169
- 9 沈云付. 科学通报,1987,2,1221~1223
- 10 张玉平. 北京师范大学学报(自然科学版);1992,28(4),420~425

(湖州师范专科学校沈云付博士撰;王世强审)

量词模态逻辑的代数语义学 algebraic semantics

for quantified modal logic 模态逻辑是研究“必然”与“可能”等模态概念的逻辑学说。模态逻辑有着悠久的历史。亚里士多德在创建形式逻辑时就用了比实然逻辑多两倍的篇幅来讨论模态逻辑,但后来被忽视了。20 世纪初刘易斯(C. I. Lewis)为了摆脱实质蕴涵悖论而引进模态概念,从而定义了严格蕴涵以代替实质蕴涵。并于 1932 年与兰福德(C. M. Langford)合著《符号逻辑》一书,提出了 $S1-1, S5$ 等 5 个著名模态命题逻辑系统,才使模态逻辑得以复兴。60 年代以前,模态逻辑的研究主要限于命题模态逻辑;极少论及量词模态逻辑的工作,而且成果也甚少。

40 年代麦克德赛(J. C. C. McKinsey)和塔尔斯基(A. Tarski)对刘易斯的系统 $S2$ 与 $S4$ 引进了代数语义。假设 S 为一个非古典命题逻辑系统,以由叠合 S 中之等价公式而得的 S 的 Lindenbaum-Tarski 代数 $\left(\frac{\mathcal{Q}}{\sim}\right) \{S, \{p_i | i \in I\}\}$ 为自由代数的那一类泛代数(universal algebras)称为 S 代数。作为格来说为完备的 S 代数称为 S^* 代数。显然,如果系统 S 的任一公式 φ 当看作任一 S 代数 A 上的多项式 Q 时恒取 A 的 ω -元(即最大元) V 为值,则 φ 必定是 S 的定理,即 $\vdash_S \varphi$,这是因为作为 S 代数中的一员的 \mathcal{Q} - T 代数 $\left(\frac{\mathcal{Q}}{T}\right) \{S, \{p_i | i \in I\}\}$ 是系统 S 的特征代数模型。因而 S 的代数语义完全性定理便十分容易得到了。早在 40 年代就已知道 $S4$ 代数就是闭包代数(即拓扑布尔代数);而高恒珊 1963 年又指出 $S5$ (即 S_5)代数就是哈尔姆斯(P. R. Halmos)1955 年提出的一目布尔代数 monadic Boolean algebras;费斯(R. Feys)1938 年提出的系统 T 的相应代数则

于1960年被莱蒙(E. J. Lemmon)称为外延代数(extension algebra)。1959年克瑞普克(Saul A. Kripke)发表了题为“模态逻辑中的一个完全性定理”的论文。此文的重要意义在于首次对一阶模态系统提出可能世界(possible worlds)语义(亦称关系语义)并对基于刘易斯系统S5之上的量词理论S5*证明了相对于此种语义的完全性定理。

早在1953年拉西阿娃(H. Rascowa)等便用代数方法研究了S4(即S4)的量词理论S4*的代数语义完全性问题。同时被研究的非古典逻辑尚有正演算S_r、海了(A. Heyting)直觉主义演算S_r和约翰逊(J. Johanson)的极小演算S_μ等,相应代数分别为相对假补格、海丁代数(亦称假布尔代数)以及约翰逊代数。拉西阿娃等对基于一般命题逻辑S之上的谓词逻辑S*所提出的代数语义可溯源于1948年莫斯托夫斯基(A. Mostowski)关于某语句σ在海丁谓词演算S_r*中不可证的论证方法。其方法为,选取一非空集J,一个完备海丁代数A,让个体变元在J中变动;对任何语句φ把φ中出现的每个k(≥1)目谓词字母P^(k)解释为定义在J的k重卡氏积J^k上而在A中取值的映射(函数)(p^(k): J^k→A;把命题联结词解释为A上的相应格运算,存在(或全称)量词解释为A中相应元素集的最小上界(或最大下界)。在这种解释下莫氏证明S_r*中的任一可证公式均恒取A中么元V为值,而σ却不然,从而得出σ在S_r*中不可证。拉西阿娃等把这一代数处理方法用于上述诸非古典逻辑,并证明对与这些系统相似的任一系统S,如果S具有某种性质(E)则对每个语句φ,若对任何非空个体集J,任何完备S代数,即S*代数A和任一解释μ,使得对于φ中每个谓词字母P^(k)(i∈I, k≥1), μ(P^(k))=p^{(k): J^k→A,均有(J, A)Φ_μ({p^(k) | i∈I})=V A中的么元,则必有⊢_S φ,即φ在S*中可证,或曰对于量词系统S*而言哥德尔(K. Gödel)型完全性定理成立。}

1953年拉西阿娃等证明了上述诸系统(包括S₁即S4)皆有性质(E),从而对它们得到了哥德尔型完全性定理。1963年高恒珊运用哈尔姆斯关于一目布尔代数的表示定理证明了S5(即S₅)具有比(E)稍弱的性质(σE),从而对量词理论S5*证明了哥德尔型完全性定理。1964年他又进一步证明上面的代数A可取为域为W的Z值全函项单纯一目布尔代数2^W,而W可取为任一可数无穷集,比如ω₁(=ω₀)即可。因2^W为单纯S5*代数,所以我们称量词系统S5*为单纯完全的。

继1959年的工作之后,克瑞普克又于1963年对正规模态命题演算S=T, S4, B, S5提出了语义分析。考虑如下公理模式和推理规则, A0. 全部重言式, A1. □A⊃B⊃□A⊃□B, A2. □A⊃◇A, A3. □(A⊃A), A4. □A⊃□□A, A5. A⊃□◇A, A6. ◇A⊃□◇A; R1. Modus Ponens, R2. A/□A。定义T={A0, A1, A3, R1, R2}, S4=T∪{A4}, B=T∪{A5}, S5=T∪{A6}=T∪{A4, A6}, 克氏称一模态系统为正规模态系统, 如果它包含T的全部定理且在R1, R2下封闭(后来正规性的条件又放宽为, 包含公理A0, A1且在R1, R2下封闭)。显然上述四系统均为正规模态系统。此类系统的克瑞普克语义(即关系语义)基于模型结构ℳ=(K, R, V), 此处K为非空集, 其元素称为可能世界, R⊆K²为K上的二元关系, V为在任一可能世界w_i∈K上对命题字母P_i的真值指派, V(w_i, P_i)=0或1(0为假, 1为真)。模型结构ℳ=(K, R, V)叫做T(或S4, B, S5)模型结构, 如果其中关系R为自反的(或自反且传递的、自反且对称的, 等价关系)。指派V可扩充至任何模态公式如下: V(w_i, ~A)=1 iff V(w_i, A)=0; V(w_i, A⊃B)=1 iff V(w_i, A)=0或V(w_i, B)=1; V(w_i, □A)=1 iff 对任何w_j∈K, 若w_iRw_j, 成立则V(w_j, A)=1; V(w_i, ◇A)=1 iff 存在w_j∈K, 适合w_iRw_j, 且V(w_j, A)=1, 可以证明⊢_SA, (此处S表示T, S4, B, S5之一), 当且仅当对任何S模型结构μ=(K, R, V)均有V(w, A)=1对任何w∈K。克瑞普克对这几个语义完全性定理的证明采用语义局面(Semantic tableaux)方法, 难而冗长。

1966年莱蒙(E. J. Lemmon)发表题为“模态逻辑的代数语义学 I / I”两篇文章, 文章一开始便指出该系列文章的宗旨是把模态逻辑中已有的最深刻的两种语义, 即代数语义和克瑞普克的关系语义加以综述, 虽然也有新结果, 但“旨趣宁可说是在于揭示了熟知结果间的联系, 提供进一步研究的体制。一般来说, 我们要证明克瑞普克型语义完全性结果可以由代数结果借助于一个中心定理(定理21)推出。”在此两文中, 他一共讨论了18个模态系统, 其中最强的4个就是T, S4, B和S5。所有这些系统的克氏语义完全性的证明在他的文章中因使用了定理21而大大简化了。他并且“希望用第3篇文章来讨论添加量词于所有这些系统”。遗憾的是由于这位知名模态逻辑专家英年早逝, 他的希望并未实现。

为了实现莱蒙的愿望, 高恒珊于1987年首先在系统S5*的代数语义与克氏的关系语义间确立了相互可转化性。设Ω_μ=⟨W, J, V⟩为S5*的任一模型结构, 此处W为可能世界组成的任意非空集, J为由个体组成的非空集, V为Ω_μ上的指派, 即对于任何谓词字母P_k⁽ⁿ⁾, 有V(P_k⁽ⁿ⁾)⊆W×Jⁿ。另一方面, 引进一个固定的S5*代数2^W, 它就是前面提到的单纯一目布尔代数。考虑S5*的代数模型m_μ=⟨J, {P_k⁽ⁿ⁾ | 0≤n<∞}⟩, 此处μ为如下指派: μ(P_k⁽ⁿ⁾)=p_k^{(n): Jⁿ→2^W, k∈K。则有如下转化:}

(I) 设Ω_μ=⟨W, J, V⟩为S5*的一个模型结构。今定义一相应代数模型M_μ=⟨J, {P_k⁽ⁿ⁾ | 0≤n<∞}⟩, μ此处对任一谓词字母P_k⁽ⁿ⁾有μ(P_k⁽ⁿ⁾)=p_k^{(n), 使得对任何个体a₁, ..., a_n∈J有p_k⁽ⁿ⁾(a₁, ..., a_n)={w | w∈W & ⟨w, a₁, ..., a_n⟩∈V(P_k⁽ⁿ⁾)}。}

(II) 设已有代数模型M_μ=⟨J, {p_k⁽ⁿ⁾ | k∈K, n∈ℕ}⟩, 则可得一相应模型结构Ω_μ=⟨W, J, V⟩如下: V(P_k⁽ⁿ⁾)={⟨w, a₁, ..., a_n⟩ | w∈P_k⁽ⁿ⁾(a₁, ..., a_n) & w∈W & a₁, ..., a_n∈J}。

设σ为一语句, 则以⟨Ω_μ, w⟩|=σ表示σ在关系模型⟨Ω_μ, w⟩上为真亦即V(w, σ)=1, 以σ|_{m_μ}表示σ在代数模型m_μ上的值即α|_{m_μ}=⟨J, 2^W⟩Φ_μ({p_k⁽ⁿ⁾ | 0≤n<∞})则由(I)或(II)均能推出如下事实:

$$\text{定理 } \langle w | \langle \Omega_\mu, w \rangle | = \sigma \rangle = \sigma |_{m_\mu}$$

由此得: 由克瑞普克1959年关于S5*的完全性定理可推出高恒珊1964年关于S5*(即S₅*)的单纯完全性定理, 反之亦然, 即该两个完全性定理可以互推。

1988年吕健安对高恒珊的上述工作作了推广。设以BF简记如下的所谓巴尔坎公式(Barcan Formula): ◇∃xA(x)⊃∃x◇A(x)。他考虑了带有公式BF的正规量词模态系统的哥德尔型代数完全性定理的成立与否的问题。为了证明该定理, 若用拉西阿娃等人1953年的方法则要验证性质(E)(或较弱的条件(σE))而这一般来说是十分困难的。但是对于由象系统K={A0, A1, R1, R2}, T(D)={A0, A1, A2, R1, R2}, K4={A0, A1, A4, R1, R2}以及T, S4, B等正规模态系统经添加巴尔坎公式BF而得到的量词模态系统K+BF, (T(D)+BF, K4+BF, T+BF, S4+BF)以及B*(注意BF在B*中可证)其相应的克瑞普克关系语义完全性定理的证明如休斯(G. E. Hughes)等著《模态逻辑引论》一书第9章所述是有一般方法可循的。此时若采用上述由克氏语义向代数语义的转化(I)便可得到和上述定理相当的结论, 从而得到相应系统的代数语义完全性定理。

事实上, 若以S*表示上述6个带(或含)BF的正规量词模态系统之任一, 以Ω_μ=⟨W, R, J, V⟩表示S*的任何克氏模型结构, 其中R为W上的二元关系, 使得在S*=K+BF情形R为任何关系, 而S*为T(D)+BF(或K4+BF, T+BF, S4+BF, B*)情形, R限于系列的(serial, 即对任何w∈W均存在一w'∈W使得wRw')(或传递的, 自反的, 自反且传递的, 自反且对称的)关系。其实S5*(亦含BF)亦属此类情形, 只不过此时R=W×W故把R略去了。考虑带算子P的布尔代数ℳ=(2^W, U, ∩, -, P), 这里U, ∩, -分别表示W的全部子集类2^W。

上的求并、交、补的运算而对任何 $A \in 2^W$ (即 $A \subseteq W$) 有 $P(A) = \{w \mid w \in W \& \exists w' \in A \& w R w'\}$, 定义 $N(A) = -P(-A)$ 则可证明 Ω 为 S^* 代数。定义 S^* 的代数模型 $m_\sigma = (J, \{P_i^{(n)}\})$, 此处赋值 $\mu(\exists x_i^{(n)} \rightarrow p_i^{(n)}) : J \rightarrow 2^W$, 使得对任何 $a_1, \dots, a_n \in J$ 有 $p_i^{(n)}(a_1, \dots, a_n) = \{w \mid w \in W \& (w, a_1, \dots, a_n) \in V(\beta_i^{(n)})\}$ 。须注意者为, 在 $(J, 2^W) \Phi$ 泛函的定义中当 $\varphi = \diamond \Psi$ 时有: $(J, 2^W) \Phi_{\diamond \Psi}(\{p_i^{(n)}\}_{i \in K^w}) = \{w \mid w \in W \& \exists w' \in (J, 2^W) \Phi_{\Psi}(\{p_i^{(n)}\}_{i \in K^w}) \& w R w'\} = P((J, 2^W) \Phi_{\Psi}(\{p_i^{(n)}\}_{i \in K^w}))$ 。则同上面一样可证明: $\{w \mid (\Omega_R, w) \models \sigma\} = \sigma \mid m_\sigma$ 。因而如果语句 σ 对任何代数模型皆有效则应有 $\sigma \mid m_\sigma = W$, 从而可见 σ 为 Ω_σ 有效的。因 Ω_σ 为 S^* 的任意克氏模型结构, 可知 σ 为克氏语义永真的, 从而由 S^* 的相应克氏语义完全性定理知应有 $\vdash_{S^*} \sigma$, 从而 S^* 为代数语义完全的。

剩下来的问题是关于非正规量词模态系统(同样带公式 BF)的情形。这项工作尚未开始, 估计无太大困难。这样我们看到莱蒙的上述未竟之业已接近完成。最后关于不带 BF 的量词模态系统, 则因其克氏语义中之个体域 J 随可能世界而变, 从而其代数语义学亦应有所变动。结果如何尚待进一步的研究。

参考文献

- 1 Mckinsey J C C. J of Symbolic logic. 1941. 6: 117~134
- 2 Mckinsey J C C, et al. Ibid. 1948. 13: 1~15
- 3 Mostowski A. Ibid. 204~207
- 4 Rasiowa H, et al. Fund Math. 1953. 40: 62~95
- 5 Halmos P R. Compositio Math. 1955. 12: 217~249
- 6 Kripke S A. der Math. 1963. 9: 67~96
- 7 高恒珊. 数学学报. 1963. 13: 68~77
- 8 高恒珊. Ibid. 1964. 14: 546~548
- 9 高恒珊. Ibid. 1987. 30: 938~846
- 10 吕健安等. Ibid. 1988. 31: 692~698

(中国科技大学研究生院高恒珊教授撰)

概括原则与悖论 comprehensive principle and paradoxes

德国康托尔(Cantor)于19世纪初创立了集合论, 它是整个数学的基础。但后来集合论中出现了悖论。悖论直接关系到整个数学的奠基问题, 从而导致数学的第3次危机。通过对悖论的分析, 普遍认为悖论的出现与概括原则中的那种造集的任意性有很大关系。然而概括原则又显得那么自然、直观, 使用起来又那么方便。能否不立足于概括原则的修改而排除悖论? 或者非修改不可, 如修改如何寻找一种方案, 使之既能排除悖论又能全面保留概括原则的合理内容? 这些问题长期以来一直成为数学家们的研究课题, 并取得了一系列重要的研究成果。

概括原则是康托尔创建古典集合论的重要思想方法之一。所谓概括原则, 是指任一个性质 P , 就能把所有满足性质的 P 对象, 也仅由这些具有性质 P 的对象汇集在一起而构成一个集合。用符号来表示就是 $G = \{g \mid p(g)\}$ 或者 $\forall g (g \in G \leftrightarrow p(g))$ 。概括原则在一阶逻辑中不是一条公理而是公理模式, 因而有无穷多条公理:

$$\forall x_1 \dots \forall x_n \exists y \forall t (t \in y \leftrightarrow \psi(t, x_1, \dots, x_n))$$

通常用 Σ_0 表示所有的概括原则公式所构成的集。如果对其中的公式 ψ 加以各种不同的限制, 就能构成 Σ_0 的各种不同的真子集, 通常记为 $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots$ 等。这是一些特殊类型的真包含于 Σ_0 的概括原则公式的集合。换句话说, 概括原则可以根据实际情况加以适当的限制和修改。

1900年前后, 在集合论中出现了两个著名的悖论, 康托尔悖论和罗素悖论。它们直接动摇了集合论作为整个数学大厦的基石, 冲击了以严谨著称的数学和逻辑学科。对于种种排除集合论悖论方案的提出和研究, 经仔细分析, 以下4方面不能同时成立:

- ① $x \in x$ 是一个条件(含 x 的语句),

- ② 任给一条件 $\psi(x)$ 决定一集合 A , 即 $x \in A \leftrightarrow \psi(x)$,

- ③ 集合为个体之一, 因而 x 处均可代以 A ,

- ④ $P \leftrightarrow \neg P$ 为一矛盾。

否则, 若设①、②、③、④同时成立, 则由①可知, 取 $x \in x$ 为一条件 $\psi(x)$, 由②可知有 A 使 $x \in A \leftrightarrow x \in x$, 由③可知有 $A \in A \leftrightarrow A \in A$, 由④必须承认 $A \in A \leftrightarrow A \notin A$ 为一矛盾。这说明①、②、③、④中至少要否定一条。20世纪初, 罗素(Russell)从否定①即否定 $x \in x$ 作为造集谓词而发展他的类型论, 策梅洛(Zermelo)和弗伦克尔(Fraenkel)基于否定②而构造 ZFC 集合论公理系统; 贝尔奈斯(Bernays)和哥德尔(Gödel)基于否定③而形成了 BG 集合论公理系统; 波茨娃尔(BoueBar)以否定④为起点发展他的多值逻辑。类型论、ZFC 和 BG 都能排除已知的逻辑数学悖论。然而不能令人满意的是对于悖论的排除都立足于概括原则的修改, 而且在排除悖论的同时过多地限制了概括原则的合理内容, 以致许多合理的数学内容由此而被抛弃了。因而应寻找一种修改概括原则的方案, 使之既能排除悖论又能最大限度地保留概括原则的合理内容。对此波茨娃尔提出保留概括原则, 改二值逻辑为多值逻辑, 希望由此而既能排除悖论, 又能保留概括原则。下面具体地评价有关这些方面的研究工作。

关于多值逻辑系统与概括原则的相容性问题, 中国莫绍缙首先迈出了关键性的一步。1954年, 他证明任一数学系统, 如果满足: ①概括原则成立, ② $p \rightarrow p$, ③ $(p \rightarrow)^{n+1} q$ 可得 $(p \rightarrow)^n q$, 则此系统必定包含悖论。并具体验证了卢卡希维奇(Lukasiewicz)无穷逻辑系统 \mathcal{L}_ω ($3 \leq n < \omega$) 加上概括原则之后, 就是这样一个个系统。这表明在经典数学范围内, 不修改概括原则, 而单独发展无穷的无穷逻辑系统, 则无法避免悖论。然而由于卢卡希维奇无穷逻辑系统 \mathcal{L}_ω 不满足上述条件③, 因而莫先生所给的方法, 不能判定无穷逻辑系统与概括原则是否相容。20世纪60年代, 这一问题的研究又取得了新的进展。先是斯科伦(Skolem), 接着张辰中(C. C. Chang)及芬斯特(Fenstad)各自用不同的方法证明了卢卡希维奇连续值逻辑系统 \mathcal{L}_c 与几种特殊类型的概括原则公式集 $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3$ 等等之间的相容性。但是 \mathcal{L}_c 配以 Σ_0 之后是否相容仍然没有作出明确答复。但应指出, 即使对此问题作出肯定的答复, 也还不能表明, 在概括原则之外, 再配以其它集合论公理后, 仍能与 \mathcal{L}_c 相容。张辰中就曾证明, 在概括原则公式集 Σ_2, Σ_3 之外, 再加上外延公理后, 就不再与 \mathcal{L}_c 相容。但要发展数学, 仅有概括原则而不上其它集合论公理是不可能的。1984年, 中国朱梧楨和肖冀安证明任一数学系统, 如果满足条件: ①概括原则成立, ② $p, p \rightarrow q \vdash q$, ③ $p \rightarrow p$, ④集合的无穷并是允许的, ⑤自然数系统被包含在内, 则此数学系统必定包含悖论。考虑到任一内涵足够丰富的数学系统对于上述条件②~⑤总应满足, 从而可得出结论: 既要完全保留概括原则, 又要排除悖论, 同时还要发展数学, 这在经典数学范围内是不能实现的, 即若对概括原则不作任何修改, 仅改变与之配套的二值逻辑而发展多值逻辑, 则不能排除悖论。从而使30年无大进展的难题终于获得彻底解决, 并且这表明朱教授已把莫先生的结果从有穷推广到无穷, 从卢卡希维奇一类逻辑系统推广到其它一切逻辑系统。

1984年以来, 朱梧楨和肖冀安长期合作研究最终创立了中介数学系统 MM (包括 ML 和 MS), 并在这一非经典的数学系统中彻底解决了这一遗留问题。 MM 既不依赖于经典的逻辑演算系统, 也不依赖于任何经典意义下的集合论系统。它是一种新型的、内涵丰富的、具有较强表达能力的非古典数学系统。它处处贯穿一条中介原则, 即承认有中介对象存在的反对对立面是存在的。对于 ML 而言, 这是一种直接引入对立否定词 \neg 和模糊否定词 \sim 的逻辑演算系统, 是一种有特色的三值系统。它包括中介逻辑的命题演算系统, 谓词演算系统和同异性演算系统。整个 ML 是为构造 MS 而直接准备的逻辑工具, 而 MS 是一种既能处理清晰谓词造集问题又能处理模糊谓词造集问题的公理集合论系统。在古典集合论中对于概括原则的使用必须

有一个前题,那就是一切可用以造集的谓词都必须是清晰的;另外,概括原则实际上包含两层含义,其一是清晰谓词必可造集,其二是所造出的集由且仅由造集谓词决定。ZFC、BG、类型论等都是集中修改第一层含义,即这样或那样地限制造集的任意性。MS中则正好相反,一方面引进模糊造集谓词,另一方面放弃一谓词唯一确定一集的观点。它引入了概集和恰集的概念,进而引入泛概括原则。MS中的泛概括原则全面修改了概括原则,但最终又在谓词与个体约束的情况下,全面保留了概括原则的内容。另外,在MS中已经证明,历史上种种逻辑数学悖论包括在ZFC中无需解释的多值逻辑悖论和无穷值悖论均可在MS中排除;在相容性问题上,凡是ZFC所取得的成效,在MS中均已实现。

概括原则与悖论的研究极大地推动了数学的发展。中介数学这一新兴的研究领域正处在发展和完善之中,有许多理论问题亟待进一步研究,如MS的相对相容性、中介模型论、中介证明论、中介模态逻辑、中介代数系统等。它的广泛应用尚处于探索阶段,有可能在人工智能、数据库、知识工程、模式识别、自动控制、专家系统等领域取得一系列应用成果。

参考文献

- 1 Moh Shaw—Kwoi. J. S. L., 1954, 19~37
- 2 Zhu Wujia, et al. Proc. 15th Intern Symp. MVL, 1985, 369
- 3 朱梧楦编著,几何基础与数学基础,辽宁教育出版社,1987, 206~268
- 4 朱梧楦等,数理化信息,1987,2:253~263
- 5 朱梧楦,肖奚安,中国科学(A辑),1988,2:113~123

(南京航空航天大学毛宇光博士、林钧海教授撰)

中介逻辑演算 mekium logical calculus (ML)

20世纪80年代构造和发展的一种非经典的逻辑演算系统,它以承认中介对象的存在和贯彻中介原则为实际背景和思想原则。ML包括中介命题演算MP及其扩张系统MP*,中介谓词逻辑演算MF及其扩张系统MF*,以及中介逻辑的同异性演算系统(即带等词的中介谓词逻辑)ME*等5个演算系统构成。由于中介原则仅指出存在着这样的反对对立谓词P和~P,有对象x使有~P(x),所以ML并不在一切场合排斥二值逻辑的使用,甚至在系统内仍然使用排中律,只是其具体内容不同于经典二值逻辑中之排中律而已,而且否定词~在ML中被定义为:

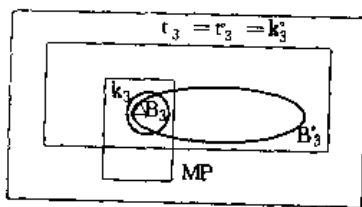
$$\sim P =_{df} P \rightarrow \sim P =_{df} \sim PV \sim P$$

ML中绝大多数推理规则都是非经典的,ML中还有一套清晰化算符 $\Delta, \sim, \&$,当人们无需处理模糊现象时,可用这套清晰化算符对ML予以清晰化,使之既可约化为经典的二值逻辑,又可严格证明任一经典二值逻辑演算系统均为ML子系统。

1985年以来,ML的相容性、完备性、可靠性等均已得到证明,ML的范式理论已被建立。又谭乃、肖奚安证明MP*的命题联结词含量是完全的,而肖奚安、朱梧楦又证明MP的命题联结词含量是不完全的,从而由MP到MP*的扩张具有实质性意义。肖奚安、朱梧楦又进一步研究了历史上各种三值逻辑系统的语言表达能力。在MP*为命题联结词含量完全之三值逻辑系统的基础上,进一步证明卢卡希维奇(Lukasiewicz, J.)三值系统L₃、波斯特(Post)三值系统P₃、斯勒配克(Slupecki)三值系统S₃和伍旧夫(Woodruff)三值系统W₃也都是命题联结词含量完全的三值逻辑,从而它们的语言表达能力都是等效的。如果它们同时又是可靠的和完备的,那么就可以证明它们都是互相等价的。但却由于它们在各自被构造的时候,不仅各有其不同的实际背景,而且对于如何引进第三值的具体含义和解释也各不相同,从而不仅使得这些系统可以采用各不相同的构造形式,同时在使用价值与范围、应用的方便与自然程度、发展的速度及深度也很不一致。此外,肖奚安、朱梧楦又进一步

研究各种命题联结词含量不完全的三值逻辑系统在语言表达能力方面的等效与不等效关系,证明MP和任何其它命题联结词含量不完全的三值逻辑系统的语言表达能力都不等效。如下图所示:

$$MP^* = L_3^* = P_3^* = S_3^* = W_3^*$$



图中凡在右上角标以*者,都是命题联结词含量完全的命题逻辑,其余为命题联结词含量不完全的三值命题逻辑逻辑,其中B₃、B₃*为波茨娃尔(Bochvar)三值系统,而K₃、K₃*为克林(Kleene)三值系统,此外应指出,ML为构造和发展中介公理集合论准备了逻辑工具。

近年来,有关中介逻辑演算的研究热点是:(1)对中介逻辑演算的各个演算系统(MP,MP*,MF,MF*,ME*)进行严格的语义研究,即研究这些系统的可靠性、完备性、一致性和可判定性等等。(2)中介逻辑演的范式理论。(3)中介命题逻辑中的命题联结词的独立性问题。(4)中介命题逻辑之命题联结词含量的完全性和不完全性。(5)中介逻辑的语言表达能力,特别是中介命题逻辑与历史上各种三值命题逻辑之语言表达能力的比较性研究。

目前正在起步或已获初步成果的研究课题有:(1)基于中介逻辑演算的逻辑程序设计语言的研制,这就是在中介逻辑演算的语形和语义研究的基础上,研制一种能实现含中介对象的逻辑程序设计语言,内容包括文本设计、语言实现中的算法设计和软件实现。(2)中介逻辑在非单调推理中的应用,即利用中介逻辑演算在语形研究上的优势,在语形上统一几种主要的非单调推理系统,并利用中介逻辑模拟非单调推理;这对进一步开发和研究非单调推理有意义。(3)中介直觉主义逻辑,即对中介推理的可构造性作深入研究,再由此而建立中介直觉主义逻辑系统。

参考文献

- 1 Wujia Zhu, Xian Xiao, Math Res & Exposition, 1988, 8: 327~617
- 2 Xiao Xi'an, Zhu Wujia, Journal of Nanjing University, 1988, 24: 583; 1989, 25: 165
- 3 Xiao Xi'an, Zhu Wujia, Mathematical Biquarterly, 1988, 5: 177
- 4 邹晶,科学通报,1988,33(13)
- 5 Zhu Wujia, Xiao Xi'an, Mathematical Biquarterly, 1989, 6: 52
- 6 Xiao Xi'an, Zhu Wujia, The Nineteenth International Symposium on Multiple-Valued of Logic, 1989
- 7 盛建国,应用数学,1989,4
- 8 Xiao Xi'an, Zhu Wujia, A Friendly Collection of Math, 1990, 1: 34~38
- 9 姚楠,肖奚安,朱梧楦,中国第4届多值逻辑学术讨论会论文集,1990
- 10 Zhu Wujia, Xiao Xi'an, Journal of Nanjing University, 1990, 26: 564; 1991, 27: 209

(南京航空航天大学朱梧楦教授撰)

中介公理集合论 ma system of medium axiomatic Set theory (MS)

一种以中介逻辑演算ML为逻辑推理工具的非经典公理集合论系统。1902年,罗素(Russell)的悖论震惊了哲

学界、逻辑学界和数学界。为了在集合中避免悖论的出现，人们曾提出过多种解决方案，其中由罗素当年提出的“限制性限制论”，最终导致了近代公理集合论的诞生和发展，1908年德国策墨罗(Zermelo)首先建立了他的集合论公理系统，后经弗朗克尔(Fraenkel)、冯·诺伊曼(von Neumann)和斯科林(Skolem)等的几次改进，终于形成了著名的ZFC公理集合论系统，在该近代公理集合论系统中，历史上曾经出现的悖论已被排除，且至今未被发现有新的悖论出现，但也未能在理论上证明该系统永不可能出现悖论。在近代公理集合论中，还有如GB等其它公理集合论系统。但从总体上来说，ZFC系统显得直观和自然，使用又较方便，因而被普遍采用。但应指出，各种近代公理集合论的发展，都不涉及数学研究对象的再扩充。亦即古典集合论和近代公理集合论所能接受的造集谓词，均被限制为康托意义下的精确谓词。

20世纪60年代，查德(Zadeh)创始的而被发展起来的模糊集理论，标志着数学的发展，已进入数学研究对象由精确性量性对象到模糊性量性对象的再扩充时代，查德的不朽功绩在于他第一个明确提出，必须用数学的手段去分析处理大量存在的模糊现象，同时又提供了一各相对合理可行的处理方法，进而建立和发展了当今意义下的模糊集理论。但在这理论中，没有解决模糊谓词的造集问题，因而也就未能在数学基础理论意义下实现数学研究对象由精确性到模糊性的再扩充，因而必须拓宽经典数学的逻辑基础和集合论基础，必须在构造系统时，贯彻一条相反于经典数学所坚持的无中介原则的中介原则，从而导致了中介公理集合论的建立和发展。

中介公理集合论以非经典的中介逻辑演算为配套的逻辑工具，并由21条非逻辑公理(模式)构成，其中以泛概括公理为核心，在中介公理集合论中，首先给出了有如模糊谓词 $\langle_{x_1, \dots, x_n} \text{Fuz } P, \text{清晰谓词 } \langle_{x_1, \dots, x_n} \text{dis } P, \text{概集 } A^{Com} P(x, t), \text{恰集 } A^{Ex} P(x, t) \text{ 等概念的形式定义，直至数学基础理论意义下解决了模糊谓词的造集问题，因而在数学基础理论意义下完成了数学研究对象由精确到模糊性的再扩充。其次，大家公认整个精确性经典数学可由ZFC之正则公理以外的9条公理推出，但这9条公理已被证明为MS中对谓词与个体在某种约束条件下的9条定理。而且严格证明了任何一个经典的二值逻辑系统都是ML的子系统。从而整个精确性经典数学可在MS中产生并奠基于MS。又各种近代公理集合论对悖论的排除都涉及概括原则的修改，但在排除悖论的同时又过多地限制了原则的合理内容，因而需要寻找一种如何修改概括原则的方案，使之既能排除悖论，又能最大限度地保留概括原则的合理内容。这一问题在经典数学中不仅没有解决，而且几乎是不可能经典数学范围内解决的。然而在ML和MS中，通过泛概括公理和泛概括定理证明“任何正规清晰谓词都存在着一个该谓词的恰集”，而MS意义下的一切正规清晰谓词又囊括了康托意义下的一切造集谓词。这表明在MS中已完全保留了康托意义下的概括原则。另一方面，对于历史上曾经出现的种种逻辑数学悖论，以及在二值系统中无需解释的多值逻辑悖论与无穷值悖论等，均在MS中得到了解释，从而也就解决了如何修改概括原则的遗留问题。此外，中介公理集合论也开辟了以非经典逻辑演算为配套逻辑工具的公理集合论研究方向。$

在中介公理集合论MS构造中，除了接受中介逻辑演算ML(MP, MP*, MF, MF*, ME*)的全部形式符号、定义符号和推理规则外，还要引入两个基本的常谓词：其一是二元常谓词 \in ，解释并读为“属于”，其二是一元常谓词 m ，解释并读为“小”，从而在MS中除了接受ML中关于合式公式(Wff)的所有归纳定义外，还要添加如下的定义。

如果 x 和 y 都是个体词，则 $x \in y$ 和 $m(x)$ 都是合式公式。

在MS中，规定以 $a, b, c, a_i, b_i, c_i, A, B, C, A_i, B_i, C_i, X, Y, Z, X_i, Y_i, Z_i, \alpha, \beta, \gamma, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \mu, \nu, \omega_i (i=0, 1, 2, \dots)$ 表示个体词。

MS是以ML为逻辑推理工具的，已被形式化了的公理集合论系统，它有一系列概念的形式定义及21条公理(模式)的形式化表达式。

A1 外延性公理 $a = b \leftrightarrow \forall x(x \in a \leftrightarrow x \in b)$

定义 1.1(子集) $a \subseteq b =_{df} \forall x(x \in a \rightarrow x \in b), x \notin y =_{df} \sim(x \in y), x \notin y =_{df} m(x \notin y), a \subseteq b =_{df} \sim(a \not\subseteq b), a \not\subseteq b =_{df} \exists x(x \in a \wedge x \notin b)$.

定义 1.2(真子集) $a \subset b =_{df} a \subseteq b \wedge (a \neq b \vee a \not\subseteq b)$.

A2 对偶公理 $\exists x \forall y(x \in c \leftrightarrow \neg b(x = a \vee x = b))$.

定义 1.3(对偶集) $x \in \{a, b\} =_{df} \neg b(x = a \vee x = b)$.

定义 1.4(单点集) $\{a\} =_{df} \{a, a\}$

定义 1.5(有序对) $\langle a, b \rangle =_{df} \{\{a\}, \{a, b\}\}$.

定义 1.6(单点序) $\langle a \rangle =_{df} aa$

定义 1.7(有序组) $\langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle =_{df} \langle \langle a_1, \dots, a_{n-1} \rangle, a_n \rangle, (n=2, 3, \dots)$

定义 1.8(模糊谓词) $\langle_{x_1, \dots, x_n} \text{fuz } P =_{df} \exists x_1, \dots, \exists x_n (\sim P(x_1, \dots, x_n; t_1, \dots, t_r))$

定义 1.9(清晰谓词) $\langle_{x_1, \dots, x_n} \text{dis } P =_{df} \sim \langle_{x_1, \dots, x_n} \text{fuz } P$

定义 1.10(清晰集) $\text{dis } a =_{df} \text{dis } x \in a$

定义 1.11(模糊集) $\text{fuz } a =_{df} \text{fuz } x \in a$

定义 2.1(恰集) $a^{Ex} P(x, t) =_{df} \forall x(x \in a \leftrightarrow p(x, t))$

定义 2.2(恰集简记) $a = \{x | p(x, t)\} =_{df} a^{Ex} P(x, t)$

A3 联集公理 $\exists s(b = \{x | \exists y(y \in a \wedge x \in y)\})$.

定义 2.3(联集) $\cup a =_{df} \{x | \exists y(y \in a \wedge x \in y)\}$.

定义 2.4(联) $a \cup b =_{df} \cup \{a, b\}$.

定义 2.5(多元集) $\{a_1, \dots, a_n\} =_{df} \{a_1, \dots, a_{n-1}\} \cup \{a_n\}, n=3, 4, \dots$

A4 交集公理 $\exists s(b = \{x | \forall y(y \in a \rightarrow x \in y)\})$.

定义 2.6(交集) $\cap a =_{df} \{x | \forall y(y \in a \rightarrow x \in y)\}$.

定义 2.7(交) $a \cap b =_{df} \{a, b\}$.

A5 外集公理 $\exists s(b = \{x | x \notin a\})$.

定义 2.8(外集) $a^- =_{df} \{x | x \notin a\}$.

A6 中介集公理 $\exists s(b = \{x | x \notin a\})$.

定义 2.9(中介集) $a^- =_{df} \{x | x \notin a\}$.

A7 清晰集公理 $\exists s(b = \{x | \neg b(x \in a)\})$.

定义 2.10(清晰集) $a^0 =_{df} \{x | \neg b(x \in a)\}$.

A8 卡氏积公理 $\exists c(c = \{x | \exists y \exists z(y \in a \wedge x \in b \wedge \neg b(x = \langle y, z \rangle))\})$.

定义 2.11(卡氏积) $a \times b =_{df} \{x | \exists y \exists z(y \in a \wedge x \in b \wedge \neg b(x = \langle y, z \rangle))\}$.

A9 真集公理 $\exists s(b = \{x | (x \subseteq a)\})$.

定义 2.12(幂集) $P_a =_{df} \{x | (x \subseteq a)\}$.

定义 2.13(幂清晰集) $F_a =_{df} (P_a)^0$

定义 3.1(概集) $a^{Com} P(x, t) =_{df} \forall x((p(x, t) \Rightarrow x \in a) \wedge (\neg p(x, t) \Rightarrow x \notin a))$.

定义 3.2(正规谓词) MS中有如下的形成规则：

- ①若 x, y 是项，则 $x \in y, x = y$ 是正规谓词。
- ②若 P, Q 是正规谓词，则 $P \rightarrow Q, \neg P, \sim P$ 都是正规谓词。
- ③若 $P(a_1, t_1, \dots, t_r)$ 是正规谓词，个体词 a 在其中出现， x 不在其中出现，以 x 替换 a 的所有出现而得 $P(x, t_1, \dots, t_r)$ ，则 $\forall x P(x, t_1, \dots, t_r)$ 和 $\exists x P(x, t_1, \dots, t_r)$ 都是正规谓词。

MS中之谓词是正规谓词，当且仅当它能由上述形成规则①、②、③生成。如果 P 是MS中的正规谓词，则记为NorP。

A10 泛概括公理 对任何NorP(x_1, \dots, x_n, t)而言只要其

中不包含 a 的自由出现,则

$$\exists a (a \stackrel{Com}{x} \exists x_1 \dots \exists x_n (\Delta(x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle) \wedge P(x_1, \dots, x_n, t)).$$

定义 3.3(全集) $v =_{df} \{x | x = x\}.$

定义 3.4(空集) $\Phi =_{df} V^-.$

定义 3.5(下概集) $a \stackrel{Lcom}{x} P(x) =_{df} \forall x ((x \in a \Rightarrow p(x)) \wedge (x \notin a \Rightarrow \neg p(x))).$

定义 3.6(单值谓词) $\bigcup_{\langle x_1, x_2 \rangle} \psi(x_1, x_2, t) = d_5.$

$$\forall x_1 \forall x_2 \forall x_3 (\psi(x_1, x_2, t) \wedge \psi(x_1, x_3, t) \Rightarrow x_2 = x_3).$$

A11 替换公理 对任何 $\bigcup_{\langle x_1, x_2 \rangle} \psi(x_1, x_2, t)$, 只要其中没有 b 出现, 则有

$$\forall a [m(a) \Rightarrow \exists b (m(b) \wedge b \stackrel{m}{=} \exists x (x \in a \wedge \psi(x, y)))].$$

定义 3.7(替换集) $repa =_{df} \{y | \exists x (x \in a \wedge \psi(x, y))\}.$

定义 3.8(后继) $a^+ =_{df} a \cup \{a\}.$

定义 3.9(后继集) $bSuca =_{df} a \subseteq b \wedge \Delta \forall x (x \in b \rightarrow x^+ \in b)$

A12 后继集公理 $\forall a (m(a) \Rightarrow \exists b (m(b) \wedge bSuca)).$

定义 3.10(么元素集) $I(a) =_{df} \exists x (a = \{x\}).$

A13 选择公理 $m(a) \wedge \forall x \forall y ((x \in a \wedge y \in a \wedge x \neq y) \Rightarrow x \cap y = \Phi) \Rightarrow \exists b (m(b) \wedge \Delta \forall x (x \in a \wedge x \neq \Phi \Rightarrow I(b \cap x))).$

A14 清晰公理 $dis m(x).$

定义 4.1(巨集) $Gi(a) =_{df} \neg m(a).$

A15 巨集公理 $Gi(a) \vee Gi(a^-) \vee Gi(a^+).$

A16 小清晰集公理 $m(a) \Leftrightarrow m(a^0).$

A17 单点小集公理 $I(a) \Rightarrow m(a).$

A18 小联集公理 $m(a) \wedge \forall x (x \in a \Rightarrow m(x)) \Rightarrow m(\bigcup a).$

A19 小交集公理 $m(a) \wedge \exists x (x \in a \wedge m(x)) \Rightarrow m(\bigcap a).$

A20 后继恰集公理 $m(a) \Rightarrow \exists b [m(b) \wedge b \stackrel{m}{=} \forall y (ySuca \rightarrow x \in y)].$

定义 4.2(后继恰集) $a'' =_{df} \{x | m(a) \wedge \forall y (ySuca \rightarrow x \in y)\}.$

A21 小幂集公理 $m(a) \wedge m(a^-) \Rightarrow m(Pa).$

定义 4.3 (清晰冥集) $Pa =_{df} \{x | m(a) \wedge x \subseteq a^0 \wedge dis x\}.$

近年来,有关中介公理集合论的研究内容主要是:(1)精确谓词与模糊谓词的划分与定义。(2)中介公理集合论中的各种集合运算。(3)中介公理集合论系统与近代公理集合论系统之间的关系。(4)种种逻辑数学悖论在中介公理集合论中的解释方法。

当前,对于进一步发展中介公理集合论而研究的课题是:(1)建立中介意义下的基数、序数理论。(2)探讨中介公理集合论与近代公理集合论之间的相对相容性。(3)研究连续统假设在中介公理集合论中的表现形式与结果。(4)开发中介公理集合论的应用前景,例如,目前正在研制的中介集语言就是其中之一。

参考文献

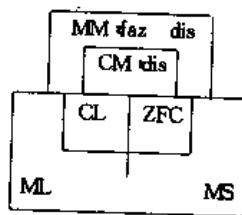
- 肖奚安等. 自然杂志, 1984, 7, 723
- 肖奚安等. 自然杂志, 1986, 9, 554, 632, 714, 794, 873, 948
- 肖奚安等. 自然杂志, 1987, 10(3)
- 朱梧槎. 几何基础与数学基础. 沈阳, 辽宁教育出版社, 1987
- Zhu Wujia, Xiao Xi'an, J Math. Res & Exposition, 1988, 8: 139
- 朱梧槎, 肖奚安. 中国科学(A辑), 1988, 2

- Xiao Xi'an, Zhu Wujia. SCIENTIA SINICA (Science in China), Series A, 1988, 30(11)
- Zhu Jianying, Xiao Xi'an, Zhu Wujia. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 36
- Zhu Wujia, Xiao Xi'an. Methodology and Philosophy of Science, 1991, 1
- 肖奚安等. 集合论导引, 南京: 南京大学出版社, 1991 (南京航空航天大学朱梧槎教授撰)

中介逻辑 medium logic 狭义地说,中介逻辑仅指中介

逻辑演算系统 ML , 广义地说,中介逻辑除了它的基础部分,即演算系统 ML 之外,还应包括中介公理集合论系统 MS , 以及近几年发展起来的中介代数、中介模态逻辑、中介逻辑的根岑(Gentzen)系统、中介模型论、中介逻辑定理的机器证明理论与实现、中介直觉主义逻辑以及中介逻辑之范式理论等等。

广义中介逻辑简记为 $MM(ML$ 和 $MS)$ 。它是朱梧槎、肖奚安于 20 世纪 80 年代建立起来的一种非经典逻辑演算系统与公理集合论系统。建立 ML 和 MS 的思想原则是无条件贯彻“中介原则”。在经典的二值逻辑和精确性经典数学中,在构造任何逻辑系统或数学系统时,都必须无形中贯彻一条相反于“中介原则”的原则,即在论域的适当限制下,确认任何反对对立谓词 P 和 $\neg P$, 都没有中介对象存在,即不存在任何对象 x , 能使 x 部份地具有性质 P , 同时又部份地具有性质 $\neg P$ 。这就是所谓“非男即女”、“非真即假”等等。因而该原则叫做“无中介原则”。但在事实上,被排斥于经典数学之外的中介对象或模糊现象客观地广为存在,只是精确性经典数学不予承认和研究而已。60 年代,扎德(Zadeh)明确提出要用数学的手段去处理和模糊现象,并提出一套相对合理的处理模糊现象的方法,即模糊数学。模糊数学的诞生标志着数学的发展进入数学研究对象由精确性到模糊性的再扩充时代。然而现行的模糊数学没有解决模糊谓词的造集问题,因而没有在数学基础理论意义下实现数学研究对象由精确性到模糊性的再扩充,在 ML 和 MS 中,不仅精确谓词可以造集,同时完全解决了模糊谓词的造集问题,并且严格证明任何一个经典的二值逻辑系统都是 ML 的子系统,而且近代公理集合论系统 ZFC 中除正则公理外,其余用以推出整个经典数学的 9 条集合论公理,均已严格地被证明为 MS 中的 9 条定理,这表明整个经典数学也可产生于 ML 和 MS 并奠基于 ML 和 MS 。从而 ML 和 MS 就为精确性经典数学和处理模糊现象的不确定性数学(未来的不确定性数学将有别于当今意义下的模糊数学)提供了一个共同的理论基础,并在数学基础理论意义下完成了数学研究对象由精确性到模糊性的再扩充。如下图所示:



此外 dis 表示清晰现象,而 fuz 为模糊现象的简记。CL 表示经典二值逻辑,CM 表示精确性经典数学系统,其余记号均已在上文申明。

中介逻辑今后研究的热点为:(1)中介逻辑演算系统的语义研究。(2)中介模态逻辑。(3)中介逻辑的模型论性质。(4)中介逻辑的根岑(Gentzen)系统,即中介证明论系统。(5)中介代数。

目前正在起步或已取得初步成果的研究内容有:(1)中介逻辑定理机器证明的理论与实现。(2)基于中介逻辑推理的程序设计语言。(3)基于中介公理集合论的程序设计语言。

参考文献

- 1 Zhu Wujia, Xiao Xi'an. Math. Res & Exposition, 1988, 8: 327, 457, 617
- 2 Xiao Xi'an, Zhu Wujia. Journal of Nanjing University, 1988, 24: 583. 1989, 25: 165
- 3 Xiao Xi'an, Zhu Wujia. Mathematical Biquarterly, 1988, 5: 177
- 4 Xiao Xi'an, Zhu Wujia. SCIENTIA SINICA (Science in China), 1988, 31(11)
- 5 邹晶. 科学通报, 1988, 33(13)
- 6 Zhu Wujia, Xiao Xi'an. Mathematical Biquarterly, 1989, 6: 52
- 7 Pan Yin, Wu Wangming. Proc 19th Intern Symp Multiple-Valued Logic, 1989
- 8 Zhou Jing, Qui Weide. Proc 19th Intern Symp Multiple-Valued Logic, 1989
- 9 Qian Lei. Proc 19th Intern Symp Multiple-Valued Logic, 1989
- 10 Zhu Wujia, Xiao Xi'an. Journal of Nanjing University, 1990, 26: 564. 1991, 27: 209

(南京航空航天大学朱梧楦教授撰)

实集和复集 real set and complex set 自康托(G. Cantor)

在1873年创立朴素集合论后,人们对数学的认识便进入一个新的境界。但由于1901年罗素(B. Russell)在朴素集合论中发现了悖论,使人们认识到康托给集合下的定义是有缺陷的。为了消除悖论,便促成了策墨罗(E. Zermelo)和弗伦克尔(A. A. Fraenkel)为代表创立的ZF公理系统的诞生。

然而ZF公理系统是不完善的,象连续统假设这样深刻的问题已被证明在该系统内是不可判定的。这是哥德尔(K. Gödel)于1938年和柯恩(P. J. Cohen)于1963年工作的结果。虽然也还有其它一些公理系统出现,但也未获得令人满意的结果,这就促使人们在某种意义上不得不“从头开始”。

由于给集合下定义会带来麻烦,因此集合被认为是定义的概念。它通常被描述成:“一些对象的全体”(以下简称“P”)或类似的说法。而具体解释这些对象时,又要求称作元素的对象要有“确定”、“互异”两个特性。这与P已有了相当的差别,事实上仅由P所得到的集比我们通常所说的集要广泛得多。但也要注意,P中的“一些”是不能用“全部”来替换的。

既然集合是定义的概念,如何较好地描述这个概念仍然是值得考虑的。即使是这样,集合论在早期的研究中亦产生一些相当重要的结果。又因这些结果大都涉及到数学的“根基”,因而“数学基础”的研究也随之蓬勃开展起来。

那么,仅由P来讨论集合会得到一些什么结果呢?首先应提到的就是扎德(L. A. Zadeh)在1965年给出的F集。F集问世,被认为是“确定性”这条限制的破缺,并由此拓宽了经典集合论研究的范围。然而实际上,F集的重大意义是提示了非整集的存在。

由于P中并未说明元素不许重复,因此若去掉互异性的限制,我们就再次地扩大了集合的范围。因为相同的元素(比如5个3)确实可构成一个集合。这实际上是将集合中每个不同的元素皆以一个数值λ_i——称为“位置值”来标明。将λ_i限定在[0,1]中讨论时,便构成F集理论。λ_i仅取(0,1)中的值时即为经典集,即经典集中的元素被安排在实轴的0,1两个点上且与论域U有关。一般λ_i可在高斯平面上找到其对应点。当某集的λ_i仅取实数时,称某集为实集;当某集的λ_i取复数时,则称某集为复集。尤其是当某A中的元素u_i位置值λ_i为自然数m时,即表明A中有m个同样的元素u_i,而λ_i的值为-m时,即表明若在A中加入m个u_i后,A中u_i的“个数”将变为零。从上面的论述中可以看到:人们对于“两个特性”的认识,是经过认可一破

缺一高一层次的认可的曲折过程的。

为了论述方便,下面我们简略地给出复集的定义、运算和一些有关方面的内容。

定义1 所谓给定了论域U={u_i|t∈T}上的一个复集A,是指对于∀u_i∈U都指定了一个复数λ(u_i)∈C,叫做u_i对A的位置值。映射λ(·):U→C,u_i→λ(u_i)叫做A的位置函数,其中C为复数集。特别是

- λ(·):U→R,则称A为实集;
- λ(·):U→[0,1],则称A为F集;
- λ(·):U→{0,1},则称A为经典集;
- λ(·):U→{0},则称A为零集,记作O_U。

这里O_U是指对U而言的零集,一般若U≠V,则O_U≠O_V,当考虑某问题不会引起误解时可省去下标。

至少有一个u_i,使λ(·):u_i→λ(u_i)且λ(u_i)∈C-R,则称A为虚集。

由于复集由其论域和位置函数所刻画,所以复集的表法有下面几种:

$$A = \sum_{i \in T} \lambda(u_i) u_i = \sum_{i \in T} (\lambda_i) u_i = \sum_{i \in T} \lambda_i u_i,$$

$$A = \sum_{u \in U} (\lambda(u)) u = \sum_{u \in U} (\lambda) u = \sum_{u \in U} \lambda u.$$

可视不同场合而选用最简记法,并且当λ(u_i)=1时可省略λ(u_i)。为简明起见,常使用第一行中的记法。其中“∑”表A的所有元素连同位置函数的一个总括。特别指标集T为可数集时,

$$A = \sum_{i=1}^{+\infty} \lambda_i u_i = \lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2 + \dots$$

其中“+”即表A的元素连同位置值的一个列举。

在研究某具体问题,对于给定的T₀,若∀t∈T₀,有λ_t=1,则A=∑_{t∈T₀} u_t即可作为该问题的论域U₀。因此若T₀≠T₁,常有U₀≠U₁,这在复集问题的讨论中须特别注意。

复集A中的元素可通过其位置值在高斯平面上表示出来。U上全体复集所构成的集类记作C(U),类似有R(U)等等。

定义2 若n元函数F(λ⁽¹⁾, λ⁽²⁾, ..., λ⁽ⁿ⁾)有意义,并设A^(j) = ∑_{i∈T} λ^(j) u_i, (j=1, 2, ..., n), 则F(A⁽¹⁾, A⁽²⁾, ..., A⁽ⁿ⁾) = ∑_{i∈T} F(λ⁽¹⁾, λ⁽²⁾, ..., λ⁽ⁿ⁾) u_i, 尤其当n=2时,有F(A, B) = ∑_{i∈T} F(λ_i, μ_i) u_i. 其中A = ∑_{i∈T} λ_i u_i, B = ∑_{i∈T} μ_i u_i.

由定义2不难证明:

定理1 若f(λ_i)有意义,则f(A) = ∑_{i∈T} f(λ_i) u_i.

推论 若f(λ_i)=0,则f(A)=0.

由定义2及定理1,可得一系列运算法则。这里从略,在这里再一次强调论域U的重要性。作为一个具体的例子,可以在复集中证明,欧拉公式亦成立:

$$\cos A + i \sin A = e^{iA}.$$

定义3 设函数F的变元为集,则称F为集函数。当X^(j)∈C(U)时,称F(X⁽¹⁾, X⁽²⁾, ..., X⁽ⁿ⁾)=0为n元复集函数(j=1, 2, ..., n)。当某集为变元时,可称该集为变量集,否则称常量集。特别,当X∈C(U)和X∈R(U)时,分别称Y=f(X)为一元复集显函数和一元实集显函数。显然,一个集函数由对应关系和论域所确定。

定义4 含有未知集的等式叫做集方程,简称方程。解出未知集的过程叫解集方程。若某集替换方程中的未知集后可使方程成为恒等式,则该集就称为集方程的集解,简称为解。

解方程的方法与解代数方程或微分方程(若集方程中含有关于未知集的微分运算的话)的解法类似,所不同的只是解方程时要先求出论域U。特别有下面的定理2:

定理2 若一元n次集方程有解,则解的个数为n^m,其中m=cardU.

对于实集,可以考虑包含关系.用包含符号: \subseteq (含于), \subset (真含于)等联结的式子称实集包含式.关于实集包含式有下面的定理3:

定理3 设 $A^{(j)} = \sum_{i \in T} \lambda_i^{(j)} u_i$ ($j=1, 2, \dots, n$), 则 $f(A_1, A_2, \dots, A_n) \subseteq g(A_1, A_2, \dots, A_n)$ 的充要条件是 $f(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \leq g(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$. 由该定理可以获得一批有价值的实集包含式.

定义5 设 $A = \sum_{i \in T} \lambda_i u_i$ ($\lambda_i \in C$), 若 $\sum_{i \in T} \lambda_i$ 有意义, 则称 $\sum_{i \in T} \lambda_i$ 为 A 的复势并简称为势, 仍记作 $\text{card} A$. 显然该定义包含了实集势的定义.

由定理1知 $|A|$ 为实集, 因而有 $\text{card}|A| = \sum_{i \in T} |\lambda_i|$ (这里设等式右端有意义), 我们称 $\text{card}|A|$ 为复集 A 的模势. 另外在应用中有时还要考虑复势模: $\text{card} A| = \sum_{i \in T} |\lambda_i|$. 复势、模势和复势模在复集理论中各有不同的作用.

以上只论述了实集和复集的几个基本方面, 实集和复集涉及的范围比较广泛, 本文不可能都一一列举到. 由于该理论的研究时间不长, 预计在今后若干年内将有较大的进展, 特别是其逻辑基础与应用将成为研究的热点.

参考文献

- 1 Hausdorff F 著, 集论. 张义良, 顾家驹译. 北京: 科学出版社, 1960
- 2 Andrzej Mostowski 著, 数学基础研究 30 年. 郭世铭等译. 武汉: 华中工学院出版社, 1983
- 3 Zadeh L A 著, 模糊集合、语言变量及模糊逻辑. 陈国权译. 北京: 科学出版社, 1982
- 4 朱栢枫编著, 几何基础与数学基础. 沈阳: 辽宁教育出版社, 1987
- 5 孙桂秋. 湖南科技大学学报, 1987, 2: 17~28
- 6 张锦文, 王雪生. 连续系统假设. 沈阳: 辽宁教育出版社, 1988

(湖南中医学院分院孙桂秋撰)

广义凸集 generalised convex sets 设 X 是实线性空间, 对 $x, y \in X$, 记 $[x, y] = \{x | x = \lambda x + (1-\lambda)y, \lambda \in [0, 1]\}$, 称 $S \subset X$ 是凸集, 如对 $\forall x, y \in S$ 有 $[x, y] \subset S$. 虽然凸集的某些结论可以追溯到 18 世纪中叶, 但近代凸集理论则是 20 世纪初由卡拉什多利(C. Carathedory), 闵科夫斯基(H. Minkowski)等人开创的, 他们对集合的凸包、凸集的支撑、分离等问题进行了研究, 为凸集理论的建立奠定了基础. 以后由于赫里(E. Helly), 克里(V. L. klee), 哥德曼(J. Goldman)等一大批数学家的努力, 到 20 世纪 50 年代凸集理论已基本形成. 由于凸集理论在纯数学、应用数学、经济学等学科中得到广泛应用, 所以它一直为人们所注目. 同时人们也注意到实际问题中的许多集合不具备凸性, 而只有某种类凸性, 这就促使一些学者针对所研究问题的需要, 提出了许多减弱凸性要求的广义凸集概念.

1928 年, H. Tietze 对 R^n 中的集合 S 提出了一类局部凸性概念, 得出了用较弱的局部凸性反映整体凸性的狄茨定理, 克里(1951)将其推广到一般的拓扑线性空间 X , 对 $S \subset X, \bar{x} \in S$; 称 S 在 \bar{x} 局部凸, 如对 $\forall x \in S$, 有 $[\bar{x}, x] \subset S$; 称 S 在 \bar{x} 强局部凸, 如存在 \bar{x} 的邻域 N , 使 $S \cap N$ 是凸集; 称 S 在 \bar{x} 弱局部凸, 如存在 \bar{x} 的邻域 N , 对 $\forall x, y \in S \cap N$, 有 $[x, y] \subset S$, 并得出了狄茨定理: 一个闭连通集 S 是凸的, 当且仅当 S 是弱局部凸的. 一个连通的弱局部凸集必是折线连通的. 以后克依(D. C. Kay 1971 和 1982) 又对狄茨定理作了进一步推广. 另外依温(G. Ewing, 1977) 又将 S 在 \bar{x} 局部凸推广为 S 在 \bar{x} 局部星状, 如对 $\forall x \in S, \exists \alpha > 0$ 使 $(1-\lambda)\bar{x} + \lambda x \in S, \forall \lambda \in (0, \alpha)$. 这个概念在不可微优化问题的讨论中常用到.

1946 年, M. A. Krasnosel'skii 在考虑公共可见点问题时,

称 $S \subset R^n$ 是星形的, 如 $\exists u \in S$ 使 $[x, u] \subset S, \forall x \in S$, 借用这概念得出了一个赫里型的艺术画廊定理: 若 S 是 R^n 中至少含有 $n+1$ 个点的紧集, 又对 S 的每 $n+1$ 个点 x_0, x_1, \dots, x_n 都存在一个可见点 y (即 $[x_i, y] \subset S, i=0, 1, \dots, n$), 则集合 S 是星形的.

1974 年, P. L. Yu 在讨论多目标最优化问题的非控制时引进了一种锥凸性概念, 他称 $S \subset X$ 关于 $d \in X$ 是方向凸的, 如对 $\forall x, y \in S, \lambda \in [0, 1], \exists \mu \geq 0$ 使 $\lambda x + (1-\lambda)y + \mu d \in S$; 对 X 中的凸锥 C , 称 S 是 C -方向凸的, 如对 $\forall x, y \in S, \lambda \in [0, 1], \exists z \in C$ 使 $\lambda x + (1-\lambda)y + z \in S$; 称 S 是 C -凸的, 如 $S+C$ 是凸集. 以后在一些多目标最优化方面的文献中又出现了一些更弱的锥凸性概念, 如赵(K. L. Chew, 1984)称 S 是 C -凸的, 如 $\text{co}S \subset S+C$, 其中 $\text{co}S$ 是 S 的凸包. 布勒姆(A. Bressan, 1987)称 S 是 C -凸的, 如 $x, y \in S, x-y \in C, \text{蕴涵} [x, y] \subset S$. 梅家骝(1988)称 S 是弱 C -凸的, 如存在集合 A 使 $O \in A \subset C$, 且 $S+A$ 是凸集.

1976 年, V. G. Boltyanskii 提出了一种 H -凸性概念, 1981 年索坦(V. P. soltan)将其扩充为: 设 H 是 R^n 的单位球面上的一个子集, 称 $S \subset R^n$ 是 H -凸的, 如果它是一族外法线属于 H 的开半空间的交. 他对这种 H -凸集的一些一般的性质进行了讨论.

1979 年, J. Szczepaniak, 设 $0 < S \leq 1$, 称集合 $A \subset X$ 是 S -凸的, 如对 $\forall x, y \in A, a, b \geq 0, a^S + b^S = 1$, 有 $ax + by \in A$. 相应地定义 $f: A \rightarrow R$ 为 S -凸函数, 如 $f(ax + by) \leq a^S f(x) + b^S f(y)$, 每当 $x, y \in A, a, b \geq 0, a^S + b^S = 1$. 他将凸函数不等式的一些性质推广到 S -凸函数.

1983 年, J. P. Vial 设 $r > 0, B(x, r)$ 是赋范线性空间 X 中以 x 为中心, r 为半径的闭球, $R_x = \{B(x, r) | x \in X\}$, 对 $x, y \in X, \|x-y\| \leq 2r$, 记 $D_r(x, y) = \bigcap \{B | B \in R_x, x, y \in B\}$, 称 $S \subset X$ 关于 r 弱凸, 如对 $\forall x, y \in S, \|x-y\| < 2r$ 有 $D_r(x, y) \cap S \neq \emptyset$; 称 S 弱凸, 如 $\exists r > 0$, 使 S 关于 r 弱凸. 称 S 在 $\bar{x} \in S$ 局部弱凸, 如 $\exists r > 0, \epsilon > 0$ 使 $S \cap B(\bar{x}, \epsilon)$ 关于 r 弱凸. 他还引进了强凸集的概念, 讨论了强(弱)凸集的性质, 其中特别是引进了支撑球的概念, 它是支撑超平面概念的推广.

1984 年, I. Marugsciao 引进一种弧式凸性, 称 $S \subset R^n$ 是 m -多角形凸的, 如对 $\forall x, y \in S, \exists \varphi: [0, 1] \rightarrow S$ 使 $\varphi(0) = x, \varphi(1) = y$ 且存在 $0 = t_1 < \dots < t_m = 1$ 使 $\varphi(t) = \frac{t_k - t}{t_k - t_{k-1}} \varphi(t_{k-1}) + \frac{t - t_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} \varphi(t_k), t \in [t_{k-1}, t_k]$. 相应地还定义了 m -多角形凸(拟凸, 伪凸)函数, 讨论了这类广义弧式凸函数的极值性质. 梅家骝(1981)在讨论多目标非控制点的性质时, 曾引进一类锥弧式凸性, 对 $S, C \subset R^n$, 称 S 是弧式 C -凸(严格凸), 如对 $\forall x, y \in S$, 存在 $\varphi: [0, 1] \rightarrow S$, 使 $\varphi(0) = x, \varphi(1) = y$, 对 $\forall t \in [0, 1]$ 有 $a = (1-t)x + ty - \varphi(t) \in C$ (且 $-a \in C$). 称 S 弧式 C -拟凸, 如对 $\forall x, y \in S$, 存在 $\varphi: [0, 1] \rightarrow S, \varphi(0) = x, \varphi(1) = y$ 且对 $\forall t \in [0, 1]$ 有 $x - \varphi(t) \in C$ 或 $y - \varphi(t) \in C$. 讨论了锥弧式凸性的基本性质.

1985 年, A. Aleman 称 $S \subset X$ 弱凸, 如对 $\forall x, y \in S, \exists p \in (0, 1)$ 使 $(1-p)x + py \in S$, 若有某个 p 不依赖 x, y , 则称 S 是 p -凸的, 特别如 $p = \frac{1}{2}$, 称为中点凸的. 1987 年狄可夫(M. P. DymkoV)定义另一种 p -凸性, 设 $a_i \in R^n, i=1, \dots, m$. 称 $S \subset R^n$ 是 p -凸的, 如对 $\forall x, y \in S, \lambda \in [0, 1], \exists z \in S$ 使 $a^T z = \lambda a^T x + (1-\lambda)a^T y, i=1, \dots, r, (a_i^T)^p \leq \lambda(a_i^T)^p + (1-\lambda)(a_i^T)^p, i=r+1, \dots, m$, 其中 p 是使上述关系式成立的最小自然数, 文中讨论了这类 p -凸集的极小点的必要和充分条件.

1988 年梅家骝从区域规划、场地设置的角度出发, 提出了一类广义凸集概念, 称 $S \subset R^n$ 是伪(严格伪)凸集, 如存在凸集 A , 闭集(紧集) B , 使 $S = A \setminus B$, 若其中 A 是凸锥, 又称 S 是伪(严格伪)凸锥. 称 S 拟凸, 如对 $\forall x, y \in S, (x, y) \cap S$ 在 (x, y) 中稠密; 称 S 弱拟凸, 如对 $\forall x, y \in S, (x, y) \cap S \neq \emptyset$; 称 S 强拟凸, 如对 $\forall x, y \in S, (x, y)$ 中最多有有限个点不属于 S . 称 S 为拟锥.

若对 $\forall x \in S, \{\lambda x | \lambda \geq 0\} \cap S$ 在 $\{\lambda x | \lambda \geq 0\}$ 中稠密, 称 S 为拟凸锥, 如 S 既是拟锥又是拟凸集. 系统地讨论了这类广义凸集(锥)的运算性质、射影定理、支撑定理、分离定理、相对内部的特征. 1989 年又讨论了这类广义凸集的支撑函数、退化锥、障碍锥的性质. 1990 年考虑了这类广义凸集的九种切锥的基本性质以及各种切锥之间的关系. 1991 年考虑了伪凸集的 Pareto 有效极点的存在性. 1989 年郭元明等将这类广义凸集推广到赋范线性空间 X , 考虑了弱拟凸集 $G \subset X$ 对 $x \in X$ 的最佳逼近和 G 对有界集 $F \subset X$ 的联合最佳逼近的唯一性, 说明在严格凸赋范线性空间中的弱拟凸集均为半一切比雪夫集合. 1992 年郭元明又将前面所得结果应用到 $L_p(T, m)$ 空间, 得到了 $L_1(T, m)$ 空间中最佳逼近的特征及唯一性, $L_p(T, m) (1 < p \leq 2)$ 空间中最佳逼近的强唯一性. 徐士英(1990)说明了伪凸集、拟凸集与太阳集之间的关系.

参考文献

- 1 Szczepaniak J. Funct Approx Comment Math, 1979, 7: 3~7
- 2 Soitan V P. Dokl Akad Nauk SSSR, 1981, 258: 1095~1062
- 3 Kay D C. Discrete geometry and convexity. New York, 1982, 170~191
- 4 Vial J P. Math Oper Res 1983, 8: 231~259
- 5 Marugsciac I. Polygonal convex functions, Ma thematicca (cluj), 1984, 26: 53~64
- 6 Aleman A. Anal Numer Théor Approx, 1985, 14: 1~6
- 7 Bressan A. J Math Anal Appl, 1987, 1: 234~246
- 8 Dymkov M P. Vestsi Akad Navuk BSSR Ser Fiz - Mat Navuk, 1987, 125: 20~25
- 9 梅家骧. 系统科学与数学, 1988, 8: 97~106
- 10 郭元明. 系统科学与数学, 1992, 12: 30~34

(南昌大学梅家骧教授撰; 李宗元审)

切锥 tangent cones 设 X 是一个 Banach 空间, $S \subset X, x_0 \in S, S$ 在 x_0 点的切锥 $T(S, x_0)$ 是对集合 S 在 x_0 点附近的一类局部锥逼近. 这类锥逼近是近代凸分析、非光滑分析、非线性分析中的一个重要论题. 它在最优化理论中起着关键性作用, 在最优化控制论、变分不等式、微分包含、收敛性理论中也得到广泛应用.

早在 1930 年波利根德(G. Bouligand)就提出了第一个切锥概念, 他定义 S 在 x_0 点的伴随锥为 $T_B(S, x_0) = \{y \in X | \liminf_{t \rightarrow +0} t^{-1} d_t(x_0 + ty) = 0\}$, 其中距离函数 $d_t(x_0 + ty) = \inf\{\|x_0 + ty - x\| | x \in S\}$. 它是一个闭锥, 且有 $T_B(S, x_0) = \{y \in X | \exists \mu_k \rightarrow +0, \exists d_k \rightarrow y \text{ 使 } x_0 + \mu_k d_k \in S\} = \{y | \exists \lambda_k > 0, \exists x_k \in S, x_k \rightarrow x_0, \text{ 使 } \lambda_k(x_k - x_0) \rightarrow y\} = \{y | \text{对原点的任意一个邻域 } V, \forall r > 0, \exists \mu \in (0, r), \exists u \in V \text{ 使 } x_0 + \mu(y + u) \in S\} = \limsup_{t \rightarrow +0} t^{-1} (S - x_0) = \bigcup_{\epsilon > 0} \bigcap_{\delta > 0} \bigcup_{0 < h < \alpha} [\frac{1}{h} (S - x_0) + \epsilon B]$, 其中 B 是 X 中的单位闭球, 集值映射的极限是 Kuratovskii 意义下的极限. 它们是以以后形成各种其它切锥概念的基础.

切锥概念提出后, 并未引起足够重视, 直到 1965 年杜波夫斯基(A. D. Dubovickii)和米留金(A. A. Miliutin)在考虑约束极值问题时又提出两个新的切锥概念 $T_D(S, x_0) = \{y \in X | \lim_{t \rightarrow +0} t^{-1} d_t(x_0 + ty) = 0\} = \{y | \text{对 } \forall \mu_k \rightarrow +0, \exists d_k \rightarrow y \text{ 使 } x_0 + \mu_k d_k \in S, K \text{ 充分大时}\} = \liminf_{t \rightarrow +0} t^{-1} (S - x_0)$; $T_M(S, x_0) = \{y \in X | \text{存在原点邻域 } V, \exists r > 0, \text{对 } \forall \mu \in (0, r), \forall u \in V \text{ 有 } x_0 + \mu(y + u) \in S\} = \{y | \text{对 } \forall \mu_k \rightarrow +0, \forall d_k \rightarrow y \text{ 有 } x_0 + \mu_k d_k \in S, K \text{ 充分大时}\}$, 其中 $T_D(S, x_0)$ 是闭锥, $T_M(S, x_0)$ 又称为内切锥, 是开锥. 随后阿巴迪(J. Abadie, 1967)、古格勒德(M. Guignade, 1969)又利用波利根德切锥定义非线性规划的约束规格, 导出了最优解的 $K-T$ 必要性条件. 1970 年洛克菲勒(R. T. Rockafellar)又

发现凸函数 $f: X \rightarrow R$ 在 x 的次微分 $\partial f(x) = \{p \in X^* | \langle p, y \rangle \leq f'_+(x, y), \forall y \in X\} = \{p \in X^* | (p, -1) \in N_B(\text{epif}, (x, f(x)))\}$, 其中 epif 是 f 的上图, $f'_+(x, y)$ 是 f 在 x 沿方向 y 的右方向导数, 正则锥 $N_B(\text{epif}, (x, f(x)))$ 是切锥 $T_B(\text{epif}, (x, f(x)))$ 的负极锥. 由于切锥在最优化及凸分析中获得这样重要的应用, 切锥才开始为人们关注.

1975 年克拉克(F. H. Clarke)也提出了一种切锥 $T_C(S, x_0) = \{y \in X | \limsup_{t \rightarrow +0, x \rightarrow x_0} t^{-1} d_t(x + ty) = 0\} = \{y \in X | \text{对 } \forall \mu_k \rightarrow +0, \forall x_k \rightarrow x_0, x_k \in S, \exists d_k \rightarrow y \text{ 使 } x_k + \mu_k d_k \in S\} = \liminf_{t \rightarrow +0, x \rightarrow x_0} t^{-1} (S - x)$. 这是一个闭凸锥, 若 S 是凸集有 $T_C(S, x_0) = T_B(S, x_0) = T_D(S, x_0)$. 他还说明, 若 $f: X \rightarrow R$ 在 $x_0 \in X$ 是局部李普希兹的, 那么 f 在 x_0 点的克拉克次微分 $\partial f(x_0) = \{p \in X^* | \langle p, y \rangle \leq f^0(x_0, y), \forall y \in X\} = \{p \in X^* | (p, -1) \in N_C(\text{epif}, (x_0, f(x_0)))\}$, $f^0(x_0, y)$ 是 f 在 x_0 关于方向 y 的克拉克广义方向导数, 正则锥 $N_C(\cdot, \cdot)$ 是克拉克切锥 $(T_C(\cdot, \cdot))$ 的负极锥. 结合对凸函数的类似结果, 西里阿特-尤鲁迪(J. B. Hiriart-Urruty, 1979)联想到可以借助切锥来定义函数的方向导数和次微分, 比如对函数 $f: X \rightarrow R$, 定义 f 在 $x \in X$ 关于方向 y 的方向导数 $f'(x, y) = \inf\{r \in R | (y, r) \in T(\text{epif}, (x, f(x)))\}$, 次微分 $\partial f(x) = \{p \in X^* | (p, -1) \in N(\text{epif}, (x, f(x)))\}$. 由取不同的切锥产生不同的方向导数及次微分, 形成不同的次微分理论. 这激发了人们对切锥的研究兴趣, 将切锥研究推向高峰, 出现了大批研究论文, 其中柯勒特(B. Cornet)1981 年的博士论文、西曼(J. S. Treiman)1983 年的博士论文、皮诺特(J. P. Penot, 1981, 1985)、瓦特金斯(G. G. Watkins, 1985, 1986)对前面提出的各种切锥的性质及它们之间的关系作了细致的讨论. 例如皮诺特(1981)说明若 $X = R^n, S$ 闭, 则 $T_C(S, x_0) = \liminf_{x \rightarrow x_0} T_B(S, x)$. 西曼(1983)说明若 S 闭, 则 $\liminf_{x \rightarrow x_0} T_B(S, x) \subset T_C(S, x_0)$. 另

外, 多勒吉(S. Dolecki, 1982)、波温(J. M. Borwein, 1986)、哈代(G. Hadad, 1987)、瓦德(D. E. Ward, 1988)分别研究了切锥在收敛性理论、不等式系统、微分包含、非光滑最优化中的应用. 特别是 1984 年奥宾(J. P. Aubin)、依克兰德(L. Ekeland)设 X, Y 是两个 Banach 空间, F 是从 X 到 Y 的正常集值映射, $(x_0, y_0) \in \text{graph}(F)$, 称一个从 X 到 Y 的集值映射 $DF(x_0, y_0)$ 为 F 在 (x_0, y_0) 的导数, 如 $\text{graph}(DF(x_0, y_0)) = T_C(\text{graph}(F), (x_0, y_0))$. 如将其中的克拉克切锥 T_C 换为波利根德切锥 T_B , 则称为伴随导数. 这种用切锥定义集值映射的导数不仅在非线性分析中有重要意义, 而且近几年柯里(H. W. Corley, 1987, 1988)、鲁克(D. T. Luc, 1989)、塔里诺(T. Tanino, 1988)等成功地将它们应用于多目标规划和集值映射极值问题.

自克拉克切锥提出以后, 近十几年还提出了许多新的切锥概念. 例如波特扬斯基(V. G. Boltyanskii, 1975)提出的帐篷概念, 洛克菲勒(1979)定义 $T_R(S, x_0) = \{y \in X | \text{对 } \forall \mu_k \rightarrow +0, \forall x_k \rightarrow x_0, x_k \in S, \forall d_k \rightarrow y \text{ 有 } x_k + \mu_k d_k \in S, K \text{ 充分大时}\}$ 为 S 在 x_0 的超切锥, $T_R(S, x_0) = \{y \in X | \text{对 } \forall \mu_k \rightarrow +0, \forall x_k \rightarrow x_0, x_k \in S \text{ 有 } x_k + \mu_k y \in S, K \text{ 充分大时}\}$ 为 S 在 x_0 的径向超切锥, 说明 $T_R(S, x_0)$ 是开凸锥, 如 S 闭, 有 $T_R(S, x_0) = \text{int} T_C(S, x_0)$. 皮诺特(1981)定义 $T_F(S, x_0) = \{y \in X | \text{对 } \forall \mu_k \rightarrow +0, \text{任意使得 } \mu_k^{-1}(x_k - x_0)$ 收敛的 $x_k \in S, x_k \rightarrow x_0, \forall d_k \rightarrow y \text{ 有 } x_k + \mu_k d_k \in S, K \text{ 充分大时}\}$. 马丁等(D. H. Martin, 1981)提出的指示锥. 由慕斯库(C. Urescu, 1982)定义 $T_\alpha(S, x_0) = \{y \in X | \exists \mu_k \rightarrow +0, \text{对 } \forall d_k \rightarrow y \text{ 有 } x_0 + \mu_k d_k \in S, K \text{ 充分大时}\}$, 它是开锥, 如 S 凸则是开凸锥且 $T_\alpha(S, x_0) = T_M(S, x_0)$. 多勒斯基(1983)提出的超切锥. 马丁和瓦特金斯(1985)提出的核心切锥. 约费(A. D. Ioffe, 1986)用序列化方法统一描述切锥, 对前面定义的各种切锥的运算性质作了详细讨论, 还提出了径向切锥和内径向切锥的概念. 柯勒特(1987)定义 $(T_{C_0}(S, x_0) = \{y \in X | \forall u \in X, d_t(u) = \|u - x_0\|$

隐涵 $\{y, u - x_0 \leq 0\}$, 这是闭凸锥。他采用一种巧妙的方法统一地讨论了各种切锥集值映射 $T(S, x), x \in S$ 的连续性的性质。波温等(1989)提出的超切锥。皮诺特(1985)对 $(t_k, x_k) \in (0, \infty) \times S$ 收敛于 $(0, x_0)$ 定义了一般的 e -收敛性, 借助它皮诺特(1985)、阿伯杜尼等(B. El. Abdouni, 1989)各自定义了一种 e -切锥。当其中的 e -收敛性取不同的特殊的收敛性时, e -切锥将对应不同的切锥, 它包含常用的波利根德切锥、克拉克切锥。阿伯杜尼还定义了对集值映射的拟内部 e -切锥。丹克斯(S. Dancs, 1990)设 $S, Q \subset X, x_0 \in \text{cl}Q$, 定义 S 在 x_0 相对 Q 的上广义切锥 $T(Q, S, x_0) = \limsup_{\substack{t \rightarrow +0, \\ x \rightarrow Q^0}} t^{-1}(S - x)$, 讨论了这种广义切

锥的性质及在最优化的应用。卡瓦沙吉(H. Kawasaki, 1988)、柯米勒提(R. Cominetti, 1990)各自定义了一种二阶切锥并成功地应用于非线性规划二阶最优性条件的讨论。帕伯拉多(M. Pappalardo, 1991)讨论了局部李普希兹函数上图的波利根德切锥与 Dini 导数的关系。由于大量切锥概念的产生, 相应地出现了许多不同的次微分理论, 也扩大了切锥的应用范围。

参考文献

- 1 Hirart-Urruty J. B. Math Oper Res, 1979, 4: 79~97
- 2 Rockafellar R. T. Nonlinear Analysis, 1979, 3: 145~154
- 3 Ursescu C. SIAM J Control Optim, 1982, 20: 563~574
- 4 Clarke F. Optimization and nonsmooth analysis. New York, John Wiley & Sons, 1983
- 5 Aubin J. P., et al. Applied nonlinear analysis. New York, John Wiley & Sons, 1984
- 6 Penot J. P. Lecture Notes in Economical and Mathematical Systems 255, Springer-Verlag, 1985, 41~54
- 7 Cornet B. Math Prog Study, 1987, 30: 17~33
- 8 Dancs S. J Optim Theory Appl, 1990, 67: 43~55
- 9 Pappalardo M. J Optim Theory Appl, 1991, 70: 97~107
- 10 梅家骥. 江西大学学报(自然科学版), 1990, 14: 24~30
(南昌大学梅家骥教授撰, 李宗元审)

Pareto 有效点的存在性 existence of pareto efficient points 设 X, Y 是二个线性空间, A, B 分别为 X, Y 的非空子集, C 是 Y 中的非空凸锥, $f: A \rightarrow Y$. 对 $y, z \in Y$ 定义 $y \leq z \Leftrightarrow z - y \in c$. B 的 Pareto 有效点, 次有效点集分别为 $E(B, C) = \{y \in B \mid \text{不存在 } z \in B, z \neq y \text{ 使 } z \leq y\}, N(B, C) = \{y \in B \mid \text{不存在 } z \in B \text{ 使 } y \leq z, z \leq y\}$, 对向量最优化问题 $(V_p): C - \min_A f(x)$, 其有效解, 次有效解集分别为 $E(f, c) = \{x \in A \mid f(x) \in E(f(A), C)\}, N(f, c) = \{x \in A \mid f(x) \in N(f(A), C)\}$, 考虑 (V_p) 的有效解, 次有效解的存在性, 通常是先考虑 B, C 满足什么条件时, $E(B, C), N(B, C)$ 非空, 再考虑 f, A 满足什么条件, $f(A)$ 具有前面对 B 的要求。

1974 年游(P. L. Yu)说明若 $Y = R^m, C$ 是锐的, B 紧, 则 $E(B, C) \neq \emptyset$. 随后许多学者围绕这基本定理进行研究。这些研究主要是从以下几个方面展开的: (1) 讨论其它非控点的存在性。(2) 向无限维空间拓广。(3) 减弱关于 C 的尖性假设。(4) 减弱 B 的紧性假设。(5) 建立函数的锥连续性概念, 配以 A 的某种紧性, 以期实现 $f(A)$ 具有所希望的紧性。从证明方法看, 主要是借用纯量化方法或借用 Zorn 引理, 仅有个别结论是借助不动点定理来证明的。代表性的工作主要有:

1978 年哈特利(R. Hartley)对 $y \in Y$, 记截割 $B_y = (y - c) \cap B$, 称 B 是 C -截割紧的, 如对 $\forall y \in B, B_y$ 紧, 说明若 $Y = R^m, B$ 是 C -截割紧的, 则 $N(B, C) \neq \emptyset$, 围绕它, 在有限维空间, 比曾(G. R. Bitran, 1979)等、汉尼格(M. I. Henig, 1982)、沙哇拉吉(Y. Sawaragi, 1985)等借用退化锥反映 B 的锥有界性, 再辅以 B 的某种锥闭性去代替前面 B 的锥紧性导出了几个存在性定理。后又被梅家骥(1987)改进为若 $\exists y \in Y$ 使 $(y - C) \cap B$ 非空紧, 则 $N(B, C) \cap (y - C) \neq \emptyset$, 波温(J. M. Borwein, 1983)对 Y

为可分拓扑线性空间时, 说明若 C 是闭凸锥且 B 是 C -截割紧的, 则 $N(B, C) \neq \emptyset$, 这结论又被斯特拉-卡瓦(A. Sterna-Karwat, 1986, 1987)拓广为若 $C \in \mathcal{D} = \{D \text{ 为 } Y \text{ 中的凸锥} \mid \text{对 } Y \text{ 的每个闭子空间 } L, \text{ 如 } D \cap L \text{ 是子空间, 则 } D \cap L \text{ 也是子空间}\}$, B 是 C -截割紧, 则 $N(B, C) \neq \emptyset$.

1978 年西塞利(L. Cesari)等设 Y 为 Banach 空间, 称 C 满足 π -性质, 如 $\{a \in Y^* \setminus \{0\} \mid \forall \delta \geq 0, \{y \in C \mid a(y) \geq -\delta\} \text{ 弱紧}\} \neq \emptyset$. 称 B 下有界, 如 $\exists u \in Y$ 使 $B \subset u + C$ 证明了如闭凸锥 C 满足 π -性质, B 下有界, 则弱 C -有效点 $w\text{-inf}(B, C) = \{x \in w\text{-cl}B \mid (x - C) \cap \{0\} \cap B = \emptyset\} \neq \emptyset$, 如 B 还是弱闭的, 则 $E(B, C) \neq \emptyset$. 龚循华(1988)将其改进为若 Y 是自反 Banach 空间, C 是锐闭凸锥, C 又是正规的(即 Y 中任意序区间都范数有界), B 有下界, 则 $w\text{-inf}(B, C) \neq \emptyset$. 他 1990 年又引进了 π -性质概念, 用以说明有效点的存在性, 斯台(T. Staib, 1988)设 C 为闭凸锥, 说明了如 $Y = R^m, B$ 有界, 则 $\text{inf}(B, C) = \{x \in \bar{B} \mid (x - C) \cap \{0\} \cap B = \emptyset\} \neq \emptyset$, 如 Y 是自反 Banach 空间, B 凸且有界, 则 $\text{inf}(B, C) \neq \emptyset$, 如 Y 是可分拓扑线性空间, C 点式, B 是 C -截割紧的, 则 $\text{inf}(B, C) \neq \emptyset$.

1980 年柯里(H. W. Corley)设 Y 是 Banach 空间, 称 B 是 C -半紧的, 如 B 的任意形如 $\{(x_\alpha - C)^c, \alpha \in I, x_\alpha \in B\}$ 的复盖均有有限子覆盖, 称 $f: A \rightarrow Y$ 是 C -下半连续的, 如对 $\forall y \in Y, f^{-1}(y - C)$ 是闭的。设 C 为尖闭凸锥, 说明了如 B 是 C -半紧的, 则 $E(B, C) \neq \emptyset$, 如 A 紧, f 是 C -下半连续的, 则 $E(f, C) \neq \emptyset$. 塞柯尼(J. P. Cecconi, 1986)说明其中关于 C 闭的假设可去掉。汉尼格(1982, 1986)、本森(H. P. Benson, 1983)、沙哇拉吉(1985)等说明若 $Y = R^m, C$ 为点式闭凸锥, $B + C$ 闭, $B + C$ 凸, 则 $E(B, C) \neq \emptyset \Leftrightarrow H(B, C) \neq \emptyset \Leftrightarrow B_0(B, C) \neq \emptyset \Leftrightarrow B_c(B, C) \neq \emptyset \Leftrightarrow B$ 满足控制性质 $(DP) \Leftrightarrow B$ 是 C -半紧的 $\Leftrightarrow B$ 是 C -截割紧的, 其中 $H(B, C), B_0(B, C), B_c(B, C)$ 分别是 B 的汉尼格、波温、本森真有效点集。龚循华(1990)设 Y 是 Banach 空间, C 为点式闭凸锥, 说明如 $\exists y \in Y$ 使 B_y 是 C -半紧的, 则 $E(B, C) \neq \emptyset$.

1983 年波温设 Y 为可分拓扑线性空间, 称 C 具有 Daniell 性质, 如 Y 中每个有下界的减网收敛于它的下确界, 说明了如 C 是闭凸锥且具有 Daniell 性质, B 又有一个有下界的闭截割, 则 $N(B, C) \neq \emptyset$. 1984 年赵(K. L. Chew)设 Y 是 Banach 空间, 称 B 是 C -归纳的, 如 B 关于 C 的非空截割全序链的交非空。说明了若 C 是点式凸锥, B 是 C -归纳的, 则 $E(B, C) \neq \emptyset$. 如 C 是凸锥, $C \cap (-C)$ 闭, B 是 C -归纳的, 则 $N(B, C) \neq \emptyset$. 1986 年杨(J. Jahn)设 Y 是自反 Banach 空间, C 是点式凸锥, 范数 $\|\cdot\|_y$ 在 C 上强单调递增(即 $u, v \in C, u \neq v, u \leq v$ 隐涵 $\|u\| < \|v\|$), 说明若 $\exists y \in Y$ 使 B_y 弱闭且有下界, 则 $E(B, C) \neq \emptyset$, 若 $\text{int}C \neq \emptyset, B$ 弱闭且 $\exists u \in Y$ 使 $B \subset u + \text{int}C$, 则 $B_c(B, C) \neq \emptyset$. 另外, 杨还讨论了弱有效点的存在性。

1989 年鲁克(D. T. Luc)进一步拓广了波温和杨所得的结果。他设 Y 是一个实拓扑线性空间, C 是凸锥, 称 Y 中一个网 $\{x_\alpha, \alpha \in I\}$ 是减网, 如对 $\alpha, \beta \in I, \beta > \alpha$ 有 $x_\alpha > x_\beta$ (指 $x_\alpha \geq x_\beta$ 但 $x_\beta \not\geq x_\alpha$). 称 B 是 C -完备的, 如不存在形如 $\{(x_\alpha - C)^c\}$ 的对 B 的覆盖, 其中 $\{x_\alpha\}$ 是 B 中的一个减网。称 C 是校正的, 如 $C + C \setminus L \subset C, L = C \cap (-C)$. 说明了如 C 是校正凸锥, 那么 $N(B, C) \neq \emptyset \Leftrightarrow B$ 有一个非空 C -完备截割。如 B 是 C -完备的, C 是校正凸锥, 那么 B 满足控制性质。

设 $Y = R^m, E(B, C) \neq \emptyset, B$ 的有效极点集 $E_B = E(B, C) \cap \text{ext}B$, 其中 $\text{ext}B$ 为 B 的极点集, 游(1975)说明若 C 为凸锥, B 是紧多面凸集, 则 $E_B \neq \emptyset$. 波温(1983)说明若 C 为闭凸锥, B 为紧凸集, 则 $E_B \neq \emptyset$. 梅家骥(1991)说明若 $0 \in C, C$ 在 0 点凸(C 不一定凸也不一定是锥)。 B 是不含直线的闭凸集(或 B 是紧集, $\{a \mid \langle a, x \rangle < 0, \forall x \in C \setminus \{0\} \neq \emptyset\}$, 则 $E_B \neq \emptyset$).

对 $e \in C \setminus \{0\}$, 定义 B 的 e -有效点集 $e\text{-}E(B, C) = \{x \in B \mid (x - e - c) \cap \{0\} \cap B = \emptyset\}$. 斯台(1988)说明若 Y 是可分拓扑线性

空间, C 是点式闭凸锥, B 有界 (或有下界, 或 $\exists a \in Y^*$ 使 $a(y) \geq 0, \forall y \in C, a(e) > 0$ 且 $\inf a(B) > -\infty$), 则 $e - E(B, C) \neq \emptyset$.

对集值映射 $F: A \rightarrow 2^Y$, 柯里(1987)定义 $N(F, C) = \{x \in A \mid F(x) \cap N(F(A), C) \neq \emptyset\}$, 讨论了这种次有效解的存在性, 鲁克(1989)设 Y 是可拓拓扑线性空间, 称 F 在 A 上 C -上连续, 如对 $\forall x_0 \in A, F(x_0)$ 的任意邻域 V , 存在 x_0 的邻域 U 使 $F(x) \subset V + C, \forall x \in U \cap \text{dom} F$. 他设 F 在 A 上 C -上连续, A 紧, C 为凸锥, 说明若 $C \in \emptyset, F$ 是紧 V 值的, 则 $N(F, C) \neq \emptyset$. 若 C 是校正的, F 是 C -半紧一值的 (或对 $\forall x \in A, F(x) + C$ 是闭的, C -完备的) 则 $N(F, C) \neq \emptyset$.

目前在减弱 C 的凸性假设方面的工作尚不多见. 这可能是由于 C 不凸就意味着序关系缺少传递性, 因而证明存在性定理时最有力的工具 Zorn 引理不能使用, 从而给问题讨论带来困难, 但这必竟是一个值得研究的问题.

参考文献

- 1 Yu P L. J Optim Theory Appl, 1974, 14, 319~377
- 2 Hartley R. SIAM J Appl Math, 1978, 34, 211~222
- 3 Cesari L, et al. Trans Amer Math Soc, 1978, 244, 37~65
- 4 Corley H W. J Optim Theory Appl, 1980, 31, 277~281
- 5 Borwein J M. Math Oper Res, 1983, 3, 64~73
- 6 Chew K L. J Optim Theory Appl, 1984, 44, 1~53
- 7 Jahn J. Mathematical vector optimization in partially ordered linear spaces. Verlag Peter Lang GmbH Frankfurt and Main, 1986
- 8 Staib T. J Optim Theory Appl, 1988, 59, 289~306
- 9 Luc D T. Lecture notes in economics and mathematical systems 319. Springer-verlag, 1989
- 10 梅家骥. 系统科学与数学, 1991, 11, 313~319

(南昌大学梅家骥教授撰, 李宗元审)

代数 数论 组合理论

李代数 Lie algebra 一类重要的非结合代数, 因挪威 Sophus Lie 得名. 一个李代数 L 是域 F 上一个线性空间, 在其中定义了双线性的二元运算 $[x, y]$ (称为方括号运算, 换位运算或李运算) 且对所有 $x, y, z \in L$ 满足 ① 反对称性, $[x, x] = 0$; ② Jacobi 恒等式, $[[x, y], z] + [[y, z], x] + [[z, x], y] = 0$. 李代数在历史上是由李群的研究导出, 是李群的“线性化”, 反映了李群主要的局部性质, 因此最初曾称为“无穷小李群”, 但现在李代数理论已发展成为一个独立的数学学科, 它同很多其它数学部门及物理学有着广泛的联系.

设 S, T 为李代数的子空间, 记由所有 $[x, y], x \in S, y \in T$, 张成的子空间为 $[S, T]$. 若 $[S, S] \subseteq S$, 则称 S 为 L 的子代数; 若 $[S, L] \subseteq S$, 则称 S 为 L 的理想, 令 $L^{(0)} = L$, 归纳地定义 $L^{(k+1)} = [L^{(k)}, L^{(k)}], k = 0, 1, 2, \dots$. 若有 $n \geq 0$, 使 $L^{(n)} = 0$, 则称 L 为可解的. 任一李代数 L 有唯一的极大可解理想, 称为 L 的根, 若 L 的根为 0, 则称 L 为半单的, 若 L 的理想只有 L 及 0, 则称 L 为单的, 李代数 L 到李代数 L' 的线性映射 ψ 称为同态若对所有 $x, y \in L$ 有 $[\psi(x), \psi(y)] = \psi([x, y])$. 令 $gl(V)$ 表线性空间 V 上线性变换的全体 (若 $\dim V = n$, 则它也可看作所有 n 阶矩阵的全体). 对 $x, y \in gl(V)$, 定义 $[x, y] = xy - yx$, 则 $gl(V)$ 成为一李代数, 李代数 L 到 $gl(V)$ 的同态称为 L 在 V 上的表示, V 称为 L 的一个模, 表示理论是李代数理论的重要组成部分, 李代数在物理学中的应用主要是通过表示而实现的.

复李代数 (即复数域 C 上的李代数) 的理论最完备、最深刻. 任一复李代数 L 可表成一半单李代数和它的根的半直和 (Levi 定理). 因此大致上说, 对复李代数的研究可分解为对半单李代数及可解李代数的讨论. 可解李代数的分类尚未完成, 但知道任一可解李代数同构于一由上三角矩阵组成的李代数

(李定理). 设 $x \in L$, 令 adx 为 L 上线性变换 $y \mapsto [x, y]$. 定义 $K(x, y) = \text{Tr } adx \text{ } ady$ (Tr 表线性变换的迹), 则 K 为 L 上对称双线性型, 称为 L 上的 Killing 型. 若 L 可解, 则 K 恒为 0, 若 L 半单, 则 K 非退化, 任一半单李代数可分解成单理想的直和, 因此对半单李代数的研究可归结为讨论单李代数. 单李代数的分类在 19 世纪末已由 W. Killing 及 E. Cartan 从李群角度完成, 以后又经 H. Weyl, B. L. vander Waerden, H. S. M. Coxeter, E. Witt, E. Dynkin 及 N. Jacobson 等简化、改进, 现简述其要点如下, 设 L 为半单李代数, L 的元 h 称为一环面元如 L 上变换 adh 可对角化, 由环面元组成的子代数称为环面, 设 T 为 L 的一个极大环面, 则 T 为交换代数, 即 $[h_1, h_2] = 0$ 对所有 $h_1, h_2 \in T$, 因此 L 有空间分解 $L = H + \sum L_\alpha$, 其中 α 为 H 上线性函数, $L_\alpha \neq 0, [h, x_\alpha] = \alpha(h)x_\alpha$ 对所有 $\alpha \in T, x_\alpha \in L_\alpha, \alpha$ 称为关于 T 的一个根, 所有根的集合 Δ 称为 L 的根系, 在 Δ 中存在一子集 $\Pi = \{\alpha_1, \dots, \alpha_l\}$ 使每一 $\alpha \in \Delta$ 有 $\alpha = \sum k_i \alpha_i$, 其中 k_i 为或全为正或全为负的整数, 利用 Killing 型, 可将 Δ 看作一维欧氏空间 E 的子集. 令 $\langle \alpha, \beta \rangle = \frac{\alpha(\alpha, \beta)}{(\beta, \beta)}$, 这里 (\cdot, \cdot) 是 E 中内积, 则 $\langle \alpha, \beta \rangle$ 为整数, 令 $C_{ij} = \langle \alpha_i, \alpha_j \rangle$, 矩阵 (C_{ij}) 称为 L 的 Cartan 矩阵, 它具有下列性质: (i) C_{ij} 为整数; (ii) $C_{ii} = 2$; (iii) $C_{ij} \leq 0$ 当 $i \neq j$, 且 $C_{ij} = 0$ 蕴涵 $C_{ji} = 0$; (iv) C_{ij} 的每一主子行列式都大于 0. 一个半单李代数的同构类由它的 Cartan 矩阵完全确定, 因此对半单李代数的分类转化为对 Cartan 矩阵的分类, 每一 Cartan 矩阵对应一由点、线及箭头构成的图形, 称为 Dynkin 图, 单李代数对应于连通的 Dynkin 图, 因此问题化为对连通 Dynkin 图的分类, 结论是连通 Dynkin 图 (因而单李代数) 共有 4 大类及 5 个特殊情形, 分别记为 $A_l (l \geq 1), B_l (l \geq 2), C_l (l \geq 3), D_l (l \geq 4)$ 及 E_6, E_7, E_8, F_4, G_2 (足标数称为秩). J. -P. Serre 于 1966 年给出了从一个 Cartan 矩阵用生成元与关系式直接构造相应的半单李代数的方法, 保证了每一型单李代数的存在性.

实数域 R 上的李代数与李群有密切的关系. 设 L 及 L_C 分别为 R 及 C 上李代数, 如 $L \otimes_R C \cong L_C$, 则称 L_C 为 L 的一个复化而 L 为 L_C 的一个实形式, 一个半单实李代数称为是紧致的如它的 Killing 型是负定的, 每复半单李代数在同构意义下有唯一的半单紧致实形式, 设 u 为一紧致半单李代数, g 是它的复化, σ 为 u 上对合自同构, 令 $u_+ = \{x \in u \mid \sigma(x) = x\}$ 及 $u_- = \{x \in u \mid \sigma(x) = -x\}$, 则在 g 内 $g_0 = u_+ + iu_-$ 为一实半单李代数, 且任一实半单李代数皆可这样得到, 因此实半单李代数的分类可在复半单李代数分类的基础上通过对紧致李代数的对合分类得到.

无限维李代数也日益显示其重要性, 这方面的研究已取得重大进展. (1) Kac-Moody 李代数. 在 Cartan 矩阵定义中去掉条件 (iv), 得到广义 Cartan 矩阵, 对每一广义 Cartan 矩阵, 用 Serre 的方法同样可 (在复数域上) 构造一李代数, 它一般是无限维的, 称为 Kac-Moody 李代数, 是 V. G. Kac 及 R. V. Moody 在 1969 年独立地构造出来的, 按广义 Cartan 矩阵的性质, Kac-Moody 李代数可分为有限型 (即复半单李代数)、仿射型及不定型 3 类. Kac-Moody 李代数大大扩展了复半单李代数的理论, 很多复半单李代数的重要结果都可推广到 Kac-Moody 李代数, 它和许多数学部分有深刻的 (有时是出乎意料的) 联系, 在理论物理学方面有重要应用, 因此受到很大的重视, 已发展成一内容丰富的数学分支. (2) Virasoro 代数. 这是由基 $\{e_i, i \in Z, c\}$ 张成的李代数, 它的乘法表是 $[e_i, e_j] = (m-n)e_{i+j} + \frac{m^3-m}{12}\delta_{i+j,c}, [c, e_i] = 0, i, j \in Z$. Virasoro 代数与 Kac-Moody 李代数有密切关系. (3) Cartan 型李代数. 这是由流形上向量场构成的李代数. 由 E. Cartan 在 1909 年讨论无限维伪李群分类时提出, 有 W, S, H, K_4 大类. 它们在微分几何及微分方程等理论中有重要作用, 从 1964 年 V. W. Guillemin 及 S. Sternberg 开始, 很多数学家重新对它们进行了深入的研究.

作为一个纯代数系统,李代数也可以在特征为 $p > 0$ 的域 F 上定义和讨论,但特征 p 李代数的理论与特征 0 时有很大的不同。即使在代数闭域情形,一些最基本的命题如李定理、Levi 定理、关于 Killing 型的结论、半单李代数分解为单李代数直和在特征 p 时都不再成立。因此必须发展新的概念和方法,一个特征 p 的李代数 L 称为是局限的,如果 L 中定义了一个一元运算 $x \rightarrow x^{[p]}$ 使 $(cx)^{[p]} = c^p x^{[p]}$, $c \in F$; $(adx)^{[p]} = adx^{[p]}$; 及 $(x+y)^{[p]} = x^{[p]} + y^{[p]} + S(x,y)$, $x, y \in L$, 这里 $S(x,y)$ 是 x 和 y 的 $p-1$ 重换位运算的一个确定的和式,许多最重要的特征 p 李代数都是局限的,从 40 年代初开始即进行了素特征代数闭域上单李代数的分类的研究,除了与复数域上类似的 A_1-G_2 几类李代数(称为典型李代数)外,还知道有 W, S, H, K 四大族 Cartan 型及广义 Cartan 型单李代数,它们对应于复域上的 Cartan 型李代数,但是有限维的,1986 年 R. E. Block 及 R. L. Wilson 证明当 $p > 7$ 时,典型李代数及局限 Cartan 型李代数穷尽了所有的单李代数,1991 年 H. Strade 及 R. L. Wilson 证明了当 $p > 7$ 时一个单李代数或为典型的或为广义 Cartan 型的,因此使这历史长达半个世纪的问题基本上得到解决。

参考文献

- 1 Gelfand I M, et al. The cohomology of the Lie algebra of formal vector fields (Russian), Izv Akad Nauk SSSR (Ser Mat), 1970, 34: 322~337
- 2 Humphreys J E. Introduction to Lie Algebras and Representation Theory. Springer-Verlag, 1972
- 3 严志达等. 李群及其 Lie 代数. 北京: 高等教育出版社, 1985
- 4 Block R E, et al. J of Algebra, 1988, 114: 115~259
- 5 Kac V G. Infinite-Dimensional Lie Algebras (3rd Ed). Cambridge University Press, 1990
- 6 Strade H, et al. Bull Amer Math Soc, 1991, 24: 357~362
(华东师范大学沈光宇教授撰)

泛代数 universal algebra 现代代数的一个重要部分,是群、环、域、格和模等抽象代数分支进一步抽象产生的数学分支。也是一个综合性较强的高层次代数理论,且具有丰富的实际背景、广阔的发展前景和广泛的应用。

19 世纪 80~90 年代,一些数学工作者把群、环、域、格、模等抽象起来研究,出现了泛代数的萌芽。1898 年,怀特希德(A. N. Whitehead)在他的《A Treatise on Universal Algebra with Applications》中,首次提出了“泛代数”这个名称。20 世纪 30~40 年代,伯克霍夫(G. Birkhoff)、塔斯基(Tarski)和军森(Jonsson)等人以集合论和格论等为基础和基本工具,开拓了古典泛代数的研究工作,主要在泛代数的子代数格、合同关系格及同态同构定理等方面做了很多比较深入的和有影响的工作。

对泛代数研究的意义认识,直至 20 世纪 50 年代之后,随着电子计算机的出现和不断发展,计算机语言和语义理论的研究逐步深入,泛代数理论在计算机理论研究方面的作用越来越大。反过来,这也促进了泛代数的研究,在 50~80 年代,泛代数的古典理论进一步发展,现代理论和整个泛代数的研究体系逐步建立,出版了一批专著,发表了大批论文,出现了格瑞直(G. Grätzer)、科恩(P. M. Cohn)和墨肯塞(R. McKenzie)等一大批国际上的泛代数研究的专家。

中国的泛代数研究工作起步比较迟,王世强在国内发表的第 1 篇关于泛代数的论文,发表在 1964 年的《数学进展》上。80 年代以来,刘绍学、卢景波、胡庆平、许昊等人先后也发表了一批论文,在泛代数的一系列研究方向上得到了很多重要的结果,有些工作还开拓了一些新方向。80 年代以来,国内外泛代数研究,实际上是多条线进行和多层次发展的,这是泛代数研究的一个基本特点。从总体上讲,泛代数研究工作可以分为 4 个部分,(1)基础理论研究。主要研究泛代数自身的本质特点和内涵的理论。(2)外延理论研究。主要研究泛代数理论与其它学

科、数学分支的联系和相互影响。(3)发展理论研究。主要研究从泛代数出发进一步发展的一些代数理论。(4)应用理论研究,主要研究泛代数的应用及应用所必须展开的一些理论研究。至今,这 4 部分都已做了大量深入的研究。

泛代数的基础理论研究是泛代数研究的中心。迄今,这一部分研究的内容已相当丰富,概括起来主要有:(1)基本概念。主要涉及泛代数的概念、同态和同构映射、泛代数范畴、关于泛代数的基数函数和序数函数等。(2)新代数的生成。主要涉及子代数、商代数、积代数、次直积、直极限和逆极限等生成新代数的基本方法,研究一些基数函数的不变性质或变化情形,研究新代数生成法下的某些不变性或逆不变性。(3)代数结构。以格、闭包系统和多项式为工具研究子代数系统的结构、合同格及同态和同构定理,进而解决一些与新代数的生成有关的一些问题和展开代数的类的算子、等式类或簇论的研究。(4)某些泛代数类。大体上可分为由泛代数结构取得特殊情形定义的代数、由子代数定义的代数、由合同关系定义的代数、由某些性质定义的代数等,后者还包括很重要的自由代数及与之有关的一些问题的研究,例如恒等、万有函子、 F -字代数、运算的克隆及 F -代数范畴中的表示等。

泛代数理论研究使用多种工具,常用的主要有 3 种:(1)来自集合论的工具,如基数、序数、选择公理和它的一些等价命题、闭包系统等。(2)来自范畴论的工具。如范畴、函子、自然变换、函子的伴随、交换图和万有性质等。(3)来自经典代数的工具。如半群、群、环、格、多项式和理想等。经典代数工具的使用也使泛代数研究产生了两类自然的问题:一类是推广问题,即某一抽象代数分支中的某个结果或采用的某个方法可否一般在泛代数中研究,如理想对环的研究起了极为重要的作用,而在泛代数中引进理想的概念是一个令人感兴趣的事情。另一类是应用问题,在本文最后再作介绍。注意,一些传统的方法在泛代数理论研究中得到了应用,并且有一定的发展。例如,归纳法是一种传统的方法,在泛代数理论研究中常常使用对自然数的数学归纳法和对序数的超限归纳法,还进一步采用了各种归纳法,对闭包系统的 A -归纳法,对函数复合次数的归纳法(类似子逻辑归纳法),对秩(记号个数)的归纳法,对子代数系统的 S -归纳法,且在以泛代数为基础的代数规范论中进一步采用结构归纳法。这些都丰富了泛代数研究的工具和方法。

泛代数的外延理论涉及多门学科和多个分支,内容丰富,且正在不断发展。泛代数的外延理论涉及到的重要专题或方向主要有:泛代数范畴,是泛代数与范畴论结合产生的一个专题;模型论,是泛代数与数理逻辑结合产生的一个数学理论;拓扑(泛)代数,是在泛代数上赋以拓扑结构,且使每个运算皆连续而产生的,本质上是泛代数和拓扑学的结合的产物;同调(泛)代数,是泛代数和同调论结合产生的一个专题,主要用同调和上同研究代数调的方法来。泛代数的发展理论已涉及一系列的数学理论。在泛代数中加上一些有限元偏运算而成为偏代数。泛代数和偏代数总称为有限元运算系统,其进一步发展是无限元运算系统。有限元运算系统和无限元运算系统一起组成了代数运算系统,其进一步发展是关系系统。而代数运算系统和关系系统一起组成了(抽象)代数系统(或广义的泛代数)。这些数学理论的研究构成了泛代数丰富的发展理论。

经过半个多世纪许多数学工作者的努力,泛代数已有了很多应用,并形成了内容丰富的应用理论。泛代数的应用主要有 3 个方面:一是在数学内部,在自然数、广群、半群、环、线性代数、Lie 代数及 Jordan 代数中的应用;二是用于语言理论,解决有关语法问题;三是以泛代数为基础建立某些学科或分支的某些理论,如计算机科学理论中有一个新分支——代数规范论,实际上是用泛代数研究语言规范的理论,它的基本目的是为了决语义问题(包括一级语义问题和二级语义问题)。

泛代数是正在迅速发展中的一个重要的数学分支。今后,泛代数在其基础理论、外延理论、发展理论和应用理论方面都

将会有相当大的发展。从目前来看,泛代数研究中比较热的专题有:(1)基数函数问题。通过引入一批重要的基数函数,对泛代数进行数量研究,逐步形成泛代数的基数函数理论。(2)扩张问题。研究泛代数的各种扩张方式,研究由扩张造成的代数间的关系和变化,也研究与扩张有关的一些问题,逐步建立泛代数的扩张理论。(3)几个基本问题。如研究泛代数的闭包系统、等价及理想等,进一步丰富泛代数理论。(4)几类代数,如结合代数、分配代数、有序代数和自由代数等的研究。另外,还有簇论、拓扑代数、同调、偏代数、关系系统及应用方面的研究。

泛代数在中外数学工作者及逐步掌握它的理论物理工作者、理论化学工作者及计算机科学理论工作者的共同努力下将会有相当大的发展,并将推动模型论、语言代数、计算机语言理论及代数规范论等的重大发展。

参考文献

- 1 王世强. 数学进展, 1964, 2: 213~218
- 2 Grätzer G. Universal Algebra (Second Edition). New York: Springer-Verlag, 1979
- 3 Cohn P M. Universal Algebra, London D. Reidel Publishing Company, 1981
- 4 许曼. 西北大学学报, 1982, (3): 110~116
- 5 卢景波. 北京师范大学学报, 1983, 2: 37~43
- 6 刘绍学. 北京师范大学学报, 1985, 1: 17~24
- 7 胡庆平. 数学学报, 1987, 6: 780~787
- 8 胡庆平. 西北大学学报, 1987, 3: 32~38
- 9 胡庆平. 西北大学学报, 1989, 2: 27~33
- 10 胡庆平, 李丹. 泛代数. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993

(西北大学胡庆平教授撰)

路代数 path algebra 代数领域中构造代数的基本方法之一。具有直观性。由于帕瑞塔(Morita)的等价理论,路代数与代数闭域上的有限维代数紧密相关,即路代数模掉一个容许理想所得的商代数的表示范畴是有限维代数的表示理论的主要研究对象。路代数的表示在代数表示论中占有重要的地位。许多重要的数学问题,如线性代数中矩阵的标准型问题和几何中的一些问题等都与路代数的表示等价。

假定已知一个箭袋(quiver),换句话说,给了一个有向图 Q ,我们再固定一个域 K ,考虑所有由有限长路(这里路有起点和终点的)为基所构成的 K 上向量空间 KQ ,定义乘法为路的自然相连接(两条不可连接的路定义其乘法为0)。这样便得一个域 K 上的结合代数,称之为路代数。

路代数产生,于是在20世纪70年代初。当时,皮特·伽布利欧(P. Gabriel)试图将不同的代数和几何问题归结为线性代数问题,他引入路代数及其表示,并证明代数闭域上的任何有限维代数都Morita等价于一个路代数模掉一个容许理想(admissible ideal)所得的商代数。于是,有限维代数的表示就归结为路代数的商代数的表示。而后者可用一簇与路代数的顶点一样多的向量空间及与箭向一样多的线性变换以及这些线性变换之间应满足的一些关系来描述。这样有限维路代数表示有限型的判别定理就由伽布利欧用箭袋完全刻画了,这个定理的另一个转理想的证明后来由贝恩斯坦(I. N. Bernstein)等给出,这里我们称 KQ 是表示有限型的,是指在同构意义下,它的不可分解的表示只有有限多个。伽布利欧的定理表明:一个有限维路代数 KQ 是表示有限型的,当且仅当 Q 看作图时是有限个Dynkin图的不相交并。于是,每个不可分解表示由其维数向量唯一确定。在此之后,德拉波(V. Dlab)和林格尔(C. M. Ringel)于1978年推广这一结果,并研究了驯服型(tame)的路代数,这类代数是表示无限型的。他们证明一个连通路代数是驯服型的当且仅当 Q 看作图时是扩张Dynkin图。在他们的研究中,驯服型路代数的表示范畴的结构得到深刻的刻画,他们证明该范畴由预投射分支、预内射分支和若干个管(tube)组成。林格尔还对

路代数的另一表示型,即野型(wild)路代数作了详细研究。我们知道,野型路代数是既不是有限型也不是驯服型路的代数,对野型路代数表示范畴的研究是一个十分困难的问题。然而,林格尔1978年研究表明,有限维野型路代数除了预投射和预内射分支外,还有正则分支,且正则分支都具有形状 $\square A_\infty$ (即形如正半平面上的格点之集合)。因此,与驯服型代数不同,它没有管状分支。这是首次对野型路代数的表示所作的精确描述。

在对路代数的表示范畴的“宏观”研究得到了一些结果的基础上,到了20世纪80年代,人们开始了对路代数进行“局部”的研究,这里主要指的是对野型路代数的分支及其模以及态映的研究。首先,为了度量路代数的表示范畴的分支的增长状况,德拉波和林格尔曾引入增长数(growth number)的概念,并用考克斯特矩阵(Coxeter matrix)的最大特征根来确定它。证明有限型路代数的增长数是零,驯服型的是1,而野型的则大于1。本文作者确定增长数较小的野型路代数。最近,路代数的理论以及增长数被德拉波和林格尔用于刻画半单曾于1990代数的塔(tower of semisimple algebra)理论以及所涉及到的琼斯指数(Jones index),而且大于4的最小琼斯指数正好在增长数较小的野型路代数中得到实现。

因为预投射与预内射分支是直向的,可以说是相当好的分支,于是,主要的研究便放在正则分支上。正则分支上的表示如果没有真子正则表示,则称为拟单表示(quasi-simple),它也是人们感兴趣的表示之一。因为正则分支上的任何不可分解表示在同构意义下有唯一的滤使其因子(factor)是拟单的。这样,该分支上任何不可分解表示都是由其滤长和其拟头(quasi-top)决定的。因此,正则分支可由它的拟单表示决定。另一类感兴趣的表示是无限维不可分解表示,但它作为其自同态环上的表示是有限长的,这类表示叫做一般(generic)表示。林格尔曾在1979年就证明驯服型路代数有唯一的一个一般表示。最近,哈培尔(D. Happel)和翁格尔(L. Unger)构造无限多个野型克隆涅克尔(Kronecker)代数的一般表示。

关于态射,贝尔(D. Baer)证明,如果 X 和 Y 是两个不可分解的正则表示,则存在一个整数 $s(X, Y)$,使得 $\text{Hom}(X, \tau^s Y) \neq 0$ 对任意的 $s \geq s(X, Y)$ 。这里 τ 表示Auslander-Reiten位移。这个事实的相反结论是克努尔(O. Kerner)证明的,即存在一个整数 $t(X, Y)$,使得 $\text{Hom}(\tau^t X, Y) = 0$ 对任意的 $t \geq t(X, Y)$ 。于是,整体上说,在野型路代数的正则分支上,映射是单方向的,即朝着 AR -箭袋的箭向的相反方向。

克努尔对野型路代数 KQ 的研究进一步揭示了野型路代数的野性。他的研究主要集中于对由所有正则分支所构成的集合 $\Omega(Q)$ 的研究。注意 $\Omega(Q)$ 是可以由拟单表示的 τ -轨道来作指标集的。他证明了这个集合可以看作是与 Q 不相关的,即给定两个路代数 KQ 和 KQ' (这里 K 是代数闭域),则 $\Omega(Q)$ 和 $\Omega(Q')$ 是内在一一对应的,这个结果深刻反映路代数的更本质的特点。这里我们要指出的是,野型路代数的分类问题是与许多重要的数学问题连在一起的,如 $n \geq 3$ 个同阶矩阵组的同时进行列与行变换的标准型分类问题,因此,它的答案也是对这些数学问题的答案。

另外,利用路代数去研究倾斜代数(tilted algebra)也取得了许多成果。比如,斯特劳斯(H. Strauss)证明,如果 KQ 是无限表示型的,且它的一个倾斜表示 T 无预内射直和项,则 T 的自内态代数($\text{End} T$)有唯一预射分支,如果令 I 表示它在该环中的零化子,则商代数 $(\text{End} T)/I$ 是隐代数(concealed algebra)且与 KQ 有相同的表示型,利于倾斜理论,翁格尔建立了任何一个连通野型代数与野型克隆涅克尔代数的关系。她还研究了路代数上由偏倾斜(partial tilting)表示所构成的集合的几何性质。

目前路代数表示论的研究热点大体上分为:(1)对某些具有特殊性质的表示的研究,如拟单表示,无自扩张的砖块(brick)等。(2)克努尔对应的性质及其不变量。(3)路代数的表

示与李代数的联系。(4)偏倾斜表示所构成的集合的几何性质的进一步研究。

从环论的角度,对路代数进行探讨,也在80年代取得了若干进展。首先是同构问题:即两个路代数 KQ 和 KQ' 同构是否必有 Q 同构于 Q' ?这个问题由刘绍学等肯定解决。此外,他还讨论了另外一个自然的问题,即箭袋的性质是如何与路代数的性质联系在一起的?他用箭袋 Q 中的数据分别给出了 KQ 是Artin的(半单的、半本质的、左Noether的等)的充分和必要条件。这些结果后来也被他推广到赋值图上。

参考文献

- 1 Gabriel P. Naz Alta Mat. 1973,11:81~104
- 2 Bernstein I N, et al. Russian Math. Surveys. 1973,28:17~32
- 3 Dlab V, et al. Memoirs Amer Math. Soc. 1978. 173
- 4 Ringel C M. Math Z. 1978,161:235~255
- 5 Dlab V, et al. Proc Amer Math Soc. 1981,83(2):228~232
- 6 Baer D. Manuscr Math. 1986,55:69~82
- 7 Liu S X. Acta Math sinica. 1988,131:483~487
- 8 Xi C C. Comm in Algebra. 1990,18(8):3413~3422
- 9 Kerner O. J Algebra. 1991,142:37~57
- 10 Dlab V et al. J Funct Anal. 1991,102:35~46

(北京师范大学惠昌常博士撰)

BCI-代数 BCI-algebra 由日本井关清志在1966年引入,以集合论、命题演算、群论、Boole代数等为背景。经过20多年的发展和国际上一些数学工作者的努力,尤其是一些中国数学工作者的突出工作,使得BCI-代数已成为当前国际上比较活跃的一个抽象代数分支。

BCI-代数实际上是一类泛代数。一个BCI-代数是具有下列条件的 $(2,0)$ 型的(泛)代数 $\langle X; *, 0 \rangle$:

- I-1. $((x * y) * (x * z)) * (x * y) = 0$,
- I-2. $(x * (x * y)) * y = 0$,
- I-3. $x * x = 0$,
- I-4. $x * y = y * x = 0 \Rightarrow x = y$,
- I-5. $x * 0 = 0 \Rightarrow x = 0$.

它可如下地引入自然半序:

- I-6. $x \leq y \Leftrightarrow x * y = 0$.

20世纪60年代以来,BCI-代数的发展过程大体上可以分为两个阶段。

第1阶段是1966~1979年。在这1阶段中BCI-代数理论的最大成就是井关清志等人引入了BCI-代数和BCK-代数(BCI-代数的一种特殊情形)的概念。在第一阶段中对BCK-代数的研究得到初步发展。日本、波兰、苏丹和斯里兰卡的20多位作者写出了几十篇有关BCK-代数的论文,对BCK-代数从性质、若干类、生成新代数的方法及子集(包括理想)等方面进行了较为系统的研究。尤其是井关清志和塔那加等人在这一阶段中作了很多很好的工作,引进了许多概念,得到了一批有意义的结果,对可换性、有界性、拟可换性、关联性、正定关联性及其具有条件(S)的性质进行了较系统的研究,开拓和丰富了BCK-代数的研究工作。

第2阶段是从1980年至今。在第1阶段中除了BCK-代数的一些结果外,BCI-代数的研究工作并没有多大进展,这是因为BCK-代数类 \subseteq BCI-代数类。1980年井关清志肯定地得出结论,给出了第1个真BCI-代数的例子,并对BCI-代数进行了一些初步的研究。

1980年以来,中国数学工作者开始投入BCI-代数理论的研究工作,陆续写出和发表了一批论文,尤其是胡庆平在1987年出版了《BCI-代数》一书,这是国际上第1本关于BCI-代数的专著,给BCI-代数理论建立了一个框架。中国数学工作者在

这10多年中陆续研究和开拓了BCI-代数的一系列课题和专题方向,大大地推进了BCI-代数理论的研究。例如,1980年胡庆平和井关清志,引进了结合BCI-代数的概念,把BCI-代数和群论联系起来,且开拓了研究BCI-代数的一个方向:1985年,雷天德在此基础上引入了广义结合BCI-代数;1987年胡庆平和李欣,引入了具有散子代数性质的BCI-代数;1990年胡庆平,引入了具有散有限半序性质的BCI-代数。这些代数类间有下列真包含关系:结合BCI-代数类 \subset 广义结合BCI-代数类 \subset 具有散子代数性质的BCI-代数类 \subset 具有散有限半序性质的BCI-代数类 \subset BCI-代数类。

经过10多年的大量研究,现在已经发现BCI-代数与泛代数有密切的关系。实际上,BCI-代数是泛代数意义下的一种代数,也是具有代数结构和自然序结构的一种数学公理系统,因而也研究泛代数中一般研究的问题,例如簇论和理想等。关于簇论的结果已有:一切BCK-代数的类和一切BCI-代数的类皆是亚簇,可换BCK-代数类 $(i, j; m, n)$ 型拟可换BCI-代数类等都是簇。在BCI-代数理论中对理想除了一般研究外,还利用理想成功地引入了商代数。

BCI-代数与格论、群论也有密切的联系。例如,我们已经知道BCI-代数理论中有下列结果:任意有界、可换的BCK-代数是相对于 \wedge 和 \vee 的一个格,一个BCK-代数在一定条件下成为一个Boole代数;胡庆平和井关清志(1982,1984)得到:如果BCI-代数 $\langle X; *, 0 \rangle$ 是结合的,则 $(X, *)$ 是以0为恒等元的对合群,其逆亦真;雷天德进一步得到了广义结合BCI-代数和交换群之间的密切的“伴随”关系。

BCI-代数与点集拓扑和拓扑群也有密切关系。一个BCI-代数 $\langle X; *, 0 \rangle$ 再赋以拓扑结构,且使 $*$ 成为连续映射,就成为BCI-拓扑代数,由自然半序引入的自然拓扑等都可满足这一条件,这种拓扑代数和拓扑群有密切的关系。另一方面,胡庆平(1987)还研究了BCI-代数的拟一致结构和一致结构,进而引入了一致拓扑,从而赋以拓扑结构。

这10多年中BCI-代数理论的主要研究方向是:(1)纯代数的研究。即BCI-代数理论的内在数学研究,主要着力于以下几个方面:本身性质的研究,构造新代数的方法探讨,各类BCI-代数的结构研究以及基数问题、真类问题及真子类问题的研究,结合性—广义结合性—具有散子代数性质这一方面的研究,子集和点的研究。(2)与其它数学分支联系的研究。即BCI-代数理论的外部的数学研究,主要是BCI-代数与泛代数、格论、群论、点集拓扑和拓扑群等分支的联系,还有与集合论、环论、根性理论等方面的联系,都已有有人展开一些工作,分别取得了一些结果。(3)建立和提出一些新的课题,使BCI-代数理论的研究不断深入,如胡庆平(1988)研究BCI-代数自然半序的几何特点,和研究了用自然半序定义的一类代数——具有散有限半序性质的BCI-代数,这实际上开拓了BCI-代数理论的一个新课题——BCI-代数自然半序的序结构研究(1990)。

从目前来看,BCI-代数理论研究的重点专题主要有:(1)BCI-代数的自然半序。主要首先研究极小元,胡庆平和胡志刚已经得到了极小元定理、极小元乘积定理和链积问题等一批结果,进一步应对原子、高层元素、整个自然半序结构等展开深入的研究。(2)几类BCI-代数。对拟可换的BCI-代数、类似可换的BCI-代数、具有条件(S)的BCI-代数、正常的BCI-代数和局部有限的BCI-代数等分别进行了一些研究,已取得一批结果。(3)扩张问题。对BCK-代数扩张为BCK-代数、BCK-代数扩张为BCI-代数、BCI-代数扩张为BCI-代数等均已有所研究,并也有一些有趣的结果。(4)BCI-代数的范畴BCI。研究其一些性质、有关的几个问题及子范畴等,已取得一些研究成果。(5)BCI-代数的同调。已对BCI-代数的链复形、同调代数及同伦等问题展开了研究,得到了一些结果。(6)环式BCI-代数。已引入了环式BCI-代数的概念,研究了环式BCI-代数

的一些性质,并利用矩阵方法,研究环式 BCI-代数的其它问题。(7)BCI-拓扑代数,对其一些代数问题、拓扑问题及进一步的问题已分别进行一些研究,已有一些初步的结果。(8)BCI-代数理论的应用,已经在泛代数、群论和数论等分支中找到一些应用、得到一些成果。

参考文献

- 1 Imai Y, Iseki K. On axiom system of propositional calculi. Proc Japan Acad, 1966,42:19~22
- 2 Iseki K. Proc. Japan Acad, 1966,42:26~29
- 3 Hu Qingping, et al. Math, Zem Notes, 1980,8:553~555
- 4 胡庆平,等. 科学通报, 1982,12:714~716
- 5 Hu Qingping et al. Math, Jap, 1984,2:251~253
- 6 胡庆平. BCI-代数. 西安:陕西科学技术出版社, 1987
- 7 胡庆平,等. 纯粹数学与应用数学, 1987,1:39~46
- 8 胡庆平. 数学杂志, 1987,1:63~69
- 9 胡庆平. 西北大学学报, 1988,3:5~8
- 10 胡庆平. 纯粹数学与应用数学, 1990,2:13~20

(西北大学胡庆平教授撰)

BCH-代数 BCH-algebra 是由胡庆平于 1981 年引入,并由日本井关清志定名的一类抽象代数。经过胡庆平和一批同行 10 多年不懈的努力,迄今已建立了 BCH-代数理论的框架,确立了一批专题,明确了一些主要方向,得到了一些结果,使之成为较活跃、正在迅速发展的现代代数的一个分支。

1966 年,日本的依美和井关清志引入 BCK-代数。如果 $\langle X; *, 0 \rangle$ 是一个 (2,0) 型代数,且满足下列公理:对于任意的 $x, y, z \in X$,

- k-1. $((x * y) * (x * z)) * (z * y) = 0$,
- k-2. $(x * (x * y)) * y = 0$,
- k-3. $x * x = 0$,
- k-4. $0 * x = 0$,
- k-5. $x * y = y * x = 0 \Rightarrow x = y$.

则称 $\langle X; *, 0 \rangle$ 为一个 BCK-代数。1966 年井关清志引入了 BCI-代数,即 (2,0) 型代数 $\langle X; *, 0 \rangle$, 满足下列公理:对于任意的 $x, y, z \in X$, 成立

- l-1 = k-1,
- l-2 = k-2,
- l-3 = k-3,
- l-4 = k-5,
- l-5. $x * 0 = 0 \Rightarrow x = 0$.

1980 年胡庆平和井关清志合作研究结合 BCI-代数,即具有性质

$$(Ass.) (x * y) * z = x * (y * z)$$

的 BCI-代数 $\langle X; *, 0 \rangle$, 其中 x, y, z 是 X 中任意 3 个元素。结合性是 1966 年引入 BCI-代数以来发现的关于 BCI-代数的第 1 个固有性质。在研究结合 BCI-代数的同时,胡庆平得到了 BCI-代数的下列特征:设 $\langle X; *, 0 \rangle$ 是一个 (2,0) 型代数,则 $\langle X; *, 0 \rangle$ 是一个 BCI-代数的充要条件是它满足 l-1, l-3, l-4 和下列条件:

$$(p-1) (x * y) * z = (x * z) * y, \forall x, y, z \in X$$

1981 年,胡庆平在上述研究的基础上提出以 l-3, l-4 和 (p-1) 为公理建立一个新的代数系统。作者的这个意见得到了井关清志的大力支持,且井关清志教授把这类代数定名为 BCH-代数(即 (2,0) 型的 Hu-代数)。一个 BCH-代数是具有下列条件的 (2,0) 型代数 $\langle X; *, 0 \rangle$; 对于任意的 $x, y, z \in X$ 成立下列公理:

- H-1. $x * x = 0$,
- H-2. $x * y = y * x = 0 \Rightarrow x = y$,
- H-3. $(x * y) * z = (x * z) * y$,

其中非空集合 X 称为 BCH-代数 $\langle X; *, 0 \rangle$ 的基础集合。自

1981 年以来,胡庆平和一批同行对 BCH-代数作了很多研究。在井关清志的大力支持下,关于 BCH-代数较早的论文发表在日本,以后国内的一些杂志陆续发表了一批关于 BCH-代数的论文,而胡庆平将 BCH-代数理论的基本框架写成专著发表,这是在专著中第 1 次出现对 BCH-代数的介绍。美国的 Math. Reviews 及德国的 Zentbl. Math. 均对作者引入的 BCH-代数作了介绍,使国内外一些数学工作者对 BCH-代数产生兴趣,并进行学习和研究。

10 多年来对 BCH-代数的研究表明,这是十分必要的。首先, BCH-代数是一种独立的公理代数体系。1987 年胡庆平和杨永证明了 BCH-代数的 3 条公理 H-1, H-2 和 H-3 互不蕴涵,因而 BCH-代数公理系统是独立的。其次, BCH-代数类是比 BCI-代数类较大的一个代数类,易知成立下列包含式: $BCK\text{-代数类} \subset BCI\text{-代数类} \subset BCH\text{-代数类}$ 。前一真包含式是井关清志在 1980 年给出的,而 1983 年胡庆平和李新给出了第 1 个真 BCH-代数的例子,从而 BCH-代数类真包含 BCI-代数类。第三,存在无限多个真 BCH-代数,而且一切真 BCH-代数已构成一个真类。第四,产生了一批新问题,如胡庆平在 1983 年就提出了关于 BCH-代数的一系列值得研究的问题: BCH-代数类和范畴 BCH 的研究、BCH-代数性质的研究、BCI-化和 BCK-化的研究、理想和自然的二元关系 \leq 的研究及某些 BCH-代数类的研究等。第五,已经有了初步的应用,如胡庆平已将 BCH-代数用于泛代数的研究。

随着 BCH-代数理论不断丰富和研究的不断深入,逐步出现了一批研究 BCH-代数的专题。从目前来看,研究 BCH-代数的主要专题有以下 8 个:(1)对于关系 \leq 的研究。实际上, $\langle X; *, 0, \leq \rangle$ 是一个关系系统,其中 $x \leq y \Leftrightarrow x * y = 0$, 因而有一系列需研究的问题,例如 BCI-代数的自然半序的结构, BCH-代数的关系 \leq , 及由 BCH-代数导出的一类关系系统等。(2)新代数的生成的研究。如子代数、积代数、并代数等,而合理的商代数问题更是研究的一个热点。(3)某些 BCH-代数类的研究。本质上是同构分类问题的需要,是一个很很重要的问题。(4)扩张问题研究。主要有:把井关清志的 BCK-代数的“一点扩张”(为 BCI-代数)推广为“一点直接扩张”(为真 BCH-代数);真 BCI-代数的一点扩张(为真 BCH-代数);真 BCH-代数本身的一点扩张;以及进一步的问题,如多点扩张、并集扩张及限制或“减点”问题等。(5)基数函数和序数函数研究。本质是用数量的方法研究 BCH-代数。(6)簇和亚簇。主要考察 BCH-代数类及其各主要子类哪些是簇或亚簇,及作为簇或亚簇具有什么性质或相互关系。(7)结构问题。从目前来看需要解决的问题很多,如 BCH-代数的代数结构、具有自然半序 \leq 的 BCH-代数的序结构、不具有自然半序的关系 \leq 的结构、各类代数本身结构的特点等。(8)同态和同构问题研究。如不变性问题、与生成子代数的关系、与各代数类的关系、同态和同构定理研究,尤其是同构分类问题的研究等。

研究 BCH-代数的方法主要有 5 类:(1)集合论方法,主要有数量方法(如基数和序数的使用),论证方法(如使用各种归纳法)、公理方法(如利用选择公理,或连续统假设)、子集方法(如包、核、闭包系统)等。(2)范畴论方法。主要使用范畴、函子、自然变换、伴随、万有性质、交换图等。(3)泛代数方法。如一般到具体的方法,以格、多项式、闭包系统为工具研究代数结构的方法,以合同关系建立商代数的方法,泛代数的某些专题(如簇论、扩张理论等)引伸到 BCH-代数的方法等。(4)经典代数的方法,在半群、群、环、域、格、模等代数系统研究中采用的方法也可应用于 BCH-代数的研究,如在 BCH-代数中研究理想、根、根性、素性、分解等。(5)其它方法。如拓扑学中的方法(一点扩张、一点完备化)、拓扑群的方法(拓扑代数)、同调的方法(同调 BCH-代数)、线性代数的方法(环式 BCH-代数)等。

BCH-代数还有丰富的外延理论。BCH-代数范畴 BCH, 这是 BCH-代数和范畴论结合的产物,主要研究 BCH 的性质、

有关 BCH 的一些问题和 BCH 的子范畴等。同调 BCH—代数,这是同调代数与 BCH—代数结合的产物。环式 BCH—代数,这是 BCH—代数与环论、线性代数结合的产物,主要研究性质、矩阵及其它有关问题。BCH—拓扑代数,这是 BCH—代数和拓扑学结合的产物,主要研究几个有关的代数问题,有关的拓扑问题及其它进一步的问题。

预计, BCH—代数理论研究今后 10 年中的主要热点应是: BCH—代数的结构、主要的专题和主要的外延方向,估计基础理论研究仍将围绕着结构、分类、基数、四基(点、子集、子类、簇)等展开,并将进一步着手应用问题的研究。

参考文献

- 1 Imai Y, et al. Proc. Japan Acad., 1966, 42: 19~22
- 2 Iseki K. Proc. Japan Acad., 1966, 42: 26~29
- 3 Hu Qingping, et al. Math, Sem Notes, 1980, 8: 553~555
- 4 胡庆平,等. 科学通报, 1982, 12: 714~716
- 5 Hu Qingping, et al. Math, Sem Notes, 1983, 11: 313~320.
- 6 Hu Qingping, et al. Math, Japonica, 1985, 4: 659~661
- 7 胡庆平. BCH—代数. 西安: 陕西科技出版社, 1987
- 8 胡庆平,等. 西北大学学报, 1987, 2: 58~62
- 9 胡庆平. 数学季刊, 1989, 3: 104~106
- 10 胡庆平等. 西北大学学报, 1990, 1: 18~30

(西北大学胡庆平教授撰)

BCK—代数的理想 ideals of BCK—algebras BCK—代数作为一个抽象代数系统,当其初等理论建立以后,如何引入它的理想,就成为 BCK—代数深入发展的一个关键问题。1975 年日本井关清志引入了 BCK—代数的理想概念,充分反映了 BCK—运算 $*$ 的不对称性这一特点。多年的发展表明,理想理论是 BCK—代数的最重要最基本的理论分支之一,与格论、环论和布尔代数等有着广泛的联系,它的出现标志 BCK—代数的研究进入新的阶段。

BCK—代数 $\langle X, *, 0 \rangle$ 的非空子集 I 叫做理想,如果它满足: $0 \in I$ 和 $x * y, y \in I$ 蕴涵 $x \in I$ 。以 $I(X)$ 记 X 的全体理想之集,显然 $\{0\}, X \in I(X)$ 。如果 $I(X) = \{\{0\}, X\}$, 则称 X 是单的,包含子集 A 的最小理想称为 A 生成的理想,记为 $\langle A \rangle$ 。如果 A 是有限集,则称 $\langle A \rangle$ 是有限生成的。代数学的一个重要问题是: 如何用 A 表示 $\langle A \rangle$ 。井关清志给出了一个优美的结果: $u \in \langle A \rangle$ 当且仅当存在 $x_1, \dots, x_n \in A$ 使 $(\dots(u * x_1) * \dots) * x_n = 0$ 。以该结果为工具,波兰 T. 特拉赛科(T. Traczyk)和 M. 帕兰辛斯基(M. Palansinski)先后证明 $\langle I(X) \rangle = X$ 是一个无限分配格,即 $\forall I_1, I_2 \in I(X), I_1 \cap I_2$ 是含于 I_1 和 I_2 的最大理想, $(I_1 \cup I_2)$ 是包含 I_1 和 I_2 的最小理想; $\forall I_1, J_\alpha \in I(X) (\alpha \in A), I \cap (\cup \{J_\alpha, \alpha \in A\}) = (\cup \{I \cap J_\alpha, \alpha \in A\})$ 。

理想的重要作用之一是构造商代数。对于 BCK—代数 X 的理想 I , 称 $x \sim y$ 当且仅当 $x * y, y * x \in I$ 。二元关系 \sim 是 X 上的一个同余关系,以 C_x 记包含 x 的等价类,定义 $C_x * C_y = C_{x * y}$, 则 $\langle X/I, *, I \rangle$ 是一个 BCK—代数,其中 $X/I = \{C_x, x \in X\}$, 称做 X 关于 I 的商代数。巴基斯坦阿汗山(J. Ahsan)和德赫木(A. B. Thaheem)证明了对应定理: 以 $\{I, X\}$ 表示 X 中包含 I 的所有理想之集,则映射 $\mu: \{I, X\} \rightarrow I(X/I)$ 使得 $\mu(I) = I/I$ 是一个格同构。由对应定理知,理想 I 是极大的当且仅当 X/I 是单的。

用理想刻画代数是 BCK—代数中一个有趣的研究方向,井关清志和田中昭太郎(S. Tanaka)最初引入两类代数: 正定关联 BCK—代数和每个理想是正定关联的 BCK—代数。这两类代数有何关系? 经过 3 年多的研究,1979 年井关清志证明它们是等价的。从而开创了用理想刻画代数的研究方向。孟杰于 1986 年引入关联理想概念,借此刻画了关联 BCK—代数。如何引入可换理想,并借此刻画可换 BCK—代数? 这里存在的主要困难是 $x * (x * y)$ 和 $y * (y * x)$ 在一般 BCK—代数中关于 BCK—序

\leq 不可比较,而可换性条件是 $x * (x * y) = y * (y * x)$ 。为了克服这一困难,孟杰从寻找可换性等价条件着手,1988 年证明可换性等价于: $x \leq y$ 蕴涵 $y * (y * x) = x$ 。借此引入了可换理想的概念,并研究以上 3 类理想的分布状态。BCK—代数 X 的非空子集 I 叫做一个正定关联理想,如果它满足: $0 \in I$ 和 $(x * y) * z, y * z \in I$ 蕴涵 $x * z \in I$ 。 I 叫做一个可换理想,如果它满足: $0 \in I$ 和 $(x * y) * z, z \in I$ 蕴涵 $x * (y * (y * x)) \in I$ 。 I 叫做一个关联理想,如果它满足: $0 \in I$ 和 $(x * (y * x)) * z, z \in I$ 蕴涵 $x \in I$ 。一个理想是关联的当且仅当它既是可换的又是正定关联的。关于它们的分布状态有下述深刻结果,设 I 和 J 是 X 的两个理想,且 $I \subseteq J$, 如果 I 是正定关联(可换,关联)理想,则 J 也是正定关联(可换,关联)理想。用理想可以刻画代数: BCK—代数 X 是正定关联(可换,关联)的,当且仅当 X 的每个理想是正定关联(可换,关联)的当且仅当零理想 $\{0\}$ 是正定关联(可换,关联)的。理想理论的发展推动了商代数研究的深入,若 I 是 BCK—代数 X 的一个理想,则 X/I 是可换(正定关联,关联)的,当且仅当 I 是一个可换(正定关联,关联)理想。特别地, I 既是极大的又是关联的当且仅当 X/I 是二阶 BCK—代数。这是布尔代数中 Tarski 定理的推广: 布尔代数 X 的理想 I 是极大的当且仅当 $X/I \cong 2$ 。

理想的分解是理想理论的另一个研究方向。阿汗山开创了这个方向。BCK—代数 X 叫做一个诺德(Noether)代数,如果它的每个理想是有限生成的。理想 I 叫做既约的,如果 $\forall A, B \in I(X), A \cap B = I$ 蕴涵 $A = I$ 或 $B = I$ 。1977 年阿汗山得到了既约分解定理: 若 X 是一个诺德代数,则它的每个理想是有限多个既约理想的交。他在有界关联 BCK—代数条件下得到了质分解定理,由于有界关联 BCK—代数是布尔代数,所以阿汗山的质分解定理实质上是布尔代数相应结果的平移。为了减弱有界关联的条件,必须揭示 BCK—代数的特性。帕兰辛斯基给出下述重要引理: 在 BCK—下半格 X 中,如果对自然数 m 和 n 有 $a *^m x = a *^n y = 0$, 则存在自然数 k 使得 $a *^k (x \wedge y) = 0$, 其中 $x \wedge y = \inf\{x, y\}, x *^l a = x * a * a * \dots * a$, $a *^l x = (a *^l x) * x$, 这为他的质分解定理打下了基础。BCK—下半格 X 中的理想 I 叫做质的,如果 $x \wedge y \in I$ 蕴涵 $x \in I$ 或 $y \in I$ 。帕兰辛斯基于 1982 年得到质分解定理: 若 BCK—下半格 X 是一个诺德代数,则它的每个理想是有限多个质理想的交。他还讨论了极小质分解及唯一性的问题。质理想和商代数的关系,以 1991 年阿汗山(J. Ahsan)、迪巴(E. Y. Deeba)、德赫木(A. B. Thaheem)下述结果为最好: 可换 BCK—代数 X 的理想 I 是质的当且仅当 X/I 满足消去律,即 $C_x \wedge C_y = C_0$ 蕴涵 $C_x = C_0$ 或 $C_y = C_0$ 。迪巴还证明在适当的运算下, $I(X)$ 是一个 BCK—代数。

理想与同态是密切相关的。若 $\langle X, *, 0 \rangle$ 和 $\langle Y, *, 0 \rangle$ 是 BCK—代数,映射 $f: X \rightarrow Y$ 叫做一个同态映射,如果 $\forall a, b \in X, f(a * b) = f(a) * f(b)$ 。集合 $\text{Ker}(f) = \{x \in X, f(x) = 0\}$ 叫做 f 的核。井关清志证明 $\text{Ker}(f)$ 是 X 的一个理想。如果 f 还是满射,则 $X/\text{Ker}(f) \cong Y$, 这就是第 1 同构定理。中国黄涵和黄俊敏分别建立了第 2 和第 3 同构定理,后者还系统研究了 BCK—代数的根性。1987 年美国古尔(S. K. Goel)和阿罗拉(A. K. Arora)考虑如下问题: 设 I 是 X 的一个理想, Y 是任一 BCK—代数,存在同态映射 $f: X \rightarrow Y$ 使得 $\text{Ker}(f) = I$ 吗? 显然回答是否定的。那么当 I 附加何种条件时,回答是肯定的? 为解决这一问题,他们引入了固执理想的概念。理想 I 叫做固执的(obstinate),如果 $x \in I$ 和 $y \in I$ 蕴涵 $x * y \in I$ 。他们证明: 若 X 和 Y 是任意两个 BCK—代数, I 是 X 的一个固执理想,则存在同态映射 $f: X \rightarrow Y$ 使得 $\text{Ker}(f) = I$ 。1992 年孟杰证明这个结论的逆也成立。井关清志、古尔、阿罗拉、帕兰辛斯基、孟杰等讨论了各种理想的关系: 在一般的 BCK—代数中,固执理想、极大且关联的理想、极大且正关联的理想彼此等价; 固执理想必是既约理想,但其逆不真。在 BCK—下半格中,既约理想等价于质理想。在关联 BCK—代数中,固执理想、极大理想、质理想和既约

理想彼此等价。

BCK一代数是一个年轻的学科,它的理想理论远未成熟,今后将有更大的发展,下列问题将引起关注:(1)用格理想的观点和方法研究理想,加拿大胡章成(C. S. Hoo)和印度的罗马纳莫尔特(P. V. Ramana Murty)于1987年证明了有界可换BCK一代数中的理想必是格理想,其逆不真。进一步关系有待研究。(2)1991年巴斯坦阿斯拉木(M. Aslam)和德赫木引入零化子、零因子和对合理想等概念,这些有待深入研究。(3)理想和同态是密切相关的。随着范畴论的观点方法渗入BCK一代数,势必对理想作广泛的研究。(4)借鉴斯东(M. H. Stone)关于布尔代数和布尔环的工作,讨论BCK一代数的拓扑及其它分析问题。

参考文献

- 1 Iseki K, Tanaka S. Math, Japon, 1976, 21: 351~366
- 2 Palansinski M. Math, Seminar Notes, 1982, 10: 467~471
- 3 Goel S K, Arora A. K Math, Japon, 1987, 32: 559~567
- 4 孟杰. 数学年刊. 1987, 2: 262~268
- 5 孟杰. 纯粹数学和应用数学. 1990, 6(2): 33~37
- 6 Ahsan J, Deeba E Y, Thaheem A B. Math, Japon, 1991, 36: 875~882
- 7 Aslam M, Thaheem A B. Math, Japon, 1991, 36: 895~706

(西北大学孟杰教授撰)

BCI, BCK 代数的扩张与分类 extension and classification of BCI and BCK-algebras 设 X 是一个 BCI 一代数, 所谓作 X 的一个扩张, 是找一个 BCI 一代数 Y , 使得 X 成为 Y 的真子代数, 或者 X 同构于 Y 的一个真子代数。类似可定义 BCK 一代数的扩张。对 X 与 Y 之间的关系加不同的限制或要求, 就可以得到 X 的许多不同的扩张方式。

扩张理论的意义主要有两个方面。一是用来解决分类问题, 即确定所有互不同构的代数类; 二是用来解决构造问题, 即找出高阶的复杂的代数与低阶的简单的代数之间的联系。

自日本数学家 K. Iseki 20 世纪 60 年代提出 BCK 与 BCI 代数的概念之后, BCK 代数首先有了较多的研究。在扩张理论方面也是这样。

BCK 代数的第 1 种扩张方法是 1975 年 Iseki 提出来的, 1980 年, Yutani 把这种扩张称为 Iseki 扩张, 设 $X = \langle X, *, 0 \rangle$ 是 BCK 一代数, 元素 $u \in X$, Iseki 扩张是把 u 添加到 X 中使 $X' = X \cup \{u\}$ 成为 BCK 一代数, 而 u 成为 X' 的单位元(即最大元)。BCK 代数的第 2 种扩张方法是 Iseki 1976 年提出来的, 称为 BCK 一代数的不相交并, 对一族 BCK 一代数也可以定义不相交并。1976 年 Iseki 和 Tanaka 还定义了 BCK 一代数的直积。1980 年 Iseki 和 Yutani 定义了 BCK 一代数的两种有序并, 这些都是 BCK 一代数的不同的扩张方法。

有关 BCI 一代数的扩张理论的最初工作也是由 Iseki 进行的。1980 年他提出从一个 BCK 一代数出发用“镶边”法构造一个真 BCI 一代数的方法, 从而首次证明真 BCI 一代数的存在性。同时他提出 BCI 一代数的直积。在作并代数方面迄今为止最好的结果是在 1984 年由西北大学的学生李欣得到的, 目前文献中称之为李欣并。这种方法是作一个 BCK 一代数和一个 BCI 一代数的并代数从而得到一个新的 BCI 一代数。李欣并方法是一种十分有用的方法, 它还包括 Iseki 的“镶边”法以及其他的一些扩张方法作为其特例。两个 BCK 一代数的李欣并仍是 BCK 一代数。所以李欣并又提供了一种 BCK 一代数的扩张方法。

BCK 一代数扩张方法的最新进展是姜豪在 1992 年提出的 3 种新的扩张方法, 分别称为添零扩张、小原子扩张和链扩张。姜豪用自己提出的方法(1990), 借助电子计算机确定了所有阶 $n \leq 6$ 的 BCK 代数。他给出所有阶 $n \leq 6$ 的 BCK 一代数的完全分类表。1991 年沈百英主编的专著给出了 6 阶单 BCK 一代数和 6

阶 4 型 BCK 一代数的完全分类表。其他 6 阶 BCK 代数的分类表也已经发表。1988 年姜豪决定了所有这样的有限真 BCI 一代数 X , 其 BCK 一部分是 B_2 (2 阶 BCK 一代数), 而 $X/B_2 \cong Z_2^n$, 其中 Z_2^n 表示 2 阶循环群 Z_2 的伴随代数。1993 年姜豪在 Math. Japonica 上发表了所有阶 $n \leq 5$ 的真 BCI 代数的完全分类表。

目前扩张理论的一个研究方向是解决 BCI 代数的并代数问题。胡庆平等人在 1986 年已经证明两个真 BCI 代数不能作并代数。故只能象李欣那样考虑一个 BCK 代数与一个 BCI 代数的并代数。现在的问题是设法找出一个 BCK 代数与一个 BCI 代数能作并代数的充分必要条件, 从而判定是否存在比李欣并更一般的扩张方法, 或者存在与李欣并不同的扩张方法。

扩张理论的另一个研究方向是给定 BCI 代数 A 与 B , 确定所有满足下面两个条件的 BCI 代数: (1) X 包含 A 且 A 是 X 的理想。(2) $X/A \cong B$, 这方面的扩张理论形式上类似于群的扩张理论, 但实质上是不同的。因为群是有结合性的代数结构而 BCI 代数是而非结合的代数结构。引入合成列与合成因子等概念后, 由上述扩张理论可以推断研究 BCI 代数的结构归结为研究上述扩张方法与确定单 BCI 代数的分类。朱怡权完成了真的单 BCI 代数的分类。由此可知单 BCI 代数的分类问题主要是单 BCK 代数的分类问题。而后者是一个尚未解决的困难问题。目前最好的结果已确定了所有阶 $n \leq 6$ 的单 BCK 代数。在这种扩张方法的研究迄今为止除了姜豪(1992)中得到的结果以外尚无新的结果发表, 可以说进展甚微。

扩张理论与分类问题是 BCI 与 BCK 代数中的根本问题, 同时也是困难的问题。目前有大量问题有待解决。这方面的理论突破预计将为 BCI 与 BCK 代数的发展带来新的活力, 将为这两种代数的实际应用开辟新的途径。

参考文献

- 1 Iseki K. Math Sem Notes(Kobe Univ), 1975, 3: 1~12
- 2 Yutani H. ibid, 1980, 8: 181~186
- 3 Iseki K, Tanaka S. Math. Japonica, 1976, 21: 351~366
- 4 Iseki K, Yutani H. Math Sem Notes(Kobe Univ), 1980, 8: 307~308
- 5 Iseki K. ibid. 1980, 8: 125~130
- 6 Iseki K. ibid. 1980, 8: 181~186
- 7 姜豪. 杭州大学学报(自然科学版), 1988, 15(4): 388~395
- 8 Jiang Hao. Kobe J Math, 1990, 7(1): 33~46
- 9 沈百英主编. “双 B”代数和计算机逻辑论文集. 上海: 上海交通大学出版社, 1991
- 10 姜豪. 杭州大学学报(自然科学版), 1992, 19(1): 1~9

(杭州大学姜豪副教授撰)

群表示论 the representation theory of groups 群 G 在一个范畴 D 上的表示, 是指 G 到范畴 D 中某个对象 A 的同构群的同态。通过群表示, 人们将一个需要加以研究的群 G 与另一个比较具体的群 H 联系起来, 并由 H 的性质来探究 G 的性质, 或者通过 G 对 A 的作用来研究 A 的性质, 这一理论就是群表示论。群表示论是现代数学的重要理论分支, 它不但应用于数学各个领域而且还应用于量子化学、理论物理等许多学科。线性表示与置换表示是最重要的 2 种表示。线性表示是群 G 到一个向量空间上的线性变换群的同态, 而置换表示是群 G 到一个置换群的同态。下面我们的讨论仅限于有限群表示。有限群表示的基本概念可推广到无限群, 但无限群表示所关心的对象主要是拓扑群, 特别是局部紧拓扑群, 目前这一领域已发展成为现代分析的一个重要分支。

群表示论是 19 世纪末德国 G. Frobenius 创立的, 此后 Frobenius 与 W. Burnside, I. Schur 发展了复表示理论, 并利用特征标研究群的结构得到了丰富的结果, 著名的 Burnside 定理, 即仅含 2 个不同素因子的有限群是可解群, 就是利用特征标理论证明的。直到 70 年代初才出现这一定理的纯群论证明,

但纯粹论证法仍不及表示论证明简洁。第1部系统论述群表示的著作是 Burnside 1911 年的《有限群理论》。

其后对群表示论作出最重要贡献的是德国 R. Brauer。从 20 世纪 30 年代开始直到 1977 年 Brauer 去世的 40 多年中, Brauer 和他的学生们发展了有限群的模表示理论,其主要内容包括 Brauer 块论三大定理。这 3 个主要定理将对于群 G 的块及块中特征标的研究归结于对 G 的某些局部子群的块及块中特征标的研究。1941 年 Brauer 得到了亏数为 1 的块的常特征标与模特征标的结构。25 年之后 J. G. Thompson 将不可分解模的顶与源的概念,以及 Green 对应应用于具有循环亏群的块的研究,1966 年 E. C. Dade 在 Thompson 工作的基础上完成了循环块的结构理论。Brauer 工作的一个特点是在建立投射模的基本性质之后尽量避免模的理论而主要讨论特征标的性质,并把它应用于群的结构讨论。模表示被成功地应用于有限单群分类理论,有限单群分类工作于 1981 年完成,这是群论诞生 100 多年来最出色的成就。

1959 年 J. A. Green 开始对群代数的不可分解模进行系统的研究,1964 年得到的 Green 对应是研究群代数不可分解模的基本工具。Green 还证明块的 Brauer 对应与块代数作为双边 G 模的 Green 对应一致。不可分解模的理论至今仍是群表示理论中所关心的重要问题。

1979 年 J. L. Alperin 与 M. Broué 在 Brauer 关于块熔合理论的基础上提出了局部表示论的方法,继之 Broué 与 L. Puig 对于零块的特征标进行了详细的刻划, Puig 进一步引入点群与源代数的概念,并于 1988 年求出了零块的源代数。这些结果是继循环块的理论之后模表示论中最深入最完整的理论。局部表示论是目前活跃的研究领域。Alperin 1984 年的著作《局部表示论》是这一领域的重要著作。1987 年 Alperin 在有限李型群结构的启发下提出一般有限群的权猜想。这一猜想如果成立,可以推断模表示中许多过去难以证明的结果。目前已经证明这一猜想对于 p -可解群、李型群以及对称群是成立的,但一般情况下这一猜想仍是一个十分困难的问题。

70 年代以来,由于 M. Auslander 和 I. Reiten 的工作, Artin 代数的表示理论得到很大的发展。Auslander 和 Reiten 首先引入几乎分裂序列的概念,并证明对于每个 Artin 代数的每有限生成非投射不可分解模恒存在唯一的几乎分裂序列,然后利用几乎分裂序列构造一个称之为 Auslander-Reiten 箭图的有向图 Q , 箭图 Q 联系一个路代数 kQ , 每单 kQ -模是一维的,并且已知的代数 A 与 kQ 的一个商代数 Morita 等价。这样代数 A 的模范畴性质可由箭图 Q 的性质决定。80 年代以来 K. Erdmann, P. J. Webb 等将代数表示的 Auslander-Reiten 理论与方法应用于有限群表示的研究,并作了一系列工作,特别对于亏群为循环群、四元数群、二面体群或半二面体群的块中不可分解模的结构作了比较详细的讨论。D. J. Benson 将这些结果以及表示论的上同调方法汇集在他新近的著作《表示与上同调》两卷本中。

通常把有限群的复特征标理论称为常表示论。常表示论的一个重要进展是李型群的表示。有限李型群是极其重要的一类有限群,李型群的复表示经过长期的研究在 70 年代由于 P. Deligne 与 G. Lusztig 的工作,目前这一理论体系已经建立。1976 年 Deligne 与 Lusztig 利用 l -adic 上同调理论构造了一族广义特征标,并详细研究了它们的性质,这族广义特征标是求出李型群全部不可约复特征标的关键。李型群复表示理论的主要结果收集在 R. W. Carter 1985 年著的《有限李型群,共轭类与复特征标》一书中。常表示的一般理论近年也得到不断的完善,其中主要的工作包括可解群的特征标、 M -群的群论刻划、特征标的维数、特征标对应以及特征标积与共轭类积的分解等方面, I. M. Isaacs 1976 年著的《有限群的特征标理论》相当详细地论述了常表示的主要内容。

当前有限群表示论的研究主要是模表示的研究,而模表示

研究的中心问题是群代数不可分解模的构造及分类问题。但是全体有限群代数不可分解模的分类目前还是一个非常困难的问题。就块论而言,如何将循环块的理论推广到具有可换亏群的块,对于一个已知的有限 p -群 D ,怎样刻划以 D 为亏群的有限群块代数的 Morita 等价类等等都是人们非常关注的问题。

参考文献

- 1 Isaacs I M. Character theory of finite groups. New York: Academic Press, 1976
- 2 Alperin J L. Proc Sym, Pure Math, 1980, 37: 369~375
- 3 Curtis C W, et al. Methods of representation theory. New York, Wiley, 1981
- 4 Feit W. The representation theory of finite groups. New York, North-Holland, 1982
- 5 Carter R W. Finite groups of Lie type, Conjugacy classes and complex characters. New York, Wiley, 1985
- 6 Benson D J. Representations and cohomology. Cambridge: Cambridge Uni. Press, 1991

(西南师范大学张广祥教授撰)

Fuzzy 正则半群 fuzzy regular semigroups

是 Fuzzy 半群的一个重要研究对象, Fuzzy 代数系统的研究是由罗逊菲尔特(A. Rosenfeld)在 1971 年发表的文章《Fuzzy Groups》开始的。当时他提出 Fuzzy 群的概念,其中也涉及到 Fuzzy 半群的原始思想。较系统地研究 Fuzzy 半群的是从 1979 年开始的。1979 年黑木(N. Kuroki)提出半群的 Fuzzy 双理想的概念; 1980 年威振开提出 Fuzzy 亚群的思想,并研究 Fuzzy 亚群列; 1981~1982 年黑木进一步研究半群的 Fuzzy 双理想与 Fuzzy 理想之间的关系,并提出半群中 Fuzzy 半素理想的概念; 1988 年鲍廷莱纳(B. T. Lerner)又讨论了半群上的 Fuzzy(右)拓扑。至此,人们对 Fuzzy 半群的研究还未深入到它的子结构上去。

直至 1990 年沈继忠(Shen JZ)在文章《On Fuzzy Regular Subsemigroups of a Semigroup》中才提出 Fuzzy 正则子半群、Fuzzy 弱正则子半群、Fuzzy 完全正则子半群和 Fuzzy 弱完全正则子半群的概念,并且讨论了它们的某些代数特征和性质。

Fuzzy 子半群的定义是: 设 S 是一个半群, $\mu \in F(S)$, 如果 $\forall x, y \in S$ 有

$$\mu(xy) \geq \min(\mu(x), \mu(y))$$

则称 μ 为 S 的 Fuzzy 子半群。

Fuzzy 正则子半群与 Fuzzy 弱正则子半群的定义是: 设 S 是一个半群, $\mu \in F(S)$ 是 S 的 Fuzzy 子半群, 若 μ 满足 $\forall x \in S$, 当 $\mu(x) \neq 0$ 时, 存在 $x' \in R_x (R_x = \{x' | x' \in S, xx'x = x\})$, 使 $\mu(x') \geq \mu(x)$, 则称 μ 为 S 的 Fuzzy 正则子半群; 若 μ 满足 $\forall x \in S$, 当 $\mu(x) \neq 0$ 时, 有 $R_x \neq \emptyset$, 且

$$\sup_{x' \in R_x} \mu(x') \geq \mu(x)$$

则称 μ 为 S 的 Fuzzy 弱正则子半群。

W 研究的主要结果有:

(1) 当 μ 具有上确界性质时, μ 是 Fuzzy 正则子半群当且仅当 μ 是 Fuzzy 弱正则子半群。

(2) $\mu \in F(S)$ 是 S 的 Fuzzy 正则子半群 $\Rightarrow \mu \cdot \mu = \mu$;

(3) 若 S 是半群, 令 $S^* = S \cup \{1\}$ 是一个带单位元的半群。 $\forall \mu \in F(S)$, 定义 $\mu' \in F(S^*)$, 其中

$$\mu'(x) = \begin{cases} 1, & x=1 \\ \mu(x), & x \in S \end{cases}$$

显然 $\forall \lambda \in [0, 1], 1 \in \mu_\lambda$, 则 $\mu \in F(S)$ 是 S 的 Fuzzy 正则子半群当且仅当 $\forall x \in S$, 当 $\mu(x) \neq 0$ 时, 存在 $\lambda \in (0, 1]$ 及幂等元 $e \in \mu_\lambda$, 使 $x\mu_\lambda' = e\mu_\lambda$, 其中 $\lambda = \mu(x)$ 。

(4) 设 $\mu \in F(S)$ 是 S 的 Fuzzy 子半群, 则 μ 是 Fuzzy 弱正则子半群当且仅当 $\forall x \in S$, 当 $\mu(x) \neq 0$ 时, 有 $(x\mu x)(x) \geq \mu(x)$ 。

Fuzzy 完全正则子半群和 Fuzzy 弱完全正则子半群的定义是, 设 $\mu \in F(S)$ 是 Fuzzy 子半群, 且满足 $\forall x \in S, \text{当 } \mu(x) \neq 0$ 时, 存在 $x^* \in R_x \cap C_x (C_x = \{y | y \in S, yx = xy\})$, 使 $\mu(x^*) \geq \mu(x)$, 则称 μ 为 S 的 Fuzzy 完全正则子半群; 若 μ 满足 $\forall x \in S, \text{当 } \mu(x) \neq 0$ 时, 有 $R_x \cap C_x \neq \emptyset$, 且

$$\sup_{x^* \in R_x \cap C_x} \mu(x^*) \geq \mu(x)$$

则称 μ 为 S 的 Fuzzy 弱完全正则子半群。

主要结果有:

(1) 当 μ 满足上确界性质时, μ 是 Fuzzy 完全正则子半群, 当且仅当 μ 是 Fuzzy 弱完全正则子半群。

(2) 设 μ 是 S 的 Fuzzy 子半群, 则 μ 为 S 的 Fuzzy 弱完全正则子半群, 当且仅当 $\forall x \in S, \text{当 } \mu(x) \neq 0$ 时, 有

$$(x^2 \mu x^2)(x) \geq \mu(x),$$

(3) 设 μ 是 S 的 Fuzzy 子半群, 则 μ 为 S 的 Fuzzy 弱完全正则子半群, 当且仅当 $\forall x \in S, \text{当 } \mu(x) \neq 0$ 时, 有

$$(x^2 \mu \cap \mu x^2)(x) \geq \mu(x)$$

对于 Fuzzy 正则半群的进一步研究, 目前尚未发现。但是它的研究内容还是很丰富的。例如 Fuzzy 正则子半群与 Fuzzy 理想、Fuzzy 单半群之间关系, 如何定义 Fuzzy 格林(Green)关系, 从而讨论 Fuzzy 完全正则子半群与群并之间的内在联系, 也可以进一步研究 π -Fuzzy 正则子半群。

今后的发展也可能进一步开拓 Fuzzy 子半群的研究。1991 年沈继忠定义了 Fuzzy 阿基米德(Archimedean)子半群, 并讨论了它的代数结构与性质。主要结果是下述诸命题等价: (1) 半群 S 的每一个 Fuzzy 真左理想是 Fuzzy 阿基米德子半群。(2) $FL(S)$ 是 S 的 Fuzzy 阿基米德子半群。(3) 或 S 是阿基米德半群; 或 S 中存在一个极大 Fuzzy 左理想 β 是 S 的 Fuzzy 阿基米德子半群, 而且 $\forall \lambda \in (0, 1), \forall a \in S \setminus \beta_\lambda$, 有 $\beta_\lambda \cdot a \supseteq \beta_\lambda$ 。

参考文献

- 1 Zadeh L. A. Information and Control, 1965, 8: 338~353
- 2 Rosenfeld A. J Math Anal Appl, 1971, 35: 512~517
- 3 戚振开. 哈尔滨工业大学学报, 1980, 2: 1~9; 1980, 4: 1~6
- 4 Kuroki N. Fuzzy bi-ideals in semigroups, Comment Math Univ St Paul, 1980, 28: 17~21
- 5 Kuroki N. Fuzzy Sets and Systems, 1981, 5: 203~215
- 6 Kuroki N. Fuzzy Sets and Systems, 1982, 8: 771~779
- 7 Bogdanovic S. Novi sad, 1985
- 8 Lerner B-T. J Math Anal Appl, 1988, 134: 306~311
- 9 Shen J Z. Information Sciences, 1990, 51: 111~120
- 10 沈继忠. 江西师范大学学报(自然科学), 1991, 2: 109~113 (江西师范大学沈继忠教授撰; 应明生教授审)

Klein 群的有限性定理 finiteness theorems in the

theory of kleinian groups Klein 群理论是 19 世纪 Schottky, Klein 和 Poincare 创立的。此后长期没有得到充分地发展。直到近年来, 由于 Thurston 的工作, Klein 群的几何与拓扑的方法才得到明显的进展。Klein 群的解析理论是从 1964 年 Ahlfors 的文章《Finitely generated Kleinian groups》开始的。文中的 Ahlfors 有限性定理是解析理论的基础。从此, 有限生成的 Klein 群曾一度成为 Klein 群理论研究的中心课题。

设 Γ 是一个 Klein 群, $\Omega = \Omega(\Gamma)$ 是 Γ 的全不连续区域, $\Lambda = \Lambda(\Gamma)$ 是它的极限集, 则轨道空间 $\Omega(\Gamma)/\Gamma$ 是一些 Riemann 曲面的并。如果 Δ 是 Ω 的一个分支, Γ_Δ 是 Δ 的稳定子群, 则 Δ/Γ_Δ 是分歧的 Riemann 曲面。两个分支 Δ_1, Δ_2 称为共轭的, 如果有 $\gamma \in \Gamma$, 使得 $\gamma(\Delta_1) = \Delta_2$ 。如果 $\Delta_1, \Delta_2, \dots$ 是 Γ 的两两不共轭的完备的分支, $\Gamma_i = \Gamma_{\Delta_i}$, 则

$$(1) \Omega(\Gamma)/\Gamma \approx \cup \Delta_1/\Gamma_1 + \cup \Delta_2/\Gamma_2 + \dots$$

称 Klein 群 Γ 在分支 Δ 上是有限型的, 如果 Δ/Γ_Δ 是由一

个紧 Riemann 曲面去掉有限个点得到的。称 Klein 群 Γ 是有限解析型的, 如果它只有有限个非共轭的分支, 而且在每个分支上都是有限型的。Ahlfors 得到 Ahlfors 有限性定理: 有限生成的 Klein 群是有限解析型的。

这个定理的逆定理是不真的。1967 年 Bers 得到更精细的结果。如果 Γ 是非初等的 Klein 群, Ω 的每个分支 Δ 都有 Poincare 度量, 而且这个度量可以诱导到 Ω/Γ 上。这时可以计算出 Ω/Γ 的面积 $\text{Area}(\Omega/\Gamma)$ 。 Γ 是有限解析型的, 当且仅当 $\text{Area}(\Omega/\Gamma)$ 是有限的。Bers 得到两个有限性定理, 其中 Bers 第一有限性定理也称为面积定理。

Bers 面积定理: 如果 Γ 有 N 个生成元, 则 $\text{Area}(\Omega/\Gamma) \leq 4\pi(N-1)$ 。

Bers 第二有限性定理: 如果 $K(\Gamma)$ 为 Ω/Γ 的分支数, 则 $K(\Gamma) \leq 18(N-1)$ 。

Bers 的面积不等式是准确的, 当 Γ 是 Schottky 群时等式成立。对分支数不等式, Maskit 猜测 $K(\Gamma) \leq 2(N-1)$, 至今尚未证实。20 世纪 70 年代 Kra [3] 研究了 Klein 群的自守形式和 Eichler 上调理论, 这一理论更适合于讨论有限性定理。一个 Ω 上的可测函数 μ 称为权 $(-2q)$ 的自守形式, 如果 $\gamma_*^q \mu(z) = \mu(\gamma(z)) \gamma^q(z) = \mu(z)$, 对一切 $\gamma \in \Gamma$ 成立。对 $q \geq 2, L_q^\infty(\Omega, \Gamma)$ 为 Ω 上有界的自守形式空间, $B_q(\Omega, \Gamma)$ 为它的全纯子空间。设 Π_{2q-2} 是阶数不超过 $2q-2$ 的多项式全体, 群 Γ 按规律: $P \cdot \gamma = \gamma_*^{-q}(P)$ 右作用在 Π_{2q-2} 上。映射 $\chi: \Gamma \rightarrow \Pi_{2q-2}$ 称为上闭链如果 $\chi(\gamma_1 \cdot \gamma_2) = \chi(\gamma_1) \cdot \gamma_2 + \chi(\gamma_2)$, 对一切 $\gamma_1, \gamma_2 \in \Gamma$ 成立。对每个 $P \in \Pi_{2q-2}$, 映射 $\chi: \gamma \rightarrow P \cdot \gamma - P$ 称为上边缘链。显然, 上边缘链必是上闭链。一阶 Eichler 上调群 $H^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})$ 是上闭链除以上边缘链所得的商空间。如果 Γ 是有限生成的, 生成元个数为 N , 则 $\dim H^1(\Gamma, \Pi_{2q-2}) \leq (2q-1)(N-1)$ 。当 Γ 是有限生成的自由群时等式成立。设 $A \in \Gamma$ 是一个抛物元素, 一个上调类 $[\chi]$ 称为关于 A 是抛物的, 如果存在 $v \in \Pi_{2q-2}$, 使得 $\chi(A) = v \cdot A - v$ 。 $PH^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})$ 是关于 Γ 中所有抛物元素都是抛物的上调类。 $PH^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})$ 是 $H^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})$ 的子空间。给定一个有界的自守形式 μ 位势 $F_\mu(z)$ 是全平面上的连续函数, 且 $\chi_\mu: \gamma \rightarrow \gamma_*^{-q} F_\mu - F_\mu$ 是一个上闭链, 从而得到 Bers 映射

$$(2) \beta_q^*: L_q^\infty(\Omega, \Gamma) \rightarrow PH^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})$$

$$\mu \mapsto [\chi_\mu]$$

$\beta_q^*(L_q^\infty(\Omega, \Gamma)) = \beta_q^*(B_q(\Omega, \Gamma))$ 。 β_q^* 限制在全纯自守形式空间上, Ahlfors 证明 β_q^* 是单射, Kra [3] 证明当 Γ 是有限解析型时 β_q^* 是单射。Bers 猜测 β_q^* 总是单射, 此猜想对一般情况尚未证实。对 Klein 群 Γ 总可得到蕴含关系。

(3) 有限生成 $\rightarrow H^2(\Gamma, \Pi_{2q-2})$ 有限维 $\rightarrow B_q(\Omega, \Gamma)$ 有限维 \rightarrow 有限解析型。

80 年代 Sullivan, Kra 研究了尖点形式的有限性定理: 如果 Γ 有 N 个生成元, 则 Γ 的尖点形式最多有 $5(N-1)$ 个。用 $\dim(H^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})/PH^1(\Gamma, \Pi_{2q-2}))$ 可以得到尖点形式的更精确的估计, 此外对拟尖点, 抛物不动点都可以估计。例如 Kra 得到 Kra 定理: 如果是有 N 个生成元的 Klein 群, 则 Λ 最多含有 $18(N-1)$ 互不等价的抛物元素的不动点。

近年来, 有限性定理的研究仍在继续, 从蕴含关系 (3) 可见, 有限生成, $H^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})$ 有限维, $B_q(\Omega, \Gamma)$ 有限维, 有限解析型之间尚存在一些间隙。王键和蔡惠京的文章中定义了这一类拟有限生成的 Klein 群, 它也具有 $H^1(\Gamma, \Pi_{2q-2})$ 有限维的性质, 所得结果在弥补这些间隙方面是一个初探。

参考文献

- 1 Bers L. J. Analyse Math, 1967, 18: 23~41
- 2 Kra I. Reading, Massachusetts, 1972
- 3 Sullivan D. Acta. Math, 1981, 147: 289~299
- 4 Ahlfors, L. V Amer J Math, 1984, 86: 413~429
- 5 Kra I. J. D'Analyse Math. 1983/1984, 43: 51~87

6 王键. 湘潭大学学报, 1990, 12(1), 1~7; 1990, 12(2): 1~7; 1992, 14(2): 15~24.

(湘潭大学王键教授撰)

半线性格 *semilinear lattices* 也称半向量格, 指的是含有与格结构相容的半线性结构的格. 是线性格或向量格概念的推广, 是一种特殊的半群格. 半线性结构, 或称半向量结构, 是一种较线性结构要弱的结构, 在半线性结构中含有加法与数乘两种运算, 但并不构成线性空间, 它在加法运算下只是具有零元的加法半群, 而数乘运算也不满足向量关于纯量加法的分配律. 半线性格的概念有着重要的实际背景, 研究半线性格及各种特殊的半线性格的种种性质具有重要意义.

由某个给定集合的一切子集所成之族在集合的包含关系下构成格, 被称为该集合上的子集格. 对于子集格的研究由来已久. 20 世纪下半叶以来, 集值映射理论的发展进一步促进对于子集格的研究. 自 1965 年美国自动控制论教授勒·阿·扎德(L. A. Zadeh)提出模糊集合的概念后, 人们开始对于模糊子集格即由某个给定集合上的一切模糊子集所成的格的研究. 子集格与模糊子集格的非常重要的特殊情形是当给定的集合为线性空间的时候. 这时, 给定集合中的加法与数乘的线性运算会自然诱导出其上的子集格与模糊子集格中相应的加法与数乘运算, 这样诱导出的运算虽不能使得格成为线性格, 但它保留有线性运算的部分性质, 而且与格运算具有适当的相容性. 通过对上述一些模型的共性的分析, 1991 年范先令抽象出半线性格概念. 其定义如下:

如果一个格 L 中含有加法运算“+”与数域 K 上的数乘运算“ \cdot ”, $K \times L \rightarrow L$, 使得 L 在加法运算下是具有零元 θ 的交换半群, 且对于任意的 $x, y, z \in L$, 与 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda \in K$, 有:

- (1) $\lambda_1(\lambda_2 x) = (\lambda_1 \lambda_2)x$,
- (2) $\lambda(x+y) = \lambda x + \lambda y$,
- (3) $1x = x$,
- (4) $\lambda\theta = \theta$,
- (5) $x + (y \vee z) = (x + y) \vee (x + z)$,
- (6) $\lambda(x+y) = (\lambda x) \vee (\lambda y)$,
- (7) $(\lambda_1 + \lambda_2)x \leq \lambda_1 x + \lambda_2 x$,
- (8) $\theta x \leq \theta$.

则称 L 为半线性格(或半向量格).

目前对于半线性格的研究还仅刚刚开始, 而且只是研究了半线性格的一些基本性质; 研究了半线性格中的某些具特殊性质的元, 如线性元与凸元; 研究了某些特殊的半线性格, 如半线性完备格, 半线性闭集格, 半线性分子格等.

半线性格的理论有很大的发展前景. 目前格的理论内容已非常丰富, 在格中增添半线性结构后会产生一系列需进一步研究的新问题. 近期的研究热点有下述两个方面: 一是对于半线性格范畴本身的研究. 例如半线性格间的态射尚需研究. 二是研究所谓拓扑半线性格, 即在半线性格中增添适当的拓扑结构的情形. 这方面, 拓扑线性空间上的子集格与模糊子集格可提供良好的素材. 现在已经有比较成功的模糊拓扑线性空间与拓扑分子格等理论, 这为研究拓扑半线性格奠定了基础. 进一步, 可望建立拓扑半线性格上的分析学.

参考文献

- 1 Birkhoff G. Amer Math Soc, 1948, 25
- 2 Katsaras A K, et al. J. Math Anal Appl, 1977, 58: 136~146
- 3 王国俊. 中国科学, 1983, 12(A): 1063~1072
- 4 吴从忻. 模糊数学, 1985, 1: 1~14
- 5 范先令. 数学年刊, 1991, A11(3): 257~264

(兰州大学博士生导师范先令撰)

Morita 对偶 *morita duality* 环论中的 Morita 对偶理

论, 是除环上向量空间对偶的推广, 由 Morita 和 Azumaya 在 20 世纪 50 年代末建立的. 1974 年, Anderson 和 Fuller 介绍了 Morita 对偶理论. 1992 年, 薛卫民曾对该理论进行了较详细的论述.

设 V 为域 F 上向量空间, 记 $V^* = \text{Hom}_F(V, F)$. 若 $\dim(V) < \infty$, 则 $\dim(V) = \dim(V^*) = \dim(V^{**})$, 从而 $V \cong V^* \cong V^{**}$. 若 $\dim(V) = d = \infty$, 则 $\dim(V^*) = |F|^d > d$, 从而 $V^* \not\cong V$, 同样 $V^{**} \not\cong V$.

设 $D^V(V_D)$ 为除环 D 上的左(右)向量空间, $V^* = \text{Hom}_D(V, D)$ 为 D 上右(左)向量空间, 若 $\dim(V) < \infty$, 则 $V \cong V^{**}$. 因此, $\text{Hom}_D(-, D)$ 导出了有限维左 D -向量空间与有限维右 D -向量空间之间的一个对偶.

令 R 和 S 为含单位元的结合环, 称左 R -模范畴 $R\text{-Mod}$ 和右 S -模范畴 $\text{Mod}-S$ 之间存在一个 Morita 对偶, 如果存在完全子范畴 $C \subseteq R\text{-Mod}$ 和完全子范畴 $D \subseteq \text{Mod}-S$, 这里 C 和 D 关于子模和商模封闭且包含所有的有限生成模, 使有反变加法函子 $F: C \rightarrow D$ 及 $G: D \rightarrow C$ 满足 $GF \cong 1_C$ 及 $FG \cong 1_D$. 此时, 称环 R 具有(左)Morita 对偶, 环 S 具有右 Morita 对偶, 该对偶可由 (F, G) 导出.

Morita (1958) 和 Azumaya (1959) 证明 (F, G) 导出一个 Morita 对偶当且仅当存在忠实平衡双模 ${}_R E_S$ 使得 ${}_R E$ 和 E_S 都是内射上生成元(cogenerators), 且有 $F \cong \text{Hom}_R(-, E)$ 和 $G \cong \text{Hom}_S(-, E)$, 此时 C 和 D 就是由所有的 ${}_R E_S$ -自反模组成. 因而, 也称双模 ${}_R E_S$ 导出 Morita 对偶. 若有 R -双模 ${}_R E_R$ 导出 Morita 对偶, 称之为 Morita 自对偶. 因此, 要证明一个环 R 具有 Morita 自对偶, 首先要证明 R 具有 Morita 对偶, 该对偶由某个双模 ${}_R E_S$ 导出, 然后证明 $R \cong S$. Morita 和 Azumaya 证明了每一个交换 Artin 环均具有 Morita 自对偶, 他们还证明了一个左 Artin 环 R 具有 Morita 对偶当且仅当每一个不可分解的内射左 R -模是有限生成的. 利用 Cohn(1966) 和 Schofield(1985) 的除环构造, 可给出一个 Artin 环 R 使得 R 不具有 Morita 对偶, 或 R 具有 Morita 对偶但不具有 Morita 自对偶.

设双模 ${}_R E_S$ 导出 Morita 对偶, 若 R 为左或右完全环, 则 R 必为左 Artin 环, 此时 S 为右 Artin 环, 且模 M 为 ${}_R E_S$ -自反模, 当且仅当 M 是有限生成的, 即 Artin 环的 Morita 对偶基本上保持了除环上向量空间的对偶性质. 若 R 为(双边)Artin 环, 则 S 是否为左 Artin 环还是一个未解决的问题. 若 R 为左 Noeth 环, 不能推出 S 为右 Noeth 环, 反例见参考文献[9] 的第 5 章, 但若 R 为(双边)Noeth 环, 可推出 S 为右 Noeth 环, 此时 S 是否为左 Noeth 环还是一个未解决的问题.

若 R -双模 ${}_R R_R$ 导出 Morita 对偶, 称环 R 为 PF -环或上生成元环, 此时 ${}_R R$ 和 R_R 都是(内射)上生成元, PF -环 R 称为 QF -环, 若 R 满足以下 4 个等价条件之一: (1) R 为左 Artin 环. (2) R 为右 Artin 环. (3) R 为左 Noeth 环. (4) R 为右 Noeth 环.

关于一般环的 Morita 对偶理论, 线性紧性起着重要的作用.

设 M 为一个模. 设 $m_i \in M, M_i \leq M, i \in I$, 称族 $(m_i, M_i)_{i \in I}$ 为可解的, 如果存在 $m \in M$ 使得 $m - m_i \in M_i, \forall i \in I$, 称族 $(m_i, M_i)_{i \in I}$ 为有限可解, 如果对任意有限子集 $I_0 \subseteq I$, 族 $(m_i, M_i)_{i \in I_0}$ 都是可解的. 称模 M 为线性紧模, 如果 M 的任何有限可解的族都是可解的, 线性紧模是 Artin 模的一个推广, 环 R 称为左(右)线性紧环, 如果左(右)模 ${}_R R(R_R)$ 是线性紧模.

1970 年 Müller 证明了环 R 具有 Morita 对偶当且仅当 R 为左线性紧环且 $R\text{-Mod}$ 的极小内射生成元 ${}_R E$ 为线性紧模, 此时 ${}_R E_S$ 导出 Morita 对偶, 这里 $S = \text{End}({}_R E)$. 若 ${}_R E_S$ 导出 Morita 对偶, 则左 R -模(或右 S -模) M 为线性紧模, 当且仅当 M 是 ${}_R E_S$ -自反模. 若 R 为具有 Morita 对偶的可换环, 则 R 具有 Morita 自对偶. Müller 问: 是否每一个交换线性紧环具有 Morita 对偶? 1990 年, Anh 给予了肯定回答.

设 R 为左线性紧环(则 R 为半完全环), 设 ${}_R E$ 为有限上生成的内射上生成元。若 ${}_R E$ 还是线性紧模, 则 ${}_R E_S$ 导出 Morita 对偶, 这里 $S = \text{End}({}_R E)$ 为右线性紧环, E_S 为线性紧的有限上生成的内射上生成元。这是 Müller 定理的一个推广。若 R^S 导出 Morita 对偶且 R 为(双边)线性紧环, 则 S 是否为左线性紧环还是一个公开问题。

若 D 是一个除环, 则幂级数环 $D[[x]]$ 具有 Morita 自对偶, 该对偶可由 $D[[x]]$ —双模 $E = D\left[\frac{1}{x}\right]$ 导出。若 R 为一般的具有 Morita 对偶的环, 则是否幂级数环 $R[[x]]$ 不一定具有 Morita 对偶。尚且不知。对于任意环 R , 多项式环 $R[x]$ 均不是左线性紧环, 因此 $R[x]$ 不具有 Morita 对偶。

设有环扩张 $R \leq S$, 人们探讨在什么条件下由 R (或 S) 具有 Morita 对偶或自对偶可推出扩张 S (或子环 R) 也具有 Morita 对偶或自对偶。

1989 年, 薛卫民指出, 对于环的有限扩张 $R \leq S$ (即 R_S 和 S_R 为有限生成模), 环 R 和环 S 的 Morita 对偶性没有联系。1984 年, Lemonnier 证明若 $R \leq S$ 为有限三角扩张, 则 R 具有 Morita 对偶可推出 S 也具有 Morita 对偶。虽然逆命题还未解决, 逆命题对左 Artin 环 S 成立。1990 年, Kraemer 证明除环上的有限正规扩张环均具有 Morita 自对偶。

1983 年, Azumaya 称一类 Artin 环为正合环, 证明它们具有 Morita 对偶且预言它们具有 Morita 自对偶。这一预言还未解决, 甚至两类特殊的正合环, 局部分配环和 Artin 双环, 它们是否具有 Morita 自对偶还未得到证实。一类特殊的局部分配环—序列环, 它们具有 Morita 自对偶。这一结果由 Waschbüsch (1986) 及 Dischinger 和 W. Müller (1984) 得到证明。

综上所述, Morita 对偶理论的研究多年来一直在进行, 取得了一定的进展, 但还有许多问题未解决, 需要进一步研究与探讨, 使之更加系统化, 内容更加丰富, 成为环论研究的一个重要组成部分。

参考文献

- 1 Morita K. Duality for modules and its applications to the theory of rings with minimum condition. Tokyo Kyoiku Daigaku, Ser A6, 1958, 83~142
- 2 Azumaya G. Amer J Math, 1959, 81, 249~278
- 3 Müller B J. J Algebra, 1970, 16, 60~66
- 4 Anderson F W & Fuller K R. Rings and Categories of Modules, Springer-Verlag, Berlin, 1974(second edition, 1992)
- 5 Azumaya G. J Algebra, 1983, 85, 477~489
- 6 Lemonnier B. Dimension de Krull et dualite de Morita dans les extensions triangulaires, Comm. Algebra, 1984, 12, 3071~3110
- 7 Anh P N. Morita duality for commutative rings. Comm Algebra, 1990, 18, 1781~1788
- 8 Kraemer J. Math J Okayama Univ, 1990, 32, 103~109
- 9 Weimin Xue. Lecture Notes in Mathematics 1523, Springer-Verlag, Berlin, 1992

(福建师范大学薛卫民教授撰; 许永华审)

Hadamard 矩阵猜想 Hadamard 若一个 n 阶矩阵 $H_n = (h_{ij})$ 的元素 h_{ij} 取值为 $+1$ 或 -1 , 且满足正交性条件

$$\sum_{i=1}^n h_{ik} h_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ n, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

那么矩阵 H_n 叫做 n 阶 Hadamard 矩阵, 简称为 H —矩阵, 条件(1)可表为

$$H_n H_n^T = nI_n \quad (2)$$

其中 H_n^T 是 H_n 的转置, I_n 是 n 阶单位矩阵。

1893 年, Hadamard 证明: n 阶实矩阵 $A = (a_{ij})$ 在条件 $|a_{ij}| \leq 1$ 下其行列式 $\det A$ 满足 $|\det A| \leq n^{n/2}$ (Hadamard 不等式), 而

当等号成立, 即

$$|\det A| = n^{n/2} \quad (3)$$

时, 便是 Hadamard 矩阵。Hadamard 矩阵的名称就是由此产生的。然而, 把 Hadamard 矩作为正交矩阵来研究, 是早远在它获得“Hadamard 矩阵”这个名字以前的 1867 年, 这是由 Sylvester 开始的。

由上述 3 个等价条件(1)、(2)和(3)知, 一个 H —矩阵 H_n 经过等价变换, 行换序、列换序, 对某些列的所有元素乘以 -1 、对某些行的所有元素乘以 -1 、转置, 产生的矩阵 H_k 仍然是 H —矩阵。

Hadamard 矩阵, 除了在信息论、统计学和电子技术等方面有广泛的应用外, 作为数学本身的问题, 也是重要的和有趣的。最简单的 H —矩是一阶和二阶 H —矩: $H_1 = (1), H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ 。然而, 一个阶数大于二的 H —矩阵, 它的阶数一定是 4 的倍数。但是, 一个数是 4 的倍数, 是否存在一个 H —矩阵其阶数恰好是这个数? 这是一个尚未能解决的难题, 人们猜想: 若 $n \equiv 0 \pmod{4}$ 那么存在 n 阶 H —矩阵。这就是人们常说的著名的 Hadamard 矩阵猜想。

1867 年 Sylvester 从二阶 H —矩 H_2 开始, 用递归构造的方法得到一族 2^k 阶 H —矩阵,

$$H_{2^k} = \begin{pmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{pmatrix} \quad k \geq 2$$

这族 H —矩通常叫做 Sylvester 扩大。从此, 开始了 Hadamard 矩阵构造方法的研究。最简单的构造方法是由两个已知 H —矩阵的 Kronecker 积来构造另一个 H —矩阵。设 $A_n = (a_{ij})$ 和 $B_m = (b_{ij})$ 分别是 n 阶和 m 阶 H —矩阵。那么 A_n 与 B_m 的 Kronecker 积

$$A_n \times B_m = (a_{ij} b_{kl})$$

也是一个 mn 阶 H —矩, 因而, Kronecker 积的方法拓广了 Sylvester 扩大。

因为 $4n$ 阶 H —矩阵和二阶 H —矩阵的 Kronecker 积为 $8n$ 阶 H —矩阵, 所以, 构造 n 为奇数的 $4n$ 阶 H —矩阵, 是证实 Hadamard 矩阵猜想的关键。1933 年 Paley 用二次剩余法对 $4n-1$ 为素数幂的情形和 $2n-1$ 为素数幂的情形构造了 $4n$ 阶 H —矩阵。设 p 为素数, 且 $4n-1 = p^r, r$ 为正整数。并设 $a_0, a_1, \dots, a_{p^r-1}$ 为 $GF(p^r)$ 的元素, 使得 $a_0 = 0$ 和 $a_{p^r-i-1} = -a_i, i = 1, 2, \dots, p^r-1$, 在 $GF(p^r)$ 上定义特征函数:

$$x(a_i) = \begin{cases} 0, & \text{若 } a_i = 0, \\ 1, & \text{若 } a_i \text{ 为二次剩余,} \\ -1, & \text{若 } a_i \text{ 为非二次剩余.} \end{cases}$$

于是, 构造矩阵 $Q = (q_{ij}), q_{ij} = x(a_i - a_j)$, 又令

$$s = \begin{pmatrix} 0 & e^T \\ -e & Q \end{pmatrix}$$

此处 e 是元素为 1 的 p^r 维列向量。因此, $H_{2(p^r+1)} = I_{p^r+1} + s$ 是 $4n$ 阶 H —矩, 又若 $2n-1 = p^r, r$ 为正整数, 按照上述方法构造矩阵 Q , 且令

$$S^1 = \begin{pmatrix} 0 & e^T \\ e & Q \end{pmatrix}$$

从而, $H_{2(p^r+1)} = S^1 \times \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} + I_{p^r+1} \times \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}$ 是 $4n$ 阶 H —矩阵。

1944 年, Williamson 对一般 n , 利用 4 个 n 阶对称循环矩阵构造 $4n$ 阶 H —矩阵, 设 A, B, C, D 为 n 阶对称循环矩阵, 且其元素都是 $+1$ 和 -1 , 如果满足 $A^2 + B^2 + C^2 + D^2 = 4nI_n$, 那么

$$H_{4n} = \begin{bmatrix} A & B & C & D \\ -B & A & -D & C \\ -C & D & A & -B \\ -D & -C & B & A \end{bmatrix}$$

是 $4n$ 阶 H —矩阵, 并把形如 H_{4n} 的 H —矩阵叫做 Williamson

型 H -矩阵。因此,利用这个方法,对于透过 paly 的网眼的阶数 92, 116, 156, 172, 188, 236, ... , Williamson 构造了其中 172 阶 H -矩阵。又因为 Williamson 方法适合用电子计算机探索, 1961 年, Baumert 借助电子计算机找出了 92 阶 H -矩阵。此后不久, 116 阶 H -矩阵也得到了。1965 年, Baumert 和 Hall 证明: 若 $4n$ 阶 Williamson 型 H -矩阵存在, 则必存在 $12n$ 阶 H -矩阵。从而, 156 阶 H -矩阵也相继得到。

1967 年, Goethals 和 Seidel 撤掉 Williamson 方法中要求 A, B, C, D 的对称性的限制, 给出了构造 H -矩阵的方法。设 A, B, C, D 是具有元素为 $+1$ 和 -1 的 n 阶循环矩阵。若条件

$$AA^T + BB^T + CC^T + DD^T = 4nI_n$$

成立, 那么

$$H_{4n} = \begin{bmatrix} A & BR & CR & DR \\ -BR & A & -D^T R & C^T R \\ -CR & D^T R & A & -B^T R \\ -DR & -C^T R & B^T R & A \end{bmatrix} \text{ 是 } 4n \text{ 阶 } H\text{-矩}$$

阵, 其中

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

n 阶矩阵。并把上述矩阵 A, B, C, D 称为 n 阶 Williamson 矩阵。从此以后的研究越来越趋精细化。精细化的代表人物 Turyn 用各种手段得到 188 阶 (1973 年) 和 236 阶 (1974 年) 的 H -矩阵。在某种程度上使 Turyn 的方法系统化, 便是 T -矩阵。Wallis 和 Cooper 把 4 个 n 阶 Williamson 矩阵 W_1, W_2, W_3, W_4 和四个 m 阶 T -矩阵 A, B, C, D 组合

$$\begin{aligned} X &= A \times W_1 + B \times W_2 + C \times W_3 + D \times W_4 \\ Y &= -A \times W_2 + B \times W_1 - C \times W_4 + D \times W_3 \\ Z &= -A \times W_3 + B \times W_4 + C \times W_1 - D \times W_2 \\ V &= -A \times W_4 - B \times W_3 + C \times W_2 + D \times W_1 \end{aligned}$$

便得 4 个 mn 阶 Williamson 矩阵。从而, 达到构造更高阶 H -矩阵的目的。1985 年, 泽出和江构作出特殊的 67 阶 H -矩阵。

Williamson 利用 4 个 n 阶对称循环矩阵构造 $4n$ 阶 Williamson 型 H -矩阵。然而, 对任意正奇数 n , 是否存在 $4n$ 阶 Williamson 型 H -矩阵? 这也是一个尚未解决的问题, 虽然, 20 世纪 70 年代 turyn 和 Whiteman 先后对一些特殊的正奇数 n , 证明 Williamson 型 H -矩阵存在, 离这个问题的彻底解决还相距甚远。

Hadamard 矩阵从作为正交矩阵的研究开始, 已有 100 多年历史, 但至今仍然存在许多尚未解决的问题, 归结起来有如下猜想: (1) 对任意正整数 n , 存在 $4n$ 阶 Hadamard 矩阵; (2) 对任意正奇数 n , 存在 $4n$ 阶 Williamson 型 Hadamard 矩阵; (3) 由等价变换可把一个 Hadamard 矩阵变换为对称的和斜对称的 Hadamard 矩阵。

在这些猜想中, 猜想 (1) 是最根本的, 也是将来的热点问题, 要证明这一猜想, 就得表明 $4n$ 阶 Hadamard 矩阵的存在性。这需要作两方面的工作, 一是研究一种崭新的、带有普遍性的构造方法; 二是找出一种新途径, 把已知的 Hadamard 矩阵或有关知识加以推广, 使能造出新的 Hadamard 矩阵。

设 $H_n = (h_{ij})$ 是 n 阶 H -矩阵, $S = \{1, \dots, n\}$ 是 n 元集合, 定义 S 上的子集系 $\omega = \{s_1, \dots, s_n\}$, 使得 $h_{ij} = 1$, 则 $j \in s_i$, 且满足条件:

$$|s_i \Delta s_j| = \frac{n}{2}, i \neq j,$$

其中 $s_i \Delta s_j$ 表示集合 S_i 与 S_j 的对称差, 并称 ω 为 H_n 的关联子集系。显然, 若存在 n 阶 H -矩阵, 则必存在 H_n 的关联子集系。反之亦然。从而, 把 Hadamard 矩阵的研究转化为 Hadamard 矩阵关联子集系的研究。因此, 如果对集合 S 再加一些限制, 可能会使 Hadamard 矩阵的研究有较大的进展。

参考文献

- 1 Sylvester J J. phil Mag. 1867, 34(4): 461~475
- 2 Paley R E A C. J Math phys. 1933, 12: 311~320
- 3 Williaman J. Duke Math J. 1944, 11: 65~81
- 4 Baumert L D. Math of Comp. 1965, 19: 442~447
- 5 Turyn R J. J combinatorial Th. ser A. 1972, 12: 319~321
- 6 Whiteman A L. J Comb th ser. 1973, 14: 334~340
- 7 刘璋温. 数学的实践与认识, 1978, 4: 55~57
- 8 黄国泰. 数学的实践与认识, 1988, 4: 68~70

(海南师范学院黄国泰教授撰)

Fuzzy 拟阵 fuzzy matroids 拟阵理论源于 H. Whitney

1935 年发表的论文《on the abstract properties of linear dependence》。这一理论提供了研究图论、代数、格论、横截理论 (transversal theory) 及其他数学分支的许多基本问题的有效方法。自 60 年代以来, 拟阵理论成为异常活跃的研究焦点, 某种程度上与 1958~1959 年 W. T. Tutte 所做的工作有关。近年来, 美国 R. Goetschel 和 W. Voxman 在 Fuzzy 集基础上, 首次提出 Fuzzy 拟阵的概念。在更广泛的框架下, 作了一系列的探讨工作。在 Fuzzy 拟阵的研究中迈开了很有价值的一步。

拟阵有圈公理、基公理、独集公理等公理体系。更由于 Fuzzy 点的层次性, 因而在 Fuzzy 集的基础上, 建立 Fuzzy 拟阵的合理框架是非常困难的。R. Goetschel 和 W. Voxman 在反复比较研究的基础上, 成功地提出了 Fuzzy 拟阵的合理框架。并在该框架下讨论了拟阵理论中的经典问题, Fuzzy 秩函数 (Rank Function)、Fuzzy 基 (Base)、Fuzzy 基的基数 (Cardinality)、Fuzz 圈 (circuit)、Fuzzy 拟阵与一种 Greedy 算法 (Algorithm)。近年, 刘旺金、莫智文、王先清等引进了 Fuzzy 横截 (transversal)、部分 Fuzzy 横截。研究了 Fuzzy 拟阵与它们之间的关系。讨论了 Fuzzy 拟阵的多种子结构, 以及 Fuzzy 点平行、 σ -算子、闭性质等内容。

总之, Fuzzy 拟阵的研究还只是刚刚开端, 有待研究的问题还很多。如连通性、圈拟阵等。

参考文献

- 1 Whitney H. Amer J Math. 1935, 57: 509~533
- 2 Tutte W T. Trans Amer Math Soc. 1958, 88: 144~174
- 3 Tutte W T. Trans Amer Math Soc. 1959, 90: 527~552
- 4 Goetschel R & Voxman W. Fuzzy matroids, FSS 1988, 27: 291~302
- 5 Goetschel R, Voxman W. Bases of fuzzy matroids, FSS 1989, 31: 253~261
- 6 Goetschel R, Voxman W. Fuzzy Circuits, FSS 1989, 32: 35~43
- 7 Goetschel R, Voxman W. Fuzzy matroids and a greedy algorithm, FSS, 1990, 37: 201~213
- 8 王先清. 四川师大学报 (自然版), 1992, 1: 12~15
- 9 莫智文等. 四川师大学报 (自然版), 1992, 3: 17~21

(四川师范大学莫智文副教授撰)

图的度序列 degree sequences of graphs 图论研究的一个基本领域。

给定一个 n 阶简单图 G , 其顶点 v_1, v_2, \dots, v_n 的度依次为 $d_1, d_2, \dots, d_n, d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n, \pi = (d_1, d_2, \dots, d_n)$, 即是图 G 的度序列。若它是某个图的度序列, 一个非增的非负整数序列 $\pi = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 是可图的 (graphic), 由于同构的图具有相同的度序列, 而度序列相同的图未必同构, 因此度序列是图同构的不变量, 但不是全系不变量。所以一个图的度序列的代数性质必然部分地反映这个图的图论性质, 其反映程度是度序列研究的基本课题。度序列的研究主要围绕下面两个基本问题进行: (1) 刻划可图序列; (2) 对给定的图论性质 P , 刻划蕴含 P (Potentially- P) 可图序列和强迫 P (forcibly- P) 可图序列。

1957年 Gale 与 Ryser 率先给出可图序列的刻划,从而揭开研究度序列的序幕。至今已发表 400 多篇论文。关于可图序列的刻划,至今已发现 7 个判准和 1 个算法,即: Gale—Ryser 判准 (1973)、Erdős—Gallai 判准 (1960)、Fulkerson—Hoffman—McAndrew 判准 (1965)、Grünbaum 判准 (1969)、Berge 判准 (1973)、Bollobás 判准 (1978) 和 Ruch—Gutman—Hasselbath (1979, 1984) 以及 Kleitman—Wang 算法 (1973)。应该说,在以往数十年里,可图序列的刻划已经彻底解决。但一些基本性工作尚有待进一步研究。1991 年 Sierksma 和 Hoogeveen 用循环论证法证明,可图度序列的 7 个判准是等价的。1992 年 J. S. Li 进一步证明,上述 7 个判准实质上只有两个,即 Gale—Ryser 判准, Erdős—Gallai 判准, Fulkerson—Hoffman—McAndrew 判准, Berge 判准和 Ruch—Gutman—Hasselbath 判准是同一件事物的不同表述形式,而 Grünbaum 判准与 Bollobás 判准则是另一件事物的两种表述形式。J. S. Li 研究了 n 维可图序列集合 G_n 的整体性。易知 G_n 在序列间优越关系下成为偏序集。J. S. Li 刻划了偏序集 G_n 中的极大元。1991 年 Favaron, Mahéo 和 Saclé 证明,可图序列 π 的剩余 $R(\pi)$ (Residue) 是偏序集 G_n 上一个 Schur 凸函数。

最早研究蕴含 P 和强迫 P 可图序列的是 Edmonds。1964 年,他给出了蕴含 k 边连通可图序列的刻划。此后,蕴含 P 和强迫 P 可图序列的研究便得到蓬勃发展。其主要研究方法是:(1) 利用判定可图序列的 Kleitman—Wang 算法,即所谓 Laying off 技巧。(2) 利用 Edmonds 在刻划蕴含 k 边连通可图序列时所使用的 Interchange 技巧及其变形。所谓 Interchange 技巧是指:设 G 是可图序列 π 的一个实现,若 G 含有边 xy, uv , 不含边 xu, yv , 则 $G' = G - xy - uv + xu + yv$ 也是 π 的一个实现。从图 G 到 G' 的变换是保持可图序列不变的一种变换,它称为对 π 进行一次 Interchange。Laying off 技巧是指:设 $\pi = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 是非增的非负整数序列,从 π 中去掉第 k 项 d_k , 并将余下的 d_k 个最大的项各减去 1, 得到序列 π' 。从 π 到 π' 的过程称为从 π lay off d_k 。1973 年, Wang 和 Kleitman 用 Laying off 技巧给出蕴含 k 边连通可图序列的刻划,并且给出 Edmonds 上述结论的新证明。关于强迫 k 边连通可图序列,1969 年 Bondy 给出一个充分条件。当 $k=1$ 时,1991 年 Choudum 给出一个充分条件,但强迫 k 边连通和强迫 k 边边连通可图序列的刻划问题仍未解决。

具有 Hamilton 圈的图称为 Hamilton 图。刻划强迫 Hamilton 可图序列的问题是 Nash—William 于 1966 年提出的。1976 年 Bondy 和 Murty 将它收入到他们的名著《Graph Theory with Applications》,列为当时图论中 50 个未解决问题之一。它一直是人们关注的一个热点。到目前为止,所有的研究都集中在充分条件上。主要方法则是运用 Bondy 和 Chvátal 引进的 k 闭包概念。给定正整数 k , 对图 G 中任意两个度之和至少为 k 的不相邻顶点都连一条边,直到不能再连为止,得到的图 $C_k(G)$ 即是 G 的 k 闭包。Bondy 和 Chvátal 证明, π 阶图 G 为 Hamilton 的充要条件是, n 闭包 $C_n(G)$ 为 Hamilton 的。在 Bondy—Chvátal 方法基础上, Zhu 和 Tian 给出了可图序列为强迫 Hamilton 的一个充分条件。这是迄今为止所得到的最好的充分条件。1988 年 P. Л. Тышкевич, А. А. Черняк 和 Ж. А. Черняк 称 Zhu 和 Tian 所用的方法为 Bondy—Chvátal—Zhu—Tian 方法。但是 Nash—William 20 多年前提出的刻划强迫 Hamilton 可图序列的问题仍未解决。至于蕴含 Hamilton 可图序列的刻划问题, Rao 已经解决。

刻划蕴含可平面和强迫可平面可图序列的问题一直为人们所关注。由 Euler 公式可知,可平面图 G 的度序列 $\pi = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 应满足 $d_1 + d_2 + \dots + d_n \leq 6(n-2)$ 。满足这一条件的可图序列 π 称为 Euler 序列,其中等式成立的 Euler 序列称为极大的。另外,一个可图序列 $\pi = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 称为 k 序列,若 $d_1 - d_n = k$ 。1971 年, Owens 首先研究蕴含可平面可图序列的刻划问题。他证明,除 (4^7) 和 (5^{14}) 外,每个 Euler 零序列都是蕴含

可平面的,这里 $\pi = (4^7)$ 表示 π 是由 7 个 4 组成的。随后 Schmeichel 和 Hakimi 证明,除 $(5^{10}, 4)$, $(5^{12}, 4)$, $(6, 5^{12})$, $(6, 5^{14})$ 外,每个 Euler 1 序列都是蕴含可平面的。他们还证明,除 $(4^5, 2)$, $(5^{11}, 3)$, $(6^{b-7}, 4^7)$, $k > 7$, $(5^3, 3^3)$, $(7^1, 5^{12})$ 以及未定情形 $(5^{13}, 3)$, $(7, 5^{17})$ 外,每个非极大 Euler 2 序列都是蕴含可平面的。他们也研究了极大 Euler 2 序列,留下未定情形: $(7^{h+1}, 6^{2-h}, 5^{13+h})$, $(7^{3+2h}, 6, 5^{15+2h})$, $(7^{5+2h}, 5^{17+2h})$, $k=0, 1$ 。他们提出如下猜想: $(5^{13}, 3)$, $(7, 5^{17})$ 和 $(7^3, 5^{17})$, $(7^{h+1}, 6^{2-h}, 5^{13+h})$, $k=0, 1, 2$ 和 $(7^{5+2h}, 5^{17+2h})$, $k=0, 1$ 都不是蕴含可平面的,而上述其他未定序列都是蕴含可平面的。Ruscitti, Fanelli 研究了上面遗留的序列, Mao 研究了序列 $(7^{5+2h}, 5^{17+2h})$, $k=0, 1$ 和 $(7^3, 5^{17})$, 证明它们不是蕴含可平面的,从而宣告 Schmeichel—hakimi 猜想的解决,然而刻划蕴含可平面可图序列的问题并未解决。至于强迫可平面可图序列的刻划问题, Rao 已经解决。

与无向图情形相比,有向图情形的可图序列的研究进展较为缓慢。最令人注目的是 1960 年 Fulkerson 给出了非负整数偶序列 $\pi = [(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_n, s_n)]$ 为有向可图序列的判准,从而解决了可图序列的刻划问题。其次是 1965 年 Beineke 和 Harary 给出了蕴含强连通有向可图序列的刻划。自然要考虑的是蕴含 k 强连通有向可图序列的刻划问题。1979 年 Chaiken, Kleitman 和 S. Y. R. Li 考虑了这一问题,得到了有向可图序列为蕴含 2 强连通的一个充分条件。他们的结论离蕴含 2 强连通有向可图序列的刻划相去甚远。至于蕴含 k 强连通有向可图序列的刻划问题,则难度更大。而刻划强迫 k 强连通有向可图序列的问题,至今仍未解决。李炯生等和 Bagga 与 Beineke 曾对特殊有向图类(如竞赛图,多部竞赛图)得到一些结论,例如李炯生等给出了蕴含 k 强连通和强迫 k 强连通得分向量的刻划。

根据 Rao, Тышкевич, Черняк 以及李炯生的综述文章,可以预期,图的度序列的研究将围绕以下几个问题进一步展开:(1) 深入研究偏序集 G_n 的整体性质,考虑偏序集 G_n 上哪些计数函数是 Schur 凸的,哪些是 Schur 凹的。(2) 深入研究蕴含 P 和强迫 P (有向)可图序列的刻划问题,特别是强迫 k 边连通可图序列、强迫 Hamilton 可图序列和强迫可平面可图序列的刻划以及蕴含 k 强连通有向可图序列的刻划等。这些问题的解决,无疑将是度序列研究的突破性进展。

参考文献

- 1 Rao S B. Combinatorics and Graph Theory, Proceedings. Calcutta 1980, Berlin, Springer—Verlag, 1981, 415~440
- 2 Zhu Y, Tian F, J. Combinatorial Theory, Ser. B, 1983, 35 (3): 247~255
- 3 Тышкевич Р И, Черняк А А, Черняк Ж А. КИБЕРНЕТИКА, 1987, 6: 12~19; 1988, 2: 1~12; 1988, 5: 1~8
- 4 Mao J Z. Kexue Tongbao (English Ed), 1987, 32(2): 145~146
- 5 Favaron O, Mahéo M, Saclé J—F. J Graph Theory, 1991, 15 (1): 39~64
- 6 Sierksma G, Hoogeveen H. J. Graph Theory, 1991, 15(2): 222~231
- 7 Choudum S A. Discrete Mathematics, 1991, 96 (3): 175~181

(中国科技大学博士生导师李炯生撰)

竞赛图理论

theory of tournaments 竞赛图是一类特殊的有向图,它不但是体育比赛和科学实践中对比实验的数学模型,也是研究有向图时经常使用的一种模型,它的理论非常丰富又独具特色。竞赛图理论的研究有着悠久的历史,不过对竞赛图的组合性质的研究则是 20 世纪 50 年代才发展起来的。1968 年出版了 Moon 的竞赛图理论的第 1 本专著,1978 年 Reid 和 Beineke 的综述文章全面论述了该名著问世以来的进展,是进一步研究竞赛图的基础。竞赛图理论的研究主要围绕得分向

量、圈、王、极端问题、自同构群和邻接矩阵等展开的。

n阶竞赛图 \$T_n\$ 的 \$n\$ 个顶点的得分依次记作 \$r_1, r_2, \dots, r_n, r_1 \le r_2 \le \dots \le r_n\$, 则 \$R = (r_1, r_2, \dots, r_n)\$ 是 \$T_n\$ 的得分向量。所有得分向量为 \$R\$ 的竞赛图集合记作 \$\mathcal{F}(R)\$。对 \$k=0, 1, \dots, [\frac{n-1}{2}]\$, 记 \$R_k = (k, \dots, k, 2k, 2k+1, \dots, (n-2k-1), n-k-1, \dots, n-k-1)\$。1953年 Landau 证明, 设 \$R = (r_1, r_2, \dots, r_n)\$ 是非降的非负整数向量, 则 \$\mathcal{F}(R) \neq \emptyset\$ 的充要条件是, \$R\$ 被 \$R_0\$ 所优越。使 \$\mathcal{F}(R) \neq \emptyset\$ 的向量 \$R\$ 称为得分向量。所有 \$n\$ 维得分向量集合记作 \$\mathcal{F}_n\$, 它在向量间优越关系下是一个偏序集 (poset)。1966年 Harary 和 Moser 证明, 对于 \$R \in \mathcal{F}_n, T_n \in \mathcal{F}(R)\$ 为强 (连通) 的充要条件是, \$R\$ 被 \$R_1\$ 所优越。称得分向量 \$R\$ 是强的, 若 \$R\$ 被 \$R_1\$ 优越, 不是强的得分向量 \$R\$ 称为可约的。

由于同构的竞赛图具有相同的得分向量, 而得分向量相同的竞赛图未必同构, 因此得分向量是竞赛图的同构不变量, 但不是全系不变量。所以得分向量的算术性质必然部分反映竞赛图的组合性质。这种反映的深度是一个值得研究的问题。设 \$P\$ 是一个图论的性质, 称 \$R \in \mathcal{F}_n\$ 为蕴含 \$P\$ 的, 若存在具有性质 \$P\$ 的 \$T_n \in \mathcal{F}(R)\$。称 \$R \in \mathcal{F}_n\$ 是强迫的, 若所有 \$T_n \in \mathcal{F}\$ 都具有性质 \$P\$。20世纪80年代中期, Bagga 和 Beineke 以及李炯生等独立地给出了蕴含 2 强得分向量的刻画。1985年 J. S. Li 等给出了蕴含 \$k\$ 强得分向量的刻画。他们还刻画了强迫 \$k\$ 强、蕴含 \$k\$ 可约、强迫 \$k\$ 可约、蕴含 \$k\$ 边强和强迫 \$k\$ 边强得分向量。

多部竞赛图是竞赛图的自然推广。1962年 Moon 将上面提到的 Landau 定理和 Harary-Moser 定理推广到多部竞赛图, 得到类似的结论。Bagga 和 Beineke 考虑了蕴含 2 强二部得分序列的刻画。李炯生等刻画了蕴含 \$k\$ 可约和强迫 \$k\$ 可约多部得分序列。

1954年 Davis 考虑了不同构竞赛图的计数问题。他应用 Pólya 计数定理给出了 \$n\$ 个不同构竞赛图的个数 \$T(n)\$ 的计数公式, 并给出 \$T(n)\$ 的母函数 \$T(x) = \sum_{n=1}^{\infty} T(n)x^n\$ 和 \$n\$ 阶不同构

强竞赛图的个数 \$t(n)\$ 的母函数 \$t(x) = \sum_{n=1}^{\infty} t(n)x^n\$ 间的关系:

$$t(x) = \frac{T(x)}{1+T(x)},$$

从而解决了不同构强竞赛图和可约竞赛图的计数问题。于是问题进一步化为, 对给定的 \$R \in \mathcal{F}_n\$, 求 \$|\mathcal{F}(R)|\$。

1984年 Brualdi 和李乔证明, 若 \$R \in \mathcal{F}_n\$ 是强的, 即 \$R\$ 被 \$R_1\$ 优越, 则 \$|\mathcal{F}(R)| \ge |\mathcal{F}(R_1)| = 2^{n-2}\$; 若 \$R \in \mathcal{F}_n\$, 则 \$|\mathcal{F}(R)| \le |\mathcal{F}(\bar{R})|\$, 这里 \$\bar{R}\$ 是正则或拟正则的。又当 \$n\$ 为奇数时, \$|\mathcal{F}(R)| \ge 2^{\frac{n-1}{2}} + 2^{\frac{n-3}{2}} - 2\$; 当 \$n\$ 为偶数时, \$|\mathcal{F}(R)| \ge 2^{\frac{n-2}{2}}\$。

1986年万宏辉和李乔证明, 偏序集 \$\mathcal{F}_n\$ 上的函数 \$|\mathcal{F}(R)|\$ 是 Schur 凹的。他们并证明, 当 \$n\$ 为奇数时, \$|\mathcal{F}(\bar{R})| \ge \prod_{1 \le i \le \frac{n-1}{2}} \binom{2i}{i}\$; 当 \$n\$ 为偶数时, \$|\mathcal{F}(\bar{R})| \ge \prod_{1 \le i \le \frac{n-2}{2}} \binom{2i+1}{i}\$。

竞赛图中极端问题是竞赛图理论研究的一个热点问题, 它和计数问题有着密切的联系。设 \$R \in \mathcal{F}_n, T_n \in \mathcal{F}(R)\$。\$T_n\$ 中 \$k\$ 阶强子竞赛图的个数为 \$\sigma_k(T_n)\$。记 \$\sigma_k(R) = \max\{\sigma_k(T_n); T_n \in \mathcal{F}(R)\}\$, \$\sigma(k;n) = \max\{\sigma_k(R); R \in \mathcal{F}_n\}\$。早在 20 世纪 40 年代, Kendall 等人就证明, 对 \$T_n \in \mathcal{F}(R), R = (r_1, r_2, \dots, r_n)\$, 有 \$\sigma_3(T_n) = C\binom{n}{3} - \sum_{i=1}^n \binom{r_i}{2}\$。从而 \$\sigma_3(T_n) = \sigma_3(R)\$, 并且当 \$R = \bar{R}\$ 时 \$\sigma_3(R)\$ 取到最大值 \$\sigma(3;n)\$。1965年 Beineke 和 Harary 证明, 对正整数 \$k, 3 \le k \le n, \sigma_k(R)\$ 在 \$R = \bar{R}\$ 处取到最大值 \$\sigma(k;n)\$, 并给出它的值。同样, 设 \$R\$ 是强得分向量。对 \$T_n \in \mathcal{F}(R), T_n\$ 中 \$k\$ 阶传递子竞赛图的个数为 \$\tau_k(T_n)\$。记 \$\tau_k(R) = \max\{\tau_k(T_n); T_n \in \mathcal{F}(R)\}\$, \$\tau(k;n) = \max\{\tau_k(R); R \text{ 为强的且 } R \in \mathcal{F}_n\}\$; 又记 \$\alpha_k(R) = \min\{\tau_k(T_n); T_n \in \mathcal{F}(R)\}\$, \$\alpha(k;n) = \min\{\alpha_k(R); R \in \mathcal{F}_n\}\$。1966年 Moon 证明, 对正整数 \$k, 3 \le k \le n\$, 定义在 \$\mathcal{F}_n\$ 中所有强得分向量构成的偏序子集 \$\mathcal{F}_n\$ 上的函数 \$\tau_k(R)\$ 在 \$R = \bar{R}\$ 处取到最大值 \$\tau(k;n)\$, 并给出它的值。1989年 Reid 给出 \$\alpha(4;n)\$ 的下界。至于偏序集 \$\mathcal{F}_n\$ 上的函数 \$\alpha_k(R)\$ 是否在 \$R = \bar{R}\$ 处取到最小值 \$\alpha(k;n)\$ 以及它的确切值等问题仍未解决。同年 Q. Li 提出如下问题: \$\mathcal{F}_n\$ 上函数 \$\alpha_k(R)\$ 是否是 Schur 凹的? \$\alpha_k(R)\$ 是否是 Schur 凸的? \$\mathcal{F}_n\$ 上函数 \$\tau_k(R)\$ 是否是 Schur 凸的? 这些问题仍待解决。

竞赛图中的圈结构对于研究竞赛图的组合性质具有基本的重要性。一个经典的结论是: 竞赛图 \$T_n\$ 为强 (连通) 的充要条件是 \$T_n\$ 具有 Hamilton 圈。1968年 Moon 将这一结论推广为: 对 \$n\$ 阶强竞赛图 \$T_n\$ 中每个顶点 \$u, T_n\$ 中必有过顶点 \$u\$ 的 \$k\$ 圈, 这里 \$k=3, 4, \dots, n\$。和 Moon 几乎同时, Alspach 考虑了将顶点换成弧的相应问题。若对 \$n\$ 阶竞赛图 \$T_n\$ 中的每条弧 \$uv, T_n\$ 必有一条由 \$v\$ 到 \$u\$ (或 \$u\$ 到 \$v\$) 的长为 \$k\$ 的道路, 则记 \$T_n \in P_k\$ (或 \$T_n \in P'_k\$)。若对每个 \$k=2, 3, \dots, n-1\$, 有 \$T_n \in P_k\$, 则 \$T_n\$ 称为弧泛圈图。Alspach 证明, 正则竞赛图是弧泛圈图。朱永津和田丰等人给出了使 \$T_n \in P_k\$ 且 (或) \$T_n \in P'_k\$ 的一些充分条件。1982年 Z. Wu, K. Zhang 和 Y. Zou 证明 \$T_n\$ 为弧泛圈充要条件是, \$T_n \in P_2\$ 且 \$T_n \in P_{n-1}\$。随后张克明进一步证明, 对每个 \$k=2, 3, \dots, n-1, T_n \in P_k, P'_k\$ 的充要条件是, \$T_n \in P_2, P_2\$ 且 \$T_n \in P'_{n-1}\$。张克明还考虑二部竞赛图的弧泛偶圈性。1991年张克明、宋增民和王建中讨论了 Hamilton 二部竞赛图。

竞赛图中 \$m\$ 王问题与体育比赛如何排名次有关。设 \$R \in \mathcal{F}_n\$。对于 \$T_n \in \mathcal{F}(R), T_n\$ 中 \$m\$ 王的个数记为 \$k_m(T_n)\$。1953年 Landau 证明, \$k_2(T_n) \ge 1\$。1980年 Maurer 证明, 若 \$k_2(T_n) \neq 2\$, 则 \$k_2(T_n) \ge 3\$。记 \$K_m(R) = \max\{k_m(T_n); T_n \in \mathcal{F}(R)\}\$, \$k_m(R) = \min\{k_m(T_n); T_n \in \mathcal{F}(R)\}\$, \$\mathcal{F}_n\$ 上函数 \$K_m(R)\$ 与 \$k_m(R)\$ 各具有什么性质, \$K_m(R)\$ 之最大值 \$K(m;n)\$ 和 \$k_m(R)\$ 之最小值各是多少, 都是值得进一步研究的。1991年 Goddar 等人考虑了多部竞赛图中 \$m\$ 王问题。他们证明, 不含传递点的二部竞赛图 \$T\$ 同一部分顶点集中最大得分顶点一定是 4 王。同年 Petrovic 和 Thomassen 证明, 不含传递点的多部竞赛图至少有一个 4 王, 而且有无数个二部竞赛图, 它们不含 3 王。最近新加坡 K. M. Koh 等人证明, 不含传递点的二部竞赛图至少有 4 个 4 王, 而不含传递点的三部竞赛图至少有 3 个 4 王。多部竞赛图的 \$m\$ 王问题尚待进一步研究。

竞赛图的邻接矩阵 (即竞赛矩阵) 的代数性质和竞赛图的组合性质间的联系既是竞赛图理论关注的一个问题, 也是新兴的组合矩阵论研究的一个热点。从 60 年代末到 70 年代初, Brauer 和 Gentry 以及 Moon 和 Pullman 证明, \$n\$ 阶竞赛矩阵 \$M_n\$ 的特征值之实部在 \$-\frac{1}{2}\$ 与 \$\frac{n-1}{2}\$ 之间, 其 Perron 值为 \$\frac{n-1}{2}\$ 的充要条件是 \$M_n\$ 为正则的。Moon 和 Pullman 还确定了本原竞赛矩阵的本原指数集。1989年 Caen 和 Hoffman 证明, \$M_n\$ 的秩至少是 \$n-1\$, 且正则竞赛矩阵是满秩的。1990年 Maybee 和 Pullman 证明, 设 \$\lambda\$ 是 \$M_n\$ 的特征值, 则 \$M_n - \lambda I_n\$ 的秩为 \$n-1\$, 或者 \$\lambda\$ 的实部为 \$-\frac{1}{2}\$, 其中 \$I_n\$ 是单位矩阵。1992年 Caen, Maybee 和 Pullman 证明, 若 \$\lambda\$ 的实部大于 \$-\frac{1}{2}\$, 则 \$\lambda\$ 的几何重数与代数重数相同。

关于竞赛图的自同构群, 1963年 Moon 证明, 一个有限群为某个竞赛图的自同构群的充要条件是, 其顶点数为奇数。1966年 Goldberg 给出了当 \$n \le 14\$ 时 \$n\$ 阶竞赛图的自同构群的阶数之最大值 \$g(n)\$, 同年 Goldber 和 Moon 给出了 \$g(n)\$ 的上界。之后人们开始考虑子竞赛图的同构性质对母竞赛图的组合性质的影响。对给定的 \$k\$, 称 \$T_n\$ 具有 \$D_k\$ (或 \$I_k\$), 若 \$T_n\$ 中 \$n-k\$ 阶子竞赛图都有相同得分向量 (或都同构)。1969年 Jean 刻画了具有 \$I_2\$ 的竞赛图, 1974年 Muller 和 Pelant 刻画了具有 \$D_2\$ 的竞赛图。1973年 Kotzig 提出刻画具有 \$I_1\$ 的竞赛图, 1987年李

关于竞赛图的自同构群, 1963年 Moon 证明, 一个有限群为某个竞赛图的自同构群的充要条件是, 其顶点数为奇数。1966年 Goldberg 给出了当 \$n \le 14\$ 时 \$n\$ 阶竞赛图的自同构群的阶数之最大值 \$g(n)\$, 同年 Goldber 和 Moon 给出了 \$g(n)\$ 的上界。之后人们开始考虑子竞赛图的同构性质对母竞赛图的组合性质的影响。对给定的 \$k\$, 称 \$T_n\$ 具有 \$D_k\$ (或 \$I_k\$), 若 \$T_n\$ 中 \$n-k\$ 阶子竞赛图都有相同得分向量 (或都同构)。1969年 Jean 刻画了具有 \$I_2\$ 的竞赛图, 1974年 Muller 和 Pelant 刻画了具有 \$D_2\$ 的竞赛图。1973年 Kotzig 提出刻画具有 \$I_1\$ 的竞赛图, 1987年李

炯生等刻划了具有 D_1 的竞赛图,并给出具有 I_1 的竞赛图的一个必要条件。1990年 J. S. Li, D. D. Huang 和 Q. Pan 刻划了具有 D_k 的有向图, $k=1, 2$, 和具有 I_2 的有向图。至于刻划具有 I_1 的有向图(或竞赛图)问题尚待解决。

今后,竞赛图理论的主要研究方向是,(1)偏序集 \mathcal{S}_n (或 \mathcal{S}_n)上各种函数的 Schur 凸(Schur 凹)性质;(2)对各种竞赛图的图论性质 P ,蕴含 P (或强迫 P)得分向量(m 部得分序列)的刻划;(3)竞赛矩阵的组合性质;(4)竞赛图中其他有趣的问题:如 m 王问题,具有 I_1 的竞赛图的刻划等。

参考文献

- 1 Moon J W. Topics on Tournaments. New York, Holt, Rinehart and Winston, 1968, 1~102
- 2 Reid K B, Beineke L W. Tournaments in Selected Topics in Graph Theory. Beineke L W & Wilson R J Ed, New York, Academic Press, 1978, 169~204
- 3 Li J S, Huang G X. Chinese Science Bulletin, 1985, 30(7): 990
- 4 Li Q. Annals of the New York Academy of Sciences, 1989, 576: 336~343
- 5 张克明, 宋增民, 王建中. 南京大学学报数学半年刊, 1991, 1: 6~10
- 6 吴正声. 应用数学学报, 1987, 10(3): 284~288
- 7 Tan S P, Koh K M. Kings in multipartite tournaments, to appear
- 8 de Caen D, Gregory D A, Kirkland S J, Pullman N J, Maybee J S. Linear Algebra and its Applications, 1992, 169: 179~193
- 9 Li J S, Huang D D, Pan Q. J Combinatorial Theory, Ser B, 1990, 50(2): 288~298

(中国科技大学李炯生教授撰)

计算组合学和计算图论 computational combinatorics and graph theory

20世纪70年代发展起来的研究解决组合学和图论方面的理论问题与应用问题的计算机方法。由于图论是组合学的一部分,两者紧密相联,因此这里同时介绍计算组合学和计算图论。

由于计算机的迅速发展和普及,组合学和图论又是计算机科学的重要理论基础,因此计算组合学和计算图论的发展对计算机的理论与应用,以及组合学本身都有很重要的意义。

计算组合学和计算图论的第1个重大成就是1976年美国 K. Appel 和 W. Haken 用计算机证明著名的四色定理:任何一个平面图可用4种颜色着色使任何两个相邻的国家着不同的颜色。同时在其它方面也不断取得新的成果,我们可以归纳为以下几个方面。

1. 组合对象的非数值计算的方法。最常用的非数值计算包括搜索、查找、排序等问题。搜索与查找,就是在一个集合中如何查找一个特定的元素或快速、不重复地考察每一个元素,这是许多实际问题和计算机软件设计中常遇的问题。排序问题是将某一个集合的所有元素按某个指标进行排列,也是任何一个计算机语言系统必须处理的问题。对于搜索与查找,虽然有各种不同的算法,但基本的方法可以分为两类:一种称为深度优先搜索法(Depth first search);另一种称为广度优先搜索法(Breadth first search)。在计算机数据结构中对所谓栈(stack)和队(queue)的处理就是分别用这两种方法。今后的发展方向大致有两方面,一是针对新的实际问题,以这两种基本方法为指导,不断设计出新的算法。二是随着计算机的进一步发展,例如并行机的出现,需要处理更加复杂的搜索、查找与排序等问题。

2. 组合最优化算法的研究。有许多实际问题和理论问题涉及在一个集合中寻找在某种意义下最优的元素,这就是组合最

优化问题。几乎所有有关寻找最优元素的问题都可用组合数学与图论来建立数学模型和寻找适当的算法,最常见的是以下几类:(1)最短路与最优树问题。(2)最大匹配与最优匹配问题。(3)网络流中的最大流与最小流问题。(4)旅行商问题:求通过各个城市的路程或费用最小的旅行路线。(5)中国邮递员问题:求通过各个街道的最短投递路线。(6)最优排序问题:若干台机器和若干种加工零件,如何安排加工次序使总的加工时间最短。除了这6类问题外,还有一大类问题是线性规划与整数规划,它是运筹学的基本内容,同时也属于组合优化的范围。

在这几类问题中,有些问题在一定条件下已有好的算法,但有些至今未找到好的算法,例如旅行商问题是一个著名的难题,在最优排序问题中,有些情况也是十分困难的。组合优化有非常广阔的发展前景,由于实际问题层出不穷,不断会有新的最优化问题需要解决;另一方面,旅行商问题和某些最优排序问题远远没有解决,可进一步从理论上、算法上加以研究。

3. 组合计数的计算机方法。所谓组合计数问题就是求某一类组合结构的数目。经典的组合计数方法是求得一个有限的计数公式、递推公式或生成函数等,随着计算机的发展,对于一些找不到简单的计数公式的问题,可以设计适当的计算机方法来计算具体的数目,这些方法大多以群论中的 Burnside—Polya 理论为基础,由此得到的一些计数方法用手工是很难进行的,计算机使这些方法有了实际的意义,这些方法在图的计数问题获得了较为系统的成果,在70年代末已有专著出版,并且在化学方面得到了成功的应用。加拿大 R. C. Read 在这些方面作出了突出的贡献。中国学者也有不少新的成就。

目前仍有许多组合结构的计数问题没有解决,例如著名的 Hamilton 图的计数问题,用计算机已经得到低阶的数目,能否改进方法得到更高阶的结果,尚待研究。

4. 图的构造、同构检验方法以及图的参数的计算方法。把某一类组合结构全部构造出来不仅具有实际意义,而且在理论上也有很大的价值。例如组合设计中拉丁方的结构,图论中各类图的构造等。与构造问题紧密联系的是同构检验问题,因为我们要构造的是互不同构的图,判断两个图是否同构可转化为判断两个 0-1 矩阵经过行(列)调换后能否变为相同的问题,如果用枚举法来做,计算复杂度是 $n!$ 量级的。有人对次数加以限制的图的同构检验找到了好的算法,但算法比较复杂。计算机还可用来研究图的一些性质与参数,例如前面提到的四色定理的证明,如果加以推广,就是求一个图的色数。还有求一个图的连通度,判断一个图的平面性等问题。

此外,计算图论还在一些新的高科技领域如大规模集成电路(VLSI)的设计与研究取得新的成果。

参考文献

- 1 Read R C. Selected Topics in Graph Theory. Academic Press, 1978, 417~444
- 2 徐利治等. 计算组合数学. 上海:上海科学技术出版社, 1983
- 3 Papadimitriou C H 等著. 组合最优化和复杂性. 刘振宏等译. 北京:清华大学出版社, 1988
- 4 胡冠章. 数学的实践与认识, 1989, 3: 76~79
- 5 Tinhofer G, et al. Computational Graph Theory, Comput. Suppl 7, Springer, Vienna, 1990
- 6 Hu G, et al. Applied Mathematics A Journal of Chinese University, 1993, B8(1): 25~31

(清华大学胡冠章教授撰)

图的点染色和边染色 vertex-colourings and edge-colourings of graphs

在组合论中常借用颜色使研究对象具有某特征或作出某种分类,“涂色”常泛指没有附加条件地将色分派给研究对象。典型问题如:正方形4顶点用黑白2色任意涂色,可有6种不同图案(全白、全黑、3白1黑、3黑1白、2白2黑同色相邻或相间)。完全图 K_n 的边红蓝2色任意涂色,必有

同色边的 K_3 (拉姆齐 Ramsey 数 $R(3,3)=6$)。图论中研究对象(点和边)的色分派常要求满足附加条件,故改术语为染色。

图 $G=(V, E), |V|=n, |E|=m, (n \text{ 个点}, m \text{ 条边})$ 。除非特别标明,一般研究无多重边,无自环的标之为简单图的图,本文也是。图 G 的顶点染色,是对每一点指派一种颜色,使相邻的点都有不同的色(或称正常点染色,经常简称染色)。如给定 k 种色,可以用 $\lambda(\lambda \geq k)$ 种色作出正常点染色,就说 G 是 k -可(点)染色,使 G 有正常染色的最小色种数称为(点)色数,记为 $\chi(G)$,对于 k -可染色图,必有 $\chi \leq k$,如记 $\chi(G)=k$,则说 G 是 k 色的。

求图的色数意义深远。众所周知的四色猜想说,在平面(球面)上(每个国家认为由一个单连通区域表出,两国相邻即有一段公共边界线,任何地图能够只用 4 种色染色,使没有两邻国有相同色。图论中采用改造成对偶图的方法,每个区域缩为 1 个“代表点”,2 个有公共边界的代表点之间连接一条“边”,平面图就对偶了 1 个由“代表点”和“边”组成的平面图(地图的对偶图)。这个对偶图的点染色就是地图的面染色。

四色猜想的本意就是认为:每一个可平面图是 4-可点染色的,早期研究这猜想的有莫比乌斯(Möbius, 1840)、格思里(Guthrie, 1850)、德·摩根(De Morgan, 1850)。肯普(Kempe, 1879)曾给出猜想的许多错误“证明”中的第 1 个“证明”,实际上, Kempe 的链路方法证得的是“五色定理”。希伍德(Heawood, 1890)指出了他的错误,直到 1976 年美国的阿佩尔(K. Appel)、黑肯(W. Hakan)和考奇(J. Koch)3 人用电子计算机证明了四色定理,有不少学者认为首开了机器证明的范例。也有不少学者认为不严密,不予承认。总之,还有相当一些人仍在探索简明的证明。当然,确定点色数是基本问题,已求得: $\chi(K_n)=n, \chi(K_n-e)=n-1, \chi(\overline{K_n})=1, \chi(K_{p,q})=2, \chi(C_{2k})=2, \chi(C_{2k+1})=3$ 。科尼希(König)1931 年证明了一个图是双色的,当且仅当它不含奇圈。但是 3-可色图的特征还没有解决。已经求得一些估界,记 Δ 为最大的点度粗略的有 $\chi \leq 1 + \Delta$ 。对于 $\Delta \geq 3$ 的图,估式 $\chi \leq \Delta$ (除了 $K_{\Delta+1}$ 作为 G 的分支以外)成立。由贝克霍夫(Birkhoff, 1912)作为冲击四色猜想而引入的色多项式也是求色数的工具,记 $P(G, \lambda)$ 为一个标定图至多用 λ 种色(点)染色的不同方式个数。它也是 λ 的一个整系数多项式。当 $\lambda < \chi(G)$ 时, $P(G, \lambda)=0$,使 $P(G, \lambda) > 0$ 的最小正整数就是 $\chi(G)$ 。四色猜想断言:可平面图 $G, P(G, \lambda) > 0$ 。易于看出 $P(K_n, \lambda) = \lambda(\lambda-1)\dots(\lambda-n+1) = \lambda_{(n)}, P(\overline{K_n}, \lambda) = \lambda^n$ 。任何一个非完全图 G ,若 u, v 是非邻接点,则

$$P(G, \lambda) = P(G+uv, \lambda) + P(G_{u-v}, \lambda)$$

式中 $G+uv$ 表示添加 uv 边后的图, G_{u-v} 表示等同 u, v 二点所得的图,它变成 $n-1$ 个点的图了。多次递归使用 $P(G, \lambda)$ 就等于若干完全图的色多项式之和。与此逐次加边方式相仿,还有逐次减边方式求 $P(G, \lambda)$ 的,如 G 中有邻接边 $uv, P(G, \lambda) = P(G-uv, \lambda) - P(G_{u-v}, \lambda)$ 。多次递归使用, $P(G, \lambda)$ 等于若干孤立点图色多项式的代数和。色多项式系数表征了图的结构之间的内在性质: $P(G, \lambda) = \lambda^n - m\lambda^{n-1} + \dots + (-1)^{n-p} a_p \lambda^p$ 。即 n 个点 m 条边 p 个连通分支的图的色多项式必是首系数为 1, λ^{n-1} 系数为 $-m$, 以下均正负交替。最低非零项是 λ^p , 里德(R. C. Read, 1968)猜想: $P(G, \lambda)$ 的系数绝对值是单峰性的,即先上升后下降。同构的图,色多项式相同,反之,不一定。已证出,一个有 n 个点的图 G 是一棵树当且仅当 $P(G, \lambda) = \lambda(\lambda-1)^{n-1}$ 。而 4 个点的树就有不同构的 P_4 和星 $K_{1,3}$, 一般的具有相同色多项式的图的特征还没有解决。另一难题是如何判断多项式是否是某个图的色多项式。

色多项式作为研究色数的工具还有很多潜在的成果待开拓,图论作为离散数学范畴,没有“万能”或通用的研究手段,如数学分析中有成熟手段:极限,微分,积分,级数等。图论中邻接矩阵特征多项式,再借用线性代数和近世代数中已有成果,发展成称为“代数图论”的分支。色多项式研究正在发展中,点染

色另外的研究方向有唯一可染色图问题[用 $\chi(G)$ 种色对 $V(G)$ 作的色划分是相同的]、色临界问题[对 G 中每一点 v , 都有 $\chi(G-v) = \chi(G) - 1$ 称为临界图]。

在理论计算机科学研究领域,算法复杂性是基本概念,它对现实的指导意义深远。只有运算次数是求解问题规模 n 的多项式,这个算法才是可行的,不然发生指数爆炸,一般都效果不好,尤其是一类称之为 NP -完全型难题在现在计算机结构体系下是难以找到有效算法的,已经证明,对任意的图 $G=(V, E)$, 欲判断 G 是不是 3-可染色是一个 NP -完全问题(斯托克迈耶 stockmeyer, 1973 证出)。

图 $G=(V, E)$ 的边染色,即对图的每条边指派一种色且使得没有两条邻接边有相同色, G 中同色的边集也可称为(色)边独立集(匹配),使 G 有边染色的最小色种个数称为边色数,记为 $\chi'(G)$ 。记 Δ 是 G 的最大度,维津(Vizing)在 1964 年证出 $\Delta \leq \chi'(G) \leq \Delta + 1$, 此后称 $\chi'(G) = \Delta$ 的为第 1 类图 C_1 , 其余的,归入第 2 类图 C_2 。并引出了对边色数分类的大量研究,已证得属于 C_1 的图类有:二分图,完全图 K_{2k} 等,属于 C_2 的图类有 K_{2k+1}, C_{2k+1} 等。但通用图的分类还没有找到判据。已有人对 143 个连通的 6 个顶点以下的图分类,仅有 8 个属于 C_2 , 这 8 个图中有 C_3, C_5, K_5, K_5-e 等。厄尔丢斯(Erdős)和威尔逊(wilson)在 1977 年证明 n 个点的图中, C_1 类图占的比值,随 $n \rightarrow \infty$ 趋于 1, 分类问题中还有不少充分性定理,如对于正则图,如 $m > \Delta \cdot [\frac{1}{2}n]$, 则 G 属于 C_2 类,另一个有趣的结论,四色定理等价于 3 正则平面图的面染色数为 3, 它显示了“点”染色与“边”染色之间的内在联系。

边色数的另一研究方向是边色临界图,如果 G 是连通的且属于 C_2 类,对于任一条边 e , 有 $\chi'(G-e) < \chi'(G)$, 则 G 称(边色)临界图,或说是 Δ -边色临界的,如奇圈 C_{2k+1} 是 2-边色临界的, K_5-e 是 4-边色临界的,这方面已证得一些必要条件;如果 G 是 Δ -边色临界的,则 G 不含割点,记 I 是 G 的任意一个边独立集,则 $\chi'(G-I) = \chi'(G) - 1$; 对于满足 $2 \leq i \leq \Delta$ 的每个 i , G 含有一个 i -边色临界子图;如 v 和 w 是 G 中邻接点,则必有 $d(v) + d(w) \geq \Delta + 2$; 不存在正则的 Δ -边色临界图,满足 $\Delta \geq 3$ 。

关于边染色又引出不少猜想,贾柯勃逊(Jakobsen, 1974)、比耐克(Beineke)和威尔逊(wilson)在 1973 年猜想(因子分解猜想):每一个偶数点的边色临界图含有一个 1-因子;每一个边色临界图含有一个 2-因子(k -因子即每点的度为 k 的生成子图。维津在 1968 年猜想: Δ -边色临界图必有 $m \geq \frac{1}{2}(n(\Delta-1)+3)$ 。

另一研究方向是唯一(边)染色图,即 G 的边集在 $\chi'(G)$ 种色边染色下,色划分是唯一的那些图。此时 G 也称为 χ' -唯一边可色图。对此已证得唯一边可色图的必要条件:(1)每条色边都和其它色的一条边邻接。(2)记 $H(\alpha, \beta)$ 为 G 中 α 色和 β 色的边导出双色子图,则 $H(\alpha, \beta)$ 或是开路,或是闭偶圈。(3)满足不等式:

$$\frac{1}{2}n \cdot \chi' - \binom{\chi'}{2} \leq m \leq \frac{1}{2}n \cdot \chi$$

(4)如 G 还是 k -正则图($k \geq 3$),若 G 中对任取的一条边插入一个点(一次细分)所得的图记为 H , 则 H 是 3-临界的,此外还证得仅有的 4-边色临界图是 $K_{1,4}$ 。在唯一边可色图研究领域内有不少猜想,猜想(1)每一个平面唯一 3-可边染色图,除了 $K_{1,3}$ 外,都含一个三角形;猜想(2)非平面的 3 正则唯一 3-边可染色图,只有一个彼得森(peterson)型图 $P(9, 2)$, 即外圈是依次标点为 1, 2, ..., 9 的 C_9 , 每点向内延伸一条边,加一个点,相应记为 1', 2', ..., 9', 而且这 9 个点隔号相连形成另一个 C_9 : 1'3'5'7'9'2'4'6'8'1'; 猜想(3): 每一个恰有 3 个哈密顿圈的 3 正则图是唯一 3-边可染色的。

在边染色问题中,中国学者引入了边一色多项式,记为

$$Q(G, \lambda) = \lambda^m - a_1 \lambda^{m-1} + a_2 \lambda^{m-2} - \dots + (-1)^k a_k \lambda^{m-k}$$

其中 $a_1 = \sum_{i=1}^n \binom{d_i}{2}$, d_i 为每点的度, $a_2 = \binom{a_1}{2} - \sum_{i=1}^n \binom{d_i}{3} - N(\Delta)$, $N(\Delta)$ 为 G 中三角形个数. $m-k=p(G)$, 是 G 的连通分支数. 如果两个图点数相同且边色多项式也相同就能得出两个图同构, 则说这个图是边色多项式拟色唯一的. 已推知边色多项式拟色唯一的图有: $P_n, K_n, K_{n,n}, \bigcup_{i=1}^m C_n, T_n$ ($n \leq 5$ 的树), 而对于点数 $n > 5$ 的树, 其边色多项式 $Q(T_n, \lambda)$ 不是拟色唯一的 (唐廷载、韩绍岭, 1991).

在点染色、边染色基础上, 1965 年有人把点和边结合看待, 提出了“全染色”概念, 一个图的全色数 $\chi_2(G)$ 是对图的点、边进行色分配, 使既是点染色又是边染色并且点和关联边不同色的最小色种个数, 如 $\chi_2(K_{3,3})=5$. 比扎特 (M. Behzad) 1965 年猜想: 对任何图, $\chi_2(G) \leq \Delta(G) + 2$. 边染色在电网络, 课程表问题, 拉丁方构造等领域也获得应用.

关于对任意一个图, 实施正常点染色, 或边染色的有效算法或近似算法是重要的课题, 关于全染色, 多重图, 超图等元素染色在理论和应用方面还有大量工作等待人们去研究.

参考文献

- 1 Beineke L W, et al. Selected topics in graph theory, 1978, 103~126
- 2 Yap H P. London Mathematical Society lecture Note Series, 1986, 108~887
- 3 唐廷载, 等. 数学研究与评论, 1991, 11(4), 522 (北京理工大学杨骅飞副教授, 孙良审)

优美图、鲍丹狄克猜想

Bodendiek conjecture about graceful graphs 一个点集 V 以及 V 中某些点对连线(边)的集合 E , 就构成一个图(graph). 现实世界任何一个离散事物集合以及这集合中两元素间的一种关系, 都可用图作数学模型. 最早的图论论文是欧拉(Euler)1736 年写成的关于哥尼斯堡(Königsberg)七桥问题. 20 世纪 60 年代以来, 随着近代科技特别是计算机的应用, 使图论在理论上迅速发展, 并在自然科学、社会科学和近代科技的许多方面, 都有广泛、重要的应用.

对于简单图 $G(V, E)$, 若每一个顶点 $v \in V$, 存在一个标号 $\psi(v) \in \{0, 1, 2, \dots, |E|\}$; 不同顶点的标号不同; $uv \in E, |\psi(u) - \psi(v)|$ 称为边 uv 的标数, 且不同边的标数不同, 则称 G 为优美图 (graceful graph). 由于优美图在编码理论、 λ -射线晶体学、雷达、通讯网络和无线电天文学等方面有实际应用, 并且大多数图不是优美图, 从而论证图的优美性, 便成为比较活跃的课题. 邦迪 (Bondy) 和默蒂 (Murty) 1976 年提出 50 个未解决的图论难题, 优美图问题是其中第 15 个. 至今未解决的重要问题是如何判别一个图是否是优美图. 解决此问题是非常难的, 部分原因是由于目前缺乏较系统有力的研究工具; 并且优美图的子图未必还是优美图, 也给优美图的论证带来障碍. 所以当前国内外学者只图于寻求某些特殊图类的优美标号. 树是优美图的猜想, 现已得到众多结果, 但离完全解决还相差甚远. 鲍丹狄克 (Bodendiek) 猜想一个圈加一条弦是优美图 (连接圈上不相邻两点的边称为弦), 于 1977 年提出, 它的几个特殊情形也同时得证. 这个猜想也是很难的. 经过近 4 年的努力, 才由德劳姆 (Delome) 等于 1980 年给出证明. 随后冯成进于 1983 年、陈志增于 1986 年也分别独立地给出证明. 一般证法大多是找规律直接标号, 再证明是优美标号. 陈志增一改直接标号方法, 引进 GL 矩阵, 通过 GL 阵的运算, 证得该猜想. 由于 GL 阵方法在一定范围内较为有力, 故随即用 GL 阵于 1986~1991 年证得 Bodendiek 猜想的一种推广: 连接两个顶点的 3 条独立路所成简单图是优美的 (其中有 3 种特殊情形的结论略有变通), 并证得其它一些优美图类. 与此同时, 柯赫 (Koh) 等于 1982 年证得该猜想的另一种推广, 从圈上一点任意引 2 (或 3) 条相邻的弦, 构成优美图; 并且在圈 $C_n = v_1 v_2 v_3 \dots v_n v_1$ 中, 引所有可能使 $i \geq P$ 的弦 $v_i v_i (3 \leq p \leq n-1)$, 所成的图记为 $C_n(P)$, 又证得 $C_n(P)$ 是优美图. 此后马旭东于 1988 年证得当 $p=0, 3 \pmod{4}, C_n(p)$ 是优美图; 同时他又进一

步推广, 证得从 $C_n(3)$ 的 v_1 向 V_i 连接 k_i 条与 C_n 没有公共内点的长为 2 的路 (整数 $k_i \geq 1, i=2, 3, \dots, n$), 且所有路相互独立, 也构成优美图; 他还证得另一种特殊多弦圈的优美性.

今后若干年内, 下列几个图类是否优美图, 可能会被关注: (1) 连接两个顶点的多条独立路所成简单图. (2) 一般的有一个公共顶点的多条弦的圈. (3) 一般多弦圈. (4) 多圈共弦图, 等等. 鉴于当前尚缺乏系统有力的理论工具, 看来只能从这些图类的特殊情形, 逐步证起, 并且一般说是很困难的.

参考文献

- 1 Bondy J A, Murty U S R. Graph Theory with Applications. Macmillan, 1976
- 2 Bodendiek R, et al. Elemente der Mathematik, 1977, 32, 49
- 3 Delome C, et al. Journal of Graph Theory, 1980, 4, 409
- 4 Koh K M, et al. Bull Malaysian Math. Soc, 1982, 5(2): 49~63
- 5 冯成进. 科学通报, 1983, 13
- 6 陈志增. 内蒙古师大学报, 1986, 3, 1~9
- 7 Ma Xudong. J Math Res & Exposition, 1988, 2, 215
- 8 Chen Zhizeng. Physica-Verlag (Heidelberg, FRG), 1990, 737~746
- 9 陈志增. 内蒙古师大学报, 1991, 3, 11

(内蒙古师范大学陈志增教授撰)

实数的有理逼近

approximation to real numbers by rationals 人们经常遇到无理数的近似计算问题, 由此产生了用有理数逼近无理数的误差估计问题, 这就是丢番图 (Diophantine) 逼近论的一个最基本的研究课题, 即实数的有理逼近. 它主要包括单个实数的逼近与多个实数的联立逼近, 齐次逼近与非齐次逼近.

1842 年, 狄利克雷 (Dirichlet) 利用抽屉原理首先证明了实数有理逼近的一个结果, 如果 α 是任意实数, Q 是大于 1 的实数, 那么存在整数对 p, q , 满足两个不等式 $1 \leq q < Q$ 和 $|aq - p| \leq Q^{-1}$. 由此可得, 如果 α 是任意无理数, 那么存在无穷多对互素的整数对 p, q , 满足不等式: $|\alpha - \frac{p}{q}| < q^{-2}$. 1891 年, 胡尔维茨 (Hurwitz) 将上式改进为: $|\alpha - \frac{p}{q}| < \frac{1}{\sqrt{5}} q^{-2}$, 并指出: 对于某些无理数, 常数

$1/\sqrt{5}$ 是最佳值, 不可再减小. 1903 年, 波莱尔 (Borel) 利用连分数理论给出了胡尔维茨定理一个更具体的新的证明. 与此同时, 由于数的几何的发展, 1896 年, 闵可夫斯基 (Minkowski) 利用凸体定理证明了其著名的线性型定理. 线性型定理的证明对实数有理联立逼近问题的研究起到了很大的推动作用, 由此而产生了一批关于齐次与非齐次联立逼近的重要结果. 从 18 世纪中期到 19 世纪初所获得的这一系列研究成果, 近百年来一直被用作实数有理逼近问题研究的重要工具.

从 20 世纪初期中期, 实代数数的有理逼近问题变为这一研究课题的热点. 刘维尔 (Liouville) 在 1844 年提出, 如果 α 是次数为 d 的实代数数, $u > d$, 则不等式: $|\alpha - \frac{p}{q}| < \frac{1}{q^u}$, 只有有限多个有理解 p/q . 根据这一结果, 刘维尔构造出历史上的第一个超越数: $a = \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n!}$. 1909 年, 图埃 (Thue) 将其改进为 $\mu > \frac{1}{2}d + 1$. 1921 年, 西格尔 (C. L. Siegel) 将其改进为 $\mu > 2\sqrt{d}$. 1947 年, 戴森 (F. J. Dyson) 对其做了进一步改进. 尽管有这些改进, 但它们都与代数数的次数有关. 1955 年, 罗斯 (Roth) 得到了与代数数的次数无关的最好结果, 即 $\mu > 2$. 由于一重要结果, 罗斯获得了 1958 年菲尔兹奖. 1970 年, 施密特 (W. M. Schmidt) 将罗斯定理推广到了多个实代数数的联立逼近问题, 给出了对应的实代数数联立逼近定理. 关于罗斯定理的一系列研究工作大大推动了超越数以及不定方程的研究.

从 20 世纪 60 年代末起, 实数的有理逼近研究进入了一个新的研究时期, 这一时期研究工作的两个明显特点是: 研究工作趋向

于细致性以及应用性。

近年来, Roth 定理的研究仍有继续。Roth 工作的根本限制在于它是非有效的。1968 年, 贝克(A. Baker)成功地证明, 对于任何次数 $n \geq 3$ 的代数数以及任何 $k > n$, 皆存在可以计算的常数 $c > 0$, 使得: $|Q - \frac{y}{x}| > c x^{-k} (\log x)^{-1}$, 对于所有整数 $x, y (x > 0)$ 成立。这一有效性逼近结果在数论中有很多重要应用。

1982~1984 年, 雷省特(E. Reyssat)、丘季诺夫斯基(G. V. chudnovsky)以及其他一些数学家用 Padé 逼近等不同方法先后研究了 $\log 2, \pi/\sqrt{3}, \pi^2$ 等无理数的 Roth 型逼近, 给出了一系列有效性逼近定理。1987 年, 鲁哈泽(E. A. Rukhadze)对 $\log 2, \pi^2$ 的 Roth 型逼近进行了改进。同年, 杜比茨卡斯(A. Dubitskas)使用多项式、行列式以及适当的估计改进了 $\pi/\sqrt{3}$ 的有理逼近, 并将其研究成果用于微分方程的研究工作中, 对于其它型的单个实数的有理逼近也趋于细致化。例如, 1984 年贝拉(A. Balog)等人使用傅立叶(Fourier)展开与指数和讨论了用无平方因子数的丢番图逼近。对于形如 $e, e^{\frac{1}{2}}, e^{\frac{2}{3}}, e^{\pm \frac{2}{3}}$ 和 $\alpha - \sqrt[3]{a}$ 等无理数的有效性逼近的研究也取得了不少重要结果。

在对实数的联立逼近方面的研究细致化也极为明显。1979 年, 朱尔卡特(W. Jurkat)等人讨论了关于最好的 2 维丢番图联立逼近以及它们的算法。1984 年, 哈曼(Glyn Harman)使用丢番图逼近的度量定理以及特征和估计研究了用非平方因子整数的逼近。其后, 图恩希尔(P. Thurnheer)研究了用一定整数对的联立逼近。1988~1989 年, 贝拉等人讨论了用素数的联立丢番图逼近问题, 斯密特(Schmidt)等人对于 2 维非齐次联立逼近进行了研究。

近年来, 实数有理逼近的另一个研究趋势是应用性, 即人们开始注重于将研究工作引入并运用于其它研究领域。1983 年, 丘季诺夫斯基(D. V. Chudnovsky)等人对线性微分方程解的有理逼近进行了讨论。1986 年, 罗基特(A. Ročket)发表了《丢番图逼近论中的一个局部定理及其对于 Pell 方程的应用》一文。1988 年, 拉尔谢(G. Larcher)讨论了有关连分数的收敛问题及其在自动论中的应用。以及人们对于经济学研究问题中所遇到的实数 α 的有理逼近问题的研究。他们的一系列研究作为实数的有理逼近的研究开辟了新路。

20 世纪 70 年代以来, 关于实数的有理逼近的一些古典问题的研究仍然是人们研究的一个热点, 每年都有一批研究成果见诸于各种数学杂志。例如, Dirichlet 定理以及连分数理论的研究仍然是实数有理逼近的重要研究课题。从研究技术角度讲, 古典的研究结果如连分数理论、Dirichlet 定理、Minkowski 定理等依然为重要的研究工具。近年来, 在实数有理逼近的大量研究中还采用了解析方法、矩阵理论、特征和以及筛法等数学研究工具, 同时计算机技术也得到了应用。

实数的有理逼近是一个研究内容极为丰富的课题, 同时也是个十分棘手的研究课题, 存在着许多难点, 而要解决这些难点则困难重重, 其中有一部分问题依靠目前已有的研究技术是无法解决的。关于这方面的内容, W. M. Schmidt 曾作过较为详细的介绍。实数有理逼近的应用将是今后具有前途的一个研究方向, 实数、有理逼近的研究成果一直是各学科领域研究中的一个重要工具。如能将实数的有理逼近问题的研究与具体学科有机地结合, 将会对整个科学的发展起到积极的推动作用。

参考文献

- 1 Baker A. Tans Roy Soc London, A263(1967—1968), 173~191, 193~208
- 2 Jurkat W, et al. Math Ann, 1979; 244(1), 1~32
- 3 Schmidt W. Progress in Mathematics Birkhäuser, 1983, 271~287
- 4 Harman, Glyn J. London Math Soc, 1989, 39(3): 405~413
(西北大学袁进副教授撰, 潘承彪审)

数论函数值分布 对于数 f 在自然数集 N 上的数论函数 (Arithmetica function) $f(n), n \in N$, 取值可以是实数, 也可以是

复数(一般为实数), 例如著名的 Euler 函数 $\varphi(n)$, 除数函数 $\tau(n)$, 以及除数和函数 $\sigma(n)$ 等等。由于其分布的复杂性, 过去一般采用均值估计的办法, 这方面已有不少成果。

20 世纪 50 年代开始, 有人开始对若干数论函数, 如上述 $\varphi(n), \tau(n)$ 以及 $\sigma(n)$ 等采用初等方法, 对其函数值的分布作了些新的探讨。Somayaiult, Seirpinski 与 Schinzel 等, 曾获得了一些有趣的结果。这里应当提到的是, 当 50 年代初, Sierpinski 与 Schinzel 的论文发表后, 华罗庚指出, 采用 Brun 筛法可以导致 $\varphi(n), \sigma(n)$ 值分布的精密结果, 闵嗣鹤完全赞同华罗庚的见解, 并认为采用 Brun 方法还可相当深刻的解决 Schinzel 问题。

沿着华罗庚指明的方向, 王元、邵品琮与 Schinzel 相继相互独立地证实了华罗庚的预见。也完全解决了 A. Schinzel 的除数函数值分布的问题。在数论函数值分布的研究过程中, 一个非常深刻的转折性结果是王元在 50 年代末的一项研究工作。王元将 Аинник-Renyi 新筛法与 Brun 方法相结合创建了新方法, 建立了一个非常有效的基本引理就可以将上述关于 $\varphi(n), \sigma(n)$ 及 $\tau(n)$ 的值分布性质均跃进到素数集上成立。

对于 Hardy—Wright 函数 $H(n) = \varphi(n) \cdot \sigma(n)/n^2$, 在附近密集分布也有很好的性质, 邵品琮运用王元方法在素数集上考察有比原 Hardy—Wright 不等式更强的结果, 吕新忠对 Hardy—Wright 数论函数作了进一步的推广, 也获得了比原先更强的结果。80 年代初, 邵品琮对于 $\Omega(n)$, 及 $\omega(n)$ 这两个与素因子个数有关的函数及一类称为广泛的数论函数均作出了相应精密的值分布结果。

1956 年 3 月, 匈牙利 Hajos 访华时, 转达了匈牙利 Erdos 提出的一个除数问题, Erdos 原来的问题为: 任给正整数 k 及 n_0 , 是否存在自然数 n , 使当 $n > n_0$ 时, 有:

$$\tau(n) > \prod_{\tau(n+v) \cdot \tau(n-v)} \quad (E)$$

邵品琮仍用筛法, 解决了 Erdos 问题, 并得到比猜想 (E) 更强的结果。特别是如今运用王元的新筛法来彻底回答 Erdos 除数问题, 有比原来 Erdos 猜想更深刻得多的结果。有: 定理 E, 任给正整数 k, n_0, m 和 $M > 1$, 一定存在素数 $p > n_0$, 且满足

$$\log^{(r)} \tau(p+1) > M \cdot \prod_{\tau(p+1+v) \cdot \tau(p+1-v)} \quad (E_2)$$

其中 $\log^{(r)} x = \log \log^{(r-1)} x$, 而 $\log^{(0)} x = x$ ($r=1, 2, \dots, m$), 进一步讲, 在 $(1, X)$ 内满足 (E_2) 的素数 p 的个数 $N^*(X)$, 当 X 充分大时, 有:

$$N^*(X) > C \cdot \frac{X}{\log^{2k+1} X \log \log X} \quad (E^*),$$

其中 $C^* = C^*(k, n_0, m, M)$ 是一与 X 无关的正常数。

90 年代初, 邵品琮对于一般数论函数 $f(n)$ 定义它具有 Erdos 强度, 是指: 如果任给正整数 k 及 n_0 , 总存在自然数 n , 满足 $n > n_0$, 且有:

$$f(n) > \prod f(n+v) \cdot f(n-v) \quad (E^{**})$$

80 年代的工作已证明了除数函数 $\tau(n)$ 具有 Erdos 强度。运用筛法手段, 对于 $\omega(n)$ 与 $\Omega(n)$, 以及演变了的 Euler 密度函数 $\xi(n) = (n)/n$, 和 Hardy—Wright 的密度函数 $H^*(n)$, 均具有 Erdos 强度, 而且可以在素数集上取值予以表述。

一个数论函数 $f(n)$ 称为可加的 (additive) 指: $f(mn) = f(m) + f(n)$, (当 $(m, n) = 1$), $f(n)$ 称为可乘的 (multiplicative) 是指: $f(mn) = f(m)f(n)$, (当 $(m, n) = 1$)。如果一切 m, n (不论互素与否) 均有 $f(mn) = f(m) + f(n)$, 或 $f(mn) = f(m)f(n)$, 则称为完全可加的 (completely additive) 或完全可乘的 (completely multiplicative)。例如: $\Omega(n), \omega(n)$ 为可加函数。 $\sigma(n), \varphi(n), \tau(n)$ 为可乘函数。文献说明了上述具体可加与可乘函数在值分布方面具有的一些有趣的性质。反过来, 如果一个数论函数, 已知一些值分布的性质, 能否指明为何种数论函数呢? 关于这方面问题, P. Erdos 首先指出: 一个可加函数如果满足条件

$$f(n+1) = f(n) + o(1) \quad (\text{当 } n \rightarrow \infty)$$

则它是完全可加的, 且 $f(n) = c(\log n)$, c 为某常数。I. Katai 接着将上述条件减弱为: $\sum |f(n+1) - f(n)| = o(x)$ (当 $x \rightarrow \infty$) 时, 仍有 $f(n)$ 为完全可加的。F. Skof 给出另外条件仍有 $f(n)$ 为完全可加的。

1980 年, Mauclarre 与 Murata 曾得到联系 Skof 与 Katai 两者结果的结果, 一般地讲, 记实数 z 到它最近的整数的距离为 $\|z\|$

||, 则根据 Muclaire 与 Murata 的结果可得出下列结果, 定理 M. 若 f 可加, 且 $l/x \sum \|f(n+1)-f(n)\| \rightarrow 0 \quad (x \rightarrow \infty)$ (A) 则 f 为完全可加的。

I. Katai 猜想, 若 $f(n)$ 可加, 且满足 (A) 则有:

$$f(n) = c \log n + g(n) \quad (B)$$

其中 c 为一常数, 而 $g(n)$ 为一整值可加函数, 但 katai 猜想至今未被证实, Katai 首先假设: $\|f(n+1)-f(n)\| = O(1/n)$ (1)

之下, 得出了 (B) 的结果。1982 年 Katai 将条件减弱, 定理 K: 若 $f(n)$ 是可加的, 且 $n \|f(n+1)-f(n)\| = O(n^v)$ (2)

此处 $v < 1$, 则 (A) 成立。

接着, 1983~1984 年间, Katai 在此基础上写了一系列文章, 主要是针对下列两个主要问题进行讨论研究: (1) 设 f 为复值完全可乘函数, 且满足 $\lim \sum a_i f(n+i) = 0$ (*)

此处 $a_i (i=0, 1, \dots, k)$ 为绝对常数。是否能由 (*) 全部决定出 $f(n)$? (2) 设 K 为一正整数, f 与 g 为复值可乘函数, 且满足:

$$\sum |g(n+K)-f(n)|/n < \infty, \quad (**)$$

是不是能够决定出满足 (***) 的一切 f 与 g ? 关于条件 (*) 及 (***) 的研究总与特征函数 $c \log n, n^c$ (c 为常数) 有关, 经条件的分析, 所获得的结果是十分有趣的。关于 Katai 猜想, Katai 曾证明了, 当 f 满足 $\|f(n+1)-f(n)\| = O(1/n)$ 时, 有结果为 (B) 式。嗣后, Katai 又改进为: 当 f 满足 $\|f(n+1)-f(n)\| = O(n^{-\epsilon})$ 时, 此处 $\epsilon > 0$ 为任意小常数, 则 (B) 成立。

1984 年, Katai 又进一步改进, 当 f 满足 $\|f(n+1)-f(n)\| = O((\log n)^{-2})$ 时, 则 (B) 成立。

1987 年在加拿大 Quebec 国际数论会议上, 邵品琮曾用初等特殊的方法, 将 f 附加条件 $\|f(n+1)-f(n)\| = O(\exp(-A(\log n)^k))$ 时 (B) 成立, 当然结果不如上述 Katai 的结论, 但 Katai 认为方法有潜力, 循此建议, 最近邵品琮与唐元生获得了比上述 Katai 结果更好的下列结果: 若 f 满足 $\|f(n+1)-f(n)\| = O((\log^{(m)} n)^{-1})$, 其中 $\log^{(m)} n = \log \log \dots \log n$, 则 (B) 成立。

参考文献

- 1 Shao pin—tsung, Bull. Acad. Polon. Sci. II, 1956, 4, 569~572
- 2 王元. 数学学报, 1958, 23(5), 1~11
- 3 邵品琮. 科学通报数理化专辑, 1980, 4~56
- 4 Mauclaire J—L, Murata, Leo. Proc Japan, Acad, 1980, A 56, 438~440
- 5 Katai I. Acta math Hungar, 1984, 43(3—4), 259~272
- 6 Katai I. Acta math Hungar, 1985, 44(1—2), 125~132
- 7 邵品琮. 青岛大学学报(自然科学版), 1992, 1~2, 1~8
- 8 Shao pincong. Journal of Qing—dao University, 1991, 4(3~4), 38~49

(青岛大学邵品琮教授撰)

克莱姆法则的推广 extensions of Cramer rule

众所周知, 求解 n 阶非奇异线性方程组 $Ax=b$ 的 Cramer 法则是把解向量 x 的分量 x_i 表成两个行列式之商的形式, $x_i = \det A(i \rightarrow b) / \det A, i=1, 2, \dots, n$.

这里 $A(i \rightarrow b)$ 表示矩阵 A 的第 i 行换成向量 b 后得到的矩阵。(Robinsen, 1970) 给出 Cramer 法则一个非常优美的短证, 1982 年起陆续发表了一系列论文, 将 Robinson 中的证明技巧应用于相容的或不相容的, 或相容的面带有约束条件的线性方程组的解和不相容矩阵方程组的最佳逼近解的行列式表示, 从而推广了 Cramer 法则。推广的基本思想是从已知的矩阵 A 出发构造一个加边矩阵 $\begin{pmatrix} A & U \\ V & O \end{pmatrix}$ 。当 U 和 V 满足一定条件时, 加边阵非奇异, 再由加边阵构成的线性方程组求出原方程组的解。

1982 年 Ben—Israel 和 Vorghese 指出, 已知 A 为 $m \times n$ 阶矩阵 $\text{rank } A=r, U$ 为 $m \times (m-r)$ 阶和 V 为 $n \times (n-r)$ 阶的满秩矩阵。它们的列分别为零空间 $N(A^*)$ 和 $N(A)$ 的基, 则相容线性方程组 $Ax=b (b \in R(A))$ 的极小范数解和不相容线性方程组 $Ax=b (b \notin R(A))$ 的极小范数最小二乘解 $x=A^+b$ 的分量 x_i 均可表为

$$\text{两个}(m+n-r)\text{阶行列式之商, } x_i = \det \begin{pmatrix} A & (i \rightarrow b) & U \\ V & (i \rightarrow O) & O \end{pmatrix} / \det \begin{pmatrix} A & U \\ V & O \end{pmatrix}, i=1, 2, \dots, n.$$

这一结果突破了只能在非奇异线性方程组的范围内应用 Cramer 法则的框框, 开阔了人们的思路。接着王国荣(1986)给出了不相容线性方程组极小 N 范数, M 最小二乘解 $x=A_{\#}^+b$ 的 Cramer 法则。1989 年又给出了求解一类奇异线性方程组 $Ax=b (\text{Ind}(A)=k, b \in R(A^k))$ 的唯一解 $x=A_{\#}^+b$ 的 Cramer 法则。季均(1985)给出了求解不相容矩阵方程 $AXB=D$ 最佳逼近解的 Cramer 法则。Wornor(1984)讨论一类相容约束线性方程组唯一解的 Cramer 法则。值得一提的是 Wornor 除了用上述构造加边非异矩阵的方法外, 还提出另一种较筒形式的 Cramer 法则, 其基本思想是把原方程组中的奇异方阵 A 加一个修正阵 B , 使 $A+B$ 非异, 然后从相应的非奇异线性方程组求出原方程组的解。例如, 当 A 为 n 阶矩阵, $\text{rank } A=r, b \in R(A), M$ 和 N 分别属于零空间 $N(A)$ 和值空间 $R(A)$ 的补子空间 $N_c(A)$ 和 $R_c(A)$ 。设 C 和 D 为 $n \times (n-r)$ 阶列满秩矩阵, 它们的列分别是 N_c 和 M 的基。取 $B=CD^*$ 。则相容约束线性方程组 $Ax=b, x \in M$ 的唯一解 x 的分量 x_i 可表为两个 n 阶行列式之商:

$$x_i = \det[(A+B)(i \rightarrow b)] / \det(A+B) \quad i=1, 2, \dots, n.$$

这一结果中出现的行列式阶数与原问题相同, 且容易构造, Cramer 法则推广这一新进展。启发我们去研究其它一些问题的较筒形式的 Cramer 法则。王国荣(1992)系统地研究了不相容线性方程组的极小 N 范数 M 最小二乘解和极小范数最小二乘解。一类奇异线性方程组唯一解及不相容矩阵方程最佳逼近解的较筒行列式表示。

Prasad 和 Bapat(1992)得到了求广义 Moore—Penrose 解的广义 Cramer 法则。在研究 Cramer 法则推广的同时, 可得到 $M-P$ 逆 A^+ , 加权 $M-P$ 逆 $A_{\#}^+$, 群逆 $A^{\#}$, Drazin 逆 A_d 等多种广义逆的行列式表示。目前正在研究的是, 当 $T \cap N(A) = \{0\}$ 时, 一般约束线性方程组 $Ax=b, x \in T$ 的唯一解的 Cramer 法则和约束矩阵方程 $AXB=D, R(X) \subset T, N(X) \supset S$ 有唯一解的条件, 并给出唯一解的较筒行列式表示。

参考文献

- 1 Robinson S M. Math Mag, 1970, 43, 94~95
- 2 Ben—Isracl A. L A A, 1982, 43, 223~226
- 3 Verghesc G C. L A A, 1982, 48, 315~316
- 4 Werner H J. L M A, 1984, 15, 319~330
- 5 季均. 上海师大学报, 1985, 14(2), 11~23
- 6 Wang Guorong. L A A, 1986, 74, 213~218
- 7 Wang Guorong. L A A, 1989, 116, 27~34
- 8 王国荣, 王峰. 上海师大学报, 1990, 8(4), 353~362
- 9 王国荣. 上海师大学报, 1992, 21(1), 1~7
- 10 Prasad K M, Bapat RB. L A A, 1992, 165, 59~69

(上海师范大学王国荣教授撰)

费马大定理 Fermat's last theorem 法国费马(P. de Fermat)

大约于 1637 年在古希腊丢番图(Diophantus)的书《算术》(拉丁文译本)第 2 卷第 8 题“将一个平方数分为两个平方数之和”的空白处写下的一个命题。用今天的语言叙述, 费马大定理是: 当 $n > 2$ 时, 方程 $(1) x^n + y^n = z^n$ 没有正整数解。费马当时声称, 他已找到一个奇妙的证明。但是, 350 多年过去了, 不仅没有找到费马的所谓“奇妙的证明”, 而且不知有多少优秀数学家试图证明它, 均没有成功。所以, 费马大定理在今天也叫费马最后定理或费马猜想。

关于费马大定理, 从提出到 1847 年大约过了 200 年, 进展非常缓慢。当 $n=3, 4$ 时, 费马本人已给出了证明。100 年后, 欧拉(L. Euler)发现 $n=3$ 时费马的证明不完全, 因而他给出了一个完全的证明。1823 年, 71 岁高龄的勒让德(A. —M. Legendre)又成功地证明了 $n=5$ 的情形。高斯(C. F. Gauss)在给出 $n=3$ 的情形的另一个证明后, 试图证明 $n=7$ 的情形, 但他失败了。为此, 高斯称费马大定理是“人们不能证明, 也不能否定的命题”。1839 年, 拉梅(G. Lamé)证明了 $n=7$ 情形。

第1个对费马大定理作出突破性工作的是德国库默(E. E. Kummer),他在1847年证明了当 n 是正规素数时费马大定理成立。所谓正规素数,是指素数 n 满足: n 不整除分圆域 $Q(\eta)$ 的类数,这里 $\eta = \exp(2\pi i/n)$ 。库默还给出判断 n 是不是正规素数的方法:设 $n > 3$ 是素数,如果 n 不整除前 $\frac{n-3}{2}$ 个贝努里(Bernoulli)数的分子,则 n 是正规素数。通过计算,小于100的奇素数中除37,59,67外都是正规素数。但是直到今天,人们也不知道正规素数是有限的还是无限的。尽管如此,库默由于研究费马大定理而引入的“理想数”的概念,创立了一门崭新的数学分支——理想数论。所以,人们称费马大定理是一只“会下金蛋”的鸡。这或许是研究费马大定理的一个最重要的理论意义。

1908年,德国佛尔夫斯凯尔(Wolfskehl)逝世前,遗言中要求将10万马克巨款作为奖金授于第1个证明费马大定理的人。这个奖的设立,大大推动了对费马大定理的研究。所谓的“证明”纷纷传来,但无一例外均是错误的。

近,现代研究费马大定理,大约可分为3个方面,第1个方面是对一般的 n 来研究,通常找费马大定理不成立的必要条件;第2个方面是研究 $(n, xyz) = 1$ 的情形,称为费马大定理的第一情形;第3个方面是研究 $(n, xyz) > 1$ 的情形,称为费马大定理的第二情形。

对第1个方面,假设方程(1)有正整数解,不妨设 $0 < x < y < z$ 。1966年,裴利沙斯特利(M. Perisastri)证明 $x^2 > z$ 。1988年,毕尔莱克(K. Bialek)证明 $x^2 > 2z + 1$ 。1989年,曹珍富证明对 $2 \leq m \leq n-1$ 均有:

$$x^m > nx^{m-1} + (n-m)x^{m-2} + (n-m)x^{m-3} - \sum_{2 \leq i \leq m} \binom{m}{i} z^{m-i} \quad (-1)^i.$$

例如取 $m = 2$,我们有 $x^2 > nz + n - 3$ 。同时,他还证明了 $x^n > \frac{n + \log 2}{2} \cdot z^{n-1}$ 。以上是关于方程(1)正整数解的估计。关于解的个数方面,英国莫德尔(L. J. Mordell)于1922年提出了一个著名的猜想:在有理数域里,亏格大于或等于2的有理系数二元多项式方程最多只有有限个解。1983年,德国伐尔廷斯(G. Faltings)使用代数几何的深刻工具证明了莫德尔猜想(伐尔廷斯的证明是对于任意数域来证的),从而推出:当 $n \geq 4$ 时,方程(1)如果有 $(x, y) = 1$ 的解,则最多只有有限组。无疑,这又是对费马大定理的重大突破。利用伐尔廷斯的结果,1985年,希斯-布朗(D. R. Heath-Brown)证明了 $\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{r(N)}{N} = 0$,这里 $r(N)$ 表不超过 N 使费马大定理不成立的 n 的个数。这说明,对“几乎所有”的 n 费马大定理皆成立。此外,当 $n < 4 \times 10^8$ 时费马大定理已被证明是成立的。

对第2个方面,即费马大定理的第一情形,早期的结果是热尔曼(S. Germain)与勒让德得到的,他们证明了当 n 是素数并且 $2n + 1, 4n + 1, 8n + 1, 10n + 1, 14n + 1, 16n + 1$ 之一是素数时费马大定理第一情形成立。1894年,文特(Wendt)考虑了由二项式系数 $\binom{k}{1}, \binom{k}{2}, \dots, \binom{k}{k}$ 构成的一个循环行列式:

$$D_k = \begin{vmatrix} \binom{k}{1} & \binom{k}{2} & \dots & \binom{k}{k-1} & \binom{k}{k} \\ \binom{k}{2} & \binom{k}{3} & \dots & \binom{k}{k} & \binom{k}{1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \binom{k}{k} & \binom{k}{1} & \dots & \binom{k}{k-2} & \binom{k}{k-1} \end{vmatrix}$$

证明:设 n 是一个素数使得 $q = 2kn + 1$ 是素数,如果 $q \nmid D_{2k}$ 并且 $n^{2k} \not\equiv 1 \pmod{q}$,则费马大定理第1情形成立。由此结果可以推出热尔曼与勒让德的结果。1935年, E. 莱默(E. Lehmer)证明:设 p 是奇素数,则 $p^{p-2} \cdot (2^{p-1} - 1) / p$ 整除 D_{p-1} 。卡里兹(Carlitz)沿着这个线索于1960年证明:如果 $n = p$ 是奇素数, $p^{p+33} \nmid D_{p-1}$,则费马大定理第1情形成立。另一方面, D. E. 莱默与 E. 莱默推广前人结果,证明:设 n 是素数,如果费马大定理在第1情形时不成立,则对所有素数 $q \leq 43$ 均成立 $(2) q^{n-1} \equiv 1 \pmod{n^2}$ 。利用这个结果

他们证明当 $n \leq 25374887$ 时费马大定理第1情形成立。1985年,爱德曼(L. M. Adleman)与希斯-布朗证明有无穷多个素数 n 使费马大定理第1情形成立,即有:设 $S = \{n: n \text{ 是素数使费马大定理第1情形成立}\}$,则 $\#(n \in S: n \leq x) \gg x^{0.6687}$,符号 $\#(\cdot)$ 表示集合 (\cdot) 的元素个数。这个结果也是多年来人们梦寐以求的。1988年,格莱茵维勒(A. Granville)和蒙娜根(M. B. Monagan)将(2)式中的 q 改进为 $q \leq 89$,并用此结果证明出费马大定理第1情形对 $n \leq 714591416091389$ 成立。1989年,唐耐(J. W. Tanner)与瓦格斯塔夫(S. S. Wagstaff Jr.)证明当 $n < 156442236847241729$ 时第1情形成立。

对于 n 为默森(Mersenne)素数或费马素数的情形,裴利沙斯特利证明费马大定理第1情形成立。1989年,曹珍富证明 n 为 $(q^m - 1)/(q - 1), (q^m + 1)/(q + 1) (2 \oplus m)$ 或 $(q^{2^m} + 1)/2 (q > 2)$ 的素数时,费马大定理第1情形均成立,这里 $q \leq 89$ 是素数。

对于 $n = 2p, p$ 为奇素数,1977年特亚尼安(G. Terjanian)利用丢番图方程中的柯召方法证明费马大定理第1情形成立。利用范迪维尔(H. Vandiver)证明的“若 n 是素数, $n \mid xyz$ 且(1)成立,则 $n^3 \mid xyz^n$ ”的结果,罗特克魏兹(A. Rotkiewicz)、孙琦与曹珍富在1983年前后分别独立地证明 $8p^3 \mid x$ 或 $8p^3 \mid y$ 。1987年,曹珍富证明如果方程 $x^{2p} + y^{2p} = z^2$ 有整数解,这里 $p > 3$ 是素数,则 $4p^3 \mid x$ 或 $4p^3 \mid y$ 。后来,罗特克魏兹与辛赤尔(A. Schinzel)也得到类似的结果。对于方程 $x^{2p} + y^2 = z^{2p}, x^{2p} + y^{2p} = z^p$ 以及 $x^{2p} + y^p = z^{2p}$,曹珍富也证明了一系列定理,这些定理与方程 $x^{2p} + y^{2p} = z^2$ 的结论相似。有趣的是,对方程 $x^{2p} + y^{2p} = z^p$ 的结果,4年后罗特克魏兹才得到。

另一类结果是1953年依恩柯利(K. Inkeri)证明的,即:如果对于素数 n 方程(1)有满足 $0 < x < y < z, n \nmid xyz$ 的整数解,则

$$x > \left(\frac{2n^3 + n}{\log(3n)} \right)^n.$$

对第3个方面,即费马大定理的第二情形,已有的结果非常少。原因是前面处理第一情形的方法均不能用来处理相应的第二情形。1929年,范迪维尔继续库默的工作,一般性的证明了,设 n 是奇素数,如果 $Q(\eta)$ 的类数的第2个因子 h^+ 不被 n 整除,并且所有贝努里数 $B_{2kn} (k = 1, 2, \dots, \frac{n-3}{2})$ 的分子都不被 n^3 整除,则费马大定理成立。但是,因为第2因子 h^+ 的复杂性,试图避开 h^+ 就成为摆在人们面前的课题。为此,范迪维尔证明了一系列结果。1954年, D. H. 莱默、E. 莱默与范迪维尔证明适用于计算的新定理:设 n 是一个非正规素数,令 $a_i (1 \leq a_i \leq \frac{n-3}{2})$ 是下标使 $n \mid B_{2a_i}$ 。如果对所有下标 $a_i, 2^{a_i} \not\equiv 1 \pmod{l}$ 和 $\theta_{a_i} \not\equiv 1 \pmod{l}$,则费马大定理成立,这里 l 是素数, $l = kn + 1 < n^2 - n, \theta_{a_i} = e^{-kd/2} \prod_{1 \leq j \leq n-1} (t^k - 1)^{n-1-2a_i}$, t 是满足 $t^k \equiv 1 \pmod{l}$ 的正整数, $d = \sum_{1 \leq j \leq \frac{n-1}{2}} j^{n-2a_i}$ 。

此外,依恩柯利于1953年证明,如果 n 是奇素数, $0 < x < y < z, n \mid xyz$ 且满足方程(1),则 $x > n^{3n-4}, y > \frac{1}{2} n^{3n-1}$ 。这个结果是可以改进的。

综上所述,费马大定理历史悠久,且在不同时期都有众多数学家参与工作,成为数学界最热门且又是最持久的课题。目前看来,最重要的结果是从80年代初伐尔廷斯开始得到的。

今后,这一课题的热点将是:(1)使用椭圆曲线来研究。1986年,弗雷(G. Frey)把费马大定理与椭圆曲线联系起来,例如他证明了谷山-魏尔(Taniyama-Weil)猜想蕴涵费马大定理。但谷山-魏尔猜想是算术几何(也称丢番图几何)的深刻课题。在1988年初曾盛传日本宫冈利用椭圆曲线证明了费马大定理,但过后不久,伐尔廷斯便发现了宫冈有一处不可弥补的错误。(2)对 abc 一猜想的研究。设 a, b, c 是互素整数满足 $a + b + c = 0$,则对任给 $\epsilon > 0$ 均有 $\max\{|a|, |b|, |c|\} \ll \prod_{p \mid abc} p^{1+\epsilon}$ 。这就是马塞尔(Masser)与奥斯特勒(Oesterle)提出的所谓的 abc 一猜想。显然,如果这个猜想被证明,则费马大定理对充分大的指数成立。1988年,赛尔维曼(J. H. Silverman)证明了,如果 abc 一猜想成

立,则有无限多素数 n 满足 $2^{n-1} \not\equiv 1 \pmod{n^2}$ 。(3)关于(1)的解的估计与相关方程的研究。例如当 x, y, z 中有一个为素数幂时,方程(1)是否有正整数解?对相关的方程如 $x^n + y^n = cz^l$ (n, l 均为素数)等,也有过大量的研究,并且将继续吸引人们的注意。(4)初等方法对第一情形将继续发挥作用,例如已知斐波里数、欧拉数、费波那兹(L. Fibonacci)数都可用来研究第一情形。探讨新的二阶递推序列对第一情形的应用,将是人们进一步研究的题目。(5)人们也将探讨有力的研究第二情形的方法,以及其它的一些情形。在这些热点当中,前两个对费马大定理的彻底解决最富有探索性。我们期待着人类在费马大定理上再创奇迹,早日攻克这一著名难题。

校稿附记:1993年6月23日,英国外尔斯(Andrew Wiles)在剑桥大学牛顿数学研究所作了两个半小时的题为“模形式、椭圆曲线和伽罗华表示”的学术报告,报告中宣布他证明了谷山-魏尔猜想对于半稳定的椭圆曲线成立。由于费雷由费马方程的一组正整数解得到的椭圆曲线(称为费雷曲线)是半稳定的,并且费雷曲线不满足谷山-魏尔猜想,所以费马大定理已作为推论得到证明。

据英国报纸说,外尔斯的这项工作的预印本长达1000多页,目前完全弄懂这项工作的证明细节的数学家不会超过6人。所以,这项工作将需要几个月的时间进行审查。尽管如此,有关专家与权威人士仍大都持肯定态度。笔者认为,不管结果如何,热点(1)~(5)仍将是有益的课题,特别是给出简化的、简洁的或完全新的证明,仍将吸引数学家们的极大兴趣。

参考文献

- 1 Ribenboim P. 13 Lectures on Fermat's Last Theorem. New York: Springer-Verlag, 1980
- 2 Heath-Brown D R. Bull London Math Soc, 1985, 17(1): 15~16
- 3 Adleman L M, Heath-Brown D R. Invent, Math, 1985, 79(2): 409~416
- 4 Frey G. Ann Univ Sarav Ser Math, 1986, 1(1): iv+40pp
- 5 曹珍富. 自然杂志, 1987, 10(5): 393; 1989, 12(9): 718; 1990, 13(5): 314
- 6 Silverman J H. J Number Theory, 1988, 30: 226~237
- 7 Granville A, Monagan M B. Trans Amer Math Soc, 1988, 306(1): 329~359
- 8 Tanner J W, et al. Math Comp, 1989, 53(188): 743~750
- 9 曹珍富. 丢番图方程引论, 哈尔滨, 哈尔滨工业大学出版社, 1989
- 10 Rotkiewicz A. Colloq Math, 1991, 62(1): 15~19

(哈尔滨工业大学曹珍富教授撰)

数学分析

临界点理论 the critical point theory

研究实 Banach 空间(流形) X 上实 Frechet 可微泛函数,即 $I \in C^1(X, R)$ 则 $I'(x) \in X^*$, 而 $I'(x) = 0$ 是指 $(I'(x), y)(x^*, x) = 0, \forall y \in X$. 称 x 为临界点相应的泛函数称为临界值。算子方程 $I'(x) = 0$ 与某个微分方程定解问题(称为所给泛函数的 Euler 方程)相对应。这时泛函数的临界点是定解问题的弱解,弱解的意义由泛函数所在空间和它的拓扑决定。由于它的应用背景广泛,临界点理论一直受到许多学者的注意。

临界点理论渊源于古典变分方法。后者把寻求泛函数极值和极值点化为微分方程定解问题研究。Dirichlet 原理则是最早的例子,它反过来从极小化 Dirichlet 积分出发求解 Laplace 方程。直到 19 世纪末期, Poincare 和 Hilbert 才给出了这个问题的完整叙述和证明。通常把寻求极小值点的方法称之为变分学中的直接方法。它主要是求找泛函数的极小化序列并研究它的收敛性。往往

需要泛函数关于弱拓扑的下半连续性,这是 Tonelli 在 20 年代提出的。沿着这个方向还应提到凸分析的发展,Clarke 和 Ekeland 的对偶(Duality)原理及 Ekeland 的变分原理。

临界点理论的发展可追溯到 20 世纪 30 年代。基于最速下降流(由初值问题 $\frac{d\eta}{dt} = -\frac{I'(\eta)}{\|I'(\eta)\|^2}, \eta(0) = x \in K$ 定义)方法, Ljusternik-Schnirelman 证明,定义在紧流形 X 上光滑实值函数 I 至少有 $Cat(X)$ 个临界点在 X 上,这里 X 的畴数(Category)是指复盖区的,在 X 中可收缩闭子集的最小数目。同一时期, Morse 证明,当泛函数 I 非退化时,它的 Morse 指数为 k 的临界点个数不少于紧流形 X 的 k 阶贝蒂(Betti)数;这里 I 非退化是指在它的任一临界点 \bar{x} 处,它的 Hessian 矩阵 $I''(\bar{x})$ 非奇异,此时 $I''(\bar{x})$ 的最大负子空间维数记为临界点 \bar{x} 的 Morse 指数。他们从不同方面揭示了紧流形上函数的临界点集合与流形自身拓扑性质的关系并成功地应用到闭测地线和极小曲面问题得到多解。

20 世纪 60 年代 Palais-Smale 推广他们的工作到无穷维 Hilbert 和 Banach 空间。他们提出描述泛函数紧性的(C)条件(现在称之为 PS 条件): $\{x_n\} \subset X$, 若 $I(x_n)$ 有界且 $I'(x_n) \rightarrow 0$, 则 $\{x_n\}$ 有收敛序列。并且给出了伪梯度向量场概念:令 $\mathcal{X} = \{x \in X, I'(x) \neq 0\}$. 称 $V: \mathcal{X} \rightarrow X$ 是 I 的伪梯度向量场,如果 $\|V(x)\| \leq 2\|I'(x)\|, \langle V(x), I'(x) \rangle \geq \|I'(x)\|^2$. 当 $I \in C^1(X, R)$, 他们证明此时 V 确实存在。利用它产生泛函数的下降流 $\eta: [0, 1] \times \mathcal{X} \rightarrow X$, 由 $\frac{d\eta}{dt} = -V(\eta), \eta(0, x) = x \in \mathcal{X}$ 定义。于是有

Morse 形变引理 设 $I \in C^1(X, R)$ 满足 PS 条件, $U \subset X$ 是 $K_a = \{x \in X; I(x) = a, I'(x) = 0\}$ 的一个邻域。则存在 $\epsilon > 0$ 使得 $\eta(1, I^{a+\epsilon} \setminus U) \subset I^{a-\epsilon}$. 当 $a \in K, \eta(1, I^{a+\epsilon}) \subset I^{a-\epsilon}$.

极大极小原理 设 $I \in C^1(X, R)$ 满足 PS 条件。设 Γ 是 X 中集合族,关于下降流 η 不变;若集合 $B \in \Gamma$ 则 $\eta(t, B) \in \Gamma, \forall t \in [0, 1]$, 那么只要 $c = \inf_{\Gamma} \sup I(x)$ 有限, C 必是 I 的临界值。

取 Γ 为 X 中单点集,则 $c = \inf_x I(x)$. 特别它包含了 Ljusternik-Schnirelman 的结果;令 $\Gamma_k = \{B \subset X; cat(B, X) \geq k\}$, 则上述方式确定的 C_k 是临界值。

重数定理 如果 $C = C_{k+1} = \dots = C_{k+n}$, 则 I 至少有 n 个临界点在临界水平 C 。

自然它的前提是 X 有非平凡拓扑使 Γ_k 非空。当空间 X 有平凡拓扑,而泛函数在某紧群 G 作用下不变时,可考虑商空间 X/G 上的泛函数,通常商空间有较丰富的拓扑。但若群 G 不是自由作用,商空间将是奇异的,不再是流形,上述途径也行不通。另一方面畴数是个比较难计算的拓扑不变量。为此 Coffman 和 Krasnosel'skii 提出了亏格(genus)概念,给出了 Z_2 群指标。80 年代以后多种指标理论出现,大大扩充了变分理论的应用范围。应该提到的有 Fadell-Husseini-Rabinowity 的上同调指标, Ambrosetti-Rabinowity 的伪指标, Benci 的 S^1 群几何指标。

当空间拓扑平凡,泛函数又无对称性时,直至 80 年代 Ambrosetti-Rabinowity 给出了山路引理才打开了一个新局面。

山路引理(Mountain Pass Lemma) 设 $I \in C^1(X, R)$ 满足 PS 条件,且 ① $I(0) = 0$, ② 存在 $p > 0, a > 0$ 使 $I(x) \geq a$ 当 $\|x\| = p$; ③ 存在 $e \in X, \|e\| > p$ 使 $I(e) < a$, 令 $\Gamma = \{p \in C([0, 1]; X); p(0) = 0, p(1) = e\}$. 则 $c = \inf_{\Gamma} \sup I(x)$ 是临界值。

随后出现 Ni(倪伟明)、Benci-Rabinowity 提出的环绕(linking)概念,给出了泛函数在零点不定时的集合类 Γ . 针对应用,出现了众多的变分原则,它们与硬分析技巧相结合大大地扩充了应用范围。

Morse 理论主要是通过水平集 I^a 和泛函数 I 在集合 $I^{-1}([a, b])$ 中临界点集的构造来描述水平集 I^a 的构造。它的基础是 Morse 引理, Morse 函数(即它的所有临界点非退化)在临界点附

近局部微分同胚于一个标准的非退化的,保持 Morse 指数的二次函数。因而泛函数在这点附近的行为可以用一系列同调群(临界群)来刻画。设 U 是 x_0 的邻域且 x_0 是 I 中 I 的唯一临界点,对应于临界 c 。令 $c_q(x_0, I) = H_q(I^{-1}(c) \cap U, I^{-1}(c) \setminus \{x_0\} \cap U, \mathbb{Q})$, $q=0, 1, \dots$, 其中 \mathbb{Q} 是系数群。称它们为 I 在 x_0 的临界群。 $\text{rank} C_q(x_0, I)$ 称为 I 在 x_0 的 Morse 型数。当 $I \in C^2$, x_0 是 Morse 指数为 j 的非退化临界点,有

$$C_q(x_0, I) = \begin{cases} \mathbb{Q}, & \text{当 } q=j \\ 0, & \text{当 } q \neq j \end{cases}$$

Morse 不等式 设 $I \in C^1(\mathbb{X}, \mathbb{R})$ 满足 PS 条件, 设 $a < b$ 是 I 的正则值, I 在 $I^{-1}[a, b]$ 上至多有有限个临界值 $c_1 < c_2 < \dots < c_m$,

每个临界点的临界群都是有穷秩的。记 $M_q = \sum_{j=1}^m \text{rank } H_q(I^j, I^j, I^j, \mathbb{Q})$, $\beta_q = \text{rank } H_q(I^b, I^a)$ 。则 $M_q - M_{q-1} + \dots + (-1)^q M_0 \geq \beta_q - \beta_{q-1} + \dots + (-1)^q \beta_0$, $q = 0, 1, \dots$, 且 $\sum_{q=0}^{\infty} (-1)^q M_q = \sum_{q=0}^{\infty} (-1)^q \beta_q$ 。

胞腔粘合定理 设 $I \in C^2(\mathbb{X}, \mathbb{R})$ 满足 PS 条件。又设 c 是它的孤立临界值, $K_i = \{y_1, \dots, y_{m_i}\}$ 都是非退化临界点, 则存在 $\varepsilon > 0$, 使 $I^{-1}(c) \cap I^{-1}(c-\varepsilon) \cup h_1(B^{m_1}) \cup \dots \cup h_m(B^{m_m})$ 有相同伦型, 这里 $I^{-1}(c) \cap h_i(B^{m_i}) = I^{-1}(c-\varepsilon) \cap h_i(B^{m_i}) = h_i(\partial B^{m_i})$, m_i 是 y_i 的 Morse 指数, B^{m_i} 是 m_i 维球, $h_i: B^{m_i} \rightarrow E^m \times \{y_i\}$ 是同胚映射, E^m 对应 $I''(x_i)$ 的极大负不变子空间, 而 $x_i = x_{i+} + x_{i-}$, $(x_{i+}, x_{i-}) \in E^+ \times E^-$, $h_i(\theta) = x_i, i=1, \dots, m$ 。

这里要求函数非退化。它不仅在理论上是个限制, 在应用上也是很难先验知道的。70 年代 Gromoll-Meyer 利用伪梯度向量场建立了孤立临界点的 $G-M$ 对(pair)(或称管状领域), 除去了非退化假设。这种思想被 Conley 进一步发展, 建立了孤立临界点的 Morse 指标, 它甚至能处理非变分问题。这里还应提到 Rothe 50 年代的工作。

Morse 理论提供了多临界点存在的信息。在某些情形它比 Ljusternik-Schnirelman 理论给出更好的估计。张恭庆研究二者的关系, 确定由极大极小原理得到的临界点的临界群, 拓补度, 从而给出更精确的估计为判定多解提供更多的信息。这方面工作还可见 Hofer, 刘嘉荃, 田刚, Solimini 等的研究成果。

临界点理论的应用自始至终伴随着它发展, 在研究几何学、物理学中提出的非线性椭圆边值问题, 非线性波动方程周期解, Hamilton 方程组周期轨道等问题上得到许多新的有意义的结果。近年来大量工作关心“失去紧性”问题, 即 PS 条件不是整体满足时, 如何挖掘出问题的紧性。由于 PS 条件破坏的水平集值有着物理学或几何学意义, 相信这也将是近期研究工作的热点。例如几何学中 Yamabe 问题引出的临界指数问题; 这方面工作可见 Schoen, Brezis-Nirenberg, Struwe, Bahri, Coron 和丁伟岳的研究等。由天体力学三体问题等为背景的奇异位势 Hamilton 系统非碰撞轨道的存在性可见 Moser, Ambrosetti, Coti Zelati 等的论著。特别在研究 Hamilton 系统时, Conley-Zehnder, Floer 关于 Arnold 猜测的结果; 用辛几何研究 Weinstein 猜测的工作可见 Viterbo, Hofer, Zehnder 和龙以明等的工作。

参考文献

- 1 Palais R S. Proc Symp Pure Math, AMS Providence, 1970, 15, 185~212
- 2 Rabinowitz P H. Minimax methods in critical point theory with applications to differential equations. CBS, 1986, No. 65
- 3 Nirenberg L. Bull AMS(New Ser), 1981, 4, 267~302
- 4 Kung-ching chang. Infinite dimensional Morse theory and applications. Monterial, Canada, 1985
- 6 Struwe M. Variational Methods, Springer-Verlag, 1990

(浙江大学吴绍平教授撰)

概周期线性系统

linear almost periodic systems 一个

对 $-\infty < t < +\infty$ 定义而且连续的函数 $f(t)$ 为概周期函数, 如果对任意 $\varepsilon > 0$, 存在相应的 $L(\varepsilon) > 0$, 使得在任意长度为 L 的区间中至少可以找到一点 τ , 使

$$\|f(t+\tau) - f(t)\| < \varepsilon \quad (-\infty < t < \infty)$$

τ 称为相对于 ε 的一个概周期。

我们所熟悉的周期函数, 拟周期函数(是指函数 $f(t) = F(\omega_1 t, \omega_2 t, \dots, \omega_m t)$, $F(u_1, \dots, u_m)$ 关于 u_1, \dots, u_m 以 2π 为周期)都是概周期函数的特例。在自然界中严格的周期运动是比较少的, 相对来说, 概周期运动比较常见。另一方面运动现象常常是用微分方程描述的。因此, 概周期微分方程与概周期解的研究在理论与应用上都有重要意义。而概周期线性方程则是概周期方程的基础, 概周期线性方程的深入研究将引导概周期微分方程向纵深发展。

常系数线性系是直接可解的, 因此常系数线性系的解的特征及渐近性质是完全清楚的。19 世纪初, 弗洛特(Floquet)证明连续的周期系数线性系 $x' = A(t)x$ 总可以通过同周期的正则变换 $x = L(t)y$ ($L(t), L^{-1}$ 皆有界)化为常系数线性系 $y' = By$ 。这就是著名的 Floquet 理论。尽管具体寻找这个正则变换是困难的, 但 Floquet 理论在揭示周期线性系的解的结构方面和周期解的扰动理论, 分支理论中都起了关键的作用。

1963 年前苏联阿诺尔德(Arnold, I)在《数学进展》杂志上提出了微分方程理论中有待解决的若干重要问题。其中的一个问题是说 Floquet 理论对拟周期线性系是否成立。也就是说, 拟周期线性系是否可通过同频率的正则变换化为常系数线性系。中国林振声于 1977 年解决了这个问题。他证明当系数满足无理数条件时拟周期线性系总可以通过同频率的正则变换化为常系数线性系。他还证明拟周期线性系总可以通过同频率的正交变换三角化。这两个重要结果是拟周期线性系统的理论基础。

由于二阶周期线性系在应用上有重要价值, 近 20~30 年围绕二阶周期线性系解的渐近性质与特征指数的求法(或近似求法)有大量的研究工作。这些工作散见于各种数学期刊和微分方程的书籍中。至于拟周期线性系与概周期线性系, 由于难度高, 相应的研究成果比较少。截至 70 年代中期, 有关拟周期线性系与概周期线性系的主要成果都收集在芬克(A. M. Fink)的专著《概周期微分方程》与吉泽太郎(T. Yoshizawa)的专著《稳定性理论与周期解、概周期解的存在性》中。

线性微分方程系 $x' = A(t)x$ 与线性算子 $T = A(t) - \frac{d}{dt}$ 有密切关系。 T 是导数有界且连续的函数空间 B_1 到有界连续函数空间 B_0 的线性算子。 T 的谱决定了线性方程 $x' = A(t)x$ 的重要性。因此, T 的谱也称为线性微分方程 $x' = A(t)x$ 的谱。同时不难证明: λ 是 $x' = A(t)x$ 的谱点, 当且仅当 $x' = A(t)x$ 的 λ -平移系 $x' = (A(t) - \lambda I)x$ 不具有指数型二分性(若存在投影方阵 P 及常数 $K \geq 1, \alpha > 0$ 使 $x' = A(t)x$ 的基本解方阵 $X(t)$ 满足 $|X(t)PX^{-1}(s)| \leq K \exp(-\alpha(t-s))$ ($t \geq s$), $|X(t)(I-P)X^{-1}(s)| \leq K \exp(-\alpha(s-t))$ ($t \leq s$), 那么就称 $x' = A(t)x$ 具有指数型二分性)。

容易证明常系数线性系具有点谱。由于周期线性系的 Floquet 理论, 因此周期线性系也具有点谱。因此人们自然提出这样的问题: 拟周期线性系与概周期线性系是否也具有点谱, 1968 年前苏联米里翁什科夫(Millionsikov)给出了概周期线性系具有连续谱的例子, 接着前苏联学者又给出了拟周期线性系具有连续谱的例子。这些结论一度被认为是概周期线性系理论的重要进展。然而到 1988 年, 中国陈晓星指出了这两个结果是错误的。继而, 林振声证明概周期线性系仅有点谱。从而使学术界曾一度混淆的思想得以澄清。林振声的这一结果是对概周期线性系理论的重大贡献。

近来, 关于概周期线性系的另一重要进展是关于概周期线

性系的分解问题。常系数线性系与周期系数线性系若有指数型二分性(且投影不满秩也不为零),则可以分别通过常系数与周期的正则变换分解为两个维数较低的常系数线性系与周期线性系。对概周期线性系是否有类似的结果呢?波默(K. J. palmer)对这个问题给出了否定的答案。他举例说明当概周期线性系具有指数型二分性(且投影 p 不满秩,也不为零)时,该系统未必可通过概周期正则变换分解为两个维数较低的概周期线性系,而只能通过非概周期正则变换进行分解。一个未解决的难题是,尽管变换不一定可取作概周期,但分解后的系统是否仍可保持为概周期。

关于概周期线性非齐次系 $x' = A(t)x + f(t)$ 在临界情形(即 $x' = A(t)x$ 不具有指数型二分性)下概周期解的存在性问题也是近十年来研究的热点之一。关于这个问题的一个经典结果是由法瓦德(Favard)于1933年给出的。他证明了若 $x' = A(t)x$ 的外壳中的每一个系统的有界解 $x(t)$ 都满足 $\inf_{x \in R} |x(t)| > 0$, 那么 $x' = A(t)x + f(t)$ 有有界解就有概周期解。人们试图修改这个结果,希望能将“外壳”这一条件去掉。然而1981年詹生(R. A. Johnson)证明了,若仅有 $x' = A(t)x$ 的每一个非平凡有界解 $x(t)$ 满足 $\inf_{x \in R} |x(t)| > 0$, 即使 $x' = A(t)x + f(t)$ 有有界解也不能保证概周期解的存在性。

近年来虽然出现一些关于概周期非齐次线性系在临界情形下存在概周期解的文章,但都附加了很强的条件。詹生(R. A. Johnson)和塞尔(G. R. Sell)以及其他一些学者研究了二维概周期线性系的分解与极小集等问题,获得了一些较深入的结果。例如,塞尔证明了二维概周期线性系的极小集个数只有1, 2, ∞ 三种可能。中国学者何崇佑,姜东平等研究了概周期线性系与概周期非线性系概周期解的存在性及条件,获得了一系列好的结果。

70年代以来,国外学者引入非自治系的拓扑等价与结构稳定概念。这给概周期线性系的研究注入新的活力。以林振声为首的福州大学微分方程稳定性讨论班获得了概周期线性系的一系列结果。例如,证明了当 $x' = A(t)x$ 具有指数型二分性, $f(t, x)$ 有界且有小的李卜西兹常数时概周期非线性系 $x' = A(t)x + f(t, x)$ 拓扑等价于它的线性部分,且等价函数 $H(t, x)$ 关于 t 也是概周期的。又如,证明了概周期线性 $x' = A(t)x$ 在概周期扰动下结构稳定的充要条件是 $x' = A(t)x$ 具有指数型二分性。我们已知,线性系 $x' = A(t)x$ 具有指数型二分性当且仅当 $x' = A(t)x$ 等价于 $x' = \text{diag}(-1, \dots, -1, 1, \dots, 1)$ 。一个悬而未决的问题是:若 $x' = A(t)x$ 是概周期的,是否能保证等价函数 $H(t, x)$ 关于 t 也是概周期的。

前面提出的一系列未解决的问题可能都是今后一段时间里的研究热点。除此之外,概周期解的扰动问题与分枝问题也可能是今后一段时期里的研究热点。概周期解的扰动与分枝问题都与概周期线性系密切相关。由于概周期线性系的理论相对于周期线性系来说还是很不完备的,因此,概周期解的扰动与分枝问题要比周期解的扰动与分枝问题困难得多。正由于此,这方面的研究工作至今还是很少的。林振声关于概周期系仅有点谱的结论为这一课题提供了有力的工具,但还需要关于概周期线性系的进一步深入研究。

参考文献

- 1 Favard J. Lecous sur les Fonctions presque-periodiques, Gauthiervillars paris, 1933
- 2 Arnola I. Small denominators and problems of stability of motion in classical and celestial mechanics. Uspehi Math, Nauk, 1963, 18(6): 91~192
- 3 Millionsikov. Differential Equations, 1968, 4: 391~396
- 4 Fink A M. Almost periodic differential equations. Springer-Verlag Berlin, 1974
- 5 Palmer K J. Jour Math Anal Appl, 1979, 69, 8~16
- 6 Palmer K J. J Diff Equa, 1980, 36, 374~390
- 7 Johnson R A. Proc Amer Math soci, 1981, 82, 199~205

- 8 Yoshizawa T. 概周期解的存在性, 广西人民出版社, 1985
- 9 Chen Xiaoxing. Annals of differential equations, 1988, 4: 399~404
- 10 Lin Zhensheng. J Appl Math, 1989, 6, 491~506
(福州大学史金麟教授撰)

大系统的稳定性 stability of large scale systems

这种理论是从20世纪60年代开始发展起来的。早在1959年,秦元勳首先提出了稳定性理论中方程组的分解问题。随着科学技术的迅速发展,系统规模的扩大,计算机的广泛应用,控制系统也出现了多层次的复杂化与大型化,促使人们不得不研究大系统理论。

考虑系统

$$\begin{aligned} (\sum_i) \quad \dot{Z}_i &= f_i(Z_i, t) + g_i(Z_1, \dots, Z_l, t) \quad (1) \\ i &= 1, \dots, l. \end{aligned}$$

这里 $Z_i \in R^{n_i}, t \in J = [t_0, +\infty), f_i: R^{n_i} \times J \rightarrow R^{n_i}, g_i: R^{n_1} \times \dots \times R^{n_l} \times J \rightarrow R^{n_i}$. 在下面总假设,对于所有的 $t \in J, f_i(Z_i, t) = 0$ 的充要条件是 $Z_i = 0$, 令 $\sum_{i=1}^l n_i = n, x^T = (Z_1^T, \dots, Z_l^T) \in R^n$.

$$f(x, t)^T = [f_1(Z_1, t)^T, \dots, f_l(Z_l, t)^T]$$

$$g(x, t)^T = [g_1(Z_1, \dots, Z_l, t)^T, \dots, g_l(Z_1, \dots, Z_l, t)^T]$$

及

$$g_i(Z_1, \dots, Z_l, t) \Delta g_i(x, t), i = 1, \dots, l$$

故有

$$g(x, t)^T = [g_1(x, t)^T, \dots, g_l(x, t)^T]$$

我们将系统(1)写成

$$(\psi) \quad \dot{x} = f(x, t) + g(x, t) \Delta h(x, t) \quad (2)$$

显然, $f_i: R^{n_i} \times J \rightarrow R^{n_i}, g_i: R^n \times J \rightarrow R^{n_i}$ 以及 $h_i: R^n \times J \rightarrow R^{n_i}$. 我们总假设,对于所有 $t \in J, h(x, t) = 0$ 的充要条件是 $x = 0$.

由方程(2)所描述的系统可以认为是由下面 l 个系统

$$(\phi_i) \quad \dot{Z}_i = f_i(Z_i, t) \quad (i = 1, \dots, l) \quad (3)$$

的一个非线性和时变的关联。

系统(2)称为复合系统 (ψ) , 或称为关联系统 (ψ) , 或称为具有分解 (\sum_i) (由方程(1)描述)的大系统 (ψ) , 方程(3)被称为第 i 个孤立子系统 (ϕ_i) .

通常处理大系统问题可分为如下3个步骤: ①将大系统 (ψ) (方程(2)), 分解成 l 个孤立子系统 (ϕ_i) (方程(3)), 具有分解 (\sum_i) (方程(1)). ②对于每个孤立子系统 (ϕ_i) 应用 Ляпунов 第二方法(重要的是具体地构造出 Ляпунов 函数). ③整个系统的定性分析, 由子系统及关联结构的定性性质决定。

研究大系统零解的稳定性, 通常采用以下两种方法: ①向量 Ляпунов 函数方法, 以子系统的 Ляпунов 函数 V_i 作为 V 的分量, 用比较原理, 由已知系统(或低阶系统)的稳定性来得出大系统的稳定性. ②标量 Ляпунов 函数方法, 取子系统的 Ляпунов 函数的加权和作为大系统的 Ляпунов 函数, 即取 $V = \sum_{i=1}^l \alpha_i V_i$, 再利用 Ляпунов 定理, 以得出大系统的稳定性。值得注意的是由章毅和张毅所提出的处理大系统稳定性的参数变易法, 近年来已得到广泛的应用。

大型动力系统可视为互相作用分量(子系统)的一个不均匀结构, 分量(子系统)之间的互相作用在强度和形状上悬殊很大。一组子系统能暂时地与其余子系统分离, 导致了大型动力系统结构上的变化, 因此我们需要考虑系统在结构变化(结构扰动)下的稳定性, 即关联稳定性。借助于有向图和互联矩阵等概念, 利用上面所提到的研究大系统的向量 Ляпунов 函数方法与标量 Ляпунов 函数方法, 可以研究大型动力系统的结构稳定性。

为了说明标量 Ляпунов 函数方法的实质, 我们证明下面定理。首先作下面约定, 我们称孤立子系统 (ϕ_i) 具有性质 A, 如果存在一个连续可微函数 $V_i: R^{n_i} \times J \rightarrow R$, 及函数 $\phi_1, \phi_2 \in \mathbb{R}, \phi_3 \in K$

及常数 $\sigma_i \in R$, 使得不等式

$$\psi_1(|Z_i|) \leq V_i(Z_i, t) \leq \psi_2(|Z_i|)$$

及

$$DV_{i(\psi_i)}(Z_i, t) \leq \sigma_i \psi_{i3}(|Z_i|)$$

对于所有的 $Z_i \in R^n$ 及所有 $t \in J$ 成立。

定理, 具有分解 (\sum_i) 的复合系统 (ψ) 的零解是大范围(全局)一致渐近稳定的, 如果下面的条件满足, ①每个孤立了系统 (ψ_i) 具有性质 A; ②给定 V_i 及假设①中的 ψ_i , 存在常数 $a_{ij} \in R$,

使得不等式 $\nabla V_i(Z_i, t)^T g_i(Z_1, \dots, Z_l, t) \leq [\psi_{i3}(|Z_i|)]^{\frac{1}{2}} \sum_{j=1}^l a_{ij} [\psi_{j3}(|Z_j|)]^{\frac{1}{2}}$ 对所有 $Z_i \in R^n (i=1, \dots, l)$ 及 $t \in T$ 成立, ③给定假设①中的 σ_i , 存在一个 l -向量 $a^T = (a_1, \dots, a_l) > 0$, 使得矩阵 $S = (S_{ij})$ 为负定, 其中

$$S_{ij} = \begin{cases} a_i(\sigma_i + a_{ii}) & i=j \\ (a_i a_{ij} + a_j a_{ji})/2 & i \neq j \end{cases}$$

证: 对复合系统 (ψ) , 我们选取如下的 Ляпунов 函数:

$$V(x, t) = \sum_{i=1}^l a_i V_i(Z_i, t) \quad (4)$$

这里函数 $V_i(Z_i, t)$ 由假设①中给出, $a_i > 0 (i=1, \dots, l)$ 是由假设③中给出的常数, 显然 $V(x, t)$ 连续可微, 且对于所有的 $t \in J$, 有 $V(0, t) = 0$ 。由于每个孤立子系统 (ψ_i) 具有性质 A, 得出

$$\sum_{i=1}^l a_i \psi_{i1}(|Z_i|) \leq V(x, t) \leq \sum_{i=1}^l a_i \psi_{i2}(|Z_i|)$$

由假设 $\psi_{i1}, \psi_{i2} \in KR$ 得出, $V(x, t)$ 是正定的, 具有无限小上界, 且有无限大性质, 事实上, 存在 $\psi_1, \psi_2 \in KR$, 使得

$$\psi_1(|x|) \leq V(x, t) \leq \psi_2(|x|)$$

对所有 $x \in R^n$ 及 $t \in J$ 成立, 因

$$DV_{(\psi)}(x, t) = \sum_{i=1}^l \{ (a_i [\partial V_i(Z_i, t) / \partial x] + \nabla V_i(Z_i, t)^T f_i(Z_i, t)) + a_i [\nabla V_i(Z_i, t)^T g_i(Z_1, \dots, Z_l, t)] \} \quad (5)$$

由假设①及②得出

$$DV_{(\psi)}(x, t) \leq \sum_{i=1}^l \{ a_i \sigma_i \psi_{i3}(|Z_i|) + a_i [\psi_{i3}(|Z_i|)]^{\frac{1}{2}} \sum_{j=1}^l a_{ij} [\psi_{j3}(|Z_j|)]^{\frac{1}{2}} \}$$

令 $W^T = [(\psi_{13}(|Z_1|))^{\frac{1}{2}}, \dots, (\psi_{l3}(|Z_l|))^{\frac{1}{2}}]$

$R = (r_{ij})$ 是 $l \times l$ 矩阵, 其中

$$r_{ij} = \begin{cases} a_i(\sigma_i + a_{ii}) & (i=j) \\ a_i a_{ij} & i \neq j \end{cases}$$

已知

$$DV_{(\psi)}(x, t) \leq W^T R W = W^T (\frac{1}{2}(R + R^T)W) = W^T S W$$

这里 $S = [S_{ij}]$ 是假设③中所给出的矩阵, 因为 S 是对称的, 故其所有特征值为实的, 由假设③ S 是负定的, 故其特征值均为负, 所以 $\lambda_M(S) < 0$, 又有

$$DV_{(\psi)}(x, t) \leq \lambda_M(S) W^T W = \lambda_M(S) \sum_{i=1}^l \psi_{i3}(|Z_i|)$$

因此 $DV_{(\psi)}(x, t)$ 是负定的(对所有 $x \in R^n$ 及 $t \in J$) 故对所有 $x \in R^n$ 及 $t \in J$, 有

$$DV_{(\psi)}(x, t) \leq \lambda_M(S) \psi_3(|x|)$$

其中 $\lambda_M(S) < 0$, 因此复合系统 (ψ) 的零解是大范围一致渐近稳定的。

以上处理常微分方程大系统稳定性的方法, 已用于研究离散大系统的稳定性, 离散动力系统结构扰动下的稳定性, Volterra 积分微分方程大系统的稳定性, 具有无穷时滞中立型积分微分方程大系统的指数稳定性等等, 并在控制理论中得到广泛的应用。

参考文献

- 1 王慕秋. 科学记录, 1960, 4(1)
- 2 Michel A N, Miller R K. Qualitative Analysis of Large Scale Dynamical Systems. New York: Academic Press, 1977
- 3 Siljak D D. Large-Scale Dynamical Systems, Stability and structure. Elsevier North-Holland, Inc New York, 1978
- 4 王联, 王慕秋. 非线性常微分方程定性分析, 哈尔滨工业大学出版社, 1987
- 5 章毅, 王慕秋. 科学通报, 1990, 35(2)
- 6 Wang Muqiu, Wang Lian, Du Xuatang. Acta Math Appl, 1992; 8(1)

(中国科学院数学研究所王慕秋研究员撰)

巴拿赫空间结构理论 是泛函分析最重要的组成部分。1932年波兰巴拿赫(S. Banach)的专著《线性运算理论》(Théorie des opérations lineaires)的出现, 标志着对赋范线性空间和巴拿赫空间理论系统研究的开始。在巴拿赫的光辉著作中提出巴拿赫空间理论的许多问题, 它综合代数几何和分析的观点和方法, 在这种框架中, 古典数学的方法统一成近代的方法, 而这种统一的方式是十分和谐和非常有效的。就巴拿赫空间理论而言, 已经派生出许多新分支, 内容十分丰富。巴拿赫空间结构理论是拿赫空间理论中最活跃发展的分支之一。

自从1936年克拉克松(J. A. Clarkson)为了推广拉东-尼科丁(Radon-Nikodym)定理提出一致凸性并研究 $L_p (1 < p < \infty)$ 的一致凸性以来, 开展了对巴拿赫空间范数严格凸(strictly convex)、一致凸(uniformly convex)、局部一致凸(locally uniformly convex)和弱局部一致凸(weakly locally uniformly convex)以及与之相联系的各种光滑性(smoothness)的研究。1958年樊畿(K. Fan)和格利克斯伯格(L. Glicksberg)研究赋范线性空间球面的几何性质。1963年林顿斯塔斯(J. Lindenstrauss)用比绍普-费普斯(Bishop-Phelps)定理建立光滑点(smooth point)和强光滑点(Strongly smooth point)的存在性之间的联系。相继用凸性模和光滑模刻画空间的凸性和光滑性, 研究空间范数的各种可微性, 进而研究巴拿赫空间上的凸函数的可微性。1950年詹姆斯(R. C. James)给出用绍德(Schauder)基刻画空间的自反性(reflexivity)。1957年詹姆斯构造了在理论上非常重要的巴拿赫空间 J 、空间 J 等距同构与它的第2共轭空间 J^{**} 、 J 的典则映射像在 J^{**} 中余维为一, 并且 J 的雷卡平方不同构于 J 的任何子空间。1964年詹姆斯给出了空间非自反的各种条件。1972年给出了空间超自反(super reflexive)的种种条件。相继开展了在不同的条件下空间是自反、超自反和次自反的各种研究。关于绍德(Schauder)基的研究是巴拿赫空间结构的重要问题之一。但是, 很长一段时期因惑着人们的问题是: 常见的可分巴拿赫空间都具有绍德基, 是否每个可分巴拿赫空间都具有绍德基? 因为常见的可分巴拿赫空间都具有绍德基, 这就是著名的巴拿赫空间基的存在性问题。1973年恩夫劳(P. Enflo)的光辉反例给此以否定的回答。他研究了比空间具有绍德基稍弱的性质即空间的逼近性质(approximation property)。他用组合数学方法构造出不具有逼近性质的可分巴拿赫空间。每个巴拿赫空间都具有基序列(basic sequence)。这一事实是由著名的马祖尔(Mazur)引理得出的结论。1955年Mazur提出: 是否每个巴拿赫空间都具有无条件基序列(unconditional basic sequence)? 这就是所谓的“无条件基序列问题”。经过多年的研究, 于1990年高瓦斯(W. T. Gowers)证明这个问题的答案是否定的。关于巴拿赫空间的无穷维子空间问题。主要研究一般巴拿赫空间与经典巴拿赫空间的关系。历来巴拿赫空间结构理论研究的集中点之一是想找出可以等距同构地嵌入到每个无穷维巴拿赫空间的那些“基本”空间。从经典巴拿赫空间理论的观点出发, 人们可以指望在一般巴拿赫空间中能够找到的“基本”空间当然是 c_0 和 $L_p (1 \leq p < \infty)$ 。1930年巴拿赫

就提出是否每个巴拿赫空间必含有一个子空间几乎等距于 c_0 和 L_p (某个 $1 \leq p < \infty$)。几乎一切常见的经典巴拿赫空间都含有 c_0 —副本或者 L_p —副本 ($1 \leq p < \infty$)。

但是这个问题却是肯定的。1974 年崔尔松 (B. S. Tsirelson) 构造出一个不含 c_0 —副本也不含 L_p —副本 ($1 \leq p < \infty$) 的具有无条件基的无穷维自反巴拿赫空间。1976 年费格 (T. Figiel) 和约翰逊 (W. B. Johnson) 给出一个具有这种性质的一致凸巴拿赫空间。那么是否每个巴拿赫空间必含有一个无穷维子空间是自反的, 或者同构于 C_0 或者 L_p ? 这就是所谓的 James 三分法问题。1974 年罗申塔尔 (H. Rosenthal) 的两分法准则把这一问题的解决大大地推进了一步。Rosenthal 证明, 巴拿赫空间的每个有界序列或者含有一个子序列等价于 L_1 的单位向量基或者含有一个弱 Cauchy 子序列。除此之外, 是否巴拿赫空间有一子空间, 它或者同构于一个共轭空间或者同构于 c_0 ? 如果巴拿赫空间不含 L_p —副本, 是否此空间有一子空间具有可分共轭空间? 这些问题有待进一步研究。

关于可余子空间问题, 1960 年培辛斯基 (A. Pełczyński) 给出 C_0 和 L_p ($1 \leq p < \infty$) 的可余子空间的一个完全刻画即空间 c_0 和 L_p ($1 < p \leq \infty$) 的每个无穷维子空间同构于原空间本身。其证明的方法被称为 Pełczyński 分解法。由此开展了对空间的素性 (prime) 和素型性质 (primary) 的研究。如果无穷维巴拿赫空间 X 的每个无穷维可余子空间都同构于 X , 则称 X 是素空间。除了 C_0 和 L_p 是素空间外, 1967 年 J. Lindenstrauss 证明 L_∞ 是素型空间并猜想 Orlicz 序数空间是素空间, 但是至今还没有证明。厄尔斯帕奇 (D. E. Alspach) 于 1977 年研究了序数上的连续函数空间的素型性质。1977 年卡萨扎 (P. G. Casazza) 证明吉姆斯次自反空间是素型空间。1983 年安德 (A. D. Andrew) 证明空间 JT 是素型空间。1983 年布根 (J. Bourgain) 研究了 $H^{(\infty)}$ 的素型性质。1981 年埃德加 (G. A. Edgar) 提出巴拿赫空间的二元序理论在研究原空间共轭空间和其上的伴随算子性质的深层次上比较两个巴拿赫空间, 从而给出了巴拿赫空间的分类新方法。1974 年霍夫曼 (J. Hoffman) 提出了“型” (type) 的概念。1986 年米尔曼 (V. Milman) 和皮席 (G. Pisier) 提出了“弱余型-2” (w -cotype-2) 的概念。用型和余型对巴拿赫空间和巴拿赫空间上的算子的结构进行分类。1989 年 G. Pisier 用弱型-2 和弱余型-2 引进了一类新的巴拿赫空间, 即所谓弱项伯特 (w -Hilbert) 空间。把概率论和逼近论的方法结合起来用于结构理论的研究。

预计在未来的研究中将会集中在以下这些问题上: (1) 有限维子空间与无穷维空间的结构联系, 特别是它们的局部性和渐近性质。(2) 用缺、缺型序列和解析缺等研究巴拿赫空间的各种几性质。(3) 用巴拿赫—马祖尔距离从度量上刻画各种结构性质。(4) 与调和分析方法相结合研究空间结构性质。把研究巴拿赫空间上算子性质与空间的结构性质结构起来, 如用经典函数论研究巴拿赫空间上的算子函数与空间结构性质以及巴拿赫空间上凸函数和各种函数的可微性和非线性几何性质。(5) 开展对次巴拿赫空间结构性质的研究等。

参考文献

- 1 Enflo P. Acta Math, 1973, 130: 309~317
- 2 Lindenstrauss J, et al. Classical Banach spaces I Function spaces. Berlin Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1979, 1~188
- 3 Banach S. Theory of linear operations. Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo, North-Holland Mathematical Library, 1987, 38, 1~162
- 4 Pełczyński A. Some aspects of the present theory of Banach spaces. Amsterdam, New York, Oxford, Tokyo, North-Holland Mathematical Library, 1987, 38: 163~30.
- 5 Johnson W B, et al. Israel J of Math, 198, 64(3): 267~276
- 6 Tomczak-Jaegermann N. Banach-Mazur distances and finite dimensional operator ideals, Pittman, 1988

- 7 Pisier G. The volume of convex bodies and Banach space geometry. Cambridge, Cambridge university press, 1989, 1~250
- 8 Gowers W T. Ph D Thesis Cambridge University, 1990, 8
- 9 Kalton N J, et al. Israel J of Math, 1990, 72(3): 299~312
- 10 赵俊峰. Banach 空间结构理论. 武汉, 武汉大学出版社, 1991, 1~490

(武汉大学赵俊峰教授撰)

Banach 格与正算子 Banach lattices and positive operators

Banach 格理论是泛函分析的重要分支。Riesz 空间 (又名向量格或线性格) 是一代数格, 又是一向量空间, 并且序同代数运算相容。Riesz 空间赋予与序相容的范数使之成为 Banach 空间, 则称之为 Banach 格。Banach 格将代数、拓扑、序 3 种结构溶于一身, Banach 格上正算子是 Banach 格上算子理论的主要研究对象。Banach 格与正算子理论的研究旨在揭示它们 3 种结构间的联系以及在空间、算子结构和性质方面产生的影响。

作为泛函分析的出发点, 并有大量研究和广泛应用的经典函数空间, 都有其自然的序关系存在。1928 年, 黎茨 (f. Riesz) 的一篇题为“线性泛函之分解”的短文预示了 Riesz 空间的开端。约在 1935 年, 由黎茨、弗雷登特 (H. Freudenthal)、凯特诺维奇 (L. V. Kantorovitch) 3 人分别采用不同的方法独立地建立了 Riesz 空间理论。其中以弗雷登特关于 Riesz 空间中的潜定理最为出色, 它把测度论中著名的 Radon-Nikodym 定理和 Hilbert 空间上 Hermitian 算子的谱分解定理作为直接推论, 由此很快吸引了大批数学工作者参与此项理论的研究, 为促进 Riesz 空间理论的发展起了很大的推动作用。

20 世纪 40 年代初期, 日本、美国、前苏联等国都成立了各自相应的研究中心。日本以拉卡罗、阿嘎萨娃和约希塔为首, 前苏联以佩斯克 (A. G. Pinsker)、凯特诺维奇、瓦利克 (B. Z. Vulikh) 等人为首, 他们主要是从事于 Riesz 空间的代数性质和收敛性质等方面的理论研究, 美国则以卡库坦尼 (S. Kakutani)、波宁布莱斯特 (H. F. Bohnenblust) 为代表, 注重具体或抽象的 M -空间与 L -空间结构性的讨论。他们的巨大成就和贡献正是 Banach 格早期理论的重要组成部分。到 40 年代末期现有的研究成果已为 Banach 格理论奠定了坚实的基础。

1950 年, 拉卡罗、凯特诺维奇等人以他们各自的研究成果为基础撰写的专著分别在日本和前苏联的首次出现, 在其国内产生了很大影响。50 年代中期, 在世界各国众多数学家的共同努力下, 使 Riesz 空间和 Banach 格已基本形成一完整的理论体系。并且在此之前很少有人问津的正算子研究也开始出现。从 50 年代末到 60 年代中期, Banach 格与正算子的讨论全面铺开并不断深入, 参与的人数也迅速增多。其中最为出色的当推安多 (T. Ando)、戈弗曼 (C. Goffman)、凯普莱 (S. Kaplan)、扎宁 (A. C. Zaenen)、斯切夫 (H. H. Schaefer) 等人。他们的研究重点主要集中在以下 4 个方面: (1) Banach 格的序连续性、弱紧性、Banach 空间的嵌入等空间性质。(2) 格同态、区间保持等特殊正算子的结构方面。(3) 正算子的分支、不变理想、谱尤其是边缘谱等方面。(4) 算子空间、算子 Banach 格的拓扑、序结构方面。到 60 年代末期已经很好地建立了 Banach 格上正算子的基础理论。

如果说在 50~60 年代, 受高速发展的泛函分析之影响, 使 Banach 格与正算子理论的研究在形式和方法上多少有对称或模仿泛函分析的痕迹的话, 那么在 70 年代, 这项理论的研究则完全摆脱了这一点, 并在内容上逐步显示出固有特色, 以及自己的一套研究方法和技巧。特别是在 1974 年, 斯切夫的专著《Banach 格与正算子》的出现, 对 Banach 格理论向纵深发展起到了划时代的意义, 它标志这项理论已真正成为一独立的分支。多兹 (P. G. Doods) 和弗勒林 (D. H. Fremlin) 在正算子的控制性质与格性质方面的系列工作可谓 70 年代正算子理论研究的一块里程碑。与此同时, 阿布诺蒙维克 (Ju. A. Abramovic)、阿利普林特斯 (C.

D. Aliprantis)、布肯萧(O. Burkinshaw)、卡特外特(D. I. Cartwright)、斯奇普(A. R. Schep)、韦克司迪(A. W. Wickstead)等人也做了大量的工作。他们的研究主要涉及到绝对可和算子、积分算子、核算子、L-弱紧和M-弱紧算子等以及这些算子组成的空间。可以说这10年是正算子理论成熟和丰收的年代。

80年代, Banach格与正算子理论继续稳步向前发展。美国的阿利普林特斯和布肯萧在正算子的各种紧性方面的系列工作和他们1984年出版的专著《正算子理论》以及荷兰扎宁的专著《Riesz空间I》均是其重要标志。从60年代末到80年代, Banach格理论已成功地应用在经济、物理、控制论、随机过程等许多领域。1986年华罗庚关于《大范围经济理论的数学依据》,就是正算子(正矩阵)应用的典型范例。

目前从事于这项理论研究的人数甚多。在前苏联、德国、美国、荷兰等都有研究团体。前苏联主要以函数论为工具,德国与荷兰则注重拓扑和测度论方面的技巧;美国则偏重于经典泛函分析中的方法。但他们都有各自的研究风格。罗马尼亚的尼库勒斯库(C. P. Niculescu)在70~80年代中的杰出贡献,使之成为当今从事正算子理论研究的佼佼者,尤其是他在80年代发表在“算子论杂志”的几篇力作,掀起了正算子研究的一个高潮。如今正算子理论研究的热点主要集中在特殊算子类(如各种弱紧算子类、Dufford-Pettis算子类、A、B-型算子类等等)的拓朴性质、格性质、拓朴结构和格结构等方面。而在Banach格中研究热点一是表现在空间的经典性质(如Radon-Nikodym性质、序连续性、Dieudonne性质、Grothendieck性质等)之刻画及在算子论方面的应用;二是特殊空间(如函数空间、KB-空间等)结构性质的研究。作为Banach格与正算子理论的另一研究热点就是在其他学科中的应用,这也是该项理论有等进一步发展的重要方面。

参考文献

- 1 Grothendieck A. Canad J Math, 1953, 5: 129~173
- 2 Schaefer H H. Banach lattices and positive operators. Springer-Verlag, Berlin and New York, 1974
- 3 Doods P G, Fremlin D H. Israel J Math, 1979, 34: 287~320
- 4 Aliprantis C D, Burkinshaw O. Trans Amer Math Soc, 1982, 274: 227~238
- 5 Zaanen A C. Riesz spaces I, North-Holland publishing company Amsterdam, New York, Oxford, 1983
- 6 Niculescu C P. J Operator Theory, 1985, 13: 49~61

(西南交通大学陈滋利副教授撰)

可分解算子 decomposable operator 巴拿赫空间X上有界线性算子T称为可分解算子,如果对T的谱 $\sigma(T)$ 的任意有限开复盖 $\{G_j\}_{j=1}^n$,存在T的谱极大空间 $\{Y_j\}_{j=1}^n$,使得X有线性分解 $X=Y_1+Y_2+\dots+Y_n$,并且T在谱极大空间 Y_j 上限制 T_{Y_j} 满足包含关系 $\sigma(T_{Y_j})\subseteq G_j, j=1, 2, \dots, n$. 可分解算子的意义在于通过对谱 $\sigma(T)$ 的分割导致空间X按T的谱极大空间的一种线性分解。

有限维线性空间 R^n 上实对称二次型 $\sum_{i,j=1}^n a_{ij}x_i x_j (a_{ij}=a_{ji}, i, j=1, 2, \dots, n)$ 可由正交变换 $U: R^n \rightarrow R^n$ 化成标准型 $\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i^2$,用算子理论语言来说,即是有限维线性空间上自伴算子酉等价于对角算子。有限维线性空间上一般矩阵,由约当(G. Jordan)定理,它相似于一个约当标准型,将有限维线性空间矩阵的约当标准型理论移植到无限维线性空间,是线性算子理论一项中心的课题。这不仅是理论自我完善,更为重要的是它为物理等自然现象提出一个适当算子理论框架。我们一般称之为线性算子谱分解理论。

20世纪初,已建立希尔伯特(D. Hilbert)空间自伴算子谱分

解理论。1954年,丹佛(N. Dunford)等建立巴拿赫(S. Banach)空间谱算子理论,这是第1个系统的非自伴算子谱分解理论。1962年,考洛久拉(I. Corojoara)建立广义谱算子理论,次年,弗雅兹(C. Foias)建立巴拿赫空间上可分解算子理论。这是迄今为止,最广泛而且具有丰富内涵的算子谱分解理论。

60年代初至70年代初,是可分解算子理论初步形成阶段。1963年,弗雅兹提出可分解算子概念,直到1968年,考洛久拉和弗雅兹合著《广义谱算子》专著出现,可分解算子理论初步形成。这一时期,可分解算子理论的研究集中于算子局部谱理论,可分解算子的函数演算等,其中引人注目的研究是可分解算子的继承性问题;设T是巴拿赫空间X上可分解算子, Y是T的谱极大空间,那么限制算子 T_Y 和T在商空间 X/Y 上诱导商算子 T^Y 是否仍是可分解算子。阿波斯托(C. Apostol)详细研究 $\sigma(T_Y), \sigma(T^Y)$ 和 $\sigma(T)$ 之间关系,1968年他证明T是强可分解算子当且仅当 T_Y 是强可分解算子,当且仅当 T^Y 是强可分解算子; T_Y 是可分解算子当且仅当 T^Y 是可分解算子,直到1978年,阿布里奇(E. Albrecht)构造一个精巧的例子说明存在T可分解而 T_Y 不可分解的算子,才否定回答可分解算子的继承性问题,但是,这问题并未彻底解决。

70~80年代前后,是可分解算子理论的蓬勃发展时期,一系列重大而引人注目的研究成果出现。阿波斯托推广谱测度引入谱容度,并与弗雅兹一起,在1968年证明T是可分解算子当且仅当T有谱容度。这一结果表明谱算子和可分解算子的重大差异在于谱测度具有一致有界性条件,而谱容度不具这个一致有界性条件。算子T称为有谱分解性质,简记SDP算子,如果在可分解算子定义中用一般不变子空间代替谱极大空间。SDP算子具有单值扩张性,问题的关键在于证明SDP算子T的谱子空间 $X_T(F)$ 是闭的。这一难点先后被阿布里奇(1979)、拿吉(S. Nagy, 1978)和蓝吉(R. Lange, 1981)解决。他们证明T是可分解算子当且仅当T是SDP算子,这个结果的意义在于指出可分解算子理论是最广泛且有一定内涵的谱分解理论。算子T称为2-可分解算子,如果在可分解算子定义中开复盖的数目仅限于2个 $\{G_1, G_2\}$ 。可分解算子与2-可分解算子的等价性是由拉巴里诺尔(M. Radiabali-pour, 1978)和蓝吉(1981)先后独立证明的。证明的关键在于指出2-可分解算子具有瓦西列斯库(F-H. Vasilesin)引入的几乎局部化谱,这是比可分解性强而比强可分解性弱的一种分解性。可分解算子的等价性描述方面还有一些,并且人们在这方面研究仍在继续,新的等价性条件还在不时出现。

算子的对偶理论是指T与 T^* 的性质及其相互关系的理论,是算子理论的重要研究课题之一。1964年,江泽坚、邹承祖利用弱*拓扑技巧建立谱算子对偶理论。1971年,伏龙扎(st. Franza)证明,若T是可分解算子,则 T^* 亦是可分解算子,同时,进一步指出,对自反巴拿赫空间来说,上述结论的逆也是对的,对非自反巴拿赫空间。蓝吉曾予研究,但证明有误。1982年,王声望、邹承祖和孙善利,对非自反巴拿赫空间证明,若 T^* 是可分解算子,则T亦是可分解算子。毕西谱(E. Bishop)提出算子的性质 γ ,方资求(C. K. Fong)于1988年提出性质 γ^* ,并且研究了 (T, γ) 与 (T^*, γ^*) 的性质及其相互关系。可分解算子的各种性质的对偶理论都有深入研究的必要。

两个交换的可分解算子的和与积是否仍是可分解算子。意斯期迈尔(Jörg Eschmeier)在1985年举出希尔伯特空间上两可交换的可分解算子,但是它们积是不可分解的。由此可知,它们和亦是不可分解的,但是问题并没结束,人们集中于研究在什么条件下,两个交换的可分解算子的和与积仍是可分解算子。

可分解算子与其它算子的关系迄今仍是可分解算子理论研究的热点。这些研究充实了可分解算子理论,1969年,弗雅兹利用皇冠定理证明 C_0 类算子是可分解算子,捷发林(A. A. Jafarian)证明弱压缩算子是可分解算子。1973年,威赫威(B. L. Wadhwa)建立谱算子和可分解算子之间的关系。王声望和刘光

容还引入介入谱算子和可分解算子之间的一类算子,称可单位分解算子,并指出单位分解算子与可分解算子之间关系。

算子理论研究的困难之一,就是算子谱的拓扑结构之复杂性以及当 λ 靠近谱时, $\|R(\lambda, T)\|$ 变化状态的复杂性。拉加巴里谱尔,捷发林以及拉加魏(M. Radjavi)利用于解算子范数增长阶判断各类型算子的可分解性。张莫宙也利用它判断各种广义谱算子。

为将可分解算子理论应用到其它数学分支,或为谱分解理论自身完美,都须将有界可分解算子理论推广到无界情况。这种推广自然期望无界可分解算子应是无界谱算子的推广,孙善利、邹承祖、张莫宙及王声望先后提出闭可分解算子理论,孙善利建立闭可分解算子的对偶理论,并证明一类具有谱奇异的 $L^2(0, 1)$ 中的二阶微分算子 L 不是闭谱算子而是闭可分解算子,研究一些微分算子的可分解性,特别是离散型算子的可分解性仍是十分有意义的问题。

80年代初至今,是可分解算子理论发展的深入时期。这一时期,提出并且解决可分解算子理论一些深入的新课题,主要体现在下述3个方面。首先,阿波斯特在1981年结合布朗(S. Brown)技巧,提出无条件可分解算子,并且建立关于不变子空间存在性定理。后来,1985年拉加巴里谱尔指出无条件可分解算子而是具有丹佛条件(B)的可分解算子。其次,在1984年谱第纳(M. Putinar)利用他所建立的亚正规算子的函数模型,证明亚正规算子是次可分解算子(确切地说是二阶次标算子)。这一结果使得我们可期望用可分解算子理论去研究亚正规算子的不变子空间问题。最后,可分解交换算子组理论方兴未艾。1970年,泰勒(J. L. Taylor)利用Kousz复形及其上同调模建立交换算子组的联合谱概念以及解析函数演算。1974年,阿布里奇和瓦西列斯库提出可分解交换算子组的谱容度概念。随之,伏龙扎在1975年就系统引入研究交换算子组的局部谱理论,并给出具有谱容度交换算子组的基本性质。目前可分解交换组理论,一方面试图将单个可分解算子的一些重要性质推广到交换算子组,一方面探讨可分解交换算子组出现的新的研究课题。由于 C^* 中开、闭集的拓扑结构比 C 中复杂得多,使得可分解交换算子组理论研究起来十分困难,还有许多研究有待深入开展。

参考文献

- 1 Apostol C. Rev. Roum. Math. Pures Appl, 1968, 13: 147~150
- 2 Colojoara I, Foias C. Theory of generalized spectral operators. Gordon & Breach, New York, 1968
- 3 Frunza st J. Functional Analysis, 1925, 19
- 4 Albrecht E. manuscripta Math, 1978, 25: 1~15
- 5 Lange R. Proc Amer Math Soc, 1981, 8: 401~406
- 6 Putinar M. J operator theory, 1984, 12, 385~395
- 7 孙善利. 数学年刊, 1984, A1: 49~54
- 8 Radjabalipoar M. Math Ann, 1985, 272: 567~577
- 9 Wang Shengwang. Math Soc Lecture Note Series, Cambridge, Univ Press, Cambridge-New York
- 10 邹承祖. 线性算子的谱分解理论. 长春, 吉林大学出版社, 1987

(吉林大学邹承祖教授撰)

黎斯算子的分解 the decomposition of Riesz operators

又称黎斯算子的韦斯特(West)分解。这是泛函分析方向算子理论中的一课题。

设 X 是一个复的无限维巴拿赫空间, $B(X)$ 、 $K(X)$ 和 $Q(X)$ 分别表示 X 上线性有界算子全体、紧算子全体和拟幂零算子全体。一个线性有界算子 T 被称为黎斯算子,是指 T 的谱具有和紧算子一样的谱结构,谱 $\sigma(T)$ 是一个至多可数集,唯一可能的聚点是零,非零谱点都是 T 的孤立有限代数重特征值。

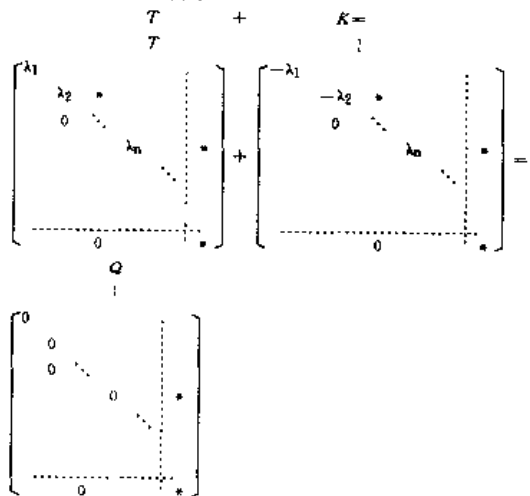
黎斯算子的全体记为 $R(X)$ 。由定义直接得到包含关系, R

$(X) \supseteq K(X)$ 和 $R(X) \supseteq Q(X)$ 。并且,由算子紧扰动理论知识有 $R(X) \supseteq K(X) + Q(X)$ 。1966年,爱尔兰的韦斯特(T. T. West)证明:当 X 是希尔伯特空间 H 时, $R(H) = K(H) + Q(H)$ 。就是说,希尔伯特空间上的每一个黎斯算子 T ,可分解为一个紧算子 K 与一个拟幂零算子 Q 的和: $T = K + Q$ 。从此,对于一般巴拿赫空间 X 上的黎斯算子,是否也都可作这种所谓韦斯特分解的问题,就提了出来,引起算子理论界的兴趣和关注。1984年,《线性与复分析问题集》一书把它列为当代分析方向未解决的课题之一。该课题的研究与巴拿赫空间上算子紧扰动及算子理想等课题的研讨直接或间接地相联系。

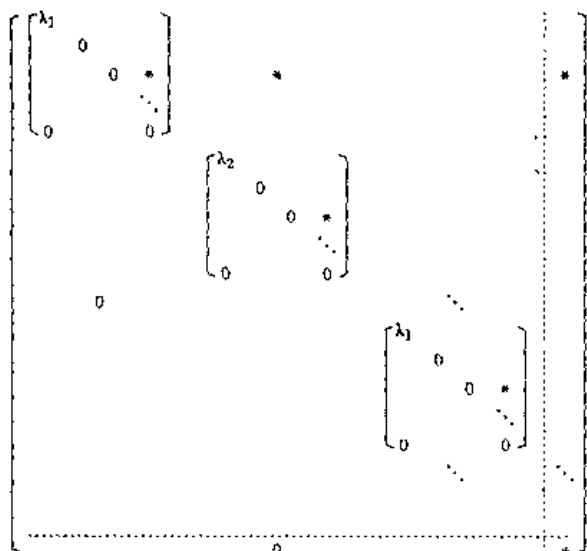
70年代和80年代前期,黎斯算子分解的研究进展甚微。有过一种猜测:在相差一个线性同胚的意义上说,只有希尔伯特空间,其上所有的黎斯算子可韦斯特分解。1980年,劳里(Laurie)和拉德佳维(Radjavi)得到过黎斯算子可West分解的一个充分条件: $\sum n|\lambda_n| < \infty$ (其中 λ_n 是 T 的非零特征值按各自的代数重数重复的一个排列)。后来,这一分解条件被减弱为: $\sum |\lambda_n| < \infty$ 。另外,还讨论过黎斯算子带附加条件的韦斯特分解。例如,当黎斯算子 T 可韦斯特分解 $T = K + Q$,而且 $KQ = QK$ 时,称 T 具有完全的韦斯特分解,当分解式 $T = K + Q$ 满足 $KQ - QK \in Q(X)$ 时,称 T 具有次完全的韦斯特分解,等等。道松(H. R. Dowson)举例说明,即便是希尔伯特空间 H ,也存在黎斯算子 $T \in R(H)$, T 虽可韦斯特分解但不可完全分解。后来,史密斯(Smith)等人又证明:希尔伯特空间 H 上的每一个黎斯算子可有次完全的韦斯特分解。

1986年,加拿大的戴维森(Davidson)与美国的埃雷罗(Herero)合作,取得了课题研究的突破性进展,否定了“只有希尔伯特空间,其上所有的黎斯算子可韦斯特分解”的猜测。他们证明,如果巴拿赫空间 X 具有有限维 P 块分解结构,则 X 上的每个黎斯算子都可韦斯特分解。因而获知一大类非希尔伯特空间,包括经典序列空间 c_0, l_p ($1 \leq p < \infty$)在内,其上的每个黎斯算子都可韦斯特分解。

这一进展是采用构造紧扰动算子 K 的新方法取得的。以往的方法,限于构造主对角线元素依次为 T 的非零特征值的上三角矩阵型式的紧扰动算子 K 。简单地讲, K 的型式为 T 的“原有型式”所限,如图所示:



而戴维森和埃雷罗的方法是:先构造一个 T 的紧扰动算子 K_1 ,使得 $T + K_1$ 有一个无限维零空间 $\text{Ker}(T + K_1)$ 。然后,根据具体需要,让 $\text{Ker}(T + K_1)$ 依次作适当的有限维方块,分别和 $T + K_1$ 的各特征子空间穿插结合成块上三角矩阵型式。如下图所示,“改造”后的 $T + K_1$ 形如:



然后,在 $T+K_1$ 的每一“主对角”块元素的相应位置,构造紧算子 K_2 的“主对角块”,使得相应两“主对角块”之和是零算子。

1988年,钟怀杰改进和推广了上述新方法,证明包括函数空间 $L_p(\mu)$ ($1 < p < \infty$) 在内的更大一类巴拿赫空间上的黎斯算子也都可韦斯特分解。

上述方法的第1个步骤,由于零属于黎斯算子 T 的左本性谱与右本性谱的交集,总可以构造第1个紧算子 K_1 ,使得 $\text{Ker}(T+K_1)$ 是无限维闭子空间,故对一般巴拿赫空间都可行。但第2个步骤,为了要构造第2个紧算子 K_2 ,要先在子空间 $\text{Ker}(T+K_1)$ 中取得一个与 c_0 或 l_p ($1 \leq p < \infty$) 同构且在 X 中可补的无限维闭子空间,就存在作一般性推广的困难,并非每个巴拿赫空间含有与经典序列空间同构的可补子空间。

最近,钟怀杰把巴拿赫空间局部理论研究成果应用到这一课题的研讨中,避免了获取无限维可补子空间的步骤,证明每一 B -凸空间,其上所有的黎斯算子也可韦斯特分解,把研究朝问题肯定回答方面又推进了一步。新结果的意义在于:已知每个巴拿赫空间 X ,都具有介于数1和2之间的某一“型参数” $p(X)$ ($1 \leq p(X) \leq 2$),又知空间 X 具有 B -凸性等价于 X 具有“型参数” $P(X) > 1$ 。那么,新结果使问题归结于在型参数 $P(X) = 1$ 的一类空间中研讨了。

应用和改进已有的各种方法,预期还可在一些子空间结构性质较为清晰的巴拿赫空间,获得进一步肯定结果。近年来,国际上空间理论,尤其是局部理论研究日益深入,构造了一些性质“异常”的巴拿赫空间。这些空间为本课题的深入提供了远远超出经典巴拿赫空间范围的讨论对象。因而不应排除这种猜测:存在一个巴拿赫空间 X ,有黎斯算子 $T \in R(X)$ 不可韦斯特分解。课题的深入,似乎更多地依赖于空间结构理论的进展。

参考文献

- 1 West T T. The decomposition of Riesz operators, Proc London Math Soc, 1966, 16(3): 737~752
- 2 Chui-Smith, Proc Amer Math Soc, 1976, 60
- 3 Dowson H R. London Math Soc monograph, 1978, 12
- 4 Laurie C, et al. Bull London Math Soc 1980, 12, 130~132
- 5 Lecture Notes in Math. Springer Verlag, 1984, 1043
- 6 Davidson K R, et al. Indiana Univ Math J, 1986, 35: 333~343
- 7 钟怀杰. 科学通报, 1988, 7, 614~615
- 8 钟怀杰. 数学年刊, 1990, 11A(6): 699~706

(福建师范大学钟怀杰副教授,林辰申)

Orlicz-Sobolev 空间的逼近理论 approximation theory of Orlicz-Sobolev spaces Sobolev 空间的逼近理论,在

椭圆边值问题和变分不等式的近似解法中有广泛的应用。当偏微分方程的非线性属于多项式型的

$$\sum_{0 \leq |\alpha| \leq n} (-1)^{|\alpha|} D^\alpha a_\alpha(x, f) = f_0(x)$$
 (f 为 $\{D^\beta f\}_{|\beta| \leq n}$ 的函数),可用 Sobolev 空间 $W^{m,p}(\Omega)$ 有效地加以处理。如果非线性不是多项式型的,例如为指数型的

$$-\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \exp \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) + \exp f = f_0,$$

那么利用 Sobolev 空间 $W^{m,p}(\Omega)$ 就难以处理该方程解的存在性和研究它的性质。因此将凸函数 ψ 由更一般的凸函数 $M(t)$ 承担,空间 $L_p(\Omega)$ 代之以更一般的 Orlicz 空间 $L_M(\Omega)$,得到 Orlicz-Sobolev 空间 $W^m L_M(\Omega)$ 。空间 $W^m L_M(\Omega)$ 就有可能能够处理非多项式型的非线性偏微分方程。而空间 $W^m L_M(\Omega)$ 的近似理论将为研究非多项式型的非线性偏微分方程和变分不等式提供有力的工具。

Sobolev 空间的逼近理论主要由 Di. F. Guglielmo 于 1969~1970 间建立起来的,这种理论在椭圆边值问题近似解法中的应用总结在 J. P. Aubin 的专著《Approximation of Elliptic Boundary-Value Problems》中,这种理论在变分不等式近似解法中的应用总结在 U. Mosco 的著作《变分不等式近似解理论》中。

肖应昆于 1981 年将 Sobolev 空间的逼近理论推广到 Orlicz-Sobolev 空间,用离散方法建立了用梯形函数逼近 E_M 空间 ($E_M(\Omega)$ 表示 Ω 上有界且支集在 $\bar{\Omega}$ 的有界函数 u 的空间在 $L_M(\Omega)$ 内的闭包。当且仅当 $(M, \Omega) \Delta$ -正时, $W^m E_M(\Omega)$ 和 $W^m L_M(\Omega)$ 重合,若 $1 < p < \infty$, $M_p(t) = t^p$,则 $W^m L_{M_p}(\Omega) = W^m E_{M_p}(\Omega)$ 的元素,同时建立了用卷积作 E_M 空间元素的逼近,并且建立了 Orlicz-Sobolev 空间 $W^m E_M$ 的分段多项式逼近理论。

1985 年肖应昆引入并证明了 E_M 空间的连续模定理,这对 Orlicz-Sobolev 空间的逼近理论是十分重要的。并用连续模对逼近度进行估计,得到比 1981 年更为深刻的一些结果。

可以预测将 Sobolev 空间的有限元逼近推广到 Orlicz-Sobolev 空间,在某些条件下,Orlicz-Sobolev 空间可建立下述的有限元逼近

设 (i) $\lambda(x) \in L_M(\Omega)$ 具有紧支集且 $\int_{\Omega} \lambda(x) dx = 1$;

(ii) $\mu(x) \in W^m L_M(\Omega)$ 具有紧支集且 $\int_{\Omega} \mu(x) dx = 1$

算子 R_h 和 P_h 定义如下

$$(i) P_h u_h = \sum_{j=0}^{n-1} u_h \mu \left(\frac{x}{h} - j \right)$$

$$(ii) R_h u = (h^{-1} \int_{\Omega} \lambda \left(\frac{x}{h} - j \right) u(x) dx)_{0 \leq j \leq n-1}$$

当 $u \in W^m E_M(\Omega)$, $\lambda(x)$ 和 $\mu(x)$ 满足某些条件,则存在常数 c 使得

$$\| D^k (u - P_h R_h u) \|_M \leq c h^{l-k} \| D^l u \|_M$$

其中 $0 \leq k \leq s \leq m$ 。

Orlicz-Sobolev 空间的逼近理论可望在非多项式型的非线性偏微分方程的近似解法中得到应用。

参考文献

- 1 Di Guglielmo F. Calcolo, 1969, 6, 279~331
- 2 肖应昆. 科学通报, 1981, 3, 189~190
- 3 肖应昆. 计算数学, 1985, 1, 90~96

(江西师范大学肖应昆教授)

自动连续性理论 巴拿赫(Banach)代数领域中近 50 年来最活跃的分支之一。它研究的基本问题是巴拿赫代数 A 与 B 满足什么代数条件时,从 A 到 B 的任一态必然连续。一般地,研究拓扑向量空间 X 与 Y 上附加什么条件时,任一线性算子 $T: X \rightarrow Y$ 都连续。与自动连续性紧密相关的是代数或空间的结构性

质。业已表明,自动连续性的研究使得代数结构与拓扑结构之间的深刻联系得以体现。从而,推动了巴拿赫代数理论的发展。

自动连续性的研究起源于20世纪40年代艾德赫特(M. Eidelhet)关于巴拿赫空间 E 上全体有界线性算子代数 $B(E)$ 上完备范数拓扑唯一性的研究以及盖尔凡德(I. M. Gelfand)与纳依马克(M. A. Naimark)对 B^* -代数表示的探讨与开普兰斯基(I. Kaplansky)关于 $C(X)$ 的著名问题的提出与讨论。50年代的研究基本上围绕开普兰斯基问题开展。最有趣的结果之一是1955年辛格(I. M. Singer)与维尔莫(J. Wermer)的一个定理:交换巴拿赫代数上连续导子(derivation)的值域包含在该代数上的加克堡森(Jacobson)根之中;因而,半单交换巴拿赫代数上没有非零的连续导子。

60~70年代,经过贝德(W. G. Bade)、克特斯(P. C. Curtis)、约汉逊(B. E. Johnson)、辛克莱(A. M. Sinclair)、代勒斯(H. G. Dales)、纳屋森(K. B. Laursen)与艾斯特勒(J. Esterle)等人的深入研究,取得了一系列的丰硕成果。基本的研究方法与众多的研究成果汇集在辛克莱的专著《线性算子的自动连续性》(1976)与代勒斯的综述文章《自动连续性》(1978)之中。该时期建立的基本概念与技巧性工具有:《分离空间》、《连续性理想》、《主有界性定理》、《稳定性引理》与《滑动搬移原理》。最深刻的结果之一是约汉逊于1967年得到的定理:半单巴拿赫代数 A 上具有唯一的完备范数拓扑且从任一巴拿赫代数到 A 上的满同态是自动连续的。

80年代的研究大都是关于代勒斯1978年提出的有关未解决问题的讨论。前期的研究充分体现:自动连续性问题与巴拿赫代数结构性密切相关,此相关性正是自动连续性问题困难之所在。1981年在美国加利福尼亚州立大学举行了关于《根巴拿赫代数与自动连续性》的国际学术会议。会议录(Lecture Notes in Math. 975)收集了有关自动连续性问题的综合报告与研究论文13篇,同时还提出了一系列未解决的问题。

在同态自动连续性方面,值得一提的是1980年艾斯特勒的工作。他证明:从 $c_0(X)$ 到巴拿赫代数上的同态自动连续。这一结果肯定地回答了代勒斯提出的一个公开问题。另一类重要工作是关于约汉逊定理的各种推广。1981年,阿彼特(B. Aupetit)应用次调合函数与谱半径的深刻结果证明:从巴拿赫代数到半单巴拿赫代数上的谱压缩线性算子必然连续。他还证明:从巴拿赫代数到半单巴拿赫代数的有限或可数余维的稠子代数上的任一同态自动连续。同年,吉浦(J. C. Tripp)证明:如果 ϕ 是从巴拿赫代数 A 到 B 的同态且存在 $b \in \phi(A)$ 使 $\bigcap_{n=1}^{\infty} b^n B = \{x \in B \mid bx = 0\} = \{0\}$,则 ϕ 连续。由此得到了几个较为广泛的自动连续性定理。劳艾(R. J. Loy)发现:具有有限余维根的可分巴拿赫代数上具有唯一的完备范数拓扑且仅当根具有有限余维的平方。同时,阿尔贝希特(E. Albecht)与代勒斯通过研究分离空间的幂零性与零化性,证明:从没有非零有限维不可约 $*$ -表示的有单位 C^* -代数到任一巴拿赫代数中的同态自动连续。他们还证明:如果 C^* -代数 A 的任一有限余维的闭双侧理想都有单位元,那么从 A 到巴拿赫代数中的同态必连续。1982年,阿彼特用次调合函数的方法证明:从巴拿赫代数 A 到 B 的任一同态 θ 满足 $r(\theta(a)) \leq r(b + \theta(a))$ ($a \in A, b \in \theta$ 的分离空间, r 表示谱半径)。由此证明约汉逊1967年的相应定理。1984年,代勒斯汇总讨论了从 C^* -代数出发的同态的自动连续性,并指出:《主有界性定理》、《分离空间》与《连续性理想》是处理 C^* -代数中自动连续性问题的基本方法与工具。同年,纳屋森应用《稳定性引理》研究了《分离空间》的稳定性,再次证明艾斯特勒1980年得到的定理。通过研究换位子理想,他还证明:从具有有限余维的换位子理想的可分 C^* -代数到任一交换巴拿赫代数中的同态自动连续。1985年,纳屋森又证明:从 C^* -代数到交换巴拿赫代数上的满同态自动连续。这是该理论中又一重要而深刻的结果。1988年,作者引入并研究了巴拿赫代数 A 上的形式幂级数代数 $A[[X]]$ 与 A 上

的幂级数巴拿赫代数 \mathcal{P}_A ,得到了有关的自动连续性结果。这方面的讨论推广了劳尺(E. R. Lorch)、哥任贝呢(S. Grabiner)与东尔滋(H. J. Schultz)的有关工作。1989年,作者又研究了代勒斯与阿尔贝希特在1981年提出的3个公开问题。引入了巴拿赫代数的正交单位分解性质,得到了有关自动连续性定理。

在线性算子自动连续性方面的研究也取得了较大进展。1980年,诺伊曼(M. Neumann)总结汇集了他与阿尔贝希特关于同态、导子、因果算子、局部算子方面的研究方法,发表了《线性算子的自动连续性》的综述论文。1981年,阿尔贝希特再次应用他们建立的《滑动搬移原理》,讨论了空间 $L^p(\Omega, \mu)$ 上的局部线性算子的自动连续性。同年,维利斯(G. A. Willis)研究了群代数 $L^1(G)$ 上导子的连续性。此年间,代勒斯还研究了巴拿赫 $*$ -代数上正线性泛函的连续性。1986年,哥拉美拉(K. V. Graimella)研究了半素巴拿赫代数上导子的自动连续性问题,证明:素理想皆闭的半素交换巴拿赫代数上的导子必连续。他还发现:有单位的整域巴拿赫代数上的导子都连续等价于有单位的半素交换巴拿赫代数上的导子都连续。1991年,入恩弟(V. Runde)证明:素理想皆闭的交换巴拿赫代数 A 上的导子与满同态均有幂零的分离空间。由此推出了哥拉美拉的结果。1987年,约汉逊引入了广义同态的概念,推广了以前的 ϵ -同态。经过研究分离空间的零化性,证明:(1)从巴拿赫代数到半单巴拿赫代数上的广义同态自动连续。(2)从巴拿赫代数到半单交换巴拿赫代数中的广义同态自动连续。(3) C^* -一代数间的保 $*$ 广义同态自动连续。

回顾自动连续性理论产生与发展的历史,尽管有一系列的深刻结果相继获得,但由于问题的复杂性与一般化,使得该理论考虑的基本问题远未彻底解决。代勒斯在1978年提出的众多问题中,仍有一部分带有根本性的问题尚未得到实质性进展。目前仍然悬而未决的难题有:(1)从巴拿赫代数到半单巴拿赫代数中的稠值域同态连续吗?(2)从巴拿赫代数到半素巴拿赫代数上的满同态连续吗?(3)从那些 C^* -一代数到巴拿赫代数中的同态自动连续?(4)从什么样的巴拿赫代数到任一巴拿赫代数的满同态自动连续?(5)巴拿赫代数的同态都有广义幂零的分离空间吗?(6)从 C^* -代数到巴拿赫代数上的同态连续吗?要解决这些公开难题的关键在于以下几个方面:(1)对巴拿赫代数、半单或半素巴拿赫代数及 C^* -代数结构的深入研究。(2)对代数结构与拓扑结构的协调性探讨。(3)建立更为细致有力的研究方法与工具。(4)对同态、导子等线性映射的结构性研究。

今后的研究热点有:(1)建立更为有效精细的技巧性方法与工具。(2)深入揭示巴拿赫代数中的两种结构的内在联系。(3)刻画同态、导子及某类线性算子的分离空间与连续性理想。(4)探求各难题的约化研究。(5)继续讨论某些问题的特殊情况。(6)自动连续性理论的应用研究。

参考文献

- 1 Sinclair A M. London Math Soc Lecture Note Series, 1976, 21: 1~91
- 2 Dales H G. Bull London Math Soc, 1978; 10: 129~183
- 3 Neumann M. Functional Analysis; Surveys and Recent Results I, North-Holland, 1980, 269~296
- 4 Bade J M, et al. Lecture Notes in Math, 1983, 975
- 5 Dales H G. Functional Analysis; Surveys and Recent Results II, North-Holland, 1984, 197~218
- 6 Laursen K B. Functional Analysis; Surveys and Recent Results III, North-Holland, 1984, 219~232
- 7 Willis G A. J Austral Math Soc (series A), 1986, 40: 299~320
- 8 Laursen K B. J London Math Soc, 1987, 36(2): 165~175
- 9 曹怀信. 陕西师范大学学报, 1988, 16(2): 1~5
- 10 曹怀信. 陕西师范大学学报, 1989, 17(4): 1~4

(陕西师范大学曹怀信副教授撰;路干亭审)

多重傅立叶级数的波赫纳—黎斯平均 Bochner

— Riesz means of multiple Fourier series 多重傅立叶 (Fourier) 级数的一种最自然的线性平均, 是研究多元周期函数的重要工具。这个领域的开创性研究是波赫纳 (S. Bochner) 于 20 世纪 30 年代做出的。40 年代末, 中国程民德对波赫纳—黎斯平均 (Bochner—Riesz means) (以下简称 B—R 平均) 做过系统研究, 对多重三角级数唯一理论做出了重要贡献。50 年代, 程民德和陈永和开创了用 B—R 平均一致逼近函数的研究。这一阶段的研究工作基本上限于高于临界指数的 B—R 平均。50 年代末 60 年代初, 斯坦因 (E. M. Stein) 对于不大于临界指数的 B—R 平均的研究, 做出了有本质性重大意义的贡献。他的工作包括对极大 B—R 算子的估计, 使用了算子解析族内插的深刻工具, 得到一系列关于平均收敛及几乎处处收敛的结果, 从而把这一领域的研究推向新的高度。70 年代以来, 随着近代分析数学的蓬勃发展, 美、欧、前苏联及中国的许多数学家在这一领域做出了重要的工作。这一领域逐渐成为多元傅立叶分析中结果比较丰富的领域。同时, 这一领域也是中国学者较早弥补十年动乱的损失较快进入国际前沿的领域。

80 年代以来, 中国学者对于 B—R 平均的定点收敛性, 全测度集上的收敛性, 各种尺度下的逼近及全测度集上的逼近, 强求和及强逼近等方面作出了全面、系统的研究工作, 取得了丰富的结果。例如在块生成的空间上, 陆善镇 (和 M. H. Taibleson, G. Weiss) 证明了临界指数的 B—R 平均的几乎处处收敛性; 王昆扬首次对临界指数的 B—R 平均在全测度集上的逼近进行了研究。这些在陆善镇、王昆扬合著的《Bochner—Riesz 平均》一书中有较全面的介绍。

程民德在给《Bochner—Riesz 平均》一书所写的序言中, 引述 C. Fefferman 和 E. M. Stein 分别在 1974 年和 1986 年在国际数学家大会上对调和函数研究进展的总结后所写道的“多元调和函数分析仍有许多重要的基本问题有待于进一步深入研究。”多重 B—R 平均, 特别是不大于临界指数的情形, 无论在几乎处处收敛, 强求和, 逼近等各方面, 仍有很多基本问题没有达到完善解决的地步。然而, 这些问题的解决看来是相当困难的, 也许需要引入新思想。

参考文献

- 1 Bochner S. Amer. Math Soc, 1936, 40, 175~207
- 2 Bochner S, Chandrasekaran K. Ann of Math, 1948, 49(4), 966~978
- 3 Cheng M T. Ann of Math, 1950, 2, 403~416
- 4 程民德, 等. 北京大学学报(自然科学), 1956, 4, 411~425
- 5 Stein E M. Acta Math, 1958, 100, 93~147
- 6 Stein E M. Ann of Math, 1961, 73, 87~109
- 7 陆善镇, 等. Bochner—Riesz 平均. 北京: 北京师范大学出版社, 1988. 1~414

(北京师范大学博士生导师王昆扬教授撰)

σ -完备半序线性空间理论 the theory of σ -complete

semi-order linear space 匈牙利黎斯 (F. Riesz) 在波隆那 (Bologna) 国际数学家大会 (1928) 上的讲演, 奠定了半序 (有序、偏序) 线性空间理论的轮廓。原苏联的康托洛维奇 (A. B. Канторович) 及日本的角谷静夫等一大批学者在此领域作出了突出贡献。该理论对各种函数空间的研究更加丰富多采, 在积分论、概率论与方程求解等多方面得到广泛应用。

若对集 E 中的某些元素 x, y, z , 定义了序关系“ \leq ”, 且满足 (1) $x \leq x$; (2) $x \leq y, y \leq z$ 则 $x \leq z$; (3) $x \leq y, y \leq z$, 则 $x \leq z$, 这时称 E 是半序的。若 $x \leq z, y \leq z$, 则称 z 是 x 与 y 的一个上界; 若 x, y 的任何一个上界 w 均有 $x \leq w, y \leq w$, 则称 z 为 x 与 y 的上确界, 记作 $z = x \vee y$ 。下确界可对偶定义。若半序集 E 中每对元素均有上确界与下确界, 则称 E 为一个格。

对数域上的集 E 定义了加法与数乘运算且满足结合, 交换, 分配等 7 条公理, 则称 E 为线性 (向量) 空间。

在实半序线性空间 E 中, 一般要求代数运算与半序满足相容条件, 1. $x \leq y$, 则 $x+z \leq y+z$; 2. $x \geq \theta, \lambda \geq 0$, 则 $\lambda x \geq \theta$ 。

格实线性空间称作黎斯空间 (向量格)。可对其中的元定义正部、负部与模 (绝对值); 对有向列 $\{x_n\}$ 定义 (0)-收敛, 对序列 $\{x_n\}$ 定义 (0 σ)-收敛。

半序线性空间 E 叫做备的, 若其中任何有上界的集合均有上确界; E 叫 σ -备的, 若其中任何可数有上界集合均有上确界; E 叫做弱 σ -备的, 若其中任何有上界的增列有上确界。显然, 备 $\Rightarrow \sigma$ -备 \Rightarrow 弱 σ -备。在 σ -备黎斯空间, 有直和分解定理成立。

半序线性空间 E 叫做阿基米德 (Archimedes) 型的, 若 $x, y \in E$, 对于任意自然数 n , 当 $\theta \leq x \leq n^{-1}y$ 成立时即有 $x = \theta$ 。

弱 σ -备半序线性空间是阿基米德型的。

史树中获得绝对形式的凸集分离定理: 设 E 为线性空间, F 为黎斯空间, C 为 $E \times F$ 中的凸锥; 若集 $\{y | (\theta, y) \in C\}$ 有下界且存在 $\hat{y} \in F$ 使集 $\{x \in E | (x, \hat{y}) \in C\}$ 是 E 中的吸收集, 则存在线性映射 $\Lambda: E \rightarrow F$ 使 $\Lambda x + y \geq \theta, \forall (x, y) \in C$ 。其后, 王苏生又讨论了相对形式的极值问题。史、王的结果均系著名的库恩—塔克 (Kuhn—Tucker) 定理的推广。

近 10 年来, 讨论与 σ -备性黎斯空间有关的文章大约有 20 篇左右, 其中多篇研究扩张问题, 提出了最大拓扑扩张、最大 σ -扩张与戴德金 (Dedekind) 扩张等概念; 另有多篇考察 σ -戴德金备的黎斯空间的一些问题, 例如 1989 年诺瓦克 (M. Nowak) 给出了模的概念, 并讨论所谓奥尔里奇 (Orlicz) 格, 1990 年沃克 (W. Wnuk) 研究了某些局部实黎斯空间的最大黎斯子空间, 1984 年卢森堡 (W. A. J. Luxemburg) 用新方法证明了阿梅米亚 (Amemiya) 的表现定理; 每一个黎斯空间同构于实的次直积。

1991 年顾心力等研究了映豪斯道夫 (Hausdorff) 拓扑线性空间到 σ -备黎斯空间算子的变分问题, 分别讨论了绝对形式与相对形式的变分不等式以及极大极小问题。

在弱 σ -备半序线性空间的算子方程求解, 近年来有一系列工作。1956 年, 关肇直在实希尔伯特 (Hilbert) 空间, 对连续正定有界对称线性算子的映象, 利用最速下降法, 获得零点定理; 1984 年, 张上泰在弱 σ -备半序线性空间推广了关肇直的结果并获得另一对不动点定理; 其后, 顾心力、刘清荣、戴士元等又相继推广了张上泰的结果。1992 年, 顾心力创造非对称迭代, 证明了多个二元算子方程的求解定理, 例如其中之一是: 设 E 为弱 σ -备半序线性空间或具有正规锥的实巴拿赫 (Banach) 空间, $\{u_0, v_0\} \subset E, A: [u_0, v_0] \times [u_0, v_0] \rightarrow E$ 关于 M 拟对称压缩, 关于 $a = N - a, b = 1 - a$ 混合单调且满足 $\theta \leq A(u_0 - v_0), A(v_0, u_0) \leq (1 - a)(v_0 - u_0), a \in (0, 2^{-1}), -\infty < N < M < 1 - a$, 则方程 $A(u, u) = \theta$ 有唯一解 $\bar{u} \in [u_0, v_0]$ 。

1991 年, 顾心力等获得和算子的 E 压缩映象与非扩张映象定理: 设 E 为弱 σ -备半序线性空间, $[y_0, z^0] \subset E, c \in E, h, g: [y_0, z^0] \rightarrow E$ 满足 $[gy_0 + hx_0 + c, gz_0 + hy_0 + c] \subseteq (\supseteq) [y_0, z^0], \theta \leq (x - y)gx - gy(\supseteq) \leq a(x - y), \theta \leq (x - y)hy - hx(\supseteq) \leq b(x - y), ([y, z] \subseteq [y_0, z^0], 0 \leq a, b, a + b < 1)$ (对非扩张要求 $0 < a, b, a + b > 1$), 则方程 $gx + hx + c = x$ 在 $[y_0, z^0]$ 有唯一解。

1977 年, 波特 (A. J. B. Potter) 引入并讨论 α 凹与 $-a$ 凸算子, 接着, 万伟勋、秦成林、郭大钧分别在半序 Banach 空间研究了这两类算子的不动点。1988 年, 顾心力在弱 σ -备半序线性空间分别获得这两类算子的和与积的不动点。1992 年, 顾又将此结果推广到二元算子: 设 P 是弱 σ -备半序线性空间 E 上的正锥, $P \neq \Phi, 0 < a < 1, A: P \times P \rightarrow P$ 是 α 凹凸混合单调算子, 则存在唯一的 $x^* \in P$ 使得 $A(x^*, x^*) = x^*$ 。

在半序线性空间求解算子方程, 近年来有一系列开创性工作 (例如孙经先等), 但还有大量问题有待进一步研究。另外, 对映拓扑空间到半序空间的变分不等式理论也有许多工作可作。

参考文献

- 1 Potter A J B. Quart. J Math, Oxford, 1977, 29(2): 93~99
- 2 张上泰. 数学学报, 1984, 27(2): 256~263
- 3 史树中. 数学年刊, 1985, 6A(4): 431~438
- 4 Luxemburg W A J. Algebra and order (Luming-Marseille, 1984), Belin, 1986, 223~229
- 5 Nowak M. Comment Math Univ Carolin, 1989, 30(2): 261~279
- 6 孙经先. 数学学报, 1989, 32: 457~463
- 7 Yan Xin-li, et al. Appl Math Mech, 1991, 12(9): 863~870
- 8 颜心力. 应用数学, 1991, 4: 107~114
- 9 Yan Xin-li. Math Japonica, 1992, 37(3): 519~527

(西安建筑科技大学颜心力教授撰)

Bers 空间中之逼近 approximations in Bers spaces

设 D 是扩充复平面 C 上其边界 ∂D 至少含 2 个点的单连通区域, 从而 D 共形等价于单位圆盘 $\Delta = \{z \in C, |z| < 1\}$. 不妨令 ψ 是就范于 $\psi(\xi_0) = 0, \psi'(\xi_0) > 0$ 的 D 到 Δ 上的共形映射, 而 ψ^{-1} 为其逆映射, 此处 $\xi_0 \in D$ 是固定一点, 置 $\lambda_D(\xi) = |\psi'(\xi)|$ 为 D 上的 Poincaré 度量. 若用 $A(1)$ 表示 D 上的解析函数之全体, 那么对于 $p \in (0, \infty)$ 我们可用 Poincaré 度量定义 D 上的 Bers 空间 $A_q^p(D)$, 它是由满足 $\|f\|_{p,q,D} = \int_D |f(x+iy)|^p \lambda_D^{-q}(x+iy) dx dy < \infty$ 的函数 $f \in A(D)$ 组成的完备的线性空间. $A_q^p(D), q \in [2, \infty)$ 首先是由 L. Bers 在 1965 年引入并开始研究的, 它是著名的 Hardy 空间 $H^1(\Delta)$ 的推广. 后来, 数学家把 $A_q^p(D), q \in [2, \infty)$ 推广到更一般的情形亦即 $A_q^p(D), p \in (0, \infty), q \in (0, \infty)$ 于是也就统称为 Bers 空间. Bers 中的逼近论主要是指: Bers 空间中多项式类的完备性; Bers 空间中的多项式之最佳逼近问题; Bers 空间中的有理函数之逼近各分支在实际中, 如在物理学的电场理论中, 都有重要的意义. 以下主要从 3 个方面来综述.

(1) Bers 空间中多项式类的完备性. 设 $I_p = \sup\{q, \int_D \lambda_D^{-q}(x+iy) dx dy = \infty\}$ 及 $I(D) = \{q, \int_D \lambda_D^{-q}(x+iy) dx dy < \infty\}$. 不难知道 $I_p \in [1, 2]$ 而 $I(1) = (1, \infty)$ 及 $I(2) = [2, \infty)$. 这 2 个量是 J. Burbea 于 1977 年引进的. 它在多项式类于 Bers 空间中之完备性研究中起着很重要的作用. 1934 年, A. И. Маркушевич 与 O. J. Farrell 独立地证明, 若 D 是 Caratheodory 区域, 则多项式类在 $A_q^p(D), p \in (0, \infty)$ 中是完备的. 接着, 在 1966 年和 1969 年 L. Bers 和 M. J. Knopp 分别将他们的结果推广到 D 为 Jordan 区域时的 $A_q^p(D), q \in [2, \infty)$ 上去了. 又若对区域 D 的条件加强, 即当 D 是 Смирнов 区域时, T. A. Metzger 与 M. Sheingorn 在 1973 年证实了多项式类在 $A_q^p(D), q \in (1, \infty)$ 中是完备的. 其实, M. Sheingorn 对一类特殊的 Jordan 区域——早被 J. Earle 与 A. Marden 定义, 证明了上述事实. 如 ∂D 是可求长的 Jordan 曲线, 那么 T. A. Metzger 就 $q \in (\frac{2}{3}, \infty)$ 和 $q \in (1, \infty)$ 分别于 1973 年和 1974 年证明了多项式类在 $A_q^p(D)$ 中完备. 进而, 如 $(\psi^{-1})'(\Delta)$ 是 C 上可以忽略一个正对数容量集, 那么就 $q \in I(D)$ 多项式类还在 $A_q^p(D)$ 中完备. 从上面的若干结论看出, 一旦限制区域 D 的条件愈多且要使多项式类在 $A_q^p(D)$ 中完备, 那么对 q 的限制也就愈少. 于是, 自然会问: 是否可以同时减弱 D 及 q 的条件使多项式类仍在 $A_q^p(D)$ 中甚至在 $A_q^p(D)$ 中完备呢? J. Burbea 做了这方面的尝试. 他在 1977 年获得如下结果: 当 D 是 Jordan 区域且 $I_{TP} = 1$ 时, 那么多项式类在 $A_q^p(D)$ 中完备, 其中 $p \in (0, \infty)$ 且 $q \in I(D)$. 同年, 他对 D 是 Caratheodory 区域得到相同的结果. 后来 J. Burbea 在 J. Brennan 的提携下于 1978 年考虑了 D

为非 Caratheodory 区域时多项式类在 $A_q^p(D)$ 中之完备性, 得到类似的结论.

(2) Bers 空间中多项式之最佳逼近. 换句话说, 多项式类在 $A_q^p(D)$ 中的逼近阶估计及其逆定理之问题. 为此, 对 $f \in A_q^p(\Delta)$ 及 $\delta > 0$ 先令 $\omega(\delta, f) = \sup\{\|f(e^{i\theta+h}) - f\|_{(p,q,\Delta)}, |h| \leq \delta\}$, $\omega(\delta, f) = \sup\{\|f(*+h) - f\|_{(p,q,\Delta)}, |h| \leq \delta\}$ 并规定 $f|_{\partial\Delta} = 0$. 其次, 若用 Π_n 表示所有次数不超过 n 的代数多项式 Q_n 组成的集合, 则置 $\rho^{(n)}(f) = \inf\{\|f - Q_n\|_{(p,q,\Delta)}, Q_n \in \Pi_n\}$. 从 1984 年到 1989 年, 沈燮昌, 邢富冲及苏兆龙研究了 $A_q^p(\Delta), p \in (0, \infty), q \in (1, \infty)$ 中的多项式类之最佳逼近问题, 他们 3 人获得: $\rho^{(n)}(f) \leq C_p \omega(\frac{1}{n}, f)$, 进一步, 若 $f^{(m)} \in A_q^p(\Delta)$ 则 $\rho^{(n)}(f) \leq C_p \omega(\frac{1}{n}, f^{(m)})/n^m$. 这儿, $C_p > 0$ 是一仅依赖于 p 的常数, 又当 p

$\in [1, \infty)$ 时, 有 $\omega(\frac{1}{n}, f^{(m)}) \leq C \int_0^{\frac{1}{n}} [\omega(t, f^{(m)})] dt, C > 0$ 为一常数. 同时, 他们又给出上述结论的逆命题. 此外, 1987 年, 沈燮昌, 邢富冲与张有光获得了 $A_q^p(\Delta), p \in (0, 1), q \in (1, \infty)$ 中的 Hardy-Littlewood 型不等式并用于逼近. 就一般区域 D , 钟乐凡用 Faber 变换于 1988 年证明了: 若 ∂D 是光滑曲线且其切线与正实轴的夹角满足 $Lip_\alpha, \alpha \in (0, 1)$ 条件, 那么, 就 $f \in A_q^p(\Delta), q \in (1, \infty)$ 有 $\inf\{\|f - Q_n\|_{(p,q,\Delta)}, Q_n \in \Pi_n\} = O(\delta^\alpha)$ 当且仅当 $\omega(\delta, f \circ \psi^{-1}) = O(\delta^\alpha)$. 次年, 钟乐凡利用邢富冲和苏兆龙之定理又给出了当 D 是含原点的 Lipschitz 区域时 Π_n 在 $A_q^p(D), p \in (1, \infty), q \in (1, \infty)$ 中的逼近阶.

(3) Bers 空间中的有理函数之逼近, 这类问题通常比前两类难得处理. 首先, L. Bers 在 1965 年证明如下事实: 若 $\Lambda \subset \partial D$ 且 $\bar{\Lambda}$ 是 Ample 的, 则对任意的 $f \in A_q^p(D)$ 都存在极点只在 Λ 上的有理函数 R_n 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \|f - R_n\|_{(1,q,D)} = 0$. 特别考虑形如 S_n

$(\xi) = \sum_{k=0}^n 1/(\xi - \xi_k), \{\xi_k\} \subset \partial D$ 的有理函数在 $A_q^p(D)$ 中的逼近问题是很有意思的, 因为 $1/(\xi - \xi_k)$ 可以看成点 ξ_k 处有单位电子引起的复电场. 1973 年, C. K. Chui 证明了: 若 D 是 Jordan 区域且 ∂D 可求长, 则 $f \in A_q^p(D), q \in (2, \infty)$ 可被形如 $S_n(\xi)$ 的有理函数逼近, 即 $\lim_{n \rightarrow \infty} \|f - S_n\|_{(1,q,D)} = 0$. 1972 年, D. J. Newman 指出 $q \in (2, \infty)$ 是必不可少的, 他还指出: 当 $q \in (1, 2]$ 时, $f = 0 \in A_q^p(\Delta)$, 在 $A_q^p(\Delta)$ 中不可能被形如 S_n 的函数逼近. 一般地, C. K. Chui 与沈燮昌合作, 在 $q \in (2, \infty)$ 下, 对 ∂D 加上一此光滑条件, $\partial D \in C^{2+\epsilon}, \epsilon > 0$, 获得了 S_n 在 $A_q^p(D)$ 中的逼近速度, 亦即 $E_{n,q}(S) = \sup\{\inf\{\|f - S_n\|_{(1,q,D)}, S_n = 0(1/n^{\alpha-2})\}$ 或 $O(1/n^{\alpha+2})$, 此处 $S_n = \{f \in A_q^p(D), \|f\|_{(1,q,D)} \leq 1, \omega(\delta, f) = \sup\{\int_{\Delta} |\phi^{-1}(w+h) - \phi^{-1}(w)| \cdot |(\phi^{-1})'(w)|^q (1-|w|^2)^{q-2} dudv = O(\delta^\alpha), \alpha \in (0, 1], w = u+iv\}$. 更深入一步, 他俩还得到 f 具有高阶导数时的逼近阶的精确估计. 再者, 对于给定极点在外部的有理函数在 Bers 空间中的逼近问题, 1987 年, 先由沈燮昌同吴志坚合作获得: 设 $a_j \in \partial\Delta$ 且 s_j 为 a_j 在 $(a_n)/f$ 中出现的次数, 若 $|\arg(a^j - e^{i\theta})| \geq \frac{\pi}{2} + \epsilon, \epsilon > 0, \beta \in R^1$, 则

对 $f \in A_q^p(\Delta), p \in (1, \infty), q \in (1, \infty)$ 存在 $R_n(\xi) = \sum_{j=1}^n a_j^{(n)}(1/1 - \bar{a}_j)^{s_j-1}$ 使得 $\lim_{n \rightarrow \infty} \|f - R_n\|_{(p,q,\Delta)} = 0$ 当且仅当 $\sum_{j=1}^n (1 - |a_j|)^{s_j-1} = \infty$ 进而, 若不假设 $\{a_j\}$ 位于上述角形区域, 则为了实现上述逼近, 就只须将 $\sum_{j=1}^n (1 - |a_j|)^{s_j-1} = \infty$ 改成 $\sum_{j=1}^n (1 - |a_j|)^{s_j} = \infty$ 即可. 到了 1988 年, C. K. Chui 和沈燮昌把沈-吴之结果推广到 Δ 上的比 Bers 空间更为广泛的空间 $A^p(\phi, \Delta), p \in (1, \infty)$ 上去了. 最

后,肖杰于1990年研究了再生核型有理函数序列在 $A^p(\psi)$, $p \in [1, \infty)$ 上去了。最后,肖杰于1990年研究了再生核型的有理函数序列在 $A^p(\varphi)$, $p \in [1, \infty)$ 中的逼近,而相应于 $A^q(\Delta)$, $p \in (1, \infty)$, $q \in (1, \infty)$ 中的结果分别由 S. Axler, D. H. Luecking 和 R. Rochberg 等人在1980~1986年之间获得。沈燮昌和肖杰又把肖杰的结果推广到一般的 Bers 空间 $A^p(D)$, $p \in (1, \infty)$, 中去了。

以上是自20世纪60年代以来关于 Bers 空间中各类逼近问题的一个基本又是主要的概述。研究这些问题的数学家主要是采用实分析、复分析、调和分析、泛函分析、函数构造逼近及数值计算方法进行讨论的。其实,在这一领域还存在大量的问题值得研讨。(1)对于不同特征的区域,究竟赋予什么度量性的充要条件才能使多项式类在 $A^p(D)$ 中完备? 这个问题的解决是否会与区域的某种“容量”有关。(2)就多项式的最佳逼近论中,考虑 $f \in A^p(\Delta)$ 具有高阶导数情形以及当 $p \in (0, \infty)$, $q \in (0, 1)$ 时一般 Bers 空间 $A^p(D)$ 中多项式最佳逼近。此外能否将已知结果中的区域之边界条件进一步减弱也是值得考虑的问题。(3)在一般区域 D 上或 D 上或 ∂D 上找插值基点以及由其产生的插值多项式,如 Lagrange, Hermite, 等插值多项式使得它们在 $A^p(D)$ 中进行逼近,并求出逼近阶。(4)讨论极点区域 D 的边界 ∂D 上的一个子集 Λ 的有理函数在 $A^p(D)$ 中的完备性是重要的。另外,研究再生核型的有理函数类(极点在 D 的外部)在 $A^p(D)$ 中的完备性也是极为有意义的,因为它与现代的调和分析和插值论紧密联系在一起。(5)试把前述的一切概念,思想与方法,理论,结果与问题全部移植到多连通区域上的 Bers 空间中去并找到它们在其它学科中的应用是非常有意义并富有创造性的工作,但这不是一件容易的事。

参考文献

- 1 Маркушевич А И. Теория аналитических функций гитТЛ москва-ленинград, 1950
- 2 Bers L. J Analysis Math, 1965, 14, 1~4
- 3 Bers L. Amer, J Math, 1965, 87, 196~214
- 4 Bers L. Acta Math, 1966, 116, 113~134
- 5 Chui C K. Proc AmerMath Soc, 1973, 40(2), 438~442
- 6 Burbea J. J London Math Soc, 1977, 15(2), 255~261
- 7 Burbea J. Ark Math, 1978, 16, 229~234
- 8 沈燮昌. 复变函数逼近论. 北京: 科学出版社, 1992
- 9 肖杰. 北京大学理学博士学位论文, 1992
- 10 钟乐凡. 数学年刊, 1992. 13A(4), 465~472

(北京大学 沈燮昌 教授、肖杰博士撰)

弱化的 Hilbert 第 16 问题 weakened Hilbert's 16th problem

Hilbert 第 16 问题的研究, 仍然是当今非线性微分方程研究领域最基本和最富挑战性问题之一。1990年5月22日, 美国 S. Smale 在美国 Los Alamos 国家实验室召开的“非线性研究 10 年”国际会议上, 作了标题为“动力系统回顾: 尚待解决的大问题”的邀请报告, 提出了十大问题, 其中的第 7 问题就是 Hilbert 第 16 问题。他说这个问题是 Hilbert 提出的 23 个问题中“最难捉摸的一个”。鉴于一般的 Hilbert 第 16 问题的困难性, 1977 年前苏联 Arnold 提出了以下弱化的 Hilbert 第 16 问题: “设 H 为变元 (x, y) 的 n 次多项式, p 为 m 次多项式, 问函数

$$I(h) = \iint_{H \leq h} p(x, y) dx dy$$

可能有多少个实零点?”

函数 $I(h)$ 的实零点个数与 Hilbert 第 16 问题有什么关系呢? 实际上这个问题涉及具有多项式 Hamilton 量的 Hamilton 系统的非保守扰动。根据 20 世纪 30 年代前苏联 Pontryagin 和 50 年代中国张芷芬等人的工作, 对于 Hamilton 扰动系统

$$\dot{x} = H_x(x, y) + \epsilon P(x, y, \epsilon),$$

$$\dot{y} = -H_y(x, y) + \epsilon Q(x, y, \epsilon),$$

倘若当 h 改变时, 水平集 $H(x, y) = h$ 是未扰动系统的某个闭轨族 $\delta(h)$, 那么, 考虑产生函数

$$I(h) = \int_{\delta(h)} P dy - Q dx = \iint_{H \leq h} (P_x + Q_y) dx dy,$$

当 $I(h) \neq 0$ 时, 由 $I(h)$ 的零点个数及其性质可以判定扰动系统可能产生的极限环个数。因此, 弱化 Hilbert 第 16 问题实际上是问: 对于给定的平面 $n-1$ 次 Hamilton 系统(其首次积分为 n 次多项式), 在 $m+1$ 次多项式非保守扰动下, 扰动系统可能产生多少个极限环? 如果水平集 $H(x, y) = h$ 对应于若干族分离的闭轨道, 弱化的 Hilbert 第 16 问题也涉及极限环的相对位置问题。由于多项式 Hamilton 扰动系统是一类特殊的多项式系统, 因此 Arnold 问题是“弱化的”Hilbert 第 16 问题。

注意到积分 $I(h)$ 实际上是 Abel 积分, 因此, 前苏联 Petrov 等人将上述问题改述为: 设

$$\omega = A(x, y) dx + B(x, y) dy$$

是微分 1-形式, $A(x, y), B(x, y)$ 与 $H(x, y)$ 是多项式, 问 Abel 积分

$$I_\omega(h) = \int \omega$$

有多少个实零点? 其中积分沿 $H(x, y) = h$ 的闭轨族进行。

$I_\omega(h)$ 的零点个数是否有限? 1984 年, 前苏联 Khovansky 与 Varchenko 已解决这个有限性问题。后者的文章证明, 对任何自然数 n 存在自然数 $C(n)$, 使得若 A, B, H 的次数不大于 n , 则 $I_\omega(h)$ 的零点个数不多于 $C(n)$ 。前者的文章证明了更为一般的性质。

为研究 $I_\omega(h)$ 的零点, 人们引入了以下的空间概念: 由区间 $[a, b]$ 上定义的 n 个函数 $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 构成的实 n 维函数空间称为 Chebychev 空间, 倘若这些函数的任何非平凡线性组合在 $[a, b]$ 内至多有 $n-1$ 个零点(包括重零点), 如果零点个数小于 $n+a$, 称该函数空间为具有精确度 (accuracy) a 的 Chebychev 空间。

$$\begin{aligned} \text{对于 } H_1 &= y^2 + x^3 - x, \\ H_2 &= x^3 + y^3 + xy, \\ H_3 &= y^2 \pm (x^2 - y^4), \end{aligned}$$

ω 的次数小于或等于 n 情形, $I_\omega(h)$ 可表示为某些完全椭圆积分的线性组合。将 $I_\omega(h)$ 的定义域延拓到复域, Petrov 的系列文章研究并证明了 I_ω 的空间的 Chebychev 性质, 在 Petrov 的工作之前, 对于 $H = H_1$, ω 的次数分别为 2 与 3, Bogdanov 与 Il'yashenko 也分别研究过类似问题, 最近加拿大 Rousseau 与波兰 Zoladek 合作, 对

$$\begin{aligned} H &= y^2 + x^2 \mp x^4, \\ H &= y^2 - 2x^2 + x^4, \end{aligned}$$

A, B 的次数小于或等于 n 的情形, 在对称性情况下, 作了细致研究, 给出了 Chebychev 精确度的估计, 并证明 Chebychev 性质的精确度随形式 ω 的次数增加而增加。

除直接对 $I_\omega(h)$ 的零点性质作一般研究外, 在动力系统分枝理论研究, 研究余维 2 分枝与高于余维 2 的分枝集, 特别是关于旋转 $\frac{2\pi}{q}$ 而不变的扰动向量场族的研究, 大都归结于多项式 Hamilton 扰动系统的定性讨论。在这个方向上已经发表了数十篇文献, 所采用的方法和结果都与弱化的 Hilbert 第 16 问题密切相关。几乎所有的国际上著名的动力系统分枝理论专家都在这个问题有所贡献。例如, 前苏联 Arnold, Il'yashenko, Neishtadt, Bogdanov, Silnikov 等; 美国的 Hale, Chow, Guckenbeimer, Holmes, Chicone 等; 加拿大的 Langford, Rousseau, Joyal 等; 欧洲的 Carr, Takens, Zoladek, Cushman, Sanders, Dumortier, Roussarie, Van, Gils; 巴西的 Sotomayor 等。中国的数学工作者张芷芬、李承治、王铎、李继彬等或与外国数学家合作, 或自

己独立地在这个方向也做了许多深入的工作。

Hilbert 第 16 问题分为上下两个部分,上半部分涉及 n 次平面代数曲线分离闭分枝的相对位置及代数曲面分离闭分枝的最大张数和相对位置,下半部分涉及二维 n 次多项式微分系统的极限环最大个数 $H(n)$ 和极限环的相对位置。上文所述前苏联学者们关于 $I_n(h)$ 的零点个数研究主要关心极限环的个数问题,对于极限环的相对位置问题很少问津。1987 年在长春召开的第 2 届全国常微分方程定性理论会议上,笔者曾作过《关于弱化的 Hilbert 第 16 问题的研究》的综合报告。在该报告中,笔者认为:弱化的 Hilbert 第 16 问题,实质上是 Hilbert 第 16 问题上下两部份的统一,并非孤立地研究该问题的后半部。事实上,为研究多项式 Hamilton 扰动系统的动力学性质,第一步必须知道未扰动的 Hamilton 系统有什么样的全局相图。对 $n-1$ 次 Hamilton 系统,实际上是要知道 n 次代数曲线族的全局性质,在此基础上,对于附加的多项式扰动项,利用未扰动系统已知的全局知识去获取扰动的不可积系统的大范围性质。因此,平面代数曲线分离闭分枝的相对位置与多项式系统的极限环个数和分布研究是统一的。在“弱化”的框架下,为研究 Hilbert 第 16 问题的后半部,首先要研究 Hilbert 第 16 问题的前半部。

居于上述思想,笔者与黄其明、刘正荣、林怡平等合作,自 1985 年起详细地讨论了一类对称 3 次 Hamilton 扰动系统的全局与局部分枝,证明希尔伯特数 $H(3) \geq 11$, 极限环呈多重相包的复眼分布。而且平面多项式 Hamilton 系统有什么样的多重相包的闭轨分布,经过扰动可以获得同样相包类型的极限环分布。换言之, n 次 Hamilton 系统闭轨族中“眼内的眼”有什么复杂的样式,扰动的可积系统也会出现极限环分布的同样样式,并且同一“眼”中,极限环可能是成串的。在 Pontrjagin、张芷芬、Melnikov 等工作的基础上,笔者还总结和提出了讨论 Hamilton 扰动系统全局与局部分枝相图统一的“判定函数法”。

综上所述,“弱化的 Hilbert 第 16 问题”已经获得许多引入注目的结果。然而,人们仅对 Hamilton 量为 4 次多项式以下的情况作过较一般的研究,对于任给的 $n(n > 4)$ 次多项式 Hamilton 量,仍是尚未解决的问题。Hilbert 说过:“重大的个别问题是数学的活的血液”,“只要一门科学分支能够提出大量问题,它就充满着生命力”。弱化的 Hilbert 第 16 问题的研究继续为数学家们提供大量的用武之地,它将对数学和其它科学的发展产生广泛的影响。

参考文献

- 1 Bogdanov R I. Trudy Sem Petrovsky (in Russian), 1976, 2: 23~35
- 2 Arnold V I. Fields, Func Anal Appl, 1977, 11(2): 1~10
- 3 Varchenko A N. Func Anal, 1984, 18: 98~108
- 4 Knovansky A G. Func Anal Appl, 1984, 18: 119~128
- 5 Petrov G S. Functional Anal Appl, 1984, 18: 148~150
- 6 Carr J, et al. J Diff Eq, 1985, 59: 417~463
- 7 Jibin Li et al. Acta Math Sinica, 1985, 28: 509~521
- 8 李继彬. 昆明工学院学报, 1985, 13(1): 94~109
- 9 Rousseau C, et al. J Diff Eq, 1991, 94: 41~54

(昆明理工大学、云南省应用数学研究所李继彬教授撰)

多元奇异积分算子理论

theory of several variables singular integral operators 多元奇异积分是一种特殊的积分变换,它是一维 Hilbert 变换到高维欧氏空间的推广,由 A. P. Calderon 和 A. Zygmund 于 1952 年引入。他们就最基本与最典型的情形证明奇异积分算子的 L^p 有界性。这是奇异积分理论的奠基性工作,以后经 E. M. Stein, G. Weiss 和 C. Fefferman 等人,把奇异积分算子同 Hardy-Littlewood 极大函数、面积积分、多元调和函数边界性质以及 Littewood-Paley 理论联系起来,构成了近代调和分析的主要工具。同时由 L. Nirenberg 等人在奇异积分理论和方法基础上,发展出伪微分算子、Fourier 积分算

子等理论,形成偏微分方程近代理论的一个重要方面。

首先应考虑 n 维欧氏空间 $R^n (n > 2)$ 上的 Poisson 方程 $\Delta u = f$ 。试用牛顿位势

$$u(x) = c \int_{R^n} \frac{f(y)}{|x-y|^{n-2}} dy$$

求解。为验证这个函数满足方程,形式地在积分号下微分两次,得到

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_j^2} = \int_{R^n} \frac{\Omega_j(x-y)}{|x-y|^n} f(y) dy \quad (1)$$

式中 $\Omega_j(y) = C(1-n|y|^{-2}y_j^2)$, 一般说来,积分(1)是发散的。因为它的核 $\Omega_j(x)/|x|^n$ 按绝对值大小来说,在原点 $x=0$ 附近是不可积的,也即按 Lebesgue 积分的意义来说,积分(1)一般不存在。但由于 Ω_j 在 R^n 的单位球面 S 上的平均值等于 0, 即

$$\int_S \Omega_j(y) d\sigma(y) = 0$$

所以对“好”的函数来说,只要把积分(1)理解为

$$\lim_{\rho \rightarrow 0^+} \int_{|x-y| > \rho} \frac{\Omega_j(x-y)}{|x-y|^n} f(y) dy \quad (2)$$

就可以证明这极限是存在的。并且可进一步证明,如果 $f(x) \in L^p(R^n) (p > 1)$, 那么积分(2)所定义的 $\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_j^2}$ 也属于 $L^p(R^n)$ 。

按正常意义是发散的积分(1),用(2)来定义就是收敛的。因此人们都称(1)右方的积分为多元奇异积分或多元奇异积分算子。

一般的多元奇异积分算子是按如下定义的一种积分变换

$$Tf(x) = \lim_{\rho \rightarrow 0^+} \int_{|x-y| > \rho} \frac{\Omega(x-y)}{|x-y|^n} f(y) dy \quad (3)$$

式中 $\Omega(y)$ 是零次齐次函数,即对任意的 $\lambda > 0$, 满足 $\Omega(\lambda y) = \lambda^0 \Omega(y)$, 并且在 R^n 的单位球面 S 上的平均值等于 0, 即 $\int_S \Omega(y) d\sigma(y) = 0$, 同时还具有一定的光滑性。(1)中积分是奇异积分算子的一个特例。A. P. Calderon 和 A. Zygmund 于 1952 年的奠基性工作就是证明:如果 $f(x) \in L^p(R^n) (p > 1)$, 则由(3)所定义的 $Tf(x) \in L^p(R^n)$ 并且

$$\|Tf\|_{L^p} \leq C \|f\|_{L^p}$$

式中 C 与 f 无关。

从 Fourier 变换的观点来看,如果 $f(x) \in L^2(R^n)$, 则 $Tf(x)$ 和 $f(x)$ 的 Fourier 变换可用等式

$$(Tf)^\wedge(x) = m(x)f^\wedge(x)$$

联系起来。其中 $m(x)$ 是 R^n 上的一个零次齐次函数,更准确些, $m(x)$ 和(3)中的 $\Omega(x)$ 有下面的关系:

$$\Omega(x) = \int_S \left(\frac{\pi}{2} i \text{Sign}(x \cdot y) + \log \frac{1}{|x \cdot y|} \right) \Omega(y) d\sigma(y) \quad (4)$$

式中 $|x| = 1, i = \sqrt{-1}, x \cdot y$ 表示 x 与 y 的内积。

积分(3)是第一代的多元奇异积分算子,它是卷积型的。这种算子的研究,如它的收敛性,它在各种空间上的有界性,甚至在各种加权空间上的有界性等等都有较完整、成熟的结果。它的理论主要适用于常系数偏微分方程。

随着人们更深入的探讨,在 20 世纪 60 年代,由 Kohn-Nirenberg, Hormander 等人提出第二代的多元奇异积分算子。它是伪微分算子,研究的主要对象是

$$Tf(x) = \int_{R^n} K(x, x-y) f(y) dy \quad (5)$$

它比较接近卷积,仍可用 Fourier 变换作为主要工具来研究。它对线性变系数方程理论有重要意义。

算子(3)的 L^2 有界性是用 Plancherel 定理来证明的。Plancherel 定理不能用到非卷积型算子上,所以这就产生了困难。例如 Calderon 的 k 阶交换子就是调和分析中最典型的非卷积型奇异积分算子。1978 年, R. R. Coifman 和 Y. Meyer 提出了分布核与 Calderon-Zygmund 奇异积分算子的概念,它既包括了卷积型奇异积分算子,也包括主要的经典伪微分算子,还包括许多其它的非卷积型算子。这就是第三代的多元奇异积分算子。

定义如下:

设 $T: D(R^n) \rightarrow D'(R^n)$ 是线性连续算子, 其中 D 是 Schwartz 函数空间, D' 是其对偶. 如果存在 $K(x, y) \in D'(R^n \times R^n)$, 它在 $R^n \times R^n \setminus \{x=y\}$ 上的限制是一连续函数(仍记为 $K(x, y)$), 满足

$$\textcircled{1} |k(x, y)| \leq \frac{C}{|x-y|^{n+1}}$$

$$\textcircled{2} |k(x, y) - k(x', y)| \leq \frac{C|x-x'|^\delta}{|x-y|^{n+\delta}}$$

当 $|x-y| > 2|x-x'|$, 其中 $0 < \delta \leq 1$;

$$\textcircled{3} |k(x, y) - k(x, y')| \leq \frac{C|y-y'|^\delta}{|x-y|^{n+\delta}}$$

当 $|x-y| > 2|y-y'|$.

并且对任意 $f, g \in D, \text{Supp}f \cap \text{Supp}g = \emptyset$, 有

$$(Tf, g) = \int_{R^n} \int_{R^n} K(x, y) f(y) g(x) dy dx \quad (6)$$

则称 T 为广义奇异积分算子, K 为 T 的分布. 如果 T 能扩张为 L^2 有界算子, 则称 T 为 Calderon-Zygmund 奇异积分算子.

广义奇异积分算子有界性的中心问题是 L^2 有界性. 在 Plancherel 定理不能应用的情况下, 能否有一个一般性的证明 L^2 有界性之准则? G. David 和 J.-L. Journé 于 1984 年第一次得到了这样准则:

$T(1)$ 定理: 设 $T: D(R^n) \rightarrow D'(R^n)$ 为广义奇异积分算子, 则 T 为 Calderon-Zygmund 奇异积分算子, 当且仅当 T 是弱有界的, $T(1) \in \text{BMO}$ 和 $T^*(1) \in \text{BMO}$. 其中 T^* 是 T 的转置算子.

对 Calderon-Zygmund 奇异积分算子来说, 其 L^2 有界性保证了它在许多空间的有界性. 所以 $T(1)$ 定理为近代调和研究的重大成果之一.

多元奇异积分理论的丰富发展, 尤其是在 Calderon-Zygmund 分解(这个分解是 A. P. Calderon 和 A. Zygmund 在证明积分(3)的 L^2 有界性发现的, 其作用是关键的). 基础上发展出的一整套实变函数论方法, 不仅在近代调和分析和偏微分方程的理论中, 而且在多元复变函数论、概率论和位势理论中, 起着重要的作用. 目前, 国际上对小波分析(Wavelets analysis)研究的最好方法之一就是应用 Calderon-Zygmund 奇异积分理论. 因此, 对多元奇异积分算子理论领域中尚待解决问题的研究有着重要意义.

参考文献

- 1 Calderon A P, et al. Acta Math, 1952, 88, 85~139
- 2 Stein E M. Singular integrals and differentiability properties of functions. Princeton Univ Press, 1970
- 3 Journé J L. Lecture Notes in Math, 1983, 994
- 4 David J, et al. Ann of Math, 1984, 120, 371~397
- 5 Garcia-Cuerva J, et al. Weighted norm inequalities and related topics. North Holland Amsterdam, 1985
- 6 Torchinsky A. Real variable methods in harmonic analysis. Academic Press, 1986
- 7 David J. Lecture Notes in Math, 1991, 1465
- 8 邓东皋等. 数学进展, 1991, 20(3): 294~310

(河南大学李登峰副教授撰, 施威亮审)

Chebyshev 中心 chebyshev centers 设 E 是赋范线性空间, $A \subseteq E$ 是有界子集, 定义:

$$r(A) = \inf_{x \in E} \sup_{a \in A} \|a - x\|$$

则称 $r(A)$ 为 A 的 Chebyshev 半径, 而 A 的 Chebyshev 中心就是 $E(A) = \{x \in E; \sup_{a \in A} \|a - x\| = r(A)\}$. 提出这一问题是很自然的. 例如, 由于试验误差, 当我们不能确切地知道函数时, 可以把它理解为一个集合, 然后用单个的最优元素代表这个集合. 另外, Chebyshev 中心在最优回复理论的研究中也有重要意义.

Chebyshev 中心这一概念首先是 Garkavi 在 1962 年提出并研究的, 并在 1964 年给出下面的结果:

定理 G Banach 空间 E 中每一有界集 A 至少有一 Chebyshev 中心 $y_0 \in COA$, 当且仅当 E 是完备内积空间或 E 的维数 ≤ 2 .

下面结果最早是由 Kadets 和 Zamyatin 在 1968 年对 $S = [a, b]$ 给出的, 一般情形是由 Franchetti 和 Cheney 给出的.

定理 K-Z: $B(S)(C(S))$ 中任一有界集恒有非空的 Chebyshev 中心, 其中 S 是任一拓扑空间, $B(S)(C(S))$ 是全体实有界(连续)函数所组成, 并赋予一致范数.

对 $Y \subseteq E, A$ 的相对或限制(Chebyshev 中心), 是

$$E_Y(A) = \{y \in Y; \sup_{a \in A} \|a - y\| = r_Y(A)\}$$

其中, $r_Y(A) = \inf_{y \in Y} \sup_{a \in A} \|a - y\|$, 为 A 的相对或限制 Chebyshev 半径. 这一问题自 60 年代就有许多研究. 关于唯一性, 1980 年 Amir 和 Ziegler 定义了 E 关于子空间 Y 的严格凸性和各向一致凸性.

定理 A-Z 设 Y 是 E 的子空间, 则: (1) 对任何紧子集 $A \subseteq E, E_Y(A)$ 至多只有一个元当且仅当 E 关于 Y 是严格凸;

(2) 对任何有界集 $A \subseteq E, E_Y(A)$ 至多只有一个元当且仅当 E 关于 Y 是各向一致凸的.

关于相对 Chebyshev 中心的特征, 当 A 是局部紧时, 由于可转化成 $C(A, E)$ 中的单元逼近, 故可以毫无困难地得 Kolmogorov 型特征定理. 但对一般的有界集 A , 要给出其 Kolmogorov 型特征定理并非易事. 1982 年, Freilich 和 McLaughlin 在 Y 是凸集时给出下列的 Kolmogorov 型特征.

定理 F-M $y_0 \in E_Y(A)$ 当且仅当对任何 $y \in Y$ 存在 $L \in \text{ext}K$ 满足 $U_L(L) - \text{Re}L(y_0) = \sup_{a \in A} \|a - y_0\|$ 且 $\text{Re}L(y - y_0) \leq 0$, 其中 $K \subseteq E^*$ 的闭单位球 B^* . 在 K 上赋予 $\sigma(K, G)$ 拓扑, $x_n^* \rightarrow x_0^* \Leftrightarrow \forall g \in G, x_n^*(g) \rightarrow x_0^*(g)$, 且 K 满足: (1) K 是 $\sigma(K, G)$ 紧; (2) 任何 $a \in A, y \in Y$, 有 $\sup_{L \in K} \text{Re}L(a - y) = \|a - y\|$. 而 $U_L(L)$ 定义为:

$$U_L(L) = \sup_{a \in A} \text{Re}L(a); U_L(L) = \inf_{OEU(L) \in O} \sup_{a \in A} U_L(a)$$

其中 $U(L)$ 为在 K 上的开例域全体.

但定理 F-M 中的必要性未必成立, 我们在 1987 年举例说明不真, 并刻划了非线性情形下的相对 Chebyshev 中心的特征.

定理 X-L 设 Y 是 E 中一子集, 则下述论断等价: (1) 对任何有界集 $F, y_0 \in E_Y(F) \Leftrightarrow \forall y \in Y$, 存在 $L \in Y$, 使 $U_L(L) - \text{Re}L(y_0) = \sup_{f \in F} \|f - y_0\|$ 且 $\text{Re}L(y - y_0) \leq 0$; (2) Y 是同时太阳集. 即对任何有界集 F , 若 $y_0 \in E_Y(F)$, 则 $y_0 \in E_Y(F_a)$, 其中 $F_a = y_0 + a(F - y_0), a \geq 0$.

关于 $E_Y(A)$ 的非空性, 即相对 Chebyshev 中心的存在性. 若某种紧性, 例如局部有界紧或局部有界弱紧, 且 Y 是闭或弱闭, 则对任何有界集 $A, E_Y(A)$ 非空. 但是当 Y 没有任何紧性, 则其研究相当困难. 1991 年, D. V. Pai 和 P. T. Nowroji 在 E 中的子空间 Y 引进 R_1 性质, 这是单元逼近中 $1/\frac{1}{2}$ -球性质的推广, 并证明了下面的存在性定理.

定理 P-N 设 E 是 Banach 空间, Y 是 E 的子空间, 若 Y 关于 E 中所有的有界集(紧集)有 R_1 性质, 则对任何有界集(紧集) $A, E_Y(A) \neq \emptyset$.

目前有众多的文献在研究 $E_Y(A)$ 的连续性与强唯一性, 对 E 中任何两个有界集 A, B , 其 Hausdorff 距离定义为:

$$H(A, B) = \max\{\sup_{a \in A} \inf_{b \in B} \|a - b\|; \sup_{b \in B} \inf_{a \in A} \|a - b\|\}$$

1982 年, P. Szeptycki 和 F. S. Var VLeck 证明了下述定理.

定理 S-V 若 E 是 Hilbert 空间, 则对任何两个紧子集 A, B 有

$$\|E(A) - E(B)\|^2 \leq [r(A) + r(B) + H(A, B)]H(A, B) \quad (*)$$

并提出下述两个问题

问题 S-V-1, 若 A, B 没有紧性 (*) 式是否成立?

问题 S-V-I, 当 E 是一致凸空间时, $\|E(A) - E(B)\|$ 是否有类似于 (*) 式的估计?

1988 年, 我们给问题 S-V-I 一个肯定回答;

定理 L, 设 E 是 Hilbert 空间, Y 是 E 中凸集, 则对任何有界集 A, B 有

$$\|E_r(A) - E_r(B)\|^2 \leq [r r(A) + r r(B) + H(A, B)] H(A, B)$$

问题 S-V-I, 在 1989 年由王嘉平与俞鑫泰解决。

在当前及今后的研究中, 相对 Chebyshev 中心的定量分析, 如相对 Chebyshev 中的实现, 相对 Chebyshev 半径的计算等, 将成为热点和趋势。

参考文献

- 1 Garkavi A L. The Chebyshev centers and the convex hull of a set, Uspehi Mat Nauk, 1964, 19, 139-145
- 2 Amir D, Ziegler Z. Relative Chebyshev Centers in Normed Linear Space I, J Approx Theory, 1980, 29, 235-252
- 3 Franchetti C, Cheney E W. Simultaneous approximation and restricted Chebyshev centers in function spaces, in "Approximation Theory and Applications", ed. by Z Ziegler, Academic Press, New York, 1981, 65-88
- 4 Freilich J H, McLaughlin H W. Approximation of bounded sets, J Approx Theory, 1982, 34, 145-158
- 5 Franchetti C, Cheney E W. The embedding of Proximinal sets J Approx Theory, 1986, 48, 213-225
- 6 徐士英, 李冲, 等. 最佳同时逼近的特征. 数学学报, 1987, 30 (4): 528-535
- 7 Szeptycki P, Van Vleck F S. Centers and nearest points of sets, Proc A.M.S, 85 1987, 85, 27-31
- 8 Li Chong. On a problem on Chebyshev centers, Advance in Math, 1988, 17(2): 216-217
- 9 Wang J P, Yu X T. Chebyshev centers, Chebyshev centers and the Hausdorff metric, Manuscripta Math, 1989, 63, 115-128

(杭州商学院李冲副教授撰, 徐士英审)

Chebyshev 集的太阳性和凸性 Chebyshev sets' solar properties and convexity

设 E 为赋范线性空间, M 为 E 中子集, 令 $d(x, M) = \inf_{m \in M} \|x - m\|$,

$$P_M = \{m; m \in M, \|x - m\| = d(x, M)\}$$

若对任何 $x \in E, P_M x \neq \emptyset$, 则称 M 为存在性集, 如 $\forall x \in E, P_M x$ 为单点集, 则称 M 为 Chebyshev 集。

为讨论最佳逼近的唯一性, Efimov 和 Stechkin 在 1958 年引入太阳集的概念: 若由 $m \in P_M x$ 可推得 $\forall \epsilon > 0$ 有 $m \in P_{M, \epsilon} x$, 其中 $x_\epsilon = m + \epsilon(x - m)$, 则称 M 为太阳集。

为了讨论 Chebyshev 集和太阳集、凸集间的关系, 还需知下述概念:

M 为有界紧集, M 与 E 中任何球的交集是紧集。

M 为逼近紧集: $\forall m_n \in M$ 满足 $\|x - m_n\| \rightarrow d(x, M)$ 时, 必有子列 m_{n_k} 收敛。

E 为光滑空间, $f \in E^*$ 满足 $\|f\| = 1, f(x) = \|x\|$ 称为 x 点的支撑泛函。如果对每一 $x \in E$, 支撑泛函唯一, 称 E 为光滑空间。

E 为一致凸空间, $\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0$, 由 $\|x\| = \|y\| = 1$ 及 $\|x + y\| > 2 - \delta$ 可推得 $\|x - y\| < \epsilon$ 。

Chebyshev 集、太阳集、凸集三者间的关系: (1) Banach 空间 E 中有界紧 Chebyshev 集必为太阳集。(2) 光滑空间 E 中存在性太阳集必凸。(3) 一致凸空间 E 中逼近紧 Chebyshev 集必为太阳集。

(4) 实 $C(x)$ 中逼近紧 Chebyshev 集是太阳集。

Dunham 于 1975 年在 $C[0, 1]$ 中举出 Chebyshev 集不是太

阳集的例, 说明 (4) 中逼近紧不能省。

例: 设 $\psi: R_+ \rightarrow R$ 严格单调并满足

$$\psi(0) = 1, \lim_{x \rightarrow \infty} \psi(x) = 0$$

$$\text{令 } V_a(x) = \begin{cases} (2+a)\psi(x/a) & a > 0 \\ 0 & a = 0, \end{cases}$$

则 $M = \{V_a; a \geq 0\}$ 是 $C[0, 1]$ 中 Chebyshev 集, 但不是太阳集。

对 Hilbert 空间 H , 由 (2)(3) 有: 逼近紧 Chebyshev 集 \Rightarrow 存在性太阳集 \Rightarrow 凸集。去除逼近紧条件, 在 Hilbert 空间 H 中, Chebyshev 集是否一定是凸集? 这是至今未解决的问题。

当 H 不完备时, Johnson 于 1987 年给出上述问题的否定解答, 在内积空间中给出不凸的 Chebyshev 集。

例: $E = \{(x_1, x_2, \dots, x_n, \dots); x_n \in R, \{i_1, x_i \neq 0\}, x_i \neq 0\}$ 为有限集)。

$$\text{令 } E_n = \{x \in E; x_n \leq 0, x_i = 0, i > n\},$$

$$1 = A_0 > A_1 > A_2 > \dots > 0, L_0 = F_0 = 1$$

归纳地定义:

$$a_n(x) = 1 + A_n L_n(x),$$

$$L_{n+1}(x) = a_n(x) F_n^2(x) + [a_n(x) - 1] F_n(x) x_{n+1} - x_{n+1}^2,$$

$$F_{n+1}^2(x) = \frac{2L_{n+1}(x)}{[a_n(x) + 1]}$$

命 $S_n = \{x \in E_{n+1}; x_{n+1} = -F_n(x), L_j(x) \geq 0, j = 1, 2, \dots, n\}$

$M = \bigcup_{n \geq 1} S_n$, 则 M 为 E 中不凸的 Chebyshev 集。

讨论最佳远达问题, 令

$$Q_M x = \{m \in M; \|x - m\| = \sup_{m \in M} \|x - m\|\},$$

即 $Q_M x$ 为 M 对 x 最近点全体。

如对 $\forall x \in E, Q_M x$ 均为单点集, 则称 M 为唯一远达集。

对赋范线性空间 E , 可讨论关于 $\sum = \{x; \|x - c\| = r\}$ 的反演变换

$$f(x) = c + (r^2 / \|x - c\|^2)(x - c)$$

易见

$$f: E \setminus \{c\} \rightarrow E \setminus \{c\}$$

当 E 为内积空间时, Klee 指出: 当 S 是 E 中不通过 c 的球面时, $f(S)$ 也是球面。利用上述反演变换, Klee 证得下列论断有 (2) \cap (1); (1) E 中任何 Chebyshev 集是凸集; (2) E 中任何唯一远达集是单点集。

虽然对许多具体空间, 证实了唯一远达集的单点性, 但对 Hilbert 空间, 这仍是一个悬而未决的问题。

对 Hilbert 空间 H 的有界子集 M , 数

$$r(M) = \inf_{x \in H} \sup_{m \in M} \|x - m\|$$

称为 M 的 Chebyshev 半径。满足

$$\sup_{m \in M} \|c - m\| = r(M)$$

的 $c \in H$ 称为 M 的 Chebyshev 中心。对 Hilbert 空间的有界子集, Chebyshev 中心存在且唯一。

Astaneh 于 1983 年证得下述结果:

M 是 Hilbert 空间 H 中唯一远达集, $c, r(M)$ 为 M 的 Chebyshev 中心和 Chebyshev 半径, 则 M 或为单点集, 或对 $x \in (c, q(c))$ 有

$$\|q(x) - q(c)\| > \sqrt{2} r(M),$$

其中 $q(x)$ 为远达点映照。

最后, 介绍关于几乎 Chebyshev 集的一些结果; Stechkin 于 1963 年对赋范线性空间 E 中子集 M , 引进唯一性集

$$T_M = \{x; P_M x \text{ 为单点集}, x \in E\}.$$

如果 $E \setminus T_M$ 至多是第 1 纲集, 则称 M 为几乎 Chebyshev 集。并且证明:

一致凸空间中任何闭集都是几乎 Chebyshev 集。

1978 年 K. S. Lau 将 Stechkin 的结果推进到自反、局一致凸空间。这里局一致凸的意义为:

记 $s = \{x \in E, \|x\| = 1\}$, $\forall \epsilon > 0$ 及 $x \in S, \exists \delta(x) > 0$,
 当 $y \in s, \|x+y\| > 2-\delta(x)$ 有 $\|x-y\| < \epsilon$.

K. S. Lau 同时举例说明: 条件自反不可省, 局一致凸不能减弱为严格凸.

1990 年李冲将 K. S. Lau 的结果推广到 K 局一致凸空间, 证得

自反的 K 局一致凸空间的任何闭子集是几乎 k -Chebyshev 集.

K 局一致凸是指: $\forall \epsilon > 0, x \in S, \exists \delta(x) > 0$ 对任何 $x_1, x_2, \dots, x_k \in s$ 及 $\|x+x_1+\dots+x_k\| > k+1-\delta(x)$ 有

$$\sup \left\{ \begin{matrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ f_1(x) & f_1(x_1) & \dots & f_1(x_k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_k(x) & f_k(x_1) & \dots & f_k(x_k) \end{matrix} \right\} | f_i \in E^*, \|f_i\| \leq 1, i=1, 2, \dots, k \} < \epsilon$$

K 几乎 Chebyshev 集意思是: 对 P_{Mx} 定义维数 $\dim P_{Mx} = \dim[\text{Span}(P_{Mx} - P_{Mx})]$, 记

$$B_M = \{x \in E, P_{Mx} \neq \emptyset \text{ 且 } \dim P_{Mx} < k\}$$

若 $E \setminus B_M$ 至多是第一纲集, 则称 M 是 k -几乎 Chebyshev 集.

不同空间中 Chebyshev 集特性的研究已有不同程度的展开, 随着进一步研究, 期望会得到更全面更深入的结果. 特别对 Hillert 空间中 Chebyshev 集是否是凸集的遗留问题可望得到解决.

从单目标逼近到多目标逼近, 最佳共同逼近中相应的唯一性集的研究现已初步展开, 近期可望得到更多更好的结果.

对非线性优化问题, 甚至非线性多目标优化问题, 对应于某种意义上最优解的唯一性问题也是值得研究的重要课题.

参考文献

- 1 Efimov N V, Stechkin S B. D A N SSSR, 1958, 118: 17~19
- 2 Efimov N V, Stechkin S B. D A N SSSR, 1959, 127: 254~257
- 3 Klee V. Math Annalen, 1961, 142: 292~304
- 4 Stechkin S B. Rev Roumaine Math Pur Appl, 1963, 8: 5~18
- 5 Vlasov L P. Math Zametki, 1967, 2: 191~200
- 6 Dunham C B. Math Bull, 1975, 18: 35~38
- 7 Lau K S. Indian University Math J, 1978, 27: 791~795
- 8 Astaneh A A. Indian J Pure Appl Math, 1983, 14(10): 1311~1317
- 9 Johnson G G. J A T, 1987, 51: 289~332
- 10 李冲. 几乎 k -Chebyshev 子集, 1990, 33(2): 251~258
 (浙江师范大学徐士英教授撰)

太阳集和最佳逼近的特征 sun sets and characterization of best approximation

设 E 是赋范线性空间, $M \subset E$, 令 $P_{Mx} = \{m \in M, \|x-m\| = \inf_{m \in M} \|x-m\|\}$,

1961 年, Garkavi 对凸集 M , 给出刻画 $m_0 \in P_{Mx}$ 的 Kolmogorov 型特征定理:

M 凸: $m_0 \in P_{Mx} \Leftrightarrow \forall m \in M, \exists f \in E^*$ 满足 $\|f\| = 1, f(x-m_0) = \|x-m_0\|, \text{Re}f(m-m_0) \leq 0$.

对于非凸集, 上述 Kolmogorov 型特征定理能否成立? 要使 Kolmogorov 型特征定理成立, M 应满足怎样的充要条件?

为讨论最佳逼近的唯一性, 1958 年 Efimov 和 Stechkin 引入太阳集的概念如下: $m \in P_{Mx} \Rightarrow \forall t > 0, m \in P_{Mx_t}$, 其中 $x_t = m + t(x-m)$. 1969 年 Brosowski 证得:

定理 B 下列条件等价: (1) M 是太阳集; (2) $\forall x \in E, m_0 \in M$ 有: $m_0 \in P_{Mx} \Leftrightarrow \forall m \in M, \exists f \in E^*$ 满足 $\|f\| = 1, f(x-m_0) = \|x-m_0\|, \text{Re}f(m-m_0) \leq 0$.

关于太阳集, 有下述结论: (1) M 是太阳集等价于 $\forall x \in E, m_0 \in M, m_0 \in P_{Mx} \Leftrightarrow \forall m \in M, \text{有 } m_0 \in P_{[m_0, m]x}$, 其中 $[m_0, m]$

$= \{m_\lambda; m_\lambda = m_0 + \lambda(m-m_0), \lambda \in [0, 1]\}$; (2) M 是太阳集, m_0 是 M 对 x 的局部最佳逼近 $\Rightarrow m_0 \in P_{Mx}$; (3) M 是光滑空间 E 中的存在性太阳集 $\Rightarrow M$ 凸; (4) M 是严格凸空间 E 中的存在性太阳集 $\Rightarrow M$ 是 Chebyshev 集; (5) 设 X 紧, E 为实 $C(X)$, M 是 $C(X)$ 中太阳集等价于下列条件之一: (i) M 对 x 的局部最佳逼近必为最佳逼近; (ii) M 有闭符号性质: $\forall m_0, m_1 \in M$, 及满足 $\inf_{x \in A} |m_1(x) - m_0(x)| > 0$ 的闭集 $A \subset X$, 则 m_0 属于 $\{m \in M, [m(x) - m_0(x)][m_1(x) - m_0(x)] > 0, x \in A\}$ 的闭包.

将最佳逼近的目标由单元 x 换成 E 中有界集 F , 即为最佳同时逼近问题, 令

$$P_M(F) = \{m \in M, \sup_{f \in F} \|f-m\| = \inf_{m \in M} \sup_{f \in F} \|f-m\|\},$$

$m_0 \in P_M(F)$ 称为 M 对 F 的最佳同时逼近.

对 M 是凸集的情形, 1982 年 Freilich 和 Mclaughlin 证得 Kolmogorov 型特征定理:

定理 F-M M 凸, $m_0 \in P_M(F) \Leftrightarrow \forall m \in M$, 存在 $L \in \text{ext}K$ 满足 $U^\#(L) - L(m_0) = \sup_{f \in F} \|f-m_0\|, \text{Re}L(m-m_0) \leq 0$.

其中符号意义如下:

设 $G \supset M$, 对 E^* 中闭单位球 B^* , 赋以 $\sigma(B^*, G)$ 拓扑; $x_i^* \rightarrow x_0^* \Leftrightarrow \forall g \in G, x_i^*(g) \rightarrow x_0^*(g)$.

K 取 B^* 的子集, 满足: (1) K 是 $\sigma(K, G)$ 紧集; (2) $\forall f \in F, m \in M$, 有 $\sup_{L \in K} \text{Re}L(f-m) = \|f-m\|$

$U^\#(L)$ 为 K 上函数, 定义如下:

$$U^\#(L) = \sup_{f \in F} \text{Re}L(f) \quad L \in K$$

$$U^\#(L) = \inf_{O \in U(L), \lambda \in O} \sup_{f \in F} \text{Re}L(\lambda) \quad L \in K$$

其中 $U(L)$ 为 L 的邻域全体.

Freilich 和 Mclaughlin 只对实空间 E 加以证明, 复空间 E 的证明类似.

我们举出反例, 指出定理 F-M 中 $L \in \text{ext}K$ 是错误的, 应改正为 $L \in K$. 进一步, 对于非凸集, 我们于 1987 年得到定理 X-L 下列条件等价:

(1) M 是同时太阳集; \forall 有界集 F 及 $m_0 \in M$, 有 $m_0 \in P_M(F) \Rightarrow \forall t > 0, m_0 \in P_M(F_t)$, 其中

$$F_t = \{f_t; f_t = m_0 + t(f-m_0), f \in F\}$$

(2) \forall 有界集 $F, m_0 \in P_M(F) \Leftrightarrow \forall m \in M$, 存在 $L \in K$, 满足 $U^\#(L) - \text{Re}L(m_0) = \sup_{f \in F} \|f-m_0\|, \text{Re}L(m-m_0) \leq 0$.

再讨论 M 对 $\{f_i\}$ 的 P 阶联合最佳逼近问题, 设 $P \geq 1$, 数列 $\{\lambda_i\}$ 满足 $\lambda_i \geq 0, \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i = 1$, 对任何满足 $\sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \|f_i\|^P < \infty$ 的 E 中

序列 $\{f_i\}$, 求 $m \in M$, 使 $\sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \|f_i - m\|^P$ 最小.

在讨论中, 我们固定 $\{\lambda_i\}$, 并令

$$F^* = \{(f_i)_t; f_i \in E, \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \|f_i\|^P < \infty\}$$

记 $Q_M(\{f_i\}) = \{m; m \in M, \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \|f_i - m\|^P = \inf_{m \in M} \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \|f_i - m\|^P\}$.

并引入 P 阶联合太阳集的概念如下: $\forall \{f_i\} \in F^*, m_0 \in Q_M(\{f_i\}) \Rightarrow \forall t > 0, m_0 \in Q_M(\{f_{i,t}\})$, 其中 $f_{i,t} = m_0 + t(f_i - m_0)$.

对 P 阶联合最佳逼近我们证得 Kolmogorov 型特征定理.

定理 X $P \geq 1$, 下列论断等价:

(1) M 是 E 中 P 阶联合太阳集.

(2) $\forall \{f_i\} \in F^*, m_0 \in Q_M(\{f_i\}) \Leftrightarrow \forall m \in M, \forall \Psi_i \in \|\Psi_i - m_0\|^{P-1} M_{f_i - m_0}$ 满足 $\text{Re} \sum_{i=1}^{\infty} \lambda_i \Psi_i(m-m_0) \leq 0$,

其中 $M_{f_i - m_0} = \{\Psi; \Psi \in E^*, \|\Psi\| = 1, \Psi(f_i - m_0) = \|f_i - m_0\|^{P-1}\}$

(3) $\forall \{f_i\} \in F^*, m_0 \in Q_M(\{f_i\}) \Leftrightarrow \forall m \in M, \forall i, \exists \Psi_i \in \parallel$

$f_i - m_0 \parallel^{p-1} q(M_{f_i - m_0})$ 满足 $\sum_{i=1}^n \lambda \Psi_i(m - m_0) \leq 0$
其中 $\varepsilon(M_{f_i - m_0})$ 表示 $M_{f_i - m_0}$ 的端点全体。

最后, 讨论更一般的非线性优化问题, 设 E 为线性拓扑空间, $M \subset E, \psi(x)$ 为 E 上连续凸泛函, 讨论优化问题: $\inf_{m \in M} \psi(m)$ 。
记

$$P_M(\psi) = \{m \mid m \in M, \psi(m) = \inf_{m \in M} \psi(m)\},$$

并引入 ψ 太阳概念如下, 记 $C_{m_0}(M) = \bigcup_{m \in M} [m_0, m]$, 若由 $m_0 \in P_M(\psi)$ 可推出 $m_0 \in P_{C_{m_0}(M)}(\psi)$, 则称 M 为 ψ 太阳。

可得得:

定理 X 设 E 为线性拓扑空间, $\psi(x)$ 是 E 上连续凸泛函, $M \subset E, m_0 \in M$, 则下列条件等价:

(1) M 是 ψ 太阳

(2) $m_0 \in P_M(\psi) \Leftrightarrow \forall m \in M, \exists f \in \partial\psi(m_0)$ 满足

$\text{Ref}(m - m_0) \geq 0$, 其中 $\partial\psi(m_0) = \{f \mid f \in E^*, \text{Ref}(y - m_0) \leq \psi(m_0), y \in E\}$

(3) $m_0 \in P_M(\psi) \Leftrightarrow \forall m \in M, \exists f \in \varepsilon(\partial\psi(m_0))$ 满足

$\text{Ref}(m - m_0) \geq 0$ 。

从特殊的优化: $\inf_{m \in M} \|x - m\|$ 到一般非线性优化 $\inf_{m \in M} \psi(m)$,

最优解的特征的研究已有局部展开, 对 $\psi(m)$ 不凸、不光滑的情形, 结果较少, 今后可望得到进展。

$\psi(m)$ 从数值到向量值, 从数值优化到多目标优化也是优化问题研究深化的重大一步, 对非线性多目标优化问题的研究目前局限于有限维, 对于一般情形, 各种意义下的最优解的特征刻划是今后值得研究的课题。

参考文献

- 1 Efimov N V, Stechkin S B. D A N SSSR, 1958, 118: 17~19
- 2 Garkavi A L. Uspekhi Mat Nauk, 1961, 16(4): 141~145
- 3 Brosowski B. Abstract spaces and approximation. ISNA 10 Birkhauser Verlag, 1969, 140~159
- 4 Freilich J H, Melaughlin H W. J A T, 1982, 34: 146~158
- 5 徐士英, 等. 数学学报, 1987, 30(4): 528~535

(浙江师范大学徐士英教授撰)

函数论中的极端点和支撑点理论 theory of extreme points and support points in function theory

极值问题在几何函数论中占有重要位置。关于解析单叶函数族 S 系数的著名比伯巴赫(Bieberbach)猜想, $|a_n| \leq n$ [1984 年被美国路易斯·德·勃朗吉斯(Louis de Branges)解决]就是一个有趣的极值问题。20 世纪 70 年代以来, 几何函数论在研究许多具体极值问题的同时, 开始研究一般极值问题, 即寻求某些解析函数空间上连续线性泛函的最大值和相应的极值函数——支撑点。线性拓扑空间的有关理论表明, 对于紧的解析函数空间, 这些最大值与其闭凸包的极端点集上的最大值一致。所以, 刻画支撑点和极端点的性质, 寻求它们的表达形式, 对解决极值问题至关重要。

早期的研究工作主要是解析单叶函数族 S 和亚纯单叶函数族 Σ 的支撑点和极端点的一般性质。1970 年伯瑞克曼(L. Brickman)证明 S 的极端点是一割线映射, 其像域的边界是一条伸向无限远点且具有单调模性质的连续曲线。1971 年普夫鲁格(Pfluger)指出, S 的每一个支撑点也具有同样性质。容易知道 Σ 族没有极端点。对其子族 Σ_0 (常数项为零), 早在 1955 年, 斯普凌格(Springer)断言, 支撑点的充分条件是像域的余面积为零。直到 1982 年哈密尔顿(D. H. Hamilton)用很高的技巧证明其逆命题也正确。

伯瑞克曼等人早在 70 年代利用泛函分析理论和凸性技巧对 S 的几个重要特殊子族进行了深入的研究。1971 年他们确定了典型实照、星形以及凸形子族的极端点和支撑点。近于凸形族的

问题比较困难, 直到 1984 年才由豪恩勃劳尔(R. Hornblower)和威尔金(Wilken)完全解决其支撑点的表达形式。

舍伍(Schiffer)创造的境界变分原理是研究 S 族支撑点的有力工具。1974 年伯瑞克曼和威尔金利用这种方法证明了支撑点像域的余集是简单的解析弧, 它满足一个与相应泛函有关的二次微分方程(以舍伍命名)。由该方程出发, 他们又发现: 支撑点除外弧的径向角小于 $\pi/4$ (即 $\pi/4$ 性质), 可能在有限端点处例外; 除外弧在无限远点有一渐近半直线。1983 年杜林(P. Duren)、梁(Leung)和舍伍对支撑点除外弧在有限端点处的径向角进行了细致的研究。他们指出: 对点值泛函和系数线性组合等泛函相应的支撑点在除外弧的有限端点处径向角等于 $\pi/4$ 。杜林等人于 1983 年还指出, 对有型泛函(假设没有二级零点)若径向角在有限端点处等于 $\pi/4$, 则除外弧必是一半直线。1991 年张玉林和马进喜指出, 二级零点的假设条件可以去掉。1979 年杜林证明导数泛函支撑点除外弧具有单调辐角和单调径向角的猜想。布朗(Brown)于 1978 年和 1985 年分别指出这一猜想对点值泛函和某些系数泛函是正确的。一般情况下的杜林猜想至今尚未解决。

关于亚纯单叶函数族 Σ 的支撑点, 1987 年阿布·穆汗纳(Abu-Muhanna)和梁发现, 若 Σ 中函数的除外值是一条解析曲线, 则它是一个支撑点; 若这一函数还是有理函数的话, 则除外弧一定是直线段或圆弧。这一发现表明 Σ 族的支撑点比 S 族多得多。

从属族的极端点和支撑点理论一直是比较活跃的研究课题。解析函数 F 的从属族的极端点集 $E_S(F)$ 和 F 与什瓦尔兹(Schwarz)函数极值点的复合函数究竟有什么关系? 1983 年阿布·穆汗纳在 F 单叶, F' 属奈万里纳(Nevanlinna)族且 F 的像是位于一半平面内的 Jordan 域的假设条件下证明了 $E_S(F) \subset \{F \circ \phi; \phi \in EBo\}$ 。1989 年阿布·穆汗纳和海伦拜克(D. J. Hallenbeck)更将这一命题的假设条件减少到只需 F 是解析单叶的即可。至于从属族的支撑点, 1984 年阿布·穆汗纳证明了, 若 F 是解析函数, 其从属族的支撑点一定是 F 与什瓦尔兹函数类某支撑点的复合。塔克泽斯卡(Tkaczynska)和阿布·穆汗纳在 F 属于凸映射的闭凸包和 F 在闭单位圆盘上解析的条件下分别于 1990 年和 1985 年证明逆命题成立。

关于极点不在原点的亚纯单叶函数族 $S(P)$, 1991 年张玉林和马进喜发现, 其极端点像域的余面积为零。他们同时指出, 在相差一留数因子的情况下其逆命题也成立。另外 $S(P)$ 星形子族的支撑点的具体表达形式也被他们确定。

多叶函数的极端点和支撑点的理论近年来也取得不少进展。早在 1976 年海伦拜克和列文斯敦(A. E. Livingston)确定了 P 叶星形、凸形及近于凸形族的闭凸包和极端点。1989 年罗东汉获得星形和凸形子族的支撑点并部分解决了近于凸族的支撑点。1989 年海伦拜克和卡塔泽那(Katarzynna)确定了 P 叶星形、凸形和近于凸从属族的极端点。对支撑点除近于凸族部分解决外, 星形和凸形从属族被他们完满解决。

关于极端点和支撑点理论在极值问题上的应用已取得许多新的研究成果。由于单叶函数族 S 系数的查尔斯曼猜想: $|a_n^2 - a_{2n-1}| \leq (n-1)^2$ 蕴含着著名的比伯巴赫猜想: $|a_n| \leq n$, 从而受到人们的关注。1986 年布朗对 S 的星形子族证明这一猜想成立。1988 年马万伦证明了 $n \geq 4$ 时这一猜想对近于凸族的闭凸包成立, 当然对近于凸族也成立。对于 β 次近于凸从属族的系数估计, 1975 年海伦拜克得到 $\beta \geq 1$ 时的严格上界。而当 $\beta \geq 0$ 时, 1988 年考夫(W. Koepf)用不同的技巧予以完全解决。考夫同时找到 β 级 ($\beta \geq 0$) m 次对称近于凸函数导数 P 次积分平均的精确上界。

解析单叶函数的极端点和支撑点理论的研究虽已取得丰富的成果, 但仍有一些问题尚待研究。预计今后关于各子族的研究可望获得某些进一步的成果。另一方面, 近年来解析单叶函数理论已推广至多叶函数和调和映射更加广泛的研究领域。随着这些理论的深入发展, 其极端点和支撑点理论将成为研究热点。特别

是调和单叶映射,它是80年代国际上新兴的研究课题,截止目前,极端点和支撑点的研究成果很少,预计会有较大的发展。

参考文献

- 1 Duren P L. Univalent Functions. New York, Springer-Verlag, 1983
- 2 Hallenbeck D J, et al. Linear problems and convexity techniques in geometric function theory. Boston: Pitman Advanced inc, 1984
- 3 Hallenbeck D J. Lecture on complex analysis, Singapore: World Scientific, 1988, 121~127
- 4 Koepf W. Complex Variables, 1988, 10(4): 349~357
- 5 Wan-cang Ma. Proc Amer Math Soc, 1988, 104(3): 741~744
- 6 Abu--Muhanna, et al. Tran Amer Math Soc, 1988, 308(1): 83~89
- 7 刘书琴,等. 数学进展, 1989, 18(2): 129~141
- 8 Yu-Lin Zhang, et al. Jour Math Anal Appl, 1991, 160(2): 598~601

(西北大学张玉林教授撰;刘书琴审)

现代位势论 modern potential theory 数学分析领域中较早完成现代化变革的一个分支,它的研究对函数论(包括 Riemann 曲面论)、微分方程、泛函分析、拓扑学、调和函数等相邻数学分支的发展产生重大作用;它与随机过程的内在联系的研究产生了“概率位势理论”这一新的数学分支;它在物理、流体力学、静电学等学科中也有广泛的应用。

位势论起源于物理学的万有引力学说和静电学。远在 1733 年拉格朗日(J. Lagrange)就发现,力场是一个位势函数的梯度。1772 年拉普拉斯(P. S. Laplace)证明,在不分布质量的地方,位势函数满足 Laplace 方程。从 18 世纪到 19 世纪末,位势论的研究限于 n 维欧氏空间 R^n 的 L. Newton(牛顿)位势($n \geq 3$);

$$U^n(x) = \int_{R^n} |x-y|^{2-n} du(y), \quad (1)$$

(其中 μ 是一个正拉夫 Radon 测度, $|x-y|^{2-n}$ 称为 Newton 核)及对数位势($n=2$);

$$U^2(x) = \int \log \frac{1}{|x-y|} du(y) \quad (2)$$

(其中 $\log \frac{1}{|x-y|}$ 称为对数核, μ 同上)。现在人们将这种位势论称为经典位势论。19 世纪末,位势论的三个基本原理,即极小值原理、收敛性质及 Dirichlet 问题已基本建立,为现代位势论的发展做了充分的准备。

20 世纪以来,由于现代函数论、测度和积分理论、泛函分析广泛应用,一般拓扑、抽象代数等思想方法,并与概率论相结合,位势论得到迅速发展和变革,形成了现代位势论;它的研究又反过来促进了有关分支的发展。

30 年代,瓦莱·普桑(Valleé-Poussin)用现代观点改进并发展了班加来(Poincaré)扫除法,佛罗斯特曼(O. Frostman)发展了 Gauss 变分法,成功地解决了紧集的平衡问题和扫除问题。同时,位势核已推广到 M. Riesz 核,即(1)式中的牛顿核改为 $|x-y|^{a-n}$, $0 < a < n$, μ 为变号测度的形式,它对应于非局部微分算子,已不属于通常偏微分方程所关联的位势核了。

从 40 年代起,泛函分析、拓扑学的方法系统应用于位势论并使它发展到一个新水平。1941 年,加当(H. Cartan)利用希尔伯特(D. Hilbert)空间理论研究具有有限能量的测度,建立了新的扫除法,获得很大成功;同年马丁(R. S. Martin)建立了 Martin 边界理论,导致关于正调和函数及理想边界的深入研究。1950 年戴尼(J. Deny)用 L. Schwartz 分布论(广义函数论)解决了 Dirichlet 原理中的完备化问题;1955 年绍凯(G. Choquet)建立了一般容量理论、可容性定理并用紧凸集的极值点理论改进了 Martin 定理的证明。此外,关于一般的空间(如流形,局部 Abel

群)和更一般形式的位势核的位势论也有了深入的探讨。

50 年代后,位势论迅速发展。除了它越来越广泛、深入地复分析、拓扑学、几何测度论、微分几何、微分方程、调和函数、泛函分析等相邻数学分支相互结合、相关渗透且发挥着日益显著的作用外,还具有如下两个特点:

其一是,各种公理系统的位势论不断建立和完善。为了统一处理已有的理论并加以推广使之适用于一般的椭圆型与抛物型微分方程及随机过程,从 50 年代后期到 70 年代初,陶治(G. Tautg)、杜布(J. Doob)、鲍尔(H. Bauer)、波尼(J. M. Bony)、康斯坦丁尼斯库(C. Constantinescu)、A. Cornea 和 M. Brelot 等人先后给出不同的公理系统,建立了各种形式的调和空间位势论;与此同时, J. Deny 等人则从能量与 Dirichlet 积分等概念出发建立了 Dirichlet 空间的公理系统。

其二是,位势论与随过过程的内在联系得到深入研究,同时促进了分析与概率论这两个在 40 年代前仍被视为互不相干的数学领域的发展。40 年代中期,角谷静夫、考茨(Kac)和 Doob 等人先后发现经典位势论与布朗(Brown)运动之间存在一种对应关系。50 年代,Doob 为揭示二者的联系作了大量工作;1957 年亨特(G. A. Hunt)进一步推广到较一般的 Markov 过程(亦称 Hunt 过程)。从此,位势论的基本概念获得了明确的概率意义,而分析工具又大大促进了概率论的发展。Martin 边界被翻译成概率的语言并用于研究 Markov 过程;由于调和空间引入了 Markov 半群,因而构造出 Markov 过程,公理位势使随机过程的研究提高到一个新水平。80 年代, C. P. McKean 和 S. Ito 等人在流型上用随机微分方程建立扩散过程,提供了用概率来研究位势论的一种方法。在 Doob, Hunt, 麦叶(P. A. Meyer)和钟开莱(K. L. Chong)等人一系列出色工作的基础上,80 年代末已形成“概率位势论”这样一门新学科。

当前关于位势论的研究,大体可从下述 5 个方面来考察:

关于一般位势论的研究仍然占有较大的比重 这里指的是在 R^n 、Riemann 流形(包括曲面)、 C^* 及其中的多圆柱等具体空间上关于一般核的位势及相关问题的研究,这是经典位势论的直接发展。例如,自 1965 年 L. Landkof 的名著《现代位势论基础》问世至今,前苏联一直有大批学者在从事 Riesz 位势的研究;法国 Ancona 等从 1978 年至今对 R^n 上区域的 Martin 边界、Green 函数的边界性质、Harnack 性质等有一系列创造性工作;中国章逸平 1986 年对边界的两种瘦性作了比较;英国许多学者于 80 年代发表了许多关于 R^n 的超平面等一些特殊区域上的调和、上调和性质的研究。关于调和与上调和函数的细边界值与角形边界值的研究至今仍是热点之一,80 年代台湾黄俊雄关于 Doob 猜想有许多出色的工作;1988~1990 年,日本 Y. Mijuta 的工作引人注目,高琪仁从 1986 到 1989 发表的结果把 Doob 与黄俊雄的工作推进一步。从 1974 至 1991 年 M. Nakai 与 T. Tada 等关于与方程 $\Delta u = \rho u$ 相关联的 Martin 边界与 Picard 原理有了大量深入的研究成果。吴炯圻于 1983~1989 年的几篇文章发展了 Nakai 的部份工作。在 1990 年国际位势论上,加拿大的 J. C. Taylor 与 K. Gowrisankaran 分别报告了《关于多圆柱的正潜底部的 Martin 紧致化》与《关于多圆柱的非切极限》的研究。关于多重调和函数的研究,中国科学院的马志明等学者也做了重要的工作。关于位势论在流体力学、静电学等方面的应用研究在各种杂志也时常见到。

位势论的公理系统不断发展完善

(1)关于调和空间位势论;1990 年捷克 I. Netuka 在 P 调和空间上研究了 Dirichlet 问题的边界行为。1991 年吴炯圻与高琪仁在不用限制可数基的调和空间上研究了位势延拓与广义容量。从 70 年代起对细调和、细解析函数作出深入研究的 B. Fuglede 近年来在研究调和空间之间的调和映射获得很好的结果;捷克 J. Lukes 等人 1986 年发表了专著《实分析与位势论中细拓扑方法》。近年来,对调和空间中的细拓扑又有新的研究。

(2)关于 Dirichlet 空间与 Dirichlet 形式;例如 1990 年美国

M. Rieckner《在非局部紧空间由 Dirichlet 形式表示的位势论》中体现了概率与位势的结合。

(3)关于扫除空间与 H^1 锥理论。它们都是调和空间位势论的进一步发展。扫除空间是德国 J. Bliedtner 与 W. Hansen 定义的,近年来也有许多新研究。他俩的专著《位势论——扫除的分析与概率方法》1986 年出版后在国际上影响深远。N. Boboc, A. Cornea 和 Ch. Bucur 于 1981 年发表了专著《位势论中的次序与凸性: H^1 —锥》,近年来这个理论有很大发展。

(4)非线性位势论公理系统。这是当前研究的热点之一。1987 年的国际位势论会上, Ilpo Laine 作了《公理化非线性位势论》的综合报告,总结了他本人及 P. Lindqvist, O. Martio 和 P. Lehtola 等人的工作;1990 年国际位势论会上, E. M. J. Bertin 等人又做了关于非线性与拟线性位势论的研究报告。F. Y. Macda 等许多位势论名家现在都对非线性系统表示了很大兴趣。

函数论中的位势论 从函数论中脱胎出来的现代位势论反过来促进了函数论的发展。1985 年美国《当代数学》杂志以 Riemann 曲面为题介绍了张鸣镛等中国学者的研究工作,张鸣镛的工作主要体现在共形映射与极大 Riemann 曲面的研究,其它的有关于理想边界(吴炯圻), Riemann 曲面分类(邱曙照), 广义对数位势(张翊), 下调和延拓(费显宗), 细解析函数与细边界极限(高琪仁、林勇)等工作。日本许多学者关于函数论中的位势论一直有很好的结果, S. Sakai 等对求积域也有深入研究。1987 年 David Drasin 在主要采用拟共形映射与位势论相结合的方法,出色地解决了 F. Nevanlinna 的一个猜想,在数学界有较大影响。

目前这个方面的一个热点是美籍华人吴徽眉(J. M. Wu)以及 N. G. Makorov 所进行的关于边界畸变、边界密度与 Green 函数、调和测度的性质等与共形映射及几何测度论有关的研究。在 1990 年的国际位势论会上,他们各自的特邀报告受到与会者的一致关注和欢迎。

概论位势论 除在上述特点 2 中谈及外,1990 年法国 C. Dellachrie 和 G. Moko djki 分别发表了《Hunt 过程的非线性模式》和《位势论与遍历收敛定理》,对这个领域的发展产生深刻影响。近年来 J. C. Taylor, K. Ito, B. Øksendao 等人关于 Brown 运动和扩散过程的研究仍引人注目。非局部紧 Abel 群上的位势论的研究也有新的发展。国内王梓坤等以及武汉大学一批学者对这个方向的发展作出了重大贡献,吴春章 1989 年也发表了有关的研究。

泛函、微分方程与位势论的结合

(1)各类方程的研究始终与位势论的方法与内容相结合。1990 年国际位势论会上,美国 C. E. Kenig 的特邀报告《非光滑系数的椭圆方程的 Dirichlet 问题与 Neumann 问题》及会上 W. Hansen 等人关于 Schrodinger 方程(算子)的论文都集中探讨了位势论性质。

(2)LP 位势论是一个新发展起来的专题。例如,1990 年美国 D. R. Adan 发表的《LP 位势论方法与非线性 PDE》,瑞典 L. I. Hedberg 发表的《非线性位势论》,都采用了 LP 方法。

(3)其他,近来关于 Soblev 空间、Hilbert 空间、Hardy 空间、一般线性拓扑空间、关于积分方程和其他算子(如 Helmholtz 算子)的研究都有许多与位势论相结合的内容。

总之,从当前位势论的发展趋势来看,今后,它与相邻数学分支的相互渗透和结合必将进一步深入,这将导致此前有关领域的一些猜想和难题的解决,公理系统特别是非线性公理系统将有新的突破,位势与概率的结合有广阔的前景,它将大大超过当前的范围。

参考文献

- 1 Brelot M. On Topologies and boundaries in potential theory. Springer, 1971
- 2 Constantinescu C, Cornea A. Potential theory on harmonic spaces. Springer, 1972
- 3 王梓坤. 布朗运动与位势. 北京: 科学出版社, 1983

- 4 吴炯圻. 数学年刊, 1983, A(6), 689~698
- 5 Doob I L. Classical potential theory and its probabilistic counterpart. Springer, 1984
- 6 Zhang Mingyong. Amer Math Soc, 1985, 151~155
- 7 Zhang Yiping. C R Acad Sc Paris, 1987
- 8 高琪仁. 数学年刊, 1989, 10A(3): 328~332
- 9 Wu Jiongqi, Gao Qiren. Potential Theory—Proceedings of the International Conference on Potential Theory. Berlin; Walter de Gruyter, 1992, 361~365
- 10 Bliedtner J, Hansen W 著. 位势论——扫除的分析与概率方法. 高琪仁, 吴炯圻译. 厦门: 厦门大学出版社, 1993
(福建漳州师范学院吴炯圻副教授撰, 高琪仁审)

Stein 估计 设随机向量 X 服从多元正态分布 $N(\beta, I_n)$, 考虑参数 β 的估计问题。在二次损失下, 当 $n \leq 2$ 时, 人们证明 X 是 β 的容许估计。从直观上看, 似乎很有理由猜想这个结论对 $n \geq 3$ 仍成立。但出人意料是: Stein(1956)否定了这一猜想, 他找到了 X 的一个改进估计

$$\delta(x) = [1 - (n-2) / \|X\|^2] X.$$

Stein 这一估计除了使人们进一步认识到低维与高维的质的区别外, 其意义和作用主要在如下 3 个方面: (1)由 Stein 估计得知, 协方差已知的多元(维数大于 2)正态均值参数的常用(在诸优良性下均优的)估计——样本均值, 在二次损失下, 不再是一个好的估计(就判决理论而言)。由此而引起了人们对其他常用估计的反思。(2)Stein 估计是一有偏估计, 但它控制了最小二乘(LS)估计 X , 这一最佳无偏估计。这就引起了人们对有偏估计的研究。(3)Stein 估计在容许性理论中的作用可以说是历史性的, 它是这方面许多研究工作的起点。

自 Stein 估计以后, 人们开始对常用估计进行反思, 在一定意义下, 改进了一些常用估计(主要是多维的常用估计)。Hudson(1978)利用分部积分法, 给出了指数族

$$f_0(x) = \exp(\theta x - \psi(\theta)) k(x), \quad -\infty < x < +\infty$$

的一个自然的恒等式, 即对任一绝对连续函数 $g(x)$ 来说, 如果 $E|g'(x)| < +\infty$, 则有

$$E[-k'(x)/k(x) - \theta]g(x) = E g'(x).$$

并利用此恒等式, 在二次损失下, 得到了多元(维数大于 2)指数族参数的一致最优无偏估计 $T(x) = (-k'(x_1)/k(x_1), \dots, -k'(x_n)/k(x_n))'$ 的改进估计, 该改进估计把正态分布下的 Stein 估计推广到了指数族这一更大而又常用的分布类。Haff(1979)利用给出风险函数无偏估计的方法, 改进了 Wishart 分布的协方差逆阵的常用估计。Hudson 和 Haff 的这两种方法在研究常用估计的改进估计中至今仍很活跃, 例如, haff(1980)利用这两种方法获得了多元正态协方差阵常用估计的改进估计, BiLodeau 等(1989)在矩阵损失下, 利用这两种方法输出了多元正态均值的常用估计的改进估计。除了上述两种方法外, 利用变换群下不变性理论来改进常用估计也是一重要方法, Shorroek 等(1976)利用该方法改进了正态方差的常估计, 中国王静龙(1984)将其推广到多元正态的协方差阵。从有关这方面的研究工作来看, 研究常用估计的改进是十分困难的问题, 它依赖于方法的突破和创新。

以 Stein 估计为开端, 人们后来提出许多新的有偏估计。Hörl 等(1970)提出了线性模型

$$Y = X\beta + e, \quad E(e) = 0, \quad \text{Cov}(e) = \sigma^2 I$$

的回归系数 β 的岭估计

$$\beta(R) = (X'X + kI)^{-1} X'Y,$$

自那时以来, 这种估计的研究和应用得到了广泛的重视, 成为目前最有影响的一种有偏估计。主成分估计是 Massy(1965)提出来的另一种有偏估计, 但它与 Stein 估计和岭估计提出的背景不同, 它主要是基于多元分析中一个重要概念——主成分分析而提出来的。进一步, Webster(1974)推广了主成分估计这一概

念,他提出了特征根估计,这一估计引人注目的地方是:它不象主成分估计那样只限于考虑自变量部分(在回归分析中),而是把因变量也放在一起来考虑.以上提到的这些有偏估计都在一定的意义上改进了LS估计.虽然这些有偏估计都是非线性的,但计算机的发展使得它们的使用成为可能.有关这方面的研究结果表明,在非线性的估计类中改进LS估计的潜力很大.但在关于这些估计优良性的进一步研究中,目前所作比较多的是计算机模拟试验,且在众多的有偏估计中,还没有一个估计被认为是优于其它有偏估计的.因此,从理论上对这些有偏估计优良性的进一步研究,以及寻找新的更优的有偏估计将是今后的一个重要课题.

Stein估计使容许性理论有了长足的发展.Cohen(1966)在二次损失下,利用Bayes理论和Stein估计给出了方差已知的多元正态均值 β 的线性估计AY可容许的特征——A对称,A的特征根均在 $[0,1]$ 内,且当维数 $n \geq 3$ 时,A最多只有两个特征根1.

继此以后,人们开始考虑线性模型参数估计的容许性问题.对均值参数而言,一个自然的估计类是线性估计类,C. R Rao(1976)利用矩阵理论获得了均值参数线性估计在线性估计类中可容许的特征.对方差参数来说,二次型估计类是一自然估计类,中国吴启光等(1982)利用矩阵理论研究了方差二次型估计在二次型估计类和一般估计类(在正态假定上)中的容许性,得到了深刻的结果,徐兴中最近获得了二次型估计在二次型估计类中可容许的特征.陈平等(1983)考虑了二阶原点矩的二次型估计的容许性,在较特殊的线性模型下,得到了深刻的结果.对于多元线性模型来说,此时型式上的二次损失是一矩阵,有关其风险矩阵的比较有许多种不同的标准,对每一个标准都对应的有一容许性定义.谢民育(1990)利用多重线性代数理论研究了均值参数线性估计在线性估计类中关于诸容许性的分类问题,并获得关于各类可容许的特征.谢民育继而(1993)在误差服从正态的假定下,研究了均值参数线性估计在一般估计类中关于诸容许性的分类问题,也得到了关于各类可容许的特征.谢民育(1991)还考虑了协方差阵的二次型估计在二次型估计类中关于诸容许性的分类问题,并找到了关于各类可容许的充要条件.最近谢民育等(1993)利用优良设计理论提出了关于多元的泛优良性和泛容许性的概念,并获得了多元线性模型均值参数线性估计在线性估计类中泛容许性的特征.

从上面的研究工作可以看出,到目前为止,容许性理论的发展模式是:研究一自然估计在自然估计类和一切估计类中的容许性的特征.

参考文献

- Stein C. Proc Third Berkeley Symp Math Statist Prob. Univ of California Press, 1956, 197~206
- Cohen A. Ann Math Statist, 1966, 37: 458~463
- Hoerl A E, Kennard R W. Technometrics, 1970, 12: 55~88
- Rao C R. Ann Statist, 1976, 4: 1023~1037
- Shorrock R W, Zidek T V. Ann Statist, 1976, 4: 627~638
- Haff L. Ann Statist 1979, 7: 1264~1276
- 吴启光,成平,李国英.中国科学,1981,7: 815~825
- Xie Minyu. Chinese Science Bulletin, 1990, 35: 881~883
- Xie Minyu. J Multivariate. Anal, 1993, 44: 220~226
- Xie Minyu, Zhang Yaoting. Chinese Science, Bulletin, 1993, 38: 1071~1074

(华中师范大学谢民育撰;夏明远审)

弱p叶函数 weakly p-valent functions 在单位圆盘 $\Delta = \{z \mid |z| < 1\}$ 内解析的函数 $f(z)$,且满足:若对于每一 $R > 0$,或者 $f(z)$ 在 Δ 内取 $|w| = R$ 的每一 w 值恰好 p 次;或者在 $|w| = R$ 上的一 w , $f(z)$ 在 Δ 内取此 w 值少于 p 次,其中 p 为正整数.这是英国海曼(W. K. Hayman)于1951年提出的.由定义可见,弱

p叶函数包含了p叶函数与圆周平均p叶函数.

对弱p叶函数几何理论的探讨是世界单复变函数论研究的主要课题之一.长期以来,国内外函数论专家们对弱p叶函数进行了一系列研究,取得了一系列好的成果.

以记号 $W(p)$ 表示这类函数,并设函数 $f(z)$ 在 Δ 内有展式:

$$f(z) = a_0 + a_1z + \dots + a_nz^n + \dots \quad (1)$$

1951年海曼研究了 $W(p)$ 的函数与导数的模.对于不取零值的函数(1)有

$$\begin{aligned} |a_1| &\leq 4p|a_0| \\ |a_0|((1-|z|)/(1+|z|))^{2p} &\leq |f(z)| \\ &\leq |a_0|((1+|z|)/(1-|z|))^{2p} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |f(z)| &\leq 4p/(1-|z|^2)|f(z)| \\ &\leq 4p|a_0|(1+|z|)^{2p-1}/(1-|z|)^{2p+1}; \end{aligned}$$

对于在 $z=0$ 处有 p 重零点的函数

$$f(z) = z^p + a_{p+1}z^{p+1} + \dots \quad (z \in \Delta) \quad (2)$$

有

$$\begin{aligned} |a_{p+1}| &\leq 2p \\ |z|^p/(1+|z|)^{2p} &\leq |f(z)| \leq |z|^p/(1-|z|)^{2p} \\ |f(z)| &\leq p((1+|z|)/[|z|(1-|z|)])|f(z)| \\ &\leq p|z|^{p-1}(1+|z|)/(1-|z|)^{2p+1} \end{aligned}$$

上述估计是准确的.且(2)式的 $f(z)$ 在 Δ 内取 $|w| < 4^{-p}$ 的每一 w 值恰好 p 次.

1974年伯恩斯坦(A. Barenstein)对于 $W(p)$ 中的函数(2),推得如下凸积分平均值不等式:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\log |f(re^{i\theta})|) d\theta \leq \int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\log |K(re^{i\theta})|) d\theta$$

其中 $0 < r < 1$, $\Phi(x)$ 是 $(-\infty, +\infty)$ 内的一个凸、非减函数, $K(z) = z/(1-z)^2$.

1979年何泳贤对于 $W(p)$ 中不取零值的函数 $f(z)$,推得如下凸积分平均值不等式:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\pm \log |f(re^{i\theta})|) d\theta \leq \int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\pm \log |F(re^{i\theta})|) d\theta$$

$0 < r < 1$, $\Phi(x)$ 是 $(-\infty, +\infty)$ 内的一个凸、非减函数, $F(z) = ((1+z)/(1-z))^{2p}$.

1974年海曼与威特斯曼(A. Weitsman)对于 $W(p)$ 中的函数 $f(z)$,推得如下积分平均值不等式:

$$\begin{aligned} 1/(2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} |f(re^{i\theta})|^\lambda d\theta &< A(p, \lambda) \mu_p^\lambda (1-r)^{1-2p\lambda} \\ (\lambda > 1/(2p), 0 < r < 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1/(2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} |f(re^{i\theta})|^\lambda d\theta &< A(p, \lambda) \mu_p^\lambda \\ (\lambda < 1/(2p), 0 < r < 1) \end{aligned}$$

由此得(1)的系数不等式:

$$|a_n| < A(p) \mu_p n^{2p-1} \quad (n > p)$$

这里 $\mu(p) = \max_{0 \leq q \leq p} |a_q|$, $A(p, q, \dots)$ 是仅依赖于 p, q, \dots 的一个常数.

1977年希金森(C. G. Higginson)研究了 $W(p)$ 的函数 $f(z)$ 的最大增长半径,即,使得

$$\lim_{r \rightarrow 1} (1-r)^{2p} |f(re^{i\theta})| = \alpha(\theta) > 0$$

的 θ .证得 $W(p)$ 中在 Δ 内有 q ($0 \leq q \leq p$)个零点的函数(1),对于每一 $\theta \in [0, 2\pi]$,极限 $\alpha(\theta)$ 必存在,且集合 $E = \{\theta \mid \alpha(\theta) > 0\}$ 是一可数集;推得 $\Sigma \alpha(\theta)$ 的界有如下结果:

$$\Sigma [\alpha(\theta_v)]^{1/(2p)} < 2\pi^2 A(q) \mu_q^{1/(2p)}$$

其中 $\mu_q = \max_{0 \leq v \leq q} |a_v|$, $A(q)$ 是仅依赖于 q 的一个常数.

对于 $W(p)$ 中函数(2),推得

$$\Sigma [\alpha(\theta_v)]^{1/(2p)} \leq 1$$

而且 $\Sigma [\alpha(\theta_v)] < 1$,除非 $f(z) = z^p(1-ze^{i\lambda})^{-2p}$, λ 为实数.

对于 $W(p)$ 中不取零的函数(1), 推得

$$\sum [\alpha(\theta_n)]^{1/(2p)} \leq (4^p |a_0|)^{1/(2p)}$$

而且 $\sum \alpha(\theta_n) \leq 4^p |a_0|$, 除非 $f(z) = a_0((1+z^p)/(1-z^p))^{2p}$, λ 为实数。

希金森还得到 $W(p)$ 中函数(1)系数的渐近估计:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (|a_n|/n^{2p-1}) = [\sum \alpha(\theta_n)]/(1-2p)!$$

而且, 若 $\alpha(\theta) > 0$ 的 θ 不止一个, 则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (|a_n|/n^{2p-1}) \leq [\sum \alpha^2(\theta_n)]^{1/2}/(2p-1)!$$

及 $\lim_{n \rightarrow \infty} (|a_n|/n^{2p-1})$ 不存在。

1982~1986年, 何泳贤研究了 $W(p)$ 的函数的充要条件及 p 次覆盖半径。 $W(p)$ 不外乎分成两类, 一类是在 Δ 内有 p 个零点, 一类是在 Δ 内有少于 p 个零点, 以符号 $W_1(p)$ 与 $W_2(p)$ 分别表示它们, 证得:

$f(z) \in W_1(p)$ 的充要条件是: 存在正数 1_f , 使当 $|w| < 1_f$ 时, $f(z) - W$ 在 Δ 内有 p 个零点, 而在 $|w| = R (R \geq 1_f)$ 上, 存在一 W_R , 使 $f(z) - W_R$ 在 Δ 内有少于 p 个零点。

$f(z) \in W_2(p)$ 的充要条件是: 对于每一 $R > 0$, 在 $|w| = R$ 上存在一 W_R , 使 $f(z) - W_R$ 在 Δ 内有少于 p 个零点。

对于上述 $W_1(p)$ 的充要条件中的正数 1_f , 我们称为 $f(z)$ 的 p 次覆盖半径。 推得 1_f 与最小模 $m(r, f) = \min_{|z|=r} |f(z)|$ 有如下关系:

$$1_f = \lim_{r \rightarrow 1} (r, f) \quad (r_0 < r < 1)$$

其中 r_0 为 $f(z)$ 在 Δ 内的零点的模之最大值。

对于在 Δ 内具有相同零点且一致收敛于不为常数的函数 $f(z)$ 的函数列 $\{f_n(z)\}$, $f_n(z) \in W_1(p)$, $n=1, 2, \dots$, 以 $1_{f_n}, 1_f$ 分别表示 $f_n(z)$ 与 $f(z)$ 的 p 次覆盖半径, 证得 $\lim_{n \rightarrow \infty} 1_{f_n} = 1_f$ 。

还证得 $W_1(p)$ 中有界函数 $f(z)$ 的 p 次覆盖半径 1_f 与其边界值 $f^*(e^{it}) = \lim_{r \rightarrow 1} f(re^{it})$ 有如下关系:

$$1_f = \inf \{ |f^*(e^{it})|, 0 \leq t \leq 2\pi \}$$

由此导出 $W_1(p)$ 中有界函数 $f(z)$ 的模的估计:

$$e^{\theta} \prod_{k=1}^p (r - |b_k|) / (1 - r|b_k|) \leq |f(re^{i\theta})| \leq e^{\theta} \prod_{k=1}^p (r + |b_k|) / (1 + r|b_k|)$$

其中 b_1, b_2, \dots, b_p 为 $f(z)$ 在 Δ 内的零点,

$$e^{\theta} = \inf \{ |f^*(e^{it})|, 0 \leq t \leq 2\pi \},$$

$$e^{\theta} = \sup \{ |f^*(e^{it})|, 0 \leq t \leq 2\pi \}.$$

1976年哈伦巴克(D. T. Hallenback)与利文斯顿(A. E. Livingston)研究了 $W(p)$ 中 p 叶函数的子类的极值点。以 $S(p, p)$, $C(p, p)$, $K(p, p)$ 分别表示星形、凸形、近于凸形子类, 以 $EHS(p, p)$, $EHC(p, p)$, $EHK(p, p)$ 分别表示这3个子类的团凸壳的极值点集, 证得

$$EHS(p, p) = \{ f(z) = z^p / (1 - xz)^{2p}, |x| = 1 \}$$

$$EHC(p, p) = \{ g(z, x) = \int_0^x P r^{p-1} / (1 - xr)^{2p} dt, |x| = 1 \}$$

$$EHK(p, p) = \{ k(x, y) = \int_0^x P r^{p-1} (1 - yr) / (1 - xr)^{2p+1} dt, |x| = |y| = 1, x \neq y \}$$

1989年罗东汉证得上述 $S(p, p)$, $C(p, p)$, $K(p, p)$ 3个 p 叶函数子类的支撑点与极值点有如下关系:

$$\text{Supp } S(p, p) = EHS(p, p)$$

$$\text{Supp } C(p, p) = EHC(p, p)$$

$$\text{Supp } K(p, p) \subset EHK(p, p)$$

第3个关系式是否能反过来仍未解决。

最近几年, 中外函数论专家们较多地研究弱 p 叶函数的各种特殊子类。1989年杨定恭证得 p 叶函数(2)的子类 $S_{n,p}(A, B)$ 有关系:

$$S_{n+1,p}(A, B) \subset S_{n,p}(A, B)$$

这类是由满足

$$D^{n+p} f(z) / D^{n+p-1} f(z) < (n+p-1)/(n+p) + 1/(n+p) (1 + Az)/(1 + Bz)$$

($z \in \Delta, -1 \leq A < B \leq 1$) 的 $f(z)$ 组成, 其中 $D^{n+p-1} f(z) = [z^p / (1-z)^{n+p}] * f(z), n > -p$ 。他还推得 p 叶函数子类 $S_p^*(A, B)$ 的一类积分算子仍属于 $S_p^*(A, B)$, 即

$$g(z) = [(c + pa)z^{-c} \int_0^z t^{-1} f(t) dt]^{1/c}, f \in S_p^*(A, B)$$

其中 $a > 0, c$ 满足 $\text{Re } c \geq -pa(1+A)/(1+B), S_p^*(A, B)$ 是由在 Δ 内有展式

$$f(z) = a_p z^p + \sum_{n=1}^{\infty} a_{n+p} z^{n+p} \quad (a_p \neq 0)$$

且满足 $z f'(z) / f(z) < p(1 + Az)/(1 + Bz)$ ($z \in \Delta$) 的 p 叶函数 $f(z)$ 所组成。

1989年尤洛勒格底(B. A. Uralegaddi)与泊特尔(H. S. Patil)研究了亚纯 p 叶函数族 $\Sigma(p)$, 它由

$$f(z) = 1/z^p + a_0/z^{p-1} + a_1/z^{p-2} + \dots \quad (3)$$

在 $D = \{z | 0 < |z| < 1\}$ 内解析的 p 叶函数 $f(z)$ 组成。推得 $\Sigma(p)$ 的子类 P_{n+p-1} 满足: $P_{n+p} \subset P_{n+p-1} (n > -p)$, P_{n+p-1} 是由 $\Sigma(p)$ 中满足

$$\text{Re} \{ (D^{n+p} f(x))' / (D^{n+p-1} f(x))' - (p+1) \} < -p(n+p-1)/(n+p) \quad (x \in D)$$

的 $f(z)$ 所组成, 其中 $D^{n+p-1} f(z) = [1/z^p (1-z)^{n+p}] * f(z)$ ($n > -p$)

1989年 Nunokawa, Mamoru 与 Owa, Shigeyoshi 证得 $W(p)$ 中函数(2)是 p 叶星形的充要条件是: $|\arg f^{(p)}(z)| < (1/2)\pi \alpha_1$ ($z \in \Delta$), 其中 $\alpha_1 = 1/2 + (2/\pi) \text{arctg}(1/2) = 0.795$ 。

1990年他们又证得 $W(p)$ 中函数(2)是 p 叶星形的另一充分条件是: $1 + \text{Re}(z f''(z) / f'(z)) < p + (1/2)$ ($z \in \Delta$) 且沿射线 $\arg z = \alpha$ 与 $\arg z = \pi + \alpha (\alpha \in [0, \pi])$ 有裂缝的单位圆盘内有 $\text{Im}(f'(z) / z^{p-1}) \cdot \text{Im}(e^{i\alpha} z) \neq 0$ 。

他们还证得 $W(p)$ 中函数(2)是 p 叶近于凸函数的充分条件是:

$$p - 2p(\beta - p) / (k - p) < 1 + \text{Re}(z f''(z) / f'(z)) < \beta \quad (z \in \Delta),$$

其中 $1 + p \leq K$ 及 $(p+k-1)/2 < \beta \leq (p+k+1)/2$ 。

1990年 Owa 证明了 Nunokawa 猜想, 若 $f(z)$ 是在 Δ 内具有展式(2)的解析函数, 且

$$\text{Re}(1 + z f''(z) / f'(z)) < p + 1/2 \quad (z \in \Delta)$$

则 $f(z)$ 是 p 叶星形函数

1991年 Nunokawa 证得在 Δ 内具有展式(2)的解析函数 $f(z)$ 是 p 叶星形的充分条件是:

$$|1 + z f''(z) / f'(z)| < p^{-1} |z f'(z) / f(z)| \log 4 e^{p-1}, (z \in \Delta)$$

另一充分条件是:

$$|1 + z f^{p+1}(z) / f^{(p)}(z)| < |z f^{(p)}(z) / f^{(p-1)}(z)| \log 4, (z \in \Delta)$$

当前, 国内外对弱 p 叶函数的研究正方兴未艾, 随着 1985年比巴霸赫(Bieberbach)猜想的解决, 有关单叶函数几何理论上许多问题也随之解决, 因而函数几何理论研究的热点自然转向弱 p 叶函数($p \geq 2$)方面。从国内外最新研究成果和进展的信息来看, 20世纪90年代对弱 p 叶函数研究的热点是: (1)弱 p 叶函数的性质, 各种特殊函数子类的特点、关系和充要条件。(2)系数估计、偏差定理、闭包及凸性半径等等。(3)亚纯弱 p 叶函数的特点及其各子类的性质与充要条件。

参考文献

- Hayman W K. J Analyse Math, 1951, 1: 155~179
- Hayman W K, Weitsman A. Math Proc Cambridge Philos. Soc, 1975, 7: 119~137

- 3 Higginson C G. Proc London Math Soc, 1977, 35(2): 291~312
- 4 何泳贤. 华中师院学报(自然科学版), 1983, 17(1): 1~6
- 5 何泳贤. 华中师院学报(自然科学版), 1985, 19(2): 29~32
- 6 何泳贤. 数学杂志, 1986, 6(3): 269~276
- 7 罗东汉. 四川大学学报, 1989, 26(1): 21~26
- 8 Uraleghadi B A, Patil H S. Math Chronicle, 1989, 18: 75~77
- 9 Aouf M K. Tamkang J Math, 1989, 20(2): 135~146

(广州金融高等专科学校何泳贤教授撰, 高仕安教授审)

修正 L 逼近理论 modified L approximation theory 又称“变形 L 逼近理论”, 即“变形平均逼近理论”。通常的 L 范数下的最佳逼近的特征没有明显的几何意义, 而且使用也不方便。因此, 寻求并研究具有明显的几何意义而又使用方便的 L 型度量(即 L 范数的变形)的新的逼近方法, 在理论上和实际应用上都具有十分重要的意义。

鉴于一致范数下的最佳逼近的特征具有明显的几何意义——交错性, 同时已经建立了完美的切比晓夫(Chebyshev)理论, 1982 年皮克斯(A. Pinkus)和歇夏(O. Shisha)首次提出两类 L 型度量, 对于 $f \in C[0, 1]$ 定义

$$\|f\| = \sup_{0 \leq a < b \leq 1} \left\{ \left| \int_a^b f(x) dx \right|, f(x) > 0, x \in (a, b) \text{ 或 } f(x) < 0, x \in (a, b) \right\},$$

$$\|f\|^* = \sup_{0 \leq a < b \leq 1} \left\{ \left| \int_a^b f(x) dx \right|, f(x) \geq 0, x \in (a, b) \text{ 或 } f(x) \leq 0, x \in (a, b) \right\},$$

他们建立的此度量下的线性最佳逼近理论包含经典的切比晓夫理论的许多本质的内容; 交错特征和唯一性, 其中作为切比晓夫理论的核心交错定理在这里表述为: 若 $f \in C[0, 1]$ 而 G 为 $C[0, 1]$ 中的 n 维 Chebyshev 子空间, 则 $g \in G$ 为 f 之最佳逼近当且仅当至少存在 $n+1$ 个小区间 $I_1 < I_2 < \dots < I_{n+1}$ 满足条件

$$\left| \int_{I_i} [f(x) - g(x)] dx \right| = \|f - g\|, i = 1, 2, \dots, n+1$$

及

$$\int_{I_{i-1}} [f(x) - g(x)] dx = - \int_{I_i} [f(x) - g(x)] dx, i = 1, 2, \dots, n.$$

1986 年马志伟进一步完善了这一理论(发表于 1991 年), 证明了强唯一性并建立了切比晓夫理论的范围, 也就是使切比晓夫理论成立的必要条件。1990 年马志伟和史应光又将此理论推广到有理函数的逼近。

但是这两种度量都存在同一个缺点, 就是它们都不是范数, 这自然会给研究和应用带来不便, 因而也使得切比晓夫理论的有些内容仍不能保持, 例如存在性等。为了克服这一缺点, 1988 年史应光提出了一种新的变形 L 逼近方法, 对应的度量是 L 型的, 同时它是一种范数:

$$\|f\| = \sup_{0 \leq a < b \leq 1} \left| \int_a^b f(x) dx \right|$$

令人感到惊奇的是, 在此范数下建立的逼近理论保持了切比晓夫理论的几乎所有的本质内容: 存在性、唯一性、交错特征、强唯一性以及最佳逼近算子的连续性等。更进一步, 还讨论了杰克生(Jackson)型定理、闵次(Müntz)型定理、黎弗林(Rivlin)问题及切比晓夫理论的范围。

1990 年冷文浩成功地将这一理论推广到有理函数的逼近中去, 建立了包括唯一性、交错定理及强唯一性在内的逼近理论。如果我们注意到普通的最佳 L, 有理逼近不仅判别很困难, 而且通常仅得到局部最佳逼近, 那么上述变形 L 逼近的理论意义和应用价值就十分明显了。同年, 方明讨论了基于此范数的 $L_p (1 < p < \infty)$ 型度量:

$$\|f\|^* = \sup_{0 \leq a < b \leq 1} \left| \int_a^b f(x) |f(x)|^{p-1} dx \right|$$

虽然这已不再是范数了, 但依然能建立类似于切比晓夫理论那样

的逼近理论。因而仍具有其理论价值。

这个研究方向的创立虽然时间不长, 但已日益引起人们的关注和重视。众所周知, 最佳一致逼近的研究历史悠久, 既深且广, 成果丰富且十分完美。而变形 L 逼近又大多具有与此逼近相似的特点, 所以, 可以进行与此平行的系统研究, 以求完善和深化这一理论。

非线性逼近更值得重视, 这方面迄今为止尚仅限于有理函数的逼近, 至多是广义有理函数的逼近。当然困难是明显的, 但是希望与困难同在。上面提及的有理函数的逼近所显示的优点表明, 非线性的变形 L 逼近或许正是它发挥作用的地方, 值得人们去探索。

新的 L 型度量仍有待人们去寻求, 人们期待那些在理论上或应用上有价值的 L 型度量的发现。

参考文献

- 1 Pinkus A, et al. J. Approx Theory, 1982, 35: 148~168
- 2 Shi Yingguang, Approx. Theory Appl, 1988, 4: 109~119
- 3 Ma Zhiwei, et al. J Approx. Theory, 1990, 62: 262~273
- 4 Fang Ming. J Approximation Theory, 1990, 62: 94~109
- 5 冷文浩. 应用数学学报, 1990, 13: 473~483
- 6 Ma Zhiwei. Progress in Approximation Theory(Nevai P. et al. Eds). New York: Academic Press, 1991, 667~692
- 7 Shu Yingguang, J Approx. Theory, 1991, 67: 239~251

(中国科学院计算中心史应光教授撰)

集函数的自连续性 autocontinuity of set functions

经典测度论中研究的测度是具有可加性的。然而, 随着对客观事物的更广泛、更深刻的认识, 建立大量非可加测度及其积分的一般理论是非常有意义的工作。较之经典测度, 非可加测度失去了经典测度论中赖以得到许多重要结论的可加性, 因此, 为将可加测度的某些重要结论推广到非可加测度, 人们自然要对非可加测度再附加一些条件。集函数的自连续性就是众多条件中最重要的一个, 它有效地刻划了某类非可加测度及其积分的一系列重要结论。

集函数的自连续性的提出及应用和一类非可加测度的提出和发展密切相关。众所周知, 经典测度理论和积分理论是经典数学的重要基础理论之一, 那么对于模糊数学这一刚刚诞生而又迅速崛起的新兴学科来说如何定义模糊测度和模糊积分, 显然是一项非常有意义的工作。既然美国查德(L. A. Zadeh)把普通集合的概念于 1965 年推广到了模糊集合, 对于测度理论, 一种自然的想法便是设法建立模糊集合某一类上的测度, 有人把这种测度叫做模糊测度, 相应地, 可以进一步建立模糊集合上某类函数的积分, 并叫做模糊积分。从事这方面研究的学者不少, 并有很多有意义的结果。日本菅野道夫(M. Sugeno)于 1974 年首次提出了另一种意义下的模糊测度和模糊积分。

以前, 我们曾考虑过一个确定的点对于一个模糊集合的隶属程度, 它是经典集合论中点对集合的属于关系的一种推广。现在我们来考虑另一种推广, 即考虑一个尚未确定的点对于分明集合(经典集合论中的集合)的属于关系。因为在概率论中, 一个事件的发生与否, 是以一个样本点是否属于某个集合来描写的。但在信息不够充分的条件下, 如何来判断一个点是否属于某个集合呢? 我们可借用查德引进模糊集的想法来处理这一问题, 即给出一个属于区间 $[0, 1]$ 的数来描写这个尚未确定的点属于该集合的程度(当然这种判断往往带有主观性), 也就是说, 给出这个集合的一种度量。概率测度就是这类度量中常用的一种, 它有着完全客观的背景, 但在许多场合下, 这类度量并不都象概率测度那样具有可加性。如: 设对某商店出售的一种服装进行评判, 为简单起见, 我们只考虑 3 个主要因素即花色式样, 耐穿程度及价格, 并由此来组成论域: $U = \{ \text{花色式样}(u_1), \text{耐穿程度}(u_2), \text{价格}(u_3) \}$ 。我们不妨如下规定主要因素的重要性程度(即度量): $\mu(u_1) = 0.6, \mu(u_2) = 0.5, \mu(u_3) = 0.8, \mu(u_1, u_2) = 0.7, \mu(u_1, u_3)$

$= 0.9, u(u_2, u_3) = 0.8, u(u_1, u_2, u_3) = 1$, 显然有 $u(u_1, u_2) \neq u(u_1) + u(u_2)$ 。此外, 人们对客观事物的主观评分通常可归结为一个集函数, 它也往往不具有可加性。

基于上述想法, 1974年菅野道夫提出了用比较弱的单调性来代替可加性的一类集函数, 称之为模糊测度, 并相应地定义了可测函数关于模糊测度的积分, 他的理论已开始应用于主观评判过程等方面, 在此我们考虑的就是菅野道夫提出后经拉列斯库(D. Ralescu)等推广了的模糊测度及其积分。由于模糊测度不具有可加性, 它的结构就显得十分松散, 以致想建立形如经典测度论中的理论体系一般是很难做到的, 除非对模糊测度本身附加某些结构性的限制。为此, 国内外许多学者做了大量的尝试, 得到了不少有意义的结果, 但主要讨论大多是对模糊测度附加较强的次可加性或满足 λ -律, 甚至模糊可加性后得到的, 具有一定的局限性。1984年王震源首次引进集函数的自连续性这一重要概念, 自连续性与王震源同时提出的零可加性、一致自连续性等新概念一起, 有效地刻画了许多类型非可加测度的宏观与微观结构。对模糊测度附加这类要求, 比之某些文献中所用的次可加性、模糊可加性、 λ -律等条件要弱, 它们之间的关系为: Fuzzy可加 \Rightarrow 次可加 \Rightarrow 一致自连续 \Rightarrow 自连续; λ -律 \Rightarrow 次可加($\lambda \leq 0$) \Rightarrow 一致自连续 \Rightarrow 自连续 \Rightarrow 。这些条件对模糊测度空间上可测函数列及模糊积分序列的收敛是本质的, 且具有针对性, 从而是十分有效的。

基于自连续性等新概念, 许多专家学者做出了许多很有意义的结果。1984年宋仁明把自连续性等概念用于(N)模糊积分的研究, 取得一系列有意义的结果, 1984和1985年王震源等人讨论了可能性测度空间与模糊测度空间上可测函数序列各种收敛之间的关系, 推广了经典测度论中著名的拉贝格(Lebesgue)定理、黎兹(F. Riesz)定理以及爱戈洛夫(Egoroff)定理等, 并指出了经典测度中这些定理对测度可加性的依赖不是本质的。这也为讨论可加测度空间上模糊积分序列的收敛打下了基础, 1990年哈明虎、王熙照把自连续性等概念用于模糊集上(S)Fuzzy积分、(N)Fuzzy积分及Fuzzy泛积分, 也取得了一系列很有意义的结果, 1991年, 王震源在总结自己及他人结果的基础上, 撰写出专著《非可加测度理论及其应用》。

运用自连续性概念于模糊测度及其积分理论虽已取得较大成果, 但有些问题尚须研究、探索, 综合归纳起来大致为: (1) 寻求比自连续性更弱的条件得到同样结论或者证明自连续性是某些定理或命题的最弱条件。(2) 自连续性的代数运算性质。(3) 自连续性虽已应用于综合评判、模糊聚类、模糊模式识别等决策、决策系统, 但还只是停留在理论研究上, 在实际应用中取得重大突破者尚不多见。(4) 利用自连续性概念得到的非可加测度一般理论还有待于进一步发展、深化和完善。

参考文献

- 1 Zadeh L A. Information and Control, 1965, 8: 338~353
- 2 Sugeno M. Tokyo Institute of Technology, 1974
- 3 Ralescu D, et al. J Math Anal Appl, 1980, 75: 562~570
- 4 Wang Zhenyuan. J Math Anal Appl, 1984, 99: 195~218
- 5 Wang Zhenyuan, Fuzzy Sets and Systems, 1985; 16: 277~290
- 6 宋仁明. 模糊数学, 1985. 3: 91~106
- 7 哈明虎, 等. 河北大学学报(自然科学版), 1991, 4: 17~21
- 8 王熙照, 等. 河北大学学报(自然科学版), 1991, 1: 17~24
(河北大学王震源教授、哈明虎博士、王熙照撰)

时滞微分不等式 delay-differential inequality 又称

具有时滞的微分不等式(differential inequality with delay)。此类不等式源于带有时滞微分不等式的比较原理, 尔后逐渐发展成具有独特风格的一类新型的不等式。它主要在泛函微分方程解的性质的研究中有广泛的应用。比如, 对于解的估计、解的有界性、解的稳定性等方面的应用, 都非常有效, 其有效性不亚于格朗瓦尔一贝尔曼(Gronwall-Bellman)型积分不等式在常微分方程稳定

性理论研究中的作用。

最早的纯量时滞微分不等式, 是由哈拉那(A. Halanay)于1961年创建的;

若设存在常数 $\alpha > \beta > 0$, 对于 $t \geq t_0$ 上有如下不等式

$$\dot{x}(t) \leq -\alpha x(t) + \beta \bar{x}(t) \quad \text{成立,}$$

其中 $\bar{x}(t) = \sup_{t-\tau \leq \sigma < t} x(\sigma)$, 而 $\tau \geq 0$ 为常数, 则存在常数 $\gamma > 0$ 和 $K > 0$, 使对于 $t \geq t_0$ 有

$$(1) \quad x(t) \leq K e^{-\gamma(t-t_0)} \quad \text{成立.}$$

尔后于1975年, 由陶库玛玛(H. Tokumarn)等, 将上述纯量时滞微分不等式推广成高维时滞微分不等式。

在不影响其应用有效性的前提下, 为了证明时方便起见, 庄维尔(R. D. Driver)于1977年在引用哈拉那不等式时, 增设 $x(t)$ 为非负连续函数, 这样所得不等式(1)中的 K 为 $\bar{x}(t_0)$ 而 γ 为方程 $\gamma = \alpha - \beta e^{\gamma\tau}$ 的(唯一的)正实根。

1986年, 马万彪和章毅从不同角度建立了不同形式的非定常高维时滞微分不等式, 有关这方面研究的结果, 可归纳为:

若设 $A = (a_{ij})_{m \times m}, B = (b_{ij})_{m \times m}$ 为实常矩阵, $x(t)$ 于 $[t_0 - \tau, +\infty)$ 上非负连续, 且于 $t \geq t_0$ 上有如下不等式

$$(2) \quad \dot{x}(t) \leq g(t)[Ax(t) + B\bar{x}(t)] \quad \text{成立,}$$

其中 $g(t) = \text{diag}(g_1(t), \dots, g_m(t))$ 且 $g_i(t) \geq l > 0$ 连续, l 为常数, 而 $x(t) = \text{Col}(x_1(t), \dots, x_m(t)), \bar{x}(t) = \text{Col}(\bar{x}_1(t), \dots, \bar{x}_m(t)), \bar{x}_i(t) = \sup_{t-\tau \leq \sigma < t} x_i(\sigma), \tau \geq 0$ 为常数。

又若 $a_{ii} < 0, a_{ij} \geq 0 (i \neq j), b_{ij} \geq 0$ 且 $-(A+B)$ 为 M 矩阵, 则存在常数 $M \geq 1$ 和 $\gamma > 0$, 使对于 $t \geq t_0$ 有

$$(3) \quad x(t) \leq M \bar{x}(t_0) e^{-\gamma(t-t_0)} \quad \text{成立.}$$

若将(2)换为

$$\dot{x}(t) \leq g(t)x^\alpha(t)[Ax^\beta(t) + B\bar{x}^\beta(t)] \quad \text{成立,}$$

其中

$$x^\alpha(t) = \text{diag}(x_1^\alpha(t), \dots, x_m^\alpha(t)), y^\beta(t) = \text{Col}(y_1^\beta(t), \dots, y_m^\beta(t)), y_i(t) = x_i(t) \text{ 或 } \bar{x}_i(t), \alpha + \beta = 1, \text{ 则结论(3)仍成立.}$$

尔后, 贾保国将时滞微分不等式(2)改进为时滞微分不等式和纯差分不等式混合在一起的混合型时滞微分不等式, 即将(2)换成

$$(4) \quad k \dot{x}(t) \leq g(t)[Ax(t) + B\bar{x}(t)] \quad \text{成立,}$$

其中 $k = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_m)$ 且 $k_i \geq 0$, 则结论(3)仍成立。

1987年以来, 章毅等人从另外的角度建立了一些时滞微分不等式, 于1991年发展成定常的和非定常的混合型时滞微分不等式:

若设 $x_i(t) (i=1, 2)$ 于 $[t_0 - \tau, +\infty)$ 上非负连续, 且于 $t \geq t_0$ 上有如下不等式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) \leq -r x_1(t) + \sum_{j=1}^m (a_j \bar{x}_1(t) + b_j \bar{x}_2(t)) \\ \dot{x}_2(t) \leq \sum_{j=1}^m (c_j \bar{x}_1(t) + d_j \bar{x}_2(t)) \end{cases} \quad \text{成立,}$$

其中 $r > 0, a_j \geq 0, b_j \geq 0, c_j \geq 0, d_j \geq 0$ 均为常数, 而时滞 $\tau \geq 0$ 亦为常数,

又若存在常数 $\alpha_i (i=1, 2) > 0, k > 0$ 使

$$\begin{cases} 1/(a_1 r) \sum_{j=1}^m (a_j \alpha_1 + b_j \alpha_2) k^{j-1} < 1, \\ 1/(a_1 r) \sum_{j=1}^m (a_j \alpha_1 + b_j \alpha_2) k^{j-1} < 1, \end{cases}$$

则当 $\bar{x}_1(t_0)/\alpha_1 + \bar{x}_2(t_0)/\alpha_2 < k$ 时, 于 $t \geq t_0$ 有 $x_1(t) + x_2(t) \leq (\alpha_1 + \alpha_2) k e^{-\lambda(t-t_0)}$, 其中 $\lambda > 0$ 为常数。另外, 若设 $x_i(t) (i=1, 2, \dots, m)$ 于 $[t_0 - \tau, +\infty)$ 上非负连续, 而 $y_i(t) (i=1, 2, \dots, m)$ 于 $[t_0, +\infty)$ 上非负连续且于 $t \geq t_0$ 上有如下不等式

$$(5) \begin{cases} \dot{y}_i(t) \leq r_i(t) [-a_i y_i(t) + \sum_{j=1}^m b_{ij} \bar{x}_j(t)], \\ x_i(t) \leq y_i(t) + \sum_{j=1}^m c_{ij} \bar{x}_j(t), \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

成立, 其中 $a_i > 0, b_{ij} \geq 0, c_{ij} \geq 0$ 均为常数, $r_i(t)$ 为非负连续函数且 $r_i(t) \geq r > 0, r$ 为常数, $\tau \geq 0$ 为常数.

又若矩阵 $(b_{ij}/a_i + c_{ij})_{m \times m}$ 之谱半径小于 1, 则存在常数 $k \geq 1$ 和 $\lambda > 0$, 使对于 $t \geq t_0$ 有

$$x_i(t) \leq k \max_{1 \leq j \leq m} [\max(y_j(t_0), \bar{x}_j(t_0))] e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (i=1, 2, \dots, m) \text{ 成立.}$$

实际上, 不等式(5)是不等式(4)的特殊情形, 比较其他所设也仅是形式上的差异.

1988年, 斯力更和马万彪创建了变量时滞可为无界的混合型时滞微分不等式:

若设 $A = (a_{ij})_{m \times m}, B = (b_{ij})_{m \times m}$ 为实常矩阵, $x(t)$ 于 I 上非负连续, 且于 $t \geq t_0$ 上有如下不等式:

$$k \dot{x}(t) \leq g(t) [Ax(t) + B\bar{x}(t)] \text{ 成立,}$$

其中 $k = \text{diag}(k_1, k_2, \dots, k_m), k_i \geq 0$ 为常数;

$g(t) = \text{diag}(g_1(t), g_2(t), \dots, g_m(t))$ 连续且 $g_i(t) \geq \gamma > 0, \gamma$ 为常数;

$x(t) = \text{Col}(x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)), \bar{x}(t) = \text{Col}(\bar{x}_1(t), \bar{x}_2(t), \dots,$

$\bar{x}_m(t)), \bar{x}_i(t) = \sup_{t-\Delta(t) \leq \sigma \leq t} \{x_i(\sigma)\}$, 时滞 $\Delta(t)$ 非负连续.

又若 $a_{ii} < 0, a_{ij} \geq 0 (i \neq j), b_{ij} \geq 0$ 且 $-(A+B)$ 为 M 矩阵, 则有如下结论:

(i) 如果 $\Delta(t)$ 有界, $0 \leq \Delta(t) \leq \Delta(\Delta$ 为常数), 则存在常向量 $M > 0$ 和常数 $\gamma > 0$, 使对于 $t \geq t_0$ 有

$$x(t) \leq M |\bar{x}(t_0)| e^{-\gamma(t-t_0)} \text{ 成立.}$$

(ii) 如果 $\Delta(t)$ 无界, 且 $t - \Delta(t) \rightarrow +\infty (t \rightarrow +\infty)$, 则存在常向量 $M > 0$ 使对于 $t \geq t_0$ 有

$$x(t) \leq M |\bar{x}(t_0)|_{\infty} \text{ 且 } \lim_{t \rightarrow +\infty} x(t) = 0.$$

其中 $|\bar{x}(t_0)|_{\infty} = \sum_{i=1}^m \sup_{-\infty \leq \sigma \leq t_0} \{x_i(t_0 + \sigma)\} < +\infty$.

这里的区间

$$I = \begin{cases} [t_0 - \Delta, +\infty), & \text{当 } 0 \leq \Delta(t) \leq \Delta \text{ 时,} \\ (-\infty, +\infty), & \text{当 } \Delta(t) \text{ 无界时.} \end{cases}$$

1989年以来, 斯力更和马万彪又建立了带有积分项的一般非正常线性时滞微分不等式、非线性混合型时滞微分不等式以及反方向的各种时滞微分不等式. 在1990年陈伯山也建立过一类非线性时滞微分不等式. 为了简单起见, 归纳统一成如下形式:

若设 $x_i(t) (i=1, 2, \dots, m); R \rightarrow R_+$ 连续, 使当 $x_i(s) \leq l \leq +\infty (t \geq s \geq t_0)$ 时, 于 $t \geq t_0 \geq 0$ 有如下的不等式

$$k_i \dot{x}_i(t) \leq r_i(t) f_i(x_1(t), \dots, x_m(t); \bar{x}_1(t), \dots, \bar{x}_m(t);$$

$$\int_{t_0}^t A_{i1}(t, \tau) R_{i1}(x_1(\tau)) d\tau, \dots, \int_{t_0}^t A_{im}(t, \tau) R_{im}(x_m(\tau)) d\tau] \quad (i=1, 2, \dots, m) \text{ 成立,}$$

其中 $k_i \geq 0$ 或 $k_i \leq 0, -\infty \leq a \leq 0; \bar{x}_i(t) = \sup_{t-\Delta(t) \leq \sigma \leq t} \{x_i(t+\sigma)\}, \Delta(t)$ 连续且 $0 \leq \Delta(t) < t, t - \Delta(t) \rightarrow +\infty (t \rightarrow +\infty); r_i(t); R_+ \rightarrow R_+;$

$A_{ij}(t, \tau); R_+ \times R \rightarrow R_+$ 连续; $f_i(x_1, \dots, x_m; y_1, \dots, y_m; z_1, \dots, z_m)$ 于 $\sum_{i=1}^m (x_i + y_i + z_i) \leq \delta_1 \leq +\infty (x_i \geq 0, y_i \geq 0, z_i \geq 0)$ 上连续, 且关于 x_i 拟单调不减; $R_j(u)$ 于 $0 \leq u \leq \delta_2$ 上连续、非负、不减, 且 $R_j(0) = f_j(0, \dots, 0; 0, \dots, 0; 0, \dots, 0) = 0$

另设 ① $r_i(t) > 0, \int_{t_0}^{+\infty} r_i(t) dt = +\infty;$

② $\int_{t_0}^t A_{ij}(t, \tau) d\tau \leq S_{ij} < +\infty (t \geq t_0)$ 且对 $\forall s > 0$ 使 \lim

$$\int_{t_0}^t A_{ij}(t, \tau) d\tau = 0;$$

③ 存在正数 d_1, \dots, d_m 使当 $0 < u \leq \delta_3 \leq +\infty$ 时, 有 $f_i(d_1 u, \dots, d_m u; d_1 u, \dots, d_m u; s_1 R_{i1}(d_1 u), \dots, S_{im} R_{im}(d_m u)) = \bar{f}_i(u) < 0$, 则有如下的结论:

① 如果 $k_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, m), \min\{\bar{f}_1, \bar{f}_2, \bar{f}_3\} = \bar{f}_i < +\infty, \|\varphi\| = \max_{1 \leq i \leq m} \{\sup_{t \leq t_0} x_i(t)\}$ 充分小, 则存在与 t_0 无关的常数 $M \geq 1$, 使 $x_i(t) \leq M \|\varphi\| \leq l (t \geq t_0)$ 且 $\lim_{t \rightarrow +\infty} x_i(t) = 0 (i=1, 2, \dots, m)$; 如果 $\bar{f}_i = +\infty$, 则上述结论中的 $\|\varphi\|$ 只要有界即可.

② 如果 $k_i \leq 0 (i=1, 2, \dots, m; \sum_{i=1}^m k_i \neq 0), \bar{f}_i < +\infty, \max\{x_i(t)\} > 0$, 且于 $(-\infty, t_0]$ 上不减, 则当 $\|\varphi\|$ 充分小时, 存在 $\bar{t} \geq t_0, \delta > 0$ 使 $\sum_{i=1}^m x_i(\bar{t}) \geq \delta$; 如果 $\bar{f}_i = +\infty$, 则只要求 $\|\varphi\|$ 有界, 有 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^m x_i(t) = +\infty$.

综上所述, 自1986年以来, 在时滞微分不等式的研究方面出现过一些重要的突破: 一是混合型时滞微分不等式的建立. 二是具无界时滞的时滞微分不等式的建立. 三是反方向时滞微分不等式的建立; 四是非线性时滞微分不等式的建立. 这种种时滞微分不等式的建立, 使之成为具有独特风格的一种新的分支, 同时将泛函微分方程稳定性理论的研究也推进了一步, 并给其它有关学科或实际应用也提供了新的方法和工具. 虽然, 时滞微分不等式的研究发展较快, 但一般非正常线性时滞微分不等式和具有一般无穷时滞的时滞微分不等式的题设条件还较苛刻, 需改进或精确; 另外, 时滞微分不等式的应用范围也需进一步扩大.

参考文献

- 1 Halanay A. Com Acad R P Romaine, 1961, 11(11), 1305~1310
- 2 Tokumarn H, et al. Proc of IFAC 6th world congress, Boston, 1975, 44(4)
- 3 Driver R. D. Ordinary and delay differential equations. New York, Springer-Verlay, 1977, 389~391
- 4 章毅. 中国科学, 1988, 4, 337~347
- 5 斯力更, 马万彪. 科学通报, 1988, 33(15), 1130~1133
- 6 斯力更, 马万彪. 科学通报, 1989, 34(5), 394
- 7 陈伯山. 科学通报, 1990, 35(19), 1514~1515
- 8 Si Ligeng, Ma Wanbiao. Nonlinear Analysis, 1991, 17(8) 787~801
- 9 秦元勋. 常微分方程青年论文专辑, 北京: 科学出版社, 1991: 203~211
- 10 章毅. 数学进展, 1991, 20(4), 488~494

(内蒙古师范大学斯力更教授、马万彪副教授撰)

李雅普诺夫函数的构造 construction of Lyapunov functions

运动系统的稳定性研究, 是自然科学和工程技术中很受人们关心的问题. 古典的例子, 是太阳系的稳定性及旋转流体所构成的星球稳定性等等. 近年来, 运动稳定性理论在世界各国都引起极大的兴趣. 因此, 由李雅普诺夫(Ляпунов, 即 Lyapunov) 在 19 世纪 90 年代所开创的理论, 在物理科学和工程技术的各个领域, 都获得了广泛的应用.

A. M. Ляпунов 在他于 1892 年发表的《运动稳定性的一般问题》论文中, 提出了处理稳定性问题的两种方法. 其中第 2 种方法(有时又称李雅普诺夫直接法), 不需要去寻求运动方程的特殊解, 而是构造一族曲面(即构造李雅普诺夫函数), 用它们来刻画系统的积分曲线的动向, 以解决平衡点的稳定性问题. 但是 Lyapunov 函数的作用, 决不仅限于对稳定性或不稳定性事实的建立. Lyapunov 函数方法还是研究自动调节系统的最有效方法之

一。对具体的非线性自动调节系统而言,适当地作出李雅普诺夫函数,就能解决一系列有重大实际意义的问题。例如可以给出调节量变化的估计、调节质量的估计、调节时间的估计等等。前苏联 A. M. Леров 和 А. И. Лурье 在这方面做了大量的工作。利用李雅普诺夫函数可以估计经常作用下扰动的的影响,可以解决大范围稳定性问题。

从 20 世纪 60 年代开始, Lyapunov 函数方法已逐渐成为研究非线性振荡理论的一种重要有力工具。由于在电系统中电振荡和通讯工程相关,振荡被用来达到通讯的目的,所以非线性振荡理论在电讯工程中内容最丰富,其中许多所处理的对象,关系到非线性回路中的振荡,它们在数学上就表示为非线性常微分方程,而周期解的稳定性则是其中心问题。日本吉泽太郎从 1954 年到 1959 年建立了解的有界性与 Lyapunov 函数之间的联系,从而为研究非线性周期系统的周期解之存在性奠定了基础。此外,在构造 Poincaré—Bendixson 环域的外境界线时,应用 Lyapunov 函数方法,有时会比用传统定性方法要简洁得多。所以李雅普诺夫稳定性理论中的一个核心问题,就是李雅普诺夫函数构造问题。

长期以来尽管人们作了不少的努力,但直到目前为止,对于一般非线性系统,如何构造其 Lyapunov 函数的通用有效的方法还是没有。虽然如此,针对实际中出现的各种非线性系统,通过定性分析,然后根据实际情况构造出恰当的李雅普诺夫函数,就这一点而言,还是取得了极其丰硕的成果。因此在探索非线性系统的 Lyapunov 函数构造的一般方法过程中,系统地总结现有的 Lyapunov 函数构造的各种方法,从中找出构造 Lyapunov 函数的规律,这对从事常微分方程定性理论的研究是很有必要的,其意义亦是深刻的。

但是,在研究 Lyapunov 函数的一般方法中,对每一个非线性常微分方程组而言,任何预先给定的函数,都可以作为该系统的李雅普诺夫函数。事实上,当要求函数 V 由给定的系统所构成的全导数 $\frac{dV}{dt}$ 为常负时,我们就可写出系统零解稳定性的若干充分条件。如果用这种推理方法,去探讨系统稳定性的充分条件,我们将不可避免地沉溺在很少有价值的、稳定性的、充分条件的讨论中。而这种充分条件,显见它的人为性太大,因此最终导致与系统稳定性的必要条件差得很远,往往是不能反映系统的实质。这是应当引起我们从事稳定性理论研究的同志所注意的。

众所周知,就常系数线性系统而言,它的李雅普诺夫函数(一般指二次型)构造的原理早就为 A. M. 李雅普诺夫本人所解决。但是针对具体的 n 阶常系数线性系统

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

当它的特征方程 $|a_{ij} - \lambda \delta_{ij}| = 0 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$ 的所有根都具有负实部时,即 $\operatorname{Re} \lambda < 0 \quad (i=1, 2, \dots, n)$ 。

怎样通过系数 a_{ij} , 把我们所要求的李雅普诺夫函数用简明和简洁的形式写出来? 尽管在 $n=2$ 时,这一工作已由 И. Г. Малкин (马尔金) 在 1954 年给出。可是对一般 n 维的情形,直到 1959 年才由蒙德林给出。И. А. БарБашин (巴尔巴辛) 关于 n 阶常系数线性方程组的李雅普诺夫函数公式,虽然概括了蒙德林的结果,但是他在 1968 年才在前苏联微分方程期刊上发表。李森林就分离变量下的非线性系统的全局稳定性,构造了一个很有意义的 Lyapunov 函数。当系统是二维时, Lyapunov 函数就是用 4 段直线拼成的封闭曲线族。

对于一般可分离变量的二阶非线性系统全局稳定性之 Lyapunov 函数研究,不论国外还是国内都作了不少研究。由于在此种情况下,毕竟有平面定性理论的工具可以利用,有物理力学的规律可以遵循,所以研究成果较丰富,基本上处于完善的阶段。事实上,经验也告诉我们,最成功的李雅普诺夫函数,可以在给出系统的物理解释时得到。特别是当被研究的动力系统,有典型的

物理模型时,李雅普诺夫函数可以被作出。因此,这也是二维非线性系统全局稳定性的李雅普诺夫函数构造之文献特别多的原因之一。至于三阶情形的 Lyapunov 函数的构造问题,情况就复杂多了。虽然普里斯(B. A. Плисе)早在 1958 年进行过专题研究,但收效甚微。直到巴尔巴辛的李雅普诺夫函数公式给出后,对于三阶非线性系统全局稳定性的研究,才可以说有了一定的起色。E. A. БарБашин 本人针对一类特殊的三阶非线性方程,利用他的关于三阶常系数线性系统所导出的 Lyapunov 函数公式构造了一个简洁又显明的 Lyapunov 函数。这个函数几乎在 70 年代后半期国际上出版的有关稳定性理论专著中都有引用。同样针对一般的三阶非线性方程,通过寻求方程

$$\ddot{x} + a\dot{x} + b\dot{x} + cx = 0$$

各种可能形式的 Lyapunov 函数,然后采用类比方法,王联等找到了一系列简洁有意义的 Lyapunov 函数,不仅统一地解决了 Kasprzyk 在 1972 年提出的 3 个非线性三阶方程的全局稳定性问题;而且根据这些三阶非线性系统的 Lyapunov 函数,解决了锁相技术中出现的、具有正切鉴相特性的、三阶环路方程的全局稳定性结构问题。从而为这种高阶环路不会出现失锁点和不会出现假锁的现象找到了理论根据。这种寻求非线性系统的 Lyapunov 函数的方法之特点,就是构造 Lyapunov 函数的理论是充分的。针对某一类非线性函数而言,用类比法构造 Lyapunov 函数的过程中,对非线性函数所附加的条件不仅仅是保证稳定性足够,而且一旦此非线性函数转变为线性函数时,那么这些条件对于保证稳定性来说,也是必要的。

此外,在变系数线性系统的稳定性研究中, Lyapunov 函数的构造问题,至今还是很难进行。对于一般非自治、非线性系统的 Lyapunov 函数构造,更是困难重重。1973 年王嘉秋在研究缓变系统的稳定性时,首先发现可以用常系数线性系统的 Lyapunov 函数公式来解决缓变线性系统的稳定性问题。从而为工程控制论中采用的冻结系数法提供了理论根据。1976 年秦元勋、王联、王嘉秋、胡文瑞在研究天体物理星云结构星系密度波理论中,遇到了一个非线性、非自治的二阶常微分方程组,通过定性分析,采用比较向量场的方法,构造了一个极其恰当的 Lyapunov 函数,从而解决了密度波在共转区的不稳定性问题。

李雅普诺夫函数的构造已发展成为今天常微分方程理论中的一个重要研究课题。正是由于它具有明显的几何直观和简明的分析技巧,所以易于为广大的实际工作者和常微分方程理论工作者所掌握。因此这个方法不仅在电学、控制工程、现代物理等许多科学技术领域中获得广泛地应用,而且在常微分方程学科理论的研究中也将会得到更进一步的发展。随着近代电子计算技术的蓬勃发展,生态平衡生物数学的兴起,常差分方程(描述离散时间系统)已经成为一个重要的且有用的数学模型。无疑上述 Lyapunov 函数方法将是差分方程解序列的全局定性结构研究的一个有力工具。这将为 Lyapunov 函数构造这个课题的研究开创了一个广阔的前景与新的研究领域。再则泛函微分方程是目前国内外受人们非常重视、且又很热门的学科,对它的定性研究是很不成熟,特别是对它的稳定性研究,要能得到实质性的成果,还有赖于 Lyapunov 泛函数的构造这个课题的研究。无疑这将是 Lyapunov 第 2 方法的又一个广阔的研究领域。应当引起我们的重视与关注。

参考文献

- 1 秦元勋,王嘉秋,王联. 运动稳定性理论与应用. 北京: 科学出版社, 1981
- 2 王联,王嘉秋. 非线性常微分方程定性分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987
- 3 李森林,温立志. 泛函微分方程. 长沙: 湖南科技出版社, 1987
- 4 秦元勋,刘永清,王联,郑祖麻. 带有时滞的动力系统的运动稳定性. 北京: 科学出版社, 1989
- 5 王联,王嘉秋. 常差分方程. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1991

(中国科学院数学研究所王联研究员撰)

椭圆型方程弱解的有界性 boundedness of weak so-

lutions of elliptic equations 椭圆型方程最简单的例子是调和方程,它的解称调和函数。在所有满足同样边值的可微函数中,调和函数使狄利希莱(Dirichlet)积分取最小值。这个事实称狄利希莱原理。根据它,求解给定边值的调和函数可以归结为求狄利希莱积分的极小。19世纪50年代黎曼(B. Riemann)用这样的方法第一个证明调和函数边值问题解的存在性。但是黎曼的方法受到与他同时代的魏尔斯特拉斯(K. Weierstrass)的批评,因为只能讲狄利希莱积分有最大下界而不能断言达到最小值。为了解决狄利希莱原理存在的矛盾,需要把解的概念加以拓广并在相应的空间中求得它。对一个主部为散度型的二阶椭圆型方程,用有紧支集的可微函数去乘,然后在所考虑的区域上求积分,经过分部积分之后即得一个积分恒等式,它只含有未知解的一阶偏导数。一个函数能使积分恒等式满足,就称为原来方程的弱(广义)解。由于弱解要求的条件比古典解少,可以较易和在较弱条件下求得它。当弱解有足够的可微性时它就是古典解。弱解概念的引入,特别是结合索波列夫(С. Л. Соболев)空间理论和泛函分析方法,使得对拟线性椭圆型方程理论的研究自20世纪50年代后期以来有了质的飞跃和蓬勃的发展。

20世纪30年代,经典的肖德(J. Schauder)定理解决了二阶线性椭圆型方程狄利希莱问题古典解的可解性问题。对于一个拟线性二阶椭圆型方程,如能获得未知解自身及其一阶梯度的赫德(Holder)系数的估计,那么狄利希莱问题的存在性也就得到解决。但只有二维情形为尼伦伯格(L. Nirenberg)于1953年成功解决,空间维数 n 大于2的情形则有本质的困难。1956年柯德斯(H. O. Cordes)只在对方程最高项系数矩阵的特征值加了限制(这种限制随着维数的增加越来越大)才作出了解自身和解梯度的赫德系数估计。

1957年笛乔治(E. de Giorgi)和纳什(J. Nash)几乎同时而又独立地对高维情形,证明只有主部的可测系数散度型二阶线性齐次椭圆型方程弱解的赫德连续性,1960年莫塞尔(J. Moser)又给出了另外的证明。此后,一般形状的可测系数散度型二阶线性椭圆型方程弱解的赫德连续性、可微性以及解的其它性质都得到解决。对弱解的性质有了很好的认识,决定弱解的性质的是方程的结构条件和自由项的可积性属性。当自由项的可积性超过某个确定的幂次时,弱解是有界的并非赫德连续的,低于这个幂次时弱解是无界的,仅可能有某种确定的可积性,刚刚达到这个幂次时,弱解属于适当的奥尔里奇(W. Orlicz)空间。弱解的进一步可微性取决于方程系数和自由项条件的改善。对这些发展作出贡献的有斯丹帕奇(G. Stampacchia)、摩勒(C. B. Morrey)、拉迪任斯卡娅(O. A. Ладыженская)和乌拉利采娃(H. Н. Уралова)等。

拉迪任斯卡娅和乌拉利采娃从60年代初即开始利用弱解研究二阶拟线性椭圆型方程,在解有界的前提下得到弱解的赫德连续性和进一步的可微性,并进而解决古典解的存在性。她们的考虑尽管结构条件很广泛,却只限于非蜕化情形。1964年余简(J. Serrin)第一次对主部为散度型的二阶拟线性蜕化椭圆型方程证明弱解(属于 W_p^1 空间, $p > 1$)的有界性和赫德连续性。余简的结构条件是线性方程所满足的结构条件的最自然的推广,但还不是最一般的。此后拉迪任斯卡娅和乌拉利采娃考虑了散度型二阶蜕化椭圆型方程更一般的结构条件的情形。

如所已知,当 $1 < p < n$, W_p^1 空间中的函数只是 p^* 次可积, $p^* = np/(n-p)$ 是索波列夫嵌入定理所允许的极限指数。因此当在 W_p^1 空间中寻求解时,方程的非线性项关于未知解 u 的增长阶受到制约,不应超过某个临界指数;同时非线性项关于解梯度的增长阶 γ 不应超过 p 。实际上为使定义弱解的积分恒等式有意义, γ 不应超过 $p(1-1/p^*)$, $p(1-1/p^*) < \gamma \leq p$ 的情形称为自然增长情形,在这种情形为使定义弱解的积分有意义,需要增加未知解的可积性限制。拉迪任斯卡娅和乌拉利采娃限于方程的

非线性项关于解的增长阶严格低于临界指数、关于解梯度的增长阶 $\gamma < p(1-1/p^*)$,证明了弱解的有界性、赫德连续性和存在性(对存在性的证明还要增加单调性条件的限制)。她们也考虑自然增长的情形,在 $\gamma = p$ 的情形要求未知解为有界(否则不能保证小范围内解的唯一性定理成立)并证明弱解的赫德连续性;在 $\gamma = p - \epsilon$ 的情形由于解的有界性解决不了,不得不增加 $p = n$ 的限制(在这种情形解 u 可以任意次可积),而这是不必要的。自始至终弱解的有界性是伴随弱解的赫德连续性一起得到研究的。有界性的解决乃是证明解赫德连续性必需解决的一步而且是极关键的一步,此外,弱解的有界性特别是解最大模的估计对于证明弱解的存在性也是重要的。

80年代以来,应用临界点理论使达到临界增长的欧拉(Euler)型拟线性椭圆型方程弱解的存在性取得重要进展,人们更渴求解决弱解的正则性。1989年朱熹平和杨健夫对达到临界增长指数的散度型二阶拟线性椭圆型方程作出弱解的局部有界性以及进一步的正则性。他们的考虑只限于非线性项关于解梯度的增长阶 $\gamma = p(1-1/p^*)$ 的情形。同年梁鉴廷在允许方程非线性项关于未知解 u 达到临界增长、关于解梯度的增长阶满足自然增长条件: $p(1-1/p^*) < \gamma < p$,在增加弱解的适当可积性的前提下证明了弱解的整体有界性,此后于1991年又证明了弱解的局部有界性。尽管他们所用证明方法不同,但都充分利用了勒贝格(Lebesgue)积分的绝对连续性来克服由于非线性项关于 u 达到临界增长所带来的困难。

和椭圆型方程密切有关的是变分泛函的极小问题,后者和希尔伯特(D. Hilbert)第20问题相联系。对于变分泛函,其被积函数关于 u 的梯度的增长阶是 p 时,最恰当的是在 W_p^1 空间中寻求泛函的极小。为了得到正则的解(指使泛函取极小的函数)关键是证明解的有界性。只要证明了解有界,那么无论解的赫德连续性或进一步的可微性都可以解决。至多在必要时增加关于被积函数的限制条件。无论是拉迪任斯卡娅和乌拉利采娃或贾昆塔(M. Giaquinta)和宙斯提(E. Giusti)都只能在被积函数关于 u 的增长阶严格低于索波列夫极限指数的条件下证明极小的有界。1991年在允许被积函数关于 u 的增长阶达到索波列夫极限指数的条件下,梁鉴廷对不可微泛函的单调障碍问题证明极小函数的有界性,已包括解决上述泛函极小有界性的遗留问题。

至于对散度型主部的二阶拟线性椭圆组,弱解的有界性研究仍然很不充分,技术上的困难也很大,一些对单个方程很有效的方法在方程组的情形不再适用。拉迪任斯卡娅和乌拉利采娃在60年代为了研究非散度型的一般拟线性椭圆型方程创立了对角型椭圆组的理论,并对属于 W_2^1 空间的弱解(向量函数)证明了有界性和赫德连续性,但是她们对未知解增加了不必要的可积性限制。1982年迈埃(M. Meier)对满足余简结构条件的散度型主部的二阶拟线性椭圆组(弱解属于 W_p^1 空间, $p > 1$)证明了弱解的有界性,包括局部有界和整体有界。但迈埃的条件迄今仍不太清楚什么样的方程组可以满足,当方程组是对角型椭圆组时,迈埃的条件是满足的。1991年梁鉴廷和鲁文文限于 $p \geq 2$ 对散度型主部的对角型椭圆组(弱解属于 W_p^1 空间)证明了弱解的整体有界性,允许方程组的非线性项关于未知解的模的增长达到临界指数,同时允许关于未知解梯度的模的增长阶 γ 满足条件: $p-1 \leq \gamma < p$ 。和单个方程的情形相比,无论对结构系数所要求的可积性或未知解所要求的可积性(在自然增长条件的情形)都要强一些。

参考文献

- 1 Morrey C B. Multiple integrals in the calculus of variations. New York Inc: Springer-Verlag, 1966, 1~506
- 2 Gilbarg D, Trudinger N S. Elliptic partial differential equations of second order. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, Tokyo, 1983, 1~505
- 3 Giaquinta M, et al. Invent Math, 1983, 72: 285~298
- 4 拉迪任斯卡娅 O A, 等. 线性和拟线性椭圆型方程. 严子谦等

译.北京,科学出版社,1987.1~664

- 5 朱熹平.中国科学 A 辑,1988,(3):225~237
- 6 朱熹平,等.系统科学与数学,1989,9(1):47~52
- 7 梁鉴廷.阴山学刊(自然科学版),1989,(1):6~12
- 8 梁鉴廷.阴山学刊(自然科学版),1991,(2):1~7
- 9 梁鉴廷,等.数学研究与评论,1991,11(4):589~594

(中山大学梁鉴廷教授撰)

超双曲型方程定性研究 the qualitative researches of the ultrahyperbolic equation 1923年,哈达玛(J. Hadmard)提出:“超双曲型方程似乎不具有任何正确地提出问题,即不具有与微分方程一起给出辅助的边界条件以保证解的唯一性和存在性”。1946年,彼得罗夫斯基(I. G. Petrowsky)作了类似的陈述:“对于相当大一类偏微分方程,我们不知道任何正确提出的问题,超双曲型方程似乎就是其中之一”。1960年,欧文斯(O. G. Owens)认为:“哈达玛-彼得罗夫斯基断言,主要适用于非特征问题”。由此可见,超双曲型方程问题的提法,即对超双曲型方程支柱上的数据该怎样取,问题才变为可能,支柱如何选择,定解问题才为适定?应该是超双曲型方程研究的中心课题,即超双曲型方程定性研究的内容。

首先引人注意的是阿斯盖生(L. Asgeirsson)在20世纪30年代的工作,他主要证明超双曲型方程

$$F(\mu) = \sum_{i=1}^m (\frac{\partial^2 \mu}{\partial x_i^2} - \frac{\partial^2 \mu}{\partial y_i^2}) = 0, (m \geq 2)$$

的解的中量性质:

设 R_{2m} 是 $2m$ 维空间内一闭单联域, μ 是 $F(\mu) = 0$ 在 R_{2m} 内的正规解, $(x_0^i, \dots, x_m^i; y_0^i, \dots, y_m^i)$ 是 R_{2m} 内任一内点, t_0 是由不等式

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - x_0^i)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - y_0^i)^2} \leq t_0$$

所限定的点组成的域整个在 R_{2m} 内的正数,则当 ρ, σ 是适合不等式, $\rho + \sigma < t_0$ 的任到正数时, μ 在 $\sum_{i=1}^m (x_i - x_0^i)^2 = \rho^2, \sum_{i=1}^m (y_i - y_0^i)^2 = \sigma^2$ 上的中量,等于它在 $\sum_{i=1}^m (x_i - x_0^i)^2 = \sigma^2, \sum_{i=1}^m (y_i - y_0^i)^2 = \rho^2$ 上的中量,即中量

$$M(\rho, \sigma) = \int_{\Omega_1} \int_{\Omega_2} \mu(x^0 + \alpha\rho, y^0 + \beta\sigma) d\Omega_\alpha d\Omega_\beta,$$

$$\Omega_1: \sum_{i=1}^m \alpha_i^2 = 1, \Omega_2: \sum_{i=1}^m \beta_i^2 = 1$$

是 ρ, σ 的对称函数。

此即著名的阿斯盖生定理,这个定理的重要性不仅在于可以用它来讨论波动方程的柯西(A. L. Cauchy)问题、特征问题以及超双曲型方程的特征问题等一系列问题的适定性,而且可以用它来建立超双曲型方程的解的某种奇特的拓展性:

对于一般超双曲型方程

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 u}{\partial y_i^2} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

假定在域

$$\sum_{i=1}^m (y_i - y_0^i)^2 \leq a^2, \sum_{i=1}^m (x_i - x_0^i)^2 \leq \epsilon^2$$

给定了初值 $\mu(y, x, 0)$, 那末,它在区域

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - y_0^i)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - x_0^i)^2} \leq a$$

上就是已知的,并且解 $\mu(y, x, t)$ 在区域

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - y_0^i)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - x_0^i)^2} + t^2 \leq a$$

上便被唯一确定。

这个解的奇异拓展性的结果有两层意义,一是深刻而统一地说明了某些定解问题不适定的根本原因,如波动方程的柯西问

题(支柱为时向)、位势方程的柯西问题以及超双曲型方程的柯西问题等,再是有推进多实变函数发展的可能性。

20世纪40年代末至60年代,超双曲型方程的研究,主要集中在各种定解问题的提法上,并得到一系列启发性结果。1942年,翁斯(G. Owens)利用里曼(G. F. B. Riemann)方法的推广,对四变元超双曲型方程证明以下事实:解在特征锥顶点的值依赖于被特征锥截出的初始曲面上解的值,以及解的有限次微商的值;并由此显式解可以得到柯西问题初值必需满足的条件。1948年,彼斯尼柯夫(N. S. Piskunov)用分离变量的方法解决了四变元超双曲型方程特征问题的解的存在性与唯一性,1961年,布拉哥森斯基(A. S. Blagoveseenski)利用积分几何的结果及解的中量定理解决了 $2m$ 个变元的这类问题。1962年,欧文斯就四变元非齐次超双曲型方程齐次狄立克雷(P. G. Dirichlet)问题用特征函数与特征值构造级数形式的解,证明了解的存在性与唯一性。

70年代随着微分算子的发展,超双曲算子的研究引人注目。1974年,摩瑞(A. C. Marry)、普劳特(M. H. Protter)研究了超双曲算子的渐近性态与柯西问题。1978年,奥格瓦(H. Ogawa)研究了超双曲不等式的解的能量衰减。1979年,他又对更一般的超双曲型方程的此类问题作了探讨,从而较深刻地了解了超双曲型方程的解在无穷远的性态。

80年代以来,以吴新谋为代表的线性偏微分方程定性研究者认为,所有线性偏微分方程,应该并且可以用基本解来解决。根据这一思想,对超双曲型方程作了系统的探讨。1983年,凌岭从超双曲型方程的基本公式与基本解出发,则有

$$(\Delta)Pf \int_{(V)} [vF(\mu) - \mu F(v)] dv = -Pf \int_{(V)} (v \frac{d\mu}{dn} - u \frac{dv}{dn}) ds,$$

其中 (V) 上的点是适合下列二不等式

$$\sum_{i=1}^m (x_i - x_0^i)^2 \leq r^2, \sum_{i=1}^m (y_i - y_0^i)^2 \leq s^2$$

所代表的点, (S) 为其边界, n 为 (S) 的内法线方向, Pf 为发散积分的有限部分, μ 为超双曲型方程 $F(\mu) = 0$ 的正规解, v 为基本解 Γ^{1-m} , Γ 是两点 $(x, y), (x_0^i, y_0^i)$ 间测地距离的平方。计算 (Δ) 两端发散积分有限部分,定义解的中量 M ,从而给出阿斯盖生定理的新证明。此新证明的意义不仅在于给出了定理证明的全分析过程(过去证明只是综合性的),更重要的是把超双曲型方程的研究纳入哈达玛理论之中,同时指明超双曲型方程的研究,自然应通过基本解,为研究此类方程各种问题,另辟一条途径。在此基础上,提出超双曲型方程广义势解的概念,此广义势解是由基本解乘以正规函数并取发散积分的有限部分构成,同时证明此广义势解是非解析的。1990年,凌岭又通过基本解系统研究了超双曲型方程的解的性质,并证明任意变元超双曲方程狄立克雷问题的解的存在性与唯一性。

超双曲型方程定性研究,是建立偏微分方程定性理论的一个组成部分,很多问题有待研究发掘。主要是:变系数超双曲型方程中量性质的建立、解的奇特拓展性质的研究、利用解的中量性质及解的拓展性质,统一研究各类问题的适定性与不适定性;建立广义势理论与发散积分有限部分方程的反演理论,从而系统研究超双曲型方程的各类边值问题;基本解在研究各种新方程的解的性质与定解问题的提法起着关键作用;研究基本解的构造(高阶)与性质,必有助于定解问题的解决;多复变函数论提出大量超双曲型方程(组),这类问题的研究,既丰富超双曲型方程定性研究的内容,又将促进多复变函数论里曼理论的建立。

参考文献

- 1 Owens Glyun. Math J, 1942, 9, 272~282
- 2 Piskunov N S. Doklady Acad Nauk, SSSR(N. S), 1948, 59: 439~442
- 3 O G Owens. Amer J Math, 1952, 74, 309~316
- 4 吴新谋,等.数学物理方程(第2册).北京:科学出版社, 1959. 44~52, 264~273
- 5 Blagoveseenski A S. Doki SSSR, 1961, 140, 990~993

- 6 Murray A C, Protter M H. Math J, 1974, 75, 24: 115~130
 7 Ogawa H J. Diff equa, 1979, 1: 73~84
 8 凌岭, 等. 数学学报, 1983, 26(1): 108~113
 9 凌岭. 数学学报, 1990, 33(4): 497~504

(西北大学凌岭教授撰)

常微分方程稳定性理论 stability theory of ordinary differential equations 通常称为运动稳定性理论。简称稳定性理论。是常微分方程理论的一个重要分支。主要研究干扰对由常微分方程所描述的系统运动状态的影响。从而建立判断运动的稳定性态的一些准则。由于力学系统和工程技术问题中都要考虑其运动稳定性。因此, 稳定性的研究也是一般力学和应用数学的基本问题。

稳定性理论由 19 世纪末俄国李雅普诺夫(A. M. Ляпунов)开创。李雅普诺夫在《运动稳定性的一般问题》(1892)中给出了常微分方程 $dx/dt=f(t,x)$ 解的稳定性、渐近稳定性及不稳定性定义。通常称之为李雅普诺夫意义下的稳定性。同时提出了研究其稳定性的两种方法。在第 1 种方法中, 提出变系数线性微分方程组的特征数、正规解族和正则系统等概念, 并建立了相应的特征数理论。证明了当一次近似是正则系统且其所有特征数为正时方程零解是渐近稳定的。第 2 种方法的特点是不求出方程的解, 而通过构造一类具有特殊性质的函数 $V(t,x)$ 来判断微分方程解的稳定性态。因此又称为李雅普诺夫直接方法。这类函数 $V(t,x)$ 称为李雅普诺夫函数, 简称 V 函数。李雅普诺夫应用 V 函数方法研究了方程右端一次近似为常系数的非线性系统零解的稳定性, 包括特征方程中具有一个零根或两个零根或一对共轭虚根而其余特征根均具负实部这 3 类临界情形的稳定性。对周期系统也作了类似分析。

20 世纪 50~60 年代, 在美国贝尔曼(R. Bellman)、莱夫谢茨(S. Lefschetz)及拉萨尔(J. P. LaSalle)等的大力介绍和推动下, 稳定理论在世界范围内迅速发展起来。在中国, 则在秦元勋、张学铭、许淞庆等的大力提倡下, 形成一支可观的研究队伍。

叶鲁金(Н. Ц. Еругин)等研究第 1 方法中一次近似系统特征数与稳定性保持问题的关系, 并进一步探讨特征数的性质与计算等。50 年代马尔金(И. Г. Малкин)提出特征数的稳定性问题, 贝洛夫(В. Ф. Былов)等则研究了最大、最小特征数的上、下稳定性和特征数的重合等问题。

对于李雅普诺夫第 2 方法, 切塔也夫(Н. Г. Четков)等研究李雅普诺夫稳定性条件。提出了一致稳定性等概念, 建立了著名的切塔也夫不稳定定理。同时研究了李雅普诺夫稳定性条件的必要性。通过分类并应用微分方程的解构造 V 函数, 基本上解决了各种稳定性定理的逆问题。

关于稳定性定理条件的研究, 除了个别条件的削弱, 例如 dv/dt 定号性的减弱等条件之外, 最有名的是向量李雅普诺夫函数和微分不等式比较方法的引入。60 年代贝尔曼和马特洛索夫(В. М. Матросов)通过向量 V 函数将微分方程稳定性的研究转化为以 V 函数为自变量的另一微分方程的正解的稳定性的研究。

李雅普诺夫定义的稳定性原是局部性质的概念, 在实际应用中往往要考虑全相空间的情形。50 年代初巴尔巴辛(Е. А. Барбащин)和克拉索夫斯基(Н. Н. Красовский)引进了无限大函数的概念把李雅普诺夫定理推广到全空间, 建立了全局稳定性理论。其结果后来广泛应用于自动调节系统、电力系统和生态系统中。

早在 60 年代, 拉萨尔便应用拓补动力系统的极限集概念建立了“不变性原理”。用李雅普诺夫函数刻画微分方程解的极限集位置。70 年代以来, 不变性原理用于全局稳定性的各种研究。从力学问题中还提出了部分变元稳定性概念。通过对 V 函数条件的改进也得到了部分变元稳定性的有关定理。

40 年代末, 控制理论的发展提出了一类自动调节系统(称为 Лурье 系统)的绝对稳定性问题。50~60 年代对这类问题作了细

致的研究, 为此而发展了 V 函数方法和波波夫(Попов)频率法则, 并研究了其相互联系。反映了古典控制论的频率方法和现代控制论的状态空间方法的结合。

70 年代以来, 稳定性理论得到了进一步的发展。除了 50~60 年代发展起来的控制系统的绝对稳定性、临界情形稳定性、向量李雅普诺夫函数和比较方法等继续得到发展外, 在科学技术发展的推动下还提出了若干新的问题和方法。同时, 稳定性理论与方法, 已广泛地渗透到其他学科中去。

60 年代初, 秦元勋、王慕秋、王联即已提出将大系统的稳定性问题分解为子系统的稳定性。刘永清亦曾应用 V 函数的分解来处理大系统的稳定性。后来贝利(F. N. Bailey)应用向量李雅普诺夫函数研究大系统。70 年代以来, 大系统的稳定性研究得到了迅速发展。在电力系统暂态稳定性研究中得到实际应用。

生态种群模型是一种仅当变量为非负时才有意义的特殊类型微分方程, 可以通过引入特殊形式的 V 函数来研究其生态系统的稳定性。化学、生物、物理等学科的发展也提出了众多的各类系统的稳定性问题。

技术研究要求研究的干扰范围和时间间隔, 一些实际系统可能是不可微或不连续的, 对其扰动影响的研究提出了有限时间区间稳定性、经常扰动作用下稳定性、区间稳定性及不连续系统稳定性等各种技术稳定性问题。

李雅普诺夫方法已不限于研究稳定性问题, 也可应用于研究解的有界性、振动性等。吉泽太郎(T. Yoshizawa)曾深入研究概周期微分方程的稳定性、有界性。同时, 利用李雅普诺夫函数研究周期解、概周期解的存在性。

李雅普诺夫稳定性理论与方法已渗透到各类学科中去。对动力系统、泛函微分方程、随机微分方程、微分积分方程、含脉冲系统和偏微分方程建立了相应的稳定性理论。李雅普诺夫特征数在混沌(Chaos)和分形(Fractals)研究中也起着重要作用。

50 年代, 儒波夫(В. И. Зубов)已将常微分方程稳定性的结果转移到距离空间的流上。后来, 逐渐形成了以李雅普诺夫函数为主要工具的动力系统稳定性理论。60 年代主要研究动力系统的紧不变集和闭不变集的稳定性。70 年代以来, 非紧集、“过程”及一般系统的稳定性理论得到迅速发展。李雅普诺夫函数还应用于流形上动力系统的孤立块理论研究。

泛函微分方程从理论建立的开始便同时研究其稳定性问题。40~50 年代主要研究差分微分方程稳定性。60 年代全面开展有滞后型泛函微分方程稳定性的研究。70~80 年代则主要研究无限时滞系统和中立型泛函微分方程稳定性。其主要工具是李雅普诺夫泛函和拉什密辛(Б. С. Рагулин)型 V 函数。

运动稳定性的含义一般不局限于常微分方程所描述的系统, 也不受限于李雅普诺夫稳定性理论。科学技术特别是航天技术的发展促进了力学系统稳定性的研究。提出并发展了有关哈密顿系统稳定性、卫星姿态稳定性、充液腔体旋转运动稳定性、陀螺力学系统稳定性、粒子和质点运动稳定性、碰撞运动稳定性以及流体稳定性等一系列力学系统稳定性问题。

今后, 稳定性理论将继续在新技术的应用中发挥作用, 并在控制理论、偏微分方程、微分积分方程等学科中得到发展。同时, 动力系统理论、非线性科学的发展和电子计算机的应用将为稳定性理论的发展开拓新的方向。

参考文献

- 1 Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости Движения, Гостехиздат, 1950
- 2 Красовский Н. Н. Некоторые Задачи теории устойчивости Движения, Физматгиз, Москва, 1959
- 3 许淞庆. 常微分方程稳定性理论. 上海: 上海科学技术出版社, 1962
- 4 Lefschetz S. Stability of nonlinear control systems. New York: Academic Press, 1964
- 5 Yoshizawa T. Stability theory by Lyapunov's second

method. Tokyo, Publ Math Soc. Japan, 1966; 9
 6 Барбашин Е. А. Наука, Москва, 1970
 7 LaSalle J. P. Soc for Industrial and Appl Math, 1976
 8 秦元勋, 王嘉秋, 王联. 运动稳定性理论与应用. 北京: 科学出版社, 1981
 9 Lakshmikantham V, et al. Stability analysis of nonlinear systems. New York, Marcel Dekker, 1989
 10 Шестаков А. А. Наука, 1990

(中山大学朱思铭教授撰)

可近集与车贝雪夫集 proximal set and Chebyshev set

逼近论最早是 1854 年车贝雪夫考虑连续函数用 n 次多项式最佳一致逼近。20 世纪 20~30 年代经过 F. Riesz, Kirchner 和 Borel 建立了存在性、唯一性、包含 0 特征性定理, 及 J. W. Young, V. Poussin 和 Haar 等人的交错性特征定理, 确立了 Haar 条件。此时, 一方面平均逼近有著名的 Jackson 唯一性定理, 60 年代起开始统一到考虑赋范空间(或度量空间)一点到某个集 G 的最近距离问题, 开始了泛函逼近论, 产生了可(逼)近集(即存在性集)、车贝雪夫集(即存在唯一性集)两种重要概念。除紧集外, Riesz 的有限维空间本征首先提供一类重要可逼近集。R. C. James 到 1972 完全解决了自反空间的自反性是它所定义连续线性泛函都有极大元, 从而它的闭子空间都是可近集, 此期间 1960 年 R. R. Phelps 的卓越工作首创了唯一性的对偶理论。X 的闭子空间 G 具(U)性等价于 X^* 中 G^\perp 是车氏集, 而 G 可近且具(U)性则推 G 是车氏集, 但一般非等价。V. Indumathi 1987 年沿对偶思想获得 $f \in G^\perp$ 有极大元与 G 可近性的种种关系。对超平面说, 它可能是不可近的, 其例子 I. Singer, A. L. Garkavi 都发现过, N. V. Efimov 1961 年引入近紧性及闭圆紧性, 二者是介于紧性与可近性的, 1964 年 Singer 指出可近未必近紧, 近紧未必圆紧。近紧性深入研究见潘文熙 1989 和 1991 年的文章, 一向难回答近紧集本征是什么, 于 1975 年 Koshev 获知一致凸空间中, G 近紧等价于 G 可近, 度量投影 P_G 紧像且 l, s, c , 超平面 $\psi^{-1}(c) \dots$ 的可近性等价于 ψ 有极大元。但此命题推到有限余维 $m \geq 2$ 情形是否成立? 1982 年 F. Deutsch 指出 ψ_1, \dots, ψ_m 极大元存在仅是必要而非充分, 1985 年 L. P. Vlasov 找到有限余维 G 可近性的等价条件, 乃 $U_x + G$ 是闭的 (U_x —单位球), 也等价于 $U_x \cap G$ 闭。对闭凸集, 则自反空间固然保证它可近性, 但非自反空间仍是难题。实例空间 $C(Q), l^1, L^\infty(\Omega)$ 等可近子空间研究以 70 年代 Garkavi, Phelps 与 Singer 1974 年工作为代表, 还有 R. Holmes—B. Kripke, J. Blatter, 1983 年 R. Khalil 与 W. Deeb 研究了 L_p 中可近集, 对 X 中取值的空间 $C(Q, X), L^1(\mu, X)$ 最基本问题是提升性即子空间 Y 和 X 中可近是否导致 $L_p(\mu, Y)$ 在 $L_p(\mu, X)$ 中可近, $K-D$ 。二人已着手研究 $L^1(\mu, Y)$, 对于 $C(Q, Y)$ A. Kamel 于 1986 年找到了例子 $C(Q, Y)$ 于 $C(Q, X)$ 中不可近, 且 X 有限维, Kamel 的系列工作是与算子空间逼近问题联系进行的。此外, 1988 年新恒利研究了 $L_\infty(\mu, Y)$ 。

可近性一个难研究问题是传递性, 一般并不具备。1971 年 W. Pollul 首先用可近传递性表征自反性, 1987 年 Indumathi 引入 Pollul 空间 $P(n)$, 即 X 合乎 $\forall G$ 于 M 可近, M 于 X 可近, 且 $dim X/G \leq n$ 则 G 于 X 可近, 表明一定良好传递性。例如 C_0 , 遗憾的是无限维 $C(Q)$ 与 $L^1(\mu)$ 都不是 $P(2)$ 空间, 这方面工作可说是 James 工作的深化。

人们关注另一问题是给两个可近集 F, G , 何时才使 $F+G$ 是可近集? Repess—Cheney 1982 年用了 G 中一个弱紧性条件推 $F+G$ 可近。M. Feder 1987 年首先在 C_0 中找到反例, 但 $F+G$ 闭。正命题: B 空间中子空间 F, G 一个可近。一个自反, $F+G$ 闭, $F \cap G$ 有限维, 则 $F+G$ 可近, P. K. Lin 1989 年肯定了 $F \cap G$ 有限维条件可不需要。对 $F \cup G, F \cap G$ 可近性等远远未有人研究。对 $C(Q), Q=S \times T, S, T$ 紧, 1951 年 Diliberto—Strauss 已确立 $C(S)+C(T)$ 在 $C(S \times T)$ 中是可近集。这问题实即多元函数用较

少元函数的组合最佳逼近存在性问题。进一步问 $G \subset C(S), H \subset C(T)$ 何时闭集 $G+H$ 在 $C(S \times T)$ 可近? 一般地 G. Aumann 1959 年已造出反例。而 Repess, Cheney 1980 年研究正面结果是: 当 G, H 是有限维子空间; 到 G , 到 H 的度量投影一个连续, 一个 Lip 的, 则 $G \otimes C(T) + C(S) \otimes H$ 是 $C(S \times T)$ 中可近的余子空间。

与可近性研究同时, 尚有两个问题, 即双偶可近性(p. b. 性, Prox bid)及极不可近性。前者即 X 在 X^{**} 中可近性。最早 1960 年 J. Blatter 的长文章论述 $C(Q), C_0, L^1(\mu)$ (μ 正测度) 都具 p. b. 性。1986 年 K. R. Davidson 企图证明 PAP(投影逼近性)空间 X 可以改等价范数使 X 于 X^{**} 极不可近。遗憾的是他那通过 C_0 为线索的证明被王嘉三和王建华 1991 年的文章指出错误, 而且举出了反例。不过改范数的研究日渐重视。

车氏集方面, 1960 年 Phelps 的对偶理论已涉及到。而实例空间, 如 $C(Q), L^1$ 判定其中 G 车氏性有 Singer 1970 年的书最详尽。分 G 有限维、有限余维、及一般子空间逐一详尽, 但显得琐碎。还有 Garkavi 工作, 若结合空间条件, 自反凸空间中任意闭凸集是车氏集且此性质表征该类空间。利用对偶, 如光滑空间表征, 是比如 $1 \leq n \leq dim X - 1, n$ 维任意的每个子空间具(U)性。Singer 推广到 $(k+1)$ 严凸性则相应于 k 半车氏子空间(特别 $k=0$), O. Kro6 1984 年解决了 $C^r[a, b]$ 中 n 维 G 为车氏集的本征问题。在研究有限维 G 为车氏集时, 1970 年 Ault, Deutsch, Morris 和 Olson 引入内插子空间, 它一定是车氏的, 甚至强车氏的, 而在 $C(Q)$ 而言, 正好是 Haar 条件。

车氏集一个根底问题是各种空间中, 各种结构的车氏子空间(不平凡)是否存在? 1956 年著名的 J. Maihuber 定理指出 $C(Q)$ 中存在维数 $n \geq 2$ 的车氏子空间必须 Q 同胚于圆周一子集。所以 $C([a, b] \times [c, d])$ 中 $n \geq 2$ 维 Haar 组就不存在。沿着 M 定理有 1973 年 Henderson, Ummel 考虑 Q 局紧情形。1982 年 Brown, 1985 年 Mc Cullough, Wulbert 给出了 M 定理的新证明。1964 年 Makovoz 研究 $C(Q)$ 中余维 n 车氏集存在条件, Phelps 与 Garkavi 研究 $L^1(\mu)$ 空间, 竟在很常情况下, 比如无原子, 则 n 维车氏子空间不存在, 除非有 $\geq n$ 个原子。余维 n 存在性恰好条件相同。就 $L^\infty(\mu)$ 而言, n 维车氏子空间总是不存在, 余维 m 都涉及有无 $\geq m$ 个原子。Singer 1969 和 1974 年建立两个例子, C_0 中的有限项以外为 0 的数列全体 X_0 , 则 X_0 中不存在任何车氏子空间, 但可分空间反例无人建立, 存在众多未解决的问题。B. 空间是否必存在余维 m 的半车氏子空间? 自反空间必存在余维 $m \geq 2$ 的车氏或可近子空间吗? (自反空间必存在车氏超平面)。自反空间必存在一维车氏子空间吗? (若一维存在, 2, 3, ... 维必亦然) 1970 年 Ewald, Larman 和 Roger 指出若 XN 维, 则低维车氏子空间必存在。虽然通过 Krein—Milman 端点公式可推 B. 空间必存在半车氏闭超平面, 但车氏超平面仍未解决。又空间什么本征, 使有限维(或有限余维)车氏子空间存在? 就 $C[a, b]$ 中, 是否存在无限维又是无限余维的车氏子空间亦未解决。1984 年 Sastry 和 Srinivasan 研究存在的车氏超平面相应的 ψ 有多少, 是否于 S_p 中稠密。

著名车氏集凸性问题, 至今未彻底解决。最早 1934 年 Bunt 及 Motzkin 证出欧氏空间中车氏集必须是闭凸集, 1961 年 Klee 提出猜想 Hilbert 空间中车氏集可能必须是凸的或至少是太阳集, Vlasov 1961 年回答了 B. 空间中近紧车氏集必是太阳集, 因而有限维空间中车氏集必是太阳集。但仍未解决是否凸集, 但假设了光滑空间则凸性肯定。1976 年 C. B. Dunham 找到了 $C[0, 1]$ 中车氏集非太阳集。1987 年 G. Johnson 找到了某实内积空间(非完备)中一个车氏集而非太阳集, 故此, 基本上否定了 Klee 猜想, 但 Hilbert 空间如何, 还未完全解决。此外, Vlasov 也获知光滑空间中的可近集, 则太阳集等价于凸集。又 1958 年 Efimov 和 Stechkin 最早曾证明光滑空间中近紧车氏集是凸的, 故此其全面推进 Vlasov 的工作。

Efimov 和 Stechkin (1963) 首先研究殆(almost)车氏集 G ,

即 X 到 G 有唯一最佳逼近, 这样 x 全体 U_G 是残集. 类似定义殆可近集. 对闭集(不设凸)逼近打开了研究的大门. 他们(及 1964 年 Garkavi) 首先证明一致凸空间中凡闭集是殆车贝的, 而(LUR)空间中闭集 G , 则 U_G 是稠密集. 1977 年 K. C. Lau 的一系列工作改进到(LUR)兼自反空间中闭集是殆车贝的, 而自反兼(H)空间中闭集是殆可近的. 1976 年 M. Edelstein 找到自反兼严凸空间中某闭集 G 却不是殆车贝的. 改设(LUR)同样被否定. 60 年代 Garkavi 考虑 $C(Q)$ 中的殆车贝集. 1984 年 M. Bartele-D. Schmidt 找到 $C(Q)$ 中有限维子空间是殆车贝集的等价条件, 用 P_G Lip 性表征之. 1990 年 Schmidt 研究了 $C(Q)$ 中 L^1 范数最佳逼近的殆车贝集. 而“殆”方面工作已与 P_G 连续选, 强唯一性等发生了联系.

参考文献

- 1 Singer I. Best Approximation in Normed Linear Spaces by Elements of Linear Subspaces, 1970
- 2 Blatter J. Mem. AMS, 1972, 120, 1~121
- 3 Singer I. The Theory of Best Approximation and Functional Analysis, SIAM, Philadelphia, 1974
- 4 Deutsch F. JAT, 1982, 36, 226~236
- 5 潘文照. 全国第 3 届逼近论会议论文集, 南京大学版, 1983, 117~129
- 6 Deeb-R Khalil W. JAT 1989, 59, 296~299
- 7 潘文照. 数学季刊, 1989, 4(2), 39~48
- 8 娇恒利. 数学研究与评论, 1990, 2: 221~226
- 9 李冲. 数学学报, 1990, 62, 251~259

(暨南大学潘文照教授撰)

投影界及极小投影理论 theory of projection bound and minimal projection 投影概念原始出自几何. 自空间及映射概念拓广以来, 投影 P 乃代表一种映射, 由空间 X 映到子集 M 上, 合 $P^2=P$. 又分线性与非线性两大类, 前者是线性投影(寻常只称投影), 所指 P 是线性连续的. 而 M 是个余子空间. 另一类乃度量投影, 即度量空间中点到一集的近距映射, 一般是非线性的. 早在 1940 年 R. S. Phillips 及 1941 年 A. Sobczyk 已发现 C_0 及 c 都是 l^∞ 中非余的闭子空间(即线性投影不存在). 1971 年 Lindenstrauss 和 Tzafriri 发现 $M[0,1]$ 中 $C[0,1]$ 也是非余的, 并发现凡 B 空间中要使任一闭子空间都是余的必须只须它同构于 Hilbert 空间. 幸好赋范空间中的有限维子空间总是余的, 于是人们最感兴趣是到有限维子空间 M 的投影, 一般 M 上投影两大问题是投影极小范数 $\lambda(M)=\inf\{\|P\|, P \text{ 投影到 } M\}$ 及极小投影 P_0 , 即 $\|P_0\|=\lambda(M)$, 是否存在及构造如何. 余子空间 M 是个共轭空间时, M 上极小投影存在. Berman-Harschiladze (1940) 最早证出 $C[a,b]$ 到 n 次多项式空间 π_n 投影极小范数 $\lambda \geq \frac{\log n}{8\sqrt{\pi}}$. 但极小投影构造始终未能给出. 到 1990 年 K. Petras 把

λ 值必进到 $\lambda \geq \frac{4}{n^2}(\log n - \log \log n)$. 富里车贝展式部分和只是渐近地到达极小范数. 1986 年 P. Vertesi 讨论了离散化成的 Lewanowic 算子. 但也指出要求内插性的渐近极小投影是不存在的. 除非 $\lambda(M)=1$ 情形. 对于周期函数情形即顺利得多, Lozinski 1948 年证明 $C_{2\pi}$ 到 n 阶三角多项式空间 T_n 的富里和是极小投影. 1969 年 Cheney, Hobby, Morris, Wulbert 和 Schurer 的论文又证实是唯一极小投影. 1978 年, C. Franchetti 和 Cheney 证明 $L^2[0,1]$ 中 Rademacher 投影是极小投影, 而冯玉瑜考虑 Walsh 投的极小性. 一般 B 空间说到 n 维 M , $\lambda(M)$ 能有多大界限? 对此 1971 年 M. Kadec 和 Snober 证明 $\lambda(M) \leq \sqrt{n}$, 且 \sqrt{n} 是最佳数. 一方面 1941 年 Sobczyk 在 l^p ($1 \leq p < \infty, p \neq 2$, n 维) 中找到了子空间 M , 使 $\lambda(M) \geq \frac{1}{2}(n^{\frac{1}{p}} - \frac{1}{2} - 1)$.

1960 年 B. Grünbaum 找到了 l^1 到 $\psi^{-1}(0)$, $\psi = (\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \dots)$ 的 $\lambda=2$, 但不存在极小投影. 1976 年 C. Franchetti 和 Cheney 算出了 $L^1[-1,1]$ 到二维子空间 π_1 则 $\lambda(\pi_1) \approx 1.2204$ 对 Disc 代数 $A(D)$ 到 π_n , 则 1975 年 K. O. Geddes 和 T. C. Masan 证出 Taylor 投影是极小投影. 继之 1982 年 Fisher, Morris 和 Wulbert 证明唯一极小性. 1982 年 L. Brutman 算出 λ 渐近数值重阶为 $\log n$, 一些非极小投影范数又能多大呢? 1973 年 J. W. Baker 证明 C 空间中 $\text{Sup}\{\|P\|, P \text{ 投影到 } n \text{ 维 } M\} \geq 2n+1$, 表明投影界数值分布的宽广性. 特殊结构的投影如插值投影, 则联系着 Turan 最优性理论, 80 年代 Kilgoor, Bor, Pinkus 和 Brutman 等人颇多研究; 还有积分算子投影研究亦颇受注意. 对超平面 H 的极小投影问题, 首先 $1 \leq \lambda(H) \leq 2$. 1983 年 Franchetti 考究确有没有投影到 H 上的 P , 使 $\|P\| \leq 2$ 呢? 他获知一个充分条件乃是 H 中任何有界集都存在车贝中心. 特别设 X^* 到 X 有范数 1 投影(更特别是, X 自反)则充分. 1986 年 S. Rolewicz 研究 $L^p[0,1]$ 中到超平面极小投影. 因为自反空间中, 对凡余子空间极小投影必存在. 1983~1984 年 W. L. Odinez 进一步考究极小投影唯一性, 指出自反严凸空间中, 对超平面极小投影若 $\|P\| > 1$ 则 P 是唯一极小投影. 又由 Lindenstrauss 1966 年关于自反空间可改等价范数成光滑严凸的命题, 用此推到 B 空间总可改等价范数使到任何超平面的极小投影是唯一的.

范数 1 投影当然是更特殊的极小投影, 但除非 Hilbert 空间, 它不会遍布出现. 早在 1939 年 S. Kakutani 已发现三维 X 中若到任何二维子空间都有范数 1 线性投影, 则 X 只能是 Hilbert 空间. 不过凡赋范空间中到一维子空间必存在范数 1 投影. 二维情形就很不同. 范数 1 投影一基本问题是什么 X , 什么余子空间 M 才保证 X 到 M 范数 1 投影存在呢? 还未系统解决. 1966 年 T. Ando 发现 $L^p[0,1]$ ($1 \leq p < \infty, p \neq 2$) 中对闭超平面不存在范数 1 投影. $L^1 \rightarrow [0,1]$ 到 $L^1[0,1]$ 则有范数 1 投影. 1977 年 B. Beauzamy 和 B. Maurey 继续此研究, 考究扩大的空间 $Y \supset L^\infty(\mu)$, 1984 年已获知 Y 到 $L^\infty(\mu)$ 有范数 1 投影. 但 L^∞ 换为一个光滑空间 X 则否定, 1971 年 Lindenstrauss 和 Wulbert 指出 $C(Q)$ 中到 M 有范数 1 极小投影的特征. 若任 $Y \supset X$, 都存在 Y 到 X 的范数 1 投影, X 就叫 (P_1) 空间. 类似用 $\|P\| \leq \lambda$ 相应叫 (P_λ) 空间. 1950 年 D. B. Goodner 指出了 (P_1) 空间一些等价条件, 一定程度等距同构于 $C(Q)$, Q 极端不连通. 至于 E. M. Alf-sen 和 E. G. Effros 1972 年 L^p 投影理论蓬勃发展以来, 那些 L^p 投影均是范数 1 投影. L^p 和块, M 伊等都是 1 余子空间.

非线性大类以度量投影 P_G 为代表与线性投影大异, 其界总有 $1 \leq \|P_G\| \leq 2$. 界与 P_G Lip 性或 Lip 选都有关联. 1958 年 G. Freud 著名命题强唯一性推局部 Lip 性. 严凸空间中从 R 半径闭球入手易证 $\|P_y - P_x\| \leq \frac{2R}{\|x\|} \|y-x\|$. 所以是局部 Lip 的. 1975 年 O. Bjornestal 及 1983 年 T. Abatzoglou 证出一致凸且一致光滑空间中, 对闭凸集 G , 则 P_G 是一致 Lip 的, 且给出 $\|P_G y - P_G x\|$ 的上界, 用凸模反函数 δ^{-1} 与光滑模 ρ 表示. 关于 $\|P_G\|$ 界限, 1980 年 F. Deutsch 和 J. M. Lambert 找出了 $C[0,1]$ 中到达 $\|P_G\|=2$ 的例子. 还有任指定 $1 \leq \gamma \leq 2$, 在 l^p (2 维) 中找到 1 维车贝子空间 G , 使 $\|P_G\|=2$, 且 P_G 线性. 1980 年 P. D. Morris 也有 P_G 线性例. 可见度量投影具线性及 $\|P_G\|=1$ 都不限于 Hilbert 空间所独有.

标志着空间结构一个重要常数是射径 Lip 常数 $\Lambda(X)$. 命 T 是对单位球度量投影(叫射径投影), 即 $T_x = \begin{cases} x & \text{当 } \|x\| \leq 1 \\ \frac{x}{\|x\|} & > 1 \end{cases}$. 1967 年 Figueiredo 和 Karlovitz 已指出 T 是一致 Lip 的, $\|T_x - T_y\| \leq \lambda \|x-y\|$. 如此 λ 的最小值称 X 的射径 Lip 常数. $1 \leq \Lambda(X) \leq 2$, 在 1974 年 R. L. Thele 的一个计算 $\Lambda(X)$ 公式其上, 1983 年 P. Kapoor 和 S. B. Mathur 证实了一个重要关系 $\Lambda(X) = \text{MPB}(X)$, 即 $\Lambda(X)$ 与空间的度量投影界同值, 从而使

MPB(X)数值计算上有了简化途径。已求出 $MPB(l_1^p) = \sup_{0 < t < 1} \frac{(1+t^{p-1})^{1/p} (1+t^p)^{1/p'}}{1+t^p}$ ($1 < p < \infty, \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$) 特别地 $p = 3, 4$ 相应值 $\frac{1}{3} (17 + 7\sqrt{7})^{1/3} \approx 1.096, (1 + \frac{2}{3}\sqrt{3})^{1/3} \approx 1.162$ 。补充一下, $MPB(l_1^2) = 2, MPB(l_1^{\infty}) = 2, l_1$ 情形还未推出。1980年 Franchetti 证实 B 空间有 $\Lambda(X) = \Lambda(X^*)$, $\Lambda(X)$ 实质上与 B 空间的其他常数有内在联系, 对于了解空间结构有相当作用。例如, M. A. Smith 证明了 $MPB(X) < 2$ 等价于 X 是 NQ (勾非方)空间。

参考文献

- 1 Sobczyk A. Duke M J, 1941, 8:78~106
- 2 Grunbaum B. Pac, J M, 1960, 10:193~201
- 3 Cheney C A, Hobby P. Tran A M S, 1969, 1:249~258
- 4 Baker J W. Appr Theory I, Texas 1973, 247~250
- 5 Cheney C E W. Spaces, Appr, Theory I, Texas, 1976, 365~368
- 6 Deutsch F, Lambert J M. JAT, 1980, 29(2):116~131
- 7 Franchetti C. JAT, 1983, 38:319~333
- 8 Kapoor P, Mathur S B. JAT, 1983, 38:66~70
- 9 潘文熙. 数学季刊, 1989, 4(2):39~46

(暨南大学潘文熙教授撰)

度量投影理论 theory of metric projection 度量投影 P_G 即度量空间中点到一集 G 的近距离映射。1974年 I. Singer 确立此名, 分单值与集值两大类。早在1960年 Cheney 和 Phelps 等就已对单值的 P_G 概称近距离映射 (proximity map)。除最基本性质, 如齐性、幂等性、拟可加性 $P_G(x+g) = g + P_Gx (g \in G)$ 等外, 几个重大问题乃 P_G 连续性、Lip 性、可加性、微分性、界 $\|P_G\|$ 、集值映射 $1, s, c$ 性, u, s, c 性、连续选等。连续性方面1964年 Singer 首先指出赋范空间中, 对有限维车贝子空间或度量空间中近紧车贝集 G , 则 P_G 连续于全空间, 近紧一词是1961年 Efimov 和 Stechkin 引入的。添进空间条件方面, 早在1958年 Ky Fan 和 I. Glicksberg 证出自反、严凸、(H)性空间(记 $(R_x) \cap (R) \cap (H)$) 中闭凸集 G , 则 P_G 连续, G 只是车贝集。要使 P_G 连续需其他什么条件? 1968年 Wulbert 知 B 空间中言, G 必须圆连通, 并分析了 Ky Fan 三条件的作用。潘文熙1991年获 $(R_x) \cap (H)$ 的丰富多充要条件, 联系了近紧、齿性、强曝性等。1969年 V. Klee 指出 (H) 仍非必要的, E. V. Osman 70年代以 L. P. Vlasov 系列研究确立了 Osman 空间, 是使凡闭凸集 G, P_G 单位连续的空间本征, 它真正区别于 $(R_x) \cap (R) \cap (H)$ 空间, 及 $(R_x) \cap (R)$ 空间。1967年 Vlasov 又引入 CLUR 空间, 1971~1973年 Vlasov 和 Osman 研究知 CLUR 中车贝集 G , 则 P_G 连续性等价于 G 近紧性。 P_G 可加性或收缩性方面, 1958年 Hirschfeld 创立几个定理, 其中若 n 维 ($1 \leq n \leq \dim X - 2$) 的任一子空间 G 都是车贝的, 且 P_G 可加, 则导致 X 等价于内积空间, 可加性换为收缩性 $\|P_Gx\| \leq \|x\|$ 亦如此。这开创了用 P_G 性质描述内积空间本征的先例。此方面前景广阔。 P_G Lip 性以 Freud 定理为基础, 反命题即 P_G 局 Lip 性何时推得强唯一性呢? 1984年 M. Bartelt 和 D. Schmidt 就 $C(Q)$ 中有限维 G 建立了这方面命题, 另外 H. ranschfeld 型命题乃1971年 Lindenstrauss 和 Tzafriri 建立的: $(R_x) \cap (R)$ 空间(维数 ≥ 3) 中若任一闭子空间 G 都有 P_G 局 Lip, 则 X 同构于内积空间。且二氏指出 P_G 局 Lip 性却非内积空间所独有。关于局 Lip 常数 λ 能有多大呢? 1982年 S. Bridge 获得 $C[0, 1]$ 中有限维 Haar 子空间 G 时的 λ 估计式。

80年代 P_G Lip 性已发展到量化研究, 引入 P_G 的连续模 $\Omega_G(x, \varepsilon) = \sup_{\|z-x\| \leq \varepsilon} \|P_Gz - P_Gx\|$ 。这方面以1981年 G. Gordini, 1982年 P. Szeptyski, 1983年 T. Abatzoglu 的工作为代表。关于 P_G 的微分性质, 1968年 R. Holmes 和 B. Kripke 详尽推出

$L^p(\mu) (1 < p < 2)$ 中有限维子空间 G 时 P_G 微分公式及存在性。 G 为闭凸集情形, 1969年 J. B. Kruskal 给出了 R^3 中闭凸集 G 例, 使单边 G 微分都不存在, 但 P_G 连续。这方面, 深入要用度规泛函 $\rho_G(x)$ 为工具。对 R^n , Hilbert 空间已有不少可微性结果, 如 E. Asplund 1973年获知 R^n 中闭集 G , 则 $P_G a. e. F$ 可微。1982年 S. Fitzpatrick, R. R. Phelps 指出 Hilbert 空间中, G 闭凸则 P_G 是 $\phi_G(x) = \frac{\|x\|^2}{2} - \frac{1}{2}d^2(x, G)$ 的 F 导数。1984年 Phelps 考虑某些 B 空间, 1979年 Abatzoglu 考虑 n 维赋范空间范数在一定可微条件下对闭集 G, P_G 的 F 可微性。关于 $d(x, G)$ 的可微性, 继1981年 Klee 有1989年 J. R. Giles 获一定结果。对 Hilbert 空间中 C^2 流形 G , 研究 P_G 的有1975年 C. Chui, G. Phillips 和 P. Smith, 1976年 J. M. Wolfe 及1980年 Abatzoglu 等。

集值度量投影研究重点与单值情形不同, 首先是 P_G 本身何时 $1, s, c, u, s, c$ 的? 若二者俱备则是集值连续的, 更若单值回复单值 P_G 连续性。更重大问题是何时有某种性质的单值选, 例如连续选。1968年 J. Blatter, P. Morris 和 D. Wulbert 指出度量空间中, G 是近紧集便有 u, s, c , 但只设 G 可近集却不真。 Osman 1970年指出 G 设可近, 欲 $P_G u, s, c$, 必先满足 $d(x_n - x_0, G) \rightarrow 0, x_n \rightarrow x_0$ 则 $x_n \rightarrow x_0$ 。判别 $1, s, c$, 较难。1973年 B. Brosowski 和 R. Wegmann 指出即使 G 是有限维子空间亦不保证 $1, s, c$, 为此1964年 A. L. Brown 所引入一种 (P) 性空间(比严凸性弱)却等价于任有限维 G (或只要任一维 G) $P_G 1, s, c$, 且成立时 P_G 有连续选, 好在 $C_0, L^1(T, \mu), T \neq \emptyset$ 有限原子和都是 (P) 性空间。有限维多角空间等亦然。 $1, s, c$ 性与连续选关系密切, 最值得注意的是对 n 维子空间 G 何时 P_G 有连续选, 1980年 F. Deutsch 和 P. Kenderov 引入 $n-1, s, c$ 性。1987年 S. D. Fisher 证明了对 n 维子空间 G , 欲 P_G 有连续选等价于 $P_G(n+1)-1, s, c$ 的。1980年 Deutsch 和 Kenderov 指出 G 是殆车贝集时, P_G 有连续选等价于 $P_G 2-1, s, c$ 的。系统研究连续选的基础工具是1956年 E. Michael 的连续选定理: 由伪紧空间到 B 空间的 $1, s, c$ 集值映射 Φ , 只要每点像是非空闭凸集则 Φ 有连续选。1980年 H. Kruger 指出 G 是可近子空间, $P_G 0, s, c$, 则 P_G 有连续选, 而 P_G 有零性连续选则必须 $P_G L, s, c$ 。1964年 Brown 始引入 CSF 空间, 即对有限维 G, P_G 有连续选者。 $(P) \Rightarrow (CSF)$, 但 (CSF) 本征尚未解决。实例空间 $C(Q)$ 中 P_G 连续研究最热门。1968年 Blatter, Morris 和 Wulbert 获深刻结果, 描述了 $P_G L, s, c$ 以及 u, s, c 及零点集 $Z(P_G f)$ 构造的关系, 所设 G 是伪车贝子空间, 即任 $f, P_G f$ 是有限维非空的。由此 $C[0, 1]$ 中的有限维空间 G 若非车贝的, 则 P_G 也不可能 $1, s, c$ 。 $C(Q)$ 中最简单一维子空间 $G = [g_0]$, P_G 有连续选的本征于1969年 A. J. Lazar, Morris 和 Wulbert 解决, 即 $Z(g_0)$ 的边界点只能 ≤ 1 个, 且在这个边界点的某一邻域上 $g_0(t)$ 定号, 故最初曾猜想条件单纯取决于 g_0 的零点集, 实际却还取决于 $g_0(t)$ 定号与否。 G 是有限维情形, 多年来一直为入所关注, 但未彻底解决, 只分别获一些必要与充分条件, 比如1977年 G. Nürnberger 设 G 有限维, P_G 就有内径连续选。一方面1980年他又证实 P_G 有连续选必须 G 是弱 Haar 子空间, 这就大量联系 R. Zielke 和 D. Zwick 的工作。1971年 Brown, 1978 和1982年 Nürnberger 和 M. Sommer 的研究涉及连续选唯一性问题。1990年 Blatter 全面探讨于 $C(Q)$ 中有限维 G 时 P_G 连续选问题。其他实例空间方面, 1969年对 $L^1(\mu)$ 无原子, G 有限维指出 P_G 不存在连续选, 1968年 Morris 就有限余维 G 获 P_G 有连续选一些充要条件。1985年 J. Reif 研究了 C_0, l^1, l^∞ 空间情形。1988年 Deutsch, V. Indumathi 和 K. Schnatz 对 $L^1(\mu)$ 中一维 $G = [g_0]$ 欲 P_G 有连续选等价于 $g_0(t)$ 合 Lazar 条件。而 l^1 情形是早些 Lazar 1969年解决的。Lip 选与线性选也有不少研究。1978年 E. Behrend, 1979年 D. T. Yost 研究了 B 空间中闭子空间 G 时 P_G Lip 选。1989年李武(Li Wu), Deutsch 和 S. H. Park 深入研究集值 Lip 性与 Lip 选关系。这三人1991年对 $G_0(t)$ 中 $f|_G = 0$

(S 紧)的闭伊 M 研究 P_G 有线性选等价于每个 $g \in C(S)$ 的保范, Tietze 展拓为 $f \in c_0(T)$ 都有线性选, 而 Lip 选亦类似。1990 年 V. A. Ubhaya 究用凸函, 拟凸函佳逼的 Lip 选。1982 和 1987 年 Deutsch 对赋范空间中有限维子空间 G, P_G 有连续选, 或可近子空间 G, P_G 有线性选的本征条件, 用了 $P_G^{-1}(0)$ 描述, 1985 年 P. K. Lin 对 $c_0(T)$ 中有限维子空间 G , 找到 P_G 有线性选充要条件, 也研究 L_p 时 P_G 线性情形, 1991 年宋文华继续深入研究 G 是可近余维 n 情形。

逼近集 G 变动时 P_G 的研究, 普通用 Hausdorff 距离 $h(G, G')$ 。1982 年 P. Szeptylskin 和 T. Vleck 就 Hilbert 空间, 闭凸 G, G' 建立了 $\|P_G x - P_{G'} x\| \leq [d(x, G) + d(x, G')]h(G, G')$ 。潘文熙推广到凸空间获完善公式, 若偏高度 $\Delta(G', G) \leq d(x, G)$ 且 $\Delta(G, G') \leq d(x', G')$, 则 $\|P_G x - P_{G'} x\| \leq d(x, G) \delta^{-1} \left(\frac{\Delta(G', G)}{d(x, G)} \right) + d(x, G') \delta^{-1} \left(\frac{\Delta(G', G)}{d(x, G')} \right)$, δ^{-1} 是凸模逆函, 其他情形估计上界为 $h(G, G')$ 。另一研究方式用闭凸集列 G_n 的 Mosco 极限集, (M. 氏 1969 年始) 表达了何时 $P_{G_n} x \rightarrow P_G x$ 或 \xrightarrow{W} 。有 1984 年 M. Tsukada 和 1987~1990 年 G. Beer 的系列工作。

改范数后的 P_G 问题, 1989 年 Brown 首提出到 n 维 G 投影 P 能改等价范数使 P 成为度量投影的 P 特征是什么。先考虑改范数后 $P_G \supset P$ 。1991 年 L. Vesely 考虑了自反空间中闭子空间 G , 找到充要条件。对可分子空间或余维 $m \geq 2$ 的 G 也进行了讨论, 这与空间强曝露点有关。改范数研究才刚刚开始。

参考文献

- 1 Ky Fan, Glicksberg. Duke MJ, 1958, 25: 553~568
- 2 Singer I. Rev Roum M, Pures of Appl. 1964, 9: 167~177
- 3 Singer I. SIAM, 1974, 1~95
- 4 潘文熙. 全国第 3 届逼近论会议论文集, 1983, 117~129
- 5 Deutsch F. JAT, 1989, 58: 297~314
- 6 宋文华. JAT, 1991, 66: 53~57
- 7 Blatter J. Unique continuous selections for metric projections of $C(X)$ onto finite - dimensional vector spaces, 1990, 61: 194~221
- 8 Vesely L. JAT, 1991, 66: 72~82

(暨南大学潘文熙教授撰)

联合逼近 simultaneous approximation' 由单点逼近发展到联合逼近最初是由 f 及导数 f' 同时逼近引起, 然后 C, L^p 等空间有限个或一列函数 $F = \{F_n\}$ 被逼近, 有 sup 联合与 \sum 联合两大类, $r_G(F) = \inf_{g \in G} \sup_n \|f_n - g\|, \sigma_G(F) = \inf_{g \in G} \sum_{n=1}^{\infty} \|f_n - g\|$ 。每种又有弱形, 比如 $\sup \|f_n - g\|$ 换为 $\|\sup |f_n(t) - g(t)|\|$ 。20 世纪 60~70 年代顺利解决了 $F = \{f_1, f_2\}$ 或有限个情形, 化为单个函数被逼近为主, 如 J. Diaz, McLaughlin, G. Phillips, Sahney, Holland, 史应光, 王美琴, 王建忠, 徐士英, McGabe, W. Ling 等人均有建树。例如 Ling 解决了 $\sigma' = \inf_{g \in G} \left(\|f_1 - g\| + \|f_2 - g\| \right)$ 化为单点逼近 $e = \inf_g \left\| \frac{f_1 + f_2}{2} - g \right\|$, 指出当 $e \geq \frac{1}{2} \|f_2 - f_1\|$, 则 $\sigma' = 2e$, 且联合佳逼元 (b. s. a.) 唯一, 当 $e < \frac{1}{2} \|f_2 - f_1\|$ 则 $\sigma' = \|f_2 - f_1\|$, 非唯一。

放眼到赋范空间中, 则基本的问题是一个有界集 F 被 G 联合逼近, $r_G(F) = \inf_{g \in G} \sup_{f \in F} \|f - g\|$ 。b. s. a. 元 g_0 的全体记 $Z_G(F)$ 。特别 G 是全空间, 记为 $r(F), Z(F)$, 即 F 的车贝半径与车贝中心集。联系 1962 年 Garkavi 的首创工作, b. s. a. 的存在性与唯一性研究者颇多。 F 设为紧集或一般有界集区别很大。T. Narang 1983 引用 F 对 G 可远距性是介乎中间的 F 条件。获知 $(R_2) \cap (R)$ 空间中, F 紧, G 闭凸, 则 b. s. a. 唯一存在。1976 年

E. Rozemap. Smith 由一个引理推出当 F 对 G 可远距, G 是自反子空间, 则 b. s. a. 唯一存在, X 自反, G 闭凸, F 有界则推 b. s. a. 存在, X 严凸, G 凸, F 对 G 可远距则推 b. s. a. 唯一。潘文熙已引入一种强化近紧性(叫工类近紧), 是指对任何相对于 G 可远距的 F , 当 $\{g_n\} \subset G, r_{g_n}(F) \rightarrow r_G(F)$ 则存在子 $g_n \rightarrow g \in G$ 。他证实 $(R_2) \cap (H)$ 空间中 G 闭凸, 则 G 是工类近紧的。当 G 工类近紧, F 对 G , 可远距, 则 b. s. a. 存在。1979 年 J. Mach 研究存在性时创立一崭新概念: (X, G) 具 (P_1) 性 (G 是 X 中闭子集), 乃指 $\forall \gamma > 0, \epsilon > 0, \exists \delta(\epsilon) > 0$ 及 $h(x, y), x, y, h \in G, \|h - x\| < \epsilon$, 当 $|\theta| < \delta$ 则 $B(x, r + \delta) \cap B(y, r + \theta) \subset B(h, r + \theta)$ 。若 $h(x, y)$ 连续时, 叫 (P_2) 性。 (P_1) 性保证对凡有界集 F , b. s. a. 存在, (P_2) 对 $Z_G(F)$ 映射连续性起作用, 1980 年 Mach 再度引入 $(Q_1), (Q_2)$ 性 (按他原作叫 P_1, P_2 性实, 与前者不能混同) 是对 (G, B) , B 是某些有界集 F 之类而言, 1991 年 A. Chiacchio 和 J. Prohla 引入 (G, B) 具 (A) 性概念, 亦保证 b. s. a. 存在, 特别 B 是任何单点集之类时, 转化为 Yost 性。 (A) 性对研究 $C_b(S, G)$ 中 b. s. a. 有重要作用。

对于 b. s. a. 的本性及属性, 单点逼近的著名 Kolmogorov 条件移植到紧集 F 情形联逼是成立的。而使用了极大泛函集 $S_F = \{f \in X^*: \|f\| = 1, \sup_{x \in F} \text{Re} f(x) = m(F)\}$ 这里 $m(F) = \sup_{x \in F} \|x\|$ 。潘国权、郭元明都指出由 K. 氏条件必要性需要引出联合太阳集概念产生, 它比单点逼近的太阳集严格, 但比凸性弱。郭氏证明严凸空间中对 F 紧, G 是联合太阳集, 则 b. s. a. 只 ≤ 1 个, 此外引入范数“子 F 处”弱导数 $\tau(F, y) = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{m(F+ty) - m(F)}{t}$, 则为 b. s. a. 又一本征条件乃 $\tau(F - g_0, g_0 - g) \geq 0$, 这集 F 紧, G 凸。又一本征乃任 $g \in G, \exists \psi \in \text{ext} U_x$ 及 $x \in F$ 有 $\psi(x - g) \geq \psi(x - g_0) \geq r_{g_0}(F)$ (Amir-Mach 判别法)。特别当 G 是 n 维子空间, 又化为 $\exists \psi_1, \dots, \psi_n \in \text{ext} S_{F-g_0}$ 及 $r_0, \dots, r_n \in F, a_i \geq 0 \sum_{i=1}^n a_i = 1$, 使 $\psi_i(x_i - y_0) = r_{g_0}(F), \sum_{i=1}^n a_i \psi_i(g - g_i) \leq 0, \forall g \in G$ 。对 $Z_G(F)$ 集的性质, 1984 年 Amir-Mach 指出 F 可“割弃”一个球 $B(g_0, t), 0 \leq t \leq r_{g_0}(F)$ 以替 F 不影响 g_0 佳逼性。而 G 也可适当割弃或扩伸, 像单点逼近那样。关于 $Z_G(F), Z(F)$ 集的分布, 1964 年 Garkavi 指出希氏空间则任有界集 $F, Z(F) \cap \overline{\text{co}} F \neq \emptyset (\dim X > 2)$, 且反之推空间此性。1976 年 Rozema 得任闭子空间 $G, Z_G(F) \cap \overline{\text{co}} \cup_{x \in F} Z_G(x) \neq \emptyset$ 亦表征希氏空间, 而且 G

改用闭凸集却不真。比如选 G 为球体, F 是球外的两点可验知。映射 $F \rightarrow Z_G(F)$ 自 Mach 记作 $\text{Cent} G: 2^F \rightarrow 2^G$, 叫联合度量投影, 或叫车贝中心映射。1978 年指出 X 凸, 则映射单值存在且一致连续, $C(S, X)$ 中亦如此。1980 年 Amir 和 Ziegler 则减弱设 X 相对于 G 凸亦成立。A. P. Bosznay 1978 获知 $(R_X) \cap (LUR)$ 空间中, 闭子空间 G , 则 cent_G 单值存在且连续。潘文熙获得度量空间中, 若 G 有某种强近紧性, F_0 有界, F_0 的某 Hausdorff 度量领域的任意 F 都使 $Z_G(F)$ 为单点时, 则 cent_G 于 F_0 处连续。这推广了著名的 Singer 定理, 从而一定条件空间中, G 闭凸, F 对 G 可远距便可 Cent_G 连续。潘氏进一步研究 (UR) 中 Cent_G , 连续性获量性公式, 找到了局部连续模。设 G 闭凸 F, F' 有界 (b. s. a. Z, Z' 就存在唯一) 则 $\|Z - Z'\| \leq 2 \min \left\{ r \delta^{-1} \left(\frac{h}{r} \right), r' \delta^{-1} \left(\frac{h}{r'} \right) \right\}$, 这里 $h = h(F, F'), r = r_G(F')$ 。特别在希氏空间呈 $Ah \frac{1}{2}$ 形, Mach 的 Q_1, Q_2 性对 cent_G u. s. c. 性等都有重要用途, 潘氏再考虑了 G 变动时的连续性 $G_1 \rightarrow Z_G(F)$, 它也是 Lip 的, 且只要 $h(G, G_1)/r < 2$ 则 $\|Z_G(F) - Z_{G_1}(F)\| \leq r \delta^{-1} \left(\frac{h(G, G_1)}{\gamma} \right) + r_1 \delta^{-1} \left(\frac{h(G, G_1)}{r_1} \right)$ 。这里 X 凸, G 闭凸, $r_1 = r_{G_1}(F)$ 。其他情形右边改成 $Ah(G, G_1)$ 形, 他同时考虑了 $G_n \uparrow G_\infty$ 时 $\|Z_{G_n}(F) - Z_{G_\infty}(F)\| \rightarrow 0$ 的问题。对 Cent_G 连续模必将更深化研究。猜想当 Cent_G 具一定的收缩 Lip 性会导致 X 是内积空间这一类 Hirschfeld 型命题迟早会发

现。Cent₀的连续选问题也必然将开展研究。

联合强唯一性已初步有研究。潘一郭开始考虑 $m(F-g) - m(F-g_0) \geq \mu \|g-g_0\|, \forall g \in G$, 这时 g_0 叫联合强最佳逼近(s. b. s. a.), μ 叫强唯一常数。

若 F 紧 G 闭凸, 已证明 $\sup\{\text{Ref}(g_0-g): f \in \text{ext}S_{F-g_0}\} \geq K \|g-g_0\|$ 导致 g_0 是 s. b. s. a. 找到此式的种种等价条件, 这推广了单点逼近时 P. F. Mah(1984)所讨论的各条件。又 $\mu = \mu(F)$ 有一种 u. s. c. 性 $\lim_{h(F_n, F) \rightarrow 0} \mu \leq \mu(F)$ 。联合拟强唯一性 $m^p(F-g) - m^p(F-g_0) \geq \mu_p \|g-g_0\|^p$ 。人们注意到 Smarzewski(1986, 1988)就单点逼近对 $L^p(\mu)$ 已有完善结果。当 $p \geq 2$ 求得 $\mu_p = \frac{1}{2^{p-2}}$ 郭元明对联合逼近分别 G 闭凸集, 闭子空间时获得 $\mu_p = \frac{1}{2^{p-1}}$ 与 $\frac{1}{2^{p-2}}$, 结果相当完美。

求联合最佳逼近点概念可扩展到求最佳 N 网, 军事上为布置炮台群问题 $r^N = \inf_{\{g_1, \dots, g_N\} \subset G, x \in Y, 1 \leq i \leq N} \sup \|x-g_i\|$, 达到左方那个 \inf 的 $\{g_1, \dots, g_N\}$ 叫最佳 N 网。 $N=1$ 回复 s. b. s. a. 这是 1962 Garkavi 最早引入的, 他指出 G 紧, 或者共轭 B 空间中 G 是 W^* 闭集, 则凡有界集 F , 最佳 N 网存在。当 G 是子空间, 涉及 G^* 到 G 有范数 1 投影性等也保证存在性。潘文熙剖析 $r^N=0$ 的条件及深入讨论最佳 N 网存在性, 对两集最近距离 $\rho(F, G) = \inf_{x \in F, y \in G} \rho(x, y)$, 潘氏系统讨论最近点对 $\rho(x_0, y_0) = \rho(F, G)$ 存在性及唯一性, 以及近渡点 $x_0, P(x_0, F) = P(F, G)$ 性质及叠映射 $P_F P_G$ 的不动点有关性质。关于最近点对存在性 1988 年 Xu Xiubin 获一些充分条件: F 紧弱, G 凸, G 关于 F 可近, 则最近点对存在。潘氏获另一些充分条件: (1) F 紧, G 关于 F 可近, 或 (2) F 闭圆紧, G 关于 F 可近, 且有界, (3) 自反, F, G 皆弱闭, 一个有界。最近点对唯一性方面, 引入严凸集, $x, y \in G, 0 < \theta < 1$, 则 $\theta x + (1-\theta)y \in \text{int}G$ 起了重要作用。潘氏还建立仿射集、超平面、直线种种之间最近距离的命题, 又涉及许多带距离性分离定理, 大大推进了 Mazur 的结果, 开拓了泛函逼近论的新篇章。

参考文献

1 Ling W H. Pro AMS, 1975, 48, 185~188
2 Mach J. M Ann, 1979, 24, 157~164
3 Narang T D. JAT, 1983, 39, 93~96
4 Amir D. JAT, 1984, 40, 364~374
5 Mah P F. JAT, 1984, 41, 91~99
6 潘文熙, 郭元明. 全国第 5 届逼近论会议论文集, 河南大学学报(增刊), 1988

(暨南大学潘文熙教授撰)

算子逼近 operator approximate IN. 溯源于积分方程的核用退化核逼近所产生, 乃提出一个有界线性算子 $T \in B(X, Y)$ 被紧算子或有限秩算子最佳逼近。最先有 1960 年 Gohbert-Krein 及 Schatten 的书详细研究了 Hilbert 空间中的紧算子集 $K(H)$ 。建立由特征值导出的 S -数一套理论 $A \in K(H)$ 则 $\inf_{T \in K_n(H)} \|A-T\| = S_{n+1}(A)$, $A \in B(H)$ 则 $\inf_{T \in K(H)} \|A-T\| = S_\infty(A)$, 且有 T_0 到达 \inf 。1970 年 N. Căc 证明当 X, Y 自反, Y 具收缩基底, 则 $K(X, Y)^* = B(X, Y)$ 。

1972 年 P. Halmos 研究用自伴正算子、弥散算子 $\text{Im}T \geq 0$, 增殖算子 $\text{Re}T \geq 0$ 等的最佳逼近问题, 得到简明答案。1971 年 Holmes 和 Kripke 研究可到达范数算子集 $A_z(H, H)$ 证出它是 $B(H)$ 中 I 稠密集。1979 年 J. Johnson 和 J. Wolfe 证出可到达数值半径算子集 $\text{NRA}(C(Q))$ 稠于 $B(C(Q))$, 所谓数值半径 $r(T) = \sup_{\|z\|=1, \|f\|=1} |f(Tz)| \leq \|T\|$ 。1985 年 C. S. Cardassi 继续深入, 1982 年 I. D. Berg 和 B. Sims 证出对凸闭 X , $\text{NRA}(X)$ 稠于 $B(X)$ 。1987 年他们又证 X 可以是 $c_0, l_1, L^p(\mu)$ 光滑空

间等。1989M. Acosta 和 R. Polys 证出凡 B 空间二次共轭是 NRA 的空间 $(\supset \text{NRA}(X))$ 总是稠于 $B(X)$ 的。C. W. Kim 1975~1980 年研究了收缩算子集的可逼近性。

主流仍然是研究 $K(X, Y)$ 在 $B(X, Y)$ 中的可(逼)近性为最大课题。首先由于一般 $B(X)$ 不是自反, 又只要 $\dim X \geq 2$ 则 $B(X)$ 又不是严凸的, 所以难指望空间几何理论去解决之。是否 X, Y 施加良好条件, 即达到可近性呢? 1971 年 Holmes 和 Kripke 已指出即使是 Hilbert 空间, Y 凸, 仍然出现 $K(X, Y)$ 不可近(指在 $B(X, Y)$ 中不可近, 以下都略去此句), 故更多讨论到 $X=L_p(\mu)$ 情形, 或 $Y=C(Q)$ 情形。Holmes 氏就一般 X, Y 推出过 $\delta(T) = d(T, K(X, Y))$ 与 $\Delta(T) = \sup\{\lim \|T s_n\|: S_n \xrightarrow{W} 0, \|s_n\|=1\}$ 的一个关系 $\Delta(T) \leq \delta(T)$, 且若存在 T_0 全连续, $\|T-T_0\| \leq \Delta T$ 则 T_0 必是 T 的最佳全连续算子, $\|T-T_0\| = \Delta(T) = \delta(T)$ 。特别就 H_1, H_2 空间就存在 T_0 。实例算子空间解决全连续最佳逼近的第一个范例为 1978 年 Mach 和 Ward 证出 $K(l_1)$ 是可近集, 且 $d(T, K(l_1)) = \lim$

$\sup \sum_{j=1}^n |t_{i,j}|$ 这里 $(t_{i,j})$ 是 T 的表现矩阵。1980 年 M. Feder 更考虑 $T: l_1 \rightarrow L_1(\mu)$ 则 $K(l_1, L_1(\mu))$ 可近的本征是 μ 是纯原子。1979 年 H. Fakhoury 研究 $K(L_1, Y)$ 可近性, 是运用 Y 中有界集 B 的非紧度 $\alpha(B)$ 为工具建立了 F 氏公式 $d(T, K(X, Y)) \geq \alpha(TU_B)$ 。由于 T 可表现为 $Tu = \int_0^1 u(s)x(s)ds$, 表现于 $x(s) \in L_\infty(\mu, Y)$ 的 T 像集叫 B , 故此予设 Y 凸凸时, $K(L_1(\mu), Y)$ 是可近的, 且 T 到它的最佳逼近度为 $\alpha(B)$ 。刚才 Y 不凸凸却大不同。

1980 年 Feder 首先发现 $K(L_1[0, 1])$ 为不可近集。 $K(C[0, 1])$ 也不可近。这就说虽 X 可分, 而 $K(X)$ 可以是不可近集。1985 年 Y. Benyamini 和 P. K. Lin 研究了 $K(L_p), K(L_p, l_p), K(l_p, L_p)$ 等, 分别 $1 < p < 2, 2 < p < \infty$, 其中 $T \in B(L_p), 2 < p < \infty$, 若合 Weis 条件即 $x_n \xrightarrow{w} 0, x_n$ 匀圆, 则 $\|Tx_n\| \rightarrow 0$, 则 T 有佳逼近算子。另一大类算子空间 $K(X, C(Q))$ 的可近性研究颇多。最重要是 J. Mach 1978 年创立 X 的 M_1 与 M_2 条件, 谓 X^* 中凡有界网 (x_n) 及 $y \in X^*, \|x_n + y\|$ 与 $\|x_n\|$ 之差趋于 $\|y\|$, 而是按某种权函数意义而言。若 X 合 M_1 条件, 则 $K(X, C(Q))$ 是可近集。除了 Hilbert 空间 $l_p (1 < p < \infty), c_0$ 都合 M_1 条件。若减弱为 X 只合 M_2 条件则无可近性结论, 但每个 $T \in B(X, C(Q))$ 可估出最佳逼近度下界 $\delta(T) \geq \sup_{s \in C(Q)} \lim_{t \rightarrow s} \|u(s') - u(s)\|$, u 是 T 的表现子。

1980 年 K. S. Lau 独立考虑了 X 匀光滑得到 $K(X, c(O)) (O$ 是拓扑空间) 是可近集。联系到 $K(C[0, 1])$ 的不可近性, 自然要问 $K(C(Q))$ 有何种 Q 使它可近吗? 要求 Q 的本征问题到 1989 年 Yost 基本有了部分回答。

有限秩算子集 $(秩 \leq n) K_n(X, Y)$ 的可近性方面, 最早已证 $K_n(H)$ 可近性。但似乎太难发现不可近的例。直至 1986 年 Kamel 又有例子 $K_n(l_1, c_0(S))$ 及 $K_n(l_1, C(Q))$, 而紧集 Q 设含正整数集一点紧化同胚像 Q , 它们在相应全连续算子空间中不可近。可注意的是 $K_n(l_1, c_0)$ 不可近于 $B(l_1, c_0)$, 而 K. Seetkamp 早些证出 $K(l_1, c_0)$ 可近。Kamel 建立了一个“缩像原理”: 若 $K_n(X, Z)$ 可近, Y 是 Z 中范数 1 余子空间, 则 $K_n(X, Y)$ 可近。关于 $K_n(X, Y)$ 于 $K(X, Y)$ 不可近例还同时发现 (X, Y) 为 $(c_0, c), (c, c)$ 或 $c_0(S)$ 都是, Kamel 解决另一问题是 $K_N(X, Y)$ 可近, 是否导致任 $n, K_n(X, Y)$ 可近呢? 即 N 是否本质固定或否呢? 他予以否定回答。事实上, 任 $m \neq n$ 有某有限维 X , 紧 Hausdorff Q 使 $K_m(X, C(Q))$ 可近而 $K_n(X, C(Q))$ 不可近。

1972 年 E. M. Alfsen 和 E. G. Effros 阐述了 M -伊 (ideal), L_p 和块 (summand) 等特殊投影子空间的结构。追溯最早 1950 年 J. Dixmier 已证出 $K(H)$ 是 $B(H)$ 中的 M -伊。当时尚未以 M -伊命名。由于著名三球定理的建立, 大大显露了 M -伊构造才广泛用到实例空间中, 例如 1971 年 R. Ando 证明了 M -伊是

可近集及合 Pheps 氏 (U) 唯一展拓性。1975 年 P. Smith J. Ward 证出 $K(l_1)$ 非 M 伊却可近, A. Lima 1977~1979 三年卓著工作中建立三单位球定理及引入半 M-伊, 他证出凡 M 伊上的度量投影 P_M 总是 Lip 的 $d_H(P_M x, P_M y) \leq 2 \|x - y\|$, 且 P_M 恒有连续选。他又最先证出 c_0 是 l_∞ 中的 M 伊。1979 年 Lima 大量地证出 $K(l_p, l_p) (1 < p \leq r < \infty)$ 是 M 伊, 而 $K(l_1), K(l_1, l_p), K(l_p, l_\infty), K(c_0, l_\infty)$ 都非 M 伊, 但却可近。随后又证出 $K(l_\infty, l_\infty)$ 不是可近集。较早些 1973 年 J. A. Hennefeld 已证 $K(c_0, c), K(l_p, c_0) (1 < p < \infty)$ 是 M 伊。1979 年 Yost 与 1978 年 Smith 和 Ward 都独立证出 $K(X, c_0)$ 是个 M 伊。1980 年 Saatkamp 证 $K(X, c_0(s))$ 恒是个 M-伊。Lima 又研究 Y 是 Lindenstrass 空间, 则 $K(l_p, Y) (1 < p < \infty), K(C_0(T), Y)$ 都是 M-伊。1985 年 C. Cho W. Johnson 研究闭子空间 $X \subset l_p (1 < p < \infty)$ 何特征使 $K(X)$ 是 M 伊。

1979 年 Yost 引入子空间 M 的 $1/2$ 球性, 乃三球性中一球指定了是单位闭球。所以它是 M-伊的弱化。仍获得凡 $1/2$ 球性子空间是可近集, P_M 恒有拟加, 齐性单值选。Yost 发现一有趣事实, 在复域下 $K(c, c)$ 不具 $1/2$ 球性, 但实域下却具 $1/2$ 球性。 $K(c_0, C(Q))$ 实域下亦如此, 复域下则仍未证实属谁。不过 $K(c_0, c)$ 却不同, 它在实复域下都具 $1/2$ 球性。Yost 又引入三球性又一种弱化条件。叫 Yost 性。上述关于 M 伊、半伊、 $1/2$ 球性、Yost 性这些子空间已探明实质确有区别, 不过实例证明则远远未全清楚。

参考文献

- 1 Halmos P R. Indiana Univ M J, 1972, 21(10): 951~960
- 2 Aifsen E M, Effros E G. Sturcture in real Banach spaces An M, 1972, 96: 98~173
- 3 Feder M. JAT, 1980, 29: 170~177
- 4 Mach J. Pro AMS, 1978, 72(1): 99~104
- 5 潘文熙. 全国第 3 届泛函分析会议报告, 1983: 1~15
- 6 Kamal A. JAT, 1986, 47: 132~171
- 7 Yost D T. JAT, 1987, 49: 99~109.
- 8 Bang H, Odell E. JAT, 1987; 51: 274~287
- 9 Yost D T. JAT, 1989, 50: 100~110

(暨南大学潘文熙教授撰)

奥尔里奇空间及其几何 Orlicz space and its geometry

奥尔里奇空间是波兰奥尔里奇于 1932~1936 年间引入并讨论的。这是一类包含经典函数空间 L^p 和经典数列空间 l^p 为特例的具体空间, 它由满足一定条件的生成函数所生成, 生成函数通常有 N 函数、杨 (Young) 函数和 Φ 函数 (它们所满足条件的最本质差异在于前两类函数具有凸性, 而第三类不具有), 它们依次包括幂函数 $|u|^p$ 的 $p > 1, p \geq 1$ 和 $p > 0$ 的情形, 并且 N 函数和杨函数生成的奥尔里奇空间是巴拿赫 (S. Banach) 空间, 而 Φ 函数生成的则是弗雷谢 (M. Frechet) 空间。奥尔里奇空间的研究, 一方面为研究巴拿赫空间与弗雷谢空间提供直观背景材料, 另一方面对积分方程、偏微分方程、概率论、实、复分析乃至控制论等学科又都有着广泛的应用, 它已成为泛函分析中的一个重要分支。

奥尔里奇空间理论提出后, 在相当一段时间内并未得到长足的发展。直到 50 年代初, 前苏联克拉斯诺西斯基 (M. A. Krasnosel'skii) 和鲁季茨基 (Ya. B. Rutickii) 发表了一系列有关奥尔里奇空间的论文, 他们的研究密切结合对积分方程的应用, 1958 年将所得成果总结出版了奥尔里奇空间方面的第 1 部专著, 1962 年吴从忻将该书译成中文出版。与此同时, 荷兰蔡年 (A. C. Zaanen) 和鲁森伯格 (W. A. J. Luxemburg) 也从事这方面的研究, 特别是鲁森伯格 1955 年在论文中给出了一种不同

于奥尔里奇所定义的范数 (后人分别称这两种等价的范数为奥尔里奇范数和鲁森伯格范数)。在此期间, 日本中野秀五郎等发展的模半序线性空间理论也与奥尔里奇空间有一定的联系。

50 年代后期, 在奥尔里奇领导下恢复了对奥尔里奇空间的研究, 不仅联系到固变函数与积分、富氏级数、逼近论、求和法及复分析诸方面, 而且开展了由 Φ 函数生成的奥尔里奇空间的研究。1958 年奥尔里奇访问中国, 其所作报告的内容后来整理成书, 于 1963 年在中国出版。在奥尔里奇访问中国的前后, 中国也开展了对奥尔里奇空间的研究。最早刊出论文的有: 丁夏畦、吴从忻将奥尔里奇空间用于著名的索伯列夫 (Sobolev) 嵌入定理的推广, 郭大钧、王声望分别对卡拉太屋独里 (Caratheodory) 算子与乌利孙 (Urysohn) 算子和测度函数应用。

关于奥尔里奇空间的近期研究, 从 80 年代以后出版的几本各具特色的著作中可得到反映。1983 年, 吴从忻与王廷辅, 以及丁夏畦、穆希拉克 (J. Musielak) 同时出版了各自的著作。前者除了介绍中国的相关研究外, 还具有教科书与工具书的特点; 丁夏畦的著作是对偏微分方程应用方面的成果总结, 第 3 本则侧重于较奥尔里奇空间更广的穆希拉克-奥尔里奇空间的理论和应用, 其中包含有普千尼克 (R. Pluciennik) 的成果。最近, M. M. Rao 与任重道出版的著作是以由杨函数生成的奥尔里奇空间为对象, 并集中了著者们在对概率论和插值问题应用等方面的成就。

至于奥尔里奇空间几何, 最早的工作是鲁森伯格 1955 年博士论文中的 L_M (通常分别用 $L_M, l_M, L_{(M)}, l_{(M)}$ 表示关于奥尔里奇范数与鲁森伯格范数的奥尔里奇函数空间和数列空间) 的一致凸性的充分条件, 接着 1957 年梅尼斯 (H. W. Milnes) 讨论了 L_M 的一致凸性与严格凸性, 然而就是对这两种最基本的凸性的研究, 这时也并未完成。随着近年来巴拿赫空间几何学成为人们特别感兴趣的一个研究领域, 奥尔里奇空间几何的研究自然也受到大家的关注, 吸引了以色列、波兰、中国、美国、西班牙等国的不少学者从事该领域的研究。特别是波兰波兹南和中国哈尔滨等地的研究人员的工作最为系统和完整。

经过哈尔滨的陈述涛、王廷辅、吴从忻以及波兹南的胡吉克 (H. Hudzik)、卡明斯卡 (A. Kaminska) 等人 10 多年的工作, $L_M, L_{(M)}, l_M, l_{(M)}$ 中介于一致凸和严格凸之间的各种凸性 (诸如局部一致凸、各向一致凸等等) 和 K 一致凸、近似一致凸、 H 严格凸等其它凸性以及各种非方性 (包括一致非方、非方、局部一致非方、一致非 l^p 、非 l^p 、局部非 l^p 等) 的借助生成 N 函数 $M(u)$ 的判据已经全部得到。这些判据表明对于两种等价范数, 奥尔里奇空间的几何性质可以相同, 也可以完全不同。这里还要说明的是: 刻划 L_M 几何性质的一个重要手段是吴从忻等于 1978 年所公布的计算公式: 对非零的 x 有

$$\|x\|_M = \frac{1}{K} (1 + \int_G M[Kx(t)] dt) \Leftrightarrow K \in [k^*, k^{**}],$$

其中 k^*, k^{**} 由 $M(u)$ 和 $x(t)$ 所唯一确定。

关于奥尔里奇空间局部几何性质的研究已经开始, 端点、 λ 点、稳定点的判据业已获得, 并且由此引起了弱于严格凸的 λ 性质和稳定性等整体几何性质的讨论, 也出现了 $M(u)$ 异于通常凸性条件 (即严格凸与一致凸) 和限制增长性条件 (指 Δ_2, ∇_2 条件等) 的新条件, 还应用了集值映射 $K; x(t) \rightarrow [k^*, k^{**}]$ 的工具, 这些方面均需作进一步探讨。

奥尔里奇空间中各种几何常数的讨论也已展开, 一些几何常数 (如装球常数) 的精确表达式已经得到, 另一些几何常数 (如圈线长等) 则已被用于刻划某些几何性质。对于穆希拉克-奥尔里奇空间几何的研究, 尽管已有胡吉克、卡明斯卡、吴从忻、陈述涛、孙慧颖的工作, 但目前还仅局限于严格凸、一致凸、复严格凸、复一致凸等内容, 研究得还很不充分。至于由 Φ 函数生成的奥尔里奇空间的几何问题, 眼下研究得更少, 仅维斯拉 (M. Wiska) 等有些工作, 这方面研究的展开势必会推动一般的弗雷谢空间, 甚至局部凸空几何学研究的产生、形成与发展。

从理论上讲, 奥尔里奇空间的几何性质可直接用来否定

巴拿赫空间几何学的一些公开问题(如1991年孙慧颖等否定回答了关于 λ 性质的两个公开问题),这种方式要比直接构造具体反例更为优越。在应用上,王廷辅等也已将奥尔里奇空间几何性质用于概率论、逼近论和控制论。这些都显示出奥尔里奇空间几何的作用,这种作用和影响显然会日益增强。

最后还应指出,林登斯特劳斯(J. Lindenstrauss)等人对奥尔里奇数列空间的对称基和同构余子空间等几何问题有一系列研究,在他们1977年出版的著作《经典巴拿赫空间I》中所提出的公开问题,“若 $M(u)$ 是极小奥尔里奇函数,则 l_M 是素(prime)巴拿赫空间吗?”至今尚未得到解决。

参考文献

- 1 Luxemburg W A J. Banach function spaces, 1955, 1~70
- 2 Krasnosel'skii M A, et al. Convex functions and Orlicz spaces, 1958, 1~266; 吴从圻. 北京: 科学出版社, 1962. 1~255
- 3 奥尔里奇. 线性泛函分析. 北京: 科学出版社, 1963. 1~138
- 4 吴从圻, 王廷辅. 奥尔里奇空间及其应用. 哈尔滨: 黑龙江科技出版社, 1983. 1~461
- 5 丁夏畦. 可微函数与偏微分方程. 武汉: 湖北科技出版社, 1983. 1~270
- 6 Musielak J. Orlicz spaces and modular spaces. Berlin, Springer-Verlag 1983. 1~222
- 7 吴从圻, 等. Orlicz 空间几何理论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1986. 1~283
- 8 Wu Congxin, et al. SEA Bull. Math. 1990, 14, 75~85
(哈尔滨工业大学博士生导师吴从圻撰)

广义线性模型 generalized linear models 线性模型是统计学中应用最广泛的分支之一,广义线性模型则是经典的线性模型的推广。

在经典的线性模型中,我们用刺激变量 X 的线性函数 $\hat{Y}=X^T\beta$ 来拟合响应变量 Y ,称 $Y-\hat{Y}=e$ 为拟合误差。高斯(Gauss)在1809年首先引进了正态分布来描述误差,后来,他抛弃了正态假设而仅用固定方差这一假定得到了参数 β 的无偏估计类中有最小方差的估计,即由极小化 $e^T e$ 来估计 β ,这就是著名的最小二乘法。

广义线性模型放宽了 Y_i 有固定方差这一假定,减弱了 Y_i 的均值 μ_i 为 X_i 的各分量的线性组合这一限制,仅假定 Y_i 的方差为 $V(\mu_i)$,即为均值的函数,也称为方差函数,还假定 μ_i 的函数 $g(\mu_i)$ 为 X_i 的线性函数,即 $g(\mu_i)=X_i^T\beta$,这里函数 $g(\mu_i)$ 被称为联系函数。这样,广义线性模型把非线性限制在联系函数和方差函数之中,保留了对预报量有贡献的成分,从而把那些不满足经典线性模型假定的数据分析纳入广义线性模型的框架之中。

20世纪以来,人们在分析变量之间的相互关系时提出了许多新的统计模型和统计分析的方法。1922年费歇尔(Fisher)在考察培养皿上的媒体生长情况时,提出了重对数线性模型;1935年伯尼斯(Bliss)对响应变量是属性变量的情形提出了Probit分析方法;在考察与寿命等有关的生存数据时,考克斯(Cox)于1972年提出了对生存数据的回归模型。在所有这些模型中,一个显著的特点是它们都不满足经典线性模型的假定。耐尔德和魏德朋(Nelder and Wedderburn)于1972年提出了广义线性模型,它不但涵盖了前面所提到的各种模型,而且由于联系函数和方差函数选择的灵活性,使其应用的范围大大拓宽。

当联系函数 $\eta=g(\mu)$ 取不同的形式时,则可得到不同的统计模型。若 $\eta=\mu$,则得到经典的线性模型;若 $\eta=\log(\mu/(1-\mu))$,则得到logit模型;若 $\eta=\phi^{-1}(\mu)$,这里 ϕ 是标准正态分布之分布函数,则得到Probit模型;若 $\eta=\log(-\log\mu)$,则得到重对数线性模型;若取 $\eta=\log\mu$,则得到对数线性模型。我们不再一一列举了,由此可以看出,广义线性模型所包含的内容之丰富。

广义线性模型用加权最小二乘法求参数的最大似然估

计。魏德朋(Wedderburn)和哈伯蒙(Haberman)于1976年和1977年几乎同时给出了最大似然估计存在的充要条件,且表明如果参数 θ 的最大似然估计 $\hat{\theta}$ 存在,则 $\hat{\theta}$ 唯一确定。最大似然估计的渐近性质也有很多学者进行了研究。法玛亚(Fahrmeir)和考夫曼(Kaufmann)于1985年给出了最大似然估计渐近性质的一些最新的重要结果,在很一般的条件下证明了最大似然估计的渐近存在性、相容性及渐近正态性。魏德朋在1974年在对广义线性模型进行参数估计时,还引入了拟似然函数这一概念,它基于这样的考虑,若响应变量 Y 的分布属于指数族分布,则其对数似然函数的导数即得分函数仅与 Y 的均值和方差有关,此时,我们虽然不知道 Y 的分布的具体形式,却可以由令其得分函数为零得到最大拟似然方程,这样,我们只需要知道二阶矩假设而不必考虑分布的具体形式,就可以得到参数的拟似然估计。

在广义线性模型的研究中另一个重要课题是模型检验。卜瑞盖翎(Pregibon)在广义线性模型的模型检验方面做了一些开创性的工作。这方面的工作主要集中在两个方面,一是检验数据与模型中的假定是否相符(模型诊断),另一个是如何把对拟合影响显著的观察值分离出来(数据诊断)。人们已构造了各种形式的残差、偏差、距离等统计量用于模型诊断和数据诊断,利用图形分析进行诊断也是一个直观明了的方法。

近年来,有关广义线性模型的理论和应用成果不断涌现,由于这门理论还很年轻,故有很多领域有待进一步研究和开发。一是改进模型的适用性。在广义线性模型中我们假定各响应变量是相互独立的,方差也仅与均值有关,如何将这一限制取消,考虑各 Y_i 是相关的,方差和其它变量的均值也有关,将会大大推广模型的实用性。还可考虑线性预报量中既含有参数的线性形式,又含有变量的非参数形式的半参数广义线性模型,还可以考虑随机效应模型。另一个重要的方向是对病态数据的处理。由于病态矩阵使得迭代过程不收敛,许多学者提出了将岭估计、压缩估计、主成分估计等有偏估计推广到广义线性模型的参数估计上来。此外,诸如刀切法(Jackknife)、投影追踪法(Bootstrap)、随机过程统计等现代统计方法应用于广义线性模型也都是很有意义的研究方向。

参考文献

- 1 Nelder J A, et al. J R Statist Soc, A, 1972, 135: 370~384
- 2 Pregibon D. Ann Statist, 1981, 9, 705~724
- 3 McCullagh P, et al. Generalized linear models. London Chapman and Hall, 1983
- 4 McCullagh P. Ann statist, 1983, 11, 59~67
- 5 Fahrmeir L, et al. Ann Statist, 1985, 13, 342~368
- 6 Johnson W, et al. J of statist. Planning and Inferencell, 1985, 33~56

(安徽师范大学郭大伟副教授撰)

凸函数 convex functions 凸函数是一类具有良好性质的重要函数,在数学的众多领域都具有广泛应用,在现代变分学、最优化理论、最优控制、数理经济学和非线性泛函分析等学科中发挥着重要作用,20世纪60年代中后期形成的以凸函数和凸集为基本研究对象的新兴数学分支—凸分析,已成为上述有些学科的重要理论基础和有力工具。

19世纪末20世纪初,哈代(O. Hölder)、颜森(J. L. W. V. Jensen)和闵可夫斯基(H. Minkowski)奠定了凸函数理论的基础,闵可夫斯基1892年曾提出凸函数的概念。设 $C \subset R^n$ 是一凸集(即对任意 $x, y \in C, \lambda \in [0, 1]$ 有 $\lambda x + (1-\lambda)y \in C$), $f: C \rightarrow R$, 如果对任意 $x, y \in C, \lambda \in (0, 1)$ 有

$$f(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq \lambda f(x) + (1-\lambda)f(y)$$

则称 f 是 C 上的凸函数,如果当 $x \neq y$ 时,严格不等式成立,则称 f 是 C 上的严格凸函数。从几何观点来看凸函数是很直观的,如果 $f(x)$ 的图象上任意两点连成的弦位于所对应的曲线上或曲线上方,那么实值函数 f 便是凸函数。上述定义等价于,对任意 x_1 、

$x_2, \dots, x_n \in C$, 对任意 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, 有

$$f\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i\right) \leq \sum_{i=1}^n \lambda_i f(x_i)$$

在凸函数发展初期, 人们就发现, 利用函数的凸性可以简便地证明一些重要不等式, 例如, 由 $f(x) = -\ln x$ ($x \in R, x > 0$) 的凸性可得

$$x_1^{q_1} x_2^{q_2} \dots x_n^{q_n} \leq q_1 x_1 + q_2 x_2 + \dots + q_n x_n$$

其中 $x_i > 0, q_i > 0 (i=1, 2, \dots, n)$, $\sum_{i=1}^n q_i = 1$

在上述不等式中令 $q_i = \frac{1}{n}$, 再以 $\frac{1}{x_i}$ 代替 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$

可得

$$\frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}} \leq \sqrt[n]{x_1 x_2 \dots x_n} \leq \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

这就是算术—几何—调和平均不等式。

凸函数理论真正引起重视, 是由于 20 世纪 40 年代后期和 50 年代初期冯·诺伊曼(J. Von Neumann), 但泽(G. Dantzig)、库恩(H. W. Kuhn)和塔克(A. W. Tucker)等人对博弈论和数学规划的研究。50 年代初, 人们对凸函数、凸集和凸锥进行了深入研究, 这方面的代表人物是芬凯尔(W. Fenchel)和克利(V. L. Klee), 他们的研究为后来凸分析的形成打下了坚实基础。

设 f 是定义在 $C \subset R^n$ 上的函数, 称

$$\text{epi } f = \{(x, a) \in R^{n+1} | x \in C, a \in R, f(x) \leq a\}$$

为 f 的上图, f 的凸性与集合 $\text{epi } f$ 的凸性紧密相关, 即有

命题 1 f 是凸集 $C \subset R^n$ 上的凸函数当且仅当 f 的上图 $\text{epi } f$ 是 R^{n+1} 中的凸集。

凸函数在其定义域中不一定处处连续或可微, 不过在其定义域的内点处一定连续, 且在內点处沿任何方向的左、右方向导数都存在, 对一元函数还有

命题 2 设 f 为 (a, b) 上的实值函数, 那么 f 在 (a, b) 上凸的充要条件是 f 在 (a, b) 上的左导数 f_- 和右导数 f_+ 处处存在, 且对 $x_1, x_2 \in (a, b), x_1 < x_2$, 有

$$f_-(x_1) \leq f_+(x_1) \leq \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \leq f_-(x_2) \leq f_+(x_2)$$

一般函数可微未必一阶偏导数连续, 而芬凯尔 1951 年证明

命题 3 开凸集上的实值可微凸函数必有连续的一阶(偏)导数。

对二次可微函数, 拉达玛赫(H. Rademacher)1922 年证明

命题 4 设 f 是开凸集 $C \subset R^n$ 上的二次可微函数, 则 f 是 C 上的凸函数的充要条件是, f 的 Hessian 矩阵在 C 上处处都是半正定的, 即对每个 $x \in C$, 有

$$y^T \nabla^2 f(x) y \geq 0, \forall y \in R^n.$$

凸函数漂亮的极值性质在最优化理论中起着重要作用。

命题 5 凸集上的凸函数的任一局部极小值点一定是整体极小值点。

命题 6 开凸集上的可微凸函数的极小值点与驻点等价。

凸函数的现代发展和强大威力是和凸分析的形成联系在一起。凸分析正式成为一门数学学科是以法国的莫罗(J. J. Moreau)1966 年的讲义《凸泛函》和美国的洛克菲勒(R. T. Rockafellar)1970 年的著作《凸分析》的问世为标志的。这两位数学家对凸函数的性质进行了深入系统研究, 把导数(梯度)的概念对凸函数进行推广, 提出了次微分(subdifferential)的概念。设 $C \subset R^n$ 是非空凸集, $f: C \rightarrow R$ 是凸函数, 向量 $\xi \in R^n$ 称为 f 在 $x \in C$ 的次梯度, 如果对一切 $y \in C$, 均成立

$$f(y) \geq f(x) + \xi^T (y - x)$$

这个不等式有一个简单的几何意义, 仿射函数 $h(y) = f(x) + \xi^T (y - x)$ 的图象是上图 $\text{epi } f$ 在 $(x, f(x))$ 点的非垂直支撑超平面。

凸函数 f 在 x 的所有次梯度的集合称作 f 在 x 的次微分, 记作 $\partial f(x)$ 。 $\partial f(x)$ 可能是空集, 可能只包含一个向量, 也可能包含无穷多个向量。

如果 $\partial f(x)$ 不是空集, 则称 f 在 x 是次可微的。凸函数在其定义域的内点总是次可微的, 反过来, 设 f 是定义在非空凸集 $C \subset R^n$ 上的实值函数, 如果 f 在 C 的任一內点处处次可微, 则 f 在 C 的内部是凸的。因此, R^n 上的实值函数是凸函数的充分必要条件为处处存在次梯度, 这一点是 M. S. Bazaraa 和 C. M. Shetty 在 1976 和 1979 年出版的两本书中明确指出的, 它反映了函数的凸性与次可微性的密切关系。凸函数 f 在 x 可微的充要条件是: $\partial f(x)$ 恰好只含单个向量 ξ , 并且, 这时 $\xi = \nabla f(x)$ 。

次梯度的特性可以用方向导数来表征, 即有

$$\partial f(x) = \{\xi \in R^n | f_+(x; h) \geq \xi^T h, \forall h \in R^n\}$$

其中 $f_+(x; h) = \lim_{t \rightarrow 0^+} \frac{f(x+th) - f(x)}{t}$ 是 f 在 x 点沿方向 h 的右方向导数。

莫罗和洛克菲勒发现了次微分的一些很好的性质, 如:

- (1) $\partial f(x)$ 是闭凸集。
- (2) $\partial(\lambda f)(x) = \lambda \partial f(x), \forall \lambda \geq 0$ 。
- (3) 若 f_1, f_2 是凸集 $C \subset R^n$ 上的凸函数, 且 C 至少有一个內点, 则有 $\partial(f_1 + f_2)(x) = \partial f_1(x) + \partial f_2(x)$ 。
- (4) f 在 x^* 达到整体极小值的充要条件是 $0 \in \partial f(x^*)$ 。

第(4)条可以看作微分学中费尔马(Pierre de Fermat)定理的推广。

需要说明的是, 一般凸分析方面的文献中, 都允许凸函数在扩充的实数集 $R \cup \{\pm\infty\}$ 上取值, 为叙述方面起见, 我们只考虑在实数集 R 上取值的情形。

与次微分紧密联系的是共轭函数的概念, 这是由芬凯尔 1949 年引进, 又由洛克菲勒 70 年代前后发展完善的。这一概念是力学和变分学中 Legendre 变换的推广。设 f 是 R^n 上的实值函数, 其共轭函数定义为

$$f^*(\xi) = \sup_x \{\xi^T x - f(x)\}, \xi \in R^n$$

由定义可知

$$f(x) + f^*(\xi) \geq \xi^T x, \forall x, \xi \in R^n$$

这叫做 Young-Fenchel 不等式。

同样, 还可以定义 f 的二次共轭

$$f^{**}(x) = \sup_{\xi} \{\xi^T x - f^*(\xi)\}, x \in R^n$$

共轭函数总是凸函数, 一般地有 $f^{**} \leq f$, 而当 f 在 x 次可微时, 有 $f(x) = f^{**}(x)$ 。 $f = f^{**}$ 当且仅当 f 是下半连续凸函数。

共轭函数看起来是一个抽象的数学概念, 它却有直观的几何意义和明确的经济解释, $-f^*(\xi)$ 可以看成是 f 的上图 $\text{epi } f$ 的支撑超平面(一元函数时称为切线)在纵轴(f 轴)上的截距。设 x 为产出丛, ξ 为产出价格系, $f(x)$ 为成本函数, 那么利润的最大可能值作为价格的函数由共轭函数 $f^*(\xi)$ 给出。类似成本和利润这样的对偶关系在微观经济分析中还很多。

次微分与共轭函数之间的关系由下列结果可以看出

$$\xi \in \partial f(x) \Leftrightarrow f(x) + f^*(\xi) = \xi^T x$$

当 f 是下半连续凸函数时, 还有更对称的关系式

$$\xi \in \partial f(x) \Leftrightarrow x \in \partial f^*(\xi).$$

虽然共轭函数的定义中不要求 f 是凸的, 但对凸函数意义较大, 它是研究凸规划的对偶性和稳定性的有力工具, 这方面洛克菲勒在 60 年代后期和 70 年代给出了一系列新颖而深刻的结果, 并具有很大的潜力。

1986 年, Hiriart-Urruty 利用共轭函数给出了极值的一个充要条件: 设 f 是 R^n 上的可微函数, 则 $x^* \in R^n$ 是 f 的极小值点的充分必要条件是: (1) $\nabla f(x^*) = 0$, (2) $f^{**}(x^*) = f(x^*)$, 在此情况下, f^{**} 在 x^* 是可微的且 $\nabla f^{**}(x^*) = 0$ 。

目前凸函数及凸分析的发展已比较成熟, 而其局限性也很明显。于是近年来, 对广义凸函数、非凸函数、非凸分析或非光滑

分析的研究方兴未艾,成为热门课题,而凸分析的巨大成功对这一研究一直起着鼓舞和示范作用。此外,近年来对凸集值映射的研究也取得一定进展,但其重要性和实际影响还未被充分认识。

参考文献

- 1 Fenchel W. Convex cones, sets and function. Lecture notes, Princeton University, Princeton, N. J. 1951
- 2 Rockafellar R T. Convex analysis. Princeton University press, Princeton, N. J., 1970
- 3 Avriel M. Nonlinear programming, analysis and methods. Prentice-Hall, Inc. 1976
- 4 Bazaraa M S, Shetty C M. Foundations of optimization, Berlin, Springer (Lecture notes in economics and mathematical systems, 1976, 122).
- 5 Hiriart - Urruty J B. American Mathematical Monthly, 1986, 93(7), 556~558
- 6 史树中,凸分析. 上海:上海科学技术出版社, 1990
- 7 刘三阳. 西安电子科技大学学报, 1990, 17(1): 63~69
(西安电子科技大学博士生导师刘三阳撰;游兆永审)

非凸函数 nonconvex functions

早在 20 世纪 50 年代就有了推广凸函数的工作。W. Fenchel(1953)和 H. Nikaidō(1954)引入了拟凸函数的概念。定义在凸集 $C \subset R^n$ 上的实值函数 f 称为是拟凸的,如果对任意 $x, y \in C, \lambda \in (0, 1)$ 有

$$f(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq \max\{f(x), f(y)\},$$

对任意实数 $a \in R, f$ 的水平集定义为

$$S(f, a) = \{x \in C | f(x) \leq a\}.$$

定义在凸集 $C \subset R^n$ 上的函数 f 为拟凸函数的充要条件是:对任意 $a \in R, f$ 的水平集都是凸集。

实际上,具有凸水平集的函数, B. de Finetti 于 1949 年曾研究过,他的结果后来被 W. Fenchel 推广和校正。

若 f 在开凸集 $C \subset R^n$ 上可微,则 f 为拟凸函数的充要条件是:对任意 $x, y \in C$

$$f(x) \leq f(y) \Rightarrow (x-y)^T \nabla f(y) \leq 0$$

60 年代, K. J. Arrow, A. C. Enthoven, J. A. Ferland, B. Marjos, C. Berge 和 D. G. Luenberger 等人在研究拟凸函数的性质、充要条件及其应用方面作了重要工作, M. A. Hanson, B. Martos, S. Karamardian 和 R. Elkin 等人提出并研究了严格拟凸性(显拟凸性)、强拟凸性(无名凸)等。

1965 年, O. L. Mangasarian 引入伪凸函数的概念,称可微函数 f 为开凸集 $C \subset R^n$ 上的伪凸函数,如果对任意 $x, y \in C$ 有

$$(x-y)^T \nabla f(y) \geq 0 \Rightarrow f(x) \geq f(y),$$

若 $x \neq y$ 时,后一不等式是严格不等式,则称 f 是严格伪凸函数。Tuy 在 1964 年也提出了类似的概念,称作半凸函数。

可微凸函数是伪凸的,伪凸函数是拟凸和严格拟凸的。

O. L. Mangasarian 1965 年证明:若 f 是开凸集 $C \subset R^n$ 上的伪凸函数,则 $x^* \in C$ 是 f 在 C 上的整体极小点当且仅当 $\nabla f(x^*) = 0$ 。

1967 年, J. Ponstein 研究了凸性、拟凸性、伪凸性等 7 种凸性之间的关系。

关于拟凸性、伪凸性等广义凸性的性质、特征、判别准则以及在数学规划中的应用的研究在 70 年代和 80 年代一直很活跃, W. E. Diewert, M. Avriel, I. Zang, J. P. Crouzeix, J. A. Ferland, R. W. Cottle 和 S. Schaible 等人获得了许多很有意义的新成果。

伪凸性和拟凸性等广义凸性早已成为最优化理论的重要经典概念,但直到目前,有关它们的进一步推广及应用研究仍很活跃,并有了新的突破。

1980 年, M. A. Hanson 提出了全新的广义凸(或称为非凸)概念,设 $f: R^n \rightarrow R$ 可微

(1)若存在向量值函数 $\eta: R^n \times R^n \rightarrow R^n$ 使

$$f(x) - f(y) \geq \eta(x, y)^T \nabla f(y), \forall x, y \in R^n$$

则称 f 是不变凸的(invex);

(2)若存在向量值函数 $\eta: R^n \times R^n \rightarrow R^n$ 使

$$x, y \in R^n, f(x) \leq f(y) \Rightarrow \eta(x, y)^T \nabla f(y) \leq 0$$

则称 f 是拟不变凸的(quasi-invex);

(3)若存在向量值函数 $\eta: R^n \times R^n \rightarrow R^n$ 使

$$x, y \in R^n, \eta(x, y)^T \nabla f(y) \geq 0 \Rightarrow f(x) \geq f(y)$$

则称 f 是伪不变凸的(pseudo-invex)。

Hansen 当时称这 3 类函数分别为第 I、第 II、第 III 类函数,不变凸、拟不变凸、伪不变凸是 B. D. Craven 1981 年采用的名称, invex 由 invariant convex 缩写而来因为 Craven 发现性质(1)在双射坐标变换下是不变的。

Hanson 1980 年证明,如果非线性规划的目标函数和每一约束函数关于同一 η 是不变凸的,那么弱对偶性和 Kuhn-Tucker 条件的充分性照样成立。类似地,将拟凸性、伪凸性分别减弱为拟不变凸、伪不变凸,相应的结论仍然成立。

1985 年 B. D. Craven 和 B. M. Glover 证明:可微函数是不变凸的当且仅当它的任意驻点都是整体极小点。由不变凸性的这一特征可见,伪凸函数或伪不变凸函数都是不变凸函数,而不变凸函数显然也是伪不变凸函数,于是不变凸和伪不变凸一致。不过一个函数作为不变凸函数时所对应的 η 一般与其作为伪不变凸时所对应的 η 是不同的。

不变凸性是对凸性的较大突破,它在数学规划最优解的充分性、鞍点等价性、对偶性和 Slater 约束规格等问题中,可以代替常用的凸性,拟不变凸性和伪不变凸性也有类似作用,从而使许多已有的结果得以大大推广。Hanson 的论文出现之后,研究、运用和推广 Hanson 工作的热潮迅速兴起,涌现了大量新成果。近年来,随着非光滑分析的发展,利用(广义)方向导数、广义梯度等工具将不变凸性、拟不变凸性和伪不变凸性向非光滑函数推广的工作增多。在 10 余年的研究热潮中, M. A. Hanson, B. D. Craven, B. Mond, A. Ben-Isreal, B. M. Glover, R. R. Egudo, T. Weir, V. Jeyakumar, R. N. Kaul, S. Kaur, D. H. Martin, T. W. Reiland, 林铨云、刘三阳、杨新民等入为推广和发展 Hanson 的工作做了大量工作。

有必要指出的是, Hanson 和 Mond 1982 年曾试图用下述方式进一步推广凸性定义,设 $f: C \subset R^n \rightarrow R$ 可微,称 f 在 C 上是 F -凸的,如果对任意 $x, y \in C$, 存在次线性泛函 $F_{x,y}: R^n \rightarrow R$ 使 $f(x) - f(y) \geq F_{x,y}[\nabla f(y)]$, 而如果有

$$F_{x,y}[\nabla f(y)] \geq 0 \Rightarrow f(x) \geq f(y)$$

则称 f 在 C 上是 F -伪凸的。Hanson 和 Mond 当时以为这种广义凸性比不变凸、伪不变凸应用更广,此后,一些学者还利用这种广义凸性“推广”数学规划中的若干已有成果。遗憾的是,这种研究并未达到预期目的, Craven 和 Glover 1985 年指出, F -凸和 F -伪凸实际上也是不变凸的,这是因为由定义易知, F -凸和 F -伪凸函数的驻点也是最小值点,而这正是不变凸函数的特征。

1953 年, K. Fan 在推广极小极大定理时引入了类凸(convexlike)的概念,称 $F: C \subset R^n \rightarrow R^n$ 在 C 上是类凸的,如果对任意 $x, y \in C, \lambda \in (0, 1)$, 存在 $z = z(x, y, \lambda) \in C$ 使

$$F(z) \leq \lambda F(x) + (1-\lambda)F(y).$$

类凸性的条件很弱,不同于上述广义凸性、非凸性的角度推广了凸性,在 Fan 的工作之后相当一段时间,未见类凸性的进一步研究和应用。直至 1980 年, K. H. Elster 和 R. Nehse 讨论了类凸规划的最优性条件, 1982 年, M. Hayashi 和 H. Komiya 讨论了类凸规划的对偶性, 1985 年, V. Jeyakumar 给出了更一般的 ρ -类凸定义,将经典的凸性一定理推广为类凸性一定理,并给出了在数学规划中的应用, 1987~1990 年, 刘三阳讨论了 ρ -类凸性在向量极值问题中的应用。

一般的广义凸性或非凸性概念都是从减弱数学规划最优性充分条件的角度提出的,而类凸性则可以改进最优性必要条件。

1983 年, J. P. Vial 给出了 ρ -凸的概念,设 $C \subset R^n$ 是凸集,

称 $f: C \rightarrow R$ 是 ρ 凸的, 如果存在实数 ρ , 使对任意 $x, y \in C, \lambda \in [0, 1]$ 有

$$f(\lambda x + (1-\lambda)y) \leq \lambda f(x) + (1-\lambda)f(y) - \rho \lambda(1-\lambda) \|x-y\|^2$$

$\rho > 0$ 时称 f 是强凸的, $\rho < 0$ 时称 f 是弱凸的, $\rho = 0$ 时 f 是凸的.

强凸和弱凸并非新概念, 早在 1963 年, E. S. Levitin 和 B. T. Poljak 在研究约束极小化方法时就提出了强凸概念. 70 年代也有一些学者研究过强凸性, 不过 J. M. Ortega 等人称之为一致凸性(B. T. Poljak 和 R. Elkin 分别在 1966 年和 1968 年还讨论过一致拟凸性), R. T. Rockafellar 称之为模是 $\frac{1}{2}\rho$ 的强凸函数.

J. P. Vial 等人在 70 年代也研究过弱凸性. J. P. Vial 在 1982 年和 1983 年对强(弱)凸函数进行了深入研究, 1986 年, V. Jeyakumar 研究了强(弱)凸函数的次梯度对偶性.

M. Avriel 等人在 70 年代还提出并研究过弧式凸函数和 r -凸函数.

总之总结、整理、研究、改进、推广和应用非凸函数的工作仍是一项很有意义和潜力的课题, 并将与非光滑分析的研究更密切地结合在一起. 对非凸函数建立类似于凸函数和凸分析的系统理论. 形成非凸分析的完整框架, 将是一项具有深远影响的工作, 而恰当建立实用有效的非凸函数概念是这一工作的基础, 也是有待进一步探讨的重要问题.

参考文献

- 1 Mangasarian O L. Nonlinear Programming. New York: McGraw-Hill 1969
- 2 Avriel M. Nonlinear programming; analysis and methods. Prentice-Hall, Inc, 1976
- 3 Hanson M A. J Math Anal, Appl, 1981, 80: 545~550
- 4 Vial J P. Math Oper Res, 1983, 8(2): 231~259
- 5 Jeyakumar V. Convexlike alternative theorems and mathematical programming. Optimization, 1985, 16: 643~652
- 6 Craven B D, Glover B M. J. Austral. Math. Soc. (Ser. A), 1985, 39: 1~20
- 7 Ben-Isreal A, Mond B. J Austral Math Soc (Ser. B), 1986, 28: 1~9
- 8 Reiland T W. Bull Austral Math Soc, 1990, 42: 437~446.
- 9 刘三阳. 西安电子科技大学学报, 1990, 17(1): 63~69
- 10 刘三阳. 应用数学, 1991, 4(1): 58~63

(西安电子科技大学博士生导师刘三阳撰, 游兆永审)

随机幂级数及指数级数 幂级数及指数级数分别是下列形状的级数:

$$(1) f(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n z^n, \quad (z = x + iy).$$

$$(2) g(s) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n e^{-\lambda_n s}, \quad (s = \sigma + it, 0 \leq \lambda_0 < \lambda_1 < \dots < \lambda_n \uparrow +\infty).$$

其中系数 a_n 是复常数, z 及 s 是复变数; (1) 及 (2) 也分别称为泰勒(Taylor)级数及狄里克莱(Dirichlet)级数, 分别有收敛圆盘 $|z| < r$ ($0 \leq r \leq +\infty$) 及收敛半平面 $Res < c$ ($-\infty < c < +\infty$). 当级数(1)及(2)中的系数是概率空间 (Ω, \mathcal{A}, P) 上的随机变量时, 它们分别称为随机幂级数及指数级数. 在理论上, 这类级数具有很有意义的独特性质. 在应用中遇到幂级数及指数级数时, 其系数往往不能确切给出, 因而随机系数情形的研究对于应用也很有意义.

波莱尔(E. Borel)于 1896 年猜测, 一般说来, 泰勒级数的收敛圆是它的自然边界, 即收敛圆上每点都是奇异点. 1929 年, 斯泰因豪斯(H. Steinhaus)证明了, 如果(1)的收敛半径 r 满足 $0 < r < +\infty$, 并且如果 $Z_n(\omega) = e^{iz^n \theta_n(\omega)}$, 其中 $\theta_n(\omega)$ 是在 $[0, 1]$ 上均匀分布的独立随机变量, 那么

$$(1') f(z, \omega) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n Z_n(\omega) z^n$$

的收敛圆几乎必然(简称为“a. s.”)是 $|z| = r$, 而且它 a. s. 是 $f(z; \omega)$ 的自然边界. 所谓“几乎必然”指的是有关事件实现的概率是 1.

巴莱(R. E. A. C. Paley)和齐格蒙德(A. Zygmund)在 1931 年证明了在 $\{Z_n(\omega)\}$ 是拉德马赫(H. Rademacher)序列, 即 $Z_n(\omega)$ 是取 1 及 -1 的概率都是 1/2 的独立随机变量时, 上述结论仍然成立. 他们还把这结果推广到随机指数级数:

$$(2') g(s; \omega) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n Z_n(\omega) e^{-\lambda_n s},$$

并且研究了 $f(z; \omega)$ 的增长性.

由上述结果, 可见波莱尔的猜测是正确的. 由于某些缺项幂级数或指数级数以收敛圆或收敛直线为自然边界, 可见随机幂级数或指数级数与前者有相似之处.

里尔-纳捷夫斯基(C. Ryll-Nardzewski)在 1953 年证明了当(1')中 $\{a_n Z_n(\omega)\}$ 是一般独立随机变量时, 或者 $f(z; \omega)$ 的 a. s. 自然边界是 a. s. 收敛圆或者有复系数幂级数, 使得 $f(y; \omega)$ 减去它而得的随机幂级数以其 a. s. 收敛圆作为 a. s. 自然边界.

阿福特(A. C. Offord)和李特尔伍德(F. E. Littlewood)在 1948 年证明了当 $f(z)$ 是 ρ 级 ($0 < \rho < +\infty$) 整函数, $\{Z_n(\omega)\}$ 是拉德马赫序列时, $f(z; \omega)$ a. s. 是 ρ 级整函数, 而且 a. s. 从原点出发的每一条射线是 $f(z; \omega)$ 的无例外值的波莱尔方向, 即在以这种射线为平分角线的任何角形(顶点在原点)内, $f(z; \omega)$ 取任何有限复数值足够多次.

余家荣在 1950 年证明了, 当 $g(s)$ 是某些有里迪(J. F. Ritt)级(简称(R)级) ρ ($0 < \rho$) 的整函数, $\{Z_n(\omega)\}$ 是斯泰因豪斯或拉德马赫序列时, 按照 $\rho = +\infty$ 或者 $< +\infty$, a. s. 每一条水平直线都是 $g(s; \omega)$ 的波莱尔线, 或者在宽度为 π/ρ 的任何水平带形内有 $g(s; \omega)$ 的一条水平波莱尔线. 但对这些波莱尔线不能断定是否有例外值.

在 20 世纪 60~70 年代中, 有关研究继续发展.

阿诺尔德(L. Arnold)在 1966 年用 $|a_n Z_n(\omega)|$ 的分布函数 $F_n(x)$ 表示出(1')的收敛半径 $r_c(\omega)$ a. s. 所取的值, 而且在 $F_n(x) = F(x), F(+0) < 1$ 时, 证明了一种零一律, 即

$$r_c(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{a. s.} \\ 0 & \text{a. s.} \end{cases} \Leftrightarrow \int_1^{+\infty} \log x dF(x) \begin{cases} < +\infty \\ = +\infty \end{cases}$$

卡昂纳(J. -P. Kahane)在 1968 年明确了里尔-纳捷夫斯基的结果, 证明了当 $\{a_n Z_n(\omega)\}$ 是独立、对称的随机变量时, $f(z; \omega)$ 的 a. s. 收敛圆是 a. s. 自然边界, 还把这结果连同其他结果推广到(2'). 当 $\{Z_n(\omega)\}$ 是高斯(Gauss)序列, 即 $Z_n(\omega)$ 是独立的、期望为 0、方差为 1 的高斯复随机变量时, 按照 $\sum |a_n|^2 < +\infty$ 或 $= +\infty$, 卡昂纳分别得到了 $f(z; \omega)$ 的一些重要的极限性质和值的分布性质.

当 $\{Z_n(\omega)\}$ 是斯泰因豪斯序列, (1) 的收敛半径是 1, $\sum |a_n|^2 = +\infty$, 阿福特证明了 $f(z; \omega)$ a. s. 没有有限亏值, 即函数可取任何有限复数值足够多次. 余家荣在 1978 年把阿诺尔德的前述结果推广到(2'). 他引进了右半平面内解析函数的(R)级, 得到了推进零一律的结果. 他还证明了: 当 $\lim_{n \rightarrow +\infty} (\log n / \log \lambda_n) < +\infty, \lim_{n \rightarrow +\infty} (\log |a_n| / \lambda_n) = 0, \lim_{n \rightarrow +\infty} (\log^+ |a_n| / \log n) = \rho / (\rho + 1)$ ($0 < \rho < +\infty$), $\{Z_n(\omega)\}$ 是拉德马赫或斯泰因豪斯序列时, $f(z; \omega)$ 的收敛横坐标 a. s. 是 0, $f(s; \omega)$ 在 $Res > 0$ 内 a. s. 有(R)级 ρ , 并且 a. s. $Res = 0$ 上每一点都是波莱尔点, 即在这样的点的任何邻域内, 函数取任何有限复数值足够多次, 至多有一例外. 但这些点的级以及关于它们是否没有例外值, 在当时还不能确定.

从 80 年代开始, 有关研究得到了进一步的发展, 解决了一些以往没有完全解决的问题.

米拉伊(T. Murai)和卡昂纳在 1983~1984 年证明了阿福特的前述结果在 $\{Z_n(\omega)\}$ 是高斯序列时仍然成立. 要使得这结果在

$\{Z_n(\omega)\}$ 是拉德马赫序列时成立,米哈伊在1981年加上了条件 $\inf\{|a_n|\} > 0$,雅可布(M. Jacob)和阿福特得到了改进的条件,孙道椿和刘全升则加上了条件 $\lim_{n \rightarrow +\infty} (\log |a_n| / \log n) = +\infty$.

孙道椿和余家荣在1988年引进了一种更广泛的随机变量序列,即 N 序列,它包含拉德马赫、斯泰国豪斯以及高斯序列作为特例.他们在1990年明确了余家荣关于波莱尔点的成果,证明了在前述假设下,而 $\{Z_n(\omega)\}$ 是 N 序列时, a. s. Res=0 上每一点都是无例外值的 $\rho+1$ 级波莱尔点.对于无穷级与更广泛的级的情形,也有类似结果.对于(1')及(2')所定义的随机整函数,也可按同样想法进行研究,从而改进阿福特与李特伍德以及余家荣的有关成果.

现在随机幂级数及指数级数的研究已取得不少成果,特别是值分布方面的成果比较显著.还有许多有待进一步研究的课题,例如(1)已有成果对于 N 序列是否都能成立?对其它序列呢?(2)随机幂级数及指数级数是否有与缺项幂级数及指数级数相应的其他性质?(3)随机拉普拉斯变换是否有一些类似性质?(4)随机级数空间的研究.(5)随机级数有关成果的应用的探讨,等等.

参考文献

- 1 Steinhaus H. Math Z, 1930,31:408~416
- 2 Paley R E A C, Zygmund A. Proc Cambridge Phil Soc, 1930~1932
- 3 Littlewood J E, Offord A C. Ann of Math, 1948,49:885~952, 1949,50:990~991
- 4 Yu Chiayung. Annales Ec Norm Sup, 1951,68(3):65~104
- 5 Arnold L. J r and angew Math, 1966,222:356~365
- 6 Offord A C. Studia Math, 1972,41:71~106
- 7 Mruai T. J London Math. Soc, 1981,24:480~494
- 8 Kahane J P. Some random series of functions. Cambridge Univ. Press, 1985
- 9 Sun Daochun, Yu Jiarong. Chin Ann of Math, 1990,11B:33~44
- 10 余家荣. 数学进展, 1990,19:257~264

(武汉大学余家荣教授撰)

数值积分法 method of numerical integration 直接地

完成对动力微分方程的逐步积分得到体系动力响应的方法.如 n 个自由度体系的动力微分方程:

$$\{M\}(\ddot{u}) + \{C\}(\dot{u}) + \{K\}(u) = \{P(t)\}$$

其中 $\{M\}$ 、 $\{C\}$ 和 $\{K\}$ 分别为 n 阶质量阵、阻尼阵和刚度阵. $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 和 $\{u\}$ 分别为各质量的加速度、速度和位移矢量. $\{P(t)\}$ 作用在体系各质量上的强迫力矢量.对于线弹性系 3 个矩阵为常数矩阵,对于弹性体系,则 3 个矩阵将随时间和本构方程应力应变关系的变化而改变.求解方程的动力响应,可用振型迭加法、有限差分法以及数值积分法.在一般情况下,动力方程中 3 个矩阵并不都是对角阵,因此,方程组是耦合的,当 n 较大时,求解联立方程的工作非常繁重,为使计算得到简化,可以采用坐标变换手段,使方程组解耦,变成 n 个独立方程:

$$\{X + \Delta\}(\dot{X}) + \{Q^2\}(X) = \{Q^T\}R(t)$$

其中 Δ 为对角阵,元素值为 $2\omega_i \xi_i$, ξ_i 是第 i 振型阻尼比, $\{Q\}$ 是关于 $\{M\}$ 阵规格化的特征向量 $\phi_1 \phi_2 \dots$, $\{Q^2\}$ 是由特征值 $\{\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2\}$ 组成的对角阵, $\{X\}$ 为新坐标系的正则坐标, $\{R(t)\}$ 为广义荷载.对于不耦合的方程组,可用杜哈梅(J. M. C. Duhamel)积分精确地求解.

有限差分法是最早用外推形式求解动力响应的一种方法,有二阶中心差分格式.1950年 J. C. Houbolt 提出用前 3 个时刻的位移矢量来描述这一时刻的位移、速度和加速度矢量的显式格式,该算法人工阻尼(又称算法阻尼或算法逸散)较强,振幅衰减较大,而且不容许以参数来控制人工阻尼.尽管它有这种缺点,但许多人认为当需要人工阻尼时还是可以用于工程实际的.另一

个问题是它仍需要起步公式来解决前 3 步的计算问题,对于线弹性体系,该算法是无条件稳定的.在 20 世纪 70 年代 E. L. Wilson 提出的统一分析稳定的基本方法对此作了进一步证明.

数值积分法,是不必首先说明在特征向量上的平衡关系,而直接完成对动力微分方程的逐步积分.但在非耦合方程求解时,为保证积分精度,每一个方程可以选择不同的时间步长,而在直接积分法中所有振型的响应选择同一个公共的时间步长 Δt ,这种积分只能对 Δt 是周期的小分数的那些响应分量得到精确值,而其它振型响应分量计算并不精确.但是,如果振幅是很小响应,误差并不重要,不过需要对有所振型积分都稳定.稳定意味着时间 t 的位移、速度和加速度由于舍入引起的误差在积分过程中不增长.如果时间步长足够小,对高频分量响应精确积分可保证稳定,但这需要一个非常小的时间步长,而这个响应的精确积分通常不是必须的.

1956年, P. D. Lax 和 R. D. Richtmyer 对用时间积分法解微分方程的稳定性问题已进行过评述,1959年 N. M. Newmark 首先提出广义加速度法求解动力方程响应问题,该法是一种隐式格式且是无条件稳定的方法,在格式中引入了两个自由参数 (γ, β) ,适当地选择参数可以改变加速度的性质和稳定的精确度.当取 $\gamma = 1/2$ 和 $\beta = 1/6$ 时就是线性加速度法,当取 $\gamma = 1/2$ 和 $\beta = 1/4$ 时为常平均加速度法,该法无人工阻尼及振幅衰减,但周期延长

3%,若 $\gamma > 1/2$ 出现人工阻尼,如果 $\beta \geq \frac{(\gamma + \frac{1}{2})^2}{4}$ 所述算法是无条件稳定的.用平均加速度来表示这一时刻的速度和位移矢量的尚有龙格-库塔法,用前 3 个时刻的位移、速度和加速度矢量来表示这一时刻的 3 个矢量有预测-校正的 Milne 多步法.

进入 20 世纪 60 年代,对多步法的稳定性问题以及用数值积分法求解动力响应问题有进一步研究,如在 1963 年 G. G. Danquist 对多步法稳定性的研究;1966 年 D. E. Johnson 对 Houbolt 法的稳定性问题进行了论证;1967 年 C. W. Gear 着重研究了非弹性体系动力方程的数值积分问题;1968 年 E. L. Wilson 应用直接积分法解地下结构的动力分析问题等等.70 年代研究者们对各种格式的稳定性、振幅衰减率、周期增长率进行了较全面的研究,如 1971 年 R. E. Nickell、1973 年 R. D. Krieg、1976 年 T. J. R. Hughes 等,他们分别对数值积分中近似算子的稳定性问题、方法的收敛性、能量的衰减和周期增长以及数值方法在有限元中的应用进行研究,有代表性的论文是 1973 年 K. J. Bathe 和 E. L. Wilson 的文章,该文为直接积分格式的稳定性分析提供了一个系统而又基本的方法.该法在基本格式中引入一个能控制稳定性的参数 θ ,故称 Wilson- θ 法,在 $\theta \Delta t$ 时间间隔内加速度呈线性变化,而 $\theta \geq 1$,在已知 t 时刻的 3 个矢量后,不是先算 $t + \Delta t$ 时刻的 3 个矢量,而是先超前计算 $t + \theta \Delta t$ 时刻的 3 个矢量,然后用 $t + \theta \Delta t$ 时刻的矢量退到 $t + \Delta t$ 时刻的 3 个矢量,直至算出全部动力响应.

为研究稳定性问题,将基本格式代入非耦合的动力方程,得出用 t 时刻的 3 个矢量表示 $t + \Delta t$ 时刻的 3 个矢量关系式,矩阵 $[A]$ 为 3×3 阶矩阵,当计算 n 个时间步长之后,矩阵 $[A]$ 成为 $[A]^n$,设 $\rho(A)$ 是矩阵 $[A]$ 的谱半径, $\rho(A) = \max |\lambda_i| (i = 1, 2, 3)$, λ_i 为 $[A]$ 阵的特征值,若 $\rho(A) \leq 1, n \rightarrow \infty$ 时, J^n 有界(J 是 $[A]$ 阵的 Jordan 形式)就是稳定准则.此外,如果 $\rho(A) < 1$,则 $J^n \rightarrow 0$ 且 $\rho(A)$ 越小,收敛得越快.并将稳定准则引入到 Houbolt 法和 Newmark 法中,研究其稳定性, Wilson- θ 法,当 $\theta = 1$ 时,是线性加速度法,是有条件稳定格式.当 $\theta = 2$ 时,是平均加速度法,为无条件稳定格式,但数值积分导致周期增长和振幅衰减太大.当选取 $\theta = 1.37$ 时为无条件稳定极限值和最小误差,一般取 $\theta = 1.4$. Wilson- θ 法具有较强的人工阻尼,振幅衰减太大,只有当时间步长 $\Delta t = 0.01T$ (T 为周期)时积分是精确的.这种算法对滤掉高频响应是有好处的.从精度比来看,该法好于 Houbolt 法,从

周期增长百分率来看,该法不如 Newmark 法,而从振幅衰减率来看又优于 Newmark 法。

从 70 年代末到 80 年代,许多数学工作者又提出了多种无条件稳定的积分格式,并从不同的角度改进了前面几种格式,如 Hilber- α 法以及配置格式;两步法;Bossak 的 α 法;改进的 Wilson- θ 法;速度有限单元法;Nazzi-Amderheggen 的 β 法以及三参数法等。

1977 年和 1978 年 H. M. Hilber 提出的 Hilber- α 法及配置格式法,该法在基本格式中引入 3 个参数(α, β, γ),主要参数 α 可对基本动力方程进行匹配,即 $[M]\{\dot{u}_{t+\Delta t}\} + (1+\alpha)[K]\{u_{t+\Delta t}\} - \alpha[K]\{u_t\} = \{F_{t+\Delta t}\}$, α, β, γ 参数控制算法稳定性和人工阻尼,如果 $\alpha=0$,该法退化为 Newmark 方法族。用 Wilson 提出的稳定准则,时行稳定分析后得出谱半径 $\rho(A) \leq 1$, (当取 $\alpha=0, \beta=0.25, \gamma=0.5$ 时,即为 Newmark 法中的梯形法则, $\rho(A)=1$) 为无条件稳定的一步格式,当 α 取负值时 ($\alpha=-0.1 \sim -0.5$), 振幅衰减和周期增长率都好于 Houbolt 法、Wilson- θ 法,它具有可连续控制算法阻尼的特点。在特定的条件下可以达到零阻尼。Hilber 还提出一种算法具有竞争性所具备的 5 个属性:(1)对于线性问题的无条件稳定性。(2)在每一步中需要求解的隐式方程不超过一组。(3)二阶精度。(4)在高阶模型中可控制计算散逸。(5)自起步。

1978 年作者提出了一个具有较高精度,并能控制算法阻尼无条件稳定的两步数值积分法,初提算法时用 3 个自由参数,后经计算比较在算法中只保留一个参数 δ 用于控制算法阻尼。当取 $\delta = \frac{1}{6}$ 时该法无算法阻尼。在特定情况下,当 $\delta > \frac{1}{6}$ 时,致使解中高振型响应可以有效地被滤掉,且有 Wilson- θ 法的特点。该法以 Simpson 法则为依据,在每两步时间间隔内加速度呈二次曲线变化。当 $t-\Delta t$ 时刻及 t 时刻的位移、速度、加速度矢量已知时, $t+\Delta t$ 时刻 3 个矢量即能唯一确定。基本格式中是用前两个时刻的 4 个量值来描述这一时刻的 3 个量值。在应用 Wilson- θ 法提出的稳定准则时,需将 3×4 阶矩阵 $[A]$ 转换为 4×4 阶矩阵 $[A1]$,分析 $[A1]$ 矩阵得出它的特征方程 $\lambda^4 - \lambda^3 - \lambda^2 + \lambda = 0$,特征值 $|\lambda_i| = 1, (i=1, 2, 3, 4)$, 即 $\rho(A) = \max |\lambda_i| = 1$ 。该法当取 $\delta = \frac{1}{6}$ 时,则无振幅衰减率、周期增长率。若不考虑周期增长,振幅、衰减率都小于 Newmark 法、Collocation 法、Wilson- θ 法、Hilber- α 法。该法唯一的缺点是需有起步公式。

1980 年 L. W. Wood 和 M. Bossak 提出的 Bossak- α 法,实为 Newmark 法改进的一种方法。杨真荣提出的速度有限单元法,为数值积分法的一步法形式,而在稳定证明中用 3×3 矩阵来求 3 个根,讨论谱半径问题。

1981 年孙焕纯提出的改进 Wilson- θ 法,该法主要假定加速度在时间步长内是时间的二次函数,即 $\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \{A\}\Delta t + \{B\}\frac{\Delta t^2}{2}$, 其中 $\{A\}、\{B\}$ 分别表示加速度的一次和二次变化率,在 n 个自由度体系中是 $2n$ 维向量。

1988 年邵慧萍等提出的三参数(α, β, δ)算法,该算法可包括 Newmark 法(令 $\alpha=\delta=0$)、Hilber- α 法(令 $\alpha=0$)和 Bossak 的 α 法(令 $\delta=0$)。它具有无条件稳定的性质,是二阶单步算法,且具有合适的算法阻尼。该法和 Wilson- θ 法等方法比较,需要的内存量和 CPU 时间基本一致,而在相同的 $\rho(A)$ 值前提下,该算法的精度有所提高。

从众多算法看来,算法的精度一个比一个好,而同时都能满足无条件稳定的准则,且大都有参数可调人工阻尼,所以数值积分法已达相当高的水平。

参考文献

- 1 Houbolt J C. J Aeronaut, Sci, 1950, 17, 540~550
- 2 Newmark N M. Proc Am Soc Civ Engs, 1950, 85(EM3): 67~94
- 3 Bathe K J, Wilson E L. Earthg Engng Struct Dyn, 1973,

1: 283~291

- 4 Hilber H M, Hughes T J R. Earthq Engng and struct Dyn, 1978, 6, 99~117
- 5 Wood W L, Bossak M & Zienkiewicz O C Intern. J Nemer, Meth Engng, 1980, 15, 1562~1566
- 6 孙焕纯. 力学学报, 1981, 2, 153~164
- 7 丁树人. 固体力学学报, 1983, 3, 333~340

(太原工业大学丁树人教授撰)

变率配置法 method of rate collocation

可直接求解微分方程近似解的数值方法,是加权残数法中一个新的基本方法。加权残数法的解题思想远在 20 世纪 30 年代即提出,那时主要应用于数学领域,到 50 年代,这一方法才正式被归纳统一为加权残数法,又称加权残值法或加权余量法。该法分析问题,先假定一个试函数作为近似解,将试函数代入控制微分方程和边界方程或初始条件,一般不能满足而出现残值,用 R_I 和 R_B 分别表示控制微分方程的残值和边界方程的残值。这些残值在整个域内(V)或在边界(S)上,须按某种平均意义来消除残值,根据不同的条件引入不同的权函数 W 乘以残值使其为零,基本方程为:

$$\int_V R_I W_i dv + \int_S R_B T_i ds = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中 W_i 和 T_i 分别为在域内和边界上(或初值)所采用的权函数,由此可得到消除残值的方程组,它是一系列线性或非线性的代数方程组,联立求解这些方程组,便得出满足控制微分方程和边界条件的近似解。若假定的试函数满足边界方程(或边界条件)即 $R_B=0$, 仅用 $\int_V R_I W_i dv = 0$ 式而消除残值 R_I , 则称内部法,若假定的试函数满足控制微分方程,即 $R_I=0$, 仅用 $\int_S R_B T_i ds = 0$ 式消除残值 R_B , 则称边界法,否则称混合法。

不同的权函数 W_i 反映在消除残值时的不同准则,加权残数法可根据不同的权函数而得到不同的基本方法,通常有以下几种形式:(1)配点法;(2)最小二乘法;(3)子域法;(4)伽辽金法;(5)矩量法。

加权残数法的基本特点是:在理论方面它直接从控制微分方程出发求解问题,简单易懂,不象变分法那样需要复杂的数学处理,又由于它的应用与问题的能量泛函是否存在无关,因而它的应用范围较广,是半解析法的一种,即解析法与离散结合的方法。在计算方面,计算程序十分简单,所求解的代数方程组的阶数较低,计算机内存容量要求不高,可以充分发挥微机的作用。此外,加权残数法在求得结果的同时,可以给出残值的大小,而残值的大小可以直接反映出解答的精确度,这一优点较为独特。

加权残数法从 70 年代末引入固体力学中以来,不论在理论上还是在工程应用中,新方法的提出和应用都取得了较大的发展。1982 年中国在厦门召开了第 1 届“全国加权残数法学术交流会”,会上就有 64 篇学术论文发表,随后又召开了第 2 届、第 3 届学术会议。1986 年日本国际计算力学会议和美国第 1 届计算力学世界大会,中国的 MWR Method of Weighted Residuals 论文最多。到 1990 年底,中国力学工作者在国内外各种学术会议和刊物上发表的 MWR 论文超过 500 多篇,范围广泛地涉及到各个学科。如该法可解弹性力学中的平面问题;三维问题;在板壳中的薄板弯曲问题;大挠度问题;稳定问题和动力响应问题;中厚板的静、动问题以及非线性结构的静、动力问题。

在上面提到的 5 种基本方法中,配点法是 MWR 中使用的最简单的一种方法,最易于同其它方法结合使用,因此应用极为普遍(国外使用的 MWR 就以配点法为最多)。但一般单纯配点法精度较低,故国内的许多学者大大地发展配点法,如样条伽辽金配点法、矩量配点法、能量配点法、最小二乘配点法、配线法、分段配线法、变率配点法、变率配线法、变率配面法以及变率配置混合法。

80 年代末,姜开春等提出在概念上与其他 MWR 不同的变

率配点法,主要特点是在低阶微分空间处理残值,它扩充了配点法的概念,也为MWR在数值方法求解中开辟了一条新的途径。其精度在同样网格下高于一般配点法,但需考虑残值方程式的波动情况,且在集中力作用时不能求导,应用时也有一定困难。

1991年太原重型机械学院姚河省硕士研究生论文对该法进行研究,提出变率配线混合法及变率配面法,解决了变率配点法对集中力不能求导的问题。同样以四边简支薄板为例,采用3×3到11×11的均匀网格划分,同时用配点法、配线法、变率配点法和变率配线法进行计算,结果表明,在同样网格划分条件下,变率配置法比一般配置法计算结果好。在集中力作用下分别用配面法和变率配面法进行计算,变率配面法比配面法收敛更快。另外,将配线法和变率配点法联合使用,计算正交各向异性单层薄板受均布载作用时的中点位移,效果良好。1992年太原工业大学郭胜利硕士研究生把变率配置法(配点、配线及配面法)推广到解中厚板的静、动力问题,先将厚板方程化为可解形式(有限阶),经过数学处理得出以中面挠度 \bar{W} 表示的厚板方程:

$$D\nabla^4(1+B_1\nabla^2+B_2\nabla^4+B_3\nabla^6+\dots)\bar{W}=P$$

其中 $D=Eh^3/12(1-\mu^2)$, ∇^2 为对 x,y 的二维拉氏算子, h 为板厚, P 为分布载荷。

$$B_1 = \frac{(8-3\mu)h^2}{40(1-\mu)}, B_2 = \frac{(107\mu^2-480\mu+583)h^4}{840(1-\mu)^2}, B_3 = \frac{9050-11445\mu+5064\mu^2-779\mu^3h^6}{15120(1-\mu)^3} \frac{h^6}{64}$$

取试函数 $\bar{W} = \sum_{i,j=1}^n A_{ij} \varphi_{ij}$ 满足边界条件,则残值为:

$$R_j = \sum_{i,j=1}^n A_{ij} D\nabla^4(1+B_1\nabla^2+B_2\nabla^4+B_3\nabla^6)\varphi_{ij} - P$$

引进算子列阵 $\{T\} = [1 \frac{D}{DX}]^T$, 则令 $\{T\}R_j = \{0\}$, 即能求出系数 A_{ij} 。

这种方法是:设问题的控制微分方程及边界条件已知,取方程的近似解为 $\bar{U} = \sum_{i=1}^n C_i \varphi_i$, 其中 \bar{U} 为试函数, φ_i 是一组线性无关的基函数, C_i 为任意常数。将试函数代入求解方程,则有残值 $\{R\}$, 引入残值变化率算子 T , 并作用于残值, 则有

$$T\{R\} = \begin{Bmatrix} T_1 R_j \\ T_B R_B \end{Bmatrix}$$

式中 $T_1 = \frac{d^{(j)}}{d\bar{r}^{(j)}}$ 为域内的 j 阶微分算子, \bar{R} 为域内的矢; $T_B =$

$\frac{d^{(j)}}{d\bar{r}^{(j)}}$ 为沿边界 S 的 j 的阶微分算子, \bar{R} 为边界 S 上的矢。令试函

数 \bar{U} 的残值变化率函数 $T\{R\}$ 在闭域 V 上的加权积分等于零,

即 $\int_V W\{T\{R\}\} dv = 0$ 。 W 为权函数, 随着不同的权函数和不同的变率配置方式可得不同的变率配置法。

变率配点法:当权函数 W 取为点源函数狄拉克 δ 函数时有:

$$\int_V W\{T\{R\}\} dv = \int_V W_i\{T\{R\}\} dv = \int_V \delta(P-P_i)\{T\{R\}\} dv = \{T\{R\}\}_{P=P_i} = 0$$

变率配线法:取权函数 W 为线源函数 W_k 时, 则有:

$$\int_V W\{T\{R\}\} dv = \int_V W_k\{T\{R\}\} dv = \int_{P_{k1}}^{P_{k2}} \{T\{R\}\} dL_k = 0$$

变率配面法:当取试函数 W 取为面源函数 W_i 时, 则有:

$$\int_V W\{T\{R\}\} dv = \int_V W_i\{T\{R\}\} dv = \int_w \{T\{R\}\} dv = 0$$

该法高阶变率理论是可行的, 而目前尚无高阶变率算例。另一方面, 将该法如何引入到扁壳的静动力中去的问题, 还有待进一步研究。

参考文献

1 姜开春, 王德清. 固体力学学报, 1988; 4
2 姚河省, 太原重型机械学院硕士研究生论文, 1991

3 戴少度, 姚河省. 力学在工程中的应用. 北京: 中国林业出版社, 1992. 345~348
4 丁树人, 郭胜利. 计算力学理论与应用. 北京: 中国科学出版社, 1992. 124~127
5 郭胜利. 太原工业大学硕士研究生论文, 1992
(太原工业大学丁树人教授撰)

非局部变分力学 nonlocal variational mechanics

变分法是一个古老而又具有强大生命力的数学分支, 它不但在理论方面仍在继续深入发展, 而且在应用方面更是日益广泛流传, 特别是从20世纪60年代, 电子计算机逐渐普及, 使得有限单元法迅速兴起并渗透到许多研究领域和实用部门。因此, 作为有限单元法理论基础的变分法, 在国内外越来越受到重视并取得日新月异的进展。中国学者在变分法这一学科领域内作出了重要贡献, 得到国际学术界的公认。从1993年由19位国际知名学者创办出版新的国际性学术刊物《变分法和偏微分方程》就足以看出, 变分法又有向深度和广度大发展的势头。

早在1696年, 约翰·伯努利(John. Bernouli)就以分开信形式提出最早的一个变分命题, 即最速降线问题。后经莱布尼兹(Leibniz)、牛顿(Newton)、雅可比·伯努利(Jacobi Bernouli)的努力才得到较为完满的解决。历史有名的第2个变分命题, 是短程线问题, 这个问题于1697年被约翰·伯努利所解决, 但它的普通理论却直到后来通过欧拉(Euler)和拉格朗日(Lagrange)的努力才得以建立。第3个变分命题是等周问题, 它的变分特性是由欧拉察觉出来的。从历史上看, 可以说是欧拉和拉格朗日在解决这些变分问题过程中创立了经典的变分法。1744年欧拉从泛函变分获得微分方程, 后来人们称这类微分方程为欧拉方程。1755年拉格朗日用比欧拉法更简便的方法获得同样结果, 所以后来人们也称这类分方程为欧拉-拉格朗日方程。

1918年奈特(Noether)概括了力学研究中存在的不变性、对称性的规律, 并指出使用量不变的无穷小变换导致守恒定律, 这就揭示了一系列对称间的转化关系。后来人们称之为奈特定理。接着希尔伯特(Hilbert)和爱因斯坦(Einstein)都从事过这方面的研究, 从而把不变性变分理论提高到一个新水平。这在变分法的发展史上可说是一个新的里程碑。不变性变分理论不仅对数本身, 而且对其他学科, 特别是力学和物理学的发展有着极其深远的影响并起到非常有力的推动作用。

自1969年以来, 埃德伦(Edeien)出版专著并发表一系列学术论文对经典的(即局部的)变分法和不变性变分理论进行全面推广, 从而建立起非局部变分力学的框架。他所创建的非局部变分力学与经典变分理论的根本区别是欧拉方程不再是微分方程, 而是积分微分方程。

埃德伦的非局部变分力学的框架包括下列主要内容, 把经典变分法的各种概念推广到非局部情形; 建立非局部变分法的驻值条件; 非局部欧拉-拉格朗日算子的性质, 导致线性算子的拉格朗日的函数, 自共轭和反自共轭的定义, 变分嵌入问题, 边界条件和连续性要求; 具有多个相关变量的非局部驻值化问题, 欧拉-拉格朗日算子的零类; 伴随定理和存在性问题; 动量-能量复形(complex), 欧拉方程的不变性, 积分问题; 是有约束的驻值问题; 无约束的非局部变分问题; 多重相互作用问题, 泛函的多重相互作用展开; 扩展的泛函变分; 各种能量形式和恒等式, 弱的坐标不变性, 弱的点不变性, 守恒定律; 强的坐标不变性和强的点不变性; 绝对不变性; 拉格朗日函数类, 有约束的拉格朗日函数类的特征。

从1972年, 巴特卡(Bhatkar)对上述埃德伦的非局部变分力学框架作了重要补充, 其中包括隐含非局部性的概念, 具有隐含非局部性的驻值条件, 具有约束的隐含非局部变分问题, 构造非局部变分力学的拉格朗日函数的方法和拉格朗日乘子法等。

埃德伦本人曾在他的专著《非局部场论》中阐述了非局部连续的变分表述问题, 但是不够具体。航天民曾于1981年应用非局

部变分力学建立了隐含的和多重相互作用的非局部微极热弹性固体的本构理论。总的看来,在理论的应用方面成果不多,似乎还没有引起足够的重视。

根据非局部变分力学的发展现状,今后应从理论和应用两方面开展研究工作:(1)在现有理论框架中还存在几个疑难问题,急需解决,而且这个框架还未能覆盖经典理论中的全部相应问题,因此需要进一步完善和补充非局部变分力学的理论框架;(2)在应用方面需要进一步寻求和开拓非局部变分力学的应用领域。

(辽宁大学戴天民教授撰)

几何 拓扑

分形 fractal 1975年,法国曼德尔布罗特(B. B. Mandelbrot)首先采用分形一词。分形,指的是一类处处连续但处处不可微的几何对象。数学上的定义是,分形指豪斯道夫维数 d_H 严格大于拓扑维数 d_T 的集合。但更方便的定义是:一类具有伸缩对称性其局部以某种方式(自相似性或自仿射性)与整体相似的形体叫分形。研究分形形态、数量表征及其构造演化的科学称为分形几何学(或分形理论)。

自然界的分形几何理论,是现代数学的一个新分支,它与动力系统的混沌理论交叉结合,相辅相成,它的方法已成为科学家和工程师们处理自然与工程中不规则图形的强有力的理论工具,已在数学、物理、化学、生物、医学、地质、地震、材料、音乐、美术、经济等许多领域广泛应用。

1875年,德国维尔斯特拉斯(K. Weierstrass)构造了处处连续但处处不可微的函数。德国康托(G. Cantor)构造了有许多奇异性质的三分康托集。1890年意大利皮亚诺(G. Peano)构造了填充空间的曲线。1904年,瑞典科契(H. Von Koch)设计出类似雪花和岛屿边缘的一类曲线。1915年,波兰谢尔宾斯基(W. Sierpinski)设计了像地毯和海绵一样的几何图形,这些都是解决分析与拓扑学中的问题提出的反例,但它们正是分形几何思想的源泉。1919年,德国豪斯道夫(F. Hausdorff)开始了奇异集合性质与量的研究,提出分数维概念。1928年布利干(G. Bouligand)将冈可夫斯基容度应用于非整数维,由此能将螺线作很好的分类。1932年庞特里亚金(L. S. Pontryagin)等引入盒维数。1934年,贝塞考维奇(A. S. Besicovitch)更深刻地揭示了豪斯道夫测度的性质和奇异集的分数维,从而产生豪斯道夫-贝塞考维奇维数。以后,这一领域没有引起更多人的注意。先驱者们的工作只是作为分析与拓扑学教科书中的反例而记载下来。

1960年,曼德尔布罗特在研究棉花变化的长期性态时,发现价格在大小尺度间的对称性;同年在研究信号的传输误差时,发现误差传输与无误差传输在时间上按康托集排列;在对尼罗河水位和英国海岸线的数学分析中,发现类似规律。他总结出自然界中很多现象从尺度变换角度表现出的对称性。他将这类集合称作自相似集,其严格定义可由相似映射给出。他从欧氏测度不能刻画这类集的本质,转向维数的研究中,发现维数是尺度变换下的不变量,他主张用维数来刻画这类集合。1975年,曼德尔布罗特用法文出版了分形几何第一部著作《分形,形、机遇和维数》,1977年该书的英文版将分形定义为豪斯道夫维数严格大于其拓扑维数的集合。总结了根据自相似性计算实验维数的方法。由于相似维数只对严格自相似这一小类集有意义,豪斯道夫维数虽然应用广泛,但在很多情形下难以用计算方法求得。因此分形几何的应用受到局限。1982年,曼德尔布罗特的新著《自然界的分形几何》出版,书中讨论了数学、物理、天文、地理、生理、经济学等多种学科中的分形问题,并重新研究了盒维数。为避免稠密可列集盒维数与集所在空间维数相等的缺陷,1982年特里科特(C. Tricot)引入填充维数,1983年格拉斯伯格(P. Grassberger)和普

罗克西娅(I. Procaccia)提出根据观测记录的时间数据列直接计算动力系统吸引子维数的算法。1985年,曼德尔布罗特提出并研究自然界中广泛存在的自仿射集,而自相似集则可通过仿射映射来严格定义。1982年德金(F. M. Dekking)研究递归集,这类人形集由迭代过程如嵌入方法生成,使用范围更广泛,但维数的研究非常困难。德金获得维数上界,1989年,钟红柳等人解决了德金猜想,确定了一大类递归集的维数。随着分形理论的发展和维数计算方法的逐步提出与改进,1982年以后分形理论逐渐在很多领域得到应用并越来越广泛,建立简便易行的维数计算方法,以满足应用发展的需要,还是一项艰巨的任务。

自然界中的分形,与概率统计、随机过程关系密切,确定性的古典分形集加入随机性,就会产生出随机康托集、随机科契曲线等各种随机分形。1968年,曼德尔布罗特研究布朗运动这一随机过程时,将其推广到与分形有关的分数布朗运动。1974年他又提出分形渗流模型。1988年,柴叶斯(J. T. Chayes)给出了详细的数学分析,1984年,扎尔(U. Zähle)通过随机删削而得到十分有趣的分形构造。随机分形能更真实地描述和模拟自然现象。

动力系统中的分形集是近年分形几何中最活跃和最引人入胜的一个研究领域,动力系统的吸引子通常都是分形集。它们产生于非线性函数的迭代和非线性微分方程中,1963年,洛伦兹(E. N. Lorenz)在研究流体的对流运动时,发现后来以他的名字命名的第1个奇异吸引子,这是一个典型的分形集。1976年法国伊依(M. Hénon)考虑标准二次映射迭代系统时获得伊依吸引子,它具有某种自相似性和康托截面的分形性质,1985年劳威尔(H. A. Lauwerier)将斯梅尔的马蹄映射变形成劳威尔映射,其迭代下不稳定流形的极限集成为典型的奇异吸引子,它与水平线的截面为康托集。1985年,格雷波基(C. Grebogi)等构造了1个二维迭代函数系统,其吸引界是维尔斯特拉斯函数,并得到盒维数。1985年,迈克多纳(S. M. Mac Donald)和格雷波基等得到分形吸引界的3种类型:(1)局部不连通的分形集;(2)局部连通的分形拟圆周;(3)既不局部连通又不是拟圆周。前两者具有拟自相似性。

动力系统中另一类分形集来源于复平面上解析映射的迭代。居利亚(G. Julia)和法图(P. Fatou)于1918~1919年间开创这一研究,他们发现,解析映射的迭代把复平面划分成两部分,一部分为法图集,另一部分为居利亚集(J集)。他们在处理这一问题时还没有计算机,完全依赖于他们自身固有的想象力。1980年,曼德尔布罗特用计算机绘出用他名字命名的曼德尔希罗特集(M集)的第一张图,1982年道迪(A. Douady)构造了含参二次复映射 f_c 。其居利亚集 $J(f_c)$ 随参数 c 的变化呈现各种各样的分形图象。著名的有道迪兔子,圣马科吸引子等。同年,茹厄勒(D. Ruelle)得到J集与解析映射系数的关系,解决了解析映射J集豪斯道夫维数的计算问题。茹勒特(L. Garnett)得到 $J(f_c)$ 集豪斯道夫维数的数值解法,1983年韦当(M. Widom)进一步推广了部分结果。法图在1926年就开始整函数迭代的研究,1981年密休威茨(M. Misutrewicz)证明指数映射的J集为复平面,解决了法图提出的问题,引起研究者极大兴趣。发现超越整函数的J集与有理映射J集的性质差异,1984年德万尼(R. L. Devaney)证明指数映射 E_λ 的 $J(E_\lambda)$ 集是康托集或复平面而 $J(f_c)$ 是康托尘或连通集。

复平面上使 $J(f_c)$ 成为连通集的点 c 组成M集,尤希斯(H. Jürgens)和派特根(H-O. Peitgen)认为,M集的性质过去一直是并且将来继续是数学研究的一个巨大难题。通过将数学理论与计算机图形学实验加以融合,及道迪、惠巴德(H. Hubbard)等人在这方面进行的基础性研究工作,在解决这一难题方面已取得重大进展,使人们加深了对M集的了解。道迪和惠巴德1982年证明M集是连通的和单连通的。人们猜测M是局部连通的,目前每一张计算机图形都证实了这一猜测,但至今还没有人能给予证明。M是否为弧连通,目前尚不清楚,M集边界的维数也是值得研究的问题之一。

M 集除了将 J 集分成连通与非连通的两类之外,还起着无穷个 J 集的图解目录表作用。即把 M 集 C 点周围的图形放大就是与 C 点有关的 J 集的组成部分。但这一发现的数学严密性至今仍未确定,谭磊(Tan Lei)1985年证明在每一个密休威茨点邻近 M 集与相关 J 集之间存在着相似性,尤更斯等在 M 集的静电位研究中获得与自然形貌相似的分形图象,目前包括尤更斯等在内的很多研究人员都致力于借助计算机探索 M 集,其它一些分形集的三位电位再现及相关的研究工作也正在取得进展,1990年德万尼通过数值实验观察到 M 集的复杂图形由许多不同周期的周期轨道的稳定区域共同构成。1991年黄永念运用他提出的代数分析法证明了这一事实,他还研究了 M 集及其广义情况周期轨道整体解析特性。

巴斯勒(B. M. Barnsley)和德门科(S. Demko)1985年,引入迭代函数系统, J 集及其它很多分形集都是某些迭代函数系统的吸引集,用其它方法产生的分形集也可用迭代函数系逼近,1988年,劳威尔(H. A. Lauwerier)通过数值研究发现毕巴斯勒等研究含参数的函数系迭代动力系统,得到 M 集类推集 D 并发现 D 与 M 在连通性上的差异,在线性映射系迭代下,可以产生著名的分形曲线——双生龙曲线。1986年米朱泰尼(M. Mizutani)等对其动力系统进行了研究。

一般动力系统下的分形集,其豪斯道夫维数 d_H 难以通过理论方法或计算方法求得。对于具有迭代式构造的分形集,贝德浮德(T. Bedford)等在1986年已给出卓有成效的算法,但对一般非线性映射迭代动力系统产生的分形集,这些结果都难以应用,其豪斯道夫维数 d_H 的结论与算法实际上没有。卡普兰(J. L. Kaplan)和约克(J. A. York)1979年引入李雅普诺夫维数 d_L 并猜测 $d_L = d_H$;1981年勒拉皮尔证明 $d_H \leq d_L$; 杨(L. S. Young)1982年证明二维情况下 $d_H = d_L$; 艾茹瓦(A. K. Agarwal)等1986年给出例子说明高维情形卡普兰—约克猜测不成立。这一猜测力图从动力学特征推断几何结构,其反问题是由吸引子维数推断混沌动力学,这是值得研究的问题,但目前工作甚少,且主要限于计算机研究。此外,含参动力系统混沌临界态或突变处的分形集维数也有待进一步研究。

多重分形(multifractals)是与动力系统奇异吸引子有关的另一类重要分形集,其概念首先由曼德尔布罗特和伦依(A. Renyi)引入,法默(J. D. Farmer)等在1983年定义了多重分形广义维数,1988年博尔(T. Bohr)等人将拓扑熵引入多重分形,哈尔西(T. C. Halsey)等引入配分函数,科莫多(M. Kohmoto)为多重分形引入熵函数和自由能。建立了多重分形与热力学的类比,1988年,阿内多(A. Arneodo)等引入将小波变换用于多重分形研究。费德(J. Feder)和特沃(T. Tel)等人进行了多重分形子及标度指数的研究。李(J. Lee)等发现了多重分形热力学形式上的相变。1990年,伯克(C. Beck)得到广义维数的上下界和极限并研究了多重分形的均匀性量度。曼德尔布罗特研究了随机多重分形及负分维。1991年科维克(Z. Kovács)等引入双变量迭代系统,由最大特征值和吉布斯势导出维数,李雅普诺夫指数,提供了对多重分形相变分类的一种手段。对于多重分形目前虽已提出不少处理方法,但从数学的观点上看,还不够严谨,部分问题的数学处理难度也较大。

分形理论真正发展起来才10余年。值得庆幸的是,近年分形理论的应用发展远远超过了理论的发展,给分形的数学理论提出了更新更高的要求。数的理论计算、估计,分形重构, J 集和 M 集及其推广形式的性质,动力学特征及维数研究是今后的研究重点。多重分形理论的完善以及如何用这些理论来解决实际问题可能会引起科学家们广泛的兴趣,而动力学特征、相变和子波变换可能会成为其中的几个热点。

参考文献

- 1 李后强,等.分形与分维.成都:四川教育出版社,1990.1~120
- 2 汪富泉,等.分形几何与动力系统.哈尔滨:黑龙江教育出版社,

社,1993.20~50

(四川师范学院汪富泉副教授;李后强教授审)

拓扑 Boole 格理论

theory of topological boolean lattice 拓扑 Boole 格又称为拓扑布尔(Boole)代数,是具有拓扑结构的布尔代数。拓扑 Boole 格理论是拓空间理论的推广和应用。布尔代数的理论在思维科学、计算机科学和自动化技术等科技领域有着广泛的应用。一般拓扑学是一个应用广泛的现代数学基础的重要分支。拓扑 Boole 格的理论为拓扑学的应用开辟了更广阔的前景,在经典数学与许多现代科技领域之间架起了一座桥梁,也是研究拓扑理论的重要方法。

1922年波兰库拉托夫斯基(K. Kuratowski)从闭包运算 $A \rightarrow \bar{A}$ ($A, \bar{A} \in P(x)$, x 是一个集合, $P(x)$ 表示 x 的幂集)出发,定义 x 上的拓扑,给出了拓扑空间的一般定义。这样,一方面表明拓扑空间是拓扑 Boole 格的特款——有支柱的拓扑 Boole 格。另一方面,在库拉托夫斯基公理系统中,点的概念并不出现,闭包运算只是 Boole 格 $P(x)$ 中的映射,这引起人们的极大兴趣,即不用点作原始概念来考虑拓扑结构的理论。从而为拓扑空间的理论推广到拓扑 Boole 格上奠定了坚实的基础。1937年日本寺阪英孝开始把库拉托夫斯基的方法与格论结合起来,讨论了拓扑格的理论。诺伯林(G. Nöbeling)把这一论点系统发展,其著作《分析拓扑学原理》(Grundlagen der analytischen topologie, 1954)就是在这种看法下写成的。

另一具有开创性的工作是,1937年法国嘉当(H. Cartan)提出的滤子理论,用以推广平常点列的收敛,这与定向点列的收敛实际上是等价的。而在滤子理论中也是用集代替点作为基本概念,为把拓扑空间的理论推广到拓扑 Boole 格上,开辟了一条重要渠道。此后,以法国学派为主要代表的许多论著,都进行了将拓扑空间的一些结果推广到更一般的拓扑 Boole 格中去的讨论。

关肇直1958年编著的《拓扑空间概论》一书,不仅是中国第1本专门论述点集拓扑学的著作,也是第1本介绍拓扑 Boole 格理论的著作,为拓扑学、拓扑 Boole 格理论在中国的传播和发展起了重要作用。

近期拓扑 Boole 格理论的研究成果,散见于拓扑学、格论和数理逻辑等数学分支学科的文献中。海外学者的工作主要在 Boole 格的各种拓扑的性质和数理逻辑方面的研究,并且滤子和超滤子仍然是研究的重要对象和渠道。1979年赛贾列夫(Z. M. Saidaliev)讨论了各 Boole 格上的一种拓扑性质,对于各 Boole 格 B 和无限基数 τ ,给出了一个 B 上的分离拓扑是 τ -拓扑的充要条件。1981年巴尔卡(B. Balcar)和西蒙(P. Simon)等人,研究了在什么条件下 Boole 格 B 的一个给定族 A 有不相交的加细的问题及必须将多少集合加入到一个给定滤子,从而得到一个超滤子基的问题。1983年特布劳斯基(B. Tsembrowski)讨论了 B_3 -代数的正规超滤子,找出了 B_3 -代数的正规超滤子存在的充要条件,借助于正规超滤子刻画了 B_3 -代数的一些子类的特性,描述了恒存在正规超滤子的 B_3 -代数的结构,指出这类超滤子的存在性与 B_3 -代数的良连通性(Well-connectedness)的性质紧密相关。这里引入的良连通性是拓扑 Boole 格的良连通性的推广。并指出这类包含正规超滤子的 B_3 -代数在代数语义学中有重要应用。1984年施泰纳·唐纳德(D. Steiner, Donald)等人,在偏序集中引入分子元的概念,讨论了非分子生成集的不存在性,指出:对于 Boole 格 B ,其子集 G 是生成集的充要条件是 G 为主超滤子。1986年特布劳斯基又研究了萨斯柯(R. Suszko)在1975年引入的称为 B -代数的一类 Boole 格,在所考虑的这类 Boole 格中,有些子类对于非弗雷格(G. Frege)逻辑的代数语义学是重要的,且对麦金西(J. C. C. McKinsey)—塔尔斯基(A. Tarski)定理:每个拓扑 Boole 格是某个良连通拓扑 Boole 格的同态象,进行了推广并作了证明。1987年吉尔茨(G. Gierz)研究了分配格的扎里斯基(O. Zariski)拓扑,这种拓扑是经过由分配格 L 上的一个格多项式和 L 的一个任意固定元来定义闭集而建立的。特别

当分配格是 Boole 格时,扎里斯基拓扑与区间拓扑一致。并展示了扎里斯基拓扑与本性扩张的密切关系,每个分配格有一个为 Boole 格的极大本性扩张,而单射是从扎里斯基拓扑到区间拓扑的拓扑嵌入。

中国董荣森近年对拓扑 Boole 格的理论进行了广泛深入的研究,致力于将拓扑空间的理论推广到拓扑 Boole 格上,其研究工作较侧重于格论方面。他讨论了拓扑 Boole 格的积、商、紧性、连通性和完备化等问题。较成功地将拓扑空间的积和连通性的基本理论推广到了拓扑 Boole 格上,摒弃了拓扑 Boole 格连续性的传统定义,建立了新的连续性定义,从而使得拓扑空间连续性的基本理论可以推广到拓扑一般 Boole 格上。由于拓扑 Boole 格的完备化问题是拓扑空间的理论可以被概括和推广到拓扑 Boole 格上去的一个关键,由此促进了对格的完备化问题的研究。董荣森取得了一系列完备化理论的重要成果,特别是 1987 年提出了“容”的概念,1990 年又提出了有依存关系的简明的完备化思想。

拓扑 Boole 格的理论是数理逻辑、格论和拓扑学等分支学科的学者们共同关心的理论。因此,今后可望取得的进展仍将主要围绕在这些分支学科中。一方面拓扑 Boole 格的各种拓扑性质的研究将继续取得进展。另一方面,与数理逻辑(如代数语义学等)密切相关的拓扑 Boole 格的研究将取得较丰富的成果。就将拓扑空间的理论全面推广到拓扑 Boole 格上而言,除已基本解决的积、连通性和连续性 3 个问题外,其它许多的理论问题都值得人们进一步研究。经过对完备化等理论的研究,可望完全达到法国学派没有达到的目标。同时,将拓扑空间的理论推广到拓扑一般 Boole 格、拓扑相对有补分配格,甚至推广到拓扑格上,格的有依存关系的简明的完备化问题;格的同态扩张成完备同态;维数理论;以及应用问题等等,都有待人们去继续研究。

参考文献

- 1 Nöbeling G. Grundlagen der analytischen topologie, Springer-Verlag, Berlin, 1954
- 2 关肇直. 拓扑空间概论. 北京: 科学出版社, 1958
- 3 Balcar, B, et al. Trans. Amer. Math. Soc. 1981, 267(1): 265~283
- 4 Tembrowski B. Demonstratio Math, 1983, 16(3): 601~617
- 5 Steiner Donald D, et al., Nonexistence of nonmolecular generic sets, Publ. Inst. Math. (Beograd)(N. S.), 1984, 36(50): 29~34
- 6 Tembrowski, B. Studia Logica, 1986, 45(20): 167~179
- 7 Gierz Gerhard, et al. Rocky Mountain J. Math, 1987, 17(2): 195~217
- 8 董荣森. 数学学报, 1988, 31(5): 584~594
- 9 董荣森. 科学通报, 1989, 34(3): 238~239
- 10 董荣森. 中国科学(A 辑), 1991, 5: 449~456

(江西师范大学 董荣森 副研究员,
江西教育学院 闵佑林 副教授)

拟常曲率流形

manifolds of quasi-constant curvature
也称拟常曲率空间。设 M 是一个 $n (> 3)$ 维黎曼流形, α 和 b 是 M 上的两个函数, $Z = \omega^a$ 是 M 上的一个向量场, 如果 M 的曲率张量 K 具有形式

$$K_{hji} = a(g_{hj}g_{ii} - g_{hi}g_{jj}) + b(g_{hj}\omega_i\omega_l + g_{li}\omega_h\omega_j - g_{li}\omega_h\omega_l - g_{ij}\omega_h\omega_l) \quad (1)$$

其中 g 是 M 的 Riemann 度量, 则称 M 为拟常曲率流形。简记其为 Q 流形。并称 Z 为其生成元。当 $\langle Z, Z \rangle = e$ 时, (1) 式中的 $a = \frac{2T-R}{(n-1)(n-2)}$, $b = \frac{e(R-nT)}{(n-1)(n-2)}$, 这里 R 是 M 的数量曲率, T 是 Z 对应的 Ricci 主曲率。当 $\langle Z, Z \rangle = 0$ 时, 称 M 为广义拟常曲率流形, 这时函数 $a = \frac{-R}{n(n-1)}$, b 不确定。亚射影流形和 k -

特殊共形平坦流形均为特殊的拟常曲率流形。特别, 当 $b=0$ 时, Q 流形便成为熟知的常曲率流形。

如所知, 常曲率流形既是共形平坦的, 又是爱因斯坦的, 即为特殊的共形平坦黎曼流形。介乎常曲率流形和共形平坦流形之间的黎曼流形的存在性问题, 由 T. Adati 最早解决。1951 年发表的《关于亚射影空间》的论文中, 他指出了由 B. Kagan 和 P. Rachevsky 于 1930 年各自引入的“亚射影空间”是共形平坦的, 并且证明亚射影空间是容有保圆变换的共形平坦空间, 而使这类空间具有常数截面曲率的充要条件是

$$u_{ij} = \frac{1}{2} (\psi_{i,j} - \psi_{j,i} - \xi^k (\varphi_{ij}\varphi_{kl} - \varphi_{il}\varphi_{kj}) + \psi_{i,j}\beta_j - \psi_{i,j}\beta_j) = 0.$$

若从集合概念的角度去考察, 这一结果表明, 集合 {共形平坦流形} \supset {亚射影流形} \supset {常曲率流形}。因此, 从 20 世纪 30 年代开始至 60 年代, 有关亚射影流形的研究是几何学研究中活跃的课题之一。

1972 年 B. Y. Chen 和 K. Yano 发表了论文《共形平坦空间的超曲面》。在该文中, 他们利用“共形平坦空间中的共形平坦超曲面必定是拟脐点超曲面”的已有结果, 讨论了常曲率空间中的共形平坦超曲面, 由此引入了 k -特殊共形平坦流形。该流形的曲率张量可表示为

$$K_{ijh} = g_{hj}L_{ii} + L_{ij}g_{ii} - g_{hi}L_{jj} - g_{ij}L_{hh} \quad (2)$$

$$L_{ij} = -\frac{1}{2}(k + \alpha^2)g_{ij} - \beta(\nabla_i\alpha)(\nabla_j\alpha) \quad (3)$$

式中 $\alpha (\neq \text{const})$, β 是二函数。反之, 每个 k -特殊共形平坦流形必可等距嵌入常曲率空间作为超曲面而实现, 这时 (3) 中 $\alpha \neq \text{const}$ 的限制可取消。这类流形与亚射影流形的关系是: 集合 { k -特殊共形平坦流形} \supset {亚射影流形}。且它们都是介乎常曲率流形和共形平坦流形之间的两类流形。

自然要问, 是否还存在另外这样的流形? 如果存在, 他们与上述两类流形有什么关系? 对此, B. Y. Chen 等人作出了部分回答。在 1973 年出版的《子流形的几何》中, B. Y. Chen 提出了曲率张量 K 具有形式 (1) 的黎曼流形 M , 其度量 g 正定, 且 (1) 中的向量场 Z 是伴随于 M 上的一个单位 1-形式 $\omega = \omega_i dx^i$ 的向量场。他指出这样的流形是共形平坦的, 且具有以下 3 个性质: (i) 伴随着垂直于向量场 Z 的二向量场 X 和 Y 的曲率算子 $K_{ij}X^iY^j$ 使 Z 消失, 即 $K(X, Y, Z) = 0$ 。(ii) 关于包含向量场 Z 的截面的截面曲率是常数。(iii) 关于和 Z 垂直的截面的截面曲率是常数。后来 K. Yano, C. S. Houh 和 B. Y. Chen 又证明若 $n (> 3)$ 维黎曼流形 M 满足上述 3 个性质, 则 M 的曲率张量必可写成形式 (1)。这表明拟常曲率流形的本质概念事实上是由 B. Y. Chen 首先提出的, 尽管在提出时他没有采用“拟常曲率流形”这一术语。同时, 从 M 为拟常曲率流形的上述充要条件 (i), (ii) 和 (iii) 可知, 这类流形是特殊的共形平坦流形, 但又不一定是常曲率流形。即拟常曲率流形确为介乎共形平坦流形和常曲率流形之间的一类流形。

最先明确提出“拟常曲率流形”这一概念的是 V. Boju 和 M. Popescu。《微分几何》杂志 1978 年发表了他们的论文《拟常曲率空间》。该文用纯几何的方法导出了这一概念, 而简称为 QC 空间。该空间 M 的一个几何特征是在其中存在向量场 Z , 使在每一点 $P \in M$, 都有 $Z_P \neq 0$, 且所有截面 $\sigma \in (Z_P, \theta(\rho))$ 的截面曲率彼此相等。这里 $\theta(\rho) \in (0, \frac{\pi}{2})$ 是 σ 在 P 点与 Z_P 的交角。按此定义, 在 QC 中选取正交单位活动标架场 $Z_1, Z_2, \dots, Z_n = Z, V$ 。Boju 等两人求得了 QC 流形的曲率张量分量为: $K_{ijh} = H, K_{nijn} = N(i, j = 1, \dots, n-1, \text{且 } i \neq j)$ 其余为零。由此知曲率张量在此标架下可写成形式 (1), 其中 $Z = \omega^a$, 但这时 $\omega_n = 1, \omega_1 = \dots = \omega_{n-1} = 0$ 。又因为表示形式是张量等式, 故它在任何标架下都成立。也即 (1) 是 QC 的一个代数条件。反之, 这个代数条件被满足的正定度量的黎曼流形也一定是 QC 流形。因此 (1) 式就是 QC 流形的一个代数特征。从而, 对于正定度量的黎曼流形, QC 流形等价于拟常曲率流形。

当黎曼流形的度量不定时, 对于拟常曲率流形的研究当首

推白正国。他在1982年发表的论文中证明,若一个 $n(\geq 4)$ 维黎曼流形 M 可以等距嵌入于两个不同曲率 K_0 和 K_1 的常曲率空间,则 M 一定是共形平坦的,且得出了这样的 M 的一个代数特征。接着在1985年发表的另一论文中,白正国对这样的流形进行了详细的研究,并完全确定了其度量形式。进而,在1986年发表的《拟常曲率黎曼流形在常曲率空间中的等距嵌入》一文中,进一步明确证明前二文讨论的流形与拟常曲率流形是等价的。至此,才完成了“拟常曲率流形”这个概念的建立工作。

然而,这样建立的拟常曲率流形是否具有类似于QC流形的几何特征,并使得当流形的度量正定时,拓广的概念就是V. Boju等所引入概念的原有意义?关于此,在1987年发表的论文中,李中林作出了肯定的回答。他证明曲率张量以形式(1)表征的黎曼流形 M 的一个几何特征是:其中存在一个向量场 Z ,使在每一点 $P \in M$,所有截面 $\sigma \in (Z_P, (P))$ 的截面曲率彼此相等。其中 $H(P) = e_1 \langle Z, X \rangle^2 + e_2 \langle Z, Y \rangle^2$,而 $\langle X, X \rangle = e_1, \langle Y, Y \rangle = e_2, \langle X, Y \rangle = 0$ 。因此,称(1)式表征的黎曼流形为“拟常曲率流形”便有了实质的含义,且这一概念是对“QC流形”概念的拓广。

白正国把拟常曲率流形记为 Q 流形,并指出 Q 流形有值得注意的几何特性。事实上,这类流形除了上述已阐述的代数特征和几何特征外,还具有以下主要的特征性质:(1)拟常曲率流形等价于共形平坦的拟Einstein流形。从而,它既是特殊的共形平坦流形,又是特殊的拟Einstein流形。(2)黎曼流形 M 为拟常曲率流形的充要条件是 M 容有一族常数平均曲率的全脐点常曲率超曲面,而当超曲面为全测地时, M 为拟Einstein的。同时 M 的生成元就是超曲面的法向量。

现在可以把各类所涉流形组成的集合间的关系综述如下: {共形平坦流形} \supset {拟常曲率流形} \supset {一阶共形平坦流形} \supset { k -特殊共形平坦流形} \supset {亚射影流形} \supset {常曲率流形}。同时有,(1)拟常曲率流形为亚射影流形的充要条件是其生成元为测地线。(2)拟常曲率流形为 k -特殊共形平坦流形的充要条件是 $\text{div} \nabla i(nT - R)$ 。这里“ ∇i ”是协变微分算子。(3)若 Q 流形的数量曲率 R 为常数,则它必是亚射影流形。(4)若 Q 流形的生成元是调和向量场,则它必为容有平行向量场的亚射影流形。当流形的度量正定时,(1)的结论曾为黄正中指明。(5) Q 流形的阶数为2的充要条件是 $R = 2T \neq 0$ 。由这些关系得知,Kagan意义的亚射影流形作为特殊的拟常曲率流形早在1930年就被发现。

综上所述,拟常曲率流形是较常曲率流形更广泛的一类流形,但又是特殊的共形平坦流形,具有值得注意的性质,因而引起国内外许多数学工作者的兴趣。从70年代初发现开始,有关该流形的研究文献时有所见,限于篇幅,不能一一枚举。当前研究涉及的内容除了拟常曲率流形本身的性质,以及与已有流形的关系外,热点是关于子流形的讨论。一是把该流形作为常曲率空间的子流形的某些性质,另一则是讨论拟常曲率的子流形的一些性质,例如极小子流形、具有平行平均曲率向量场的子流形、不变子流形等的有关性质。特别是探讨作为著名的Simons不等式的推广的不等式,以及相关的Pinching问题,还有关于该流形上的特征值问题等。这一些问题的研讨均有待进一步展开。所有这些问题的研究无疑对丰富微分几何的内容,促进微分几何的发展都是很有意义的。

参考文献

- 1 Adati T. Tohoku Math. J 1951, 3: 159~173
- 2 Chen B Y. Tensor, N. S. 1972, 26: 318~322
- 3 Chen B Y. Geometry of submanifolds. New York: Marcel Dekker Inc, 1973. 169~170
- 4 Boju V. Popescu M. Diff Geom, 1978, 13: 373~383
- 5 Bai Zhengguo Chin. Ann. of Math, 1982, 3(4): 471~482
- 6 Hwang Chengchung. 数学研究与评论, 1983, 3(1): 1~16
- 7 白正国. 数学年刊, 1986, 7A(4): 445~449
- 8 李中林. 杭州大学学报(自然科学版), 1987, 14(2): 158~168

9 Bai zhengguo. Chin Ann of Math, 1988, 9(1): 32~37

10 李中林. 杭州大学学报(自然科学版), 1988, 15(3): 245~255
(杭州大学李中林教授撰;白正国审)

保圆几何 concircular geometry 讨论保圆变换以及存在这类变换的空间的几何。所谓圆即为测地圆,是指一个黎曼空间 (M, g) 中第1曲率为常数,第2曲率恒为零的曲线 $\Gamma: x = x(s)$ ($i=1, \dots, n$),其微分方程是

$$\frac{\delta^3 x^i}{\delta s^3} + g_{ij} \frac{\delta^2 x^j}{\delta s^2} \frac{\delta^2 x^k}{\delta s^2} \frac{\delta x^l}{\delta s} = 0 \quad (1)$$

式中算子 $\frac{\delta}{\delta s}$ 表示关于 Γ 的弧长 s 的协变微分。而保圆变换则是指使每个测地圆都变到测地圆的共形变换。

对于二黎曼空间 (M, g) 和 (\bar{M}, \bar{g}) ,若度量张量 g 和 \bar{g} 有关系

$$\bar{g}_{ij} = \rho^2 g_{ij}, \bar{g}^i_j = \frac{1}{\rho^2} g^i_j, \quad (2)$$

则称 M 和 \bar{M} 间存在着共形对应或共形变换。且能选取局部坐标系使这个对应表现为 $\bar{x} = x$ 。在此变换下,测地圆的对应曲线 $\bar{\Gamma}$ 称为共形测地圆。一般说来, $\bar{\Gamma}$ 不是圆。为使共形变换(2)将每个圆都变到圆的充要条件是(2)中的函数 ρ 满足偏微分方程

$$\rho_{ij} = \Phi g_{ij} \quad (3)$$

其中 $\rho_{ij} = \nabla_j \rho_i - \rho_i \rho_j + \frac{1}{2} g^{kl} \rho_k \rho_l g_{ij}$, $\rho_i = \frac{d\rho}{dx^i}$, Φ 是某函数,而“ ∇_j ”表示协变微分。这一著名结果是K. Yano在1940年发表的论文《保圆变换》中建立的。同时在这篇文章中,K. Yano提出了“保圆几何”的概念。接着他把关于这一几何的系统研究写成了“保圆几何”的系列论文,先后于1940年和1942年正式发表。上述《保圆变换》就是其中的第一篇。该文建立了圆的微分方程(1),证明(3)是(2)为保圆变换的充要条件,并得到了在保圆变换下不变的保圆曲率张量

$$Z_{ij} = R_{ij} - \frac{R}{n(n-1)} (g_{ij} \delta_j^i - g_j^i \delta_i^j) \quad (4)$$

及其缩并张量 $Z_\mu = R_\mu - \frac{R}{n} g_\mu$,式中 R_μ 和 R 分别是黎曼空间 M 的Ricci张量和数量曲率。该文最后定义了保圆平坦空间是 Z_{ij} 恒为零的空间。显然它是常曲率空间。而且从(4)及其缩并张量易得:利用保圆变换常曲率空间或爱因斯坦空间相应变到常曲率空间或爱因斯坦空间。这些结果指明了保圆变换的基本性质。《 $\rho_{ij} = \Phi g_{ij}$ 的可积条件》是系列篇之二。该文通过对这一可积条件的讨论得出了几个定理,定理的结果可综述为:若一个黎曼空间 M 存在保圆变换(2),则 ρ -曲面; $\rho(x) = \text{const}$ 是 M 的一族全脐点超曲面,且其正交轨线 ρ -曲线为测地Ricci曲线。反之,若 M 容有这样一族超曲面,则 M 必存在保圆变换。这个结果揭示了黎曼空间存在保圆变换的一个几何特征。

若 M 中的曲线 $\Gamma: x = x(s)$ 不是圆,则(1)的左边确定的是一个向量 V 。可见圆是其特殊情形。系列篇之三《曲线的理论》首先证明 V 的方向在保圆变换下不变,在此基础上再导出保圆变换下其他的不变方向,从而建立起保圆几何中曲线的Frenet公式。此外,该文还证明:若 V_n 中超曲面 V_{n-1} 的任一圆也是 V_n 的圆,则 V_{n-1} 是具有常数平均曲率的全脐点超曲面。同时指出,全脐点超曲面的平均曲率是常数的性质不是一般共形变换的不变性质,但在保圆变换下该性质却是不变的。

系列篇之四与之三比较,则更为广泛地讨论保圆几何中《子空间的理论》,得出了 V_n 的保圆变换(2)在子空间 $V_m (\subset V_n)$ 中的诱导共形变换; $\bar{g}_{\alpha\beta} = \rho^2 g_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, \dots, m$)也为保圆的充要条件是函数 ρ 满足 $\rho_{\alpha\beta} = \Psi g_{\alpha\beta}$ 。特别,当 V_m 是 V_n 的全脐点子空间时,诱导共形变换必定是保圆的。该文同时建立了保圆几何中的高斯(Gauss)和科达溪(Codazzi)方程,以及魏加吞(Weingarten)公式。最后从保圆几何的角度考察了几个已知的著名定理。系列篇的最后一篇讨论了特殊的《爱因斯坦空间》,探讨存在保圆变换

的这类空间的结构,分别得出了数量曲率为正,为零或为负时的线素形式。并指出二爱因斯坦空间的共形对应必定保圆。

这些系列论文表明,K. Yano 是建立保圆几何的奠基人。当然,在他之前对共形变换的研究也不乏其人,而对于在共形变换下 M 的对应的共形测地线可以是圆的事实,A. Fialkow 于 1938 年就已经发现。而且他还明确指出,满足(3)的共形变换(2)是特别简单的,且具有有趣的几何特征。这些都在 1939 年发表的论文《共形测地线》中有记载。A. Fialkow 把所得的有关结果分别作为该文的第 6 节和第 8 节中的主要定理之一。并在文章的最后专辟整个第 12 节着重讨论了满足(3)的共形变换。证明确实存在着允许这种共形变换的一大类空间。至于对 K. Yano 的上述系列篇之五所涉课题的研究,则可追溯到更早。在 1925 年发表的文章中,H. W. Brinkmann 讨论的就是彼此共形的爱因斯坦空间。然而所得结果的分析意味较浓,因而 K. Yano 方感必须从保圆几何的角度去对此问题进行重新研究,以探讨彼此共形的爱因斯坦空间的几何性质。

保圆几何系列论文发表后,虽然有若干作者进行了各种后继研究,但都未对允许保圆变换的黎曼空间的结构作进一步的深入探索。直到 60 年代初,姜志渊部分地解决了这类空间的结构问题。在 1962 年发表的论文中,他研究了容许 m 个独立保圆变换的黎曼空间 M ,在假设对应的 m 族 ρ -曲面彼此正交的条件下,导出了 M 的线素形式为 $ds^2 = g_{ab}(x^1, \dots, x^{n-m})dx^a dx^b + \sum (dx^a)^2 (a, b = 1, \dots, n-m; \alpha = n-m+1, \dots, n)$, 并证明它是这类黎曼空间的一个特征。

接着,白正国得到了更为深刻的结果。《数学学报》1964 年发表了他的《存在若干独立保圆变换的黎曼空间》论文。该文的贡献在于,①不附加任何其他条件,完全解决了容许 r 个独立保圆变换的黎曼空间 M 的结构,除了导出 M 的线素形式外,还确定了保圆变换的函数 ρ 的解析表示式。②指出了 M 和 \bar{M} 有相同的保圆曲率张量不仅是共形变换(2)为保圆变换的必要条件,而且也是充分条件。同时得到了(2)为保圆变换的另一充要条件是 $R_{ij} - \frac{R}{n}g_{ij} = R_{ij} - \frac{R}{n}g_{ij}$ 。③深化了对熟知的常曲率空间和爱因斯坦空间的认识,得出了关于常曲率空间的十分美妙的性质。这些工作对于保圆几何乃至微分几何的发展所起的作用无疑是实质性的。

上述所有这些研究都着眼于(2)中的函数 ρ 满足微分方程(3)的共形变换,而涉及的不变性质也仅是保持对应曲线具有圆的几何特征,这自然便产生了两类问题。一是满足(3)的共形变换(2)除了使圆对应于圆以外,是否还有满足其他几何或物理性质的另外曲线相对应?二是是否有满足其他条件的共形变换也能使保持某几何或物理性质的曲线相对应?如果这样的共形变换存在,是否也有相应于保圆几何系列论文中论述的那些结果?对此,李中林作出了完满的肯定回答,他在 1987 年和 1991 年发表的论文中,提出了“拟保圆变换”的概念。拟保圆变换是指(2)中的函数 ρ 满足微分方程

$$\rho_{,j} = A g_{,j} + B \xi_j, \quad \langle \xi, \xi \rangle = e \quad (5)$$

的共形变换。李中林导得了类似于保圆曲率张量的拟保圆曲率张量 $L_{j\mu} = R_{j\mu} - \frac{R-2T}{(n-1)(n-2)}(g_{j\mu}\delta_i - g_{\mu i}\delta_j) - e \frac{nT-R}{(n-1)(n-2)}(\xi_j \xi_\mu \delta_i - \xi_i \xi_\mu \delta_j + g_{j\mu} \xi_i \xi_\nu - g_{\mu i} \xi_\nu \xi_j)$ 证明共形变换(2)为拟保圆变换的充要条件是 M 和 \bar{M} 有相同的拟保圆曲率张量或其缩并张量。并由此推得,利用拟保圆变换可将拟常曲率空间或拟爱因斯坦空间分别变到拟常曲率空间或拟爱因斯坦空间;而生成元彼此对应的二拟常曲率空间,或基本元彼此对应的二拟爱因斯坦空间的共形变换就是拟保圆变换。他还证明一个黎曼空间 M 存在拟保圆变换的充要条件是 M 容有一族正常的拟脐点超曲面,且其正交轨线为测地线。同时指出保圆变换是拟保圆变换的特款,而满足(6)的拟保圆变换(2)不为保圆的条件是 $\xi_i \perp \rho$ 。此外他还定义了 M 中第二曲率 $k_2 = 0$, 第一曲率为 $k_1 = ab(a^2 \sin^2 t +$

$$b^2 \cos^2 t) - \frac{1}{2}, t = f(s), \frac{\partial t}{\partial s} = (a^2 \sin^2 t + b^2 \cos^2 t)^{-\frac{1}{2}}$$
 的曲线为椭圆。

并建立了相应的微分方程,且证明:若 M 和 \bar{M} 之间存在着满足(5)的拟保圆变换(2),则该变换将速度系中切方向为 ρ 之主方向的每个椭圆变到速度系中的椭圆,同时他还发现保圆变换的新的性质:条件(3)是共形变换(2)将每个椭圆速度系变到椭圆速度系的充要条件,也是将每个圆速度系变到圆速度系的充要条件。将这些结果与保圆几何已有的结果相比较,可见前者的相应工作把关于保圆变换和共形变换的研究推进了一大步。

由此可见 K. Yano 和白正国等对保圆几何的建立和发展作出了贡献,在几何学界立即引起了极大兴趣。继而许多作者便从不同方面对此概念进行了各种各样的探讨。例如 T. Adati 便证明了亚射影空间是容有保圆变换的共形平坦空间。S. Ishihara 和 Y. Tashiro 合作的论文《关于存在保圆变换的黎曼流形》于 1959 年发表。而 M. Obata 的《黎曼流形与球等距的某些条件》的主要结果也与方程(3)密切相关。至于有关共形变换的研究文献更是多种多样。由此可见“保圆几何”概念的提出,不仅在当时对微分几何的研究起了推动的作用,而且对此后微分几何的发展也有深远的影响。直到 80 年代乃至现今一些微分几何的概念都与“保圆”的概念有着千丝万缕的联系。特别对共形变换的进一步探讨已不仅是现代微分几何的一个重要课题,在当今的物理学界对此的研究也方兴未艾。而讨论到“共形变换”,势必或多或少会涉及到保圆几何中的有关概念。因此,在这方面继续作深入的探索实在是极具开发价值的一件工作。

参考文献

- 1 Brinkmann H W. Math Ann, 1925, 94, 119~145
- 2 Fialkow A. Trans Amer Math Soc, 1939, 45, 443~473
- 3 Yano K. Concircular geometry. I-V, Proc. Imp. Acad. Tokyo, 1940~1942
- 4 Ishihara S, Tashiro Y Math J Okayama Univ, 1959, 9, 19~47
- 5 姜志渊. 杭州大学学报(自然科学版), 1962, 1, 9~14
- 6 Obata M. J Math Soc Japan, 1962, 14(3), 333~340
- 7 白正国. 数学学报, 1964, 14(1), 62~74
- 8 Adati T, Miyazawa T. Concircular vector fields and an almost paracontact structure. Tensor, 1981, 35, 308~312
- 9 李中林. 数学物理学报, 1987, 7(4), 411~417
- 10 Li Zhonglin. Acta Math. Sci, 1991, 11(1), 56~64

(杭州大学李中林教授撰,白正国审)

σ -空间与 Σ -空间 σ -spaces and Σ -spaces

自 1944 年丢当内(Dieudonné)定义仿紧空间以后,对仿紧性理论的研究蓬勃开展,主要是由于它包含着度量空间与紧空间两大空间类。它的弱点是两个仿紧空间的积未必是仿紧的,为了使仿紧空间的积保持仿紧性,必须加上某些条件。下面叙述可数个仿紧空间的积的情况。这一问题可以归结为找出这样的空间类 \mathcal{S} (尽可能广泛些),使 \mathcal{S} 中仿紧元素序列的积是仿紧的。对类 \mathcal{S} 本身来说也要求关于某些通常的拓扑运算是封闭的,在这一方面已取得相当满意的结果。

1960 年福罗立克(Frolík)把类 \mathcal{P} 取为所有岂赫(Cech)意义下完备拓扑空间。1963 年阿尔亨格尔斯基(Arhangel'skii)推广福罗立克的研究结果,把 \mathcal{S} 取为所有 ρ 空间的类(按岂赫意义下完备空间是 ρ 空间)。1964 年森田纪一(Morita)得到等价的结果,把 \mathcal{P} 取为所有 M 空间类。 M 空间不同于 ρ 空间,但仿紧 M 空间类与仿紧 ρ 空间类是重合的。从完全不同的方向,奥山晃弘(Okuyama)于 1967 年取 \mathcal{S} 为 σ -空间类。1969 年永见启应(Nagami)取 \mathcal{S} 为 Σ -空间类统一地推广了前面的所有结果。

σ -空间与 Σ -空间不仅在仿紧空间的可数积保持仿紧性这一问题上起着重要作用,致使仿紧空间的应用更广泛,而它们本身也都是度量空间在某些方面的推广,且具有良好的性质,甚至比

度量空间更良好的性质(下文 σ -空间及 Σ -空间的性质(5)),从而决定着它们在拓扑空间理论中的重要地位。

空间 X 的子集族 \mathcal{A} 称为这空间的网,如果对每开集 U 及 $x \in U$,存在 $A \in \mathcal{A}$,使 $x \in A \subset U$.如果 \mathcal{A} 是 σ -离散、 σ -局部有限、 σ -闭包保持、或 σ -遗传性闭包保持的,则称这网是 σ -离散、 σ -局部有限、 σ -闭包保持、或 σ -遗传性闭包保持的,如果 \mathcal{A} 是闭集族,则称这网是闭网。

空间 X 称为 σ -空间,如果它具有 σ -局部有限闭网,按此定义,无非是把著名度量定理中的基底换为网(基底的元素必须是开的,网则不然),对正则空间 X ,下列性质是等价的:① X 具有 σ -离散网,② X 是 σ -空间,③ X 具有 σ -闭包保持网。

σ -空间具有下列良好的性质:①在正则空间, σ -空间在闭映射下的象是 σ -空间。②设 $\{X_n\}$ 是 σ -空间序列,则积空间 $\Pi(X_n, n=1,2,\dots)$ 是 σ -空间。③设 $\{X_n\}$ 是仿紧 σ -空间的序列,则积空间 $\Pi(X_n, n=1,2,\dots)$ 是仿紧 σ -空间。④ σ -空间的任何子空间是 σ -空间。⑤设空间 X 是可数个闭 σ -子空间的并,则 X 是 σ -空间。⑥设空间 X 具有局部有限闭复盖 $\{X_\alpha\}_{\alpha \in A}$,每一 $X_\alpha (\alpha \in A)$ 是 σ -空间,则 X 是 σ -空间,⑦设 X 是正规空间, X 为闭复盖 $\{X_\alpha\}_{\alpha \in A}$ 所控制,每一 $X_\alpha (\alpha \in A)$ 是 σ -空间,则 X 是 σ -空间(按 X 为闭复盖所控制是较弱于这闭复盖是局部有限的情况)。

以上性质是奥山晃弘在 1967~1971 年得到的,性质⑦中的条件“正规”能否去掉?直到最近(1991 年)才为林寿肯定地解决。

空间 X 称为半分层空间,如果对 X 中每一开集 U ,可以确定一闭集序列 $\{U_n\}$ 满足:(1) $\bigcup_{n=1}^{\infty} U_n = U$, (2) 设 U, V 是开集,且 $U \subset V$, 则 $U_n \subset V_n (n=1,2,\dots)$; 如果更满足 (3) $\bigcup_{n=1}^{\infty} U_n^c = U$, 这里 U_n^c 是 U_n 的内核,则称 X 是分层空间,分层空间是 σ -空间, σ -空间是半分层空间。分层空间、半分层空间都具有比较好的性质。特别分层空间是正规且仿紧的,它具有相应于 σ -空间的性质:①、②、③、④、⑥、⑦。

σ -空间类已解决了所提出的可数个仿紧元素的积是仿紧的问题(见上述 σ -空间的性质③),但是仿紧 σ -空间类与仿紧 M 空间类(或仿紧 p 空间类)没有什么“联系”,更不能包含对方。水见启应引入的 Σ -空间类既解决了可数个仿紧元素的积是仿紧的问题(见下面 Σ -空间性质(3)),又能同时包含 σ -空间类与 M 空间类。

空间 X 称为 Σ -空间(强 Σ -空间),如果存在 σ -局部有限闭集族 \mathcal{B} 及由可数紧集(紧集)组成的复盖 \mathcal{C} 使对 X 中的开集 $U, C \in \mathcal{C}, C \subset U$, 存在 $F \in \mathcal{B}$ 使 $C \subset F \subset U$ 。显然 σ -空间 \rightarrow 强 Σ -空间 $\rightarrow \Sigma$ -空间。

由上述定义,易知 σ -空间按完备映射(闭映射且每一纤维是紧的)的原象是强 Σ -空间,按准完备映射(闭映射且每一纤维是可数紧的)的原象是 Σ -空间,但其逆均不真,后者均严格地包含前者。

Σ -空间(强 Σ -空间)具有下列良好的性质(便于读者比较,按 σ -空间的相应性质的次序排列):①设 f 是空间 X 到空间 Y 上的准完备映射,则 X 是 Σ -空间当且仅当 Y 是 Σ -空间,②' 设 $\{X_n\}$ 是强 Σ -空间的序列,则积空间 $\Pi(X_n, n=1,2,\dots)$ 是强 Σ -空间。③ 设 $\{X_n\}$ 是仿紧 Σ -空间的序列,则积空间 $\Pi(X_n, n=1,2,\dots)$ 是仿紧 Σ -空间。④ Σ -空间的 F_σ 子空间是 Σ -空间。⑤设空间 X 是可数个闭 Σ -子空间的并,则 X 是 Σ -空间。⑥设空间 X 具有局部有限闭复盖 $\{X_\alpha\}_{\alpha \in A}$,每一 $X_\alpha (\alpha \in A)$ 是 Σ -空间,则 X 是 Σ -空间。⑦设空间 X 为闭复盖 $\{X_\alpha\}_{\alpha \in A}$ 所控制,每一 $X_\alpha (\alpha \in A)$ 是完全正规的 Σ -空间,则 X 是 Σ -空间。

以上性质是水见启应于 1969 年得到的,其中性质②'是对强 Σ -空间说的,不是对 Σ -空间说的。显得很不对称,故用②'表示。是否可将②'中的“强 Σ -空间”都换成“ Σ -空间”? 这问题尚未解决。又性质⑦中的条件“完全正规”能否去掉? 至今尚未解决。

至于怎样的 Σ -空间才是强 Σ -空间? 有,“空间 X 是强 Σ -空间当且仅当它是仿紧的 Σ -空间”。怎样的 Σ -空间才是 σ -空间? 有,“空间 X 是 σ -空间当且仅当它是具有 G_δ 对角线的 Σ -空间”。

比较 σ -空间与 Σ -空间的性质①,前者为闭映射所保持,后者为准完备映射保持。后者对映射性质的要求较强。是否 Σ -空间也能为闭映射保持? 答案是否定的。为此学者们引入 Σ^* -空间(Σ^* -空间)以推广 Σ -空间且使能为闭映射所保持。

空间 X 称为 Σ^* -空间(Σ^* -空间),如果存在 σ -遗传性闭包保持(σ -闭包保持)闭集族 \mathcal{B} 及由可数紧集组成的复盖 \mathcal{C} 使对 X 中开集 U 及 $C \in \mathcal{C}, C \subset U$, 存在 $F \in \mathcal{B}$ 使 $C \subset F \subset U$ 。这里是把 Σ -空间定义中的“局部有限”分别改为“遗传性闭包保持”及“闭包保持”,由于局部有限 \rightarrow 遗传性闭包保持 \rightarrow 闭包保持,所以 Σ -空间 $\rightarrow \Sigma^*$ -空间 $\rightarrow \Sigma^*$ -空间。其逆均不真。

由上述定义可知 Σ^* -空间、 Σ^* -空间在闭映射下的象分别是 Σ^* -空间、 Σ^* -空间。这样对空间的映射性质改善了,可是对积空间的保持却不那么“良好”了。奥山晃弘指出,如果 X 是仿紧 Σ^* -空间而不是 Σ -空间(麦考尔(Michael)曾作出这样的空间以说明 Σ -空间不能为闭映射所保持),则 X 与闭区间的积不是 Σ^* -空间。 Σ^* -空间的情况较好些,奥山晃弘证明,“ Σ^* -空间与紧空间的积是 Σ^* -空间。麦考尔指出, Σ^* -空间在拓扑空间理论中的应用取决于下述关键性问题:“如果 X, Y 都是仿紧 Σ^* -空间, $X \times Y$ 是否一定是仿紧空间?”这问题尚未解决。

为了说明 Σ^* -空间与 σ -空间的关系,下面引入 σ^* -空间:空间 X 称为 σ^* -空间,如果存在 σ -闭包保持闭集族 \mathcal{B} , 使对每一 $x \in X, \bigcap \{F, F \in \mathcal{B}, x \in F\} = \{x\}$ 。利用这概念,我们有:“下列性质是等价的:① X 是 σ -空间; ② X 是 Σ -空间及 σ^* -空间; ③ X 是 Σ^* -空间及 σ^* -空间。”

参考文献

- 1 Frolik Z. Bull Acad Polon Math Ser. 1960, 8: 747~750
- 2 Arhangel'skii A V. SSSR 1963, 151, 751~754
- 3 Morita K. Math Ann, 1964, 154, 365~382
- 4 Okuyama. Sci Rep Tokyo Kyoiku Daigaku Sec. A. 1967, 9, 236~254
- 5 Michael E A. Proc. Wash. State Univ Conf Gen Top, 1969, 13~19
- 6 Nagami K. Fund Math, 1969, 65, 160~192
- 7 Okuyama A. Pacific J Math, 1972, 42, 485~495
- 8 高国士. σ -空间、 Σ -空间及 Heath-Hodel 映象(上), 1984, 4, 137~142
- 9 林寿. 数学年刊, 1991, 12A, 186~189

(苏州大学高国士教授撰)

M_1 -空间 M_1 -Spaces 1961 年赛特(Ceder)引入 M_1, M_2, M_3 空间如下:

“正则空间 X 称为 M_1 -空间如果 X 具有 σ -闭包保持基; 称为 M_2 -空间, 如果 X 具有 σ -闭包保持拟基, T_1 空间 X 称为 M_3 -空间如果 X 具有 σ -胶垫对基。”这些空间都是度量空间的简单而有效的推广。

由 $M_i (i=1,2,3)$ 空间的定义,易知 $M_1 \Rightarrow M_2 \Rightarrow M_3$ 。至于相互蕴含关系是否成立是赛特当年提出的问题。正因为闭包拟基概念与胶垫对基概念较接近,在赛特的论文中,有许多性质为 M_2, M_3 空间所共有(证明方法也类似),而 M_1 空间是否具有这些性质,至今尚不知。因此,人们首先致力于证明 $M_3 \Rightarrow M_2$ 。15 年后,格龙哈格(Gruenhage, 1976)、游尼刺(Junnila, 1978)独立地证明了 $M_3 \Rightarrow M_2$ 。这一成功激励着人们继续向证明 $M_3 \Rightarrow M_1$ 进军。由于就 M_1 -空间本身研究其性质,困难大而很少成效,一旦证明了 $M_3 \Rightarrow M_1, M_3$ -空间的良好性质(M_3 -空间又称分层空间,具有非常好的性质,见本书“ σ -空间与 Σ -空间”)都是 M_1 -空间的性质。遗憾的是 20 余年来,既不能证明又不能找到否定的反例,这可能和对 M_1 -空间本身性质的研究太少有关,所以作者的意见,以后的研究应以研究 M_1 -空间的性质与试证 $M_3 \Rightarrow M_1$ 并重。

赛特得到的关于 M_1 -空间的性质是作为 $M_i (i=1,2,3)$ 空间的共同性质叙述的:(1) $M_1 \Rightarrow M_2 \Rightarrow M_3 \Rightarrow$ 仿紧且完全正规。(2)

M_1 -空间类分别关于可数积封闭。(3)在 M_2 -空间,可分性,Lindelof 性质、可数链条件(countable chain condition)等价。(4)仿紧的局部 M_1 -空间是 M_1 -空间。

赛特证明了 M_2 -空间、 M_3 -空间具有遗传性、满足局部有限闭和定理及关于闭子集的商空间保持后,分别提出如下问题:(1) M_1 -空间的子空间(闭子空间)是 M_1 否?(2)关于 M_1 -空间,局部有限闭和定理是否成立?(3)设 X 是 M_1 -空间,闭集 $A \subset X$,商空间 X/A 是 M_1 否?

这些问题至今尚未解决,下面提供些部分结果。

关于问题(1),易知 M_1 -空间的开子空间是 M_1 。此外伊藤宗彦(Ito, 1984)证明了“ M_1 -空间的稠子空间是 M_1 。”从而可知,对 M_1 -空间说:闭遗传性 \Rightarrow 遗传性。

关于问题(2)、高国士(1983)、伊藤宗彦(1984)互相独立地证明了“关于 M_1 -空间,局部有限正则闭和定理成立。”即如果 X 存在由正则闭集组成的局部有限覆盖 $\{X_\alpha\}$,每一 X_α 是 M_1 -空间则 X 是 M_1 -空间。此外,高国士还得到“设 X 是正规空间, $\{U_\alpha\}$ 是 X 的局部有限开覆盖,且每一 U_α 是 M_1 -空间,则 X 是 M_1 -空间。”这定理改进了性质(4)的 M_1 -空间部分。考察赛特对 M_2 -空间、 M_3 -空间局部有限闭和定理成立的证明过程,他先证明两个闭子空间的并情况。如果两个 M_1 -的闭子空间的并是 M_1 的话,则赛特的证法对 M_1 -空间也成立,所以问题(2)可以转化为“两个 M_1 闭子空间的并是 M_1 否?”答案如果是肯定的话,则局部有限闭和定理对 M_1 -空间成立,肯定地解决了问题(2)。如果答案是否定的,则存在不是 M_1 -空间的 M_3 -空间。

关于问题(3),朱俊(1985)、夏省祥(1986)分别得到:“设 M_1 -空间 X 的闭子集 A 的边缘是紧的,则 X/A 是 M_1 -空间”及“设 M_1 -空间 X 的闭子集 A 是可数个开-闭集之交,则 X/A 是 M_1 -空间。”波什等(Borges-Lutzer, 1974)指出问题(3)等价于问题(4)、“ M_1 -空间的每一闭子集都具有 σ -闭包保持开邻域基否?”

赛特证明 M_2 -空间的每一闭子集都具有闭包保持邻域基后,提出问题(5):“ M_1 -空间的每一点都具有闭保持开邻域基否?”并证明,如果问题(5)的答案是否定的,则存在不是 M_1 -空间的 M_3 -空间。

问题(3)中 M_1 -空间 X 到商空间 X/A 上的商映射显然是闭的。更一般地可提出如下问题(6):“ M_1 -空间能为闭(完备)映射保持否?”关于这问题的部分结果,有波什等的“设 f 是 M_1 -空间 X 到空间 Y 上的不可约(irreducible)完备映射,则 Y 是 M_1 -空间”及高国士的“设 f 是 M_1 -空间 X 到 Y 上的拟开的(quasi-open)可数双商(countably biquotient)闭映射,则 Y 是 M_1 -空间。”由于不可约、伪开(pseudo-open)映射是拟开的,完备映射是可数双商的,所以后者改进了前者。根据上述二定理,可提出如下问题(7):“ M_1 -空间能为不可约(拟开)闭映射保持否?”关于这个问题,夏省祥有如下结果:“ M_1 -空间为不可约(拟开)闭映射保持当且仅当 M_1 -空间的每一闭子集具有 (σ) -闭包保持开邻域基。”这结果说明问题(7)等价于问题(4),此外,伊藤宗彦证明了一个重要结果:“遗传性 M_1 -空间为闭映射保持”。

自 1976 年、1978 年,格龙哈格、游尼刺证明 $M_3 \Rightarrow M_2$ 后,人们热衷于证明 $M_3 \Rightarrow M_1$ 。但仅得到一些等价条件。在格龙哈格、游尼刺已证明 $M_3 \Rightarrow M_2$ 的基础上,海丝(Heath, 1981)等遵循当年赛特引入 M_2 -空间的思路,对每一 M_2 空间构造相应的 M_1 -空间及由这 M_1 -空间到 M_2 -空间上的完备映射(且是 retraction)。得到:“每一 M_2 -空间是某一 M_1 -空间的完备象。”

从而得到下述等价条件:(1) $M_3 \Rightarrow M_1$ 。(2) M_1 -空间的闭子空间是 M_1 -空间。(3) M_1 -空间在完备(闭)映射下的象是 M_1 -空间。这定理统一了问题(1)及问题(6)(包括问题(3)),对 $M_3 \Rightarrow M_1$ 问题的研究有效地提供了广阔的论证基础。

最后叙述伊藤宗彦又一重要结果:“设 M_3 -空间 X 的每一点都具有闭包保持开邻域基,则 X 是 M_1 -空间。”

关于 $M_3 \Rightarrow M_1$ 问题的研究已持续 30 年,不仅没有解决,而且看不到任何可以解决的迹象。这是拓扑空间理论中最著名的难

题之一,最近美国玛丽罗定(Mary Rudin)对此甚感兴趣,重新提出这一问题(见《Open problems in topology》,North-Holland, 1990)。

参考文献

- 1 Ceder J. Pacific J. Math, 1961, 11: 105~125
- 2 Gruenhagen G. Stratifiable spaces are M_2 , Topology Proceedings, 1976, 1: 221~226
- 3 On the $M_3 \Rightarrow M_1$ question. Topology Proceedings. 1980, 5: 77~104
- 3 Heath R. W. et al. Proc Amer Math Soc, 1981, 83: 146~148
- 4 朱俊. 苏州大学学报, 1983, 1: 67~70
- 5 Kao Kuo-Shih. Pacific J Math, 1983, 108: 121~128
- 6 Ito M. Pacific J Math, 1984, 113: 85~91
- 7 夏省祥. 仿紧性与广义度量空间, 南京: 江苏科技出版社, 1988, 213~224
- 8 高国士. 苏州大学学报, 1988, 3: 289~300

(苏州大学高国士教授撰)

圆(球)素几何学 geometry of circles and spheres

圆(球)素几何学,是在平面上以有定向的圆为基本元素,在空间中以有定向的球面为基本元素的几何学。它不同于以点为基本元素的点素几何学,或以(无向)直线为基本元素的线素几何学。20 世纪 40 年代初,姜立夫采用二阶对称方阵代表拉(Laguerre)氏圆(含有向圆和无向点圆),用二阶埃尔米特(Hermite)方阵代表拉氏球(含有向球和无向点球),进而用满足辛(Symplectic)条件的 2×4 矩阵表示李(Lie)氏圆(含拉氏圆、有向直线和无穷远点圆)和李氏球(含拉氏球、有向平面和无穷远点球)。这样,分别对应于点素平面和点素空间的射影群,仿射群和度量群,圆素平面和球素空间的变换群就可以用辛群及其子群表示。于是经典圆(球)素几何获得新面貌,并有广阔的发展前景。华罗庚由此发展成矩阵几何学。

60 年代初,姜立夫提出他的全部计划如下:

第 1 阶段:对称方阵与埃尔米特方阵(圆与球,超圆与超球),辛群变换论[麦比乌斯(Möbius)群,拉氏群,李氏群],用方阵代数来研讨辛群几何学。

第 2 阶段:辛群曲线论与曲面论(圆列、圆汇,球列、球汇,球丛),用活动标架法来发展辛群几何学(伪欧氏空间的微分几何)。

第 3 阶段:辛群联络空间(麦氏联络空间,拉氏联络空间,李氏联络空间),用外微分法来推广黎曼几何与非黎曼几何。

早在 1944 年,姜立夫给出圆素和球素仿射变换的分类及其不变圆和球。1954 年,姜立夫在中山大学科学讨论会上作了“圆素几何学的新面貌”的报告,用方阵代数完整而系统地建立了矩阵圆(球)素几何学,展现了第一阶段研究的重要而带基础性的成果。1956 年,姜立夫还指导黄树棠利用拉氏圆(球)素仿射辛反演解决了古典的阿波罗尼(Apollonius)问题和它的推广。

1959 年起,姜立夫结合研读嘉当(E. Cartan)的专著,开始利用活动标架法来研究一般拉氏圆列的微分性质。何少辉利用伪循环活动标架,得到抛物型圆列的微分方程和弗朗内(F. Frenet)公式,以及这类圆列的一系列几何性质。黄树棠继而改用伪正活动标架,得到椭圆型和双曲型圆列的相应的结果,从而对一般圆列的微分分类和属性获得了比较全面而系统的了解,后一课题的研究延续到 1985 年,在吴大任的协助下告一段落。

60 年代初,姜立夫孜孜不倦地用矩阵理论充实辛群解析几何的基础工作。他对圆素辛变换进行分类,并确定每类变换的不变圆集。1985~1992 年,黄树棠和杨淦在吴大任协助下,对圆(球)素辛反演作出全面系统的分类,并获得每类的不变圆(球)集。还有许多基础性研究值得做。

如果把圆素平面上的拉氏圆 $Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{12} & z_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho+\xi & \eta \\ \eta & \rho-\xi \end{pmatrix}$ 看作三维仿射空间的点 (z_{11}, z_{12}, z_{22}) 或 (ρ, ξ, η) , 则圆素平面上的圆列和圆汇依次对应于点素空间的曲线和曲面. 又若取圆素平面上的度量 $\det(z_1 - z_2) = (\rho_1 - \rho_2)^2 - (\xi_1 - \xi_2)^2 - (\eta_1 - \eta_2)^2$, 而把 $\sqrt{|\det(z_1 - z_2)|}$ 看作点素空间中两点“距离”的话, 这便属于三维闵可夫斯基(Minkowski)空间的伪欧氏(Euclid)几何学. 同理, 球素几何学对应于四维闵氏空间的伪欧氏几何学, 它实质上是狭义相对论的另一表达形式.

1989年, 黄树棠协助郑敏珍研究了三维闵氏几何, 获得了拉氏圆素几何关于圆矢量, 线性圆列和线性圆汇, 以及圆素仿射辛变换的一些基本性质. 有关的研究尚待深入下去.

参考文献

- 1 Coolidge J L. A treatise on the circle and the sphere, 1916, 3~10
- 2 Blaschke W. Differentialgeometrie der Kreise und Kugeln, 1929, 4~6
- 3 姜立夫. 科学记录, 1942, 1(45): 257~262
- 4 华罗庚. Trans. Amer Math Soc, 1945, 57, 441~490; 1947, 61, 193~255
- 5 黄树棠. 中山大学学报(自然科学版), 1956, 2, 21~33
- 6 黄树棠. 中山大学学报(自然科学论丛), 1984, 104~122
- 7 杨淦. 南开大学学报(自然科学版), 1987, 1, 20~35;
- 8 吴大任编. 姜立夫教授(1890-1978)纪念册. 天津: 南开大学出版社, 1989, 54~74
- 9 郑敏珍. 漳州师范学院学报, 1989
- 10 黄树棠. 南开大学学报(自然科学版), 1986~1992
(中山大学黄树棠副教授撰; 杨淦审)

光滑映射芽的决定性理论 奇点理论中十分活跃的研究专题, 描述微分流形之间的光滑映射在一点附近最重要的局部性态. 刻划有限决定的映射芽的本质特征, 判定一个映射芽在什么条件下有限决定并对其决定性阶数进行估计, 是映射芽的决定性理论的基本问题. 在1968~1971年期间, 马瑟(J. N. Mather)以《C[∞]映射的稳定性》为总标题发表的6篇系列论文为这一研究奠定了基础.

一般地, 在C[∞]映射芽集 $\mathcal{S} = \{(R^n, 0) \rightarrow (R^p, 0)\}$ 上给定一等价关系, 可考虑 $f \in \mathcal{S}$ 由它的r次导网 $j^r f$ 有限决定的问题. 马瑟引入了5类C[∞]微分同胚芽群, 并通过这些群在集 \mathcal{S} 上的作用来规定等价关系, 这5类群通常记为 $\mathcal{R}, \mathcal{L}, \mathcal{G}, \mathcal{X}, \mathcal{A}$. 例如群 \mathcal{R} 与 \mathcal{L} 分别由源空间 $(R^n, 0)$ 及靶空间 $(R^p, 0)$ 上的C[∞]坐标变换组成, \mathcal{R} (及 \mathcal{L}) 在 $f \in \mathcal{S}$ 上的作用是通过映射芽复合从右边(及左边)作用在 f 上. 群 \mathcal{A} 定义为 \mathcal{R} 与 \mathcal{L} 的直积. C[∞]芽 $f: (R^n, 0) \rightarrow (R^p, 0)$ 是 r - \mathcal{G} -决定的(其中 \mathcal{G} 可为上述5类群中的任何一个), 是指 \mathcal{S} 中所有与 f 具有相同 r -导网的映射芽均位于轨道 $\mathcal{G} \cdot f$ 中, 而 f 的 \mathcal{G} -决定性阶数是使得 f 为 r_0 - \mathcal{G} -决定的最小正整数 r_0 . 例如若 $f: (R^n, 0) \rightarrow R$ 是莫尔斯函数芽(此时 $Df(0) = 0$, 且矩阵 $\| \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} (0) \|$ 满秩), 则由莫尔斯引理知 f 恰为 $2-R$ -决定的. 对于一般的 \mathcal{G} -有限决定的C[∞]芽, 在 \mathcal{G} -等价意义下, 可由它的有限次泰勒展式来完全确定, 因而在局部分析中具有重要意义.

为叙述马瑟的著名结果, 记C[∞]函数芽环 $C_n = \{(R^n, 0) \rightarrow R\}$ 的极大理想为 m_n , 令 θ_f 表示沿 f 的C[∞]向量场芽所组成的 C_n -模, 简记 $\theta_1 | (R^n, 0)$ 为 θ_n . $tf: \theta_n \rightarrow \theta_f$ 和 $\omega f: \theta_p \rightarrow \theta_f$ 分别由 $tf(\xi) = T_{i_0} \xi$ 和 $\omega f(\eta) = \eta_0 f$ 给出. $T\mathcal{S}(f)$ 视 \mathcal{S} 的不同情形分别取为 $T\mathcal{R}(f) = tf(m_n \theta_n), T\mathcal{L}(f) = \omega f(m_p \theta_p), T\mathcal{A}(f) = T\mathcal{R}(f) + T\mathcal{L}(f), T\mathcal{G}(f) = f^* m_p \cdot \theta_f, T\mathcal{X}(f) = T\mathcal{R}(f) + T\mathcal{G}(f)$. 整数 d

$(f, \mathcal{S}) = \dim_R(m_n \theta_f / T\mathcal{S}(f))$ 叫做 f 关于 \mathcal{S} 的余维. 加夫尼(T. Gaffney)于1979年给出了著名的马瑟无穷小判别法的一个改进形式. 设 $f \in \mathcal{S}$, 则下列各条等价:

- (b) f 是 \mathcal{G} -有限决定的,
- (c) 对于某一 $r, T\mathcal{S}(f) \supset m_n^r \cdot \theta_f$,
- (d) $d(f, \mathcal{S}) < +\infty$.

更精确地, 有(i)若 f 是 r - \mathcal{G} -决定的, 则 $T\mathcal{S}(f) \supset m_n^{r+1} \cdot \theta_f$, (ii)若 $T\mathcal{S}(f) \supset m_n^{r+1} \cdot \theta_f$, 则 f 是 $(er+1)$ - \mathcal{G} -决定, (iii)若 $d(f, \mathcal{S}) = d < +\infty$, 则 $T\mathcal{S}(f) \supset m_n^{(d+1)\epsilon} \theta_f$, 其中当 $\mathcal{G} = \mathcal{R}, \mathcal{G}$ 或 \mathcal{X} 时, $\epsilon = 1$; 当 $\mathcal{G} = \mathcal{L}$ 或 \mathcal{A} 时, $\epsilon = 2$.

群 \mathcal{S} 中的成员取 s -导网为恒同映射者所成之集 \mathcal{S}_s , 是群 \mathcal{S} 的正规子群, \mathcal{S}_s 在C[∞]芽集 \mathcal{S} 上的作用可定义 \mathcal{S} 上的等价关系, 从而可定义 \mathcal{S}_s -决定性. 对于 $\mathcal{R}_s, \mathcal{S}_s$, 及 \mathcal{X}_s , 有限决定性, 库哈兹(W. Kuchars)于1976年就函数芽、热尔韦(J. -J. Gervais)于1977年就一般的映射芽给出了刻划. 1984年布鲁斯(J. W. Bruce)等对 \mathcal{L}_s 及 \mathcal{A}_s 有限决定性提供了另一种形式的刻划, 戴蒙(J. Damon)分别对 \mathcal{A} 和 \mathcal{X} 的一类几何子群刻划了有限决定性.

对有限决定性的刻划还可用托姆(R. Thom)提出的通用开折概念来描述, 即C[∞]芽 f 是 \mathcal{G} -有限决定的, 当且仅当 f 有一个 \mathcal{G} -通用开折. 通用开折是奇点理论对现代数学最重要的贡献之一, 它是突变理论的核心.

对应于上述5类群的5种决定性, 它们之间具有某种联系, \mathcal{R} - (及 \mathcal{L} -) 有限决定性与 \mathcal{X} -有限决定性相关, \mathcal{L} -有限决定性与 \mathcal{A} -有限决定性又彼此相联. 例如若C[∞]芽 $f \in \mathcal{S}$ 不是浸入与浸没, 则 f 是 \mathcal{R} -有限决定的 $\Leftrightarrow p \leq 2$ 且 f 是 \mathcal{X} -有限决定的. 假若 f 是实解析芽, 那么 f 作为C[∞]芽是 \mathcal{G} -有限决定 $\Leftrightarrow f$ 作为实解析芽是 \mathcal{G} -有限决定 $\Leftrightarrow f$ 的复化作为全纯芽是 \mathcal{G} -有限决定. 因此在对C[∞]芽的决定性阶数进行估计时, 近十多年来人们的兴趣更多地是就 $\mathcal{G} = \mathcal{X}$ 及 \mathcal{A} 的情形来进行研究. 从历史上看, 马瑟的工作着重于C[∞]稳定性、稳定映射的稠密性与分类问题. 他对稳定的映射芽的决定性阶数已作出好的估计, 并且给出了各类稳定映射芽的标准型, 但对非稳定的有限决定的映射芽的阶数估计以及标准型问题尚未深入考虑. 自1975年以来, 加夫尼、马蒂内(J. Martinet)以及迪普莱西(A. du Plessis)等提供了一系列好方法用以精确估计决定性阶数. 现举下例加以简单说明: 设映射芽 $f: (R^2, 0) \rightarrow (R^2, 0), (x, y) \rightarrow (x, y^3 + x^2 y)$, 按照马瑟的估计, f 是 $10^{24}-\mathcal{A}$ -决定的; 而依加夫尼的方法, f 是 $6-\mathcal{A}$ -决定的; 依迪普莱西的方法则为 $3-\mathcal{A}$ -决定的. 1985年以来, 中国奇点理论工作者在李培信主持下开展了这方面的研究, 对 $\mathcal{A}_s, \mathcal{R}_s$ 及 \mathcal{X}_s 决定性阶数估计取得一些好结果.

1979年, 布罗德森(H. Brodersen)及威尔逊(L. C. Wilson)同时研究了 ∞ - \mathcal{G} -决定性. 映射芽 $f \in \mathcal{S}$ 是 ∞ - \mathcal{G} -决定的, 意指 \mathcal{S} 中与 f 具有相同无穷泰勒级数的每一芽 g (此时 $j^\infty g(0) = j^\infty f(0)$) 必 \mathcal{G} -等价于 f . 此外, 在这之前还引入了 $\mathcal{G}^{(k)}$ -等价性, $0 \leq k < \infty$. 事实上, 群 \mathcal{S} 中的成员均为C[∞]微分同胚芽, 若将C[∞]条件减弱为C^k, 即用C^k微分同胚芽来代替便可得到群 $\mathcal{S}^{(k)}$, 由此可诱导出C[∞]芽集 \mathcal{S} 上的等价关系, 并且这些等价关系产生相应的 $\mathcal{G}^{(k)}$ -决定性, 于是可引入如下一些条件, 对任意 $f \in \mathcal{S}$ 及 $0 \leq k \leq \infty$,

- (a_k) f 是 ∞ - $\mathcal{G}^{(k)}$ -决定的,
- (b_k) f 是 $\mathcal{G}^{(k)}$ -有限决定的,
- (c) $m_n^\infty \theta_f \subset T\mathcal{S}(f)$,

(g) 存在 R^n 中原点0的一邻域 U 及芽 f 的一个代表 $\tilde{f}: U \rightarrow R^p$, 使得对 $U - \{0\}$ 中的每一有限子集 S, \tilde{f} 在 S 处的多重芽是 \mathcal{G} -稳定的.

几何条件(g)适用于解析芽, 为此又引进了条件(e), 称为“椭圆形”条件. 例如当 $\mathcal{G} = \mathcal{R}, \mathcal{G}$ 或 \mathcal{X} 时, 取 C_n 中的理想 $I_{\mathcal{G}}(f)$ 分别为 J_f (由 Df 的 $p \times p$ 子式所生成), $f^* m_p \cdot C_n$ 及 $J_f + f^* m_p \cdot C_n$, 并且条件(e)要求有限生成的理想 $I_{\mathcal{G}}(f) \supset m_n^\infty$. 当

然还可以用一组 Lojasiewicz 不等式来表达条件(e).

沃尔(C. T. C. Wall)在 1981 年发表的综述性论文中,将许多学者的研究概括为下述结论:对于 $\mathcal{S} = \mathcal{R}, \mathcal{F}, \mathcal{N}$ 或 \mathcal{L} , 下列条件

$$(a_k) (0 \leq k \leq \infty), (b_k) (0 \leq k < \infty), (t) \text{ 及 } (e)$$

是等价的. 如果 f 是解析芽, 则上述诸条件还等价于 (g) .

而对于 $\mathcal{S} = \mathcal{A}$, 布罗德森于 1990 年在一次奇点理论学术会上报告了下述结果: 记条件

(g') 对于每一 $f \in \mathcal{F}$, 若 $j^\infty f(0) = j^\infty f(0)$, 则 f 满足 (g) ,

又 $0 < k \leq \infty$, 则条件 $(e), (t), (g')$ 及 (a_∞) 是等价的, 并且它们中的每一个与 $(a_k) (p+1 \leq k < \infty)$ 及 $(b_k) (p+1 \leq k < \infty)$ 中的任何一个等价.

在探讨有限决定映射芽的标准型时, 自然提出如何识别属于同一等价类中的诸映射芽的问题. 对此问题的研究, 导致迪普莱西于 1980 年引入 M - \mathcal{S} -决定性, 其中 M 为 $(C_n)^p$ 的一个 C_n -模, 现就 $M = (I)^p$ (I 为 C_n 中理想) 简述之. f 叫做 I - \mathcal{S} -决定, 如果 g 是 f 的任意一个 I -逼近 (即要求 $y_i o g - y_i o f \in I, i = 1, \dots, p$), 则 g 与 f 是 \mathcal{S} -等价的. 通常所说的 r - \mathcal{S} -决定性就是这里的 m_n^{r+1} - \mathcal{S} -决定性, 并且 ∞ - \mathcal{S} -决定性就是 m_n^∞ - \mathcal{S} -决定性. 1982 年, 加夫尼和迪普莱西对情形 \mathcal{A} 给出如下基本估计: 若 $f \in \mathcal{F}$ 是有限奇异型的, 又 C_n 中理想 I 满足 $I \cdot \theta_f \subset T_{\mathcal{A}}(f)$, 则 f 是 I - \mathcal{A} -决定的. 近几年来, 中国一些学者开展了 I - \mathcal{S} -决定性的研究, 其中 $\mathcal{S} = \mathcal{R}, \mathcal{A}$, 或 \mathcal{N} .

映射芽的决定性理论还包括不变量的研究 (映射芽的余维便是其中之一), 以及探讨 \mathcal{S} - (及 $\mathcal{S}^{(k)}$ -) 决定的映射芽是否有普遍意义的问题. 此外, 由 \mathcal{S} -有限决定性进而研究 \mathcal{S} -半有限决定性, 并且群 \mathcal{S} 不只限于前述的 5 类, 这说明研究内容十分丰富. 由于所讨论的映射芽的定义域是有限维空间, 自然会问: 能否将所述的理论推广到无穷维情形呢? 马格努斯 (R. J. Magnus) 于 1976 年曾著文考察过定义在 Banach 空间上的函数芽的决定性及开折, 但至今为止, 对于无穷维情形的研究成果似乎不多, 有待继续深入.

参考文献

- 1 Mather J N.
 - I Ann of Math, 1968, 87: 89~104
 - II Ann of Math, 1969, 89: 254~291
 - III IHES, 1969, 35: 127~156
 - IV IHES, 1970, 37: 223~248
 - V Adv in Math, 1970, 4: 301~336
 - VI Lecture Notes in Math, 1971, 192: 207~253
- 2 du Plessis A. Invent. Math, 1980, 58: 107~160
- 3 Wall C T C. Bull London Math Soc, 1981, 13: 481~539
- 4 Gaffney T, et al. Invent Math, 1982, 66: 137~163
- 5 Damon J. Memoirs Amer Math Soc, 1984, 50(306)

(湖南师范大学李养成教授撰)

Fuzzy 度量空间和 Fuzzy 拓扑空间的度量化

度量空间和拓扑空间的度量化理论是拓扑学中的基本理论. 在 Fuzzy 拓扑学中, 情形也是如此. 由于层次结构的影响, 使得这一研究更具复杂性和技巧性. 在 Fuzzy 拓扑学中, 度量概念有各种观点, 但具有丰富内容且至今被认为是十分成功的度量理论是循 B. Hutton 和 M. A. Erceg 引入的度量而发展的.

1977 年, 在 Fuzzy 一致结构的基础上, Hutton 称:

Z 上的一个 Fuzzy 拟伪度量是 L^Z 上的一个映射族 $D = \{D_r, L^Z \rightarrow L^Z, r > 0\}$ 满足条件 $(A1) \rightarrow (A4)$; 若 D 还满足 $(A6)$, 则称 \mathcal{D} 为 Z 上的一个 Fuzzy 伪度量. 这里

$$(A1) D_r(\emptyset) = \emptyset,$$

$$(A2) D_r(A) \geq A,$$

$$(A3) D_r(UA) = UD_r(A),$$

$$(A4) D_r \cdot U_s \leq D_{r+s},$$

$$(A6) D_r = D_r^{-1}.$$

Z 上的 Fuzzy (拟) 伪度量拓扑定义为以 $\{D_r(A), r > 0, A \in \mathcal{D}\}$ 为基生成的 Fuzzy 拓扑, 并且被 Hutton 证明.

一个 Fuzzy (拟) 一致空间 (L^Z, \mathcal{D}) 可 (拟) 伪度量化, 当且仅当 \mathcal{D} 具有可数基.

1979 年, Erceg 从推广于集间的 Hausdorff 距离入手, 引入了 Fuzzy (拟) 伪度量的概念:

Z 上的一个 Fuzzy 拟伪度量是一个映射 $P: L^Z \times L^Z \rightarrow [0, \infty]$ 满足下面条件 $(M1) \rightarrow (M4)$:

$$(M1) P(\emptyset, A) = \infty, \forall A \in L^Z, \{\emptyset\},$$

$$P(A, A) = 0, \forall A \in L^Z,$$

$$P(A, \emptyset) = 0, \forall A \in L^Z,$$

$$(M2) P(A, C) \leq P(A, B) + P(B, C), \forall A, B, C \in L^Z,$$

$$(M3) (i) A \leq B \Rightarrow P(A, C) \geq P(B, C), \forall C \in L^Z$$

$$(ii) P(A, UB_i) = VP(A, B_i), \forall A, B_i, (i \in \Delta) \in L^Z.$$

$(M4)$ 设 $A, B_i \in L^Z (\forall i \in \Delta)$, 若由 $P(B_i, C) < r \Rightarrow C \leq A (i \in \Delta)$, 则由 $P \cdot (VB_i, D) < r \Rightarrow D \leq A$.

对每个 $r > 0$, 可自然联系一个映射 $D_{r,1} L^Z \rightarrow L^Z, D_r(A) = V \{B \in L^Z: P(A, B) < r\} (\forall A \in L^Z)$, 称 $\{D_r, r > 0\} = D_p$ 为 p 的相关邻域映射族, 若 \mathcal{D} 还满足 $(A6)$, 则称 P 为 Z 上的 Fuzzy 伪度量. Fuzzy (拟) 伪度量拓扑仍如 Hutton 所定义的. Erceg 指出, D_p 是 Hutton 意义下的 (拟) 伪度量. 从而从拓扑角度来看, Hutton 引入的 Fuzzy (拟) 伪度量空间等价于 Erceg 所引入的. 梁基华等指出, 从度量角度来看, 这两个概念是不等价的, 并证明:

Erceg 的 Fuzzy 拟伪度量由满足条件 $(A1) \rightarrow (A5)$ 的映射族 $\{D_r, r > 0\}$ 唯一确定且条件 $(A5)$ 独立于 $(A1) \rightarrow (A4)$. 这里, $(A5) D_r = V D_s$.

每个 Fuzzy 伪度量空间是正规的. Hutton 在 Fuzzy 单位区间上构造了标准伪度量, 其伪度量拓扑恰是其上的标准拓扑. 与通常拓扑空间中的情形类似, 1983 年证明可数个可 (拟) 伪度量的 Fuzzy 拓扑空间的积空间是可 (拟) 伪度量化的; 若格值 L 具有可数生成集, 则每个 Fuzzy 拟伪度量空间是 $Q-C_1$ 的, 并且给出了 Uryschn's 度量化定理的 Fuzzy 推广.

具有可数基的 Fuzzy 拓扑空间 (L^Z, δ) 是可伪度量化的, 当且仅当 (L^Z, δ) 是正规空间.

不久, 刘应明利用嵌入定理给出了这一结果的一种简洁证明.

Hutton 和 Erceg 关于 Fuzzy 度量空间的工作被公认为“无点派”的优秀成果. 但是 Fuzzy (拟) 伪度量作为映射族比较复杂, 尤其对称性不具几何直观, 难以进行深入研究, 因而希望对此进行直观描述. 另一方面, Fuzzy 伪度量是否具有通常伪度量的点式表示, 是 Fuzzy 度量理论研究中饶有趣味的. Erceg (1979) 首先考虑这一问题, 但却未能成功. 1983 年, Hutton 利用 Fuzzy 格的范畴积给出了 Fuzzy 伪度量的一种点式表示, 由于范畴积结构的复杂性, 依然不便使用. 1987 年, 梁基华等建立了如下颇具几何直观的点式度量.

称映射 $d: P(L^Z) \times P(L^Z) \rightarrow [0, \infty]$ 是 L^Z 上的一个点式 (拟) 伪度量, 若 d 满足如下条件 $(P1) \rightarrow (P3)$ $(P1) \rightarrow (P4)$. 这里 $P(L^Z)$ 表 Z 上的 Fuzzy 点全体且

$$(P1) \text{ 若 } \lambda \leq \beta', \text{ 则 } d(x_\lambda, x_\beta) = 0$$

$$(P2) \text{ 对 } x_\lambda, y_\beta, z_\gamma \in P(L^Z), \forall r > d(y_\beta, z_\gamma), \text{ 存在 } \beta' \leq \beta' \text{ 使 } d(x_\lambda, z_\gamma) < d(x_\lambda, y_\beta) + r$$

$$(P3) \text{ 若 } \beta = \bigvee_{i \in \Delta} \beta_i, \text{ 则 } d(x_\lambda, y_\beta) = \bigwedge_{i \in \Delta} d(x_\lambda, y_{\beta_i}), \text{ 且 } d(y_\beta, x_\lambda) = \bigwedge_{i \in \Delta} d(y_{\beta_i}, x_\lambda)$$

$$(P4) d(x_\lambda, y_\beta) = d(y_\beta, x_\lambda)$$

并且我们证明了上述点式 (拟) 伪度量等价于 Erceg 给出的

(拟)伪度量。

利用这种有点苛刻,梁基华给出了 Fuzzy (拟)伪度量空间可数乘性的构造性证明,说明 Fuzzy (拟)伪度量空间中的网收敛可用此点式度量直观描述;特别是给出了 Fuzzy 拓扑空间的 Smirnov-Nagata 度量化定量。

具有 σ -局部有限基的正则 Fuzzy 拓扑空间是可伪度量化的。

根据罗懋康(1985)构造的反例可知上述结论的逆命题一般不成立。从而寻求当格值 L 满足什么条件时能使上述结论的逆命题成立,也是一个值得进一步考虑的问题。

对于拓扑生成的 Fuzzy 拓扑空间,1990年,梁基华得到了更完美的结论:

1. 拓扑生成的 Fuzzy 拓扑空间 (L^Z, δ) 是可伪度量化的,当且仅当它的底空间是可伪度量化的。

2. 若 L 具有可数生成集, (L^Z, δ) 是拓扑生成空间,则下面几条等价,① (L^Z, δ) 是可伪度量化的;② (L^Z, δ) 正则且具有 σ -离散基;③ (L^Z, δ) 正则且具有 σ -局部有限基。

最近,彭育威对 Ercey 的 Fuzzy 拟伪度量定义进行了简化,证明:

映射 $P: L^Z \times L^Z \rightarrow [0, \infty]$ 是 Ercey 意义下的(拟)伪度量的充要条件是 P 满足如下条件 (B1)-(B3) (B1)-(B4)

(B1) $A \supseteq B \Rightarrow P(A, B) = 0$

(B2) $P(A, C) \leq P(A, B) + P(B, C)$

(B3) $P(A, B) = \bigvee_{y \in B} \bigwedge_{x \in A} P(x, y) (\wedge \emptyset = \infty)$

(B4) 若 $P(A, C) < r \Rightarrow C \subseteq B$ 等价于若 $P(B', E) < r \Rightarrow E \subseteq A'$ 。这里 $x_k \ll A$ 表 x_k way below 于 A 。

当上述 P 限制在分子集上时,也可给出拟伪度量另一种点式刻画。

最后应该指出,虽然对 Fuzzy (拟)伪度量的研究取得了较大的进展,但还有许多工作有待进一步深入,例如, Fuzzy 伪度量空间与 Fuzzy 仿紧空间之间的协调关系, Fuzzy 紧伪度量空间的研究,各种度量定理的 Fuzzy 表现等。

参考文献

1 刘应明. 中国科学(A辑) 1982;8
2 Uniformities on fuzzy topological spaces. Part I, Fuzzy Math. 1983. 3(1)
3 梁基华. 数学年刊, 1985. 6A(1)
4 罗懋康. 四川大学学报(自然科学版), 1985. 4
5 Liu Ying-Ming. The analyses of fuzzy information (Ed J C Bzdek) 1986. 4
6 梁基华. 数学学报, 1987. 6
7 王国俊. L-Fuzzy 拓扑空间论. 西安: 陕西师范大学出版社, 1988

(四川大学梁基华撰)

Fuzzy 拓扑共生结构 fuzzy syntopogenous structure

1968年, C. L. Chang 以 L. A. Zadeh 的 Fuzz 集理论为骨架, 引入了 Fuzzy 拓扑空间的概念。几十年来, 通过国内外学者的共同研究, 已经使它从起初的移植研究逐渐走上了创新的道路。层次结构的特点使它不同于一般拓扑学的特有风格。Fuzzy 拓扑学中 3 个重要结构为: 一致结构, 邻近结构, 拓扑共生结构。其中拓扑共生结构的研究进展大体分为两条线: 第 1 条线是 1977 年 B. Hutton 利用 L^X 上的保并增值自映射族创造性地定义了一致结构, 1979 年 A. K. Katsaras 首先研究 Fuzzy 邻近结构理论, 1983 年 A. K. Katsaras 和 C. G. Petalas 讨论了 Fuzzy 拓扑结构, Hutton 式 Fuzzy 一致结构, Fuzzy 邻近结构的一致化处理方法, 提出 Fuzzy 拓扑共生结构概念, 给出了这 3 种结构的统一框架。第 2 条线是 1981 年 R. Lowen 将 L. A. Zadeh 提出的 Fuzzy 集, 用于一致结构理论, 提出 Lowen 式 Fuzzy 一致结构。

1987 年 G. Artico 和 R. Moresco 研究了与 Lowen 式 Fuzzy 一致结构相容的 Artico-Moresco 式 Fuzzy 邻近结构。1990 年 A. K. Katsaras 讨论了与 Lowen 式 Fuzzy 一致结构, Artico-Moresco 式 Fuzzy 邻近结构相容的一致化处理框架——Fuzzy 拓扑共生结构。

下面论述 Fuzzy 拓扑共生结构的研究成果和现状。希腊 A. K. Katsaras 等建立 Fuzzy 拓扑共生结构初步理论着手于首先讨论 Fuzzy 半拓扑生成序, Fuzzy 拓扑生成序。研究 Fuzzy 拓扑共生结构与 Fuzzy 拓扑, Fuzzy 邻近, Fuzzy 一致的相互诱导关系, 以及 Fuzzy 拓扑结构, Fuzzy 邻近结构, Fuzzy 一致结构这三种结构是 Fuzzy 拓扑共生结构的特款。并且研究 Fuzzy 拓扑共生结构中具体问题, Fuzzy 拓扑共生结构的逆象; 两个 Fuzzy 拓扑共生结构之间映射的 (S, S') -连续性; 在 (S, S') -连续映射下 Fuzzy 拓扑共生结构的逆象; Fuzzy 拓扑共生结构的乘积。建立 Fuzzy 实直线 R_p 上的 Fuzzy 拓扑共生结构 $S_R = \{ \langle \epsilon : \epsilon > 0 \rangle \} (\mu \langle \epsilon \rho \Rightarrow \mu = 0$ 或 $\rho = 1$ 或 $\exists t \in R, \forall a \in R_p, \mu(a) \leq a(t-) \leq a(t-\epsilon) \leq \rho(a))$ 。并且得到重要定理: 任何 Fuzzy 拓扑共生结构 (X, S) 都由 (X, S) 到 (R_p, S_R) 的有界 (S, S_R) -连续函数族生成。

近来, 中国刘旺金和莫智文等将 Fuzzy 拓扑共生结构 (X, S) 与 X 上的代数结构相结合进行研究。讨论了 X 上的 Fuzzy 拓扑共生结构与预序的相互生成关系及其递增(减)性、连续性、Fuzzy 拓扑共生预序空间等相关内容。进而研究了 Fuzzy 拓扑共生结构的连通性、弱诱导拓扑共生扩张、Fuzzy 拓扑共生 g -族等课题。

该领域 Fuzzy 拓扑共生结构的收敛理论, Fuzzy 拓扑共生结构的紧化理论都有待于进一步研究。

参考文献

1 Katsaras A K. JMAA, 1984, 99; 219~236
2 Artico G. Fuzzy Uniformity FSS 1987, 21: 85~98
3 莫智文. 四川师大学报(自), 1987, 4: 45~52
4 莫智文等. 工程数学学报, 1989, 2: 38~42
5 Katsaras A K. Fuzzy Syntopogenous structures compatible with lowen fuzzy Uniformities and Artico-Moresco fuzzy proximities, FSS, 1990, 36: 375~393
6 刘旺金等. 模糊系统与数学, 1990, 2: 31~37
7 刘旺金等. 模糊系统与数学, 1991, 1: 17~22
8 莫智文等. 数学季刊, 1991, 3: 45~52
9 舒兰等. 电子科技大学学报, 1989, 2: 164~170

(四川师范大学莫智文副教授撰)

不可约空间理论 theory of irreducible spaces 仿紧空间的广泛应用, 引起了对仿紧性的形形色色的推广, 形成覆盖性质理论。绝大部分的覆盖性质都能使“可数紧闭子集成为紧子集”(这一性质称为 iso-紧性)。不可约(irreducible)空间引起人们的兴趣是从 1950 年阿伦等(Arens-Dugundji)利用弱仿紧(metacompact)空间的不可约性证明了“弱仿紧的可数紧空间是紧空间”开始的。以后人们一方面寻找哪些类型的空间具有不可约性, 另一方面发现了不可约性的类似于使可数紧性成为紧性的一些作用。这样, 就使不可约性在拓扑空间理论中, 特别是覆盖性质方面起着很大作用。

空间 X 的开覆盖 \mathcal{U} 称为最小的, 如果不存在 \mathcal{U} 的真子族覆盖 X 。空间 X 称为不可约的, 如果 X 的每一开覆盖具有最小的加细开覆盖。空间 X 称为 θ -加细的(θ -refinable), 如果 X 的每一开覆盖 \mathcal{U} 存在加细开覆盖序列 $\{\mathcal{V}_n\}_{n \in \mathbb{N}}$, 对每一 $x \in X$, 存在 $n(x) \in \mathbb{N}$ 使 $0 < \text{ord}(x, \mathcal{V}_{n(x)}) < \omega$; 称为弱 θ -加细的(weakly θ -refinable), 如果 X 的每一开覆盖 \mathcal{U} 存在加细开覆盖 $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} \mathcal{V}_n$, 对每一 $x \in X$, 存在 $n(x) \in \mathbb{N}$, 使 $0 < \text{ord}(x, \mathcal{V}_{n(x)}) < \omega$; 如果在弱 θ -加细空间的定义中更添加: (\mathcal{V}_n^*) 是点有限的 $(\mathcal{V}_n^* = \bigcup \{V: V \in \mathcal{V}_n\})$, 则称 X 为弱 $\bar{\theta}$ -加细的(weakly $\bar{\theta}$ -refinable)。熟知弱仿紧 $\Rightarrow \theta$ -加细 \Rightarrow 弱 $\bar{\theta}$ -加细 \Rightarrow 弱 θ -加细, 而相反蕴含关系都不能成立。

1975 年蓬奈(Boone)证明, “ θ -加细空间是不可约的”, 并提

出问题：“弱 θ -加细空间是否不可约？”1977 年度文 (Van Douwen) 等否定地回答了这问题，他们构造了一个正则、弱 θ -加细而非不可约的空间。

1975 年斯密司 (Smith) 引入了弱 $\bar{\theta}$ -加细空间。弱 $\bar{\theta}$ -加细空间是否不可约引起人们的兴趣。1976 年蓬奈证明：“弱 $\bar{\theta}$ -加细空间是不可约的”。

斯密司曾提出问题：“可数弱仿紧的弱 θ -加细空间是否弱 $\bar{\theta}$ -加细空间？”随着上述结果的证明，把上述问题改写为问题 1：“可数弱仿紧的弱 θ -加细空间是否不可约？”这问题尚未解决。

蓬奈曾给出不可约空间的一个有效的刻画：“空间 X 是不可约的，当且仅当 X 的每一开覆盖 $\{U_\alpha\}_{\alpha \in A}$ 存在离散闭集族 $\{F_\beta\}_{\beta \in B}$ 使 $B \subset A, F_\beta \subset U_\beta (\beta \in B)$ 且 $\{U_\beta\}_{\beta \in B}$ 覆盖 X ”。

易知可数紧空间的每一离散集族是有限的， \aleph_1 -紧空间 (每一不可数子集有聚点) 的每一离散集族是可数的 (也称为性质 (δ))，易知性质 (δ) 等价于 \aleph_1 -紧，而 Lindelof 空间具有性质 (δ) 。由上述刻画得下述定理，“在不可约空间：①可数紧性与紧性等价。② \aleph_1 紧性与 Lindelof 性质等价。”这定理显示了不可约空间的有趣的性质。

从本文开端的叙述似乎不可约性与 iso-紧性有蕴含关系，其实不然。弱 θ -加细空间是 iso-紧的，但不是不可约的，此外，有反例说明：不可约性 + 集态正规性 \neq iso-紧性，这由于不可约性不是闭遗传的。

空间 X 称为 $\delta\theta$ -加细的、弱 $\delta\theta$ -加细的、弱 $\bar{\delta}\theta$ -加细的。如果把 θ -加细的、弱 θ -加细的、弱 $\bar{\theta}$ -加细的定义中的 “ $0 < \text{ord}(x, \mathcal{V}_{\theta}(x)) < \infty$ ” 分别改为 $0 < \text{ord}(x, \mathcal{V}_{\theta}(x)) \leq \infty$ ”。

斯密司在引入弱 $\bar{\theta}$ -加细空间后曾证明 θ -加细性蕴含弱 $\bar{\theta}$ -加细性，但在引入弱 $\bar{\delta}\theta$ -加细空间后他不知是否有类似的蕴含关系。故有问题 2：“ $\delta\theta$ -加细空间是否弱 $\bar{\delta}\theta$ -加细的？”这问题尚未解决。

1984 年马虚督 (Mashburn) 证明：“ T_1 的 $\delta\theta$ -加细空间， T_1 的弱 $\bar{\delta}\theta$ -加细空间都是不可约的”。必须指出条件 T_1 不能去掉。但他是对 $\delta\theta$ -加细空间、弱 $\delta\theta$ -加细空间分别证明的，并没有解决问题 2。

1972 年詹奈 (Bennett) 等把完全性附加于弱 θ -加细空间，得到：“完全的，弱 θ -加细空间是次仿紧的，从而是不可约的。”

1977 年刘应明引入拟仿紧性与狭义拟仿紧性，按狭义拟仿紧 \Rightarrow 拟仿紧，且 θ -加细 \Rightarrow 狭义拟仿紧，故有：拟仿紧空间是否不可约的？”这问题已为朱俊 (1991) 正面地解决：“ T_1 拟仿紧空间是不可约的”。但条件 T_1 不能去掉。

不可约空间的遗传性及映射性质。很多的覆盖性质具有闭遗传性，特别是具有 F_0 -遗传性 (即每 $-F_0$ ，子空间保持原来空间的性质)。例如，仿紧、弱仿紧、次仿紧、 θ -加细、弱 θ -加细、 $\delta\theta$ -加细、弱 $\delta\theta$ -加细等等，因此，再附加条件“完全性”后可获得遗传性。对不可约空间来说，情况未必尽然。

不可约空间不具有闭遗传性。1976 年度文宣称“每一空间可以作为闭子集浸没于某一不可约空间”，未见其构造。1979 年代维斯 (Davis) 等给出了构造。对任一空间 X 可以构造不可约空间 $g(X)$ 使 X 同胚于 $g(X)$ 的某闭集且变换 g 保持势 (无限情况)、特征 (character)、分离性及集态正规性等。不可约空间虽不具有闭遗传性，可有下列有趣结果 (因完全的次仿紧空间是遗传性次仿紧的)：“完全的，弱 θ -加细空间是遗传性不可约空间”。这定理之所以有趣是弱 θ -加细空间未必具有不可约性。至于是否可用“不可约”代替上述定理中的“弱 θ -加细”，我们提出如下问题 3：“完全的、不可约空间是否遗传性不可约的？”

上述问题已为朱俊 (1991) 否定地解决，他证明：“完全的、不可约空间是开遗传的，未必是闭遗传的。”

关于不可约空间的映射性质的讨论。我们提出问题 4：“不可约空间能否为闭 (完备) 映射所保持？”这问题尚未解决，朱俊 (1991) 曾给出这问题部分解答：① T_1 拟仿紧空间的闭象是不可约的。② 设 X 不可约， A 闭于 X ，则 X/A 是不可约的。① 中的条

件 T_1 不能去掉。

参考文献

- 1 Bennett H R, et al. Gen Top Appl, 1972, 2: 49~54
- 2 Smith J C. Proc Amer Math Soc, 1975, 53: 511~517
- 3 Boone J R. Bull Austral Math Soc, 1975, 12: 143~148
- 4 Smith J C. Proc Amer Math Soc, 1976, 57: 133~139
- 5 Boone J R. Pacific J Math, 1976, 82: 351~357
- 6 Van Douwen E, et al. Houston J Math, 1977, 3: 141~152
- 7 刘应明. 数学学报, 1977, 20: 212~214
- 8 Mashburn J D. Top. Proc, 1984, 9: 339~352
- 9 高国士. 数学进展, 1989, 18: 143~149
- 10 朱俊. 数学学报, 1991, 34: 309~315

(苏州大学高国士教授撰)

拓扑分子格理论 theory of topological molecular lattices 按 Bourbaki 学派的观点，数学中有三大母结构，即代数结构、拓扑结构和序结构。拓扑分子格理论是拓扑结构与序结构结合产生的一门新学科，它把近年来出现的 Fuzzy 拓扑学纳入拓扑格的理论框架之中，是点集拓扑学、Fuzzy 拓扑学及 L-fuzzy 拓扑学的共同推广。

1965 年，美国 L. A. Zadeh 提出 Fuzzy 集的概念。集 X 上一个 Fuzzy 子集 A ，实际上是从 X 到单位区间 $[0, 1]$ 的一个映射，这种映射的全体记作 $[0, 1]^X$ 。如果把 X 的通常子集 B 与其特征函数等同看待的话，那么 B 实际上是从 X 到 $\{0, 1\}$ 的一个映射，这种映射的全体是 $\{0, 1\}^X$ 。因为 $\{0, 1\} \subset [0, 1]$ ，所以 Fuzzy 子集的概念是通常子集概念的推广。1968 年 C. L. Chang 提出 Fuzzy 拓扑空间的概念，他称 $[0, 1]^X$ 的一个子族 δ 为 X 上的 Fuzzy 拓扑，如果 $0, 1 \in \delta$ 且 δ 对有限交与任意并运算封闭，这里 $0, 1$ 分别表示 X 上最小与最大的映射，而交与并分别指映射取下确界与上确界的运算，称序对 (X, δ) 为 Fuzzy 拓扑空间。有了这个 Fuzzy 拓扑 δ ，一系列的基本概念似乎就可仿效点集拓扑学中的相应概念而得出。如，称 δ 中的 Fuzzy 集为开集，称包含于 Fuzzy 集 A 中的最大 Fuzzy 开集为 A 的核，记作 A^0 ；若 $H' = 1 - H \in \delta$ ，则称 H 为闭集；称包含 A 的最小闭集为 A 的闭包，记作 A^- ；称 (X, δ) 为紧空间，若 X 的每个开覆盖 \mathcal{U} (即 $\mathcal{U} \subset \delta$ 且 $\sup \mathcal{U} = 1$) 都有有限子覆盖，等等。其实，由于 $\{0, 1\}^X$ 与 $[0, 1]^X$ 有许多相似之处 (如，De Morgan 对偶律都成立，联系两个空面的基本映射也有许多共同的性质等)，点集拓扑学中的那些立足于这些共同基础的命题自然也就在 Fuzzy 拓扑空间中成立而无需再进行任何证明。

正因如此，C. L. Chang 曾乐观地说：“一般拓扑学中的许多基本概念可以容易地推广到 Fuzzy 拓扑空间中去”。然而，人们很快就发现，由于比一般拓扑空间多了一个序结构，Fuzzy 拓扑学要比一般拓扑学远为复杂，比如上面提到的用有限覆盖的方法在 Fuzzy 拓扑空间中定义紧性很快就被发现是完全失败的。事实上， $[0, 1]^X$ 与 $\{0, 1\}^X$ 虽然有若干共同性质，但差别毕竟是巨大的。如，排中律不成立 (即， $A \wedge A' = 0$ 与 $A \vee A' = 1$ 不再成立)，排一原则不成立 (即，从 $x_i \in \bigvee A$ ，推不出存在 i_0 使 $x_i \in A_{i_0}$) 等。这些都是重大的原则性差异，以致使点集拓扑学中以点的邻域系为基本工具的传统方法在 Fuzzy 拓扑学无法适用。这一情况迫使国外的学者回避 Fuzzy 点的观点。1975 年，B. Hutton 首先引入了 Fuzzy 正规空间的概念，而涉及到 Fuzzy 点的正则空间等概念则是以后才引入的。先引入正规性的理由，用 Hutton 的话来说，是因为“正规性是可单纯由开集和闭集 (即，不涉及点) 的语言加以定义的。”如果说这种做法在一开始时还不很自觉的话，那么 M. A. Erceg 则在他的一篇文章中公开宣称：“在探讨 Fuzzy 集理论时，我们发现在普通集理论中的点并不是如所想像的那么重要了”。实际上，从 1975 年以来，无点派确实作了不少工作。如，Hutton 在极小族、Fuzzy 单位区间和 Fuzzy 一致结构等方面的

工作至今在 Fuzzy 拓扑学中仍占有重要地位,但无点派的兴起毕竟是由于有点化研究没有出路而带来的结果。在此情况下,蒲保明与刘应明打破传统的邻域方法,引入具有重要意义的“重域”的概念,为有点派的研究开辟了道路。

从格论的角度来看,无论是在 $L_1 = \{0,1\}^X$ 上展开的点集拓扑还是在 $L_2 = [0,1]^X$ 上展开的 Fuzzy 拓扑,都是某种格 L 上的拓扑,从而也都可以纳入拓扑格理论之中。G. Nöbeling 的书对此早有论述,只是其框架过于广泛以致于所得出的具体结论过于贫乏。特别是由于缺少点的概念及其相应的邻近结构理论,从而像仿紧性等这样重要的局部性质,像嵌入理论等这样基本的研究课题等都无法讨论。因此,我们自然想到去构造一种新的拓扑理论,使它一方面具有相当的广泛性,至少能把点集拓扑学与 Fuzzy 拓扑学二者都作为特殊情况而包含在内,同时又保留点集拓扑学的点式风格和丰茂的研究成果。正是基于这种考虑,王国俊于 1979 年提出《拓扑分子格(I)》的理论。这样一种格 L ,其中含有充分多的类似于点的元素,叫做分子,它是点集拓扑学中点的概念以及 Fuzzy 拓扑学中 Fuzzy 点的概念的抽象化。它一方面起着基本单位的作用,任何元素都可表示为分子之并,另一方面它又不是最小的和不可分的。这也正是我们称之为分子而不称其为原子的原因。对于分子,提出了它的远域系概念,这是对点集拓扑学中邻域概念以及 Fuzzy 拓扑学中重域概念进行变革与抽象,基于以排斥远来刻划近的思想所提出的概念。利用远域这一工具,成功地建立起了分子的 Moore-Smith 收敛理论。同时,在拓扑分子格范畴中还提出了一种新的态射—序同态,它是从通常映射与 Zadeh 型函数的众多性质中抓住其正向保并与逆向保对合这两条性质并加以抽象化而得出的。事实证明正是那两条性质起着关键作用,整个理论的展开也表明把序同态作为拓扑分子格范畴中的态射是恰当的。这样,分子、远域与序同态就成了拓扑分子格理论的 3 个支柱。

1983 年,王国俊又提出了《广义拓扑分子格》理论,对分子的概念作了大幅度的推广,而远域与序同态这两个概念则保持不变。不久就发现 Fuzzy 格 L 是满足这一广义理论的,从而该理论已经把 L -fuzzy 拓扑学作为特例而包含在内了。此后,又注意到逆序对合对应的存在对拓扑分子格理论的展开并不起什么重要作用,王国俊于 1985 年又提出了《完全分配格上的点式拓扑理论》,这里已不再要求格 L 上具有逆序对合对应存在, L 可以是不对称的。这时基于闭元概念的远域工具照样适用,但重域工具已无法应用。同时更清楚地看到,就邻近结构而言,远域结构具有最广泛的适用性。与此对应的一个事实是:闭的概念比开的概念更为重要。再者,由于一个分子的远域构成一个理想,因而在广泛的框架之下理想的收敛理论就要取代与邻域方法相配套的渗透的收敛理论,至于序同态,由于逆序对合对应已不复存在,把逆向保对合的要求改为逆向保并,就产生了广义序同态理论。至此,拓扑分子格理论已形成了初步完整的理论体系。点集拓扑学的一些著名的定理与理论,如, Kuratowski 14 集定理、杨忠道定理、樊畿定理和拟一致结构理论等也已成功地推广到了拓扑分子格理论之中。

拓扑分子格理论今后的研究热点是:(1)高次分离性的研究,包括正则、完全正则与正规分离性等。(2)与闭相对偶的开的概念的研究。(3)紧性与仿紧性理论的研究。(4)一致结构与度量化问题的研究。预计在以上各问题的研究中后两个问题将会于近年内取得进展。

参考文献

- 1 Nöbeling G. Grundlagen der analytischen topologie, Springer-Verlag, 1954
- 2 Zadeh L A. Information and Control, 1965, 8: 338~353
- 3 Chang C L. J Math Anal, Appl, 1968, 24: 191~201
- 4 王国俊. 科学通报, 1983, 28, 1089~1091
- 5 蒲保明, 刘应明, J Math Anal, Appl, 1980, 76: 571~599
- 6 王国俊. 中国科学(A 辑), 1983, 12: 1063~1072

- 7 王国俊. 陕西师大学报(自然科学版), 1985, 1~2
- 8 樊太和. 科学通报, 1986, 31: 244~249
- 9 刘应明. Fuzzy Sets and System, 1987, 21: 43~51

(陕西师范大学博士生导师王国俊撰)

谱几何的正问题反问题 spectral geometry, direct and inverse problems

设 (M, g) 是紧致的、连通的 n 维黎曼流形。 Δ 是作用在 $C^\infty(M)$ 上的 Laplace 算子, 则黎曼流形 (M, g) 的谱, 记作 $\text{Spec}(M, g)$ 定义为

$$\text{Spec}(M, g) = \{\lambda \in \mathbb{R} : \Delta f = \lambda f, \lambda \neq 0\}$$

称 f 是与 λ 相关的特征函数。其全体构成 $C^\infty(M)$ 的一个子空间 $P_\lambda(M, g)$ 。它是有限维的, 其维数 m_λ 是 λ 的重数。研究谱有关的几何学称为谱几何。若 (M, g) 的坐标图 (U, Φ) 的坐标为 $(x^1, \dots,$

$$x^n), \text{ 则 } \Delta \text{ 的局部表达式为 } \Delta = \frac{1}{\sqrt{|g|}} \sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\sqrt{|g|} g^{ij} \frac{\partial}{\partial x^j} \right), \text{ 这$$

$$\text{里 } (g_{ij}) = (g_{ij})^{-1}, g = \det(g_{ij})$$

从 20 世纪 40 年代开始, A. Pleijel 等人对 $\text{Spec}(M, g)$ 作了研究, 60 年代 S. Agmon 等人逐渐发展了谱理论, M. Berger 在 1971 年出版的专著《Le spectre d'une variété riemannienne》中系统地论述了谱几何, 同时指出谱几何与近世代数、拓扑、现代分析、偏微分方程和物理等各个分支之间的联系。从 70 年代开始, 法国 Arthur L. Besse 几何学派的 M. Berger, P. Bérard, S. Gallot, D. Meyer, M. Gromov, H. Urakawa, S. S Chern 和 S. T. Yau 等相继获得了谱几何的成果。M. Berger 和 P. Bérard 于 1983 年出版了《Le spectre d'une variété riemannienne en 1982》, 把谱几何的发展汇编成文献资料, 为进一步开展谱几何的研究创造了极好的条件。尤其是 P. Bérard 于 1986 年出版了名著《Spectral geometry, direct and inverse problems》, 将谱几何的研究归纳成正问题和反问题两大类。

谱几何的理论同 Hilbert 空间的谱算子理论密切相关, 为此, 谱几何的正问题指的是: 由黎曼几何的性质导出 Hilbert 空间算子理论的谱的特性。谱几何的反问题指的是: 由谱几何的信息导出黎曼流形的几何性质。具体地说, 谱几何的正问题由 3 部分内容所组成: (1) 一些流形谱的计算; (2) 关于特征值的信息; (3) 谱的简单应用。谱几何的反问题系指由谱值确定流形的几何性质。

对于无边界的黎曼流形: 球面 (S^n, g_0) , 平坦环面 $(R^n/T^n, g)$, 平坦 Klein 瓶, 实射影空间 $(P^n(R), g)$, 复射影空间 $P^n(C)$, 四元数射影空间 P_2 和 Cayley 八元数构造的射影平面 P_8^2 , 它们的谱已经知道。带有边界的 R^n 中的圆盘, 矩形块, 直角三角形, 扇形块; R^n 中的立方体, 正四面体等等流形的谱的计算亦已解决。然而, R^2 中任意三角形内部区域, 椭圆内部区域, S^n 中 $1/8$ 的球面以及 S^n 上任一球面三角形所围成区域的谱的计算至今尚未解决。当然, 对于一些其他的流形的谱的计算将成为 1 个较复杂的问题。

特征值的估计是一个重要的研究课题。利用一些等周不等式找出第一个非零特征值的下控与上限是一个研究热点。进一步结合黎曼不变量, 利用割迹、闭测地线的性质, 讨论 Pinching 等问题是共同感兴趣的课题。

谱几何反问题的探讨是当今十分活跃的一个研究课题。若 $\text{Spec}(M, g) = \text{Spec}(N, h)$, 则称两个黎曼流形 (M, g) 和 (N, h) 是等谱的。十分自然地问题: 当 $\text{Spec}(M, g) = \text{Spec}(N, h)$ 时, (M, g) 与 (N, h) 是否等距, 或者是否微分同胚, 或者是否同胚, 这是值得研究的问题。本问题具有正面的肯定。因为当 $\text{Spec}(M, g) = \text{Spec}(N, h)$ 时, $\dim M = \dim N$ 。此表明由谱可决定一个拓扑不变量, 即流形的维数。此外, 尚有 $\text{vol}(M, g) = \text{vol}(N, h)$, 故当 $\dim M = 2$ 时, 由 Gauss-Bonnet 公式, 谱可决定另一个拓扑不变量, 即 Euler-Poincaré 示性数。下面给出一系列肯定的回答。

若 $\dim M = \dim N = 1$, 且 $\text{spec}(M, g) = \text{Spec}(N, h)$, 则 $(M,$

$g) = (N, h)$, 意即两个黎曼流形 (M, g) 与 (N, h) 等距。

若 (M, g) 是球面 (S^2, g_0) , 实射影平面 $(P^2(R), g_0)$, 平坦环面 (T^2, g_0) 和平坦 Klein 瓶 $K(a, b)$ 这 4 种流形之一, 则 (M, g) 可用谱加以确定。

若 (M, g) 是数量曲率为常数的曲面, 且 $\text{spec}(M, g) = \text{spec}(N, h)$, 则 (N, h) 也是数量曲率为常数的曲面。

若 (M, g) 是截面曲率 σ 为常数的三维流形, 且 $\text{spec}(M, g) = \text{spec}(N, h)$, 则 (N, h) 也是截面曲率为 σ 的三维流形。

若 (M, g) 是截面曲率为常数 σ 的四维流形, 且 $\text{spec}(M, g) = \text{spec}(N, h)$, $\chi(M) = \chi(N)$, 则 (N, h) 也是截面曲率为 σ 的四维流形。

(S^n, g_0) 和 $(P^n(R), g_0)$ 当 $n \leq 4$ 时, 典型结构可用它们的谱予以鉴定。然而, 当 $n \geq 5$ 时, (S^n, g_0) 和 $(P^n(R), g_0)$ 是否可用它们的谱来完全决定呢? 退一步说在 S^n 和 $P^n(R)$ 上的典型结构能否用它们的谱来决定, 至今尚未解决。

本问题具有反面的否定。M. Kneser 于 1967 年构造两个 12 维环面, 它们等谱但不等距, J. Milnor 于 1968 年构造两个 16 维平坦环面, 它们等谱但不等距, 然而它们是同胚的。J. Ikeda 于 1980 年证明存在等谱的曲率为 +1 的 5 维透镜空间, 它们既不等距也不同胚。M. F. Vigneras 于 1980 年证明存在等谱的曲率为 -1 的三维流形, 它们既不等距也不同胚。C. Gordon 和 E. Wilson 分别于 1983 年和 1984 年给出例子, 存在单参数族 5 维黎曼流形, 使族中任意两个元素是等谱的, 但不等距。

P. Berard 在 N. Bourbaki 1988~1989 年 n°705 上, 结合近世代数, 现代分析, 偏微分方程等理论, 论述了等谱与不等距的最新成果, 把谱几何的研究推向了高潮。

参考文献

- 1 WARNER F. Foundations of differential manifolds and Lie groups, Scott, Foresman and Co, 1971
- 2 Cheeger J. - EBIN, D. Comparison theorem in Riemannian geometry, North-Holland 1975
- 3 Berger M, Gauduchon P, Mazet E. Le spectre d'une variété riemannienne, NO 194 Springer 1971
- 4 Meyer D. Inegalites isoperimetriques et des applications, II, (ces actes)
- 5 Gromov M. Paul Levy's isoperimetric inequality, I H E S, 1980
- 6 Chen S S. Spectra of discrete uniform subgroups of semisimple Lie groups, Pacific J. Math. 1982, 99
- 7 Berard P, Berger M. Le spectre d'une variété riemannienne, en 1982, Kagei Publication 1983
- 8 Berard, P spectral geometry : direct and inverse problems, IMPA, 1986
- 9 Gallot S. Sobolev inegalit and some geometric application, (ces actes)
- 10 Yau S T. Isoperimetric constants and the first eigenvalue of a compact Riemannian manifold, Ann Scien Ecole Norm Sup, 1975, 8

(南京大学马传渔教授撰, 莫绍揆审)

黎曼流形的谱 spectrum of Riemannian manifold 又称谱几何, 是大范围分析领域中整体微分几何的一个重要分支。集泛函、拓扑、复变、偏微分方程、代数等内容于一体, 从而有力地推动了几何学科的发展。谱几何中所采用的几何方法广泛地应用在其他数学与物理学科之中, 已成为现代基础数学理论研究的一个热点。

设 q 是 $[a, b]$ 上连续函数, 则 $[a, b]$ 上一维的具有 Dirichlet 边界的 Schrödinger 方程

$$\begin{cases} y''(t) - q(t)y(t) + \lambda y(t) = 0 \\ y(a) = y(b) = 0 \end{cases}$$

的 Sturm-Liouville 特征值问题, 是指找的那些 λ 值称为特征值, 使得 Schrödinger 方程具有非零的 C^2 类函数 y 的解。

R. Courant 于 1953 年引进的 Cauchy 问题:

$$\begin{cases} y''(t) - q(t)y(t) + \lambda y(t) = 0 \\ y'(a) = 0, y'(b) = 1 \end{cases}$$

的解 u_λ 。设 $[a, b]$ 上函数 $u_\lambda(x)$ 零点的个数记作 $N(\lambda)$, 即 $N(\lambda) = \#\{u_\lambda(x) \text{ 在 } [a, b] \text{ 中 } x \text{ 的零点}\}$, 利用 Sturm 比较定理, 可以证明 $N(\lambda)$ 是一个递增的、右连续函数, 当 $\lambda \rightarrow \infty$ 时, $N(\lambda) \rightarrow +\infty$, 并且那些不连续点正好是 Schrödinger 方程的解。

J. Dneudonné 于 1975 年将 Schrödinger 方程化为积分方程, 利用紧致算子谱理论证明存在特征值的无穷序列 $0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots \rightarrow +\infty$ 。

如果 D 是 R^n 中具有逐段光滑边界 B 的有界区域, 考虑特征值问题:

$$\begin{cases} \Delta f(x) = r f(x), & x \in D, \\ f = 0, & x \in B. \end{cases}$$

这里 $f \in C^2(D) \cap C^1(\bar{D})$, $\Delta = -\sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$ 。

H. Weyl 于 1946 年和 M. Kac 于 1966 年, 把 D 想像作鼓面, 把特征值 $0 < r_1 < r_2 < r_3 < \dots$ 取作基调, 倾听鼓声, 以得到鼓面的形状, 由 $\sum_{k \geq 1} \exp(-r_k t) = \frac{\text{area } D}{4\pi t} - \frac{\text{leng } B/4}{\sqrt{4\pi t}} + \dots$ 可判定

鼓的面积和周长等等, 根据这些物理背景和几何模型引入 4 种类型黎曼流形谱的概念。

(1) 闭的谱问题。设 M 是紧致的、连通的黎曼流形, Δ 是 M 上 C^2 或 C^∞ 函数的 Laplace 算子, 则黎曼流形 (M, g) 的谱是 λ 的全体: $\lambda \in R$, 使得 $\Delta f = \lambda f$ 存在非平凡解 $f \in C^\infty(M)$ (或 $f \in C^2(M)$), 黎曼流形 (M, g) 的谱记作 $\text{Spec}(M, g)$, 称 λ 为特征值 (或谱值)。

(2) Neumann 谱问题。设黎曼流形 (M, g) 的 $\partial M \neq \emptyset$, M 紧致且连通, $\text{Spec}(M, g)$ 是 λ 的全体: $\lambda \in R$, 使得 $\Delta f = \lambda f$ 存在非平凡解 $f \in C^2(M) \cap C^0(\bar{M})$ 。并满足边界条件 $\nu f|_{\partial M} = 0$, 其中 ν 是 ∂M 上向外的单位法向量场。

(3) Dirichlet 谱问题。设黎曼流形 (M, g) 的 $\partial M \neq \emptyset$, M 紧致且连通, $\text{Spec}(M, g)$ 是 λ 的全体: $\lambda \in R$, 使得存在 $\Delta f = \lambda f$ 的非平凡解 $f \in C^2(M) \cap C^0(\bar{M})$ 。并满足边界条件 $f|_{\partial M} = 0$ 。

(4) 混合型谱问题。设黎曼流形 (M, g) 的 $\partial M \neq \emptyset$, M 紧致且连通, N 是 ∂M 的开子流形, $\text{Spec}(M, g)$ 是 λ 的全体: $\lambda \in R$, 使得 $\Delta f = \lambda f$ 存在非平凡解 $f \in C^2(M) \cap C^1(M \cup N) \cap C^0(\bar{M})$, 并满足边界条件: 在 $\partial M - N$ 上, $f = 0$; 在 N 上, $\nu f = 0$ 。

对于上述四类谱问题, $\text{Spec}(M, g)$ 构成一个序列 $\{0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots \rightarrow +\infty\}$, 是离散的, 且趋向于 $+\infty$ 。对于每一个特征值 λ , $\Delta f = \lambda f$ 的解空间记作 $P_\lambda(M, g)$, 称为与 λ 相关的特征子空间, $P_\lambda(M, g)$ 的元素称为特征函数, 每一个 $P_\lambda(M, g)$ 是有限维的, 其维数称为特征值的重数。

M. Berger 1971 年出版专著《Le Spectre d'une variété Riemannienne》——黎曼流形的谱, 把谱的研究推向纵深发展。M. Berger 和 P. Berard 于 1982 年列出谱几何研究的详细文献资料, 既总结了前阶段这一领域的科研成果, 又指明了今后的研究课题。S. Gallot, 于 1986 年在法国数学学会杂志《Astérisque》上, 系统地总结了谱几何的研究成果。特别是 P. Berard 于 1986 年由 Springer LN1207 出版《Spectral Geometry, Direct and Inverse Problems》——谱几何的正问题和反问题, 将谱几何的研究推向高潮。

目前, 谱几何的研究热点是:

(1) 谱几何的正问题。计算流形的谱, 例如球面、实射影空间、复射影空间、平坦环面等流形谱的计算早已解决, 但至今尚有许多流形谱的计算却十分困难, 例如, 球面三角形区域等等。

(2) 特征值的估计。在许多著作与文献中, 都对第一个非零特征值 λ_1 进行估算, 确定其上界与下控。结合黎曼流形的几何特

征,进一步估计 λ_1 或 λ_2 , 并研究 Pinching 问题。

(3) 利用谱的结果, 得到流形的一些几何性质。若 $\text{Spec}(M, g) = \text{Spec}(N, h)$, 能否断定 (M, g) 或 (N, h) 是等距的、同胚的或者微分同胚的, 这是一个十分有趣的研究课题。

(4) 因为作用在 $f \in C^\infty(M)$ 上的 Laplace 算子是一个实的、正定的、自伴随的、二阶椭圆型微分算子, 它与偏微分方程学科的研究密切相关。为此, 可以研究一类更为广泛的二阶线性椭圆型方程: $\Delta U - vU = \lambda U$, 式中 Δ 表示流形 M 的 Laplace 算子, $v \in C^\infty(M)$, 称为位势, 称常数 λ 为 Schrödinger 算子 $\Delta - v$ 的特征值, 对应的解称为特征函数。关于 $\Delta - v$ 的特征值的讨论已引起大家的关注。

(5) 设 (M, g) 是闭的黎曼流形, $A^p(M)$ 表示 M 上 p 次外微分形式 ($p \leq \dim M$) 所生成的空间, 作用在 A^p 上的微分算子 $\Delta = \delta d + d\delta$, 式中 d 是外微分算子, $d: A^{p-1} \rightarrow A^p$; δ 是余微分算子, $\delta: A^p \rightarrow A^{p-1}$ 。当 $f \in A^0(M)$, $\delta f = 0$ 。当 $\alpha \in A^p(M)$, $1 \leq p \leq n$, $\delta\alpha = (-1)^{n(p+1)} * d * \alpha$, 这里 $*$ 是 Hodge 星算子, 即若 $\alpha \in A^p(M)$, 则 $*\alpha \in A^{n-p}(M)$ 。由此可见, $\Delta = d\delta + \delta d$ 是 $A^p(M) \rightarrow A^p(M)$ 的线性映射, 称为黎曼流形 (M, g) 上的 Laplace-Beltrami 算子, 或简称 Laplace 算子。满足 $\Delta\alpha = 0$ 的微分形式 α 称为调和形式。特别地, 满足 $\Delta f = 0$ 的函数 $f \in A^0(M)$ 称为调和函数。调和形式的应用以及满足 $\Delta\alpha = \gamma\alpha$, $\alpha \in A^p(M)$ 的 p 次微分形式谱 $\text{Spec}(M, g)$, (当 $p=0$ 时, $\text{Spec}(M, g)$ 即为 $\text{Spec}(M, g)$), 它的研究尚待进一步深入。

(6) 谱几何主要用于讨论热方程和波动方程基本解(简写作 SFEC), 所谓基本解是指 $M \times M \times \mathbb{R}_+$ 上的一个函数 E , 它满足下述 3 条公理:

SFEC1 E 在 $M \times M \times \mathbb{R}_+$ 上是连续函数, 对第 2 个变量是 C^2 的, 对第 3 个变量是 C^1 的。

SFEC2 $L_2 E = 0$ 。此处 $L_2 = \Delta + \frac{\partial}{\partial t}$, 而 Δ_2 是指对第 2 个变量的拉普拉斯算子。

SFEC3 对任何 $m \in M$, 有

$$\lim_{t \rightarrow 0_+} E(m, \cdot, t) = \delta_m.$$

这里的 δ_m 是在 m 点的 Dirac 测度。

于是, 当 $t \rightarrow 0_+$ 时, SFEC 的渐近展式为

$$E \sim \sum_{i=0}^{\infty} (4\pi t)^{-\frac{n}{2}} e^{-\frac{d^2}{4t}} (u_0 + u_1 t + \dots + u_i t^i + \dots)$$

其中 $u_i \in C^\infty(M \times M)$ 的一个法正交基, 则

$$E(m, m', t) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{-\lambda_i t} \Phi_i(m) \Phi_i(m').$$

黎曼流形 (M, g) 上波动方程的基本解(或波动核)是函数 $E(t, x, y)$, 其中 $(t, x, y) \in \mathbb{R} \times M \times M$, 它满足

$$\begin{cases} (\frac{\partial}{\partial t} + \Delta_y) E(t, x, y) = 0 \\ E(0, x, y) = \delta_{xy} \\ \frac{\partial E}{\partial t}(0, x, y) = 0 \end{cases}$$

在谱几何意义下, 它是算子 $\cos(t \sqrt{\Delta})$ 的核。

例如, (S^2, g_0) 的波动核是

$$E(t, x, y) = C_2 |t| (|x-y|^2 - t^2)^{-3/2}$$

其中 C_2 为某一常数, 而函数

$$x^2 = \begin{cases} 0, & \text{当 } x \geq 0, \\ |x|^2, & \text{当 } x < 0. \end{cases}$$

波动方程的方法是由 L. Hormander 于 1960 年以后研究函数 $N(\lambda)$ 而引入的, 它可用黎曼流形的谱和流形上闭测地线长度之间的一些关系式而加以说明, 1973 年 Y. Colin DE Verdiere 以及 1975 年 J. J. Duistermaat 解决了这个问题。

这类偏微分方程的研究同物理上和朔运动与概率论的研究有联系, 通过参考文献 2 可以进一步予以探讨。

参考文献

- 1 Minakshisundaram S, Pleijel A. some properties of the Laplace operator on Riemannian manifolds, *Canad. J Math*, 1949
- 2 Lichnerowicz A. géométrie des groupes de transformation, Dunnod, Paris, 1958
- 3 Kac M. Can one hear the shape of a drum. *Amer. Math. Monthly*, 1966, 73
- 4 McKean H P, Singer I M. Curvature and the eigenvalues of the Laplacian, *J Diff Geom*, 1967, 1
- 5 Cheeger J. The relation between the Laplacian and the Diameter, *Archiv Der Math*, 1968, 19
- 6 Saki T. on Riemannian manifolds, *Canad J, Matn*, 1949, 1
- 7 Berger M, Gauduchon P, Mazet E. Le spectre d'une variété riemannienne, *Lecture Notes in Math*, n° 194, Springer 1971
- 8 Berard P, Berger M. Le spectre d'une variété riemannienne en 1982, *Kaigei Publications*, 1983
- 9 Berard P. Spectral geometry: direct and inverse problems, *IMPA*, 1986
- 10 马传渔. 黎曼流形的谱. 南京: 南京大学出版社, 1993
(南京大学马传渔教授撰; 莫绍揆审)

黎曼流形特征值的估计 estimation of the eigenvalue of a manifold Riemannienne

谱几何正问题的一个重要研究课题是计算流形的谱。通常直接算出流形的谱是十分困难的, 为此要对特征值(即谱值)进行估计, 找出其下控与上界。此问题引伸到等周不等式的探讨, 以及 Pinching 问题的研究, 此外, 在物理学中, 确定鼓膜的形状也需用特征值的计算。

设 (M, g) 是紧致、连通的黎曼流形, 则黎曼流形 (M, g) 的谱:

$$\text{Spec}(M, g) = \{\lambda \in \mathbb{R} \mid \Delta f = \lambda f, \lambda \neq 0, f \in C^\infty(M)\},$$

这里 Δ 是作用在 $C^\infty(M)$ 上的 Laplace 算子。

$$\text{Spec}(M, g) = \{0 = \lambda_0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \dots \uparrow +\infty\}$$

黎曼流形 (M, g) 的剖分函数 $Z(t)$ 定义为 $Z(t) = \sum m_i e^{-\lambda_i t}$, 这里 m_i 为特征值的 λ_i 的重数, 由 $Z(t)$ 可决定 (M, g) 的谱值及其重数。Minakshisundaram-Pleijel 于 1949 年得到剖分函数的渐近展开式, $\sum m_i e^{-\lambda_i t} (4\pi t)^{-n/2} (a_0 + a_1 t + \dots + a_k t^k + \dots)$, 这里 a_k 是黎曼不变量。实际上是流形 M 的曲率张量与其各阶共变导数的函数。根据 McKean-Singer 引入的正交不变量方法, 可得到

$a_0 = \text{vol}(M, g)$, $a_1 = \frac{1}{6} \int_M \text{tr} \cdot Vg$, $a_2 = \frac{1}{360} \int_M (2|R|^2 - 2|\rho|^2 + 5r^2) Vg$, 这里 r 是数量曲率, ρ 是 Ricci 曲率, R 是黎曼曲率, a_3 已由 T. Sakai 于 1971 年算出, 而当 $k \geq 4$ 时, a_k 几何意义至今尚不知。

第 1 个非零特征值 λ_1 的计算, 不仅在谱几何研究中具有一定的理论价值, 而且在鼓膜振动和波方程中也具有应用价值, A. Lichnerowicz 于 1958 年指出: 设 (M, g) , 是一个 n 维紧致的黎曼流形, 若存在正数 $k > 0$, 使得 $\rho \geq kg$, 其中 ρ 为 Ricci 张量, 则 Δ 的第 1 个非零特征值 λ_1 , 满足 $\lambda_1 \geq \frac{n}{n-1} k$ 。它的逆定理就是 M. Obata 于 1962 年建立的 Obata 定理: 设 (M, g) 是一个 n 维紧致的黎曼流形, 若存在正数 $k > 0$, 使得 $\rho \geq kg$, 并且 $\lambda = \frac{n}{n-1} k$, 则 (M, g) 与 (S^n, g_0) 等距。J. Cheeger 于 1970 年得到 λ_1 的极小值原理:

$$\lambda_1 = \inf_{f \in H_1} \frac{\|df\|^2}{\|f\|^2}$$

这里 $H_1(M)$ 是与 1 正交的一切 C^1 函数所构成的空间。如果采用范数 $\|f\|_1^2 = \|f\|^2 + \|df\|^2$, 则 $H_1(M)$ 关于范数 $\|f\|_1$ 是完全的。J. Cheeger 于 1968 年得到 λ_1 的上界: 如果对于任一自然数 n , 存在一数 $h(n) \geq 0$, 使得 n 维紧致黎曼流形 (M, g) 的截面

曲率大于或等于 0, 则 $\lambda_1 \leq h(n) \times [\text{diam}(M, g)]^2$. 在此, 依赖于 n 的 $h(n)$ 如何选择为最佳? 曲率非负的条件能否去掉, 这一切有待于进一步改正. Cheeger 定理的证明与流形 (M, g) 上一点 m 的割迹 $C(m)$ 密切相关, 而割迹的研究又同闭测地线的性质相联系, 为此, 闭测地线理论与割迹性质的研究推动了谱几何学科向纵深发展.

假设流形 (M, g) 可分为两个开子流形 M_1 和 M_2 , 并以闭子流形 S 为其共同边界, 记

$$h = \frac{\text{vol}(S)}{\inf\{\text{vol}(M_1), \text{vol}(M_2)\}} \quad \text{则 } \lambda \geq \frac{h^2}{4}$$

这是 M. Berger 于 1970 年建立的, 本结果的证明需用 Morse 临界点理论. 至于 $\frac{h^2}{4}$ 是否为 λ_1 的最好下界? 这个问题至今尚未解决. 此外, 对第 2 个非零特征值 λ_2 是否有估算的必要? 如果要进行计算, 其下控与上界又是如何? 这一切问题既难面有趣.

设 D 是 (R^n, g_0) 中光滑的有界区域, 区域 D 中 Dirichlet 特征值为 $\{\lambda_k\}$. 置 $N(\lambda) = \text{Card}\{j | \lambda_j \leq \lambda\}$, 则当 $\lambda \rightarrow +\infty$ 时, $N(\lambda) \sim C(n) \text{vol}(D) \lambda^{n/2}$, 这里 $C(n) = (2\pi)^{-n} \text{vol } B^n$, B^n 是 R^n 中的单位球, 这就是 H. Weyl 于 1911 年建立的渐近公式, 换一种写法为 $N(\lambda) = \text{Card}\{j | \lambda_j \leq \lambda\} = C(n) \text{vol}(M, g) \lambda^{n/2} + o(\lambda^{n/2})$. 假设 (M, g) 是无边界, 连通的黎曼流形, 1956 年 Avakumovic 和 1968 年 L. Hormander 指出 $N(\lambda) = C(n) \text{vol}(M, g) \lambda^{n/2} + o(\lambda^{\frac{n-1}{2}})$, 认为这个估计是最佳的. 1975 年 J. Duistermat 和 V. Guillemin 认为 $R(\lambda) = N(\lambda) - C(n) \text{vol}(M, g) \lambda^{n/2}$ 与 (M, g) 测地线流关系密切. 粗略地说, $R(\lambda)$ 为 $\lambda^{\frac{n-1}{2}}$ 阶当且仅当 (M, g) 的测地线流是周期的, 即所有测地线是具有相同周期的闭测地线. 例如, 球面 S^n 上所有测地线是以 2π 为周期的周期测地线. 同样可粗略地说: 如果测地线流不是周期的, 则 $R(\lambda) = o(\lambda^{\frac{n-1}{2}})$. 1976 年 P. Berard 和 B. Randol, 对于负曲率流形证明 $R(\lambda) = o(\lambda^{\frac{n-1}{2}} / \log \lambda)$. 一般对 $R(\lambda)$ 的研究是较为困难的, 它要用数论知识. 对带有边界的流形, 困难就更大了. 然而为了计算, 估计流形的谱, 这一领域的工作仍是一个研究热点.

参考文献

- 1 Obata M. J Math Soc Japan, 1962, 14
- 2 Cheeger J. Archiv Der Math, 1968, 19
- 3 Urakawa H. Proc Japan Acad, 1977, 53
- 4 Li P, Zhong J Q. Invent Math, 1981, 65
- 5 Berard P. IMPA

(南京大学马传渔教授撰; 莫绍揆审)

黎曼流形与洛伦兹流形中的常平均曲率子流形

研究具有常平均曲率的完备黎曼流形到空间形式中的等距浸入涉及到流形上的分析, 主要研究方法是利用 E. Cartan 引进的活动标架法.

对极小曲面, 1915 年 Bernstein 证明了:

定理 1 三维欧氏空间中定义在全平面上的完备极小曲面是平面.

由此产生了 Bernstein 问题. 在 $n-1$ 维欧氏空间 R^{n-1} 全体上定义的 n 维欧氏空间 R^n 中的完备极小超曲面是超平面吗? 针对这一问题, E. de Giorgi (1965), F. J. Almgren (1966) 和 J. Simons (1968) 分别对 $n=4, 5$ 和 $n \leq 8$ 肯定地解决了 Bernstein 问题. 对于 $n \geq 9$, E. Bombieri, E. de Giorgi 和 E. Giusti 于 1969 年给出了 Bernstein 问题的否定回答. 对 Bernstein 问题的球面解释, 1936 年为 Myers 证明.

定理 2 如果一个 n 维闭黎曼流形被极小地浸入在单位球面 $S^{n+1}(1)$ 中的闭半球面中, 则 M 是超球面 $S^n(1)$.

Myers 定理现已被成庆明推广到完备的黎曼流形. Myers 定理的证明方法是证明从 M 上的任意点到闭半球面的边界距离函数是上调和函数, 再由 Hopf 的极大值原理得知这个距离函

数恒等于零. 因此 M 是全测地的, 即为超球面 $S^n(1)$. 1968 年 Simons 利用此思想方法研究球面中的极小子流形, 为极小子流形的研究做出了重要贡献. 他获得了由第 2 基本形式模长的平方满足的一个二阶线性椭圆型偏微分方程, 并利用它证明下述定理.

定理 3 设 M 是单位球面 $S^{n+p}(1)$ 中的 n 维闭极小子流形, 则

$$\int_M \dots [2-1/p] S - n] S \, dv \geq 0, \text{ 其中 } S \text{ 为 } M \text{ 的第 2 基本形式模长的平方.}$$

Simons 的文章问世之后, 引起了几何学家的广泛兴趣, 先后发表百篇研究空间形式中极小子流形的文章. 根据 Simons 定理我们知道, 如果 $S \leq n/(2-1/p)$, 则 $S=0$ (这时 M 是全测地的) 或者 $S=n/(2-1/p)$. Lawson (对 $p=1$), Chern (陈省身) do Carmo 和 Kobayashi (对任意的 p) 分别独立地确定了 $S=n/(2-1/p)$ 的闭极小流形. 他们获得:

定理 4 $S^4(1)$ 中的 Veronese 曲面和 $S^{n+1}(1)$ 中的 Clifford torus 是 $S^{n+p}(1)$ 中唯一满足 $S=n/(2-1/p)$ 的闭极小超曲面.

上述结果也已经被推广到完备的情形. 1974~1975 年邱成桐连续发表了两篇关于常平均曲率子流形的文章. 他从几个不同的角度研究了这类子流形, 并提出了一些很有意义的问题. 对应于 Simons 的结果 Yau 证明了利用截面曲率的限制代替对 S 的限制.

定理 5 设 M 是单位球面 $S^{n+p}(1)$ 中的闭极小子流形. 如果 M 的截面曲率大于等于 $(p-1)/(2p-1)$, 则 M 是全测地的, 或 $S^4(1)$ 中的 Veronese 曲面或 $S^{n+1}(1)$ 中的 Clifford torus.

现在利用截面曲率研究极小子流形的更进一步的结果也已经被做出. 综合从 1979 年至今关于利用 Ricci 曲率 Pinching 条件所得结果, 我们有

定理 6 设 M 是 $S^{n+p}(1)$ 中的闭极小子流形如果其 Ricci 曲率满足

$$\text{Ric}(M) \geq \begin{cases} n-2 & n \geq 4 \\ 1/2 & n=3 \end{cases}$$

则 M 是全测地的, 或 $n=2k$ 且 $M=S^k(2) \times S^k(2)$ 或 $n=4$ 而且 $M=P^2(4/3)$. 其中 $P^2(4/3)$ 是二维复射影空间.

关于具有常数量曲率的闭极小超曲面, Chern 有如下的猜想: 对于单位球面 $S^{n+1}(1)$ 中具有常数量曲率的闭极小超曲面, S 的值是离散的.

Simons 证明 S 的第 1, 2 个值分别是 0 和 n , 并且 Chern 等给出了 $S=n$ 时 M 是 Clifford torus. 关于 Chern 的猜想, 彭家贵, 滕楚莲, 杨洪苍和成庆明从 1982 年至今证明了如下结论.

定理 7 设 M 是 $S^4(1)$ 中的 3 维完备极小超曲面. 如果 $S \leq 6$ 且为常数, 则 $S=0, 3$ 或 6. 特别当 M 是闭极小超曲面时, M 是等参的.

定理 8 设 M 是 $S^{n+1}(1)$ 中 n 维闭极小超曲面. 如果 $S \leq 5n/4$ 且为常数, 则 $S=0$ 或 n .

根据已知的闭极小超曲面的例子和定理 8, 我们可以推测 S 的第 3 个值可能是 $2n$. 这也是我们今后要研究的问题之一.

另一方面. 在 Simons 定理的启发下, 1971 年 Nomizu 和 Smyth 研究了黎曼空间形式中的常平均曲率的完备超曲面, 他们获得:

定理 9 设 M 是黎曼空间形式 $M^{n+1}(c)$ ($c \geq 0$) 中的常平均曲率完备超曲面. 如果 M 的截面曲率非负且数量曲率为常数, 则 M 是全脐的或者 M 是两个非负常曲率流形的黎曼积.

1974 年 Yano 和 Ishihara 在法曲率平坦的条件下把 Nomizu 和 Smyth 的结果推广到任意余维数的情形. 对于常平均曲率子流形类似于 Simons 的 Pinching 条件, 从 1974 年至今在不断发展和改进的情况下, 可归结为如下定理.

定理 10 设 M 是单位球面 $S^{n+p}(1)$ 中的 n 维具有平行平均曲率向量的紧致子流形, 如果 $S \leq C(n, p, H)$, 则 M 是全脐的, 或 M 为 $S^{n+p}(1)$ 中 $n+1$ 维球面 $S^{n+1}(1) / \sqrt{1+H^2}$ 中的 Clif-

ford torus 或为 $S^1(1/\sqrt{1+H^2})$ 中的 Veronese 曲面, 其中 H 为平均曲率。

当 M 是完备的情形, 部分结果也成立。特别对于 $n=3$ 的情形我们有

定理 11 黎曼空间形式 $M^4(c)(c \geq 0)$ 中具有非负常数量曲率的非零常平均曲率完备超曲面仅有 $S^3(c_1)(c_1 > c), R^4 \times S^{3-4}(c_1)(k=1, 2), S^3(c_1) \times S^2(c_2)$ 和 Veronese 曲面的管子 (tube)。

常平均曲率子流形的研究要比极小子流形的研究困难的多。但人们自然会问对极小子流形成立的结果, 常平均曲率子流形是否成立? 因此今后一段时间内, 人们会对黎曼空间形式中的常平均曲率完备子流形做更进一步深入的研究。对于非空间形式中的完备子流形的研究也可能是今后发展方向之一。

作为 Bernstein 型问题的洛仑兹解释, Calabi (对 $n \leq 4$)、S. Y. Cheng (郑绍远) 和 Yau (对任意的 n) 已经证明

定理 12 Minkowski 空间 R^{1+n} 中的完备极大类空超曲面是全测地的。

正象 Marden 和 Tipler 指出的那样, 对任意时空中常平均曲率完备类空超曲面在相对论中都有意义。因此完备类空超曲面的研究近年来迅速发展起来。从 1987 年~1991 年 Akutagawa、成庆明、Ramanathan 的结果可归结为:

定理 13 设 M 是 de Sitter 空间 $S_1^{n+1}(c)$ 中的 n 维具有平行平均曲率向量的完备类空子流形。如果 $n^2 H^2 \leq 4c(n=2)$ 或 $n^2 H^2 < 4(n-1)c(n \geq 3)$, 则 M 是全脐的。

另外应该注意的一个问题是洛仑兹空间形式的完备类空子流形和黎曼空间形式中的常平均曲率的完备子流形有个本质的区别, 即黎曼空间形式中的第 2 基本形式中的模长平方可能是无界的, 但洛仑兹空间形式的常平均曲率的完备类空子流形的第 2 基本形式的模长平方一定是有界的。这已经被成庆明和 Nakagawa 证明。并且这类超曲面的一些特征也已经被给出。类空子流形的研究主要是 80 年代开始, 今后将会有更大的发展。

参考文献

- 1 Simons J. Ann of Math, 1968, 88, 62~105
- 2 Bombieri E. et al. Invent Math, 1969, 7, 243~268
- 3 Chern S S, et al. Functional analysis and related fields. Berlin-New York, Springer, 1970, 59~75
- 4 Yau S T. Amer. J Math. 1974, 96, 346~366, 1975, 97, 76~100
- 5 Cheng S Y, et al. Ann of Math, 1976, 104, 407~419
- 6 Peng C K, et al. Seminar on minimal submanifolds, Princeton Univ. Princeton, 1983, 177~198
- 7 杨洪苍, 等. 科学通报, 1990, 34, 167~171
- 8 Cheng Q M. Math Z, 1991, 206, 333~339

(东北大学成庆明撰)

概率论 数理统计

量子随机分析 quantum stochastic calculus 自从 1900 年普朗克(Planck)提出能量的量子概念以来, 量子力学的发展愈来愈显示了它的随机本质; 玻尔(Bohr)的原子模型(1913)、德布洛意(de Broglie)的波粒二象性原理(1925)、薛定谔(Schrödinger)方程(1926)和海森堡(Heisenberg)的测不准原理(1927), 使物理学家们意识到: 量子力学本质上是一种随机的力学。于是, 在 20 世纪 20 年代末至 30 年代初, 几乎和柯尔莫戈罗夫(Kolmogorov)奠定古典概率论基础的同时, 波恩(Born)、狄拉克(Dirac)和冯·诺意曼(von Neumann)提出了量子概率论。至此, 概率论才进入了量子力学。但是在一个相当长的时期内, 物理学家们在得心应手地应用泛函分析和算子代数作为量子力学的数学工具的同时, 却没有利用近代概率论的许多深刻结果和精

湛技巧来发展量子力学, 对于他们来说, 概率论的应用仅仅在于阐明量子力学的基础。这种情况直到 70 年代才有所改变。80 年代以来, 由日本伊藤清所开创的关于随机函数无穷小分析的随机分析学正逐步渗入量子力学, 使之大为改观, 一个崭新的数学物理分支——量子随机分析——正在形成。

量子力学中最基本的概念是状态和观测。按照冯·诺意曼的量子概率论公理, 量子系统的状态是复希尔伯特空间中的密度算子, 而每一单位矢量称为一个纯粹状态, 物理量的观测则是其中的自共轭算子, 即“量子随机变量”。在纯粹状态 ψ 下, 观测 A 落在区间 Δ 中的概率为 $\|\Pi_A(\Delta)\psi\|^2$, 其中 $\Pi_A(\cdot)$ 是算子 A 的谱测度。如果系统在初始时刻处于纯粹状态 ψ_0 , 则在时刻 t 的状态为 $\psi_t = e^{iHt/\hbar}\psi_0$, 其中 H 为能量观测, $\hbar = h/2\pi$, h 为普朗克常数, 这就是描述量子系统动态发展的薛定谔图式。由于量子概率论的对象是希尔伯特空间中的算子, 一般说来, 它们是不能交换的, 因此量子概率论可以称为“非交换”的概率论, 如果这些算子能交换, 量子概率论就化为古典概率论。

随机分析学的基础是随机积分理论。在古典随机分析中, 建立随机积分理论必须定义递增的 σ -代数流、适应随机过程、条件期望和鞅等概念。在量子力学中, 由于所考虑的是算子值过程, 代替 σ -代数流的是一族递增的算子代数, 称为冯·诺意曼代数 (或 W^* 代数)。利用塞格尔(Segal)的非交换抽象积分理论、巴勒特(Barnett, 1982)等建立了一套量子随机积分理论, 定义了量子鞅, 得到了关于量子下鞅的类似于古典下鞅的杜勃(Doob)——梅耶(Meyer)分解定理, 还研究了量子随机微分方程的解。与此同时, 哈德逊(Hudson)与帕塞沙拉西(Parthasarathy)也建立了一套非交换的随机分析理论, 他们利用指数矢量(即相干状态)在福克(Fock)空间中的完全性和所讨论算子的可闭性, 本质上是矢量值过程代替算子值过程, 从而不需要冯·诺意曼代数和塞格尔的理论, 只用普通的勒贝格积分和自由博色(Boson)场算子的典则交换关系(CCR), 直接推广了古典的伊藤公式。他们选择了 3 个基本的量子鞅: 增生(creation)、湮灭(annihilation)和保守(conservation)鞅作为量子噪声过程, 它们是古典布朗运动过程和普哇松(Poisson)过程的直接推广。为了研究物理量的观测在出现上述量子噪声的系统中的动态发展, 他们在有界系数情形下, 得到了量子随机微分方程的解唯一存在且为酉算子过程的充分必要条件。稍后, 他们的结果被推广到系数无界但满足某些解析性条件的情形。量子随机微分方程有着深刻的物理背景。阿卡迪(Accardi, 1989)等研究了某些量子系统模型的弱耦合极限和低密度极限, 证明了系统观测在弱耦合情形下的动态发展, 当耦合参数趋于零时, 其极限为一量子动态半群, 它是某个由量子布朗运动驱动的量子随机微分方程的解, 在低密度情形, 当气体密度趋于零时, 其极限动态半群则是某个由量子普哇松过程驱动的方程的解。

阿卡迪等将量子随机过程定义为 C^* 或 W^* 代数之间的一族同态单射。在这种观点下, 伊万斯(M. Evans)与哈德逊将古典微分流形上的随机微分同胚流的概念推广为量子扩散过程或量子随机流, 并利用非交换或非线性的上调理论研究了这种随机流的构造。另外, 诸如古典随机分析中的鞅的随机积分表现定理、停时和停止过程、局部时等概念, 近年来也被推广到量子随机分析中, 由于量子随机过程没有古典随机过程的“轨道”概念, 因此这些概念和古典随机分析有本质的区别。以自由费米(Fermion)场算子的典则反交换关系(CAR)代替 CCR, 可以平行地建立费米随机分析理论。但哈德逊和帕塞沙拉西利用一种反射过程得到了反称霍克空间和对称霍克空间的同构关系, 从而使费米随机分析自然地转化为博色随机分析。另一种量子随机积分的定义是利用霍克空间算子的积分核表示, 它首先由马森(Maassen, 1985)提出, 但其思想可以追溯到贝热津(Berezin, 1965), 它使各种运算化为相应核的运算, 因而也可以统一处理博色和费米两种情形, 带来许多方便。

量子随机分析的中心课题是研究量子系统的动态发展。然

而实际的量子物理系统,除了极端或理想化情形外,都是非马尔科夫的,即预测将来的发展不能仅仅建立在现在观测的基础上,而必须利用它的全部过去历史。另一方面,由于霍克空间同构于平方可积泛函空间,因此霍克空间中的分析实质上是 L^2 理论,这有非常大的局限性。值得注意的是,近年发展起来的无穷维随机分析理论,特别是马里亚万(P. Malliavin)的随机变分学和飞田武幸(T. Hida)的白噪声分析理论,提供了克服上述困难的有力工具。例如,最近贝拉夫金(Belavkin, 1991)利用随机变分定义了非适应算子过程的量子随机积分,建立了非适应的量子伊藤公式,构造了非平稳、非马尔科夫、非适应的量子朗之万(Langevin)方程的解;又如飞田武幸等(Hida, Obata 与 Saito, 1990)利用白噪声分析中的微分算子 ∂ 和其共轭算子 ∂^* ,得到了白噪声泛函空间中算子的积分表示,在此基础上,笔者提出了广义量子过程和量子白噪声的概念,并推广了量子伊藤公式,由于白噪声分析方法突破了 L^2 理论,因而应用于量子随机分析有很大的优越性。

参考文献

- 1 von Neumann J. Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Berlin, Springer, 1932
- 2 Accardi L, et al. Quantum stochastic processes. Publ RIMS, Kyoto Univ, 1982, 18: 97~133
- 3 Barnett C, et al. The Ito-Clifford integral. J Funct Anal, 1982, 48: 172~212
- 4 Hudson R L, et al. Commun. Math Phys, 1984, 93: 301~323
- 5 Huang Z Y. Advances in Math, 1988, 17(2): 360~378
- 6 Hudson R L. Probability Theory and Mathematical Statistics. VNU Science Press, 1990, 512~525
- 7 Belavkin V P. J Funct Anal, 1991, 102: 414~447
- 8 Parthasarathy K R. An Introduction to Quantum Stochastic Calculus, Birkhäuser, Basel, 1992
- 9 Meyer P A. Lect Notes in Math, 1993, 1538
- 10 Huang Z Y. Nagoya Math J, 1993, 129: 23~42

(华中理工大学黄志远教授撰)

渐近鞅理论 theory of asymptotic martingales

自20世纪50年代经典鞅论完成后,近代鞅论迅猛发展的同时,人们考虑能否减弱鞅定义中的条件而仍能保持鞅的部分性质,其主要特点是鞅条件在各种不同的极限意义下成立,这就是自60年代开始发展起来的渐近鞅理论。设 $Z = (x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1)$ 是实值适应可积序列, T 和 T 分别表示 $(\mathcal{F}_n, n \geq 1)$ 停时有界停时全体,记 $T(\sigma) = \{\tau \in T; \tau \geq \sigma\}, \forall \sigma \in T$ 。

- ①称 Z 是鞅(Martingale),若 $E(x_{n+1} | \mathcal{F}_n) = x_n$ s. s. $n \geq 1$;
- ②称 Z 是拟鞅(Quasimartingale),若 $\sum_{n=1}^{\infty} E(|E(x_{n+1} | \mathcal{F}_n) - x_n|) < \infty$;
- ③称 Z 是渐近鞅(Amart),若 $\lim_{\sigma \in T} E x_\tau$ 存在且有界;
- ④称 Z 是依概渐近鞅(Pramart),若 $\lim_{\sigma \in T} \sup_{\tau \in T(\sigma)} P\{|E(x_\tau | \mathcal{F}_\sigma) - x_\sigma| > \epsilon\} = 0, \forall \epsilon > 0$;
- ⑤称 Z 是极限鞅(1)(Mil(1)),若 $\limsup_n \sup_{m \geq n} |E(x_m | \mathcal{F}_n) - x_n| = 0$ a. s.
- ⑥称 Z 是极限鞅(2)(Mil(2)),若 $\lim_{\sigma \in T} P\{\sup_{n \geq \sigma} |E(x_n | \mathcal{F}_\sigma) - x_\sigma| > \epsilon\} = 0, \forall \epsilon > 0$;
- ⑦称 Z 是极限鞅(3)(Mil(3)),若 $\lim_{\sigma \in T} \sup_{m \geq \sigma} P\{|E(x_m | \mathcal{F}_\sigma) - x_\sigma| > \epsilon\} = 0, \forall \epsilon > 0$;
- ⑧称 Z 是依概极限鞅(1)(GFT(1)),若 $\lim_n P\{\sup_{m \geq n} |E(x_m | \mathcal{F}_n) - x_n| > \epsilon\} = 0, \forall \epsilon > 0$;
- ⑨称 Z 是依概极限鞅(2)(GFT(2)),若

$$\limsup_n \sup_{m \geq n} P\{|E(x_m | \mathcal{F}_n) - x_n| > \epsilon\} = 0, \forall \epsilon > 0$$

⑩称 Z 是循序鞅(PM),若存在上升的适应集合列 $(A_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1)$

使有 $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = \Omega$ 且在 A_n 上有 $E(x_{n+1} | \mathcal{F}_n) = x_n$ a. s., $n \geq 1$;

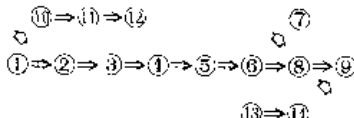
⑪称 Z 是终鞅(EM),若 $p\{\omega; E(x_{n+1} | \mathcal{F}_n) \neq x_n \text{ i. o.}\} = 0$;

⑫称 Z 是拟终鞅(QEM),若 $\sum_{n=1}^{\infty} |E(x_{n+1} | \mathcal{F}_n) - x_n| < \infty$ a. s.;

⑬称 Z 是 L^1 -极限鞅(1)(L^1 -Mil(1)),若 $\lim_n (\sup_{m \geq n} |E(x_m | \mathcal{F}_n) - x_n|) = 0$;

⑭称 Z 是 L^1 -极限鞅(2)(L^1 -Mil(2)),若 $\lim_n \sup_{m \geq n} E|E(x_m | \mathcal{F}_n) - x_n| = 0$.

上述序列也称为鞅型序列,它们之间有下述关系:



若把上述序列定义中的绝对值 $|\cdot|$ 改为 $[\cdot]^{1(-)}$,就得到相应的上(下)鞅型序列。例如称 Z 是极限下鞅(3),若

$$\limsup_{\sigma \in T} \sup_{m \geq \sigma} P\{[E(x_m | \mathcal{F}_\sigma) - x_\sigma]^{-} > \epsilon\} = 0, \forall \epsilon > 0$$

对给定的 σ 域流 $(\mathcal{F}_n, n \geq 1)$,设 \mathcal{C} 表示具有某一特性的实值 $(\mathcal{F}_n, n \geq 1)$ 适应的可积序列全体,称 \mathcal{C} 具有:

- (A)可选停止性,若对每一个 $(x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}$,有 $(x_{\tau \wedge n}, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}, \forall \tau \in T$
- (B)可选采样性,若对每一个 $(x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}$,对任取的上升停时列 $(\tau_n, n \geq 1) \subset T$,均有 $(x_{\tau_n}, \mathcal{F}_{\tau_n}, n \geq 1) \in \mathcal{C}$ 。
- (C)Riesz分解性,若对每一个 $(x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}$,有分解 $x_n = M_n + z_n, n \geq 1$

其中 $(M_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1)$ 是鞅,而 $E z_n I_A \rightarrow 0, n \rightarrow \infty, \forall A \in \bigcup_{n=1}^{\infty} \mathcal{F}_n$;

(D)极大值不等式性,若对每一个 $(x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}, \sup_n E|x_n| < \infty$

$$\text{有 } \sup_{\lambda \in \mathbb{R}^+} \lambda P\{\sup_n |x_n| > \lambda\} < \infty;$$

(E)a. s.收敛性,若对每一个 $(x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}, \sup_n E|x_n| < \infty$,

$\lim x_n$ a. s.存在;

(F)变换性,若对每一个 $(x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}, (u_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1)$ 可料序列

(i)若 $(u_n, n \geq 1)$ -致有界,则 $(y_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}$,其中

$$y_n = \sum_{k=1}^n u_k (x_k - x_{k-1}), n \geq 1 \quad (x_0 = 0)$$

(ii)若 $\sup_n E|u_n| < \infty$,在集合 $\{\sup_n |u_n| < \infty\}$ 上

$\lim y_n$ a. s.存在

(G)方差可加性,若对每一个 $(x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1) \in \mathcal{C}, \sup_n E|x_n| < \infty$,有

$$\sum_{n=1}^{\infty} (x_{n+1} - x_n)^2 < \infty \text{ a. s.}$$

已知鞅具有所有上述性质,鞅型序列②~⑭保持上述鞅性质的情况如表1所示。

关于鞅型序列及其有关性质的一系列结果,常称为渐近鞅理论,几乎与此同时,向量值渐近鞅理论也被建立。设 $(\mathfrak{X}, \|\cdot\|)$ 是一Banach空间, $Z = (x_n, \mathcal{F}_n, n \geq 1)$ 是 \mathfrak{X} 值Bochner可积适应序列,若把实值鞅型序列定义中的绝对值 $|\cdot|$ 换成 $\|\cdot\|$,即可得到相应的向量值鞅型序列的定义。例如称 Z 是一致渐近鞅,若 $\lim_{\sigma \in T} \sup_{\tau \in T(\sigma)} E\|E(x_\tau | \mathcal{F}_\sigma) - x_\sigma\| = 0$ 。当 $\mathfrak{X} = \mathbb{R}$ 时,渐近鞅与

一致渐近鞅是等价的,但在一般 Banach 空间中,只有一致渐近鞅 \Rightarrow 渐近鞅成立。向量值鞅与鞅型序列的鞅性质常与值空间 X 的几何性质有关。例如,1985 年 M. Talagrand 证明了下述命题——设 X 是一 Banach 空间,则下述等价:(1) X 有 RNP,(2)满足条件 $\sup E \|x_n\| < \infty$ 的任一 X 值 Mil(3)必 a. s. 按范数拓扑收敛。现在,实值与向量值渐近鞅理论已趋于成熟,随着随机集理论的兴起,集值鞅与渐近鞅理论正处于发展阶段。

表 1

鞅性	A	B	C	D	E	F	G
鞅	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
拟鞅	✓	✓	✓	✓	✓	F(ii)	✓
渐近鞅	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
依概率渐近鞅	✓	✓	×	X*	✓	×	×
极限鞅(1)	X*	X*	×	X*	✓	×	×
极限鞅(2)	X*	X*	×	X*	✓	×	×
极限鞅(3)	X*	X*	×	X*	✓	×	×
依概率极限鞅(1)	×	×	×	X*	Pr.	×	×
依概率极限鞅(2)	X*	X*	×	X*	Pr.	×	×
循序鞅	✓	×	×	X*	✓	✓	✓
终鞅	✓	×	×	X*	X*	X*	X*
拟终鞅	✓	×	×	X*	X*	F(ii)*	X*
L ¹ -极限鞅(1)	×	×	✓	X*	Pr.	×	×
L ¹ -极限鞅(2)	×	×	✓	X*	Pr.	×	×

说明:(1)表中✓表示有此性质,×表示无此性质,X*表示在条件 $\sup_{t \in T} E|x_t| < \infty$ 下有此性质。

(2)Pr. 表示仅有依概率收敛性。

(3)F(ii)表示仅有变换性(ii),F(ii)*表示在条件 $\sup_{t \in T} E|x_t| < \infty$ 下有变换性(ii)。

参考文献

- 1 Edgar G A, et al. J. Multivariate Anal, 1976, 6: 193~221, 572~591
- 2 Millet A, et al. Can J Math, 1980, 32: 86~125
- 3 Gut A, et al. L. N. M., 1983, 1042
- 4 Egghe L. Stopping time techniques for analysts and probabilists. Cambridge University Press, 1984
- 5 Tomkins R J. Can J Statist, 1984, 12: 99~106
- 6 Talagrand M. Ann of Probability, 1985, 13: 1192~1203

(华东师范大学汪振鹏教授撰)

强极限理论

strong limit theory 是以研究强逼近理论随机过程样本轨道性质及随机序列部分和增量渐近行为为主要对象的极限理论的一个重要方面,是自 20 世纪 70 年代以来概率论最活跃的分支之一。它包括研究 Wiener 过程及其相关 Gauss 过程的样本轨道渐近性质,并用它来逼近较一般的过程或随机序列,从而导出后者的样本轨道或增量的渐近性质,也包括直接研究更一般的过程的样本轨道性质,及较一般的随机序列的增量性质。

关于 Wiener 过程的重对数律(Lévy, 1937)、钟莱重对数律(1948)及独立同分布随机变量(i. i. d. r. v.)序列部分和的 Hartman-Wintner 重对数律(1941)等极限理论的经典定理是强极限理论的早期结果。Strassen(1964)强不变原理的出现开创了近代强极限理论研究的先河。至 70 年代,以匈牙利 Csörg ö, M 和 Révész, P 等为代表,获得一系列结果,如关于 Wiener 过程增量理论, i. i. d. r. v. 序列的部分和用 Wiener 过程的强逼近及其增量理论,经验过程及分位点过程用 Brown 桥及 Kiefer 过程的强逼近等等,它们组成了强极限理论的基本内容,被总结在 Csörg ö 和 Révész 的专著《Strong Approximations in Probability

and Statistics》(1981)中,正如该书前言中指出的,今后将进一步开展(1)多参数部分和的强极限理论;(2)高维欧氏空间或 Banach 空间情形的强极限理论;(3)非独立情形;(4)独立非同分布情形强极限理论的研究。80 年代强极限理论的发展是在不断深化原来已被研究的领域同时,在上述 4 个方面开展了卓有成效的工作。在这些研究中吸引了许多概率论学者参加,中国学者也作出了重要贡献,他们的主要结果已被总结在林正炎、陆传荣的专著《强极限定理》中。

1. Wiener 过程的增量理论。Lévy 的连续模定理是 Wiener 过程 $\{W(t), t \geq 0\}$ 增量的早期结果,即

$$\limsup_{h \rightarrow 0} \sup_{0 \leq t \leq 1-h} \sup_{0 \leq s \leq h} |W(t+s) - W(t)| \sqrt{2h \log(1/h)} = 1 \quad (\text{a. s.})$$

在它和重对数律基础上, Csörg ö 和 Révész 提出了增量理论。首先讨论增量有多大,即证明

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \sup_{0 \leq t \leq T} \sup_{0 \leq s \leq a_T} \beta_T |W(t+s) - W(t)| = 1 \quad (\text{a. s.})$$

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \beta_T |W(T+a_T) - W(T)| = 1 \quad (\text{a. s.})$$

其中 a_T 是 T 的不减函数, $0 < a_T \leq T$ 且 T/a_T 也是不减的, $\beta_T = \{2a_T(\log(T/a_T) + \log \log T)\}^{-1/2}$ 。当 a_T 还满足 (*) $\lim(\log(T/a_T))/\log \log T = \infty$ 时,上面第 1 个式子中 \limsup 可改为 \lim 。以后国内外许多学者讨论当放宽条件(*)时,如何修改正则化因子使上述形式增量的下极限为 1,也讨论了这类增量收敛的速度。从统计问题引出的增量的另一种形式——滞后增量有多大也被研究了,即 $\limsup_{T \rightarrow \infty} \sup_{0 \leq t \leq T} |W(T) - W(T-t)| / \{2t(\log(T/t) + \log \log t)\}^{1/2} = 1$ (a. s.) 随后综合这两种形式还给出了增量的--般形式。此外,在钟重对数律基础上, Csörg ö 和 Révész 讨论了 Wiener 过程增量有多小。这些结果还都被相应地推广到 Wiener 过程局部时的增量上。

两参数 Wiener 过程 $\{W(s, t), 0 \leq s, t < \infty\}$ 的增量也被深入地研究了。对于某些特殊选取的矩形集合 L_T , Csörg ö 和 Révész 证得 $\limsup_{T \rightarrow \infty} \sup_{R \in L_T} \delta_T |W(R)| = 1$ (a. s.), 其中 δ_T 是与 L_T 有关的

正则化因子,在一定条件下, \limsup 也可改为 \lim 。国内一些作者把一参数情形许多结果推广到两参数情形,诸如相应下极限存在的条件,另一类重对数律,滞后增量,增量的一般形式,增量有多小等都被一一研究了。

2. 随机变量序列部分和的强逼近。Strassen 利用 Skorohod 嵌入原理证明了第 1 个强逼近结果: $\lim_{n \rightarrow \infty} |S_n - W(n)| \sqrt{n \log \log n} = 0$ (a. s.), 其中 S_n 是均值为 0, 方差为 1 的 i. i. d. r. v. 序列的部分和。这方面的最佳结果是由 Komlós, Major 和 Tusnády 给出的,他们通过发展分位点变换法,证得:设在零的某领域中矩母函数存在,则 $|S_n - W(n)| = O(\log n)$ (a. s.); 如仅设 $p(>2)$ 阶矩存在,则 $|S_n - W(n)| = o(n^{1/p})$ (a. s.)。Sakhanenko 考虑了独立但不必同分布随机变量序列,在对矩母函数附加一定条件后,证明这类序列的部分和可以用一系列正态随机变量序列的部分和以一定的速度强逼近。Eimmahl 研究了多维独立随机向量序列的部分和用多维独立正态随机向量序列部分和逼近的结果,对于相依变量序列(如各种混合情形)部分和的强逼近,国内外有许多作者利用 Skorohod 嵌入方法作了细致讨论,在不超过 4 阶矩有限时有较佳结果。关于多参数的随机场也有类似结果。

3. 部分和的增量。由上两部分可写出 i. i. d. r. v. 部分和增量的各类结果,如当矩母函数在零的领域内存在时,对不减正整数列 a_N , 在一定条件下,有

$$\limsup_{N \rightarrow \infty} \max_{1 \leq n \leq N} \max_{1 \leq k \leq a_N} \beta_N |S_{N+a_N} - S_n| = 1 \quad (\text{a. s.}),$$

其中 $\beta_N = \{2a_N[\log(N/a_N) + \log \log N]\}^{-1/2}$; 当仅设 $p(>2)$ 阶矩存在时,也有同类结果成立。对滞后增量也有相应结果。又当 $a_N \sim \log N$ 时成立着相应的大数律。

关于独立但不必同分布的随机变量序列,由于强逼近结果

未达到同分布情形那样完美,故为给出相应结果需另辟途径。林正炎利用直接建立增量的尾概率精确估计,在一定的矩条件下,对 Csörgő-Révész 增量、滞后增量及大数律都给出了理想的结果。此外,对没有矩假设的场合及一些相依变量情形,也建立了部分和增量结果。邵启满还研究了部分和增量有多少,不仅改正了 Csörgő-Révész 书中关于这一问题论证的不慎之处,而且推进到独立不同分布情形。

4. 经验过程。用 Brown 桥及用 Kiefer 过程的强逼近,作了相当完美的讨论,且被扩展到分位点过程(也称逆经验过程)上,并进一步利用这些来讨论经验过程、分位点过程本身的样本性质。

5. Gauss 过程的增量。作为 Wiener 过程增量的另一种推广,近年来对于具有重要实际背景的无穷维 Ornstein-Uhlenbeck 过程有较多讨论。Csörgő 和林正炎讨论了它的样本轨道性质,包括连续模和重对数律等。随后,又被 Csörgő、林正炎和邵启满推进到更一般的 I_p 值 Gauss 过程上,讨论了它们的样本轨道性质。

参考文献

- 1 Strassen V Z. Wahrsch. verw Gebiete, 1964, 3, 211
- 2 Komlós J, Major P, Tusnády D Z. Wahrsch. verw Gebiete, 1976, 34, 33
- 3 Csörgő M, Révész P. Strong Approximations in Probability and Statistics, New York, Academic Press, 1981
- 4 林正炎, 中国科学, 1984, 27, 1065
- 5 Chen G J, Kong F C, Lin Z Y. Ann Probab, 1986, 14, 1252
- 6 邵启满, 陆传荣, 中国科学, 1986, 29, 1243
- 7 林正炎, 中国科学, 1988, 31, 467
- 8 Shao Q M. Ann. Probab. 1989, 17, 809
- 9 Csörgő M, Lin Z Y. Probab. Theory Rel. Fields, 1991, 89, 423
- 10 林正炎, 陆传荣, 强极限定理. 北京: 科学出版社, 1992

(杭州大学林正炎教授、陆传荣教授撰)

随机算子方程理论 theory to random operator equations

是随机泛函分析的重要组成部分。随机泛函分析,是概率论和泛函分析相互渗透与相互交错产生的一门新的数学分支。由于大量实际问题和应用科学中研究的自然现象是非决定性的,即带有随机性质,因而描述这类非决定性现象更为真实的数学模型,自然应是各种类型的随机方程。而随机算子方程的研究,又在各类随机方程(随机积分方程、随机微分方程、随机积分微分方程、随机微分包含等)的研究中起着核心作用。这些,就导致了点值和集值随机算子理论的迅速发展。关于点值和集值随机算子方程理论的主要问题,本质上和决定性点值与集值算子方程的理论相同,即有解的存在性、唯一性、特征、构造和逼近等问题。因此利用概率论和泛函分析的理论、技巧和方法研究各类随机方程随机解的存在性、唯一性、解集性质和给出各种求解方法,进而对随机现象给出规律性解释就是随机方程理论研究的主要内容。

20世纪50年代,以 Spacek 和 Hans 为首的捷克布拉格学派对随机算子的不动点理论作了开创性工作,也对随机泛分析的早期发展作出了开拓性贡献。

1960年 Hans 证明了随机 Banach 压缩算子随机不动点的存在定理。1962年王梓坤率先在国内介绍了随机泛函分析理论并对随机算子理论作了大量工作。1969年 Mukherjea 和 Bharucha-Reid 证明了 Schauder 不动点定理的随机化推广。1972年 Bharucha-Reid 在《随机积分方程》中介绍了随机算子方程的可解性理论及其对求解各类随机积分方程中的应用。1971和1974年 Tsokos-Padgett 在《应用于随机系统的随机积分方程》和《应用于生命科学和工程中的随机积分方程》中研究了产生于各种应用科学中的随机代数方程、随机微分方程、随机差分方程和随机积分方程的可解性理论及解集性质。

1976年 Bharucha-Reid 发表了综述论文《随机分析中的不

动点定理》,评论和综述了随机算子不动点理论及其应用已取得的成果,同时也提出若干值得研究的问题。此综述论文的发表大大促进和推动了点值和集值随机算子不动点理论,随机点值和集值算子方程求解理论,随机积分方程和随机微分方程理论和随机微分包含理论的迅速发展。

1977~1978年 Itoh 和 Engl 等首先研究了集值随机压缩算子和集值随机非扩张算子随机不动点的存在性问题。1978年和1981年,Engl 和 Bocsan 分别在各自的假设下,对点值和集值随机算子证明一般随机不动点定理,即如果决定性算子的不动点存在,在任何条件下,相应的随机算子的随机不动点也存在。这对弄清决定性算子理论和随机算子理论之间的本质联系和区别是非常必要的。

1977年 Lee-Padgett 推广 Altman 求解决定性算子方程的收缩理论,首先对点值随机算子引入了随机收缩概念,应用此概念研究点值随机算子方程解的存在唯一性及逼近解的迭代方法,同时也给出对随机非线性积分方程的应用。由于这一理论自身不仅提供了非线性随机算子方程解的存在性与唯一性的理论依据,也给出了逼近解的近似方法而且有广泛的应用前景,从而引起国内外学者的广泛兴趣。1983年 Padgett 在《随机收缩方法及其对随机非线性方程的应用》中对这一理论的发展进行了评论和综述。

1979年 Bharucha-Reid 在其编辑出版《随机方程逼近解》一书中,集中总结和评述了随机算子方程逼近解理论研究的新成果和发展趋势。特别在由 Nashed-Engl 编写的《随机广义逆和随机算子方程逼近解》中指出了随机泛函分析发展的4个前沿方向。该文集对研究随机算子方程逼近解的学者是很有参考价值的文献。

1979年 Itoh 在 Banach 空间的可分闭凸子集上对点值和集值凝聚随机算子和非扩张算子证明随机不动点的存在定理并应用于随机微分方程,同年 Andrus-Nishiura 在 Nowak 的工作基础上证明集值随机算子的一般随机不动点定理,同时也将 Boyd-Wong 关于决定性非线性压缩算子的结果推广到集值随机非线性压缩算子的情形。

80年代,点值和集值随机算子和随机算子方程的理论及其在各领域的应用都有了迅速发展。

1982年 Kravvaritis 在 Kannan-Salehi, Itoh 和他本人在关于含有单值单调型随机算子的随机方程的有关结果的基础上,对含有集值单调型随机算子的随机方程和不等式获得了随机解的存在性定理。其后 Joshi, Papageorgiou 和 Kravvaitis 在一系列文章中对此问题有进一步的深入讨论。1986年 N. X. Tan 在较多的假设下研究了随机拟变分不等式随机解的存在性。1981年 Phan Chu'ong 证明 Kakutani-Ky Fan 不动点定理的随机推广,并于1984年应用于证明集值随机 Volterra 积分方程随机解的存在性上。

自1981年以来,中国张石生、丁协平、刘作述、陈绍仲、林熙、傅俊义和卢同善等对各类随机点值和集值压缩型算子和非扩张型算子证明了随机不动点的存在性定理,讨论迭代逼近问题并给出了对于随机积分和微分方程的应用。1984年丁协平对集值随机算子组证明随机不动点定理并给出了对于非线性随机积分和微分方程组的应用。

1983年 Sehgal-Waters 在适当条件下推广 Itoh 关于单值凝聚算子的不动点定理到非自映象情形,1984年他们又获得 Browder-Fan 型结果的随机推广,1985年 Sehgal-Singh 在紧凸假设下对集值连续随机算子证明了 Ky Fan 型随机最佳逼近定理和随机不动点定理。1988年 Lin 对定义在闭球或闭凸集上的点值连续随机凝聚和非扩张算子证明了 Ky Fan 型随机最佳逼近定理和随机不动点定理。关于具有非紧定义域连续集值凝聚算子的 Ky Fan 型随机最佳逼近定理还是待解决的问题。

1986年以来, Papageorgiou 在一系列论文中研究了集值随机算子的可测性问题,推广了具有各类连续性质的集值随机算子

的一般随机不动点定理,讨论了点值和集值随机算子方程解的存在性定理,同时将所得结果广泛应用于随机微分包含理论并得到许多重要结果。

1983年Engl-Rögnish在具有非唯一解的非线性随机算子方程逼近解的收敛性上作了重要工作,1984年以来丁协平在Lee-Padgett工作的基础上对点值和集值随机算子组引入广义随机收缩概念,利用这些概念得到了点值和集值随机算子方程组解的存在唯一性定理和逼近随机解的迭代法,并给出了对于随机积分和微分方程组的应用。其后Reddy、邵永恒等在解集性质和应用上也作了重要工作。

关于点值和集值算子方程理论的另一活跃领域涉及70年代由Schweizer、Sklar和Sherwood等人奠定基础的概率度量空间理论和概率赋范空间理论,1979年中国游兆水首先在国内倡导PM-空间理论及其应用研究。其后张石生、丁协平、龚怀云、曾文智、方德宣和林熙、朱林户和郭铁信等对概率度量空间结构和不动点理论都作了一系列重要工作,特别是西安交通大学在随机赋范空间和随机度量空间的空间结构理论、线性算子理论等方面作出了重要贡献。为从空间随机化途径研究随机算子和随机算子方程进一步打下了理论基础,为随机泛函分析的进一步发展开辟了新的途径。

参考文献

- 1 王梓坤, 数学进展, 1962, 5(1): 45~71
- 2 Bharuch-Reid A T. Bull. Amer Math Soc, 1976, 82(5): 641~657
- 3 Itoh S A. Pacific J Math, 1977, 68: 85~90
- 4 Engl H W. J. Math Anal Appl, 1978, 66: 220~231
- 5 Engl H W. J. Math Anal Appl, 1979, 261: 261~273
- 6 Bharucha-Reid A T. Approximate Solution of Random Equations, Amsterdam, North-Holland Publ, 1979
- 7 Padgett W J. Prob Anal Related Topics, 1983, 3: 195~255
- 8 丁协平, 应用数学和力学, 1984, 5(4): 561~575
- 9 Kravvaritis D. J Math Anal Appl, 1986, 114: 295~304
- 10 Papageorgiou N S. Proc Amer Math Soc, 1986, 97: 507~514

(四川师范大学丁协平教授撰)

随机差分方程的稳定性理论 the stability theory of stochastic difference equations 随机差分方程是差分方程和随机过程理论相结合而产生的一门科学,它与随机微分方程有着密切的联系,但也具有自身的特点。在这一领域里,随机差分方程的稳定性理论的研究占有重要地位,而且关于稳定性理论在确定性差分方程和随机过程的基础上的研究进展较快,且其应用范围也越来越广泛,涉及到系统科学、工程控制、生态学等各个领域。

1961年,贝尔曼(R. Bellman)指出,概率论与古老的微分方程理论掺合起来是一项富有新意而且具有巨大吸引力的边缘学科,随后许多学者在这一领域里进行了理论和应用两方面的深入研究,发展成为多门学科。在微分方程的求解方法中,差分法是一种重要的手段,这就要求深刻研究差分方程的一些性质,主要是差分方程稳定性的研究。这些研究与随机过程理论结合起来,就导致随机差分方程稳定性理论的研究。考虑这样一个随机系统(也称非线性随机差分方程), $X_{n+1}=f(X_n, V_n)$,其初始条件 X_0 是一个给定的 m 维随机向量, f 是一个连续实值向量函数, V_n 是一个随机向量序列,则可知其解是一离散随机过程,给定一些限制条件,其解可以成为马尔可夫链(Markov chain)。讨论其解在概率意义下的稳定性、渐近稳定性、全局稳定性,由于赋予概率意义,则稳定性的定义也就更广泛(如指数 P 稳定等等),对线性差分方程,其研究可看成是式的特例。

1965年,贝西(R. C. Bucy)较简单地讨论了非线性随机差分方程的稳定性问题;1979年,俞中明结合差分方程稳定性的李雅普诺夫(Liapunov)函数方法和鞅论,进一步讨论了这类方程的

稳定性,得到几个稳定性的充分条件。70年代,美国拉萨尔(J. P. Lasalle)发现李雅普诺夫函数与伯克霍夫(G. D. Birkhoff)极限集之间的关系,而得到不变原理。由这一原理可高度概括动力系统(含差分方程)稳定性的基本理论和最新成果。1988年,王明文将这一原理应用到随机差分方程稳定性理论的研究中去,得到了几个较好的充分性条件,而且前人的工作只是特例。

关于随机差分方程的研究工作国外稍多一些,国内就很少有人研究。主要工作也在于差分方程稳定性理论加了随机因素后的平行推广。近几年,有的学者在研究随机差分方程与连续随机过程之间的关系,特别是用随机差分方程去逼近随机微分方程的解,随机逼近理论的研究等将会有重要的意义,也是这一领域的热点之一。再就是随机差分方程应用领域的研究,以往的模型大多不考虑随机因素,加入随机影响后,得到的特殊模型解的稳定性结构,这方面还可与计算机结合起来进行数学分析。另外的热点是高阶随机差分方程稳定性理论的研究,目前,这方面的研究工作还少见。

(江西师范大学王明文副教授撰)

Hilbert 空间中随机微分系统稳定性理论 the stability theory of stochastic differential systems in Hilbert space 一般受噪声扰动的动态系统的理想数学模型,是20世纪40年代由日本伊藤清建立的随机微分方程。以这种方程描述的系统称为Itô随机微分系统(简称为随机微分系统)。Hilbert空间中的随机微分系统,以更抽象、统一的形式描述了有限维空间中的随机微分系统,随机偏微分系统以及具有滞后的随机微分系统等等。此空间中的随机微分系统稳定性理论就是以近代随机分析理论与方法结合抽象空间中的确定性微分方程稳定性理论与方法,来研究这类系统的李雅普诺夫(Ляпунов)稳定性理论——各类随机意义下的稳定性分析和判据的建立,Ляпунов泛函的存在性及其构造以及系统的最优稳定化等等。这样建立起来的稳定性理论,作为特例,不但可应用于上述有限维空间中的各类系统,而且在新的抽象理论基础上,有可能较容易得到新的更深的结果。

随机系统稳定性理论的建立,一直是以确定性系统稳定性理论为基础,并随着它的发展而发展。Hilbert空间中随机微分系统稳定性理论的建立与发展过程也充分反映了这一历史特征。达特柯(R. Datko)于1968年和1970年首先将有限维空间中确定性常微系统稳定性理论中的Ляпунов定理[关于霍维茨(Hurwitz)矩阵定理]推广到Hilbert空间上的算子强连续半群。1972年,他又研究了在一般Banach空间中发展方程的一致渐近稳定性。在他工作的基础上,1976年,查柏赛克(J. Zabczyk)研究了无穷维的随机“鲁里叶(Lurie)”型线性系统的稳定性。1978年,豪斯曼(U. G. Haussmann)将Datko的工作推广到了Hilbert空间中的线性随机微分方程:

$$dX + AXdt = B(X)dw,$$

其中 A 为可分Hilbert空间 H 上的强连续半群 U_t 的线性生成算子, W 为可分Hilbert空间 K 上的维纳(Wiener)过程,其协方差算子 $W \in \mathcal{L}(k, k)$ (k 到自身的连续线性映射空间)为一正核算子, $B(\cdot) \in \mathcal{L}(H, \mathcal{L}(k, H))$ 。这一工作也推广了60年代科辛(F. KoZin)关于有限维空间中线性随机微分系统稳定性方面的工作。同年,以柯尔坦(R. F. Curtain)为首的英国沃里克(Warwick)大学控制论中心,以《无穷维线性系统理论》为题,在“Lecture Notes in Control and Information Sciences”, vol. 8上,系统地发表了他们在这一领域中的工作。1979年,日本依启卡瓦利用动态规划方法研究了具有状态和控制相关噪声的无穷维线性系统的随机调节器问题和最优平稳控制以及稳定性等。以上这些工作,不仅为Hilbert空间中线性随机微分系统稳定性理论奠定了基础,而且也为Hilbert空间中非线性随机微分系统稳定性理论的发展创造了条件。

1982年,Ichikawa在他原来工作的基础上,借助于Hilbert

空间中的 Ляпунов 函数,研究了下面一类半线性随机发展方程的稳定性:

$$dy = [Ay + f(y)]dt + G(y)dw,$$

其中: A 为实可分 Hilbert 空间 Y 上的强连续半群 S(t) 的无穷小生成算子; f: Y → Y 且 G: Y → S(H, Y), 均为 Lipschitz 连续映射; W 为实可分 Hilbert 空间 H 上具有增量协方差算子 W 的 H-值 Wiener 过程. 他所得到的结果, 推广了 Haussmann 与 Curtain 的工作. 同年, 周(P. L. Chow)对下面一类非线性随机发展方程的稳定性也作了研究:

$$dy = A(y)dt + B(y)dw,$$

其中, A: X(实自共轭的 Banach 空间) → Y(实可分 Hilbert 空间), B: X → S(H, K), 均为有界连续映射, 并且 K 为实可分的 Hilbert 空间, 使得 X ⊂ K ⊂ Y = X*, 均为测度连续; W 仍为具有增量协方差算子 W 的 H-值 Wiener 过程. 他借助于 G_0(包含原点) ⊂ K 中的一个 Ляпунов 泛函, 建立了该系统的 a. s. 有界性, a. s. 稳定性, a. s. 渐近稳定性以及 a. s. 全局渐近稳定性等判据.

Ichikawa 与 Chow 是较早将稳定性理论中的“Ляпунов 直接法”推广到 Hilbert 空间中随机微分系统稳定性分析中来的两位学者. 1983 年, Ichikawa 在前述 Zabczyk(1976)工作的基础上, 又进一步研究了随机发展方程的绝对稳定性. 他从几个方面推广了 1972 年莫诺桑(T. Morozan)在有限维情形的工作. 1984 年, Ichikawa 在他 1982 年工作的基础上, 较系统地研究了上述一类半线性随机发展方程的有界性、稳定性和不变测度, 所得到的结果推广了 1969 年(1972, 1973)查凯(M. Zakai)和米雅哈拉(Y. Miyahara)在有限维情形的工作. 同年, 他又发表了关于一类非线性半群的指数稳定性和 L_p-稳定性的等价性结果. 这一结果不仅可应用于有限维确定性的和随机的微分方程, 也可应用于半线性的确定性和随机发展方程, 由它可推得已有的相应结果.

1984 年, Itô 的《无穷维空间中随机微分方程基础》, 为该领域的研究工作奠定了系统和严格的数学基础. 在 Ichikawa (1982)工作的基础上, 胡宜达于 1985 年, 将稳定性理论中的“比较方法”推广到上述的一类半线性随机发展方程, 从而将此类随机发展方程的稳定性在一定的条件下, 归结为一类(一维)确定性常微分方程相应稳定性的判定. 这不但推广了 1982 年 Ichikawa 的相应结果, 而且也推广了他本人在有限维情形中的相应工作. 1986 年, 胡宜达又利用比较方法建立了上述一类半线性随机发展方程的各种有界性的比较准则以及不变测度的存在性与唯一性的比较准则; 从而将此类随机发展方程不变测度的存在性与唯一性分别与一类(一维)确定性常微分方程的有界性与稳定性建立了直接的联系, 并且也推广了上述 Ichikawa 在 1984 年工作中的相应结果. 1987 年, 马洪发表了有关 Hilbert 空间中随机微分方程解的某些渐近性质的结果.

从诸如化学动力学、神经生理学中的众多实际问题来看, 只考虑 Hilbert 空间值的随机过程是不够的, 而且从理论上讲, 考虑可数 Hilbert 核空间及其对偶比考虑 Hilbert 或 Banach 空间更自然也更完美. 于是 1986 年, 卡林普尔(G. Kallianpur)等从实际应用中提出了一类可数 Hilbert 核空间及其对偶空间. 嗣后, 1987 年, 佩雷斯-阿伯鲁(V. Pérez-Abreu)在此类核空间中, 研究了关于对偶空间值 Wiener 过程的随机积分. 然而此类核空间的对偶空间中的随机分析学基础还不是很完善的, 以致不能进一步对此类核空间的对偶空间中的一般随机微分方程的稳定性理论开展研究. 为此, 胡宜达于 1990 年, 建立了此类核空间的对偶空间中的随机微分概念和 Itô 公式. 1991 年, 他证明了此类核空间的对偶空间中的前述的一类半线性随机发展方程解的存在唯一性定理. 1992 年, 他又发表了此类核空间的对偶空间中的半线性随机发展方程解的一些性质, 等工作. 上述工作, 为在此类核空间的对偶空间中, 进一步研究一般随机微分方程稳定性理论建立了必要的基础.

Hilbert 空间中随机微分系统稳定性理论仍是一个非常不成熟的研究领域, 很多方面的工作, 诸如, Ляпунов 泛函的存在性及

其构造, 以及一般非线性系统的最优稳定化等等研究, 至今还未真正涉及. 特别是可数 Hilbert 核空间的对偶空间中随机微分系统稳定性理论的研究, 还尚未深入地展开. 这一切的一切都有待于今后有志于该领域的研究工作者们的努力.

参考文献

1 Haussmann, U G. J Math Anal Appl, 1978, 65: 210~235
2 Chow P L. J Math Anal Appl, 1992, 89: 400~419
3 Ichikawa A. J Math Anal Appl, 1982, 90: 12~44
4 Hu Xuanda. J of Nanjing Univ Math Biquarterly, 1987, 4: 1; 1~4
5 Ma Hong. Osaka J Math, 1987, 24: 2: 321~330
6 胡宜达. 高校应用数学学报, 1988, 3: 2: 57~68
7 胡宜达. 南京大学学报数学(半年刊), 1992, 9: 1: 8~17
(南京大学胡宜达教授撰)

循环序列相关系数的分布 distribution of the serial correlation coefficient

序列相关是许多动态模型随机扰动的重要特性, 在许多学科中, (如时间序列分析、经济计量学等)都对序列相关有专门的讨论. 要检验某一模型中随机扰动有无序列相关性, 首先要知道序列相关系数的分布, 或了解其分布的某些特征等. 因此, 研究序列相关系数的分布就显得十分重要.

设(Z, Z_2, ..., Z_n)为取自随机扰动 Z_t 的一个时间序列样本, 定义第 l(落后 l 步)的序列方差为:

$$c_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-l} (z_i - \bar{z})(z_{i+l} - \bar{z})$$
$$l = 0, \dots, n-1$$

z̄ 为所观测序列的样本均值 z̄ = (z_1 + z_2 + ... + z_n)/n.

于是得到第 l(落后 l 步)的序列相关系数:

$$\gamma_l = c_l/c_0$$

在进行分布理论的研究中, 即使在扰动 z_t 为标准正态白声(独立同分布)的假设下, 也不可能求得 γ_l 的分布的明显形式. 但是如果考虑循环序列相关系数, 分布问题便可以解决.

$$\text{设 } \tilde{\gamma}_l = \hat{c}_l/\hat{c}_0$$

$$\text{此处 } \hat{c}_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-l} (z_i - \bar{z})(z_{i+l} - \bar{z}), (l \geq 0), \text{ 而循环的定义为 } z_{i+n} = z_i.$$

在对 z_t 为标准正态白声的假设之下, 当 l=1 时(落后一步)有:

$$\tilde{\gamma}_1 = \begin{cases} \frac{\frac{1}{2}(n-1)}{\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i V_i} & n \text{ 为奇数} \\ \frac{\frac{1}{2}(n-1)}{\sum_{i=1}^{n-1} V_i} & n \text{ 为偶数} \end{cases}$$

其中:

$$\lambda_i = \cos(2\pi i/n) \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

$$v_i \sim \chi^2(2), \quad v \sim \chi^2(1)$$

γ̃_1 的分布函数为:

$$P(\tilde{\gamma}_1 > \gamma) = \begin{cases} \frac{\frac{1}{2}(n-1)}{\sum_{i=1}^{n-1} (\lambda_i - \gamma) \frac{1}{2}(n-3)} & \lambda_{\frac{n-1}{2}+1} \leq \lambda \leq \lambda_{\frac{n-1}{2}}, \quad n \text{ 为奇数} \\ \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^{n-1} (\lambda_i - \lambda_j)}{\frac{1}{2}(n-1)} & \\ \frac{\frac{1}{2}(n-2)}{\sum_{i=1}^{n-2} (\lambda_i - \gamma) \frac{1}{2}(n-3)} & \lambda_{\frac{n-1}{2}+1} \leq \lambda \leq \lambda_{\frac{n-1}{2}}, \quad n \text{ 为偶数} \\ \frac{\prod_{j=1, j \neq i}^{n-1} (\lambda_i - \lambda_j)}{\frac{1}{2}(n-2)} & \end{cases}$$

上述结果是由安德森(R. L Anderson)于 1942 年给出的, 通常称

为安德森分布(R. L. Anderson),由此我们可得对原假设显著性的单侧或双侧检验。但杜宾(Dubin)和沃森(Watson)在1971年曾指出,其中的主要结果早在1863年已由阿比(Abbe)得到。一般情况下,R. L. Anderson有如下结果:对 $\hat{\gamma}_1(l>1)$ 当 l 与 n 无公约数时:

$\lambda_1 = \cos(2\pi k l/n)$, λ_1 的分布同 $l=1$, 如果 l 与 n 有公约数,分布的函数形式可能改变。

R. L. Anderson在推导分布时所用的技巧是求一循环矩阵的行列式值,并用联合分布求边缘分布。对于一般情况 $\hat{\gamma}_1$ 分布的具体结果,采用分解循环矩阵和特征函数的方法推导了 $\hat{\gamma}_1(l \geq 1)$ 的分布函数。

迪克森(Dixon, 1944)通过对 (\hat{c}_1, \hat{c}_0) 的特征函数:

$$\varphi(s, t) \propto \prod_{k=1}^{n-1} \left\{ 1 - 2i(t + \cos \frac{2\pi k}{n}) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

进行近似,使得:

$$\varphi(s, t) \propto \prod_{k=1}^{n-1} \{a + \beta \cos \theta_k\}^{-\frac{1}{2}} \quad (a = 1 - 2it, B = -2is, \theta_k = 2\pi k/n)$$

于是得到其前 n 阶矩与下述分布:

$$\frac{\Gamma(\frac{1}{2}n + \frac{1}{2})}{\Gamma(\frac{1}{2}n)(\frac{1}{2})} \gamma^{-1}(1 - \lambda^2)^{\frac{1}{2}(n-2)}$$

相同。于是可得上述R. L. Anderson分布的近似表达式,也就是说,循环序列相关系数的分布近似于从标准正态总体中抽出容量为 $n+2$ 的样本的普通相关系数平方的分布。

在推导循环序列相关系数 $\hat{\gamma}_1$ 分布的过程中,所用的重要技巧是对循环矩阵复数域的求行列式值或酉阵对角化分解,而序列相关系数 γ_1 却不能由循环矩阵表示,因而不可能用此法求其分布。有关循环序列相关系数分布的进一步讨论可从两方面展开,首先是非循环情形,即对序列相关系数的讨论,这方面的研究很多,文献资料也很丰富。但这已超出本条目的内容。其次,是在非标准状态下,循环序列相关系数及其联合分布的讨论。几十年来,有关这方面的讨论很少,零星的几篇文献讨论的也比较肤浅,结果并不理想。特别是近些年来循环序列相关系数似乎要被人们遗忘。这也许是新的热门的统计学课题不断涌出,吸引了人们的注意,另一方面,是因为用现有的方法对循环序列相关系数分布研究很繁琐,是否用新的数学工具进行研究是今后的新课题。

参考文献

- 1 Anderson R L. Ann Math Statistics, 1942, 13: 1~13
- 2 Dixon W J. Ann Math Stat, 1944, 15: 119
- 3 Durbin J, et al. Testing for Serial Correlation in the least Squares regression I. I. Biometrika, 1950, 37: 4~9; 1951, 38: 159; 1971, 58, (1)
- 4 Watson G S, et al. Ann Math Stat, 1951, 22: 46
- 5 Watson G S. On the Joint distribution of Circular Serial correlation coefficients. Biometrika, 1956, 43: 161
- 6 Vif Grenander, et al. Statistical Analysis of Stationary Time Series. John & Sons, 1957
- 7 Kendal M. The Advanced Theory of Statistics, 3. Butler & Tamner Ltd, 3
- 8 朱世斌. 河南师范大学学报, 1988, 4: 17~25

(河南师范大学朱世斌撰)

影响评价与数据诊断 在统计学的研究中,为了研究某个问题,常常去收集与该问题有关的数据,然后假定一个适当的模型,去分析这些数据,进行统计推断,进而做出有关结论。这里有两方面的问题,一方面,任何模型都是对客观复杂过程的一种近似描述,它不可避免地要包含某些假定,甚至模型本身也是一种假定,那么自然要问模型本身是否真的近似反映了实际问题?它与数据中的绝大多数数据是否一致?另一方面,如果模型正

确,那么在实际收集数据过程中,由于疏忽或失误常出现一些错误数据,这些错误数据的存在是否会严重干扰所作的统计结论?如果是,怎么诊断出来?怎么评价这种干扰的程度?这些问题都是在用统计方法解决实际问题时必须做出回答的。

影响评价与数据诊断正是因回答这些问题而发展起来的一种统计方法。这种方法是通过两种扰动方式:一种是剔除数据,另一种是对数据的微小扰动,研究某一关心的目标在扰动前后的变化,进而找出离群值或异常值点(outlier),高杠杆点(high leverage points)和强影响点(influential points),正是通过诊断,可以发现数据之间更精确的结构,从而对模型进行改进。这无疑会提高统计推断的准确性。

影响评价与数据诊断研究的比较成熟的成果是对线性回归模型中相关数据的诊断以及数据对目标的影响,这方面的内容形成回归诊断的内容。最早,人们发现回归分析中的残差包含了许多模型假设与数据的信息,因此残差成为回归诊断最基本也是最重要的诊断统计量。常用的是内(外) t 化残差,通过它可以诊断数据中的离群值。Anscombe和Tukey(1963)、Ellenberg(1973)、David(1981)等都研究了这种类型的残差。由于残差总是与线性回归的投影阵也称帽子阵相联系,所以帽子阵在残差分析中占有重要地位。Hoaglin和Welsch(1978)指出通过它可以诊断出设计空间的高杠杆点。也可以看成是设计空间的离群值点。

回归诊断的另一重要内容是影响分析。在正常情况下,数据中的每一组数据对统计推断的影响应该相差不多。如果某个数据影响突出,那么包含这组数据的模型和不包含这组数据的模型所作出的统计推断就会相差很大。我们称这组数据为强影响点。找出合适的统计度量影响,并给出标准,是影响分析的主要任务。

最初的影响分析,主要考虑剔除数据对回归估计以及预报方面的影响。文献中提出的度量影响的量测有3类:一类是距离型量测。它们是建立在Hampel(1974)的影响函数基础上的,又可统一为Cook的距离函数,以Cook距离(1977)和Welsch与Kuh(1980)的W-K统计量为代表。另一类是体积型量测。主要有Andrews-Pregibon(1978)统计量、协方差比统计量以及Cook和Weisberg(1980)的置信域的体积比等。再一类是Bayes型量测。主要由Johnson(1979)做出。后来Cook(1986)从对数据的微小扰动着手,考虑扰动前后似然函数的变化,利用微分几何中的曲率研究数据及模型的局部影响。这一方法有其广泛的适用性,得到了许多统计学家的重视。

在考虑实际问题时,如果实际数据的许多点都与既定模型有很大的偏差,则常常是保留模型,通过寻求对数据的一个适当的变换,使变换后的数据能很好地拟合模型,然后再进行有关统计推断。用得最广泛的一类变换是Box-Cox变换。该变换包含一个变换参数 λ ,它可通过数据估计出来。于是,它不可避免地受到数据中离群值点和强影响点的影响。因此诊断出数据对变换的影响,是处理数据不可缺少的部分。常用的数据变换的诊断方法有Atkinson(1973, 1986)的Atkinson诊断法, Cook和Wang(1983)的似然距离法,还有Atkinson(1985)的图诊断法,进一步还可考虑数据变换的局部影响。

除了用诊断统计量进行诊断外,在回归诊断中还发展许多图示法。常用的有Anscombe(1973)的标准残差图, Mosteller等(1977)的加变量点图, Ezekiel(1924)的偏残差图, Atkinson(1982)的具包络的正态图等。

过去大多数影响评价和数据诊断主要是建立在正态线性模型基础上。现在影响评价和数据诊断已经推广到许多领域。在多元分析中, Campbell(1978)研究了判别分析中的影响函数, Radhakrishnan(1981)研究了一般参数估计的影响问题, Critchley(1985)研究了主成分分析中的影响问题, Pregibon(1981)讨论了Logistic回归的影响评价问题, Mc Cullagh等(1983)研究了广义线性模型的影响问题。Pena和Martin(1986)等对时间序列中的影响问题给出了一系列的研究成果。对非线性模型中的影响问

题也有一些研究。

影响评价与数据诊断,从最初的离群值诊断,发展到影响评价,从正态线性模型到广义线性模型,时间序列模型以及多元分析模型,其研究范围和深度不断扩大。但至今人们还没有建立影响评价和数据诊断的稳固基础。虽然研究范围扩大了,但除了正态线性模型的结果比较丰富外,其它领域虽有研究,但还不够深入、全面。Bayes 统计是当今统计学的重要流派,其研究已深入到各个领域。同样,研究影响评价和数据诊断的 Bayes 方法也是一个很有前途的方面。图示法一直是统计学家感兴趣的领域。对于高维数据如何用图示法给出直观诊断,仍然是大家追求的目标。统计软件中包含的诊断和影响的方法很少,如何使影响评价与数据诊断完全成为软件还有待研究。稳健方法和诊断方法都是人们关心的问题,只是研究的着眼点不同,那么如何使两种方法结合起来,还有待研究。总之,影响评价和数据诊断今后仍然是统计学的一个十分活跃的领域。

参考文献

- 1 Belsley D A, et al. Regression Diagnostics, Identifying Influential Data and Source of collinearity. New York: Wiley, 1980
- 2 Pregibon D. Ann Statist, 1981, 9: 705~724
- 3 Cook R D, et al. Residuals and Influential in Regression. New York and London: Chapman and Hall, 1982
- 4 Atkinson A C. Transformations and Regression, Oxford Univ Press, 1985
- 5 Chatlerjee S, et al. Statistical Science, 1986, 1: 379~416
- 6 Cook R D. J Roy Statist Soc Ser B, 1986, 48: 133~169
- 7 戴伯新. 数学的实践与认识, 1988, 2: 61~71
- 8 韦博成, 等. 统计诊断引论. 南京: 东南大学出版社, 1991

(南京理工大学戴伯新撰; 项可风审)

共线性的诊断与评价

文献中对共线性一直没有严格的定义。术语 Collinearity, multicollinearity, ill conditioning 都用来表示共线性。从字面上,两个变量共线性是指两个变量的数据向量落在一条直线上,即在 n -维子空间上。一般来说, k 个变量共线性,是指如果这 k 个变量的数据向量落在维数小于 k 的子空间上,即其中一个向量可以用其它几个向量线性表示。实际上,这种精确的共线性是很少出现的,共线性只是近似意义上的。

在线性回归模型 $Y = X\beta + \epsilon$, $E(\epsilon) = 0$, $Var(\epsilon) = \sigma^2 I$ 中,共线性是指设计 X 矩阵中列向量与列向量之间是否存在共线性。

所以从本质上说回归模型中的共线性是设计矩阵 X 的数据特征,而不是回归模型的统计特征。但在线性回归的许多应用领域中,数据常常是非试验数据,这时数据之间常常出现共线性,那么对于建立在该数据基础上的线性回归模型的统计方面是否会出现问题?答案是肯定的。共线性虽不是统计问题,但对二乘估计及其它估计有很重要的影响,共线性的诊断与评价就是要对数据矩阵 X 中共线性的存在提出诊断方法,研究共线性存在时,对回归估计等的影响程度进行评价,并提出相应治疗措施。

关于对数据矩阵 X 中共线性的诊断,人们提出了一些方法,最直接的就是直观诊断法。直观上,实际工作者认为变量之间应呈现某种规律,如回归系数的符号;另外有些变量实际工作者对其重要程度有一个认识。如果回归结果跟想象的不符,则人们常认为数据矩阵中共线性存在,或用共线性来解释这种不符合。但这种不符合的出现并不是共线性的充分必要条件。下面介绍几种诊断方法:

相关阵 R 的检验法。当 X 是中心标准化时, $R = X^T X$,当某两个变量之间的相关系数很大时,确实表明这两个变量之间存在共线性。但可能有3个或更多个变量之间存在共线性,而没有两个变量之间存在高相关,此时,用 R 就不能诊断出来。另外相

关阵 R 不能揭示在变量之间存在几个近似共线性关系。

方差膨胀因子诊断法。当 X 是中心标准化长度为1的数据矩阵时有 $R^{-1} = (X^T X)^{-1}$, R^{-1} 的对角元 r_{ii} 称为方差膨胀因子 VIF_i [Chatterjee and Price (1977)]。它与 X_i 的多重相关系数 R_i 的关系是 $VIF_i = 1/(1-R_i^2)$ 。式中 VIF_i 称为方差膨胀因子是因为第 i 个回归系数的方差 $\sigma_{\hat{\beta}_i}^2 = \sigma^2 VIF_i$,可见 VIF_i 很高,意味着 $R_i \rightarrow 1$,即出现共线性,引起第 i 个回归系数的方差变大。但这里出现与用 R 诊断同样的问题。另外对 VIF_i 的高低无法给出一个有意义的界限。

Farrar 与 Glauber (1967) 技术。设 Z 是来自 p 维正态分布的 n 个样本,且 X 是中心标准化的,则 $R = Z^T Z$ 。当 Z 的列完全共线性时, $\det R = 0$,当 X 的列正交时, $\det R = 1$ 。从而可用 $\det R$ 去检验 Z 中的列偏离正交或共线性的程度。Farrar 和 Glauber 提出用统计量 $x^2 = -(n-1 - (2p+5)/6) \ln \det R$, 这里 $x^2 \sim x^2(p(p-1)/2)$, 去检验 $H_0: \det R = 1 \rightarrow H_1: \det R \neq 1$ 。如显著,认为有共线性。进一步,他们还提出用偏相关系数 $r_{ij} = -r_{ij} / \sqrt{r_{ii} \cdot r_{jj}}$ 去判定共线性的类型。该方法同样存在许多问题。

特征法诊断。目前普遍采用矩阵 $X^T X$ 或相关阵 R 的特征根诊断共线性的存在。Kendall (1975) 和 Silevy (1969) 建议如果 $X^T X$ 有很小的特征根存在,说明共线性存在。但对“小”,没有明确的界限。

条件数诊断。在数值分析中,广泛采用条件数作为诊断量测。方阵 $X^T X$ 的条件数定义为 $k = \lambda_1 / \lambda_p$, 其中 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p > 0$ 为 $X^T X$ 的特征根。一般认为 $k \geq 100$ 存在较强共线性, $k > 1000$ 存在严重共线性。但条件数不能告诉我们有几个共线性关系以及每个共线性关系中包含哪几个变量。

回归系数方差分解比联合条件指标诊断法。这是目前发展得比较好的一种方法。该方法由 Belsley 等在 1980 年提出的。设 X 的列标准化。如模型有常数项,则 X 包含1。对任意矩阵 $X_{n \times p}$ 可分解成 $X = UDV^T$, 其中 $U_{n \times p}$, $V_{p \times p}$, $D_{p \times p}$, 且 $U^T U = V^T V = 1$, $D = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$, $\mu_i \geq 0$, $i = 1, 2, \dots, p$, μ_i 称为 X 的奇异值。则 $X^T X = VD^2 V^T$, V 是对角化 $Z^T Z$ 的特征向量。 μ_i^2 是 $X^T X$ 的特征根, $i = 1, 2, \dots, p$ 。从计算角度,矩阵 Z 的奇异值分解的算法要比算 $X^T X$ 的特征系统数值稳定性好,尤其在 X 是病态时更是如此,人们发现, X 列中的近似线性关系对应着有较小的奇异值。依据条件数的定义, $k(x) = \mu_{\max} / \mu_{\min} \geq 1$, 其中 μ_{\max} , μ_{\min} 为 Z 的非零最大和最小奇异值,它反映病态条件的程度。于是定义 $\eta_k = \mu_{\max} / \mu_k$, $k = 1, 2, \dots, p$, 为矩阵 Z 的第 k 个条件指标。如果出现高条件指标,就认为 Z 列中有近似线性依赖。大量的模拟研究表明,如果共线性很弱,条件指标小于10,共线性很强,条件指标在10到30之间,共线性很严重,条件指标在30以上乃至100以上。由此有 n 个高条件指标,就有 n 个共线性关系。

进一步,通过回归系数 $b = (X^T X)^{-1} X^T Y$ 的方差 $Var(b) = \sigma^2 (X^T X)^{-1} = \sigma^2 V D^{-2} V^T$, 进行分解有 $Var(b_k) = \sigma^2 \sum_{j=1}^p \frac{V_{kj}^2}{\mu_j^2}$ 可见 $Var(b_k)$ 分解成 p 项和,每项只与唯一的一个奇异值对应。令 $\Phi_{kj} = V_{kj}^2 / \mu_j^2$, $\Phi_k = \sum_{j=1}^p \Phi_{kj}$, 则定义第 k 、第 j 个方差分解比为 $\pi_{jk} = \Phi_{kj} / \Phi_k$, $k, j = 1, 2, \dots, p$, 从而存在 n 个条件指标诊断为高条件指标,就有 n 个共线性关系。在与高条件指标相应的方差分解比中,有 n 个回归系数的方差分解比大(超过0.5),就认为有 n 个变量包含在共线性关系中,并且这些方差分解比的大小提供了对应的回归估计受共线性影响的程度。

诊断出线性回归模型中共线性存在以后,必须消除或设法减弱共线性,以便提高最小二乘估计的精度,提高预测的准确性。这种补救的方法一是引进新数据,但此时新数据可能成为强影响点;另一种是利用 Bayes 技术,通过对回归系数 β 引进一些随机约束来改进估计;还有一种是用有偏估计如岭估计方法,通过引进岭参数,增强二乘估计,主成分估计等的稳定性。

参考文献

- 1 Chatterjee S, et al. Regression Analysis by Example. New York, John Wiley and Sons
- 2 Kendall M G. A course in Multivariate Analysis. Griffin, London
- 3 Farrar D E, et al. Review of Economics and statistics, 1967, 49:92~107
- 4 Silevy S D. J Roy Statist. Soc, Ser B, 1969, 31:539~552
- 5 Golub G H, et al. Numerische Mathematik, 1970, 14, 403~420
- 6 Kumar T K. The Problem of Multicollinearity; A survey, Abt Associates, Inc, Cambridge, Mass, 1975
- 7 Belsley D A, et al, Regression Diagnostics, New York, John Wiley and Sons, 1980, 85~261
- 8 戴伯新. 数学的实践与认识, 1989, 453~61

(南京理工大学戴伯新撰;项可风审)

逐步 Fisher 判别方法 stepwise Fisher's discriminating method

判别分析是多元分析中应用性较强的一个分支。它根据研究对象 y 被分为 k 个总体(类别)时,可能与 m 个因子 x_1, x_2, \dots, x_m 有关,从每个总体 G_α 中抽取 n_α 个样品数据 $x\{i\}, x\{j\}, \dots, x\{i_2\}$ ($\alpha=1, 2, \dots, k; n_1 + \dots + n_k = n$)。

依一定的判别准则建立判别模型。比如,当使用 Fisher 判别准则建立线性判别函数

$$y = \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m \quad (2)$$

后,就可以由式(2)对任一样品 $x(i) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})'$ 的属类作出预测。例如,根据 n_1 个正常人及 n_2 个冠心病人都同样检查了 m 个因子的数据,依判别准则得出模型(2)后,就可以对某个也做了同样 m 个因子(症状)数据的人作出是否得了冠心病的诊断,又如可以利用历年的气象因子的数据资料建立的判别模型来预测明年某地的雨量是偏多、偏少、或正常、等等。

怎样由已知的 n 个样品数据(1),按一定的判别准则求出 β_j ($j=1, 2, \dots, m$) 的估计 $\hat{\beta}_j$ 而建立判别效果好的判别式?这是判别分析的核心问题。目前常用的方法有 Bayes 准则、Fisher 准则、距离判别和非参数方法等,无论采用哪种准则或方法建立的判别模型对任一样品作出预测推断时,都有可能产生错判。根据所用方法建立的判别准则,都相应地有一套计算错判概率的理论方法。为了使得建立的判别模型有实用价值,不管使用怎样的数学错判原则,都必须保证原样品的回代正确率 η 愈大愈好。从实用的要求而言,若 $\eta < 80\%$,则模型的外延预测能力是比较差的;若 $\eta > 90\%$,则外延预测的错判将可能大大地减少。

实际工作者往往知道 y 与某些因子有关。因此,选择判别能力强的因子变量 x_j ($j=1, 2, \dots, m$) 建立判别模型是判别分析中最重要的问题。如果 G_α ($\alpha=1, 2, \dots, k$) 遵从正态分布,利用 Bayes 准则所建立的逐步判别分析方法是 60 年代中期以来国内外使用最为普遍的计算程序。该方法筛选因子变量的依据是 Wilks 统计量,按此原则建立的判别模型有时达不到使样本回代正确率最高这一要求。1990 年谭良也用判别符合率的观点讨论了 Bayes 准则下的判别分析方法的因子筛选问题。当 G_α 的分布任意时,至今尚无提供较好的选择因子的方法。比如关于距离判别方法的筛选因子问题,张尧庭、方开泰曾提出利用已选的 r 个因子的总体分辨率(其中 $\bar{x}^{(i)}$ 为第 i 个总体样本均值向量; $V^{(i)}$ 为样本协方差

阵)

$$H^{(r)} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\bar{x}^{(i)} - \bar{x}^{(j)})' V^{(i)-1} (\bar{x}^{(i)} - \bar{x}^{(j)}) \quad (3)$$

和预先选定的 H_0 , 采用统计量

$$H_j = (n - (r+1) - 1) \cdot \frac{E_{(r+1)} - E_{(r)}}{E_{(r)}} \quad j \in (m) \cap j \in (r) \quad (4)$$

筛选因子。当 $\max H_j \triangleq H_{i_j} > H_0$ 时,则选入因子 x_{i_j} , 而剔除因子的准则也类似式(4)的统计量。但这里存在 H_0 的选择标准及式(4)的确定问题。因为直到现在 H_j 的分布是未知的,所以实际应用中尚缺乏理论根据。对于 Fisher 判别方法,至今尚未提出怎样筛选因子。

为改进 Fisher 判别方法没有筛选因子功能的缺点,本条目提供一种直观的筛选因子的方法。其筛选因子的标准就是前面提过的样品回代判断正确率。具体计算步骤如下:

设具有 m 个因子的 n_α 个样品 $x\{i\}, x\{j\}, \dots, x\{i_2\}$ 取自均值向量为 $\mu^{(\alpha)}$, 协方差阵为 $V^{(\alpha)}$ 的总体 G_α ($\alpha=1, 2, \dots, k; n_1 + \dots + n_k = n$)。

根据方差分析的原理,对组内离差阵

$$E = \sum_{\alpha=1}^k \sum_{i=1}^{n_\alpha} (x\{i\} - \bar{x}^{(\alpha)})(x\{i\} - \bar{x}^{(\alpha)})' \quad (5)$$

进行分解

$$E = LL' \quad (6)$$

并由组间离差阵

$$B = \sum_{\alpha=1}^k n_\alpha (\bar{x}^{(\alpha)} - \bar{x})(\bar{x}^{(\alpha)} - \bar{x})' \quad (7)$$

与 L 所形成的特征方程

$$|L^{-1}BL'^{-1} - \lambda I| = 0 \quad (8)$$

之后,按下述逐步筛选因子的具体步骤建立 Fisher 判别式(其中 \bar{x} 表示样本的均值向量, \bar{x}^* 表示总体 G_α 的样本均值向量, $\alpha=1, 2, \dots, k$)。

1. 由式(8)计算各因子的最大特征值 $\lambda_j^{(1)}$ ($j=1, 2, \dots, m$)。

① 求出对应于 $\lambda_j^{(1)}$ 的特征向量 $a_j^{(1)}$, 则对任意的样品 x 所建立的判别式为:

$$a_j^{(1)'} x_j^{(1)'} L^{-1} x \quad (9)$$

② 利用式(9)回代计算各样品的对应值 \hat{y}_i ($i=1, 2, \dots, n$)。从而在求出各类的平均值 $\bar{y}^{(\alpha)}$ 后,就可确定出判别任一样品 x 的鉴别临界值 \bar{y}_c ($\alpha=1, 2, \dots, k; c=1, 2, \dots, k-1$)。最后可以依各样品的数据 y_i 判别它的属类与原分类相符合的正确数 $n_j^{(1)}$ 。

③ 令 $n_{i_1}^{(1)} = \max_{j \in (m)} n_j^{(1)}$ (10)

则第一个吸收的因子为 x_{i_1} , 记为 $(\&) = \{i_1\}$ 。其中 $(\&)$ 既表示入选因子的下标集,也表示吸收因子的个数,如果有 $n_{i_1}^{(1)} = n_{i_2}^{(1)}$, 且 $i_1 \neq i_2$ 及 $\lambda_{i_1}^{(1)} > \lambda_{i_2}^{(1)}$, 则吸收因子 $x_{i_1} = x_{i_2}$ 。

2. 固定因子 x_{i_1} , 结合其余 $m-1$ 个因子的每一个,依式(8)

计算 $\lambda_j^{(2)}$ ($j \in (m) \cap j \in (\&)$), 然后重复使用 1. 中的①—③步骤, 求出

$$n_{i_2}^{(2)} = \max_{j \in (m)} n_j^{(2)} \quad (11)$$

如果 $n_{i_2}^{(2)} > n_{i_1}^{(1)}$, 则继续吸收第 2 个因子 x_{i_2} (否则挑选因子的步骤结束)。此时 $(\&) = \{i_1, i_2\}$

从下一步起,每吸收一个新的因子,都要考虑能否剔除其它已吸收的因子。计算步骤与上面叙述的类似。一直到不能剔除,也不能吸收新因子为止。

如果模型(2)中的因子有些是质的数据,那么对质的因子施行数量化(也可直接由所给的等级按自然数赋值)后仍然适用。因此,有关数量化模型同样可用上述方法逐步筛选因子,从而使本方法的应用范围更为广泛。

上述介绍的逐步筛选因子的思想方法同样适用于距离判别方法。它以回代正确率这一标准及类似的计算步骤(1)、(2)替代

式(3)、(4),就可得到比较自然的逐步距离判别方法,而且 G_n 的分布可以是任意的。

一般情况下,由于 Fisher 判别方法在回代计算中要比距离判别方法简单得多,所以在判别效果相差无几的情况下,使用 Fisher 判别方法会更方便。

从给定的 m 个因子寻找回代正确率高的,由 $k(\leq m)$ 个因子组成的判别模型,当 m 较大时需要计算 $2^m - 1$ 种组合因子的判别模型,这样做计算量是很大的。本条目提供的方法不但计算量小,而且直观,易于实现。特别是在实用上能达到原样本的回代正确率的要求即可选用。从而填补了这方面的研究空白。由于判别分析有着广泛的应用,相信今后将会有更好的筛选因子的计算方法出现。

参考文献

- 1 Rao C R. Linear Statistical Inference and Its Applications. New York; John Wiley, 1971
- 2 科学院计算中心. 概率统计计算. 北京:科学出版社,1979
- 3 董文泉,等. 数量化方法及其应用. 长春:吉林人民出版社,1981. 9
- 4 张尧庭,方开泰. 多元统计分析引论. 北京:科学出版社,1983
- 5 郭福星. 逐步 Fisher 判别方法. 数理统计与应用概率,1987, 12
- 6 谭良. 数学的认识与实践,1987,1
- 7 郭福星. 多元统计分析. 福州:福建科技出版社,1990. 9
- 8 谭良. 数学的认识与实践,1991,1
- 9 潘懋. 数理统计与管理,1991,1

(福州大学郭福星教授撰)

非参数密度估计 在非参数统计模型中,假定总体分布是完全未知,即不能通过有限个参数加以界定,而且分布的泛函形式也是未知,通常可用分布函数或密度来描述其分布。但当样本为多维时,更方便地是使用密度函数。无论从统计模型的设定、解释或是统计推断,都同估计未知分布密度有关。

密度估计的非参数方法的重要进展,始于 Rosenblatt(1956)的工作,而 Parzen(1962)的工作则将一项重要的估计方法即核方法系统化。另一项值得一提的工作,则是 Loftsgarden 和 Quesenberry(1965)完成的。他们提出了密度估计的另一种方法,即最近邻估计法,然而对最近邻估计的系统研究则是 Wagner(1973),Devroye 和 Wagner(1977)完成的。至此已形成非参数密度估计的两个主要方法。

Parzen 的核估计是:假设 Z_1, \dots, Z_n 是一组来自未知密度函数 $f(x)$ 的 ($d \geq 1$) 维样本。设定一个定义在 R^d 上核函数 $K(\cdot)$ [通常假定 $K(\cdot)$ 也是密度,例如正态密度等] 及一串常数 $h_n > 0$ 。定义基于 Z_1, \dots, Z_n 的以 $K(\cdot)$ 为核的 $f(x)$ 的估计为

$$f_{n1}(x) = (nh_n^d)^{-1} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-Z_i}{h_n}\right)$$

并称 h_n 为窗宽,它是核估计的主要光滑参数。随后为了理论分析的方便,也有作者将核 K 的限制放宽,不要求 K 非负。

最近邻估计则是基于直观观察:在样本 Z_1, \dots, Z_n 中,对估计函数值 $f(x)$ 来说,其作用最大的是“最接近” x 的那些样本,具体来说,对给定正整数 $k = kn(\leq n)$,令 $a_n(x)$ 为中心在 x 的 R^d 中的球的半径,使该球含 Z_1, \dots, Z_n 中的 k_n 个样本点,记此球的体积为 $S_n(x)$,则定义 $f(x)$ 的最近邻估计为

$$f_{n2}(x) = k_n/nS_n(x)$$

在这段时间,也有人考虑这两种方法的结合,即随机窗宽核估计,见 Moore 和 Yackel(1977)的工作。

到现在为止,文献中出现的非参数密度估计的方法已很多,较为系统的总结可见 P. B. Rao(1983)的专著。其主要成果如下,(1)估计的相合性。Parzen 在他的著名工作中得到如下结果,对核 K 及窗宽的适当限制下,估计量是逐点均方相合及一致相合

的,即 $\lim_n E[f_{n1}(x) - f(x)]^2 = 0$ 及 $\sup_x |f_{n1}(x) - f(x)| \xrightarrow{P} 0$ 。而 Devroye(1980)则在很一般条件下,得到估计量的一致强相合性

(即 $\sup_x |f_{n1}(x) - f(x)| \rightarrow 0, a.s.$)。对于最近邻估计,Devroye 和 Wagner(1977)在很弱的假定下,证明了一致强相合性。(2)收敛速度。Schuster(1976)证明,对导数有界的密度族,核估计有强一致收敛速度 $(n^{-\frac{1}{4}+\epsilon})$ 。陈希孺(1983)则将此结果改进为 $O(n^{-\frac{1}{3}} \sqrt{\log n})$,并指出其主要部分的指数 $\frac{1}{3}$ 已不能再改进。对于最近邻估计,陈希孺(1981)证明,对 r 阶导数存在的密度族,逐点收敛速度为 $O(n^{-\frac{r}{2r+1}} \cdot \sqrt{\log n})$,而达不到 $O(n^{-\frac{r}{2r+1}})$;陈希孺(1983)还对满足 Lipschitz 条件的密度族,证明了其一致收敛速度为 $O(n^{-\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{\log n})$ 。(3)一致相合的必要条件。这是 Schuster(1969)首先提出的一个问题,即对核 K 及窗宽满足一定条件,由此构造的核估计若一致收敛于某个函数 g ,问 g 是否必为总体密度,且 g 是否必须一致连续? Schuster 在对 K 及 h_n 的一系列假定下,得到了肯定的回答。陈希孺、成平先后对之作作了彻底改进。关于最近邻估计相合的必要条件,其问题的提法同前。一维(即 $d=1$)的情形是由陈希孺、柴根象得到肯定的回答。(4) L_1 模相合性。 L_1 模,即 $\int |f_n(x) - f(x)| dx$,其中 f_n 或为 f_{n1} 或为 f_{n2} ,也可能是任一别的密度估计。它是估计偏差的更为自然的一个整体测度。其相合性研究对模式识别、判别分析均有重要应用。Devroye(1983)在很为一般假定下证明 L_1 模相合与 L_1 模强相合、均方相合等结果,且给出相合的充要条件。

以上这些成果全在大样本理论方面。事实上由于非参数模型的特点,不可能有太多的深入的小样本结果。关于后者,在文献中主要是涉及无偏密度估计的存在性。B. P. Rao 在其专著中对此也有提及。此外,对于大样本方面的成果即使从面上也有许多重要成果未在此提及的,例如密度导数的估计,陈桂景(1984)有系统的成果。

近几年,密度估计的文章仍在文献中不时出现。主要是:

(1) L_r 模及平均 L_r 模相合性。其定义分别是 $m_r(f_n) = \int |f_n(x) - f(x)|^r dx$ 及 $M_r(f_n) = E(m_r(f_n))$, $r \geq 1$, f_n 是任一密度估计。考虑 $\lim m_r(f_n) = 0, a.s.$ 或 $\lim M_r(f_n) = 0$ 成立的充要条件。这是对 Devroye(1983)工作的深化。当 f_n 为核估计时,白志东和赵林城(1987)证明,如 K 为密度,则充要条件是

$$\int f^r(x) dx < \infty, \int K^r(x) dx < \infty$$

以及

$$\liminf_n h_n^d = 0, \limsup_n h_n^d = \infty.$$

当 f_n 为最近邻估计时,必须限定 $r > 1$ 。赵林城(1986)在 $d=1$ 时,吴跃华(1989)对一般的 d ,证明:如果

$$\int f^r(x) dx < \infty, \liminf_n \frac{kn}{n} = 0, \limsup_n \frac{kn}{\log n} = \infty$$

则

$$\liminf_n m_r(f_{n2}) = 0, a.s.$$

(2) 研究随机直方图估计。这是对通常的直方图估计的一个本质改进。这种估计由 J. Chen 和 H. Rubin(1984)首先加以研究。他们证明,在一系列复杂条件下,这种估计是 L_1 相合的。陈希孺、赵林城(1987)则得到 L_1 强相合条件。而且,赵林城、Krishnaish、陈希孺(1987)很快又对此条件作了实质上改进,并建立了一般的 L_r 模相合性。(3) 研究密度估计的实施问题,其中特别是对核估计,研究有关参量的实际选择,引出了许多较为实用的方法。B. W. Silverman(1986)的专著“Density estimation for statistics and Data analysis”对此有较详细的介绍,并且也提出了尚未解决的问题。

除了以上提到的 3 个主要发展方向外,还有一些研究新的估

计方法的工作。另外密度估计的应用的研究也是一个重要趋势。

参考文献

- 1 Rosenblatt M. Ann Math Statist, 1956, 27: 832~837
- 2 Parzen E. Ann Math statist, 1962, 33: 1065~1076
- 3 Loftsgarden D O, et al. Ann Math Statist, 1965, 36: 1049~1051
- 4 Devroye L P. Ann statist, 1977, 5: 536~540
- 5 Schuster E F. Ann Math statist, 1969, 40: 1187~1195
- 6 陈希孺. 中国科学, 1982, 25: 455~467
- 7 陈希孺. 系统科学与数学, 1983, 3: 263~272
- 8 Rao B. P. Nonparametric functional estimation, Academic press, 1983
- 9 赵林城. 应用概率与统计, 1987, 3: 46~50

(同济大学柴根象教授撰)

概率度量空间 probabilistic metric spaces 简称PM-空间, 是用统计量描述两点间距离的一类新型空间, 它以包含通常的度量空间为特例。从某种意义上讲, 该空间更符合客观实际。PM-空间理论及应用的研究不仅对概率论和泛函分析的发展有重要的意义, 而且对随机算子理论和各类随机方程的研究也将产生重要的影响。

自1942年门格(K. Menger)提出PM-空间的概念以来, PM-空间理论的研究已取得许多重要的进展。1960年什伟泽(B. Schweizer)和斯科拉(A. Sklar)研究了PM-空间的拓扑结构, 证明了具连续三角范数 T 的门格PM-空间 (E, F, T) 是由邻域系 $\{U_\epsilon(\lambda), y \in E, \epsilon > 0, \lambda > 0\}$ 导出的拓扑的豪斯道夫(F. Hausdorff)空间, 并且给出按该拓扑收敛的等价性刻画。1962年塞士特诺夫(A. N. Serstnev)引入并研究了一类特殊的PM-空间—概率线性赋范空间(简称PN空间), 这类空间包含线性赋范空间为特例。1969年塞伍德(H. Sherwood)引入并研究了另一类特殊的PM-空间, 即E空间, 为随机算子理论的研究提供了新的框架。与此同时, 美国、南斯拉夫、罗马尼亚等国的一大批数学家进一步开展了对PM-空间理论的研究。1983年什伟泽和斯科拉在他们的专著中系统地总结了多年来关于PM-空间理论所取得的丰硕成果。

从1980年以来, 在游兆永的倡导下, 中国数学工作者在PM-空间理论及PM-空间中非线性分析的理论和应用方面取得了一批为人称道的结果, 对PM-空间理论的发展作出了贡献。

PM-空间具有独特的“度量”性质。为了研究这一性质, 1989年游兆永、朱林户引进了PM-空间与伪度量族生成空间等距同构的概念, 并给出等距同构的充要条件; 1990年方锦暄给出了门格PM-空间等距同构于某伪度量族生成空间的充要条件; 另外, 他还引入 T -伪度量族生成空间和 L -伪度量族生成空间的概念并给出门格PM-空间表现定理之一; 1985年张石生得到了PM-空间、门格PM-空间及PN-空间可度量的条件以及与之相关的度量函数的具体表达形式, 作为其应用还得到了门格PM-空间中有关紧性、可分性和分离性的一些重要结果。

PM-空间中集合的概率有界性是非常重要的概念。张石生和龚怀云在1988年给出判别PM-空间集合概率有界、概率一致有界、概率半有界和概率无界的充分必要条件, 为PM-空间中的线性算子理论及PM-空间中单值和集值映象不动点理论的研究提供了有力的工具。

PN-空间中的线性泛函理论是PM-空间理论的重要研究方向。1987年米夏勒克(J. Michalek)给出了PN-空间中的线性泛函概率范数的定义及某些基本性质, 证明线性泛函 f 关于概率范数有界的充分必要条件是 f 连续。另外, 他还引入广义门格PN-空间的概念, 证明了门格PN-空间的拓扑对偶可视为一特殊的广义门格PN-空间, 给出了拓扑对偶空间的拓扑是线性拓扑的充分必要条件, 还证明拓扑对偶空间的拓扑是可度量化

的。

1984年卡列娃(O. Kaleva)等引入的模糊度量空间包含门格PM-空间为特例, 而这一类模糊度量空间又可嵌入一类广义距离空间。基于这一思想, 于是在PM-空间中引入一种偏序, 把门格PM-空间嵌入广义距离空间, 并利用偏序的方法来研究PM-空间理论; 1985年曾文智引入概率2距离空间的概念, 并研究了这一空间的拓扑结构及其对不动点问题的应用; 1989年张石生、黄南京等引入一种偏序, 把门格概率2距离空间嵌入广义2距离空间, 借助广义2距离空间的一些性质得到了门格概率2距离空间的一些相应结果。随着PM-空间理论的深入和发展, 1990年林熙等引入并研究了随机内积空间, 取得一些有意义的结果。

在1991年国际数学会编辑的《数学主题分类》中“概率度量空间”已被列条, 这就标志“概率度量空间理论”已形成数学的独立分支。由于它是刚独立的新的数学分支, 急需人们去进一步研究和完善。例如下面所述的就是几个急待研究的问题: (1) 概率内积空间准确、有效、简洁的定义, 以及概率内积空间理论的研究。(2) 概率度量空间的几何理论及拓扑性质的进一步研究。(3) 概率度量空间上线性和非线性分析理论的研究。

参考文献

- 1 Schweizer B, et al. Probabilistic Metric Spaces, North-holland, 1983, 1~275
- 2 Kaleva O, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1984, 12: 215~229
- 3 Shih-sen Chang, The metrization of probabilistic metric spaces with applications, Univ u Novom Sadu, Zb. Rad Prirod. — Mat Fak Ser Mat, 1985, 25(1): 107~117
- 4 曾文智. 数学研究与评论, 1987, 7(2): 241~245
- 5 Michalek J. Linear functionals in SLM-spaces, Comment. Math Univ Carolinae, 1987, 28(1): 111~126
- 6 张石生. 应用数学和力学, 1988, 9(2): 117126; 9(3): 193~204
- 7 游兆永, 朱林户. 中国科学, 1989, A31(1): 19~24
- 8 Shih-sen Chang Nan-jing Huang, Math Japonica, 1989, 34(6): 885~900
- 9 方锦暄. 科学通报, 1990, 35(22): 1701~1203
- 10 林熙, 等. 科学通报, 1990, 35(22): 1707~1709

(四川大学张石生教授、黄南京副教授撰)

概率度量空间上的非线性分析 non-linear analysis on probabilistic metric spaces 简称PM-空间上的非线性分析, 是随机非线性分析这一新兴的边缘学科的重要组成部分。这一理论和应用的研究, 不仅丰富和发展了非线性分析理论, 而且为非线性随机算子理论和非线性随机方程的研究提供了新的理论基础。

PM-空间上的非线性分析理论及应用的研究, 始于20世纪70年代舍嘎(V. M. Sehgal)和巴鲁洽-雷德(A. T. Bharucha-Reid)关于PM-空间中非线性压缩映象不动点定理的研究。他们在三角范数 $T = \min$ 的条件下, 把熟知的巴拿赫(S. Banach)压缩映象原理推广到门格(K. Menger)-PM-空间。受这一工作的启发, 国内外的许多数学家, 比如, 海泽克(O. Hadzic)、伊斯特拉特斯库(V. I. Istratescu)、张石生和方锦暄等在不同的条件下, 对PM-空间中各种类型的压缩映象、非扩张映象和扩张映象不动点及重合点的存在性、唯一性以及迭代序列的收敛性等进行了系统的研究, 取得了许多重要的成果, 而且还把它们成功地应用于随机算子方程和随机非线性积分方程随机解的存在性问题的研究。

众所周知, 拓扑度理论和非线性算子理论是非线性分析的重要组成部分。但PM-空间上的拓扑度和非线性算子理论研究至今仍非常薄弱, 只是最近才出现了这方面的初步工作。1989年

张石生和陈玉清首先证明了门格概率赋范空间(简称为门格—PN—空间)中的连续紧映射可用有限维映射来逼近,从而利用有限维空间的布劳维(L. Brouwer)度建立了门格—PN—空间中连续紧映射的勒内—舒德(Leray—Schauder)度理论。作为这一结果的应用,得到了门格—PN—空间中非线性映射的一系列不动点定理,为非线性算子方程的求解提供了有力的工具。1990年张石生和陈玉清首次给出了门格—PN—空间中(强、极大)增生映射方程解的存在性,并讨论了具单值连续强增生映射方程解的存在性,并利用拓扑度的方法,得到了门格—PN—空间中多值增生映射方程解的存在性条件。

另外,阿特曼(M. Altman)在巴拿赫空间中建立的收缩理论,对研究巴拿赫空间中非线性算子方程解的存在性和唯一性问题起着重要的作用,而李(A. C. Lee)和丕节特(W. J. Padgett)建立的随机收缩理论,为进一步研究随机算子和随机方程开辟了新的道路。基于上述思想,最近张石生和曾文智等引入了概率收缩和概率收缩偶的概念,研究了非阿基米德(Archimedean)门格—PN—空间中具有概率收缩和概率收缩偶的单值算子方程(或方程组)的解(或公共解)的存在性,为PM—空间中非线性算子理论的研究,提供了一种有效的方法。

近来,一些学者在门格—PM—空间中引入门格—豪斯道夫(F. Hausdorff)度量的定义,给出了门格—PM—空间度量量化表示,讨论了门格—PM—空间中多值映射和相容映射的不动点的存在性。

卡里斯蒂(J. Caristi)定理和尔克兰德(I. Ekeland)变分原理是近代非线性分析的两个基本定理。1991年张石生和郭进利等利用偏序方法,在PM—空间中得到了这两个定理的推广形式,直接证明它们的等价性,而且在所得的PM—空间中的卡里斯蒂定理中取消了三角范数 $T = \min$ 及存在概率有界的迭代序列的条件,这样应用该定理时更加方便。另外,林熙等人对PM—空间中的随机算子理论也进行过研究。

PM—空间中的非线性分析理论正处于萌芽阶段,许多问题有待于进一步研究。如:(1)PN—空间或概率内积空间中的变分不等式和相补问题理论及应用的研究。(2)PM—空间中线性和非线性算子理论及应用的研究。(3)PM—空间中集值映射和非扩张映射理论及应用的研究。

参考文献

- 1 林熙. 科学通报, 1983, 28(4): 199~201
- 2 Shih—sen Chang. Scientia Sinica (Series A), 1983, 26(11): 1144~1155
- 3 Hadzic O. Novi Sad, 1984; 1~37
- 4 Shih—sen Chang. Acta Math. Sinica, 1985, 1(4): 366~377
- 5 方锦韬. 数学年刊, 1990, 11A(6): 707~711
- 6 张石生. 科学通报, 1990, 35(19): 1451~1454
- 7 龚怀云. 数学研究与评论, 1990, 10(2): 239~242
- 8 Shih—sen Chang, et al. Acta Math App 1991, 7(3): 217~228

(四川大学张石生教授、黄南京副教授撰)

回归分析 regression analysis 数理统计的一个重要分支。

在数量分析中往往会发现有些变量之间存在着某种不确定的关系,如果其中一些变量为可控变量而另一些变量作为它们的因变量对这种不确定关系的分析研究称为回归分析,通过回归分析可建立可控变量与因变量之间的数学表达式,从而进行预测和控制。

早在19世纪初,就有人利用最小二乘原理作了一些回归分析方面的工作,而“回归”一词则由英国F. Galton首先提出的,同时他还对父母的身高与子女的身高之间的关系进行了回归分析。

不确定关系中最简单的情況可归纳成由Gauss—Markov给出的线性回归模型。

模型形式为:若对随机变量 y 和变量 x_1, x_2, \dots, x_p 取得了几组观测测量(样本):

$$(y_i, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}), (i=1, 2, \dots, n)$$

且数据满足关系:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i, (i=1, 2, \dots, n)$$

其中诸 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ 相互独立,且均服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布。

模型中的 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ 为待估计参数,称为回归系数。求出了 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ 的估计值 $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$ 便可建立起回归方程:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \dots + \hat{\beta}_p x_p$$

模型也可表示成矩阵形式:

$$\begin{cases} Y = X \cdot \beta + \epsilon \\ \epsilon \sim N(0, \sigma^2 I) \end{cases}$$

其中: $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$; $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)^T$;

I 为 n 阶单位矩阵;

$$X = \begin{bmatrix} 1, & x_{11}, & x_{12}, & \dots, & x_{1p} \\ 1, & x_{21}, & x_{22}, & \dots, & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1, & x_{n1}, & x_{n2}, & \dots, & x_{np} \end{bmatrix}$$

模型中参数向量 β 的估计的古典方法是最小二乘估计(LS估计)。若记 β 的估计值为 $\hat{\beta}$,由最小二乘原理及微积分知识可建立起正规方程组:

$$(X^T X) \cdot \beta = X^T \cdot Y$$

当 $X^T X$ 非奇异时, β 的LS估计为:

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

β 的LS估计具有良好的性质:(1) $\hat{\beta}$ 是 β 的线性无偏估计。(2)对 y 与 x_1, \dots, x_p 可进行显著性假设检验。(3)可检验第 i 个因素 x_i 对 y 是否有显著影响。正因为这些性质,所以LS估计至今仍被不少统计工作者采用。

非线性情况一般都尽可能化为线性情况处理。多项式回归是最常用的非线性回归。对 p 元多项式回归只要令 $x_1 = x^1, \dots, x_p = x^p$,便可化为 p 元线性回归。正交多项式回归则是一种改进的多项式回归。

逐步回归是随电子计算机技术的发展而产生的一种回归方法,就是将变量逐一引入回归方程,先建立与 y 相关最密切的一元线性回归方程,然后再找第二个变量建立二元线性回归方程,……,每一步都要引入变量的显著性检验,仅当其显著时才引入,而每引入一个新变量后对前面已引进的老变量又要逐一检验,若发现某个变量变成不显著,就要将它剔除;重复这些步骤直到引入的变量均为显著而又没有新的变量可引入时,就结束挑选变量的工作而建立回归方程。

LS估计具有很多优良性质,但有时并不很理想。这主要是由两个原因引起的。其一是当 x_1, x_2, \dots, x_p 存在复共线性时(即 X 的列向量接近线性相关时),LS估计性能变坏;其二是LS估计受异常值影响很大。为了克服以上缺点,从20世纪60年代开始产生了一些新的参数估计法:

岭回归是由A. E. Horel在1962年提出,R. W. Plennard在1970年完善这种估计方法。岭回归的基本想法是以经过“中心化”、“标准化”处理的线性回归模型(这时 $\beta_0 = 0$),选择适当的 k 使 $\hat{\beta}(k) = (\hat{\beta}_1(k), \hat{\beta}_2(k), \dots, \hat{\beta}_p(k))^T = (X^T X + kI)^{-1} X^T Y$ 达到尽可能小的均方误差,以便消除复共线性的影响。因 k 的选择依赖于未知参数 β 和 σ^2 ,所以选择 k 有一定的困难。对 k 的选择法有岭迹法、方差扩大因子法等。必需指出的是岭回归不具有无偏性。主成份估计是W. F. Mally于1965年提出的一种回归估计法。其基本思想为:对原自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 通过一个线性变换产生一组新的自变量 Z_1, Z_2, \dots, Z_p ,然后把新自变量组中对试验变化不大的自变量并入模型的常数项中去(即以0为回归系数),这样便消除了 X 的复共线性。

稳健回归是为了克服估计值受异常观测值较大影响而提出的一类回归分析法。不少学者提出了多种稳健回归,其中Huber在1964年引入的M—估计较为常用。事实上随着 $|x|$ 的增加 x^2 迅速增加,为此用一个增加速度比 x^2 慢的函数 $\rho(x)$ 代替 x^2

以减少异常观测值对估计值的影响,这种想法就是 M-估计的出发点。

不依赖模型的分布类型的回归分析法称为非参数回归。权函数回归是非参数回归中较成熟的一种。这里的权函数是“距离”的函数(“距离”可以是广义的,不一定是欧氏距离),它反映了对样本值的不同重视程度。

下面给出权函数回归的一般方法:

记样本值为: $(y_1, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}) \triangleq (y_i, x_i) \quad (i=1, 2, \dots, n)$

$(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}) (i=1, 2, \dots, n)$ 为点 P_i 的坐标。

要求点 $Q = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \triangleq X$ 处 y 的预测值 \hat{y} 。

这里的“距离”就是指从 P_i 到 Q 之间的距离。由于离 Q 点越近的 P_i 对应的函数值 y_i 对 Q 点处 y 的值影越大,故 P_i 离 Q 越近权重应越大。当权函数 (W_i^*) 已确定,便可得回归函数 $E(y|x)$ 的估计值 $\hat{E}(y|x) = \hat{y} = \sum_{i=1}^n W_i^* \cdot y_i$ 。还需说明一点,权函数的确定除了要满足一定的数学条件外,还要考虑实际情况。而权函数与最小二乘估计的结合回归法,则是统计工作者比较乐意使用的方法。

样条函数、计算方法等数学学科在回归分析中的应用日益广泛必会促使新的回归分析法的产生;而对某些回归分析性质的进一步讨论、研究也是当前人们感兴趣的一类问题。随着人们对社会科学、自然科学中不确定数量关系研究的不断深入,电子计算机技术在回归分析的应用日益广泛,可以相信回归分析这一学科必会得到进一步的发展。

参考文献

- 1 中国科学院数学研究所数理统计组. 回归分析. 北京: 科学出版社, 1975
- 2 Seber G A F. Linear Regression Analysis. Wiley, 1977
- 3 苑诗松等. 回归分析及其试验设计. 上海: 华东师范大学出版社, 1981
- 4 陈希孺, 王松桂. 近代实用回归分析. 南宁: 广西人民出版社, 1984
- 5 方开泰, 全辉, 陈庆云. 实用回归分析. 北京: 科学出版社, 1988

(上海交通大学鲍祥霖讲师撰)

最优回归设计 optimal regression design

回归分析是解决实际问题的一种重要方法。回归方程性能的好坏取决于试验点的选择。随着科学技术的发展,从 20 世纪 50 年代末开始,人们研究如何从数理统计的意义上比较不同的试验设计和建立最优回归设计的问题。在最优回归设计领域中,美国 J. Kiefer 进行了开创性的工作, J. Kiefer 和 J. Wolfowitz 首先给出了倍受赞美的关于 G-最优性和 D-最优性的“等价定理”,为最优回归设计的理论发展奠定了基础。在以后的发展过程中,大致形成以 J. Kiefer 和 G. E. P. Box 为首的英、美学派和莫斯科大学教授 V. V. Fedorov 为首的前苏联学派。英、美学派的学者强调研制应用问题的方法,而前苏联学者着重研究最优回归设计的数学理论和应用问题的算法。

按数学模型的类型来划分,最优回归设计可分成关于参数的线性回归和非线性回归的最优设计。非线性回归最优设计,还处于理论探讨阶段,在实际中应用很少。线性回归模型的一般形式为

$$E(y|u, \theta, \tau) = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(u) \quad (1)$$

这里, y 是随机变量, u 是可控向量, $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)^T$ 是待估计的参数向量, τ 是未知的“不感兴趣”的参数, $f_i(u) (i=1, 2, \dots, k)$ 是给定的关于 u 的函数, E 表示期望算符,此外,不失一般性,还假设

$$\text{Var}(y|u, \theta, \tau) = r$$

问题是:要估计 θ 的线性函数,试验设计应如何,才能使这种估计在一定的意义下是最优的?

J. Kiefer 首先将实际应用的离散试验设计问题推广成连续测度设计问题,把试验区域 \mathcal{X} 上的一个试验设计看成是 \mathcal{X} 上的一个连续概率测度分布 ξ 。对于试验区域 \mathcal{X} 上给定的回归模型,令 $M(\xi)$ 表示试验设计 ξ 的信息矩阵,而最优回归设计的目标是:在所有的设计 ξ 中,找出使实泛函 $\Phi(M(\xi))$ 达最大的 ξ^* ,

$$\Phi(M(\xi^*)) = \max_{\xi} \Phi(M(\xi)) \quad (2)$$

这里, Φ 是由最优性准则确定的凹性实泛函。

根据实际问题,人们提出了各种各样的最优性准则,常用的有

(1) D-最优性 使设计的信息矩阵行列式达最大,

$$\det M(\xi^*) = \max_{\xi} \det M(\xi)$$

(2) D_A -最优性 设 A^T 是一个给定的秩为 $s (s \leq k)$ 的矩阵,使设计 ξ^* 满足

$$\det \{A^T [M(\xi^*)]^{-1} A\}^{-1} = \max_{\xi} \det \{A^T [M(\xi)]^{-1} A\}^{-1}$$

(3) D_s -最优性 是 D_A -最优性中 $A^T = (I, 0)$ 的特殊情况,这里, I_s 表示 s 阶单位阵。

(4) E-最优性 使设计 ξ^* 满足

$$\max_{C \in \{C^T, -I\}} C^T [M(\xi^*)]^{-1} C = \min_{\xi} \max_{C \in \{C^T, -I\}} C^T [M(\xi)]^{-1} C$$

(5) A-最优性 使设计 ξ^* 满足

$$t_r \{M(\xi^*)\}^{-1} = \min_{\xi} t_r \{M(\xi)\}^{-1}$$

这里, $t_r(\cdot)$ 表示迹(trace)运算。

(6) G-最优性 令 x 表示设计导出空间 H 内的一点,使设计 ξ^* 满足

$$\max_{x \in H} x^T \{M(\xi^*)\}^{-1} x = \min_{\xi} \max_{x \in H} x^T \{M(\xi)\}^{-1} x$$

J. Kiefer 和 S. D. Silvey 等利用非线性分析中的 Fréchet 导数为工具,建立了最优回归设计的理论体系,其主要结果可表述为下面的两个定理:

定理 1 令 \mathcal{X} 表示设计的信息矩阵的集合, $\Phi(M(\xi))$ 是定义在 \mathcal{X} 上的凹泛函,则设计 ξ^* 是 Φ -最优的充要条件是:对所有的设计测度 ξ , 都有

$$F_{\Phi} \{M(\xi^*), M(\xi)\} \leq 0, M(\xi) \in \mathcal{X}$$

这里, $F_{\Phi} \{M_1, M_2\}$ 表示关于泛函 Φ 的在 M_1 处沿 M_2 方向的 Fréchet 导数。

定理 2 设 Φ 是 \mathcal{X} 上的凹泛函,且在 $M(\xi^*)$ 处可微,则 ξ^* 是 Φ -最优设计的充要条件是

$$F_{\Phi} \{M(\xi^*), x x^T\} \leq 0, \text{对所有的 } x \in \mathcal{X}$$

对于信息矩阵是非奇异阵的情况,已得到判别某个设计是 Φ -最优的充分条件,而且对于大部分常用的最优性准则,此充分条件也是必要条件。但是,对于一般性的最优性准则,所得的充分条件是否也是必要条件,此问题有待解决。

对于实际的试验设计问题,为了得到 Φ -最优设计测度,需要给出特殊的算法。在计算技术迅速发展的今天,人们已转向利用计算机通过数值方法来构造 Φ -最优设计测度,求 Φ -最优设计测度的数值算法是从一个非退化的设计开始,通过叠代运算来得到渐近最优设计测度或最优设计测度。按其叠代步长来划分,主要有两种算法:每一步骤都采取最优步长的 Fedorov 算法(V-算法)与采取固定步长的 Wynn 算法(W-算法)。此外,适应于各种情况,还有很多其它的算法,例如,交换算法等。

从实用角度看,与连续测度设计相比,一个更为实际的最优回归设计问题是 Φ_n -最优设计问题:对于试验区域上指定的回归模型和预先指定的试验次数 n ,求试验次数为 n 并且按 Φ_n -最优准则来衡量是最优的试验计划 ξ_n^* 。对于 Φ_n -最优设计问题,连续最优设计的基本定理(定理 1 和定理 2)不再成立。构造适用于电子计算机来寻找 Φ_n -最优设计的算法,仍然是人们考虑的一个重要问题。

现在,最优回归设计中受到人们关注的一个问题是寻找兼顾多个最优准则的最优设计。兼顾某些指定的最优准则的最优设计,其充要条件已被得到。继续扩充这些研究成果,以及针对某些常用的回归模型具体地给出兼顾多个最优准则的最优设计,仍需继续研究。更一般地,人们提出所谓的“泛最优设计问题”:求设计 ξ ,它的信息矩阵 $M(\xi)$ 能使任意的凹性最优准则泛函达最大。关于“泛最优设计”的性质已有一些结果。但是,对于给定试验区域上的回归模型,如何判别“泛最优设计”是否存在,以及如果存在如何给出仍需要研究。

对于同时考虑定量因子和定性因子的情况,为减少试验次数,可采用“简化的定量因子和定性因子的直积模型”。针对这类模型,如何给出试验次数少而且性能优良的设计,是人们关注的一个热点。另一个研究热点将是(关于参数)非线性回归模型,如何给出某种最优意义下的最优设计。

参考文献

- 1 Fedorov V V. Theory of optimal experiments. New York: Academic Press, 1972
- 2 Silvey S D. Optimal design. London: Chapman and Hall, 1980
- 3 Steinberg D M. et al. Technometrics, 1984, m26: 71~130
- 4 Atkinson A C. International Statistical Review, 1988, 56 (2): 99~115
- 5 Dodge Y. et al. Optimal design and analysis of experiments. North-Holland, 1988

(东北大学关颖男教授撰)

混料试验设计 mixture experimental design

是安排混料试验和分析混料数据的数学理论和方法,合理地选择少量的试验点,通过不同的百分比试验得到指标与各成分比例之间的回归方程,从而得到最优配方。

混料试验设计的研究是联系开发性工作的应用基础研究,其研究成果具有很好经济效益和广泛的社会效益。在工业试验方面,已在润滑油、火药、汽油混合物、混凝土、聚合物塑料、合金、陶瓷、油漆、食品、制药、磨具磨料、混纺纤维和烧结矿等产品的研究研制中得到应用。在理论上,它的研究涉及到许多数学分支,例如,组合数学、代数拓扑学、N维几何学、泛函分析、突变理论等。它的研究也提出许多新的数学问题有待解决。

混料试验设计自20世纪60年代开始发展之际就是试验设计的一个重要分支。美国H. Scheffe于50年代末60年代初发表的一系列论文为混料试验设计的发展奠定了基础。由于混料试验设计具有明显的实际应用价值,所以它引起了许多数理统计学家和实际工作者的研究兴趣,发表了许多学术论文,其中以美国和原苏联学者的论文较多。1981年美国John Wiley and Sons出版公司出版的美国J. A. Cornell所著《Experiment with Mixtures》是世界上第1本关于混料试验设计的专著,书中较全面地论述了到出版时为止关于混料试验设计的研究成果。

假定用 y 表示试验指标,用 x_1, x_2, \dots, x_q 表示 q 分量系统中各分量所占的百分比。混料试验设计是要在混料约束条件

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \\ x_i \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (1)$$

的限制下合理地选择试验点,得到 y 关于 $x_i (i=1, 2, \dots, q)$ 的回归方程,使得计算简单、分析容易和回归方程精度好,便于推测最适宜的混料配方。由于混料约束条件(1)的限制,使得混料试验所采用的回归模型不同于一般常用的回归模型。混料试验设计中最基本、最常用的回归模型是Scheffe混料规范多项式和多重线性多项式。例如, q 分量二阶Scheffe混料规范多项式为

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

只有一次项和二阶交叉项,而没有零次项和平方项,这里, $E(\cdot)$ 表示期望算符,各个 β 表示待估参数。

混料变量 $x_i (i=1, 2, \dots, q)$ 的取值区域(1),在几何上可解释为 $(q-1)$ 维空间中的一个正规单纯形 S_{q-1} 。正规单纯形 S_{q-1} 的顶点代表单一成分的混料,棱上的点代表两种成分组成的混料,面上的点代表多于两种而少于 q 种成分组成的混料,而正规单纯形的内点则代表全部 q 种成分组成的混料。对于 $q-1$ 维正规单纯形 S_{q-1} 上的 q 分量 m 阶混料规范多项式模型,可以采用单纯形—格子设计;对于 $q-1$ 维正规单纯形 S_{q-1} 上的多重线性多项式模型,可以采用单纯形—重心设计。单纯形—格子(重心)设计具有良好的性质,它们是混料试验设计中最早出现的两类设计,也是最基本、最常用的两类设计,许多其它的设计是从这两类设计派生出来的。

探索正规单纯形因子空间 S_{q-1} 上的响应曲面的另一研究途径是:把受混料约束条件(1)限制的 q 个分量变换成数学独立的 $q-1$ 个变量,不是原封不动地采用 q 分量系统,而是研究数学独立的 $q-1$ 个变量系统下的响应曲面。之所以这样做,有两种原因:①数学独立变量系统的数学模型、设计方法及设计优良性等都为人们所熟知,有现成的结论可资利用。②数学独立变量系统的模型参数估计有很好的直观解释,易于被人们理解。有多种变换能够实现从 q 分量混料系统向数学独立的 $q-1$ 个变量系统的变换。这些变换在理论上都是等价的,它们之间的主要差别在于混料分量与所变换的变量之间的联系形式。

在一些混料问题中,由于物理、化学、经济及技术等方面的要求,或者由于以前研究所得的结论,对各个分量比例 x_1, x_2, \dots, x_q ,除了要满足混料约束条件(1)之外,还要对某些或者所有的分量附加另外的限制。其中最常见的是,对每个分量 x_i 都要附加以上、下界的限制

$$0 \leq a_i \leq x_i \leq b_i \leq 1 \quad (i=1, 2, \dots, q) \quad (3)$$

这里, a_i 和 $b_i (i=1, 2, \dots, q)$ 都是由具体问题决定的常数。关于有上、下界约束的混料问题,可以采用极端顶点设计、XVERT算法设计、剖分设计等方法来解决。

由于混料问题的约束条件(1)的限制,混料数据的分析方法也不同于一般回归分析中常用的数据分析法,而是使用混料数据分析法。例如,为通过回归方程预测指标的极大(小)值,我们不能简单地通过求回归方程的一阶导数且令其为零来得到,而要求条件极值。为了适应不同的混料问题,人们也给了许多不同于多项式的其它类型的混料模型,例如,附加倒数项的多项式模型、Becker的齐次模型、对数比模型、可加模型和比率模型等。

传统的混料问题,假定指标不受混料总量的影响,但在一些问题上,混料总量也要影响指标。例如,对某农作物施以混合肥料,不仅各种肥料在总量中的百分比(分量比例),而且总的施肥量(总量)也影响指标(产量)。如何给出简单实用而且易于解释的含有总量因子的混料回归模型及其试验点尽量少的试验设计,此问题虽有一些结果,但有些问题还有待于研究。

对于同时含有“成分变量”及“过程变量”的混料问题,传统的解决办法是采用这两类变量的“乘积模型”及其“乘积设计”。“乘积设计”的缺点是试验点太多难于实施。实践证明:多数情况下,两类因子间的(高阶)乘积项不存在(或可以忽视)。如何给出简单实用的简化了的二类变量的“乘积模型”及其试验点较少而且性能良好的设计,这将是混料试验设计的一个研究热点,即所谓的“析因混料试验设计”,它将是人们关注的一个重要目标。

最优设计和混料设计,是试验设计学科的两个分支,科学发展要求将它们结合起来。最优混料设计将是人们关注的研究热点。对于各种混料模型,分别研究各种最优标准下的最优设计,可以期待得到一批研究结果。使用混料设计,要比使用正交设计和析因设计等复杂。特别是实际中常遇到的分量具有上、下界附加约束,或者分量的线性组合具有上、下界附加约束的混料试验,其试验设计和数据分析更为复杂。研制适于微型机用的混料设计的算法及其应用软件是混料试验设计的一个应用课题。

参考文献

- 1 Cornell J A. Experiment with Mixtures. New York: John

- Wiley and Sons, 1981
- Steinberg D M, et al. *Technometrics*, 1984, 26: 71~130
 - Atkinson A C. *International Statistical Review*, 1988, 56 (2): 99~115
 - Dodge Y, et al. *Optimal Design and Analysis of Experiments*. North-Holland, 1988
 - 关颖男. 混料试验设计. 上海: 上海科学技术出版社, 1990
(东北大学关颖男教授撰)

运筹学

运筹学 operations research 是用数学方法研究各种系统最优化问题的学科。应用运筹学解决问题的动机是为决策者提供科学决策的依据；目的是求解系统最优化问题，即制定合理运用人力、物力和财力的最优方案；对象是工农业、商业、民政、国防等部门的各种系统，特别是已经建立的各种系统；方法是应用数学语言来描述实际系统、建立数学模型并据此求得最优解。可以说，运筹学是一门在实践中得到广泛应用的学科。

运筹学一词最早出现于1938年。当时，英国波得塞雷达站负责人洛维(A. P. Rowe)提出对整个防空作战系统的运行问题进行研究，以解决各雷达站之间以及雷达站与整个防空作战系统之间应如何协调配合才能有效地防备德机入侵的问题。为此专门成立了由各方面科学家组成的研究小组，并以“OR”命名这种研究活动(运筹学在美国称为 Operations Research, 缩写为 OR)。二次世界大战期间，运筹学研究有了新的发展。当时，为了急待解决作战中所遇到的许多错综复杂的战略战术问题，英美一些具有不同学科和背景的科学家，组成了许多运筹学小组，专门从事军事运筹学的研究。典型的研究课题有：高射炮阵地火力的配置，护航舰队规模的大小，开展反潜艇作战的侦察等。由于受到战时需要的压力，在不同学科相互渗透而产生的协同作用下，在上述几个方面都取得了不少研究成果，为运筹学有关分支的建立作出了贡献。战后，在军事运筹学小组工作过的一些科学家转向研究在民用部门应用运筹学方法的可能性，从而促进了在民用部门应用运筹学的发展。1947年，美国 G. B. 丹捷格在研究美国空军资源配置问题时提出了线性规划及其通用解法——单纯形法。50年代初，应用电子计算机求解线性规划问题获得成功。1951年 P. M. 莫尔斯(P. M. Morse)和 G. E. 金布尔(G. E. Kimball)合著的《运筹学方法》一书正式出版，标志着运筹学这门学科已基本形成。50年代末，美国的一些大型企业已陆续应用了运筹学方法以解决生产经营活动中所出现的问题。例如，石油企业用线性规划制定生产计划等。后来，又针对企业中的一些普遍性问题，诸如库存、资源分配、设备更新、任务分派等进行了研究，并提出了许多相应的方法和模型。60年代中期，运筹学开始用于银行、医院、图书馆等服务性行业和公用事业。一些发达国家的企业、政府、军事部门等都拥有相当规模的运筹学研究组织，专门从事有关方法和建模的研究，为科学决策提供所需信息和依据。早在1948年，英国成立了运筹学俱乐部，1954年改名为英国运筹学会。美国运筹学会创立于1952年，出版《运筹学》专业杂志。1957年，在英国牛津大学召开了第1届国际运筹学会议，以后每隔3年召开1次。1959年，成立了国际运筹学联合会(IFORS)。中国于1956年成立了第1个运筹学小组，1980年成立了中国运筹学会。

60年代以来，美国许多大专院校相继开设了运筹学课程和有关的一系列课程，许多著名大学还设立了运筹学的理科硕士和哲学博士的研究生课程。70年代后期，中国由于大力提倡系统工程在各个领域中的应用，作为系统工程主要基础理论之一的运筹学，也就更加受到重视。在中国的有关高等院校不仅设置了运筹学专业，培养从事运筹学研究和应用的人才，而且在管理类、财经类等的有关专业普遍将运筹学定为课程，一些系统工程专业及

其他专业的硕士生也将运筹学作为学位课程修读。

运筹学是一门多分支的应用学科。其主要分支有：线性规划、非线性规划、整数规划、几何规划、大线性规划、动态规划、图论、网络理论、决策论、排队论、博弈论、存贮论、搜索论和可靠性理论等。

应用运筹学处理问题时，可以分为5个步骤：①提出问题：即提出需要解决的问题，确定要求达到的目标，并分析问题的周围的环境和约束条件。②建立模型：收集足够的数，用数学语言来描述问题，建立目标函数、约束方程、确定决策变量等，并选用合适的方法，据此建立运筹学模型。③最优化：选择求解方法，程序设计和调试，仿真运行和方案择优。④解的评价：通过灵敏度分析等方法，对所求得的解进行分析和评价，并据此修正各种参数。⑤决策和实施：向决策者提供有关信息和优化方案，帮助决策者制定实施优化方案的计划，并在方案实施过程中发现新的问题和不断进行优化。

运筹学应用的关键在于模型的建立和求解。运筹学模型是对客观现实的一种描述，它必须反映实际，但又是现实世界的一种抽象，以便研究其共性，使模型达到现实性、简洁性和适应性的要求。常用的运筹学模型有：分配模型、运输模型、网络模型、计划排序模型、存贮模型、决策模型、排队模型、博弈模型、搜索模型等等。求解现代运筹学模型必须借助于电子计算机。现在已有各种运筹学软件包供应，从而使运筹学能处理相当复杂的大型问题。

近年来，运筹学在企业生产经营管理，工程建设、军事作战、科学试验、财政经济以及社会系统等各个领域中都得到了极为广泛的应用，并在各自的应用范围内发展了一些新的专业分支。同时，运筹学学会还召开了许多专业性会议，讨论的课题有：“军事运筹学”、“运筹学在公共生计划中的应用”、“运筹学在公共交通事业中的应用”、“运筹学在旅游观光事业中的应用”、“运筹学在体育中的应用”、以及“能源运筹学模型”、“教育运筹学模型”、“刑事司法运筹学模型”等等。看来这种发展趋势将会持续下去。另一方面，随着运筹学逐渐向复杂的社会大系统渗透，而社会大系统又往往存在着大量不确定因素和模糊因素，一般说来，这些因素难以定量分析，因此，仅仅依靠用数学模型来作定量分析，已很难解决这类系统的最优化问题。所以运筹学方法的研究内容已出现了定量分析和定性分析相结合的发展趋势。80年代初，加拿大 M. 弗雷塞(M. Fraser)和 W. 希普尔(W. Hipel)在对元对策中的某些定义加以修正，并补充定义了一些新的概念，从而形成了“冲突分析”理论，并于1984年正式出版了《冲突分析》(Conflict Analysis)一书，冲突分析就是对某些难以定量分析的冲突事件进行正规分析的一种分析方法，实践证明，用冲突分析求得的解和现实情况更加符合，因而其方法也更加实用。同时，借助计算机进行分析和人一机对话，使分析结果的分类非常方便和迅速。

参考文献

- Morse P M, G E Kimball. *Methods of Operations Research*. New York; Wiley, 1951
- Churchman C W, Ackoff R L, Aronoff E L. *Introduction to operations Research*. New York; Wiley 1957
- Wagner H W. *Principles of Operations Research with Applications to Managerial Decisions*, New Jersey; Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1975
- 李德等编. 运筹学. 北京: 清华大学出版社, 1982
- 陶谦坎主编. 运筹学. 西安: 西安交通大学出版社, 1987

(西安交通大学陶谦坎教授撰)

向量值最优化问题的对偶性 on duality for vector valued optimization problems 向量值最优化也叫多目标最优化或多目标规划。20世纪40年代后期线性规划中完美的对偶理论和50年代初 Kuhn, Tucker 的里程碑式的论文，鼓励很多学者把对偶性的概念推广到非线性规划以至更一般的规划问题，60

年代二次规划、凸规划对偶理论的成功创立,将对偶理论的研究推向一个新的高潮,使之成为数学规划的重要组成部分,70年代向量值最优化蓬勃发展以来,其对偶理论的研究也占有极其重要的地位,并取得了可喜的进展。

称一对向量值最优化问题(一个叫原问题,另一个叫对偶问题)关于某种含义的最优解是对偶的,通常指它们满足下述条件:
 (1)其中一个是极小化(min)问题,另一个是极大化(max)问题。
 (2)极小化问题的任一可行解的相应目标函数值不小于极大化问题的任一可行解的相应目标函数值。
 (3)若一个问题有某种意义下的最优解,则另一个问题也有同一意义下的最优解,且相应的目标函数值相等。

对偶理论的主要问题是:建立对偶模型(给定原问题,建立合适的对偶问题),在适当条件下证明上述(2)、(3)成立。

早在1951年,线性规划诞生初期,D. Gale, H. W. Kuhn 和 A. W. Tucker 就建立了矩阵最优化(包含向量线性最优化为特殊情况)的对偶模型,归结为向量线性规划即为

$$(VLP_{GKT}) \begin{cases} \min d \\ C^T x \leq d \\ Ax \geq b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (VLD_{GKT}) \begin{cases} \max d \\ b^T u \geq d^T \lambda \\ A^T u \leq C^T \lambda \\ u \geq 0, \lambda > 0 \end{cases}$$

其中 $A \in R^{m \times n}, C \in R^{p \times n}, b \in R^m, d \in R^p, x \in R^n, u \in R^m, \lambda \in R^p$ 。

Gale 等人证明了上述规划关于有效解的对偶性。

1974年, J. S. H. Kornbluth 提出了如下向量值线性最优化对偶模型:

$$(VLP_K) \begin{cases} \min Cx \\ Ax \geq B\lambda \\ Ax \geq 0, \lambda > 0 \end{cases} \quad (VLD_K) \begin{cases} \max B^T u \\ A^T u \leq C^T \mu \\ u \geq 0, \mu > 0 \end{cases}$$

其中 $A \in R^{m \times n}, C \in R^{p \times n}, B \in R^{m \times p}, \lambda \in R^p, x \in R^n, u \in R^m, \mu \in R^p$ 。

他证明这一对向量值线性规划关于有效解(真有效解)的对偶性并用之于灵敏度分析。

1977年, W. Rödder 提出向量(矩阵)值函数的鞍点概念,并将 Gale 等人的对偶理论纳入其中,还给出了 (VLP_{GKT}) 与 (VLP_K) 、 (VLD_{GKT}) 与 (VLD_K) 的解之间的关系。

1978年, H. Isermann 证明了如下多目标线性规划的对偶性:

$$(VLP_I) \begin{cases} \min C^T x \\ Ax \geq b \\ x \geq 0 \end{cases} \quad (VLD_I) \begin{cases} \max Ub \\ \mu^T UA \leq \mu^T C \\ \mu^T U \geq 0 \\ \mu > 0 \end{cases}$$

1983年, J. W. Nieuwenhuis 利用择一定理,给出了这一对规划的对偶性一个简单的证明。

1985年, E. H. Ivanov 和 R. Nehse 讨论了以上各对向量值线性规划对偶模型之间的关系, Y. Sawaragi 等人在锥序下建立了以上各对向量线性规划对偶模型关于非控解的对偶理论。

向量值非线性最优化的对偶理论,近年来讨论较多,影响较大的有 Lagrange 型对偶、Wolfe 型对偶、Mond-Weir 型对偶、共轭型对偶。这些都是标量最优化已有对偶模型的推广,其对偶定理的证明也基本上是借助标量最优化来完成的,但其中的难度也不小。

设有向量值非线性最优化问题(原问题):

$$(VP) \begin{cases} \min f(x) \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases}$$

其中 $x \in R^n, f(x), g(x)$ 和 $h(x)$ 分别是 p 维、 m 维和 k 维向量值函数。

1979年, T. Tanino 和 Y. Sawaragi 对上述原规划定义了向量值 Lagrange 函数:

$$L(x, u, v) = f(x) + \langle u^T g(x) + v^T h(x) \rangle$$

其中 $\langle u^T g(x) + v^T h(x) \rangle$ 表示各个分量均为 $u^T g(x) + v^T h(x)$ 的

p 维向量函数。通过引入两个集值映射:原映射和对偶映射,将标量凸规划的 Lagrange 对偶理论推广到向量值最优化,这是一项极有价值 and 影响的杰出成果。

1981~1988年,林连云研究了(VP)的 Wolfe 型对偶问题:

$$(VD) \begin{cases} \max L(y, u, v) \\ \lambda^T \nabla_y L(y, u, v) = 0 \\ u \geq 0, \lambda \text{ 为权向量} \end{cases}$$

他先后在多种广义凸性条件下,证明了关于(弱)有效解的对偶性。1987年, R. R. Egudo 和 M. A. Hanson 在不变凸性条件下,证明了(VP)和(VD)关于 Geoffrion 真有效解的对偶性。

1980~1985年, B. D. Craven, G. Bitran, B. D. Corley, E. H. Ivanov 和 R. Nehse 将上述 Lagrange 函数中的向量 u 和 v 分别用矩阵 A 和 B 代替,给出了新的 Lagrange 函数:

$$L(y, A, B) = f(y) + Ag(y) + Bh(y), A \in R^{p \times n}, B \in R^{k \times n}$$

提出了类似上述(VD)的对偶规划,并在(VP)为凸规划的情况下,证明了关于有效解的对偶性。

1988年,刘三阳对一类非光滑非凸向量值最优化证明了 Wolfe 型对偶性。

1981年, B. Mond 和 T. Weir 提出了新颖的最优化对偶模型,对上述向量值最优化(VP)而言,其对偶问题为

$$(VD_{MW}) \begin{cases} \max f(u) + \langle \sum_{i \in I_a} y_i g_i(u) + \sum_{j \in J_a} z_j h_j(u) \rangle \\ \lambda^T \nabla f(u) + y^T \nabla g(u) + z^T \nabla h(u) = 0 \\ \sum_{i \in I_a} y_i g_i(u) + \sum_{j \in J_a} z_j h_j(u) \geq 0, a = 1, 2, \dots, r. \\ y \geq 0, \lambda > 0, \sum_{i=1}^r \lambda_i = 1 \end{cases}$$

其中 $I_a \subseteq M(g(x))$ 的分量下标集, $J_a \subseteq K(h(x))$ 的分量下标集, $a = 0, 1, \dots, r$, 某些 I_a 或 J_a 可以是空集, $I_a \cap I_\beta = \emptyset (a \neq \beta)$,

$$\bigcup_{a=0}^r I_a = M, J_a \cap J_\beta = \emptyset (a \neq \beta), \bigcup_{a=0}^r J_a = K.$$

特别当 $I_0 = M, J_0 = K$ 时, (VD_{MW}) 变为前面的 Wolfe 型对偶模型,当 $I_0 = \emptyset, J_0 = \emptyset, I_1 = M, J_1 = K$ 时, (VD_{MW}) 变为如下形式:

$$(VD_{MW}) \begin{cases} \max f(u) \\ \lambda^T \nabla f(u) + y^T \nabla g(u) + z^T \nabla h(u) = 0 \\ y^T g(u) + z^T h(u) \geq 0 \\ y \geq 0 \end{cases}$$

这个对偶模型有一个显著特点,就是与原问题(VP)具有相同的目标函数,很多文献中所说的 Mond-Weir 型对偶往往是指这个模型。

Mond-Weir 对偶模型提出以来,很受重视,1986年以来, Weir, Egudo, Mond, Craven 和 Hanson 等人分别在各种条件下(包括伪凸性,拟凸性和不变凸性),研究了 Mond-Weir 型对偶理论,刘三阳在非光滑非凸情况下,分别研究了(VP)和 (VD_{MW}) 及 (VD_{MW}) 的对偶性。

共轭对偶理论是利用共轭函数来建立对偶模型的。相应于原问题(VP)引进扰动函数

$$\varphi(x, u, v) = \begin{cases} f(x, u, v), \text{ 当 } g(x, u, v) \leq 0, h(x, u, v) = 0 \\ +\infty, \text{ 其它} \end{cases}$$

及其共轭函数

$$\varphi^*(T, A, B) = \max \{Tx + Au + Bv - \varphi(x, u, v) \mid x \in R^n, u \in R^m, v \in R^k\}$$

其中 $T \in R^{p \times n}, A \in R^{p \times m}, B \in R^{p \times k}, \varphi^*$ 是集值映射。

1980年, Tanino 和 Sawaragi 给出的共轭对偶模型为

$$(VP_{TS}) \min \varphi(x, 0, 0) \quad (VD_{TS}) \max -\varphi^*(0, A, B)$$

(VP_{TS}) 与 (VP) 等价,在凸性条件下,他们证明了 (VP) 与 (VD_{TS}) 关于有效解的对偶性,1981~1982年, H. Kawasaki 用不同的方式研究了共轭对偶模型关于弱有效解的对偶性,1981年, S. Brumelle 用“inf”和“sup”分别代替“min”和“max”,证明了共轭对偶模型关于真有效解是对偶的,1984年,汪寿阳在非控解意

义下建立了向量值最优化的共轭对偶理论,1992年,周厚春、程钧谟在有效解意义下推广了集值映射的共轭函数定义,给出了向量值最优化的广义共轭对偶理论。

也有不通过扰动函数研究共轭对偶性的, J. Zown 和 C. Gros 分别在 1975 年和 1978 年推广了 Fenchel 的共轭对偶理论,对凸向量值最优化建立了与上面对偶模型截然不同的共轭对偶形式和对偶定理。

此外,向量值最优化的对称对偶和自身对偶理论也取得一定进展,1983~1989年,林铨云、Weir、Mond 和 Hanson 等人在这方面作了很有价值的工作。

值得一提的是,在中国,林铨云对向量值最优化对偶理论研究得最早,成就最为突出。

关于向量值最优化的对偶理论,目前还不完善,需要研究的问题还很多,特别值得提出的是:(1)建立新的对偶模型。(2)发展和完善共轭对偶理论。(3)深入系统研究集值分析,对向量值最优化问题中遇到的集值映射作重点探讨,这有可能发展成为向量值最优化的重要理论基础。(4)研究非光滑、非凸最优化问题的对偶性。(5)对偶性与最优性、稳定性和计算方法的互相结合与渗透。

参考文献

- 1 Iserrmann H. Zeit Oper, Res, 1978, 22: 33~41
- 2 Gros C. European J Oper Res, 1978, 2: 368~376
- 3 林铨云. 高等学校计算数学学报, 1981, 3(1): 18~25
- 4 林铨云. 应用数学学报, 1983, 6(1): 76~85
- 5 汪寿阳. 系统科学与数学, 1984, 4(4): 303~313
- 6 Sawaragi Y, Nakayama H, Tanino T. Theory of multiobjective optimization, New York: Academic press, Inc, 1985
- 7 Egudo R R, Hanson M A. J. Math. Anal. Appl 1987, 126: 469~477
- 8 Weir T. J Austral Math Soc (Series A), 1987, 43: 21~34

(西安电子科技大学博士生导师刘三阳撰;游兆水审)

线性规划的单纯形方法 simplex method of linear programming 单纯形方法是计算线性函数在凸多面体集合 S 上极值点的算法。其中 $S = \{x | Ax = b, x \geq 0, x \in R^n\}$, A 和 b 分别是给定 $m \times n$ 矩阵和 m 维向量。它首先是寻找 S 的一个顶点(基本可行解)或确定 S 是空集。然后从 S 的一个顶点按某种规则沿棱搜索至另一顶点,产生目标函数值为单调的路径,使其终止于极值点,或是终止一顶点,它是使目标函数值为无界的极射线的端点。

单纯形方法是求解线性规划问题和研究凸多面体几何的有效工具,也是研究科学决策的重要手段。它被广泛应用于工业、军事、经济计划、交通、能源、资源分配、城市规划和科学管理等方面。也是运筹学、管理科学、数值最优化和计算机科学等学科的重要组成部分,对它们的发展也有重要的影响。

1947年丹特齐格(G. B. Dantzig)设计求解线性规划的单纯形方法。实际上先前的许多数学家和经济学家在凸多面体几何、代数、最优化和经济模型等方面研究了类似的问题和求解方法。1826年傅立叶(J. B. J. Fourier)在研究超定线性方程组的无穷模极小值时,应用从凸多面体一个顶点至另一顶点的下降法已蕴含着单纯形方法的主要思想,也是最早涉及的线性规划问题。1894年福尔卡什(Gy. Farkas)论述齐次线性不等式组解的存在性条件中已孕育着线性规划的对偶原则。1939年康托洛维奇(L. V. Kantorovich)在研究生产组织和计划中的数学方法时已应用了对偶单纯形方法。希契科克(F. L. Hitchcock)和库普曼斯(T. J. C. Koopmans)也分别于1941年、1948年在对运输问题静态模型的研究中应用单纯形方法的原则。1947年冯·纽曼(Von Neumann)研究经济增长模型时指出 $\text{Max}\{cx | x \geq 0, Ax \leq b\}$ 和不等式组 $x \geq 0, Ax \leq b, yA \geq c, y \geq 0, cx \geq yb$ 之间的等价性。这就是1951年由盖尔(D. Gale)、库恩(H. W. Kuhn)和塔克(A. W.

Tucker)严格证明的线性规划对偶定理。它不仅是单纯形方法的理论基础,也对线性和非线性规划的发展产生深刻的影响。1953年丹特齐格和奥查德—海斯(W. Orchard—Hays)设计修正单纯形法。1954年莱姆基(C. E. Lemke)和比尔(E. M. L. Beale)独立提出对偶单纯形法。1956年丹特齐格、福特(L. R. Ford)和富尔科森(D. R. Fulkerson)推出原始对偶单纯形方法。

在数值计算方面,单纯形方法主要是研究进出基变量的转轴规则、基矩阵逆的计算及其数值稳定性和算法的有效性等。它与计算机、稀疏矩阵计算的发展密切相关。

转轴规则的研究包含退化和非退化。1952年查尼斯(A. Charnes),丹特齐格和他的学生在研究退化问题中独立应用不同的扰动规则,并以字典序方法证明其迭代有限终止。1977年布兰德(R. G. Bland)用组合规则从最小下标中选取进出基变量方法,避免无限循环。图论、对偶方法也被应用于研究退化问题。对非退化问题,1977年戈德法布(D. Goldfarb)和里德(J. K. Reid)研究丹特齐格等人提出的几种主要转轴规则的结果表明它们的效率几乎是相同的。

对基矩阵逆的计算,1954年丹特齐格和奥查特—海斯给出逆的初等矩阵乘积形式,并以重新求逆避免由迭代次数增大引起舍入误差积累的数值不稳定性。1957年马尔科维奇(H. M. Markowitz)采用重新排列基矩阵行列的顺序,使重新求逆后的初等矩阵乘积形式有较好的稀疏性。1969年戈卢布(G. N. Golub)和巴特尔斯(R. H. Bartels)应用LU分解表示基矩阵(L 、 U 分别是上、下三角矩阵),它具有更好的稀疏性质。1971~1972年黑勒曼(E. Hellerman)和巴里克(D. Barick)综合上述两方法的优点在重新求逆中予选部分主元,使分解有良好的数值稳定性和稀疏性。随后许多学者都致力于对转轴迭代中如何保持基矩阵分解的三角形、稀疏性和数值稳定性等方面的研究,并取得很大的进展。许多研究结果被应用于研制软件包。如IBM公司的MPSX1370、CDE公司的APEX II和斯坦福大学的MINOS等。

对求解系数矩阵有特殊结构线性规划问题单纯形方法的研究,其一是对基矩阵分解、修正等采用特殊计算技术,它比直接应用单纯形法更有效。其二是应用1960年丹特齐格和沃尔夫(P. Wolfe)的分解原则导出的分解算法,把原来问题转化为一系列独立的小问题求解。80年代以来由于并行体系结构计算机的迅速发展,分解算法及其并行化的研究受到广泛的重视。许多研究结果说明其有非常明显的实际有效性。

自50年代以来,许多学者从多方面致力于单纯形方法有效性的研究,考察求解大量实际问题的数值经验和应用蒙特卡罗方法进行数值试验的结果,表明单纯形方法平均转轴迭代的次数一般是 $am(2 \leq a \leq 6)$ 。另一方面,1957年赫希(W. H. Hirsch)提出凸多面体直径 d (连接任意二顶点最短路径的最大值),并猜测 d 不超过其不等式个数与维数之差。显然 d 是单纯形法通过顶点路径的最大数。研究证实赫希猜测对特殊类凸多面体是正确的,一般说是不成立的。1981~1988年奥林(J. B. Orlin)、巴林斯基(M. L. Brifinski)和戈德法布等人分别证明应用对偶单纯形法和单纯形法求解最小价格网络流量和分配问题的迭代次数是多项式的。这是有重要意义的。1972年克莱(V. Klee)和明蒂(G. J. Minty)首次给出丹特齐格转轴规则单纯形法和迭代次数是指数函数的线性规划问题。相继的研究证明其它转轴规则的算法的迭代次数也是指数函数。由算法的复杂性理论,人们怀疑线性规则是否属于P类问题?1979年哈齐扬(L. G. Khachiyan)用椭球方法证明存在求解线性规划问题的多项式时间算法,理论上确立了线性规划问题是属于P类。1984年卡玛卡(N. Karmarkar)提出多项式时间的内点方法,它在算法复杂性和实际有效性方面都有很大进展。它对单纯形法的研究有重要的影响。

平均复杂性是刻画单纯形方法有效性的另一尺度。它是应用概率分析方法对按照某类分布输入线性规划问题的数据,计算其转轴迭代次数的期望值。1982年博格瓦特(K. H. Borgwardt)证明在一定概率模型假设下一种转轴规划单纯形法的平均迭代

次数是多项式的。1983年斯梅尔(S. Smale)应用不同概率模型和转轴规则证明对固定 $m, \max\{cx \mid x \geq 0, Ax \leq b\}$ 的平均迭代次数上界是 $O((\log n)^{m^2+m})$, 同年海孟维奇(M. Haimovich)对更一般的斯梅尔模型证明博格瓦特转轴规则的平均迭代次数是线性的。随后陶德(M. J. Todd)等在较强的假设条件下证明平均复杂性是二次函数的模型。概率分析方法对揭示单纯形方法的本质有一定的作用。然而如何使研究的模型能客观地反映实际问题还面临着不少困难。

在数值计算方面今后单纯形方法主要是研究求解超大规模线性规划问题的稀疏矩阵技术(包括舍入误差分析、病态现象和稳定性等问题)和退化问题的处理。并行计算技术的发展为大幅度提高单纯形方法的效率带来希望,新的并行化的单纯形算法和对特殊结构问题的并行化算法的研究将受到重视。内点方法近年来取得的进展将推动内点—单纯形混合型算法的研究。对概率分析方法的研究会有进一步的发展。若能在强多项式复杂性的单纯形类新算法的研究取得进展,它对理论研究和实际应用将产生重要的影响。

参考文献

- 1 Dantzig G B. Linear Programming and Extensions. Princeton University Press, 1963
- 2 Hellerman E, et al. Mathematical Programming, 1971, 1: 195~215
- 3 Klee V, et al. 3-rduSympos. Inequalities, AP, New York, 1972, 159~175
- 4 Bland R G. Mathematics of Operations Research, 1977, 2: 103~107
- 5 Khachiyan L G. Dokl. Akad. Nauk USSR, 1979, 244(5): 1093~1096
- 6 Borgwardt K H. Princeton University Press Zeitschrift for Operations Research, 1982, 26, 157~177
- 7 Murtagh B A, et al. Technical Report SOL 83-20, Dept. of Operations Research, Stanford, Stanford University 1983
- 8 Karmarkar N. Combinatorica 1984, 4, 373~395
- 9 Ho J K, et al. Mathematical programming 1989, 42, 391~405
- 10 Todd M J. Mathematical Programming, K T K Scientific Publishers, Tokyo, 1989, 109~157

(中国科学院计算数学与科学工程计算所魏紫蜜副研究员撰)

参数线性规划 parametric linear programming 是线性规划研究的一个分支,其研究对象为 $\min\{C(\lambda)^T x \mid A(\mu)x = b(\theta), x \geq 0\}$ 。其中 $C(\lambda), x$ 为 n 维向量, $A(\mu)$ 为 $m \times n$ 维矩阵, $b(\theta)$ 为 m 维向量, λ, μ, θ 为参数,表示线性规划中的目标系数 C , 约束矩阵系数 A 和约束方程的右端项 b 是可以变化的。若这些系数不依赖于参数,则就是一般的线性规则,即

$$\min\{C^T x \mid Ax = b, x \geq 0\}$$

在实际生活中抽象出来的线性规划模型,为了反映这些现象和活动随时间的变化,势必改动规划中的系数。另外,建模时系数的确定本身是有误差的,因而一般线性规划解的讨论涉及参数规划的性质。正是由于这些原因,在 Dantzig 于 1947 年提出解线性规划单纯形法后不久,就开始了参数规划的研究。

参数规划研究的对象是,当规划问题中输入的已知常数或特定参数发生变化时,最优解以及相关的某些性质的不变性或变化规律,还包括在参数变化时对规划问题解法的改进。具体地说:

1. 研究不变性。例如最优解的存在性,找出使问题有最优解的参数区域,即分析临界区域和临界区域的总和,这是最经典的参数规划研究的内容。临界区域,是指使最优解相应的最优基不变化的参数区域,临界区域之并称为有效参数域。

2. 研究变化规律。(1)灵敏度分析:主要研究目标函数的最优值及其他有关性质随参数值变化的规律,例如目标函数的最优值作为参数的标量函数时的连续性、凹凸性,相对价格随参数的变化,即相当于分析对偶解松紧性随参数的变化。(2)解的稳定性研究:分析参数变化时最优解本身的变化,在 80 年代以前的这方面的结果可参看 T. Gal 的著作。

在 80 年代初,主要由于经典的问题已基本解决,故参数线性规划的研究停滞不前。解的稳定性问题用一种新的形式提出,促进了这方面的研究(Xiang-Sun Zhang, 1990)。他们把参数规划的最优解集看成是由参数集到问题定义空间的点到集的映射,研究这一映射的连续性。传统的研究只是解决了这一映射的上半连续性,新的研究则侧重于下半连续性。这一研究具有现实意义,相当于在实际应用中在参数变化时不仅要求最优目标值连续而且要求最优解作为参数空间的向量函数本身也连续。他们的工作证明了只在约束方程右端项含有标量参数的参数线性规划的解集是连续的点到集的映射。为了得出在有效参数域上的连续最优解,提出了一个称为“推广的 Bland 对偶单纯形算法”。然后,对于目标函数和约束矩阵中含参数模型解集的连续性也获得了结果(Li Sheng, 1992)。目前的研究正集中在向量参数的情况,对于右端项有向量参数的情况已证明了连续性。

线性参数规划的理论研究工作在今后的发展取决于提出新的问题和概念。有两个方面是值得注意的,一是把线性参数规划研究中的方法和思路引入非线性参数规划的研究之中,二是在实际应用中发展参数规划的算法。目前的研究主要是结合单纯形方法,随着多项式时间的线性规划算法的发展,如何提出参数线性规划的一系列新的概念可能是重要的任务。

参考文献

- 1 Dinkelbach W. Sensitivitätsanalysen und parametrische Programmierung. Berlin-New York: Springer 1969
- 2 Nozicka F, et al. Theorie der linearen parametrischen Optimierung Berlin: Akademie-Verlag, 1974
- 3 Gal T. Parametric programming and related topics, New York: McGraw-Hill, 1979
- 4 Xiang-Sun Zhang, et al. Mathematical Programming, North-Holland, 1990, 47
- 5 Li Sheng, et al. Proceedings of APORS'91, Beijing, 1992

(中国科学院应用数学所章祥荪研究员、崔晋川副研究员撰;吴方宙)

路径分析 path analysis 又称通径分析,是线性回归分析的一种。路径分析研究的是通过建立与观测数据一致的“原因”、“结果”的路径结构,对变量之间的关系作出合理的解释。它被应用于群体遗传学、生物社会科学、各种经济关系的分析及多元系统分析等领域,特别是,它对传统的回归分析、相关分析方法无法作出合理解释的一类问题,提供了一种有效的手段。

1921 年 Sewall Wright 最早提出路径分析法,并利用它解决了不少群体遗传学中的问题。1934 年 Wright 在《The Method of Path Coefficients》中正式作为一种统计方法介绍路径分析。1948 年李景均(C. C. LI)所著《群体遗传学引论》有一章介绍路径分析,该书首次把路径分析引入中国。1977 年他在另一本著作《Path Analysis》中全面介绍了路径分析及其在各个领域的应用和发展。80 年代以来这种方法逐步被广泛应用于生物、社会、经济等领域。

路径分析方法主要是建立在线性回归模型的基础上。下面通过一实例说明该方法的特点。为了确定人类品质的数量指标——智商(IQ),研究环境因素与遗传特征之间的重要关系。资料包括调查 100 个家庭(父母、子女)的 IQ 值,这些家庭环境指标测量值、养父母及养子女的 IQ 值,这两组父母在家庭环境与 IQ 方面极其相似,根据测量数据得如下相关系数:

	亲父母组	养父母组
父母、家庭环境	$r_{PE}=0.86$	($r_{FE}=0.86$)
父母、子女	$r_{PO}=0.61$	$r_{PC}=0.23$
子女、家庭环境	$r_{OE}=0.49$	$r_{CE}=0.29$

其中, P, O 分别代表亲父母与其后代, F, C 分别代表养父母及养子女。对于亲父母组, 父母与家庭环境之间的相关系数为 0.86, 而对养父母组则假定与亲父母组相同, 按线性回归模型可作如下路径图(图 1)。

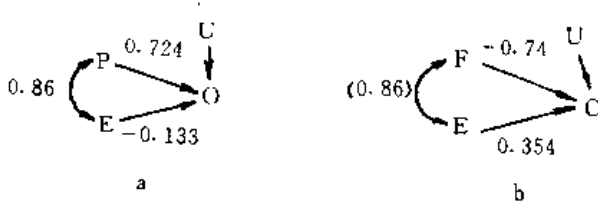


图 1

图中 O, C 为结果变量, 从原因变量到结果变量用单箭头联接起来的为路径线, 其上数字为路径系数, 即标准化变量之偏回归系数。双箭头联接起来的为相关线, 其上数字为相关系数。

由图 1(a) 家庭环境 E 到子女 O 的路径系数 $P_{OE} = -0.133$, 这意味着家庭好的子女其 IQ 低, 对应的偏回归系数自然也是负值。显然, 无法作出合理的解释, 它与我们一般的观察结果矛盾。图 1(b) 有类似的情况, 说明回归模型无法合理分析此类问题。

若用偏相关分析的方法, 可求得消除了父母 IQ 的影响后, 家庭环境与子女之间的相关系数 $r_{OE.P} = -0.086$, 也出现负值, 同样无法得到合理的解释, 在父母 IQ 相同的条件下, 为什么家庭好的子女其 IQ 低, 这也是毫无道理的。

出现上述情况的原因何在? 注意到路径系统图 1(a)(b) 中的残差变量之路径系数可求得都比较大, 说明可能在残差变量中还有其它未考虑到的变量, 为此必须重新建立与生物遗传学理论一致的因果系统, 如下图(图 2)。

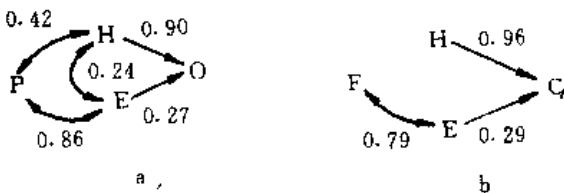


图 2

比较图 2 与图 1, 先不管路径上的数值, 我们发现其间有重要的区别, 首先, 前面已指出所谓家庭环境因素广义来说包括除遗传因素以外的所有其它因素, 因此, 可以认为个体之 IQ 完全由遗传力与环境因素确定。图 2 无残差因子到子女 IQ 的路径, 此其区别之一。其次, 图 2 中父母 IQ 到子女 IQ 之间无直接路径, 甚至父母与其亲生子女亦无直接路径。在纯粹回归问题中, 为了描述与预测的目的, 总可以建立父母关于子女的回归。但是从生物遗传学的角度, 父母的表型与子女表型之间并无直接的联系, 两者只能通过遗传机制(H)联系, 它是表型相关的原因。于是在图 2 中引入了在图 1 中缺漏的子女的遗传机制(H)。这也是路径分析方法的一个优点, 它能帮助我们在作分析时寻找隐藏的因

子。
通过路径系数运算法则可得图 2 中各路径之数值。由图 2 (a) 知家庭环境 E 对子女 IQ 无负影响, 其直接影响为其上路径系数值 0.27, 而由家庭环境 E 通过遗传机制 H 对子女 IQ 的间接影响则为 $0.9 \times 0.24 = 0.22$ 。同样由图 2(b) 知, 养父母对养子女的影响不再是负值, 其影响是通过家庭环境因子 E 达到的, 等于 $0.79 \times 0.29 = 0.23$, 这与观测资料相符。因此路径分析方法得以恰当地处理了上述问题。

近来, 程新意(1984)等在研究棉花产量与单位面积的株数、每株结铃数、单铃重、衣分等的关系时, 用路径分析法得出单位面积株数对皮棉产量的直接影响不大, 其影响主要通过单铃重的间接作用。同样, 孙德林于 1991 年研究经济关系时应用逐步路径分析法, 把那些高度相关而对结果变量的直接作用较小的变量舍弃后得一逐步回归方程。这种方法用于预测, 取得了良好的效果。

路径分析方法大多建立在线性回归模型的基础上, 目前已逐步发展到各类回归模型, 并且着眼于应用方面, 但大多还停留在作为处理实际问题的一种手段。在理论上至今仍未建立严格的统计量, 自然也无法作相应的统计检验, 这是今后研究工作中的一个努力方向。

参考文献

- 1 Wright S. J Agric Res, 1921, 20: 557~585
- 2 Wright S. Ann, Mtah Stat 1934, 5: 161~215
- 3 Li C C. An introduction to population genetics. National Peking Univ Press, 1948
- 4 Li C C. Assortative mating in man proc 2nd meeting of Mexico Society of Genetics, 1975
- 5 Li C C. Path Analysis—a Primer. The Boxwood Press, 1977
- 6 程新意, 等. 数理统计与管理, 1984, 6
- 7 古华民. 数学的实践与认识, 1988, 1
- 8 孙德林. 中国现场统计研究会第 5 届年会论文集, 1991 (华南师范大学古华民教授撰)

目标规划 goal programming 多目标决策的一种方法。

由于它的模型比较符合现代化管理决策的实际, 方法灵活, 有能力处理各种没有统一度量单位, 互相矛盾的多目标, 而且便于利用电子计算机技术, 所以已经成为解决现代化管理中多目标决策问题的有效工具, 近年, 目标规划正受到世界各国运筹学家的重视, 应用成果也日益显著。实践证明, 目标规划能够处理很广泛的实际问题, 也很容易被实际工作者接受和掌握。

1961 年美国查尔斯(A. Charnes)和库帕(W. W. Cooper)第一次提出“目标规划”这一名称, 当时, 目标规划的概念最初仅仅作为处理线性规划无法解决的问题而出现的。目标规划的中心思想就是“合理安排有限资源, 使决策结果尽可能地接近预先指定的目标”。

伊杰尼(Y. Ijiri)1965 年提出了目标的优先等级和优先权因子的概念, 而且给出了改进的“目标规划”单纯形算法。正是由于目标点, 目标优先等级、正负偏差变量和软约束等特点, 使目标规划模型十分灵活方便, 成为解决多目标决策问题的有效工具。

1968 年查尔斯(Charnes)首先把目标规划应用到广告计划和劳力计划, 伊杰尼(Y. Ijiri)主要研究了目标规划在财务管理中的应用。1968 年康丁里(B. Contini)研究了不确定条件下的目标规划方法, 从而提供了把统计方法用于目标规划的可行性。

60 年代是目标规划的萌芽时期。目标规划从无到有, 不断引进新的思想概念和计算方法, 开始在经济管理各个领域应用。然而, 它能解决的实际问题规模还很小, 而且只能解决线性问题。对于非线性问题、随机问题、整数问题都还没有涉及。

70 年代, 目标规划理论不断发展, 应用也日益广泛。出版了两本至今仍作为目标规划入门必读的专著。1972 年, 李(S. M. Lee)出版了世界上第 1 本目标规划专著。全书分两大部分, 第 1 部分介绍目标规划的原理、方法和计算机程序; 第 2 部分

介绍目标规划的应用范围及成果,包括:生产计划、财务决策、市场销售和广告计划,公司行政管理,大学行政管理,政府决策分析,医院护理计划等。

伊格尼乔(J. P. Ignizio)于1976年出版了一本目标规划专著,主要讨论了非线性目标规划和整数目标规划的算法和应用。他还在1978年发表了一篇综述,列举了47篇目标规划论文和著作,其中已包括线性目标规划、非线性目标规划、整数目标规划、0—1目标规划。

70年代目标规划发展的一个特点是与其它最优化技术相结合,不断丰富目标规划的内容和方法,扩大了它的应用范围,并且成功的应用到一些大规模的实际问题中,取得了很好的成果。70年代末已有大系统目标规划、网络目标规划、随机目标规划、投入—产出目标规划、分式目标规划等。

70年代目标规划发展的另一个特点是在充分利用计算机做工具的基础上,与“交互作用”相结合,做到两个“对话”,即“人机对话”和“分析者—决策者对话”,使它更符合管理决策的实际,进一步发挥了目标规划的灵活性和有效性。

1983年伊格尼乔提出了线性目标规划的多维对偶理论,这是目标规划理论上的一个重大进展,1984年又进一步指出了线性目标规划对偶的存在条件、可行性条件和最优性条件。1985年提出了线性目标规划的多维对偶算法(MDD算法)。它可以把一个多目标决策问题LGP(K 个优先级, m 个约束, $n+2m$ 个变量)转化成对偶问题DLGP。DLGP模型由 K 个单目标最优化问题($n+2m$ 个约束, m 个变量)构成,但是其中至少有 $2m$ 个界约束(即LGP的行数 m 的2倍),而起作用的约束至多只有 n 个。因此只要利用带有界变量的标准软件包MPSX或FMPS以及有效的GUB技术,就能非常迅速的求解DLGP,进而求解LGP。一般来说,对于大规模(上千约束和变量)LGP问题,只要 $n < m$ 或 $n \approx m$ 时,运用MDD算法总是优于序列单纯形算法。

1985年,莱拉(Liana)研究了模糊目标规划的模糊对偶性。巴修(Basu)研究了运输目标规划模型的对偶性。还讨论了目标规划模型中目标优先权因子的修正方法;罗宾(Rubiu)讨论了目标规划的模糊优先权结构;1986年格斯(Gass)研究运用层次分析法(AHP)确定大型线性目标规划中目标的优先等级和优先权因子;他还进一步研究模糊目标规划的优先权结构;1989年贝克(Beck)研究了目标规划模型中的冗余;通过对20个案例的研究,发现几乎26%的优先等级是多余的,大约1/4的目标在最优化过程中实际上并未起作用。

80年代,目标规划算法和软件的研究取得了长足的进展,其研究成果已占理论研究成果的首位。伊格尼乔1983年提出的线性目标规划的反射 P 空间算法在线性目标规划的4种已知算法中是最好的,比S. M. Lee改进的单纯形算法至少可以减少 $2m^2$ 个元素的内存和运算(m 是约束条件个数),当约束条件增多时,节省的内存和计算量是相当可观的。

1984年李还提出了求解目标规划的符号流图法(SFG),它有许多优点:使用了稀疏矩阵技术,能迅速有效的求解目标规划,并且简化了灵敏度分析,便于用几何图示说明解空间,1985年他又研究了机会约束非线性目标规划的梯度算法;盖特(M. K. Get)研究使用稀疏矩阵技术在微机上求解目标规划问题,并提供了软件包;1986年马克兰德(R. E. Markland)研究了大规模整数目标规划的求解策略和计算机上的有效实现;柯霍兰(P. Korhonen)研究了目标规划的交互作用算法,把目标分为灵活目标和不灵活目标,在计算机上给出每一个解的图文显示,并且采用带参数最优化程序的标准软件包,效果很好;1986年塔哈(Tcha)研究了一般线性目标规划的微机软件,微机内存512K,软件特征是采用修正单纯形算法和FORTRAN语言,使用稀疏矩阵技术克服微机有限内存,并使用修正的逆乘积形式减少累积运行误差;1987年李研究了0—1目标规划的新算法,与通用的老算法相比,可节算10%CPU时间;1988年阿马斯特隆(R. Armstrong)研究了非线性、非凸目标规划的有效算法及计算

机实现;1989年威尔逊(Wilson)研究了0—1目标规划的次优性和灵敏性分析。

自80年代中期以来,由于方面的迫切需要,各种新的目标规划模型不断出现,例如,1986年,拉维军(Ravindran)研究了非线性整数目标规划模型;1988年李查(Reza)研究了把目标规划(GP)、层次分析法(AHP)与专家意见法(DELP)三者相结合的新模型,以及在决策支持系统中的应用,把目标规划与各种现代化管理决策技术结合,不断发展新的目标规划模型,这无疑今后继续努力的方向。

目标规划的发展以应用为主,在国民经济管理各行业、各部门的应用日益广泛。现将那些具有方向性的新成果简介如下:

目标规划在工程(金属切削加工、轴承系统、储水系统、高速公路、太阳能系统、土木结构、雷达系统等)的优化设计中,已有很多应用成果。当前特别值得注意的是目标规划在柔性加工系统(FMS)中的应用,1987年卡马(Kumar)、1988年李开始了这方面的工作。

1987年戴沙迪斯(Kesanctis)用目标规划模型进行群体决策支持系统(GDDS)的研究;1988年依欧(Eom)以大规模目标规划为基础,建立了总体融资决策的支持系统;1988年查卡拉哈(Ozkarahhan)建立了救护计划决策支持系统的目标规划模型。

1986年夏拉德(Sharda)建立了金融期货交易预测的目标规划模型,可以预测时间周期为13周的各种货币的利率变化,并能预测现金流的变化趋势和未来价格;1988年查尔斯(A. A. Charnes)用目标规划作工具,研究美国近20年中经济政策的可行性,检查各种重要的政治决策的后果及影响;1988年戴维(David)用目标规划对美国“反垄断”法律的经济政策进行了研究;1989年伊格尼乔运用线性整数目标规划进行了影子价格研究;1989年布斯(Booth)建立了利率风险预测的目标规划模型,得到了银行经营的最优策略。

1984年弗瑞特(Freet)研究了目标规划在大范围预测中的应用;1985年塔依(Tayi)研究了多项式目标规划在抽样技术中的应用,要满足多指标,样本容量尽可能小,并使风险小、成本低;1986年弗瑞特又建立了适用于正态分布和非正态分布的双组群判别分析线性目标规划模型;1986年巴克(Baker)运用目标规划确定指数平滑预测模型的最优预测参数;1987年拉维军(Ravindran)研究了非线性整数目标规划在抽样技术中的应用;1989年查尔斯(A. Charnes)把目标规划模型与回归分析技术结合,构成了新的经济统计学模型。

1986年罗米拉(Romero)介绍了1970~1982年目标规划文献300篇,并且根据12种不同类型模型和18个应用领域进行分类统计。1987年李介绍了1971~1986年的148篇论文,并指出目标规划的应用范围正在日益广泛。

目标规划于80年代初期引入中国,发展非常迅速。两本目标规划专著已于1986年和1988年分别翻译出版。1987年国内出版了第1本目标规划专著,1991年论文《目标规划的特点和进展》,对1984~1989年《国际运筹学文摘》上公开发表的152篇目标规划文献进行了统计分析,指出了目标规划的发展方向。

当前目标规划研究的热点是各种目标规划模型的对偶理论及其应用,目标和优先权结构的深入研究,特别是各种目标规划模型算法和软件的深入研究。另一方面,目标规划将继续在经济管理各个领域、特别是在第三产业(外贸、金融、保险、服务业等)得到更广泛的研究和应用。

参考文献

- 1 Charnes A, Cooper W W. Management Models and The Industrial Applications of Linear Programming, 1961
- 2 Lee S M. Goal Programming for Decision Auerbach Publishers Inc, 1972
- 3 Ignizio J P. Goal Programming and Extensions. Lexington Books D. C. Heath and Company, 1976
- 4 Ignizio J P. Multiple dimension dual for linear goal Pro-

- gramming, Computer & O. R., 1983, 10(1)
- 5 Ignizio J P. Computational methods in lexicographic linear goal programming, J O R S, 1983, 34(6):539~542
- 6 Lee S M. Dissertation research on goal programming (1971-1986), OMEGA, 1987, 15(5):345~347
- 7 宣家骥, 方爱群. 目标规划及其应用. 合肥:安徽教育出版社, 1987
- 8 G Booth. Goal Programming Models for managing interest-rate risk, OMEGA, 1989, 17(1):81~89
- 9 宣家骥. 多目标最优化文集, 1991, 5:78~89

(湖南大学宣家骥教授撰)

多目标最优化 multiobjective optimization 研究在一定限制条件下多于一个目标的最优化(极小化或极大化)。其中心内容是多目标数学规划,或称向量极值。它是应用数学和运筹学的重要分支。多目标极小化问题记作

$$V-\min_{x \in X} f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))^T, \quad (\text{VMP})$$

其中 $x \in R^n$ ($n \geq 1$) 叫决策变量, $f(x) \in R^m$ ($m \geq 2$) 叫向量目标函数, $X \subset R^n$ 叫约束集, 记号 $V-\min$ 表示 $f(x)$ 中的各目标被同时极小化。多目标极大化问题记作 $V-\max_{x \in X} f(x)$ 。(VMP)中的决策变量 x 和向量目标函数 $f(x)$ 可以不限于欧氏空间,一般是将 x 和 $f(x)$ 考虑为拓扑向量空间或其他抽象空间中的点进行研究。

多目标最优化的思想萌芽于1776年经济学中的效用理论。1986年,法国帕累托(V. Pareto)首先在经济平衡的研究中,考虑把本质上是不可比较的许多个目标化为单个目标的最优化问题,从而涉及多目标最优化并引进被称为帕累托最优的概念。1947年,冯·诺意曼(J. Von Neuman)和莫根施特恩(O. Morgenstern)提出在许多决策者彼此有矛盾的情况下的多目标决策问题。1951年,库普曼斯(T. C. Koopmans)从生产和分配的效率分析中考虑了多目标最优化问题,引入有效解的定义,并获得某些基本结果。同年,库恩(H. W. Kuhn)和塔克尔(A. W. Tucker)从研究数学规划的角度讨论了向量极值问题,也得到一些理论结果。1963年,扎德(L. A. Zadeh)则从控制论的研究中考虑了多目标最优化问题,引进了非劣解概念并得出某些结论。这些工作为多目标最优化学科的形成奠定了初步理论基础。

在多目标最优化的进一步发展,首先是1968年杰夫里翁(A. M. Geoffrion)为排除变态的有效解,给出了恰当有效解概念,从而获得线性加权和标量化的完备定理。1974年,游伯龙(P. L. Yu)在目标空间用一般的凸锥和由点集映射定义的控制结构表达偏爱关系,引入了锥极解和非受控解,同时得到一些有关理论结果。他的工作对以后的研究产生了相当大的影响。在上述工作的基础上,在1977~1983年间,鲍温(J. M. Borwein)、本森(H. P. Benson)和海尼格(M. I. Henig)等又分别引进在锥意义下的各种恰当有效解,并展开了广泛的讨论,取得若干一般性的结果。1992年,胡毓达(Y. D. Hu)借助由目标空间中一类特殊的非凸锥确定的较多序类,定义了多目标最优化的一类较多有效解和较多最优解。这些解利用问题中较多个目标的信息,更仔细地刻划了多目标最优化问题。

各种解的存在性、几何特性、最优性条件,以及解集的结构等,是多目标最优化研究中的重要理论问题。自70年代以来,多目标最优化问题的解关于约束集和控制结构的稳定性,则是多目标最优化研究的又一重要领域。然而,至今在这方面的工作尚不多。1979年内卡彻(P. H. Naccache),以及1980年塔尼诺(T. Tanino)和萨瓦拉吉(Y. Sawaragi)的研究具有基本意义。另外,对偶理论是多目标最优化中具有丰富内容的研究方向。自1977年以来,伊塞曼(H. Isermann)、纳卡雅玛(H. Nakayama)、杰翰(J. Jahn)和林桂云(C. Y. Lin)等在拉格朗日(Lagrange)对偶、共轭对偶、对称对偶和自身对偶诸方面,已取得不少有价值的成果。

在求解多目标最优化问题的方法上,从1971年贝纳扬(R.

Benayoun)等提出第一个交互规划方法以后,由决策者和分析者交互进行求解的多目标交互规划方法受到人们广泛的重视。1972年由杰夫里翁(A. M. Geoffrion)和戴埃(J. S. Dyer)以及1976年由齐翁茨(S. Zions)和华利尼斯(J. Wallenius)提出的方法,是多目标交互规划方法中有代表性的著名方法。自60年代以来,多目标最优化的应用在国际上获得普遍成果。解决问题的规模已达数千个变量和上千个目标。

当前,多目标最优化的研究在以下诸方面受到学者们的重视和关注:(1)关于各种解的性质的进一步探讨,特别是关于解集拓扑性质的研究。(2)无限维问题,即抽象空间中的多目标最优化问题。(3)不可微多目标最优化问题。(4)新的多目标交互规划方法。(5)多目标最优化在各领域的有效应用。研究多目标最优化理论与一般抽象空间有密切联系,它的不少理论问题尚有待进一步深入和发展。

参考文献

- 1 Koopmans T C. Cowies commission monograph. New York: Wiley, 1951, 13
- 2 Kuhn H W, Tucker A W. Proceedings of the second Berkeley symposium on mathematical statistics and probability. California Berkeley, 1951, 481~492
- 3 Geoffrion A M. J Math Anal Appl, 1968, 22: 618~630
- 4 Benayoun R, de Montgolfier, J, Tergny, J & Iaritchev, O., Math. prog, 1971, 1(3): 366~375
- 5 Yu P L. J Optim Theory Appl, 1974, 14: 319~377
- 6 Hu Y D. Optimization: techniques and applications, 1992, 1: 368~374

(上海交通大学胡毓达教授撰)

群体决策 group decision making 也叫团体决策或多人决策,是决策理论和运筹学的一个现代分支学科。研究如何联结决策群体中各个决策者的偏爱结构,对备选方案作出群体偏爱结构判断,从而进行方案择优或偏爱排序的问题。群体决策是一门与数学、经济学、心理学等学科有着密切关联的交叉性现代边缘学科。

对于备选方案为有限离散的情况,设 $\{x^1, \dots, x^n\}$ ($n \geq 3$) 是备选方案集, DM_i ($i=1, \dots, m, m \geq 2$) 是第 i 个决策者, $G = \{DM_1, \dots, DM_m\}$ 是决策群体,则群体决策过程如下:

$$\{x^1, \dots, x^n\} \rightarrow x^* \text{ 或 } x^1 > x^2 > \dots > x^n,$$

其中 x^* 为某意义下的最优方案, $>$ 表示优先关系, $j_i \in \{1, \dots, n\}$ 。由各决策者 DM_i ($i=1, \dots, m$) 对某方案 x^j 的偏爱导出群体 G 对 x^j 偏爱的法则叫社会福利函数,它是群体决策的一个基本概念。从一定意义上说,群体决策主要是研究社会福利函数的存在性和构造。

由多个决策者组成一个群体,进行集体决策的方法古已有之。但是,作为一门现代数理学科,群体决策主要形成于20世纪50年代。1951年,美国数理经济学家阿罗(K. J. Arrow)出版了《社会选择与个人价值(Social Choice and Individual Values)》一书,作者在引进合理决策的公理体系的基础上,提出和证明了著名的“不可能性定理”。阿罗的这一影响深远的名著为群体决策学科奠定了基本理论基础。1969年,多基(N. Dalbey)用戴尔菲(Delphi)法对群体决策所作的实验研究,为群体决策的实用化迈出了重要的一步。1975年,凯尼(R. L. Keeney)和柯伍德(C. W. Kirwood)从理论上讨论了群体决策的社会福利函数问题。次年,罗伯茨(F. S. Roberts)将群体决策的模式进行系统的总结,发表了“离散数学模型:群体决策”的著作。以上是群体决策研究中带有基本重要性的一些工作。

近期,1980年温德尔(R. E. Wendell)开始3对有多目标的群体决策问题的研究。1983年,戈达德(S. T. Goddard)则展开了群体决策的竞赛排序的讨论。1985年,西奥(F. Seo)和塞卡瓦(M. Sakawa)把模糊手段引入群体决策研究。1989年,王小方

(H. F. Wang)和沈生远(S. Y. Shen)则对备选方案为连续的情形,讨论了多目标线性规划的群体决策问题。在现阶段,这些研究都具有开拓新的研究方向的意义。

群体决策的各种社会福利函数的存在性、构造方法以及群体的结构,其内部的利益的分配等,仍是群体决策研究的基本课题。备选方案为连续变量的情形,以及多目标群体决策问题,则是群体决策中具有一定难度的新的热点和新方向。它的应用涉及重大国际问题的决定、经济发展规划、金融指标投资、文体竞技比赛等广泛范围。因此,对它的研究常会遇到多方面的学科知识问题。从某种意义上说,现代管理也就是一个群体决策的过程,所以,在现代社会,对群体决策作进一步深入的理论和应用研究,将是既艰难又十分必要的工作。

参考文献

- 1 Arrow K J. Social choice and individual values New York; Wiley, 1963.2
- 2 Keeney R L, Kirhwood C W. Management science, 1975, 22:430~437
- 3 Wendell R E. Operations research, 1980, 28:1100~1106
- 4 Goddard S T. Management science, 1983, 29(12):1384~1392
- 5 Seo F, Sakawa M. IEEE Trans Syst Man, Cybern, 1985, 15(1):28~44
- 6 Wang H F, Shen S Y. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1989, 19(1):59~66

(上海交通大学胡毓达教授撰)

计算数学

多重网格方法 multigrid method 简称MG方法。它最初是做为求解椭圆型边值问题的一种加速收敛技术而被提出的。最早出现在20世纪60年代初期,但当时并未引起重视。直到70年代,经A. Brandt等的研究,此方法的本质及其重要性才逐步为人们认识,并得到迅速地应用发展,成为80年代计算方法研究中的热门课题之一。对一般椭圆型边值问题,采用多重网格技术可以获得与网格步长无关的收敛因子,大大加快了迭代法的收敛速度,采用全多重网格法更可进一步减少迭代次数,从而达到最佳的计算效率。从80年代以来,多重网格技术及多层次计算思想(Multi-level computation)的应用范围也在不断扩大,被用于计算不定常问题、非椭圆型问题、积分方程、特征值问题等等,甚至许多并非由连续问题离散而导出的问题。多重网格法的计算过程适合做向量化、并行化的处理,适应当前计算机硬件的发展趋势,同时也促进了它与区域分裂法、并行算法等现代计算技术的相互结合、渗透。

经典的求解椭圆型边值问题的迭代算法如Jacobi方法、Gauss-Seidel方法等对于不同频率的误差分量具有不同的收敛因子。通常波长接近于网格步长的高频误差的衰减速度最快,而相应于低频误差的收敛因子则随频率的下降而趋向于1,即影响收敛速度的主要因素来源于误差中的低频部分。换一角度说,经典的迭代算法对误差函数通常具有较强的光滑作用,只需少数几次迭代便可有效地消除误差函数中的高频振荡部分而使其成为一个光滑函数。多重网格法正是利用许多迭代算法的这一特点构造出来的。它的基本原理是利用一组越来越粗的网格来对细网格上的近似解进行修正,从而加快迭代过程的收敛速度。具体做法是首先在细网格上进行几次迭代(采用通常的迭代法,如Gauss-Seidel迭代),以使误差函数变得光滑,然后将误差函数所满足的方程(称为余量方程)插值到粗网格上去求解,再利用粗网格上求出的(误差函数的)解对细网格上的解进行修正,从而消除细网格上的近似解的误差中的低频部分,加速迭代过程的收敛速度。上述过程中细网格上的迭代称为光滑迭代过程,而利用误差函数

在粗网格上的解对细网格上的近似解进行修正的过程称为粗网格修正过程,所使用的迭代算法称为基本迭代方法或光滑算子。双网格方法就是利用两组不同粗细的网格重复进行光滑迭代和粗网格修正直到细网格上的近似解收敛到给定精度。在许多重网格上递归地使用双网格方法,即在粗网格上求解误差函数时采用同样的基本迭代方法而借助于更粗的网格加速收敛,便是多重网格方法。在多重网格法中将经过光滑后的误差函数插值到粗网格上求解主要基于以下几条理由:(1)误差函数已足够光滑可在粗网格上得到很好的近似。(2)误差函数中主要包含低频分量,在粗网格上可更有效地消除这些分量。(3)粗网格上求解的计算量大大小于在细网格上求解。在多重网格法中误差中的不同频率的分量分别在不同粗细的网格上得到有效地消除,既减少了细网格上的迭代次数,又加快了整个过程的收敛速度。

多重网格法中除了在最粗的网格上用迭代或直接算法求出精确解(指满足一定误差要求的解)外,在中间的各层网格上只进行一至数次“光滑迭代—粗网格修正—光滑迭代”的迭代过程,然后使用所得的近似解对更细一层上的解进行修正,而不必在每层网格上都求出方程的精确解。通常将粗网格修正前的光滑迭代称为预松弛,而将粗网格修正后的光滑迭代称为后松弛。若在中间的每层网格上均进行相同次数的粗网格修正,则将粗网格修正的次数称作循环指数,通常以 γ 表示。 $\gamma=1$ 时称为V循环 $\gamma=2$ 时称为W循环,这是最常见的两种循环流程。还有一种循环流程是根据每层网格上误差的下降情况动态地控制网格间的切换,现在已不常用。

为了说明在多重网格法中怎样将余量方程插值到粗网格上求解,假设所求解的方程为 $LU=F$,其中 L 是求解区域 Ω 上的椭圆型微分算子(可以是非线性的), U 为未知函数。考虑双网格的情形,设 G_h 为细网格, G_H 为粗网格, L_h 和 L_H 分别是 L 在 G_h 和 G_H 上的离散近似(通常是有限元或差分逼近)。我们希望计算 U 在 G_h 上的满足 $L_h U_h = F_h$ 的近似解,其中 F_h 是 F 在 G_h 上的一个近似。进一步假设我们有一个粗网格 G_H 到细网格 G_h 上的插值算子 p (称为扩展算子)和一个细网格 G_h 到粗网格 G_H 上的插值算子 r (称为限制算子)。设 u_h 为 U_h (经光滑迭代后产生)的近似解, $v_h = U_h - u_h$ 为误差函数。当 L_h 为线性算子时, v_h 满足方程 $L_h v_h = F_h - L_h u_h$,我们只需将此方程右端的余量项插值到 G_H 上即可导出粗网格方程: $L_H V_H = F_H$,其中 $F_H = r(F_h - L_h u_h)$ 。可取0做为 v_H 的初始近似,求出 V_H 后再将其插回 G_h 对 u_h 进行修正: $u_h = u_h + P v_H$ 。这样导出的算法称为CS算法(Correction Storage),因为在粗网格上计算、存储的是细网格近似解的修正量(Correction),它仅适合解线性问题。当 L_h 为非线性算子时,我们可将 v_h 满足的方程写成:

$$L_h(u_h + v_h) = (F_h - L_h u_h) + L_h v_h$$

将上述方程中的余量项 $F_h - L_h u_h$ 及 u_h 插值到粗网格即可导出 v_H 在粗网格 G_H 上所满足的方程:

$$L_H(r u_h + v_H) = r(F_h - L_h u_h) + L_H(r u_h)$$

令 $u_H = r u_h$, $u_H = u_H + v_H$,可得 u_H 所满足的方程为:

$$L_H u_H = F_H$$

其中 $F_H = r(F_h - L_h u_h) + L_H(r u_h)$ 。通常取 u_H^0 做为 u_H 的初值。求出 u_H 的近似解后即可得出 $v_H = u_H - u_H^0$,然后插值到 G_h 上用于修正 u_h : $u_h = u_h + P v_H = u_h + P(u_H - u_H^0)$ 。此算法称为FAS算法(Full Approximation Scheme),因为在粗网格上计算的是 u_h 的一个全近似 u_H 。对于线性问题FAS与CS算法等效,而对于非线性问题,FAS格式可获得与线性问题一样的收敛速度。

将多重网格的基本算法(CS或FAS)与套网方法(Nested-iteration)结合则导出全多重网格法(Full MultiGrid,简称FMG)。在全多重网格法中,首先从最粗的网格开始,每次求得一层网格上的解后,用高阶插值算子(通常阶数高于粗网格修正中使用的插值算子 p),将其插到更细一层网格上做为迭代求解的初始近似,直到所得的近似解达到一定的逼近精度。每层网格上的求解则借助于CS或FAS算法来进行。对于许多椭圆型问题,

每层网格上只需做一次V循环迭代便可使近似解的代数误差低于离散带来的误差。FMG方法还可与自适应局部网格加密、Richardson外推法等技术结合,进一步提高计算效率。

多重网格法的另一发展趋势是代数多重网格法(Algebraic MultiGrid method,简称AMG)。代数多重网格法从代数的角度出发,运用多重网格法思想构造求解线性方程组的快速算法。与之相对应,传统的多重网格法也叫做几何多重网格法。代数多重网格法中根据所求解的方程组的系数构造虚拟的粗网格及粗网格方程,而不管所解问题的具体物理及几何来源,同一个程序可用于计算一大类问题,甚至某些并非由连续问题离散而产生的线性方程组。假设所求解的线性方程组为 $LU=B$,其中 L 为 $N \times N$ 矩阵, B 为已知向量。我们可将下标集合 $G=(1, \dots, N)$ 看作细网格,而选取 G 的一个子集做为粗网格。通常采用 Gauss-Seidel方法做为基本迭代法,而取粗网格方程为 $rLp v = r(B-Lu)$ (即粗网格上的算子为 rLp),其中 r 为限制算子, p 为扩展算子, u 在细网格法上的修正量。由于限制算子可取为扩展算子的转置, $r=p^T$,因此代数多重网格法中实际需确定的只有粗网格的选取和扩展算子 p 的定义。它们的构造尚属研究中的问题。

参考文献

- 1 Brandt A, Dinar N. Numerical Methods in PDEs Academic Press, 1984
- 2 Hackbusch W. Multigrid methods and applications, Springer-Verlag, 1985
- 3 McCormick S. Math Comp. 1986, 19: 1~372
- 4 McCormick S. Multigrid methods, theory, applications and supercomputing, Proc 3rd Copper Mountain conference on multigrid methods, Marcel Dekker, 1988
- 5 McCormick S. Proceedings, 4th Copper Mountain Conference on Multigrid Methods, 1989
- 6 Brandt A. Rigorous quantitative analysis of multigrid, Weizmann Institute of Sciences Report, The Weizmann Inst. of Sciences, Rehovot, Israel. 1990

(中国科学院计算中心科学与工程计算国家重点实验室 张林波副研究员、博士撰)

厄密特—费叶插值理论 theory of Hermite-Fejér

interpolation 设 $x_k \in [-1, 1] (k=1, \dots, n)$ 为一节点系, $f(x)$ 为定义在 $[-1, 1]$ 上的实函数。称满足

$$H_n(f, x_k) = f(x_k), H_n'(f, x_k) = 0, k=1, \dots, n \quad (1)$$

的 $2n-1$ 次代数多项式 $H_n(f, x)$ 为函数 $f(x)$ 的厄密特—费叶插值(多项式)(以下简记HF插值)。取雅可比(Jacobi)多项式 $P_n^{(\alpha, \beta)}(x) (\alpha, \beta > -1)$ 的零点为节点系,记对应的HF插值多项式为 $H_n^{(\alpha, \beta)}(f, x)$ 。以第一类和第二类契比晓夫(Chebyshev)多项式 $T_n(x), U_n(x)$ 的零点为节点系的HF插值分别是 $H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x)$ 和 $H_n^{(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})}(f, x)$ 。此外,对条件(1)进行修改还有拟厄密特—费叶插值和高阶厄密特—费叶插值。

一方面,由于HF插值构造简单,且对不同节点系具有不同的性质;另一方面,由于它与计算有关和在理论上的价值,使得对这类插值的研究成果较多。主要分为以下3个方向:

1. 逼近阶的估计。1916年,费叶(L. Fejér)证明,对于 $f \in C[-1, 1]$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \| H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f) - f \| = 0, \quad (2)$$

这里 $\| \cdot \|$ 表示在 $[-1, 1]$ 上的一致范数。

以后,波波维奇(T. Popoviciu)等人建立了用连续模估计(2)的逼近阶。其中较好的结果是鲍亚尼奇(R. Bojanic)于1969年建立的第1个非点态精确逼近阶:

$$\sup_{f \in H_n} \| H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f) - f \| \sim \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega(1/k), \quad (3)$$

此处和以后,记号“ $A_n \sim B_n$ ”表示存在两常数 $0 < C_1 < C_2$ 使 $C_1 A_n \leq B_n \leq C_2 A_n$;

$H_n = \{f \in C[-1, 1]; \omega(f, t) = O(\omega(t))\}$, $\omega(t)$ 是给定的连续模。

1981年,谢庭藩和哥德诺夫(S. J. Goodenough)等人各自独立地建立了体现(1)的插值性质的点态逼近阶:

$$H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x) - f(x) = O(1) \omega(f, \frac{|T_n(x)| \sqrt{1-x^2}}{n} + \frac{T_n^2(x)}{n^2}) + O(1) \frac{T_n^2(x)}{n} \int_{1/n}^1 \frac{1}{t^2} \omega(f, t \sqrt{1-x^2+t^2}) dt \quad (4)$$

$$H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x) - f(x) = O(1) \omega(f, \frac{|T_n(x)|}{n}) + O(1) \frac{T_n^2(x)}{n} \sum_{k=1}^n \omega(f, \frac{\sqrt{1-x^2}}{k} + \frac{1}{k^2}) dt \quad (5)$$

精确的点态阶是什么呢?这是沈燮昌在1983年提出的1个问题。1984年,孙燮华解决了这个问题,建立了下述的点态精确阶:

$$\sup_{f \in H_n} |H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x) - f(x)| \sim \left\{ \omega \left(\frac{|T_n(x)| \sqrt{1-x^2}}{n} + \frac{T_n^2(x)}{n^2} \right) + \frac{T_n^2(x)}{n} \sum_{k=1}^n \omega \left(\frac{\sqrt{1-x^2}}{k} + \frac{1}{k^2} \right) \right\} \quad (6)$$

不难验证(4)与(6)的右边是等价的。因此,谢庭藩给出的估计(4)是精确的。其实,(6)的第一个点态精确阶是孙燮华对拟HF插值 $Q_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x)$ 于1983年建立的。沿着这个方向,1984年谢庭藩对 $H_n^{(\alpha, \beta)}(f, x)$ 建立了点态精确阶,解决了沈燮昌于1983年提出的另一问题。随后,1986年孙燮华对一切 $-1 < \alpha, \beta \leq 0$ 建立了 $H_n^{(\alpha, \beta)}(f, x)$ 的点态精确阶。但是,所有这些结果都是对正的HF插值建立的。对于非正的HF的插值,比如,对于较简单的关于契比晓夫节点的拟HF插值 $Q_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x)$ 能否建立形如(6),或者较弱的结果(3)的问题尚未解决。就逼近阶估计这个方向而言,虽然今后的研究热点是对雅可比节点以外的其它各种节点,比如,拉盖尔(Laguerre)节点,厄密特节点、其它正交多项式的零点为节点的HF插值,高阶HF插值建立逼近阶的估计,但是,重要的进展将是对非正的HF插值建立点态的精确阶。

2. 逼近阶的渐近展开。1981年,哥德诺夫等人对拟HF插值 $Q_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x)$ 建立了点态渐近展开式

$$\Delta_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}(x) := \sup_{f \in Lip_1} |Q_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x) - f(x)| = \sqrt{1-x^2} |U_n(x)| \left\{ \frac{2}{\pi} (1-x^2) |U_n(x)| \frac{\log n}{n} + O\left(\frac{1}{n}\right) \right\} \quad (7)$$

同年,蒋元林对 $H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x)$ 建立了非点态的渐近式

$$\Delta_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}} := \sup_{f \in Lip_1} \| H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f) - f \| = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\log n}{n} + O\left(\frac{1}{n}\right) \quad (8)$$

他的结果(8)被孙燮华改进为点态的渐近式。同时,首次建立了对 $Lip_1 \alpha (0 < \alpha < 1)$ 类的渐近展开式。

1985年,哥德诺夫对偶数的 n 建立了非点态的完全的渐近式

$$\Delta_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}} = \frac{2 \log n}{\pi n} + \frac{2}{\pi} (\log \frac{8}{\pi} + \gamma) \frac{1}{n} + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k^*}{n^{2k+1}}, \quad (n=2m) \quad (9)$$

此处 γ 是欧拉(Euler)常数, $B_{2k} (k=1, 2, \dots)$ 是贝努里(Bernoulli)数,

$$A_k^* = \frac{(-1)^{k-1} (2^{2k}-1)^2 B_{2k}}{2k(2k)!} \left(\frac{\pi}{2}\right)^{2k-1}, k=1, 2, \dots$$

1990年,蒋元林又将(9)改进为点态渐近式。对于奇数 n ,相应的完全展开式是什么呢?这是一个有意义的问题。对于 $Lip_1 \alpha (0 < \alpha < 1)$ 的渐近展开问题可能更困难些,但是,这些问题的解决正是这个方向的有价值的重要进展。

1985年,谢庭藩注意到(7)式中,当 x 趋向于端点 ± 1 和节点 x_k 时,展开式的主项的阶将高于余项,也就是说,(7)式是非一致成立的。于是,谢建立了第1个一致成立的渐近式:

$$H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(x) = \frac{(1-x^2)U_n^2(x)}{n+1} \cdot \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{1-x^2} \log(1+(n+1)\arccos|x|) + |x| + \frac{1-x^2}{(n+1)|x-x_j|} + O(\sqrt{1-x^2}) \right)$$

式中 x_j 为最接近 x 的一个节点。

对于一般的雅可比节点,由于它不能通过三角替换变成 $[0, \pi]$ 上的等距节点,所以这类问题要开辟新方法。谢庭藩问

$$\Delta_n^{(0,0)}(x) = \sup_{t \in I_n} |H_n^{(0,0)}(f, x) - f(x)|$$

有怎样的渐近式?

1986年,周信龙先建立叶菲莫夫(Efimov)型渐近展开,然后解决了上述问题中 $\omega(t)=t$ 的情形。对于一般情形,甚至对 $\omega(t)=t^\alpha (0 < \alpha < 1)$ 情形,问题尚未解决。

同前节的问题一样,所有上述的结果都是对正的 HF 插值建立的。今后,若能对非正的 HF 插值建立渐近式将是这个方向上的另一重要成果。

3. 饱和问题与逆定理。德伏(R. A. DeVore)曾经提出算了 $H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x)$ 的饱和问题,这个问题,在1973年被沙巴陶斯(J. Szabados)解决。他证明:

- (i) $H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x) - f(x) = o(1/n) \Leftrightarrow f = \text{const.}$
- (ii) $H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x) = o(1/n) \Leftrightarrow g(\theta), \tilde{g}(\theta) \in \text{Lip } 1,$

此处 $g(\theta) = f(\cos \theta), \tilde{g}(\theta)$ 是 $g(\theta)$ 的共轭函数。

对于一般 Jacobi 节点,相应插值的饱和问题较困难。1985年,周信龙在这方面取得重要进展,解决了当 $-1 < \alpha = \beta \leq -\frac{1}{2}$ 时, $H_n^{(\alpha, \beta)}(f, x)$ 的饱和问题:

- (i) $H_n^{(\alpha, \beta)}(f, x) - f(x) = o(1/n) \Leftrightarrow f = \text{const}$ (10)
- (ii) $H_n^{(\alpha, \beta)}(f, x) - f(x) = o(1/n) \Leftrightarrow g(\theta) \in \text{Lip } 1$ 且 $\frac{g'(\theta) |\sin \theta|^{2\alpha+1}}{|\sin \theta|^{2\alpha+1}} = o(1)$

1987年,他进一步解决了当 $-\frac{1}{2} < \alpha = \beta \leq 0$ 时相应的饱和问题。此外,周信龙还首先建立了点态饱和定理,即(10)中的阶代之以点态阶 $\left(\frac{\sqrt{1-x^2}}{n} + \frac{1}{n^2} \right)$,从而建立相应的充要条件。

与饱和问题密切相关的是正逆定理的建立。谢庭藩于1981年建立了如下正逆定理:设 $\psi(\delta) > 0 (0 < \delta \leq 1)$ 是单调增函数,满足

$$\int_0^1 \frac{\psi(t)}{t} dt + \delta^2 \int_0^1 \frac{\psi(t)}{t^3} dt = o(\psi(\delta))$$

则

$$H_n^{(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})}(f, x) - f(x) = o\left(\psi\left(\frac{1}{n}\right)\right) \Leftrightarrow \omega(g, \delta) + \omega(\tilde{g}, \delta) = o(\psi(\delta)) \quad (11)$$

显然,除(11)外,大量的逆定理问题都未解决,还有点态正逆定理、非正的 HF 插值的饱和与正逆定理也都是今后值得研究的有意义的问题。

参考文献

- 1 谢庭藩. 数学年刊, 1981, 2: 463~472
- 2 Goodenough S J, et al. J Approx. Theory, 1981, 31: 253~260
- 3 沈燮昌. 数学进展, 1983, 31: 253~260
- 4 孙燮华. 高等学校计算数学学报, 1983, 5: 366~373
- 5 Xie Tingfang Chin. Ann Math, 1985, 6B: 457~464
- 6 Zhou Xinlong. Approx Th its Appl, 1985, 1: 17~26

(中国计量学院孙燮华教授撰)

同伦方法 homotopy methods 设 $f: C^n \rightarrow C^n$ 是 n 维复空间的连续自映射, 则求解 $n \times n$ 方程组 $f(x)=0$, 就是求映射 f 的零点。为此, 引入便于把握的零点清楚的辅助映射 $g: C^n \rightarrow C^n$, 形成连接 f 和 g 的同伦映射 $H: [0, 1] \times C^n \rightarrow C^n$, 即要求 H 连续, 并且对所有 $x \in C^n$ 都成立 $H(1, x) = g(x)$ 和 $H(0, x) = f(x)$, 那么, 从 $H(1, x) = g(x)$ 的已知零点出发, 沿着同伦 H 的零点集 $H^{-1}(0) = \{(t, x) \in [0, 1] \times C^n; H(t, x) = 0\}$

若同伦参数 t 从1变到0, 就得到目标映射 $H(0, x) = f(x)$ 的零点, 即得到原问题的解。这就是同伦方法(homotopy methods)的基本思想。

由于维尔斯特拉斯(Weierstrass)逼近定理, 在下面的叙述中, 我们都不妨假定所论的映射都是可微二次以上的光滑映射。

同伦方法对于非线性计算和值分布讨论都是有利的工具。和20世纪70年代以前的延拓法(continuation methods)相比, 现代同伦方法的主要标志是运用参数的萨德定理(Parametrized Sard's Theorem), 它使我们可以在同维空间的一个满测度子集中选择同伦的设计参数, 有足够的自由度保证所采用的同伦以原点为正则值, 于是同伦的零点集 $H^{-1}(0)$ 是 $[0, 1] \times C^n$ 中的实一维光滑流形, 即光滑简单道路。如果辅助映射和目标映射匹配得好, 有界性条件就成立, 即同伦的零点集中的光滑简单曲线都不会跑到无穷远的地方。如果所用的同伦对每个固定的同伦参数 t 都是解析的映射, 那么利用哥西-黎曼条件(Cauchy-Riemann condition)可以证明, 这些光滑简单曲线对同伦参数 t 具有严格的单调性。在上述条件之下, 从辅助映射 g 的平凡零点出发的光滑简单道路, 引导到达目标映射 f 的零点, 从而按重数计算, f 和 g 的零点数目相同。基于这种思想, 高堂安将单复变函数的罗歇定理(Rouche Theorem)很容易地推广到多复变的情形, 做了通常需要借助度理论(Degree theory)的工作, 同时大大放宽了定理的边界条件。这一推广, 是演示现代同伦方法要义的范例。

就非线性数值计算来说, 因为是循从辅助映射 g 的平凡零点出发导向目标映射 f 的零点的光滑曲线走, 所以也说这是一种路径跟踪(path-following)方法。通常, 人们把这作为微分方程初值问题处理, 采用数值分析中已经相当成熟的算法来实现。例如, 所谓预估-校正法(predictor-corrector method)就是这样一种算法: 沿切线走一步预估, 再用比如说牛顿法校正, 一步一步走下去。于是, 自然就要处理步长选择和步长调节的问题。

同伦方法的先驱工作, 是凯洛克(R. B. Kellogg)、李天岩和约克(J. Yorke)的论文《布劳维尔不动点定理的一个构造性证明及计算结果》和斯梅尔(S. Smale)的论文《价格调节的一种收敛过程和整体牛顿方法》, 它们都以数理经济学一般经济均衡理论为背景, 因为有限纯交换经济的价格调节机制都可以表示为凸包腔的连续自映射, 而均衡价格就是相应自映射的布劳维尔(Brouwer)不动点。虽然不动点的存在早已解决, 但是不动点的计算方法直到60年代末才发展起来。随后, 在周修义(S. N. Chow)、马勒-帕雷(J. Mallet-Paret)和约克1978年的论文《寻找映射的零点: 概率-构造性的同伦方法》和1979年的论文《计算多项式方程组全部零点的一种同伦方法》中, 现代同伦方法的基本架构已经形成。

前已述及, 现代同伦方法如果在同维空间的一个满测度子集中选择同伦的设计参数, 即可保证所采用的同伦以原点为正则值, 从而从辅助映射 g 的平凡零点出发的光滑简单道路, 引导到达目标映射 f 的零点, 方法即可成功。由此可见, 对于设计参数的几乎所有可能的选取, 同伦方法都能成功。根据几何概率, 人们就说: 对于设计参数的每一随机选取, 同伦方法成功的概率为1。实际使用中, 同伦方法成功的概率接近1。

除了计算均衡价格和不动点以外, 现代同伦方法最早在计算多项式方程组全部零点的问题上取得令人注目的结果。这一工作的理论背景是代数几何的代数流形讨论。设

$$f = (f_1, \dots, f_n): C^n \rightarrow C^n$$

是一个多项式映射, 每个分量 f_i 由有限个形如 $a_{i,1}x_1^{q_1} \dots x_n^{q_n}$ 的项

组成,其中 a 为非零复常数, q_1, \dots, q_n 为非负整数, x_1, \dots, x_n 为 n 个复变量。称 $q_1 + \dots + q_n$ 为项 $ax_1^{q_1} \dots x_n^{q_n}$ 的次数,记 f 中所有项的次数的最大者为 d ,称为 f 的次数。最后,称 (d_1, \dots, d_n) 为多项式映射 f 的次数。经典的贝索特(Bezout)定理断定,映射 f 的孤立零点的数目不超过 $d_1 \dots d_n$,后者称为多项式映射 f 的贝索特数。如果多项式映射 f 的孤立零点的数目正好等于它的贝索特数,就称该多项式映射满零点。已经证明,如果 f 的齐次多项式映射只有 0 这个“平凡零点”,那么 f 就满零点,即按重数计算, f 的孤立零点的数目达到它的贝索特数。

值得注意的是,实际应用中提出的多项式映射的孤立零点的数目常常比它的贝索特数少,我们称这类多项式映射为亏欠(deficient)多项式映射。因为辅助多项式映射通常是满零点的,如果仍依原来的方式从辅助多项式映射的全部零点出发进行构造和计算,势必有许多计算发散到无穷,造成很大的浪费。为了有效地估计亏欠多项式映射的孤立零点的数目并且经济地算出它的全部孤立零点,李天岩等人提出随机乘积同伦(random product homotopy)的概念,针对存在无穷远零点这个造成亏欠的原因,按照映射的具体结构来构造同伦,从而根本不跟踪无界的曲线。

同伦方法的另一个热点是特征值问题的讨论。特征值问题是亏欠多项式映射的典型例子。为了求解最多只有 n 个解的特征值问题,原来的同伦方法需要跟踪 2^n 条曲线,其中只有占很小比例的 n 个路径跟踪过程是收敛的,其余 $2^n - n$ 个计算都浪费了。不仅如此,在这 2^n 个路径跟踪之中,判断哪 n 个将收敛,尤其是棘手的问题。引入随机乘积同伦以后,只需跟踪 n 条路径,并且它们都将收敛到所论的特征值问题的解。就完全解决相应问题所需跟踪的曲线的数目来说,这已是最好可能的结果。

还要指出的是,只要有足够的处理器,就可以互不干扰地跟踪从辅助映射的各个平凡零点出发的光滑曲线。所以,同伦方法本身具有并行实现的结构。此外,从以上介绍可知,它还具有经常大范围收敛的特点和整批求解的特点。

参考文献

- 1 Kellogg R B, et al. SIAM J Numer Anal, 1976, 4: 473~483
- 2 Smale S A. Math Economics, 1976, 3: 1~14
- 3 Chow S N, et al. Math Comp, 1978, 32: 887~899
- 4 Chow S N et al. Springer Lecture Notes in Math, 1979, 730: 77~78
- 5 Li T Y, Sauer T. Lin Alg Appl, 1987, 91: 65~74
- 6 Li T Y, Sauer T, Yorke J Numer Math, 1987, 51: 481~500
- 7 李天岩. 数学进展, 1988, 17: 260~266
- 8 王则柯. 自然杂志, 1989, 12: 664~667
- 9 王则柯, 高堂安. 同伦方法引论. 重庆: 重庆出版社, 1990
- 10 Li T Y, Wang X. Solving deficient polynomial systems with homotopies which keep the subschemes at infinity invariant. Math. Comp, 1991, 56: 693~710

(中山大学王则柯教授撰)

数值方法计算复杂性理论 computational complexity theory of numerical methods

复杂性的科学研究,大体分为两个方面,计算机科学的复杂性理论和数值计算的复杂性理论。两者既有密切的联系,又有明确的界限。

一种数值计算方法,通常是对于一类问题提出来的。本来,研究计算方法,就一定要考虑计算成本或算法效率的问题。在这个意义上,数值方法的效率讨论源远流长。然而,直到20世纪70年代,仍局限于计算速度和收敛阶的讨论,即在通常关于初始值的一定条件下,计算有几阶收敛。这是一种局部的和渐近的讨论。进入80年代以来,人们开始从整体上,而不是在局部探讨某种算法的总成本或者平均成本,回答在随机地选取一个初始值的

条件下,解决某种类型的数值计算问题的平均成本是多少这样的问题。

随着社会经济和科学技术的发展,人们所面对的科学计算问题规模越来越大。同一种算法,解小规模的问题须花费时间少,解大规模问题花费时间多。值得研究的是,随着问题规模的增大,使用这种算法解决问题所需要的计算时间如何增加。设想把问题的规模记作 n ,关于用某种算法求解问题所需的时间的理论估计记作 $T(n)$ 。我们试从两个角度比较 $T(n) = n^5$ 和 $T(n) = 2^n$ 这样两种算法。首先假定机器的速度不变,比方说都是 $1\mu s(1 \times 10^{-6}s)$ 进行一次运算,那么当问题规模 n 增大时,为了解决问题所需要的时间增加的情况如下:

n	10	20	40	60
$T(n) = n^5$	0.1s	3.2s	1.7min	13.0min
$T(n) = 2^n$	0.001s	1.0s	12.7d	36600a

现有机器	速度 100 倍的机器	速度 1000 倍的机器
$T(n) = n^5$	1000	2500
$T(n) = 2^n$	1000	1007
		3980
		1010

换一个角度,如果在现有的计算机上,两种算法在 1h 内所能解决的问题的规模都是 $n = 1000$,那么当机器的运算速度提高时,1h 内所能解决的问题的规模增大的情况如下:

现有机器 速度 100 倍的机器 速度 1000 倍的机器

$T(n) = n^5$ 是多项式关系的代表, $T(n) = 2^n$ 是指数式关系的代表。由此可见,如果某种算法所面对的问题的规模和解决问题所需要的时间之间是多项式关系,那么尽管用现有的机器不能求解规模太大的问题,但是随着机器速度的提高,将来这种算法将足以对付那样规模的问题。相反,如果是指数式关系,那么就这种算法而言,机器速度的提高,很可能将赶不上人们所面临的问题的规模的增长,从而我们不得不寻求新的算法。基于这样的认识,如果 $T(n)$ 与 n 的关系是多项式型的关系,算法将被认为是可接受的,并且称为是多项式时间算法 (polynomial-time algorithms); 否则,如果 $T(n)$ 与 n 的关系是指数型的关系,算法将被认为是不可接受的,那是所谓指数时间算法。这里要注意的是: ① $T(n)$ 不必是绝对的机器时间,也不必是基本机器动作的数目。为讨论的方便,使用更多的是执行所论算法的基础步骤的数目,例如方程或方程组求解的牛顿方法的牛顿迭代次数,线性规划问题单纯形法的转轴运算次数,等等。② 某些原来不看作指数函数关系,但是肯定不是多项式的情形,例如 $T(n) = cn^{1.5n}$, c 常数,也看作是指数式的关系。所以,计算复杂性理论所说的指数时间算法,可以理解为多项式时间算法以外的算法。

数值方法计算复杂性理论的基本内容,就是判别和论证现有的各种算法是不是多项式时间算法,帮助寻找和设计新的多项式时间算法。

从最坏情形分析,发展到平均情形分析或概率情形分析,是80年代以来数值方法计算复杂性讨论的新的特征。我们以代数方程牛顿方法(Newton method)为例,说明这一进展的意义。设 $f(x)$ 是一个多项式,那么 $f(x) = 0$ 就是一个代数方程。求解代数方程的牛顿方法,可以表为下面的迭代公式:

$$x_k = x_{k-1} - f(x_{k-1})/f'(x_{k-1}), \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

其中, x_0 称为迭代初值。如果初值选得好,牛顿方法收敛很快;如果初值选得不好,牛顿方法收敛很慢,甚至根本不收敛。数学研究,有着眼于最坏情况的传统。一个命题,只有当所述结论在命题条件的最坏情况下也能成立,才算成立。这就是所谓一般性(generality)的含义。算法效率的讨论,就其本义来说,是以计算收敛为前提的。如果不收敛,即计算不成功,就谈不上计算的效率。这种传统,导致最坏情形分析的计算复杂性讨论,它把牛顿方法等许多虽然有时失效但是经常用得很好的算法拒之门外。

近年来,除了必然发生的事件以外,数学开始十分关注“几乎必然要发生”的事件,关心发生概率为一(即百分之百)的事件。这就是通有性(genericity)的含义。就应用问题而言,它包括讨论所谓大概率(即接近百分之百)的事件。牛顿方法计算之收敛,就是大概率事件,从而可以进行牛顿方法计算复杂性讨论。

斯梅尔(S. Smale)就代数方程的牛顿方法提出逼近零点(approximate zero)的概念。多项式的每个单零点,都联系一个牛顿方法的快速收敛邻域,逼近零点构成该邻域的核心部分。一旦找到逼近零点,余下的计算量就微不足道了。斯梅尔设置步长参数 $h, 0 < h \leq 1$, 先用比较细致的参数的牛顿迭代

$$x(k) = x(k-1) - hf(x(k-1))/f'(x(k-1)), k=1, 2, 3, \dots$$

寻求逼近零点。他不是让 $x(0)$ 去配多项式,而是固定 $x(0)=0$, 看哪一些多项式能与这个 $x(0)$ 匹配得好。结果发现,在整个多项式空间中,匹配得不好的多项式只占据测度为零的一个子集。把这些最坏的多项式和其它一些较坏的多项式排除在外,对余下的多数多项式,参数的牛顿迭代会很快找到多项式的逼近零点。循此思路,斯梅尔证明,给定 $p, 0 < p < 1$, 和正整数 n , 以下结论成立的概率至少为 $1-p$: 参数牛顿迭代将在 cn^3/p^7 步内为任一 n 阶多项式找到一个逼近零点,这里 $c > 0$ 是一个常数。采用计算复杂性理论的行话,那就是:概率地说来,牛顿方法是多项式时间算法。

有资料表明,当今世界经济效益最大的科学计算方法,是线性规划问题的单纯形算法。几十年来,单纯形算法的实际应用记录极好,以致它的创始人丹齐克(G. B. Dantzig)撰文表示,他相信单纯形算法的计算成本,是问题规模的线性函数。但是另一方面,有人在70年代初设计了一类线性规划问题,证明对于这类问题,单纯形算法虽然仍然有效,但计算成本是问题规模的指数函数。按照斯梅尔的思路,对于单纯形算法,那类人为设计而实用中迄今未遇到过的问题,恰恰是最坏的情况。斯梅尔证明,概率地说来,单纯形算法不但属于多项式时间算法,而且是其中最好的线性时间算法。

其它重要的工作包括对增量算法、一般收敛算法、单纯同伦算法的计算复杂性的讨论,学科本身的理论构架,还有以有限成本达到无限精度的讨论。动力系统理论、拓扑学、图论、辩群理论、代数几何、几何概率、单叶函数理论,都在这一讨论中扮演重要的角色。在这里,纯粹数学的若干深层研究,显示与数值方法计算复杂性理论的关联。

参考文献

- 1 Smale S. The fundamental theorem of algebra and complexity theory Bull. AMS(N. S.), 1981, 4: 1~36
- 2 Smale S. Math Prog, 1983, 27: 241~262
- 3 王则柯等. 中国科学(A辑), 1984, 27: 8~16
- 4 Shub M & Smale S. SIAM J Comput, 1986, 15: 145~161
- 5 Smale S. Proceedings of International Congress of Mathematicians, AMS, 1987, 87~121
- 6 Renegar J. Math. Prog, 1988, 40: 113~163
- 7 Smale S. SIAM Review, 1990, 30: 211~220
- 8 Renegar J, Shub M Math Prog, 1992, 53: 1~16
- 9 王则柯. 计算的复杂性. 长沙: 湖南教育出版社, 1993

(中山大学王则柯教授撰)

加权穆尔—彭罗斯广义逆

weighted Moore-Penrose inverse 设 A 为 $m \times n$ 阶矩阵, M 和 N 分别为 m 和 n 阶 Hermitc 正定阵, 则存在唯一的 $n \times m$ 阶矩阵 X , 满足 $AXA=A, XAX=X, (MAX)^* = MAX, (NXA)^* = NXA$, 称 X 为 A 的加权 Moore-Penrose 广义逆, 简称加权 $M-P$ 逆, 并记作 $X = A_{MN}^+$. 当 M 和 N 分别为 m 和 n 阶单位阵 I_m 和 I_n 时, $A_{MN}^+ = A^+$, 称为 A 的 $M-P$ 逆. 当 A 为非奇异方阵时, $A^+ = A^{-1}$.

利用方阵 A 的正则逆 A^{-1} , 可以表示非奇异线性方程组 $Ax=b$ 的解 $x=A^{-1}b$. 利用加权 $M-P$ 逆 A_{MN}^+ 可以表示矛盾线性方程组 $Ax=b$ 的极小 N 范数 M 最小二乘解 $x=A_{MN}^+b$. 为得到这个解, 有必要研究 A_{MN}^+ 的计算方法. 近年来, 已经得到了计算 A_{MN}^+ 的有限算法(王国荣, 1987), 嵌入算法(王国荣, 1990)和递推算法(王国荣, 陈水林, 1986). 递推算法实质上是给出分块阵 $A_k = [A_{k-1}, a_k]$ 的加权 $M-P$ 逆用 A_{k-1} 的加权 $M-P$ 逆表示.

其中 A_{k-1} 是 A_k 的前 $k-1$ 列组成的矩阵, a_k 是 A_k 的第 k 列. 作为推广, 缪建铭(1989)讨论了分块阵 $A=[UV]$ 的加权 $M-P$ 逆的表示, 还研究了秩一修正矩阵 $B=A-cb^*$ 的加权 $M-P$ 逆表示, 并给出了矩阵之和 $U+V$ 的加权 $M-P$ 逆表示, 其中 U 和 V 满足 $UN^{-1}V=0$ 或 $U^*MV=0$.

因为计算机上实际执行的是计算某个扰动线性方程组 $(A+E)(x+\delta x)=b+\delta b$ 的极小 N 范数 M 最小二乘解 $x+\delta x=(A+E)_{MN}^+(b+\delta b)$. 为了估计扰动解 $x+\delta x$ 与原解 x 之间的误差 $\|\delta x\|_N$, 所以有必要研究加权 $M-P$ 逆的扰动理论. 王国荣(1987)指出, 当 (w) 条件: A, E 是 $m \times n$ 阶矩阵, $\text{rank}(A+E) = \text{rank}(A)$, $\Delta = \|A_{MN}^+ - (A+E)_{MN}^+\|_{NM} \|E\|_{MN} < 1$ 成立时, 给出了 $(A+E)_{MN}^+ - A_{MN}^+$ 的表达式进而给出 $\|(A+E)_{MN}^+ - A_{MN}^+\|_{NM} / \|A_{MN}^+\|_{NM}$ 和 $\|\delta x\|_N$ 的上界估计式, 此外还讨论了加权 $M-P$ 逆的连续性问题. 陈果良(1992)修改 (w) 条件中的 $\text{rank}(A+E) = \text{rank}(A)$ 为 $R(E) \subset R(A), R(E^*) \subset R(A^*)$, 得到 $\|(A+E)_{MN}^+ - A_{MN}^+\|_{NM} / \|A_{MN}^+\|_{NM}$ 更好的上界估计式.

随着并行计算机的出现, 各类问题的并行算法设计和研究成为当前热门的课题, 80年代末, 国际上开始出现研究 $M-P$ 逆并行算法的论文(De Vcl, Krishnamurthy, 1987~1988). 几乎同时, 王国荣和陆森泉(1988)不仅研究了 $M-P$ 逆而且也研究了加权 $M-P$ 逆的并行算法, 讨论了算法的计算复杂性, 并且给出了一个重要的等价性定理. 继续研究适合各类并行计算机的行之有效的加权 $M-P$ 逆的并行算法是很有意义的工作。

参考文献

- 1 Wang Guorong, Chon Yonglin, A recursive Algorithm for Computing the Weighted Moore-Penrose Inverse A_{MN}^+ . JCM, 1986, 4(1): 74~85
- 2 Wang Guorong, A Finite Algorithm for Computing the Weighted Moore-Penrose Inverse. A M C, 1987, 23: 277~289
- 3 王国荣. 加权广义逆的扰动理论. 应用数学与计算数学学报, 1987, 1: 1. 48~60
- 4 De Vcl O Y, Krishnamurthy E V. A Iterative Pipelined Array Architecture for the Generalized Matrix Inversion. IPL, 1987(88), 26: 263~267
- 5 Wang Guorong, Lu Sonquan. Fast Parallel Algorithm for Computing Generalized Inverses A^+ and A_{MN}^+ J C M, 1988, 6(4): 348~354
- 6 Miao Jian-ming. Representation for the Weighted Moore-Penrose Inverse of a Partitioned Matrix, J C M 1989, 7(4): 321~323
- 7 缪建铭. 秩一修正矩阵的加权 Moord-Penrose 逆. 上海师范大学报, 1988, 17(3): 21~26
- 8 缪建铭. 矩阵之和的加权 Moord-Penrose 逆. 应用数学和计算数学学报, 1989, 3(2)
- 9 Wang Guorong. An Imbedding Method for Computing the Generalized Inverse, J C M 1990, 8(4): 27~31
- 10 陈果良. 加权条件数在矩阵扰问题中的极小性质. 华东师大学报, 1992, 1: 1~7

(上海师范大学王国荣教授撰)

信赖域法

trust region methods 一类很新的求解非线性规划问题的计算方法. 它和经典的线性搜索方法并列为目前求解非线性规划问题的两类主要数值方法. 信赖域法思想新颖, 算法可靠, 具有很强的收敛性质. 它不仅能很快地求解良态问题, 而且也能有效地求解病态(ill-coditoned)的优化问题. 信赖域法的研究是近年来非线性规划的领域的一个重要研究方向, 是当今寻求如何构造新的优化计算方法的主要途径.

信赖域法起源于鲍尔(M. J. D. Powell)1970年的工作. 他提出一个求解无约束优化的算法, 该算法在每次迭代时强制性地要

求新的迭代点与当前迭代点之间的距离不超过某一控制量。鲍尔引入控制步长这一技巧,是因为他发现传统的线搜索方法常常由于线搜索步太大而导致算法失败,特别是当问题病态(ill conditioned)时尤为如此。控制步长实质上等价于在当前迭代点为中心的一个邻域内对一个近似于原问题的简单模型求极值。这种技巧可以理解为我们只在一邻域内对近似模型信赖(trust),所以这一邻域被称为信赖域(trust region)。利用这一技巧的方法也就称为信赖域法。后来,人们发现控制步长在模型问题是二次函数时等价于对模型函数的海色阵增加一个纯量阵(scalar matrix),后者在利温伯格(K. Levenberg)1944年以及马夸尔特(D. W. Marquardt)1963年的求解非线性最小二乘方法中就已用到。

1975年鲍尔给出了信赖域法的第一个收敛性结果。他在仅假定函数连续可微、近似海色阵满足 $\|B_k\| \leq c(1 + \sum_{i=1}^k \|s_i\|)$ 的条件下证明了无约束优化的信赖域法的全局收敛性。鲍尔还给出了一个超线性收敛性定理。1984年鲍尔将要求收敛的条件放松到 $\|B_k\| \leq ck$ 。鲍尔证明的收敛性结果都是弱收敛意义下的,即 $\lim_{k \rightarrow \infty} \inf \|g_k\| = 0$ 。这种弱收敛结果在实际计算中对于保证算法有限终止是足够的。在稍强的假定下,舒尔茨(G. A. Shultz)、许纳博(R. B. Schnabel)和伯德(R. H. Byrd)证明了无约束优化的信赖域法在强收敛意义下的全局收敛性。

1982年弗莱彻(R. Fletcher)提出了用信赖域法来求解复合非光滑优化(composite nondifferentiable optimization)问题。他给出了一个模型算法,并在模型二次函数的海色阵一致有界的假定下证明了该算法的全局收敛性。1985年袁亚湘(Y. Yuan)在仅要求近似海色阵满足 $\|B_k\| \leq ck$ 的假定下证明了一类非光滑优化的信赖域法的全局收敛。

1984年袁亚湘构造出一个极大极小问题,指出了一类非光滑优化的信赖域法仅有线性收敛速度。造成这种线性收敛的原因是在每次迭代时函数的真实下降与预估下降之比都小于 $\frac{1}{2}$ 。这个比值不靠近1,使得算法错误地认为点到还未收敛,故缩小信赖域半径,导致信赖域约束在每次迭代都是积极的,因而破坏了算法的超线性收敛性。

1982年弗莱彻提出了一个二阶校正步(second order correction step)信赖域法。二阶校正步法基本上和弗莱彻的模型信赖域法一样,只是在一些迭代中求解一个二阶校正子问题。1985年袁亚湘证明了对于包括极大极小在内的一类复合非光滑优化问题,如果拉格朗日(Lagrange)乘子的估计较好,则弗莱彻的二阶校正步法是二次收敛的。后来,帕克(J. V. Burke)将袁亚湘的结果推广到一般的复合非光滑优化。

信赖域方法应用到约束优化的一个明显困难,是线性化的约束条件在信赖域内可能无解,于是不能像线搜索方法那样在线性化约束条件的可行域内找新的迭代点。对这一困难目前主要有两种处理办法。第1种是将线性化约束条件中的约束函数值项都乘上一个属于 $[0, 1]$ 的乘子,它实际上是将每个线性化约束的可行域向当前迭代点平移。这种技巧在线搜索方法逐步二次规划方法(SQP)中已被用来处理线性化约束无解的情形。利用这一技巧的信赖域法有1985年瓦蒂(A. Vardi)提出的方法以及1987年伯德等人提出的方法。第2种办法是将所有线性化约束之误差的平方和当作一个约束,使得该平方和不超过某一容许量。这种技巧于1985年由西莉斯(M. R. Celis)、丹尼斯(J. E. Dennis)和塔皮亚(R. A. Tapia)提出。1991年鲍尔和袁亚湘所提出的信赖域法也采用了该技巧。

约束优化信赖域法的另一个重要因素是价值函数(Merit function)的选取。价值函数是用来判别一个试探点是否可以接受的,它通常是某种形式的罚函数。在瓦蒂方法、伯德—许纳博—舒尔茨方法、和西莉斯—丹尼斯—塔皮亚方法等中,价值函数是 L_1 精确罚函数。利用 L_1 精确罚函数的优点在于比较容易证明

算法的全局收敛性。但是由于 L_1 精确罚函数是非光滑的,马洛托斯(N. Maratos)效应可能发生,故算法不可能保证超线性收敛。为此,伯德等人在1987年提出的算法中当试探步不能被接受时就计算一个二阶校正步,这样就保证了算法的总体收敛性。

1991年,鲍尔和袁亚湘在他们的算法中用弗莱彻的光滑精确罚函数作为价值函数。利用光滑罚函数的优点是马洛托斯效应不可能出现,从而比较容易得到超线性收敛结果。美中不足的是,计算该罚函数的导数时需要目标函数和约束函数的二阶导数。所以,鲍尔和袁亚湘提出了一种特殊的价值函数预估下降量的近似算法,避免了计算任何二阶导数且保证了算法的收敛性和超线性收敛性。

在西莉斯—丹尼斯—塔皮亚方法和鲍尔—袁亚湘方法中,每次迭代需要求解的子问题是在二个凸的二次约束下求一个二次函数的极小。袁亚湘1990年对该子问题进行了深入的研究,证明了在一定条件下该子问题的拉格朗日函数的海色阵最多只有一个负特征值。1991年袁亚湘给出了一个求解凸的子问题的算法,该算法是基于对偶问题,利用了投影牛顿步。这个算法具有超线性收敛性,但缺点是不适合求解非凸问题。1992年张寅提出另一个求解凸子问题的算法,该算法采用变量代换,把子问题化成一个等价的一维优化问题,然后求解。目前,对于一般非凸的子问题还没有好的求解方法,是有待解决的重要问题。

1991年,诺塞达尔(J. Nocedal)和袁亚湘提出了将信赖域法和线搜索方法相结合的思想,并依此给出了一个利用信赖域以及回溯(back-tracking)技巧的求解无约束优化的算法。这是综合两大类算法之优点的一个有益的探讨,但该方面的工作有待进一步深入。

信赖域法是非线性规划的一个较新的方向,它将吸引更多的优化工作者,信赖域法的研究热点将主要是寻求有效的求解约束优化问题的信赖域法,特别是能较好地处理不等式约束问题的算法;对已有的信赖域子问题提供好的计算方法;构造新的信赖域子问题;探讨信赖域法在其它优化分支如线性规划等中的应用;以及进一步深入将信赖域与线搜索相结合的研究等。

参考文献

- 1 Powell M J D. Numerical Methods for Nonlinear Algebraic Equations. London: Gordon and Breach Science, 1970, 87~144
- 2 Powell M J D. Nonlinear Programming 2. New York, Academic Press, 1975, 1~27
- 3 Fletcher R. Math. Prog Study, 1982, 17: 67~76
- 4 Fletcher R. Numerical Analysis Berlin, Springer - Verlag, 1982, 85~115
- 5 Powell M J D. Math Prog, 1984, 29, 297~303
- 6 Yuan Y. Math Prog, 1985, 31, 269~285
- 7 Vardi A. SIAM J Numer Anal, 1985, 22, 575~591
- 8 Celis M R. et al. Numerical Optimization SIAM. Philadelphia, 1985, 71~82
- 9 Byrd R. et al. SIAM J. Numer Anal, 1987, 24, 1152~1170
- 10 Yuan Y. Math. Prog, 1990, 47, 53~63

(中国科学院计算数学所袁亚湘研究员撰)

拟牛顿法 quasi-Newton methods 非线性规划的一类计算方法。这类方法的基本思想是利用梯度差来构造满足“拟牛顿方程”的近似海色阵。拟牛顿法具有不需要计算二阶导数、收敛速度快等优点,它是目前求解中小规模(从几个到几百个自变量)的非线性规划问题最有效的数值方法。

第1个拟牛顿法由美国的戴维登(W. C. Davidon)1959年提出。由于戴维登的算法并没有在正式学术杂志上发表,而是在一份Argonne实验室的科研报告中所介绍,故这一算法开始并未受到重视。1963年英国弗莱彻(R. Fletcher)和鲍尔(M. J. D. Powell)对戴维登的算法进行了分析、整理和修改,所以这一算法

被人称为DFP方法。此后,拟牛顿法的研究受到许多优化专家的重视。另一个著名的拟牛顿法由布罗伊登(G. C. Broyden)、弗莱彻、戈德法伯(D. Goldfarb)、夏洛(D. F. Shanno)在1970年独立地提出,故被称为BFGS方法。在60年代末期,布罗伊登等人提出对称秩1算法(SR1),这是形式最简单的对称拟牛顿修正公式。1970年鲍尔将非结称秩1修正公式对称化,导出一个秩2公式,被称为“鲍尔对称化布罗伊登”(PSB)公式。后来,更多的拟牛顿修正公式被提出,著名的有布罗伊登族和黄(H. Y. Huang)族。DFP法、BFGS法和SR1法都属于布罗伊登族。

1968年迈尔斯(G. E. Myers)首先发现对于凸的二次函数,精确线搜索下的DFP方法实质上是一个共轭梯度法,从而证明了DFP方法具有二次终止性。1971年鲍尔证明了对于一致凸函数,精确线搜索下的DFP方法是收敛的,且具有Q-超线性收敛性。鲍尔的证明技巧是估计近似海色阵的迹。他还利用精确线搜索条件导出了一个非常重要的恒等式。1972年狄克逊(L. C. W. Dixon)证明了黄族中所有的拟牛顿法在精确线搜索下产生相同的点列。1973年布罗伊登、丹尼斯(J. E. Dennis)和莫雷(J. J. Moré)提出一种新的分析拟牛顿法收敛性的技巧,他们利用修正矩阵每次修正后范数不可能增加太大这一特性证明了几个著名的拟牛顿法如DFP法、BFGS法以及SR1法等方法在步长为1时的局部超线性收敛性。

自从鲍尔证明DFP法的超线性收敛性以来,人们十分关注精确线搜索下的拟牛顿法的收敛阶问题。1973年布尔迈斯特(W. Burmeister)首先证明了DFP法的n步二次收敛性。后来,这一结果被里特(K. Ritter)、舒勒(G. Schuller)等人进一步改进,但他们所需的条件太苛刻。在通常的条件下,鲍尔于1984年证明了 $\|x_{k+1} - x^*\| = O(\|x_k - x^*\| \|x_{k+1} - x^*\|)$,并且指出拟牛顿法的Q-收敛阶可以小于R-收敛阶。同年,袁亚湘(Y. Yuan)举例证明拟牛顿法的最小Q-收敛阶是1,即不可能存在常数 $\delta > 0$ 使得 $\|x_{k+1} - x^*\| = O(\|x_k - x^*\|^{1+\delta})$ 。

关于非精确线搜索下拟牛顿法的全局收敛性,鲍尔1976年开创性地证明了BFGS方法的收敛性。鲍尔的基本思想是估计修正矩阵的迹和行列式以及利用它们之间的关系。1986年谢元富利用鲍尔的技巧将鲍尔的关于BFGS法收敛性的结果推广到满足一定条件下的一组拟牛顿法。不足的是,谢元富的条件依赖于修正矩阵的条件数,而当条件数大时,满足要求的拟牛顿法实质上非常接近BFGS方法。1987年,伯德(R. H. Byrd)、诺塞达尔(J. Nocedal)和袁亚湘证明了除DFP法外的整个布罗伊登族的全局收敛性。DFP法的全局收敛性至今悬而未决。

对于非凸函数的情形,至今仍没有任何全局收敛性结果。当目标函数非凸时的一个主要难点是 $\|y_k\|^2/s_k^T y_k$ 不一定有界,而 $\|y_k\|^2/s_k^T y_k$ 的有界性对于估计近似海色阵的迹是至关重要的。在假定迭代点列收敛的前提下,鲍尔在1972年证明了如果 $n=2$ 则精确线搜索下的DFP法必收敛于目标函数的稳定点。1988年康定国和俞文颀将鲍尔的结果推广到 $n > 2$ 。

1989年伯德和诺塞达尔提出了用函数 $\psi(A) = \text{tr}(A) - \ln(\det(A))$ 来研究算法的收敛性。 ψ 函数技巧可理解为鲍尔分析拟牛顿法收敛性的技巧加工和整理。利用 ψ 函数分析算法的收敛性更简单、明了。而且 ψ 函数同时还可用来分析算法的超线性收敛性。不足的是,目前利用 ψ 函数分析收敛性常要求目标函数一致凸,而鲍尔原始的技巧只需要目标函数是凸的就可以了。另外,现在看来, ψ 函数技巧对于分析DFP法的全局收敛性仍然无能为力。分析DFP法全局收敛性的主要难点在于DFP法的修正公式中没有 $-\frac{B_k s_k s_k^T B_k}{s_k^T B_k s_k}$ 项,而这一项在BFGS法中可控制 $\text{Tr}(B_k)$

增长的速度。要证明DFP法的收敛性的关键在于估计 $\sum -\frac{s_k^T B_k s_k}{s_k^T y_k}$ 或等价地估计 $\sum \frac{s_k}{s_k^T y_k} [\|g_{k+1}\|^2 - \|g_k\|^2]$ 。另外一种解决这一问题的可能是引入一种新的类似于 ψ 函数的方法。

对于大规模问题,拟牛顿法所需内存很大。为此,1977年佩

里(J. M. Perry)和夏洛提出有限内存(Limited Memory)拟牛顿法。有限内存拟牛顿法每若干步迭代后重新置近似海色阵为单位阵,它实质上是共轭梯度法的推广。1989年,诺塞达尔和刘(D. C. Liu)每若干步迭代后取近似海色为 $\frac{\|y_k\|^2}{s_k^T y_k} I$ 得到一个有限内存BFGS方法。

早期人们应用拟牛顿法时都是直接修正近似海色阵 B_k 。这样每次迭代需要求解一个n阶线性方程组。为此,后来人们利用逆矩阵的修正公式直接产生 $H_k = B_k^{-1}$,但美中不足的是修正 H_k 的数值稳定性往往比修正 B_k 要差得多。为了使算法既基于修正 B_k ,又避免解线性方程组,吉尔(P. E. Gill)和默里(W. Murray)于1972年提出把 B_k 分解成 LDL^T 的形式,然后每次迭代修正L和D。吉尔和默里的方法具有计算最小、数值稳定等优点,但它的缺点是程序复杂。1987年鲍尔提出修正矩阵 H_k 的共轭分解。鲍尔的方法是将 H_k 分解成 $Z_k Z_k^T$,然后修正 Z_k 的每一列,使得 Z_k 的列向量是共轭方向。这一方法的优点是便于在并行计算机上实现,而且可对 Z_k 的各列进行加权使得 B_k 的条件数不太大。

关于拟牛顿法的研究成果已有很多,但仍有不少重要的问题待解决,例如:DFP方法对凸函数在非精确线搜索下的全局收敛性、BFGS方法对于非凸函数的收敛性、拟牛顿法在精确线搜索下的收敛速度是否可达到 $\|x_{k+1} - x^*\| = O(\|x_k - x^*\| \|x_{k+1} - x^*\|)$ 等。另外,拟牛顿修正公式的新的加权(sizing)技术、列调节(column scaling)技术,有限内存拟牛顿法,可分离优化问题的分块(partitioned)拟牛顿方法,以及并行(parallel)拟牛顿方法等也将是研究的热点。

参考文献

- 1 Davidson W C. AEC Res and Dev Report, ANL-5900, 1959
- 2 Fletcher R, et al. The Computer J, 1963, 6: 163~168
- 3 Broyden G C. Inst Maths Appl, 1970, 6: 222~231
- 4 Powell M J D. J Inst Maths Appl, 1971, 7: 21~36
- 5 Dixon L C W. J Opt Theory Appl, 1972, 10: 34~40
- 6 Dennis J E, et al. Math Comput, 1974, 28: 549~560
- 7 M J D Powell, R W Cottle and C. E. Lemke, eds., Nonlinear Programming, SIAM-AMS Proceedings vol. IX (SIAM publications, Philadelphia, 1976, 53~72
- 8 Yuan Y. IMA J. Numer Anal, 1984, 4: 233~239
- 9 Byrd R, et al. SIAM J Numer Anal, 1987, 4: 1171~1190
- 10 Powell M J D. Math Prog, 1987, 38: 29~46
- 11 Byrd R, et al. SIAM J Numer Anal, 1989, 26: 727~739

(中国科学院计算数学所袁亚湘研究员撰)

边界元方法 boundary element method BEM 又称边界积分方程法(BIEM)。是在经典的积分方程方法的基础上吸收有限元离散技术而发展起来的求解偏微分方程的数值方法。它的基本思想是尽可能地把原问题的求解转化为数值求解边界积分方程,把原问题的解用边界积分的形式来表示。它的主要优点是:把区域上的边值问题转化为边界上的积分方程,空间维数降低一维,一般只要求出定义在边界节点上的某些确定的值就可用于计算区域内任意点上所需物理量的值,因而可节省数据准备工作和计算量。该方法特别适用于求解无限区域上的问题。另一个显著的优点是:由于离散误差仅来自于边界,故计算精度高,在区域内部还有高阶超收敛性,特别适用于那些变化率剧烈的问题,如应力集中等问题。该方法在工程和科学计算上得到广泛应用的另一个因素是它的通用性强,不受区域形状的限制,易于编制计算程序、制作有效的工程计算软件。

通过边界积分方程来求解边值问题的思想可追溯到19世纪中期,例如Helmholtz, Rayleigh。早期的应用主要在于位势理论和流体力学方面,例如Kellogg, Lamb。20世纪50年代原苏联学者采用位势积分方程来研究数学物理方程的解和解的适定性

作了很多理论工作,如 Михлин, Купрадзе, Смирнов。把位势积分用于数值计算始于 60 年代,如 Jaswon, Symm 和 Hess。从工程应用的观点把直接边界积分方程用于求解弹性静力学的工作则始于 Cruse 和 Rizzo(1968)。在其后的 10 年中,随着电子计算机的广泛使用,也由于有限元法研究的深入和对工程计算的巨大影响,数值求解边界积分方程的比较切实可行的离散化技术逐渐形成,边界积分方程与其它数值计算方法的关系也逐渐明了。从着眼于求边界积分方程数值解的离散技术和对边界离散的方式而言,边界积分方程法逐渐被边界元法的称呼代替。1978 年第 1 届工程中的边界元法国际会议在英国南安普敦大学召开,第 1 本边界元法专著问世,标志边界元法的兴起。

边界元法直接用边界物理量(位势和流通量、位移和面力等)作为求解变量来建立边界积分方程(通过广义格林公式或加权余量法等),称为直接法。从虚拟的密度函数或虚设在边界的虚荷载作为求解变量来形成边界积分方程(位势积分),称为间接法。通常用配置法或配点法(Collocation)来离散边界积分方程。配置法是一种以满足纯插值约束条件的方式寻求算子方程近似解的方法。用于边界元法时,首先要将边界剖分成单元,在每个单元上根据插值约束条件确定一定数目的节点,形成节点上的恒等方程,再把在整个边界上的积分离散为在每个单元上的积分,从而得到以节点处的物理量或密度函数为未知量的线性代数方程组。解线性代数方程组得到全部边界节点值,将其代入解的积分表达式的高散公式中,就可计算区域内任意点处解的近似值。

最常用的插值是拉格朗日插值。最简单的边界单元在二维情况下是直线段单元,在三维情况下是平面三角形或四边形单元,且假定在每个单元上边界量是常量。采用样条插值的边界元又称为样条边界元。边界元法的计算量主要用在形成线性代数方程组系数矩阵。由于系数矩阵的非稀疏性和非对称性,矩阵元素的求值有大量积分计算,特别是采用高阶协调边界元时所涉及的积分计算尤其是奇异积分计算,其计算量是较大的。边界元法用于求解线性问题时,可以完全归结为边界的离散化,但用于求解非线性或动力问题时,除边界积分外,还有区域上的积分。如果不能完全将域上的积分进一步转换为边界积分,就只好同时使用边界单元和内部单元。一般有两种方式来处理这类带区域积分的问题。一种是对边界未知量和区域内部未知量用迭代的方式轮流求解,另一种是采用把域内未知量与边界未知量联合求解的方式。这时边界元法仅在边界上计算的优势将会失去。所以在涉及解变系数或非线性问题时,往往使用边界元和有限元的耦合法(Coupling)。

边界元法用于求解与时间相关的问题也有几种处理方式:利用带时间变量的基本解得到带时间积分的边界积分方程;或者对时间变量作拉普拉斯变换以转换成椭圆型方程后在象空间中用边界元求解,最后通过数值逆变换得到原问题的解;也可以先用差分代替对时间的微分,在时间步长内对椭圆型方程求解。边界元法作为一种工程计算方法,其应用范围非常宽广,其研究内容已深入到各种学科领域的数值计算。如固体力学中的弹性、塑性、粘弹性、粘塑性问题,板壳问题,断裂问题,动力学问题,热应力、蠕变、接触问题,岩土力学中地基结构与岩土相互作用问题。此外还有非弹性问题,形状优化问题,位势流、粘性流、水波分析等流体动力学问题,波的传播和散射,震动等问题。现已有许多与各种专门问题相联系的边界元法专著出版。如声学中的边界元法(Ciskowski, 1991),热传导中的边界元法(Wrobel et al, 1991)断裂力学中的边界元法(Aliabadi et al, 1991),非齐次重调和现象的边界元分析(Camp et al, 1991)、机电工程中的边界单元(Brebbia et al, 1990)、弹性动力的边界单元法(Manolis, 1987)等。边界元法作为一种数值计算方法,本身的内容还处在不断的充实和发展中。对它的研究还包括边界元的数学理论,各种类型的基本解,各种形式的边界单元(边界离散方式和插值形式),改进奇异积分的计算,各种提高精度的算法,边界元与其它数值方法的耦合方法以及边界元工程计算软件等。目前英国的软件系统

BEASY (Boundary Element Analysis System)有较大的影响。

从 1980 年起,每年至少召开一次边界元法国际会议。丰富的研究成果较集中的反映在由 Brebbia 主编的各届会议文集中以及由他主编的边界元法进展专集中。另外还有由 Banerjee 主编的边界元法发展专集。近年中国已举办过 4 次工程中的边界元法学术会议,由杜庆华主编的论文集反映了中国在边界元法研究上达到的新水平。

参考文献

- 1 Brebbia C A. The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press, 1978
- 2 Banerjee P K. Development in Boundary Element Methods - 1, Applied Science Publishers LTD, 1979
- 3 Brebbia C A, et al. Boundary Element Techniques - Theory and Applications in Engineering, Berlin: Springer-Verlag, 1984
- 4 Mackerle J, et al. The Boundary Element Reference Book, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1987
- 5 杜庆华等. 边界积分方程方法—边界元法. 北京: 高等教育出版社, 1989
- 6 Grilli S, et al. Computational Engineering with Boundary Elements, Computational Mechanics Publications Southampton, 1990
- 7 陈正宗, 洪宏基. 边界元法. 台北: 新世界出版社, 1990.
- 8 Brebbia C A, et al. Boundary Elements XI V, Computational Mechanics Publications, 1992
- 9 Brebbia C A, Ingher M S. Boundary Element Technology, VI computational Mechanics publications, 1992

(重庆建筑大学祝家麟教授撰)

边界元方法的数学分析 mathematical analysis of boundary element method

用边界元方法求解偏微分方程的初值(或初边值)问题首先要把原问题转化为边界上的积分方程,并把原问题的解用积分方程的解在边界上的积分表出;然后通过对边界(有时也包括区域)的离散化过程数值求解边界积分方程,进而得到原问题的近似解。边界元方法的数学分析或者称边界元方法的数学理论研究包括如何将边值(或初边值)问题转化为边界积分方程(简称为边界归化);这些积分方程的性质如何,是否适定(唯一可解性和对初边值的连续依赖性);积分方程的离散方式;边界单元的建立及性质;边界元空间(或称边界有限元空间)的逼近性;边界元近似解的收敛性和误差估计;各种提高精度的算法及其理论依据等内容。这些研究对于改进和发展边界元法都是至关重要的。

边界元法的一个显著特点是原问题转化为边界积分方程的途径并不是唯一的。它大体上可分为两类。(1)广义格林(Green)公式法(或称直接法)。用广义格林公式和基本解导出解的积分表达式,再利用已知边界条件得到确定未知边值函数的边界积分方程。(2)位势法(或称间接法)。将边值问题的解表成单层位势或双层位势,再利用边界条件和位势的性质,导出确定未知密度函数的边界积分方程。利用这两类方法,可以将一边值问题转化为不同形式的边界积分方程。除在某些情况下通过一定的技术处理可能得到非奇异的积分方程外,一般情况下这些积分方程是奇异的。在边界元法的工程应用中,就是根据积分方程的形成方式和积分方程中未知函数有无明显物理意义的区别把边界积分方程区分为直接边界积分方程和间接边界积分方程的。从积分方程的性质区分,可归纳为第一类或第二类弗雷德霍姆(Fredholm)积分方程,带时间变量时为维他里—弗雷德霍姆(Volterra - Fredholm)积分方程;或为弱奇异的,或柯西(Cauchy)主值型奇异的,或为哈得马(Hadamard)有限部分型奇异的(也称为超奇异的)。这些积分方程的性质很不相同,研究它们的方法也迥然不同。特别提及的是在经典的位势理论中,总

是将边值问题转化为第二类积分方程求解,这是因为第二类弗雷德霍姆积分方程解的适定性有成熟的理论依据,这正是古典边界积分方程论所研究的内容。然而这种方式要失去原问题可能具有的自伴性等有用性质,还会相对地增加计算量。

近年来, G. C. Hsiao, J. C. Nedelec, W. L. Wendland 等人致力于研究用第一类积分方程求解的方式,不仅在理论上论证了从弱奇异到超奇异的非一类边界积分方程解的适定性,而且建立了切实可行的计算方法。实践证明,第一类边界积分方程特别适用于求解细薄区域外部或者由线、面构成的开边界的边值问题,可有效地应用于断裂、屏障等实际问题。冯康 1975 年提出利用格林函数将边值问题归化为边界上含有发散积分的有限部分的超奇异积分方程的思想。此后,处理这种超奇异积分方程的数值方法被称为正则边界元法(因为通过格林函数得出边界积分方程的方式是直接的,与有限元公式的耦合最为自然,故又称为自然边界元)。正则边界元法要求区域几何形状比较规则,然而它和有限元耦合就可适用于求解任意形状区域的问题。将原问题转化为边界积分方程过程中,要不可避免的使用基本解或格林函数。有时也采用修正格林函数或近似基本解的技术以克服边界元法中的困难。注意到原始边值的可解性与归化得到的边界积分方程的可解性并不总是一致,边界元方法的数学分析的首要任务就是论证边界元法的合理性。

M. Costabel, E. Stephan 和 W. L. Wendland 等人最早用拟微分算子理论统一研究各种形式的奇异边界积分方程,他们指出这些积分方程如果纳入拟微分算子的框架,都可以归结为边界上的强椭圆拟微分算子,由 Garding 不等式便知这些算子可分解为正线性算子与紧线性算子之和,而这恰好是迦辽金(Galerkin)法收敛的充要条件,从而为用 Galerkin 法求解边界积分方程建立起一套进行误差估计的程式。J. C. Nedelec 等人一直用变分方式建立边界积分方程的解与原问题的广义解之间的联系,并在适当的 Sobolev 空间中讨论区域上的广义解与其在边界上的迹之间的对应,通过 Lax-Milgram 定理得出用 Galerkin 法求解边界积分方程的适定性及收敛估计。近年来,对在非光滑边界或开边界上的积分方程的研究、对非光滑边界条件或非线性边界条件问题的研究也都有许多成果,并对边界元解在非光滑处的奇异性和相应的技术处理方法上给出了理论分析。

在工程应用中,常用配置法求解边界积分方程。配置法比迦辽金法计算简单,但理论分析比较困难。对于第 2 类边界积分方程,可借助经典配置法理论给出误差估计。关于光滑曲线上的第一类边界积分方程的奇数阶样条函数配置法,Arnold 等将它等价于某一迦辽金法,得到其收敛结果。一些人根据定义在闭曲线上的函数可表成实轴上的周期函数,且边界积分算子可化为具周期核函数的卷积算子与光滑核的算子之和的特点,提出了许多精度高且计算量小的算法,例如迦辽金配置法、快速傅里叶变换算法、样条—三角函数迦辽金法、积分配置法等。对曲面上的边界积分方程的数值方法的理论分析更为困难些,例如,对三维问题用配置法解第一类方程的收敛性就没有证明。目前,椭圆边值问题的边界元法的数学分析已相当深入,有限元法的一些理论和技巧已移植到边界元法中,如自适应算法、h-p 方法、外推法、高精度组合方法等。用边界元法求解变分不等式问题,用边界元法求解奇异振动问题,在区域分解算法中应用边界元法,边界元与有限元或其它数值技术的耦合,无论在算法上或理论上的研究,都有所发展。

参考文献

- 1 Nedelec J C, et al. Comput. Methods Appl Mech Engi, 1976, 8: 61~80
- 2 Hsiao G C, et al. Math Anal Appl, 1977, 58: 449~481
- 3 Feng Kang. Proc J Intern Congress Math, Warsaw, 1983, 8 (16~24), 1439~1453
- 4 Arnold D N, et al. Math Comput, 1983, 41: 349~381
- 5 Wendland W L. The Mathematics of Finite Elements and

Applications Ed. Whiteman, Academic Press London 1985, 193~277

- 6 Costable M, et al. J. Reine Angew Math, 1986, 372L, 39~63
- 7 Umetani S. Comput Mech Publications, 1988
- 8 祝家麟. 椭圆边值问题的边界元分析. 北京: 科学出版社, 1991
- 9 余德浩. 自然边界元方法的数学理论. 北京: 科学出版社, 1993

(重庆建筑大学祝家麟教授撰)

数学机械化 mathematical mechanization 数学操作的机械化解,使之成为简单的、单调的、刻板的、重复的动作组合,这样就可以用计算机处理、解决大量的数学问题。

中国古代数学基本上是一种机械化的数学。秦汉时期的《九章算术》,其中对四则运算、开方的机械化算法过程有详细说明,对于线性方程组的解法在魏晋时期的刘徽所写的《九章算术注》中就已说明了几种机械化的消去法及其详细的机械算法过程。到宋代更发展到了高次代数方程求数值解的机械化算法。求解同余式的问题,秦九韶在其《数书九章》中曾给出了“大衍求一术”的算法,其机械化程序非常之高。数学的机械化主要是几何学机械化,而几何学机械化方法起源于 12 世纪和 13 世纪中国宋元时期初次出现的几何学代数化,即将几何学问题化为多项式问题,以及相伴而生的多项式组消去法。

17 世纪德国莱布尼兹(G. W. Leibniz)曾有过“推理机器”的机械化证明的设想。只是直到 19 世纪末德国希尔伯特(D. Hilbert)以及后来建立的数理逻辑,才使这一问题具有明确的数学形式。几十年来数学家们为解决这一问题付出了巨大劳动,但是他们所得到的结果基本上是反面的,即所谓不可判定性。例如有:哥德尔(K. Gödel)定理;初等整数论的定理证明不可能机械化。随着电子计算机的问世,使证明机械化这一设想有了现实的意义。1950 年波兰塔斯基(A. Tarski)证明了一个值得称道的正面结果——塔斯基定理;初等几何(以及初等代数)的定理证明可以机械化。塔斯基等人还因此提出制造判定机器(也就是证明机)的设想。然而他们的方法与设想基于斯图姆(C. F. Sturm)定理的某种推广,而且这些方法极繁复,实际上计算机难以实现。

1956 年以来,美国科学家开始尝试用电子计算机证明一些数学定理,1959 年美国王浩设计了相应的程序,用计算机证明了罗素(B. A. W. Russell)、怀德海(H. Whitehead)的巨著《数学原理》中的几百条定理,仅用 9min。1976 年,美国阿佩尔(K. Appel)和哈肯(W. Haken)在高速电子计算机上用 1200h 的计算时间证明了“四色定理”,使 100 多年来未能解决的这个难题得到了肯定的回答。

另一个被忽视的正面结果,是由希尔伯特在 1899 年提出的“希尔伯特机械化定理”:初等几何中只涉及关联与平行关系的定理证明可以机械化。显然这是塔斯基定理的一个特例,但值得注意的是,希尔伯特的机械化证明方法是切实可行的。

中国吴文俊在中国古代数学机械化思想的启发下,独立研究并于 1977 年获得了下面的结论:

定理 1 初等几何中只牵涉到关联、平行与合同关系的定理证明可以机械化。

这与希尔伯特不谋而合。同时吴文俊还对所需计算量作出了理论上的估计,得到:

定理 2 初等几何中只牵涉关联、平行与合同关系且“不可约”的定理证明,其计算量满足不等关系:计算复杂度 \leq 定理复杂度 \cdot 几何复杂度。

1978 年,吴文俊又将初等几何的结果推广至初等微分几何,得到:

定理 3 在初等微分几何中,凡可用微分多项式等式关系表达的定理的证明可以机械化。

只是这里定理证明的机械化方法依赖于里奇(G. Ricci—Curbastro)关于微分方程与微分代数的理论与方法,比用初等几何的情形要复杂得多。

吴文俊提出的新的机器证明方法被称为“吴方法”,它是基于Ritt原理和零点分解定理的。吴文俊、周成青、王浩、胡森和王东明等人,使用吴方法在微机上迅速地解决下述各问题:(1)初等几何定理的机器证明与机器发明。如1989年周成青基于吴方法用自己编制的程序,在计算机上证明了512条定理;所用的机器时间一般每条定理才几秒钟,其中还有许多新定理。这种方法还普遍适用于各种初等几何,其中包括非欧几何、圆几何等。(2)微分几何定理的机器证明与机器发明。(3)未知关系的机械推导。(4)高次代数方程组求解问题。(5)因子分解问题(特别是对多变量多项式的因子分解)。

举世瞩目的吴方法可以分成下面3个主要步骤证明几何命题:第1步,把几何命题化为纯代数问题。第2步,将几何命题假设部分的代数关系式进行整理,然后依确定步骤验证命题终结部分的代数关系式是否可以由假设部分已整理成序的代数关系式中推出。它包括:(1)整序,即是把假设部分化成一种规范形式——吴升列。(2)伪除法求余,最后得到的多项式 R_0 ,如果 R_0 是零多项式,就表明在非退化条件下,所要检验的命题成立。这由吴方法中一条定理所保证。而如果 R_0 不是零多项式,吴方法证明(i)若相应的升列是“不可约”的,则 $R_0 \neq 0$ 便表明命题不成立。(ii)对“可约”的升列,则总可以通过因式分解,分解为几个“不可约”的升列,从而把问题完全解决了。第3步,依据第2步中所确定的步骤编程序,并在计算机上实施,以得出命题是否成立的最后结论。

吴方法的出现,开辟了数学机械化的一个新纪元,用它不但证明牛顿定律可以用计算机程序从开普勒定律推导出来,而且也在机器人学、自动控制、计算机视觉、化学平衡、几何模型等领域有着广泛的应用。吴方法大有方兴未艾之势,这一领域中有许多有意义的课题尚待解决。如(1)几何不等式的证明机械化。(2)非退化条件的处理方式,尚有争论。(3)可约系统的更有效算法。(4)如何把研究范围从多项式推广到初等函数。(5)怎样设计并序程序,用作处理更复杂的问题。

在吴文俊数学机械化理论与方法的影响下,1986年以来中国洪加威等人又提出了通过数值实例的检验来证明几何定理的思想与方法,这一方法在机器证明领域是一很有前景的研究热点。

参考文献

- 1 Taraki A. A decision method for elementary algebra and geometry, 1951
- 2 Wang Hao. IBM J Res Dev, 1960, 4, 2~22
- 3 吴文俊. 中国科学, 1977, 6, 507~515
- 4 吴文俊. 科学通报, 1978, 523~524
- 5 Wu Wen-tsun. Automated. Theorem proving: AMS, 1983, 235~242
- 6 吴文俊. 几何定理机器证明的基本原理. 北京: 科学出版社, 1984
- 7 吴文俊. 吴文俊文集. 济南: 山东教育出版社, 1986, 280~387
- 8 Shang-Ching Chou. Mechanical Geometry Theorem Proving D Reidel Publishing Company, 1988
- 9 井中. 自然杂志, 1990, 10, 682~688
- 10 吴文达. 中国科学院院刊, 1991, 1, 39

(安徽机电学院王庚副教授撰, 胡炳生审)

例证法 proof by exemplification 通过数值实例的检验证明几何定理的思想与方法,即用举例的方法证明数学定理。它不仅是理论上的探讨,而且确实能用在计算机上或通过手算证明相当难的几何定理,人们还用它发现了一些新定理。

例证法是在吴文俊数学机械化理论与方法的影响之下,由

中国数学家在80年代首先提出的。1986年,洪加威在加拿大多伦多举行的第27届国际电脑科学基础会议上,作了题为《能用举例的方法证明几何定理吗?》的学术报告,最早得出用举例的方法足以证明几何定理(即单点例证法)。1989年张景中和杨路正式提出了另一种更有实用价值的例证法即数值并行法(也称多点例证法)。其实这两种方法的基本思想,大体上都是在1984年产生的。这以后侯晓荣于1990年在天津计算数学会议上又报告了另一种例证法。但是最实用的是数值并行法。这3种例证法都是分别基于以下3个定理。

定理1. 设 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是 x_1, x_2, \dots, x_m 的多项式,它关于 x_k 的次数不大于 n_k ,对应于 $k=1, 2, \dots, m$,取数组 $a_{k,i} (= 0, 1, \dots, n_k)$ 使得 $l_1 \neq l_2$ 时,有 $a_{k,l_1} \neq a_{k,l_2}$,如果对任一组 $(l_1, \dots, l_m, 0 \leq l_k < n_k)$,都有 $f(a_{1,l_1}, \dots, a_{m,l_m}) = 0$,则 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是恒为零的多项式。

定理2. 设 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是 x_1, x_2, \dots, x_m 的多项式,它关于 x_k 的次数不大于 $n_k, 1 \leq k \leq m$,又设它的标准展式中非零系数的绝对值不大于 L ,不小于 $S > 0$,如果变元的一组值 $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_m$ 满足

$$\begin{cases} |\hat{x}_1| = p_1 \geq \frac{L}{S} + 1 \\ |\hat{x}_k| = p_k \geq P_1^{\frac{1}{k-1}} + 1 \quad (k=3, \dots, m) \end{cases}$$

则有 $|f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_m)| \geq S > 0$ 。

定理3. 设 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是 x_1, x_2, \dots, x_m 的整系数多项式,它关于 x_k 的次数不超过 n_k ,又设 p_1, p_2, \dots, p_m 是 m 个互不相同的素数,则当取 $\hat{x}_k = \sqrt[n_k]{p_k}$ 时,只要 f 不恒为零,总有 $f(\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_m) \neq 0$

着眼于多项式根的个数所得到的定理1,提供了可以证明的几何定理例证法即数值并行法;着眼于多项式根的界限的定理2,就提供了单点例证法;而着眼于多项式根的性质定理3,则提供了侯晓荣例证法。

数值并行法可以证明代数恒等式,也可以证明能化成代数恒等式的几何命题。对于代数恒等式的证明,首先要估计 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 关于各个变元 x_1, x_2, \dots, x_m 的次数的上界。其次是确定用哪些数值代入检验,这时已估计好了 x_k 的次数不超过 n_k ,那就让 x_k 这个变元取 n_k+1 个不同值。 n_k+1 个不同的值 $a_{k,0}, a_{k,1}, \dots, a_{k,n_k}$ 组成有限集 $A_k, k=1, 2, \dots, m$ 。从 A_1, A_2, \dots, A_m 中各取一个,便凑出一组 (x_1, x_2, \dots, x_m) 的值;一共可凑出 $(n_1+1)(n_2+1) \dots (n_m+1)$ 个数组来。这样的数组集称为格阵。最后将这每组值都代入 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 加以检验。若每组值都使 $f=0$,便证明 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 恒等于零。

对于几何定理的证明步骤和思路如下:第1步,利用取坐标或三角函数,把问题表成代数形式;在一组代数等式条件下,问另一代数等式是否成立。第2步,设想利用假设条件消去结论等式中的约束变元,使结论转化为只含自由变元的代数方程,估计此代数方程关于各变元的次数以确定格阵规模(并不真的写出这个方程)。第3步,根据格阵规模取自由变元的若干组数组,检验命题对于这些具体数值是否成立。如果都成立,则表明第2步中的代数方程为恒等式,从而命题为真。第2步中的消去约束变元得到一个只含自由变元的代数方程,是总能办到的,这可由吴—Ritt整序原理保证。

单点例证法的思想,是对于一个数学命题,可以通过给出一个数值例子,使该命题成立的充要条件是该命题对该特例成立。在计算检验这个具体例子的时候,需要进行加、减、乘、除、开方等等,一定会有误差。如果最后的等式判断语句中,等号两边之差非常接近零,那么我们可以根据一些裂缝定理,说明如果一个数学等式判断语句两边的差小到一定程度之后,就说明绝对等于零。在证明代数恒等式时,对于一元代数恒等式的证明则需要举一个足够大的数值例子;而对于一个多元代数恒等式的证明,这个数值例子要涉及很大的变元数值。如按定理2,有

$|\dot{x}_m| > (\frac{L}{S})^{(n_1+1)(n_2+1)\dots(n_m+1)}$, 这表明运算涉及的有效数字之

长正比于 $\ln|\dot{x}_m| > (n_1+1)\dots(n_m+1)L_m \frac{L}{S}$. 而作一次乘法, 运算工作量正比于有效数字长度的平方, 即 $(\ln|\dot{x}_m|)^2$. 显然当变元数目稍多时, 将涉及很大的数值计算, 这在计算机上难以实现. 但它所引出的观念的确是美妙而吸引人的, 也引起了国际数学界同仁的很大兴趣.

很有研究前景的数值并行法用于机器证明, 还有许多变化与发展: (1) 单点例证法与数值并行法可以结合使用, 对某些变元用单点法, 另一些变元用数值并行法. (2) 数值并行法与吴一Ritt 除法可以结合使用, 先消去一些变元, 再对剩下的约束变元用并行法. 这样可对不同的问题寻找组合优化的证法. (3) 既然吴一Ritt 除法可以把“条件等式”问题化为“自由变元恒等式”问题, 那么, 任一种检验代数恒等式的数值方法都可以和吴一Ritt 除法结合起来形成几何定理机械化证明的数值算法. 这已超出了例证法的范围, 但仍可以用数值并行法. (4) 数值并行法还可以用来证明几何不等式这一机器证明中的难点, 但这有待于进一步研究.

参考文献

- 1 吴文俊, 中国科学, 1977, 6: 507
- 2 洪加威, 中国科学(A 辑), 1986, 3: 234~242
- 3 洪加威, 中国科学(A 辑), 1986, 3: 225~233
- 4 邓光克, 科学通报, 1988, 24: 1851
- 5 张景中, 杨路, 数学认识与实践, 1989, 1: 34~43
- 6 Zang J, Yang L, Deng M. Theoretical Computer Science, 1990, 74: 253
- 7 张景中, 自然杂志, 1991, 1: 55~62

(安徽机电学院王庚副教授撰; 胡炳生审)

应用数学

Fuzzy 值函数的广义积分 general integral about Fuzzy value function Fuzzy 值函数的积分研究取值为 Fuzzy 集 (特别是 Fuzzy 数) 的函数的积分问题. Fuzzy 函数的广义积分研究无界的 Fuzzy 值函数及无穷限 Fuzzy 值函数的广义积分问题. 这是两个联系十分紧密的问题, 是经典分析及普通集值分析相应内容的推广. 由于它们研究的对象更广泛, 更能反应和处理复杂的现实问题, 研究起来更困难, 但更有意义. 现实问题中, 碰到函数的取值, 一般不是一个确定的值, 而是多值的、集值的, 甚至是 Fuzzy 值的. 对这一类问题, 研究其分析问题, 能解决原来难以量化的一系列问题, 特别是经济问题、工程问题及人文科学问题. Fuzzy 值函数的积分及广义积分的理论为复杂系统及 Fuzzy 系统提供了一种强有力的分析工具.

20 世纪 60 年代初, 为解决一系列经济及统计问题, 美国、法国的一些学者提出了区间值及集值函数的微积分理论. 但是, 它们也不能完全用于处理一系列复杂系统的分析问题. 1965 年, 美国扎德(L. A. Zadeh)发表“Fuzzy 集合”一文, 标志着 Fuzzy 数学的诞生. Fuzzy 集理论为的是用简明的数学方法, 对复杂系统作出合乎实际的处理. 在自动控制、系统分析、经济管理等等许多不确定系统决策方面, 有明显的实际意义. 它为计算机科学的发展提供强有力的工具.

Fuzzy 数是 R 上的特殊 Fuzzy 集. 它是实数的区间数的推广, 对 Fuzzy 数, 自 1972 年起国外即开始研究, 并且不断深入. 随着 Fuzzy 数研究的深入, 1978 年, H. Nguyen 在《关于 Fuzzy 集扩展原理注记》一文中, 已经注意到将普通积分推广到 Fuzzy 积分的可能性及思想. 1978 年, 杜布瓦(D. Dubois)及普哈德(H. Prade)首次利用扩展原理, 讨论 Fuzzy 值函数积分及微分问题. 特别是研究了定义在有限区间且取值为 Fuzzy 数的一类 Fuzzy

值函数的积分问题, 将其定义为:

$$I(a, b) = \int_{a \in (0,1]} \alpha \int_a^b f_{\alpha}^{-}(x) dx + \int_{a \in (0,1]} \alpha \int_a^b f_{\alpha}^{+}(x) dx$$

说明了这种定义与扩展原理的一致性. 并给出了 f 取值为 $I-R$ 型 Fuzzy 数时, Fuzzy 积分的算法及与 Riemann 和的关系, 并讨论了其性质. 这类积分是推广普通集值积分的一种尝试. 但是, 他们所引出的概念不太直观、不太易懂, 且理论上不够系统严密, 计算不方便, 甚至困难. 同时, 他们还给出了 Fuzzy 值函数的导数. 这一系列工作总结在《Fuzzy 集及系统一理论及应用》一书中. 1982 年, 杜布瓦(D. Dubois)及普哈德(H. Prade)将 1978 年的思想及结果进一步发展, 利用扩展原理, 继续研究 Fuzzy 值函数的积分理论, 并指出其计算的可行性, 使 1978 年的工作更系统化、理论化. 同时还讨论了 Fuzzy 区间上的积分理论及 Fuzzy 微分理论. 但是, 微积分的基本公式, 即牛顿—莱布尼茨公式, 在 Fuzzy 值微积分理论中, 未能成立, 这是一个严重的不足. 1983 年, 罗承忠、王德谋将区间值函数的积分推广, 然后利用它定义 Fuzzy 值函数的积分, 推广了杜布瓦(D. Dubois)等人的一元 Fuzzy 值函数的积分理论, 又给出了多元 Fuzzy 值函数的积分定义. 证明了定义的合理性及 Fuzzy 值函数的积分性质. 他们所采用的方法是“集合套”理论. 这使得 Fuzzy 积分的概念和理论直观易懂、系统严密. 1985 年, 王德谋、罗承忠推广了杜布瓦(D. Dubois)等的 Fuzzy 微分运算. 但是牛顿—莱布尼茨公式仍不成立. 1987 年, 岑泳霆讨论了区间值函数及 Fuzzy 值函数的牛顿—莱布尼茨公式, 应用集合套理论及 Fuzzy 集分解定理, 引入了 Fuzzy 值函数的微积分理论. 但是, 这里所定义的导数为“同序可导”或“逆序可导”, 适用范围窄. 随着 Fuzzy 数空间的代数性质及拓扑性质的深入研究, 从极限理论的角度推广 Fuzzy 微积分理论的工作亦在进行. 1986 年, R. Goetschel 等在 Fuzzy 数空间中引入一种变量, 建立极限概念, 导出拓扑向量空间, 建立起 Fuzzy 导数及 Fuzzy 积分概念, 证明了一些基本性质, 特别是证明了 Fuzzy 微分和积分的互逆公式成立. 但是, 该理论的一个严重不足是取值为 Fuzzy 数的函数的导数不一定是 Fuzzy 数, 并且引入的极限的性质不太好. 1987 年, O. Kaleva 以 Fuzzy Hausdorff 度量为基础, 引入极限概念, 类似经典分析建立起微积分理论, 并讨论了 Fuzzy 微分方程. 具有较好的性质. 沿着后一路线, 推广 Fuzzy 微积分理论的工作有许多. 但是, 利用“集合”套理论和“极限理论”建立起来微积分理论之间的关系, 以前一直讨论不够. 并且, 在 1988 年前国内外文献中尚不见讨论 Fuzzy 值函数的广义积分问题.

1988 年, 吴传生利用 λ -截集, 集合套理论及分解定理和表现定理, 给出区间值函数及 Fuzzy 值函数的广义积分理论 (包括无穷限 Fuzzy 值函数及无界 Fuzzy 值函数的广义积分), 证明了定义的合理性, 且将普通分析中的运算性质推广开来. 同时, 还讨论了 Fuzzy 数列及取值为 Fuzzy 数的 Fuzzy 值函数的极限定义, 主要方法是由 Fuzzy 数之间的 λ -截集的 Hausdorff 距离诱导出 Fuzzy 数之间的距离, 由该距离导出 Fuzzy 数 R 中的拓扑结构, 在这一拓扑结构下, R 仍具有可分性、连通性、完备性. 从而引出的极限的性质也较好. 由极限理论, 导出了无界的 Fuzzy 值函数及无穷限 Fuzzy 值函数的广义积分的另一定义. 并证明了由极限理论和“集合套”理论引出的两种定义的等价性. 基于极限的观点, 讨论 Fuzzy 值函数的广义积分和 Fuzzy 级数的联系. 该文的结果, 使得以前由几种方式讨论的不同的 Fuzzy 值函数的积分、Fuzzy 值函数的广义积分、Fuzzy 级数的概念, 均能统一在 Fuzzy 极限的框架之下. 1991 年, 吴从新等在抽象意义下讨论 Fuzzy 微积分的工作, 与吴传生工作的思想渊源具有相似之处. 1989 年, 郭述忠对区间值函数与 Fuzzy 值函数的无穷积分亦进行了一定的讨论. 1990 年, 吴传生进一步讨论了含参变量的 Fuzzy 值函数的广义积分一致收敛性问题. 将 Fuzzy 值函数的积分, 广义积分推广到取值为 R 上的一般 Fuzzy 集值函数的情形 (不限于 R -Fuzzy 值函数), 并讨论了含参变量的取值为一般

Fuzzy 集的函数的广义积分的一致收敛(收敛)的收敛条件及性质。不仅如此,文中还对含参变量的一致收敛的 R -Fuzzy 值函数的分析性质进行了讨论,将经典分析中连续性守恒、逐项微分、逐项积分性质完全平行推广过来。而且这里引出的导数概念略有拓宽,对其结构分析得较为透彻。值得指出的是,1991年,吴从忻,马明利用模糊数表示定量及嵌入定理,将 Fuzzy 映射和取值于巴拿赫空间,甚至局部凸的拓扑线性空间的抽象函数的联系起来,研究 Fuzzy 映射的分析方法,在理论上更完善。与 Fuzzy 值函数广义积分理论相平行,Fuzzy 级数理论研究亦在进行。

Fuzzy 积分和广义积分的理论,将是一个广泛的研究领域。首先,其应用似乎非常广泛。国外,已有人利用 Fuzzy 积分理论研究 Fuzzy 经济空间,国内亦有人用它研究经济模型。Fuzzy 积分理论的应用无法估计,值得深入探讨。另外,经典分析中黎曼积分及广义积分理论,可推广到勒贝格积分及其它各种形式的推广, Fuzzy 值函数的积分和广义积分亦可作相应推广。系统地建立这些推广的理论,并研究其相互关系,将是饶有趣味的。完善 Fuzzy 值函数的微积分理论,再深入系统地研究 Fuzzy 微分方程、积分方程、Fuzzy 动力系统的理论,这是一个十分重要的广阔的领域。

参考文献

- 1 Dubois D, et al. Fuzzy sets and Systems: Theory and Applications A Cademic Press, New York, 1980
- 2 Dubois D, et al. Towards Fuzzy differential Calculus, FSS, 1982,8(1):1~70;8(2):105~116;8(3):225~233
- 3 罗承忠,等.模糊数学,1983,3(3):45~52
- 4 Goetschel R, et al. Elementary fuzzy Calculus FSS,1986,18(1):31~317
- 5 Kaleva O. Fuzzy Differential equations, FSS, 1987,24(3):301~317
- 6 岑泳鑫.模糊数学,1987,3~4,13~18
- 7 吴传生.武汉工学院学报,1988,4:75~87
- 8 郭述忠.模糊系统与数学,1989,3(2):49~58
- 9 吴传生.武汉工学院学报,1990,1:47~56
- 10 吴从忻,等.模糊分析学基础.北京:国防工业出版社,1991
(武汉工学院吴传生副教授撰;蔡宏材审)

区间动力系统的强健稳定性

robust stability for interval dynamical systems

强健性是近年来许多数学分支的热门话题。所谓强健性,常常可以定义为一个动力系统的某些固有性质在特定的结构扰动下的不变性。李雅普诺夫(Liapunov)意义下的强健稳定性便是一个动力系统在指定的结构扰动下的不变的李雅普诺夫稳定性。这类问题有很强的实际背景,因为数学模型描述一个实际动态过程每每是近似的,或因测量与计算的误差,或为了必要的简化,常有建模误差以及随环境变化的参数扰动,故研究实际问题时对一个不确定动力系统(或微分包含,或多值微分方程)的强健行为比对一个确定性系统的灵敏的定性性质更有兴趣。

李雅普诺夫意义下的强健稳定性主要研究以下两方面的问题:

1. 给定一个动力系统及其的参数变化范围(一般为区间),研究该系统在允许的参数扰动下的稳定性,例如,研究微分包含:

$$\frac{dx}{dt} < f(t, x, a), \quad x \in R^n, a \in R^m \quad (1)$$

的稳定性,其中 $a_i \in [a_i, \bar{a}_i]$ 不确切知道, a_i, \bar{a}_i 为已知, $i = 1, 2, \dots, m$ 。

2. 给定一个确定的稳定系统,求出不改变稳定性的最大允许扰动界限[也称强健稳定度],例如,已知未扰动系统

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x), x \in R^n \quad (2)$$

具有某种稳定性,期望其不确定的扰动系统

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x) + g(t, x) \quad (3)$$

具有相同的稳定性,其中扰动 $g(t, x)$ 不确切知道,仅知 $\|g(t, x)\| \leq k \|f(t, x)\|$, 向量究竟允许多大?

1978年前苏联学者卡得诺夫[Khartionov]首先研究了区间多项式 $I[a, \bar{a}]$:

$$f_n(x) = x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n \quad (4)$$

的强健稳定性,其中 $a_i \in [a_i, \bar{a}_i]$ 不确切知道,仅知区间端点 $a_i, \bar{a}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。记 $I^*[a, \bar{a}]$ 为

$$f_n(x) = x^n + a_1 x^{n-1} + \dots + a_n \quad (a_i = \underline{a}_i \text{ 或 } a_i = \bar{a}_i, i = 1, \dots, n) \quad (5)$$

显然, $I[a, \bar{a}]$ 与 $I^*[a, \bar{a}]$ 分别有无穷多个, 2^n 个多项式。卡得诺夫证明了下列有趣的结论:

定理1. $I[a, \bar{a}]$ 中全体为霍尔维茨(Hurwitz)[简称 H]多项式等价于 $I^*[a, \bar{a}]$ 中全体为 H 多项式。

定理2. $I^*[a, \bar{a}]$ 中全体为 H 多项式,当且仅当 $I^*[a, \bar{a}]$ 中特定的4个为 H 多项式。

这两个定理是区间多项式强健稳定性的奠基性工作。无穷多个多项式的 H 稳定性居然等价于4个特定的多项式的 H 稳定性,无论从理论上还是从应用上讲都是令人满意的。由于证明原定理很繁琐,1987年耶里(Yerry)利用哥西(Cauchy)幅角原理和 $f_n(x)$ 之根对系数的连续依赖性简化了卡得诺夫的证明。安德逊(Anderson)等人还证明了当(4)中 $n = 2, 3, 4$ 或5时,可分别用特定的1, 2, 3个多项式代替定理2中的4个多项式。但当 $n \geq 6$ 时,4这个数不能再减少。

与(4)式的强健稳定性相反的一个问题,是 H 多项式的强健度问题,即给定一个 H 多项式:

$$f_n(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0 \quad (6)$$

令 a_i 改变 $\pm \delta a_i (i = 0, 1, \dots, n)$, 要求寻找尽可能大的 Δa_i , 使当 $|\delta a_i| \leq \Delta a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 时扰动多项式:

$$\tilde{f}_n(x) = (a_n \pm \delta a_n) x^n + (a_{n-1} \pm \delta a_{n-1}) x^{n-1} + \dots + a_0 \pm \delta a_0 \quad (7)$$

仍为 H 多项式,这个 Δa_i 称为 $f_n(x)$ 的强健度。不少学者分别用 H 氏代数方法、奈魁斯特(Nyquist)几何方法以及复函中的儒施(Rouche)定理研究(6)的强健稳定性。

还有一个问题是研究 H 多项式簇的凸性问题,给定两个同项的 H 多项式 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$, 它们的凸组合

$$f_\lambda(x) = (1-\lambda)f_1(x) + \lambda f_2(x), \quad \lambda \in [0, 1]$$

是否仍为 H 多项式?若是,则可由两个 H 多项式凸组合派生出一类 H 区间多项式,且为 H 稳定的证明提供简便方法。但有反例表明,凸组合保持 H 稳定性不变是有条件的,巴里米什(Barmish)给出了 m 个同项多项式 $P_1(x), \dots, P_m(x)$ 的多胞形

$$P(x) = \sum_{i=1}^m r_i P_i(x)$$

($\sum_{i=1}^m r_i = 1, r_i \geq 0$) 为 H 稳定的充要条件。

若将(4)式与 R^n 中向量 (a_1, \dots, a_n) 对应,则研究(4)式的强健稳定性可视为研究 R^n 中的一个超矩形的稳定性。黄琳等得到一般的多胞形的稳定性可由相应的超矩形的棱、顶点的稳定性来确定的结果。

当(4)式作为定常线性离散动力系统的特征多项式簇时,自然要研究(4)式的斯萨(Schur)稳定性[简称 S 稳定],即 $f_n(x)$ 的所有零点在 $|z| < 1$ 内。人们猜想: $I[a, \bar{a}]$ 与 $I^*[a, \bar{a}]$ 的 S 稳定性等价。赛斯克(Ciesik)证明猜想是正确的,但当 $n > 3$ 时有反例,从而表明猜想失真。 $I[a, \bar{a}]$ 为 S 稳定的充要条件为何,至今未知。虽然原则上可用双线性变换化 $I[a, \bar{a}]$ 的 S 稳定性为另一类区间多项式 $J[a, \bar{a}]$ 的 H 稳定性研究,然而极难实现,因为两

着系数对应关系太复杂。\$I[a, \bar{a}]\$ 的 \$S\$ 稳定性之所以没有类似于定理 1.2 的结果是因为 \$H\$ 多项式系数均同号, \$S\$ 多项式没有类似的必要条件。

豪克洛特(Hoklot)等人研究了 \$S\$ 多项式的多胞形保持 \$S\$ 稳定性不变的条件。也有人研究 \$S\$ 多项式的强健度, 但无论从研究的深度还是从所获得的结果看, 对 \$I[a, \bar{a}]\$ 的 \$S\$ 稳定性比 \$H\$ 稳定性的研究逊色多了。

考虑连续或离散的时间动力系统:

$$\frac{dx}{dt} \subset I[A, \bar{A}]x, \quad x \in R^n; \quad (7)$$

$$x(m) \subset I[A, \bar{A}]x(m-1), \quad x \in R^n, \quad (8)$$

自然要研究区间矩阵 \$I[A, \bar{A}]_{\Delta} \{A: A \leqq \bar{A}\}\$ 的 \$H, S\$ 稳定性, 这里 \$\underline{A} = (\underline{a}_{ij})_{n \times n}, \bar{A} = (\bar{a}_{ij})_{n \times n}\$ 已知, \$A(a_{ij})_{n \times n}\$ 不确切知道, 仅知 \$\underline{a}_{ij} \leqq a_{ij} \leqq \bar{a}_{ij}\$。令 \$I^*[A, \bar{A}]\$ 表由端点 \$\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n\$ 组成的矩阵全体, 显然 \$I^*[A, \bar{A}]\$ 有无穷多个, \$I^*[A, \bar{A}]\$ 最多有 \$2^{n^2}\$ 个。

有人著文断言 \$I[A, \bar{A}]\$ 与 \$I^*[A, \bar{A}]\$ 的 \$H\$ 稳定性等价, \$S\$ 稳定性等价, 但随后就有人举反例否定这些结论, 且指出其证明错在何处。到目前还只得到 \$I[A, \bar{A}]\$ 为 \$H\$ 稳定, \$S\$ 稳定的一些充分条件。充要条件是什么, 至今未知。对于 \$H\$ 矩阵, \$S\$ 矩阵同样有人研究 \$H\$ 稳定的强健度, \$S\$ 稳定的强健度, 也同样有人研究其多胞形的 \$H\$ 稳定性, \$S\$ 稳定性, 其方法大多数是用李雅普诺夫函数或矩阵特征值估计法。

将这些思想推广到时滞系统、中立型系统, 也有不少类似的工作。

从稳定性理论的发展史可看到, 人们早就注意到了研究始值与系统的结构同时扰动下的稳定性(即经常干扰下的稳定性)比李雅普诺夫稳定性更有意义, 它与今天的强健稳定性类似。为何前者已少有人问津, 后者则成为热门话题? 因为在很一般的条件下, 经常干扰下的稳定性与李雅普诺夫一致渐近稳定性等价。此外, 经常干扰下的稳定性定义中的两个扰动区域只求存在, 不计大小, 而实际问题中, 要求扰动区域为额定。拉萨尔(Lasalle)和莱夫赫茨(Lefschitz)提出了实用稳定性概念, 更接近于现在的强健稳定性, 但在一段相当长时间内响应者很少, 固然是由于提法过于一般, 更重要的是未得到更多的实际问题的支持。最近, 拉克什米堪坦姆(Lakshmintham)等人重新提出实用稳定性, 将拉萨尔等人的实用稳定性定义的两个集合予以量化, 随后写了一本书。系统的所谓关联稳定性, 非减性控制系统的绝对稳定性等等都可视为强健稳定性的雏型。

从已有的论文看, 除 \$I[a, \bar{a}]\$ 的 \$H\$ 稳定研究彻底外, 其它方面则尚逊色, 已有的结果, 或条件太复杂, 或结果较保守。如何克服条件的复杂性及降低结果的保守性, 恐怕还有很多工作可做。

强健性概念还期望推广到其它领域, 如生态系统、神经网络系统、常微结构稳定性, 甚至在偏微分方程、偏泛函微分方程、随机微分方程中引述强健度, 也不无意义。

参考文献

- 1 Lasalle J, Lefschitz S. Stability by Liapunov's Direct Method with Applications, New York: Academic Press, 1961
- 2 Khartionov V L. Differentialnye Uravneniya, 14(11)
- 3 Yeung K S. Int J Control, 1983, 38(2): 459~464
- 4 Barqish B R. IEEE Transaction on Automatic Control, 1984, 29(10): 935~946
- 5 Hoklot C C, Bartlet A. IEEE Transaction on Automatic Control, 1986, 31(1): 355~357
- 6 Yerry K S, Wang S S. IEEE Transaction on Automatic Control, 1987, 32(9): 818~823

- 7 Aderson B D O, Jury E L. IEEE Transaction on Automatic Control, 1987, 32(10): 909~913
- 8 Huang L, Hollot C V, Bartlett C. Int J. Control, 1987, 45(2): 649~660
- 9 Ciesik J N. IEEE Transaction on Automatic Control, 1987, 32(3): 237~238
- 10 Lakshmintham V, Leela S, Martynyuk A A. Stability Analysis of Nonlinear Systems, New York and Basel: Marcel Dekker Inc, 1989

(华中师范大学廖晓昕教授撰)

单纯不动点算法 simplicial fixed point algorithms

自 20 世纪初布劳维尔(Brouwer)不动点定理出现以来, 各种不动点定理成为应用数学领域许多问题解的存在性讨论的有力工具。不动点定理的条件一般都比较弱, 而结论却很强, 从而得到赞赏。许多应用问题都可以方便地表述为等价的不动点问题, 更使不动点定理在应用领域大受欢迎。然而, 从计算的角度看, 除了收缩映射的不动点定理以外, 各种不动点定理的用处还是很有有限的, 因为它们并不告诉怎样把肯定存在的不动点找出来, 不动点的数值求解还是要借助某些迭代过程, 但这些迭代方法通常要对问题提出比较苛刻的条件才能保证计算收敛。这种情况在 60 年代末期发生了根本的变化。

1967 年美国斯卡夫(H. E. Scarf)发表论文, 提出计算单形上连续自映射的不动点的一种在有限步内必定成功的算法, 开创了不动点有效算法发展的新篇章。

1928 年, 德国斯派奈(E. Sperner)曾经证明过一个通称斯派奈引理的定理。欧氏空间中 \$p+1\$ 个仿射无关的点的凸包, 称作是一个 \$p\$ 维单形(simplex)。在二维的情形, 因为二维的单形就是三角形, 该定理可以叙述如下: 如果把一个大三角形按照单纯剖分(simplicial triangulation)的要求规则地分成规则相触的许多小三角形, 然后往小三角形的每个顶点上随便丢下 0, 1, 2 三个号码中的一个, 那么只要大三角形的底边上没有 2, 左侧边上没有 1, 右侧边上没有 0, 就一定有一个小三角形, 它的三个顶点分别带有 0, 1, 2 全部三种标号, 称为全标三角形。

设 \$S = \{(x, y, z) \in R^3: x, y, z \geqq 1; x + y + z = 1\}\$ 是所说的大三角形(二维单形),

\$F: S \to S, f(x, y, z) = (f_x(x, y, z), f_y(x, y, z), f_z(x, y, z))\$ 是 \$S\$ 的连续自映射, 那么符合 \$F(x, y, z) = (x, y, z)\$ 即符合

$$f_x(x, y, z) = x, \quad f_y(x, y, z) = y, \quad f_z(x, y, z) = z$$

的一点 \$(x, y, z) \in S\$, 因为在映射 \$f\$ 之下保持不动, 就叫做 \$f\$ 的一个不动点(fixed point)。在数理经济学经济均衡理论中, \$p\$ 维单形上的讨论相应于 \$p+1\$ 种商品的纯交换经济模型的讨论。现在 \$p=2\$, 表示有 \$p+1=3\$ 种商品, \$x, y, z\$ 分别是这 3 种商品的价格, 而 \$f\$ 表示该纯交换经济中供不应求的商品价格上升、供大于求的商品价格下降的价格调节机制。所以, 不动点就相应于供不应求则商品价格上升、供大于求则价格下降的市场调节之下保持不动的一组价格, 它们正好使得市场供求关系取得平衡, 所以称为均衡价格(equilibrium prices), 有关的讨论也就属于经济均衡理论(economic equilibrium theory)。

现在按照下述的规则确定小三角形顶点的标号, 就容易证明只要小三角形足够小, 全标小三角形的任一顶点都可以作为 \$f\$ 的数值不动点。标号规则是: 若顶点 \$(x, y, z)\$ 符合

$$f_x(x, y, z) \leqq x > 0, \quad f_y(x, y, z) \geqq y, \quad \text{就赋予标号 } 0; \text{ 否则, 若符合}$$

$$f_y(x, y, z) \leqq y > 0, \quad f_z(x, y, z) \geqq z, \quad \text{就赋予标号 } 1;$$

在所有其余情况, 都赋予标号 2。

斯卡夫已经引进了上述标号法, 它所导出的顶点标号, 完全符合斯派奈引理的条件, 于是应用斯派奈引理, 就知道一定存在数值不动点。斯卡夫的贡献, 在于发明了一种可行的算法去确定数值不动点的位置。后来, 经过库恩(H. W. Kuhn)的改进, 这种

(中山大学王则柯教授撰)

算法可以简述如下。

大三角形已经单纯剖分成规则相处的许多小三角形,这些小三角形的边都称为单纯剖分的棱,因为大三角形的底边上没有2,所以底边上的顶点的标号只有0和1两种,又因为左侧边上没有1,右侧边上没有0,所以底边左端顶点的标号一定是0,右端顶点的标号一定是1,从而在底边上一定有一条棱,其左端标号为0,右端标号为1。从这个棱出发,按照遇到一端标号为0一端标号为1的棱就穿过去的规则向大三角形里面走,并且保持在穿越时标号0的顶点在左、标号1的顶点在右,那么一定可以在有限步内到达作为数值不动点的全标小三角形,这一描述具有鲜明的组合特征。事实上,略早于斯卡夫的论文,樊畿的《从一个定向 n 维伪流形到八角剖分的 m 维球的单纯映射》的论文,就已经在更广泛的意义上奠定了上述算法的组合框架。也许因为论文本身没有显现数理经济学的背景,所以除了斯派奈生前的被推崇以外,这篇重要论文似乎长期未能受到足够重视。

主要因为把大单形单纯剖分为许多规则相处的小单形是上述计算的基础,所以这类算法通称单纯不动点算法(simplicial fixed point algorithms)。

上面二维演示的算法有一个缺点,即每一轮计算必须从大单形的边沿开始,从而如果一轮计算的结果的精度达不到要求而必须在更精细的单纯剖分的基础上开始新一轮的计算时,先前计算所获得的信息不能发挥作用。为克服这一缺点,伊夫斯(B. C. Eaves)和莫里尔(O. H. Merrill)在1972年分别将同伦引入算法,把计算 S 的自映射的不动点的问题放在高一维的空间 $[0, 1] \times S$ 中去考虑,从人为辅助映射的已知不动点出发,随着同伦参数 t 从1走向0,过渡到目标映射的不动点。莫里尔方法从1直接走到0,程序实施方便,但每一轮计算的精度改进有限,所以要重复执行多次。伊夫斯方法则从1经过 $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, \dots$ 趋向0,使用随着同伦参数变小而越分越细的渐细单纯剖分,计算在达到精度要求时中止,但是剖分的程序实施比较复杂。

范德兰(G. van der Laan)和台尔曼(A. J. J. Talman)在1979年提出不须使用辅助维,但是可以从大单形的单纯剖分的内部任一顶点开始的算法,较好地解决了每一轮计算充分利用先前计算所获得的信息的问题。

经济学讨论中常常有这样的情况:面对一定的环境,存在一组最优的决策。这就导致集值映射(set-valued mapping)的概念。说 F 是 S 的一个集值自映射,指的是对每个 $x \in S, F(x)$ 是 S 的一个子集而不是一个点。集值映射的不动点的特征是 $x \in F(x)$,称为角谷(Kakutani)不动点,而原来单值映射的以 $x = f(x)$ 为标志的不动点,称为布劳威尔不动点。前述赋每个顶点以一个整数的标号法称为整数标号法,而计算集值映射的角谷不动点,原则上必须采用向量标号法,例如赋每个顶点 $x \in S$ 以向量 $y - x$,其中 $y \in F(x)$ 。

由于单纯剖分在单纯不动点算法中的重要性,围绕单纯剖分的效率,有过许多重要的工作。新近出现的 D 剖分,按各种效率度量,都优于先前的剖分法。关于向量标号算法道路的二维网状结构的讨论,从几何上论证了算法的无例外可行性。

除了多项式方程组数值解的讨论以外,当前的研究更多地集中在计算复杂性讨论和数理经济学应用的开拓上。

参考文献

- 1 Ky Fan, J Comb Theory, 1967, 2: 588~602
- 2 Scarf H E. SIAM J Appl Math, 1967, 15: 1328~1341
- 3 Todd, M J. Springer Lecture Notes in Econ, and Math Systems, 1976, 124
- 4 van der Laan G, Talman A J J. Math Prog, 1979, 17: 74~84
- 5 Eaves B C, Yorke J A. Math, Op Res, 1984, 9: 363~375
- 6 王则柯. 单纯不动点算法基础, 广州: 中山大学出版社, 1986
- 7 王则柯. 数学年刊(A辑), 1990, 11: 399~406
- 8 Dang C. Math Op Res, 1991, 16: 148~161

基于滤波器方法的非线性系统的故障检测与诊断

随着系统规模的不断扩大和复杂性的增加,人们迫切地需要提高系统的可靠性和安全性,而故障检测与诊断技术则是实现这一目标的有力手段,具有重大的应用价值。由于实际系统严格地说均是非线性系统,由此导致了研究基于滤波器方法的非线性系统的FDD技术,它是FDD领域的前沿课题之一。

1971年美国的俾尔德(R. V. Beard)首先提出了用解析冗余(软件冗余)代替硬件冗余的新思想,是现代FDD技术的开端。随着现代控制理论、信息论及计算机科学的发展,已提出了众多有效的FDD方法,并已在宇航、核电站及众多的工业过程中得到应用。美国的威尔斯基(A. S. Willsky)等于1974年提出了一种广义似然比方法,用于检测和估计动态系统中的阶跃型故障,随后布埃诺(R. Bueno, 1976)、泰利(J. L. Tylee, 1981)和马迪韦尔(A. Madiwale, 1983)等又对其进行了发展和应用。1976年基恩(T. T. Chien)等给出了一种修正的序列概率比方法,可用于动态系统故障的检测。1979年,德国的弗里德伦德(B. Friedland)应用非线性滤波器,给出了一种极大似然估计方法,用于检测并估计单输入单输出系统的突变型故障,并于1981年将其推广到了多输入多输出系统,将系统参数用马尔柯夫链进行表达。印度的图格纳特(T. K. Tugnait)于1981年提出了一种检测和诊断系统结构变动的方法,为减少计算量,他采用了多种近似滤波器。1984年,芬兰的哈尔梅(A. Halme)等提出了一种基于自适应滤波器的故障检测方法,可以检测出传感器和驱动回路的缓变偏差型故障。

基于滤波器方法的非线性系统的FDD方法具有广泛的适用性,这首先是由于这种方法是基于模型的非线性系统的FDD的主导方法,而观测器方法可看成滤波器方法的特例。其次,即使线性系统的参数估计问题通常也要转化为非线性系统的状态估计问题进行处理。此外,系统中通常存在随机干扰,因此可处理随机干扰的滤波器方法自然显得更加重要。

由于非线性系统的最优滤波器通常是无穷维的而不可实现,因此在非线性系统的FDD方法中基本上采用的是次优的近似滤波器。采用滤波器方法进行非线性系统的FDD有两种主要策略,一种是由滤波器对非线性系统的状态进行重构,并由此得到残差序列,然后通过对残差序列进行处理,采用统计决策方法得到系统的故障信息。但这一策略通常只适合于进行故障的检测,不适合于确定故障的部位及估计出故障的大小(诊断)。另一种策略是将滤波器用于非线性系统的参数估计,在线得到系统的参数序列,通过对参数序列进行统计分析,不仅可以检测出故障,而且还可达到对故障进行诊断的目的。

1979年吉村正(T. Yoshimura)等采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)同时估计系统的参数及状态,并用序列概率比法监控系统的运行状态,当检测得知系统参数发生阶跃故障时,立即修正相应的预报协方差阵,以此达到对时变参数的有效估计。1984年,乌索罗(P. B. Usoro)等同样采用的EKF及序列概率比方法,成功地对某通风及空调系统的故障进行了检测。1984年,路易(J. Louis)等采用EKF及残差加权法得到了一种FDD方法,可用于检测核反应堆的故障。1987年,希腊的普利泽(A. Pouliezios)等提出了一种基于离散型平方根滤波器的故障检测与诊断方法,实现了对机器人驱动系统参数的在线监控。1990年德国的弗兰克(P. M. Frank)采用逆非线性模型构成残差向量的办法,得到了一种故障检测方法,可用于检测机械臂故障。德国的伊泽曼(R. Isermann)从1981年起就一直致力于研究基于参数估计的FDD方法,并已将其研究成果成功地应用到了诸如电机驱动水泵、液体及气体输送管道的故障检测与诊断。中国的周东华(D. H. Zhou)等于1990年提出了一种次优渐消的扩展卡尔曼滤波器,并基于这种滤波器提出了一整套系统性的用于非线性时变随机系统的故障检测与诊断方法,达到了对被控系统的传感

器、驱动回路及元器件故障的同时检测与诊断,不仅可以检测及诊断阶跃型突变故障,而且还可以检测及诊断缓变型偏差故障。

采用基于滤波器方法的 FDD 技术的首要前提是需要建立被控系统的比较准确的数学模型,并且此数学模型的精度要高于控制系统所要求的模型精度。采用参数估计策略时,要求过程元器件参数同模型参数具有一一对应的关系,这样才能通过对模型参数的监控达到对被控过程元器件监控的目的。另外由于在线辨识系统的参数和状态的要求较高,因此故障检测与诊断系统所要求的计算机与控制系统所要求的计算机相比,应具有更高的运算速度。

基于滤波器方法的非线性系统的 FDD 技术发展时间很短,与线性系统的 FDD 技术相比还很不成熟,仍有许多尚待解决的理论与技术问题,如:(1)实用有效的用于非线性系统状态及参数估计的滤波器,使其具有较低的计算复杂性,较强的关于系统噪声的鲁棒性,极强的对实变参数的跟踪能力,及对滤波初值的不敏感性。(2)多变量非线性系统脉冲故障的检测与诊断方法;(3)无先验知识的被控过程结构变化的检测与诊断方法;(4)基于滤波器方法的 FDD 技术的最优阈值的选取;(5)与基于知识及利用人工神经网络的 FDD 方法的有机结合;(6)以 FDD 为中心的容错控制系统的研究,以及实时专家系统的建立。

可以相信,上述问题的解决不仅会使基于滤波器方法的 FDD 技术趋于完善并得到更广泛的应用,而且会大大促进现代控制理论的发展。

参考文献

- 1 Will sky A S. Automatica, 1976, 12: 601~611
- 2 Chien T T, et al. IEEE Trans on AC, 1976, 21: 750~757
- 3 Friedland B. IEEE Trans on AC, 1979, 24: 932~937
- 4 Isermann R. Automatica, 1984, 20: 387~404
- 5 叶银忠,等.信息与控制, 1985, 14: 27~34
- 6 Frank P M. Reliability and Related Knowledge Based Approach 1987, 1: 35~98
- 7 Frank P M. Preprints of 11th IFAC World Congress 1990, 2: 76~81
- 8 周东华,等.控制理论与应用, 1991, 8: 1~10
- 9 Zhou D H, et al. Preprints of IFAC/IFIP/IMACS Symposium on Robot Control, 1991, 1: 723~728

(浙江大学周东华博士撰)

模糊光学和计量学 fuzzy optics and metrology

一般说来,对光学和计量学中的一些问题处理常用的数学方法是数理统计和误差分析法。特别是对计量标准的精度分析、分类、优选,一般只考虑某项指标最大相对误差。但某项指标的最大相对误差并不能全面地反映事物的整个情况,需要考查计量标准各种指标的综合性能。此外,计量中每项指标特性的划分标准界限本身就具有模糊性,并且测试系统或测试对象过于复杂,而难以精确化。事实上,在光学和计量学中使用许多与模糊有关的概念和判断,而其中一些物理量的描述和测试正是建立在这些与模糊有关的概念之上的。模糊光学与计量学就是将模糊数学与光学和计量学结合起来,把模糊数学的概念和方法引入光学和计量学中,去探索和描述光学和计量学中经典数学无法使用或难以描述的方面。

模糊数学应用于光学和计量学领域开始于 20 世纪 80 年代初 S. K. Pal 和 R. A. King 的工作。他们提出以隶属函数的模糊化映照和对比加强算子来进行图象增强处理的 P-K 法,获得了可观的效果,处理后的图象质量优于空域法的结果。中国上海计算技术所的汤仁彪也作过类似工作。他首先将模糊数学中的对比加强算子加以推广,获得了广义的对比加强算子,然后利用正弦函数的模糊化映照和广义的对比加强算子来进行图象的增强处理,效果不但优于 P-K 法,且处理过程简单灵活,这种方法对于某类图象的噪声也具有抑制作用。此外,也有人开展了根据模糊关

系对光学图象分类的研究工作,但最先开展模糊数学应用于计量学领域研究的是中国李祚泳等人。

1982 年,李祚泳等将模糊集理论应用到光学计量中,他们将模糊关系和模糊变换应用于氙灯特性的综合评判,从而给出氙灯整体综合特性的数学描述。接着又应用贴近度与择近原则概念和模糊相似优选法或模糊聚类分析法给出光学计量标准组的最佳选择方法。1983 年李祚泳等又提出通过建立物理标准的某一物理量值与该物理标准的其它特性指标的模糊关系方程,并求解该模糊关系方程,找出各指标间的模糊关系。根据这个关系,由物理量值各指标的实测值就可以算出物理标准量值的最优估计值。1984 年,他又将随机性和模糊性结合起来,提出用模糊概率法对光源发光强度稳定性优劣的可能性作估计。1986 年中国路耀华应用加权评审的模糊评审法建立了计量精度综合评判的数学模型,此模型能较完整地、客观地、全面地反映计量工具或设计方案的各种精度的指标综合起来加以评判,以便作出分析比较或寻求最佳方案。同年李继陶等应用形状贴近度概念刻画函数图象的形状变化规律,并建立一个相对比较函数 $f(x_i/T_n; x_0)$ 来表达图象集合 $T_n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中的任一图象 x_i 相对于图象集合 T_n 而言与标准图象 x_0 的相似程度,给出了用相对比较函数对光学图象的模糊识别结果。并且应用形状贴近度概念刻画同色异谱颜色的样品间的光谱分布差异,给出了颜色样品间同色异谱程度的模糊判别。他们还应用广义的模糊运算综合决策模型和模糊积分运算,以反射全息图的衍射效率为例,对全息图的质量进行了预测,其预测拟合率达 80%。应用这些方法有助于指导全息照相的处理过程,提高全息图质量。1987 年李祚泳提出把多峰谱线的峰值对比度集合作为可测函数 $f(x)$,以每个峰值区域内谱线的光强度分布对波长的面积分与整个谱线光强度对波长的面积分的比值作为峰值域对比度的重要性测度 $g(\cdot)$,应用模糊测度理论,给出多峰谱线或多峰干涉条纹的对比度的一种新的表述。1989 年他又根据非相干光直线象的最佳对比度条件,应用正态模糊函数内积概念,简易地导出了光学系统在具有对称和非对称两种扩散函数情形下,用非相干光照明所成的相邻直线象的能量分布互不干扰条件。1988 年 T. K. De 和 B. N. Chatterji 应用模糊集概念,进一步探讨了图象的对比增强总的技术。1990 年李继陶等又提出了基于图象的特征因子对于图象类别的模糊性,因而用一个隶属函数来表示。根据模糊数的合成运算,考虑到全部特征后给出图象隶属于所有类的可能性分布,从而给出一种图象有监分类的新方法。

今后,模糊数学应用于光学和计量学领域,除了将模糊逻辑、模糊推理、模糊多元分析等开拓到计量学和光学信息处理,如光学编码、图象噪声的消除、图象的信息压缩、特征的提取和识别外,很有可能还将探索发展一种为处理模糊光学信息的一种计算机——模糊光学信息处理计算机。若能实现这种突破,无论对于计算技术和光学技术都将是一种飞跃。

参考文献

- 1 Pal S K, et al. Electronics Letters, 1980, 16(10): 376~378
- 2 Pal S K. IEEE, 1982, 4(2): 204~208
- 3 李祚泳. 计量学报, 1982, 3(2): 123~134
- 4 李祚泳, 赵邦杰. 模糊数学, 1983, 3(2): 67~73
- 5 李祚泳, 王元杰. 光学学报, 1984, 4(8): 765~768
- 6 路耀华. 系统工程, 1986, 4(3): 37~44
- 7 李继陶,等. 模糊数学, 1986, 6(1): 25~31
- 8 Zuoyong Li, Jitao Li et al. BUSEFAL, 1986, 26: 114~121
- 9 Zuoyong Li. CJIMW, 1987, 6(1): 101~105
- 10 De T K, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 25(2): 145~157

(成都气象学院李祚泳教授撰,陈楨培、王柏钧审)

模糊线性回归分析 fuzzy linear regression analysis

经典的线性回归分析是数理统计中最重要的内容之一,是一种十

分重要的数据处理方法。但是在含有人为影响在内的实际问题中,由于人心观察的模糊性,这种仅考虑随机性在内的回归分析方法便失去了它应有的作用。模糊线性回归分析就是考虑模糊性的一种统计方法,是模糊数据处理的一种不可忽视的手段,在不确定环境下的预测方面,为决策人提供辅助决策等方面有着重要作用。

第1类模糊线性回归模型于1982年由田中英夫(Tanaka)等人引进。在这类模型中回归方程中自变量是实值变量,因变量是模糊值变量,参量为模糊数。这种回归方法不认为变量的估计值与观察值之间的差异是系统的随机误差引起的,而认为是由于系统的不确定性或系统参数的模糊性造成的,且反映在一个表示模糊现象的模糊线性函数上,这种模糊线性函数由扎德(L. A. Zadeh)的扩展原理定义。模型的模糊参数意味着一个表示系统模糊性的可能性分布,通过定义模型的拟合度及模型的模糊性程度,其模型参数的估计问题可化为一个线性规划问题,规划的目标函数为模糊性程度,约束为拟合度不小于某给定的阈值,这类线性回归模型对发现估计系统中的模糊结构是很有用的。田中英夫等人将上述模型应用到了预定房地产的价格体系中,解释了价格体系中存在的不确定性。

应用第一类模糊线性回归模型,可以构造不确定环境下的预测模型。1985年,海什马提(B. Heshmaty)与康德尔(K. Kandel)应用上述第一类模糊线性回归模型构造了美国从60年代中期到80年代初期电子工业市场中计算机及外部设备的销售价格预测模型。由于对测量模型中的每一个独立变量均没有先验的知识可寻,因此应用第一类线性回归分析可以检验那些独立变量在测量模型中最为活跃,对测量模型的贡献成分最大。这些筛选出来的变量可以认为是影响计算机及外部设备的销售价格的主要因素。通过求解上述回归问题,回归参数的估计值可以给出。最后通过分析这些模糊参数的中心,宽度解释相应变量的效能,通过代入相应变量的值可以计算售价的预测值以及这些预测值的模糊程度。由于计算机及外部设备的销售价的预测值是由模糊集给出的,决策人可以根据模糊集的三角隶属函数决定一个预测区间,从而给决策留有一定的余地。

从理论上谈,第1类模糊线性回归模型可以认为是一种可能性线性系统,因而第1类线性回归又称为可能性线性回归模型。模糊集可以认为是一种可能性分布,可能性分布与可能性测度可以在一定条件下相互决定。对于一个可能性线性系统来说,输入值为非模糊的,但其输出值是模糊的,称为可能性输出。可能性输出一般可以通过可能性测度来计算,其计算方法类似于用概率测度计算随机输出。

第1类模糊线性回归模型的一般形式由巴道西(A. Bardossy)于1988年给出,设回归参数为L-R型模糊数,一般回归模型的模糊性可分为极大型、平均型、积分型3种。通过在一些约束下极小化模型的模糊性,第一类回归的参数估计问题可化为某些数学规划问题或优化问题。其结果当然依赖于L-R型模糊数的选取及模糊性度量的选取。

第2类模糊线性回归模型于1987年由王震源引进。这类模型中,回归参数是实参量,而变量是取值为模糊数的变量,因而这种线性回归又称为模糊值变量线性回归。在这种方法中变量的观察值与估计值之间的差异仍认为是系统的模糊性造成的,但这种模糊性反映在变量取值为模糊数上。

第2类模糊线性回归的一些参数估计原则,可借助可能性理论给出,类似于随机变量,可以定义可能性变量的分布函数,讨论可能性变量代数运算的分布,并可建立可能性的母体、子样等统计概念。由于第2类模型中变量取值为模糊数,因此建立模型的第1步需通过每个自变量的母体分布估计出L-R型模糊数的参数,通过模糊数之间的线性运算,可得到因变量母体分布形式,其次需规定母体的模糊性程度,其参数估计原则可由于子样出现的可能性最大及母体分布的模糊性最小输出。最后这种估计原则导致的计算问题仍为一系列线性规划问题。这种参数估计方法可认

为是经典的极大似然估计在可能性变量中的推广。

第3类模糊线性回归模型是前两类的综合,它是指线性系统本身带有不确定性即参量是模糊的且变量是取值为模糊数的变量,从理论上讲这种模型含有第1、第2类作为特例,因而有着较前两类更为广泛的运用。由于模糊数的运算关于乘法就某一类来讲不是封闭的,这给第3类模型的讨论带来很大困难。哈明虎和王熙照1990年对这类模型作了初步探讨,指出了用阶梯型模糊数近似代替模型的模糊参量及模糊变量,可得到一个运算封闭的近似系统。利用可能性理论,可对此近似模型提出Minimax估计即极小化最大损失量的参数估计原则,将估计问题转化为一系列无约束优化问题求解。

第3类模糊回归模型是目前研究的难点,主要体现在以下几个问题上:(1)母体估计的优良性准则。(2)模型参量及变量均取值为一般的模糊数时的参数估计问题。(3)由于最终的计算问题大多化为一些特殊类型的优化问题,对这些特殊的优化问题需给出经济的计算方法。(4)参数检验问题及逐步筛选变量的施使。(5)一般非线性模糊回归模型的建立及计算方法。

由于第3类模糊回归模型从理论上可以概括经典的回归,能将随机性、模糊性综合在一起考虑,并且可广泛应用于价格预测、综合评判、数据处理等领域,因而能促使在其各个方面都能迅速发展。

模糊线性回归研究的热点为:(1)模糊线性回归一般理论的建立。(2)模糊回归同模糊聚类、模糊判别等问题联系的研究。(3)模糊线性回归的计算方法问题。(4)对众多实际问题的具体应用。

参考文献

- 1 Tanaka H, et al. IEEE, Trans Systems Man Cybernet, 1982, 12: 903~907
- 2 Heshmaty B, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1985, 15: 159~191
- 3 哈明虎,等. 河北大学学报, 1989, 5: 15~19
- 4 Bardossy A. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 37: 65~75
- 5 Wang Zhenyuan, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 36: 225~336
- 6 哈明虎,等. 模糊系统与数学成果会论文集. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991. 19~21
- 7 Wang Xizhao, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 51: 179~188

(河北大学哈明虎博士、王熙照副教授撰; 吴从折审)

模糊可靠性 fuzzy reliability 20世纪80年代之前所谓的可靠性,都是只考虑事物随机性的可靠性,称之为经典可靠性或普通可靠性。随着科学技术的发展,尤其是大的复杂系统的出现,人们的认识由单纯的随机性逐渐深入到了随机性与模糊性相互渗透的更高层次。这时,经典可靠性的传统观念和方法与人类本质的思维方式、事物的复杂化以及模糊信息和模糊概念等发生了严重的冲突。以致经典可靠性只能解决随机性问题,对于随机性与模糊性相互渗透的问题却无能为力。为了解决上述矛盾,必须建立新的可靠性观念、原理和分析、计算方法。模糊可靠性的研究就是在这种背景下出现的。

模糊可靠性是经典可靠性的拓展,它既考虑事物随机性又考虑事物模糊性时的可靠性。

国外研究模糊可靠性始于20世纪80年代初期,他们的工作主要局限于应用模糊数学的原理和方法解决经典可靠性中某些参数的计算问题。1984年,福龙达(H. Furuta)和继莱伊西(N. Shiraishi)在《模糊集合及系统》(Fuzzy Sets and Systems)上发表了“故障树分析中的模糊重要度”(Fuzzy importance in fault tree analysis)一文,将模糊集合理论应用于重要度的计算。这几乎是最早涉及模糊可靠性的文章。1990年辛格(D. Singer)在上述杂志上发表了“模糊集合应用于故障树和可靠性分析”(A

fuzzy Set approach to fault tree and reliability analysis)一文,比福龙达和绥莱伊西的文章前进了一步,但是仍然未达到系统地研究模糊可靠性的境界。

中国对模糊可靠性的研究也十分重视。80年代初期,钱学森曾提醒有关的研究单位说,怎样把模糊数学应用于可靠性分析,并希望组织力量做这方面的工作。正式的研究始于80年代中期,王光远自1986年起,先后发表了数篇有关模糊可靠性的文章,对一般结构(尤其是抗震结构)的模糊可靠性进行了开拓性的研究。他将可靠性分作3类:(1)随机可靠性—只考虑随机性时的可靠性,即经典可靠性。(2)模糊可靠性—只考虑模糊性时的可靠性。(3)模糊随机可靠性—既考虑随机性又考虑模糊性时的可靠性,也称做广义可靠性。他进一步提出了“模糊有效域(Ω)”和“模糊失效域”等概念,并将模糊随机可靠度定义为结构在使用期限内正常工作(Ω)发生的概率。这些研究工作对中国模糊可靠性研究的起步和发展起了重要的作用。

李廷杰与高和从测度的角度出发,在国内外首次全面、系统地研究了模糊可靠性的基础概念和方法,自1988年起,已先后在国内外有关杂志上发表了13篇文章。在经典可靠性定义的五项内容(对象、条件、时间、功能和能力)中,他们着眼于功能和能力的模糊性,定义模糊可靠性为产品在规定的条件下,在预期的时间内,某种程度上保持其规定功能的能力,这个“能力”既可以用精确概率表示,也可以用模糊概率表示。按照模糊概率论的原理,他们将可靠性分作4类:(1)清晰事件—精确概率型,即经典可靠性。(2)模糊事件—精确概率型。(3)清晰事件—模糊概率型。(4)模糊事件—模糊概率型。后三类的可靠性统称为模糊可靠性。为了描述可靠性定义中各种不同的模糊功能,他们借助于模糊语言的组成规则,利用各种语言算子、模糊余集的概念和语言值的运算法则,获得了几十种模糊功能子集。例如:“极可靠”、“很可靠”、“可靠”、“比较可靠”、“比较不可靠”、“不可靠”、“很不可靠”、“极不可靠”、“不大可靠”、“倾向于可靠”……。同时他们还定义了模糊故障,并按照故障的不同程度,将模糊故障分作八大类。另外,他们还定义了模糊可靠性的主要指标(比如模糊可靠度、模糊故障率、模糊平均寿命、模糊维修度等),并且按照模糊集合理论和模糊概率论的原理和方法建立了各主要指标在前述三种类型下不同的数学模型。他们的这些研究工作对中国模糊可靠性研究的发展起了推动作用。

中国自80年代中期起,模糊可靠性研究蒸蒸日上,已经先后发表了约40篇文章。这些论文的着眼点和方法是各式各样。从着眼点考虑,有的着眼于“时间”的模糊性,有的着眼于“条件”的模糊性,而更多的着眼于“功能”的模糊性。从方法上考虑,有的应用可能性理论,有的应用模糊映射原理,有的应用模糊概率论等。总之,国内研究模糊可靠性具有以下特点:全面,系统,发展快,形式多样。目前,中国研究模糊性的势头和成绩在国际上遥遥领先。

模糊可靠性目前还处于初步形成和发展阶段。但我们相信,通过许多人的共同努力,模糊可靠性终将会成为一支成熟的工程技术学科。

参考文献

- 1 Furuta H, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1984, 34(2): 205~213
- 2 王光远,等.力学学报, 1986, 448~445
- 3 王光远,等.地震工程与工程振动, 1986, 6(1)
- 4 李廷杰,等.模糊系统与数学, 1988, 11~23
- 5 Onisawa T, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1988, 28(2): 115~127
- 6 李廷杰,等.模糊系统与数学第3卷第1期, 1989, 3(1): 38~45
- 7 李廷杰.系统工程理论与实践, 1989, 9(3): 26~31
- 8 Singer D A. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 34(2): 145~155

9 Li Tingjie. BUSEFAL, 1991, 48: 140~145

10 Cai Kai-Yuan, et al. Fuzzy Sets and Systems, 1991, 42(2): 145~172

(北京航空航天大学李廷杰教授、高和副教授撰;李忠应审)

奇异摄动理论

theory of singular perturbation 奇异摄

动问题广泛存在于航天、等离子体、非线性振动、电磁辐射、核聚变、湍流、燃烧、勘探、气象、海洋、控制论、化学反应、半导体物理、生物物理、生态学、医学、经济学等领域。在实际问题中,特别是在高新技术中提出的一类问题,在许多情况下,可以用奇异摄动方法解决。奇异摄动方法的优点是能给出足够精度的解析结构的解,克服单纯用数值方法求得的离散的近似解所带来的弱点。因此它越来越受到国际学术界的重视。

摄动理论起源于天体力学。19世纪后期,为了研究月球、行星的运动,拉普拉斯(P. S. Laplace)、德洛勒(C. E. Delaunay)、希尔(G. W. Hill)和汉森(P. A. Hansen)等开始用了摄动方法。后来,邦加雷(H. Poincare)在《天体力学新方法》中归纳了这段时期的各种成果,提出了建立摄动理论的一些研究方向,如级数解理论、周期解理论和特征指数理论等。20世纪以来,用变换理论作为研究方向又有了很大的发展,特别是50年代以后,由于人造卫星的发射以及电子计算机的广泛应用,变换理论成为摄动理论的一种重要工具。

奇异摄动理论是在发展中逐步形成的,是在现代科学中出现的一类问题,特别是在研究非线性问题时,或者由于所研究的区域是无限的,或者是所归纳的微分方程最高阶导数项带有小参数的系数,或者被研究的偏微分方程在退化时其类型有改变,或者微分方程中存在奇点等等,用“正规的”摄动方法已不能处理这类问题,因此各种奇异摄动方法就应运而生,并发展成为一种新的理论。

从20世纪60年代以来,利用奇异摄动方法解决了大量的实际问题。在非线性和振动方面,1971年诺德林格(P. D. Noerdlinger)和佩托赛(R. Pertosian)讨论了在自重作用下星系的宇宙膨胀的影响,克富凯恩(J. Kevorkian)研究了具有慢变频率的一维振子通过共振区的问题。1970年阿克贝格(R. C. Ackerberg)和奥马利(R. E. O'Malley)首次讨论了出现转向点的二阶微分方程的振动(A—O共振),这个问题引起了许多学者的兴趣,1989年江福汝对这个问题给出了产生共振的必要条件。在轨道力学和飞行力学方面,1966年奈弗(A. H. Nayfeh)分析了具有小推力的人造卫星从圆形轨道上起飞的问题。1970年雷曼斯(R. V. Ramanth)研究了直升飞机的动力学问题。在等离子体物理方面,1971年纳瓦克(G. J. Lewak)讨论了等离子体中静电波的相互作用,德波洛瓦纳(M. Dobrowolny)和罗杰斯特(A. Rogister)分析了高 β 等离子体中的磁流体波的传播。在大气层科学方面,1971年林德詹(R. S. Lindzen)研究了赤道波通过切变的传波问题,1988年亨特(J. C. R. Hunt)、莱波维奇(S. Leibovich)和利查德斯(K. J. Richards)研究了低山对近地大气影响理论。在固体力学方面,早在1947年钱伟长就讨论了圆形薄板的大挠度问题,1965年莫特尔特(M. P. Mortell)分析了在圆柱壳体上的行进波问题和壳体上的波的传播,1969年莫利努(L. Morino)研究了非线性翼段的颤振。1980年斯图西克(Л. С. Спруник)研究了扁球壳稳定性问题。在流体力学方面,1971年波利(K. K. Puri)研究了两个适合流体的振动,米特切儿(C. E. Mitchell)研究了燃烧不稳定性问题,1978年范杜克(Van Dyke)研究了管道内粘性流动,考虑了截面积缓慢变化、均匀加热等效应。1983年侯斯(F. A. Howes)研究了在粘性力、毛细力和重力作用下沿平面运动的定常单向薄层流的数学模型。1985年海勃曼(R. Haberman)和孙(R. Sun)讨论了非线性弥散波的焦散问题,1989年兰德(B. E. Launder)讨论了湍流—扩散问题。

随着大量实际问题的解决,反过来又促使奇异摄动在理论

(安徽师范大学莫嘉琪教授撰)

一的进一步发展。在常微分方程理论方面,1952年吉洪诺夫(A. Н. Тихонова)讨论了一般非线性方程组的初值问题的退化定理,1954年布利斯(H. И. Брису)首先用微分不等式方法讨论了一个二阶微分方程的奇异摄动问题,1968年杰克森(L. K. Jackson)详细地综述了这个方法,1978年侯斯利用这个方法研究了更广的问题,1969年章国华(K. W. Chang)把对角化技巧成功地应用于奇异摄动问题,1970年奥马利(R. E. Jr. O'Malley)指出了一类非线性奇异摄动问题的内部不一致性,1971年霍本斯坦特(F. Hoppensteadt)讨论了一类带小参数微分方程解的性态,1972年瓦西里娃(A. B. Васильева)和布图佐夫(Ф. Бутузов)研究了条件稳定方程的理论,内部过被层理论和含小偏差变元的微分一差分方程,1973年杜尔(F. W. Dorr)、帕特(S. V. Parter)和夏宾(L. F. Shampine)把极值原理应用于奇异摄动问题,1988年凯雷(W. G. Kelley)研究了奇异摄动问题解的适定性,1989年周钦德、苗树梅研究了微分差分方程边值问题,1990年瓦思瓦斯(A. Wazwas)讨论了一类二阶方程的两个转向点问题。在偏微分方程理论方面,1957年维西克(М. И. Вишик)和柳斯杰尔尼克(А. А. Люстерник)综述了奇异摄动线性微分方程的边界层校正法,1975年德亚哥(E. H. de Jäger)讨论了一类双曲型方程的奇异摄动,1979年夏奥(G. C. Hsiao)和威纳切特(R. J. Weinacht)讨论了一个奇异摄动 Cauchy 问题,1984年兰德(G. S. Ladde)和兰克斯米克山姆(V. Lakshmikantham)讨论了非线性椭圆型方程组的边值问题,1985年尼西尤拉(Y. Nishiura)和富奇(H. Fujii)讨论了一类反应-扩散方程组的奇异摄动解的稳定性定理,1989年布图佐夫和布契涅夫(B. Ю. Бучнев)讨论一类二阶抛物型方程的奇异摄动,1990年爱克豪斯(W. Eckhaus)和伽贝(M. Garbey)讨论了双曲型方程奇异摄动解的渐近分析,1991年林宗池讨论了极限方程为椭圆-抛物四阶椭圆型方程的奇异摄动。在数值理论方面,1969年伊林(A. M. Il'in)首先对常微分方程第一边值问题构造了指数型拟合差分格式,1980年杜纳(E. P. Doolna)、米勒(J. J. Miller)和许尔德斯(W. H. A. Schilders)全面系统地叙述了一阶常微分方程初值问题和二阶方程边值问题的指数型拟合差分解法,杜飞(D. J. Duffy)对一类抛物型方程奇异摄动问题研究了指数型拟合差分格式,1985年苏煜城用外推法于奇异摄动数值问题,1991年林鹏程研究了奇异摄动抛物型方程混合问题的差分解法,1982年雷哈尔特(H. J. Reinhardt)提出自适应网格加密有限元方法,巴布斯卡(I. Babuska)和苏姆扎克(W. G. Szymak)对迎风有限元和指数型拟合有限元进行了误差分析,1984年尼基马(K. Nijima)和纽墨尔(M. Numer)利用 Liouville-Green 变换构造了一些高阶格式,1986年西希肯(G. I. Shishikin)利用非均匀网格解决了奇异摄动特征边界问题。

随着科学技术的发展,各种非线性奇异摄动问题将会有更深入的研究,转向点问题仍为热门的研究方向,奇异摄动多重尺度方法将进一步扩展并越来越被运用,奇异摄动的主要理论研究对象将由常微分方程转为偏微分方程。

参考文献

- 1 Wasow W. Asymptotic Expansions for Ordinary Differential Equations. New York, Wiley & Sons, 1965
- 2 O'Malley R E. Introduction to Singular Perturbations. New York, Academic Press, 1974
- 3 Kevorkian J, et al. Perturbation Methods in Applied Mathematics. New York, Springer-Verlag, 1981
- 4 Nayfeh A H. Introduction to Perturbation Techniques. New York, John Wiley & Sons, 1981
- 5 Chang K W, et al. Theory and Applications. New York, Springer-Verlag, 1984
- 6 Lagerstrom P A. Applied Mathematical Sciences 76. New York, Springer-Verlag, 1982
- 7 Маслов В П. НАУКА, 1988, 25(2), 15~23

投入产出分析 input output analysis

用数学工具综合研究经济系统中各部门在产品生产中物资消耗、劳动力消耗与所得的收益之间依存关系的一种方法。投入是指在进行一项经济活动中的消耗,如在生产中要消耗一定数量的原材料、动力、人力及设备,产出是指生产活动结果所得到的一定数量的产品。在各种经济活动中投入与产出之间具有一定的数量规律性,这种规律性正是投入产出分析研究的对象。

1936年美国瓦西里·列昂惕夫(Wassily Leontief)在《美国经济系统中投入和产出的数量关系》一文中首次公开提出投入产出分析的基本思想,以后他对投入产出分析法作了进一步的论述,并用这一方法对美国经济结构作了分析研究。1968年联合国统计局正式规定投入产出是国民经济核算的一个重要组成部分。

投入产出分析法是通过投入产出模型进行分析运算的。投入产出模型按计量单位分类可分为价值型和实物模型,按照涉及的范围不同可分为国家模型及企业模型。投入产出模型由投入产出表及数学模型两部分组成。下面简述一下全国价值型投入产出模型。

投入产出表 表中 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 是第 i 个部门总产值、

投入	产出	中间产品					最终产品					总产品			
		农业	黑色金属工业	有色金属工业	电力工业	其他	个人消费	社会消费	生产性积累	非生产性积累	库存变化		进出口	其他	最终产品合计
农业	1	X_{11}	X_{16}	X_{17}	X_{18}									F_1	X_1
...
黑色金属	6	X_{61}	X_{66}	X_{67}	X_{68}									F_6	X_6
有色金属工业	7	X_{71}	X_{76}	X_{77}	X_{78}									F_7	X_7
电力工业	8	X_{81}	X_{86}	X_{87}	X_{88}									F_8	X_8
...
劳动者收入		V_1	V_6	V_7	V_8										
社会纯收入		M_1	M_6	M_7	M_8										
总收入		X_1	X_6	X_7	X_8										

总收入, $X_j (j=1, 2, \dots, n)$ 是第 j 个生产部门在生过程中消耗的第 i 个部门的产品数量, $F_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示第 i 个生产部门的最终产品数量, $V_j, M_j (j=1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 个生产部门的劳动者收入、社会纯收入。在进行分析前先要认真统计所有的数据(包括最终产品中的各项),并把这些数据填写在相应的格子内。

数学模型

分配方程组: $\sum_{i=1}^n X_{ij} + F_i = X_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$

生产方程: $\sum_{i=1}^n X_{ij} + V_j + M_j = X_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$

若令 $W_j = V_j + M_j (j=1, 2, \dots, n)$
 (2)式即为: $\sum_{i=1}^n X_{ij} + W_j = X_j \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2')$

直接消耗系数: 记 $A_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} \quad (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$

称 $A_{ij} (i, j=1, 2, \dots, n)$ 为第 j 个生产部门对第 i 个生产部门的直接消耗系数。对直接消耗系数显然有, $A_{ij} \geq 0 (i, j=1, 2, \dots, n)$; $\sum_{i=1}^n a_{ij} < 1 (j=1, 2, \dots, n)$

$$\text{记: } A = (A_{ij})_{n \times n} \quad (4)$$

称 A 为直接消耗系数矩阵。

$$\text{由 (3) 式得: } X_j = A_{ij} \times X_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$\text{(5) 代入 (1) 得: } \sum_{j=1}^n A_{ij} \times X_j + F_i = X_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$\text{(6) 写成矩阵形式为: } A \cdot X + F = X \quad \text{或: } (I - A)X = F \quad (7)$$

其中 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T, F = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T$

称 $I - A$ 为列昂惕夫矩阵, 可以证明 $I - A$ 为可逆矩阵。于是有: $X = (I - A)^{-1}F$ (8)

直接消耗系数矩阵刻画了国民经济各部门之间的直接联系。而实际上各部门之间还存在着间接联系。例如钢铁部门生产过程中要用煤炭, 这是直接消耗, 而钢铁部门在生产过程中又要用电力, 但电力生产也要煤炭。这就形成了钢铁生产对煤炭生产部门的一次性间接消耗; 同样地有二次、三次等间接消耗。为了全面反映部门之间的联系, 有必要引入完全消耗及完全消耗系数概念。

若用 $b_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 部门对第 i 部门的完全消耗系数。根据以上分析有关系式:

$$B_{ij} = A_{ij} + \sum_{k=1}^n B_{ik}A_{kj} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

其中 k 表示第 i 个生产部门与第 j 个生产部门发生间接联系的中间环节部门。

记 $B = (b_{ij})_{n \times n}$, 称 B 完全消耗系数矩阵; 将 (9) 写成矩阵形式, $B = A + B \cdot A$ (10)

$$B \cdot (I - A) = A$$

$$B = A \cdot (I - A)^{-1} = (I - A)^{-1} - I \quad (11)$$

这里 I 为 n 阶单位矩阵。

建立了模型后便可对经济结构进行分析并编制经济发展计划。由模型可分析各部门之间的比例; 积累与消费的比例; 模型还综合地评价了系统的经济效益, 事实上完全消耗不要就全面地反映了系统的科技及管理水平; 模型中公式 (7) 及 (8) 揭示了各部门的产品总量及能提供给社会的最终产品的关系, 为科学地制订经济发展计划提供了依据。模型还有其他方面的应用。

以上介绍了全国价值模型模型及应用。实物型模型是以单位产品的产量作为统计单位且不进行活劳动消耗的统计, 这决定了实物型模型中没有生产方程组; 此外实物型模型中的直接消耗系数 a_{ij} 与所消耗物资的价格无关, 故不受价格变动的影响, 对衡量各部门的生产技术和管理水平更为直接有力。

企业投入产出模型也可分为价值型与实物型两种, 企业投入产出分析法原理上与全国投入产出分析类同, 但在编制投入产出表时可根据不同的目的而编制不同的栏目。

当前投入产出分析法已得到了深入的发展及广泛的应用, 这体现在以下几个方面: (1) 从应用范围看有日益扩展的趋势, 已有不少国家应用投入产出分析法来分析环境保护、资源利用、国际贸易、人口问题、收入分配及预测经济发展的规模。(2) 投入产出分析与其他数学方法和模型的结合日益深入 (与经济计量学模型相结合及与最优控制理论相结合是当前研究的一个热点)。(3) 电子计算机技术在投入产出分析法中得到了广泛的使用, 人们已经利用电子计算机技术对数据进行加工整理, 并利用电子计算机技术计算完全消耗系数矩阵及列昂惕夫逆矩阵。(4) 用投入产出分析法进行经济分析的模拟工作。可以相信随着经济活动的发展及电子计算机技术的提高, 投入产出分析法会得到更加广泛的应用与发展。

参考文献

- 1 Wassily Leontief. Input-Output Economics. New York, Oxford University Press, 1966
- 2 乌家培, 张宋一主编. 投入产出在中国的应用, 山西: 山西人民出版社, 1984
- 3 钟契夫等编著. 投入产出原理及应用. 北京: 中国社会科学出版社, 1985

4 国家统计局国民经济平衡统计司编. 投入产出表的编制与应用. 北京: 中国统计出版社, 1988

(上海交通大学施祥霖讲师撰)

生产函数 production function 当代西方经济学, 特别是微观经济学中广泛使用的概念。它表示一家厂商(或整个社会)所投入的生产要素(劳动、资本和土地等)的某一种组合同它所能得到的最大数量的产出之间的依存关系。如果用 P 代表总产量, a, b, c, \dots, n 代表各种不同的生产要素的投入量, 则生产函数的公式为: $P = f(a, b, c, \dots, n)$ 。这表明总产量 P 决定于各种不同的生产要素 a, b, c, \dots, n 等在一定时间内的投入量。从生产要素的组合比例及其与产出的关系, 可以看出一个厂商(或整个社会)的生产技术情况。

关于生产函数的发端, 西方有些经济学家认为可以上溯到古典政治经济学创立的初期。18 世纪 70 年代, 亚当·斯密(Adam Smith)在《国富论》一书中研究分工时, 关于“针”的制造就是运用生产函数的概念来分析投入与产出关系的。但只是到了 19 世纪末 20 世纪初, 西方经济学家才开始利用数理公式表达生产函数。

1901 年, 瑞典经济学家威克塞尔(K. Wicksell)在他的主要著作《政治经济学讲义》第 1 卷, 提出了生产函数的公式为 $P = a^{\alpha}b^{\beta}$ (其中 a, b 为生产要素, 指数 $\alpha + \beta = 1$)。1928 年, 美国数学家柯布(C. W. Cobb)和经济学家道格拉斯(P. H. Douglas)在其论文“关于生产的一种理论”中, 充分运用了威克塞尔的上述创见。紧接着在 1934 年, 道格拉斯在其知名著作《工资理论》(The Theory of Wages)中, 特别邀请了长于数学的友人柯布为他的理论设计出下述公式: $P = bL^kC^{1-k}$ (式中 L, C 分别指一定时期内劳动和资本的投入量, P 指和他们相对应的生产量, b 和 k 为常数, $b \neq 0, 0 < k < 1$)。这就是著名的“柯布—道格拉斯生产函数”(C-D 函数)。经过对数变换, 并根据 1899~1992 年美国制造业资本和劳动对生产影响的历史资料, 进行最小二乘估计的结果得到 $b = 1.01, k = 0.75$ 。由此得到 C-D 函数的估计式为: $P = 1.01L^{0.75}C^{0.25}$ 。这表明, 每增加 1% 的劳动所引起的产出的增长, 将三倍于每增加 1% 的资本所引起的产出的增长。这一结论被认为与美国这一时期工资收入与资本收入之比(3:1)大体相符。

C-D 函数首次将经济数学和模型的方法引入生产分析, 在西方经济学界引起巨大反响。它使经济学家们从抽象的纯理论研究转向了实际生产的经验分析, 并为这一领域的进一步发展奠定了基础。在随后兴起的计量经济学中, 它也得到了广泛的应用。但是, 由于 C-D 函数仅能描述在某一恒定的技术水上下投入量与产出量的关系, 因而就使它在分析技术进步作用方面显得无能为力。1942 年, 荷兰经济学家丁柏根(Jan Tinbergen)对 C-D 函数进行重大改进, 将其中的常数 b 换成一个随时间而变化的量 A_t , 即 $P = A_t L^k C^{1-k}$ 。 A_t 代表某一时期的技术水平, L, C 和 P 是时间 t 的函数。这样, 技术进步对产出的影响就可以表现出来。

50 年代中期, 美国经济学家索洛(R. M. Solow)提出以增长速度方程为模型, 用“余值法”测算技术进步, 进一步赋予生产函数新的生命力。索洛所生产函数写成下面的一般形式: $P = F(C, L, t)$, t 是时间变量, F 是可微分函数。在希克斯(J. R. Hicks)中性技术进步条件下, 上式可变为: $P = A_t f(C, L)$ 。 A_t 表示 t 时期的技术水平。对上式求全微分并在两端除以 P , 令 $\alpha = \frac{\partial P}{\partial C} \cdot \frac{C}{P}$,

$\beta = \frac{\partial P}{\partial L} \cdot \frac{L}{P}$, 得到产出增长速度方程: $\frac{P'}{P} = \frac{A'_t}{A_t} + \alpha \frac{C'}{C} + \beta \frac{L'}{L}$ (其中符号'表示对时间的导数)。它表明, 产出的增长是由资本、劳动投入量的增加和技术水平的提高带来的。在 α, β 确定之后, 技术进步速度便可通过“余值”测算出来。余值法的最大优点, 就是无需对生产函数的具体形式做任何假设, 就可以对技术进步的作用做出定量的估计。索洛的余值法问世以来, 各国学者纷纷采用他的

方法(或将其方法与C-D函数相结合),去分析各国的经济发展状况。

1961年,美国经济学家阿罗(K. J. Arrow)与索洛等3人合作,提出固定替代弹性生产函数,即CES(constant elasticity of substitution)生产函数,使生产函数的理论有了新的突破。CES函数的形式为: $P=A(\delta L^{-\rho}+(1-\delta)C^{-\rho})^{-1/\rho}$ 。它是一族函数,包括C-D函数和里昂惕夫(W. Leontief)生产函数。阿罗等人的主要贡献在于,把人们对于生产函数的认识从产出对投入要素的弹性和规模报酬(μ)推广到包括替代弹性 $\sigma = \frac{1}{1+\rho}$ 和分配系数 δ 的新函数形式。当劳动支出在总成本中占的比例越来越大时,研究投入要素之间的替代弹性就更具有一定意义了。

1968年,萨托(R. Sato)和霍夫曼(R. F. Hoffman)推导出变替代弹性(VES)生产函数 $\frac{Z'}{Z} = \frac{1}{k + Bex\rho} \frac{dlnk}{\sigma(k)}$ 其中, $k = \frac{C}{L}$, $Z = \frac{P}{L}$, $Z' = \frac{dz}{dk}$, $B > 0$, 为积分常数;在完全竞争的假设下, $\sigma(k) = \frac{a(k)\beta(k)}{a(k)\beta(k) - k a'(k)}$ 为替代弹性, $\beta(k) = 1 - a(k)$;因此只要 $\int \frac{a(k)}{k} dk$ 可积,就可以得到显式的生产函数。VES函数的优点是释放了CES函数要求替代弹性必须为常数的限制。

1973年,克里斯滕森(L. R. Christenson),乔根森(D. W. Jorgenson)和刘遵义(L. J. Lau)3人提出超越对数(transcendental logarithmic)生产函数(简称 Translog 函数)。这种函数假设有 n 种生产投入 (X_1, X_2, \dots, X_n) , 一种产出 P , 则: $\ln P = a + \sum_{i=1}^n \alpha_i \ln X_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \ln X_i \ln X_j$, 式中 a, α_i, γ_{ij} 都是待估系数,其中 $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$ 。如果只考虑两种投入要素 L 和 C , 那么 translog 函数应为:

$$\ln P = a + \alpha \ln L + \beta \ln C + \gamma \ln L \ln C + \delta (\ln L)^2 + \epsilon (\ln C)^2$$

实际上这是C-D函数的一种扩展形式,当 $\gamma = \delta = \epsilon = 0$ 时,上式退化成C-D函数。

1980年Y. Sheinin提出了三级CES生产函数,把劳动L、资本C、能源E和原材料M4种要素都放到生产函数中进行研究。这种函数的形式如下:

$$J = (a_1 C^{-\rho_1} + a_2 E^{-\rho_1})^{-1/\rho_1}, V = (d_1 J^{-\rho_2} + b_2 L^{-\rho_2})^{-1/\rho_2}, P = A(c_1 V^{-\rho_3} + c_2 M^{-\rho_3})^{-1/\rho_3}$$

合成一式则有: $P = A \{c_1 [b_1 (a_1 C^{-\rho_1} + a_2 E^{\rho_1})^{-\rho_2/\rho_1} + b_2 L^{-\rho_2}]^{\rho_3/\rho_2} + c_2 M^{-\rho_3}\}^{-1/\rho_3}$

改变4种要素在函数中的位置,可以得到不同形式的三级CES函数。由上式可知,各要素之间的替代弹性不再是等同唯一的了。

除上述之外,有些西方经济学家还提出了一些其它的生产函数表达式,如泽尔纳(A. Zellnev)和雷卡发(N. Revankar)在1969年建立的广义生产函数(GRF),具有和CES函数相同的替代弹性,但规模报酬是可变的,并且是按照预先给定的方式随产出的变化而变化,即规模报酬是产出的函数。还有A. N. Halter, H. O. Carter和J. G. Hocking等人在1957年提出的超越生产函数(transcendental production function)及Nerlove和Ringstad在1967年提出的Nerlove-Ringstad生产函数等。由于这些函数都与C-D函数有一定的关系,故被称为C-D函数的扩展形式。

有关生产函数的理论是建立在微观经济基础上的,要研究全国的生产情况,即把单个企业(或部门)的生产函数加总形成总量生产函数时,则需要很强的假设条件。许多学者对此进行了深入研究,在这方面的主要成果有:1955~1956年, H. S. Houthakker从“有效分布”角度出发,研究了总量生产函数的存在性。在企业的生产函数是固定比例的假设下, Houthakker证明企业生产函数系数的差异(有效分布)满足帕累托(Pareto)分布,

对应的总量生产函数是C-D型函数。1964年,格林(H. A. J. Green)证明,当所有微观变量可取任意正数时,微观生产函数可以加总成总量生产函数的充分必要条件是所有的微观函数都是可分相加性函数。在此条件下形成的总量生产函数也是可分相加性函数。1964~1965年,格林、索洛与非希尔(F. M. Fisher)分别研究了不考虑相加性假设条件时,总量生产函数的存在性。他们得出的共同结论是,在每一个企业的有效生产(成本最小)的条件下,当且仅当所有微观函数有相同的函数形式,并且它们都是一阶齐次函数时,总量生产函数存在。

1968年,莱弗豪利(D. Levehari)扩展了Houthakker的成果。通过密度函数,从固定比例的两个要素的微观生产函数得到了宏观的CES函数。1975年,萨托(K. Sato)提出,如果①所有的企业都生产一种同质产品;②所有企业的生产函数都相同,仅生产要素的系数不同。设4个生产要素的微观生产函数形如 $A = F(\alpha_i C_i, \beta_i L_i, \gamma_i E_i, \delta_i M_i)$, 对于所有的 i (企业)皆相同;其中 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 和 δ_i 分别表示 C_i, L_i, E_i, M_i 的有效系数;③每一个企业的资本量固定;④有效系数 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 和 δ_i 固定;⑤每一个企业的生产在最优条件(给定资本量时利润达到最大)下进行;这些条件满足,那么必然存在与有效系数有关的分布函数。萨托认为从这个分布函数可以证明短期总量生产函数确实存在。

80年代以来,我国的经济理论工作者也开始利用生产函数来研究和分析经济、生产等问题。这方面的研究主要集中在:关于测定技术进步在产出增长中的贡献;关于全要素生产率的研究;利用生产函数模型进行企业和部门的经济预测;建立宏观经济模型等。

生产函数理论和方法的研究中存在的问题主要有:(1)对投入要素变量数据的处理和参数估计问题。(2)如何使约速性较强的生产函数与实际情况拟合。(3)关于资本与劳动产出弹性的测算问题。(4)关于提出新的生产函数表达式等等。

参考文献

- 1 Arrow K J, Chenery H B, Minhas B S, Solow R M. Review of Economics and Statistics, 1961, 43: 225~235
- 2 Sato R, Hoffman R F. Review of Economics and Statistics, 1968, 50: 453~460
- 3 Zellnev A, Revankar N. Review of Economics and Statistics, 1969, 36: 241~250
- 4 Christenson L R, Jorgenson D W, Lau L J. Review of Economics and Statistics, 1973, 55: 28~45
- 5 邵钢. 数量经济技术经济资料, 1985, 6: 1~13
- 6 谢千里, 罗斯基, 郑玉歆. 数量经济技术经济研究, 1990, 8: 22~31

(哈尔滨工业大学刘静副教授撰,尹绍瑞审)

电磁场数值计算及应用

numerical calculation in electromagnetic field and application 利用计算机,采用数值方法解电磁场问题,是自70年代发展起来的一门新学科,问题深入到工业生产的各个领域。

1856年麦克斯韦从数学的推演出发,以积分和微分的形式描述了电场和磁场之间的相互关系,得到了举世闻名的麦克斯韦方程组。百余年来,人们以此为出发点,从事着电磁场的理论分析与工程计算和设计。

$$\nabla \times H = J_e + \frac{ad}{at} \quad \nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -\frac{aB}{at} \quad \nabla \cdot D = P$$

可以归结为求解边值问题的泊松、拉普拉斯方程 $\nabla^2 \psi = -\frac{P}{\epsilon}$ 或 $\nabla^2 \psi = 0$ (偏微分方程)过去通常有两类方法:(1)严格解析法或称为解析法,经典方法有求解偏微分方程的分离变量法和求解积分方程的变换数学法——格林函数法。(2)近似解析法或称为近似

法。在数理方法中,主要的有逐步逼近法、微扰法、变分法和迭代变分法。还有采用高频技术的几何光学法、物理光学法、几何绕射法(GTD)等以上解析法只能求解一些典型的问题。许多算法只适用于二维和稳态问题,不适用于不均匀和非线性问题,另外需花费一定的精力寻求特殊的算法和技巧,而实际电磁场的问题相当复杂。

自从高速、大容量电子计算机引入电磁场领域之后,给电磁学开辟了新的前景—数值法。数值计算法的主要特征是将微分、积分方程中所作用的连续函数离散化,将微分方程化为差分方程,或将积分方程中的积分化为有限和,从而建立代数方程组,并利用松弛和迭代等技巧求解,原则上适用于任何复杂边界,精度高,缺点就是答案正确与否需要实验或其它可靠的结果来证明。

短短的20年,数值法已深入到工业生产的各个领域,解决的面愈来愈广,分析的问题亦日趋复杂,已从线性场到时变场,从稳态场到瞬变场,从单一物理场发展到多种物理场的耦合场。此外,位函数和场强的计算精度也有了很大提高,其中尤以后者的进展更为工程界所关注。

从20世纪40年代开始就有人试探用数值方法解决具有简单边界形状的场问题,此时有限差分法(FDM)已广为应用。虽然更早可以追溯到高斯时代,对于一维问题,早在1868年,莫尔(Mohr)在求梁的挠度时所用的图解弦线多边形法,就是完整的有限差分法。最早应用于二维问题,是1908年由龙格作出的。由有限差分法得到的大型代数方程的解法也同时得到了发展。这些发展源于高斯、雅可比(Jacobi)和赛得尔(Seidel)的基本贡献,以理查德(Richardson)和莱布曼(Liepmann)在迭代领域里的成果,高斯、杜里特(Doolittle)和乔英斯(choleski)在直接法领域里的成就为基础,而真正使用差分法解决电磁场问题,是从1964年Winslow利用向量位,采用有限差分法离散,求解了二维非线性磁场问题开始。随后,Colonias和Dorst用该程序设计了同步加速器磁铁,并且把它发展成为TRIM软件包。此后采用有限差分法计算线性和非线性二维场的程序如雨后春笋般地在美国和西欧出现,如LINDA、MARE和NUTCRACKER等等。

有限差分法简单、直观,无论是常微分方程还是偏微分方程,各种类型的二阶线性方程,以致高阶或非线性方程,均可利用它转化为代数方程组再求其数值解。其基本点是:基于差分原理,用离散点(节点)所组成的网格来代替连续区域,仅在每个离散点上算出未知量。例如用“差商”来近似代替导数和积分并作为各节点值的函数,把连续函数转化为离散方程。其最大缺点就是网格只能采用规则的形式:如矩形等,使得网格与边界和交界面形状不能拟合,不太适合于场的变化十分剧烈的问题,不适用于曲线边界和交界面。尽管有这些不足,但在1970年以前,实际上已占垄断地位,例如科罗拉多大学爱尔德莱小组以及弗里茨、缪勒和塞尔夫在交流发电机和直流电机上都采用它。

目前各种数值计算方法应运而生,并相继应用到各类电磁场问题中。

1. 有限单元法(FEM)。也简称有限元法。以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法。能量泛函的欧拉方程就是与泊松方程吻合而转化为求泛函的极值解—变分问题。在FEM中,把整个场域剖分为许多单元,每个单元用合适的插值函数来表示一未知量,可生成一组代数方程组,然后再用直接法或迭代法即可求出各个节点的值。早期广泛应用于拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场。此后证明,应用加权余量法中的迦辽金法或最小二乘法等同样得到了有限元方程,因而可用于任何微分方程所描述的各类物理场,同样适用于时变场,非线性场以及分层介质中的电磁场求解。适用于具有复杂边界形状或边界条件、含有复杂媒质的定解问题。特别是近10年来,由于数值处理技术的提高,例如采用不完全Cholesky分解法或新的预处理共轭梯度法、采用自适应网格剖分、坐标变换和形状函数的应用、标号寻优、边界寻优等方法,使得有限元法在电磁场数值分析的领域中,越来越占有主导地位。

当然也存在不少问题,得到代数方程组元数大,需借助大、中型计算机,特别对三维问题尤感不便。对无限区域中的求解问题不易处理。

2. 边界元素法(BEM)。为了克服有限元的缺点,人们寻求和发展了边界法。所谓边界元素就是把区域的边界分割成许多元素,在元素上所考虑的插值函数,可以有种种形式。

“边界元素”这个词,首先在20世纪70年代由英国的Southampton大学土木工程系开始使用,将此法移植到电磁场领域则是80年代的事。1978年以来曾召开多次边界元素法国际会议。应用前景是诱人的,但尚有许多不足之处:系数矩阵不是稀疏阵;矩阵中所有元素都要用数值积分计算;计算时间长;不适易处理多种介质问题;场区材料性质复杂。

3. 等效源法。是近10年来发展起来的求解静电磁场问题的有效方法,是将原边值问题化作电源问题来处理的,它把边界的影响,用虚设的模拟电荷的影响来等效代替。因此本质上也属于边界元法。

4. 矩量法(MOM)。是一种将连续方程离散化为代数方程组的方法,此法对于求解微分方程和积分方程均适用。格林顿(R. F. Harrington)于1968年出版的专著中,对用此法求解电磁场问题作了全面而深入的分析,用统一的观点简明扼要地介绍了这种方法。矩量法是将所求方程写成带算符的符号方程,再将待求函数表示为某一组选用的基函数的线性组合,并代入符号方程,最后用一组选定的权函数对所得方程取矩量,得到一个代数方程组再求解。广义讲,它能统一各种数值方法,只是基函数和权函数取各种不同形式的结果。此法在天线分析和电磁场散射问题中有更广阔的前景。

此外,还有几何绕射理论和时域电磁场的分析方法(高频近似方法);奇点展开法(SEM,1975年Prony提出)和时序法;时域差分法。因为各种计算方法各有优缺点,分别适用于各种不同的场合,所以,近年来提出了各种不同方法相结合的组合法。例如实验方法与解析法相结合;解析方法与数值方法相结合;各种不同的数值方法间的结合;有限元—边界元法;有限元—模拟电荷法;模拟电荷法—矩量法;区域变换—有限元法;奇点展开法与变分法;矩量法与几何绕射理论,格林函数法与矩量法等等。

本课题今后的研究热点是:(1)完善这些方法,并应用到三维、非线性、时变的场合;(2)研究通用化的程序,即发展各种电磁场计算的软件包,以减少从事计算的人员编制程序的工作量,如输入数据的自动编制,输出数据的自动处理。用输入、输出数据的图像装置来进行控制。用小型计算机的处理都还将进一步发展。(3)计算精确度的明确化;(4)探讨另外新的计算方法,例如最小二乘配点法,蒙特卡罗法,网格图论法,伴随场法。(5)综合各种数值方法优点的组合法仍然是一个研究方向。

参考文献

- 1 Roger F. Harrington, Field computation by Moment Methods, 1981, 6
- 2 Chari M V K, Silvester P P. finite elements in electrical and magnetic field problems, 1985, 3
- 3 河野照哉宅间薰. 电磁场数值计算法, 1985, 11
- 4 周省三, 邵汉光. 静态电磁场的数值计算, 1987, 8
- 5 李忠元. 电磁场边界元素法, 1984, 12
- 6 樊明武, 颜威利. 电磁场积分方程法, 1988, 1
- 7 刘圣明. 电磁场的数值方法, 1991, 4
- 8 盛剑宽. 工程电磁场数值分析, 1991, 11

(华北电力学院孙孝瑞副教授、陈斌发硕士撰)

家电产品质量分级中的模糊数学概念 application of fuzzy mathematics to the quality appraisal of housekeeping electrical appliances 现代数学与集合论密切相关,集合可以表现概念,集合的运算和变换可以表现判断和推理。在普通集合论中,一个元素对于一个集合,要么属于、要么不属于,二者必

居其一,且仅居其一。这样就限定了普通集合论只能表现“非此即彼”的现象。当代许多学科的分类标准和等级指标反映了普通集合论的这个特征。如目前的洗衣机产品质量分级规定,就是这种“非此即彼”的二值逻辑的体现。在产品质量分级的限定值(区间)制定后,某产品的检测值对该等级而言,就成了要么属该等级,要么不属该等级。这样的级别划分方法,在级与级的分界处形成了一个突变,表现不出级别之间的自然过渡及同一级别内的性能差异。事实上产品的性能是顺序渐变的,而现行的产品质量分级的规定,却将顺序渐变的过程在某些限定值处,人为地断开,形成一个级别的突变。因此,要使考核项目的级别划分更接近人们的自然感觉和判断,就必须接受这样一个事实:即不同的级别之间存在着一个中介过渡状态,级别间的过渡是一个顺序渐变的过程;级别内也存在对该级别的符合程度上的差异。要描述这样的具有“亦此亦彼”的模糊概念,就要借助于“模糊集合论”的有关理论。1965年,美国L. A. Zadeh根据工作中的体会写出了一篇名为《模糊集合》的论文,开始用数学的观点刻划事物的模糊性。

若以洗衣机产品质量的分级为例,现行的《家用洗衣机产品质量分级规定(草案)》中的解释“C级:产品一般水平”。而产品的一般水平显然是一个模糊概念,其外延是极不分明。为此,特构造如F的模糊统计试验:

通过调查,对洗衣机噪声的“一般水平”,根据各自的体验和理,确定一个噪声的取值范围,即给出 ζ 和 η 的一对数值,

ζ : C与B级的分界点;

η : C与D级的分界点。

只要找出了 ζ 和 η 的概率分析,就可确定C级的隶属函数表达式。对于这样的三相模糊统计试验,有如下的定理。

定理:设 (ζ, η) 是满足 $P(\zeta \leq \eta) = 1$ 的连接随机变量,对于 (ζ, η) 的每一次取值,都联系着一个映射:

$$e(\zeta, \eta): R \rightarrow P_3 = (\underline{A}_1, \underline{A}_2, \underline{A}_3)$$

$$e(\zeta, \eta)(x) = \begin{cases} \underline{A}_1 & \text{当 } x \leq \zeta \\ \underline{A}_2 & \text{当 } \zeta > x \leq \eta \\ \underline{A}_3 & \text{当 } \eta < x \end{cases}$$

(1)

则由此三相模糊统计试验所确定的三相隶属函数为:

$$\begin{cases} \mu_{\underline{A}_1}(x) = \int_x^{+\infty} p_{\zeta}(\mu) d\mu \\ \mu_{\underline{A}_3}(x) = \int_{-\infty}^x p_{\eta}(\mu) d\mu \\ \mu_{\underline{A}_2}(x) = 1 - \mu_{\underline{A}_1}(x) - \mu_{\underline{A}_3}(x) \end{cases}$$

(2)

式中 $P_{\zeta}(\mu)$ 和 $P_{\eta}(\mu)$ 分别分别为 ζ 和 η 的边缘概率密度函数。

由于 (ζ, η) 是被调查者在大量的独立作用的各种因素综合影响下所做出的选择,考虑到人们在认识上有趋于一致性的正态分布特点,可导出上述定理的推论如下:

推论:设 $\zeta: N(a_1, \sigma_1), \eta: N(a_2, \sigma_2)$

则三相模糊统计所确定的三相隶属函数(式2),可简化为:

$$\begin{cases} \mu_{\underline{A}_1}(x) = 1 - \Phi\left(\frac{x-a_1}{\sigma_1}\right) \\ \mu_{\underline{A}_3}(x) = \Phi\left(\frac{x-a_2}{\sigma_2}\right) \\ \mu_{\underline{A}_2}(x) = \Phi\left(\frac{x-a_1}{\sigma_1}\right) - \Phi\left(\frac{x-a_2}{\sigma_2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Phi(x)$ 为正态分布的分布函数。

根据式3及噪声G级的限定值(C与B级的分界点为67dB, C与D级的分界点为71dB),并考虑到每个噪声测试值只可能对两个相邻级别产生隶属关系,可得出式4描述的C级隶属函数。同理,也可确定出噪声各个级别的隶属函数。

$$\mu_{\underline{C}} = \Phi\left(\frac{x-67}{0.67}\right) - \Phi\left(\frac{x-71}{0.67}\right) \quad (4)$$

用隶属函数进行单因素评判,不但较好地处理了分界点附近测试值分布的情况,而且将不同产品质量上的差异保留下来,以便传递给综合评判,从而解决了现行分级方法中用C级描述实测值I的的单因素评判,排除了两性能上的差异;用B描述实测值I的的单因素评判时,在感觉上加快了I与I的差异等问题。

随着计划经济向社会主义市场经济的过渡,轻工产品质量的分级应逐步引入模糊数学的概念,才能使产品质量的评价更为科学合理。

参考文献

- 1 汪培, 模糊集合论及其应用, 上海: 上海科技出版社, 1983
- 2 Washing Machines Consumer Report 1991, 2
- 3 全自动洗衣机 6 社 6 铭柄目, 1990

(北京轻工业学院乔五之教授撰)

力学

理论力学

计算力学非线性分析 nonlinear analysis of computational mechanics

计算力学问题, 不管它是连续介质力学系统还是有限自由度问题, 用数值方法求解时最终归结于在计算机上求解一些基本的数学问题。从计算角度看, 这些基本问题的求解规模, 表征了发展的水平, 它们可以归结为如下 4 类问题:

1. $Ax=b$, $x, b \in R^n, A \in R^{n \times n}$ 为非退化矩阵
2. $AX=\lambda X$, $\lambda \in C, X \in C^n, A \in R^{n \times n}$
3. $f(x)=0, f: R^n \rightarrow R^n$
4. $x=f(x, \lambda), x, f \in R^n, \lambda \in R$

这些问题就是: (1) 线性代数求解; (2) 特征值问题; (3) 非线性方程组求解问题; (4) 动力系统的全局求解问题。这些问题中 n 的大小决定了计算力学解题能力与发展水平。

目前的情况是: (1) 线性代数方程求解能力, 由于采用了稀疏矩阵、消去法等一系列技巧, n 可以达到 10 万阶。(2) 特征值问题如果要将全部特征与特征向量求出, 一般解题规模 $n < 1000$ 。(3) 如果要将全部实的和复根都求出来, $n < 100$ 。(4) 要将动力系统解的拓扑结构描绘出来, 并求出分叉解和各种特殊轨道, 目前 $n=10$ 就已经十分困难了。

这个总的发展水平意味着, 对线性问题来说, 大部分实际问题可以满足要求, 但对非线性 2、4 来说距离甚远。值得注意的是, 上述第 2 类问题, 也可以化归为第 3 类来求解, 即令 $\lambda=x_0$ 有

$$\begin{cases} Ax - x_0 x = 0, x_0 \in C, x = (x_1, \dots, x_n) \in C^n \\ \sum_{i=1}^n x_i \bar{x}_i = 1 \end{cases}$$

为一个二次联立方程组, 共有 $n+1$ 个方程

这就是说上述 2、3、4 类问题之所以求解规模仍不能满足主要是因为它是属于非线性的。

对于实际上比较重要的一大类非线性问题, 近年来人们开发了不少有效的算法。其中最重要的是如下两个方法, 即延续算法和单形算法。前者发端于计算力学中的荷载增量法; 后者发端于数值求解一元非线性方程的二分法。

延续算法 令

$$f(x, \lambda) = 0 \quad x, f \in R^n, \lambda \in R \quad (1)$$

求 (x, λ) 满足上式。它的解一般是一维流形, 并设去 (x_0, λ_0) 是已知的解流形上的一点。解流形是 R^{n+1} 中的曲线, 不妨记 $\lambda = x_{n+1}$, 则(1)可写为

$$f(x) = 0, f: R_{n+1} \rightarrow R^n \quad (2)$$

(2)的微分为

$$\frac{Df}{Dx} dx = 0 \quad (3)$$

令 $\underline{J} = (J_1, \dots, J_{n+1})$ 其中

$$J_i = (-1)^{i+1} \left\| \frac{Df}{Dx} \right\| \quad (4)$$

式中令 i 表示在 $\frac{Df}{Dx}$ 中删去第 i 列。可以证明向量 \underline{J} 满足方程(3), 将 \underline{J} 标准化, 引进单位向量

$$\underline{\tau} = \frac{1}{J} \underline{J} \quad (5)$$

我们来求解(1)的问题化归为微分方程初值问题

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = \underline{\tau} \\ x(0) = x_0 \end{cases} \quad (6)$$

利用通常的预报修正办法可求得解 $x=x(s)$, 参数 s 称为弧长。所以这一方法又称为伪弧长法。利用它可以成功地越过结构计算中的极值点。这个方法在数值方法上的发展对应于数学家所称的同伦算法, 并成功地应用于求特征值特征向量和求解非线性方程组等问题。

单形算法 考虑非线性方程组

$$f(x) = 0, f: R^n \rightarrow R^n \quad (7)$$

设 $\Omega \subset R^n$, 我们要在 Ω 内求 $f(x)=0$ 的根, 为此在 Ω 内引入离散点, 并以这些离散点组成 Ω 的一个单形剖分。这个思想和有限元剖分有某些类似, 在单形 $\{x^0, x^1, x^2, \dots, x^n\}$ 上的顶点 $x^i (i=0, \dots, n)$ 的坐标组成的行列式

$$\begin{vmatrix} x_1^0 - x_1^n, \dots, x_n^0 - x_n^n \\ \dots \\ x_1^{n-1} - x_1^n, \dots, x_n^{n-1} - x_n^n \end{vmatrix} \neq 0 \quad (8)$$

令在单形顶点 x^i 上 $f(x^i) = f^i \in R^n (i=0, 1, \dots, n)$, 则当在单形上存在向量 $w = (w_0, \dots, w_n) \in R^{n+1}$ 在 $0 \leq w_i \leq 1 (i=0, \dots, n)$ 内线性方程组

$$\begin{bmatrix} f_0^0 & \dots & f_0^n \\ \dots \\ f_n^0 & \dots & f_n^n \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_0 \\ \dots \\ w_{n-1} \\ w_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

有解时, 称这个单形为完全单形。当 $f(x)$ 足够光滑, 单形充分小, 在单形上总存在

$$x^* = \sum_i w_i x^i \quad (10)$$

满足

$$f(x^*) = 0 \quad (11)$$

一旦找到了一个完全单形, 便可以将这个单形加细分为 2^n 个小单形, 并逐个检查它的完全性。从而使 x^* 是足够精确地表示。对于 $n=1$ 时, 便归结于通常的二分法解一元非线性方程。

总结这两个非线性算法, 都把求解非线性问题归结为分步线性问题。由于目前线性问题计算能力已达到相当大的规模, 所以这类非线性问题的计算能力也在一定程度上达到满意的结果。延续算法从一点开始, 可以把解曲线追踪到充分远。而单形法, 可以将一个解逼近到充分精确。当然延续算法如果碰到解曲线的分叉点, 则还存在实际的困难需要克服。

考虑动力系统

$$\dot{x} = f(x, \lambda), f: R^n \times R \rightarrow R^n \quad (12)$$

并令 (x_0, λ_0) 为平衡曲线上的某一点, 它满足

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (13)$$

满足(13)的全部解称为静平衡曲线。曲线上的分叉点定义为 (x, λ) 满足

$$\text{Re} \mu = 0 \quad (14)$$

这里 μ 为 $\left(\frac{Df}{Dx}\right)$ 的特征值。如果在分叉点 $\text{Im} \mu = 0$, 这时具有零特征值, 这种分叉对应于静分叉, 物理上反映平衡曲线两个以上解分支的交点, 否则称为 Hopf 分叉, 物理上反映出现极限环的运动。

目前, 利用延续算法和单形法, 可以成功地确定高维动力系统静分叉点以及分叉后各解分支的追踪问题。

对于 Hopf 分叉点的确定,以及分叉后极限环的追踪,则还存在实质上的困难。主要困难在于分叉点判别(14)依赖于求出全部特征值,而目前特征值的求解代数还不够高,分叉后极限环追踪问题由于自由度迅速增高,变得十分复杂。事实上, Hopf 分叉产生的极限环在初始时是一高维空间中的二自由度椭圆,之后随着 λ 变化它变为高维空间的闭曲线。由于描述它需要将空间成倍地扩展,复杂性也迅速提高。因此,这个问题的研究大部分还限于三维或四维空间中讨论。

今后计算力学将具有如下的特点:(1)线性问题。在计算机上扩大计算规模将主要地并不是依赖于计算技巧,更主要依赖于硬件发展。这方面两个重要的技术突破预计使线性问题的求解能力将提高两个数量级。第一,国外报导,10 000M 内存的芯片研制成功;第二,并行计算机出现并发展。(2)自 80 年代发展的连续算法,静分叉问题的数值方法得到通用软件实现并商品化。随着力学非线性知识的普及,在工程中求解复杂结构的屈曲、后屈曲行为以及多次屈曲将变为工程设计的常规课题。金属压力加工、注模、流体稳定性等一批实际和理论课题将随之而解决。(3) Hopf 分叉及分叉后极限环追踪问题,对高维空间将得到实际的解决。(4)计算力学理论上进一步综合。适应于现代化科学综合性趋势的发展,作为计算力学、计算流体力学与计算固体力学以及一般力学之间的分界将逐渐模糊起来。它们将在统一的计算力学框架之下得到发展。它们的主要概念与方法将逐步统一。

计算力学不断吸收数学、计算机科学与其他学科的研究成果特别是动力系统、拓扑学、代数几何、计算数学等方面研究成果,改进计算方法。同时将计算力学的研究成果向物理、天气预报、结构工程等方面推广和转移。

参考文献

- 1 武际可,计算结构力学及其应用,1993,2:193~197 (北京大学武际可撰)

欧拉和力学的变分原理

欧拉(Leonhard Euler, 1707~1783)在经典力学发展中的历史功绩,在于将数学分析方法应用于力学问题。分析力学这门科学是以少数假定为基础,由这些假定出发,导出物体的平衡和运动的全部规律。目前,力学的变分原理是分析力学的基础,也就是数学上用变分关系的形式表示的基本的、原始的规则,力学的全部运动微分方程和定律都是作为变分原理的逻辑结果。各种变分原理,无论在形式上及变分手段上,还是在共同性上,都彼此不同,但每一个原理在其可应用范围内都是一个基础,并且好像综合了相应物质系统的整个力学。

变分原理在形式上可分成表征任何给定时刻运动的微分原理和表征任何有限时间间隔运动性质的积分原理。欧拉主张以基本微分原理之一,即现今知道的达朗伯-拉格朗日(D'Alembert-Lagrange)原理作为起源,并首先在数学上给出了最小作用量积分原理的严格的富有成效的表述,其更一般的研究由拉格朗日和雅可比(Jacobi)继续和完成。

力学的变分原理促进了与其相关的强有力的数学形式体系,拉格朗日和哈密顿(Hamilton)形式体系的发展,它们与力学中的变换问题,李(Lie)群守恒律及其它基本问题密切相联系。

欧拉最初的大量工作花费在力学上,1736年在彼得堡发表了他的《力学,或者说用分析描述运动的科学》著作,在这个工作中欧拉以合理的形式建立了点的运动方程并系统地用它们解决了许多问题。

为解一系列振动理论问题,欧拉(1740)将雅·伯努利-赫曼原理推广应用于复摆振动问题,即“其作用下的推动力应当是构成摆的重物,为使有可能一起运动,这些推动力等价于在重力作用下所得到的那些力;因此,如果它们的方向相反,则前者与后者应处于平衡”这个原理是拉格朗日形式的达朗伯普遍原理的前身。

在此期间欧拉还研究了等周问题,即在给定长度的所有闭

单闭曲线中确定一条线使之保持最大面积的问题,并发表了一系列文章,这些文章奠定了数学新领域—变分学的基础。1744年欧拉发表了变分学著名论文,其中特别给出了定积分

$$J = \int_a^b F(x, y, y') dx \quad y(a) = \alpha, y(b) = \beta \quad (1)$$

取极值的必要条件。

为了导出上述条件,欧拉将区间 $[a, b]$ 分成代横坐标 $x_0 = a, x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1} = b$ 的相等小区间,用代纵坐标 $y_s = f(x_s)$ 的折线代替未知曲线 $y = f(x)$,用有限差之比 $f'(x_s) = (y_{s+1} - y_s) / (x_{s+1} - x_s)$ 代替导数 $f'(x_s)$,用有限和

$$S' = \sum_{s=0}^n F(x_s, y_{s+1}, y_s)(x_{s+1} - x_s)$$

代替积分(2)。

为了确定函数 S' 的极值,取其对 y_{s+1} 的导数并让它等于零,得到方程

$$\left[\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{\Delta}{\Delta x} \left(\frac{\partial F}{\partial y'} \right) \right] \Big|_{x=x_s} = 0 \quad (s = 0, 1, \dots, n, n+1)$$

且 $\Delta x = x_{s+1} - x_s$, 在 $\Delta x \rightarrow 0$ 的极限下,得到欧拉方程

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dx} \frac{\partial F}{\partial y'} = 0 \quad (a \leq x \leq b) \quad (2)$$

我们简略地叙述谢道夫(Сендов)变分方程,它是基于变分方法对不可逆过程的推广。谢道夫方程有形式

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} \int_V \Lambda dv dt + \delta W^* + \delta W = 0 \quad (3)$$

其中 V 为连续介质的任意体积, $[t_0, t_1]$ 为任意时间间隔, $\Lambda = \rho [(1/2)v_i v^i - U]$ 为拉格朗日函数, δW^* 和 δW 是如下形式的泛函:

$$\delta W^* = \int_{t_0}^{t_1} \int_V \rho T ds dv - \delta G' + \delta A_{\text{外}}^{\text{面}}$$

$$\delta W = - \left[\int_V \rho v_i \delta x^i dv \right] \Big|_{t_0}^{t_1} + \int_{t_0}^{t_1} \delta A_{\text{内}}^{\text{面}} dt$$

并且 ρ 为质量密度, U 和 S 为单位质量的内能密度和熵密度, x^i 为坐标, $v^i = dx^i/dt$ 为速度, T 为温度, $\delta G'$ 为非补偿热, $\delta A_{\text{外}}^{\text{面}}$ 和 $\delta A_{\text{内}}^{\text{面}}$ 分别为外体力和面力的功。

在方程(3)中,拉格朗日函数 Λ 和泛函 δW^* 是给定量,泛函 δW 由方程(3)确定,它的计算相应于建立状态方程。

变分方程(3)实际上是考虑到热力学第一、第二定律所描述连续介质的动力学普遍方程对时间的积分。

变分方程(3)由谢道夫(1965)给出,与建立复杂性连续介质新模型的问题相关。谢道夫将这个变分方程作为连续介质力学的原始公设。在变分方法范围内建立新的模型,包括确定选取等定函数并给出拉格朗日函数 Λ 和泛函 δW^* 。

高斯(Gauss 1829)赋予达朗伯-拉格朗日原理以极值原理的形式。引入仅在加速度上不同于真实运动的想象速度,高斯证明了对于真实运动来说,拘束有极小:

$$\sum \frac{1}{2} m_v \left(\dot{r}_v - \frac{F_v}{m_v} \right)^2 = \min$$

赫兹(1894)在建立无力学时提出了直路(或最小曲率)原理

$$\frac{1}{2} \sum m_i \dot{r}_i^2 = \min$$

它实际上是特殊情形 $F_v = 0$ 时的高斯原理。

契塔耶夫(1941)给出了高斯原理的变形,证明了对于真实运动来说,如果力学系统是完全自由的,那么由在作用力场中高斯的正向想象运动和为建立真实运动所需力场中的倒退(反向)运动两者组成的基本循环上的功 A 是极大:

$$A = \max A_{\mu}, \quad A_{\mu} = \sum \langle F_v - m_v \ddot{r}_v \rangle \cdot \left(\dot{r}_v + W_v^{\mu} \frac{dt}{2} \right) dt$$

其中 W_0 为想象运动中的加速度。

注意到这个原理是赫曼和欧拉思想的直接变形,拉格朗日在叙述达朗伯原理时发展了这个思想,运用热力学卡诺(Carnot)原理的办法,契塔耶夫原理可扩充通常研究的力学系统的特性。

这个原理在物理系统方面的推广形式有

$$\delta \left\{ -\frac{dt^2}{2} \sum \frac{1}{2} MV_0^2 [(F_0 - m_0 W_0)^2 + \Delta Q - \Delta U] \right\} = 0$$

其中 U 为内能, ΔQ 为热流, 并利用热力学第一、第二定律。这就是物理系统的契塔耶夫原理。

最后我们简述最优控制的最简单问题, 这个问题是在问题

$$J = \int_{t_0}^{t_1} f_0(t, x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r) dt = \min$$

中, 在条件

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(t, x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_r), t_0 \leq t \leq t_1$$

$$x(t_0) = x_0, x(t_1) = x_1, u(t) \in U$$

下, 来寻求必要条件。

设可允控制类由代第一间断点、在某闭域 U 上取值的所有分段连续有界函数 $u(t)$ 组成。这个问题就是庞特里雅金(Понтрягин)提法下变分学的拉格朗日问题, 类似问题的本质特征是事先确定在闭域 U 上取值的可允控制类。

如果在研究中引入庞特里雅金函数

$$\Pi(\psi(t), x(t), t, u(t)) = \sum_{v=0}^n \psi_v f^v(t, x, u)$$

那么, 相变量 x^i 和起拉格朗日乘子作用的辅助变量 ψ_i 的方程可写成正则形式

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial \Pi}{\partial x_i}, \frac{d\psi_i}{dt} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x^i} \quad (i = 0, 1, \dots, n)$$

下述定理成立: 设 $u(t), t_0 \leq t \leq t_1$ 是相点由位置 x_0 到位置 x_1 过渡的可允控制, 而 $x(t)$ 是相应的轨道, 于是 $x(t_0) = x_0, x(t_1) = x_1$ (时刻 t_0, t_1 固定)。为使 $u(t)$ 给出代固定时间的最优问题的解, 必须存在与 $u(t)$ 和 $x(t)$ 对应的、非零连续矢量函数 $\psi(t) = (\psi_0(t), \psi_1(t), \dots, \psi_n(t))$, 使得

① 对所有 $t, t_0 \leq t \leq t_1$, 变量 $u \in U$ 的函数 $\Pi(\psi(t), x(t), t, u)$ 在点 $u = u(t)$ 达到极大

$$\Pi(\psi(t), x(t), t, u(t)) = M(\psi(t), x(t), t) \quad u \in U$$

② 函数 $\psi_0(t) = \text{const}$ 为非正。

显然, 庞特里雅金极大值原理属于微分变分原理范畴。当控制的可允值集合为开集时, 极大值原理等于著名的维尔斯特拉(Weierstrass)条件。但在控制落到域 U 的边界上时, 维尔斯特拉条件一般说不满足, 而极大值原理此时也是对的。

可以证明, 最优原理也可表为积分变分原理形式

$$\delta \int_{t_0}^{t_1} \left(\sum_{i=0}^n \psi_i x^i - \Pi \right) dt \geq 0, \delta x_i = 0 \quad t = t_0, t_1$$

在一般情形下, 由这个积分原理可导出运动方程, 边界条件和横截性方程以及庞特里雅金极大原理。

(合肥工业大学朱永春撰)

力学中的分形

分形几何学是研究被数学家称为“病态”的不规则的集合, 这些不规则集合一般地说不光滑的, 定量地描述这种不规则性是分维。在经典几何中, 点是零维的, 曲线是一维的, 平面是二维的。这种维数只取整数值, 是拓扑学意义下的维数, 记为 D_T 。它反映的是为了确定一个点在空间的位置所需独立坐标的数目或独立方向的数目。1919年 Hausdorff 提出维数可以是分数即分数维, 并定义了分数维的 Hausdorff 测度。Mandelbrot 为模拟分形推广了 Hausdorff 维数定义, 提出分形是一个集合, 它的 Hausdorff 维数严格大于它的拓扑维数

D_T 。这样, 一个分形应当满足两个条件: 第一是其测度应是 Hausdorff 测度; 第二就是其 Hausdorff 维数严格大于它的拓扑维数。

在分形应用上人们基本上仍局限于自相似分形, 但已经不在满足于去追求单纯一个分维值。人们开始过多地去研究分形的物理机理, 去研究自相似性存在的范围和程度。在分形理论上人们已从单一维的分形描述过渡到多标度分形分析, 所谓多标度分形是定义在分形上的多个标度指数的奇异测度组成的无限集合。在一个分形物体上, 不同物理量的不连续分布决定了相应于给定奇异测度分布的无限分形集, 因而不同的分布决定了在分形物体上的不同多标度分形谱, 它是物体微观特性的一个反映。

最近在分形研究中出现的另一热门的分支即分形的小波变换。它是经典的傅里叶变换的扩充和推广, 是信号分析中一个强有力的数学工具。在频谱分析中它可以将任一维信号分解成时间和频率的独立贡献, 同吮又不失去原有信号所包含的信息。这种分解的方法是选定适当小波后, 通过伸缩和平移来进行的, 它相当于一个数学显微镜, 具有放大、缩小和平移的功能。进行小波变换, 构造数学显微镜的关键在于选择合适的小波。

小波变换目前已广泛用来研究分形扩展现象, 特别是小波变换的数学显微镜功能不仅能用来研究分形的局域特性, 更重要的是可用来追溯一个分形体的构造规则。

根据塑性微观理论, 在屈服应力下塑性变形的产生主要是由于材料内部位错的形成, 位错运动所形成的垛及内部缠结, 晶格之间的错位, 进而形成滑移场。当让 S_5 表示滑移线结构的占位, h 代表其高度时, 材料的宏观塑性剪切变形 γ_{μ} 可以对单位体积内所有滑移线的微观剪切变形 (h/S_5) 进行求和来获得:

$$\gamma_{\mu} = \sum (h/S_5) \quad (1)$$

由于在微观照片上, 很容易量出 S_5 和 h , 因此人们对滑移场的分形模拟并没给过多的注意。事实上, Cantor 集能较好地模拟局部剪切现象。作为传统 Cantor 集, 是对给定的单位直线段进行三等分, 去掉中间一段, 保留端点。将剩下的两段再三等分, 去掉中间段保留端点。如此操作继续下去即得到 Cantor 尘集, 其分维 $D = \log 2 / \log 3 = 0.6309$ 。在局部塑性剪切情况, 滑移步和剪切量均是随机的。我们可以构造一些随机的 Cantor 集来模拟这种局部剪切现象。

值得说明的是, 滑移场完整的分形描述是相当困难的。众所周知, 滑移分布不仅取决于应变的方位和应变量, 而且取决于材料微结构的特征, 这个领域的分形研究还很薄弱, 有待我们去开发和进一步的探究。

应用分形理论研究材料的损伤断裂已取得一系列成果。首先材料断裂后, 其断裂表面凹凸不平, 是一个近似的分形表面。H. Xie (1989) 进行岩石火断口的分形分析, 得到 W 分维 D 与损伤断裂能 G_f 的关系为 $G_f = k_1 - k_2 D$, 这里 K_1 和 K_2 为材料常数。这表明: 材料断裂表面的不规则性反映了在断裂时损伤断裂的能量耗散及其微结构效应; 而这种不规则性又可由分形得到很好的模拟。这样我们可根据材料断口的分形特征, 追溯到材料断裂时的宏观力学行为 (G_f 和 K_1 等)。尽管目前该领域研究还有某些争议, 但它确实是从材料破坏后的断口定量分析, 去推测它的断裂性质和失效原因的一种新方法。

人们很早就发现材料断裂的微观形式主要表现为沿晶断裂、穿晶断裂及其耦合形式。C. W. Lung (1986) 提出了沿晶断裂的分形模型 ($D = 1.26$)。谢和平在岩石的实验观测基础上, 相继建立了材料穿晶断裂分形模型和沿晶与穿晶耦合的分形模型, 并由实验测定出相应的分维, 表明了理论与实测是吻合的。特别是使用这些分形模型可定性和定量地解释许多以前无法解释的现象。H. Xie (1988) 通过分形分析首次给出了沿晶和耦合断裂最容易发生的定量描述。H. Xie (1989)、C. W. Lung (1986) 详尽地分析了裂纹扩展速率的分形效应。在同一晶粒尺寸的材料中, 沿晶和耦合断裂具有最快的扩展速率。所有这些, 如果不考虑分形就

不可能定量地反映出这些规律性,也不可能直接建立微观与宏观相结合的表达式。

引起裂纹分叉的物理实质似乎还没有一个理想的解释。Smith 应用复变函数理论研究了裂纹分叉的非规则性,表明分叉将使断裂韧性值增加,但其推导过程相当冗繁。Smith 的断裂韧性计算式为

$$K_{Smith}/K_0 = \sqrt{2} \left(\frac{1-\beta}{\beta} \right)^{-\beta/2}$$

而用分形几何推导的计算式为

$$K/K_0 = \left[\left(2\cos\left(\frac{\pi\beta}{2}\right) \right)^{D-1} \right]^{1/2}$$

其中 $D = \log 3 / \log \left(2\cos\frac{\pi\beta}{2} \right)$ 。H. Xie (1989, 1992) 还给出了裂纹分叉非规则几何效应和微结构对断裂韧性的影响,这是 Smith 经典分析无法得到的。

考虑一个热力学系统,这个系统有 Ω 种可能的状态,假定这 N 种状态出现的概率相等,则系统的热力学熵等于

$$S = k \ln \Omega \quad (2)$$

这里 k 为玻耳兹曼常数。另一方面,从概率信息理论的观点来看,这一系统具有的概率熵为

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \log P_i \quad (3)$$

式中 P_i 为第 i 个状态出现的概率。

由假设,这个系统的 Ω 个状态出现的概率相等,即 $P_i = 1/\Omega$, ($i=1, 2, \dots, \Omega$)。这样上式成为

$$H = \log \Omega \quad (4)$$

可见对同一物理系统,热力学熵与概率熵只差一个常数

$$S/H = k \ln \Omega / \log \Omega \quad (5)$$

以此为基础,我们就可以由具有概率测度分布的多标度分形来给出热力学描述。

考虑一个集合,假定在第 n 步,该集合被分成 $N(n)$ 个球。在第 $n+1$ 步,这些球又被分成 $N(n+1)$ 个球。设在第 n 步划分中,划分的第 i 个球具有概率 P_i ,它满足标度关系

$$P_i = l_i^{\epsilon_i} \quad (6)$$

且第 i 个球的直径 l_i 具有标度指数 ϵ_i ,即

$$l_i = \exp(-n\epsilon_i) \quad (7)$$

这是涉及到两个标度指数 ϵ 和 α 的分布。当 n 变大时, l_i 趋于零。这里 ϵ_i 具有热力学统计物理中单粒子“能量”的含义。我们记标度指数位于 $(\epsilon, \epsilon+d\epsilon)$ 和 $(\alpha, \alpha+d\alpha)$ 间的那些球的数目为 $\Omega(\epsilon, \alpha)$ $d\epsilon d\alpha$, 我们期望对于大 n 存在广义熵函数 $Q(\epsilon, \alpha)$ 使得

$$\Omega(\epsilon, \alpha) = \exp[nQ(\epsilon, \alpha)] \quad (8)$$

如定义配分函数

$$\Gamma(q, \beta) = \sum P_i^q l_i^\beta = \sum \exp[-n\epsilon_i(\alpha_i q + \beta)] \quad (9)$$

相应的自由能定义为

$$G(q, \beta) = \frac{1}{n} \ln \Gamma(q, \beta) \quad (10)$$

由方程(22)和(23), $\Gamma(q, \beta)$ 可写成积分形式

$$\Gamma(q, \beta) = \int d\epsilon \int d\alpha \exp\{n[Q(\epsilon, \alpha) - (\alpha q + \beta)\epsilon]\} \quad (11)$$

由最陡下降法,结合(24)式,可得

$$G(q, \beta) = Q(\epsilon_c, \alpha_c) - (\alpha_c q + \beta)\epsilon_c \quad (12)$$

式中 ϵ_c 和 α_c 给出了 $Q(\epsilon, \alpha) - (\alpha q + \beta)\epsilon$ 的极大值。由此可得

$$\left. \frac{\partial Q(\epsilon, \alpha)}{\partial \epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_c, \alpha=\alpha_c} = \alpha_c q + \beta \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial Q(\epsilon, \alpha)}{\partial \alpha} \right|_{\epsilon=\epsilon_c, \alpha=\alpha_c} = \bar{\epsilon} q \quad (14)$$

$$\epsilon_c = - \frac{\partial}{\partial \beta} G(q, \beta) \quad (15)$$

$$\epsilon_c \cdot \alpha_c = - \frac{\partial}{\partial q} G(q, \beta) \quad (16)$$

于是

$$Q(\epsilon_c, \alpha_c) = G(q, \beta) - q \frac{\partial G(q, \beta)}{\partial q} - \beta \frac{\partial G(q, \beta)}{\partial \beta} \quad (17)$$

这样只要知道广义自由能就可求出 ϵ_c, α 和熵 $Q(\epsilon, \alpha)$ 取自由能的零点,令

$$G(q, \beta = \beta_c(q)) = 0 \quad (18)$$

由

$$\Gamma(q, \beta = \beta_c(q)) = \sum P_i^q l_i^{\beta_c(q)} = 1 \quad (19)$$

有

$$\tau(q) = (q-1)D_q \quad (20)$$

由多重分形特性,可求出

$$\beta_c(q) = -\tau(q) = (1-q)D_q = f(\alpha) - \alpha q \quad (21)$$

通过求解(32)式,可获得 $\beta_c(q)$ 进而求得广义分维 D_q 。在 $\beta = \beta_c$ 这一临界点,由(26), (27)和(32)式可推得

$$Q(\epsilon_c^*, \alpha_c^*) = \left. \frac{\partial Q(\epsilon, \alpha_c^*)}{\partial \epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_c^*} \epsilon_c^* \quad (22)$$

$$f(\alpha_c^*) = \left. \frac{\partial Q(\epsilon, \alpha_c^*)}{\partial \epsilon} \right|_{\epsilon=\epsilon_c^*} \quad (23)$$

将(37)式代入(27)和(28)式,即得

$$f(\alpha_c^*) = \alpha_c^* q + \beta_c(q) = \alpha_c^* q - \tau(q) \quad (24)$$

和

$$\left. \frac{df(\alpha)}{d\alpha} \right|_{\alpha=\alpha_c^*} = q \quad (25)$$

$$\alpha_c^* = - \frac{d\beta_c(q)}{dq} \quad (26)$$

这样一旦通过解方程(32)式获得 $\beta_c(q)$, 就可以由(40)式求得 α_c 和 $f(\alpha_c)$ 。易证 $f(\alpha)$ 函数就是该多标度分形的奇异性谱函数。

当退化到特殊热力学熵,即 $q=0, \beta = \beta(q=0)$, 这时热力学自由能

$$F(\beta) = S(\epsilon_c) - \beta\epsilon_c \quad (27)$$

可以证明这时 $\beta_c = D_0$, 即为 Hausdorff 维数。

综上所述,可以看到广义自由能 $G(q, \beta)$ 起着热力学中特性函数的作用,这种热力学形式的多标度分形理论给出了更全面和更丰富的描述。

总之,分形在力学中的应用研究才刚刚起步,在许多领域有待我们去开发、创新。我们坚信,只要我们将分形引入到现有的力学框架中去,必将使我们对材料的非线性力学行为产生新的认识,必将推动材料细观力学和微观力学理论应用的发展。

参考文献

- 1 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman, San Francisco, 1983
- 2 Paladin G, Vulpiani A. Phys. Rep. 1987, 156, 147~158
- 3 Argoul F, et al. Phys. Rev. A, 1990, 41(10), 5537~5560
- 4 Hornbogen E. Int. Materials Rev. 1989, 34(6), 277~296
- 5 Xie H. Chinese Science Bulletin. 1989, 34(15), 1292~1296
- 6 Xie H. Aca. Mechanica Sinica. 1988, 4(3), 255~264
- 7 Xie H. Int. J. of Fracture, 1989, 41(4), 267~274
- 8 Smith E. Arch. Mechanics, 1986, 38(1~2), 185~190
- 9 谢和平, 高峰. 岩石力学与工程学报, 1991, 101, 60~70
- 10 Kohmoto M. Phys. Rev. A37, 1988, 1345~1352
- 11 谢和平. 岩土介质的分形孔隙和分形粒子. 力学进展, 1993

(中国矿业大学谢和平教授撰)

ics and dynamic digit test technique 系统动力学是综合性的科学,它以物理学、化学、生物学等基础科学作基础;以数学和应用软件为工具,致力于研究自然系统、工程系统(已建成的或尚在设计中的)中所发生的动态过程。它对自然灾害的防治和避免,对工程系统的安全运行、改进和故障诊断,都有重要的意义。

系统动力学采取的方法,就是为系统建立数学模型,把动态进程的研究变换为对数学模型的求解和分析,数学模型是“虚拟的系统”。从实系统过渡到虚系统以对动态过程进行研究,是系统动力学的根本思想。

1788年拉格朗日发表了名著《分析力学》,从牛顿的力学理论出发,为多自由度机械系统拟定了数学模型的建立方法,把机械运动的研究归结为求解拉格朗日第1类或第2类运动微分方程,使物理学的分支科学—牛顿力学走向应用,可以认为拉格朗日是系统动力学奠基人。

许多基础科学的研究,一旦成熟,都表现为某种系统的数学模型的建立,并走向应用,走向系统动力学。弹性力学成熟的标志,是建立了弹性体振动或波动的数学模型;流体力学成熟的标志是建立了纳维—斯托克斯方程。电磁学成熟的标志,是为电路系统建立了基尔霍夫回路方程和结点方程,是为电磁场建立了麦克斯韦方程。

可以说,对一个系统的动态进程的研究,在科学中是沿着两个方向进行的。一个方向就是将系统作尽可能的简化,建立最简单的数学模型,以便发现基本定律。这通常是基础科学采取的方向。另一个方向则是将系统一般化,拟订普适的数学模型,以便于应用,这就是系统动力学采取的方向。从方法论角度看,系统动力学与基础科学并没有区别。

从数学的观点看,数学模型常分为两类:一类为离散型,表现为常微分方程组,其复杂性常用自由度数量度。另一类为连续型,表现为偏微分方程组,其复杂性依赖于定解条件。系统动力学的应用,长期以来,只在简单的数学模型(例如线性模型)中才取得成功。

1948年维纳发表了名著《控制论或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》,指出有可能发展一种一般的方法去研究各式各样系统中的控制进程。这种方法需要概括应用全部科学分支,例如信息论、系统动力学、算法论、概率论等的成就。这本书常被认为是控制论诞生的标志;还指出各基础科学应该走向综合的必要性,系统动力学应研究广泛的系统,特别是耦合系统,以便支持更具综合性的控制论的发展。

50年代,随着计算机技术的迅猛发展,一批有远见的结构动力学家拟定了有限单元法;在信号处理领域,则有FFT的发明。强有力的数字算法,使复杂数学模型的求解不存在原则上的困难。此方法被普遍接受,成为研究一切系统动态的基本方法。

对于一给定系统,系统动力学的研究方法是建模与求解,即:(1)为给定系统建立泛定的数学模型,泛定是指模型参数是可替换的;(2)建立数学模型参数库;(3)建立输入(或激励)信号库,所谓输入信号,是系统所受环境的影响的数学模拟;(4)编制系统动态数字试验软件,它对不同参数的数学模型是通用的;(5)数字试验结果的处理软件的编制。处理软件包括动态进程时域或频域特征的提取、灵敏度分析、优化、解析解的回归、动画显示等功能。这些工作最终都表现为软件,将它们装入计算机(例如微机或工作站)就构成给定系统动态的专用数字试验装置。这样的装置,我们称为给定系统的动态数字试验系统(一种计算机试验系统)。

一个实际系统(存在的或尚在设计中的)的动态数字试验系统建成后,关于动态进程的研究,就从实际系统过渡到“虚拟系统”的研究。系统动力学和动态数字试验技术,属于国外近来流行的所谓“视像计算技术”或“虚拟现实技术”。

许多通用的大型应用软件,只要有建模的功能,无疑都应视为系统动力学的成果。CSAR公司(Computerized Structural Analysis & Research)新近推出的应用软件系统CSA/Nastran具

有结构热传导、气弹性、电磁场等多种建模功能,已在全世界的工程界广泛运用。1992年开始传入中国,我们认为这类研究仅是系统动力学发展的一个方面。对于专业研究机构,个人以及专业生产厂家,他们更关心专门动态数字试验系统的研制。因为他们需要对自己关心的系统作更深入细微的分析。过分的通用化,对他们来说是个负担。因此从70年代开始,专门的动态数字试验系统逐步涌现出来。

C. A. Brebbia等人研究了英国索兰水城的环流与污染物的扩展;R. T. Cheng等人研究了伊利湖水的环流;J. J. Connor等人研究了马萨诸塞海湾的环流与采矿沉积物的弥散。这批研究开创了系统动力学在环境工程中的应用的局面,林健和黄琳对大型空间结构的动力学建模与控制作了综述和研究。R. L. Huston给出了多体动力学模拟与分析方面近期进展的述评,应用多体动力学方法,徐铭陶等建成了摩托车行驶状态下的振动数字试验系统,洪嘉振等建成了跳水运动的计算机仿真系统。K. F. Jensen等人将系统动力学方法应用于化学工程,他们研究了化学蒸气沉积反应器中混合对流流动的仿真和输运现象。徐铭陶等人研究了脱硫塔中脱硫剂的雾化与废气的流动,王保国和卞荫贵研究了超声速和高超声速气道的数值模拟。P. Meakin(美国杜邦公司研究与开发中心)研究了材料破坏与变形的模型。Y. S. Garud(美国Slevy公司)研究了材料的环境助长开裂的建模问题。R. K. Jain以及吴望一等人用系统动力学方法研究了肿瘤对药物的生理屏障的机理。

有远见的专业生产厂家,已预见到单纯采用测试手段以改进产品的质量是不够的,他们开始设立产品动态数字试验室,研制动态数字试验系统,例如东方电机厂正着手研制大电机机电耦合动态数字试验系统。这样的试验系统一旦建成,就为产品的改进提供了新手段,必将使越来越多工厂走上发展自己的动态数字试验技术的道路。

70年代,系统动力学开始跨越线性界限,注目于非线性系统,一批先驱学者,如E. Lorenz, R. May, M. Henon, J. Hubbard, P. Marcus, D. Ruelle等,通过计算机试验,发现即使是十分简单的非线性微分方程,甚至迭代方程,都可能蕴含着极其复杂的动态行为,即走向混沌,走向奇异吸引子(strange Attractors)。B. Mandelbrot创立的分形几何学(Fractal Geometry)恰是奇异吸引子的几何理论。今天,来自不同科学的研究者,都试图在自己活动的领域中寻找奇异吸引子,并作出具体的解释。人体内节律的异常,可能是一种动力系统病;湍流的奥秘,可能是走向混沌的一种特殊途往的表现。非线性的研究为系统动力学的发展带来无限勃勃生机。

参考文献

- 1 维纳,控制论(或关于在动物和机器中控制和通讯的科学),北京:科学出版社,1961
- 2 Brebbia C A, Adey R. Proc Finite Element Seminar, Chilton, UK Atlas Computer Laboratory, 1975
- 3 May R. Nature, 1976, 261: 459~467
- 4 Mandelbrot B. B The Fractal Geometry of Nature, Freeman, New York, 1977
- 5 Stewart H B, Thompson J M. Nonlinear Dynamics and Chaos. Wiley, Chichester, 1986
- 6 陈滨. 分析动力学. 北京:北京大学出版社,1987
- 7 林健,黄琳. 力学进展,1991,21(3)
- 8 徐铭陶,但斌,等. 摩托车技术,1992,3
- 9 Meakin P. 力学进展,1992,22(1)

(重庆大学测试中心徐铭陶教授撰)

结构动力学修改重分析 structural-dynamics-modification reanalysis 在结构/机械系统设计过程中,越来越重视系统的动态特性预测和改进,以便尽早发现和预防可能出现的有害振动问题,进而实现系统动态特性的最优设计。但是,许多大

型复杂结构的有限元模型往往具有数千上万的自由度,难以实现反复多次的结构修改重分析。然而,这种结构修改设计和重分析过程具有两个重要特点:其一是每步修改后的结构与前一步所分析的结构之间一般只有较小的差别,其二是每步修改一般只在结构的少数自由度上或较小的区域内进行。这为简化重分析计算过程提供了极有利的条件,从而得以在此基础上发展出高效的重分析方法。“结构动力学修改”就是以结构振动特征值问题的高效重分析方法和结构(修改)重设计技术的理论及应用研究为主要内容的一个结构动力学分支。它显然包括两个方面:其一是正(修改)问题,即在给定结构修改型式和已知修改前结构的振动模态参数的条件下,应用高效重分析方法确定修改后结构的振动模态参数,一般称之为结构动力学修改重分析问题;其二是逆(修改)问题,即在已知修改前结构的振动模态参数并预定义修改后结构的振动模态参数的条件下,应用约束最优化设计方法等确定结构修改型式,一般称之为结构动力学修改重设计问题。另外还有一类逆修改问题,即根据结构振动模态参数的有限元分析结果和实验测量结果对有限元模型的参数(矩阵)进行校正,一般称之为结构动力学半分析模型修正问题,它与结构动力学修改重设计问题在数学求解方法上十分相似。结构动力学修改是结构动力学领域极为活跃的一个分支,对它的正问题和逆问题均有大量的研究文献和成果,而且两者基本上是互相独立发展的。下面简述已较成熟的正修改重分析问题的研究概况。

考虑结构振动分析的有限元模型的特征值问题,当不计阻尼时,设对修改前的(原)结构有如下实模态线性广义特征值问题

$$(K_0 - \omega_0^2 M_0)x_0 = 0 \quad (1)$$

其中质量阵 M_0 一般是对称正定实矩阵,刚度阵 K_0 一般是对称正定或半正定实矩阵。方程(1)的解给出以特征值(固有振型的平方) $\omega_0^2 = \lambda_0$ 为对角元的特征值(对角)矩阵 Λ_0 和以特征向量(固有振型) x_0 为列的模态矩阵 X_0 。对修改后的(新)结构则有

$$(K - \omega^2 M)x = 0 \quad (2)$$

$$M = M_0 + \Delta M \quad K = K_0 + \Delta K \quad (3)$$

其中 $\|\Delta M\| \ll \|M_0\|$ $\|\Delta K\| \ll \|K_0\|$ 而且质量修改矩阵 ΔM 和刚度修改矩阵 ΔK 一般均包含许多零元。设结构修改不导致结构构形变化,则原结构的特征向量是新结构特征空间的一组完备向量基,因此可将方程(2)变换到模态坐标系中,即引入模态变换 $X_1 = X_0 x_1$ 并前乘以 X_0^T , 记 $\lambda_i = \omega_i^2$, 得

$$(\Lambda_0 - \lambda_i I + X_0^T \Delta K X_0 - \lambda_i X_0^T \Delta M X_0)x_i = 0 \quad (4)$$

其中利用了特征向量的正交正规化条件

$$X_0^T M_0 X_0 = I (\text{单位阵}), \quad X_0^T K_0 X_0 = \Lambda_0 \quad (5)$$

方程(4)是结构动力学修改问题的一般表达式。为避免用常规算法直接求解方程(4)(亦即方程(2)),需要根据对结构所采取的实际修改措施的特点和方程(1)、(2)的特征解的性质,对方程(4)做适当的简化,进而探索高效求解方法。在此方面已取得很大进展,众多的研究者先后提出和发展了许多不同的结构动力学修改重分析方法,可将它们归为3类,即基于小修改的方法、基于局部修改的方法和基于模态缩减的方法。

基于小修改的结构动力学修改重分析技术又包括3种不同的方法:即瑞雷(Rayleigh)商方法、灵敏度方法和摄动方法。瑞雷商方法是最简单的特征值快速重分析技术,它是基于结构经过小量修改后其固有振型不发生明显改变的假设(这要求结构的相邻固有振型互相分离),采用原结构的特征向量,通过瑞雷商估计新结构的特征值,即

$$\lambda_i = (\omega_{0i} + \Delta\omega_i)^2 = \frac{X_{0i}^T (K_0 + \Delta K) X_{0i}}{X_{0i}^T (M_0 + \Delta M) X_{0i}} \quad (6)$$

假定 $\Delta\omega_i/\omega_{0i}$ 是小量,上式可简化变换为

$$\frac{\Delta\omega_i}{\omega_{0i}} = \frac{X_{0i}^T \Delta K X_{0i} - \omega_{0i}^2 X_{0i}^T \Delta M X_{0i}}{2\omega_{0i}^3} \quad (7)$$

通过此式可基于原结构的固有振型简便地分析结构固有振型对单个集中质量或刚度修改的灵敏度,在这方面已得到一些重要结果。王(B. P. Wang)1986年进一步对此方法做了一些深入的探讨。灵敏度方法则是基于新结构的特征值和特征向量的泰勒(Taylor)级数展开式,利用特征参数(模态)灵敏度分析结果及原结构特征值和特征向量,估计新结构的模态参数。以特征值为例,近似到二阶项,有

$$\lambda_i(v) = \lambda_{0i}(v_0) + \Delta v \frac{\partial \lambda_i}{\partial v} + \frac{1}{2} (\Delta v)^2 \frac{\partial^2 \lambda_i}{\partial v^2} \quad (8)$$

其中 v 为设计变量(结构参数), $v = v_0 + \Delta v$ 。这种方法尤其适用于基于模态参数梯度的结构最优化设计过程。至于特征参数导数的计算方法,请参阅“模态灵敏度分析”词条。

摄动方法(也称小参数法)是结构动力学修改重分析的重要理论工具和计算技术,对它的研究已相当深入。它与上述灵敏度方法在一定意义上是等价的,即也以计算由结构修改引起的特征值和特征向量改变量来代替对新结构振动特征值问题的常规重分析。现引用小参数 ϵ 表达无阻尼结构参数修改(摄动)量 ΔM 和 ΔK

$$\Delta M = \epsilon M_p \quad \Delta K = \epsilon K_p \quad (9)$$

当 M_p 和 K_p 分别按模与 M_0 和 K_0 同阶时, $0 < |\epsilon| \ll 1$ 。在建立新结构特征参数的摄动计算方法时,必须根据原结构特征参数的不同性质区分相异特征值、重特征值和密集特征值等几种情形。只要参数矩阵 M 和 K 关于 ϵ 连续且可微,则对应于每个相异原特征值 λ_0 的新特征对 (λ, x) 也连续且可微,并可展开为 ϵ 的收敛幂级数

$$\lambda = \sum_{r=0}^{\infty} \epsilon^r \lambda_{ri} \quad x_i = \sum_{r=0}^{\infty} \epsilon^r x_{ri} \quad (10)$$

将其代入方程(2)和 x_i 的正规化条件式

$$x_i^T M x_i = 1 \quad (11)$$

按 ϵ 的幂次可分别得出第一阶、第二阶等一系列摄动方程,解之即得各阶摄动量 $(\lambda_{1i}, x_{1i}), (\lambda_{2i}, x_{2i})$ 等。至于其求解方法,则与模态灵敏度分析算法类似,也有模态展开方法、代数直接方法和代数迭代方法等(请参阅“模态灵敏度分析”词条)。为兼顾适当的估计精度和尽可能少的计算量,一般只确定到第二阶摄动量即可。在原特征值 λ_{0i} 为重特征值情况下,新特征值 λ_i 虽然仍是连续的,但它在 $(\epsilon=0)$ 处不可微,而仅是方向可导的,相应的原特征向量 x_{0i} 不唯一且是极端病态敏感的,因而新特征向量 x_i 在 $(\epsilon=0)$ 处不连续。所以,相异特征值情形的摄动算式不适用于重特征值情形。然而,由于矩阵 M_0, K_0 和 $\Delta M, \Delta K$ 的实对称性和 M_0 的正定性,无阻尼结构振动特征值均不亏损(即重特征值的几何重数必等于其代数重数),而且属于一个重特征值的特征向量组成一稳定的(对参数摄动不是病态敏感的)不变子空间,因此可通过对该不变特征子空间的摄动计算来代替对单个特征向量的直接计算。这正是重特征值摄动分析的基本方法。

瑞雷(J. W. S. Rayleigh)是研究结构动力学修改重分析问题的先驱者,在其名著《声学理论》(1894年)中,他应用摄动分析方法对无阻尼和有阻尼结构振动特征值和特征向量重分析问题均做了研究,这是摄动理论的奠基性工作。薛定谔(E. Schrodinger)1926年在研究量子力学的一种埃尔米特(Hermite)矩阵特征值问题的近似求解方法时,较系统地发展了这种摄动理论,他首次提出了重特征值情形的摄动重分析技术。因此,特征值问题的摄动重分析方法也被称为瑞雷-薛定谔方法。琼斯(R. P. N. Jones, 1960)、威尔金森(J. H. Wilkinson, 1965)、威尔考克斯(C. H. Wilcox, 1966)和赫什菲尔德(J. O. Hirschfelder, 1969)等进一步探讨和推广了瑞雷-薛定谔摄动法。由于在大型复杂结构(尤其对称结构)振动分析和动态优化设计中往往出现

重特征值问题,许多学者也对重特征值及其特征向量的扰动(灵敏度)分析方法进行过研究(请参阅“模态灵敏度分析”词条)。比重特征值更为常见的是密集特征值组(其中也可能包括重特征值),与其相应的特征向量往往也是病态敏感的,其扰动性与重特征值情形相似。胡海昌对此做了深入研究(1983,1987,1991),提出了相应的解法。对于高度集簇的密集特征值组,可直接采用重特征值扰动重分析方法。在一般情况下,则可采用罗姆斯坦德(K. M. Romstad)等(1973)和胡海昌(1983,1987)等提出的模态缩减方法,即将新结构的特征值问题(2)投影到原结构的密集特征值组的不变特征子空间中,得到一缩减了的易于求解的低阶特征值问题。当然,模态缩减方法的用途不仅限于此,它是一种获得广泛应用的基于模态截断原理的近似分析技术。

基于结构小修改的模态重分析方法的精度特性一般不能满足结构修改量较大的工程实际问题的要求,但为了充分地利用这些简便、高效的快速重分析技术,可采用分步(增量)扰动策略。王龙生等(1983)、布鲁克斯(P. C. Brooks)和夏普(R. S. Sharp, 1987)、吕振华等(1990,1991)先后对此方法进行过研究;后者还将其与一类扰动叠代方法相结合,提出了一种高精度分步扰动算法,并应用于结构固有振动特性的参数历程分析。模态扰动分析方法在应用中的另一项发展是,基于结构的无阻尼实模态或比例阻尼复模态参数,通过对结构的阻尼参数(矩阵)的扰动,简便地求得结构的实际阻尼复模态参数,从而可避免直接求解复模态二次广义特征值问题的困难。这种扰动解法最早在瑞雷的书中提出,米罗维奇(L. Meirovitch)推广应用于阻尼陀螺系统复模态特征值问题的扰动求解(1979,1980,1985),查恩(K. R. Chung)和李(C. W. Lee, 1986)、郑兆昌(1985,1990)和吕振华等(1988,1990,1991)对其做了进一步的研究和发展。

对于存在阻尼、回转效应以及循环力的实际结构/机械系统,其振动特征值问题为二次广义特征值问题,但可化作阶数增大一倍的线性广义特征值问题。对于结构修改问题,则有与式(1)~(3)相对应的形式

$$A_0 x_0 = \lambda_0 B_0 x_0 \quad y_0^T A_0 = \lambda_0 y_0^T B_0 \quad (12)$$

$$A_{x_i} = \lambda_i B_{x_i} \quad y_i^T A = \lambda_i y_i^T B \quad (13)$$

$$A = A_0 + \Delta A \quad B = B_0 + \Delta B \quad (14)$$

其中参数矩阵 A_0 、 B_0 (亦即 A 、 B) 一般为非对称实矩阵, B_0 (亦即 B) 非奇异,特征值 λ_0 和左、右特征向量 y_0 和 x_0 (亦即 λ_i 、 y_i 和 x_i) 一般均是复的。由于一般矩阵复模态特征值问题的重特征值(特征向量系)可能是亏损的(即其几何重数小于代数重数),而且具有亏损特征值的矩阵还可能是减次的(即其同一重特征值出现在其约当(Jordan)标准形矩阵的一个以上不全为一阶的约当块中),所以在进行复模态特征值问题的扰动重分析时,必须根据原问题(12)的特征值的不同性质而区分以下6种情形:(1)非亏损矩阵(既无亏损特征值的矩阵对 A_0 、 B_0)的相异特征值;(2)亏损矩阵的相异特征值;(3)非亏损矩阵的重特征值;(4)非减次(亏损)矩阵的非亏损重特征值;(5)非减次(亏损)矩阵的亏损重特征值;(6)减次矩阵的亏损重特征值。第一种情形的扰动分析方法与实模态相异特征值情形相似,只是需用到左、右特征向量的双正交关系式。但其余几种情形都不是实模态扰动分析方法的简单推广,而要涉及到计算亏损特征值的主向量(约当链)和用普伊西沃克斯(Puiseux)级数(即 e 的分数次幂级数)代替普通幂级数展开式等新的重要问题。勒温(A. Y. T. Leung)1990年对这些情形(尤其亏损矩阵情形)下的扰动重分析方法进行了较全面的阐述,但早在兰恩卡斯特(P. Lancaster, 1966)、肯托(T. Kato, 1966)和戴夫(A. S. Deif, 1982)等的著作中就已对亏损矩阵特征值扰动问题先后进行过不同程度的研究,并得出了大多数情形下的基本结果,而赖里希(F. Rellich)的早期研究结果(1937~1953,1976)则是后来的有关研究工作的基础。至于非亏损矩阵的相异特征值扰动重分析问题,许多文献都对其进行过研究并用于分析工程振动问题,其中尤以米罗维奇等(1979,1980,1985)的结果最为重要。刘清等推导过非亏损实(对称)矩阵对

(代表粘性阻尼振动系统)特征值问题的重特征值扰动算式(1986)。

另一类完全不同的结构动力学修改重分析方法是基于局部非小量修改情形而提出的。杨(D. Young, 1948)、李(X. F. Z. Lee)和赛贝尔(E. Saibel)(1952)、达斯(Y. C. Das)和纳弗拉特那(D. R. Navaratna, 1963)较早探索过这条途径,1968年威森伯格(J. T. Weissenburger)相继提出的“特征值修改方法”奠定了这类重分析方法的基础。他把对结构参数例如刚度的局部修改表达成:

$$\Delta K = \Delta k u u^T \quad (15)$$

其中 Δk 为刚度修改量, u 为表示修改位置的向量。再令 $u = X_0^T w$, 代入方程(4)(设 $\Delta M = 0$), 得

$$(\Delta_0 - \lambda_i I + \Delta k u u^T) z_i = 0 \quad (16)$$

通过考虑该矩阵方程的各行,可用原结构特征值 λ_0 直接表达出新结构(在模态坐标系中)的特征向量 z_i 的各个分量,并可导出新结构的如下特征方程

$$\sum_j \frac{u_j^2}{\lambda_i - \lambda_{0j}} = \frac{1}{\Delta k} \quad (17)$$

应用牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson)算法可解得诸 λ_i 。显然,这是一种精确重分析方法,但方程(17)比方程(16)亦即(4)易于求解。波姆扎尔(R. Pomazal)和斯尼德(V. W. Snyder)1971年把此方法推广到了阻尼振动系统,并考虑了非对称矩阵、重特征值和部分模态展开等情形。霍尔奎斯特(J. Hallquist)和斯尼德等在随后几年间又对这类方法及其应用做了广泛的研究。朱光汉和郭平1988年基于结构阻尼复模态特征值修改方法分析了结构局部修改对模态参数的最大可能影响程度,王小刚等1990年则把结构局部修改重分析方法推广到了粘弹性阻尼振动系统。

结构动力学修改重分析的上述各种方法可应用于一系列振动工程问题,其中最主要的是结构动力学修改重设计以及结构动态优化设计问题。此外还可根据模态分析和动态试验结果,利用这些分析方法进行结构故障诊断。结构振动特征值问题的重分析方法也可应用于流-固耦合振动(颤振)特征值问题和结构稳定性(屈曲)特征值问题等。吕振华等还将矩阵特征值问题的扰动重分析方法引入到矩阵奇异值分解问题的扰动重分析(1988,1990,1991),这是一个值得进一步研究的方面。

参考文献

- 1 Kato T. Perturbation Theory for Linear Operators. Springer-Verlag New York Inc. US, 1966, 62~126
- 2 Romstad K M, Hutchinson J R, Runge K H. Int. J Numer Methods Eng, 1973, 5: 337~349
- 3 Deif A S. Advanced Matrix Theory for Scientists and Engineers. England; Abacus Press, Tunbridge Wells, 1982, 202~229
- 4 Baldwin J F, Hutton S G. AIAA J., 1985, 23(11): 1737~1743
- 5 Wilkinson J H. 代数特征值问题. 石钟慈, 邓健新译. 北京: 科学出版社, 1987, 64~113
- 6 胡海昌. 多自由度结构固有振动理论. 北京: 科学出版社, 1987, 13~38
- 7 Leung A Y T. Commun Appl Numer Methods, 1990, 6: 401~409

(吉林工业大学吕振华教授撰)

边界元若干基本概念 20世纪60年代是大型计算机发展的起点,计算机硬件从那时起开始发展,这是促成有限元法作为工程计算工具出现的最为重要的因素;当时,有限元法开始成为最方便、最通用的数值方法。

虽说有限元法因其通用性以及有可能以更加符合实际的方式描述工程问题而被很快接受,但必须提供复杂的几何定义,例如节点的坐标,单元体的连接,等等。大量的信息需要编码,而且

所得的大量输出使有限元系统不便使用,它的解难以分析。为此,70~80年代研制了前处理程序模块和后处理程序模块等软件。

70年代初,为解决上述困难,开始寻找问题的其它理论解。以这些方法为基础,出现了用于桥梁或高层建筑的有限条法、任意有限差分法与配置法的结合、某种矩阵级数或矩阵传递法等数值方法。同时,对混合原理的研究(主要与有限元结合起来)是以麻省理工学院的工作为出发点的,在 Washizu 的工作中能够找到对这些方法在结构力学中的解释,这些方法的发展与边界积分方程方法应用方面的新进展相平行地进行。在那以前,边界积分方程方法应当认为是不同类型的解析法,与工程中使用的近似法没有多大关系。

现代边界积分方程法也与 Fredholm 的工作有直接关系。他基于离散化的程式讨论了方程的解。Hass 和 Smith 在 1962 年把 Fredholm 型的第 2 类积分方程用数值形式表示了出来,并以此法计算了在均匀势流中轴对称体所引起的扰动。Tom Cruse 应用边界积分方程求解弹性动力学问题, Richard Shaw 给出了暂态波散射问题的边界积分解。Shaw 的另一些重要工作包括用间接边界积分公式求解弹性动力学问题,以及三维散射问题,流体与结构的交互作用,本征值问题,扩散问题和渐近展开解等问题。

边界元的另一位先驱者是 Maurice Jaswon, Jaswon。1963 年发表了一篇关于扭转问题的积分方程解法。他利用第 2 类积分方程把该问题用翘曲函数表示出来,并用数值法求解了问题,得到了抗扭刚度和边界剪应力,这是有效利用边值和法向导数之间的积分关系的最早的论文之一。此外,在 1963 年, Jaswon 用第 1 类 Fredholm 积分描述了静电电容问题 George Symm 用数值法求解了这个方程。他们对此又加以修正,以便用保角映射来求解该问题。

Jaswon et al 还用两个调和函数把平面弹性静力学问题描写成 Airy 应力函数问题,从而得到了两个单层密度的,有耦合的积分方程。

在 60 年代,南安普顿大学的一个小组,就开始了应用积分方程求解应力分析问题。边界积分方程的进一步工作在 1972 年也是在南安普顿大学召开的第 1 届国际工程中的变分方法会议上报道过。南安普顿大学 Lachat 的工作最早把高阶元用于弹性静力学。

70 年代在边界积分的研究与应用方面活动日益频繁。南安普顿大学提出的利用曲线元的思想,由 Cruse 针对三维弹性应力分析加以发展。Cruse 还提出根据表面力如何求得表面应力的方法,而且指出把内部的体积载荷转化成边界载荷的方法。

70 年代已开始召开专门讨论边界积分或者更专门讨论边界元法的会议。1977 年组织了一次边界积分方程法在应用力学中的计算应用的研讨会。1977 年 Jaswon 和 Symm 还出版了《关于位势理论和弹性静力学中积分方程方法》一书,其中包括 Rizzo 的弹性静力学公式与 Kupradze 的早期公式之间等价证明的颇有独创性的资料。

1978 年由 C. Brebbia 所著的第一本以边界元作为书名的专著问世。这本书的重要性在于指出了边界元法与其它工程方法(特别是有限元法)的相互关系。而且 Brebbia 还首先指出如何利用加权残值法推出边界积分方程。

到 70 年代末,边界元法的一些较重要的特点以及它与经典的边界积分公式之间的差别,已为人们清楚了解。

80 年代边界元法得到了巩固和进一步的工程应用。在 70 年代后期和 80 年代初,边界元方法被推广到解决材料非线性和与时间有依从关系的问题,其中包括双曲型的和抛物型的问题。

早在 70 年代初,边界元法就开始用于求解弹性力学问题,这方面,它一直是特别成功的。

在早期阶段,因为边界积分方程的表示方法能达到很高的数值精确度,所以它们对求解断裂力学和应力集中问题变得很有吸引力。首次利用边界积分方程作弹性断裂力学分析的,是

Cruse 和 Burem 在 1971 年的工作,他们以张开缺口来模拟裂纹。对于这种情况,由于当两个裂纹表面接近时,方程组变成奇异的,所以边界元的结果一般不很精确。

Blandford, Ingraffea 和 Liggett 在 1981 年建议再细分区域以避开奇异性。这种方法仅要求各个表面在彼此接近时,处于不同的子区域内。

Snyder 和 Cruse 首先提出应用计及裂纹表面无应力条件的特殊基本解。这种方法的优点是不需要离散裂纹表面。另一种方法是所谓位错表示法。这种方用积分式子描写裂纹表面上的内部应力,从而产生高阶奇异性。

弹性静力学中关于应力强度因子计算的工作,最近由 Sato, Tanaka 和 Nakamura 作了报道,而 Martine 和 Dominguez 则发表了用四分之一节点元来表示裂纹顶端的奇异性,最近又把它推广到计算动态应力集中因子。范天佑和 Hahn 最近报道了边界元法在动态断裂力学中的应用。

利用边界积分方程解决非弹性问题始于 70 年代,这个主题的第 1 篇论文,看来应归于 Swedlow 和 Cruse。该文提出了含有塑性应变项的 Somigliana 恒等式的推广形式。这个表示法是以直接法为基础的,由此得出了三维问题的表达式。

在 1973 年, Ricardella 首次利用边界元法给出了弹塑性问题的数值结果。他对二维问题采用了 von Mises 屈服准则。Mendelson 讨论了弹塑性问题的不同积分公式,即直接公式、间接公式和报告中称为半直接法的直接双调和公式。报告给出了包括圆轴受扭情况的某些简单问题的解。Mendelson 还给出了二维和三维情况下的内应力表达式。

把边界元道次应用于粘塑性应归功于 Chaudonneret。他在 1977 年利用直接公式来研究带缺口的平板,并把所得结果与实验值进行比较,所提出的积分方程具有“初始应力”的形式,他利用线性边界元和常值矩形元来作数值计算。

1978 年, Bui 对奇异非弹性项积分的导数提出过一个恰当的表示式,他证明了与求导有关的自由项的存在。这工作终于求得了非弹性应力的正确表示式,从而是一项重大突破。继此工作之后, Mukherjee 和 Kumar 成功地完成了与时间相关的非弹性率律蠕变分析,他们对于边界未知量和非弹性应变运用了预校正时间积分格式和常值插值。

1981 年, Telles 和 Brebbia 把弹塑性体的半平面基本解用于边界元而求解了半无限问题。这时,在半平面的自由表面上的面力无需进行边界离散。此外,1981 年他们还利用 Perynna 的本构模型成功地引起了可以统一处理塑性、蠕变和粘塑性准则。

Brunet 处理了循环塑性,并表明用边界元法求解承受任意载荷的弹塑性硬化问题结果很好。他用的是带有应变记忆效应的线性和非线性硬化的本构定律。

粘弹性问题的边界元法,早期是用 Laplace 变换以及在变换平面内用相应的准弹性原理求解的,1985 年 Tanaka 提出了利用时空倒易原理以及利用时空变量表示的基本解。他的结论是,依赖于时间的方法很可以代替变换方法。

Mukherjee 的研究小组把边界元用于包含粘塑性变形在内的大应变和大变形问题,做了一系列工作,而且在 1983 年把这些思路推广到解决金属成型问题。

最近, Mukherjee 和 Poddar 对承受任意载荷的任意形状壳体提出了非弹性表示式,但仅对弹性情况有数值结果。

1973 年, Chang 的工作是一项重大的进展。他使用与时间有关的基本解和直接边界元表示式,求解了各向异性介质和各向同性介质中的暂态扩散问题,在时间和空间上全部用常值离散。

1980 年, Brebbia 和 Walker 提出另一种方法求解除了暂态扩散问题,即同时利用边界元和有限差分方法,这里的时间导数是以有限差分的形式加以近似,以在时间域上求解。

1980 年, Tanaka 利用他的“边界体积”元法研究了暂态热传导问题。这种方法除了要用与边界元有关的方程外,对于内部区域还要附加方程。之后,这种方法应当用来求解线性和非线性的

热传导问题。

1985年 Nardin 和 Brebbia 提出把他们用以解动力问题的新的方法加以推广以求解抛物型问题。这个方法现在称为双互易法,这个表示式通过对时间有关的域内的积分引入一种近似,使这些积分可以变换成边界上的表达式,这样就把问题化到边界上去了。这种变换是再次利用互易原理实现的,因此其名称为双互易法。1986年该法被用来求解了一些实际的工程问题。

边界元法在暂态地下水流动问题中的应用,是 Liggett, Liu 和 Liggett 以及 Lennon 等的工作所完成的。在多孔介质中两种流体之间的移动界面,在假设不计混合的条件下(即轮廓分明的交界面模型),由 Liu 等所讨论。

到目前为止,很少有人利用二维与时间有关的基本解,以数值方法求解波的传播问题。Cole 等把标量波方程的二维时域积分方程应用求解暂态弹性动力的反平面运动。

Mansur 和 Brebbia 应用边界元法分析了遵从二维标量波方程的暂态问题。他们从加权残值出发,利用 Green 定理先推出了由 Morse 和 Feshbach 所获得的相同积分方程。接着,作进一步的变换消去积分方程中出现的 Heaviside 函数的导数,从而得出一个能用于数值解的通用方法。他们采用类似于 Cole 等人提出的时间步长方法来获得时域解。

Cruse 和 Rizzo 最早利用 Laplace 变换来消除问题中对时间的依赖关系,把边界积分法用来求解弹性动力学问题。Manolis 和 Beskos 推广了 Cruse 的工作,利用 Fourier 变换代替 Laplace 变换,结果是他们的表示式给出比 Cruse 和 Rizzo 所得结果更好的数值结果。

Kobayashi, Niwa, Nishimura 等人研究了弹性动力学问题的稳态解。他们在频域内获得暂态响应的解;他们的研究集中于地质力学和孔洞周围应力状态方面。Kobayashi 和 Nishimura 讨论了利用 Laplace 变换推导 Green 张量的形式,还得到了稳态弹性动力学的 Mindlin 解。1983年他们应用半无限元对二维的土工结构相互作用问题作了研究。

Nardini 和 Brebbia 提出了本征值和暂态动力问题的边界元解的一种有创见的新方法。这种方法可以把质量矩阵表示为仅是边界节点的函数。这样,弹性动力学问题就可以用类似于有限元或有限差分中的方法来处理,即把问题化为矩阵形式的与时间有关的微分方程组。

一般流体的流动规律是由 Navier-Stokes 方程所描写,能描写不可压缩流动,也能描写可压缩流动。有许多有限差分的解和有限元的解是以所谓“原始”方法作为基础的,也就是说,Navier-Stokes 方程用速度和压力来表示出来,不过这种表示式常常不稳定,特别对于不可压缩流体。因此,对于许多二维问题,人们采用守恒的表示式,也就是说,用流函数和涡量来表示或仅用流函数来表示。

Lighthill 提出,利用速度和涡量作为因变量可以获得 Navier-Stokes 方程的另一种方便的形式。这样,有可能把方程组分离成运动学部分和动力学部分。后者把任一给定时刻的速度场通过一个积分关系与该时刻的涡量场联系起来。

Onishi, Kuroki 和 Tanaka 对自然对流问题,提出了一个以流函数、涡量和温度作为变量的表示式。Bush 和 Tanner 以弹性力学的 Navier 方程作为基础,即利用“准体力”的表示方法,导得一个表达式。他们的表示式经过推广,利用 Oseen 的线性化方法,解决了外部流动问题。

对于定常缓慢蠕行的不可压缩粘性流动情况,Youngren 和 Acrivos 以速度和压力作为自变量,利用弹性力学的基本解,获得了三维问题和轴对称问题的精确结果。该表示式还被 Bush 和 Tanner 用来分析球体的蠕行运动,被 Okabe 和 Kikuchi 用于研究矩形域内部的二维流动问题。

Kelmanson 以流函数和涡量作为自变量提出了另一种表示式,将其用于诸如奇异流动、尖角附近流动和自由面流动这样一些复杂问题的分析。最近 Ingham 和 Kelmanson 将这种方法加以

推广,用于润滑技术的分析。

平板弯曲的边界元表示式源于 Jaswon, Maiti 和 Symml 1967 年的论文,该文利用位势理论给出二维弹性静力学双调和方程的解。1968年, Jaswon 和 Maiti 把同一表示式应用于薄板的横向挠曲。

1979年, Stern 更完整地提出了平板弯曲的边界积分方程。他的工作阐明了平板弯曲时,角点所引起的问题和积分方程的收敛性。在《边界元进展》一书中给出了薄板裂纹的应力强度因子显式基本解。他还认识到对于直接方法而言,选择内点还是边界点作为参考点,对基本解提出的要求有原则的差别,由此丰富了边界积分方程各种可采纳的基本解,从而又产生了一新的表示式。

Van Weeen 对平板弯曲应用了 Reissner 理论。这个理论考虑了板横向弯曲时的剪切变形,由此可以得到以弯矩和剪力合量表示的偏微分方程组。这种方法比起薄板理论来,主要优点在于可以满足 3 个原来的边界条件,而用不到像薄板理论中所做的那样,把它们化为 2 个边界条件。

Kamiya 等求解了夹层板的弯曲问题; Tanaka 处理了若干薄板大挠度问题; Kin 研究了板的应力集中问题。Tanaka 和 Miyazaki 分析了承受弯曲和薄膜载荷的平板问题,而且研究了装配板结构的情况; Costa 和 Brebbia 针对平板的屈曲分析提出了一种边界元表示式,并指出该法对这一类问题可以得到极为精确的结果。

McDonald 和 Wexler, 他们把关于有限元和边界积分方程联合方法应用于电磁场。Shaw 和 Falby 及 Osias 等于 1977 年发表了关于联合法的论文。Zienkiewicz 等试图利用能量法把边界元矩阵转换成等价的有限元矩阵而且使之对称化,遗憾的是,因为他们对于变分概念作了错误的解释,从而他们的论点是错误的。利用边界元所获得的有限元型矩阵的对称化,常常包括某种误差,正如 Brebbia 于 1978 年所指出的那样。Brebbia 和 Georgiou 于 1979 年讨论了能够使用的两种联合形式:一是把边界元区域作为有限元区域来处理;另一是把有限元区域转变为边界元区域。两种方法,如果没有像在矩阵对称化时所引起的那种数值误差或近似,就会给出同样的结果。1981年, Margulies 提出了另外一种方法,利用双重积分把有限元和边界元联合起来。Beet 和 Meek 于 1981 年把两种方法联合起来处理了弹塑性力学的无限域问题。边界元和有限元的联合法现已相当成熟,并且用于许多计算机的编码之中。

用边界元法研究接触问题这一重要的非线性问题有独特的优点,但是出人意料的是直到目前为止对这问题的研究还很少。首次应用是 Andersson 作出的,他利用增量法,按照问题的提法一个节点一个节点地进行。1984年, Bezzine 和 Fortune 发表过一篇平板弯曲的文章,也用类似的方式处理了接触问题。Abdul-Mihsein, Bakr 和 Parker 于 1986 年利用二次元把这个方法推广到轴对称问题;而 Paris 和 Garrido 则利用间断的线性元做了同样的事情。1986年 Kuich 提出另一种采用柔度矩阵的方法,在此表示式中,先对构件形成柔度矩阵,然后利用特殊的程式找到接触中的实际表面。

边界元法的某些优点,早已用于求解复位势问题,尤其是静电学问题。它们在电力工程中的一些有趣的应用包括研究近海结构的阴极保护系统,而这方法是现在在工程实践中已被人们认可的功能齐全的计算机编码的早期发展的起点。

随同功能强大超级计算机的出现,最近研制出的新的优化算法重新对形状优化发生了兴趣,边界元法在这方面是理想的工具。Soares 等利用 Pshenichny 线性化方法求解了非线性问题。

关于几何非线性问题的应用,除已述及的特殊问题外,其余是很少有人研究论述的。

(中南工业大学王嘉新撰)

模态参数灵敏度分析主要指对结构固有振动频率和振型关于结构设计参数的导数的计算分析,它作为解决结构动力学修改分析和重设计、振动控制系统设计分析、振动系统辨识、动力学分析模型修正及结构故障的振动诊断等振动工程问题的一个重要理论工具,受到广泛的重视。在结构动力学修改中,通过模态灵敏度分析,可以得知在结构上何处修改哪种参数可以最有效地移动某阶固有振型和/或减小指定位置处的某阶模态位移,从而可确定最优修改措施,并可定量地预测结构修改的效果。在模态灵敏度分析的基础上,建立结构动态特性优化设计的数学模型,可减少设计变量的数目而缩小问题的规模;在优化计算过程中,通过灵敏度分析,可指示设计变量的最优修改方向,并可利用灵敏度计算结果对模态参数进行高效近似重分析,从而显著地提高优化计算效率。

结构振动特征值问题的一般形式为

$$Ax_i = \lambda_i Bx_i \quad (1)$$

$$y_i^T A = \lambda_i y_i^T B \quad (2)$$

$$y_i^T Bx_i = 1 \quad (3)$$

其中 A, B 一般为对称的 $n \times n$ 实矩阵,假定它们是设计变量(结构参数) v 的显式函数; λ_i 为第 i 阶特征值(固有振型的度量), y_i 和 x_i 分别为第 i 阶左、右特征向量(固有振型)。模态(特征)灵敏度分析理论的基本问题是确定特征值 λ_i 和特征向量 x_i, y_i 对于设计变量 v 的变化,即矩阵 A, B 的元素变化的灵敏度(导数)。早在 1846 年,雅可比(C. G. J. Jacobi)就提出计算矩阵特征值导数的问题,并给出一个特殊情形即 A 为对称阵且 B 为单位阵 I 时的结果

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial v} = y_i^T \frac{\partial A}{\partial v} x_i \quad (4)$$

自那时以来,许多学科领域的众多学者先后为特征灵敏度分析理论的建立、改进和应用做出一系列的贡献。他们从各种不同领域的理论问题出发,采用各种不同的分析方法,得出了以各种不同形式表达的结果。在不同的学科中,对特征灵敏度分析问题往往是从不同的角度进行研究的,因此它既被视为数值分析理论的一个问题,又被看作振动理论的一个方面,还被作为线性系统理论的一个部分。

1964 年,兰恩卡斯特(P. Lancaster)对特征值导数做了严格的处理,尤其指出重特征值的导数本身仍是一个低阶辅助特征值问题的解。这是重特征值及其特征向量灵敏度(振动)分析技术的一个重要特点,然而这一发现实际应归功于量子力学家薛定谔(E. Schrödinger),他早在 1926 年就建立了重特征值振动分析方法的这一理论基础。威尔金森(J. H. Wilkinson)1965 年也仔细研究了重特征值的振动性态。此后又有辛普森(A. Simpson, 1976)和豪格(E. J. Haug)等(1980~1982)探讨过重特征值灵敏度问题,阐明了多重特征值只是方向可微的事实。胡海昌进一步对相异、相重和相近特征值的振动问题分别做了较系统的研究(1981, 1983, 1987)。钟万镛和程耿东则基于瑞雷(Rayleigh)商驻值原理推导了重特征值灵敏度的一种算式(1985)。

1968 年福克斯(R. L. Fox)和凯普厄(M. P. Kapoor)建立了 A, B 为对称阵时特征值导数的算式

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial v} = x_i^T \left(\frac{\partial A}{\partial v} - \lambda_i \frac{\partial B}{\partial v} \right) x_i \quad (5)$$

并提出了计算特征向量导数的两种方法,其一是直接解一奇异的非齐次代数方程组,所建议的消除奇异性的代数处理措施将使系数矩阵失去可能具有的带状性;其二是把特征向量导数在特征向量空间展开,即令

$$\frac{\partial x_i}{\partial v} = \sum_{k=1}^n a_{ik} x_k \quad (6)$$

系数 a_{ik} 可通过对式(1)求导并将式(6)代入求得。虽然理论上要求此展开式包括全部 n 个特征向量,但可以证明,只采用较少的特征向量也可获得较好的结果。罗杰斯(L. C. Rogers, 1970)和斯坦沃特(G. W. Stewart, 1972)推导了一般问题(方程(1)(2))的

特征值和特征向量灵敏度算式

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial v} = y_i^T \left(\frac{\partial A}{\partial v} - \lambda_i \frac{\partial B}{\partial v} \right) x_i \quad (7)$$

$$\frac{\partial x_i}{\partial v} = \sum_{k=1}^n a_{ik} x_k, \quad \frac{\partial y_i}{\partial v} = \sum_{k=1}^n b_{ik} y_k \quad (8)$$

系数 a_{ik} 和 b_{ik} 可通过方程(1)、(2)及特征向量的正规化条件求得并将式(8)代入来确定。普劳特(R. H. Plaut)和侯赛因(K. Husseyin, 1973)、鲁迪西尔(C. S. Rudisill) (1974)和道蒂(S. Doughty, 1982)等也先后得出了同于罗杰斯的结果,另外还建立了特征值的二阶导数公式。一般问题的特征向量的二阶导数公式是由泰勒(D. L. Taylor)和凯恩(T. R. Kane, 1975)等建立的,但克罗斯雷(T. R. Crossley)和波特(B. Porter)1969 年已推导出了在 $B=I$ 的情况下特征值和特征向量的二阶灵敏度算式。由于特征值和特征向量一般是设计参数的非线性函数,所以它们的高阶,尤其二阶导数往往是必要的,因此也受到后来的许多研究者的重视。加格(S. Garg)1973 年探讨了 A, B 为复矩阵时特征值和特征向量的导数计算问题,其结果与福克斯和凯普厄的相类似。范贝勒(H. Van Belle)还把电网分析中的伴随结构理论推广移植到机械结构灵敏度分析中(1974, 1976, 1978, 1982),建立了模态参数的二阶灵敏度算式。范霍奈克(P. Vanhonacker)1980 年进一步将其推广到阻尼振动问题。这种特殊的模态灵敏度分析方法的一个优点是,可适用于改变结构构形的结构修改问题。

计算特征向量导数的另一种代数方法较早由纳尔逊(R. B. Nelson)提出(1976),被称为纳尔逊方法,然而在罗姆斯坦德(K. M. Romstad)等 1973 年的论文中已从振动分析角度介绍过这一方法。对特征值问题(1)求导,有

$$(A - \lambda_i B) \frac{\partial x_i}{\partial v} = - \left(\frac{\partial A}{\partial v} - \lambda_i \frac{\partial B}{\partial v} \right) x_i \quad (9)$$

其中矩阵 $A - \lambda_i B$ 是奇异的。纳尔逊方法是把特征向量导数表示成

$$\frac{\partial x_i}{\partial v} = u_i + c_i x_i \quad (10)$$

并对方程(9)进行约简,即令 $A - \lambda_i B$ 的第 m 行和第 m 列非对角元全部为零,同时将 u_i 和方程右端向量的第 m 元置零(m 为 x_i 的最大元序号)。然后解此方程即得 u_i , 系数 c_i 则可通过对此特征向量的正规化条件 $x_i^T B x_i = 1$ 求导并将式(10)代入而得到。这种方法的优点在于,它只用到需求导的特征值及其右特征向量,而且保持了方程系数矩阵可能具有的带状性,当只求少数几个特征向量导数时具有较高效率。奥杰尔沃(I. U. Ojaivo)1986 年把纳尔逊方法推广到重特征值情形,取得了部分结果,米尔斯-柯赖恩(W. C. Mills-Curran)接着完成了这一推广(1988),后者发现在确定属于重特征值的特征向量的第一阶导数时必须利用第二阶导数方程。这是重特征值的特征向量灵敏度(振动)分析技术的又一重要特点,早在拜伦(F. W. Byron)和富勒(R. W. Fuller)1969 年的书中即已对此做过较详细的讨论。戴雷(R. L. Dailey)稍后于米尔斯-柯赖恩也做了同样的工作(1989)。庄(J. N. Juang)等(1989)和吕振华(1990)对重特征值的特征向量灵敏度(振动)分析方法做了进一步的阐述。卡丹尼(C. Cardani)和曼特甘泽(P. Mantegazza, 1979)、蔡则彪和郑铁生(1991)等也对纳尔逊方法做过探讨和改进。

纳尔逊方法虽可节省计算量,但需对方程做较为复杂的代数处理。因此,胡海昌 1987 年提出了一种可更简便地消除方程(9)的奇异性的一般处理方法,即只需将特征向量的正规化条件所提供的补充方程叠加到特征向量导数(振动)方程上即可。这尤其适用于非带状系数矩阵情形,而且对于重特征值情形也一样简便。另一方面,计算特征向量导数的特征向量展开方法(也称模态方法)的效率也可设法提高,如可有效地利用模态截断技术,还可仿照结构振动响应分析的模态加速度法的伪静态响应修正技术来提高展开式的收敛速度,这便是王(B. P. Wang)1985 年提出的改进模态方法,它在许多方面可与纳尔逊方法一类的代数

方法相媲美,尤其对于稠密系数矩阵问题更是如此。

计算特征向量导数的方法除上述模态(展开)方法(又称伴随方法)和代数(直接)方法外,还有一类(代数)迭代方法,它是由鲁迪西尔和丘(Y. Chu)1975年首先提出的,安德鲁(A. L. Andrew)对其做了改进和推广(1978, 1979)。此类方法曾被认为是低效无用的,但后来经过泰恩(R. C. E. Tan, 1986~1989)、泰恩和安德鲁(1989)的改进,采用了一些加速收敛的外推算法,使其效率和精度均有显著提高,大大增强了它与直接方法的竞争力,并且当只求少数几阶特征向量导数时,它往往优于模态展开方法。

特征向量导数的模态展开计算方法虽在效率和精度方面均不具有绝对优势,但它在重特征值问题以及特征亏损问题的灵敏度(摄动)理论分析上的重要性,是其它各种方法都不可比的。作为这一方法的发展,利姆(K. B. Lim)和庄等1989年提出了利用奇异值分解技术来计算重特征值的特征向量导数的方法,开辟了解决这一问题的一个新途径。当不能完全确定出重特征值的特征子空间的基或其重数未知甚至不定时,借助于这种奇异值分解方法,能可靠地确定所需的各个子空间的基。

应用上述各种模态灵敏度分析方法,即可计算结构振动的各个模态参数对结构上各部分的各种设计参数的灵敏度数值,进而确定较灵敏的(或不灵敏的)设计参数及其位置。但是,对于大型或复杂结构,这种大范围的搜索计算要花费很多计算量,或者难以对整个结构进行完整的灵敏度分析,因此可能导致遗漏最灵敏点,影响灵敏度分析结果的可靠性。为克服这一困难,吕振华等基于模态展开方法,建立了关于结构固有振型和振型对结构质量和刚度的灵敏度的一系列定性分析结论(1988, 1989, 1991),分别给出了对低阶(低频)和高阶(高频)模态参数影响最灵敏的各种结构参数(集中质量、内部连接刚度、边界约束刚度)及其位置等重要信息,在一定程度上揭示了结构固有振动特性设计的最优动力学修改原理。这一原理对解决振动控制工程中的结构动力学修改和动态优化设计问题等具有直接的指导意义。根据定性灵敏度分析的结果再进行数值灵敏度分析,可大大节省计算量。此外,应用动态子结构模态综合方法,将结构动力学分析模型缩聚后再做模态灵敏度分析,也可有效地提高计算效率。1991年赫奥(J. H. Heo)和艾曼(K. F. Ehmann)进一步提出了根据子结构模态及其灵敏度,来确定整体结构模态灵敏度的子结构模态灵敏度综合方法。

上述研究都是基于结构的离散化(有限元或集中参数)模型的。至于连续型(分布参数)模型的模态灵敏度(摄动)分析方法,也已进行过较为系统的研究,可参阅法沙德(M. Farshad, 1974)、斯坦特森(K. A. Stetson, 1975)、豪格(E. J. Haug)和罗赛莱特(B. Roussel, 1980)、雷斯(R. Reiss, 1986)、哈弗特克(R. T. Haftka)等(1990)年的论文及豪格、乔伊(K. K. Choi)和科姆科夫(V. Komkov, 1986)、胡海昌(1981, 1984)的专著。然而,在基于边界元模型的结构模态灵敏度分析方面,还处于初期研究阶段。

模态灵敏度分析是结构动力学的一种多用途分析技术,对它的深入研究和广泛应用已成为一个富有成果的领域,并且还在发展之中。例如,在模态灵敏度分析的基础上还可进行频率响应函数和受迫振动响应的灵敏度分析,约希穆拉(M. Yoshimura, 1984)、纳兰兹(A. G. Nalecz)和温彻尔(J. Wicher, 1988)、夏普(R. S. Sharp)和布鲁克斯(P. C. Brooks, 1988)等对机械结构系统频率响应函数灵敏度分析的研究是这方面的代表性工作。再如,具有随机参数的结构的模态参数和动态响应统计分析也须以模态灵敏度分析为基础,宋恩(T. T. Soong)和鲍格达诺夫(J. L. Bogdanoff, 1963~1964)、柯林斯(J. D. Collins)和汤姆森(W. Thomson, 1967~1969)、哈塞尔曼(T. K. Hasselman)和哈特(G. C. Hart, 1972)等是这一问题的早期主要研究者,他们的工作引起许多人的兴趣,随后20余年取得了一系列进展。1991年,希恩(T. D. Hien)和克莱伯尔(M. Kleiber)进一步对随机结构动

态响应的设计灵敏度分析问题进行了研究。又如,在受控结构的动力学分析中以及当应用动态有限元方法或动态子结构模态综合法进行大型复杂结构设计分析时,都需要进行非线性特征值问题的模态灵敏度分析,这是尚需广泛探索的一个研究方向。

参考文献

- 1 Adelman H M, Haftka R T. AIAA J., 1986, (5): 823~832
- 2 Haug E J, Choi K K, Komkov V. Desing Sensitivity Analysis of Structural Systems, Florida: Academic Press, Inc., 1986
- 3 Lim K B, Junkins J L, Wang B P. J. Guidance, 1987, 10 (6): 581~587
- 4 Murthy D V, Haftka R T. Int. J. Numer. Methods Eng., 1988, 16: 293~311
- 5 Sutter T R, Camarda C J, Walsh J L, Adelman H M. AIAA J., 1988, 26(12): 1506~1511

(吉林工业大学吕振华教授撰)

陀螺力学 又称陀螺仪理论、陀螺动力学,一般为力学的分支,研究陀螺系统的运动规律。旋转中的物体,当旋转轴在惯性空间中改变方位时所产生的特殊力学现象,称为陀螺效应。陀螺的广义概念指一切具有陀螺效应的旋转物体。在工程技术中,各种陀螺仪、高速旋转机械、自旋的天体或航天器都是陀螺力学的研究对象。

陀螺力学起源于经典刚体动力学。1765年,欧拉(L. Euler)建立了描述刚体定点运动的欧拉方程,从而有可能利用严格的数学方法研究旋转刚体的运动规律。欧拉方程仅对有限几种特殊情形存在解析积分。其中,1834年的欧拉方程原理可以解释无力矩陀螺的运动规律,1788年确立的拉格朗日(J. -L. Lagrange)方程原理则可对陀螺摆类型的自旋弹丸或玩具陀螺的运动作出解释,1852年,傅科(J. B. L. Foucault)展示了作为现代陀螺仪雏形的傅科陀螺,用以揭示地球的自转。随后,陀螺仪迅速在航海和航空技术中得到应用。实际陀螺仪带有复杂的支承装置,其力学模型比经典刚体动力学研究的简单刚体模型要复杂得多,因此必须建立更完善的陀螺仪原理以指导工程实践。

利用转子高速旋转的特点,可将运动微分方程线性化而建立陀螺力学的线性理论。在线性理论中,陀螺效应由微分方程中的“陀螺项”所体现,其特点是与广义坐标的一次导数有关,系数矩阵为反对称矩阵。开尔文(L. ord Kelvin)和泰特(P. G. Tait)首先提出,契塔耶夫(H. Г. Черепан)严格证明了陀螺项和阻尼项影响保守系统平衡状态稳定性的一般性定理。从工程实用的观点出发,陀螺的运动可分解为进动和章动。进动是陀螺仪受到力矩作用时旋转在惯性空间中缓慢偏转的现象,章动是由惯性引起的陀螺旋转轴的高频微幅抖动。忽略章动的进动理论是实用陀螺仪理论的重要部分,可用以解释主要陀螺仪器的工作原理,分析误差产生的原因和补偿办法。

导航技术的发展对陀螺仪提出了更高的精度要求,陀螺仪力学模型的各种非线性因素变得不可忽略,传统的实用陀螺仪力学理论已不能满足工程技术的要求,而发展了陀螺力学的非线性理论,以弥补线性理论的不足。伊式林斯基(A. Ю. Ципинский)对非线性陀螺力学作出重要贡献。1955年,马格努斯(K. Magnus)和古德斯坦(R. Goodstein)分别独立发现的章动漂移现象是对陀螺定轴性传统结论的修正。高精度陀螺仪改变了传统的方向支架支承,各种新型支承方式如液浮支承、气浮支承、静电支承、磁场支承、挠性支承等相继出现。这些研究丰富了陀螺力学的内容。

天体是经典刚体动力学的主要研究对象。尽管天体自旋可能十分缓慢,但转动功能仍可能超过干扰力矩的功,因此陀螺力学的基本原理也适用于天体绕质心的转动。航天技术的迅速发展,人造天体即航天器的出现使陀螺力学的研究热点转向航天器的姿态运动。与陀螺仪不同,航天器的复杂结构不能采用简单的刚体模型。1958年美国发射的第1颗人造卫星——探险者一号

的失稳证实,由于存在挠性部件,经典刚体动力学的结论已不再适用。研究带挠性部件或充液腔的多体系统在干扰力矩和控制力矩作用下的绕质心转动规律是近代陀螺力学的发展方向。

(刘廷柱撰)

广义连续介质力学 generalized continuum mechanics. 该名词来源于国际理论和应用力学协会(IUTAM),于1967年为纪念科瑟拉两兄弟(E.和F. Cosserat)创建有向物质点连续介质理论和嘉当(E. Cartan)提出空间挠率概念所做出的贡献在联邦德国举行的“广义连续介质力学”国际讨论会。当时会议主席克雷诺(E. Kröner)曾明确提出要统一各种理论,并用广义连续统理论在唯象模型和微观模型间的鸿沟上架起一座桥梁的看法。

早在1887年,沃依特(W. Voigt)就提出事物一部分对其邻近部分的作用可能引起体力偶和面力偶的猜想。1893年杜海姆(P. Duhem)曾经指出,对于固体的宏观性态来说,如果能用具有方向于向量表示附加自由度的粒子的连续统模型来描述可能会更准确些。1907~1909年间,科瑟拉两兄弟成功地实现了沃依特-杜海姆的猜想。后来大家就把这种有向粒子连续统模型称为科瑟拉连续统模型,把这种连续统理论称为科瑟拉连续统理论。

直到1958年,埃里克森(J. L. Ericksen)和秋斯德尔(C. Truesdell)进一步指明了方向子的意义并提出杆和壳中应力和应变的准确理论。同年,贡特(W. Guenther)研究了科瑟拉连续统的静力学和动力学问题并提出它与连续位错理论的联系。这两篇论文的发表引起高度重视,使得广义连续介质力学迅速发展并逐渐形成相当完整的理论体系。

在古典连续介质力学中采用3个基本假定:(1)把物体看做是具有3个自由度的物质点的集合;(2)所有守恒定律对物体的任意微小部分都成立;(3)物体任意点的状态只受该点的任意小邻域的影响。这里第1个假定略去了物质点的极性性质,第二个假定排除了荷载对物体运动和状态变化的长程效应,而第3个假定则忽略了物质点的长程交互作用,广义连续介质力学则是对古典连续介质力学的改进和扩展,可以解释或解决古典连续统理论所不能解释或解决的一大类问题,它包括极性连续介质力学、非局部连续介质力学和非局部极性连续介质力学。

极性连续介质力学保留古典连续介质力学的第2和第3个假定并把第1个假定改为:在整体的宏观运动中,每个物质点可以看做是一个微小物体进行微运动。如果只许微小物体刚性运动,则这种连续统理论称为微极连续介质力学,如果还允许微小物体变形,则为微态连续介质力学。由于所采用的模型的变化,在古典连续统理论中的各个环节都要进行相应的修改。例如,微极连续介质力学中的应变还需刻划点与邻点间微运动的差别;柯西应力原理需要扩充,应力张量不再是对称的,质点除具有质量外,还具有自旋惯性等。已经建立了许多属于极性连续介质力学范畴的理论。例如,力偶应力弹性理论、微结构弹性理论、多极连续统力学、非对称弹性理论、科瑟拉曲面理论、微弹性固体的非线性理论、有向流体理论、极流体理论、非对称流体理论、微极流体理论等等。极性连续介质力学的应用范围正在扩大,例如可以建立严格的杆、板、壳理论;可以研究颗粒状物质、骨骼、复合材料和液晶的运动;可以较好地模拟血液流动;可以采用微结构理论研究湍流;可以分析微极固体中的波的传播问题;可以提出微极地球模型研究地震过程;可以用来计算平移球体和转动球体的阻力;可以应用于行星大气层以及海洋表面和底层有关问题等等。

非局部连续介质力学放弃古典连续介质理论的第2和第3个假定,考虑连续统的非局部效应。物体总是由具有某种特征长度(尺寸或距离等)的粒子(原子、分子、颗粒等)组成的,外荷载也具有特征长度或特征时间(区域尺寸、频率等)。当内、外特征长度相近时,古典连续介质力学就不再适用,就需要采用非局部连续统理论。但该理论并不是微观理论,用的仍然是唯象的但考虑了由微观性质引起的效应,但是有希望在唯象理论和微观理论

之间起到“搭桥”的作用。从1967年以来,得到的弥散曲线与点阵动力学的结果相符,用于断裂、位错和旋错、晶格缺陷等问题,都消除了古典弹性理论中出现的应力奇异性,用来处理板中挤曲成形、圆柱弹体侵入问题已给出比较理想的结果;可以用来研究气体的非局部扩散问题;以及解决非局部流体的管道流动、剪切流动问题等等。

非局部极性连续介质力学是极性连续介质力学和非局部连续介质力学的结合。

广义连续介质力学的发展趋势可以概括为:(1)应用广义连续统理论研究古典连续介质力学中的相应问题,例如,微极连续统体内的应力集中、微极圆柱体的弹性振动、微极弹性体的稳定性、微极流体的非定常流动、非局部弹性波传播等等问题。(2)扩充广义连续介质力学的研究范围,形成微极场论、非局部场论、非局部微极场论,例如,涉及热效应、混合物、与电磁场相互作用以及相对论性有关的广义连续介质力学;(3)加强基础理论研究,例如,公理化问题、唯一性问题、内蕴理论、现代数学的应用等等。(4)更强调物理方面,形成离散系统的连续统模型的研究;(5)寻求和扩大广义连续统理论的应用领域;(6)实验或试验至关重要,但因技术条件限制,目前基本上尚属空白。其中(4)、(5)是当前广义连续统场论的研究热点。

参考文献

- 1 埃德伦 D G B 著,非局部场论,戴天民译,南京:江苏科学技术出版社,1981
- 2 爱林根 A C,卡法达 C. B. 著,微极场论,戴天民译,南京:江苏科学技术出版社,1982
- 3 爱林根 A C. 著,非局部微极场论,戴天民译,南京:江苏科学技术出版社,1982

(辽宁大学戴天民教授撰)

物理力学 physical mechanics 研究宏观力学现象的微观理论,是近代力学的分支。其目的是从构成物质的微观粒子(原子、分子等)的结构和相互作用出发,找出介质及材料力学性质等的计算方法,并对力学过程的微观机理进行研究,使力学问题的解决建立在微观分析与计算的基础上。它从物质的微观结构出发,跳出了传统连续介质理论框架,将宏观与微观结合起来,使力学问题的解决可以不完全或不直接依靠宏观的实验来提供论据。因此它既是为工程技术服务的科学技术,又是使力学的理论向微观层次深化的基础性学科。

20世纪50年代,钱学森编写了《物理力学讲义》,开辟了这门学科的发展道路。物理力学的一些内容虽早已分散在其他学科中作了研究,但集中起来进行系统深入的研究,当成一门新兴学科加以发展,还是钱学森首先提出来的。这对力学的发展和现代化起了很大的推动作用。

物理力学建立和发展的时代背景,主要是出现了多种有重要意义的极端条件下工程问题。例如核爆炸、宇航技术等,涉及的温度可达几千度到上亿度,压力达 10^{15} Pa,应变率达每秒 $10^6 \sim 10^8$ 等。在这样的条件下,介质和材料的性质很难用实验方法直接测定,需要利用从微观或细观结构出发来推算宏观性质的方法。此外在某些力学问题中,出现了远离平衡态或是特征尺度与微观结构的特征尺度可以比拟的情况,此时必须从微观结构分析入手处理宏观问题。又如由于连续介质力学理论在处理时间和空间尺度极小的问题时遇到困难,这就必须把这些问题放在原子尺度和原子中相互作用时间尺度上来解决。此外材料科学的发展需要提出能真正揭示出问题本质的指导新材料设计的微观理论模型和计算方法。近代物理学的发展,特别是原子分子物理及统计物理学的发展,加上近代计算机和计算方法的发展,为物理力学的研究提供了良好的基础,使这门学科的建立和发展成为可能。

物理学的发展大致分为2个阶段。从20世纪50年代到70年代初,主要集中在高温高压下介质的物理性质研究。这是因为流体介质方面的统计热力学理论已比较成熟,且原子分子物

理又提供了比较充分的基本数据,因此有条件开展这方面的工作。例如,高温气体的热力学与输运系数以及辐射性质的研究同高超声速气体动力学的发展及核爆炸技术的需要密切相关。从微观到宏观的理论计算方法已获得了高达几十万度甚至上亿度的高温气体的性质。又如,由于工程上和强爆炸力学的需要,开展了高压固体状态方程的研究。由于甚高压下介质的性质可以当作流体,而压力高达几十帕到 10^{15} Pa 下的固体,原子之间的相互作用仍然可以在原子分子理论的基础上加以处理,通过由微观到宏观的计算获得了成功,并把所获成果应用到工程上,证明了物理力学方法的有效性。

70年代以来,新技术和高技术又有了长足发展。激光的出现以及激光在工程上的应用,提出了一系列新的力学问题。在这些问题中至少在激光照射的能量沉积过程中就存在着许多瞬态过程,而这些过程涉及高温高压状态以及同强辐射的相互作用问题。对这些过程不能直接由连续介质理论入手处理,只有基于微观理论去认识这些过程和对问题进行研究,才能过渡到以连续介质力学方法处理这些问题。固体力学的发展在材料本构关系、强度与断裂方面,建立了一套包括损伤力学、断裂力学等全新的科学方向。这再次激发人们要发展微观理论、细观力学和宏观理论,即发展多层次的理论。材料力学性质的微观理论是在原子与分子层次上的研究,当它与材料性质联系起来,并借助于其他层次的理论,就可对材料力学性质进行预测,最终成为能指导材料设计的原子分子工程。由于能够从原子与分子尺度上去观察细致的过程,人们有希望对那些远离平衡的过程进行深刻研究。这些过程所涉及的问题有激波波阵面结构、爆轰波结构、燃烧锋面结构,以及界面或细小亚结构附近的流动、变形与破坏过程等。在那些远离平衡的力学现象中已给不出宏观的唯象参数和唯象规律,因此微观描述就成为唯一可行的办法。大规模微粒子、微缺陷在外力下的运动产生的向宏观力学现象的过渡,也还有待于建立合适的统计模型。

目前,这门学科形成了下列一些重要研究方向:(1)固体材料力学性质的微观理论;(2)力学问题的分子动力学模拟;(3)高压固体状态方程与高温气体(4)辐射输运及辐射流体力学;(5)激波物理及爆轰波物理;(6)激光、粒子束与材料相互作用动力学研究;(7)物理力学计算中的原子分子参数研究;(8)新材料的原子分子设计。

根据新技术和高技术发展的需求,预计今后10年物理力学的研究,将在材料力学性质的微观理论,高温高压条件下物理性质的研究,激光与物质相互作用机理的研究,以及新材料的原子分子设计等方面取得较大进展。

参考文献

- 1 苟清泉. 物理力学的发展与展望. 力学进展, 1991, 21(1): 1~5

(合肥工业大学薛伟博士撰)

振动理论

随机振动 无法用确定性函数, 须用概率统计方法定量描述其运动规律的振动。

随机振动的研究, 是从质点的布朗运动开始的。随后, 爱因斯坦对不规则的运动用概率的规律进行分析。从1923年维纳开始把布朗运动作为随机过程来研究, 逐步构成了随机过程和应用上的两种基本类型。美国早在1958年和1963年在麻省理工学院举行了两次随机振动国际会议, 从此随机振动理论就作为一门新的学科诞生了。

1965年库利(Cooley)和图基(Tukey)提出快速傅里叶变换算法之后, 随着计算机的高速发展以及, 信号处理机进入新的阶段等, 这些都极为有效地推动了随机振动理论在工程中的应用, 使宇航、航空、船舶、车辆、机械、建筑、仪表等学科的研究提高了

层次。

随机振动的问题包括:(1)响应预测, 即已知激励和系统的物理参数, 求响应;(2)系统识别, 即已知激励和响应, 求系统的动态特性;(3)环境调查, 即已知响应和系统的动态特性, 求激励。

随机振动与确定性振动的研究方法有明显的不同。前者难度大、概念的意义深、适用面广。随机振动通常用概率反映随机事件出现可能性的大小。将随机事件的结果用数量描述, 就得出随机变量的概念, 故又称随机过程。而随机振动仅是随机过程的一种例子。

假设在一定条件下重复某个随机试验(如车辆在道路上的行驶试验), 得到系统响应(如乘坐的铅垂加速度或驾驶盘的角加速等)的一次次时间历程, 用 $X_n(t)$ 表示, $n=1, 2, \dots$ 对于不同的 n 都可以看作一个样本, 而这大量的样本构成一个集合, 记为 $X(t)$, 它等于 $[X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)]$, 用它代表一个随机过程。

对于随机现象, 人们感兴趣的往往不是各个样本本身, 而是这些样本总体得出的统计特性。例如, 以随机函数 X 在瞬时 t 取值不大于 X 的概率, 可定义一维概率分布函数

$$F(x, t) = P_{rob}[X(t) \leq x]$$

并由此导出一维概率密度函数

$$f(x, t) = \frac{d}{dx} F(x, t)$$

类似地, 可定义多维概率分布函数与密度函数。从随机函数的概率密度函数又可确定各种统计的数字特征, 例如各次矩可以定义如下:

$$E[X^n] = \int_{-\infty}^{\infty} X^n f(x, t) dx \quad (n=1, 2, \dots)$$

记号 $E[\]$ 表示集合平均。可见, 一次矩即随机函数的平均值 μ_x ; 二次矩即均值 μ_x^2 ; 而二次中心矩

$$\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 f(x, t) dx = \sigma_x^2$$

称为方差, 它的平方根 σ_x 常称为标准差。平均差反映过程的总倾向; 均值往往与总体平均能量相联系; 方差即表示总体动态的能量又表征随机变量的分散程度。

平均特性又需区分集合平均和时间平均。根据统计特性是否随采样时间原点的选取而变化, 随机过程可分为非平稳过程和平稳过程。根据集合平均特性是否等同于时间平均特性, 随机过程又可分为各态历经的和非各态历经的。各态历经的随机过程一定是平稳的; 反之则不一定。

在各种统计平均特性中, 最重要的是相关函数和功率谱密度。一个随机振动的样本可以看作大量数目的具有随机振幅与相位的谱和振动之和。它的总功率就等于各阶谱和分量之和。人们在研究和描述过程中最感兴趣的是找出这种功率如何按频度分布。平稳随机过程 $X(t)$ 的自相关函数 $R_x(\tau)$ 定义为乘积 $x(t)x(t+\tau)$ 的集合平均值。它是时间坐标移动值 C 的函数, 反映相隔 τ 的两个时刻的随机变量之间线性相关程度, 同时它还蕴藏着随机过程中各个谱和分量频率和平均功率的信息。将自相关函数进行傅里叶变换, 便得到频域信息的自动频谱密度 $S_x(f)$, 简称自谱, 它能描述随机过程的平均功率按频率的分布规律。公式为

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau$$

逆傅里叶变换

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) e^{i2\pi f\tau} df$$

当 $\tau=0$ 时

$$R_x(0) = E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} S_x(f) df$$

由此可见, $S_x(f)$ 曲线下的面积正是均方差。

自相关和自谱是同一个随机过程得到的统计特性, 类似地可以定义两个不同随机过程 X 和 Y 之间的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 和互谱 $S_{xy}(f)$ 。从互谱还可以定义相干函数

$$r_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_x(f)S_y(f)}, \quad 0 \leq r_{xy}(f) \leq 1$$

相干函数是比相关函数更为有用和有效的信息。它分为常相干函数、多重相干函数和偏相干函数。常相干函数的主要用途有：(1) 判别单输入输出系统是否为线性；(2) 研究输入与输出是否相关；(3) 识别系统的频率响应是否可信；(4) 衡量测试环境的噪声有否超出允许的等级。多重相干函数用于多输入单输出系统，评价各输入提供输出的比重。偏相干函数用于多输入多输出系统，评价各传递通道是否线性、频率响应函数是否可信、此输入与彼输出是否相关以及测试环境的噪声有否超出允许的数值等。

随机过程中的一类特别重要的过程，称为正态过程，亦称高斯过程，平稳正态的一维概率密度函数可表示为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right\}$$

正态过程在工程中大量存在，它的数学表示式可以规格化，并完全取决于标准差 σ_x 和数学期望 μ_x 。随机振动的许多激励源(如大气湍流、海浪、路面等)都可以看作正态随机过程。用正态随机激励于系统产生的响应，可以识别此系统是线性还是非线性。

常系数线性系统在平稳随机激励 X 作用下，产生平稳随机响应 Y 的单输入、单输出问题，有如下关系

$$S_y(f) = |H(f)|^2 S_x(f)$$

$$S_{xy}(f) = H(f) \cdot S_x(f)$$

式中 $H(f)$ 是系统的频率响应函数。

线性时不变系统受多个平稳随机输入作用，产生多个平稳随机输出时的多输入、多输出问题，有如下矩阵形式的关系

$$[S_y(f)] = [H^*(f)][S_x(f)][H(f)]^T$$

$$[S_{xy}(f)] = [S_x(f)] \cdot [H(f)]^T$$

式中 $*$ 表示共轭， T 表示转置。应用自谱和互谱评价车辆转向机构的操纵性问题、互相关函数确定各传递通道提供响应的比重、响应自谱确定振动的频率结构、知道地震激励求结构物的响应自谱和均方值等。

线性时变系统受多个非平稳随机输入，产生多个非平稳随机输出时，有如下矩阵形式的关系

$$[S_y(f_1, f_2)] = [H^*(f_1, f_2)][S_x(f_1, f_2)][H(f_2, t)]^T$$

$$[S_{xy}(f_1, f_2)] = [S_x(f_1, f_2)][H(f_2, t)]^T$$

式中 $[H(f, t)]$ 为时变系统的频率响应矩阵， $[S_x(f_1, f_2)]$ 为双频率响应谱矩阵， $[S_y(f_1, f_2)]$ 为双频率响应谱矩阵。

电视塔或快艇杆受随机风力作用时的响应、变质量火箭发动机在推力有机分量时的振动、变速运动运载工具(汽车、拖拉机、坦克、火车、工程行走机械等)的非平稳(起动或制动)随机振动、有机干摩擦存在时的非平稳随机振动响应的最大可能值问题等都是非平稳随机振动的应用。

对于非线性系统受白噪声随机激励时的振动问题，它的分类既不像确定性振动用自由度由少到多分类，也不像线性系统随机振动用输入和输出由少到多进行分类，而是按响应的马尔可夫过程维数进行分类。对于一维(半自由度系统，单自由度系统就是二维，两自由度系统就是四维，依此类推)非线性系统受白噪声激励时，响应用条件概率密度函数表示偏微分方程，简称 FP 方程，又称 FPK 方程。FP 方程既适用于求强非线性系统的响应，又能求线性系统的响应，但响应都必须具有马尔可夫性质。例如对于一维马尔可夫随机过程的 FP 方程为

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial(fa_1)}{\partial y} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2(fb_1)}{\partial y^2}$$

式中 $f = f(y, t | y_0, t_0)$ 为条件概率密度函数， y 为 t 时刻的响应， y_0 为初始时刻 t_0 的响应； a_1 和 b_1 为系数，取决于激励的概率特征(如数学期望、标准差、相关函数、自谱等)和系统的物理参数(如质量、阻尼和刚度等)。响应是多维马尔可夫随机过程的 FP 方程为

$$\frac{df}{dt} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial y_i} [a_i f] - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2}{\partial y_i \partial y_j} [b_{ij} f] = 0$$

式中 f 为多维条件概率密度函数，系数 a_i 和 b_{ij} 分别为

$$a_i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} E[Z_i - y_i]; \quad b_{ij} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t^2} E[(Z_i - y_i)(Z_j - y_j)]$$

式中 y_i, y_j 为 t 时刻的响应， Z_i, Z_j 为 $(t+\Delta t)$ 时刻的响应， E 为集合平均算符。用 FP 方程建立非线性系统激励、系统、响应三者关系的偏微分方程是精确的，可以一次求出响应的非平稳随机过程信息和平稳随机过程信息。有随机成分的发动机转速的传递方程、存在液体非线性阻尼的系统在随机激励作用下的振动方程、装非线性率弹簧隔离仪器的随机振动方程、有干摩擦阻尼力作用时的车辆随机振动方程等都可转换为 FP 方程求解。

非线性系统的随机振动问题由于求解上很困难，因而发展了各种近似解法，如 Fourier 级数的 Rice 法、等价线性化方法、摄动法、高斯矩闭合法、Monte Carlo 法，以及平均法等。每种方法都只能在特定条件下求解特殊问题为最佳，至今尚未找到普通运用的近似法。

当振动系统的特性参数是随机变量时，这种系统称为随机系统。随机系统的问题可以分为在集中参数系中质量、弹簧常数、阻尼系数等是随机参数或在分布参数系中特性参数是随机的情形。在随机系统中除了研究系统输出的统计性质，还要讨论系统的稳定性。工程中的梁或柱由于材料特性、形状尺寸和支承条件是随机的，所以是随机参数系统的固有值问题。船上钢丝悬挂的声纳，由于海浪引起悬挂点发生随机运动，这个声纳系统也是随机参数系统。

随机响应的统计特性还可用于可靠性设计，可使产品以给定的概率在规定条件下和在规定时间内成功地完成规定的功能。常用的有强度可靠设计、振动可靠性设计和控制可靠性设计等。

参考文献

- 1 Crandall S H, Mark W D. Random Vibration in Mechanical Systems, Academic Press, 1963
- 2 Светлицкая В А. МАИНОСТРОЕНИЕ, 1976
- 3 下乡太郎. 随机振动. 力学参考文献资料三. 北京: 科技文献出版社, 1976
- 4 具达脱 J S, 皮尔索 A G, 著. 随机数据分析方法. 凌福根译. 北京: 国防工业出版社, 1978
- 5 Haugen E B. Probabilistic Mechanical Design. New York, 1980
- 6 Roberts J B. Shock and vibration Digest, 1981, 13(5): 15~29
- 7 Roberts J B. Shock and vibration Digest, 1981, 13(5): 15~29
- 8 Hammond J K, Harrison R F. IEEE, 1985
- 9 Yang C Y. Random Vibration of structures. A Wiley Interscience Publication New York, 1986
- 10 庄表中, 陈乃立, 高廉. 非线性随机振动理论及其应用. 杭州: 浙江大学出版社, 1986

(庄表中撰)

非线性振动、分叉和混沌理论 nonlinear vibration, bifurcation and chaos theory and its application

20 世纪 60 年代初确定性非线性动力学系统现代混沌(复杂运动)的发现被认为是 20 世纪科学的 3 个重大成就之一。确定性系统通常由常微分方程、偏微分方程、差分方程甚至简单的迭代方程所描述，一般情况下，这些方程的系数都是确定的。混沌来自动力学系统的非线性因素，线性微分方程具有一种重要的叠加特性，非线性系统一般是不可解的，也是不能叠加的。

非线性因素是任何振动系统都存在的，它们来自系统的物理的、几何的、结构的、耗散的以及运动的等等。随着科学的发展，非线性振动有了新的定义。动力学系统的确定运动和从一种确定运动向另一种确定运动的过渡过程称为振动。确定运动是指具有重复性和一定稳定性的运动，过渡过程是向确定运动趋近的

整个过程、某个确定运动过渡过程的集合构成它的吸引域。在所研究的系统中当某个物理参数变化至一定值时确定运动的定性改变称为分叉。假若这种确定运动的改变进行得足够快(即跳跃式的)称之为硬式产生的,相反为软式的,在这样的系统中产生的振动现象称为非线性振动。

非线性振动理论是20世纪20年代后迅速发展起来的,А. А. Андро́нов 等根据 Poincaré 摄动法思想,研究了一个自由度非线性振动系统解的各种性质,并对其某些分叉行为做了探讨。М. Г. Малкин 将摄动法推广到多自由度非线性系统,建立了求周期解及研究解的稳定性的完整的理论,为了适应工程技术领域应用的需要,Крбилюв, Боголюбов 和 Митрополский 在 Van der Pol 法的基础上建立了平均法,简化了研究周期解的稳定性问题。70年代末 Nayfeh 和 Mook 将各种形式的多尺度法系统化,并有效地解决了一些连续介质系统的非线性振动问题,上述这些方法只能求得当系统的参数为确定的常数(不发生微小变化)时的一部分周期解,称之为经典的非线性振动理论。而实际上解的数量和行为更丰富,同时工程实际问题中振动系统的参数往往会发生一些微小的变化,如高速行驶车辆在直线道路上行驶的速度、化工流程中的温度和密度、参数激励振动系统中激励的振幅和频率等都有可能发生微小的变化(摄动),而这些参数的振动有时会引起系统周期响应的本质的变化,响应的本质的变化即分叉,并有可能导致复杂的运动——混沌。

分叉表示当系统某个参数连续变化时周期解的数目和性质发生的跳跃性的本质的变化,一般常微分方程描述的动力学系统相迹的分叉问题可分为静态(平衡态、定常态)分叉和动态(极限环)分叉,或局部分叉和全局分叉。其次,描写实际物理系统的微分方程常常包含着参数,而这些参数的准确值是无法知道的,其测量值会有微小波动,若模拟物理系统的微分方程的向量场在参数连到某临界值时结构是不稳定的,那么解的行为当微分方程右端(向量场)发生微小变化时将发生质的变化,这种现象也就是分叉。可见分叉有时是不可避免的,甚至可以说是非线性系统中最普遍的一种力学现象。另外,经常会遇到所建立的模拟方程十分庞大的情况,以致无法对之进行的理论分析研究,为了简化分析往往把在动力学过程中变化较小的量当作常量,或忽略一部分代表次要因素的变量,以大大简化微分方程的阶数和形式,然而从简化后的方程中用经典的非线性振动理论估计被忽略因素的影响常常是不可能的。在这种情况下,可把丢掉的因素看作是对简化向量场的摄动,从而可用分叉理论来分析研究这种影响。参数随时间变化很慢时称为“慢变参数族”,含有该类参数的振动系统称为张弛振动系统,张弛振动理论和参数不随时间变化的分叉理论是紧密相关的,当“慢—快”系统中的慢变参数变化速度为零时,“慢—快”系统变成了上面提到过的分叉系统族,当变化速度不是零的时候,发生一些称之为“动力学分叉”的特殊现象。

分叉理论与工程问题有着紧密的联系,如高速行驶车辆的行驶稳定性,管道振动,人体神经网络的分叉问题,超导问题中的分叉现象分析,激波的分叉,对称系统中的分叉等非线性动力学问题都是经典的非线性振动理论不能解决的。

非线性振动学从经典的摄动法、渐近分析的方法发展到分叉理论是必由之路。非线性系统出现分叉、倍周期分叉特别是全局分叉在许多情况下会导致混沌运动。故分叉理论还可以使人们了解非线性振动系统的运动状态是如何从正常的有序状态过渡到混沌状态的。

关于分叉理论的发展, V. I. Arnold 在第 17 届国际理论与应用力学大会的报告《数学和力学中的分叉和奇异性》中做了很好的综述。当前关于多参数分叉问题,高阶退化分叉问题,对称性破坏缺系统的分叉,向量场范式(Normal Form)理论,特别是退化范式理论等问题,受到极大重视,高维系统的范式理论、非自治系统范式理论也是值得注意的问题。

非线性参数激励振动系统的复杂动力学行为的研究,是当前非线性振动研究中十分活跃的课题,已引起了很多科学家的兴

趣,参数激励可分作外参数激励和内参数激励两种;外参数激励是由外部原因使系统的某些参数作周期性变化;内参数激励是多自由度系统产生的内共振或称自动参数激励,该类问题受到重视的原因是:(1)参数激励振动系统容易失稳,失稳后则可能出现复杂的动力学行为。(2)大量的工程中的动力学问题属于非线性参数激励振动系统。例如在土木及各类结构中,在轴向振动压缩载荷作用下各类构件的横向振动问题;支点作垂直振动的单摆;具有刚度作周期变化的弹性元件的振动系统;大型柴油机曲轴考虑往复质量对转动惯量影响时的扭转振动问题;柔性梁在跟随周期力作用下的扭弯联合振动系统;船舶的晃动问题;充液系统的容器沿铅直方向平时自由液面的晃动问题等都属于外参数激励系统。拱、梁、板、壳具有对称形状和张紧绳索或电缆在平面简谐力作用下的失稳问题都是内参数激励问题。

从 1868 年开始线性 Mathieu 方程已得到深入研究,1963 年 Bogoliubov 和 Mitropolsky, 1979 年 Nayfeh and Mook 分别研究了 Mathieu—Duffing 方程的周期解。A. K. Bajaj 于 1987 年研究了 Mathieu—van der Pol—Duffing 系统的分叉。D. T. Mook 等于 1990 年研究了多频非线性参数激励振动系统在组合共振情况下的周期解, K. Yagasaki 等同年研究了参数激励和外激励联合作用下非线性动力学问题,并证明存在同宿轨道。陈子恕和 M. F. Langford 等自 1980 年以来研究了非线性参数激励系统的 $1/2$ 亚谐波分叉等理论,和在概周期参数激励下的 $1/2$ 亚谐波分叉,任意亚、超谐波分叉问题,随机参数激励时的亚谐波分叉,并对该系统进行了机械模型实验研究。何国伟研究了非线性参数激励振动系统多重循环对称特性的分叉问题,杨绍普、陈子恕研究了一类参数激励系统的全局分叉。

混沌是指在确定性非线性振动系统中出现的一种有限范围的运动,这种运动毫无规律可言,类似于随机过程,对初值极端敏感,即初值有微小的变化,经很长时间后,则运动可相差甚远,这意味着 Liapunov 意义下的不稳定,这就是通常所说的蝴蝶效应。也就是说,混沌运动具有长期的不可预测性,是不稳定的有限定常运动。这个定义指出了混沌运动的两个主要特性:不稳定性(该性质可用平均 Liapunov 指数大于零来精确化)和有限性。或除平衡、周期和拟周期以外的有限定常运动称为混沌运动。所谓的有限定常运动,是指运动状态能在某种意义上(以相空间的有限域为整体来看)不随时间而变化。

自 1963 年 Lorenz 发现了奇怪吸引子以来,至今人们知道了 4 条比较典型的通向混沌的道路:倍周期分叉,间歇过渡,二次 Hopf 分叉和 KAM 环面破裂。前几条的机理在理论上已基本清楚,但最后一条的机理在理论上尚未解决。另一导致混沌的重要机理是同宿和异宿分叉,鞍点的稳定和不稳定流形在扰动下会横截相交,从而产生双曲极限集,即 Smale 马蹄,数学家认为这是混沌的一种基本结构。Melnikov 于 1963 年提出了分析同宿轨道相交的理论方法。虽然对混沌的研究已有了一些进展,但对高维系统和无限系统中发生混沌的研究工作尚不多见,主要困难是高维系统中稳定流形和不稳定流形的直观结构很难想像。

微分方程局部集合的有限光滑范式对全局分叉理论也是重要的。它们显著地简化了寻求和研究全局分叉问题,同样也简化了所获得结果的论证。从另一方面说,全局分叉理论可以分出范式理论。

根据当前和近期发展,非线性振动研究工作的重点将集中在以下几个方面:(1)非线性振动系统的分析方法;(2)非线性振动系统的分叉理论;(3)非线性振动系统的混沌机理及其控制;(4)力学及工程技术系统中的非线性振动、分叉与混沌问题;(5)生态学、生物力学、化学、近代物理学、经济学及社会学中的非线性动力学问题;(6)高维非线性振动系统的数值计算技术(快速数值计算方法、计算代数、并行信息处理机的应用);(7)非线性振动问题的实验研究。

(天津大学陈子恕撰)

固体力学

齿轮应力分析 gear stress analysis 指分析和求解轮齿和轮体各点应力和应力分布的方法。齿轮应力分析,主要用于确定与齿轮失效有关的危险点的应力集中部位的峰值应力。齿轮应力的大小及其分布不仅与其承受载荷和温度有关,也与其形状、尺寸和材料性质等有关。齿轮应力包括齿轮弯曲应力、齿轮齿面接触应力。齿轮应力分析涉及面广,包括圆柱齿轮、圆锥齿轮、圆弧齿轮、蜗杆传动、行星齿轮传动等的应力分析。齿轮应力分析方法主要有计算法和实验法,而在工程应用中往往采用计算和实验相结合的方法,来相互补充和验证,保证齿轮应力分析的可靠性和有效性。

1892年, W. Lewis 发表了建立在抛物线等强度梁基础上的、齿轮弯曲应力计算公式,开创了齿轮弯曲应力计算方法的基础。该理论是将抛物线在齿形内切位置的平面作为危险截面,故称为平截面法,以后围绕这种方法各国学者进行了深入研究。1947年, A. B. Вepxoвckий 由轮齿实际断裂情况提出齿根应力计算的折截面法,即危险截面看成是折截面。1961年, 会田俊夫首先将保角映射法用于求解齿轮的弯曲应力,用平面弹性力学方法求得弯曲应力的解析解。1969年, G. C. Mudd 首先用有限元法分析了表面淬火渐开线齿轮的弯曲应力,此后有限元法、边界元法精确求解齿轮弯曲应力不断发展,由二维问题发展到三维问题,也成为今后精确求轮齿弯曲应力的有力手段。1926年, S. Timoshenko 应用光弹实验法测量齿轮弯曲应力。以后各国学者相继发展了电阻应变法、全息干涉法、散斑干涉法,使弯曲应力的测量和分析更加精确。

1882年, H. R. Hertz 导出了两弹性圆柱体接触表面最大压应力公式。E. Videkey 在1908年第1次应用 Hertz 理论进行齿面应力的计算,奠定了接触应力分析的理论基础,该理论至今仍被采用。为了更精确地计算齿面接触应力,1971年 T. F. Conry 和 A. Seireg 以柔度矩阵法提出了接触载荷分布问题的数学规划法。该法使有限元法、边界元法求解齿轮的接触问题成为可能。进入80年代,许多学者用有限元法、边界元法对齿轮的接触应力进行了研究,但仍不系统。接触应力的实验测量一直比较困难,对齿轮接触实验主要是针对材料疲劳特性及许用应力而进行的。1931年, Kutzback 首次进行了接触疲劳实验,至今已有许多学者就影响接触强度的各个因素进行了大量实验,得出许多有价值的结论。

自 W. Lewis 提出平截面法计算齿轮弯曲应力理论以后,许多学者就危险截面位置的确定提出各自的方法。1928年, E. Buckingham 研究了齿轮弯曲应力与速度的关系,并于1949年提出力点切线法确定危险截面的位置的弯曲应力计算公式。1926年, H. Hofer 根据光弹实验的结果,提出用30°切线法确定危险截面位置,该法现在被 ISO 及大多数国家齿轮弯曲强度计算方法所采用。1940年, G. Niemann 提出中点法确定危险截面位置,由于实用不方便,1961年提出的弯曲应力计算公式中,改用30°切线法。1955年, B. n. Aндоетckнй 在 A. B. Вepxoвckнй 提出的折截面法基础上推导了该方法的计算公式,使折截面法得以实用。平截面法和折截面法都把轮齿看作悬臂梁,用材料力学方法计算其应力,轮齿短而宽,且齿上载荷集中,材料力学方法不适合,为此 T. J. Jaramillo 于1950年提出了悬臂梁矩像法。1960年, Z. J. Weblauer 引入应力沿齿宽分布影响,引申了矩像法;同时 B. A. Shottter 于1970年提出了平面应力各向同性楔形理论,旨在克服悬臂梁理论的不足。由于悬臂梁理论和楔形理论不能表达齿形、齿根过渡曲线,因此应力计算比较粗糙,精度低,但因方法简单,目前各国工程上还是广泛采用悬臂梁用平截面法计算,为完善这些方法,各国学者进行了大量实验,引入一些系数加以

修正。以上方法只能计算齿轮最大弯曲应力值,不能计算齿面及齿轮内应力分布,70年代以后,为提高齿轮弯曲应力计算精度,保角映射法、有限元法、边界元法得到迅速应用。会田俊夫提出的保角映射法是运用平面弹性理论的保角映射方法计算齿轮应力的精确解,因其映射函数求解困难未能实用。1980年寺内喜男改进映射函数,使映射精度得到提高,但求解映射函数仍为试凑法,影响计算精度。1987年程乃士实现了计算机求解轮齿的保角映射函数,精确地表达齿形和齿根过渡曲线,得到弯曲应力的精确解,使这一方法在工程中实用成为可能,不仅快速、方便,且精度高。

随着数值计算方法的发展,继 G. C. Mudd 之后, G. Chabert 和 L. Wilcox 先后于1970年用有限元法分析了二维模型的弯曲应力分布,随后 Harrison, 户部, H. Winter, R. Mathis 都进行了这方面研究。V. Simon 于1980年用三维有限元模型,得出了精确的计算轮齿偏移量和应力的公式。有限元法可以精确地表达齿形、齿根过渡曲线及齿体结构,成为精确分析齿轮应力状态的重要方法之一。边界元法是继有限元之后发展起来的新的数值分析方法,不仅精度高,且仅沿物体边界进行单元划分,节省计算机容量,提高了计算效率。1982年, M. Alemanni 首先用边界元法计算了直齿轮齿根应力,且与有限元结果作比较。1983年, V. Rubenchik 又将其边界元数值解答与传统方法进行对比,此后很多学者用边界元法求解各种齿轮弯曲应力,结论是在齿轮面积与体积比小时,边界元法省时、高效,且可得精确解。

继 S. Timoshenko 的光弹实验之后, T. J. Dolan 于1940年用光弹实验法提出应力集中系统的概念。R. B. Heywood 于1948年由光弹实验法提出等强度梯形的齿根应力计算的经验公式。同时电阻应变法开始用于定量测定轮齿表面应力值,激光散斑法用于轮齿弯曲应变的测量。这样由实验方法建立了许多轮齿弯曲应力的经验公式,使各方法趋于完善,也验证了理论计算结论。

自 Hertz 公式问世以来,很多学者进行了齿面接触问题研究。1928年, K. Wissman 给出了计算单齿啮合点齿廓压应力的计算公式。1953年, J. O. Smith 发表了法向力与切向力同时作用下,三维接触应力的计算公式。这些公式简单、粗糙,但使用方便,工程实际中普遍采用。近年来,为解决齿面载荷分布和齿间载荷分配,以便精确求解齿面接触应力。1973年, T. F. Conry 用所提出的柔度矩阵法计算了齿宽方向载荷分布和齿廓修形量,提供了解决齿面接触问题的理想途径,为有限元法、边界元法分析齿面接触应力奠定基础。B. Fredriksson, N. Kamoto, 岡本纪明等采用有限元法, J. Andersson 等采用边界元法于20世纪70年代完成了精确分析齿面接触应力,但这些方法还需深入研究。

继 Kutzback 之后, M. Ulrich 第一个实验研究了点蚀形成过程,于1934年证实了齿廓表面上出现的裂纹。N. Käser 1977年通过实验表明,齿面点蚀的形成与相对齿廓无关,而是本身存在前期破坏,使常规接触应力理论进一步完善。此外许多学者进行了大量试验,如,齿的微量变形和齿面失效状况实验,齿面弹性流体动压润滑参数定量试验等,但由于接触点的运动和局部微观性,准确测量齿面接触应力,尚无可靠手段。

近代已开始应用数学、力学、材料学、几何学和现代设计理论的最新成果以及现代的实验技术和分析方法来研究齿轮应力分析技术。当前研究的热点问题:(1)现行各种齿轮强度计算标准,需大量采用有限元等方法对各种齿轮参数影响分析结果加以修正,使其准确可靠。(2)有限元法、边界元法、保角映射法等计算方法复杂,寻求使其在实际当中方便、快速应用的手段,势在必行,并探索能完全模拟齿轮运行状态的应力计算方法。(3)探讨测量齿面接触应力的可靠方法。(4)计算机辅助试验技术在齿轮试验中应用的研究。

参考文献

- 1 Hertz H., Journ. Für die reine und angewandte Uathematik, 1882, 156: 71
- 2 Lewis W. Proc Eng club phild, 1893

- 3 Videkey E. Beiträge zur Berechnung der Zahnäder Zeitschrift Österreichischen Ingenieur und Architekten Vereins, 1908, 3
- 4 Timoshenko S. Band R V. The strength of Gear Teeth Mechanical Engineering, 1926, 1105
- 5 会田俊夫, 寺内喜男. 日本机械学会论文集. 昭(36. 6). 27 (187)
- 6 Conry T F, Seireg A. Tran. of ASME, 1971, 6: 387~392
- 7 Wilcox L. Tran. of ASME, 1973, 11

(东北大学程乃士教授、孙大乐博士撰)

结构分析 analysis of structure 其任务是计算结构物在环境因素(如温度、外力等)作用下的变形和内力以及结构自身的力学特性的量(如静、动力特征值的临界载荷和自振频率)。结构力学研究对象, 早期限于杆系结构(如桁架、框架和拱等)。自从有限元法和计算机应用于力学计算之后, 板、壳及其与杆系的组合结构和块体结构也纳入结构力学的研究范畴。

结构的分类, 除上述按结构形式的分类外, 按结构的用途范围可分为: 土建结构(如桥梁、房屋、输电塔、隧道、管道、水塔等), 化工工业结构(如各类反应塔、压力容器、储液罐等), 钢铁工业结构(如各种熔炼炉、盛钢筒等), 航空航天工业结构(如飞机、飞船、卫星、天线、太阳帆板等), 水工结构(如水坝、闸门、码头、水上平台等), 船舶结构, 车辆结构, 机械结构, 仪表结构等等, 其中又有刚性结构和柔性结构之分, 如悬索桥、起重机之吊索、输电线、天线、太阳帆板和仪表中某些部件则属柔性结构。

结构分析的分类, 从结构所承受的载荷与时间的关系来分, 有静力与动力分析两大类; 考虑温度影响还有热应力分析; 但从力与变形的物理关系、变形的几何关系和问题的特殊性来分, 又有线性分析与非线性分析之分, 如物理关系和几何关系都是线性的问题属于线性分析, 其中任一关系是非线性的问题则属于非线性分析, 还有一些特殊的问题, 如自由—移动边界问题、流固或气固、冰固耦合问题的分析也属于非线性分析。

从分析的内容上又分刚度、强度分析; 特征值分析, 包括静力特征值分析就是求结构的临界载荷, 动力特征值分析就是求结构的自振频率和相应的振型; 动力稳定性分析, 就是在参数振动下求结构的动力稳定区域; 还有结构在动载荷作用下的接触—碰撞分析, 等等。

结构力学是在 19 世纪从经典力学体系中分离出来, 形成一门独立的学科, 它的理论是由力的平衡条件, 变形的几何条件和力与变形的物理关系建立起来的。所以结构分析方法, 即结构力学问题的解法有方法、位移法和力与位移的混合法以及基于此的各种变分原理。英国麦克斯韦(J. C. Maxwell)于 1864 年发表了超静定结构的力法方程, 意大利卡斯蒂利亚诺(A. Castigliano)于 1887 年在其著作中发表了利用变形势能求超静定结构位移和内力的理论。他们的工作为杆系结构的刚度、强度分析奠定了理论基础。在变分原理方面应当特别提到的是中国钱令希, 提出的结构力学余能原理和胡海昌于 1955 年提出的三类变量广义变分原理, 由于在同年晚两个月后日本人鷲津久一郎也发表了类似的广义变分原理, 所以后来统称为胡—鷲津变分原理。

尽管结构分析的一般理论已经建立, 但限于计算工具的落后, 仍然缺少快速有效的计算方法, 所以只能计算小型的问题。直到 30 年代英国柯劳斯(H. Cross)先后于 1930 年和 1932 年提出了刚度分析的柱比拟法和力矩分配法, 才使得结构的数值分析方法有了一个飞跃, 在结构分析史上开创了一个新纪元。从此较为复杂一些结构的分析成为可能, 适应了当时广泛发展的钢结构计算的需要。反过来也正是这种生产发展的需要推动了结构力学理论和方法的发展。力矩分配法统治了结构分析 20 多年, 在中国也有很大的发展。但是即使有了力矩分配法, 也得采用许多简化模型, 如将空间结构简化成平面结构或者将平面结构简化成梁、板、拱等来计算, 结果是比较粗糙的, 有时不靠实验方法来检验,

对复杂的大型结构的精确分析仍然是无能为力的。

1956 年美国特涅尔(M. J. Turner)及柯劳夫(R. W. Clough)第一次正式提出了有限元法, 并给出了最基本的平面三角形单元。接着德国阿吉利斯(J. H. Argyris)采用能量原理、矩阵分析方法分析组合结构, 有限元法首先在飞机结构分析中得到了有力的应用。应当指出, 有限元法的概念在此之前 1943 年曾由柯朗(R. Courant)提出。

50 年代中叶之后, 电子计算机有了较快的发展, 它为求解较大结构线性分析提供了快速有效的计算工具, 反过来又推动了有限元法的快速发展。从金柯威兹(O. C. Zienkiewicz)的综述性文献中可以看到, 有限元法首先在平面应力问题中发展起来, 接着很快地建立块元、壳板弯曲元、厚壳元以及其它结构形式的单元。当然杆系结构的每一个杆件就是一个自然的有限元。当有限元法确立了其在弹性力学、结构力学的数值分析中的有效地位以后, 又很快发展到动力分析、稳定性和物理、几何非线性问题分析的各个方面。由于这些问题的计算更为复杂, 因而又推动了计算机、计算机语言和有限元通用程序的发展。现在国际上通用的功能齐全的大型结构分析程序有美国的 MSC/Nastran、德国的 Adina 和 Aska 等, 在中国被普遍利用的还有 SAP V, SAP M 大型计算机程序, 还有结构分析的微机程序 SAP82 和 DDFW 等。除此之外还有各种专用程序, 如中国航空结构分析的 HAJIF 程序。

有限元法、矩阵分析与计算机的结合为结构分析及数值分析开创了一个新纪元。紧接着有限元法之后, 布莱比阿(C. A. Brebbia)于 1978 年发表了《工程师的边界元法》一书。张佑启于 70 年代提出了有限条法, 这是将解析与离散法相结合的一种解析法, 可以大大节省计算时间。孙焕纯于 1991 年提出了虚边界元法, 避免了奇异积分的处理并解决了边界元法对边界附近精度差的“边界层效应”问题。

结构分析研究已经解决了的问题有: (1) 线性弹性分析问题, 几十万阶线性代数方程组可解; (2) 特征值(分支屈曲、自振特征)分析问题; (3) 连续体结构弹塑性分析问题, 几何非线性分析问题; (4) 结构后屈曲分析问题; (5) 静力摩擦接触分析问题, (一般三维摩擦接触分析); (6) 静力障碍问题; (7) 线性、非线性动力响应分析问题; (8) 流固耦合分析问题。虽然可以进行一般的分析, 但是有些特殊问题, 如储液罐在罐底提高时, 引起的接触—碰撞以及液面大幅晃动问题, 尚待深入研究; (9) 土建结构的结构—基础—土—水的耦合动力分析问题, 理论已经确立, 剩下的是关于土的动力特性(包含各种含水量的影响)和力—变形关系问题尚未解决; (10) 复合材料结构静力分析的一般问题虽然可以进行, 但是其中一些特殊问题, 如边界上应力状态的分析尚待解决。

目前正在研究尚待解决的问题有: (1) 结构动力弹塑性分析。这在理论上没有什么问题, 只是动力加载的弹塑性本构关系比较复杂, 是一个待研究的课题; 另外尚缺少高精度、快速有效的适用于非线性动力分析的逐步积分格式。(2) 结构的接触—碰撞的弹塑性分析。在航天组合结构的各构成结构之间, 相邻的土建结构之间, 机械结构、车辆结构、船舶结构在运行过程中都存在这种问题。过去只是近似地估计碰撞力作用于接触处, 既不考虑接触区域的变化, 也不考虑塑性变形的影响等。钟志华在论文中(1988)以算例显示该项研究的重要意义。问题的关键, 在于数学模型的建立以及碰撞力与时间的关系的确定。(3) 气固、液固耦合。如气固、液固耦合引起的颤振, 储液罐在地震作用下由于液面耦合引起罐底提高的移动边界, 接触—碰撞, 液面大幅度晃动等。温德超在这方面做过有价值的实验和理论研究。(4) 土建结构的结构—基础—土—水的耦合。该问题的关键, 在于土在各种不同含水量下的动力特性以及力—变形关系不能准确地确定。(5) 弹性体中波的传播。目前虽然有一些动力有限元解法, 这些解法对振动分析是有效的, 但对波的传播来说大都精度不高, 计算时间稍长, 由方法的误差积累, 特别是反射波的干涉, 会造成分

析的失真。尤其是在多种介质中的传播问题尤为严重,目前已受到各国学者的关注。(6)结构的热、超屈曲、振动耦合。这在航天结构分析中有特殊的重要意义,是今后需要研究的重要课题之一。(7)结构的动力随机分析和模糊分析。在结构分析中遇到一些物理量有随机性,如载荷的大小、材料的强度等;另一些物理量具有模糊性,如许用应力、地震烈度等,这些量都是不确定的。但过去都一律按照确定量用确定性分析方法进行分析,这是不恰当也是不完全合理的。因为最终分析的结果无法反应其随机特性。例如,最大超载和相应的变位和内力以及出现的相应的概率等;模糊特性,如这些量实际发生的可能变化情况,即所谓的隶属度等,因而产生了结构的随机分析和模糊分析。动力随机分析目前已有成熟的理论,但工程应用尚不多。模糊分析尤其是动力模糊分析,王光远及其领导的研究组在过去10年中做了大量的研究工作,但应用于工程实际尚需一段较长的时间。(8)复杂应力状态下的强度理论和本构关系的研究。特别是一些非金属材料、复合材料(包括混凝土和碳纤维混凝土及碳纤维混凝土)的强度理论和本构关系,过去虽然已做过不少研究,如赵国藩及其领导的研究组对混凝土及碳纤维混凝土的复杂应力状态强度理论及本构关系做了许多实验及理论研究,复合材料本构关系方面也有不少实验成果,但相应的强度理论研究不多,其它方面也尚待进一步研究。(9)滚动摩擦接触分析。在铁路车轮与铁轨相互作用的分析中,或门式起重机的轮与轨相互作用的分析中,这对轮的设计及运行中的卡轨及轮轨磨损的研究,都有很重要的实际意义。例如,空间静摩擦接触滚动的动力条件,轨道弹性性质的影响,以及塑性分析等等。(10)空间摩擦接触。该问题的难点在于摩擦滑移方向是未知的,需要反复叠代,以及是否收敛;另外,分析摩擦接触常用的库仑摩擦定律,经实验证明,只适用于刚体之间的摩擦现象,弹性体之间或弹性体与刚体之间的摩擦现象皆不符合该定律,这也是亟待研究解决的。

参考文献

- 1 Cross H, Morgan N D. *Continuous frames in reinforced concrete*, New York, John Wiley, Sons, 1932
- 2 钱令希. *超静定结构力学*. 上海:上海科学技术出版社, 1951
- 3 胡海昌. *中国物理学报*. 1955, 10(1), 33~54
- 4 Zienkiewicz O C. *Appl Mech Rev*, 1970, 23: 249~256
- 5 Clough R W, Penzien J. *Dynamic of structures*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1975
- 6 Brebbia C A. *The boundary element method for engineers*, Pentech Press, 1978.
- 7 钟万勰, 丁殿明, 程耿东. *计算结构力学*. 北京: 高等教育出版社, 1990

(大连理工大学博士生导师孙焕纯撰)

工程结构分析 analysis of engineering structure 是固体力学的一个分支,属结构力学范畴,研究工程结构受力和传力的规律以及结构优化的学科。所谓工程结构,是指能够承受和传递外载荷的系统,包括杆、板、壳以及它们的组合物,如高层建筑、桥梁、汽车车架、船舶外壳、飞机机翼等。

工程结构分析的内容有:(1)研究在外载荷作用下工程结构中的应力、应变和位移等的规律;根据工程结构可靠性要求,确定工程结构承受和传递外力的能力;(2)运用力学的基本理论和方法,分析不同形式和不同材料的工程结构,为工程设计提供分析方法和计算公式,发展新型工程结构。计算机的发展以及有限单元法等的形成而形成的计算结构力学为工程结构分析提供了强有力的计算工具和手段。

工程结构分析按研究对象可分为:(1)杆系结构分析,包括桁架和刚架分析;(2)薄壁结构,包括薄壁梁、薄壁板和薄壁壳;(3)整体结构,它是用整体原材料经机械铣切或经化学腐蚀加工而成的结构,它对某些边界条件问题特别适用,常用作变厚度结构。

工程结构分析按研究性质可分为:(1)结构静力分析。分析工程结构在静载荷作用下的弹性变形和应力状态以及结构优化问题。静载荷是指不随时间变化的外加载荷,有时也把变化较慢的载荷,近似地视为静载荷。(2)结构动力分析。分析工程结构在动载荷作用下的响应和性能。动载荷是指随时间改变的外加载荷,在动载荷作用下,结构内部的应力、应变及位移也必为时间的函数。(3)结构稳定分析。细长型和薄型结构在受压时会在内部压应力远小于屈服极限的情况下发生失稳,结构稳定分析主要是确定结构失稳时的临界载荷。(4)结构断裂和疲劳分析。工程结构内部不可避免地存在裂纹,裂纹会在外载荷作用下失稳扩展而发生断裂破坏;也会在幅值较小的交变载荷作用下扩展而起引疲劳破坏。工程结构断裂和疲劳分析的一个重要内容是在结构裂纹和工作环境一定的情况下,确定结构的剩余寿命。

工程结构分析有3种主要方法:即使用分析、实验分析、理论分析。它们往往是相辅相成,并交替使用的。使用分析是在工程结构使用过程中进行不断总结分析比较,并辅之以实验分析和理论分析。使用分析对新设计的工程结构尤为重要,其性能要通过使用来检验。实验分析是工程结构性能检验的重要依据,分为3类:即模型实验、真实结构部件实验和真实结构实验。理论分析包括简化模型和采用计算方法两个方面。理论分析时必须采用一些假设,把实际结构简化成理想的典型结构,随着计算工具的改进和计算方法的提高,计算模型愈接近实际工程结构。计算模型确定后,就可以运用各种合适的力学方法,求出工程结构内部的受力和变形状态以及结构破坏的极限载荷,计算方法最基本的是位移法、力法和混合法。大型电子计算机出现后,计算方法发展很快,各种方法都有其相应的通用程序。

19世纪初,由于工业的发展,人们开始设计各种大规模的工程结构。对于这些结构的设计和事故分析,人们要对工程结构作较精确的分析和计算,工程结构分析的理论和方法开始从理论力学和材料力学中独立出来。到了19世纪中叶,工程结构分析已成为固体力学的一个专门分支。

1826年,法国的纳维(C. -L. -M. -H. Navier)提出了静不定结构分析的一般方法。1864年,英国麦克斯韦(J. C. Maxwell)提出桁架内力分析的图解法,指出桁架形状和内力图是一对互易图,并提出求解静不定桁架位移的单位载荷法,创立位移互等定理。1873年,意大利的卡斯蒂利亚诺(A. Castigliano)提出了卡氏第一定理,导出了计算多腹杆桁架的近似方法。1877年,英国的瑞利(Rayleigh)具体讨论了诸如杆、梁、轴、板等工程结构的振动问题并提出了著名的瑞利法。1908年,瑞士的里兹(W. Ritz)提出了一个求解变分问题的近似方法,后来成为求解工程结构振动问题的瑞利-里兹法。

1913年和1915年,前苏联的布勃诺夫首先提出,后由伽辽金推广应用的布勃诺夫-伽辽金法(Bubnov-Galerkin method),可作为分析工程结构的近似方法;其优点是只需知道结构的平衡方程,而不必得出能量表达式,特别可用于非线性问题中。1914年,德国的本迪克森(A. Bendixen)创立了转角位移法,用以解刚架和连续梁问题。1932年,美国的克罗斯(H. Cross)提出力矩分配法,主要用于刚架的受力分析。1938年,捷克的克卢切夫(C. V. Kloucek)提出变形分配法,通过广义位移的叠代过程,求解连续梁和刚架等的位移和内力。

1939年,卡门(T. Von Karman)和钱学森创立了壳体非线性稳定性理论。1940年,辛格(J. L. Synge)和钱伟长应用张量分析建立了极为普遍的板壳理论。1947年,钱伟长提出了用摄动法解决薄板大挠度一类非线性方程的求解方法。1954和1955年,胡海昌、鹭津久一郎分别提出了胡海昌-鹭津久一郎变分原理,并在这个基础上,发展了各种广义变分原理,大大推动工程结构分析的发展。

60年代以来,工程结构分析进入现代研究。有限元法兴起,改变了工程结构分析的面貌。以各种变分原理为基础,根据各种工程结构的特点,人们建立了不同形式的杆元、板元、壳元、夹层

板元、三维应力元、奇异元、杂交元等,并发展了各种半解析法,例如有限条法、样条有限条法、综合离散法、样条综合离散法等。此外,有限差分法、加权残数法等也有了新的发展。

用于求解静、动力和优化问题的结构软件系统日趋成熟,其特点是具有很强的适用性和颇高的可靠性,并具有自动生成原始数据的前处理和自动分析计算结果及绘图的后处理功能,这类软件在70年代有很大发展。80年代以后,这类软件系统进入微型计算机上使用,与绘图技术结合,以工程结构分析为核心的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)迅速发展。

当前工程结构分析的热点是:(1)具有新型结构形式和新型材料的结构分析,包括载荷确定和材料本构关系的研究;(2)结构和热、风、声等耦合时的结构分析问题;(3)随机结构动力分析和结构可靠性研究;(4)工程结构的优化分析和智能结构的研究;(5)工程结构的损伤和损伤检测的研究,结构剩余寿命的分析。

参考文献

- 1 中国大百科全书(力学),北京:中国大百科全书出版社,1985.8
- 2 Lin Y K, Elishakott I. stochastic structural Dynamics I. New Theoretical Developments, springer-Verlag, 1990
- 3 Lin Y K, Elishakott I. stochastic structural Dynamics 2, New Practical Application: springer-Verlag, 1990
- 4 Allabadi M H, Brebbia C A, Cartwright D J. Localized Damage Computer-Aided Assessment and control. springer-Verlag, 1990

(中山大学陈树坚副教授撰)

并行计算结构力学

parallel computational structural mechanics 当前,对工程结构的分析和设计,一般采用串行计算机和串行分析方法。但是,随着现代科学技术的发展,出现了如航天飞机、空间站、海洋油气钻井平台、高耸的电视塔等大型或超大型的复杂结构。这些结构系统不仅具有很大自由度的组合结构,还含有非线性因素。因此,对这些结构分析和设计必须借助于高阶的数值分析模型和大量计算。然而,就目前的计算能力,无法按一定的精度和速度要求,统一完成分析计算。

在20世纪70年代初,人们利用高度发展起来的硬件和新的计算机体系结构,组装出了并行计算机。由于并行机不管是在内存,还是在运算速度上都是现在的串行机无法比拟的。因此,它一经问世便受到科学界和工程界的高度重视。国际上,几亿次/秒至几十亿次/秒的并行机已投入使用,几百亿次/秒的并行机已向世。在中国由国防科技大学等单位已研制出10亿次/秒的“银河”Ⅰ型并行计算机。

基于并行计算机随之出现了一种新型数值计算方法——并行算法。因为它计算效能高,将成为今后一种主导性的计算方法。在国际上,除了召开多次专门的国际并行计算大会以外,还创办了专业性的并行计算的国际刊物(Parallel Computing)。但是,在计算结构力学中进行并行算法的研究,是在1975年之后才逐渐发展起来的。从1977年到1987年间,有关有限元方法和相应的数值并行计算的文章已发表近200篇。目前,在计算结构力学领域内,围绕着基于变分原理的有限元法和基于边界积分方程的边界元法,以及基于现已问世的各种并行机,已形成一个新的学科分支——并行计算结构力学。它的出现解决了许多应用串行机和串行方法不能完成结构分析和设计的问题,在国际上已针对一些具体的并行机开发研制了一些大型结构分析软件。国内由于受到计算机设备的限制,研究工作起步较晚,但是,已受到工程界和科学界的高度重视。

目前,并行计算结构力学正在向两个方向迅速发展。一是子结构并行分析方法,它包含有限元子结构并行算法和边界元并行算法,前者已逐渐趋于成熟,而后者研究尚少。这一方面的研究,在于挖掘结构力学自身的并行性,是计算结构力学并行算法的基本问题。二是对系统方程组实施并行求解的各种算法。当然,上

述两个方面的并行分析方法可联合使用。

早在1977年,R. E. Fulton讨论了利用子结构方法建立并行过程的问题。之后,不少学者作了这方面的研究工作,他们不但对子结构直接并行算法进行了讨论,还对子结构的划分方法以利于取得最佳效率进行了分析。

对有限元子结构并行解法,张汝清提出了具体的并行计算格式。之后,对狭长型类结构,提出了一种新的结点编号和并行静凝聚算法,能有效地节省内存和缩短计算时间;基于Choleski分解提出了一种新的并行静凝聚方法,比一般的子结构并行方法,能节省很大的运算量;基于波前法的概念,提出了子结构并行有限元法,对节省内存和提高运算速度都是十分有益的。

动力响应问题的并行算法,在国外主要是通过各种动力积分方法的并行化来完成的。C. Farhat等对多种积分方法,包括中央差分法, Wilson- θ 法, Newmark法的并行化进行了讨论,提出了在集中质量的情况下,中央差分法的并行效率最好,但是,很少使用子结构方法。对结构动态特性分析的并行算法,张汝清首先给出了子结构模态综合并行求解的理论模型,固定界面子结构模态综合并行解法,并在《并行计算结构力学》一书中又利用子结构方法的概念,对空间叠代法和 Lanczos方法建立起具有特定力学含义的并行算法,并对算法的效率进行了分析。

在非线性问题的并行分析方面,C. Farhat, L. Crivell, E. Wilson曾对非线性问题进行了讨论,他们将结构分成可能的弹塑性区和线性区,并将线性区划分为子结构进行并行静凝聚,同时将线性子结构作为超单元组集进总刚,但该方法未对非线性进行静凝聚。对于弹塑性分析,胡宁等利用有限元子结构方法,对线性区和非线性区并行进行静凝聚,提高了并行效率,同时利用多波前并行处理技术,既节约了内存,又提高了运算速度。张汝清利用接触问题的参数变分原理,建立了接触问题子结构并行算法。

目前,求解系统方程组的并行算法,在两个方面迅速发展着。一是并行直接解法,二是并行叠代解法。并行直接解法的主要优点是算法稳定性好,精度高,同时,便于对现在广泛使用的串行程序进行修改。但在计算并行求解过程中,由于多次调用系统功能实现并行控制,会浪费不必要的进程等待信息和传递信息时间,导致并行算法的效率下降。并行叠代解法的主要优点是可避免和减少同步控制,并且有些方法如 EBE方法,可在不形成总刚度阵的情况下解得结果。它的缺点是不便子和目前现有的大型软件接口。一般来说,叠代解法应用在具有向量处理能力的并行机上效率是高的。

J. M. Ortega根据向量计算机和并行计算机的并行环境,全面地系统地介绍了并行直接法和并行叠代解法。在有限元系统方程组的并行直接解法上,如按列高存储的 LDL^T并行分解方法,及相应的程序已经提出。现在广泛研究和使用的并行叠代解法是共轭梯度法,在这种方法的基础上,实现 EBE方法。国外不少学者在这方面作了研究。

预计在未来的5~10年内,在如下的几方面将会向着更深入和更广阔的方向发展。即:(1)向各种数值分析方法发展,提出更多高效能的并行分析算法;(2)向具有复杂的非线性本构关系领域发展,如对弹塑性、粘塑性、蠕变损伤、接触以及岩土渗透固结问题等实施高效能的并行算法;(3)向各种大型结构(包含动力、大变形问题等)的分析和设计方向发展;(4)向更加完善和适用方向发展,将在一些特定的并行机上,装配调试一些成熟的并行分析程序,同时,使一些典型的有限元过程,如将生成刚度阵,求解方程,动力积分方法等固定化、模块化,形成并行分析和适用性都很强的,融合并行机和并行软件为一体的有力的分析工具,即所谓有限元机器。

参考文献

- 1 Noor A, Husen Kamel, Fulton R E. Comp, struct, 1977, 8:621~632
- 2 Charbel Farhat. Comp & Struct, 1988, 28(5):579~602

3 Charbel Farhat, Edward Wilson. Comp, Struct, 1988, 28 (2); 289~304
 4 Barragy E, Carey G F. Int Jou for Numer meth in Engng, 1988, 26, 2367~2382
 5 Chien L S, Sun C T. Comp & struct, 1989, 31(2); 1023~1029
 6 James M. Ortega, Introduction to parallel and Vector Solution of linear systems, Plenum press, 1989
 7 张汝清, 胡宁. 力学与实践, 1991, 13(6)
 8 Zhang Ruqing. Applied Mathematics and Mechanics, 1991, 12(1); 93~100
 9 张汝清. 并行计算结构力学. 重庆: 重庆大学出版社, 1992. 12 (重庆大学张汝清教授撰)

不同模量弹性理论及其数值计算 theory and numerical computation of dual elastic modulus

不同模量弹性理论是研究材料的拉、压弹性模量和波松比不等的弹性力学问题。随着新型材料工业的日益发展和新型结构材料(如: 玻璃钢, 陶瓷, 塑料, 混凝土, 岩石, 地基, 某些金属等)的开发和利用, 用不同模量弹性理论及其数值计算来分析新型材料的强度、刚度和蠕变等问题已开始受到广泛的重视。在现代技术——建筑业、机器制造、飞机制造、造船及火箭等行业中, 愈来愈多地应用受拉与受压时力学特性不相同的新型结构材料。不同模量弹性力学及其数值计算是为解答新型材料结构的刚度和强度而建立起来的。利用这一新学科提高了力学分析的精度, 揭示了利用经典弹性理论分析的矛盾和局限性。不同模量弹性理论基于经典弹性理论, 它同各向异性弹性力学和复合材料力学等一样, 是经典弹性理论的延伸和分支。

不同模量弹性理论由阿姆巴尔楚米扬(C. A. Амбарцумян)于20世纪70年代创立。该理论用来计算受拉与受压时力学特征不同的玻璃钢等新型材料结构的强度、刚度、温度应力、蠕变等问题。

阿姆巴尔楚米扬总结分析大量新型材料的试验数据得出结论, 大部分不同模量材料的拉伸和压缩的应力—应变图可用两条直线近似画出, 即用在零点切线不连续的分段直线来表示, 其精度是足够的。

在不同模量弹性理论中, 与经典弹性理论一样, 亦假定所研究的物体是连续的弹性体, 并且是均匀的和各向同性的, 不存在最优方向, 材料的弹性性质在各个方向是相同的。但是, 根据主应力在给定点上符号的不同, 在相应的方向上可表现出不同的弹性性质。同时还假定, 所研究的材料在任意应力状态下只发生弹性小变形并服从连续介质的一般规律。因此, 经典弹性理论与不同模量弹性理论之间的差别仅包含在建立应力与应变之间的物理关系中。

若干新型结构材料具有相当大的不同模量性, 其中如任意排列加筋和不加筋的聚合物。聚合材料的不同模量性主要与制造工艺、联系材料和加筋材料的质量、特性及温度等等有关。下表列出了有机玻璃在拉伸时弹性模量几乎比压缩时弹性模量小一倍, 与试验的温度和增塑剂的含量有关。

温度 ℃	增塑剂 %	E+ 10 ⁷ Pa	E- 10 ⁷ Pa	E+/E-
25	0.0	137.0	274.0	0.90
	5.0	137.0	238.0	0.58
	10.0	118.0	214.0	0.55
38	0.0	130.0	220.0	0.59
	5.0	130.0	202.0	0.64
	10.0	89.0	120.0	0.74

在此理论中, 把3个主应力有相同符号的点或区域叫做第一类点或区域, 把某一个主应力符号与另外两个主应力符号不同点或区域叫做第二类点或区域。对第1类点, 不同模量弹性理论与经典弹性理论的基本公式完全一致; 对第2类点, 在其物理方程中应分别使用E+, μ+或E-, μ-, 根据以上的特点和假设, 建立不同模量弹性理论的基本方程, 并对若干问题作出了解答。阿姆巴尔楚米扬等利用不同弹性模量理论, 分析薄壁圆筒的扭转、梁的纯弯曲、空心圆柱体的轴对称、空心球形容器、棱柱体的纵向振动等若干称之为最简单的问题。诚然, 用分析法求解不同模量弹性理论问题, 比用分析法解经典弹性理论问题会更加困难, 特别是对工程结构, 通常是无能为力, 难点在于所使用的弹性模量E+, μ-或E-, μ+与主应力符号及其主方向牵到一起, 而给定点的主应力符号和方向与外载荷、求解区域、边界条件有关, 通常是非线性问题。

为了便于实现和简化问题, 阿姆巴尔楚米扬的理论和算法, 是建立在θ=μ-/E+-μ/E-=0条件下的。这一限制性的假设很不符合大多数新型材料的特性, 因而说该理论和算法的应用价值很窄。在此期间未见有关于数值解法的论文发表, 仅靠理论确实很难解答实际工程问题。

自从1986年鄂瑞峰、张允真翻译出版了《不同模量弹性理论》(Theory of dual elastic modulus)之后, 中国学者开始了不同模量弹性理论的数值分析工作, 后于1989年1~2月张允真、王志峰在中国首次公开发表了《不同拉压弹性模量刚架的算法》和《不同模量弹性力学问题的有限元法》2篇论文, 为这一学科的数值解打开了研究局面。迄今为止, 包括不同模量性材料试验在内, 在中国公开发表已近20篇文章, 其中主要是算法研究, 含有有限元位移法、初应力法、小参数法等。

在数值算法中, 取广义弹性定律是:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_\alpha \\ \epsilon_\beta \\ \epsilon_\gamma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_\alpha \\ \sigma_\beta \\ \sigma_\gamma \end{Bmatrix}$$

或 $\{\epsilon_I\} = [a]\{\sigma_I\}$
 式中: $\epsilon_\alpha, \epsilon_\beta, \epsilon_\gamma$ 是主应变; $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma$ 是主应力; a_{ij} 是柔度系数; 下标 I 表示主应变(力)。

如果 $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma > 0$ 则 $a_{ii} = 1/E^+, a_{ij} = -\mu^+/E^+$; 如果 $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma < 0$, 则 $a_{ii} = 1/E^-, a_{ij} = -\mu^-/E^-$; 如果 $\sigma_\alpha, \sigma_\beta > 0, \sigma_\gamma < 0$ 则 $a_{11} = a_{22} = 1/E^+, a_{33} = 1/E^-, a_{12} = a_{21} = a_{31} = a_{32} = -\mu^+/E^+, a_{13} = a_{23} = -\mu^-/E^-$, 等等。

阿姆巴尔楚米扬作了如下假定:

$$\mu^+/E^- = \mu^-/E^+$$

因而矩阵[a]是对称的。如果用[D]表示弹性矩阵, 则

$$\{\sigma_I\} = [D]\{\epsilon_I\}, [D] = [a]^{-1}$$

应变能表达式是

$$U = \{\epsilon_I\}^T [D] \{\epsilon_I\}$$

或

$$U = \{\sigma_I\}^T [D] \{\sigma_I\}$$

式中: $\{\epsilon_I\} = [L]\{\epsilon\}$; $[D] = [L]^T [D] [L]$; $\{\epsilon\}$ 是全应变列阵; [L]是主应变方向列阵。

不同模量弹性力学的总势能可表达为

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T [D] \{\epsilon\} dv - \int_V \{f\}^T \{F\} dv - \int_S \{f\}^T \{P\} ds$$

式中: $\{f\}$ 、 $\{F\}$ 、 $\{P\}$ 分别是位移、体积力、表面力分量的列阵。

最小势能原理的变分表示为

$$\delta \Pi = 0$$

对有限元计算模型的总势能泛函为

$$\Pi_P = \sum_{i=1}^M \left[\frac{1}{2} \int_{V_i} \{\epsilon\}_i^T [D]_i \{\epsilon\}_i dv - \int_{V_i} \{f\}_i^T \{F\}_i dv - \int_{S_{i\alpha}} \{f\}_i^T \{P\}_i ds \right]$$

式中, M 是单元总数。

设单元位移函数为

$$\{f\} = [N]\{d\}$$

由此得到应变列阵和几何矩阵

$$\{\epsilon\} = [B]\{d\}, [B] = [H][N]$$

式中: $[N]$ 、 $\{d\}$ 、 $[H]$ 分别是单元的形函数, 节点位移和微分算符矩阵。

于是, 得到

$$\begin{aligned} \Pi_P = \sum_{i=1}^M & \left[\frac{1}{2} \{d\}_i^T [k]_i \{d\}_i - \{d\}_i^T \{\bar{r}\}_i \right] \\ [k]_i = & \int_{V_i} [B]^T [D]_i [B]_i dv, \{\bar{r}\}_i = \int_{V_i} [N]^T \{F\}_i dv \\ & + \int_{S_a} [N]_i^T \{P\}_i ds \end{aligned}$$

式中, $[k]_i$ 和 $\{\bar{r}\}_i$ 分别是单元 i 的刚度矩阵和节点荷载列阵。

设 $\{u\}$ 是结构整体的节点位移列阵, 利用最小势能原理

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{u\}} = 0$$

将得到结构的方程组

$$[K]\{u\} = \{P\}$$

式中, $[K]$ 和 $\{P\}$ 分别是总刚度矩阵和方程组右端项, 它们分别由 $[k]_i$ 和 $\{\bar{r}\}_i$ 集成。

通过解结构代数方程组, 可以得一组解答 $\{u\}$, 再由 $\{u\}$ 可以求得应力、主应力、应变、主应变以及主方向。这一组解答并非不同模量结构的真实解, 因为在本次计算中弹性矩阵 $[D]$ 是根据第 1 或 2 类区域设定的。

不同模量弹性力学问题通常采用迭代法求解, 用第 i 次迭代结果以确定 $[D]_i$ 矩阵, 进而用 $[D]_i$ 求 $\{u\}^{i+1}$, 其迭代格式为

$$[K]_i \{u\}^{i+1} = \{P\}$$

如果第 $L+1$ 次迭代解与第 L 次迭代解相差无几, 满足精度要求, 则认定 $\{u\}_{L+1}$ 为真实的位移解答。计算表明, 本迭代法是收敛的, 收敛速度快。

以上的算法是在 $\mu^+/E = \mu^-/E$ 或 $\theta = 0$ 条件下进行的。中国学者张允真、孙东科、赵达壮研究了在 $\theta \neq 0$ 条件下的算法, 并作了误差分析。

不同模量弹性力学及其数值计算在中国尽管研究成果不多, 但确实取到了一个好的开端。随着科技事业的发展和新型工程材料的开发和利用, 对不同模量弹性理论及其数值分析会有更高的要求 and 广泛的应用。

今后主要的研究热点是: (1) 新型材料的力学特征试验, 测出材料的 E^+ 、 E^- 、 μ^+ 、 μ^- 以及它们随温度的变化; (2) 加强算法研究, 提供有效的计算方法, 以适应静力和动力, 线性力学和非线性力学, 材料力学和板壳力学等分析的需要; (3) 加强不同模量弹性、塑性力学的探索, 建立和发展相应的理论, 使之更严谨更完善更全面; (4) 应用及其研究是发展这一学科的推动力量, 总结不同模量弹性力学及其数值分析在现代工程中的应用, 必会对工作大有裨益。

(大连理工大学张允真教授撰)

线性粘弹性问题 linear viscoelasticity problem 线性粘弹性材料的边值问题, 包括线性粘弹性等温边值问题和线性热粘弹性边值问题。线性粘弹性材料的应力-应变行为服从线性规律, 可模型化为线弹性和理想粘性的组合。线性粘弹性的解应满足包括几何方程、平衡或运动方程、本构方程、边界条件和初始条件在内的若干组数学条件, 其中除本构方程外的其他控制条件均来自线性弹性理论, 只是全部变量皆附加了对时间的依赖性而已。粘弹性边值问题的建立及其求解和材料粘弹性的描述构成了粘弹性力学的两大基本内容。很多工程材料如聚合物、玻璃、陶瓷和混凝土等在较低的环境温度和较小的应力水平下, 其应力-应变关系近似服从线性粘弹性规律。

最早的线性粘弹性力学模型是由最简单的弹簧元件和阻尼

器元件组合而成的。1874 年波尔兹曼(L. Boltzmann)提出基于叠加原理的遗传积分表达式, 建立了三维各向同性线性粘弹性材料的应力-应变关系, 并把它推广到各向异性线性粘弹性材料。

1962 年, 高尔腾(M. E. Gurtin)导出各向同性粘弹性体在等温和准静态条件下解的唯一性定理。欧德(F. Odeh)等人先后给出各向异性线性粘弹性体在动荷下有关解的唯一性的论述。1982 年克里斯坦森(R. M. Christensen)把等温边值问题的解的唯一性定理推广到非等温的热粘弹性领域。

线性粘弹性静力学问题包括求解刚性支承上粘弹性体的变形、求解强迫位移引起的应力和上述两种边界同时存在的情况等 3 种类型。对于第 1 类问题, 可根据应力状态与材料性质无关的定理用弹性状态计算方法求得所谓准弹性解。第 2 类问题可归结为沃尔泰拉(Volterra)第二类积分方程(松弛方程)的求解。第 3 类问题较复杂, 需要联立求解一个沃尔泰拉积分方程组, 传统的积分方程解法有影响函数法、积分变换法和有限差分法。影响函数法主要用于材料模量变化很小及初瞬时弹性应力为常量的情况。线性粘弹性边值问题的基本方程经过积分变换之后, 形式上和线弹性问题的基本方程相同, 称为弹性-粘弹性相应原理。利用相应原理, 先求得含变换参数的相应的线弹性问题的解, 然后经过反演, 即可得到线性粘弹性问题的解。有限差分法是一种直接解法, 它把计算时间划分成一系列时间间隔, 把本构方程中的积分用各个时间间隔上的数值积分代替, 从而导出求解未知量的递推公式来。对于线性粘弹性体的冲击、振动及波的传播等问题, 必须考虑惯性项的影响。通常可采用傅里叶(Fourier)变换或拉普拉斯(Laplace)变换来求解上述瞬态动力粘弹性问题。

由于塑料工业的发展及迅速兴起的复合材料产业的迫切需要。近年的主要研究工作集中在各向异性线性粘弹性本构关系、线性粘弹性问题的数值求解方法及冲击、振动和粘弹性波的传播等动力问题诸方面。

时间-温度等效原理, 常用于由较窄时间范围内不同温度下的试验数据换算基准温度下长时间范围内的模量时间行为。但对于聚合物基复合材料, 随着温度的改变, 基体模量的变化相对于纤维模量的变化要大得多, 由此引入非线性, 导致主曲线失真。1990 年, R. F. Gibson 等把各向同性粘弹性材料的时间-频率变换方法推广到各向异性粘弹性材料, 获得高精度的主曲线。除了有限差分法之外, 有限单元法和边界单元法已成为求解线性粘弹性问题的有效工具。1987 年, Yadagiri 等采用有限单元法求解了粘弹性联结问题; 克温(Y. L. Kuen)等由变分原理导出各向异性热粘弹性边值问题的基本方程; 李江等人给出广义时间拉普拉斯交换-有限元复合法; 杨海天等把振动、边界元和有限元法结合起来, 提出一种求解线性蠕变问题的新方法。线性粘弹性结构的动力响应是具有重要应用价值的研究课题之一。杨挺青等利用拉普拉斯变换先求得变换空间中位移的一般解和应力表达式, 然后采用数值逆变换的方法计算出实际粘弹性的位移场和应力场。孙炳楠等采用边界单元法获得动载作用下的二维粘弹性结构在变换空间内的数值解, 然后采用改进的道宾(Durbin)数值反演方法得到粘弹性数值解。N. K. Chandiramani 等和 C. Gabriel 同样利用拉普拉斯变换给出正交各向异性板动力稳定问题的求解过程。曼级(Y. Mengi)等导出了粘弹性复合筒动力问题的近似理论并给出了计算实例。

聚合物及其复合材料的粘弹性研究正处在迅速发展的阶段。工程塑料、现代陶瓷及复合材料等轻质、高强、高性能材料的工业应用将推动线性粘弹性问题实用分析方法的进一步发展。以下诸方面的研究方向将具有重要的理论和应用价值: 线性粘弹性动力响应分析; 静载线性粘弹性失效判据; 线性粘弹性断裂力学研究; 线性粘弹性疲劳问题; 各向异性线性粘弹性结构的稳定问题等。

参考文献

- 1 杨挺青, 王胜利, 黄王盈. 固体力学学报, 1987, 8(1): 78~86

- 2 Stango R J, Wang S S. *Comp Sci Tech*, 1989, 35, 273~282
- 3 Mengi Y, Birlilik G A. *J Sound and Vibration*, 1989, 130 (1), 55~67
- 4 Gibso R F, Wang S J, Sheppard C H. *J Comp Materials*, 1990, 24, 441~453
- 5 孙炳楠, 戚支全. *上海力学*, 1990, 11(1), 23~31
- 6 李江, 张恒. *洛阳工学院学报*, 1991, 12(3), 33~40
- 7 Kuen Y L, Hwang I H. *Int J Solids Str*, 1991, 27, 927~945
- 8 杨海天, 郭瑞峰. *计算结构力学及应用*, 1991, 8, 249~156
(洛阳工学院张恒教授撰; 尹昌官审)

塑性力学 plasticity 是固体力学的一个重要分支, 研究物体受力后, 超过弹性极限而产生永久变形和作用力之间的关系, 以及物体内部应力和应变的变化规律。塑性力学以实验为基础, 即从实验找出受力物体超出弹性极限后的变形规律, 并将这些规律进行归纳, 提出合理的塑性状态时应力应变(或应变增量)之间的关系式, 从而建立塑性力学的基本方程。塑性力学的基本实验有单向拉伸实验和静水压力实验, 通过单向拉伸试验可以获得加载和卸载时的应力—应变曲线以及弹性极限和屈服极限的值。而且从这里可以看出: 在塑性状态下, 应力与应变之间的关系是非线性的而且没有单值对应的关系。由静水压力实验可以得出, 静水压力只能引起金属材料的弹性变形而且对材料的屈服极限影响不大(岩石材料则不同)。

为了简化分析, 塑性力学经常采用一些假设: (1) 材料是各向同性和连续的; (2) 材料的弹性性质不受塑性变形的影响; (3) 平均正应力不影响材料的屈服, 体积变形是弹性的。这些假设一般适用于金属材料, 对于岩土材料则应考虑平均正应力对屈服的影响。塑性力学的应力应变曲线通常采用: (1) 理想弹塑性模型; (2) 刚塑性模型; (3) 强化模型。在复杂应力状态下, 判断物体屈服状态的准则称为屈服条件, 屈服条件是各应力分量的组合函数。对于金属材料, 最常用的屈服条件为最大剪应力屈服条件亦称特雷斯卡(H. Tresca)条件以及弹性形变比能条件又称米泽斯(R. Mises)条件; 而对于岩土材料则常用莫尔—库伦 Mohr—Coulomb 屈服条件。对于强化材料, 屈服条件将随塑性变形的增长而变化, 改变后的屈服条件称为后继屈服条件或加载屈服条件。特雷斯卡屈服条件是一个线性代数方程, 当知道主应力大小的次序后, 使用这一条件较为方便, 若不知道主应力大小的次序时, 使用米泽斯条件较为方便, 但在数学上则要联立求解一个非线性代数方程和一组偏微分方程。此外, 屈服条件主要应根据具体材料来选择确定。德国的洛德(W. Lode)发现对于韧性较好的材料, 米泽斯屈服条件与试验数据符合较好。由于塑性变形与变形历史有关, 因此塑性应力—应变关系用增量形式给出较为方便, 用增量形式表示塑性应力—应变(或应变增量)关系的理论称为增量理论, 增量理论在理论上是合理的但应用起来却比较麻烦, 因为要积分整个变形路径才能获得最后的结果。采用全量形式表示塑性本构关系的理论称为全量理论, 在比例变形的条件下可通过积分增量理论的本构关系获得全量理论的本构关系, 由于全量理论使用方便, 因而常常用来求解问题。一般说来在偏离比例变形条件不大时, 全量理论的计算结果和实验结果比较接近, 这个理论以伊柳辛(A. A. Iliushin)给出的比较完整, 数学表达式也比较简单。

求解塑性力学边值问题时, 所使用的平衡方程、几何方程以及力和位移的边界条件都同弹性力学中所使用的完全一样, 只是物理关系不能再采用弹性力学中的胡克定律而是采用塑性增量或全量的本构关系。由于塑性本构关系是非线性的, 因而在求解具体问题时需要合理的简化, 找出解决问题的方法, 再进行求解问题。在塑性力学中, 常用的求解方法有:

(1) 简单弹塑性问题。又称弹塑性静定问题, 由于所求的各未知量的数目和已知方程式的数目相同, 只采用平衡方程和屈服条件便能将问题中的各未知量找出。梁的弹塑性弯曲, 圆柱体弹

塑性扭转和受内压或外压作用的厚壁圆筒和厚壁圆球的分析都属于这类问题。

(2) 滑移线法。适于求解塑性平面应变问题。因为在这类问题中, 不仅可作为最大剪应力迹线的滑移线是两族正交曲线, 变形体中各点的平均应力等于应力第一不变量, 米泽斯屈服条件和特雷斯卡屈服条件具有相同的形式。由于这一方法满足塑性力学的全部条件, 因而所得到的解为完全解。采用的是刚塑性材料模型假设, 最大剪应力等于材料的剪切屈服极限。使用滑移线法能找出变形体中各点的应力分量和相对应的位移增量分量。

(3) 界限法。又称上、下限法。由于要找到满足全部塑性力学方程的完全解比较困难, 界限法将塑性力学方程分两类, 第一类中包括平衡方程、屈服条件和力的边界条件, 这些条件称为静力条件, 如一个解能满足全部静力条件则称这个解为静力解, 用静力解所求得的极限载荷一定比完全解的极限载荷小, 最多和完全解的极限载荷相等。另一类方程中则包括外力所作的功等于物体内部所耗散能的条件及结构的几何边界条件。这种方法称机动法, 用机动法求解的极限载荷比用完全解所求得的极限载荷大, 最多和完全解的极限载荷相等。

(4) 主应力法。假定剪应力对材料屈服条件影响很小, 这时屈服条件简化为线性代数方程式, 同时假定相对某一个轴主应力分布是均匀的。将简化后的屈服条件和平衡方程联立求解, 不仅能获得各种工艺过程的极限载荷而且能找出各应力分量的分布规律。

(5) 参数方程法。当采用米泽斯屈服条件时, 往往采用满足屈服条件的参数方程。将参数方程代入平衡方程后, 再按边界条件求出积分常数从而得到问题的解。

(6) 加权残值法。首先应假设一个试函数, 在试函数中包括一些待定常数。将试函数代入平衡方程和屈服条件后或边界条件后, 一般得不到满足, 因而产生残值, 在残值中包括待定参数。通过消除残值的条件可以获得一组以待定参数为未知量的代数方程组。由这一方程组求出下限解的一个加权平均值。

(7) 有限元法。经常使用的有弹塑性有限元和刚塑性有限元, 其优点是不仅可以找出变形体内各应力应变分布规律及变形力, 而且可以用来分析变形全过程, 从而找出变形或成形工艺的最优方案。

塑性力学在工程中有广泛的应用: ①结构的塑性极限分析和安定分析; ②构件的塑性极限分析和安定分析; ③金属块体成形; ④金属板料成形; ⑤金属轧制; ⑥塑性动力响应和塑性波; ⑦自紧技术; ⑧在岩石和土壤中的应用; ⑨残余应力的研究。

由此情况看出, 塑性力学的研究范围十分广阔, 目前已取得了大量的研究成果, 特别是由于它在许多工程实际中获得了成功的应用, 因而也进一步地促进了这门学科的发展。

参考文献

- 1 徐秉业, 陈森灿编著. *塑性理论简明教程*. 北京: 清华大学出版社, 1981
- 2 徐秉业编. *塑性力学*. 北京: 高等教育出版社, 1990
(清华大学博士生导师徐秉业教授撰, 博士生导师姚振汉审)

结构塑性极限分析 plastic limit analysis of structures

研究结构在塑性极限状态下的特性, 又称结构破损分析。当外载荷达到某一极限值时, 结构将变成几何可变机构, 这时变形将无限制地增长, 从而失去承载能力, 这种状态称为结构的塑性极限状态。在塑性极限状态分析中, 由于不考虑弹性变形, 分析问题大为简化, 而所得到的塑性极限载荷与考虑弹性变形过程时所得到的结果是完全一样的。塑性极限分析的任务是: (1) 求出结构的塑性极限载荷; (2) 找出极限状态下结构中的应力分布规律; (3) 求出结构在极限状态下满足塑性变形规律和结构机动条件的破损机构。

为了求解这些问题, 除了要知道结构材料的有关参数外, 还应注意静力和机动的条件, 这些条件是: (1) 屈服条件, 即结构出

现屈服时其广义力(弯矩、轴向力或薄膜力)应满足的条件;(2)破坏机构条件,在极限状态下结构的运动规律,即结构失去承载能力时的运动形式;(3)平衡条件;(4)几何条件。以上(1)、(2)两个条件应该建立在理论分析和实验研究的基础上,是结构极限分析的物理依据。(3)、(4)两个条件是结构处于弹性状态或塑性状态都必须满足的条件。如果所求得的解能满足以上全部条件而且满足所给定的边界条件,这样的解即为极限分析的完全解。

在结构极限分析理论中,一般采用如下几个假设,即:(1)材料是理想刚塑性的,不考虑材料的弹性性质和强化效应;(2)结构的变形足够小,因此变形前后都能使用同一平衡方程,而且材料变形的几何关系是线性的;(3)在达到极限载荷前,结构不失去稳定性;(4)所有外载荷都按同一比例增加,即满足比例加载条件。在结构极限分析中,一般采用广义应力作为变量,而不直接采用应力作变量。弯矩、剪力、轴向力、壳体的薄膜力都可以作为广义应力。凡是在极限条件中起作用的内力称为广义应力。当广义应力满足极限条件时,则表示结构上这一点已进入屈服状态,当结构上有若干个截面达到屈服状态时,则结构可能成为机构,变形将无限地增加,这时结构达到了极限状态。

在结构极限分析中,经常要用到如下概念:(1)静力容许应力场:凡满足平衡条件和力的边界条件且不破坏极限条件的应力场,称为静力容许应力场;(2)机动容许位移场:凡满足几何约束条件并使外力作正功的位移场,称为机动容许位移场。在一般情况下,静力容许应力场和机动容许位移场并不一定是极限状态下真实的应力场和真实的位移场。

为了求出复杂结构的极限载荷,要经常利用上限定理和下限定理。(1)下限定理:在所有与静力容许应力场相对应的载荷中,最大的载荷为极限载荷;(2)上限定理:在所有与机动容许位移场相对应的载荷中,最小的载荷为极限载荷。根据上、下限定理,有两种求解极限载荷的方法,即机动法和静力法。

在静力法中,要求结构必须满足平衡条件、力的边界条件,且不破坏极限条件。由静力法所求得的极限载荷比真实的极限载荷小。在机动法中要先假设一个破坏机构,并使外力在所假设的破坏机构上作正功。由机动法所求得的极限载荷比真实的极限载荷大。如果一个载荷既是极限载荷的上限又是极限载荷的下限,这个载荷将满足极限分析中的全部条件。

对于复杂结构,为了求出极限载荷,可以放松对极限条件的要求,即对极限条件进行简化以便找出解的上限或下限。用广义力表示的极限条件其数学表达式往往是非线性的。将这种非线性的代数方程与结构偏微分平衡方程联立求解往往是非常困难的,因此采用线性化的极限条件进行求解是很有意义的。在实际问题中,弯矩和薄膜力并不总是同时起主要作用的,因此可以提出这样的简化,当弯矩起主要作用时,可以忽略薄膜力在结构进入极限状态时的作用,而当薄膜力起主要作用时,则可忽略弯矩对结构进入塑性状态时的影响。因此在极限条件中,不同时出现弯矩和薄膜力,即不考虑弯矩和薄膜力之间的耦合现象。当只有一个弯矩出现在极限条件中时,称为单矩弱作用极限条件;当有两个弯矩出现在极限条件中时,则称为双矩弱作用极限条件。对于梁、桁架、刚架、轴对称圆板和旋转轴对称薄壳都已找到了大量的完全解。对于较复杂的结构,都可用静力法或机动法分别找出下限解和上限解。

早在1914年卡金契(von Kármán)和基斯特(N. C. Kist)便对连续梁的极限承载能力进行了研究,提出了只要满足平衡条件,而在梁的任何截面上都没有使梁破坏的弯矩时,则结构不致于破坏,这实际上是下限定理的萌芽。此后英格尔斯夫(A. Ingerslev)和约翰逊(K. W. Johanson)提出了用塑性铰线求板的极限载荷理论。格涅兹捷夫(A. A. Gvozdev)又就杆系结构和混凝土结构提出了确定极限承载能力的上限和下限准则。

关于梁和刚架的极限分析目前已研究得比较完整,发展了许多分析方法,如不等式法、机构迭加法等,对于较复杂的连续梁和刚架都能比较有效地进行极限分析。

板和壳的极限分析要困难一些,原因是这类结构的平衡方程往往是偏微分方程,且用广义力表示的极限条件又是非线性的。因此只有比较简单的问题才能找到完全解。对于板壳极限分析,美国的霍奇(P. G. Hodge)曾作过许多有益的工作。他所提出的夹层结构极限条件以及单矩或双矩弱作用极限条件在求解复杂壳体和组合结构中获得了广泛的应用。由于电子计算机的发展,将极限分析问题作为线性规划问题来研究,不仅使求解问题更为方便,而且进一步推动了塑性极限分析这门学科的发展。

参考文献

- 徐秉业,刘信声编著. 结构塑性极限分析. 北京:中国建筑工业出版社,1985

(清华大学博士生导师徐秉业教授撰,博士生导师姚振汉审)

结构塑性动力响应

众所周知,组成工程结构的基本构件通常是梁、板、拱、壳。当这些基本构件受到强动载荷作用或突加速度时,就可能产生大的塑性变形,导致结构过量的永久变形而失去原有功能,以及造成结构的局部或整体破坏。这不仅与结构形状和材料性质有关,而且还取决于载荷强度和载荷持续时间。如果载荷作用时间足够短,则即使载荷幅值远远大于结构的静态极限载荷,由于构件的惯性力抵抗外力做功,也可以保证结构不至于产生过量的永久变形,因而不会失效。塑性动力分析的一个重要目的就是预报这种永久变形(广义)量的大小和位置,从而确定相应的安全准则,为工程提供理论依据。当然,工程中的结构问题一般是非常复杂的,在很多情况下约束条件以及载荷种类往往都难以确定,同时结构的受载过程可能是多种力学机理交织在一起,伴随着几何大变形和大的非弹性应变,并且与材料的损伤、断裂耦合在一起,因此使动力分析变得很困难。

结构的塑性动力分析大体可分为两类。第1类是应力波问题,第2类是整体响应问题。一般来讲,如果载荷作用时间极短或载荷变化极为迅速,并且结构在某一方向的尺寸较大,而我们又希望了解物体在这一尺度方向上的瞬态局部变形和应力变化的规律,这时就要考虑应力波问题。另一方面,如果结构尺寸有限,特别是当载荷作用在小尺度方向时,如梁、板、壳的厚度方向,这时应力波穿过厚度的时间大约是微秒量级。在这样短的时间内,波经过来回往复传播,很快把变形传给整个物体,结构将出现整体加速运动。从时间上来划分,应力波作用在前,结构整体响应在后。但是,假如我们关心的是结构整体内的广义变形随时间的变化,尤其是最终的残余变形,那么,结构的动力响应就成了主要的研究内容。通常对横向载荷作用下的有限结构进行塑性动力分析时并不考虑应力波过程,而只研究整体响应。当然也有少量文献把两者耦合在一起加以考虑。

与弹性静力学相比,塑性动力学的复杂性主要表现在以下几个方面:(1)弹塑性材料在动载作用下,应变率产生效应使本构关系发生很大变化,材料的动态特性更加复杂。(2)动力学方程增加了介质的惯性力和时间自变量,这使方程求解更加困难。(3)动载作用常常使结构变形大大增加,从而不得不计入有限变形的影响。(4)破坏模式明显增多,多种内力效应交织在一起,使主次矛盾难以分清。

在结构的塑性动力响应分析中,假如把弹性变形、应变率效应、应变强化、有限变形、初始缺陷等各种因素都考虑进来,问题将非常复杂。Symonds 等的工作表明,如果外载输入结构的能量远远大于结构本身所能贮存的弹性变形能,同时载荷作用的时间又远远小于结构的最小自振周期,那么,一般可以采用刚塑性材料的本构模型来建立问题的一阶近似理论。这样的处理使问题大大简化,避开了由于对各种材料动态本构关系缺乏了解而带来的困难,同时获得结果表达形式相对地比较简单却能与实验基本吻合。因此,刚塑性的分析方法表现出很强的生命力,一直受到力学界和工程界的重视。几十年来,对梁、板、拱、壳这些构件的刚塑性动力响应一直都在不断地进行着研究。另一方面,为了满足工程界的需要,直接用于复杂结构塑性动力分析的各类数值方法

及相应程序也得到了迅速发展。

上述提到的刚塑性动力响应的一阶近似理论,实际上它是建立的忽略弹性变形、应变率效应、应变强化、有限变形、初始缺陷等与材料本构以及几何非线性有关的各种因素基础上的,其基本做法大体上是沿用结构的刚塑性准静态极限分析的思想,只是由于解法简便,在输入结构的能量很大的情况下,它确实一定程度上反映了结构塑性动力响应的本质。因此,对一阶近似理论加以修正、补充,并估计其它诸效应在结构响应过程中影响使之符合实际材料的动力特性和结构的几何特性,就形成了塑性动力响应目前理论研究的重点或方向。

材料的弹性效应 到目前为止,通过对结构进行弹塑性动力分析从而获得塑性动力响应解析解的文献只有唯一的一篇,即1950年,P. E. Duwez 对中点受撞击而获得一个初始速度的无穷长梁进行弹塑性动力分析给出的结果。由于弹塑性分析涉及加载、卸载、再加载,这些过程又与时间及随时间变化的塑性区形状联系在一起,所以即使对于非常简单的结构,分析起来也十分困难。但是,材料的弹性效应在塑性动力响应中起多大影响的研究工作却一直在进行。上文提到 Symonds 提出了忽略弹性的两个条件:即(1)输入结构的动能远远大于结构所能贮存的弹性应变能;(2)载荷作用时间远远小于结构自振的最小周期。最近 Symonds 和 Trye 又分析了单自由度的质量弹簧模型,弹簧分别是理想弹塑性和刚塑性的。他们分析了在6种不同型式脉冲载荷作用下两种模型的动力响应。将最终位移之差,输入能量与最大弹性能之比(R),以及载荷作用时间,画在同一张图上,最后得到两个主要结论,第一,上述条件(1)是刚塑性必解逼近弹塑性解的必要条件,但不是充分的;第二,如果不满足上述条件(2)并且压力脉冲有一个非零的增长时间,则两个解的误差将相当大,但是随着 R 增加,误差相对减小。需要说明的是,Symonds 分析的是单自由度的质量弹簧模型。这些结论是否也适用于连续体的情况,或者只是连续体结论之中的一部分,这个问题似乎还需要进一步认识。

Forrestal 等提出的近似估计材料弹性效应在塑性动力响应中的影响的方法也很有特点,它不仅简单而且与实验非常符合,其基本思想与 SEP 方法有类似之处。他首先认为梁的初始阶段是弹性振动,并求出振动的弹性解,同时判断最大弯矩发生的截面,在某个时刻 t_0 ,该截面产生初始屈服,然后梁进入弹塑性振动阶段。通过对塑性区的形状作一些假设,并认为初始屈服时刻,梁所具有的动能全部消耗在塑性区内来建立能量平衡方程,最后求得梁的最终挠度。这种近似估计法求解过程非常简单。如果材料是应变率敏感的,那就可以联立 Cowper-Symonds 本构关系,求得相应的动屈服应力。他们对 6061-T6 铝材以及 1018 钢的简支梁受均布冲击载荷的实验表明,理论结果与实验符合很好。存在问题是这个方法在应用方面局限性很大(如对结构的约束条件有限制),并对塑性区假设很大程度上是人为的,但是由于计算简单实用而受到人们的关注。

继 Symonds 和 Fleming 用有限元程序 ABAQUS 研究弹塑性悬臂梁端部受集中质量撞击的塑性动力响应以后,Reid 和 Gui 重新用 ABAQUS 研究了这一问题。

横向剪力和转动惯量的影响 刚塑性动力响应的一阶近似理论并不考虑剪力对材料屈服的影响,也不考虑剪切转动惯量对平衡方程的影响。这样的近似对于静载荷情况是比较容易接受的。除了深梁、中厚板、中厚壳以外,在横向静载的作用下,梁、板、壳的内力主要表现仍然是弯矩和膜力。但是,对于强动载荷作用下的结构,无论是理论还是实验都证实,剪力起着非常重要的作用,这就使结构有可能产生剪切破坏模式。根据刚塑性分析的1阶近似理论,梁、板、壳在受到冲击载荷作用时,其载荷作用边界的初始剪力将达到无穷大。Jones 等通过理论分析后指出:(1)受均布冲击载荷的梁、板在支承处可能发生剪切破坏;(2)剪切在结构的高阶模态响应中起着重要作用;(3)剪切转动惯量在刚塑性动力响应中通常不起主要作用;Spencer 和 Jones 对纤维增

强形梁的研究结果表明,对各向异性梁的动力响应,剪力也起着重要作用。

一个有代表性的实例是王仁分析的简支薄板在冲击载荷作用下的刚塑性动力响应。

有限变形的影响 上面所谈到的剪力效应,实际上主要发生在响应初始阶段。与之相比,有限变形的影响却主要发生在响应的后期。随着响应过程的发展,结构发生大的几何变形,由此往往导致膜力逐渐增大。受轴向约束的梁以及板、壳在受到横向动载作用时,这种现象非常突出。一般地说,有限变形影响包含了对两类效应的研究。第1类是指结构在发生几何变形时诱导出的膜力对结构承载能力的影响。在这类问题中,支承对结构内部约束都较强。第2类是指几何构形变化引起平衡方程几何关系改变所造成的效应,这时结构所受的约束较弱,而膜力不起主要作用。

应变率效应 应变率的效应在塑性动力分析中起着极其重要的作用,特别是应变率敏感材料,在强动外载作用下,动态屈服应力比静屈服应力往往高出许多。因此,如果忽略应变率的影响,势必造成模型与实际问题的明显误差。但是怎样估计应变率的影响,使这种估计既能满足一般工程的要求,又不会导致计算过程的过分复杂,却是一个非常伤脑筋的问题。自60年代以来,许多学者为寻求一种简便而可靠的方法做过大量的工作,然而直到今天,这项工作仍然没有得到满意解决。下面几项工作是比较令人振奋的。

(1) Cowper-Symonds 关系的应用, Cowper 和 Symonds 发现材料的动态极限屈服应力(σ_B)与应变率($\dot{\epsilon}$)之间的关系可以通过一个简单的经验公式表示为

$$\sigma_B/\sigma_0 = 1 + (\dot{\epsilon}/D)^{1/P}$$

其中 σ_0 是静态极限屈服应力。在这个公式中只有两个待定常数 D 和 P 。他们经过一系列的实验给出一些材料如软钢、铝合金等的常数数值。很显然这个方程的形式是 Perzyna 方程的一种特殊情况。

尽管 Cowper-Symonds 关系是经验性的,但是已经在塑性动力响应分析中得到了广泛应用,无论是解析结果还是数值结果都表明能够与实验符合。可是这并不等于问题已经解决,事实上,由于在响应过程中结构各点的应变率是随时间和空间而变化的,即使对于非常简单的结构分析过程也很复杂,所以在应用时,通常采取某一特征或平均应变率作为近似估计。这自然就免不了具有一定的人为性。

(2) Perrone 的工作, Perrone 通过对两个单自由度构件塑性动力研究,发现在整个响应过程中动态极限屈服应力可以近似取为一个常数。这个常数由结构产生初始屈服时的应变率来确定(Cowper-Symonds 关系)。他把精确解与近似解做了比较发现误差很小,后来他的结论被实验所证实。

材料和结构中缺陷的影响 在研究塑性动力响应问题时,一般并不考虑结构或材料中可能存在初始缺陷,如几何缺陷、裂纹、损伤、腐蚀等。而事实上材料和结构中存在着初始缺陷是不可避免的。无疑,这些缺陷对结构的响应过程会产生重要影响,在某些情况下它们会导致结构承载能力和最终变形与缺陷结构显著不同。另一方面,缺陷在动载作用下的性质又是断裂动力学的一项研究内容。

余同希和华云龙在分析折梁对突加载荷的塑性动力响应时,发现过去常用的分析方法(即单铰模式)不能给出完全解,在某些条件下梁的部分区段要破坏极限屈服条件,为此他们引进了不稳定铰的概念,实际上这就是对载荷作一个上界估计。华云龙、余同希和 Reid 在对受阶跃载荷作用的阶梁形梁的折梁进行分析时,引入了所谓“双铰模式”,获得了这个问题的完全解。在这一工作的基础上,杨嘉陵和华云龙等把这个模式推广到脉冲载荷的情形,并对含凹槽的直梁的刚塑性动力响应进行了讨论。最近 Reid、华云龙和杨嘉陵又获得了折梁受到面外脉冲载荷作用的完全解。

杨嘉陵和余同希通过分析在均布阶跃、脉冲和冲击荷载作用下,中点含缺陷的简支梁的刚塑性动力响应,发现缺陷对结构响应的影响主要表现在如下几个方面:(1)变形模式与完善结构有明显差异,缺陷处将出现固定铰;(2)缺陷处有明显的应变集中,耗散能分配在缺陷上的比例随着缺口加深而明显增大,这种状况很可能导致缺陷失稳,从而降低结构的承载能力;(3)存在着某些最危险情况,当结构参数满足一定条件时,外界输入能量将全部消耗在缺陷处。

(北京大学杨嘉陵、余同希、王仁撰)

裂纹体弹性波散射 早在19世纪末,数学上非常严格的经典弹性理论已基本趋于完善,并且均匀各向同性介质中弹性波传播的研究也取得了重大的成就,例如1887年Rayleigh表面波的发现以及1876年Pochhammer对无限长圆柱一般振动的精确理论分析,至今在弹性波的研究中仍起着十分重要的作用。但直到二次大战期间,出于了解高速冲击荷载作用下结构性能的需要,弹性动力学才重新得到青睐。到20世纪60~70年代,由于生产和军事上研究地震现象、地下核爆炸、高速撞击的冲击荷载作用下材料和结构的响应等问题的需要;由于人们在开发利用各种应用技术(例如利用弹性波的折射和反射来研究地球的内部结构,查明地层分布和勘探石油资源等,利用超声波进行材料的无损检测和人体检测,利用场发射监视裂纹的扩展,在雷达和声呐技术中利用电磁波和声波的反射准确地确定目标的位置和状态,利用高速撞击产生的应力波研究材料的动态性能,等等)过程中进一步了解弹性波传播特性的需要,使弹性波理论又一次得到了迅速发展,成为固体声学、电磁学、地球物理学、地震工程、无损检测、爆炸力学、动态断裂力学和材料动态性能研究的重要基础。

弹性波的散射理论是弹性波研究领域中的一个重要组成部分。从70年代开始,随着地震探矿技术、定量无损检测技术、雷达和声呐技术的发展以及动态断裂和应力集中等问题的研究,它越来越受到人们关注。尽管从工程应用的观点来看,大量的弹性波散射问题是弹性动力学的反问题,即由测得的弹性波的散射数据进行反推,以确定诸如发射源、介质的密度和弹性常数、散射体的大小、位置和方向等。但是为了能够准确地解决工程中的弹性动力学反问题,首先必须对弹性波散射的正问题进行系统和深入的研究,以便得到其固有的规律和特性,进而对解决弹性动力学反问题提供指导。这就是促使人们在弹性波散射理论方面进行大量研究工作的原因。实际上关于弹性波散射问题研究的历史,一直可以追溯到1863年Clebsch对球状缺陷的弹性波(矢量波)散射的研究,其后Rayleigh总结了他对光的散射以及球体和圆柱体对弹性波(数量波)散射的研究工作,而Lamb对流体中的声波散射问题进行了较为详尽的研究。在Rayleigh的工作以后,虽然声、光、电磁波的散射研究成为物理学中一个相当活跃的领导,但关于弹性波的散射问题,除了部分地震学者稍感兴趣以外,却很少有人问津。直到50年代,人们才重新研究弹性波的散射问题,首先是Nishimura等研究了动荷载作用下弹性体内球形孔洞周围的应力集中问题,紧接着Ying等研究了多晶固体内平面纵波的散射问题。后来的许多研究工作主要集中在低频稳态波的散射和应力集中问题上,以及集中在瞬态入射脉冲的响应等问题上,这一时期的工作Pao等有较详尽的总结。而从60年代开始,随着断裂力学的发展,研究在弹性波作用下裂纹尖端的力学行为成了许多力学工作者关心的一个热点,并随着定量无损检测技术的发展,裂纹体弹性波散射的远场特性研究日益受到人们的关注,并出现了大量关于这种研究的文献,它已成为当今应用力学界一个较为活跃的前沿课题。

裂纹体弹性波散射问题的数学处理较为复杂,许多学者各自使用不同的方法对各种问题进行相应的研究,而最常用的方法有积分方程法和射线法。积分方程法是从弹性动力互等原理出发或直接积分变换入手,将问题转换为对积分方程的求解而得到问题的解答。积分方程一般可以分成两大类,一类是Fredholm

积分方程;另一类是具有Cauchy型积分核的奇异积分方程。射线法是把波动方程中的势函数取成级数形式,该级数具有未知的振幅和相位函数,在高频下得到相位函数满足程函方程,而振幅函数满足输运方程。该方法在入射波频率较高时能得到较为理想的结果,Achenbach等对该方法进行了较为详细的阐述。另外还有Green函数法,数值分析法等。由于在一般情况下得到的散射场往往十分复杂,分析应用都十分困难。而对裂纹的弹性波散射问题通常最关心的是在裂尖附近散射场的力学行为和远离裂尖处散射场的渐近特性。因此问题通常表述成以下两大类:一类是通过极限分析反映出裂纹尖端的应力强度因子或裂纹张开位移随入射波频率的变化特性,另一类是通过渐近分析反映出散射场在远离裂尖时其幅值随入射波频率变化的幅频特性。

均匀介质中单一裂纹弹性波散射的二维问题研究。事实上Fridman的工作已经开始关于裂纹的弹性波散射问题的研究。De-Hoop应用积分变换研究了半无限长裂纹对平面波的散射问题,并给出了在时域的全部精确解。但是在后来相当长的时间内,这方面的研究工作进行得很少。

60年代末,G. C. Sih从研究裂纹尖端的力学行为出发,首先对裂纹的弹性波散身问题进行了大量富有成效的研究工作,得到了许多关于裂纹尖端应力强度因子在时域或频域内的结果。这些研究工作包括:有限宽裂纹对弹性波散射的研究,硬币形裂纹对垂直入射的膨胀波和扭转波散射的研究,弹性板内穿透裂纹对弯曲波散射的研究,运动裂纹对剪切波散射的研究,Griffith裂纹对突加载响应的研究以及硬币形裂纹对突加载矩响应的研究等。

由于单一裂纹的弹性波散射是一个最基本的问题,因此它首先受到许多力学工作者的关注。在这方面Achenbach等用射线法和积分方程等方法,对半空间中各种裂纹在P波、SV波、SH波、Rayleigh波、Love波等入射时的散射问题分别进行了研究。他们的工作不只局限于研究裂纹尖端的动态应力强度因子,同时还研究散射位移场在远离裂尖时的所谓远场特性,他们还利用这种力学模型研究由于断层面上滑动而激发的地面运动的近场和远场特性。Robertson运用积分变换方法研究了无限介质中硬币形裂纹对P波的散射问题,并给出了在裂纹中心位置裂纹面张开位移的幅值随入射波频率的变化曲线。Mal研究了Griffith裂纹对垂直入射的纵波及反平面剪切波的散射问题以及硬币形裂纹对垂直入射的纵波及扭转波的散射问题。他主要分析了裂纹尖端应力强度因子及裂纹面的张开位移随入射波频率的变化规律。Ryan和Mal研究了半空间中次表面裂纹对反平面剪切波的散射,主要分析了裂纹离自由面的距离与裂纹长度的比值对裂纹尖端应力强度因子及裂纹面张开位移的影响。van der Hilden和Neerhoff利用积分方程法研究了无限介质中有限宽裂纹对P波和SV波的散射,得到了能量散射及应力强度因子随入射波频率的变化特征。还有许多学者采用各种不同的方法从各个不同的侧面对这一类问题进行了研究。

到目前为止,对均匀介质中单一裂纹弹性波散射的二维问题可以说已基本解决,虽然其力学模型与真实裂纹的弹性波散射问题有较大的差别,但是这些结果却有助于认识在裂纹体中弹性波的传播规律,促进弹性动力学的发展以及弹性波散射反问题的研究。

均匀介质中单一裂纹弹性波散射的二维问题研究。存在于介质中的裂纹形状往往是不规则的,数学处理极其复杂,因此,研究时首先以硬币形裂纹模型代替真实裂纹,使所得结果更具有实际意义。

对于硬币形裂纹的研究,Sih,Robertson和Mal等的工作进行得较早,但他们只局限于研究入射波垂直于裂纹面的情形,因而可将问题转化为轴对称的二维问题。Martin首先研究了无限介质中硬币形裂纹弹性波散射的一般情形,他引入一个称为弹性双层的概念(类似于弹性动力学中的简谐双层势),并证明了散射位移场的解可由满足一定条件的弹性双层来表示。然后他定义了一个关于裂纹面张开位移的Green函数,并给出了关于求解该

函数的第 2 类 Fredholm 积分方程。但是其 Fredholm 解极为复杂,后来 Martin 和 Wickham 对该积分方程进行了数值求解,并对 P 波,SV 波的散射位移场在远离裂纹时的幅频特性给出了数值计算结果。Roy 和 Adler 分别对椭圆形裂纹的弹性波散射问题进行了理论分析和实验研究。由于三维问题在数学处理上存在困难,以致至今所得到的解析结果仍较少。

近年来随着数值分析方法的发展,边界积分方程已成为处理裂纹弹性波散射三维问题的一个重要工具。Visscher 首先采用边界积分方程法,研究了无限介质中任意形状平面裂纹对弹性波的散射问题,结果发现当用低频波入射时,只有用非常精确的实验才有可能区分硬币形裂纹和一般形状的裂纹。这是因为只有当入射波的波长与裂纹尺寸处于同一量级时,才能从与散射场干涉的峰谷中给出关于裂纹形状的信息。Badreck 和 Achenbach 采用同样的方法对平面裂纹的散射问题进行三维分析,研究了硬币形裂纹和椭圆形裂纹对中频和高频弹性波的散射问题。结果发现,当入射波的频率足够高时,椭圆形裂纹与硬币形裂纹的散射场具有明显的差异。裂纹弹性波散射的三维分析是一个较为困难的问题,现有的结果很多,许多问题还有待作进一步的研究。

表面裂纹弹性波散射问题的研究。表面裂纹较常见却又较难处理,对结构破坏来说,它们的危险性通常都较大,因而研究表面裂纹对弹性波的散射问题受到力学工作者的普遍重视。

Datta 首次给出了在低频下,半空间中表面裂纹对反平面剪切波散射的近似解。后来 Datta, Shah 和 Fortunko 采用杂交有限元法进一步对该问题进行了深入的研究。Mendelsohn, Achenbach 和 Keer 分析了垂直自由边界的表面裂纹对表面波的散射问题,他们利用 Chebyshev 多项式展开得到了积分方程的级数解。另外, Achenbach, Gantesen 和 Mendelsohn 采用高频射线法对同一问题进行了研究。Datta 和 Shah 研究了与自由表面成 45 度角的斜裂纹及 Y 形的分叉裂纹对超声波的散射,而 Shah 等采用杂交有限元技术和解析相结合的方法研究了它们对弹性波的散射问题,并给出了裂纹附近散射场的表面位移场及裂纹尖端应力强度因子的计算结果。Angel 等就垂直于自由边界的表面裂纹对其斜入射的 Rayleigh 表面波的散射问题分别进行了二维和三维分析。他们巧妙地将问题分解为对裂纹面上位错密度函数的奇异积分方程。最后在频域内给出了裂纹尖端应力强度因子、反射和透射系数以及辐射到介质内部的时间平均能流的数值结果,并发现当入射角超过某一临界值时,辐射到介质内部的能量为零。而 Zhang 和 Achenbach 用边界积分方程法详细地研究了与自由边界成任意 α 角表面裂纹对 Rayleigh 波的散射问题,并用边界元进行了数值求解。由结果得知,裂纹面与自由边界的夹角对散射场有十分明显的影响。Angel 利用积分变换技术研究了表面裂纹对 Love 波的散射问题,结果表明,其散射场的远场形式只是有限个模态的 Love 波的叠加。他给出了前三阶模态的反射和透射系数与入射波频率的关系曲线,另外还有许多学者对表面裂纹的散射问题进行了大量的实验研究。

总的来说,目前对表面裂纹的弹性波散射问题已进行了大量的研究工作。然而研究工作基本上局限于二维的平面应变问题,至于如半圆形或半椭圆形表面裂纹的三维分析,还未见到研究结果。

在弹性波导情况下裂纹的弹性波散射问题的研究。在工程实际中,有的结构尺寸在某一方向上的尺寸比其它方向上的尺寸小得多,当弹性波在这类结构的介质中传播时,在边界上来回反射在有限方向上,形成驻波形式向前传播的所谓弹性波导。在弹性波导情况下,边界对散射波的反射使问题变得十分复杂。Srivastava 等首先采用积分变换方法,研究了无限长圆柱体中硬币形裂纹对简谐 P 波的散射问题,并主要分析了裂纹尖端动态应力强度因子,随入射波频率的变化规律。而 Dhaliwal 等采用相似的方法,研究了无限长圆柱体内环形裂纹对扭转波的散射问题。Chen 和 Itou 分别研究了有限宽弹性带内中心裂纹对反平面剪

切及平面压缩冲击载荷的动态响应;而 Srivastava 研究了有限宽带内中心裂纹对 SH 波的散射问题,并发现只有当入射波频率小于某一临界值时,散射波才能在带内传播,而这一临界值又与带宽有关。Wassef 应用 Green 函数求解矩形条中裂纹受分布简谐力作用的问题,进一步考虑了一般形式体积力的影响,分别对裂纹面上受均布稳态载荷作用及受 Dirac's delta 函数分布的简谐波作用的情况进行了研究,采用 Green 函数及 Fourier 展开的方法得到了问题的解答。Boriskovsky 应用自由振动模态分析的方法,研究了带裂纹的有限宽板受简谐波作用问题,他通过加权求和得到应力强度因子,并进行了数值计算。Mikata 等运用 Hankel 变换和 Laplace 变换,在 Laplace 域内求解了厚壁圆筒内环形裂纹对扭转冲击载荷的动态响应。他经过数值反演,给出了裂纹尖端动态应力强度因子,随时间的变化曲线。

Zhang Zimao 等分析了简谐纵波作用下厚壁圆筒内环形裂纹尖端应力强度因子,随频率的变化规律。

以上关于弹性波导情况下,裂纹的弹性波散射问题的研究,大都只研究了裂纹尖端附近散射场的一些特性,并且以最简单的反平面剪切及扭转问题居多,而对于远场特性的研究十分不够。因此有许多问题还有待于进一步研究。

界面裂纹弹性波散射问题的研究。非均匀介质在工程实际中是十分常见,如地壳、层合板、复合材料层板等。而在不同介质之间,由于各种原因引起的缺陷如夹杂、裂纹等成为结构破坏的主要原因。因此,对不同介质界面裂纹的研究,首先引起了断裂力学工作者的注意,而随着复合材料在工程中的大量应用,关于界面裂纹的弹性波散射问题也越来越受到人们的重视。从 70 年代末, Srivastava 等研究两个半空间的界面裂纹受简谐载荷作用的简单问题开始,至今在界面裂纹的弹性波散射问题方面已取得了不少很有意义的研究成果。

首先是 Neerhlf 研究了加层半空间界面裂纹对 Love 波的散射问题,并分析了散射波的远场特性。Yang 和 Bogy 对加层半空间界面裂纹的弹性波散射问题进行了较为详细的分析。他们首先利用 Green 定理得到关于散射位移场势函数的奇异积分方程,并进行了数值求解,最后在频域内给出了裂纹尖端 I 型、II 型应力强度因子的计算结果;同时讨论了裂纹长度与加层厚度比对裂纹尖端应力奇异性的影响。Gracewski 和 Bogy 进一步研究了浸没在水下的加层半空间界面裂纹对弹性波的散射问题,这一模型对研究水下结构的动力学响应应具有一定的参考价值。Kuo 研究了两个正交各向异性半空间界面裂纹对冲击载荷的响应,给出了裂纹尖端瞬态应力强度因子随时间的变化曲线。Kundu 的工作主要研究了双层板中界面裂纹对反平面冲击载荷动态响应的近场动力学特性。在以上的工作中,当考虑界面裂纹对 P 波,SV 波的散射场时,在裂纹尖端附近存在着振荡奇异性问题。王晓东采用在裂纹尖端存在局部接角区的力学模型,研究了多层介质中界面裂纹的弹性波散射问题。这种方法消除了散射场在裂纹尖端的振荡奇异性,得到了应力强度因子及裂纹面张开位移的计算公式,并给出了数值结果。

对于界面裂纹弹性波散射的远场特性,Boström 研究了两个半空间界面裂纹对 SH 波散射的远场特性。他用裂纹面的张开位移作为未知函数得到积分方程,再利用 Chebyshev 多项式得到级数解,并对散射波进行了远场分析。另外,马兴瑞对层状介质中界面裂纹的 P 波、SV 波散射问题进行了较为详细的研究。他利用传递散射矩阵得到了任意多层介质中单一裂纹(包括平面应变的穿透裂纹及硬币形裂纹)的散射对偶积分方程,并对加层半空间界面裂纹的弹性波散射问题进行了较为深入的探讨。同时利用 Jacobi 多项式得到关于裂纹面张开位移密度函数的级数解,不仅分析了散射场在裂纹尖端附近的动力学特性,对其远场特性也进行了渐近分析,得到了许多有价值的结果。

多个裂纹的弹性波散射问题的研究。介质中存在的裂纹在实际问题中往往不一定是单个的,如在主裂纹附近出现的微裂纹,由加工工艺引起的周期性裂纹等。而对于多个裂纹的弹性波

散射问题,由于相互干扰使得散射波无论在近场还是远场的行为都有很大的变化,并在数学处理上也变得更为复杂。然而由于实际问题的需要,近年来在这方面的研究工作亦有较大的进展。

对于多裂纹问题的处理,首先由 Jain 和 Kanwal 对无限介质中共面双 Griffith 裂纹的弹性波散射问题进行了研究,但其结果只适用于低频时的情况。Itou 研究了无限介质中共面双裂纹的动态应力集中问题,并研究了无限介质中共面双裂纹的 SH 波散射及双矩形裂纹冲击载荷的动态响应问题。后来这方面的文献较少,但在近几年间又有了新的进展,首先是 Gross 和 Zhang 研究了无限介质中多个裂纹系对 SH 波的散射问题,并以双裂纹为例,给出了大量关于应力强度因子的数值结果。从数值结果可见,当两个裂纹间的距离减小时,散射场相互作用的增强使得裂纹尖端应力强度因子的峰值增大。

Zhang 和 Achenbach 运用位移 Green 函数和边界积分方程的方法,研究了无限大介质中双裂纹的弹性波散射问题,分析讨论了散射波的远场特性,并用边界元法进行了数值计算,得到了一些有参考价值的结论。Huang 和 So 采用位错模型对无限介质中任意位置的两个裂纹的 P 波、SV 波散射问题进行了研究,并主要分析了裂纹间的距离对应力强度因子的影响。Huang 和 So 还采用同样的方法对多个裂纹的 SH 波散射问题进行了类似的分析研究。

而对多个界面裂纹的弹性波散射问题,目前所得的结果还不多,只有 Kundu 等人对最简单的 SH 波进行了研究。章梓茂等研究了层状介质中任意多个非共面交界裂纹的弹性波散射问题,利用积分变换,给出了关于 P(SV)波及 SH 波散射的对偶积分方程,并对双覆盖层半空间的两个非共面交界裂纹的 SH 波散射进行了较为详尽的分析,给出了散射场在近场和远场的特性曲线;另外章梓茂等对硬币形裂纹进行了类似的分析,并与 Griffith 裂纹进行了比较。Achenbach 等对无穷介质中周期裂纹的弹性波散射问题进行了较为深入的研究,分析了入射波垂直于裂纹面时的情况;运用有限 Fourier 变换技术将周期性边值问题转化为带周期核的奇异积分方程,再用 Chebyshev 多项式展开得到级数解;还着重分析了在裂纹面上反射系数和透射系数的频率特性,同时发现当入射波频率一定时,散射波在远场的形式只能是有限个模态的叠加;后来进一步研究了斜入射时的散射问题,这时在裂纹面上的反射和透射波存在的波型转换使问题变得更加复杂。他们发现,在含有双周期分布裂纹的介质中,对入射波而言存在着两种频带,一种称为通过带,当入射波频率在这一频带范围内时,入射波能够通过裂纹面而传播;另一种称为停止带,当入射波频率在该频带范围内时,将无法通过裂纹面传播。邹振祝等研究了两个半空间周期界面裂纹对 SH 波的散射问题,结果发现,对于任何频率的入射波,散射波场在远离裂纹时,至少存在一个常幅值的 SH 波。而随着入射波频率的提高,在远场将激发出多个高阶的散射波,其振型为余弦函数,并且高阶波的波速大于低阶波的波速,所以在远场的散射波具有弥散性。

总的来说,裂纹体弹性波散射问题的研究是当前许多力学工作者十分关心的课题。随着弹性动力学反问题研究的深入及定量无损检测等应用技术的发展,对弹性波散射正问题的研究提出了更多的新要求,还有许多工作有待于进一步深入研究。

(北方交通大学章梓茂、陈英俊,哈尔滨工业大学马兴瑞、邹振祝撰)

中国管状接头应力分析进展 早在 20 世纪 60 年代以前 Bijlaard 与 Dundrova 就提出用解析法进行管状接头的弹性分析。由于数学上的一些困难,分析只局限于 T 型管接头及共弦管接头上的应力分布。支管传给弦管的载荷则根据一些经验假设。因此,这些分析应该说具有一定的经验性。管状接头弹性分析的半解析法则由 Scordelis 首先提出。他假设沿交贯线的弦管垂向位移是均布的,其值与支管上端部的垂向位移一致,即认为支管是一个刚体。陈铁云认为这个假设只对直径 $\beta = d/D$ 小于

0.25 时才合适。Scordelis 的分析也只局限于 T 型管状接头。陈铁云及其同事们舍弃了这个刚体假设,将 Vlasov 位移函数展开成单三角级数来求解弦管(薄壳)的 8 阶微分方程(Love-Timoshenko 方程),并提出“拟子结构”模型。这样就找到了沿着交贯线的离散传递力,由此编制了相应的计算机程序 JST-I,并分别用本程序及 Scordelis 方法对陈铁云等自制钢质模型 No 进行计算。结果表明,我们的计算结果远较 Scordelis 的接近试验结果,达到了计算结果与试验结果基本一致。但是 JST-I 如 Scordelis 法一样只适用于 T 型管状接头,而且只局限于弦管的应力分布。为了克服这些局限性,我们同时考虑了垂向传递力与水平方向的传递力,并将交贯线离散成有限个小微块,支管与弦管被认为是独立薄壳。支管与弦管的位移函数则分别在各自轴向与周向展开成双三角级数。将这些双角级数代入薄壳的平衡微分方程就可求得这些级数的系数,同时注解这些薄壳平衡方程,就可求得交贯线处的传递力、传递力矩以及支管与弦管的应力分布。适用于 T, Y, K 型接头的相应程序称为 JSK-I。K 型接头可以当作两个 Y 型接头来处理。为使 JSK-I 能扩大应用于支管端部受有面内弯矩与面外弯矩的情况,我们用虚功原理代替薄壳的平衡方程,并在交贯线上先取有限个节点,导出了每个子结构(支管、弦管)的对称柔度矩阵,形成管接头的总柔度阵,经过约束处理使得支管、弦管的节点力、位移与应力分布。同时编制了 JSK-I, JSK-I 与 20 节点三维有限元相结合可以用来计算管状接头焊缝及其附近的应力分布。它较二维有限元、三维有限元相结合的方法更节约 CPU 时间。将 Vlasov 位移函数在周向展开成单三角级数,并采用初参数法求解弹性薄壳的 Donnell 方程,得到了具有加强段(jointcan)的弦管应力分布。由于支管的传递力是经验值,所以计算结果也就具有一定的经验性,对 JSD-I 稍作修改就可用来计算具有圆环加强的 T 型管状接头与搭接接头等复杂管状接头的应力分布,后者提出了复杂的交贯线方程,其相应程序为 JSD-IV。

Greste 早在 70 年代就指出用有限元法进行管状接头的应力分析。中国在 80 年代,也提出了用不同类型的有限元进行管接头的应力分析。一种高精度具有 54 个自由度的三角形圆柱厚壳单元对计及剪切变形影响的 T 型管接头进行了应力分析。通用结构程序 SAP5 也曾用来进行管接头应力分析以校验半解析法的精确性。中国船舶科学研究中心对圆环加筋的关系式以及圆环筋的有效性。石理国、姚木林用 SAP5 程序计算了内环加强的型管接头的应力集中系数,并对钢模进行了电测,又作了光弹性模型试验,提出了参数修正法。

上述这些分析和试验都仅限于平面管状接头,对于 K 型和 X 型管接头,两支管上的载荷组合形式的,由于这些分析有接头形式和支管受载形式的局限性,因此无法用来确定复杂载荷条件下支管接头,尤其是空间多支管接头的应力集中系数。事实上,近海平台结构中的大部分接头具有多根支管,这些支管往往不在与弦管构成的同一平面内。例如,常见的四腿导管架平台,其立管上的接头处(角接头)一般为 4 支管或 6 支管接头,各支管之间存在着刚度效应以及载荷相互作用效应。因此,其应力分布和应力集中现象将与平面单支管接头有较大的差异。空间接头的应力分析不可能由平面接头应力分析取代。在现阶段的管接头设计中,由于缺乏空间多支管接头应力集中的研究资料,就将空间接头当作平面接头来处理,或借助已有的关于平面接头应力集中系数的经验公式来确定空间管接头的最大应力。这种处理方式的合理性与安全性是有待研究的。另一方面,作为处于波浪中的平台结构,其管状接头支管上的载荷在一个波浪周期内随时间而变,因此相当复杂。对某一根支管来说,其载荷分量的大小和方向将有所不同;对接头中各支管来说,其载荷分量的大小和方向将有所不同;对接头中各支管来说,它们之间的载荷组合形式也将不断变化,而不是某种指定的比例关系。现有的研究中,对应于单一载荷或某种载比时的组合,载荷下的接头的热点应力及其位置不能客观地反映出复杂载荷条件下接头的最大应力。

由于工程设计的需要,管状接头的应力分析正朝着多支管

的、空间性的、受组合载荷作用的方向发展。Wordsworth 首先对空间两支管的 DT 型接头进行了实验应力分析,揭示了异面载荷的相互作用对热点应力的影响,有限元被认为是空间管接头应力分析的主要手段。中国学者在这方面也作了不少工作,中国科学院力学研究所编制了空间管接头有限元分析程序。他们将空间管接头离散成若干个子结构或超单元,采用 20 节点的厚壳三维元和降维技术,该程序具有网格自动生成的功能。朱福根等用 SAPS 计算了近海平台空间 DT 型管接头的应力分布。但由于接头几何形状和载荷比较复杂,有限元分析中未知数的数目很大,刚度矩阵的带宽也较大,故对计算机及其内存有较高的要求,计算费用昂贵,不能广泛应用。为此,国外一些学者通过实验和有限元计算寻求一些经验公式来计算空间管接头的应力集中系数。如 Efthymiou 提出的用影响函数表示一根支管上的载荷引起的在另一根支、弦管交贯线上的应力大小。Romeyn 对平面 X 型和空间 DX 型接头进行了实验研究,比较二者之间应力集中系数上的差异,他又根据有限元分析提出确定 DX 型接头交贯线上冠点和鞍点上应力的经验公式。但是这些函数与经验公式都有它们的局限性,因此,尚须寻求一种能确定空间管状接头应力集中系数的既经济又可靠的计算方法。陈铁云和张惠元提出一种任意组合载荷下空间多支管接头应力分析的半解析法。根据半解析法原理,陈铁云编制了相应的计算机程序“SAMTJ”。用此程序陈铁云及张惠元对 Romeyn 进行试验用的 DX 接头钢模进行了计算。计算结果与试验值、与用 Efthymiou 影响函数所得的计算值以及用有限元法所得的计算值(Romeyn)进行了比较,为了与平面管接头相比较还计算了 X 型管接头的应力。除 X 接头的轴向载荷下弦管鞍点应力及面外弯矩下的支管鞍点应力与试验值相差较大外,其余情况都与实验值很接近。同时,通过计算还发现,DX 型管接头异面轴向载荷对接头的 SCF 影响很大。如果两根支管受拉,另两根支管受压,则 DK 接头的 SCF 值将高达 47.65,这个值为相应 T 型接头 SCF 值的 2.3 倍($SCF_T = 21.36$),为平面 X 型接头的 1.5 倍。可见把空间管状接头当作平面管状接头来处理有时会导致危险的结果。对于组合载荷作用下的空间多支管接头,我们还提出了应力集中系数矩阵的概念。用这个概念能一目了然地反映出多支管接头的载荷相互作用效应的大小,解决了常规的 SCF 概念在多支管接头受组合载荷作用时,不能很好反映应力集中程度的困难。

近海平台管状接头的柔性行为导致总体管状结构的过大变形、结构内力的重新分布、构件临界屈曲载荷的减小和结构振动频率及其模态的改变。因此,近年来管状接头的这种局部柔性以及它对结构总体分析的影响引起有关方面普遍的关注,已成为管接头领域的新课题。美国的 API 和挪威的 DNV 在他们的设计规范中都要求平台结构分析时考虑接头的局部柔性。

Fessler 和 Spooner 对管状接头进行了一系列环氧树脂模型的实验研究,并根据实验结果提出了 T/Y 型接头在轴力、面内弯矩或面外弯矩作用下局部柔度系数的经验公式,并进一步在 6 个多支管模型试验结果的基础上提出了 T 型接头在面内弯矩和面外弯矩载荷下的局部柔度经验公式。Ueda 采用一组梁单元来反映接头各部分的变形特征和传力功能,建立了较为简洁的柔性接头模型。Holmas 等将接头等效成一个用来连接弦管与支管径形的变形单元,并近似求解了该变形单元的刚度。另外 Efthymiou 和 Romeyn 用有限元法研究了管接头的局部柔性。笔者与他的学生们用半解析法计算了 Holmas 和 Ueda 接头模型中 T/Y 和 TY 接头的柔性系数,并探讨了接头的柔性对平面总体结构分析的影响。陈伯真等利用平面管接头半解析应力分析程序 JSK-1, JSK-1 按 Fessler 模型计算了 T/Y 和 K 型的局部柔性,给出了这种接头的柔度系数经验公式,还进行了 T 型接头的钢模试验,但试验结果偏离经验公式太远。综上所述,确定平面管接头的局部柔度主要手段为试验、有限元法或半解析法。但面对空间多支管接头,局部柔性的研究还不够充分。在空间结构分析中考虑接头的局部柔性将更有意义。

在恶劣的巨浪环境中,近海平台将承受严重载荷。同时管状接头交贯线附近的很大一部分区域将出现塑性变形,这将导致低周疲劳(或延性断裂)。为此对管状接头进行弹塑性分析就甚为需要。用解析法进行管状接头的弹塑性分析难度很大,目前对管状接头进行弹塑性分析多半是借用如 Adina 等通用结构程序。中国船舶科学研究中心曾用 Adina 计算了 T 型管接头的弹塑性变形,其计算费用极其昂贵,所以编制新的管接头弹塑性变形的专用程序是颇具实用价值的。

在圆柱薄壳上形成的 15 个参数与 20 个参数的耦合元具有列式简单、收敛快、CPU 时间短及满足刚体模式等优点,常被用来进行管接头的弹塑性分析。薄壳元的物理矩阵是由于单元模型集成,从而可得薄壳元的物理矩阵与子单元弹塑性矩阵之间的关系式。同时用高斯消去法时,采用顺序-逆序修正法以便在每一载荷增量中只求解塑性区的静力平衡方程。用丁管接头的各薄壳在支管与弦管的交贯线上,进行组合情况的相应程序称为 JSK-VI。它具有网格自动分割的前处理程序,用此程序对支管端作用下的钢模 ST-4 与 ST-5 进行了数值计算,求得在不同载荷下热点的塑性应变。JSK-VI 与通用结构有限元程序相比,具有输入数据少、CPU 时间短等优点,但 JSK-VI 只适用于弦管的小挠度范围,塑性节点法则用来求解弦管具有大挠度情况时的管接头的弹塑性分析。文中将塑性节点法稍作修正用来构造杂交应力三角形扁壳元的非线性(物理与几何非线性)的列式,并编制了相应的程序 JSK-VII。用此程序计算了钢模 ST-1、ST-4、SY-2、SK-2G 与 SKO-1 的弹塑性变形。

尽管管状接头遭受最大载荷状态的概率很小,百年一遇,但还是必须把它设计成能承受最大设计静载荷的结构。目前中国有许多有关管接头最大强度的试验数据,但理论计算方面只有少数利用 Adina 计算的结果,而且这种计算花费人力、物力太大。陈铁云、刘勇辉根据一般壳体极限分析的而且变分原理求得了支管受有轴向载荷的 T 型管接头的极限载荷上限值,再用非线性规划求得最佳上限值;同时对钢模 ST-2、ST-3、ST-4 与 ST-5 进行实验研究,在这些试验中观察到了塑性区(运动可能场)的形成与扩展,这对理论分析中的塑性区生成的假设提供了基础。所编制的相应程序称为 JSK-IV,按这些程序所计算的极限载荷与试验数据相当接近。管接头在外载荷作用下,形成的运动和能场在数学上列式很困难,这造成了用一般变分原理来寻求 Y、K 型及更复杂接头的极限分析式的困难性。为节约计算机内存,把结构离散成若干刚性区与塑性区,只在塑性区进行网格分割,而通过拉格朗日乘子法又将原来的规划问题变成一个无约束的新的规划问题。令目标函数的梯度为零,通过目标函数的极小化与叠代法可得一组合适的位移速度场,从而求得结构最大载荷的上限值。通过柱壳与 T 型管接头的数值计算表明数值计算结果与经典解或试验数据相当接近。为此编制的程序称为 JSK-V。支管端受轴压作用的钢模 ST-1、SY-1 及支管受拉-压作用的钢模 SK-4 的极限分析,在 JSK-V 基础上编制成 JSK-VI。通过对任意收集到的 40 个试验数据用 JSK-VI 进行计算并与用 API, Reber, Pan, Yura, JSSC, Kurobane 等经验公式计算的结果作比较分析及可靠性分析。分析结果表明,用 JSK-VI 估算管接头的最大承载能力比用上述经验公式更为可靠。石理国、姚木林也计算了单内环加强的 T 型管接头的极限承载能力。上海海洋石油设计工程公司顾宏鑫于 1988 年采用圆环模型、理想弹塑性材料以及热点断面的屈服条件,对支管承受轴力和弯矩作用时管接头的承载能力进行了非线性交互影响的分析,并与现行 API 标准进行了比较与评议。最近顾宏鑫与陈铁云进行了把这套分析引伸到支管承受轴力、面内弯矩与面外弯矩联合作用情况的讨论,并提出了新的改进公式。

(上海交通大学陈铁云撰)

断裂动力学 断裂力学的一个新分支,是涉及惯性效应的断裂力学。惯性效应有许多种,最重要的直接影响断裂现象的有

两种:(1)外力(载荷)随时间迅速变化;(2)物体中的缺陷发生快速扩展。在这两种情形中,惯性效应都必须考虑。例如,在日常生活中,人们用一个静力使一个物体分成两半,往往不容易做到,但若用幅值同静力一样大小的力撞击这个物体,却可能容易地使这个物体分成两半。这说明迅速变化的外力与静止的外力在造成物体断裂方面产生的效果是不一样的。

现代工业发展的趋势,造成大型工程结构日益增多,其中多数处在动态载荷作用下。有一些大型结构,例如大型水坝,大型船舰、石油与天然气的输送管道、核反应堆压力容器、飞行器等,不仅规模大,处在动态载荷作用下,而且安全性能绝对重要。用线性弹性断裂力学对这些结构中已经存在或可能存在的裂纹的静态起始扩展进行分析,或用弹塑性断裂力学对裂纹的缓慢扩展进行分析,并且提出相应的防范措施,已起到了很好的保障作用。但是在受到加载速率很高的载荷作用下,或结构中的裂纹发生快速扩展时,线性弹性断裂力学和弹塑性断裂力学便将无能为力。为了解决这些问题,断裂力学的这个新分支——处理惯性效应的断裂力学,即断裂动力学发展起来了。

最早研究断裂动力学的是英国著名物理学家、诺贝尔物理学奖获得者 N. F. Mott。他于 1948 年提出动态断裂问题,认为应该在 Griffith 判据中增加动能项,以便使之适用于动态断裂问题。1951 年,英国女科学家 E. H. Yoffe 第一次研究了运动裂纹问题。从那时起至今,断裂动力学的发展走过了漫长的路。以应力强度因子及其判据为物理基础的现代断裂力学的发展,可以以 1957 年作为一个标志,这门学科的形成大约在 20 世纪 50 年代末或 60 年代初,而断裂动力学作为一个科学而建立起来,则更晚。范天佑认为大约是在 70 年代中后期,因为只有从这时起,有关动态断裂的基本概念才逐渐达到科学化的标准。

根据目前比较公认的观点,断裂动力学主要包括两个方面的内容:(1)裂纹稳定。外力迅速随时间变化,这里的外力是一种广义的力,既包括直接作用到物体上的冲击载荷,也包括波动(爆炸波、地震波等)对物体的作用,这时研究裂纹的动态起始扩展;(2)外力随时间变化不明显,而裂纹发生快速传播。这时研究裂纹的传播与裂纹的止裂。

针对上述两个方面的问题,断裂动力学已经取得了相当的进展,并且已经开始用于解决生产实践中的问题和基础研究方面的问题。

断裂动力学与普通断裂力学(或称断裂静力学)的不同在于前者考虑了惯性效应,这里惯性效应是通过应力波这种物理过程而影响断裂现象的。应力波的传播在数学上由波动方程组控制。要得到描写高速载荷(包括弹性波)作用下稳定裂纹或恒定载荷作用下的快速传播裂纹的物理状态,就必须求解裂纹顶端的动态应力强度因子 $K_I(a, \sigma, t)$ (对于 I 型裂纹而言),其中 a 代表裂纹的特征尺寸, σ 代表工作应力(或工作应力的幅值), t 代表时间。为了得到这种动态应力强度因子,必须在适当的初始条件和边界条件下求解上述波动方程组。在这种计算工作中,发展了一些有效的数学方法,其中积分变换——积分方程法扮演了一个主要角色,和大型高速电子计算机相结合,有限差分法和有限元这些数值方法也很有效。目前已经得到了一定数量的动态应力强度因子的计算结果。

对于受冲击作用的稳定裂纹,在每一种材料, $K_I(a, \sigma, t)$ 都具有一个临界值,记为 $K_{ID}(\dot{a}, T)$,称为动态断裂韧性,是一个材料常数,其中 \dot{a} 代表加载速率 $= d\sigma/dt$, T 为温度,当

$$K_I(a, \sigma, T) = K_{ID}(\dot{a}, T) \quad (1)$$

则裂纹处于临界状态,若 $K_I(a, \sigma, t) > K_{ID}(\dot{a}, T)$, 则裂纹临界扩展。这样人们就建立起第一个动态断裂临界条件(或动态断裂判据)。 $K_{ID}(\dot{a}, T)$ 可由不同的实验方法测得。美国材料与试验协会和德国的材料与试验协会先后提出了建议的测试方法,用于测量 $K_{ID}(\dot{a}, T)$ 。

对于快速传播裂纹,对每一种材料, $K_I(a, \sigma, t)$ 也存在一个临界值,记为 $K_{ID}(\dot{a}, T)$,也称为动态断裂韧性,是一个材料常

数,其中 $a = V$ 代表裂纹扩展速度, T 为温度,人们建立起第二个动态断裂判据,即

$$K_I(a, \sigma, t) \leq K_{ID}(\dot{a}, T) \quad (2)$$

其中等号表示裂纹传播,小于号表示止裂。以这个判据为基础发展起来的止裂设计,在工程应用上具有重要的意义,也就是采用各种措施,防范可能发生的裂纹快速扩展;因为快速扩展,将导致灾难性的后果。措施之一是降低动态应力强度因子 $K_I(a, \sigma, t)$ 的值;措施之二是提高动态断裂韧性 $K_{ID}(\dot{a}, T)$ 的值以及其它的一些工程措施。由于这一问题在民用与军用工业上的重要意义,从 70 年代后期开始,在工业和科学发达的国家投入了不少人力与物力进行研究。突出的是 1977 年 3 月至 1980 年由 12 个工业国的 30 个重要的实验室联合研究“裂纹止裂测试方法”的合作项目。美国的材料与试验协会 1983 年提出了“ $K_{ID}(\dot{a}, T)$ 测试的建议的规范”。另一个例子是美国与加拿大之间天然气输送管道,曾在 70 年代发生过严重的破裂事件,美国组织了不少实验室进行了分析研究,提出了止裂的措施。

上面提到断裂动力学的基本原理及其在工程中的应用。断裂动力学在材料科学中的应用也同样重要,其中上面提到的 $K_{ID}(\dot{a}, T)$ 与 $K_{ID}(\dot{a}, T)$ 本身就是材料常数,同材质、成分、组织结构、热处理过程及其环境因素密切相关,一方面它们是评价材料性能的参量,同时材料在设计、制造及处理过程中进行一些优化,对提高 K_{ID} 与 K_{IC} 值能起很大作用。

断裂动力学在声学中也有重要应用。固体介质中的裂纹对声波的散射,是声学的一个基本问题,同时在无损检测方面又是一个重要的手段,而无损检测在实践的重要意义是人所共知的。

现代地震学表明,地震(尤其是构造地震)的发生是断层快速错动的结果,断层就其力学性能上看,同裂纹类似,从这个意义上讲,地震在本质上是大幅度裂纹快速传播的结果。所以断裂动力学在地震学的应用价值上就更为重大。

由于篇幅的限制,还有许多内容未能介绍。由于断裂动力学是一门极为年轻的科学,在现阶段尚不成熟,一些领域还有待发展和研究(例如动态裂纹顶端附近的塑性变形及其效应的问题,等等),从而使断裂动力学日臻完善,并且在基础研究和工程实践的应用上发挥更大的作用。

参考文献

- Williams M L, Knauss W. G. Int J Fracture, 1985, 27: 122 ~ 312
- 范天佑. 断裂动力学引论(第 1 版). 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 398
- Freund L B. Dynamic fracture mechanics, Cambridge; Cambridge University Press, 1990, 563
- Parton V Z, Boriskovsky. Dynamic fracture mechanics, New York; Hemisphere publishing Corporation, 1989, 1: 310; 2: 375
(北京理工大学材料科学研究中心博士生导师范天佑教授撰)

中厚板理论 theory of moderate thick plate

加载后由于横向剪切力引起的剪切变形与弯曲变形属于同一数量级的板弯曲理论。中厚板理论首先于 1945 年由瑞斯纳(E. Reissner)提出,又称瑞斯纳板理论,它与薄板理论的主要区别在于分析中厚板时必须考虑横向剪切变形的影响。近百年来,受弯构件分析方法主要属于经典理论范畴,采用 Kirchhoff“直法线”假定;由于这一假定,才使复杂的力学理论能应用于大部分板结构的计算。经典理论的“直法线”假设规定原垂直板中面的法线变形后仍保持为直线,且垂直于此变形后的中面,也即是剪切变形为零。由平衡微分方程得知,不均匀的弯矩和扭矩必将产生垂直剪力和相应的剪应力,有剪应力而无剪切变形这是不符合固体力学基本方程的。从物理上来看,无剪切变形是与假定剪切模量 $G_2 \rightarrow \infty$ 等价的,这实际上是用假想的不是完全各向同性的材料来代替真实的可以认为是各向同性的材料。此外经典理论还假定挤压变形为

等。另一方面我们从弹性薄板挠曲四阶微分方程 $D \nabla^4 W = q$ ，以及相应的两个边界条件来看，它们能够，并且必须在每一边缘上得到满足，即是由于假定 $G_z = \infty$ ，对于作用在板横截面上的力矩，如果力矩向量与截面法线相重合，则板单元不会相应地产生转动，这使我们能够把作用在边缘 $X=a$ 上的水平剪应力所引起的扭矩变化率 $\partial M_{xy} / \partial y$ 和作用在同一边缘上的垂直剪力 Q_x 的影响等同起来；边界条件的数目由 3 个减为两个，由于边界条件数目的减少，使弹性薄板的应力分析大大地简化。然而对于有限厚的板则需要 3 个边界条件，要比 2 个更容易得到较为精确的答案。

对于工程中常用的板结构，其厚跨比远小于 1 时，板中应力则有 $\sigma_z \ll \tau_{xz} \ll \sigma_x$ 之关系，因此，在计算弯曲应力时，忽略剪应力产生的剪切变形和法应力产生的挤压变形还是许可的；而当板的厚度增大时，剪应力 τ_{xz} 、 τ_{yx} 和挤压应力 σ_z 相对于 σ_x 、 σ_y 就显得不能忽略不计，因此，在大厚跨比的中厚板中必须考虑剪切变形和挤压变形的影响。在 1944 年和 1945 年瑞斯纳提出中厚板理论以后的几十年中，许多科学工作者对该理论进行了大量的研究。采用不同的假设、不同的独立变量以及不同的置换方式，得出了不同的中厚板理论，大体可归纳为两大类，第 1 类是单挠度理论，即以总的垂直挠度 W 和剪力 Q_x 、 Q_y 或者转角 β_x 、 β_y 为独立变量的一组微分方程的形式；第 2 类是双挠度理论，即将总挠度 W 分为弯曲挠度 W_b 与剪切挠度 W_s 之和。

关于单挠度理论，在 1945 年瑞斯纳提出的一种形式是以挠度和剪力 Q_x 和 Q_y 为独立变量表示的一组方程

$$D \nabla^2 \nabla^2 W = q - \frac{2-\mu}{10(1-\mu)} h^2 \nabla^2 q$$

$$\frac{h^2}{10} \nabla^2 Q_x - Q_x = D \frac{\partial}{\partial x} \nabla^2 W + \frac{h^2}{10(1-\mu)} \frac{\partial q}{\partial x}$$

$$\frac{h^2}{10} \nabla^2 Q_y - Q_y = D \frac{\partial}{\partial y} \nabla^2 W + \frac{h^2}{10(1-\mu)} \frac{\partial q}{\partial y}$$

第 2 种形式是以挠度和转角 β_x 、 β_y ($\beta_x = -\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{6}{5} \frac{Q_x}{Gh}$ 、 $\beta_y = -\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{6}{5} \frac{Q_y}{Gh}$) 为独立变量表示的一组方程

$$D \nabla^2 \nabla^2 W = q - \frac{2-\mu}{10(1-\mu)} h^2 \nabla^2 q$$

$$\frac{h^2}{10} \nabla^2 \beta_x - \beta_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^2(1+\mu)}{10(1-\mu)} \nabla^2 W + W \right) + \frac{6h(1+\mu)}{25E(1-\mu)} \frac{\partial q}{\partial x}$$

$$\frac{h^2}{10} \nabla^2 \beta_y - \beta_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^2(1+\mu)}{10(1-\mu)} \nabla^2 W + W \right) + \frac{6h(1+\mu)}{25E(1-\mu)} \frac{\partial q}{\partial y}$$

其中 D 为板的抗弯刚度， E 为弹性模量， μ 为泊桑系数， h 为板厚， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 。该方程组是在限定水平位移偏离经典理论的“直法线”部分的位移函数—称偏离位移函数 $P(x)$ —以及同时考虑挤压变形影响—挤压变形函数 $B(x)$ —均为三次曲线分布形式。

$$P(x) = \frac{3}{2} \left[\frac{x}{h} - \frac{4}{3} \left(\frac{x}{h} \right)^3 \right],$$

$$B(x) = \frac{3}{4} \left[\frac{x}{h/2} - \frac{1}{3} \left(\frac{x}{h/2} \right)^3 - \frac{2}{3} \right]$$

而推导出来的。

1947 年 H. Hencky 给出的中厚板理论 2 种形式的方程组，其独立变量与 Reissner 式中的独立变量相同，但转角表达式则不同 ($\beta_x = -\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{Q_x}{Gh}$ 、 $\beta_y = -\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{Q_y}{Gh}$)，偏离位移分布函数 $P(x) = \frac{x}{h}$ ，不考虑挤压变形的影响，给出的弯曲应力沿板厚为直线分布规律，看起来是 Reissner 理论的简化，而实际上则是出发点不同，因该文于 1944 年 11 月在内部刊物上发表过。

50 年代，R. D. Mindlin (1951)、Ф. Б. Буаоо (1957) 等提出的中厚板理论则只考虑剪切变形的影响，而略去挤压变形的影响，认为挤压应力 σ_z 的最大值为表面承担的表面外荷载 $q(x, y)$ ，它

远小于弯曲应力 σ_x 或 σ_y 。他们限定偏离位移函数 $P(x)$ 分别为 $\frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{h} z$ 及 $\frac{3}{2} \left[\frac{z}{h} - \frac{4}{3} \left(\frac{z}{h} \right)^3 \right]$ ，挤压变形函数均为零 $B(x) = 0$ 。Mindlin 方程中的独立变量与 Reissner 式中独立变量相同，但转角表达式有所不同，而 Буаоо 则是通过变量置换，用二个新的独立变量 t_x 及 t_y 代替独立变量剪力 Q_x 、 Q_y 及转角 β_x 、 β_y ，而得出一组厚板理论方程。A. Kromm (1953) 则是从挤压应力 σ_z 与竖向剪应力 τ_{xz} 、 τ_{yz} 的分布规律入手，取 $\sigma_z = q(x, y) B_x(x)$ 以及 $\tau_{yz} = Q_y B_z(x)$ ，式中 $B_1(x)$ 、 $B_2(x)$ 则分别为挤压应力分布函数和横向剪应力分布函数。假定挤压应力分布函数中包括代数项和三角函数项组成的多项式，通过边界条件确定出多项式中的系数，并将三角函数展成级数最后得出 Reissner 给出的三次函数相类似的函数形式但表达式不同 $B_1(x) = \frac{1}{2} \left[\left(-1 + \frac{3}{2} \frac{x}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{h} \right)^3 \right) \right]$ ，而 $B_2(x) = \frac{dB_1(x)}{dx} = \frac{x}{4h} \left[1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right]$ ，此处 h 为 $\frac{1}{2}$ 板厚。最后给出独立变量为 \tilde{W} 和 Q_x 、 Q_y 的一组厚板基本方程。

L. H. Donnell (1946)、杜庆华 (1962)、V. Panc (1964) 则分别发表了双挠度理论的厚板理论的基本方程， $D \nabla^2 \nabla^2 W_b = q(x, y)$ 和 $Gh \nabla^2 \nabla^2 W_s = -q(x, y)$ 。胡海昌 (1962) 则是从基本弹性体方程入手，通过变换取 $\beta_x = -\frac{\partial \tilde{W}}{\partial x} - \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial y}$ 、 $\beta_y = -\frac{\partial \tilde{W}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x}$ ，式中 \tilde{W} 为弯曲挠度消去 β_x 、 β_y 得出以总挠度 w 、弯曲挠度 \tilde{w} 及一个转角 $\tilde{\theta}$ 为独立变量的一组微分方程，该方程中独立变量同 Cauchy—Riemann 方程式中独立变量，而基本方程形式不同。

1986 年丁树人对偏离“直法线”部分的位移函数 $P(x)$ 不作任何限制，而只是认为各截面水平位移偏离部分是几何相似的，仍不考虑挤压变形的影响，根据能量原理得出了更为符合实际的偏离位移函数 $P(x)$ 。因为在 $P(x)$ 式中包含有材料常数、未知板的挠度 W 、剪力 Q_x 、 Q_y ，这样需用迭代法才能求解，考虑到它的适用性，作了进一步的简化，提出与厚跨比无关仍为双曲正弦的表达式形式， $P(x) = 49.35 \frac{x}{h} - 95.70sh \frac{x}{2h}$ 。同样以挠度 W 和剪力 Q_x 、 Q_y 为独立变量得出一组基本微分方程组。

厚板理论的基本方程为非线性方程，于薄板理论基本方程组比，数学上较复杂，由于数学上求解困难，已有各种不同的近似求解方法。70 年代以前大都采用重三角级数求解，如 1962 年杜庆华对于双挠度理论采用逆解法形式，将弯曲挠度 W_b 和剪切挠度 W_s ，则假定为多项式与双曲余弦级数的组合来解厚板问题。70 年代以后则以有限元和有限条法解 Mindlin 厚板理论，即在联结处(结点或绪线)以挠度 W 和截面的转角 (ϕ_x 、 ϕ_y) 为独立变量，分别假定位移模式来建立刚度方程，进入 80 年代为提高解的精度，则采用高精度有限元解此问题，这也是相当多的，同时用高级有限条解厚板问题文章也不少。1991 年丁树人从基本方程式入手，用精度较高的曲线差分法解矩形厚板受“土山状”荷载作用下按 Reissner 厚板理论基本方程取得了较好的结果。

厚板理论的研究已较全面和成熟，而且解法也是相当多的，但有的方面已有很多方法正在进一步研究之中。

参考文献

- 1 Reissner E. JAM, 1945, 12
- 2 Hencky H. Ing—Arch, 1947, 16
- 3 Mindlin R D. JAM, 1951, 18
- 4 Kromm A. Inge Archiv xx1 Band, 1953
- 5 Буаоо Ф. Иос. АН СССР. ОТН, 1957
- 6 杜庆华清. 华大学学报, 1962, 9
- 7 胡海昌. 力学学报, 1963, 6
- 8 李星, 丁树人. 太原工业大学学报, 1990, 21(1)
- 9 丁树人, 李星. 太原工业大学学报, 1990, 21(4)

(太原工业大学丁树人教授撰)

疲劳与断裂 fatigue and fracture 疲劳是交变载荷作用下构件失效的主要形式。工程构件断裂事故的大部分属于疲劳断裂。它涉及力学、材料科学、测试技术和工程设计等多种学科和多项现代技术领域。探索疲劳断裂的机理、研究提高疲劳寿命的途径、发展合理的疲劳强度设计方法一直是工程界,特别是航空航天、船舶、车辆、动力机械、冶金机械、矿山机械、桥梁等工程界致力推进的重大课题。

疲劳问题的提出和初步探索,始于19世纪40年代钢铁材料大量生产和应用的时期。1839年, J. V. Poncelet 首先使用“疲劳”这个词描写交变载荷下金属构件的破坏。1850年前后, A. Wohler 率先进行了系统的疲劳试验,得到碳钢的 S (应力幅)— N (寿命)曲线,并提出疲劳极限的概念。1884年, J. Bauschinger 在碳钢光滑试样的疲劳试验中发现循环软化现象,后来将屈服后反向加载中屈服点下降的现象称之为“Bauschinger 效应”。1874年 W. Gerber 提出疲劳极限图,1930年 J. Goodman 提出简化的疲劳设计曲线,这种在平均应力—应力幅平面上表示设计安全区的方法,一直沿用到现在。1924年,由 H. J. Gough 撰写的有关疲劳的第1部专著在伦敦出版。

通常把寿命不大于 10^5 次的疲劳问题称为低周疲劳。低周疲劳问题中,应力水平较高,必须取应变为控制变量和设计参数。70年代, S. S. Manson 和 L. F. Coffin 用电液伺服试验机,对20余种钢进行了系统的控制应变疲劳试验,得到应变幅(S)—寿命(N)的曲线。他们独立地得到具有极大工程应用价值的近似公式,即“Manson-Coffin 公式”。同一时期的另一重大进展是由 H. Neuber 提出的, R. M. Wenzel 等发展和完善的局部应力应变法。Manson-Coffin 公式、局部应力应变法和通过先进试验技术得到的循环应力应变曲线结合,可以成功地解决光滑构件在等幅交变载荷下的低周疲劳问题。

一般把随机载荷作用的疲劳称为随机疲劳,它有着与幅值和均值不变的交变载荷疲劳问题不同的特有规律。首先,需要面临试验技术和数值分析两方面的问题。70年代以来发展的计算机控制的电液伺服疲劳试验机以及有关随机振动分析的仪器和软件,推进了这两方面的有效进展。此外,在设计分析方面要处理疲劳统计和疲劳损伤累积模型这两个环节。1945年, M. A. Miner 提出了疲劳损伤累积的线性理论。按这个理论,随机加载的疲劳损伤相当于相同幅均分布的程序加载对应的损伤。60年代, S. M. Marco, A. M. Freudenthal 等发展了非线性的损伤累积理论。70年代 M. Matsuishi 和 T. Endo 提出了疲劳统计的雨流法。这种统计反映了疲劳损伤累积的次序,体现了疲劳破坏的渐进过程。

疲劳寿命由两部分组成,形成宏观裂纹消耗的部分和宏观裂纹扩展到断裂消耗的部分。后者往往占有不可忽视的地位。研究交变载荷下裂纹扩展直到断裂的规律,充分利用破损构件的潜在能力是一个于国民经济全局有极大经济利益的课题,这个课题又属断裂力学的范围。1920年, A. A. Griffith 提出裂纹失稳扩展的能量平衡准则,1957年, G. R. Irwin 提出了应力强度因子的概念,建立了脆性断裂的应力强度因子准则,证明了与 Griffith 准则的等价性,从此形成了线性断裂力学的框架。接着 P. C. Paris 提出了用应力强度因子幅描写的疲劳裂纹扩展的幂指数律。K. Wolker 和 R. G. Forman 对 Paris 公式的低速区高速区分别给出与实验结果吻合较好的修正。于是在线性断裂力学体系下,就形成了处理裂纹体疲劳寿命问题一套完整的测试技术、分析模型和设计方法。

把疲劳问题涉及的材料参数和设计参数作为随机变量比作为定常数值更符合实际现象。因此,概率论和数理统计与疲劳强度研究的结合势在必行。这个结合可以称为概率疲劳断裂。后来又与可靠性设计方法结合,形成疲劳可靠性设计。1972年, A. M. Freudenthal 首先在结构分析中引入可靠性设计的术语“首次失效平均工作时间”(MTFF)。对于概率疲劳断裂和疲劳可靠性设计,除了依据前已阐述的有关成果外,最关键还从工业与技术

管理提供的统计资料中建立概率模型。1961年 W. Weibull 提出的概率模型是疲劳问题中最受推崇的概率模型。此外,正态分布和对数正态分布也是常用的模型。

70年代开始,一些特殊条件下的疲劳问题得到重视并取得研究进展。研究成果主要是材料疲劳特性的测试。P. G. Forrest, J. W. Spretnak 和 J. Polak 得到了低温钢光滑试样的疲劳特性。A. J. Nachtigall 甚至测到4K下10余种材料的低周疲劳特性。C. Ya. Yyarema 和 O. P. Ostash 测得两种钢从113~293K温度下裂纹扩展速率与应力强度因子幅的完整曲线。F. H. Vitovec 与 B. J. Lazan 得到蠕变对高温疲劳的相互影响, J. T. Berling 与 T. Slot 得到频率和温度对高温低周疲劳特性影响的定量描写。L. F. Coffin 用实验证明高温疲劳中氧化作用对试验结果有至关重要的影响。L. F. Coffin 还试验研究了交变温度变化下产生热疲劳。

腐蚀疲劳指介质(环境)与交变载荷联合作用产生的疲劳问题。研究成果除了特定材料对特定介质的疲劳特性测试之外,还集中在机理与防护方面。如 T. W. Crooker 对带裂纹的高强钢 HY-130 在海水下的 Paris 公式系数给出的测试结果和氢脆机理的研究。

在交变载荷下,存在两个或两个以上应力分量的疲劳称为复杂应力状态的疲劳。对于设计分析,通常按强度理论,把复杂应力状态对应的相当应力代入简单应力状态的疲劳公式进行处理。

接触疲劳是指接触表层在接触载荷的反复作用下发生的破坏现象。这是复杂应力状态的疲劳,同时又受复杂环境和工况的强烈影响。有关这一问题的损伤累积原理是 A. W. Crook 和 G. M. Hamilton 提出的。

当前实验技术和计算机技术的进步已经能够对工程中疲劳问题给出令人满意的解决办法。但这一问题的研究仍然是十分艰巨的。当前研究热点有:(1)探索疲劳性能测试和预报的简捷方法;(2)研究大型复杂结构和构件疲劳寿命分析的数值技术和软件;(3)对于光滑试样和裂纹试样,同时计入弹性、塑性和粘性的疲劳强度研究;(4)复杂应力状态,特别是非比例交变载荷下的疲劳与断裂;(5)用微观模型和唯像方法结合,研究疲劳机理,这种结合涉及细观力学、损伤力学和本构理论等近代力学分支;(6)复合材料的疲劳断裂;(7)生物材料在交变载荷下的力学行为研究。

参考文献

- 1 铁木生可 S. 材料力学史. 上海:上海科技出版社,1961
- 2 陈尧,蔡其巩,王仁智. 工程断裂力学. 北京:国防工业出版社,1977
- 3 桑多尔 B I. 循环应力与循环应变的基本原理. 北京:科学出版社,1985
- 4 徐源. 疲劳强度. 北京:高等教育出版社,1988
- 5 朱晓阳. 力学进展,1990,2:174~190
- 6 富田康光. 力学进展,1992,2:277~283

(重庆大学张培源教授撰)

疲劳裂纹扩展逻辑框架 早在1953年人们就对疲劳裂纹扩展进行了分析研究。刘浩文首先发现影响疲劳裂纹扩展率 da/dN 最重要的应力参量是应力变程 $\Delta\sigma$, 而不是最大应力 σ_{max} 。Paris, Gomez 和 Anderson 最早提出将 da/dN 与 K_{max} 相关联。后来,刘浩文提出 da/dN 应与 $(\Delta\sigma^{2\alpha})$ 成正比,这里的 α 是裂纹半长。对一“无限大”板而言, $(\Delta\sigma^{2\alpha})$ 就是 ΔK^2 。这是第一篇关于 ΔK 和 da/dN 关系的文献。不久, Paris 和 Erdogan 发现了 da/dN 与 ΔK^4 成正比的关系。几年来, ΔK 与 da/dN 的相关性已广泛地用于工程实际,并用来评价材料微观结构对被裂裂纹扩展的影响。

1. 无限大均匀宽板中裂纹的扩展

一含裂纹的金属板在承受疲劳载荷后,裂尖循环塑性变形

导致裂纹的扩展。这里讨论的问题是在一块非常宽、非常厚处于平面应变状态的金属板上有一贯穿板厚的小裂纹,与板宽相比裂纹长度很短。结合疲劳裂纹扩展问题,我们来研究裂纹长度对裂尖区域中应力场及应变场的影响。

一般而言,裂尖附近的应力、应变处于复杂的三维状态。在一非常厚板的内部,其裂尖应力、应变处于平面应变状态,而在试件的表面层则处于平面应力状态。如果试件非常厚,则试件内部的平面应变层远厚于试件表面的平面应力层。因此,内层的平面应变状态就主导了整个试件的疲劳裂纹扩展行为。在这种情况下,板的厚度可不予考虑,而半裂纹长度 a 就成了唯一的相关长度参量。因此,我们可以只用一个参量“ a ”来对实际的坐标 x, y 进行归一化处理。于是,在无量纲的相对坐标系 X, Y 中($X=x/a, Y=y/a$),所有具有不同裂纹长度的含裂纹板就可看成完全等同了。只要在板上施以相同的边界应力,通过简单的量纲分析就可以得知:在相对坐标系中,在几何相似点即同调点 $P(X, Y)$ 处,其应力与应变是完全相同的。

设在这些板中的裂纹增量 Δa 正比于它们各自的理解纹长度 a ,如果施加在这些板上的应力在循环增量 ΔN 期间遵循相同的脉动疲劳加载模式,则处于裂纹增量 Δa 范围内的材料必然经历完全相同的循环应力及循环应变。如果在裂尖的循环应力及循环应变控制了裂纹扩展过程,又如果材料是均匀的,那么,在不同的板上使各自的裂纹扩展增量 Δa 所需的循环增量 ΔN 就必然是相同的。据此,疲劳裂纹扩展率 da/dN 就与裂纹长度呈线性的正比关系:

$$da/dN = C_1 \quad (1)$$

这里 C_1 是一个与所施加应力相关的函数。上面的分析适用于小范围屈服、大范围屈服和整体屈服状态。由于分析中设想的材料是均匀的,故没有材料微观结构长度参量引入此分析。

以上对理解尖循环应力及循环应变的分析是基于裂纹长保持不变的条件下进行的,进一步的分析将推广到扩展的裂纹。设裂纹沿着扩展路径从几何相似点 $P(X_1, Y_1)$ 扩展至 $P(X_2, Y_2)$,我们来考察处于不同裂纹扩展阶段的应力及应变。试件经过 N_1 次循环以后,在第1阶段其裂纹长度为 a_1 ,经过 N_2 次循环以后,在第2阶段裂纹长度为 a_2 。假设在 P_1, P_2 这两个几何相似点处最初的应力-应变关系是相同的,又假设两个裂纹各加上裂纹增量 Δa ,且 Δa 分别与两个裂纹的原始长度成正比。在裂纹扩展一增量以后,新的裂纹长度 a'_1, a'_2 之间具有下述关系:

$$a'_1/a'_2 = (a_1 + \Delta a_1)/(a_2 + \Delta a_2) = a_1/a_2 \quad (2)$$

裂纹扩展 Δa_1 及 Δa_2 以后, P_1 及 P_2 这两个同调点仍然保持其同调性。由此我们可以得出结论:甚至当裂纹按方程(1)扩展时,处于裂纹增量 Δa 范围内的材料经历相同的循环应力及应变,方程(1)仍然有效。

疲劳条纹是由裂尖的剪切分离(shear decohesion)所造成。当控制剪切分离机理的材料特性是均匀的时,方程(1)是有效的。但是,材料在本质上总是非均匀的,因而由各个条纹间距给出的局部裂纹扩展率变化很大,只有在较大范围内获得的平均条纹间距才可以视为均匀材料的条纹间距。

根据量纲分析,无限大宽板中裂尖塑性区尺寸 r_p 与理解纹和成正比,因此,疲劳裂纹扩展率为

$$da/dN = C_2 r_p \quad (3)$$

2. 裂尖区循环应力场及应变场的表征

一含裂纹板的弹性应力场可以用一无穷级数来表示,只是在紧邻裂尖的局部区域其弹性应力及应变可近似地表示为:

$$[\sigma_{ij}(r, \theta, \epsilon_{ij}(r, \theta))] = (K/\sqrt{2\pi r})[\sigma_{ij}(\theta), \epsilon_{ij}(\theta)] \quad (4)$$

r 和 θ 是极坐标变量,裂尖为坐标原点,裂纹位于 $\theta=\pi$ 的线上, K 是应力强度因子。奇 $\sigma_{ij}(\theta)$ 和 $\epsilon_{ij}(\theta)$ 是极坐标 θ 及弹性模量的已知函数。方程(4)表明,在线弹性固体中,应力强度因子 K 是显然地表征裂尖整个应力场及应变场的单一参量。也就是说,在相同的 K 值条件下,不管试件几何形状及加载方式怎样,其裂尖的应

力场及应变场是完全相同的。材料的非均匀性、晶体的各向异性及裂尖的塑性变形导致裂尖实际应力偏离由方程(4)给出的线弹性裂尖应力(LECTS)。要讨论的问题是:如果在裂尖处发生循环塑性变形,或者材料是非均匀的,或者多晶体固体的晶粒是各向异性的,则虽然还能表征裂尖的应力场及应变场?所有上述因素引起的应力扰动均处于自平衡状态,我们可以视应力扰动的影响为沿着应力扰动源围线周边分布的所有共线集中偶力(dipoles or concentrated forces)的总和。接下来的讨论是由Eshelby提出的,讨论的焦点着眼于那些扰动因素对用 K 表征裂尖应力场及应变场能力的影响,而不是在数学上寻求对这些扰动问题的解法。首先考察较简单的夹杂物的影响,然后再讨论疲劳加载下裂尖塑性变形的影响。

材料均匀性与裂纹扩展率的关系。已经证明,在小范围屈服条件下, r_p 内的循环应力及循环应变可以由 $\Delta K, R, B$ 来表征。如果疲劳裂纹扩展率仅由处于裂尖的循环应力及循环尖变所控制,则 da/dN 必然只是 $\Delta K, R$,及 B 的函数:

$$da/dN = f_1(\Delta K, R, B) \quad (5)$$

在平面应变条件下 da/dN 与 B 无关,故有

$$da/dN = f_2(\Delta K, R) \quad (6)$$

方程(5),(6),源于一个简单的假设,即如果试件具有相同的循环应力及循环应变,从而导致有相同的变形及断裂过程,所以,对所有这些试件,其 da/dN 是完全相同的。但此解释并未拒绝考虑从一个 ΔK 水平到另一 ΔK 水平时,裂尖的变形及断裂过程可能发生的变化。因此, da/dN 与 ΔK 不会遵循一个特定的关系式,对一给定材料,该关系式须由经验确定。

3. 链开式模型

如前所述,如果控制裂纹扩展机理的变形和断裂特性都是完全均匀的, da/dN 就与 ΔK^2 成正比。如果疲劳裂纹扩展仅由剪切分离所引起,那么可以建立一个力学模型以计算属于中间 ΔK 区域的裂纹扩展率。此间裂尖塑性区内包含了足够多的随机取向排列的小晶粒,因此可以视 r_p 内的材料为完全均匀的和各向同性的。在一个各向同性的多晶体中,剪切滑移发生在最大剪应力面上,它被局限于最大剪应力面上的狭窄剪切带中,各相邻剪切带之间的材料其塑性变形则很小。

在这里,将建立链开式模型以计算小范围屈服及平面应变状态下的疲劳裂纹扩展率。由Dugdale模型及经典连续介质模型计算所得的裂尖张开位移与施加的 K 有关。链开式模型剪切分离过程引起的裂尖张开位移远小于那些由经典模型所计算出的结果,但其变量间的函数关系应该有相同的形式。

$$CTOD_{u_2} = C(1 - \nu^2)K^2/E\sigma_y \quad (7)$$

这里 $CTOD_{u_2}$ 是链开过程引起的裂尖张开位移,它不包括由裂尖钝化所产生的裂尖张开位移, ν, E 及 σ_y 分别是泊松比、杨氏模量及拉伸屈服强度, C 是比例常数,在经典的Dugdale带状屈服模型里 $C=1$ 。

首先,对一含裂纹弹塑性固体不断加载至 $K=1.10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($1000\text{psi}\sqrt{\text{in}}$),然后计算出裂尖区域的应力场及应变场,并描绘出裂尖小塑性区 r_p 。选择一剪切带 AB ,该剪切带从裂尖向塑性区边缘扩展,与 x 轴成 φ 角。施以微小增量 δK ,在 δK 施加期间,使沿 AB 剪切带自由滑移,但不允许节点离开剪切带。在 δK 施加期间,在这些节点上的切向力保持不变,法向应力沿剪切带不断增大并保持连续,以保证垂直于剪切带的相对位移为零。这些沿着剪切带的边界条件通过反复叠加以满足。

当施加 δK 时,按给定的本构关系,所有单元均发生弹塑性变形。由此可以计算出由 δK 引起的剪切分离及 $\delta CTOD_{u_2}$ 增量。裂纹扩展率与 $CTOD_{u_2}$ 几何相关。对于疲劳裂纹扩展,计算获得的裂纹扩展率为

$$da/dN = 0.02(1 - \nu^2)\Delta K^2/E\sigma_{yc} = 0.02\Delta J/\sigma_{yc} \quad (8)$$

方程(8)不存在任何调整系数,它显然给出了疲劳裂纹扩展率。

(美国Syracuse大学刘浩文撰)

多轴非比例加载下低周疲劳寿命估测

multiaxial low-cycle fatigue life under nonproportional loading 疲劳破坏通常是工程结构破坏的主要形式。疲劳问题受到多种因素的影响,如应力应变状态、环境、材料组织等,涉及到力学、材料学、物理学和化学等多学科,以往的研究主要集中于单轴状态下的疲劳问题。然而,工程中的结构元件如传动轴、涡轮机叶片、压力容器等一般承受的是双轴或三轴应力状态。由于单轴疲劳与多轴疲劳的破坏机制不尽相同,故在把单轴疲劳的研究成果推广到多轴疲劳时并不能得到满意的结果,特别是在非比例加载低周疲劳时,将给出不安全的预测,所以迫切需要对多轴非比例加载下的疲劳进行研究。随着新型多轴疲劳试验机的诞生,使得这一方面的研究可能进行。对多轴非比例循环加载下材料的循环本构行为研究表明,非比例循环加载下材料的本构行为与比例循环加载下有着本质差别。材料在非比例循环加载下存在明显的附加强化,其塑性流动特性以及应力、应变迟滞回线的形状与比例加载时均有较大差异。由于存在应力的附加强化,从而导致非比例循环加载下低周疲劳寿命大大减少。

低周疲劳寿命的研究,从50年代著名的曼森-科芬(Manson-Coffin)公式问世以来已近40年,而对于多轴低周疲劳的研究,特别是对于在多轴非比例循环加载下的低周疲劳研究只是近年才开展起来。所谓低周(应变)疲劳是指疲劳应力接近或超过材料的屈服极限,材料在每一个应力-应变循环中均有一定数量的塑性变形,其疲劳寿命比较短,一般低于 10^6 循环。1954年曼森(Manson)、科芬(Coffin)认为对于单轴拉压低周疲劳塑性应变的积累是其破坏的主要原因,因此,以塑性应变幅 $\Delta\epsilon_p$ 作为损伤参量进行疲劳寿命估算,可以较好地描述材料的低周疲劳行为。

对于多轴低周疲劳破坏的损伤分析和寿命估算一般有3种方法:等效应变法、能量法和临界面法,但尚未形成一种对各种材料和载荷普适的理论,多为经验的或半经验的。1981年辛纳斯(Sines)等提出的等效应变法是将曼森-科芬(Manson-Coffin)公式推广用于多轴低周疲劳,其损伤参量为等效应变 $\Delta\epsilon_{eq}$,它可以是八面体剪应变,最大剪应变或冯·密塞斯(Von Mises)等效应变,这种等效应变往往是从强度理论引伸而来。能量法认为塑性形变功, $(W_p = \int \sigma d\epsilon_p)$,的累积是产生材料不可逆损伤进而导致材料疲劳破坏的主要原因,将这一概念成功地用于单轴低周疲劳后,许多学者将其推广到多轴低周疲劳。1984年伊林(Ellyin)等采用密塞斯(Mises)等效应力、等效应变和幂律本构关系,以破坏时多轴塑性形变功累积与单轴塑性形变功累积等效得到多轴疲劳寿命判据。临界面法认为疲劳破坏由破坏面及关于这个面上的应力和应变状态来决定。首先计算疲劳临界面上的应力、应变,然后将临界面位置的应力、应变历史转化成累积的疲劳损伤。1973年布朗(Brown)和米勒(Miller)提出了由最大剪应变面上的两个参量控制疲劳破坏,即最大剪应变 γ_{max} 和所在面上的法向应变 ϵ_n 。之后,不同学者选择了不同的临界面和损伤参量,对上法进行了修正。

在非比例循环加载下(即不同方向的循环载荷呈非比例加载)的低周疲劳,因其应变主轴不断旋转,建立在等效应力、应变关系上的循环应力-应变关系不是唯一的,而取决于加载的非比例度。非比例循环加载将产生明显的附加强化,并且明显地影响疲劳寿命。1987年索西(Socie)对304不锈钢低周疲劳研究的结果表明,在圆形路径下,附加强化增加一倍,疲劳寿命减少90%;对In718合金,附加强化增加10%~15%,疲劳寿命减少50%。因此必须对非比例循环加载下的低周疲劳及损伤积累规律进行具体研究,否则将导致不安全的预测。

1977年卡纳扎瓦(Kanazawa)等研究了拉扭组合的非比例循环加载下的低周疲劳,认为最大剪应变面(临界面)上的最大剪应变 γ_{max} 和法向应变 ϵ_n 控制疲劳损伤发展。研究表明,低周疲劳时,在相同等效应变幅值下的非比例加载比比例加载产生更多的损伤,90°相位差的非比例加载给出最短的疲劳寿命,而比例循环

加载给出最长的疲劳寿命。他们还发现,等效应变法用于非比例循环加载条件下是偏于危险的。1980年雷斯(Leis)等对非比例循环加载进行的损伤分析,支持了Kanazawa的观点,但也指出采用纯应变进行损伤分析的不足。

有些研究者从能量法的角度开展了这方面的研究。1981年伽德(Garud)用每循环塑性功拟合疲劳寿命,按增量塑性理论,引入莫鲁(Mroz)型强化律计算塑性功,处理比例加载和非比例加载疲劳。结果表明,预测偏于保守,误差达3倍,因此建议一个权因子作用在剪应变产生的塑性功上,文中取权因子为1/2。1987年索西(Socie)认为由于非比例循环加载下存在附加强化,致使疲劳寿命减少,故寿命估算中应考虑应力项。对In718合金的剪切型破坏采用计入最大剪应变面上的法向应力 σ_n 修正布朗(Brown)和米勒(Miller)的临界面法,给出了用于预测非比例循环加载下低周疲劳寿命的三参数判据。对于304不锈钢的拉伸型破坏,则在史密斯(Smith)等提出的判据中引入了最大主应变面的最大拉应力 σ_1^{max} 。1988年法梯密(Fatemi)和索西(Socie)在研究SAE1045钢时,对布朗和米勒(Brown and Miller)的临界面模型进行了另一种修正,即以临界面上的最大法向应力 σ_n^{max} 代替法向应变 ϵ_n 。以上考虑应力修正的判据在实际应用时需要一个精细的本构关系计算应力。

发展能描述材料非比例循环本构行为的本构方程,是近十年来国际上关于材料本构关系研究方面的一个热点,受到广泛的重视。尤其重要的是对材料在非比例循环加载下附加强化的描述,一种可行的方法是引入一个符合实际且具有一定物理基础的加载路径非比例度。巴纳拉(Benallal)和马丘斯(Marpais)定义以应力或应变之间的夹角正弦为非比例度;伊林(Ellyin)和夏(Xia)定义塑性应变路径在 π 平面上的投影面积比值为非比例度;麦道威尔(Mcdowell)定义塑性应变在最大塑性应变幅的方向上的投影积分为非比例度等等。尽管这些定义都可以描述某些路径的强化行为,然而各有其局限性,特别对经过原点的直线段路径,如对十字形路径、射线状路径不能很好加以描述。因此,发展适当的非比例度定义对研究非比例循环本构关系和低周疲劳是至关重要的。

1990年以来,在国家自然科学基金重大项目资助下,西南交通大学开展了关于多轴非比例加载低周疲劳研究。研究的重点为:(1)定义了一个具有物理基础、适用性广的加载路径非比例度,该参量是一个与单元体各个方向上最大剪应变分布有关的量,体现了非比例强化与材料剪切滑移的联系。(2)建立了一个简单的用非比例度修正的非比例循环本构关系。(3)基于连续损伤力学方法,在损伤演化方程中引入路径的非比例度,结合布朗(Brown)和米勒(Miller)的临界面模型,建立了一个新的非比例加载下低周疲劳损伤分析的临界面模型,给出了可用于非比例加载下低周疲劳寿命预测的Manson-Coffin型公式。

对多轴非比例加载下的低周疲劳问题进行研究是十分复杂和困难的。如何从微观或细观层次对非比例强化以及疲劳损伤进行微观机制的观察、分析和研究,揭示疲劳破坏的本质,给出精确的循环本构关系和疲劳寿命预测,是今后这方面研究工作的重点。

参考文献

- 1 Manson S S. Behavior of material under conditions of thermal stress, NACA report, 1954, 1170
- 2 Coffin L F. Journal of Engineering Material and Technology, 1954, 76, 931~950
- 3 Brown M W et al. Proc Inst Mech Engngs, 1973, 187, 745~755
- 4 Kanazawa K et al. Journal of Engineering Material and Technology, 1977, 99, 222~228
- 5 Sines G et al. Journal of Engineering Material and Technology, 1981, 103, 82~90
- 6 Garud Y S. Journal of Engineering Material and Technology,

- gy, 1981, 103, 118~125
- 7 Ellyin F et al. Journal of Pressure Vessel and Technology, 1984, 106, 342~347
- 8 Socie D F. Journal of Engineering Material and Technology, 1987, 109, 293~298
- 9 Fatemi A et al. Fatigue of Engineering Material and Structure, 1988, 14, 149~165

(西南交通大学应用力学研究所博士生导师高庆、陈旭副教授撰, 孙训方教授审)

本构型冰力学 (constitutive ice mechanics) 主要研究冰的物理力学性质因晶体结构、盐分杂质、环境温度、受力状态、承载速率、边界约束等内外因素差异而变化的本构机理。以固体力学有关理论为基础, 凭借实验力学为其根本手段, 求得冰的本构关系及力学参数, 为冰荷载的计算及冰与结构相互作用的静、动响应(称后者为结构型冰力学)提供依据, 从而为冷区工程的可靠设计服务。

19世纪, 俄国、北欧、加拿大等国家已在研究破冰技术以保护桥梁、堤坝、护坡、港口码头等建筑物。Reusch(1864)研究拉压及弯曲时冰的流动性, 揭示了冰的塑性变形能力。Koch(1875)、Main(1887)、McConnel 和 Kidd(1888)等在各种条件下进行了许多力学性能实验, 包括拉伸、压缩、弯曲、扭转、蠕变等, 涉及冰的极限强度、海冰成分对拉伸变形的影响、静水压力对剪切变形速度的影响等。

1946年, Kobeko研究了冰的塑性变形和粘滞性; 1947年 Northwood研究了冰的弹性性质; 同年 Shishov研究了冰的强度等。二次大战结束后, 各国学者对冰物理力学性质的研究逐渐深入, 内容趋广, 项目增多, 可归纳为六项专题。

冰晶结构形态 Bragg(1922)及其后不少学者, 研究了冰的微观结构指出, 氧原子排列成四面体, 氢原子虽非排列有序, 但居于氧原子间不断颤动甚至跃迁。Devik(1949)等从微观角度先后研究了冰晶的成核机理。Assur(1958)为海冰盐份分布与柱状晶间的容纳状态提出一个理想模式, 其后他自己的工作以及其他学者的贡献, 将海冰冰晶结构形态的研究益臻完善。受力冰晶顺贝塞尔平面而推移, C轴与此平面垂直, 因此研究C轴方位对了解冰的剪切滑移十分重要。

冰的压缩、弯曲、拉伸与剪切 Butkovich(1964)对冰的极限强度的研究颇具承前启后之功。Assur(1958)和随后的一大批专家对冰的压缩、弯曲、拉伸与剪切等基本变形形式下的形变特性及强度都做出很多有价值的工作。尤其是1978年 Michel发表了专著《冰力学》, 翌年由国际理论及应用力学联合会(IUTAM)于哥本哈根召开了冰的物理与力学国际会议及1981年由 Schwarz为首的8人工作小组制定了《冰的力学性能测试国际建议标准》以后, 全世界的冰力学工作者, 通过现场测试或室内实验, 成果的报导犹如雨后春笋, 虽内容广泛, 但其共同要点有: 单轴压缩强度因温度及盐度的降低而升高; 应变速率在一定范围内, 将显示出屈服台阶和峰值应力, 而从 10^{-5} s^{-1} 增长到 10^{-2} s^{-1} 时, 压缩强度几乎增长3倍, 而在 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 区间出现极大值, 破坏形式由韧性转变为脆性。加拿大的 Sinha(1981)得出的韧脆转变点为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 中国的沈(1984)得到的为 $4.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; Mellor与 Cole(1983)给出压缩破坏应变、破坏强度、承载时间及应力应变速率之间的关系, 有0.1%、1.0%和10%、3个特征阶段; 柱状晶各向异性冰的平面应变压缩强度至少为单轴压缩的两倍半; 钢圆柱冻入海冰施加扭转可测得剪切强度。结果表明盐度增加及温度降低均将提高剪切强度; 弯曲强度也有类似压缩强度的应力速率韧脆转变点。

冰的弹性性质 最早 Boyle与 Sproule(1931)利用超声波在冰中传递速度的变化测出亚静态弹性模量。以后许多学者做了相似的工作, 求得弹性性质与雷利波传播速度的关系等。

通过压缩或弯曲可测定冰的静态弹性模量和泊松比。冰的

各向异性和非线性导致初始切线模量较高散, Sinha(1986)提出割线模量 $E_{0.5}$ 和 $E_{1.0}$ 。工程上采用破坏模量 E_f , 但其物理意义不明确, 沈(1989)提出半破坏模量 $E_{0.5f}$ 。对冰弹性性质参数的界定至今尚无定论。

冰的蠕变性质 在测定冰的力学性质的同时, 许多学者已获得蠕变速率随冰晶方向、温度、应力不同而变化的规律。50年代以来, 对冰蠕变的研究逐渐深入而形成专题。学者们进行了各种研究获得了一些共同规律, 应力与应变速率及其应变与时间之间的关系与金属材料相似, 区分为应变减速、稳定、加速三个阶段, 各段之久视温度、应力水平而异; 减速阶段为一个可恢复的“延迟弹性应变”加上一个不可恢复的“粘滞应变”, 可用多项幂函数或双曲正弦函数来描述稳态蠕变行为。IUTAM/IAHR1989年圣约翰斯市冰与结构相互作用会议后, 对蠕变的研究又上了一个台阶。

冰的断裂韧性 应用线性弹性断裂理论来研究冰的断裂韧性始见于70年代。Goodman与 Tabor(1978), 借助于金属材料各向同性的假设及试验方法, 探讨了冰的断裂韧性与裂纹扩张力。其后进入80年代, 不少于20位学者分别研究了淡水冰、多晶冰、海冰、尿囊模拟冰的I型断裂韧性 K_{IC} 。沈、林(1986)首先发表了II型断裂韧性 K_{IIC} 以及I、II两型复合断裂准则问题, 又于1989年圣约翰斯会议上发表了用紧凑压缩试件研究冰的 K_{IC} 的观点。研究者对柱状晶冰均采用了横观各向同性的处理方法, 以此表述各向异性冰的断裂韧性必然有较大的局限性。

冰的疲劳性质 Tabata与 Nohguchi(1979)用交变压缩实验得出冰的疲劳破坏时平均应力只为压缩强度的30%~60%及其消耗的机械功总量比压缩的大得多等结论。Mellor与 Cole(1981)研究了交变应力作用下各向同性多晶冰的应力-应变带回环的进展规律。

由于冷区近海海底能源的开发, 除原苏联外, 加拿大、美国、挪威、瑞典、芬兰、德国、英国、澳大利亚、新西兰、中国、日本等许多国家都重视冰力学研究, 不断地投入资金以持续充实实验能力和提高研究水平, 为工程设计提供可靠依据。在国家自然科学基金先后4次资助下, 大连理工大学力学系冰力学研究室建成了一个全天候、小而全的实验基地, 形成了一支梯队队伍, 在本构型冰力学研究方面已跻身国际行列, 并为渤海石油开发工程提供了服务。

展望今后, 本构型冰力学亟待往非线性各向异性力学行为及断裂机理方向发展, 着重点在: (1) 微观形态及形成机理以及对宏观强度的影响; (2) 宏观强度及影响因素; (3) 复合断裂裂纹面扩展规律及断裂准则; (4) 近代光测力学法研究变形行为; (5) 应用损伤力学理论分析冰的承载变形及破坏过程的规律; (6) 有限冰板受边界约束及温度变迁导致的冻胀力。

参考文献

- 1 Assur A. Composition of Sea Ice and Its Tensile Strength, Nat. Acad. Sci. - NRC Publ., 1958, 598, 106~38
- 2 Michel B. Ice Mechanics, 1978
- 3 Tryde P. (Editor) Physics and Mechanics of Ice, IUTAM Symposium Copenhagen 1979, Springer-Verlag(1980)
- 4 Schwarz J et al. Cold Regions Science and Technology, 1981, 4: 245~253
- 5 Sinha N K. Experimental Mechanics, 1981, 6, 209~218
- 6 沈梧, 林树枝. 大连工学院学报, 1984, 4: 45~50
- 7 Shen W Lin S Z. Journal of OMAE, 1988, 409~413
- 8 Jones S J, Mckenna R F, Tillotson J, Jordaan (Eds), Ice - Structure Interaction, 1989, 147~164, Springer - Verlag Berlin Heidelberg (1991)
- 9 沈梧. 国际学术动态, 1990, 2, 63~67

(大连理工大学沈梧教授撰)

光力学 photomechanics 是实验力学方法的一种。概括起

来说,它包括以下几方面内容。

光弹性法 早在1816年,D. Brewster发现受载的玻璃片放在起偏镜和分析镜之间,在白光的照射下从分析镜中可以看到玻璃片上出现带颜色的条纹,它是由于偏振光场中的玻璃片上产生双折射现象而呈现的,这些条纹的分布与玻璃片上的应力有关。1853年J. C. Maxwell在实验的基础上建立了应力—光学的关系式,它表达出材料主折率与主应力的线性关系,这是光弹性法的基本基本方程,为光弹性法奠定了理论基础。1906年开始使用赛璐珞材料制作光弹性模型以后,光弹性法得到很大的发展。1931年,E. G. Coker和L. N. G. Filon将光弹性法用于解决工程问题。1931年E. G. Coker和L. N. G. Filon编写了《光测弹性力学》一书,1941年,M. M. Frocht编写了另一本《光测弹性力学》。到20世纪70年代,由于计算机技术的飞跃发展,有人认为有限元计算方法可以代替光弹性法。1967年,D. C. Drucker发表过“光弹性将要死亡”的论点。实践证明,这种观点是极其荒唐的。1972年,R. J. Sanford否定了这种错误观点,他认为(1)由于多数构件的形状和载荷很复杂,从一个新的未经试验的计算程序得到的应力状态,要用实验方法来验证。(2)由两个或多个的接触面构成的结构,其中接触面的边界条件为未知,甚至随载荷的增加而改变。因此,所选择的计算机程序也必须用实验方法来验证其可靠性。随着光学图像处理技术和计算机技术的发展,光弹性法获得了新的血液,它使光弹性实验应力分析从手工操作向测量与数据处理自动化方向迈进,显著地提高了测试精度和速度。此外贴片法和散光法也属于光弹性法范畴。

云纹法 该词外文意思是两块薄丝绸叠在一起显示出的条纹现象,该法也称“莫尔法”。以测量物体面内位移场为例,在物体表面粘贴上一定频率的栅线(一般为几线到50线/mm,称之为试件栅。另外,在物体表面再重叠上一个变形前的栅线,称为基准栅或分析栅。当物体受载后,在白光的照射下,从物体上可以观察到云纹,它与物体的位移场有关。1955年F. K. Ligtenberg用此法解决了板的弯曲问题。1960年,S. Morse和A. J. Durelli用此法进行物体的应变分析。目前,该法已能应用于物体的面内位移、离面位移和表面斜率的测量。随着光学图像处理技术和计算机技术的发展,使云纹法已从手工操作向测量与数据处理自动化方向迈进,显著地提高了测试精度和速度。还应当指出,该法对微小变形缺乏足够的灵敏度,该法不是光学干涉法而是几何干涉法。

全息干涉法 1948年,D. Gabor提出一种新的成像原理称为“全息术”,它的特点是能记录物体反射的光强与位相,因此利用全息原理可以记录物体的三维像。具体作法是使来自同一相干光源的两束光(一束是从物体反射来的漫射光,称为物光波;另一束称为“参考光波”)在记录介质上发生光学干涉,经显影和定影处理做成“全息图”。当用原参考光照射此全息图时,由原始的物光波可以被再现出来。当时由于使用绿光通过滤光片和针孔滤波所得到光的相干性不太好,以致使全息术(即全息照相)没能得到发展。1960年发明了相干性极好的激光光源,1962年,E. Leith和J. Upatnieks等的研究使全息术产生了划时代的进展,并进入实用阶段。J. D. Hovanessian(1967)和M. E. Fourney(1968)等提出全息术在光弹性中的应用,将其称之为全息光弹性。目前,全息干涉法在全息照相、全息光弹性、全息测位移和全息测振等方面得到广泛的应用。其测量灵敏度达波长量级。

散斑干涉法 在全息干涉法测量中,再现出的物光波里参杂有非物光信息,它以斑点的噪声形式出现,称之为“散斑”。后来发现,被看成是噪声的“散斑”与物体的变形有关。1970年,J. A. Leendertz建立了双光束散斑干涉(称为散斑照相)的基本原理,1973年,Y. Y. Hung提出剪切(或错位)散斑干涉。目前,散斑干涉法在测量物体面内位移、离面位移、位移导数和测振方面得到广泛的应用。其测量灵敏度达波长量级。

云纹干涉法 也称“全息云纹法”,它与云纹法不同,是一种光学的干涉方法,它是利用照射到物体表面光栅上的相干光所产

生的衍射光,再通过衍射光之间的干涉而形成云纹的。1970年,P. M. Boone提出了全息制栅法,用两次曝光法得到云纹干涉图。1971年,D. Post和T. F. Maclaughlin利用硅橡胶在试件表面作成正交型栅线,1971年R. W. E. Cook介绍了利用光敏胶制栅的方法。1982年,D. Post制成4000线/mm的栅线,它比云纹法的测量灵敏度提高80~100倍。它可以测量物体的面内位移和离面位移。

焦散线法 也称阴影图形法,对于平面应力模型,在外载作用下,对模型厚度变化梯度特别大的区域,在相干光垂直的照射下,则从模型的前表面反射的光线相互干涉,在模型前方投影幕上会出现暗色几何图象,其轮廓线称为焦散线。如为透明模型,则从模型的后表面折射的光线也会形成焦散线。1964年,P. Manogg提出这种实验方法,1971年P. S. Theocaris,1982年A. J. Rosakis等将这种方法用来解决裂纹应力强度因子和接触问题的研究。

电子散斑干涉法 简称ESPI,它是一种用来测量光学粗糙表面的位移或变形的干涉计量技术。它利用激光散斑场作为待测表面的信息载体,利用视频技术记录、比较和处理散斑场信息,最后以散斑条纹的形式在显示器上显示出位移等值线。它与全息干涉一样有波长量级的灵敏度。其具有以下3个独特的优越性:(1)ESPI用摄像机和相应的视频图像存储器取代了全息干板,用电子手段实时处理信息,避免了全息干板的处理、复位和再现等过程,并能实时显示干涉条纹。(2)ESPI以每秒30~40帧的视频速度记录散斑场的信息,对工作环境的防震要求降低了。(3)ESPI可在明光下操作,给实验人员提供方便。由此可见,ESPI是一种高灵敏度,易操作和快速的测量手段。目前它主要用于物体的变形测量和无损检测中。1971年,J. N. Butters和J. A. Leendertz首先应用光电子器件—电视摄像机代替全息干板记录散斑图像,并输入给磁带记录仪,由摄像机输入的物体变形后的散斑图像通过电子手段不断与磁带记录仪中的散斑图像进行比较和处理,从而在显示器上能观察到电子散斑的干涉条纹。同年,A. Macovski也发表了类似的文章。当时,受电子技术水平的限制,用来存储散斑图象的磁带记录仪由于有机误差,容易引起信号畸变,导致条纹分辨率下降,因此电子散斑条纹的颗粒性较强,它一方面限制了能观察到的最大条纹级次,另一方面也不利于条纹的后续处理。1974年,H. M. Pedersen等把硅靶摄像管用于ESPI中,提高了系统对光的敏感度。进入80年代,出现了集成化的电子存储模块,这样,电视图像可以以点阵的形式量化为数字,储存在帧存体中,并能以视频速度存入和读出。利用计算机对在帧存体中的图像进行运算处理而获得条纹,这样就出现了数字散斑干涉术(Digital Speckle Pattern Interferometry,简称DSPI)这种技术进一步降低了条纹的颗粒性,为以后的条纹自动分析打下了基础。目前,ESPI和DSPI已应用于测量三维位移场、位移导数和无损检测中。

随着科学技术的发展,建立了一些新的力学分支,并有一些新的交叉学科产生,为了探索它们的基本规律,实验力学(包括光力学)是解决这种问题的重要手段。另一方面实验力学是与国民经济紧密结合的一门学科,随着航天、航空、军工和民用工业的发展,对实验力学提出许多实际问题急需解决(如热温度场与热应力场分布、材料科学、生物力学、光塑性、光粘弹性、大变形非线性、动态光力学和探索求解物体内部应力场的无损测试方法等问题)。光力学的发展前景是广阔的,为了发挥光力学的优势,还必须从以下几个方面进行努力:(1)加速将光学数字图像处理技术和微型计算机技术引入光力学方法中,使光学信息的采集和数据处理自动化。从而提高了测试精度与速度。(2)加强光纤技术在光力学方法中的应用,以解决对难以观察的区域进行测试。(3)应用光力学方法为解决薄膜力学、材料强韧化力学和界面力学问题而努力。(4)寻找求解模型内部应力的非破坏性方法。(5)开展动态光学图像的瞬态采集和数字图像的处理技术的研究。(6)发展数值计算与光力学方法的混合法。(7)发挥光力学方

法、电测法和数值计算的各自优势,综合起来解决难题。

参考文献

- 1 Coker E G, Filon L N G. Treatise on photoelasticity, London; Cambridge Press, 1931
- 2 Morse S, Durelli A. J Proc ASCE, 1960, 86: 4
- 3 Gottenburg W G. Exp Mech, 1969, 8
- 4 Hung Y Y, Hu C P, Taylor C E. Proc SPIE, 1973, 41
- 5 Rosakis A J, Freund B. J Eng Mater Technol, 1982, 104
- 6 Post D. Molr'e Interferometry for Deformation and strain studies, 1985, (10): 24(4)
- 7 Button B L, Dobbins B N, He S P, Kapasi S, wang L S. 3D Deformation Measurement Using ESPI Proc Appl opt and Opto-Electronics, Nottingham England, 1990
- 8 Shellabear M C, Tyrer. Optics and Lasers in Engineering, 1991, 15

(佚名撰)

引力波检测 gravitational waves detection 研究这一项目具有重要的意义:(1)对现有引力理论提供一个重要的检验,深化人类对引力本质的认识;(2)以引力波检测器为观测工具的引力波天文台,将开辟人类观测宇宙的新窗口;(3)引力波检测研究将促进精密测量技术,特别是量子检测技术的发展。

1916年,爱因斯坦根据引力场方程的解,预言了引力波的存在。1918年,又给出引力辐射公式指出:辐射功率依赖于运动体系质量四极矩对时间的三次微商,并得出引力波传播速度和偏振特性,从而奠定了引力波理论的基础。在此之后的其它引力理论也预言了引力波的存在,但给出不尽相同的性质。

从广义相对论观点看,引力波是变化着的四维时空曲率的传播。空间任意两点间的间隔,将因引力波的作用而变化。在局部罗伦兹(Lorentz)框架中,检测空间两点因引力波作用而产生的距离变化,是检测引力波的基本依据。这个距离变化极之微小(相对变化 $\Delta L/L \sim 10^{-20}$ 量级),因而要求引力波检测器有极高的灵敏度。

20世纪60年代,美国J. Weber首先进行引力波实验检测。他用以接收引力波信号的天线是一根长153cm,重 1.4×10^3 kg的圆柱形铝棒。1969年,他发表的检测结果是:在相距1000km的马里兰(Maryland)大学和亚贡(Argonne)国家实验室的两座天线,多次检测到来自银河中心的引力波符合信号。Weber的结果,未能为其它实验组所证实,但他的检测引力波的方法(称为共振质量检测法)包括远距离信号符合的方法,仍然是现代引力波检测的基础。

1976年,R. P. Giffard指出:共振质量引力波检测器的灵敏度,取决于检测系统的噪声,系统噪声与天线的工作温度和材料损耗、换能器和前置放大器的阻抗匹配以及前置放大器的噪声有关,并指出提高这类引力波检测灵敏度的方向。被称为第三代共振质量检测器(超低温检测器),如美国Stanford大学和意大利Rome大学的5t天线,工作温度已降低至100mK。换能器也发展了超导换能器、多模宽带换能器和参数换能器等,在增益接收频带,提高灵敏度方面有了很大的进展。Giffard还指出:放大器噪声将最终限制引力波检测器的灵敏度。具有极低噪声的超导量子干涉器(SQUID)已被普遍采用,其噪声已接近量子极限。

1971年,G. E. Moss等人在美国休斯(Hughes)实验室发展了另一种类型的引力波检测器——激光干涉型引力波检测器。干涉仪光臂两端的反射镜(以及附属质量)构成自由质量引力波检测器,这种检测器本质上是宽带的,由于地面振动的干扰,目前的检测频率下限约为100Hz量级。

激光检测器的主要噪声是光源的散粒噪声,增加入射光功率可降低这种噪声。从信号接收方面看,检测器接收灵敏度与有效光臂长L成正比,对于来自超新星事件的引力波,最佳有效臂

长为 $\frac{1}{2}\lambda_g$ (λ_g 为引力波波长)。L \approx 150km。

20世纪80年代初,德国马克斯—普朗克量子光学研究所的激光检测器,使光在反射镜间往复反射以增加有效臂长,在30m几何光臂间实现反射102次,使有效臂长达3km。由于反射光不能重叠,故要有较大的反射镜直径。美国格拉斯哥(Glasgow)大学研究组发展了另一种方法,调节两反射镜使成一光学谐振腔(Fabry perot腔)。等效臂长取决于光腔的损耗,他们在10m几何光臂上使有效臂长达30km。

几何臂长达数千米的检测器已在美国、意大利和德国开始兴建,分别使用多次反射或谐振腔技术,使等效臂长达150km。这些大尺度激光检测器预计于20世纪末建成,检测频率下限达10Hz,灵敏度达 10^{-22} 量级,实际上将成为引力波观测天文台。

mK温度的共振质量检测器的灵敏度,也将达 10^{-20} 水平。灵敏度进一步提高将受到测不准关系的限制。或者说,已达到测量的量子极限(在此情况下,重达数吨的天线棒,其行为类似于一个自由电子)。进一步提高检测灵敏度的努力,将导致一个新的检测领域——量子及亚量子测量领域的诞生。一种称为“量子非破坏检测”(Quantum Nondemolition Detection)的理论已被提出,在激光检测方面,类似的方法称为“光的挤压”(Squeezing)技术,初步的实验结果已经得出。

其它的引力波检测方法,例如采用空间技术或利用天体以检测引力波也已取得进展,但当前的主攻方向仍然是低温共振质量检测器和激光干涉检测器,前者的关键环节是制造出更低噪声的SQUID,后者的关键是得到大功率(百瓦量级)、高效率、单色性、稳定性好的连续激光源, YAD固体激光器有望取代A+激光器成为这样的光源。

引力波信号可望于20世纪末被检测到,量子极限下的检测技术将在实践中得到应用。21世纪,引力波天文台将揭开观测宇宙的新篇章。

参考文献

- 1 Weoev J. Phys Rev D Lett, 1970, 22, 24, 25
- 2 Moss G E et al. Appl Opt, 1971, 10: 2495
- 3 Lightman A P, Lee D L. Phys Rev D, 1973, 8: 3299
- 4 Giffard R P. Phys. Rev D., 1976, 14: 2497
- 5 Caveo C M et al. Rev Mod phys, 1980, 52: 341
- 6 Hough J et al. Quantum Optics. Experimental Gravily, and Measurement Theory, 1983, 515
- 7 Bocko Johnson M F. W. W. phys Rev A, 1984, 30: 2135
- 8 Wu L A et al. J. Opt Soc Am, 1987, B4, 1465
- 9 Shoemakel D, et al. Phys Rev D, 1988, 38: 423

(中山大学物理系崔世治、胡恩科教授撰)

流体力学

大气中波与流的相互作用 是大气动力学的重要课题之一。1939年, Rossby首先讨论了纬向平均流同驻波之间的关系,指出在弱的纬向平均流时期,半永久性阿留申(Aleutian)低压趋于向西飘移,并且反之亦然。Rossby和Willett(1948)又研究了与波流作用有关的指数循环。Charney(1949)研究了行星波系的垂直传播,指出高层大气对行星波的穿透是极端敏感于平均纬向风结构。1961年,Charney和Drazin等研究低层行星尺度的扰动向高层传播时,提出了非加速原理。

Eliassen和Plam(1961)对波与流相互作用的研究做出了较突出的贡献,他们得到可用于诊断分析的类波扰动对纬向平均流加速的EP通量。自从EP通量引入后,吸引更多的学者关注并从事波与流相互作用的研究。Andrews和McIntyre(1976)首先推广了EP通量。他们通过引进剩余环流分量V和W,而得到变形后的欧拉方程,这样做的好处在于能把扰动的热量部分从热

量方程中搬进动量方程进行统一处理。除此之外,另一个原因是,原来 EP 通量中 $\frac{\partial(u'v')}{\partial y}$ 是一个“病态”条件,因为此项实际计算出来的量级要比尺度分析所得的量小一个量级。为避免这样“病态”条件的出现,Andrews 等推广了 EP 通量。

在 Andrews 等推广的 EP 通量中,主要适用于正压并含有扰动的位移项 η' ,不便于用资料直接诊断。为此,高守亭等人(1988)又进一步把 EP 通量关系推广到斜压大气中,并避免扰动位移 η' 的出现,可用常规观测资料直接进行诊断。Andrews 和 McIntyre(1978)再次把 EP 通量关系扩展到有限振幅的扰动,他们使用了广义的朗格拉日平均(Lagrangian-mean),得到了有限振幅的非加速原理。总的说来,EP 通量关系被扩展成两种类别,其一是适用于小振幅的波动,但含有非守恒效应的广义 EP 通量;其二是适用于有限振幅的 EP 通量关系。Edmon 等(1980)利用箭头展示了 EP 通量的垂直剖面,这种剖面图是诊断 EP 通量辐合、辐散的直观方法。

Plumb(1985)认为 EP 通量仅是一种纬向平均量。因此它只能诊断纬向平均的沿东西方向和垂直传播的波的特征。如果资料进行南北平均,并想分析研究波动的南北向传播,纬向平均的 EP 通量关系失效,需要导出新的诊断关系。为此,他得出一个新的矢量

$$\vec{B}^R = P(\nabla^2 - E, -u'v', f_0'v' / \frac{\partial Q}{\partial Z})$$

由于在压力坐标系中,广义 EP 通量中含有扰动位移项,不易直接用资料进行诊断。为克服这一不足,Andrews(1983)又把 EHM (Edmon, Hoskins & McIntyre, 1980)导出的准地转近似下的 EP 通量矢推广到等熵坐标系中有限振幅的 EP 通量矢。即把

$$\vec{F}_P = (-u'v', f_0' \frac{V'Q'}{\theta_P}) \text{ 变为 } \vec{F}_Q = [-(\delta v')u', P'M'_x]$$

K. K. Tung(1986)认为在压力坐标系中,由于平均非地转经向流(南北向)的存在,给用 EP 通量散度去诊断纬向平均流的加速带来困难。但在等熵坐标中这个问题可以避免,于是他给出了等熵坐标系中非地转条件下的 EP 通量关系。这个关系不限于小振幅、定常态和绝热流。而后 Yang 等(1990)又进行了全球性的等熵坐标系中 EP 通量散度以及等熵混合系数的研究。

在研究波及纬向平均流相互作用的同时,Blackmon 等(1977)较早地指出波与时间平均流的相互作用。后来 Hoskins 等(1983)给出了可以诊断时间平均流加速度的 \vec{E} 矢量 = $(v'^2 - u'^2, -u'v')$,并用 \vec{E} 矢量的辐射散与辐合解释了一些遥相关现象。

临界层波动量吸收及波破碎现象也是波与流相互作用的重要内容之一。例如有名的 QBO(赤道平流层准两年振荡)和平流层爆发性增暖现象。Dickinson(1969)研究了远离源区的涡动同纬向风之间的相互作用关系。他不仅推广了 Charney 和 Drazin(1961)的非加速原理,更主要的是较好地解释了内边界层($u - c = 0$)附近波与平均流的相互作用。Holton(1975)对临界层的情况进行了研究,并指出,在临界层以下有向上输送动量,且相对于平均流有向东运动的波。而在临界层以上,有向下输送动量且相对于平均流有向西运动的波。Matsuno(1971)研究了平流层爆发性增强。并有两个基本特征:其一是向上传播的波从平均流中吸取能量时,平均流减速;其二是,在临界层有波能吸收现象。曾庆存等(1986)对大尺度扰动的演变和波与流的相互作用做了在球面大气上的研究,他指出,在某些条件下,由于旋转适应,非纬向扰动可以完全被纬向流吸收,并指出非纬向能量的吸收依赖于纬向急流的切度和扰动的尺度。

波破碎现象也是波与流相互作用的一个方面。重力波上传在平流层内的破碎以及 Rossby 波在非线性临界层或者说“缓冲带”(Surfzone)内的破碎都会影响平均流。McIntyre 等(1984)研

究了平均流内的“缓冲带”。他们指出,“缓冲带似乎是波破碎的主要区域,并为从波产生区到“缓冲带”的净角动量输送提供了一个物理图像。这个图像描述了所谓负粘性现象。

除了从动力甚至数值方面研究波与流相互作用外,不少气象学者也进行了天气学和诊断分析方面的研究。Wallace(1979)在研究北半球冬季环流瞬变涡动输送的热量、纬向动量及位涡等量的分布中发现,在急流高度上纬向动量的无旋瞬变涡旋通量要比时间平均流平流动量的无旋通量小得多。Lau(1982)研究了大尺度的瞬变波对时间平均流的作用。他指出,瞬变涡旋引起的动量和热量的水平输送对时间平均流的影响而言,热量输送一般强于动量输送。G. T. Shutts(1982)指出,即使对阻高的研究,中性涡旋能够通过雷诺应力(即扰动相关量)增援阻高流型,有利于阻高的维持。

尽管多年来关于波与流相互作用的研究广泛而深入,但主要集中在对大尺度系统方面的研究。近来,人们发现波与流相互作用与中尺度系统发生发展有关。高守亭(1991)发展了一种研究中尺度中波与流相互作用的 A-B 混合方程法,同时,高守亭等(1991)研究了波能集中与低空锋生的关系。可见对中尺度系统的研究,对了解波与流相互作用也是重要的,这为波与流相互作用的研究开辟了新的前景。

中尺度系统的发展,同基本流的垂直切变大小有很大的关系,而基本流的垂直切变增大又依赖于波与流的相互作用,所以中尺度系统的研究同波与流之间的相互作用有紧密的联系。

另一个重要方面,大气本身是非均匀介质(主要指大气层结和风速的分布不均匀)。这种不均匀造成扰动波的波数在空间中变化,波数的改变又导致波包的群速度变化,结果在某些区域(比如急流的出口区)造成波能的局地集中,在波能集中区,基本流发生局地改变有可能导致强风暴的发展。

除了以上两个方面外,波能串级以及适合中尺度波流相互作用的广义 EP 通量关系仍是值得研究的。

当前在波与流相互作用中存在的主要难点是,如何找出波能局地集中同局地平均基本流加速的定量关系,这是波与流相互作用同中尺度系统发展相联系的关键。一旦这种关系被找到,中尺度系统的研究将会有重大突破。

总之,波与流相互作用的内容广泛而丰富,可以说涉及到大气动力学的各个方面,所以,对这方面的研究还有待于进一步探索。

参考文献

- 1 Dickinson R E. J Atmos Sci, 1969, 26: 73~81
- 2 Matsuno T. J Atmos Sci, 1971, 28: 1479~1494
- 3 Andrews D G, McIntyre M E. J Fluid Mech, 1978, 89: 609~646
- 4 Edmon H J et al. J A S, 1980, 37: 2600~2615
- 5 Plumb, R A. J Atmos. Sci, 1985, 42: 217~229
- 6 Tung, K K. J Atmos. Sci, 1986, 43: 2600~2618
- 7 Zeng Qing-Cun, et al. Advan Atmos Sci, 1986, 3(1): 39~58
- 8 Yang H, Tung K K, Olaguer E. J Atmos Sci, 1990, 47: 215~241
- 9 Gao Shouting. Advan Htrnos Sci, 1991, 8(2): 165~174
- 10 高守亭,陶诗言. 大气科学, 1991, 15(2): 11~21

(中国科学院大气物理研究所高守亭撰)

流体混合动力学

mixing dynamics of fluid 于 1984 年以后形成的流体力学新分支,它综合应用涡动力学、非线性动力学及计算流体力学等学科的最新理论,以从机理上透彻了解与流体混合问题相关的动力过程为目的,并为提出新的混合机制提供理论依据。

无论在自然界或人类生活中,流体混合都起着极为重要的作用。混合问题所涉及的范围非常广泛,如星系的混合,海洋、大

气中污染介质的混合,内燃机中的油气混合,生物工程、食品工业中的富氧过程及化学工业中的各种混合。从理论上讲,流动混合与拉格朗日(Lagrange)流有着极为密切的联系,对揭示湍流的奥秘将起重要作用。

混合动力学的机理研究,从1984年阿列夫(Aref)的开创性工作以来,有了很大的进展。但对其一般机理的研究尚进行得很不充分。除了奥提诺(Ottino)最近出版的专著外,没有任何一本流体力学或其它专著讨论混合问题的一般机理。以往对混合问题的研究大都建立在对个别具体问题的研究之上,缺乏统一的理论框架。现在,已初步了解了二维非定常流的混合机理,并开始着手研究三维流动的混合规律。目前的研究大都仍处于研究对流对质点流混合的影响的基础阶段,出现一些直接以工业为目标的研究以及发现拉格朗日混沌可用于流体分离过程。

虽然混合过程随具体问题的不同而有很大差异,但其共有的基本过程可抽象为流体质点团与周围流体的混合,这一过程大致可分为3个阶段:(1)以对流为主的质点团的拉伸、折叠变形阶段;(2)以分子扩散为主的扩散阶段;(3)以分子间作用力为主的断裂阶段。实际上,在真实流动中,这3个阶段是不可分的,同时发生的。影响混合的因素非常多,但最基本、最重要的是流场的对流作用。此外,还有化学反应、光电效应、分子扩散及主动质点等影响因素会对混合效果、效率产生影响。这些影响因素在各种大小不同的尺度上起作用。湍流对混合有着极为重要的影响。

对流动混合的基本要求是:以最少的能量消耗,高效、迅速、均匀地进行混合。为了均匀地进行混合,必须消除或缩小围绕着重物不动点的不参与混合的流体区域(孤岛)。具有良好混合性能的流场必须具有在有限的空间中对质点流具有无限的拉伸能力。由于混沌流在相空间中具有在有限空间中的无限拉伸一折叠的性质[斯梅尔(Smale 马蹄)],所以具有良好混合性能的流动必须是质点混沌的。同时,流场本身可以不必是混沌(欧拉(Euler)混沌)的,而只要求其质点流是混沌(拉格朗日混沌)的,所以,从湍流到高超音速流都可以找到具有良好混合性能的运动。由彭加勒(Poincare)、本狄克森(Bendixon)、一培希奥托(Peixoto)定理可知,具有混沌特性的动力系统的维数必须大于或等于3。所以,必须在二维非定常流或三维定常、非定常流动中研究混合机理。对二维周期流而言,产生质点混沌的流场的必要条件是其流线在相继周期内相交。

目前,研究混合问题大多数是在已知速度场的基础上,进一步研究其质点流,即动力系统

$$\frac{D\bar{x}}{Dt} = \bar{v}(\bar{x}, t) \quad (1)$$

或

$$\dot{\bar{x}} = \bar{v}(\bar{x}, t) \quad (2)$$

对时间 t 积分,则得到

$$\bar{x} = \bar{f}_t(\bar{x}_0) \quad (3)$$

其中 \bar{x}_0 为其初始位置。称 \bar{f}_t 为流。对二维不可压流场,它们组成一个哈密顿(Hamilton)系统

$$u = -\frac{\partial\psi}{\partial y} \quad (4.1)$$

$$v = \frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (4.2)$$

其中 ψ 为流函数。这类系统具有哈密顿系统的一些特点,如相空间 (x, y) 不收缩,因此不存在任何形式的吸引子。

由以上研究途径可以看出混合研究的一些特点:第一,混合问题的一般机理研究极为复杂,即使仅研究对流混合机理,而不涉及化学反应、分子扩散及主动质点等其他效应,其复杂程度也是一般流体力学问题所不能相比的,因为一般无法得到解析的速度场(纳维尔-斯托克斯(Navier-Stokes)方程仅在一些特殊情形下存在解析解);即使得到了解析的速度场,也无法得到解析的流(如果可以求出解析的流,则它必定不是混沌的)。所以,总的来说,混合问题的研究至少比一般流体力学问题复杂一个数量

级。第二,与一般的混沌研究不同,在混合问题中所关心的是流的短期特性,即混合的速度,而不是系统的长期特性,第三,在混合问题中采用的一般都是大扰动,而不是小扰动,从而无法直接应用动力系统中那些基于微扰理论的结果,如KAM理论、梅尼克夫(Melnikov)方法等等。因此,在研究混合问题时必须综合应用非线性动力学方法和流体力学方法,并需要进一步发展适合于混合研究的特殊方法。

目前,研究混合问题的理论方法有两大类,即非线性动力学方法和流体力学方法。在非线性的动力学方法中还可以分为定性研究和定量研究两部分。

定性方法有:(1)彭加勒截面(映射);它可以给出混沌流的直观视觉印象。(2)周期点结构:相空间中周期点(双曲点、椭圆点和抛物点)的结构、位置及其稳定性和分叉特性决定了流的动力特性,因此在混合问题基础理论研究中具有根本意义。(3)流形分析:通过对周期点的局部流形和全局流形的拓扑性质进行研究,有助于了解流的局部和总体动力学特性。在混沌流中会出现同宿、异宿点,同宿、异宿横截,KAM环(二维时),阿诺德(Arnold)扩散(三维时)等。这些结构的出现对于判断是否混沌有重要意义。(4)斯梅尔马蹄:理论上已证明凡能够产生斯梅尔马蹄的流必定是混沌的,因此它也是混沌的一个重要判据。

定量指标有:(1)李雅普诺夫(Lyapunov)指数(集)及其结构。在混沌流中至少有一个李雅普诺夫指数是大于零的。当系统中存在怪引子时还可以利用李雅普诺夫指数集的结构特性对其进行分类。(2)分形维数及其他维数(容量维、信息维等)。(3)功率谱。

在混合问题研究中常用的流体力学方法有:(1)质点流分析。(2)脉线图像。通过研究脉线图像可深刻地揭示流的动力特性,因为从周期点出发的脉线就是该周期点的不稳定不变流形。(3)质点散布均匀度。通过计算质点散布均匀度,可以了解质点在空间中的混合程度,它是判断混合均匀程度的一个重要指标。

为了透彻了解混合机理,必须在以下诸方面进行深入的理论研究:(1)深入研究欧拉混沌流场中的拉格朗日混沌质点流及其混合性能;(2)研究能产生涡量混合的流,即研究能对涡进行统一拉伸一折叠,并产生涡量分形结构的流,因为只有这种流才可能进行湍流混合;(3)脉线动力学的建立和研究;(4)主动质点、化学反应及分子扩散等因素对混合基本过程的影响。此外,在进行理论研究的同时还必须开展试验研究,以检验理论的正确性。

参考文献

- 1 Aref H J. J. Fluid Mech, 1984, 143, 1~21
- 2 Ottino J M. The Kinematics of Mixing, Stretching, Chaos, and Transport, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1989
- 3 Ottino J M. Annu Rev Fluid Mech, 1990, 22, 207~253
- 4 吴鍾结. 力学进展, 1993, 23(1): 42~57
(空军气象学院吴鍾结教授撰)

Weis-Fogh 机构 Weis-Fogh Mechanism. 是一种与常规不同的产生升力的机构,由英国生物学家 T. Weis-Fogh 首先发现而得名。他在1973年观察一种蜂科类昆虫的飞翔运动时,发现“振翅拍击和挥摆急动”而产生升力的新机构。它不仅能产生更大的升力,并能瞬时地产生升力,不像普通机翼那样存在 Wagner 效应(即升力产生的滞后现象),还有极好的机动性和启动性。

1973年, T. Weis-Fogh 从生物学角度提出一种产生升力的“振翅拍击和挥摆急动”的机构后,同年,流体力学大师 Lighthill 敏感地意识到它的涵义,立即从流体力学角度论述了升力产生的新机理。假设小黄蜂在“振翅拍击和挥摆急动”过程,两翅拍击在一起为 a, 然后两翅张开绕尾缘旋转为 b, 空气进入空隙;两翅张开到一定角度后,两翅分开挥摆急动为 c;接着开始下一次拍击,遂通过一简化的刚性模型,依两翼板旋转张开一分开

一闭合如 a, b, c 给出模拟。根据无粘性二维流动理论研究, Lighthill 获得该运动机构产生的速度环量的计算公式。当最大张开半角 $\alpha = 60^\circ$ 时,求得在两翼张开过程中能产生的速度环量值 $\Gamma = 0.69\Omega C^2$,其中 C 为翼板弦长, Ω 为两翼旋转角速度。

Maxworthy (1979) 通过刚性机构试验,证实了 Weis-Fogh 和 Lighthill 的一些基本提法,还进一步指出粘性效应对两翼张开时产生前缘分离涡的重要作用,使之比理想流体无分离涡时产生更大升力,其速度环量一直增加到张开半角 $\alpha = 150^\circ$ 时,且有 $\Gamma = 6\Omega C^2$ 。

Haussling (1979) 应用 N-S 方程,数值求解了 Weis-Fogh 机构张开过程中瞬时流线和等涡线,示出了流动图象。

Edwards 和 Chang (1982) 根据 Lighthill 的思路,在计算两翼板张开过程中,加入一个集中涡以代表实际前缘分离涡,计算结果升力增加,并获得与 Maxworthy 试验相符的数据。J. C. Wu 和 Hu-Chen, (1984) 也作出类似结果。

Spedding 和 Maxworthy (1986) 通过可视化流场观察和瞬时升力的测定,进一步证实 Weis-Fogh 机构的平均升力系数(基于翼梢平均速度表示)可达 7~8 之高。人们早就怀疑根据一些昆虫的翅翼,如果按常规的升力理论产生升力,往往不足以支持其自身重量和推进其飞行,这些昆虫正是使用了不同的机理来产生升力才有了可能。

自 Weis-Fogh 揭示了一种产生空气动力学升力的新机构后,在开展其机理研究的同时,探讨其实际应用显然有重要意义。S. B. Furber 和 J. E. Ffowcs Williams (1979) 首先提出在透平机械中能否利用 Weis-Fogh 效应的问题,他们通过对轴流压气机转子和静子的叶片之间相互作用的理论分析和试验研究,证实了在很强的转子和静子两组叶片相互作用所引起的 Weis-Fogh 效应,能改进压气机的性能。

设想利用 Weis-Fogh 机构来设计船舶推进装置也已提出,日本神户大学 TsutaHara 和 Kimura (1987) 他们模仿 Weis-Fogh 机构的船舶推进器,将两个推进翼在双体船之间作周期性开启和闭合运动,通过理论和模型试验,测量其产生的推力和它的阻力,当两翼板开启角为 30° ,翼的横移运动速度与船速之比为 0.5 时,可获得高达 75% 的推进效率,全过程平均效率大约 53%,已呈现进一步研究的前景。

目前,人们对 Weis-fogh 机构的机理并没有完全揭示清楚,需要有进一步的发展,特别在应用方面,虽然已给我们一些启迪,但还远有潜力。可以预料,Weis-Fogh 效应必将会有更多方面被人类所利用。根据以上综述可知,当前这一领域研究的热点将有:(1)结合 Weis-Fogh 机构的运动,开展非定常运动机翼流体动力学研究,对其全过程全面揭示其流体动力特性和诸参数(如翼板开启和闭合角速度、角加速度、翼板脱开后速度和角速度以及全过程“振翅—拍击”的频率等等)影响的规律;(2)应用于改进飞机空气动力学设计方面,特别在飞行机动性上研究;(3)应用于船舶推进方面,特别是浅水推进方面将会有大的作为;(4)在其他工业部门的广泛应用。

参考文献

- 1 Weis-Fogh T. Journal Exp Biol, 1973, 59: 169~231
- 2 Lighthill M J. Journal of Fluid Mech, 1973, 60: 1~17
- 3 Maxworthy T. Journal of Fluid Mech, 1979, 93: 47~63
- 4 Edwards R H, Cheng H K. Journal of Fluid Mech, 1982, 120: 463~473
- 5 Spedding G R, Maxworthy T. Journal of Fluid Mech, 1986, 165: 247~272
- 6 Tsutahara M, Kimura T. Journal of Fluids Engineering, 1987, 109(2): 107~113

(武汉交通科技大学王献孚教授撰)

帆空气—水动力学 aero—hydrodynamics of sailing
帆艇的每一部分都在不断地研究改进和完善,并能紧密地反映

出当前技术发展的最高水平。其中帆空气—水动力学研究正在起着决定性作用。

帆是在十分高的升力系数下工作的,并有船体和海面边界存在,入射风又受海面梯度风的影响,帆空气动力学与其它多数升力方面之间有重要差别。Curry (1925) 首次积累了许多关于帆的风洞试验资料,他曾得出帆最佳拱度大约为 0.07 的不正确结论(现代帆的最佳拱度大约为 0.10~0.18 之间,而在 Curry 出书的当时通用的风帆拱度大约只 0.03)。后人们做了许多帆的风洞试验,包括普林斯顿大学 (1961) 和南安普敦大学 (1968) 一系列风洞试验报告。1936 年,Davidson 曾利用“Gimcrack”号帆船实际测得一组风帆气动特性系数,虽然这些数据是相当粗糙,而一直被应用至今。70 年代中期,麻省理工学院 Kermin 等 (1974) 又对 2 条赛艇“Standfast”号和“Bay Bea”号实测得到一些全尺度的纪录数据。

在帆空气动力学理论研究方面,二维定常软帆线性理论首先由 Thwaites (1961), Nielsen (1963) 和 Barakat (1968) 等人解出, Vanden-Broek (1982) 进一步提出了非线性软帆的精确数值解。但这些理论还不能推广应用于求解更一般的二维帆空气动力学问题。从实用的观点, Jackson 等人 (1984) 提出的数值流体力学方法,已可确定二维薄膜帆面形状和压力分布等等问题。对于实际三维帆空气动力学, Milgram (1968) 发展了帆翼升力线理论,可用来研究帆与船体间隙对获得最大推力影响问题以及获得最小诱导阻力的帆翼问题。升力线理论不能解决帆面设计问题,三维帆面压力分布的计算必须由升力面理论解决。自 80 年代以来,由于计算流体力学的发展,一系列数值方法已可用来求解这类问题,包括三维弹性帆面可以通过对弹性薄膜的微分方程和帆膜升力面理论的积分方程联立耦合求解。不定常帆翼的理论研究具有重要意义。二维帆翼在横向阵风作用下瞬时升力可用 Sears (1941) 导出的著名升力函数 $S(x)$ 来确定,对于平行于主流方向阵风,作用于二维翼上的瞬时升力亦已有 Horlock (1968) 导出。三维不定常实际帆翼的主要问题,和突风效应和船舶纵摇时的影响,利用计算流体力学的数值模拟方法现已有了计算确定的可能。

帆艇的水动力学性能对提高船速具有决定性作用。1936 年, Davidson 指出,帆艇水池试验不仅要测量阻力,并且还要测量侧向力,它在很多方面比常规船舶的船模试验更为复杂,其中船体除升沉和纵摇外,在各个自由度上被固定,试验要在不同航速、不同横倾角和不同偏航角下进行。Davidson 同时还提出的完全自由帆航试验技术,亦在 80 年代被发展应用,自由帆航试验技术的主要优点,只需要更少的试验点,而不再需要如半自由帆航试验方法那样对速度—横倾角—偏航角矩阵的插值。然而,加拿大国家研究委员会在使用自由帆航系统 10 多年后的经验表明,半自由帆航技术仍是最佳选择。水池试验模型大小是另一个重要问题,在 Davidson 的先驱工作后近 40 年中,人们都使用 1:13 的比尺模型。直到 70 年代, Kitkman 和 Pedrick (1974) 的论文指出,对小比尺船模,试验数据离散较大,许多试验点的误差在 10%~20% 范围内,而大比尺船模所获得的结果,在误差方面有相当大减少。这是一篇具有重大影响的论文,它使近年来大多数美洲杯辛迪加组织转向要求采用 1:3 大比尺试验模型。

帆艇水池试验研究作为改进帆船水动力性能的一种工具,其主要目的是设计出一种阻力小和航向稳定性好的船体线型。荷兰 DELFT 船舶流体力学试验室曾对 22 种不同的早期优秀帆船船体外形的阻力、侧向力、稳性等等进行了系统研究,所发表的 DELFT 船体系列资料,对帆船设计和选型有过参考价值。1983 年澳大利亚 I 队试用船体龙骨小翼,成为体育运动历史上一件引人注目的成就,从此在 12m 帆艇比赛中具有龙骨小翼的船体被广泛采用。1987 年 2 月,美国帆船队进行在船体表面粘贴开槽膜片减小船体阻力等等措施,从而在世界范围内又一次推动了帆船研究的进一步开展。

自 1988 年夏季以来,一种高级的 VPP 程序和帆航模拟器,

各国都在积极进行研制。VPP 是帆船速度预测程序的简称。它正在成为最高层帆船设计师的一个最重要工具,也是帆船竞赛教练的一个最重要工具。VPP 可通过计算程序在计算机上实时模拟帆船运动,在计算机上事先对各种比赛方案实践两条帆船之间的竞赛,在屏幕上显示出运动图像,还可输入风的统计数据等外部影响条件,通过两条帆船围绕全程的竞走,作出对一个已知对手竞赛取胜的概率。

VPP 程序需要对风帆空气动力和船体水动力的平衡方程进行求解,需要建立帆船正确的空气动力模型和水动力模型,其中计算流体力学应用正在发挥越来越大的作用。

关于帆船研究大多数有份量的论文,可以在美国和新西兰等国家召开的一些学术讨论会的论文集里找到,如每年两次在美国东海岸召开的乞沙比帆船学术讨论会;每年1次在美国西海岸召开的关于航行空气/水动力学 AIAA 学术讨论会;近些年来在美国佛罗里达州又开始另一系列叫坦帕海湾帆船学术讨论会;在荷兰阿姆斯特丹召开的每年2次关于帆船建造发展的荷兰人学术讨论会等等。另外, Marchajl 1979 年出版的《帆船空气—水动力学》,1982 年出版的《帆船理论和实践》以及 1986 年出版的《适应海况的船》,系统地报导了英国南安普敦大学数十年帆船研究成果,并以非常清楚和简洁的方式阐述了帆船的基础。1990 年,英国剑桥大学出版 Joubert 和 Larsson 所写《帆船设计原理》一书反映了更先进的研究成果。

根据以上简单的综述可见,帆空气—水动力学当前研究的热点为:(1)VPP 程序和帆航模拟器的研制和完善,鉴于它们的技术细节有保密性和重要性,近期内将会有更好的发展;(2)由于帆空气动力试验测试上困难,以及帆船水动力船池试验大比尺模型的昂贵,计算流体力学的应用将发挥越来越大作用;(3)新技术的应用和开创,如船体减阻新技术,改进风帆气动力新方法等等,都是至关重要的研究课题,预计还能不断取得新的突破;(4)对帆的未来研究中,诸如在突风和在帆船纵摇中帆帆的非常运动的气动特性研究,在模型试验存在困难的情况下,开展理论研究和数值计算解决问题尤有必要;(5)针对帆帆的风洞模型试验和水池船模试验中尺度效应的修正及试验方法的改进,可望在今后获得逐步解决。

参考文献

- 1 Milgram J H. Ann Rev Fluid Mech, 1972, 4: 397~430
- 2 Kirkman K L, Pedrick D R. Proc Soc Nav Archit Mar Eng Annu Meet, 1974, 1~27
- 3 Marchaj T C A. Aero-Hydrodynamics of Sailing, London, Adlard Coles. 1979
- 4 Letcher J S, Cressy C P, Oliver C C, Fritts M J. Mar. Technol., 1987, 24(4), 265~285
- 5 Lars Larsson. Ann Rev Fluid Mech, 1990, 22: 349~385

(武汉交通科技大学王献宇教授撰)

分层流体中混合流体团运动生成内波

内波的研究可分为两方面。一方面涉及特定类型内波的性质,包括它的生成、传播和衰歇,具有确定性;另一方面涉及内波场统计特征,具有随机性,包括各种类型内波之间以及它们与环境间的相互作用。

关于内波研究的趋势,1984 年在夏威夷召开的内重力波和小尺度湍流会议认为,内波研究正在从以运动学研究为主转向以源、汇和内部流动等因素为主的动力学研究,以及搞清内波和湍流联系问题为主。Garrett 和 Mund 认为波-波相互作用过程是以后一段时间理论工作的重点,其中涉及大量的计算,也需要严谨和细致的分析,特别对高垂向波数的波,强相互作用使弱作用假定失效,必须对波、微结构和湍流之间的相互联系作进一步的研究。此外与波的产生、边界作用、自由表面变化相联系的许多方面也提出了问题,尤其对波产生机理的识别和内波、剪切失稳、湍流间的相互作用需要予以重视。

依混合流体团产生的不同方式,可将该研究的应用背景分为以下几个方面论述。

1. 机械混合:(1)运动物体在分层流体中产生的尾迹流。运动物体参流场影响和尾迹流破碎是生成内波的两个方面,前者是短时间的,后者具较长的作用时间,是产生内波的主要源泉。潜艇在海洋中运动产生的内波会与声波相互作用,从而改变声学特性,使潜艇的深度控制装置无法正确地确定潜艇的深度;另一方面,通过对运动潜艇产生的内波的探测可以判断潜艇的存在和所处位置,对这种探测的研究在军事发达国家很受重视。此外,海生动物在海洋中运动,飞机在大气中的运动都会产生具有较大势能的尾迹流,这些尾迹流的破碎会导致内波的生成。(2)内波破碎、波-波相互作用等过程中也会形成不同大小的流,与周围流体相比,这种流具有较大的势能,因而在寻求原有的势能水平时,会伴有内波的生成。(3)在底部地形上的各种潮汐流、瞬变流也可以产生内波,并且发生波-流的相互作用,导致这些流的运动特性、外形发生改变。

2. 剪切失稳,剪切流的失稳所产生的大尺度涡旋,使分层流体混合而形成一流体团,该流体团的破碎会产生孤立波,Maxworthy 用它来解释木星上大红斑的形成。

3. 对流作用:指水平或垂向由于温度变化而引起的运动。Clarkd 用这一过程来解释澳大利亚中南部地区天空中出现的阵阵晨风(morning glory), Briggs 观察到火星上也有类似现象。

其他还有,在大气中,雷暴外流(thunderstorm outflows),海风锋(seadreeze fronts),大气悬浮体(atmospheric suspension);在工业事故中,稠密气体在大气中的扩散;石油在海面上的扩散;在海洋江河的出入口形成的盐水楔(salt wedge);悬浮淤泥或泥炭引起的混浊流等。

根据流体分层情况的不同和混合流体团破碎位置的不同,可将混合流体团在分层流体的运动和分层流体中内波的产生分成 6 种情况。对于中间侵入型的 3 种情况已有一些实验、数值分析和理论分析报道,对底部侵入型的 3 种情况仅有有限的实验报道。

中间侵入型流连续分层情形 最早的实验工作由 Schooley 和 Stewart 完成。他们做了自驱动物体在弱线性分层流体中运动产生湍流尾迹的实验,发现在物体后的尾迹中流体密度近似为常数。这股混合流体团垂直向很快地崩溃,同时在水平面内扩展,这与混合流体团的均匀密度流体中扩散成不规则的锥形的结果截然不同。他们认为这种现象是重力引起的,在分层流体中,重力迫使混合流体团恢复到自己的密度所处的水平。实验同时给出了两个设置在分层流体中染色粒子间水平距离随时间的变化情况,他们由此认为垂向尾迹的破碎是内波产生的有效源泉。

对二维圆形混合流体团在线性分层流体中破碎并且生成内波的细致实验是由吴京进行的。他受美国海军研究部门的委托,以潜艇在海洋中运动产生内波为背景而进行这项研究。他得到混合流体团外形的变化过程结果,并认为由于分层的稳定作用,在混合区边界附近的湍流将很快衰减,因此不会引起混合流体团与周围流体之间的混合。他把破碎过程分为初始阶段($Nt < 3$, N 为 Brunt-Vaisala 频率, t 为时间),主要阶段($3 < Nt < 25$)和最后阶段($Nt > 25$)。他还给出了前两阶段混合流体团水平宽度 x 及头部的速度 v 的经验表达式。

$$\left. \begin{aligned} \text{初始阶段 } (x-x_0)/x_0 &= 0.29(tN)^{1.06 \pm 0.05} \\ &v/Nx_0 = 0.32(tN)^{0.68} \end{aligned} \right\}, tN < 3$$

$$\left. \begin{aligned} \text{主要阶段 } x/x_0 &= 1.03(tN)^{0.55 \pm 0.02} \\ &v/Nx_0 = 0.57(tN)^{-0.745 \pm 0.02} \end{aligned} \right\}, 3 < tN < 25$$

前两阶段由重力决定了模化准则,最后阶段则由于粘性的作用而复杂化。此外,他还用流场显示方法观察到了内波,用与波谷和波峰相联的移动的线来表示产生的内波,这些线从破碎中心移向远处同时减小了与平面方向夹角,破碎的能量密度偏向于高频,它在 Brunt-Vaisala 频率为 8/10 处达最大值,实验没有给出波幅的数据,但他观察到了约有 0.2 倍混合区半径大小的波

高。他也指出混合流体破碎是内波非常有力的产生源。

Schoole 和 Hughes 在上述实验基础上分别对 4 种密度分布进一步作了实验研究,给出了这 4 种密度分布的等温相线,表明在这 4 种情况下都有内波产生,而弱分层流体中,内波传播速度比在较强分层流体的波速小。

(1) 3 层流体情形: Amen 和 Maxworthy 的实验结果与吴京等的实验结果有着很大的差别,混合区水平长度不再随时间的 $1/2$ 次幂而增加,虽仍是无量纲时间的幂次,但幂次数值依实验的参数在 0.89 至 0.38 间变化。他们指出,此种情形混合流体的运动不能简单地用准稳态浮力和惯性力平衡来描述,内孤立波的产生以及它们与混合区的相互作用是解释实验的关键。 $\varphi = h/H$ 是一个很重要的参数,它决定了扰动的大小。他们的实验中 $\varphi = 0.2$ 代表较强的扰动。当扰动垂向尺度和分层区尺度相当时,将会产生较多的孤立波,这会导致较强或较长时间的波与混合区相互作用,这种情形更接近海洋实际。他们给出了孤立波产生和演化的细节照片及数据。

Maxworthy 的实验较前述工作中的跃层厚度更薄。他发现混合流体团的头部的水平延伸依时间线性增加,混合流体的破碎产生一系列依振幅大小排列的孤立波,混合流体总是隐于领先的孤立波内。他指出混合流体团生成的波的个数、波幅依赖于混合流体团的特性和周围分层流体的特性。

Kao 和 Pao 用 3 种显示方法(着色法、迹线法和热线仪法)来研究混合区破碎和内孤立波的产生。

Gilreath 和 Brandt 给出了自驱动物体在分层流体中产生内波的实验结果。考虑了两种密度分布,一种是密度变化层厚度比驱动物体尺度大,另一种是该厚度比物体厚度小。最重要的结果是发现了尾迹湍流和小随机内波的强耦合。在第 2 种密度分布中,观察到了孤立波的存在,它们与壁面碰撞或相互碰撞后保持原有的形状。实验表明 Fr 数($= 2\pi U/LN$)对孤立波起着很重要的作用,它影响着波幅及波速。

Maxworthy 还考虑了地转效应的影响。在这种情形中,压力梯度与在分层流体中由于波支产生的 Coriolis 力方向相反,波幅沿着波峰变化,所以这一类波是内 Kelvin 孤立波。这种波的波速与旋转速率无关而与分层情况和最大波幅有关,旋转对波幅随时间的变化和波的横向结构有影响,与传播方向垂直的振幅呈现指数规律变化,这即离壁面越远,波速越小,这使得波向后弯曲以保证它作为整体以其一速度传播。理论上还没有预测到这些现象。

(2) 尖锐分层: Simpson 和 Britter 的实验表明,混合流体团的结构和动力学特性与在水平面上反射的无粘重力流相似,不论 Re 数多大,破碎浪花总是出现在混合区头部前。贾复等的实验表明,在混合流体团前方原底层流体被堆积成一波状物,此波与混合流体团以相同速度前进,混合流体团因有突起伴随而不出现破碎波状,湍流混合主要发生在后续体处。

(3) 中间流的理论和数值分析: Mei 考虑了处于水静平衡的分层流体,忽略周围流体的运动和粘性的作用,对完全混合流体区用了长波近似,把问题归结为一边值问题。他获得了与吴京的实验量级上一致的结果,指出当 $Nt < 1$ 时,长波近似有效,理论几乎适用于初始阶段。

Hartman 和 Lewis 考虑了周围分层环境对混合区的作用,用线性分析方法获得了部分混合流体稳态时的解。这种理论适用于混合流体团与周围分层的密度相差不大的情形,由于没有考虑粘性,对长时间由于粘性积累效应,该方法失效。在边界周围,解出现振荡,他们指出这是由于模型本身有问题造成的。他们最后指出,用这种线性方法来分析完全混合流体团的破碎问题是蛮干的。

Bell 和 Dugan 获得了混合流体团变形的短时间内的“精确”和渐近解。在求解时,引入了相似性假设,假定在混合流体团的界面上压力连续且等于当地水静压力,即假定了混合区流体与周围流体间无能量传递,在混合区总能量守恒。他们的分析表明,混合流体团以 $(tN)^2$ 作水平伸展。

Kao 应用以前分析重力流流动的理论来分析混合流体团的主要阶段,即认为混合流体在主要阶段作准稳态运动,获得了在主要阶段,水平延伸与 $(tN)^2$ 成正比的结果,并且主要阶段和 Bell 和 Dugan 的初始阶段结果进行匹配,与吴的实验相比较是一致的。

Manins 基于他的实验结果,假定在主要阶段浮升力和水平惯性力处于瞬时平衡状态,即考虑稳态的情形,获得了与 Kao 相同的结果。

Amen 和 Maxworthy 基于他们的实验,认为内孤立波的产生和它们与混合区的相互作用必须考虑。他们发展了一种无粘相似性方法,用四极子来代替混合流体区对外场的作用。他们指出,这种处理方法使边界条件不能满足,需要进一步的改进,理论结果与实验结果在 $tN < 2.5$ 区域相符。

Meng 和 Rottman 用 Hartman 和 Lewis 的方法来分析考虑旋转的混合流体破碎问题,并用连续的初始密度扰动来代替 H-L 中的间断扰动,这样消除了混合区边界上解的振荡性。但这种初始扰动的假定限制了 H-L 方法适用范围。

Yong 和 Hirt 采用标志网格法(MAC)从 N-S 方程出发求解了二维圆形混合区在分层流体破碎生成内波的问题。计算表明内波随着远离破碎核心区而很快衰减。结果与吴京的实验符合较好。

Dugan 等 Boussinesq 假定下,用差分方法求解了 N-S 方程用来模拟多种密度结构,包括均匀、非均匀混合流体区、混合区破碎的最后阶段。计算表明,在一个 B-V 频率内,混合区能量传入了外部流体。但他们的基本方程有误。

边界流 (1) 连续分层情形: Simpson 在他的摘要性文章中报道了他的实验结果。当总体 $Fr (= Q/NH, Q$ 为流量, H 为水深) 数小于 $1/\pi$ 时,第一模式波形成,它与混合流体团头部作用,使混合流体团头部不能保持原来的形状,引起了连续变形。McIlmans 用分层流体前面形成的连续的前部(consecutive fronts)解释在峡谷有时出现的泡沫状线族;动力站冷却水水流的表面温度结构的有规则间断性及河水流向海洋中出现的现象都可得到解释。

(2) 3 层流体情形: Maxworthy 报道了三维实验中孤立波以圆柱形前锋线形式演化,并指出这种波与波的卫星照片更接近。Simpson 做了二维实验,在超临界速运动时(与孤立波速相比而言)分层对混合流体运动几乎无影响,但在亚临界速度时,薄层(跃层)内的孤立波列在混合流体团前运动;并且发现在中等速度,且混合流体团密度与周围分层流体相差不大时,有一具封闭流线的孤立波生成。Schaeter 把在大气中测得的多重线(multiple frontal line)解释为是混合流体团在夜间强分层边界层逆温中运动所致,分离涡(cut-off vortex)几乎与实验观察到的隐在领先孤立波内的混合流体的运动一致。

(3) 尖锐分层: Holyer 和 Huppert 处理了波只向下游传播而不向上游传播的稳定流动,并指出在边界流中形成的波由于能量过多而破碎,因而实验中未观察到波。Simpson 观察了混合流体团受界面波的影响,指出存在一个混合流体流动从超临界到亚临界的突变区,这一现象与界面波向上游演化有关。在贾复等的实验中,发现只有当混合流体以亚临界运动,且其头部高度与界面高度充分接近时,才会形成明显的向前传播的界面波。相反,为混合流体以超临界速度运动或界面与混合流体团间距充分大时,不会激发界面波。

本课题今后研究热点有:(1)完善原有描述混合流体团运动和内波生成的线性理论。原有线性理论或适用范围很窄,或不能准确地定量描述该过程。笔者认为对于弱分层流体中小混合流体团破碎现象,由于非线性作用很小,可采用线性理论近似地描述,但必须考虑更多的因素,如长波近似是否有效、粘性效应等。(2)建立描述混合流体团运动和内波生成的非线性理论。前已述及对于 3 层流体模型已观察到内孤立波生成,显然对这种情形线性理论不再有效。对于这个过程还要考虑波流相互作用问题。对于弱

非线性情形可望从流体力学基本方程出发,简化后半解析地求解该问题。对于弱非线性情形可能只有采用数值方法求解了。(3)对底部侵入型情形,还需进一步的实验和理论工作。已有不少混合流体团在单种流体中运动的工作,但对于分层流体中的运动所作的工作还不多。(4)探究内波和湍流间的相互联系。内波破碎形成湍流,湍流影响内波的运动,它们之间的相互关系及影响到底如何还不十分清楚。(5)将理论和实验结果应用到实际中去,并用它们来解释自然界的一些现象。

(上海市应用数学和力学研究所朱勇撰)

海洋流体动力学 offshore hydrodynamics 是研究海洋流体与结构物相互作用的科学。流体的作用是海洋工程建筑物上的主要外部荷载,由于海上构筑物的昂贵投资,结构的安全性又与人员的生命密切相关,所以海洋流体动力学的研究对于设计经济、可靠的海上建筑物具有重要的意义。

海洋流体动力学的主要特征是存在着自由水面和波浪的随机性,同时也存在着旋涡脱体等其它流体动力学中常见的现象。对于结构形式、波浪状况的不同,海洋流体中的各个因素对结构的作用起着不同影响。为了研究的方便,海洋流体动力学进一步分为确定和不确定的问题,势流绕流和粘性、旋涡脱体等问题。在确定性分析中波浪被看作是单方向的、连续稳定的等振幅波动过程,然后根据这一前提确定波浪力的大小。在不确定性的分析中,波浪被看作是随机的波动过程,人们通过统计分析和频谱分析的方法确定结构上波浪作用力的统计分布值。当结构尺度与波浪尺度相比较小时,流体的惯性力起着主导的地位,流体的粘性和旋涡脱体产生的影响相比是较小的,流体可以假设为无旋、无粘的理想流体,流体与结构物的作用问题可以应用势流理论进行求解。当结构尺度较大时,流体的粘性和旋涡脱体所产生的作用则不能忽略,这时粘性拖曳力与惯性力往往具有相同的量级。另外,对于浮体和柔性结构物的共振响应、粘性和旋涡脱体引起的粘性阻尼,对降低结构的响应幅值起着非常重要的作用。

当结构尺度与波浪尺度相比较小时,由于流体粘性和旋涡脱体引起的拖曳力是不能忽略的。对定常流对杆件引起的拖曳力,在流体力学领域早已做过了大量的研究。对于规则波浪对杆件引起的波浪力, Morison 等(1950)提出了用水质点速度引起的拖曳力与水质点加速度引起的惯性力之和加以表达的形式。由于结构尺度很小,结构对绕流的影响可以不予考虑。这一公式是被称为 Morison 公式。Morison 公式是经验性的公式,其中的系数需要通过实验或现场资料确定。由于其公式的经验性质,其计算精度多少年来一直被人们所怀疑,但目前仍找不到有坚实数学基础的理论方法,40 多年来 Morison 公式被广泛地应用于海洋结构的设计中。

Morison 最早的工作只考虑了单纯波浪对垂直杆件的作用问题,其上的水平波浪力只是波浪水平运动分量的函数。实际上波浪有时是与水流共同存在的,杆件的方向往往是倾斜的,为了继续应用 Morison 方程,人们不得对其进行一些修正。对于波浪与水流共同对杆件的作用,1955 年 Sarpkaya 将水平质点速度写成是波浪水平速度与水流速度之和的形式。对于倾斜的杆件,1958 年 Borgman 应用杆件的方向运动分量进行计算。当杆件本身还在流体中运动时,人们应用流体与结构的相对运动分量进行计算。

自然中的海浪都是非规则的。早期的研究都假设波浪为窄带的高斯过程,在高斯过程的假设下,1967 年 Borgman 通过相关函数的分析,求得了波浪谱到波浪力谱的传递函数以及 Morison 公式的线性化形式。随后, Borgman 和 Tung 将其结果扩展到了波浪共同对垂直桩柱的作用问题。对于倾斜杆件上的波浪力谱,1970 年 Malhotra 和 Penzien 先将波浪力在横截面的两个正交方向上,表示成两个互相独立的形式,然后分别应用垂直杆件下的结果。

对于随机过程,人们还常常应用概率统计的方法进行分析。

1965 年 Pierson 和 Holmes 在波高瑞利分布的假设下,通过窄谱分析求得了波浪力的概率分布函数。这一分布称为 Pierson-Holmes 分布。

当结构的尺度与波浪相比较小时,结构对绕流的影响已不能再加以忽略了,这时惯性力通常起着主导的地位。对于这样的问题人们通常应用势流理论进行求解。1954 年 MacCamy 和 Fuchs 对一均匀垂直圆柱进行了求解,给出了经典的大尺度问题的解析解。随后, Garrett 于 1971 年给出了截断圆柱上波浪力的解析表达, Yeung 于 1981 年给出了截断圆柱上的水动力系数。对于任意形状的物体,其理论解一般是很难得到的,通常借助于计算机,采用数值方法进行求解。一种方法是直接应用板元法,如 Garrison 1978 年将物体表面离散成一组片元,然后通过联立方程组确定各片元上的漂、汇强度。另一种为内、外域匹配的方法,在内域上应用边界元或有限元方法,外域上应用级数展开或其它方法等等。Zienkiewicz 1978 年曾综述了当时发展的 4 种外域处理方法。

对于横截面不随水深变化的垂直桩柱,1974 年 Isaacson 又进一步提出三维问题可以简化成二维水动力学问题,计算单元只沿水线布置,计算可以大大地简化。

Morison 公式中的系数与雷诺数的关系十分密切,在实验室波浪条件下得到的结果与自然海洋下的结果相差很大。因而人们自然地要着手于大雷诺数下的实验。1982 年 Sarpkaya 在 U 型水槽中,通过振荡水流来模拟波浪的作用。1988 年 Chaplin 通过拖动桩柱的方法来模拟大雷诺数下波浪对桩柱的作用。对 Morison 公式本身,近年来也提出了许多修正的形式,1981 年 Sarpkaya 提出了 4 项形式的计算公式以代替原来的两项形式。1991 年 Worden 等提出了改进 Morison 方程的新方程,在原方程中除力项外又加进力的一、二阶导数项和力的平方项。对于倾斜杆件上波浪力谱的计算,1991 年 Teng 和 Li 提出了直接从 Morison 公式出发计算波浪力传递函数的方法。早期的研究中都是将波浪过程简化为平稳的、窄带的高斯过程,而实际海洋中的波浪,由于非线性、破碎等因素的影响,与上述假设有一定的出入。近年来人们开始做非窄带、非高斯过程下的研究,1983 年 Brouwers 和 Verbeek 对宽带和窄带下波浪力的概率累积曲线做了对比,1984 年 Grigoriu 求得了波浪下非高斯拖曳力的概率分布函数。

对于粘性、旋涡脱体的数学计算的研究,不限于海洋工程领域。目前二维涡方法已经可以成功地用于模拟剪切层演化,尾涡卷起,钝体的旋涡脱落和尾迹运动等一系列问题。对于三维问题,目前还只能处理定常或准定常问题。

对于波浪对大尺度结构的一阶作用问题,1986 年 Eatock、Taylor 和 Jefferys, 1992 年 Herfjord 和 Hydro 分别对世界上几十个学校、研究机构的结果做了比较,发现部分结果仍存在着很大的不精确性。解决这一问题的办法,一是增加计算的单元,1992 年 Newman 等应用了 13 952 个单元来计算一个实际的张力腿平台;另一种办法是应用高阶的曲面单元。

当波浪较陡时波浪的二阶影响是不能忽略的。二阶力不仅是对总波浪力的修正,对于漂浮和顺应式柔性结构,二阶力还是共振响应和恒定漂移的根源。二阶力的计算目前主要有两种方法:一种是求得二阶势后再计算二阶力,另一种是 Lighthill 和 Molin 于 1979 年同时提出的应用一阶势间接地计算二阶力的方法,应用这一方法 Eatock Taylor 和 Hu 对垂直圆柱问题作了计算,中国的李宝元和吕玉麟应用有限和无限元方法也对该问题做了计算。1990 年 Kim 和 Yue 计算了两个人射波共同作用时,轴对称物体上的和频和差频作用力。

当结构做共振响应时,系统的阻尼对其反响的幅值有很大的影响,1984 年 Wichers 和 Huijsmans 的研究表明,在结构的低频振荡中波浪阻尼与粘性阻尼具有相同的量级,而波浪阻尼可以看作波流作用下的漂移力对流速的导数。因而,波流对大尺度结构的作用问题,近年来得到了许多学者的关注。1988 年, Zhao 等应用内外场匹配和摄动展开的方法对深水中漂浮物体做了计算,

1992年, Nossen等应用板元法和摄动展开的方法; 1933年, Eatock Teng又进一步应用高阶边界元进行计算。

海洋流体力学的进一步研究, 一个方面是目前尚未解决的或者是由于计算手段、实验手段的限制而不能精确确定的问题; 另一个是随着海洋的开发将要遇到的问题。从目前的研究和海洋工程不断地朝着深水发展的倾向看, 进一步的研究热点将是: (1) 波浪对小尺度桩柱作用的理论认识; (2) 波浪对结构物的高阶作用; (3) 结构高频、低频共振下阻尼和反响的确定。

参考文献

- 1 Morison J R, O'Brien M P, et al. AIME, 1950, 189, 149~157
- 2 Borgman L E. Proc ASCE, 1967, 93(2): 128~156
- 3 Tung C C, Huang N E. Ocean Engineering, 1973, 2(4): 183~193
- 4 Lighthill M J. Int conf Behaviour of Offshore Structures, 1979, 1
- 5 Molin B. Applied Ocean Research, 1979, 1(4): 197~202
- 6 Sarpkaya T. Ocean Engineering, 1981, 447~468
- 7 Wichers J E W, Huijsmans R H M. Offshore Technology Conference, 1984, 4831
- 8 Eatock - Taylor R, Jefferys E R. Ocean, Engineering, 1985, 13(5)
- 9 Teng B, Li Y. Ocean Engineering, 1991, 18(6): 535~553
(大连理工大学李玉成教授撰)

工业空气动力学 industry aerodynamics 又称风工程学(Wind Engineering)。从20世纪50~60年代起, 在航空技术发达的欧美等国家首先开始使用工业空气动力学的名词。70年代美国首先采用风工程学这名词代替工业空气动力学的提法, 并赋予明确定义, 逐渐为国际上所接受。1975年成立了国际风工程学会(IAWQ), 并将60年代开始的有关学术会议改名为国际风工程会议, 其会刊也改为风工程与工业空气动力学杂志。风工程学与(工业空气动力学)主要研究大气边界层中风与地球表面上人类活动及其劳动成果间的相互作用, 也包括一些尚未明确归入其它学科的空气动力学课题。它是经典的空气动力学与气象学、气候学、结构动力学、建筑工程学等互相渗透和促进而形成的一门新兴的边缘学科。包括的内容相当广泛, 涉及到工业、农业、交通运输业、建筑业、环境保护等各方面, 并且还在不断发展。

20世纪50年里, 风工程学的空气动力学(泛指流体力学)基础已逐步奠定, 如Prandtl的边界层概念, Taylor的湍流统计理论和扩散理论, V. Karman的湍流运动相似性及卡门涡街理论等。1940年11月7日美国塔科马(Tacoma)悬索大桥被台风吹毁垮塌的事故, 引起了V. Karman等用空气动力学理论——涡激振和颤振理论来解释大桥被吹毁的原因, 推动了工业空气动力学的发展。

50~60年代, 许多航空技术发达的工业国家, 如英国的国家物理实验室(NPL)、瑞典航空研究院(FFA)、加拿大国家航空研究院(NAE)等航空空气动力学研究机构, 纷纷开展了非航空空气动力学课题的研究, 用航空低速风洞进行风对高楼、大桥、高塔、巨大雕像、无线电天线、高架输电线的风压、风载、风致振动的实验研究, 也对车辆的减阻、运动场和建筑群的风环境、烟囱和化工厂的环境污染、种子的风传播等课题进行风洞实验与理论研究。

60~70年代, 风工程学(与工业空气动力学)有了发展。1970年在美国结构物的风载会议上, 美国科罗拉多州大学塞马克(J. E. Cermak)第一次正式定义了风工程学这一学科名词。他在世界上首次设计成功风工程研究的专用气象风洞。这种风洞的特点是: (1)能自然形成足够厚的边界层; (2)试验段较长(长高比10~15); (3)可调节试验段, 使纵向压力梯度为零; (4)能产生垂直方向的温度梯度。这一时期取得的进展主要有: 应用空气动力

学对风特性进行描述; 大气边界层模拟和模拟装置的研制; 用统计方法定量计算质量迁移、结构物风荷载等的风效应; 深入研究建筑物和结构物上的风力和风振。风工程学的问题比航空中的飞机设计要复杂得多, 飞机的许多设计工作现在可借用大型计算机来完成, 而大多数风工程的问题还无法做到这一点。于是, 70年代开始在国际上出现了建造大尺寸的风工程试验用风洞的热潮。

80年代后, 风工程学作为一门新的学科的概念被越来越多的国家所接受, 国际风工程学会成为学者发表新的研究成果的讲台。会议发表论文的重点在: 钝物空气动力和分离流、涡激振的机理研究; 高耸建筑物动态响应的理论和实验研究; 大桥的风致振动的理论和实验研究; 风环境的理论和实验研究等。这一时期最突出的进展是制订了国际风荷载标准, 这就是由加拿大达文波特(A. G. Davenport)根据大量边界层风洞实验数据、实地实测数据和各国的经验, 并根据对复杂地形地貌风荷载特性及结构物脱滑动态响应的风特性制订的国际标准(New International (ISO) Wind Load Standard)。这种标准将为高耸建筑结构、桥梁结构、高大冷却塔和电视塔等结构提供风荷载的设计依据, 它成为风工程学理论计算的重要基础。与此同时加拿大、法国、日本等国相继有一批口径大、试验段长、性能先进、测量手段现代化的大型边界层风洞。这些风洞为风工程研究创造了有利条件。

从1980年开始, 中国庄逢甘开始组织各方面的力量开展工业空气动力学的研究工作。与此同时, 1980年11月在中国空气动力学研究会(中国空气动力学学会的前身)领导下成立了工业空气动力学专业委员会。为了与国际会议协调, 该专业委员会对外改为风工程专业委员会, 对内名称不变。在这10多年时间里, 中国风工程研究工作发展迅速, 一个重要标志就是新建成10多座实用性的边界层风洞。它说明风工程在中国已形成一门独立的学科, 具备了自已专用的试验设备, 并已提供有用的数据, 缩短了与国外的差距。在这些风洞中, 北京大学1号环境风洞及中国环境科学院大气环境风洞, 都具备了温度层结的模拟能力。中国空气动力学工作者利用原有的航空风洞和新建成的边界层风洞完成了白云宾馆、珠江帆影高耸建筑群、深圳体育场、香港大佛、上海电视塔、上海杨浦大桥、广州珠江四桥等风洞试验和理论研究工作, 这些表明了中国的风工程学和工业空气动力学已进入了成熟期。

目前风工程学的热点为: (1)大气边界层模拟技术的改进; (2)钝物体空气动力学理论计算和统计分析方法的结合; (3)高耸高层建筑物、高塔、大桥的动态响应的多维理论模型的优化、风洞弹性模型的研制、边界层风洞实验测定手段现代化; (4)风灾的危害评估及防治; (5)大气环境(污染物的扩散、人类生活环境)的研究; (6)风对高速车辆的影响; (7)风能利用等。

参考文献

- 1 Pate E J, Cermak J E. Fluid Dynamics and Diffusion Laboratory Technical Report, 1963, 65
- 2 Wardlaw R L 著. 低速气动力. 刘尚培译, 1980, 3
- 3 Cermak J E 著. 低速气动力. 刘尚培译, 1980, 3
- 4 庄逢甘等. 新华文摘, 1981, 4: 219~221
- 5 朱孝业, 刘尚培. 航空知识, 1984, 10
- 6 中国空气动力学研究会. 中国工业空气动力学专业委员会. 第2届全国风工程及工业空气动力学学术会议论文集, 1986, 1~2
- 7 Davenport A G. Recent Advances in Wind Engineering, 1989, 2: 1199~1214
- 8 Sun T F. Recent Advances in Wind Engineering, 1989
- 9 Sun T F, Cui E J, Liu S P. Recent Advances in Wind Engineering, 1989

(北京空气动力学研究所朱孝业副教授撰)

煤尘飞散的空气动力学 aerodynamics of coal dust dispersion 煤尘是一种颗粒状污染物, 它来自矿山、洗煤厂、炼

钢厂、动力厂以及煤码头煤堆场。由于露天煤场的投资最小,而被矿山和港务局优先选用,故煤粉尘常被风蚀吹散在大气中。煤堆和矿料中粉尘含量大约有15%左右,据估计全球被风吹起排入大气中的粉尘每年有2~3亿吨之多,更为严重的是这些被风蚀流散的粉尘中,又有10%左右常年飘浮于空气,对人体健康的危害比烟田排放有毒气体的污染更为严重。风吹堆料有为数可观的起尘量,煤的装卸、煤场汽车扬尘所引起的粉尘量更多。矿料、石灰、水泥、木屑、谷物堆场以及它们的运输装卸都有同样的问题。如何预报和控制粉尘的起尘与扩散,并掌握其起尘和扩散规律的研究,具有重要的经济意义和社会意义。

导致煤尘从堆场迁移的空气动力学的机理十分复杂,至今人们对它的认识所知甚少。风洞模拟试验仍是获得煤粒起尘量比较可靠资料的唯一方法。近10~20年来,一些工业发达国家,根据实际环境评价或控制煤尘飞散的实际问题的需要,开展了一些风洞试验研究,获得一些有关起尘风速、起尘量计算公式等等,但都不具有通用性或普遍性意义。影响煤的起尘因素很多,主要有煤的品种、煤的含水量、煤的粒径分布谱、煤堆外形及其排列和高度、风速大小和风向、风的湍流特性、周围地形影响等等。在做缩小模型的粉尘风洞试验时,甚至连大气湿度的些微变化,也会严重影响煤的起尘量。即使其他条件相同,新老煤堆的起尘量也有显著差别,这就是说起尘量与风吹持续时间有密切关系。这些年来,世界各国虽然都开展了一些煤粉尘的风洞试验研究,但作为模型试验理论基础的相似律仍十分模糊,也无一致的结论。特别是对煤炭运输作业动态装卸过程中的煤尘飞散的风洞模拟试验,对其相似律的研究则更为缺乏。

煤尘起尘后在大气中的迁移扩散规律研究,可作为一个更广泛的论题,即固体颗粒在流体中悬浮的二相流动问题来讨论。Crowe(1982)对稀释气固数值模型所作的评述,可使我们较全面地了解稀释气固两相问题的有关理论和方法。

自从Sutton(1932)提出高斯烟羽模式以来,通过Pasquill(1961)等对其扩散参数的研究,被广泛应用于烟羽在大气中扩散预报。由于高斯烟羽模式简单易行,并可推广到多点源、线源和面源的扩散计算,许多环境评价部门也用来对煤尘在大气中扩散的预测。而高斯模式是在许多假定下获得的,这些假定有:污染源发射率为常数,湍流扩散过程是定常均匀的,地面平坦且地面对污染物认为具有全反射性质等等。将高斯模式的应用条件与实际情况相比较,往往存在较大差别,特别是对煤尘的扩散预报,在缺乏相应的扩散参数的数据时,借用大气扩散参数作计算是一个不恰当问题。

自20世纪70年代以来,由于计算机的发展,在先期由Lamb和Seinfeld(1973)等开展了另一种直接求解经典的对流扩散浓度方程的所谓K理论计算方式,用来预报烟羽尘埃在大气中迁移扩散分布。通过利用浓度方程和代表大气流场的N-S方程联立求解,还可以获得复杂地形浓度分布扩散规律,这个方法已呈现十分良好的应用前景。对于浓度方程中扩散系数K值,虽然通过Yaglom(1976)等对大气扩散现象的测定,已有一些可利用的数据,但它们还不适用于在大气中存在大湍流涡出现的计算。另外,K理论需要很大计算机时,尚不便于实际应用。

另一种以泰勒(1921)的湍流扩散理论为根据的拉格朗日粒子方法,在80年代前后,通过一些学者(如Watson & Barr, 1976; Lange, 1978; Hanna, 1979; Lamb等人, 1979; Gifford, 1982)应用于研究粒子在大气中迁移扩散的计算以来,现已能成功地预测污染物在均匀和非均匀湍流中浓度分布。这个方法是通过一组特定数量的粒子来代表污染源的发射量,它们在大气中迁移,由于需要考虑粒子在大气中跟随性和气流脉动的影响,通常是由统计方法(即Monte-Carlo方法)求解。为检验重粒子在气流中扩散分布计算结果的真实性,Snyder和Lumley(1971)所给出的试验数据,对开展这一领域的研究具有重要意义。Chen和Crowe(1984)就用Monte-Carlo方法模拟了重粒子在湍流中扩散,但他们没有涉及粒子与气流运动相关性。Lee(1986)也用

Monte-Carlo方法模拟粒子在大气中湍流扩散,而没有涉及有重量粒子的扩散问题。进一步的研究有Thomson(1987),Luhar和Britter(1989)以及新近Elghobash和Truesdell(1992)对粒子运动的直接解法。武汉水运工程学院的煤粉尘扩散规律研究小组,结合煤尘扩散预报曾发表应用Monte-Carlo方法的数值解和解析解联合计算方法,有一定参考价值。

当前,进一步研究的热点主要有:(1)对煤堆场风吹起尘量的确定和计算,用风洞模拟仍是唯一可靠的方法。风洞试验测量精度及换算修正方法需深入探讨,各种影响因素特别是新老煤堆的起尘量预报,尚有很多工作要做。(2)对煤炭运输和装卸作业的一些动态过程中,风吹飞散的煤尘预测,风洞模拟试验的相似律和建立必要的修正方法的探讨,应有希望获得更好解决。(3)在起尘机理研究方面,包括粒子间附着力的计算等,以推进用理论方法计算煤堆的起尘风速和起尘量的研究,并将有助于提出各种更有效的防止起尘的方法和措施。(4)用粒子方法预报煤尘在大气中扩散分布是一种自然的方法,近期内仍将获得继续发展。应用这种方法,需要有大气边界层的测量资料,才能使计算中需要的气象资料输入(速度的脉动值和拉格朗日自相关函数等等)更符合实际测量值。(5)对煤场特别是大型煤堆场的煤尘飞散问题,根据现有资料世界各国正在开展空气动力学软件的研制,使之能随时预报堆场附近几百平方米范围内被煤粉尘污染浓度分布情况,便于有关主管部门能及时作出环境治理决策或限制措施,以造福于人民。

参考文献

- 1 Snyder W H, Lumley J L. J Fluid Mech, 1971, 148(1), 41~71
- 2 Lamb R G, Seinfeld J H. Environ. Sci Technol, 1973, 7, 253~261
- 3 Gifford F A. Atmospheric Environment, 1982, 16(3), 505~512
- 4 Chen P P, Crows C T. Gas Solid Flows, FED, 1984, 10, 37~41
- 5 Lee J T, Stone G L. Atmo Envi, 1986, 20(11), 2185~2197
- 6 Thomson O J. J Fluid Mech, 1987, 180, 529~556
- 7 王献孚. 气动实验与测量控制, 1989, 3(2), 53~58
- 8 章社生, 王献孚. 武汉水运工程学院学报, 1989, 13(3), 43~53
- 9 王献孚, 楼宇娟. 气动实验与测量控制, 1990, 4(2), 30~35
- 10 Elghobashi S, Truesdell G C. J Fluid Mech, 1992, 242, 655~700

(武汉交通科技大学王献孚教授撰)

换热器流体结构动力学及异型压力容器 fluid structure dynamic of (shell-and-tube) heat exchanger and special pressure vessel 管壳式换热器既是流体设备和传热设备,又是压力容器,它既有流体流动和热交换热量传递问题,又有应力强度和介质腐蚀以及热应力、热膨胀变形和位移等问题,流体在壳程管束中横向流动时还会出现各种机理的流体诱导振动。因此,研究范围包括传热管及管束各阶振动固有频率、管束振动偶联和振动响应特性,以及振动磨损、振动疲劳破坏等是集结构、材料、流体介质及温度和压力等于一体的边缘综合课题, (简称“换热器结构动力学”),它有些类似新兴的边缘学科“流体结构动力学”。管壳式换热器的管板,是一种特殊的压力容器部件—当量平板,用以使流体进出换热器壳程均匀分布和减少进出口压降,并起一定的热膨胀位移补偿作用的外导流筒,则是由“圆柱壳体—过渡圆环壳体—短锥壳”等组成的具开孔接管的压力容器,而且又是具有热位移性能的半波膨胀节,其受力复杂。这两个部件,前者已分别列入国外机械工程ASME和管壳式换热器TEMA标准,且亦都列入中国管壳式换热器标准,但都还没有完全成熟或是缺乏具体依据。炼油和石油化工行业中常用的列入

ASME、TEMA 和中国管壳式换热器标准中的 K 型壳程结构,亦广泛应用于卡特尔(Kettle)再沸器中,它是非轴对称的变径锥形壳体与轴对称圆柱体等相联的非常规壳体。又如如具定距柱或鼓泡的螺旋板换热器,具鼓泡的米勒板(Miller)板式或夹套式换热器,高温高压石油化工废热锅炉中的椭圆集流管等壳体,它们都是换热器异形或异型压力容器或其部件。

本课题在研究各种一般的非圆截面压力容器的应力强度理论、设计和规范化的基础上,还重点结合换热器和特别是管壳式换热器的上述异型壳体的应力强度、变形和位移性能、结构参数、热应力以及传热管的振动响应特性和振动疲劳等。所述异型压力容器系包括非圆截面异形压力容器和诸如布管的或受力非轴对称的圆形管板(例如局部不布管 NTIW 管板,具管程分程隔板的多管程管板,以及具大中心孔蒸发器管板和集“发生”、“冷凝”、“蒸发”、“吸收”于一体的布管复杂的溴化锂制冷装置管板等),外导流筒组合矩容器亦归入此类。这类异型(或异形)压力容器及设备部件有些已列入规范,有些在理论和应用设计技术上还是空白,更多的还没有规范化。1984年,钱颂文、岑汉钊、吴振强等对双管程弓形区不布管的 NTIW 换热器管板进行冷模应力强度分析和试验,建立了三维有限元模型和计算机程序,得到该管板应力和变形的结果,开创了这一研究的先例。这一工程分析已发表(1989年),并得到国际上承认,为国际四大检索 SCI 所收录。尔后,他们又对此管板进行热模试验和有限元分析,并考虑到双管程所引起的不同管程因管子管板温度和热膨胀不同而产生的管板上不同管程的附加轴向力,所得结果与美国 A. I. Soler 的《Mechanical Design of Heat Exchangers and Pressure Vessel Components》(1984)的管板传热和热应力分析实例相一致。与此同时,中国黄允昌等进行了中央开大孔的蒸发器管板的研究,亦采用了三维有限元模型。南京化工学院的学者对变载荷的现场换热器高压管板进行了载荷谱分析和可靠性研究。这些工作还仅仅是开始,还有大量工作有待于探索。

换热器外导流筒是换热器上发展的新结构,它的压降小,使壳程流体分布均匀,又有位移热膨胀补偿能力,也可减少壳程 E 旁流和增加管板布管,特别适用于当今发展热点折流杆和孔板式纵向流换热器。80年代初,兰州石油机械研究所首先研究和发表了外导流筒的文章,他们采用了悬臂梁的近似分析法。1985年,江楠和钱颂文进一步应用壳体理论对外导流筒进行研究,论文在韩国召开的国际 ASME、KSME 和原子能规范会议上发表。尔后,经过对此不断地进行研究,建立了有限元计算模型,探索其结构参数的最佳化;另外,在不少换热器设计中,特别是炼油折流杆和化肥折流杆、水煤气变换换热器上,经过数百台的应用实践,得到了良好的效果。此外,张镜新等对阀门等异形容器出版了专著。洪锡纲自 1986 年,接受了全国压力容器设计标准委员会的任务,承担非圆形截面压力容器的应力分析研究和建立设计规范,该项研究已于 1989 年列入中国规范 GB150-89 钢制压力容器附录 D 中,填补了中国规范的这一空白。另外,洪锡纲等于 1985 年和 1990 年对啤酒米勒板换热器作了理论分析与应力测试,提出在引进生产线上开发应用。浙江大学等对鼓泡夹套等也取得了专利。林榕端对螺旋板换热器弧形板壳作了系统的研究,取得了很大成绩。黎延新以及南京化工学院和化工部化工设备中心站等对换热器膨胀节作了长期的研究,并在生产中获得应用,还成立了中国膨胀节协会。

综上所述,异形压力容器,特别是换热器非轴对称受力异型压力容器部件这一领域的研究,在国内外还十分薄弱,今后研究的热点将是:(1)对换热器外导流筒应进行结构和结构参数的优化研究以及建立大量设计图线和简化设计公式;建立软件包,将其规范化,并列入换热器规范,以方便设计应用。(2)对各种异型管板,特别是工业中已应用到的重要换热设备上的异型管板,尚需大力进行研究,建立软件包。诸如局部不布管的高效换热器异型管板,溴化锂异型管板的温度场及温差应力,多管程管板温度场和温差应力等。(3)对量大面广使用寿命极短的制冷氨冷凝器

的管板应力、应力腐蚀、管板泄漏和开裂、使用寿命等应深入研究,以分析其破坏原因,力学机理,并提出解决措施。

参考文献

- 1 全国压力容器标准化技术委员会, GB150-89 钢制压力容器, 1989
- 2 吴振强, 岑汉钊, 钱颂文, 化工机械, 1989
- 3 钱颂文编著, 管壳式换热器结构动力学, 广州: 华南理工大学出版社, 1990
- 4 洪锡纲, 廖景媛, 第 3 届全国压力容器学术会议论文集, 1992.4
- 5 Jiang N Qian S W. Proceeding of International Symposium on PVT and nuclearcodes, Standard KSME, ASME
(华南理工大学钱颂文教授, 洪锡纲副教授)

受限共轴射流 confined coaxial jets 是一类具有重要性的湍流剪切流,它们发生在许多工程设备中。例如,工业广泛应用的射流泵,通过射流(主流)的高速引射,使被引射的低速或静止的流体(副流)吸入,并与主流混合;各种工业燃烧设备中的燃烧室,其燃料和氧化剂常通过引射作用被吸入,在受限共轴射流的混合过程中,所形成的回流区对加强混合和火焰的稳定性有重要作用;飞机和船舶的引射器装置,它们利用高速气(液)流的动量传递给被引射吸入的副流,可获得推力的增加和噪音的降低等等。近年来,由于在高能化学激光器中的应用,为受限共轴射流的研究提供了进一步的推动力。

从工业流体力学角度,受限共轴射流的流动类型,可分为不可压缩的引射流,亚声速气体引射流,超声速-亚声速气体引射流,超声速-超声速气体引射流,以及二相(气-固、气-液)引射流等等,并可考虑 2 种物质具有化学反应的混合。

自 20 世纪 40 年代以来,对引射流进行了大量的理论分析和试验研究,Porter 和 Squyers (1981)所收集的有关引射系统理论和性能方面的论文,已达 1 600 篇以上。大多数早期的理论研究,都基于一维或准一维的流动分析,其具有代表性的工作可见 J. H. Keenan 等的论文(1950),J. Fabri 等的一篇评述(1958),以及 L. Crocco 的专著(1958)。

不可压缩受限共轴射流,在管内的混合过程包含一些有特殊意义的流动区域:即射流核心区,相似速度分布区,受限壁面的边界层发展区,以及可能的分离区,特别是两股射流交界的剪切层的发展区,其流动结构更复杂。Craya 和 Curtet (1955)曾提出一种近似理论,并定义一个被称为 Craya-Curtet 数 C_c :

$$C_c = \frac{1}{\sqrt{m}}, m = \frac{A}{Q^2} \int_A (u^2 + \frac{p}{\rho}) dA - \frac{1}{2}$$

式中 m 是无量纲动量通量, Q 为流量, A 为混合管面积, u 为管截面上轴向速度, p 为静压, ρ 为流体密度。当引射流直径 d_0 远小于混合管直径 D_0 , 及引射流速 U_j 远大于被引射流速 U_a 时, C_c 还可近似地表示为

$$C_c = \frac{U_a D_0}{U_j - U_a d_0}$$

对等截面混合管,试验证明当 $C_c \leq 0.96$ (也有入建议 $C_c < 0.85$) 时,在混合管内便有流动分离区存在。Barchilon 和 Curtet (1964)发表的论文用平均流方法测量受限共轴射流的平均速度、壁面静压和分离区大小的一些结果具有代表性。Razansky 和 Brighton (1971)利用热线风速仪和 Suzuki 等(1983)利用激光流速仪作出有更全面的试验研究。自 80 年代以来,用 N-S 方程对受限共轴射流已开展一些数值计算的研究,如 Khodadi 和 Vlachos (1989), ZHU 和 Rodi (1992)等,他们分别用 SIMPLE 算法和 QUICK 算法,以及 k-e 二方程湍流模型,都能获得与试验值相近似的结果。

可压缩气体受限共轴射流,在管内混合过程除与不可压缩流体受限共轴射流有相类似的流动区域外,对超声速引射流,在混合管内还将发生激波与边界层相互作用的一个十分复杂的流

动区域。超声速引射器的混合能量损失要远大于亚音速和不可压缩引射器的混合损失。影响可压缩气体引射器性能的参数甚多,气体的比热比、分子量、滞止压力、滞止温度、质量流量、喷管截面积、混合管面积、混合管长度和背压,混合管进口处气流各自马赫数,以及混合后的混合气体的状态参数和混合气流马赫数等等。Dutton, Mikkelsen 和 Addy 等(1982)利用一维流理论已能较好地计算出引射器设计计算有关问题。在此基础上,引射器的优化设计更受重视, Dutton 和 Carrol (1986)的论文对此问题有所阐述。实际优化问题常常是在给出主副流气体比热比、分子量、滞止温度等参数的条件下,要求选择引射器几何尺寸,使它具有最好的运行性能。优化的目标函数可以是求得最大的引射混合后静压,或满足所有条件下的引射气体的总压为最大,或得到被引射气体的质量流量为最大,或所需引射气体的质量流量为最小。由于可压缩气体引射器性能的影响因素多,引射器工作时敏感性分析已成为实际需要, Wacholder 和 Dayan (1984)首先展开了这一问题的研究。本文作者对氧气和燃气混合的引射系统优化设计及引射器运作过程中诸参数敏感性分析,已研制成计算软件(1993),这种计算软件,对引射系统设计和运行操作有重要指导作用,是任何凭经验的设计师所无法替代的。鉴于一维流理论分析的局限性,它不能确定共轴射流在混合管内混合发展过程,从设计观点也就不能正确地理论上确定混合管所必需的长度,解决这些问题都必需进一步开展对混合过程三维流的计算。这方面的研究工作近年来正方兴未艾, Drummond 等(1986, 1987)、Boretti (1989)和 Eklund 等(1990)的论文,可作进一步研究的开端。

受限共轴二相射流在工业上也有广泛的应用,如设计和改进煤粉燃烧室的性能和品质,就需要研究引射的煤粉粒主流与被引射的空气副流在混合过程中相互作用,即煤粒相粒子扩散和射流所挟带的空气扩散分布,它们与粒子大小、粒子载荷比、两相流速度比的关系。Hedman 和 Smoot (1975), Leavitt (1980)及浙江大学的 Fan 等(1992)进行了试验研究,已获得一些有规律的结论。最近,受限共轴二相射流的数值模拟计算的研究工作,越来越受到重视,但它尚处于初期发展阶段。

综上所述,受限共轴射流研究,不论在理论和应用方面,都有很大的继续发展的余地。根据工业流体力学应用和发展的需要,当前本课题研究的热点有:(1)对工业应用的各类引射器,开展优化设计及敏感性运行程序的研制,以提高引射器的工作效率;(2)在工业设备的运行操作中,设计和推广各类引射器的可能应用,可获得显著的经济效益;(3)正在努力解决受限共轴射流数值计算中的一些难题,如湍流模式、有效的差分格式、多相流模拟方法等等,并研制成计算软件,以便实际推广应用;(4)进一步试验受限共轴射流中的流场动力学和剪切层涡结构的规律,揭示其内部流动机理,将有助于湍流模型的建立和所开展的降低噪音的研究,并提高工业流体力学水平。这些研究工作,相辅相成,互相促进,可预料在今后的实践中将会更好地解决所提出的一些问题,并还会不断开拓其应用范围,进一步丰富和扩大研究的内容。

参考文献

- 1 Keenan J H, Neumann E P, Lustwerk F. Journal of Applied Mechanics, 1950, 17(9): 299~309
- 2 Fabri J, Siestrunk R. Advances in Applied Mechanics, New York, Academic Press, 1958, 5: 1~34
- 3 Crocco L. Fundamentals of Gas Dynamics, Princeton University Press, 1958, 3: 272~293 (中译本:定常气体动力学的一维处理法,北京:科学出版社,1985)
- 4 Porter J L, Squyers R A. ATC Report NO. R-91100/9CR-47A, Texas: Vought Corporation Advanced Technology Center, 1981
- 5 Dutton J C, Mikkelsen C D, Addy AL. AIAA. J. 1982, 20(10): 1392~1400

- 6 Launder B E, Rodi W. Ann Rev Fluid Mech, 1983: 429~459
- 7 Englar R J, Huson G G. Journal of Aircraft, 1984, 21(7): 473~483
- 8 Hisashi Matsuda, Sei-Ichi Iida, Michio Hayakawa. Journal of Fluid Engineering, 1990, 112(4): 462~467
- 9 王献孚, 黄锦文, 潘卫明. 水动力学研究与进展, 1992(A7), 7(1): 36~41

(武汉交通科技大学王献孚教授撰)

涡旋运动与混沌 vortex motion and chaos

涡旋运动及其相互作用在自然界和工程技术的各种宏观流动中,以及微观湍流结构中,起着十分重要的作用。应用传统的流体力学方法(包括计算流体力学方法),尚不足以解决非定常涡旋运动的全部问题。近年来,人们开始把非线性动力学方法与传统方法结合起来,揭示出一些引起涡旋运动中的混沌现象,它们同流态转换、流致噪声和湍流掺混等都有密切联系。这一方向的深入研究将有可能把当代流体力学研究推到一个新的水平,并对丰富和发展动力系统理论,有重要的基础意义和广泛的应用价值。

利用混沌理论研究有涡流动的的动力特性时,采用 Euler 和 Lagrange 两种基本观点。了解混沌流动复杂特性的关键在于弄清周期点的几何结构及流的局部分叉和整体分叉特性。

研究 Euler 流场的混沌时,必须对完全的偏微分方程(Navier Stokes 方程)进行截断处理,以得到一组低阶常微分方程组,然后对这一方程组所代表的有限维动力系统进行研究,如 Lorenz 的工作。但由于无法保证截断后低维系统中的混沌也会在无限维的偏微分方程系统中出现,而且随着保留阶数的不同,有时会出现定性上不同的动力响应。所以在流体力学界,对用这种方法研究混沌问题一直存在着怀疑和争论。Shirer 与 Wells 认为应用截断方法时必须满足的条件是:所得到的解在所有高阶模型及偏微分方程系统中也同样出现,即当采用更高阶模型时不再出现新的稳态解,就可认为该模型是可用的。Marcus 发现, Lorenz 模型之所以不能作为物理上可接受的湍流模型,其根本原因就是不能满足以上条件。另外,人们发现作了有限截断,所得到的模型只能反映偏微分系统中某些特定的混沌特性。在具体进行截断处理时,常用的方法有 Galerkin 法和流场的局部级数展开等方法。

研究 Lagrange 质点流混沌时,往往是基于 Euler 速度场,采用 Lagrange 观点,跟踪流体质点的运动,研究由此定义的动力系统。即

$$Dx/Dt = v(x, t)$$

对时间积分,得

$$x = f_t(x_0)$$

其中 x_0 为其初始位置。称 X 为流。如果流动是时间周期的,运用 Poincare 截面法,运动可表示为映射

$$x = f_T(x_0) = f^n(x_0)$$

其中, n 是流的周期数, T 是时间周期。此时,映射的质点轨迹在 Poincare 截面上用一系列点来表示,而不是连续的轨迹,这样就将连续的流用离散的映射来表示。研究 Lagrange 混沌时,无需作人为的高阶截断。但由于 Euler 速度场的解析解一般无法得到,而且近似求得的速度场会对 Lagrange 混沌进一步产生影响,所以 Lagrange 混沌的研究难度总的来说比 Euler 流场中的混沌更大。直接研究 Lagrange 涡量的演化过程有可能从根本上揭示 Euler 流场中的混沌与 Lagrange 质点流混沌间的联系。

我们讨论无界空间中涡旋运动的混沌特性,重点放在一些理论模型上,如 Tendril-Whorl 流, Aonold-Beltrami-Childress 流, Kelvin 猫眼流等。这些理论模型的解析特性相对较为简单,可深入研究它们的动力特性,总结出最基本的规律,从而为研究更为复杂的实际流动提供方法和经验。这里的例子有二维非定常流动,也有三维定常流动。在三维情形中流可以沿 KAM(Kol-

mogorov-Arnold-Moser) 表面进行“Arnold 扩散”,但其过程极为缓慢。三维流场的混沌速度场的动力特性极为复杂,但在这些流动中,已经知道长度以指数规律增长,且其质点流也是混沌的。

TW 流是一种简单的周期流动,每个周期中的流由均匀拉伸流和非线性旋转流组成。TW 流有两种基本结构:(1)在稳定周期轨道的椭圆不动点附近形成的螺旋形流动,即 Whorl 流;(2)由不稳定周期轨道上的双曲不动点产生的指数拉伸、折叠结构,即 Tendril 流。Berry 等首先研究了 TW 流,而后 Khakhar 等对它进行了详细分析。

首先,进行局部分析。在极坐标系中,拉伸映射与旋转映射的综合作用是

$$f(r, \theta) = f_{ext}, f_{rot}, \quad f^{-1}(r, \theta) = (r', \theta')$$

其中,

$$r' = r[(1/a^2)\cos^2\theta + a^2\sin^2\theta]^{1/2}$$

$$\theta' = \text{tg}^{-1}(a^2\text{tg}\theta) - \text{Brexpr}(-r)$$

$$\alpha = \exp(\epsilon \text{Text})$$

此处, B 为常数。拉伸部分为 $(0 < t < T_{ext})$

$$u_x = -\epsilon x, u_y = \epsilon y$$

旋转部分为 $(T_{ext} < t < T_{ext} + T_{rot})$

$$u_r = 0, u_\theta = -\omega(r)$$

这里 T_{ext} 和 T_{rot} 分别为拉伸部分与旋转部分的时间, ϵ 为位伸系数, $\omega(r)$ 是描述旋转率的系数。对周期点 $P^* = (r^*, \theta^*)$, 得

$$\theta^* = \text{tg}^{-1}(1/a)$$

$$B r^* \exp(-r^*) = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\alpha-1/\alpha}{2}\right) = 2\pi n, n=0, 1, 2, \dots, M$$

对 $M=0$ 时,引入参数

$$\beta = B e^{1/\text{tg}^{-1}\left(\frac{\alpha-1/\alpha}{2}\right)}$$

由上式可得 TW 映射的不动点为

$$\theta^* = \text{tg}^{-1}(1/a)$$

$$r^* \exp(1-r^*) = 1/\beta$$

通过对该映射周期 1 不动点的局部线性化分析,求得决定周期 1 不动点性质的参数 G 。对应于不同的 G , 不动点的性质亦不同,具体情况如下: $G > 0 \rightarrow$ 双曲型; $G = 0 \rightarrow$ 抛物型; $0 > G > -1 \rightarrow$ 椭圆型; $G = -1 \rightarrow$ 抛物型; $-1 > G \rightarrow$ 双曲型。

通过对局部分叉的分析,可知当 $\beta=1$ 时,在 $r^*=1$ 处出现两个周期 1 的点,这两点都是抛物型的;随着 β 的增大,这两点分别分裂成两个点,其中位于 $r^*>1$ 的范围的两个点是双曲的,而位于 $r^*<1$ 的范围的两个点是椭圆的。所以在 $\beta=1, r^*=1$ 处出现鞍-结点分叉。当 β 进一步增大时,会发生 2 次分叉,这时椭圆点先变成抛物点,然后再变成双曲点。同时,还会产生两个新的周期 2 的椭圆点,即发生了周期倍化。对周期 2 的点可进一步进行局部分析, Khakhar 等发现在发生周期倍化时,在周期 2 的发生点处,它是抛物型的,而当 β 稍稍增大一点,它们即变成椭圆型的。随着 β 的继续增大,会发生第 2 次周期倍化,这时周期 2 的点变成双曲型的,同时,在每个周期 2 的点处产生出两个周期 4 的椭圆点。

Khakhar 等还指出 TW 映射具有同宿/异宿性质。同宿/异宿横截意味着存在马蹄映射,进而证明 TW 流确实存在混沌特性。他们还给出了 TW 映射中马蹄映射的例证。

1965 年 Arnold 提出满足 Euler 方程和不可压缩条件

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \omega \times U = -\nabla(P + \frac{1}{2}u^2)$$

$$\nabla \cdot U = 0$$

的 1 组三维定常流动的解

$$dx/dt = u = A \sin z + C \cos y$$

$$dy/dt = v = B \sin x + A \cos z$$

$$dz/dt = w = C \sin y + B \cos x$$

其中, A, B, C 为实参数。这一流动还满足 Beltrami 条件

$$\omega = \lambda(x)U, \quad U \cdot \nabla \lambda = 0$$

Arnold 提出这一模型的目的是:首先研究空间湍流的规律,

然后与事先存在的时间湍流相互作用,以开辟一条研究完全发展湍流的道路。Childress 也独立地研究了类似模型。Henon 在 $A =$

$\sqrt{3}, B = \sqrt{2}, C = 1$ 的条件下,证明了该系统存在混沌。Dombre 等称这种流动为 Arnold-Beltrami-Childress 流,简称 ABC 流。当参数 A, B, C 之一等于零时,该系统是可积的,这为解析地研究其 KAM 表面等动力特性提供了理论上的便利。Dombre 等对 ABC 流作了十分详细的研究,发现在 ABC 流中存在 6 个主导涡。进一步的研究表明这些涡不是直的,而是以左螺旋方式扭转的(周期为 2π)。这些涡共处于流场中的“周期柜”中(即, $0 \leq x \leq 2\pi, 0 \leq y \leq 2\pi, 0 \leq z \leq 2\pi$ 的空间中),但又避免相互间的直接接触。在涡与涡之间的流场中有着极为丰富的流动结构。Dombre 等的数值模拟结果说明在 ABC 流的三维定常流中,流线上相邻质点的位置会随时间以指数规律迅速分开,但局限在一有界区域内游荡,其结果是单条流线看上去充满了整个混沌区域的空间。他们还应用摄动法研究了近可积情形和共振情形。ABC 流的动力学分析从一个侧面说明了 3 维涡旋的动力特性是极为复杂的。

Galloway 和 Frisch 还研究了 ABC 流动的线性稳定性问题,他们的结果说明 ABC 流动在 Reynolds 数大于 10 时是不稳定的。用多重尺度法研究的结果表明在更小的 Reynolds 数时,该流动也是不稳定的。Moffatt 也研究了无粘情形下 ABC 流动的稳定性问题。McLanghlin 用摄动法研究了 ABC 流中粒子尺寸对混沌特性的影响,发现粒子的惯性和有效质量的存在有助于消除 Lagrange 流,并且粒子会被流动中涡旋的周期轨道或准周期轨道所俘获。对 ABC 流的深入探讨有助于空间湍流机理的研究。

Kelvin 猫眼流对剪切流中的混合过程及剪切湍流理论研究都具有重要意义。Kelvin 猫眼流最先由 Kelvin 进行研究,它在流体力学的平行剪切流稳定性理论研究中引起人们持久的兴趣。

这里,我们讨论对 Kelvin 猫眼流进行扰动后流动的混沌特性。下列流函数

$$\psi(x_1, x_2, t) = Ux_2 + \left[\frac{\Delta U h}{2}\right] \ln \left\{ \cosh \left[\frac{x_2}{h} \right] + A \cos \left(\frac{x_2 - Ut}{h} \right) \right\}$$

所表示的流动为一列涡旋以速度 U 向 x_1 方向移动,称为 Kelvin 猫眼流。其中,无量纲参数 A 代表涡量集中的程度, ΔU 为涡列两边的速度差, h 与涡间距成正比。迹线与质点轨迹的演化过程可由

$$dx_1/dt = \partial\psi/\partial x_2$$

$$dx_2/dt = -\partial\psi/\partial x_1$$

$x_1 > 0$ 方向平移的相对坐标系中,流函数变为

$$\psi'(x_1, x_2) = \frac{\Delta U h}{2} \ln \left\{ \cosh \left(\frac{x_2}{h} \right) + A \cos \left(\frac{x_1}{h} \right) \right\}$$

在这一坐标系中,流是自洽的,因此是可积的。对上式依 $\Delta U h/2$ 进行无量纲化处理后得(采用同样记号)

$$\psi'(x_1, x_2) = \ln(\cosh x_2 + A \cos x_1)$$

相对于运动坐标系的流体质点速度为

$$f_1 = \frac{dx_1}{dt} = \frac{\sinh x_2}{\cosh x_2 + A \cos x_1}$$

$$f_2 = \frac{dx_2}{dt} = \frac{A \sin x_1}{\cosh x_2 + A \cos x_1}$$

由于速度场有异宿点,因此扰动将会导致其稳定流形与不稳定流形的相交。利用 Melnikov 方法对简单的面积不变扰动

$$g_1 = \epsilon \sin(\omega t)$$

$$g_2 = 0$$

可得 Melnikov 积分为

$$M(t_0) = \left[\frac{-\epsilon A \cos(\omega t_0)}{1+A} \right] F(\omega)$$

其中,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \sin(x_1) \text{ 流形} \sin(\omega t) dt$$

因 $M(t_0)$ 为受扰动流形间的距离,可以预计在 $F(\omega)$ 的极值处(对

应于 $\omega=0.3$ 附近)会出现最强的混沌。由 Poincaré 截面法 ($x_1 \pmod{2\pi}$) 可见果然在 $\omega \approx 0.3$ 处的混沌最强。

进一步考虑各涡之间的相互作用时,则须求助于数值计算。以上所讨论的 Kelvin 猫眼流显然不是湍流的,其根本原因在于它无法进行涡量混合。为此, Danielson 人为地构造了一种能够进行涡量混合的 Kelvin 猫眼流,从而得到混沌的 Euler 流场。

无界空间中的其它涡运动有如下几种:(1)理想点涡模型;(2)剪切流中的涡旋与混沌;(3)尾流中的涡旋与混沌;(4)三维涡旋运动。

谈庆明等最先对二维轴承流进行了非线性动力特性研究。与此同时, Aref 与 Balachandar 也对其进行了数值模拟。而后 Swanson 与 Ottino 从混合机理研究的角度对它进行了详细的实验和数值模拟研究。通过对偏心轴承流的内、外边界施加周期扰动,在流动中即出现同宿、异宿轨道研究表明,低阶周期点的流形起着主导作用,并且对应于很宽的参数范围都会出现 Lagrange 混沌。值得注意的是, Aref 与 Jones 发现,轴承流中的混沌对流能促进流体分离过程。

Sody 通过数值求解涡量-流函数形式的 Navier-Stokes 方程,研究了在波浪壁通道内的流动。由于涡旋的存在可以使流动产生混沌,但另一方面,在一定条件下,通过适当的非正常激发,也可以形成十分有序、更为稳定的涡旋。

壁面附近的结构不稳定涡旋流与流动分离及湍流直接相联系。其速度场可由一个局部成立的级数展开来表示,而它必须是满足无滑移条件的 Navier-Stokes 方程在固壁处的局部解。所以,问题归结为确定级数的系数,并可通过改变一些未定的系数来考察流场拓扑结构的变化。当级数的最低阶系数变为零时,就会产生高阶奇性现象,这些现象发生在初始分离、初始涡旋形成及涡旋破裂即将发生之际。当远离分叉态时,已形成的结构稳定流一方面保持它的拓扑结构不变;另一方面流面,涡面会发生变形、拉伸和折叠。因此在研究混沌流动时,必须从局部描述向全局描述转变。

另外,还有几种十分重要的涡旋运动,如 Bénard 对流,同心圆柱 Couette 流中的 Taylor 涡,空穴流及点涡、涡丝等。

(空军气象学院吴锤结教授撰)

壁面射流 wall jets. 是指沿着壁面喷射的一种剪切层流动,它提供的动量具有很强的附壁效应,特别是沿凸壁面射流,使壁面处压强小于射流外侧的压强,而产生柯达(Connda)效应,并增强边界层对周围流体的吸入量。壁面射流作为工程上应用的一种技术,利用少量壁面射流可获得边界层控制的很高效益,航空和船舶部门已用于高升力机翼的设计。此外,它在加热、冷却、通风、减阻、控制噪音以及石油工业中燃烧废气的 Connda 火舌设计等许多工程中的应用都具有直接经济价值。

壁面射流的研究,起源于热传导问题的分析。最早对平壁面射流进行试验研究工作的是 Forthmann(1934),他观测到壁面射流的自保持特性,其边界层厚度沿壁面位置 X 线性增大,最大速度则反比于 \sqrt{x} 减小,以及内层区(从壁面 $y=0$ 到最大速度处离壁面距离 $y=y_m$)的速度分布为 $1/7$ 次方变化等等规律。直到 20 世纪 60 年代前后,大量的试验研究和理论研究有进一步的深入展开。对平壁面射流速度分布第一个作出解析解的是 Glauert(1956),实验测定亦证实,平壁面射流内层区速度分布十分符合对数律公式,外层区使用 Sech² 速度分布有很好的近似。Mathieu(1959)的分析又正确地指出,由于壁面射流边界层中外层区对内层区的影响,使零切应力的位置不位于最大速度 y_m 处,而被移到离壁面大约 $\frac{2}{3}y_m$ 的地方;Lauder(1969)用混和长理论亦得到一致的结果;Irwin(1973)实验测量进一步证实了这个结论。壁面射流边界层的动量,因壁面摩擦等因素而衰减,各家实验数据比较分散,对其数量概念尚不很明确,但总的说,二维壁面射流的动量衰减并不严重。对于壁面切应力, Kruka(1974)等都作出

有可供参考的一些经验计算公式。Lauder 和 Roid(1981)对壁面射流外层区湍流特性的实验资料有所综述。

有两类凸壁面射流已有较多研究,即圆柱壁面射流和对数螺旋壁面射流,前者具有重要实际应用意义,后者因其流动有很好的自保持特性而具有理论上的指导性。流动显示表明,壁面射流沿圆柱表面流动时的分离角可高达 120° 以上(指射流起始角为 0° ,沿圆柱表面到分离点的附壁流动的角度)。圆柱壁面射流边界层厚度变化以及有关的湍流特性已有 Guirton(1970)和 Wilson(1976)等的试验研究资料。对数螺旋壁面射流,据 Guirton(1977)等的测量认为:射流边界层在相当大范围内仍有很好的自保持特性,故被 1981 年“复杂湍流研究”的 Stanford 会议推荐为理论研究该类问题的主要参考标准。对于凸壁面射流自保持区域内湍流场中诸能量平衡关系的测量和分析, Lauder 和 Roid(1983)的评述有所概括。

Viets 和 Sforza(1970)首次发表三维壁面射流的试验表明,随后的一些试验研究也都证实,三维壁面射流的一个显著特性,即它的横向扩展率远远大于法向扩展率,射流在两个方向扩展宽度比达到 $5.5:1$ 。这一现象的机理何在?引起人们浓厚的兴趣。Lauder 和 Roid(1983)的初步分析解释, Hisashi 和 Matsuda 等(1990)的进一步试验研究,流线向涡和马蹄形涡等拟序结构的一些假设的提出,尚无一致的定论。

环量控制翼作为壁面喷流的一项应用技术,突出地反映了研究壁面喷流的重要实际意义。对于具有钝尾缘机翼绕流,应用壁面射流技术能将其分离点后移,提高机翼升力。Kind 和 Maul(1968)所发表的引人注目的试验结果,吸引了众多学者的继续研究。美国 Davia-Taylor 船舶研究和发展中心,自 1969 年以来,为解决海军飞机升降问题,对利用壁面喷流的高升力环量控制翼的研制进行了大量的研究,包括翼型选择、尾缘圆柱半径大小、射流喷嘴位置和高度以及其它影响因素。他们的一些研究成果可在 Englar(1975)提出的一篇 AD 报告中见到。在风洞试验对环量控制翼取得成果的基础上,飞行试验也在 1979 年获得成功。风洞试验和飞行试验证明,只要利用发动机废气对机翼壁面切向喷流所构造的环量控制翼(简称 CCW),能获得比通常具有襟翼的机翼还要大 3 倍以上的升力。而鉴于所存在的一些问题(如阻力增大、射流能量能否更充分利用以及射流吸力峰区对机翼产生负的俯仰力矩等等)为改进其性能的进一步研究工作仍在继续地进行,如 Harvell 和 Franke(1985)的双孔射流装置, Englar(1984)的小尾半径环量控制翼的提出。中国武汉水运工程学院流体力学教研室研究小组所作的试验表明(1990),小展弦比环量控制翼的三维效应极为严重,并开展了如何抑制三维效应的研究。武汉水运工程学院对环量控制翼在船舶上应用的研究已指出,可控环量船用舵具有极其优良的船舶慢速和微速运动中操纵性能,即使不用舵操纵船舶也可以实现此性能。

利用壁面喷流能有效地控制夹在流层间的纵向涡,而涡的控制对许多工业领域有重要的潜在意义,如改善空气动力学特性、提高船舶推进效率、减小阻力、控制和衰减噪音以及改善热传导性能。在这些方面虽然已有一些实际应用,但壁面射流对涡运动产生的效应在内在机制的认识尚少,当前正在开展这方面的研究工作。如 Ligrani 和 Schwartz(1990)对射流孔的几何形状和方向、射流直径与涡大小、射流孔位置与涡位置、射流强度与涡环量的影响关系开展了一些试验研究。

综上所述,对壁面射流及其应用的研究仍在继续发展中,根据工业流体力学的应用和发展需要,以及根据 1986 年美国 NASA Ames 研究中心召开的环量控制工作会议所提出的 25 篇论文等资料,本课题当前研究的热点认为有以下几方面:(1)继续开展环量控制翼的试验研究和理论研究。在理论计算预测其性能方面对适用的湍流模型需要进一步改进。在试验研究方面应与理论研究相结合查明壁面射流的三维效应的机理,并探讨抑制三维效应的方法,这将直接影响环量控制翼的性能的提高。环量控制翼的试验研究和理论研究将是多方面的,它作为一项应用技

术, 创新的喷射技艺、提出新的喷射概念, 始终将受到重视。环量控制翼应用于直升飞机的旋翼已取得成功, 可控环量的旋翼研究也成为今后研究的一个热点。(2) 开展壁面射流与涡的相互作用的机理研究, 对利用壁面射流在传热、减阻、降噪音以及提高飞机、船舶推进性能方面, 将会起进一步促进作用。(3) 在各个工业领域尚存在广泛应用的潜力, 小至汽车玻璃窗除雨和除尘、高温叶片的薄膜冷却、机翼和浆叶性能控制等等, 大至高炉流道、水筒加速、船体线型设计等等都存在应用前景, 有的尚待我们进一步的开发和研究

参考文献

- 1 Forchmann E. Ing Arch. 1934; 5: 42
- 2 Glaucrt M B. Journal of Fluid Mech. 1956; 1: 623
- 3 Kind R J, Mauld D. Aero Quart. 1968; 19(5): 171-182
- 4 Newman B G. CASI Journal. 1969; 17(8): 288~305
- 5 Irwin H P A H. J Fluid Mech. 1973; 61: 33
- 6 Launder B E, Rods, W. Prog. Aerosp Sci. 1981; 81~128
- 7 Dutton J C, Carroll B F. Journal of Fluid Engineering. 1986; 108(4): 414~420
- 8 Drummond J P, Rogers R C, Hussaini M Y. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1987; 64: 39~60
- 9 Khodadadi J M, Vlachos N S. AIAA J. 1989; 27(5): 532~541
- 10 Eklund D K, Drummod J P, Hassan H A. AIAA J. 1990; 28(9): 1633~1641

(武汉交通科技大学王献学教授撰)

气液两相流瞬变过程 liquid-gas two-phase transient flow

气液两相流指的是管道中流动的介质是气体和液体的混合物。气液混合物既可以是—种物质, 也可以是两种不同的物质, 前者称为单组分的气液两相流, 后者称为双组分的气液两相流。由于气液的比例不同, 管道放置的方式不同, 以及其他因素的影响, 形成的气液界面的形状、流型也各异。流型通常分为泡状流、塞状流、层状流、环状流和雾状流等。瞬变过程指的是管道系统中某一边界条件发生变化时, 管道中流动的流体从—种恒定状态转变到另—种恒定状态的过程。在此过程中, 流速、压力, 甚至流型都有着显著的变化, 往往导致流体对管壁的作用力有较大幅度的增加, 是确定管壁承载力、设计管道布置形式及结构形式, 防止某些严重事故发生的重要依据。气液两相流瞬变过程的研究广泛应用于核电站、火电站的循环冷却水管道系统, 石化的输送管道系统, 航天器的液体燃料管道系统, 城市排污下水道系统以及人体血液循环系统等, 逐渐成为近代流体力学研究领域中—门十分重要的分支

气液两相流瞬变过程的研究在 60 年代后期开始迅速发展, 研究的主要内容是瞬变过程中气液两相的相互作用和宏观的运动规律。1969 年沃利斯(G. B. Wallis)对描述两相流宏观运动规律的 3 种简单的一维数学模型, 即均匀流模型、分离流模型和漂移流模型进行了系统的介绍, 均匀流模型主要特点是忽略两相之间的相对运动以及质量、动量等交换, 把两相流作为具有平均性质的单一拟流体。1976 年马丁(C. S. Martin)等提出的三特征线方程就是该模型在瞬变过程研究中的具体运用, 较好地解决了泡状流瞬变过程的模拟, 漂移流模型主要特点是引入漂移通量来反映两相之间的相对运动, 1979 年马丁等将该模型用于塞状流瞬变过程的模拟, 但计算结果与实验结果有一定的差别, 其原因在于恒定流条件下得到的漂移通量经验关系式不能较好地反映瞬变过程中气塞的运动规律。分离流模型分别列出两相的质量、动量和能量方程, 考虑两相之间的各种交换, 利用界面的耦合条件使其方程组封闭, 但忽略了相与界面压力和虚拟质量力的分离流模型是—组病态方程, 不能用于气液两相流瞬变过程的模拟, 这—重要的结论 1992 年由杨建东等人从理论上予以了证明。上述

3 种同向的数学模型均可由分析模型在特定的条件下简化得出。在 70 年代后期分析模型有着迅速地发展, 迪尔黑等在守恒方程、虚拟质量力等方面做了大量的工作, 形成了较完整的理论系统。1950 年汉科克斯(W. T. Hancock)等将该模型用于气液两相流瞬变过程的研究, 重点讨论了在层状流、泡状流和雾状流中的应用, 但用于瞬变过程中两相之间的相互作用和耦合的认识很不够, 加上—维模型的局限, 无法反映该过程气液界面强烈的二维、三维性质和变化, 所以分析模型的应用受到了限制。

压力波的传播速度是气液两相流瞬变过程研究中至关重要的问题, 这是因为波速的大小直接影响着瞬变过程中压力波动的幅值、周期等动态响应特性。气相易压缩的性质决定了气液两相流的波速不是常数, 而是强烈地依赖于气液的比例、流型以及压力波动的变化。1968 年亨利(R. E. Henry)等根据均匀流模型, 分离流模型和积率响应模式导出了 3 种不同的波速公式, 分别应用于泡状流、层状流(包括环状流和雾状流)和塞状流, 在此之后, 人们对泡状流、层状流的压力波传播速度进行了较深入的研究与亨利等人的工作相比, 主要考虑了液体的压缩性、管壁的弹性对波速的影响, 对于泡状流还考虑了气泡表面张力作用, 扩大了波速公式的适用范围。塞状流的波速公式由于无法考虑压力波在气液界面上的反射, 缺乏充分的理论依据, 所以没有得到进一步的探讨和应用。事实上 1980 年汉科克斯等人的工作已经证明了无论对哪一种流型, —维气液两相流的压力波传播速度是积分分析模型的两个特征根, 当特征根中的虚拟质量系数等于无穷大时就得到均匀流模型的波速公式, 等于零时就得到分离流模型的波速公式。塞状流是介于泡状流和层状流之间的一种复杂的流型, 如果能确定塞状流的虚拟质量系数和其他有关的参数和关系式, 就不难得到塞状流的压力波速公式。

积分分析模型的两个特征根表示着—维气液两相流界面波的传播速度, 界面波速度主要取决于相与界面的压力差以及气液两相的相对速度, 尽管它的大小同气相、液相的速度同量级, 但对于界面的稳定性有着重要的作用。1969 年沃利斯仅给出了层状流的界面波的波速, 而 1980 年汉科克斯等人给出的界面波的波速公式更具有普遍意义, 适用于不同流型的瞬变过程。

激波也是气液两相流瞬变过程中发生的一种波动现象, 它是由陡峻的压力波形成的。1978 年潘梅内伯汉(M. Padmanabhan)和马丁对泡状流中的激波形成、构造和传播速度进行了实验研究, 结论是激波的波速符合由均匀流模型得出的 Hugoniot 关系式。1981 年莱斯(H. J. Rath)在考虑了管壁弹性的前提下, 导出了泡状流中激波的波速公式, 并且研究了各种影响因素的数量关系, 得出了空穴率和管壁弹性对激波的特性具有非常强烈影响的结论。

气液两相之间的相互作用以及界面的耦合条件是十分重要的问题, 涉及到界面上质量、动量和能量的交换, 力的平衡, 界面的运动速度等—系列的规律如何补充, 也涉及到守恒方程式中—些重要的参数如虚拟质量系数、非连续相的分布参数等如何确定, 由于气液两相流的界面现象十分复杂, 人们对它的认识还不够, 所以到目前为止取得的研究成果并不多, 尤其是对于瞬变过程更是如此。

鉴于气液两相流瞬变过程中存在的问题, 近期的研究重点是(1)塞状流瞬变过程的研究。塞状流界面形状复杂, 采用—维方法进行模拟难以得到满意的结果, 因此有必要采用二维甚至三维的数学模型;(2)气液两相之间的相互作用及耦合条件的研究。这方面的研究除了理论分析外, 更多地需要实验, 以加深对某些不确定性规律的认识;(3)瞬变过程中界面波动稳定性以及流型转变的研究。在瞬变过程中不可避免出现气液界面的变形、破碎、聚并等现象, 甚至局部的流型发生变化, 这些变化将极大影响着—些宏观量的大小, 如压力幅值、波动周期等。

参考文献

- 1 Wallis G B. One dimensional two-phase flow, New York, McGraw Hill, 1969

- 2 Martin C S, Padmanabhan M. J of Fluids Engineering, 1979,101(1),42~52
- 3 Drew D A, Cheng L, Lahey R R. Int J of Multiphase Flow, 1979,5(4),233~242
- 4 Hancox W T, Ferch R L, Liu WS. Int. J of Multiphase Flow, 1980,6(1),25~40
- 5 Hetsroni G. Handbook of Multiphase Systems. Washington: Hemisphere pub. co. 1982
- 6 Yang J D, Wu R Q, Chen J Z. J of Hydrodynamics, 1992,4(1),83~90

(武汉水利电力大学杨建东教授撰)

流变学

工程结构流变问题 rheological problems of engineering structures 工程结构的流变问题是流变学在工程结构中的应用。工程结构的蠕变现象在19世纪已观察到,但它的真正性质到本世纪初才发现。1907年美国材料试验学会(ASTM)首先报导了钢筋混凝土梁的蠕变资料。1910年E. N. Ha Andrede 首先揭示了金属蠕变三阶段概念,到本世纪30年代,关于工程结构的蠕变现象、特性和基本理论大体形成,以后又进一步发现应力松弛现象。

从20世纪30年代至今的60年中,有关混凝土与金属结构等的流变问题取得巨大进展,现已查明,混凝土在不变持续荷载作用下,变形随时间不断增长,其数值可达瞬时弹性变形的1~3倍。在预应力钢筋混凝土结构中,由于应力松弛引起预应力逐渐丧失的现象。而且由于流变,结构中的应力应变状态也为之改观,因此,在结构设计中,流变是个不可忽视的因素。以下简要介绍若干工程结构的流变问题。

线粘弹性梁 前捷克斯洛伐克 Zdenek Sobatkm 提出了等价应力,等价应变等一系列有关概念,并把微分型和积分型合并,抽象出微分-积分算子概念,对工程结构粘弹性体进行了系统的研究,导出了一系列新结论。由于引进了“等价”概念,普遍虎克定律仍成立。

$$\bar{\sigma} = E_0 \bar{\epsilon} \tag{1}$$

$\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}$ 分别称为等价应力和等价应变。

$E_0(x, y, z, t)$ —普通弹性模量,它与坐标及时间有关。

定义微分-积分算子:

$$\left. \begin{aligned} \bar{A} &= a_0(t) + a_1(t) \frac{\partial}{\partial t} + \dots + a_r(t) \frac{\partial^r}{\partial t^r} + a_{-1}(t) \int_{t_0}^t k(t-\tau) d\tau \\ \bar{B} &= b_0(t) + b_1(t) \frac{\partial}{\partial t} + \dots + b_r(t) \frac{\partial^r}{\partial t^r} + b_{-1}(t) \int_{t_0}^t L(t-\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \bar{A}\sigma = a_0(t)\sigma + a_1(t) \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \dots + a_r(t) \frac{\partial^r \sigma}{\partial t^r} \\ &\quad + a_{-1}(t) \int_{t_0}^t k(t-\tau)\sigma(\tau) d\tau \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= \bar{B}\epsilon = b_0(t)\epsilon + b_1(t) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \dots + b_r(t) \frac{\partial^r \epsilon}{\partial t^r} \\ &\quad + b_{-1}(t) \int_{t_0}^t L(t-\tau)\epsilon(\tau) d\tau \end{aligned} \tag{4}$$

类似地定义:等价曲率 $\bar{C} = BC$ 等价挠度 $\bar{W} = BW$ 等价弯矩 $\bar{M} = \bar{A}M$ 等价剪力 $\bar{Q} = \bar{A}Q$ 等价荷载 $\bar{q} = \bar{A}q$ 对于粘弹性梁,假定“平面假设”仍成立,于是有

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= zc \\ C &= -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中, C —曲率, W —挠度。由(1)、(5)式,有

$$\bar{\sigma} = E_0 Z \bar{C} = -E_0 Z \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} \tag{6}$$

由材料知

$$M = \int_F \sigma Z dF$$

两端作用算子 \bar{A} , 则

$$\bar{M} = \int_F \bar{\sigma} Z dF = E_0 \bar{C} \int_F Z^2 dF = -E_0 J \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} \tag{7}$$

式中

$$J = \int_F Z^2 dF, \text{对质心的惯性矩, } F \text{—横截面。}$$

由(6)、(7)得

$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{M}Z}{J} \tag{8}$$

与受纯弯曲的弹性梁的正应力公式有相似形式。

对于弹性梁,弯矩、剪力、荷载有如下关系:

$$\frac{\partial M}{\partial x} = Q, \frac{\partial Q}{\partial x} = -q, \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = -q,$$

两端分别作用算子 \bar{A} , 则得

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial x} = \bar{Q}, \frac{\partial \bar{Q}}{\partial x} = -\bar{q}, \frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial x^2} = -\bar{q} \tag{9}$$

(7)式代入(9)第三式,得

$$E_0 J \frac{\partial^4 \bar{W}}{\partial x^4} = -\bar{q} \tag{10}$$

与弹性梁结果类似。

线粘弹性刚架 粘弹性刚架的转角和位移的有关公式,如弹性刚架一样可借助虚功原理求得。

在弯矩 M 作用下弹性杆单元 ds 的转角为

$$d\varphi = \frac{M ds}{EJ}$$

结合(1)、(5)、(8)式可求得粘弹性杆单元的等价微分转角为

$$d\varphi = \frac{\bar{M} ds}{E_0 J} \tag{11}$$

定义

等价转角 $\bar{\varphi} = B\varphi$

等价轴力 $\bar{N} = \bar{A}N$

等价扭矩 $\bar{M}_t = \bar{A}M_t$

等价扭角 $\bar{\varphi}_t = B\varphi_t$

把 $\bar{W}, d\varphi$ 看成虚值,直接应用虚功原理,或先对 $W, d\varphi$ 应用虚功原理,然后作用以算子 \bar{B} 均可得

$$\bar{W} = \int_{t_0}^t M_0 d\varphi$$

把(11)式代入,得

$$\bar{W} = \int_0^s \frac{M_0 \bar{M}}{E_0 J} ds \tag{12}$$

式中 M_0 及后文将用到的 Q_0, N_t, M_{t0} 分别表示在所求位移方向作用的单位力引起的弯矩、剪力、轴力和扭矩。

应用虚功原理,类似地可得由等价剪力引起的等价位移(挠度)

$$\bar{W}_q = k \int_0^s \frac{Q_0 \bar{Q}}{G_0 F} ds \tag{13}$$

式中 k 为剪应力分布不均系数, G_0 为普通剪切模量。

类似地,可得由等价轴力引起的等价挠度,等价扭矩引起的等价扭角。

于是,由等价弯矩、剪力、轴力、扭矩 $\bar{M}, \bar{Q}, \bar{N}, \bar{M}_t$ 引起的总等价位移为

$$\bar{W} = \int_0^s \frac{M_0 \bar{M}}{E_0 J} ds + k \int_0^s \frac{Q_0 \bar{Q}}{G_0 F} ds + \int_0^s \frac{N_0 \bar{N}}{E_0 F} ds + \int_0^s \frac{M_{T0} \bar{M}_t}{G_0 J_t} ds \tag{14}$$

$$\bar{\varphi} = \int_0^s \frac{M_0 \bar{M}}{E_0 J} ds + k \int_0^s \frac{Q_0 \bar{Q}}{G_0 F} ds + \int_0^s \frac{N_0 \bar{N}}{E_0 F} ds + \int_0^s \frac{M_{T0} \bar{M}_t}{G_0 J_t} ds$$

线粘弹性板

定义:

等价应力分量 $\bar{\sigma}_{ij} = \bar{A}\sigma_{ij}$

等价应变分量 $\bar{\epsilon}_{ij} = \bar{B}\epsilon_{ij}$

线性各异性向性的等价应力-应变关系为

$\bar{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}\bar{\epsilon}_{kl}$ (16)

式中 $C_{ijkl}(x, y, z, t)$ 为各向异性普遍四阶张量。

由弹性薄板理论知

$\epsilon_x = -Z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \epsilon_y = -Z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \gamma_{xy} = -2Z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$

引用张量, 偏导数下标记法, 记为

$\epsilon_{kl} = -ZW'_{kl}$

作用以算子 \bar{B} , 有

$\bar{\epsilon}_{kl} = -ZW'_{kl}$ (17)

代入(16)式, 则有

$\bar{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}ZW'_{kl}$ (18)

由弹性理论知, 单位长度板的弯矩可表为

$m_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} Z dz$

弯矩平衡方程的张量表达式为

$m_{x,i,j} = -q(x, y, t)$

即

$\frac{\partial^2 m_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 m_y}{\partial y^2} = -q(x, y, t)$

对它们分别作用以算子 \bar{A} , 则有

$\bar{m}_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\sigma}_{ij} Z dz$ (19)

$\bar{m}_{ij,j} = -\bar{q}(x, y, t)$ (20)

若沿板厚各向一致性, 将(19)连(18)式代入(20)式, 则得

$(C_{ijkl}\bar{W}_{kl})_{,ij} = -\frac{12\bar{q}(x, y, t)}{h^3}$ (21)

对于均匀厚度一致正交板, 则有

$C_{11} \frac{\partial^4 \bar{W}}{\partial x^4} + 2(C_{12} + 2C_{33}) \frac{\partial^4 \bar{W}}{\partial x^2 \partial y^2} + C_{22} \frac{\partial^4 \bar{W}}{\partial y^4} = \frac{12\bar{q}(x, y, t)}{h^3}$ (22)

与弹性薄板受横向荷载弯曲时的位移方程

$\nabla^2 \nabla^2 W = \frac{q}{D}$

有类似形式。

线粘弹性壳 考虑一薄壳单元, 由力的平衡, 得 3 个平衡方程, 并分别作用以算子 \bar{A} , 得粘弹性薄壳的等价平衡方程如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{m}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{m}_{xy}}{\partial y} &= -\bar{P}_x \\ \frac{\partial \bar{m}_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{m}_y}{\partial y} &= -\bar{P}_y \\ \frac{\partial^2 \bar{m}_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 \bar{m}_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 \bar{m}_y}{\partial y^2} + \bar{n}_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + 2\bar{n}_{xy} \frac{\partial^2 Z}{\partial x \partial y} + \bar{n}_y \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} &= -\bar{P}_z \end{aligned} \right\} (23)$$

式中 $\bar{P}_x, \bar{P}_y, \bar{P}_z$ 分别为 x, y, z 轴方向的等价荷载分量; $\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{n}_{xy}$ 分别为法向和切向等价合力分量; $\bar{m}_x, \bar{m}_y, \bar{m}_{xy}$ 分别为等价弯矩和扭矩。且

$\bar{P}_x = \bar{A}P_x, \bar{P}_y = \bar{A}P_y, \bar{P}_z = \bar{A}P_z$
 $\bar{n}_x = \bar{A}n_x, \bar{n}_y = \bar{A}n_y, \bar{n}_{xy} = \bar{A}n_{xy}$

$\bar{m}_x = \bar{A}m_x, \bar{m}_y = \bar{A}m_y, \bar{m}_{xy} = \bar{A}m_{xy}$

等价应力合力分量和等价应力合力偶为

$\bar{n}_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\sigma}_{ij} S dS$ (24)

$\bar{m}_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{\sigma}_{ij} S dS$ (25)

式中, 当 $i=j$ 时, 分别为 $\bar{n}_x, \bar{n}_y, \bar{m}_x, \bar{m}_y, \bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y$ 。 S 是局部坐标, 表达任意点到薄壳中性面的垂直距离。

妨弹性理论, 可得等价应力、应变关系的物理方程, 等价应变、位移关系的几何方程。忽略法向应力及剪应力对垂直于中性面方向的变形的影响, 对一致正交的粘弹性壳有:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_x &= \frac{E_0}{1-\mu_0^2} (\bar{\epsilon}_x + \mu_0 \bar{\epsilon}_y) \\ \bar{\sigma}_y &= \frac{E_0}{1-\mu_0^2} (\bar{\epsilon}_y + \mu_0 \bar{\epsilon}_x) \\ \bar{\sigma}_{xy} &= \frac{E_0}{2(1+\mu_0)} \bar{\epsilon}_{xy} \end{aligned} \right\} (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}_x &= \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \bar{W} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - S \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} \\ \bar{\epsilon}_y &= \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \bar{W} \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} - S \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial y^2} \\ \bar{\epsilon}_{xy} &= \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - 2\bar{W} \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} - 2S \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} (27)$$

式中 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 分别是 x, y, z 方向的等价位移分量。 $z=z(x, y)$ 是中性面方程。

且 $\bar{u} = \bar{B}u, \bar{v} = \bar{B}v, \bar{w} = \bar{B}w$,

(26) 连同 (27) 式分别代入 (24)、(25) 式, 得 $\bar{n}_{ij}, \bar{m}_{ij}$, 再代入 (23) 式, 乃得基本微分方程组:

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_{11}\bar{\mu} + \bar{S}_{12}\bar{\nu} + \bar{S}_{13}\bar{W} &= \lambda\bar{P}_x \\ \bar{S}_{21}\bar{\mu} + \bar{S}_{22}\bar{\nu} + \bar{S}_{23}\bar{W} &= \lambda\bar{P}_y \\ \bar{S}_{31}\bar{\mu} + \bar{S}_{32}\bar{\nu} + \bar{S}_{33}\bar{W} &= \lambda\bar{P}_z \end{aligned} \right\} (28)$$

式中 $\lambda = -\frac{1-\mu_0^2}{E_0 h}$,

\bar{S}_{ij} 是复杂线性微分算子, 例如

$S_{11} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1-\mu_0}{2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}, S_{12} = \frac{1+\mu_0}{2} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}$, 等等。

以上介绍, 借助微分-积分算子及等价变量概念, 推导粘弹性梁、板、壳的若干主要结果的一般方法。其实, 对每种结构, 可根据实际材料的流变特性及其流变模型, 直接推导具体本构关系。

我们仅就线粘弹性体而论, 对于非线性粘弹性体, 也可得出相应方程, 只是形式更为复杂。

参考文献

1 Ponter A R S, Hayhurst D R. Creep in Structures, 3rd IUTAM Symposium, Leicester, UK, 1980 Spinger - verlag Berlin Heidelberg New York, 1981
2 Zdeněk Sobatka. Rheology of Materials and Engineering Structures, ACADEMIA Prague, 1984
3 Irving H. Shames, Elastic and Inelastic Stress Analysis Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1992
4 Reiner M. Deformation, Strain and Flow, The Whitefriars Press Ltd., 1960

(上海城市建设学院陈德坤教授撰)

岩体流变学 rheology for rock mass

是流变学在岩体和岩石天然材料中的一个应用, 是流变学的一个分支, 它研究各种岩石(岩体)材料的变形及强度与应力、温度及时间的关系。岩体或岩石的流变性是指岩石(体)的应力和变形随时间的变化过程, 它包括蠕变与松弛两方面。

岩体流变问题研究的先驱是 A. A. Michelson(1917)。嗣后,

R. H. Evans(1937), D. T. Griggs(1939)等分别进行不同岩石材料的流变试验。

60年代开始,岩体流变学才引起普遍注意。中国算是开展岩石流变学理论研究较早的国家之一。早在50年代,结合三峡水利枢纽地下工程的特点,陈宗基提出了岩石流变概念及其有关理论。从70年代后期起,他在中科院地球物理所,致力于运用流变学研究大地的变迁,并研制了测试用的高温高压伺服控制流变设备。袁龙蔚近年研究流变断裂学取得新进展,并将应用于研究岩体流变。在研究地下工程围岩的稳定分析、破坏过程及其与支护结构的相互作用时,岩体的流变性是必须考虑的因素。离开流变观点,衬砌支护毫无意义。此外,它对高边坡、坝基等岩体工程的理论和实践也极为重要,因此,岩体流变学已成为围岩稳定分析和支护结构设置及岩体工程的理论基础。

试验工作是了解岩石和岩体流变属性的主要手段,在试验工作基础上,通常采用两种方法来分析研究岩体流变问题,即模型法与等效法,岩体流变学研究的根本目的,是建立岩石(岩体)的本构方程,确定岩石流变参数,并以此来定性及定量的描述岩石变形与应力及时间的关系,进而解决地下工程实际问题。人们根据对岩石的蠕变试验,松弛试验的结果,结合工程现场的调查、分析确定岩体的流变力学模型,建立岩体的本构关系,作为岩体流变性研究的基础。

关于岩体的流变模型,到目前为止,各国研究者采用的已有10多种,分为三大类,即弹性模型类、粘性模型类及塑滑性模型类。不同研究者,对不同地区不同类型的岩石,根据室内外岩石或岩体流变试验或观测推断,采用不同流变模型来代表各种岩体。通过流变模型的正确选择,推导本构关系,在变形不大的条件下,弹性力学中的平衡方程及几何方程仍可应用,只需将流变本构方程代替弹性力学中的广义虎克定律,可以证明,通过拉普拉斯变换,任何弹性力学可以求解的岩石力学问题,线性流变学也完全可以求解。因为粘弹性体方程通过拉普拉斯变换,适当选取当量弹性常数后,就成了在相应面力和体力作用下与原粘弹性体有相同几何形状的弹性体问题,由弹性体解答经代换可得粘弹性体的拉普拉斯变换的解答,求其逆拉氏变换,而得粘弹性体解答。此法是E. H. Lee(1955)首先提出的,后来被称为“粘弹对应性原理”。但此法在求逆拉氏变换时,常遇数学上困难,需采用技巧性方法巧妙处理。

在求解过程中还需确定诸流变参数,其数目等于流变模型的元件数。它们可通过实测求得,也可通过试验结合流变模型计算得到。

理论上,凡弹性力学可以求解的岩体力学问题,岩体的线性流变问题都可通过拉普拉斯变换求解。但对地下结构的许多实际问题,还难以藉这类解析求解算结果,至于非线性流变问题,除一些极简单问题外,更难以用解析方法求得封闭解,往往需求助于数值解,电子计算机的发展提供了实施各种数值分析的条件。

岩体流变学的数值方法近年来得到很大的发展,各种方法应运而生,其中应用最为普遍的首推有限单元法,其次边界元法以及以这两种相耦合或派生出来的其他方法。经过30年的努力,有限单元法已成为一种相当完善和成熟的数值方法,能以求解包括粘弹性及非牛顿体在内的所有时效非线性问题,并已在大型岩体工程结构物的设计施工中得到广泛采用。岩体流变问题的有限元解法,一般采用时间步长一荷载增量初应变迭代计算,即将粘性应变看成初应变,每一时步迭加上相应的初应变增量,对于线性流变问题,只要连续不断地解线性弹性方程直至材料变形趋于稳定为止。现以山岩洞室开挖问题为例,说明解法的思路与步骤。

设总应变 $\{\epsilon\}$,包括弹性应变 $\{\epsilon_e\}$ 和粘性应变 $\{\epsilon_v\}$,即

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_e\} + \{\epsilon_v\} \quad (1)$$

设单元 e 内存在初应变 $\{\epsilon_0\}$,弹性应变 $\{\epsilon_e\}$ 与应力 $\{\sigma\}$ 成线性关系,即物理方程为

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon_e\} = [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\}) \quad (2)$$

几何方程为

$$\{\epsilon\} = [B]\{\delta\}^e \quad (3)$$

式中, D, B 分别为弹性矩阵、几何矩阵。

由平衡方程,并结合式(2),(3),可得单元节点力

$$\begin{aligned} \{F\}^e &= \int_v [B]^T \{\sigma\} dv = \int_v [B]^T [D](\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\}) dv \\ &= \int_v [B]^T D [B] dv \{\delta\}^e - \int_v [B]^T D \{\epsilon_0\} dv \\ &= [k]\{\delta\}^e - \{F_0\}^e \end{aligned} \quad (4)$$

因此,可将粘性应变 $\{\epsilon_v\}$ 当作初应变, $\{F_0\}^e$ 表示粘性初应变产生的单元节点附加荷载,即

$$\{F_0\}^e = \int [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dv \quad (5)$$

单元刚度矩阵

$$[k]^e = \int [B]^T D [B] dv \quad (6)$$

故总体平衡方程为

$$[k]\{\delta\} = \{F\} + \{F_0\} \quad (7)$$

总刚度矩阵

$$[k] = \sum [k]^e \quad (8)$$

粘性应变所产生的总的附加结点荷载

$$\{F_0\} = \sum \{F_0\}^e \quad (9)$$

设 $\{F\}$ 为节点荷载,对于山岩洞室开挖问题, $\{F\}$ 相当于作用于开挖边界节点释放荷载。此时,由(2)式得到的即由开挖引起的释放应力场 $\{\sigma_r\}$,总的应力场 $\{\sigma\}$ 为释放应力场 $\{\sigma_r\}$ 与初始地应力场 $\{\sigma_0\}$ 的迭加。

开挖问题,平衡方程(7)式的求解过程:

1. 开挖阶段:在成洞之初,粘性应变尚未发展,即 $t=0$ 时, $\{\epsilon_v\}=0, \{F_0\}=0$ 。故由平衡方程(7)式,可求得成洞瞬时的位移场 $\{\delta\}$ 。进而可得成洞瞬时总应力场 $\{\sigma\}$ 。

2. 粘弹性或粘塑性阶段:在任一时刻 t ,都需把每个单元的总应力 $\{\sigma\}$,化为主应力 $[\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3]^T$,并按下式计算主应力平均值 σ_m 和等效应力 $\bar{\sigma}$:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad \bar{\sigma} = \sqrt{J_2}, \text{ 且 } \sigma_3 = \mu(\sigma_1 + \sigma_2)$$

$$\text{式中, } J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (10)$$

利用屈服函数,判断单元是否进入塑性状态。

当采用莫尔-库仑准则时,由下式计算屈服函数

$$F = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \sigma_m + \sqrt{3} \sigma + 6 \frac{\cos \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (11)$$

若 $F < 0$,则该单元属粘弹性阶段,否则为粘塑性阶段,各单元逐一判断。

粘弹性阶段时,粘性应变可根据所采用的流变模型计算得到,例如对于kelvin模型。

$$\dot{\epsilon}_v + \frac{E}{n} \epsilon_v = \frac{\sigma}{n} \quad (12)$$

在 t_{i-1} 到 t_i ($\Delta t = t_i - t_{i-1}$)时刻对(12)式积分,并认为 σ 在 t_{i-1} 到 t_i 时刻内保持不变,于是有

$$(\epsilon_v)_i = e^{-\frac{E}{n} \Delta t} (\epsilon_v)_{i-1} + \frac{1}{E} (1 - e^{-\frac{E}{n} \Delta t}) (\sigma)_{i-1} \quad (13)$$

推广到多维应力状态,则为

$$(\epsilon_v)_i = \exp\left(-\frac{E}{n} \Delta t\right) (\epsilon_v)_{i-1} + \frac{[A]}{E} (1 - \exp\left(-\frac{E}{n} \Delta t\right)) (\sigma)_{i-1} \quad (14)$$

式中 $[A]$ 为泊松比矩阵,对于平面应变问题为:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ -\frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{1-\mu} \end{bmatrix}$$

求得 $\{\epsilon_v\}_t$,就可由(5)式求附加节点荷载 $\{F\}_t$,各单元都照此办理,并按(9)式,求总的粘性附加节点荷载 $\{F_v\}_t$ 。

有了 $\{F_v\}_t$,就可以由(7)式($\{F\}$ 已知)求位移场并由(2)、(3)式求 $\{\epsilon\}_t, \{\sigma\}_t$ 。

每一时步重复以上步骤计算,直至应力或应变变化率逐步减小最后趋于零为止。

当经过若干时步计算后,设在 t_i 时刻,某一单元出现屈服函数 $F > 0$,则该单元此时刻开始进入粘塑性阶段。此时 $\{F_v\}_t$ 仍可按(5)式求算,但 $\{\epsilon_v\}_t$ 要改为粘塑性应变 $\{\epsilon_{vp}\}_t$,它可根据相应流变模型求得,其余类推。

对于非线性流变问题的有限元解法可类似地采用时步-切应变法描述,仍把粘性应变视为初应变,并由(5)求 $\{F_v\}_t$ 。

但此时,由于应力应变关系是非线性的,因此,总体平衡方程是非线性的,总刚度 $[k]$ 不再是常刚度,而与应力应变有关,因此,每一时步都需用求解非线性方程的方法求解总体平衡方程。

继有限元法之后,边界元法是求解复杂工程力学问题的又一种有力数值方法。

它是在边界积分方程(把线性偏微分方程的边值问题归化为等价的边界积分方程求解)基础上,借助有限单元的思路,把边界离散化,并采用相应插值函数,这就成了“边界元法”,它是 Kizko 于 1967 年首先采用的。

一般的边界积分方程难有严密的解释解,但用数值方法求解时,只需把边界离散为边界单元,并在其节点之间插值,就可以把边界积分方程转变为线性代数方程组,由此解出各边界单元节点处的待定边界值,再利用边界值与域内函数值关系式,计算区域内任一点函数值。

对于粘塑性问题,可由平衡方程、几何方程和物理方程,演引得到三维粘塑性问题控制微分方程,对它取拉普拉斯变换,除去时间变量,而获得一个在变换空间的线性微分方程,就可用边界元法求解,再用数值逆变换法,可得原问题随时间变化的数值解。

参考文献

- 1 Lee E H. Quart Appl Mth, 1955, 13
- 2 Nishihara M. Doshisha Engng Rev, 1958, 8
- 3 Eienkiewicz O C. Int. J. Mech Sci. 1968, 10
- 4 Vyalov S S. Rheological Fundamentals of Soil Mechanics, Elsevier Science Publishers, 1986
- 5 孙钧主编. 岩石力学新进展. 吉林: 东北工学院出版社, 1989
- 6 陈德坤. 岩体的流变性对固定稳定性的影响. 中国科技成果大辞典, 1995, 1119

(上海城市建设学院陈德坤教授撰)

高聚物流变学

polymer rheology 流变学是研究物体流动和变形和科学,现在它已渗透到包括高分子材料在内的许多技术领域。在高分子物理学领域,原有的弹性、塑性、粘流变形等内容已逐渐发展扩充形成本领域的一个重要分支——“高聚物流变学”或“高分子流变学”。

近 20~30 年来,随着各种高分子材料的发展,作为聚合物加工的最重要操作如注射、挤出、压延等都要通过固体物料的熔融、非牛顿流动及再固化成型过程等,都离不开变形与流动。因此,流变学已成为聚合物加工成型方法的理论基础,并为设计加工成型机械提供必要的设计参数。

低分子液体流动新产生的变形是完全不可逆的,而高聚物在流动过程中所产生变形是部分可逆的,在高聚物材料的流动或加工中出现的一些异常现象,诸如高分子液体的“爬杆”现象(Weissenberg 效应)毛细管挤击物的膨胀现象,无管虹吸效应,管流中的“反冲”现象,等等奇特现象,这些现象只有从流变的观点才能加以解释。

早在公元前 1540 年,古埃及的 Amenemhet 就发明过一种

称为水钟的陶器制品,用以测定器内水位高度与时间关系及温度对流体粘度的影响,这属于对流变学的肤浅认识。以后希腊人、罗马人虽继续了一些工作,但总的说进展缓慢。16 世纪后,Galilei 提出了液体具有内聚粘性概念;Hooke 建立了弹性体的应力应变关系;特别是 Newton 发现了液体流动规律,对流变学的发展起了很大作用。19 世纪经 W. Weber, R. Koheravsch, J. C. Maxwell 等的工作,发展了流变学理论,特别是发现了 Poiseuille 定律。19 世纪以后又有许多学者作了可贵贡献,特别是 Bingham,不但发现了润滑油、乳油等通称为 Bingham 体的流动法则,还把以往流变学积累的零星知识系统归纳,正式命名为流变学。

流变学的现代发展是二战后开始的,40 年代化学工业所提供的大量新材料,尤其是合成高分子材料的兴起,是这一发展的重要推动力。现代连续介质流变学理论是从 M. Reiner 开始的,1945 年他提出流体的非线性粘性理论,50 年代是现代连续介质流变学理论发展的重要阶段, J. G. Oldroge 的论文(1950)是其里程碑。50 年代中后期 Rirlin, Erickson, Green, Truesdell, Noll 等的工作基本上代表这门学科的现状和前沿。C. Truesdell 在第四届国际流变学会议上(1965)介绍了流动与变形的理性力学后,流变学发展到一个新阶段,从描述现象的唯像论阶段发展到考虑物质内部“质点”结构的实体论阶段。

实践表明,在新材料面前,流变学面临挑战,不单是力学响应更加复杂,而且传统的连续介质力学法本身面临考验。虽然这一理论提供了许多有用的构写本构关系的原理,但它有许多不足之处,突出的是它不能对本构关系中可能出现的一切常数或函数作出合理的物理解释,更不能将它们与材料的物质结构联系起来,于是人们又转向重视微观结构的研究,重新捡起分子力学方法,通过对分子运动的了解,以建立高聚物的结构与宏观性能间的内在联系,物质的宏观物性是其微观分子运动的反映,而高分子的分子内和分子间的相互作用力具有决定性影响。

高分子流变学的分子理论,按其早期发展历史,可分为两个基本分支:珠-簧模型和网络模型。珠子(小球)在液体介质中移动要受粘滞阻力,弹簧则受弹性的代表,因此,用珠子与弹簧串联形象地表示粘弹性自然的。珠-簧模型又可分为多种,最简单的是由两个珠子和连接它们的弹簧组成,形如哑铃,称哑铃模型。另一种是由 N 个长度相等的弹簧和 $(N+1)$ 个珠子组成的更为复杂的项链状珠-簧模型,也称 Rouse 模型(1953)。在 Rouse 模型中第 i 号小球受来自第 $(i-1)$ 和第 $(i+1)$ 号小球弹性力的作用和流体的粘滞阻力的作用,当两个作用平衡时,二力矢量和为零。若将它们投影到 x 轴上,则成一维链型链,对于含有 N 个链段的单个高分子链可列出 $(N+1)$ 个方程,也可借助矩阵,表示成一个方程。该模型中假定作用在小球上的外力只是简单的 Stokes 粘性阻力,且假定小球的存在和运动对于液体的速度场无影响,流体可自由穿过小球。B. H. Zimm(1956)考虑了“流体动力学相互作用”,改进了 Rouse 模型,故也称 Rouse-Zimm 模型,适用于线粘弹性流体,它与并联许多 Maxwell 元件所代表的行为等同。但 Rouse-Zimm 模型只对稀溶液是严格的。对于高分子浓溶液, A. S. Lodge(1956)发展了网络模型和理论,在推导理论时,作了静止的高分子溶液通常是均匀网络等四项假定,导出了粘度与法向应力差公式等。

从 60 年代后期开始, De Gennes(1968), M. Doi 和 S. F. Edwards(1978)等人针对高分子浓溶液和熔体中的链缠结,提出了一种新的模型——蛇行管道模型, Doi-Edwards 理论的基本思想是,每条链横向片段的运动都受到与它相邻的其它一些链所组成的绳线网络所阻碍,大尺度位移的重新排列和扩散,假定主要靠蠕动,即由每条链平行于其自身轮廓线的随机蛇动完成。蛇行管道模型理论为流变学分子理论引入崭新篇章。

由以上模型可导出高聚物诸物理参数之间关系和有关的公式,但它还难以构写出本构关系,因此,对微观结构的进一步分析研究,来发展本构关系乃是今后研究的一个方向。

高分子的流变性也同高分子的粘度、高分子的分子量分布及分子形状等有依赖关系,这方面,不同研究者虽提出一些定量计算公式,但与实测尚有差距,且缺乏统一公式,有待于进一步研究。

可以说,高分子流变学是流变学的最重要家族,也是目前最活跃的家族,前程无量。

参考文献

- 1 Lodge A S. *Elastis Liquido*, London: Academic Prest, 1964
- 2 Lenk R S. *Pullis Bers*. London LTO: 1978

- 3 Chang Dae Han. *Rheology in polymer*. New York, and London: Academic press, 1979

- 4 金日光. 高聚物流变学及其在加工中的常用. 北京: 化学工业出版社, 1986

- 5 Tanner R I. 流变学最近的进展. 郭仲衡等译

(上海城市建设学院陈德坤教授撰)

物 理 学

理论物理学

引力物理 gravitational physics 引力是自然界已知的 4 种基本相互作用之一。任何物体毫无例外地都受到引力相互作用。对地面物体所受的重力,人类早有认识,而当今人类的视野已扩展至大尺度的时空范围,对于宏观物体运动和演化,引力更是起着主导的作用。因而近代引力论成为天体物理学前沿研究的基本理论工具。还有迹象表明,引力效应可能对某些微观过程起着一定作用,引力和另外 3 种基本相互作用的统一亦愈来愈受到关注。引力理论的研究已经并正在继续改变和充实着人类对时空和宇宙的认识。另一方面,由于引力实验是以广阔宇宙空间为“实验室”的、高精度的实验,它依靠着也同时推动着各种精密测量技术、空间技术等的发展。

引力物理的第 1 个里程碑是众所周知的牛顿万有引力定律(1687),它在弱引力场和低速运动的情况下相当准确地、统一地描述了地面物体和行星的运动。1916 年,爱因斯坦(A. Einstein)创立的广义相对论是人类对引力认识的一次新飞跃。爱因斯坦把“引力质量与惯性质量相等”提升为内涵更丰富的“等效原理”,并提出了“引力几何化”的思想。根据这一思想,引力不是一般意义上的“力”,而是“时空的弯曲”。由于物质无例外地在时空中运动,这就自然地解释了引力的万有性。广义相对论可以概括为:“时空告诉物质如何运动,物质告诉时空如何弯曲”。后者定量地体现为爱因斯坦引力场方程。爱因斯坦引力场方程是一个二阶非线性偏微分方程,它的第 1 个解析解——真空静态球对称解——随即由史瓦西(Schwarzschild)得出。在此基础上,广义相对论解释了水星近日点每百年约 43" 的剩余运动,并预言掠过太阳表面的光线将发生 1.75" 的偏折。后者于 1919 年被爱丁顿(Eddington)率领的日全食观测队所证实,这事件使整个科学界为之震惊和激动。此后,爱因斯坦用广义相对论研究我们的宇宙,宣告了作为科学的宇宙学的诞生。韦尔(H. Weyl)试图把几何化的思想推及电磁场,开创了研究各种相互作用统一理论的先河。

60 年代以后,一方面由于天文学的一系列重大发现(类星体、脉冲星、宇宙背景辐射等)的刺激,另一方面由于高精度的计时、测距等技术及空间技术的发展,广义相对论和引力的研究空前活跃。出现了大量不同于广义相对论的引力理论,并对广义相对论及其他引力论进行了大量高精度的实验检验,包括对引力最基本的性质(如等效原理等)的检验,以及大量的“后牛顿检验”等。(多数近代引力论以牛顿理论为极限,但在高一阶近似——即“后牛顿效应”的预言上是各不相同的。)到目前为止,只有极少数引力理论能通过所有这些严格的检验,其中广义相对论仍然是最“标准”的引力论。另外,近年来对广义相对论的内涵,亦开展了大量艰难的理论探索,例如大尺度时空结构的研究,爱因斯坦场方程的求解,包括对引力场研究有重大影响的角速度转动球体的外部引力场解,即 Kerr 解(R. P. Kerr, 1963)。

虽然广义相对论今天以其优美的理论结构和坚实的观测与实验基础而处于引力物理的核心,但这当然丝毫不意味着引力物理研究的终极,而恰恰是大大激发了引力物理的研究。由于引力场十分微弱和不可屏蔽,以及近代引力论用来描述引力场的数学工具十分精巧,且物理内涵十分丰富,因而无论在实验还是理论上,引力物理领域还有很多极有意义的问题等待我们解决。另一方面由于近年来,随着精密加工和测量技术、低温技术、激光技

术、无线电技术、空间技术的飞速发展,使得引力物理的实验手段有了较快的提高。而大型高速电子计算机的出现,使寻求高度非线性的引力场方程的数值解成为可能。理论研究和观测实验正成为引力物理研究中互相促进而又互相补充的两个方面。在目前和今后的一段时间内,以下几方面可能成为引力物理研究的热点:

高精度的引力物理实验 现有实验的精度还有待进一步提高,广义相对论和其他引力理论中有所预言、而未被实验证实的部分还需进行检验,例如自旋质量的磁型引力的检验,引力辐射的直接检测,黑洞的确认等。

引力辐射的实验可能继续成为实验引力物理的一个热点。尽管经过几十年的努力,引力波探测器的灵敏度已提高了四个数量级,但仍未达到所需的灵敏度。世界对引力辐射的实验研究并未因此而冷落下来,这是由于引力波的直接检测将是区分广义相对论和其他并行的引力理论的重要证据。

任何成功的引力理论,在弱场情况下都具有相同的牛顿极限。牛顿反平方律的精确检验将对引力物理的理论基础是否牢固作出判断。在宇宙尺度上已证明反平方律与实验结果很好地符合,中等尺度的实验也有一些结果,未来的实验应在厘米和毫米尺度上进行。

如何把空间引力实验移至实验室进行,是今后实验引力物理学家的一个努力方向。以天体作引力源,在空间或地面进行的实验或观测将不可避免地带有很大不确定性。要较大幅度提高实验的可信度,必然要采用实验室尺度的物体质量源进行实验。

引力场方程求解的研究 从广义相对论第 1 个精确解——球对称史瓦西解得到以后,人们在寻求引力场方程精确解上取得了很大的进展。但现在得到的许多解,都只在形式上满足引力场方程,而对它的边界条件、解的物理意义、是否存在可以检测的物理效应等都不甚清楚。由于引力场方程中未知数的个数大于方程的个数,要得到唯一确定的解,除了边界条件外是否还需要补充约束方程,亦在探索中。

求解高度非线性的引力场方程的解析解需要在数学上开展解的生成技术的研究,即如何从一个已知的解寻求另一些解。

引力场方程求解研究的另一内容是寻求引力场方程的近似解和数值解。

随着高精度引力物理实验的开展,引力场和其他场,如电磁场、量子场等的耦合解正显得越来越重要。

引力物理和量子力学的交叉 引力理论中奇点的存在在经典理论范围内无法消除。有人猜测,也许考虑量子性的引力理论后,就可能消除奇点的存在。另一方面,由于弱相互作用和电磁相互作用的统一已经完成,作为下一个目标,就应该考虑自然界 4 种相互作用的大统一理论。研究这种统一,其实质就是研究量子引力理论。

目前的研究成果离最终的统一还十分遥远,但弯曲时空的量子场论将引起越来越多物理学家的兴趣。

引力物理与天文学、天体物理学的交叉 支配宇宙达到和谐的各种因素中,引力是起着主导作用的。正是由于引力的存在,才使宇宙避免了热力学第二定律预言的“热寂”,使宇宙按一定的规律演化。所以,从引力物理诞生之日起,它便与天文学和天体物理学建立了牢不可分的关系。天文学和天体物理学的发展给引力物理的发展提供了证据,引力物理的发展给天文学和天体物理学的发展提供了预言。

可以认为,在今后相当长的时间内,随着天文观测手段的完善,关于宇宙起源与演化,致密星体、黑洞,引力波天体源,宇宙大

尺度结构的观测和理论解释将是这一领域的热点。

参考文献

- 1 Misner C W, et al. Gravitation, W. H. Freeman Company, San Francisco, 1973
- 2 Hawking S W, Israel W. General Relativity, Cambridge Univ Press, Cambridge, 1979
- 3 温伯格 S 著. 引力论和宇宙论. 邹振隆等译. 北京, 科学出版社, 1980
- 4 秦荣先, 阎永廉. 广义相对论与引力理论实验检验. 上海, 上海科学技术文献出版社, 1987
- 5 Blair D G. Proceedings of the Fifth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, et al, World Scientific, Singapore, 1988
- 6 郑庆璋, 崔世治. 广义相对论基本教程. 广州, 中山大学出版社, 1991.

(中山大学崔世治教授, 唐孟希副教授撰)

相似理论 theory of similtude 又称物理模拟法。研究自然界和工程科学中各种相似现象相似规律的一门科学。它与模型试验一起, 构成一种科学、有效的研究方法, 即相似方法。

模型试验作为相似方法的具体体现, 是当今世界科学研究的一种重要手段。它不直接地去研究自然现象或物理过程本身, 而是在实验室条件下, 利用与这些现象或物理过程相似的物理模型进行试验研究。

相似方法就其实质说, 是指在基本现象相同情况下的一种模拟方法, 也称为物理模拟方法。与此对应的, 是所谓的数学模拟方法。这时模型与原型的物理过程有着本质的区别, 但它们的对应量都遵循着同样的微分方程式(或由此而来的传递函数), 具有数学上的相似性。此类模拟大致如: (1)用电场来模拟温度场, 材料的应力场和有限自由度的机械振动系统; (2)用导热现象来模拟分子的扩散现象; (3)用电解槽各点的电位来模拟不可压缩无粘性流体的运动、柱状弹性杆的自由扭转、薄膜的变形等; (4)用薄膜的受力情况模拟板、杆、壳的受力和弹、塑性变形, 电磁场特性, 热传导现象和不可压缩无粘性流体的运动; (5)用单摆运动模拟细长杆件的不稳定弯曲和用复摆运动模拟 L-C 共振电路; (6)用砂锥模拟杆件处于扭转屈服状态下的扭矩, 等等。而物理模拟方法, 则是以正确选择物理现象(或过程)的物理量作为其根据或依托的, 所以具有极强的生命力。

1638年, 伽利略在他的选集《两门新兴的学科》中提到, 当威尼斯商人采用几何相似法建造起一艘比原有船只更大的帆桨大船时, 发现它在航行中有欠坚固, 于是这位科学家敏感地指出, 这就是一门新兴学科的初萌时期。到了1686年, 牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中, 提出了机械运动相似的法则, 指出如果两个运动刚体满足 $\frac{F_1}{m_1} = \frac{F_2}{m_2}$ 同值, 则运动相似。

1848年, 法国科学院院士 J. Bertrand 在力学相似的论文中, 利用相似变换的方法建立了相似第1定理(相似正定理), 描述了相似现象的性质。1914年, 美国 J. Buckingham 将物理量间的一般函数关系转变为各相似不变量(即相似准则或 π 项)间的特定函数关系, 建立起了相似第2定理(π 定理)。为了说明同类现象实现相似所需具备的主要条件, 1930年, M. B. Кирпичев 和 A. A. Тухман 提出并证明了相似第3定理(相似逆定理)。相似理论的基本理论体系初告完成。

1883年 Reynold 对管中液体流动开始进行研究, 1903年莱特兄弟对飞机机翼及随后(1908)对飞机升空进行研究。1915年, Ehrenfest-Afanassjewa 对量纲分析法进行研究等等, 成为人们利用相似方法解决问题的早期实例。其后此法被广泛应用于流体力学、固体力学、电磁学、热学、气象、地质、音响、工程结构、金属切削、土地整治、医学、生物学等基础自然科学领域以及一些尖端科学如核技术、宇航科学、地下爆破以至于生命科学中血管动力

学等方面的研究。

目前存在于国际、国内的一个重要问题, 是如何将相似方法用于指导一些并不成熟的领域的模型研究。土壤—机器系统, 可视为此中典型一例。

1944年, M. G. Bekker 在越野车辆的性能研究中, 应用量纲分析技术, 探求土壤—车辆系统的力学关系, 为推导车辆的行驶性能、计算沉陷和滑转等提供了理论依据。

1957年, 美国的 Bockhop 在试验用土槽中, 进行了圆盘牵引力的测定, 发现在粘土含量较高的土壤中, 原、模型的试验结果难于一致, 这种情况直到1959年才被 Mcleod 解释成是由于土壤同时存在着导致模型畸变的两种参量: 容重 γ 和粘性系数 C。并由此引伸出了模型畸变的概念和随后各国发展起来的一系列畸变模型处理技术, 如补偿模型法、概念类比法、分解—叠加法和级数展开法等。

1979年, 中国吉林工业大学在纯砂土中进行了试验结果可转换性的研究, 并于80年代尝试将相似方法同回归试验设计方法相结合(1986), 或将模糊数学中贴近度的概念用于模型试验结果的检验(1987)。《四轮驱动拖拉机牵引效率的模拟》一文, 是这一时期吉林工业大学打破国际研究传统的代表作, 它将相似分析技术引向了整机性能, 并且触及到整机性能中最复杂的牵引效率问题。

相似理论这一学科的最终成熟, 取决于复杂领域所面临的一系列疑难问题得到解决的程度。土壤—机器系统今后研究的热点是: (1)参量的选择。(2)模型的形式, 其关键是畸变模型的求解, 包括畸变处理技术的发展和畸变系数、预测系数的确定等以及畸变因素的消除, 包括剔除次要参量、应用量纲扩充以及同回归试验设计相结合等。(3)经验公式的建立, 为此1950年美国 G. Murphy 在其著作中首先介绍了用于指导有关试验程序编制及其建模方略的函数理论, 并于1971年为 G. Bovis 所从事的实验研究工作所严格证实。但这一理论无法适应模型出现畸变的情况, 从而又促使人们设法消除模型的畸变, 或在出现畸变的场合设法找出新的指导理论和解决办法。(4)长度缩 RCl 的数值, 这基于物理模拟现象中, 一切物理量的相似比(即相似常数)都以 Cl 值为转移, 并且构成同它的函数关系, 而随各领域情况不同, Cl 值的大小对模型试验结果影响至巨。

综上所述, 可知相似方法迄今已经发挥出了它的重大作用, 但作为研究手段, 这种方法尚亟待充实、完善。

参考文献

- 1 Baker W E, et al. Similarity Methods in Engineering Dynamics, 1972
- 2 江守一郎など. 模型実験の理論と応用, 技報堂, 1973
- 3 Isaacson E Q, et al. Dimensional Methods in Engineering and Physics, 1975
- 4 Schuring D J. Scale Models in Engineering, 1977
- 5 Седов Л И. Методы подобия и размерности в механике, 1981
- 6 任露泉, 等. 吉林工业大学学报, 1986, 3
- 7 徐挺, 等. 农业机械学报, 1987, 1
- 8 徐挺, 等. 对应论方法学. 北京, 中国建筑工业出版社, 1988
- 9 徐挺, 相似理论与模型试验. 北京, 中国农业机械出版社, 1982 (吉林工业大学徐挺教授撰)

场论与粒子理论 field theory and particle theory 研究物质存在的基本形式——场和粒子的性质、运动和相互作用基本规律的理论。场是一个无穷自由度系统, 它的激发是粒子。场的相互作用表现为粒子的产生、消失、散射和转化。通过这一理论的研究, 人们对物质的基本组成和各种相互作用(电磁、弱、强、引力)的认识不断深化发展。场论研究还扩展到凝聚态物理等其他领域。因此, 这一理论的研究对于当代物理学的进展有十分重要的基本意义。

19世纪中期建立起来的电磁场理论(Maxwell, 1962)是经

典场论的典范,它成功地描述了宏观电磁相互作用。从19世纪末到20世纪初,电子、光子和其他粒子相继发现。为了描述微观电磁相互作用,必须把经典电磁场论量子化(Dirac, 1927)。Jordan-Wigner (1928)建立电子场的量子化理论,而量子场论的一般形式由Heisenberg Pauli (1929)建立。量子场论从建立时起就面临一个严重困难:这个理论的最低阶微扰给出和实验数据符合得相当好的结果,但高阶计算则往往得出无穷大。如何解决这个发散困难成为当时量子场论研究的重要问题。Tomonaga (1946)、Schwinger (1948)和Feynman (1949)等提出避免这一困难的方法。他们提出如何从高阶结果的无穷大中抽取有物理意义的有限修正量的规则。这就是量子场论的重正化理论。用这一方法成功地解释了电磁现象中极为精细的效应,使量子电动力学成为当代与实验事实符合得非常精确的一种理论。量子电动力学是建立其他相互作用的量子场论的典范。

除了电磁相互作用之外,从20世纪30年代起,对粒子相互作用的其他形式有不少探索。Fermi (1934)提出4费米子相互作用作为弱相互作用的基本形式。李政道、杨振宁(1956)提出弱相互作用中宇称不守恒,随后被实验证实。这一发现导致Feynman-Gell-Mann (1958)确立弱相互作用的V-A形式。但这理论,包括有中间玻色子的理论,是不可重正化的,因而还不是完善的理论。强相互作用的探索经历更长的时间。Yukawa (1935)假设 π 介子传递核力,开始了强相互作用的研究。到50年代中期,由于被发现的强子数目迅速增加,已不可能把某几种强子看作基本场而由它们组成另外的强子,从而曾经设想抛弃用基本场描述强相互作用,而代之以S矩阵和色散关系的研究。60年代中期建立了强子的夸克模型,人们才逐渐认识到强相互作用应从比强子更深的层次—夸克层次来探讨。

20世纪40年代末以后,被发现的粒子种类迅速增加。因此,研究粒子的对称性、分类及深一层次的结构就显得十分重要。对称性分为时空对称性和内部对称性两类。前者包括电荷共轭C,宇称P,时间反演T等。已知弱相互作用中C和P分别不守恒,而在K介子衰变中又发现CP不守恒(1964)。关于CP破坏问题至今仍是粒子理论研究的重要问题之一。内部对称性的早期研究有SU(2)(同位旋)对称性,坂田模型和SU(3)对称性等。坂田模型是探讨强子内部结构的最早尝试。Gell-Mann (1964)从他的SU(3)八重法形式地引入了夸克概念。最有系统地探讨强子深一个层次结构的是北京粒子理论组(1965)提出的相对论层子模型。现在已经确认强子是由夸克(层子)组成的。

量子电动力学是相互作用理论的典范。电磁作用具有规范不变性。电磁场是规范场,它传递电磁相互作用。杨振宁-Mills (1954)把规范场概念推广,提出非阿贝尔规范场理论。但是,规范粒子是零质量的,而传递弱相互作用的中间玻色子是带质量的。要把弱相互作用纳入规范理论的框架,必须解决规范场的质量问题。Higgs (1964)提出规范对称自发破缺使规范场获得质量的机制。随后Weinberg (1967)、Salam (1968)成功地建立了弱电统一理论,它包括了电磁相互作用和通过中间玻色子传播的V-A型弱相互作用。这理论通过了各种实验检验,特别是在它预言的质量上发现了中间玻色子 W^\pm, Z^0 (1983)而被确立。

规范场论的另一重要进展是't Hooft (1971)证明了规范场论的可重正性。关于量子场论的重正化群理论这时也有重要进展。重正化群研究始于20世纪50年代。Callan和Symanzik (1970)导出重正化群方程,其中一个推论是有效耦合常数随能量标度改变的行为。Gross, Wilczek和Politzer (1973)发现只有非阿贝尔规范场给出有效耦合常数随能量增大而变小的结果,即渐近自由性质。这和深度非弹性散射实验结果很好地相符。在此基础上发展了强相互作用是夸克通过“色”规范场(胶子)的SU(3)的规范作用。这作用在短距离渐近自由,在长距离导致夸克禁闭。Wilson (1974)提出格点规范理论研究规范场的非微扰性质。Creutz (1980)发展对这理论的Monte Carlo模拟方法。现在,由于巨型计算机的迅速发展,对强子—胶球能谱、矩阵元等非微扰

现象的研究仍在不断进行中。目前关于物质相互作用的标准模型是SU(3) $_c$ ×SU(2) $_L$ ×U(1) $_Y$ 。第一因子是强作用QCD,后面两个因子是弱电统一模型。

标准模型实质上并没有把3种相互作用统一起来。它含有3个不相关的耦合常数和许多任意参量。此外,夸克和轻子具有相似的弱相互作用,而标准模型没有说明这种对称性。因此,有必要进一步发展使3种相互作用实质上统一起来的理论。这就是大统一理论。统一的可能性在于3个耦合常数有不同的重正化群行为。在某个很大的质量标度 M_x ($\sim 10^{14}$ — 10^{15} GeV)下,3个耦合常数会合在一起,因而相互作用可以用仅含一个耦合常数的更高对称的规范群来描述。质量标度降低时,对称破缺为强相互作用及弱电作用部分。标度再降到 M_w 以下时,后者再破缺为弱相互作用及电磁相互作用。能容纳已知粒子的最小对称群为SU(5)。Georgi-Glashow (1974)开始大统一理论的研究。大统一理论的主要成就是正确地定出弱电统一理论的未定参数 θ_w ,还正确地给出夸克轻子质量比 m_b/m_c 。由于大统一理论把夸克和轻子统一起来,理论一般导致质子衰变。实验没有发现质子衰变,这给大统一的形式以很严格的限制。另外如何解释一个理论中含有两个差别巨大的质量标度 M_x 和 M_w ,以及Higgs场的任意性等,都是大统一理论未能解决的问题,至今还没有完备的大统一理论。

另一种更高的对称性是费米子和玻色子之间的对称性,称为超对称性。Volkov, Akulov (1973), Wess-Zumino (1974)最早研究了超对称性。它可能在一定程度上解决大统一理论中的Higgs场问题和质量等级($M_x \gg M_w$)问题,但也带来新的困难。超对称理论中,每一种玻色子都与一种费米子配对。而在已知粒子中,都没有互相成为超对称配对的。因此超对称理论必须在现有粒子之外再引入另外的配对粒子,至今对此没有任何实验证据。把超对称定域化,理论自然包括引力场在内,成为超引力理论。关于引力相互作用,它的量子场论高度发散,因而是不可重正化的。长期以来未能建立量子引力理论。超引力理论自然地把引力作用与其他相互作用统一起来,而且可以降低引力理论的发散度,因而有可能导致有限的量子引力理论。但关于这方面还需要做大量的研究工作。

量子场论的发散困难源于点模型。如果离开点模型,给粒子以一定的扩展性,则发散度可以降低。点以外的最简单扩展体是弦。在强相互作用研究过程中,Nambu (1970)首先成功地建立一个相对论性的经典弦理论。20世纪70年代中期以后,经过Green, Schwarz等人的工作,发展了量子化弦理论,作为一种有希望的粒子基本理论。研究表明,自洽的量子化玻色弦只存在于26维空间,而量子化费米弦存在于10维空间。由费米弦可构造满足超对称性的超弦。反常消去的要求基本上确定了弦理论的形式。弦理论也自然地包括引力子在内。但是,由于量子化弦理论只存在于 $d > 4$ 维空间,要使理论与物理实际接触,必须把多余的维数紧致化。而紧致化却有非常多的可能性,使弦理论失去预言能力。弦理论曾统治粒子理论界一段时间。自80年代后期,它的影响逐渐衰退。

近年场论的一个引人注目的进展是2+1维场论及其在凝聚态物理中的应用。Wilczek (1982)指出二维空间的电荷—磁通复合体(任意子)具有奇异的统计性质,即介于费米统计和玻色统计之间的分数统计。Schonfeld (1981)和Jackiw等(1982)指出带有Chern-Simons项的2+1维规范场论产生拓扑质量。随后的研究表明C-S场论导致分数统计、分数角动量和分数电荷,因而具有丰富的物理内容。数学上,任意子的交换构成辫子群。C-S场论成功地应用到分数量子霍尔效应上,是场论对凝聚态物理应用的重要进展。另一方面,Witten (1989)指出C-S场论的拓扑性,发现它和三维流形上纽结的拓扑关系,开展了拓扑场论的研究。三维拓扑场论与二维共形场论、可积场论及量子群等都有密切关系,它们是现代场论新的发展方向。

粒子物理研究的数十年间,场论与粒子理论取得重大的进展,主要是把各种相互作用归结为规范理论的形式,对物质结构

的夸克—轻子—规范场层次的规律有了较基本的认识,但也留下一些重要问题,包括如何在标准模型之外进一步认识相互作用的更高的统一,如何把引力作用与其它作用统一;Higgs粒子的本质,各代夸克—轻子的对称性以及物质更深一层次的结构,等等。对这些问题在近20年间做了许多理论探索,积累了大量理论结果,但对作为解决物理问题的基本理论还很不成熟。预期新一代的加速器实验及更精密的实验结果将会促进场论与粒子理论的新突破。目前一些研究热点是:(1)量子引力理论;(2)粒子物理和宇宙学的相互关系;(3)Higgs粒子的本质;(4)重夸克的现象学;(5)拓扑场论、共形场论以及低维场论在凝聚态物理中的应用。

参考文献

- 1 Heisenberg W, Pauli W. Zeit F Phys, 1929, 56(1): 59~168
- 2 Schwinger J. Phys Rev, 1948, 74: 1439
- 3 Yang C. N., & Mills. R. L. Phys Rev, 1954, 96: 191
- 4 Lee T D, Yang C N. Phys Rev, 1956, 104: 254
- 5 Weinberg S. Phys Rev Lett, 1967, 19: 1264
- 6 't Hooft G. Nucl Phys, 1971, B 33: 173, B 35: 167

(中山大学郭硕鸿教授撰)

分数统计与任意子 fractional statistics and anyons

按照量子理论,两个全同粒子交换算符的本征值 P 只能等于 $+1$ 或 -1 。自旋是 \hbar 整数倍的粒子(玻色子) $P = +1$, 全同玻色子系统的波函数当粒子交换时是对称的。自旋是 \hbar 的半整数倍的粒子(费米子) $P = -1$, 全同费米子系统的波函数当交换一对粒子时反对称。玻色子遵从玻色—爱因斯坦统计, 费米子遵从费米—狄拉克统计。通常的量子理论认为,任何粒子都只能是玻色子或费米子,粒子的统计只有玻色—爱因斯坦统计和费米—狄拉克统计两种。由于自然界中只发现存在玻色子和费米子两类粒子,因而在量子理论建立后一段相当长的时期内,人们对上述结论没有做进一步的深入分析。量子理论的上述结论仅是从全同粒子不可分辨性对波函数对称性的要求中引出来的。20世纪60年代后,有一些物理学家觉得这个结论的论证不够严密,提出过一些疑问。例如1973年Mriman就提出过,相距遥远的两个星系中的电子有什么理由通过波函数反对称化的方式关联起来呢?

决定粒子遵从什么统计的量不是交换算符本征值 P , 而是交换两个全同粒子后几率幅出现的交换相因子 $\zeta = e^{i\theta}$ 。玻色子的 $\zeta = 1$, 费米子的 $\zeta = -1$ 。因此无论是玻色子还是费米子,交换相角 θ 都是 π 的整数倍。在 θ 是 π 的整数倍这个意义上,玻色—爱因斯坦和费米—狄拉克两种统计可统称为整数统计。

1977年,Leinaas与Myrheim系统地分析了空间维数和空间拓扑性质对粒子统计的影响,取得很大进展。他们得出三维和三维以上的空间中 ζ 的值只能等于 $+1$ 或 -1 , 故只能存在费米子和玻色子两类粒子及费米—狄拉克和玻色—爱因斯坦两种统计;但对二维空间且不存在时间与空间反演对称性的情况,交换相角 θ 的取值可以不受限制, θ/π 可以不等于整数。 θ/π 不等于整数时的统计便称为分数统计。Leinaas与Myrheim的研究成果的重大意义在于证明了二维空间中不能排除既非玻色子也非费米子的粒子或准粒子存在的可能性,这种粒子或准粒子的统计性质可以连续穿插在玻色子和费米子统计性质之间。二维空间中允许出现分数统计,对二维和准二维系统的研究将产生巨大的影响。

Leinaas与Murheim的论文1977年发表后,在几年中没有受到应有的重视。直到1982年分数量子霍尔效应发现后, Halperin指出Laughlin准粒子具有分数统计,这篇论文的意义才开始显示出来,受到普遍重视。

带电粒子和磁单极的复合体称为dyon。假如构成dyon的带电粒子是玻色子,在三维空间中交换两个全同的dyons,交换相因子 $\zeta = -1$, 这时的波函数虽然是对称的,但遵从的是费米—狄拉克统计。反之,如果带电粒子是费米子,则 $\zeta = +1$, 波函数反对称但出现的统计则是玻色—爱因斯坦统计。这是由 ζ 而不是 P 决定统计的一个例子。但是dyon的 ζ 只能取 $+1$ 或 -1 , dyon遵从

的仍然是整数统计。引入磁单极可以改变统计, Wilczek于1982年把研究推广到二维空间。他将限制在一个平面中运动的带电粒子和垂直于这一平面的细长磁通管组成复合体,磁通管的管壁不允许带电粒子穿过,这样的复合体称为任意子。任意子的交换相角 θ 随磁通管的磁通量连续变化,从而可遵从分数统计。同时,任意子可以具有不等于整数和半整数的总角动量,更概括一点说,对带电的玻色子或费米子引入统计规范场后便成为任意子,遵从分数统计。

从任意子模型提出以来到90年代初,主要的理论研究有以下的几个方面:(1)分数量子霍尔效应与任意子。1983年, Laughlin研究霍尔效应的机制,讨论处在磁场中的二维电子气,得出准粒子带有分数电荷。于1984年, Halperin指出 Laughlin准粒子是任意子,遵从分数统计,并将 Laughlin的理论推广到分级分数量子霍尔效应。这是将分数统计与任意子理论用于实际问题的第一个成功的研究工作。(2)任意子量子力学。现在已有单个任意子、两个自由任意子和处在简势阱中的两个任意子的量子力学严格解。(3)任意子统计力学。任意子遵从分数统计,任意子统计力学显然是一个很吸引人的研究课题。但任意子的量子力学问题没有解决好,这几年来任意子统计力学研究,集中在讨论和计算第二维里系数上。自由任意子气体的第二维里系数于1985年已有结果。处于磁场中的任意子气体的第二维里系数1990年也已算出,近一两年还在进一步计算。至于任意子之间有动力学相互作用的情况,1991年才有初步的结果。统计力学的问题关键在于计算配分函数,但多任意子的量子力学没有解决之前,只能发展近似方法。近两三年对近似方法有一些人做了一些工作,但仍未有比较满意的近似方法。(4)任意子超导电性。1988年 Laughlin指出任意子在高 T_c 超导体中可能扮演重要角色。随后有一些人做了一些研究工作,这些工作在理论上都有一定依据,但氧化物超导体中是否存在任意子,实验上由这类超导体中时间和空间的反演对称性是否受到破坏来给出答案,但至今,实验研究还不能做出定论。

今后几年的理论研究热点,大致上有以下3个互有联系的问题:(1)寻找处理多任意子量子力学的方法和发展可用的近似方法;(2)研究计算任意子系统配分函数的近似方法,找到比较满意的近似方法,进一步研究任意子的统计力学性质,建立较系统的任意子统计力学;(3)研究任意子超导机制和任意子在二维或准二维凝聚态物理中的其它可能作用。

参考文献

- 1 Leinaas J M, et al. Nuovo Cimento, 1977, 37: 1~23
- 2 Wilczek F. Phys Rev Lett, 1982, 48: 1144~1146
- 3 Wilczek F. Phys Rev Lett, 1982, 49: 957~959
- 4 Arovas D P, et al. Nucl Phys, 1985, B251: 117~126
- 5 Halperin B I. Phys Rev Lett, 1984, 52: 1583~1586
- 6 Laughlin R B. Phys Rev Lett, 1988, 60: 2677~2680
- 7 Wilczek F. World Scientific, Singapore, 1990

(暨南大学陈代森教授撰)

孤立子与生命活动 早在1834年,英国科学家Russell观察到的水渠中出现的奇妙现象:“由两匹马拉着在水渠中急速行进的船,突然停下来,在船前激起一个孤立的水波峰,保持巨大速度和原来形状滚滚向前行进了大约1~2km”。但由于当时科学技术的限制,没有人对这一问题从理论上和实验上作进一步探索。直到60年后的1895年, Korteweg de Vries才从理论上推导出了描述这种孤立水波的运动方程,即KdV方程式。但人们怀疑KdV方程的解是否稳定。20世纪50年代的Fermi, Pasta和Vlam等人研究的FPU问题,他们将64个质点用非线性弹簧连成一个非线性的振动弦,计算其中能量分布,发现与线性能量均分定理的结果显著不同,由此受到启示:在这个系统中可以出现非线性波。这表明除水系统外,在其它系统中也能观察到孤立波的存在。1965年,美国的Zabryk和Kruskkaal用数值方法详细考

察了等离子体中孤立波相互碰撞的非线性相互作用过程。1968年,美国的 AKNS 等人又给出了反散方法求解 KdV 方程的孤立波的方法。1973年,人们又在冰箱中再现了 Russell 的 KdV 孤立波,从而在世界范围内掀起了“孤波热”。自此以后,人们在大到宇宙,小到基本粒子,复杂到生物体等所有物理系统中都求得了孤立子的存在。

从数学角度讲,它是非线性微分方程的局域性行波解(所谓“局域性”是指解在空间无穷远处趋于零或确定的常数的情况)。同时,这种局域性行波(或孤立波)在通过相互碰撞后将不消失或碰烂,其波形和速度都不会改变或只有微弱的改变的稳定的孤立波便称便称为孤立子。从物理学角度讲,它是由非线性场所激发的、能量不弥散的、稳定的准粒子。从理论上讲,这种准粒子具有一切物质的属性,如能量、动量、质量、电荷、自旋等特性,并且在运动中或相互碰撞中也不受到破坏;同时,它还遵守无穷多的守恒规律,例如能量、动量、质量守恒定律,所以它具有一切物质或粒子的共性,是物质世界中的一员。但是,由于它是在非线性场中形成的新型准粒子,因此也具有许多自己“个性”,例如它既具有波动性,又具有粒子性,同时又是遵守经典运动规律的粒子。所谓波动性,因它是真正的一个行波,它可以速度 V 在时空中传播,但也可以在空间不进行传播,处于静止状态,后者称为非传播孤立子。典型例子是 1984 年吴汝君和崔洪农与我们观察研究的水槽中的非传播孤立波,它们满足的 KdV 方程、非线性薛定谔波动方程和非线性 Klein-Gordon 方程(包括 Sine-Gordon 方程)等波动方程。说它具有粒子性,是因为它具有如上所述的一切粒子的基本特性,在两个孤立相互碰撞后的规律和一切粒子的碰撞特征与规律是一样的。它比量子力学中讲的微观粒子具有的波粒二象性的物理图像更加具体、更加直接、也更容易理解。它与微观粒子不同的地方,是它遵守经典运动规律,服从牛顿方程式或经典哈密顿方程。这不但可以从它的运动方程中得出,也可从崔洪农与庞小峰等对非传播孤立子所进行的实验中的观察到。这种孤立子受不同外界作用时,可作匀速或匀加速等多种经典运动(这种特性已制成录像带和图片发行)。

孤立子的另一个特性是:它是由通常的物质和粒子在色散力和非线性作用力同时存在的环境或场中演化或自陷而成的。例如,现已为日本电信公司作为超高速信号通信的光孤立子是激光光束在非线性质(如光纤)中的自聚焦而生成的;超导孤立子是超导电子与晶格畸变相互作用生成的;有机分子和蛋白质中的 Davydov 孤立子或我们在建立的新理论中的孤立子是过剩电子或激子与晶格畸变相互作用“自陷”而成的。由于演变或自陷前的物质的性质不同,以及所受到的性质和所处的环境不一样,或者说物质的性质和所处的环境不一样,使得形成的孤立子的特性千差万别。例如,有些孤立子的质量大到天体中一个星球或云团,有的质量又仅与电子质量相差无几,其能量、电荷等差别就更大。各种各样的孤立子存在,标志着非线性世界比线性世界更加奇妙,更加复杂,内容更加丰富多彩。另外,从本质上讲,自然界的一切现象基本上是一个非线性问题。所以,非线性问题才是揭示自然界规律的科学,而孤立子问题的研究的意义自然本质重要性也显而易见了。

传输生物能量与生物信息的孤立子理论 长期以来,人们对生命体中生物能量与生物信息传输的微观机制一直未弄清楚,因而对许多生物生理过程(例如肌肉收缩等)的机制及理解模糊不清。然而,人们要去揭示生物奥秘,发展生物工程,又必须解决这个问题。因为从生物物理的角度来讲,生命过程就是生物能量、物质和信息的变化、协调和统一的过程。其生物组织有序地综合运动和相互协调变化则是一切生命的基础。另外,由现代科学得知,生物体是一个具有耗散结构特征和自组织结构的、满足热力学等四定律的、开放的非平衡态热力学系统,它要不断的同外界进行物质、能量和信息交换,以维持生物自组织和耗散结构,即维持生命活动。因此,生物能量与信息传输则是生命活动的最基本、最主要的过程。于是,生物能量和生物信息到底如何传输、

以何种形式传输,就成为了生命科学的中心问题。

由于生命体不同于一般物体,它是由电子、原子、小分子、生物大分子、细胞或生物组织等多种层次组成的最复杂体系。这种复杂性不但表现为层次多,还在于它是具有自我装配、自我复制、自我调节和自我更新的活的生命体。然而,这些问题的关键都在生物大分子——蛋白质和核酸(DNA 和 RNA)的存在。因此,研究生物能量和信息在蛋白质和核酸中的传输便是此问题的中心了。

蛋白质分子系统中生物能量和信息的传输问题引起了 A. S. Davydov 的极大重视。他和他同事们从 60 年代末期以来,就一直从事准一维分子系统中孤立激发的研究。Davydov 在 1979 年,将他在准一维分子系统中的孤立理论移植到 α -螺旋蛋白质分子中,研究了蛋白质分子中的结合能的传输问题。他认为在生物体内,由 ATP 水解作用等生物过程提供的能量(大约为 0.4eV)可以通过蛋白质分子中的过剩电子(excess electron)或 amide I(CO 键)振子的振动量子(大约具有 0.21eV 或 1665cm⁻¹的能量)同分子链的结构畸变(或低频声子)相互作用而“自陷”成的孤立子来进行传递。此时,这个孤立子和链的畸变一起携带能量和信息,沿分子链方向传输一段宏观距离而可以保持能量、动量、波形以及其它准粒子特性不变。他将在 α -螺旋蛋白质中因集体激发产生的激子和分子链的位移变化的运动方程写成。

$$i\hbar\dot{a}_{na} = [E_0 + \chi(\beta_{n+1,a} - \beta_{n-1,a})]a_{na} - J(\alpha_{n+1,a} + \alpha_{n-1,a}) + L(\alpha_{n,a+1} - \alpha_{n,a-1}) \quad (1)$$

$$M\dot{\beta}_{na} = W(\beta_{n-1,a} - 2\beta_{na} - \beta_{n+1,a}) + \chi(|\alpha_{n+1,a}|^2 - |\alpha_{n-1,a}|^2) \quad (2)$$

而把描述由 ATP 水解作用等提供的能量而引起的集体激发的尝试波函数写成

$$|\Phi\rangle = \left(\sum_n a(t) \beta_{na}^\dagger |0\rangle_{ex} \right)$$

$$\left(\exp \left\{ \frac{1}{i\hbar} \sum_n u_{na}(t) P_{na} - \Pi_{na}(t) R_{na} \right\} |0\rangle_{\mu} \right) \quad (3)$$

其中 E_0/\hbar 是一个孤立的氨基酸分子中的 amide-I 振子的振动频率, M 是一个氨基酸分子的质量, J 是沿分子链上的两相邻分子间的迁移偶极能, W 是氢键的弹性系数, L 是两条相邻螺旋长链之间的迁移偶极能, χ 是激光-声子耦合(EPC)常数,它表示了由于氢键链改变一个单位时长度所引起的 amide-I 振子的振动频率的改变。 β_{na} 是激子的产生算符 R_{na} 和 $P_{na} = MR_{na}$ 分别表示氨基酸分子的纵向位移算符和相应的共轭动量算符。而 $\beta_{na} = \langle \Phi | R_{na} | \Phi \rangle$, n 表示螺旋的圈数, $a=1, 2, 3$ 表示蛋白质分子的 3 条链, (n, a) 规定了一个氨基酸分子。如果对(1)、(2)式作连续性近似,便可得到一个非线性 Schrödinger 方程(NLSE), 马上便可以得到由激子通过与分子链的位移相互耦合而自陷成的 Davydov 孤立子, 这就是传递生物能量和信息的 Davydov 孤立子机制及理论。在这种机制中, EPC 常数 χ 是一个关键因素。许多人的研究表明, 产生 Davydov 孤立子, χ 应有一个阈值存在。在这个阈值之上, 有 Davydov 孤立子存在, 在此值下, 则没有。1980 年, Kuprievich 等人用从头算起法求得 $\chi = 35\text{PN}$; 后来算得 $\chi = (30-60)\text{PN}$; Pierce 算得 $\chi = (7-26)\text{PN}$ 。Careri 等人求得 $\chi = 62\text{PN}$; Scott 等人用数值计算方法求得 $\chi = 50\text{PN}$ 。 χ 的如此差异是蛋白质分子氢键长度(大约为 $2.8 \pm 0.12 \text{ \AA}$) 取值不一样及所用的方程的近似程度的差别等造成的。另外在氢键长度变化范围内, CO 键居于 1 价与 2 价之间, 因此 CO 键的强度灵敏地依赖于邻近氢键长度的变化, 致使 χ 值也相应改变。现在人们作计算时, 对单链蛋白质模型常取 $\chi = (20-62)\text{PN}$, 对三链蛋白质模型常取 $\chi = (35-62)\text{PN}$ 。

Davydov 理论为生物能量与信息的传递提供了一个很好的机制。对此, 在后来的十多年间, 许多著名的科学家如 Scott 等及其他科学工作者全面深入地研究了 this 理论, 并将它用来解释肌肉收缩等多种生理现象, 获得了一定成功。而理论的研究主要集中在两个方面: 一是 Davydov 理论的精确性; 二是 Davydov 孤立

子的热稳定性和理论的实用性。

在 80 年代初期, Scott 等人认为(1)、(2)式反映了 Davydov 孤立子的本性, D. H. Olsen 等人(1989)用分子动力学编码方法来表示沿螺旋轴方向的力学传递, 在研究中他们发现方程组未能全面反映蛋白质分子中各种偶极矩相互作用的影响。他们加进了这些相互作用, 提出了修正的 Davydov 方程组, 并进行了具体的数值计算, 求出了 Davydov 孤立子的振动结构。作者又采用了特殊方法第一次求出了它的严格解析解, 给出了 Davydov 孤立子的一些奇异特性, 增强了人们对 Davydov 方程组仍未完全考虑真实的 amide-1 振子之间的各种相互作用的认识。另外, 在一个实际的 α -螺旋蛋白质分子中, 可能还有一些自由度通过一些附加的衰减机制阻碍了孤立子的运动, 或通过一些较独特的弯曲和扭转组合畸变来改变孤立子的状态。这在 Davydov 方程的动力学特性的研究中都是应当加以考虑的。

关于 Davydov 理论的实用性就是指 Davydov 孤立子在生理温度 300~310K 时是否稳定存在, 它的寿命是否足够长, 长到它能完成传递生物体的能量和信息的任务, 这是 Davydov 理论能否存在下去的一个关键问题。如果在这个温度下, 它的寿命极短, 便无法起到它应有的作用, 则 Davydov 理论再好也没有意义了; 对于这个问题分歧意见较大, 大多数人持否定态度。仅 Scott 等人用数值计算法得出了 Davydov 孤立子在 300K 时仍能存在, 但 Lomdahl 等人通过对 Davydov 方程附加一个跌落项和色散项的办法所作的数值计算表明, Davydov 孤立子在 300K 时的寿命太短而无法生存, 也没有任何生物学运用价值。令人信服的论证是 J. P. Cottingham 等人(1989)用量子力学的微扰理论方法计算了 Davydov 孤立子在 300K 时的寿命仅达 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ s。在这段时间内, Davydov 孤立子只能走过不到 10 个氨基酸分子的距离而失去了生物学意义, 因而无法承担起传递生物能量与信息功能。Wang 等人使用蒙特卡罗方法和单螺旋线模型去计算了 Davydov 哈密顿算符的本征态的热力学平衡特性。得到了在 300K 时 Davydov 孤立子是极不稳定的结论。另外, Förner 等人和 Lawernee 等人都作过温度效应的研究, 并也得出相同的结论。看来 Davydov 孤立子不大可能在 300K 的生理温度范围内存在而去完成它的生物功能。这个结论也可从 Davydov 本人得到的孤

立宽度反比于 $(1-T/T_0)[T_0 = \frac{\pi}{2} \frac{h}{K_B} (\sqrt{\frac{W}{M}})]$ 的公式中得到证实。在 $T=T_0$ 时, 孤立子变成一个无限宽的扩展态(这不是孤立子状态)。对于三螺旋蛋白质模型来讲, $T_0 = 100 \sim 120$ K, 即 Davydov 孤立子也不可能在 300K 的温度下存在下去。

基于这些问题, 在 1989 年丹麦召开的专门讨论 Davydov 孤立子的国际会议上, 代表们一致认为 Davydov 理论是一个十分粗糙和不完善理论, 需要改进和发展。Takeno 等人建议关于自陷量子振动能量的 Davydov 描述应修改为表示允许振动量子数随时间而改变。它可以通过把迁移偶极算符 $J(\hat{B}_n \hat{B}_{n-1} + \hat{B}_n \hat{B}_{n+1})$ 改变成为 $J(\hat{B}_n + \hat{B}_n)(\hat{B}_{n-1} + \hat{B}_{n+1})$ 来得到。Lindenberg 和 Miglioni 等人拥护这种观点, 但得到的结果并不理想。Wang 等人改进计算方法出发, 也未得到好的结果。看来只动“小手术”改进计算方法等无法收到好的效果。必须对蛋白质分子中的集体激发特性进行重新认识和重新研究, 才可能收到好的效果。

庞小峰等人认真分析了 Davydov 理论之所以不适合于生物蛋白质分子系统的重要原因是, Davydov 理论是把多年研究的一般分子系统的孤立子理论机械移植到蛋白质分子中所造成的。但生物大分子的蛋白质是不同于一般分子系统的, 它是一类生物自组织系统。因此在建立描述该体系中集体激发的哈密顿函数和波函数时, 必须考虑这个基本特性, 不能机械照搬。我们在分析由 ATP 水解作用等提供的能量而引起的蛋白质分子结构畸变和局域性涨落的特点后, 给出了一个较为全面反映蛋白质分子的动力学特征的哈密顿量

$$H = \left(\frac{1}{2m} \sum_i P_i^2 + \frac{1}{2} m \omega_0^2 \sum_i \gamma_i \gamma_i - m \omega_0^2 \sum_i \gamma_i \gamma_{i+1} \right)$$

$$+ \left(\frac{1}{2} M \sum_i R_i^2 + \frac{W}{2} \sum_i (R_i - R_{i-1})^2 + \frac{1}{2} m \chi_1 \sum_i (R_{i+1} - R_{i-1})^2 + m \chi_2 \sum_i (R_{i+1} - R_i) \gamma_i \gamma_{i+1} \right) \quad (4)$$

这里不但考虑了低频声学声子的作用, 而且也考虑了纵向光学声子的作用, 同时还考虑了 amide-1 振子与所在氨基酸分子及相邻氨基酸分子的振动量子(声子)之间的相互作用。并且我们还论证了这个具有自组织特征的蛋白质中所产生的集体激发所具有的相干特性, 因而我们应用了一个新的准相干态波函数(即我们的波函数), 而不是 Davydov 波函数来描述这种状态, 即将该体系的波函数表示为

$$|\Phi\rangle = |\varphi\rangle |\beta_q\rangle = \left(\frac{1}{\lambda} \sum_{n_0} (1 + g_{n_0}(t) B_{n_0}^\dagger) |0\rangle_{cc} \right) \left(\exp \left\{ \sum_{n_0} (a_{n_0}^*(t) \hat{a}_{n_0} - a_{n_0}(t) \hat{a}_{n_0}^\dagger) \right\} |0\rangle_{\mu} \right) \quad (5)$$

再采用新方法, 得出了与 Davydov 理论迥然不同的结果。例如其孤立子的能量为 $(1.49 \sim 4.46) \times 10^{-3}$ eV, 与实验值 1.86×10^{-3} eV 相当接近, 但 Davydov 理论得到的孤立子能量为 1.4×10^{-4} eV, 与实验值相差甚远。我们还得到激子速度 $v_g = 10^3$ m · s⁻¹。声速 v_{aq} 为 5×10^3 m · s⁻¹ $\ll v_{aq} \leq 10^4$ m · s⁻¹, 与实验值 $(3.6 \sim 44.8) \times 10^3$ m · s⁻¹ 接近。但 Davydov 理论得到的 $v_{aq} = 100$ m · s⁻¹, 与实验值相差较远。计算了由新孤立子运动产生的比热也与实测值吻合。我们又研究了这类新孤立子的温度效应, 发现了这类新振幅虽然随温度而改变, 但在 310K 时, 这类孤立子仍是稳定的。单就温度影响来讲, 在 310K 时仅比 10K 时增加 2~3 倍。但若又考虑由温度不等子零而引起的分子链的非线性振动效应对孤立子振幅引起的减少的抵消作用后, 这孤立子在 310K 的振幅变化不大, 因而能保持稳定。临界温度可达 348~359K。庞小峰等还计算这类孤立子在 310K 时的寿命可达 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ s, 与 Princeton 大学 R. Austin 等人实测结果 10^{-10} s 很接近, 在这段时间内, 它可通过大约 10^4 个氨基酸分子。这表明这类孤立子够也承担起自己的生物功能, 在生物学过程中是非常有用的。另外又论证了这类孤立子的量子特性, 非线性振动对它的影响, 超声速运动特征, 自发辐射效应, 拉曼散射以及穆斯堡尔效应等问题, 都获得了较合理的结果, 说明了他们的理论是正确的, 适合蛋白质分子系统。

关于蛋白质分子的生物能量由孤立子传递的实验研究已由 Webb 和 Carteri 等人(1984)对与它的结构完全相似的 $[\text{CH}_3\text{CONHC}_6\text{H}_5]_n$ 分子晶体中的拉曼光谱和红外谱测试和 Faum 等人对蛋白质分子所作的自由电子激光脉冲测试以及 BobKnk 等人的微微秒泵-探针实验测定工作中所证实。看来, 以上的理论是正确的。

核酸中的孤立子及其生物功能 对于另一类生物大分子——核酸(DNA 和 RNA)则是生物遗传信息的负载者, 包括人在内的生物之所以能一代一代相传下去, 就是由 DNA 分子的解链和复制功能引起的。并且它还是制造蛋白质的模板。然而人们一直未弄清楚这个复制过程是如何完成的。因而对生物遗传与变异及癌症等疾病的原因一直未弄清楚。实验测定复制叉的移动速度, 对原核细胞约为每秒 1 000 核苷酸。对于真核细胞约为每秒 100 核苷酸其的速度大约为 10^{-3} cm · s⁻¹ 的数量级。如果我们把解链过程看成机械的螺旋转动, 则 DNA 转动速度大约应为 $10 \sim 100$ r/s。这么大的速度, 对 DNA 的运动来讲是无法理解的。但若把 DNA 的解链看成一种量子力学的构象改变, 运用微观动力学理论可以估计出复制叉的移动速度约为 10^5 cm · s⁻¹, 大大高于实验值。若放弃微观动力学观点, 采用统计力学的途径, 可得到合理的复制叉速度, 但又难于解释链与复制的高度有序性。看来 DNA 的解链与复制是一个非常复杂的问题。但我们最近利用 DNA 的孤立子运动和分形理论可能对这个问题有较合理的解释。

关于 DNA 中的孤立子运动, 最早由 S. N. Englander 等人(1980)研究过, 以后 S. Yomosa(1989)等人及庞小峰对 B-DNA

的平面基转子模型的孤立子理论也作过广泛、深入的研究。近似认为DNA的碱基(C, T, A, G)是一个平面转子。双螺旋中的两个转子在ATP水解作用和外界刺激提供的能量作用下,可分别绕着螺旋轴转动(其转角为 φ_n, φ'_n),从而改变了DNA的构象,引起互补碱基之间的氢键能,相邻碱基之间的堆积能和螺旋状扭转能,碱基集团之间的范德瓦斯相互作用能和Fröhlich吸收能等的变化。考虑这些效应,我们把第 n 个互补碱基的运动方程表示为

$$I_n \ddot{\varphi}_n = J_n [\sin(\varphi_{n+1} - \varphi_n - \varphi_0)] + J'_n [\sin(\varphi_{n+1} - \varphi_n - \varphi'_0)] + h_n \sin \varphi_n - \lambda_n \sin(\varphi_n - \varphi'_n) - \chi_n \sin(\varphi_n - \varphi'_n) + 3\beta_n \cos \varphi'_n \sin \varphi_n - \alpha_n \sin \varphi_n, \quad (6)$$

$$I'_n \ddot{\varphi}'_n = J_n [\sin(\varphi_{n+1} - \varphi - \varphi'_0)] + J'_n [\sin(\varphi'_{n+1} - \varphi' - \varphi'_0)] + h'_n \sin \varphi'_n - \lambda'_n \sin(\varphi'_n - \varphi_n) - \chi'_n \sin(\varphi'_n - \varphi_n) + 3\beta'_n \cos \varphi_n \sin \varphi'_n - \alpha'_n \sin \varphi'_n, \quad (7)$$

庞小峰曾对这组差分方程在分立与连续近似下的解作过研究,发现DNA有包括混沌状态在内的各种空间构象和局域性涨落态存在,同时也存在各种各样的孤立子激发。利用这些孤立子的不同性质及其变化特点,借助于各种酶(如解链酶、旋转酶、拓扑异构酶、引发酶和连接酶等)的参与,在 Mg^{2+} 离子和其他调节因子(适当的生化反应过程的配合下,解释了DNA的解链与复制、转录以及转录过程,指出了DNA的这种复制过程是一种分形现象,其分维数为0.63。正常的分形造成一代一代的相传,不正常的分形造成了遗传的变异和癌症等疾病的发生。以上这些结果看来较为合理。这种孤立子理论,已为室温下DNA的自行打开与关闭的氦氛交换实验结果的DNA激光拉曼谱实验所证实,当然这里还有许多问题值得进一步研究。

以上这个理论的自身弱点也仍存在,它仅考虑了DNA中碱基的相对运动,而未考虑组成DNA的其两部分:脱氧核糖和酸根及碱基在ANP水解作用等的刺激下,引起的局域性涨落和结构畸变所产生的分子内部的激发状态从而在DNA中引起生物能量与信息的传输过程和交换变化。最近我们考虑了这一效应,运用在蛋白质中,我们较为成功的新理论,研究了包括碱基在内的DNA的动力学特征,得到了在DNA中存在着前面讲的结构孤立子,还存在传递生物能量与信息的传播孤立子。它们之间密切配合,互相变化,完成了DNA的生物功能(如复制、转录、转释信息存储、遗传与变异、基因表达等)以及B-DNA和A-DNA与Z-DNA态之间的相互转化,得到了较为合理的结果。目前这方面的研究工作还在进行。

由以上的研究可以看出,生命活动是紧密地与孤立子运动相关的。这主要是由于生物的各个组织以及组成它的生物蛋白质和核酸都是一类生物自组织。这种生物自组织是一个典型的非线性系统,从而在其中造成了各式各样的孤立子。同时生物功能的完成,例如生物的生存,必须要正确判定外界刺激的大小与性质。以便能作出恰当的反映,这就需要能量与信息传输的无损失及保真性。要做到这一点,必须要孤立子才能完成,而其它形式的载流子(如电子、空穴、激子等)各种各样的准粒子以及各类弹性波等都不可能承担起这一任务。因此生物孤立子的研究显得非常重要,它将揭示生物奥秘,认识生命的特性和本质起着关键性作用。深入研究它,对于发展整个生命科学有着极其重要的作用。

(西南民族学院庞小峰撰)

状态方程

描述物质压力、体积和温度之间的关系,又称PVT行为的数学表达式,可以表达为 $f(P, V, T) = 0$ 。一个可靠的状态方程不仅能准确反映流体的PVT行为,更有价值的是能够计算纯物质或混合物的其他热学性质,如相平衡关系、混合物临界性质、焓变化和熵变化等。状态方程和理想气体热容相结合,可用来表示所有的热力学基本方程式。因此,状态方程在热力学理论研究、工程设计和过程模拟等实际应用方面都有重要意义。

自1834年首次完整地建立理想气体状态方程以来,已发表的状态方程多达几百个。它们大致可分为两类,一类是在归纳宏观物性的基础上建立的经验型状态方程,另一类是根据统计力学

原理导出的理论型状态方程。前者又因方程形式上的特点,习惯地分为立方型方程和多常数方程。

1873年范德华(J. D. van der Waals)提出的vdW方程, $P = RT/(V-b) - a/V^2$ 是第1个能够定性描述真实流体的立方型方程。在以后陆续发表的各种修正式中,最成功的是RK方程(1948),其中主要的修正时将常数 a 改变为与温度有关的 $a/T^{0.5}$,它改善了方程计算气相性质的精度。1972年索弗(G. Soave)提出SRK方程,方程中的 a 又修正为 $a_c \cdot \alpha$ 。 a_c 是由临界性质计算的常数, α 是温度和偏心因子的函数,由纯物质蒸气压数据拟合,这一修正使方程能连续地描述汽液相性质。目前工程计算中广泛采用的立方型方程,如PR方程(1976),HK方程(1980),PT方程(1982),CCOR(1983)等,都各有自身的特点和适用的最佳范围。这些方程的常数都需要用其它物性的实验数据(蒸汽压、密度、蒸发焓等)拟合,立方型方程能展开成体积的三次多项式计算简便,在较大范围内可得到合理的结果,但精度稍差,特别是在临界区和近临界区。1979年马丁(J. J. Martin)、阿博特(M. M. Abbott)分别提出普遍形式的立方型方程,揭示了各种立方型方程的内在联系及方程存在的缺陷,为方程的改进提供了有益的线索。从现有的情况看,改进工作主要集中于:提高方程常数的精度或增加常数的个数,更准确地反映纯物质临界性质和体积性质;改进 α 的表达式,更好地拟合纯物质蒸气压数据。福泽(R. Fukuzato)曾系统研究过纯物质状态方程精度对混合物性质计算的影响,一般认为纯物质性质拟合得好,混合物性质计算往往能取得好效果。

无穷级数形式的维里方程 $P = A/V + B/V^2 + C/V^3 + \dots$ 是多常数状态方程的代表,其他多常数方程多数由它演化而来。其中著名的BWR方程(1940)和经过斯塔林(K. B. Starling)改进的BWR方程较早应用于工业生产中,特别对烃类体系和制冷系统热力学性质计算有较好效果。1975年李(B. I. Lee)和凯斯勒(M. G. Kesler)将BWR方程与对应态原理相结合,建立了三参数对应态解析表达式,增强了方程对非极性化合物物性的推算和预测能力。MH状态方程(1955)是另一个获得实际应用的多常数方程,方程常数只需用临界点参数和一个蒸汽压数据确定。1981年侯虞钧等将MH方程从汽相扩展到液相,用于极性和非极性体系相平衡、混合热等计算。多常状态方程的特点是精度高而本身又不过于复杂,1991年维特勒(A. Vetere)提出的6种常数状态方程就体现了这种意图。然而另一种多常数状态方程是专门为某种特定物质开发的,如甲烷、二氧化碳、氨、水、空气等,这类方程描述的PVT范围广、精度高,方程常数往往高达几十个,用来绘制热力学图表以及用于在对应态关联式中计算参考流体的性质等。基南(J. H. Keenan)等编制水蒸汽性质表时就使用了有58个常数的水蒸汽方程。

推导理论型状态方程目前较多采用微扰理论的方法。微扰理论的基本点是假定实际流体是某种参考流体的微扰体系,将实际流体的位形自由能按参考流体作泰勒级数展开,然后从参考流体的性质计算实际流体的性质。1954年茨瓦兹格(R. W. Zwanzig)奠定了微扰理论的基础。1967年巴克(J. A. Barker)和亨德森(D. Henderson)解决了求取二次微扰项系数的难题,使微扰理论趋于完善。1971年维克斯(J. D. Weeks)等提出的WCA理论改进了微扰项的收敛性,仅取一级微扰项就能得到较满意的结果。60年代末人们发现硬球流体与真实流体的分布函数有较好的一致性,因此早期的微扰方程以硬球分子为参考流体,其中较好的有BACK方程(1977),但这些方程只能用于简单的非极性体系。1978年普劳斯尼茨(J. M. Pransnitz)及其同事考虑了分子大小、极性等因素,提出了微扰硬链理论(PHCT)和相应的状态方程。方程分别用Carnahan-Starling硬球方程和Alder的方阱分子展开式表示斥力项和引力项,并引入外自由度参数,对简单分子和聚合物都能在整个密度范围内适用。针对方程复杂、计算费时不足,接着又提出了各种截断式(TPHCT)和简化式(SPHCT)。以后通过改变引力项表达式和使用不同的势能函数,

派生出微扰软链方程(PSCT, 1986)、微扰各向异性链方程(PACT, 1985)、转子链方程(COR, 1983)等, 形成一个体系, 较全面地反映了分子间极性力、缔合、溶剂化、络合、量子效应和离子作用, 成功地用于包括高度非理想体系在内的各种流体相平衡计算。建立普遍化的 van der Waals 配分函数是推导理论型状态方程的另一种有效方法。1985年桑德勒(S. I. Sandler)及其同事基于 van der Waals 配分函数, 把简单的格子模型用于方阱流体导出状态方程。以后他们结合计算机模拟结果, 采用修正的 $\exp-6/LJ$ 等势能函数以及改进自由体积和能量项的表达式, 提出了一些新的有较高精度的状态方程。从配分函数出发和从径向分布函数出发推导状态方程, 两者无本质区别, 都建立在分子相互作用势能函数基础之上。由于分子间相互作用相当复杂, 至今人们对此了解不多。求取包括引力和斥力的势能函数, 数学上也十分困难, 常需作简化和近似, 有的还需引入经验参数。因此, 在势能函数的表达、位形自由能模型的构造、微扰项数的确定等方面还有待深入研究。

当纯物质状态方程应用于混合物时, 需要建立混合规则。混合物性质计算精度既与纯物质状态方程有关, 也与选用的混合规则有关。多年来, 普遍使用经典的单流体二次混合规则, 表征分子能量和大小的交叉项分别采用几何平均和算术平均的组合方法, 它实际上是一个无序混合模型, 适用于简单的非极性混合物。1953年斯托特勒(H. H. Stotler)和本尼迪克特(M. Benedict)在能量参数组合规则中引入二元相互作用参数 K_{ij} , 扩大了方程的适用范围。 K_{ij} 的值除了轻烃体系有一些规律外, 其他物系还无法从理论上预测, 只能由实验数据拟合。1978年维达尔(J. Vidal)将状态方程的能量参数与无限压力下的超额自由能 g^E 联系起来, 首次把局部组成(LC)的概念引入状态方程, 接着他与赫龙(M. J. Huron)采用 NRTL 型的 LC 混合规则成功地计算了高压流体相平衡。LC 混合规则改善了状态方程在高密度区的性能, 但在低密度区不符合组成二次混合关系的准则。1981年莫勒普(J. Mollerup)、怀廷(W. B. Whiting)和普劳斯尼茨分别提出与密度有关的局部组成(DDCL)混合规则, 克服了上述缺陷。这类混合规则在高密度时显示局部组成型活度系数关联式的特征; 密度趋于零时, 局部组成消失, 还原为经典的二次混合规则。但统计力学理论和计算机模拟结果却表明局部组成随密度降而更明显。于是胡英等人(1984)、桑德勒及其同事(1985)、李(R. J. Lee)和赵广绪(K. C. Chao, 1986)又进一步提出了符合这种变化趋势的局部组成表达式。DDLC 混合规则把状态方程和活度系数模型联系起来, 有很大的实用价值。与此同时, 形式简单的二次混合规则也不断得到发展, 主要的改进是把相互作用参数 K_{ij} 表示成温度和混合物组成的函数, 混合规则中有两个或更多的可调参数, 虽然参数 K_{ij} 的物理意义有所减弱, 但方程更具柔性, 能灵活用于不同条件下的热力学性质计算。

开发形式简单、使用方便、高精度、大范围普遍适用的状态方程及混合规则是今后努力的目标。计算机模拟实验技术在理论状态方程和混合规则研究中起了很大作用, 日益受到重视。借助计算机模拟的有力手段, 开展分子水平的流体性质研究, 必将推动状态方程研究的迅速发展。经验状态方程在实际应用中的成功不是偶然的, 从统计力学的理论高度对经验方程进行总结, 从中得到有益的启示也是一项十分有意义的工作。工业生产中新部门、新技术的出现给状态方程研究提出了新的课题, 如与超临界流体萃取技术有关的临界区流体性质研究, 与表面活性剂广泛使用有关的微乳液相行为研究, 与气体净化、废液处理等过程有关的电解质溶液理论研究; 与化肥、制碱等生产工艺有关的有化学反应的相平衡研究等。此外, 状态方程用于计算粘度、表面张力、扩散系数等传递性质的研究工作刚开展不久, 有着广阔的发展前景。

参考文献

- 1 Beret S, et al. AIChE J, 1975, 21, 1123~1132
- 2 Martin J. J Ind Eng Chem Fundam, 1979, 18, 81~97
- 3 侯冀钧, 等. 化学学报, 1981, 1, 1~10

4 胡英. 流体的分子热力学. 北京: 高等教育出版社, 1983

5 Sandler S I. Fluid Phase Equilibria, 1985, 19, 233~257

(浙江大学胡望明副教授撰, 吴兆立教授审)

耗散结构和非平衡态热力学 dissipative structure and non-equilibrium thermodynamics 当体系处于远离平衡态时, 体系通过与外界环境不断交换物质和能量以及其内部的不可逆过程(能量耗散过程)形成各种有序状态, 普里戈津(I. Prigogine)将这样形成的有序状态称为耗散结构, 为了处理和解释耗散结构, 普里戈津等人通过将经典热力学的概念和方法推广到非平衡态和不可逆过程, 创立了非平衡态热力学。耗散结构概念的确立以及非平衡态热力学的建立和发展, 使得人们对自然界的发展规律有了更完整的认识, 有利于人们认识并利用自然界中各种有序现象, 因而具有广阔的应用前景。

自然界中存在着大量的有序现象(也称自组织现象), 从热力学观点看, 主要可分为2类: 一类是分子水平上定义的有序, 可以在孤立的环境中以及平衡条件下维持, 不需要与外界环境进行任何物质和能量的交换, 例如晶体的有序结构; 另一类有序即耗散结构, 可呈现出宏观范围的时空有序。耗散结构在生物体系和社会体系中普遍存在, 例如许多树叶, 花朵以及各种动物的皮毛等常常呈现出漂亮的规则图案, 生物钟现象等, 根据达尔文(G. H. Darwin)生物进化学说以及人类社会的进化学说, 发展过程总是趋于种类繁多, 结构和功能变得复杂, 生物体系趋于更加有序, 更加有组织。即使在无生命界, 也可发现许多有序现象, 最著名的是别洛索夫(B. P. Belousov)一扎鲍廷斯基(A. M. Zhabotinsky)反应, 在这种反应中, 某些组份浓度和反应体系的颜色随时间作周期性的变化, 称为化学振荡, 在一定条件下还可出现许多漂亮的花纹, 形成规则的空间波形, 并以一定的速度进行扩散, 产生化学波。由于耗散结构是通过体系与环境间不断进行物质和能量的交换才能维持, 体系均处于非平衡态和不可逆过程中, 经典热力学无法处理这类问题, 回答和解决这类问题是新兴的不可逆或非平衡态热力学的任务。

非平衡态热力学可以追溯到100多年以前汤姆逊(W. Thomson)关于热电现象的研究, 但是由于受到经典热力学的束缚, 该理论一直未能引起重视, 直到40年代普里戈津等人通过对熵源强度的明确计算, 并建立了统一的不可逆唯象理论, 非平衡态热力学才得以迅速发展, 其发展过程大致分为3个阶段。

1. 仔细研究了熵产生过程。经典热力学第2定律只简单地说明不可逆过程使熵增加, 即熵产生取正值, 但没有回答熵产生从何而来。普里戈津等人发现, 熵产生是对应于化学反应, 热传导, 扩散和粘滞等各种不可逆过程的两个因子的乘积之和, 记作:

$$P = dis/dt = \sum J_p X_p$$

式中 P 为单位时间内的熵产生(即熵增率), J_p 是“流”或速率, 如化学反应速率, 扩散速率等, X_p 是“力”, 如化学亲和力, 浓度差等, ρ 表示不同的组分, 平衡态时, “力” X_p 消失, “流”也随之消失。

2. 线性非平衡态热力学。其研究仅限于体系很接近平衡态时的情况, 即所谓非平衡态的线性区, 这一理论是在1931年昂萨格(L. Onsager)建立的, 其基本公式是“力”与“流”的关系:

$$J_p = \sum_i L_{ip} X_i$$

式中 L_{ip} 是线性输运系数, 它满足以下关系:

$$L_{ip} = L_{pi}$$

称为昂萨格倒易关系, 它可以由很普遍的微观可逆性原理, 结合涨落理论加以推导, 也可用实验验证。例如, 实验表明, 在接近平衡态时, 热传导张量是对称的。昂萨格关系的重要性在于它指出了熵产生包含着重要的物理意义, 因此不可逆过程本身是值得研究的。

线性非平衡态热力学的另一重要基础是最小熵产生定理。1945年普里戈津对该定理从理论上作证明。当系统处于稳定态

时,熵产生值 P 取最小值,这就是最小熵产生定理。它说明在靠近定态的附近,熵产生最小可以作为定态的判据。然而,根据上述定理,在定态附近不可能出现新的结构,如果系统由于涨落从定态 1 达到定态 2,则下一步还是由 2 态回到 1 态,如图 1 所示。在这里涨落不起作用,或更确切地说,在靠近平衡态时,涨落只起很小的表面作用。而耗散结构是在某些条件下,通过系统中稳定态失稳,某些涨落被放大而形成的有序结构,显然线性非平衡态热力学无法处理耗散结构。

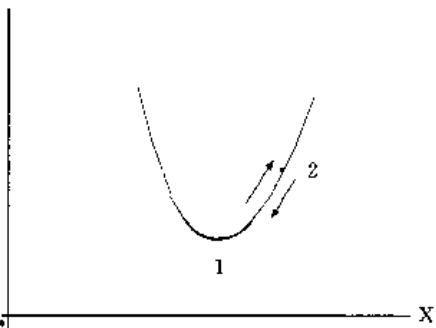


图1

3. 非线性非平衡态热力学。普里戈津等人研究发现,当系统远离平衡态时,“力”与“流”的关系是非线性的,在远离平衡的定态,其熵产生不一定取最小值,当系统远离平衡态时会出现新的性质和结构。典型的例子是化学振荡反应。普里戈津等人通过引进局部平衡假设,把线性非平衡态热力学推广到非线性区,形成非线性非平衡态热力学。该理论可以说明,在什么条件下系统远离平衡会失稳,会发生自组织过程,以至产生耗散结构:

(1) 系统中要包含一定的非线性因素。化学反应总是由粒子间的碰撞而引起的,因此它的基本规律永远是非线性的,如能满足一些条件,如存在催化剂,反馈条件等,则非线性的化学过程导致与平衡结构非常不同的动态结构,这是一种新的状态,是在不稳定点以后发生的大量分子一致动作的表现。典型的例子是化学振荡和空间化学波,它们都是在系统远离平衡态时,由一系列非线性的化学反应步骤组成,并通过自催化反应作为反馈条件而形成的一种耗散结构。

(2) 远离平衡系统失稳以致形成新的结构还依赖于非线性的反常涨落,其来源于系统本身的分子结构。任何系统都存在小的涨落现象,在平衡态附近,所有的涨落都是衰减的,但当远离平衡态时,在不稳定点附近的涨落有很大的反常,最初在小范围内产生,最后在大范围内产生,以致使整个系统的性质发生变化,空间化学波就是由涨落所致。如果说在平衡态附近涨落只是对平均值的小小修正,那么远离平衡时,则是涨落驱动了平均值,使系统从一种状态变到另一种状态。

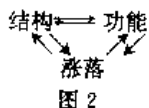


图2

根据非平衡态热力学的观点,耗散结构有 3 个互相关联的方面,如图 2。“结构”指时间或空间结构,如失稳引起的化学振荡或化学波,而“功能”指化学或生物活性,如化学振荡或化学波只能产生于一定的反应体系(即这些体系具有上述活性)，“涨落”在结构与功能之间起中间作用,引发失稳现象,所以绝大多数化学振荡或化学波都存在一定的诱导期。

耗散结构也可以被看成一种有对称缺陷的结构。例如,靠近平衡时有球对称,离开平衡在第一分叉点时呈轴对称,下一级分叉点是更低级的对称,如图 3。其中 X 可以是化学反应中某组份的浓度变化值, β 是控制反应的参量(如温度,反应物浓度等),当 β 达到某些特定值时, X 原来的值失稳而产生新的结构,随着一个接一个新的结构的出现,就可以形成耗散结构,常见的是化学振荡以及化学波。

非平衡态热力学及耗散结构理论现在仍处在发展之中,其主

要发展趋势是:

(1) 耗散结构还仅仅是一种概念,仅是一种在不稳定点之后可能出现的新结构,须从理论上证实它的存在,同时揭示其行为,因此须在非平衡态热力学中引进动力学方程及适当的数学分析;(2) 和经典热力学一样,非平衡态热力学同样也需要讨论其微观基础,这就需要引进统计热力学方法。目前受到特别重视的一个方面是热力学关系在偏离平衡态时的适用性。非平衡态热力学和耗散结构的研究在我国虽然起步较晚,但由于在理论和实践上的重要性,而引起越来越多的科学工作者的重视。

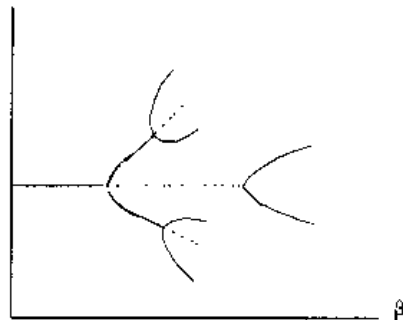


图3

参考文献

- 1 Onsager L. Phys Rev, 1931,37:405
- 2 Prigogine, I. Bull Classe Sci, 1945,31:600
- 3 Glansdorff P, et al, 1971
- 4 Nicols G, et al. Self—Organization in Nonequilibrium Systems, 1977
- 5 普里戈津. 自然杂志, 1980,3:11
- 6 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构, 1986
- 7 郑重知. 不可逆过程热力学及现代反应动力学导论, 1987

(上海师范大学李和兴副教授撰,蒋萍初审)

声学

声学计量 传播声波的媒质有气体、固体和液体,相应的分支学科分别称为空气声学、超声学和声学。因此,目前声学计量主要内容包含空气声(电声)计量、听力计量、超声功率计量和水声(水下电声)计量等 4 个方面,其中以空气声计量内容最为丰富。它涉及人们的听觉,如用于改进房间的音质和放声系统的高保真度;用于测量噪声并加以控制以及改善人们的生活环境等。它对声频和电声事业的发展至关重要。水声计量主要用在军事方面,如海军兵器中的声纳、水雷和鱼雷等,在民用上用来导航、捕鱼、研究海洋、地质地貌等。超声计量用来检查材料质量,了解化学反映过程,提高金属冶炼质量,测量温度、高度、硬度和液体厚度、节能、人工降雨、农业生产以及人体的诊断和治疗上。听力计量用来对机器操作人员的听力作定期普查,对人耳采取保护措施。为了进行正确的测量,就需要建立听力零级标准。

从中国商代随州的曾候乙编钟在世界上率先采用十二音律,伽利略研究了弦振动规律,牛顿提出了波动理论,到经典的瑞利所著的《声学理论》的发表,声学已发展到了成熟的阶段。到 20 世纪后,随着无线电的发明,电子管的出现以及物理学其它分支(如量子理论、固体理论、低温物理等)的出现,不但使得声波的产生、接收及声学的测量技术产生了飞跃,而且使声学理论形成了许多声学分支和边缘学科,伴随而来的是大量的声学测量问题。

首先是空气声计量。20 世纪初,贝尔发明了用于电话机的碳粒传声器首次把声波转换为电信号。不久,由于电子学的发展,人们已经能够测量各种频率、波形和强度的声波,从而奠定了近代声学基础。

在声学中,声压、声功率和声强是 3 个重要的基本参数。由于直接测声功率和声强比较困难,因此常常通常测量声压来间接测功率和声强。而要准确测出声压就必须用灵敏度经严格校准的传声器,瑞利盘曾用来作传声器的绝对校准,也曾使用过热线法作

声压的绝对测量。近年来,校准传声器声压灵敏度用耦合腔互易法,由于不少声学测量专家进行了大量的研究工作,使该方法为国际标准化组织所采纳,建议作为传声器绝对校准的标准方法。使用此方法,若在腔中充以氦气,则其校准频率范围可达60~100kHz,不确定度约±(0.05~0.1)dB。自由场互易法用来校准声场灵敏度,频率在20kHz以下,不确定度约±0.2dB。此外尚有使用于现场校准的标准声源法,其校准频率为250Hz,不确定度为±0.2dB。

声学测量技术的发展有赖于采用新的先进的测量设备,与电子测量仪器一样,声学测量仪器也经历了电子管、晶体管和集成电路3个发展时期。过去测量声波都是模拟式电子仪表,测量速度和准确度受一定限制。60年代初,由于计算技术和大规模集成电路的发展,出现了数字式仪表,以微处理机为中心的测量仪表不但实现了小型化、多功能,而且由于采用了快速傅里叶算法而实现了实时分析,出现了一些新的声学测量技术和分析方法。例如实时频谱分析、声波测量、声污鉴别、瞬态信号分析等。

对于声压测量新方法的研究,有人提出用激光测量传声器膜片的振幅以确定声压值的办法。澳大利亚国家标准实验室以测量质点速度的方法替代声压的测量。

其次是水声(水下电声)计量。校准水下电声换能器的技术和工艺大约是在1947年开始的,当时在美国建立了水声计量研究所(USRL),由Maclean和Cook各自独立提出利用互易原理校准水下电声换能器的方法。1942~1945年间,USRL和哈佛、加州两大学已形成了在浅水湖和水池中作互易校准的实施程序。

1945年以后,已能对小型水听器进行校准,频率范围从2Hz到2.2MHz。当要求静水压可变速时,其校准能力为:频率只能在2~100Hz,耐静压仅0.61~0.71M标准气压。这时的标准水听器作为“标准”采用,都不理想。

到1950年初,水声计量工作的成果,除在湖泊、水库和水池中水听器作校准外,美国水声计量研究所基准处(USRD)还建立了加固容器以及低频1kHz以下的“K”系统(700m水深)和管状加压容器“J”系统(7000m水深)。

此外,原苏联、澳大利亚、日本以及欧洲的美、法、德、意和荷兰等都早已建成本国的水声声压基准装置。

中国水声声压基准装置有3套:1Hz~3.15kHz为密封腔压电补偿法装置,不确定度为±0.7dB;2~100kHz及高频水声声压装置,0.1~5MHz,不确定度为±(0.9~1.1)dB。

中国发展规划中还拟于1995年前,建成管状加压校准系统(1000m水深)。

以往的水声计量都是建立在稳态信号基础上的。自80年代以来,USRD用“斜坡”式瞬态信号上传递函数求换能器的接收灵敏度与发送响应,USRD还利用高分子聚合物PVF₂压电薄膜作接收器,刚性的PC塑料作挡板,构成了比Trott近场基阵简单、低价、质轻的平面聚焦基阵,用于校准高分辨率声纳接收基阵。

再次是超声功率计量。超声的形成期早在1830年,当时F. Savart用h1齿轮产生了频率为 2.4×10^4 Hz的超声,1912年震惊世界的Titanic号船沉没促使科学家P. Langevin致力于水下超声作为侦察的手段,1927年R. W. Wood发表对超声能量作用的实验报告,为今天称为功率超声学这门学科奠定了基础。

在中国,超声学研究的大规模开展则始于1956年12月科学规划后,经过30年的历程,已建立了超声功率基准装置及检定系统。采用辐射压力法,其中瓦级和毫瓦级功率分别为0.5~20W和1~500mW,频率范围和不确定度均为0.5~10MHz和±5%。

美国NBS,英国NPL和德国、日本、澳大利亚、俄罗斯等国还使用电学法 and 声光法等。

最后是听力计量。一些工业发达国家,均建有强大的听力计量研究基地。1980年以来,ISO开始制订国际听力零级标准。中国自60年代中期开始准备,先对20多个民族的外耳道物理尺寸进行测量,提出仿真耳模型的概念。到70年代后期,先后完成了

气导和骨导听力零级和听阈的测定,建成了国家听力计量基准。其中气导听力国家基准频率范围为0.1~10Hz,不确定度为0.1~0.3dB;骨导听力国家基准频率范围为0.1~8Hz,不确定度为0.2~0.5dB。

听力计量标准器的研究工作有许多设想,如设想建立一个标准仿真头,则能综合解决标准仿真头骨,标准仿真口和标准仿真喉问题。

参考文献

1. Beranek L. L. Acoustic Measurements, 1949
2. Bobber R. J. Underwater Electroacoustic Measurements, 1970
3. 马大猷. 声学手册. 北京: 科学出版社, 1983
4. Brinkmann K. International Standardization In The Field of Audiometry Reporting In Beijing, 1985, 9, 26
5. 奥岛基良. 超声测量动向, 计划与制. 1989, 28(5): 350~361

(中国计量学院焦孚平副教授撰)

声纳 sonar sonar 一词是 sound navigation and ranging (声导航与测距)的缩写。声纳是利用声波对水下物体进行探测和定位识别的方法及所用设备的总称。人们要进行海洋调查研究、海洋运输、海洋资源开发利用、水下工程建设和海上战争等,都需要有高效的水下观察手段。实践证明,光波和电磁波在海洋中的衰减很厉害,而声波却是在海洋中唯一能够远距离传播的能量形式,因此声波就成为水下观察、通讯、定位和制导等最有效的手段。声纳的起源可以追溯到意大利达·芬奇(L. Da Vinci)的贡献。1490年他曾写到:“假如你使船只停泊,把一根管子的一端放入水中,另一端接到你的耳朵,你就会听到远方的船只。”他的这个发现,包括了近代声纳的基本构成—声源、水声接收器和信号处理器,即航行的船只相当于水声发射换能器(阵),管子相当于水听器(阵),人脑相当于电子计算机。现代声纳的雏形是1917年法国郎之万(P. Langevin)为对付德国潜艇的攻击而研制成的探测潜艇的回声定位声纳。有许多因素影响声纳的性能,如声波的传播衰减,海面海底和海水中物体对声波的多途效应,海洋噪声和舰艇及载体的自噪声,海面、海底、海洋生物和海水中的不均匀性产生的混响,目标的反射本领,多普勒效应等等,而这些因素又与海洋环境因素有关,如声速—深度分布、波浪、水深、海流等。随着大规模与超大规模集成电路,微处理机、自适应系统、相关与非相关处理、波束形成、数字滤波、压缩技术、自适应线谱增强、低频分析测距、合成孔径、专家系统等新技术在声纳中的广泛应用,使得声纳在信号处理、搜索速度、目标识别、操作自动化、可靠性和维修等方面的性能都得到迅速提高,从而声纳的品种不断增多,用途也日益扩大。

1. 噪声测向声纳。这是一种被动式声纳。它本身不发射声信号,而专门检测水下目标发出的声信号,由于它不发射信号,所以比较隐蔽,是利用接收目标舰艇发出的噪声检测目标,并测定其方位。

2. 噪声测距声纳。这是一种新型的被动式声纳,它是利用沿潜艇长度方向按一定间隔安装的3个水听器阵,接收目标潜艇发出的噪声,根据测得目标的方向和声波到达3个阵的时间差,经计算装置算出目标的距离和方位,而且可连续地传输给武器射击指挥系统。

3. 拖线阵声纳。这是一种非常新型的被动式声纳,它的水听器与电缆组成一长线阵,用拖曳电缆把它拖曳在船尾数百米到一千多米处。长线阵用聚氨酯橡胶护套,电缆用开夫拉(Kevlar)塑料填芯,具有很大的抗拉强度,比重接近于1,便于在水中拖曳控制,拖线阵很长,可以获得很高的空间增益,由于它远离舰艇,受拖曳舰艇噪声的影响甚小,且拖曳深度可变,便于克服跃层障碍,它的作用距离一般为数十海里,用于战略反潜的,其作用距离可达数百海里。

4. 主动式声纳。这是由声纳发射器向水中发射声信号,借助于目标反射来达到各种检测目的。回声定位声纳就是典型的主动式声纳,由它自身发射声波,声信号在水中传递过程中遇到目标后反射,反射声信号再由声纳接收器接收。根据水中声速和接收信号的时间差,以及声信号返回的方向,就可确定目标的距离、方位和速度。主动式声纳可以探测到无噪声的静目标,这是被动式声纳所不能比拟的。另外,由于消声减振技术的发展和运用,潜艇噪声不断降低,被动式声纳的作用距离很受影响,而主动式声纳却不受其影响,因此它特别适于检测低噪声目标,如测深、探雷等。

5. 探雷声纳。这是一种主动式声纳,它的探测对象是锚雷或沉底水雷。因水雷体积小形体复杂,要可靠地发现并识别它,一般要使用很高的发射频率,搜索时一般用 50~100kHz,识别时使用数百千赫。探雷声纳主要装备在扫雷舰上,也可以安装在水面舰艇和潜艇上,用以发现水雷并测定其方位和距离,保证舰艇在雷区航行的安全。

6. 直升机吊放声纳。该声纳已成为反潜侦察的重要手段之一。直升机在工作时能在海面上方十几米处低空悬停,将换能器用钢缆吊放水中,吊放深度一般为十几米,最深可达一百多米。吊放声纳的特点是机动性能好,轻便,干扰小,不需很强的发射功率即可达到较远的作用距离。

7. 声纳浮标。这是航空反潜声纳的重要探潜设备之一,分主动式和被动式两种。声纳浮标从飞机上被掷出来,先利用旋翼减速,然后落入水中,再放出换能器和天线。信号通过天线发送出去,与安装在飞机上的多路接收机联系,其探测距离可达数十海里。

8. 侦察声纳。这是一种被动声纳,用来接收敌方主动声纳发射的声信号,并确定其方位、工作频率和信号形式,以便避开对方声纳的探测,或采取相应的干扰措施。由于敌方主动声纳信号是未知的,所以接收机的频率较宽,一般在 1~50kHz 或更宽一些。

9. 声纳干扰器。该干扰器分为噪声发生器和回声模拟器两种。噪声发生器发射强功率的噪声干扰声波,使对方主动式声纳饱和,荧光屏上呈现一片亮光,无法判断目标的位置,造成其工作失效或效果降低。回声模拟器则模拟敌方声纳发射的信号制造假回波,使敌方声纳误以为是目标回波信号,从而不能准确测定目标的真实方位。

10. 声诱饵。这是一种在水面舰艇和潜艇上拖曳或可放出的假目标,形状像鱼雷。它发射模拟本艇的噪声或回波作为诱饵,使敌方的制导鱼雷错误地跟踪攻击,起到保护本艇的作用。

11. 固定式声纳监视系统。该系统也称岸用声纳站,其工作方式有主动式和被动式两种。换能器固定在大陆架海底(浅海工作)或大陆架边缘的海底上(深海工作),用电缆与岸上的电子设备连结。固定式声纳有两种,一种基阵为集中型,大基阵尺寸可达数十米以上;另一种是分布式,换能器可布设成栅栏状的线列阵形式。

12. 民用声纳。主要有测深仪、鱼群探测仪、测量海底地貌的地貌仪(也称测扫声纳),探测海底地层结构的地质剖面仪和用于导航的测量本舰相对大地的速度的多普勒导航声纳等等,随着海洋开发业的发展,民用声纳的品种将会越来越多。

在上述各种声纳中,水声换能器是它们的重要组成部分,水声换能器是在水中发射和接收声波的装置,也称声纳换能器,应用最广泛的是电声转换的水声换能器,(即把电信号转换为水中声信号的水声发射器)和把水中声信号转换为电信号的声波接收器,(即水听器)。水声换能器按其换能机理又分为可逆式和不可逆式两类,前者既可作发射器,也能作水听器,其形式有压电、电动、静电、磁致伸缩和电磁式等;后者有流体动力式、电火花、气枪、激光热致发声和爆炸声源等,在舰艇、鱼雷和其他水声武器中广泛应用的是压电和磁致伸缩式水声换能器。当给压电或磁致伸缩材料一定频率的交变电场或磁场时,就能引起这些材料在相同频率下的机械振动,于是与水接触的振动表面就把振动传给水,

从而引起向外辐射声波;或者,当材料受声波的作用而产生机械振动时,就会产生电压。压电换能器采用的压电材料有石英、酒石酸钾钠、磷酸二氢铵和硫酸锂等压电单晶体,常用的是锆钛酸铅、钛酸钡、钛酸铅等压电陶瓷。磁致伸缩换能器常用的磁致伸缩材料有纯镍、铝铁合金和镍钴铁氧体等,近年来,聚偏氟乙烯压电有机薄膜、由压电陶瓷和高分子聚合物构成的压电复合材料、稀土铁超磁致伸缩材料和玻璃陶瓷等新型换能材料,在水声换能器中的应用也日益普遍。

水声换能器的重要特性包括:频率特性,即发射器的发射电压(或电流)响应,水听器的自由场电压响应;方向特性,即换能器在频率或频带固定时,对不同方向声波的相对响应;电声转换效率和电阻抗等。由于水声换能器在水下工作,所以它必须是水密封,耐静水压,防腐,防海生物污染,还要考虑与水的声阻抗匹配等,为了提高声纳换能器的性能,通常用声障板来改善其方向性,用加有透声的导流罩减少水中运动所引起的湍流和空化的影响。

水声换能器的发展与海军技术的发展紧密相连。当前由于战略核武器和能发射远程弹道导弹的核潜艇的存在,使海上防卫的区域扩大到整个海洋,为适应对远程目标探测距离越来越远识别目标分辨率越来越高的要求,当前水声换能器的研制工作多集中在以下两个方面:一是开展对低频大功率水声换能器以及在深水条件下使用可靠性的研究;另一方面是寻找新的换能材料和建立新的换能原理。聚偏氟乙烯压电薄膜换能器,压电复合材料换能器,光纤水听器,磁流体换能器,稀土铁超磁致伸缩换能器以及低频小尺寸大功率水声换能器,小型宽带换能器阵等都是当前水声换能器发展中新的研究课题。

参考文献

- 1 汪德昭,尚尔昌.水声学.北京:科学出版社,1981
- 2 周福洪.水声换能器及基阵.北京:国防工业出版社,1984
- 3 William S. Burdic. Underwater Acoustic System Analysis, New Jersey: Prentice Hall, INC, 1984
- 4 栾桂冬,等.压电换能器和换能阵.北京:北京大学出版社,1990

(中科院声学研究所朱厚卿研究员撰)

光 学

光学向光子学的开拓 光学正经历着向光子学开拓的一个崭新时期。这是当今及今后一个时期光学发展的主流。它十分类似于 20 世纪上半世纪中电学向电子学的开拓,其科学与技术意义将十分地深远。

光学是一门较早发展的学科。它在科学与技术的发展史中占有重要的地位,在现在与将来仍然是和仍将是一个重要的科学技术领域。然而应当看到,在激光出现之前的一个较长时期内,光学的发展是比较缓慢的。相比之下,电子学的发展则是十分地迅速。它在技术上的进展则更是日新月异,令人瞩目。特别是,微电子与计算机的应用迅速地普及到自然科学的各个领域,甚至社会科学的各个部门,并进入千家万户,对当代信息社会的发展起着十分重大的推动作用。这是电学向电子学开拓的影响结果。当前,光学向光子学的开拓也将会产生类似的影响结果。

早先的光学主要是利用各种物质的宏观光学特性,如光的折射、反射、成像与照明等特性,而未去深究其微观的物理原因。然而,随着光学的发展,人们逐渐地转注于研究光子与物质(包括光子与光子,光子与电子)相互作用的微观特性,以及与这种微观特性相联系的光与激光的产生、传播和探测等过程;同时,也逐渐地注意研究光子承载信息的非凡能力,以及它在承载信息时的变换和处理等基础问题。光学的这一新开拓的方面是一个十分广泛的领域,我们可以用光子学来概括它。

对光子学的范畴可作两种理解:一是狭义上的理解,即对应于类似电子学的应用基础,它只涉及信息通过光子的承载、变换

和处理等基本问题,二是广义上的理解,除上述范畴外,还应包括光与物质相互作用的基本问题,以及光与激光的产生、传播和探测等基本问题,更涉及光子的本质与作用。我们倾向于后一种理解。基于这种理解,光子学显然应包括如下的一些光学分支:光谱学与激光光谱学、非线性光学、光化学、光生物学、量子光学、激光物理、光电子学、红外物理与信息光学等。

由上述关于光子学的内涵可知光子学并不是一个突然冒出的陌生领域。实际上它早已开始于20世纪初光谱学的出现,及稍后光电效应的发现。然而,1960年激光的出现,则急剧加速了光学向光子学的开拓。

自激光出现以来,在光子学的领域内不断地涌现出许多新鲜的事物,使人眼花缭乱。在这种迅猛发展的情况下,人们曾匆忙地用各种新的名词来描述新发展的方面,如量子电子学、光物理、激光物理、光电子学、光波电子学、非线性光学、量子光学等。但他们都或只反映较窄的个别方面,或描写不够确切,如量子电子学(指什么量子不清楚。既是光量子,何必又归之为电子学)等。使用光子学这一名词可以更确切更全面地概括上述光学中新发展的整个宽广领域。

光子学的发展,使光学学科迸发出新的青春活力;同时,也迅速地产生出许多十分有用的光子技术与光子工程。主要有:光谱分析与激光光谱技术、红外与多光谱遥感、激光测距与雷达、激光稳频与波长计准、激光计量与检测、机器视觉、激光器设计与制造工程、激光医学诊断与治疗、激光通讯、激光分离同位素、光纤传感、光诱导化学反应与气相沉积、激光全息、光记录与光盘技术、光学信息处理与光计算、激光材料加工与处理、激光育种与遗传变异等。上述光子技术与光子工程的发展,极大地推动了光子学自身的纵深发展与光学科学技术向各个科学技术领域的渗透,对现代科学技术的发展正在产生着重大的影响作用。

然而,自激光出现以来的30多年中,尽管光子学与光子技术有了相当大规模的发展,特别是光通讯已走上了大规模的工程实施与推广阶段,但对光子技术的大范围应用与普及来说,还存在不少的障碍与困难。这主要是因为激光器的激光转换效率低、功耗高、器件体积庞大(除半导体激光器外),各种非线性光学器件也大都需要在强光作用下运行。这就使得它们难以与微电子技术相适配,更难进入千家万户。为了进一步发展光子学与光子技术,有必要走与微电子技术相类似的发展道路,发展微小光子学器件与微技术,开辟通向微光子技术的各种途径。

回顾国际上光学发展的近况可以看到,大致从80年代初开始,一些科学先进国家的光学科学与技术工作者不断地调整研究方向,化大力气,致力于微光子技术的开拓工作。10多年来,他们在这一开拓中取得了显著的成效。他们的努力主要集中在如下的一些方面。(1)从发展半导体与半导体量子阱激光器入手,研究微腔辐射与微腔光子动力学,不断降低激光阈值(接近100 μ A),提高激光转换效率(~60%)与输出功率(~120W/条),扩展波段(向短波方向扩展至蓝、绿光,向中红外波段扩展至4~5 μ m),改善模式特性与压缩脉宽(~ps),推动激光器向小型、高效、全固化方向迈进;进而实现阵列化,集成化与微型化。(2)探索巨光学非线性(或称弱光学非线性)效应与材料,特别是低维与纳米材料中的光学非线性的增强效应,研制适合于弱光(mW级)下操作的超高速光开关、(空间)光调制器,相位共轭器,光学双稳器等新器件,推动光学信息处理与光计算技术的发展。(3)研究光纤与波导中的光孤子传输、光频转换、光子开关、波分复用技术、光振荡与光放大等非线性波导与激发现象,研究光纤中的光敏效应与光纤栅的制作,发展光子学集成器件,推动光通讯技术的进一步发展。(4)研究光致相变、磁光、光色、光折变、光子回波与光谱烧孔等效应,发展高密度光存储技术与器件。(5)探索凝聚态物质中的超快现象,研究超短光脉冲的非线性压缩方法,发展ps与fs超短光脉冲技术与激光器,发展超高速光探测器,光电子开关,以及它们的小型化。(6)研究高度平行处理与互联的理论,与光学实现的方法,仿效神经网络的功能,发展光学神经网络,光计算算法与结构。

除上述以外,微光子技术的重要支撑技术:(1)远紫外与软X射线的成像与超微光刻技术;(2)光学近场显微镜(或称光学隧道扫描显微镜)与共焦扫描显微镜技术也有了快速的突破性发展。这保证了微光子器件的顺利实现。

在80年代的10年中,上述技术的迅猛发展已使微光子技术初成体系;同时也丰富了光子学的内容。在此基础上,在90年代的又一个10年中,它将会更加加速地发展,并取得更大的成效。可以预期,它将会在如下方面有重大的突破:(1)从紫光至中红外波段的激光器将基本上完成小型、高效、全固化的换代(这十分类似于20世纪50年代电子管向晶体管的换代)。从而使激光技术的应用范围大大地扩大,并开始走向普及化。(2)光通讯将有效地解决超长距离通讯及进入家庭的有关技术措施(如中继放大、复分复用光通讯技术的实用化、孤子传输、光交换系统等),其使用将更为普遍。(3)(光盘、CCD探测器、三维光存储器,空间光调制器,光互联器,相位共轭器,光双稳器等将较普遍地应用于平行处理的超级计算机中;同时,一些专用的光学计算机将开始投入使用。这些应用将极大地提高计算机的运算速度,并扩大其智能功能。而光盘将较普遍地进入千家万户。(4)激光与光纤传感技术将较普遍地得到应用,特别广泛地应用于工业与医学领域。(5)以激光二极管加光纤组成的灵敏的光谱测量系统将走出僻静的实验室,广泛地进入平常的生产车间,野外与空间,成为极普通的现场测控工具。

总之,90年代将是第1代微光子技术日益趋向成熟的一个时期。当然,以后还会有它的第2代、第3代……的继续发展时期。顺便指出,原有的成像光学技术也正在向微光学技术的方向迈进。只有先进的微光学与微光子技术才能更好地与高度发展了的微电子技术相适配与相结合,从而有可能发展出更高水平的新一代信息技术。应当说,由于光学固有的高度平行处理的能力,高的载频能力,已获得最短的电磁脉冲(~fs),以及光子的传输速度远比电子的快等优点,光子技术必将在信息技术中占有重要的地位。可以预期,21世纪的信息技术将是微电子技术、微光子技术及其交叉的微光电子技术为它的基础技术支柱。它们在各自的发展中将相互渗透,相互结合,相互补充,相互促进,因而交相辉映。

发展光子学,微光子技术这是光学科学技术今后一个时期发展的主流,它的发展已充分地展示了光学的广阔的应用前景。从发展的战略上考虑,我们有必要加强对它的研究与紧密地跟踪,以更好地推进我国光学科学技术的发展。

(南开大学物理系张光寅教授撰)

自适应光学

大型光学系统,如天文望远镜、集光镜、中继镜、激光发射接收系统等,影响系统光学质量的误差源可分为低频和高频成分两大类。属低频成分的有:理论误差,设计及制造误差,结构及支架的维修误差,热畸变、重力形变及机械变形等,其带宽自直流到约0.1Hz;属高频成分的有:外界空气热影响、来自阵风的反射镜变形、跟踪误差、大气湍流及激光经大气时的热晕等,其带宽的范围由1Hz到 1×10^4 Hz,其中大气湍流带宽可高达1000Hz。如何克服以上误差是光学工作者不懈研究的课题。至20世纪中期,利用传统光学技术,系统一经制成,特性即已确定,无法校正低频干扰及实时校正各种动态干扰,以“被动”为特征。以大气湍流影响为例,自伽利略时代起,天文学家利用增大望远镜口径及采用更加灵敏的探测器的方法,使观察灵敏度提高了近 10^6 倍。但直到近期,由于无法克服大气湍流形成的波前动态扰动,即使用口径5~6m的望远镜在最好的站址,观星的角度分辨率为 $0.5''$ 左右,仅相当一台口径为10cm的望远镜的分辨率。1953年,Babcock首先提出校正波前动态误差的思想,实时测定畸变波前,经反馈,控制波前校正器。补偿畸变使系统达到理想状态,即让光学系统具有感知外界扰动,自动调整工作状态和参数,校正动态误差的自适应能力。以上思想,原则上为克服自直流至高频各种成分提出了崭新的思路,是光学科学中新出现的两个分支

学科:自适应光学和能动光学的基础。

自适应光学和能动光学这两个学科,通常以校正误差的通带区分:补偿带宽小于0.1Hz误差的系统称为能动光学系统;而补偿高频误差,特点别大扰动和热晕的系统为自适应光学系统。从实质上看,这两个学科的概念、理论和技术基本是相同的,界面难以区分。自适应光学奠基人之一的J. W. Hardy在1991年综述评论“Adaptive Optics—a Progress Review”中,已将能动光学和自适应光学合于自适应光学范畴讨论。R. K. Tyson在1991年出版的专著“Principles of Adaptive Optics”中更将自适应光学简洁地定义为“利用环境信息改进光学信号质量的科技领域”赋予该学科更广阔的内涵。从学科不宜划分太空出发,自适应光学和能动光学应该合一,而统一以自适应光学涵盖。自适应光学是一门新兴、交叉、高科技学科,与其关系最密切的相关学科有近代光学、应用光学、大气光学、信息科学、光电子学、电子学、微电子学、计算机科学、精密机械、自动控制、材料科学等,其系统与技术进展又多依赖于近代光学制造工艺与检测、光电探测器与技术、超高速数据处理、微驱动器件与技术等高新技术研究成果。

发展自适应光学的原动力主要来自天文学和军事需要。天文学家利用它克服大气扰动,提高望远镜的角分辨率,以求达到衍射极限,同时使点源像更集中,改善信噪比,提高探测灵敏度。军事上用快速精密跟踪、指向,建立高分辨率望远镜侦察识别目标。星球大战计划中利用自适应光学提高激光到达靶标的能量密度,是激光武器的关键技术。此外,用于天文、侦察、遥感、战略防御等各种用途的空间光学系统,为克服设计、制造及热、结构变形等误差也必须采用自适应光学。自1953年以来,自适应光学发展大致可分为3个阶段。(1)1953年至70年代中期为基础研究阶段,主要进行基础理论研究和系统预研。在此阶段,研究和开发了大气扰动理论、激光通过大气热晕模型,各种自适应光学系统理论模型、波面探测、重构和控制理论与技术等在预研方面广泛进行了计算机模拟设计,并研制成旋转光栅剪切波面传感器、硬件信号处理电路及多道变形镜等关键单元器件。由于在可见光区运用自适应光学实时校正大气扰动的技术要求很高,难度很大,例如,需几十至上千单元的多路平行校正,几百Hz的系统带宽, $\lambda/10$ 的波前校正精度以及对相当于6等星的探测,一次采样光子流密度小于1000光子/cm²·s等。因此,作为全系统研究发展较缓慢,没有可供实用的系统报导。(2)70年代中期至80年代末为发展阶段。以1976年1月A. Buffington等人在Lick和Leuschner天文台利用像锐化自适应光学系统首次完成星像的实时校正为标志,随着近代光学、光电子学、微电子学等的进展,自适应光学进入新的发展阶段。在理论、系统用单元技术研究方面均取得重大进展。具有代表性的有:提出激光导星,多层共轭校正,局部校正等理论。美国发展了多项激光束补偿计划:大气补偿实验ACE,短波长自适应光学技术SWAT,低功率激光大气补偿实验卫星LACE和激光中继镜实验卫星RME等。由美国、欧洲各国和中国等研究发展近20项大型自适应光学成像补偿系统,有些已取得重大进展;旋转光栅剪切波面及H-S波前传感器已趋成熟,分立表面及连续表面多道变形镜技术取得重大突破等。(3)90年代起,自适应光学步入成熟及推广应用阶段。1990年至1991年,自适应光学取得两项里程碑式的成就。在天文应用方面,欧洲各国的COME—ON计划利用3.6m望远镜在2.23 μ m处取得5等星像点半高宽0.18”的成绩。在军事方面,LACE卫星试验SWAT计划成功,达到60cm口径近衍射极限分辨率0.2”水平并成功地同时运用了合作信标和激光瑞利导星信标两种方式工作。上述成就标志着科学界已掌握自适应光学系统的理论、设计和制造技术,自适应光学已步入成熟及应用期。随国际局势剧变,美国军方对自适应光学的研究于1991年5月部分解密,其所得的高水平成果对自适应光学的研究是极大的推动。

80年代以来自适应光学在系统和单元技术的主要进展如下。

激光导星 1981年J. Feinlib在美国国防部的秘密报告中

首先提出利用激光通过大气散射产生激光导星的建议。瑞利导星产生于10km以下低高度处。1982年W. Happer在秘密的Jason报告中提出用389nm激光射至90~100km处大气散逸层的钠原子层产生共振散射形成激光钠导星的建议,由于钠共振散射截面很大,在相同高度,激光钠导星可比瑞利导星亮1000倍。由于人造的激光星可产生于天空任何位置,即可解决自适应光学系统缺乏足够参考星和导星,天空复盖率很低的难题。激光导星在军事上还可用作信标,在激光导星研究方面,美国国防部(DOD)的研究始终处于领先地位。1988年8月MIT林肯实验室Primmerman研究组利用夏威夷Haleakala山上60cm口径望远镜首先完成用瑞利导星校正星像的闭环实验。该组用512nm,5Hz重复率,2J/Pulse的染料激光器,在8km以下高度产生瑞利导星,利用有241个作动器的变形镜在可见光区完成对一等星Procyon的闭环校正,所获星像基本达到衍射极限,校正后星像的峰值强度比未校正高10倍。1989年2月菲利浦实验室的Fugate研究组完成了类似实验,利用钼蒸汽激光器在10km高度产生瑞利导星,在800nm近红外区完成对单星和双星的闭环校正。1984年12月Primmerman研究组在白沙基地首先完成产生钠激光导星的试验,在大气钠原子散逸层产生直径1m的光斑。由于缺乏适用的激光器,科学界至今未完成钠星闭环校正实验。为克服聚焦非等晕误差及配合多共轭自适应光学研究,必须研究激光导星技术。1990年10月Primmerman研究组利用两个染料激光器多产生两个相隔30cm的远的瑞利导星,并在原理实验中证实了可利用多导星信息合成获得总波前。

激光补偿自适应光学系统 为研究激光束自动诊断、净化、高精度捕获、跟踪、瞄准及激光经大气传播的校正,美国自80年代以来开展多项激光补偿自适应光学系统研究。著名的短波长自适应光学试验SWAT站,1988年8月首次完成用瑞利导星进行大气湍流校正的试验。1990年2月14日美国发射了用于激光武器的LACE和RME卫星,其实验情况为:对LACE,当卫星由Maui岛上空飞过,首先向卫星发射一束激光,测量大气扰动引起的光束畸变,然后再向卫星的探测器阵列发射一束测试数据用于改进激光束经补偿的激光束聚在靶标上的能量密度,改进地基激光武器。1991年利用LACE进行的SWAT试验60cm口径、0.2”的衍射分辨率。并首次试验了卫星上后向反射合作信标和瑞利激光星两种信标方式。对RME,主要是验证激光束精密跟踪和指向,当RME飞过Maui岛时,首先由岛上两部448nm和514.5nm低功率氩激光器照射RME,使中继镜准确地把它反射回设在岛上的靶标上。RME实验首次于1990年6月25日完成,在RME实验中激光束精确返回靶标,精度优于0.2”。RME的指向和跟踪精度比以前在飞机或卫星中进行的类似实验高两个数量级,证实了空间中继镜中继地基激光的可行性,亦增加了SDI(II)制造定向能战略武器的信心。另一项波前控制实验WCE是Kaman Aerospace公司预定为Star Lab计划的激光束校正系统。其目的是演示空间捕获、跟踪瞄准平台ATP。实验采用自适应光学校正接收波前以改善成像、跟踪性能,发射模拟高能激光束,并用自适应光学改善目标辐照。

自适应成像补偿系统 80年代以来,全世界已完成和在建的大型自适应成像补偿系统近20个,其中仅美国、欧洲和中国完成了实时校正大气湍流星体成像。由欧洲各国共同完成的COME—ON自适应光学系统为自适应成像补偿系统发展的里程碑。由于自适应光学用于近红外较可见区有很大优越性;校正单元少、通带窄、等晕角大,导星天空复盖率高等,故该系统采用首先突破近红外波段的思想,为第一台采用可见光探测近红外校正双色系统的自适应望远镜。1989年10月和11月COME—ON用Haute省天文台的1.52m望远镜,获得5等星2.2 μ m处的衍射极限像。1990年4月利用COME—ON的改进型,在ESO La Silla Chile 3.6m望远镜上获得近红外不同波段的校正像,其中在2.23 μ m,K波段处获得星像FWHM 0.18”,相对未校正时信噪比增益12的最好结果。1991年4月24日又在K波段获得

BU411 双星的校正像, 双星距为 $1.3''$, FWHM 改进为 $0.14''$ 。近期, G. Gebring 等利用此系统还获得 Southern Star Carina 猛烈爆炸喷射气体、尘埃的多光谱图 ($2\mu\text{m}$, $4\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$), 图中显示出复杂的喷射图像。COME—ON 突出的天文学成果令人信服地证实了自适应光学的应用潜力。特别是, 这些成果的取得用少量作动器 (19 个) 仅约 10Hz 的带宽和 0.03 的光学透过率取得的, 这就证明了利用较简单、价廉、市售的器件和技术即可构成成功的自适应光学系统。

补偿低带宽误差的大型光学系统 补偿带宽小于 0.1Hz 的光学误差的系统是下一代地基望远镜和空间光学系统的关键。已制成直径 3.5m 的蜂窝轻质反射镜, 在轻质反射镜上再加上能对面形控制, 可抑制低频面形误差。ITEK 为美国空军制造 LAMP 系统, 应用 7 块分镜构成口径 4m、 $f/1.25$ 的抛物镜面, 使用材料为 ULE, 每块分镜面由许多机电驱动器推动, 全系统有 312 个控制通道, 各块间由白光干涉仪控制同相。LAMP 系统预定与 Alpha 化学激光器连接, 进行天基激光武器试验。ESO 的 3.6m 新技术望远镜 (NTT) 采用 75 个电驱动器控制能动薄镜面, 主、次镜均为能动控制, 面形可控制在 $(\lambda/20)\text{rms}$ 范围。NTT 的经验并用于 ESO 超大规模望远镜计划 (VLT) 中, 该计划为当代最大的光学干涉仪计划, 单镜为 8.2m 能动薄镜, 4 台这样的自适应望远镜相干构成基线长 120m, 相当有效口径 16m 的干涉仪, 理论角分辨率约 2.1ms, 超过现今最高水平约两个量级。在天基光学系统中, 2.4m Hubble 空间望远镜主镜即为用自适应光学的能动镜。JPL 正为 NASA 发展口径大于 Hubble 的大型可展开反射镜计划, 此计划采用能动控制的多元精密分块镜。

Hartmann—Shack 波前传感器的研究已趋成熟 F·Rod-dier 提出的曲率传感器, 测量波面局部曲率, 可不经任何中间运算直接控制双压电变形镜或薄膜变形镜, 提供了一种适于校正低阶模的简洁、经济的部分校正方案。夏威夷大学研制应用曲率传感器的自适应光学系统已于 1991 年在实验室校正人造卫星源成功。

光电探测器件与技术 广泛采用了像增强器 CCD—ICCD, 电子轰击背照 CCD—EBSCCD 及红外阵列探测器等尖端的光电器件技术以及光子计数技术。像元 64×64 , 帧频 5 000Hz, 700nm 处量子效率为 60%, 电子读出噪声 $50e^-$ 的硅 CCD 阵列已有商品出售, 128×128 元, 帧频 40 000Hz 的器件亦已问世。

数据处理 自适应光学要求极高的数据处理速率。如对 100 个通道、带宽 100Hz 的系统, 计算速率要求为每秒 1 000 万次乘加。现主要采用并行数字化乘加器实现, 随计算机软硬件技术的发展, 数据率超过每秒 200Mbyte, 每秒可作 1.6×10^8 定点运算的实时处理器已有市售。

波面校正器 TTL 公司制成 512 个单元的分立表面多道变形镜, 该镜成功地用于口径 1m, 校正 $0.35\mu\text{m}$ 紫外激光的自适应望远镜。该公司还发展了模块制造技术, 已具有制造 9 000 单元镜的能力。Itek 公司利用新型材料 PMN, 发展了低电压电致伸缩变形镜 LVEM, 作动器数 241 个, 校正 $\pm 2.5\mu\text{m}$, 宽 1 000Hz, 所施电压仅 ± 75 , 已成功地用于多种激光补偿自适应系统, 为当代领先的变形镜技术。模块化、集成化、微型化是发展变形镜技术的主要方向。Arcetri 天文台发展液晶波面校正器是值得注意的动向, 如能突破普通液晶响应慢的缺点, 可望在自适应光学系统中获得广泛应用。

我国自适应光学研究始于 70 年代末, 多年来在系统和单元技术研究方面已取得重大进展。(1) 动态波前误差实时校正系统。该系统用动态剪切干涉作波面探测, 21 单元变形反射镜为校正元件。1985 年实现室内模拟目标闭环, 1987 年与 $\Phi 250\text{mm}$ 望远镜对接实现室外水平光路大气湍流补偿, 1990 年 9 月利用光子计数技术进行波前探测, 在云南天文台首次实现天体目标的全程大气实时校正, 使中国成为继美国, 欧洲多国 COME—ON 计划后在世界上第 3 个实现此目标的国家, 研究水平达到世界先进行列。(2) 高频振动法波前校正系统, 用远场能量集中度为指标, 高

频振动爬山法进行自动寻优控制, 19 单元变形镜实现波前校正。此系统用于上海光机所 LF12 大功率激光装置, 使静态焦斑能量集中度提高 3 倍。(3) 研制成多元整体压电变形镜, 37 单元变形反射镜、高速倾斜镜等关键器件, 开发多种压电微位移驱动系统及精密平移器。

自适应光学正步入成熟期, 当今世界上发达国家在研究或计划各种用途的空间光学系统及地基大型光学系统时均把采用自适应光学作为提高系统特性最重要的措施。为发展我国的空间科学、天文学及提高战略防御能力, 应巩固和发展我国在自适应光学研究方面已取得的成果和地位, 并赶超世界先进水平。

自 20 世纪末至 21 世纪初, 自适应光学的应用领域将大大扩展。由主要为军事和天文大型计划服务扩展到各个门类的光学仪器。可利用自适应光学改进各种激光系统、干涉仪、光谱仪、光盘机、成像及投影系统等。可以预见, 采用系统优化概念并考虑到单元器件进入集成化、模块化生产。用简单价廉的自适应光学系统即可改进光学系统性能的理想将成现实。采用自适应光学将成为一切光学仪器自动化、智能化的重要标志。与此同时, 生产和销售自适应光学单元器件和技术, 如阵列透镜、波前传感与光电探测器集成单元、数据处理器、变形镜或其它位相校正器, 乃至全系统的有关结构将逐渐形成。为迎接上述挑战, 建议: 加强对自适应光学的学术和科普宣传, 使之成为学术与工程界广泛了解; 由各种计划和资金渠道扶植自适应光学的一般应用和广泛研究, 以拓宽其应用领域; 选择研制已有基础, 应用面广的单元器件和技术 (如微驱动器) 为生产试点, 发展新型产业结构。

(北京理工大学博士生导师俞信撰)

薄膜光学 是近代光学的一个分支, 研究光学薄膜的特性和设计, 光学薄膜的淀积技术以及它对薄膜生长、微结构和薄膜光学特性影响, 薄膜光学常数及基本特性的测试等。是利用光波在薄膜系统中的传播特性, 以改变表面的光谱反射、透射特性, 或反射、透射光束的偏振状态及相位变化。

光学薄膜的设计, 在 20 世纪在 60 年代末、70 年代初曾是非常活跃引人注目的课题, 现在已成为常规应用技术。自 70 年代以来, 研究和发工作更面向实际薄膜的制备和工程技术问题, 使各类光学薄膜的性能有了显著提高。在过去 20 年中, 取得的最大进展是人们在基础水平上对薄膜的特性、薄膜的成核、生长和微结构有了更深入的认识和理解; 且薄膜被认为是各向同性的、均匀的平行平面薄膜。实际薄膜或多或少地偏离于这种理想模型, 使薄膜的所有特性都不及同样成分的块状材料。薄膜在大气环境中, 随着潮气的吸附, 它的光学的、机械的性能都要变坏, 薄膜的光谱特性向长波方向的漂移则众所周知。所有这些都和 Pearson 揭示的薄膜微结构有直接联系, 即只要基板温度低于蒸发物溶点的 0.45 倍, 热蒸发的光学薄膜都具有显著的柱状结构, 所有柱体的外表面形成了比薄膜外表面大得多的内表面, 而柱体之间留下了大小从数埃到数百埃的形似毛细孔的空隙。表征薄膜紧密程度的一个重要量是聚集密度, 它被定义为实心柱体的体积与整个薄膜体积 (柱体 + 空隙) 的比值。实测的光学薄膜的聚集密度大约从 0.7 到接近于 1。即使是聚集密度为 0.9 的薄膜, 它仍然有 10% 的体积是空隙, 它的折射率因薄膜的折射率随着环境的变化而变化。只要环境是不加控制的, 那么 10% 体积的薄膜性质是无法控制的。

薄膜的这种特殊的柱状生长被认为是由于达到基片表面的蒸汽分子或原子的有限迁移率和已经淀积的原子或分子对后继蒸发分子的阴影所造成的。基于这一模型所作的薄膜生长过程的计算机模拟也显示了柱状结构的特征。

薄膜的特殊构造所带来的潮气吸附是光学薄膜技术中的一个主要问题。潮气吸附是使薄膜光、机特性变坏和不稳定的主要原因, 至今它还没有完全解决。但在过去的 10 年中所进行的电场辅助、离子辅助和低压反应离子镀膜技术的研究, 对解决这一问题是有帮助的。

电场辅助对 ZnS/Na_3AlF_6 滤光片的稳定性有重要贡献,采用 3 400V、50Hz 和 -2 400V 的 AC、DC 电场,可使滤光片吸潮后的光谱漂移接近于零,其机理主要归结为膜层结构和化学计量的改善,但电场辅助对氧化物膜几乎无作用,而离子辅助(IAD)和低压反应离子镀(PIPD)对改善氧化物性能有很大贡献。

光学薄膜技术仍将面临很大的挑战。一方面和激光陀螺、激光聚变及激光武器等有关的激光研究,课题对光学薄膜提出了苛刻的要求。例如大功率的钎玻璃激光聚变系统,在波长 $1.06\mu\text{m}$ 处 1ns 的脉冲能释放 200~300kJ 的能量,并进而转换成二倍频和三倍频波长即 $0.53\mu\text{m}$ 和 $0.35\mu\text{m}$ 。激光系统对光学薄膜的要求可以归纳为以下 3 点:(1)正确的光谱特性 例如对 KDP 晶体和聚焦透镜的减反射膜要求 3 个波长上的反射率小于 0.5%,而高反射膜的反射率均大于 99%。对三向色镜,则要求在 $1.06\mu\text{m}$ 处有 97% 的反射率,在 $0.53\mu\text{m}$ 和 $0.35\mu\text{m}$ 处有 50% 的反射率。(2)具有高的稳定性 用于激光聚变的光学薄膜必须承受严酷的环境,特别是高温和灰尘。(3)最重要的是抗激光破坏的性能 由于薄膜元件的激光破坏阈值远比同样材料的块料低,影响了激光系统的性能和效率。要使激光系统在接近于甚至优于块状材料的预期极限下运转,这是超出了当前光学薄膜技术的发展水平的。就高能激光应用来说,现今的光学薄膜中的吸收是太大了;薄膜的折射率也难以重复和控制,薄膜的应力水平也太高;与基片的附着力或薄膜与薄膜的附着力有时也不够理想。由于这种种原因,光学薄膜往往在远低于本征阈值的功率水平下就破坏了。迄今,通过保护层、选择合适的材料和改进设计等措施,虽然损伤阈值有了可观的提高,但还远不能满足高能激光系统的要求。看来必须在基础水平上对薄膜的物、化特性作系统的研究,改善薄膜的制造工艺,才能提高薄膜的性能。另一方面是适用于大面积、大批量生产的光学薄膜的发展。如近年来发展起来的建筑物窗口玻璃上的阳光控制薄膜和热反射镜。由于它不仅可大大降低能源的耗费,而且可实现现代建筑的美学要求,因此受到建筑行业的关注。这种光学薄膜要求层数不多,但必须成本低,能耐恶劣的使用环境,适宜于大面积大批量生产。这不仅需要在设备上更新,而且还须借助于新颖的膜系设计、薄膜材料和制备工艺。目前制造这种薄膜主要有两种方法:(1)镀在聚合薄膜等软基底上,采用滚筒式磁控溅射设备;(2)直接镀在 $1\text{m} \times 2\text{m}$ 或 $2\text{m} \times 3\text{m}$ 的玻璃上,采用连续或半连续式磁控溅射技术。

上述两个方面的制备技术和装备是相当不同的,但两者都须在薄膜材料方面开展基础和应用的研究,以更好地理解薄膜的结构、光学特性以及制备工艺同结构和光学特性的关系。可以预料这将导致光学薄膜性能的全面提高。

为了提高薄膜性能,薄膜特性检测是不可缺少的。这些测试,包括光学特性、机械特性、化学特性和光学常数及膜层厚度的测量。在这方面的研究,目前仍是薄弱环节,有待于坚持不懈的努力。

参考文献

- 1 Pearson J M. Thin Solid Films, 1970, 6: 349~358
- 2 Gu P F. Electric field-assisted deposition of optical coatings, 1988, 156: 153~160
- 3 Gu P F, Chen Y M, et al. Applied Optics, 1989, 28: 3318~3322
- 4 Guenther K H, et al. Proc SPIE, 1989: 1019

(浙江大学博士生导师顾培夫撰)

光学与光电子学计量 the measurements of optics and optoelectronic 是研究紫外、可见和红外波段(10nm~1mm)光辐射测量、光信息测量和光与物质相互作用特性测量的科学技术领域,是近代高科技的重要组成部分,已广泛地应用于光纤通信、光纤传感、光计算机、激光加工、激光印刷、激光存贮、激光分离同位素、燃烧的光谱诊断、资源的遥感、遥测、环境保护、激光医学、激光核聚变、激光武器等科学技术和生产领域。

1729 年布盖(Bouguer)发明了比较天体亮度的光度计,1760 年朗伯(Lambert)提出了单色光通过均匀物质时的吸收定律,他发现:一个亮度在各个方向上都相等的发光面,在某一个方向上的发光强度等于这个面垂直方向上的发光强度 I_0 乘以方向角余弦,称为朗伯定律。之后,各种目视光度计相继问世。当时,使用“烛光”为标准光源,测定蜡烛在水平方向上的发光强度,后来相继采用菜油灯、成烧灯、纯乙酸成酯灯(亥夫纳, Hefner 灯)。1881 年国际电灯技术委员会把烛光规定为光度的国际性单位,规定将 1 磅鲸鱼油脂制成 6 支蜡烛,以每小时 120 格令的速度燃烧时,在水平方向上的发光强度为 1 烛光。19 世纪末 20 世纪初热辐射基本定理:基尔霍夫定律、斯忒藩-波耳兹曼定律、维恩定律、普朗克辐射定律的建立,为辐射量度和光度学奠定了理论基础。之后,黑体空腔理论的研究,指导了设计和研制空腔黑体,建立了高温、中温、低温空腔黑体作为辐射标准。在光度基准方面,1909 年英、法、美三国协议,采用由成烧灯导出并用一组炭丝白炽灯保持的“国际烛光”,白炽灯的稳定性较好,但复现性较差,几乎无法制出两只发光强度一样的白炽灯。1937 年国际计量大会决定使用铂金凝固温度下的全辐射体为光度基准,使用“新烛光”单位,并定义:全辐射体在凝固温度下的亮度为 60 新烛光每平方厘米。1 新烛光等于 $1/1,000$ 国际烛光。1948 年第 9 届国际计量大会通过用拉丁名称坎德拉(Candela)取代新烛光。1967 年第 13 届国际计量大会决定将(坎德拉)₁₉₄₈ 定义改为:(坎德拉)₁₉₆₇ 是在 $101325\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 压力下处于铂凝固温度的黑体的 $1/600000\text{m}^2$ 表面在垂直方向上的发光强度。由发光强度可以导出光通量、光量、亮度、光出射度、照度、曝光量等一系列光度量标准。辐射度量的基准和标准将已知温度的黑体作为基准,从 1 200K 到 3 000K 的黑体大都用大电流加热石墨管或圆柱体作黑体,大约一小时内精度和稳定性优于 1%。从 200K 到 1 200K 都是用电热丝加热各种金属腔作黑体,精度大约 100h 内为 1%。虽然用于光度的白金点黑体长期稳定性优于 0.01%,但低熔点的黑体可提供非常稳定的辐射。金点(1 337K)黑体长期稳定性优于 0.1%。镉点(505K)、铟点(692K)和金点黑体一样好。对于温度高于 1 200K,通常用钨带灯或钨钨灯与黑体进行比较后作为传递标准。除此之外,还可用标准接收器作为辐射度标准或基准,其中以电校准绝对接收器最为成熟。此外,美国国家标准局(NBS)70 年代还研制了热释电型的绝对辐射计,1980 年由盖斯特(Guist)等人研制成功已确定量子效率的自校准硅光电二极管。英国国家物理实验室(NPL)研制的氦冷却小型绝对辐射计,用它来确定的斯忒藩-波耳兹曼常数与计算值在 10^{-4} 以内一致,它与 NBS 的自校准硅光电二极管进行对比,一致性达到 $\pm 0.2\%$ 。近年来,很多国家把已建立的同步辐射加速器作为辐射标准。在紫外辐射标准方面,美国 NBS 研制了壁稳氩弧作基准,用氩灯和小氩弧作为传递标准。

光源的辐射强度是一个客观的量,它是光源在给定方向的单位立体角上发出的辐射功率(辐射通量)。但是光源的发光强度是一个带主观因素的量,它除了与光源的辐射强度有关外,还与人的视觉有关。根据对一定数量的正常人眼相对光谱灵敏度度的计量和统计,国际照明委员会先后规定了国际平均眼明(白昼)视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 和暗(黄昏)视觉光谱光效率函数 $V'(\lambda)$,发光强度 I_v 、光谱辐射强度 $I_{e,\lambda}$ 之间的关系可用下式表示:

$$I_v = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} K(\lambda) I_{e,\lambda} d\lambda$$

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda)$$

这里, $K(\lambda)$ 是光谱光视效率的转换因子, K_m 是波长为 555nm 时的 $K(\lambda)$ 值。根据一些国家的测量和计算,1977 年国际计量委员会规定 K_m 值为 $683\text{lm} \cdot \text{w}^{-1}$ 。对于暗视觉发光量的系统,这个值的变化只有 3%,因此保证了令人满意的连续性。1979 年第 16 届国际计量大会决定废除(坎德拉)₁₉₆₇ 定义,采用(坎德拉)₁₉₇₉ 新定义,坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $1/683\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}$ 。定义中, $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 辐射波长约为 555nm,它是

人眼感觉最灵敏的波长。

光度、辐射度新基准的建立及确定其量值传递系统,保证光度、辐射度量的准确、一致、可靠;发展光度、辐射度量的测量方法与技术;研究用于光度、辐射度测量的光电、热电探测元、器件,发展智能化光度、辐射度测量系统等,是近代研究热点。1990年,国际新标准 ISO/DIS, 31-6, 1990《光及有关电磁辐射的量和单位》中新规定了光子数、光子通量、光子强度、光子亮度、光子出射度、光子照度、光子量等一系列光子度量来描述光子强度的空间分布和传播特性。根据光辐射量子理论可以确定描述微观物理的光子量和辐射度量之间对应关系,通过普朗克常数将两者联系在一起。由于近代光电子科技的发展,促进了光电子工业的兴起以及光子时代的出现,因此光子度量学是近代研究的一个新领域。

1665年胡克(Hooke)发现了薄膜所产生的彩色现象。但是,只是当牛顿于1666年发现日光可以用三棱镜分解成各种颜色,并且确定每一种纯颜色各由一个折射率来标志的时候,才对颜色的基本性质搞清楚。1801年,扬(Yong)提出红、绿、蓝3种色光按一定比例可以混合成日光。1860年,赫姆霍兹(Helmoltz)完善了扬的理论,发展成为较完整的三色学说。1878年,赫林(Helming)提出了一种四色对抗学说,他认为在视网膜中有三对感光视素,一对是红/绿视素,对红光和绿光响应;一对是黄/蓝视素,对黄光和蓝光响应;还有一对白/黑视素,只要有光就响应。在三色混合实验中发现,任何一种颜色均可用3种原色红(R)、绿(G)、蓝(B)的匹配而成。1929年,莱特(Wright)用目视三色光度计进行颜色匹配,所选用的三基色为红(650nm)、绿(530nm)、蓝(460nm),但是在匹配460~530nm光谱色和650nm时三色系数要出现负值。1931年吉尔德(Grnd)用色温为2900K的白炽灯通过一定带宽的红(630nm)、绿(540nm)、蓝(460nm)三原色相加匹配得到的日光(色温为4800K),三色系数是等量的。为了统一色度计量,1931年国际照明委员会(CIE)在莱德和吉尔德工作基础上,用红(700nm)、绿(546.1nm)、蓝(435.8nm)的三基色和等能量日光(E)光源为标准,建立了视角小于2°的CIE1931XYZ系统,为了在色度图上能以均匀距离来表示颜色的表色系统,用X、Y、Z3个数值表示一种颜色,称为三刺激值。此系统仅适用于2°视场的中央视觉的观察条件,为了适应大场视的观察条件,1964年CIE规定了10°大视场的CIE1964补充标准色度观察者三刺激值和相应的色度图,称为CIE1964补充标准色度学系统。由于CIE(x, y)色度图在表示颜色差别方面不够理想,空间上的距离变化不完全代表视觉上的相等差别。1960年CIE根据麦克亚当(MacAdam)的工作制定了“均匀色度标尺图”,也称CIE1960UCS图。在颜色测量时,若对颜色测量的准确度要求不太高,可以用系统的颜色图谱的色标进行目视比色,国际上常用的有孟塞尔(Munsell)表色系,它以色调(H)、明度(V)和彩度(C)为基础系统地排列的色卡。1931年美国最早出版了《孟塞尔颜色图谱》,以后在1939年和1943年分别经美国国家标准局和美国光学学会修订出版了《孟塞尔颜色图册》,这本图册的新版包括两套样品,一套为无光泽样品,1973年出版的样品数有1150块颜色样品,32块由白到黑的中性色样品。另一套为有光泽样品,1974年出版的样品数有1450块颜色样品和37块由白到黑的中性色样品。

1800年英国赫舍尔(Herschel)用灵敏的温度计研究太阳的热分布时,发现在可见区太阳光谱的红端有很强的热辐射。1843年梅伦尼(Melloni)对热辐射的反射、折射、吸收等实验证实了红外线的存在。1801年瑞脱尔(Writher)发现可见区太阳光谱的紫端有很强的感光作用,从实验上发现了紫外线。1814年,夫琅和费(Fraunhofer)发明了用准直光管、三棱镜、望远镜组成的分光镜,它用分光镜测量了太阳光谱中的暗线,并初步确认了约700条太阳光谱中的暗线,1822年,他用透射光栅精确地测定了钠的谱线。1859年,基尔霍夫(Kirchhoff)和本生(Bunsen)检验了一批纯金属元素的火焰光谱和火花光谱,编制了很完整的太阳光谱图和许多金属元素光谱图。1868年,埃斯屈朗(Angstrom)在对太阳

光谱作了大量研究后,给出了近千条太阳光谱线表,并精确地确定了绝对波长。1893年,迈克耳逊(Michelson)采用干涉法,以巴黎的标准米尺对镉(Cd)元素的3条谱线波长进行了测量。1900年,法卜利-珀罗(Fabry-Perot)用多光束干涉法精确地测量了波长。1906年,迈克耳逊精确地对镉红线进行了绝对测量,得到

$$\lambda_{Cd} = 643.8469 \text{ nm}$$

1927年,国际协议决定将这条谱线作为光谱长度标准。在实际使用中,由于同位素的超精细结构和多普勒增宽的影响,使复现性受到限制。1960年,第11届国际计量大会提出用⁸⁶Kr灯发射的606nm的橙黄色光谱线作为波长标准,建立了米定义:米的长度等于⁸⁶Kr原子的2P_{1/2}和2d_{5/2}能级间跃迁所对应的辐射在真空中波长的1650763.75倍。国际计量委员会还规定了氪灯的工作条件,氪灯线的真空波长为:

$$\lambda_{Kr} = 605.780210_3 \text{ nm}$$

在光谱测量中将谱线直接与⁸⁶Kr波长标准进行对比是很不方便的,因此国际上又规定了铁谱线和惰性气体的谱线作为次级标准。由于激光技术的发展,1982年已经能精确地测定光在真空中的速度,光速是一个不变量,1983年10月第17届国际计量大会通过了新的米定义:米是光在真空中于1/299792458秒时间间隔所经路径的长度。根据国际计量委员会的推荐,米的实现方法有时间法、频率法和辐射波长法3种,它们都是建立在真空中光速C为确定值的基础上,即 $C = 299792458 \text{ m/s}$,1983年国际计量委员会推荐了5种激光辐射波长和两种同位素单色光辐射的真空波长和频率值,用它们中的任一条光谱线均可实现米。

在19世纪波动光学、干涉和衍射理论的发展基础上,20世纪中下叶,光学材料、光学零部件、光学仪器与光学系统性能的测试方法与技术日趋成熟,光学玻璃、光学晶体、光学塑料和光学薄膜的光学测量和检测标准,光学胶片的密度、速度、反差、鉴别率极限及调制传递函数、光学传递函数、线扩散函数和点扩散函数的测量;光学镜头、光学分划板、光学棱镜、光栅、光学滤光片、偏振器件、法卜利——珀罗干涉具、光学空间滤波器和光学码等光学零部件的光学测量和检测标准;成像透镜的曲率半径、焦距、屈光度及望远系统、显微镜、投影系统和照相系统的象差、畸变、鉴别率极限、调制传递函数、光学传递函数、线扩散函数和点扩散函数的测量。

19世纪末赫克发现了光电效应,20世纪初普朗克的量子理论、爱因斯坦(Einstein)的光子假说,建立了光的量子理论,光电效应开始应用。50年代,半导体材料物理的研究,进而对内光电效应(光电导、光生伏特)、热电效应进行深入研究。60年代各种热电、光电探测元、器件迅速发展起来,相应地发展了热电、光电材料及热电、光电探测元件及成像器件和光电子系统性能的测试方法与技术的研究;热电材料、热敏电材料、新型外光电材料和内光电材料光电参数的测量;辐射热电偶、热敏电阻、热敏电等光探测器光电特性的测量;光电管、光电倍增管、光电电阻(光导管)、光电池、光电二极管等光电探测器特性的测量;光电摄像器件以及近年来发展起来的电荷耦合器件(CCD)的光谱灵敏度、像元分辨率等器件参数的测量;80年代以来,光电子成像系统、光电子跟踪系统、光电子对抗系统、光电子图像处理系统、光电子信息传输和处理系统、光电子机械视觉系统等性能的测试方法与技术的研究迅速发展。

20世纪50年代发光材料有了较快的发展,70年代发光器件、显示器件和大屏幕显示系统相继发展起来,相应地发展了发光材料、发光器件、显示器件和大屏幕显示系统的测试方法与技术的研究;固体、气体、液体和等离子体发光材料的发光强度、光谱、显色特性、偏振特性、发光持续时间和发光效率的测量;发光器件、显示器件和大屏幕显示系统的发光强度、发光持续时间、发光效率和显示系统的对比度和分辨率的测量。

1960年世界上出现第1台激光器,到现在,激光器已广泛地应用于各个领域,相应地发展了激光材料、激光器件和激光仪器与系统性能测试方法与技术的研究;固体、气体、液体和等离子体

激光材料的能源、光谱、跃迁几率、寿命、增益系数等参数的测量;激光器、可调谐激光器输出光谱范围、激光功率和能量测量、脉冲激光波形、平均功率、瞬时功率、峰值功率的测量,激光波长测量,线宽测量和激光束轮廓测量,相应地建立了标准和量值传递系统;激光加工、检测、激光印刷、激光医疗仪器、激光信息系统、激光同位素分离系统及激光武器系统性能的测试方法与技术的研究。

激光器的出现,激光与物质相互作用的研究,发展了非线性光学理论,同时各种非线性光学材料和非线性光学器件快速发展起来,相应地发展了非线性光学材料、光学偏转、调制、变频和偏振器件性能的测试方法与技术的研究;固体、气体、液体和等离子体非线性光学材料光性及非线性光学系数、极化率的测量;利用非线性声光、电光、磁光等效应的光学偏转器件、调制器件、开关器件、存贮器件和偏振器件性能的测量;非线性倍频、多次谐波器件和非线性混频和变频器件性能的测试方法与技术研究。

1966年,高琨预言了光纤能成为优良的光通信传输介质,到1970年已经制造了低损耗的光纤,随之各种光纤通信系统迅速发展起来,带动了光纤材料和光纤元器件的发展。80年代光纤通信系统已经在世界上得到了广泛地应用,光纤通信系统也从短波段发展为长波段光纤通信系统。近年来,光纤激光器、光纤放大器也迅速地得到应用,相应地发展了光纤材料、光纤元器件、连接器、耦合器等光纤通信系统性能测试方法与技术研究。与此同时,70年代兴起了光纤传感器的研究,也相应地发展了光纤传感系统及特种光纤和光纤传感器性能测试方法与技术研究。

1978年,加波提出了全息光学的理论。近20年来,图像的特征识别、图像的处理技术,发展了全息光学计量。与全息光学发展的同时,光学信息的存贮、运算和处理等技术及相应的各种元、器件也日趋成熟,光电混合计算机系统和光计算机系统研究迅速开展起来,相应地发展了光信息存贮、运算、处理等元、器件和光计算机系统部件性能的测试方法与技术研究。

光学和光电子学计量今后的研究热点为:(1)光纤通信系统、光纤传感系统及相应地元器件性能的计量测试;(2)光信息处理系统、光计算机系统及相应元器件性能的计量测试;(3)激光光谱辐射标准和新的激光波长标准研究;(4)新型非线性光学偏转器件、调制器件、开关器件和偏振器件性能的计量测试;(5)机器人视觉、图像识别与理解系统、光电机械视觉系统及光学神经网络系统的研究;(6)激光光谱测量方法与技术和遥感光谱测量。

参考文献

- 1 刘少珏,国外光学计量的发展与状况,国家计量局情报研究所,1985
- 2 中国计量测试学会,中国计量科学技术的现状与展望,1989
- 3 鲁绍曾主编,现代计量学概论,北京:中国计量出版社,1987
- 4 李家华编译,美国国家标准局(NBS)长运规划,国家计量局情报研究所,1987

(中国计量学院张在宣教授撰)

毫米波、亚毫米波准光学 millimeter wave and sub-

millimeter wave quasi-optics 准光学介于几何光学和波动光学之间。研究毫米波和亚毫米波的传播、折射和反射等几何光学过程时,必须同时考虑到波动的固有特性,即波的绕射现象。采用“类似”光学的原理、方法和结构来解决毫米波、亚毫米波技术中电动力学系统所遇到的困难,提出了适合于从微波向光波过渡的毫米波、亚毫米波段的特征结构,即开放型结构——准光开放腔(准光腔)、开放波导和绕射光栅。既克服了按微波缩尺模拟法设计而造成的工作空间尺寸过小、Q值低和本征谱密集困难,又能避免因按光学原理设计而造成的工作空间尺寸过大的缺点。为了使高频电磁振荡或电磁波约束在开放结构的局部空间中,可用下列3类物理现象来实现:(1)利用边界或类似的不均匀性来约束;(2)形成焦散面(Caustic Surface)来约束;(3)利用不同介质的分界面或复杂的分层结构约束。而准光腔能使高频电磁振荡

限制在给定的空间;用开放波导可以形成局限性的表面导波或容积导波;而绕射光栅则可将容积波变换成表面波或作相反变换。自20世纪70年代以来已研制出一系列毫米波、亚毫米波准光元、器件与系统,已广泛用于毫米波、亚毫米波真空电子学和固态电子学、特种天线、波谱仪、干涉仪、偏振仪、材料(介质、半导体和铁氧体等)检测、等离子体诊断、探伤、射电天文和通信等领域。

19世纪60年代初,前苏联卡皮查(И. П. Капица)首先将原来用于激光器的开放腔(Open Resonant Cavity)推广应用到毫米波段,展开了“毫米波开放腔及其在毫米波电子学中的应用研究”,用“开放腔”代替“封闭腔”,并用新的物理机制解决“活性媒质”对“开放腔”的耦合激励问题。毫米波段的开放腔与光波开放腔的区别在于,前者的工作空间尺寸只是大于波长,而后者则远远大于波长;前者中的波是准平面波,而后者则是平面波,故前者称为“准光开放腔”(准光腔),后者则称为“光学开放腔”(光腔)。准光腔从60年代开始已成功地应用于真空电子学,分别用直线电子束、曲线电子束和相对论电子束进行激励。至今已研制成O型及M型奥罗管(Orotron),绕射辐射振荡器及其变态结构、绕射辐射放大器与级联放大器、利达管(Ledatron)、Orotron自由电子激光、相对论奥罗管、准光腔回旋管(Gyrotron)、准光腔自由电子激光等一系列准光电真空器件。中国科学院电子所、电子科技大学高能所、北京大学、机电部十二所等单位也在毫米波准光振荡器方面开展了一系列研究工作。

前苏联魏因施泰恩(Л. А. Вайнштейн)在贝科夫(В. П. Бокор)等人的实验研究的推动下,从1962年到1966年对开放腔和开放波导作了系统的理论研究,撰写了专著《开放腔与开放波导》(1966年出版,有中译本),该书奠定了开放腔和开放波导的理论基础,至今仍广为国际微波和激光学术界所引用。

1966年6月在美国纽约召开了第1届国际准光学会议,由美、英、法、德、意大利、荷兰等国著名学者参加,共发表22篇论文,分为4个专题:(1)波的绕射、传播和辐射;(2)开放腔和波束波导;(3)准光波导元件;(4)准光部件的应用。对当时除前苏联以外的准光学成就进行了一次检阅。

从新学科的形成和发展来看,乌克兰科学院无线电物理与电子学研究所的舍斯托帕洛夫(В. П. Шестопалов)领导下所进行的开拓性研究工作是有特色的。他们对准光腔、开放波导、绕射光栅、绕射辐射效应、绕射辐射振荡器、放大器、变态结构(短焦距型、多次超越型、多电子束型、多反射镜型)都作了大量深入系统的研究,所提出的理论,所进行的设计、研制和应用,都为毫米波、亚毫米波准光学奠定了坚实的数理基础和精湛的实验技术,从而形成了新的学科分支。他们发表了一系列论文和专著有:《波在光栅上的绕射》(1973)、《绕射电子学》(1976)、《现代绕射理论中的累加方程》(1983)、《毫米波与亚毫米波技术的物理基础》(1985)、《波的谐振散射》(1986)、《开放结构的谱理论和激励》(1987)、《毫米波与亚毫米波电子学》(1988)。另外,瓦因什泰恩的《绕射理论和因子化方法》(1966)和尼伏约多夫(Е. И. Невядомая)的《开放式同轴谐振结构》(1982)等专著都对准光学有很大贡献。

自70年代末开始,准光腔成功地推广应用到半导体固态电子学领域,分别用单只或多只耿氏二极管、崩越二极管、半导体薄膜以及多源元件阵列进行“匹配”耦合激励,实现多种结构的准光固态振荡器、功率合成器、倍频器和变频器。(1)多振荡器准光功率合成:1983年温定格尔(L. Wandinger)等首先进行了准光功率合成的研究,1986年明克(J. M. Mink)研制成毫米准光功率合成器,1987年中国电子科技大学研制成36GHz二管和四管准光功率合成振荡器,1989年东南大学研究了复合式准光功率合成法,1989年前苏联布加科夫(В. М. Буцаков)采用栅格方法进行准光功率合成;(2)阵列式准光功率合成:1988年日本东京大学K. Mizuno等提出了多元阵列式(栅格)准光功率合成法,合成腔用一个带栅格的平面反射面和一个球冠反射面构成的Fabry-Perot腔,器件安装在栅格平面反射面上。普扑维克(Z. B. Popovic)等从1988年开始研制了一系列集成栅格式准光功率合成器,其

特点是合成器件多,便于集成化;(3)微带天线式准光功率合成:1987年杨(S. Young)等用两个微带振荡器,通过模耦合至微带天线输出到准光腔中合成。1988年夫劳(P. G. Frayne)等提出阵列式微带天线式准光功率合成法,将多个有源天线通过槽耦合到准光腔进行功率合成。1991年约克(R. A. York)等用二维有源微带天线阵列进行准光功率合成,采用二维弱耦合振荡器阵列来限制耦合强度,减少多频模的产生,可获得较好的锁定特性,便于集成化。1990年赫伍(R. J. Hwu)等研制了准光栅倍频器,用非线性电容(BLN二极管)对栅加载,得到100GHz的三倍频器。1991年上海科技大学研制成150GHz准光腔稳频谐波振荡器。

1972年到80年代英国伦敦大学和英国国家物理实验室开展了用准光法测量电介质的系列研究。马斯卡列夫(и. н. москалев)和奥吉方诺夫斯基(А. М. Огефановский)在专著《等离子体诊断》(Диагностика плазмы)一书中详细论述了用开放圆柱或圆桶腔作为等离子体的微波诊断。1988年上海科技大学开展了用准光腔检测高Tc超导体的系列研究工作。

该学科的研究热点是:(1)准光滤波器和双工器;(2)准光有源器件;(3)空间功率合成;(4)准光振荡器、倍频器和放大器;(5)准光成像和相位阵列;(6)准光开放波导集成电路;(7)准光开放结构作为传感器的应用。

参考文献

- 1 Proc of the Symposium on Quasi-optics, New York, 1964
- 2 Валнштейн П. А. Открытие Резонаторов II Открытие Волноводов, 1966
- 3 Нефедов Е. П., Открытие Коаксиальные Резонансные Структуры Наука Думка, 1982
- 4 Шестоналов В. П. Физические Основы Миллиметрового II СВЧ — Миллиметровый Техники, Наука Думка, 1985
- 5 李英. HTC 超导材料的准光测量方法. 1989年中国电子学会学术讨论会论文
- 6 Eric L. Holman, Ralston S. Robertson, Solid-state Microwave Power Oscillator Design, ARTECH House, 1992
- 7 Li Ying, W-Band 2nd Harmonic Inp TED Oscillator Stabilized by Quasi-optical Cavity Resonator, 22nd European Microwave Conference, 1992, 658~661

(上海科学技术大学李英教授撰)

超辐射 superradiation 1954年,美国普林斯顿大学Palmer物理实验室狄克(R. H. Dicke)在研究自发辐射的相干性时,首先提出超辐射概念,并加以讨论,所以也常常将超辐射称为狄克超辐射。随后,超辐射现象的研究引起了世界许多科学家的关注。1972年J. H. Eberly对其作了进一步讨论;J. C. MacGillivray等做了经典解释;R. Bonifacio等做了全量子解释;1978~1979年,R. Glauber等又做了更严格的解释。

由于人们认识的深化,在激光出现之后,较普遍地称超辐射为放大的自发辐射(Amplifying Spontaneous Emission,缩写为ASE)。实质上,放大的自发辐射仍然是由自发辐射诱导的受激辐射过程占主导地位,所以应该属于激光的范畴,但其激光特性却比通常的激光要差,例如近似的N₂激光器所产生的激光就属于这种类型。在高增益的准分子激光器、染料激光器以及半导体激光器中,也观察到不管是否有任何入射辐射所产生超辐射。由于相干激发的时间很短,这类激光器常常不需要谐振腔,因此,人们常常将发射ASE的高增益系统称为无腔(或无镜)激光器,并且也常常将这种无腔激光作用(Lasing)称为“超辐射”。其实质是自发辐射通过受激辐射而得到放大,与相干自发辐射不同。

通常,发光系统中各个粒子的自发辐射是互不相干的,但是理论分析和实验都证明,在一定情况下,大量相同粒子组成的系统,能发生一种特殊的自发辐射过程,这时各个粒子的自发辐射是相干的。这种相干性自发辐射就是前面提到的超辐射。超辐射是许多原子所构成的系统的集体自发辐射。光子回波就是超辐射

的一个具体例证。理论证明,当那些个别的偶极子的相位重新变为一致时,它们具有大的宏观极化强度,从而产生回波;而在其它时刻的极化强度可忽略。实际上,相位无规的偶极子一般以正常的速率辐射,给出的能量与原子密度的平方成正比。但是,当偶极子的相位变为一致时,它们以一种集体的方式进行辐射,其初始辐射率比例于N²。这就是超辐射的主要特征标志。超辐射的全量子理论认为:一组耦合的原子的合作辐射构成所谓的超辐射。所以,超辐射是原子系统的集体行为,即合作效应。

1975年R. Bonifacio等发现超荧光(Superfluorescence)现象。超荧光是在不存在初始的宏观极化强度情况下产生的,泵浦光源可以是相干光源,也可以是非相干光源。当原子系统开始处于粒子数反转状态时,状态之间并不相关。半经典理论认为,超荧光是由普通的自发辐射噪声开始,然后逐步过渡到合作的自发辐射。超辐射和超荧光现象都已为实验所观察。从历史发展来看,超荧光是狄克超辐射分离出来的一个分支,但从发光机制来看,可以认为超辐射是超荧光的合作发射阶段。所以有的科学家认为超辐射和超荧光是同一物理现象,并不加以区分。

总之,根据半经典理论,超辐射可归结为:相干激发产生相干态,再辐射相干光。由于相干激发的时间很短,受激粒子对辐射场的相位表现出记忆能力,造成同相位偶极子阵列,从而自发辐射出相干光,所以超辐射是一种瞬态现象。超辐射不同于通常的激光,因为前者的发光机制是相干自发辐射,后者是受激辐射,超辐射的辐射强度与原子密度的平方成正比,辐射寿命(即脉冲宽度)与原子密度成反比,而且有很好的方向性和相干性。

自狄克(R. H. Dicke)发现超辐射现象以来,许多科学家的关注,其原因如下。(1)对超辐射现象的研究,有助于深入认识我们周围的物质世界,在理论上和科学技术上都有其独特的深远意义。另外,超辐射作为一种特殊的发光机制——相干自发辐射,目前已有较深入的了解,并且应用这种发光机制已研制出许多性能独特的激光器,例如N₂激光器、准分子激光器等。(2)超辐射在高增益的大功率激光器中,尤其显示出非常重要的作用。有的大功率激光器是利用超辐射现象,以便提高输出激光功率。而有的激光器则要克服超辐射带来的不利,因为超辐射现象的出现,会大大耗尽激光上能级的粒子数,减小应该获得的增益,而且还会以意外的方式损害激光器。(3)超辐射是原子系统集体的合作效应,所产生的相干自发辐射与通常的受激辐射相比,虽然要差一些,但是由于超辐射的辐射强度与原子密度的平方成正比,所以输出强度仍然相当可观。其次,超辐射的带宽也是很窄的,典型宽度比增益线宽小几倍,并且超辐射具有极高的方向性。另外,超辐射具有可以与受激辐射相比拟的空间相干性,但时间相干性稍差。总之,利用超辐射制备的激光器具有一些独特性能,应用极其深入。

人们对超辐射现象的研究仍在继续进行。例如中国科学工作者在研究人体指纹谱过程中,也发现只有用超辐射才能解释的特殊现象。对超辐射现象的进一步研究,必然会对物质世界的认识更加深化,从而开拓出更为广泛的应用前景。

参考文献

- 1 Dicke R H. Phys Rev, 1954, 93: 99
- 2 Eberly J H. American J Phys, 1972, 40: 1374
- 3 MacGillivray J C, et al. Phys Rev, 1976, A14: 1169
- 4 Bonifacio R, et al. Phys Rev, 1975, All: 1507, A12: 587
- 5 Glauber R, et al. Phys Lett, 1978, 68A: 29. Phys Rev Lett, 1979, 42: 1740. A19: 1192. Phys Rev, 1979, A19: 1192
- 6 伍长征,等. 激光物理学(第1版). 上海: 复旦大学出版社, 1989. 39

(陕西师范大学李祥生副教授、傅克德教授撰;王天真审)

红外目标辐射特性 radiation properties of object 辐射体通过电磁波向外输送辐射能,也可以认为是由光子输送能量。这是两个独立的概念,都被用来解释辐射的物理特性。用频率 ν 、波长 λ 和波速 c 3个参数来描写辐射。 c 是光子速度,其它两个参

数是独立的,它们的关系是 $c = \lambda \nu$, 可以任意选择 ν 或 λ 作为特征参数. 若以波长来分类辐射, 其波长较短的有 γ 射线和 X 射线, 波长较长的是无线电波. 波长从 0.3 到 50 μm 的辐射是热辐射, 是仅仅由于介质温度而引起的介质发射的辐射能. 波长 0.76 ~ 1 000 μm 的辐射, 称为红外辐射. 国际照明委员会把红外区又作了划分, 由 0.76 ~ 1.4 μm 为近红外, 1.4 ~ 3 μm 为中红外, 3 ~ 1 000 μm 为远红外. 但根据应用之不同, 如按地球大气对红外线的透明性, 或在光谱学上, 又有不同的划分方法.

离开作为辐射源的物体表面, 向某一方向传递辐射能的量值, 可以用辐(射)出(射)度简称辐出度, 符号为 M 表示, 其定义是离开表面一点处的面元辐射能通量, 除以该面元的面积. 单位是每平方米瓦. 在给定的温度和波长下, 辐射体能够发射的辐射能, 有一个最大数量, 发射这个最大数量辐射能的物体称为黑体. 对于黑体可表达为: 能完全吸收所有入射能量(不论其波长、方向或偏振态)的辐射体, 当它在给定温度上达到热平衡时, 它能在任何波长和方向上, 发出最大的光谱辐出度. 在热力学温度为 T 时, 辐射体黑体的单位表面积, 在波长 $d\lambda$ 范围内, 向半球空间发射的辐射功率, 即光谱辐出度, 可以由普朗克定律的显函数形式普朗克公式描述, 公式为

$$M_{\lambda}(T) = \frac{C_1}{n^2 \lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} - \frac{C_2}{(e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

单位每平方米瓦. 总辐射特性是指整个波长范围, 单位表面积, 单位时间发射的能量, 其值可以通过光谱能量密度积分得出, 斯忒藩-玻耳兹曼定律 (Stefan-Boltzmann law) 给出黑体的总辐出度的计算式为

$$M(T) = \int_0^{\infty} M_{\lambda}(T) d\lambda = n^2 \sigma T^4$$

两式中, n 为周围介质的折射指数, 真空中 $n=1$, 气体中 $n \approx 1$; C_1, C_2 是第 1、第 2 辐射常数, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数.

朗伯余弦定律指出, 辐射源单位表面积向空间某方向单位立体角发射的辐射功率, 和该方向与表面法线夹角的余弦成正比. 遵守此定律的源, 称为朗伯源. 它是一个理想化的概念, 黑体精确遵守朗伯定律.

黑体是理想的辐射发射体, 上面介绍了黑体表面的辐射特性. 而常见的工程材料表面性能是不同于黑体的. 为此, 定义一个无量纲量——发射率 ϵ , 及定义光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$, 表示所给表面相对于黑体表面的辐射能力, 即

$$\epsilon = \frac{M(T)}{M_{bb}(T)} \quad \text{及} \quad \epsilon(\lambda) = \frac{M_{\lambda}(T)}{M_{\lambda bb}(T)}$$

此处加了脚注 bb , 标明是黑体的参数. 由于辐射的定向性, 发射率又分为: 半球发射率 ϵ_h , 方向发射率 $\epsilon(\theta)$, 及法向发射率 ϵ_n . 朗伯体的 $\epsilon_n, \epsilon(\theta)$ 和 ϵ_h 相等, 常记为 ϵ . 可以从资料中查出电绝缘体或导电体的 ϵ_h/n 比值.

根据发射率的状态, 辐射体可以分为黑体、灰体和选择性辐射体 3 类.

黑体, ϵ 和 ϵ_{λ} 皆为 1. 辐射特性遵守普朗克定律和斯忒藩-玻耳兹曼定律.

灰体, ϵ 和 ϵ_{λ} 皆小于 1. 在整个研究的波长范围内, 发射率是个不变的数. 用脚注 g 表示灰体, 则 $M_g = \epsilon M_{bb}$. 若灰体是朗伯体, 适合于该灰体的普朗克公式和斯忒藩-玻耳兹曼公式是

$$M_{\lambda g} = \epsilon \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \\ M_g = \epsilon n^2 T^4$$

式中略去折射指数 n .

选择性辐射体, 光谱发射率随波长改变而变化, 只在有限光谱区, 有时可以看成是灰体.

辐射发射率的定义可以看出, 它是一个与温度有关的量. 同时, 它也随着表面例如粗糙或光滑有关, 有时甚至随着晶粒结构的不同, 会有急剧地变化. 所以说, 辐射发射率与物体材料、温度、波长和表面状态等因素有关, 是一个不易定量的数值. 但也有相

当多的资料给出了物体状态在给定温度和波长情况下的光谱发射率或全发射率, 可供查询参考. 当然, 仅靠查资料来确定 ϵ 值, 往往是很困难的.

气体介质不具有连续光谱. 由于气体分子的振动和转动能量的跃迁, 产生了红外辐射, 双原子分子是能够进行这种跃迁的最简单分子. 可是 H_2, O_2 和 N_2 这种对称双原子分子, 由于没有永久性的偶极矩, 所以对于红外辐射是透明的. 多原子分子例如 CO_2 , 在红外范围内, 它有两个基本光谱带, 即波长为 15 和 4.3 μm 为 2.7 和 1.9 μm 的两条复合带. 近年来不少文献讨论了红外辐射在气体中的辐射通量的计算. 由于气体的分子结构各异, 谱带情况不同, 所以红外辐射的传递问题, 同时还要考虑包围气体的边界壁面的辐射特性, 以及温度、压力等状态参数.

(清华大学魏平田副教授撰)

光压力 光对物质产生的压力, 它在光的电磁理论发展过程中和有关天体物理中(包括现已证明, 在有关恒星极限体积的问题中)起重要作用.

开普勒在解释彗星尾巴的形状时就提出光压力的说法. 在关于光的本性讨论过程中, 牛顿提出的微粒说也暗示着存在光压力. 认为投射到物体表面的光粒子, 它的一部分动量传给了物体时便产生压力.

杨氏干涉实验证实了光的波动性, 麦克斯韦的电磁波理论进一步证明了光是电磁波, 同时推断出光辐射对物体产生压力的结论, 并且算出了它的数值. 光波是横电磁波, 入射光波的电磁场在物体表面产生与电矢量方向相同的感生电流. 光能本身的磁场按照安培定律与这电流相互作用, 形成了对物体的作用力, 即光压. 其数值大小与光强度有关, 作用力的方向与光波传播方向相同. 假定入射的是平行光束, 当物体是绝对黑体时, 它受到的光压力 P 等于光能量密度 u ; 当物体表面对光辐射的反射率为 R 时, 受到的压力 $P = u(1+R)$; 反射率 $R=1$ 的理想镜面反射体, 受到的光压 $P = 2u$. 假定垂直入射至物体表面每平方米面积上的辐射能量是 E , 相应的能量密度 $u = E/c$ (式中 c 是光速). 最后得到的光压 P 表达式是:

$$P = \frac{E}{c} (1 + R) \quad (1)$$

根据光的微粒说, 光子对物体传递动量产生了压力. 假设频率 ν 的单色光正入射到物体表面, 光子的动量是 $h\nu/c$. 能量为 E 的光束中包含的光子数目 $N = E/h\nu$. 物体单位表面积得到的动量就是作用在这个面上的压力, 即

$$P = N \cdot \frac{h\nu}{c} = \frac{E}{c}$$

如果物体表面的反射率等于 R , 则入射的 N 个光子中有 $(1-R)N$ 个被表面吸收, 有 NR 个被反射. 被反射的光子其动量变化是 $2h\nu/c$, 物体相应地也获得相同数量的反冲动量. 所以, 物体受到的作用力 P 是:

$$P = N \frac{h\nu}{c} (1-R) + 2NRN \frac{h\nu}{c} \\ = \frac{E}{c} (1+R)$$

它与由波动说得到的结果相一致.

1909 年前苏联科学家列别捷夫第 1 次从实验上测出光压. 实验用的仪器是悬挂在细丝下的悬体, 在它的两边上固定着一些薄而轻的小翅, 其中一些涂黑色, 一些则是光亮的. 悬体放置在抽真空的容器内, 然后用光学系统把从弧光灯发射来的光束聚焦照射悬体上的小翅. 由于光压力的作用, 悬体发生偏转, 由此便也可以量度出光压力的数值. 实验测量得到的光压数值, 与由麦克斯韦理论计算值相符(准确到 20%); 另外, 根据公式(1), 光束照射到亮小翅时, 对悬体产生的光压力应该是照射以黑小翅时的 2 倍, 列别捷夫实验观察的结果也显示出这种关系.

激光器发明之后, 人们可以在实验室得到极高亮度(比太阳亮度高亿万倍)的光源, 很容易从实验中观察光压现象. 在现有的

激光技术水平, 不难获得 10^{17}W/cm^2 的光功率密度, 它作用在物体表面, 产生的光压强高达 10^{10}Pa 。此外, 强激光束与物体相互作用时, 还出现了一些先前不曾被研究过的力学现象, 主要如下。

光学粘胶力 原子在两束或者多束交叉激光束中受到的合作用力。处在 - 对相向传播激光束中的原子, 它受到的光学粘胶力 F 为:

$$F = \frac{kI^2}{2I_0} \frac{v(16\delta/\Delta v)}{[1 + (\frac{2\delta}{\Delta v})^2]} \quad (2)$$

式中 I_0 是饱和光强, 表示原子两个能级之间的耦合程度; I 是激光束强度 ($I/I_0 \ll 1$); v 是原子运动速度; Δv 是原子谱线自然宽度; δ 是激光频率偏离原子共振跃迁频率的值 (即失谐值); k 是激光波数; $\hbar = h/2\pi$, h 是普朗克常数。

辐射力 原子吸收光子而受到的压力。原子吸收频率 ν_1 的光子跃迁到激发态, 同时获得了动量 $h\nu_1/c$ 。经过时间 τ (τ 是原子激发态寿命) 原子跃迁至基态, 发射出频率 ν_0 的光子, 同时获得反冲动量 $h\nu_0/c$ 。原子自发发射的光子在空间的分布是随机的, 所以原子在作多次吸收和发射光子的动作之后, 得到的反冲动量平均值为零。而获得了朝激光束传播方向的净动量, 亦即原子受到与光束传播方向相一致的作用力, 其数值 F 由下式给出

$$F = \frac{h}{2} kv \quad (3)$$

式中 k 是激光波数, v 是原子的自发辐射速率。假定激光波长 $\lambda = 500 \text{nm}$, 原子自发辐射速率 $v = 10^8 \text{s}^{-1}$, 那么原子受到的作用力约为 $6.7 \times 10^{-20} \text{N}$, 它比原子受到的重力还大得多 (对于质量 100 个原子质量单位的原子受到的重力为 $1.66 \times 10^{-23} \text{N}$)。

反冲压力 物体表面吸收了激光能量之后发生急剧汽化, 形成冲击波而产生的挤压力。反冲压力 P 由下式给出

$$P = k \cdot \rho_0 Du \quad (4)$$

式中 ρ_0 是物体材料初始密度, D 是冲击波速度, u 是物体表面蒸发物向外飞散速度, k 是比例系数。

超声压力 物体受激光作用在内部产生高强度超声波而产生的压力。

一是在激光作用下物体局部区域温度迅速上升, 引起体积膨胀, 同时在其周界产生超声弹性振荡, 产生压力。其数值 P 由下式计算

$$P = 2\beta BI \left(\frac{\tau}{\pi k \rho C J} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 β 是热膨胀系数, B 是体积弹性模量, I 是激光强度, τ 是激光脉冲宽度, C 是比热, k 是材料的热导率, J 是热功当量, ρ 是材料的密度。

二是在激光作用下发生受激布里渊散射, 同时伴随产生高强度的超声波, 并产生压力。其数值 P 为

$$P = \rho CI \quad (6)$$

式中 C 是比热, ρ 是介质密度, I 是在光束传播方向产生的超声波强度, I 值为

$$I = \frac{\omega_0 V \tau}{\omega L} P_1$$

式中 ω_0 是声波频率, ω 是激光频率, V 是超声波速度, L 是激光与物质相互作用长度, P_1 是斯托克斯分量强度, τ 是激光脉冲宽度。

电致伸缩力 在激光电场作用下物体发生形变而产生的压力。其数值 P 由下式计算

$$P = \frac{E^2}{8\pi} \rho \frac{dc}{d\rho} = V \frac{E^2}{8\pi} \quad (7)$$

式中 $V = \rho \frac{dc}{d\rho}$ 是材料的力学常数, E 是激光的电场强度。光功率密度为 ρ 的激光束, 相应的电场强度 E 为:

$$E^2 = 2\rho \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

真空中的 $(\mu_0/\epsilon_0)^{\frac{1}{2}} = 367.7 \Omega$ 。

光压力在科学研究和生产实践中起着重要作用。激光核聚变是 20 世纪末以来 10 年内的重大科学研究项目, 光压力在这项研究中起着十分重要作用。根据核聚变的劳逊条件, 如果要求获得 100 的增益, 使用的激光能量要求高达 100 亿 J, 激光脉冲宽度是 ns 量级。这样高的要求在技术上很难达到。后来美国科学家泰勒提出了压缩聚爆理论, 通过压缩等离子体密度, 可以大幅度地降低对激光能量要求, 它们的关系是 $E \propto (n_0/n)^2$, 这里的 E 是激光能量, n_0 是材料在通常状态的密度, n 是材料的等离子体密度。压缩等离子体体积的第一步便是靠光的压力; 第二步是利用激光反冲压力。如果使用的激光功率密度是 $10^{17} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 那么, 利用光的压力和光的反冲压力, 对等离子体产生压强高达 10^{16}Pa , 足可以使等离子体产生百倍以上压缩。1979 年美国劳伦斯·利弗莫尔实验室利用高功率激光束照射铝靶, 测量到对等离子体产生 1 TPa 的压强; 中国科学家在 1988 年利用输出功率 10^{12}W 的 LF-12 激光装置进行实验, 也观察到由激光在铝靶上产生 4.9 MPa 的压强和对等离子体的压缩现象。

利用光压力能够把原子运动速度降低到接近零, 相应地, 原子被冷却到了接近于开氏温标零度。现在利用激光照射钠原子, 能够把它的由 1 000 m/s 初始平均运动速度迅速降低到 30 cm/s, 相应地, 钠原子的温度被降到 240 μK 。利用光压力也能够使原子束偏转, 目前在实验室已能够使钠原子束偏转 7.7 mm。

利用光压力能够捕捉单个原子; 捕捉和控制有机体、细菌。比如利用一束氩离子激光和 - 一束氦氖激光, 能够捕捉、移动、转动长度为 0.5 μm 和 1.5 nm 的细菌。

利用光压力, 有可能使物质的原子、分子重新排列。这项技术的发展远景是利用人工设计方法制造有特殊性能的材料和药物。

人们还设想利用光的力学效应设计制造新型加速器 (称为光加速器), 预计利用它加速相同能量的粒子, 加速器的尺寸比现有的加速器小得多, 而且它还能够加速中性粒子 (现有的加速器则是没有加速中性粒子的能力)。光加速器的研究现在也已获得进展, 利用 CO_2 激光器输出波长 9.6 μm 和 10.6 μm 的激光束, 对中性粒子平均加速为 0.3 ~ 1 MeV/m, 最大加速为 2.8 MeV/m。

参考文献

- 1 Sharma S B, Rieckhoff K E. Can J Phys, 1970, 48: 1179
- 2 王育竹, 等. 中国科学, 1984, A: 467
- 3 DaYid J, Wincland, et al. Phys today, 1985, 6: 34
- 4 Lettr P D, et al. Phys Rev Lett, 1988, 61: 169
- 5 顾援等. 物理学报, 1988, 37: 239
- 6 徐国祥主编. 实用激光医学. 广州: 广东高等教育出版社, 1990 (雷仕湛撰)

光谱光度学

spectrometry 研究光谱测量的科学, 包括紫外、可见、红外光谱波段光谱位置、光谱强度、光谱轮廓、光谱辐射寿命、光谱辐射偏振度和光谱辐射相干性的测量, 是近代光学计量科学的重要分支学科。它已广泛地应用于信息工程与光电子工业、能源工程、空间工程、资源开发、化工、石油、纺织、冶金及新材料工业和环境保护。它研究的主要内容有: (1) 光谱辐射特性的测量和光谱辐射标准; (2) 研究和发 展光谱测量方法与技术; (3) 研究和发 展光谱测量系统。

早在原始人类发展时期, 就对颜色现象进行了观察, 但直到 1666 年牛顿 (Newton) 才科学地用玻璃三棱镜进行了著名的太阳色散实验, 在屏上看到了太阳彩色分光现象, 牛顿把屏上得到的彩色图样称为光谱 (Spectrum), 这是有历史记载的第 1 次观察太阳光谱。从光谱测量的发展历史来看, 大致可以分为 3 个时期。

萌芽与发展时期 (1666 年 ~ 19 世纪末) 牛顿通过实验发现, 白光由各种独立颜色的光混合而成, 他认为与各种颜色相联系的微粒会激发以太进入各种特征振动, 而红色的感觉对应于以太的最长的振动, 紫色则对应于最短的振动。

早在 1729 年, 法国的布盖 (Bouguer) 发明了光度计, 用以比

较天体的亮度,这种思想后来也用于目视的分光光度测量。1760年朗伯(Lambert)建立了一套完整的光度学原则,光度学诞生,标志着光度学已成为一门独立的学科,这些原则也适用于分光光度测量。

1802年,渥拉斯顿(Wollaston)观察到太阳连续光谱中的暗线(他误认为是颜色的分界线),他还首次描述了火焰光谱。1815年,夫琅和费(Fraunhofer)发明了用准直光管、三棱镜、望远镜组成的分光镜(Spectroscope),用狭缝代替了牛顿时期用的针孔,这是光谱仪器制造的一大进展,他用分光镜测量太阳光谱中的暗线,确认了大约700条太阳光谱的暗线,并且用字母A到H标志其中8条暗线,他还用10.16cm望远镜和火石玻璃棱镜组成的光谱仪首次观察了恒星的光谱和行星的光谱。

小赫舍尔(J. F. Herschel)研究了盐类的火焰光谱,他发现不同金属的盐类具有不同颜色的火焰光谱。之后,埃斯屈朗(Angström)在1885年发表了一系列金属的光谱,还描述了气体光谱和吸收光谱,通过一系列观察,人们认识到每一种元素有自己标志的发射和吸收光谱。

1859年,基尔霍夫(Kirchhoff)指出了光的吸收和发射关系的普遍公式,而且强调了不同元素发射标志谱的重大意义。他指出:“整个物体在相同温度下,对于同一波长光线的发射率与吸收率之比是一个常数。”在相同的温度下,气体发射标志的线光谱,也吸收它辐射和线光谱。钠的火焰会吸收比它强的相同的黄光,他认为太阳光谱中的暗线是由于太阳内部发射的连续光谱被太阳周围冷却了的气体中的一些元素的强烈吸收造成的。他发现太阳光谱中的夫琅和费暗线和已知元素的发射线相重合,这个发现在很大程度上证明了地球外星球上的物质和地球组成物质一样,都是由相同的化学元素组成的,他和本生(Bunsen)检验了一些纯金属元素的火焰光谱和火花光谱,他们确认在太阳中存在一些金属元素。基尔霍夫编制了很完整的太阳光谱图和许多金属元素的光谱图,可惜他没根据波长来定位,以致不能用作太阳的标准光谱。1864年哈根斯(Huggins)用分光镜研究星云,揭示了它们的组成结构,并发现行星状星云所发出两条特殊的绿色谱线,直到1941年才揭示它们属于镍、钙的禁线。之后,1865年他用光谱方法发现一些恒星含有钠、钙、镁、铷等元素。

总之,在这个时期,确定了每种元素有自己的标志谱,并且测定了许多元素的标志谱,而且利用光谱方法对太阳、星体和地球上的物质成分进行了检测。

1802年,杨(young)根据光的波动说,很精确的测量了薄膜干涉的7种颜色的光谱区为:675~427nm,这是有史以来第1次确定了可见光的光谱范围。

1822年,夫琅和费用自己刻制的透射光栅,精确地测定了钠的双黄线,它的测量值为588.6nm和589.0nm,这是历史上首次对光谱线波长的测量,他还首次编制了约有700条光谱线的太阳光谱图。

1868年埃斯屈朗(Angstrom)在对太阳光谱作了大量研究后,给出了有近千条太阳光谱线的谱线表。他用3块玻璃光栅通过细致的测量确定了绝对波长,而且用埃(Å)(1Å=10⁻¹⁰m)作为光谱波长的单位。

之后,由于照相干板明胶技术的发展,照相记录方法已可实用,改善了光谱测试精度。另一方面,由于光栅刻制技术的进展而发明了凹面光栅。1887年罗蓝(Rowland)发表了新的太阳光谱谱线表。几年之后,又发表了许多元素的光谱表和太阳光谱夫琅和费暗线谱表,他对钠黄线测量并进行了加数平均,测量Na黄线的波长为589.156×10⁻¹⁰m,罗蓝确信在2132.91×10⁻¹⁰m到7714.68×10⁻¹⁰m光谱区,他的测量精度到0.01×10⁻¹⁰m。

1893年,迈克耳逊(Michelson)采用干涉法,以巴黎的标准米尺(当时国际的长度基准)对3根镉(Cd)元素的谱线波长进行了比较测量,他的测量精度超过了以前的工作(见表1)。

表1 镉(Cd)波长

光谱线	迈克耳逊 10 ⁻¹⁰ m	罗蓝 10 ⁻¹⁰ m	比值
镉红线	6438.4782	6438.680	1.000033
镉绿线	5085.8240	5086.001	1.000036
镉蓝线	4799.9107	4800.097	1.000039

迈克耳逊经过测量发现钠(Na)黄线的谱线太宽不适宜作为波长的标准。

1900年,法卜利-珀罗(Fabry—perot)扩展了干涉方法,根据迈克耳逊的测量值确定了一些元素的光谱线波长,1905年他正式选用一些谱线作为次级标准,1922年正式采用铁谱和稀有气体元素的光谱线作为次级标准。

1800年英国赫舍尔(W. Herschel)用灵敏的温度计研究太阳的热分布时,发现在太阳光谱的红端外边有很强的辐射热,他首次发现了太阳的红外光谱,但当时没认识到这是一种光而误认为是辐射热。1834年意大利的梅伦尼(Melloni)在进行热辐射红外线的反射、折射、吸收等实验中发现红外线本质上和光类似。1861年克诺布劳赫(Knoiblauch)用干涉、衍射和偏振实验证明了人眼看不见的红外线和可见光的区别仅在于它的波长较长。

1801年瑞脱尔(Writher)在研究照相干板时,发现光谱紫端的外部有很强的感光作用,从而发现了紫外线。19世纪中叶,进一步证实了光是电磁波,可见光是电磁波谱中很窄的一个区域,而紫外线和红外线也是电磁波。

1856年缪勒(Müller)把新的照相技术应用下较短波长的紫外辐射。1862年斯托克斯(Stokes)发现石英在紫外区是透明的,他借助于弧光和火花光源观察了一系列金属紫外光谱。1863年马斯卡脱(Mascart)拍摄了太阳的紫外光谱(直到2.950×10⁻¹⁰m),并确定了波长,罗蓝进行不精确的紫外光谱测量,并把波段扩展到2.150×10⁻¹⁰m但由于照相干板明胶对短于2.300×10⁻¹⁰m的紫外线有吸收,因此曝光灵敏度迅速降低,再加上大气中氧的吸收使向紫外波段扩展遇到了困难。舒曼(Schumann)采用炭石制造棱镜和透镜,而且把整个装置封闭在真空容器中,他成功地使紫外光谱延伸到200×10⁻¹⁰m(这是由于炭石紫外吸收的限制)。1905年李曼(Lyman)采用凹面光栅反射系统代替炭石光学系统使紫外光谱延伸到500×10⁻¹⁰m,之后在对光源、光栅刻制技术进一步改进后,紫外光谱已经延伸到4×10⁻¹⁰m,进入软X光光谱区。

在红外光谱区,罗蓝采用红区灵敏的照相干板,将光谱延伸到7.715×10⁻¹⁰m。1880年阿勃尼(Abney)进一步改进照相干板后,将波段扩展到20.000×10⁻¹⁰m。之后采用热电接收器成功地使红外光谱推向了远红外光谱区,直到与微波区连接。

牛顿的光谱实验装置仅有一个针孔、一块透镜和一块棱镜组成。夫琅和费使用狭缝制造了第1台棱镜光谱仪,并在棱镜的后面用望远镜来观察天体和各种元素的光谱线,他编制了有700条谱线(暗线)的太阳光谱图。他还制造了第1台光栅光谱仪,用金钢石首次成功地刻制了每厘米3000条线与每厘米625条线的透射光栅,并根据光栅常数和衍射角来确定波长,其精确度达10⁻⁷cm,光栅的研制对光谱测量和光谱仪器的发展具有重要意义。

初步成熟和应用时期(19世纪末到20世纪50年代末)

1865年麦克斯韦(Maxwell)根据电磁理论总结出来的电磁运动方程方程式,预言了电磁波的存在并以光速传播。1888年赫芝(Hertz)通过实验发现了电磁波,并证实它具有光的一切特性——折射、反射、干涉、衍射和偏振,而且以光速传播,说明光是一种电磁波,从而建立了光的电磁理论。19世纪对红外线和紫外线的发现,扩展了光的波段,在长波方向与微波相衔接,短波与软X光相连。

19世纪末热辐射的光谱分布规律与光电效应的规律无法用

经典理论解释等一系列矛盾,促使了近代量子理论建立。其建立和发展首先应用到原子、分子结构,并解释了光谱的产生,光谱与原子、分子结构的关系,建立了原子、分子光谱理论。

对于非相干光辐射,通常用黑体辐射源作为计量的基准。从理论上讲,任何物体只要它的温度在绝对零度以上,都能发射电磁波辐射。19世纪60年代,基尔霍夫通过实验发现,物体的辐射本领(用辐射出度 M_e 来量度)愈高,其吸收辐射的本领(用吸收率 α 来量度)也愈高,对所有物体而言,它们之间的比值是相同的,它是波长和温度的函数,与物体的材料和形状无关。20世纪初,普朗克总结了黑体辐射的规律,给出了黑体的光谱辐射出度 $M_e \lambda$ 是温度和波长的函数。

$$M_e \lambda = c_1 \cdot \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}$$

其中 c_1, c_2 分别为第1、第2辐射常数, $c_1 = 3.7408 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2, c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$

人的眼睛在可见区一定波长的光辐射刺激下,不但能产生明暗的感觉,还能产生颜色感觉。实验表明,任何一个颜色都能够用3个原色红(R)、绿(G)、蓝(B)的适当比例相加而获得。若用(R)、(G)、(B)代表红、绿、蓝3个原色的单位量,用C代表混合得到的颜色,则可用下面的代数式表示

$$(C) = r(R) + g(G) + b(B)$$

式中 r, g, b 是3个系数,分别表示3个原色的匹配量,式中的等号代表匹配的意思。1929年莱特(Wright)用目视3色度计进行颜色匹配所选用的三基色为650nm(红)、530nm(绿)、460nm(蓝)。用这3种原色可以匹配各种颜色,但是在匹配460~530nm一带光谱色和650nm的红色时,要出现负值。莱特也曾用他的三原色系统匹配白色光源(色温为4800K),结果三原色量是不等的。1931年吉尔德(Guild)制造的色度计的基色是用一个白炽灯(色温2900K)加上一带窄带的红、绿、蓝滤色片,三原色分别是630nm(红)、540nm(绿)、460nm(蓝),用这三原色相加匹配出的白色光(色温为4800K)是等量的。为了统一色度计量,1931年国际照明委员会(CIE)在莱特和吉尔德工作基础上,将确定700nm(红)、546.1nm(绿)、435.8nm(蓝)的三基色和以等能量白光(E)光源为标准的系统,称为“1931 CIE— $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ ”表色系统。用 x, y, z 3个数值表示一个颜色,称为光谱三刺激值,可用下列公式求得:

$$\begin{aligned} X &= K \int \psi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ y &= K \int \psi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K \int \psi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

式中 K 为归一化系数,它是将照明体的 y 值调整为100时得出的, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 为标准色度观察者光谱三刺激值,也叫色匹配函数,是标准数据; $\psi(\lambda)$ 称为颜色刺激函数,它表示被测量颜色对象的光谱分布。对于光源来说, $\psi(\lambda)$ 就是光源的相对光谱功率分布 $P(\lambda)$; 对于透射样品来说, $\psi(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot P(\lambda)$, $\tau(\lambda)$ 是样品的光谱透射比; 对于反射样品来说 $\psi(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot P(\lambda)$ 这里 $\rho(\lambda)$ 是样品的光谱反射比。

对于光源的色度计量,实际上就是计量这个光源的相对光谱功率分布 $P(\lambda)$, 因此从这个意义上讲颜色的测量实际上也是可见区的光谱光度测量。色度量值的传递用标准色板。经光谱光度计量所得到的标准色板,给出标准的 x, y, z 三刺激值及标准的色品坐标 x, y 值,可用它来检定各种现场使用的色度计、色差计等颜色计量仪器。在各种颜色的标准板中,标准的白色漫反射板是最基本的标准。

早在1823年巴俾涅(Babinet)提出必须从可见光波长中而不是在实物尺寸中寻找长度基准。之后,进行了一系列研究工作。1906年,迈克耳逊对镉元素的红色辐射谱线波长 λ_{Cd} 进行了计量,得到 $\lambda_{Cd} = 643.84696 \text{ nm}$ 1927年国际协议决定将这条谱线作为光谱学的长度标准。但是由于天然元素是由比例(丰度)不确定的几种同位素的混合物,一些同位素的辐射具有超精细结构,而

且实际上还存在多普勒增宽影响着复现性。到1960年,第11届国际计量大会认为1927年国际协议的米定义已经满足不了计量学当时所要求的准确度,提出用 ^{86}Kr 灯发射的606nm的橙黄色谱线作为波长标准,建立米的新定义为:米的长度等于 ^{86}Kr 原子的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中波长的1650763.73倍。同时国际计量委员会规定了氪灯的工作条件。氪橙红的真空波长为:

$$\lambda_{Kr} = 605.7802103 \text{ nm}$$

在光谱测量中,将谱线直接与 ^{86}Kr 波长标准进行对比是很不方便的,因此国际上又规定了铁谱线和惰性气体的谱线为次级标准。从紫外区到红外线,列出了铁和一些惰性气体元素的光谱线。

在这一时期,光谱方法与光谱技术有了飞速地进展,这主要表现在:1928年,喇曼(Raman)发现透明物质散射的光有频率改变的效应,称作为喇曼散射。喇曼散射光谱方法克服了红外光谱技术上的一些困难,作为红外光谱互为补充的手段应用于分子结构及成分分析,而且发展了各种类型的喇曼光谱仪。

另一方面,红外材料,红外探测元件的进展,促进了红外光谱技术,红外吸收光谱已经广泛地应用于化学、石油、化工、药物分析。同时发展了各种进行红外光谱测量的红外光谱仪器。

60年代,各种调制光谱测量技术的发展,比较实用的是富里哀(Fourier)变换测量技术,这种技术和计算机技术的结合,发展了用于中、红外光谱的富里哀变换光谱仪。

火焰光谱、火花、弧光光谱作为发射光谱的测量分析方法已经成熟。广泛地应用于矿物分析、金属及合金钢分析、纯物质分析。

原子吸收光谱测量技术也已经成熟,1954年沃尔许(walsh)发明了原子吸收光谱仪,并已应用于微量元素的测量分析。

原子束、分子束技术以及磁共振技术已经广泛地应用于消多普勒效应高分辨光谱测量,用来研究原子和分子的精细结构与超精细结构测量。

近代发展时期(20世纪60年代至今)近代解决能源的几种主要途径都与光谱测量有关,如原子能利用问题,太阳能的利用,太阳能的发电、加热以及燃烧、节能技术、光合作用等均要进行光谱测量。光谱测量与天体的研究始终紧密地联系在一起,是人类认识天体的重要手段。除了揭露天体结构、组成、运行规律外,近代科学技术已开始探索天体资源的开发和利用,促进了真空紫外及极远紫外光谱测量的发展。地下资源(地面资源,也包括深地层资源)、水下资源的开发除了传统的逐点取样光谱测量分析外,已经采用光学光谱透感测量,利用卫星、航天飞机拍摄的地面、地物的反射光谱图,经过信息处理技术获取资源信息,也可用于环保与军事。近代大气污染、水的污染、自然环境的破坏已经严重威胁到人类健康地生活,采取遥控的共振荧光与散射光谱测量获得环境污染和环境保护的信息。此外,各种原材料、(包括冶金、矿物、化工原料等)、纯物质、药物、各种新材料的组成、结构,均迫切需要发展光谱测量技术。

经典光谱测量技术由于受到光谱分辨率、灵敏度的限制,时间和分析速度的限制已经不适应于科学技术的发展和应用的需要。20世纪60年代激光科学技术特别是可调谐激光技术的发展,新型光谱探测元件及探测技术的发展,特别是光电二极管自校准技术和微弱光谱信息的接收和处理技术以及微处理机的应用,使光谱测量技术的发展产生了一个革命性的变化,进入了一个新的发展时期。这个时期的研究热点为:

1. 激光光谱测量技术。1958年汤斯(Townes)和肖洛(Schawlow)提出了激光器的设计原理。导致了60年代激光技术的发展。1960的梅曼(Maiman)首先制成第1台红宝石激光器。其后,各式各样的激光器发展起来了,特别是波长可调的各种可调谐激光器的出现和发展,使光谱测量技术有了突破性发展,实现了极限光谱分辨率、极限的时间分辨率、超高灵敏度检测和波段的开拓。(1)光谱分辨率已提高了几个数量级,克服了仪器宽度的影响,可以测量到物质谱线的真实结构。采用各种消多普勒技

术,已经可达到小于 10^{-11} 的分辨率,进一步采用辐射冷却原子、俘获粒子的技术,可达到更高的分辨率。(2)探测极限灵敏度也提高了几个数量级,通常光谱测量的灵敏度可达 $10^5 \sim 10^6$ [原子/ cm^3],现在利用激光共振电离光谱测量技术可以检测到 $10^2 \sim 10^3$ [原子/ cm^3]。1977年美国橡树岭实验室的赫斯特(Hurst)用激光共振电离光谱方法已经测量到单个原子。(3)时间分辨率也提高了几个数量级,常规光谱测量的时间分辨率为 10^{-8} s。利用激光非线性光学技术和锁模技术已经研制成可见区及红外区的微微秒和亚微微秒(现在利用锁模技术已可达到 6×10^{-15} s激光脉冲)的调谐激光器,开拓了微微秒和亚微微秒光谱测量技术,用来研究瞬态过程和弛豫过程。(4)空间分辨率的提高,利用激光的相干性可以将激光束会聚到微米级的小区域上,获得极高的光谱辐射能密度,产生高温高稠密的等离子体,另一方面,利用可调谐激光探针在生物、医学上可作为一种变革的手段会发生深远的影响,具有重要意义。

2. 遥感光谱测量。被动式的遥感光谱测量,如天体光谱测量已在19世纪开始应用,近代由于空间科学技术的发展,已经可以用卫星和航天飞机、飞机等等进行遥感光谱测量,进行资源勘察等。近代主动式的遥感光谱测量利用可调谐激光器通过测量共振荧光光谱或共振散射光谱获得有关资源的信息和环境污染的信息。

3. 波段的开拓。过去由于光源和探测器技术限制了紫外和红外光谱测量,近年来,同步辐射器、真空紫外软X光或可调谐激光技术和远红外可调谐激光光谱技术的出现,迅速地推动了软X对或紫外和红外波段的光谱测量。

4. 新型光谱探测元、器件及探测技术。由于新型光电、热电等材料的出现以及集成元、器件技术的进展,发展了适用于各个波段的高探测极限灵敏度的真空光电子元、器件,半导体光电、热电子、器件,热释电器件和电荷耦合器件(CCD),为光谱辐射测量提供了探测元、器件。80年代初出现的硅光电二极管自校准技术有可能成为第3代的光辐射基准,近年来利用单色激光器进行定标,已经可以用作可见区和近红外区的光谱辐射标准。

除此之外,近代光谱微弱信号测量技术有了迅速的发展,已经广泛地应用锁相放大技术、取样积分技术、光子计数技术和光学多通道、分析技术等弱信号电子接收技术,并广泛地应用微机技术。

5. 激光波长基准。1983年10月第17届国际计量大会通过了米定义:米是光在真空中于 $1/299792458$ 秒时间间隔内所经路径的长度。1983年国际计量委员会推荐了5种激光辐射波长和两种同位素单色光辐射的真空波长值和频率值,用它们中的任一条光谱线均可实现米。目前利用激光冷却原子束和光学Romsey条纹已能做到 3×10^{-13} 的相对精度,有可能进一步将激光频率的稳定度提高到 10^{-15} 以上;另一方面可能发现新的激光谱线以实现米定义。

(中国计量学院张在宣教授、张艺副教授撰)

导数分光光度法 derivative spectrophotometry

在进行分光光度分析时,通常面临下述两方面的问题:外来物质与主成分吸收带相互重叠,干扰对待测物的鉴别和测定;在测定波长范围内,辐射光受到溶剂、胶体、悬浮体等的散射或吸收,减弱了直达检测器的光强,降低了分析性能。对此,传统的方法通常是采用诸如过滤、沉淀、蒸馏、萃取和色谱等化学和物理化学分离手段来消除影响。近些年来,利用改进测试仪器性能克服上述局限性的努力已收到显著效果。

虽然使用某一仪器进行测量所获得的基本信息不随输出方式而有实质性变化,但是,输出信息的表达方式往往对信息的适用性产生明显的影响。因此如何选择适宜的输出来满足检测的要求,无疑也是分析化学工作者十分关切的问题。导数分光光度法,它与根据分子在特定波长(或频率)下光吸收(或透过)曲线来鉴别和测定物质的常规分光光度法不同,而是利用光吸收(透

过)对波长的导数曲线来确定和分析吸收峰的位置和强度。由于导数光度法具有下述优点:能检出1个或2个以上的重叠吸收带;能分辨在强吸收曲线“肩部”的弱吸收带;能精密确定单一吸收峰的位置;能消除基线的影响;能进行定量测定。总之,对于提高分析性能,改善方法选择性及克服上述局限十分有效,因此,这种使用导数输出的分析方法近几年已得到了迅速发展,应用日益广泛。

20世纪50年代初期,V. I. Hammond等提出了导数分光光度法,其原理为:根据朗伯-比尔定律

$$I/I_0 = e^{-cd} \quad (1)$$

可得
$$\frac{dI}{d\lambda}/I = -cd \frac{d\epsilon}{d\lambda} \quad (2)$$

从(2)式可看出:输出的一阶导数信号与试样浓度呈线性关系,其测定灵敏度依赖于摩尔吸光系数对波长的变化速度。

同样可写出其余高阶导数方程

二阶导数为:
$$\frac{d^2I}{d\lambda^2}/I = c^2 d^2 \left(\frac{d\epsilon}{d\lambda} \right)^2 - cd \frac{d^2\epsilon}{d\lambda^2} \quad (3)$$

三阶导数为:
$$\frac{d^3I}{d\lambda^3}/I = c^3 d^3 \left(\frac{d\epsilon}{d\lambda} \right)^3 + 3c^2 d^2 \frac{d\epsilon}{d\lambda} \frac{d^2\epsilon}{d\lambda^2} - cd \frac{d^3\epsilon}{d\lambda^3} \quad (4)$$

四阶导数为:
$$\begin{aligned} \frac{d^4I}{d\lambda^4}/I = & -c^4 d^4 \left(\frac{d\epsilon}{d\lambda} \right)^4 + 4c^3 d^3 \frac{d\epsilon}{d\lambda} \frac{d^2\epsilon}{d\lambda^2} \\ & + 3c^2 d^2 \left(\frac{d^2\epsilon}{d\lambda^2} \right)^2 - cd \frac{d^4\epsilon}{d\lambda^4} \end{aligned} \quad (5)$$

由上可见对于二、三阶导数,当 $\frac{d\epsilon}{d\lambda}$ 为零时,光强对波长的二阶和三阶导数与浓度呈线性关系,当 $\frac{d\epsilon}{d\lambda}$ 和 $\frac{d^2\epsilon}{d\lambda^2}$ 均为零时,光强的四阶导数与浓度呈线性关系。更高阶导数的情况亦与此类似。这就是导数分光光度法定量分析的基础。

如何获得导数图谱和解释导数曲线是导数分光光度法的两个重要环节。关于获得导数图谱的技术,50年代后期到60年代末,研究最多的是电子微分法,即将仪器的输出信号(I)对时间(t)微分得到 dI/dt 。此时,如果波长扫描速度($d\lambda/dt$)保持为常数,即可得到

$$dI/d\lambda = (dI/dt) / (d\lambda/dt)$$

因 $d\lambda/dt = c$ (常数) 故

$$dI/d\lambda = (1/c)(dI/dt)$$

Mavtin曾用简单的RC微分线路实现此目的;在此期间也出现了双波长光度法。

60年代到70年代是研究的高峰时期,除继续研究上面两种方法外,又相继出现了数值微分、波长调制及机械式转速计等。其中1964年A. Savitzky等提出了一种对数字、数据进行最小二乘法拟合平滑和求导处理的简单卷积方法。尔后J. Steiner等对此进行了修正和补充;1973年R. N. Hager对各种波长调制方法进行了比较。1981年J. K. Kauppinen等报导了一种采用傅里叶变换自重叠合(Self-deconvolution)技术求导方法。这些方法不仅可用于对光谱数据求导,且对提高光谱信噪比十分有利。随着微型计算机的广泛使用,此技术必将获得迅速发展。

在获得以导数方式输出的信息后,如何识别和考察这种导数图形,对分析人员来说是十分重要的。1955年,T. Giese曾将具有不同高度、宽度和不同的波峰距离的两个重叠的波带利用图示计算机,用图解法进行了一次微分,说明导数分光光度法区分重叠峰的能力。1963年,R. C. Smith对等高宽波形相同的两个重叠带的一、二阶导数光谱的分辨率进行了计算,得到的结果为对高斯型带一、二阶导数光谱可分辨所需的波峰距离分别为半峰宽的0.85和0.63。对Lorentzian型带,相应的为0.56和0.33。1975年,T. C. O'Haver等研究了小波峰分别被2.5、10倍高2倍宽的波带覆盖,两峰中心距离为大峰半峰宽的0.75倍,利用导数曲线可以识别小波带的存在。1980年,J. E. Cahill等用差分法计算导数光谱后认为, n 阶导数光谱的 S/N (信噪比)和原光谱的比值,和微分波长差($\Delta\lambda$)的 n 次方成正比,但他在深入考察导数技术对光谱曲线的影响后进一步指出,在应用导数技术时,必须注意

导数阶数(n)和微分波长差($\Delta\lambda$)的选择,当 n 增加时分辨率显著提高,而 S/N 降低;当 $\Delta\lambda$ 增加时 S/N 提高,但达到一定程度后,由于偏离效应,此优越性即被削弱。在实际工作中,需统筹考虑。G. Talsky 等对高达七阶导数的曲线进行研究后认为,在通常情况下,四阶导数即可获得最佳分辨,并保持较低噪声。1985年,陈璞等人在 TRS-80 微型计算机上,计算了高等宽、不等高等宽的两个重叠的高斯型带的二、四阶导数的分辨情况。1988年李建军等从量子化学角度讨论了导数分光光度法中重叠谱带的相互干扰,得到了一些理论标准和误差公式,并通过实验数据作了验证。

关于导数光度法的应用,70年代后期以来得到了较快的发展。利用导数光度法分辨能力高的特点可实现常规光度法难于进行的多组分同时测定,例如 S. Shibata 用双波长导数法同时测定了基本吸收曲线重叠十分严重的 2,4-二氯酚及 2,4,6-三氯酚混合物。又如李金和等提出了组合导数分光光度法,并用此方法成功测定了 M_1 与 W , M_2 与 T 的混合物。关于蛋白质和氨基酸分析,导数光度法,特别是高阶导数法,已被用作确定蛋白质特征“指纹”的工具,在分析氨基酸混合物时,由于光谱重叠严重,要用常规光度法来实现各组分的测定,通常是很困难,甚至是不可能的。例如 Balestrieri 采用二阶导数光度法即可同时测定色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸。还有异构物的分析,异构物大多具有相似谱带,在混合物中吸收带重叠而不易检出,也难以确定异构物中各吸收曲线的特征峰(或谷)的位置。可是用 1 阶导数曲线鉴别分析鞣花甙和 1-脱氢鞣花甙。用高阶导数分析正丙醇和异丙醇,正丁醇和异丁醇以及测定汽油中的苯等均获得满意的结果。

混浊、悬浮和乳浊液分析:导数光度法在微分过程中能消除混浊、悬浮及乳浊液质点所产生的光散射影响和背景干扰,例如由于废水的混浊度变化使其中酚的常规光度测定造成困难。S. Shibata 利用一阶导数技术消除背景干扰;A. P. Demchenko 报导了高混浊条件下蛋白质的分析。

V. J. Hammond 等最初将导数技术引入分光光度分析。近年来,这种导数输出技术已经常用可见紫外分光光度法推广到诸如红外、原子吸收和原子荧光、核磁共振、色谱、极谱以及发射光谱等分析手段。涉及的分析对象包括环境、生物、医药、食品、染料、矿物、合金等方面。应用范围从气体、溶液、混浊液到固体试剂。适宜于进行痕量分析,研究反应动力学和考察催化剂表面吸附行为等,显示出特殊的优越性。

参考文献

- 1 Hammond V J, Price W C. JOSA, 1953, 43: 924
- 2 Grese A T, French C S. App Spectrosc, 1955, 9: 78
- 3 Martin H H. Nature, 1957, 180: 231
- 4 Savitzky A, Golay M. Anal chem, 1964, 35(8): 1627
- 5 Hager R N, Jr. Anal chem, 1973, 45(13): 1131A
- 6 Demchenko A P. Ukr Biochem Zh, 1979, 51(1): 80
- 7 Cahill J E. Int. Lab, 1980, 1(2): 64
- 8 Kauppinen J K, Moffatt D J, Mantsch H H, Cameron D G. Anal Chem, 1981, 53(9): 145A
- 9 李建军, 罗庆亮, 曾云鹤. 高等学校化学学报, 1988, 9(4): 337
- 10 李金和, 莫长生, 史慧明. 分析化学, 1989, 17(3): 217

(陕西师范大学杨台情、傅克德教授撰)

瞬态相干光谱学 coherent transient spectroscopy 以瞬态相干效应为基础研究物质的微观动力学过程,是最近发展起来的激光光谱学的一个分支,称为瞬态相干光谱学。它可以分辨被线型掩盖的光谱精细结构,提供其它光谱学方法无法得到的关于物质内部深层次的信息。

瞬态相干光谱学中的基本物理概念源于 Bloch 等开创的核磁共振方法。核磁共振研究能揭示磁偶极子相互作用的物理图像,其中自旋这个概念起着重要的作用。Feynman 等论证了任何

二能级系统都可以处理为 1/2 自旋系统,因而磁共振与光学共振之间存在明显的相似特征。

考虑到弛豫衰减时,强相干场作用下二能级系统的跃迁几率 W_{12} 可表示为

$$W_{12} = E^{-2} \sin^2(\pi/2) t$$

其中 r 为弛豫时间的倒数,而

$$X = \mu_{12} E_0 / \hbar$$

称为 Rabi 频率, μ_{12} 是二能级偶极跃迁矩阵元, E_0 为入射场振幅。因而二能级系统与相干场相互作用时,上下能级粒子数处于脉动状态。当观测时间小于弛豫时间时,即可观察到脉动辐射信号。这种现象称为瞬态相干现象。

在理论研究方面, Bloch, Torrey 和 Hahn 做出了重要贡献。Bloch 最先引入了偶极矩和磁场的概念,前者现称为 Bloch 矢量,后者称为有效场。不过,以宏观感生极化强度为场源的波动方程, Bloch 只求出了稳态解。Torrey 利用拉普拉斯变换给出了波动方程的普遍解,但他的普遍解中有 4 个难以确定的常数,限制了 Torrey 解的实际应用。Hahn 在 Torrey 工作的基础上导出了比较实用的普遍形式并在若干瞬态相干效应中得到应用。

最近 30 年来,瞬态相干光谱学的实验技术取得了长足进展。从实验技术的观点看,观测瞬态相干光学效应,必须具有与测量介质能级共振的单色强相干光源,要能形成理想的脉冲序列激发介质,要有提取瞬态信号的检测手段和数据处理系统。早期的实验使用脉冲激光器,在光频区成功地观察到与核磁共振中相类似的瞬态相干效应,例如光子回波、光学章动和自感应透明等均在光频区被相继发现。但由于激光波形不稳,脉宽、幅度和持续时间无法控制,因而难于进行精确的测量。70年代后期,由于可调谐激光器调谐范围扩大,线宽压窄,瞬态相干实验不再局限于少数系统。特别是 Stark 开关技术和频率开关技术的引入,大大推动了这一光谱学分支的发展,发现了一些新的瞬态相干效应,而且使这一领域的工作实现了从定性研究向定量分析的飞跃。

最近 10 年这一领域研究的主流是利用瞬态相干效应研究弛豫过程。特别值得指出的是 Berman 和 Brewer 等在利用光子回波对速度碰撞的研究时,不仅测出了碰撞参数,而且使碰撞粒子速度的大小和方向对光谱线增宽的影响也能得到圆满解释。他们对绝热反转和延迟光学章动的研究能测定出能级弛豫速率。另一个最新进展是把瞬态相干效应应用于高分辨光谱测量。例如孙陶亨和 Kash 等利用相干 Raman 拍频技术测量 CH_3F 分子的振转跃迁简并态,得到了一系列禁戒跃迁在混合时的强辐射,能级间隔仅数十千赫。他们还利用光子回波技术测定了该分子的核自旋与分子转动间相互作用的超精细分裂。利用瞬态相干效应直接测定偶极跃迁矩阵元近来取得了新的进展。例如 Shoemaker 等利用 Stark 开关技术对 NH_2D 分子的跃迁矩阵元进行了测定,其精度大大超过了早先 Hocker 等用脉冲 CO_2 激光测定 SF_6 跃迁矩阵元的精度。

展望今后的发展,瞬态相干光谱面临以下几方面问题。从理论的角度看,对弛豫机制的细节研究有待进一步深入,目前尚未找到能对实验结果圆满解释的理论模型。对超辐射的理论还不能透彻说明不相关的粒子如何通过辐射相互作用建立协同的相关关系。从实验技术的角度看,尽管频率开关技术是比较理想的方法,但研制带有频率开关的稳频激光器还有许多问题要解决,但这方面技术的进展可能推动瞬态相干光谱学向纵深发展。最后,瞬态相干效应在光谱学中的应用正处在初级阶段。但从已取得的结果看,潜力是很大的,亟待进一步开拓。

参考文献

- 1 Bloch F. Phys Rev, 1946, 70: 460
- 2 Torrey H C. Phys Rev, 1949, 76: 1059
- 3 Feynman R P, Vernon E L, Hellwarth R W. J Appl Phys, 1957, 28: 49
- 4 Brewer R G, Azriel Z, Genack, Phys Rev Lett, 1976, 36: 959
- 5 孙陶亨, Kash J A, Hahn E L. 北京大学学报, 1985, 3: 32

(陕西师范大学王应宗副教授、傅克德教授撰)

自由电子激光 free electron laser 1976年,在美国坦福大学的超导电子直线加速器上成功地运行了世界上第1台自由电子激光器(FEL),这是人类开发利用电磁波谱资源的又一次重大突破。此后,许多发达国家的一些高水平实验室相继投入FEL研究,FEL运行波长从毫米波、远红外到可见光,真空紫外,成了跨越波谱范围最宽、调谐能力最大的一种激光源。FEL的最高峰值功率已达GW级。利用FEL作固体物理、材料科学、医学分子生物学研究的头几批科研成果已经问世;为医学、材料科学和核聚变研究的专用FEL,有的已出光运行,有的正建造或设计中。

FEL的工作原理虽不复杂,但不同于60年代发展起来的常规激光器。它是一种用相对论优质电子束作为工作媒介,在周期磁场中以受激发射方式放大短波电磁辐射的新型强相干辐射源。常规激光器的工作媒介是能实现粒子数反转的一些固体或气体物质,如红宝石、二氧化碳气体等,其光发射依赖于工作媒介原子或分子中束缚电子的能级跃迁。正是相对于这种受原子或分子束缚的电子而言,FEL中的电子是在真空中的“自由”电子,不受原子或分子束缚(尽管受外界磁场束缚),故名“自由电子激光”。

FEL振荡器工作原理为由一系列沿着扭轨磁铁长度方向(轴向)交替排列极性相反的磁极形成周期为 λ_w 的周期磁场。当一个来自加速器的电子在扭轨磁铁的中间平面($Y=0$)穿过周期磁场时,便左右交替偏转波浪式向前运动,这意味着电子在磁力的作用下产生了垂直于轴的加速度。电子作加速运动时要辐射电磁波,该电磁波主要集中在轴向前方,我们称它为电子的自发辐射,它包含有各种波长,但都以光速沿轴向向前传播。如果其中有波长为 λ_n 的辐射,而电子沿轴向前进一个 λ_w 距离所需的时间正好等于 $(\lambda_w + n\lambda_n)/c$,即有

$$\lambda_w/v_z = (\lambda_w + n\lambda_n)/c \quad (1)$$

式中, n 是整数; c 是光速; v_z 是电子的轴向速度。那么电子在每个运动周期内发出的自发辐射对于波长为 λ_n 的辐射波而言其互相的相位差为零,得以叠加加强;而对其它波长的辐射,其互相的相位差不为零,互相抵消。(1)式称为共振条件,它可以写成对 λ_n 表达式。令 γ 是以电子静止能量为单位的电子总能量,则有

$$\gamma^2 \equiv 1/(1 - \beta_z^2) \equiv 1/[2(1 - \beta_z)] \quad (2)$$

将(2)代入(1)式,并考虑 $n=1$ 的基波,可得

$$\lambda = \lambda_w/2\gamma^2 \equiv \lambda_w(1 + K^2)/(2\gamma^2) \quad (3)$$

式中, K 是与 λ_w 、 B_w (扭轨磁铁磁场强度)相关的参数。(3)式说明了FEL得到短波辐射的原理,同时也说明了FEL的输出波长可以在很宽范围内调谐的原因,因为从加速器来的电子束,其能量可以方便地在很大范围内连续调变。目前已有可提供从MeV到GeV能量电子束的各种加速器,如果 λ_w 为2cm,那么原则上可以用FEL得到从毫米波到X射线(0.5nm)整个短波谱区的电磁辐射,这是现有的任何其它激光源都办不到的。以上是单个电子在通过扭轨磁铁时其自发辐射如何在 λ 波上得到加强的情况,即自发辐射的净结果是得到波长为 λ 的辐射。但FEL作为一种受激辐射源,关键是它的受激辐射机理,即每个电子的辐射是如何相互加强的。如果进入扭轨磁铁的每个电子能近乎相同的相位发出辐射,就可实现每个电子自发辐射的相干叠加,所以问题归结为必须造成电子束在波长 λ 上的群聚。单个电子的自发辐射光波被一对光学镜反射,在第二次反射后,光波与电子束一起进入扭轨磁铁,光波电磁场与扭轨磁场的合成波将对电子束造成沿轴向的作用力,称之为有质动力。有质动力波具有光波的频率,但波数更大(波长更短),因此它的传播速度慢于光速,而与电子的轴向速度相当,两者可同步前进。这样,在电子看来,有质动力波电磁场是有效场,处于波的不同相位区的电子将受到有质动力的略微加速或减速(取决于电子与所在点的有质动力波电场是同相还是反相),造成电子束在光波长 λ 上的群聚。原先线密度均匀的电子束在有质动力波作用下发生的密度调制使电子束分成一个个越来越密集的微束团,各微束团间的距离就是光波长 λ ,这样各个电子

自发辐射的相位差几乎为零,辐射就被相干叠加,形成受激辐射。

除受激辐射机理外,FEL的单程增益概念也很重要。既然有质动力波不是加速就是减速电子,这就存在电子束与有质动力波间的能量交换。当电子的轴向速度 v_z 稍大于有质动力波的同步速度 v_s 时,FEL小信号单程增益函数 $G>0$,即电子束与有质动力波作用的净结果是把能量交给了有质动力波,从而放大了进入扭轨磁铁的光波,这对应于被略微加速的电子数少于被略微减速的电子数的情形。

FEL的基本工作模式依据有质动力波中光波的来源的不同分为两大类:如果电子束的自发辐射被一对光学镜反射造成入射光波,并与电子束的受激辐射共振,FEL就工作于振荡器模式;如果有质动力波里的光波场来源于某一外光源,则FEL工作于放大器模式;如果电子束流强足够长,扭轨磁铁的长度也足够大,以致电子光束单次通过扭轨磁铁时的自发辐射造成电子束的群聚,电子束的受激辐射同时被放大,FEL就工作于超级辐射模式。为探索FEL向短波长和高效率发展的新路子,近年来还研究成功了几种的工作模式,其中突出的有两级振荡器模式、高次谐波光学速调管模式和主振荡功率放大模式(MOPA)。

加速器技术、扭轨磁铁和光镜技术是FEL赖以发展的三大技术支柱,特别是加速器技术。实际上,FEL的原理机制目前已了解得比较清楚,研究发展FEL的主要努力已转向加速器技术,其次是扭轨磁铁和高稳定高反射比反射镜。理论和实践证明,任何一台成功运转的FEL主要取决于加速器能否提供高品质的电子束,包括高流强(几十到上千安培的脉冲峰值电流)、低发射度(束归一化发射度小于 7λ)、低能散度(小于 $1/2N$, N 是扭轨磁铁的周期数)、长电子束宏脉冲宽度(足以使增益达到饱和)和电子束脉冲时间结构的稳定性。尽管加速器技术已有半个多世纪的发展历史,但对提供如此优异品质的电子束,现有的各类电子加速器都面临挑战。特别是当FEL向着短波长发展时,对电子束品质的要求变得更为苛刻。在FEL推动下,电子加速器技术已有不少重大发展。(1)微波电子枪技术。发射电子的阴极放在射频谐振腔内。由于微波电场的击穿场强比直流电场高得多,电子束在高梯加速电场下很快就达到了相对论能量,从而有效地抑制了在低能时由于空间电荷效应导致的发射度迅速增长。热阴极微波枪多采用单晶 LaB_6 的阴极储备式阴极。由于电子源的原初归一化发射度反比于阴极的发射电流密度,大多数热阴极在 $20\text{A}/\text{cm}^2$,而 $\text{Cs}_2\text{K}_2\text{Sb}$ 、 Cs_3Sb 等光阴极可高达 $200\text{A}/\text{cm}^2$,所以光阴极微波电子枪的发展引起很大重视。采用激光引发阴极电子发射的另一个优点是易于控制电子束脉形状和时间结构,这在不少FEL的应用领域中十分重要。1989年,Maday等作Nd:YGA锁模激光器激励微波枪内的单晶 LaB_6 时,获得了当时世界上最高亮度的加速器电子束($5 \times 10^{11}\text{A}/\text{m}^2 \cdot \text{rad}^2$)。(2)高亮度注入器技术。一台加速器的电子束品质很大程度上由它的注入器决定。在FEL推动下,发展起来的高亮度注入器主要有两条技术路线。 ns 栅控电子枪加次谐波聚束器(一级或二级),后接次谐波预加速段,使电子速达到相对论能量($2 \sim 5\text{MeV}$)后,再进入磁相位压缩系统,以进一步提高峰值电流。为减小低能时的发射度增大和降低能散,次谐波聚束器采用基波与三倍频波的混频波,其幅度比 $9:1$ 。这种注入器的设计亮度高达 $10^{12}\text{A}/\text{cm}^2 \cdot \text{rad}^2$,峰值电流 200A 。光阴极微波电子枪,加次谐波预加速段,再加磁相位压缩系统。这种注入器的亮度可以做得比前者更高。有几个工作于真空紫外或X射线的高功率FEL采用这种注入器。(3)电子束能量回收技术。把从扭轨磁铁出来的电子束送入减速器装置,使电子束剩余能量返回给电子加速器。这种能量回收技术对静电加速器型FEL而言,是使加速器能提供安培级脉冲电子束流而不引起端电压过大波动的唯一方法,对射频加速器型FEL而言,是大幅度提高总体效率的主要手段。目前电子束能量回收率可达95%以上。(4)长脉冲、高稳定度功率源技术。为得到平均功率大的FEL,大功率微波功率源的脉冲长度从几 μs 向几百 μs 、甚至 ms 连续波方向发展,而输出脉冲的平顶平坦度要求长时间好

1%。(5)强流束传输技术。强流束传输技术包括消色散和等时性传输、磁相位和能量压缩系统、强流束的尾场效应控制等涉及防止电子束品质变坏的技术。(6)电子束诊断技术。ns和ps级电子束脉冲的能谱、时间谱诊断技术是研究和监测FEL运行的重要手段。利用切伦科夫辐射、条纹像机和射频场快扫描谱仪等技术来诊断电子束品质已成功用于FEL研究和运行监测。

扭轨磁铁是使相对论电子束与原初入射光波场能量交换的装置,它的设备的优劣会影响FEL的输出特性。大多数扭轨磁铁采用永久磁铁(钕钴、钕铁硼等),也有采用电磁铁的(螺旋电流绕组)。磁场周期一般在2~3cm,幅度典型是0.2T量级。周期和幅度值有的是固定的,有的设计成为一定的坡度(逐渐绝热地变小),以便在更多的周期数内满足共振条件(3)式,从而提高电子束能量引出效率。扭轨磁铁制造、安装过程中要十分注意误差的控制,既要保证各周期内的磁积分为零,又要保证中心轴与光学腔轴重合。FEL的单程增益与磁场周期数 N 的三次方成正比,但电子束能散又必须小于 $1/2N$,所以在加速器能保证的能散条件下,尽可能选取 N 比较大的设计。目前扭轨磁铁设计的一个重要研究方向是实现短周期(微型扭轨磁铁),这将大大降低电子束的能量参数,从而简化加速器和射线屏蔽,为推广应用FEL打开方便之门。FEL用的光腔反射镜类似于传统激光器所使用的反射镜。它首先必须具有宽通带特性,以保证光腔能在FEL所设波长范围内工作;第二,高镜反射比问题,尤其工作于短波长的FEL,增益低,对镜反射比非常苛刻,需用稳定的宽带镀膜;第三,光学元件应具有抗辐射损伤能力,特别是电子储存环上的FEL,大角外同步辐射可以迅速地损伤一般的高反射比镀膜。所以研制耐UV辐射的稳定高反射比光镜是发展紫外X射线FEL的必要条件;第四,在短波、高功率情况下,腔内的能量散逸可能损毁镜面。例如,10mW的FEL输出通过穿透比为1%的反射镜也会引起镜面的逐渐损坏,这将是发展高功率FEL的一个棘手问题。

FEL与常规激光器和微波器件工作波长和峰值功率水平相比较,不仅覆盖的工作波长区最宽,而且就单个激光器而言,也有最大的波长调变能力,这是FEL的最大优点,使它在医学、分子生物学、材料科学应用中将独占鳌头。常规激光器只能输出与光散射介质中的能量跃迁相对应的特定波长,染料激光器虽在窄的范围内调谐,但要有一个气体激光器作为光泵抽取,而且只能在较低的功率水平上工作。常规激光器至多只能把输入能量的百分之几转换为光,而FEL有高达65%的潜在效率。近年已成功实现了电子束的能量回收,并采用带有坡度的渐变扭轨磁铁,使一些已运行的FEL达到约40%的效率。从峰值功率水平讲,常规激光器已达 10^{12} W,而FEL最高水平是 $10^8\sim 10^9$ W。不过FEL的平均功率水平可以做得比常规激光器高得多,这是FEL的优势所在。因为常规激光器的平均功率水平受限于工作介质的废热排除,而FEL工作介质是真空中飞行的电子束,不存在热效问题。FEL最高平均功率水平设计值是100kW连续波($10\mu\text{m}$ 波长)。在发展短波方面用常规激光器已获得几nm的X射线,而已运行的FEL最短波长是240nm(前苏联VEPP-3电子储存环FEL);美国的PEP大储存环,正设计用超辐射工作模式得到4nm的X射线FEL;其扭轨磁铁长度为60m;美国杜克大学正在建造10~20nm的FEL,以上是总的能力上评述FEL目前水平。如果从不同的波长谱区来比较,那么FEL最富竞争力的波长区在远红外($1\text{mm}>\lambda>10\mu\text{m}$),在这里不仅可填补大片空白电磁波谱,而且功率水平超过现有电磁波谱源几个量级;其次是真空紫外到软X射线区($400\text{nm}>\lambda>100\text{nm}$),因为在这里没有其它可调谐的强相干辐射源。

FEL发展的趋向可归结为5个方面:(1)高功率、特别是高平均功率。美国星球大战支持下的高功率FEL是这方面代表,主要是洛斯阿拉莫斯和波音公司的0.5~1 μm FEL(射频直线加速器型),其输出激光脉冲串长度达 s 量级,峰值功率在 10^8 W。(2)短波。有好几台设计在真空紫外X射线运行的FEL可望在近几年内出光,大多数是基于电子储存环的。美国杜克大学专门设

计的10nmFEL和PEP大环4nmFEL是这方面最引人注目的例子。在一些低能加速器上采用两级振荡器工作模式来得到短波FEL,最成功的是美国UCSB。他们用6MeV 20A能量回收型电子静电加速器电子束,得到1 μm 15kW的FEL输出。(3)连续波运行FEL。在世界著名的连续电子束加速器CEBAF上将建造连续波FEL,它分两个部分;CEBAF注入器将建造2~30 μm 红外FEL,1kW连续波;其北端射频加速器区将建立200~800nm真空紫外FEL。(4)短波运行下的高效率机理研究。随着FEL向短波推进,效率变得越来越低,必须探索短波运行下FEL的高效率新机理。这方面的突出例子是高次谐波光学速调管工作模式在获得紫外FEL上的成功,这是一种发展短波长和高效率两方面兼顾而有效的FEL新工作模型。(5)紧凑型FEL。从实用、小型、经济角度看,已运行FEL还很不合要求,所以发展紧凑型FEL至关重要。这方面的突出例子是美国斯坦福大学的1mm~100 μm 远红外FEL,其微波电子枪长7.8cm,电子束能量2~4MeV,采用微型扭轨磁铁,整个FEL总长2m。

实际上FEL是一种最优异的强相干辐射源,其应用前景将是十分辉煌的:(1)国防领域美国星球大战计划把FEL作为陆基定向能武器优选对象,已投入巨资,并计划于1994年进行关键性陆基FEL整体技术实战试验,FEL还可望作为激光雷达、激光通讯和光对抗的高功率、可调谐功率源,因为频率捷变可使敌方难以防备;调谐到大气或水下传输佳点,可保证战略通讯。(2)重大医学应用。光动力学治癌:把无毒光敏剂注入人体,恶性肿瘤容易吸收而健康组织很少吸收,利用它对FEL波长的选择性,既可诊断和定位恶性肿瘤,又可使含敏剂的肿瘤产生单态氧,从而杀死肿瘤细胞而无损于正常细胞。美国已在这方面取得了重要进展,鉴定了几十种光敏剂,推进了白血病和淋巴瘤的治疗。用常规激光器作为光动力学治癌,波长离HPD吸收峰太远,平均功率也不够高,效果不好。心血管病治疗:激光能摧毁动脉斑块和血管血栓,关键是要选择波长,使其不被其它正常组织吸收,以避免血管穿孔或再闭的危险发生。FEL的宽调谐能力和光脉冲功率的可控性可以做到这一点。高级眼科手术:1.5 μm 波是眼睛的安全波长,FEL能方便提供,它比目前常用的ND:YAG激光器(1.06 μm)安全8000倍,比CO₂激光器(1.06 μm)安全100倍。几十ps的FEL短脉冲用于透明的或染色的眼睛组织的外科分裂,而 μs 可变宽度长脉冲串适用于视网膜的光焊接。射频加速器FEL,可方便地提供上述两类光脉冲。单色性是光凝固的最重要条件,需依据被治疗组织是眼前部(结膜、角膜、虹膜)还是眼底部(玻璃体、脉络膜、视网膜)来选择波长,而能量密度和聚焦性能好是进行精确凝固的前提。FEL的波长可调,能量密度高,是光凝固手术的理想光源。(3)生命科学研究。人体组织的电磁能吸收系数在0.7~3 μm 波长区有4个量级的变化,0.7 μm 被称为“治疗窗”,吸收极小,而3 μm 附近是水的吸收峰,因此在该波段连续精细可调对人体生命科学研究十分重要。但常规激光器在该波段不能很好调谐(染料激光器的调谐范围仅在0.4~1 μm ,功率水平也不够高),射频加速器型FEL既可输出ps级超短光脉冲,又可从几 μs 到上百 μs 控制这些脉冲串的持续时间,再加上波长的连续性,使它成为支撑生命科学重大前沿课题研究的崭新技术,如光合作用原始过程研究的ps光谱,复制DNA的动力学过程和谐振态研究,生命生理过程的激光超显微探测等。(4)材料科学研究。用FEL作材料光谱分析可获得比常规光谱分析高一个量级的分辨率。FEL的波长可调就可有选择性地光致离解材料的原子或分子,达到分辨出样品中某种元素的单个原子,这是其它分析方法难以达到精度。比分子弛豫时间还短的ps级光脉冲与波长可调相结合就可控制材料的键选择化学过程,从而开发新材料。在一个分子的光致离解可催化大数目的它种分子时,高效的FEL可用于控制催化作用,并达到商业开发。远红外超短脉冲FEL是材料非线性光谱分析和瞬态过程研究的重要手段。FEL的高峰值功率在合适的波长下可用于材料照射改性。(5)能源领域。FEL在mm波段可有MW级的平均功率输出,可用来强磁场

约束的等离子体以电子回旋谐振加热, 或对高 β 等离子体进行加热和诊断。FEL 在同位素分离富集工艺中也有吸引力, 如 $16\mu\text{m}$ 波长 FEL 用于 ^{235}U 分离, 分离系数高、成本低、可充分利用铀资源。(6) 激光加速器。现代高能加速器极其庞大、复杂和昂贵。利用聚焦好的高强度激光可产生比高频加速腔中高出几个量级的电场的电场强度, 从而使加速器尺寸和造价均大为减小, 这种所谓激光加速器被认为是实现超高加速和加速器小型化的有竞争力的途径。FEL 的高亮度为激光加速器的成功提供了可能。

(中国科学院上海原子核研究所博士生导师
赵小凤、杨福家院士撰)

激光光谱学 laser spectroscopy 激光光谱学是激光出现后蓬勃发展起来的学科。它以激光为光源, 解决传统光谱学不能解决或难以解决的问题, 例如高分辨和超高分辨光谱, 高激发态光谱以及超快过程光谱等问题。近 30 年来, 无论是光源、光谱方法或应用方面, 激光光谱学都在快速发展。首先, 光谱分辨率愈来愈高。1970 年, 是激光光谱学有较大突破的一年, 当时用饱和吸收法获得了激光腔外气体消多普勒加宽谱, 观测了碘分子被多普勒加宽所淹没的超精细结构, 谱线宽度为 6MHz , 分辨率为 10^6 。其次, 时间分辨率越来越高。1965 年出现了激光锁模技术, 开始发展脉宽为微微秒的超短脉冲激光。目前已可短至 0.03ps , 随着脉宽的压缩, 激光功率愈来愈高, 已可达 10^{12}W 以上。超短脉冲激光和激光调谐技术的结合建立了微微秒光谱学。近 10 年, 激光光谱学与其它学科相互渗透, 交叉的深度和广度都在不断发展。例如, 凝聚态物理中的固体能谱及表面物理、理论物理中的广义相对论的验证等, 都和激光光谱学有密切关系。激光光谱更是激光化学和激光生物学的重要基础。

近 20 年来发展了多种多样的激光光谱学方法。除通常的激光吸收和激光荧光光谱法外, 主要有: (1) 在线性光谱范围内的各种消多普勒加宽的光谱法。该法包括原子束、分子束、光学双共振、能级交叉及量子拍频等方法。这些方法本来出现在激光问世之前, 但激光的出现为这些方法增加了活力, 较早成为激光光谱学的一个重要方面, 例如高强度的脉冲调谐激光促进了量子拍频的开展。继 1963 年首次通过荧光观测到由激光激发的量子拍频之后, 又发展了通过吸收、双折射及二向色性, 以及场致或光致电离来观测量子拍频的方法, 光频——微波, 光频——射频双共振在揭露被多普勒加宽所淹没的精细和超精细结构方面, 一直在起着重要作用。(2) 饱和光谱学。1963 年随着兰姆凹陷 (Lamb. PiP) 及烧孔效应的发现, 开始了以饱和激发为基础的饱和光谱学的研究; 1970 年以后广泛用来得到消多普勒的光谱, 开始测定饱和吸收; 以后由于要降低气体密度以减小压力加宽, 提高分辨率, 于是在 1972 年出现饱和光谱的内调制荧光法; 最近几年又出现了饱和吸收的外差检测法, 进一步提高了饱和光谱法的高分辨能力。(3) 偏振光谱法。用偏振光进行有选择的饱和激发, 使被激发体系产生双折射和二向色性, 与此同时用交叉偏光进行检测, 可以获得很高的光谱分辨率和灵敏度。1981 年后又将偏振光谱法与上述内调制荧光法结合起来, 建立了内调制偏振光谱法。(4) 消多普勒双光子光谱学。1970 年提出设想。1973~1974 年观测到钠原子消多普勒双光子光谱。从此开始这方面的研究, 成为高激发态光谱研究的重要手段。(5) 光学 Ramsey 技术。70 年代末, 用以上提出的一些消多普勒光谱方法, 原则上应使光谱分辨率到自然线宽的极限, 但当人们试图使分辨率超过 10^{10} 时, 遇到了分子有限渡越时间的影响和平方项多普勒加宽因素所带来的障碍, 空间分辨的 Ramsey 技术用以克服前一种障碍, 已经获得了 LKHZ 的测量结果。与此同时也发展了时间分辨的光学 Ramsey 技术, 它可以克服超短脉冲谱展宽在光谱测量中对分辨率的不良影响。(6) 陷阱原子 (离子或分子) 光谱学。这是为克服平方项多普勒加宽, 以获得自然线宽极限的分辨率而发展起来的一种新的光谱学方法, 理论估计可使分辨率达到 10^{14} 。(7) 非线性光学的光谱方法。随着激光光谱学研究范围的扩大, 人们希望发展一些不仅适

用于气体中的原子和分子, 同时也适用于凝聚态物质的光谱方法, 在探测各种非线性光学效应基础上发展起来的几种光谱学方法就属于这一类。这里仅介绍最有代表性的两种。喇曼增益和逆喇曼光谱学, 用这种方法探测分子或晶体的振动能级时, 可以在可见区激发和接收, 避开红外区激光光源和接收技术的困难。四波混频光谱法, 这是以三阶非线性光学现象中的共振增强效应为基础发展形成的一种光谱学方法, 可用于测量包括激发态之间的能级间距以及激发态的纵向和横向弛豫时间。其中相干反斯托克斯喇曼散射 (CARS) 光谱已得到广泛应用。(8) 多光子电离光谱法。它借助于多光子电离的过程, 通过探测离化的电子或离子来研究光谱, 应用较广。主要用于分析原子和分子激发态、里德伯态的能级及其性质, 它也是激光同位素分离和单原子探测的手段。(9) 瞬态相干效应。包括光子回波、光学章动、光学自由感应衰减等, 用于光谱学的一种方法主要用于测量原子、分子及固体中各种无激发的纵向和横向弛豫时间。

由于激光光谱的高灵敏度、高光谱分辨率和高时间分辨率, 已经或将在以下几方面具有科技开发意义: (1) 揭露原来被谱线加宽所掩盖的精细和超精细结构, 使原子和分子结构的研究更趋深化; (2) 探测原子、分子的高激发态、里德伯态及其性质; (3) 复杂谱线结构的简化标识; (4) 基本物理常数的测定及基本物理问题的研究; (5) 单原子或少数原子与分子的检测; (6) 超快过程及不稳定物质的探测和研究; (7) 激光光谱学是激光引发化学反应、激光定向化学反应等激光化学问题的基础; (8) 固体能谱及各种碰撞、弛豫过程的研究; (9) 激光光谱学对于新激光谱线的发现和新型激光器的研制都具有重要意义; (10) 激光光谱学在工业上应用愈来愈广, 如激光同位素分离、激光测污、环境科学、化学工业中的激光催化、激光合成等。

在今后一段时间内, 估计激光光谱学仍会朝着超高光谱分辨率和高灵敏度方向发展, 并在应用于基础物理问题的研究及应用于激光化学等以下几方面会有新的突破。目前已经有了些实现的方案, 今后还会出现新的方案, 一旦突破自然线宽的极限, 将会带来新的理论和实验问题。(1) 光谱分辨率将超越谱线自然线宽给出的极限。(2) 随着超短脉冲激光技术的发展, 时间分辨率有可能超越微微秒而达到 10^{-15} 范围, 这时, 脉冲光本身以及在如此短时间内, 光与物质的相互作用都会出现新的理论问题, 需要重新加以阐释, 也会出现一些新的现象。(3) 随着探测灵敏度的更进一步提高, 光场统计性的问题会变得突出。光谱的研究将会与光场统计性和相干性的研究紧密结合。(4) 许多基本物理问题将会通过激光光谱的精确测定而受到检验、修正和发展, 随着一些基本物理常数的精确测定, 某些基本物理理论可能会遇到冲击。(5) 激光分离同位素和微量杂质原子的检测会逐步走向实用, 化学反应动力学过程的激光检测和控制也会有较大进展。(6) 激光光谱将会成为包括物理学、化学、生物学、地矿学等在内的许多实验室的基本研究手段之一而被广泛采用。

参考文献

- 1 Ch. Ch. Bordé C R. Acad. Phys Sci Paris, 1970, 271, 371
- 2 nschHäT W, et al. Phys Rev Lett, 1971, 26, 946
- 3 nschHäT W. et al. Opt Comm, 1974, 11, 50
- 4 Biraben F, et al. Phys Rev Lett, 1974, 32, 643
- 5 Allen L, Ebrely J H. Optical Resonance and Two-level Atoms, New York: John Wiley and Sons, 1975
- 6 Baklanov Y V, et al. Appl Phys, 1976, 9, 171
- 7 Wieman C, Hänsch T W. Phys Rev Lett, 1976, 36, 1170
- 8 Ielokhov V S, Chebdayev V P. Nonlinear laser spectroscopy, New York: Springer-Verlag, 1971, 4~11

(陕西师范大学唐小玲讲师、傅克德教授撰; 王天真审)

激光参数的测量 单模运转的激光器, 其模模的观测方法很多, 其中比较熟知的有直接观测法、光点扫描法、扫描干涉仪法、法布里—珀罗照相法和拍频法等。随着科技的发展, 许多新的

测量方法也应运而生。现在,可以用摄像机把激光束成像于硅靶摄像管的靶面上,输出的视频信号及行场同步脉冲经专用电路处理后,送到示波器观测或计算机显示并打印。同样,在 He-Ne 激光器输出的高斯光束的截面内,对任意等距离 3 点采光测量,经过处理也可以得到此光束强度的径向分布。对于 GaAs 或 Nd:YAG 等近红外激光器的输出光场的测量,可以利用二极管线阵对红外光有较高灵敏度的特性,用光二级管阵等组成简单的光学多道显示仪,就可进行实时观测。而采用光纤技术进行空序→时序变换的方法,可以实时显示相对光强曲线,也可以对激光器的横模模式进行定量研究。此外,电荷耦合器件(CCD)测量光强,已取得很大进展。线阵(CCD)可以将按空间分布的激光能量转变为按时间分布的电压信号,然后经存储显示,就可以观测到近场或远场的光场空间分布。

目前,国内用面阵 CCD 测量脉冲 Nd:YAG 激光束能量空间分布状态的方法是比较先进的。它是将面阵 CCD 摄像机与图像处理仪相结合,对脉冲 YAG 激光能量分布进行测试,进行数据采集,用 ADC 调入微机,处理、绘图、打印等一系列工作。其中,He-Ne 激光是系统的准直光源;YAG 激光系统是被测信号源;成像系统由衰减片 A、1.06μm 滤光器、调节光强的一对 Glan-Foucault 棱镜、聚焦透镜 L 和 CCD 相机构成。透镜 L 将被测激光束聚焦在摄像区上,其焦距的选择与系统的安装和 CCD 光敏面的尺寸有关,最后被测光束聚焦。在摄像区上的光斑尺寸应小于 CCD 相机的光敏面尺寸。图像处理仪与光束成像系统组成一体,采集储存激光能量空间分布信号,然后通过接口由键盘调入微机的内存,自动软件进行处理,给出高/中分辨的三维黑白/彩色图形。图形空间形象性强,可正视、侧视,又可背视。激光有“卫星”斑也十分清楚。

对脉冲 YAG 激光器的光束能量分布测量,利用 CCD 相机帧同步配合适当的脉冲延时控制激光器闪光灯的触发,容易探测到激光信号。

精确、简便而可靠地测量超短脉冲的脉宽,往往是超短脉冲激光器研制及应用的关键,其主要的测量方法有直接测量法和相关测量法。前者包括用光电探测器加上快速响应示波器直接观察及条纹照相法。相关测量法有二次谐波法及双光子荧光法等等。其中二次谐波法比双光子荧光法更为经济实用,分辨力、精度较高,目前的应用越来越广泛。对于被动锁模玻璃激光器,它的输出以非共线倍频的方式在 LiIO₃ 内产生二次谐波,用一维二极管阵列将谐波强度的空间分布示于通用示波器,根据脉宽与谐波光强分布的宽度之间的关系,可得出脉冲串的平均脉冲宽度。还可以 GaAs 表面的 SHG 方法对碰撞锁模的 Nd:YAG 激光的脉冲宽度进行测量,可以测出 PS 量的激光脉宽。超短光脉冲还可以用亚纳秒响应的检测仪器测量 PS 激光脉冲,然后通过对预测信号进行解卷积运算以求得脉宽的方法来实现。

一种较先进的方法,是用谐波法测量 PS 脉冲激光的宽度。它是用光栅取样,倍频作快门,以 CCD 作实时显示的超高速照相装置。CCD 所测的空间强度波形是被测光脉冲的自相关函数。脉宽可用下式确定:

$$\tau = \frac{\lambda N}{\sqrt{2c \cos \alpha}} \cdot \tau' \quad (1)$$

式中,τ' 是 CCD 测得高斯型光斑的半宽度,λ 为入射到光栅上的激光波长,N 为光栅每毫米距离上刻线的条数,α 为光栅的入射激光与出射激光之间的张角,c 为光速。

这种方法除了 CCD 强度测量有 10% 误差外,脉宽变化主要来自锁模激光器本身。如果与计算机联机进行实时处理,将会更加方便快捷。

$$\text{光束发散角定义为: } \theta_{(z)} = \frac{dW(Z)}{dZ} = \frac{\lambda/\pi W_0}{[1 + (\pi W_0^2/\lambda Z)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

远场发散角定义为:

$$\theta(\infty) = Z \rightarrow \infty \theta = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad (3)$$

两式中,W(Z) 为坐标总 Z 处的光斑半径,W₀ 为光腰半径,λ 为激光波长。

从以上发散角的定义可以看出,发散角的测量都可归结为光斑半径的测量,而高斯光束光斑半径的测量方法有:孔径法、针孔扫描法、不透明窄条法、刀口扫描法。由测出的光斑 W(Z) 就可以求出(远场)发散角。一个简单的二极管阵列、示波器和凸透镜组成的系统,就可以测出 W_f(聚焦点处的光斑半径,由 θ_f = W_f/f 就可求出远场发散角)。除了由束径来确定发散角的方法外,还可以利用不同 Q 值光栅测量激光高斯光束的发散角,这种方法仅需探测光束透射光栅后功率的最大值和最小值即可。

此外,还可以采用光纤技术进行空序→时序变换的方法,对 TEM₀₀ 模,示波器能实时显示出高斯曲线的全貌,很方便地测出发散角。当强分布花样照射在采光窗上时,通过空序→时序变换器把相对光强空间位置变化的函数变成按时间变化的函数,并变成与光强成线性关系的光电流。因为该法采用 50Hz 的高速光扫描,同时设置了同步脉冲和扫描标志线发生器,所以用示波器就能实时观察到稳定、清晰、连续的高斯曲线全貌。该方法的关键是空序→时序的变换,可以采用光纤技术进行。当光场分布照射在光纤的线端时,通过光纤的排列将光强分布有顺序地分布在光纤圆端的圆周上。对分布在圆周上光强的扫描,就相当于对分布在线端上的光强扫描一样,实现了线→圆的变换,这样就可进行高速扫描,同时也实现了空序→时序的变换。

(电子科技大学林晓莹、杨大让、胡志平撰)

军用中小功率(能量)CO₂ 激光技术

早在 20 世纪 60 年代初,激光器刚问世不久,美国休斯公司就研制成功第 1 台原始的红宝石脉冲激光测距机。自那时以来,激光测距就成为军事上不可缺少的装备了。

激光测距已经取代了以前的一般光学测距。其基本原理就是测量激光束从发射到达目标并被反射回来所需要的时间。实际上激光测距就是一具功能简化了的激光雷达。由于激光束比普通雷达波束窄、脉冲宽度为几纳秒到几十纳秒,所以脉冲激光测距机的距离分辨率和测距精度都较普通雷达高。一般军用激光测距机的精度已达到 2~5m,精密激光测距甚至可达厘米量级。激光测距的测程,在近地面范围内,由于受大气衰减影响较大,一般都低于普通雷达,但在高空(或深空)及垂直程上则可很大。目前军用测距机的测程都是几千米到数十千米。激光测距机的重量也由最初的几十千克减少到几百克(目前的测距望远镜)。

激光测距机大致经历了 3 个发展阶段,即以红宝石激光测距机为代表的原始阶段,以效率较高的 Nd:YAG 为光源并采用硅雪崩二极管为探测器的实用阶段,以及最近发展的采用各种人眼安全波段的激光测距机和引入外差接收而同时实现测距、测速甚至成像的多功能观、瞄、测合一系统的第 3 阶段。这实际上已从单纯的激光测距发展成具有完整雷达功能的激光雷达系统,这样的系统将作为 90 年代战场的主要工具。

激光测距的关键,是激光光源与探测元件。尽管 YAG 激光测距机在当前使用最多、技术也最为成熟,但由于它工作于 1.06μm 波长,对人眼极不安全,而且易受大气条件和战场烟尘的影响,因此使其发展受到了限制。早在 70 年代就提出“人眼安全”激光测距概念。在此之后,陆续出现了 10.6μm 波长的 CO₂、2.06μm 波长的 Ho:YLF、1.73μm 的 Er:YLF 以及 Nd:YAG Raman 频移 1.54μm,以及直到 1985 年才通过美国陆军使用评价鉴定的 1.54μm 波长钕玻璃激光测距机。就目前技术条件来看,由于 2.06μm 和 1.73μm 波长尚未找到适合测距用的高灵敏度探测器,所以发展不快,只有 10.6μm CO₂ 及 1.54μm Raman 频移和钕玻璃激光测距机最受人注目,并都已达到了实用化水平。

表1 Stanag 3606 人眼激光安全标准

激光器	波长	允许最大曝光量(J/cm ²) 重频(1Hz)重频(10Hz)	
红宝石	0.6943	5×10^{-7}	1.6×10^{-6}
Nd:YAG	1.06	5×10^{-6}	1
钼玻璃	1.54	1	1×10^{-7}
CO ₂	10.06	1×10^{-2}	3×10^{-3}

CO₂激光器与其它激光器相比具有以下优点:工作波长与今后广泛使用的8~12 μm 波段的红外热像仪(FLIR)相同,致使其传输性能以及穿透烟雾、雨雾、霾的能力相同,两者具有很好的兼容能力。CO₂激光器(包括波导CO₂激光器与TEA CO₂激光器)的器件效率高,一般都在8%~10%,适合于做成高重复频率的CO₂激光测距机。10.6 μm 波长CO₂激光有良好的透过大气雾、霾和战场烟雾的能力。一台CO₂激光器可以很方便地实现多条谱线输出,进行选支调谐。CO₂激光波长较长,由于长波长大气湍流的去相干作用较短波长弱得多,例如在强湍流情况下($C_N = 10^{-13}\text{m}^{3/2}$),在10km的水平传输距离上1.06 μm 的相干接收半径只有10.06 μm 波长的1/25,约0.4cm,因此,在水平程近地表面的应用中,长波长极有利于进行外差接收。基于上述种种优点,我们认为未来的CO₂激光技术在军事上有很大的潜力。军用CO₂激光系统的发展是曲折和漫长的。早在20世纪60年代末期,M. C. Teich就完善了CO₂激光外差接收技术理论,当时大家热心的是外差激光雷达与光通信系统(大气与深空)。但是由于元器件不成熟,CO₂激光器的可靠性、寿命以及调制、接收等基本元件都没有过关,所以外差CO₂激光技术只能进行一些基础实验研究,并未取得实质性进展。此后,到了70年代初期,由于TEA CO₂激光器以及波导CO₂激光器的出现,并且随着解决了封闭式器件的寿命、可靠性、稳频与调谐、调制、扫描技术和宽带HgCdTe探测器及致冷等技术问题,为军用CO₂激光技术第2阶段的发展奠定了坚实的基础。1974年报导了连续波调频(FM-CW)外差CO₂激光雷达的试验结果,不久以后,1978年RSRE报导了直接探测的脉冲CO₂激光测距机,从此以后在军用CO₂激光技术方面出现发展高潮。在这期间,无论是直接探测,还是外差探测的军用CO₂激光系统,都有了实质性的进展。

在军用CO₂激光系统中,具代表性的产品有:英国费兰蒂公司的303、307、311型直接探测CO₂激光测距机,外差接收305型CO₂激光测距机,116型高重复直接探测CO₂激光测距机,RSRE的外差CO₂激光测距仪;美国GTE西尔凡尼亚公司的精密跟踪系统(PATS系统),林肯实验室的火池(Fire Pond)系统;英国DREV公司的混合型TEA CO₂激光测距机,还有法国TPC137型直接探测脉冲式CO₂激光测距机与THC198型外差式脉冲CO₂激光测距机以及美国Texas仪器公司的激光器/热成像仪组合测距机等等。这些CO₂激光系统所采用的是TEA CO₂激光器、混合型TEA CO₂激光器与波导CO₂激光器;探测方式包括直接探测与外差探测,激光器工作频率从1Hz到100kHz甚至更高。可以认为,目前采用TEA CO₂激光器的低重复CO₂激光测距机与高重复CO₂激光测距机都已完成了工程发展。今后的发展方向是研制与红外热像仪全兼容的CO₂激光测距系统。除了直接探测与外差探测的CO₂激光测距以外,军用CO₂激光的其它方面的重点是制导、战场化学感测(测毒)与CO₂激光雷达。

当前,中国军用CO₂激光技术也得到发展。小型TEA CO₂激光器、直接与射频激励的波导CO₂激光器、高重复TEA CO₂激光器、混合型TEA CO₂激光器、光栅调谐小型波导CO₂激光器都已研制成功或通过鉴定。光伏型HgCdTe探测器已用在国产

的CO₂激光测距场上,被动稳频的CO₂激光器的频率稳定度已达到 10^{-6} ~ 10^{-7} 量级,主动稳频用NH₂D斯塔克池及SF₆饱和吸收池技术也已有报导,同位素CO₂激光器也已研制成功。但是,主动稳频CO₂激光器、外差用宽带HgCdTe探测器以及探测器用的致冷技术仍未见实用产品。在CO₂激光应用方面,CO₂激光多路载波已研制成功,便携式脉冲CO₂激光测距原理样机已通过技术鉴定并进行过多次外场试验,调谐波导CO₂激光器也进行了试验等等。总之,国内军用CO₂激光技术在直接探测CO₂激光测距机制研究方面已达到或接近国外80年代初中期水平,但是CO₂激光外差技术、接收技术研究方面则刚刚起步,正处在初期阶段。为了推动国内军用CO₂激光技术的发展,今后的研究方向是:(1)在现有直接探测CO₂激光测距机原理样机的研究基础上尽快实现向工程化、实用化方面过渡,同时尽早投入力量开展高频CO₂激光测距机的研制工作,在高重复CO₂激光测距机的研究工作中尽量利用低重复CO₂激光测距机已取得的成果,其最大测程定为5~10km,重复频率选取30~50Hz为好。(2)尽快开展CO₂激光测距机/热像组合兼容系统的研制工作,研制工作的重点是长寿命小型高重复器件(包括催化劑)以及CO₂激光与热像仪探测器共基片的研制工作(快速高响应度光导型HgCdTe探测器的研究工作)以及同步扫描技术的研究工作。(3)CO₂激光的最大优势在于外差接收,因此射频波导的CW外差与混合型TEA CO₂激光器脉冲外差的工作应同步进行,以适应今后不同应用场合的需要。(4)注意发展军用CO₂激光系统的相关技术,例如,致冷技术、CO₂催化再生技术、高重复、长寿命快速高压开关技术、光束调制与解调技术以及光束扫描技术等。

(西南技术物理研究所封鸿洲撰)

光波和微波的相互作用 light wave and microwave

interaction 自20世纪70年代以来,由于半导体激光器、集成光学、纤维光学和微波单片集成电路(MMIC)的发展,以及两者在半导体材料和工艺方面的兼容性,使得原来各自平行发展的光波和微波两门学科开始紧密结合,形成了新兴的光波和微波交叉学科,今后的发展趋势是两者将密不可分地融合为统一体。光波和微波相互作用包括光对微波信号的产生、放大与变换的控制作用,以及微波对光的传输、折射、偏振及信号传递的控制作用两个方面。前者主要利用光对微波半导体器件有源层中载流子浓度与运动的激发与控制;后者则利用导光媒质的极化与载流子分布受微波场控变而导致光导率、折射与偏振特性的改变。

目前该学科所涉及的范畴为:光载微波信号对微波半导体器件或功能组件的控制技术,包括微波振荡器的光控注入锁定技术、空间多路混频的本振馈电技术。这时,光是作为微波信号的载体,其实质仍是一个微波(参考)信号对另一个微波有源组件的控变作用;光信号对微波半导体器件或组件的直接控制技术,包括光控变频微波振荡器、光控微波放大器、光控微波移相器与衰减器、光控高速微波开关以及图像(光)信号对微波发射源的直接调制技术等;微波场对光的控变作用,包括微波信号对激光源的调制技术、MMIC内部场结构、电路性能及端阻抗的探测技术等;微波、毫米波信号的光致产生技术,包括重复频率为微波频率的高峰值、无抖动、时间可控的毫微秒脉冲与连续信号的产生及其应用(开关与门电路、采样、A/D变换等),具有特殊波形的微波毫微秒脉冲串的产生。用脉冲激光产生纳秒电脉冲,激励微波谐振腔产生微波、毫米波信号。用飞秒(10^{-15} s)激光脉冲在半导体或晶体上激励出太赫(THz= 10^{12} Hz)频谱的电磁脉冲。

微波信号的光控技术与电控技术相比的优点有:控制光源与被控制微波器件间具有接近理想的相互隔离,消除了空间与电路中的电磁干扰与信号串扰;以光纤替代笨重的射频馈电网络,可达到轻量、低成本、低损耗、宽频带、高可靠性;高稳定、无抖动、超快速的光控响应;光控电路轻量、紧凑、可与MMIC兼容和集成,构成光微波单片集成电路(OMMIC)或光电子集成电路(OEIC)。

早在1963年,加可白(H. Jacobs)在研究光电导体的迁移特

性时采用了光和微波的相互作用。70年代后期,对该学科展开了广泛的研究。开始时,仅利用光纤代替波导或同轴线传输微波信息,但很快发现光除作为微波的载体外,还可对微波信号作光控之用。尤其在微波相控阵中,用光控进行扫描极有吸引力,这就引发了光和微波相互作用这一新领域的探索。至今,该学科已成为学术界和工业界的热门课题,在国际学术会议上也被列为讨论的专题,如MTT-S、SPIE、IR和MMW等。

1. 微波振荡器的光载微波注入锁定技术及光控微波技术。有源相控阵技术,复用接收技术及脉间捷变频技术是未来的通信、雷达、对抗及宇航的关键技术。可以断言,新一代卫星通信和雷达必须用有源相控阵,而有源相控阵的核心是空间配置的各个有源T/R模块间的频率与相位同步问题。而传统的微波馈电网络存在结构庞大、损耗大、模块间信号串扰和空间安装困难等严重缺陷,难以付诸实用。这可用光纤网络来代替,以光为载体将微波(参考)信号对光进行调制,通过光纤网络作注入锁定。这是利用光和微波相互作用的最早研究课题。

至今已对二端口和三端口半导体结型器件,如IMPATT、BARITT、TED、BJT、FET、HEMT、PMHEMT等构成的微波振荡器的光载微波注入锁定进行了广泛的研究。光载微波的关键是光的微波调制技术,目前对于锁定常用简单的内调制法,其响应速率低于10GHz,但若对激光器作深调制,则由于激光二极管的非线性和被锁定微波半导体器件的非线性,而可利用这些非线性所产生的谐频效应,对被锁定振荡器作分谐波锁定。利用分谐波锁定可大大提高光载微波注入锁定的应用频率。光载微波锁定的另一个问题是微波信号的检取,这可直接利用被锁定振荡器的有源区的光控变来检取,也可经光检波器检取后再作注入锁定。若在MMIC中兼容集成了光载微波注入锁定,就能克服MMIC微波振荡器在制作高Q稳频腔的困难。

微波半导体器件对光具有快速的响应能力,其上升时间接近脉冲前沿时间,跌落时间则取决于载流子寿命。若用飞秒激光脉冲构成光控捷变频微波振荡器,即可取代目前使用的复杂而昂贵的频率合成器。

至今已研制成光控增益放大器、光控分路收发开关、光控移相器、光控衰减器等光控微波功能组件。这在有源相控阵、复用技术以及与MMIC集成兼容,以构成功能更强的OMMIC都在探索中。美国马利兰大学的李齐湘(Lee Chi H)在皮秒光电子器件方面的研究工作,揭开了超快激光与微波毫米波相互作用的新领域。80年代以来,美国IBM Watson研究中心的格列柯夫斯基(D. Grischkowsky)和哥伦比亚大学微电子实验室的张希成(Xi-cheng Zhang)在用飞秒激光脉冲产生皮秒电脉冲(THz电磁辐射)方面进行了一系列的研究工作。

2. 光的微波调制技术。光的微波调制技术是光—微波相互作用的关键技术,可分为内(直接)调制与外(间接)调制。内调制用微波信号对激光二极管工作点控变的直接调制,调制频率受激光二极管响应速率所限,预计极限频率为20~25GHz,调制带宽也不平坦,需附加补偿网络,这是目前内调制技术研究课题之一。外调制是利用晶体(如LiNbO₃)的电光效应,据微波调制信号的电馈入方式,可分为行波型和谐振型,外调制不受激光器响应速率所限,极限频率可达40GHz。

3. 微波副载波多路复用(MSCM—Microwave Subcarrier Multiplexed)光纤传输系统。利用微波频率的副载波多路复用可克服时分复用的许多缺点,是多信息传输分配的最佳方案。在MSCM系统中是由每个用户或信道来的信息调制微波频率分开的副载波,再由微波副载波对光载波进行强度调制。故复用是在微波副载波频率内实施,因此可用窄带接收,避免了宽带和高速去复用过程,接收机带宽仅由一个信道的带宽决定,使其性能很好。目前已用于光缆电视、数字信号传输、综合业务网和雷达网中。

4. 光—微波相互作用在MMIC芯片和材料检测中的应用。1987年以来,马利兰大学和斯坦福大学的科学家分别提出了用

电光效应和光电导效应,即利用光—微波相互作用实现MMIC外特性(S参数等)和内特性的测量方法。这些方法无需芯片测试架,消除了微波网络化法的缺点,且能得到从直流到毫米波的宽带响应,并能对电路的内特性进行直接测量。利用光电脉冲天线的THz瞬态电磁辐射,可对各种电介质和掺杂半导体材料进行超宽带检测。

该学科的研究热点为:(1)设计新型器件,使其既具有良好微波性能,又有高效率的光耦合;(2)利用HEMT的新的光控机制,如负光电导率等;(3)运用扫出模(Sweep-out Mode)可产生Ips光电脉冲,为使长寿命载流子半导体产生ps光电脉冲提供可能途径;(4)采用载流子注入或耗尽来改变半导体基片折射率,以便使外调制器与MMIC兼容集成;(5)MSCM向更高频率、更宽频带方向发展;(6)开发光—微波相互作用的新机制和各个应用领域。

参考文献

- 1 Lee Chi H. *Pi cosecond optoelectronic Devices*. Academic press, 1984
- 2 Guggenmos J L, Jhonson R L. *Proc SPIE*, 1987, 789: 70~77
- 3 Martellucci S, Chester A N. *Plenum*, 1987
- 4 Ramee Simons. *Optical control of Microwave Devices*, ARTECH House, 1990
- 5 IEEE MTT-38, Special Issue on Applications of Lightwave Technology to Microwave Devices, Circuits, and systems, 1990, 5

(上海科技大学李英教授撰)

光学元件列阵的赝相位共轭特性

pseudo-phase conjugation of optical arrays 自从1972年B. YaZel'dovich首次在受激布里渊散射中发现相位共轭以来,人们已在多种非线性光学效应中发现了相位共轭特性。但由于非线性相位共轭必须要用激光作为泵浦,只能工作于狭窄的波段,工作面积限于非线性相互作用的较小区域。受非线性光学效应的阈值影响,很难用于高功率激光。因而,迄今有关非线性光学相位共轭方面的研究还仅局限于实验室中。

1978年V. K. Orlov等发现后向直角反射器列阵具有近似的相位共轭(即赝相位共轭)特性。此后,人们已对各种光学元件,列阵的赝相位共轭特性进行了理论和实验研究(宋如华,1988)。由于赝相位共轭镜(PCCM)具有工作面积大、响应速度快、价廉易得,能工作于白光和无源被动等优点,因而赝相位共轭器进入实用化的一种有效途径。

作为相位共轭器件的相位共轭镜(PCM),其工作特性可用光场与物质的非线性相互作用来描述,但其过程及形式过于复杂。为此,A. Yariv等1979年根据相位共轭镜对光波的变换特性,提出了描述相位共轭器的光线变换矩阵:

$$M_1 = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

王绍民等则提出了描述相位共轭镜工作特性和第二类变换矩阵(适用于参考消息光束的变换)

$$M_2 = \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 ρ 为入射光束波面在(PCM处)的曲率半径,这意味着PCM的有效曲率半径随入射光束的曲率而变,因而是真正的“自适应”,故(2)式更能反映PCM的工作特性。

进一步,我们导出了与(2)式等效,但具有不同形式,因而能揭示PCM更深的工作机理的变换矩阵的另3个形式

$$M_3 = \begin{pmatrix} a_3 & b_3 \\ b_2 & d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2i}{r} & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M_4 = \begin{pmatrix} a_4 & b_4 \\ c_4 & d_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -ik\omega^2 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$M_3 = \begin{pmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{r}{\rho} k \omega^2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中 k 为入射光波矢, ω 为光束半径, ρ 为光束波阵面的曲率半径, $r = \frac{\pi \omega^2}{\lambda} = \frac{K}{2} \omega, z = \sqrt{-1}$ 。总之利用(1)~(5)式, 不仅能简洁明了地描述 PCM 的工作特性, 而且对处理一些有关 PCM 的问题十分方便。例如, 在讨论相位共轭光腔 PCR 时, 利用矩阵方法, 则很容易将列阵的相位共轭特性与非线性相位共轭特性作比较, 对研究列阵间成像特性具有重要意义。

王绍民从几何光学理论出发, 利用光线变换矩阵, 运用 4×4 阶增广矩阵及失调矩阵方法, 导出了球形光学元件列阵的几何光学成像公式。其结果是对于曲率半径为 R 的球形列阵, 当单元变换矩阵元为 a, b, c, d 时, 则列阵成像的物距 μ 和像距 ν 之间的关系为

$$\nu = \frac{\left(\frac{R+b-l}{R}\right)\mu + b}{\left(\frac{d \mp 1}{R}\right)\mu + d} \quad (6)$$

其中 l 为单元的纵向尺寸, (6)式相应的光线变换矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} (R+b-l)/R & b \\ (d \mp 1)/R & d \end{pmatrix} \quad (7)$$

对于平面列阵, ($R \rightarrow \infty$), (6)式和(7)变为

$$\nu = \frac{\mu + b}{d} \quad (8a)$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & d \end{pmatrix} \quad (8b)$$

因而, 上式中只要 $b=0, d=-1$, 则有

$$\nu = -\mu \quad (9a)$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (9b)$$

显然(9)式与相位共轭镜的成像特性相同, 故知道这种列阵具有相位共轭的成像特性。例如, 直角反射器, 猫眼光学单元组成的列阵, 就具有上述性质。进一步, 王绍民利用移动参考而技巧, 推出 16 种光学元件, 其所组成的列阵具有相位共轭特性。

另一方面, 人们利用各种单元组成的列阵进行了相位共轭成像及光波相位畸变补偿实验。各种实验均表明, 所预言的各种光学单元组成的列阵, 确实具有近似的相位共轭特性及一定的补偿波前相位畸变的能力。但同时也发现, 这种补偿是不完全的, 因而其相位共轭特性只能得到部分演示; 而且实验中还发现各种单元组成的列阵其补偿相位畸变的能力是不同的, 即实际的列阵成像与由光线光学理论导出的理想相位共轭成像有差异, 并且这种差异是随不同的开阵单元而不同的。

为此, 我们进一步考虑了实际列阵的尺度不能作为傍轴近似的情况结果表明, 对于不同单元组成的列阵, 其成像特性是不同的, 即其补偿能力是不同的, 且所有已知光学元件作为列阵其成像不是完全理想的相位共轭器, 相应列阵的综合成像变换矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} a(1 - \text{sinc}(r'_1)) + \text{sinc}(r'_1) & b \\ c(1 - \text{sinc}(r'_1)) & d \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中 a, b, c, d 为列阵单元的变换矩阵, r'_1 为入射光学的倾角, 由上式与(8)式比较可知, M 不仅与 b, d 有关, 还与 a, c 有关, 因而尽管 16 种列阵满足 $b=0, d=-1$, 但其变换矩阵

$$M = \begin{pmatrix} a(1 - \text{sinc}(r'_1)) + \text{sinc}(r'_1) & 0 \\ c(1 - \text{sinc}(r'_1)) & -1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

仍与 PCM 的变换矩阵有差异, 由此说明了实验中所出现的一些现象; 16 种列阵中, 不同单元 a, c 值不同, 且由于多出与 r'_1 相关的项, 使列阵的成像偏离理想的相位共轭成像。

由于列阵各单元的尺度是相对较小的, 因而更严格的理论应该用波动光学理论来描述。为此, 周国生等提出了列阵成像的衍射理论, 在傍轴近似下, 他们利用光路程函及菲涅耳成像理论, 分

析了列阵的相位共轭成像特性及其补偿相位畸变的能力。研究结果表明, 所得出的主要结论与由光线光学得到的一致, 这是由于两者均利用了傍轴近似; 但用衍射理论更细致地刻划了成像的机理和性质。由于出发点仍是傍轴近似, 因而仍无法解释一些实验现象。为此, 我们进一步对列阵的衍射成像进行了分析, 在保留高阶近似后, 利用衍射积分公式, 得到了物场经过列阵后, 在像平面上的像场分布

$$E_3(x_3, y_3) = \frac{-1}{\lambda^2 \mu (b g_2 \cdot W d)} e^{i(k)(\mu + \nu + z)}$$

$$\sum_m \int_{-\infty}^{+\infty} dx_0 dy_0 E_0(x_0, y_0) \times \text{EXP}\left(i \frac{k}{2}\right)$$

$$(d_{22}x_{2m}^2 + 2d_{21}x_{2m} - d_{22}y_{2m}^2 + 2d_{21}y_{2m} + f) \times$$

$$\int_{-K_0}^{K_0} dx_{1m} dy_{1m} \text{EXP}\left(-ik\right) (A_{12} \xi_{1m}^2 + A_{11} \xi_{1m} + B_{12} \eta_{1m}^2 - B_{11} \eta_{1m}) \quad (12)$$

其中式内各参量的意义从略, 由(12)式若令

$$A_{12} = B_{12} = 0 \quad (13)$$

即可得列阵的单元成像位置, 当 $A_{11} = B_{11} = 0$ 则得像物极大值点(即衍射极大)位置。由式(13)可得确定单元像点位置(x_{2m}, y_{2m}, W)的方程。若式(12)中令

$$|KR^2 a^2 A_{12}| \ll \pi, |KR^2 a^2 B_{12}| \ll \pi$$

$$b_2 = b_1 = a_1 = 0$$

$$b'_1 = a'_2 = a'_1 = 0 \quad (14)$$

则可得综合像平面的位置及像面上的场分布。当满足

$$a^2, W^2 \gg x_0^2 + y_0^2$$

则可过渡到傍轴近似情况; 而对于平面列阵, 则可得满足综合成像的条件: $a = -i, b = 0, d = -1, W = \mu, M = -1$, 及

$$|c| \ll \frac{\lambda}{a_1^2} + \frac{2}{\mu} + \frac{3}{\mu^2} (x_{2m}^2 + y_{2m}^2) \quad (15)$$

此时, 综合像具有相位共轭特性。

事实上, 要使列阵具有理想的相位共轭特性, 对单元的要求是比较高的, 即对 a, b, c, d 4 个单元矩阵元均有要求, 由此可说明实验中观察到的现象。

进一步, 当引入畸变介质, 我们得到了普适意义下列阵的成像理论, 并证明了当列阵满足一定条件时, 它可以消除宏观及微观畸变。此外, 目前我们正在利用计算机对列阵成像进行计算机模拟实验研究, 以算得在有畸变介质存在时, 各种不同单元所组成的列阵的成像规律及畸变特性, 进一步工作正在进行之中。

(成都电子科技大学应用物理系宋如华撰)

透明晶体中缺陷的光学显微像

光学显微术对晶体中缺陷的观察, 是基于光与缺陷在晶体中所引起的不均匀性的交互作用。晶体中缺陷的应力场在正交偏光下因应力双折射所产生的衬度是所谓双折射像, 通过双折射像的衬度分布、特征或消光规律可以识别缺陷的类型和研究缺陷的特征参量(如位错的柏格斯矢量)。晶体中的溶质原子优先地沿缺陷沉淀, 沉淀粒子的光散射可使沉淀粒子成为可见, 而沉淀粒子链将勾勒出缺陷的空间组态, 这是所谓缀饰法。通常有两种方法来观察缀饰的缺陷, 这就是超显微法和层析法。理论与实验表明, 缺陷本身的光散射, 可使缺陷成为可见, 这就是扩大了层析法的使用范围。总之, 通过双折射像法和缀饰法, 可以识别晶体内部缺陷的类型, 即区分刃型位错、螺型位错、层错与不全位错、铁电、铁弹、铁磁畴界、孪晶界、小角度晶界和包裹物, 可以确定缺陷的某些特征参量和空间组态, 使得光学显微术成为表征透明晶体质量的有效方法。

双折射像方法 晶体中的介电系数和折射率是其中应力场的函数, 因此应力双折射技术可以用来获得透明晶体中有关缺陷应力场(或应变场)的信息。W. C. Bond 和 J. Andrus(1956)首次

使用这项技术观察到硅单晶体中刃型位错的应力双折射端点像。R. Bullough(1985)得到了这类缺陷像中的衬度分布。而 V. C. Indenbom 等(1962)等根据像的衬度分布给出了确定滑移面以及识别柏格斯矢量符号的方法。B. K. Tanner 和 D. J. Fathers(1973, 1974)发展了各向同性晶体及各向异性晶体中螺型和刃型位错的侧面像的应力双折射理论。根据位错线侧面像的消光规律可以识别位错线的类型,即确定位错线是螺型还是刃型。例如,在各向同性晶体中,与起偏器振动方向成 45° 的位错线,若其衬度为最小(消光),则为螺型位错,衬度为最大则为刃型位错。当位错线平行或垂直于起偏器振动方向时刃型位错侧面像消光,螺型位错侧面像的衬度为最大。混合型位错在任何情况下都不消光。他们的理论分析已为实验观察所证实。

早期处理应力双折射的位错成像理论是在各向同性近似的假定下进行的,理论预言螺型位错不存在应力双折射端点像。但葛传珍等 1986 年在 GGG 和 YAG 单晶体中首次观察到 $\frac{\alpha}{2}$ [111]螺型位错的端点像,并发展了在弹性各向同性,光弹各向异性近似下立方晶体中螺型位错端点像的成像理论。理论预言,螺型位错端点像中的等强度曲线是两个相切于原点的圆,当晶体相对于正交偏振器转动时,端点像的角位移为样品转角的 3 倍。这些预言在葛传珍等(1986)在 GGG 和 YAG 的实验观测中得到证实。葛传珍等(1991)进一步将螺型位错端点像的理论推广到弹性和光弹都是各向异性的立方晶体中。分析结果表明,随着弹性和光弹的各向异性增加,端点像中的等强度曲线由两个相切于原点的圆逐渐畸变为“蝶形”,这已在 Ba(NO₃)₂ 晶体中的实验观察所证明。

在实验上所观察到的刃型位错和螺型位错花结状端点像中,部分花瓣常常出现与预期相反的衬度,这是由于晶体中长程应力场所引起的。可以用长程应变场叠加在刃型位错和螺型位错的应力变场上来进行分析。通过计算机模拟像和实验像相比较,两者符合得很好。显然也可以通过上述理论与实验对比,来估计晶体中长程应力场的大小。

以不全位错为边界的层错的双折射像(1987)被蒋树声、A. R. Lang 和 B. K. Tanner(1981)观察到。当层错面与起偏器振动方向成 45° 时,层错呈敏锐的亮线;而当层错面与起偏器振动方向平行或垂直时,层错像全部消失。他们提出了解释层错像的模型。在此模型中,层错由具有垂直于层错面的单轴应变的薄片所取代。包裹物的双折射像比较容易观察到,该像具有四次对称性并且具有与偏振器振动方向一致的“十”字消光线。当样品固定时,“十”字消光线随正交偏振器的旋转而旋转;当正交偏振器固定而样品旋转时,“十”字消光线的取向不变。这个事实已被 Tanner 和 Fathers(1974)对各向同性材料中球形包裹物的双折射像的分析所解释。重螺位错的双折射像的理论也被 Tanner 所发展,这类位错的端点像的行为与球形包裹物相同,而其侧面像的消光规律与刃型位错一致。

在双折射磁性材料中,电磁波传播的理论亦被发展并用来解释飞钇铁氧体中与观察面斜交的磁畴畴界、变晶片和晶粒晶界的条纹衬度,也被用来解释钛酸钡晶体中铁电畴界的双折射像。双折射像的观察通常使用显微镜进行。徐秀英等利用反射偏光显微方法成功地补偿了晶体的旋光效应,在具有高旋光性的 Bi₁₂GeO₁₂ 晶体中获得了位错的双折射端点像和侧面像。

对于光弹系数甚小的晶体,缺陷应变场所引起的位相差甚小,用通常的偏光显微镜显然得不到位错的应力双折射像。相衬显微术则可以观察到相差小于 $\lambda/300$ 所产生的衬度,因而利用相衬显微镜 Loschke 已经观察到 GaP 晶体中的位错像。不过所获得的位错像尚不够清晰。利用相衬显微术观察缺陷的技术与理论尚待发展。

随着磁光器件、固体激光器件和光电半导体器件的发展,缺陷的表征已成为材料研究的重要方面,例如在石榴石晶体和 III-V 族半导体材料的研究中,利用双折射像法已经获得了大量有益

的信息。

应用 Klapper's 理论,在弹性各向异性材料中, Schoudt 和 Weiss 根据单位生长长度位错线弹性能的极小原量,在直拉法具有凹和凸界面的 GGG 晶体中,对具有不同柏格斯矢量的位错在生长过程中延伸轨迹进行了理论分析,并用双折射像法进行了观察。其结果表明,理论预言与实验观察符合得很好。在晶体生长过程中,利用位错的延伸规律使位错延伸出晶体,或利用小面阻挡位错的延伸等方法,可以获得无位错晶体。对于诸如界面稳定性、生长界面上位错露头处包裹物的捕获以及 III-V 族化合物处层中的错配位错和内应力等,使用双折射像术都得到了较好的结果。

光散射方法(超显微方法和层析方法) 晶体中溶质原子优先地沿位错线沉淀,沉淀的颗粒勾画出位错的空间组态。若沉淀颗粒具有较强的光散射能力,则可以通过透射显微镜或超显微方法进行观察,这种显示位错空间组态的方法称为缀饰法。通常,没有被沉淀粒子缀饰的位错,其散射能力太小以致不能用普通的超显微方法进行观察。然而 Mariya 和 Ogawa 发展了光散射层析方法并成功地观察到石英晶体中没有缀饰的位错。缺陷本身(未被缀饰)的光散射理论也同时获得了发展。

如果将缀饰剂的原子看作为各向同性的膨胀中心,则它仅仅与缺陷应力场的静压分量有交互作用。对于直线位错,此静压分量仅由位错柏格矢量的刃分量产生。据此模型,缀饰原子与位错间长程弹性交互作用仅使缀饰原子集中到刃型和混合型位错线的近邻而不能缀饰螺型位错。然而,对于实际晶体,由于局部的非线性弹性效应和弹性各向异性,例如,在面心立方点阵中缀饰原子与切应力间也存在长程弹性交互作用,稳定的填隙组态亦具有四方对称性在各向异性材料中直螺型位错的应力场也具有静压分量,所以缀饰剂原子也能向螺型位错线的近邻聚集。另一方面,位错提供了缀饰原子在沉淀过程中的非均匀成核的位置,当缀饰原子的局域浓度超过溶解限时,缀饰剂原子的聚将沿位错线形成。沿位错线的沉淀颗粒必须足够小,以使通过沉淀颗粒勾画出位错的空间组态;但沉淀颗粒又必须足够大,以产生足够的光散射,使能通过普通光学显微镜或超显微方法进行观察。通过人为地控制缀饰过程可以做到这一点,例如缀饰剂可以在晶体生长时掺入并随后的冷却过程中沉淀于位错线上,或是在生长后从晶体外部通过扩散引入。此时,位错核心提供了优先扩散的通道。此外在位错缀饰时,同时加电场可以增加缀饰剂在晶体中的扩散。在 LiNbO₃ 和 LiTaO₃ 晶体中的位错线和位错网就是这样被成功地缀饰的。层错与缀饰原子间没有明显的长程弹性交互作用,但是由于层错提高了其近邻的填隙原子溶解度,因而层错可以看作自填隙原子的尾间。Stolwijk 等已用金成功地缀饰了硅中的层错。

在透明晶体的位错观察中,用光散射方法和超显微方法已经获得了一系列重要结果。

随着成像理论与观察技术的发展,双折射像法、光散射层析法和超显微法已经成为透明晶体的质量表征的有效方法。

(南京大学葛传珍撰)

表面增强喇曼散射 surface enhanced Raman scattering (简称 SERS) 是指当分子吸附在某些特殊准备的金属表面时,其喇曼谱增强 $10^3 \sim 10^6$ 倍的现象。

1928 年,印度喇曼在研究光散射问题时发现了一种非弹性散射现象,即喇曼散射。但由于一般分子的散射截面较小,一直很难做为界面定位研究的有效手段。1974 年,英国 Fleishman 在研究吸附于银电极上的吡啶分子的喇曼散射时,偶然发现吸附分子比自由分子的喇曼信号有显著增强。1977 年 van Duyn 领导的研究小组及 Creighton 领导的研究小组又重新证实了 Fleishman 的实验结果,并给出了增强倍数为 10^6 倍。从此在结合表面学科和光散射学科的基础上产生了表面增强喇曼散射研究领域。

SERS 效应引起了电化学、光学、界面、催化等方面的科学工作者的强烈反响,70 年代末到 80 年代初,主要工作是积累更多

的数据以探讨机理,初步建立关于 SERS 的理论模型。针对各种实验结果,人们认为 SERS 是多种机制的重叠效应,所有的理论本质上都以金属表面对入射光电场和分子极化率以及它们之间的相互作用的影响为基本出发点。喇曼散射强度正比于分子感应偶极矩 P 的平方,其中 $P = \alpha \cdot E$ 是分子偶极矩。 α 是分子极化张量, E 为作用于分子上的入射光电场。由此,喇曼散射强度的增强来源于分子上的电场增强,并且其理论可划分为二类:一类是分子增强机制,侧重这部分的理论一般称之为化学模型理论;一类是电磁增强机制,即由于接近表面,使得作用于分子上的局域电磁场增强,而局域电场的增强又有表面等离子体共振模型、镜像场模型、天线共振子模型等等。表面等离子体共振模型主要是以金属表面的粗糙提供光与表面等离子体耦合的必要条件,而一些金属用可见光就可激发表面等离子体,并发生共振,从而使金属表面的电场增强。该模型要求入射光和散射光频率接近金属衬底等离子体共振频率,这个频率依赖于表面粗糙性质,用这一理论对单个球形金属颗粒表面及附近分子的计算结果预言了具有良好的增强作用,而且其共振区位于或接近可见光谱区,并较好地解释了表面预处理的作用及为何在红光区域的激发才有利于获得铜、金表面上的 SERS 效应。但该模型不能解释粗糙度对 SERS 的影响,以及增强因子随分子与表面间距离的增强而急剧减少等现象。镜像场模型是指吸附在 Ag 表面的分子(偶极子)在金属中感应出“像”来,该偶极子发射喇曼散射光时它的像也同时发出,增强了散射强度,再加上表面反射场造成的局域场增强,这样会引起 16 倍的散射截面增加。此模型的增强因子强烈依赖于分子同表面的距离,而且没有计入粗糙度的影响,也不能解释增强的长程效应,局域性很大。在此期间虽然对 SERS 的物理类模型研究颇为深入,但对其化学类模型的研究进展不大。

80 年代末期,研究者的主要工作放在了关于 SERS 的应用研究方面。诸如催化和热分解过程中间产物的探测分析;表面络合物的研究;生物化学中分子的构型变化及结构成分分析;界面行为的研究;二维相变过程研究;染料分子的感光过程和增强机理的研究;吸附动力学的研究等。同时对 SERS 的化学类模型的认识亦逐步深入,涉及的主要有活位模型和电荷转移模型。所谓活位是表面缺陷位置上由一些活性原子组成的原子簇,分子吸附在这些活位上时,其喇曼散射截面有极大的增强。该模型对水的 SERS 给出了较为合理的解释。而电荷转移模型认为从分子的基态到金属费米面附近的空电子态可以发生共振跃迁,改变分子有效极化率,产生喇曼散射的增强。另外,人们还通过大量的实验研究,发现电场由于表面被增强而产生二次谐波;又由于吸收的增强,金属和分子之间能量的传递受到影响,从而产生荧光增强,荧光淬灭等现象;此外还有四波混频现象。这些增强现象加在一起,出现一个新名词即表面增强光谱学(SES),它不仅扩大了 SERS 的研究范围,也为理解 SERS 机理提供了更多信息。

90 年代初,新型激光器的研制以及表面增强超喇曼散射和表面增强共振喇曼散射的应用进一步拓展了 SERS 的范围。

SERS 的主要特点有:许多分子都能产生 SERS 效应,但只有少数金属表面上可以出现 SERS 效应,公认的金属是:Ag、Au、Li、Na、K;能实现 SERS 的金属表面要有一定亚微观或微观粗糙度(前者为几十纳米,后者为原子尺度);SERS 表现为长程性(分子离开表面 $1 \sim 2 \times 10^{-10} \text{m}$ 效应便迅速减弱);SERS 强度与激发频率关系不是 ω^4 ,而表现为宽的(几百至上千)共振;分子的不同振动模式增强因子不同,并有不同的激发曲线;跃迁的选择定则在 SERS 中被放宽了,有时仅为红外活性的模式或亚模式也会出现在散射谱上;散射光是完全退偏振的;第一吸附层与后来的吸附层表现不同,有时有分子衬底振动模出现;在电化学池实验中增强因子和激发曲线均与施加电势有关;能产生 SERS 的表面,同时产生非吸附分子的较弱的连续非弹性散射谱。

研究 SERS 的主要实验体系及特点有:(1)电化学体系:是利用化学氧化—还原反应,使浸在电解液中的金属电极表面粗糙。其特点是,简单易做,增强效应易观察。但该体系中参与物质

种类多,分析过程复杂。(2)金属胶体体系:它与纯电磁理论中孤立球形理论很接近,易于进行理论研究,并可检验增强机制,但胶体体系易于凝聚。(3)化学沉积银膜体系:该方法工艺简单,且样品的均匀性、持久性及增强效果都较理想。(4)机械抛光体系:对高纯度的 SERS 活性金属 Ag 等,用不同粒度的 Al_2O_3 或人造金刚石研磨膏机械磨抛表面,以得到相应粒度的表面粗糙度。易控制和估计表面粗糙度。(5)酸等化学蚀刻金属表面:将银片放入一定浓度的 HNO_3 (或 H_2O , NH_3OH 混合液)溶液中腐蚀一定时间,便可得到具有一定粗糙度的银表面。但易受浓度、腐蚀时间的影响。

在所有实验体系中,衬底以银最为常见。

由于 SERS 具有高灵敏度、高分辨率和低检测极限的特点,可在常温、低温、常压、高压、低压下,以光子为探针,为非破坏性的,可以实时实地测量,使喇曼技术有可能在电解液或大气环境存在条件下,对表面分子的振动性质进行详尽而独特的研究。另外,由于它不需超真空,能用多种溶剂,可以进行远距离定位检测,并可用于非常规条件乃至危险环境中去。SERS 与时间分辨喇曼光谱技术的结合,使 SERS 分析在催化反应过程、电极过程及表面界面动态过程中,已经取得相当大的进展并将逐渐深入研究。目前,有关 SERS 效应的新的金属基底,不同吸附分子,对于增强因子的更为定量的计算以及用于分离多种增强机制的实验研究正在不断进行。

参考文献

- 1 Fleischmann M, et al. Chem phys lett, 1974, 26: 123
- 2 Albrecht M G, Creighton J A, J Am Chem Soc, 1977, 99: 5215
- 3 Jeanmaire D L, Van Duyne R P, J Electroanal Chem, 1984, 84: 1
- 4 Otto A, Cardona M, Güntherodt G, Springer-Verlag, 1984, 289
- 5 Moskovits M, Rev Mod Phys, 1985, 57: 783
- 6 苗润才,等.物理学报,1988,37:1370
- 7 苗润才,等.物理学报,1992,41:1542

(陕西师范大学傅克德教授、苗润才副教授撰;王天真审)

目标激光散射特性 laser scattering signature of targets

随着激光技术在现代国防和国民经济建设中的广泛应用,在各种不同的领域中相继开展了激光散射特性研究,如晶体激光散射,气体、液体和等电子体激光散射等。目标激光散射特性研究是因激光技术在现代国防科学技术中的应用而发展起来的新的激光散射研究领域,主要研究军用目标在激光照射下激光散射场的强度、相位、偏振等特性与目标的几何结构、表面材料的粗糙度和光学常数等参数之间的关系。近十几年来,激光技术在现代国防中的应用取得了令人瞩目的进展,如激光雷达和测距,激光制导,激光引信等。这些军用激光系统的设计和评估都需要全面了解目标的激光散射特性,以此为基础确定军用激光系统的体制、技术途径及激光功率和作用距离等技术指标。

目标激光散射特性研究的主要手段有 3 种:理论研究、材料和缩比模型的实验室测量和真实目标的现场测量。

目标激光散射特性的理论研究是根据目标表面材料的粗糙度、几何参数和光学常数计算激光散射场的分布特性。最常用的计算方法有:(1)基尔霍夫法或物理光学法。这种方法的优点是直接从电磁场的基本理论出发导出激光散射场的分布;缺点是需要做很多近似,否则很难得到散射场的解析表达式。这种方法一般适用于光滑的、表面曲率半径较大的材料和近于后向散射的情况。(2)几何光学法。它用稳相法计算材料表面稳态点的散射场,然后由稳态点的数目和分布求总的散射场分布。这种方法简单、直观,但能应用这种方法的情况不多。(3)微扰法。这种方法假定散射场可以用平面波的叠加来表示,它只适用于材料表面起伏远小于照明激光波长的情况。(4)双结构法。这是微扰法和基尔霍夫

法的合并,如果能将表面粗糙度分布分为分别适用于这两种方法的两种结构,则可以合并用这两种方法得到激光散射场分布。这种方法可以扩大微扰法和基尔霍夫法的适用范围,但对于给定的随机表面,建立粗糙度的双结构是很困难的。

目标激光散射特性的理论计算是一项相当烦琐的工作,目标表面材料状态的细微变化可能给计算结果带来相当大的误差。实践中,用目标表面材料的双向反射分布函数(BRDF)的实测值和目标表面的几何结构参数计算目标激光散射特性是一种行之有效的办法,计算结果与现场测试结果相当吻合。

材料和缩比模型的实验室测量有两类工作:材料的双向反射分布函数测量和缩比模型的激光散射特性的计算。后者是测量按一定比例缩小后的目标模型的激光散射特性,然后按相似性原理换算为全尺寸目标的激光散射场分布。缩比模型测量的设备和测量费用低,测量条件容易控制,但由于激光波长很短,目标表面的细微差别对激光散射特性影响很大。因而对目标模型的制作精度要求苛刻,数据的相似变换也具有相当大的难度。真实目标的现场激光散射特性测量是将目标架设在转台上(静态测量)或在目标运动状态下(动态测量)测量目标的激光散射场分布特性,这种方法测量的数据真实可靠,但测试设备和运行费高。

国外于20世纪70年代已大量开展目标激光散射特性研究工作,这种发展势头是由于自60年代末以来,军用激光系统取得长足进步而引起的。70年代中期,美国弹道导弹防御高技术中心制订了“激光雷达特征计划”,组织很多单位参与这项计划。美国国家标准局的B. L. Danielson于1977年为该计划提出了激光雷达截面的定义和标定标准的建议,以便参与该计划的各单位使用统一的名词和术语来表达所取得的研究成果。罗马航空发展中心(RADC)的J. H. Michels等对再入飞行体和诱饵模型的激光后向散射特性进行大量的测量和计算,建立了后向散射的数学模型——BKSCAT,为了研究激光雷达截面的标定标准,美国航空大学的J. C. Higgins于1985年测量了13种不同尺寸的镜面反射球的激光雷达散射截面,并用按几何光学推导的解析式进行了估算。在近乎后向散射的情况下,计算值与测量值之间的差异在10%以内。

在中国,激光技术在国防现代化的应用中取得了相当大的成绩,促进了目标激光散射特性研究工作的发展。在理论计算方面,西安电子科技大学电波研究室的同志们凭借他们在微波散射方面坚实的理论基础和丰富的实践经验,开展了激光散射特性的理论研究工作。“七五”期间,他们在该领域中已取得了一些可喜的研究成果,并处于国际先进水平。他们根据铝基材料及涂层的粗糙度和光学常数计算激光散射场的分布特性,取得了和实测结果相当一致的理论计算值。在材料和缩比模型的实验室测量方面,中国科学院安徽光机所做了大量的工作。他们自行研制的测试设备主要技术均达到或超过了美国国家标准局的同类设备技术指标。国家航天局二院二〇七所于1989年成功地研制1.06 μm 激光波段真实目标远场测量设备,可用于大型军用目标激光散射特性现场测量,填补了国内外真实目标激光散射特性现场测量的空白。目前该所正研制其它激光波段的激光散射特性测试设备。

目标激光散射特性研究是服务于军用激光系统研制的应用性基础研究,因而它将随着军用激光系统的发展所提出的新需求而开展相应的研究工作。从目前军用激光系统的发展趋势来看,目标激光散射特性研究在未来一段时间内将注重于3个方面的工作:(1)建立标准化的测量和数据处理程序和规范化的数据表达格式,使不同实验室的数据可以相互比较和使用,理论研究、缩比模型测量和全尺寸目标现场测量数据可按统一的标准术语描述。(2)研究激光散射特征提取和模化方法,探索根据目标激光散射特征对目标进行分类和识别的技术途径。(3)研究目标激光散射的图像特征。近几年来激光成像雷达发展很快,为目标的分类和识别开辟了一条新的途径,由于图像含有更多的目标信息,因而目标激光图像特征的提取与模化将是一个极其重要的研究领域。

总之,目标激光散射特性研究是一个方兴未艾的新领域,它将随着军用激光系统的发展而越发显示出它在国防技术现代化中的重要价值。

参考文献

- 1 Goodman J W. Proc. IEEE, 1965, 53(11):1123
- 2 Danielson B L. Proposed standards of ladar signatures, 1977
- 3 Higgins J C. The construction and calibration of a ladar cross-section measurement range. 1985
- 4 江荣熙,刘文清. 研究报告集,安徽光机所编,1985, 76
- 5 刘佳,等. 红外与激光技术, 1988, 2: 35
- 6 王一平,吴振森,等. 目标激光散射理论分析和计算方法研究报告,西安电子科技大学电波研究室编, 1990

(航空航天部二院仇维礼研究员撰)

共振激光蒸发 resonant laser ablation 又称共振激光蒸发

激光蒸发是随着脉冲激光器的发展而诞生的一项用在固体样品分析和新材料制备上的光气化新技术。人们将一束脉冲激光聚焦在固体材料表面上,被激光照射处的材料在激光光子的轰击下,就以原子、分子或粒子团的形式从固体表面蒸发或喷射出来。这是一种比传统的热蒸发、离子溅射更有效的汽化手段。通常用于光气化的激光器是固定波长输出的Nd:YAG固体激光器或准分子激光器,因而在汽化过程中不会发生共振光电离,俗称非共振蒸发。共振激光蒸发是20世纪80年代后期才起步的一项新的探索。在激光共振蒸发中,用一可调谐的染料激光器取代固定波长输出的激光器,并将激光输出波长调在与所研究的原子或分子的某一电子跃迁的共振波长上,使得样品在被气化的同时实现共振激发乃致电离,从而有选择地增加了某种离子的产额。这是激光蒸发和激光共振电离两先进技术的一种有机结合,将其用于样品分析上,使其灵敏度有了很大程度的提高。

早在20世纪60年代,伴随着第一台脉冲红宝石激光器的诞生,人们就开始了用激光作为固体材料气化手段的探索,但是直到高能脉冲激光器商品化的80年代,这项研究才迅速发展起来,到1985年已开始形成了一门独立的热门学科,出现了以激光蒸发为气化手段的固体样品分析仪器。最典型的仪器是激光诱导质谱仪(LIMA)和激光微区探测质谱仪(LAMMA)。虽然高度聚焦的激光可使几个微米大小的微区探测成为可能,但由于采用的是非共振蒸发,离子的产额很低,通常比中性粒子小2~3个数量级,从而限制了探测灵敏度。

1985年,法国米勒(J. F. Muller)等人在用他们的LAMMA系统对分子膜进行分析时,用一台波长可调谐的染料激光器取代常规的固定波长输出激光器,结果发现激光波长对离子产额影响很大;波长变短,产额增高。这是将可调谐染料激光器用于激光蒸发技术上的第1次成功尝试。

1987年,米勒他们在试图用共振电离来提高探测灵敏度的试验中,用一束波长可调谐激光实现激光汽化和共振电离两过程获得成功。他们分别对不同基体材料中的不同含量的金属镉(Cd)、铜(Cu)和钼(Mo)进行共振和非共振探测比较,发现将激光波长调在与任一金属电子跃迁的共振波长时,这种金属离子的产额比在偏离共振波长0.4~0.7nm时的离子产额增强;其增强倍数为5~50倍(因基体材料的不同而不同),例如,在环氧树脂中的铜离子在共振时增强了50倍,而在白砷中的铜离子却只增加5倍,这种现象被认为是基体效应所致。值得一提的是,与以往用固定波长激光作的探测相比,共振蒸发时的探测灵敏度有了很大的提高,如:环氧树脂中铜的探测极限从20nm降为只有0.04nm。

1988年,美国庞(H. M. Pang)和扬(E. S. Yeung)分别在真空和充有缓冲气体、氮气的条件下做了相似工作。他们用的样品是Na₂WO₃和纯金属铜。在他们的实验装置中没有质谱仪,离子信号的收集通过一对加了高压的电极来实现;单个激光脉冲作用下从固体表面释出的粒子总量可以通过氮气和释出粒子间的

碰撞所产生的声波来监测。在真空条件下,共振蒸发时的离子产额获得了高达 70 倍的增强,但与米勒他们的结果相比,铜和钠的共振波长都出现了更大的展宽,分别为 2.2 和 1.4nm,在有一个标准大气压的氦气情况下,共振宽度增加到 6nm,粒子间的碰撞被认为是这种非常展宽的主要机制。他们的声波监测表明,共振蒸发和非共振蒸发两种情况下,单个激光脉冲所产生的粒子总量完全相同,从而证实了共振电离是导致离子产额增强的唯一机制。

80 年代末,英国李丁汉(K. W. D. Ledingham)等人建立了一套共振电离质谱分析系统(RIMS)。在这套系统中,样品的汽化和共振电离是在不同时间、不同空间里分别通过两台不同的激光器来实现的,称之为激光蒸发共振电离光谱技术(LARIS)。它不仅有很高的灵敏度而且不受基体效应的影响,但操作过程比较复杂。于是,他们在建立此系统的同时开始了用一台激光器实现两过程的研究。在他们的实验中,一束弱聚焦的染料激光以 5 度左右的掠射角入射样品,光照区域内的样品表层被脉冲前期的激光汽化而后被同一脉冲的后期激光电离,离子信号通过一时间飞越质谱系统来记录。用此装置分别对钙(Ca)和半导体材料砷化镓铝($Al_0.3Ga_{0.7}As$)中的铝(Al)和镓(Ga)进行共振蒸发,取得了高达 2 个数量级的离子产额增强,且共振波长宽度只有 0.05nm;在共振电离谱上,镓的两个同位素很易分辨,且它们的离子产额之比与它们的丰度比例合得很好。他们将这种用一束激光实现固体汽化和共振电离两过程的技术命名为共振激光蒸发(简称RLA)。将用此技术得到的钙的电离谱与用LARIS技术记录的电离谱比较,两者的共振位置、共振宽度完全一致,从而证实了共振激光蒸发中的共振电离发生在粒子被汽化以后的假设。

在这期间,在这个实验室做访问的中科院物理所的汪力也参加了这项技术的研究,他以砷化镓(GaAs)中的镓为研究对象,对其共振电离谱的线型、展宽机制以及激光能量对离子产额的影响作了较深的探讨,提出了激光诱导碰撞展宽和能量累积碰撞电离的假说,使这项技术的研究上了一个新的台阶。

目前,他们正致力于将此技术用在微量探测上,已经取得了 10^{-6} 量级的探测灵敏度;对标准钢样品中的微量铝的探测获得了令人满意的结果。从含 500nm 铝的钢中测得的离子信号比从含 5 000nm 铝的钢中测得的离子信号小了 5 倍。最近,这个实验室正在用以 45 度入射角的激光对不同基体中不同含量的锰(Mn)进行探测,结果比用在掠射角入射的RLA所用的激光脉冲能量更低的激光(约 10 μ J)也获得了 nm 量级的探测灵敏度;当基体材料为铝时,锰的探测极限甚至小于 1nm。

共振激光蒸发技术作为一门新的实验技术,只有几年的研究历史,由于需要稳定输出的可调谐激光器和高真空系统,当前世界上从事这项技术应用研究的人还不多。虽然它已在微量探测上显示出灵敏度高、要求的激光能量低和对样品破坏少等优点,但由于受基体效应、激光能量起伏等因素的影响,共振激光蒸发微量探测还停留在定性或半定量分析阶段。可望随着脉冲可调谐激光器的不断完善和趋于普及,这项技术的应用研究将会揭开新的篇章。

当前对这项技术应用研究的热点已从原子转向分子,特别是生物大分子(如蛋白质)的研究,力图与最新发展起来的基体辅助激光解吸电离技术(Matrix-Assisted Laser Desorption Ionisation)相互补充,成为生物大分子质量测定和蛋白质结构信息研究的有力工具。

参考文献

- 1 Muller J F, Krier G, et al. J Mass Spectrom Ion Proc, 1985, 64: 127~138
- 2 Verdun F R, Krier G, Muller J F. Anal Chem, 1987, 59: 1383~1387
- 3 Pang H, Yeung E S. Anal Chem, 1988, 61: 2546~2551
- 4 McLean C J, et al. Int J Mass Spectrom. Ion Processes, 1990, 96, R1~R7

- 5 Wang L. et al. Appl Phys, 1991, B53: 34~38
- 6 Wang L, Ledingham K W D, et al. Appl Phys, 1992, B54: 71~75
- 7 Ledingham K W. D, et al. R. Surface and Interface Analysis, 1992, 18, 576~578
- 8 Zheng R E, et al. A new surface analysis technique, 1993, 9 (英国格拉斯哥理工大学郑荣儿博士撰)

非线性光学产生 VUV/XUV 相干辐射 the generation of coherent VUV/XUV radiation by nonlinear optical process 20 世纪 60 年代初在可见波段实现了激光辐射后不久,人们就考虑短波长激光辐射的产生问题了。今天,尽管可见和紫外段的激光器已成为常规产品,进入了工业、科技以及日常生活的各个领域,但还不能轻易获得可供应用的 VUV/XUV(100~200nm¹⁰~100nm)激光输出。

分析目前实验室实现短波长激光常用方法的物理机制发现,要得到较高功率和较好光束质量的短波长激光,每一种方法都有其必须解决的物理和技术问题。目前实验室着重研究的方法有:自由电子激光(FEL);高剥离离子 X 射线激光;非线性光学效应产生短波长相干辐射。

众所周知,当波长进入 VUV 区以后,空气和大多数固体非线性光学材料就开始对光有强烈的吸收,所以,产生 VUV/XUV 相干辐射必须采用具有较高电离能和较宽透明带的气体材料作为非线性介质。对 VUV/XUV 辐射的探测和应用均应在真空中进行。由于较高效率地产生 VUV/XUV 相干辐射又往往要求比较高的介质密度,所以在早期的工作中均把气体介质密封在气室中,用具有较短截止限的固体材料如 MgF_2 (115nm)或 LiF (105nm)等作为产生光的出射窗口,以同时保证产生区有较高的介质密度,而探测和应用区有较高的真空度。然而当光的波段进入 LiF 截止限以下时,没有任何固体材料能充当这种窗口,所以解决窗口问题成为产生更短波长($\lambda < 105nm$)相干辐射的关键。为此出现了许多无窗口的实验方案,如气流隔离、针孔缓冲差压、旋转针孔差压、脉冲喷嘴、毛细列阵差压等,其中 A. H. Kung 和 J. Bokor 等分别独立首次使用的脉冲喷嘴被证明是一种简单而有效的技术,成为在以后非线性光学效应产生 XUV 相干辐射工作中最常采用的实验方案。对于气体中非线性光学效应产生 VUV/XUV 相干辐射物理过程的理论处理,至今仍沿用传统的非线性光学理论,即在电偶近似下对光和介质相互作用进行微扰论处理。

当电磁波在介质中传播时,介质会在电磁场作用下产生极化强度 P 。在电偶极近似下,宏观极化强度矢量与电场的关系可以表示为:

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}:EE + \chi^{(3)}:EEE + \dots \quad (1)$$

其中第 1 项为线性项, $\chi^{(1)}$ 就是常见的极化率, $\chi^{(2)}$: EE , $\chi^{(3)}$: EEE ,...等分别和外电场成二次、三次、...关系,它们分别是二阶、三阶、...非线性光学效应来源。 $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$...是非线性极化率张量,当电磁波的电场相对于介质内部电场很小时,可以用微扰论对其求解。

非线性光学效应产生 VUV/XUV 相干辐射一般以气体为非线性介质,而气体介质具有中心反演对称性,所以气体中只会产生奇次非线性效应。对于产生 VUV/XUV 波段的相干光,常常采用的和频过程 $\omega_{n-1} = \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n$,将极化强度的 n 阶非线性项代入耦合波方程或求其积分解,就会得到产生光的光强 I_g 与入射光及气体系统参数的关系为:

$$I_g \propto N^2 |x^{(n)}(-\omega_{n-1}; \omega_1, \dots, \omega_n)|^2 \prod_{j=1}^n I_j F^{(n)} \quad (2)$$

这里假设入射光 ω_j 共轴传播并在同方向线偏振; N 为气体密度; I_j 为第 j 束光的光强; $x^{(n)}(-\omega_{n-1}; \omega_1, \dots, \omega_n)$ 为该和频过程的非线性极化率张量在入射光同方向线偏振时唯一有贡献的张量元; $F^{(n)}$ 为位相匹配函数,它与入射光的模式、聚焦的共焦参数

6. 气体介质的密度 N , 气体的长度 L , 气体色散造成辐射与感应极化强度间的波矢失配 Δk , 以及入射激光聚焦于介质中的位置等因素有关。

从(2)式可以看出, 在入射光强度一定时, 要想提高和频过程的效率, 应该有以下几种途径: 使非线性过程的相位匹配函数 $F^{(n)}$ 尽可能达到较大的值。在保证位相匹配函数 $F^{(n)}$ 最大值的前提下尽量提高作用区的气体密度, 为此通常在作用气体中加入匹配气体, 使 $F^{(n)}$ 最佳时工作气体的密度尽可能提高, 从而有较高的效率。由于非线性极化率中含有许多正比于 $1/(\omega - \omega_0)$ 的项, 其中 ω 为入射光频率或入射光频率的组合, ω_0 为介质能级间的跃迁频率, 所以当 $\omega \rightarrow \omega_0 \rightarrow 0$ 即入射光与介质某能级共振时, 非线性极化率可以大大提高, 这就是非线性光学过程的共振增强效应, 在共振增强下, 非线性过程的效率可以得到很大的提高。

实验工作中, 多数在利用较高电离电位的金属蒸汽原子(如 Hg, Mg, Zn 等)或惰性气体作为非线性介质, 尤其是高次谐波的产生过程, 介质的饱和光强直接影响着最高次数, 所以惰性气体已成为最佳的非线性介质。

金属蒸汽中可调谐 VUV/XUV 相干辐射的产生早在 20 世纪 70 年代就有报导。到 1982 年, 利用金属蒸汽已实现了 LiF 截止限以上几乎所有区域的 VUV 相干辐射。此后, R. R. Freeman 等利用 He 作为缓冲气体充满探测系统, 在 Hg 中首次得到 LiF 截止限以下可调谐相干辐射。1985 年, P. R. Herman 和 B. P. Stoicheff 等利用毛细阵列技术解决了金属蒸汽中产生 XUV 相干辐射的窗口问题, 在 Hg 中把可调谐范围推进到 87.5nm, 远远超出 Hg 的电离限之外, 这也是金属蒸汽中可调谐 XUV 相干辐射迄今达到的最短波长。由于金属蒸汽的激发态能级多位于 VUV 的长波区, 早期的倍频晶体中得到的紫外光能与金属原子的激发态能级双光子共振, 所以, 金属蒸汽中产生的 VUV/XUV 相干辐射多由双光子共振四波和频过程(TFWSM)获得。P. R. Herman 和 B. P. Stoicheff 等获得的 105.0~87.5nm 辐射已位于 Hg 的电离区, 虽然这个区域内 Hg 对产生的光有较强的吸收, 但是由于这个区域的介质的色散, 且其非线性极化率和色散系数变化都很缓慢, 所以产生的辐射可以宽带平缓调谐。这种平缓调谐对于研究原子、分子光谱非常有利。金属蒸汽中 TFWSM 过程效率一般在 10^{-5} ~ 10^{-3} 之间。在某些过程中, 如果入射光再和原子能级达到三光子共振, 非线性极化率就会被强烈地共振增强, 以致在紧聚焦条件下, 正色散区和负色散区的 FWSM 过程有相当的效率, 采用一定的聚焦结构和较大尺寸的气体, 这种三光子共振可以使 FWSM 的转换效率达到 5%, 输出功率达到 0.5MW 以上。

惰性气体的激发态能级多位于 VUV 的短波区或 XUV 区, 所以早期在没有较高效率和宽带透明倍频晶体的条件下, 惰性气体中的工作一般采用非共振四波和频(NFWSM)或三次谐波过程(THG)。到 80 年代中期, 利用这些过程已在除 He 之外惰性气体负色散区的大多数区域和少部分正色散区得到可调谐 VUV/XUV 相干辐射。北京大学物理系的非线性光学小组利用脉冲喷嘴提供小尺寸的气体介质, 在 Kr 和 Ar 的第一共振态下得到可调谐 VUV 相干辐射。虽然在元素第一共振态之下介质均为正色散, 但小尺寸的气体分布可以使和频过程降低对介质负色散的要求, 从而正色散区的和频过程具有与负色散区相当的效率。由于在第 1 共振态以下元素的色散系数与非线性极化率变化都很缓慢, 所以在这个区域可以产生宽带平缓调谐的短波相干辐射。然而, 惰性气体的非线性共振过程的效率较低, 当入射光功率为 MW 级时, 效率一般为 10^{-6} ~ 10^{-5} 。为了提高转换效率, 往往在工作气体中加入缓冲气体进行相位匹配, 通过相位匹配转换效率有时可以提高两个量级以上, 输出功率达到几十瓦。

利用 Xe, Kr 中的双光子共振混频过程可以较高效率地产生宽带可调谐 VUV/XUV 相干辐射。双光子共振四波差频(TFWD)产生的 VUV 光一般在元素的第一共振态之下, 而双光子共振四波和频(TFWSM)产生的 XUV 辐射一般在元素电离

限以外, 这两个区域都因其较缓慢变化的色散系数和非线性极化率而成为产生宽带平缓调谐相干辐射的理想区域。TFWDM 过程的转换效率一般在 10^{-3} 左右, 当利用缓冲气体进行相位匹配后, 效率可达到 5%, 输出功率达到 kW 级。TFWSM 过程的效率一般在 10^{-5} 左右, 这个过程可以有效地把可调谐 XUV 辐射的范围向短波推进(目前达到 72.5nm)。

入射光功率一般在 10kW~5MW 之间, 焦点处的功率密度约为 10^{10} ~ 10^{11} W/cm², 这样入射光的电场强度相对于原子内部库仑场足以认为是一种微扰, 以微扰论为基础的非线性光学理论基本上可以解释四波混频和谐波过程中的所有现象。然而当激光功率密度达到 10^{13} /m² 以上时, 激光场的电场强度已足以和原子内部电场相比拟, 从而出现了许多现有非线性光学理论难以解释的现象。强光场下的高次谐波过程则解决了这一难题, 几年来在实验和理论方面也都取得了令人瞩目的进展, 成为研究光和物质相互作用的一个新的领域。

在强激光场下, 高次谐波过程显示出区别于较弱场下的非线性过程的特点, 主要表现在: 谐波强度并不像以往非线性光学理论预言的那样随着次数的增加急剧下降, 然后出现一个很长的平台, 也就是 31 次谐波的产生效率与 7 次谐波相当, 随着入射光强度的增加, 这个平台延长, 在平台之后随着次数的增加强度又急剧下降。2n 次谐波的强度并不与 I^n 成正比, 当 $n > 11$ 时, 要比 I^n 平缓得多, 而且在光强更大时都出现饱和现象。此外, 高次谐波过程中没有显示出位相匹配因子 $F^{(n)}$ 的作用。这两种可能性, 一是位相匹配因子在高次谐波过程中没有作用, 二是位相匹配因子对于各个谐波的作用相同。对于这些用微扰论下的非线性光学理论难以理解的现象, 人们提出了许多解释, 在物理机制上认为强光下的高次谐波过程有区别于弱场下非线性光学过程的特点, 主要表现在: (1) 当强脉冲作用于原子时, 原子内部的电子波函数将不再遵从一般只考虑库仑场时的 Schrodinger 方程, 波函数会受脉冲激光的电场强度的影响发生变化, 遵从时间与入射光强有关的 Schrodinger 方程。(2) 强场下的高次谐波过程总是由多光子电离过程伴随, 多光子电离会引起基态原子的抽空和大量离子、电子的出现, 从而造成宏观非线性极化率的改变。一般来说, 由于离子具有较高的电离电位, 其非线性极化率较小, 造成高次谐波强度的变化。(3) 多光子电离过程产生的自由电子对相位匹配的影响已远远超过原子色散的影响, 使产生光与感应极化强度之间的波矢失配 Δk 亦不再随谐波次数 n 的增大急剧下降, 而成为一个对 n 不太敏感的物理量。

除上述以外, 还有一些其它的非线性光学过程可以产生 VUV/XUV 相干辐射, 如分子中的混频过程、高阶混频过程、高阶相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)等。

对于非线性效应产生 VUV/XUV 相干辐射的工作, 今后的发展方向是: 寻找新的物理过程和作用方式, 从物理机制上进行改进, 提高非线性过程的转换效率, 以获得较高功率 VUV/XUV 相干辐射, 将是较低功率方面 VUV/XUV 产生工作中的一个重要方向。这对于化学、原子、分子结构研究等方面的应用十分重要。新型紫外倍频晶体的出现使利用 Kr, Xe 甚至 Ar 的高激发态能级进行双光子共振混频成为可能。这样利用小功率激光就可以把 XUV 可调谐范围向短波方向大大推进。高次谐波的物理机制, 强激光场下光和物质相互作用的实验和理论将仍是一个研究热点。中等功率可调谐激光的高次谐波使深 XUV 以至 X 射线区可调谐相干辐射的产生成为可能, 这可大大推动高剥离态离子、等离体光谱、微生物的全息摄影、生物工程等高科技领域的发展。

(北京大学博士生导师孙陶亨、田渊产撰)

光子选通与频域存储 photon gated and frequency domain optical storage 在光盘存储技术中, 由于光的衍射, 光学头聚焦在记录介质上最小光斑的极限尺寸约为 $1\mu\text{m}$ 。因此, 光盘记录介质的 (x, y) 二维空间有一个数量级为 10^8 bit/cm²(bit 是信

息单元,称位)的存储密度上限。若能在同一个记录光斑上通过改变激光的频率来产生记录信息的某种效应,则可在同一个 (x, y) 点实现频率 (ω) 空间(域)的多重记录。光子选通光谱烧孔,简称PHB,是有可能应用于频率域存储的一个途径。如果PHB材料作为光盘介质,则可实现光盘的三维 (x, y, ω) 存储。理论估计光谱烧孔的数目即频率域存储的多重度的数量级约为 $10^3 \sim 10^4$,因而光盘三维存储密度的上限可达 $10^{11} \sim 10^{12} \text{bit/cm}^2$ 。

自从1978年美国IBM公司的G. Castro等人提出将PHB应用于频域多重记录以来,已有许多国家对PHB光存储技术进行了研究。中国也于1987年将PHB研究列入了高科技计划。PHB介质是一种以光活性客体(主体)组成的有机高分子体系。在低温下,当用单模激光照射后,在客体分子非均匀展宽谱线范围的吸收带内相应于激光频率的位置上,会出现吸收率(或透射率)的减小(或增大),因而在吸收率(或透射率)曲线上呈现出凹坑(或凸峰),这种现象称为光谱烧孔。如果一个光谱孔对应于一个数据位,就可建立频率域的光存储。

有关PHB研究可分为两类:一类是单色(包括单色单光子和单色双光子)光谱烧孔。此类烧孔由于不存在阈值而使读出具有破坏性。为了消除这个缺点,目前多数人已将研究方向转向第2类,即双色光子选通光谱烧孔。这是利用两束不同颜色(波长为 λ_1, λ_2)的光同时照射在合适的体系上形成光谱孔。其中一束光(λ_1)只起选择烧孔频率位置的作用,因而称为选位光,另一束光(λ_2)则起光致反应形成光谱烧孔的作用。没有这束光就不可能烧孔,因而称为选通光。由于读出过程中只使用第一束光(λ_1),因而也就不存在破坏性读出问题了。

近几年来,各国对一些有机光子材料进行了PHB研究。例如对一种体系:四苯并吡吩锌—巴豆酸/苯氧(基)树脂,简称为Zn-thp-CA/phR,从样品的制备、孔的形成到孔的检测,包括孔的寿命、孔的温度效应、孔的擦除性能以及孔的选通比等进行了系统的实验研究。现将该项研究作一简介。

样品制备 将Zn-thp(客体)、CA(添加剂)及phR(主体)溶于四氢呋喃后制成样品溶液,其中Zn-thp/CA=1/400(分子比),PhR(固体)中Zn-thp的浓度约为 $2 \times 10^{-3} \text{mol/L}$ 。取此适量溶液置于黑暗环境中固化成厚约 $30 \sim 100 \mu\text{m}$ 的薄膜。

烧孔与孔的检测 将试样固定在低温恒温器的样品架上,单模连续染料激光器用作选位光源, A_1 激光器用来泵浦染料激光器,并作为选通光源。所有烧孔实验均在20K的温度下进行。烧孔过程中到达样品表面的选位光功率密度 ρ_1 、选通光功率密度 ρ_2 以及样品被双色光照射(即烧孔)时间 τ_B 可以根据需要进行控制。孔的检测(读出)是利用白光光源、单色仪、锁相放大器、光电倍增管以及记录仪等通过烧孔前后透射光谱变化的检测来实现。

检测结果 (1)烧孔范围。计算得到20K下的非均匀线宽约为 384cm^{-1} (617.6—632.5nm)。实验表明,长波侧能实现烧孔范围大于632.5nm,但随着波长继续增长,需要适当提高烧孔功率密度。(2)孔的寿命。设一个刚烧得的双色孔,深度为10%(孔深为烧孔前后吸收率的变化与烧孔前吸收率之比),则可算得,当该孔衰减至原孔深的40%时约需6年时间,孔宽随保存时间变化很缓慢。即在20K下,孔几乎能长期保存。进一步的实验表明单色孔孔形比双色孔孔形衰变得快。(3)孔的温度效应。对于20K下,波长在627.9nm附近,深为6.66%,宽为 1.73cm^{-1} 的一个双色光子选通孔,分别将其退火(升温)至40K、60K、80K和100K,并在每个温度上稳定15min后,测得的孔形随着退火温度的升高,孔形逐渐变浅变宽直到消失。但样品冷却至原温后,由于升温引起的孔形变化却只能部分地恢复。而且升温越高,孔形恢复越少,当温度循环的幅度达100K时,孔已不复存在。(4)孔的擦除性能。用功率密度为 50MW/cm^2 的 A_1 激光照射一个双色光子选通孔时随着光擦除时间的增长,孔深逐渐填平(擦除)。若使用更大功率密度的 A_1 激光去照射,则孔将更快地擦除。(5)孔的选通比。选通比 G 定义为在相同烧孔条件下,双色孔深与单色孔深之比。双色孔对应于选位光和选通光同时作用下形成的孔;而单

色孔则是选位光单独作用的结果。 G 值的大小直接反映光子选通光谱烧孔中选通光作用的大小。为了消除单色烧孔因无阈值而导致破坏性读出的缺陷,要求设计的PHB材料体系具有大的 G 值。对于给定的样品, G 值的大小与孔的检测温度,孔形成后在一定温度下保存的时间以及烧孔条件的取值等因素有关。

迄今,国内外已研究过的PHB介质离频域存储实用化的要求还相距甚远。PHB的性能、参数不仅与材料体系本身有关,而且与存储时的读写等条件有关。PHB技术的理论基础涉及激光光谱、固体物理、低温物理、有机和无机化学、高分子材料等学科领域。要从机理上弄清PHB现象的本质和规律,从而研究出一种合适的选通型存储介质还不容易,但可望取得突破性进展。

参考文献

- 1 Castro G, Haarer D, et al. U. S. Patent, 1978, 4(101):976
- 2 Haarer D. Jpn J Appl Phys, 1987, 26: 227
- 3 Moerner W E. Springer Verlag, Berlin, 1988
- 4 Arnold S, et al. Opt. Lett, 1991, 16: 420
- 5 Zhonglu Zhang, Luqing Shi, et al. Appl Phys, 1993, B56: 1~3

(北京航空航天大学丁汉泉教授撰;张忠麟审)

全息层析术

holographic tomography 全息术应用于三维场干涉测量中采用的多方向全息图的记录和读出方法以及场函数的层析重建计算方法,称为全息层析术。近些年,全息术对固体力学的应用研究已趋成熟,国外许多公司开发了便于用户立即投入使用的完备系统。例如在全息无损检测方面提供了整套检测设备,它已广泛应用于汽车、飞机、机床等工业部门,尤其在轮胎无损检测方面的应用最有成效。其中全息干涉度测量是全息术的主要领域之一。

早在20世纪60年代中期,全息术已在二维流场或轴对称(即圆柱对称)流场的干涉测量中获得实际应用。对于这类流场,只需用单方向照射的物光束,记录流场在状态变化前(折射率为 n_0)和状态变化后(折射率为 $n(r)$)的两次曝光全息图,光线通过流场变化前后的光程差 Φ ,同全息图再现像的干涉图样有如下关系:

$$\Phi = \int_{S_1} f(r) ds \quad (1)$$

式中 S_1 为光线的路径, $f(r) = n(r) - n_0$ 为流场中 r 点处的折射率差,称为折射率场(函数), $\Phi = N_1 \lambda$, N_1 为干涉图中相应于光线 r 的干涉级数, λ 为激光波长。从干涉图中获得的一系列干涉数据 N_1 ,反过来求解(1)式的被积函数 $f(r)$,这一过程称为折射率场的重建(或称反演)。从干涉图重建出折射率场后,只要建立流体(例如热气流、燃气、传热液体、电弧或火花放电等离子体、高速气流、激波等)的折射率同待测参量之间的关系式,就可从折射率场转换成相应的参量场。由此可见,全息术应用于流场的干涉测量,需要解决两个关键问题:其一是全息图的记录(信息存储)和读出(干涉数据采集)方法;另一个问题是折射率场的重建计算方法。对于轴对称场($f(r) = f(r)$),这两个问题较容易解决。但是对于三维场 $f(x, y, z)$,特别是瞬变三维场 $f(x, y, z, t)$,问题就不那么简单了。对于三维场,必须在大角度范围(最好在 180° 平面角范围)内用方向上连续或分立的物光束在同一块平板或多块平板上记录多方向全息图,并能从各个角度方向的全息图的再现像中读出具有足够冗余量的一系列采样(干涉)数据,才能较精确地重建出三维场来。在重建计算中,先把流场沿物光和参考光平行的方向分层分析处理(层析),计算出各个层面上的折射率场,例如 $f(x, y, z_1)$, $f(x, y, z_2)$, ... 再经插值计算得出三维场 $f(x, y, z)$ 。

国外在70年代初用全息层析术研究了三维场。国内从70年代末以来,对稳态或准稳态的自然对流液体、燃气的三维温度场以及电弧等离子体的三维温度、粒子浓度、电高度场进行了原理性的全息层析术研究。

由投影图(光线透过物体后的辐照度,例如 x 光透视图)或干

涉图获得场函数(与投影图对应的场函数表示物体的吸收系数)的线积分数据,得出场函数的关于层析重建的数学理论和计算方法,早在 20 世纪 50 年代就出现在许多不同的学科领域。利用电子显微术得来的数据重建出噬菌体的分子结构,利用送往大气层外的火箭采集的数据重建出超新残星的 X 射线结构。这些各不相同的学科都应用着共同的数学基础。迄今,在诊断医学方面,从多个 X 射线投影值获得人体内部的结构分布,称为计算机断层扫描(CT)。关于三维场函数层析重建计算,多年来,射电天文学、电子显微术、计算机断层扫描、全息干涉度量术等领域的学者相互借鉴和启示,获得了多种有效的计算方法和十分喜人的应用成果。

方程(1)有多种重建算法,大体可分为两类:其一是利用各种数学变换法由(1)式求出 f ; 其二是将 f 表示成由基函数组成的级数,代入(1)式求出 f 。下面避开复杂的数学描述,略作简介。

变换法 通常把场函数对应的空间叫场空间,光程差函数(干涉图)对应的空间叫 Radon 空间,场函数的 Fourier(傅氏)变换的函数对应的空间叫傅氏空间。三者可根据有关数学定理和公式相互变换。

1. Radon 变换法。(1)式的数学含义是光程差函数是场函数的 Radon 变换。早在 1917 年, Radon 就给出了(1)式的逆变换式(即用光程差函数表示的场函数的解析式), M. V. Berry 和 D. F. Gibbs 利用 Fourier 变换,于 1970 年也给出了(1)式的逆变换式。在 Radon 空间直接对实验中获得的光程差数据进行插值,代入逆变换式计算出场函数。

2. 卷积法。将 Radon 逆变换式写成卷积形式,经 Fourier 变换为乘积,再利用快速 Fourier 变换(FFT)算法求出其逆变换即得场函数。

以上两算法需要在 180° 视角内采集干涉数据,称为完全角重建。以下的各种算法可在小于 180° 视角内采集干涉数据,称为有限角重建。

3. Fourier 变换法。利用中心截面定理,将光程差函数变换到傅氏空间,在傅氏平面内插值、延拓,然后求其逆变换即得场函数。

级数展开法 将场函数 $f(x, y)$ 展成某种级数

$$f(x, y) = \sum_{m, n} f_{mn} b_{mn}(x, y) \quad (2)$$

代入(1)式,有

$$\Phi(P_i, \theta_j) = \sum_{m, n} f_{mn} A_{mn}(P_i, \theta_j) \quad (3)$$

$$\text{其中 } A_{mn}(P_i, \theta_j) = \int_{S_{ij}} b_{mn}(x, y) ds \quad (4)$$

式中 θ 表示光线的方向(光线与 x 轴的夹角), P 表示光线的位置(光线与坐标原点间的垂直距离)。对于不同倾角 $\theta_j (j=1, 2, \dots, T)$ 和不同径向值 $P_i (i=1, 2, \dots, I)$ 的光线,可使(3)式构成一组关于未知数 f_{mn} 的线性方程,解出未知数 f_{mn} 代入(2)式,就可得出场函数。

1. 网格(grid)法(或称 rect 法)。把场空间分成 $M \times N$ 个面积为 $\Delta x \Delta y$ 的矩形单元(分辨单元即测点),每个单元内假定有均匀的折射率,则有

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f(m\Delta x, n\Delta y) \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x} - m\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta y} - n\right) \quad (5)$$

由(2)、(4)、(5)式得

$$A_{mn}(P_i, \theta_j) = \int_{S_{ij}} \text{rect}\left(\frac{x}{\Delta x} - m\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\Delta y} - n\right) ds \quad (6)$$

由(6)、(3)式通过计算机数据处理,可得 f_{mn} 。

2. 抽样定理法(或称 Sinc 法)。D. W. Sweeney 和 C. M. Vest 利用一个抽样定理为基础的表达式

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N f(mlx, nly) \text{sinc}\left(\frac{x}{l_x} - m\right) \text{sinc}\left(\frac{y}{l_y} - n\right) \quad (7)$$

式中 l_x, l_y 为 x, y 轴上的采样(测点)间距。由(2)、(4)、(7)式得

$$A_{mn}(P_i, \theta_j) = \int_{S_{ij}} \text{sinc}\left(\frac{x}{l_x} - m\right) \text{sinc}\left(\frac{y}{l_y} - n\right) ds \quad (8)$$

由(8)、(3)通过计算机数据处理,可得 f_{mn} 。

级数展开法最后归结为求解方程组

$$\Phi = A \times f \quad (9)$$

式中 Φ 为 $I \times J$ 个光程差数据组成的向量, f 为 $M \times N$ 个测点上待重建的数据组成的向量, A 为 $(I \times J) \times (M \times N)$ 个系数组成的矩阵。

对于有限角,实际上处理时常采用超量数据($I \times J > M \times N$)来求解(9)式的最小二乘解,即寻找 f , 使得下式成立

$$\|R\| = \|A \times f - \Phi\| = \min \quad (10)$$

$\|\dots\|$ 定义为平方范数。但是, (10)式还不一定能唯一地决定 f , 因为可能有多个 f 满足(10)式。为此,可以依靠场的先验知识,从多个解中寻找满足场空间物理限制的解。

关于多方向全息图的记录方法,国内外已做过的一些原理性实验中大体有两类。

1. 完全角记录。将多块干板在 180° 范围围成弧形,每块干板记录一个方向的两次曝光全息图。此法光路布置复杂,不宜应用于工程实际。对于稳态场,可仿照 CT 照相那样,使光束同试验对象相对转动,每转过一个角度,更换一块干板,记录一个方向的全息图。此法同一般的离轴全息图的记录方法完全一样,光路简单,它把多方向记录等效于不同时刻的单个方向记录。但实际存在的流场大多是不稳定的或瞬变的。

2. 有限角记录。用一束或有一定夹角的对称宽准直光束照射分束元件(例如多级次相位光栅),使它变为在方向上分立的一系列准直光束,再在紧靠分束元件后方的漫射屏(例如毛玻璃)的作用下,使照明光线在较大平面角范围连续均匀地照射试验区。参考光一般可用一束或两束对称入射的发散光。此法记录的全息图,可在 90° 范围连续地读出再现象的干涉数据。此法的光能损耗大,除非试验对象是稳态或准稳态的,可以进行较长时间的曝光。用宽准直光束垂直照射分束元件,使它变成方向上分立的多准直光照明整个试验区,靠近试验区后方的透镜将物光束会聚在漫射屏上,全息干板将排列在漫射屏上的各个方向的物光信息记录下来。在观察这类全息图的再现象时,可不用改变观察方向,同时看到相应于分束光的多个分立的干涉图。若试验对象是高亮度的电弧,可在透镜的后焦面上设置挡光屏(若设置暗箱,则挡光屏是暗箱的一个面),在各准直光束的焦点处开一小孔(对暗箱,参考光束同箱壁交点处也要开一小孔),这样,就可屏蔽弧光的噪声干扰。

CT 早已普遍应用于医学实践,因为人体内部的组分对应于吸收系数场,场的线积分对应于投影(透视)图,透视图只需使用能透过人体的非相干光源。加上人体可视作准稳态场,可以在不同时间拍摄层析计算所需的任何方向的透视图,而且在层析计算时可以完全忽略射线在人体内的偏折。而流体的某些参量对应于折射率场,场的线积分对应于干涉图。对于干涉图,特别是全息图,必须使用时间、空间相干性极好的激光器。对于稳态场,虽然可使用连续激光器在不同时间拍摄多方向全息图,但对整个拍摄时间内的环境稳定性有非常苛刻的要求,拍摄(曝光)的时间越长,对稳定性的要求越高。对于动态场,必须使用输出能量足够大的高性能脉冲激光器在同一时刻拍摄大角度范围的双脉冲全息图。脉冲激光器的输出能量同它的相干性是互相制约的,要提高相干性,必须进行严格的选模,但这样做以损耗能量为代价。再者,对于折射率梯度较大的介质,必须考虑光线的偏折,加上试验区如果较大,测点数较多,就会大大增加计算机的运算时间,致使实时数据处理带来困难,等等。这些使得全息层析术还不能普遍应用于生产实践。但随着脉冲激光技术、计算机技术、信息存储和显示技术等的进一步发展,全息层析术的研究将会开发出完备的

系统。

参考文献

- 1 Herman G T. Image Reconstruction from projections, 1980
- 2 Vest C M, et al. Appl. Opt. 1984, 23: 2433
- 3 Kim J H, et al. IEEE Trans. Med. Imaging, 1985, 4: 139
- 4 D'areufed S, Farrell P V. Optics letters, 1985, 10: 203
- 5 Gao Yiqing, Ding Hanquan. Acta Optica Sinica, 1988, 8 (10): 892

(北京航空航天大学丁汉泉教授撰, 张忠麟审)

X 射线激光全息术 指用 X 射线激光作为相干光源对物体进行全息摄影, 获得全息图, 然后通过全息图的再现获得微观物体的空间分辨的三维图像的高新技术。当前, X 射线激光和 X 射线光学所取得的进展, 对生物和生命科学的研究具有重大现实意义。由于 X 射线激光具有短波长、高亮度、短脉冲、相干性等特点, 因而 X 射线激光全息术能够使人们看到活的生物细胞和亚细胞结构以及动力学过程。从长远来看, X 射线激光全息术有可能使人们第一次看到分辨为原子尺度的生命、物理和化学动力学过程。

全息原理是 1948 年英国丹尼斯·伽柏(Dennis Gabor)为提高电子显微镜的分辨本领而提出的。全息术的原理适应于各种形式的波动, 如微波、声波、电子波、X 射线等。而用 X 射线全息术, 可以获得活的细胞的三维结构。从研究生物样品的观点, 可以把 X 射线全息技术分为两类: 菲涅耳变换全息术和傅里叶变换全息术。菲涅耳全息术有共轴菲涅耳变换全息术(伽柏全息术)和离轴菲涅耳变换全息术。伽柏全息术的优点是简单, 样品与 X 射线束共轴, X 射线束既是参考波又是样品的照明(物波)。伽柏全息术的不足之处是需要有高分辨记录介质, 同时记录面必须放在样品的“远场”, 否则实像与虚像会互相干扰。离轴全息术是对伽柏全息术的改进, 记录时参考光波和物光波之间有一夹角, 再现时得到分开的两个立体像, 并且也和直射光分开, 避开了互相干扰。傅里叶全息术是指物体的像可以通过全息图作傅里叶变换而得到。可以证明, 所有的傅里叶变换全息图, 是用非准直光照明物体所记录的无透镜傅里叶变换全息图的一个特殊情况, 参考源发射的球面波与样品的散射波在记录面相干, 傅里叶变换全息图中条纹图像的空间频率可以通过改变参考源和样品间的距离或改变记录面样品的法向距离而加以调整, 因此可以避开像菲涅耳全息术那样空间分辨受记录的感光介质颗粒大小影响。

按照波动光学, 能够分辨的最小间隔称为分辨极限, 它是光学成像系统的重要性能之一。按照瑞利判据, 显微镜的分辨极限 $e = 0.61\lambda/A$, 式中 λ 为人射光的波长, A 为显微镜的数值孔径, 分辨极限和入射光波长成正比。现代生物学中, 人们想要直接分析小于光学显微镜分辨极限($\sim 2.000 \times 10^{-10}\text{m}$)的大分子结构(例如染色质-酶复制复合物、核膜孔结构、蛋白质复合物结构等), 了解它们的功能。随着国际间遗传学研究的进展, 要求能够提供像遗传物质 DNA(脱氧核糖核酸)和 RNA(核糖核酸)结构和功能信息。光学显微镜已不能满足要求, 虽然电子显微镜的分辨极限比光学显微镜小得多, 但是由于成像过程中要对生物样品进行切片、脱水、染色和固定等, 引起部分结构解体和环境变化, 与真实的活的状态有所不同, 不能满足研究的需要。人们希望研究活的生物细胞和亚细胞结构和功能, 了解正常环境下三维大分子结构和生命过程动力学。把全息技术和显微镜相结合, 作成全息显微镜进行放大称作全息显微术。用强脉冲激光束可将物体的信息在短瞬间内冻结起来, 以便对瞬变物体进行深层次的三维动态分析。发展中的 X 射线激光全息术可以满足生物显微术的这些新的要求。X 射线激光器可以提供短脉冲、高亮度和相干的软 X 射线作为全息术的光源, 配合合适的 X 射线光学部件, 可以获得反映动态过程的瞬间全息图, 通过计算机数值再现这个全息图, 可以获得高空间分辨的生物微观结构的三维图像。

虽然早在 1952 年就有人考虑了 X 射线全息术, 但是由于存

在 X 射线源、X 射线光学部件和探测器方面等技术原因, 高分辨 X 射线全息术的实验演示姗姗来迟, 60 年代和 70 年代同步加速器技术的发展为新的低亮度 X 射线源创造了条件; 70 年代建立的高功率、亚纳秒脉冲的光学激光器为 X 射线激光器提供了必要的泵浦源; 70 年代和 80 年代半导体电子工业技术的进步, 使得人们有能力制造 X 射线光学部件(透镜、反透镜和分光镜等)。这一切对 X 射线全息术来说都是非常重要的。1984 年实验室 X 射线激光演示实验成功; 1986 年 Howells 等人利用布鲁克海文实验室的 NSLS(国家同步光源)电子贮存环的波荡器和单色器的 $25 \times 10^{-10}\text{m}$ 辐射作 X 光源, 获得老鼠胰腺酶颗粒的伽柏全息图; 1987 年美国利尔实验室用软 X 射线激光作光源进行了世界上第 1 例 X 射线激光全息术的原理性演示实验, 获得一个直径为 0.008mm 的碳纤维的伽柏全息图。

X 射线激光指波长为 $(300 \sim 0.1) \times 10^{-10}\text{m}$ 的激光, 在研究短波长激光时把波长为 $(300 \sim 20) \times 10^{-10}\text{m}$ 的辐射称为软 X 射线。产生 X 射线激光所需的泵浦源的功率密度 (W/cm^2) 与 X 射线激光的波长的 $9/2$ 次方成反比。因此世界各国实验室中用于 X 射线激光研究的泵浦源大都是脉冲宽度为纳秒或亚纳秒的高功率激光器。但由于功率仍有限, 所以只能进行软 X 射线激光的研究。和其它的 X 射线源如 X 射线管、同步辐射源等相比, X 射线激光的优点是亮度高、脉冲短, 因此特别适合于微观过程的动态全息摄影。

泵浦激光打靶后产生的等离子体是 X 射线激光的激活物质。目前实验室软 X 射线激光的研究主要集中于 3 种物理机制, 即离子的电子碰撞激发、离子的碰撞复合和离子的线共振激发。离子的电子碰撞激发机制是目前世界上唯一获得高放大和增益饱和的软 X 射线激光机制, 也是唯一可用于全息术的 X 射线激光。处于基态的等电子系列闭合壳层的离子(类氦、类镍和类钨离子)经电子碰撞激发到激光跃迁的上能级, 由于下能级相对基态是电偶极允许跃迁, 辐射衰减速率很大。结果形成上下能级间的粒子数反转如果柱状等离子体中能够产生粒子数反转而形成受激跃迁上迁辐射放大的区域足够大, 维持时间足够长, 就能产生软 X 射线激光。这种机理产生的软 X 射线激光的上下能级差 $\Delta n = 0$, n 为原子的主量子数, 即只能在同一主壳层的不同次壳层之间发生跃迁, 例如氦离子的 $3p-3s$ 跃迁, 类镍离子的 $4d-4p$ 跃迁等。这种机理有一个显著的特点, 就是对于不同的等电子系列的闭合壳层的离子, 单级激发强度随 n 的增大而增大。从能级利用效率看, 类镍离子($n=3$)和类钨离子($n=4$)的电子碰撞激发比类氦离子($n=2$)的电子碰撞激发更有效。美国利弗弗尔实验室的类镍钨离子($4d-4p$)跃迁的辐射放大实验中观测到 $GL \approx 7$, 其中 G 是增益系数, L 是增益区长度。并观测到类镍金离子的 $4d-4p$ 跃迁的 $35.6 \times 10^{-10}\text{m}$ 的辐射放大, 进入了“水窗” [$(43.7 \sim 23.2) \times 10^{-10}\text{m}$]。类镍钨离子的 $4d-4p$ 跃迁谱线 $\lambda = 44.8 \times 10^{-10}\text{m}$ 是软 X 射线激光全息术光源的有力候选者。

生物细胞 X 射线全息摄影有一个最佳波长, 这时相干的 X 射线散射最大, 同时 X 射线吸收和对样品的损伤都最小。生物细胞的散射截面最大值约在 $44 \times 10^{-10}\text{m}$ 处, 吸收剂量最小值刚好在碳的 K 吸收边上, 因此软 X 射线全息摄影的最佳波长为 $44 \times 10^{-10}\text{m}$, 位于“水窗”的外边。为了防止在产生 X 射线全息图过程中生物体吸收 X 射线引起的损伤, 需要限制入射 X 射线能量和曝光时间, 使被摄物体不会膨胀到大大超过其初始尺寸的程度, 即全息图一定要在 X 射线加热引起的爆炸可能破坏物体之前就产生了。为此, 要求 X 射线激光脉冲要尽可能短, 例如小于 50ps。如果生物体含有 X 射线散射截面大的物质, 例如用免疫金标记法把直径小到 $10 \times 10^{-10}\text{m}$ 的尘埃球加到细胞结构中, 这样 X 射线剂量可以大大降低, 尘埃球颗粒愈大所需剂量愈低。用直径 $300 \times 10^{-10}\text{m}$ 的金微球作标记, 允许曝光时间达几百 ps, 处于目前研制中的 X 射线激光器输出脉冲宽度之内。

波长 $44 \times 10^{-10}\text{m}$ 的软 X 射线在蛋白质中的平均自由程有 $2\mu\text{m}$, 因此限制了成像的生物体的厚度。另一个最佳波长值在 24

$\times 10^{-10}\text{m}$ 处,这个波长的 X 射线在蛋白质中的平均自由程有 $9\mu\text{m}$,因此成像的范围较宽,它可能是 X 射线全息术的最终运转的波长。

目前实验室 X 射线激光研究中要解决的问题是:泵浦能量转换为 X 射线激光能量的效率低(而且装置庞大、价值昂贵);相干性差,普通激光可用谐振腔选模,软 X 射线谐振腔的研究尚处于起步阶段;可供生物体全息摄影的波长选择性小,近期波长 $44 \times 10^{-10}\text{m}$ 附近的软 X 射线激光有可能达到增益饱和,但要得到波长 $24 \times 10^{-10}\text{m}$ 附近的软 X 射线光困难很大,而且波长愈短难度愈大。

用 X 射线拍摄的全息图可以用可见光再现而获得放大的还原图像,放大倍数为可见光波长与所用的 X 射线波波长之比,这也称为全息放大。

计算机数值模拟和数值再现是研究 X 射线激光全息术的重要手段。以平面波为例,计算机模拟过程分两步:第一步,一个模拟的物体散射一个向前传播的相干平面波,新的场被记录在一张底片上,给出一个真实的强度分布的模拟,即全息图。第二步,一个相干的平面波通过全息图而被散射,在某一确定距离处,散射波的强度分布近似于模拟物体的初始场。具体的过程是假定入射场在时间上是谐振的、散射的、各向同性的,这时能推导出一个标量方程称为亥姆霍兹(Helmholtz)方程,这个方程的解给出各处的场。如果我们能记录一处的场(振幅和位相),我们就能计算另一处的场,也就是说能作成—个物体的“像”。除了特殊情况外,解亥姆霍兹方程是很困难的,但可用近似方法求解。为了确保计算机模拟结果是正确的,可以用可见光进行实验。用底片和数字化相机记录全息图,然后把数字化信息传递给计算机,通过数值模拟给出再现图像。通过对不同样品的图像对比,修改模拟程序,最后可得到可信的计算机模拟系列程序。利用这套程序进行 X 射线全息系统问题的研究就会有指导价值。模拟研究表明,为了分析具有几十个 nm 分辨率分子三维结构,需要多视图全息术。

X 射线激光全息术是建立在 X 射线激光器、X 射线光学和全息术基础上的交叉学科新技术,目前还处在原理性演示阶段。近期目的是利用波长 $44 \times 10^{-10}\text{m}$ 左右的 X 射线激光完成全息过程的演示实验。利用波长更短的(例如 $\sim 24 \times 10^{-10}\text{m}$)X 射线激光全息摄影,获得三维的活细胞结构图像,进而利用波长更短(例如 $1 \times 10^{-10}\text{m}$)的 X 射线激光全息术进行诸如表面物理、原子分子物理、化学反应动力学等方面需要高分辨率的快过程的研究。获得价格相对低廉、易操纵、重复频率高和波长在水窗区或更短的 X 射线激光器和相应傅里叶变换全息术的 X 射线光学部件,仍然是非常艰巨的任务。X 射线激光技术的迅速发展已经使 X 射线光全息摄影脱离了科学幻想,预计很快就能实现。

(北京应用物理与计算数学研究所彭惠民撰)

国外全息显示技术 近年来,国外全息显示技术发展迅速,这里主要介绍国外全息显示技术的某些进展。

彩色反射全息正进入商业市场 与 Bonton 彩虹全息相比,反射全息的色彩与观察角度、位置关系不大,色彩基本保持不变,使它在全息显示中具有特别的地位。然而,因为复制多色反射全息图的成本随着颜色数目的增加而增加,使以往多数反射全息图是制成单色的。近年来,通过提高产量和改进方法,使多色反射全息图的制作过程流水线化,其成本降到市场能接受的水平。最明显的结果是:在 1993 年中,彩色反射全息图在商业全息显示领域内数量猛增,并在市场获得强烈的反响。

为减小开支,多数厂家采用假彩色方法拷贝多色反射全息图。通过曝光前膨胀乳胶的厚度或在曝光后作适当的化学处理来控制乳胶的厚度。多数假彩色方法会带来彩色像差,使波长偏移后的像离开原位,而难以保持像的分辨率和景深。采用 DCG 介质则受到更严格的限制,为使图像无畸变,通常像深不能超过 3cm。

多色反射全息图也可采用 3 种适当波长的激光来制作。通常用红、绿、蓝(R、G、B)3 种色。使用 RGB 记录介质和足够大的光

学件,能提供共轭照明。所获得的像无色差,波前没有畸变,颜色的对准也得以简化,从而降低了制作成本。

新的研究进展促成一种自动、彩色全息立体图拷贝装置的问世。1994 年 2 月,SFIR/ES&T 的电子成像会议中举行实用全息技术第 6 次会议上,有两个研究组介绍了他们在彩色桌式全息印像机方面的工作。麻省理工学院的介质实验室,他们的装置由计算机处理系统和能够投影屏定位的光学系统以及在最后的全息立体图上可处于任意位置的光学元件组成。用单一波长的激光器拍摄、制作一步全色全息立体图,尺寸可达 $(24 \times 10 \times 8)\text{cm}^3$,水平视角可达 68° 。东京理工学院的图像科学和工程实验室制作的系统,使用 3 个波长进行彩色编码,采用双凸透镜来扩展全息图的视区,立体图的狭缝宽 2mm,每帧之间狭缝的移动量仅 0.5mm,因此每 0.5mm 的缝曝光 4 次,有助于像的连续,并防止全息图出现线条。制成的全息图具有 60° 的视角,曝光 400 帧。为了补偿波长弥散以及照明光源的尺寸,该系统采用立体图数据的预畸变处理。这种自动彩色全息立体图拷贝装置的开发将为非模压全息复制技术带来重大突破。

边缘照明技术 边缘照明的概念在 1970 年已提出(L. H. Lin, 1970),1988 年报导了用这种概念实现的一种紧凑显示装置(J. Upatneks, 1988)。1990 年开始用在显示彩虹全息图上。

1992 年美国阿拉巴马大学展出了用边缘照明方法显示的彩虹全息图,其光源装在全息图的镜框框内,镜框仅 3cm 厚,下端有一根带电源插头的软线,将它挂在墙上,插上插头,便可观赏。装置由 3 部分组成:光波导、彩虹全息图和光源。光波导包含两片平行放置的玻璃和中间的空气隙;光源是一个微型白光灯泡,位于玻璃片间靠近其边缘处,全息图与光源需保持适当距离以提供较均匀的照明。从灯泡发出的光通过玻璃片的多次反射照明全息图,在靠近光源处,镀铝镜而复合在光波导上以减少光的泄漏并降低玻璃的温度。使用一只 12W、20W 的卤化物灯时,该系统的最大温度不超过 65°C ,这就保证了把光源装在镜框内的安全。

照明光的主要部分具有非常倾斜度的入射角。为了获得有效的再现,全息图在记录时要采用相似的几何光路布局。

此法也开始用在全息光学元件上。例如,将物光代之以一束准直光。此时全息图就变成了一个全息光学元件,具有准直光束的功能;同样也可直接使它具有会聚光速等其它功能。

这种光学元件对空间的要求大为减少。例如,一个传统透镜系统占据的空间约为 $\pi f d/3$,其中 f 是透镜的 f 数, d 是透镜直径。面对边缘照明的全息元件,只需 $d/5$ 的厚度,故其所占空间约为 $d^3/5$ 。其 4—F 透镜系统所要求的体积仅为传统透镜的 $1/10$ 。

另一种具有吸引力的应用前景是瞄准,可用作望远镜、测量仪器、罗盘或武器的瞄准。

条纹锁定技术 为了获得高质量的全息图,必须在记录全息信息时获得能见度好的干涉条纹。为解决这一问题,国外很早便提出条纹锁定法。经过多年的发展改进,现在已趋成熟。其基本原理是:物光与参考光相互干涉的光场中置一光电检测器,当任何因素引起这两束光的位相差发生变化时,条纹也将随之变化。这时,检测器收到的信号将通过反馈电路控制参考光光路中的压电陶瓷装置,使之增大或减小参考光的光程,从而使光场中的干涉条纹锁定在稳定位置。

此法的缺点是:当两光束的夹角增大时,条纹间隔减小,以致在此情况下这种方法完全失效。为解决这一困难,MacQuigg 采取了一种改进方法。他在正常曝光记录之前,先用记录系统拍摄一幅全息图。然后放回原位,正式曝光时利用其莫尔条纹来取得信号。这时,两束光中任一束光路的位相变化将引起莫尔条纹变化。虽然此系统的灵敏度并未提高很多,但它可以从全息图的较大面积上获取较多的光能。可使用灵敏度要求不高的光探测器,并且对检测器的稳定性的要求也降低了。

Frejlich 以及 Cescato 等进一步发展了这种方法。他们使用光致抗蚀剂及重铬酸明胶作记录介质,当这些材料对干涉条纹曝光时,在光较强的区域将引起介质折射率的微小变化。变化如

此微弱,必须通过后继处理放大才能产生明亮的全息图。尽管如此,如果在处理前把全息图放在强再现光束下仍可见到微弱的像。在这新法中,曝光的头几秒钟记录的条纹与变化了的实时条纹将发生干涉而引起莫尔条纹,利用它作为锁定条纹的信号。此法的优点是,无需先制作全息图,只是这种条纹的对比度较低,它的衍射效率约为 0.008%,此法使用于长时间曝光的全息拍摄中很有效。

时序相干成像 瑞典 Nils Abramson 提出的飞行光全息术,是一种利用可见光透射人体的成像技术,称作时序相干成像(CCI)。它基于全息术中最基本的概念,即只有相干光才可干涉而形成全息图,并且全息图像的景深决定于光的相干长度。由于脉冲光相干长度很短,如将光脉冲分为两束来制作全息图,只有那些光程差小于相干长度的光才能干涉。对于 1ps 的光脉冲,其相干长度仅有 0.3mm。

在美国西北大学,研究者采用了一个字母“E”(笔画粗细为 2.5mm,字高 8mm)把它夹在两片散射板中作为被拍摄检测的物体。通常情况下,由于字母被散射板遮住,无论从那一面,肉眼都看不到这个字母。当把它放在扩展了的平行激光束中,光通过它后将产生散射,来自物光束未被散射的光与参考光中较短光程者相干,而被散射的物光则与参考光中较长光程的光相干,光程差超过相干长度者则不相干。因此,这幅全息图相当于一幅由连续的、对应于不同光程的许多全息图所组成。当再现激光束沿着全息图移动时,每幅全息图便依次逐一显示,这时,观察者可看到对应于曝光时间先后变化着的图像。于是,夹在散射板中间的字母“E”便显现在全息图的再现像中。

目前 CCI 技术需要用高能激光脉冲,因为大部分光能被物体所吸收,但它的初步成果已受到科学界的重视。

全息光学元件已进入汽车工业 全息光学元件作为平视显示器已成功地应用在飞机工业中,并已进一步走入汽车工业。

德国的大众汽车公司和美国休斯公司分别独立的发展了此技术,并用在汽车的挡风玻璃上。

大众系统的主要组件是一片倾斜放置的全息反射镜,它把来自液晶显示的像反射给驾驶员(只反射来自液晶显示器的光,而对其它的光则是透明)。这由体全息布拉格条件的波长选择性能所决定。用此系统驾驶员不仅无需低头看仪表读数,而且由于反射的虚像位于离驾驶员约两米远处,使驾驶员不那么费力地改变眼睛的聚焦,从而减低了眼睛的疲劳。此外,它还可衰减阳光的照射。

休斯公司的设计与大众的不同,后者的液晶显示是从下向上投射在挡风玻璃上,再反射给驾驶员;而前者则采用一种装在汽车中央的红灯照明系统(CHMSL)。照明灯包括卤化物灯泡、抛物面反射器、长波滤光片,用它发射近准直的红色光束。为使反射光束足够强,全息元件需有很高的衍射效率。乳胶要有足够的厚度,以免更高级衍射。然而又必须考虑窄光谱带宽与宽波带的照明灯相适应。解决的方案是选择 25μm 厚的重铬酸明胶。

内窥全息成像 通常的内窥镜检查法是在细管内用有序排列的成像光纤束插入体内,从另外的光纤将照明光导入体内。用普通摄影方法记录时,由于透镜的使用而限制了图像的分辨率。即使采用分辨率高的胶片也无济于事。采用全息记录时,由于不使用透镜,在使用全息干记录时,可以获得分辨率比常规医疗器械高的图像。

全息内窥镜的记录胶片压在机体组织上(接触型全息图),激光通过单模光纤导向软片,然后从机体组织表面反射回软片,并与原始激光束干涉,将机体组织的反射全息图记录下来。

这种全息内窥成像的主要优点是:用它产生的图像同显微镜下看到的实际活体组织检查样品的图像相比,这样,外科医生就不必取得机体组织的样品。这种方法所摄制全息图像的质量决定于全息胶片的分辨率、染色以及所选择的激光波长。此方法可用于诊断消化道及妇科疾病,进一步改进全息内窥镜的型式,还可用它检查身体的其它部位。

电视全息技术 电视全息技术也称作电子散斑干涉术,其主要应用是时间平均法振动分析,与传统的全息时间平均法相比。由于它用 CCD 摄像机取代全息干,免除了全息干的处理过程,具有准时分析的优点。

近年来一些先进的光电干器件,如自聚焦透镜、线性压电位相调制器等,引入此技术。微机数字图像处理技术的新发展也进一步改善了其信息处理,特别是一些新的处理方法,如时间平均相减等方法的使用,产生了新一代的电子散斑干涉术,使产生的图像清晰,条纹反差度高,可见条纹级别高。而且使用此法时,几乎不需要特别的隔离设备,具有很好的实用价值。

美国激光技术公司还开发了一种“电子剪切照像术”,它是研究复合件脱粘、组合不紧的极有力的检测手段。它获得变形结构的条纹图样的方式与电视全息技术相似,这些条纹在与其自身完全相同的副本上横向平移,所产生的拍频图纹表示位移的微分,使得发在多数工程环境中的刚性位移得以补偿,使人们能在不稳定的环情况下进行测量。

(云南工学院激光研究所熊秉衡、杨齐民、郭定君撰)

激光腔外的脉冲压缩 腔外压缩技术一开始就与光纤结下了不解之缘,光纤波导的独特性质决定了它在脉冲压缩中的地位。理论研究表明,光脉冲在光纤中的传输可由下述方程进行有效描述:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \alpha A + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

式中 A 为脉冲包络函数, T 为在以群速 v_g 运动的坐标系中的时间。值得指出的是(1)式没有考虑高阶非线性效应,当脉宽 < 100fs 时,需引入一些高阶修正项才能完整地描述。下面分析(1)式所及的主要效应:

右端第 1 项描述光纤的线性衰减, α 为衰减系数,现代光纤技术已使光纤衰减降至很低(例如 0.2dB/km)且压缩过程中所用光纤较短(几米至几百米),故衰减项可以忽略。忽略衰减项时,(1)式通常称为非线性薛定谔(NLS)方程。

右端第 2 项描述光纤的群速度色散(GVD), $\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D(\lambda)$ 为通常的色散参数)称为 GVD 参数。所谓 GVD 是指不同波长 λ 的成分在光纤中传输群速 v_R 不一样的性质。

右端第 3 项描述光纤中一种非常重要的非线性光学效应:自相位调制(SPM)。非线性参数 $\gamma = n_2 \omega_0 / CA_{\text{eff}}$ (A_{eff} 为光纤有效截面)。由于光纤中的非线性 Kerr 效应(即光纤折射率 n 随光强 I 而变化, $n = n_0 + n_1 I + n_2 I^2$, n_0 为线性折射率, n_2 为 Kerr 系数),使光纤的折射率随光强 $I(t)$ 从而随时间 t 变化,经长度 L 的光纤后,将引起随时间变化的附加相位移动

$$\Delta\varphi(t) = \Delta n K L - n_2 I(t) K L \quad (2)$$

此即 SPM 效应,其中 $K = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为真空波长。SPM 将引起随时间变化的附加频率

$$\Delta\omega(t) = -d[\Delta\varphi(t)]/dt = n_2 K L dI(t)/dt \quad (3)$$

使脉冲包络的不同部位具有不同的频率,形成的啁啾脉冲(chirped pulse)。以下从 4 个方面介绍腔外脉冲压缩技术的实验情况。

光纤-光栅对压缩 光栅对作为一种常用的、较理想的色散延迟线是 Treacy 在 1969 年为克服被动锁模钛玻璃激光器输出的 ps 光脉冲的固有负啁啾而推出的。如图,入射角为 γ , 衍射角为 $(\gamma - \theta)$, 选择光栅常数 $\frac{\lambda}{2} < d \leq \lambda$, 以便只存在一级衍射,从而提高一级衍射效率,由光栅公式

$$\sin\gamma + \sin(\gamma - \theta) = \lambda/d \quad (4)$$

可知,频率越高(λ 越小), θ 越大,光线两次经过 aa' 面获得的时间延迟 τ 越小,可以证明,当脉冲谱宽 $\Delta\omega$ 与中心频率 ω_0 满足 $\Delta\omega \ll \omega_0$ 时, τ 与 ω 成线性关系(脉宽 > 100fs 的脉冲通常能满足此条件)。其比例系数可通过改变光栅对间距 L_g , 光栅常数 d 和入射角 γ 而调整。

光纤—光栅对压缩原理是：由于光纤的SPM效应，在脉冲中心区形成“红头紫尾”的线性较好的正啁啾，正GVD使啁啾脉冲的低频前沿传输快，高频后沿传输慢，从而脉冲在时域展宽；光栅对使“红头”（低频）延迟多，往后叠，“紫尾”（高频）延迟少，往前赶，因啁啾和延迟均线性较好，故通过选择参数 L_g, d, γ 可使各频率分量几乎同时达到光栅对出射面 aa' ，从而使脉冲在时域得到最佳压缩。

光纤—光栅对压缩已由大量实验证明是压缩脉宽从ins到几十个fs，频率从可见到红外大范围光脉冲，产生到数个fs的最短光脉冲的有效手段。Gomes等对此作了较完整的综述。特别提出的是Knox等利用此技术将620nm波长的40fs光脉冲压缩至8fs，压缩后脉冲谱宽为70nm，表明其傅里叶变换极限脉宽为6fs。后来Fork等利用棱镜组补偿高阶色散项，果然获得6fs的脉冲，这是目前世界上获得的最窄脉冲。此外，Zysset等利用双级光纤—光栅对将Nd:YAG激光器输出的1.06 μ m、90ps光脉冲压缩至200fs，获得450倍的总压缩比。

基于效应压缩 借助光纤的SPM和负GVD的共同作用，在适当条件下，脉冲的时域和频域特性在光纤传输过程中将保持不变或发生周期性变化，对应的脉冲分别称为基阶孤子和高阶孤子。理论给出基阶孤子能量 P_1 、孤子阶数 N 、孤子周期 Z_0 分别为

$$P_1 = |\beta_2| \gamma T_0^2 \tag{5}$$

$$N^2 = P_0 / P_1 = \gamma P_0 T_0^2 / |\beta_2| \tag{6}$$

$$Z_0 = \pi T_0^2 / 2 |\beta_2| \tag{7}$$

式中 T_0 为脉宽， P_0 为峰值功率。求解NLS方程还可得光孤子的演化规律，基阶孤子形状永远不变；高阶孤子演化较复杂，但在孤子周期的前段均表现为变窄和分裂，这是SPM和GVD共同作用的结果。SPM导致脉冲频谱的展宽，产生正啁啾，负GVD使正啁啾脉冲得到压缩。对基阶孤子，GVD和SPM相互平衡，脉冲形状和频谱均不发生变化，高阶孤子，首先SPM占主导地位，GVD不足以补偿由SPM引起的频谱展宽，从而脉冲变窄；随着脉冲的变窄，中心部分强度急剧增高，SPM使频谱发生显著变化，GVD作用随之增大，直到二者相当，脉冲变得最窄。高阶孤子的变窄特性正是孤子效应压缩的基础。

光纤—光栅—孤子效应压缩 光纤—光栅对压缩和孤子效应压缩作为两种基本的压缩技术是互补的，分别工作于不同的GVD区域，亦即工作于不同的光谱区，其分水岭为光纤的零色散波长 λ_0 ，促成两种技术的是色散位移光纤技术。此种技术可压缩 $\lambda_{0d} < \lambda < \lambda_{0u}$ 的光脉冲，这只需在前级选用色散上移光纤，后级选用下移光纤或普通光纤，从而使各级工作于上文所述的相应的GVD区域即可。实验已证明这是获得高压缩比的有效技术。

全光纤压缩 实际上这是光纤—光栅对技术在 $\lambda_{0d} < \lambda < \lambda_{0u}$ 波长范围上的变形（实验所用典型波长为1.32 μ m），它由正GVD和负GVD光纤直接对接而成，即用负GVD光纤代替光栅对色散延迟线。Blow Gouveia—Neto等分别在ps和fs区域进行了实验，虽然压缩比有待提高，但全光纤压缩器具有很多优点，主要是便于集成，操作方便，省去了大量精细的光路调整工作。

腔外脉冲压缩技术其巨大的（现实的和潜在的）应用价值是：它将窄的脉宽和高的脉冲功率合为一体。

压缩后脉冲的超短时间特性，使之成为一种探索超快现象的强有力的工具。利用其超短的瞬时性质可以有效地对物质中某些最基本的过程（例如固体中的声子衰变、分子间的电荷转移等，多数发生在ps时间尺度上）进行“拍照”。PS或FS脉冲使这些超快物理过程变“慢”。皮秒脉冲已被作为一种基本的研究工具应用于物理学、化学以及生物学的广大领域。皮秒脉冲及其与物质的相互作用已经是并且仍然是科技的一个前沿领域。

脉冲宽度在时域上压缩的同时，意味着脉冲功率在时域上的集中，这种瞬态的高功率性质使人能够研究许多重要的瞬态非线性现象。此外，利用这一性质可以使粒子或受激态产物在短时间内达到相当的浓度，这可以用来操纵光闸、触发条纹相机或产生非线性光学效应。

腔外压缩技术的另一个最诱人的应用是在孤子通信研究中的应用。利用压缩技术可获得孤子源，研究孤子形成、传输特性、研究孤子的相互作用等。目前，国外孤子通信的系统理论和单元技术已日趋成熟，实验室已进行孤子在12000km距离上的传输试验，不仅如此，贝尔实验室准备投资10亿美元在5~10年内将孤子通信系统推向实用。孤子通信的优点是高码率、长距离、无中继。它只要求进行周期性能量补偿就行，从而省去了一般光通信系统中用来完成脉冲重新整形、放大、检查误码和重新发送等项工作的复杂的光电组合的中继站，可实现全光通信。

（武汉大学翟华金、李宝其撰）

电磁学

磁学计量 magnetic metrology 包括磁学量单位的选取、标准的建立、磁量具与磁测仪器的检定以及各种磁现象的研究、应用中的磁性测量工作。

早在公元前3世纪，中国就有“慈（磁）石召铁”和使用“司南”（指南针）的记载。1785年，库仑(Coulomb)发明了依靠测量悬挂磁铁的摆动周期来测量磁场的相对强弱的方法；1832年高斯(Gauss)发明了根据长度、质量和时间这3个基本量来绝对测量地磁场的方法，对于单位制学说的发晨起了很大的推动作用；应用法拉第(Faraday)电磁感应原理的“冲击法”是沿用至今的古典的测磁方法之一。在19世纪初到20世纪40年代的100多年中，磁测量虽然具有一定的重要性，但技术落后，操作麻烦，应用远不如电测量那么广泛，与电测量相比就不能处于从属的地位。

1946年，布洛赫(Bloch)和珀塞尔(Purcell)各自发现在大块物质（而不是原子束）中的核磁共振现象，给磁测量技术带来一次革新。核磁共振法建立的磁场标准是电磁量的第一个自然标准。而且可以由强、弱磁场中分别测定质子回转磁比(γ_p)，来完成对电流的绝对测量。同样基于磁共振原理的光泵磁强计，由于工作物质共振频率的提高和光泵使共振信号增强，其灵敏度可达 10^{-12} T。与此同时，由于电子技术的发展和磁测应用范围的扩大，其他原理的各种磁测仪器也迅速发展起来。1959年有了第1个商品化霍尔(Hall)器件，不久就形成能测交、直流磁场的多品种的霍尔效应磁强计系列产品。而从20世纪30年代的铁磁探针发展起来的磁通门磁强计，也在弱磁测量中得到广泛应用，曾装备阿波罗12、16飞船测量月球磁场。

1964年由美国西尔佛(Silver)和齐默尔曼(Zimmerman)发明的基于直流约瑟夫森(Josephson)效应和磁通量子化原理的超导量子干涉器件，给磁测量技术又带来一次新的变革。目前的超导量子磁强计的磁通和磁场分辨力分别可达 10^{-21} Wb和 10^{-13} T，是最灵敏的磁通和磁场测量仪器，并具有 $0 \sim 10^{12}$ Hz范围内良好的频率特性。

前苏联于20世纪30年代开始建立磁学量值传递系统。在中国，1931年施汝为发表了第一篇磁学论文，1934年几经周折建立中央研究院物理所近代磁学研究室，1987年发展成为中国科学院磁学开放研究实验室，后又改名磁学国家重点实验室。解放后，北京大学、南京大学、兰州大学、山东大学等一批高校都设立了磁学专业，后来又有了西南应用磁学研究所这样的研究机构；并有了哈尔滨电表厂、上海第四电表厂、北京地质仪器厂等一批生产磁测仪器和几百个生产磁性材料的厂家，但直到50年代，磁学计量工作几乎还是空白。60年代以后才迅速发展起来。目前，世界上也只有俄罗斯和中国建立起较为完整的磁学量值传递系统。

中国的强磁场基准由磁天平和电磁铁组成，磁场范围 $0.5 \sim 1$ T，准确度为 1.6×10^{-6} 。弱磁场基准则是保存在北京中国计量科学研究院樱桃沟实验室的赫姆霍兹(Helmholtz)线圈，磁场常数为 $K = 2.28060272 \times 10^{-4}$ T/A，计算准确度为 8×10^{-7} 。它们也分别是强、弱磁场中测定质子回转磁比装置的一部分。1988年在为电磁单位改值向国际计量局提供数据的十多个国家中，全部

数据被采用的仅有美、英、澳、中国 4 个国家,标志着我国强、弱磁场标准已达到国际先进水平。

各国磁通(互感)标准都是康贝尔(Campbell)线圈。中国曾于 1963 年从前苏联引进一个,1986 年又新制作一个,计算准确度均为 2×10^{-5} 。前苏联于 1969 年建成新的磁通基准计算准确度高达 1×10^{-6} ,英国 NPL 于 1987 年建立的一个准确度达到 2×10^{-6} 。主要受石英骨架加工和线圈绕制精确性的限制,受计算方法误差、线圈自重及环境的影响。

世界上唯一的磁矩基准建于前苏联,原先采用椭球磁钢。1976 年改用其面积常数可准确计算的 4 个线圈作为新基准,其中单层绕组的 3 个线圈的计算准确度为 2×10^{-4} 。

磁量具包括磁通量具、磁场量具、磁矩量具和标准测量线圈。磁量具的比较以往都沿用冲击法比较装置。1980 年后,中国首次将安匝自动平衡直流比较式电桥用于磁量具的比较,不确定度可减小到原先的 1/3,灵敏度则提高 10 倍以上,与冲击比较法相比具有明显的优点。

在材料磁性测试方面,1988 年中国计量科学研究院研制的 MATS-1—2000 多功能材料磁性自动测量装置,成功地将计算机技术用于材料内部 B 和 H 的同时采样和运算,打破了过去硬、软磁材料和交、直流磁性分别测量的格局。同样,将计算机用于磁带、磁粉的测试,矫顽力计制作等,也取得了成功。

作为材料磁矩和其它参量主要测试仪器之一的振动样品磁强计,过去主要依靠进口,1990 年,由吉林大学推出的 JDM-14 型微振样品磁强计,达到 80 年代国际水平。

到 90 年代初,中国已制订了磁学计量的名词规范(JJG1013-89),制订了主要磁学计量器具和标准样品的检定规程(JJG 242-82,316-83,352-84,354-84);制订了磁性测量方法的一批国家标准(GB2845-81,3217-82,3655-83,3656-83,3658-83);制定了主要磁量具的检定系统(JJG 2021-89,2052-90)等,从总体上说,已使磁学计量成为计量学中一个独立分支,并进入世界先进行列。

根据 1989 年北京举行的电磁计量国际会议和 1990 年、1993 年 7 个全国性学会联合召集的第 7 届、第 8 届全国磁学、磁性材料会议提供的信息,磁学计量领域在 20 世纪的研究热点:(1)应用超导量子干涉器件的超导磁强计,尤其是高 Tc 材料超导磁强计的进一步研制与应用;(2)计算机,尤其是单片机用于各种磁测仪器的开发应用;(3)特殊材料,特殊器件中的磁性测量;(4)脉冲及超导强磁量具的建立,零场空间的建立,超强及超弱磁场中各种现象与效应的研究及有关磁性测试;(5)磁学计量保证体系的建立和完善;(6)磁性材料生产过程中的质量控制。

参考文献

- 1 牟尔雪夫等著. 直流与交流磁测量. 列湘元等译. 上海:上海科技出版社,1964
- 2 Jijlstra H. Experimental Methods in Magnetism, North-holland, Publishing Company, 1967
- 3 陈竹年. 电测与仪表, 1982, 1: 21~23
- 4 阿拉法谢耶夫等著. 磁场参数测量器具. 张伦译. 北京:科学出版社,1983
- 5 乔蔚川等. 计量学报, 1988, 9(3)
- 6 Proceedings of ISEM' 89, Beijing China, 1989: 231~264, 451~465
- 7 JJG 1013-89. 磁学计量常用名词术语及定义. 北京:中国计量出版社,1990
- 8 第 7 届全国磁学磁性材料会议论文集, 湖南娄底, 1990, 210~229, 839~963
- 9 第 8 届全国磁学磁性材料会议论文集, 山东烟台, 1993, 781~878

(中国计量学院陈竹年副研究员撰)

谱域方法 spectral-domain approach 这种方法要追溯

到一百多年前的 Fourier 分析法。对于一个周期的时间信号,可以把它展开成包含不同频率的 Fourier 级数,不同的分量对应于不同的幅度,这就构成了周期函数的频谱。对于非周期信号,Fourier 级数可以推广为 Fourier 积分,相应的谱也就变成了连续谱。这种做法也可以用到空域中,对一个空间函数进行 Fourier 分析,其物理概念可以理解为用频率相同振幅和相位不同的平面波来叠加出一个给定的空间分布。每一个平面波叫做平面波谱,一般情况下这是一个复谱。这种平面波的叠加,数学上就相当于 Fourier 变换。柱面波也可以用来叠加出一个给定的空间分布,这在数学上相当于 Hankel 变换。平面波、柱面波和球面波是可以互相表示的,这样做使处理各种不同的边值问题更加简化和具有更大的灵活性。例如在求解位于平面边界上的偶极子的辐射场时,由于点源辐射的是球面波,而边界是平面,这样的边值问题难以求解。但是如果把球面波展开成平面波或柱面波,这时由于在同一平面上不论是平面波或柱面波都有相同的反射系数,因而在由这些波谱所构成的谱域中,匹配边界条件就容易得多,也就是说,在谱域中求取谱域 Green 函数要容易得多,这是谱域方法的最主要的优点。所付的代价是,在回到空域时要作反变换或做谱域积分。因此,求谱域 Green 函数和作反变换或处理谱域积分就成为谱域方法的主要研究内容。谱域方法应用的范围很广,它可以用来解决电磁场边值问题,也可以用在天线和目标散射特性的近场测量等场合。除了数值方法以外,对某些特定的结构还可以用解析方法(Mitra & Lee, 1971),即 Weiner-Hopf 方法。谱域方法是电磁理论中一种重要的有效的方法。

1909 年 Sommerfeld 首次把谱域方法用来求解电磁理论问题,给出了球面波的谱域表示,这就是著名的 Sommerfeld 积分。1966 年 Clemmow 的著作系统地介绍了谱域方法。1968 年 Yamashita 等人把谱域方法应用于分析微带线。1973 年 Itoh 等人在谱域中应用 Galerkin 法,并系统地给出了用谱域法处理微带结构的过程,并把这种方法正式命名为谱域方法(Spectral-Domain Approach; SDA)。Itoh 给出的求解步骤和所用的符号一直沿用至今。

进入 20 世纪 80 年代后,谱域方法得到了很大发展。为求取谱域 Green 函数,需要在分界面上匹配边界条件,这在多层情况下比较繁琐。1980 年 Itoh 应用等效传输线和坐标变换的方法解决了这一问题并首次引入了谱域导抗法。这样,谱域 Green 函数的求取就变得十分简捷。从 1984 年开始,在谱域中应用传输线理论方面,Bornemann 等人还发展了几种等效的方法。其中的电场磁场传输矩阵法是先找出沿分层介质分界面法线方向的传输矩阵,再利用场分量的连续性在分界面上匹配边界条件;在位函数传输矩阵法中,由于位函数不满足传输线方程,因而传输矩阵很容易得到,但是位函数不满足连续性条件,因而要引入耦合矩阵。这两种传输矩阵法弥补了通常谱域方法不能应用于不等高波导和不能用于考虑金属片厚度的缺陷,但是金属片厚度趋于零时失效。1987 年方等人提出的广义谱域导抗法可以解决这个问题。这个方法是利用零反应原理建立空域积分方程,再对积分方程作 Fourier 变换,并利用 Parseval 定理得到谱域方程,在谱域方程中场和流的关系可以利用导抗方法求得。

直线法的引入是谱域方法的又一重要进展。这种方法最早是 Liskovets 在 1965 年提出并用于求解理论物理问题。这种方法也叫微分差分法。1980 年 Schulz 等人把这种方法引入了电磁理论领域。它是把所考虑的区域用平行于分界面法线方向的离散的直线近似,相应地沿分界面内两个正交方向的偏微分就代之以差分近似。这样,偏微分方程简化为沿法线方向变量的耦合常微分方程,再用正交变换或称为直线法变换,把它变为传输线方程。前面所介绍的谱域方法是通过 Fourier 变换或 Hankel 变换进入变换域,这里则是通过直线法变换进入变换域。在变换域中,传输线方程也一样可以用谱域导抗法求取,谱域 Green 函数也与前面介绍的具有相同的形式(因而直线法也可以看成谱域法的一种。)1990 年 Wu 等人把 Fourier 变换和直线法变换结合起来,提出了

一种新的方法,这种方法除了分界面的法线方向外,另外两个方向上一个方向用 Fourier 变换,另一方向用直线法变换。相对于直线法而言,这种方法也可以说成是平面法,它在处理有些问题时特别有效,这也大大丰富了谱域法的内容。与差分方法相比,直线法在法线方向上不需进行差分而是充分利用了解析特性,因而具有较高的计算效率;与谱域法相比,它没有选取基函数的问题,因而有很大灵活性。由于直线法在很多的情况下有突出优点,近几年发展很快,处理的问题已经从闭域扩展到开域,处理的结构也更加复杂,还提出了时域直线法等新方法。

谱域方法作为 Fourier 变换方法,实际上是一种非线性的谱分析。与线性谱分析相比较,非线性谱分析有许多优点。在处理谱域积分时,近年来应用非线性谱分析的方法把 Sommerfeld 积分的积分核展成指数级数,再交换求和与谱积分的次序把谱积分解析地积出,并且导致了镜像解释。1990 年 Wills 从理论上对非线性谱分析的特点进行了分析。非线性谱分析的引入,使谱域方法更添光彩。

除此之外,近来谱域方法在各个方面的应用都有重要的进展,其中包括 Mittra 等人在应用谱域方法处理绕射和天线问题以及谱域迭代法等多方面的贡献;Clarke 和 Brown 在《Diffraction Theory and Antennas》(1980)以及 Jull 在《Aperture Antennas and Diffraction Theory》(1981)中所系统总结的谱域方法在天线和绕射理论方面的工作;Brehnovskikn 的经典著作《Waves in Layered Media》(1980)所总结的谱域方法在分层介质研究中的进展等。作为谱域方法重要应用的近场测量也有长足进展,在这方面中国学者毛等人的贡献引人注目。

从目前所发表论文的数量和动向来分析,谱域方法当前研究热点主要有以下几个方面:(1)复杂结构和复杂材料的分层介质谱域分析法的研究,其中包括非平面分层介质、周期加载、交叉线、考虑实际衬底材料的损耗和非各向同性、超导微带结构、铁氧体微带结构等;(2)近场测量,其中包括近场天线测量、近场散射特性测量、只利用幅度信息恢复近谱等;(3)解决电大尺寸问题的研究以及混合方法的研究,例如谱域法与微扰法相结合、谱域法与快速 Fourier 变换相结合、谱域法与多层矩量法相结合、直线法与网络分解法相结合等;(4)在时域问题中应用谱域方法。

参考文献

- 1 Mittra R, Lee S W. Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves, MacMillan Company, 1971
- 2 Itoh T. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1980, 28, 733~736
- 3 Schulz U, Pregla R. AEU, 1981, 34, 1173~1178
- 4 Bornemann J. Proc Inst Elec Eng pt H, 1985, 132, 1~6
- 5 Jansen R H. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1985, 33, 1043~1056.
- 6 Wills J D. Ibid, 1990, 38, 488~451.
- 7 Wu K, Vahdieck, R. Ibid, 1990, 38, 1309~1318.
- 8 毛乃宏,傅德民,张进民,张士选. 西安电子科技大学学报, 1991, 18, 65~72.
- 9 鲁述,徐鹏根. 电磁场边值问题解析方法. 武汉:武汉大学出版社, 1992
- 10 方大纲. 电磁理论中的谱域方法. 合肥:安徽教育出版社, 1995 (南京理工大学方大纲教授撰)

镜像理论 image theory 电磁理论的基本问题是在一定的介质中求解满足边界条件的 Maxwell 方程。对于三维问题,在单位强度点源的情况下,求得的解叫做 Green 函数。按照唯一性定理,给定边界条件,域上的值就可以唯一地被确定。这样,可以在不含真实源的区域内适当的位置上放虚拟源也即镜像来代替实际的边界以满足边界条件。因而在真实源区,求解边值问题的 Green 函数就被简化为求取自由空间的点源及其镜像的解。这就是镜像理论。由于上述的镜像理论的宽广的内涵,因而它在电

磁理论中有很重要的作用。它不但用于求解静场问题也用于求解交变场和瞬态场,所涉及的问题包括天线、散射和逆散射、各种微带或波导结构、探地、高压工程等。

镜像理论最早是从研究理想导体平面结构开始的,20 世纪 60 年代以后,扩展到了研究平面分层介质,1968 年 Silvester 找出了平面分层介质的电荷镜像,得到了这种结构的静态空域 Green 函数,并且用它成功地分析了微带传输线的横电磁波特性。1978 年 Chow 等人发展了上述镜像理论,他们考虑了电荷的交变性,因而是一个动态模型。所得出的微带衬底近似动态空域 Green 函数,可用来分析微带线的色散特性和微带不连续。由于这种镜像还是从电荷镜像出发,考虑波动效应不可能在整个分界面满足边界条件,因而还是一种低频近似或者说是近场近似,它所适用的距离范围和衬底参数范围都受到一定的限制。这种 Green 函数十分简单,物理概念也很清晰,许多情况下仍有实用价值。

平面分层介质 Green 函数的精确解可以由谱域方法得到,此时,把点源产生的球面波看成是包含实和复在内的各种波谱的平面波或柱面波的叠加,前者对应于 Fourier 变换,后者对应于 Hankel 变换。在谱域内,不论是平面波还是柱面波,场量在整个平面上都具有相同的边界条件,因而边界条件很容易严格被满足。把所有波谱叠加起来,也就是说做谱域积分就可得到所要求的解。这个积分是 1909 年 Sommerfeld 给出的,因而以他的名字命名,简称为 SI。由于它的被积函数变化激烈,因而数值积分比较困难。关于这个积分的有效计算方法的研究直到最近还在进行,文章也很多。1982 年 Mosig 等人用一种有效的数值积分方法计算了微带衬底的精确 Green 函数,这个函数在近似条件下与 Chow 用镜像理论导出的近似 Green 函数完全吻合。这就使得对于 Chow 的镜像的近似性的分析有了严格的依据。

由于 SI 的数值积分还是很费时,寻求近似镜像仍是追求的一个目标。另一种途径是从 SI 出发,用解析方法把 SI 的积分核近似表示成法向(与分界面垂直的方向)波数的指数级数。在交换求和与积分的次序之后,谱域积分可以解析积出,并且可以导致镜像解释,也就是说,除原来的源以外,级数中的各项的贡献相当于镜像的贡献。这个级数近似展开式不是唯一的,在不同的近似条件下所得到的近似展开式其适用范围和精度也不尽相同,所得出的镜像丰富多彩,例如可以是若干个高散镜像或者离散镜像加上连续镜像等。1984 年 Mahmoud 在 Wait, Bannister, Mohsen 和 Metwally 等人工作的基础上对不同的展开方法作了统一的处理,这可看成是对这方面成果的一个阶段总结。这些镜像已被应用于地球物理探地,地下或水下通讯等方面,取得了很好的效果。

1984 年 Lindell 等人提出了平面分层介质的精确镜像理论(EIT),这是镜像理论的重要进展。这个理论的出发点是用解析方法把 SI 的积分核表示成法向波数的指数积分。在交换积分次序之后,谱域积分可以很容易地求得,空域积分则代表空间连续镜像的贡献,这个积分的被积函数变化平缓,数值积分比较容易。由于这种镜像的得到是从 SI 出发,并且没有作准静近似,因而包含了所有波动现象,因而也叫全波连续镜像。这种镜像的使用,原则上没有什么限制,但是对不同的分层介质结构和不同的源要分别作数学处理,有些情况下空域镜像也可表示为级数形式。这种镜像已被用来分析微带衬底结构,两层介质的透射场等。

1988 年 Fang 等人在 Cui 的工作的基础上提出了全波离散镜像理论(FWDIT)。这个理论出发点是用数值方法把 SI 的核表示成法向波数的指数级数。所用的数值方法是 Prony 方法。在精度不够的情况下再用非线性优化方法。这时, Prony 方法所得到的结果就作为非线性优化的初值。这种方法不需要对不同的分层介质结构作特殊的处理,具有很好的通用性,并且也具有高的计算效率。但是这种镜像在近区和远区之间的中间区,有时还需要用“接力”的措施,这种镜像已被用来分析电磁散射,近地和埋地天线,微带天线阵等许多实际问题。

1990 年以来, Yang 等人又对全波离散镜像进行了许多改

进,发表了一系列文章,其中包括推广到屏蔽微带结构和有耗介质,给出了不用接力全程适用的 Green 函数表达式,厚薄相差悬殊的微带结构收敛 Green 函数的处理以及结合实际测量求取复镜像等。

镜像理论除了在上述平面分层介质方面有许多重要的进展以外,在处理非平面结构方面也有许多有意义的进展。最典型的是最优化模拟镜像技术(OSIT)。这种技术可以处理任何复杂边界的凸的几何形状。例如对一个给定的导体,可以在它的内部放上源,要求这些源在导体表面在均方误差最小的意义下满足边界条件,在源的个数给定后,这些源,包括它们的位置,就可以用非线性优化的方法让计算机去找。这些源实际上就是镜像。对于静电场问题,它们是电荷,对于交变电场,它们是电偶极子和磁偶极子。1982年Chow等人用这种技术计算了立方导体,圆导电柱等的电容及电容的上下界。Chow等人还用这种技术求解了导体的雷达散射截面,分析了雨滴的散射特性,解决了一批高压工程中所遇到的实际问题。事实上,最优化模拟镜像技术和近年来发展起来的多极子技术(GMT)和等效源法也是完全相通的。这些技术把解析方法与数值方法结合起来,对处理复杂边值问题十分有效,例如中国学者曹伟等人用等效源法成功地分析了波导不连续问题。盛剑霓等人在《工程电磁场数值分析》(1991)的著作中,对等效源法有系统的总结。

古典的镜像理论经过近几十年丰富和发展焕发了青春,并且还有广阔前景。这方面的研究工作还在不断深入,研究热点大致有以下几个方面:(1)现有理论和技术,其中包括EIT,FWDIT,OSIT,GMT等的继续发展,这方面最近仍有不少文章发表;(2)时域镜像的研究也已经展开,这是一个有实际意义的新的研究课题,目前尚属起步(Nikoskinen,1991);(3)非平面复杂介质镜像的研究,其中包括球型和杆型介质,非平面分层介质,手征(chiral)介质,Tellegen介质及其它各向异性介质(Lindell,1992),这些方面还有许多研究工作有待进行;(4)磁流镜像的研究。

参考文献

- 1 Chow Y L, Ibrahim N E. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, 1978, 26: 978~983
- 2 Mosig J R, Gardiol F E. Advances in Electronics and Electron physics, Academic Press, 1982, 139~237
- 3 Chow Y L, Lan Y F, Fang D G. J Appl Phys, 1982, 53: 7144~7148
- 4 Mahmoud S F. IEEE Trans. Antennas. Propagat, 1984, 32: 679~683
- 5 Fang D G, Yang J J, Delisle Y G. IEEE Proc. H. Microwaves, Antenna & Propag, 1988, 135: 297~303
- 6 曹伟,龙斌. 电子学报, 1991, 19: 57~64
- 7 Nikoskinen K I. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1991, 39: 698~703
- 8 Lindell I V. Ibid, 1992, 40: 228~233

(南京理工大学方大纲教授撰)

电器电磁场 电磁场问题是电器中的主要问题之一。高压电器中电场强度分布,各种电磁铁中磁场分布、磁场作用力和电动力计算,电磁机构的静态和动态特性分析,交流电器中涡流和损耗等问题,都是以电磁场问题为基础。现代电磁场值计算及软件已成为电器特性分析和优化设计的主要方法和手段。

1856年麦克斯韦(Maxwell)从数学推演出发,以微分方程式描述了电场与磁场间的相互关系,得到了麦克斯韦方程组。百余年来,人们以此为出发点,从事着电磁场的理论分析与工程设计。实际的电器电磁场问题是相当复杂的,如不规则的边界形状、复杂的物质结构及材料性能的非线性等,以致在计算机出现以前,只能对个别规则形状的场域采取简化措施,得出麦克斯韦方程的解析解。大多数情况下则把实际的场域问题转化为路的问题

进行处理,用集中参数来等效代替分布参数。在相当长的时间内,简化的路的方法是电器设计计算的主导方法,这种计算方法的误差是很大的。

随着计算技术和计算机应用的发展,20世纪60年代开始出现电磁场的现代数值计算方法。在1964年Winslow利用矢量位,采用有限差分法离散,求解了二维非线性问题。1974年前联邦德国BBC公司W. Ochs在电器界首次将有限差分法应用于接触器中二维磁场计算。1970年,加拿大P. Silvester和美国M. V. K. Chari首先把有限元法引用到电磁场计算中。有限元法以变分原理为基础,用剖分插值的办法建立各自由度间的相互关系,把二次泛函的极值问题转化为一组多元代数方程组求解。它能使复杂结构、复杂边界情况的边值问题得到解答,特别适合于处理非线性铁质介质问题。有限元法在电器电磁场数值分析领域中,越来越占有主导地位。1976年瑞士BBC公司K. Reichert等发表了《用磁场数值计算方法计算力和力矩》一文,首次将有限元法应用于悬浮式电磁铁磁场和力的计算。1972年英国C. W. Trowbridge等提出了电磁场积分方法,离散仅需在源区进行,所以能较好地解决开域问题及连续场值计算问题。随后出现以积分方法为基础,能解二维、三维非线性静磁场的软件包GFUN,1976年,C. W. Trowbridge和J. S. Imkin又发展了边界积分法,离散只涉及铁区边界,从而使未知数大为减少,使CPU时间减少。对线性或近似线性的情况,达到了相当高的精度。相应的软件包为BIM2D。为了解决非线性问题,1978年C. W. Trowbridge等提出双标量位法,它用两种标量位来描述磁场,在电流区采用简化标量位,在铁区采用全标量位,交界面上过多的未知数可通过交界面条件予以消去。这是一种积分-微分混合方法,能成功地求解三维静磁场问题,相应的软件包为TOSCA。1981年,美国N. A. Demerdash和M. V. K. Chari等提出三维磁场矢量位有限元法,分别采用双旋度方程和矢量泊松方程进行离散处理,较好地解决了三维非线性问题。随后,以矢量位和标量位相结合求解三维涡流场的有限元法相继出现,较成功的求解三维涡流场的软件包为英国的ELEKTRA。

对于电磁电器的设计与计算,不仅需要计算其场值,而且要求解其静态吸力特性和动态特性,即在吸合过程中电流、吸力、速度和位移等随时间变化的特性。1985年,美国推出了ANTIC85软件包,适用于计算螺管型电磁铁的动态特性。同时,中国研制了FEMA2D软件包,可应用于各种型式交直流电磁铁二维磁场和静态、动态特性计算。法国TE公司也推出用于交流接触器设计计算的二维有限元程序。上述软件均可直接用于电磁电器优化设计。

1991年,在意大利索伦托召开了第8届国际电磁场计算会议,提出3个当前电磁场数值计算研究的前沿课题:(1)电磁场逆问题。电磁场问题是由已知电磁电器的几何尺寸和激励电流用数值计算方法求解其场值和特性,而电磁场逆问题是由要求的场值和特性求解电磁电器的几何尺寸和激励电流。逆问题实际上是以数值计算方法为基础的多参数多目标的优化设计问题。(2)电磁场耦合问题。大多数电器的特性往往决定于电磁场与其他物理场,如力场、热场等的综合作用,求解电磁场与力场、热场等耦合问题是电器设计计算的关键问题之一。(3)并行计算。电磁场问题及其逆问题的数值计算,需要求解大型矩阵方程,尤其是对于三维涡流场问题,计算机容量和速度就成为一个瓶颈问题。有限元方程的并行算法,如EBE(Element-by-Element)技术的出现为此开辟了广阔的道路。

参考文献

- 1 Ochs E. Weg zur Methodischen und Kontrollierbaren Entwicklung von Schutzen. Elektrische Hill, 1975
- 2 Reichert K, et al. Proc of Conf on Computation of Magnetic Field. Oxford, 1976
- 3 Trowbridge C W, et al. Three Dimensional Computer Program (TOSCA) for Non-Linear Electromagnetic Field.

- RL-79-097,1979
- 4 Demerdash N A, et al. *Electrical Apparatus*, IEEE Trans, 1981, 8(100)
 - 5 Chari M V K, et al. *IEEE Trans*, 1981, 8
 - 6 Nehi T W, et al. *IEEE Trans*, 1988, 24(1)
 - 7 Yan W L, et al. *IEEE Trans*, 1988, 24(1)
 - 8 Hoole H. *IEEE Trans*, 1991, 27(5)
 - 9 颜威利, 等. *中国电机工程学报*, 1991, 11(5): 34~42
(河北工学院颜威利教授撰)

电流变流体 electrorheological fluids 在外加电场作用下, 流变特性发生显著、迅速且能可逆变化的一种介质。

1896年, 达夫(A. W. Duff)发现在电场作用下蓖麻油和石蜡油粘度变化的现象。1946年安德雷德(E. N. da C. Andrade)发表《液体对电场的粘度效应》。这些研究主要涉及电场作用下单相液体的粘度变化, 而且这种变化幅度很小, 其作用机理被解释为电场作用下, 由液体中离子在电极附近的聚集而导致极性分子聚集, 结果使局部粘度增大。1939年美国温斯洛(W. M. Winslow)发现, 电场作用下有数种悬浮于低粘度油液中的微粒趋于形成纤维素, 并沿电场方向跨越两种极板。1949年, 论文发表了, 掀起了对多相电流变流体的研究。1970年, 英国谢菲尔德大学以布洛(W. A. Bullough)为首的研究小组开始发表他们的研究报告。1983年斯坦哥诺姆(J. E. Stangroom)认为水是这种流体的引发剂, 从而提出了“水桥”的机理。

80年代开始, 这种流体的工作再度兴盛。1987年在美国马萨诸塞州举行首届国际性电流变流体学术讨论会。1989年又在美国的北卡罗来纳州举行了第2次国际性电流变体学术会议。接着1990年又在新的墨西哥州举行了与流变学年会相结合的电变流学术会。

通过国际性的学术交流, 有关这种流体的术语也趋于统一。即从电粘带效应、温斯请效应趋于电流变效应; 从电粘带流体、电流体、功能流体、依赖电场流体、趋于电流变流体。同时, 对于电流变流体作用机理有了初步的认识。一致认为, 电流变效应与分散介质和分散质的介电常数上的错配密切相关。电场作用下, 介电常数的错配使微粒表面电场发生集中, 导致微粒在静电引力作用下沿电场方向成链, 并形成纤维状结构。在电场和剪切力同时存在时, 流变特性是微粒间极化相互作用和流体动力分别作用的结果。另外, 为了克服含水型电流变流体的诸多缺点, 对无水型电流变流体的研究十分活跃。

在流体作用机理方面, 英国利物浦大学的布洛克(H. Block)等人研究了交变电场中电介体的极化机理。针对单轴稳态旋转和随机旋转的球状微粒, 解释了交变电场和剪切力同时作用下微粒的谐振现象, 并于1984年发表了研究论文。1990年, 在详细分析无水型电流变流体的电变特性和介电特性的基础上指出, 界面极化是导致电流变流作用的机理。给微粒两端提供过剩电荷的载体通道, 包括微粒本身的传导和载体在其表面的迁移, 或束缚在双电层中的电荷随着反号电荷在液体中的反向运动, 从而极化速度最佳。一旦发生便导致强极化, 使微粒受库仑力的作用在静止时形成纤维状结构, 在剪切力作用下微粒携手共进。外电场和剪切力同时作用时, 微粒在流场中转动, 破坏纤维状结构, 使长轴指向剪切力方向。微观上的结构重建和宏观上的剪应力变化主要取决于极化方向、极化大小和以微粒为参照系时对交变场交换响应的快慢程度。这样, 微粒的极化度以及极化速度对电流效应而言十分重要。1990年, 美国斯坦福大学的阿德里亚尼(P. M. Adriani)和加斯特(A. P. Gast)从胶体化学方面研究了电流变流体在外加电场作用下的成链机理。利用光学显微镜和数学成像分析仪分析了链长的分布并指出, 微粒表面电荷足以阻止场致聚集, 高于阈值电场时, 链的形成受到弥散的限制。1991年, 美国北卡罗来纳州立大学的陈(Y. Chen)、斯普雷彻(A. F. Sprecher)和康拉德(H. Conrad)发表有关电流变流体中微粒间静电作用一

文。主要研究了电流变流体中微粒表面电场分布和两微粒间库仑化作用力——中心距与微粒相对介电常数间的关系。数学模拟表明, 两微粒即将接触时, 局部电场强度集中, 比外电场强度高一数量级, 从而得出依此数学模型计算的微粒间的作用力要比利用经典的点偶极近似方法所预测结果高一数量级的结论。实验结果证明了模型的正确性, 从侧面解释了1990年英国曼彻斯特大学惠特利(M. Whittle)利用偶极——偶极相互作用模型所得的结果与实验结果的最大值相差一数量级的原因。

在应力传递机理研究方面, 美国斯坦福大学的阿德里尼(P. M. Adriani)和加斯特(A. P. Gast)在1988年利用胶体化学知识, 将微粒处理为刚性体, 将电流变流体处理为由这些偶极矩定向排列的刚性球体组成的浓缩悬液。模拟表明, 高频抗剪弹性模量和动力粘度都是微粒容积比和偶极强度的函数。1989年, 美国伊利诺斯大学的马歇尔(L. Marshall)等人的研究中, 引入了能够反映趋于分裂微观结构的粘性力与产生这种结构息息相关的极化作用力的比值——梅森数使相对粘度仅仅取决于微粒的容积比和梅森数。同年, 美国斯坦福大学的加斯特(A. P. Gast)和伊利诺斯大学的朱科斯基(C. F. Zukoski)联合综述了20世纪30年代以来在电流变流体研究方面的进展和存在的问题。1990年, 美国伊利诺斯大学的金柏格(D. J. Kingenber)和朱科斯基(C. F. Zukoski)发表了《电流变流体在稳态剪切作用下的特性》一文。由于宾汉型性体模型不能描述这种流体的微观结构对有限剪切率的抵抗性, 也不能预测该体系的动态响态, 所以在引入“流体区”与“固体区”共存和剪切力作用下“固体区”的退化参数后, 建立了反映稳态剪切特性的连续模型。从而显示了随着电场强度和剪切率的变化, 区域边界随梅森数而变的实验现象。1991年金柏格(D. F. Klingenberg)等人研究了电流变流体的应力传递机理, 以评估粘性力和极化作用力在应力传递中的重要性。在保持动态屈服应力和零电场、高剪切率下粘性力不变的前提下, 引入粘性力和极化作用力之间的偶合应力—附加应力, 修改了宾汉型性体模型。对于适合梅森数、极化作用力与粘性力之间的叠加效应达到最大值。同年, 金柏格等人指出: 流变特性对分散质和分散介质的介电性十分敏感电流变流体的这种特性主要取决于体和界面等的极化机制, 也取决于介电“常数”。欲大大提高动态屈服应力, 分散质介电常数应尽可能大, 而分散介质的介电常数应尽可能小。同时, 分散质微粒表面必须有足以防止短路的添加剂。1992年, 美国加利福尼亚技术学院的伯奈卡兹(R. T. Bonnecaze)和布雷迪(J. F. Brady)在以往工作的基础上建立了电流变流体的动力学模型。其中用到了“斯托克司动力学”类分子动力学方法, 在于精确地包容在粘性力和极化作用力同时存在时, 稀、浓缩电流变流体中微粒间的静电作用和动力作用。用“斯托克司动力学”描述微粒间的动力作用与流变特性; 而从胶体中微粒间静电相互作用力守恒入手, 用胶体的静电能描述静电作用。当梅森数在某一范围变化时, 就可以直接通过计算机模拟将动力特性与流体体现的宏观流变特性相联系, 生动形象地揭示微观结构的三种变化过程: 链间、链内和网络重整。1992年, 他们又研究了电流变流体的屈服应力与静电能之间关系。利用动态模拟, 从事动态屈服应力的理论和实验研究, 为进一步了解电流变流体的潜在机理和现象提供了工具。值得一提的是, 前苏联以科罗布诺(E. V. Korobro)为首的研究小组、美国密歇根大学以菲利斯科(F. E. Filisko)为首的研究小组也研究了电流变流体的流变特性。

在无水型多相电流变流体的研究方面, 1992年美国特拉华大学的杨(I-Kuan Yang)和夏因(A. D. Shine)联合发表了有关单相电流变流体的研究成果。在电场作用下, PHIC向列型液晶, 体现出突出的流变效应。其作用机理不同于多相电流变流体。电场作用下, PHIC的永久偶极矩沿棒状分子的长轴走向, 永久偶极矩在电场中的转向引起了棒状分子长轴超于电场方向排列, 使剪切粘度增大。同时, 分子结构所提供的设计柔顺性对将分子偶极矩设置于沿分子主链, 将非极性流体中的溶解性设置于分子侧链的设计更具有吸引力。

总之,在电流变流体本身研究方面经历了从单相到多相,现在又研究单相电流变流体的过程。同时也经历了从温斯洛(W. M. Winslow)的含水型到菲利斯科(F. E. Filisko)、布洛克(H. Block)和凯利(J. P. Kelley)等的无水型电流变流体的发展过程。由于这种流体涉及的知识面广,导致了人们对这种流体作用机理和应力传递机理的广泛研究。到目前为止,这些研究都仅仅停留于微粒之间物理相互作用的水平上,而对主导这种相互作用因素的研究仍未受到广泛重视。如强电场作用及离子电荷载体对微粒极化特性的影响;迁移电荷载体、表面电荷和离子强度的影响;双电层以及扩散双电层中离子体密度对微粒相互作用的影响;表面迁移和吸附强度对添加剂作用的重要性;浓缩电流变流体中重叠双电层以及小粒径对微粒相互作用的影响;微粒表面结构粗糙度、尺寸大小和形状的影响以及温度和交流电场的影响等。这也很可能成为今后电流变流体研究人员的研究目标。同时也不否认,电流变流体向单相化和局部化发展的可能性。故仍需对该流体进行深入的研究。

参考文献

- 1 Winslow W M. J Appl Phy Vol, 1949, 20: 1137~1140
- 2 Klass K, Martinek T W. J Appl Phy, 1967, 38(1): 67~80
- 3 Marshall L, Zukoski F. J Chem Soc, 1989, 185(9): 2785~2795
- 4 Alice P, Gast, Zukoski F. Science, 1989, 30: 153~202
- 5 Treasure U Y, Filisko F E, Radzilowski L H. J Rheol, 1991, 35(6): 1051~1068
- 6 Klingenberg D J, Zukoski C F. J Chem Soc, 1991, 87(3): 425~430
- 7 Bonnecaze R T, Brady J F. J Chem Phys, 1992, 96(3): 2183~2202
- 8 I-Kuan Yan, Shine A D. J Rheol, 1992, 36(6): 1079~1104

(华中理工大学吕崇耀博士、钱祥生教授撰)

电子物理学

电子计量 electronic metrology 许多国家把电子计量又称为无线电计量、高频电磁计量、微波计量或射频计量。它是无线电电子技术中,经常遇到的并需要测量的高频和微波电磁量作为研究和应用的计量测试。所谓高频和微波大体上指 30kHz 以上一直到 110GHz,即从长波、中波、短波一直到微波中的亚毫米波波段。在频段低端,某些电子计量测试项目还可能进行到极低的频率。例如电子计量中失真度的计量,并包括低至 10Hz 或 10Hz 的整个音频段。示波器等计量测试则常常一直达到零赫兹。所谓电磁量指的是可以定量描述的物理现象、各种物质、物理系统的固有性质。这种性质包括它们的大小数值的含义以及它对某些标准量的比值,也就是单位值。严格说来,对电磁波的完整描述必须确定电磁场的大小、空间分布和时间变化。但实际上,人们常习惯用一些具体的易于测量的参量来描述。这些参量很多,大体上可分为 6 种:(1)有关电能的量:如电流、电压、功率、电场强度、电磁干扰等。(2)有关电信号特征的量:如频率(频率原属电子计量的传统项目,现已分离出去,与时间计量合在一起,称为时频计量;然而频率计和波长计的校准和检定,往往依旧是电子计量的业务范围)、波形参数、脉冲参数、调制参数、频谱、噪声、信号、噪声比等。(3)有关电路元件材料参数的量:如阻抗、导纳、电感、电容、品质因数、介质损耗角正切、介电常数、导磁率等。(4)有关无源和有源网络性能特性的量:如网络的反射参量、传输参量等。(5)有关电子器件的特性参数:如电子管的跨导、晶体管以及集成电路参数(近 10 年来,集成电路从小规模向大规模、超大规模发展,计量参数量须不断缩小,并随着微电子学的迅速发展,微电子学计量亦相伴而生)等。(6)表征无线电电子技术设备性能特性的参量:如灵敏度、频带宽度、噪声系数等。

计量学的基本工作包含 3 个方面:不断完善计量单位制;按照规定的定义,研究、建立、复现物理单位的计量基准,并把基准量传递下去;研究推广正确的测量方法和制定计量检定规程,包括操作方法、环境条件和数据处理。在电子计量工作中还建立了一系列导出单位的标准,并进行这些导出间接单位的比对和传递,因为这样可以一些最常用的较为基本的导出单位便于统一并且也能获得更准确的传递。目前我国电子计量开展量值传递的参量,大约为 20 个左右,其中比较重要的基本参量有:电压、功率、衰减、相位、噪声、微波阻抗、场强干扰、脉冲参数、调制度、频偏、失真度、电阻、电容、电感、品质因数等。综上所述,电子计量研究无线电电子技术中的电子测量,其目的在于使全国乃至全世界范围内统一计量单位,以确保量值的准确一致。

1888 年赫兹对偶极子辐射场的研究,从实验角度证实了电磁场的存在,1901 年马可尼完成了横渡大西洋的无线电电报通信;一直到第二次世界大战期间微波技术的迅速发展,在此基础上各工业发达国家在不同程度上建立了很多高频和微波计量标准后,才把电子计量从电磁计量中分离出来。二次世界大战后,国际计量学咨询委员会任命一个射频工作组其主要任务是将米制公约所属成员国组织起来,进行高频和微波各参量的国际比对并公布比对结果。

几个基本参量计量标准的水平为:(1)1967 年美国 NBS 研制成一种测辐射热电压电流标准(Bolovac),由于某些认识上的原因,NBS 没有用它建立高频电压国家标准,而是用宽带同轴功率标准按功率、电压、阻抗 3 个参量的关系导出电压量值,其量值体现在一个频率带宽稳定性好的同轴热电转换器的参考面上,达到的指标为(10~1000)MHz, (0.1~7.5)V,准确度士(0.1~1)%。1979 年中国首先从理论上论证了只要加工和组装精度满足要求,薄膜热变电阻片置入高频座所引起的电磁场扰动影响可以忽略不计。从而解决了一些国家对 Bolovac 方案存在的疑虑。我国研制成功的新型辐条状薄膜电阻,既有较高的灵敏度(100Ω/W),又有较小的电感分量(0.1nH),保证了高频电压标准达到国家先进水平,其指标为(10~3000)MHz, (0.1~2)V,准确度士(0.21~0.70)%。(2)美国 NBS 的衰减标准主要由 3 套标准组成,即 30MHz 截止衰减器校准系统、串联中频替代衰减器校准系统、同轴衰减器校准系统。我国已建立了 30MHz 截止衰减器校准系统、电信载频衰减标准以及波导衰减标准采用调制副载波技术等。(3)美国 NBS 建立的噪声标准有:同轴高温噪声标准、波导高温噪声标准和同轴低温噪声标准等。

中国研制的同轴高温噪声标准无论在标准源设计及高温匹配电阻的制造工艺方面均有独到之处。

电子技术是现代科学技术中最活跃、发展最快的学科之一。电子技术日新月异的发展,不断向电子计量提出新的要求,要求更高的准确度、更宽的频段和量程、更快的计量速度,要求从对单一器件的单一参量发展到对复杂系统的多种参量的综合计量。随着电子计算机科学技术的研究开发,大规模集成电路测试仪、自动网络分析仪、自动脉冲计量系统,自动时域网络分析仪以及六端口网络分析仪等自动测试系统相继出现;由于充分利用了计算机的存储功能和快速计算的特点,用软件来修正硬件的不完善性等技术措施,使得自动测试系统具有自校准和自动修正测量误差的能力,所以它不但实现了快速自动计量,而且其计量准确度在一定量程内也可达到计量标准的水平。

参考文献

- 1 Ries F X. Trans IEEE, 1976, 3: 254
 - 2 中国计量科学技术的现状与展望, 1984, 25: 8
 - 3 鲁绍曾, 现代计量学概论. 北京: 中国计量出版社, 1987
- (中国计量学院焦治平副教授撰)

光电子技术 photo-electronics 光学和电子学结合的交叉学科。经历了将近一个世纪的努力,创造出许多性能超卓,用途广阔的光电子产品,它已成为当今各国十分重视发展的高科技产

业部门。光电子技术主要分支有：光电子材料和器件；光电子测量仪器以及配套的光学和电子学系统；应用开发及系统工程。

从历史的发展来看，人类对光信息（光强、颜色、图像等）的观测经历了3个阶段：目视、照相和光电测量。早期的光学仪器，例如望远镜、显微镜，主要靠眼睛观察，为此发展了视觉理论和物镜、目镜的设计。尽管目视法作定量测量精度不足，但直观性好，在搜索、取景和精调仪器等方面使用方便，至今许多光学和光电子仪器都有目视光学（辅助）部件。照相技术的发明和发展成功地解决了图像的获取和保存问题，人们可以通过事后对图像作形态学、几何学和光谱（黑度）的分析和测量，深入研究客体的特性。照相技术对科技、生产和人类生活的影响是重大和深远的。它的缺点是后处理时间长，非实时测量。由于感光底片具有很高的分辨率，容易保存和再现（放映或制成照片）方便，直观性好。照相法在航测、遥感和偶发事件的记录仍具有它独特的优点。基于光电效应的光电测量法似乎兼顾了目视和照相法的优点，具有较好的实时性、直观性和精确性，已成为现代光学信息测量的主流。

20世纪初物理学家曾对光电效应作过详细的研究，总结出它的实验规律：光辐照下电子从含硷金属的光阴极逸出（亦称外光电效应）。在一定频率的光波照射下，饱和光电流与光强成正比，反向电压可以遏止光电流，遏止电压 V_a 与入射光的频率成正比，对不同的光阴极材料有一个截止频率，低于这个频率的光辐照不再产生光电流；光电效应是在极短时间（ 10^{-9} s）内发生。上述实验规律用经典的电磁理论解释遇到困难。1905年，爱因斯坦提出光的量子学说，给出光电效应的公式，成功地解释了上述实验规律。他的公式为：

$$h\nu = mv^2/2 + A$$

式中 $h\nu$ 为光量子的能量， A 为电子脱出功，右边第1项为电子逸出时的初动能。从上式可得

$$eV_a = h\nu - A$$

由此可见用高频率的光子击出的电子具有较高的初动能，因而需要更高的电压才能遏止光电流。又当 $h\nu_m < A$ 时，光量子的能量不足以击出电子， ν_m 称为截止频率。这是一个光子击出一个电子的量子效应，所需时间极短而且极其灵敏。爱因斯坦的光量子学说是近代物理最重要的基本原理之一，同时也是光电子技术的理论基础。

当光照射到半导体材料时，会改变材料的电导率，产生电子—空穴对，称为内光电效应，同样服从爱因斯坦的光量子学说。人们利用外光电效应制成光电子发射器件；利用内光电效应制成半导体光电子器件。

光电子发射器件包括光电管、光电倍增管和像增强管等系列产品，这些产品主要是电真空制品。利用二次电子发射制成的光电倍增管的测量灵敏度可比光电管高4~6个数量级，甚至可以探测单光子讯号，其光谱响应范围覆盖着紫外到近红外各波段。对 γ 射线和X射线可通过闪烁晶体产生可见荧光，再由光电倍增管检测。高增益、宽带响应加上低噪声和较大的测量动态范围等优点的光电倍增管一直是光探测器的主角。

像增强管是解决低照度下获取图像而研制的器件。当物像投射到光阴极后在它的背面形成一个电子图像，经过加速极和电子透镜成像在观察屏，产生更高亮度的图像，其增益约为几十到100倍。带有电子倍增微通道板的新一代器件，总增益可达 10^4 以上。如果采用红外敏感的光阴极，这种器件可以把红外图像转为可见光图像，称为红外变像管。它可以在黑夜环境下观察远方景物，在军事侦察、安全防范、夜间航行等方面发挥重要作用。由于红外器件很重要，多年来的努力方向是开发新材料，使器件从近红外推向远红外波段。除此以外，发展具有某些特殊功能的器件，例如：X光敏感器件、超灵敏器件和快速响应的选通像增强管等也是当前一个热点。

半导体光电子元件包括光敏电阻、光电二极管、光电集成放大器等。所有这些器件均建立在半导体工业基础上。半导体光电子元件的缺点是波长响应范围目前还局限在可见至近红外，增益

低，测量动态范围不如光电倍增管，但它具有功耗低、体积小、集成度高等一系列优点，在许多场合上已取代了光电管和部分光电倍增管。

多道探测是集成半导体光电子器件一个重要发展，目前线性CCD光电管阵列已达到每 cm^2 2048像素的水平，在宽带光谱探测、光投影法尺寸检测、条码识别、计算机光学扫描读入器以及线性扫描航测系统中有极其广泛的应用。为黑白和彩色摄像机用的二维CCD器件近年有很大发展，特别是小型化的CCD摄像机，首先用在电视制导炸弹，随后制成轻便型的家庭摄像机取得巨大市场，超小型的CCD摄像机预期在医用内窥镜和工业（特别是化工和热工）设备的内部遥控观测方面发挥很大作用。

20世纪30年代，人们在电影拷贝上增加一个声光伴音带以及放映时对伴音带的光电播放系统，成功地解决了有声电影的同步播放问题。自此，光电子技术就与影视、传播事业的发展结了缘。众所周知，各种摄像机、电视机是电视广播事业的重要器材，加上新兴的激光影视器材，是当今销售量最大的光电子产品。由摄像机、监视器（必要时加上计算机管理）组成的遥控监视系统在公共安全防范、交通管制乃至商店、住宅保安等方面都有广泛应用。

发光二极管以及半导体激光器，本质上是逆光电效应。在光纤通讯、显示、各种激光应用等方面占重要地位。由于半导体材料的能隙大多数为1eV左右，其相应波长在红到近红外。多年来人们一直在探求蓝、绿光乃至更短工作波段的材料和工艺，困难不少但最近似乎有所突破。

围绕各种光电子探测器件和使用目的，需要配上不同的光学系统和电子系统。有些产品需求量很大，专业性很强。整机的设计、制造，特殊部件的加工以及材料、工艺等，构成了一个庞大的光电子产业。围绕光电子技术的发展，大量的研究与开发工作正在进行。

参考文献

- 1 Driscoll W G, Vanghan W. Handbook Optics, McGraw-Hill Book Co. 1978, 4: 1~16
- 2 Wolfe W L, Zissis J G. The Infrared Handbook, 1978, 11: 1~103
- 3 Marcuse D. Principles of Quantum Electronics, New York: Academic Press, 1981, 447
- 4 龚祖同, 李景原, 等. 光学手册. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986, 21: 1097~1153

（中山大学李文冲教授撰）

光电子成像 photoelectronic imaging 入眼是非常灵敏而且紧凑的图像探测器，但它具有一系列固有的物理限制。通常，人眼的限制可以分为两大类：一类是眼睛作为成像探测器的限制，即受地点（此地）、时间（此刻）和细节察觉能力的限制；另一类是眼睛作为辐射探测器受限于可见光的限制，即受灵敏度和波长的限制。光电子成像的目的是采用光电子的方法来克服或缓和上述的限制。对于前者，可利用电视、图像存储和图像处理的方法以补救人眼在空间、时间和细节察觉能力上的局限，对于后者，可利用图像增强和图像转换技术来弥补人眼在灵敏度和响应波长上的不足。这样，人眼所见到的利用光电子方法所构成的图像包含了肉眼所不能察觉的图像信息。因之，光电子成像技术开拓了人眼的视觉，特别是克服了人眼在极低照度下以及有限光谱响应下的限制。作为光电子成像的重要部分—夜视和热成像技术，它一方面利用像增强技术、微光电视摄像技术、成像光子计数探测技术使微弱照度下的目标成为可见；另一方面利用红外探测器通过大气窗红外波段使热目标可见。

光电子成像技术始于20世纪30年代。1934年在德国，第1只红外变像管问世。它利用光子—电子转换原理，使银钨光阴极接受红外辐射，由光子转换为电子，再通过荧光屏，使电子转换为光子，得到人眼能察觉的图像。它在二次世界大战和朝鲜战争

的夜战中得到应用,但是,主动红外夜视有暴露自身目标的缺点。人们自然想到从2个方向发展,一是利用夜天自然微光,即被动微光技术,另一是利用红外波段 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 2个大气窗口,即被动红外热成像技术。当然,在40~50年代,具体的技术途径是并不清楚的。

在被动微光直视领域,50年代末期,对可见光敏感的高灵敏度的三碱光阴极以及传输图像的纤维光学面板的出现,再加上同心球电子光学系统,使60年代初诞生了第1代光纤面耦合的3级级联微光增强器(称为1代管)。可是,第1代像增强器具有太重、太笨的缺点,人们经过多年的探索,研制成功了使电子倍增的微通道板(MCP),使级3光纤耦合的第1代像增强器降为一个带有MCP的单级管,这就是第2代微光像增强器(称为2代管)。与此同时,又出现了一种新型的负电子亲和势GaAs光阴极,它的光谱响应和灵敏度较三碱光阴极有大幅度改进和提高,当用它取代第2代微光像增强器的三碱光阴极,80年代初研制成功了第3代微光像增强器(称为3代管),使夜视下应用的视距提高约1倍。但是,近年来,第2代像增强器并不示弱,终于在传统的三碱光阴极的灵敏度上有大突破,再加上改进管子结构与MCP性能,从而出现了超二代管与2代半管,其使用效果与第3代像增强器接近,费效比较第三代像增强器为好。

90年代以来,第3代微光像增强器还出现了向短波长(蓝光)延伸的蓝加强3代管与向近红外波长延伸的红加强3代管。前者的性能与探测距离较标准型3代管要高1倍;后者既可用于低照度下的目标观察,又可与 $1.06\mu\text{m}$ 激光照射器联合使用,用于主动成像。

为了进一步解决在极低照度下的应用,出现了杂交管的方案,即以2代薄片管或3代管作为前级,以单级1代管为次级,充分调动各自的优点,使增益和信噪比能寻求最佳折衷。同样,若在像管中采用选通的方案,将使器件的动态范围进一步扩大。

在被动微光电视领域,真空摄像器件如硅增强靶摄像管(SIT)和分流直像管(Isoccon)与固体摄像器件如电荷藕合器件(CCD)之争更为激烈。即使就CCD而言,还有像增强CCD与电子轰击CCD之争。此外,还有电子轰击非晶硅/增强MOS成像器的方案。尽管从目前看来,微光真空摄像器件处于较为困难的境地,但一旦新型靶面的出现,将会有新的突破,胜负尚未可预期。但无论如何,器件的固体化或真空与固体结合是大势所趋的方向。

用于天文和空间探测的成像光子计数探测系统的出现是天文电子相机的必然的逻辑发展,也是像增强技术与固体摄像技术结合的进一步发展。自30年代拉耳芒相机(Lallemand camera)利用电子照相像管和核乳胶底片结合获取星空图像以来,虽经多次改进,但均没有实时显示与接着的图像分析的能力。近10年来,CCD以及各种电子探测读出系统的出现彻底地改变了原先天文电子的工作方式,使天文星空探测大大地迈进了一步。

在被动红外领域,红外热成像,这原先是作为夜视系统的一个扩展领域而进行研究的,期望它能为图像转换提供一条新的途径。但它的发展大大地出乎人们的意外。当前,致冷与非致冷热成像的研究各有千秋。即使用致冷方式,也有多元光子探测器与扫描型探测器(Sprite detector)以及各自发展的通用组件之争,而红外焦平面阵列乃是致冷型探测器向更高、更先进发展的体现,前景十分辉煌。尽管如此,非致冷探测器包括硫酸三甘肽的摄像管以及多元的热电探测器在红外热成像中仍占有一席之地。特别是多元阵列热电探测器的热像仪的性能已接近或达到致冷型第一代前视红外仪的水平,进展的态势也是十分喜人的。

顺便指出,随着光电子成像技术的发展,应用范围也在扩大,现已发展与夜视几乎无关(如应力分析、临床诊断)的众多领域,前景是很宽广的。

光电子成像技术作为一门分支学科,随着科技水平的提高与国防、经济建设的需要,在不断发展之中。新的概念、新的思想、新的工艺和新的技术的出现,推动着光电子成像技术日新月异的发

展。90年代的光电子成像技术发展总的方向为:向着高增益、高分辨率、低噪声、宽光谱响应、大动态范围、小型化、固体化方向前进。各种元器件在性能上将有很大的改进,如将会出现 $4\text{K}\times 4\text{K}$ 高密度的CCD面阵;灵敏高达 $3000\mu\text{A}/\text{m}^2$ 以上的NEA光阴极,且向 $1\mu\text{m}$ 以上波长扩展;方形通道,弯曲通道与长寿命的微通道板以及新型电子倍增器与靶面,高密度($4\text{K}\times 4\text{K}$)和高位置灵敏度($<1\mu\text{m}$)的MCP电子读出系统,这一切将使图像增强、低照度摄像和光子探测等技术跃上一个新台阶。而红外焦平面阵列探测器将导致新一代热像仪灵巧化与智能化。随着微电子技术 with 光电子技术的进展,光电子成像器件的固体化、集成化以及固体与真空相结合已成为不可避免的趋势。中国的科技工作者面临的任务是很艰巨的,要齐心协力,迅速跟上,不断前进和创新,尽快地接近和赶上国际先进水平。

参考文献

- 1 Biberman I. M., Neudleman S. Photoelectronic Imaging Devices, New York: Plenum Press, 1971, 1~2
- 2 Mclean T P., Schagen P. Electronic Imaging, New York: Academic Press, 1979
- 3 Morgan B L. Institute of Physics Conference Series, 1991
(北京理工大学周立伟教授撰;高雅允审)

真空微电子学 vacuum microelectronics 是1988年6月13~15日在美国弗吉尼亚州举行的第1届真空微电子学国际会议时提出的一门新兴学科。

20世纪20年代初,人们发现了Rocky Point效应,导致对场致发射现象进行深入的理论和实验研究。1926年,Gossling发表了为了解释上述现象所作的假设。1928年,英国剑桥大学的Fowler和Nordheim从理论上利用量子力学的隧道效应研究场致发射现象,给出了著名的确定尖端处场致发射电流密度的F-N方程。

30年代初,利用各种实验技术证实F-N理论的实验研究十分活跃。当时有两派,一派用点与面(Point-to-Plane)的几何结构进行实验研究,另一派用面与面(Plane-to-Plane)的几何结构。直到1936年Mueller制成了单晶的尖端后,才从实验上定量地证实了F-N理论。但是由于利用普通单晶尖端的场致发射存在着许多难以克服的困难,如引出极需加 $2\sim 20\text{kV}$ 的高压,电子发射的不稳定性,真空度要求非常高(低于 $133\times 10^{-4}\text{Pa}$),为获得高电流和高电流密度所要求的阴极阵列,制造很困难,并且难以使得每个发射尖端具有相同的场的转换因子等等;又加这个时期半导体学说的高速发展和晶体管的出现,使得真空电子学的研究和与固体电子学领域的研究和发展的实际,相形见绌。虽然真空管有耐高温和抗辐射的优点,可对大多数实际的近代应用来说,体积太大(比固态器件大几个量级)、速度太慢。因此随着半导体和集成电路出现,真空管一度便从电子学中逐渐消失。但是固态器件对高温和辐射是很灵敏的,后又激起了对微型真空器件的兴趣。因为这是一种新颖的小型化真空管,它与传统的真空管不同,不是采用热阴极产生电子流的原理(热电子发射原理),而是采用一种所谓冷阴极的场致发射原理。这种小型化真空管既与传统的真空管一样,具有耐高温和抗辐射的优点,又由于其大小是微米级的,因而速度比相同体积的固态器件要快得多。

早在1957年,美国国际空间研究所(SRI)就开始了真空微电子学的研究。1961年该所的Shoulders提出场致发射真空微型三极管的研究,并于1968年由该所的Spindt制造出来。它的阴极是一个在蓝宝石衬底上有钼-铝氧化物薄膜的层状结构,有随机或规则的微米级大小的小孔阵列,每个小孔有一个钼的场致发射锥体,在每平方厘米的面积上可以作出 5×10^4 个小孔,在层状结构上加 $20\sim 200\text{V}$ 电压时,就有场致发射发生。1974年Wesinghouse研究实验室的Thomas用单晶硅衬底靠选择蚀技术制造出直径为 3cm 的大面积的尖形场致发射体阵列,密度可达到 1.5×10^6 尖端/ cm^2 。1976年Spindt又利用薄膜技术和电子束

微型平板印刷术制作场致发射阴极, 所制成的钨的锥体阵列密度达到 6.4×10^5 锥体/cm², 锥体高度为 1.5 μ m, 尖端半径约为 50nm, 每个锥体能发射的最大电流为 50~150 μ A, 所加电压为 100~300V, 工作气压为 133×10^9 Pa, 平均电流密度为 10A/cm². 对 100 个锥体的阵列和总发射电流为 2 μ A (或电流密度为 3A/cm²) 的条件下所进行的寿命试验, 寿命超过 7000h. 1983 年 Spindt 等人又报道了 SRI 对场致发射阴极阵列的研究计划. 他们致力于改进工艺, 提高均匀性和增加发射体尖端阵列密度, 并探索高电流密度运用.

1988 年 6 月, 第 1 届真空微电子学国际会议召开后, 正如美国海军研究实验室的 Grag 和 Spindt 认为: 一种高电流密度的金属场致发射体阵列 (FEA) 和一个以 FEA 为基础的硅平面晶体三极管的成功实现, 标志着真空微电子学的形成. Brodie 认为, 有 4 个技术领域的发展促使真空微电子学的诞生, 即: 热离子真空管 \rightarrow 热离子发射 \rightarrow 真空击穿 \rightarrow 场致发射 \rightarrow 真空微电子学; 固体器件 \rightarrow 集成电路 \rightarrow 微细加工工艺技术 \rightarrow 材料工艺技术 \rightarrow 真空微电子学; 显微镜 \rightarrow 光 (10^{-6} m) \rightarrow 电子 (10^{-8} m) \rightarrow 场离子 (10^{-10} m) \rightarrow 隧道效应 (10^{-10} m) \rightarrow 真空微电子学; 有生命的细胞的科学 \rightarrow 分子工程 \rightarrow 真空微电子学. 总之科学家们把 1988 年 6 月在美国召开的首届真空微电子学国际会议看作是真空微电子学这门新学科诞生的标志.

在第 1 届和第 3 届两次真空微电子学国际会议期间, 各国科学家们从材料和制造技术上致力于提高场致发射体阵列和器件的性能, 包括硅尖覆难熔金属, 减小尺寸和发射体尖端的半径, 提高阵列集成密度, 使用新的结构和不同材料等方面进行了深入的研究工作, 使得场致发射体阵列和器件的制作技术和性能达到很高的水平. 具体成果在第 3 届真空微电子学国际会议上所发表的文章中有充分的反映. 因此 Adler 和 Spindt 等人指出: 在这次会议上提供的各种微米大小的场致发射体阵列是真空微电子学发展历史上的一个转折点.

目前具有代表性的研究水平是: Spindt 等人 (1991) 所研制的场致发射体阵列, 封装密度达到 1.5×10^7 尖端/cm², 整个阵列面积的直径从 10 μ m 到 12.5cm, 电流密度达到 100~1000A/cm², 跨导 50S/cm², 寿命 8 年. Adler 等人 (1991) 研制的低压薄膜场致发射体阵列, 在门极与发射体之间的电压为 20V 时, 就可观察到场致发射, 在 30V 时, 有 300nA/尖端的稳定发射. Ghis 等人 (1991) 将场致发射体阵列作成平板荧光显示的结构, 表明具有高分辨率、高亮度和低功率的特性. Holland (SRI) 等人 (1991) 利用 Spindt 型的场致发射阴极研制了真空微电子学场致发射三极管 (VMFET, S), 截止频率达到 100Hz. 日本富士通公司元器件技术实验室的 Keiichi Betsui (1991) 用干法刻蚀和自对准沉积工艺制作的阵列尖端的曲率半径小于 20nm, 集成密度为 6.25×10^6 尖端/cm², 门极孔径 2 μ m, 阳极偏压 600V, 门极电压 100V 时, 单尖发射电流 5 μ A, 最大单尖发射电流可达 50 μ A.

近几年来, 真空微电子学已有很大的进展, 但相应的理论、技术和实际应用还需进一步探索和提高. 90 年代的研究重点应是: (1) 利用不同材料、结构和制作技术研制性能理想的 FEA 器件; (2) 对真空微电子器件的器件原理和微观机理的研究; (3) 对真空微电子器件可能实现的各种应用的研究.

参考文献

- 1 Cossling B S. Phil Mag. 1926.1:600
- 2 Spindt C A, et al. Appl Surf Sci. 1983.16:268
- 3 Grar H F, et al. IEEE Trans ED. 1989.11(36):2636
- 4 Adler E A, et al. IEEE. Traus ED. 1991.38(10):2275
- 5 Spindt C A, et al. IEEE Trans, ED, IEEE Traus ED., 1991.38(10):2355
- 6 Adler E A, et al. IEEE Trans ED. 1991.38(10):2304
- 7 Ghis A, et al. IEEE Trans. ED. 1991.38(10):2320
- 8 Holland C E, et al. IEEE. Trans. ED. 1991.38(10):2368
- 9 Keiichi Betsui. Tech. Digest of 4th Int'l Vacuum Microelec-

tronics Conf. Japan; Nagahama, 1991, 26

(西安电子科技大学过巴吉教授撰)

半导体物理学

半导体光催化 用半导体粒子作光催化剂早已有报道, 但在 A. Fujishima (1972) 用半导体作光电极分解水及 A. J. Bard (1979) 将光电化学理论扩展到半导体微粒光催化剂的报道发表之后, 半导体光催化才有很大的发展, 从太阳能利用的观点来看, 半导体光催化有着重大的应用前景, 它不仅能生产有用的物质, 如光解水制氢、光催化有机合成, 而且还能降解有毒物质, 处理废水、节约能源等, 它是将太阳能转换为化学能的一个重要途径.

半导体光催化的特征 把分散在溶液中的每一颗半导体粒子近似地看成是一个小型短路的光电化学电池, 可以用光电化学的基本理论来阐明光催化反应机理, 当用能量大于能带隙的光照射到半导体分散体系时, 半导体粒子吸收光产生电子-空穴对, 在电场的作用下电子与空穴分离, 分别迁移到粒子表面的不同位置, 与溶液中相应的组分进行氧化与还原反应, 若总反应的自由能变化小于零, 光能以克服反应的活化能, 这是光催化反应; 若总反应的自由能变化大于零, 反应中吸收光能转换为化学能储存, 这是光电解, 统称为光催化反应. 由于半导体光催化过程是按光电化学反应进行的, 故又称为光电催化反应. 物质能否在半导体界面进行光催化反应, 是由该物质的氧化还原电位和半导体能带位置所决定的, 半导体价带的能级代表该半导体空穴的氧化电位的极限, 任何具有氧化电位在半导体价带位置以上的物质, 原中央电视台上都可以被光生空穴氧化; 同理, 任何具有还原电位在半导体导带以下的物质都可以被光生电子还原. 半导体光催化体系的实验装置简单, 光吸收效率高, 适用于电解质、非电解质及水和有机溶液体系, 因此, 光催化体系的范围较为广泛, 此外半导体光催化还有以下特性.

催化剂粒子和吸附. 分散在溶液中的半导体粒子尺寸小, 可以从几微米 (μ m) 到几个纳米 (nm), 由于粒子小, 单位质量的粒子数目多, 光吸收效率高, 不易达到光吸收饱和的程度; 体系的比表面积大, 反应面积就大, 同时也有利于反应物的吸附. 董庆华等 (1989) 的实验结果表明, 在光催化反应中, 反应物吸附在催化剂的表面是光催化反应的一个前置步骤, 催化反应的速率与该物质在催化剂上的吸附量有关, 吸附效应甚至允许光生载流子优先与强吸附的物质进行反应, 不管溶液中其它物质的氧化还原电位顺序.

催化剂的活性. 计算表明, 在粒径为 1 μ m 的 TiO₂ 粒子中电子从体内扩散到表面的时间约需 100ns, 而粒径为 10nm 的微粒中只需 10ps, 因此, 粒径越小, 电子与空穴复合几率越小, 电荷分离效果就越好. 在分解水的实验中, TiO₂ 粒径小, 产氢量高. 半导体上负载金属或金属氧化物可提高光催化活性, 担铂的 TiO₂ 催化分解水产氢的活性比未担铂的提高一个数量级, 活性提高的原因是降低催化剂上析氢超电势和增加电荷分离效率. P. Pichet (1987) 研究了担金属的氧化物半导体表面性质、催化活性和选择性, 说明这些性质与金属和半导体两者的催化性质和相互作用有关, 吴越 (1987) 按照金属与半导体之间形成结的性质, 分析了金属对半导体表面进行的光催化反应可能具有的效应. Nakamatu 报道 TiO₂ 表面担铂, 铂粒子之间的距离在 100nm 左右产氢量最高, 中户囊 (1990) 研究在半导体表面负载超微粒金属且金属粒子之间有一定距离, 催化效果最好.

催化剂的选择性. 由于光催化剂粒子小, 表面氧化和还原的位置距离就很近, 因此催化反应的途径与在电极分离的电池不同. 例如 TiO₂ 与铂电极组成电池, 光分解醋酸, 生成乙烷和 CO₂ 而 Pt/TiO₂ 粒子催化分解的产物是甲烷和 CO₂, 因为微粒上氧化和还原的位置很近, 氧化的产物 CH₃ 自由基立即与还原的产物氢结合, 生成甲烷. 不同种类的半导体催化反应的选择性也不同.

用 Pt/TiO₂ 和 Pt/CdS 催化分解乳酸,前者分解产物是 H₂、CO₂ 和 CH₃CHO,而后者分解产物是 H₂ 和 CH₃COCOOH。

光照下半导体粒子电位的浮动效应。半导体分散系中一个特殊的性质是粒子的电位可以变动。按照半导体在溶液中能带的位置, TiO₂ 的导带电位不足以还原氢,因此,在光电化学电池中不加偏压是不能析出氢的;但在 TiO₂ 粒子上可收集到氢。W. W. Dunn(1983)用泥浆电极法测量了溶液中半导体粒子的电学性质,测出在醋酸溶液中 TiO₂ 粒子的电位在光照下是浮动的,粒子的电位负移 0.4V,提高了 TiO₂ 的电子能级,因此可以还原氢。同样的理由, In₂S₃、Fe₂O₃、MoS₂ 催化剂粒子也可还原氢。

半导体粒子小于 100nm 就是胶体,胶态半导体体系的特点是它可以透过可见光及紫外光,因此可用近代的光化学方法研究光催化过程中的电荷转移、中间产物的生成、催化反应的动力学和反应机理,这对理解光催化过程是非常重要的。

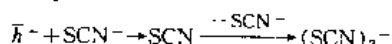
纳秒(ns)和皮秒(ps)激光闪光光解技术是探测半导体中电荷的捕获和复合的方法,结果表明,电子和空穴的捕获是很快的过程,在胶态 TiO₂ 中电子的捕获在 30ps 内完成,空穴较慢,约于 250ns 左右完成。ESR 对锐钛矿型 TiO₂ 粒子研究表明,电子和空穴分别被捕获在 Ti⁴⁺ 和邻近表面的氧化物离子的位置。

紫精类化合物常用于探测界面电荷转移,还原态的紫精可用吸收光谱检测。M. Gratzel(1982)研究了胶态体系中 H⁺ 浓度对还原甲基紫精的影响,在较低 H⁺ 浓度时,胶态半导体上多相电子转移的动力

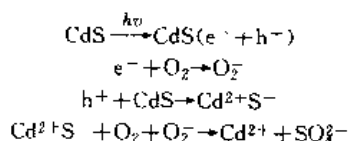
$$\eta = E_{CB} - E_{A^0/A^-}$$

其中 E_{CB} 是导带的能级, E_{A⁰/A⁻} 是电子受体的标准还原电位。Brown、Mulveny 等研究了胶态氧化物周围的电位分布及还原物质的电荷对电子转移速率的影响,说明调节溶液的 H⁺ 浓度值和离子强度可以控制表面电位,使它有利于界面电荷的转移。P. V. Kamat(1985)用激光闪光光解研究了噻嗪和吩嗪在 TiO₂ 和 CdS 胶体的还原过程。

为了使宽能带半导体吸收光波长扩展,可以在半导体表面修饰一层有机染料,受激发的染料分子将电子注入半导体的过程,可用快速闪光光解和微波吸收技术来研究。当溶液中有电子清除剂时,空穴停留在半导体表面的时间可以到微秒(μs)。用适当的物质与空穴反应就被氧化。Gratzel 用激光闪光光解研究了 SCN⁻ 在胶态 TiO₂ 的氧化过程



(SCN)₂⁻ 可从吸收光谱验证, T. Moser 等(1981)研究了卤素离子 Cl⁻、Br⁻、I⁻ 在胶态 TiO₂、CdS 及 In₂S₃ 上的氧化。卤素离子在 TiO₂ 上的氧化效率与它们的氧化电位有关,还研究了若干有机化合物如丙醇、半胱氨酸及甲基橙在半导体上的氧化过程。当溶液中缺少与光电子或空穴反应的物质时,过剩的载流子与半导体进行反应,引起光腐蚀,例如在含空气的 CdS 体系中, CdS 受到光阳极腐蚀,其反应如下:



氧促进 CdS 的阳极腐蚀,如果排除体系中的氧则会抑制 CdS 的光阳极腐蚀;反之,若溶液中存在与电子反应的物质如甲基紫精,而溶液中又无适当的物质与空穴反应则会加强 CdS 的阳极腐蚀。若溶液中存在空穴清除剂而又无适当物质与电子反应,则表面剩余的电子也会引起 CdS 的光阴极腐蚀,腐蚀产物为金属镉。

当半导体粒子尺寸小于 50nm 以下,粒子显出与单晶半导体不同的光学和电学性质。例如 CdS 粒子大于 50nm,它的吸收光谱阈值为 515nm(相应 CdS 能带隙为 2.4eV),随着粒子尺寸减小,吸收光谱发生变化,吸收光谱阈值逐渐向短波移动。反映 CdS 的能带隙在增大,仔细地测量了 CdS、ZnO 和 PdS 的吸收波长阈

值和能带隙与粒子尺寸的关系,能带隙小的半导体吸收波长的变化较为显著。单晶砷化镉为黑色(能带隙为 0.5eV),制备粒径 10 到 2nm 的砷化镉微小粒子,得到所有可见光的颜色。又如胶态 CdS 的荧光为桔黄色,随着粒子尺寸减小, CdS 胶体荧光变为绿色。这些直超细微粒子具有与单晶半导体不同性质的原因是由于粒子减小而量子化的结果。半导体的载流子限制在一个小尺寸的势阱中,有些条件下,导带和价带能级变成分离的能级,因而能带隙增大,吸收光谱阈值向短波方向移动,这种效应称为尺寸量子效应,这种具有与尺寸有关的光学和电学性质的粒子称为量子化粒子,简称 Q⁻ 粒子。量子力学计算表明,在这种情况下能带隙移动等于 $\hbar^2/8m^*R^2$, 其中 m^* 是载流子的有效质量, R 是粒子的半径,载流子的有效质量越小,尺寸量子效应越显著。

尺寸量子效应的研究在物理中很活跃,这种效应对化学性质的影响也逐渐被化学家所重视。Henglein 等成功地制备了各种超细胶态半导体,如 CdS、Cd₃P₂、Cd₃As₂ 等,这些胶态粒子的光吸收从可见光到近红外光,已经表明,这种超细微粒子对光催化反应有明显的影。H. Miyoshi(1990)研究胶态氧化铁粒子,它们的能带隙随粒子减小而增大,导带能级向负移,价带能级也以相同的速度向正移,光电流起始电位由 -0.050V 移到 -0.75V (Vs. SCE),由于尺寸量子效应使半导体导带移向更负的电位和价带移向更正的电位,这必然加强半导体光催化剂的氧化和还原能力,提高光催化活性。A. Fojtik(1984)报道 CdS 的粒子尺寸减小,光阳极腐蚀减少,在溶液中稳定性增大,光阳极腐蚀减少的原则是与空穴竞争的反应(如氧化溶剂)速度增加有关。

将两种不同的半导体粒子联起来就成为一种夹心结构的半导体胶体,一边为能带隙较小的半导体,一边为能带隙较大的半导体,例如 CdS 和 TiO₂ 或 CdS 和 ZnO 体系,当光照在能带隙小的半导体上则会对另一半半导体有响应,例如 CdS 胶体有荧光,加入 TiO₂ 后,随 TiO₂ 的浓度增大而 CdS 荧光减弱,催化还原甲基紫精的能力则随 TiO₂ 浓度增大而增强,产生这个效应是因为 CdS 吸收光产生电子-空穴对,电子跃迁到导带并立即转移到 TiO₂ 的导带,而空穴有能转移我,因此增加电荷分离效率, CdS/TiO₂ 的光催化活性则比单一 CdS 提高得多,类似的效应在 Cd₃P₂/ZnO 夹心结构胶体中也观察到,而且随着 Cd₃P₂ 粒径减小,它的导带能级越负,电子从 Cd₃P₂ 转移到 ZnO 的驱动力就越大。由于尺寸量子效应有可能调节半导体的粒径来控制半导体的能带隙大小和能带的位置,它将对半导体光催化反应带来重大的影响。

光催化的应用 光催化分解水。在光催化反应中研究得最多的是光催化分解水, TiO₂ 和 SrTiO₃ 在水溶液中化学稳定性好,但它们的带隙太宽,太阳能利用效率低,与太阳光谱相匹配的半导体如 CdS、CdSe 在水溶液中发生光腐蚀,虽然研究过在半导体表面负载金属和金属氧化物,或在半导体表面修饰一层光敏剂或在溶液中加入光敏剂或牺牲剂,但完全分解水的效率仍是很低的。效率低的另一原因是氧化产物与还原产物之间发生逆反应,堂免一成(1989)提出一种层状结构担镍的铈酸盐(Ni/Rb₄Nb₅O₇)的新型催化剂,在紫外光照下(330nm)分解水的量子效率达 10%。但这种催化剂只能吸收紫外光,还需要进一步改进,研究适合于太阳能分解水的新光催化剂。

光催化合成反应。半导体催化用于有机化合物最初的例子是 -Kolb 反应, B. Kraeutler(1977, 1979)用 Pt/TiO₂ 催化剂使醋酸脱羧生成甲烷,用 TiO₂ 催化分解醇的水溶液产生氢,顾毓贞以 ZnS 为催化剂,用甲醇作底物,光催化产氢,同时合成乙二醇或丁二醇,在甲醇和乙醇的混合溶液中产氢及合成丙二醇。M. A. Fox(1983)用 TiO₂ 为催化剂在含氧的有机溶剂中,光催化分解苯化合物,生成邻位取代苯化合物,所得产物的收率较高,光催化成为制备邻位取代苯化合物的一种方法, Toumaru 在含氧和二氧化钛的有机溶剂中光催化 1,1-二苯基乙烯,反应生成 1,1-二苯基环氧和苯酮等化合物, Hama 研究了胺的光催化氧化,氧化甲苯胺生成偶氮化物,光催化反应产物与反应条件(如胺的起始浓度,

半导体种类等)有关。半导体光催化合成的另一例,是在有氨、甲烷和 Pt/TiO₂ 的水溶液中合成氨基酸。

光催化氧化无机物和分解氧化有机物。由于光照半导体产生的空穴和电子具有很强的氧化和还原能力,能氧化有毒的无机物和降解大多数有机物,将它们最后分解、氧化成为 CO₂、H₂O 和简单的无机物,因此,利用太阳能光催化分解无机和有机物的方法受到重视。B. Krautler (1977)用 TiO₂ 光催化氧化水中 CN⁻ 及卤素离子, E. Borgarello (1982)用 CdS 光催化氧化 H₂S 成为单质硫,量子产率约 50%, J. M. Herrman (1983)用各种半导体粒子光催化分解草酸(存在纺织工业废水中),其中以 TiO₂ 最稳定,光催化活性最高,蔡乃才(1988)研究了各种有机酸在 Pt/TiO₂ 上的分解速率与分子结构的关系, K. Hashimoto (1984)用 Pt/TiO₂ 光催化分解水中各种碳氢化合物 C. Y. Hsiao (1983)首先报道用 TiO₂ 光催化分解有害的卤代烯烃,最终产物是 CO₂、H₂O 和无机酸,后来陆续报道了用半导体光催化方法分解酚、卤代芳香族化合物、二乙基硝基苯磷酸盐、表面活性剂、金属有机化合物以及有机磷农药等等。在这些报道中,光催化剂在多用 TiO₂,因为它在水中稳定,它的价带的电位很正,光子空穴几乎可以氧化所有的有机基团,最后将它们完全分解,成为无害的物质,由于光催化分解水中有毒污染物的方法简便,又能避免通常化学方法处理水带来的二次污染问题,因此研究用太阳能作能源,光催化分解有害的废弃物、处理水中污染物、净化水质的应用试验正在开展,据报道美国能源部所属桑迪亚国家实验室试验成功以太阳能作动力的净化污染水的解毒处理系统,美国伯尔得公司太阳能研究所采用集束太阳能破坏水中有机污染物,效果较好。

考虑到光激发半导体有较强的氧化能力,松永足(1985)提出用 TiO₂ 分散体系的杀菌方案,杀死酵母菌和大肠杆菌, A. Fujishima 有 TiO₂ 杀 HeLa 细胞,川合用半导体粒子制备超纯水,这都是一些新的研究方向。

人们对半导体催化已进行了广泛的研究,在某些方面已显示出它的特点和应用前景,但是还存在着能量转换效率不高和发生光腐蚀等问题,需要进一步开展研究,并向实际应用方面发展。

(武汉大学化学系董庆华撰)

非晶态半导体 amorphous semiconductors

非晶态或称无定形态是相对于晶态而言的不具备结晶状态的物质,亦即一种缺乏原子周期性结构的固体材料。最早论证非晶态材料可以具有半导体性质的是前苏联科学院院士约夫(A. F. Yofe),他在 1947 年前后就提出,决定物质的半导性的最基本结构特点是其近程序特性,并在实验上证实了一些半导体材料在玻璃态甚至液态的情况下,尽管没有周期性结构的长程有序性,但由于保留着其原来的短程序特点而使其半导性仍然存在。比较完整而又沿用至今的非晶态半导体电子结构模型是在 1968 年前后提出的,这就是所谓 Mott-CFO 模型(CFO 是 Cohen, Fritzsche 与 Ovshinsky 的缩写),其基本出发点是,如果短程序特性在非晶态中与晶态相同,晶态的电子结构的一些基本特征(即电子态密度按能量分布形成由能隙隔开的导带和价带;以及能隙的平均宽度)就保留下来,而非晶态的长程无序性(起因于短程序的无规起伏和在实际非晶态中大量存在的结构缺陷如空位、悬键等)则对其电子结构产生两个重要的效果:一是相对于晶态的鲜明的带边的向带隙伸延的带尾,这与晶态半导体(重掺杂)由于杂质附加势产生的导带尾或价带尾相似。另一个是使电子态定域化,被定域化的电子与轻度掺杂的晶态半导体中由杂质在禁带中引入的非本征电子态相似,处于这些状态中的电子,其波函数被定域于某个原子的平衡位置附近,在绝对零度下水无出现于其它原子附近的可能。这与在能带中的电子态具有扩展态特性是截然不同的,在扩展态的电子不定域于某一确定的空间位置,即使在绝对零度下,仍有一定几率出现于空间各处。上述的由近程序起伏引起的带尾态和由结构缺陷引起的带隙态就都是被定域化的。因此非晶态半导体的电子结构模型就可以归结为:它既保有基本的能带特征(价带与导带),

但又不存在真正的能隙(禁带),而代之以存在一个展能隙亦称迁移率隙,利用这个图像就可以分析种种存在于非晶态固体中的半导体特性,如电导与光电导、光学性质和发光现象,等等。

直到 70 年代初期,人们对这种半导体材料是否有技术应用价值,还持怀疑态度。其基本原因除了这类材料特性存在稳定性与重复性的问题外,更重要的是对外来杂质极不敏感而不能有效和可控地实现 P 型与 N 型掺杂。当时较普遍的看法是:非晶态半导体不可能具有掺杂效应,原因是长程无序本身为外来杂质原子提供了饱和价键的足够机会所致,而外来杂质取正常价键结构与非晶态固体的无规网络结合,使系统处于能量最低的状态。1975 年英国 Dundee 大学的 Spear 与 LeComber 研究组,首先对用辉光放电法制备的非晶硅实现了灵敏的磷(N 型)、硼(P 型)代位掺杂,使其室温电导率的改变达到十个数量级。事实上,是辉光放电分解硅烷(SiH₄)淀积非晶硅薄膜时在材料中引进了大量的氢原子(约 5%~10%),而氢原子则起了补偿通常在非晶硅中大量的悬键的作用,大大地降低了带隙态的密度,消除了费米能级的被“钉扎”情况,从而使外来的代位杂质有效地起掺杂作用。而这种有用的非晶硅材料亦从此被赋予一个恰当的表达形式: a-Si:H, 意思是一种硅氢合金。

非晶硅实现掺杂效应之后,应用这种材料研制的各种器件相继出现。在众多的应用可能之中,实际起主导作用的是两种器件,首先是曾以为可以解决当时能源问题困扰的非晶硅太阳能电池,随后是更具实际市场潜力的非晶硅薄膜晶体管 a-Si:H TFT。

非晶硅太阳能电池,相对于晶态硅具有两个明显优点,首先是与太阳光光谱十分匹配的光吸收特性,其次是加工工艺上的优点,即它以薄膜形式构成。然而非晶硅有其固有的弱点,一是由能隙定域态的存在而导致的载流子迁移率与寿命偏低,使在开始时非晶硅太阳能电池的光电转换效率极低(1%左右,而当时晶态硅电池效率已大于 15%);另一个弱点是稳定性较差。1977 年就发现了一种 a-Si:H 固有的光诱导亚稳效应(其后以发现者名字称为 Staebler-Wronski 效应),非晶硅经强光照射后会使其效率增大(退火可以复原原状),从而使电池效率一般都会下降 10%左右,经过努力,到 80 年代中期,非晶硅电池光电转换效率,在小面积样品上已达 13%,而工业性较大面积的光电池亦接近 10%,而采用宽带隙与窄带隙材料相结合以充分利用太阳光谱能量的异质结层叠式电池,则在理论上其光电转换效率可超过 20%。目前,非晶硅光电池已充分占领了消费商品电源市场(如计算器、手表、干电池充电器等);在电力系统方面,亦已开始向一些供电装置方面发展。特别是作为辅助能源在发展环保性电动车(electric vehicle)中很有吸引力。

当前,最主要的趋势是在发展以非晶硅为主的各种非晶半导体电子器件的基础上,研究非晶态半导体在办公室自动化的应用。办公室自动化发展要求提高业务信息处理机的输入/输出设备的性能,利用非晶硅可大面积制成薄膜的优点,通过大面积光刻技术,在其上制作场效应管、CCD 器件、光电二极管等。因而由这些器件组成以大面积 a-Si:H TFT 阵列为中心的非晶态半导体电子器件全新型的输入/输出设备。在图文显示器方面,由它们制成的大规模集成电路驱动的液晶显示屏,由于控制单元(TFT)制造在每一像素之上,因此不存在限制显示大型化的因素。可以预期,以 a-Si:H TFT 为中心的非晶态半导体电子器件,较之太阳能电池,更具有近期的明显的经济益。有人认为,非晶态半导体将以大面积电子学(large area electronics)迈进 21 世纪。

参考文献

- 1 Joffe A F, Regel A R. Progr Semicond, 1960, 4: 237
- 2 Mott N F. Adv Phys, 1967, 16: 49
- 3 Cohen M H, Fritzsche H, Ovshinsky S R. Phys Rev Lett, 1969, 22: 1065
- 4 Spear W E, LeComber P G. Solid St. Commun, 1975, 17: 9
- 5 Staebler D L, Wronski C R. J Appl Lett, 1977, 31: 292
- 6 LeComber P G. J. Non-Cryst. Solids, 1989, 115: 1

7 Catalano A, Carlson D E, et al. J. Non Cryst. Solids, 1989, 115: 14

8 Oana Y. J. Non Cryst. Solids, 1989, 115: 27

(中山大学彭少颢教授撰)

P-N 结击穿电压蠕变 walkout in P-N junction

简称击穿电压蠕变。是指 P-N 结发生雪崩时, 击穿电压随雪崩时间而增加的现象。其特征是击穿电压随雪崩时间而增加; 击穿特性较“硬”; 随着时间的延长, 击穿电压最后趋向于一饱和值; 击穿停止后需经过一定时间才能恢复最初的击穿电压数值。击穿电压蠕变是平面型半导体分立器件和集成电路经常发生的现象, 它的出现与器件内部氧化层中(或氧化层上)的可动离子的沾污和再分布以及雪崩时半导体表面处, 产生的热载流子向氧化物中的注入有关。击穿电压蠕变造成了半导体器件击穿电压的不稳定, 这将使工作于反向偏置的器件, 如稳压二极管和变容二极管等无法工作。此外它还常常伴随有沟道漏电、阈值电压漂移等其它表面效应, 从而降低了半导体器件和集成电路的成品率和可靠性。对 P-N 结击穿电压蠕变的研究, 有助于深入理解热载流子向二氧化硅中的注入, 氧化物陷阱对热载流子的俘获等问题; 并可提高半导体器件与集成电路的成品率和可靠性。

P-N 结击穿电压蠕变的研究主要集中在两个方面: 一是产生击穿电压蠕变的机理或击穿电压蠕变的物理模型; 另一是消除或减弱击穿电压蠕变的工艺方法。前者是后者的理论基础, 而且通过后者来检验其正确性。

关于击穿电压蠕变产生的机理的演变过程可以分成两个大的阶段, 即定性理论和定量理论阶段。

定性理论阶段(1965~1976) 在此阶段内, 关于击穿电压蠕变产生的机理主要有 3 个物理模型:

格罗夫(A. S. Grove)等提出的氧化物中正离子(例如钠离子)再分布模型。他们在研究与 P+ 区有联系的沟道电流时, 发现 P+-N 结雪崩前后的反向击穿特性有很大的变化, 沟道电流减弱。他们认为发生雪崩击穿时, 通过结的电流较大, 可使结的温度上升。氧化物中的可动正离子在一定温度下, 受边缘电场的作用在氧化物中发生再分布, 使击穿电压增长。

古特洛(R. W. Gurtler)提出的氧化物正负两种电荷再分布模型。他认为氧化物中包含正负两种电荷, 但正电荷的数量超过负电荷。在发生雪崩以前它们是均匀分布的; 发生雪崩时电流变大, 温度升高, 在电场作用下, 正负电荷发生再分布削弱表面电场, 增大了击穿电压面发生击穿电压蠕变。他所测得的蠕变恢复激活能为 0.35eV。而不同于钠离子在 SiO₂ 中发生再分布的激活能为 1.05~1.35eV。古特洛将这种差异解释为钠离子沿平行于界面方向和垂直于界面方向漂移时, 所对应的激活能不同所致。

申克(J. F. Schenck)提出的热载流子注入模型。他认为在雪崩击穿过程中, 热载流子注入 SiO₂ 中, 中和原来电应力感生的电荷, 减弱表面电场造成击穿电压蠕变。

在这 3 种定性模型中, 前二者基本上是一致的, 都归结为氧化物中电荷的再分布, 但具体的电荷有些不同。第 3 种模型认为热载流子向 SiO₂ 中注入是造成蠕变的根本原因。基于上述情况, 人们普遍认为雪崩时, 氧化物中电荷再分布和载流子向 SiO₂ 中的注入是造成击穿电压蠕变两个相互独立的因素。

定量理论阶段(1977~) 这个阶段的 3 个理论模型都是围绕着热载流子向 SiO₂ 中注入的机理进行的。原因是近些年来随着半导体工艺的不断改进, 氧化物中的离子沾污和固定电荷数量已能很好地控制, 氧化物电荷再分布模型已失去了现实意义。

沃威定量理论模型。1977 年沃威(J. F. Verwey)等提出的定量理论模型解释了击穿电压蠕变量 ΔBV 随时间 t 变化的规律。此模型的基本假设是: (1) 表面雪崩产生的电子空穴对中只有一种载流子能注入到 SiO₂ 中; (2) 注入的氧化物电流为界面处氧化物电场的指数性函数; (3) 击穿电压 BV 是栅压 V_G 的线性函数; (4) 在氧化物中被陷阱的电荷仅限于发生雪崩区的上部; (5) 氧化

物中沿着和界面垂直的方向上, 陷阱的电荷是均匀分布的; (6) 在氧化物中只有很少部分陷阱被载流子占据。将根据上述假设导出的 ΔBV 特性与实验结果对比, 发现在 t 值居中的范围内理论与实验结果符合较好, 但在 t 值较大和较小的范围内, 理论与实验结果偏差很大。

萨拉斯瓦特(K. C. Saraswat)定量理论模型。萨拉斯瓦特等于 1978 年提出的击穿电压蠕变模型所基于的物理过程基本上与沃威理论相同, 但有其不同处: 一是对发生蠕变的分过程所采用计算公式与沃威不同, 二是考虑了电子、陷阱在 SiO₂ 中的分布及其来源, 认为是氧化物中的水关联陷阱。此理论与实验符合得较好, 然而只有已知氧化物电流密度 $J_{ox}(t)$ 的函数形式时才可计算出 ΔBV 的大小。

陷阱饱和理论模型。1979 年郭维廉针对沃威理论在大 t 值范围与实验结果偏差较大, 和萨氏理论只有已知 $J_{ox}(t)$ 函数形式的前提下才能得出 $\Delta BV(t)$ 具体解析表达式(而且假定 $J_{ox}(t)$ 是可积的)的问题, 建立了击穿电压蠕变陷阱饱和理论。此理论为: 在实际情况下沃威的第 6 点假设常与事实不符, 即当陷阱密度较小而雪崩后注入的热载流子数目较大时, 载流子填充陷阱的几率将随着时间的增加而减少。设可被填充的陷阱数目随时间的增长作指数性的减少。陷阱饱和理论不仅克服了以上两种理论存在的缺点, 而且还定义了描述击穿电压蠕变的 3 个基本参量, 从而使击穿电压蠕变理论完整化和系统化。

根据以上所述的击穿电压蠕变产生的机理, 以 P-N 结为例消除蠕变的方法有: (1) 减少或补偿 SiO₂ 中的可动离子或固定正电荷(因正电荷提供了表面雪崩和硅中电子向 SiO₂ 注入的电场), 具体工艺方法有磷硅玻璃、HCl 氧化、聚酰亚胺钝化、背面扩金工艺等; (2) 减少水向 SiO₂ 中的扩散, 清洗后彻底烘干, 以减少 SiO₂ 中的水关联陷阱密度; (3) 采用半绝缘的掺氧多晶硅对器件钝化, 使钝化介质层中不带任何电荷。

关于击穿电压蠕变目前有待进一步研究的问题有: (1) 关于蠕变产生的机理是二元的还是一元的问题, 因为 SiO₂ 中的正电荷有利于发生表面雪崩和电子向 SiO₂ 中的注入, 而且古特洛测得的 0.35eV 激活能恰好与水关联陷阱的激活能值相等, 有待进一步研究; (2) 水关联陷阱与蠕变的直接对应关系还有待以更深入的研究来证实; (3) 新的更为有效地消除击穿电压蠕变的方法也有待进一步研究。

参考文献

- 1 Grove A S, et al. IEEE Trans. Electron Devices, 1965, 12: 619~626
- 2 Schenck J F. 6th R. Phys Symp Proc, 1967, 31~39
- 3 Gurtler R W. IEEE Trans. Electron Devices, 1968, 15: 980~986
- 4 Verwey J F, et al. Solid-state Electronics, 1977, 20: 689~695
- 5 Saraswat K C, et al. Solid-State Electronics, 1978, 21: 813~819
- 6 郭维廉. 半导体技术, 1979; (1~2): 20~30
- 7 郭维廉. 硅-二氧化硅界面物理(第 1 版). 北京: 国防工业出版社, 1982. 176
- 8 Guo W L, et al. IEEE Trans. Electron Devices, 1987, 34: 1788~1794

(天津大学郭维廉教授撰; 万良风声)

MIS 隧道结器件 mis tunnel junction devices 由金属

(M)、超薄(UT)绝缘体(I)和半导体衬底(S)组成的一种器件。因其绝缘层非常薄(1.4~5nm)而具有载流子隧道效应故称为隧道结。如以重掺杂简并半导体(如 n⁺ 多晶硅)代替其中的金属, 则构成半导体(简并)/绝缘体/半导体(即 SIS)隧道结。MIS 隧道结和 SIS 隧道结统称为 CIS 隧道结。用 MIS 隧道结代替常规掺杂 P-N 结制作的器件称为 MIS 隧道结器件。

从学术价值方面看,对 MIS 隧道结的研究有助于深入了解肖特基势垒如何过渡到厚氧化物 MOS 结构,以及超薄介质膜的隧穿效应;从实用方面看利用 MIS 隧道结本身的特点可以研制成具有一定特色的半导体器件而适应国民经济和国防建设的需要。

MIS 隧道结器件的发展大体可以分成两个阶段:(1)从 1973~1980 年左右,这一阶段主要是建立了 MIS 隧道结的物理模型、对 MIS 隧道结基本特性的研究和对 MIS 隧道结的初步开发应用;(2)从 1980 年左右到现在,此阶段是 MIS 隧道结器件全面发展的时期,各种不同的 MIS 隧道结器件被研制成功并开始开发应用。

MIS 隧道结因流过其超薄绝缘层中电流不同而可分成两种。如果流过绝缘层的主要电流成分的载流子与衬底的少数载流子(如 P 型硅中的电子即为少数载流子)相同则称此结为少子 MIS 隧道结;如果与衬底的多数载流子相同则称为多子 MIS 隧道结。例如 Al/UTS₂O₂/p-Si 结为少子 MIS 隧道结,Au/UTS₂O₂/p-Si 结为多子 MIS 隧道结。

1974 年格林(M. A. Green)等从 MIS 结构的能带图出发,考虑了 MIS 隧道结的半导体区、超薄绝缘层中的隧道电流、界面陷阱对电流的贡献和电压关系 4 个方面,建立起一组非线性微分方程。利用计算机通过叠代技术求出其数值解,进而求出其电流-电压(I-V)特性和电容-电压(C-V)特性。通过计算得到两个重要的结果:1. 当绝缘层非常薄而正向偏压较小时,少子 MIS 隧道结的 I-V 特性与理想 P-N 结的 I-V 特性非常相似。这时,少子 MIS 隧道结完全可以代替掺杂 P-N 结而制作半导体器件。另一方面少子 MIS 隧道结与掺杂结相比又具有其本身的特点,这些特点是:非常高的少子注入效率;结深非常浅;不存在重掺杂效应;在低温下无载流子冻结效应。利用这些特点可以研制成具有一定特色的半导体器件。2. 虽然多子 MIS 隧道结的 I-V 特性在正反两个方向比较对称,然而它却存在多子倍增效应。例如将低功函数金属与 N 型硅衬底形成的多子 MIS 隧道结处于反向偏置,当界面有少子注入时,结上的电压降主要体现在表面势垒 V_s 上,超薄氧化物上的电压降 V_{ox} 很小,半导体表面处的导带底高于金属中费米能级很多,故流过 1 层的多子(电子)隧道电流很小。但当界面处有少子空穴注入时,空穴聚集界面形成反型层,使氧化物上电压降 V_{ox} 增大,进而使半导体导带底下降和 V_s 减小,这将引起多子隧道电流的增大此即 MIS 隧道结的多子倍增效应。利用多子倍增效应可制成特殊的放大器件。

在完成 MIS 隧道的物理模型和研究了 MIS 隧道结的基本电学特性后,格林等随即把少子 MIS 隧道结特性用于研制 MIS 硅太阳电池。1913 年,朱纯(J. Shewchun)等将多子 MIS 隧道结的多子倍增效应应用于研制表面氧化物晶体管(SOT),使两种器件都取得较好的效果。

在 1980 年以后,MIS 隧道结器件得到全面发展,各种 MIS 隧道结器件相继出现,MIS 太阳电池的转换效率也不断提高。现将主要的几种 MIS 隧道结器件分别介绍如下。

MIS 太阳电池 MIS 太阳电池是由一大面积的少子 MIS 隧道结代替常规掺杂 P-N 结构成的光电转换器件。为了使光透过,可选用透明金属膜结构或细栅金属条结构,为收集更多的光,在 M 层上还需沉积一层抗反射膜。与常规掺杂结电池相比,它具有工艺程序简单(无高温工艺)、对紫光响应强、适宜多晶材料、转换效率高特点。1984 年,格林等研制的 MIS 太阳电池首先将效率提高到高于 18%。

MIS 隧道结发射极晶体管 也称为 MIS 异质结发射极晶体管,它是用少子 MIS 隧道结代替常规 P-N 结作为发射极的双极晶体管,器件的集电结仍由扩散结担任。MIS 隧道结发射极晶体管从结构上可分成台面型、平面型两种,从功能上可分成超高电流增益型和超低 h_{FE} 温度系数型两种。超高电流增益型在设计时充分发挥了少子 MIS 隧道结少子注入效率非常高的特点,1986 年,法希(M. Farshi),郭维廉用这种结构研制出电流增益 h_{FE} 达

到 3 万的双极晶体管,超低 h_{FE} 温度系数型设计时充分利用了此结无重掺杂效应的特点,曾研制出从 -55~100℃,h_{FE} 温度系数为 12.8% 的晶体管。

横向 MIS 隧道结晶体管 此种器件是一种发射结和集电结都由 MIS 隧道结构成的横向双极晶体管,基区由衬底构成。因其工作原理的不同又分为成多子倍增型和少子注入型两种。在少子注入型中,发射结注入至基区中的电子沿横向扩散到加反偏的集电结完成放大作用。1989 年,郭维廉等所研制的此种器件最高的 h_{FE} 达到 842,而且具有数值很小的负 h_{FE} 温度系数。在多子倍增型(N 型衬底)中发射结向集电结注入少子空穴,空穴达到反向偏置的集电结时,通过前边所述的多子倍增效应使通过电极的多子(电子)电流增大而起放大作用,h_{FE} 可达到 22。

MIS 隧道结源漏 MOS 晶体管 由少子 MIS 隧道结代替掺杂结作为源和漏制成的 MOS 晶体管。1986 年,由法希等首次研制成功。除了具有常规 MOS 管的电学特性外,还由于其结深非常浅(约为 0.02μm)而具有很强的抗短沟道效应的能力。

MIS 隧道结双极反型沟道场效应晶体管 也称为 BICFET,它是由西蒙(J. G. Simmons)等于 1985 年提出而由法希等于 1986 年首次研制的。其结构和工作原理类似于多子倍增型横向 MIS 隧道结晶体管,所不同的是在 BICFET 中用一个扩散 P⁺-N 结来代替多子倍增型 MIS 横向晶体管中的 MIS 隧道发射结向集电结注入少子空穴。从另一个不同的角度看,它相当于一个以 p 型反型层作为基区的纵向 NpN 型双极管。由于其基区极薄故预计有极高的频率响应和电流增益,但目前研制结果和理论预计相差很远。

MIS 隧道结开关器件 1977 年,由西蒙等人提出,其结构为 M/UTI/n-Si/p⁺-Si。即一个 n 型衬底多子 MIS 隧道结与一个 n-P⁺掺杂结组合而成,它具有电流开关型(即“S”型)负阻特性。与传统的开关器件相比,它具有很高的开关速度、与典型的 IC 工艺相容、可实现光注入和电注入两种注入模式等特点。

MIS 隧道结氢敏器件 是金属钯(Pd)、超薄 SiO₂ 与 n 型 Si 衬底组成的一种少子 MIS 隧道结。氢气被 Pd 吸附后,扩散到 Pd/UTS₂O₂ 的界面改变了 Pd 的功函数进而改变流过结的电流以检测氢气的含量。例如 1981 年,由罗兹(P. F. Ruths)等研制的氢敏器件,对 154ppm 的氢可使反向隧道电流改变 3 个数量级,因而它是一种高灵敏度的氢敏器件。

MIS 隧道结器件的长期使用寿命是早期被人们关注的一个问题。但经郭维廉等于 1988 年测得结果证实,Al-Ti/UTS₂O₂/p-Si 结的发射极晶体管,如果结温 80℃,则其失效中位寿命可达到 300a,何况实际结温一般都低于 80℃,故其长期使用不会成为问题。

综上所述,MIS 隧道结器件发挥其固有的特点,在某几个方面形成具有一定特色的半导体器件,以弥补常规器件这些领域的不足。

MIS 隧道结器件目前尚有待进一步研究的问题有以下几点:(1)少子 MIS 隧道结,由于其反型层极薄,故结的串联电阻较大。应进一步研究设法尽量减小其串联电阻;(2)通过改变 UTI 材料进一步改善和延长其使用寿命;(3)利用 MIS 隧道结研制和开发新的 MIS 隧道结器件,扩展 MIS 隧道结的应用前景。

参考文献

- Green M A, et al. Solid -State Electronics, 1974, 17: 551
- Simmons J G, et al. Solid-State Electronics, 1977, 20: 955~961
- Ruths P F, et al. IEEE Trans. Electron Devices, 1985, 28: 1003~1009
- Farshi M, Guo W L, Green M A. IEEE Electron Device Letters, 1986, 7: 632
- Farshi M, et al. IEEE Electron Device Letters, 1986, 7: 513
- Farshi M, et al. IEEE Electron Device Letters, 1986, 7: 474
- Guo W L, Farshi M, Green M A. Solid -state Electronics.

1988,31,1071

- 8 Guo W L, et al. The proceeding of the 2nd international conference on solid state and integrated circuit Technology, 1989, 343~345

(天津大学电子系郭维廉教授撰; 万良风审)

应变量子阱器件 strained quantum well devices 主要是指应变量子阱光电器件, 并且以应变量子阱激光器为主要代表, 也包括应变量子阱激光放大器和应变量子阱探测器等。

自从1962年第1个半导体激光器问世以来, 为了提高它的激光特性, 进行了大量研究工作, 先后发展了同质结、单异质结和双异质结等结构。自从1974年R. Dingle等报导了量子阱激光器的光学特性之后, 由于量子阱激光器阈值电流低、温度稳定性好、单纵模性能稳定、窄线宽等优点而受到重视, 并得到了飞速发展。

80年代中期, 随着分子束外延、金属有机化合物气相外延以及化学束外延技术的发展, 化合物半导体材料超薄层生长技术和晶格失配异质外延技术日益成熟, 开始把应变效应引入到半导体激光器中, 利用应变效应改善半导体激光器的性能, 发展半导体激光器新的应用, 取得引人注目的成果。我们知道, 只要衬底与外延层材料晶格常数差别不是很大, 外延层又足够薄时, 两种材料在平行界面方向上有一个统一的晶格常数, 亦即晶体处于弹性形变状态, 而不引起位错。通常把不发生范性形变的最大厚度称为临界厚度, 它与材料力学性质、应变大小有关。根据晶格常数大小的不同, 这时外延层处于压应变状态或张应变状态。

为了从理论上分析这种应变结构对器件性能的影响, 常常把这种双轴应变分解为一个纯静水压应变和一个单轴应变。纯静水压应变引起禁带宽度的变化, 而单轴应变则改变了晶体的对称性, 使简并的能带分裂, 改变能带形态或使各子带相对位置发生变化。1986年英国A. R. Adams和美国E. Yablonovitch等各自独立指出利用压缩应变可以实现最高空穴带为类轻空穴带, 从而可以大幅度减小Auger复合和价带间吸收, 减小线宽增强因子。此后, 又从理论上用紧束缚法和K·P耦合法对压应变量子阱激光器进行了很多研究, 结果表明, 利用量子尺寸效应可以使最高空穴子带在生长平面方向 Γ 点附近局部范围内有较小的有效质量, 如果再考虑压缩应变则可以使这一小的有效质量区域增大, 有效质量进一步减小, 从而可更加减小空穴状态密度, 增加增益, 使激光器阈值电流进一步减小, 进一步改善它的温度稳定性, 提高振荡频率。1991年, E. P. O'Reilly等从理论上指出了伸张应变能使轻空穴态为最高空穴子带, 且TM模可具有更大的增益矩阵元, 并对不考虑量子尺寸效应只考虑张应变效应时, 计算了其增益, 发现伸张应变亦可减小激光器阈值电流。1992年, M. Sugamura又对压缩和伸张应变下InGaAs/InP系量子阱的光增益进行了较全面的理论分析, 指出由于在伸张应变状态下, 有大的导带基态和轻空穴子带之间的TM模光学矩阵元和高的联合态密度, 从而伸张应变也能改善量子阱激光器的特性。

在进行理论研究工作的同时, 也利用X-光、光荧光等手段, 对InGaAs/GaAs、GaInP/GaAs、InGaAs/InP、AlGaAs/GaAs等材料体系, 从实验上研究了应变对这些材料光电特性的影响, 发现应变使带隙和能级位置的变化基本上与理论上预计的结果一致。1986年以后, 还同时开展了应变量子阱激光器的研制工作, 对于压应变量子阱激光器, 主要有InGaAs/GaAs(Al)和InGaAs/InGaAsP两种体系。目前报导的InGaAs/InGaAsP系列压应变量子阱激光器阈值电流密度已达到 $147\text{A}/\text{cm}^2$; 最小阈值电流为 0.8mA ; 最小线宽增强因子为2; 最大端面输出功率为 325mW ; 压应变多量子阱分布反馈激光器在 10Gbit 下直接调制啁啾宽度已降到 0.2nm 。对InGaAs/GaAs(AL)体系压应变量子阱激光器最小阈值电流密度为 $65\text{A}/\text{cm}^2$; 最小阈值电流为 0.35mA ; 最大端面输出功率为 1.6W 。

对于伸张应变量子阱激光器的研究, 实验工作还要比理论工作早一点。目前InGaAs/InGaAsP系列张应变量子阱激光器阈

值电流密度最小可达 $92\text{A}/\text{cm}^2$; 最小阈值电流为 0.8mA ; 线宽增强因子为1.5; 3dB 带宽高达 40GHz 。

除了上述优点之外, 应变量子阱激光器另一个引人注目的原因是可以开拓新的波长。近几年来, 光纤放大器的发展已使它成为光纤通讯系统中的重要一员。随着光纤放大器的发展, 对作为它泵源的 $0.98\mu\text{m}$ 和 $1.48\mu\text{m}$ 激光器的需求也就愈来愈多。适当选择应变, InGaAs/GaAs(AL)体系应变量子阱激光器是唯一可以实现 $0.98\mu\text{m}$ 激射的激光器, 同样, 应变量子阱InGaAs(P)/InGaAsP激光器可以实现 $1.48\mu\text{m}$ 激射。近年来这两种激光器在美国、日本等均已有商品。

由于应变量子阱激光器阱宽通常很薄, 以保证量子尺寸效应和不产生位错, 因而限制因子很小。为了提高限制因子, 这种激光器常常作成分别限制多量子阱结构(SCH), 或者变折射率分别限制结构(GRSCH)。对于压应变量子阱, 可以实现较强的带填充效应不仅发生在导带, 而且也发生在价带。采用变折射率分别限制异质结构的单片集成, 20个不同波长的DFB激光器阵列激射波长范围在 $1459.2\sim 1590.6\text{nm}$ 之内。这将为波分复用光通信系统和长波长通讯提供了很有用的器件。

值得注意的是, III-V族化合物半导体蓝光量子阱激光器是当前急需的一种很有前途的激光器。它是用ZnSeCd作阱, ZnSe作垒, 这也是一种应变量子阱结构, 利用应变效应可以进一步降低阈值, 有利于实现室温连续工作。目前美国、日本、英国都已经用这种结构制成了室温脉冲工作的蓝光(490nm)激光器。

在应变量子阱激光器发展的初期, 曾经有人怀疑应变量子阱激光器的可靠性。最近有人对应变量子阱激光器作了寿命实验, 据报导其连续工作寿命已超过2万h, 从而表明这个问题也是可以解决的。

尽管目前对应变量子阱激光器的理论工作已有许多报导, 但在全面、系统分析应变类型、大小对激光器各种性能的影响, 并在此基础上给出应变量子阱激光器的优化设计等方面, 还有大量工作要做。在实验上, 研究制造各种激射波长的应变量子阱激光器, 改善它的性能和增强它的可靠性等, 也都是当前的研究热点。

半导体激光放大器是另一重要的光电子器件, 在光纤通信中使用的半导体激光放大器, 一般要求对偏振不灵敏, 而通常的半导体激光放大器很难做到这一点, 采用大光腔或厚有源区等方法的效果也不很明显。对张应变量子阱激光放大器的理论分析表明, 适当的选择张应变大小, 可以使张应变量子阱激光放大器做到对偏振不灵敏。日本K. Magari等于1991年率先在实验上成功地解决了这个问题, 他们研制的张应变量子阱激光放大器对TE和TM模光增益的差只有 0.5dB 。此后, 从实验中发现张和压应变交替的量子阱InGaAsP/InP激光放大器也对偏振不灵敏。

应变量子阱结构在探测器上的应用, 主要是扩展波长响应范围, 例如GaAs的室温带边为 $0.87\mu\text{m}$, 与应变量子阱激光器相似。用应变InGaAs/GaAs超晶格结构, 已经在GaAs衬底上实现了吸收边为 $1.05\mu\text{m}$ 的光电探测器。

参考文献

- 1 Adams A R. Electron. Lett. 1986, 22: 249
- 2 Yablonovitch E, et al. J Lightwave Technol. 1986, 4: 504
- 3 O'Reilly E P, et al. Electron Lett. 1991, 27: 1417
- 4 Wang C A, et al. IEEE J Quantum Electron. 1991, 27: 681
- 5 Thijs P J A, et al. IOOC-ECOC, 1991, 31
- 6 Okamoto M, et al. IEEE J Quantum Electron. 1991, 27: 1463
- 7 Magari K, et al. IEEE Tran Photo Technol Lett. 1991, 3: 998
- 8 Sugamura M, et al. Appl Phys Lett. 1992, 60: 1842
- 9 Chen T R, et al. Appl Phys Lett. 1992, 60: 1782

(吉林大学刘式埔教授撰)

固体物理学

发光多孔硅 早在50年代, A. Uhlir 和 D. R. Turner 等就已提出, 在 HF 溶液中用电化学方法对单晶硅进行阳极处理, 就可以得到多孔硅。后来又对它的结构、材料成分和光电性质等进行了研究, 而且 C. Pickering 等在1984年已观察到多孔硅在可见光波段的荧光现象。在同一个时期, 已将多孔硅用于集成电路中的器件隔离和 SOI 材料生长。早期研究主要集中于低孔度多孔硅。1990年 L. T. Canham 报道, 多孔硅的孔度高于80%, 在可见光范围内可以观察到很强的光致发光现象, 并提出(1991)多孔硅的结构是一些直径小于5nm的晶丝, 正是由于晶丝的二维量子尺寸效应面发射可见光, 其能量远大于体单晶硅的带隙宽度。接着又出现了关于多孔硅电致发光的报道。如果在多孔硅上淀积一层透明电极, 加上电源, 在电流诱导下可以发光, 在溶液中, 甚至在阳极处理过程中都可以观察到发光现象。

多孔硅的发光现象不但可以在发光器件, 大屏幕显示等方面得到应用, 更重要的是可能为硅为基底的光电子的发展打开大门。以大规模集成电路和超大规模集成电路为代表的微电子学已发展到了极高的水平, 微细加工技术已使器件线条精度达到亚微米, 并正向器件的物理限尺寸——0.1 μm 逼近。进一步提高集成电路性能的方向之一, 是将传播速度更快, 信息容量更大的光引进集成电路, 形成光电集成, 即进入光电子学领域。集成电路是以单晶硅为基底材料, 但是硅单晶只能在红外区(1.1eV)发射极微弱的光。如果将多孔硅发光性能与已经高度发展的集成电路技术结合起来, 将为光电子学的发展开辟一条新路。90年代, 多孔硅的研究进入了一个新的阶段, 形成了一个热潮。研究的重点是多孔硅的结构, 包括它的空间结构(是晶丝还是晶粒)和微观结构(是单晶还是非晶), 多孔硅的发光机理以及多孔硅的形成机理。

低孔度多孔硅基本上是保持原衬底硅的单晶结构框架, 只是在多孔硅层中形成许多孤立的孔洞, 孔洞呈枝杈状。但是有一些研究表明, 多孔硅中含有非晶成分。Canham 等(1990, 1991)指出, 当孔度达到80%, 相邻的孔交叉连通, 而留下一些孤立的晶柱或晶丝, 称为量子线。而晶丝的结构是有序的, Raman 散射研究和光致发光测量, 也支持多孔硅的结构是有序晶体这一观点。但是 R. P. Vasquez 和 T. Geouge(1992)X射线光电子能谱(XPS)分析和电子衍射结果表明多孔硅主要表现了非晶体特性。

透射电子显微镜(TEM)对于材料结构分析是一种直观而有效的方法。A. C. Cullis 和 L. T. Canham 1992首先对高孔度多孔硅作了TEM分析, 发现高孔度多孔硅总体上呈现为无规则的珊瑚状, 其中包含了一些丝状物, 这就是量子线。鲍希茂等(1993)对高孔度多孔硅作了系统的TEM分析, 有一些样品, 多孔硅膜会自动从硅衬底上剥离, 也可以用电化学法剥离。剥离下来的多孔硅膜依然发光, 说明它们保持了原来的结构, 可将这些膜直接用于TEM观察。

从多孔硅的TEM照片及电子衍射图上可以看到, 多孔硅呈珊瑚状, 由大量颗粒组成, 颗粒的尺寸一般为2~3nm。还可以看到一些枝状物, 但它们似乎是由一些颗粒连成, 证明多孔硅是由晶柱或晶丝构成。M. W. Cole 等(1992)横断面TEM观察得到了类似的结果。高孔度多孔硅仍然保持了原来晶向为(100)的单晶衬底的晶体框架, 但又含有一定的无序成分。真正要确定多孔硅的微观结构, 应借助于高分辨率电子显微镜(HREM)。从HREM照片上可以看到, 无序区中镶嵌着许多有序小区域, 颗粒尺寸一般为2nm左右, 各有序区晶格排列基本上保持了(100)衬底的晶向。HREM分析也没明确地观察到较大的晶丝。根据上述TEM和HREM分析, 可以认为, 多孔硅是由许多小颗粒组成, 颗粒的内核是有序的, 外面覆盖一个无序壳层, 这些颗粒在空间堆成无规则的珊瑚状, 有序晶核的排列基本保持原来单晶体的晶向。Cole 等报道了类似的HREM观察结果。

多孔硅的结构对环境敏感, 制成后在保存过程中其结构会有某些变化, 变化还随环境不同而异。

鲍希茂等用电子衍射对多孔硅结构的变化进行了研究。结果表明样品的有序性较明显, 但是在空气中保存20d之后, 样品有序性明显下降, 无序性增加。当HF浸泡30s后, 衍射图表明样品的有序性有所恢复。J. C. Tsang 等(1992)用Raman散射分析, 发现了这种变化规律, 并认为刚制成的多孔硅中有序晶粒表面Si键是被H钝化的, 在空气中O置换了H, 造成了较大的应力, 致使晶粒表面下层无序化。在HF中浸泡恢复了H对表面的钝化, 也使表面层恢复有序。但G. Bai 等(1990)有报道, 双晶X射线衍射表明, 氧键置换了氢键只引起应力变化, 不引起结构变化。氧化引起的无序化是可恢复的, 但是有一些结构变化是不可恢复的。鲍希茂等在作TEM观察时, 提高电子束流强度(约4倍)对刚制备的多孔硅照射20min, 样品已变为无序且不能用HF浸泡恢复。对于多孔硅, 最感兴趣的还是它的光学性质, 特别是它的发光性质。只能发射微弱的红外光的非直接带隙硅, 经阳极处理后却能发射很强的可见光, 波长可以从红、橙、黄直到绿色。多孔硅荧光光谱不但光子能量比原单晶高, 而且强度也大得多。多孔硅荧光光谱随着制备条件, 保存环境等的不同, 表现出许多不同的特点, 而这些特点往往是探寻多孔硅发光的机理的重要线索。(1)多孔硅的孔度与荧光波长的关系。荧光波长随多孔硅的孔度增加而移向短波段, 即光子能量随孔度而增大。低孔度的多孔硅基本上无荧光发射, 孔度达到60%在近红外区开始出现荧光; 孔度70%以上, 荧光开始从红外区进入可见光区; 孔度80%以上, 可进入橙光段。(2)蓝移现象。多孔硅的电化学处理结束后切断电源, 继续在HF中进行化学腐蚀称为开路腐蚀, 光谱可以继续向短波段移动, 或者电化学处理结束, 将样品从HF溶液中取出, 由于多孔的样品吸附了大量的HF溶液, 化学腐蚀依然进行, 光谱也会移向短波段, 这种现象称蓝移现象。(3)荧光的退化与恢复。荧光在空气或氧气中不仅有蓝移现象, 它的发光强度也往往随之变化。一般光强随时间而减弱, 甚至淬灭, 如果加温或有光照存在, 退化过程则更快。但是退化的荧光经HF腐蚀, 往往可以恢复或部分恢复其发光强度。在氮气中也可以在一定程度上恢复。(4)多孔硅荧光瞬态特性。多孔硅荧光瞬态衰减过程不是简单指数过程, 而是包含两个以上的指数过程, 反映了复合过程的复杂性。

多孔硅的发光机理是当前的多孔硅研究的焦点, 已提出了10余种模型, 大体上可分为三大类: 量子尺寸效应、非晶发光模型和与表面相关的发光模型。

(1)量子尺寸效应。从量子理论得知, 当晶体的尺寸在某一维度上足够小(一般小于5nm, 这一维度将产生量子限制效应, 使禁带或能级间距增大, 辐射复合的发光将移向高能量。Canham(1990)提出的发光量子线可称为二维量子线, 面A. Hhalimaori(1991)及V. Vezan 等(1992)认为, 荧光起源于电化学腐蚀残留下的晶体框架, 它们是类似羊毛团状的量子网络。近来的TEM分析表明, 多孔硅更可能是由量子点构成。对于多孔硅荧光光谱瞬态过程也已进行了许多研究, S. Gardelis 等(1991)的研究提出复合过程是低维(一维或零维)结构中的激子过程或有激子参与OTEM, 特别是HREM分析结果, 对量子尺寸效应是一个有力的支持。Raman谱, 电子顺磁共振, X射线吸收等分析确认多孔硅包含有序晶粒, 因而有利于量子效应模型。胶体悬浮硅微粒和蒸发硅微粒的发光现象从另外的角度支持了量子效应模型。此外, 用量子效应模型可对多孔硅的许多特性作出解释, 例如, 荧光光子量大于硅带隙宽度, 荧光光谱的蓝移现象, 氧化引起的荧光变化过程等。

(2)非晶发光模型。C. Picker 等(1984)报道, 多孔硅中含有较多的氧, 形成无序混合Si₂O, 其发光光谱也与非晶硅相似。发光光谱是由悬挂键缺陷态及带边跃迁引起, 而带边跃迁的能量受氧、氢等的影响很大。P. Vasquez 等(1992)的X射线光电子能谱(XPS)分析表明, 多孔硅中含氧并不多, 仅是一层表面的自然

氧化层,但多孔硅的光电子谱却与非晶硅相同,说明对于发光,有序晶体不是必需的。T. P. Pearsall 等(1992)用电子衍射确定,多孔硅是非晶结构,而荧光光谱也具有某些类似非晶谱的特征。如果用量子尺寸效应对结果进行修正,荧光光谱的相似性还可以得到部分改善,但毕竟不能完全拟合两者的差别。多孔硅荧光光谱与温度的关系也与非晶硅有相似之处,为了拟合其差别, X. L. Zheng 等(1992)等引入了激子和声子的作用。对于非晶模型来说,应当讨论一下非晶的产生。对于非晶的产生,基本上有两类看法,其一,认为多孔硅晶丝或晶粒表面应力引起无序化; K. Barla 等(1984)双晶 X 射线衍射分析表明,多孔硅的晶格常数比原衬底硅大,会产生较大的应力。其二,自然氧化过程也在多孔硅表面引起应力,过大的应力会引起表面层甚至整个晶粒无序化。

(3)与表面相关的发光模型。这类模型有数种,有的与多孔硅的晶体结构有关,有的则无直接关系。(1)Siloxene 衍生物发光模型: M. S. Barandt 等(1992)从化学上早已知道 Siloxene ($\text{Si}_2\text{O}_3\text{H}_6$)是一类具有荧光性质的物质。测量表明,化学合成的 Siloxene 与阳极处理生成的多孔硅,具有类仿的荧光光谱,红外吸收谱和 Raman 谱,由此认为,多孔硅表面具有 Siloxene 的衍生物 $\text{Si}-\text{O}-\text{H}$, 并产生发光。这个模型引起了人们的注意,但是,如何用这样的模型解释多孔硅一系列的特性,有待进一步工作。(2) SiH_2 模型 C. Tsai 等(1991); 红外吸收光谱分析表明,多孔硅表面存在 $\text{Si}-\text{H}_2$, 升温退火 H 解吸, HF 浸泡又可恢复。这些变化与荧光光谱的变化有对应关系,从而认为,多孔硅发光是由 SiH_2 引起。另外 Y. H. Xie 等(1992)报道,多孔硅中存在有 SiH_x ($x=1\sim 2$)官能团,它们可能是电化学处理过程中生成的或电化学过程停止后化学沉积而成。(3)表面吸附分子发光模型(Z. Y. Xu 等, 1992); 多孔硅荧光光谱的温度关系既与单晶硅不同,也有别于非晶硅。在空气或氧气中,荧光衰减及淬灭,有光照时衰减淬灭加速,说明有光化学反应发生,故认为,多孔硅巨大的表面积化学吸附的某些分子是发光的起因,例如氢、氟、氧、碳等,在多孔硅表面这些分子的存在业已证明。(4)晶粒间表面局域态复合模型: Y. H. Xie 等(1992)通过 TEM 和瞬态荧光光谱分析提出,刚制成的样品,晶粒被 H 钝化,在空气中 O 逐渐置换 H , 形成表面局域态,通过局域态的复合而发光。局域态的分布决定了荧光光谱随时间的非单一指数衰减特性。对于晶粒表面局域态的产生还有另一种观点,认为它起因于晶粒表面的应力。从以上的介绍可以看出,随着样品制备条件和继后的保存条件不同,多孔硅的性质可以有很大的差异。这就使测试复杂化,使结果分析具有不确定性,从而提出了繁多的发光机理模型。上面还只是列出了一些主要模型,从不同的实验事实出发,还衍生出了许多修正模型。看来要最后阐明发光机理,需要对不同生长条件的样品在不同环境、不同的条件下作多方面的系统研究。

最常用的制取多孔硅的方法是电化学腐蚀法。一般腐蚀槽是用聚四氟乙烯制成,把样品的 Si 接片接电源阳极,用铂片或硅片作阴极。最常用的电解液为 HF , 或 HF 加乙醇。多孔硅的生长与许多因素有关,如样品型号,电阻率和晶向,溶液的成分和浓度,电流密度和环境温度。多孔硅生长的化学反应过程较复杂,但有一些基本过程已有较一致的看法。在 HF 溶液中,硅的化学腐蚀速度(无电场作用)是极慢的,其表面硅键被氢钝化,可以组成 $\text{Si}-\text{H}$ 和 $\text{Si}-\text{H}_2$ 两种键。被氢钝化的硅表面在电化学腐蚀过程中,必须从样品体内获得一个空穴, F 才能转换一个 H 。失掉了一个 H 后,硅上的另一个 H 稳定性下降,另外的 F 可以取而代之,并向样品释放一个电子。放出的两个 H 构成一个 H_2 。失掉钝化的 Si , 被 HF 溶解,产生 SiF_4 进而与 F 结合形成 SiF_6 。一般假设样品 Schottky 接触是正偏,而 N 型样品是反偏。发生反应的条件之一,是向反应界面提供空穴。所以,一般在 P 型 Si 上多孔硅易于生长,而 N 型 Si 上往往需要光照激发空穴,或由加于 Schottky 接触上的反偏压而产生,反应过程中不断释放 H_2 气泡。

一般人们了解的电化学阳极腐蚀是一种抛光过程。在加了电

场后,作为阳极的样品(金属或半导体)上凸出的部位电力线最集中,首先受到腐蚀,因而起到抛光作用。而多孔硅电化学腐蚀时却形成多孔状结构。为了了解这一现象,已经提出了许多解释和模型。例如,反应产生的 H_2 气泡掩蔽了某些区域的腐蚀,反应过程中产生并沉积于孔壁上的绝缘层阻止了继续腐蚀。众多的模型中有 3 种是较受重视的。(1)Beale 耗尽模型(M. I. J. Beale 等, 1980); 本征半导体是高阻材料,其费米能级被打扎在禁带中央。如果腐蚀过程中出现了孔,当孔与孔之间的壁层厚度小于耗尽层的厚度,孔壁中的载流子全部耗尽,它不能再向 Si/HF 界面提供空穴,腐蚀停止,孔壁不再继续腐蚀。由此可以解释样品掺杂浓度等参数对多孔硅生长的影响。(2)扩散限制模型: Witten 和 Sanders 提出了一种扩散限制模型,用来分析固相中杂质沉淀,固液反应等,其要点是假设反应速度是由参与反应过程的反应物的扩散过程所限制。多孔硅形成过程中,空穴必须参与,在样品中,特别是在高阻样品中,空穴浓度低,要维持电化学过程不断进行,要靠靠体为一个扩散长度内空穴不断产生并向 Si/HF 界面向扩散。当然每一个空穴的扩散是随机运动的。空穴一旦扩散到 Si/HF 界面,立即与界面上的 Si 反应,如果界面不平,那些凹陷处获取空穴的几率最大,增强了腐蚀,并形成正反馈,而且孔壁一旦出现凹处,同样会增强腐蚀,孔洞将出现枝叉。根据这一模型,孔与孔之间的残留的壁层厚度约为 2 倍的扩散长度,而扩散长度是与半导体掺杂浓度等参数直接有关。(3)量子模型: 该模型认为,当晶丝或晶粒尺寸减小到 10^{-10}m 量级,发生量子尺寸效应,硅的带隙变宽,载流子的浓度随即下降,晶丝或晶粒的载流子将耗尽,从而限制了小尺寸晶粒继续腐蚀。这一模型将多孔硅的形成机理与发光机理统一了起来。

多孔硅的研究从 1990 年开始,进入了一个新阶段,即高孔度发光多孔硅研究阶段。研究的重点是发光机理、与发光机理紧密相关的结构问题以及形成机理。至今,这些问题均尚无定论,研究的热潮方兴未艾。

(南京大学博士生导师鲍希茂撰)

团簇的结构和奇异性 团簇是由几个至几百个原子、分子或离子通过物理或化学结合力组合在一起相对稳定的非刚性集合体,是介于气态和固态之间的物质结构的新形态。团簇所表现的许多特性既不能归之于单个原子分子,也不能归之于固体或液体。例如,在一宽广的温度、压强和团簇尺寸范围内,可发生绝缘相和导电相并存;液相和固相的并存及转变;壳层电子结构和“液滴”结构并存等。团簇作为凝聚态物质的初始形态,在各种物质由原子分子向大块材料转变过程中起着关键作用。研究团簇的形成、结构和性质,不仅可在原子分子物理与凝聚态物理之间架起一座桥梁,形成一个新型交叉学科,而且对于发展原子间、分子间相互作用的理论,对于材料科学、表面科学、催化反应动力学以及环境科学等都具有重要意义。

从 80 年代中期开始,王广厚等在团簇的物理和化学性质、结构特点等方面进行了一定的实验和理论研究,取得了一些有意义的结果。例如,发现溅射金属离子簇形成与构成元素的同位素性质有关,获得微晶型和络合物分子型的两类碱金属卤化物离子簇及其幻数,惰性元素原子簇的幻数结构和键长的变化,碱金属原子簇电荷状态和稳定构型的关联,团簇的温度效应和相变特征,氧化钛团簇的结构和尺寸效应,团簇凝聚的自组织和标度不变性,团簇形成纳米固体的界面效应和结构重排, C_{70} 团簇及 C_{60} 固体的相变和光衰变特性等。本文仅就团簇幻数、同位素效应、超团簇结构及凝聚过程中的分形特性及团簇族构成纳米固体的界面徒动效应等方面作一概述。

团簇的形成与构成元素的同位素性质有关(即同位素效应)。载能粒子(能量从几至几十 keV)轰击固体表面可发射光子、电子、原子、离子以及相当数量的中性和带电团簇。用 8keV 中性氦原子轰击多晶铜,用二次离子质谱(SIMS)分析溅射产生的铜离子簇 Cu_n^+ 发射强度。大量产生的离子簇可分为两类:一是异同位

素离子簇,如 $[\text{Cu}(65)_1(63)_1]^+$, $[\text{Cu}(63)_2(65)_1]^+$ 等;二是同位素相同离子簇,如 $\text{Cu}(63)_2^+$, $\text{Cu}(65)_2^+$, $\text{Cu}(63)_3^+$,若取 $I(n)$ 是原子数相同的 Cu_n^+ 产额之和, $I_{nc}(n)$ 是异同位素离子簇的强度,两者比值 $R=I(n)/I_{nc}(n)$ 包含着离子簇形成过程中的同位素效应。参数 I 、 I_{nc} 和 R 随 n 呈奇偶变化,满足奇偶性:

$$\begin{aligned} I(\text{Cu}_{2p+1}^+) &> I(\text{Cu}_{2p}^+) \\ I_{nc}(\text{Cu}_{2p+1}^+) &> I_{nc}(\text{Cu}_{2p}^+) \\ R(\text{Cu}_{2p+1}^+) &> R(\text{Cu}_{2p}^+) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 p 是正数整数;大多数异同位素离子簇有较大产额,特别是那些具有奇数原子的团簇。这表明,第一,异同位素离子簇是择优发射的;第二,溅射过程中团簇的形成与构成元素的同位素性质有关。用这个观点来考察溅射 Na^+ 强度不呈奇偶变化是因为钠只含一个同位素 ^{23}Na ,而铜含 ^{65}Cu 和 ^{63}Cu 两种同位素。比较溅射氯化钠和氯化铜所形成的团簇时,发射团簇的幻数结构与构成元素的同位素性质也有关。根据溅射的统计模型和同位素分馏特征计算结果与异同位素离子择优发射的实验事实相吻合。之后,R. Pellow和M. Vala提出类似的概念解释溅射碳团簇的奇偶性。A. A. Berejin等根据团簇同位素效应提出获得同位素有序结构的固体,即同位素超晶格的可能性,以便发展用于光存储和光通讯的同位素光纤。

团簇的幻数序列和稳定结构与构成团簇元素的键合方式有关,不同的幻数特征不仅反映团簇产生的物理根源,而且控制其物理化学性质。原子中的电子状态、原子核的核子状态,具有幻数特征(壳层结构),它是与对称性和相互作用势密切相关的;团簇具有类似的特征。在质谱分析中,含有某些特殊数目原子的团簇呈现峰值,表明这些团簇特别稳定,所含的原子数称之为“幻数”。团簇幻数序列与构成团簇的原子键合方式密切相关,它们是金属键来源于自由价电子,半导体键有取向共价键、碱金属卤化物为离子键以及惰性元素原子间的范德瓦尔斯键。

惰性元素构成的团簇是位置序起主导作用的壳层结构。最为典型的实验结果是超声喷注产生Xe_n簇的质谱分布。在 $n=13$ 、19、55、147等处呈峰值,其强度大约是相应后一个团簇(如14、20、56等)强度的两倍或更多,这就是幻数。在Ar、Kr等其它元素中也观察到类似的结构。这类幻数特征与惰性元素团簇的几何对称性存在密切关系,簇内原子间范德瓦尔斯键可用Lennard-Jones相互作用势来描述,即

$$V(r) = 4\epsilon \left(\frac{\sigma^{12}}{r^{12}} - \frac{\sigma^6}{r^6} \right) \quad (2)$$

团簇系统的哈密顿量是

$$H = \sum_i \frac{P_i^2}{2m} + \frac{1}{2} \sum_{i,j} V(|r_i - r_j|) \quad (3)$$

如果忽略温度及振动,则系统能量是

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n V(|r_i - r_j|) \quad (4)$$

n 是团簇中的原子数目, σ 和 ϵ 是第2维里系数。团簇的稳定结构所对应的原子排列位形使能量 E 取极小。利用数值方法,从随机位形出发寻找最佳位形,求出相邻两原子团簇结合能之差 $\Delta E(n) = E(n) - E(n-1)$,可得到 $\Delta E(n)$ 的变化曲线,计算结果给出幻数是7、13、19、55等。稳定结构的最佳位形,对应着对称性好的几何图形,如 $n=7$ 构成双五角锥体, $n=13$ 是正廿面体,具有5次对称轴的对称性; $n=19$ 组成双廿面体,面 $n=55$ 是具有层状结构和满壳层的廿面体,具有紧密束缚结构,其幻数对应着几何对称性好的团簇,故也称几何幻数。值得注意的是,如果考虑团簇内原子平均键长随 n 的变化,发现在 $Dn \leq 5$ 时, (R/σ) 总是大于大块固体的平均键长 (R_0/σ) ;当 $n > 5$ 至12时,团簇键长迅速变短并很快地短于大块固体的键长。之后,键长可分成表面原子的平均键长 $(R/\sigma)_{\text{ex}}$ 和内部原子之间的键长 $(R/\sigma)_{\text{in}}$ 。前者随原子数增加

而增加,后者则总是小于大块材料的键长,表明团簇内结合紧,具有较高的内压。

用8keV氩原子轰击LiF单晶,解理面为(100),可产生两类氟化锂离子簇:微晶型的 $[\text{Li}(\text{LiF})_n]^+$ 和络合物分子型 $(\text{LiF})_n^+$ 。由于锂有两种天然同位素,在 $n=13$ 时,只存在 $[\text{Li}(7)_7(6)_6\text{F}_{14}]^+$,强度为0.40;在 $n=14$ 时,只存在 $[\text{Li}(7)_7(6)_7\text{F}_{14}]^+$,强度为0.31,表明 $n=13$ 和 $n=14$ 分别是这两种离子簇的幻数。然而,在溅射氯化钠晶体时可产生 $(\text{NaCl})_n^+$ 、 $[\text{Na}(\text{NaCl})_n]^+$ 、 $[\text{Na}(\text{NaCl})_n\text{Cl}]^+$ 等离子簇,其强度可从SIMS质谱得到的。无论是离子簇 $[\text{Li}(\text{LiF})_n]^+$ 、 $[\text{Na}(\text{NaCl})_n]^+$,还是 $[(\text{NaCl})_n\text{Cl}]^+$,在 $n=13$ 处的强度增大,而 $n=14$ 处则消失,表明 $n=13$ 是这些离子簇幻数。在 $[\text{Cs}(\text{CsI})_n]^+$ 质谱上,可发现 $n=13$ 、22、37、和62等处呈峰值,对应于一些紧密束缚结构 $3 \times 3 \times 3$ 、 $3 \times 3 \times 5$ 、 $3 \times 5 \times 5$ 和 $5 \times 5 \times 5$,是最低表面能的微晶态。碱金属卤化物是二分量的离子键化合物,电子紧被束缚,团簇内聚力主要来自单极库仑力。在刚性近似下,离子间的相互作用可描述为经典的静电相互作用和量子“短程”相互作用

$$V_{ij} = \frac{Z_i Z_j}{r_{ij}} + A \exp(-r_{ij}/\rho) \quad (5)$$

离子簇的总能量是所有两体相互作用能量之和,然后取最小值,求得稳定构形。在给出的氯化钠团簇 $[\text{Na}(\text{NaCl})_n]^+$ 具有能量最小的结构图上,可以看出 $n=13$ 的结构接近NaCl晶格排列,最稳定。对于 $(\text{NaCl})_n^+$ 团簇,在 n 小时,六角形堆积在能量上有利;当 $n \geq 20$ 时,则呈较稳定的氯化钠晶体的原子排列。

在金属团簇中,原子的价电子与相邻原子键合形成分子轨道。因此,当 n 很小时,分子轨道理论应用于团簇的结构研究。采用Hückel近似,摒弃线性链模型,将哈密顿形式写成

$$H = \sum_i (\alpha_i + E_{ii}) |i\rangle \langle i| + \sum_{i,j} \beta_{ij} |i\rangle \langle j| \quad (6)$$

其中基矢 $|i\rangle$ 原子轨道, α_i 和 β_{ij} 是Hückel理论积分, E_{ii} 是原子能级。假定 $\{|i\rangle\}$ 是正交的,那么,经变分法可得Hückel方程

$$\{(E_{ii} - E)\delta_{ij} - \beta_{ij}\} \langle C_j | \rangle = 0 \quad (7)$$

解此Hückel矩阵,考虑所有可能的钠团簇的组构,选取能量最低的稳定结构的团簇,当 $n \leq 4$ 时,中性和带电团簇具有平面结构。在 $n=5$ 时,中性簇是平面梯形,带电簇 Na_5^+ 则是四面体加菱形。之后,中性簇和带电簇的稳定结构相差更大。一般说来,前者比后者的对称性要好,例如, Na_5 是五角锥体, Na_7 是双五角锥体,而 Na_4^+ 和 Na_7^+ 无明显对称形态。电离不仅对团簇形成有影响,而且对团簇最佳稳定结构也有影响。值得指出的是,由于快原子轰击(FAB)过程中存在同位素效应,溅射钠离子簇SIMS谱不呈奇偶性。当金属团簇稍大,可用凝胶球模型考察电子运动特性,得到与实验结果相符合的幻数。

超团簇的形成和分形凝聚在一定程度上反映团簇向大块材料转变过程中的基本特征,具有自相似性和标度不变性。载体团簇特性的研究不仅是制备高质量薄膜的基础,而且与晶体生长机制密切相关。用蒸发和惰性气体冷却法获得铜团簇,淀积在液氮温度冷却的非晶绝缘薄膜衬底上,进行透射电镜观察,得到团簇的显微像。经计算机图像处理,并用点数法和密度相关函数法得到各种聚集体的分维数。这些小团簇(又称初级团簇)直径为 $5.5 \pm 0.5 \text{ nm}$,分布不均匀,并按2、3、4、5、6、...分组结合成簇状(cluster-of-clusters)。当氢气压从0.5增加到 $10 \text{ T} \times 133.3 \text{ Pa}$ 时,这些簇状集合还会进一步聚集成平均尺寸为 47.0 nm 的超团簇。每个超团簇由数十个小团簇(或称初级团簇)组成的,最后,这些超团簇融合成尺寸为 $38.9 \pm 1.7 \text{ nm}$ 的球状大团簇(或称次级团簇),形成两种尺寸确定的团簇,这从系统自发凝聚过程中热力学性质来理解。Y. K. Huang观察到超微粒子从最初尺寸约 $70 \times 10^{-10} \text{ m}$,集成尺寸为 $100 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的过程。在一定的热力学条件下,系统中的粒子具有确定的尺寸。低于这个尺寸,自发凝聚过程很快,使粒子聚合,因为聚合这些粒子所需要的焓与凝聚过程中表面释放能量成比例,由于两球形粒子聚合成较大粒子的弛豫

时间与其半径的四次方成比例,因此,如果初粒子的尺寸已经很大,过程将很长,则意味着这个过程不会发生,如果粒子尺寸很小,表明这个进展很快,以致实验上无法测出。B. K. Teo 和 H. Zhang 把小团簇形成大团簇的过程与原子构成团簇类比,以 $n=13$ 具有廿面体结构的团簇作为构成更大团簇的单元,认为更大团簇是由于这种廿面体的小团簇以一定方式结合而成,而不再是一个一个原子垒加而成的。

团簇构成纳米固体的性质取决于界面的结构和特征,在隧道电流作用下,界面排序可由无规向有规转变。用团簇研制新材料是近年来团簇研究由基础向应用开拓的重要方面,特别是具有可贵性质的纳米结构材料。这是用蒸发和惰性气体冷凝制备尺寸为 $5\sim 15\text{nm}$ 的金属或化合物团簇,经原位压制成三维纳米结构的固态材料。它是一类新型固体,具有很高浓度的界面组元($10^{19}/\text{cm}^3$),因而其性质与化学成分相同的晶态和非晶态差别甚大。一般情况下,晶态和非晶态之间的性质仅相差 5% 左右,而纳米晶体与普通晶体性质可相差 50% 至 10^{21} 倍! 纳米铜的自扩散率是 $2 \times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$ 。纳米固体有 20%~50% 甚至更多的原子处在界面心,故也成为研究晶界物理学的新领域。已采用各种手段探索其界面结构以及如何控制其结构敏感性,主要结构特点是,晶界面平均原子密度(相对于晶态)下降 10%~30%; 界面区域的原子间距分布很宽。扫描隧道显微镜 (STM) 不仅具有极高的空间分辨率(横向分辨率好于 $1 \times 10^{-10}\text{m}$, 纵向分辨率好于 $0.1 \times 10^{-10}\text{m}$), 可直接给出固体表面原子图像和形貌,而且可进行团簇和原子操作以及表面修饰。用扫描隧道显微镜对纳米固体钯和铜进行实时观察,得到一些重要的新结果: (1) 纳米固体钯 (Pd) 的晶粒(团簇)呈球形或变形球,尺寸约为 10nm , 无序排列。相邻两晶粒间形成晶界,晶界是无规的,无择优取向。晶粒之间还存在着尺寸约几至 100nm 的空隙。(2) 为了研究纳米材料动力学性质,在恒定隧道电流时,对纳米钯样品表面的固定区域连续扫描,以便观察扫描过程中表面结构随扫描时间的变化。原样纳米钯表面 STM 图像,纳米晶粒是随机分布的并有一些尺寸不等的空隙。经过 10min 扫描后,空隙附近的晶粒开始运动,空隙变大变深。进一步扫描,纳米钯表面测量区域内几乎所有晶粒开始快速运动,剧烈地改变着晶粒边界。再扫描 5min 得到的 STM 图,清晰地显示晶界呈蚯蚓式运动。一些晶粒结成链状簇,而链状簇之间形成宽 20nm , 长 30nm 左右的沟。(3) 纳米钯材料经过上述重构后晶粒已结成链状,平行排列,晶界有序化。(4) 纳米固体还存在一些超结构,即由数十个小团簇组成的超团簇。经过扫描电流的作用,这些超团簇聚合并出现趋向排布,呈有序结构。在纳米铜晶中也观察到类似的晶界移动和结构重排现象,表明在隧道电流作用下,纳米固体中团簇可在远低于熔点温度的情况下做各向异性运动。

众所周知,完整晶体具有最低能态,而晶界以及空位空隙和位错等缺陷处有多余体积,产生非平衡态。从晶界状态方程出发,可以得到晶界能与剩余体积成比例。由于纳米结构固体中晶界和缺陷浓度高(在团簇尺寸为 $5\sim 10\text{nm}$ 时晶界浓度高达 $10^{19}/\text{cm}^2$), 故纳米材料中多余材料能量相当高。而晶界行为与其热力学性质,诸如多余能量、多余焓和多余熵以及体膜量关系密切。例如,纳米钯(晶粒尺寸为 6nm)比普通多晶钯的比热增强 29% (250K) 至 53% (300K)。在 300K 时,纳米钯的多余熵是钯晶熔融熵的两倍。因此,在纳米固体中,自由能的减少少给晶界提供大的驱动力,导致其运动。在空隙和界面附近,原子间相互作用力处于不平衡状态,原子是弛豫的。具有高隧道电流密度(可达 $10^6\text{A}/\text{cm}^2$) 的 STM 针尖激发引起晶界运动,空隙附近首先受到扰动,以减少多余能量。随着空隙附近原子弛豫运动的加剧,破坏了晶界其它部分力的平衡,从而进一步触发原子移动,直至晶粒间原子相互作用力建立新的平衡。通过空位、空隙和晶界在移动过程中重新组合,产生一个新的能量更低的“紧边界”。这种稳定构形包含许多紧密链状结构,并为空位组成的沟状界所分开,使纳米晶体成为具有趋向排布的重构表面。由团簇构成纳米固体晶界

运动和结构重排现象的研究,不仅表明在一定条件下固液界面效应起着决定性作用,控制着结构敏感性质,而且为按照人们意愿修饰和改变纳米材料的结构和性质提供了新的途径。

团簇的科学研究正处在蓬勃发展的阶段,有待阐明的问题很多。例如,各种不同元素的团簇生长而转变到大块材料的关节点; 关于团簇壳层结构的最大尺寸; 一些过渡元素以及复杂化合物团簇的结构和特性; 实验上获得足够产额、元素和尺寸都确定的团簇束流,以便深入研究团簇结构与声光电磁等异常性质的关系。总之,团簇和团簇构成材料的研究涉及从基础到应用相当广泛的科学领域。一方面,这个迅速发展的新型学科的应用前景是十分广阔和非常诱人的; 另一方面,在探索团簇应用中所产生的新思想肯定会加速该学科的成熟和导致重要材料的诞生。

(南京大学物理系博士生导师 毛广厚撰)

自旋回波 (SEFT) 是指在核磁共振实验中给核自旋系统加上几个频率为 $\omega_0 = \gamma H_0$ 的射频脉冲,在脉冲之间和脉冲之后观察到的核自旋系统的磁化矢量的重复信号。

1950 年, E. L. Hahn 首先提出并完成了自旋回波实验,并用自旋回波测量核自旋系统的横向弛豫时间 T_2 , 所用脉冲序列是 $90^\circ, \tau, 180^\circ$ 。其原理如下: 先给自旋体系在 X' 轴上加上 90° 脉冲, 此时磁化矢量倒向 Y' 轴。由于存在自旋-自旋弛豫和磁场不均匀性, 样品中各部分所经受的磁场就略有不同, 因而它们的共振频率也略有不同。所以在旋转坐标系中, 磁化矢量开始扇形散开并失去相位相干。如果核 a 所处的局部磁场略高于平均磁场值, 则其进动频率会比多数核稍快一些, 若核 B 所处的局部磁场略低于平均磁场值, 则其进动频率就会慢一些。因此经过时间 τ , 磁场的均匀性就造成磁化矢量的扇形展开。如果此时加上 180° 脉冲, 磁化矢量就会绕 X' 轴转 180° , 此时慢核反而走在宏观磁化矢量前面, 而快核 a 反而落在宏观磁化矢量后面。但快者必竟快, 经过时间 τ 即 $(t-2\tau)$, 它们就会重新聚集在 $-Y'$ 轴上, 这就是自旋回波。回波的幅度与磁化矢量在 Y' 轴的分量 M_y' 成正比, 可用 $M_y'(t) = M_0 e^{-\frac{t}{T_2}}$ 表述, 此处 T_2 是自然的横向弛豫时间。回波的幅度与加上 180° 脉冲的时间 τ 有关。如果多次重复 $90^\circ, \tau, 180^\circ$ 脉冲序列, 而每次将 τ 值改变一些, 可得到一系列自旋回波。回波幅度的包络线就是核自旋系统的自然弛豫时间 T_2 所决定的指数衰减曲线, 由此经过数学处理便可求得核自旋系统的弛豫时间 T_2 (即 T_2')。

自旋回波消除了磁场不均匀性的影响, 其幅度只与自旋弛豫时间有关。因此它被广泛用于测量核自旋系统弛豫时间, 同时它也是产生 J 谱的基础。

1954 年卡尔 (H. Y. Carr) 和帕塞尔 (E. M. Purcell) 提出用多脉冲序列法来测 T_2 , 也叫 CP 方法, 其脉冲序列是 $90^\circ, \tau, 180^\circ, 2\tau, 180^\circ, 2\tau, \dots$ 。这种方法的优点是有一个脉冲序列就可得到 N 个自旋回波信号而不用将 E. L. Hahn 的脉冲序列重复 N 次, 因此节约了实验时间, 同时大大减少了分子扩散对测 T_2 的影响, 如果时间间隔 τ 选择得足够小, 实际上就消除了分子扩散对测量结果的影响。

用上述方法测量 T_2 不太大的样品是比较合适的, 对于 T_2 较大的样品, 用上述 CP 方法会带来很大误差。其原因是: 样品中的射频场 H_1 的非均匀性不易控制, 因此会影响脉冲精度。特别是 180° 脉冲如果不精确, 多次重复使用不精确的 180° 脉冲, 会造成误差积累, 从而影响 T_2 的测量精度。为了克服 CP 方法的这个缺点, 可以使用交替相位多脉冲序列法。其脉冲序列是 $90^\circ, \tau, 180^\circ, x', 2\tau, 180^\circ, x', 2\tau, \dots$ 。这种脉冲序列虽然可以克服 180° 脉冲不精确带来的误差, 但要交替变换 180° 脉冲的相位是很麻烦的, 也不易实现。

1958 年, 梅吉姆 (S. Meiboom) 和吉尔 (D. Gill) 为了克服上述方法的困难, 提出了 CP 方法的改进方法, 这就是所谓 CPMG 方法。这种方法使用 $90^\circ, \tau, 180^\circ, y', 2\tau, 180^\circ, y', 2\tau, \dots$ 脉冲序列, 不必交替变换 180° 脉冲的相位而且克服了 180° 脉冲不精确造成

的误差积累,是一种比较理想的方法,在测量 T_2 方面得到了广泛的应用。

1971年,T. C. Farrar和E. D. becker在他们合著的《Pulse and Fourier Transfonance NMR》一文中叙述旋转坐标系中横向弛豫时间 $T_{2\rho}$ 的测量时,又介绍了旋转坐标中的自旋回波法,以及旋转坐标系中改进的自旋回波法来消除射频场 H_1 的非均匀性的影响。这种方法在测量复杂分子中原子核的 T_2 值及发生化学交换的系统中的 T_2 值方面得到了普遍采用。

在弛豫时间的测量方面,自旋回波法除了在上述的脉冲序列中应用外,在核自旋的纵向弛豫时间(自旋—晶格弛豫) T_1 的测量中也得到了应用。对复杂自旋体系中各条谱线单独的横向弛豫时间 T_2 的测量也用了自旋回波方法。

自旋回波方法的另一重要用途是产生和形成J谱。J谱的实质是在于自旋回波受到自旋—自旋偶合所调制。1952年,Hahn和Maxwell两人首先指出当两组相互偶合核都受到重新聚焦脉冲的影响时,自旋回波被同核偶合所调制。1971年,R. Freeman和H. D. W. hill在实验中实现了自旋回波的被调制。在无同核偶合的自旋体系中进行自旋回波实验时,在 $t=2\tau$ 时刻磁化矢量集中起来形成一个自旋回波。但对有同核偶合的体系,在 $t=2\tau$ 时刻,磁化矢量不是聚集起来形成一个回波,而是分别在不同位置集中起来形成多个回波,最简单的同核偶合体系也形成两个回波。回波的个数等于自旋核由于其它核偶合而产生的谱线分裂的条数。这种由几个回波代替一个回波的现象称为自旋回波的被调制。鉴于这种调制是由于偶合而产生,回波的幅度与偶合常数 J 有关,因此又叫 J 调制。对这些回波进行处理所得到的波谱称为 J 谱。 J 谱是测量微小的自旋—自旋偶合常数的非常精确的工具,它可以把化学位移与偶合常数区分开来,同时又是在磁场均匀性较差的情况下提高分辨率的有效手段。它开辟了应用大样品管来提高灵敏度的道路,是一项最有用的新技术。

1976年,博登豪斯(G. Bodenhausen)等人把 J 谱学与二维傅里叶变换核谱学结合起来,提出了二维 J 谱学,其基本方法是将有偶合情况下的核系统的自旋回波实验划分为3个时间周期。规定 $t < 0$ 时是预备期。当 $t=0$ 时加上 90° 脉冲,使核系统产生横向磁化强度分量。当 $t=\tau$ 时加上 180° 脉冲,使核自旋翻转, $t=2\tau$ 时产生回波。在回波顶点出现的时刻之前称为发展期,定为 t_1 ,即 t_1 是 $0-2\tau$ 期间。而把 $t > t_1$ 的时间称为检测期,定为 t_2 。这样同样是从回波的顶点开始,只取其后半部分,这相当于一个FID信号,它是 t_2 的时间域函数。重复这个实验,每次改变 t_1 的长度,就可以获得一系列时间域的FID信号,这些信号不仅是 t_2 的函数,也是 t_1 的函数。这样便获得了二维时间域函数 $S(t_1, t_2)$,对 $S(t_1, t_2)$ 进行双重傅里叶变换就得到二维 J 谱。

异核偶合体系二维 J 谱的实验方式与同核的情况有些不同。因为异核的共振频率相差很远,观测核的 180° 脉冲虽然可以使观测核的磁化矢量实现镜像反射,但不能使偶合核的自旋状态实现翻转,因而观测核的回波不存在 J 调制。对异核偶合体系可以用门控去偶方式或质子反转方式来获得异核二维 J 谱。

20世纪80年代,不少波谱工作者以自旋回波的调制为基础提出了不少十分有意义的脉冲序列,使二维 J 谱得到了飞速发展。在异核偶合 J 谱中出现了选择性质子反转法和半选择性质子反转法,分别可以获得高分辨的远程偶合谱及只含有单键偶合的二维 J 谱,将单键偶合和远程偶合可以区分开来,从中可以精确测定 $^nJ_{CH}(n > 1)$,这给分子的构象研究和谱线的归属提供了十分有用的信息。在同核二维 J 谱中,用 J 调制的自旋回波加上先进的计算机处理技术,可以分别在 F_1 维和 F_2 维只出现 J 偶合与化学位移,实现了化学位移和 J 偶合的分解。这是同核二维 J 谱的很大成功,它相当有效地克服了复杂偶合关系引起的谱线的重迭和拥挤,对解析复杂分子的氢谱具有十分重要的意义。

(陕西师范大学于富斌工程师、张新怀工程师、傅克德教授撰;王天真审)

超微颗粒的磁性 magnetism of ultrafine particles

超微颗粒的尺度介于原子、分子团簇与块状物体之间,通常泛指尺度约为 $1-100\text{nm}$ 之间的微小颗粒。“超微”的含意并非单纯指尺寸微小,还有随着颗粒尺寸的减小,量的变化在一定条件下会引起理化性质的质变,例如磁性超微颗粒处于单畴临界尺寸时会呈现矫顽力的极大值,当进一步减小尺寸时又会使矫顽力趋于零而呈现超顺磁性。从功能材料的角度出发,当颗粒尺寸减小到一定临界尺寸时,声、光、电、磁、热以及催化等性质会呈现出与大块物体质的差异,这标志着颗粒尺寸对某一性质而言已进入超微颗粒的范畴。“超”的含义则表明它已具有与大块物体显著不同的特性。超微颗粒与原子团簇之间目前尚无严格的分界线,广义的超微颗粒亦包含原子团簇,反之原子团簇的尺度已扩展到超微颗粒的范围。原子团簇不具有平移对称性,仅具有点群对称性,通常尺度为 1nm 之内,而超微颗粒则具有平移对称性,也许可作为二者的分界线。

20世纪30年代,人们从磁畴理论出发,预言颗粒尺寸小于其临界尺寸时会呈现磁单畴性,Kittel曾设想了各种单畴体的磁构型,对单畴临界尺寸进行了粗略的估算,单畴尺寸通常为 10nm 量级。磁畴理论对铁磁材料宏观磁性与磁化过程的了解与解释起了重要的推动作用。50年代人们从微磁学的理论出发更为严格地处理了磁单畴的问题。当磁性颗粒处于单畴状态时,磁壁将消失,反磁化过程将以磁化矢量转动方式进行,从而呈现出由磁各向异性(磁晶各向异性,形状各向异性)所决定的高矫顽力。在理论指导下,60年代人们热衷于研究高性能的磁粉水磁体。

当磁性颗粒尺寸进一步减小时,与体积成正比例的磁晶各向异性亦随之减小,当环境的热能与其相当或更大时,颗粒内的磁化矢量在热扰动下将作混乱的无规取向,从而导致剩磁与矫顽力均为零的超顺磁性状态。此时颗粒聚集体的特性十分类似于无相互作用的磁性原子集合体的顺磁性,磁化强度随磁场、温度的变化同样服从朗之万理论,无磁滞现象。所不同的是,颗粒中通常含有 10^5 量级的原子数,所以冠以“超”字以示区别。对超顺磁性的研究具有实际应用的价值,30年代人们利用 Fe_3O_4 胶体用来观察磁畴结构,60年代美国研制成磁性液体,目前已成为磁性材料中别具风格的新分支,美、英、日、俄等国已批量生产,中国亦有不少单位进行研制与少量生产,目前已成功地应用于旋转轴密封如真空、充压、防尘、封油等密封器件中以及各类阻尼器件、润滑、研磨、扬声器等。

磁记录是信息存储、处理的重要手段,自从1898年发明钢丝录音以来,发展十分迅速。磁记录发展的总趋势是大容量、高密度、高速度、低价格。由于磁记录密度近似地与矫顽力的平方根成正比,为了提高记录密度必须提高记录介质的矫顽力。此外,磁记录介质的本征信噪比与磁层中单位体积的颗粒数的平方根成正比,减小颗粒尺寸有利于提高颗粒在磁层中的堆积密度。因此颗粒型磁记录介质发展的方向是颗粒细化化。颗粒的细化化不仅可以获得高矫顽力,而且还有利于获得均匀的薄磁层、光滑的表面和高的信噪比。40年代,商业上首先用 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁粉作为磁记录介质,通常 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 颗粒呈针形,长轴约为 $0.5\mu\text{m}$,短轴比约为 $10:1$,经过50多年的改进,目前颗粒尺寸已减少到 $0.2\mu\text{m}$,每克磁粉可含2500兆个微颗粒,使视频信噪比提高 $5-6\text{dB}$,近年来采用在惰性气体中进行蒸发冷凝的物理方法,制成尺寸约为 20nm 的超微金属(合金)球状颗粒,它比 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 类型磁粉具有更好的磁特性。80年代起,在垂直磁记录的推动下,以Ti、Co、Sn等离子代换的六角晶系钐铁氧体备受人们重视,用于磁记录的典型颗粒尺寸直径为 50nm ,厚度为 20nm ,其高频特性优于 $\text{Co}-\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 磁粉,化学稳定性优于金属磁粉,现已成为新型的磁记录介质。

除小尺寸效应外,对超微颗粒有时还必须考虑量子效应。30年代已有人提出了量子尺寸效应的物理概念,60年代初期,日本久保首先从理论上较为严格地处理了量子尺寸效应。理论上表明,当颗粒尺寸小到与一些物理特性长度,例如电磁波波长、传导

电子波长、超导体的相干长度等相当或更小时,通常准连续的金属能带将会成为分立的能级,假如平均能级间距与热能、静电能、静磁能、超导能隙以及光子等能量相当或更大时,颗粒系统将呈现宏观物体所不具有的一系列新效应。例如,超微颗粒的磁化率、比热与颗粒中所含的电子奇偶数有关,光谱线产生蓝移,导电金属可转变为电绝缘体等现象。量子尺寸效应有力地促进了超微颗粒的研究,而成为超微颗粒研究史上的重要里程碑。

1959年,Bean与Livingston曾提出宏观量子隧道效应的概念,用来定性地解释超细镍微颗粒为什么在低温会继续保持超顺磁性。80年代有人从理论上计算了单畴微颗粒磁化强度通过势垒的隧道几率。90年代曾采用扫描隧道显微镜技术控制纳米尺度磁性超微颗粒的沉积,用量子相干磁强计研究低温条件下微颗粒磁化率对频率的依赖性,实验结果表明在低温确实存在磁的宏观量子隧道效应。量子尺寸效应、隧道效应将会是未来微电子器件的基础,或者它确立了现存微电子器件进一步微型化的极限。

超微颗粒的比表面积与颗粒直径成反比例,随着颗粒尺寸的减少,表面原子的比例将显著地增加,表面效应将不容忽略。50年代人们就注意到表面原子具有比体内更低的对称性,因此将会存在表面磁各向异性。70年代人们研究了铁氧体超微颗粒表面自旋钉扎效应,不同的表面吸附物可以显著地改变超微颗粒的表面各向异性,实验表明表面磁结构不同于体内,可以生成非共线的磁结构,例如 NiFe_2O_4 微颗粒表面包覆一层表面活性剂油酸后,发现表面自旋被强烈地钉扎,在液氮温度下,强磁场下仅磁化到75%。80年代以后人们开始研究金属磁性超微颗粒的表面(界面)效应,以及它对磁化过程的影响。

目前国际上对超微颗粒磁性研究的热点是小尺寸效应、表面效应以及量子效应,其应用的背景是高密度磁记录材料、磁性液体、微粉永磁、吸波材料以及磁性超微颗粒在催化领域中的应用。国内将“纳米材料科学”列入“八五”攀登计划,磁性纳米材料的研究则是其中主要内容之一。此外对原子团簇磁性的研究涉及到基本磁性与其磁性的来源,亦为国际上引人注目的课题。

参考文献

- 1 Wohlfarth E P. Phys Lett, 70A 1979, 489
- 2 Halperin W P. Rev Mod Phys, 1986, 58, 533
- 3 Chudnovsky E M, Gunther L. Phys Rev Lett, 1988, 60, 661
- 4 Khanna S N, Linderoth S. Phys Rev Lett, 1991, 67, 742
- 5 You-wen Du, et al. J Appl Phys, 1991, 70, 5903
- 6 都有为. 物理学进展, 1993, 13, 255

(南京大学博士生导师都有为教授撰)

核磁双共振 nuclear magnetic double resonance

又称双照射实验。它是1954年布洛赫(Bloch)为了解决一般核磁共振谱中谱线的严重拥挤、重叠等难以解析的困难而提出的核磁共振实验方法。核磁双共振是指在同一静磁场 H_0 样品中的两种原子核或原子核集团同时发生共振的现象。即在样品中除了加上第1射频场 H_1 之外,还必须在垂直于 H_0 的方向上加上第2射频场 H_2 。两个射频场的频率 ω_1, ω_2 分别满足样品中相互耦合的两种原子核在静磁场 H_0 中的共振条件,这样才可以使两种原子核同时发生共振。不论是连续波质子谱,还是脉冲傅里叶变换NMR谱,实现双共振的原理是一致的,只是由于仪器的结构不同在个别实验技术上略有差异而已。

核磁双共振按照不同的参数变化有不同的分类。按照照射核和观察核是否相同进行分类,可以有“同核双共振”和“异核双共振”;按照第2射频场 H_2 的频率特性分,可以有单相干射频场和无规射频场;按照第2射频场的照射方式分,可以有连续照射方式,在FT-NMR中常用的有门控照射方式。按照第2射频场的功率分类,可有以下几种:当 $\gamma H_2 > J$ 时,可以进行自旋去偶;当 $\gamma H_2 \approx J$ 时,可以进行选择性去偶;当 $\gamma H_2 \approx \Delta \frac{1}{2}$ 时,可以进行自

旋微扰;当 $\gamma H_2 < \Delta \frac{1}{2}$ 时,发生核间双共振或广义“NOE效应”。

核磁双共振技术可以在确定一些隐藏的谱线、简化图谱、确定化学位移、确定偶合常数的相对符号、确定化合物的能级图、提高灵敏度等方面起到非常重要的作用,是确定化合物结构的得力工具之一。

在核磁双共振技术的发展史上,20世纪60年代的工作奠定了基础,从理论和实验两方面探讨和研究了核磁双共振的一些基本问题。70年代双共振技术得到了充分的发展和广泛的应用。特别是伴随着脉冲傅里叶变换技术的引入和电子计算机技术在核磁共振波谱学中的应用,使得核磁双共振技术在深度和广度方面都取得飞跃性的进展。

1962年W. A. Anderson和R. Freeman研究了第2射频场对高分辨核磁共振谱的影响,对任意两种核即同核($\delta \gg J$ 的情况)和异核的双共振实验从理论上进行了阐述。根据第2射频场功率强弱程度的不同,分别讨论了第2射频场的作用和引起谱线的变化。并以AX体系为例用经典图像对去偶现象进行了解释,同时指出:仅仅在弱的偶合体系中,才可以实现完全去偶;在 AX_m 体系预期将有残余裂分;另外,去偶实验中观测核的共振频率具有Bloch-Siegert位移,这是准确测定化学位移时必须考虑的;去偶场会影响谱线的强度,会产生核的Overhauser增值,不宜用去偶谱推导定量结果。

1962年7月,W. A. Anderson和R. Freeman又详细研究了弱干扰场在核磁双共振中的应用,给出了早期的自旋微扰实验模型。研究表明,当干扰场 H_2 的强度远小于自旋去偶的值(即 $\gamma H_2 \ll J$)时,受干扰的谱线所关联的谱线发生裂分。其规律是:对前进式跃迁,谱线强度增加,但裂分较差;对反身式跃迁,谱线的强度减小,但裂分较好。只有干扰场的频率严格对准被干扰谱线的频率,微扰所产生的双峰才严格与原来谱线的位置对称。利用此法可以建立能级图,并推断偶合常数的相对符号。

1963年,J. K. Baldeschwieler和E. D. Randall全面研究了核磁双共振的化学应用,系统总结了前期核磁双共振的研究成果,用量子力学的观点对核磁双共振的理论进行了详尽的阐述。对核磁双共振的应用进行了系统归类,指出核磁双共振可以进行自旋去偶、测量化学位移、发现隐藏的谱线、测定偶合常数和弛豫时间。并列举了10余种双共振实验,对其特定的用途进行了深入的阐述。

1966年,R. R. Ernst研究了随机噪声去偶。从理论和实验两个方面探讨了用强的随机噪声照射核自旋系统进行异核去偶的问题。研究表明,用一个随机噪声调制的干扰场照射核自旋系统,使其功率覆盖整个谱宽范围,预期可以消除所有的裂分,特别是偶合较弱的自旋体系,去偶效果十分满意。而对于很窄范围内的强的偶合,则可以用一个强度较大的调制的相干频率照射,可以获得完全去偶,为以后发展起来的宽带去偶和选择照射技术奠定了基础。

1972年,K. G. R. Pachler在Ernst工作的基础上,研究了弱偶合体系中的偏共振现象,解决了偏共振实验中的一些基本问题。1973年J. W. Ensley又将偏共振技术应用到较强的偶合体系,使偏共振技术得到了广泛的应用。由于偏共振技术既明显缩短了裂分间距以消除谱线之间的混合交叉和重叠,又保留了偶合信息,因而可以用来确定谱线归属。特别优越的是可以直接根据峰形来判断4类不同的碳(即 $\text{CH}_3, \text{CH}_2, \text{CH}, \text{C}$)信号。

1971年F. W. Van Deursen研究了连续波核磁共振中的核间双共振(INDOR),并首先应用于异核双共振中。以AX体系为例,总结了INDOR实验的有关规律。实验表明,被监测的谱线与被干扰谱线无共同能级时,无INDOR信号,有共同能级时有INDOR信号;被监测谱线与被干扰谱线构成前进式时,INDOR信号为正;构成反射式时,INDOR信号为负。在同核情况下,INDOR信号为正常跃迁的一半;在异核的情况下,最大相对强度变化接近 γ_1/γ_2 (γ_1 是观测核, γ_2 是照射核),INDOR实验可用于检

测隐藏的谱线,直接测定偶合常数。对解析谱线严重重叠的弱偶合谱时非常有用。正因为如此,J. Feeney 和 P. Partington 于 1973 年的 FT 方式中,采用从双共振谱中扣除相同条件下($\gamma H_2 \approx 0.1 \sim 0.3 H_2$)的单共振谱的方法,得到了类似于连续波方式中的 IDNPR 实验的图谱,即所谓“赝 INDOOR”实验,从而弥补了 FT-NMR 中无法进行 INDOOR 实验的缺陷。

1971~1975 年,K. G. R. Pachler 和 P. L. Wesels 等多名波谱工作者,先后多次进行了“选择性粒子数反转”(简称 SPI)实验,这是比 INDOOR 更有用的技术。其实验关键是采用选择性 π 脉冲,使某一跃迁的粒子数反转,用非选择的 H_1 脉冲进行采样。SPI 实验比 INDOOR 获得更高的灵敏度,对观察天然丰度低的核,如碳、氮等十分有用,它可用于谱线归属,测定偶合常数的相对符号,检测隐藏的谱线,测量选择性质子的弛豫时间。

在核磁双共振中,值得提及的另一类重要技术是核 Overhauser 效应—NOE。Overhauser 效应是欧沃豪斯本人在 1953 年首先观察到的,它是电子与核之间的效应,NOE 是核与核之间的效应,其原理同电子与核之间的效应一样。由于 NOE 效应在核磁双共振中普遍存在,因此从 50 年代后期到 70 年代后期,许多科学家都从不同角度研究了 NOE 效应,并由此发展起许多有用的实验技术。这一时期的研究工作,归纳起来有两个方面。其一,同核 NOE 实验在立体化学结构测定中是非常有意义的,选择性的测量同核 NOE 效应可以确定化合物的空间结构;异核 NOE 效应特别适宜于用来提高天然丰度核的灵敏度,为低灵敏度核的研究打开了一条通道。其二,利用 NOE 效应发展起来的多种实验技术,如门控去偶技术、反门控去偶技术、动态 Overhauser 实验技术、各种极化转移技术等,得到了广泛的应用,为化合物结构研究提供了更多有效的途径和手段。

进入 80 年代以后,脉冲傅里叶变换波谱学的进一步发展和二维谱的出现,数以千计的脉冲序列和各种二维谱,无不用到核磁双共振技术。随着科学技术的进步,在核磁双共振的基础上核磁三共振技术已应运而生。可以预料,核磁双共振、多共振技术,在核磁共振波谱研究领域将会广泛地应用并发挥越来越大的效力。

参考文献

- 1 Anderson W A, Freeman R. J Chem Phys, 1962, 37: 85
- 2 Freeman R, Anderson W A. J Chem Phys, 1962, 37: 2053
- 3 Baldeschwieler J D, Randall E D. Chem Rev, 1963, 63
- 4 Ernst R R. J Chem Phys, 1966, 45: 3845

(陕西师范大学于富斌工程师、张新怀工程师、傅克德教授撰;王天真审)

位场波谱分析 又称“重磁位场频率域分析”。近 20 多年来,随着电子计算机和数据处理技术的迅速发展和普及,用波谱分析方法对重磁异常进行处理和解释,在理论和实践两个方面都取得了令人信服的成就,促使其成为一个新兴分支学科。

从 1807 年傅里叶级数理论的建立,谱分析便迅速为各个科学领域所利用。20 世纪 40 年代以来,随着电子计算机的出现和应用,为谱分析从理论走向实际提供条件。1965 年美国 Cooley 与 Tukey 提出快速傅里叶变换算法,即 FFT 算法,并编制出计算程序。这种算法使得原来与 N^2 成比例的计算量变成 $N \log_2 N$, 因此 N 很大时,计算速度比原先有成万倍的提高。而且计算精度高、计算过程稳定。

1958 年,迪安(Dean)开始利用现代波谱分析方法对重磁位场进行研究 and 解释,论证了各种位场转换的波谱特性。1962 年,前苏联索洛维也夫(Соловьев)讨论了垂直磁化条件下二维磁异常波谱的一般表达式,推导了板状体异常的波谱公式,提出了相应的解释方法。这时期前苏联出版的供高等学校用的重磁勘探教科书中已有专门一章介绍重磁异常的波谱分析方法。1965 年奥迪加德(Odegard)讨论了水平圆柱体、球及垂直断层面上重磁异常的波谱公式,并提出用指数分解的解释方法。1966 年斯佩克特

(Spector)等讨论了点极、单线极及有限长偶极总磁场异常的能谱公式,研究了磁化方向、磁源体尺寸及埋深的影响,并首次提出磁异常的谱函数可表示为 3 个因子的乘积。同年,布哈塔查里亚(Bhattacharyya)推导了直角棱柱体总磁场异常的波谱公式。1967 年富勒(Fuller)详细讨论了垂向二次导数、向上向下延拓的种种二维网格算子的波数响应,从波谱分析的角度评价了以往在空间域导出的各种二维网格算子的优劣。1968 年舍马(Sharma)讨论了任意角度二维断层重力异常波谱及其解释方法。

70 年代对较复杂形体的重磁位场波谱分析研究有了进一步发展。1973 年拉奥(Rao)研究了二维棱柱体重力异常的波谱函数及其解释。帕克(Parker)在 1972~1974 年提出快速计算物性界面位场异常的约束正、反演公式,国内外学者都曾采用,并在其基础上有所发展。从理论上首先阐明了位场波谱意义的是法国著名的地球物理学家巴兰洛夫(Baranov),他在 1975 年发表的《应用地球物理中的位场及其变换》一书中,论述了拉普拉斯方程的解和位场波谱之间的深刻联系。1975 年布哈塔查里亚提出了多边形截面二维物体重磁异常的波谱函数及其解释方法。1977 年布希马森卡拉姆(Bhumasancaram)等人推导了二维倾斜板重力异常的波谱公式,并提出对各种规则二维物体都适用的“标准化”解释方法。1978 年皮德松(Pederson)推导了二维、似二维及三维任意多面体的位场波谱公式。

应用波谱分析方法研究重磁异常的一个主要困难是剖面长度有限(测区有限),里甘(Regan)1976 年讨论了用各种滤波窗克服剖面有限影响的可能性。柯德尔(Cordell, 1982)结合理论模型分析提出了有限长剖面的空间域等效源外推法及波数域旋尾滤波法。里卡德(Ricard)1988 年提出坐标旋转法,黄国祥等(1989)提出卡尔曼滤波法。

80 年代以来除继续发展重磁异常波谱分析的正反演理论外,更多地注意起实际应用。1980 年巴布(Babu)讨论了二维不对称三角棱柱体总磁场异常波谱及其解释。皮德松 1985 年讨论了椭球体重磁异常波谱公式及其解释。西尔瓦(Silva, 1986)提出用等效源法克服低纬度航磁化极的不稳定性。格伦瑟(Granser, 1987)推导了密度随深度成指数变化时的三维重力常波谱函数及其解释。这一时期西方各国将位场波谱分析方法广泛用于航磁异常解释、反演磁性界面深度、居里等温面(磁性体下界面)深度、视磁化强度填图以及沉积盆地重力异常反演、莫霍面反演等。

在中国,重磁异常波谱分析的研究工作虽起步较晚,但在理论上还是在应用上都发展很快,取得不少新成果。70 年代末以来,在重磁异常波谱基本关系式及正反演方法方面有杨文采、侯重初等人的工作。在滤波变换方面有王继伦、侯重初等人的工作。在介绍国外有关情况的基础上,特别是利用位场的调和性,重力位与磁位之间的泊松公式以及重磁异常之间的内在联系时,系统归纳了前人获得的各种波谱公式,总结了重磁异常波谱的基本规律。1987 年程方道、黄国祥合著的《重磁位场波谱理论及其应用》一书是这方面的第一本专著,对有关问题作了系统论述。程方道用波谱分析方法讨论了位场波数域变换处理中的随机误差传递问题,得出了理论上及实际上有意义的结果。与此同时,重磁异常波谱分析方法在中国的航磁异常解释、磁性界面反演、居里等温面反演、视磁化强度填图,区域重力反演,莫霍面反演等方面均广泛应用。

重磁位场波谱分析的研究工作,正沿着以下几个方向进行探索和发展:(1)进一步研究和克服波谱分析数值计算中产生的误差,特别是剖面有限长所产生的误差。(2)继续完善和充实波数域重磁异常处理系统。(3)发展和建立波数域重磁异常解释系统。

参考文献

- 1 Parker R L, Huestis S P. J. G. R. 1974, 79(11): 1587~1592
- 2 Silva J B C. Geophysics, 1986, 51(2): 369~382
- 3 Cheng Fangdao. 中南矿冶学院学报, 1986, 4: 10~16
- 4 程方道, 黄国祥. 重磁位场波谱理论及其应用. 长沙: 中南工业

大学出版社,1987

5 Granser. Geophys. Prosp, 1987, 35(9):1030~1041

6 侯重初,杨全成.物探化探计算技术,12(3):191~194

(中南工业大学程方道教授撰)

介电谱研究

介电谱覆盖 $10^{-6} \sim 10^8 \text{Hz}$ 共达 14 个数量级的广阔频段,是研究分子结构、极性固体中空间电荷运动、弛豫过程和介电谱规律的最有效方法之一。由于测量技术的改进和新效应的发现,传统的概念正面临着许多新的发展。物质的复介电常数 $\epsilon(f) = \epsilon'(f) - i\epsilon''(f)$ 随频率 f 的变化关系在红外和更高频段表现为弱阻尼(共振)型,而在射频以下一般为强阻尼型。德拜把强阻尼型称为弛豫型。按照热力学的严格定义:一个宏观系统由于周围环境的变化或经受了—个外加作用变成非热平衡态,系统内部的微观运动可使它回复到热平衡态;由非热平衡态过渡到新的热平衡态的整个过程称为弛豫。按照定义,物质和外加作用发生共振时,弛豫过程不仅存在而且起着十分重要的作用。弛豫效应决定着共振色散和吸收的线型和线宽。

在热平衡下,系统的微观状态按一定的统计分布,例如按玻耳兹曼分布。在光频电磁场作用下,介质中出现光激发,跃迁到高能态的电子通过热跃迁或受激辐射回到低能态,弛豫时间被称为电子停留在高能态的寿命。在红外辐射作用下晶格振动吸收其能量出现某种模式过多的声子,这些非平衡声子通过与其分子交换能量而恢复热平衡声子分布,非平衡声子寿命就是弛豫时间。以上两种弛豫过程规律决定于微观相互作用,因为微观相互作用通常比宏观作用强得多,因此系统宏观条件对弛豫时间的影响可以忽略。在射频和更低频段,介电谱出现另一种情况:系统中存在的局域电偶极矩的取向运动和束缚空间电荷的位移运动规律,决定着弛豫过程。高分子聚合中存在侧基键提供的局域电矩。晶体缺陷和非晶固体中的深能级常束缚着一些空间电荷。它们在外电场作用下转至新的取向或位移至其它束缚位置,以适应于较低的能量状态。当外场除去后,它们要改变取向或束缚位置,而达到新的平衡态混乱分布,通常都要靠积累一定的热运动起伏能量以跨越某个位垒。因此,这种弛豫时间较长并容易受系统所处的环境条件的影响。一般地介电谱研究射频和更低频率(不高于 10^8Hz 频段)的弛豫过程,从中可获得有关高分子的侧基键和固体中的束缚空间电荷运动规律的大量信息。这是近代研究这类物质结构的最有效手段之一。

频域参数 早期,技术方面倾向于将物性参数描述为频率的函数以便于应用,这称为频域方法 $\epsilon'(f)$ 和 $\epsilon''(f)$ 就是介电谱中的频频参数,代表复介电常数的实部和虚部。1899 年 H. Pellat 归纳了早期的经验规律:

$$\frac{\epsilon(\omega) - \epsilon_h}{\epsilon_s - \epsilon_h} = \frac{1}{1 + i\omega\tau} \quad (\epsilon_s = \sqrt{-1}, \omega = 2\pi f) \quad (1)$$

其中 τ 称为介电弛豫时间, ϵ_h 为高频介电常数, ϵ_s 为静态介电常数, τ 的意义为在介质经阶跃式的外电场作用后,介质的极化强度按 $\exp(-t/\tau)$ 的规律衰减。

任何绝缘电介质的电阻总不会是无穷大。类似于 $\epsilon(\omega)$ 可将非零的电导率写为复频域参数 $\sigma(\omega) = \sigma'(\omega) - i\sigma''(\omega)$ 。由电路技术容易理解 σ 的实部 σ' 和 ϵ 的虚部 ϵ'' 等效,而 σ 的虚部 σ'' 和 ϵ 实部 ϵ' 等效。因此,物质对外电场的作用所能产生的极化和传导两种响应的特性参数可统一用广义介电常数 $(\eta)\omega = \eta'(\omega) - i\eta''(\omega)$ 来描述,从能量分析可以求出

$$\eta'(\omega) = \epsilon'(\omega) - \frac{4\pi\sigma''(\omega)}{\omega}$$

$$\text{且} \quad \eta''(\omega) = \epsilon''(\omega) + \frac{4\pi\sigma'(\omega)}{\omega} \quad (2)$$

许多学者还保留如下的认识: $\eta(\omega)$ 的定义和(2)式的关系只是纯数学形式上的,因为传统认为 $\omega \rightarrow 0$ 时有 $\sigma'' \rightarrow 0$ 和 $\epsilon'' \rightarrow 0$, 于是 η

$\rightarrow \epsilon' \rightarrow \epsilon_s$, 从而极化响应终归可以和电导响应分开。按照这种看法, $\eta''(\omega \rightarrow 0)$ 是一个奇点,而在 $\omega \rightarrow 0$ 时 $\omega\eta''(\omega)$ 应等于和 ω 无关的常数 $4\pi\sigma'(0)$, $\sigma'(\omega=0)$ 被理解为直流电导率。由于从金属发展到半导体均未发现固体的电导率和频率在工频以下显著有关的现象,所以这种保留的认识还未碰到太大的困难。然而技术上近年来却希望找到在低频以下电导率强烈随频率而变化的材料,因为它关系到电力工业方面的重要应用。

概念上的最大困难在于如何理解 $\omega \rightarrow 0$ 的意义,什么是静态介电常数 ϵ_s 。根据上面的定义, $\epsilon(\omega \rightarrow 0)$ 以实数 ϵ_s 为极限。今天的介电谱实验技术已可做到 10^{-6}Hz 的超低频,但仍常发现显著非零的 $\epsilon''(\omega)$ 和未等于常数的 $\epsilon'(\omega)$ 。 10^{-6}Hz 的频率相应于周期为 11 天,怎样才能算是 $\omega = 0$ 的所谓静态呢? 在许多高分子聚合物和其他一些固体中,局域电偶极矩和深束缚空间电荷往往处于亚稳态。亚稳态和基态能量相差不多,但要跨越很高的位垒才能由亚稳态返回基态,这时系统经外加作用后,要建立新的热平衡态常常需要花一两星期甚至更长的时间。

70 年代以来,电介质的压电和热释电效应技术的广泛应用,促使人们注意到这响应中也都存在类似于极化响应的弛豫现象。就是说在电介质中响应一般均落后于外加作用。这使介电谱所研究的弛豫效应变得更为复杂。

时域测量技术 物性参数的频域描述方法本来是为了便于应用。但要在 1Hz 以下的频段进行物性参数的测量很困难,技术上根本无法进行,其实完全不同的另一种测量方法在 19 世纪末期就开始出现,直到 1970 年才开始被采纳。人们称这种测量方法为时域技术,它显得更加适用于弛豫过程的直接观察。设在时间 $t = 0$ 时,体系经历了一次阶跃式的外加作用,称此后体系的响应时间变化的规律为阶跃响应函数 $F(t)$ 。例如,在(1)式的德拜型介电极化弛豫中, $F(t) = \exp(-t/\tau)$ 。理论上可以证明:只要响应是线性的,并且因果律成立,则 $(\frac{-\partial F}{\partial t})$ 的傅里叶变换就等于频域参数,例如,将 $\exp(-t/\tau)$ 对 t 作微分,然后再作傅里叶变换,就可给出(1)式。线性响应通常是很好的近似,只要外加作用足够小,响应总是线性的。而因果律则更是物理学界一向默认的公理,意味着过去的事情可以影响将来,而未来的事情不能影响过去,因此时域测量技术是可以广泛使用的。现在看来时域测量比频域测量所需设备要简单得多,特别是低频端几乎不受限制,可推及 $10^{-1} \sim 6 \text{Hz}$ 而毫无困难。

时域技术是正在兴起的有效的测量技术,新的测量技术的出现总会暴露旧的认识中存在的矛盾并使之尖锐化。许多电介质并不遵从(1)式的德拜型弛豫规律。为了找到响应函数 $F(t)$ 的表示式,许多学者进行了大量艰深的理论研究工作,但结果总不能较好地符合实际,而实验工作者则试图寻找行之有效的经验公式,其结果反而使问题变得更为复杂化。例如认为 $F(t)$ 具有上述指数型衰减规律,而引入弛豫时间 τ 的分布函数的概念。无论是纯理论推导还是凭经验探索,为查明 $F(t)$ 的物理意义和具体表示式而花费了巨大的努力,并且这种努力还在继续着。可喜的是利用含时间过程的近代统计理论,证明了介电极化响应函数 $F(t)$ 的物理意义是,它等于系统的总电偶极矩的自相关函数。但其具体表示形式因系统微观结构的复杂性而未能得出。

现代电子计算机技术的发展促使了一部分科学工作者向消极的方法发展。他们干脆不去理会 $F(t)$ 的物理意义,只是单纯为了满足技术上作为测量频域物性参数方法的需要,直接将不同的时间 t 测得的大量数据进行微分和傅里叶变换的数学计算,以得到频域参数的最后结果,幸而计算机内存量已可足够随机寄存实验数据,从而促进了快速傅里叶变换(FFT)软件的开发。但是,作为物理学问题,更重要的是要查明 $F(t)$ 中隐含的物质微观结构和宏观物性之间的关系的信息。

电介质中其它的弛豫效应。介电谱方法是从研究电介质在外加电场作用下的极化弛豫效应开始了。1966 年以前,未曾注意到电介质的压电效应和热释电效应发生弛豫现象。1968 年 G. Arlt

观察到极性高分子聚合物的压电常数有显著非零的虚部。因而线性不可逆热力学在介电极化效应中的应用被推广到压电效应。在热力学中应力和应变各 6 个独立分量, 电场和电位移各 3 个分量都是共轭量。在共轭物理量中一个被视为广义力, 另一个为广义位移, 两者的乘积有能量的意义。在两组共轭量中, 各选一个为独立变量(作用), 其余为应变(响应), 则作用矢量有 9 个分量, 响应矢量也有 9 个分量, 其间的关系用 9×9 矩阵联系, 共有 81 个物性参数成为复数时, 所描述的弛豫效应要比介电极化弛豫显得更为丰富多彩了。研究这些复杂的弛豫所得到的微观信息以及可能导致的新技术应用是令人鼓舞的。其中值得指出的是应力和应变是共轭量, 联系两者的弹性系数中的虚部描述弹性弛豫, 它必须是正值以代表物质形变过程中的内摩擦损耗, 这正如电场和电位移是共轭量一样, 联系两者的介电常数的虚部也必须是正值以代表介电损耗。但是, 应力或应变之一和电场或电位移之一, 相互之间不是共轭量, 关联两者的压电常数中的虚部描述的压电弛豫是一种交叉弛豫, 它既是可为正值也可取负值, 所代表的是能量转移而非损耗。

1982 年, 由于采用了电荷直接测量的精密的新方法, 李景德发现了长时间热释电弛豫效应。接着又发现了长时间的压电弛豫效应和长时间的压电弛豫效应。由于使用了专门为弛豫效应基础研究设计的特别精密的测量方法, 实验结果证实了唯象理论的预言, 即同一样品的响应函数 $F(t)$ 在不同环境条件下, 可以出现两种不同的典型形式: 在弛豫过程中若样品处于非零外加电场或应力作用之下, 则 $F(t) = \exp(-t/\tau)$, 称为随机弛豫; 若弛豫过程中系统处于恒温和无外加作用的自由环境, 则 $F(t) = \exp(-\sqrt{t}/\tau)$, 称之为自由弛豫。根据热力学的严格定义, 频域物性参数的值同测量时样品所处的环境条件有关。同一个样品的同一个物性参数的恒应变(有外力作用)值和零应力(自由)值是不同的; 其它环境条件的变化也会改变这个参数的值。而 $F(t)$ 和频域性参数通过傅里叶变换有唯一的联系, 则由频域物性参数的逆傅里叶变换可以确信 $F(t)$ 也和测量时样品所处的环境条件有关。热释电弛豫过程和压电弛豫效应证实了实验环境条件对弛豫规律的影响; 将这个结果再用于介电极化弛豫过程规律的影响; 将这个结构再用于电极化弛豫效应时, 取得了完全的成功, 并且进一步明确了不同条件下弛豫时间 τ 的意义。

时域物性参数 被广泛采用的物性参数只有由热力学严格定义的频域参数。既然频域参数和响应函数通过傅里叶变换有唯一的联系, 而响应函数 $F(t)$ 的基本形式已经知道, 就可以通过 $F(t)$ 的热力学意义来严格定义时域参数, 以表征物性。用频域或时域参数表征物性, 其作用是等效的。下面以极化响应为例来加以说明。

样品做成电容 C , 在测量前, 先令 C 充电至电压 U 至平衡。然后在 $t=0$ 时, 令 C 通过 R 放电, 测量放电电荷的变化规律 $Q(t)$ 。对于局域电偶极矩和束缚空间电荷, 其响应频段一般落在 $10^{-5} \sim 10^4 \text{ Hz}$, 可令

$$Q(t) = Q_0 [1 - A_1 e^{-t/\tau_1} - A_2 e^{-t/\tau_2} - A_3 e^{-\sqrt{t}/\tau_3} - A_4 e^{-\sqrt{t}/\tau_4}] \quad (3)$$

其中 $(A_1 + A_2 + A_3 + A_4) = 1$, $\tau_1 < \tau_2 \ll \tau_3 \ll \tau_4$ 。而响应函数

$$F(\omega) = [A_2 e^{-i\omega\tau_2} + A_3 e^{-\sqrt{i\omega}\tau_3} + A_4 e^{-\sqrt{i\omega}\tau_4}] / (A_2 + A_3 + A_4) \quad (4)$$

称为 $(A_1\tau_1)$, $(A_2\tau_2)$, $(A_3\tau_3)$, $(A_4\tau_4)$ 为材料的时域物性参数, 其中和 ϵ_h 相应的高频电容 $C_h = A_1 Q_0 / u$, 和 ϵ_s 相应的静态电容 $C_s = Q_0 / U$; 而 τ_1 决定于 RC_h 时间常数。

(3) 式和 (4) 式是按随机和自由弛豫唯象理论定出的。 A_1 项是由普通 RC_h 放电电路所决定的。在 t 不够大时样品电极上仍残存非零电压, 故可能出现随机弛豫的项 A_2 。当 $t \gg \tau_1$ 时, 样品电极已放电完毕, 可认为是处于零电场的自由弛豫。因为研究的频段

宽达 9 个数量级, 故可能出现不同微观机构的自由弛豫 A_3 和 A_4 。在许多情况下, 实际上有 $A_2 = A_4 = 0$ 。 $(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4)$ 分别为不同机构的弛豫时间; (A_1, A_2, A_3, A_4) 分别为各微观机构对极化响应贡献的成分。因此时域参数的物理意义十分明确, 它把不同微观机构在极化响应中提供的信息分子分开了, 从而使研究宏观物性和物质微观结构间的关系显得特别方便。当有必要研究更宽的频段时, 可能出现更多的不同的随机或自由弛豫的项。但至今未发现多于 (3) 式的 4 个项。如果改用图 1(b) 的测量方法, 在 $t=0$ 时加上充电电压 U , 则通过电阻 R 的充电电荷 $Q(t)$ 仍可用 (3) 式和 (4) 式; 但因子 $\exp(-\sqrt{t}/\tau)$, 因为此时样品始终处于外电场作用下, 表现为随机弛豫。

测量电荷 $Q(t)$ 的仪器总有非零输入电阻, 任何测量电路也总不能做到零电阻, 一般说来时域参数和 R 值有关; 但当 R 足够小时各时域参数分别趋向稳定的极限值, 称为短路参数; 而当 R 足够大时, 各时域参数则趋向于恒定的开路值, 时域参数有短路和开路值之分。这和电介质的一般频域参数类似, 它们也有短路值和开路值之分。在实际测量中, 由数据 $Q(t)$ 按 (3) 式拟合给出进域参数的过程简单, 而 (3) 式各项的傅里叶变换均有积分公式, 由时域参数可立即计算解决傅里叶变换问题的麻烦, 因而所需测量的数据个数也可减少。

非线性参数 利用频域参数描述非线性材料很麻烦, 有时甚至不可能。例如用电介质非线性材料做成的电容器, 其电容量和外加电压有关。通常的频域测量只能给出不同偏压下的电容值。这只能是微分电容而不是总电容量随电压变化值, 频域测量通常要外加 1V 左右的信号, 若在此范围内已出现显著非线性, 则其结果的意义就变得含糊。定义出时域参数后描述非线性效应的方法变得简单了。只要使用不同的电压 U , 就可以得到各时域参数随 U 变化的关系, 当然, 这时频域和时域参数之间的傅里叶变换关系因线性响应的假设条件下不成立而不存在, 无法给出频域结果。这并不是时域的缺点, 而是这种情况下, 频域参数失去意义。

在氧化陶瓷非线性电容器的时域参数随外加电压 U 变化的实验中, 片状样品面积为 3.32 cm^2 , 厚 0.0749 cm , 两面烧银电极。 ZnO 陶瓷具有非线性电阻, R_t 就是样品电阻随外加电压 U 的变化值。在 $U < 27 \text{ V}$ 时, $R_t > 3 \text{ M}\Omega$, 样品呈现电容性。这时它的极化机械可分为四种成分, 弛豫时间 $\tau_1 \approx 2.7 \text{ ms}$, $\tau_2 \approx 20 \text{ ms}$, $\tau_3 \approx 1 \text{ s}$, $\tau_4 \approx 240 \text{ s}$ 。由于在实验电压范围内均有 $\tau_1 < \tau_2 \ll \tau_3 \ll \tau_4$, 故 4 种机械提供的极化信息能很好地分开。其中 $A_1 C_s$ 至 $A_3 C_s$, 占的分量很小, 而且表现为线性。静态电容 C_s 的非线性效应来自成分 $A_4 C_s$, 成分 A_4 可解释为同界面和晶粒之间存在着类似二极管的阻挡层; $A_4 C_s$ 在 $U=0$ 上的峰值反映了和 U 同向那一边的阻挡层由高阻变为导通的过程, $A_4 C_s$ 在 $U=10 \text{ V}$ 左右的峰值反映了和 U 反向那一边阻挡层的击穿导通过程。

介电谱方法从研究高分子聚合物发展到用来研究晶态物质的工作, 近年来才刚刚开始。引用时域参数的概念后, 介电谱方法显得更为有用了。李景德曾经用类似方法研究 TGS 单晶的铁电相变过程, 得出了有意义的新结果。前面的实验结果还表明, ZnO 变阻器的低压器的低压漏取决于两个阻挡层, 而高电压下的非线性系数取决于两个阻挡层, 而高电压下的非线性各级系数取决于同界面。

Pellat 早在 1899 年就发表介电弛豫的论文, 虽然 80 年代以来, 介电谱技术在研究高分子聚合物中有了很大的发展并取得了许多重要成果, 但在基本概念上仍局限于德拜在 1929 年定下的框架, 也许因为德拜在物理学史上的重要贡献, 使许多学者在弛豫时间定义上受他的影响, 因而忽视了实验环境条件从而遇到许多麻烦, 电介质物理学的重要关系显示了物性参数的定义和测量条件间的重要关系, 近代测量方法精度的提高, 导致发现自由弛豫时间和随机弛豫时间的不同意义, 在此基础上找到了时域参数的表征方法。虽然一般说来技术应用上的频域参数表征物性较为方便, 在频域参数无能为力时使用时域参数就更为有效, 特别在

关系到微观机理和非线性问题上,时域参数的作用是不可替代的。描述弛豫效应的两种参数即使等效,使用哪一种参数本质上也只是个习惯问题。时域参数的提出对时域技术的改进及介电谱研究将起一定促进作用。

(中山大学李景德撰)

分子束外延 molecular beam epitaxy (MBE) 20世纪70年代初在真空蒸发基础上迅速发展起来的薄膜生长新技术,它是在超高真空条件下构成晶体的各个组分和掺杂原子(分子)以一定的热运动速度,按一定的比例喷射到热的衬底上进行晶体的外延生长,其特点是生长速度慢($\sim 1\mu\text{m/h}$),生长温度低,可精确控制外延层的厚度和表面界面平整度达原子量级,并可随意改变组分和掺杂,结合适当的掩模,可以生长二维和三维的图形结构,生长时还可以用掠射式高能电子衍射(RHEED)原位观察表面结构,校正生长参数和研究生长机理。MBE技术使人们可以在原子尺度上改变材料的结构参数,从而改变能带结构和波函数,创造具有全新物理特性的新材料和新器件(即所谓的“能带工程”),推动了新一代以超晶格微结构材料为基础的半导体科学技术的发展。

MBE技术的发展是基于Guther(1958)发展的真空淀积III-V族化合物的三温度法和Arthur(1968)对Ga、As以及GaAs表面相互作用的反应动力学研究。1969年以后,Cho进行了MBE的开创性研究,他将Ga源和As源放置在超高真空中,并分别加热至不同温度,产生的Ga和As束射向加热的清洁GaAs表面,一层接一层地生长出了符合化学计量比的高质量的GaAs单晶薄膜,接着他又利用MBE进行了GaAs的n型、p型掺杂和多种GaAs/AlGaAs半导体器件的研制。1973年Chang用MBE方法生长成功GaAs/AlGaAs超晶格材料,并观察到了电子在这种人为周期场中运动所特有的负阻效应,证实了Esaki和Tsu在1968年提出超晶格概念时的理论预计,从此MBE技术引起了人们极大的兴趣,并兴起了以MBE为基础的半导体超晶格微结构的研究热潮。1976年Gassad等充分发挥MBE的特点,生长出上个周期的GaAs/AlGaAs交替单原子层的超晶格结构,获得了与GaAs和AlGaAs的晶体结构及能带结构迥然不同的全新的人工改性材料。1978年Dingle等研制出在AlGaAs中掺杂GaAs中不掺杂的调制掺杂GaAs/AlGaAs超晶格,由于电子和离化施主在空间被分隔开,使异质结界附近GaAs势阱中的二维电子气具有极高的低温迁移率。利用这种迁移率增强效应,1980年S. Hiyamizu等作出了具有优越的超高速、超高频特性的高电子迁移率晶体管(HEMT),这是MBE在新型高速器件方面的重大进展。同时,在1979年,Tsang通过改进MBE生长环境清洁度,大大降低了MBE AlGaAs中的非辐射复合中心,从而使MBE GaAs/AlGaAs双异质结激光器的阈电流密度低于 $1\text{kA}/\text{cm}^2$,达到可与LPE相比的水平,使MBE在光电子器件中的应用取得突破性进展,从此MBE被公认为是发展新一代半导体器件的关键技术而受到愈来愈广泛的重视和应用。

1983年,Joyce等发现MBE生长时,在原位进行表面观测的高能电子衍射的强度有时会发生衰减性的周期振荡,他们认为这是由于MBE二维层状生长时(即生长前沿着表面上的原子台阶一层接一层地推进)生长表面的粗糙度的周期变化所致,一个周期对应于一个单原子层的生长,这一效应的发现和将其应用于MBE生长,使MBE的控制精度在80年代中期达到了单原子层量级,为了在MBE生长时获得原子级平整的界面,在80年代中后期还发展了多种工艺方法,其中有使吸附于生长表面的原子有充分时间弛豫到表面的大原子台阶边沿上去的生长间断法,有为提高原子在表面的迁移速度,使其有足够能量运动到最佳生长位置去的迁移率增强法(MEF)和将构成化合物的不同原子(分子)束交替射向衬底表面进行逐层外延的原子层外延(ALE)等。为了实现在原子层空间范围内的陡掺杂,还发展了 δ 掺杂等方法。

原子级加工精度的MBE技术和能带工程设计相结合,已创

造出了许许多多的具有各种优异性能的半导体超薄层结构新器件,特别是在量子阱光电子器件和超高速、超高频器件和电路方面,自80年代中期以来取得了许多令人瞩目的进展,其中有些已进入批量生产。如GaAs/AlGaAs调制掺杂异质结材料中二维电子气的迁移率1989年作到高达 $1.1 \times 10^7 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ (0.3K),利用这种迁移率增强效应制作的高电子迁移率晶体管(HEMT)被认为是最有发展前途的超高速超高频器件,1986年已开始批量生产,目前研制的HEMT器件,在94GHz下噪声为1.4dB,增益为6.6dB, $f_{\text{max}}=250\text{GHz}$,并已研制成功16KSRAM。利用量子阱结构的量子尺寸效应和台阶状态密度分布等物理特性等制作的量子阱激光器,具有阈值电流密度低、可单纵模工作、谱线宽度窄、特征温度高、高频调制特性好等特点,被公认为是理想的激光光源,迄今分子束外延制备的各种不同体系材料的激光器的波长已可覆盖 $0.6 \sim 20\mu\text{m}$ 范围,其中AlGaAs系的可见光激光器在1990年也进入了批量生产,并已在光盘、光印刷、光通信和激光光泵等多方面进入了实际应用。利用量子阱材料具有的室温激子吸收的非线性光学效应和在外电场下激子峰红移的量子限制Stark效应,已研制了多种结构的半导体光调制器和光双稳态器件,它们具有快速(ps量级)、低功耗(μW 量级)、室温工作和体积小等特点,特别是80年代中期Miller等人发展的MBE GaAlAs/GaAs量子阱结构的自电光效应双稳器件(SEED),功耗很低,易列阵化和可与量子阱激光器、调制器等进行单片集成,已用它作出了世界上第1台数字式光信息处理机,被认为是光计算术的重大突破。80年代末利用量子阱材料电子子带间的跃迁和发射,还研制成功了可工作于 $8 \sim 10\mu\text{m}$ 波段的、探测率达 $1 \times 10^{10} \text{cm}^2/\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ (77K)的远红外探测器,并作出了 128×128 的阵列,达到了实用水平。

利用量子阱结构的纵向输运特性还研制出一系列的超高速、超高频器件,如利用双势垒或多势垒的共振隧穿效应的负阻高速器件,利用MBE作的GaAs/AlGaAs异质结双极晶体管的工作频率已高达 100GHz , $F_{\text{max}} > 200\text{GHz}$,在60GHz下,输出功率达45mW, HBT环形振荡器的延迟时间达到了1.9ps/门。由于这些重要器件的研制成功和在80年代中后期HEMT、激光器器件进入批量生产,改变了不少人原来认为MBE只是适合于实验室研究不适合于生产的观点。

早期的MBE研究多集中于晶格匹配的GaAs-AlGaAs体系,80年代中期以后,其他体系材料(包括含P、含Sb的III-V族、IV-VI族化合物和IV族元素半导体等)和晶格失配材料组成的应变异质结、超晶格的MBE研究蓬勃兴起。Tsang发展的CBE技术,综合了MBE和MOCVD的优点,将MBE的固态源换为气态源,特别适用于有重要应用价值的P化合物体系的材料生长,已用以研制出InGaAsP/InP激光器等一系列光电子器件。此外MBE ZnSe/ZnS可见光激光器和GeSi/Ge HBT等新型器件的研制成功,表明MBE技术能在各种半导体材料领域发挥重要作用。将晶格失配的材料组合成的应变异质结和超晶格材料,当超晶格的各层厚度不超过自的临界值时,层间的晶格失配可由晶格的弹性形变来调节,MBE的实验结果表明即便失配度大到7%,也可在界面不产生失配位错,并且材料的能带结构及相关的物理性能还可通过改变层厚和应力改变,这不仅为设计各种特殊能带结构的新材料开拓了更为广阔的道路,而且在基础物理研究和新型器件应用方面也有重要意义。如应用应变异质结GaAs/InGaAs作的P-HEMT,室温性能优于通常的HEMT,用这种材料作出的量子阱激光器可工作于 $0.98\mu\text{m}$ 波长,能用作掺Er⁺光纤放大器的光源。在Si衬底上外延GaAs综合了Si和GaAs两种材料的优点,在高速集成和光电子集成电路方面有诱人的应用前景,MBE GaAs/Si复合衬底材料已批量生产。

MBE虽然已经可以生长原子级精控的材料,但其生长机理尚不十分清楚,有待深入研究,二维层状生长过程的计算机模拟研究和发高灵敏、高清晰度的原位表面观测方法将会是重要的研究途径。各种体系材料的应变超晶格材料的MBE生长、界面

应力应变特性及其对材料性能和能带结构的影响和器件的应用研究是一个有待开拓的、广阔的领域。性能优异的 MBE GaAs-AlGaAs 系的新型结构材料、器件和电路的研制需进一步向实用化和生产化方向发展,相应的可以同时进行多片外延生长、大面积均匀、可长周期工作的生产型的 MBE 设备和采用气态源的 MBE 设备将会进一步发展。

参考文献

- 1 Cho A Y, Arthur J R. Progress in Solid State Chemistry, 1975,10:157
- 2 Beave J H, et al. Appl Phys, 1983, A31(1):1
- 3 Chang L L, Ploog K. NATOSAI Series, Applied Sciences, 1985, 87
- 4 Herman M A, Sitter H. Fundamental and Current Status, 1989
- 5 Cho A Y, J. Cryst. Growth, 1991, 111:1
- 6 Tsang W T. J. Cryst. Growth, 1991, 111:529

(孔梅影撰)

应变层超晶格 strained layer superlattice 简称 SLS, 是具有一定晶格失配度的两种材料, 利用分子束外延(MBE)和金属有机化学气相淀积(MO-CVD)等超薄层外延生长技术制备异质结构时, 依靠弹性形变调整其原子间距, 最后使二者都达到界面原子排列仍保持晶格匹配的超晶格结构。SLS 的出现, 增加了超晶格材料选择的自由度和灵活性, 通过独立调节组分、应力、层的厚度和数目以及掺杂等参量, 可以对材料能带结构进行剪裁, 从而为设计和制造各种新的固体电子器件开辟了一条重要途径。可以说, SLS 是固态量子理论和先进晶体生长技术完美结合的产物。

1982 年, 美国的奥斯本(G. C. Osbourn)首次提出了 SLS 的概念, 并成功地制备了界面完整性良好的 GaAs/GaAs_{0.2}P_{0.8} SLS。其后关于各类 SLS 的材料制备, 光电性质, 输运特性以及器件应用的系统研究日渐活跃与成熟。1984 年比安(J. C. Bean)等采用 MBE 生长了高质量的 Ge_xSi_{1-x}/Si SLS。同年, 藤安(H. Fujiyasu)等利用热壁外延(HWE)首次试制了 I-V 族的宽带隙 ZnSe-ZnS/GaAs SLS。1985 年史密斯(D. L. Smith)等研究了作为重要红外探测器材料的 HgTe/CdTe SLS。此后, III-V 族的 InGa_xAs_{1-x}/GaAs, GaAs_xP_{1-x}/GaP 以及 GaSb/AlSb 等 SLS 的研究开始兴起。目前, 材料科学家们已用各种薄层外延技术制备了多达数十种的 SLS, 大大丰富了半导体超晶格与量子阱的研究内容。

典型的 SLS 结构包括 3 个主要部分: 第一是单晶衬底层; 第二是固溶体过渡区; 第三是 SLS 本身, 它由相间的薄层形成。由于相间薄层晶格常数不匹配, 因而每层都会产生弹性应变。研究 SLS 的生长特性发现, 临界层厚 h_c 是一个关键参数, 当生长层厚小子 h_c 时, 应变层中无位错形成; 当生长层厚大于 h_c 时, 将在界面处产生晶格缺陷, 1975 年马修斯(J. W. Matthews)首先提出一种力学平衡模型, 用于解释应变层中位错的形成。该模型假定, 位错的产生是由于力学平衡被破坏引起的。1985 年皮波(R. People)等人从能量作用的角度出发, 提出了一种能量平衡模型, 认为失配位错是由于应变层中能量平衡被破坏导致的。其后许多学者采用各种测量方法实验研究了 h_c 的值。1985 年弗里茨(I. J. Fritz)等人 and 皮波等人分别研究了 InGaAs/GaAs SLS 和 Ge_xSi_{1-x}/Si SLS 的 h_c , 结果表明, 前者与力学平衡模型符合较好, 而后者与能量平衡模型取得了吻合。1987 年比安, 1988 年小滨(Y. Kohama)和金(C. A. King)等的几个研究集体对不同材料的 SLS 进行了实验测量, 其结果均与两种模型预期的 h_c 值有一定程度的偏离。1988 年多德逊(B. W. Dodson)等和 1991 年杰恩(S. C. Jain)等的研究指出, h_c 的理论值和实验测量值之间的偏离起因于应变层中存在的应变弛豫、界面原子的四面体成键方式以及测量方法的灵敏度与准确性。

80 年代中后期以来, 围绕着 SLS 的各种电子性质, 人们作了大量细致而深入的研究工作。InGaAs/GaAs SLS 的子能带结构研究受到普遍重视。1985 年马津(J. Y. Marzin)等利用透射光谱研究了 InGaAs/GaAs SLS 的轻重空穴行为, 推断轻重空穴和轻空穴被分别束缚在 InGaAs 和 GaAs 层中。1987 年门奈兹兹(J. Menéndez)等的光反射和光荧光谱研究表明, 其轻重空穴和轻空穴都束缚在 InGaAs 层中。1990 年沈学础等用光电流谱研究了 InGaAs/GaAs SLS 的电子结构, 指出电子和轻重空穴被束缚在 InGaAs 层中, 而轻空穴被束缚在 GaAs 层中。I-V 族 SLS 的激子光学非线性研究引起了人们的极大兴趣。1986 年安德森(D. R. Andersen)等在 77K 下用泵浦-探测技术研究了 ZnSe/ZnMnSe SLS 的激子吸收饱和特性, 认为窄阱时的激子吸收饱和特性主要来自于激子态的相空间填充和激子库仑屏蔽效应两种机制的共同效应。1988 年付(O. Fu)等在 10K 下研究了 ZnSe/(Zn, Mn)Se SLS 的激子发光特性, 首先观察到激子分子发光。范希武领导的小组在 1990 年研究了 ZnSe/ZnS SLS 中的激子发射和吸收, 首次观测到 ZnSe 势阱中 $n=1, 2$ 子能带轻重空穴激子的 2 个发光谱带, 以及 $n=1, 2$ 子能带重, 轻空穴激子的 4 个吸收谱带; 1991 年在 77K 下研究了 ZnSe-ZnS/CaF₂ SLS 的光学双稳态特性, 首次观测到纳秒量级的激子型光学双稳, 并将其机理分别归结为激子增强吸收型和激子色散型; 同年, 关郑平等在 77K 下研究了 ZnSe_{1-x}Sx/ZnSe SLS 的光致发光, 发现在较低的激发密度下, 光谱中激子与自由载流子的散射起主导作用, 当激发密度进一步增加时, 激子与激子间的色散对光谱展宽起主导作用, 并且随不同势阱而异。在不同衬底上生长 Ge_xSi_{1-x}应变层形成的 SLS 具有不同的能带不连续性。1984 年皮波对在 Si 衬底上生长的 Ge_xSi_{1-x}/Si SLS 所作的研究表明, Ge_xSi_{1-x}的导带底略低于 Si 的导带底, 因此构成第 1 类超晶格。1986 年泽勒(C. Zeller)等人研究了生长在 GeSi 合金上的 Ge_{1-x}Si_x应变层, 由于该层的压缩应变, 使得 Si 的导带底低于 Ge_xSi_{1-x}的导带底, 构成第 2 类超晶格。

SLS 结构的光电性质可以与体材料或晶格匹配材料相比拟, 甚至优于前二者。精确地控制 SLS 的掺杂特性, 易于生长异质结构或调制掺杂结构, 以使更多的半导体系统使用高迁移率器件。同时, SLS 结构的相间周期性还可以影响半导体的直接和间接跃迁特性, 有可能以两种间接带隙材料为基础而创造出一种具有新的直接带隙性质的超晶格。这些性质使 SLS 在新一代固态电子器件的研究与开发中显示出了广阔的应用前景。1986 年皮尔索尔(T. P. Pearsall)等人 and 代姆勃克斯(H. Daembkes)等采用调制掺杂技术分别制成了具有高迁移率的 Ge_xSi_{1-x}/Si 场效应晶体管。1988 年哈姆(D. L. Harne)等人试制了高性能的 Ge_xSi_{1-x}/Si 双异质结双极晶体管(DHBT), 其开关频率为 12GHz。1992 年腊斯克(J. Lasker)等人制成了 AlGaAs/InGaAs/GaAs MODFET, 其频率响应可达 49GHz。1989 年塔夫特(R. C. Taft)等人开发了具有良好工作特性的双极反型沟道场效应晶体管(BICFET), 室温下的电流增益为 365。1990 年帕顿(G. L. Patton)等人研制成功了开关频率达 75GHz 的 DHBT。1990 年美国伊利诺斯大学报导了 InGaAs/GaAs 量子阱激光器, 在 980nm 波长下输出功率达 100mW, 这为掺饵光纤放大器在光纤通讯中的实用化提供了技术保障。同年, 美国的 AT&T 开发了 InGaAs/InP 量子阱 DFB 激光器, 在 1.55μm 下可有高达 100mW 的功率输出, 该激光器阈值低达 1.5mA。1990 年日本的岡安(M. Okayasu)等人报导了波长为 980nm 的 InGaAs/AlGaAs 应变层结构激光器, 在 50℃ 下输出 30mW, 连续工作时间可达 2500h。1989 年休濠(I. Suemune)等人采用 MO-CVD 法制成了 ZnSe_{0.88}Se_{0.12}/ZnSe 应变层结构, 在 N₂ 激光器的 337.1nm 谱线的激发下, 得到蓝色波段的受激发射, 最高温度可达 180K, 增益为 2000cm⁻¹, 1991 年他们又把温度提高到 400K。1991 年汉斯(M. A. Haase)等人首次在 77K 下观测到 P-ZnSe/CdZnSe-QW/n-ZnSe 结构激光二极管发射的波长为 490nm 蓝绿色激光。SLS 在长波长红外光探测器方面

具有重要的应用。1984年勒依(S. Luryi)等人首先在Si衬底上生长了GePIN结形成的光探测器,在1.3 μm 波长时具有 $\eta=40\%$ 的量子效率。1988年这个研究小组又制成了工作频率可达103GHz的混和隧道雪崩二极管(MITATT)。

半导体超晶格与量子阱的研究代表了当今半导体物理与器件研究的主导方向,而SLS的研究又代表了超晶格与量子阱研究的主流。材料生长工艺是进行SLS研究的生命线,因此进一步完善和发展现代超薄层外延工艺,以制备结构特性良好的SLS是一个首要而关键的问题。除了MBE和MO-CVD之外,化学束外延(CBE)和原子层外延(ALE)是两种十分有前途的工艺。对SLS物理性质的研究,集中在继续发展与完善理论方案以及实验手段,探讨晶格失配系统的结构性质等。开发新的器件与电路工艺,尤其是Si同GaAs等的异质兼容技术,新的调制掺杂方法以及超精细蚀刻等,以使各类新器件的构想得以实现,并且进一步提高器件性能,乃是摆在微电子工程师们面前的一个紧迫而重大的课题。

参考文献

- 1 Osbourn G C. J. Appl Phys. 1982, 53: 1586~1589
- 2 Anderson N G. et al. Mat Res Soc Symp Proc. 1985, 37: 223~238
- 3 People R. IEEE Trans. Quantum Electron. 1986, 26: 1696~1710
- 4 O'Reilly E P. Semicond Sci Technol. 1989, 4: 121~137
- 5 Fan X W, et al. Proceedings of the sino-soviet seminar on spectroscopy and optoelectronics in semiconductors and related materials. World scientific publishing, 1990, 154~164
- 6 Jain S C. Semicond Sci Technol. 1991, 6: 547~576
- 7 Shen D Z. et al. Nonlinear Optics. 1991, 1: 319~324

(河北大学彭英才副教授、中国科学院长春物理研究所范希武研究员撰)

穆斯堡尔效应 Mossbauer 是指 γ 射线的无反冲发射和共振吸收效应。1957年由前西德穆斯堡尔(R. L. Mossbauer)发现。穆斯堡尔效应的实质在于这种 γ 射线的发射和吸收是与晶格没有能量交换的过程,即零声子过程。这时,共振吸收谱线极其尖锐,谱线宽度极窄,也就是说它具有特别高的能量分辨本领。对于Fe-57,能量分辨率可达 10^{-12} ,即10万亿分之一。由于穆斯堡尔效应的发现, γ 射线能量测量的精度由0.1eV提高了8个数量级以上。

原子核与核外环境之间存在着超精细相互作用,因此原子核所在处的电磁场会对核能级产生影响。反之,观察到这种相互影响,可以得到物质微观结构信息。利用穆斯堡尔效应来探测物质微观结构的领域被称为穆斯堡尔谱学,通过超精细相互作用,用穆斯堡尔谱学便于获得物质微观结构信息。

至1991年,人们已发现的穆斯堡尔元素达46个,穆斯堡尔核素92个,穆斯堡尔跃迁113个,最常用的穆斯堡尔核素为Fe-57, Sn-119和Eu-151,三者合计占研究工作的80%以上。其中能量分辨率特别高的穆斯堡尔跃迁是Zn-67的93.3keV跃迁, Ta-181的6.23keV跃迁和Ge-73的13.3keV跃迁,能量分辨率分别高达 5.3×10^{-16} , 1.1×10^{-14} 和 8.6×10^{-14} 。选用何种穆斯堡尔核素当然首先取决于它在该项研究工作中所能获得信息的意义,其次取决于获取信息的方便程度,例如母核的寿命,共振截面的大小,线宽是否合适,源的制备和射线测量是否方便等。穆斯堡尔核素的母核寿命大于30d的便于在一般实验中使用,寿命小于1天的只能在反应堆或加速器旁进行实验。

穆斯堡尔核的数目有限,再加上大多数穆斯堡尔核的研究必须使用低温条件,是穆斯堡尔谱学方法的主要限制。

穆斯堡尔谱由一组或多组共振谱线组成。谱线的位置、宽度、形状、面积都包含着待测样品微观结构的信息。反映这些信息的穆斯堡尔参量主要有:(1)无反冲分数(也称穆斯堡尔分数、德拜

一维勒因子),指零声子过程的几率。它反映共振原子与其周围环境间约束的强弱。(2)二次多普勒能移(也称温度能移),它起源于原子的热运动,与同质异能移一起决定谱线中心的位置。(3)同质异能移(也称化学能移),起源于核电荷与原子核所在处电子电荷密度分布间的库仑相互作用。(4)四极分裂,取决于原子核电四极矩及核外电荷造成的穆斯堡尔原子核处的电场梯度张量。(5)磁超精细分裂,取决于原子核磁矩及原子核所在处的磁场。(6)谱线宽度。共振谱线的理想宽度为自然线宽的二倍,样品厚度、超精细场非均匀分布、以及原子扩散、弛豫等物理过程都会影响谱线宽度和形状。

穆斯堡尔效应被发现之后,许多物理学家首先感兴趣的是它具有极高的能量分辨率。利用它测定引力红移就是著名一例。以往只有通过天文观测来测定引力红移,而且由于观测上难以与其它因素引起的多普勒红移区分,观测精度只有5%,1960年用穆斯堡尔效应在地球上直接证实 γ 射线在重力场中的红移的结果,在1%精度内验证了等效原理关于引力红移的预言。此外,穆斯堡尔效应首次成功地验证了横向多普勒效应,首次测定了铁磁介质中原子核所在处的内磁场。

穆斯堡尔效应在核物理学中用于确定处于激发态的一些原子核的核参数,如测定激发态的寿命,测定用其它方法难以准确求出的激发态的电四极矩,精确测定激发态原子核的g因子和磁矩,以及激发态和基态原子核半径的变化。这些测定的实验结果可以用来和一些理论预计值比较,以检验核模型的正确性。由于至今人们对于原子核结构的了解还有待深入,通过超精细相互作用来了解原子核的结构是一个不可忽视的途径。

穆斯堡尔效应最为吸引人的应用是研究物质的微观结构,它已进入化学、固体物理、分子生物学、地质学、冶金学、材料科学、考古学等几乎所有涉及物质微观结构的自然科学领域,使得一些重大的理论预测得到验证,使某些基本观点得到新的见解,使原先无法进行的实验得以有足够的精度来实现。在化学中,研究结构和化学键,确定价态和自旋态,研究反应机理和反应动力学、反应中间产物,研究催化、腐蚀和表面化学,鉴别复杂混合物中的各个组份。在固体物理中,研究晶体结构,对称性位错和点缺陷,相分析和相变,弛豫,杂质的影响,表面和界面,超细微粒和纳米材料,非晶态材料,确定转变温度和易磁化方向等。在生物学中,研究在正常条件和病理条件下新陈代谢引起的变化,含铁蛋白质的结构和功能,以及地中海贫血症、疟疾等医学病理。在地质学和矿物学中,用以鉴定岩石的结构、组份、价态,探索矿床成因,研究月球岩石、火星岩石和陨石,探索太阳系起源和演化。在冶金学中,研究金属和合金的变形、缺陷和内应力。研究织构和磁结构,研究材料性质与加工的关系。在考古学中,研究化石、古陶瓷和艺术珍品、鉴别颜料中铁的价态,等等。

目前,该领域不断深入和扩大,国际会议频繁,并且持续成为评述最多的科学领域之一。而且各种新的应用仍不断出现,促使人们继续应用穆斯堡尔方法去解决古老的课题,去意外地发现新现象,去巧妙地应用新技术,并且用以探索其他未知领域。在方法学方面,用同步辐射作为穆斯堡尔源的可能性以及原子核共振散射中的相干道增强效应的研究已取得显著效果,重离子在束穆斯堡尔谱学、航天器上的穆斯堡尔谱仪、穆斯堡尔成像研究、用穆斯堡尔效应实现 γ 激光的设想等都是研究的热点。在应用领域方面,超导材料,超细微粒和纳米材料,非晶,含铁蛋白和分子生物学的课题,陨石,星际尘埃和太阳系起源及演化的研究可能为潜在的重大科学技术的开发作出贡献。值得指出的是,穆斯堡尔谱学的应用已不再限于基础研究而逐渐进入工业技术领域,钢铁工业的每一个部门,从选矿一直到炼钢,甚至鼓风机中的煤、灰料和钢渣都用得上穆斯堡尔谱学,产品的相分析和相变研究更是这样。另外在催化、石油、煤炭、化工、磁性材料等行业也已受到重视。

参考文献

- 1 Mossbauer R L. Naturwissenschaften, 1958, 45: 538

- 2 Gibb T C. Principles of Mössbauer Spectroscopy, London: Chapman and Hall, 1976
- 3 夏元复, 叶纯源, 张健. 穆斯堡尔效应及其应用. 北京: 原子能出版社, 1984
- 4 夏元复, 陈懿. 穆斯堡尔谱学基础和原理. 北京: 科学出版社, 1987

(南京大学夏元复教授撰)

高压物理学

超导电性 是某些金属材料在一定温度以下所呈现的异乎寻常的电、磁综合特性。超导体一词表示当冷却到一定温度以下时能表现出超导电性的材料。人类对超导电性的研究历史可分为3个阶段: 第1阶段自1911~1957年是人类对超导电性的基本探索和认识阶段, 第2阶段从1958~1985年属于超导技术应用的准备阶段, 第3阶段自1986年发现高温超导材料, 人类开始步入超导技术开发时代。如若能在常温下实现超导电性, 则将使现代文明的一切技术发生变化。

1908年7月10日昂尼斯(H. K. Onnes)领导荷兰莱顿大学实验室液化氦气成功, 他利用液氦能获得1K的低温。1911年他发表论文宣布: 在4.2K附近, 汞的电阻突然下降为零。超导电性这一名词是昂尼斯随后在1913年提出的; 同年在锡、铅等元素上也发现了在一定温度下(称之为超导转变温度)电阻突然消失的现象, 这叫零电阻效应。1933年德国迈斯纳(W. Meissner)和奥克斯费耳特(R. Ochsenfeld)发现超导体具有完全抗磁效应, 现称为迈斯纳效应。零电阻效应和迈斯纳效应是超导体的两个基本性质。此后直到20世纪50年代又发现超导体一些其他主要性质, 如同位素效应、超导态下电子比热的指数规律, 在超导转变温度(T_c)处超导态正常态相变时电子比热跳跃变化规律, 正常超导相变前后晶体结构无变化以及电子谱中有超导能隙存在等。这就使人们认识到, 对超导电性的任何一个成功的微观理论必须在统一的微观物理图像基础上解释这一系列实验规律。1956年库珀(L. N. Cooper)完成了导致超导微观理论的关键一步, 在对一个简单的双电子模型进行计算之后, 库珀指出: 当两个电子间在金属内出现吸引位势 V 时, 不论 V 多么小, 都存在一个以大小相等而方向相反的动量(且具有相反自旋)而形成的电子对束缚态。库珀认为, 这一结果表明, 可能出现一种正常金属费米海的不稳定性, 因为金属中的原有电子有可能重新组合它们自己, 使每对电子进入库珀对态, 从而使多体系统进入比费米海能量更低的稳定状态, 这导致超导基态。在库珀这一工作基础上, 巴丁(J. Bardeen), 库珀、施瑞弗(J. R. Schrieffer)共同完成了超导微观理论, 称之为BCS理论。

20世纪60年代对超导技术应用的尝试达到高峰。主要有三大方面, 一是实用超导材料的发展, 继50年代中期制成 V_3Si ($T_c = 17.1K$), Nb_3Sn ($T_c = 18.1K$)后, 60~70年代制成 $Nb_3Al_{0.75}Ge_{0.2}$ ($T_c = 20.5K$), Nb_3Ga ($T_c = 20.3K$), Nb_3Ge ($T_c = 23.2K$)。二是大量的超导技术应用初探, 如1961年首次用实用超导材料铌三锡制成第1个能产生强磁场的超导磁体, 磁场达7T, 而且损耗电能小, 体积小, 从此打开了超导技术应用的局面; 同时, 铌铋、铌钛、铌三锡实用超导导线得到发展和商用; 1966年有人建议设计速度为550km/h超导磁悬浮列车, 1969年制成一台 2.4×10^6W 直流超导电机。三是20世纪60年代超导电子器件的问世; 1962年约瑟夫森(B. D. Josephson)指出, S_1IS_2 结(S_1, S_2 为超导薄层, I 为绝缘薄层)可以通过无阻电流, 只要电流小于某一临界值, 1963年他的预言被证实, 现称为约瑟夫森效应或超导隧道效应; 1963年罗威耳(J. M. Rowell)发现超导隧道结的临界电流随磁场变化非常敏感。1963年以后, 大量的实验工作详细研究了约瑟夫森效应的其它各方面, 并使这一效应得到广泛的实际应用, 一门新兴的学科——超导电子学诞生了。

1986年超导转变温度获突破性进展, 从此超导电研究进入了新阶段。1986年1月IBM的苏黎世实验室研究人员K. A. Müller和J. G. Bednorz发现Ba-La-Cu-O的化合物中 T_c 有可能有高达30K的超导电性。其后的研究都证实了他们的发现, 从而为解决高温超导材料提供了一种方法。1987年, 美国朱经武等首先制成了超导转变温度在液氮沸点以上的超导材料Y-Ba-Cu-O系统。1988年又有人制成不含稀土元素的Bi-Sr-Ca-Cu-O及Tl-Ba-Ca-Cu-O系统, 后者的超导转变温度可达125K。1993年, 朱经武等发现 $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ 的超导转变温度可达153K。

高温超导材料的发现给超导电性的广泛应用揭开了序幕。世界各国都在用很多人力、物力去研究具有高临界电流密度的高温超导实用线材、带材, 还希望突破用高温超导材料发展超导电子器件。总的看来, 高温超导研究现状仍处于攻坚阶段, 遇到了一些在1986年始未料及的困难。例如, 除继续探索更高温度超导材料外, 制造高质量并有足够大小的单晶是很重要的技术应用基础, 也是能测定高质量实验数据, 提高复现程度的基础; 又如, 高温超导材料的薄膜制造技术遇到了在低温超导材料上没有碰到的问题, 如各向异性引出的取向控制问题, 而随着要求大面积以及多层器件结构对膜的特殊要求, 还需发展相应的特殊技术。为实现实用的高温电子学器件, 需要深入研究一系列技术问题, 如衬底、缓冲层、膜选择及合成、加工、作结、元件、器件以及产品等。

应该指出, 高温氧化物超导材料只是提高超导转变温度的途径之一。与此同时, 探索有机超导体的研究不容忽视。1980年发现了第1批有机超导体, 其 T_c 不到1K, 以后发展很快, 1990年的纪录是(BEDT-TTF) $_2X$ 这一类中当 X 为 $Cu(N(CN)_2)Br$ 时, T_c 为12K。1991年有关的突出事件为掺杂 C_{60} 系统的发现, 如 K_3C_{60} , T_c 为19K, Rb_3C_{60} , T_c 为29K, Cs_2RbC_{60} , T_c 达33K。其实, 有机材料的优势在于种类繁多, 把其C键、H键改变一下就是新材料。若在有关几点上突破, 那么接踵而来的规律必然大大超过目前的高温氧化物超导材料。

相信20世纪末到21世纪初, 超导电广泛应用会日趋实现。它将在电能输送、电力工程、磁流体发电、受控热核反应、超导信号能、超导电子计算机、超导电子学器件、超导磁体技术、超导磁悬浮列车、探矿技术、地震研究技术、生物磁学、医学临床应用、针灸机理研究、气功机理研究、强磁场下物性及军事应用等广泛领域掀起瞩目的技术革新, 从而对人类生活产生深远的影响。

参考文献

- 1 Onnes K H. Leiden Communication, 1911, 120b
- 2 Meissner W, et al. Naturwissenschaften, 1933, 21: 787
- 3 Cooper L N. Phys Rev, 1956, 104: 1189
- 4 Bardben J, et al. Phys Rev, 1957, 108: 1175
- 5 Josephson B D. Rev Mod Phys, 1974, 46: 251
- 6 Bednorz J G, Müller K A. Z. Phys, 1986, 64B: 189

(北京大学博士生导师章立源教授撰)

高压熔解规律

fusion law under high bressure 指描述固体物质的熔点与压力、体积以及其它物理量之间关系的方程式。它已经成为物理学上一类经典问题而广泛地应用于物质结构、材料物理、地球物理、天体物理、合金理论和高压物理等诸多领域中。尤其是对高压物理, 熔解规律的研究无论是在理论上还是在实验上都具有十分重要的意义。

1890年萨瑟兰德(W. Sutherland)观察到的经验规律:

$$bTmM^{1/6} = \text{常数}$$

是高压熔解规律早期定量表达式之一。式中 Tm 是金属的熔点, b 是平均膨胀系数, M 是原子质量。1891年萨瑟兰德又提出熔解的固体动力学理论, 认为固体原子为振动且相互碰撞的硬球, 振动振幅增加到与原子直径有关的某一确切值时, 固体便熔解。随着高压实验技术的不断发展, 人们从实验和理论两个方面对该课题进行了大量著有成效的研究工作。1910年林德门(F. A. Lindemann)假设固体原子热振动振幅随温度升高而增大到近邻原子

平均位置间距的一半时,即近邻原子直接接触时,固体就发生熔解。同时他又假设描述原子振动的虎克常数应选取与爱因斯坦频率 ν 相对应,并且 $h\nu = k\theta$ 。由这两点出发,他推导出了林德门定律

$$T_m = C \cdot M\theta^2 \nu^{2/3}$$

式中 C 是常数, θ 是特征温度, ν 是原子体积。这个定律直到今天仍被广泛应用。1929年西蒙(F. Simon)根据固体的熔点随压力变化的实验结果总结出经验方程:

$$P = a[(T_m/T_0)^c - 1]$$

式中 a, c 是与物质有关的常数, T_0 是压力为零时物质的熔点。1963年巴布(S. E. Babb)对西蒙方程作了最详尽的检验工作,他列出了280多种物质的西蒙参数值,表明这些物质基本上都可以用西蒙方程描述它们的熔解曲线。1966年肯尼迪(G. C. Kennedy)和克劳特(E. A. Kraut)从室温下压缩率与物质熔点之间存在有线性关系总结出经验方程:

$$T_m = T_0(1 + k\Delta\nu/\nu)$$

式中 k 是与物质有关的常数, $\Delta\nu$ 是压力 p 导致的物质体积的改变量。

林德门定律,西蒙方程和肯尼迪-克劳特方程是3个最著名的高压熔解方程,其中肯尼迪-克劳特方程是西蒙方程的低压近似。1981年杜宜瑾把西蒙方程表示为压力的幂级数形式后,在低压近似下与肯尼迪-克劳特方程进行比较,讨论了两个方程系数之间的关系。

自20世纪60年代以来,关于高压熔解规律的研究工作主要集中在用不同的方法推导出已有的熔解方程和新的熔解方程,以适用于不同的物质系统和更宽的压力范围。推导高压熔解方程的方法,一是从林德门定律和德拜模型出发,一是从热力学理论,即从克拉贝龙-克劳修斯方程出发。前者必须已知Grüneisen参数 γ 与体积 ν 之间的依赖关系并选用适当的固体等温态方程。后者必须对熔解热和熔解前后的体积变化量或者他们与压力的关系作出某种假定。因此二者的结果均为半经验一半理论方程。在由林德门定律和德拜理论出发推导熔解方程的工作中,1966年维达(S. N. Vaidya)和雷伽-哥帕尔(E. S. Raja Gopal)假定Grüneisen常数 γ 与体积 ν 无关,直接应用微积分学推导出了肯尼迪-克劳特方程。为了便于与实验数据相比较,1973年雷诺斯(C. L. Reynolds)等人把Bridgman方程所表示的等温压缩代入到肯尼迪-克劳特方程,建立了一个熔点随压力变化的新方程:

$$[\Delta T_m/T_0](\beta p)^{-1} = 2(\gamma - 1/3)(1 + c_2\beta p)$$

式中 β 是压缩系数, c_2 是一个与非简谐性有关的常量。1977年雷诺斯利用新方程讨论了压力对碱卤化合物的影响。1976年可奇曼(P. R. Couchman)和雷诺斯应用特迪(D. G. Tait)方程推导出了可奇曼-雷诺斯方程:

$$T_m = T_0[1 + p/(A + Dp)]^{(2\gamma-1/3)}$$

式中 A 和 D 是与物质有关的常数。该方程比西蒙方程和肯尼迪-克劳特方程适用更宽的压力范围,由此作某些近似便可得到上述两个方程。1989年斯洛瑟(H. Schlosser)等人应用等温态方程 $\Delta\nu/\nu_0 = \ln(1 + bp)/a$ 得到了一个新的关于熔点与压力之间关系和公式

$$T_m = T_0 X^2(1 + bp)^{2/\alpha}$$

式中 $X = (V/V_0)^{1/3}$, $a = B_0 + 1$, $b = a/B_0$, B_0, B_0' 分别是固体体积弹性模量及其对压力的一阶导数。在低压近似下,由该方程也可得西蒙方程。在由克拉贝龙-克劳修斯方程出发推导熔解方程的工作中,1958年沃尔尼(A. V. Votnel)假定沿熔解曲线熔解热与熔解前后体积变化量之比是压强的线性函数,推导出了西蒙方程。1966年米克赫基(K. Mukherjee)假定沿着熔解曲线熔解前后体积变化量和熔化焓之比是常数,推导出了肯尼迪-克劳特方程。1982年杜宜瑾、严祖同和陈立涿提出熔解热与压力的二次关系式,推导出了可奇曼-雷诺斯方程,而西蒙方程是其低压近似。几乎在同时,1982年博格斯拉夫斯基(Yu. Ya. Boguslavskii)也由热力学理论推导出了西蒙方程。在他的工作,熔化焓和熔解前后体积的变化量被分别表示为压力的线性函数。还有一种推导高压

熔解方程的方法是把固体的熔点与其结合能联系起来考虑。1979年何寿安和徐济安认为熔化意味着固体原子的热运动克服结合能的束缚,因此他们假定熔点与结合能成正比,并利用Murnaghan方程推导出了西蒙方程,给出了西蒙常数的新的物理含义。1984年弗朗西斯科(G. Francisco)等人假定固体原子热振动振幅受热增大到与原子标志长度相等时,固体就熔解,于是他们由Vinet广义能量函数推导出了一个熔点与其结合能成正比的简单关系: $T_m = 0.032\Delta E/k_B$,式中 ΔE 是固体结合能, k_B 是玻尔兹曼常数。

在反常元素熔解规律的研究方面,1979年包拉斯夫斯基(U. Y. Bolusravskii)等人研究了BaI熔解曲线上的极大现象,得到一个用弹性波传播速度表示的熔点与压力关系的表达式。1982年包拉斯拉夫斯基又提出了一种解释在熔解曲线上出现极大现象的方案。为了确定元素熔点的最主要的因素,1991年华莱士(D. C. Wallace)根据固相和液相的能量和熵的统计力学理论对实验数据进行了分析,发现密度是常数时反常元素单位原子熔解焓比正常元素的大得多。对正常元素,熔解规律由熵的晶格动力特征温度和液相相关两个因素决定,而对反常元素,较大的熔解焓来源于熔解时电子基态的改变,同时熔解规律还和相应的电子能量改变相关。

高压熔解规律的纯理论研究方面,从50年代后期以来就陆续有报导。1958年温赖特(T. E. Wainwright)等人研究了刚球系统的相变理论。1964朗格特-希金斯(H. C. Longuet-Higgins)和威顿(B. Widom)提出了Ar熔解的刚球模型,1974年克劳福德(R. K. Crawford)提出了更为简单的硬球熔解模型并应用于Ar。在这些研究工作中都是以硬球系统的特性为基础,配以引力势的近似处理。近来在纯理论研究中采用自由能密度函数理论做了不少工作,其中1985年柯廷(W. A. Curtin)和阿什克罗夫特(N. W. Ashcroft),1989年登顿(A. R. Denton)和阿什克罗夫特的工作最为令人满意。

熔解理论的发展仍很不完善,不论是唯象理论还是纯理论的研究工作,都正面临着高压实验技术迅速发展的挑战。在反常元素和难熔元素的熔解理论和熔解曲线的渐近行为方面的研究工作还很不充分。这些问题必将是今后的主要研究方向。

参考文献

- 1 Babb S E. Rev Mod Phys, 1963, 35: 400
- 2 Reynolds C L. et al. J Chem Phys, 1974, 60: 6 2205
- 3 Couchman P R. Reynolds C L Jr J Appl Phys, 1976, 47: 5201
- 4 何寿安,徐济安理学报, 1979, 28: 581
- 5 Do Yi-jing Do, J Phys, 1981, C14: L03
- 6 Do Yi-jing, Zu-tong Yan, Li-Rong Chen. J Phys, 1982, D15: 263
- 7 Boguslavskii Yu Ya. Phys. Status Solidi, 1982, (b)109: 145
- 8 Guinea F. et al. Appl Phys Lett, 1984, 44: 53
- 9 Schlosser H, et al. Phys Rev, B1989, 40: 5959
- 10 Wallace D C. Proc R Soc Lond. A 1991, 433: 631

(安徽师范大学严祖同教授撰)

原子核物理学

超核 hypernucleus 除了中子和质子外,还包含一个或多个超子的原子核。

1953年,波兰达内什(M. Danysz)和普尼夫斯基(J. Pniewski)从暴露在宇宙线中的核乳胶里发现了第1个 Λ 超核。

在以后的十多年里, Λ 超核物理的研究工作,仅限于在宇宙线中用核乳胶或泡室系统地研究 Λ 超核基态结合能。由于在宇宙线中能观测到的事例稀少,因此在这一阶段 Λ 超核物理进展很慢。

1963年波德戈列茨基(М. и. Подгорецкий)发现反应 $\pi(K, \pi)$ Δ 的运动学条件适合于研究 Δ 超核。随后,费希巴哈(H. Feshbach)和克尔曼(A. K. Kerman)对此反应作了比较详细的研究。他们发现,当入射 K^- 介子的实验室动量为350MeV/c时,反应产生的 Δ 超子几乎是无反冲的,可以留在原子核内,使原子核变为 Δ 超核,同时放出 π^- 介子: $\Delta Z(K^-, \pi^-)Z$,这里 Z 标记质量数为 A ,电荷数为 Z 的 Δ 超核,由于在这个反应中重子和介子之间发生了奇异数交换,通常称此反应为奇异交换反应。利普金(H. J. Lipkin)指出,奇异交换反应可以被用来产生 Δ 超核激发态。1970年伯姆(G. Bohm)等在核乳胶里发现了吸收静止 K^- 介子产生的 Δ 超核 ${}^{12}\text{C}$ 和 ${}^{14}\text{N}$ 的激发态,并确定了 ${}^{12}\text{C}$ 的激发能约为11MeV,欧洲核子研究中心(CERN)—海德堡—华沙小组用计数器技术研究了 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^4\text{He}$ 的 γ 谱和静止 K^- 奇异交换反应。 Δ 超核激发态的发现和计数器技术的应用,为开展 Δ 超核能谱学的实验研究创造了条件。在随后的十多年里,由于先后在CERN的质子同步加速器(PS),美国布鲁克海文国家实验室(BNL)的交换梯度同步加速器(AGS)和日本筑波科学城高能物理国家实验室(KEK)的PS上引出了高强度的 K^- 介子束流,建成并改进了专门用于研究奇异交换反应的 (K, π) 谱仪。实验上相当精确地测量到了 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 和 ${}^{40}\text{Ca}$ 等一系列 Δ 超核的 (K^-, π^-) 反应能谱和分别属于 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^4\text{He}$ 的2条 γ 谱线;另外,梅(M. May)等在BNL的AGS上通过 (π^-, K^-) 反应应用符合方法又测量到 ${}^7\text{Li}$ 壳 Δ 超核(${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^{10}\text{B}$ 和 ${}^{16}\text{O}$)的 γ 谱。80年代初,多弗(C. B. Dover)等指出:由于在协同产生反应 $\pi^+n \rightarrow K^+\Delta$ 中动量转移甚大,因此通过反应 $\Delta Z(\pi^+, K^+)Z$ 产生的 Δ 超核大多处在高自旋态,特别是自然宇称的拉伸态,弥补了动量转移小的奇异交换反应的不足,后者只能产生处于低自旋态的 Δ 超核。1985年,一个国际合作组在BNL的AGS上测量到从 ${}^7\text{Li}$ 到 ${}^{19}\text{F}$ 等一系列 Δ 超核的 (π^+, K^+) 反应能谱,所有这些 Δ 超核激发能谱的测定都为开展 Δ 超核能谱的理论研究创造了良好的条件。目前,对 Δ 超核激发态的理论解释,大致分为3类:利普金等的奇异相似态理论;奥尔巴赫(N. Auerbach)和加尔(A. Gal)以及许夫纳(J. Hüfner)等的弱耦合壳模型;张宗焯、厉光烈和沈建平提出的超对称态理论。

Δ 超核的发现启发人们去寻找含有其它超子(例如 Σ , Ξ 和 Ω 等超子)的超核,但是,一直到70年代末,实验上还没有观测到 Δ 超核以外的其它超核。当时理论上认为,这是由于上述超子在核中可以通过强相互作用转化为 Δ 超子并释放出大量的能量,包含这些超子的超核激发态的能级宽度要比 Δ 超核的大得多,因此实验上较难观测到。以 Σ 超子为例,理论上预言 Σ 超核激发态的能级宽度约为20MeV左右。可是,80年代初,贝尔蒂尼(R. Bertini)等在CERN的PS上通过 (K^-, π^-) 反应观测到了能级宽度小于8MeV的 ${}^9\text{Be}$ 激发态。随后,皮卡茨(H. Piekarz)等在BNL的AGS上通过 (K^-, π^-) 反应又观测到了 ${}^7\text{Li}$ 和 ${}^{12}\text{C}$ 的激发态;贝尔蒂尼等通过 (K^-, π^+) 反应又观测到了 ${}^{12}\text{C}$ 和 ${}^9\text{Be}$ 的激发态;以及山崎等在KEK的PS上通过静止 K^- 俘获实验观测到更窄的 Σ 超核激发态,其宽度不超过5MeV。这些窄 Σ 超核激发态的发现对理论研究提出了挑战,围绕如何解释窄 Σ 超核激发态,理论上展开了热烈的讨论,基斯林格(L. S. Kisslinger)认为,在转化过程 $\Sigma N \rightarrow \Delta N$ 中末态的相对动量高达290MeV/c。根据测不准关系,这意味着 Δ 和 N 应相距很近,因此短程斥力将起作用。在考虑了短程斥力作用以后,他发现 Σ 超核激发态的能级宽度只有几个MeV。若果真如此,那么不仅可以观测到窄的 Σ 超核激发态,而且应该能够观测到窄的 Σ 超核基态,但是实验上至今没有发现任何 Σ 超核基态。多弗和加尔提出了另一种看法:在 Σ 超子的动量小于200MeV/c的情况下,转化过程 $\Sigma N \rightarrow \Delta N$ 主要是通过 $I=1/2, {}^3S_1$ 道,因此, $I=3/2, {}^1S_0$ 道为主的 ΣN^{-1} 粒子—空穴激发态将有窄的能级宽度。他们预言,通过 (K^-, π^+) 反应比 (K^-, π^-) 反应更有利于产生窄 Σ 超核激发态。在他们的理论指导下,皮卡茨等通过 (K^-, π^+) 反应确实观测到了窄的 Σ 超核激发态。但是他

们的理论正好不能说明为何通过 (K^-, π^-) 反应也同样可以观测到窄的 Σ 超核激发态。总之,到目前为止,人们仍未弄清为何存在窄的 Σ 超核激发态。

Δ 超核和 Σ 超核都是奇异数为-1的超核,那么,是否存在奇异数更高的超核呢?实验上至今没有发现奇异数为-2的 Ξ 超核。但早在60年代就发现了两个双 Δ 超核, ${}^{10}\text{Be}$ 和 ${}^8\text{He}$ 。这两个双 Δ 超核都是在核乳胶照片中发现的,是由轻乳胶核俘获 Ξ^- 超子而产生的。通过分析它们衰变产物的能谱关系,可以得到其中两个 Δ 超子之间的结合能分别是 $\Delta B_{\Delta\Delta}({}^8\text{He})=(4.7 \pm 0.1)$ MeV和 $\Delta B_{\Delta\Delta}({}^{10}\text{Be})=(4.5 \pm 0.4)$ MeV。这是目前仅有的有关 Δ - Δ 相互作用的实验知识。另外,1977年贾菲(R. J. Jaffe)根据MIT 11袋模型预言可能存在相对于强作用衰变稳定的双 Δ 束缚态,即所谓的 H 粒子,其质量为2150MeV,小于两倍 Δ 超子的质量,自旋和宇称为 0^+ ,同位旋为0,奇异数为-2。他的预言得到了势模型、孤子模型和格点规范理论支持。从夸克层次来讲, H 粒子是唯一的一个6个夸克(2个 u 夸克,2个 d 夸克和2个 s 夸克)都处在1S态上的双重子系统。有可能存在这样的束缚系统,是完全可以理解的,实验上为了寻找 H 粒子,人们提出了各种尝试方案。遗憾的是,至今尚未发现。

研究超核物理不仅为原子核结构提供了大量的新知识,而且为研究基本粒子相互作用提供了新手段,正因为研究超核物理有着如此重要的意义,近年来超核物理已经发展成为中能核物理的一个重要分支。

参考文献

- 1 Danysz M, Pniewski J Phil Mag, 1953, 44, 348~350
- 2 Подгорецкий М И. жэТФ, 1963, 44, 695~696
- 3 Danysz M. Nucl Phys, 1963, 49, 121~132
- 4 Lipkin H. J. Phys Rev Lett, 1965, 14, 18~20
- 5 Bohm G, et al. Nucl Phys, 1970, B24, 248~252
- 6 Kerman A K, Lipkin H. J Ann Phys, 1971, 66, 738~757
- 7 Auerbach N, Gal A. Phys Lett, 1974, 48B, 22~24
- 8 Zhang Zong-ye, Li Guang-lie, Shen Jian-Ping Trans. Acad. Sci. Ser., I, 1980, 40, 274~286
- 9 Bertini R, et al. Phys Lett, 1980, 90B, 375~378
- 10 厉光烈. 物理学进展, 1991, 11, 331~352

(中科院高能物理所博士生导师厉光烈撰)

量子计量学 quantum metrology 量子物理学和计量学相结合的计量学的一个新领域。

计量学是保证测量统一和准确的科学,它研究同类量的比较(测量及其单位)、不同量的联系(单位制)、量的信息的产生(测量仪器)与信息的交换(量值传递),以保证生产和商品的社会化,科学技术的可靠性和连续性。量子计量学是量子物理学的一个新分支,也是计量学的一个新领域,它的研究内容包括以下几个方面。

利用量子现象来复现计量单位,建立计量标准,使之由实物标准向自然标准过渡。

1900年普朗克(Planck)为解释黑体辐射经验公式而创立的量子论,得到了光电效应和康普顿(Compton)散射实验的验证。而原子与离子线状光谱及原子束通过不均匀磁场时受力偏转的斯特恩—盖拉赫(Stern—Gerlach)实验,进一步揭示了微观世界的不连续性——量子化的特征,终于由薛定谔(Schrodinger)和海森堡(Heisenberg)等人创立了量子力学。

量子化微观体系的恒定性远远超过了人造的实物标准,于是便产生了建立更为准确、更为稳定的量子标准的想法。

1906年,美国迈克尔逊(Michelson)用镉红光谱线的波长作历史上第1个长度量子标准 $\lambda=6438.4696 \times 10^{-10}\text{m}$ 。

1960年第11届国际计量大会决定用 K_2S_8 光谱线长来定义米,复现准确度最高可达 4×10^{-9} 。1983年第17届国际计量大会通过米的新定义,推荐5种激光辐射和两种同位素单色光辐射的真空波长值,作为长度标准,其中碘镉频612nm激光器是由中国

计量科学研究院首先研制的。

1945年,最早用分子束方法观察到核磁共振现象的拉比(Rabi),建议用原子谱线来建立时间和频率的量子标准。但直到1955年才在英国NPL建立起第1台铯原子钟。80年代德国PTB用铯原子钟复现频率的准确度已达到 10^{-14} 。1986年中国计量科学院铯原子钟的综合不确定度为 3×10^{-13} (曾和PTB作过比对)。

60年代前后,各国陆续采用核磁共振技术建立强、弱磁场的自然标准并进行电流的绝对测量。美国NBS(现名NIST)于1978年建立弱磁标准的不确定度为 2.4×10^{-7} ,英国于NPL于1974年建立强磁标准的不确定度为 1.0×10^{-6} ,中国于70年代完成强、弱结合绝对测定安培课题,强、弱磁的不确定度分别为 3.5×10^{-6} 和 0.8×10^{-6} 。1962年由约瑟夫森(Josephson)预言的超导电子隧道效应(约瑟夫森效应)和1980年由克里青(Klitzing)等人发现的量子霍尔效应(克里青效应)很快就用于电压和电阻的量子标准的建立。中国量子化霍尔电阻和约瑟夫森电压标准的不确定度目前都达到 10^{-8} 的数量级。

迄今为止,一个以频率量为基础的世界范围的量子计量标准体系已经初步形成。

在中国,已把“以量子物理为基础的现代计量科学技术研究”列入《国民经济和社会发展十年规划和第八个五年计划纲要》之中。

研究基本物理常数作为量与量之间,尤其是微观量与宏观量之间联系的桥梁。基本物理常数是自然界中的一些普适常数,目前常用的有104个,包括一些组合常数。其中除气体常数 R 和引力常数 G 外,其余各常数都可由5个独立常数通过相应的关系式计算得到。这5个独立常数是:真空中光速 c ,普朗克常数 h ,基本电荷 e ,电子静止质量 m 和阿伏加德罗(Avogadro)常数 N_A 。由于各个常数都由不同的物理规律联系在一起,每个常数可以由不止一个关系来确定,由此可以列出一组方程(方程数>待求常数个数),用最小二乘法求得待求常数的最佳值(不确定度最小的数值),称为基本物理常数的平差。

1929和1932年,分别由伯奇(Birge)和科恩(Cohen)进行了第1、第2次物理常数的平差。1955年,科恩和杜蒙德(DuMond)发表了常数的国际推荐值。1963年,由于采用新的原子量标准,用 $K_{\alpha 1}$ 光谱线来定义米以及国际温标的修改,他们又进行了一次平差。此后数十年间,国际单位制单位及标准又有了一系列变化。1967年,采用 C_{133} 原子跃迁频率来定义秒。1968年,采用新的国际温标,尤其是用约瑟夫森效应测定 $2e/h$ 工作的快速进展,导致1969年泰勒(Taylor)等人对物理常数作了一次新的重要的平差。1973年,由于光速精密测量及测得的 $2e/h$ 值更加准确,泰勒和科恩发表了物理常数的最佳值供国际上采用。此后,由于无多普勒激光光谱系及原子束技术的进展, R_{∞} 的不确定度由 1.5×10^{-8} 减小到 1.2×10^{-8} ;由于 A_{206}^{206} 和 A_{199}^{199} 银同位素丰度比的重新准确测定,银原子量的不确定度减小到 3×10^{-7} ,从而使法拉第(Faraday)常数的不确定度减小到 1.3×10^{-6} 。加上其他一些进展,1986年泰勒和洛克威尔(Rockwell)给出了物理常数的最新推荐值,以国际科技数据委员会(CODATA)基本常数工作报告的形式发表。

1988年国际计量委员会通过决议,自1990年1月1日起,采用新的约瑟夫森常数和克里青常数:

$$K_J = 2e/h = 483597.9 \text{ GHz/V}$$

$$R_K = h/e^2 = 25813.807 \Omega$$

基本物理常数的准确测定,是量子计量学的一个重要组成部分。

通过自然单位制的研究,揭示物质世界更深刻的内在规律。单位的选择是有任意性的。从严格的意义上讲,自然标准就是复现自然单位的实物;而目前采用的国际单位制,大多是公认、习惯采用的单位,并非真正的自然单位。

1906年,普朗克曾设想采用 h, m, c, e 作为基本单位,但极

少有人认真研究过。1989年,中国计量学院在发表的一项研究中指出:从 h, m, c, e 这些自然单位出发,由单位方程反推出表示物理量之间关系的与单位无关的方程,则物理学中许多量子效应,如磁共振 $\omega = \gamma B$,磁通量子化现象 $\phi_0 = h/2e$,约瑟夫森效应 $U/f = nh/2e$,克里青效应 $R = h/ne^2$,甚至还有一些尚未发现或尚未完全证实的新效应(如电容——电感量子化关系式 $L/C = nh^2/e^4$,电流量子化效应 $I = nef$)等等,都可从自然单位制单位的推导过程中得到,这可能暗示着物质世界蕴藏着更深刻的内在规律。

量子计量学在20世纪内到21世纪初的研究热点为:(1)新型量子频标尤其是激光频标的研制包括激光频率链的建立与完善。(2)质量自然标准的探索。利用航天技术在失重、无尘的条件下制造出纯净完美的晶体,或是利用可动线圈天平及激光干涉仪,按电功率与机械功率相等的原理,由电学量求得质量。(3)电单位量子标准及应用超导量子干涉器件(SQUID)的测量仪器的进一步研制。(4)磁生体系中宏观量子隧道效应(MQT)的研究及其在计量学中可能产生的应用。(5)通过基本物理常数的新的平差,从总体上提高物理常数值的准确度,并形成更为合理的量子标准体系。这就是在近10~20年内我们所能预见到量子计量学的发展前景。

参考文献

- 1 Vigoureux P. Proc Royal Soc, 1962, 270: 72
- 2 Josephson B. J Phys Lett, 1962, 1: 251
- 3 Klitzing K V, Dorda G, Pepper M. Phys Rev Lett, 1980, 45: 494
- 4 Likharev K K, Zorin A B. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, 21(2)
- 5 Kibble B P, et al. NPL Report DES, 1988, 88
- 6 Taylor B N, Cohen E R, A Report of the CODATA Task Group on Fundamental Constants, CODATA Bulletin 1986, 11(63)
- 7 Zhou Gengru, et al. Proceeding of ISEM'89, Beijing, 1989, 131~138
- 8 陈竹年. 计量学报, 10(1): 24~28
- 9 张钟华. 第5届全国基本常数激光参数激光器件学术会议论文集, 1992, 6
- 10 Stamp P C E, et al. Int J Mod Phys, 1992, B6: 1355

(中国计量学院陈竹年副研究员撰)

中子计 neutron gauge 根据中子与物质的散射和吸收作用而设计的一类检测仪表的总称。通常限于“中子—中子”法,即用同位素中子源发射中子和中子探测器探测中子。中子计的应用研究开始于测量水分,目前已发展到测量料位、特定元素含量、含氢指数和比表面积等。该检测计已在工农业生产和科研方面得到应用。根据作用原理的不同,中子计分为插入型、表面型、透射型和散射型等;根据使用场合不同,中子计又分为手提式、移动式 and 固定式等。

1932年恰德维克(J. Chadwick)发现中子后,中子物理及其应用的研究发展很快。在这种背景下,出现了对中子计的研究工作。

1952年恰德纳(W. Cardner)等利用费米(E. Fermi)中子年龄理论研究了插入型中子计和中子计探头。当时研究的目的是针对检测土壤水分的。中子源发射的快中子在土壤中被慢化,热中子探测器记录的热中子数与土壤水分的大小有关,因此插入型中子计可以测量水分。1956年范贝维尔(C. H. M. Van Bavel)等研究指出:中子法测量土壤水分时存在一个影响球,中子计只能测量这个影响球体积范围内土壤的水分。同年,荷尔梅斯(J. W. Halmcs)研究了插入型中子计测量土壤水分的标定方法和现场应用方法。

20世纪60年代对插入型中子计的研究更加深入。1965年费尔加德(P. L. Vlaard)详尽地研究了插入型中子计测量土壤水分

的方法理论,利用3组扩散理论对典型的丹麦土壤水分响应进行了计算。研究表明:探头内中子源与探测器的相对位置对探测效率和灵敏度来说是矛盾的,设计时应采取最佳位置。关于测量土壤的体积问题,他指出范贝维尔的概念是错误的,提出了重要球的新概念。因为探测器记录的热中子是快中子与无限大土壤作用的结果,在不同精度时存在不同的重要球半径。1966年国际原子能机构(IAEA)在维也纳举行了中子水分计顾问会议,讨论了中子土壤水分计的术语定义问题。1970年总结各国的研究成果,出版了一本关于中子水分计的理论和实践的指导书。这时,关于插入型中子水分计的方法原理研究已经成熟;手提式插入型中子水分计已在农业和建筑方面应用,固定式插入型中子水分计开始在钢铁工业应用。

70~80年代,中子计在多方面发展。插入型中子计除在测土壤水分方面扩大应用外,还被用于其它领域。1975年亚马麻土(J. Yamamoto)等将它与示踪技术相结合,在单井中测量地下水的流速、流向。1979年南京大学刘圣康等在研究插入型中子计测烧结料水分的测量球半径时,发现中子计的响应对含氢材料的料位很敏感。当被测物料的含氢量为常数时,可以当作料位计使用。1983年马休(P. J. Mathew)等利用插入型中子计测煤的料位(但对于缺氧的石英砂,中子测料位不灵敏)。他们在热中子探测器外包了一层聚乙烯,使被砂散射返回的快中子被慢化,因而使热中子探测器有响应。1983年刘圣康等还研究了含水物质内的超热中子空间分布,为研制插入型超热中子水分计提供了理论依据。

早在1966年加德纳(R. P. Gardner)等利用双组中子扩散理论研究过表面型中子水分计。同年,革米尔(Gemmell)等利用多组理论进行了研究。1969年列波尔特(W. J. Lippold)等用蒙特卡罗(Monte Carlo)法进行了研究。1975年杜(W. L. Dunn)等利用3组扩散理论对3种不同形式探测器进行了研究。他们的研究表明:在土壤表面的中子源向土壤发射快中子,被土壤慢化后部分热中子返回到在土壤表面的探测器中,被记录的快中子数与土壤水分有关,因此,表面型中子计可以测量表层的土壤水分。1966年已开始用表面型中子计测量表层土壤水分,用 γ 射线测土壤密度。1990年湖南省交通科研所朱怀安等,研制了手提式和移动式表面型水分密度计。1975年孟恰(A. R. D. Monchy)等研究了表面型中子界面计,并首次用于测量丙烷脱沥青分离器内泡沫和液体的界面。1981年差尔顿(J. S. Charlton)等将表面型中子计作为含氢材料的料位计。1978年亚马麻土等将表面型中子计用于测量油桶底板与地基间的间隙。

透射型中子计的原理是基于中子束通过物质时会被衰减。1970年哥布纳夫(V. Gorbunov)等研究了快中子透射探伤。1973年皮尔斯(T. B. Pierce)研究了用热中子透射计测量盘形金属板内硼、锂及氢元素的含量。1975年审克拉尔(K. F. Sinclair)研制了热中子透射扫描计,用于探测材料内部缺陷。1976年海尔夫(S. Helf)研究了利用快中子透射减速原理检测食品水分。1978年卫达(N. Wada)研究了同轴型中子透射装置(氢分析器),用于测量重水中的轻水含量。1983年高永洋(T. Higashi)等研究了快中子透射计,利用Cf-252中子源发射的中子和 γ 射线同时透射测量焦炭的水分和密度,获得经密度修正的水分值。

1980年开始,刘圣康等详尽地研究了热中子透射计及其应用。用3组扩散理论和实验研究了慢化体内的中子通量密度分布和幅比分布,获得热中子束引出的最佳设计。1980年首次用热中子透射计测量小样品水分;1981年用于测量石油岩样的含氢指数;1983年用于测定磁性材料 $Ba_{1-x}Gd_xFe_{12-x}Zn_2O_{19}$ 和 $Ba_{1-x}Gd_xFe_{12}O_{19}$ 中的含钆量;1985年用于测量磁粉 $\gamma-Fe_2O_3$ 的含氢量;1988年用于研究测量钢板厚度;1989年用于研究测量水泥的比表面积。另外,1985年刘圣康研究了热中子- γ 射线透射检测,其装置利用锂玻璃对中子和 γ 射线都有响应的特点,解决了用一个探头同时检测样品的水分和密度,从而得到精密修正的水分值。

散射型中子计的原理是基于中子进入物质后会被散射。1980年刘圣康等研究了热中子散射计,也已用于测样品水分;1983年还研究了测量水分的非线性问题。原则上,散射型中子计适用于测中子散射截面大的元素,这方面的应用尚待开发。

20世纪内的研究热点:(1)研究新的中子检测方法,开发新类型的中子计,以解决工业自动化生产中的一些检测难题;(2)仪表集成化和微机化;(3)现有中子计继续推广应用。

参考文献

- 1 Gardner W, et al. Soil Sci, 1952, 72: 391
- 2 Ølgaard P L. 1965, 97
- 3 IAEA, Tech Report, 1970, 112
- 4 Reynolds G M. American society for testing and materials, 1976, 58
- 5 Higashi T. Radioisotopos, 1979, 28(2), 116
- 6 刘圣康. 核技术, 1989, 12(8): 546~548
- 7 刘圣康. 中子水分计. 北京: 原子能出版社, 1992

(南京大学刘圣康教授撰)

用于核素测量中的切连科夫计数技术

当一个带电粒子通过透明介质,它的速度比相同介质中光的速度还大时,就产生切连科夫辐射。该效应是前苏联П. А. Черенков于1934年发现的,И. Тамм和И. Франк对此作了理论研究。切连科夫辐射的研究和应用,一直是高能物理学家的领地,直到现在,切连科夫计数器仍然是探测高能质子和介子的重要手段。后来,人们领悟到,在水溶液中许多 β 放射性核素能产生切连科夫辐射,可以利用它进行核素的测量。利用切连科夫计数法测量 β 放射性核素,有以下几点优于普通液闪方法:直接在水溶液中计数,不用加入有机闪烁液,成本低,无毒性;制备测量样品简便,测量瓶中可充满待测溶液,有效灵敏度高;计数后的溶液可以回收,继续进行化学操作。此外,实验室中普遍拥有的液闪装置不经改装就可应用,不用专门添置设备。这些优点推动了此项研究工作的发展。到70年代末,这种测量方法已达到成熟阶段,对一些影响因素,如溶剂的折射系数和体积的影响、淬灭及其校正、波长移动剂的使用,都做了比较详细的研究,并确定了单一核素的计数条件。近期研究工作集中于扩展应用领域以及多核素混合物的测量。

发生切连科夫辐射的条件为 $\beta n > 1$ 式中 β 为粒子运动的相对速度(粒子速度/光速); n 为透明介质的折射系数。对于相对论电子, β 和电子能量 $E(\text{keV})$ 有关:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{1}{(\frac{E}{511} + 1)^2}}$$

如介质是纯水, $n=1.332$,于是电子形成切连科夫辐射时, β 必须大于0.7508,由此得到 $E=263\text{keV}$ 。这就是说,只有能量大于263keV阈能的电子才能形成切连科夫辐射。

切连科夫辐射的另一个重要性质是有很强的方向性,它相对粒子运动方向成 θ 角发射: $\cos\theta = \frac{1}{\beta n}$ 由式(2)可知,随电子能量增加, β 接近1, $\cos\theta$ 接近0.7508。由此得到,电子引起的切连科夫辐射的最大发射角在水中为 41.3° 。

切连科夫过程产生的光子有着确定形状的连续谱分布。理论上,这个谱从X射线一直延伸到微波范围,和计数测量有关的主要部分处在近紫外到蓝色的区域。人们所熟悉的围绕着游泳池反应堆堆芯的蓝色亮光,就是切连科夫辐射。

普通的液体闪烁计数装置不需任何改装就可进行切连科夫计数测量,普通液闪测量 ^3H 的仪器设置,对于大多数核素的切连科夫计数都是满意的。由于切连科夫辐射的方向性,仪器在单管型式下计数会有高的计数效率,但本底却增大许多。所以,在实际应用中几乎全都设置于符合型式。测量中普遍应用体积为20ml的标准尺寸的液闪测量瓶。瓶子的材料以聚乙烯为最佳,这种材料能使方向性很强的切连科夫辐射发生散射,并且对紫外光的吸

收也小,所以,计数效率高且本底低,低钾玻璃瓶的本底次之,普通玻璃瓶最高,但由于价格低廉仍在大量使用。本底计数率(min^{-1})由于仪器及测量瓶的不同,在几个到几十个之间变化。

由切连科夫过程影响探测效率的因素有阈能、方向性和光子产额。在水中只有大于 263keV 的 β 粒子才能产生切连科夫辐射,因此,核素放出的 β 连续谱中低于阈能的 β 粒子将不能被探测。另外,切连科夫过程的光子产额相当低,辐射方向性也不利于光的收集,因此发射低、中能 β 粒子的核素的探测效率都较低。这是切连科夫计数法的一个缺点。实验测定一些核素的探测效率结果表明,由于核素的 β 能量的不同,探测效率有很大差别。可以采取一些措施提高中低能核素的探测效率。如选择折射系数高的溶剂作计数介质以降低阈能;应用波长移动剂,减弱切连科夫光的方向性并减少吸收。这些措施都收到了明显效果。另外,影响探测效率的设备因素诸如仪器的放大增益及窗宽的设置,样品体积、测量管的材料等都值得注意。

和普通液闪比较起来,切连科夫计数样品的溶剂选择有更大的自由度。实际上,任何透明液体都能用来做为切连科夫辐射的产生介质。对溶剂的主要要求是,它在蓝色和近紫外谱区能传输辐射能量且只有小的衰减。 β 粒子形成切连科夫辐射的阈能仅依赖于溶剂的折射系数。在高折射系数的溶剂中其阈能变低,这样,在核素发射的 β 连续谱中有更多的部分被计数,计数效率将增加。对中低能核素,其效率的提高是很显著的。人们发现,甲基水杨酸(常温下是液体)是一种很好的切连科夫计数介质。它有高的折射系数(1.522),并具有波长移动剂的作用,可大大提高中低能核素的探测效率。实验发现,对 $^{18}\text{F}\beta^+$ (635keV)和 ^{36}Cl (709keV),效率提高了几十倍,可达 $80\%\sim 90\%$,接近普通液闪水平。

为了得到可重复的测量结果,计数溶液的体积是一个必须控制的参数。每个研究者须要通过实验确定所用装置的体积效率函数。从一些核素的体积效率曲线图中可以看出, β 核素的能量越低,体积的影响越大。切连科夫计数中体积效应比普通液闪更显著。在应用标准液闪瓶的计数系统中,曲线在接近 10ml 处通过最大值。但是对于一个给定的低水平液体样品,人们往往采用最大可能的体积,以求达到更低的探测限。

γ 射线和低原子序数的物质,例如水的相互作用,主要通过光电效应和康普敦散射过程产生次级电子。当这些次级电子能量超过 263keV 阈能时,切连科夫辐射就发生了。H. H. Ross(1969)用 ^{55}Mn (没有 β 辐射)作了实验,其计数效率为 5.4% ,其中 2.4% 来自溶剂和 γ 射线的作用, 2.1% 来自样品瓶的玻璃, 0.9% 来自光电倍增管的窗。 γ 射线的响应和 β 粒子形成的切连科夫事件在最终效果上是相同的。可以说, β - γ 核素较纯 β 核素只增加了一些额外的探测效率。如果在水中加入高原子序数的物质, γ 射线产生的次级光电子和康普敦电子就增加了,其探测效率将提高。这样有可能作为探测 γ 放射性核素的手段。

某些物质具有波长移动剂的性质,它吸收短波长的光(如近

紫外光),并在可见光区域各向同性地 π 发射,这种化合物叫做波长移动剂。在切连科夫计数溶液中加入 π 移动剂后,紫外光的吸收和切连科夫光的方向性都减弱了,使计数效率得到提高。这对低能 β 核素的测量是有价值的。4-甲基伞形酮以及一些羧-磺酸的衍生物已成功用于此目的。应用波长移动剂将带来某些弊病,比如,制样的简单性丧失了。另外,加入这类化合物后,计数体系就变成切连科夫和普通液闪的混合体系了,由此可能带来化学淬灭。为了克服加入波长移动剂可能引起的化学淬灭,H. H. Ross设计了一种由两个同心室构成的石英测量瓶。内室盛计数溶液,外室放波长移动剂。但未得到普遍应用。

在液闪测量中淬灭现象是影响计数准确性最重要的因素。淬灭分化学淬灭和颜色淬灭两类。在普通液闪计数中,化学淬灭经常是严重的,分子被去激而不发射可见光的辐射。在切连科夫计数中不存在化学淬灭,是由这个效应的性质决定的。没有化学淬灭,制样的自由度就大了。实验表明,强酸如硫酸、盐酸、磷酸、高氯酸,强碱如氢氧化钾、钠、铵,以及相应的盐都不明显降低切连科夫计数效率。在切连科夫计数中,存在紫外及可见光被吸收引起的颜色淬灭。例如,很普通的 NO_3^- 、 NO_2^- 离子就是强的吸收紫外光的物种,这就基本上限制了应用硝酸溶液去计数。有色溶液特别是黄色和红色比蓝色引起的淬灭要严重。

淬灭引起计数效率降低和脉冲高度谱变化。较高能量核素的脉冲高度谱,发生淬灭时显著移向较低能量,强度有所减少。较低能量核素的高度谱移动较少,但强度降低显著。解决淬灭问题最理想的办法是消除产生淬灭的因素。(1)稀释法。当待测溶液的放射性水平足够高时,将样品进行稀释,使淬灭物质浓度低于引起淬灭的界限。(2)化学脱色。正因为切连科夫计数不存在化学淬灭,所以可使用强烈的化学手段使样品脱色,并已在粪、尿及血液样品的测量中广泛使用。当淬灭因素不能消除时,需要对淬灭影响进行校正。已经发展的校正方法有:内标定法、内道比法、外标定法、外道比法和分光光度法。这些方法已在普通液闪测量中广泛采用。

切连科夫计数技术已应用到许多领域中的样品测量,如动物和植物组织、同位素制备、环境物质、反应堆排出流以及医学试验等。应用切连科夫计数时,按计数体系的不同可分为单一核素和多核素测量。对单一核素进行测量的技术已很成熟,已有10多种核素实现了切连科夫计数。其中,使用最普遍的是 ^{32}P 的测量,其次为 ^{90}Sr - ^{90}Y 。利用切连科夫辐射的特点,可以对多核素体系进行测量。例如,L. C. Brown利用阈能效应快速测定 ^{32}P 、 ^{33}P 混合物。 ^{32}P 应用切连科夫计数,而 ^{33}P 低于阈能则完全被“隐蔽”。有些核素的 β 能量较阈能高得不多,计数效率低,可以在它存在下应用道比法对硬 β 核素进行测量。如B. Carmon等完成了大量 ^{132}P 中切连科夫计数测量 ^{90}Sr - ^{90}Y 和 ^{106}Ru - ^{106}Rh 。 α 粒子的切连科夫阈能在 1000MeV 以上,通常 α 核素的能量远低于此值,因此,可以在 α 核素存在下测量 β 核素。

(中国原子能科学研究院郭景儒研究员撰)

化 学

化学计量学 chemometrics 又称计量化学或计测化学,系译自瑞典 S. Wold 1971 年提出的 Chemometrics 一词。化学计量学应用数学、统计学与计算机科学的工具与手段,设计或选择最优化学量测方法,并通过解析化学量测数据,最大限度地获取有关物质系统的化学信息及其他相关信息。化学计量学研究化学量测的基础理论与方法学,其发展与作为化学表征与量测科学的现代分析化学的发展紧密关联。现代化学测试仪器的进展,使化学量测过程数据获取的自动化程度大大提高。化学工作者面对大量的测试数据,需要从这些原始化学量测数据中提取有用的相关信息,以解决生产与科学研究中的各种实际问题。计算机的普及与应用,使许多过去无法实际应用的数学与多元统计方法能通过机器实现,为化学工作者解析复杂体系的量测数据与获取化学信息提供了有效手段,促进化学计量学发展成为新兴的化学分支领域。化学计量学的发展,可追溯到 20 世纪初美国 W. S. Gossett 提出的 Student 分布。在化学、特别是分析化学中,应用数理统计方法对化学量测数据进行误差分析已有较长历史。但直至 60 年代,这方面的研究主要仍停留在描述型统计方法的应用上,如标准差、置信区间等的估计。有机化学中线性自由能与分子参量之间的关系,开创了化学计量学构效关系的基础研究。70 年代化学工作者特别是分析化学工作者开始大量应用各种多元统计及其他数学与计算机科学新方法进行化学量测的实验设计与数据解析,形成了化学计量学这一化学学科分支。

化学计量学包括十分广泛的内容,如分析信息理论、采样理论、分析检测理论、校正理论、分析信号的滤波、平滑、变换、卷积等处理方法、化学模式识别、定量构数关系研究、化学专家系统、化学试验设计与优化、化学反应的数字模拟、合成化学计量学等。现代化学仪器与化学计量学结合起来,为解决复杂的各类化学与相关学科的实际课题提供了强有力的手段。这些课题包括如复杂试样的分析鉴定、商品质量检测与真伪辨别、资源调查与预报勘测、污染监控与环境保护中污染源查找、卫生防疫与职业病及地方病病因研究、临床化学分析与疑难疾病如癌症早期诊断、法医检验与罪犯侦查、考古研究、催化剂及各种功能材料构效关系研究与设计、药物设计、波谱解析与结构分析、有机合成设计与定量化研究,等等。以化学计量学软件武装各类测试仪器,是实现化学分析仪器智能化的基本途径。将化学计量学与化学传感器阵列结合起来,有可能模拟生物的嗅觉与味觉功能,是化学计量学研究的重要实用课题之一。

参考文献

- 1 Wold S, Albano C, Dunn W J, et al. Mathematics and statistics in chemistry, 1984
- 2 Sharaf M A, Man D L, Kowalski B R. Chemometrics. New York: John Wiley, Sons, 1986
- 3 Massart D L, Vandeginste B G M, et al. Chemometrics, 1987
- 4 俞汝勤. 现代分析化学的信息理论基础. 长沙: 湖南大学出版社, 1987
- 5 俞汝勤. 化学计量学导论. 长沙: 湖南教育出版社, 1991
(湖南大学俞汝勤院士撰)

化学生态学 chemical ecology 化学生态学的历史渊源可追溯到公元前希腊的提奥夫拉斯图斯(Theophrastus)发现藜对苜蓿的抑制作用和中国秦汉时期的名著《神农本草经》。李时珍的《本草纲目》记载了 1892 种药物对人体的医疗和毒理作用,并

指出生产地不同生理作用也不同。1832 年,瑞士德坎多尔(De Candolle)提出作物的土壤病是由自身的渗出物引起,轮作制可使之缓解。法国昆虫学家法布尔(J. H. Fabre)在 1879 年报道了雌性天蚕蛾能引诱几公里以外的放飞雄蛾,但又称引诱剂是弥漫在大气中的粒子和以太波。荷兰费尔沙非特(Verschaaffelt)在 1910 年指出菜粉蝶幼虫喜食十字科叶子是因含芥子油苷。德国布腾南特(A. Butenandt)从 1939 年开始用数千头雌性家蚕蛾做试验,希望能确定引诱雄蛾所用的化学成分,最后增加到 25 万头,直到 1959 年,由于色谱分离方法的发展以及他本人对生理活性测试方法的多年摸索才鉴定了第 1 个性信息素蚕醇的化学结构。化学生态学的真正发展是在现代微量化学分析方法和生测技术的出现之后。1969 年,芬兰黑格努尔(R. Hegnauer)首先使用生态化学的术语。1970 年,以化学生态学为名的第 1 本专著出版,1975 年,国际性期刊《化学生态学学报》(J. Chem. Ecol.)问世。1977 年,英国哈博恩(B. J. Harborne)的《生态生物化学入门》出版,又在 1986 和 1989 年发表两篇各有 3 万多字的综述。到目前为止,化学生态学尚处在初级发展阶段,主要鉴定了大量的生态物质;对其作用的阐明,大多仅限于个体水平。琼斯(C. G. Jones)在 1988 年呼吁《化学生态学学报》的论文应增加生态学的比重,其实这是学科发展阶段的真实写照。现阶段实际上只能算是生态化学,但应朝化学生态学的方向努力。在物种对象方面,以昆虫和植物的研究居多。依斯曼(M. B. Isman, 1989)对化学生态学文献作了抽样调查,约有 70% 涉及昆虫,并指出其原因是昆虫在适应环境的进化过程中对天然物质的利用可称得上冠军,其方式的多种多样也居生物之最。

在一个生态系统中,从生物物种内和种间的通信交往、侵犯和防卫、种群动态、群落组织,直到生态系统的结构和功能,时时处处都有化学物质在起作用。这种化学物质称为生态物质(ecomone),其中研究较多的传递信息的信号化合物(semiochemical),又有种内种间之分,种内称信息素(pheromone),种间有利己素(allomone)和利他素(kairomone)。信号化合物的名称先由昆虫学界提出,现已扩展到整个动物界,在微生物界也有使用。植物界的化学通信还很少发现,报道过树木受虫害后会向邻树报警,但未鉴定出化学成分。至于他感作用(allopathy)是否属于信息传递,尚未见评述,但属于化学生态学范畴是毋庸置疑的。

生物间相互作用的结果可分为 3 种类型:一方受益,另一方受损;一方受益,另一方无损;双方均受益。昆虫以植物为食,骤然看似乎属第一类,但因植物对外来因素有感应能力,可用本身的生长、代谢等过程进行调节,将受损部分修补,甚至引起与自己种群的繁荣发展有关的适应变化,从而出现二三类关系。化学生态学的任务就是要研究这些相互作用的化学媒介,即生态物质的结构、作用机制、化学合成方法和生物合成途径,直到生态物质对生物的生理和行为的影响以及对生态系统的结构和功能的影响。经过最近 20 多年的努力,已从周围大气中捕集生态活性物质的试样;从一头昆虫鉴定其信息素成分的技术,提供了阐明个体差异的可能;在电生理检测方面,已能分辨出接收某种化学成分的专用细胞。

生态物质多种多样,其作用方式千变万化,生态物质的鉴定方法已趋成熟,每年都有大量新物质或已知物质新功能的报道。有许多生态物质是早先被认作无关紧要的次生代谢物,后来才发现生物界对化学物质的利用很节约,一物多用的例子屡见不鲜。蝶类把吡咯咪啶(pyrrolizine)生物碱兼作信息素和防卫物两种用

途。更有趣的是有一种蜘蛛不会织网,却能散发多种昆虫的信息素把它们诱来作为食物而被称为“化学骗子”。其实蜘蛛没有这样高的思维,只是进化中的巧合而已。另一方面,自身合成生态物质的例子也并非罕见。伞形科植物的防卫物可以因昆虫的适应而从简单的羟基香豆素经线萜吡喃并香豆素而进化到角稠结构。这和人类因害虫产生抗性而研制新农药有异曲同工之妙。在生物共同进化过程中,这种“道高一尺魔高一丈”式的化学武器竞赛的例子还可以举出很多。除了“武器竞赛”,还有“兵法策略”。绿桉木的防卫物集中在嫩芽和雄蕊柔荑花序中,而在可牺牲的节间组织中含量少,以求“舍车保帅”;有一种落叶树,各片叶子的毒物含量有很大差异,迫使昆虫要逐片品味,导致被天敌捕食机率的增加。化学生态学在 80 年代的一大进展是对丹宁的认识。原来只知道植物丹宁能和蛋白络合而对动物有害,现在发现不同丹宁对不同蛋白的亲合力不同,缩合丹宁对动物的危害最大,但动物有多种对付方法。哺乳动物接受丹宁后能在腮腺合成亲合力特强的富脯氨酸蛋白而把丹宁清除,有些昆虫靠肠中的表面活性剂削弱丹宁和蛋白的络合。

化学生态学的研究方向除了继续从生物个体鉴定各种生态物质外,要增加生态学的成分,即研究生态物质在群落和生态系统范围内的作用。化学生态学的应用前景最佳,特别对生态合理农药的研制以及其他仿生技术的发展将作出极有利的贡献。

参考文献

- 1 Sondheimer E, et al. Chemical ecology. Academic New York. 1970, 336
- 2 Химия и экология. И. Ф. Вая Штшница Клинцев (СССР 1981, 55c
- 3 Anon. Chemistry in ecology, an editorial review. Chem Ecol, 1982, 1(1):1
- 4 Bell W J, et al. Chemical ecology of insects. Sinauer Sunderland USA. 1984, 524
- 5 占前恒, 林七雄. 身边近生物间的化学的交涉: 化学生态学入门. 东京: 共出版社, 1985, 232
- 6 Harborne B J. Recent advances in chemical ecology. Nat Prod Rept 1986, 3: 323; 1989, 6: 85
- 7 钦俊德. 昆虫与植物的关系. 北京: 科学出版社, 1987: 227
- 8 Harborne J B. Introduction to ecological biochemistry. Academic London 1 Sted, 1977, 243; 1982, 278; 1988, 356
- 9 周昌弘, 等编. 国际植物化学生态学研讨会论文集, 中央研究院植物研究所专刊第九号, 台北 1989, 504
- 10 Insect chemical ecology, a multi-author review. Experientia 1989, (3): 213

(江苏省激素研究所华湘翰副研究员撰)

农药化学 pesticides chemistry 化学农药是植物保护与病虫害作斗争不可缺少的化学武器之一。而农药化学,则是新兴的交叉学科,它有别于有机化学,而是以病原菌、害虫、害螨、线虫、杂草等动植物微生物作为对象,研究对付它们的具有特定的或特殊的化学物质,并进行有机合成成为内容。最近统计,全世界范围约合成这类化合物 195 万种,但经过筛选,具有生物活性的仅有 400 多种达到商品化与实用化,成为有价值有机农药新品种。这说明农药是化学与生物学两大学科紧密结合、相互渗透的综合领域,而且在应用上还涉及农学、医学、环保、毒理等学科的交叉,所以也是高技术密集、跨学科的系统工程。农药化学是基础也是源头,与各学科又是不可分割、相辅相成的整体。加强这一领域的研究,才有可能促进农药工作的发展,才可能在系统工程中发挥导航的作用,而创制具有中国特色的新农药,农药化学新领域具有理论与实用的科学意义。

40 年代以前,与病虫害作斗争仅以天然的杀虫植物和无机矿物油,这属第 1 代农药。1944 年由米勒(Müller)首次发现 DDT

后,有机合成农药问世,发展成为三大支柱(有机氯、有机磷、氨基甲酸酯类)杀虫剂,新品种相继涌现,这是全盛时代,属于第 2 代农药。在解决粮食危机,控制消灭传染疾病的媒介等方面确实起了重要的作用,也促进了各学科的发展。在 1962 年卡逊(R. Carson)所著《Silent Spring》(寂静的春)中,提出了农药对自然生态的破坏及农药生物浓缩残留污染公害问题后,对有机农药的功与过,褒贬不一,引起争议。有的甚至完全否定,而提倡不使用农药,这种抨击和主张是不现实的。世界谷物生产,每年因虫害损失达 14%,病害 10%、草害 11%,不断增长人口对粮食的需求,若无农药就无保证。Carson 强调开发使用无公害农药的必要性,并不是主张全部废除之。自此,残留期长的 DDT、666 被禁产、禁用。新农药的研制面临新的挑战,现阶段创制新品种,历期长(8~10a),投资增高(平均 8 000 万美元)、命中率低(随机合成 10 000~20 000 个化合物),预测 90 年代需从 7~8 万个化合物中筛选出一个达到世界级高效安全的新品种。目前只限于经济发达的国家能投入、担风险、有中心和配套研究系统。而第三世界仍依靠进口和仿制,独立生产自己的全新品种尚属罕见。近代对农药的概念与需求有所改变,不再强调以“杀死”为特征和目的,而是吸取生物化学和分子生物学等最新成就,用有机化合物影响、控制和调整各种有害生物的生长、发育和繁殖的过程。在保障人类健康和合理的生态平衡前提下,使有益生物得到有效的保护,有害生物得到较好的抑制,以促进农业现代化向高层次发展,这些具有特殊的生物活性的有机物质都属于农药,也就是艾德(U. EDER)等 1987 年称为第 3 代及第 4 代的农药。他们把保幼激素(Juvenile)、抗保幼激素(Anti-Juvenile,例如:早熟素 Prococene)、蜕皮激素(Ecdysones)及合成的几丁质抑制剂(Chitin synthesis Inhibitors),甚至合成的拟除虫菊酯类化合物都算第 3 代,而把改变害虫取食行为的拒食剂(Antifeedant)和交配行为的信息素(Pheromones)归为第 4 代。这种趋势区别于第 2 代就在于从杀虫谱广转为选择性强(不仅对人畜且对有益生物或天敌也安全),从速效性转为影响生长发育(IGR Insect Growth Regulator)的缓效作用,从高毒高残留硬农药转为低毒低残留的软农药。因此,寻找化学结构新颖而特殊的毒理机制作为主攻方向,这是热点更是难点。所以,国际上新动向是强化化学与生物结合,多方位拓宽视野,以高新技术探索具有活性的有机化合物新途径。

从化学观点看,长期基于以杂原子(基因)为中心的反应论假说,或以原料、中间体的选择出发,随机合成,大量筛选,虽取得不少成果,但其盲目性使命中率降低,这条常规的途径,以有机分子设计的理论及采用量子化学、分子力学、SAR、CAMM 等方法,计算机辅助设计合成,研究构效关系,企图逐步改变现状。从生物学观点看,也由被动变主动,探索新靶标,寻找决定毒杀作用新的毒性基因的分分子合成,同时建立快速化、微量化、标准化、独特新颖的生物检测体系。这也涉及对生物的作用机理、药理、毒理的阐明,需要加强生理生化基础研究,故生物合理研究法(Biorational approach)在创制农药中再度被重视和发展。

在元素有机化学的领域中,有机磷化学仍占主导,五元或七元环磷酰硫化物、磷酸酯类、笼状有机磷等是国际农药会的议题(1990 年,汉堡),在杀菌、除草方面获得实用。杜邦公司(Du Pont)推出的有机硅化合物氟硅唑,具有高效内吸广谱杀菌特性。有机锡、二唑锡也作为杀螨剂涌现。此外,氟元素或氟基团导入,合成出新品种氟乐灵,是著名的除草剂,氟酰胺是优良的杀菌剂,含氟的菊酯也具有杀虫杀螨兼顾的性能。特别重视的是光学活性,手征性活性物质的拆分,转化和非对称合成的研究日益被人们所认识。世界上使用的农药和医药中有 22% 是纯光学体,它能立体选择的与专一酶的作用位点相吻合,提高活性降低用量,不仅改进生态学指标更提高经济效益。光学活性农药也是现代化农药高难技术发展的趋势之一。

在探索未开发天然物作为先导化合物方面已蓬勃发展。在生物源学说的指导下,寻找具有杀虫、杀菌活性的动植物资源,已有

悠久的历史。现代分析仪器的微量化,更加促进了对其有效组分的识别,在某种意义上,自然界是创制新农药最好设计师,它提供了新信息,历史上从毒扁豆碱发展氨基甲酸酯类、从沙蚕毒素(Nereistoxin)发展出巴丹等新品种,从除虫菊突破合成拟除虫菊酯类杀虫剂,都是杰出的成功实例。这条途径若以模拟天然物的母体结构作为先导化合物,运用拮合原理,电子等排概念进行修饰,或通过构效关系进行改造、简化仿生合成设计,将可导出有特色的新品种,例如:马丁·杰克森(Martin Jacobson)从事44年杀虫植物研究的经验,汇编总结1631种具有拒食作用的植物衍生物,认为楝科(Meliaceae)、芸香科(Asteraceae)、紫菀科(Astereceae)、锦葵科(Malvaceae)、唇形科(Labiatae)和Canellaceae为最有应用前途的植物,对其过去、现在和未来作了综述,值得参考。国外对楝科植物的研究取得显著成果,从亚非地区的印楝树(*Azadirach indica*)发现有效成份Azadiachtin印楝素,具有高效拒食与IGR作用。确定其复杂的化学结构花费十多年,国际每两年召开专题会,全合成正在进行。最近它的粗提物和部分纯化应用,已获专利的商品名为“Margoson-O”获美国环保局(EPA)批准,允许销售这种改良的配制品。这是天然农药的方向。中国华南农业大学植保系昆虫毒理室也坚持研究天然产物十多年,为自然资源的开发与利用,提供信息和科学依据。还有一些新发现,如植物防御素(Phytoalexins),它源于植物自身产生主动御敌的化学物质,如稻瘟病原菌入白植株后,产于防御物Oryzalexins,结构已被鉴定。这方面的突破,有可能使未来害虫综合治理(IPM)进入所谓“预防性农业”(Prophylactic agriculture)阶段,人为活化或合成植物主动防御物来达到此目的也是有可能的。天然源产品是饶有趣味有待开发的潜在源泉。

新靶标的探索,也是新动向,已有可喜的苗头,例如:依据昆虫表皮形成过程中抑制几丁质合成酶的机理,已开发出灭幼脲,定虫隆等许多新品种。磺酰脲类除草剂,是抑制植物体内带支链的氨基酸的生物合成,即抑制有些氨基酸合成过程中必不可少的乙酰乳酸合成酶(ALS),磺酰脲类分子和ALS酶的作用点为酶中的硫胺焦磷酸素,这些研究提供可靠新的筛选模型。杜邦公司已合成4万多个磺酰脲类化合物,在世界上也掀起热潮,发表专利120篇,介绍1000万个各种可能的磺酰脲类化合物,咪唑啉酮类,三唑并嘧啶类都是ALS抑制剂。此外 γ -氨基丁酸(GABA)突触也是新靶标,笼状有机磷化合物尽管尚未出现突破,但已用抑制性的神经传导作用位点来寻找GABA抑制剂。光敏性杀虫剂、除草剂、异株克生化合物、酶抑制剂等都处于方兴未艾的研究阶段。

参考文献

- 1 见里朝正,无公害农药,北京:农业出版社,1982
- 2 赵善欢,等.华南农业大学学报,1985,6(2):79~89
- 3 Keyserlingk H C von, et al. Approaches to New Leads for Insecticides. Spring-Verlag Berlin Heidelberg,1985,1~46
- 4 Martin Jacobson, Insecticides of Plant Origin, 1989,1~10
- 5 Shang Zhi-Zhen. Proceedings of the International Seminar Recent Developments in the Field of Pesticides and Their Application to Pest control. UNIDO,1990,187~198
- 6 吉冈宏辅.农药译丛,1991,13(1):15~19
- 7 德国《化学工业》编辑部.农药译丛,1991,13(5):1~4
- 8 李正名.农药译丛,1991,30(4):3~8
- 9 National Research Council. Neem, A tree For Solving Global Problems. National Academy Press, Washington D C,1992
(南开大学尚稚教教授撰)

生物光化学 光感受体(即感光的物质)的光化学,光感受体范围广,功能各异。物质受光激发后则处于激发态。

紫外光(UV)对生物大分子作用的研究经历了3个阶段:早期用253.7nm(即254nm)波长光;中期用的是UV光解技术;后期即80年代后用激光冲光作为光源。早期研究从光化学角度主

要研究造成蛋白质变性、肽键与氢键以及二硫键的断裂、脱羧与脱氨基作用,甚至酮和醛的分解。UV对蛋白质及酶的作用,得出的结论是其中的芳香氨基酸(尤其是色氨酸)与胱氨酸对照射敏感。用UV闪光光解技术作用于蛋白质,由于往往是在水溶液中进行,所以可引起光离解,因此反应中可检测到水化电子。现在常用265nm波长的激光,延时有3ns与15ns,也有用微微秒(ps)的。毫微秒UV脉冲激光对中性水溶液中的酪氨酸(try)与苯丙氨酸(phe)的作用都是双光子作用,并且都通过三重态(即 ^3try 与 ^3phe)完成,但在碱性条件下为单光子过程。水化电子量效率 $\Phi_{e_{aq}^-}$,前者是0.095;后者是0.15。色氨酸与前两者不同,光电离的最初反应是单光子过程,电子是从较高的电子激发态(S_N)或从最低激发单重态(S_1)较高振动能级释放的,双光子过程的贡献很小。但在低温玻璃态(77K)则主要通过色氨酸三重态实现双光子过程,但此时用的是非单色光(D. V. Bent等,1989)。

L. I. Guosswiener(1982)用265nm波长脉冲激光光解一些酶得到的产物,如 try^- 与 trp^- 的量子效率之和等于 e_{aq}^- 与 RSSR^- 的量子效率之和,说明酶的原初光解过程就是光离解。进一步实验指出,色氨酸水溶液光解可以是单光子也可以是双光子过程,但在普通UV光强下则为单光子过程。用265nm(UV)与5nm(G)双波长光照射可以证明上述的结论。用265nmUV(17ns延时)照射色氨酸溶液,光离解产生水化电子的量子效率可为(UV+G)的双激发而提高,单独UV照射 $\Phi_{e_{aq}^-}$ 也可随加热而提高。但是(UV+G)照射在20~80℃范围内,色氨酸产生的水化电子的量子效率是恒定的。色氨酸单用UV照射在高温(80℃)下,其 $\Phi_{e_{aq}^-}$ 可以达到(UV+G)照射时的大小。由此说明,UV照射的单光子光解过程在热作用下会跟双光子过程竞争。酪氨酸与色氨酸不一样,单用UV照射就有双光子过程。因为将 try 与 trp 光离解最初形成的 $\Phi_{e_{aq}^-}$ 与用2654nm波长单光子过程对铁氰化钾作用产生的 $\Phi_{e_{aq}^-}$ 比较,对 trp 而言,单用UV照射呈直线,用(UV+G)照射呈向上弯曲的线;但对 try 而言,两种情况都为向上弯的曲线,以表明双光子过程。

对于上述结果的解释是:吸收一个光子可以产生一个短寿命的中间产物(X),此中间产物可为光再活化也可随加热而活化。这一中间态称为CTTS态,即电荷转移到溶剂的一种状态。电子从CTTS态形成仅能在高介电常数环境中发生,如乙二醇-水溶液在玻璃态时,色氨酸受照射时的 $\Phi_{e_{aq}^-}=0.01$,但在室温下 $\Phi_{e_{aq}^-}=0.2$,这是因为在室温下,水的介电弛豫快, $\Phi_{e_{aq}^-}$ 增加。

(UV+G)联合照射各种酶、芳香氨基酸,光离解的量子效率都很高,说明这些蛋白质光离解都是双光子过程。G. Grabner等(1991)用不同延时不同波长的激光照射血叶啉水溶液, $\Phi_{e_{aq}^-}$ 的大小,在0.2~ $>1000\text{mJcm}^{-2}$ 激光能量范围内,决定于激光能量。当用毫微秒266nm与355nm两种波长分别照射时,水化电子主要是由双光子过程形成。在单光子过程中, $\Phi_{e_{aq}^-}(266\text{nm})=0.05$,大于 $\Phi_{e_{aq}^-}(355\text{nm})=0.004$;也就是说,355nm单光子几乎不形成水化电子。在双光子过程中,用355nm(30ps)照射比用355nm(10ns)照射时 $\Phi_{e_{aq}^-}$ 要大。只用532照射则无水化电子产生,上述不论是单光子还是双光子过程, $\Phi_{e_{aq}^-}$ 都随血叶啉浓度增加而降低。

激光对蛋白质与酶溶液作用可产生水化电子,这些水化电子可对蛋白质及其组分作用。但是水化电子的产生途径以及水化电子对蛋白质的作用机制及详情仍,需要进一步研究。

核酸的嘌呤与嘧啶碱基吸收200~300nm的紫外光,但长期以来都是用254nm波长研究UV对核酸的作用。核酸组分在室温溶液中荧光寿命只有1~10ps,量子效率低。早期研究UV对核酸作用的光化学,只知道有氢键的断裂,股间的交联,嘌呤碱基吸收的能量可以转移给嘧啶碱基或糖-磷酸,骨架而引起进一步的化学变化。60年代后期,由于发现在UV照射下形成一些光产物,因此开始重视对产物形成的分析,最初发现的是光水合物,以胸腺嘧啶(T)为例,即在5,6双键上加一个水分子,以后又发现

在 5,6 双键上形成环丁烷二聚体 T 但量子效率较低。而 6,4 嘧啶-嘧啶酮光加成物(非环丁烷二聚体)的量子效率比二聚体还要低很多。光水合物是由激发单重态形成,而环丁烷二聚体是由三重态形成。但嘧啶三重态寿命很短 $\tau_T = 2\mu\text{s}$, 系间为窜越及磷光量子效率(Φ_{sc} 及 Φ_p)都很低。胸腺嘧啶及嘧啶在水溶液中 Φ_{isc} 分别为 0.006 与 0.02。

真空紫外:由于激光光源的兴起,经常用的是短波紫外光,如 248nm, 266nm 等等。由于新光源的发现,可以产生 <200nm 波长的远紫外光,所以乃建立了真空紫外光化学。用 ArF 激发二聚体可产生 193nm 波长的紫外激光(L. E. Kochevar 等, 1990), 而同步辐射加速器可产生 130nm 波长光。

193nm 的 UV 已应用到外科手术即用来割去皮肤。193nm UV 可引起 DNA 股断裂, 碱性易变位与核酸内切酶易感产物, 但它不引起变异的光产物。193nm 对水是透明的, 不为水所吸收, 能量全由 DNA 吸收。193nm UV 形成二聚体的量子效率比 254nm 波长要低 10 倍, 而股断裂等量子效率则很高。Kochevar 与 L. A. Buckley (1990) 报道, 193nm 对质粒 DNA 作用可通过单光子过程发生光解, 形成单股断裂的量子效率可达 9×10^{-5} 。

193nm 与 254nm 波长比较, 除具有对皮肤较低的穿透力外, 还具有较低的毒性与致突性, 这是因为它比 254nm 波长形成的二聚体少的缘故。

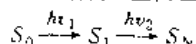
超短脉冲激光与双光子的作用: 1963 年, 1963 年, K. H. S. Baddasaryan 等发现在冰冻状态下用低强度 UV 照射有机分子时有两步激发, 后来又发现由较高三重态形成的光产物的量子效率与光强的平方成比例。借助两步激发就有较高激发态布局, 它们可能具有约 6~10eV 的能量, 从而导致原初光化学过程如光电离以及溶剂的敏化溶解。

1979 年 D. G. Kuyukov 在开始用微微秒 UV 脉冲激光 (10^{13}Wcm^{-2} , $\tau_p = 29\text{ps}$, $\lambda = 266\text{nm}$) 照射胸腺嘧啶水溶液, 发现第 1 跃迁的吸收有不可逆的降低, 再用 240~300nm 波长照射得到的差光谱与胸腺嘧啶的 $S_0 \rightarrow S_1$ 的吸收带完全一致, 说明激光照射后形成的产物不吸收 266nm 波长光。以后他就用 $\Delta D/D$ 光密度值为指标, 进一步两个波长研究了胸腺嘧啶稀水溶液, 一个波长是 266nm (能量 = 10mJ $\tau_p = 20\text{ps}$), 另一波长为 532nm (能量 = 10mJ $\tau_p = 25\text{ps}$), 结果单独用 266nm 脉冲光照射可看到, 样品的光密度在低光强时增加到高光强时达饱和。若同时用 532nm 波长照射, 可加强在低光强下光密度的变化。若两种波长光间隔 100ps, 这种加强作用消失。由此可见, 两个波长同时照射时, 由 266nm 脉冲光产生的一个中间激发态可吸收 532nm 脉冲光而处于更高激发态, 而且中间激发态寿命很短, 因此两个波长相隔 100ps 时, 后一波长就没有效果, 从而证明这是一个两步激发的过程。Kryukov 等还证明, 高强度 ps 脉冲激光对胸腺嘧啶的光解产物与低光强 UV 产生的光产物, 在质与量上都不一样。

所谓两步激发, 就是使已经处于 S_1 或 T_1 能级的激发态分子再吸收第 2 个光子而处于更高激发态。这就是需要发处于更高激发态 S_N 与 T_N 的速率大大超过 S_1 或 T_1 的失活率。这一要求可有两种条件满足, 一种是用强激光光源增加激发率; 另一种是在低温冰冻条件下增加 S_1 或 T_1 的寿命。

1989 年, F. N. Dobbrove 等对不同能量和脉冲延时的 UV 对质粒中核酸单股断裂, RNA 交联与核苷酸中的糖苷键的断裂等进行了比较, 结果表明, 在高强度中能量大的比较量小的量子效率要大, 它们又比低光强 UV 量子效率高。

自 1979 年后经过多年实验后, 已经了解两步激发可以有两通道达到更高激发态即通过 $S_1 \rightarrow S_N$, 也可通过 $T_1 \rightarrow T_N$ 。现在已基本肯定, 用 ps 脉冲激光激发产生高位的 S_N , 即:



而用 ns 激发, 虽然可产生 S_N 与 T_N 两者, 但主要是产生高位的 T_N , 所以它的通道是:



在这一通道中存在系间窜越过程, 所以光化学的量子效率的量子效率一般比 S_1 通道的两步激发低, 换言之, 即毫微秒比微微秒脉冲光的光化学量子效率低。上述实验也说明这一点。

UV 激光对核酸股断裂的作用: UV 脉冲激光对 DNA 股断裂包括单股断裂与双股断裂, 这方面的研究目的是了解 UV 对细胞及细胞内核酸的作用机制。

1980 年, D. A. Angelov 证明, 用微微秒 UV 脉冲光照射核酸组分的水溶液, 双光子作用可使水光解产生一些产物, 并且参与了核酸组分的分解; 还证明胸腺嘧啶在水溶液中光解的量子效率决定于溶液的浓度, 浓度降低光解的量子效率增加, 证明双光子对水的光解产物参与了胸腺嘧啶的光解。但 1987 年 O. N. Nikogosyan 证明, 毫微秒 UV 照射胸腺嘧啶水溶液, 双光子解水的产物不参与胸腺嘧啶的光解。

Hgorner 用 244nm 与 266nm 两种波长的毫微秒与微微秒强激光照射核酸水溶液可产生水化电子, $\Phi_{e_{aq}}$ 在低光强时随光强增加而呈线性增加, 说明水化电子与碱基阳离子对可由双光子激发产生。Nikogosyan 则认为, 光强超过 10^9Wcm^{-2} , 水化电子的量子效率也会下降, 并且 ps 激光对 poly(U) 的 ssb 形成也是如此, 即 Φ_{ssb} 会由于饱和效应而降低。用 250nm 波长低光强的 UV 照射多核苷酸, DNA 与 RNA 形成 ssb 的量子效率很低, 约为 10^{-6} , 这是单光子作用。若用较低高光强 (10^7Wcm^{-2}) 或较高浓度核酸 ($\sim 10^{-4}\text{mol/L}$) 测量, 由于碱基受激发形成碱基阳离子基团乃导致单股断裂。

用高强度激光, 不论是用 ns 还是用 ps 脉冲光, 对单股断裂形成有两种看法: 一种看法认为其形成是由于碱基阳离子基团的作用; 另一种看法则认为是 $\text{OH}\cdot$ 作用的结果。D. V. Nikogosyan 研究了在无氧条件下双光子对单股断裂形成的作用, 因为在溶液中受毫微秒脉冲激光的光解可形成水化电子, 在有 N_2O 时这些电子乃转变成 $\text{OH}\cdot$, 后者作用于核酸形成单股断裂。实验指出, 若在溶液中加入足够的 N_2O , 使所有水化电子都清除掉, 则各种不同的核苷酸的 Φ_{ssb} 都可增加一倍。

核酸受 UV 作用也可引起双股断裂, 这有两种可能: 一种是由单个离子直接形成; 另一种是两个独立的光解分别形成两个单股断裂, 因而是一个积累过程。但核酸与核苷酸单股断裂形成尚无定论。

一般而言, 凡是能发荧光的物质都能发磷光, 但一般不一定能检测到。近年来发现, 只要很好地去除溶液中的氧, 在室温下可测量磷光。

磷光由三重态产生, 测量三重态可以反映蛋白质的特性。测量三重态和磷光有下述几种方法: (1) 当三重态寿命很短时 ($\text{ns} \sim \text{ms}$), 可用三重态-三重态吸收法 ($T_1 \rightarrow T_N$), 用 $T_1 \rightarrow T_N$ 吸收法测得木瓜蛋白酶、牛血清白蛋白 (BSA)、人血清白蛋白 (HSA) 等色氨酸的三重态。HSA 含有一个 trp 残基, 其 $\tau_T = 0.5\text{ms}$, BAS 中含有两个 trp 残基, 无氧时 τ_T 分别为 0.5ms 与 6ms。 (2) 三重态寿命较长即大于 ms 时, 可用直接测量磷光的方法研究。最早测定的是马肝中的 LADH (乳酸脱氢酶) 以及大肠菌中的碱性磷酸酶 (AP), 许多关于室温下蛋白质磷光的知识都是从此两种酶得到。 (3) 三重态寿命可通过部分漂白基态的恢复间接检测到, 此即 TAA 法。 (4) 延迟荧光 (DF), 方法有两种: 一种叫 P-type DF, 即三重态-三重态湮灭法; 另一种叫 T-type 或 E-type DF, 即 $T_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_0$ 过程。T-type DF 的强弱决定于三重态激发单重态间的能量差。 (5) 光学测定三重态磁共振方法 (ODMR), 此法基于三重态在磁作用下可分裂成 3 个亚能级。其布局不同有不同的磷光, 需要在 2K 中进行。

蛋白质的磷光可用做蛋白质结构和动力学的探针。蛋白质在溶液中的长寿命磷光反映色氨酸处于相当坚固的微环境中。许多球蛋白的磷光对温度都有依赖性, 即在 170K 以下, 温度升高对磷光只有很小影响, 温度高于 170K 或更高, 磷光寿命就降低, 当溶液变成流体时暴露的色氨酸的磷光则被溶解氧猝灭, 所以室温下 Φ_p 只有低温下的 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ 。温度升高磷光峰位会移向长波

长。室温下的磷光多是从埋藏 t_{rp} 发出。一般而言,在无猝灭剂时埋藏的 Trp 衰减时间较长。凡含有一个色氨酸的蛋白质都具有相当长的磷光寿命,但荧光峰位则蓝移,这是由吡啶微环境的疏水性造成,同时说明了长寿命的磷光团深埋藏在蛋白质内部(G. B. Stranbini, 1990)。

对蛋白质中的色氨酸三重态的猝灭也是一种反映蛋白质微环境和动力学的探针(N. E. Geacintov 等, 1989)。氧既是磷光的猝灭剂也是荧光的猝灭剂。荧光的双子猝灭常数 K_q 与双分子碰撞速率常数 K_d 相等。但溶液中三重态猝灭常在正常状态下蛋白质不允许氧穿过,但是在瞬间结构涨落时,蛋白质仍成为“开放”状态,使 Trp 暴露于猝灭剂下。由于氧对色氨酸磷光不受扩散速率限制,因而氧也与蛋白质的挠性有关。丙烯酸胺对蛋白质发光的猝灭常数也是 $K_q > K_d$,而 K_q 对蛋白质中 Trp 埋藏程度较不敏感,这可以通过单重态猝灭是长程作用而三重态猝灭是短程作用来理解,但是丙烯酸胺的猝灭作用与距离的依赖性仍需进一步研究。D. D. S. W. Calhoun 等用不同大小的猝灭剂分子对 10 种蛋白质磷光猝灭的结果是:当 Trp 埋藏程度增加,小分子猝灭剂的 K_q 降低到最小;中等大小的猝灭剂的 K_q 则有较大的变化,即易感性大;大分子猝灭剂的 K_q 也减小。Calhoun 还用大分子猝灭 9 种蛋白质磷光,发现对同一种蛋白质不同猝灭剂的 K_q 相同,从而说明猝灭决定于蛋白质而不决定于猝灭剂。

(复旦大学程极济撰)

生物电化学 bioelectrochemistry 电化学与生物学的交叉学科,它以生命过程中的电现象以及外电场对不同生物体系的影响为主要研究对象,旨在从分子水平或超微结构水平揭示相关生物事件的本质与规律。生物电化学的某些研究课题在电生理学、生物化学或生物物理学中可能遇到,但所采用的原理和方法各有所异。生物电化学对生物医学科学领域中不同问题的研究主要基于电化学的基本原理和实验方法,从而创建了自成体系的独立学科分支。

据考证,“生物电化学”一词最早出现在 Hampel 主编的《电学百科全书》中,但是人们对于这一领域的探索可追溯到 18 世纪末。1791 年意大利 L. Galvani 根据青蛙实验的结果,发表了阐述生物体组织与电相互作用的研究报告,这一科学活动被认为是生物电化学的历史开端。在同一年代, A. Volta 也对生物体的电现象进行探讨,提出神经是电导体的观点。几年之后 J. W. Ritter 从事了电生理和氧化还原方面的研究。1843 年 D. Raymond 测定了静态和受刺激后肌肉和神经的电流,几乎同时 Helmholtz 测定了神经脉冲的传播速度,而 Bernstein 发展了生物电本质的物理概念。20 世纪初, L. Michaelis 将氧化还原电势的概念引入生物体系,而 D. Keilin 提出呼吸链的氧化还原模型。1941 年 A. S. Gyögyri 把生物大分子的导电性能同固体物理理论联系起来。1961 年 P. Mitchell 提出了生物体系能量转化的化学渗透理论,并利用氧化还原模型加以阐明。随后 I. Prigogine 建立了适用于生物过程的不可逆热力学理论。上述这些贡献都对生物电化学的学科发展产生了不可低估的影响。尽管如此,生物电化学作为新的学科分支直至 1971 年才得到国际上的普遍承认。最有影响的事件是当年在罗马举行了第一届国际生物电化学会议,同时成立了由电学家、生物学家、生物物理学家和电生理学家共同组成的学术机构——国际生物电化学学会。生物电化学能够在今天成为独立分支立于科学之林,不仅是最近 20 年来人们对生命科学高度重视的结果,更重要的是由于大多数生命过程具有电化学的本质,从而为有关课题的电化学研究提供了更多的成功机会。20 世纪 60 年代后电化学理论和实验技术的迅速发展为生物电化学的兴盛提供了良好的条件。

生物电化学研究正在沿着分子水平、细胞水平和生物体水平 3 个不同的层次同时展开,内容十分广泛。当前较有代表性的研究课题可概括为如下几个主要方面。

1. 生物体系的组分及其模型化合物的氧化还原过程和质子

交换过程的热力学和动力学。围绕生物能过程和代谢过程的基本问题,对各种生物氧化还原体系或模型物进行广泛研究。为了探索细胞色素 P450 系统、呼吸链、光合成和固氮作用的机理,研究了醌、黄素、大环配体金属络合物、细胞色素、辅酶和酶,以及非酶氧化还原蛋白等有关的各类化学物种的电化学性质,并利用当代电荷传递理论和能量传递理论加以解释。光合成和生物发光研究开辟了生物光电化学的新领域。研究了一些重要代谢过程中的电子和质子的传输过程以及所伴随的化学反应,酶活性中心的电化学性质,超氧化物自由基的形成机理,代谢过程的电化学调节。药理作用也与生物氧化还原紧密相关,已对维生素和神经镇静剂等一系列药物的电化学性质、药物与生物高分子形成的复合物的界面电化学性质进行研究。核酸及其组成物质的电化学研究正在增多。值得注意的是,80 年代以来光谱电化学技术的日益广泛应用,大大加速了生物氧化还原研究的步伐,成为揭示过程机理、检测过程中间物的强有力工具。

2. 生物膜及其模型物中的电荷分离与物质传输。这一领域的研究对象有生物体系中的电位起源、电子传递链与光合成的电极学状况、离子载体与离子选择性通道、以传递蛋白质为中介的离子传输过程、以及兴奋性细胞膜及模型物中的过程。生物电化学研究用的膜模型物多种多样,有双层膜、脂质体、溶液/空气界面、电解质/介电液体界面、互不混溶的电解质溶液界面。不同模型系统有着各自的应用范围并要求使用不同的实验技术。类脂双层膜已被用于重构模型细胞体系,以研究由脂溶性阴离子和膜活性络合物引起的离子传输、膜的表面性质(如双层膜结构、不同离子或表面活性剂的吸附)、膜的机械性质和在电场中的稳定性。对膜的不同模型物的研究已为膜过程的机理解释打下了基础。

3. 生物电动现象和外加电磁场作用下生物体系或其组分的行为。有关研究包括生物电动现象和力-电现象、生物膜的介电性质、细胞电融合机理等。典型的例子如血凝和心血管问题的电化学机理,不均匀电场中生物大分子的分布与运动,体系介电性质和外加电磁场对细胞分裂、融合和生长的影响。外加电磁场对器官功能的影响已有报道,如外电场对动物肝功能与胆汁分泌的影响作用等。

4. 应用生物电化学。可分为两大类型:(1)生物电化学技术的应用,如生物电化学传感器(酶电极、组织电极、微生物电极、免疫电极以及基于离子载体的离子选择性电极等)的研究,生物分子电子学装置的研制,电合成中的生物催化,生物燃料电池,生物光解水体系与储能体系,细胞或生物分子的电分离技术,利用细胞电融合或电基因转移的生物技术(如用于制备胰岛素、干扰素、肽和蛋白质等),微生物污染的电化学防止等。为了实现这些技术应用,尚需开展大量的应用基础研究。如在生物传感器、生物电催化和生物燃料电池研究中,涉及到电极表面的生物功能化、生物电极上的反应动力学与电流响应特性、酶的直接电子传递及其增强作用、还原态辅酶的电化学再生、生物电化学反应器性能等一些基本问题。(2)电化学技术在生物医学科学中的应用,包括生物体系表征的电化学技术(尤其是活体电化学技术)的研究,用于诊断或卫生检疫的生物电分析方法的建立,治疗用的电化器器件的研制(如植入式假器官材料的电化学性能研究,心脏起搏器用的长寿命化学电源和刺激电极,人工胰脏中的葡萄糖传感器,人工肾中的电化学消毒系统)。除上述外,脑电图、心电图、电针灸、损伤骨骼的电刺激愈合再生、癌肿瘤的电化学消除等,也属应用生物电化学的研究范围。

生物电化学已经取得瞩目的进展,但它仍然处于幼年时代。可以预期,随着各个科学技术领域的新理论和新方法不断汇集于生物电化学的研究中,该学科将得到更快的发展,并为人类社会带来不可低估的效益。

参考文献

- 1 Hampel C A. The Encyclopedia of Electrochemistry. New York: Reinhold, 1964
- 2 Blank M. Bioelectrochemistry: Ions, Surfaces, Membranes.

- Washington: Am Chem Soc, 1980
- Koryta J. *Electrochim Acta*, 1984, 29: 1291~1292
 - Chizmadjev Yu A. *Electrochemistry in Research and Development* (eds Kalvoda R and Parsons R). New York: Plenum Press, 1985, 211~221
 - Srinivasan S, et al. *Bioelectrochemistry* (Comprehensive Treatise of Electrochemistry vol. 10). New York: Plenum Press, 1985
 - Milazzo G. *Electrochim Acta*, 1986, 31: 1491~1494
 - Gutmann F, Keyzer H. *Modern Bioelectrochemistry*. New York: Plenum Press, 1986
 - Milazzo G, Blank M. *Bioelectrochemistry I. Biological Redox Reactions*. New York: Plenum Press, 1983; *Membrane Phenomena*. New York: Plenum Press, 1988
 - Dryhurst G, Niki K. *Redox Chemistry and Interfacial Behavior of Biological Molecules*. New York: Plenum Press, 1988
 - Junter G A. *Electrochemical Detection Techniques in Applied Bioscience*. Chichester: Ellis Horwood, 1988

(厦门大学博士生导师吴辉煌教授撰)

声化学 sonochemistry 主要指利用超声空化能量加速和控制化学反应, 提高反应产率和引发新的化学反应的一门新边缘交叉学科, 是声能量与物质的一种独特的相互作用。1927年 W. T. Richards 和 A. L. Loomins 发现超声化学效应。随着科学技术的进步, 已经能够提供高效率而经济的各种功率超声源, 为声化学的研究和超声在化学化工中的应用提供了重要条件。

声空化是指存在于液体中的微气核(空化核)在声场的作用下振动、生长和崩溃闭合的动力学过程。在空泡崩溃闭合时产生局部高温、高压和发光。液体中的微小气核在声场的作用下响应可能是缓和的, 也可能很强烈。这取决于声场状况, 如声强、频率和液体的性质如表面张力、粘度和蒸气压以及周围的环境如温度和压力等等。根据对声场的响应程度, 人们一般将空化分为稳态空化和瞬态空化两种类型。稳态空化是一种较长寿命的气泡振动, 常持续几个声周期, 而且振动常是非线性的。一般在较低声强(小于 $10\text{W}/\text{cm}^2$) 时发生。这种在声场中振动的气泡, 由于在膨胀相气泡的表面积比压缩相大, 使膨胀时扩散到泡内的气体比压缩时扩散到泡外的多(即所谓“整流扩散”), 而使气泡胀大。当振幅足够大时, 有可能由稳态转变为瞬态空化。气泡崩溃闭合时所产生的局部高温、高压不如瞬态空化高, 因为气泡中主要充有气体和小量蒸气, 气体有缓冲作用。稳态空化所引起的微冲流会增加质的传输。瞬态空化一般在较高声强(大于 $10\text{W}/\text{cm}^2$) 发生, 只在一个声周期内完成。当声强足够高, 在声压为负半周时, 液体受到大的拉力, 气泡核迅速胀大, 可达到原来尺寸的数倍, 继而在声压正半周时, 气泡受压缩而突然崩溃而裂解成许多小气泡而构成新的空化核。在气泡迅速收缩时, 泡内的气体或蒸气被压缩而产生约 5000C 的高温, 类似太阳表面的温度, 及局部高压约 50MPa , 相当于深海底的压力。伴随着发光、冲击波, 在水溶液中产生自由基 $\cdot\text{OH}$ 。

在液体中有悬浮固体的颗粒的非均匀相的情形, 所发生的声空化与纯液体中的空化现象有很大的不同。由于液-固交界面附近声场受扰动, 观察不到纯液体中那种对称、球状的空泡崩溃, 而发现空泡崩溃时向固体表面喷出速度达 100ms^{-1} 的微射流, 使固体表面发生凹蚀。这种现象只有固体的表面积比共振气泡大几倍时才发生。小的固体颗粒在湍流和冲击波的驱使下可使固体粒子产生高速冲撞。

声空化所产生的局部高温、高压、发光、冲击波、微射流等能加强传质, 使固体表面保持高的活性, 同时使不相溶的液-液界面发生乳化分散。

超声化学效应的机理普遍认为是超声空化。空化产生的易难

程度和强度与超声场、液体介质的性质以及周围环境诸因素有关。在液体中产生空化的最低声强或声压幅值称为空化阈。一般说提高声强会增加空化强度, 加强化学效应, 而频率高会提高空化阈使难于发生空化; 液体介质的粘度高, 表面张力大则难于发生空化, 一旦空化发生, 将增加空化强度, 增强化学效应; 液体中含气量增加会降低空化阈, 所含气体的 γ 值(热传导比值)大时所产生的空化强度也高; 液体的温度升高会使表面张力及粘度下降、蒸气压上升这些都会降低空化阈, 但同时也会降低空化强度; 当液体的外部压力提高时, 空化阈也提高, 即不易产生空化。要得到预期的超声化学效应, 必须综合考虑上述影响声空化的因素, 合理设计声化学反应器。

超声在有机合成中的应用研究发展较快, 主要研究对象是多相反应, 特别是有机金属反应。在有机物氧化、缩合、取代、偶联、加氢、环丙烷化和氢硅化反应等方面得到广泛的应用(J. Lindley 等, 1987)。声化学反应一般在低超声频段($20\sim 30\text{kHz}$) 进行。其反应大致可分4种基本类型(T. J. Mason 等, 1989)。有金属表面参与的反应: 一种是金属作为试剂在反应中消耗掉; 另一种是金属只起催化作用。声空化所产生的冲击波及溶剂向金属表面高速喷射的微射流使金属表面不断被清洗、腐蚀、更新和激活, 增加有效反应面积而加速反应。有粉末状的固体颗粒参与的反应: 声空化作用能将金属或非金属颗粒进一步粉碎, 增加反应面积和使表面活化, 有可能替代相转移催化剂(PTC), 作为促进固-液多相反应的一种新手段。同时空化作用使多相介质混合得更均匀, 提高质的传输。在水或粘度低的液体中高速旋转的机械搅拌, 其最高的质传输系数 K 为 $0.015\text{cm}^2/\text{s}$, 转速再高 K 也不再增加, 而超声空化作用可进一步提高。乳化的反应: 声空化促使两种不相溶的液体迅速乳化, 增加反应区域, 可以代替 PTC。如果将 PTC 和声空化作用结合起来, 效果更好。均相反应: 空化泡中一般充有气体和溶剂的蒸汽, 当气泡崩溃时, 蒸气受压缩而产生的局部高温、高压, 产生自由基, 伴随冲击波的作用会改变溶剂结构而影响反应。

超声以一种独特的能量形式在合成化学反应中有以下一些特点: (1) 加速化学反应, 提高反应产率。例如在催化反应中用镍作催化的烯烃加氢反应, 在超声的作用下活性增大几十万倍(K. S. Suslik 等, 1989)。又如特丁基氯在乙醇水溶液中的反应在声强不高的超声作用下反应速加快2倍, 若优化温度、溶剂配比和适当声强, 反应速度可加快20倍(J. P. Lorimer 等, 1987)。 (2) 降低反应条件。例如金属铜用于 Ullmann 偶联时(J. Lindley 等, 1987), 往往需要高温, 在超声作用下金属颗粒被粉碎, 使所需反应温度下降。又如在硅氢反应中, 传统方法需要进行强烈的机械搅拌, 同时要求温度在 $40\sim 80\text{C}$ 的条件下才能反应, 而在超声作用下可不用机械搅拌, 在 30C 下即可进行反应(B. H. Hon 等, 1983)。 (3) 缩短反应诱导时间, 声化学反应可以缩短生成 Grignard 试剂的诱导期(J. P. Spich 等, 1980)。含有水及乙醇各 0.01% 的乙醚溶液进行声反应时, 其诱导期仅需 10s , 而用传统方法则需要 $6\sim 7\text{min}$ 。有机卤化物与金属锂合成烷基锂的超声反应(50kHz) 可以避免用活泼试剂, 能提高反应性, 消除诱导期。 (4) 进行有些传统方法难以进行的合成反应。例如难反应的芳基卤化物, 用超声辐射时可发生偶合反应(T. D. Lash 等, 1985)。又如 $\text{Fe}_2(\text{CO})$ 与萘在超声作用下在负 20C 即可生成稳定的络合物(M. J. Begley 等, 1987), 而用其它方法难以做到。除上述特点外, 超声辐射还能改变反应产物, 减少某引起经典反应步骤, 避免某些副反应产生等。

高聚物反应一般在低频($< 400\text{kHz}$) 高声强($> 3\text{W}/\text{cm}^2$) 的超声作用下进行。聚合反应: 丙烯腈、丙烯酸酯和甲基丙烯酸酯等或者分散在水中, 经超声辐照能够聚合。高分子降解反应。高聚物溶液在超声作用下引起粘度持久降低。降解有均裂、异裂及分子内歧化等方式。高分子在溶液中的形态对降解有很大关系。在良溶剂中分子链扩张受机械力作用时容易降解而在不良溶剂中分子链卷曲, 降解困难。人们曾提出各种理论来解释降解机理, 如声空

化介质产生自由基与高分子之间作用的降解理论;冲击波使快速运动的溶剂分子与高分子间产生的摩擦导致分子链断裂和剪切力降解理论等等。共聚反应:利用超声进行共聚反应的研究非常活跃。与化学共聚不同,超声共聚反应时间短,操作简单,特别是对那些用普通方法难以进行的共聚物更为有用。超声合成共聚物有两条途径:一是高聚物—单体反应。通过高聚物降解产生大自由基引发单体共聚;另一途径是高聚物—高聚物反应。通过两种高聚物降解物降解产生的大自由基交叉结合。目前已实现丙烯酰胺与丙烯腈共聚形成嵌段共聚物,苯乙烯—甲基丙烯酸甲酯共聚。我国成都科技大学也曾用超声方法引发聚乙烯醇与丙烯腈共聚制备了嵌段共聚物。聚丙烯酰胺与聚氧化乙烯形成的接枝共聚物。以上不少共聚物用常规化学方法难以制备,超声方法为合成上述产物提供一条新的途径。

超声在电镀方面的应用研究在20世纪50年代已有报导。最简单的方法是将超声直接引入电镀槽中。声空化作用增加沉积层的速率,在镀铜时得到较光亮的镀层,电流密度可以增加8倍。电镀时在很宽的电流范围内不必严格控制温度也能达到所需的镀层要求。引入超声的另一种方法是将超声振动加在阴极上。镀锌时用低碳钢作阴极,在其上加20kHz的超声振动,结果其微硬度增加10%,镀层晶粒变细而光亮(E. Namgoohg等,1984)应用的另一领域是非电镀化学沉积。对外形复杂的铸件用超声进行非电镀沉积能够得到均匀的镀层,沉积速率比不加超声提高5倍。用于高分子薄膜的电沉积也得到良好的效果。

超声在化工中有多方面的应用。固体粉碎、分散:超声空化能破碎悬浮在液体中的固体颗粒,使粉末分散在液体中。例如用于石墨粉碎,云母及高岭土剥片,用于磁盘、带氧化铁粉的分散。处理陶瓷浆液时能提高成品的密度,改善性能等。萃取:能缩短萃取时间,例如提取环境样品中的苯并芘时比用常规方法快30倍以上(高达治,1982)。消泡沫:在饮料和制药工业中,超声消泡沫不需要加消泡剂。强超声通过空气直接辐射到液体表面,无机械接触。除气:溶于液体中的气体在声场作用下振动、生长并聚成大的气泡上升到液体表面而逸出。可用于照相乳液除气,熔融金属、玻璃等的除气以减少凝固时形成的孔隙。超声雾化:超声雾化液体可以得到均匀而大小可控的雾滴。在吸入治疗,环境增湿、调湿,制造固体粉末及燃油雾化燃烧等方面已得到应用。乳化:超声乳化的主要优点是不用或少用表面活性剂。在饮料、制药、化妆品工业及油水乳化改善燃烧等方面已得到应用,有着广阔的应用前景。以上讨论都是在低频强超声在液体中引起空化的化学反应和应用。通过测量高频率(0.5~10MHz)超声在液体中的传播速度、衰减和散射等可以用来测量分析混合液体的组分、浓度和分散相的粒度等等。是一种没有运动部件、非侵入式的新分析手段。

60年代的声化学实验大部分是在商用超声清洗槽内进行,其声强一般低于1W/cm²。70年代开始在高声强条件下进行,声强为几十W/cm²,大部分采用现成的产品如超声细胞破碎机,几乎没有为进行声化学实验的专用设备。这些设备共同存在的问题是没有声学量的指示,特别是声功率或声强的指示。所以有不少发表的实验结果不能重复,不能相互比较。近年来许多研究者虽然设计了各种各样的声化学反应器的实验装置,但大多只从化学反应条件考虑,在处理介质中的声场,声能密度仍然不清楚。T. J. Mason等(1992)用量热法通过测量介质中的温升速率来计算声功率及声能密度,使定量工作前进一步,但使用有局限性。目前声化学开始有少量工业规模的应用,但如何合理设计声化学反应器,提高处理效率是推动工业应用要解决的另一个重要课题。

声化学不同于传统的光化学、热化学和电化学,它依赖于声能量与物质间的一种独特的相互作用。声能引发、促进和控制化学反应且具有许多特点:在某些情况下能缩短反应诱导时间,减少某些经典反应步骤,加速反应过程,提高反应产率,避免某些副反应产生,降低反应条件以及进行一些用传统方法难以实现的合成反应。

综上所述,声化学在化学各领域内的研究非常活跃,并在研

究和应用方面都取得了许多成果。声化学效应的主要机理是声空化。声空化的形成、状态及强度与声参数、介质的物理化学性质以及周围环境有关。如何充分利用声能,正确设计声化学反应器,提高处理效果,必须进一步了解空化现象及其对物质的作用机理;必须研制适用于实验室及工业生产规模的超声设备,以促进工业应用。

(中国科学院声学研究所林仲茂研究员撰)

力化学 mechanochemistry 研究物质系统内机械能与化学能相互转换过程的科学。它包括两个方面的内容:一是机械能转化为化学能过程,固态晶体或高聚物在机械能作用下,化学键会重新组合,导致分子结构和材料性质的一系列变化,这些变化对合成新材料、提高产品质量,强化某些化工过程是十分重要的;二是化学反应放出能量转化为机械能的化学生力过程。最复杂的化学生力过程存在于生命体系之中。如生物分子通过生物膜的传递或肌肉组织的收缩。力化学可以模拟重要生命过程。目前已提出各种类型“力化学机”,利用有浓度梯度的LiBr和NaCl电解质溶液和酸度,刺激胶原和纤维素,使之收缩或膨胀,带动机器做功,这些研究不仅可以深化对生命的认识,在工程上也有着潜在的用途。

力化学过程理论基础,力化学体系往往是多组合多相体系,又常多步过程,伴生次级反应及其它能量形式出现,所以力化学过程异常复杂,已提出多种理论。一是机械力引起的弹性能转化为化学能的过程是通过原子间距改变而实现的平衡过程。另一种理论则认为弹性能以热形式放出引起化学键的振动而激发的非平衡过程。力化学研究领域、固态力化学、晶体或高聚物的粉碎球磨、聚合物加工(钻、切、割)聚合物拉伸、撕裂、疲劳试验等。橡胶态力化学。如天然橡胶和合成橡胶塑炼。熔融态力化学。液液态力化学:高速搅拌、溶液深冷与熔化、降摩剂筛选等。力化学为合成新型高聚物和新材料提供了新途径。在机械能作用下,实现嵌段与接枝共聚,使聚合物提高强度、耐冲击、热稳定、耐氧化、亲水性、粘合性。力化学反应使炭黑在橡胶混炼中达到补强目的。力作用使分子量降低,可塑性增加,有利成型加工。力-电化学将了解金属材料在应力作用下腐蚀机理,找到控制腐蚀方法。力化学在纤维素水解、摩擦化学、减阻剂的开发、催化剂的制备、改变药物润湿性、鱼肉冷藏和解冻等方面均有重要用途。膨胀性土体在水作用下发生物理化学变化,导致宏观应力改变,这是力化学的有待探讨的重要领域。力化学也是地球有机生命起源的基础,加强力化学研究,有助于揭开生命起源的奥秘。

参考文献

1. Вумбигно Л. Ю. кинетика и природа Механохимии химических реакций, успехи химии 1971, 11:1935
2. Jellinek H H G. Aspects of Degradation and stabilization of polymer Elsevier sci pub company Amsterdam axford New York 1978
3. Casale A, Porter R S. Polymer stress reactions, vol2 Academic Press New York, 1979, 2
4. 巴拉姆鲍依姆 H K 著. 高分子化合物力化学. 江晓兰译. 化工出版社, 1982
5. Зархню А. С. механодеструкция под действием Метод Молекулярно-динамички. успехи химии 1989, 4: 644
6. 邝生鲁, 贡长生. 力化学及其应用. 自然杂志, 1991, 14(9): 684

(武汉化工学院邝生鲁副教授撰)

缺陷化学 defect chemistry 缺陷化学属材料科学的范畴,是固体化学的一个重要分支学科。它是研究固体物质(材料)中的微观、显微缺陷(主要是点缺陷)的产生,缺陷的平衡,缺陷存在对材料性质的影响以及如何控制材料中缺陷的种类和浓度等问题。“材料的缺陷控制”既是过去和现用材料的主要问题,

也是将来新材料研制开发的关键。

1926年,弗伦克耳(T. Frenkel)为了解释 Alx 离子晶体导电的实验事实,提出了所谓的“弗伦克耳缺陷”模型;1930年瓦格纳(Wager)和肖脱基(Schottky)在研究晶体的电导率时,发现电导率与化学反应活性之间有密切关系,提出了所谓“肖脱基缺陷”模型。Frenkel, Wager, Schottky认为晶体在0K时是完美无缺的,所有离子均处在正常位置上。当温度高于0K时,由于热激发的作用,最终总会使某些格点上的离子离开了正常位置,从而形成点缺陷:空位和间隙离子,缺陷的平衡浓度由晶体平衡时,古布斯自由能为极小来确定。Frenkel, Wager和Schottky的点缺陷观点及其理论是基于当时已经相当成熟的分子运动论、化学热力学和统计力学的理论上,加上实验事实的支持,所以能广泛地被人们所接受并被沿用至今。Frenkel, Wager和Schottky也被公认为缺陷化学的创始人。

1937年德国德博尔(de Boer)提出了F色心模型,建立色心理论,开始了对晶体中点缺陷的络合方面的研究。1938年,中国李薰在研究杂质缺陷对金属强度的影响时,发现了氢杂质是导致钢轴“发裂”这个长期令人困惑不解的难题,并发明了钢中去氢技术。

1942年塞兹(Seitz)和普莱斯未克(Preisweik)为了阐明晶体扩散的机制而研究铜中点缺陷的形成能。同年亨丁顿(Huntington)利用Hartree-Fock近似和BMP方法计算了铜中的点缺陷形成能。1948年发现了辐照生成Frenkel缺陷的所谓维格纳(Wigner)效应。同年马特(Mott)和科尼(Gurney)对具有能抵消错价置换式杂质的过剩电荷的空位缺陷进行了研究。1947年11月17日肖特基、巴登、布拉顿在研究晶体表面性能时发现晶体管作用。这个发现为在晶体中引入缺陷并利用缺陷开辟了广阔的前景。

1954年塞兹(Seitz)对离子晶体,1955年金兴(Kinchin)和皮斯(Pease)对半导体晶体,1958年布鲁姆(Broom)和哈姆(Ham)对金属晶体采用高温淬火、冷加工,特别是用高能加速器提供的高能粒子辐照等方法引入空位和间隙离子,进而研究这些缺陷的本质,如形成能、迁移能、相互结合能等。1951年美国贝尔实验室利用合金烧结掺杂生产出合金结型晶体管,1954年生产出合金结硅晶体管,1956年实现半导体中杂质扩散技术,生产出扩散结型晶体管,1957年美国基尔比(Kilby)发明集成电路。晶体管和IC的生产每一步都离不开对杂质缺陷的控制:拉单晶(尽可能除去晶体中各类杂质,特别是氧),掺杂(掺入所需的元素),防杂(尽可能防止生产中各种有害杂质污染)等。

1958~1962年,人们对晶体中点缺陷的研究已经积累了丰富的理论知识和实验结果,在研究各类点缺陷,特别是肖脱基缺陷、间隙原子缺陷、反结构缺陷、弗伦克耳缺陷、I-A缺陷及阳离子分配缺陷时,发现它们都可以看作为像原子、离子、分子一样的化学单元,它们作为物质的组分而存在并参加化学反应,它们参加的反应也可以看作“类”化学反应(quasichemical reactions),因此,可以用“类”化学反应方程式以及相应的质量作用定律和平衡常数来表示。点缺陷的“类”化学反应平衡常数方程的求解十分困难,50年代末60年代初,克罗格(Kröger)和文克(Vink)采用了一种分区近似的方法,首次求解得到晶体 PbS 中各类点缺陷的浓度以及缺陷浓度随平衡气相分压 P_{H_2} 变化曲线。Kröger和Vink的工作使人们在采用化学理论(化学反应平衡常数方程和质量作用定律)研究晶体中缺陷(缺陷种类,浓度及浓度变化规律)上获得成功。这是继Frenkel, Wager和Schottky的点缺陷理论以来缺陷化学理论上的一次重大发展。

1960年范布尔仑(Van Bueren)、塞格(Seeger),1961年贝涅门(Bennemann)和科尔勒(Guéré),1964年达马斯克(Damask)和Schottky,泰勒(Taylor)和费罗伯(Firob),1967年梅利(Mairy),1968年温伯拉特(Wynblatt)和彼得罗夫(Petrov)等先后对多种晶体中点缺陷的性质进行了研究,1968年Petrov和Nashburn利用Müller等人发展起来的场离子显微镜技术获得

了铌晶体的间隙离子和空位的显微照片,人们首次直接观测到点缺陷。半导体的杂质缺陷控制技术方面于1960年晶体汽相外延生长技术获得成功;1963年纳尔逊发明了液相外延生长技术。在器件方面1960年卡恩和阿塔拉研制成功MOS晶体管;1966年东德研制出MES晶体管。特别是MOS技术使器件各项性能大大提高,对IC制造十分有利。

1970年,博伊尔人在研究MOS的 SiO_2 中的污染物碱离子导致硅表面电位发生变化并影响器件性能难题时,发现可利用MOS结构的表面反型层形成过渡响应和MOS阵列间反型层电荷转移原理制造电荷耦合器件(CCD),开创了半导体存储器的历史。1972年2月,W. M. Regitz(雷基兹)发明了1024位MOS动态随机存储器。同年9月,IBM公司在计算机主存储器上使用了双极随机存取存储器。超荧光、光学双稳态等“强光光学”的出现提供了高分解率的激光光谱学,为研究晶体缺陷,特别是杂质缺陷提供了有力的手段。1979年,埃伽尔(Y. Egawa)指出可用纠错技术来实现整片半导体存储器系统的缺陷消除技术;同年斯恩格(R. P. Cenker)也提出可用冗余结构实现半导体存储器的缺陷消除技术。这是近世代数理论第一次应用于缺陷化学领域。1974年Kröger和Vink等经过多年的研究,总结出一套点缺陷符号,为点缺陷的描述,为有点缺陷参加的化学反应方程式书写带来了很大的方便,有助于推动缺陷化学的研究。

1986年比特娜丝(Bednorz)和穆勒(Müller)最先发现氧化物 $\text{Ba}_x\text{La}_{1-x}\text{CuO}_{3-y}$ 在35K时呈现超导电性,1987年张其瑞等发现 $\text{Ba}_{0.4}\text{Y}_{0.9}\text{CuO}_3$ 在130K时呈现超导电性。同年韦尔契(D. O. Welch)和艾玛利(V. J. Emery)、科埃斯(D. E. Cox),以及中国承焕生等先后发现氧化物超导体的结构和超导性强烈依赖于氧的含量。1987年贾春林等用透射电子显微镜观察研究了Y-Ba-Cu-O超导材料的显微结构,提出了超导电性微观理论,认为Tc主要取决于导体的电子和声子结构以及相互作用的强度,Je则强烈依赖于磁通钉扎中心与磁通线间的相互作用,即与材料在冶金、冷加工和热处理过程中生产的结构和化学缺陷密切相关。1987年,日本松下电器半导体研究中心开发成功半导体新掺杂技术:ECR等离子掺杂技术。利用电子和磁场的相互作用使杂质分子离子化。在室温条件下完成掺杂,一改过去要在高温下完成掺杂的做法,大大降低有害缺陷的浓度。

当前,缺陷化学的研究热点:(1)高温超导研究方兴未艾,非常规超导体不断涌现,如一种比金刚石还硬,制作简单的布基球碳60通过掺入钠钾等卤金属而呈现高温超导特性。通过研究这些高温超导体中杂质、缺陷的作用有可能导致新的超导机制和高Tc及高Jc的超导体的发现。(2)为了满足超大规模集成电路对基片晶体大型化和器件微细化的要求,杂质引起的缺陷以及热缺陷将成为问题,低温制备技术和冗余结构纠错技术将成为研究课题。(3)绝缘体半导体化的研究,拟通过采用特殊掺杂技术,缺陷控制技术和缺陷退火技术等使带隙宽的绝缘物质半导体化,制造出在极高温度下也可稳定工作的半导体材料。(4)仿硅材料的研制。拟将具有直接迁移型能带结构并能发出红外光或可见光的物质以某种形式与硅形成一体生长出来,制造出新型的光电子材料。(5)用特殊的方法制备多原子构成的特殊用途的材料,如用敏感材料集成传感器件等。缺陷控制,作为电子能级尺度的缺陷控制,将是一切新材料研制开发的关键。

参考文献

- 1 Френкель Я И. Z. Physik, 1926, 35: 652
- 2 Dienes G J, Vineyard G H. Radiation Effects in Solid. Interscience, 1957
- 3 Schulman J H, Compton W D. Colour Centres in Solid. Pergamon Press, Oxford, 1962
- 4 Hsiao M Y. IEEE Trans on Reliability, 1969, 18: 108
- 5 Kröger F A. The Chemistry of Imperfect Crystals. North Holland, 1974
- 6 Leibfried G, Breuer N. Point Defects in Metals, Springer,

- 1978, 2: 1980
 7 Cenker R P. ISSCC Digest of Technical Paper, 1979, 150
 8 Bednorz J G, Müller K A Z. Phys B. Condensed Matter, 1986, 64: 189
 9 Welch D O, Emery V J, Cox D E. Nature, 1987, 327: 278
 10 King K C, Mura T J Phys Chem solid, 1991, 52(8): 1019~1030

(华南师范大学江茂、张栋梁撰; 蔡文正审)

胶体化学与医药研究 colloid chemistry and medicine research 几十年来, 胶体化学的理论与应用获得了很大的发展。它对医药研究的重要性正日益受到人们的重视。现在, 胶体化学已经深入到制剂学、分子生物学、临床医学等医药学的许多方面。目前正在着力研究并已获得很大发展的某些交叉学科领域, 如生物医学工程、医用高分子材料、生物流变学与血液流变学、控释给药与定向给药等, 胶体化学更是发挥着越来越重要的作用。

“胶体”一词最早是英国格雷姆(T. Graham)于1861年提出的。在胶体化学的发展历程中, 不但其研究内容不断深入, 开拓的领域越来越广泛, 而且不断丰富着其它边缘学科, 特别是医药学的研究内容。从胶体化学观点看来, 动物与人的肌体只不过是由各类粗分散体系、胶体分散体系, 凝胶及高分子溶液组成的复杂分散体系。这些分散体系被不同的生物膜隔开, 它们既独立地发挥着各自的生理功能, 又彼此相互协调, 构成统一的有机整体, 维持着正常的生命活动。如果构成肌体的分散体系一旦失去其动态平衡, 正常的生命活动就会受到干扰或破坏, 于是产生疾病。因此, 疾病实际上是由于生理平衡发生紊乱, 胶体分散体系的某些性质发生变化造成的结果。分析测定这些变化, 并应用胶体化学的理论与方法使之恢复正常, 这就是治病。因此, 从生病到治病, 实际上是一个胶体分散体系性质由变异到正常的变化过程。随着胶体化学的不断渗透与扩展, 它在医药学中已经开拓了许多重要的研究领域, 并取得了很大的进展。这不仅丰富了胶体化学自身的研究内容, 而且也有力地推动了现代医药学的发展。

人工器官 表面现象的理论在生物医学工程中具有重要的意义。某些人工器官, 如吸附型人工肝、人工肺就是在对表面吸附研究的基础上发展起来的。吸附型人工肝实际上是一个装满吸附剂的血液灌流器, 它是通过净化危难病人的血液进行解毒的一种急救治疗装置。制备吸附型人工肝的关键是要有合适的医用吸附剂。它除了应满足吸附剂的一般条件外, 还必须具有良好的血液相容性。活性炭是一种比较好的广谱吸附剂, 缺点是血液相容性差, 因此, 人工肝的早期研究皆因找不到合适的医用吸附剂而归于失败。直到1978年, 张明瑞(T. M. S. Chang)用血液相容性材料将活性炭包膜, 成功地解决了这一难题后, 吸附型人工肝的研究与开发才得到了迅速发展, 并逐渐用于临床。除了包膜活性炭外, 已研制的医用吸附剂还有树脂、氧化淀粉等。中国研制的NK-110树脂也具有较好的血液相容性。可以预料, 对表面吸附的深入研究将为人工肝提供更多的性能优良的医用吸附剂。

在表面现象研究的促进下, 人工肺、人工血液、医用粘剂、生物传感器的研究也都取得了很大的进展。这些研究成果将大大提高人们与疾病作斗争的能力。

医用高分子材料 随着医药学的发展, 高分子材料的应用日益广泛。由于生物体自身具有排斥异物和维持自己再生的能力, 而高分子材料不具备这种生命力, 因此严格说, 至今尚未研制出真正生物相容性材料。用表面化学观点阐明生物体与高分子材料界面间的特性, 是研制生物相容性材料的重要途径。血小板具有止血功能, 这是生物体巧妙的自身防卫能力, 但是, 这对高分子材料的应用却带来很大困难, 因为血液与高分子材料接触时, 它会在材料表面凝固, 并形成血栓。从表面化学观点看来, 这是与表面能量有关的一种界面现象。显然, 高分子材料的表面自由能与其血液相容性直接有关。通过表面修饰来改善高分子材料的血液相容性, 这是医用高分子材料最活跃的研究领域。自从将肝素与高

分子材料表面结合, 制得血液相容性材料以来, 这方面的研究获得了很大的发展, 经表面修饰制备的医用高分子材料有的已经用于临床。

生物流变学与血液流变学 流变学是胶体化学的重要研究内容, 它是美国滨汗(C. E. Bingham)于1929年创立的。流变学研究物质在外力作用下流动与变形的规律性, 其研究对象和应用范围非常广泛, 几乎包括了所有分散体系, 当然也包括生物机体和人体。流变学在生物机体的许多重要生命现象和过程中有着极其重要的作用和意义。从宏观的生物机体和人体的运动, 到微观的细胞新陈代谢, 红细胞与血小板的分散、聚集等, 都与其流变性有关。根据研究对象和范围的不同, 流变学在医学中发展为生物流变学与血液流变学两个分支。

生物流变学是利用流变学的基本原理研究生物机体及其组成系统、器官、细胞和生物高分子的流变性以及它们所表现的生命活动过程中的流变现象的一门正在发展中的边缘学科。它是科普利(A. L. Copley)于1948年首先提出的, 它对生物学、医学、农业、畜牧业都有着十分重要的作用。体液流变性变化与疾病的关系是临床上正在努力研究的课题, 并取得了很大进展。例如, 通过测定患者痰液的流变性变化可以判断肺的病变情况和了解药物的疗效。另外, 通过测定人或动物生殖器官粘液的流变性变化来探索生育规律, 以便寻找新的控制生育或人工授精的办法, 这也是生物流变学正在深入开展的一些重要研究领域。

生物流变学中发展最快的是血液流变学, 它研究血液及其组成成分的流动和变形的规律性。血液是血细胞分散在血浆中的悬浮体溶液, 而血浆是血浆蛋白等高分子化合物的胶体溶液。在正常情况下, 血液容量、血液粘度、血浆渗透压这些反映血液特性的理化常数都有一定的数值范围。研究表明, 对引起血液粘度升高的一类疾病, 不管病因如何, 原则上都可以采用降低血液粘度以改善血液供给状况的血液流变学疗法进行治疗或缓解。这种方法对有的疾病已收到较好的疗效, 对高血压、脑溢血、脑梗塞等疾病的治疗正处于研究中。

控释给药与定向给药 制剂学基本上是胶体化学原理与制剂工艺的结合。药物的许多剂型, 如合剂、洗剂、乳剂、气雾剂等, 都是胶体分散体系, 它们都是依照胶体化学的原理与方法制备的。控释给药与定向给药是药物制剂学研究比较活跃的领域。

传统的给药方式具有重复给药和毒副作用大等弊端。为了克服这些缺点, 人们正在研究并发展着一种新的给药系统, 这就是控释给药与定向给药。这种新型给药系统大多是用医用高分子材料与药物制成的特殊胶体体系。

控释给药是给药系统发展的第3代, 它可以按预定时间和程序有控制地将药物释放入血液循环系统或病灶区域, 以使血药浓度维持在有效治疗范围内。根据药物控释原理与方法的不同, 主要有控制扩散、化学控制、溶剂激活等不同途径。正在研究和采用的剂型和给药方式有微型胶囊、渗透泵、皮肤控释给药、体腔置放给药等。复方甲地孕酮微型胶囊制剂, 硝酸甘油透皮制剂等都是已经应用的控释给药制剂。

最合乎理想的给药方式应当不仅能有效地控制药物的释放速度, 而且还能使药物在体内定向化, 这就是定向给药或靶向给药, 又称“导弹制剂”。它是将药物与合适的载体结合, 制成某种剂型, 然后借助载体对靶组织的亲和性和特异性使药物在靶部位集中, 从而达到减少剂量、提高疗效和降低毒副作用的目的, 它是给药系统发展的第4代, 特别适用于抗肿瘤药物。

在定向给药中, 载体起着十分重要的作用。很多载体, 如乳剂、混悬剂、毫微囊、脂质体等都是胶体或粗分散体系。另外, 影响药物靶向性的某些性质, 如载体颗粒大小、表面电荷、表面疏水性等也都是表面化学的研究范围。因此, 胶体化学在定向给药的研究与开发中起着十分重要的作用。

在定向给药载体中, 人们对脂质体寄予很大希望。为了提高脂质体对靶组织的选择性和对肿瘤细胞的亲和性, 有人把载药脂质体与对抗特定细胞的免疫球蛋白结合起来, 借助免疫球蛋白的

特异性将脂质体导向靶组织。这是一种比较有希望的定向给药方法,因此,受到人们的普遍重视。

增强载药脂质体靶向性的其它方法有改变载药脂质体的大小和表面性质,设计新型热敏脂质体、光敏脂质体及H⁺敏感脂质体等。这些正在研究中的方法虽然已经取得了可喜的进展,但距实际应用还相差很远,需要继续不断地研究和探索。

以上是胶体化学在医药研究中起着重要作用的一些领域。这些研究在许多方面仍然是初步的,正处于不断发展中,很多问题需要进一步探索。在人工器官方面,医用高分子材料是关键。用表面修饰等方法研制新型生物相容性材料是该领域今后研究的重点;血液等体液流变变化与疾病的关系是生物流变学正在开发的研究领域,它将为心血管病和某些肠胃疾病的诊断、治疗提供新的方法与途径;控释给药与定向给药始终是药物制剂学非常活跃的研究领域,具有很大的发展前景,用特异性生物物质对药物载体表面进行修饰,以增强其靶向性将是今后研究的重点,它将为征服癌症做出贡献。

胶体化学与医药学的相互渗透与促进不断丰富和拓宽着它们的研究内容和领域,并正在诞生一门新的边缘学科——医药胶体化学。

参考文献

- 1 野一色泰晴. 国外医学(生物医学工程分册), 1984, 7(2): 79
- 2 谢星辉. 国外医学(药学分册), 1985, 12(3): 158
- 3 马远鸣, 徐慧英. 安徽大学学报, 1987, 27: 2
- 4 陈长治, 俞耀庭. 生物医学工程学杂志, 1987, 4(3): 211
- 5 杨孔章, 贝小来, 曹宗顺, 等. 界面与膜及其应用(第1版), 北京: 科学出版社, 1989: 260
- 6 Litt M. Chem Eng Prog, 1989, 85(12): 54
- 7 Davis S S, et al. 生物医学工程学杂志, 1989, 6(3): 226
- 8 杨明京, 周茂飞, 乐以伦, 等. 生物医学工程学杂志, 1990, 7(1): 59
- 9 Langer R. Chem. in Britain, 1990, 26(3): 232
- 10 曹宗顺, 卢凤琦等. 化学通报, 1991, 10: 21

(山东医科大学曹宗顺副教授)

生命科学与分析化学 life science and analytical chemistry 生命科学是以生物的生命过程为研究对象,也是生物、化学、物理、数学等学科之间相互渗透形成的交叉科学,并将成为自然科学的带头学科, 21世纪将是生物科学的世纪。

世界科技发达国家都将生命科学列为优先发展的领域。美国居领先地位。美国大学的化学家已经纷纷投入生命过程中化学的研究,形成了生物无机、生物分析、生物有机、生物高分子、生物物理化学等生命化学的新领域。生命科学和分析化学具有密切的关系。美国著名分析化学家B. L. Karger在1990年指出,生命科学中很多进展是分析化学所推动,如聚合酶链反应技术、多维核磁共振、DNA顺序分析、高分辨X-射线结构分析等新方法的发展,对生命科学进入分子水平的研究,带来巨大的影响。X-射线结构分析确定DNA分子的双螺旋结构,就为生命科学进入分子水平打开了一个突破口(L. Stryer)。基因DNA顺序分析为许多基因组、基因表达的调控和蛋白质结构,提供了大量信息是研究生命科学的分子基础;多维核磁共振波谱测定蛋白质分子的三维结构,已成为研究蛋白质结构与功能,探讨生物活性机理的基础;现代生命科学中很多问题已经成为化学和生物学的共同研究对象。生命科学向分析化学提出的热门课题,目前集中在核酸、蛋白质、多肽等生物大分子分析;生物药物分析,超痕量、超微量生物活性物质,如单个细胞内神经传递物质(多巴胺等)分析及活体分析;在生物无机分析中,痕量元素分析已集中到元素在生物组织层、单个细胞、甚至细胞膜中、人体蛋白质碎片内的微分布及其结合形式方面。使用超微量样品的微痕量分析,检出限要求达到fg(10⁻¹⁵g)级水平(高鸿, 1991)。

生物大分子的研究,涉及生命科学最本质的内容。一切生命

活动都建立在生物大分子的结构、运动及其相互作用的基础上,其结构复杂,以蛋白质结构为例,分为4个层次,一级结构为氨基酸顺序;二级结构指互相接近的氨基酸残基的空间关系,多数是螺旋型结构;三级结构指相互较远的氨基酸残基的空间关系,通常提供生物大分子结构与功能之间关系;四级结构指各分子单元在复杂阵列中的装配,如含有几条多肽链(亚基)的蛋白质,亚基的排列具有更重要的生物功能。有关生物大分子一级结构的信息正在迅速增长,如已测定多种蛋白质的RNA(核糖核酸)全部顺序。基因DNA顺序分析已发表约3000万个碱基数据(A. E. Bruno, 1991)。生命科学的研究已进入以生物工程为标志的新时期。生物工程可以分离基因和转移基因,根据人类的需要改造生物性,创造新品种,将成为21世纪的主导产业。人的基因DNA有30亿个碱基,目前已测量最长的基因序列是酵母DNA,全长约30万个碱基(K. B. Jacobson, 1992)。它和人的基因DNA相比较,相差4个数量级。而且目前DNA序列分析速度,每年约100万碱基。DNA是由大量脱氧核糖核苷酸组成的极长的线形大分子,分子的骨架由糖和磷酸基团组成,在整个分子中不变,并含有腺嘌呤(A)、鸟嘌呤(G)、胸腺嘧啶(T)、胞嘧啶(C)4种碱基,其顺序是可变的。DNA是遗传分子,其遗传信息由碱基的顺序所决定。因此DNA顺序分析在人的基因及生命科学研究中占有十分重要的地位,也是难度较大的分析技术。DNA是很长的生物大分子了,最小的多瘤病毒DNA分子由5100碱基组成。DNA顺序分析一般均先消化降解成若干片段。采用凝胶电泳分离,检测每个片段的碱基顺序,用计算机定出各片段的位置,再排出DNA的全部顺序。

1977年提出了第一个实用的DNA顺序分析技术,采用化学裂解法或限制酶法消化降解DNA,以放射性同位素标记DNA片段。用凝胶板电泳分离,再用放射法检测。整个分析操作冗长、十分花费精力,一个5000碱基的DNA顺序分析,需两年才能完成。1986年提出用4种荧光染料标记DNA片段,采用激光荧光法测定,检出限达到1~100a mol DNA/带。1987年美国Applied Biosystems公司推出平板凝胶电泳—激光荧光检测的DNA序列测定仪。在一块凝胶板上同时电泳24个样品,测序速度达到50碱基/(小时/每条泳道)或1200碱基/(小时/每块板)。由于采用激光扫描自动荧光检测,自动记录测定结果,并绘制出彩色图谱,排出DNA顺序,方法较简便、快速、无放射性危害和污染。1984年Schwartz等提出改进的脉冲场平板凝胶电泳(PFGE),分离DNA碱基能力提高约2个数量级,适用于大DNA片段的分离,已用于例行分析。K. Gardiner(1991)对PFGE有详细评述。1992年Yeung等采用光学多道图像检测器(CCD),在PFGE分离过程中,直接观察电泳分离图像,适时调节脉冲时间及条件,使电泳速度提高10倍,DNA测序能力据称达到23000碱基/h。1988年美国Karger等首次报道用毛细管凝胶电泳(CGE)分离DNA。经改善后,分辨率达3×10⁶板/m,比HPLC分离提高近3个数量级。DNA测序速度达450碱基/h。荧光检测的检出限达100zmol。美国威斯康星大学L. M. Smith等(1991)在CGE分离DNA方面进行了一系列出色的研究。如在高电场(400V/cm),CGE分离DNA序列速度高达1000碱基/h,比常规平板凝胶电泳仪测序速度快25倍。激光荧光检出限达到200zmol。加拿大Alberta大学Dovich等采用He-Ne激光器及柱后激光荧光检测,检出限达2zmol(1200分子)。在高电场(365V/cm)DNA测序速度也达到1000碱基/h。单支毛细管电泳测序速度相当于24条平板电泳所得结果。1992年Europhor公司已推出自动毛细管电泳—激光荧光检测的DNA测序仪。

目前已报道的DNA测序方法,应用于人的基因DNA30亿碱基序列的测定,仍远远不能满足要求,应提高分离通过量。Smith于1991年提出两条途径,采用很多毛细管同时平行进行电泳分离;或采用超薄凝胶平板电泳,提高分离速度。1992年X. H. Huang等报道毛细管阵列电泳装置,平行安排24支毛细管,同时进行电泳分离,采用激光扫描共焦荧光检测,获得较好分离

效果,据称可以安排 100 支毛细管阵列电泳及同时检测,使分离样品数可增加 2 个数量级,有可能用于人的基因 DNA 序列测定。激光共振电离光谱具有检测单个原子的能力。已有应用于 DNA 测序的检测方法研究,由于具有很高灵敏度、很高选择性、高空间分辨率、很快的分析速度等优点,有可能在人的基因研究 DNA 测序中发挥作用。

K. B. Jacobson (1992) DNA 序列分析已应用于临床、药物、重组 DNA 生产医疗用蛋白质分析等方面。在法检科学中应用 DNA 测序侦破案,可能是法检分析的一个重大突破。

每种蛋白质都具有专属的氨基酸顺序。测定蛋白质中氨基酸顺序是研究其生物活性的基础,氨基酸顺序的改变将产生异常功能和疾病,如镰刀形红细胞贫血病是由于一种蛋白质中一个氨基酸顺序的变化而产生。因此顺序测定是分子病理学的基础,是现代医学中前沿领域。由于同一祖先的蛋白质才具有相似的氨基酸顺序,因此在考古学中已发挥重要作用。

蛋白质的氨基酸顺序分析,采用常规的液相色谱紫外吸收检测,但只能获得 pmol 蛋白质序列信息。毛细管电泳—紫外吸收法的检出限改善到约 0.2 pmol。质谱法也可测定 0.1 pmol 蛋白质序列。1992 年 K. C. Dovich 等提出毛细管电泳—光热检测法,使检出限改善 3 个数量级,达到 0.5 fmol (100 fg)。并在 13 min 30 s 内分离了 20 种氨基酸。二维分离是将两种不同分离原理的分离方法串联使用。它是提高分离效率的有效途径。Jorgenson 等提出 HPLC—HPCE 串联技术分离蛋白质,鉴别了猪心和牛心的细胞色素 C 之间的差异,获得满意的二维谱图。核磁共振波谱是测定生物大分子结构的有力方法。A. M. Gronenborn 等 (1990 年) 对应用 500~600 兆超导核磁共振波谱测定溶液中蛋白质的三级结构作了详细的评论。质谱的新技术和新方法主要针对生物大分子分析,关键是扩大质谱范围及提高检测灵敏度。串联质谱 (MS—MS)、色谱联用 (LC—MS) 及软电离技术的研究十分活跃。大气压力离子喷雾法 (API) (E. C. Huang 等, 1990) 和电喷雾离子化法 (ESI) (R. D. Smith 等, 1990) 是 LC—MS 新的接口技术,适用于非极性到极性及热不稳定生物大分子。如蛋白质 DNA 和多肽等,所得谱图有时还包括氨基酸序列信息。拉曼光谱中共振拉曼、傅里叶变换拉曼、共焦拉曼微光谱等在生物大分子结构分析中获得应用。可以获得 DNA 碱基组成、DNA 和蛋白质二级结构、DNA 与蛋白质比例等信息 (G. J. Poppels 等, 1991)。

神经递质多巴胺、儿茶酚胺类生物小分子分析,是生命科学前沿研究中最热门的课题之一,90 年代生命科学已经深入到最复杂的领域,脑的结构和功能的研究。人脑有 10^{11} 个神经细胞,通过神经原形成神经通路,成为脑的十分精确的功能基础。研究单个神经细胞中神经递质多巴胺等生物胺类如何产生信号、传导信号,以及这些信号如何改变靶细胞的功能,已成为探索人类的感知、学习、运动、思维和记忆等功能的物质基础。分析化学家的任务是研究和开发新的分析技术和新方法,提供脑神经细胞中神经递质及其代谢物浓度变化的信息。由于神经细胞的直径数十微米,体积仅数纳升,神经原传播信息速率高达 50 m/s,涉及在生物超微环境中检测快速化学反应,对分析化学提出了艰巨而诱人的挑战。单个神经细胞分析的难度在于常用的 HPLC—电化学、微型薄层色谱、GC—MS 等方法,灵敏度不够;酶催化放射性标记法灵敏度高,但受反应活性的限制。美国宾州大学 Ewing 研究组于 1987 年首次提出用毛细管电泳 (HPEC)—微电极伏安法分离及测定多巴胺及儿茶酚胺类神经递质。于 1990 年采用直径 5 μ m 毛细管电泳,直径 2 μ m 碳纤维电极直接插入毛细管柱的末端,进行电化学检测,毛细管柱的另一端作进样器直接插入池塘蜗牛脑神经细胞 (直径 200 μ m) 中,首次对单个神经细胞中多巴胺及 5—羟色胺进行了活体分析,样量仅 0.27 pL,检出限 0.5 amol。并对池塘蜗牛单个脑神经细胞中多巴胺的浓度变化进行了测量。由于哺乳类动物的脑神经细胞直径约 20 μ m,必须进一步研究直径更小的微电极及尺寸更小的毛细管电泳,才可能对哺乳类动物的单个脑神经细胞进行活体分析。1992 年,研制

出直径 400 nm 超微碳纤维电极,对多巴胺和儿茶酚胺有良好的电学响应,有可能应用于单个人神经细胞中神经递质物质的检测。

美国北卡罗来纳大学 Jorgenson 研究组于 1987 年提出用微型柱 HPLC—伏安法进行单个神经细胞整体分析。采用直径 15 μ m 毛细管柱,直径 9 μ m 碳纤维微电极,进样 5 nL,检出限 0.1 fmol。并对陆地蜗牛单个脑神经细胞 (直径约 130 μ m) 中多巴胺,5—羟色胺、酪氨酸、色氨酸进行了定量分离和测定。并测定了单个牛肾上腺素神经细胞中儿茶酚胺类化合物肾上腺素和去甲肾上腺素。此法仅用于单个神经细胞的整体分析,还不能用于活体分析及空间分析。但在定量测定时有较好的准确度和精密性。

1992 年斯坦福大学 R. N. Zare 提出的 HPEC—CCD 二维检测器用于生物微环境高灵敏分析,HPCE 用于研究加州软体动物神经肢的特性;北卡罗来纳大学 Whightman 提出的测量单个细胞中激素分泌动力学。加州大学 W. G. Kuhr 提出的酶修饰超微电极测量活体中神经递质物质的动力学等。表明单个神经细胞分析化学的研究正在迅速发展。单个神经细胞分析除研究神经化学、神经生物学、神经药理学外,也应用于研究激素、新陈代谢、免疫系统等领域。

现代临床医学为了加强临床诊断越来越依靠临床分析。在现代临床分析中生物传感器已经成为重要的分析技术。体外在线 (on-line) 阵列传感器系列已应用于临床分析,将取样针头直接插入病人血管中,流出的血液通过 PCO_2 、 H^+ 、 PO_2 、 K^+ 、 Na^+ 、电导、葡萄糖等阵列传感器测量,然后弃去,可以进行连续或间歇式测量。活体传感器将传感器装在大号针头内,直接插入体内,进行连续测量,是较理想的分析技术。在生物传感器研究中,研制能连续监测糖尿病人血液中葡萄糖的传感器,已经成为重要的研究目标。糖尿病人由于体内胰岛素分泌不正常,在一天内血糖浓度有较大的波动,造成高血糖或低血糖,给病人带来危害。将葡萄糖传感器植入狗体内,进行连续监测,已经成功地工作数月 (G. Rcach 等, 1990)。人们希望将植入体内的活体葡萄糖传感器与植入体内的胰岛素泵相连接,可以自动连续监测和控制胰岛素释放,使糖尿病人的血糖保持正常水平,并能连续工作 5a 以上,将给糖尿病人带来福音。在临床及毒物学实验室已经更普遍测量痕量元素。实验室中最常测定的痕量元素有 Cu、Zn、Cr、Se、Mn、Al、Pt、Pb 和 Cd,其中营养元素有 Zn、Cu、Cr、Se 和 Mn;治疗元素有 Pt 和 Al;环境污染元素有 Pb 和 Cd。一般分析试样为血液、血浆、血清、尿、粪便,其它体液和组织中上述 10⁻⁹ 级痕量元素。由于不须同时测定多种元素,实验室中最常采用石墨炉原子吸收法 (C. J. Menendez—Botet, 1991)。一些新的分析技术也日益受到重视,如 ICP—MS 用于测定脑组织中 38 种痕量元素 (F. M. Corrigan 等, 1991)。在生物分析中应用 ICP—MS 已有评述 (S. F. Durrant, 1992)。毛细管电泳在临床分析中应用有明显增长 (W. G. Kuhr 等, 1992)。细胞水平的分析技术正在迅速发展。如应用生物传感器测量细胞内外 K^+ 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 及 Cl^- 等 (I. Janata, 1992)。用卟啉修饰碳纤维超微电极 (0.5~1 μ m) 测定单个细胞中镍,检出限达 0.6 fg (B. F. Malinski, 1991);采用荧光检测的流动注射细胞分析 (J. Ruzicka 等, 1992),以及毛细管电泳分析蛋白质结合的钙及锌等 (H. J. Kajiwaradfa, 1992)。

(武汉大学程介克、王宗礼撰)

似晶格模型理论

quasi-lattice model 似晶格模型理论属于引入实际体系的物理模型来描述液体和溶液的理论。当局部地考察液体的结构,与无规则的气体相比液体的结构特点更接近于固体的结构,且当温度远低于临界温度时,其配位数有一个相当明确的平均值。似晶格模型强调液体近程有序的特点,将液体的结构抽象为与具有一定配位数的晶体的格子类似,因而有些著作中亦称之为格子模型。似晶格模型理论由于物理模型合理,数学处理简单,在溶液理论的发展过程中占有重要地位。

不少作者为似晶格模型理论的发展做出过贡献,如 Porter

(1920), van Laar 和 Lorenz (1925), Heitler (1926), Hildebrand (1929), Guggenheim (1935), Fowler 和 Guggenheim (1939) 以及 Hildebrand 和 Scott (1940), 然而系统的理论体系则是由 Guggenheim (1952) 及其学派发展的。对由尺度和结构不同的分子构成的溶液, 其基本假设为: 体系中小分子占据一个晶格格位, 大分子的分子尺度为小分子的 r 倍, 可将大分子划分为 r 个节, 每个节占据一个格位; 分子或分子的节在一定晶格格位的平衡位置上做振动运动; 分子或分子的节在格位上彼此交换而不影响晶格的结构, 因而体积仅取决于分子的总数, 超额体积为零; 位形配分函数由两项独立的贡献所组成, 分别为分子在格位上处于静止状态的能量的贡献和分子在格位上的振动能的贡献, 进一步假设振动能对位形配分函数的贡献与组成无关。采用似晶格模型理论能够对一般的小分子溶液, 组分分子尺度及结构差异显著的溶液直至高分子溶液进行处理。

Flory (1953) 和 Huggins (1958) 从似晶格模型出发, 根据分子在晶格格位中占据不同数目的邻接格位的形象化假设, 各自分别发展了处理高分子溶液的理论和方法。由于 Flory 和 Huggins 所发展的方法为描述高分子溶液的某些重要特征的定量理论的发展提供了基础, 所以至今他们所发展的方法在很多场合仍在应用。

然而 Guggenheim 所发展的似晶格模型理论对一般的溶液体系, 由于其能量项过于简化, 往往与实际情况差距较大, 但不能不承认这个理论提供了一个比较好的模型。在这个模型的基础上实际应用中发展了许多半经验的关联式, 特别是从 60、70 年代以来由于局部组成概念的引入, 在工程中获得广泛的应用。其中最成功的例子是由 Abrams 和 Prausnitz (1975) 在似晶格模型和局部组成概念的基础上发展的 UNIQUAC 方程。UNIQUAC 方程将溶液中组分的活度系数表达为组合项和剩余项的贡献。活度系数的组合项体现分子尺度及形状对活度系数的影响, 以似晶格模型导出的无热溶液式表示; 活度系数的剩余项体现分子间相互作用对活度系数的影响, 以关联局部组成和总体组成的 Boltzmann 式导出的局部组成式表示, 此亦可看作对似晶格模型理论的一个经验修正。利用 UNIQUAC 方程既可以描述汽液平衡也可以描述液液平衡, 并允许在一定范围内对温度进行外推。对于多元体系, 当具备其中所有可能的二元体系的参数时, 利用 UNIQUAC 方程可以由二元体系的数据推算多元体系的汽液平衡。Abrams 和 Prausnitz 也曾尝试用 UNIQUAC 方程关联高分子溶液的汽液平衡。可以说 UNIQUAC 方程是化学工程中最有价值的方程之一。Fredenslund 等 (1975, 1977) 在 UNIQUAC 方程的基础上借助于基团作用的概念导出了 UNIFAC 基团贡献法。UNIFAC 方法的优势在于对于种类极为广泛的非电解质混合物体系的热力学性质可以由有限数目的基团性质进行关联, 因而可以对缺乏甚至没有实验数据的混合物体系的组分活度系数进行推算或预测。经过多年不懈努力, 到 1991 年 UNIFAC 方法的基团相互作用参数表所涉及的主基团数目已扩展到 30 种, 并已广泛应用于化学工业的许多方面。

似晶格模型理论另一方面的进展是对高分子溶液的描述。Sanchez 和 Lacombe (1976) 在 Guggenheim 的工作基础上进一步扩展了似晶格模型, 其中最重要的进展是在配分函数中以晶格中未被任何分子或分子的节所占据的格位或称空洞来描述液体的自由体积, 因此他们所发展的模型亦被称为晶格流体模型 (Lattice fluid model)。Sanchez 和 Lacombe 从晶格流体模型的配分函数出发进而得到高分子溶液的状态方程以及各种热力学性质的表述。Okada 和 Nose (1981) 进一步考虑空洞在晶格中的非随机分布, 对于极性高分子溶液, 这种非随机分布的考虑改进了 Sanchez 和 Lacombe 的工作。在 Sanchez 和 Lacombe 以及 Okada 和 Nose 的工作中对不同组分的分子的节的尺度采用了不同的值, 当推广到混合物体系时, 由于对格位大小不同的晶格的处理而使方程的数学表达复杂化。Panayiotou 和 Vera (1982) 采用预先设定晶格格位的尺度及配位数的方法改进了晶格流体模型, 理

论上可以使对纯化合物的处理直接推广到混合物体系。Kumar 等人 (1987) 进一步完善了 Panayiotou 和 Vera 的方法, 特别是对多元混合物体系的处理。

与小分子溶液相比, 描述高分子溶液热力学性质和相平衡行为的实验数据更为缺乏, 因而类似地, 基团作用的概念也被引入到高分子溶液的情形。High 和 Danner (1989) 在 Panayiotou 和 Vera 的工作基础上构造了基团贡献法的晶格流体模型, 并已用于聚苯乙烯、聚乙烯、聚乙二醇、聚丙烯、聚氯乙烯溶液汽液平衡的预测。然而在预测过程中仍需要具体体系的参数, 因此 High 和 Danner 的方法尚未成为完全的预测方法。

从理论上讲似晶格模型对溶液组分的分子尺度及形状没有限制, 另一方面由于工业上的兴趣, 目前似晶格模型以及在其基础上发展的晶格流体模型被更多地用来描述高分子溶液的相平衡。目前比较成功的例子多是高分子溶液汽液平衡的情形。然而对高分子溶液来说更有意义的是对液液平衡的推算, 但目前液液平衡的研究还未达到定量描述的程度。另外对聚合物共混体系互溶性的推算也是一个很有意义的应用领域, 这类问题的解决有助于材料科学的发展, 然而这也是难度更大的问题。

对于预测的问题, 目前尚未形成完整的方法。基团贡献法的应用范围取决于已有的基团种类及参数数目, 现在已有的方法所包含的基团种类以及参数数目仍是很有限制的。对于较难描述的体系, 如高分子水溶液汽液平衡的预测和由高分子溶液汽液平衡数据获得的参数用于进行液液平衡的预测等都是有待解决的问题。

参考文献

- 1 Guggenheim E A. Mixtures. Clarendon Press, 1952
- 2 Flory P J. Principles of Polymer Chemistry. Cornell Univ. Press, 1953
- 3 Huggins M L. Physical Chemistry of High Polymers. Wiley, 1958
- 4 Abrams D S, et al. AICHE J. 1975, 21: 116
- 5 Fredenslund Aa, et al. Vapor - Liquid Equilibria using UNIFAC, a group-contribution method. Elsevier Sci Pub Co, 1977
- 6 Sanchez I C, et al. J Phys Chem. 1976, 80: 2352
- 7 Panayiotou, C. et al. Polym J. 1982, 14: 681
- 8 High M S, et al. Fluid Phase Equilib. 1989, 53: 323

(中国科学院化工冶金研究所温浩副研究员撰; 许志宏审)

非化学计量化合物 compound of nonstoichiometry

针对组分成定比化学计量化合物而言的。晶体化合物发生化学计量偏离是由于晶体内存在着原子或电子缺陷的关系, 这对化合物的电、磁、光、声、力和热等性质会发生影响。从近代晶体结构的理论和实验研究结果表明, 具有化学计量比和非化学计量比的化合物是普遍存在的。更确切地说, 非化学计量比化合物的存在是更为普遍的现象。随着科学技术的发展, 非计量化合物越来越显示出它的重要理论意义和实用价值。目前, 氧化物陶瓷高温超导体的出现就是一个极好的例证。为此, 人们认为, 非化学计量比是结构敏感性能的根本。

道尔顿 (D. Dalton) 的定组成或整数比的概念是肯定化合物的判据和准则, 化合物的许多性质都可以用定组成定律来解释。这个理论可以圆满地解释有机化合物中分子晶体的许多问题, 但用来说明原子或离子晶体化合物, 就不一定正确。贝托莱 (C. L. Berthollet) 曾指出, 在原子或离子晶体化合物中, 不一定总是遵守定组成定律。同一种物质, 其组成可以在一定范围内变动。

1912 年库尔纳可夫 (H. C. Kypchakob) 学派在研究二元和多元金属体系的状态图及其它性质的组成图时, 发现金属体系中普遍存在着两类化合物。一类是所谓道尔顿体, 一类是贝托莱体 (Bertholide)。道尔顿体是一类具有特定组成的化合物, 在状态图的液相线和固定液相线上有一个符合整比性的极大值, 而且在

其它性质组成的恒温图上,都有一个奇异点。贝托来体是一类具有可变组成的固相,反映在状态图上是在液相线和固液相线上没有一个符合整比性的极大点,而且在其它性质的组成的等温线图上,也没有一个奇异点。

直到1939年申克(R. Schenck)和丁曼(T. Diagamann)关于Fe—O体系的研究,以及比尔兹(W. Biltz)和朱萨(R. Juza)关于二元化合物分解平衡压的研究,都指出了许多离子化合物或分子化合物中,组成在一定的范围内可变的广泛存在着的情况。例如,对方铁矿的物相研究表明,它的组成是 FeO_{1+x} , $0.09 < x < 0.19$ (在900℃)。又如,黄铁矿FeS组成也是 FeS_{1+x} 。

同时瓦格纳(C. Wagner)和肖特基(W. Schottky)对存在晶体和晶格缺陷的统计热力学研究指出,在任何高于0K的温度时,任何一种固体化合物存在着组成在一定范围变动的单一物相,而严格地按照理想化学整比组成的或由单纯的价键规则导出的化合物,并无热力学地位。

对于偏离整比或非化学计量化合物,可以从两个方面加以规定:(1)纯粹化学的定义所规定的非化学计量化合物,是指用化学分析、X射线衍射分布和平衡蒸气压测定等手段能够确定其组成偏离整比的均一的物相。如 FeO_{1+x} , FeS_{1+x} , PdH_x 等过渡元素的化合物,这一类化合物组成偏离整比较大。(2)从点阵结构上看,点阵缺陷也能引起偏离整比性的化合物,其组成的偏离是如此之小,以至于不能用化学分析或X射线衍射分析观察出来,但是可以由测量其光学、电学和磁学的性质来研究它们,这类偏离整比化合物具有重要的技术性能。

其中与非化学计量化合物关系最密切的是点缺陷。点缺陷是指那些对晶体结构的干扰仅仅波及到几个原子间距范围的缺陷。这一类缺陷包括晶体点阵结构位置上可能存在的空位、间隙原子和杂质原子,也包括在固体化合物中部分原子互相错位。除此之外,晶格缺陷还和离子的扩散有关,这除了对离子的传输、固体反应的速度有直接影响外,还引起晶格缺陷相互作用,从而形成所谓扩展缺陷,包括簇、切变面的重要因素。一般地说,缺陷的浓度不大时,它将以孤立的点缺陷形式存在,并按统计热力学的规律变化;但当缺陷的浓度较大时,则将有关相互作用发生;因相互作用 $E(\text{缺陷}-\text{缺陷})$ 的大小不同,可排列成有序的簇,或者切变面。通过掺入异种离子控制氧化物的非化学计量性时,由于加入离子和晶格缺陷间的相互作用比较强烈,因添加离子以及母体晶格的种类不同,可以形成多种多样的簇和切变面。目前,在一些有代表性的氧化物中已发现多种扩展缺陷。

至于非化学计量化合物的合成,一般可采用固体化合物制备的实验技术,如:(1)高温固相反应合成法,合成时以相图作考,根据相图确定配料比例、温度、气体的压强、制备方法等等。常用骤冷法来固定高温缺陷状态;(2)掺杂以加速非化学计量化合物的生成。掺杂促使形成稳定的和具有特殊性质的非化学计量化合物,这已在许多功能材料上获得应用,在许多发光和激光材料中,往往掺杂少量的杂质元素,不仅给材料赋予新的性质,而且形成了一些新的非计量化合物。用蒸发溶液法从磷酸盐中生长出掺Mn的五磷酸铈晶体 CeP_3O_{11} ; Mn,就是一种非计量化合物;(3)用辐照的方法制备非化学计量化合物也是一个简单易行的方法。突出的例子制备LiF的色心晶体;(4)高压下合成非化学计量化合物。近年来在高压和超高压条件下,合成非计量化合物日趋活跃,并具一定特点。

原则上说,晶体的所有物理性质都是由晶体的组成和结构所决定的,结构中是否存在缺陷、缺陷类型和缺陷的浓度的大小都会影响晶体的物理性质。随着晶体中扩展缺陷的逐步完善(如有序的点缺陷和超结构,结晶学剪切结构CS,块结构和复杂共生体系中的缺陷状况)以及它对非计量化合物计量的影响进一步被弄清,固体化学这门学科就会真正获得突破性进展。

参考文献

- 1 苏勉曾编著. 固体化学导论. 北京: 北京大学出版, 1986. 1~210

- 2 Sleight A W. Science, 1988, 1519~1527
- 3 West A R 著. 固体化学及其应用. 苏勉曾, 谢高阳, 申洋文等译. 上海: 复旦大学出版社, 1989. 78~140
- 4 Rao C N R, Gopalakrishnar J 著. 固态化学的新方向. 刘新生译. 长春: 吉林大学出版社, 1990. 10~256
- 5 Jorgensen J D. Physics Today, 1991, 34~40
- 6 Disalvo F J. Science, 1990, 649~655
- 7 Raveau B, Michel C, et al. J Solid State Chemistry, 1990, 181~201
- 8 徐如人主编. 固相合成方法. 北京: 化工出版社, 1991. 50~200
- 9 李言荣, 李有谟, 洪广言. 化学通报, 1991, 1~6
- 10 Li Yanrong, Li Youmo. J Superconductor, 1992, 3(1): 1~4

(电子科技大学李言荣博士撰)

电荷密度的拓扑理论 分子结构一直是化学研究的重要课题。经典结构模型指出: 原子保持它的性质不变, 即使是当它与其他原子结合时也是如此。这就是说原子作为客观实体, 它存在于分子之中并通过键网络把它们联接在一起。

量子力学为现代分子结构模型提出了有力的工具, 它克服了经典模型中无法对分子结构进行定量描述的缺陷。但它仍然不能充分地、把为化学家所熟悉的, 分子是由原子及它们之间的化学键所组成的, 这样一个经典图象的合理内涵反映出来。但这并不意味着, 由于量子力学应用于分子体系的研究使得经典的原子和键的概念消失了, 而是由于缺乏一个有效的“分子中的原子”的量子力学描述。

分子中原子的性质是表征化学键和分子反应性的一个重要方面。一个孤立的原子在物理上是可以测量的, 它是一个带Z个正电荷的原子核和Z个负电荷的电子构成的总体。然而, 一旦它与其它原子结合, 而成为分子的一部分时, 这个概念就不再成立。一个成键的原子, 或称为分子中的原子, 不再具有确定的电子数。它可以与其周围环境交换电子和动量, 构成一个量子力学开体系。这就意味着, 对于一个成键的原子, 不可能找到一个态函数来恰当地描述它。按Dirac的观点, 分子中的原子, 无论是实验上还是量子力学上, 都是不可测量的。因此, 描述分子中的原子, 通常应该采用处理量子力学开体系的密度矩阵法, 或者能在分子空间严格定义原子的子空间, 这种子空间能与它周围环境交换电子和动量。同时还要求, 满足总体系的所有量子力学基本原理都可以等效地应用到这些子体系(原子空间)。

从60年代后期以来, 所有的研究几乎都与布居分析的进展密切相关, 而不同布居分析方法又都集中在如何对分子电荷密度进行合理分割上。对分子电荷的分割方法大体上可以分为两大类, 一类是按基函数所展开的Hilbert空间的分割, 另一类是在Cartesian空间的分割。基组分割方案中有代表性的Mulliken布居分析法, SEN方法(Shared electron number)以及自然布居法。其中Mulliken布居分析法是广为采用的方法。它的能力的不足之处是众所周知的。在Hilbert空间分割完全依赖于所选择的Hilbert空间的特性。而在Cartesian空间的分割则为1对1的关系。即将分子中的每一个原子划分成一个区域。这就使得从量子力学出发的理论, 得以在新的层次上再现经典模型中“分子是由原子和它们之间的化学键所组成的”这样一个显明的物理图象。

在Cartesian空间进行分割的方法大体有3种方式:(1)1970年Politzer等建议的以自由原子做参比所定义的分子中原子的区域;(2)80年代Wiberg推出以—种假设分子做参比的方法;(3)近年来Bader等人推出的, 无需任何参比, 而仅仅是基于分子电荷密度的拓扑性质的分割方法。它是迄今为止最严格而直观的分割技巧。分子中原子性质的拓扑理论就是基于这种分割方法而发展起来的。

Bader等关于电荷密度的拓扑理论(或称为分子中原子的理

论)的发展,可以分为3个明显的阶段。他在60年代发表的文章中还没有对电荷密度进行分割的企图;70年代初,Bader, Beddall和Cade提出了电荷密度的“自然分割法”(natural partitioning)可以认为是第2阶段的开始。按此法定义的原子界面是垂直于键轴并通过沿键轴方向电荷密度达到极小值的点。后来又做了某些修改,使得这种分割下的分子片满足局部维里定理(Local Virial Theorem)第3阶段始于70年代末,从Bader, Anderson和Dake发表了《关于电荷密度分布的量子拓扑》文章开始至今。这期间经历了理论基础不断完善和应用范围日渐扩大的过程。

电荷密度的拓扑表征主要由它的梯度向量场($\nabla\rho(r)$),和Laplacian量($\nabla^2\rho(r)$)给出。首先,借助于电荷密度梯度向量场的性质实现了对分子空间的拓扑分割 $\nabla\rho(r)$ 的临界点,即 $\nabla\rho(r)=0$ 的点,描述了电荷分布的基本特征。它们可以按临界点处Hessian矩阵的非零本征值的个数(Rank)和正、负本征值个数的差(Signature)进行分类。它们的可能组是(3,-3),(3,-1),(3,+1),(3,+3),每一种临界点都对应着分子结构的一个特定的结构要素。如用(3,-3)所表征的临界点为原子核所在的位置;而(3,-1)临界点只出现在两个成键的原子之间,它是两个原子间存在化学键的充分必要条件,故称为键临界点(Bond Critical Point);(3,+1)临界点,也称环临界点(Ring Critical Point),它的存在标志分子中存在一个环状结构;而(3,+3)临界点的存在,则表明分子中存在一个笼状结构,称为笼临界点(Cage Critical Point)。

在梯度向量场中,始于键临界点并与Hessian矩阵正本征值相对应的一对梯度线,将两个成键原子联结起来,定义了该两个原子间的键径(Bond Path);始于键临界点并与Hessian矩阵负本征值相对应的梯度线,定义了零流面(Zero Flux Surface),零流面上的所有点都满足 $\nabla\rho(r)\cdot n(r)=0$ 的条件,它们将分子空间分割成原子片,从这个意义上讲,分子中通过所有(3,-1)临界点所产生的一组零流面就将整个分子空间分割成为化学上可识别的类原子区域的集合,每一个区域称为一个Basin,每一个Basin包含一个原子核。因此,每一个被零流面所包围起来的(3,-3)临界点(原子核),连同终止于它的所有梯度线所掠过的三维空间就定义了分子中的原子,满足分子总体系的量子力学定理都可以等效的被应用于这些子体系。而分子的总体性质可由组成分子的所有原子性质的加合得到。

目前,能够提供电荷密度的方法,还只限于由量子化学从头算得到的波函数推导而来,但它给出比从头算多得多的信息。例如,在每个原子区域对电荷密度的数值积分可以精确地得到原子布居。类似地,可以得到原子能量、原子体积、偶极矩等40多种性质。此外,电荷密度的Laplacian量 $\nabla^2\rho(r)$ 可以极好地揭示原子的壳层结构、确定分子中电荷密度或疏松的准确位置和程度,从而判断分子的亲电、亲核反应性,预见分子间作用的大小和方向(如氢键的方向性等)。键临界点处的Laplacian量可以用来判断化学键的类型。Bader和Gillespie最近发表的一篇文章中,用 $\nabla^2\rho(r)$ 的性质为价电子对互斥理论(VSEPR)作了精辟的理论解释。

目前这种理论方法已被越来越多的理论和实验化学家所认识,并广泛用于分子结构、化学键的本质和化学反应等方面的研究。其中比较活跃的有Bader, Wiberg和Cremer等研究集体,中国科学工作者从80年代中期以来,也开展了这方面的理论和应用研究。

总之,由量子力学所得到的分子波函数以及由它所导出的电荷密度 $\rho(r)$ 仍然隐含着经典模型的信息。同时,量子力学也提供了得到这些信息的完整描述。因此,电荷密度的拓扑理论一方面再现了经典分子结构模型,又在新的层次上提供了分子电子结构的更详尽的细节,需要强调的是,尽管迄今为止对分子电荷分布的分析都是基于量子化学计算的结果,但这个理论本身是独立于电荷密度的得来方法的。如果能用实验的方法来确定电荷密度分布,那么人们就可以摆脱求解Schrodinger方程的烦恼,而直接得

到关于原子和分子性质的信息,另外,利用零流面(Zero flux surface)对空间进行分割的基本思想也可以借鉴来定义固体中的Wigner-Seitz单胞、溶液里的溶质或分子晶体中的分子等等。

参考文献

- 1 Mulliken R S. J Chem Phys, 1955, 23: 1833~1848
- 2 Davison R E. J Chem Phys, 1967, 46: 3320
- 3 Roby K R. Mol Phys, 1974, 27: 81
- 4 Reed A E, et al. J Chem Phys, 1985, 83: 735
- 5 Politzer P, et al. J Am Chem Soc, 1970, 92: 6451
- 6 Wiberg K B. J Am Chem Soc, 1980, 102: 1229
- 7 Bader R F W, et al. J Am Chem Soc, 1971, 93: 3095
- 8 Bader R F W, et al. J Am Chem Soc, 1979, 101: 1339
- 9 Bader R F W, et al. Adv. in Quantum Chem, 1981, 14: 63~121
- 10 Cao Wenliang, et al. J Mol Struct Theochem, 1991, 251: 297
(北京化工大学曹维良、张敬杨撰)

休克-哈伯德方法 Hückel-Hubbard method 此法结合休克近似和哈伯德近似,是一种简单的 π 电子组态相互作用理论。此理论方法注意到分子体系的拓扑性质,具有物理图象清晰和计算简化的优点,有广阔的发展应用前景。

1931年休克(E. Hückel)提出一种适用于共轭 π 体系的简单分子轨道理论,后来称为休克分子轨道(HMO)法。HMO法注意到分子体系的拓扑性质,具有简单而便于概括规律性的优点,其不足在于过分粗略。1963~1964年霍夫曼(R. Hoffmann)将HMO法推广为考虑全部价电子和计算重叠积分的方法,称之为推广的休克分子轨道(EHMO)法。此法较HMO法精确,但失去了HMO法中所含的分子拓扑性。1976年马生(F. A. Matsen)在多体理论中将休克近似和哈伯德近似结合起来,从而形成了一种简单的 π 电子组态相互作用理论,称之为休克-哈伯德方法(H-H方法)。H-H方法保留了HMO法中所含的分子拓扑性,并在一定程度上体现了 π 电子的组态相互作用,故有其特殊的优越性。

按无自旋理论,从 p 个正交归一化轨道的所有 N 电子可构造无自旋矢量空间 $V(\rho^N)$,此空间中 N 电子体系的哈密顿算符 H 可表为

$$H = \sum_{r,s} h_{rs} E_{rs} + \frac{1}{2} \sum_{r,s,t,u} V_{rs,tu} (E_{rs} E_{tu} - \delta_{rs} E_{tu}) \quad (1)$$

其中 δ_{rs} 为克罗内克(Kronecker)符号,单电子积分 h_{rs} 、双电子积分 $V_{rs,tu}$ 和酉群 $U(\rho)$ 的无穷小生成元(也称为基本对称算符) E_{rs} 的定义式分别是

$$h_{rs} = \langle r | h | s \rangle \quad (2)$$

$$V_{rs,tu} = \langle t_j | \langle r_i | e^2 / r_{ij} | s_i \rangle | u_j \rangle \quad (3)$$

$$E_{rs} = \sum_{i=1}^N |r_i\rangle \langle s_i| \quad (4)$$

上式中 h 表示单电子算符, r_i 表示电子 i 处于用 r 标记的轨道,但不含自旋, s 、 t_j 和 u_j 等也有类似的意义。对 h_{rs} 和 $V_{rs,tu}$ 的处理,有各种不同的近似方法,最简单的近似处理方法就是采用休克近似。这就是将(1)式理解为共轭分子中 π 电子体系的哈密顿算符 H 的表示式,其中 r 、 s 等表示碳原子的 π 原子轨道(即 p 轨道),并令

$$h_{rs} = \begin{cases} \alpha & (r=s) \\ 0 & (r \neq s, r \neq s \pm 1) \\ \beta & (r = s \pm 1) \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{rs} = \langle r | s \rangle = \delta_{rs} \quad (6)$$

$$V_{rs,rs} = 0 \quad (7)$$

其中 α 和 β 为休克参数, S_{rs} 为重叠积分。可见休克近似不仅将 h_s 参数化和忽略 π 原子轨道间的重叠,而且忽略了所有的双电子积分。1976年马生提出一种改进休克近似的方法,这就是保留休克近似中的(5)和(6)式而修改(7)式。他采用哈伯德(J. Hubbard)在1963年讨论固体能带理论时所用的近似,即只考虑双电子积分项的单中心积分部分并使之参数化,故令

$$V_{rs,rs} = I \delta_{rs} \delta_{rs} \quad (8)$$

其中 I 称为哈伯德电子排斥参数。在休克近似中用(8)式代替(7)式,即成为休克-哈伯德近似,由此导出的理论计算方法即是 H-H 方法。

马生在1976年提出 H-H 方法时,同时采用休克参数为反应坐标讨论了乙烯的顺-反异构、[2+2]环加成和[1,3] σ 键迁移反应。计算结果表明,对自旋单重态(S_0)的基态乙烯,其能量 $E(S_0)$ 在两个亚甲基形成的二面角 $\Phi = 90^\circ$ 时出现高的能峰,因而基态乙烯的顺-反异构因受到高能势垒的阻碍而难以进行。第一和第二激发态分别为自旋三重态(T_1)和自旋单重态(S_1),相应的能量 $E(T_1)$ 和 $E(S_1)$ 对二面角 Φ 而言均不存在能垒,故激发态乙烯容易进行顺-反异构。此外,计算所得的能量曲面表明,同面-异面环加成[2_s+2_s]的活化能低于同面-同面环加成[2_s+2_s],异面[1,3] σ 键迁移的活化能低于同面[1,3] σ 键迁移。1983年孙家钟、封纪康等应用 H-H 方法对[2+2]环加成反应进行了更深入的研究。在他们的工作中,采用分子轨道构造盖尔方德(Gelfand)基并引用局部对称性进行对称性分析,计算所得的活化能值见表1。

表1 [2_s+2_s]和[2_s+2_s]的活化能(eV)

	[2 _s +2 _s]	[2 _s +2 _s]
环加成	3.11	2.16
环加成逆反应	3.95	3.19

比较活化能的高低,即知[2_s+2_s]应是热允许的反应,[2_s+2_s]则是热禁阻的反应。1990年和1992年,何福城、李象远除了用 H-H 方法计算了丁二烯电环合、己三烯电环合、[2+2]和[2+4]环加成以及[1,3] σ 键迁移等周环反应的势能面以外,并用经典轨迹方程和朗道-季勒(Landou-Zener)模型对这些反应进行了非绝热计算。计算结果表明,不同反应途径的非绝热跃迁几率相差很悬殊,由此可以解释这些反应在光激发条件下的立体选择性。对于丁二烯电环合反应的计算结果见表2。

表2 丁二烯电环合的非绝热跃迁几率

反应方式	g_c	P	选择性
顺旋	1.29	5.11×10^{-11}	光禁阻
对旋	3.62	1.30×10^{-2}	光允许

其中 g_c 为第1激发单重态和基态的非绝热耦合项, P 为此两态间的非绝热跃迁几率。上述有关周环反应的结论都与著名的伍德沃德-霍夫曼(Woodward-Hoffmann)定则相符。

1985年福克斯(M. A. Fox)和马生在 H-H 方法中引入电子结构图来说明 π 体系的电子结构。他们定义 π 体系的对比能量 $E_R(K) = E(K)/(I-\beta)$ 和价键指数 $x = I/(I-\beta)$, 并将 $E_R(K)$ 表为 x 的函数。根据计算,乙烯 π 体系4个态的对比能量分别为:

$$E_R(S_0) = \frac{1}{2} [x - \sqrt{x^2 + 16(x-1)^2}]$$

$$E_R(T_1) = 0 \cdot x$$

$$E_R(S_1) = x$$

$$E_R(S_2) = \frac{1}{2} [x + \sqrt{x^2 + 16(x-1)^2}]$$

$E_R(K)$ 对 x 所作的图称为 π -CI 图。用直线来代替 π -CI 图中的曲线,即得 π 体系的电子结构图,故后者是前者的简化结果。乙烯

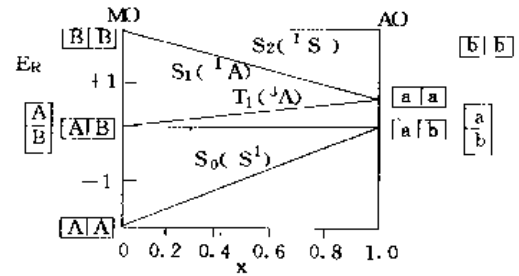


图1 乙烯 π 体系电子结构

π 体系的电子结构图如图1所示。图中填有休克分子轨道 A、B 的方格和填有碳原子 2p 轨道 a、b 的方格,分别表示乙烯 π 体系的分子轨道(MO)和原子轨道(AO)盖尔方德态; $S_0(S)$ 表示乙烯基态为自旋单重态,它对分子中的对称面 σ_v 是对称的; $T_1(3A)$ 表示第1个自旋三重态,它对 σ_v 是反对称的,其它的标记也有类似的意义。当 $x=0$ ($I=0$) 时,休克-哈伯德近似还原为休克近似,这时乙烯的 π 电子是完全离域的,即处于休克态;当 $x=1$ ($\beta=0$) 时,乙烯的 π 电子被驱入原来的碳原子轨道,因而是完全定域的,即处于价键态。在这两种极端情况下,各态能量大小顺序都与实际不符。实际的能量大小顺序是 $E_R(S_0) < E_R(T_1) < E_R(S_1) < E_R(S_2)$, 即 $0 < x < 1$ 。当取 $x=0.6$ 时,所得乙烯 π 体系各态的能量数值则与实验结果基本一致。按电子结构图, π 体系的电子结构既有休克态成分也有价键态成分,因而可看成是二者的混合。

H-H 方法除了用于讨论共轭 π 体系的电子结构和协同反应的立体选择性以外,用于研究原子团簇的结构和性质也是很有希望的。事实上, EHMO 和 H-H 方法都是休克方法的改进,前者已成为量子化学常用方法之一,后者还有待进一步研究和发

参考文献

- Hückel E Z. Physik, 1931, 70: 204, 1932, 76: 628
- Hubbard J. Proc Roy Soc, London, 1963, 276A: 238
- Matsen F A. Int J Quantum Chem, 1976, 10: 511
- Sun Chia-chung, et al. J Phys Chem, 1983, 87: 3412
- Fox M A, et al. J Chem Educ, 1985, 62: 367: 477
- 何福城,等.庆祝唐敬庆教授执教五十年学术论文专集.长春:吉林大学出版社,1990. 51
- 李象远,等.高等学校化学学报,1992,13: 834

(成都科技大学何福城教授撰)

气相电子衍射

gas electron diffraction 简称GED,是指高速运动的电子流受到气体分子的散射,其散射波相互干涉,形成衍射图的现象。这类衍射图由弥散的同心圆环组成,用测量黑度的设备,可测出在不同散射角方向的散射电子束强度,其中含有原子在分子中排布、分子内部的振动、转动等信息,所以它是研究自由状态小分子结构的一种主要方法(其他还有微波谱、高分辨振动谱和转动光谱等方法),文献上这类结构数据,大都来自GED方法。

GED的研究对象,是从单原子气体直到数十个原子的小分子。现已扩展到自由基、聚合分子(范德华分子)等不稳定物种。研究的目标早期是原子在分子中的排列及相关课题,50~60年代开始,也测定平均振幅,后来加上振动的非谐性,分子中电子密度分布,分子内部运动包括内旋转、多种大振幅运动等。

气相电子衍射的理论,可追溯到1915年,德拜(P. J. W. Debye)计算了自由分子的X射线干涉图形,认为应是弥散的同心圆环,包含原子间距的信息。1930年德国的马克和维尔(Mark, Wierl)首先用GED研究 CCl_4 分子,接着作了一批先驱性的实验工作,研究了键长受化学环境的影响,提出了共价半径,研究了分子的几何异构,分子的平面性、内旋转和构象等。这类工作,到目前仍有重要的意义。当时成为建立现代化学键理论的重要实验基础。

按照技术的发展,GED的历史分成3个阶段:30~40年代用目视法,照相拍摄衍射图后,用测微光度计记录散射强度,峰位置用目视法帮助判断,可达到相当的精度。50年代起,用“转子-测微光度计法”,在照相干板前设置一个心形转子,使中心附近曝光时间远远短于半径较大的边缘部分的曝光时间(根据需要可用半径平方加权或二次方加权的转子,称为 R^2 或 R^3 转子)。此举大大提高了衍射图的质量,使相片从中心到边缘都清楚地记录了衍射强度,因此可以从强度分布得出分子中原子对的均方振幅,收缩效应(Shrinkage)、振动非谐性和旋转异构体等较精确的结构信息。这一阶段还获得了原子中电子密度分布的实验信息。60~70年代起,用计算机处理数据,这可作为第3阶段。运用了最小二乘拟合的矩阵运算方法和快速傅里叶(Fourier)变换等,使实验数据处理变得精确快速,提高了自动化的程度。

GED的主机分成电子枪室和衍射室二大部分。以直立式主机为例,上部是电子枪,下面是衍射室,中间联接部是聚焦电磁透镜和光阑。以中国自制的南京师范大学QDY-1型主机为例,主要部件有:电子枪,(产生加速电子流);上部磁偏转线圈;隔离阀;光阑(控制电子束是否进入衍射室);荧光屏;主电磁透镜;下部磁偏转线圈;防散射光阑;样品气入口(喷嘴);心形转子;磁流体密封件和照相室。仪器工作时,首先要抽到高真空(如 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ Pa),电子束由电子枪中的高压电场加速,经过光阑、磁偏转、光阑到荧光屏。当屏被移开时,电子束流经主电磁透镜进入衍射室,和气体样品相遇,产生散射,衍射图用电子感光胶片拍摄。这是负片,供测微光度计测量,得到光密度或黑度曲线,经过换算,得散射强度曲线(即不同散射方向的散射强度),散射方向可用散射角 θ 作变量但更常用散射矢量 $s(s = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2})$,这时散射强度记为 $I(s)$,这是总强度,包括原子散射和分子散射。从 $I(s)$ 中减去原子散射强度($I_A(s)$),即得分子散射强度 $I_M(s)$:

$$I_M(s) = \sum_{i,j} f_i(s) \cdot f_j(s) \cdot \cos(\eta_i(s) - \eta_j(s)) \exp(i^2 s^2 / 2) \sin(sr_{ij}) / sr_{ij}$$

其中 f_i, f_j 和 η_i, η_j 分别代表 i, j 原子的散射因子和位相,此数据可由文献查得。式中余下的 r_{ij} 和 l_{ij} 分别是 i, j 原子间距离和根均方振幅,它们都是分子结构参数。给这些参数一套初始值,代入公式计算,得到计算的 $I_M'(s)$,和实验的 $I_M(s)$ 相比较,用最小二乘法拟合实验曲线,得出和它对应的 r_{ij} 和 l_{ij} 的值,这就是结果。如果把 $I_M(s)$ 值经过一定的变换,可以得到径向分布曲线,其中每个峰代表一种原子间距,由此可形象地看出结果。更为精确的理论计算公式中,还含有振动不对称常数等项,也属测定对象。有些气体中含不同构象的分子,其分子散射强度还和一定的构象组成相对应,故GED还用于构象组成的确定。

GED方法的实现,有一定的难度。在实验技术上,主要是高压稳定;高真空稳定且抽速要高;以及完善的防止乱散射的设计。其次是相片质量要高。在数据处理上,由于第一手实验信息只是一维的强度曲线,当分子稍复杂时,结构参数个数会增加很多,不易得出最小二乘的解。所以,近20年来,GED的结果常用转动谱、振动谱、微波谱的结果或同理论计算结果相对照,最后才确定精确的结构参数。因此,GED研究的均是较小的分子。到目前为止,此法测得的原子间距,误差在千分之几,少数到万分之几,和X射线对晶体结构测定的精度相近。对于均方振幅、振动的非谐性、收缩效应等,也能得出2~3位有效数字的结果,深化了对分子内部运动和内部相互作用的认知。

GED的研究领域相对说比较稳定。分子空间结构,包括键长、键角、二面角等参数的测定、振幅、分子中电子密度分布等仍然是研究的主要课题。新的研究领域可分为两个方面:一是仪器的改进和研究对象的变化;二是数据处理方法的进步。前者如采用略高的加速电压,高效的真空系统;增加能量分析器以分解弹性和非弹性散射强度以及用现代计数技术代替常用的胶片记录方法。这些研究都提高GED的原始数据的质量,尤其是计数方法的应用,可达到快速、准确的效果,但费用很高。由于仪器的更新,

研究对象可能发生变化,例如更大些的分子的结构研究;以更精确的方法研究分子内部运动、构象组成及构象转变等。近10多年中对气体喷嘴有许多研究,如高温和低温喷嘴,用于研究不同条件下气化的分子结构;研究不同温度下分子的行为等。还有用超声喷嘴产生多聚分子之类的介稳物种,或核过程的中间产物等,再用GED研究其结构。也曾有产生离子自由基的报导,利用电磁辐射产生激发态分子或离子等。喷嘴改进后将GED用于研究气相反应的工作,已有少量的报导,但意义重大。目前还只有GED可在短时间内截留介稳物种包括短寿命反应中间产物的结构信息。

除上述新发展外,作为理论工作,原子间、分子内和分子间多重散射的研究也是新的领域,有一定成果。70年代末曾有人研究电子全息技术,将来仍可能有所发展。

数据处理方法的发展对GED研究工作的推进,意义重大。数据处理的精确、快速和自动化是一个大的研究领域。可能出现新的处理系统:从高精度的散射强度曲线出发,自动地选取库中数据中的已知结构参数为参考初始值,以人机对话方式输入。计算结束时除给出结构参数、误差的数据外,还能给出为相互作用势能,电子密度分布等,并在屏上显示分子图象。

参考文献

- 1 Buck I. et al. Structure Data of Free Polyatomic Molecules, Springer Verlag, Berlin, 1987, 2(15)
- 2 Goodman P. Fifty years of Electron Diffraction, Reidel; Dordrecht, 1981
- 3 Bartell L S. et al. J Chem Phys, 1979, 70: 3952
- 4 Bartell L S. Wong T C. J Chem Phys, 1983, 78: 7165
- 5 Ischenko A A. Appl Phys B, 1983, 32: 161
- 6 Bartell L S. Barshad Y Z. J Phys Chem, 1987, 91: 1890; 1988, 92: 282
- 7 Kuchitsu K. Fifty Years of Electron Diffraction, 356
- 8 Hargittai I. Stereochemical applications of Gas Phase Electron Diffraction part A, B., VCH Publishers Inc., 1990
- 9 金安定. 化学通报, 1991, 11: 12

(南京师范大学金安定研究员撰)

核磁共振波谱学

nuclear magnetic resonance spectroscopy 核磁共振波谱学是研究放入静磁场 B_0 中的磁性核吸收相应频率的射频场 B_1 能量状况的谱学方法,属射频波谱学。由于具有极高分辨率(0.1 Hz),其共振频率能准确反映分子中各核微环境的微小差异。并且,自旋-自旋偶合常数与核Overhauser效应(NOE)分别揭示核间成键状态及空间关系。对同一分子还可通过分子中的不同核种进行多核核磁共振研究。核磁共振波谱学已渗入化学、生物、物理、医学等广泛领域中,成为研究分子的结构和动力学过程的最有效手段之一。

1946年布洛赫(F. Bloch)与珀塞尔(E. M. Purcell)领导的两个小组同时发现了核磁共振现象。1950年前后相继发现了化学位移和自旋-自旋偶合作用。表征核外电子分布状态的化学位移和表示核间通过成键电子相互作用的自旋-自旋偶合常数是核磁共振波谱的两个基本结构参数。据此50年代已确立了核磁共振波谱在有机化学结构和动力学研究中的独特地位。60年代初发展起来的双共振技术,又为确定谱线归属,提高灵敏度提供了有效途径。

核磁共振波谱对微小结构差异的高度灵敏与检测灵敏度的低下形成了显明的对照。除不少磁性核为天然丰度低的同位素外,灵敏度低的根本原因在于其观测频率在所有谱学方法中最低。因此,核磁共振波谱的发展,一直围绕着提高灵敏度这一主题开展。前后采用不断提高 B_0 、极化传递、双共振等技术。而1966年厄恩斯特(R. R. Ernst)与安德森(W. A. Anderson)在谱学上率先成功地进行了傅里叶变换波谱实验。他们采用强而短的射频脉冲实现了多频道激发。然后检测其响应—自由感应衰减信号,

经付里叶变换获得了通常的频谱。脉冲傅立叶变换技术与宽带去偶技术相结合,将核磁共振波谱的灵敏度提高了一两个数量级,是一次革命性的飞跃。借此一些自然界中重要的 ^{13}C 、 ^{15}N 等稀弱核的观测,成为常规测试。70年代核磁共振碳谱,取得了辉煌的成功。与此同时,电子学、计算机技术的迅速发展,尤其是超导高磁场磁体方面的进展,大大改善了核磁共振波谱检测灵敏度,对中小分子的氢谱,其样品所需量由早期的几十毫克降低到几百微克。

脉冲傅立叶变换核磁共振问世以后,早期人们的注意力集中在利用其多频道波谱节省时间的优点,提高灵敏度。不久,人们很快发现该方法的另一优点—对信息的可加工性,根据需要可对复杂信息进行剪辑。1971年吉尼尔(J. Jeener)在南斯拉夫举行的夏季讨论会上提出了二维核磁共振的想法。待体系达到热平衡,激发脉冲产生信号后(预备期),不是立即观测,而是令其发展一段时间(演化期),后传递给另一核(混合期)进行检测(检测期)。实验中以一定增量逐步增加演化时间进行一系列观测,获得两个独立时间变量 t_1 和 t_2 的函数 $f(t_1, t_2)$,对其进行两次傅立叶变换便得到两个独立频率的函数 $F(\omega_1, \omega_2)$,即二维波谱。1974年厄恩斯特小组首次成功地进行了二维实验—二维 J 谱实验。他们利用 t_1 和 t_2 期间的哈密顿作用的不同,将化学位移与 J 偶合分离到两个频率轴上,显示二维谱将变量范围由一个轴推延到一个平面带来的好处。后经厄恩斯特和弗里曼(R. Freeman)等小组的不懈努力,二维核磁共振波谱结出了丰硕的果实。70年代中期以后,人们的注意力逐步转向更重要的二维波谱—二维相关谱。1976年厄恩斯特小组发表了二维波谱理论描述的经典文章。之后的5年期间,相继发展了化学位移相关谱,二维NOE谱,多量子波谱等。相关谱中 t_1 期间的某核的磁化(或相干),在混合期中传给与其作用的另一核,颇似接力赛中队员将接力棒传给自己的队友。它的魅力在于在一个实验中将相互作用核之间的所有偶合网络一并勾画出来。通过 ^1H - ^1H 之间键合作用建立起氢偶合网络的同核化学位移相关谱COSY、通过 ^{13}C - ^1H 之间 J 偶合作用建立碳氢偶合网络的异核化学位移相关谱C-H COSY、经二次或多次传递建立次近邻或次次近邻网络的接力COSY,建立质子整个偶合网络的TOCSY等,如雨后春笋竞相涌现。一维FT核磁共振中不能直接检测的多量子跃迁,在二维谱中可间接予以观测。1980年前后,弗里曼小组巧妙利用双量子相干发展了 ^{13}C - ^{13}C COSY谱,据此首次可以通过谱学信息直接勾画出分子中碳的骨架。化学位移相关谱的发展,改变了人们传统的谱分析方法,不再是一味追求谱线位置的精确估算,而是通过核间联系把握分子结构。1979年厄恩斯特小组提出了另一类相关谱—化学交换与二维NOE谱NOESY。NOESY谱是靠交叉驰豫建立的相关谱,因此它提供的是有关核间空间距离的信息。键合作用和空间距离信息的结合,使很多与构象有关的难题迎刃而解。二维相关谱不仅成功地应用于天然化合物等中小分子的结构研究中,而且在生物大分子结构研究中亦获得极大的成功。80年代初,伍斯里胥(K. Wuthrich)小组发展了由NOESY谱得到的有关距离范围的约束以及由 J 偶合值得到的有关扭转角约束条件下,经距离几何法计算,确定溶液中生物分子三维结构的方法。1985年首次用二维NMR方法独立确定小球蛋白—牛精液蛋白酶阻止剂的完整三维结构,之后几年内已确定几十个分子量在10 000u以内的小蛋白质在溶液中的三维结构。继单晶X射线衍射法之后,二维核磁共振波谱成为崭新的研究分子空间结构的有力工具。它既不需要培养单晶样品,又可在接近于生理状态下测定生物大分子的三级结构,使其具有更大的吸引力。

当研究10 000分子量以上的分子时,遇到了两个主要困难,即谱线严重重叠和谱线变宽。鉴于此1987年前后发展了三维核磁共振波谱,它是由两个二维实验适当合并而成。由于波谱变量由二维的平面扩展为三维空间,在二维谱中拥挤重叠的峰进一步散开,便于分析。人们发现同核三维相关谱中,交叉峰数目增加,不易分析,而且当大分子的谱线线宽超过同核 J 偶合值时,其同

核三维化学位移相关谱中,有关峰消失,限制了其应用。与此相反,异核 J 偶合值较大,其交叉峰数目与二维波谱大致相同,引起了人们的广泛关注。为了克服稀核灵敏度低的困难,采用了 ^{13}C 、 ^{15}N 等核高度浓缩的样品。1989年前后用浓缩样品成功地进行了异核三维、四维核磁共振实验,用 ^{15}N 化学位移差异分离NH氢谱以及用 ^{13}C 化学位移的差异分离 α 氢氢谱的重迭,进而确定了分子量在20 000以下的小蛋白质的水溶液结构。

化学、生物、医学等领域对复杂对象的结构与性能关系以及分子间作用与运动的探索,必将进一步推动核磁共振波谱学的发展。超高场磁体的研究仍会继续,近几年内17.5T磁体的750MHz核磁共振商品谱仪即将投入市场。多维核磁共振波谱的主要困难,在于所用时间长,数据量大。除了配置大存储、快速的数据系统外,如何提高实验效率将成为活跃的课题。替代相位循环而采用脉冲梯度场,将大大缩短实验时间。减少间接检测的时间域上的数据点是热门话题,研究更佳的选择脉冲,进行选择性多维实验以及发展有效的线性预测等方法推延数据看来有望。由核磁共振数据推测大分子三维结构的软件系统,仍需进一步研究,尤其是包括全弛豫矩阵分析在内的NOE数据分析以及约束动力学分析等有效优化方法的开拓,至关重要。

参考文献

- 1 Bloch F, et al. Phys Rev, 1946, 69: 127
 - 2 Purcell E M, et al. Phys Rev, 1946, 69: 37~38
 - 3 Ernst R R, Anderson W. Rev Sci Instr, 1966, 37: 93~102
 - 4 Bax A. Two-Dimensional Nuclear Magnetic Resonance in Liquids. Reidel, Dordrecht: 1982
 - 5 Ernst R R, Bodenhausen G, Wokaun A. Principles of Nuclear Magnetic Resonance — once in One and Two Dimensions, Oxford: Clarendon Press, 1987.
 - 6 Wuthrich K. NMR of Proteins and Nucleic Acids. New York: Wiley, 1986.
 - 7 袁祖文, 裴奉奎. 核磁共振波谱. 北京: 科学出版社, 1989
 - 8 Griesinger G, et al. J Magn, Reson, 1989; 84: 14~63
 - 9 Clore G M, Gronenborn A M. NMR Spectroscopy to Protein Structure Determination, Progr NMR Spectrosc, 1991, 23: 43~92
- (中国科学院长春应用化学研究所博士生导师裴奉奎研究员撰)

含时薛定谔方程在分子动力学中的应用

application of time-dependent schrodinger equation in molecular dynamics 含时薛定谔方程是其模平方值与时间有关的波函数 Ψ 所满足的量子力学方程。求解这个方程可以得到 $|\Psi|^2$ 随时间的变化关系。化学反应时,整个体系的 $|\Psi|^2$ 将随时间改变,所以含时薛定谔方程在化学动力学,尤其是在反应动力学中有很多应用。解定态薛定谔方程讨论动力学中的散射问题,称为定态散射理论,解含时薛定谔方程讨论散射问题,称为非定态散射理论。

含时薛定谔方程是与时间有关的量子力学方程的一种表象。另两种表象,海森堡(Heisenberg)运动方程和量子刘维尔(Liouville)方程,它们和含时薛定谔方程在数学上是等效的。但从这3种表象出发,进行近似处理,则得到不同计算方案,并在反应动力学中有不同的应用。

求解含时薛定谔方程的主要近似方法是波包法。这一方法是观察一给定起始条件的波包在空间随时间的运动,以讨论粒子间的碰撞散射问题。由于求解时,用时空网格上的函数值集合,近似代替解析函数,进而用差分代替微分求解微分方程,所以又称为格点法。1959年玛祖(Mazur)等首次用格点法研究了共线模型反应,1971年麦卡洛夫(McCulloch)等首次用隐式格点法研究了 H 和 H_2 的共线交换反应。1973年阿斯克(Askar)等为减少隐式格点法的计算工作量提出了显式格点法。1978年,丘兰德(Kulander)等用预测校正格点法,研究了光分解过程。1984年,

科斯洛夫(Kosloff)等用傅里叶变换的格点法研究了表面速率反应。

格点法的一个优点为,它是一个初值问题。1984年,塔尔-伊泽(Tal-Ezer)和科斯洛夫用切比舍夫(Chebyshev)展开,精确、有效地计算了传播子 $[\exp(-iHt)\Psi(t=0)]$ 的作用;1985年,毛里(Mowrey)和考里(Kouri)将其推广到有内部自由度的紧耦合计算。这一方法只须重复计算哈密顿算子 H 对一矢量的作用,而不须像典型定态法中那样,要计算 H 和总能量 E 的差[即 $(H-E)$]的倒转作用。当 Ψ 表在一格点上时, $H\Psi$ 的计算是不费力的,因为这时可以用快速傅里叶变换来计算导数。格点法的另一吸引人的特点是波包包含了宽阔和连续的能量区域,从中可得到 S 矩阵和散射概率。非定态法和定态法一样,可以精确计算原子-双原子分子体系的反应横截面,而因为非定态法计算工作量只随 $\log N$ 或 $N^{1+1/D}$ (N :被研究体系的量子态数, D :被研究体系的自由度)缓慢上升,所以可望用非定态法计算更高能量和更重粒子体系的反应散射。例如,对于共线反应体系,含时法比定态法要耗时多得多,但对于非弹性双原子-表面散射,波包法是唯一可行的一种近似方法。为达此目的,首先要发展能从波包中在数值上提取严格反应散射信息的精确方法;其次,要提出一种足够有效的计算规则,使缓慢上升的优点能变成实际有用,即这种计算规则能与计算机处理有关课题的能力相匹配。另一方面,对于反应体系,计算散射问题的难点是出现反应物,产物和相互作用区等不同的原子分布排列。在大多数定态法中,是将所有可能的构型排列耦合一起,得到一耦合方程组,它复盖所有可能的构型空间。非定态法也可采用同样的处理方案,但一种更加有效的应用计算机时和内存的方案则是1989年纽霍瑟(Neuhauser)等提出的方案:将反应散射问题转化为非弹性散射问题来处理,即在任一时刻,只计算波包在一组非弹性雅各比(Jacobi)坐标系中的演化。这种可能性的出现,是应用复势函数的结果。复势函数吸收了波包中各种在物理上会离开由某些格点定义的构型空间区域的部分。在最简单的方法中,反应概率决定于波函数进入各产物区的通量,并在它们未进入非弹性数字格的边缘前,吸收掉其中的反应部分。反过来,总反应概率也可以从总弹性和非弹性散射的余额来计算。用一复势函数,令波包向反应区传播,并吸收掉波包中的非弹性散射部分,则可以得到反应 S 矩阵的列矢。将反应问题转化为非弹性散射问题,可以继续使用非弹性散射计算中的技巧,这些计算技巧已相当成熟,包括:简单的雅各比坐标,转动(有时包括振动)态中的紧耦合展开,从一能量或动量连续区上的单波包中解出散射概率。此外,还可应用波包的时间-能量解析(代替空间-动量解析),从反应能量得到随能量而改变的反应概率。只要复势函数放置得离反应区足够远,波包在被分析前不受反应区干扰,用非弹性散射来计算反应散射的方法是严格的。

纽霍瑟等的方案中另一项技巧是用投影算子技术使波函数分解为两部分,即紧耦合(振-转)态的加和部分及集中在强相互作用区的部分。前者可伸展至散射坐标的远距离处,后者中的振动运动则用格点值表述。这样,可以使主要计算力量耗在对体系力学性质重要的相互作用区,并可有效地讨论许多开放的渐近通道,无用的通道则可用复势函数锁住。

1991年坎波斯-马蒂纳兹(Campos-Martinez)和科尔桑(coalson)将含时格点法扩展为从头算计算规则,以得到严格的量子波包的动力学。这一新的计算规则应用了单个含时格点法波包轨线的正交零级含时基函数组的迭加。迭加系数本身与时间有关,它们反映了基函数的混合方式,以代表含时薛定谔方程的严格解。迭加系数的演化由一组一阶线性耦合常微分方程组所控制。系数间的耦合由零级基组各元间自然等同相互作用势的矩阵元所给定。他们计算了共线非弹性原子和莫尔斯(Morse)振子散射体系的 S 矩阵元,结果正确,并可推广到更复杂体系。

1991年,索梅达(Someda)等用算子——代数方法发展了一种波包动力学理论,用于光分解计算。这一方法用一近似的包含

若干变分参数的时间演化算子,使波包传播。这些变分参数的时间演化由含时变分原理所确定,实际上是得自初值问题的数值积分。近似时间演化算子与相空间中威格内(Wigner)函数的仿射变换相关联,在威格内函数定义域在相空间中的极限条件下,由这一近似时间演化算子描述的时间演化变为经典力学,变分参数则与经典力学变数相关联。他们推导了三原子分子共线解离生成双原子碎片的振动态分布的计算式。计算了 CF_3I 分子作为三原子分子(F_2)-C-I光解离产物 CF_3 基的对称变形振动分布,与严格的紧耦合法结果一致。

1992年,葛华才和江逢霖提出了一种混合式格点法。这一方法综合了隐式法和显式法的长处,计算机时比一般隐式法约少2个数量级,用该法计算了 H 与 HF 共线交换反应,结果与实验值一致。

用海森堡表象的含时量子力学方程的一种近似求解方程称为相空间矩运动方程。1991年,葛华才和江逢霖首次用它研究了分子内振动能量的再分配现象。预计,除了含时薛定谔方程在动力学中应用的研究将继续受到重视外,海森堡运动方程和量子刘维尔方程也将会在动力学中得到各自相应的应用。

参考文献

- 1 Mazur J, et al. J Chem Phys, 1959, 31(5): 1395~1412
- 2 McCullough E A, et al. J Chem Phys, 1971, 54(8): 3578~3589
- 3 Askar A, et al. J Chem Phys, 1978, 68(6): 2794~2798
- 4 Lee Soo-Y, Heller E J. J Chem Phys, 1982, 76(6): 3035~3044
- 5 Kosloff R, et al. J Chem Phys, 1984, 81(8): 3722~3729
- 6 Campos - Martinez J, Coalson R D. J Chem Phys, 1990, 93(7): 4740~4749
- 7 Neuhauser D, et al. Computer Phys Comm, 1991, 63: 460~481
- 8 Someda K, et al. J Phys Chem, 1991, 95: 2156~2166
- 9 Ge Huacai, Jiang Fenglin. Chem Phys, 1991, 155: 345~349
- 10 葛华才, 江逢霖. 复旦学报(自然科学版), 1992, 31(1): 6~12
(复旦大学江逢霖教授撰; 谢震审)

有机物合成路线的计算机辅助设计 computer assisted organic synthesis 就是通常所说的计算机辅助有机合成(Computer Assisted Organic Synthesis, CAOS),指由计算机辅助化学家找出目标分子的各种可能的合成路线。化学反应成千上万,达到该目标化合物的可能合成路线非常多。化学家不可能记住所有的化学反应式,因此所设计的合成路线不一定是最佳的。能否利用计算机来帮助人们从成千上万的合成路线中找出最佳的或较好的合成路线呢?最早提出这种想法的是 G. E. Vleduts, 而把理想变成现实的则是美国 Harvard 大学的 E. J. Corey 和 W. T. Wipke。Corey 第 1 个观察了有机化学家在整個合成工作过程中扮演的角色及其逻辑思维过程,提出有机合成工作的 4 个阶段:(1)选择要合成的分子(即确定目标产物 Target)→(2)作可行性分析,给出初步合成方案→(3)具体进行合成路线设计(选择具体反应原料条件编排反应进行先后次序)→(4)实验操作。他认为用计算机模拟合成路线的分析过程是可行的。当给定目标分子后,从它出发逆着反应方向倒推出前体,再从这前体出发推出新的前体,直至前体为原料为止。于是就形成了如下图 1 所示的合成树。由此可见,对于给定的目标分子可有多条合成路线供选择,因此必须对合成树进行修剪,只留下合理的枝叉。在分析过程中虽有一些反应机制理论可用于指导,如考虑反应中心的空间位阻,电子效应,反应活化能,干扰基团,副反应的竞争,单步和总体产率,目标分子的对称性等等,但更多是凭个人经验。要用计算机模拟化学家设计合成路线的思维过程,则必须将这些经验条理化,才能编入程序。Corey 于 1967 年总结出一些通用的合成策略和实现这些策略所用的分析方式,1969 年与 W. T.

Wipke 编写并成功运行了第 1 个计算机辅助有机合成路线设计程序 OCSS (Organic Chemical Synthesis Simulation), 标志着计算机辅助有机合成这一交叉学科的诞生。

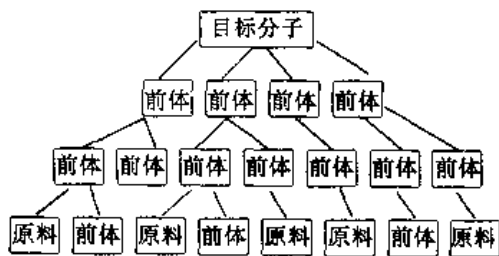
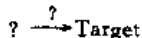


图 1

自此之后,这方面的研究日趋活跃,已建立起的比较有代表性的系统有:

作者	程序名称	首次发表时间	国家
Corey - Wipke	OCSS	1969	美国
Corey	LHASA	1971	美国
Wipke	SECS	1974	美国
Ugi - Gasteiger	CICLOPS	1974	德国
Gelernter	SYNCHEM2	1978	美国
Hendrickson	SYNGEN	1981	美国
Wipke	SST	1984	美国
Funatsu-Sasaki	AIPHOS	1988	日本
Sello	LILITH	1988	意大利

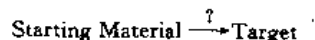
有的系统已得到了实际应用。从已发表的 CAOS 系统来看可分为两大类,一是以 Corey 为代表的经验型,一是以 I. Ugi 为代表的理论型。Corey 领导开发的 LHASA 系统是经验型的代表,其主要目标是辅助解决这样的合成问题,即已知要合成的目标分子,如何设计合成路线?



LHASA 的设计思想是模拟有机合成化学家分析、设计合成路线的思维过程,模拟有机合成化学家常用的“逆向合成法”(Retro-Synthetic Approach)。他们首先识别要合成目标分子的结构特征,然后由此推导产生一系列该目标分子的可能前体,即从目标分子倒推出一系列的起始反应步骤与反应,并希望这些步骤和反应物有可能通过已知的方法来实现。其推导合成路线是通过“反应”的检索来实现的。在反推的过程中,分析的出发点是在目标分子的结构中,找到那些与已知反应的产物结构一致,或近似一致的子结构。Corey 等人把合成化学家的经验加以总结归纳,提出了逆合成分析的通用策略以及实现这些策略的规范化流程。他们用 12 步分析流程法,概括有机化学家设计合成路线的思维过程:简化目标分子的复杂程度;找出合成子;生成等价合成子;加入控制合成子;切开合成子,生成前级产物(前体);找出切开合成子对应具体反应;把得到的前体当作新的目标分子,继续重复上述过程;一直分析到适当的原料为止;排除结构不合理的前体;检查有没有遗漏的问题;重复以上分析步骤,给出所有可能的合成路线;给各条路线评分。自 1969 年以来,上述逆合成分析策略及规范化流程经 Corey 小组的不断修改和补充,已调整为 5 套针对不同问题的分析策略 (Strategy): Transform - Based Strategy; Structure - Goal Strategy; Topological Strategy;

Stereochemistry Strategy; Functional Group Based Strategy。以 LHASA 为代表的有机合成路线辅助分析程序,是建立在对反应数据库进行信息检索基础之上的,它们给出的结果十分具体、实用,有关反应的条件、产率等信息也较完全,但从另一个角度看,也隐含着缺点:要事先编辑建立一个反应数据库;还要根据合成领域的新进展不断充实和更新数据库中的内容;最致命的是,整个分析过程都局限在数据库所包含的反应范围之内,不可能包含有新的反应步骤。

Ugi 所领导的小组建立的 CICLOPS 是理论型系统的最初模型,其主要目标是解决另一类合成问题,即知道要合成的目标分子,并规定了可选用的合成原料范围和反应步骤的上限,但具体的反应条件不清楚:



CICLOPS 的理论基础是化学反应矩阵代数模型,假设任何一个分子中的原子,都是通过化学键相互作用的,化学反应的本质就是原子壳层电子的转移,分子结构可用矩阵来表示。矩阵的每行、或每列分别对应于分子中的一个原子,如果分子中有 n 个原子,则矩阵为 $n \times n$ 阶方阵,其中非对角线上的元素 b_{ij} ($i \neq j$), 对应于 i, j 两元素间所形成的价数,而对角线上的元素 b_{ii} 代表 i 原子上未配对的价电子数, Ugi 他们称这种矩阵为价键电子矩阵 (Bond Electron Matrix), 简记 BE 矩阵。他们把所有参加反应的分子用一个 BE 矩阵 E 来表示,把所有的产物用另一个 BE 矩阵 E' 来表示,这两个矩阵之差则对应于反应过程中价电子转移的情况,称之为反应矩阵 (Reaction Matrix), 简记 R 矩阵,反应可用下式来表示:

$$E + R = E'$$

而且所有的反应都可用 R 矩阵来归类。Ugi 在总结已知的反应过程中发现:反应只断一根旧键的有 5 种类型;反应中折断两根旧键的有 12 种类型;反应时折断 3 根旧键的有 21 种类型,即总共有 38 种类型的矩阵。有了这些基本的反应类型,就可以把有机合成路线的分析过程形式化、推理化。后来 Ugi 又把 BE 矩阵对角线上的元素 b_{ii} 扩展成一个一维多元向量,不仅用来记录第 i 原子上未配对的价电子数,还用来记录该原子上所带电荷以及立体化学信息等等。

纵观已有的计算机辅助有机合成路线分析程序,基本上都是追求以下两个目标之一,一是试图建立有机反应机制的逻辑体系,从而更深入地了解化学反应的本质,并预言可能的新反应,启迪化学家的思维。二是力求给化学家一些实用的帮助,如帮助分析找出目标分子可能的合成路线,选择适宜的合成原料,估计反应的产物等等。有的方法侧重于对反应有较好的预测能力,有的则倾向于产生合成路线的全面性,但是两者总是难以兼顾。

CAOS 发展到今天,预言它将胜过人的智能还为时尚早,但是随着人工神经网络等新技术的引入,CAOS 必将有更大的进展。

中国目前只有为数不多的大学和研究所初步开展了计算机辅助有机合成路线设计的工作。南开大学已建立起中国第一个有实用价值的有机合成反应数据库,包含近 7 万条常用的有机合成反应,可说是一个良好的开端。

参考文献

- 1 Vleduts G E, et al. Inf Storage Retr, 1963, 1(3~3): 101~116
- 2 Corey, E J. Pure Appl Chem, 1967, 14: 19~37
- 3 Corey E J, et al. Science, 1969, 166(3902): 178~192
- 4 Corey E J. Quart. Rev Chem Soc, 1971, 25: 455~482
- 5 Blair J, Gasteiger J, Ugi I, et al. Computer Representation and Manipulation of Chemical Information. John Wiley, Sons, 1974, 130~145
- 6 Gasteiger J, Ugi I, et al. ACS Symp Ser, 1977, 61: 33~59

(南开大学中心实验室林少凡教授、
张金磊副教授、乔圆圆讲师撰)

无机化学

无机微孔物质骨架型设计

the framework structure of inorganic micro porous material 无机微孔物质是指孔径范围在 $(3\sim 20)\times 10^{-10}\text{m}$ 的无机晶态物质。这类物质具有排列整齐、走向有序、孔径一致的孔道系统。它们呈现出优异的吸附性能、催化性能和离子交换性能。被广泛地应用于石油炼制、化工、冶金、电子、环保等部门。这类物质的结构是由排列有序的空旷的骨架结构和骨架外可移动的阴、阳离子或被吸附分子两部分组成。无机微孔物质骨架型设计是在对这类物质的结构测定和这些结构间相互联系的研究基础上发展起来的一门新兴学科。它对新颖微孔材料的结构确认和对它们的开发应用提供了极大的帮助。

第1个无机微孔物质是1756年瑞典克劳斯坦达(A. F. Cronstedt)发现的沸石。迄今已报道有数百种天然和人工合成的分子筛类微孔物质。最早发现的这类物质在加热后会像沸似地起泡,其组成多为硅铝酸盐,故被称为“沸石”。后来发现这类物质具有筛分分子的能力,又被冠以“分子筛”雅名。泰勒(W. H. Taylor),泡林(L. Poling)在20世纪30年代首先用单晶X衍射方法测出了一些沸石的结构,证实了这类物质具有开放性孔道的三维骨架结构。到了60年代后,这类物质的合成与性能研究引起了不少学者的浓厚兴趣。很多新颖无机微孔材料被人工合成出来,但遗憾的是,多数这类物质很难得到足够大的晶体供单晶衍射分析使用。这些材料的结构解析主要依靠多晶衍射方法解决。在采用多晶衍射法解析之前,通常需要先提出一个假设结构模型,通过对模型数据逐步修正拟合,以获得正确的结构参数。因此很多学者在对这些物质的分析的过程中,进行了一系列的假设结构设计和各种结构之间的关联研究,例如1956年勃莱克(D. W. Breck)等为测定A型沸石的结构,首先设计了一个26面体的模型,称其为 α 笼,并解得了A型沸石的结构,继而,有关沸石骨架结构分类的讨论与假设骨架结构的设计研究十分活跃。1968年密歇(W. M. Meier)提出了次级结构单元(Second building unit)概念。大部分沸石骨架结构可以由一种或几种不同的次级结构单元构成。肖曼柯(D. P. Shoemaker)在1973年提出一种联系次级结构单元及各种沸石骨架结构之间互相关联的一种转换方法,称西格玛(Σ)转换。从1977年开始,威尔兹(A. F. Wells),史密斯(J. V. Smith)等人从拓扑几何的观点对沸石骨架作了系统研究,并提出了一系列理论骨架结构。巴勒(R. M. Barrer),安琼斯(K. J. Anrdies),本纳特(J. M. Bennett),勃纳纳尔(G. O. Brunner),柯可太罗(G. T. Kokotailo),吉林大学化学系等在沸石骨架型间的关联研究和新的骨架结构设计中作了不少工作。

随着人工合成的分子筛类物质的不断增多,并且出现了很多由非硅铝元素部分或全部替代骨架中的硅,铝的微孔物质,“沸石”和“分子筛”的概念已逐步发生变化。有些学者主张对非硅铝骨架的微孔物质仍沿用“沸石”和“分子筛”的称呼,或称“类沸石”“类分子筛”物质,有的则开始采用微孔类物质或微孔晶体的称呼。随着非硅铝元素参与骨架组成,出现了很多新奇的骨架型,进一步推动了微孔物质骨架型设计研究。

无机微孔物质骨架型设计目前主要围绕着阴离子四面体连接而成的三维骨架为主,叫作三维四结点网。因为这种结构形式最为重要。如在大量硅酸盐结构研究中发现,硅氧四面体通过顶角相连优于通过棱边或面互相连接。磷、铝或某些他非金属元素也可以形成四面体氧配位,进而形成骨架结构。在硅铝氧四面体中,(Si, Al)-O的距离在 $(1.53\sim 1.78)\times 10^{-10}\text{m}$ 之间,O-(Si, Al)-O键角是 $109.46\pm 5^\circ$, (Si, Al)-O-(Si, Al)角在 130°

$\sim 180^\circ$ 之间。两个硅(铝)氧四面体中心距离大约在 $(3.0\sim 3.2)\times 10^{-10}\text{m}$ 。其它元素也可根据它们的各自成键情况得到键长键角范围。这些数据是无机微孔物质骨架结构设计的主要几何参数。因为氧原子在两中心原子的中间,在最初考虑它们的骨架拓扑结构模型时可以被省略。无机微孔物质骨架结构设计的方法主要有:(1)以中心原子T形成的 TO_4 四面体互相连接成一维链,然后由各种不同形式的一维链互相连接组成三维骨架结构模型。(2)由上述的一维链先构成二维的平面网,然后再由这些二维网构成三维骨架结构模型。(3)根据已知结构在特定方向下的投影,寻找具有同样投影的可能的三维结构,从而导出一系列假设结构模型。(4)由已知结构中的一些基本结构单元或部分结构块,通过某些对称变换,如平移、旋转等变换得到一系列新骨架型。(5)采用前面提到的 Σ 转换或反 Σ 转换,从一已知结构或它基本结构单元的得到相关的新结构模型。(6)根据给定的晶胞参数和晶胞内中心原子的数目及对称性与键长键角限制,直接计算中心原子的可能排布,从而得到一系列假设结构模型。(7)将一个基本结构单元放置在某些相关空间群中,适当调整正晶胞参数与中心原子间的相对位置,可以得到一系列骨架结构模型,最后再根据各元素的化学性质和成键规律,对整个模型稳定性作出判断。

采用计算机技术可以大大加快结构设计的进程,特别是方法(6)和(7),必须在计算机的帮助下才能实现。在得到设计结构的一系列结构参数和原子坐标参数后,可以通过晶体结构分析的有程序计算出它们的键长、键角,从而可以判断这种结构存在的可能性。虽然目前已经可以实现采用计算机在几分钟内设计出很多种结构模型,但是设计思想必须依靠人们对晶体几何的理解和人们对微观结构中各种原子,离子互相键合规律的认识。

无机微孔物质骨架型设计研究促进了很多新颖结构物的发现。例如 AlPO_4-11 是首先由 AlPO_4-5 的结构经一次反 Σ 转换得到的模型后解出。而另一个具有18员环超大孔道的VPI-5磷酸铝分子筛结构模型,则是由 AlPO_4-5 结构经 Σ 转换得到。1984年美国芝加哥大学史密斯教授曾对这一模型作过研讨,但直到1988年才由美国弗吉尼亚工业大学戴维斯(M. E. Davis)等人合成出来。近年来很多分子筛的结构,例如 AlPO_4-16 , AlPO_4-39 , ZSM-20, THETA-1, EU-1, AlPO_4-31 , BETA等等分子筛都是通过先设计结构模型,然后采用多晶衍射法解出它们的结构。无机微孔物质的骨架结构设计研究还有助于揭示不同构型骨架之间互相关联的内部结构因素。例如近年来根据VPI-5与 AlPO_4-8 分子筛内部结构之间的互相关联,揭示了18员环的VPI-5向14员环的 AlPO_4-8 分子筛相变的实质。

无机物质骨架结构设计最初目的是为多晶结构分析提供合理模型而兴起的,同时它又为一门新兴的学科——分子工程学的发展提供了经验与基本数据。分子工程学的宗旨是在理论指导下,为了某种需要设计出具备某种性质的特定结构的物质,然后采用各种合成和制备技术得到这一材料。当然这一设想是多少化学家梦寐以求的理想的新开发新型材料的捷径,但目前离实现这一理想的路途甚远。这门学科国内外尚属起步阶段。无疑,作为无机物质的骨架型设计将是它征途中的第一步,同时这门学科的发展将会对材料科学产生重大影响。

参考文献

- 1 Shoemaker D P. Molecular Sieves. Leuven University Press. 1973, 138
- 2 Breck D W. Zeolite Molecular Sieves. (New York) Wiley, 1974
- 3 Meier W M, Olson D H. Atlas of Zeolite Structure Types. London, 1987
- 4 Smith J V. Chem Rev. 1988, 16: 149
- 5 Kokotailo G T. Proceedings of the 8th International Zeolite Conference, 1989, B 715
- 6 Lynne B. Moccusker. Acta Cryst, 1991, A47: 297

- 7 徐翔华,张丽萍,徐如人. 高等学校化学学报, 1992, 5: 561
(吉林大学徐翔华副教授撰)

湿法磷酸精制技术 *technique of humid phosphoric acid*

磷酸的最终用途决定于它的纯度,而磷酸的纯度一般又取决于它的生产方法。虽然热法磷酸工艺能满足制取高纯磷酸的要求,但热法磷酸耗电一般为 9 700kW·h/t 磷酸,成本很高,其生产过程中产生粉尘及有害气体对环境造成污染。湿法磷酸虽含杂质很多,但若以适当方法精制后其纯度可达食品级,能与热法磷酸的纯度相媲美。其成本比热法低 20%~30%,能耗仅为热法的 1/3,相应的用其制取的精细磷酸盐的成本也比较低。因此,很多国家都力图从净化湿法磷酸的途径来满足制取高纯度磷酸的需求。据不完全统计 1985 年全世界磷酸产量为 3 761.2t,其中湿法磷酸为 2 402.5t,占总产量的 64%。

磷酸按生产方法分为热法磷酸和湿法磷酸,按商业销售及用途分为农业类和工业材料类。当前世界发达国家中磷酸及磷酸盐的发展趋势正从农业型向材料型转化,近年来在光学材料、光电材料、荧光材料、电子材料、生物工程材料以及吸附剂、催化剂等方面进行开发利用。

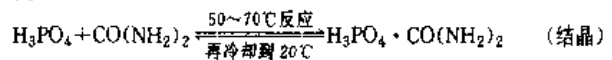
早在 1914 年 Fox 就用脂肪醇从硫酸分解磷矿的粗磷酸中获得纯磷酸。1933 年 Milligan 研究了用正丁醇五级萃取得到纯磷酸的方法。1934 年 Vana 研究了用环己烷一类的氧化产物,甲基环己烷、甲基环己醇等作萃取剂精制粗磷酸的方法。1952 年 Helferich 等,研究了硫酸法制得的粗磷酸在醚、丙酮、丁酮等溶剂中的溶解度。1957 年以后 A. Baniel 和 R. Blumberg 发表一系列论文和专利,提出了比较完整和系统的用有机溶剂萃取粗磷酸制取纯磷酸的方法,以色列采矿公司 (Israel Mining Industries, 简称 IMI) 根据这个方法建立相应的工厂。1959 年日本东洋制碱公司在 IMI 法基础上添加了离子交换系统,并成功的制得了食用规格的纯磷酸。1985 年美国 Bechtel 石油公司研究成功了一种精制磷酸的 BESA-2 法,此法的第 1 步是将磷酸钙、简单磷酸盐与硫酸反应,第 2 步将反应产物在甲醇及硫酸中溶解及萃取可得浓度为 31% P₂O₅ 的磷酸,再经后处理和离子交换法处理,最后得到纯磷酸。爱尔兰 Goulding 公司研究了用甲醇为沉淀剂处理粗磷酸的氯化钾反应液,醇相中沉淀析磷酸二氢钾后,再将醇相精馏可得到高纯磷酸。近年来美国专利报导了把粗磷酸中 CaO 的浓度调整到 0.25%~3%,添加氢氟酸,在氟化钙析出的同时 Fe、Al、Mg 等共沉淀除去的方法和调整 Ca、Al、F、Si、SO₄²⁻ 的克分子比,使之生成由其杂质构成的结晶性络合物沉淀而除去杂质的方法。中国成都科技大学研究了以正丁醇和异戊醇为萃取剂净化湿法粗磷酸工艺,华东化工学院研究了以二丁基亚砷 (DBSO) 萃取净化粗磷酸工艺,华中师范大学研究了以 (CHEOH+CHN) 为萃取剂净化湿法粗磷酸工艺。湿法磷酸精制,目前常采用的方法归纳起来有 3 种类型。

离子交换及电渗析法 仅限于粗磷酸中 Ca²⁺、Mg²⁺、Fe³⁺、Al³⁺、As³⁺、Mn²⁺ 等阳离子的脱除。离子交换法精制粗磷酸目前尚有很多技术问题没有解决,所以至今工业化者甚少。电渗析法是将湿法磷酸中的有机物先用活性炭除去,然后在一定的电流密度下进行渗析,可制得精制磷酸。此法的技术关键是筛选具有良好选择性的离子交换膜,否则分离 SO₄²⁻ 等杂质相当困难,而且膜孔易于被堵塞,不能处理浓度较高的磷酸,因而精制成本高。距实用阶段尚远。

化学净化法 包括结晶法、沉淀法等。通常用水溶性溶剂 (碱金属或铵离子) 与粗磷酸混合,除去磷酸中可溶性杂质 (对每一种杂质只能分别进行净化处理)。如加入 Na⁺ 或 NH₄⁺ 与硅酸使氟化物以氟硅酸盐的形式被除去,加 Ba 盐或 Ca 盐的化学沉淀法除去 SO₄²⁻。

自 80 年代初以来,利用结晶作用进行湿法磷酸精制的研究相当活跃。采取的主要技术路线是, (1) 由湿法磷酸中结晶出 H₃PO₄·H₂O (熔点 29.32℃) 或 H₃PO₄ (熔点 42.35℃); (2) 使磷

酸与添加剂 (如尿素、三聚氰胺等) 形成复盐结晶析出,其反应过程为:



因为溶液呈酸性,所以铁、铝等杂质遗留在母液中,使结晶纯度提高。结晶洗涤后用硝酸复分解,析出硝酸尿素复盐,得到液体磷酸:



此法的研究和应用有继续发展和不断完善的趋势; (3) 结晶析出磷酸盐,然后将其转化为磷酸; (4) 溶剂沉淀法 (水可溶性溶剂), 此法采用与水完全互溶的溶剂 (甲醇、乙醇、异丙醇、丙醇等), 使磷酸及水溶于溶剂,而使湿法磷酸中的杂质成不溶性的盐沉淀而被除去。

用结晶法精制湿法磷酸,还有不少技术问题一时难以解决。例如各种晶体都有一定的溶解度,致使最终达到的净化度也是有限的,而且必需进行多次结晶,工艺复杂,不便于工业化。

溶剂萃取法 在湿法粗磷酸精制中,已得到广泛应用的是有机溶剂萃取法。它的优点是所得产品纯度高、生产工艺相对比较简单、节省能源、原料消耗低、环境污染少而且有利于磷矿资源的综合利用。下面仅介绍两家具有代表性的粗磷酸精制工艺方法。

IMI (Israel Mining Industries) 法。 以色列采矿公司开发的 5 000t/a 规模的湿法磷酸净化工艺。该工艺使用的有机萃取剂为二异丙基醚 (或二异丙基醚 85% 和异丁醇 15%) 混合溶剂。湿法粗磷酸 [P₂O₅ 53%~55%, SO₄²⁻ 2.7%~3.5%, 固体 (最大值) ≤1.5%, Fe (最大值) ≤1.5%] 在低温下 (0~2℃) 与萃取剂相互混合,大量磷酸和少量杂质被萃取到有机相,荷载磷酸的有机相与反萃产品稀磷酸对接接触洗去有机相中的杂质。萃洗后的有机相送到反萃取工段用去离子水接触后,有机相中的磷酸被反萃到水相中,从而得到较纯稀磷酸,稀磷酸经溶剂回收被浓缩脱色后即得纯度很高的精制磷酸产品。反萃后的有机相返回到萃取工段循环使用。

萃取工段所得的萃余相 (水相) 经溶剂回收后,加入碳粉钙粉或石灰乳与其中残存的磷酸反应可得到肥料磷酸钙和饲料磷酸钙。

IMI 法原料及公用系统消耗定额 (以 tP₂O₅ 计)

湿法粗磷酸 1.25t, 工艺水 0.7m³, 补充溶剂 0.3kg, 冷却水 125m³, 电 80kW·h

IMI 法精制后磷酸的技术指标:

P ₂ O ₅	48%~61%	Fe	(40~80) × 10 ⁻⁶ %
SO ₄ ²⁻	0.81%~1.5%	Al	(2~10) × 10 ⁻⁶ %
Mg	(5~7) × 10 ⁻⁶ %	F	0.06%~0.07%
Ca	(3~50) × 10 ⁻⁶ %		

Iprochim/Icechim 法。 罗马尼亚化工工程公司 (Iprochim) 和化工研究院 (Icechim) 联合开发了一种已获工业应用的以正丁醇为萃取剂净化粗磷酸的方法, P₂O₅ 的生产能力为 10 000t/a。精制后磷酸的主要技术指标为:

净化磷酸	净化后精制磷酸	净化前磷酸	净化后精制磷酸
P ₂ O ₅ 27%~30%	61.6%	SO ₄ ²⁻ 11.17~40.39g/L	0.006%~0.01%
Fe 2.34~10.69g/L	≤0.01%	Ca 0.91~5.7%g/L	≤2 × 10 ⁻⁶
Al 1.27~5.66g/L	≤8 × 10 ⁻⁶	F 5.97~18.7g/L	≤100 × 10 ⁻⁶
Cl	微量	测不出	

精制后的磷酸主要用于磷酸钠、磷酸氢二钠、磷酸三钠、磷酸二氢铵、焦磷酸钠、三聚磷酸钠、饲料磷酸钙等的生产。

中国华中师范大学研究了以(CH₃OH+CHN)为萃取剂净化湿法磷酸工艺。该工艺是将粗磷酸(或粗磷酸与盐酸酸解磷矿的酸解液的混合液)。

先用化学法净化,再用混合萃取剂萃取,萃取后荷载磷酸的有机相以含一定量的稀磷酸(水相)洗涤,再用蒸馏工序的冷凝水进行反萃取。反萃取后的有机相送回萃取工序循环使用;反萃取后的水相(即稀磷酸)经浓缩和脱色,即为精制纯磷酸。浓缩工序的冷凝水供反萃取使用。

萃取后的萃余液(水相)送回回收工序,先蒸馏回收其中溶解的有机溶剂,然后添加磷酸钙或石灰乳进行中和以回收其中残存的磷酸,得副产品肥料磷酸氢钙及饲料磷酸氢钙。最后将含钙镁杂质的溶液作废液排放。

溶剂萃取法精制粗磷酸的技术关键是萃取剂的筛选和相应的新萃取体系的建立。能全面符合标准的萃取剂是极少的。精制湿法磷酸试验用或工业用的溶剂有C₄~C₅脂肪醇,磷酸酯;醚(二异丙醚等);酮及酯(甲基异丁基酮、环己酮、醋酸酯等);胺及酰胺;复合萃取剂(如磷酸三丁酯/异丙醚,二异丙基醚/异丁醇,环己酮/环己醇等)。

溶剂萃取法精制粗磷酸今后的发展趋势为:(1)试验证明,复合萃取剂往往比单一萃取剂效果好,特别是具有协同效应的复合萃取剂的筛选和相应萃取体系的研究将会是很有发展前途的。(2)采用单一方法将粗磷酸净化时,不能全面和深度除去其中的杂质,所以近来都力图采用复合净化法。即有机溶剂萃取——离子交换法;结晶沉淀法——有机溶剂萃取法;有机溶剂萃取法——特定成分除去法。(3)采用溶剂萃取法净化粗磷酸时,磷酸的收率和纯度往往是相互矛盾的,若注意纯度则收率低;反之若追求收率则不得不降低其纯度。而今后在此方面的研究是致力于探索两者统一的方法,或者将湿法磷酸的净化与生产精细磷酸盐工艺相结合的方法,将是很有发展前景的研究领域之一。

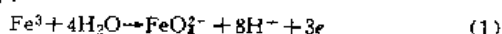
参考文献

- 1 Fox J. Ind Eng Chem, 1914, 6: 828
- 2 Milligan C H. U. S. Patent. 1933, 1(929): 443
- 3 Vana. U. S. Patent. 1934, 1(968): 544
- 4 Helferich B, et al. Chem Ber, 1952, 85, 461
- 5 Baniel A. Blumberg Chem et Ind, 1957, 78, (4), 327, Brit. Chem Eng, 1959, 4: 223
- 6 Israel Patent 1957, No. 9660, 1958, CA. 52, 105, 181
- 7 Chem Eng, 1962, 69(26): 34~36, 1963, 70(24): 76
- 8 C & EN, 1985, 63(42): 23~25
- 9 赵廷仁等, 化工进展, 1992; 2: 45~49

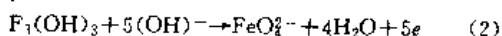
(华中师范大学赵廷仁教授撰)

高铁酸盐 1841年Fenmy首次合成高铁酸钾。20世纪50年代左右, J. M. Schrye和G. W. Thompson在实验室利用次氯酸盐氧化三价铁盐制备出高纯度、高产率的高铁酸钾。之后,人们提出了不少工业生产性的制造方法。如:电解法、高温过氧化物等。另外, H. J. Hrostowski等制备出Rb⁺、Cs⁺的纯净高铁酸盐,然后用高铁酸钾与碱土金属或过渡金属反应制得Ba²⁺、Sr²⁺、Co²⁺、Pb²⁺、Hg²⁺、Ni²⁺、Ag⁺、Mn²⁺等多种高铁酸盐。1958年R. H. Wood等通过测定含水高铁酸钾与高氯酸在25℃下的反应热,计算出FeO₄²⁻离子的生成热,由此又计算出其生成自由能ΔE_g⁰ = (-322.4 ± 8.37) kJ/mol,并计算了半反应:

酸性条件:



碱性条件:



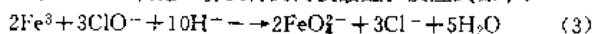
氧化还原电位: E₁⁰ = -2.220(V); E₂⁰ = -0.72 ± 0.03(V)。

从电极电位值可以看出,高铁酸有强的氧化能力,可以氧化许多物质。高铁酸根离子在水溶液中能杀死大肠杆菌和一般细菌,去除污水中有害有机物、-NO₂⁻及剧毒CN⁻等。高铁酸根高

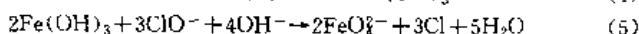
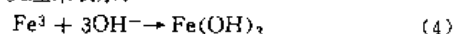
子分解产生的Fe(OH)₃可以作为吸附剂,吸附各种阴离子,起到净水作用。其它方面的研究包括:高铁酸盐作理想的磁记忆材料,以及通过控制酸酐的分解速度制造各种类型的羟基氧化铁等。

制备高铁酸盐的基本方法有次氯酸盐氧化法、电解法和高温过氧化物法(干法)。次氯酸盐法产率及纯度好;电解法原材料消耗少,但电力消耗大,副产物多;而高温过氧化物法需要获得高温,但纯度和产率较高。

次氯酸盐氧化法:在碱性条件下,用次氯酸盐(最常用NaClO和KClO)氧化三价铁得到高铁酸盐。反应式如下:



它可以用下面两步反应来表示:



采用以上两步可以避免铁盐阴离子进入氧化阶段。因为高铁酸根能氧化许多离子,使最后产率及纯度下降,因此上两步反应比较有利。

由于碱土金属及过渡金属的次氯酸盐反应活性比较低,不能直接氧化其铁盐制备高铁酸盐,而能由高铁酸钾与碱土金属及过渡金属离子进行分解反应制得。

如高铁酸钾适宜的反应参数如下:

反应温度: 10~30℃

反应时间: 0.8~1.5h

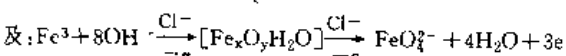
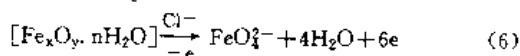
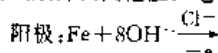
铁盐浓度: 25%~40% (以硝酸铁计)

次氯酸盐浓度: 20%~35% (过量50%)

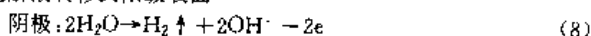
碱(KOH)浓度: 25%~35%

所选择的铁盐中,以硝酸铁反应性能最好。然后将次氯酸钾逐渐加入,搅拌控温反应,生成高铁酸钾,再加入高浓度KOH或片状KOH使高铁酸钾结晶析出过滤,滤饼用异丙醇或仲丁醇洗涤,真空低温干燥得成品。

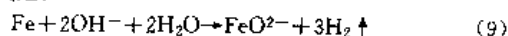
电解法:电解制备高铁酸钠,以此来与其他金属离子反应制备高铁酸钾及其他盐。电极反应如下:



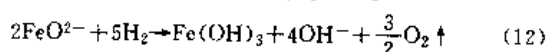
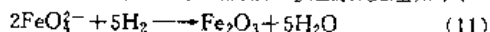
从电解液转移到阳极表面



总反应式是:



高铁酸根形成后很容易被阴极或阴极H₂还原,反应如下:



因此电解池宜采用隔膜型,隔膜材料为一种全氟磺酸树脂膜。池体用聚四氟乙烯材料。阳极为纯铁板,阴极为Ni网,阳极装有电动搅拌器,阴阳极各有加热管。阳极液组成的是:NaOH、NaCl、Fe³⁺的水溶液;阴极是NaOH水溶液。通电电解2h,加入NaOH结晶高铁酸钠。电解过程操作参数:

阳极电解液: NaOH浓度: 50%~65%

NaCl浓度: 0.05%~1.0%

H⁺范围: 10⁻¹⁴mol/L

Fe³⁺浓度: 0.1%~10%

阴极电解液: NaOH浓度: 45%~65%

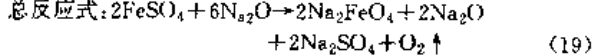
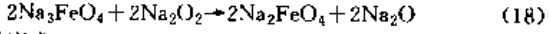
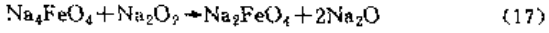
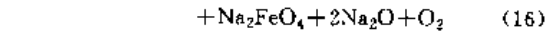
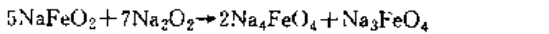
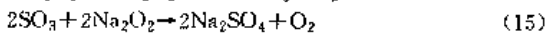
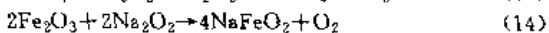
电解过程参数: 电流密度: 0.03~0.5KA/m²

电压: 1.5~3/5V

温度: 35~50℃

整个电解过程结束后得到含 Na_2FeO_4 128% 的产品电流,效率达 92.7%。

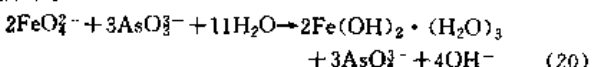
高温过氧化物法(干法):1986年E. Martinez-Tamayo等在研究 $\text{Na}_2\text{O}_2/\text{FeSO}_4$ 反应体系时,提出具有工业应用前景的方案。并认为过氧化物/硫酸亚铁体的氧化行为与所用氧化剂阳离子性质有关。例如相似体系 $\text{BaO}_2/\text{FeSO}_4$ 中,最后并没有六价铁存在,只生成四价铁盐。而 $\text{Na}_2/\text{FeSO}_4$ 体系在 N_2 流中于 700°C 反应 1h,得到产生完全的六价高铁盐,却没有四价、五价存在。反应如下:



反应过程参数: $\text{Na}_2\text{O}_2/\text{FeSO}_4$ 摩尔比 3:1.0; 反应温度 700°C, 反应时间 1h

Na_2O_2 有极强的吸湿性,混合 $\text{Na}_2\text{O}_2/\text{FeSO}_4$ 过程应在密闭、干燥的环境中进行。然后在 N_2 气流中加热反应,得到含 Na_2FeO_4 的粉末,再用 5molNaOH(溶解过程温度上升不得高于 5°C)。离心 10min,快速过滤收集滤液,加入氢氧化钾固体至饱和,高铁酸钾以结晶形式析出,过滤、醇洗、真空低温干燥得成品。

各种研究中对产品的分析主要是采用化学分析法,如铬酸盐法、溴酸盐法及铈盐法(J. M. Scrheyer 等,1950)。它们都是利用高铁酸根的强氧化性,在碱性溶液中氧化过得亚砷酸根,过量的亚砷酸根用溴酸盐、铬酸盐及铈盐回滴,从而确定 FeO_4^{2-} 浓度。反应如下。



此外,1971年A. S. Verkadrri 等提出循环伏安法分析高铁酸盐,但采用并不广泛。

高铁酸根具有正四面体结构。Fe 原子位于 4 面体的中心,4 个氧原子位于四面体的 4 个角上,而且这 4 个氧在动力学上是等价的。Fe-O 键是较强的共价键,而 FeO_4^{2-} 是单一的化学单元。高铁酸盐晶体都属于正交 $\beta\text{-K}_2\text{FeO}_4$ 晶系,与 K_2SO_4 、 K_2CrO_4 有相同的晶形,每个晶胞有 4 个分子。高铁酸盐稳定性较差,尤其是水溶液或含有少量水份的产品,很不稳定,极易分解,在酸性条件下很快放出 O_2 气。在中性或弱碱性条件下也缓慢地按式(12)分解。但随着碱性增强,分解变慢, FeO_4^{2-} 水溶液比较适宜的 H^+ 浓度范围($3.16 \times 10^{-14} \sim 3.16 \times 10^{-12} \text{mol/L}$),在此范围内 FeO_4^{2-} 几乎不分解。式(12)中生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 对高铁酸根分解有催化作用。另外,高铁酸根热稳定性随温度升高而愈来愈差。所以干燥高铁酸钾产品时温度不得高于 60°C。但碱土属高铁酸盐比碱金属及过渡金属高铁酸盐有较好的稳定性。如 $\text{BaFeO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 在中性或弱性环境中仍能稳定存在,很少发生分解。而且在 100°C 以上放置也不会失去其氧化能力。

有机物质的氧化一般使用 MnO_2 、 KMnO_4 、 Cr_2O_3 、 KCrO_7 等氧化剂,但这些试剂有毒、有污染、对皮肤及膜有腐蚀性和刺激性,而且重铬酸钾的氧化产物三价铬 Cr^{3+} 对动物具有致癌作用。高铁酸钾作为合适的氧化剂的最大障碍是它在有机物质中溶解性差,另外高铁酸钾适用的强碱性环境(H^+ 浓度 $3.16 \times (10^{-12} \sim 10^{-14}) \text{mol/L}$)也限制了其使用范围。为了解决溶解度问题,K. S. Kim 等(1984)报道使用相转移催化剂(PTC)条件下的高铁酸钾选择氧化烯丙醇、苄醇、仲醇得到了较好的结果。他们使用高铁酸钾粉末、色谱 Al_2O_3 (未活化)及 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 组成的混合物。这种混合物能在伯醇和仲醇的混合物中选择氧化仲醇成相应的酮,而伯醇不被氧化。另外,在环乙烯存在下,苄醇 5h 被氧化成苯甲醛的产率只有 20%,结果表明碳碳双键(>C=C<)束缚了高

铁酸钾的活性部位,使其不能很好地进行氧化反应。此外,这一混合氧化剂对多羟基化合物上羟基的选择性很强,如苯基-1,3-醇。4h 以 93% 的转化率生成苯基-1-羟基-3-酮。

1988年H. Firouzabadi 等探索 and 尝试了高酸银和 -水高铁酸盐的氧化性能。因为银盐昂贵,较难工业化使用,因此意义不大。而 -水高铁酸银则是较理想的有机物质氧化剂。在对质子有惰性溶剂中能有效地选择氧化有机物质。在苯、庚烯、甲苯等回流条件下氧化不同的有机物质。从氧化结果看,这种试剂的适用范围宽、氧化转化率高。能氧化许多有机物质。如伯、仲醇、 α -羟基酮、氢醌、芳族胺、苯胺、胺等等。

70年代中期,R. H. Murman, T. O. Waite, K. Svanks 对高铁酸盐作为水处理剂作了许多研究。80年代日本从加藤健司等对高铁酸盐杀菌效果作了较详细的探讨,并随着高铁酸钾工业制法的改进,开始应用小规模水处理方面。1987年,M. Gilbert 报道了高铁酸盐与原子态氯有同样的杀菌效果。有可能成为氯源消毒净水剂的替品。

综上所述,高铁酸盐可以作为新一代选择氧化剂和水处理剂。但是还需要作更深入的研究,以尽快应用于现代化学工业有环境治理工程。

(河北大学李志远、赵建国撰)

固体超强酸催化剂 solid superacid catalysts

固体超强酸是比 100% 硫酸还要强的酸,即 $\text{Ho} < -11.93$ 的酸。在催化反应中,这种固体超强酸对烯烃双键异构化、烷烃骨架异构化、醇脱水、烯烃烷基化、酰化、煤液化、酯化等许多反应都显示出非常高的活性,甚至在常温下也显示出较高的活性,这对节省能源、增加收率、提高经济效益是很有意义的。这种催化剂不腐蚀设备,不污染环境、催化反应温度低、稳定性好,制备方法简便、处理条件易行,便于工业化,有广泛的应用前景,已成为国内外研究的热点。

1979年M. Hino 等首次合成了 $\text{TiO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 等新型固体超强酸,并报道在烷烃骨架异构反应中的催化作用。1981年K. Tanabe 等报道了在烯烃双键异构化及醇脱水反应中的催化作用,1984年H. Hattori 等报道了在煤的液化反应中的催化作用,1987年R. A. Rajadyaksha 等报道了在烷基化反应中的催化作用,在1989~1991年期间,关于固体超强酸在酯化反应中的催化作用战水复等作了系列报道,发现固体超强酸 $\text{TiO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 有酯化催化作用,其催化活性与本身的酸强度表面面积有关,而酸强度又与处理催化剂的温度及酸度有关,处理条件得当,酸强度可提高几个数量级,酯化催化活性明显增强;表面面积与沉淀剂种类及热处理温度有关,处理条件得当,固体超强酸催化剂的表面面积增大,催化活性增强。在此期间王秋莹等也报道了固体超强 $\text{TiO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 对酯化反应的催化作用,经 450~500°C 焙烧的 $\text{TiO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 酸性最强,比表面积也大,催化活性强。1990年姚胜系统地报道了 $\text{M}_2\text{O}_y\text{-SO}_4^{2-}$ 型固体超强酸。某些金属氧化物的表面结合少量的 SO_4^{2-} 离子时,其酸强度(Ho)可以提高几个数量级,而成为超强酸。把不含卤素的固体超强酸用 $\text{M}_2\text{O}_y\text{-SO}_4^{2-}$ 表示,如 ZrO_2 是近中性的氧化物,而 $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 经 650°C 焙烧后,其酸强度 $\text{Ho} \geq -16.04$,是 100% 硫酸强度的 1 万倍,也是将某醛金属盐用氨水水解得到比较纯的氢氧化物或氧化物,再用含有一定浓度的 SO_4^{2-} 离子的水溶液处理,然后在一定温度下焙烧即得。但是具体合成条件对于合成这种固体超强酸来说是非常重要的,如不注意就会使酸强度减弱,甚至得不到超强酸。所以制备固体超强酸催化剂的关键就是制备条件的选择。

金属氧化物的选择 氧化物的种类对于这种固体超强酸的合成是非常重要的。1983年G. Wang 等报道了 $\text{ZrO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\text{TiO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SO}_4^{2-}$ 显示出很高的催化活性及很高的酸强度,属固体超强酸。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_4^{2-}$ 、 $\text{SnO}_2\text{-SO}_4^{2-}$ 有一定活性,引入 SO_4^{2-} 后,其酸强度有较在提高,但不是超强酸, SiO_2 、

Bi_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 CuO 、 ZnO 、 CdO 、 La_2O_3 、 MnO_2 等没有催化活性,酸强度很弱,在添加 SO_4^{2-} 后,其酸强度及催化活性没有多大变化。

制备金属氧化物的沉淀剂的影响 1986年 T. Yamaguchi 等报道了从 $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水溶液制备 ZrO_2 , 以氨水为沉淀剂要比以尿素为沉淀剂所得样品比表面积大,催化活性高。

添加 SO_4^{2-} 之前金属氧化物结果态的影响 在用硫酸或硫酸铵溶液处理之前,金属氧化物的结晶形态对制备超强酸来说十分重要。1979年 M. Hino 报道 ZrO_2 在 420°C 以下焙烧时为无定型结构,在 420°C 以上发生晶化,并且焙烧温度越高结晶度越大。对于 Fe_2O_3 来说,在 430°C 以上焙烧为无定型的,在 430°C 以上焙烧发生晶化。晶形氧化物经硫酸或硫酸铵处理后得不到超强酸。制备固体超强酸时,必须使用无定型氧化物。

含硫化物的选择 在 1985~1986 年期间, T. Yamaguchi 及 Y. Nagase 分析报道了金属氧化物添加氧化态不同的含硫化合物时其酸强度有很大差异。在 150°C 时,对环丙烷异构化反应, $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SO}_3$ 样品都具有较高活性, Fe_2O_3 样品本身活性很小,而 $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{S}$ 样品完全没有活性。有活性的 $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SO}_3$ 样品用 H_2 在 350°C 以下还原处理后,活性完全消失,而无活性的 $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{S}$ 样品用 O_2 在 450°C~500°C 氧化处理后就显示出很高的活性。由此可见,氧化物表面上的硫为高价氧化态是形成超强酸的必要条件,氧化物表面上的硫为还原态时就不会形成固体超强酸。

硫酸水溶液浓度的影响 一般说来,不同金属氧化物用硫酸溶液处理时,都有一个最佳的硫酸浓度范围,所用硫酸的浓度高于或低于这个范围时,所制得的样品的酸强度就会下降,甚至得不到超强酸。如 Fe_2O_3 用 1mol/L 以上硫酸处理时,所制得样品表面生成了一部分 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 而不能得到固体超酸。 ZrO_2 以硫酸处理的适宜浓度为 0.25~0.5mol/L, TiO_2 用硫酸处理的适宜浓度为 0.5~1.0mol/L, Fe_2O_3 硫酸处理的适宜浓度为 0.25~0.5mol/L。

氧化物的不同来源对焙烧温度的影响 $\text{M}_x\text{O}_y\text{SO}_4^{2-}$ 样品的焙烧温度对其酸强度及催化活性影响很大。氧化物来源不同,所需焙烧温度也不同。1981年荒田一志等报道了由 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 制备的 $\text{ZrO}_2-\text{H}_2\text{SO}_4$ 在 650°C 时焙烧,而由 $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 制备的 $\text{ZrO}_2-\text{H}_2\text{SO}_4$ 在 570°C 时焙烧,所得样品酸强度最高,达到 $\text{Ho} \geq -16.04$ 。它们对于丁烷转化反应表现出最高的活性。对于异丙醇脱水反应 $\text{Fe}(\text{OH})_3-\text{H}_2\text{SO}_4$ 的焙烧温度为 500°C 时活性最高。总之,焙烧温度是影响 $\text{M}_x\text{O}_y-\text{SO}_4^{2-}$ 酸强度及催化活性的重要因素。

人们对 $\text{M}_x\text{O}_y-\text{SO}_4^{2-}$ 型固体超强酸的研究与开发仅有十几年的历史,但是从固体超强酸所显示出的特点来看,它在有机合成中作为催化剂很有应用前途,已被人们所关注。今后在不断开发其应用范围的同时,将会十分重视对催化剂本身的改性工作,如引入 Pt、Pd 等金属组分会延长催化剂的寿命和提高其催化活性,酸处理条件、热处理条件、沉淀剂种类等的正确选择将会大大地提高催化剂的酸强度及催化活性,使其具有实用性,促进催化剂的更新换代,直接为国民经济建设,这将是今后研究的热点。

参考文献

- 1 Hino M et al. J chem Soc Chem Comm, 1979, 1148: 1980, 851
- 2 Tanabe K. et al. J chem Soc Chem Comm, 1981: 602
- 3 Tanabe K. et al. Fuel, 1982, 1: 389
- 4 Hitori H. et al. Fuel, 1984, 8: 117
- 5 战永复,等.无机化学学报, 1989, 1: 106~109
- 6 战永复,等.稀土学报, 1989, 1: 56~57
- 7 战永复,等.催化学报, 1989, 3: 331~333

(长春师范学院战永复副教授撰;徐书绅审)

氟的结合分布及剂量估算 环境中的氟主要来源于

核工业后处理循环流出物。氟具有水的特性,通常以氟水的形式广泛存在于环境中,环境中的氟很容易被动物和植物摄取,并通过生物合成和光合作用过程部分地结合到它们的机体,形成有机结合氟。这些受到氟污染的动物和植物又可通过食物链进入到人体,使人体同时受到两种形式氟的内照射,特别是有机结合氟更加受到人们的关注。

为了正确的评价氟的生物效应和辐射危险度,并为制定放射卫生标准及辐射防护标准提供科学依据,需掌握氟的某些环境行为、生物行为以及分布代谢等规律,不少学者已进行了大量的实验研究,从各个领域提供了许多宝贵数据。

1. 不同化学形式的氟的结合与分布行为:从文献报道来看,许多作者都重视对不同化学形式的氟摄入体内后的动力学变化规律进行比较性的研究。使其发现他们之间的共性、差异及特殊点,以便发现和找出最具有辐射防护意义的氟的化学形式。

目前已经研究过或正在进行研究的氟的主要化合物为氟水、氟化食物和氟标记的某些有机化合物。因氟水是所有氟化合物中最基本的化学形式,因此研究的最广泛且最深入,基本上取得了一致的研究结果。对氟化食物和氟标记有机化合物的研究在一些发达国家早已引起重视,有过不少报道,但仍处于扩大和深入研究阶段,有些国家正在起步或将要进行。

在利用动物实验的研究中,通常所采用的氟中毒方法主要为单次腹腔注入和胃管注入,另外还可通过以连续饮水、饮食的方式将氟均匀混合于水和食物中进行连续照射,也有人采用复合中毒法,即先一次注入氟水使体水氟达到一定浓度后再进行连续中毒。

研究结果表明,氟水进入体内后迅速而均匀地分布于全身各脏器。3d内,约有1%~3%的氟转化为组织结合氟。湿组织和干组织的氟在体内滞留分数曲线都能表达为两项指数函数,几乎所有的组织的生物半排期均为3.5d。单次摄入氟后,氟在体内按指数下降规律随着时间的增加而衰减。连续摄入氟后,起初氟在各组织中的活度随着时间的增加而逐渐增加,经过约14~21d后总氟浓度达到平衡,氟相对活度平衡范围约为40%~60%(H. Takeda et al. 1985)。组织中有有机结合氟的相对活度明显取决于所摄入的氟的化学形式。如连续摄入氟水后, F组织中结合氟的活度在21~28d内在所有的组织中均达到平衡。但当连续摄入氟化食物后,干组织中结合氟活度除肝组织外,其它组织直到连续摄入70d仍未达到平衡。氟水摄入体内后通常结合氟所占份额不到10%,而氟化食物和氟化有机化合物摄入后,结合氟的相对活度明显高于氟水。单次摄入氟化食物后,组织中有有机结合氟的量是单次摄入氟水的20~30倍。连续摄入氟化食物后是氟水的6~11倍。不同类的氟化食物,由于其分子组成不完全相同,因而相互间的差别也较大。如动物单次摄入氟化稻米、氟化小麦和氟化大豆后,有机结合氟在组织中的活度分别是单次摄入氟水后的10~20倍、20~30倍和30~50倍高(S. Okada, 1988)。从该结果可看出,氟化大豆导致的组织中结合氟浓度最高。有人认为,这与食物中所含蛋白质和脂肪的量有关。但没有明显结论,有待进一步深入探讨。

文献中报道的多种氟标记有机化合物的研究结果与氟水相比也充分证实了组织中结合氟含量的高低依赖于氟的不同化学形式。动物连续受6种氟标记有机化合物内照射22d,组织中有有机结合氟的活度明显高于动物连续接受氟水照射后的活度,总氟的活度在氟水和氟化有机化合物组织几乎处于相同水平。6种氟标记的有机化合物之间氟活度分布最高的与最低的相差3倍左右。其中氟化赖氨酸和氟化白氨酸两种化合物所致组织中氟活度最高,分别是氟水的4.1~9.0和4.0~8.6(H. Takeda, 1991)。

氟化赖氨酸和氟化白氨酸被摄入体内后,它们与机体有很高的结合能力。TaKeda解释为这两种化合物在体内可有效的合成蛋白质,其它的氨基酸类化合物是否也可导致与其相同的结合与分布行径,需对其它的化合物作进一步研究。

对总氟的剂量率来说,有人研究并估算了小鼠单次及持续受

氚水照射后各组织的吸收剂量。单次给小鼠氚水 1Bq/g 体重时, 65d 的总剂量脂肪为 $8 \times 10^{-8}\text{Gy}$ 其他组织为 $20 \times 10^{-8}\text{Gy}$ 。持续摄入氚水 1Bq/g 体重的剂量脂肪为 $0.16 \times 10^{-10}\text{Gy/d}$, 其它组织为 $0.32 \times 10^{-10}\text{Gy/d}$, 全身约为 $0.28 \times 10^{10}\text{Gy/d}$ (周舜元等, 1986)。

Takeda 的实验结果表明, 氚化有机化合物和氚化食物组与氚水相比, 前者的总剂量率低于后者, 约相差两倍左右。但从有机结合氚在总剂量率中的分布比率看, 前者却明显高于后者。例如, 氚化白氨酸的比率为 $27\% \sim 54\%$, 而氚水仅为 $4.3\% \sim 10.6\%$ 。

通常认为, 有机结合氚在体内的分布除了与氚的化学形式有关外, 还与组织本身的代谢能力有关。很多报道都表明, 在所有被检测过的脏器中, 肝组织中的结合氚在剂量率中的分布最高, 睾丸、脑和脂肪组织较低。其原因可能是因为肝是全身脏器中代谢能力最为活跃的组织, 而睾丸、脑和脂肪却相反, 但也与各组织的含水量不同有关。

动物受氚化有机化合物照射后, 组织细胞核受到的剂量平均组织剂量高, 大约是组织吸收剂量的 $1.1 \sim 2.4$ 倍。实验研究的结果还表明, 氚水在体内及细胞核中基本上呈均匀分布状态。因此可认为动物摄入氚水后组织的平均剂量和细胞核剂量是相等的。但氚化有机化合物和氚化食物却有很大区别, 某些亲核性氚标记有机化合物所致组织的细胞核剂量约是氚水的 $2 \sim 5$ 倍。

综上所述, 氚进入体内后在组织中的分布结合和剂量率与所摄入的氚的化学形式密切相关。氚化食物和氚标记有机化合物摄取到体内后与机体组织结合而形成有机结合氚的比率明显高于氚水。但在不同的氚化食物和氚化有机化合物之间由于其化学结构不完全相同, 所以在体内的生物代谢特征也有一定差别。

2. 剂量估算方法: (1) 组织剂量。组织的平均吸收剂量按下式估算 (J. Vennart et al, 1962)。

$$D = (51.2/3700)E \cdot I \text{ 式中,}$$

D 为组织的平均吸收剂量 Gy/d , E 为氚的平均能量 MeV , I 为每克组织中的氚活度 kBq/d , I 值的求得是假设每个组织中的总氚或有机结合氚的活度从氚中毒到测量是按指数下降规律随着时间的增加而衰减, 并假设氚在组织中和在细胞核中的活度分布是均匀的。

(2) 组织细胞核剂量。细胞核剂量的估算, 除需求得组织的平均剂量外, 还要计算氚在细胞核中的定位因子。定位因子可描述氚在细胞核中的能量沉积范围。下表是 1987 年 H. Takeda 等的计算结果, 按照其计算方法, 根据实验数据便可计算出定位因子值。

表 1 估算细胞核剂量的定位因子

组织	核的半径	能量分数	体积比	定位因子
	a	b	c	(LF)
肝	3.6	0.77	11.4	8.8
肾	2.7	0.71	6.7	4.8
睾丸	3.1	0.75	5.1	3.8
脾	2.1	0.63	3.6	2.3
肌肉	3.0	0.73	12.2	8.9
小肠	2.1	0.63	5.9	3.7
肺	2.1	0.63	7.9	5.0
心	2.1	0.63	16.9	10.6

- 从固定在石蜡上的组织切片的照片上测得。
- 氚在细胞核中的能量吸收份额。
- 总细胞体积与核体积之比, 从固定在石蜡上的组织切片的照片上测量, 然后进行计算。

在上述所要求的计算条件均满足的前提下, 根据以下计算公式可估算组织的细胞核剂量 (R. J. Berry, 1966; L. E. Feinendegen, 1967; T. J. Jorgensen, 1987)。

$$D_n = D_o \times LF + D_b$$

式中, D_n 为细胞核剂量; D_o 为非挥发性氚 (结合氚) 的平均组织

剂量; D_b 为挥发性氚 (总氚) 的平均组织剂量; LF 为定位因子。

从中国环境的调查结果看, 中国环境水、粮食、蔬菜、水果和蛋禽类样品中氚浓度的本底水平是日本及其他欧美国家同类样品中的 $3 \sim 4$ 倍, 特别是西北一带更高。另外, 中国核能的利用越来越广泛, 从核电站等设施中还会排放出一定量的氚污染周围环境, 根据 1988 年 S. OKada 报道的结果, 核电站周围地区的氚活度比对照地区高几倍。加之核技术在不断发展和应用, 特别是氚标记的化合物在科研、生物学研究和医疗等领域的应用不断增加, 接触氚的人员也会相继增多, 污染范围随之加大。因此, 深入开展对氚的研究十分重要, 尤其是搞清氚在体内的动力学变化规律无论从辐射防护角度还是从核事故情况下剂量估算来看, 都很有意义。

从中国目前对氚的研究看, 无论是从生物效应、辐射致癌还是从氚的代谢、剂量方面普遍对氚水研究较多, 对多种形式的氚研究还不够, 数据比较缺乏。鉴于上述情况, 应深入对更多化学形式的氚进行研究。另外, 国际放射防护委员会 (ICRP) 从辐射防护的目的提出了氚的年摄入量限值 (ALI), 这个建议是根据氚水的滞留和代谢行为而制定, 不能用于其他化学形式的氚。因此, ICRP 在制定其他氚的年摄入量限值时需要大量的实验依据。为制定辐射防护标准和对氚进行正确的卫生学评价而提供科学依据, 以及为中国积累氚研究的基本数据应深入开展对多种形式的氚的研究, 特别是有机结合氚的研究, 因有机结合氚的氚与氚水相比更具有辐射防护意义。有人发现, 氨基酸和脂肪酸类氚化有机化合物在体内可形成更高比率的结合氚。但由于数据少, 在体内的结合方式和作用机制尚不清楚还不能进行充分的讨论和结论。这些使人们感兴趣的问题, 将是或正是研究的热点。

有关氚的转移行为的研究方面, 国外虽有报道, 但国内很少有人研究。氚从环境到食物链由食物链向人体的转移及母体中的氚向仔代的转移系数等研究内容也将是国内研究的重点。

(卫生部工业卫生实验所吕慧敏助理研究员撰)

过渡金属原子簇化学 chemistry of transition metal cluster 20 世纪 60 年代兴起的介于无机、有机和催化化学之间的交叉学科。由于它与生命科学, 有机化学和固体化学密切相关, 现已发展成为化学学科内最活跃的研究领域之一。其主要的研究内容包括: 金属原子簇化合物的合成, 结构 (包括成键理论) 和化学物理性能的研究。

研究金属原子簇化合物的主要意义在于: (1) 有助于丰富化学键的理论。如金属—金属四重键化合物的发现极大地丰富了化学键的理论; (2) 簇合物可兼有配位催化剂和多相催化剂的优点, 有助于在分子水平上研究多相催化的反应机理; (3) 作为某些生物酶的模拟物, 可以在实验室的条件下模拟某些生物反应过程 (如 Mo-Fe-S 簇合物可作为固氮酶 FeMo 辅基的模拟物); (4) 一些高核数的簇合物呈现出一定的超导和光敏特性, 有可能发展成为新型的材料。

原子簇一般定义为分子内含有至少 3 个相互成键的金属原子的化合物。但通常把只含有一个金属—金属键的双金属化合物也作为原子簇的一类加以讨论。

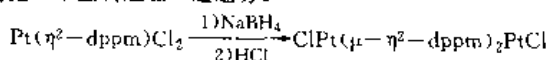
除了裸的金属簇合物外, 过渡金属簇合物一般分为含羰基、环戊二烯基、有机磷等配体的化合物和含卤素及氧属元素配体的化合物。

1907 年合成第 1 个含 M-M 单键的化合物 ($\text{Ta}_2\text{Cl}_{10} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 当时误认为是单核化合物 $\text{TaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。直到 1950 年, 经 X-射线单晶结构分析才证明了其正确的分子式和分子中含有 Ta-Ta 单键。1963 年科顿 (F. A. Cotton) 报道了第 1 个含 $\text{M}=\text{M}$ 双键的簇合物 $[\text{Re}_2\text{Cl}_2]^{3-}$ 。1964 年和 1966 年他又分别合成和证实了第 1 个含 $\text{M} \equiv \text{M}$ 四重键和 $\text{M} \equiv \text{M}$ 三重键的簇合物 $[\text{Re}_2\text{Cl}_4]^{2-}$ 和 $[\text{Re}_2\text{Cl}_5(\text{dth})_2]$ 。这些含多重金属键化合物的发现及对它们成键理论的研究极大地推动了原子簇化学的发展。

尽管含卤素配体的簇合物在原子簇化学的早期研究中起到

了重要作用。但是,研究的最为广泛的一类簇合物是过渡金属羰基簇合物及其衍生物。1967年金氏(R. B. King)首次合成了第1个含M—M多重键的羰基化合物 $[(\eta^5-C_5Me_5)_2Mo_2(CO)_4]$ 。这类含有M≡M三重键的化合物 $Cp'_2M_2(CO)_4$, (M=Cr·Mo, W),与许多配体或与其它金属化合物反应,形成了一大类羰基簇合物。

新的簇合物的合成一直是原子簇化学研究的重点。大多数这类化合物的合成依赖于偶然性。但是,已经发展了一些系统的合成方法,主要的方法有:(1)单核羰基化合物的热解或光解,如 $Ru(CO)_5 \xrightarrow{50^\circ C} Ru_3(CO)_{12}$;(2)亲核试剂进攻金属羰基负离子,如 $[Mn(CO)_5]^- + BrRe(CO)_5 \rightarrow (OC)_5Mn-Re(CO)_5$;(3)双核还原消除反应,如 $HMn(CO)_5 + MeAuI \rightarrow (OC)_5Mn-Au|L| + MeH$;(4)借助成桥配体的作用,如 $Ph_2PCH_2PPh_2$ 配体呈现出较强的把2个金属连在一起趋势。



霍夫曼(R. Hoffmann)提出的等瓣相似关系(Isolobal Analogy)不仅对理解簇合物的复杂结构十分有用,而且在一定的条件下实现金属原子簇化合物的合成设计奠定了理论基础。为此,1981年霍夫曼获得诺贝尔化学奖。

等瓣相似的原理非常简单。大多数有机化合物的骨架可看作是 CH_3 、 CH_2 、 CH 和 C 等碎片的组合。同样,簇合物的多面体骨架亦可看作是配位不饱和的金属配体碎片 ML_n 的组合。若这些有机碎片与金属配体碎片在它们的前线轨道的数目,对称性,近似能量和形状,以及处于前线轨道中的电子数目等方面相似,则这些碎片互为等瓣相似关系。互为相似关系的碎片呈现出相似的化学行为。斯通(F. G. A. Stone)等应用等瓣相似关系成功地设计合成了数百个异核金属簇合物。

含杂原子(O, S, N, P等)配体的过渡金属簇合物既丰富了簇合物化学,更与生物体中酶的作用,诸如电子传递、氧的贮运和活化、氧化还原等生命过程密切相关,这是日趋活跃和发展的领域。合成和鉴定了大量的与固氮酶活性中心有关的 $Mo-Fe-S$ 簇合物,其中的一些立方烷和立方烷结构呈现出一定的将 N_2 和 H_2 转化为 NH_3 的活性,但还远未达到可与固氮酶活性相比较的程度。经X-射线外衍精细结构分析证实固氮酶中 $FeMo$ 辅基含有一个钼原子,6~7个铁原子和8~10个硫原子。业已合成的所有 $Mo-Fe-S$ 簇合物中,最接近上述 $Mo:Fe:S$ 计量比的簇合物是 $[MoFe_7S_9(CO)_{16}]^{2-}$ 负离子。中国卢嘉锡教授对 $Mo-Fe-S$ 簇合物的研究作出了重要贡献。

原子簇化合物的结构和成键规律是研究的另一个热点。在金属簇合物中存在M—M键和金属—配体键,且配体的键合方式,立体取向极为复杂。因此,结构研究极为重要。核磁,红外,质谱等现代谱学方法的应用,尤其是单晶X-射线方法使得在分子水平上精确的了解簇合物的结构。在解释簇合物的形状与价电子数对应关系及簇合物的成键规律方面最具代表性的理论有伍德(K. Wade)的骨架电子对(SEP)理论,明格(D. M. P. Mingos)的多面体骨架电子对(PSEP)理论以及张文卿(Teo)的拓扑电子计数(TEC)理论。

金属原子簇化合物既可直接用作催化剂,也可制成担载原子簇催化剂,同时研究簇合物可以在分子水平上关联均相催化和多相催化。已合成的铂金属簇合物如 $[Pt_{19}(CO)_{12}(\mu-CO)_{10}]^{4-}$ 的体积接近于在石油重整过程中使用的担载在氧化铝上铂金属催化剂的粒子。铁羰基簇合物 $[Fe_5C(CO)_{16}]$ 、 $[Et_4N]$ 能将CO和甲醇转化成乙酸甲酯。尽管该反应形成催化循环,但其反应机理被认为与费托合成过程中一氧化碳的氢化机理相关。

过渡金属原子簇化学仍有几个重要问题需进一步研究:如何实现簇合物的合成设计,是否能够选择比一氧化碳更易解离的配体合成具有催化活性的簇合物;在原子簇作为催化剂的反应中,如何知道催化活性中心是初始加入的簇合物,还是它的分解物或者是单核络合物;高核数簇合物物理性能的研究将受到重视。

参考文献

- 1 Johnson, B. F. G. et al. *Transition Metal Clusters*. New York; Wiley-Interscience, 1980
- 2 Cotton, F. A. et al. *Multiple Bonds Between Metal Atoms*. New York; Wiley, 1982
- 3 Hottmann R. *Building Bridges Between Inorganic and Organic Chemistry*, *Angew. Chem Int Ed Engl*, 1982, 21: 711
- 4 Stone, F. G. A. *The Isolobal Connection*, *Angew. Chem Int Ed Engl*, 1984, 23: 89
- 5 Yamamoto, A. *Organotransition Metal Chemistry*. New York; Wiley-Interscience, 1986
- 6 大塚齐之助等, *金属ワテスターの化学*, 东京, 学会出版センター, 1986
- 7 Mingos, D. M. P. et al. *Introduction To Cluster Chemistry*. New Jersey; Prentice-Hall, 1990
- 8 Crahtree R. H. *The Organometallic Chemistry of The Transition Metal*. Reprinted by World Publishing Corp, 1990

(中科院大连化学物理研究所石有茂博士、陆世雄研究员撰)

镧系位移试剂 lan thanide shift reagent (LSR)

20世纪60年代后期,随着FT-NMR的出现,核磁共振技术得到了突飞猛进的发展。但是对于邻近电负性原子的氢或连接在 sp^2 杂化碳原子上的氢,由于其化学位移常落在0.5~2.5ppm范围内,产生重叠的谱峰,无法分辨。1969年, Hinckley在试验胆固醇是否在溶液中与稀土离子键合,并用顺磁位移来明确这种键合时发现, $Eu(DPM)_3 \cdot 2Py$ (DMP=二特戊酰甲烷, Py=吡啶)会引起胆固醇分子中某些氢的化学位移发生移动,而这种移动使原来重叠在一起的峰拉开了距离。随后在1970年, Sanders和Williams发现,不带吡啶的 $Eu(DPM)_3$ 作为位移试剂比前者更优越。核磁共振研究的是逆磁分子,但是,当体系内有顺磁物质时,由于其含有未成对的电子,其电子自旋磁矩比核自旋磁矩大1000多倍,而它在核外产生的局部磁场可高达1T,所以当这些顺磁性物质和逆磁分子发生络合时,它就会对逆磁分子中的核产生两种作用:一是使核的NMR信号产生很大的顺磁位移,二是缩短核的弛豫时间,并使谱线产生不同程度的增宽。位移试剂只产生顺磁位移而不使谱线严重增宽。镧系稀土离子的4f层未充满电子受5s5p层电子的屏蔽作用,所以其化学性质十分相似,但其磁学性质却强烈地依赖于4f层电子数目的多少。除了 La^{3+} 和 Lu^{3+} 是逆磁性的外,其余13个离子均为顺磁性离子,其中 Pr^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Dy^{3+} 和 Yb^{3+} 离子具有很短的电子自旋弛豫时间,因而它们能使底物产生很大的顺磁位移,同时又不使谱线明显增宽,这样,它们的许多络合物就可作为位移试剂。

70年代, $Ln(DPM)_3$ ($Ln = Eu, Pr, Dy, Ho, Yb$)外, $Eu(PTA)_3$ (PTA=三、1.1.1-三氟-5.5-二甲基-2.4-己二酮)及 $Ln(FOD)_3$ ($Ln = Eu, Pr$; FOD=三、1.1.1.2.2.3.3-七氟-7.7-二甲基-4.6-辛二酮)等 β -二酮类镧系元素络合物应用最为广泛,其研究范围从各种含杂原子的有机化合物到有机金属化合物。从本质上讲,在位移试剂与底物形成的络合物的过程中,底物起Lewis碱的作用而位移试剂起Lewis酸的作用。要使位移作用大,位移试剂的酸性越强越好,象上述含氟配体FOD形成的络合物;底物的碱性则越强越好,一般官能团的作用次序为: $-NH_2 > -OH > C=O > -O > -COOR > -CN$ 。

70年代随着镧系位移试剂的出现,镧系手性位移试剂作为它的一个分支也得到长足发展。在早些时候,用NMR区别对映异构体是用手性溶剂或采用适当的光学活性试剂,但是,这样所产生的异构体之间的差异太小而常常无法区分。1970年

Whitesides 和 Lewis 发现 $\text{Eu}(\text{PVC})_3$ ($\text{PVC} = 3$ -特丁基羟基甲撑- α -樟脑) 可以有效地拉开对映异构体的 S 构型和 R 构型中氢质子的峰。后来又发现, 这种手性位移试剂对于测定对映异构体的组成非常有用。随即, 多种手性位移试剂也被合成出来, 最常用的有 $\text{Ln}(\text{TFC})_3$ ($\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Pr}, \text{Yb}$; $\text{TFC} = 3$ -三氟羧基甲撑- α -樟脑), $\text{Ln}(\text{HFC})_3$ ($\text{Ln} = \text{Eu}, \text{Pr}, \text{Yb}$; $\text{HFC} = 7$ -七氟羧基甲撑- α -樟脑) 和 $\text{Eu}(\text{DCM})_3$ ($\text{DCM} = 2$ -龙脑酰基- α -甲烷)。所有这些位移试剂不但被用在氘谱的测定方面, 而且在 ^{13}C 、 ^{31}P 、 ^7Li 和 ^{23}Na 谱的测定中也得到广泛应用。

通过对镧系位移试剂发生作用的机理的探讨发现, 位移试剂所引起的化学位移主要有 3 种作用的贡献。其一, 络合物形成位移 (δ_{CRS}), 其本质是当底物和镧系离子形成络合物时, 镧系离子的正电荷就会使底物的电子云受到极化, 同时也可能使底物分子的结构发生某些改变。这些均会影响底物分子的电子状态, 因而使底物中核的 NMR 频率发生位移。其二, 接触位移, 当顺磁性离子中未成对电子通过自旋极化机理在底物原子中的 S 轨道中诱导出未成对电子自旋时, 它就可以进而和底物分子中的原子核通过化学键发生超精细相互作用, 引起底物分子中原子核的化学位移 (δ_{PC}), 其大小取决于金属配位体的键合性质。其三, 间接接触位移 (δ_{CS}), 间接接触位移是通过空间传递的, 来源于镧系离子磁化率张量的各向异性。由于过渡金属也有间接接触位移, McCounell—Robertson 得到的适合于过渡金属离子的间接接触位移公式被应用到解决镧系元素间接接触位移的问题上来, 得到比较满意的结果。

位移试剂不仅能简化分辨率不好的图谱, 而且还能确定对映异构体的光学纯度, 70~80 年代的研究发现, 用镧系位移试剂决定底物分子的几何结构或构型, 有其它方法所不能取代的优点。如前所述, 间接接触位移依赖于顺磁性离子与被观测核的相对空间位置, 因此它提供了一个重要的, 潜在的结构信息来源。如果能将 δ_{CS} 和 δ_{PCS} 分离开来, 则利用计算机程序模拟, 可以确定出底物分子的结构。

80 年代以来, 已开发出多种计算机程序来解析溶液中分子的结构特征。而对于 δ_{CS} 和 δ_{PCS} 的分离也已开发出变温法、数学法和双稀土混合法, 预计以后的工作将在这一方面有长足的发展。镧系元素与银离子的双核络合物及镧系元素的双配体络合物的合成及其作为位移试剂的应用的报导已有不少。这方面工作的开展为以后镧系位移试剂的发展开拓了新的领域, 可望将位移试剂的应用范围进一步扩大到更多的有机化合物和有机金属化合物中。

参考文献

- 1 Hinckley C J. *Am Chem Soc*, 1969, 91(18): 5160~5161
- 2 Whitesides G, Lewis D. *J Am Chem Soc*, 1970, 92(23): 6979~6980
- 3 Sanders J, Williams D. *J Am Chem Soc*, 1971, 93(3): 641~645
- 4 Rondeau R, Sievers R. *J Am Chem Soc*, 1971, 93(6): 1522~1524
- 5 Wolkowski Z, Beute C, Jantzen D. *J Am Chem Soc Commun*, 1972, 619~622
- 6 Sullivan G. *Top Stereochem*, 1976, 10: 287~289
- 7 Lindoy L. *Coord Chem Rev*, 1988, 48(1): 83~100
- 8 Gribrau M, Keijers C, De Boer E. *Magn Rev*, 1985, 10: 161~165
- 9 Parker D. *Chem Rev*, 1991, 91(7): 1441~1457
- 10 裴祖文, 裴奎奎. 核磁共振波谱. 北京: 科学出版社, 1989. 528~550

(陕西师范大学张新怀、于富斌、傅克德撰)

钢系元素环境化学 environmental chemistry of actinide elements 研究钢系元素在环境中的化学行为的科学,

钢系元素化学的新的分支学科。

随着世界经济的发展, 对能源的需求不断增加, 核能利用的规模越来越大。为了确保环境的安全, 稳妥可靠地处置核废物成为进一步发展核能利用所必需解决的关键问题。核废物中的铀、钚、镅等钢系元素由于它们的一些同位素放射性半衰期较长, 毒性较大, 在废物的长期处置中将成为环境安全的主要隐患。因此, 研究和了解钢系元素在环境中的化学行为对核废物处置方案的制定及其对环境影响的评估来说, 具有不可忽视的重要作用。

在人们开始利用核能之后, 对环境中的钢系元素的化学就有了研究, 然而早期的工作主要是调查钢系元素在环境中的存在与分布, 为的是了解它们对环境的污染状况以及采取减少污染的措施。70 年代以来, 钢系元素环境化学研究逐渐进入到对钢系元素在环境中的化学状况和化学反应机理的微观研究, 与钢系元素在环境中的迁移扩散的宏观研究相结合, 使钢系元素环境化学逐步成为一门新的边缘学科。

在瑞典阿拉德(B. Allard)等和美国肖平(G. R. Choppin)的文章中比较系统地总结了近 20 年钢系元素环境化学研究方面所取得的成就, 中国核能事业同核能先进国家相比, 起步较晚, 但近年来在钢系元素环境化学的有关内容方面也开展了研究工作, 主要的研究单位有中国原子能科学研究院、北京大学、清华大学、复旦大学、兰州大学等。钢系元素环境化学研究的具体内容主要有以下诸方面: 在环境条件下钢系元素的电化(氧化还原反应等)、溶液化学(络合、水解、聚合、胶体、沉淀等)、在环境物质(岩石、土壤等)上的吸附、解吸, 以及在环境中(包括在地层中)的迁移扩散等。钢系元素在环境中的化学行为不但受制于钢系元素自身的物理化学性质, 而且和环境的物理化学条件密切相关, 因此在钢系元素化学中它是一个完全新的研究领域。

钢系元素环境化学研究的特点是它的研究体系十分复杂。在存在多种有机和无机络合配体(如腐殖酸、氟离子、硫酸根、碳酸根、磷酸根等)的近中性的环境水中钢系元素将同时发生多种反应, 同时由于不同的环境水中酸度和氧化还原电位的不同, 钢系元素(如铀、钚)将处于不同的氧化态。在深地层还有较高的温度影响, 此外还有地下水中的细菌和固态物质(岩石、土壤)的影响。因此, 研究工作往往是先在实验室中经过简化的模拟条件下进行, 进而在接近环境的条件或直接在环境现场进行研究。

钢系元素环境化学研究另一特点是在环境中钢系元素一般处在很低的浓度(10^{-15}mol/L 或更低)。这不但给研究方法带来许多问题, 而且会有许多低浓度的化学问题需要研究。例如, 较高浓度条件下测定钢系元素氧化态的多种方法将无法继续使用, 需要另行研究低浓度的氧化态分析方法; 又如在钢系元素化学中一般认为由于快速的歧化反应五价钚是不稳定的, 但在极低浓度下, 由于双原子歧化反应 $2\text{Pu(V)} = \text{Pu(IV)} + \text{Pu(VI)}$ 的发生机率大大降低, Pu(V) 就显得稳定了。

由于钢系元素环境化学研究的时间还不长, 面临的又是多样的复杂的环境化学体系, 在研究方法上又有许多创新工作要做, 因此, 钢系元素环境化学还是一门年轻的学科。随着核能利用的进一步发展, 人们对环境质量的日益重视, 钢系元素环境化学的研究工作在世界范围内正在不断地加强和发展中。

参考文献

- 1 Allard B, et al. *Inorganica Chimica Acta*, 1984, 94: 205
- 2 Choppin G R. *Radiochimica Acta*, 1988, 43(2): 82

(中国原子能科学研究所林漳基教授撰)

镓化学 gallium chemistry 镓化学是稀散元素化学的一个综合性的分支。由于镓元素在自然界里并不形成本身矿物, 它广布于自然界里, 因此它含属于无机化学、分析化学、有机化学、物理化学、同位素化学等之中。

1869 年门捷列也夫根据元素性质是随着元素原子量的增加而周期性变化的规律, 曾预言在周期表中第 III 族的金属铝下边还应该有一个金属元素存在, 其性质和铝类似, 称为“类铝”。1875

年法国布瓦博德朗(L. de Boisbaudran)在分析检验从阿哲尔山谷中彼尔菲特矿区采来的闪锌矿石时,用光谱分析法发现了“类铝”这个金属元素,并命名为“Gallium”镓。同年,离析出几克金属镓并测定了它的有关物理和化学数据。镓的发现成为化学元素周期表的第1个见证者,完全证实了门捷列也夫预言的正确性和他发现的元素周期律在科学上的重大意义。

镓位于周期表第4周期第III族中,属于典型的最外层18电子的铜型离子,具有明显的亲硫性、亲石性和亲氧性。因此镓主要共存于铝土矿、闪锌矿之中,镓也经常和锗一起存在于煤中以及其他元素钼、铁、铜、钒、硅等共生在一起。镓在地壳中的克拉克值为 1.7×10^{-3} (重量,%)。由于镓的分散性与共生性,所以提取镓是比较困难和繁杂的。工业上提镓,大多采用有色金属冶炼过程中的废物作为原料,如从制铝、制钒、炼铜、炼铁、提锗、提钒过程中的废料以及精制铝后的阳极合金和煤焦化后的煤尘中提取回收,最后用电解法制得纯度为99.99%(4N)的工业镓。而制备供给半导体应用的纯度要在99.999%(5N)以上,就必须对工业镓进行精制提纯。现多采用电解精制、区域提纯、控制单晶、真空蒸馏等方法,使镓的纯度达到高纯(5N)、超纯(6N)、或超高纯(7N)的程度。

随着镓纯度的提高,镓及化合物的特性就越突出,其应用的范围也就更加广泛。

利用镓熔点低(29.8°C)、沸点高(2300°C)常温呈现液态和易形成过冷状态的特性,可以作成高温温度计用来测量反应炉和原子反应堆的温度;利用镓的冷胀热缩的特性,当镓从液体凝结成固体时,体积要膨胀3.2%,可用来产生高压或用在印刷行业中;利用镓对光的反射率特别大的优点和有良好润湿玻璃的性能,可以用来制造耐高温的光学镜子和制造特殊性能的光学仪器;利用镓能同许多金属生成低温易熔合金的特性,可用在防火报警的信号装置上和牙科合金上。这些是镓的早期应用内容。

由于镓的d层电子充满,其价电子分布在亚层4s及4p上,故按电子层有别于典型的金属催化作用,而显现出镓有很大的活性。镓的氧化物、卤化物、氢化物、半导体化合物、金属有机化合物等对聚合、脱水、脱氢、烃化、胺化、氧化、离解、抗氧化、异构化均有较好的催化活性。特别是镓在铂催化剂中的作用机理现在已经研究得比较清楚了。

镓在低温时有良好的超导性质。 U_3Ga 的电学性质引起了人们的注意,它可能成为超导体制成多丝线应用。 V_3Ga 是较好的超导材料之一,它的临界磁场强度为24T,临界温度为15.3K,主要用于制作复合多芯线用于超导贮能、贮电及屏蔽高能辐射等。1991年日本制成高纯粉末或块状的 V_3Ga ,其超导性能大为提高。若把镓添加到钽铜氧化物中,可以产生出一种新的稳定性良好的超导材料。1991年国际市场技术公司最新研制的可提供用作超导薄膜基体的单晶材料 $NdGaO_3$,相变温度高达1350°C,在生产超导薄膜的工作温度范围内不发生相变。 $NdGaO_3$ 的晶体结构为变型钙钛矿型,不产生双晶,可进行双面抛光。

镓是反磁性的,其磁化率为 $-0.31 \times 10^{-6} \text{emu/g}$ 。用自旋一回旋技术在4.2K测量时,镓核在铁中的内磁场为11T。用高纯 Ga_2O_3 制备的钹石榴石($Gd_3Ga_5O_{12}$)单晶和稀土铁石榴石 $[(Y,Sm)_3(Fe,Ga)_5O_{12}]$ 薄膜,用作磁体存储器有较高的储存密度。1992年日本在 $NdFeB$ 粘结磁体中添加1原子%的镓后,能有效地提高磁体的矫顽力。

镓是该族3种金属Ga、In、Tl中导电率最小的。它的导电率按其结晶轴的3个方向显著地改变,3个晶轴的电阻变化比例为1:3.2:7。因此对镓的某些与电解生产有密切关系的电学性质的研究,不但有理论意义,而且有实际意义。为了弄清电解中镓在阴极上的反应过程和行为,经实验研究,得出镓在阴极上放电时极化曲线并推算出电动力学控制范围和扩散动力学控制范围的达非尔方程。

镓和周期表第V族元素砷、锑、磷、氮等在高温时能与许多金属和非金属起作用,形成一系列合金或金属间化合物。它们都

具有良好的半导体性能和发光性能。如GaAs、GaP、GaSb、GaAsP、GaAlP、GaAlAs、GaInAsP、GaAlIn、GaInAsAl等。像GaAs是新发展起来的一种性能优良的半导体材料,广泛应用于电子、激光、光通讯等。像GaAs系的发光二极管(LED),它包括可见光LED、红外线LED和通讯用LED。它们分别用于指示器、耦合器、中间连接器和光通讯方面的器件上。高亮度可见光LED由于高速度、高功率、低成本,在印刷机、办公室自动化设备、程序控制器等方面的应用将有较大的发展。另外,对于民用激光器目前除用GaAlAs系材料外,还开发了InGaAlP/GaAs之类的新材料。GaAs太阳能电池比硅太阳能电池具有更优越的耐高温、抗辐射、效率高等优点,可在外层空间对卫星做供电之用。美国目前已研制出转换效率超过30%的GaAs/GaSb选层太阳能电池。GaAs的集成电路(IC)比硅集成电路更具有高速性,可快出10倍。可见,砷化镓、磷化镓等化合物的应用,为电子设备的超小型化开辟了广阔的前景。

近几年,中国科学院长春应化所对某些三价稀土元素镧钪型镓酸盐的合成与性质的研究工作填补了国内外的空白:(1)用高温固相反应法及熔盐法分别合成了粉末状及单晶体 $LnGaO_3$ ($Ln=La,Pr,Nd$)。对晶体 $LaGaO_3$ 经实验测定首次给出了它们的密度、硬度、磁化率、有效磁矩、居里常数、吸收光谱、激发光谱、荧光光谱和红外光谱等性质参数,发现 $LaGaO_3$ 在500~2500nm波段内无吸收,有希望成为红外透射晶体材料,同时它又能产生峰值为540nm的可见荧光。因此,有成为色心发光晶体的可能性。有人认为 $LaGaO_3$ 单晶也可作为氧化物超导体薄膜的衬底,用于约瑟夫逊器件、超导体晶体管和超导量子干涉器件等。(2)单掺与双掺稀土的 $La_{1-x}Ln_xGaO_3$ ($Ln=Eu^{3+},Tb^{3+},Ho^{3+},Ce^{3+},Sm^{3+}$)和 $La_{1-x}Ln_xIn_yGaO_3$ ($Ln=Yb,Ln'=Er,Ho$)类型的镓酸盐,它们的光谱性质表明:单掺稀土 Eu^{3+},Tb^{3+},Ho^{3+} 的镓酸盐,分别产生红(619nm)、兰(492nm)、绿(547nm)3种荧光,因此有可能在同一基质 $LaGaO_3$ 中,同时掺入上述3种离子后实现3基色发光。而双掺稀土镓酸盐,既具有斯托克斯发光,又具有反斯托克斯发光性质。(3)掺过渡元素的镓酸盐 $LaGa_{1-x}Fe_xO_3$ 、 $LaGaO_3$ 与 $LaFeO_3$ 结构相同,因此经高温固相反应可以形成 $LaGa_{1-x}Fe_xO_3$,由于 Fe^{3+} 进入晶格,使 $LaGaO_3$ 的结构、化学键、磁性、及红外光谱性质等产生规律性的变化。今后镓酸盐的研究将朝着扩大应用的方向发展。

镓的同位素很多,质量数在62~77之间的16个同位素都已经制造出来了。它们的半衰期从零点几秒到几天不等,而其中天然同位素只有 Ga^{69} 及 Ga^{71} 两种,前者占总数60.4%,后者占39.6%。而且镓和其化合物还具有毒性。它可损伤肾,破坏骨髓、放射性镓易被骨骼吸收,镓能沉淀在软组织之中造成神经、肌肉中毒。镓也能被许多肿瘤和恶性淋巴瘤所浓聚,所以 Ga^{67} 和 Ga^{72} 可应用肿瘤的临床诊断和治疗骨髓。医用 Ga^{68} 溶液可充作层析X射线摄影(X-CT)的阳离子放射性同位素,也有人提出 Ga^{67} 盐可作核磁共振断层扫描成像(MRI)的造影剂。还发现 $GaCl_3$ 有抑制癌瘤的作用,可制成饮料口服。镓也可制成黄酮类药物优利镓(Uligalin)使用。

镓在体育器材上的应用是做滑雪板蜡(又称镓蜡),该蜡从1988年开始在日本销售。3年同销售量增加了6~7倍。1990年日本同和矿业公司又开发了含镓的滑雪板,由于是在滑雪板的整个滑行面上混入金属镓的细微粒子进而烧结的,因此比涂蜡更能发挥效果,为力争0.1s之差的滑雪运动员所青睐。这样,镓的消费量能有稳步的增长,而且形成了一定的市场。

1989年,德国、法国和意大利在罗马附近地下1000m建造一个利用中微子与 $GaCl_3$ 进行 β 转移,以测量其放射性而用于潜艇通讯的中微子收集装置,耗镓达30t。苏联为此而耗镓70t。美国也要进行此项实验。1992年6月,意大利科学家首次观察到了太阳聚变产生中微子,从而验证了太阳的动力是由核聚变产生的理论。这是因为当中微子与镓结合时变成了锗,通过对锗的分析,就可以计算出中微子的数量及速度。

总之,随着国民经济不断的发展,特别是尖端科学、国防工业和空间技术的发展,对镨和含镨材料需要的增加,今后对镨化学的深入研究已经被提到重要的位置上来。主要热点是:(1)用经济规律开发和管理镨资源的综合利用和提高再生镨的回收技术;(2)发展超纯镨和超高纯镨的生产,寻找镨及含镨材料新的应用领域和销售市场;(3)开发和研究 24 兆赫兹以上的高频波大规模集成电路和实施 MIMIC 计划。(4)继德、法、意三国试验之后,美苏联合开展中微子探测器试验的研究。

参考文献

1. Афанасьев Ю. В. и др. Средства измерений, параметров магнитного поля, энергии, 1979
2. Yang Jianmei, et al. New frontiers in rare earth science and application, 1985, 860~863
3. 伊藤博幸. 工业材料, 1990, 38(5):87
4. Marketech International, Rare-earth Information Center News, 1991, 26(1):6
5. NIKKEI NEW MATERIALS. Nd 系异方性ボンド磁石を開発, 添加元素と粒径の最適化で最高の磁気特性, 1992, 108, 40
6. 杨健美, 等. 中国稀土学报, 1992, 10(3):259~261
(中国科学院长春应用化学研究所杨健美副研究员撰)

有机化学

有机电化学 organic electrochemistry 有机化学与电学之间的边缘学科。有机物比无机物多得多,现已超过 500 万种,因此研究和发 展有机电化学在某种意义上讲更为重要。有机电化学在,用于有机合成(即有机电解合成)、有机高分子材料的合成、能量变换、显示元件、敏感元件等、物质变换、改质等、改造环境、仿生合成等领域,展示了广阔的前景。

有机电化学的历史可追溯到 1803 年别切罗夫(Petrov)进行醇和油脂类的电解实验。1834 年法拉第(Faraday)电解醋酸水溶液生成了烃。后来柯尔贝(Koibe)进一步将该反应完善成为柯尔贝反应。由于有机化合物比较复杂,又受研究手段和应用等限制,有机电化学发展一直比较缓慢。直到 60 年代中期,美国丙烯腈电解还原二聚合成己二腈和电解氧化制取四乙基铅获得成功,并实现了大规模工业化,促使世界各国竞相研究发展有机电化学,国际学术交流也活跃起来。近些年来,中国开始从事有机电化学的研究,成立了全国有机电化学学组,并出版《有机电化学和工业》杂志,学术讨论会上也有大量的有机电化学方面的论文发表。

20 世纪 70 年代以来,世界有机电化学学者对各类有机化合物进行了电化学研究,并且出版了很多著作,对有机电化学的基本原理和研究方法都作了很好的总结。有机电化学的基本反应是阳极氧化反应和阴极的还原反应,但与无机电化学相比,有机电化学更为复杂。有机电化学反应不仅是基质与电极之间进行电子转移,往往在此前后还发生复杂的反应。电化学反应也不决定于电极电位,还决定于电极材料、溶剂、支持电解质、温度、微量添加物等反应条件。人们曾对在有机电化学中以无机电化学的概念对改变电极电位得到反应的选择性抱有极大的希望,积极地研究过一段时期,但没有得到预期的效果。有机电化学的复杂性限制了对其反应机理充分阐明。

由于有机电化学具有重要的应用价值,又基于现代技术能对复杂的反应生成物进行详细分析及各种反应条件对生成物组成影响的研究,对反应进行控制,因此,近年来对有机电化学的研究再次热情高涨。人们希望不断地发现新的有机电化学反应,并把注意力集中到反应中的活性中间体,因为它不但能说明或理解反应机理,而且对改进和开发反应都十分重要。

有机电化学的发展与以下实际应用密切相关:

1. 有机电解合成。有机电化学在有机合成中的应用产生了

现代有机电解合成工业。

2. 有机高分子材料的电解合成。传统高分子合成法是化学合成法。但自从 1979 年 IBM 的研究组完成聚吡咯和聚苯胺的电解合成工作后,特别是进入 80 年代,对导电性高分子电解合成的研究逐渐盛行。现在,把电解合成的导电性高分子材料作为新的功能性材料的有关研究已引起各方面的重视,并在先进工业国掀起了高潮。我国也做了不少工作,其中导电性高分子 LB 膜的电解合成倍受关注。LB 膜是一种分子膜,由于 LB 累积膜的电解聚合及其力学强度大幅度提高,可以从基板上剥下,其直流电导率在膜面平行方向为 $10^{-15} \cdot \text{cm}^{-1}$,垂直方向为 $10^{-11} \cdot \text{cm}^{-1}$,相差极大,显示出各向异性。这表明可以从结构上控制物质的性质,从分子一级来设计材料的性能,这在新材料、生物工程和电子技术等方面将会具有重要的意义。

3. 能量变换。在现代工业和生活中,电能占有重要的位置往往要设法把其它能量变换成电能。目前,电池需求量不断增加,尤其是航天、电子等工业的发展对电池还提出了轻量化、微型化、高能化的要求。有机电化学的发展使电池工业突破了传统的范围,出现了有机电解质高能电池、有机电池、有机物燃料电池、塑料电池。由电解合成的导电性聚合物作为电池活性材料的电池现已成为各国研究的热点。另外,把有机物作为燃料电池的燃料,及有机物在燃料电池中进行有机电化学反应,既产生电能又合成有用的有机物,这一研究引起了化学—化工界的极大兴趣,另一方面此课题将会成为研究的热点。

4. 显示元件、敏感元件。近年来对电解聚合的导电聚合物具有可以做成显示元件和敏感元件的特殊功能的发现,引起了人们的极大兴趣并展开了活跃的研究。显示元件称电显示元件(ECD)。它们在通电的情况下发生颜色的变化,选择适当结构的导电性聚合物就可以显示各种颜色。它们的反应速度快($10 \sim 20\text{ms}$),寿命很长(可重复 10^6 次)敏感元件,如电解聚合的聚吡咯膜气体敏感元件,对二氧化氮、氨、硫化氢等毒性气体有明显的反应,并可在常温下工作。

5. 物质变换。生物物质、天然物质可以通过有机电化学方法使它们变换成很多有用的产品。例如把淀粉变换成二醛淀粉,把葡萄糖变换成葡萄糖酸钙等。

6. 改造环境。利用有机电化学原理对污染环境的化合物进行电化学反应,使其成为有用的化合物也已引起重视。例如二氧化碳浓度的增加可造成温室效应,如把二氧化碳作为原料通过有机电化学反应可以合成甲烷、乙烯、乙醇、草酸等有用物质,如由太阳能电池供电进行二氧化碳的电解固定合成有用的有机物则被称为人工光合成。另外,氟氯类有机物现在被广泛的应用在致冷剂、清洗剂和发泡剂的生产中,但它们是恶化地球环境的物质。如果把它们回收后用有机电化学的方法处理,可以得到无害且有用的物质。

7. 仿生合成。有机电化学仿生合成的研究也正在兴起,并力图在实践上得到应用。用来探索新的医药品已取得了进展,在缓和的条件下用电极反应合成生物肝脏代谢物。有了良好的收效。

到目前为止,有机电化学还远不是一门成熟的学科,还待继续研究开发。就是目前所涉及的这些领域也都有大量的课题需要研究和开拓。

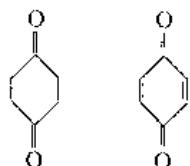
参考文献

1. 陈敏元. 化学通报, 1982, 12: 638, C. A. 99: 29787u(1983)
2. 野中勉. 近代有机电化学的动向和未来(1). 陈敏元译. 云南工学院, 1985
3. 鸟居滋. 近代有机电化学的动向和未来(3). 陈敏元译. 云南工学院, 1985
4. 陈敏元, 等编著. 有机电化学及其应用. 邯郸市化工自动化应用技术研究所, 1989
5. Baizer M M. Organic Electrochemistry. New York: Mareel Dekker, 1990
6. 庄野遵哉. 化学と工業, 1990, 12: 1969

- 7 堀義夫, 化学と工業, 1990, 12: 2016
- 8 田川管彦, 化学と工業, 1991, 9: 1546
- 9 長哲郎, 電気化学, 1993, 1: 10
- 10 陈敏元, 化学通报, 1993, 1: 34, C. A. 118: 243239u(1993)
(云南工业大学陈敏元副教授撰)

食品颜色与分子结构的关系 relation between color of food and its molecular structure

物质的显色理论目前已较为成熟。1868年 C. Graebe 和 C. Liebermann 首先提出, 有机物的颜色是由分子中的不饱和键引起的。1876年 O. N. Witt 提出了生色团理论, 认为物质的颜色是由于分子中含有某些不饱和基团引起的, 这些基团称为生色团, 如: $-\text{CH}=\text{CH}-$ 、 $-\text{C}\equiv\text{C}-$ 、 $>\text{C}=\text{O}$ 、 $-\text{CHO}$ 、 $-\text{N}=\text{N}-$ 、 $-\text{NO}_2$ 、 $>\text{C}=\text{S}$ 等。但实际上分子中含有生色团的化合物并不一定有颜色, 如: 化合物[1]和[2]都含有生色团, 但[1]无色。于是1888年 R. Nietzki 提出了物质的颜色是由发色的醌型结构决定的, 但又无法解释无醌型结构的有色化合物。



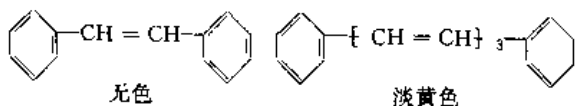
[1]无色 [2]黄色

1900年 M. Planck 提出了量子假设, 1905年 A. Einstein 提出了关于光本性的光子假设。由于量子力学的发展, 人们对物质结构的认识有了新的突破。光是一种电磁辐射, 具有波和粒子的二象性, 不同波长的光具有不同的能量。人们常见的白光, 如日光是由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等光按一定比例混合而成的, 波长范围为: 400~780nm。不同的物质对光有选择性吸收。如果物质吸收的是某种颜色的可见光, 该物质显被吸收光的互补色, 吸收紫光显绿色, 吸收蓝光显黄色。物质对可见光全部吸收显黑色, 全部反射不吸收显白色。物质吸收光的波长在可见光区之外, 则无色。

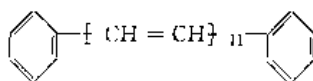
物质对光为什么有选择性吸收呢? 当光照射某物质时, 该物质的分子、原子或电子等与光子发生“碰撞”, 光子的能量转移, 使这些粒子由基态跃迁到激发态。分子、原子或电子具有不连续的量子化能级, 只有当光子的能量与被照射物质粒子的激发态和基态能量之差相当时才能发生吸收。不同物质分子结构不同, 具有不同的量子化能级, 因此对光的吸收不同。

分子中只含有一个生色团的化合物吸收光的波长在 200~400nm 之间, 属于非可见光区, 故化合物无色。研究发现: 有色物质的分子中必须含有生色团和与生色团相连的共轭结构。如: 分子中含有多个生色团, 其间形成共轭体系; 或生色团与分子中的共轭体系结构要相连。由于体系内 π 电子的离域使用, 使激发这些电子需要的能量降低, 吸收光的波长移向可见光区, 化合物显色。例如: $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ 无色, $\text{H}\{\text{CH}=\text{CH}\}_5\text{H}$ 浅黄色。

无色, 黄绿色, 橙色。有色物质的颜色还与分子结构有以下关系: (1) 分子中引入助色团有利于颜色的生成或加深。含有生色团的分子称为生色体, 在生色体分子中引入某些本身不显色的助色团, 如: $-\text{OH}$ 、 $-\text{OR}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{NHR}$ 、 $-\text{SR}$ 、 $-\text{X}$ 等, 由于助色团上的未共用电子对能与生色团或共轭键形成 $p-\pi$ 共轭体系, 使吸收光向波长增大的可见光区移动, 有助于颜色的生成或加深。(2) 共轭体系的碳链长颜色深, 形成共轭体系的碳链越长, π 电子的离域作用越强, π 电子跃迁需要的能量越低, 化合物的颜色也越深, 这种现象也称为深色效应。例如:

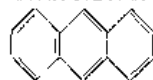


无色 淡黄色

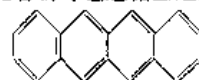


黑紫色

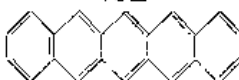
同样, 偶氮类化合物和芳香族稠环化合物等也遵循上述规律。



无色

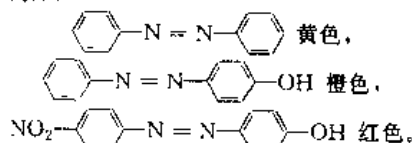


橙色

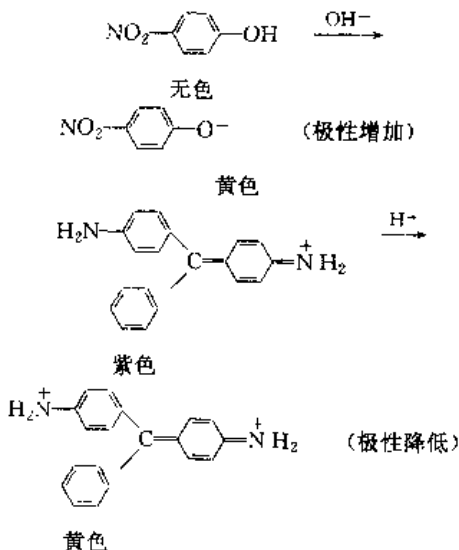


红色

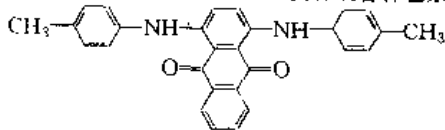
(3) 共轭体系极性增加使颜色加深。在分子中共轭体系一端引入极性基团(吸电子基或供电子基)时, 可使分子的极性增加, π 电子离域作用增强, 跃迁需要的激发能降低, 导致颜色加深。如共轭体系一端为供电子基, 另一端为吸电子基, 则分子极性增加更大, 颜色更深。例如:



极性基团的引入还能使化合物对光吸收强度增加, 这种现象称为浓色效应。例如: 对于同一波长的光, 苯酚的吸收强度为苯的 7 倍, 对硝基苯酚的吸收强度为苯的 39 倍。应当指出: 并非在共轭体系的任何位置上引入极性基团都能产生深色效应和浓色效应。(4) 分子的离子化与颜色的关系。生色体分子离子化后, 如果供电子基的供电能力或吸电子基的吸电能力增加, 使分子的极性增加, 导致颜色加深。反之, 分子极性降低, 颜色变浅, 发生浅色效应。例如:

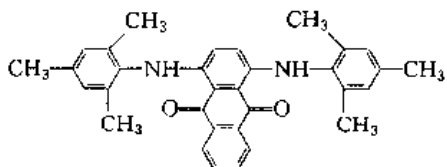


(5) 分子平面性与颜色的关系。共轭效应产生的条件之一是分子中的原子共平面。如果生色体分子平面受到破坏, 电子的离域作用就会降低, 化合物的颜色变浅。例如: 化合物[3]具有平面结构, 当其氨基的邻位引入两个甲基后形成的化合物[4], 由于甲基的空间阻碍作用, 使分子的平面性被破坏, 颜色变浅。这种现象常见于偶氮和蒽醌类化合物, 可利用这一性质合成各种色素。



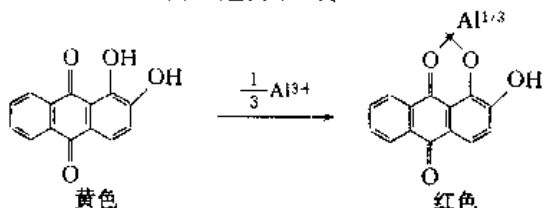
[3] 绿色

撰:焦克芳研究员审)

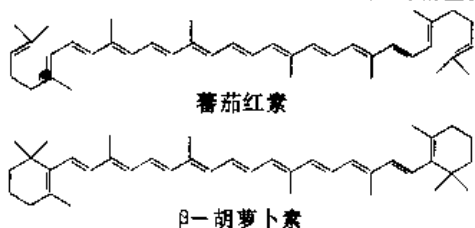


[4] 淡绿色

(6)分子内络合物的生成与颜色的关系。生色体分子可以与某些金属离子形成分子内络合物,当其共轭体系中的原子或原子团与金属离子形成配位键后,借助金属离子的桥联作用使共轭体系扩大, π 电子离域作用加强,颜色变深。例如:



食品呈现的各种颜色主要来源于天然色素和人工合成色素。天然色素主要来源于天然植物、动物和微生物。叶绿素是广泛存在于植物体内的绿色色素,属于四吡咯衍生物,是由叶绿酸、叶绿醇和甲醇3部分组成的酯。血红素存在于动物肌肉和血液的红血球中,也属于四吡咯衍生物。类胡萝卜素也称类叶红素,是在动植物食品中广泛存在的呈黄、橙、红色的脂溶性色素,如:蛋黄色素、虾黄素、蕃茄红素、辣椒红等。这类色素属于异戊二烯衍生物。



花青素色素是构成植物花、果实和叶等美丽色彩的水溶性色素,如苹果中的桔红色氯化天竺葵色素,葡萄中的紫红色氯化矢车菊色素等。这类色素的基本母核是苯环和 γ -吡喃环稠合而成,属于多酚类衍生物。红曲色素是红曲霉分泌的产物,姜黄素存在于姜黄根茎中,都属于酮类衍生物。虫胶色素是紫胶虫分泌的,胭脂虫红色素是从胭脂虫中提取的,它们都属于醌类衍生物。天然色素种类繁多,其分子都是由多个生色基和助色基组成的。

根据颜色产生的机理,人们成功地合成了许多色素。由于合成色素色彩鲜艳,性质稳定,着色力强,价格低,在20世纪50年代约有90多种合成色素用于食品着色。但是,随着科学检测技术的发展,研究者们不断发现许多合成色素有致癌、致畸等作用,于是一系列合成色素逐渐被禁止食用。至今美国允许使用的有7种,俄罗斯有3种,西欧的英、法等许多发达国家已完全禁止食用合成色素。中国目前允许使用的有7种,包括:苋菜红、赤鲜红、胭脂红、柠檬黄、夕阳黄、亮蓝和靛蓝。

现在世界各国正在逐步推行用天然色素取代合成色素,因为天然色素大多是从天然食物中提取的,安全性能较好。研究天然色素的分子结构及变色机理,控制食品加工与贮存中的色泽变化,提取各种天然色素,对天然色素进行毒理评价和制定食用规格,人工合成各种天然色素,开发食用色素新品种等,都是目前食品色素研究的重要内容。

参考文献

- 1 镰田荣基,等. 食品の色. 光琳书院, 1965
- 2 藤卷正生,等. 食の科学. 朝仓书店, 1976
- 3 Gordon P F, et al. Organic Chemistry in Colour, 1983
- 4 张莲彩,等. 天津轻工, 1990, 4: 13~19

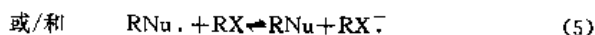
(北京轻工业学院赵玉玲副教授, 王锡臣教授

单电子转移反应 electron transfer reaction 20世纪40年代是有机化学中单电子转移反应研究的活跃时期。Lewis首次报道了光化学单电子转移氧化反应, Weiss制备了第1个芳香烃自由基正离子盐。1945年 Kenner用单电子转移机理解释了芳香烃的硝化反应。1956年 Marcus提出了处理单电子转移过程的Marcus方程,并且在无机化学中受到高度重视和广泛应用。由于50年代双电子中心的有机反应理论(即离子型反应机理)在有机化学中占主导地位,因而单电子转移反应在有机化学中曾一度被忽略。

在无机化学中,把单电子转移反应分为外层原封不动和内层电子转移两种机理,外层机理的过渡态中,两金属离子内配位层原封不动,即没有金属配体之间化学键的断裂和生成。而在内层机理过渡态中有一桥配体把两金属离子联结起来,并为电子转移提供系列连续交叠的轨道,这种桥配体可以是原子或基团(如Cl, OH, OH₂, N₃等)。有人建议在有机化学中分别用非键(non-bonding)和成键(bonding)的术语表示外层和内层电子转移机理。

60年代, Kornblum和Russell分别研究了脂肪族的单电子转移引发的亲核取代反应机理。1970年, Bunnett在系统地研究了芳香族的亲核取代反应后,结合Kornblum和Russell的研究成果,把这类反应概括为S_{RN}1(Substitution, Radical, Nucleophilic, Unimolecular)机理。S_{RN}1机理的提出,丰富了有机化学的内容,发展了有机合成的方法。

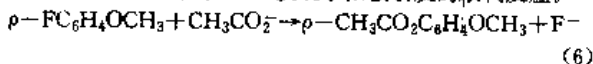
S_{RN}1反应包括链引发,链增长和链终止3个步骤。底物RX通过电子转移生成相应的自由基负离子RX^{-•}(1), RX^{-•}中X⁻作为离去基团脱掉,生成R[•]自由基(2)。R[•]与亲核试剂Nu⁻偶合, RNu^{-•}失去电子或把电子转移给底物(5)。从而构成循环。



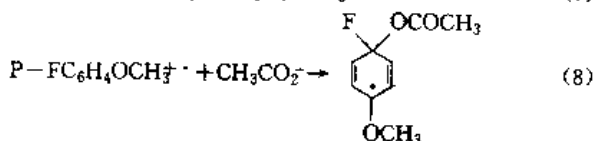
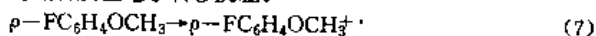
反应(1)是链引发步骤,(2)-(5)为链增长步骤。链终止反应通常通过自由基的重结合或反应系统中的自由基清除剂,如自旋捕获剂, O₂氢原子给体等。

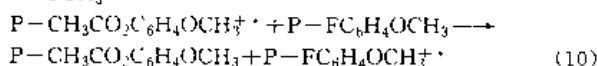
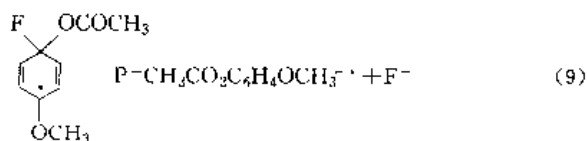
S_{RN}1反应具有反应条件温和,收率高,选择性高等优点。一些用经典方法难以实现的反应,用S_{RN}1反应可以实现。2-硝基异丙基负离子对对一硝苯基氯代异丙烷的取代反应,由于空间位阻太大,按经典方法不能反应,但在S_{RN}1反应条件下,该反应能顺利实现,而且收率高。这是因为自由基和自由基负离子中间体具有很高的反应活性,因而克服了空间位阻的不利因素。这类反应在合成化学上具有重要意义。

1980年 Ebersson和Josson发现了阳极引发的取代反应。

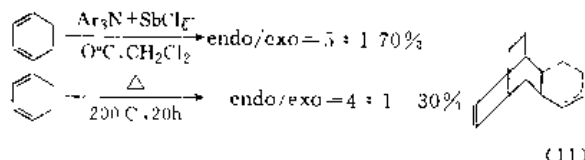


与S_{RN}1机理不同,这个反应涉及自由基正离子中间体。底物被阳极氧化为相应的自由基正离子,乙酰氧基负离子亲核进攻, F⁻离去,形成对乙酰氧基苯甲醚自由基正离子。产物自由基正离子再与底物发生电子转移反应。

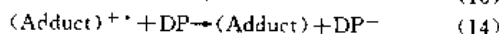
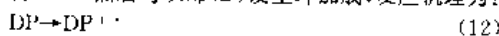




Bauld 研究了由电子转移引发的涉及自由基正离子中间体的协同反应机理。环己二烯的环加成反应,需要在 200°C 高温下反应 2h,才能得到收率为 30% 的产物。而在二(对-溴苯基)胺自由基正离子(Ar₂N^{•+})存在下,通过电子转移引发该反应,只需 0°C,5 分钟便可达到 70% 收率,且选择性高。

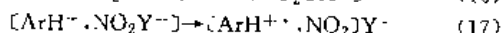
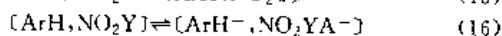
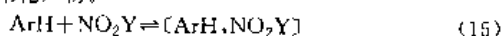


在 [4+1] 的环加成反应中,亲双烯试剂(Dienophile, DP)首先失去电子形成 DP^{•+},然后与双烯(D)发生环加成,反应机理为:



电子转移不仅引发环加成,而且还引发开环反应。

Kochi 系统地提出了电荷转移(Charge transfer, CT)的理论。根据这一理论,芳香烃硝化反应,首先硝化试剂(NO₂Y)作为电子受体,与芳香烃(ArH, 电子给体)形成电子给体-受体络合物(EDA Complex)。EDA 络合物经电荷转移生成自由基离子对(I),I 再生成硝化产物。



(I)



用时间分辨的吸收光谱可以测定 EDA 络合物和电荷转移生成的自由基离子。

Pross 提出单电子迁移(Single Electron Shift)理论,认为单电子迁移是有机反应中的一个基本过程。根据这个概念,许多有机反应,均可用这一理论解释。如 S_N2 反应,亲核试剂 Nu⁻与底物 RX 作用,实际上是 Nu⁻迁移一个电子到离去基团 X 上,即由 II 转化为 III。



近年来生命过程中的单电子转移反应的研究日益活跃,已经认识到在光合作用,呼吸等过程中存在单电子转移反应。

80 年代单电子转移反应的研究是物理有机化学的一个前沿领域,并取得了许多重要进展。目前,在单电子转移与双电子转移反应的边界反应中,何种情况下发生单电子转移,何种情况下发生双电子转移的问题,电子转移的距离问题,远程电子转移机理,分子的构象与电子转移性质的关系等方面的问题还有待于深入研究。

参考文献

- 1 Kornblum N. *Angew. Chem Int Ed Engl*, 1975, 14: 734~745
- 2 Bunnett J F. *Acc Chem Res*, 1978, 11: 413~420
- 3 Pross A. *Acc Chem Res*, 1985, 18: 212~219
- 4 Ebersson L. *Electron transfer reactions in organic chemistry*. Berlin: Springer-Verlag, 1987
- 5 Russell A G. *Advances in Physical Organic Chemistry*, ed by Bethell, D. New York: Academic Press, 1987, 23: 271~322
- 6 Kochi J K. *Angew. Chem Int Ed Engl*, 1988, 27: 1227~1266
- 7 Russell A G. *Acc Chem Res*, 1989, 22: 1~8

8 Kochi J K. *Acc Chem Res*, 1992, 25: 39~47

(兰州大学刘有成院士、郭庆祥副研究员撰)

自由基化学 free radical chemistry

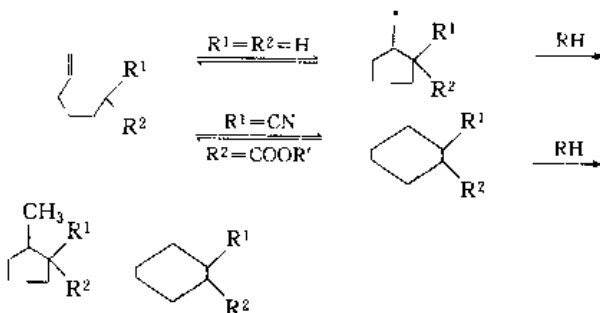
自由基是带有不成对电子的分子或原子。“基”(radical)的概念是 Lavoisier 于 1789 年提出的,用来描述诸如甲基这类基团。而“free”radical 在 19 世纪是指氰(CN)这类化合物。用气体密度法测定分子量的结果表明 CN 是二聚体(CN)₂。据此,1896 年 Ostwald 指出,经历了长期研究,人们终于认识到有机自由基固有的特殊性质,并预言有机自由基是不可能分离的。但后来的实验证明许多稳定自由基是可以分离的。1900 年 Gomberg 在研究三苯基溴甲烷与 Ag₂ 的反应时,意外地得到稳定的三苯甲基自由基(ph₃C[•]),从而确立了自由基的概念。

自由基是一类重要的有机反应中间体,自由基反应是有机化学反应一大类型(离子型、自由基型、协同型)之一。自由基化学作为一门独立的学科始于 20 世纪 30 年代。1937 年 Hey 和 Waters 提出过氧化苯甲酰对芳烃的芳基化反应是一个自由基过程,并运用自由基机理成功地解释了许多当时的有机化学理论无法解释的现象。同年 Kharasch 发现在过氧化物存在或光照下,溴化氢与不对称烯烃的反马尔科夫尼科夫加成,并提出自由基链反应机理(过氧化物效应)。40 年代和 50 年代是研究各类自由基反应积累大量数据以奠定自由基反应理论基础的黄金年代。第二次世界大战期间,由于欧美各国急需发展合成橡胶工业。而合成橡胶首先必须解决的基本问题是自由基聚合反应中的链转移和共聚合动力学,由此推动了许多自由基化学的重要课题的研究,如自由基的结构与反应活性的关系等。第二次世界大战结束后,已经积累起来的有关自由基反应的知识从高分子聚合转移到小分子反应上。这些研究中最有意义的如烃类的自由基氯化反应,自由基自动氧化反应,氧化还原引发的自由基反应,自由基重排反应等。1950 年,高灵敏度的电子自旋共振(ESR)问世,为化学家们提供了检测低浓度的自由基,深入研究自由基的结构的手段,极大地推动了自由基化学的发展。1960 年前后,有机光化学领域的研究发现光激发三线态具有双自由基的性质,从而丰富了自由基化学的内容。1967 年化学诱导动态核极化(CIDNP)现象的发现,开创了用核磁共振(NMR)技术检测自由基和研究自由基反应机理及动态学的新方法。

近 20 多年来,自由基化学的研究在理论和实践上都不断向纵深发展。在结构与反应活性关系的研究,自由基反应机理研究的基础上,自由基反应在有机合成中的应用以及生物体系自由基方面的研究成果令人瞩目。

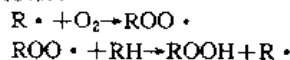
1969 年 Barton 报道了光化学诱导的甾族化合物中 NO 的重排反应。反应经历了氧中心自由基的形成和 1,6-氢迁移。Barton 反应在有机合成中具有重要意义。

通过分子内自由基加成关环可合成五员环或六员环化合物。对于 5-位有双键的自由基,1,5-关环形成环戊甲基自由基更稳定。如果溶剂是很好的氢给体,自由基中心没有使自由基稳定性增加的取代基(R¹=R²=H),则自由基加成是不可逆的。相反,如果自由基中心碳上有使自由基稳定化的取代基(如 R¹=CN, R²=COOR'),环化反应则是可逆的。于是,特别在溶剂给氢能力差的情况下,平衡将有利于六员环自由基的形成。

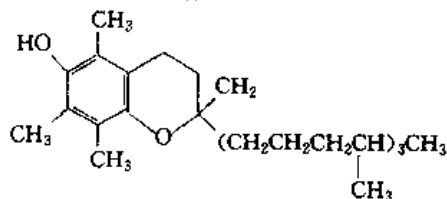


1980年代Beckwith系统地研究了高度立体选择的自由基环化反应。Ingold在研究大量自由基反应动力学和机理基础上提出自由基钟(free radical clock)的概念。稳定氮氧自由基的研究以及氮氧自由基在自旋捕获(spin trapping)和自旋标记(spin labeling)中的应用,这些都极大地丰富和发展了自由基化学的基本理论。

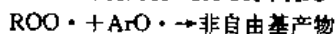
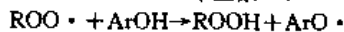
大量研究表明,自由基与许多生命现象和疾病密切相关。一方面自由基参与了诸如光合作用,呼吸等生命过程,另一方面,自由基,尤其是氧自由基可造成组织的损伤。生物体内某些分子受光,热或单电子转移反应产生自由基(R·)。R·与分子氧结合产生过氧自由基ROO·。过氧自由基是自动氧化反应的链载体。它可进攻RH产生R·和ROOH。这种自动氧化过程可对组织造成损伤。



生物抗氧化剂则是保护包括生命器官的有机物免遭氧化破坏的特殊化合物。Ingold研究了维生素E的生物抗氧化作用。维生素E(ArOH)与ROO·反应,使其变成ROOH,而维生素E自由基ArO·又可以与第2分子ROO·结合,生成非自由基产物,从而使自动氧化过程中断。



维生素E(ArOH)



1992年,刘有成等报道了维生素E和维生素C及其脂溶性衍生物在模拟生物膜体系(胶束)中的反应活性。发现抗氧化作用与脂溶性,胶束所带的电荷及所处的微观环境有密切的关系,改变这些条件,可使活性改变 10^4 倍。

自由基化学与材料科学,生命科学,环境科学及化学基础科学的各领域都有密切的关系。自由基化学的发展随生产力水平的发展而发展,受各种物理方法的发展的促进。目前在自由基化学研究中,还有一些有待解决的问题,如:自由基在氧化还原中的作用,在生命过程中的意义,在自由基反应与离子型反应的边界反应中决定速率步骤的过渡态的构象等。

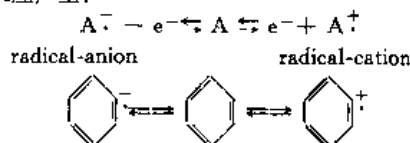
参考文献

- 1 Kochi J K, et al. Free Radicals. New York, Wiley, 1973
- 2 Davies D I, Parrott M J. Free Radicals in Organic Synthesis. Berlin, Springer-Verlag, 1978
- 3 Beckwith A L J, Roberts D H. J Am Chem Soc, 1986, 108, 5893~5901
- 4 Burton G W, Ingold K U. Acc Chem Res, 1986, 19, 194~201
- 5 Hanson P. Organic Reaction Mechanisms. New York, Wiley, 1988, 87~166
- 6 Liu Z-L, Wang P-F. Science in China (Series B), 1992, 4, 345~351
- 7 俞庆森, 蔡国强. 取代基对氮和氧自由基稳定性影响的研究. 物理化学学报, 1995, 11(6), 516~520
- 8 应立明, 夏煜, 等. CH_3N_3 的光解——生成三线态 CH_3N 自由基的光谱证据. 物理化学学报, 1995, 11(11), 961~964
- 9 程津信, 赵永显, 等. 碳自由基和氮自由基热力学稳定性的研究. 中国科学 B 辑, 1995, 25(8), 804~809

(兰州大学刘有成院士、郭庆祥副研究员撰)

自由基离子 radical ions 是带有电荷和不成对电子的分

子。带正电荷的是自由基正离子(radical cation),带负电荷的是自由基负离子(radical anion)。自由基离子可通过中性分子的单电子转移反应产生:



由于自由基离子具有自由基和离子的双重特性,因而具有很高的反应活性。自由基离子作为一类重要的有机反应中间体,受到化学家的高度重视。

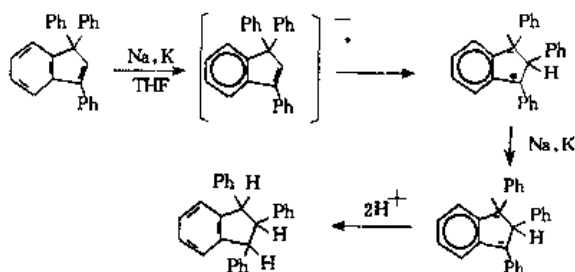
1953年,Weissman研究了四氢吡喃中金属钠与萘的反应,发现萘被还原为自由基负离子,并考察了其顺磁性,从而开创了一个新的研究领域。接着有许多关于芳烃、杂环化合物的自由基负离子的研究论文发表;随后Weissman又报道了用浓硫酸氧化产生自由基正离子的方法。

1960年,Carrington和Karplus解释了自旋密度的实验值,Szwarc和Hirota提出自由基离子对的理论。Waters和Norman研究了短寿命自由基和自由基离子,Evans等报道了自由基负离子的歧化和二聚反应。

对于芳香烃而言,接受一个电子生成自由基负离子释放的能量(电子亲和力)为2~23kcal/mol,而给出一个电子生成自由基正离子所需能量(电离势)为160~230kcal/mol。因此,制备芳烃自由基负离子比制备芳烃自由基正离子要容易得多。分子轨道理论研究指出,一些芳香烃化合物,如蒽和萘,具有高电子亲和力和低电离势。故既容易形成自由基正离子,又可形成稳定的自由基负离子。产生自由基离子的方法通常有化学氧化还原,电化学,光化学,辐射化学等方法。

自由基负离子(RA^-)的主要反应可归纳为:氧化反应,歧化反应和自由基链式亲核取代反应($S_{RN}1$ 反应)。

Miller和Boyer报道了自由基负离子的重排反应:



底物首先被碱金属还原为相应的自由基负离子,接着发生1,2-苯基迁移,随后被进一步还原。

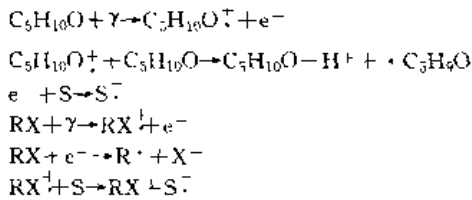
Bunnett系统地研究了卤化物自由基负离子的脱卤素反应。以碘代芳烃(ArI)为例,ArI与自由基负离子发生电子转移反应,生成的 ArI_2^- 脱去碘负离子,Ar·自由基夺氢生成芳烃。

70年代,有关自由基负离子的研究论文大约是自由基正离子的10倍。1980年以来自由基正离子的研究发展十分迅速,到80年代后期,有关自由基正离子研究论文的数量已超过自由基负离子。

溶液中产生自由基正离子的化学方法很多,以 H_2SO_4 , CF_3CO_2H , $C_3F_7CO_2H$, CCl_3CO_2H , CF_3SO_3H , FSO_3H , FSO_3H/SO_2ClF , $Hg(OCOCF_3)_2$, $Tl(OCOCF_3)_3$, $Pb(IV)$, $AlCl_3$, BF_3 , $SbCl_3$, $SbCl_5$, $Co(OCOCF_3)_3$, Ag^+ , SO_4^{2-} , 以及三芳基胺自由基正离子等作为单电子氧化剂的方法被广泛应用。Davies发展了溶液中自由基正离子的产生和ESR研究的方法。由于大多数自由基正离子具有很高的反应活性,在溶液中很不稳定。因此Shida建立了低温基架(matrix)技术。

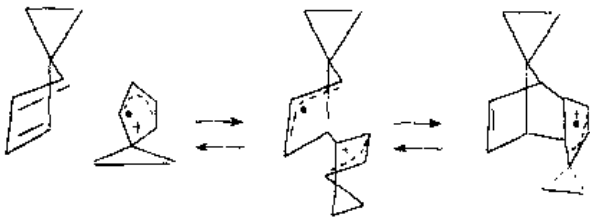
用这种方法可产生自由基负离子,也可产生自由基正离子。以电离势较低的2-甲基四氢吡喃($C_5H_{10}O$)为溶剂,把底物(S)

溶解在其中,在 77K 经 γ 照射,把电子从溶剂分子转移到底物分子,生成 $S\cdot$ 。如果以电离势很高的 Freon 分子(RX)作溶剂,则产生底物自由基正离子(S^+)

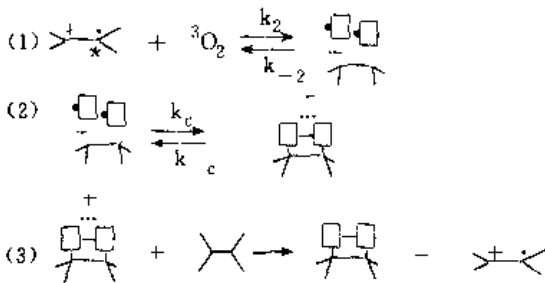


用 ESR 和其他研究手段可以方便地检测在低温基架中产生的自由基离子。

80 年代, Roth 用化学诱导动态核极化(CIDNP)方法系统地研究了溶液中光诱导电子转移产生自由基正离子的结构,以及自由基正离子的重排反应,发现自由基正离子引发的 Diels-Alder 反应是逐步进行的。自旋和电荷定域在二聚体的亲双烯试剂一边。



Nelsen 研究了自由基正离子与分子氧的反应,提出烯经过氧环化的 CRCC(Cation Radical Catalyzed Chain)机理:



1991 年 Bauld 发现烯烃自由基正离子与 BSA (Benzeneseleninic Anhydride) 反应,可生成环氧乙烷类化合物。对于二烯和多烯,反应是立体专一性的,反应经历类似 CRCC 的链式机理。这一研究成果为生物体系的环氧化反应提供了一种解释。

1990 年以来 C_{60} 的化学研究开始活跃起来。 C_{60} 是碳的第 3 种同素异形体,是由 60 个碳原子构成的足球状分子。碱金属掺杂的 C_{60} 具有超导性质。 C_{60} 自由基离子的 ESR 和电子吸收光谱的研究已有报道。这些研究结果对于了解 C_{60} 的电子结构,超导性质具有理论和实际意义。

当前,自由基离子的产生,结构,反应活性等依然是研究的热点。生物体系中由单电子转移反应(酶过程和非酶过程)产生的自由基离子的研究已受到极大关注。此外,涉及自由基离子中间体的化学反应以及在合成化学中的应用研究同样具有广阔的前景。

参考文献

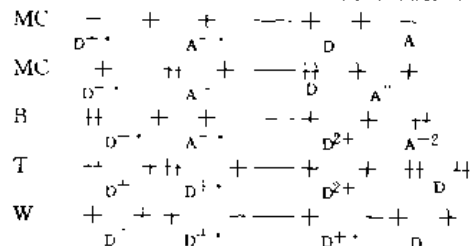
- Shida T, Haseibach, E. Acc Chem Res, 1984, 17: 180~186
- Symons M C R. Chem Soc Rev, 1984, 13: 393~493
- Courtneidge J C, Davies, A. G. Acc Chem Res, 1987, 20: 97
- Nelsen S F. Acc Chem Res, 1987, 20: 269~276
- Roth H. Acc Chem Res, 1987, 20: 343~350

- Bauld N L, Mirafzal, G. A. J Am Chem Soc, 1991, 113: 3613~3614
- Kato T, Kadama, T. Chem Phys Lett, 1991, 186: 35~39
- Kato T, Kodama T, et al. Chem Phys Lett, 1991, 180: 446~450
- Bunnett J F. Acc Chem Res, 1992, 25: 2~9

(兰州大学刘有成院士、郭庆祥副研究员撰)

有机磁体 organic ferromagnet 有机磁体是指不含金属元素且具有铁磁性的物质。以往的概念认为有机物质是抗磁性物质,即不可能具有铁磁性,但科学家从理论上预言有机磁体的存在性并且发现极少数有机物质具有铁磁性。进行潜在的有机磁体的新分子设计及其研究具有重要理论意义。有机磁体具有重量轻、毒性小、铁磁性强等特点,在一些方面有特殊应用。

1963 年麦克内尔(H. M. McConnell)首次提出了有机磁体存在的可能性,并于 1967 年提出了获取有机磁体的途径及其相应的两个模型,如图所示,MC 代表 McConnell 提出的模型。1987 年布伦斯洛(R. Breslow),1986 年托伦斯(J. Torrance)以及 1986 年伍德(F. Wudl)分别提出了另外 3 个模型,其中 B. T. W 分别代表 Breslow, Torrance 及 Wudl 提出的模型。



现以麦克内尔模型为例说明有机磁体的理论获取途径。在电荷转移形成的复合物晶体中,一般存在象 $\dots D^+ A^- D^+ A^- \dots$ 的线性序列结构,给予体分子 D 和接受体分子 A 均是反磁性的基态(自旋量子数 $S=0$)。而 McConnell 模型指的是如果某一离子晶体 $D^+ A^-$ 具有图中 MC 模型的结构,其中 D^+ 与 A^- 均是双重态($S=\frac{1}{2}$)并且其自旋间平行,则发生反向(back, $A \rightarrow D$)电荷转移后,某一配体分子(D 或 A)成为三重态,并且所有 D 之间由于与 A 自自旋相关效应而自旋平行,由此形成铁磁性微区,整体有可能成为有机磁体。

此外并非形成三重态分子仅为中性的 D 或 A,由于氧化势等原因有可能出现正向(forward, $D^+ \rightarrow A^-$)电荷转移,使得三重态为二价的 D 或 A,由此便出现了图中麦克内尔的其他几个变体模型。

要满足麦克内尔模型及其变体是很不容易的,模型中要求 D 或 A 中有一个具有简并的并且是部分占据的分子轨道,电荷转移后高自旋三重态较单重态更为稳定,给予体 D 或接受体 A 不会出现分子结构扭曲变形而出现 Jahn-Teller 分裂。从目前情况看,获取有机磁体的主要困难在于找到一种分子平面刚性大、不易变形、室温稳定的三重态分子。而现有研究主要集中在三重态分子的性质研究及其新的分子设计。

布伦斯洛从 1982 年开始详细研究了三重态分子 HET 及其衍生物与相应的配体分子 TCNE 的性质,由于 D(HET)和 A(TCNE)可呈几种氧化态和还原态,只有严格控制恰当的电荷转移量,当一价的二重态/二重态组态与二价的三重态/单重态混杂才与布伦斯洛模型一致,但布伦斯洛的实验结果并不理想。

固态结晶和高的相互作用能等“不对称环境”通常会影响到分子形状,破坏其对称性。但三重态分子与某些配体分子组合有可能变得更加稳定,例如查(L. Y. Chiang)等人用受体分子 TCNQF 与很不稳定的三重态分子 HMT 反应,得到了稳定的三重态 HMT,控制 TNCQF 的量使之在 HMT 分子间起隔离作用($\dots DDADDADDA \dots$)防止相邻 HMT 自由基之间电子配对。查

认为这个体系是很好的有机磁体模型。

米勒(J. S. Miller)等人非常详尽地研究了 $[\text{Fe}(\text{C}_5\text{Me}_5)_2]^+[\text{Anion}]^-$ (Anion=TCNQ,或TCNE,或两者混合)体系的磁性性能,结果表明其具有较好的铁磁性,并有非常可靠的证据证明其中金属元素铁对铁磁性无贡献。由于麦克内尔模型叙述过于简单,米勒依据实验结果把模型理解为 D^0A^0 激发态与 D^+A^- 基态进行混杂才能使 $D^0A^0D^+A^-$ 中的三重态稳定, $D^0A^0D^+A^-$ 成为一种新的基态。

1989年伍德等人研究了电子给予体HTTM和电子接受体1,3,5-tris(tricyanovinyl)benzene配合体系的磁性性能,此体系理论上符合图中伍德模型,但由于电子接受体分子平面性不太好,在体系中存在铁磁性微区,微区取向不一致,整个体系表现出无铁磁性。

铁磁性不仅要求分子内自旋平行,还要求整体上自旋平行,图中麦克内尔模型未涉及整体自旋平行,因此整体自旋平行是另一要攻克的难题。

就有机磁体而言,80年代才开始分子设计和模型实验方面的工作,目前取得的进展尚不能获得大量的有机磁性物质,因此有必要提出新的理论与途径,进行新的分子设计与研究,尤其是具有平面刚性大、不易变形室温稳定的三重态分子设计与研究,提出新的实验方法。现有的达到整体自旋平行的途径对于电荷转移复合物来说,两者是毫不相干的,因此要做到整体自旋平行还要做很多理论和实验研究工作。

参考文献

- 1 McConnell H M, Robert A. Welch Fonud Conf Chem Res, 1968, 11: 144
- 2 Lepage T J, Breslow R. J Am Chem Soc, 1987, 109: 6417~7421
- 3 Miller J S, et al. Chem Rev, 1988, 88: 201~220
- 4 Chiang L Y, et al. J Am chem Soc, 1989, 111: 1925~1929
- 5 张贵萍,江晓兰,龚克成. 化学通报, 1992, 1: 14~18
(深圳广密磁碟有限公司张贵萍博士撰,龚克成审)

有机体之间化学相互作用 早在20世纪20年代,欧美的一些科学家就提出一些化学生态学概念和假说。到60年代,欧美的一些植物生态学和昆虫生态学工作者与植物化学工作者合作开展了植物产生的化合物对其他植物和昆虫影响的研究。在70年代,化学生态学有关著作陆续出版,国际化学生态学会成立,学会刊物化学生态学杂志(The Journal of Chemical Ecology)开始出版发行。化学生态学作为一门系统完整的学科在英美形成。

生态系统中生物之间、生物与环境之间通过各种各样的相互作用联系在一起,这些相互作用可以是物理性的,但大部分相互作用是以物质为媒介的。这些物质媒介被称为生态化学物。生态化学物就是化学生态学的主要研究对象。化学生态学研究内容应包括植物自我防御机制、植物与昆虫间化学相互作用、昆虫之间的化学信息传递、植物间生化相互作用、植物与作为病原体的微生物间相互作用、植物对各种环境因子的生化适应、重要元素在生态系统流动中的变化、植物授粉的化学生态学、动物间以及草食动物与植物间相互作用等研究内容(T. B. Harborne, 1972)。研究又分个体、种群、群落和生态系统层次。在70年代和80年代,植物自我化学防御和抗虫植物与昆虫间的化学相互作用、昆虫间的化学通讯以及高等植物间的生化相克为化学生态学的最活跃研究领域。一些化学生态学方法和技术也迅速得到完善。如生态化学物的收集、提取、分离和鉴定,一系列生物检测技术等。化学生态学各领域的研究成果开始在农、林、园艺上应用。

生态化学物往往是微量的,难于收集、提取和分离,因此化学生态学研究深受现代分析化学的影响。由于现代微量分析化学的发展和完善,化学生态学研究已进入迅速发展时期。开展研究的国家越来越多,研究向广度和深度发展,化学生态学理论得到发

展和完善。

尽管环境与生物有机体之间相互作用方面的研究甚少,化学生态学研究涉及的领域已达到相当的广泛。其中绝大多数研究涉及生物产生的生态化学物的提取、分离、鉴定和对其他生物种和个体的影响,少量研究涉及生态化学物的产生、释放、分布、收集方法、结构与功能的关系、人工合成、生物检测方法和影响其他生物的机制。理论方法研究和群落水平化学生态学研究很少。昆虫间和植物与昆虫间化学相互作用及植物生化他感为最活跃的研究领域。化学生态学研究开始逐渐向其他生物间相互作用扩展。

植物间生化他感作用研究是化学生态学研究的活跃领域之一。1980年到1990年该领域研究范围涉及农作物种间和种群内、农作物与杂草间、自然植物群落内种间和植物群落次生演替中种间的生化他感。研究主要集中于农作物与杂草间生化他感研究。已研究过马缨丹、狗牙根、鼠尾草、薊、山菊、银胶菊、开尔粗草、掌叶苋、山柳菊、伽蓝菜、白茅、马唐、臂形草、黍、矢车菊、莎草、石刁柏、蝶须和野番茄等杂草;胡桃、白千层、桉属、白羽扇豆、牧豆树、康拉丁树、柳、臭椿等木本植物;几种地衣蕨类植物;咖啡、高粱、小麦、大麦、玉米、棉、烟草、三叶草、羊茅、黑麦草、苜蓿等作物和牧草。分离出了大量倍半萜类、酚酸类、醌类、黄酮类和有机酸类生化相克物质。并研究了胡桃醌等抑制植物对钾、钙等营养物质的吸收从而影响其生长的他感作用。生化相克物质可开发成除草剂、植物生长抑制剂和种子萌发抑制剂。有关植物间生化他感研究已在美国、墨西哥等国家应用于指导农作物间作和轮作。但还未有生化研究物质开发成除草剂。我国在该领域已开展草场杂草与牧草间、植物群落次生演替中植物间和人物与杂草间生化他感的小规模研究。服务于农林牧的人工生态系统中植物间的生化他感研究、阐述植物群落和生态系统中物种构成和分布格局及物种兴亡替代的自然生态系统中植物间生化他感研究,以及以寻找天然除草剂为目的植物生化相克研究是该领域的发展方向。

植物与昆虫间化学相互作用的研究涉及植物对昆虫的化学防御、抗虫化合物的提取、分离、鉴定及其对害虫生长、发育和遗传的影响,昆虫寻找寄主植物、适应、利用寄主植物的化学成分以及昆虫与植物间的协同进化。研究重点是植物的抗虫龙脑香、葱、紫萼、草莓、胡萝卜、萝卜、化学机制。已研究了印楝、苦楝、川楝、玉米、麦角、五倍子、白桦、棉、云杉、马利筋、仙人掌、野番茄、野茄、糖芥、无患子、马铃薯、菘蒲和野稻等的抗虫化学机制。研究了粘虫、谷实夜蛾、桔蛾、叶蝉、白蚁、蚜虫、花蝽、豆象、蚜虫、鳞类、甘薯花象、燕尾蝶、凤尾蝶、姬蜂、红蜘蛛等对昆虫化合物的反应和对寄主植物的适应。已分离出大量的萜类、黄酮类、酚类、生物碱类和有机酸类等抗虫化合物,如楝毒素、皂素、抗脱皮素、苦味素、咪唑香豆素、金丝桃素、光敏毒素、姜黄素、单宁等,可分为驱避素、昆虫拒食素、产卵抑制素、生长抑制素和杀虫素。印楝素正在被开发成天然杀虫剂和昆虫拒食剂。并对几种抗虫化合物进行了人工合成研究,以寻找天然杀虫剂为巨的抗虫植物研究和昆虫寻找食物,适应利用寄主植物化学成分以及昆虫与植物间的化学协同进化是该领域的发展方向。

蚊昆虫间化学相互作用研究集中于昆虫之间的化学通讯和昆虫防御天敌的化学机制。研究了蚊类、蚊蛉、马蜂、齿小蠹、旋丽蝇、枞色卷蛾、果蝇、烟草、实夜蛾、棉铃象、蝶类、夜蛾、蚜虫类等的化学通讯和化学防御;卷蛾、蜂蜂、烟草天蛾、椒果蝇、粘虫、洋芋钻虫、家蝇、潜蛾、松干蚧、尺蠖、桃蚜、白蚁和烟甲虫等害虫的性外激素。分离出了大量的性外激素、聚集素、引诱素、驱避素、警告素、同巢认同素、踪迹素等。研究了这些化合物对昆虫行为的影响,研究中采用了电触感图记录法。并对一些性外激素和信息素进行了人工合成研究。性外激素和信息素可用于害虫的治理,对他们的应用开发研究十分活跃。以治理害虫为目的的害虫种内和种间化学通讯研究及应用是该领域的发展方向。

哺乳动物间和哺乳动物与植物间化学相互作用的研究逐步发展。已研究了鼠、狼、麝、象、海獭、豹、貂等的化学通讯,牛、鹿、

羊、兔等对食物的选择和对所食用植物化学成分的适应。家畜及珍稀动物性外激素的生态学研究 and 植物化学组成对家畜食物选择、生长发育和遗传的影响是其发展方向。水生生物间和爬行动物间化学相互作用研究不多,主要对鲱鱼螯虾的化学通讯,大马哈鱼回游素、红树林与、蟹和珊瑚间、藻类与香蒲等水生植物间相互作用进行了研究。对蛇、晰蜴、鳄鱼等进行了研究。

植物与微生物、昆虫与微生物、植物与线虫等土壤动物相互作用也有少量研究。也有人研究过婴儿鱼腥素(三甲基氮)随年龄变化的规律。

根据国际生态学发展形势,我国科技现有水平和我国的资源特点,应重点开展以下几方面的工作。抗虫植物与昆虫间相互作用研究,主要研究天然抗虫植物的化学防御机制,植物毒素及其对昆虫生长发育的影响以及抗虫作用的化学生态;植物生化他感研究,包括作物种间和种群内、作物与杂草间生化他感研究,人工群落中种间关系、天然植物群落中一些有意义的种间关系、群落演替中种间关系的研究;昆虫间性外激素和信息素的研究;有害动物化学通讯研究;重要植物与根际微生物和土壤动物化学相互作用研究。

(中国科学院昆明生态研究所宋启示撰)

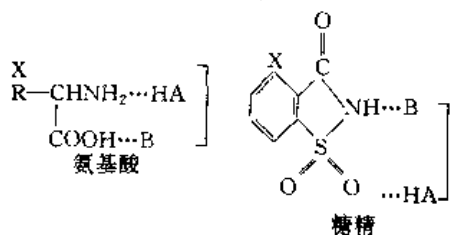
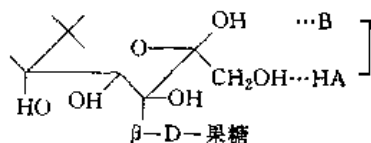
味觉产生和食品味道与分子结构的关系

formation of taste sense and relation between taste of food and its molecular structure 在现代生活中,人们对食品的色香味提出了愈来愈高的要求,为了满足人民的需要,研究食品味道与分子结构的关系具有重要意义。

世界各国对味觉的分类并不一致。中国人常称五味:酸、甜、苦、辣、咸。从生理学角度只分为:酸、甜、苦、咸4种基本味。辣味是刺激口腔粘膜引起的痛觉,涩味是刺激舌粘膜引起的收敛作用,都不是通过味觉器官感受到的,但就食品调味来说,辣和涩也应看成两种独立的味。4种基本味觉产生的过程与分子结构的关系为如下。

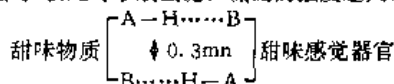
甜味 糖类是人们应用最早天然甜味物质。从化学结构上它属于碳水化合物中的多羟基醛或多羟基酮及其缩合物。糖类物质并不都具有甜味,少数单糖如葡萄糖与果糖,和一些低聚糖如蔗糖和麦芽糖等有甜味,其甜味强度各不相同。有些糖的组成和结构都相同,但由于空间构型不同,就无甜味或有苦味。例如麦芽糖和纤维二糖,它们都是由两个葡萄糖通过1,4-α键缩合而成,不同的是麦芽糖的键是α型,纤维二糖是β型。麦芽糖有甜味,纤维二糖无味。又如,α-D-甘露糖有甜味,β-D-甘露糖有苦味。

某些多元醇如山梨醇、甘露醇、木糖醇等有甜味。有些氨基酸如L-丙氨酸、D-色氨酸等都有甜味。糖精和对乙苯脲是人工合成的甜味剂。为什么组成和结构不同的化合物都有甜味呢?1967年沙伦伯格(Shallenberger)等提出了AH-B生甜团学说。下面3种甜味物质的组成和结构都不相同。



式中AH为氢供给基,B为氢接受基,X为疏水基。

沙伦伯格认为:上述化合物都具有氢的供给基AH和氢的接受基B,二者间的距离约为0.3nm。当甜味物质与甜味感受器接触时,彼此可形成氢键。氢键的强度越大,甜味越强。



沙伦伯格理论的提出成功地解释了许多物质具有甜味的原因。但该理论无法解释具有相同B-HA结构的糖和D构型氨基酸,它们的甜度为什么可以相差数千倍。后来克依尔(Kier)提出了修正。他指出:如果在甜味剂分子中,距离A0.35nm和距离B0.55nm处存在疏水基,可明显地增强甜度,如上面列举的氨基酸和糖精分子中的疏水基X。由于甜味剂中的疏水基可以与味接受膜中相应部位的疏水基相结合(相似相溶原理),使甜味剂容易被接受膜所吸附,增强了对味蕾的刺激作用。事实也证明了这种观点的正确。如:在具有相同B-HA结构,不同的D-氨基酸中,在相应部位具有疏水基的缬氨酸、亮氨酸、色氨酸等都有较强的甜味。

此外分子中存在邻二醇结构的化合物一般都有甜味,甜味的大小与邻二醇结构中羟基之间形成的分子内氢键的强弱成反比。分子内氢键越强,削弱了糖分子与味感受器之间的氢键,使其甜味减弱或不显甜味。这也是组成和结构相同,而构型不同的糖,甜度不同的原因。

酸味 酸味是由于舌粘膜上的味蕾受到氢离子的刺激而引起的。酸味的强度与酸的种类有关。试验表明:在相同的H⁺浓度条件下,不同的酸其酸味强度不同。下列酸味物质在相同的H⁺浓度条件下,酸味由强到弱的次序为:醋酸>甲酸>草酸>盐酸。产生这种现象的原因,其一是由于舌粘膜能中和H⁺,使酸味逐渐消失。醋酸等虽不是强酸,但能随着中和不断地离解出H⁺,使感受到较强的酸味;其二是由于酸味物质的阴离子对酸味强度也有影响。一般说来在相同H⁺浓度时,有机酸的酸味强度比无机酸大,因为舌粘膜对有机酸的阴离子比对无机酸的阴离子更容易吸附,而酸的阴离子可以中和舌粘膜上的正电荷,使H⁺更容易与舌粘膜结合刺激味蕾。因此食品酸味剂常采用有机酸,如醋酸、柠檬酸、乳酸等。

苦味 通常苦味是不受欢迎的味道,但许多食品都含有呈苦味的物质,如茶叶、咖啡、可可、啤酒、苦瓜等。苦味具有刺激味觉器官的作用。如果调配得适当,苦味还能起到丰富和改善食品风味的作用。

苦味物质的分子中一般都含有下列原子团:—NO₂、≡N、—SH、—S—、—S—S—、=C=S、—SO₃H等。无机盐中的Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺等阳离子和Br⁻、I⁻等阴离子都有苦味。

关于苦味与化学结构关系的理论报导不多,目前公认的有范氏理论,也称疏水键合理论:呈苦味物质的分子一般为疏水性,它与味觉器官之间是通过范德华力作用的。苦味物质的分子大都具有氢供给基和氢接受基,二基间的距离约0.15nm,形成分子内氢键,使分子成为疏水性分子。事实也证明了这个理论的正确性,如亲水性的L-谷氨酸二肽有鲜味,疏水性的二肽一般都有苦味。在有苦味的多肽分子上引入亲水基后,其苦味可以消失。

咸味 咸味是食品调味中最重要的。它是中性盐显示的味,其中氯化钠的咸味最纯净,其它盐类有复合味,例如铅盐有甜味,镁盐有苦味。

咸味是由组成盐的离子决定的,阳离子和阴离子都影响咸味的形成。咸味是卤素阴离子的共性,其中Cl⁻>Br⁻>I⁻。阳离子在加强咸味的同时,还可添加别的味,如K⁺、NH₄⁺添弱苦味,Mg²⁺添强苦味,Ca²⁺添不快的苦味。主要为咸味的盐有NaCl、KCl、NH₄Cl、LiCl、NaBr、NaI等。兼有咸味和苦味的盐有KBr、NH₄I。苦味变强的盐有CsCl、KI、MgCl₂、MgSO₄等。有机盐中与食盐咸味相近的盐有苹果酸钠和葡萄糖酸钠等。

除上述4种基本味外,由鱼、海带等引起的鲜味常与谷氨酸钠、核苷酸类等化合物有关。涩味的主要来源是单宁类物质。辣味

物质如生姜中的姜酮、辣椒中的辣椒素、芥子中的异硫氰酸丙烯酯等。

味觉作用的机理复杂。如在饮料、果汁中加入麦芽酚可强化甜味,这种现象称味的增效作用。味也有抑制作用,如咀嚼过野葛藤叶后,再吃甜或苦味物质感觉不出味道。味还有变调现象,如吃过食盐后,马上喝无味的清水会感到有甜味。研究某种味的有效成分及其合成,味的增效机理,抑制不良味的方法等都是目前味研究的重要内容。

食品风味是指食品入口前对人的视觉、味觉、嗅觉和触觉等器官的刺激,所引起的综合印象。研究食品的色香味与分子结构的关系,可用于食品加工与保鲜,提取与合成各种食品添加剂,创造新型风味食品,培育风味品种农作物,及制定鉴别食品质量的可靠指标等。今后在这些方面会有许多报导。

参考文献

- 1 Birch G G, et al. Food Science, 1976
- 2 藤卷正生,等. 食の科学. 朝仓书店, 1976
- 3 何其俊. 风味化学. 华中农业大学食品科技系编译, 1985
- 4 赵玉玲. 化学世界, 1991, 7: 4~8

(北京轻工业学院赵玉玲副教授、王锡臣教授撰, 熊克芳研究员审)

气味与分子的结构的关系 relation between odor and molecular structure 多年来人们为了探索嗅觉产生的奥秘做了大量研究,先后提出的理论和学说达 50 多种。

人的嗅觉器官是鼻腔上部 $\frac{1}{3}$ 处的嗅粘膜,面积约 2.5cm²。嗅粘膜上密集排列着嗅觉细胞和神经末梢。嗅觉细胞和周围的支持细胞能分泌一种粘液,形成感受膜覆盖在嗅粘膜表面。

早期的气味理论许多是模拟视觉和听觉产生的理论提出的假说。如, Ogle 等认为气味是由气味分子发出的电磁波经过长距离传递到嗅觉细胞产生的感觉。Teudt 等认为嗅觉细胞在与气味分子短距离或接触中,感受到气味分子内振动,产生嗅觉。Woker 等认为嗅觉是由于气味分子与嗅觉细胞发生化学或物理化学反应而引起的。Alexander 等提出的酶理论认为:气味是由感受膜中的某些酶与气味分子作用而引起的。

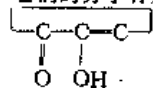
目前较受重视的气味理论有:立体化学理论、外形-官能团理论、渗透与穿透理论和振动理论。立体化学理论由 R. W. Moncrieff 于 1949 年首先提出,经 J. E. Amoore 补充发展而成。该理论也称为“键与键孔学说”。认为气味是由于气味分子的形状、大小和亲电性等与嗅觉细胞的感受体之间存在一定的互补性,能产生不同的刺激引起不同嗅觉。Amoore 从几百种有气味的物质中总结出 7 种原气味:花香气味、薄荷气味、刺激气味、腐烂气味、麝香气味、樟脑气味和醚气味,并将具有这 7 种气味的物质制成分子模型。他发现:具有相同气味的分子其外形非常相似。他把气味分子比作“键”,把接受气味分子的嗅觉细胞凹形感受部位比作“键孔”。当气味分子象键一样插入适合的凹形感受部位时,刺激感受部位产生嗅觉。不属于上述 7 种基本气味的其它气味可以看作是几种不同气味分子同时插入相应的凹形感受部位产生刺激形成的复合气味。

外形-官能团理论是 1957 年 M. G. J. Beets 提出的。认为气味除与分子的形状和大小有关外,还与所含官能团的性质及其在分子中的位置有关。当气味分子接近嗅觉感受体时形成相当于化学反应中的过渡状态,气味分子在嗅觉感受体上的排列既可能是混乱的,也可能是有序的,只有定向和有序状态才能够产生味刺激。只含有一个官能团的气味分子在嗅觉感受体表面的定向作用很强。缺乏官能团或虽有多个官能团但存在空间阻碍,气味会大大减弱。

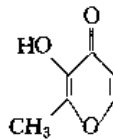
目前,上述两种理论的实验依据较充分,正在被愈来愈多的人所接受。

气味与官能团的关系 含有相同官能团的同系物一般都具有相似的气味,如:含有醇羟基(-OH)具有醇气味;含有醚基(-

O-)具有醚气味;含有酯基(-COOR)具有酯气味等。气味分子通常含有某些原子或原子团,这些官能团也称为发香团。发香原子在周期表上常位于第 IV 至 VI 族,其中 P、As、Sb、S、F 是发恶臭的原子。常见的发香团有:羟基(-OH)、羧基(-COOH)、醛基(-CHO)、酮基(-CO-)、醚基(-O-)、酯基(-COOR)、苯基(C₆H₅-)、硝基(-NO₂)、亚硝酸基(-ONO)、酰胺基(-CONH₂)、氰基(-CN)等。由于不同的发香团形状大小和性质不同,对嗅觉细胞凹形感受部位插入的位置和刺激强度也不同,产生不同的气味。此观点只适用于分子量较小,发香团在分子中所占比例较大的情况。随着碳链的加长和发香团在分子中所占比例的减小,发香团对气味的影响逐渐减小,而分子的形状和大小对气味的影响逐渐加大。例如:链状的醇类、酯类等化合物,在低分子量范围内分别具有其发香团的各种果香型气味,随着碳链的增长,香气由果香型→青香型→脂肪型变化,当碳链达到 C₁₅-C₂₀ 时则变得无气味。

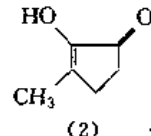
气味与分子局部结构的关系 分子的局部结构也常对气味有决定性的影响。例如化合物(1)、(2)、(3)都是从天然物提取的有焦糖气味的物质。它们的分子骨架不完全相同,但却具有相同的二酮烯醇式结构() ,因此可以推断这种相同的

局部结构是产生焦糖气味的必要条件。实验证明上述推断是正确的。化合物(4)和(5)是人工合成的,其中(5)的酮基不在环内,(4)的环是不含氧的 6 碳环,但它们分别含有 α-二酮烯醇式和 β-二酮烯醇式结构,也都具有焦糖香气,可用作食品香料。



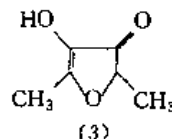
(1)

麦芽酚



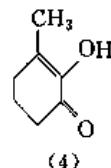
(2)

3-甲基-2-羟基-2-环戊烯酮



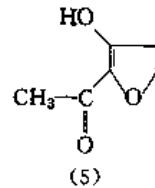
(3)

2,5-二甲基-3-羟基-4-羟基二氢咪唑



(4)

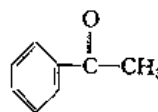
3-甲基-2-羟基-2-环己烯酮



(5)

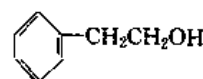
异麦芽酚

气味与分子骨架结构的关系 具有相同或相似香型的化合物并不一定都具有相同的官能团或相同的局部结构,有时分子整体骨架相同,也会具有相似的香气。例如化合物(6)、(7)、(8)都具有相似的花香气味,它们所含的官能团完全不同,假定苯环是决定香气的共同局部结构,就无法解释化合物(9)和(10)也具有与(6)等相似的花香气味的事实。因此,只能认为 6 碳环加相似侧链的分子骨架是它们具有同类型香气的决定因素。



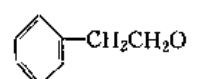
(6)

苯乙酮



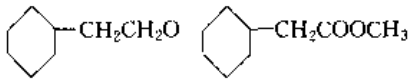
(7)

β-苯乙醇



(8)

苯乙醛

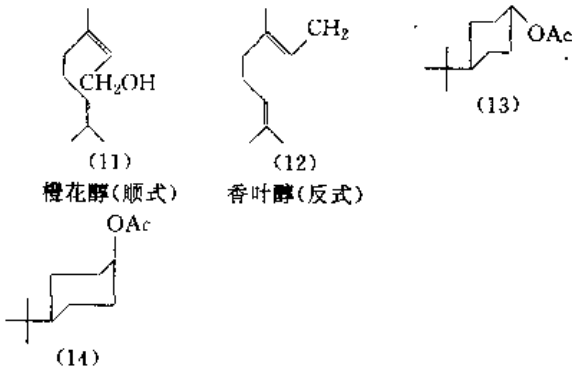


(9) 环己基乙醚 (10) 环己基乙酸甲酯

Amoore 曾对 20 多种具有樟脑气味的化合物进行研究, 它们的官能团和结构均不相同, 但根据它们的立体化学数据, 发现其分子的几何形状和大小都很相近, 这是它们具有相似气味的原因。

气味与分子立体异构之间的关系

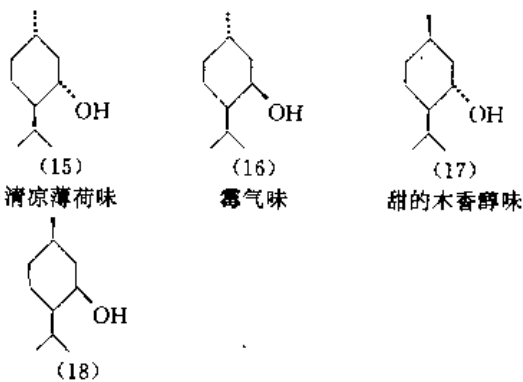
1. 几何异构体。研究发现: 由天然植物中提取的链状不饱和醇或醛一般是顺式结构, 其香气通常较淡柔和, 而人工合成的反式体的香气较浓重。(11) 橙花醇(顺式)具有轻柔的橙花型香气, (12) 香叶醇(反式)具有较浓重的玫瑰型香气, 它们的衍生物乙酸酯和乙基醚的香气也同样符合这一规律。



(11) 橙花醇(顺式) (12) 香叶醇(反式)

化合物(13)与(14)因几何异构不同, 气味也不同。(13)淡而无味, (14)是著名的香料。

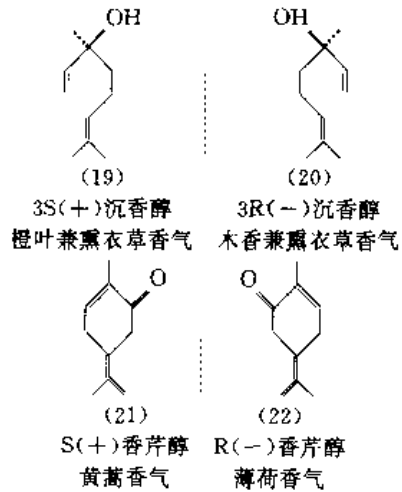
2. 非对映异构体。化合物(15)、(16)、(17)、(18)分别是薄荷醇的 4 种非对映异构体。这种非对映异构体之间气味有差异的现象是普遍存在的。



(15) 清凉薄荷味 (16) 霉气味 (17) 甜の木香醇味

介于(16)-(17)间的气味

3. 对映异构体。对映异构体之间构型的差异较非对映异构体间的差异小。长期以来, 由于光学纯的对映异构体难以制取, 研究较少, 一直认为对映异构体之间的的气味相同或相近。近年来随着色谱分离技术的发展, 光学纯的对映异构体已经容易获得。研究发现: 对映异构体对气味是有影响的, 有时是很明显的。例如化合物(19)与(20), (21)与(22)分别互为对映体, 它们的气味是有差别的。



(19) 3S(+)-沉香醇 橙叶兼薰衣草香气
(20) 3R(-)-沉香醇 木香兼薰衣草香气
(21) S(+)-香芹醇 黄蒿香气
(22) R(-)-香芹醇 薄荷香气

影响气味种类和强度的因素多而复杂, 与气味种类有关的分子特征通常包括: 偶极矩、折光率、空间效应、光谱性质等; 与气味强度相关的分子特征有: 蒸汽压、溶解度、吸附性、扩散性等。对气味进行评价也有不少困难, 如同种气味物质浓度不同, 气味不同; 一个人在不同心理状态时对同一种气味可以产生不同的嗅觉等。气味理论问题集生理学、心理学、化学和物理学等多学科知识为一体, 至今还没有一种被公认的完善理论, 有待进一步探索与研究。

研究气味产生的机理和组成, 评价气味的标准和方法, 开发与研制各种新型香精香料满足化妆品、洗涤用品和食品工业的需要等, 都是当今气味研究的重点。

参考文献

- 1 藤卷正生, 等. 香料の事典. 朝仓书店, 1980
- 2 Amoore J E. Chem Senses Flavour, 1977, 2: 267
- 3 Moncrieff R W. Food Intake and Chemical Senses. 1977. 79
- 4 Wood T F. Chemistry of the Aromatic Musk. 1980. 3~8
(北京轻工业学院赵玉玲副教授、王锡臣教授撰; 焦克芳研究员审)

均相催化 homogeneous catalysis 催化是化学工业的支柱。催化可以分为多相催化和均相催化两大类。目前, 大多数工业催化剂还是多相催化剂。均相催化主要包括酸碱催化和有机金属催化两个方面。均相催化剂以分子或离子水平独立起作用。一般来说, 其活性中心性质比较明确, 反应动力学和机理也比较清楚。要开发新型催化剂和实现高效催化过程, 其关键是加深对反应分子的活化和催化循环的控制机理的认识。因此, 发展均相催化意义不仅在于开发它们在工业上的直接应用, 更重要的是从分子水平上揭开催化作用的奥秘。如中心金属及其价态的选择, 配位体的电子效应和空间效应, 活性物种的组成和结构, 同核和异核多金属催化剂结构本质, 催化循环的控制步骤等方面; 深入认识催化过程中影响催化活性和选择性的种种因素, 从而使整个催化科学发生飞跃。

均相催化主要有 3 个方面的应用; 其一是在化工生产中的应用; 到目前为止, 世界上每年至少有 2000 万吨有机化学产品是用均相催化反应生产的。均相催化反应具有活性高、反应条件温和及高选择性的优点, 因而, 对未来化学工业的发展将有重要的影响; 但是, 也存在产物难以纯化的缺点。所以, 目前的化学工业过程主要还是通过多相催化实现的; 其二是用于催化过程的研究。均相催化可以作为相应的多相催化过程的模型反应。通过对过渡金属络合物催化剂与催化反应中间体的研究, 有助于从分子水平上理解催化反应机理, 也可以用于酶催化的人工模拟, 从而将为化工生产带来更为深刻的变化; 其三是提供精细有机合成新方法。众所周知, 现代有机合成化学的核心是开发新型的高选择性

有机合成反应。这种反应应当具有如下的特点：反应条件温和，如反应能在中性、常温和常压条件下进行；高选择性，包括化学选择性、区域选择性、立体选择性和对映选择性；仅需加入少量催化剂，反应便可以反复顺利进行；无公害，反应过程中基本不生成和不排放对环境有害的废水、废气和废渣。显然，利用金属有机络合物所进行的均相催化反应是实现上述目标最有希望的途径。

表1 均相催化的发展年表

年份	反应	催化剂	开发者
1916	乙炔水合制乙醛	Hg ⁺⁺ 盐/H ₂ SO ₄	德国
1920	丙烯水合制异丙醇	H ₂ SO ₄	Standard Oil Co.
1938	Roelen 发现烯烃的氢甲酰化反应	HC ₂ (CO) ₄	Otto Roelen
1939	Reppe 发现有机化合物的羰基化反应	VIII 族金属的羰基化合物	W. Reppe
1951	相转移催化概念的提出	季铵盐等	Makosya 等
1955	Ziegler 法合成聚乙烯	AlEt ₃ -TiCl ₄	K. Ziegler
1957	Ziegler-Natta 法合成聚丙烯	AlEt ₃ -TiCl ₄	G. Natta
1958	丁二烯齐聚	零价镍	G. Wilke
1959	乙烯氧化制乙醛	PdCl ₂ /CuCl ₂	Wacker Co.
1969	间接氧化法丙烯制环氧丙烷	可溶性 Mo 化合物	Halcon Co.
1970	甲醇羰基化制醋酸	[Rh(CO) ₂ I ₂]-/CH ₃ I	Monsanto Co.
1971	丁二烯氢氧化制己二腈	Ni ₂ , 如 Ni[Ph ₃ PO] ₄	Du Pont Co.
1974	催化不对称加氢合成 L-Dopa	Rh-手性络合物	Monsanto Co.
1976	烯烃低压氢甲酰化制醛	RhH(CO)(PPh ₃) ₃	U. C. C.
1977	SHOP 法乙炔齐聚制 α-烯烃	可溶性镍络合物	Shell Res. Co.
1983	甲醇经醋酸甲酯羰基化合成醋酐	RhCl ₃ /LiI/CH ₃ I	Halcon Co. / Eastman Co.
1984	改进 Rh 法制醛	HRh(CO)PPh ₃ ·SO ₃ H	Ruhr Co. / Rhone Poulenc Co.

在基本有机化工方面，有 3 个里程碑都是以均相催化为基础的。(1)由煤出发制成乙炔，转化为乙醛，是在汞盐催化下完成的；(2)由石油气出发，乙烯水合为乙醛是应用有机钯 PdCl₂(C₂H₄)完成的，在反应过程中加入氯化铜为辅助催化剂，完成了催化循环，其净反应则为乙烯氧化为乙醛；(3)由煤出发的合成气制成甲醇，羰基化变为乙醛是应用有机镍化合物完成的。此外，用丙烯和合成气在羰基钴存在下合成丁醛的方法，代替了过去从乙醛出发的醇醛缩合法；丙烯和水、一氧化碳以五羰基铁为催化剂生成正丁醇的 Reppe 法也已工业化，代替过去用粮食发酵制丁醇的方法。

1955 年 Ziegler-Natta 催化剂的问世，不仅为均相催化和高分子化学开辟了新的研究领域。而且也促进了整个化学工业的迅速发展。以四氯化钛和烷基铝组成的催化剂溶液不仅可使乙烯在温和的条件下聚合，生成高分子量聚乙烯，还可以使丙烯定向聚合为等规聚丙烯。几十年来，出现了一代又一代齐格勒催化剂，催化活性不断提高。80 年代以来，Kaminsky 发现用甲基铝氧烷与二甲基二茂锆组成催化体系，每克锆可得 100 吨聚乙烯，催化效率高达 1 亿倍。

均相催化在精细有机化工方面的应用，是近年来所取得的突出成就。70 年代，美国孟山都公司开发了用手性膦镍催化剂进行

不对称氢化合成左旋多巴胺(L-Dopa)是均相催化工业的典型范例。L-Dopa 是治疗帕金森病的特效药。生产 1 吨 L-Dopa，只需要 454g 催化剂。在 80 年代，日本高砂香料公司用带有轴性不对称配位体 BINAP 的铑催化剂，实现了左旋薄荷醇的工业生产，催化剂用量为 10⁻³mol，化学收率为 98%，光学收率达到 98.5%。

当前，均相催化研究的热点是：(1)均相催化用于碳一化学，即由煤或天然气制合成气，由此转化为甲醇，再以甲醇为原料合成一系列化工产品。由碳一化学取代传统的化学工艺路线，是历史的必然趋势；(2)新型金属有机络合物的合成及其在高选择性催化反应中的应用，特别是催化剂结构、活性与机理之间的关联；(3)均相催化剂多相化的研究。

参考文献

- 1 Jones W H, et al. *Catalysis in Organic Synthesis*. N. Y. Academic, 1980
- 2 Nakamura A, Tsutsui M. *Principles and Application of Homogeneous Catalysis*. N Y, Miley-Interscience, 1980
- 3 Colquhoun H M, et al. *New Pathways for Organic Synthesis, Practical Application of Transition Metals*. New York, Plenum Press, 1984
- 4 黄耀曾, 钱延龙主编. 金属有机化学进展. 北京: 化学工业出版社, 1987
- 5 钱延龙, 廖世键主编. 均相催化进展. 北京, 化学工业出版社, 1990

(华东理工大学博士生导师钱延龙、黄吉玲教授撰, 黄耀曾院士审)

Sharpless 试剂 光学活性环氧化合物广泛存在于自然界中，它们作为动植物生命过程中生物合成的中间体和作用物(保幼激素、性诱剂等)有着重要的作用，研究不对称环氧化反应可以建立许多生物过程的机理。烯烃的不对称环氧化可以进一步反应形成两个手性中心，并且环氧化合物与各种亲核试剂在温和条件下立体特异地进行反应，可以得到各种官能团的光学活性化合物，光学活性环氧化合物可作为天然产物和它们的类似物的合成子，尤其重要的是，用它可合成药物、信息素等。烯烃的不对称环氧化反应是合成化学极其重要的反应。Sharpless 试剂是烯丙基醇类化合物不对称环氧化反应的优良试剂。

1965 年, Henbest 首次报道用 (+)-过氧樟脑酸氧化孤立双键烯烃得对映体过量值(ee 值)低于 5% 的环氧化合物, 虽然其光学纯度低, 但此反应证明了可以从非手性母体合成手性环氧化合物, 随后人们对不对称环氧化反应进行了大量的研究, 可以采用手性过氧酸、α-过氧缩酮、氧杂氮丙烷等对双键进行不对称环氧化, 过氧化氢、叔丁基过氧化氢(TBHP)等氧化剂在光学活性相转移催化剂(如环糊精、金鸡纳生物碱、奎宁衍生物、手性冠醚等)存在下可对双键氧化得手性环氧化合物, 使用所谓合成酶聚氨基酸作相催化剂, 可得 ee 值近 100% 的产物。用生物方法可以得到光学纯度的环氧化合物, 但其底物范围狭小, 其反应效果很大程度上决定于反应条件。1966 年 Nozaki 等进行的不对称环丙烷化反应证明了含手性配体的过渡金属配合物对不对称反应的作用。人们为了得到高效不对称环氧化试剂, 对含手性配体的过渡金属配合物进行了大量的研究。1980 年, Sharpless 等以四异丙氧基钛、酒石酸酯和 TBHP 组成的试剂对一级烯丙基醇进行不对称环氧化, 其产物绝对构型仅依赖于酒石酸的构型, 而与反应物的结构无关, 并且 Sharpless 试剂可用于外消旋二级烯丙基醇的动力学拆分。

Sharpless 试剂对烯丙基醇反应有如下特点: 双键上有供电基的反应速率大于吸电基的反应速率, (E)型烯丙基醇的环氧化反应速率大于(Z)型的反应速率, 其 ee 值也有同样的趋势; 对于(Z)型烯丙基醇反应产物的构型, 取决于 C(3)取代的立体位阻, 位阻小 ee 值就高; 对于 C(3)是手性的烯丙基醇, (E)型异构体对反应结果无影响, 而对于(Z)型异构体不同的绝对构型配体对反

应有不同的结果,而C(3)如有太大的取代基团,环氧化反应将不会发生;烯丙基醇的反应活性增强,导致其反应产物开环活性增大,开环产物二醇是试剂的抑制剂。Sharpless试剂对高位烯丙基醇所得产物化学和光学产率都较低,同样的条件下产物的构型与烯丙基醇所得产物构型相反, β -羟基环氧化物比 α -羟基化合物更易异构化。1987年,Katsuki等用Zr-Hf代替Ti进行研究,发现Zr对高烯丙基醇有较好的活性,产物ee值可达77%。在外消旋二级烯丙基醇的动力学拆分中,赤式环氧化物更易形成,正确选择反应条件可使外消旋体中其中一个异构体并不发生环氧化反应,这样就可以得 α -羟基环氧化物和高光学活性的烯丙基醇;对于快反应异构体环氧化速率低的反应,动力学拆分就需要相当长的时间,(Z)-烯丙基醇的拆分效果比(E)-型效果差,这种情况下(Z)-赤式环氧化物的光学活性高,但(Z)-赤式却是外消旋体。二级(E)-烯丙基醇的C(3)位有1,Cl,含硅取代基时动力学拆分的效率增大,环上二级烯丙基醇得的拆分得到的光学产率较非环烯丙基醇低。除了1位含手性碳原子外的手性烯丙基醇也可以用Sharpless拆分,由于手性中心与羟基相距较远,则结果不能用一般二级烯丙基醇环氧化的规则所预测。

研究Sharpless试剂的作用形式及作用机理,对开发新的不对称反应试剂有重大意义,1983年,Sharpless等认为活性试剂的存在形式为10员环状二聚体,1984年由[Ti(酒石酸二苯胺)₂(OR)₄]的X射线结构sharpless等重新提出了活性试剂结构为酒石酸酯桥接的双对称三环二聚体,二聚体含二个酒石酸酯残基,且在一个平面上,每个酯通过两个羟基氧与钛配位,其中两个羟基氧为桥氧,每个钛的另外三个位置是两个烷氧基和羰基氧。Sharpless试剂的反应过渡态可认为是烯丙基醇和THBP取代了两个烷氧基和羰基氧,在这样的结构条件下,才能满足烯丙基醇和THBP与烷氧基的快速交换和氧的有效并且是选择性地转移。酒石酸酯的ee值与产物的ee值无线性关系的事实支持了形成二聚体这一假说。1987年,Sharpless等用一个吡啶类似物与Ti(OR)₄形成一个类似Sharpless试剂活性结构的试剂,证明了所提活性试剂结构的正确性。1989年,Sharpless等用羟基二酸酯和羟基二酸酯这样的类酒石酸酯代替酒石酸酯进行了研究,用酒石酸酯桥接二聚体结构可以很好解释结果。1991年Sharpless等对不对称环氧化的机理进行了详细的研究。

在烯丙基醇不对称环氧化反应中,一般使用TBHP作为氧化剂,一些二级烷基过氧化氢也能作为有效的试剂,位阻较大的三级烷基过氧化氢对映作用效果大,而一级烷基过氧化氢则对映效果较差。一般使用1.5~2.0当量的催化剂,而在动力学拆分中,为了扩大对映体环氧化速率的差别而使用0.6当量的催化剂。在反应体系中有痕量水则抑制反应速率,而且降低环氧化的反应选择性,这是由于在TBHP存在下,水与烷氧基钛形成过氧钛和Ti—O—Ti型化合物,降低了参与形成反应中间体钛的配位数,并毒化了试剂。利用这一点,1984年Kagan等在Sharpless试剂中加入等当量的水,组成了手性亚砷的实用试剂体系,由于手性亚砷也是很有用的合成子,所以使得Sharpless试剂得到更为广泛的应用。Kagan等改良的Sharpless试剂对芳基-S-烷基氧化,ee值可达95%,二烷基亚砷的ee值一般小于80%。为了提高Sharpless试剂的活性,1985年,周维善等在Sharpless试剂中加入催化量氯化钙和硅胶,能大幅度地降低烯丙基醇不对称环氧化的反应时间,而化学和光学产率并不受影响,而且能使化学计量Sharpless试剂所不能实现的反应得以完成,如赤霉素甲酯的环氧化,这是首例环状三级烯丙基醇不对称环氧化。Pretwich, Schwab等利用周维善改良的Sharpless试剂,合成了手性标记化合物,1992年,周维善等研究了不同金属氢化物对反应的影响及作用,认为由于高价金属离子更易与氧原子成共价键,金属离子结合到过氧化物中连接烷基的氧原子上而减弱过氧键,增加了过氧化物亲电性,加速了环氧化反应。硅胶通过吸附作用使金属离子对不同的过渡态中过氧键产生差异从而保证反应的对映选择性。1991年,周维善等对 α -糖胺, α -吡咯甲醇进行动力学拆分,产物

ee值和化学产率都很高。1986年,Sharpless等在反应体系中加入分子筛(3A,4A),Sharpless试剂可以减少到催化量,反应速率、产物的化学和光学产率均能达到化学计量的值,所需要羟基过氧化氢的量也降低了,这就解决了化学计量反应中存在的大部分问题,使一些易开环、后处理困难的产物,在催化量反应时有高的产率和ee值,反应条件温和、经济、分离容易,产率增大并适于大量制备。低分子量烯丙基醇环氧化物的现场衍生化也得以实现。1991年Takano等用加入分子筛的Sharpless试剂对三级烯丙基醇(E)-2,5-二羟基-2,5-二甲基-3-己烯进行环氧化,得到70%的产物,这是首例用Sharpless试剂对非环状三级烯丙基醇进行不对称环氧化。

Sharpless试剂所使用的酒石酸酯一般分为二异丙酯(DIPT)和二乙酯(DET),位阻大的酯可获得高产率,光学产率也略有提高。而对动力学拆分,使用位阻大的酯,产物的ee值得较大的提高,1983年,Farrall等将酒石酸酯接到高分子上,以求得试剂循环使用,但每次使用后效率都有所降低。1984年,Furia等将Sharpless试剂改为Ti(O-iPr)₄:DET=1:4,这样改进的Sharpless试剂与Kagan改进的试剂作用类似,都能将硫醚转变成手性亚砷。1984年,Sharpless等将Ti(OiPr)₄改为Ti(O-iPr)₂Cl₂,且与酒石酸之比为2:1时,反应的产物是开环的,再用碱处理可得光学纯环氧化物,而此化合物与用一般Sharpless试剂直接所得的环氧化物的构型正好相反,这为我们提供了合成不同构型化合物的便利方法。在动力学拆分中,化学产率和光学产率是相互影响的,为了使两产率都得到提高,1991年Brown等针对Sharpless试剂存在的不对称环氧化提出了双动力学拆分的设想。

最后值得一提的是用Sharpless试剂对烯丙基的不对称环氧化,所得产物一般是反式的,1991年,Grandjean等用酶法合成了不对称顺式环氧化物,有较好的ee值和化学产率。1991年,Wong等用Pseudomonas Oleovorans中提取的单氧酶对烯丙基醚进行不对称环氧化,得到较好的产率和化学产率,此单氧酶对孤立双键和硫醚都能进行不对称氧化。

自从发现Sharpless试剂以来,人们用它作为关键步骤对许多天然产物进行了直接合成。用Sharpless试剂合成出的许多优良的手性合成子,都有大量研究及应用的可能性和必要性。通过提高反应试剂的活性,可以对三级烯丙基醇进行不对称环氧化研究。对Sharpless试剂进行改性,对高烯丙基醇进行不对称环氧化,Sharpless试剂的应用有待进一步研究开发。Sharpless试剂的作用机理研究对不对称反应试剂的设计和合成研究有重要的指导作用。

参考文献

- 1 Katsuki T, Sharpless K B. J Amer Chem Soc, 1980, 102 (18): 5974~5976
- 2 Pirghen P, Kagan H B. Tetrahedron Lett, 1984, 25(10): 1049~1052
- 3 王志民,周维善,林国强. Tetrahedron Lett, 1985, 26(50): 6221~6224
- 4 王志民,周维善. Tetrahedron, 1987, 43(13): 2935~2944
- 5 Woodard S S, Finn M G, Sharpless K B. J Amer Chem Soc, 1991, 113(1): 106~113
- 6 Finn M G, Sharpless K B. J Amer Chem Soc, 1991, 113(1): 113~120
- 7 石根斌,滕铸,丁新腾. 化学通报, 1991, 4: 22~29

(复旦大学石根斌撰)

立体控制合成 LIFE=CHIRALITY 生命的现象在于其手征性,这是当前国际上发展立体控制合成的主要依据和重要意义所在。构成生命现象的两大“基石”是蛋白质和核酸,它们分别由L-氨基酸和D-(脱氧)核糖组成。凡涉及到生命现象和生理活性物质几乎都离不开有关分子的空间立体构型问题。其中,

最基础的有机分子均含有手性碳原子,不同构型的手性分子具有不同的光学活性和不同的生理活性。例如,组成蛋白质的10多种氨基酸均属L-构型,青霉胺的D-对映体是药物,而L-对映体则使眼睛失明的毒物;D-(+)-苏-氯霉素的抗菌活性比L-(-)-对映体大250倍;D-(+)-异丙肾上腺素的支气管舒张活性比L-(-)-对映体强50~800倍;(-)-3-羟基-N-甲基吗啡烷有显著的止痛作用,而其(+)-对映体却无止痛作用;二肽甜味剂ASPARTAME是由L-天冬氨酸和L-苯丙氨酸组成的,若为L-天冬氨酸和D-苯丙氨酸组成则为苦味;(+)-4-甲基-3-庚酮作为切叶蚁的警戒信息素,比(-)-对映体的活性高10~100倍。目前人们对自然界的这种特定的现象尚不能全面理解和掌握,还有待于人们去发现和认识。这些现象同时亦向化学家们提出了挑战:能否模拟生物体内特定功能,直接合成具有一定空间立体构型的生理活性物质。

从有机化学的角度来看,立体控制合成就是以对称结构或手性的有机分子为原料,经过立体选择或对映选择反应,合成不等量的立体异构体或对映异构体产物,其立体异构体过量(简称de)或对映体过量(简称ee)大于95%的合成反应就称为立体控制合成。这表明立体或对映选择反应是控制在一个空间方向进行的,得到的反应产物则是纯的立体异构体或对映异构体(即光学纯的化合物)。这方面的研究是现代有机合成中的一个前沿领域,是有机化学、立体化学和生物化学相互交叉和结合的新兴学科。

常规和经典的有机合成方法只能合成等量左右旋的外消旋体,若要获得单一构型的对映体,则需要经过拆分,以得到占外消旋体一半的某一个纯对映体,因此至少要损失另一半的产物,再加上拆分的产率不可能达到100%,所以通过常规有机合成方法合成手性化合物是一种合成和分离程序长、产率较低、经济成本较高的方法。

近年来,由于生物技术和酶化学的发展,人们对生物体内具有一定立体构型的生理活性物质立体专一合成过程开始有所认识,进而大大促进了有机化学家对模拟生物体内的立体专一合成和开拓生物体外的立体控制合成的研究。较为成功的研究有:不对称催化氢化(L-多巴)的合成、手性催化迈克尔加成反应,合成(-)-苹果酸、手性硼试剂的合成,不对称环氧化反应、二氢吡喃法合成光学纯氨基酸、亲电甘氨酸手性模板、手性相转移催化烷基化反应、不对称催化环化(甾体激素合成中C/D环化反应)以及手性亚胺的不对称合成体系等。

当前国际上立体控制合成的主要研究方向可归纳为5个方面:(1)生物技术和酶化学研究:利用自然界存在的酶为催化剂和酶抗体的诱导催化作用进行立体控制合成反应、开展氧化还原酶、水解酶、转移酶、裂合酶、异构化酶和连接酶促进催化碳-碳键、碳-氧键和碳-氮键等形成和裂解过程,合成具有立体专一性和特种功能的手性化合物。累积和认识酶催化活性中心和立体控制合成过程。(2)仿酶催化立体控制合成:根据酶催化功能和信息,研究仿酶催化机理和过程,模拟某些天然酶的催化合成功能,开展酶的化学修饰,寻找和实现在生物体外进行立体控制合成的方法和途径。(3)非酶手性催化剂及催化反应的研究:在立体控制反应中,由于手性金属、络合物的配位效应,不对称诱导效应和立体位阻效应,以及它可作为催化剂参与立体选择和对映体选择反应,从而使反应控制在一个空间方向上进行,得到高纯度立体异构和对映异构体产物。如手性磷-铍络合物的立体控制催化氢化反应,是一个较为成功的例子。(4)手性模板和手性试剂的立体控制合成研究:利用某些手性化合物合成具有特定空间构型的手性模板,作为手性试剂,经立体选择或对映体选择反应,结合不对称诱导效应,立体位阻效应,整合效应,电子效应和双手性协同效应等机理,研究和设计立体控制合成的新方法,使得到的反应产物的de或ee值大于95%。这个领域近10年来甚为活跃,不断涌现出新方法、新试剂和新模板。(5)立体控制合成方法在复杂天然产物合成中的应用研究:具有生理活性的天然产物多数含有特定的

空间结构,在进行全合成时,必须考虑立体化学问题。若采用立体控制合成方法引入新的手性中心,则可避免在反应中产生繁多的光学异构体。一些复杂天然产物往往含多个手性中心,在全合成中由于多个光学异构体的分离困难而导致全合成失败。当前国际上有关复杂天然产物的全合成仍是有机化学中的瞩目课题,合成方法和水平越来越高。如美国哈佛大学的Corey完成了近100个复杂天然产物的全合成并创立了逆分析合成法而获得1990年度诺贝尔化学奖。现在有机化学家已能合成含有20个手性中心,上万个可能异构体的复杂天然产物,其关键在于引入的手性中心时应用了立体控制合成方法。

综上所述,立体控制合成既是有机化学中甚为重要的基础研究,又是急待开拓的高技术领域。目前,有机合成化学家面临的主要任务就是如何在有机反应中达到可以控制产物立体构型的目的。该领域的研究发展潜力很大,随着研究的深入,将不断揭示立体控制作用的机理和内在规律,发现更多、更有效和更实用的立体控制合成新试剂、新反应和新方法。

(中科院成都有机化学所蒋耀忠、杨桂树撰)

共结晶化 一种形成良好晶棱晶面大尺寸有机及有机金属化合物单晶的新方法,1988年为美国明尼苏达大学伊特(Etter)教授所发现。其原理是利用主体(有机分子)作为质子授体,而客体(共结晶添加物或溶剂)作为质子受体,它们之间通过强的氢键作用形成络合物。往往是客体本身具有良好的结晶性质,而这种性质可以转移到客体与主体之间形成的氢键络合物中,主体化合物可为酰胺、磺酰胺、酚类等,客体化合物主要应用三苯基氧化膦(TPPO)。有两个因素使得TPPO有促进晶体生长作用:磷酸基的氧有很强形成氢键的能力,这可赋予形成的络合物有部分离子特征;TPPO有庞大的体积,这阻止了片状结构的形成,后者很容易引起晶体碎裂或生长成薄片状结晶。

应用一般的实验室技术很容易实现共结晶化,具体做法是将等摩尔的主客体化合物溶解在甲苯中,然后使溶液在室温下缓慢蒸发即可形成结晶。将晶体从溶液中分离出后,快速用丙酮和石油醚洗涤,然后在空气中干燥,由此得到的结晶可在偏光显微镜下检查确定是否为均一的结晶。通常这种络合物的晶形与原料的晶型不同,所得的结晶还可通过溶液NMR、固态IR和熔点测定进一步鉴定。NMR结果可给出主客体络合物间的化学计量关系,IR谱图显示络合物-OH或-NH峰比主体化合物有更低的频率(常低于 3000cm^{-1}),熔点测定表明络合物比主客混合物有更锐的熔点范围。粉末X-衍射测定已证实形成的络合物有特征的不同于主客化合物的衍射图形,单晶X-衍射结构测定证实络合物是通过主体化合物的-NH或-OH与TPPO的磷酸基氧间的氢键实现结晶化的。例如三苯基甲醇-TPPO络合物的晶胞体积可为 $(0.1 \times 1 \times 2)\text{cm}$,如果进行条件优化可能得到更大的结晶。结晶的溶剂常用甲苯,如主体化合物不溶时也可用四氢呋喃、乙腈、水等。

氢键的存在对于控制有机固态结构起着非常重要的作用。这种氢键可在主体-客体分子间形成,也可在主体-主体分子间形成。伊特教授应用英国剑桥晶体数据库资料总结出各种氢键类型和氢键形成规律并应用共结晶化作为研究分子识别性质的手段。分子间氢键图式和分子聚集态结构可通过它们的氢键数目,位置和取向加以控制。根据氢键规律可观察到主客体间的选择性并可预言最终的聚集态。在这方面研究的主体分子有取代硫脲、酰亚胺、硝基苯胺等类化合物。客体分子有苯酚、羧酸、酰胺、吡啶、脲素、三苯基氧化膦、咪唑等。应用的共结晶化过程除溶液法外,还有固态法和熔融法。这方面的研究将在材料科学发展方面起重要作用。中国目前刚开始这方面工作的研究。

参考文献

- 1 Etter M C, et al. J Am Chem Soc, 1988, 110: 639
- 2 Etter M C. Acc Chem Res, 1990, 23: 120
- 3 张正之. 化学通报, 1990, 4: 18

4 Etter M C, et al. J Am Chem Soc, 1991, 113, 2586
(南开大学元素有机化学研究所张正之教授撰)

硒羰基化合物合成 synthesis of selenocarbonyl

compounds 硒羰基化合物顾名思义为硒碳双键的衍生物,按有机化学(IUPAC命名法则)来分类为硒酮(selones), 硒醛(selenoaldehydes), 硒酯(selenoesters), 硒代酰胺(selenoamides), 硒代羧酸(selenocarboxylic acid), 硒代碳酸酯(selenocarbonates), 硒脲(selenoureas), 硒代氨基脲(selenosemicarbazides), 硒代氨基甲酸酯(selenocarbamates), 异硒氰酸酯(isoselenocyanates), 硒代烯酮(selenoketenes)等。

硒羰基化合物合成研究早于20世纪初,但至今若与硫羰基化合物化学相比仍属凤毛麟角水平。主要原因有二:一是硫羰基化合物合成中广泛应用二硫化碳和五硫化二磷引入硫的试剂,二硒化碳不但恶臭而且易聚合,五硒化二磷却是极难溶解的物质,均不具备引入硒的试剂能力,而最广泛应用的试剂是硒化氢及其盐类,它是恶臭和极毒化合物,常使研究者望而生畏;二是许多硒羰基化合物极不稳定,在处理时常析出极细的红硒,所以常常在硒羰基化学之前再冠上一个“不稳定”形容词,这是由于硒羰基的2p-4pπ键比硫羰基的2p-3pπ键和羰基2p-2pπ键重叠偏小,从轨道电负性来分析,硒羰基比较接近硫羰基(表1),硒比硫是更大立体块,所以更迅速极化(表2),导致硒羰基化合物稳定性极差,它的化学特性经常出现反常,有时甚至难以预估,尽管如此,近年来还是有了大幅度进展,促进因素是它已显示可贵的生物活性,成为筛选抗肿瘤,抗人体衰老等药物一个重要化学领域,同时如同羰基化合物一样成为合成具有药用价值含硒杂环化合物的重要中间体,它在有机合成化学中已是一种新兴的有价值的定向和立体选择性的化学试剂。

表1 羰基、硫羰基、硒羰基化合物轨道电负性

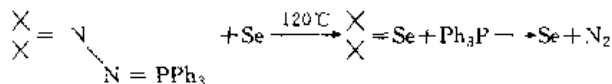
	C	O	S	Se
σSp^2	2.75	5.54	3.46	3.29
πP	1.68	3.19	2.40	2.31

表2 羰基、硫羰基和硒羰基化合物中立体因素

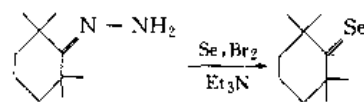
共价半径($10^{-10}m$)	O	S	Se
单键	0.74	1.04	1.17
双键	0.62	0.94	1.07

硒插入和挤出反应也是当今有机硒合成化学中一个重要课题,硒羰基化合物在氧化条件下硒常被氧挤出分子,析出红硒,相反在还原条件下却能挤出氧插入硒分子中,因此硒化氢成为引入硒的重要试剂来合成各种硒羰基化合物,但反常和难以预测结果经常发生,在1915年报导的硒甲醛是红色二聚体,直到1975年才证实是一个非硒羰基化合物(1,3,5环三硒烷),硒酮合成得到的却是二硒醚,这是由于所生成的硒酮被强还原性 H_2Se 还原成不稳定硒醇,在处理时被空气氧化而成,而溴代环丁烯二酮却生成一个共振稳定的硒酮,硒代苯甲酸也同样会发生二聚消去反应得到二酰基硒醚,它与硒代苯甲酸又能进一步反应得到二酰基二硒醚,尽管如此,它还是较成熟硒羰基化合物合成方法。美国抗癌新药Ebselen, Selenazofurin合成中仍采用。

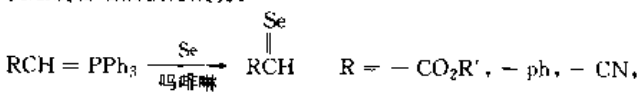
硒化氢是极毒,恶臭和还原性极强试剂,化学家一直在努力改进硒羰基合成方法,当然首先想到利用硒粉作硒引入试剂。F. S. Guzies等利用位阻性酮经除化后生成的磷叶立德(phosphoranylidene hydrazone)和硒粉在120℃反应获得硒酮,并良好得率,但机制不清,难度也较大。



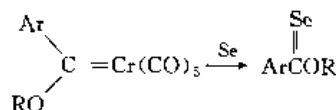
最方便制备立体位阻硒酮可用除, 35% 硒粉, 溴一起反应来制备, 得率一般在65%~80%左右。



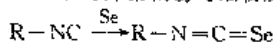
Okuma Kentaro 利用碱催化下元素硒与磷叶立德进行溶液反应制备硒酮获得成功。



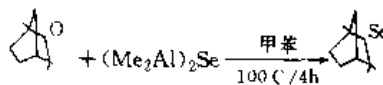
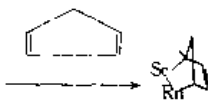
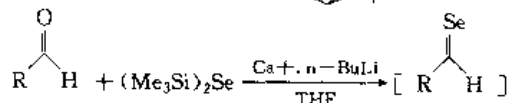
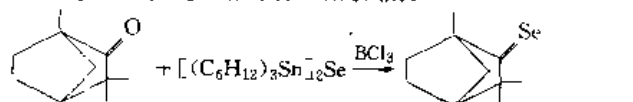
五羰基铬(O)芳基烷氧基卡宾和硒粉反应以低得率提供硒酮。



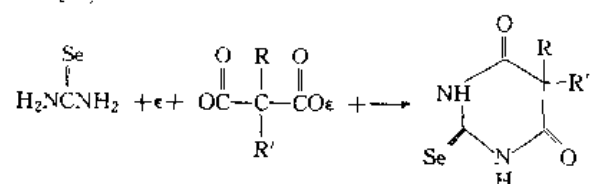
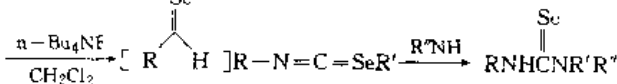
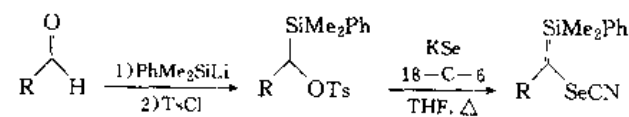
唯有异腈较易与硒粉反应成为异硒氰酸酯是常规方法之一。



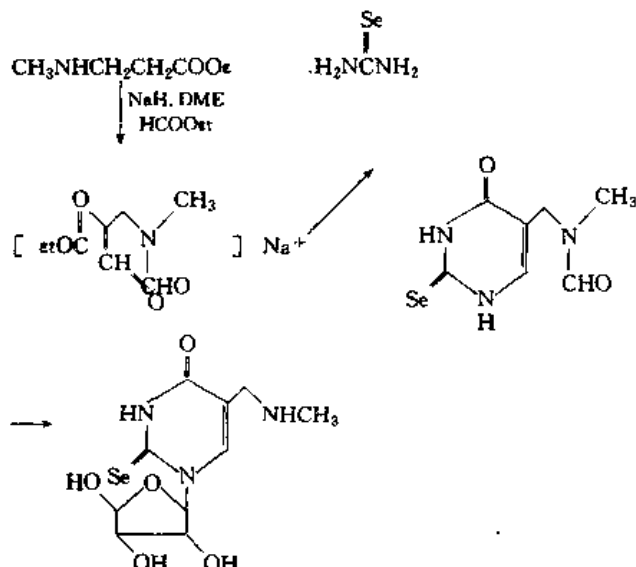
另一硒羰基合成方法是烷基金属的硒化物例(R_2Sn)₂Se, (R_2Al)₂Se, (R_3Si)₂Se 作为引入硒的试剂。



最后一个合成方法是通过硒氰酸酯, 异硒氰酸酯和硒脲等加成反应可衍生较高级硒羰基化合物。



美国在仿生合成富硒酵母中天然存在的5-甲基氨基甲基2-硒腺嘌呤就是通过硒酮加成环化反应来得到的。



硒有机化学在“硒，从微量元素到药物”研究中将有一个新的飞跃，硒巯基化合物合成化学研究也将成熟到工业生产的水准，为硒有机化合物药理学研究奠定坚实的基础。

参考文献

- 1 Silverman R B, et al. *Chemistry and Biology*, 1973, 245 ~ 304
- 2 Wittwer A J, et al. *Biochemistry*, 1984, 23:4650
- 3 Hennen W J, et al. *J Org Chem*, 1985, 50:1741
- 4 Guziec F S. *Organoselenium Chemistry*, Liotta, D, Eds. NY: John Wiley, Sons, 1987, 277 ~ 324
- 5 Paumier C. *Selenium Reagents and Intermediates in Organic Synthesis*. N Y: Pergamonpress, 1987, 3
- 6 Kentaro O. *Chem Lett*, 1988, 7:1145
- 7 Renji O. *Recent advances in selenoaldehyde chemistry*. Yuki Gosei Kagaku Kyokaiishi, 1988, 46:1149 ~ 1163
- 8 Masahito S. *化学と工业*, 东京, 1991, 44:230

(中国科学院上海有机化学研究所徐思羽副研究员撰; 丁宏勋审)

光诱导的化学合成 photoinduced chemical synthesis

光化学反应就是一类特殊的反应, 分子通过吸收光而活化, 因此, 只有被分子吸收的光对化学变化才有效, 也只有吸收了光的分子才得以活化、反应。光反应通常要求光的波长与分子的吸收相匹配, 如果分子不能吸收光, 则也可藉另一个能吸收光的分子依靠能量传递而使分子活化(光敏化); 对化学反应来说, 通常只有紫外或可见光才有效。

分子吸收光后变为激发态分子, 图 1 从¹S₀变为¹S₁, 随后的变化可以有各种途径。

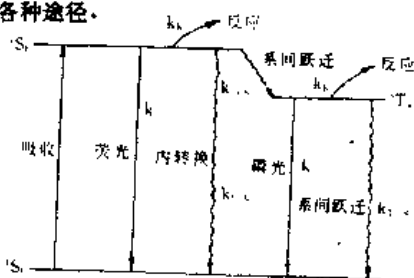
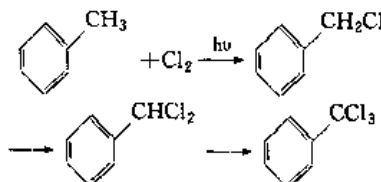


图 1

各 k 值为变化的速率常数, k_f 约为 10⁶~10¹²/s, k_p 为 10⁻¹~10⁶/s, k_{1C}, k_{1SC}, k_{1TS} 均与碰撞有关, 依赖于体系的压力, k_R 为反应速率常数(k_R^S 为单重态反应, k_R^T 为三重态反应速率常数), 若 k_R^S >> k_f, k_{1C}, k_{1SC}, 则激发态分子全部反应, 否则起反应的仅

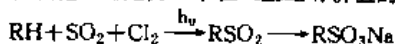
是部分激发态分子。如果光化学变化仅有上述过程, 则 Φ ≤ 1.0, k_R 愈大, Φ 亦愈大。如果光反应后还有次级过程, 例如光分解生成了活泼的自由基并随之而发生了链反应, 则量子产率 Φ 可以大于 1。因此光诱导反应通常可分两类: 引发链反应和激发态分子的反应。

引发链反应 由于此类反应的量子产率高, 光反应的能垒低, 易在工业上实现。1947 年实现第 1 个工业化的光化学合成是甲苯的氯化。



类似的反应还有石蜡的氯化(生成氯化蜡), 苯与氯合成 666 (现已停产), 甲烷的氯化等。氯化反应的量子产率通常大于 100, 有些高达 2 500, 且反应所用波长为 313nm, 365nm, 为中压汞灯的主辐射线。此类光源的电光效率高(10%~20%)。

磺氯化反应是另一个在工业上有价值的反应:

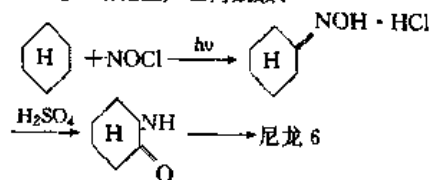


此反应量子产率 ~ 2 000, 因此, 耗电仅需 30W-h/kg 产品。与磺氯化反应相似, 磺氧化反应也有高的量子产率。反应为 RH + SO₂ + 1/2O₂ → RSO₃H, 反应在烃/水相界面上发生, 使用高压汞灯, 一个 40kW 的汞灯可以年产 1 600t 产物。效率甚高。

光引发链反应的特点是: 反应可在低温或常温下进行, 因而可改善反应的选择性; 不另加引发剂, 因而保持了体系的洁净; 引发自由基浓度可随光强度变化而任意调节。近年来, 光引发链反应取得了一些有价值的进展。(1) 1,2 二氯乙烷裂解制氯乙烯: 反应一般用热裂解方法制备, 反应温度 500~550℃, 因而副反应多, 产品氯乙烯中杂质含量高达千分之几, 1980 年 Wolfrum 采用光引发使反应温度降至 350℃ 左右, 大大减少了氯乙烯中杂质的含量。由于反应链长达 10³, 虽然使用了昂贵的激光光源, 但仍有一定经济性。近年来改用其它廉价光源和在体系中加入 Cl₂, 也同样实现了低温反应, 改善了选择性。(2) R₂X + C₂F₄ 的调聚反应: 碳链长度为 6~10 的氟碳化合物有多种用途, 它们通常用调聚方法合成。对比热反应(~200℃)与光反应(常温)结果可见光诱导反应有好的结果。例如 CF₃I + C₂F₄ 用热反应, 产物碳数以 13~21 为主, 但用光引发则以 3~7 为主。又如 BrC₂F₄Br + C₂F₄ 用热反应, C₈~C₁₀ 化合物的收率低(<10%), 用光引发时, 籍改变光强的配比, 可以使 C₄, C₆, C₈ 产物的选择性高达 90%, 80%, 50%, 单程产率也可达到 50%, 45%, 31%。

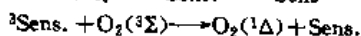
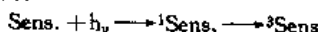
激发态分子的反应 此类反应的光量子产率小于 1.0, 因而适于合成价格高, 产品吨位小的产品。

(1) 光亚硝化生产己内酰胺:



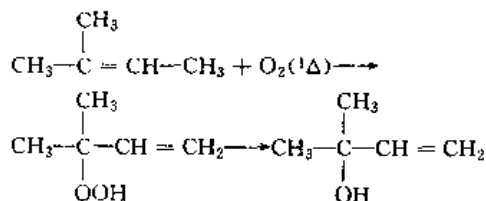
反应第一步为光化反应, 适宜波长 510~530nm。可选用碘化铊一汞灯。反应的量子产率为 0.8, 取决于光源的电光效率, 每千克环己酮的电耗为 3~5°, 所耗电费仅占己内酰胺售价的 5~8%, 目前已大规模工业化生产。

(2) ¹ΔO₂ 的反应: 氧分子的电子激发态可以通过光敏化方式生成

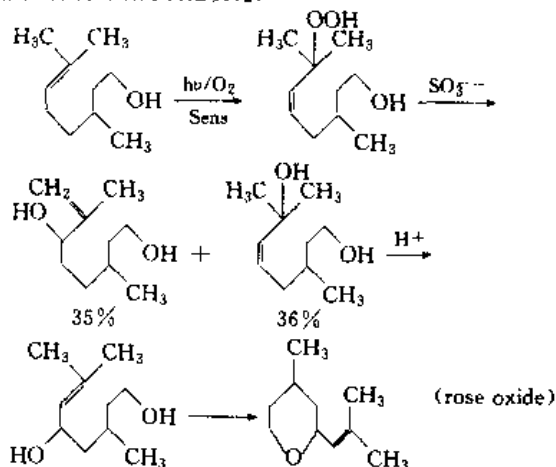


基态 O₂(三重态)通过与三重态的光敏剂(³Sens)相碰撞而转变为激发态(¹Δ)。光敏剂为吸收强的染料(水溶性的有玫瑰红、亚甲

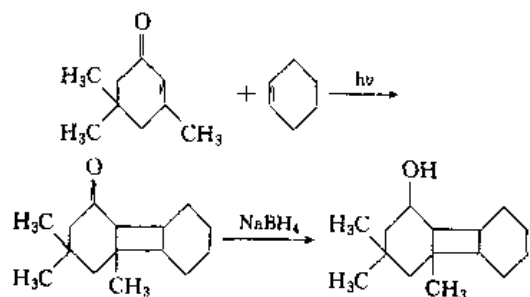
基兰等,油溶性的有四苯基用,9,10二氧蒽等),过程的量子产率接近1,生成的 $^1\Delta O_2$ 与烯类双键可发生氢提取和加成反应(简称ene反应),例如



此反应生成烯醇并使双键易位。反应的选择性高(接近100%),生成的烯醇脱水可制造异戊二烯。在电费低廉时不失为一条合成异戊二烯的新路线。这种ene反应使双键选择性地易位,在精细化学品合成中是有意义的,例如以下反应可藉ene反应从香茅醇(价低廉)合成高级的氧化玫瑰。

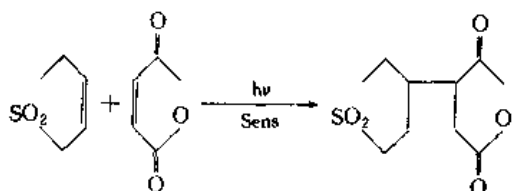


(3) 光环加成反应,烯烃与另一双键化合物(烯,芳烃或羰基化合物)在光作用下可发生光环化加成,以下二例是有意义的工作:



产物2,2,4三甲基三环十二烷醇-6是具有檀香味的香料。改变烯烃或烯酮的结构可以合成出一系列具有不同香味的香料。

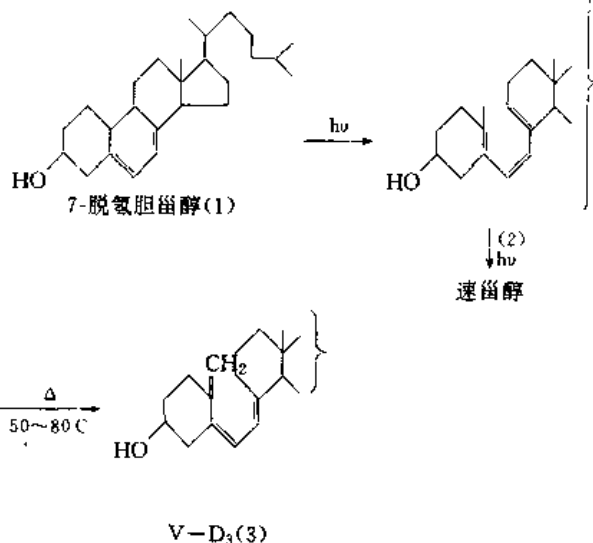
另一反应:



此反应从两个较常见的原料出发生成植物生长调节剂,是精细化工合成的又一例子。

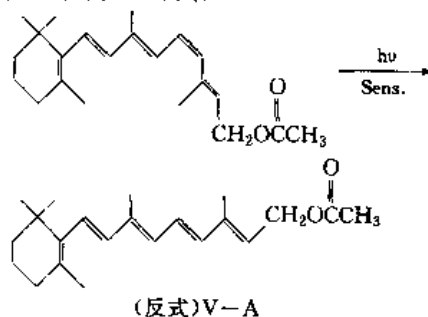
(4) Vitamin D及A的合成;目前已用于工业生产的光化学反应例子:

V-D₃合成如下式,利用光使(1)开环再加热而得稳定的V-D₃。



反应中(1)(2)均能吸收光,(2)的光解产物是无用的速甾醇。选择波长使利于(1)而不利于(2)的吸收(例如296nm)可提高V-D₃的收率。

V-A的合成是利用光异构化使顺式(无生理活性)变为反式(有生理活性),如下式:



激光诱导的化学反应 激光器的高光强,高度单色性在光化学中产生了以下多方面的特色的工作。

(1)在混合物中使一种或2种物质反应的技术,如同位素分离,激光法可使单级浓缩系数高达 2×10^4 (H-D分离),分离铀及 ^{13}C 均已达到可以实用的地步。我们还可以列举硅烷中用激光法去除杂质($\text{B}_2\text{H}_6, \text{AsH}_3, \text{PH}_3$)的工作,杂质的分解较硅烷本身快 $10^2 \sim 10^4$ 倍。

(2)在分子内选择性地断裂某一键的工作(即键选择性反应);用“注入”不同的光使分子选择地断裂不同的键是许多人的愿望,长期以来,实践证明总是在最弱键处断裂。1986年,李远哲和他的同事(E. J. Butler)发现了210nm激光使 CH_2BrI 只断裂C-Br键,248nm使 CH_2BrI 优先断裂C-I键。实现了第1个键选择性断裂。以后,又发现了几个新的例子,这表明,有些分子可能按预设计的方式“剪裁”,这是光诱导反应的新领域。

(3)对传统光反应的改进与光制备催化剂;例如:2,4,5-T的光分解,用汞灯虽可以进行,但由于波长不匹配,600W汞灯的光解效果不如40mW的特定波长的激光器,而对于并无催化活性的 $\text{W}(\text{CO})_6$,只要选择特定波长的激光照射一段时间后就变为有催化活性的 $\text{W}(\text{CO})_5$,后者使丁烯-1可以异构化。类似的例子是戊烯与 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 在无光照射时,戊烯异构化反应慢,用激光照射几个脉冲后此反应速度大增,表明 $\text{Fe}(\text{CO})_5$ 变为了高活性的催化剂。

现时限制光反应工业应用的主要原因是光源价格高,电光效率低(0.1%~10%),光功率小,且波长可变性差。由于近年已开发了有特色的光反应,电光源的不断改进也使未来光反应可能在

精细化学品的合成和其它只有靠光才能实现(如键选择性反应)的反应上得到应用。

参考文献

- 1 Anderson Jr W T. Ind Eng Chem, 1947, 39: 844
- 2 Ito Y, et al. DAS 1468737, 1962
- 3 Fischer M. Angew Chem Int Ed Engl, 1978, 17: 16~26
- 4 Wolfrum J. DE 2938353, 1980
- 5 Butler E J, et al. J Chem Phys, 1986, 84: 4104
- 6 Fuss W, et al. DE 4025154, 1990

(中国科学技术大学张临阳教授撰)

小分子活化

activation of small molecules 一些简单的小分子,如 N_2 , CO , CO_2 , O_3 , H_2 , CH_4 , SO_2 , NO_2 , NO , CH_3OH , 烯烃, 炔烃和腈等,在一定条件下通过和过渡金属配位而获得活化,从而可以进行插入、氧化加成和还原消除等一系列基元反应,使许多常规有机合成难以实现的反应,通过配位和活化而易于进行。这些分子大量存在于自然界中,且是构成人类赖以生存的 C、H、O、N 等元素最丰富的资源。合理利用这些资源,开辟温和条件下高活性、高选择性催化反应的新体系和新工艺,变革目前现有的那些反应条件苛刻、能耗高、原料消耗大和污染环境的旧工艺是历史赋予化学家们的使命。由于对小分子活化所开展的研究,已经发现了一批过渡金属络合物催化剂,它们在羰基合成、氢甲酰化、歧化、异构化、氢化、环化、聚合、氧化、还原等多种反应中,在比较温和的条件下,具有高活性和高选择性。进一步研究小分子的配位活化、反应及其规律,可以开发新的合成方法和化工过程,从而促进以这些小分子直接为原料的有机化学工业反应的发展。同时,小分子配位活化的研究和开辟新能源、发展新价键理论和结构理论、环境保护以及医药卫生等方面有密切的关系。从长远观点来说,通过小分子配位活化的研究,有可能在氮的固定,光合作用,氧的输送与贮存,新陈代谢,能量贮存与转化,金属酶的结构与功能以及生命现象的奥秘等世界重大基础课题上带来突破。例如,在温和条件下合成氨,从 CO_2 和水合成碳水化合物,甚至从 N_2 , CO_2 和水直接合成氨基酸,以期实现人类多年来梦寐以求的理想。此外,借助于生物化学研究中的信息,利用过渡金属有机络合物具有供一受电子的协同作用,电子结构和空间结构可调变的特点,模拟金属酶的结构和功能,既可作为天然的酶催化反应模型,用于活化小分子实现类酶催化反应,又可作为基础研究与重要的工业过程之间的媒介。因此,研究小分子的配位活化,反应及其规律,不仅有重要的学术意义,而且对未来化学工业过程的发展和变革必将产生巨大的影响。

化学模拟生物固氮是当代化学学科中少数几个重大基础课题之一。人们希望通过研究,弄清生物固氮的酶催化机理,能动地进行络合催化剂的分子设计,研制出能在温和条件下操作的固氮催化体系,最终实现常温常压下直接从氮和水进行氨的工业生产。目前的研究从生物和化学两个方面同时进行。在生物方面,现在正酝酿着一个重要突破,1977年从钼铁蛋白中分离出分子量低于 2000 的铁钼辅基,为阐明固氮酶活性中心结构提供了有利条件。在化学方面,仍在探索过渡金属对分子氮的配位活化规律。1965年 Allen 报道了第 1 个分子氮络合物 $[Ru(NH_3)_5(N_2)]^{2+}$ 之后,在 10 年左右的时间里,报道了数百个分子氮络合物,几乎遍及所有的过渡金属。研究表明:氮分子与过渡金属的配位主要有 η^1-N_2 (端基配位) 和 η^2-N_2 (侧基配位) 两种形式。 η^2-N_2 的配位活化比 η^1-N_2 要充分些,而 η^1-N_2 和 η^2-N_2 混合型配位又比单独的 η^2-N_2 更为有效。在 1978 年卢嘉锡提出了“网兜”结构模型,是一种 $MoFe_3S_3$ 巢式类立方烷原子簇结构形式,作为固氮酶活性中心的结构模型。此后,这个模型被进一步发展为“双网兜”结构模型,是一种 $MoFe_8S_7$ 双巢式类立方烷原子簇结构形式,含有两个钼原子的孪生双原子簇。同年,蔡启瑞从催化的基本原理出发,认为固氮酶与 N_2 应以 $\mu^3(\eta^2-N_2)$ 类型络合,提出了一种立方烷原子簇结构模型。为此,人们一方面着手合成含铁钼硫的具

有理论模型结构的原子簇模拟物或对介固氮酶活性中心结构或功能有用的化合物,另一方面,利用各种结构手段积极研究这些模拟物的特征,由此总结各种规律,力求合成出具有固氮酶活性的更为合理的模拟化合物。80 年代以来,人们已逐渐从研究个别的钼铁硫化合物发展为对系列化的原子簇化合物进行规律性的探讨,以便最终实现生物固氮的化学模拟。

世界能源结构正逐步从石油向煤过渡,与此相适应的化学工业基础原料也将出现从油向煤的转变。在这种情况下,从煤出发的化学,主要是一氧化碳的化学成为众所瞩目的课题。在这方面,主要进行 CO 的活化及配位 CO 的反应,以及合成气(以 CO 与 H_2 为主的混合物)化工的催化剂开发。第 1 个金属羰基化合物 Ni(CO)₄ 的合成虽然早在 1890 年已经成功,100 年来人们合成了大量羰基络合物,广泛考察了结构与性能的关系,但是,真正地系统研究 CO 的配位活化却是近年来的事。已经知道,CO 的活化程度和它们的配位方式有密切的关系。CO 在金属上的配位已知有如下几种形式:端基配位,双边桥式配位,平面桥式配位, σ, π -桥式配位(η^2 -配位)。端基配位是最普通的配位形式,而桥式配位对 CO 的活化更为有效。研究金属对 CO 的配位活化,对于了解从 CO 出发的多相催化反应的机理和指导工业催化剂的筛选有重要意义。在 CO 的多相催化反应中,CO 化学吸附于金属催化剂表面,实际上形成了金属羰基配位络合物,使 CO 获得活化,接着进行后续反应。在各种反应中,配位 CO 的氢化反应是当前主攻方向,因为它和 CO 的氢化为中心的 C₁ 化学有密切关系。

二氧化碳和碳酸盐是地球上碳的主要存在形式,比煤和石油中的碳要多成百上千倍。因此,从长远观点看,二氧化碳和碳酸盐是未来有机合成工业的主要碳源。据最新统计,由于现代工业的发展,现在每年向空气中排放的 CO_2 约为 $5 \times 10^{12} kg$,估计 21 世纪中期将达到 $4 \times 10^{13} kg$,这不仅使碳资源的极大浪费,而且也严重地污染了大气,由此所引起的“温室效应”可能使全球生态环境带来严重影响。还有,天然气、油田气、合成氨工业、炼铁工业等都有大量的付产物 CO_2 ,有的浓度高达 90% 以上,价廉易得,急待利用。此外,模拟光合作用使 CO_2 在温和的条件下高效地转化为有机物质是意义深远的基础性课题。因此,研究 CO_2 的活化规律,开发它的应用,不仅意义重大,而且十分迫切。由于 CO_2 是含碳化合物燃烧氧化的最终产物,比较稳定,难以活化和利用。第 1 个过渡金属 CO_2 络合物是由苏联学者 Volpin 在 1969 年合成的,其分子式为 $L_3Rh_2Cl_2 \cdot CO_2$ 。此后,经过 20 多年的努力,人们运用各种过渡金属催化剂,使 CO_2 分子中不饱和的双键得以活化,实现了许多催化反应,从 CO_2 可以合成甲醇,甲酸,甲烷,内酯,酰胺,聚碳酸酯,聚氨基甲酸酯,聚酯等。尽管催化效率还不够高,难以立即投入应用,但已出现了良好的前景。目前,对 CO_2 活化的研究主要有 3 个方面:(1)过渡金属与 CO_2 配位络合物的合成,结构与反应;(2) CO_2 对 M-X 键的插入反应(X=Cl, H, N, O 等);(3)开发用 CO_2 进行的催化有机合成反应。

分子氧的活化是处于生物化学、催化和金属有机化学的边缘领域。在生物体内各种氧载体、氧化酶、加氧酶、过氧化酶和超氧化物歧化酶与分子氧的活化密切相关。这些酶对于调节生命活动有极重要的功能。例如,血液中血红蛋白能固定大气中的氧气,具有贮存和输送的功能,是由于血红素铁能可逆地生成双氧络合物。因此合成相应的过渡金属络合物作为氧载体的模型络合物,研究其结构与性能的关系,具有一定的意义。在化工生产中,许多催化氧化反应和分子氧的活化也有密切联系。据统计,全世界生产的主要化学品中有 50% 以上是和选择性氧化过程有关的。 O_2 与过渡金属络合物不论是以侧基配位还是端基配位,结果都生成 σ 键。净结果是由 O_2 的成键轨道或孤对轨道转移部份电子到金属原子的反键 π^* 轨道,中心金属也程度不同地向 O_2 输送电子,使配位双氧变为超氧型或过氧型的配位体,从而得到活化。1963 年, Vaska 报道了第 1 个例子,可逆的单核双氧络合物 $Ir(Ph_3P)_2(CO)(Cl) \cdot O_2$ 。近年来还出现了一种活化氧的新途径。在过渡金属络合物中,氧从含氧配体(如硝基)向底物转移,然后在氧的

存在下使还原形式的配位体再氧化,从而构成循环。这种过程实际是分子氧对底物的间接氧化。目前,研究分子氧的催化活化的热点是:(1)过渡金属络合物与分子氧络合活化成超氧、过氧或单氧络合物,改变氧的自旋状态和反应能力,在温和条件下可使有机物发生选择性催化氧化;(2)利用氧化剂中的活泼氧作为氧源与过渡金属形成单氧络合物活性物种,使底物发生选择性催化氧化,这使得过去的某些氧化反应需要用化学计量的高价过渡金属氧化剂,变为使用合适的氧源配合上少量的过渡金属催化剂,这对降低成本和减少污染都是十分有利的;(3)不对称催化氧化和催化环氧化。

甲烷是天然气的主要成份。目前在工业上对甲烷及其同系物的化学加工,主要使用高温裂解、电弧、等离子焰等手段打开C-H键,反应条件十分苛刻,产物也很复杂。因此,利用过渡金属与甲烷络合,使之活化,能在温和条件下进行各种有机合成反应,可为甲烷及其同系物的化学加工利用开辟新的途径。由于C-H键的离解能比其他化学键高,最难活化,因此,直到1982年,关于C-H键的活化还没有很大的进展。1983年,Bergman发现用铈的络合物在光照的条件下能够对烷烃中的C-H键进行氧化加成;Graham和Jones也取得类似的成功;Watson用稀土金属络合物使一系列有机化合物分子中的C-H键获得了活化,等等,从而使C-H键的活化研究出现了重要的突破。到目前为止,C-H键的活化及官能团化反应,几乎都是化学计量反应。虽然报道了少数催化反应实例,但催化效率很低,离工业应用还有很大距离。当前的任务是,要大量积累实验事实,寻求C-H键的活化规律。

NO、NO₂和SO₂的活化研究得比较少,它们与过渡金属络合物的反应往往得到插入反应产物。研究它们的配位、活化与反应对于环境保护有一定的意义。

烯、炔、腈和其他小分子相比,较为活泼,它们与过渡金属形成的配位络合物很不稳定。因此,在催化反应中人们往往通过对反应产物的分析,推测反应机理,认为存在配位活化的中间步骤。但是,这些中间体难以分离和鉴定。

氢分子的活化与催化氢化反应有密切的关系。人们曾认为催化氢化过程可能是:氢分子首先与配位不饱和的中心金属配位,获得活化,然后在反应过程中H-H键断开而形成氢化物。证实这种机理的关键是分离和鉴定这种反应中间体。人们经过多年的努力,终于在1983年获得突破。美国新墨西哥洛斯阿拉莫斯国立实验室的化学家们通过振动光谱、X射线晶体结构分析、单晶中子衍射及质子核磁共振等手段证实,在一种钨或钨的八面体络合物中,有两个配位体是庞大的二烷膦基,处于相反的位置,有3个是羰基配位体,最后一个配位体是与氢分子的腰部相结合的。

总之,小分子活化是一个十分重要的研究领域,在这个领域内的每一个突破,不仅能推动化学学科的发展,而且将为社会带来显著的经济效益。目前,关于小分子活化的研究基本上仍处于初级阶段,有很大的发展前途。例如,小分子的配位与活化应当与中心金属的氧化态和电子构型、配位数、配位体的种类和立体构型等因素有密切关系,但是,目前人们关于这些仍所知甚少,没有多少可以总结的规律。这个领域就象一片广阔而肥沃的田野,等待着化学家们去耕耘和开发。

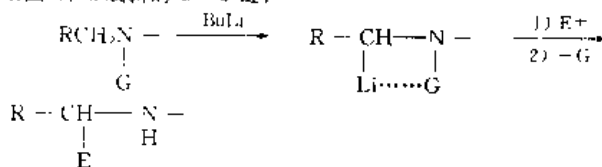
参考文献

- 1 Volpin M E, Kolomnikov I S. Pure and Appl Chem, 1973, 33(4):567
- 2 Inoue S, Yamazaki N. Organic and Bioorganic Chemistry of Carbon Dioxide. Tokyo: Kodansha Ltd, 1982
- 3 钱延龙. 化学通报, 1985, 6:6
- 4 黄耀曾, 钱延龙主编. 金属有机化学进展. 北京: 化学工业出版社, 1987: 143~161
- 5 钱延龙, 廖世健主编. 均相催化进展. 北京: 化学工业出版社, 1990: 233~304

(华东理工大学博士生导师钱延龙、黄吉玲教授撰; 黄耀曾院士审)

甲脒化学及生物碱的不对称合成

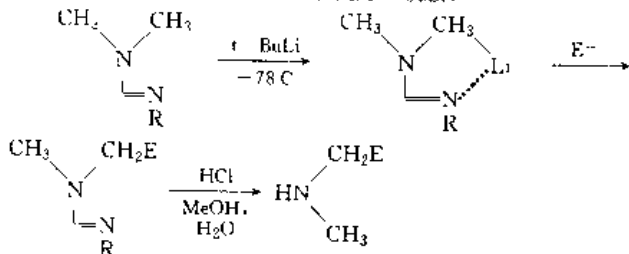
formamidine chemistry and asymmetric synthesis of alkaloids 含氮化合物的α碳原子受各种活化基团的影响,在强碱(如LDA, BuLi等)的作用下,可失去αH,生成碳负离子,受亲电试剂进攻,再除去活化基团,即形成新的C-C键;



活化基团: G = -N=O, -C(=O)CR₃, -P(=O)(NMe₂)₂, -CH=NR 等。

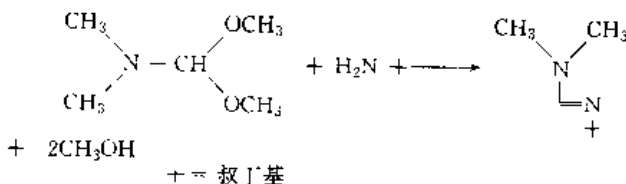
活化基团的作用是:使氮原子带有部分正电荷,增大αH的酸性。通过与碱金属的络合使用,有利于α碳负离子的生成与稳定。因此,要求活化基团G本身不得带有α酸性质子,与强碱和亲电试剂不起作用,并且易于引入,也易于除去。

亚硝基和酰基皆有活化作用,但亚硝胺有致癌作用,酰胺有难以水解除去之虞。1980年迈耶斯(A. I. Meyers)以脒代替结构类似的酰胺获得成功。如二甲胺基甲脒,在低温下与强碱(t-BuLi)作用后,生成偶极稳定的碳负离子,再与亲电试剂作用,经还原或腈解或水解,很容易得到取代的二级胺:

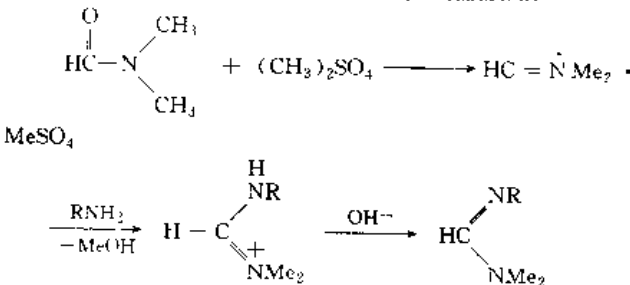


甲脒法比其它活化基团要灵活方便,用途更广。它易于由胺生成,也易于除去脒基而得到取代的胺。如果用手性胺形成甲脒,还可用于不对称合成,尤其用于天然存在的生物碱的合成。

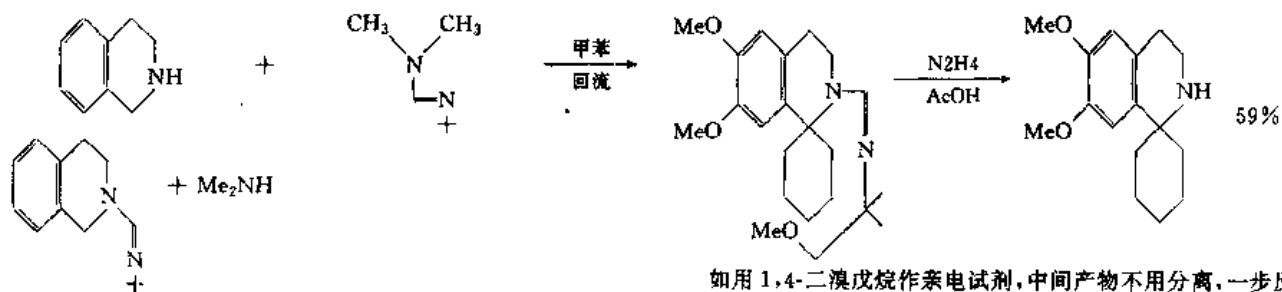
非手性甲脒的合成及应用 甲脒可以用以下方法制备:(1)直接用N,N-二甲基甲酰胺二甲基缩醛(DMF-DMA)与一级胺反应,如:



(2)用DMF与硫酸二甲酯生成盐,然后与一级胺反应:

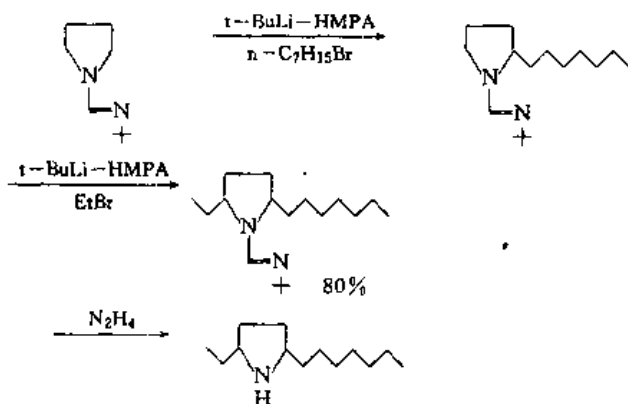


(3)用二甲胺叔丁基甲脒与其它二级胺在甲苯中回流反应,可得到此二级胺的甲脒:

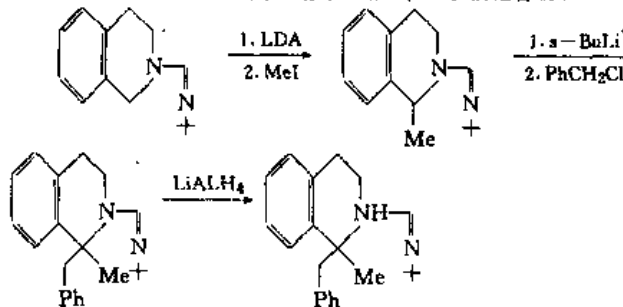


94%

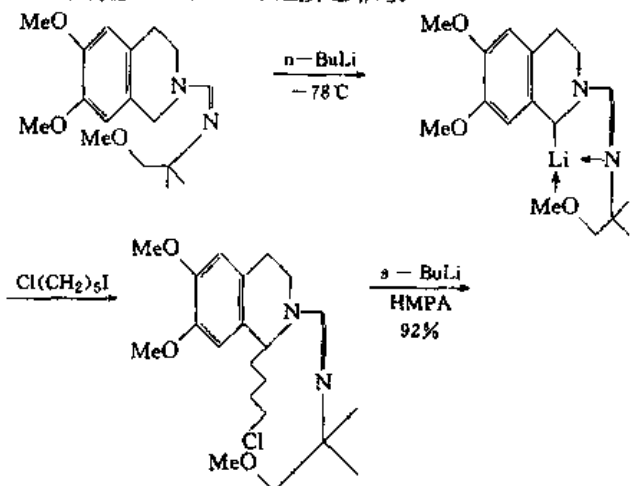
所得到的甲脒,在强碱作用下生成碳负离子,与亲电试剂作用后可以得到各种 α -取代甲脒,经肼解或水解后即得 α -取代的二级胺,例如:



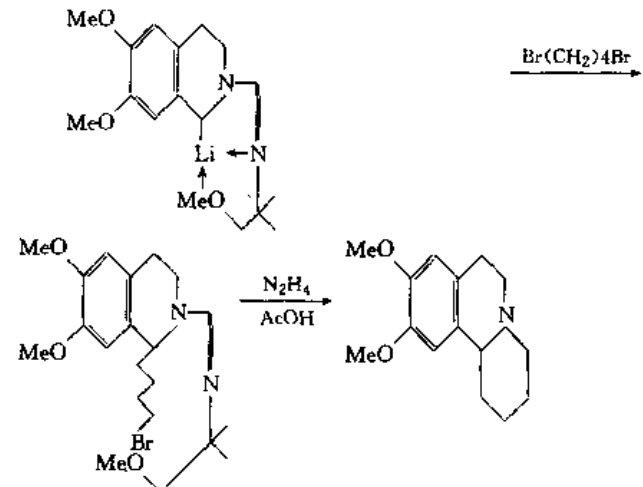
1,2,3,4-四氢异喹啉的甲脒在LDA的作用下,生成的碳负离子与MeI作用,得到1-甲基四氢异喹啉的甲脒,它还可以再次烷基化,生成1,1-二取代四氢异喹啉,即 α -季碳化合物:



如应用双官能团的亲电试剂,可制得螺环和稠环异喹啉衍生物。例如用 $\text{Cl}(\text{CH}_2)_5\text{I}$ 作亲电试剂可得到螺[环己烷-1,1'-(6',7'-二甲氧基-1',2',3',4'-四氢异喹啉)]。



如用1,4-二溴戊烷作亲电试剂,中间产物不用分离,一步反应可制得四氢异喹啉稠环化合物。



手性甲脒的合成与应用 如果以手性胺来制取甲脒,得到的手性甲脒可用在不对称合成中,以制取手性化合物,首先迈耶斯等研究比较了各种手性助剂对产物对映体过量的影响,他们将手性助剂制成四氢异喹啉的甲脒,在与LDA反应后,再和MeI反应,肼解得手性的1-甲基四氢异喹啉,在高效液相色谱手性固定相上测得%ee,各种手性试剂对1-甲基四氢异喹啉%ee的影响如下表所示。

从测得的%ee(HPLC)可以看出,最佳的助剂是缬氨酸的叔丁醚和BISPAD,而最差的是 α -苯基乙胺,其对映体过量仅只有 $\leq 10\%$ 。助剂含醚氧者一般皆有较高的%ee,可见醚氧的络合作用对提高%ee有明显的效果。如以缬氨酸的叔丁醚作为助剂,用各种卤代烃使四氢异喹啉发生1-烷基化,所得产物的%ee均在93以上:

R	%ee(HPLC)
	84
	88
	74
	99

R	%ee(HPLC)
	10
	99

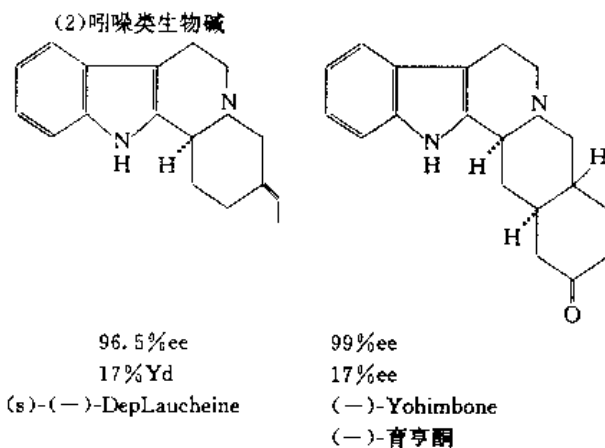
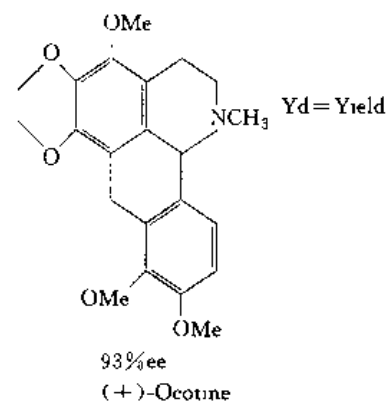
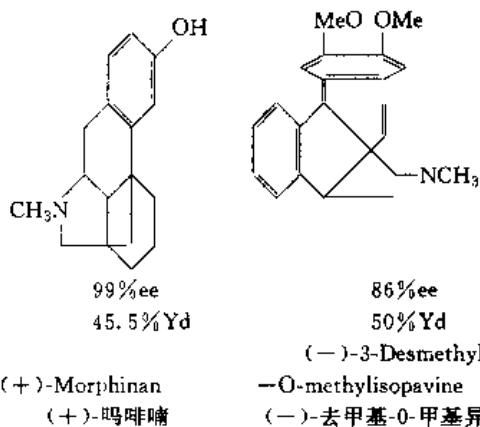
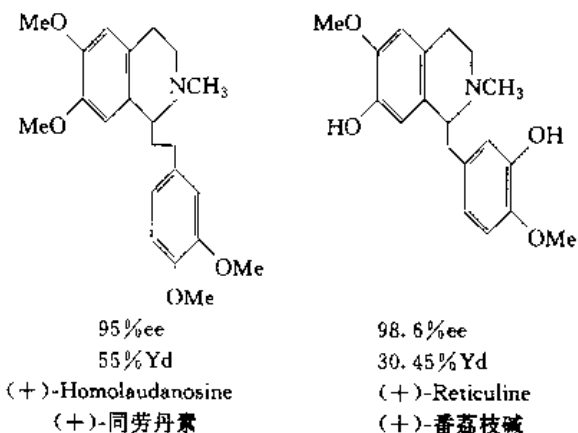
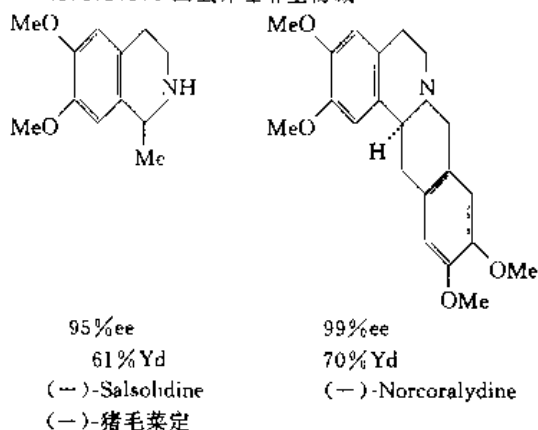
缬氨酸叔丁酯四氢异喹啉甲脒对1-烷基化产率和%ee的影响如下表所示:

RX	R	%产率	[α] _D	%ee (HPLC)
MeI	Me	50	-71.3°	99
n-BuI	Bu	56	-78.4°	96
CH ₂ =CH-CH ₂ Br	CH ₂ =CH-CH ₂	63	-81.3°	96
PhCH ₂ Cl	PhCH ₂	66	-62.2°	98
PhCH ₂ CH ₂ Br	PhCH ₂ CH ₂	67	-23.5°	93

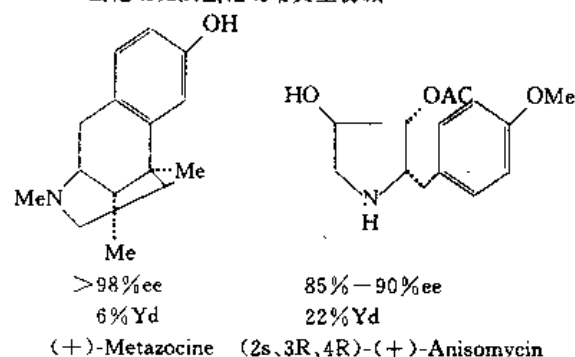
从以上所列数据可以看出,虽然手性中心距α-碳有一定距离,但在此甲脒中有适宜作配体的基团,它的络合作用使其有一个为锂化和烷基化所需要的空间排列,也就是说在此手性体系中,由α-碳形成的碳锂键会置于一个手性环境中,当它与亲电试剂作用时必有一高度非对映的立体选择性,除去此手性助剂后,便可得到高对映体过量的α-烷基胺。

用甲脒法不对称合成天然生物碱 含氮杂环手性甲脒作为不对称合成的媒介,已有了相当出色的成果,合成了四氢异喹啉类、吲哚类、八氢异喹啉类、氢化吡啶和氢化吡咯类生物碱。已合成的各类生物碱及它们的产率和对映体过量列举如下:

(1)1,2,3,4-四氢异喹啉生物碱



(3)氢化吡啶及氢化吡咯类生物碱



由此可见,用甲脒法合成天然生物碱,具有很高的立体选择性,是成功的不对称合成方法。迈耶斯教授对手性甲脒1-烷基化的反应机制作了研究,已有初步结论,他们正继续深入研究该反

应机制,与此同时,还要寻找新的手性助剂和合成季碳类型的螺环生物碱和稠杂环生物碱,以扩展现有的研究成果。

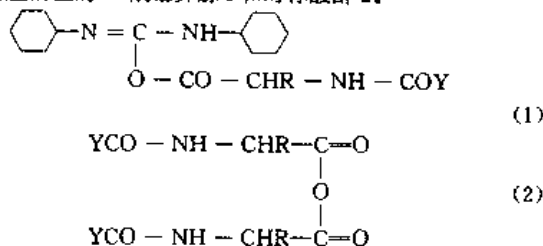
参考文献

- 1 Meyers A I, et al. J Amer Chem Soc, 1980, 102, 7125
- 2 Meyers A I, et al. Angew Chem Int Ed Engl, 1984, 23, 458
- 3 Meyers A I. Aldrichimica Acta, 1985, 18, 59
- 4 Meyers A I, et al. Tetrahedron Lett, 1985, 26, 3295
- 5 Meyers A I, et al. J Amer Chem Soc, 1987, 109, 1263
- 6 Meyers A I, et al. J Heterocycles, 1989, 28, 295
- 7 Meyers A I, et al. J Org Chem, 1990, 55, 4218

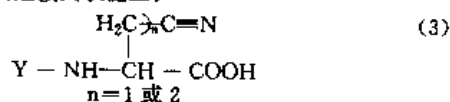
(北京师范大学杜宝山教授撰, 戚慧心审)

固相肽合成中的接肽方法 coupling methods in solid-phase peptide synthesis 固相肽合成法 (solid-phase peptide synthesis, SPPS) 自 1963 年由梅里菲尔德 (R * B * Merrifield) 首次提出其设计思路至今, 经过 30 余年多肽化学工作者的改进和完善已成为一种十分重要和常用的多肽合成技术。其发展和推广除了归功于种类繁多的固相载体、肽链在载体上的连接和解脱方法, 以及各种新型、优异的 α -氨基与侧链保护基的出现外, 还应归功于各种接肽方法日趋成熟和不断创新。在 SPPS 中得到普遍应用的接肽方法主要有 4 种: (1) 直接缩合法 (In situ 法); (2) 对称酸酐法; (3) 缩合试剂/添加剂法; (4) 活化酯法。

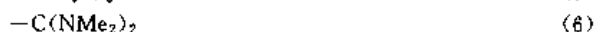
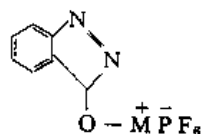
直接将 N, N'-二环己基碳二亚胺 (DCC) 和 N^o 保护的氨基酸的二氯甲烷溶液 (有时需加部分 DMF 助溶) 加入树脂中搅拌反应是 SPPS 中最早的方法 (in situ DCC 法)。所经过的活化中间体为高反应活性的 O-酰基异脲 I 和对称酸酐 2。



In situ DCC 法操作简便, 反应速度快, 产率高, 因而至今一直得到广泛的应用。但主要缺点是: (1) 在反应中生成的副产物二环己基脲在接肽溶剂二氯甲烷中的溶解度很小, 要将其洗涤除去需要花费大量的溶剂和时间, 甚至虽经多次洗涤, 仍会有少量吸附在树脂内部的空隙中而影响后反应。因此发展了生成的脲能溶于二氯甲烷的碳二亚胺型缩合试剂, 如萨拉坦可斯 (D. Sarantakos) 等 1976 年发现的二异丙基碳二亚胺; 伊泽德白斯克 (J. Izdebski) 等 1984 年和 1989 年发现的特丁基乙基碳二亚胺和特丁基乙基碳二亚胺。(2) 活化和缩合在一起进行, 消旋副反应的产物不能预先除去, 就存在连接到肽链上的危险。(3) 当羧基组分为 N^o-保护的 Asn 和 N^o-保护的 Gln 时, 不能用此法接肽, 因为二者在用 DCC 活化时, 可以发生脱水副反应生成腈化的 3,3 可以再次被 DCC 活化而连接到肽链上。

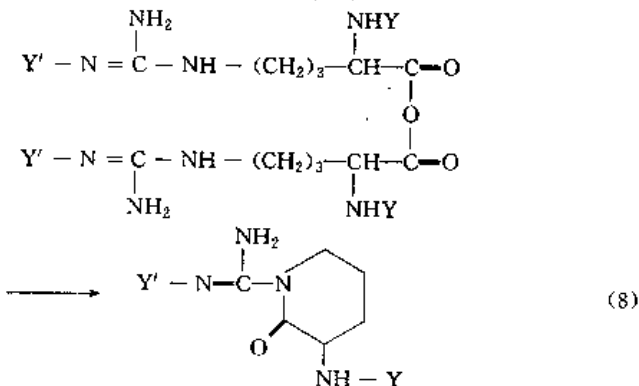


鉴于上述缺点, 人们又研究发展了其他类型的缩合试剂, 其中在 In situ 法中得到应用的有 Bop(4), PyBop(5), HBTU(6) 和 Bop-Cl(7)。

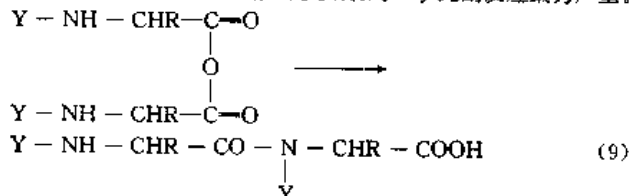


1988 年阿恰纳 (H. Echner) 采用 In situ Bop 法合成了含 28 个残基的胸腺素 α_1 , 认为该法尤其适合连续流程的固相合成技术。连接 N^o-保护 Glu 和 His (Tos) 时, 和 DCC 法相比消旋产物比例降低。而且连接 N^o-保护的 Ser, Thr, Tyr 时, 这些氨基酸的侧链羟基可不加保护。Bop 法的缺点是其反应副产物为致癌化合物 HMPA, 同时也不适用于 N^o-保护 Asn 和 Gln 的接肽。用 PyBop 代替 Bop 则生成的副产物毒性大大降低。HBTU 法比 Bop 法更为有效, 接肽时氨基酸的侧链羟基也无需保护, 而且适用于 Gln 和 Asn 的接肽。其反应副产物无毒且溶于水和二氯甲烷, 易于除去。Bop-CE 特别适用于立体位阻大的 N^o-保护氨基酸的接肽, 但其缺点是有消旋副反应。添加 HOBr 或咪唑可以降低产物的消旋程度。

鉴于 In situ DCC 法实际上主要经过对称酸酐 2 进行的事实, 1971 年威拉德 (T. Wieland) 等提出了对称酸酐法。最常用的实验步骤是将 N^o-保护的氨基酸和 DCC 按 2:1 的比例在二氯甲烷中 0°C 反应 15~20min, 滤出析出的二环己基脲, 所得对称酸酐立即用于接肽反应。Bop 和 HBTU 也可用来制备对称酸酐。对称酸酐法的特点为: (1) 反应活性高, 反应速度快; (2) 缩合产率高 (99.6%~99.8%); (3) 克服了 In situ DCC 法的某些缺点, 如 DCC 与肽链的某些副反应, 副产物二环己基脲难除去等。其主要缺点是原料浪费, 而且同样不适于 N^o-保护的 Asn 和 Gln 的接肽。对 N^o, N^o-双保护的 Arg 也不适用, 因其高活性的对称酸酐存在下式所示的副反应, 生成 δ -内酰胺 8。



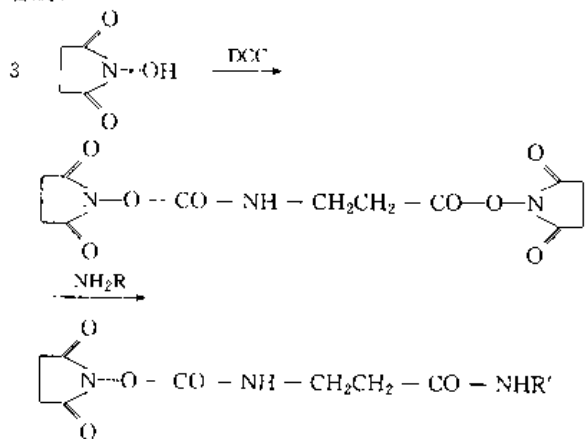
对称酸酐法的另外两个副反应为在三级胺存在下的消旋反应和下式所示的重排形成二肽 9 的副反应。9 能被进一步活化导致微量的 ($\leq 0.3\%$) “夹心肽” 的形成。对 Gly 此副反应最为严重。



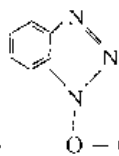
在用对称酸酐法接肽时, 卡尔斯根 (R. Kirstgen)、劳尔森 (R. H. Laursen)、王 (S. S. Wang) 等报道一旦反应开始或接近完全, 在反应液中添加某些碱性物质如二异丙基乙基胺、N-甲基咪唑和 4-二甲氨基吡啶等可以促进反应速度。但 4-二甲氨基吡啶较少使用, 因其同时也能促进消旋副反应和成二肽副反应的发生。反应液中存在 DMF 或添加三氯乙醇也有利于增加反应速

度。

1966年威敢德(F. Weygand)等人发现用DCC作缩合试剂时添加某些辅助性的亲核试剂如N-羟基丁二酰亚胺(HOSu)可以抑制DCC法中的消旋副反应和O→N迁移副反应。这一方法在SPPS中立即得到了应用。但对HOSu而言,由于它在SPPS中反应速度不理想,产率也不好,且存在下式所示的副反应,导致肽链的终止,故而在SPPS中较少用于逐步合成,较多用于片段合成。



1970年凯耐格(R. Geiger)等人报道的1-羟基苯并三唑(HOBt)是一个较好的添加剂,它不与DCC反应,因而没有象HOSu那样的副反应,而且反应速度快(接近In situ DCC法及对称酸酐法),产率高,产物的消旋程度小,还避免了In situ法中的O→N迁移副反应,因而已发展成为一种常用的固相成肽方法——DCC/HOBt法,其活化中间体主要为N^o保护氨基酸形成的HOBt活泼酯(10)。该法可按两种方式操作:(1)In situ和(2)预先活化HOBt法。也可采用其它缩合试剂如Bop和Bop-CE等来形成HOBt活泼酯。据汉得森(D. Hudson)报道,Bop/HOBt法反应速度大于In situ DCC法,而DCC/HOBt法则略小于In situ DCC法。



(10)

缩合试剂/HOBt法可采用于N^o保护Asn和Gln的接肽,因为在该种反应条件下,这两种氨基酸的脱水副反应可得到抑制。但却不适用于α-氨基邻硝基苯硫基、联苯异丙氧羰基(Bpoc)的氨基酸及咪唑基用于对甲苯磺酰保护的His的接肽,因为HOBt的酸性能引起这些对酸敏感的保护基的提前脱除。

活泼酯法是一种久为人知并得到稳定发展的成肽方法。活泼酯一般采用在DCC或其他缩合试剂存在下将N^o-保护氨基酸和相应的羟基化合物缩合制备。活泼酯法的优点是把活化中间体变成具有一定的稳定性,可以分离,纯化和贮存但仍有相当反应活性的酯类中间体,因此一系列N^o-保护氨基酸的活泼酯曾用于SPPS中。但是,因为活泼酯的立体效应大和反应活性低等不利因素在固相合成中显得更加突出,因而成肽反应慢,产率低,而且有些活泼酯在SPPS所用的溶剂二氯甲烷中的溶解度差,这就限制了活泼酯法在SPPS中的应用。为了提高活泼酯的反应活性,人们从两个方面着手努力:在活泼酯的离去部分引入强拉电性的原子或基团来提高离去部分的离去能力和活泼酯的亲电能力;在用活泼酯接肽时添加某些添加剂如HOBt或二异丙基乙基胺来加速反应。

已出现的30多种活泼酯中,在SPPS中引起人们重视的主要有邻硝基苯酯(ONo)、对硝基苯酯(ONp)、2,4,5-三氟苯酯(OTcp)、N-羟基丁二酰亚胺酯(HOSu)、五氟苯酯(Pfp)、1-羟基苯并三唑(ODhbt)、3-羟基-3,4-二氢化-4-氧化-1,2,3-苯并三唑

(ODhbt)、2,5-二苯基-2,3-二氢化-1,4-三氧代-4-羟基嘧吩酯(OTDO)、3-苯基-1-(对硝基苯基)-2-吡啶啉-5-酮(Pnp)和3-甲基-1-对硝基苯基-2-吡啶啉-5-酮(Npp)等。用ONo和ONp活泼酯接肽,反应速度慢,但可避免Asn和Gln的脱水副反应。用OTcp或Pfp酯接肽,反应速度较慢,但添加HOBt后反应速度大大加快,可接近对称酸酐法。HOSu活泼酯曾成功地用于短杆菌肽的合成,但因其前述封闭肽链的副反应,不宜推广使用。1970年凯耐格(R. Geiger)等提出的ODhbt酯是一种很有前途的活泼酯,据报道它具有和HOBt活泼酯相类似的低消旋程度和反应性质,反应速度却快于Pfp酯,接近对称酸酐法,且本身又较稳定,便于分离、纯化和贮存。OTDO酯的最大优点是产物的消旋程度极低,且其本身也很稳定,易于贮存。最近汉得森(D. Hudson)报道了Pnp和Npp酯的高反应活性,接肽反应速度居各种活泼酯之首。汉得森的实验结果表明上述各种活泼酯的反应活性顺序为:Pnp~Npp>ODhbt~DiCl/HOBt>Pfp~OTDO>OTcp>HOSu>ONp>ONo。此外,在用ODhbt、OTDO、Pnp和Npp接肽时,可通过反应完成前后颜色的变化监测反应进行的完全程度。

除了上述肽链形成的方法外,液相合成中大多数其他成肽方法如迭氮化物法、混合酸酐法、四组分缩合法等都曾在SPPS中应用过,但由于各自的缺点而没有得到推广。尽管如此,其它方法在某些特定条件下的作用也不能忽视。值得指出70年代中期由麦特休德(R. Matsueda)等人提出的氧化还原缩合法和近年来中外学者提出的活泼酰胺法在SPPS中仍有很大的潜力。如上所述,各种接肽方法各有其优点和局限,在实际工作中人们往往把不同的方法结合起来,取长补短,以满足肽合成的复杂需要。同时,进一步发展和完善现有成肽方法,探索新型缩合试剂仍然是发展固相肽合成技术的一个重要而艰巨的任务。

参考文献

- Merrifield R B. J Amer Chem Soc, 1963, 85: 2149~2154
- Wolters E T M, et al. J Org Chem, 1974, 39: 3388~3392
- Yamashiro D, et al. J Amer Chem Soc, 1978, 100: 5174~5179
- Burr C. Aspects of the Merrifield peptide synthesis. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1978
- Merrifield R B. Angew Chem, 1985, 97: 801~812
- 黄惟德,等. 多肽合成. 北京: 科学出版社, 1985, 202~205
- Barany G, et al. Int J Peptide Protein Res, 1987, 30: 705~739
- Field G B, et al. Int J Peptide Protein Res 1990, 35: 161~214
- Hudson D. Chemistry, structure and Biology Leiden: ESCOM, 1990, 914~915
- 田少雷,等. 化学通报, 1992, 2: 17~22

(中国医药研究开发中心田少雷副研究员撰, 蔡孟深审)

三卤甲烷 trihalomethane (THM) 是有机化合物甲烷衍生物的同系体的一种, 脂肪烃中最简单的构造式——甲烷(Methane, CH₄)的4个氢原子中的3个被氟、氯、溴、碘等卤素原子置换而产生的。

从理论上认为可能有10种化合物存在, 如三氟甲烷, 二氟溴甲烷, 一氟二溴甲烷, 三溴甲烷, 二氟碘甲烷, 氟溴碘甲烷, 一氟二碘甲烷, 二溴碘甲烷, 一溴二碘甲烷, 三碘甲烷。而且只有单一卤素置换的化合物, 一般叫惯用名。如氟仿(三氟甲烷), 溴仿(三溴甲烷), 碘仿(三碘甲烷)。

三卤甲烷是净水处理过程的氯处理工程上氯与原水中腐殖质等有机物反应而产生的。自来水中发现并证实的有5种化合物, 其中氟仿所占比例最大, 二氟溴甲烷, 一氟二溴甲烷, 溴仿为其次, 而二氟碘甲烷的存在量比其他4种化合物为最少。若海水混入溴化合物所占比例最大, 并且碘化合物在现阶段分析上尚有

困难。

从检出率及检出频率规定自来水中三卤甲烷是前4种化合物。而总三卤甲烷(Total Trihalomethanes, TTHM)是这4种化合物mg/l浓度的共计数。

1972年荷兰的Rook从莱茵河下游的河水中检出100 μ g/L,三卤甲烷,而且从自来水中也发现了。

1974年Rook报告在净水处理河水的过程加氯而产生氯仿。

1974年美国的Bellar等报告了水源水中氯仿浓度很低,而在净水过程每加一次氯后氯仿的浓度有意义的增加了,研究认为三卤甲烷的产生是氯与源水中有机物之间的反应而引起的。

1974年日本森田从东京水源水中检出了N.D~90 μ g/L,河水1~11 μ g/L,井水N.D~77 μ g/L,雨水6 μ g/L的三卤甲烷。

表1 三卤甲烷的物理特性

名 称	分子式	分子量	比重	熔点 ($^{\circ}$ C)	沸点 ($^{\circ}$ C)	溶解性 (g~对酒精100g)		
						水	乙醇	乙醚
氯仿	CHCl ₃	119.4	1.4985(15 $^{\circ}$ C)	-63.5	61.2	0.82 (冷时)	易	易
二氯溴甲烷	CHBrCl ₂	169.83	2.0055(15 $^{\circ}$ C)	-57.1	90.1	-	-	-
一氯二溴甲烷	CHBr ₂ Cl	208.29	3.260(20 $^{\circ}$ C)	-	-	-	-	-
溴仿	CHBr ₃	252.73	2.902(15 $^{\circ}$ C)	8.05	148.6	难	易	易

其后,1974年美国的Harries发表了新奥尔良市的癌死亡率与饮用密西西比河为水源的自来水的当地居民之间有相关的流行病学调查论文。此为,美国环境保护局(EPA)在1974年立即将新奥尔良市密西西比河下游流域河水,各种净化的水和净化后的水中有有机化合物,检出66种有机化合物,其中若干是致癌物质。这些化合物的特征以低烷基卤化物为最多,其中氯仿的最高值是133 μ g/L。根据以后的调查弄清是由净化工程杀菌消毒目的加氯消毒剂与原水中有机物反应所致。

1975年美国EPA在全美各地80个城市的河口水,河水,水库水等进行了全国有机物实况调查(NOPS),此次调查限制有氯仿、二氯溴甲烷、一氯二溴甲烷、溴仿、四氯化碳、1,2-二氯乙烷等6种化合物。报告指出在源水中未检出或检出甚少,但在氯处理的自来水中检出率高。就氯仿浓度看:80个源水中有24个样品检出0.1~1.0 μ g/L,而在氯处理的自来水中全部样品检出0.1 μ g/L以下~311 μ g/L,平均21 μ g/L;二氯溴甲烷0~116 μ g/L,平均6 μ g/L;一氯二溴甲烷0~100 μ g/L,平均1.2 μ g/L;溴仿0~92 μ g/L,平均在检出限度以下。自来水中屡次检出其他卤化有机物。认为是净水过程氯处理的结果。

加拿大在70个城市进行了自来水中三卤甲烷浓度全国调查,检出氯仿0~121 μ g/L,平均13 μ g/L;二氯溴甲烷0~33 μ g/L,平均1.4 μ g/L;一氯二溴甲烷0~6.2 μ g/L,平均0.1 μ g/L;溴仿0~0.2 μ g/L,平均0.01 μ g/L以下。

1976年英国McConnel报告从英国的Lancashire-cheshire地区各城市的自来水中,检出三卤甲烷的种类和浓度,氯仿0.7~38 μ g/L,二氯溴甲烷1~27 μ g/L,一氯二溴甲烷0~3 μ g/L,溴仿0~7.5 μ g/L。

1981年Singer调查North-carolina州9个大城市13个主要净水厂的自来水(源水为地面水),自来水的三卤甲烷(INST)为9~275 μ g/L,中心值为58 μ g/L,平均值为72 μ g/L。位于州东部的4个水厂的自来水,在一年期间接近或超过最大污染浓度(MCL)100 μ g/L。

1987年黄君礼等全面调查了中国24个大中城市的自来水,少数出厂水和管网水高于60 μ g/L。一般氯仿低于60 μ g/L,有时还检出二氯溴甲烷,一氯二溴甲烷和溴仿。

Rook和Beller等证实由天然带色水与氯反应的产物。因而自来水中带色成分的天然腐殖质的重要性增加了。腐殖质是动植

物的分解产物,最有代表性的是来自泥碳土地的浸出物,广泛存在于寒冷土地的潮湿地带和温带热带的沼泽土地的地表水和地下水。也存在于山林的腐叶土,腐植土或来自旱田的耕作土,湖泊和江河的底泥中,如地下水就是深井水。除上述之外,其类似物质包含在纸浆废水等有机带色废水中,在粪便处理厂的高色度废水,一般污水处理厂的放流水中也都出现。这些有色成分都是腐殖酸类。Oden和Page将腐殖质分类并命名,将可溶性有机物分为富烯酸(Fulvic acid,又叫水溶性腐殖酸),腐殖酸(Humic acid,又叫黑腐酸),脱氢腐殖酸(Hymatomelamic acid,又叫醇溶性腐殖酸)3类;而不可溶性物质为腐黑酸(Humin)或腐殖碳(Humuscoal)。这种划分一般认为其相互构造类似,但分子量,元素组成,官能团含量有些不同。McCrary和熊田指出其分子量是富烯酸从百到千,腐殖酸数十万或以上,而脱氢腐殖酸居其间。随其起源不同化学结构不都一样,所以,依其分子量和种类而产生三卤甲烷的生成能也不同。Honhn等和Trussel等报告腐殖酸容易生成三卤甲烷,是自来水中生成三卤甲烷的主要物质。而Ishikawa等报告脱氢腐殖酸生成三卤甲烷最多。Babcock和Singer比较了腐殖酸与富烯酸与氯反应生成氯仿的能力,得出前者生成量多,是生成三卤甲烷的重要物质,但在高浓度带色水中腐殖酸的量极少,而富烯酸的比例高。Oliver等研究报告从河水、湖水及泥碳土地水等抽出的腐殖质的分子量和种类其三卤甲烷的生成能不同,不论河水或湖水中富烯酸(分子量1000~10000)占重要部分,而湖水中腐殖酸(分子量10000~20000)和河水中(分子量2000~3000)占重要部分。提供生成三卤甲烷的富烯酸所占比例是湖水72%,河水80%。腐殖质的化学构造截至目前尚未正确确定,予想其基本构造具有芳烃环的高分子有机酸,具有羧基,羰基,甲酰基,氨基,羟基,酚基等官能团。在其分子中具有C=O, N=N, C=C等发色团和羟基,氨基等助色团,有此种基团的分子容易生成三卤甲烷物质。除此之外,最近已解明藻类及其分解代谢物能生成多量三卤甲烷。Hoehn等(1975~1976)测定了给水水龙头中的三卤甲烷与贮水池中的叶绿素a值之间有良好的相关。并用藻类现存量与藻类细胞外生成物(ECP)研究证明生成三卤甲烷的重要因子,生成物为三卤甲烷前驱物质的可能性。1991年Karimi等报告在无盖的Silver-Lake贮水池,三卤甲烷和Tox显著增加了。原因是恐怕贮水池长期滞留,防止藻类发生,加氯所致。

这几年来许多研究明确了具有乙酰基的化合物,或是由于氯化产生此基团的化合物, β -二酮,间苯二酚,像腐殖酸那样的有羟基苯类的有机化合物属于生成三卤甲烷反应的前驱物质。

Rook提倡的腐殖酸,间苯二酚的氯化反应途径作为生成三卤甲烷的生成机制,基本上是卤仿反应过程,此反应由卤化和加水分解交替而组成。在有机物分子中具有间二羟基芳香环,成为氯化反应的活化作用点,概括地说预想是经过氧化,氯化,加水分解3个过程,详细是很复杂的,不明之点多。

梶野, Peter等以及相沢和真柄都已报告腐殖质由氯化处理引起的三卤甲烷的生成的反应,大致有下面2种。(1)前驱物质 \rightarrow 氯化 \rightarrow 加水分解 \rightarrow 形成三卤甲烷。(2)前驱物质 \rightarrow 氧化 \rightarrow 氯化 \rightarrow 加水分解 \rightarrow 形成三卤甲烷。认为氧化反应是比较快的,三氯化后无论哪种反应方式都由加水分解而生成三卤甲烷。前驱物质与氯的反应在数分钟内的极初期阶段,氯将前驱物质直接氯化反应生成氯仿中间体。主要的由卤仿反应以外的反应途径。三卤甲烷的生成有许多物理化学因子参与,其生成量随反应时间,氢离子浓度,温度,前驱物质的种类及量;氯量及形态而异。处理水中的氯,卤化物也影响生成物量和种类。三卤甲烷为中心的氯仿对人的暴露的污染源来自大气,水和食品三个方面,美国EPA(1978)报告指出,在一年期间从自来水中摄取氯仿最高为343mg,平均为64mg。由自来水引起氯仿暴露量达到总暴露量的70%,认为人与自来水中三卤甲烷暴露量最大。三卤甲烷毒性问题,自从1974年Harris发表的论文开始,饮用的自来水中三卤甲烷浓度虽然是微量,但知道是致癌物质。1945年Eschembrenner等报告经口服

0.145~2.32mg/kg·d 氯仿,小鼠发生肝癌结果。美国国立癌症研究所(NCL)根据 EPA 委托,探讨了氯仿的致癌性。经口服 90~200mg/kg·d 氯仿,Osborne-mendel 种大白鼠的结果,认为雌鼠甲状腺癌,雄鼠肾上腺细胞癌。并且在 B6C3F₁ 小鼠确认雌鼠肾上腺细胞癌,雄鼠纤维细胞癌高发生率。有关二氯甲烷,一氯二溴甲烷的致癌性,尚未得到实验报告。Theiss 等用 4~100mg/kg·d 溴仿经口服小鼠,仅发生 1 例肺腺癌,并未确认有致癌性。1981 年 Karybill 指出,世界各国进行了世界性调查, NCL 与其他联邦机构共同将这些化学污染物分类。在 2211 种污染物中存在存在于自来水中有 765 种,其中 20 种是致癌性物质,23 种是致癌性和可疑性物质,18 种是致癌促进物质,56 种是致突变性物质。而同时测定的物质的大部分是挥发性物质,只不过是总体的 10%,剩余 90% 是未确认的不挥发性物质。根据流行病学调查与癌的危险性,地表水比地下水为高,氯处理后水比未经氯处理的水为高,三卤甲烷或者氯仿以外三卤甲烷浓度高的水比低的水为高,高污浊水比低污浊水为高。

从流行病学研究得到由自来水引起对人的癌的发生部位与实验动物发生部位不同。实验癌在肝脏或肾脏癌的可能性大,而流行病学调查与消化系统或泌尿系统之间有强的相关,流行病学资料与肝癌之间关系不多。

国立科学研究所(NAS)评论只不过是假定,无法确定其因果关系。

1987 年朱惠刚根据 1974 年至 1982 年间已报导的 15 篇不同地理区域的群体危险研究指出,人群与水中有机物的暴露有统计学意义的常见的肿瘤是:膀胱癌、胃癌、结肠和直肠癌;其次是食管癌、肝癌、胆囊癌、胰腺癌、肾癌、前列腺癌、肺癌和乳腺癌。这 15 篇中存在明显的不一致性,这是分析方法不可避免的缺点,个体暴露差异大,混杂因素多,无法解决因果关系。有说服力的结论是美国有些地区患癌危险性与水质有一定关系。

为降低或控制由于三卤甲烷前驱物质与游离氯反应生成的三卤甲烷,根本的是必须改善原水的水质,防止湖泊的富营养化,这是今后需要努力的方向。为降低或控制三卤甲烷的生成量,第 1 是除去三卤甲烷前驱物质等三卤甲烷的生成量。第 2 是在净水处理过程除去生成的三卤甲烷。第 3 是更换氯,使用其他消毒剂,避免三卤甲烷的生成。实际上采用组合这些方法能最大限度地降低或控制有机物的生成。当采用这些方法时,必须充分地掌握每个的特性并根据原水的特性等各净水厂实情加以探讨,这可借鉴 1987 年蒲野等的研究成果。

第 1 方法,凝集沉淀处理可除去分子量较大的前驱物质,能降低三卤甲烷生成量 20%~40% 程度, H⁺ 浓度 10⁻⁵mol/L 高注入率时得到良好结果, H⁺ 浓度上升 10 倍,除去率下降 10%~25%。以高电荷密度阳离子聚合物为助凝剂,在 H⁺ 浓度 3.16×10⁻⁶mol/L 时,铝盐必要量减少,性能更良好。与高锰酸钾并用可得良好除去率,还原的二氧化锰越低越提高其吸附性和凝集性。既不影响腐殖酸又不影响酚类,苯胺、脂肪族二酮等 5 个单体前驱物质的除去性。与活性炭吸附并用时增效一层,调节 H⁺ 浓度 10⁻⁷mol/L 左右,不但对凝集过程而且对活性炭吸附过程都有极好的效果。用碳系粒状活性炭 F-400, S-80 对三卤甲烷前驱物质的除去率分别为 52% 和 73%。用金属离子盐(硫酸铝、硫酸铁)凝集剂,对 TOC 除去能不受温度影响,但色度在低温时效果下降,铁盐低加入量时色度反而增加,提高加入量可不受大影响。TOC, 色度,三卤甲烷生成量与水温不相关, H⁺ 浓度 10⁻²mol/L 比 H⁺ 浓度 10⁻³mol/L 处理有好的倾向。三卤甲烷生成速度,生成量在低温时比室温反应小,低分子量有机物低温比室温除去难。采用 0.8~0.9mm 粒径的粒状活性炭代替砂滤,除去浊度可提高一般性滤材以上的效果,但下层需设砂层。后滤过吸附量比滤过吸附大,滤过吸附的最大吸附量是后滤过吸附量的约 50%。后滤过吸附比滤过吸附氯仿可多除去约 20%。但活性炭层的微生物增殖的有益与否,应从卫生上的危险性加以考虑。高机性能活性炭纤维(ACF)净水处理可充分地吸附除去三卤甲烷前驱物

质,平均除去率约 80%,深入研究今后可能在为代替粒状活性炭。用过滤塔,滤材为 Ottawa 砂,凝集剂为高电荷密度耐氯性阳离子聚合物,对泥碳地带抽出的腐殖酸溶液的色度除去率为 90%~95%(剩余色度腐殖酸 5mg/l 时约 0.2 度, 10mg/l 时约 0.05 度),剩余浊度 0.2 度以下,对泥碳地带河水色度的除去率为 75%~85%。氯防生成量除去率大约 40%。用膜处理除去三卤甲烷特性,用 nano 滤过膜(NF),兼有超滤过膜(UF)和反渗透膜(RO)两者特性,是一种新开发膜,对原水为地下水,石灰软化处理其三卤甲烷超出最大污染容许浓度(MCL)0.10mg/L 值的效果。在实验期间比常时的 MCL 值低。低压反渗透膜可有效的除去腐殖酸及自然水沼泽水中前驱物质,除去率为 87%~97%。用充填弱盐基性树脂的过滤筒,一种树脂 B 对三卤甲烷前驱物质减少 60%,而对氯仿减少 70%~85%。改变氯的注入点是将三卤甲烷前驱物质的一部分在氯处理前,经凝集沉淀处理除去后,氯的加入点改变在取水点的沉淀池的流出点,可降低三卤甲烷的生成量 76%。当与活性炭吸附并用,对三卤甲烷和其前驱物质的降低率为 20%(低水温时,前氯处理的三卤甲烷生成量为 100 的降低率)。

第 2 方法,曝气法目前研讨较多,此技术是基于物质移动论的原理,利用 Airstripping 充气解吸装置,可除去水中挥发性成分最有效,温度上升可达 99% 以上,装置表面积大,适用于公共自来水处理地下水的水质改善。家庭紧急除去 VOC 如氯仿,溴仿,四氯化碳等 11 种物质,用电起泡器 10~20min 搅拌,比点沸法优越,除了溴仿剩余 3.5%, t-丁基甲醚 2.0%,其余全部除去。也可借助三卤甲烷是低沸点挥发性有机物,以氯仿和四氯化碳从水中蒸发出 50% 和 90% 的时间(min)计算,前者需 25min 和 83min,后者需 29min 和 93min。有记载煮沸约 20min 三卤甲烷几乎可除去。三卤甲烷类的挥发性,用挥散的方法有降低这些物质的可能性。如贮水池前氯处理和曝气,过滤后与空气充分接触挥散,此法有前途性。

臭氧处理与活性炭吸附并用,分解三卤甲烷前驱物质成活性炭吸附容易的形态,提高处理效率,臭氧,过氧化氢和紫外线照射并用,比单独处理对三卤甲烷生成量的减少有增效效果。使用椰子壳制作的活性炭 LG-105。对前氯处理经凝集沉淀过滤生成的三卤甲烷的除去有效。除臭的粒状活性炭吸附三卤甲烷,可减少 23%~60%。而对原水水质处理方式不同的净水设施上,应用粒状活性炭未必有效果。最近用二氧化氯作为前氯处理后,实验结果是包括考虑流出水质变动,可控制三卤甲烷限度约 10μg/L。

第 3 方法,无论采用哪种代替消毒剂,首应确保安全性,然后是副产物无毒性作用。臭氧有强的氧化力,但因其残效低,必须在配水系统并用氯胺或者二氧化氯作为剩余形消毒剂,以防止细菌类再活化。臭氧可能产生有害作用的环氧化物和过氧化物。而氯胺需要约 100 倍游离氯的接触时间,不可作主消毒剂用。二氧化氯的应用限制上限不超过 1.0mg/L 防止有害作用。

参考文献

- 1 丹保慈仁. 水道水中的トリハロメタン问题, 用水 C 废水, 1981, 23, 3~10
- 2 小島高志译. 暂定第 1 种饮料水规则改正案(美国环境保护厅), 水道协会杂志, 1987, 47, 8, 134~144
- 3 日本水道协会. トリハロメタンに开する对策にっづく(昭和 56 年 3 月), 水道协会杂志, 1981, 50, 6, 59~74
- 4 小島高志译. 盐素处理にする有机ハロゲン二化合物の生成, 水道协会杂志, 1975, 45, 6, 94~96
- 5 黄君礼, 范启译, 寇广中, 刘春光. 国内主要水厂卤仿的调查, 环境化学, 1987, 6, 4, 85
- 6 取访通法译. 天然に含まれる与水中有机物と盐素处理の影響, 水道协会杂志, 1977, 47, 2, 45~52
- 7 宗宫功, 山田春美. トリハロメタン生成能に係する水质体価と前驱物质の除去, 用水と废水, 1981, 23, 8, 53~64
- 8 安达吉夫译. トリハロメタン前驱物质源としての藻类,

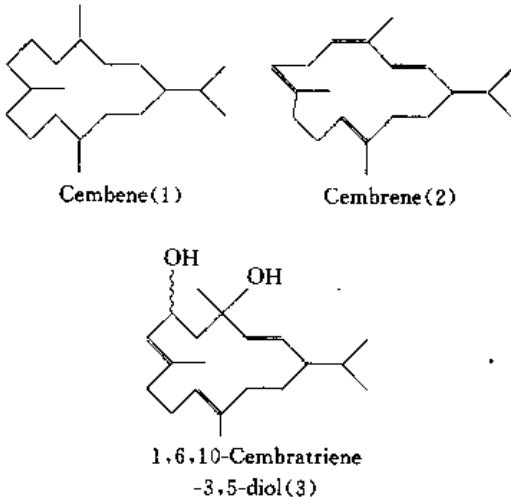
- 水道协会杂志,1980,49:11,98~101
- 9 一户正憲. 水道水源にぎけるトリハロメタン前駆物質の生成, 用水と废水, 1981, 23:8, 27~31
 - 10 富田基郎. トリハロメタンの毒性, 用水と废水, 1981, 23:8, 11~18
 - 11 梶野勝司. 盐素处理过程にぎけるトリハロメタン中間体の生成とトリハロメタン生成に及ぼす影响, 水道协会杂志, 1982, 51:7, 33~39
 - 12 浦野紘平, 武政隆夫, 伊藤新治, 陆嘉樑. 水の有机ハロゲン化合物生成ポテンシヨル, 水道协会杂志, 1987, 56:37~47
 - 13 朱惠刚. 水中有机化学污染物对人体影响评价, 中国环境科学, 1987, 7:4, 67~73
 - 14 牧豊. オゾンと粒状活性炭による上水処理, 用水と废水, 1988, 30, 11, 40~47
 - 15 迫田章义, 鈴木基之, 河添邦太郎, 井上源之助. 活性炭素纤维にするトリハロメタン前駆物質の吸着除去, 用水と废水, 1991, 33:6, 21~26.

(武汉市卫生防疫站王国新主任技师撰)

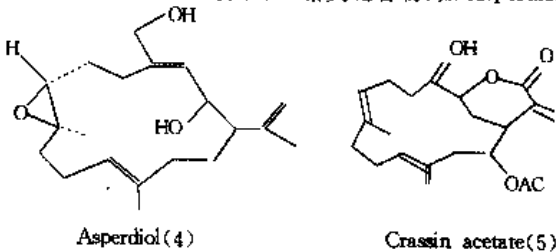
大环二萜类化合物 macrocyclic diterpenoids

大环二萜类化合物是20世纪60年代后,在松脂、烟草和海洋生物体中发现的一类含有4个异戊二烯结构单元和14元碳环的天然产物。这类化合物结构新颖、品种繁多,而且大多具有明显的抑菌、细胞毒性、抗肿瘤及调节植物生长等生物活性。因此,引起了人们的极大兴趣,是当前国际上研究的热门课题之一。开展这类化合物的分离、结构鉴定、合成及生物活性等的综合研究,无疑对合理开发利用生物资源、发展国民经济和科学事业都有重要意义。

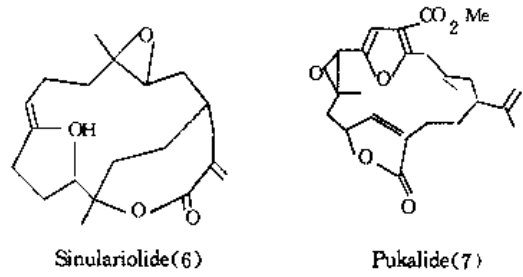
这类化合物的基本骨架为1,其中化合物2和3是最早分别从松脂和烟草中分离鉴定的此类化合物的典型代表。



这类化合物除存在于松脂、烟草等植物中外,还存在于某些动物体中。70年代后,随着海洋天然产物研究的广泛开展,从海洋生物(如软珊瑚、海扇、海藻等)中发现了许多结构新颖、复杂并且具有重要生物活性的大环二萜类化合物,如 Asperdiol(4)、



Crassin acetate(5)、Sinulariolide(6)、Pukalide(7)等。



从我国南海海洋生物如软珊瑚中也已分离鉴定出数种大环二萜类化合物。目前已知的这类化合物已有百余种,且其数目还在不断增加。就其结构而言,有较简单的烃类和醇类,也有结构相当复杂、含多个手性碳的多官能团化合物。

这类化合物的全合成研究工作从1975年开始已陆续开展,1985年以后得到了迅速发展,已成为国际上非常活跃的研究领域,许多著名的有机合成化学家、近20个研究小组参与该领域的研究工作。全合成的关键是如何有效地建立14元碳环,环化方法的选择决定着全合成的策略。合成过程中正确选择合适的保护基团,对于实现预期目标也是非常重要的。目前用于大环二萜类化合物合成的环化方法主要有如下几种:(1)经典的碳碳键形成方法,如分子内亲核取代反应(其中包括硫稳定的碳负离子和膦基稳定的碳负离子的烷基化),分子内酰基化反应、分子内 Horner-Emmons 反应;(2)通过分子内重排的间接环化方法有环扩大法和环缩小法;低价金属(如 Ti(O), Ni(O), Pd(O), Cr(II))诱导的分子内偶联;(3)其它方法,如自由基环化、羟醛缩合环化法也已用于大环二萜类化合物的全合成中,有关这些方法的情况已有综述文章报道。

在这类化合物的全合成方面,马歇尔(J. A. Marshall)研究小组做了大量开创性的研究工作,采用了新试剂,新反应以及有效的合成策略,相继完成了4种结构较复杂的大环二萜化合物的不对称合成,为此类化合物的合成积累了大量有意义的经验。其它研究小组如特乌斯(M. A. Tius),麦克默里(J. E. McMurry)等也做了不少有意义的工作,取得了可喜的成果。

中国对大环二萜类化合物的全合成研究起步较晚。兰州大学李裕林研究小组从1987年起开展了这类化合物的全合成研究工作,近期已取得了较大进展。以低价钛诱导的二萜基化合物的分子内偶联环化反应作为关键步骤,成功地合成了具有抗肿瘤活性的 Sarcophytol-B, Sarcophytol-A 苯醚衍生物, Sarcophytol-M, Isosarcophytol-A 及白蚁信息素 Cembrene-A 及其异构体 Cembrene-C, 脱氢 Cembrene-C。上述合成产物除 Cembrene-A 是提供新的合成方法外,其余6种均属首次合成。中山大学曾晓梅研究小组也已开展这类化合物全合成工作。首次成功地合成出肉芝软珊瑚素(Sarcophine)。截止目前,已有近30种大环二萜类化合物的全合成相继完成,部分全合成目标分子的名称、结构列于下表:

名称	结构
(±)-Cembrene	

名称	结构	名称	结构
(±)-Cembrene-A		(±)-Isolobophytolide	
Sarcophytol-A		(-)-Crassin	
Isosarcophytol-A		(±)-Sarcophine	
Sarcophytol-B			
1,6,10-Cembratriene-3,5-diol			
(-)-Asperdiol			
Cembranolide lactone			
dl-Anisomelic acid			

随着研究工作的逐步深入,天然资源中微量、超微量大环二萜类化合物的分离、鉴定和生测工作必然要提到日程上来,还会发现许多结构新颖,并且有重要生物活性的大环二萜类化合物,为全合成提供模型。在这类化合物的全合成方面,光学活性纯化合物的合成方法研究将受到更多的重视,包括不对称合成,动力学拆分、手性源途径和酶促合成等。此外这类化合物的生源合成和仿生合成也是值得研究的课题。随着全合成研究工作的深入开展,将给新试剂、新反应和新方法的发现以巨大的推动力。随着这类化合物简便通用有效合成方法的建立,类似物的合成及构效关系的研究工作也将蓬勃开展,这是发现新药的重要途径,具有广泛的应用前景。

参考文献

- 1 Dauben W G, et al. Cembrene, a 14-membered ring diterpene hydrocarbon, *J Am Chem Soc*, 1962, 84: 2015
- 2 Roberts D L, Rowland R L. *J Org Chem*, 1962, 27: 3989
- 3 Moore B P. *Nature*, 1966, 211: 746
- 4 Weinheimer A J, Matson J A. *Lloydia*, 1975, 38: 2513
- 5 Tursch B, Brackman J C, et al. *Tetrahedron*, 1975, 31: 129
- 6 Missakian M G, Burreson B J, Scheuer P J. *Tetrahedron*, 1975, 31: 2513
- 7 Weinheimer A J, Matson, J A, et al. *Tetrahedron Lett*, 1977, 1295
- 8 Tius, M A. *Chem Rev*, 1988, 88: 719
- 9 曾陇海. *有机化学*, 1989, 402
- 10 李裕林, 李卫东, 李瀛. *合成化学*, 1993, 1: 283, 1994, 2: 95

(兰州大学有机化学研究所李裕林教授, 李瀛副教授, 李卫东博士撰)

金属有机化学 organometallic chemistry 是化学领域中的一门交叉学科,主要研究金属—碳键的生成与变化。它是在有机化学和无机化学相互渗透中发展起来的,同时,它还和许多相邻学科具有密切的联系。例如,过渡金属和稀土元素的π络合物化学大大丰富了经典络合物化学的内容;金属有机化合物多种多样的结构类型,在键型、键长、键角、空间相对位置与排列对化学活性与反应选择性的关系方面,为结构化学提供了丰富的信息;对金属有机化合物进行分子轨道理论的计算,键能的计算和反应过渡态的能量计算,是现代量子化学的主要研究内容之一;

金属有机化合物的化学反应特点和反应机理成为物理有机化学的主要研究对象之一;立体化学概念在金属有机化学中获得广泛应用;金属有机化学的发展不仅提供了一系列高活性和高选择性的新型催化剂,而且在分子水平上的现代催化理论提供了科学依据;在分子化学中,到处可以见到金属有机化合物作为聚合催化剂的实例,而含有金属原子的高分子络合物又成为金属有机化学的重要方面;新型金属有机分析试剂使分析化学的发展出现了新局面;金属有机试剂和催化剂提供了众多的高活性、高选择性的有机合成方法,成为合成化学家手中的强有力的武器;许多金属有机化合物可以有效地用作抗癌药物、杀菌剂和抗生素;金属酶的化学,微量金属元素对植物生长与抑制的关系,以及微量金属在人体生命过程中的重要作用,实际上是自然界的金属有机化学过程。发展金属有机化学不仅具有重要的科学意义,还和开辟新能源、开发新型化学反应、研究新的合成方法、探索生命现象的本质、合成新型材料、试制抗癌药物和其他特效药物以及环境保护等一系列当前世界上最重要的研究课题,有着十分密切的关系。

金属有机化学肇始于1827年,当时发现了第1个金属有机化合物 Zeise 盐 $K[C_2H_4PtCl_3]$ 。经过100多年的发展,金属有机化学已经成为化学领域中的一门前沿学科。金属有机化学的发展年表如下:

- 1827 发现 Zeise 盐 $K[C_2H_4PtCl_3]$
- 1849 烷基锌应用于有机合成(E. Frankland)
- 1901 Grignard 反应的发现(V. Grignard)
- 1912 Grignard 获得诺贝尔奖
- 1913 Werner 获得诺贝尔奖
- 1925 Fisher-Tropsch 法的发现
- 1930 有机镧应用于有机合成(K. Ziegler)
- 1950 有机铝应用于合成(K. Ziegler)
- 1951 二茂铁的发现(T. J. Kealey, P. L. Pauson)(由 Wilkinson, Woodward 和 Fischer 等阐明结构。)烯烃金属 π -络合理论的提出(M. J. S. Dewar, 1951; J. Chatt, L. A. Duncanson, 1953)
- 1953 Ziegler 催化剂的发现
- 1954 Wittig 反应的发现(G. Wittig)
- 1956 硼氢化的发现(H. C. Brown)
- 1958 丁二烯齐聚反应的发现(G. Wilke)
- 1963 Ziegler 和 Natta 分享诺贝尔奖
- 1964 过渡金属固氮的发现(M. E. Volpin)金属卡宾络合物的发现(E. O. Fischer)
- 烯烃复分解的发现(R. L. Banks)
- 1965 Wilkinson 络合物 $RhCl(PPh_3)_2$ 的发现
- 1973 Wilkinson 和 Fischer 分享诺贝尔奖
- 1976 Lipscomb 获得诺贝尔奖(W. M. Lipscomb)
- 1979 Brown 和 Wittig 分享诺贝尔奖
- 1981 有机钯催化双羰基化反应的发现(山本明夫),等瓣类似性概念的提出(R. Hoffmann), Hoffmann 和福井谦一分享诺贝尔奖

在20世纪50年代以前,主族金属元素的化学有了一定的发展,例如,有机铍,有机镓,有机铟(格氏试剂)和有机铝的化学及其在有机合成中的应用,为现代有机合成化学奠定了基础。50年代中,二茂铁的合成成功和齐格勒催化剂的发现,大大促进了过渡金属化学的发展。近30年来,金属有机化学的发展迅速。1956年,Coats 著“Organometallic Compounds”仅300多页。经过30年,由 Wilkinson 等主编的“Comprehensive Organometallic Chemistry”已是7000多页的巨著。自1963年以来,已有7人由于从事金属有机化学的研究而荣获诺贝尔奖。

目前,金属有机化学的研究热点是:(1)金属有机化合物的合成、结构、反应性能和机理的研究;(2)金属有机化合物在合成中的应用,尤其是用于开发新型的高选择性的合成反应,包括化学

选择性、区域选择性、立体选择性和对映选择性;(3)金属有机化合物在催化方面的应用。

参考文献

- 1 Wilkinson G, Stone F G A, Abel E W. Comprehensive Organometallic Chemistry. Pergamon Press, 1982
- 2 Davies S G. Organotransition Metal Chemistry: Application to Organic Synthesis. Oxford: Pergamon Press, 1982
- 3 黄耀曾,钱延龙主编.金属有机化学进展.北京:化学工业出版社,1987
- 4 王积涛,宋礼成编著.金属有机化学.北京:高等教育出版社,1989
- 5 黄耀曾,钱长涛等编著.金属有机化合物在有机合成中的应用.上海:上海科学技术出版社,1990
- 6 黄耀曾.大学化学,1990,5(1):1

(华东理工大学博士生导师钱延龙教授、黄吉玲教授撰;黄耀曾院士审)

金属有机非线性光学晶体材料 organometallic

crystals for nonlinear optical property 某些介质受激光照射后能辐射出一种新的激光,其频率是入射光频率的二倍。这种现象称为倍频效应,具有这种性质的介质称为倍频材料。倍频效应是非线性光学效应中最常见的一种,属二阶非线性光学效应,倍频材料则属二阶非线性光学材料。它们广泛应用于激光的倍频、混频、参量放大与振荡、集成光学、光学通讯等各个方面。探索新型非线性光学材料(主要是倍频晶体材料)的研究开发工作属高技术领域,一直受到国际上的高度重视。

常见的倍频材料是无机电电晶体,例如磷酸二氢钾(KDP)、磷酸氧钛钾(KTP)和铌酸锂(LN)。中国在无机非线性光学晶体的研究开发上居国际领先地位。中国科学院福建物质结构研究所陈创天等研制的 β -偏硼酸钡(BBO)和三硼酸锂(LBO)被国际上誉为“中国牌”倍频晶体。无机倍频晶体的优点在于它们有优良的各种物理化学性质,不足之处则在于倍频系数不够高,不能满意地用于小功率激光的倍频。目前人们仍在继续努力提高无机倍频晶体的性能。

近10~20年来,人们发现不少有机化合物(主要是分子体系两端分别连有推电子和拉电子基团的大 π 共轭分子)具有很强的倍频效应。其倍频光强度可以是无机物的几十倍至上千倍,而且响应速度快。但是有机物难以长成大尺寸的、光学均匀的、各项物理化学性能都好的单晶体,影响了它们的实用。现在普遍认为,有机非线性光学材料的主要应用方向将是在集成光路中用作光波导薄膜材料。

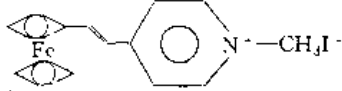
金属有机化合物是由金属原子(或离子)和有机分子配位体经化学键合而成的化合物,兼有无机化合物和有机化合物的特点,结构多变,种类繁多,因此,有可能从中探索出能集中无机和有机倍频材料的一些优点,又能克服两者的某些主要不足的新型非线性光学材料。这是非线性光学材料研究中的一个新方向。

第1篇报导金属有机化合物的非线性光学性质的论文发表于1986年。美国弗雷译(C. C. Frazier)等用粉末法测试了60多个过渡金属有机化合物的倍频性能,发现其中4个化合物的倍频效应接近或略大于无机倍频晶体ADP。此后,研究金属有机非线性光学材料的论文或专利不断出现,研究单位逐渐增多,研究工作逐步深入。6年来,研究工作大体经历了3个阶段。

第1阶段,采用粉末倍频效应测试技术,调查现有的金属有机化合物。前述弗雷译的工作即属此类。物理学家和材料科学家多从事这种研究。也有一些化学家将已有的化合物拿来测试。例如英国麦克勒活梯(J. A. McCleverty)从本组已有的结构复杂的钼有机化合物中发现了粉末倍频效应为尿素的123倍的化合物。

第2阶段,参考和借用有机非线性光学材料的“电荷转移理论”,有意识地设计和合成一些金属有机化合物,然后测试粉末倍频效应。此时多利用金属有机化合物的多变的氧化还原性质,将

金属有机基团作为电子给体或电子受体,连接到共轭体系中去。例如,牛津大学格林(M. L. H. Green)和杜邦公司谭(W. Tam)等分别采用二茂铁基或 $IPt(PEt_3)_2$ 一基作为电子给体。另一方面,有些金属有机基团(如 $W(CO)_5$)在基态表现出给电子性质,而在激发态时则表现出拉电子性质。这种特殊的电子性质对于设计非线性光学材料是十分有利的。迄今为止,已经合成出了一些有较大倍频效应的化合物,最大的为尿素的 220 倍,是紫色的二茂铁衍生物



第 3 阶段,从分子水平上测定或计算金属有机化合物的微观倍频系数 β ,以探讨金属有机化合物的分子结构与倍频性质的关系。杜邦公司的程(C. T. Cheng)与合成化学家合作,用 EFISH (Electric Field Induced Second Harmonic Generation, 电场诱导二次谐波效应)方法,测试了好几个系列的金属有机化合物的 β 值。结果表明,金属有机化合物的 β 值虽然不会超过有机化合物的 β 值,但也和后者基本相当。随后,马克斯(T. Marks)用分子轨道法计算了一些金属有机化合物的 β 值,计算结果和实验测试结果大体平行。

中国在金属有机非线性光学材料的研究领域也做了很好的工作。山东大学蒋民华等较早开始在配位化合物中探索新型非线性光学材料,取得了显著的成绩。例如长出了三(烯丙基硫脲)氯化镉的晶体,其倍频效应是 KDP 的 12.5 倍,还进一步提出了所谓“双重基元模型”。武汉大学刘道玉等设计合成了含钛、锆、铪、汞的各个系列的金属有机化合物,测试了粉末倍频效应,初步研究了结构与性能的关系。

此外,人们还从各种不同角度研究了金属有机化合物在不同形态下的非线性光学性质。杜邦公司伊顿(D. Eaton)等将金属有机化合物与硫脲等形成包络络合物(Inclusion Complexes);牛津大学戴维斯(S. R. Davies)将带长烷链的金属有机盐类化合物制成了 LB 膜。近来还有越来越多的文章介绍金属有机化合物(包括金属有机高分子)的三阶非线性光学性质。

金属有机非线性光学晶体材料的研究迄今还仅有六年的历史,但已吸引了较多的研究工作者,取得了一批令人瞩目的成果,展现了较大的潜力。迄今为止的研究还处在基础阶段,今后的研究重点是在基础理论和探索实用材料两方面深入。在基础理论方面,重点是要进一步搞清结构与性能的关系。金属有机非线性光学材料的分子设计目前主要是借鉴有机非线性光学材料方面的“电荷转移理论”,有时也借鉴无机非线性光学材料方面的“阴离子基团理论”,而真正适合金属有机非线性光学材料的理论及计算程序还未建立起来,尤其是金属原子在“分子工程”和“晶体工程”中的真正作用,还有待于揭示和发掘。在实用材料的探索中,重要的研究方向之一是克服现有材料(包括无机和有机倍频材料)普遍存在的倍频效应与透光范围的矛盾,寻找能在可见光区完全透明,而又有比较大的倍频系数,可用于半导体激光倍频的新型非线性光学材料。

参考文献

- 1 Frazier C C, et al. *J Phys Chem*, 1986, 90: 5703
- 2 Green M L H, et al. *Nature*, 1987, 330: 360
- 3 Tam W, et al. *Chem Phys Lett*, 1988, 144: 79
- 4 McCleverty J A, et al. *J Chem Soc, Chem Commun*, 1989, 1485
- 5 Marder S R, et al. *Proc SPIE*, 1989, 1147: 108
- 6 秦金贵, 刘道玉. *化学通报*, 1990, 10: 23

(武汉大学秦金贵教授, 刘道玉教授撰)

金属有机导体、半导体和超导体

organometallic conductors, semiconductors and superconductors 20 世纪 70 年代以来,随着对物质微观结构的深入认识,人们已从原来基本上属于电绝缘体的有机化合物中制得具有金属导电性的有机化

合物和具有较好导电性能的金属有机化合物。这类化合物统称“有机导体”、“有机金属”、“合成金属”、“分子导体”或“低维金属”。开展这一新兴领域的研究,无论对于发展电子工业新材料或推动金属有机化学基础研究,都具有十分重要的意义。

从严格意义上讲,金属有机化合物是指含金属—碳键的化合物。此外,本文还将涉及到那些金属与有机配体之间通过氮、硫原子与金属键合的化合物。

第 1 个金属有机半导体是由英国艾莱(D. D. Eley)于 1948 年发现的,它是酞菁铜络合物,其电导率为 $\sim 10^{-11} \text{scm}^{-1}$, 第 1 个有机导体是 1973 年由美国费拉里斯(J. Ferraris)等报导的 TTF · TCNQ 盐,其室温电导率为 500scm^{-1} , 随温度下降而电导率升高,至 59K 达到最大值,然后随温度进一步下降而急剧降低,并变为半导体或绝缘体。1980 年,法国詹洛姆(D. Jerome)和丹麦伯奇加德(K. Bechgaard)合作发现了第 1 个有机超导体 $[(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6]$, 在 $12 \times 10^8 \text{Pa}$ 下于 0.9K 时转变为超导体。1986 年,布罗萨德(L. Brossard)等又发现 $(\text{TTF})[\text{Ni}(\text{dmit})_2]_2$ 在室温下电导率为 $\sim 300 \text{Scm}^{-1}$, 在约 $6.8 \times 10^8 \text{Pa}$ 下转变为超导体,临界温度为 1.6K。迄今为止,已发现的有机和金属有机超导体的数目超过 30 个,最高的转变温度超过 10K。

金属有机超导体的研究目前仍处在探索阶段,已知具有导电特性的金属有机化合物为数不多。按其结构特点,金属有机导体主要可分为 3 类。

电荷转移复合物 这是研究得最多、发展最快和最有应用前景的一类,其通式可用 $C^{\delta+}A^{\delta-}$ 表示, C 为各种夹心金属络合物或金属有机原子簇阳离子; A 为阴离子。除 TCNQ 外,研究得最多的还有 $[\text{M}(\text{mnt})_2]^n$ (mnt = maleonitriledithiolate) 和 $[\text{M}(\text{dmit})_2]^n$ ($\text{H}_2\text{dmit} = 4,5\text{-dimercapto-1,3-dithiole-2-thione}$)。这类典型的代表有 $(\text{Cp}_2\text{Fe})^+(\text{TCNQ})_2^-$ ($\sigma_{\text{RT}} = 42 \sim 100 \text{Scm}^{-1}$), $[(\text{C}_5\text{Me}_5)_2\text{Fe}]^+[(\text{TCNQ})_2]^-$ ($\sigma_{\text{RT}} = 0.1 \text{Scm}^{-1}$) 和 $(\text{TTF})[\text{Ni}(\text{dmit})_2]_2$ ($\sigma_{\text{RT}} = \sim 300 \text{Scm}^{-1}$)。

一般说,具有高导电性的金属有机电荷转移复合物,在结构上应有以下的特点:组成复合物的电子给体和受体至少有一方是平面共轭体系;给体和受体分子在晶体中分别排列成均匀分子柱,柱内相邻分子的 π -轨道互相重叠,形成能带;电子给体和受体之间发生不完全电荷转移,生成混合价态,形成部分充填的能带,电荷沿分子柱方向传递。

合成电荷转移复合物的方法有化学法和电化学方法。用这两种方法均可以生成化学计量比不同的盐,其结构与导电性也不大相同。因此,如何控制反应条件,以得到所需要的化学计量比的单晶,仍是一个很重要的课题。

近年来,对电荷转移复合物的研究仍在寻找新的电子给体和受体以及控制分子的排列方式。例如,缪拉(Y. F. Miura)等于 1991 年研制了多烷胺—金属(dmit)₂ 复合物导电性的 LB 膜,其中一个体系是 $[(\text{C}_{10}\text{H}_{21})_3\text{N} + \text{CH}_3][\text{Au}(\text{dmit})_2]$ 与二十烷酸的混合物,其室温电导率为 50Scm^{-1} 。同年,洪尼格(Hunig)等也发现了一种新的电子受体 N, N'-二氰醌二亚胺(DCNQI)₃ = N, N'-dicyanoquinonediimines)。DCNQI₃ 铜盐是柱状分子排列,在压力作用下转变为半导体。

金属大环络合物 卟啉和酞菁都具有平面大环共轭结构。它们的金属络合物一般都是绝缘体或导电性很弱的半导体。但是令人惊奇的是,当某些金属酞菁或金属卟啉络合物用氧化剂处理以后,生成了计量式为 $[\text{M}(\text{L})\text{X}]$ (M 为各种金属, L 为配体, X 为氧化剂)的针状晶体,沿针状轴方向的电导率比原来母体的电导率最大者可增至 10^{12} 倍。

关于金属酞菁和卟啉超导体的基础研究,已作了大量的工作。碘掺入到金属酞菁和金属卟啉是以氧化剂而起作用的。共振喇曼光谱和 ¹²⁹I 穆斯堡尔谱表明,碘在这些化合物中均以 I₂ 形式存在。它们是混合价态络合物,可以写成 $[\text{M}(\text{L})^{0.5}] [\text{I}_2]_{0.5}$ 。顺磁共振研究表明,在 $[\text{Ni}(\text{L})\text{I}]$ 体系中,不同的大环配体会导致不同的机理。当 L = Pc(酞菁), omtbp(八甲基四苯并卟

咪)或tmp(四苯基卟啉)时,载流子产生于大环配体的氧化,而金属并不直接影响载流子的产生及导电过程,仅影响配体环的电子结构。当L=tbp(四苯基卟啉)或tatbp(三氮代四苯基卟啉)时,载流子产生于混合的配体 π -轨道和金属d-轨道的氧化,并在金属与配体间跳跃。这叫双混合态机理,意指中心金属和配体均呈混合价态。

荷兰希尔肯(O. E. Sielcken)等,研究了铜的酞菁、冠醚酞菁和冠醚酞菁与金属络合物的导电性,后者由于金属盐的聚合而使电导率增加。美国费拉拉(J. D. Ferrara)等系统地研究了一种新奇的n-掺杂的金属大环导体Ni(TBC)(TBC为tribengocyclodeca-1,5,9-triene-3,7,11-triynes)。这是一个平面环状络合物,Ni原子位于12个碳原子的环腔内,是迄今已知的n-掺杂金属大环导体的第1个例子,电导率为 $2 \times 10^{-3} \text{scm}^{-1}$ 。

金属有机夹层化合物在一定条件下,某些化合物可以克服另一层状物质中的范德华力,进入到层间空隙处,并因此扩大了层间距离,但并不破坏原有的层状结构,这种作用叫做夹层作用(Intercalation),生成的化合物称夹层化合物(Intercalation compounds)。一般把层状物质称为宿主(Host),进入夹层的物质称为客体(Guest)。化合物通过夹层作用可以带来一些新的性质,例如,石墨层间夹入 AsF_5 以后,电导率可以增加40倍。目前,夹层化合物的研究相当活跃,尤以石墨夹层化合物为甚。早期金属有机夹层化合物主要集中于金属有机夹心络合物(客体)和层状过渡金属二硫化物(宿主)的夹层作用。 TaS_2 在低温是超导体,其临界温度为0.8K。当金属有机夹心络合物和金属酞菁络合物与其发生夹层作用后,所生成的夹层化合物 $(\text{Cp}_2\text{Co})_{0.25} \cdot \text{TaS}_2$, $(\text{Cp}_2\text{Cr})_{0.25} \cdot \text{TaS}_2$ 和(四-二甲氨基酞菁铜) $_{0.05} \cdot \text{TaS}_2$ 的临界温度分别为3.2K,2.9K和3.1K。

金属有机夹层化合物研究的最新进展有Green和Bringley等人的工作。前者研究了以 MoO_3 和 FeOCl 为宿主和以类立方烷型金属有机原子簇为客体的夹层作用,制得了黑色的和计量式为 $[\text{Mo}_4(\eta\text{-C}_5\text{H}_4\text{P})_4(\mu_3\text{-Se})_4]_{0.06} \cdot \text{MoO}_3$ 和 $[\text{Cr}_4(\eta\text{-C}_5\text{H}_4\text{Me})_4(\mu_3\text{-S})_4]_{0.06} \cdot \text{FeOCl}$ 夹层化合物,室温电导率比相应的宿主分别增加了 10^9 和 10^5 倍。后者研究了TSF(Tetraselenafulvalene)和TMTSF(Tetramethyltetraselenafulvalene)与 FeOCl 的夹层作用,其电导率与宿主相比增加了 10^4 和 10^3 倍。

除以上3类以外,还有另外两类导电性金属有机化合物:一类是金属有机配位化合物,以 $\text{K}_2(\text{Pt}(\text{CN})_4)\text{Br}_{0.3} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为代表,室温电导率为 300Scm^{-1} ;另一类是金属有机高分子导体,目前已知的有金属卟啉和金属酞菁高分子,二茂铁高分子,有机硅高分子,以及其他含金属-碳键高分子化合物。例如,乙炔铜聚合物用 I_2 处理后,电导率可升高 10^{12} 倍。

金属有机导体的研究是一个十分广阔和有前途的研究领域。从发展方向看,今后将侧重在超导体的研究,目的旨在临界温度上有较大的突破。为此,必须对分子中的配体和中心金属原子进行设计和修饰,实现结构与性能的最优化。毫无疑问,无论是金属有机导体、半导体或超导体的应用,将可能部分代替无机电子材料,从而导致电子工业的深刻革命。

参考文献

- Melby L R, et al. J Am Chem Soc, 1962, 84: 3374
- Jerome D, et al. J Phys Lett (Paris), 1980, 41: L95
- Hoffman B M, et al. Acc Chem, Res, 1983, 16: 15
- Bringley J F, et al. Mol Cryst Liq Cryst, 1988, 170: 215~222
- Ishiguro T, et al. Mol Cryst Liq Cryst, 1989, 171: 333
- Siegfried, Hunig, et al. Advanced Materials, 1991, 3: 225~336
- 刘道玉, 秦金贵, 有机化学, 1988, 8: 487~496
(武汉大学刘道玉教授、秦金贵教授撰)

活泼有机硅中间体 active organosilicon intermediates.

有机硅化学是元素有机化学领域中发展最快而且最活跃的新兴学科之一。近数十年间,无论在基础理论还是在应用研究方面都取得了重大进展。在有机硅化学反应中,往往涉及到一些活泼中间体,如硅烯、类硅烯、含硅重键化合物($\text{Si}=\text{Si}$, $\text{Si}=\text{C}$, $\text{Si}=\text{N}$, $\text{Si}=\text{O}$, $\text{Si}=\text{S}$, $\text{Si}=\text{P}$, $-\text{Si}=\text{Si}-$ 等)、硅自由基、硅正离子、硅负离子等等。有些活泼中间体可离析出来或可以探测,而有些目前还仅停留在推测水平上。用实验或理论化学方法探测这些可能的反应中间体的化学性质对理解有机硅化学反应机理是非常必要的。

硅烯($\text{R}'\text{R}''\text{Si}:$)是有机硅化学中一类基本的反应活性中间体。它可以发生多种反应,用以合成一些新的、不常见的和独特的硅化合物。1880年弗里德(C. Friedel)在研究六卤代二硅烷热分解时,就涉及到硅烯中间体,但他并没有认识到硅烯的存在。1937年,施瓦茨(R. Schwartz)等人开始研究无机硅烯($\text{Cl}_2\text{Si}:$, $\text{H}_2\text{Si}:$)的制备、反应与光谱。1958年约翰斯(J. W. C. Johns)拍摄了 SiF_4 蒸气放电分解时的紫外发射光谱,第1次确认了 $\text{F}_2\text{Si}:$ 的存在。1962年沃尔频(M. E. Volpin)在含有二苯乙炔的二甲苯中,用金属钠与二甲基二氯硅烷反应,其结果对有机硅烯的研究起到了一定的启发作用。1964年,吉尔曼(H. Gilman)发现7-硅杂降冰片二烯热解可产生有机硅烯,1966年阿特韦尔(W. H. Atwell)发现了各种二硅烷热解生成硅烯,1970年熊田诚(M. Kumada)等人报道了多硅烷(或环硅烷)光照亦可生成硅烯,对硅烯化学的发展起了重大作用。迄今,热化学方法和光化学方法仍为产生硅烯的主要手段。70年代后,人们对硅烯的产生、结构和反应(聚合、加成、插入、重排)等方面进行了深入研究,在硅烯及其反应的化学热力学、动力学、光谱以及核化学方面也取得了许多成果,硅烯化学形成了有机硅化学中一个非常活跃的研究中心。1986年尤兹(P. Jutzi)从二卤硅烷合成了稳定的硅烯($\text{Me}_2\text{C}_5\text{Si}:$)。1990年卡什(H. H. Karsch)也报道离析出了稳定的硅烯,这为硅烯的结构、反应等方面的研究开辟了新的篇章。在硅烯化学的研究方面,加斯泊(P. P. Gaspar)等人做了很多工作。一般硅烯的基态为单线态,近期他们在合成稳定的三线态硅烯方面也取得了较大的进展。吴世晖等人则对环丙基、杂环基硅烯的制备及其分解、扩环等反应进行了较系统的研究。

与此同时,理论化学家对硅烯化学的研究也产生了极大的兴趣。1966年乔丹(P. C. Jordan)用半经验法预言,母体硅烯($\text{H}_2\text{Si}:$)的基态为单线态(1A_1),第1激发态是三线态 3B_1 。后来戈登(M. S. Gordon)等人对 $\text{H}_2\text{Si}:$ 进行的SCF、MCSCF、TCSCF、CISD等多种从头算研究,也得出同样的结论,且与实验结果吻合。近20年来,戈登在不同的从头算水平上,对不同的取代硅烯、环硅烯的电子能量、结构、活性及其异构、重排、加成、聚合、插入等反应进行了详尽的研究,预言了硅烯参加的有机硅反应机理,同时从理论角度也说明了硅烯是有机硅化学的一类重要活性中间体。

类硅烯的研究是一个正日益受到人们重视的课题。类硅烯可大体分为两类:硅烯-过渡金属络合物($\text{R}'\text{R}''\text{SiM}'\text{L}$, M' 为过渡金属, L 为配位基)和硅烯-碱金属卤化物($\text{R}'\text{R}''\text{SiMX}$, M 为碱金属, X 为卤素)。类硅烯可看作硅烯与过渡金属络合物(或碱金属卤化物)的加合物,活性较高,在一定条件下可释放出硅烯。它们与硅烯有类似的性质,虽有自己的特点,但可发生与硅烯相似的反应。第一类类硅烯作为合成试剂和发生硅烯的前驱物已有许多报道。

1970年施密德(G. Schmid)等人报道利用六氯二硅烷与四(三苯基磷)铂络合物反应,可以制备二氯硅烯-铂络合物, $(\text{Ph}_3\text{P})_2\text{Pt}(\text{SiCl}_2)_2$ 。此后,数种硅烯-过渡金属络合物已通过含硅官能的硅烷或二硅烷与相应的过渡金属化合物反应(热或光)被合成出来,同时对这些络合物的某些反应也作了研究。

1961年内菲道(O. M. Nefedow)在研究二氯硅烷与金属钨

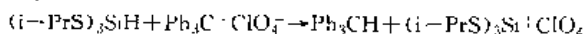
的反应时,推测认为类硅烯 $R_2SiLiCl$ 为反应的中间体。1965年吉尔曼(H. Gilman)也提出同样的观点。1980年,克拉克(T. Clark)为了与类卡宾对比,首先对最简单的类硅烯 H_2SiLiF 进行了从头算理论研究,发现它在结构上有许多特点。为了探索聚硅烷反应机理,1990年冯圣玉等对 $H_2SiLiCl$ 等类硅烯的从头算理论研究,确立了该类类硅烯的存在及其结构,并推断在二氯硅烷与金属锂的反应中,类硅烯应该是反应的活性中间体,其最稳定的平衡构型具有三员环结构,经典的四面体结构并不存在。

早在19世纪末,人们就曾设想合成含硅重键的化合物,如硅杂苯、硅碳烯(Si-C)、二硅烯(Si-Si)、硅酮(Si-O)、硅氮烯(Si-N)、二硅炔(-Si≡Si-)等,但均未成功。对60年代中期,含硅重键化合物仍被称为“不存在的化合物”。1967年古西尼可夫(L. E. Guseynikov)在热解硅杂环丁烷时,提出了硅碳烯的存在。1972年劳克(D. N. Roark)在热解桥二硅烷衍生物时首次证明了Si-Si为反应的中间体。此后, Si=O、Si=S、Si=P等作为实际存在的活性中间体都得到证明。1981年,韦斯特(R. West)从多硅烷的光解合成出了第1个稳定的二硅烯: $(Me)_2Si=Si(Me)_2$,后来又合成出两种稳定的二硅烯,1981年布鲁克(A. G. Brook)报道分离出了第1个稳定的硅碳烯: $(Me_3Si)_2Si=C(OSiMe_3)C_6H_5$,这些二硅烯或硅碳烯之所以能稳定存在,是由于其大的取代基的存在抑制了二聚或其他反应的发生。另外,取代基团的电效应也是含硅双键稳定存在的一个因素。关于含硅叁键的稳定化合物虽还未离析出来,但1986年韦斯特等人在二硅烷的热解实验中已证明了二硅炔($MeSi≡SiMe$)的存在。

含硅双键化合物在不同水平上的量子化学计算已有大量的报道,对简单的理论模型进行了构型优化,确定了它们的电子能量、结构和稳定性,同时对它们的加成、重排等反应也作了深入的研究,尤其对二硅烯和硅碳烯的研究更详尽。为了探明硅碳烯的性质,70年代后期斯卡弗等人就对不同的硅碳烯进行了CNDO、MINDO和简单的从头算计算。捷斯伯森(K. K. Jespersen)在不同相关水平上的计算结果表明,二硅烯 $H_2Si=SiH_2$ 具有非平面构型(反式弯曲构型),它易于二聚或重排为硅基硅烯。余敬曾等人对取代二硅烯进行了CNDO/2计算,说明取代基对二硅烯的稳定性有很大的影响。从理论化学家的研究结果均可表明,含硅双键化合物是存在的,它们是有机硅反应的活性中间体。

硅自由基、硅负离子的存在已被证明,如硅一氢化合物、二硅烷等化合物的光解、热解过程均可产生硅自由基、氯硅烷、二硅烷等与碱金属反应则产生硅负离子活性中间体。关于硅自由基、硅负离子的结构、能量等理论计算也已有不少报道。

对于硅正离子的存在性曾是悬而未决的问题。1983年兰伯特(J. B. Lambert)首先报道了利用带有极性基且易形成 $3P\pi-3P\pi$ (含硅)的有机硅化物,在 $Ph_3C^+ClO_4^-$ 存在下,于溶液中形成了 Si^{4+} 。



用核磁共振光谱($^{13}C, ^1H$)与电子光谱证明了结构,从而确认了硅正离子是一个真正的活性中间体。

活泼有机硅中间体作为有机硅化学广阔而又活跃的研究领域,在实验上和理论化学方面均得到了深入的发展。未来人们仍会致力于探索新反应,研究反应机理。稳定的硅烯、含硅双键化合物的合成及其化学性质的研究仍将是实验工作的热点,三线态硅烯的合成也是有意义的研究课题。类硅烯比硅烯更稳定,因此反应选择性强,开展类硅烯 R^1R^2SiMX 的实验研究将是必要的,并相信不久的将来会有较大的进展。另外,有许多活性中间体实验上还不能证明,对某些反应机理的研究停留在推测水平上。因此,用理论化学的方法进行研究颇显重要,未来的理论研究模型将会更接近实际,理论与实验结合,活泼有机硅中间体的研究必将有新的突破。

参考文献

1 Jutz P. IXth International Symposium on Organosilicon chemistry, Scotland, University of Edinburgh, 1990, I. 4

2 Gilman H, Peterson D J. J Am Chem Soc, 1965, 87, 2389
 3 杜作栋,陈剑华,贝小来,等.有机硅化学.北京:高等教育出版社,1990. 24~38; 335~359
 4 Raabe G, Michl J Chem Rev, 1985, 85, 419~509
 5 Sekiguchi A, Zigler S S, West R. J Am Chem Soc, 1986, 108, 4241~4242

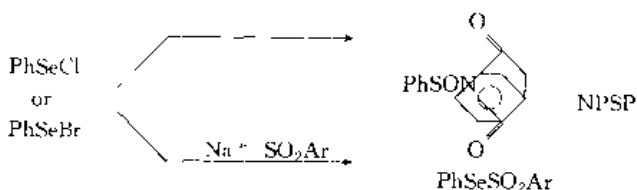
(山东大学新材料研究所冯圣玉副教授,冯大诚撰;杜作栋审)

有机硒化学 organoselenium chemistry

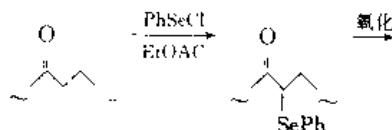
1836年,第一个有机硒化合物(二乙基硒醚)合成成功,距1818年Berzelius发现硒元素已近20年,但纯化和鉴定却又延迟30年于1869年才完成,这种难产式诞生就决定本学科发展是势必缓慢,其基本原因在于有机硒化合物不可亲气,即高毒、恶臭、自氧化和光敏性。1950年发现一些天然有机硒化物,并且有生物活性。1955年H. Rheinboldt对本领域首次作了杰出综述,结束了缓慢发展阶段。1968年美国成立发展硒/碲有机化学委员会(Selenium-Tellurium Organic Chemistry Development Association),在该组织大力支持下由D. L. Klayman编写有机硒化学巨著,使1973年出现爆发式增长趋势,发现有机硒化学与近代合成化学有密切关系,极适用于天然产物领域中化学,定向和立体选择性研究,1974年合成四硒代富烯为有机导体和超导体研究奠定基础。三大因素推动在20年内飞跃发展,导致1986年D. Liotta和K. A. Jensen专著陆续问世。

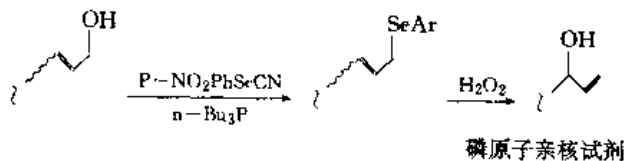
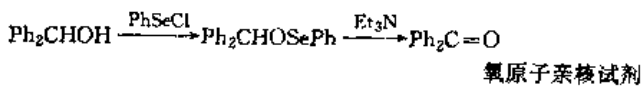
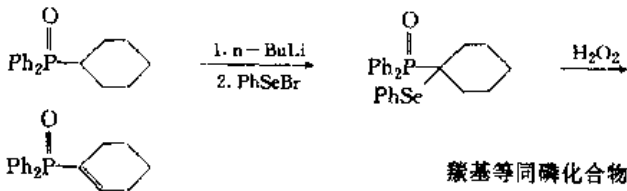
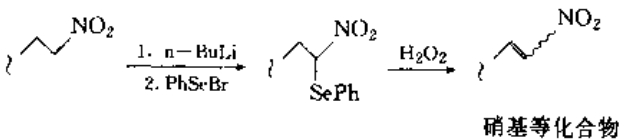
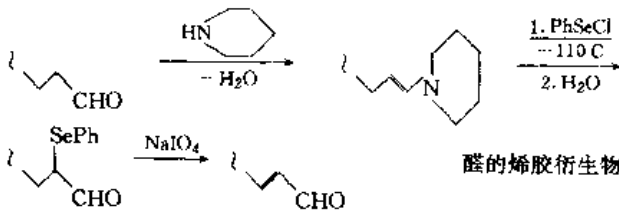
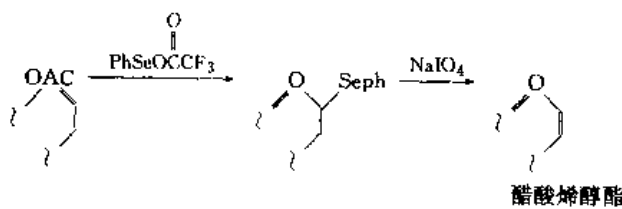
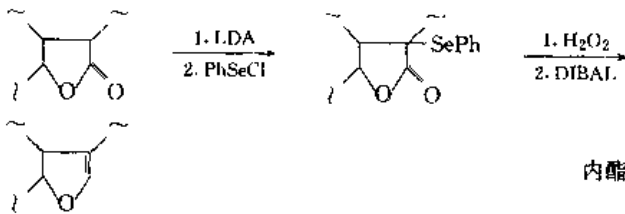
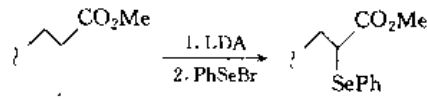
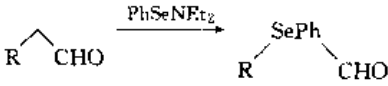
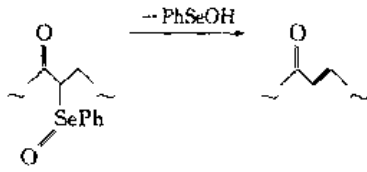
硒在周期表中属VI-A族,上有非金属的氧、硫,下有金属性砷、钼、碲,左有V-A族金属性铋和右有VII-A族非金属性溴,所以被认为准金属,具有金属性和非金属性两重性。表现在有机硒化学中为亲电硒反应和亲核硒反应。亲电硒试剂通式为 RSe^+X^- , X^- 为能离去的卤素或准卤素基团,亲核硒试剂的通式为 RSe^-M^+ , M^+ 为活泼碱金属Li等,最常用为 $RSeCl$ 和 $RSeBr$ 亲电试剂与 $RSeLi$ 和 $RSeNa$ 亲核试剂。

亲电硒反应(Electrophilic Selenium Reactions)常用试剂 $RSeCl$ 挥发性大、稳定性差和毒性大,可通过亲电硒反应衍生成 $NPSP$ 和硒代磷酸酯,它们是稳定的无色无味,能长期储存待用的试剂。



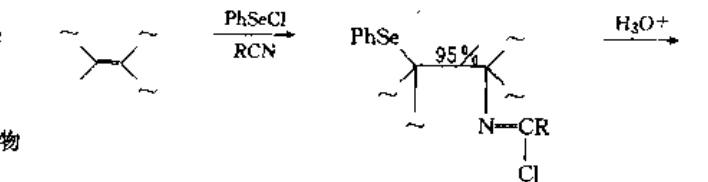
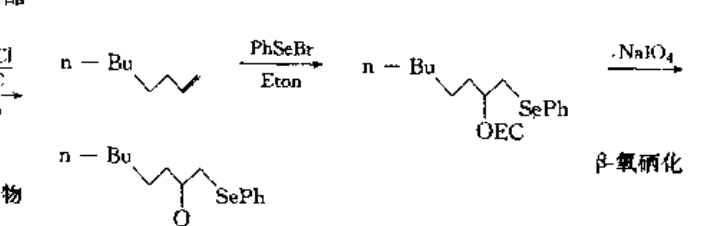
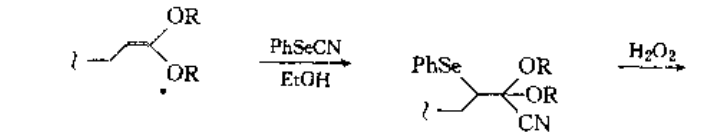
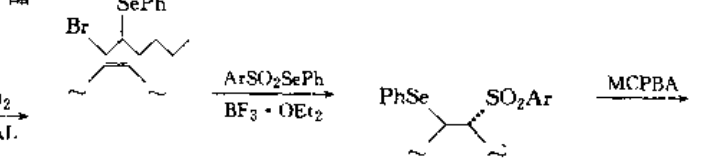
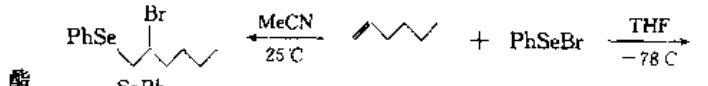
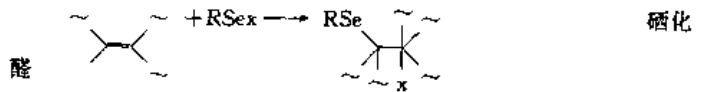
1. 亲电取代反应。羰基化合物中 α -氢是活泼氢,是典型亲核试剂,它与亲电硒试剂在室温下能进行亲电硒取代反应,最大优点是最高化学、定向和立体选择性,若产物氧化为含 β -氢有机硒氧化物就能在温和条件下进行顺式消去生成各种不同类型不饱和化合物,在有机合成化学上引入 RSe -基团就具有双键等价含义,克服经典 β -消去反应例酸催化醇类脱水,碱引发卤代烷消去和季胺盐的霍夫曼消去等缺乏专一性问题,至今本反应研究已超过3位数,所涉及羰基化合物有酮、醛、酯及内酯、烯醇乙酸酯或硼酸酯,醛的烯胺或烯酰胺衍生物,与羰基等价含氮、磷、硫和锡官能团化合物以及杂原子氧、氮、硫和磷等亲核试剂与 $RSeCl$ 发生硒化反应也有大量报导。



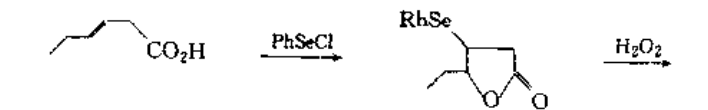


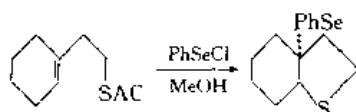
2. 亲电加成反应。1977年 Schmid 已综述有 44 种烯烃定向选择性加成反应, 根据不同亲电硒试剂和介质可分类为硒化、硒

磺化、腈硒化、β-氟硒化和 β-氧硒化反应, 立体专一性为反式加成, 在不对称烯烃加成定向选择性控制不佳, 例单烷基烯烃以乙腈为溶剂在室温下主要是马尔柯夫尼可夫加成, 但在 -78°C THF 为溶剂时产物鉴定为反马尔柯夫尼可夫加成产物。

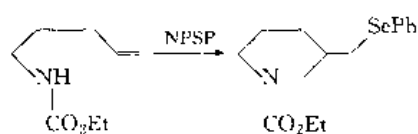


3. 闭环反应。分子中亲核末端与亲电末端之间能发生闭环反应是合成碳环和杂环化合物重要方法, 利用有机硒亲电加成反应于不饱和酯等能诱发醚化, 内酯化, S-杂环化和 N-杂环化等闭环反应已有大量报导, 应用于天然产物合成化学中有突出的优越性。

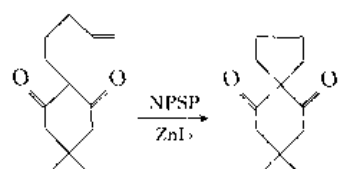




S-杂环化

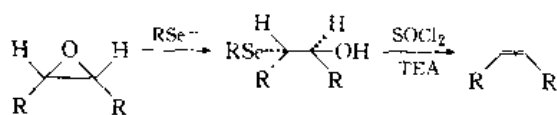


N-杂环化

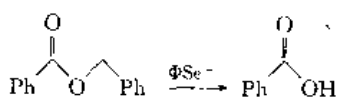


碳环化

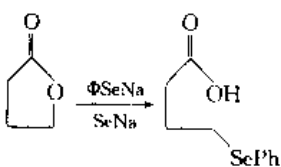
亲核硒反应(Nucleophilic Selenium Reaction) 用 NaBH₄ 加入于二苯二硒醚的醇溶液中能产生 PhSe⁻ 离子即刻进行亲核硒反应,与环氧化物以高得率产生 β-羟基烷基硒醚。也能使酯与内酯断裂实现酯酸转化,与伯、仲卤代烷反应生成硒醚,与不饱和羧基化合物得到 β-芳硒基羧基化合物,与不活泼乙烯基卤化物产生乙烯基苯基硒醚。



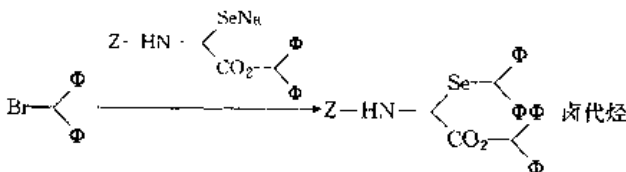
环氧化物



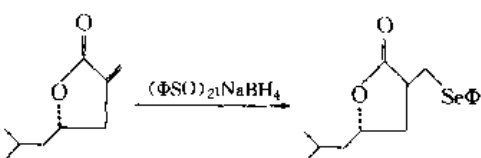
酯



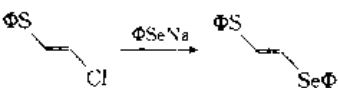
内酯



卤代烃

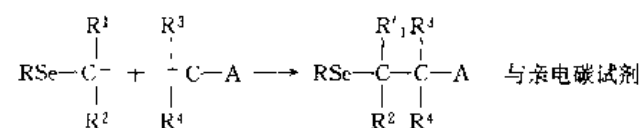


不饱和羧基化合物

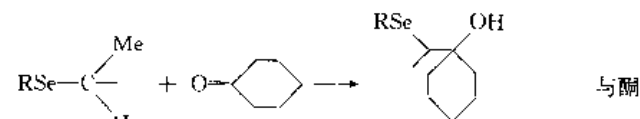


乙烯基卤化物

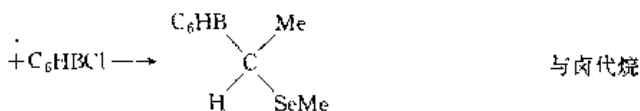
性、活性和碱性更高。现已成为极有用合成子,与亲电碳反应生成新的碳碳键,与酮反应生成 β-羟基烷基硒醚,与烷基卤化物,酰化剂以及非碳亲电试剂均能反应。



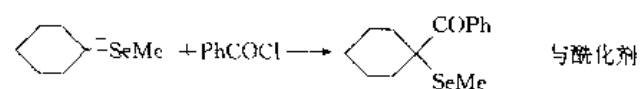
与亲电碳试剂



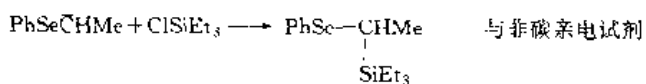
与酮



与卤代烷

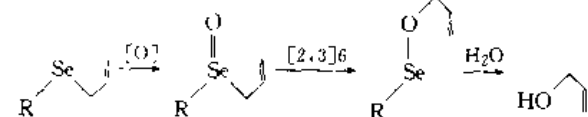


与酰化剂

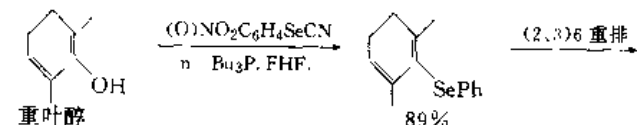


与非碳亲电试剂

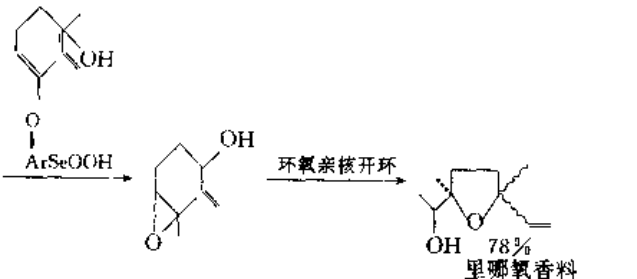
[2,3]σ重排(2,3Sigmatropic Rearrangements) 有机硒化合物 2,3σ重排涉及氧从硒转移到碳上生成碳氧键,水解断裂后产生丙烯醇单元。由于硒化和氧化断裂硒均优于硫,但由于价格昂贵,在特定天然产物化学改性上可广泛应用。



酯

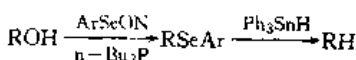


内酯

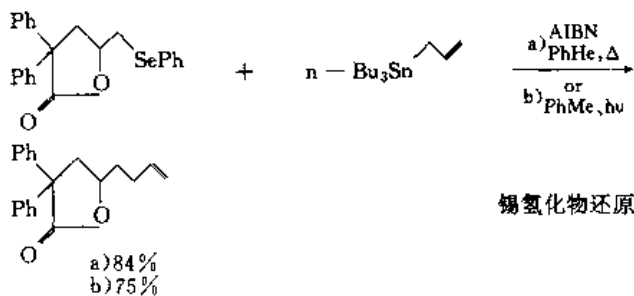


里哪氧香料

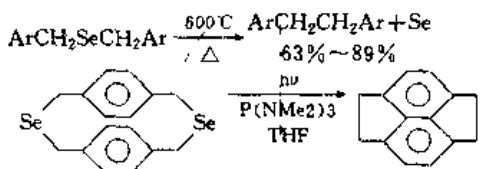
自由基反应(Radical Reactions) 众所周知硒是一个光敏元素,能进行自由基反应的有机硒化合物为二硒醚,硒醚和硒醇等,在合成化学上有用的锡氢化物还原,基于硒挤出的碳碳键生成,硒醇及其衍生物还原,和 S_{RN1} 反应,以及烯烃,丙二烯和炔烃硒磺化反应,在生命体内它也呈重要抗氧化剂作用,硒蛋白谷胱甘肽过氧化酶由于聚不饱和类酯过氧化物有关自由基过程来抑制细胞膜损伤,利用它成功应用于辐射保护剂和显影剂,以及显微成象和光导材料研究。



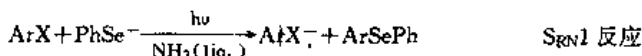
硒稳定碳阴离子(Selenium-Stabilized Carbanions) 早于 1939 年硒稳定碳阴离子制备成功,直到 1969 年 Seebach 利用二烷基胺才制备硒稳定碳阴离子,实践证明它比硫同类物稳定



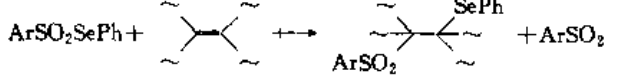
锡氢化物还原



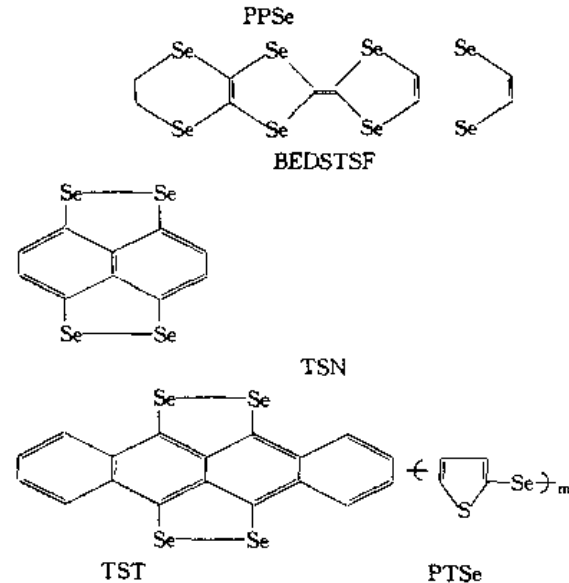
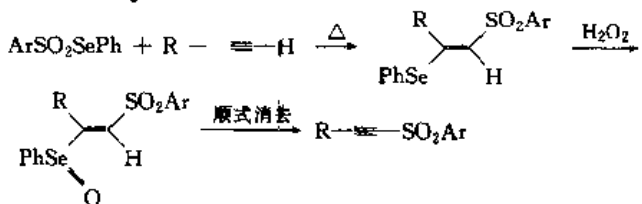
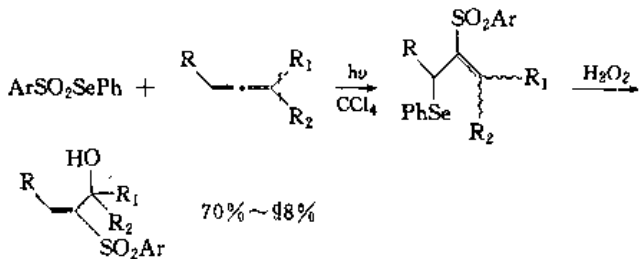
挤出硒生成碳碳键



SRN1 反应



硒磺化反应



有机硒化学还有杂环化学,络合物化学,叶立德化学都还是当今研究热点。限于篇幅,不再赘述。

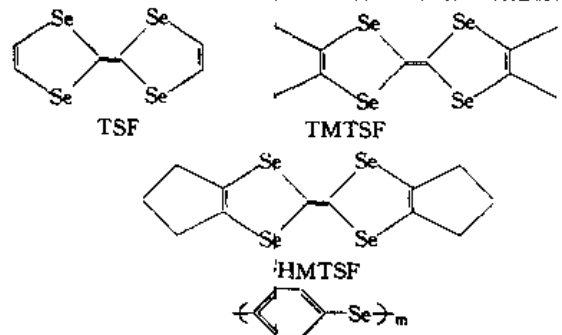
中国有机硒化学研究已于80年代入门,值得提及的杭州大学徐洵、南开大学桂明德和中国科学院黄耀曾均有一定建树,完全可以相信一支强有力研究力量将在中国成熟起来。

参考文献

- 1 Rheinbdt H. Houben - Weyl Methoden der Organischen Chemie Vol IX E Muller ed, 1955, 9
- 2 Klayman R L, et al. Organic Selenium Compounds. Their Chemistry and Biology, 1973
- 3 Clive D L J. Modern Organoselenium Chemistry. Tetrahedron Report Tetraedrom 34, 1978, 1040
- 4 Patai S, et al. The Chemistry of organic Selenium and Tellurium Compounds, 1986
- 5 Liotta. Organoselenium Chemistry, 1987
- 6 桂明德. 有机硒化合物. 张青莲主编, 无机化学丛书, 1990, 5: 471

(中国科学院上海有机化学研究所徐恩羽
副研究员撰, 丁宏勋审)

有机金属导体与超导体(Organic Metal Conductors and Superconductors) 有机金属导体为晶体电荷传递络合物和局部氧化还原的聚合物。而有有机硒化物却在这一高科技工程材料研究中占重要地位。1980年Eagler研制第1个有机硒金属导体。到1982年止研究表明硒有机金属导体比硫有较高室温导电性,甚至高达 $2000\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$,金属-绝缘体转变温度(T_{M1})比硫同类物低 14°K ,甚至在 1°K 仍有非常独特性, $(\text{TMTSF})_2\text{ClO}_4$ 在大气压和 1°K 显示超导特性,在美国已为IBM公司青睐,在国内武汉大学刘道玉教授也有浓厚兴趣和关切。引人注目有机硒化物如下:



高分子化学

高分子磁性材料 作为磁性材料一个新的分支,自70年代以来在理论与应用的研究方面,都取得了长足的进步。不少现代化的工业产品,正在愈来愈多地采用高分子磁性材料及元件,从而在相当大的程度上,改变了以往有关磁性材料的传统观念。特别是在当代电子、电气、通讯、信息等工业产品,朝着微型化、轻量化、高可靠性方向发展的情况下,高分子磁性材料以其优异的性能,而备受青睐。

大约在1000年前,人们就知道在自然界中存在着一种铁黑色的矿石,具有磁性。古人用它作成指南针,用以辨别方向。正是由于指南针的发明及运用,才促进了航海与贸易事业的蓬勃发展。

磁来源于电子的轨道运动和电子的自旋运动。前者是电子绕原子核的量子轨道运动,这相当于一个闭合电路的电流,此运动对物质的磁性起着重要作用,而电子的自旋运动,对物质的磁性也有相当大的贡献。

1968年,又贺(K. Mataga)等人在深入地研究了顺磁性有机自由基(Magnetic Organic Free Radicals)的基础上,提出这类有

机自由基可能形成P铁磁性物质的理论之后,高分子磁性材料的研究就日益开展起来了。至今,已知约有500万种有机化合物,根据磁性可将它们分为两类:即抗磁性有机化合物与顺磁性有机化合物。

抗磁性有机化合物中的结构电子都配成了对,因此它们具有稳定的电子层结构。这类有机化合物的磁化率,大致符合巴斯卡(Pascal)叠加原理,其函数式可表示为:

$$X_M = \sum n_A \cdot X_A + \sum \lambda$$

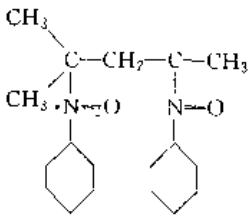
式中 X_M 为摩尔分子磁化率; n_A 为具有原子磁化率 X_A 的原子 A 的数目; λ 为修正系数。

对于结构较简单的有机分子来说,其磁化率可与上式符合得较好;但对复杂有机分子的误差较大,尤其对芳香族化合物更为显著。

在顺磁性的有机化合物中,则存在着未成对电子,故显示出顺磁性。含有未成对电子的有机基团,称之为有机自由基。从本质上分析,有机自由基是不稳定的,但含有有机自由基的顺磁性有机高分子的聚合物是稳定的。这是由于电在其分子结构中存在着空间障碍及共振结构效应的原因。顺磁性有机化合物的磁化率,决定于其所含有的不成对电子数,也就是说不成对电子的数目愈多,磁化率也愈高;反之亦然。

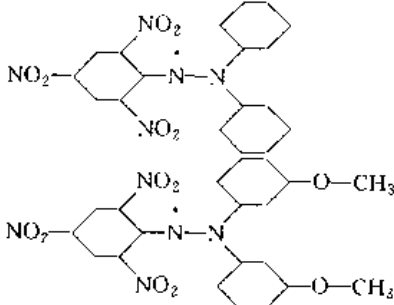
高分子顺磁性磁性材料,又可分为两类,即结构类和复合类。

所谓结构类高分子顺磁性材料,系指在共聚合物中,引入了某些含有不成对电子的有机自由基,而构成的。具有代表性有机自由基有:(1)本菲尔德-肯荣(Benfield-Kenyon)型有机自由基:



化学结构式中的·为未成对电子。

(2) DPPH 型有机自由基,这类有机自由基的结构如下:



DPPH 为 1,1—双(对氧基苯)—2—三硝基苯胍胟。

(3) PPH 硫酸铁型有机自由基: PPH 为聚双-2,6-吡啶基辛二膈。大多数有机自由基的顺磁性磁化率,是随着温度的变化而变化,如 DPPH 型有机自由基的顺磁性磁化率的极大值在 21K。

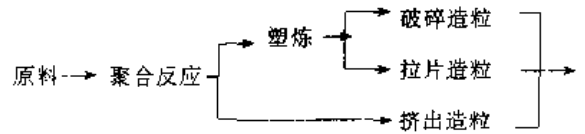
复合类高分子顺磁性材料,是指在共聚合物中,添加某些无机磁性粉体,而形成的。如铁氧粉体、铁磁性金属粉体、稀土金属及其化合物粉体,以及过渡金属间的化合物粉体等。它也有两种:一种是在非磁性的高分子聚合物中,加入某些无机磁性粉体而构成的;另一种则是在结构型的高分子聚合物中,加某些无机磁性粉体构成的。

非磁性高分子共聚合物添加无机磁性粉体所形成的高分子顺磁材料有:橡胶—无机磁性物质塑料—无机磁性物质。

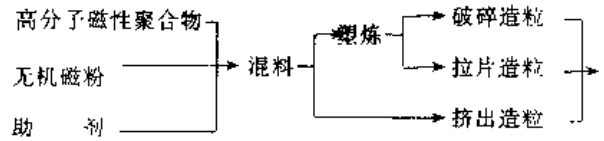
在结构型的高分子聚合物中加入无机磁粉而形成的高分子顺磁性材料,其组成中的高分子聚合物与无机磁性粉体,均具磁性。

结构类高分子顺磁性材料的加工工艺如下:

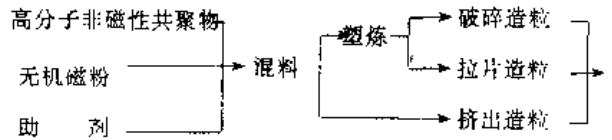
复合型高分子顺磁性材料的加工工艺如下:



拉料 → 成型 → 充磁 → 产品。

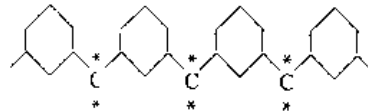


拉料 → 成型 → 充磁 → 产品;



拉料 → 成型 → 充磁 → 产品。

为了制备适应现代科学技术所需要的高分子磁性材料,科学家们正在积极开拓。根据已有的实践和理论,具有倾向性的看法是在两种有机化合物,或在有机化合物与无机物之间,如果存在着电子云的偏移,将会产生不成对电子,其产物就具有顺磁性;反之,将会产生抗磁性。按此原理去寻找或合成高分子磁性材料,会有成功的希望。再者,如果在高分子聚合物中存在如下结构的有机自由基,将会出现较强的顺磁性。



参考文献

- 1 Ohigashi N, Inokuchi H. Paramagnetic Susceptibilities Of Some DPPH, Bull Chem Soc Japan, 1969, 42, 1212~1216
- 2 近角聪信等编集. 磁性体ゾソドベシク. 朝仓书店, 1975, 752~756
- 3 孙醒经主编. 功能高分子材料及应用. 北京: 化学工业出版社, 1990, 95~114
- 4 区英鸿主编. 塑料手册. 北京: 兵器工业出版社, 1991, 854~863
- 5 王德义. 高分子磁性材料, 现代化工, 1991, 3: 51~52

(天津大学王德义撰)

黄原胶溶液

xanthan solution 黄原胶(Xanthan Gum)是一种阴性菌胞外异聚多糖,属于生物高分子。它具有增粘性、悬浮性、耐酸碱,抗盐钙等许多优异性能,广泛应用于探矿、钻井、食品等几十个工业部门。自1961年黄原胶问世以来,对它的性能研究逐渐展开。

黄原胶是聚电介质,其溶液的粘度、渗透压等显示出聚电介质所特有的浓度依赖性。用加盐的方法可以抑制或消除黄原胶溶液在低浓度时比浓粘度的迅速增大。1978年里瑞多(Rinaudo)等对黄原胶聚电介质粘度和离子强度、Na 或 Ca 型黄原胶、H⁺浓度的关系进行了研究。1988年王德润等研究了黄原胶的粘度对离子强度的依赖性,结果表明随离子强度的增加,ηSP/C 降低,当 NaCl 的浓度大于 0.005mol/L 时黄原胶聚电介质溶液行为得到很好的克服。

黄原胶是聚电介质,对它分子量的研究不同于普通高分子化

合物。1970年丁特齐斯(Dintzis)等用经典光散射法测得黄原胶的分子量为 2×10^6 。1977年霍尔兹沃思(Holzwarth)用超速离心沉降和透射电镜法分别测得黄原胶的分子量为 15×10^6 和 $4 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6$ 。1980年索恩温克(Southwinck)用动态光散射法测得黄原胶分子量为 2.16×10^6 。而由MFS等式推算出其分子量为 15×10^6 。王德润等曾用超速离心法、透射电镜法和小角激光光散射法对黄原胶的分子量进行研究,超速离心法以Svedberg方程算出分子量为 2.5×10^6 。此法比Holzwarth的方法简单,另外,采用高转速排除一切干扰因素,结果比较可靠。根据X-衍射结果认为黄原胶分子为五折,螺距为 $4.7 \mu\text{m}$ 单螺旋,根据透射电镜照片进行计算分子量为 $6.06 \times 10^6 \sim 25.65 \times 10^6$ 。以KMX-16小角激光光散射法测得黄原胶的分子量为 2.36×10^6 。虽然对黄原胶溶液的性质、分子量的研究有许多困难,但国内外的研究工作得到相一致的结论。充分表明了它的客观性。

黄原胶分子具有多分散性,因此,对它的分子量的分布的研究很有必要。1982年兰伯特(Lambert)用GPC与小角激光光散射联用方法测得其分子量分布指数为 $M_w/M_n=1.2$ 。1978年Holzwarth利用区域沉降辅以荧光示踪的方法测得黄原胶分子量分布指数为 $M_w/M_n=2.4 \sim 2.8$ 。1988年王德润等采用超声波切断技术,对黄原胶处理不同时间而获得一系列具有不同分子量的级分。然后以粘度计测其特性粘度,用小角激光光散射法测其分子量,以测得的不同分子量的黄原胶为标样,以GPC测出天然黄原胶的各种平均分子量及其分子量分布。由GPC给出 $M_n=1.4 \times 10^6$, $M_w=3.08 \times 10^6$, $M_v=2.80 \times 10^6$, $M_z=6.65 \times 10^6$, $[\eta]=2049.567$, $D(M_w/M_n)=2.18$ 。王德润等根据黄原胶特性粘数和重均分子量从Mark-Houwink方程即 $[\eta]=KM^a$ 中求出 $a=0.76$, $K=0.0258$ 两个参数,为今后的研究工作提供了方便。

黄原胶多糖和普通高聚物一样是一个极复杂的体系。Holzwarth曾用透射电镜研究认为其原始结构为二股或三股右手螺旋。王德润等以扫描电镜研究了温度、浓度对黄原胶形貌的影响。认为在极稀的水溶液(1%以下)中黄原胶所固有的一种高级结构是由许多分子或多或少绕一个中心呈放射状卷曲排列而成的菊花状聚集态结构。用超声波处理后的电镜照片表明超声波能改变黄原胶的结构形貌。加热也同时破坏菊花状的四级结构。

1977年Holzwarth等用电子显微镜研究黄原胶在水中的构象,结果表明其构象是双螺旋。他们又从流体力学和光散射数据中估算出黄原胶水溶液中单分子单位长度和摩尔质量为 $2000/\mu\text{m}$,这恰好是黄原胶单分子链理论的两倍。陶卡赫罗(Tokahiro)用光散射法研究了黄原胶的NaCl水溶液中和以单分子的无规线圈形式存在的Cadoxen中的分子量,发现前者的分子量是后者的两倍。王德润等根据黄原胶分子体积不同与分子量的差异用GPC法研究表明,黄原胶在NaCl水溶液中不只是由两个单分子形成的双螺旋构象而还有多个分子缔合的结果。整个大分子是由刚性片断连在一起的柔性链。对黄原胶单分子形貌在分变率较高的电镜($1.4 \times 10^{-10}\text{m}$)下观察,并从变性后的形态变化推测出黄原胶分子的二级结构是由40余个亚基组成的直径为 $4\mu\text{m}$ 的右手双螺旋。黄原胶分子三级结构包括环状、线状、无规卷曲、发卡状等形式。

黄原胶的结构和性能决定了它的广泛应用。它的流变性质格外重要。近年来,陶科(Tako)研究了天然黄原胶与脱乙酰黄原胶在水介质中的流变性,测定了不同浓度黄原胶的动态粘度。结果表明,天然黄原胶存在塑性。几乎总存在非牛顿流动,而脱乙酰黄原胶则在浓度低于0.3%或大于5%时才显示出来。天然黄原胶在不同浓度下动态粘度与 H^+ 浓度无关,而脱乙酰的 H^+ 浓度降低,动态粘度降低。1988年王德润等曾用旋转粘度计研究了黄原胶的粘性行为,粘度与剪切速率的关系,结果表明,粘度随剪切速率的增加而降低,属于假塑性流体。

黄原胶液晶的形成强烈依赖它所在溶液的浓度。形成液晶时,溶液中的分子成层状排列,呈螺旋结构。马雷特(Maret)用偏光显微镜证明黄原胶水溶液(7.5%)有近似胆甾型液晶的长程

有序。1982年萨拉莫内(Salamone)研究了黄原胶形成液晶的临界浓度为2.9%。1985年王德润等用小角激光光散射法,偏光显微镜法,旋转粘度计法研究了黄原胶水溶液在不同浓度下的光学性质,结构区域及粘性行为。发现当溶液浓度达到3%时,呈现胆甾型液晶特征。还发现随温度升高溶液中胆甾区域扩大。直到68℃液晶依然存在。95℃时散射强度出现最小值。从而反映黄原胶形成液晶的程度。1986年王德润等首先将Raman光谱用来研究结晶,结果表明液晶的形成只影响喇曼光谱的强度而与波数无关。王德润等还以DSC和X-衍射表征黄原胶液晶特点,并计算出黄原胶液晶面间距为 $5.88 \times 10^{-10}\text{m}$ 。

对黄原胶聚集态结构和分子水平的研究如上所述,但对其流变性和液晶研究甚少,特别是对其液晶的应用有待进一步研究。王德润预见如能将它的分子结构从 β -1,4连接改变结构并准确测出是 β -1,3连接,可能有新的功能,如抗肿瘤活性。

参考文献

- 1 Dintzis F R, et al. Carbohydr Res, 1970, 13: 257~267
- 2 George. Holzwarth Molecular weight of xanthan polysaccharide, carbohydr Res, 1978, 66: 173~186
- 3 Southwick J G, et al. Quasielastic, lightscattering studies of xanthan in solution Carbohydr Res., 1980, 84: 287
- 4 Lambert F, et al. Gel permeation chromatography of the xanthan gum using a light scattering detector polymer Bulletin, 1982, 7: 185~189
- 5 Wang Derun. International Conference liquid crystal polymer, Bordeaux France, 1987, 7: 20
- 6 王德润, 等. 高分子学报, 1988, 1: 23
- 7 王德润, 等. 高分子学报, 1990, 1: 60~66
- 8 王德润, 等. 高分子学报, 1990, 3: 322~326
- 9 王德润, 等. 高等学校化学学报, 1990, 11(7): 789~791
- 10 王德润, 等. 南开大学学报, 1990, 3

(天津师范大学陈慎之副教授撰; 王德润审)

聚烯烃结晶与相变 crystallization and phase transition

of polyolefins 聚乙烯及有规立构聚烯烃如聚丙烯、聚丁烯等都是结晶聚合物。研究结晶聚合物的结晶与相变有重要的实际意义。(1)控制结晶速率,当聚烯烃用注塑或挤出方法加工成型时,一般要求聚合物有较快的结晶速率,使其力学性能及尺寸迅速趋于稳定,不再随时间变化。(2)控制结晶度及球晶尺寸,以改善聚烯烃的力学性能、透明度等。(3)将折叠链的片晶通过各种途径转变成取向的伸直链晶体,以提高聚烯烃的模量与强度。(4)聚丙烯、聚丁烯等聚烯烃可结晶成多种晶型,通过改变结晶条件、添加成核剂等方法,使它结晶成某种不常见的晶型,以达到改性及高性能化的目的。

由于聚烯烃的品种繁多,限于篇幅,本文举几个重要的实例来说明有关聚烯烃的结晶及相变研究的进展情况。

1957年英国A. Keller与德国E. W. Fischer同时发现线型聚乙烯从稀溶液中结晶生成厚度为 $100 \times 10^{-10}\text{m} \sim 200 \times 10^{-10}\text{m}$ 的折叠链片晶,以后又在熔融状态结晶的聚乙烯中发现了片晶,人们开始认识到片晶是构成聚乙烯等结晶聚合物晶区的最基本形态。

线型聚合物是由C-C共价键联结起来的长链大分子构成的,如果所有大分子沿着某一方向伸直排列,则聚合物材料沿着此方向的理论强度应为:

$$GPa = \frac{\text{键强度, dyne} \times 10^4}{\text{分子横截面积, nm}^2}$$

由聚乙烯的晶胞参数可以估计分子横截面积, C-C键的强度是已知的。从上式估算的聚乙烯的理论强度为27.4~31.9GPa。但实测的聚乙烯的抗张强度比此值小数十至数百倍。

为了使聚乙烯分子沿着某一方向排列,许多学者研究了聚乙烯的拉伸, Peterlin提出了聚乙烯拉伸的分子模型。按照该模型,

结晶聚合物的拉伸分为由晶片构成的球晶的塑性变形、球晶向纤维晶的转化及纤维晶的塑性变形等3个阶段,但是经过高度拉伸得到的取向的纤维晶的强度也只有理论强度的1/20~1/30。

以后的研究发现,普通拉伸纤维中大部分仍然是折叠的分子链,而且还存在许多缺陷。从70年代起,不少学者用超拉伸及固相挤出等方法以取得伸直链晶体,但最成功的方法是1979年荷兰DSM公司发明的凝胶纺丝法。这方法的要点是将超高分子量的聚乙烯在稀溶液中溶解纺丝,尽量减少大分子的缠结,再使纺出的丝在非溶剂中凝聚结晶,形成无缠结的折叠链片晶,然后进行超拉伸使折叠链片晶转变成伸直链的取向纤维晶,用这种方法制得了高强度、高模量的聚乙烯纤维,其强度为5~7GPa,模量为200GPa,超过芳香聚酰胺(Kevlar)纤维,模量已接近理论值240GPa(分子链方向的晶体模量)。

Natta等发现全同立构聚丙烯在晶态具有3/1螺旋构象,取决于螺旋链的旋转方向(左旋或右旋)而存在2种有序链,由于螺旋链在晶态的不同排列而形成 α 、 β 、 γ 等晶型。 α 晶型是最常见的一种,在一般熔融或溶液结晶条件下,聚丙烯结晶成 α 晶。商品聚丙烯的等规度即全同立构五单元组的含量通常在90%左右,因此,它实际上是不同立体异构体的共聚物。由于共聚降低了它的结晶度,聚丙烯的优越的力学性能尚未被充分认识。在80年代末、90年代初,由于采用了新的催化剂体系与聚合工艺,研制并生产全同立构五单元组>95%的聚丙烯即所谓高结晶聚丙烯(HCPP)。由于它的结晶度、刚性、抗张强度、热变形温度等都比传统的聚丙烯高,见下表。因此,这种聚丙烯可以代替价格较昂贵的ABS、高抗冲聚苯乙烯、聚碳酸酯等工程塑料,在汽车、家电上获得应用。

表1 高结晶度聚丙烯与一般聚丙烯的力学性能

性能	一般聚丙烯	高结晶度聚丙烯
结晶度(%)	45~60	70
密度(g/cm ³)	0.88~0.90	0.91
刚性(10 ³ kgf/cm ²)	9~17	24
热变形温度(°C)	90~112	130
抗张强度(kgf/cm ²)	250~360	410
伸长率(%)	>600~400	50
硬度(Rockwell)	95~100	112

β 晶型聚丙烯有时虽也在聚丙烯树脂或其制品中发现,但含量很少。主要含 β 晶的聚丙烯只有在极少数成核剂存在下结晶或在温度梯度场中结晶得到。史观一等在1984年发现了高效的双组分成核剂,它由某些有机二元酸与周期表IIA族化合物组成。在该成核剂存在下,聚丙烯结晶成纯度高的 β 晶。经研究发现, β 晶相聚丙烯的抗冲强度高于一一般 α 晶相聚丙烯。它另一主要的特性是受力拉伸时发白,产生微孔,可用以制造微孔膜。表面有微孔的膜由于呈白色且能吸附颜料与油墨,因此,也是一种新型合成纸。至于在温度梯度场中结晶生成的 β 晶相聚丙烯,则可用以制造单面粗化的易浸型电容器膜。由于粗化表面易吸着浸渍的绝缘油,该种膜用以制造电力电容器,既能减小体积,又能提高其质量。

以上3个例子简要地说明,如何通过取聚烯烃结晶与相变的基础研究使价廉、易得的聚烯烃转变成高性能化的功能材料或工程塑料。可以预料,聚烯烃的改性与高性能化将会获得更大的进展,并且会成为价格最低廉、性能最多样化的高分子材料。

参考文献

- 1 Fischer E W Z. Naturforsch Keller A, Phil Mag, 1957, 2: 1171
- 2 Natta G. Corradini, P Nuovo Cim, Suppl, 1960, 15: 40

- 3 Peterlin A J. Mat Sci, 1971, 6: 490
- 4 DSM/Stamcarbon. Chain - extended polyethylene. NL Patent 79,00990 (1979). NLPatent 7904990(1979)
- 5 史观 - 自然科学年鉴(1987). 上海:上海翻译出版公司, 1987, 2: 48~64; U. S. Patent 5,231,126(1993)
- 6 Soga K. Makromol Chem, 1988, 189: 2839

(中国科学院上海有机化学研究所史观一研究员撰)

嵌镶离子交换膜 charge-mosaic membrane 嵌镶膜的概念首先是由泽尔纳(Sollner)1932年通过对生物细胞的研究而提出的。这种膜是由阴、阳离子交换单元交替排列而成的离子交换膜。由于嵌镶膜的特殊结构,将膜置于电解质溶液中会产生环电流,正是这种环电流的存在使得电解质中阴、阳离子可按各自的通道在膜中传递,而达到脱盐分离目的。嵌镶膜不仅可用于脱盐、海水淡化,而且还可用于生物物质、食品添加剂的分离,自然界中某些动物细胞也具有嵌镶膜的功能,因而开展对嵌镶膜的研究对改进分离膜性能及探讨生命科学都是很有裨益的。

早期的嵌镶膜研究主要在制备方面。第1张人工制备的嵌镶膜是由科日萨姆(P. Kollman)在1961年采用两张半圆形阳、阴离子交换膜并排拼合而制成的。发知(H. T. Hatch)所报道的蛇笼型树脂及莱茨(F. B. Leitz)制备的浇铸型嵌镶膜都属于这一类。简单物理拼合法制备简单,采用的膜强度高,故所制备的膜强度也高。再则由于这种方法采用离子交换树脂或离子交换膜拼合而成,故不需要再进行化学反应。这类膜的缺点是脱盐率低,一般小于5%。因此这类膜仅作为模型化合物。韦斯滕(J. N. Weisten)曾用阴、阳离子交换树脂嵌镶在硅橡胶片上所制备的嵌镶膜中观察到了负渗透及电解质分离现象。

随着高分子材料科学的发展,嵌镶膜已有不少新的制备途径。近年来较为使用的方法有辐照,共混及嵌段方法。查佩罗(A. Chapiro)用X光射线辐照的方法将丙烯酸,4-乙烯基吡啶接枝在聚四氟乙烯薄膜上,制得的嵌镶膜的电导率随阴、阳离子交换区域的含量提高而提高,嵌镶膜与均一离子交换膜的脱盐率相比要大100~1000倍。希斯德(G. H. Hside)采用辐照的方法将4-乙烯基吡啶接枝在SBS嵌段共聚膜上,然后再对其进行磺化、季铵化后制成了嵌镶膜。研究表明该膜对KCl与尿素的混合溶液中的KCl有一定的分离效果。以棚(H. Kawatoch)曾用氯甲基聚苯乙烯与聚丙烯腈/苯乙烯嵌段共聚物共混,再引入光交联剂后,经汞灯照射形成交联聚合物。其后用双二甲胺基乙烷季铵化、氯磺酸磺化后,制成了嵌镶膜。该膜能将NaCl与蔗糖混合溶液中的NaCl分离,NaCl与蔗糖透过系数分别为 $2.65 \times 10^{-8} \text{mol/cm}^2 \cdot \text{s}$ 及 $3.77 \times 10^{-10} \text{mol/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。灶千(M. Kamach)用阴离子聚合方法合成了聚2-乙烯基吡啶-甲基丙烯酸嵌段共聚物,并在此基础上制成了嵌镶膜。

然而在众多的嵌镶膜中,分离性能较高的嵌镶膜是山藤本辉雄1983年所报道的。这种从阴离子聚合方法制成的聚异戊二烯-苯乙烯-异戊二烯-4-乙烯基-2-甲基基-异戊二烯5嵌段共聚物经化学改性后仍具有精细的层状结构。阴、阳离子交换区域的平均距离约为50nm,阳离子迁移数为0.5。用该膜作渗析实验,观察到负渗透现象且KCl的渗透系数为 $1.09 \times 10^{-8} \text{mol/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

另一种独特的嵌镶离子交换分离池是在1983年由井川(M. Igaiva)发明的。该分离池中并排地放入阴、阳离子交换膜。池中电解质的正、负离子可从阳离子交换膜或阴离子交换膜中传递,因而这种装置也具有嵌镶膜的功能。与其它方法制备的嵌镶膜不同点在于环电流的产生不是在同一张膜上,而是在阴、阳离子交换膜排列组成的装置中产生的。

嵌镶膜近代研究重点主要有3个方面。(1)合成不同种类的嵌镶膜,特别是通过改变交换基团的性能以提高膜的分离性能。如矶野(Y. Isono)等制备了含羟基与2-甲甲基胺基的嵌镶膜,这种离子交换膜对一价与二价离子有很好的分离效果。通过调节膜外部溶液性质如H⁺浓度大小也可提高膜的分离效果。特别是对

一些两性电解质及有机酸、胺等化合物其效果更为显著。藤本辉雄的研究表明对乙酸来说, H^+ 浓度小于 3.16×10^{-6} 时的渗透率要比 3.16×10^{-6} 时的渗透率约大 12 倍(乙酸在 H^+ 浓度大于 3.16×10^{-6} 时电离度有显著的增加)。对两性电解质如赖氨酸, 在其等电点处不能透过嵌膜膜, 而当溶液中的 H^+ 浓度大于或小于等电点时可以透过嵌膜膜。梁良等人的研究表明通过改变膜外电解质溶液的 H^+ 浓度可获得最大的电解质渗透率; (2) 探讨该膜的分离机理。嵌膜膜因具有生物细胞中的某些功能, 可以预料对该膜的分离特征系统研究将有助于揭示某些生命现象。已建立的较系统, 完善的分离模型是克德姆(O. Kedem)的非平衡热力学模型。藤本辉雄据此研究了嵌膜膜的质量传递行为。获得了不同分离介质中的传递系数(W_m), 反射系数(σ_m)及电渗透系数(β)。实验数据可圆满地解释克德姆提出的非平衡热力学唯象方程。山内(A. Yamauchi)则系统研究了嵌膜膜的电化学性质, 建立了膜电导、膜电位与传递量的关系。加瓦什(C. Gavach)则以能斯特-普朗克(Nerst Plank)方程和 TMS 理论为依据, 获得了电解质在嵌膜膜中的扩散方程。由理论方程计算所得的电解质渗透量与实测值极为接近; (3) 嵌膜膜的实际应用也成为该领域的研究热点。实验表明对相同初始浓度的盐水, 提高压渗析的压力, 则浓缩率、体积流量提高, 此结论证实了莱茨 70 年代早期的实验结果。同时随初始盐水浓度提高, 相同压力下的压渗析实验表明浓缩率此时提高, 水通量则不变。这一结果说明要获得较高的浓缩率则需要高压, 初始盐浓度较低的条件操作。进一步的研究还表明 NaCl 与蔗糖混合溶液的压渗析分离不受 NaCl 浓度变化的影响, 而与本身分子量有关, 分子量愈高, 透过率愈小。压渗析具有比电渗析脱盐率高, 节能等特点, 可广泛用于制造纯水及浓缩盐水等场合。

参考文献

- 1 Kedem O, et al. Trans Faraday Soc, 1963, 59, 1941
- 2 Weinstein J N, et al. Science, 1970, 169, 296
- 3 Yamauchi A, et al. Bull Chem Soc, 1982, 55, 3297
- 4 Fujimoto T, et al. Ind Eng Chem Res, 1988, 27, 983
- 5 Isono Y, et al. J Mem Sci, 1989, 43, 205
- 6 Gavach C, et al. Desalination, 1990, 78, 343
- 7 梁良, 等. 化学简报, 1991, 4, 6

(华东理工大学梁良撰)

具有包络辨识特性的功能高分子 记忆性高分子在仿生化学中一直是人们关注的热点, 其中主-客体化学也称包络化学, 愈来愈引起科学界的重视。由于生物酶分子对底物分子, 免疫系统中的抗体对抗原等高度选择性的辨识, 促使人们去研究具有包络辨识功能的类酶高分子。分子识别最早渊源于 Emil Fischer 提出的“Lock and Key”概念, 而包络化学正是这一概念的衍生物。包络化学即是在关于某类主体分子对某类客体分子或离子专一识别的科学, 主客体分子依据范德华力、氢键、疏水作用力、空间立体效应以及其它功能基间相互匹配作用而形成的包络化合物。

具有包络特性的小分子化合物, 可分两类, 第一类是指单个小分子本身不能显示包络特性, 只有在结晶态才能表现出包络特性; 第二类是指单个分子本身具有特定的包络主体结构。早在 1849 年 F. Wohler 就发现 H_2S 能被氢醌捕获, 以后 A. Clemm (1859) 发现 SO_2 及 F. Mylius (1886) 发现 CO 也能被氢醌包络, 表明氢醌分子似乎能通过化学作用而锁住一些气态分子。直到本世纪 40 年代, X-ray 研究方法的诞生才阐明氢醌分子在结晶态时能形成一种笼状结构。具有包络特性、能和客体分子形成 $3C_6H_4(OH)_2 \cdot XG$ 的包络化合物, 其中 X 为包络进行的客体分子数目, G 为客体分子, X 在 0~1 之间。具有包络特性的酚类主体化合物还有苯酚, 取代苯酚等, 现在已经知道这些化合物能形成同晶笼状主体结构, 并和许多客体分子如 H_2S 、HCl、 SO_2 、CO、 CS_2 、HBr 等形成包络化合物。1914 年, A. P. Dianin 在合成化合物 I 时, 意外发现一些有机溶剂能紧紧包在这种化合物里, 而且

是固定量存在, 后来称这种化合物为 Dianin 化合物。

冠醚类化合物属阳离子包络作用, 目前研究的方向主要集中在立体选择性包络、离子转移、分子催化等领域。具有包络特性的高分子化合物主要有下面几种类型。

具有包络特性的天然高分子 环糊精是由淀粉通过环糊精葡萄糖基转移酶降解所得的含 6、7、8 等数目葡萄糖基单元的环状低聚糖, 分别称为 α 、 β 、 γ 等环糊精。从环糊精分子结构来看, 空腔内部是由 C-H 基团构成的两个环, 以及糖苷氧原子构成的一个环, 前者将糖苷氧原子屏蔽, 故空腔内部呈疏水性, 环糊精是一类天然模拟酶, 可以和许多客体分子形成包络化合物, 客体分子既有极性分子如胺、酸、离子如 ClO_4^- 、 SCN^- 和卤素离子, 也有高度非极性分子如脂肪族和芳香族碳氢化合物, 甚至还有气体也能参与包络。环糊精包络识别的动力究竟是什么? 除了要求主客体分子尺寸必须相互匹配外, 目前存在许多假说。环糊精和客体分子相互作用形成包络化合物过程中, 既有焓变过程也有熵变过程, 且焓变过程常常为决定过程, 这种焓变往往由以下几种造成: 主客体分子间的范德力和伦敦色散力; 客体分子和环糊精羟基氢键作用力; 主客体分子相互作用的疏水力; 包络化合物形成过程中释成高能水; 环糊精在形成包络物过程中构象变化所释放出的环应变能。其中疏水作用力是模拟酶识别的主要动力, 为改善这种疏水作用力的强度, 人们设计出各种环糊精衍生物。为了使其与生物酶分子结构更为接近, 在环糊精分子结构中引进各种催化活性基团, 如羧基、胺基、咪唑基等。1984 年 M. L. Bender 等成功地合成了凝乳蛋白酶模型化合物, 他们在环糊精分子结构上引进了咪唑基团, 羧基, 可以很好地催化酯水解反应, 通过结构设计可制备不同的环糊精分子衍生物, 合成出许多酶的模型化合物, 这将是环糊精研究的重要内容。

具有包络特性的合成高分子 将环糊精分子引入高分子链结构即得到环糊精的高分子衍生物。它可以通过化学反应交联取代环氧丙烷等, 也可通过含环糊精单元的烯类单体共聚或自聚, 以及高分子固载化的方法来制备。利用交联剂(如环氧氯丙烷、甲醛、二异氰酸酯、双官能团环醚等)交联, 在分子量 20 000 以下呈现水溶性, 具有明显的包络特性。乙烯基环糊精单体通过均聚可获得线性聚合物, 也可和丙烯酸酯、丙烯酸、乙烯基吡咯烷酮等共聚获得水溶性高分子, 分子量在 10 000 左右, 能够催化酯水解反应。增加交联剂浓度或延长反应时间, 能制备出不溶性交的环糊精高聚物, 它可制成无规形状的粉粒, 也可得到珠状体, 通过适当的致孔剂还可形成大孔结构的珠体。

目前环糊精固载化高分子的研究大都集中在硅胶载体的固载方面, 用作手性固定相色谱分离。环糊精手性固定相包络辨识必须满足以下基本条件: 客体分子必须能和环糊精形成包络化合物; 客体分子必须能和环糊精空腔结构紧紧贴合, 且客体分子的手性中心或和手性中心键的基团必须能和环糊精空腔开口处发生作用。关于环糊精手性固定相分离模式可归为多点作用模型, 它是依靠氢键、疏水力等作用的差异来拆分手性化合物。将环糊精固载到高分子微球上即可制备出环糊精的有机合成高分子手性固定相, 这是目前环糊精手性固定相的重要发展方向。

模板聚合物也属一类具有包络特性的合成高分子。一般说来, 通过含有催化活性基团的单体共聚所制备的高分子化合物, 其功能基常呈无规分布; 通过接枝共聚将事先设计好的催化体系引入聚合物链上, 这两种方法均不能获得确定的疏水空间场; 第 3 种方法是将假设的催化活性点一起集中在同一的单体上, 进行高分子合成, 尽管催化性基团位置是固定的, 基团间的协同效应也能够满足, 但空间场仍不能确定, 与酶分子链结构存在很大差距, 不像酶分子链中的催化活性功能基之间能够形成一个复杂的三维空间场。

通过模板聚合设计, 合成类酶包络主体分子应考虑以下因素: 高分链结构中必须存在特定形状的空穴或空间场; 空穴或空间场中必须存在相互匹配的, 具有确定位置的催化活性基团; 这些催化活性基团能够迅速与底物可逆地作用; 存在类似辅酶的适

当功能基团,具有合适的催化环境。

Klaus Mosbach 等报道了含咪唑基团的模板聚合物的合成及其催化酯类化合物的水解反应。这种模拟酶证明能反复使用,再生,将具有包封特性的主体分子固载化是制备包封特性高分子的最有效的方法。原则上讲,只要在固载化反应过程中不破坏主体分子的构象,所得的固载化高分子一般应具有包络识别特性。

设计和合成具有包络特性的功能高分子的最终目的是获得能够立体识别、催化反应的类酶聚合物,这无论在理论研究还是应用领域都具有重要的发展前景。

(南开大学吸附与分离功能高分子材料国家重点实验室赵晓斌、何炳林院士撰)

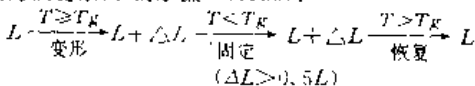
形状记忆高分子材料 shape memory polymer materials

自 1964 年发现 Ni-Ti 合金的形状记忆功能以来,记忆材料便依其独特的性能引起世界的广泛关注。已发现的记忆材料有应力记忆材料、形状记忆材料、体积记忆材料、色泽记忆材料和温度记忆材料等。

材料的性能是其自身的组成与结构特征在外部环境中的具体反映。高分子材料的性能易受外部环境的物理、化学因素的影响,这是其应用中的不利因素。但是,如果以积极的态度利用这种敏感易变的特点,就可变不利因素为有利因素。形状记忆高分子(SMP)就是据此思想制成的。在一定条件下,SMP 被赋予一定的形状(起始态),当外部条件发生变化时,它可相应地改变形状并将其固定(变形态)。如果外部环境以特定的方式和规律再一次发生变化,SMP 便可逆地恢复至起始态。至此,完成“记忆起始态→固定变形态→恢复起始态”的循环。外部环境促使 SMP 完成上述循环的因素有热能、光能、电能和声能等物理因素以及酸碱度、螯合反应和相转变反应等化学因素。世界上第 1 例 SMP 是由法国的 CdF-Chimie 公司于 1981 年开发成功的聚降冰片烯。同形状记忆合金相比,SMP 具有形变量大、赋形容易、形状恢复温度便于调整、电绝缘性和保温效果好等优点,而且不生绣、易着色、可印刷、质轻耐用、价格低廉,其应用范围广泛,在国内外发展很快。

热致感型形状记忆高分子一般都是由防止树脂流动并记忆起始态的固定相与随温度变化能可逆地固化和软化的可逆相组成(石田正雄,1989)。可逆相为物理交联结构,如结晶态、玻璃态等,而固定相可分为物理交联结构或化学交联结构。以化学交联结构为固定相的 SMP 被称为热固性 SMP,以物理交联结构为固定相的 SMP 则为热塑性 SMP。热致型 SMP 的品种丰富,日本已拥有 4 种 SMP 的工业化生产技术,即聚降冰片烯、聚氨酯、高反式聚异戊二烯(TPI)以及苯乙烯/丁二烯共聚物。其它品种还有含氟树脂、聚己酸内酯、聚酰胺等。

热致感型 SMP 的形状记忆原理。以热塑性 SMP 为例,将粉末状或颗粒状树脂加热熔化时,可逆相和固定相均处于软化状态,将其注入模具等设备中成型、冷却成为希望形状,得到起始态。在此过程中,高分子链以物理交联的方式形成固定相和可逆相。当加热至适当的温度时,例如玻璃化温度 T_g ,可逆相分子链的微观布朗运动加剧,而固定相仍处于固化状态,其分子链被束缚,材料由玻璃态转化为橡胶态。此时,以一定的加工方法可使橡胶态的 SMP 在外力作用下变形。在外力保持下冷却,可逆相固化。解除外力后即可得到稳定的新形状,即变形态。此时的形状由可逆相维持,其分子链沿外力方向取向、冻结,而固定相处于高应力形变状态。当变形态被加热至形状恢复温度例如 T_R 时,可逆相软化而固定相保持固化。可逆相分子链运动复活,在固定相的恢复应力作用下解除取向,并逐步达到热力学平衡状态,即宏观上表现为恢复原状(清水谦一,1986)。



式中 L ——样品原长; ΔL ——形变量。

日本的山口章三郎(1983)认为,处于橡胶态的 SMP 在外力

σ 作用下发生的形变率包括 3 部分,即瞬间形变率 ϵ_0 、松弛形变率 ϵ_r 和蠕变形变率 ϵ_c (相当于 C 部): $\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_r + \epsilon_c = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_r} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}) + b\sigma \lg(\frac{t}{2} + 1)$

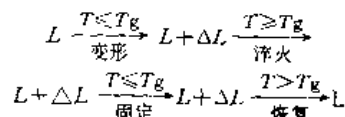
式中 E_0 、 E_r ——杨氏模量或弹性模量; t ——外力作用时间; λ ——松弛时间; b ——蠕变常数。外力解除后,已经固化的变形态受热时发生瞬间形变率恢复 ϵ_0' 和蠕变形率恢复 ϵ_c' 。由于松弛形变率 ϵ_r 为塑性形变,其形变率恢复 ϵ_r' 极小,但当加热至形状恢复温度时, ϵ_r 便发生形变率恢复 ϵ_r' 。至此,材料在宏观上恢复原状。

由形状记忆原理可以推测,可逆相对 SMP 的形变特性影响较大,固定相对形状恢复特性影响较大。可逆相分子链的柔性增大,SMP 的形变量就相应提高,形变力下降。热固性 SMP 同热逆性 SMP 相比,形状恢复的速度快、精度高、应力大,但它不能回收使用。热致型 SMP 已投入应用的和正在开发的应用领域有电子通讯、医疗卫生、机械制造、商品识别、文体体育、日常用品以及农业、能源领域。

同形状记忆合金相比,SMP 具有如下的特征。形状记忆合金的形变量低,一般在 10% 以下,而 SMP 较高,形状记忆聚氨酯和 TPI 均高于 400%。SMP 的形状恢复温度可通过化学方法调整,如形状记忆聚氨酯的恢复温度范围为 $-30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 。具体品种的形状记忆合金的形状恢复温度一般是固定的。SMP 的形状恢复应力一般均比较低在 9.81~29.4MPa 之间,形状记忆合金则高于 1471MPa。形状记忆合金的重复形变次数可达 10^4 数量级,而 SMP 仅稍高于 5000 次,故 SMP 的耐疲劳性不理想。SMP 仅有单向记忆功能,而形状记忆合金已发现了双向记忆和全方位记忆。单向记忆是指材料被加热恢复起始态后,再降低温度时不再改变其形状;双向记忆材料不仅能记忆较高温度的形状,而且能记忆较低温度的形状,当温度在高低温之间反复变化时,则不断变换形状;全方位记忆是双向记忆的特殊情况,即较低温度下的形状与较高温度的形状相反。此外,与普通树脂相比,SMP 因具有特殊的多相结构,其加工性能较差,价格也比较高。

已开发的 SMP 综合性能不够理想,材料的强度、耐热性、耐久性和耐候性等尚有待提高。例如,形状记忆 TPI 由于存在不饱和键,其耐老化性能较差。因此,在保持形状记忆功能的前提下,充分运用分子设计技术和材料的改性技术,努力提高 SMP 的综合性能已成为 SMP 应用研究和理论研究重要课题。

PVC、ABS、PMMA 等热塑性树脂,由于不含化学交联结构,可在其 T_g 以下(严格地讲是在 $T_g + 10^\circ\text{C}$ 以下),通过冷加工的方法使之变形,然后保持外力并冷却,得到变形态。当升温至 T_g 以上时,同样能恢复原状。若将冷却变形的温度控制在 T_g 以下,则形状恢复性能好,而且与外力作用时间无关;若控制在 T_g 以上,形状恢复性能下降,外力作用时间越长,恢复性能越差。在外力保持下,将变形态在 T_g 以上的温度下淬火,可提高变形态在低温下(室温)的稳定性,即在保持必要的残留形变的前提下,使易于在室温下发生形状恢复的结构稳定化,而不破坏材料整体的假平衡状态:



张福强认为,这种 SMP 是通过分子链之间的相互缠绕实现形状记忆的。在 T_g 以下,分子链之间不能相互滑动,外力作用只能使分子链的构象发生强制性变化。淬火使分子链构象的变化在材料空间的分布趋于均匀,消除局部高应力变化。在外力保持下降温时,分子链运动被严格地冻结,强制形变得以保持。当加热至 T_g 以上时,分子链构象的强制变化被解除,并逐步达到热力学平衡状态,宏观上即恢复原状。因此,如果变形态的稳定化技术合理,普通的热塑性高分子均可实现形状记忆。

已发现,某些高分子凝胶也具有热致感应形状记忆效应。日

前研究较多的是聚乙烯醇(PVA)凝胶,其固定相为化学交联结构,可逆相为由氢键等次价键为形成的微结晶等,其形状记忆性能与固定相的交联密度及其分布等因素密切相关。这种SMP可望应用于医用人造器官的制造等领域。

光致感应形状记忆高分子。以一定的方式引入适当的光致变色基团(PCG)的某些高分子材料,当受到光照射时(通常为紫外光),PCG发生光异构化反应并把这种变化传递给分子链,使分子链的状态发生显著性变化,材料在宏观上表现为光致形变,光照停止时PCG发生可逆的光异构化反应,分子链的形态相应地复原,材料则恢复原状。光照停止后,通过加热或用其它波长的光照射(通常为可见光),可加速其恢复过程(清水谦一,1986;M. Ixie,1990)。

可逆性光异构化反应的种类很多,但目前研究较多的是偶氮苯基团、螺苯并吡喃及三苯甲烷无色的衍生物为(TLD)等基团的反应。偶氮苯基团在紫外光照射下,从反式结构转变成顺式结构,4,4'位上碳原子之间的距离从0.9nm收缩至0.55nm,分子偶极距由0.5D增大至3.1D。光照停止后,发生逆向反应,又转变为反式结构,可见光($\lambda > 450\text{nm}$)的照射会加速这种转化。TLD在紫外光照射下能离解成带正电荷和带负电荷的两部分,光照停止后发生逆向反应,电荷消失,恢复至无电荷结构。

PCG在分子链中的存在方式有3种:以结构单元的形式存在于分子链的主链或支链中;作为交联剂以共价键连结大分子链;作为低分子添加剂同大分子链组成混合体系。根据PCG的光异构化反应对分子链的作用形式,分子链的形态变化有5种方式(入江正浩,1984)。第1种变化方式是通过分子链侧链上PCG之间的相互作用在光照前后发生可逆性变化实现的。属这种变化的SMP有侧链上含有偶氮苯基团的聚甲基丙烯酸、苯乙烯/无水马来酸共聚物等。由于这些PCG之间相互作用的变化受光照影响较小,材料形状恢复性能不佳。第2种变化方式是,由光致变色低分子化合物与某种高分子构成的混合体系。经光照射后,由于低分子化合物同分子链之间的憎水作用发生变化而导致的形状记忆现象。甲基丙烯酸2-羟基乙酯/丙烯酸酯(或乙烯基吡啶)共聚物与酸性黄38的混合体系等均属此类代表。作为混合体系,由光致变色低分子对分子链的传递效果较差,其形状恢复速度的重复性不理想。第3种变化方式充分利用分子链主链中PCG的顺式 \rightleftharpoons 反式异构化反应,紫外光的照射通常使材料收缩。若分子链的刚性增大,形状记忆性能下降,直至消失。主链上含有偶氮苯基团的聚酰胺、聚酰亚胺等均以此方式实现形状记忆。第4种变化是,引入TLD的分子链在光照时离解出正电荷,分子链相互排斥,材料一般表现为伸长。如侧链引入TLD($X=OH$)的聚苯乙烯、聚丙烯酰胺等。第5种方式是,引入螺苯并吡喃等侧链的高分子经紫外光照射时,分子链极性的增加使得高分子-高分子、高分子-溶剂的相互作用发生显著性变化,材料收缩。光照停止后,又可恢复原状。这类材料有含螺苯并吡喃的聚甲基丙烯酸甲酯、聚丙烯酸以及含偶氮苯的多肽和聚苯乙烯等。

由光致感应SMP制成的薄膜,不仅形变量低(2%以下),而且存在光致热效应,研究重点已转移到能克服光致热效应的高分子凝胶。含TLD的高分子凝胶的形变量最大可高达200%,但易受渗透压等因素的影响。当向凝胶中加入NaCl或其它盐类物质时,其形变量下降乃至消失,电场的作用能提高凝胶的形变速度,而且在盐类物质存在下的提高幅度更大,但具体原因尚不清楚。由于感应方式是“外接触”性的,操作简单,光致感应型SMP在应用上有独特的优越性。目前,其应用正处于研究开发阶段,可望用作印刷材料和光记录材料、“光驱动分子阀”和药物缓释剂等。

化学感应型形状记忆高分子。某些高分子材料在化学物质的作用下,也具有形状记忆现象。常见的化学感应方式有 H^+ 浓度变化、平衡离子置换、螯合反应、相转变和氧化还原反应等(清水谦一,1986;入江正浩,1989) $L \xrightleftharpoons[\text{化学物质}]{\text{}} L + \Delta L$ ($\Delta L: 0.1 \sim 3L$)

用PVA交联的聚丙烯酸纤维浸泡于盐酸溶液中,氢离子间

的相互排斥使分子链扩展,纤维伸长。当向该体系中加入等当量的NaOH时,发生酸碱中和反应,分子链状态复原,纤维收缩,直至恢复原长。

羧酸阴离子的平衡离子发生置换时,可导致高分子材料的形状记忆效应。聚丙烯酸纤维在恒定外力作用下,提高 Ba^{2+} 的浓度,即 Ba^{2+} 置换 Na^+ 时,纤维收缩;提高 Na^+ 的浓度,即 Na^+ 置换 Ba^{2+} 时,纤维伸长。据此,可望实现纤维形状的可逆形变。侧链上含有配位基的高分子同过渡金属的离子形成螯合物时,也可引起材料形状的可逆变化。经过磷酸酰化处理的PVA薄膜在水溶液中浸润后加入 Cu^{2+} ,则生成铜螯合物,薄膜收缩。当向此薄膜中引入 Cu^{2+} 的强铜螯合剂如EDTA(乙二胺四乙酸)时,PVA的铜螯合物离解,生成EDTA螯合物,薄膜可恢复原状。

蛋白质在各种盐类物质的存在下,因高次结构被破坏而收缩,当高次结构再生时则可恢复原长。同中和反应和螯合反应相比,相转变反应引起的形变及其恢复,不仅速度快,而且可逆程度高,可望用作等温下的形状记忆材料。把蛋白质纤维如明胶浸入铜氨溶液中,晶态结构转变为非晶态结构,纤维可收缩20%;若把收缩的纤维浸入浓度较低的酸性溶液,晶态结构再生,纤维便恢复原长。化学感应型SMP尚未正式应用,国外已有人建议用于蛋白质或酶的分隔膜、“化学发动机”等特殊领域。

SMP不仅品种丰富,形状记忆的方式灵活,而且状态多样,具有广阔的研究领域和开发前景。SMP今后的发展方向是,完善形状记忆原理,尤其是在分子结构理论和高弹理论的基础上建立形状记忆的数学理论,为SMP的应用和开发奠定基础;充分运用分子设计原理、材料设计原理和改性技术,提高形状记忆性能和综合性能,增加品种,满足不同的应用需要;加强应用研究和开发研究,拓宽应用领域,尽快转化为生产力。

(河北工业大学张福强撰)

聚合物结晶过程动力学 crystallization kinetics of polymers 聚合物结晶动力学分为等温及非等温结晶两大类。聚合物等温结晶动力学过程已有大量文献报导,常用实验技术有差示扫描量热法(DSC),偏光显微镜法(PLM),膨胀计法,解振光光强度法,透射电子显微镜法(TEM),广角X射线衍射(WAXD),核磁共振(NMR)等。聚合物材料实际生产过程,如挤出,模压,薄膜生产等常常是在动态、非等温条件下完成的。为了选择适宜的工艺条件,制备性能较好的材料,定量研究非等温结晶动力学过程日益重要。

等温结晶动力学 (1)聚合物结晶成核和生长的动力学理论。结晶成核的早期理论是由Gibbs(1878;1906),Volmer(1939)等人提出的。假定过冷熔体全部覆盖成核表面,并且按照Boltzmann定律,在常体积和能量下,一定大小的成核数的焓变的函数;在一定体积和温度下,则是自由能变化的函数,根据这些假定。Turnbull和Fisher(1949)导出成核速率(G)公式:

$$G = G_0 \exp(-\Delta F^*/KTC) \exp(-\varphi^*/KTC) \quad (1)$$

式中 ΔF^* 为链段穿过液固界面所需的活化能, φ^* 为形成临界尺寸晶核的表面自由能, K 为 Δ Boltzmann常数, T_c 为结晶温度。 G_0 为常数, ΔF^* 、 $\Delta\varphi^*$ 的值随温度的变化而变化,温度升高, $\Delta\varphi^*$ 迅速下降; ΔF^* 随温度的变化则可用WLF方程表述:

$$\Delta F^* = C_1 T_c / (C_2 + T_c - T_g) = \frac{4120 T_c}{51.6 + T_c - T_g} \quad (2)$$

式中 T_g 为玻璃化转变温度,在较窄的温度范围内,随温度的升高,由于 $\Delta\varphi^*$ 的迅速降低而使成核速率降低,对于聚合物,一般在过冷度 $\Delta T = 30^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 之间;而在较大的过冷度下,随温度的升高,由于 ΔF^* 的增大而使成核速率增大,成核速率与温度间的关系如图1所示。为使Turnbull-Fisher方程适合于较大范围的过冷度下均聚物的结晶,Hoffmann和Lauritzen提出了球晶生长的分子模型,认为在晶面上一个新核生成后,很快盖满生长层,且成核速率很大,而覆盖生长面的速率很小,根据这个模型,导出

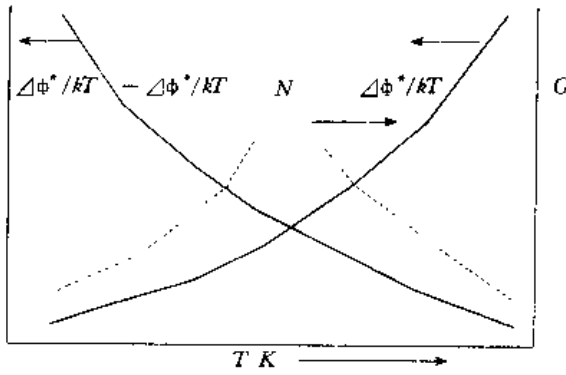


图1 成核速率与温度关系

著名的 LH 方程:

$$G = G_0 \exp[-U^*/R(T_c - T_\infty)] \exp[-K_g/T_c \cdot \Delta T \cdot f] \quad (3)$$

其中 U^* 为链段穿过液相到达结晶表面所需的活化能, K_g 是与结晶温度无关但随成核方式的变化的成核参数, $f = 2T_c/(T_m + T_c)$ 称校正因子, 为过冷液体和晶体之间本体自由能之差的相关参数, T_∞ 为假定粘流体停止运动时的温度, 它难以从实验中精确得出, 可由下式决定:

$$T_\infty = T_g - C \quad (4)$$

其中 C 为常数。Hoffmann 等指出, C 值为 30K, U^* 的值为 1500cal/mol, 对于大量的聚合物, 该值均能很好的符合。

在 LH 方程中, K_g 是不依赖于结晶温度但随成核方式的变化而变化的成核参数, 当表面二次成核是快速完成时为二维成核:

$$K_g = K_g(I) = 4b_0\sigma_s T_m^0 / \Delta H_f \cdot K \quad (5)$$

当表面二次成核是缓慢生长时二维成核:

$$K_g = K_g(II) = 2b_0\sigma_s T_m^0 / \Delta H_f \cdot K \quad (6)$$

其中 σ_s, σ 分别为折叠链和侧表面自由能, T_m^0 为平衡熔点, ΔH_f 为熔化热。

1973 年 Lauritzen 提出一种体系成核方式的判定方法, 称为 Z 判断方法:

$$Z = 10^3(L/2a_0)^2 \exp[-(X/T_c \cdot \Delta T)] \quad (7)$$

其中 L 为晶片厚度, a_0 为链宽。如果上式中 X 以实验得出的 K_g 值代入, $Z \leq 0.01$, 那么成核是以方式(I)(regime I)进行的; 如果以 $X = 2K_g$ 代入上式, $Z \geq 1$, 那么成核是以方式(II)(regime II)进行的, 根据这种方法, 得出聚甲醛, 聚丙烯, 聚三氟氯乙烯的结晶成核以方式(I)进行, 等规聚丙烯的成核以方式(II)进行。而聚乙烯在所取结晶温度范围内表现为两种成核方式(图2)。刘洁平等(1990)对聚氧化乙烯(PEO)/聚双酚 A 羟基醚(PBHE)共混体系的研究, 随非晶组份 PBHE 加入成核方式由方式(I)转化为方式(II), 与偏光显微镜的观察结果一致的。对于 T_g 有争议的聚合物 Mandelkern 提出了球晶增长速度经验公式(8), 处理许多聚合物体系获得成功。

$$G = G_0 \exp[-E_D/RT_c] \exp[-K_2 T_m / K T_c \Delta T] \quad (8)$$

式中: E_D 迁移自由能, $K_2 = 4b_0\sigma_s / \Delta H_u$, ΔH_u 为单位体积熔融热。

对于结晶/非结晶共混体系由于在共混体系中, 受非晶组份的影响作用, 体系的结晶速率是温度和组成的函数, 结晶成核和生长方式亦发生变化, 因此 Alfonso 等对 Hoffman 和 Lauritzen 提出的方程应做一定的修正使之适合于共混体系中复杂的结晶过程。

对于相容的共混体系, 由于体系中特殊的相互作用, 液相的化学势发生变化, 同时非晶组份必须从生长表面扩散开去, 因此, 结晶生长速率是由结晶组份本体结晶能力和非晶组份的扩散速度两方面的因素决定的, 两因素慢的一步决定生长速率(G_m)可用下列公式表示:

$$G_m = \frac{\phi_2 K_1 K_2}{K_1 + K_2} \exp(-\Delta F_m^*/K_B T_c) \quad (9)$$

式中 ϕ_2 为结晶组份的体积分数, K_1 为结晶链段穿过液固界面的转移速率, K_2 为非晶组份从生长表面扩散开去的扩散速率。 ΔF_m^* 是在有非晶组份影响下所形成临界核的表面自由能, 若 $K_1 \gg K_2$, 则式(9)可写成:

$$G_m = \phi_2 K_2 \exp(-\Delta F_m^*/K_B T_c) \quad (10)$$

若 $K_2 \gg K_1$

$$G_m = \phi_2 K_1 \exp(-\Delta F_m^*/K_B T_c) \quad (11)$$

对于非相容共混体系, Martuscelli 等(1984)认为, 在结晶开始时, 非晶组份被分散成球状小滴, 对球晶生长起阻碍作用, 结晶生长速率可用下式表示:

$$G = G_0 \exp[-\Delta F^*/KT] \exp[-\Delta \phi^*/KT] \exp\left[-\frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{KT}\right] = G' \exp\left[-\frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{KT}\right] \quad (12)$$

式中 G' 是按 Turnbull-Fisher 方程计算所得的球晶生长速率, E_1 为排开非晶组份所需的活化能, E_2 为非晶组份离开结晶表面时的动能, E_3 为结晶表面进入非晶组份中形成新的表面所需的能量, E_4 为克服非晶组份对结晶表面的破坏作用所需能量。

(2)影响球晶生长的因素。结晶温度对球晶生长的影响 在聚合物的等温结晶过程中, 结晶温度对球晶生长的影响较大, 可用结晶成核理论加以解释, 根据结晶成核理论得出下式:

$$\ln(\tau_{0.5})^{-1} = A + \left(\frac{-E_D}{KT_c}\right) - K \frac{T_m}{T_c \cdot \Delta T} \quad (13)$$

式中 A, K 为常数, $\tau_{0.5}^{-1}$ 为生长速率, E_D 为结晶单元越过相界的扩散激活能, T_m 为熔点, ΔT 为过冷度, 当过冷度较小时, E_D 随温度变化很小, 因此, 上式可改写为:

$$\ln(\tau_{0.5})^{-1} = B - K \cdot \frac{T_m}{T_c \cdot \Delta T} \quad (14)$$

式中 B 为常数, 若以 $\ln(\tau_{0.5})^{-1}$ 对 $T_m/T_c \cdot \Delta T$ 作图, 应为直线, 但对 Ln-PB 试样的研究结果为折线(图2), Hoffman 认为, 随温度的降低, 聚合物的结晶机理可由单二核生长转变为多二维核生长, 对于单二维核生长, 式(14)中 $K = 4b_0\sigma_s/k \cdot \Delta H_f$, 而对于多二维核生长, $K = 2b_0\sigma_s/k \cdot \Delta H_f$, 因此会出现折线, 折点出现的温度为两种生长方式转变时的温度。

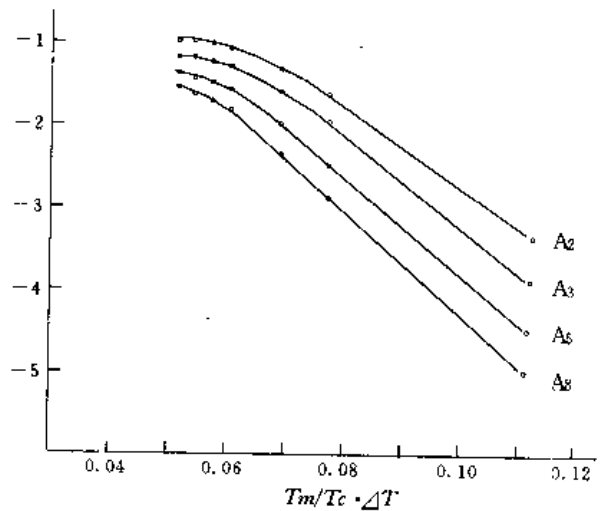


图2

(A₂, A₃……代表不同分子量样品; Ln-PB 的 $\ln(\tau_{0.5})^{-1}$ 对 $T_m/T_c \cdot \Delta T$ 作图)

从结晶成核公式可以看出, 由于结晶速率与 $1/T \cdot \Delta T$ 有关, 因此, 在某一结晶温度下, 可达到结晶速率的最大值。低于或高于这一温度, 结晶速率均会降低, 用 DSC 方法研究 PET 的等

温结晶过程,得出具有最大结晶速率的温度(T_c)为 172 C。

分子量对球晶生长的影响 对于球晶生长与分子量的关系,文献报导很不一致,Alamo 等(1982)认为分子量增加,结晶速率增加;Lopez 等(1988)认为分子量增加,结晶速率降低,张宏放等(1988)则指出,结晶速率在所取的分子量范围内有一极大值和极小值。总之,对于分子量对结晶成核和结晶生长过程的影响很复杂,目前尚没有一种完整的理论对其加以解释。

(3)聚合物结晶的熔化行为。聚合物结晶的熔点及平衡熔点

聚合物的熔融有一个较宽的温度范围,从 DSC 熔融曲线上可明确看到这一现象,一般在较高温度下结晶,其熔点较高且熔限窄,而在较低温度下结晶,熔点较低且熔限宽。

聚合物的熔融过程基本上是在非平衡条件下进行的,难以从实验中直接测得聚合物的平衡熔点,但平衡熔点又是一个很重要的分子参数,它不仅反映分子和分子链的结构特征,而且在研究结晶动力学过程中有着重要的作用,为此,Hoffman 和 Weeks(1962)提出如下关系式:

$$T_m = T_m^0(1 - 1/\gamma) + 1/\gamma \cdot T_c \quad (15)$$

式中 T_m^0 为平衡熔点, γ 为常数,其值取 1 或 2,若以实验观察的熔点 T_m 对结晶温度 T_c 作图,得到直线,将此直线外推到 $T_m = T_c$,此时的熔点即为体系的平衡熔点(T_m^0),称之为 Hoffman 和 Weeks 平衡熔点外推法,将这种方法应用于大量的实验,均取得了较满意的结果。

结晶/非晶混体系的平衡熔点及相容性 Flory 和 Huggins 指出,在混体系中,由于结晶和非晶组份之间特殊的相互作用,使体系的平衡熔点降低,可用 Flory-Huggins 相互作用参数(X)来表示, $|X|$ 值越大,这种相互作用就越大,熔点降低值就越大。

Nishi 和 Wang(1975)根据 Flory-Huggins 的理论,导出混体系平衡熔点降低公式:

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_m^0} = - \frac{RV_{2u}}{\Delta H_{2u} V_{1u}} X_{12}(1 - \phi_2)^2 \quad (16)$$

式中 T_m 为相容混合物的平衡熔点, T_m^0 为纯结晶组份的平衡熔点, ΔH_{2u} 为纯结晶组份单位体积熔化热, V_{1u} 为 1 组份的摩尔体积, ϕ_2 为结晶组份的体积分数, ϕ_1 为非晶组份的体积分数。从式(16)中可以看出, X_{12} 为负值时将导致熔点降低,若 X_{12} 为正值,预示熔点升高,这已为 Nishi 和 Wang 所注意,对于高聚物的混合物,由于热力学情况不利,正的 X_{12} 很可能引起相分离。

在式(16)中,以比值出现的 X_{12} 和 ΔH_{2u} 两个量,不能同时由量热法测量确定,为了解决这一实验问题,Nishi 和 Wang 提出下列方法:假定相互作用参数具有如下形式:

$$X_{12} = B\phi_1/RT_m \quad (17)$$

式中 B 为混合物中相互作用能量密度,因此式(16)可简化为:

$$\frac{1}{\phi_1} \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_m^0} \right) = - \frac{BV_{2u}\phi_1}{\Delta H_{2u} T_m} \quad (18)$$

若以 $1/\phi_1[(1/T_m) - (1/T_m^0)]$ 对 (ϕ_1/T_m) 作图,得到直线,可根据直线的斜率求得 B 值,对于 PVF₂/PMMA 体系,实验得出 $B = -2.98 \text{ cal/cm}^3$ (PMMA), $X_{12} = -0.295$ (160 C)。对于 PEO/PBHE 体系 $B = -6.103 \text{ J/cm}^3$ 。

(4)Avrami 方程及其应用。Avrami 方程原先从金属结晶导出,用在聚合物结晶动力学上也颇见成效,现已得到了广泛的应用,方程具体形式为:

$$X(t) = 1 - \exp(-Kt^n) \quad (19)$$

式中 $X(t)$ 为 t 时刻的结晶度, K 为动力学速率常数, n 为 Avrami 指数,将上式改写为:

$$\log[-\ln(1 - X(t))] = \log K + n \log t \quad (20)$$

以 $\log[-\ln(1 - X(t))]$ 对 $\log t$ 作图,得到斜率为 n ,截距为 $\log K$ 的直线。Morgan(1954)指出,Avrami 的指数 n 的取值可以为 1, 2, 3, 4, 依赖于成核和生长过程,对于球状生长, n 为 3 或 4,对于盘状生长, n 为 2 或 3,对于纤维状生长, n 为 1 或 2。

虽然 Avrami 方程得到了广泛的应用,但仍存在着较大的局

限性,许多实验结果表明,Avrami 指数 n 不恒为常数,甚至出现小数,不能根据 n 的值判定结晶成核和生长方式,另一方面,在结晶后期即二次结晶阶段,由于球晶互相碰撞,不再按 Avrami 模型生长,因而也就出现了偏离 Avrami 方程的现象,1988 年 IUPAC 高分子专业委员会建议规定 Avrami 方程适合于描述聚合物初期结晶行为(Primary Crystallization),Bank(1964),Hillier(1965),钱保功等(1982)和 Cheng 等(1988)对 Avrami 方程进行补充、修改及发展。

Pracella 等(1984),Brattacharya 等(1986),Liu 等(1989)和王尚儿等(1992)相继报导高分子液晶态动力学过程的研究。

非等温结晶动力学 对于聚合物非等温结晶动力学的研究报导远不及等温结晶动力学。由于非等温结晶过程很复杂,研究方法目前仅限于 DSC 方法,所用的处理方程是从等温结晶出发,同时考虑到非等温结晶的特点而修正得到的非等温动力学方程,由于考虑角度不同处理方法也不一样。

(1) Ziabicki 理论。Ziabicki(1967)根据 Avrami 方程,假定非等温结晶可以看成是忽略二次结晶条件下的多个连续的等温结晶阶段。并指出,在准静态(quasi-static condition)条件下,结晶成核和生长速率由热历程控制,结晶时间仅与外部条件的变化有关,在整个结晶过程中,Avrami 指数 n 恒为常数,对于体系的结晶过程,可用如下方程描述:

$$\frac{dX}{dt} = K(T)(1 - X) \quad (21)$$

式中 $K(T)$ 是温度 T 有关的常数, X 为结晶度,

$$X(t) = 1 - \exp\left\{-\int_0^t K[T(t)] dt\right\}$$

$$= \int_0^t K dt - 1/2 \left(\int_0^t K dt\right)^2 + 1/6 \left(\int_0^t K dt\right)^3 \quad (22)$$

与等温结晶相似,半结晶时间可用下式表示:

$$t_{0.5}(T) = \ln 2 / K(T) \quad (23)$$

对于不同的成核方式, $t_{0.5}$ 具有如下两种形式:

$$t_{0.5} = (3 \ln 2 / 4 \pi N_0 L^3)^{1/3} \quad (24a)$$

$$t_{0.5} = (3 \ln 2 / \pi H L^3)^{1/4} \quad (24b)$$

当核已预先生成时, $t_{0.5}$ 用式(24a)表示, N_0 为预先的成核浓度, L 为核的线性生长速率;当成核速率为常数时, $t_{0.5}$ 用式(24b)表示, H 为平衡状态下的成核速率。

为了解动力学过程,引入动力学结晶能力(G)的物理概念:

$$G = \int_{T_g}^{T_m} K(T) dT = K^* \cdot D \quad (25)$$

式中 D 为结晶峰的半高宽, K^* 为在某一温度(T)时 $K(T)$ 的最大值,表 1 给出一些聚合物的非等温结晶参数。

(2) Jeziorny 方法。Jeziorny(1978)根据 Ziabicki 理论,针对非等温结晶曲线的特点,认为对于速率常数 $K(T)$ 可以用一个高斯函数来表示:

$$K(T) = K_{max} \exp[-4 \ln 2 (T - T_m)^2 / D^2] \quad (26)$$

式中 K_{max} 是最大结晶速率值, K_{max} 的计算可用下式:

$$K_{max} = C_k (t_{max})^{-1} \quad (27a)$$

$$CK = \int_{t_0}^{t_{max}} V_c(t) dt / \int_{t_0}^{t_{max}} V_c(t) dt \quad (27b)$$

式中各物理量的物理意义见图(4)所示,因此,动力学结晶能力(G)可由下式表示:

$$G = \int_{T_g}^{T_m} K(T) dT = (\pi \ln 2)^{1/2} K_{max} D / 2 \quad (28)$$

动力学结晶能力(G)是非等温结晶的特征参数,考虑到冷却速率的影响,可用冷却速率进行校正:

$$G_c = G/R \quad (29)$$

式中 R 为冷却速率, G_c 为单位冷却速率的结晶能力。对于同一聚合物,在不同的 R 下, G_c 为常数。

表 1 一些聚合物的非等温结晶参数

Polymer	T_m C	T^* C	T_g C	D C	$t_{0.5}$ sec	K^* sec ⁻¹	G C·sec
Rubber	30	-24	-75	33	5000	1.4×10^{-4}	3.2×10^{-7}
IPP	180	65	-20	60	1.25	0.55	33
PET	267	190	67	64	42	0.01	1.0
Nylon-6	228	146	45	46	5	0.14	5.4
Nylon-66	264	150	45	60	0.416	1.66	133
IPS	250	170	100	60	185	0.0037	0.15

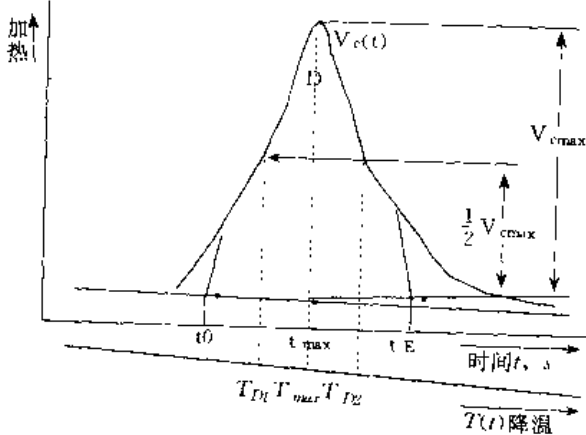


图 3 PET 非等温结晶的 DSC 曲线

(冷却速率 $dt/dt = 8.5 K/min$, 结晶速率 V_c , 结晶峰半高宽 D , $TD_1 = 486K, TD_2 = 479K, T_{max} = 483K$, 最大结晶速率 $V_{c,max}$)

(3) Ozawa 方程. Ozawa(1971)将 Avrami 方程推广于非等温结晶过程, 根据 Ozawa 的理论, 在温度 T 时的结晶度应适合于下式:

$$1 - C(T) = \exp[-X(T)/R_m] \quad (30)$$

其中 $C(T)$ 为温度 T 时的结晶度, R 为冷却速率, m 为 Ozawa 指数, $X(T)$ 由下式决定:

$$X(T) = g \int_{T_m}^T \{ N_c(\theta) R_c(T) - R_c(\theta)^{m-2} V(\theta) \} d\theta \quad (31)$$

式中: $N_c(\theta) = \int_{T_m}^{\theta} V(T) dT, R_c(\theta) = \int_{T_m}^{\theta} V(T) dT$

式中 $V(T), V(T)$ 分别为成核速率和线性生长速率, 对式(29)可改写成如下形式:

$$\log\{-\ln[1 - C(T)]\} = \log X(T) - m \log R \quad (32)$$

以 $\log\{-\ln[1 - C(T)]\}$ 对 $\log R$ 作图, 得到斜率为 m , 截距为 $\log X(T)$ 的直线, 图(4)给出 PET 的 Ozawa 的线性关系。

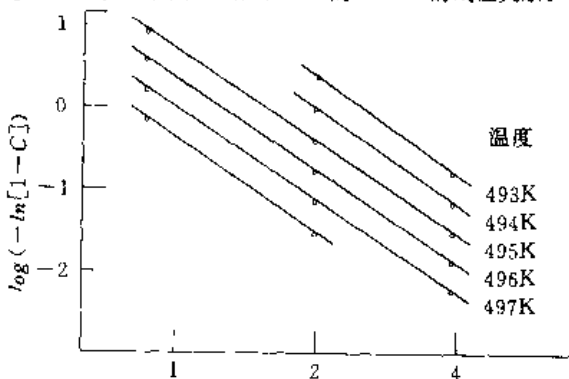


图 4 PET 非等温结晶的 $\log\{-\ln[1 - C(T)]\}$ 对 $\log R$ 作图

由于在不同的冷却速率下, 聚合物结晶的温度区间各不相同, 因此, 应用 Ozawa 方程处理实验结果时, 在作图选点存在很

大的局限性. 考虑到非等温结晶的特点, 刘结平等(1990)联系 Avrami 方程和 Ozawa 方程, 得出一个适合于非等温结晶动力学过程的基本方程, 由这个方程可获得描述非等温结晶过程某些参数。

总之, 对于非等温结晶动力学的研究, 目前已报导十多种处理方法均有一定的局限性, 这方面的工作有待于进一步的发展。

参考文献

- 1 Wunderlich B. Macromolecular Physics. New York: Academic press, 1976, 2: 1~347
- 2 刘结平, 等. 高分子通报, 1991, 4: 199
- 3 Alfonso G C, et al. Macromolecules, 1986, 19: 1143
- 4 钱保功, 等. 高聚物的转变与松弛. 北京: 科学出版社, 1986. 225~237
- 5 Cheng S Z D, et al. Macromolecules, 1988, 21: 3327
- 6 Lopez L C, et al. Polymer, 1989, 30: 884
- 7 刘结平, 等. 高分子通报, 1993, 1: 1
- 8 Xiaofu Xue, et al. CCI 1992, 318~367
- 9 高焕, 等. 高分子学报, 1992, 2: 162
- 10 薛小英, 等. 功能高分子学报, 1993, 5: 589

(中国科学院长春应用化学研究所刘结平硕士、莫志深研究员撰)

聚合物的流变行为 the rheological behaviors of polymer

1851 年, 史托斯(Stokes)等建立了牛顿流体行为的概念和理论, 对于复杂体系的流变行为的实验研究可追溯到 1867 年麦克斯韦(Maxwell)证实了在各种固体中应力松弛和粘弹行为, 1888 年, 切韦道夫(Schwedoff)测量了在明胶溶液中的蠕变现象, 第 1 次定量地测定了一个接近液体体系的粘弹行为。从 20 世纪开始, 对胶体体系性质的研究作了大量的工作, 宾汉(Bingham)指出, 早期的胶体化学家认为, 胶体化学之粘度计犹如电气科学之电流计, 胶体化学家注意到, 胶体的粘度随剪切和流动的时间而变化。粘度随剪切速率而减少的事实为宾汉和格林(Green)所证实, 宾汉发现, 悬胶体实质上是具有屈服值的软固体, 在屈服值之外, 形变速率随所施加的应力和屈服应力之间的差呈线性变化。然而 1928 年弗路(Farrow)等人对聚合物溶液的深入研究表明, 宾汉的维持线性关系的试图是不真实的, 粘度随剪切速率而减少的现象被奥斯瓦尔特(Ostwald)称之为结构化粘度(Strukturviskositut), 被威廉逊(Williamson)称之为假塑性(Pseudoplasticity), 被雷拿(Reiner)称之为非牛顿。1928 年, 贺佐(Herzog)和韦森伯(Wrsenberg)论证了悬胶体和聚合物溶液在流动期间的弹性能和弹性回复。1933 年, 门尼(Mooney)测量了橡胶流动中的弹性回复以及对正弦振动的应力响应, 另一种现象就是在流体中表现粘度随起始材料形变程度的增加而减少, 这种现象被费兰特列茨(Freundlich)称之为触变性(thixotropy), 反之, 流体粘度随剪切速率增加而增加的现象称之为触稠性(dilatancy), 1925 年, 奥斯瓦尔特首先发现聚合物溶液的粘度对剪切速率的依赖性。1929 年, 雷拿指出, 在非常低的剪切速率下粘度有一个常值 η_0 , 直至特征的剪切速率范围, 然后随第 2 特征剪切速率范围稳步地下降, 在此范围以上, 粘度维持一个常值

η_{∞} , 从1933年至1936年, 狄伦(Dillon)等测量了天然橡胶及其他化合物熔体粘度, 这是首次对聚合物熔体的粘度进行测定, 结果表明了橡胶熔体的非牛顿粘性特征。迪伦(Dillon)认为在橡胶-碳黑化合物中存在着屈服值, 并用标志物显示了流动图案, 在此期间, 门尼首次精确测定了天然橡胶的剪切粘度。

在1920~1940年对流变学的研究集中在非牛顿剪切粘度和触变性行为。但在此期间也注意到了弹性性质, 对微小振动作出响应的动力学粘度的定量研究也由菲利波夫(Philippoff)开始。1948年, 佛罗里(Flory)等研究了聚合物的零剪切粘度和分子量之间的关系, 从1955年到1957年, 波列(Poietti)、菲利波夫等对法向应力的测定作了早期的工作, 在板盘和圆锥之间流动的聚合物熔体或溶液会引起压力随半径的减少而增加的现象, 引起这种现象的原因是法向应力差的存在, 如果把方向“1”表示为速度分量方向; 方向“2”表示为速度变化方向; 方向“3”表示为等同方向, 则 $\tau_{11}-\tau_{22}$ 表示第1(主)法向应力差, $\tau_{22}-\tau_{33}$ 表示第二(次)法向应力差, 在聚合物加工过程中, 例如纺丝、吹膜、压模、注塑等, 经常遇到拉伸的问题, 由此引起流变学家的注意。1965年, 玻尔曼(Ballman)研究了聚合物的拉伸粘度。1980年, 怀特(White)等发现, 聚合物的拉伸粘度与分子量分布有关, 对于液晶高分子流变性质的研究始于1981年韦斯板仑(Wissbrun)等对液晶聚合物的熔体进行了粘度的测量, 发现大多数热致性液晶聚合物的流动曲线都出现两个屈服点, 形成所谓三区域流动(Three-zone flow), 这显然是与热致性液晶聚合物在加热过程中出现两处转变峰有关。

对聚合物熔体和溶液流变性质的研究的一个很重要的方面就是用数学模型描述聚合物体系受外力作用时的响应, 这些响应包括上述所有的现象, 经过流变学家几十年的努力, 现在已导出种类繁多的数学模拟公式, 即“本构方程”。所谓本构方程就是描述物体受力失去平衡态时材料的响应, 外加刺激作用与所导致的响应之间的关系是物质结构状态唯一的特征, 因此称为本构方程。关于聚合物熔体的本构方程有多种描述。

1958年由克里敏尼尔(Criminale)、依力克辛(Ericksen)和菲利(Filley)共同研究得出的本构方程称之为CEF方程, 具体形式为

$$\tau = -\eta\dot{\gamma}_1 - \left(\frac{1}{2}\psi_1 + \psi_2\right)\dot{\gamma}_1 \cdot \dot{\gamma}_1 + \frac{1}{2}\psi_1 + \frac{d\dot{\gamma}_1}{dt} \quad (1)$$

式中, η 、 ψ_1 、 ψ_2 分别为粘度、第1法向应力差系数和第2法向应力差系数, 它们都是应变速率张量数值 $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\dot{\gamma}_1 \cdot \dot{\gamma}_1)}$ 的函数, CEF方程有预测稳定剪切流中法向应力差的能力, 应用CEF方程的关键是确定 ψ_1 和 ψ_2 。伯特(Bird)等人推导出计算 $\psi_1(\dot{\gamma}_1)$ 的方程:

$$\psi_1(\dot{\gamma}) = \frac{4K}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\eta(\dot{\gamma}) - \eta(\dot{\gamma}')}{\dot{\gamma}^2 - \dot{\gamma}'^2} d\dot{\gamma}' \quad (2)$$

式中 K 是实验常数, 在流变函数的实验确定中经常使用是毛细管和锥-板几何结构。1975年落茨(Lodge)改进了设计, 利用“孔压误差”, 使得有可能测量稳定测粘流动状态下的 η 、 ψ_1 和 ψ_2 。如果把法向应力差系数函数 ψ_1 和 ψ_2 略去不计, CEF方程就简化为广义牛顿流体方程或GNF方程:

$$\tau = -\eta\dot{\gamma}_1 \quad (3)$$

1966年由葛达特(Goddard)和米勒(Miller)导出的本构方程

$$\tau = - \int_{-\infty}^t G(t-t') \dot{\Gamma} dt' \quad (4)$$

称之为G-M本构方程

式中 $\dot{\Gamma}$ 是应变(速率梯度)的共旋转速率, 对于小变形流动 $\dot{\Gamma} = \dot{\gamma}_1$, 由G-M方程给出一般线性粘弹性(LVE)流体。

$$\tau = - \int_{-\infty}^t G(t-t') \dot{\gamma}_1(t') dt' \quad (5)$$

式中 $G(t-t')$ 是松弛模量, 它能取依赖于模拟真实LVE行为的LVE“力学模型”的具体形式, 设想聚合物具有“双重性”, 即具有

牛顿粘性流体和虎克弹性固体这两种特性, 并且这种双重性质同时起作用。例如: 既然麦克斯韦(Maxwell)单元以剪切应力松弛实验为条件的, 对 $t=0, r=0$; 对 $t>0, r=r_0$, 因此导致应力的时间依赖为

$$\tau(t) = \gamma_0 G e^{-t/\lambda} \quad (6)$$

式中松弛时间 λ 是麦克斯韦单元的“粘度”与“模量”的比值, 方程(6)能用来定义松弛模量的时间依赖:

$$G(t) = \frac{\tau(t)}{\gamma_0} = G e^{-t/\lambda} \quad (7)$$

同样沃茨特(Voigt)单元是以蠕变实验为条件的, 由此导出柔量的时间依赖为

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\tau_0} = \frac{1}{G} [1 - e^{-t/\lambda}] \quad (8)$$

动态力学实验是有用的聚合物结构表征方法, 因为在某些频率或温度范围内, 聚合物结构运动的发生能够通过弹性动态模量(G'), 衰减损耗动态模量(G'')和耗散因子($\tan\delta$)的变化检测出来, 其中:

$$G'(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(\ln\lambda) \omega^2 \lambda^2}{1 + \omega^2 \lambda^2} d(\ln\lambda) \quad (9)$$

$$G''(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{H(\ln\lambda) \omega \lambda}{1 + \omega^2 \lambda^2} d(\ln\lambda) \quad (10)$$

$$\tan\delta = \frac{G''}{G'}$$

式中 $H(\ln\lambda)$ 为连续松弛谱的函数。

GNF方程是一系列为解析流体非牛顿行为而建立起来的经验方程, 半经验方程, 或基于分子观念建立的一般表达。这些本构方程包含了粘度函数 η 对外加(或引起的)应变速率依赖性的不同表达方法, 有如下的几种模型:

幂律模型:

$$\eta(\dot{\gamma}) = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (11)$$

式中, m —参数($N \cdot s^n/m^2$), n —幂律指数。由此可得幂律本构方程:

$$\tau = -m \dot{\gamma}^{n-1} \cdot \dot{\gamma}_1 \quad (12)$$

m 是个温度函数, 服从阿伦尼乌斯(Arrhenius)型关系: $m = m_0 \exp\left[\frac{\Delta E}{R}(1/T - 1/T_0)\right]$, ΔE 为流动活化能

依力士(Ellis)模型

$$\frac{\eta_0}{\eta(\tau)} = 1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{y2}}\right)^{a-1} \quad (13)$$

其本构方程为:

$$\tau = \eta(\tau) \cdot \dot{\gamma}_1 \quad (14)$$

这个方程用剪切应力的数值来表达粘度, 式中 η_0 是零剪切粘度, τ_{y2} 是 $\eta = \eta_0/2$ 处的剪切应力值

$(a-1)$ 是 $\lg(\eta_0/\eta - 1)$ 与 $\lg(\tau/\tau_{y2})$ 关系曲线的斜率。

加利亚(Carreau)模型

$$\frac{\eta(\dot{\gamma}) - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (15)$$

这个方程在它的非牛顿粘度预测上也很成功, 并且便于使用。

宾汉(Bingham)流体。

$$\eta = \infty \quad \tau \leq \tau_y \quad (\text{固体})$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = M_0 + \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} \quad \tau \geq \tau_y \quad (\text{流体})$$

式中 τ_y 为特征屈服应力

对于聚合物的拉伸粘度的数学描述和实验方法经近10年来流变学家的努力已日趋完善, 对于稳态拉伸流动, $\tau_{22} = \tau_{33}$, 由下式给定

$$\bar{\eta}(\dot{\epsilon}) = -\frac{\tau_{11}-\tau_{33}}{\dot{\epsilon}}$$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为拉伸速率, 对简单拉伸流动 $\dot{\gamma}_{11} = 2\dot{\epsilon}; \dot{\gamma}_{22} = \dot{\gamma}_{33} = -\dot{\epsilon}$ 。对于平面拉伸流动(纯剪切流动) $\dot{\gamma}_{11} = 2\dot{\epsilon} \quad \dot{\gamma}_{22} = -2\dot{\epsilon} \quad \dot{\gamma}_{33} = 0$ 。对于双轴拉伸流动 $\dot{\gamma}_{11} = \dot{\gamma}_{22} = 2\dot{\epsilon}; \dot{\gamma}_{33} = -4\dot{\epsilon}$ 。在实验上

$$\tau_{11} + P_{arm} = \frac{F_1}{A_1}$$

式中: F_1 为引起简单拉伸流动所需要的力, A_1 为与流动垂直的横截面面积。由于 $\tau_{22} = \tau_{33} = -P_{arm}$, 因此实验上的拉伸粘度变为

$$\bar{\eta}(\dot{\epsilon}) = \frac{-F_1/A_1}{\dot{\epsilon}}$$

从数学上推导得 $\bar{\eta} = 3\mu$, 即拉伸粘度为剪切粘度的 3 倍, 这一推导已由梅斯拿 (Meissner)、玻尔曼 (Ballman)、史蒂芬逊 (Stevenson)、以及怀特 (White) 等人的实验所证实。由于电子计算机的应用和计算技术的发展, 使得现代的流变学家能借助电子计算机对聚合物的复杂的流变行为进行模拟计算, 从而指导工程设计、产品设计等。1990 年, 韩式方介绍了计算解析法在粘弹流体力学中的应用, 他应用“准衰退记忆”原理, 发展了一类拉伸流动的扰动本构理论, 并在此基础上发展了拉伸流动稳定性的本征值理论, 同年, 金日光首先提出了有关非线性量子统计理论的物理表征值一组成之间关系的普遍方程, 并具体考虑了各种二元高分子的表现粘度一组成、模量一组成关系曲线, 计算曲线与实验值是相一致的。自从 1975 年天拿 (Tanner) 等首次用有限元法成功地求解非牛顿流体的挤出流动以来, 数值模拟已成为一个热门的课题。1985 年以来唐国俊等开展了松弛时间谱的数值分析、高聚物挤出流动中热传导的数值模拟等课题的研究, 并取得了颇为有用的结果, 在聚合物流变学领域中还有很多有待解决的难题, 诸如各种本构方程的准确性, 各种数值模拟与实验值的拟合性等问题还有测量各种流变性质的仪器、方法和改进等有待今后流变学家的努力。

参考文献

- 1 Bird R B, et al. Dynamics of Polymeric Liquids. New York: Wiley, 1977. 1: 10~50
- 2 White James L. Principles of Rheology for Polymer Engineers, published by the University of Akron, 1985
- 3 Cogswell F N. Recent Advance in Liquid Crystalline Polymer. New York: Wiley, 1985. 169~174
- 4 塔德莫尔 Z, 等. 聚合物加工原理. 耿孝正等译. 北京: 化学工业出版社, 1990. 159~216
- 5 江体乾, 等. 第 3 届全国流变学学术会议论文集. 上海: 华东化工学院, 1990. 6~32

(中国科学院广州化学研究所陈家楠研究员撰)

高分子凝胶的体积相变 高分子凝胶是由高分子的三维网络与溶液组成的多无体系, 是自然界中普遍存在的着的一种物质形态, 生物机体的许多部分就是由凝胶构成的, 眼球就是一个例子。高分子形成三维网络结构有两种方式, 即物理交联和化学交联。前者是分子链通过缠结点、微晶区等物理结合形成三维网络, 这些交联点随温度等外界条件而变化, 会出现溶胶—凝胶转变。而化学交联是分子链靠共价键式配合键结合, 产生三维网络结构。早在 40 多年前, P. T. Flory 和 W. T. Stochmayer 就研究了电解质凝胶的空胀现象 70 年代末, 由于 T. Tonaka 等人发现了凝胶的体积相变现象, 促进了该领域的发展 1980 年, F. Tonaka 等人发现化学交联的部分水解聚丙烯酰胺凝胶在水/丙酮混合溶液中, 其溶胀体积随丙酮浓度的增加而减小, 当丙酮达到某一浓度时, 这种体积变化表现为不连续的跃迁式, 他们称之为体积相变。研究发现水解程度不同的凝胶, 出现体积相变的丙酮浓度不同, 相变中体积变化的大小亦不相同。他们提出体积

相变是平衡的热力学一级相变。

凝胶的体积之所以溶胀或收缩, 是由于凝胶内部的溶液与其周围的溶液之间存在着渗透压 π 。 π 与溶剂的化学位 $\Delta\mu_0$ 有如下关系:

$$\pi = -\Delta\mu/V_0 \quad (1)$$

V_0 是溶剂的摩尔体积。根据 Flory 理论, $\Delta\mu_0$ 中有来自 3 个方面的贡献, 即高分子与溶剂混合的 $\Delta\mu_{0,mx}$, 电解质凝胶中的可迁移离子引起的 $\Delta\mu_{0,ion}$ 以及溶胀导致高分子网络形所伴随的 $\Delta\mu_{0,ela}$, 所以

$$\Delta\mu_0 = \Delta\mu_{0,mx} + \Delta\mu_{0,ion} + \Delta\mu_{0,ela} \quad (2)$$

$\Delta\mu_{0,mx}$ 可以经典的 Flory-Huggins 格子模型计算, 当分子量无限大时,

$$\Delta\mu_{0,mx} = RT[\ln(1-\Phi) + \Phi + X\Phi^2] \quad (3)$$

R 和 T 分别为常数和绝对温度, x 是 Flory 相互作用函数。

高分子电解质凝胶中有可迁移的反离子存在, 为满足电中性的条件, 它们不能自由地扩散到凝胶外部的溶液中去。凝胶就象一个反离子不能通过的半透膜, 在其两侧会产生渗透压。如果忽略固定于高分子网络上的电离基团间以及它们与反离子的相互作用, 当可迁移离子在凝胶中和外部溶液中的浓度分别为 c 和 c' ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$) 时,

$$\Delta\mu_{0,ion} = -RTV_0(c-c') \quad (4)$$

如果溶液中有添加盐, c 与 c' 的关系按 Donnan 平衡条件计算; 无添加盐时 $c' = 0$ 。设不含溶液的子凝胶中有效高分子链密度为 $\nu \text{mol} \cdot \text{cm}^{-3}$, 每个有效链带有 f 个一价电离基, 反离子也是一从价, 则:

$$\Delta\mu_{0,ion} = -RTV_0f\nu\Phi \quad (5)$$

凝胶溶胀时高分子网络受到拉伸, 导致覆盖象熵减小, 由理想橡胶仿射 (affine) 网络的弹性理论可得:

$$\nu\Delta\mu_{0,ela} = RTV_0\nu\Phi[(\Phi/\Phi_0)^{1/3} - \frac{1}{2}(\Phi/\Phi_0)] \quad (6)$$

将(3)、(5)、(6)式代入(2)式, 或得凝胶的渗透压为:

$$\pi = \frac{RT}{V_0}[\ln(1-\Phi) + \Phi + X\Phi^2] - RT\nu\Phi_0[(\Phi/\Phi_0)^{1/3} - \frac{1}{2}(\Phi/\Phi_0)] + RTf\nu\Phi \quad (7)$$

上式称为凝胶的状态方程, 它表达了 $\pi - \Phi - T$ 的关系。当溶胀达到平衡时, $\pi = 0$, 体积不再变化, (7)式可完成:

$$\tau = 1 - 2x = -\frac{V_0\nu\Phi}{\Phi^2}[2f+1](\frac{\Phi}{\Phi_0}) - 2(\frac{\Phi}{\Phi_0})^{1/3} + 1 + \frac{2}{\Phi} + \frac{2\ln(1-\Phi)}{\Phi^2} \quad (8)$$

τ 称为换算温度, 它反映了溶液对高分子的特性, 良溶剂时 $\tau > 0$, 贫溶剂时 $\tau < 0$ 。

T. Tanaka 等人(1980)利用(8)式计算凝胶的理论溶胀曲线。对聚丙烯酰胺来说, 水是良溶剂而丙酮是贫溶剂, τ 增大相当于丙酮浓度下降。在 $\tau > 0$ 的区域, 无论电离基团密度 f 取何值, 凝胶溶胀 ($\Phi/\Phi_0 < 1$), 体积随 τ 连续变化(实线)。当 $\tau < 0$ 时 $f < 0.659$ 为临界值, $f < 0.659$ 时体积连续变化; $f > 0.659$ 时则会在某个 τ 处出现体积相变。

研究表明, 体积相变是凝胶态物质的普遍现象。为了从物质特性来描述体积相变现象, E. L. Cussler 等人(1990)发展了高分子溶液的格子流体理论, 提出了可溶液的格子流体理论, 提出了可压缩格子模型, 试图将凝胶的相图与对应的未交联高分子的溶液相图联系起来。J. M. Puausnitz 等人(1989, 1990)则通过在配分函数中引进氢键的相互作用能, 建立了水凝胶的状态方程。然而, 这些理论都只是对(3)式中的 Flory 相互作用函数 x 作些改良。而对电解质凝胶来说, 电离基团之间的相互作用起着重要的角色, C. Konák 和 R. Bansil(1990)在凝胶状态方程中用 Debye-Hückel 理论来描述这种相互作用。童真还发现凝胶中的电离基团密度 f 对其剪切模量有很大的影响, 这表明电离基团的存在改

变了分子链的构象,从而偏离理想的橡胶的弹性行为。

从上述理论可知,凝胶体系的特性是由 χ 、 f 、 ν_3 三个因素来决定的,凡是可改变这三个参数的变化,都可能影响体积相变。下面介绍一些溶液组成以外的因素。

1984年, Y. Hirokawa 和 T. J. Tanaka 报告了不带电荷的聚 N-异取代丙基同丙酰胺凝胶(PNIPA)在纯水中的体积相变的现象。1990年 H. Inomata 等人研究了具有不同 N-取代丙基的聚丙烯酰胺凝胶的相图。当 N-取代基分别为环丙基(NCPA)、异丙基(NIPA)、正丙基(NNPA)时,丙基的空间体积依次增大,高分子网络的疏水性增强,使得发生体积相变的温度也依此顺序下降。其中聚 NCPA 凝胶中疏水基(环丙基)的体积量小,所以没有观察体积相变。据此,他们认为疏水性相互作用是造成低温溶胀、高温收缩型体积的主要原因。没有找到描述此种相互作用的理论。

在凝胶的高分子网络上可以引入强电离基团(如磺酸基)或弱电离基团(如羧酸基),笔者的结果表明, H^+ 浓度的变化不会改变强电解质凝胶的溶胀特性,但对弱电解质凝胶的溶胀由有很大的影响(董冀等,1992)。这是由于 H^+ 浓度的变化引起弱电解质凝胶中电荷密度 f 发生变化,从而改变凝胶的渗透压。是 Tanaka 等人最早报告了由 H^+ 浓度变化引起部分水解的聚丙烯酰胺凝胶发生体积相变的发现。I. O. hmine 和 Tanaka(1982)实验还发现添加盐的金属阳离子价态对荷电凝胶的体积相变有很大影响。他们认为凝胶内部电中性的要求使得反离子价数增高时,其浓度 C 就必须降低,由(4)式可知这会导致 π 减少引起体积收缩。他们还试图以此来说明 Ca^{2+} 离子与生体肌肉的关联。

1991年,和田直纯等人报告了一个有趣的结果。他们通过自由基共聚制得了同时带有负电荷基团 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸钠(AMPSNa)与电荷基团 N-(3-二甲氨基)丙基丙烯酰胺(NDAPA)PNIPA,其中电离基团对单体的总摩尔分数为 0.01。该凝胶的体积随温度的变化与单纯的 PNIPA 凝胶一样,仍属于低温溶胀高温收缩型。将这种两性凝胶发生体积相变的温度对负、正电离基摩尔比(AMPANa/NDAPA)作图 1 的实践。由图可知,无论哪一种电荷过量,净过量电离基的反离子都会引起渗透压升高,结果相变温度也升高,值得注意的是 50/50 的凝胶,尽管相变温度(35°C)最低,但仍高于不带电荷的 PNIPS 的 33.2°C,溶胀曲线的形状也不同。这说明虽然高分子网络上电荷的代数和为零,但电离基团之间的正负电荷协同相互仍影响着高分子链的行为,这对认识两性蛋白质的功能很有启发。

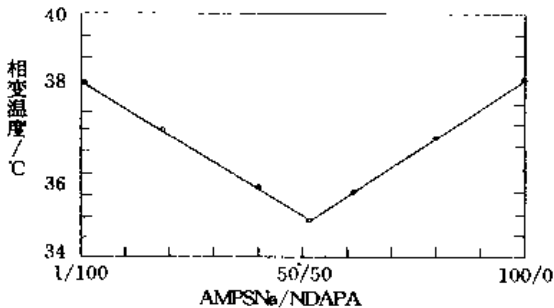


图1 具有正负电离基的两性聚N-异丙基丙烯酰胺凝胶体积相变温度与凝胶中负/正电离基单体摩尔比的关系

由光、电控制体积相变的光敏凝胶或电控凝胶是非常有应用前景的。光引发体积相变主要有两种途径,一种是用紫外线使凝胶离子化,另一种是由可见光引起凝胶的局部温度变化。A. Mamada 等人(1990)将 bis[4-(dimethylamino)phenyl] (4-vinylphenyl)methyl leucocyanide 与在 NIPA 共聚制成光敏凝胶,当没有紫外线照射时,随温度升高,体积连续地缩小。如果将温度控制 32°C 而用紫外线照射已收缩的凝胶,则发生下列离子反应,在凝胶中形成离子,从而发生溶胀,出现不连续的体积变化。A. Suzuki 和 Tanaka(1990)PNIPA 凝胶中引入了吸光分子——

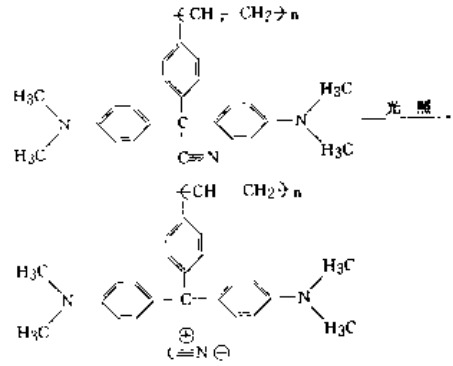


图2

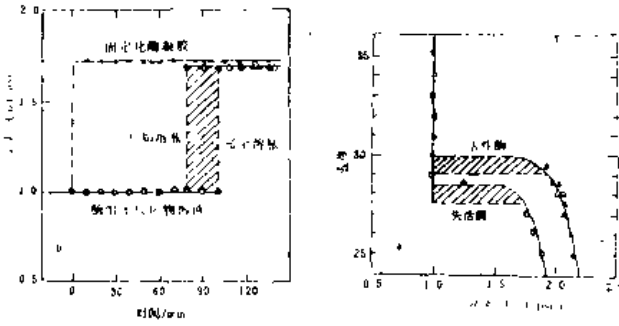
叶绿酸没有光照对凝胶体积随温度升高而连续收缩,一旦受到光照,光能被吸收,导致凝胶局部的温度升高,引起体积的不连续变化。这两种光敏凝胶都有一个共同特点,就是当温度控制在 PNIPA 相变温度时,随着光照射或遮断,可以控制凝胶体积发生连续、可速的变化。

由电场引起凝胶体积相变的机理,有人认为是因为反离子在电场作用下在凝胶内部迁移,于是形成不同部位的 H^+ 浓度不同,从而导致溶胀或收缩。部分水解的聚丙烯酰胺凝胶在水/丙酮=50/50(体积)混合溶液中,其体积随电场电压的变化。当电压较低时,仅是与正极接触的部分收缩,随着电压升高,收缩范围向负极扩大,最后整个试样收缩。

E. Kokufuta 和 Tanaka 把兔肝脂肪酶固定在热敏凝胶 PNIPA 中,用经催化脂肪酶的水解反应,通过反应物与产物的浓度变化来控制凝胶体积相变。图 2 是这种凝胶在 47.3mmol/L 丁酸乙酯溶液中,溶胀比(试样溶胀平衡与收缩后的直径之比 $d/d_{collapsed}$)随温度变化的相图。酶的失活与否对相变温度(虚线)有明显的影响。其原因在于当酶具有活性时,溶液中反应酶催化下水解,使溶液的组成发生了变化,图 2 则反映了在一定温度下(酶具有活性时的相变温度 28.9°C),酶固定在凝胶中(黑点)和溶于溶液中(白点),凝胶在丁酸乙酯溶液中体积变化的响应速度。由图可见,当凝胶带固定化酶时,放入反应物凝胶液就立即发生体积变化;而把酶溶于反应物溶液时,要在 80min 后才开始溶胀。这是因为固定于凝胶内部的活性酶会迅速地改变凝胶内部及其周围局部溶液的组成,尽管溶液总体的组成宏观上还没有变化,但这种局部组成的变化就足以改变凝胶的溶胀条件,引起体积变化。

除了通过生化反应改变溶液组成来控制体积相变外,他们还利用酶催化反应来改变溶液的 H^+ 浓度、反离子浓度从而控制体积相变(E. Kokufuta 等,1991)。这些结果表明,通过凝胶的体积相变,可以将生化反应产生的化学能反应转换成机械能输出,还可利用酶的选择性,赋予凝胶对特定的分子作出响应能力。

凝胶体系的应用是非常广泛的,而且上述各种引起体积相变的因素又可以成为控制凝胶的手段,这就进一步拓宽了凝胶的应用领域。最理想的投药方式应该是在需要的时候,以合适的速率,将所需剂量的药物投到人体需要部位。这种给药需剂量的药物称为 DDS,包括控制释放和目标药物。高分子凝胶在环境的刺激下溶胀或收缩,可以改变包埋于其中的药物向外扩散的速率,实现药物控制释放。Y. H. Bae 等人(1987)研究了在磷酸盐缓冲溶液中消炎痛从 PNIPA 凝胶中放出的过程。在 30°C 时消炎痛的释放速率为零,而当温度活跃降至 20°C 时,立即有消炎痛释出,可见其温度控制脉冲型释放。释放一般有压榨式和皮壳式两种机理,前者随温度升高凝胶体积收缩,将其内部的溶液(水和药物)一起挤压出现来;后者则温度升高凝胶表面迅速收缩,形成致密的表皮层,使其内部的溶液更加难以扩散出来。还有控制胰岛素释放的研究(K. Inohara 等,1988),将葡萄糖氧化酶(GOD)与甲基丙烯酸(二乙基胺)乙酯凝胶的一起制成复合膜,用做胰岛素的胶囊。当外输送的葡萄糖浓度升高时,糖 GOD 的作用下氧化成葡



(a) 含酶 PNIPAA 凝胶在丁酸乙酯溶液中的溶胀曲线
 (b) 含酶凝胶
 (·) 与酶溶于溶液时凝胶
 (○) 在 28.9% 丁酸溶液中的溶胀的溶胀响应曲线

图 2

葡萄糖, 于是膜中的 H^+ 浓度下降, 高分子网络上的正氯离子增多, 结果造成凝胶溶胀, 胰岛素大量释放。所以特定的物质可以控制药物的释放。

将化学能转变成机械能的换能材料, 这种功能将称为 chemomechanics, 是能够直接将化学能转变成机械能的材料, 因此也是一仿生材料。这种材料的设计原则是将高分子网络在外界刺激下发生的微观的构象变化转变成宏观的材料整体的机械运动。利用这种特性可以开发人工肌肉、促动器等。早在 40 年代末期, W. Kubin, A. Datchalsky 就开始了以凝胶为换能材料的“化学发动机”的研究, 到了 60 年代, 人工肌肉的收缩力等指标已接近动物肌肉的水平。铃木等人用反处冷冻解法制出了聚乙烯醇/聚丙烯酸/聚丙烯酰胺凝胶薄膜, 改变溶液组成, 凝胶体积随之变化, 驱动荷重, 实现化学能向机械能的直接转换。经 33 次冷冻、解冻厚度为 $10\mu m$ 薄膜, 当荷重为 $1.4kg \cdot cm^{-2}$ 时, 响应时间为 $0.12s$, 输出能量密度为 $0.106W \cdot cm^{-3}$, 与动物肌肉相近。Shiga 等人发现对浸泡在电解质溶液中的丙烯酸钠/丙烯酰胺共聚凝胶施加电场时, 尽管凝胶没有与电极接触, 但仍发生了变形, 且与和因真纯等 1991 年报道的现象不同。他们利用该现象制作了人工手指、人造鱼等样品。除此之外, 还有温差、 H^+ 浓度等驱动方式, 所产生的机械能也不局限于直接以能量的形式输出, 还可以转换成材料其它形式的响应。用电场控制过滤膜的孔就是这方面的一个例子。

物质分离材料, 作为物质分离用材料, 凝胶早已广泛地服务于各种液相色谱中了。Cussler 等人报告了利用热敏型 PNIPAA 凝胶浓缩溶液的方法。他们先把收缩了的凝胶投入溶液中, 在低温下, 凝胶溶胀而吸收溶剂然后通过过滤分离出浓缩后的溶液, 再将吸收了溶剂的凝胶加热, 超过相变温度后体积收缩放出溶剂, 重新投入使用。对分子量不同的各种物质进行浓缩实验的结果, 溶质的分子量越高则浓缩的效果越好。用凝胶分离蛋白质、微生物等活性物质, 可以避免加热等方法所产生副作用。Trank 等人用凝胶来分离大豆蛋白质, 与以往的酸凝法比较, 质量、收率都较好。

凝胶体积相变的研究方兴未艾。从基础研究的角度来看, 如何制备结构可以完全表征的共聚胶试样及如何描述荷电基团间的相互作用, 这是实验和理论方面的两个关键问题。利用凝胶是有待深入开发的领域, 由于凝胶体系与生物机体在结构上的相似性, 认识凝胶物质的运动规律对于理解生命过程的一些现象具有重要的意义。

(华南理工大学材料科学研究所童真撰)

聚合物的非晶态 amorphous state of polymers 包括玻璃态、橡胶态、结晶聚合物中的非晶部分以及结晶熔融态。

非晶态聚合物通常是指完全不结晶的聚合物, 从分子结构的角度来看具有以下特征: 高分子链结构的规整性很差, 以致根本不能形成任何可观的结晶, 如无规立构高聚物(无规立构的聚苯乙烯(α -PS)、聚甲基丙烯酸甲酯(α -PMMA)), 其熔体冷却时, 仅能形成玻璃态; 链结构具有一定的规整性, 可以结晶, 但由于其结晶速度十分缓慢, 以致其熔体在通常的冷却速度下得不到可观的结晶, 而常呈现玻璃态的结构, 如聚碳酸酯(PC); 有些高聚物其链结构虽然具有很好的规整性(如顺式-1,4 聚丁二烯), 因其分子链扭折不易结晶, 它在常温呈现橡胶态结构, 在低温时才形成可观的结晶。对于晶态聚合物, 非晶态就有两种, 一种是过冷的熔体; 另一种是晶区间的非晶区(非晶态), 后者在结构性质上与前者是有区别的。

从聚集态结构角度来看具有非晶态聚合物结构, 70 年代以来出现两种对立的学说, 其一是 Flory 学派的无规线团模型, 最近由中子小角散射(SANS)的研究表明, 非晶聚合物无论处于玻璃态或橡胶态, 在聚集态结构上是均相的, 聚合物分子均具有无规线团的结构(图 1(a)); 另一学派 Yeh 等一方面根据电子显微镜(EM)的大量观察, 一方面吸取了 Kargin 的链束模型以及 Hosemann 的次晶模型, 认为在非晶高聚物中具有局部有序性, 提出了“折迭链缨状胶束粒子模型”(Folded-Chain Fringed micellar grain model)——简称两相球粒模型(图 1(b))。另外, Vollmert 等提出了非晶链束不互相贯穿, 每个都成为圆的“塌球模型”(collapsed ball model)(图 1(c))。Pechhold 等则提出了另一个模型, 认为非晶链束可以整体曲折, 形成“曲棍状模型”(meander-shape model, 迷宫式(磁畴观测中遇到的))(图 1(d)), 他根据热力学的计算得出曲棍的半径约为 $5nm$ 。对上述一相无规线团模型提出异议。



(a) 无规线团模型(Flory)
 (b) 折迭链缨状胶束粒子模型(Yeh)
 (c) 塌球模型(Vollmert)
 (d) 曲棍状模型(Pechhold)

图 1 非晶聚合物的结构模型

表 1 聚合物中重要原子对中子及 X 射线散射的振幅

	$10^{12}cm$						
	H	D	C	N	O	P	S
中子	-0.38	0.65	0.66	0.94	0.58	0.53	0.31
X 射线	0.28	0.28	1.70	1.98	2.26	4.24	4.52

近年来, 由于中子小角散射(SANS)技术的发展及其在非晶态高聚物结构研究中所取得的结果, 有力地支持了 Flory 模型。SANS 在高分子方面的应用, 主要是根据 H 和 D(重氢)的散射振幅差别较大, 将 D 代替 H 后, 物质热力学性质在大多数情况下没有变化, 而在散射振幅上呈现区别(表 1)。迄今人们采用 SANS 已测定了各种氘代非晶聚合物固体“稀溶液”, 证明所有情况下其 $\langle r_g^2 \rangle \propto \langle r_0^2 \rangle \propto M^2$, 误差在 $\pm 5\%$ 的范围内。 $\langle r_0^2 \rangle$ 系均方

回转半径, $\langle s^2 \rangle_0$ 系均方末端距, m 分子量。在图 2 中的 D-标记各种非晶高分子子链物理图象中只有(d)是正确的。



(a) 在 θ 溶液中和在本体中高分子链形态
(b) 球珠模型
(c) 曲棍球模型
(d) 无规线圈模型

图 2 非晶态聚合物中高分子形态

上述两种对立观点,哪种观点更符合客观事实,本文作者认为首先应该给“局部有序”一个严格定义。假若液体中的“近程有序”是众所公认的话,那么就不必怀疑这种有序性也存在于非晶聚合物中。问题是这种“局部有序”的尺寸究竟有多大。目前文献一般认为所谓局部有序(Local order)区的尺寸 $< 5\text{nm}$, 远程有序(Longrange order)区的尺寸 $> 10\text{nm}$ 。如果作者也同意这个定义的话,那么 SANS 虽然有力地证实本体中高分子链形态与 θ 溶剂中相同,支持了 Flory 模型。但是它测得回转半径(R_0)值一般 $> 10\text{nm}$, 而对小于 10nm 的结构, SANS 则不敏感。事实上,所谓非晶态聚合物局部有序区,一般在 $2\sim 5\text{nm}$ 左右。应指出具有相同分子量,相同末端距,但链段排列取向不同,却具有相同回转半径是可能的,可见不能仅从末端距判断高分子链形态,还需综合考虑其它的数据。另外一个很关键的问题是许多聚合物熔体的结晶速率非常快,从线团互相穿透或无规缠结线团的模型解析骤然形成折迭链片晶那是很难想象的。总之,目前有关非晶态聚合物结构,无规线圈模型虽然存在着很多证据,但是无法解释许多实验事实,这样就不得不使人们针对不同具体情况提出了不同非晶态结构模型。

参考文献

- Allen G, et al. J. Macromol Sci, 1976, B12: 1~301
- 4th international conference on the physics of noncrystalline solids, 1977, 680
- 漆宗能, 关家玉, 沈静姝. Chemistry and Physics, 北京出版社, 1981, 213
- 郭贻成, 王震西主编. 非晶态物理学. 北京: 科学出版社, 1984. 491~540
- Murthy N S, et al. Macromolecules, 1991, 24: 1185

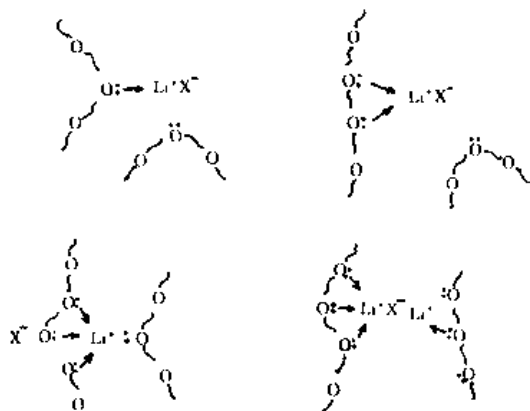
(中国科学院长春应用化学研究所莫志深研究员撰)

高分子固体电解质 polymeric solid electrolytes 又称高分子快离子导体(Polymer Ionic Conductor)。它是一种虽为固态但仍具有液体那种能溶解电解质并能传递离子迁移特性的高分子材料。其结构是由高分子主体物和金属盐两部分复合而成。与无机固体电解质相比,它具有质轻、粘弹性和容易成膜等优点,可用于全固态电池、电致变色、传感器等方面的新型材料,加上对这一新材料的基础研究方面的意义,使这一领域的研究有了迅速发展。

高分子固体电解质的研究始于 1973 年,英国 Wright 等发现聚氧乙烯(PEO)与碱金属盐的络合物体系具有离子导电性,1979 年法国 Armand 报导 PEO 的碱金属盐络合物在室温以上导电率达 10^{-3}S/m ,且有优良的成膜性能,可作锂电池的电解质,从而引起人们极大关注。此后世界各国都开展这一新材料的研究并对各种结构的聚合物,如聚酯、聚醚、聚酰胺、聚硫磺亚烃等进行广泛的探索,发现只有具有一定极性、柔顺性、低内聚能

密度的聚合物才有希望成为高分子固体电解质。PEO 是迄今研究得最多的聚合物,人们发现,它与金属盐的络合物(PEO-MX)具有优良的电化学氧化还原稳定性,EO 单元 $-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}-$, 溶剂化能力强,它既能按照离子的尺寸自动调节其由分子内或分子间组成的溶剂化作用的“笼”的大小,也可络合离子对、三离子体及四离子体等。

近年来的研究表明,PEO 与金属盐络合物的电导主要是非晶部分的贡献。Armand 等用 NMR 方法证实离子迁移发生在高弹区,并推断高分子固体电解质的导电机理可用高弹态中分子链热运动所引起的构象变化造成自由体积变化和移动与阳离子的扩散和结合这一概念加以描述。高分子固体电解质在非晶状态下导电过程模式如下:



大多数非晶络合物体系的电导率 σ 与绝对温度 T 的关系均符合自由体积理论导出的 VTF (Vogel-Tamman-Fulcher) 方程:

$$\sigma = A \cdot T^{-1/2} \exp[-B/(T - T_0)]$$

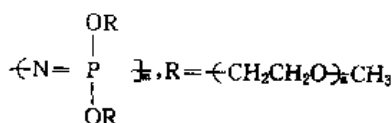
式中 T_0 为与玻璃化转变温度有关的常数, A, B 为分别与载流子浓度和活化能有关的常数。上式表明,增加载流子浓度和降低聚合物的 T_g 可以提高电导率。

为了提高高分子固体电解质的室温电导率又兼顾力学性能,人们从不同途径进行探索,大量的研究报导是对 PEO 的高分子改性以增大分子结构中非晶区的比例,主要采用以下几种共聚或交联的化学方法,也有用增塑或共混的物理方法。

共聚高分子固体电解质 只要不生成共结晶,加入少量另一种单体进行无规共聚是使原有均聚物结晶产生缺陷以降低结晶度的有效途径。王佛松、陈立泉等将氧化乙烯与氧化丙烯,环氧氯丙烷与氧化乙烯共聚大大降低了产物的结晶度甚至得到非晶产物。Armand 等也进行了类似的工作。通过这一途径,一般能使室温电导率提高到 $1\sim 5 \times 10^{-3}\text{S/m}$ 。永冈等将二甲基二氯硅烷与低分子量聚乙二醇缩聚,得到 EO 链长度不同的共聚物。其电导率随 EO 组成的增加而上升,当 EO 为 $80\sim 90\text{mol}\%$ 时呈现极大,达 10^{10}S/m 。

采用嵌段共聚也可获得类似效果。若 PEO 分子量不高,室温下大都不易结晶。日本渡边曾研究聚氧醚与聚氧丙烯的嵌段共聚物的性能,发现 σ 随 LiClO_4 浓度及聚醚段分子量而变,但对于硬段聚氧醚含量高达 30% (重量) 的共聚物,其室温电导率并没有改善。

用接枝方法制成梳状高分子也可降低结晶度。夏笃伟等合成了侧链含有类似 PEO 结构的聚甲基丙烯酸甲酯多羟乙二醇醚,与 NaCF_3SO_3 按一定比例形成络合物,室温电导率可达 10^{10}S/m 左右。Blonsky 和 Shriver 等曾将 EO 作为侧链接到聚磷腈上:



室温导电率比 PEO 均聚物高约 3 个数量级。江英彦等将 EO 接到硅氧烷主链上形成的梳形共聚物, 室温 σ 达 $7 \times 10^{-3} \text{ S/m}$ 。

交联高分子固体电解质 使用交联手段可抑制 PEO 链结晶作用, 同时还可改善机械强度。LeNest 用三官能团异氰酸酯与 PEO-PPO-PEO 三嵌段共聚物交联, 并与 LiClO_4 络合, 当 O/Li 为 20 时, 室温 σ 可达 10^{-2} S/m 。彭新生等(1989)制备环氧树脂与 PEO 的互穿聚合物网络(IPN), 藉环氧相提供强度而 PEO 与盐的络合物相提供电导性能。结果表明, 环氧网络的存在抑制 PEO 结晶性能, 同时, PEO 分子量变化一个数量级电导率变化约 1~2 个数量级。Chiang 等进行了类似的工作, 当环氧含量在 IPN 中不大于 50% 时, 电导率约为 10^{-2} S/m 。

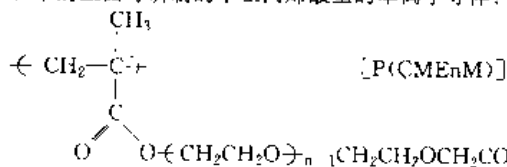
共混或增塑高分子固体电解质 共混或增塑降低高聚物的玻璃化转变温度(T_g)和结晶度因而也可作为提高电导率的手段。Kelly 等将分子量为 400 的聚乙二醇(PEG)两端的羟基为甲氧基取代, 然后与高分子量(5×10^4)PEO 共混, 当共混组成比为 60/40, $\text{O/Li}=8$ 时, 在 40°C 可获约 10^{-2} S/m 的高电导率。此体系可制成厚度约 10 μm 的薄膜, 是较理想的锂电池电解质材料。土田等以聚偏氟乙烯为骨架, α -丁内酯、碳酸丙烯酯等高温非质子溶剂为增塑剂, 电导率比未增塑的提高 3~4 个数量级。此外还有用高分子量 PEO 对液状聚磷酸 EO 体系进行反增塑以抑制流动的报导, 其电导率为纯 PEO 的 500 倍, 在 70°C 电导可与聚磷酸相仿。

除了以 PEO 为代表的聚醚型高分子外, 某些 T_g 低, 分子链较柔顺的聚酯如聚丁二酸乙二酯、聚乙二酸乙二酯、聚 β -丙内酯等也可与碱金属盐络合而具有导电性, 但其电导率均比 PEO 低。

非典型高分子固体电解质 近年来不少学者尝试以其他给电子原子如氮或硫代替聚醚中的氧与碱金属盐络合, 旨在提高室温电导率。胺类具有较高的给电子数, 在溶剂化单元中引入 N 应有利于与阳离子的配位。Shriver 等曾对 $(-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{NH})_x \cdot \text{NaCF}_3\text{SO}_3$ 作过探索, 但 σ 在 41°C 时也仅有 10^{-5} S/m 。硫类化合物包括结构为 $(-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{S})_n$ 的聚合物与锂盐不能生成络合物, 故无离子导电能力。

单离子传导型的高分子固体电解质 如上所述, 由高分子链上的给电子原子与碱金属盐络合而成的双离子导体的研究已取得令人瞩目的成就, 某些络合物体系, 其室温电导率高达 10^{-2} S/m 。然而, 随着应用领域的扩大, 其自身存在的不足令人重视。首先, 双离子导体的直流电导率随长期的直流极化作用而降低, 从而使电池的工作电流降低。为了抑制电解质中阴离子的运动, 避免产生局部浓度梯度以提高电池的能量效率, 常用的方法是增加阴离子的尺寸, 但效果不显著。一种理想的方法是将阴离子固定有高分子链上, 形成全部由阳离子提供电导的高分子固体电解质。由于阳离子与高分子链段中不移动的阴离子形成紧密离子对以及与一些氧原子产生强的螯合, 使其迁移受阻。目前, 单离子导体电导率比同温下双离子电导率低, 电化学稳定性也较差, 尚有许多困难有待克服。根据阴离子类别不同, 已报导的单离子导体主要有羧酸型和磺酸型两种单离子导体, 此外, 关于含硫酸盐、磷酸盐的单离子导体也有少量报导。

羧酸型单离子导体由于羧酸金属盐解离能较高, 电导率较低。日本的土田等研制的甲基丙烯酸型的单离子导体:

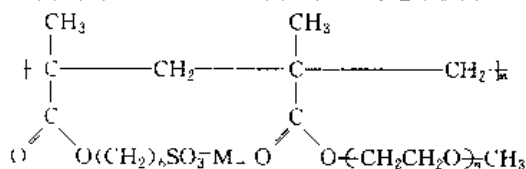


其室温电导率为 $1 \sim 4 \times 10^{-5} \text{ S/m}$ 。

内本等通过等离子体聚合方法制成厚度不足 1 μm 的高分子固体电解质薄膜, 从而弥补电导率低的缺点。

磺酸型单离子导体, 由于磺酸的强酸性, 其盐的解离能较

小, 可提高电导率。但这类离子导体通常要引进增塑组分以提高聚合物分子链的柔性。Smid Johannes 等报导了聚硅氧烷梳型聚合物($\text{PSGSO}_3^- \text{Na}^+$), 其 σ 为 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ S/m}$, 但经三缩乙二醇增塑后, σ 提高 1~2 个数量级。成都有机所万国祥等研制成功新的单离子导体 PSAMM(如下图)其室温电导率较高。



广西化学所黄玉惠等最近制备了磺化聚苯醚, 其磺酸盐成膜性能优良, 室温电导率约为 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ S/m}$, 作为电致变色材料的高分子固态电解质层效果良好, 与适当的增塑剂共混后, 其 σ 可达 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ S/m}$ 。

高分子固体电解质有广泛的应用前景。但是, 这一领域尚有许多问题有待研究。例如目前高分子电解质中离子传递机理还不十分清楚, 虽然人们从实验结果提出多种理论模型, 但关联各种因素的完整理论还未形成。为提高高分子固体电解质的电导率和改善力学性能而开发新的高分子材料仍是今后研究的重点。到目前为止, 这一新材料虽已开拓出许多应用途径, 但尚未进入实用阶段, 继续进行应用研究和开辟新用途仍是极为重要的任务。总之, 材料的开发、理论和应用研究, 将是高分子固体电解质研究的 3 个重要方向。

参考文献

- 1 Armand M B, et al. Fast Ion Transport in Solids. Amsterdam: North Holland Publishing Co, 1979, 131
- 2 Nagaoka K, et al. J Polym Sci, Polym Lett Ed, 1984, 22: 659
- 3 王佛松, 等. 国际精细与功能高分子化学和工业讨论会预印集, 1988, 454
- 4 彭新生, 等. 应用化学, 1989, 6(1): 1
- 5 黄发荣, 等. 功能高分子学报, 1990, 3(1): 1

(中国科学院广州化学研究所黄玉惠研究员, 汪传清撰, 丛广民审)

高聚物固体电解质 solid polymer electrolytes

高聚物固体电解质又称为高聚物快离子导体(Polymer fast ion conductor)和离子高聚物(ion-conducting polymer)。这是一类具有离子传导特性的高聚物和金属盐离子的复合物, 是一种虽为固体, 但仍具有类似液体电解质溶解金属离子盐, 传递离子迁移特性的功能高分子材料。高聚物固体电解质与液体电解质和无机固体电解质相比具有: 容易加工成型, 能制成大面积均匀的薄膜, 重量轻; 无液漏; 可挠性好, 耐冲击, 与电极材料接触性能良好等优点。在固体电池, 电致变色器件, 大容量电容及传感器等方面有着广泛的应用前景, 受到各国科学界、产业界的关注, 列为重点发展的新材料之一。

高聚物固体电解质的研究报道始于 1973 年, 英国的雷特(P. V. Wright)研究了聚氧乙烯(PEO)和碱金属异硫氰酸盐络合物的结构, 报道了此高聚物碱金属络合物的离子传导特性。1979 年法国的阿曼德(M. B. Armand)对聚醚和碱金属盐形成的一系列复合物进行了广泛的研究, 首先提出高聚物固体电解质在二次固体电池中应用的设想。此后, 各国学者对此领域工作的研究迅速开展, 受到普遍的重视。早期的研究工作主要注重研究聚氧乙烯与各种碱金属离子盐复合物离子导体的传导机理、结构及影响离子传导性能的基本因素。一般认为聚氧乙烯中的氧原子与碱金属离子形成 3:1, 或 4:1 组成的络合物。极性大的氧乙烯链段能促进碱金属盐的解离, 高聚物金属盐复合物中载离子的生成符合如下公式:

$$n = n_0 \exp(-u/2kT)$$

式中 n 为载离子数, n_0 为常数, w 为金属盐离子的解离能, ϵ 为介电常数, k 为常数, T 为热力学温度。

同时, 离子电导率(σ)与载离子数(n)之间存在如下线性关系:

$$\sigma = \sum n e \mu$$

式中 e 为载离子电荷, μ 为载离子迁移率。

离子在聚合物中的迁移多倾向于通过高分子链段运动所产生的自由体积来传递, 主要是在非晶区无定形高分子中进行, 络合物中金属盐的浓度、金属离子的种类、阴离子的种类、PEO 分子量及温度、压力都对 PEO 碱金属离子复合物的离子导电性有所影响。

高聚物固体电解质中作为高分子基材研究最多的是聚氧乙烯体系。此外, 人们对含其他极性基团的极性高分子, 如聚亚胺、聚乙烯硫醚、聚丙烯腈、聚偏氯乙烯等进行了研究。这些具有一定极性、柔顺性、低内聚能密度的高分子也可以作为高聚物固体电解质的基材, 但离子电导率不太高。PEO 的成膜性不太好, 使用高分子量的 PEO, 膜的力学性能有所改善, 但因结晶度的提高而不利于离子的传导。使用多异氰酸酯、多联氨、三氯氧磷和有机三氯硅烷为交联剂, 使 PEO 具有网络结构, 提高了膜的强度, 同时又能抑制 PEO 本身及 PEO 与金属离子复合物结晶相的形成。目前所研究的此体系的 LiClO_4 复合膜在室温下的离子电导率可达 10^{-2}S/m 。环氧树脂可以与聚乙二醇反应, 形成互穿网络结构, 它与 LiClO_4 复合膜的离子电导率可达 10^{-2}S/m , 膜的杨氏模量为 25kN/cm^2 。

将 PEO 链段与其它高分子链接枝或共聚是改进 PEO 固体电解质综合性能的研究热点并取得了良好的效果, 是极具实用前景的体系。Shriver 等人报道了聚双聚醚氧基磷腈体系, 它能与各种金属离子盐形成无定形结构的复合物。与 AgCF_3SO_3 形成的复合物室温下的离子电导率达 10^{-2}S/m , 70°C 可达 10^{-1}S/m 。利用磷腈上的活性基团与聚乙二醇反应交联可改进成膜性能。土田等报道了聚甲基丙烯酸酯醚与各种金属离子盐复合物的离子导电性能, 此体系成膜性良好, 室温下的离子电导率为 10^{-3}S/m , 他们还研究了不同离子半径碱金属离子盐复合膜的离子导电性, 发现随 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 离子半径的增大, 离子电导率增大的现象, 提出金属离子与高分子材料间适宜的相互作用力对提高高聚物固体电解质的离子导电性是十分重要的。此外, PEO 接枝的聚甲基硅氧烷与 LiClO_4 交联型复合膜室温下的离子电导率也接近 10^{-2}S/m 。共聚也是改善 PEO 固体电解质性能的常用方法。聚环氧丙烷(PPO)为无定形结构的高分子, 但 PPO 与金属离子盐复合物的离子电导率不高。利用环氧丙烷与环氧乙烷共聚, 可降低高分子量 PEO 的结晶度, 其固体电解质的离子电导率可达 10^{-3}S/m 。以二甲基二氯硅烷等与低分子量聚乙二醇反应得到的线性聚合物或其交联体与 LiClO_4 形成的固体电解质 25°C 离子电导率与所用聚乙二醇的分子量有关, 最佳可达 $1.5 \times 10^{-2}\text{S/m}$ 。

聚有机硅氧烷链段的柔顺性好, 最近已有报道含有一 CN 、一 COOH 、一 COOR 等极性基团的聚有机硅氧烷衍生物与 LiClO_4 、 LiCF_3SO_3 复合体系的离子导电性能, 室温下离子电导率可达 10^{-3}S/m 。此外, 聚二酸酯、聚己二酸酯、聚癸二酸酯、聚丙烯酸内酯、聚丙烯碳酸酯等聚醚型固体电解质已有不少报道, 此类型的电解质膜的机械性能较好, 但室温下的离子电导率不及聚醚电解质。

高聚物固体电解质中加入高极性的有机溶剂能进一步提高固体电解质的离子电导率, 比较常用的, 效果较好的有乙烯碳酸酯(EC), 丙烯碳酸酯(PC), 二乙二醇二甲醚等。另外也有报道无机固体电解质粉末与极性高聚物共混的体系。Stevens 等研究了 $\text{PEO}-\text{MAg}_4\text{I}_5$ ($\text{M}=\text{Li}, \text{K}, \text{Rh}$) 的共混体系, 其中 K^+ 、 Rh^+ 离子的无机固体电解质的与 PEO 共混体系的离子电导率室温下达 $2 \times 10^{-1}\text{S/m}$, 但稳定性不太好, 230d 后离子电导率下降了大约

60%。Skaarup 等将无机固体电解质 Li_3N 粉末与高聚物固体电解质 $\text{P}(\text{EO})_{12}\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ 共混, 高聚物固体电解质的离子电导率有所提高。

高聚物与金属离子盐复合体系的高聚物固体电解质存在着可迁移的阳离子和阴离子。这类离子导体在直流电场中稳定性差, 离子电导率随时间急剧下降。在某些电池等方面使用的高聚物固体电解质要求只迁移阳离子或阴离子, 在直流电场中离子迁移行为十分稳定的单离子导体。近年来单离子导电型的高聚物固体电解质的研究十分活跃。要抑制相应的离子的迁移, 一个有效的办法是将这种离子键结在聚合物链上。Shriver 等和 Bannister 等研究了聚磺酸金属盐及季胺型高聚物电解质盐和 PEO 共混的单离子导体。PEO 的量明显地影响此体系的离子电导率, 当混入较大量低分子量的 PEO, 26°C 离子电导率可达 10^{-4}S/m 。Skothem 等研究了主链为尼龙-1 结构, 侧链接有聚氧乙烯链段及二叔丁基苯酚金属盐的单离子导体, 50°C 离子电导率为 $2 \times 10^{-4}\text{S/m}$ 。Cheradame 等及 Shriver 等报道了聚醚氧基磺酸钠乙氧基聚磷腈单离子导体的离子导电性能, 离子电导率比相应的 NaCF_3SO_3 双离子导体低二个数量级。马来酸酐与苯乙烯, 马来酸酐与乙烯共聚物的聚醚磺酸盐的单离子导体也有报道, 最宜聚醚链段分子量为 $200 \sim 600$, 室温下的离子电导率为 $5 \times 10^{-5}\text{S/m}$ 。土田等研究了甲基丙烯酸锂盐与甲基丙烯酸酯醚共聚物的单离子导体。室温下的离子电导率为 10^{-5}S/m , 离子迁移率接近 1。在直流电场中离子电导率随时间几乎没什么变化, 用这种单离子导体作为全固体电池的电解质材料具有比双离子导体优越的充放电特性。他们还设计了将甲基丙烯酸酯醚中聚醚末端的甲基氧基的甲基氧化成羧酸, 合成了锂盐的单离子高聚物固体电解质。此结构为柔顺性的高分子主链, 促进离子解离及迁移的侧链及载离子源为一体的单离子导体。室温下离子电导率为 10^{-8}S/m , 若与甲基丙烯酸酯醚共聚, 离子电导率可提高 $2 \sim 3$ 个数量级。聚偏氯乙烯磺酸盐(Nafion)及羧酸盐(Flemion)膜的机械强度很好, 膜中浸入聚醚后离子电导率可达 10^{-3}S/m 。

80 年代中期人们开始研究含有二价、三价阳离子的高聚物固体电解质。多价金属离子电荷容量大, 在电化学方面将出现许多不同于单价金属离子的特性。目前研究较多的有碱土金属离子 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cu^{2+} 及稀土金属离子 La^{3+} 、 Eu^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Gd^{3+} 。主要报道这些多价金属离子高聚物固体电解质的结构, 离子电导率均不太高, 如 $100 \sim 140^\circ\text{C}$ 的离子电导率为 $10^{-4} \sim 10^{-2}\text{S/m}$ 。

用高聚物固体电解质组装的固体电池的性能最近陆续有所报道。Gauthier 等用 Li/TiS_2 、 $\text{Li}/\text{V}_6\text{O}_{13}$ 为电极, 用 $\text{PEO}-\text{LiClO}_4$ 、 $\text{PEO}-\text{LiCF}_3\text{SO}_3$ 为电解质, 制作了全固体二次电池。在 100°C 工作条件下, 电池的能量密度为 $100\text{W} \cdot \text{h/kg}$, 瞬时最大能量密度为 $900\text{W} \cdot \text{h/kg}$, 能量效率为 90% 以上, 可反复充放电 450 次。在全固体电池方面, Chiang 等研究了以聚乙炔膜为电极, $\text{PEO}-\text{NaI}$ 为电解质的锂电池, 开路电压为 $2.8 \sim 3.5\text{V}$, 电流密度为 12mA/cm^2 , 能反复充放电 20 次。Scrosati 报道了 $\text{Li}|\text{PEO}-\text{LiCF}_3\text{SO}_3|\text{聚吡咯型全塑电池}$, 100°C 的开路电压为 3.15V , 有良好的充放电循环特性。Arbignani 和 Mastragostino 研究了 $\text{Li}|\text{P}(\text{EO})_{20}\text{LiClO}_4|\text{聚噻吩型全塑电池}$, 70°C 充放电循环 $30 \sim 300$ 次, 能量效率为 98%~99%, 室温下自放电现象不明显。用在光电池上的高聚物固体电解质也有报道。如 $n-\text{Si}|\text{PEO}-\text{KI}-\text{I}_2(8:1:0.1)|\text{聚吡咯}|\text{Pt}, n-\text{Si}|\text{PEO}-\text{KI}-\text{I}_2(8:1:0.1)|\text{导电玻璃型光电池}$ 。在 100mW/cm^2 光的照射下能得到 320mV 的开路电压。

为进一步提高高聚物固体电解质的综合性能, 设计、制备与金属离子盐有着适宜的相互作用, 及具有隧道效应层状结构的高聚物固体电解质, 使其具有更高的离子电导率, 更大的机械强度及更优良的电化学性能。此外, 应用真空镀膜等先进的加工方法制备无针孔超薄材料也是这种材料实现实用化的一条途径。

参考文献

- 1 Fenton D E, Parker J M, Wright P V. *Polymer*, 1973, 14: 589
- 2 Armand M B, Cha baghe J M, Duclot M J. *Fast Ion Transport in Solids*. North Holland Publishing Co, 1979, 131
- 3 方世璧, 李永军, 江英彦. *高分子通报*, 1989, 48
- 4 Gray, Fien: M. *Solid Polymer electrolytes, fundamentals and technological applications* VCH Publishers Inc, 1991, 35~125

(中国科学院化学研究所方世璧研究员撰)

导电高聚物的光电化学行为 photoelectro chemical behavior of conducting polymers 通常的高聚物是绝缘体。1977年麦克达阿米(A. G. MacDiarmid)等用碘掺杂聚乙炔后,使聚乙炔的电导率从 10^{-8} 提高到 10^6 S/m,即从绝缘体变成了金属导体。这一发现立即引起了导电高聚物的研究热潮。研究的内容涉及到电导率、导电机理、物理化学性质和电化学性能等,随后又合成了聚噻吩和聚吡咯等导电高聚物。

聚苯胺是导电高聚物中最稳定的聚合物,它的电导率为 10^1 S/m,随电位而变化。当聚苯胺还原时,它的电导率可下降到 10^{-2} S/m以下,即具有半导体性质。1988年吉尼斯(E. M. Genies)等在研究聚苯胺膜的光电效应时发现,聚苯胺仅在红外光的照射下具有光电响应。这是因为聚苯胺在 2500cm^{-1} 以上具有很强的电子吸收。这种电子吸收可产生电子-空穴对。在间歇光的照射下,聚苯胺膜具有快速的光电响应和可观的光电流。因而聚苯胺可用于有机合成上的光助电解还原和构成光电化学装置。

1989年山姆(P. K. Shen)等报告了聚苯胺在 $1\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ H_2SO_4 溶液中,它的光电流从负值变化到正值的电位与溶液中的氧化还原对性质有关,例如在不含有氧化还原对的硫酸溶液中,其转型电位为 0.10V (VS·SCE),溶液中含有 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ 和 I_2/I^- 时,它们的转型电位分别为 0.40V 和 0.45V 。此外,氧化还原对的存在,增加了聚苯胺在正电位区光电流的稳定性,实验中也证实了聚苯胺对过硫酸的光电化学还原具有催化作用。这里应指出,在 $1\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ 的硫酸中,聚苯胺会发生部分溶解。

导电高聚物聚苯胺在不存在氧化还原对的溶液中具有光电响应,这种性质与无机半导体的光电化学性质不同,为了进一步探讨这种差异行为,穆绍林等使用没有氧化还原对存在下的NaCl溶液。实验证实,随电位的变化,聚苯胺从p-型半导体转变为n-型半导体,而这种变化是可逆的,p-型半导体位于低电位区,n-型半导体位于高电位区,转型电位随 H^+ 浓度增加而增加。在光电流-电位曲线上,出现p-型和n-型光电流峰,在 H^+ 浓度 10^{-2}mol/L 的 $1\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ NaCl溶液中,聚苯胺的p-型光电流大于n-型光电流。随 H^+ 浓度减少,p-型光电流明显减小,但 H^+ 浓度对n-型的光电流值影响较小。当 H^+ 浓度达 10^{-5}mol/L 时,聚苯胺的p-型半导体性质消失。聚邻甲基苯胺在 $1\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ NaCl溶液中的光电化学行为类似于聚苯胺,但它的p-型半导体光电流远小于n-型半导体,这可能是由于聚邻甲基苯胺的电导率低于聚苯胺(低3个数量级)而引起的。

1991年蔡生明等研究了 Cl^- 和 BF_4^- 掺杂的聚苯胺分别在 ZnCl_2 、 NH_4Cl 组成的溶液与 ZnCl_2 、 NH_4Cl 、 NaBF_4 组成的溶液中光电化学性质。其结果表明,掺杂阴离子的种类对聚苯胺的光电化学性质没有影响,但聚苯胺膜中的掺杂阴离子含量对聚苯胺的光电响应起着很大的影响。卡拉其(M. Kalaji)等研究了单色光UV和可见光对聚苯胺的光电化学性质的影响,所用的溶液为 $1\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ H_2SO_4 。他们发现聚苯胺具有光电的“记忆效应”,并认为这是由于聚苯胺膜的“长程有序”引起的。

导电高聚物光电化学行为不同于无机半导体的光电化学行为。导电高聚物的光电化学研究内容比较丰富,有关这方面的基础理论研究还在继续深入,而应用方面的研究尚属开始。随着研究的深入,无论在基础理论研究方面还是在应用研究方面,导电

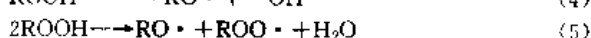
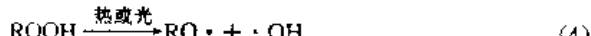
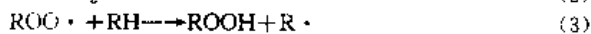
高聚物对光电化学这门学科将会有深远的意义。

参考文献

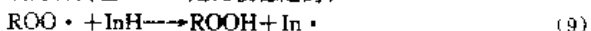
- 1 Shirakawwwa H, et al. Halogen derivatives of polyacetylene. *(CH)_x Chem Commun*, 1977, 578
- 2 Genies E M, et al. *Synth Metals*, 1988, 24: 69~76
- 3 Shen P K, Tian Z Q. *Electrochimica Acta*, 1989, 34: 1611~1613
- 4 Dong Yaohun, Mu Shaolin. *Electrochimica Acta*, 1989, 36: 2015~2018
- 5 Cai Shengmin, et al. *Bulletin of Electrochemistry*, 1991, 7: 412~415
- 6 Kalaji M. J. *Electroanal Chem*, 1991, 310: 113~126

(扬州师范学院穆绍林教授撰)

高分子降解 polymer degradation 是分子量降低导致性能变劣和分解过程,它决定了高分子材料的贮存、加工及使用寿命。例如,未加稳定剂的全同聚丙烯在室温条件下放置一个月就会因降解使其性能降低。防止高聚物降解被称之为高聚物的稳定化。通常加入稳定剂于高分子中来实现,研制高性能稳定剂及开展高分子稳定化和降解机理的研究是高分子学科中一个十分重要的课题。高分子降解是自由基反应过程,主要反应步骤为:



产生自由基的化学反应有:聚合反应、电释反应、卤化、光化学反应、燃烧、高能辐照、自动氧化、非均相催化和酶化过程。其中热氧化和紫外光引起的降解是最常见的。所以,在众多的稳定剂中,紫外光吸收剂和抗氧剂被研究得最多。前者可以吸收有害于高分子材料的光能,后者可以阻止自由基的转移,因为由抗氧剂形成的自由基($\text{In}\cdot$)是比较稳定的:



有机材料的自动氧化机理研究最早由英国橡胶生产者研究协会组织,由Bateman, Bolland, Gee, Morris和Have等于40年代完成的。抗氧剂所必备的基本性质首先由Bickel, Kooymen, Thomas和Tolman等提出。第1个人工合成的稳定自由基2,2,6,6-四甲基-4-哌啶-N-氧自由基,四甲基哌啶酮的N-氧自由基是由前苏联科学家Neiman, Rozantsev和Mamedova于1962年合成的。这些工作为受阻胺类、酚类和氮氧自由基型稳定剂的发展奠定了基础。

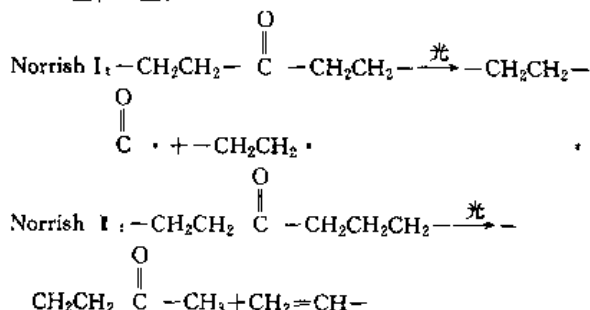
稳定剂的效果除与其分子结构有关外还同它们的挥发性,在高分子基材中的迁移速率,溶解度及使用环境有关。一个理想的抗氧剂除具有形成稳定自由基的能力外,还应具备的性质为:呈分子水平的完全溶解于高聚物中;即使在高聚物表面也不会轻易地被损失掉;非挥发性的,将高分子同稳定剂通过化学键相结合可以显著的改善这些性能。制备与高聚物键合型的稳定剂方法有3种:一是乙烯类稳定剂同乙烯单体在合成过程中共聚;二是稳定剂同高分子的官能团进行反应;三是含有官能团的稳定剂同高分子反应。一系列可聚合或接枝型的稳定剂已由Vogl, Albertsson和Janovic描述。

1977年3月在美国新奥尔良(New Orleans)召开了第1次高分子降解和稳定化的国际会议。会议的论题集中在新的,高性能稳定剂的制备,高分子稳定化与降解机理的研究,某些条件下的稳定性,新的聚合过程对高分子稳定性的影响以及高分子热氧化的研究。1989年3月在瑞士召开的第11届会议上一些新的研

究方向表现在:高分子在受热、热氧化、臭氧、光氧化、水解、辐照及微生物作用下的降解问题,特别是在 300℃ 以上高温条件下和加工条件下的热稳定性问题尤为引人注目;关于聚丙烯和聚丙烯老化研究论文开始减少,转而注重于高分子共混及其复合材料的老化研究;热氧化和光氧化稳定剂的合成及其作用机理的研究仍是研究的热点,高分子型稳定剂显示出很大的优越性;在改进高分子老化研究方法的新技术是将荧光技术应用到高分子表面层的热和光氧化降解研究。

另一方面,人们正在利用高分子降解这一特性来消除随弃性塑料及塑料地膜对全球所造成的环境污染,可控制降解塑料的研究已成为当前高分子学科中最重要的课题之一。最有适用价值的塑料降解技术有两大类:紫外光降解和生物降解。

光降解的机理主要有两种:一是认为光氧化过程包括链引发、氧化繁殖和链终止 3 步。第 2 种机理是酮光降解作用,称之为 Norrish I 型和 II 型:



聚合物中羰基吸收光能,导致高分子主链切断,光降解速度与高分子中羰基含量有关。70 年代由美国联合碳化物公司、道化公司和杜邦公司等开发的含羰基低密度聚乙烯泡沫塑料酒瓶保护套,光照 6h 开始分解,两周后可完全消失。将芳香酮、金属络合物,取代二苯甲酮与钛或锆形成的络合物加入高分子中制成光解塑料已由美国阿姆帕斯特公司,普林斯顿聚合物公司等商品化。这些光致敏剂受到光的激发而夺取聚合物分子链中的氢原子,形成自由基,引起光降解。

生物降解是由于微生物的侵蚀而使高分子发生降解的过程。绝大部分天然高分子是生物降解的。最早可生物降解聚酯树脂为聚 3-羟基丁酸酯(PHB),是由各种农副产品细菌发酵制得的热塑性树脂,由英国 ICI 公司开发,美国 ICI 公司制造,其性能与聚丙烯相似。3-羟基丁酸酯与羟基戊酸酯的共聚物 PHBV 性能优于 PHB。这两种聚合物在空气中稳定性好,当介质中有细菌活动时,可被分解成 CO_2 和水。

淀粉及其衍生物已广泛用作合成树脂的填料制成生物降解高分子。淀粉膜具有较低的透气性,是理想的食品包装材料,其生物降解产物无毒,在农膜领域也被广泛使用,美国斯特劳伦斯淀粉公司制成的塑料添加剂“依可斯达”(Ecostar)已用于制造生物降解地膜。瑞士用这种添加剂制成的商品“加速依可斯达”(Ecostar plus),生物降解能力更强,适于 30~60℃ 下使用,英国波维尔公司(Porvair Ltd)制造的生物降解塑料中含“依可斯达”为 50%。据“化学与工作新闻”(Chem. & Eng. News)1990 年报道纯的淀粉膜已研制成功,在双螺杆挤出机加工过程中淀粉中含水为 5%~14%,作为增塑剂,产品性能相似于结晶的聚苯乙烯。

淀粉也可同时起到填料和交联剂的双重作用同高聚物接枝。由于异氰酸酯同羟基有较高的反应活性,凡是带有端异氰酸酯基的树脂均可同淀粉起交联反应,所制得的聚合物是可生物降解的。

既具有光降解特性又具有生物降解特性的“双解膜”已研制成功,并已用于农膜,光降解使之分子量降低,当其进入土壤后,残存于膜中的自由基可使降解过程进一步发展,同时,可生物降解部分会被土壤中的微生物进一步降解。由于微生物选择进攻部位是高分子的链尾,经光降解的低分子更有利于生物降解。

人们有效利用高分子降解的一个特殊例子是聚丙烯可控降

解。过氧化物同聚丙烯熔融挤出过程中分解成自由基,使聚丙烯分子链在叔碳位上被切断。在降解过程中分子量分布变窄,高分子量级份优先被降解,因为分子量越大,含有可被自由基攻击的活化位数目越多,降解的几率越大。这一技术已广泛地被人们用以改善聚丙烯制品的加工性能。

高分子的降解是一个较新的研究课题,由于它同高分子的贮存、使用寿命及安全性有关,因此,这一研究课题今后将持续发展。其中新的高性能稳定剂的制备,新的聚合过程对高分子稳定性的影响,高分子稳定化与降解机理的研究将发展到一个新的水平。高分子可控降解技术,生物降解高分子将取得长足发展,许多新型的生物降解高分子将在今后 20 年内出现并广泛地被应用于农膜和食品包装。

参考文献

- 1 Bickel A F, et al. J Chem soc, 1953, 3211
- 2 Neiman M B, et al. Nature, 1962, 196: 472~473
- 3 Gugumus F. Scott G Appl Sci Publ, London, 1979
- 4 Klemchuk P P. Polymer Stabilization and Degradation ACS Symposium Series 280 American Chemical Society, Washington D C, 1985
- 5 Tzoganakis C, et al. Technol Eng, 1989, 28: 319~350
- 6 Aminabhavi T M, et al. Technol Eng, 1990, 29: 235~262
- 7 Zaikov G. 11th Annual International Conference on Advances in the Stabilization and Controlled Degradation of Polymers A Report Polym-Plast Technol Eng, 1991, 30: 105~108
- 8 Griesser H J. Degradation of Polyurethanes in Biomedical Application - A Review Polymer Degradation and Stability, 1991, 33: 329~354

(中国科学院长春应用化学研究所
刘景江研究员撰)

聚合物基复合材料的界面 the interface of polymer composites 聚合物基复合材料是以聚合物为基体,增强材料为基材形成的多相材料,相与相之间存在界面。界面不是抽象的几何学曲面,而是介于两相之间,具有一定厚度和复杂结构的区域。因此有人主张用“界面层”(interlayer)或“界面相”(interphase)替代“界面”(interface)一词。

界面对复合材料的性能起重要的作用。界面把基体和增强材料粘成一个整体,将外加应力从基体传递到增强材料,使增强材料的强度和模量得到充分的发挥,界面对复合材料的力学、粘附、摩擦、老化、润滑等性能均有重要的影响,因此界面的研究是复合材料科学中一个十分活跃的领域。

自 20 世纪 40 年代玻璃纤维增强塑料(GFRP)问世以来,科学家们就十分重视复合材料界面的研究,美国康宁(D. Corning)公司的普鲁特曼(Plueddemann)等人首次用硅烷偶联剂处理玻璃纤维,有效地提高了 GFRP 的性能。此后的界面研究主要是围绕偶联剂的作用机理及界面层的结构表征,提出了种种界面理论。

在界面层结构研究中,希拉特(Schrader)等用同位素方法研究硅烷偶联剂处理后玻纤表面的结构,发现玻纤表面的硅烷有三个层次,即可用冷水洗去的物理吸附层,可用沸水洗去的化学吸附层,以及与玻纤牢固地结合在一起的化学结合层。意希达(Ishida)等利用富利埃转换红外(FTIR)和激光拉曼光谱研究界面,从偶联剂与玻纤作用前后红外光谱的差别证明了硅烷偶联剂与玻纤表面发生了化学反应。吴毅勤等用气相色谱的方法鉴别出乙烯基三乙氧基硅烷与 SiO_2 作用后有乙醇峰出现,从另一角度证明了偶联剂与玻纤表面形成了化学键。琼逊(Johnson)等在硅烷偶联剂处理前后的玻纤上分别进行了 ^{14}C 标签的甲基丙烯酸甲酯和苯乙烯的聚合反应,证明了硅烷偶联剂与基体进行化学反应的可能性。

复合材料界面理论的研究始于50年代,至今仍在继续进行。提出的复合材料的界面理论有化学键理论、浸润理论、可形变层理论、约束层理论、酸碱作用理论、静电作用理论、可逆水解理论等等,这些理论都有一定的实验支持,但也出现许多矛盾。过去的研究工作倾向于提出一个具有普遍意义的理论,试图说明所有复合材料的界面行为,事实证明,由于界面层的表征问题至今尚存在着相当大的困难,要提出一个具有普遍意义的界面模型及其相应的理论是不切实际的,但是对特定的体系进行模型设计和理论处理,将界面性能参数如粘接功、界面自由能、溶解度参数、浸润速度、临界表面张力等与复合材料的整体性能相联系,还是很有意义的,目前,界面理论的研究仅处在半定量和经验的水平上。

航空航天事业的发展对复合材料提出了更高的要求,60年代碳纤维增强塑料(CFRP),70年代凯芙拉(Kevlar)纤维增强塑料相继问世,先进复合材料(Advanced Composite Materials)发展起来。碳纤维、Kevlar纤维等表面缺乏活性基团,与基体界面粘接弱,其复合材料有界面剪切强度低的缺点。因此对碳纤维、凯芙拉纤维等进行有效的表面处理,表征和评价表面处理的结果,是70年代以后复合材料界面研究的热点。

表面氧化法是最早发展的碳纤维表面处理技术,可分为液相氧化、气相氧化和阳极氧化法等等。液相氧化法以浓硝酸、次氯酸钠、硫酸等强氧化剂处理纤维表面,处理效果好,易控制,但多为间歇操作,并产生大量废液。气相氧化法在高温、含氧气氛中使碳纤维表面氧化,优点是设备简单、反应时间短,易连续生产,但有纤维损伤较大,反应剧烈难以控制,重复性差等缺点,阳极氧化法以碳纤维为阳极,在电解质溶液中通电后,用电解产生的初生态氧进行氧化,常用的电解质有NaOH, NH_4HSO_3 , HNO_3 , H_3PO_4 等,阳极氧化的处理条件缓和,易控制,可连续生产,是目前工业上对碳纤维进行处理的一种较为普遍的方法。碳纤维经氧化处理后,比表面积增加,表面含氧基团和含氮基团增加,由此制成的复合材料的层间剪切强度成倍地提高。

低温等离子体是处理碳纤维和Kevlar纤维等的有效方法之一,以 O_2 、 N_2 、 NH_3 、Ar等气体等离子处理后,纤维的表面浸润性提高,活性含氧基团含量增加,制成的复合材料的层间剪切强度提高。有趣的是等离子处理后纤维表面的活性基团会消失。因此处理后纤维应尽快复合或涂覆树脂保护层。对于活性消失的原因尚无定论,是低温等离子体处理研究中有待于深入研究的课题之一。

表面接枝法也是很有发展前途的表面处理方法之一。表面接枝法使乙烯基单体在纤维表面上进行接枝聚合,生长出能与基体紧密结合的界面缓冲层。接枝方法有化学接枝法,等离子接枝法和电解聚合法等。化学接枝法是通过化学方法在纤维表面引入可引发聚合反应的活性点,然后使单体聚合,坪川纪夫在该领域进行了长期探索。化学接枝法的优点是可以通过单体或聚合条件的选择设计界面层,很有理论意义,但处理方法复杂,工业化困难。等离子接枝法是将纤维进行等离子处理,利用处理后纤维表面的活性点进行接枝聚合。H. Yasuda在这方面做了大量工作,但因需要高真空设备,聚合难控制,实际应用困难。电解聚合是在电解液中加入不饱和单体,用碳纤维作为电极,利用电极反应生成的自由基引发单体聚合,但由于电解液中单体也会聚合,所以浪费较大。

虽然应用表面接枝技术可对界面层进行结构设计,但是对界面层需要什么性质的问题尚有不同见解,一种见解认为界面层的模量应介于基体与增强材料之间,形成梯度过渡;另一种观点则认为界面层的模量应低于增强材料和基体,最好是一种橡胶弹性体。两种见解都有一定实验支持,尚未得到定论。

在界面研究中,对界面层的化学组成,形貌及物理性能进行表征是认识界面、评价表面处理技术的重要手段,界面表征技术正取得长足的进步。

处理后增强剂表面的表征研究较为成熟,如化学分析法,

FTIR,紫外光谱法,微区激光拉曼光谱,ESCA, BET微量热法,反向色谱法等等均有报导,这些方法主要用来测定增强材料表面处理前后比表面积、浸润性及化学元素组成的变化。尽管目前已发展了许多先进的表面分析仪器,但由于界面层仅为纳米级的微区,组成又非常复杂,因此迄今为止还不能说哪一种方法可满意地获得有关复合材料界面层化学组成的信息,即使是最新推出的扫描二次离子质谱仪(SSIMS),核磁共振断层扫描图示,微区分析拉曼光谱等也有很大局限性。

对界面层的形貌和厚度进行表征的主要手段是高分辨的透射和扫描电镜,俄歇电子图象及成份显示仪(SAM), SSIMS,椭圆偏振仪等。最近出现的角扫描X线反射谱(GAXR)可以测定复合材料界面层的厚度。另外如果能将扫描声学显微镜的分辨率由亚微米级提高到纳米级,将是非常有效的复合材料界面厚度及形貌的分析手段。

界面层粘接强度的表征主要依靠直接的破坏性强度测定,目前基本上采用单丝拔出法、临界纤维长度 L_c 法,纤维顶出法及三点弯曲法,现在也用动态内耗测定仪来研究复合材料的界面粘接行为。就聚合物基复合材料而言,内耗的温度谱上玻璃化转变峰有分裂成两个峰的现象,其中高峰反映出界面层的行为。

聚合物基复合材料界面的研究虽已获得很大的成就,但由于界面层的微小及结构的复杂,迄今对界面的了解还是非常肤浅。实际上大量的研究仅仅限于对增强剂表面的研究,而对形成复合材料后的真实界面还缺乏真实的认识。此外对于界面层的作用也只是在传递应力上有所认识,而对界面层传递功能的作用,目前尚极少研究。预计今后对聚合物基复合材料的研究将在以下几个方面进展:(1)对先进复合材料用高性能增强纤维继续进行表面处理方法的研究,探索切实可行的经济而有效的表面处理技术;(2)将最新的科技成果和表征技术应用于界面研究,在更深层次上认识界面层的结构形貌;(3)对复合材料界面层进行控制与设计;(4)对功能复合材料的界面层作用开展研究。

参考文献

- Zisman W. Ind Eng Chem, 1963, 55(1): 19
- Schrader M E. J Adhesion, 1970, 2: 202
- Ishida H J. Colloid Interface Sci, 1978, 64: 555
- Plueddemann E P. Interface in Polymer Matrix Composites, 1974; 华东化工学院玻璃教研组译, 1980
- 吴毅勤, 等. 华东化工学院学报, 1985, 11: 451
- Yasuda H. Plasma Polymenzaflon, Academic Press Inc, 1985
- 吴人浩. 90年代中国复合材料发展展望研究会论文集, 1990
- Ishida H. Controlled Interphase in Composite Materials Proceedings of ICCI II, 1990
- 郑安响, 等. 第9届玻璃钢/复合材料年会论文集, 1991, A12
(华东理工大学胡福增副教授、王晓宾讲师撰; 吴毅勤审)

自由基活性聚合 living polymerization by free radical mechanism 1956年M. Szwarc首先发现了阴离子活性聚合反应,这是高分子化学发展过程中的又一个里程碑。其主要特征是反应的活性中心无终止及链转移,可始终保持其活性而不断增长。从反应动力学角度看,要获得活性聚合所必须的条件为(D. C. Pepper, 1975): 引发速率(R_i) \gg 增长速率(R_p); 终止速率(R_t) = 0; 转移速率(R_{tr}) = 0。前两条保证了所有的活性链可同时起步增长,且其浓度恒定,而单体的消耗速率等于增长速率,则使增长链具有同样的长度,其聚合度就等于单体浓度和引发剂浓度之比。由这类反应可以合成单分散性的聚合物、预定结构和序列的嵌段和接枝共聚物。甚至可获得特殊结构的星形和梳形聚合物。几十年来,除了在阴离子活性聚合理论方面不断深入研究以及开拓其应用领域外,还发现了乙烯型单体阳离子活性聚合、活性配位聚合和基团转移聚合等反应。

自由基是具有未成键单电子的电中性原子或原子团,化学

性质活泼,极易相互反应而终止。要使这类活性中心不发生终止和转移是很困难的。但是自由基聚合与阴离子聚合相比有一些优点,如由它可聚合的单体较多,反应温度的范围较宽,能采用的溶剂种类和聚合方法较多。

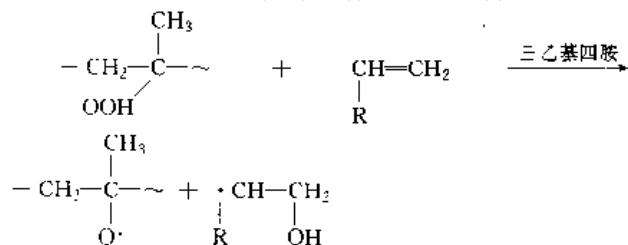
1937年H. W. Melville发现的甲基丙烯酸甲酯光引发下的气相聚合反应,当引发聚合后切断光源,聚合反应仍可延续数天。为了解释这种现象,曾假设聚合活性中心是:“活化的双键”,一旦形成就不会终止而持续增长,这种说法的意义和“活性聚合”相似。自70年代起人们就致力于研究自由基活性聚合。

在 -190°C 低温下 ^{60}Co 辐照“甲基丙烯酸丁酯-氯化锌”体系(V. A. Kabanov等,所产生的自由基因被低温冻结而保存有活性。若以缓慢的速度(如每分钟约 1°C)升温至 -100°C ,单体就开始聚合,解冻后单体转化率可达100%;所得聚合物的分子量按活性聚合的公式来计算,且相应的 M_z 、 M_w 值为 $1.04\sim 1.08$ 。另一个体系“甲基丙烯酸甲酯-磷酸”也可用类似的方法在 -90°C 下发生自由基活性聚合反应。后一个体系若在 25°C 下用紫外光引发,当磷酸用量为单体的6倍(摩尔比)时,聚合速度可提高数倍,且在转化率很低时就出现凝胶效应。若先由光引发聚合,到达低转化率(如1.6%)后即切断光源,聚合反应(即后聚合)可继续进行,转化率和聚合物分子量皆可随时间而逐步上升,此时的后聚合即按活性机理进行的。曾提出这样解释,由于配位剂氯化锌或磷酸与聚合物长链络合,改变了长链自由基的构象和动力学特性,阻滞了双基终止反应。等离子体放电效应,也可使低温下凝固的单体(如苯乙烯及丙烯酸酯类)中产生自由基(C. I. Simionescu, 1984),由此引发的后聚合具有瞬间引发和无终止的特点,且已被证明是活性聚合。冯新德等(1989)发现用等离子体引发甲基丙烯酸丁酯聚合时,后聚合的速率与固相单体中的含水量有关,并证明这个“准固相”(加水的后聚合)反应是活性聚合。

1941年时已测知,在聚合过程中沉淀下来的聚合内截留有自由基,其活性可保持达数月久(H. W. Melville)。若这种自由基能引发第二种单体生成嵌段共聚物的话,也就表明此反应是按活性机理进行的。人们曾尝试用截留的丙烯酸自由基来引发苯乙烯,但没有成功。反之,利用截留的苯乙烯自由基却可引发丙烯酸生成嵌段共聚物。通过大量的研究工作得出两条经验规律(R. B. Seymour等1981):聚合物和聚合介质两者溶解度参数差的绝对值至少为1.8;沉淀聚合物与第二单体溶解度参数差的绝对值小于3.2。若满足这两条,才能使沉淀的聚合物中截留有自由基,并使第二单体渗入沉淀物中而有效地生成嵌段物。T. Soto(1985)详尽地研究了N-甲基-丙烯酸酰胺及N-甲基-甲基丙烯酸酰胺两种单体在苯中用AIBN引发的聚合反应,发现产生的氧丙基自由基经扩散逸出溶剂苯的笼子后,可引发单体聚合,生成聚合物微球体。后者分散于溶剂苯中。若加入第二单体便可生成嵌段共聚物。利用ESR证明微球体中含有自由基,其产率高达90%。作者认为增长着的自由基与聚合物粒子间的氢键作用力十分强烈,使被吸附的自由基无法移动,只能在原地进行链增长,却不能相互反应而终止。由此解释了活性自由基得率很高的原因,也说明了聚合物微球体表面所以呈现凹凸不平 and 粗糙的原因。上述两种体系皆依赖于“物理机械的阻力”抑制了终止反应,从而使聚合反应按活性机理进行。

按经典的乳液聚合理论,体系的乳胶粒中平均只有一半聚合,即这一半中每个乳胶粒各含有一个自由基在聚合增长,而另一半中没有自由基,不发生聚合。当水相中产生的自由基进入前一半乳胶粒中,会发生终止反应;进入后一半中即可引发新的链自由基而聚合。由此可知,若能控制反应,使水相中不产生自由基,由在乳胶中已经引发聚合的反应就不会发生终止,且能一直保持此自由基的活性。捷克学者D. Mikulasova等(1974)采用“氧化聚丙烯-三乙基四胺”这一氧化还原引发体系来引发苯乙烯在乳液中聚合。原以为聚丙烯主链上的过氧化基团分解所产生的自由基可引发苯乙烯聚合,获得带有聚苯乙烯支链的接枝共聚

物。实验结果却出乎意料之外,只能得到聚苯乙烯均聚物,分子量高达 10^7 ,且 $\frac{M_w}{M_n}$ 值为 $1.005\sim 1.134$ 。K. Horie等(1974)在实验中,先引发苯乙烯聚合,然后在隔绝空气的条件下将固体的氧化聚丙烯过滤掉,滤液为含有聚苯乙烯胶料的乳液。加入第2单体甲基丙烯酸甲酯后,就可生成嵌段共聚物。由此说明,在除去了非均相引发剂氧化聚丙烯后的乳液中仍含有长活性的自由基,它能按活性机理引发第2单体进行聚合。对此反应提出如下机理:



氧化聚丙烯主链上的氢过氧化基团在三乙基四胺存在下与单体反应生成两种自由基。主链上的烷基自由基通过转移反应很快消失;单体自由基则被吸附在氧化聚丙烯表面上,由它引发苯乙烯聚合。这是自由基活性聚合的第1阶段。此自由基链在增长到一定长度后,便脱离聚丙烯表面,进入乳液成为聚合物乳胶粒,依靠单体不断扩散进入胶粒而增长,这是活性聚合的第2阶段。氧化聚丙烯不溶于水,是一种非均相的引发剂,在水相中不产生自由基,所以不会发生终止反应,因而乳胶粒中的自由基活性链将一直保持其活性。当第2单体扩散进入后,就可增长生成嵌段共聚物。D. Mikulasova等对此反应也进行了详尽的动力学研究。J. P. Bianche等(1975)曾利用光引发方法进行乳液聚合,巧妙地控制间断光照的时间可获得近乎“单分散”性的聚合物,但是这种方法所进行的反应不能算作活性聚合。

已发现“ Cr^{2+} -BPO(过氧化苯甲酰)”在溶剂二甲基甲酰胺中引发甲基丙烯酸甲酯聚合时反应分两个阶段。第1阶段,溶液呈红色,聚合速率较快;第2阶段,呈深蓝色,速率较慢。聚合温度为 30°C 或更低时,第2阶段所得聚合物的分子量随转化率而直线上升。认为 Cr^{2+} 与BPO相互反应,生成的 Cr^{3+} 能与BPO或单体生成稳定的络合自由基,阻滞了终止反应,单体却能插入其间而增长,故聚合反应按活性机理进行。如果聚合温度超过 30°C 就不是活性聚合,因为聚合温度过高将导致络合物不稳定。而在丙烯酸酯类单体中,若不带有 α 位甲基者,在 30°C 以下也不是活性聚合(郑强等,1989)。德国学者(K. D. Hurgenberg等(1981)则提出不同的意见,认为这是一个正常的聚合反应。由于溶剂参与了“ Cr^{2+} +BPO”间的反应及甲基丙烯酸甲酯的凝胶效应这两个因素,使聚合物分子量随转化率而提高。但这种说法不能解释嵌段共聚物的形成。

如果有一种引发剂,由它引发的所得的聚合物长链上带有一个弱键的端基(T. Otsu, 1982),此弱键在一定条件下分解产生一个聚合链自由基和一个较小的自由基。前者能继续引发单体聚合;后者却十分稳定,只能起终止作用。偶合终止后生成的聚合物中又含有这种弱键,可循环引发、增长和终止。在整个聚合过程中,活性中心的总数不变。故这种终止反应可视为活性中心的“休眠过程”,随时可再分解而产生自由基,重复引发和增长。其结果是聚合转化率和聚合物分子量均随反应时间而增加,类似活性聚合,故称为假自由基活性聚合。有些化合物可在加热条件下(60°C)引发甲基丙烯酸甲酯进行假活性自由聚合反应。这类引发剂又被称为“引发转移终止剂”(Iniferter),是日本学者天津隆行(1982)提出来的,在高分子合成领域中具有很重要的作用。

又发现一些聚合反应,它们皆显示出活性自由基聚合反应的某些特征。 α -氟代丙烯酸酯在二基亚砷溶剂中用偶氮二异丁腈引发的均相聚合反应,用ESR技术证明反应中存在有活性自由基。二元引发体系“二茂钴-双乙基乙酰胺亚铜”,在溶剂乙腈中可引发甲基丙烯酸甲酯聚合。 25°C 时,聚合物的分子量随转

化率而上升。利用这个反应可获得嵌段共聚物。在聚氨基葡萄糖的乙酸盐存在下,甲基丙烯酸钠盐可按自由基活性机理聚合,聚合物分子量随转化率而上升,也可由此反应合成嵌段共聚物。

单体与某些化合物(如脲、硫脲和全氯化苯并[9,10]菲等),可在低温下形成包合物,经辐射引发而使单体聚合,这个反应称为管道聚合。当选用全氯化苯并[9,10]菲时,可使丁二烯按自由基机理聚合,且带有“活性聚合”的特征。由此反应也合成得“丁二烯-异戊二烯”的嵌段共聚物。

自由基活性聚合反应虽已研究多年,但仍未找到如阴离子活性聚合那样典型的反应。在已报道的这些反应中,往往会出现一些“偏差”,如引发剂不能定量地转化成活性自由基,或单体的转化率不高,或合成的嵌段共聚物不纯,或聚合物的分子量分布较宽等。但从这些反应特征来看,可以肯定,长活性的自由基确实是存在的。若能进一步深入研究这类反应的机理,探索各种反应条件,使自由基活性聚合反应得以实现的话,则对高分子化学的发展将具有很大的推动作用。利用这类反应可合成各种新型的高分子化合物及有关的高分子材料,使自由基聚合高分子设计的领域得到进一步的扩展。

(华东理工大学张懋盛教授撰)

高分子的交联 crosslinked polymers 是指形成三维网络而影响其性能的过程。交联高分子的分子量变得无限大且是不熔不溶的。线性橡胶应用范围很窄,而交联(硫化)橡胶被广泛用于制造轮胎和各类橡胶制品。橡胶弹性理论也是在此基础上发展起来的。环氧树脂、酚醛树脂、脲醛树脂及树脂基复合材料都是通过交联将液体树脂转化为三维热固型网络。形成网络的方法可分为3类:线型链的无规交联;共聚和通过官能团端基反应。

近30年来,交联聚合物领域的主要研究课题是以改善组分间的相容性,形态及性能为目的而制备的多组分聚合物交联,如互穿聚合物网络(IPN),它是两种或两种以上的高聚物,其中至少一种是网状的,通过一定方法混合而成的聚合物网络混合物。1960年米拉(Millar)首先提出这一概念,并用分步法合成了聚苯乙烯/聚苯乙烯IPN。其抗张强度和断裂伸长比单组分高1倍,而冲击强度比高抗冲聚苯乙烯还高4倍左右。一般的共混高分子由于混合熵较低,组份间易产生相分离,彼此间有较低的粘附。因此,性能较差。而IPN两相界面互相渗透和紧密联系,产生广泛的协同效应,导致了材料具有优异的性能。1969年Sperling和Friedman制得了第1网络用第2种单体溶胀交联的IPN。1970年Frisch和Klemperer合成了两个网络同步形成的IPN。两个组分间产生化学交联的IPN称为AB交联聚合物。例如,由不饱和聚酯同苯乙烯单体一起浇注,随后聚合而成的交联聚酯是一类重要的工业材料,是1961年Sorenson和Cambell首先制得。1972年Bamford等报道了制备AB交联聚合物的新方法。刘景江等于1991年发表了用端乙烯羧基制备一系列AB交联聚合物的方法。如果这种AB交联聚合物是以自由基共聚合反应为基础制得的,其产物是一个均匀混合的多相体系。AB交联网络中结构缺陷是不可避免的,均聚物A、均聚物B、线性和支化的AB共聚物组成了可溶解部分,溶胶含量可以通过控制反应程度来改变,这类AB交联聚合物是优异的阻尼材料,在玻璃化转变区,凝胶如同“笼子”,溶胶分子如同“蛇”,这种多组分结构的协同作用增大了体系的内摩擦,使其玻璃化转变温区宽达100℃,阻尼系数极大值高达1.5。

*低分子量的末端带有各类活性官能团的遥爪聚合物如液态端羟基聚丁二烯,液态端羧基聚丁二烯等是通过固化剂同活性基团进行化学反应进行交联,它们已被用于制造固体火箭推进剂。

相类似的室温硫化的硅橡胶通常是由 α,ω -二羟基聚二甲硅氧烷与正硅酸乙酯在催化剂作用下脱醇缩合而交联的一种弹性体。如果交联反应速度大于脱出甲醇从硫化胶中蒸出的速度,则滞留于胶中的甲醇微点后蒸发留下空隙将影响胶料性能并使粘弹性变劣,采用不易挥发的交联剂,交联后脱出大分子量的高

级醇永久地残留于胶料中,则可克服这一缺点。此外,已研制出带胺基的三烷氧基硅烷型交联剂,带环氧基的新型交联剂可大大提高硅橡胶的室温硫化速度。分子链上含有双键的硅橡胶可进行二次加成,对硫化胶的“集中交联”会有积极作用。

辐照交联是利用高能射线使高分子产生自由基,进而使分子链间交联成网,经辐照交联的聚乙烯其力学性能得到显著改善。60年代末一种高新技术产品热收缩管就是在此基础上发展起来的。经辐照交联的聚乙烯具有“弹性记忆效应”,当其被加热变成高弹态,在外力作用下扩张,保型冷却,这种管材再遇热时,它有恢复到扩张前形态的功能。这种热收缩材料已广泛用于绝缘、密封、防水、防油、航空航天,电力电缆,电器设备及产品包装等技术领域。

经辐照交联的齐聚物可用于制备涂层和复合材料,齐聚物应有一个可聚合的基团和一些具有其它功能的基团,如改善粘附性能的基团。聚合速率正比于辐照剂量,与热硫化相比,辐照交联不饱和齐聚物可显著地增加硫化速度。液态单体-高分子复合材料,例如丁腈橡胶和甲基丙烯酸辛酯经辐照交联可生产各种膜涂料,可聚合的单体通常是高分子的溶剂,它应具有高反应活性,不挥发,无毒等特征;高分子提供适宜的粘度,并在主链上带有双键以参与交联反应。

微波用于热固性高分子及其复合材料的交联始于80年代,同外部热源交联相比它具有硫化速度快,硫化均匀,不易产生局部过热等优点,这对于那些纤维增强大制件的硫化特别重要。

紫外光交联是通过在高分子材料中加入光敏剂来实现。光敏剂的作用有两个方面:其一,是较低光照剂量就可以形成足够量的大分子自由基;二是可选择能量较低的波长,以减少高分子本体的降解。近十几年来,紫外光交联被广泛用于高分子涂层工业。

酚醛树脂及过氧化物已被用于具有不同反应活性的高分子的交联剂。

反应加工过程中的交联是指两种或两种以上的组分在加工过程中通过反应达到交联。早期的例子是反应注射成型(RIM)热固型聚氨酯,热固型SMC(Sheet molding Compound)及用苯乙烯改性的不饱和聚酯。近几年,反应加工过程中的交联技术已用于聚烯烃及其共混物的改性。1974年Fischer取得了第一个专利。他是将全同聚丙烯同三元乙丙橡胶共混,在混炼过程中,混合物在剪切力作用下,三元乙丙胶产生部分交联。所得的材料是动态部分交联的,但仍保持热塑性加工的特征。其后,各种制备热塑性弹性体的方法,包括物理交联,得到发展。1978年Coran等制备了橡胶组分完全硫化的热塑性材料。在交联剂的存在下使聚烯烃和橡胶组分在双螺杆挤出加工过程中产生交联反应,通过控制交联剂活性、用量及混合温度等加工条件来控制反应交联程度,可使共混体系既保持热塑性快速高效加工的优点,又可达到交联改性的目的。

30年代末Treloar等提出交联高分子橡胶态弹性理论。1944年Tobolsky对橡胶状态方程提出了修正。此后,橡胶弹性理论一直是科学家所关注的课题。80年代,合成了一系列模型交联聚合物,网络结构、缺陷、物理缠结的影响被引入橡胶弹性方程式中。

在今后10~20年内交联聚合物将得到很大发展。特别是多组分聚合物中组份间的交联将成为改善相容性,提高性能的重要手段。在交联方法方面,IPN及其相关材料如AB交联聚合物的合成及应用将持续发展,并会由两组分网络发展为三组分或多组分网络;加工过程中的动态交联将成为热塑性多相高聚物改性的重要手段而得到迅速发展;紫外光固化,辐照交联等技术将广泛用于高分子涂层的固化。

参考文献

- 1 Millar J R. J Chem Soc, 1960, 1311
- 2 Green M S, et al. J Chem Phys, 1964, 14, 80
- 3 Mark J E. The Use of Model Polymer Networks to Eluci-

date Molecular Aspects of Rubberlike Elasticity Advances in Polymer Science. New York, 1982

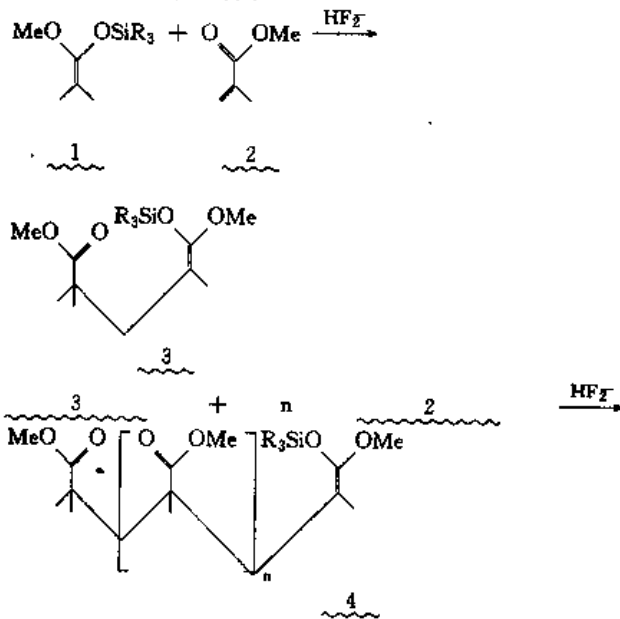
- 4 Treloar I R G. The Physics of Rubber Elasticity. 2nd Ed Clarendon Press Oxford England, 1985
- 5 Sperling L H. Pure and Applied Research on Interpenetrating Polymers and Related Materials. Ed Walsh D J et al, Martinus Nijhoff Publishers Dordrecht/Boston/Lancaster, 1985
- 6 Jovan M, et al. Review of Cure of Polymers and Composites by Microwave Energy Polymer Composite, 1990, 11: 184~191
- 7 Liu J, et al. Morphology and Dynamic Mechanical Properties of AB Crosslinked Polymers Based on Polyurethanes Polymer, 1991, 32, 1361~1368
- 8 Klemperer D, et al. Advances in INP1991, 3

(中国科学院长春应用化学研究所刘景江研究员撰)

基团转移聚合及其机理 the mechanism of group transfer polymerization

1983年 Webster 等首先发现基团转移聚合(GTP)新聚合方法。它以活性硅烷基化合物为引发剂,在一定的催化剂存在下,可使 α, β -不饱和羰基化合物聚合成“活性聚合物”。这种聚合反应可以在较宽的温度范围内(尤其适于室温)进行,可以更精确地控制聚合过程,可以获得分子量分布很窄、具有预期结构和性能的聚合物,还可以在所形成聚合物的基础上合成带有特殊端基的新聚合物,能以100%的收率合成具羟基、羧基、酯基或胺基等端基的星型聚合物等等,被认为是继50年代 Ziegler, Natta 发现配位聚合方法,开辟定向聚合新领域和 Szwarc 发现所谓活性聚合物,成功地确立阴离子聚合机理以来的新聚合方法。

典型的GTP如下所示:



其实质是在阴离子型催化剂(如 HF_z^-)的作用下,引发剂(如 1)通过其分子上的硅烷基向单体(如 2)羰基氧原子上的转移,实现与单体共轭加成。加成中间产物 3 又通过类似的基团转移过程实现与更多单体的逐一加成。聚合产物 4 在室温下存放数天之后,仍能保持其和相同或不同单体继续加成的能力,因此是一种“活的聚合物”。

GTP 所用的引发剂可以通式 R_3MZ 表示,其中 M 可以是 Si, Sn 或 Ge, 以 Si 为主, Z 为活化基团,变化较多。目前, $RR'C=C(OR'')OSiR_3$ 被认为是最好的一类,应用最多的是 $Me_2C=C$

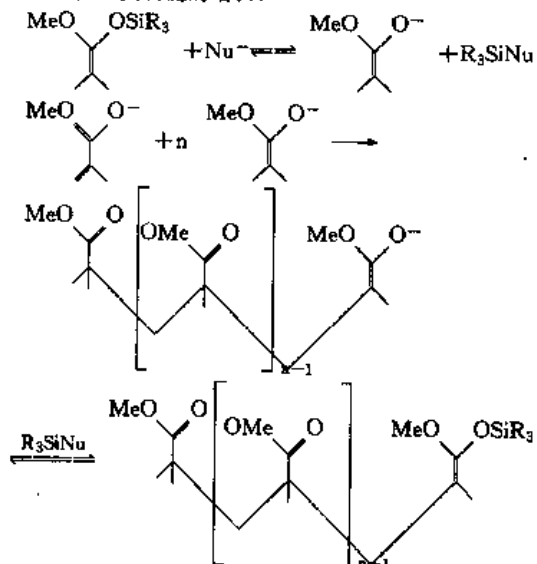
(OMe)OSiMe₃(MTS)。由 MTS 而引伸的一系列双官能基引发剂(如 $MeO(Me_3SiO)C=C(Me)(CH_2)_2C(Me)=C(OMe)OSi-Me_3$ 等)则被用于嵌段共聚物或梯、星形聚合物的制备。

催化剂含阴离子型和路易斯酸两大类。前者有如 $[(CH_3)_2N]_3SHF_2$ 、 $[(CH_3)_2N]_3SCN$ 、 R_4NF 、 R_4NCN 、含氧阴离子的季铵盐、以及加冠醚的 KF 、 $KOAc$ 、 KHF_2 等。 $[(CH_3)_2N]_3SHF_2$ 被认为是至今发现的最有效的催化剂,后者有如 ZnI_2 、 $ZnBr_2$ 、 Et_2AlCl 、 HgI_2 、 $HgClO_4$ 、 $BF_3 \cdot THF$ 等。

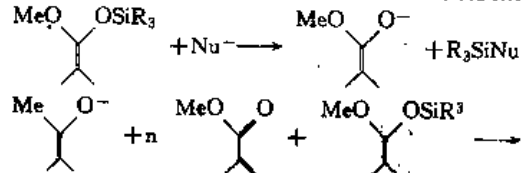
由于 GTP 反应极为迅速,为了及时排除大量聚合反应热,聚合时一般都使用溶剂,所用的溶剂必须是非质子性的,并且要依据所采用的催化剂来选择溶剂类型。在采用阴离子型催化剂时,富电子的溶剂(如 THF, CH_3CN , $CH_3OCH_2CH_2OCH_3$, $C_2H_5OC_2H_4OC_2H_5$ 等)是适宜的;但在采用路易斯酸催化剂时富电子溶剂应避免使用,而常用卤代烷或芳烃(CH_2Cl_2 、 $C_2H_4Cl_2$ 、 CH_3Ar 等)。选用溶剂时还须注意避免因溶剂参与反应导致活性链的终止,并考虑到溶剂极性对其溶解增长着的活性链能力的影响,因为这一溶解能力的强弱会直接影响到反应速率的快慢。溶剂的介电常数较低对于提高聚合速度有利。

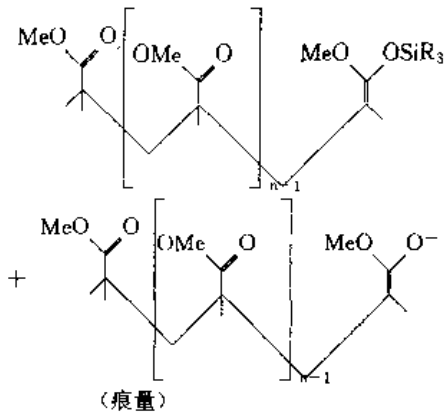
适用于 GTP 的单体目前还局限于 α, β -不饱和酯、酮、腈和二取代酰胺,而以丙烯酸、甲基丙烯酸的酯或腈研究最多,特别是通过酯基的变化,一些新型聚合物,如互穿网络聚合物、嵌段或接枝聚合物、梳形、星形或梯形聚合物、液晶聚合物或具有某种功能的聚合物等的合成尝试陆续有所报道。

有关 GTP 机理目前有可逆离解、不可逆离解、络合和离子场活化等几种见解,但尚无定论。可逆离解机理认为阴离子催化剂首先通过亲核攻击,使引发剂所含的硅烷基可逆的离去,形成新的阴离子物种和硅烷化合物,前者与单体发生迈克尔(Michael)加成,生成一个大阴离子;后者在随后的一个可逆反应中使得这个大阴离子重新硅烷基化,形成末端具有引发剂结构的活性聚合物。通过上述亲核攻击、可逆离解、加成和可逆的重新硅烷基化等反应步骤周而复始的连续循环,把一个个单体结合到聚合物上,实现链的增长:

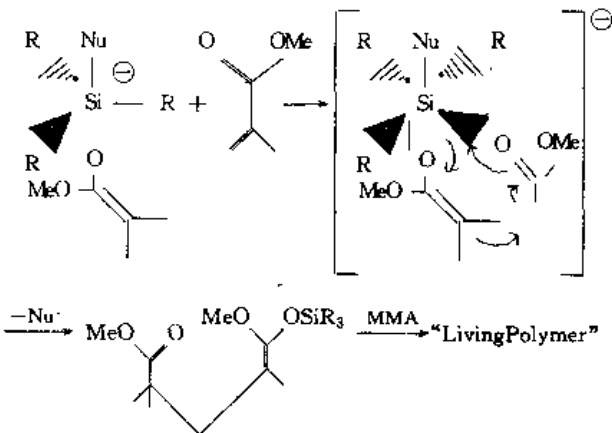


不可逆离解机理和可逆离解机理的主要差别在于引发剂受到催化剂亲核攻击之后,其硅烷基的离去是不可逆的,因此聚合中间产物的重新硅烷基化不是由这一步所生成的硅烷化合物,而是由存在于反应体系中的另一含有硅烷基的引发剂来完成的:





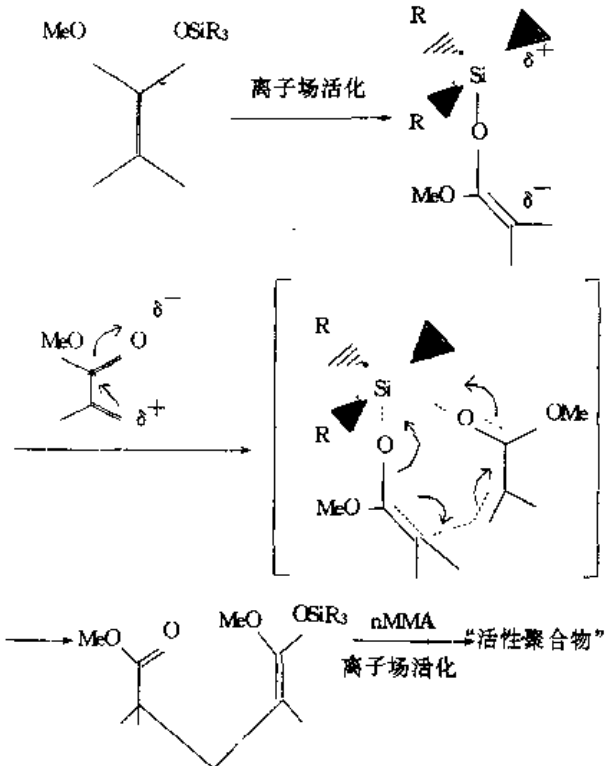
络合机理由 Webster 等首先提出,该机理认为含有硅烷基的缩醛酮引发剂在亲核催化剂的作用下形成超价态的硅中间体,继而该硅原子与单体羰基上的氧原子发生共价结合,引发剂和单体分子中的双键则完成加成反应:



鉴于上述机理在解释一些实验事实时均遇到困难,丁马太和夏海平提出离子场活化聚合机理,认为在 GTP 过程阴离子催化剂并不是通过直接络合对单个引发剂产生影响,而是通过其所产生的一种特殊形式的“离子场”而对所有的引发剂分子进行活化的。这种离子场的总强度 Q 与催化剂的摩尔浓度成正比。离子场主要对引发剂分子上的硅原子产生影响,增强其亲电性;每个硅原子所受的影响是均等的,因而其实际分享到的场强 Q_i 与体系中存在的有效硅烷基摩尔浓度 n 成反比,即 $Q_i = Q/n$ 。在特定体系中,只有 Q_i 达到一定值,即 $Q_i > Q_{min}$ (Q_{min} 数值取决于体系各组分的性质),才足以使引发剂活化到能够引发单体聚合的程度,否则聚合反应不会发生。在同一聚合体系中,在一定范围内, Q_i 值越大引发剂受到的活化程度越高,聚合诱导期越短,反应越快:

当引发剂受到由阴离子催化剂所产生的特殊离子场活化时,其硅烷基上的硅原子亲电性在某种程度上得到增强,从而有利于它和单体上因电子效应而具亲核性的羰基氧原子的结合,形成新的硅氧键的同时,断开引发剂分子原有的硅氧键,实现硅烷基由引发剂向单体的转移,与此同步,发生单体与引发剂两者的共轭加成。此后,每伴随一个单体分子的加成,都发生同样的硅烷基团转移和共轭加成,故而聚合得以连续进行,且所形成的聚合物总是具有活性。该机理所包含的五价态硅过渡态的形成有理论根据。利用该机理能解释已观察到的所有实验事实,特别是一些其它机理所无法解释的实验事实,例如在催化剂浓度不变的情况下加大引发剂用量反而会致聚合诱导期的延长;在催化剂浓度远小于引发剂浓度时,引发剂便具相当的活性,且 GTP 产物分子量接近于单分散性,而与这一浓度比关系不大;聚合溶剂对聚合产物立规性影响不大,等等。

Du Pont 公司已用 GTP 生产汽车面漆,由于分子量均一,固



含量可高达 60%,溶剂用量减少,无残存单体,既经济又少污染,且具有可在室温或略高室温下固化,耐久性强等优点。据推断,GTP 最终可在许多有机高聚物结构材料和功能材料的制备方面发挥作用,也有可能因减少迈克尔加成的副反应而在有机合成领域发挥作用。

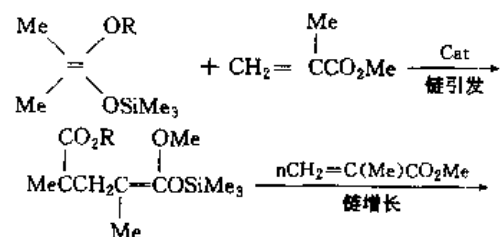
参考文献

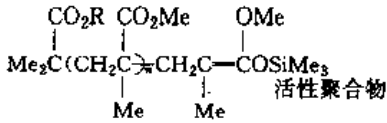
- 1 Webster O W, et al. ACS Polym Prepr; 1983,24:52, J Am Chem Soc 1983; 105: 5706, USP 4 417 034 (1983); EPO 068887(1983)
- 2 平尾明. 化学与工业,1983,36:910
- 3 余鼎声. 化学通报,1984;10:1
- 4 Quirk R J. 高分子化学新进展(来华学术报告),1985
- 5 梁良,等. 合成橡胶工业,1987,10:287
- 6 夏海平,等. 应用化学,1987,4:1
- 7 丁马太,等. 功能高分子学报,(1991 材料化学研讨会专辑),1992,5:158,高等学校化学学报,1992,9:1290

(厦门大学夏海平副教授、丁马太教授撰)

基团转移聚合 group transfer polymerization 简称(GTP)是美国 Du Pont 公司的 Webste 等人首先发现的一新型聚合方法。1983 年首次报导后,立即引起高分子学术界的重视。各国纷纷给予报道和评论,认为这是继 30 年前 Ziegler-Natta 发现配位聚合之后,在分子合成上的又一重大发现。

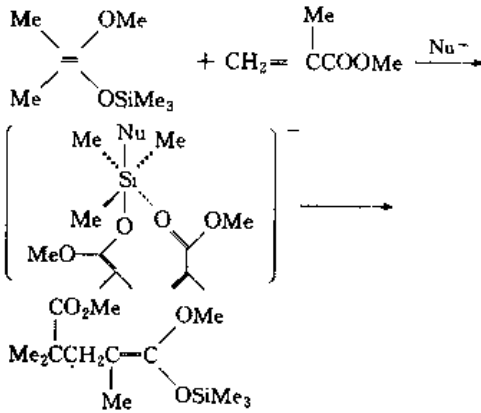
基团转移聚合应用烯酮硅烷基缩醛(Ketene silyl acetal)或类似化合物作为引发剂,在催化剂存在下,使 α, β -不饱和羰基化合物聚合。例如,在负离子催化剂存在下甲基丙烯酸甲酯的 GTP 反应:





经研究表明其一般机理为,负离子催化剂与引发剂上的硅原子形成超价配位(六配位),使得三甲基硅基向单体的羰基氧进行转移同时发生了 Michael 加成形成环状过渡态,结果生成新的烯醇硅基缩醛端基,这个过程不断重复经加聚反应以后形成活性聚合物。因此 GTP 反应的显著特点是可以控制聚合物分子量和结构形态(architecture)。

机理模式 1:

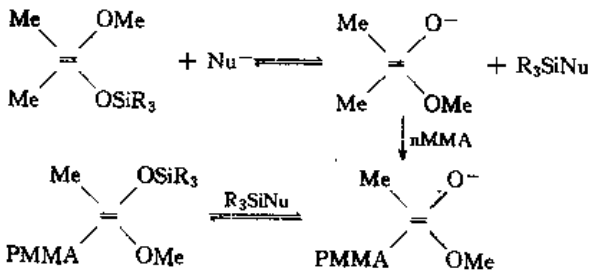


从聚合反应机理上来说 GTP 是自由基聚合、阳离子聚合、阴离子聚合和配位聚合以外的第 5 种新型加聚方法。它较其他聚合方法有更多的优点:它能在室温下迅速反应,形成活性聚合物;经聚合产生的高分子,其分子量分布很窄,接近单分散;通过引发剂和单体比例的调节,能有效地控制聚合物分子量;在活性聚合物中用不同共聚单体可得到嵌段共聚物,星型聚合物等结构形态特殊的聚合物;GTP 反应温和,用带有功能性官能团的引发剂可制得相应功能性聚合物或精细高分子(Fine polymers),所以说 GTP 反应是从分子设计的层次上来制备合成聚合物。

基团转移聚合问世的短短几年以来,国内外许多高分子研究人员,纷纷投入对 GTP 反应的研究。目前,研究动向主要集中在机理研究;新型引发剂和催化剂的合成及发现;选用单体的拓宽;功能性精细高分子合成以及制备结构形态特殊的聚丙烯酸酯类共聚物。

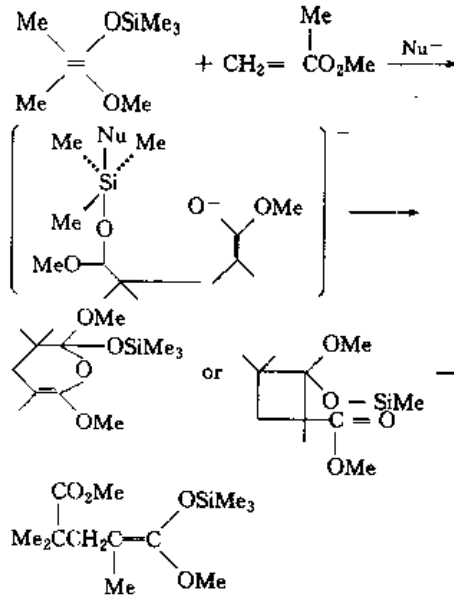
GTP 反应的机理研究 Webster 等发现 GTP 反应伊始,就提出了其机理研究中的一个基本问题,即三烷基硅基团转移是在负离子亲核催化下游离出硅烷基和烯醇负离子接着对单体进行加成(机理模式 2),还是如上所述,亲核催化剂首先与硅原子配位,然后与单体加成(机理模式 1)。

机理模式 2:



1985 年 Sogah 用加入氟代三烷基硅烷方法,考察其是否与活性链端硅烷基交换,从而否定了机理模式 2。根据量子化学计算,催化剂和引发剂配位以后,首先形成碳—碳键,然后再形成六元环或四元环中间体。因此,Webster 推测甲基丙烯酸甲酯进行 GTP 反应时如机理模式 3,但是目前尚未得到证实。

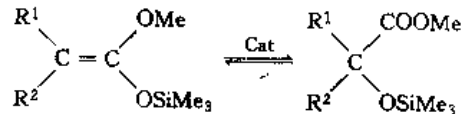
机理模式 3:



另一方面,GTP 的动力学研究也很活跃,联邦德国的 A. H. E. Müller 和 F. Bandermann 对此作了较多的报道,目前拟研究其他单体如丙烯腈的 GTP 机理、Lewis acid 催化模式、催化剂用量和效率关系、GTP 反应在什么条件下会存在诱导期、链转移、链终止等。

GTP 的引发剂、催化剂和单体 在 GTP 反应中最常用的单体是甲基丙烯酸酯;其次是丙烯酸酯;另外有丙烯腈;N,N-二甲基丙烯酰胺; α -亚甲基 γ -丁内酯等。由于 GTP 的独特机理,因而许多对其他聚合方法敏感的基团如环氧基、烯丙基、苯乙烯基均可作为单体的酯基部分引入聚合物,而这些基团仍保持原有活性。同样可在单体酯基上引入有功能性的基团,例如,具有液晶性能和其他一些大基团进行 GTP 反应而形成有特殊性能聚(甲基)丙烯酸酯材料。此外,含甲基丙烯酸酯端基的大单体,可通过 GTP 反应合成“梳形”聚合物。对于一些含有活性氧的(甲基)丙烯酸 β -羟乙酯等进行 GTP 反应时,一定需要诸如三甲基硅基等保护,以避免活性氢终止链增长。目前 GTP 适用单体面有限,因此有许多研究人员正在积极寻求发现适用 GTP 的新单体。

烯醇硅基缩醛作为 GTP 的常用引发剂。Sogah 等认为只有引发速率(K_i)大于增长速率(K_p)时,才能控制分子量、得到分子量确定分子量分布较窄的聚合物。引发剂上取代基大小对结果有显著影响,主要表现为 GTP 反应时引发剂的异构化作用。当取代基 R 为 H 时异构化速率足够影响聚合过程。此外,硅原子上烷基体积大小,对 GTP 反应的分子量控制和分布都有一定影响。



另一类引发剂如 Me_3SiCN ; Me_3SiSR ; $\text{R}_2\text{POSiMe}_3$; $\text{Ph}_3\text{P}^+\text{SiMe}_3\text{Cl}^-$ 等硅烷基衍生物,通过与(甲基)丙烯酸酯的共轭加成反应形成烯醇硅基缩醛。因此,GTP 的引发阶段包含了两步反应,导致了出现反应诱导期以及分子量控制较差等现象。

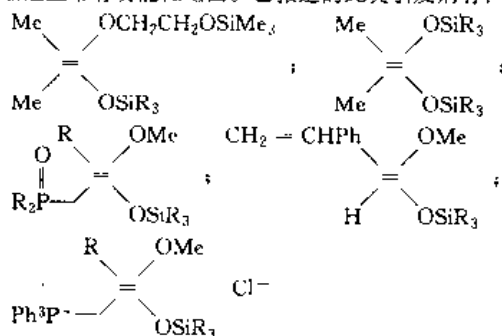
已报道的 GTP 催化剂有两大类,负离子类和 Lewis 酸类。负离子类如: $\text{Me}_3\text{SiF}_2^-$; F^- ; HF_2^- ; CN^- ; N_3^- ; 其中最常用是 $(\text{Me}_2\text{N})_3\text{SHF}_2^+$ (简称 TASHF₂⁺)。它的催化效率较高,用量一般为引发剂的 0.1% mole。Dicker 等发现了许多氧负离子可以作为 GTP 的催化剂。Lewis 酸类催化剂主要是卤化铝和烷基铝化合物。它们的用量比负离子催化剂高得多,一般为单体的 10%~20% mole。研究表明负离子催化剂较适用于甲基丙烯酸酯类单

体而 Lewis 酸类催化剂却适用于丙烯酸酯类单体。

合成功能性精细高分子 由于烯酮硅缩醛类化合物具有高度的反应区域选择性,所以 GTP 反应另一特点是在反应过程中,许多活性基团能与之“和平相处”,而在获得聚合物中保持这些基团的原有活性或功能性,从而为合成功能性精细高分子提供了手段。

正如在 GTP 单体中所述,当(甲基)丙烯酸酯的酯基部分带上些功能性基团,就可获得以聚(甲基)丙烯酸酯为骨架的功能性高分子材料。

另外一条合成功能性高分子的途径,是在引发剂烯酮硅缩醛上带有功能性基团。已报道的此类引发剂有:



它们分别引发 GTP 反应合成了端基—OH;—COOH;—CH=CHPh;R₂PO—;Ph₃P⁺—的螯形聚合物(Chelic polymers)。当带有功能性基团的引发剂进行 GTP 反应形成活性聚合物时,用一些合适的偶联试剂如 BrCH₂C₆H₄CH₂Br;Br₂和活性端反应就可制得一系列几乎含 100%功能性端基的遥爪型聚合物(Telechelic polymers)。

合成结构形态特殊的聚合物 GTP 是一种温和的活性聚合系统,在此系统内,能有效地合成嵌段共聚物、星型聚合物等。通过顺序加料方式,可以得到分子结构较为确定的(甲基)丙烯酸酯类 AB 型、ABC 型嵌段共聚物。如 Sogah 等人用 GTP 反应合成了甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸月桂酯的 AB 嵌段共聚物($\bar{M}_n = 6\ 650$, $D = 1.06$, 理论 $\bar{M}_n = 7\ 043$)。甲基丙烯酸甲酯,甲基丙烯酸丁酯和甲基丙烯酸烯丙酯的 ABC 嵌段共聚物($\bar{M}_n = 3800$, $D = 1.07$, 理论 $\bar{M}_n = 4100$)。另外可用双烯酮硅缩醛官能团引发剂制备 ABA 嵌段共聚物。

1986 年 Sogah 报道了一种以烯醇硅醚为单体醛类化合物引发剂的活性聚合方式称之为 Aldol-GTP 拓宽了 GTP 领域。合成了分子量可控分布窄的聚乙烯醇,并用此方法得到了聚乙烯醇与聚甲基丙烯酸酯的嵌段共聚物。

在 GTP 反应中可用 arm-first, core-first, 或 arm-core-arm 技术方法来制备(甲基)丙烯酸酯类星型聚合物,用于增稠剂和涂料使其具有很好柔韧性同时表现较好的硬度。其次星型聚合物可作涂料的流变控制剂,这些结构形态特殊的聚合物有待进一步研究。

综上所述基团转移聚合作为一种新型加聚技术在国际上方兴未艾,有着广阔的前景,虽然 GTP 操作要求很高,需要高纯度试剂,高度无水条件以及一些精细操作技术,但是在国内外高分子领域,精细有机合成领域中许多研究者纷纷把眼光瞄准于此,掀起了研究 GTP 热潮。很可能开创高分子领域内一种新局面。

参考文献

- 1 Webster O W, et al. J Am Chem Soc, 1983,105:5706
- 2 Bandermann F, et al. Makromol Chem. Rapid Commun, 1985,6:336
- 3 Sogah D Y, et al. organosilicon and Bioorganosilicon Chemistry: Structures, Bonding, Reactivity and synthetic Application. New York; Wiley, 1985, 20
- 4 Hertler W R, et al. ACS Polymer Preprints, 1986,27:165
- 5 Sogah, D Y, et al. Macromolecules, 1986,19:1775
- 6 Dicker I B, et al. ACS Polym. Prepr, 1987,28:106
- 7 Webster O W, et al. NATO ASI Ser Ser C, 1987,215
- 8 Sogah D Y. Macromolecules, 1987,20:1473
- 9 Shen Wei-ping, et al. Makromol Chem 1989,190:3061
- 10 Müller A H E. et al. Makromol. Chem Macromol Symp 1990,32:87

(上海科学技术大学沈卫平副教授撰)

反相乳液聚合 乳聚合技术萌生于 20 世纪早期,30 年代见于工业生产。乳液聚合已成为高分子科学和技术的重要领域,是生产高聚物的重要方法之一。许多高分子材料,如合成塑料、合成纤维、合成橡胶、粘合剂、涂料、絮凝剂、涂饰剂、医用高分子材料以及其它许多特殊用途的合成材料等等,都是采用乳液聚合法生产。新品种、新方法也不断出现,如微乳液聚合、无皂乳液聚合、辐射乳液聚合、定向乳液聚合以及反相乳液聚合等等。其中,反相乳液聚合是于 60 年代初期发展起来的一种新型乳液聚合技术,80 年代取得了较大进展。它是将水溶性单体(常溶于水),借助油包水(W/O)型乳化剂分散于非极性液体中,形成 W/O 型乳液而进行的聚合。这种聚合可采用油溶性或水溶性的引发剂,若是前者,则体系与常规乳液聚合适成镜式对照,故称之为反相乳液聚合(胡金生等,1987)。反相乳液聚合对水溶性单体提供了一个可与传统的乳液聚合一样,具有高聚合速率和高产物分子量的聚合方法,还能使水溶性单体有效地聚合成粉状或乳状产物,条件温和,避免了副反应,并有助于应用。其产品正在一些部门发挥着重要作用,如造纸工业、增稠剂、水处理、高吸水性树脂、采油等。

自从 1962 年 J. W. Vanderhoff 等首次报道反相乳液聚合的基础性工作以来,国外对这一领域的研究日见活跃。除大量的应用研究外,基础理论的研究也给予了高度重视。下表中列出了国外有关反相乳液聚合基础性研究的体系、主要原料、研究手段和考察内容等。

表 1 国外反相乳液聚合基础研究概况

体系	其它主要原料	研究手段	主要内容及结论
对苯乙烯磺酸钠	邻二甲苯	膨胀计	考察了单体的聚合动力学及机理。表明无论是胶束还是单体液滴都是粒子成核位置。Smith-Ewart 情形 1,2 分别适用于 Bz ₂ O ₂ 、K ₂ S ₂ O ₈ 引发的聚合。后者当温度较高时稍有偏离
	Span 60	粘度计	
	Bz ₂ O ₂	电子显微镜	
	K ₂ S ₂ O ₈		
AM(丙烯酰胺)	甲苯	动力学	聚合速率 v 随 AM、引发剂和甲苯浓度的升高而增大;而增大乳化剂浓度,起始 v 增大,后来对 v 无影响,最终聚合物分子量随 AM 浓度升高而增大,但随引发剂、乳化剂和甲苯浓度升高而降低。测定了反应活化能
	Sentamid 与	分子量	
	K ₂ S ₂ O ₈	活化能	

体系	其它主要原料	研究手段	主要内容及结论
AM-AN(丙烯腈)		动力学 特性粘度 粒度分布	半分批法聚合。对共聚物分子量与特性粘度进行了关联,导出了 Mark-Houwink 关系,测定了反应温度、引发剂、还原剂以及乳化剂浓度对分子量的影响。所得结果偏离 Smith-Ewart 传统乳液聚合模型,加上粒子大小的宽分布,说明由于单体在水及溶剂中不同溶解性,使乳液与溶液聚合机理共存
AM	Span 80 叔丁基过氧化氢 NaHSO ₃	数均分子量 重均分子量 物理模型	种子半分批法聚合;测定了聚合物的数均、重均分子量;讨论了其聚合的物理模型
N-乙烯吡咯-烷酮		特性粘度 分子量	通过改变反应温度、时间、引发剂、乳化剂以及还原剂来使分子量达到最大;用特性粘度及 Mark-Houwink 方程检测了两个氧化还原体系所得的聚合物分子量。结果是 NaHSO ₃ ·CH ₂ O 体系的较高;反应不遵循传统的乳液聚合机理
AM-丙烯酸钠	异链烷烃 甘油单酯、二酯 Tween 85 引发剂	分子量 聚合速率 RSV	聚合前在水相中加 NaCl、NaBr、LiCl、LiBr 等盐以提高聚合物分子量、聚合速率和单体转化率。其中 KCl 和 Na ₂ SO ₄ 对特性比浓粘度 RSV 及转化率无明显影响。
AM	甲苯	分子量 活化能	在 NaOH 存在下制备部分水解的 PAM。聚合及水解速率随 AM、NaOH 浓度的升高而加快,聚合物分子量随 NaOH 浓度升高而降低,其水解为 2 级反应
AM	邻二甲苯 Tetronic 1102 偶氮、过硫酸盐引发剂	活化能 粒子形态	聚合动力学并不受乳化剂粒子的多室结构的影响;无论是偶氮还是过硫酸盐引发剂,聚合均发生在单体液滴中,前者也在吸附乳化剂层引发
AM	邻二甲苯 Tetronic 1102 B ₂ O ₂	动力学	该反相乳液聚合并不能划分为乳液、沉淀还是溶液聚合,而是表现为各种聚合方法的特征。聚合速率与 [E] ^{1.0} ·[I] ^{2.0} 成正比。每个粒子的聚合速率随粒子体积的 0.8 次方增大;整个过程存在很强的抗加速作用;聚合是由溶解于 AM 水溶液和乳化剂相的 B ₂ O ₂ 引发的;粒子成核位置在 AM 水乳液中;PAM 胶乳是由 100~200nm 的水滴(内含 10~20nm 的油滴)分散于油相中形成的
AM-丙烯酸钠	甲苯 K ₂ S ₂ O ₈	聚合(碱解) 速率测定, 活化能	在皂化剂(NaOH、Na ₂ CO ₃)存在下进行共聚。聚合及碱水解速率随皂化剂、AM、引发剂浓度和温度的升高而增大;聚合物分子量随皂化剂浓度的升高而减小;其碱解为 2 级反应;分别测定了 NaOH 及 Na ₂ CO ₃ 存在下的表现活化能
AM	邻二甲苯 Tetronic 1102	液晶转变 张力计	形成了 W/乳化剂/O 型网状乳液而不是预期的 O/W/O 型乳液;在 25~62°C AM 发生液晶转变,在聚氧乙烯颜料熔点以上,该液晶系消失;研究了温度对乳液中水的界面张力的影响
AM	甲苯 乳化剂 AIBN(偶氮二异丁腈) Vazo67 Vazo52	UV 准弹性 光散射 透射电镜 自动毛细管粘度计	考察了偶氮引发剂在两相中的分配及其性质和浓度对聚合动力学的影响;探讨了乳化剂系统的性质和数量、搅拌速率、油性阻聚剂等对动力学及粒子大小的影响;粒子大小结果表明:存在两种聚居数的粒子,一种很小,另一种较大;聚合的引发大多是由于在油相或界面层中产生的自由基或低聚物自由基被单体捕获所致
AM-MAA(甲基丙烯酸)	甲苯 乳化剂 AIBN	气相色谱 超速离心, H ¹ NMR 电导滴定, 自动毛细管粘度计 准弹性 光散射	聚合速率在碱性条件下大于酸性条件;酸碱条件下 γ _{AM} 分子相同,而 γ _{MAA} 相差很大;起始和最终的乳液显示了同样宽的粒子分布;碱性条件下离子共聚单体的浓度对胶乳的粒子大小影响较小;酸性条件下胶乳稳定性很差;AIBN 在有机相中分解是主要的引发剂来源;证实了聚合主要发生在水相单体液滴中

体系	其它主要原料	研究手段	主要内容及结论
二烯基二甲氨基氯化铵		TGA(热解重量分析法) DTA(差热分析法)	研究了转化率对聚合物分子量的影响;在考虑凝胶效应以及单体和聚合物链转移反应的条件下,提出了由分子量来计算转化率的模型,探讨了四甲基氯化铵浓度对固体聚合物粒子电导的影响;TGA显示了相对失重,DTA给出了玻璃化温度
AM	甲苯 Span20		聚合以反相乳液或反相悬浮的方式进行,聚合特征与相率及温度有关,反相悬浮聚合时伴随着反应混合物粘度的明显增大,收率约30%时发生相转变;在反相乳液聚合中形成的凝胶发生裂构而悬浮在有机溶剂中
AM	甲苯 Span20 K ₂ S ₂ O ₈		在NaOH存在下制备低分子量PAM。提高NaOH浓度,由起始聚合速率加快,转化率升高,但聚合物分子量降低;随着反应进行,乳液从正相变为反相,提高NaOH浓度则此转变时间缩短;聚合物水解随NaOH浓度和温度的升高而增大
AM	异构石蜡 Span80 Span60 AIBN ADVN	膨胀计 粘度计 扫描电镜 动态光散 射光度计	提出了聚合的详细机理及动力学模型,可很好地预测转化率、分子量及粒子特征

除表中所列之外,还有关于AM、AM-AA(丙烯酸)、N-乙吡咯烷酮-AM 纯粹制备的报道。A. Chem(1991)还介绍了在tabular反应器中进行的AM的反相乳液聚合。反相乳液聚合的工程研究也已涉及。国外对反相乳液聚合的研究具有如下特点。(1)从聚合体系看,一种单体的均聚占绝大多数,且多采用丙烯酰胺。二元共聚的研究较少,而三元共聚则未见报道。这可能受基础研究这一内容的局限,因为共聚单体越多,则体系越复杂,难以进行竞聚率、微观结构的测定及反应机理的探讨。(2)采用的溶剂为非极性或极性小的有机溶剂,最常用的有甲苯、邻二甲苯,其它如环己烷、异构石蜡、异链烷烃、煤油等也常被用到。(3)从使用的乳化剂及引发剂看,山梨糖醇酯或聚氧乙烯山梨糖醇酯多用作乳化剂,这是因为它们属非离子型,与有机介质很匹配,有利于乳液的稳定。特别是山梨糖醇酯的脂肪酸酯等还有利于制超高分子量的聚合物。实验结果还表明,几种乳化剂的共用,或采用共聚乳化剂,对反相乳液的稳定起着很重要的作用。用到的引发剂包括水溶性和油溶性两类。水溶性引发剂多用过硫酸盐(主要是K₂S₂O₈);而油溶性引发剂则有过氧化物(多为Bz₂O₂、叔丁基过氧化物)和偶氮类(多见AIBN),其它种类的引发剂如氧化还原引发剂,用的很少。也有不用引发剂而采用辐射引发的反相乳液聚合的报道。(4)从考察内容看,一般都着重研究单体、乳化剂、引发剂的浓度及性质、反应温度等对聚合反应(如动力学、速率等)的影响,以及探讨引发、聚合机理等。对介质的作用,除皂化剂研究的较多外,其它如在酸、盐存在下的研究较少。而对产物宏观物理性质及应用有关的性能研究更少注意。

反相乳液聚合这一特定的聚合方式决定了其产品的应用领域,主要在以下几个方面。

1. 造纸工业。反相乳液聚合产品在造纸工业中主要用作铜网部张添加剂,以提高纸的干强度或染料保留值。Lai, Ta, Wang等开展了这方面的工作。他们将N-乙吡咯烷酮的反相乳液聚合产物,用NaOH溶液水解后,再用浓盐酸酸化。所得聚乙烯胺·盐酸(分子量 $\geq 10^6$)加入纸张中后,其英斯特朗(Instron)张力达 9.99×10^{-2} MPa,纸张破裂强度为 2.1×10^{-2} MPa,横向扯裂为 61.3×10^{-2} MPa。而含有聚乙烯醇(分子量 6.0×10^5)的纸张,上述参数分别为 8.6×10^{-2} 、 1.3×10^{-2} 和 5.5×10^{-2} ,同时聚乙烯胺还可提高TiO₂的保留值。

2. 水处理。丙烯酰胺均聚物或与其它单体的共聚物常用于水处理,且大多数作絮凝剂用。如Kojima, Kazutaka用Bz₂O₂引发AM反相乳液聚合,得到的产品(含水80%)用作絮凝剂,可很容易地通过喷雾方式进行。反应过程中沉积的聚合物非常少。

Ringer, Engen等也对AM的反相乳液聚合进行了研究。他们除采用AIBN作引发剂外,还利用ZnSO₄·7H₂O作促进剂,最后得到了稳定的PAM精分散体,作絮凝剂用。若无ZnSO₄·7H₂O,则聚合反应很快,并大量放热,使产品报废。丙烯酰胺的共聚物絮凝剂研究较多的是AM-AA。由于丙烯酸(AA)的引入,使该类共聚物絮凝剂又兼具增稠性能。聚乙烯胺·盐酸亦可用于水处理。另外, Yang, Henry等通过反相乳液聚合过程制得含疏水胶体聚合物,用于水中污染物(特别是油)的清除。他们采用水溶而油不溶的共溶剂(如甲醇、丙醇)和一热处理技术,来将水不溶性单体溶于水溶性单体中,并加入新型共乳化剂使之稳定。所得产物为AM-3(甲基丙烯酰胺基)丙基氯化铵-辛基内烯酰胺共聚物。

3. 增稠剂。增稠剂也是反相乳液聚合应用得较多的领域。反相乳液聚合合法生产的增稠剂已广泛用于印染工业,其产品性能很好。国外80年代的优秀产品、英国Allied Colloid公司的Alco-print PTF便是采用该法生产。

4. 吸水聚合物。Nagasuna, Kinya等用0.005~20mol%的可聚合单体(AA、丙烯酸钠、亚甲基双丙烯酰胺),浸渍水溶性载体聚合物粒子(仍由上述单体制得),得到的聚合物吸水剂1g能吸收20ml合成尿,所需时间为33s。若只有载体聚合物时,吸收时间则为160s。该吸水剂广泛用于一次性尿布和卫生餐巾中。Hirokawa, Shinya等也由水溶性乙烯基单体丙烯酸,在稳定剂剂、分散剂存在下,经反相乳液或悬浮聚合,得到一吸水聚合物粒子,18g该粒子吸水21倍(20g/cm²)而不凝聚。如果没有稳定剂存在,则3g该物质吸水10倍便生成凝胶。

5. 采油。英国Allied Colloid公司采用反相乳液聚合合法,将水溶性单体(AM、AA或2-丙烯酰胺基甲基丙磺酸)接枝到含有羟基的水溶性底物(羟甲基纤维素、葡聚糖或淀粉)上,得到的接枝共聚物可用于采油。N-乙吡咯烷酮均聚物及AM-AA的交联共聚物也可用来采油。

有关反相乳液聚合的其它应用领域还很多,如蛋白酶的固定、不燃模型产品、亲水聚合物分散剂等都有报道。聚乙烯胺·盐酸除在上述纸张添加剂、水处理、石油回收中的应用外,还可用于钻孔水泥、钻井泥化合物、酸性压裂流体及完井流体中。

国外在反相乳液聚合的基础理论和实践应用上都做了大量的工作。但仍然还有许多方面须进一步探索。在基础理论方面,今后的工作可望在以下几方面进一步展开。拓宽反相乳液的聚合体系,开展三元共聚研究等;丙烯酰胺等非离子单体与阳离子单体的二元共聚还很少有人研究,因而大有研究价值;加强对聚

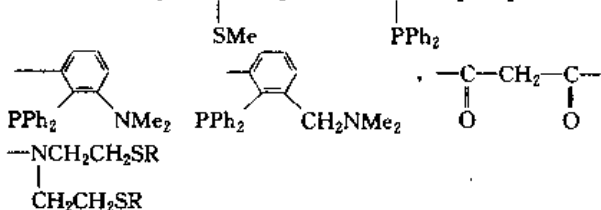
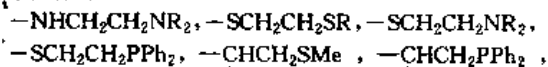
合物宏观性质的研究,以便为应用研究打下基础;介质(如溶剂、酸、盐等)对聚合反应各方面的影响不可忽略;由于反相乳液固有的不稳定性,人们正对一种新的方法——反相微乳液聚合,倾注极大的热情,也已取得了相当的成就。在今后的研究中,它仍然会占据相当的比重。在应用研究方面,除改进现有产品的性能外,“一剂多能”产品的研制很有吸引力。如文中的聚乙烯胺·盐酸就具有可作絮凝剂、纸张添加剂以及用于钻井泥化合物、钻井水泥、酸性压裂流体、采油和完井流体中等多种用途。丙烯酰胺与丙烯酸类的共聚物也同时具有增稠、絮凝及采石油的功用。若再引入某些功能性单体,则产物的性能更多样化,适用面也更广,从而为生产和应用带来巨大的便利。另外,扩大产品应用领域,如在减摩剂等方面还可进一步展开。

(湖北大学李建宗、程时远、黄鹤撰)

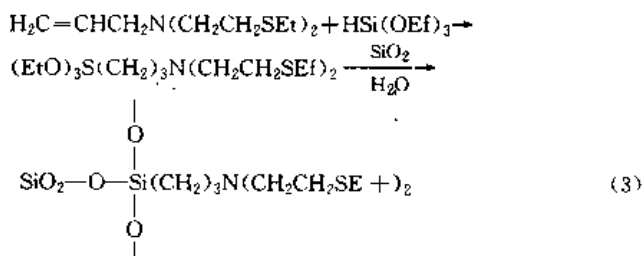
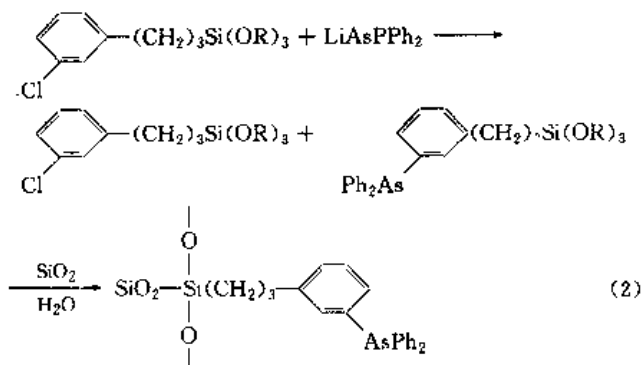
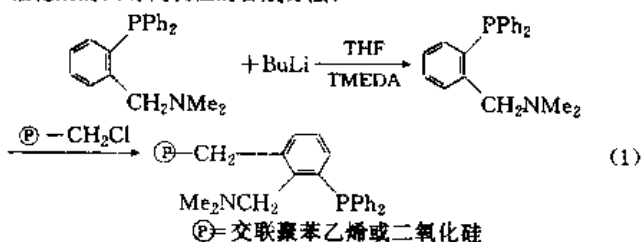
高分子负载硅氢加成配位催化剂 含有 Si-H 键的化合物或聚合物与碳碳、碳氧等重键的加成反应,称为硅氢加成反应或硅氢化,其中与碳碳重键的硅氢加成反应,是合成功能化有机硅单体和聚合物的主要途径,在有机硅化学和有机硅工业中占有重要地位。

1953年, Wagner 等发现铂-炭、铂-硅胶、铂-石棉等无机载体负载铂系金属对这一反应具有催化作用,但催化活性和选择性不太理想。1957年, Speier 等开发了氯铂酸-异丙醇催化体系,这一催化体系活性高、选择性好,反应条件温和,至今仍在广泛使用。60年代,对硅氢加成反应的研究进一步深化,所涉及到的金属除铂外,还扩展至其它铂系金属及铁、钴、镍等铁系金属,除了这些金属及其盐类,还广泛研究了它们的各种配合物。但是,这些催化剂均溶于反应介质,难以从反应体系分离回收,腐蚀金属容器,沾污反应产品,应用受到一定限制。1971年, Capka 等报道了交联聚苯乙烯负载铂配位催化剂,1975年,报道了以三氧化二铝、活性炭、硅胶为载体的功能化聚硅氧烷铂配位催化剂。有关高分子负载硅氢加成催化剂的早期发展情况和高分子负载催化剂的主要特点, Pittman 曾有一极好的评述。

高分子负载硅氢加成催化剂一般从相应高分子配体与铂系金属的盐类反应,或与它们的低分子配合物进行配体交换(平衡)制备。高分子配体中功能基包括 $-PPh_2$ 、 $-C_6H_4PPh_2$ 、 $-CN$ 、 $-SR$ 、 $-SH$ 、 $-NH_2$ 、 $-NR_2$ 、 $-C_6H_4AsPPh_2$ 等,除了上述具有单齿配位基的高分子配体外,还合成了多种具有多齿配位基的高分子配体,如:

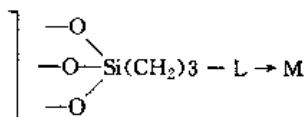


具有多齿配位基的高分子负载硅氢加成催化剂的催化活性不一定比具有单齿配位基的高分子负载硅氢加成催化剂高,但回收再用性能一般较好,催化效率较高。以下叙述高分子配体硅氢加成催化剂的具有代表性的合成方法:



(1)法实质上是高分子反应,它必然具有反应不完全、较难重复的缺点。(2)法没有分出纯净的功能化硅单体就直接水解固载,具有类似于第一种方法的弊病。(3)法从纯净的功能化硅单体着手,所得聚合物配位中心的结构比较清楚。最近有人报道,如果不直接用二氧化硅固载,而是和正硅酸乙酯共水解合成功能化硅树脂,实验重复性可大大改进。众所周知,高分子负载配位催化剂的主要缺点之一就是结构复杂,较难重复。

研究高分子负载配位催化剂结构的主要手段有光电子能谱、远红外光谱和元素分析, EXAFS 有可能提供配位中心原子间距离、配位数等结构信息,但还未见到用于高分子负载硅氢加成催化剂的有关报道。在以往的工作中,它们的结构往往用示意图表示,如:



陈远荫等发现,对于二氧化硅负载的硅氢加成配位催化剂,除非用 $(\text{EtSCH}_2\text{CH}_2\text{SiMe}_2)\text{NH}$ 等单功能硅单体对二氧化硅表面进行改性,一般情况下其结构远较上述示意图复杂,这是由于 $\text{RSi}(\text{OR}')_3$ 型硅单体在固载过程中,首先为二氧化硅表面吸附水份水解为硅三醇,由于硅醇中羟基的活性远大于二氧化硅表面羟基,它们之间更易发生缩合,结果形成带有未反应羟基的聚倍半硅氧烷包裹的二氧化硅微粒,经加热处理后,才在聚倍半硅氧烷与二氧化硅微粒间形成少量硅氧硅化学键。如果预先对二氧化硅严格进行高温真空处理,情况可能有所不同,但这样制得的高分子配体的聚硅氧烷负载量较低,从其制得的催化剂活性也并不好,其次,铂系金属化合物在配位过程中可能发生价态变化,形成具有不同价态的配位中心。在某些情况下,这一推断可从 M/L 比得到证实,例如含硫高分子配体和 RhCl_3 反应制得的负载铂催化剂,其铑氯原子比降至 1:2~3 或更低。

当前高分子负载硅氢加成配位催化剂的发展方向是:从理论上阐明高分子载体、配位基、金属的相互影响及高分子负载硅氢加成催化剂的结构与催化性能之间的关系,进一步研究催化机理,设计和合成具有更高活性和选择性的催化体系。借鉴低分子配位催化剂,包括氢化催化剂的研究成就,从酶的催化部位的结构得到的启示,有助于达到这一目标。冠醚等具有特定结构的配位基的引入,有意识地设计合成特定的配位微环境努力值得注意。另一发展的趣向是稀土金属开始引入高分子负载硅氢加成配位催化剂的领域。与基础研究的不断深化和扩展的同时,高分子

负载硅氧加成配位催化剂的工业应用,也将在今后的将来成为现实。

参考文献

- 1 Pittman C U Jr. *Comprehensive Organometallic Chemistry*. Oxford: Pergamon Press, 1982, 8: 566~592
- 2 Michalska Z M. *J Mol Catal*, 1983, 19: 345
- 3 陈远荫. *催化学报*, 1990, 11: 75
- 4 Hilal H S. et al. *J Mol Catal*, 1990, 61: 1
- 5 Lu X R, Song X P, Chen Z, et al. *Chin J React Polym*, 1992, 1(2): 142

(武汉大学陈远荫教授撰)

凝胶渗透色谱(GPC)法的校准曲线

universal calibration curve in gel permeation chromatography (GPC) GPC法的校准曲线是测定高聚物分子量和分子量分布的工作曲线,亦称普通(通用)标定线。在一定的实验条件下,它可采用直接校准或第2标准物校准,通过校准曲线可以计算待测聚合物 $[\eta] \sim KM^a$ 关系式中的常数 K, a , 相当精确的平均分子量和分布宽度指数,以及加工前后分子量及其分布的变化情况。对于研究高聚物链结构具有重要的理论和实际意义。

经典的测定分子量分布是分级法,时间长,速度慢,全凭经验试探。利用多孔性物质按分子体积大小分离,早在50年前就已报道。麦克贝恩(McBain)用人造沸石分离气体分子和低分子量的有机化合物;1953年惠顿(Wheaton)等发现许多低分子量的非离子型物质,通过离子交换树脂用水洗提、分离;1956年拉兹(Lathe)等用淀粉填充柱子,提高扩展分离范围;1959年波拉兹(Porath)等用交联的缩聚葡萄糖制成凝胶分离水溶液中不同分子量试样,并用“凝胶过滤”表示这一过程的技术发展;1961年穆尔(Moore)首次研制了高渗透疏水凝胶,从水溶液扩散到有机溶液体系,提高了分离分子量的范围,即为GPC法,是现代技术发展基础的一种新方法,具有较好的分辨能力,易于自动化,操作简便,只要实验条件选定和标准曲线的建立,就能在较短时间内得到聚合物的分级结果。GPC的校正:样品浓度和溶剂流速要低,温度和其它工作参数应恒定,再选用已知窄分布的样品为标准,以其对数 $\lg M$ 对保留体积 V_R 作图,则为该聚合物在指定的实验条件下的校准曲线。1967年贝诺瓦特(Benior)指出:当柱子、溶剂、温度、流速不变时,决定聚合物在柱保留性质的是其特性粘度和分子量的乘积 $[\eta]M$,当保留值相同时, $[\eta]M$ 相等,而与聚合物的种类和构型无关,根据这一普通原理,如果待测聚合物的 $[\eta] \sim KM^a$ 关系式中的常数 K, a 已知,则可将标样的校准曲线转变为未知样的校准曲线。

近几十年来,根据普通校正原理,有关评论引起了广泛的兴趣。经验证:对于宽分布的校正,用已知的 \bar{M}_v 样品在同样条件下洗提,被分析的样品 \bar{M}_v 可由洗提谱图计算。1970年约翰逊(Johnson)报导:已知分子量的宽分布的校准曲线是容易建立的,但其结果比窄分布的校准精度要差。如果得不到相同结构的已知分子量样品,可采用一条对同类型线性聚合物均适用的普通校准线。1970年,柯尔(Coll)认为:如果分离过程主要是体积排斥效应,对于线性的柔曲分子以及星形支化的分子,以 $[\eta]M$ 表征的流体动力学体积能够成为GPC的普通校正参数。根据这一原则,直接利用宽分布样品的 $[\eta]$ 和GPC数据计算出相当精确的分子量和该类型聚合物的 $K \cdot a$ 值。1973年阿米勒(Amiller)等认为,如果GPC淋洗在良溶剂中进行,被测聚合物和标样具有相近的 a 值,则分子量的计算就更简化了。1969年威斯(Weiss)提出,如果应用计算机的试误程序,可获得最佳 $K \cdot a$ 值。1972年鲁丁(Rudin)指出:对于高度溶剂化的高分子级分是不真实的,在某些情况下这种校正法不适用。1978年盖勒(Gaylor)等论证:棒状刚性和长支链聚合物普通校正法存在一定偏差。1971年柯克兰(Kirkland)指出:虽然用直接校准或用第2标准物校准能完成很多有意义的工作,但要非常准确地说明GPC法的校准曲线,则还

需要根据分子的几何构型校正,对曲线的反常部分如曲线的歪斜,可能柱子的超负载,吸附效应或系统设计不好而引起,则须检验,并设法校正。1989年普拉克(Prike)等用宽分布样品在同种溶剂及温度条件下的 $[\eta]$ 和GPC谱图求解 $K \cdot a$ 方法,误差较大,繁琐,而且没有解决聚合物在不适合GPC测定的问题,1991年刘龙孝等按最优化原理由理论分析解决。1991程睿时提出:GPC检测器响应对定量的基本原则;可用常规GPC成功地测定高分子在混合溶剂的恒组成下和恒化学势下的折光指数增量和优先吸附系数,则将在高分子材料以外的其它领域中发挥作用。1987年桑明敏等研究了当试样分子量分布线中低于6000的分子量曲端的百分含量对试样冲击强度作图时,发现尾端百分含量越高,冲击强度越低,反映了分子量分布的精细结构对物性的的重要性,1990年伯斯台德(Bersied)等也得出类似结论,他们将低分子量尾端的百分含量当“无效性能参数”,这一发现对分子量分布与性能间关系提供了一个新的判据。1967年怀尔德(Wild)等证实了校准线对星形支化聚苯乙烯适用,1971年贝雷(Berry)验证亦适用,1972年帕内尔(Pannell)不适用,1975年卡多(Kato)认为校准线对梳形支化聚苯乙烯有偏差。1990年格洛克纳(Glockner)等用温淋洗分级法成功地测定了支化聚乙烯以及乙烯- α -烯烃共聚物的支链分布。当1970年哥德哈特(Goedhart)等引用了GPC- $[\eta]$ 和1974年乌安诺(Ouano)等实现了GPC-小角激光光散射(LALLS)联用后,普遍地受到重视,1991年程叔攀用GPC- $[\eta]$ -LALLS三联用直接研究了普通校正对长链无规支化聚乙烯中各支化级分的适用性,发现支化度因子 $S' \geq 0.4$ 时的各支化级分普通标定均是适用的,对于共聚物表征的特殊困难是因为分子量和组成有多分散性,1985年徐懋等提出了一个新的参数表征试样的组成不均匀性,用双检测器和1989年徐种德等用交差分级法结合双检测器的GPC分别测定了PET/PCL和PET/PTE多嵌段共聚物的分子量和组成分布。1985年陈德恒指出:在研究高分子结构中,利用傅里叶变换的红外光谱(FT-IR)结合GPC技术,通过GPC柱分离其组分,用紫外光(μV)检测各组分性能的含量,核磁共振(NMR)测定其结构。通过GPC校准曲线,数据处理用微机计算高聚物分子量分布变化及其影响,1991年萨多(Sato)等应用此联用技术对甲基丙烯酸丁烯互反相共聚物的组分和结构进行了研究。

虽然GPC理论技术的迅速发展,但高聚物品种繁多,结构复杂,仍留下一些尚未解决好的问题,如千万以上超高分子量试样的测定,由于GPC法缺少合适高渗透极限的色谱柱;带有可电离基团的聚电介质的分子量及其分布的测定比较复杂;有些高巨物很难找到合适的溶剂,而且还需要一定温度,并有毒性等。

自GPC问世以来,高聚物分子量和分子量分布的测定经过50年来的发展无论在理论基础和实验技术上都已经相当完善,如GPC- $[\eta]$ -LALLS三联用,不仅可以证实普通性,而且在原理上对于测定聚合物的分子量及其分布或对分离效应可作直接校正,不需通过标定线,也不涉及分子链型和线团大小,对一些新合成的试样不需先订定Mark-Houwink方程,再经普通标定线换算,避免了各个环节所引进的误差,结果可靠,此法对高分子可作详尽而全面的表征,已有多方的应用。GPC-UV-NMR和GPC-FT-IR的结合联用对高分子有机结构可以全面了解和其应用价值。现代技术的联用是近代一项重大进展,是高分子研究中的有力手段,其应用有待今后进一步开发。

参考文献

- 1 Christopher J. et al. *J appl polym sci*, 1980, 25(12): 2985~2992
- 2 Lecacheux D. et al. *J Liquid chromatography*, 1982, 5(2): 217~228
- 3 钱水芳. *高分子学报*, 1988, 1: 7~11
- 4 Holderoqt S. *J polym su*, 1991, 29(13): 1585~1588
- 5 施良和. 1991年全国高聚物分子量和分子量分布论文报告及讨论会, 1991, 2~3

(武汉大学钱永芳高级工程师撰;田炳寿审)

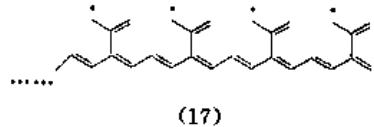
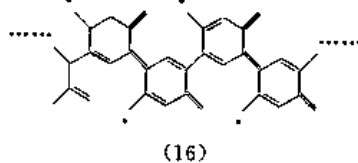
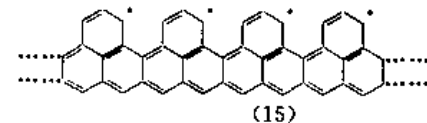
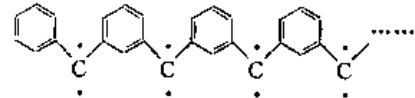
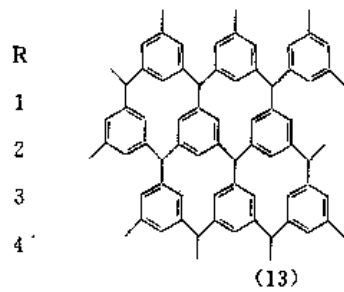
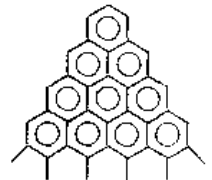
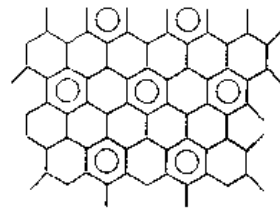
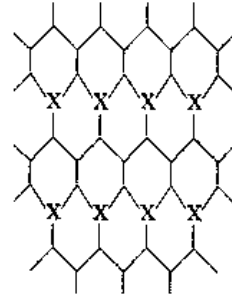
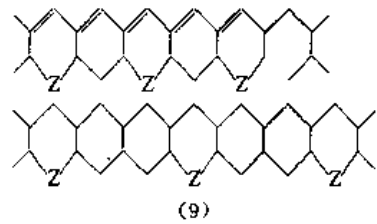
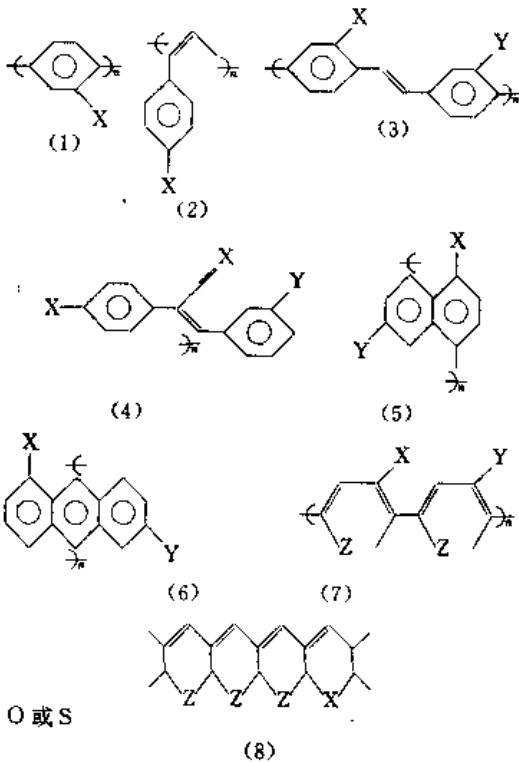
聚合物磁体

本文所综述的是不含金属元素,具有铁磁性的有机高分子物质。这类聚合物是由含稳定自由基的单体(即非Kekule,非凯库勒分子)进行聚合后得到多自由基的聚合物,与电荷转移复合物型有机磁体结构上有本质区别。有机聚合物磁体是一种低密度新型功能性高分子,具有加工成型易,可与其他高分子共混成型等优点,在医用(如人工脏器、药物定向输送)等方面有广泛应用前景。

1967年和1968年伊藤(K. Itoh)和玛他加(N. Mataga)提出合成有机聚合物磁体的可能性,1978年奥契年科(A. A. Ovchinnikov)从分子轨道理论论证了有机聚合物磁体存在的可能性。1968年玛他加利用价键轨道理论也论证了获取有机聚合物磁体的可能性,1990年蒙德内利(D. A. Modarelli)利用半经验分子轨道法(AM1-Cl)对共轭链联接的自由基对偶进行计算,结果表明相同联接基团及方式下,R=N,与R=O自由基对偶的高自旋与低自旋能量差基本一样,说明联接基的功效是内禀的。

现有的理论研究表明,为使聚合物链上的自由基的自旋平行,聚合物分子结构一般必须满足下列要求。(1)聚合物链为交替烃,分子链的重复单元的打“*”号碳原子数 N^* 多于未打“*”号碳原子数 $N(N^* > N)$ 。若高聚物每个链节有一个非键分子轨道,每个非键轨道上只有一个电子占有,由于非键轨道能量相等,根据洪特规则,自旋平等,整个分子链总自旋量子数 $S = (N^* - N) / 2 \cdot \pi, \pi$ 为聚合度。显然,无取代基的偶元环(如苯环)没有非键轨道,因此要增加取代基或在主链上设置碳原子,使得象苯环那样的偶元环具有高自旋多重性。(2)自旋极化规则,山口(K. Yamaguchi)的从头计算法表明以奇数个碳原子相连接在共轭分子链上的两自由基间的自旋平行,这实质上是自旋密度交替现象,共轭体系中相邻碳原子上的 π 电子自旋具有相反方向。因此高自旋聚合物链上的自由基必须以奇数个碳原子联接。(3)将杂原子引入聚合物,(1)、(2)仍适用。杂原子N和O比C多一(两)质子,若提供 π 电子自由基与碳原子 π 电子性质基本一样,键旋转比C稍易一些。

根据以上原则,设计了下面所示的一些潜在的有机聚合物磁体的分子结构,进一步研究。



1990年厄普桑尼(R. B. Upasani)等合成了上面所示的聚合

物(13),他们的实验结果表明所得聚合物自旋密度在每个给予分子0.18~0.23自旋量子数,且有较好的顺磁性。1986年托伦斯(J. Torrance)用另外方法也合成了聚合物(13),产物仅2%有铁磁性,结果重复性差,解释的理论模型很不充分,普遍认为结果难以置信。

1987年岩村(H. Iwamura)将2,4,6-三偶氮三苯酚晶体加热到200℃发生爆炸应得到所谓铁磁性聚合物,1mg产物中仅有几微克铁磁物质,饱和磁化率约为2G/g,这些结果尚需进一步证实。1987年奥契年科等合成了一种联乙炔的物质,并被“认为”是世界首例有机磁体,但只有0.1%单体转变成了铁磁性聚合物,由于表征极为困难,从分子结构看自由基中心与主链不共轭,分子间自旋也不会平行,因此其结果不可信。1989年岩村等合成了几种以乙炔基为主链,支链含苯环和稳定自由基的聚合物,结果表明自旋浓度值偏低,产物中仅有少量样品能被磁铁吸住,其原因需进一步研究。

1989年奥田(M. Ota)等研究了聚三芳基甲烷树脂的磁性性能,他们分别苯甲醛与此(BA/py)、苯甲醛与苯酚(BA/ph)及对羟基苯甲醛(PHBA)聚合得到3种聚合物,用紫外光辐射12h后,将其漂浮在水面上,在强磁场作用下,可观察到漂浮粒子集中在磁力线密度最大处,说明辐射脱H后,聚合物具有一定磁性性能,实际结果表明,对BA/py体系,磁化强度和矫顽力分别为 $1.2 \times 10^{-5} \text{T}$ 、 $5.17 \times 10^4 \text{A/m}$ 对BA/ph和PHBA体系则分别为 $2 \times 10^{-5} \text{T}$ 、 $7.16 \times 10^4 \text{A/m}$ 和 $5 \times 10^{-5} \text{T}$ 、 796A/m 。1986年岩村等合成得到一种多碳烯化合物,碳原子上两个电子分别位于 π 轨道和非键轨道上,根据洪特规则,两电子自旋平行,这种 π 轨道与 n 轨道(NBMO)相互作用,类似于铁磁性金属中S-d相互作用,由于分子间自旋为反铁磁性,因此未能得到铁磁性物质。

目前一些多自由基聚合物包括含用于自旋标记的氮氧自由基的聚合物均发现有3%~5%的铁磁性碎片,一些降解的或碳化的聚合物(如纤维素)均发现弱的铁磁性行为,其原因尚不清楚。国际上几次声称的所谓“首例”有机磁铁,也仅仅产物1%~3%有铁磁性,以上两者间本质上有什么联系值得进一步研究。

要获取有机聚合物磁体,分子内自旋间要平行,分子间自旋也必须平行,1963年麦克内尔(I. L. McConnell)提出了一种自旋交换模型,认为相邻的自由基是自旋反平行的,类似于两个氢原子间弱相互作用,例外的是,两个芳环之间相互作用是多中心的,在一些芳基(或烯基)自由基(特别是奇交替自由基)存在大的正或负 π 电子自旋密度,特别情况,这些自由基堆砌在晶格中很有可能正自旋密度的原子与邻近分子中负自旋密度原子是铁磁性交换作用,而总自旋角动量平行。1986年岩村设计合成了Bis(phenylmethyl)enyli][2,2]Paracyclophanes作为模型实验体,取得了与模型一致结果。1979年布契年科(A. L. Buchachenko)提出另外一种分子间自旋平行途径,要求合成合适的自由基-多自由基对偶,并且这种有机铁磁体必须有大的自旋密度,没有多余的化学集团,取代基及其它“化学残渣”。洪特(Hund)规则是根据原子和离子的经验提出的,是用于原子的,进一步推展这一原理的意义,有可能用于分子和分子间及能量不相同轨道,拉蒂(P. M. Lanti)将其成功地用于分子和双自由基。

就有有机聚合物磁体而言,目前在分子设计和模型实验方面取得了较大的进展,但尚未获得性能稳定、产率高、自旋密度大(铁磁性强)的聚合物。进行新的分子设计和新的聚合物磁体获取途径探讨有很大的发展前景。目前在分子形态结构控制,产品表征,分子间和分子内自旋相互作用性质的计算研究,及其相应电子结构的计算研究,新的聚合物磁体分子的合成还需作大量的工作。

参考文献

- 1 Itoh K. Chem Phys Lett, 1967, 2: 35~239
- 2 Mataga N. J Chem Phys, 1968, 48: 4789~4795
- 3 Upasani R B, et al. Mol Cryst Liq Cryst, 1990, 190: 35~43
- 4 Nath K, Tayloy P L. Mol Cryst Liq Cryst, 1991, 205: 87~

100

5 张贵萍,江皖兰,龚克成. 有机化学, 1992, 3: 56~61

(深圳广密磁碟有限公司张贵萍博士撰)

纤维素及其衍生物液晶 cellulose and its derivative liquid crystals 纤维素是一种天然高分子材料,资源丰富,再生周期短。纤维素及其衍生物是半刚性链大分子,能溶于许多溶剂中。它们既可以形成溶致性液晶又可以形成热致性液晶。对纤维素及其衍生物液晶的研究主要在两个方面,即理论研究和在工程技术上的应用研究。前者可以使人类对半刚性链大分子有更加深入全面的认识。后者则集中于开发制备高强度高模量的再生纤维素纤维和纤维素及其衍生物功能膜的潜力上。

1976年,韦尔波伊(R. S. Werbowyj)和格雷(D. G. Gray)首先报道了在羟丙基纤维素与水形成的浓溶液中,观察到了具有鲜艳色彩的胆甾型液晶相。从此,这一领域的研究得到了迅速发展。出现了大量的可形成液晶相的纤维素衍生物。在通常情况下,纤维素及其衍生物液晶大部分是胆甾型的。研究最多的是羟丙基纤维素。它既可以在水中,也可以在有机溶剂中形成胆甾型液晶。而且还可以形成热致性液晶。许多纤维素酯和醚类衍生物以及羟丙基纤维素和羟乙基纤维素的衍生物均被发现可以形成胆甾型液晶。纤维素在许多溶剂中也可以形成溶致性液晶。研究表明,纤维素及其衍生物分子量,取代度,取代基的结构特征,温度和溶剂对其液晶性均有影响。高分子量和较低温度有利于液晶相的形成。溶剂的酸度和极性以及溶剂与大分子链间的相互作用对液晶性也有较大的影响。溶剂的酸性越强,极性愈大,溶剂与大分子链间的相互作用愈强,形成液晶相的临界浓度愈低。对溶液临界浓度产生影响的这些因素对胆甾型液晶相的有序参数,各向异性程度和胆甾相的螺距也会产生相同的影响。取代基的结构特征对纤维素衍生物的热致液晶性影响很大。具有热致液晶性的纤维素衍生物大部分都是纤维素醚。

首次报道的纤维素溶致性液晶体系是纤维素溶于N-甲基吗啡啶-N-氧化物和水的混合溶剂中。在纤维素浓度W(纤维素) $> 20\%$ 时,溶液出现双折射。以后,又在三氯乙酸和二氯代烷(如二氯甲烷,1,2-二氯乙烷等)混合溶剂、 $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{SCN}$ 溶剂体系以及氯化锂/二甲基乙酰胺溶剂体系中观察到了纤维素溶致性液晶的形成。在上述溶剂体系中,纤维素液晶态开始出现的浓度大大低于刚性链高分子。弗洛里(Flory)的格子理论不适用于纤维素。即使用库恩(Kuhn)的链段长度计算出的临界浓度也大于实际观察到的纤维素溶液的临界浓度值。科尼奥(G. Conio)等人计算出纤维素在氯化锂/二甲基乙酰胺溶剂中的轴比高达135。即相关长度在0.1 μm 数量级。显然,纤维素大分子通过与溶剂分子复合而变得刚性。但是,至今仍然缺乏对纤维素在有序的液晶相中的行为进行系统的理论研究。

大分子链结构对液晶相的形成有很大的影响。路易斯(R. R. Luise)等人曾报道纤维素衍生物,包括能溶于有机溶剂的酯和醚以及溶于水的盐类衍生物,只有在取代度大于1.7时,在室温下才能形成液晶相。取代基的性质,如极性,大小等对液晶相的形成也有很大影响。格雷(D. G. Gray)提出柔性链取代侧基的作用是破坏主链分子间氢键,使主链运动性增加,使其容易达到取向的有序排列的平衡态。许多大的取代基会增加主链的半径并改变键的构象,从而改变大分子链的轴比。由于主链是半刚性的,纤维素衍生物液晶相形成的临界浓度大大低于弗洛里(Flory)理论所计算出的值,这与纤维素溶液的情况不同。因为取代基的性质影响到了大分子链的刚性。取代基的性质还会影响到胆甾相的螺旋结构。如乙基醋酸纤维素在氯仿中,随乙酰基含量增加胆甾相的螺旋结构从左旋变为右旋。对于分子量的影响,西克苏(P. Sixou)报道在三醋酸纤维素·三氯乙酸中,胆甾相的园二色性取决于三醋酸纤维素的分子量。

溶剂是影响纤维素及其衍生物溶致液晶性的另一主要因素。阿哈罗尼(S. Aharoni)发现醋酸纤维素,在强或中等强度的酸中,

临界浓度与溶剂的 PK 成线性关系。在另一些溶剂中,临界浓度与溶剂的摩尔体积成反比。在一些溶剂如苯甲醇中,即使浓度超过 50% 也无液晶相形成。氰乙基纤维素和乙基氰乙基纤维素致液晶形成时的临界浓度也与溶剂酸的强度和溶剂与大分子间相互作用参数有关。同样,溶剂的性质也会影响胆甾相的螺旋结构。如在二氯乙酸中,乙基醋酸纤维素是左旋的。但在氯仿中,它可以是右旋的。溶剂分子的相互作用影响到大分子链的刚性。溶剂分子的性质决定了溶剂分子间,溶剂与大分子间的相互作用,从而影响到大分子间的相互作用。大分子之间适当的相互作用对于液晶相的形成起着重要的作用。

纤维素衍生物胆甾型液晶溶液具有多重结构。在不同的浓度范围内,液晶相可呈现出园盘结构,条纹结构,假各向同性结构,平面结构和多边形结构。这些结构均具有胆甾型液晶特征。在液晶相内,有序度是非均一的。在加热液晶溶液过程中,有序度较低的部分在较低温度时首先转变为各向同性相。而有序度较高的部份在较高温度时才发生向各向同性相的转变。吉阿松(J. Giasson)等人用电子显微镜直接观察到了从液晶溶液浇铸得到的醋酸纤维素膜的胆甾相层状结构。黄勇等人利用溶剂的快速聚合把乙基氰乙基纤维素的胆甾相固定下来,用电子显微镜也观察到这种层状结构。

热致纤维素衍生物液晶与溶致性液晶相比较研究得较少。能显示热致液晶性的主要是纤维素醚和芳族酯。由于取代基的差异,从固态转变为液晶态的温度可以相差约 180°C。而显示液晶的温度范围 ΔT 可以从 10°C 到 150°C。在取代基上引入 7~16 个亚甲基可明显降低固-液转变温度。引入 6~10 个亚甲基可使 ΔT 增大。在热致液晶性纤维素衍生物中,取代基破坏了大分子链的分子内和分子间氢键。控制取代基的结构特征,取代度和取代位置,可调节纤维素衍生物的热致液晶性,甚至可以改变液晶类型。如苯甲酸和萘甲酸纤维显示近晶型和向列型而不是胆甾型液晶。

目前,对于纤维素及其衍生物液晶仍有许多基本问题不太清楚。由于取代基性质,取代位置,取代度和取代基分布对液晶性质,包括链的刚性、手性、织构、形态、液晶的类型等都有很大的影响,因此,用结构清楚的纤维素衍生物来研究从化学结构→构型→液晶态的超分子结构的有机联系是当前研究的主要内容之一。大分子胆甾相的形态结构及在胆甾相中大分子链的排列取向也将是人们关注的焦点。纤维素具有丰富的资源,而且成本低,为开发和充分利用纤维素资源,液晶纤维素及其衍生物材料的成型加工和开发应用的研究将随着对液晶相的研究的深入而逐渐得到加强。

参考文献

- Gilbert R D, et al. Prog Polym Sci, 1983,9:115
- Gray D G. Appl Polym Symp, 1983,37:179
- Giasson J, et al. Biopolymer, 1988,27:1999
- Huang Y J. Macromol Sci Phys, 1989,B28(1):131
- Gilbert R D. ACS Symp Ser, 1990,433:259
- 李新贵,等. 高分子通报, 1990,4:213
- Huang Y, et al. J. Macromol Sci Phys, 1990,B29:117
- Huang Y, et al. Polym Bull, 1992,27:535

(中国科学院广州化学研究所黄勇副研究员撰)

离子交换树脂及吸附树脂 甘斯(R. Gans)于 20 世纪初叶已应用天然及合成的沸石软化水提纯蔗糖。1935 年美国亚当斯(B. A. Adams)和霍姆斯(E. L. Holmes)又发现磺化酚醛树脂,能去除水里的金属离子。但这类树脂的稳定性不高,交换容量低,不能满足工业上的要求。自从 1945 年达累利奥(G. F. D'Alelio)发现聚苯乙烯型强酸性树脂后,1949 年罗姆-哈斯(Rohm-Haas)公司发现聚苯乙烯型强碱性树脂后,树脂的应用范围才逐渐扩充。原因是这些树脂的化学与物理稳定性好,不易碎,且交换反应速度快,交换容量大,原料易得,价格便宜。1959

年,何炳林等用聚苯乙烯及聚乙炔作致孔剂,合成孔径大,强度高和交换速度快的大孔型交链聚苯乙烯离子交换树脂。1962 年罗姆-哈斯公司,以对聚合物为不良溶剂的化合物为致孔剂,合成了大孔离子交换树脂。1973 年美国杜邦公司又合成一种全氟磺酸树脂,并用以制成离子交换膜用于以食盐水电解制碱工业作电极。

吸附树脂又称高分子吸附剂,是一种网状不溶不熔的高分子化合物,有带功能基的,也有不带功能基的。它的吸附作用,一般依赖氢键或范德华力进行的。60 年代末期已有产品出售,美国罗姆-哈斯公司生产的牌号为 XAD1-16;日本三菱化成公司生产的有 Diaion HP 系列吸附剂;南开大学生产的有 H-系列树脂、X-5 树脂、NKA 及 NKA-9 树脂、AB-8 树脂、S-8 树脂、球型碳化树脂;天津市化学试剂二厂生产 GDX-101 和 GDX-102;上海试剂厂 101、201、301、及 401 等。H 系列树脂与碳化树脂有优良的孔结构性能,平均比表面积可高达 1000m²/g(最高的甚至超过 1300m²/g),有窄的孔径分布,小的平均孔径,一般在 100Å 以下,比重大,可达 1.15~1.40g/ml,机械强度高,溶胀性能好。如同活性炭一样,可广泛应用于各个领域,而效果则优于活性炭(被吸附物易洗脱)。

种类 离子交换树脂根据它的物理性质可分为凝胶和大孔两种;由于树脂母体(或称基块 Matrix)的化学结构不同,可分为苯乙烯系列、丙烯酸系列、酚醛系列等。离子交换树脂中活性基团的性质可分为:强酸性(如磺酸聚苯乙烯)、中等酸性(如磷酸聚苯乙烯)、弱酸性(如羧甲基丙烯酸);强碱性(如聚苯乙烯下基三甲季铵碱);中等碱性(如含胍基的聚苯乙烯卡基胍)、弱碱性(如聚苯乙烯卡基胍);螯合树脂(如聚苯乙烯卡基胍二乙酸);和电子交换树脂(如聚苯乙烯硫醇)。

吸附树脂可根据它的组成而分类,如聚苯乙烯系列,丙烯酸酯系列,酚醛系列,碳化树脂系列,其它(非极性与极性单体共聚合)。

性质 (1)强酸性树脂:它的酸性接近硫酸,能与盐发生复分解作用,在任何 H⁺浓度的溶液里都能使用。(2)中等酸性树脂:这类树脂的酸性接近磷酸,能与高价金属盐发生不同程度的交换作用。(3)弱酸性树脂:这类树脂的化学性质与乙酸相似。不易与盐起交换作用;但在碱性溶液里,能与多价金属离子发生复分解作用,对二价金属离子如铜、钴、镍、汞等有较强的结合力。在使用时,要考虑它的盐型能起水解作用。它的盐易为强酸再生。(4)强碱性树脂(含季铵碱基):这类树脂的碱性相当于苛性碱,能除去水液里很弱的酸如硼酸、硅酸、有机酸、碳酸等。这类树脂与羟基及氟原子结合力很弱,故易与金属盐起复分解作用。轻型树脂对热不稳定。中国生产的强碱 I 型树脂使用温度不能超过 60°C。强碱性树脂可以在任何 H⁺浓度溶液里与阴离子交换。(5)弱碱性树脂:化学性质与铵相似,呈弱碱性,能中和水里的酸形成盐。

吸附树脂分强极性、中等极性 & 非极性 3 种。强极性吸附树脂中含有强极性的功能基,如氨基、胍基等;中等极性吸附树脂中含有酯基等;非极性吸附树脂中全是非极性化合物,如不含任何功能基的芳香基或烷基化合物,其吸附作用是依赖表面的温德华作用力或氢键。

合成 凝胶型强酸与强碱树脂主要是以苯乙烯与二乙烯苯(作交链用)为原料,因这两种化合物易得价廉,且这共聚物易引入多种基团,符合多方面应用,可谓价廉物美。强酸树脂的合成方法,是以过氧化苯甲酰使苯乙烯与二乙烯苯在加热下进行悬浮共聚,获得苯乙烯-二乙烯苯共聚物球状体后,用二氯乙烷将其溶胀,再以硫酸加热磺化即得。强碱树脂的制备,可加入氯甲基醚和二氯化锌或三氯化铝与上述共聚物反应,一定时间后,获得氯甲基化苯乙烯-二乙烯苯共聚物后再以三甲胺(称强碱 I 型)或 N,N-二甲基乙醇胺(称强碱 II 型)胺化,即得强碱树脂。弱碱树脂的制备,可用甲胺或二甲胺与氯甲基化苯乙烯-二乙烯苯共聚物反应得到。至于螯合树脂,请参阅陈义楠的编著。电子交换树脂的制备,可通过氯甲基化苯乙烯-二乙烯苯共聚物在二氯化锌的存在

下,与对苯二酚反应即得。

吸附树脂的合成方法与合成大孔离子交换的母体或基块相似,这里不拟重述。

应用 离子交换树脂用量最大的是用于水的处理,其中包括超纯水(仅含 5ng/L 的离子杂质,电阻率 $1.8 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$)。此纯度相当于用石英容器蒸馏28次才获得的水。湿法冶金方面,可从矿物提取、分离、浓缩、纯化,如铀、黄金、镍、钴、稀土元素。用于药物的回收、分离和提纯,如抗生素、氨基酸、生物碱等。用于分析化学,例如水中离子浓度的分析、稀土分析、生化分析,以及月球上痕量物质的分析等。以阳、阴离子交换树脂代替无机酸、碱进行酯化、水解、酯交换、醇醛缩合、水合反应等。用树脂代替无机酸碱,优点是不腐蚀反应器、不污染环境,反应易控制,同时催化剂可反复应用。近年有用过渡金属(如钯、铑等)与带螯合基团的高分子配位,进行氢化与甲氧酰化,获得良好的结果。用于糖、生物制品、甘油、酒等脱色。去除电镀废液里金属离子,回收电影片废液里的用物质,变害为利。用于外消旋物的拆分,固相合成,以及作为化学试剂等。

吸附树脂在60年代末、70年代初发展,由于它在分离上具特殊的优异性质,发展很快。已广泛用于脱色、多种天然产物的分离、纯化,环境保护。南开大学已研制出多种吸附树脂,用于工业生产、医学和环境保护上,获得很好的结果,例如用AB-8吸附树脂,提取甜叶菊糖甙,提出液里存在蛋白质、有机酸、叶绿素、粘液汁、无机盐等,含量超出甜叶菊甙3~7倍,提取结果,可获甜叶菊甙85%左右,只含少量色素。AB-8无论在吸附量、选择性和循环使用的稳定性均较日本的HP-20及美国的XAD-4为优。用H-103提取冬虫夏草、核苷类化合物及芳香氨基酸很有效果。采用X-5吸附树脂提取灵芝多糖,使用H-103树脂提取分析山楂中的黄酮类均获得良好效果。此外,吸附树脂用于发酵液中分离芳香糖甙类抗菌素2809(具有抗肿瘤活性的抗菌素),也获得很好的结果。以H-107吸附树脂进行血液灌流,已在天津救活80多名安眠药中毒病人,全国救活一百多人。NKA-9已用于人工肝支持装置,去除患有急、慢性肝炎病人难于排出的胆红素53%,且吸附作用很快,明显优于国外的XAD-2、XAD-4等。总之,高分子吸附剂将在生物医学工程上(血液净化)会越来越重要。吸附树脂对农药废水、苯酚及其衍生物、化工废水有机物的去除,效果是很好的。

高分子吸附剂在分离、吸附、纯化方面均较活性炭为优。因吸附剂易于再生,选择性高等,活性炭的缺点是难于再生,被吸附物难于回收。

参考文献

- 何炳林、钱庭宝,离子交换剂的制备及其性能的测定(IV),多孔性高强度强碱性聚苯乙烯型阴离子交换树脂(新型强碱201)南开大学学报,自然科学(化学专刊),1964,5,103
- 何炳林,张政朴,钱庭宝,陈洪彬,斐广文,特大孔苯乙烯-二乙烯苯共聚物的制备和孔结构研究,1、高分子能迅,1982,278
- Abram, I M. Macroporous Condensate Resins as Adsorbent. Ind and Eng Chem Prod Res and Dev, 1975,14,108~112
- 陈义镛,编著,功能高分子,1988;上海科学技术出版社
- He B, Sun, J, Li H, Sang J. Synthesis of Anchored Rh-Co Cluster Catalyst and Their Hydroformylation Properties J Macromol Sci-Chem, 1989;A26,417~431
- He B, Wang L. Hydrogenation of Olefins Catalyzed by Polymer-Bound Pd Complexes of Different Valence States Reactive Polymers, Reactive Polymers, 1989,110,73~78
- Wang, L, He B. The study of Hydrogenation of Olefins Catalyzed by Polymer-Supported Palladium-Lanthanoid Bimetallic Catalyst. 1990;12,45~50
- 刘克良,等.系列新LHRH拮抗剂的合成及其生物活性,中国科学1990,B辑,163~169

9 何炳林,手性配体高分子在光学异构体拆分中的应用研究,自然科学进展—国家重点实验室通讯,1991,1,507~514

10 Huang, S., Wang, L He B. Study of Polymer-Bound Mixed Valence Palladium Catalyst 1. Preparation and Characterization of Polymer Bound Mixed Valence Palladium Catalyst. Reactive Polymers, 1992,16,93~103

(南开大学高分子研究所何炳林院士、孙君坦教授撰)

有规立构聚苯乙烯的合成

聚合物的立体结构规整性对高聚物性能有很大影响,它决定聚合物晶体结构的类型和结晶度及其稀溶液、熔融态和固态物理性能,甚至常常还决定聚合物材料的工业应用(如聚丙烯)。因而控制聚合物立构规整性对开发新材料或“裁制”高聚物和控制聚合物的性能起着重要的作用。早在1929年H. Staudinger提出大分子概念的同时,就曾预示聚合物立构规整性的重要性。直到1954年,Natta等人用Ziegler-Natta催化剂在常压下合成等规聚丙烯后,有规立构聚合物的研究才有较大突破。几十年来, α -烯烃和二烯烃的定向聚合得到广泛研究且获得巨大进展,并已工业化。

有规立构聚苯乙烯(等规、间规)是重要的立构规整性聚合物。1955年,Ziegler和Natta分别用 $\text{AlEt}_3-\text{TiCl}_4$ 催化剂合成了等规聚苯乙烯(IPS),而间规聚苯乙烯(SPS)直到1986年才由Ishihara等人用 TiCl_4-MAO 催化剂体系在常温下合成得到。有规立构聚苯乙烯具有高熔融温度(IPS, $\sim 240^\circ\text{C}$;SPS, $\sim 280^\circ\text{C}$)、高结晶度、高热变形温度(IPS, $>170^\circ\text{C}$;SPS, $>240^\circ\text{C}$)、高拉伸强度、高模量以及优良的电绝缘性能和耐腐蚀性能。目前有规立构PS的研究方兴未艾,它们具有潜在应用前景,可用,耐温和耐化学腐蚀工程塑料、绝缘材料、塑料合金、功能纤维、分离膜、高性能泡沫材料和耐温薄膜等。

早在1950年,Marton曾用“Alfin”催化剂得到了立构规整的聚苯乙烯,但当时并未引起注意。直到1955年Ziegler和Natta用Ziegler-Natta催化剂聚合出IPS才真正认识。不过,“Alfin”型催化剂聚合苯乙烯的等规度和催化效率很低,聚合物难以抽提分级,已不再应用。对IPS的研究主要集中在寻找高等规度、高活性、高转化率的催化剂及其结构与性能及应用关系。IPS的合成已有配位聚合、阴离子和阳离子聚合, $t\text{-BuOLi}/\text{BuLi}$ 作为阴离子聚合催化剂合成IPS取得了进展(C. Luigi, 1989)。阴离子聚合IPS之优点为分子量易控制、分散指数低,而且易合成含IPS嵌段链的共聚物合金,但催化效率、转化率和等规度不及Ziegler-Natta配位聚合优越。制备IPS配位聚合催化剂有钛系、钕系、镍系和稀土体系等。

钛系催化剂由于聚合活性高且产物等规度高诸特点而占有主导地位。另外,钛催化剂的物理形态较易控制,而催化剂的物理形态恰恰是决定IPS立构规整性、催化效率、聚合物微观形态和粒度及表面堆密度的一个重要因素。镍系催化剂能有效地控制IPS分子量分布,较钛系理想(如 Ti : $\overline{M}_w/\overline{M}_n \geq 11$; Ni : $\overline{M}_w/\overline{M}_n = 1.4 \sim 4.2$)。Matta(1958,1979)研究发现苯乙烯规聚合的另一特点是只有非均相Ziegler-Natta催化剂才能合成高等规度IPS,后续研究证实这一观点。苯乙烯等规聚合过程中, TiCl_3 、 TiCl_4 母体催化剂的立体定向选择性差异不如丙烯聚合显著,这与苯乙烯单体性质有关(Natta,1979)。由于苯乙烯的芳环能与催化剂活性中心络合而失活,因此IPS聚合的催化效率比其它 α -烯烃要低(J. Boor, 1971)。苯乙烯等规聚合动力学研究表明,单体转化率、催化效率、聚合物等规度和分子量及其分布取决于催化剂组成、催化剂陈化时间、催化剂浓度、Al/Ti比、聚合温度、聚合时间、溶剂、搅拌速度和烷基铝性质及浓度。

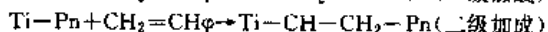
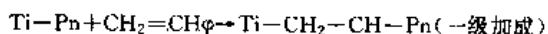
提高IPS的等规度是近年来研究的中心内容。V. P. Mardykin等人(1969)在催化剂中引入电子给予体(如醚)提高了催化剂体系对苯乙烯聚合立体定向性,而且等规度随着聚合时间而增大。N. Kashwa(1987)在催化剂中引入苯甲酸乙酯(EB)也得到相同结论,并认为EB抑制或减慢了等规活性中心的衰减,

相对加快了非定向活性中心失活。研究认为,EB有助于提高等规度主要在于它具有毒化等规性低的活性中心,提高活性中心等规性和提高等规活性中心的 K_p 值等特性。对于钒体系催化剂,Alberola发现加入杂环碱(如吡啶)有利于提高IPS等规度。据认为是杂环碱与催化剂配位形成较高定向选择性的等规活性中心所致。

Soga(1988,1989)在提高IPS等规度方面取得有意义结果,他发现二甲基二茂钛(Cp_2TiMe_2)作为助催化剂加到钛系母体催化剂中可大大提高IPS等规度(几乎达100%)。这是由于 Cp_2TiMe_2 的存在使无规活性中心很容易转化为等规活性中心所致,但大多数潜在的活性中心仍未被活化,故催化活性仍较低。

苯乙烯等规聚合过程中,如何解释等规度和催化效率及转化率相矛盾仍需进一步研究,这是IPS的催化剂研究方向。有意义的是,在钛系母体催化剂中加入稀土钨化合物得到的SN-1催化剂具有高活性、高等规度、高转化率和高聚合速率及高分子量等综合特点。而且SN-1催化剂还具有较高的苯乙烯- α -烯烃共聚活性,这与SN-1催化剂活性中心结构和浓度以及聚合机理有关(周新华,1987)。

有规立构聚苯乙烯加成方式主要有二级加成和一级加成两种:



^{13}C NMR对苯乙烯等规聚合链增长而镍催化剂则是按二级加成机理进行链增长,机理研究表明,链增长加成机理随催化剂性质而定。非均相钛系催化剂进行苯乙烯等规聚合时,与其它 α -烯烃聚合一样,单体顺式插入活性中心Ti-C键按一级加成机理进行链增长,同时链增长过程中往往伴随活性中心构型改变而引起产物立构规整性变化。此外,动力学研究表明,对单体而言,苯乙烯等规配位聚合属二级反应,但对催化剂而言属一级反应。

在低温下(-65°C)用自由基引发剂或Ziegler-Natta催化剂来合成SPS早有报道,但效率和同规度都相当低。1986年,N. Ishihara首次发现 $TiCl_4$ 或 $CpTiCl_3$ -MAO催化剂体系能合成高同规度和结晶度的SPS,而且还具有高的催化效率和单体转化率。近几年来,在Ishihara工作基础上,开发合成SPS的催化剂、研究聚合特性、结构与性能以及加工应用诸方面已取得较大进展。合成SPS的催化剂主要为Ti系和Zr系两类,其中Ti系占主导地位。

合成SPS的催化剂多数是均相可溶Kaminsky型催化剂。Ishihara(1988)研究表明,只有Ti系催化剂才能合成纯SPS,而V系和传统的Kaminsky催化剂 $[7-C_5H_5)_2ZrCl_2-MAO]$ 得不到纯SPS产物。类似的Ni系催化剂只能合成IPS,Nb,Ta,Cr和Co系根本不能合成有规立构PS。K. Soga(1988)对Ti系和Zr系等催化剂的研究支持了Ishihara结论。虽有少数Zr化合物可合成SPS,但效果欠佳。Ti系催化剂中Ti的价态、配体性质和大小对合成SPS的影响,含茂基配体的Ti系催化剂效果最为理想。Ishihara(1988)比较了各种化合物的催化活性得到如下顺序: $TiCp-TiCl_3 \sim Cp^*TiCl_3 (Cp^* \text{ 为 } \eta^5\text{-pen-tamethylcyclopentadienyl}) \gg CpTiClH \sim Ti(OEt_4) > Ti((OMe)_4 \sim TiCl_4) > TiBr_4$ 。

苯乙烯间规聚合与烷基铝的性质和浓度以及Al/Ti比有密切关系。只有MOA作助催化剂才能制备SPS,而其它有机铝化合物效果极差。MOA的存在有助于同规活性中心的形成,同时还可以阻止或延缓催化剂活性种的失活。此外,聚合温度和聚合时间对苯乙烯间规聚合速率、催化剂效率和单体转化率也有影响。

合成SPS的催化剂除主要是Kaminsky-Sinn型外,还报道了异相载体催化剂。催化剂活性和苯乙烯间规聚合特性主要取决于载体类型和性质。M. Kuramoto等人(1989)用 Al_2O_3 作载体可提高单体的转化率或产率。Soga(1990)用 SiO_2 作载体的Ti(OBu)₄/MAO/ SiO_2 催化剂热稳定性好,形成单一活性中心,有效提高催化效率和同规度,同时产物分子量分布窄;而用于丙稀

聚合时,得到聚丙烯分子量分布则较宽。这再次表明苯乙烯和丙稀间规聚合机理上的差异,值得注意的是Mg化合物作载体时,苯乙烯有规立构聚合和催化效率与Mg配体有关,含氟原子配体的Mg化合物载体有利于等规聚合,而只有非氟原子配体Mg化合物[如 $Mg(OH)_2$]载体才能合成SPS。载体金属的配体对有规立构苯乙烯聚合的作用机理以及高效载体催化剂的开发有待进一步研究。

苯乙烯间规聚合机理尚未有圆满模型提出。A. Zambelli等(1987,1989)用 ^{13}C -NMR研究SPS产物的末端结构,发现单体全部是以二级加成方式增长的,并认为二级加成插入是间规聚合的一个共同特点,链增长过程中伴随 β -脱氢反应进行链转移而发生链终止。Soga(1989)用制得SPS的Ti(OBu)₄/MAO/C催化剂进行苯乙烯共聚,发现一些通常易进行聚合的烯烃单体却不聚合,而阳离子聚合性较高的却易与苯乙烯共聚,这说明苯乙烯间规聚合可能是阳离子聚合的机理。1991年Zambelli的研究支持阳离子聚合机理的观点。

总之,合成IPS和SPS的研究仍将集中在开发高活性、高等规度、高转化率、高聚合速率的新型催化剂,同时从理论上探讨催化剂组分的作用、活性中心结构与性质及其应用的关系,从而开发出PS新型高分子材料或合金。

(中山大学高分子研究所许光学、卢泽俭、林尚安撰)

热可塑性共价交联聚合物 thermally reversible covalent crosslinked polymers

指用化学合成法制得的、含有热可逆性共价交联键的聚合物或共聚物。这类聚合物在常温下靠共价键交联显示硫化橡胶(或热固树脂)特性,而在高温下通过共价键解聚又能流动成型,制品冷却后又恢复到原有的弹性(或热固)性能。这是一类新型的制取热塑性弹性体(TPE)的交联反应,它比以往靠物理交联制取TPE能提供更高的强度和耐热性。

在工业上最有价值的热可逆性交联材料是热塑性弹性体(或称弹塑体)。迄今已有多类TPE研制成功。例如:(1)以玻璃化微区作物理交联点的聚苯乙烯类嵌段或接枝共聚物,(2)以结晶微区作物理交联点的聚氨酯类(TPU)、聚酯类(TPEE)、和聚酰胺类(TPAE)等;(3)以多重离子或离子簇微区作离子交联的含羧基、酸基和盐基的高聚体;这些TPE都是靠玻璃化、结晶和离子微区的热可逆变化来改变正常热塑性材料的性质,它们均属物理交联而非化学共价交联。(4)含化学交联微区的聚烯烃共混物(TPO)和全硫化型橡胶共混物(TPV),这种TPE的热塑性流动加工是靠未交联的结晶聚合物或硬性塑料组分,在常温下呈现弹性却是分散相硫化橡胶微粒的贡献。硫化橡胶虽为共价键交联,但交联键本身却不是热可逆的,材料的热可逆性和强度主要是热性树脂所提供的。所以迄今为止,已开发的TPE就其交联键的本性来说,都不是热可逆性的共价键交联聚合物。

化学家们巧妙地利用环戊二烯(CPD)在常温下可自动二聚化为双环戊二烯(DCP),而DCP在高温(160~170°C)又可解聚为CPD的热可逆性质[这个反应称为狄尔斯-阿德尔(Diels-Alder)反应],开发了以共价键交联制备TPE的新方法。

1974年竹下指出:由DCP构成的交联键可赋予聚合物以热可逆性化学交联。1979年肯尼迪(Kennedy)等通过Me₂AlCPD与含活性氯的聚合物如氯化丁基橡胶(Cl-IIR),或氯化乙丙橡胶(Cl-EPR)发生烷基-卤素交换反应,制得了含CPD侧基的橡胶聚合物(CPD-IIR和CPD-EPR)。发现Cl-IIR于23°C放置72h后形成了不溶性凝胶(交联聚合物),证明它可在室温下交联;若把该交联聚合物放在六氯丁二烯中,再加入马来酸酐(MA)并加热到215°C,交联聚合物即可完全溶解。表明CPD和DCP可以发生热可逆性相互转化。同样地,如把CPD-EPR放在模具中于150°C~170°C成型,冷却后胶片的拉伸强度>Cl-EPR,伸长率可达100%以上,且产物不溶,重复成型3次,材料的热塑性和物性基本不变,充分显示出热塑性弹性体的特性。如果把冷却的胶片放在六氯丁二烯中进行与上相似的反应,加热

处理,又可使胶片完全溶解。这是 CPD 可通过正、逆 Diels-Alder 反应形成热可逆性共价键交联的又一个实证。

Kennedy 等又研究了处于通爪聚异丁烯(PIB)端基的甲硅烷 CPD 的二聚化反应,发现甲硅烷基可阻止 CPD 的二聚化,但是如果在甲硅烷基和 CPD 之间插入一个亚丙基,则处于端基的 CPD 就可顺利地发生 Diels-Alder 二聚化反应,使两个分子通过 DCP 偶联起来,实现了分子量的成倍增长。1988 年萨拉孟(Salamone)等发现用环戊二烯乙醇钠和双环戊二烯基乙醇钠分别取代聚(二氯磷氮烯, $-N=PCl_2-$) 上的氯,成功地合成了侧链含 CPD 的两类磷氮烯聚合物,通过加热-冷却循环、测定产物的溶解、熔化性能以及用差热分析(DSC)测定样品的吸热、放热峰和焓变,确定几乎 100% 的 CPD 侧基参与了 Diels-Alder 转化反应。这对证实和扩展 CPD \rightleftharpoons DCP Diels-Alder 热可逆性反应,制取耐热的共价键交联 TPE 是一项重大的延伸和扩展。

最近本实验室通过活性基因反应法、共聚法和直接用 CPD 或 DCP 的衍生物作交联剂成功地制得了热可逆共价交联的氯醇橡胶、丁基橡胶和丙烯酸酯橡胶。

应当指出,活性氯与 Me_2AlCPD 之间的烷基-卤素交换反应,和以 CPD- $(CH_2)_n-ONa$ 与含卤素化合物或羧基进行醚化和酯化,在有机化学中是一类比较普遍而又易进行的反应。因此可以预期,利用 CPD \rightleftharpoons DCP 或类似地热可逆性转化来制取共价键交联的 TPE,以及对这类反应的理论研究,必将获得迅速发展和广泛应用。

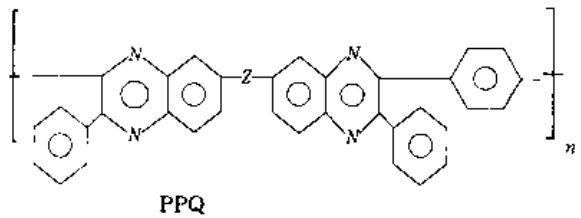
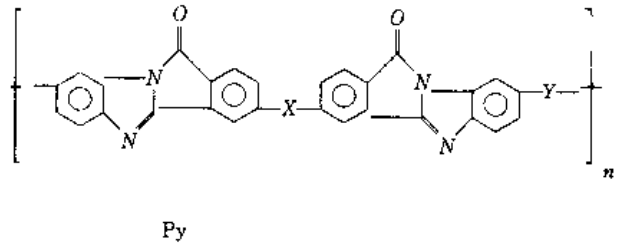
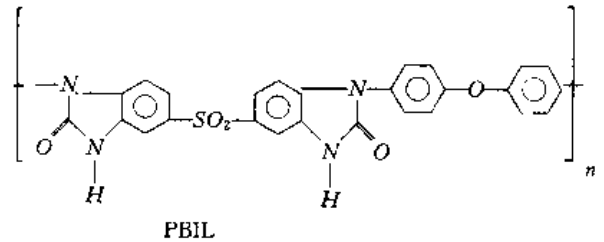
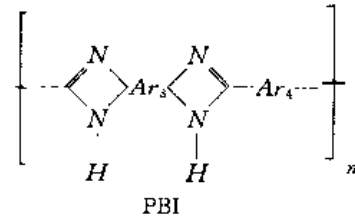
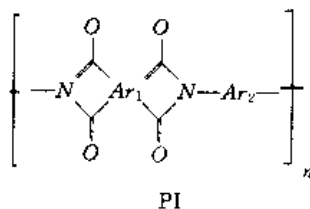
参考文献

- 1 Takeshita Y, et al. USP, 3 826 760, 1974
- 2 Kennedy J P, et al. J Polyme Sci, Polym Chem Ed, 1979, 17: 2055~2070
- 3 Kennedy J P, et al. J Polyme Sci, Polym Chem Ed, 1983, 21: 3551
- 4 Salamone J C, et al. J Polyme Sci, Polym Chem Ed, 1988, 26: 2923
- 5 焦书科. 合成橡胶工业, 1995, 18(6): 321

(北京化工大学博士生导师焦书科教授撰)

芳杂环高分子分离膜 aromatic heterocyclic polymer separation membranes 芳杂环高分子是分子主链中含有芳杂并环或杂环的高聚物。环状结构增加了高分子链的刚性,使分子的自由转动增加了困难;同时刚性链结构排列比较规整,玻璃化温度比较高;而且分子密度大,因此比强度相应增高,这就是芳杂环高分子具有优良耐热性、耐化学介质性和力学性能的主要原因,成膜性能好,又很致密,这类高聚物可作为结构材料和功能材料,它们是 60 年代宇航、航空、电子和微电子技术的需要而发展起来的,70 年代以来,作为分离膜,特别是在高温环境或其它特殊条件下使用的分离膜研究及应用正方兴未艾,是工业中必不可少的膜材料。70 年代初开始用作分离膜的主要芳杂环高分子有聚酰亚胺(PI)、聚苯并咪唑(PBI)、聚苯并咪唑酮(PBIL)、聚苯并咪唑吡咯酮(Py)和聚苯基喹啉(PPQ)等等。

其结构式如下:

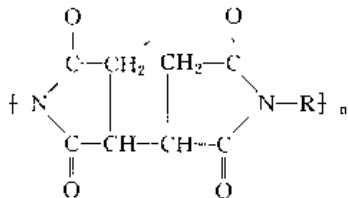


它们作为反渗透膜、超滤膜以及气体分离膜已有许多报道。

反渗透膜 1972 年莫德尔(F. S. Model)等报导了 PBI 用作反渗透膜从海水中脱盐。1974 年拜罗纳福(L. R. Belohlav)研究了 PBI 平面膜和中空纤维,与醋酸纤维素(CA)相比较,21℃ 时两者的通量相似,但 90℃ 时 PBI 仍有较高的分离性,而 CA 已失去分离作用。斯兰尼斯(Celanese)公司已研制成卷式组件,最高使用温度可达 90℃。1977 年戈尔德史密斯(R. A. Goldsmith)等指出 PBIL 不对称膜可作为海水脱盐膜。日本帝人公司研制的 PBIL 膜是近年来被国际公认的具有优良耐热及耐化学介质的膜材料之一,这种膜适用于 H^+ 浓度在 $10^{-12} \sim 3.16 \times 10^{-2} mol/L$ 范围内。在这种 H^+ 浓度值处理过的膜,其脱盐率变化不大;对于有机物, PBIL 膜也有良好的分离性,如对尿素的分离率就优于芳族聚酰胺酰肼和 CA 膜。PBIL 膜的管式组件业已商品化,还研制了卷式组件,已用于碱性或酸性废水、电镀废水处理等。用磺酸基或羧基对其进行改性,可使膜具有更高的透水速度。

聚酰亚胺在芳杂环高分子中具有优良的综合性能,所有单体比较简单、合成方便、成本低;合成方法多渠道等优点,对其作为分离膜的研究也最多。1977 年斯特拉思曼(H. Strathmann)等报导了 PI 反渗透膜的研制,随后已商品化。此外 1970 年斯科特(H. Scott)等研制了 Py 反渗透膜,其脱盐率及水通量均比对称 CA 膜优越得多,这种膜耐有机溶剂、抗氧化、耐水解及抗微生物的侵袭,可用来浓缩废液或净化水。

超滤膜 由于PI有优越的特性,而且还具有较好的透过速度和分离率。因此引起了普遍重视,PI超滤膜组件已投入市场,1984年岩间昭武等合成了如下结构的PI:



R为 , ,再采用不同的无机盐添加剂制成超滤膜分离效果良好。通常使用的超滤膜,如CA、聚丙烯酸、聚砒、聚碳酸酯等,以及商品化的有机高分子超滤膜只限于在50~60℃使用,而且使用期短。可是现实又需要分离膜在高温下操作,例如在太空消毒条件下,水的回收再利用、工业上热处理水的回收再循环使用等都需要耐热性好的超滤膜以适应高温操作的要求。1978年拉斯德罗(W. T. Wrasidlo)等研究了PPQ和PPT(聚苯基不对称三嗪)超滤膜的分离性,从水中分离葡萄糖、核酸酶或从磷酸盐中分离血红蛋白、牛血清白蛋白、核糖核酸等等。最近研制的含醚键的PPQ超滤膜对牛血清白蛋白和 α -糜蛋白酶的截留率分别为98%、93%以上,还发现制膜工艺对分离性能有很大影响。值得注意的是,这种PPQ超滤膜和市售的聚砒超滤膜相比,经沸水处理100h后,PPQ对牛血清白蛋白的截留率保持不变,而聚砒膜35h后已破裂;还研究了PPQ均质膜对有机液体混合物的渗透汽化分离性能。

气体分离膜 芳杂环高分子作为气体分离膜的研制,70年代初就引起人们极大的兴趣,正如1985年R. T. Chern指出:主链刚性,具备足够高的内聚能密度,堆积较疏松的玻璃态高聚物,很可能既有高的对气体透过系数(P),又有好的选择分离系数(α),PI和Py就是这样的高聚物。由于它们是致密的,宜于从气体中富集氟或氯,气体去湿,石油深采技术中CO₂与CH₄的分离,一碳化学中H₂与CO的分离等。气体分离膜有均质膜、非对称膜和复合膜的区别。对均质膜而言,其透过分离机制为溶解-扩散机制。1972年坎德莱斯F. P. M. Candless等研究了Kapton-H膜(Ar₁ = , Ar₂ =)对H₂与CO的分离性能,其分子链间隙和CA相似,是致密的,P_{H₂}只有2 Barrers(1 Barrer = 10⁻¹⁰cm³(STP)cm/cm²·s·cmHg),这表明在30℃时,H₂在膜中扩散较慢,随着温度的升高,P_{H₂}增大,但H₂和CO的选择分离系数 $\alpha_{H_2/CO}$ 降低,这是由于分子链运动加剧,致使分子直径大的CO也较易透过。从此人们开展了一系列研究,围绕分子结构与分离性能的关系,以期寻找P和 α 值同时得以提高的芳杂环高分子气体分离膜。在理论研究中,开展了分子结构对透气性能的影响;温度变化、添加剂、单体异构体或取代基团的引入对透气性能的影响。从分子密度、分子链间距(d-Spacing)、内聚能密度、自由体积、自由体积分数、摩尔自由体积和内聚能等因素考察了芳杂环高分子气体分离膜的功能,取得了一些规律性的进展。1986年赛克斯(C. F. Syker)指出,一般来说,酮酞型的PI(Ar₁ =)比均酞型PI(Ar₁ =)的P值低,同一种Ar₁,而不同的Ar₂的PI,链结构中有对位二苯醚键的其P值高于同位二苯醚键的,这是由于后者的空间阻碍大所致。为了提高PI的P和 α 值,1988年考罗斯(W. J. Koros)等报道了氟酞型的PI(Ar₁ =)因其空间阻碍作用,限制了两个苯环的自由旋转,且两个苯环并非共平面,使分子聚集程度小,自由体积大,致使其P值不仅比联酞型PI(Ar₁ =)的好,而且也优于均酞型PI。

1990年,斯特尔恩(S. A. Stern)等研究了含硅PI对H₂、O₂、N₂、

CO₂及CH₄透气性的关系,当Ar₁ =

时,由于-Si(CH₃)₂-基团引入主链中,使高聚物的自由体积增大,其P值较高,而 α 一般较小。近年来从联苯二酞型出发的PI,是日本宇部兴产开发的UBE氢分离用PI膜,成功地用于H₂和水蒸汽的分离,已有中空纤维装置,这种装置的特点是:对H₂和其它气体的分离度高。技术开发有:从化学反应过程产生的气体中分离氢;从石油加工废气、焦炉气或合成氨释放气中回收氢。其另一特点是在150℃下长期连续使用,而且还耐化学介质。至于杜邦(Du Pont)公司的PI中空纤维器件是从四甲基二苯醚二胺出发的。

聚苯并咪唑吡咯酮,Py是主链至少有四个稠环的刚性链高聚物,其分子链结构较PI更为刚性,是一种耐热性能优异的阶梯型高聚物,也是高分子中耐辐射最佳的高分子材料。它们是由芳族四酸二酞和芳族四胺缩聚制备的。作为气体分离膜的研究报导则始于1987年卢凤才等工作,所合成的Py制成的均质膜是一种对气体分子分离性优异的耐高温高分子分离膜,继而又合成了新型含氟、含硅的Py。根据膜结构的不同测定了对H₂、O₂、N₂、CO₂和CH₄的分离性,有的膜30℃时其P_{H₂}74.4Barrers, α_{H_2/N_2} 52;90℃时P_{H₂}136; α_{H_2/N_2} 46。有的膜30℃时其P_{H₂}8.18, α_{H_2/N_2} 264;90℃时P_{H₂}19.2, α_{H_2/N_2} 104。1991年活克(D. R. B. Walker)等报导了含氟Py对He、O₂、N₂、CO及CH₄的分离性。以上的分离性能在芳杂环高分子中是不多见的,有潜在的应用前景。

由于芳杂环高分子的优良性能,而分子结构与分离性能的关系又十分密切,寻找P与 α 值同时得以提高的芳杂环高分子,也就是研究分子结构与分离性能的关系仍然是研究的基点,今后除合成新的芳杂环高分子制备分离膜外,还可通过在现有高分子中添加小分子、共混、共聚等方法来改善膜的分离性能。对气体分离膜而言,例如可添加对某种气体有溶解性的物质以提高膜的分离性。此外,各国都在研究制膜方法,如工业上已经出现了两项重大突破:即超薄层分离技术的应用以及中空纤维的问世,从而显著地提高了透气速率,芳杂环高分子应进一步采用这种制膜方法,就其特点应用于高温环境、耐有机溶剂、或要求特殊强度材料的工业中,以推动膜科学与膜技术的发展。业已实现的例子有:UBE氢分离膜组件,其作用是聚砒分离膜组件所不及的;又如PBI反渗透膜,其特点适用于90℃,而在同样条件下,CA膜已无分离性能;至于PI超滤膜的使用温度已超过CA、聚丙烯酸、聚砒、聚碳酸酯、聚酰胺等膜。由此可见,芳杂环高分子膜在新的工业发展中已发挥作用,并且将会起更大的作用。

参考文献

- 1 Model F S, Jones H J, Proust F. Reverse osmosis and synthetic membranes, National Research Council of Canada, 1977
- 2 Goldsmith R L, Wechsler B A, Hara S. Desalination, 1977, 22:311~333
- 3 Sarbolouki M N. J Appl Polym Sci, 1984, 29(3):743~753
- 4 Stern S A, Mi Y, Yamamoto H. J Polym Sci, part B: Polym. Phys., 1989, 27(9):1887~1909
- 5 Stern S A, Vaidyanathan R. J Membrane Sci, 1990, 49(1):1~14
- 6 Kneifel K, Peinemann K V. J Membrane Sci, 1992, 65(3):295~307
- 7 卢凤才,张驰,陈观文. 高分子学报, 1987, (5):342~346
- 8 邢兰敏,白路娜,卢凤才. 高分子学报, 1992, (4):478~483
- 9 Gao X S, Tan Z S, Lu F C. J Membrane Sci, 1994, 88:37~45
(中国科学院化学研究所博士生导师卢凤才教授撰)

原位复合材料 in situ composites 起增强作用的组份在

与基体聚合物混合过程中就地产生微纤结构的过程称原位复合,所得材料称原位复合材料。原位复合是热塑性聚合物增强的一种新途径。

原位复合方法的前身是原位结晶,原位聚合和分子复合。1968年雅克(J. R. Jacques)等采用原位结晶的方法制备具各向异性的聚合物基复合材料,即在较高温度下将一种可溶于基体聚合物的低分子有机物与聚合物共混,于较低温度下有机物就地析出并结晶。由于这些晶体间只有相当弱的范德瓦作用力,以后的实验也都证明用这种方法没有希望得到高性能的材料。1981年吉斯(G. Kiss)等采用原位聚合方法,先将单体(三氧烷)在基体聚合物中结晶化,再通过 γ 射线辐照使单体进行固相聚合成为高取向的纤状聚合物。由于固相聚合反应程度低,且生成的聚合物取向度不高,也不能获得预期性能的复合材料。鲍格门(R. H. Baughman)等曾采用三键共轭的单体进行原位聚合获得成功,得到具有负的热膨胀系数的纤状伸展链单晶,并具有很高的强度和模量。但此类单体品种有限,原位聚合制备增强复合材料的方法和应用仍不能得以扩展。70年代末高柳素夫和海尔明尼亚克等分别将溶致性LCP(液晶聚合物)与柔性的聚合物进行溶液共混,再加入非溶剂使它们共沉淀,随后加工成型制得“分子复合材料”。这种复合的分散水平并非达到分子级的程度。但这一方法为原位复合材料制备奠定了基础。1987年吉斯首次提出用“原位复合材料”这一术语来表示在复合过程中就地形成各向异性增强因素的这一类聚合物复合材料,并进行了一系列热致性LCP和热塑性塑料熔融共混物形态和力学性能的研究,得出原位复合加工容易,所得材料强度和模量等性能提高显著的结论,至此以后,原位复合材料概念被世人接受,并特指为LCP与热塑性聚合物的共混物。

原位复合材料改进了传统宏观纤维增强树脂混合和加工工艺的弱点,可采用聚合物共混所用的方法,通过挤出、注塑和模压等连续成型。其共混体摩擦性低,设备磨损小,耗能低,对环境污染小。因LCP本身具较低熔融粘度,并且对基体聚合物分子可产生诱导效应,LCP与基体混合后粘度常比原基体的粘度低得多,使某些难以加工的高粘性、高玻璃化温度的聚合物易于加工,LCP起了润滑剂的作用,改善了聚合物的流动性。此外,LCP在某些结晶性的聚合物中具有成核剂的作用,加快聚合物的结晶速率。LCP除了增强基体的力学性能外,还赋予基体聚合物一些特殊性能,如耐燃性、耐辐射性、耐化学腐蚀性等,提高了通用型聚合物的应用范围。

达到高性能原位复合材料的关键有两方面:(1)LCP与基体聚合物有良好的界面粘接力。界面相互作用与两聚合物的相容性有关,研究方法和结论与通常的聚合物相似。(2)材料中必须有起增强的微纤结构。微纤的形成与加工方式、体系粘度密切相关。许多实验表明,加工时拉伸力有利于LCP形成微纤结构,因此,采用挤出、注塑成型对形成微纤是有效的,而剪切力使LCP趋于形成颗粒,所以模压对形成微纤效果差。1991年库里奇希姆(V. G. Kulichikhin)等研究以聚砜为基体的原位复合材料的流变性,获得共混体粘度与LCP含量、加工温度、剪切速率均有关,而粘度的变化影响到微纤形态和含量的变化。同年比雷(D. Beery)研究以聚碳酸酯、聚对苯二甲酸乙二酯、尼龙等为基体的原位复合材料得到,微纤形成与粘度的关系是:LCP的粘度低于基体聚合物的粘度时,LCP在基体中易于伸展取向形成微纤,反之则形成颗粒,而两者的粘度取决于加工过程的剪切速率和温度。另外,研究表明原位复合材料微纤结构和含量在皮层和芯层存在着差异,由此引起材料内外层的力学性能不均一。西格蒙(A. Siegmann)研究聚酰胺与LCP的共混物,将完整的挤出材料作力学性能测试后,再除去皮层,将芯层材料进行同样的力学性能测试,发现后者的强度和模量低于前者,而伸长率高于前者,降低或增加的数值与共混组份含量相关。这种现象被认为是喷泉流动(fountain flow)而使皮层有较高的定向作用。但有些原位复合的体系却表现为芯层微纤结构的浓度高于皮层,如威斯(R. A. Weiss)和丛

(T. Chung)等所研究的LCP和聚苯乙烯体系,LCP和尼龙12体系。这被归结为一种迁移现象,无论哪一种研究结论均表明,原位复合材料的皮芯结构形态是不一样的,力学性能也是不同的。这与加工成型工艺条件有很大的关系。

已被用于原位复合材料研究的热塑性聚物品种有通用塑料、工程塑料及特种塑料,包括聚丙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚碳酸酯、聚对苯二甲酸乙二酯、聚对苯二甲酸丁二酯、聚砜、聚醚砜、聚苯醚、聚苯硫醚、聚酰胺、聚醚酰亚胺、聚醚醚酮等。用于作原位复合材料中增强组份的商品LCP有Vectra, Ultrax, Xydar, LC-2000 XTG以及一些实验室制备的LCP。由于原位复合的基本加工条件是LCP和基体聚合物的熔融温度必须相匹配,而商品化LCP熔融温度均较高,因此获良好原位复合材料的品种是有限的。实验室制备获得增强效果明显的体系有LCP与聚对苯二甲酸乙二酯、聚碳酸酯、聚砜、聚醚砜等共混物,其强度和模量均比原基体聚合物提高2~3倍,甚至可达4~5倍。如吉斯将LCP聚醚酰胺与聚醚砜以30:70共混,所得材料的拉伸模量接近聚醚砜模量的5倍,拉伸强度为聚醚砜的2倍多,而断裂伸长却降低数倍。目前虽然在实验室有诸多的研究品种和效果显著的实例,但加工工艺和LCP价格昂贵的限制使原位复合材料的工业化实施存在困难,因此现阶段尚无商品化报导。尽管如此,就材料本身的发展趋势和高技术要求新型综合性能的材料以及特殊用途的材料而言,原位复合是一种有效的新途径,同时也是开发LCP应用的重要领域。随着LCP价格的降低和加工工艺的深入研究,可望在短期内实现工业化。

根据原位复合材料的特点和发展趋势,今后的研究方向是理论上要解决LCP在基体聚合物中成纤的规律和机理,技术上要解决加工工艺过程的控制,这两者相辅相成。探索合适的工艺过程助其微纤结构形成,以保证基体聚合物获得增强,为工业化生产提供基础数据,从实验室走向工业化。另一方面,在品种上要寻找同价格低廉的通用型聚合物加工温度相匹配的LCP,以获性能提高而成本较低的合金材料,扩大通用聚合物的高层次应用。同时进一步深入LCP与特种工程塑料的原位复合,制备高性能的合金材料,以满足特殊的应用和高技术的需要。

参考文献

- 1 Kiss G. Polym Eng Sci, 1987, 27: 410~423
- 2 Isayev A I, et al. Polym Composites, 1987, 8: 158~175
- 3 Kulichikhin V G, et al. J Appl Polym Sci, 1991, 42: 363
- 4 Beery D, et al. Polym Eng Sci, 1991, 31: 451~466
- 5 Mehta Atul, et al. Poly Eng Sci, 1991, 31: 971~980
- 6 施建良, 陈建定, 吴叙勤. 高分子材料科学与工程, 1993, 9(1): 1~7

(华东理工大学陈建定教授, 李大芬硕士撰; 吴叙勤审)

物理化学 化学物理学

轻元素稳定同位素分离 separation of stable isotopes of light elements 在已发现的2000多种同位素中,稳定同位素约275个。同一元素的同位素具有极相似的核外部性质,稳定同位素因无放射性危害,故作为示踪原子在医、药、农、生物、环境科学及生命科学等研究工作中起着极为重要的作用;利用同位素的核内性质差异,制造单一核素材料,在原子能工程、原子核结构研究以及制备医用放射性核素等方面都发挥了独特的作用。

稳定同位素均存在于天然物质中,所谓稳定同位素生产,实指分离操作。其方法分为:(1)利用质量差别的有电磁和离心法;(2)利用分子动力学性质差异的有扩散、热扩散、电迁移、分子蒸馏等方法;(3)利用热力学性质差别的有蒸馏、化学交换、萃取、色层、吸收、吸附、离子交换及结晶等方法;(4)利用化学反应动力学差别的有电解、光化学(包括激光分离)法;(5)利用生物的光合、

氧化和发酵等效应的差异,称生物分离法。实践证明第(1)、(2)类适用于原子量在50以上的重元素同位素分离,第(3)、(4)类尤其是化学交换和蒸馏法适用于轻元素同位素分离。

1881年布特列洛夫(Бутлеров)首先对元素原子量不成整数提出疑问,认为这些原子量可能是若干个整数原子量的平均值。1898年居里夫妇发现了放射性,随后人们果然发现了十种元素相同而原子量不同的原子。1910年索地(Soddy)将它们定名为同位素,希腊文的意思是(在周期表中)占同一位置。1912年汤姆逊(Thomson)对除去CO₂后的空气作低压放电,利用电磁原理发现空气中除了普通的质数为20的氖原子外,还有质量数相当于22的原子,从而证实了²²Ne同位素的存在。1919年阿斯顿(Aston)用上述原理制成了第1台质谱仪,又发现了氦、氖、氩、氪等元素的40多种稳定同位素,同时也为以后的电磁分离法奠定了基础。由于当时还不了解它们的用途,未进行实质性的分离研究,这段时间被称为同位素分离史的萌芽阶段。

1930年凯逊(Keesom)在-248.4℃低温下蒸馏液氮,实现了²²Ne与²⁰Ne的分离。1932年尤里(Urey)等在-252.6℃下蒸发液氢,首次发现并分离出氘,还进行了同位素热力学理论研究,为以后的蒸馏分离法提供了理论依据。从此同位素分离研究工作得到了蓬勃发展,两年内发表的论文超过了过去20年的总数,同位素分离进入了新阶段。1933年路易斯(Lewis)利用减容电解技术从20L水中得到浓度高于99%的重水,虽只有0.1g但却是世界上第1批重水。1933~1935年尤里等又创立了同位素化学交换反应平衡常数的计算理论,两年后人们利用该法分离出⁶Li、¹³C、¹⁵N和³⁴S等,并发现该法很适合于轻元素稳定同位素的大量分离。从1930~1941的10年中虽发明了许多物理化学分离方法,但产量少,只能供同位素本身的基础研究用,这段时间称为同位素分离史上的探索阶段。

第二次世界大战爆发后,由于军事原子能工业的发展,迫切需要大量浓缩的²³⁵U、重水和¹⁰B等,建起了大规模生产厂,促使同位素分离进入第3阶段即工业阶段。战后美苏展开了激烈的核竞争,又大大推动了氘、氦和⁶Li的工业生产。苏联在1946~1949年,美国在1951~1953年相继建起H₂S/H₂O双温交换的重水工厂,该法又称GS过程,使重水生产成本得到了大幅度的下降。

加拿大沿着重水堆路线发展核能工业,已使核电成本降至火电的一半。主要原因之一就是GS过程作了重大改进,可归纳为:(1)采用更合理的2~3级级联流程。(2)利用冷却塔底部的15~20块塔板作气-液直接换热的减湿段,取代体积庞大的间壁换热器,减少造价提高热回收率。(3)发明重叠式交换塔,减少滞留量缩短平衡时间;便于控制塔流量又降低塔阻力。(4)开发在线质谱分析技术,便于计算机控制,优化过程。(5)使用γ扫描技术监测塔内运转情况。(6)加强三废治理改善操作环境,减少H₂S损失,使H₂S收率达到99.5%以上。1960年后加拿大建成的格拉斯哥、霍克斯布和布鲁斯3座重水厂,总生产能力为每年4000t,已成为世界重水产量最多技术先进的国家。

二次大战后许多国家致力于和平利用原子能事业,若干用途广泛的稳定同位素也得到大力开发。1946年勃立威尔(Brewer)用离子迁移法分离³⁹K、⁴¹K及³⁵Cl、³⁷Cl。1954年克莱姆(Klemm)用熔融盐离子迁移法分离⁶Li、⁷Li。而锂盐液-液离心萃取以及锂盐与冠醚或穴醚萃取被认为是富集⁶Li的有前途方法。¹⁰B的分离经历了BF₃低温精馏、BF₃/二乙醚低压交换蒸馏以及BF₃/苯甲醚化学交换等方法,后来开发的BF₃/SO₂·BF₃低温交换被认为是最有希望的方法。

与有机生命体有关的碳、氮、氧、硫四元素稳定同位素对人类极为重要,它们的分离技术得到了不断发展,产量增加,成本下降。

1950年美国用既毒又贵的氟化物体系化学交换生产浓度达到60%的¹³C,以后又用耗电量大(2万度/克¹³C)的热扩散,成本高达每克¹³C3850美元,最后采用-195℃的CO低温精馏作为工

业化方法。1979年建成的工厂,生产能力约20千克¹³C/年,称COLA装置,全塔高200多米,大部分置于地洞中,是世界上最高的精馏塔。它的直接产品¹³C浓度仅达82%,经1200℃转化后再进高浓辅助塔——COLITA塔,最终浓缩至99%。它担负着世界绝大部分¹³C生产任务。后来发展的CO₂/二正丁胺/三乙胺(或辛烷)化学交换法,常温常压操作,被认为是直接生产高浓¹³C最有前途的方法。1990年杨国华等报导的年产100g¹³C浓度达90%~99%的研究结果,是该法实现工业规模生产的首例报导。

分离¹⁵N最有效方法是泰勒(Taylor)等于1950年开发的NO/HNO₂化学交换法。规模最大的生产装置是德国莱比锡中心研究所与比特罗菲林德化学联合企业合作建造的,生产能力为10kg¹⁵N/年,从1975年起运转至今。日、以、英、法和中国也有小型生产装置。美国则采用NO低温精馏(-152℃)生产¹⁵N,副产¹⁷O和¹⁸O。第1套装置生产能力为4kg¹⁵N/年,浓度≥99%以及30%浓度的¹⁷O每年0.46kg,浓度99%以上的¹⁸O每年2.6kg。1976年又建成一套年产16kg¹⁵N,1.8kg¹⁷O和10kg¹⁸O的NO精馏工厂。

水精馏是生产¹⁸O历史最悠久的方法,1960年前均用上法,至今仍占优势。以色列威尔兹曼研究所的装置,年产¹⁸O浓度达98%的D₂¹⁸O6kg,¹⁷O浓度为25%的H₂¹⁷O1.5kg,¹⁸O产量约占世界的50%。德国的卡尔斯路埃原子核研究中心年产1kg¹⁸O,浓度为99.8%,1974年开始生产99%高浓的¹⁷O。美、苏、日、瑞士和中国也有此类生产装置。

为了获得³⁴S,首先研究了SO₂/HSO₃⁻化学交换,20年的研究表明此体系不理想。也研究过CS₂液体热扩散法,还未取得满意结果。

对于稀有气体同位素的分离,用过热扩散和低温精馏技术,因需要量不大,故仍是热扩散占优势。

受控热核反应作为一种崭新巨大的能源,有着无穷的生命力,氘是其最重要的燃料。地球上的水其中所含的氘足以供给人类使用200亿年,因此不断改进氘分离技术仍是轻元素稳定同位素分离工作的研究重点。作为重水生产最主要方法的GS过程,仍有不少潜力可挖,如双温双压流程,可增大总分离系数,增产10%~15%;热原料流程有可能增产6%;内部换热流程可减少管道投资并减轻腐蚀。气-液相H₂O/H₂双温交换过程因分离系数大,无毒不腐蚀,理论能耗低,不受氘源限制,近来又研制出效果较好的防水膜铂催化剂,可用于固定床交换塔,故仍被认为是具有前途的方法,值得深入研究。激光分离氘为大幅度降低重水成本带来了希望,初步估算表明它的投资仅为GS过程的1/5~1/10,生产成本仅为1/6。研制高功率高效率精确调频的激光器,寻找效果好实用的分离体系,开发受激同位素的分离和氘再生的好方法,以及相关的问题研究,都是激光法实现工业化的重大研究课题。对于其他轻元素稳定同位素而言,不断改进化学交换及蒸馏等技术,开发激光分离研究也会有着深远的意义。

参考文献

- 1 Бахтале А. В. Разделение стабильных изотопов, 1977, 3~20
- 2 Lockhart I M. Isotopes: Essential Chemistry and Applications, 1979, 6~54
- 3 Matwiyoff N A. Stable isotope production - a distillation process, Los Alamos Science, 1983, 8: 64~65
- 4 杨国华,等. 稳定同位素分离. 北京: 原子能出版社, 1989
- 5 杨国华,等. 同位素, 1990, 3(4): 210~215

(化学工业部上海化工研究院杨国华高级工程师撰)

络合催化 coordination catalysis 以可溶性过渡金属络合物为催化剂的均相催化。是催化学科中的一个年轻分支。它的活性中心是过渡金属络合物分子,其组成均一,结构清楚,便于研究修饰。过渡金属价电子结构使其具有多样的键合能力和多种氧化价态并易于互变。不同的配位数和各种对称性的配位场,使之既能使反应物配位活化,发生反应,又能容纳非参与配体。选择不

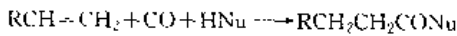
间价态和配位数的过渡金属,使用具有不同给电子能力和几何形状的非参与配体,通过电子因素和几何因素修饰催化剂的组成和结构,调变其活性和选择性,可实现在分子水平上设计催化剂。

应用于化工生产过程,络合催化的优点是反应条件温和、选择性高,不仅有化学、区域、立体选择性,而且手性催化剂的出现使之具有对映体选择性。络合催化主要缺点是催化剂与产物分离,回收重复使用较难。解决的途径一是使均相催化剂固载化,二是尽可能提高催化剂活性,使之在产物中残留量极少,无论从经济上或是产品质量上考虑都无需分离回收。

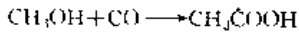
络合催化工业应用始于20世纪40年代初期的羰基化反应,50年代出现了齐格勒-纳塔(Ziegler-Natta)烯烃聚合催化剂,乙烯制乙醛的Wacker过程,60年代出现了Wilkinson加氢催化剂,烯烃齐聚等,至今已有几十个络合催化过程用于化工生产,几类主要反应如下。

氢甲酰化反应:1938年Roelen研究Fischer-Tropsch合成中意外地发现了这一反应,并很快用于工业生产,称为OXO过程: $RCH=CH_2 + CO + H_2 \rightarrow RCH_2CH_2CHO + RCH(Me)CHO$ 由烯烃制醛及其衍生物是可溶性过渡金属催化剂用于工业生产中产量最大的。早期应用 $Co_2(CO)_8$ 催化剂,反应条件下生成活性组份 $CoH(CO)_4$,产物正构醇异构醛比为1,后来出现膦配体修饰的钴催化剂 $CoH(CO)_3(PR_3)_2$,使反应压力下降,正异构产物比增至8,该催化剂也是活泼的加氢催化剂,所以主要产物是醇。铑催化剂 $RhH(CO)_2(PR_3)_2$ 可使操作压力、温度进一步下降,产物正异构比升至10以上。但铑价格远高于钴,大部分公司仍用钴催化剂。

羰基化反应:1940年Reppe发现钨族过渡金属能催化一系列CO插入反应,称为Reppe反应。



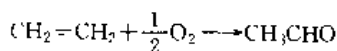
式中亲核试剂HNu可为 H_2O 、 HOR 、 $HNHR$,产物分别为酸、酯、酰胺,如HNu为 H_2 则产物为醇,即氢甲酰化反应,以缺为底物得不饱和酸、酯等。Monsanto和BASF公司分别以 Rh 、 Co 羰基碘化物为催化剂,由甲醇加CO制乙酸,是此反应最主要应用:



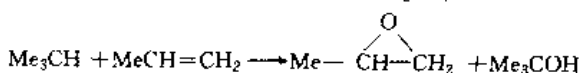
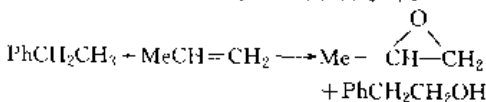
烯烃齐聚反应: $NiH_2(PR_3)_2 - AlR_3$ 是非常活泼的齐聚催化剂,Esso和Shell等公司用此过程由乙烯制长链烯烃,然后转化为洗涤剂、增塑剂、润滑油。零价镍可催化丁二烯环三聚,得到反、反,反-环十二碳三烯,如有膦配体则得到含四、六、八元环的二聚体。零价钯络合物催化了二烯齐聚,在质子化和非质子化溶剂中得到不同的链状齐聚物。

聚合反应:著名的Ziegler-Natta催化剂 $TiCl_4$ (或 $TiCl_3$)- AlR_nCl_{3-n} 已广泛地应用于高密度聚乙烯和聚丙烯等,成为最重要的一种络合催化剂。在反应过程中催化剂并非可溶的,但在基础研究和工业应用中一直被列入络合催化范畴。由于催化剂活性和立体选择性的提高,不需要溶剂,没有后处理的丙烯液相本体聚合已被广泛采用。

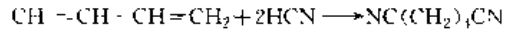
氧化反应:氧化是一大类反应。以 $PdCl_2$ 和 $CuCl_2$ 为催化剂,水、 HCl 存在下,乙烯氧化制乙醛的Wacker过程,是络合催化氧化重要工业应用。



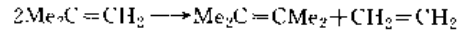
钴或锰催化下对二甲苯氧化制对苯二甲酸,是涤纶树脂的原料。铜或钼催化氧化环己烷制己二酸,是锦纶树脂的原料。在钨、钨、钽等催化剂作用下,丙烯与乙苯或异丁烷共氧化,可制得环氧丙烷,两种醇脱水后得到有用的苯乙烯和异丁烯。



氢氯化反应:DuPont公司以膦配体零价镍催化丁二烯氢氯化制己二腈,进而制己二酸或己二胺,生产锦纶-66。



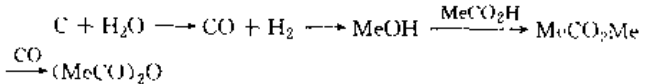
歧化反应:以双键断裂,按统计分布重新组合成产物为特征的烯烃歧化反应是最年轻的反应。1960年左右出现后很快被用于丙烯歧化制乙烯、丁烯的所谓三烯过程。随着丙烯用途的开发,此过程已失去经济价值,以钨、钨、钽等络合物为催化剂进行异丁烯歧化,蒸出乙烯,余者用于提高汽油辛烷值。



氯化反应:这是一类研究得最多的反应。第1个高活性加氢催化剂Wilkinson催化剂 $RhCl(PPh_3)_3$ 问世以来,已制备出许多有效的氯化催化剂,如 $RhH(CO)(PPh_3)_3$ 、 $RuCl_2(PPh_3)_3$ 、 $CoH(CN)_2$ 等,分别用于有机相、水相、炔烃、烯烃加氢、选择性加氢,以及 $C=O$ 、 $C=N$ 、芳烃加氢反应。

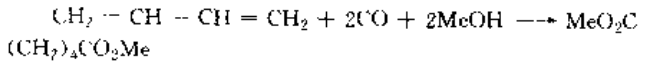
70年代初期,由于石油价格上涨,迫使各国考虑将化工原料从石油转为煤,兴起了以煤为碳源,以费-托过程为主的碳-1化学研究,促成80年代有机化工中出现了一些新的络合催化体系,主要是下述几个基于CO插入的反应:

乙酸甲酯制醋酸酐:Eastman公司第1个将生产乙酸酐原料由石油转向煤,1983年建试验厂,总过程是:

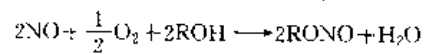
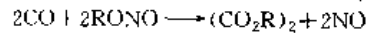


铑-膦络合物催化的最后一步产率达99%。

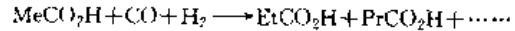
丁二烯氯化制己二酸酯:BASF公司开发的羰基钨催化丁二烯合成己二酸二甲酯,总反应为



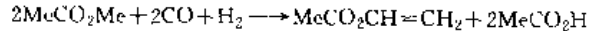
草酸酯:Ubc和Union Carbide公司开发零价钯催化CO偶联生产草酸酯,进而合成乙二醇,产率95%,NO可循环使用。



乙酸制多碳酸:Texaco公司开发的碘化物促进的钨催化剂,使乙酸转化为同系物。此过程转化率,尤其选择性尚需提高。



乙酸甲酯制醋酸乙酯:Halco公司开发的 $RhCl_3 - MeI$ 催化的该过程总反应如下,关键性一步选择性达90%。



多碳酸:Rhone-Poulenc公司应用水溶性膦配体钨代替钯催化剂进行氢甲酰化生产丁醛,产物进入有机相,便于与水相催化剂分离,直链醛达95%。

1980年以来世界化工研究开发重点逐渐转向精细化工。多数精细化工产品分子结构复杂,性能多样,产量少而价值高,以精细化工为主要应用背景的络合催化研究亦日趋活跃。其在整个催化工业中所占比例不断上升,它的巨大潜力已被人们所认识。过渡金属d轨道的高对称性可提供包括对映体选择性的高水平立体控制,使原本不能发生的反应顺利进行,并可选择更便宜的烯烃甚至CO作为原料,络合催化在精细化工,特别是合成具有生理活性的旋光性物质中必将大有可为。

络合催化的特点使其在整个催化学科中占有独特的地位。通过金属原子簇催化和均相催化剂固载化两个桥梁可将络合催化与多相催化相关联;通过模拟金属酶催化又可将络合催化与酶催化相关联。未来理想的催化体系将是既有均相催化那样结构清楚便于研究修饰的活性中心,又有酶催化那样高选择性和温和的反应条件,同时又有均相催化那样稳定性和高效率,便于分离再使用,成为具有三者优点的新的统一的催化学科与技术。

参考文献

- 1 Roelen O. German Patent, 849548
- 2 Reppe W. Liebigs Ann Chem, 1953, 1:582

- 3 Ziegler K, et al. *Angew Chem*, 1955, 67: 541
- 4 Natta G. *J Polymer Sci*, 1955, 16: 143
- 5 Smidt J, et al. *Angew Chem*, 1959, 71(5): 176
- 6 Bogdanovic B. *Adv Organomet Chem*, 1979, 17: 105
- 7 钱延龙, 廖世健编. 均相催化进展. 北京: 化学工业出版社, 1990
- 8 杨振云. 化工进展, 1991, (1): 1

(中国科学院大连化学物理研究所杨振云研究员撰)

配位化合物中配体间相互作用 intramolecular

ligand-ligand interaction in coordination compounds 在配位化学研究中, 长期以来集中注意于中心离子—配体之间的作用及其对配合物性质的影响。对配合物中已配位的配体之间的相互作用, 除本世纪初发现的“反位效应”已为广大化学工作者认识并有不少应用外, 未受到足够重视。20世纪60年代起, 随着若干微量金属离子的生理作用的发现, 特别是发现酶—金属—底物三元配合物形成是许多生物酶催化作用的重要步骤, 并且酶分子与底物分子的非配位部份的结构直接影响酶催化反应的效率, 促使无机化学家和生物无机化学家深入研究配合物中配体间的相互作用及其对配合物性质的影响。

在混合配体配合物中, 由于两种配体配位在同一金属离子上, 它们在空间上彼此靠近, 可能发生各种各样的相互作用。迄今为止, 已经确认的作用有: 形成氢键, 形成共价键(如发生缩合作用形成 Schiff 碱), 静电作用(如正负离子间的静电吸引), 配体间的疏水缔合作用, 空间位阻作用, 配体间通过中心离子的电子转移作用。其中, 在前四类作用中, 发生了配体间的直接的键合或缔合, 可统称为配体间的直接相互作用; 后两类作用则可称为配体间的间接相互作用, 在配体间没有直接的键合发生。早期发现的“反位效应”、“顺位效应”等亦应归属于间接相互作用。在上述6类作用中, 多数只能发生在少数特定组成和结构的配体之间, 有些则可能相当普遍地存在。通常在生物分子配体中, 除配位基团外, 往往还含有不参与配位的疏水基团(芳基或脂肪基)。因此, 它们在金属离子上配位后, 未配位的疏水基团之间发生疏水缔合作用将是相当普遍的现象, 并且必将对这些生物分子的配合物的性质产生重大影响。羧基酶 A 结构中的“疏水袋”在催化底物肽链 C—末端肽键水解中与底物肽链 C—末端的芳基间的疏水缔合在决定水解速率中的重要作用就是一个典型的例证。此外, 如果在配合物中, 中心离子具有一定数量的能量合适的 *d* 电子(例如中、后部过渡金属离子), 而配体之一具有电子受体(EPA)性质(例如联吡啶, 邻菲咯啉, 咪唑等芳香氮碱), 则配体间通过中心离子的电子转移作用也必将发生。因此, 在配合物中配体间相互作用的研究中, 配体间的疏水缔合作用和电子转移作用就成为近20年来的中心课题。

配体间的相互作用对配合物性质的影响是多方面的。首先, 是对配合物稳定性的影响。衡量混合配体配合物 MAB 的相对稳定性, 常用反应 $MA_2 + MB_2 \rightleftharpoons 2MAB$ 的平衡常数的对数 $\log X$ 或反应 $MA + MB \rightleftharpoons MAB + M$ 的平衡常数的对数 $\Delta \log K$ 。显然, $\log X$ 是 MAB 相对于二级配合物 MA_2 和 MB_2 的稳定性, 而 $\Delta \log K$ 是 MAB 相对于一级配合物 MA 和 MB 的稳定性。按照统计规律, $\log X$ 的统计期望值 $\log X^S = 0.6$, 而 $\Delta \log K$ 的统计期望值 $\Delta \log K^S$ 随配合物几何构型变化。当 A, B 均为二吡啶配体时, 正八面体构型为 -0.4, 平面构型为 -0.6, 正四面体构型为 -0.8, 变形八面体构型(如 Jahn-Teller 效应)为 -0.9。实验测定的 $\log X$ 或 $\Delta \log K$ 值高于统计值, 则被认为配合物具有附加的稳定性, 这通常来自配体间的相互作用。因此, 测定溶液中配合物的相对稳定性($\Delta \log K$ 或 $\log X$) 就成为研究配合物中配体间相互作用的探针。由于计算 $\log X$ 必须用到二级配合物 MA_2 和 MB_2 的稳定常数, 而对于 A, B 为大分子生物配体时往往不易测得, 故 $\Delta \log K$ 用得更多。

从60年代末起, H. Sigel 对混合配体配合物中配体间的电子

转移作用进行了系统的研究。发现 Mn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Cu^{2+} 等过渡金属离子与芳香氮碱形成的三元配合物中, *d* 电子反馈作用将受到另一配体性质的显著影响。表1给出一些 CuAB 型混配配合物的相对稳定性。

表1 CuAB 型混配配合物的相对稳定性

A	联吡啶			乙二胺		
	草酸根	甘氨酸根	乙二胺	草酸根	甘氨酸根	乙二胺
B						
$\Delta \log K$	+0.70	-0.35	-1.29	-0.79	-0.80	-1.26
$\log X$	4.90	3.50	1.10	0.94	1.03	0.31

从表中数据可见, 当第1配体为联吡啶时, 第2配体的配位原子对配合物稳定性影响十分显著。当其为 O^- 、 O^- 配位的草酸时, $\Delta \log K$ 成为正值, $\log X$ 值也很高, 大大超过统计期望值, 这显然是反常的, 说明存在着使混配配合物稳定化的特殊原因。当第2配体为 N, O^- 配位的甘氨酸时, $\Delta \log K$ 和 $\log X$ 值都明显下降, 但仍高于统计值。当第2配体为 N, N 配位的中性分子乙二胺时, 则 $\Delta \log K$ 和 $\log X$ 值最低, 甚至低于统计值。这个顺序显然是第2配体的配位原子给电子能力(Lewis 碱性)下降的顺序。 O^- 、 O^- 配体(如草酸)为强给电子配体, 它的配位, 使 Cu^{2+} 上电子密度显著增加, 有力地促进 *d* 电子向联吡啶的反馈, 形成所谓 π 电子反馈的协作效应, 大大增加了配合物的稳定性。 O^- 、N 配体的这种作用就大大下降, 电中性的 N, N 配体则基本上无此作用。于是提出了著名的含氮杂芳香碱的三元配合物中配体间的相互识别作用(discriminating effect), 即 N, N 配位的芳香氮碱优先选择 O^- 、 O^- 配位的分子为第二配体, N, O^- 配位分子次之, N, N 配体最差。表中数据还表明, 将联吡啶换为脂肪氮碱乙二胺时, 则上述识别作用基本消失, 混配配合物的稳定性趋于一致, 大致符合统计效应的规律。这从反面证明了识别作用确实来自 *d* 电子反馈作用的协作效应。这类配体间通过中心离子的电子转移作用已为配合物的电子光谱, 顺磁共振谱, CD 光谱等多种现代实验方法所证实。

配合物中配体间的疏水缔合作用是在1974年首次发现于铜(I)—联吡啶—三磷酸腺苷(ATP)三元配合物中。在这个配合物中, 由于 ATP 的嘌呤部份与联吡啶的芳环之间的疏水缔合(芳环堆砌)作用, 使配合物的稳定性大为增加。由于配体间的疏水缔合作用, 配合物可能以两种异构体存在, 即“开式”与“闭式”。其平衡常数 $K_f = [M(A)(B)]_a / [M(A)(B)]_c$ 为无因次常数, 可由 $\Delta \log K$ 值计算。进而可由 K_f 值计算平衡时闭式异构体所占百分数, 对缔合程度得到直观的理解。例如铜(I)—联吡啶—苯丙氨酸和铜(I)—邻菲咯啉—苯丙氨酸三元配合物, 通过 $\Delta \log K$ 的实验值, 算得 K_f 值分别为 2.02 和 2.80, 闭式异构体所占百分数分别达 67% 和 74%。

近年来已经成功地应用 NMR 谱、CT 光谱、CD 光谱等现代实验方法证明了配体间的疏水缔合作用。其中最简单易行也是最直接的实验证明是 1H NMR 技术。由于配体的疏水基团彼此靠近, 必然改变基团上质子所处的环境, 从而导致其 1H NMR 化学位移值的改变。已有许多实例表明通过 1H NMR 化学位移测量, 可靠地证明了配合物分子内配体间的疏水缔合作用。实验表明, 配体间的疏水缔合作用随配体所含疏水基团变大而增强, 并且有芳环—芳环 > 芳环—脂肪基 > 脂肪基—脂肪基缔合的变化规律。影响配体间疏水缔合的因素很多, 其中溶剂的影响十分有趣。实验表明, 在水溶液中加入适量有机溶剂, 有利于配体间的疏水缔合, 但过多则导致缔合下降。其原因尚不十分清楚, 有待进一步研究。配合物合成和 X 射线衍射研究表明, 在配合物晶体中也存在着分子内配体间的疏水缔合作用, 但与溶液中又有所不同。有关规律还有待研究。

参考文献

- 1 Walker F A, et al. *Inorg Chem*, 1972, 11: 2756~2763
- 2 Naumann, et al. *Eur J Biochem*, 1974, 41: 209~216
- 3 Sigel H. *Angew Chem, internat Edtn*, 1975, 14: 394~402

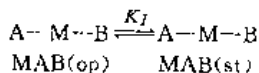
- 4 Ochiai E. *Bioinorganic Chemistry - An Introduction*, Boston: Allyn & Bacon, 1977, 380~383
- 5 Sigel H. *20th Conf Proc Coord Chem*, New York: Pergamon press, 1980, 27~45
- 6 Okawa H. *Coord Chem Revs.* 1988, 92: 1~28
- 7 Sigel H. *Pure, Appl Chem.* 1989, 61: 923~932
- 8 高恩君, 等. *科学通报*, 1991, 1630~1632

(辽宁大学刘祁涛教授撰)

配位体间的芳环堆积作用 aromatic-ring stacking

interactions between ligands 以往对配合物的研究,较多地注意配体中配位原子的性质及配体中取代基团对配位原子的影响,较少注意两个配体间的相互作用。70年代中期,随着生物配位化学的崛起,人们发现一个十分重要的现象,即在那些含有芳环配体的三元混配配合物中相当普遍地存在着配体间的芳环堆积作用,它有两个显著的特点,一是参与堆积作用的是属于配体中那些非配位基团部份;二是堆积作用能显著地增加配合物的稳定性。1974年,瑞士Basel大学的锡其尔(H. Sigel)首次报道[Cu(bpy)(ATP)]²⁺分子中的电荷迁移作用,认为该配合物中因bpy的一个吡啶环与ATP⁴⁻中的嘌呤环发生部分堆积,使其稳定常数logK从0.91增至6.96。ATP⁴⁻是生物体内代谢过程不可缺少的物质,因此配体间堆积现象便吸引着生物无机化学家们的浓厚兴趣。其中以H. Sigel和日本的雅马赫两学派工作最为系统,涉及到的金属有M²⁺(M=Cu, Zn, Co, Ni, Mn, Pd, Pt, Mg和Ca)。研究领域也迅速扩展到核苷酸、黄苷以及一系列氨基酸方面,有的共同药物作用联系起来,某些堆积配合物的单晶结构亦有研究。引起人们兴趣的是在许多氨基酸体系中还存在着烷基侧链与芳环二氮间的所谓“疏水堆积”作用。

配体发生堆积作用有严格条件的,当金属离子把配体A和B拉在自己周围并形成一定的空间结构后,A和B的非配位基团在空间条件容许下便有可能发生堆积,并存在着开放型和堆积型两种异构体间的平衡,如



K_I代表MAB(op)向MAB(st)转变的倾向,有的亦可用堆积型异构体百分数%st来表示。由于K_I直接测定很困难,故常需选定一种不存在或假设不发生堆积作用体系的配合物作为参考标准,于是便可用pH电位滴定法求得其余有堆积作用配合物的K_I和%st值。例如[Cu(phen)(CA)]⁺中当CA⁻为甲酸根或乙酸根时Cu(phen)(CA)₂就不会存在。芳环堆积作用的本质是一种电子效应,借助核磁共振氢谱的方法可以获得更为直观的信息,如Pd²⁺与一系列二肽和二胺形成的混配配合物中,由于芳环堆积产生的环流效应,使¹HNMR谱吸收峰发生了明显的高场位移,通过对化学位移Δδ值的计算可获得分子内堆积异构体的百分数。O. Yamauchi等对Pd(bpy)(tyr-glu)和Pd(en)(tyr-glu)两个配合物进行¹HNMR的比较研究,由于酪氨酸(tyr)上与OH相邻的C₃原子恰好位于和Pd²⁺配位的bpy中N原子上方,堆积作用使C₃上的H原子电荷在¹HNMR谱上明显地高场位移,而另一配合物中的乙二胺(en)因不存在芳环,就观察不到上述现象的产生。在作者研究的Pd²⁺-A(phen, bpy, trp)-UTP⁴⁻体系以及Pt(bpy)(en)(AMP)形成的四元混配配合物中同样存在着因堆积而导致氢谱高场位移的情况。电子光谱和CD光谱亦可用来研究堆积作用,但相对使用较少。

迄今已对配体间堆积现象得出一些重要的规律,主要表现在以下4个方面:(1)芳环的大小。配体间芳环的大小对堆积作用有决定性的影响,下表是几种Zn(Ⅰ)配合物的K_I和%st值,这种堆积顺序的变化,完全和参与堆积的芳环大小顺序相一致:

配合物	Zn(phen)(ATP)	Zn(bpy)(ATP)	Zn(bpy)(ITP)	Zn(bpy)(UTP)	Zn(trp)(ATP)
%st	≥95	55	48	~40	35
K _I	≥20	1.2	0.9	~0.7	0.5

Phen>bpy>trp和ATP>ITP>UTP。堆积作用有时还必须考虑参与堆积芳环的匹配性,例如Cu(Phen)(UTP)²⁺和Cu(bpy)(UTP)²⁺,前者有堆积异构体57%,后者为55%。如果把UTP⁴⁻换成ATP⁴⁻,则前者为92%,后者却仅为86%。产生这种差异的原因在于UTP⁴⁻中的嘧啶环较ATP⁴⁻中的嘌呤环为小,它能与较小的芳环(bpy中的吡啶环)发生较佳堆积,而较大的嘌呤环只可与较大的phen环才能匹配堆积。另外,芳环堆积还与配体结构有密切关系,在Cu²⁺-phen-PCA体系中(PCA为



当n=0~2时,其堆积度随n增大而增加(由21%增至49%),n=3~4时的堆积异构体分别降至28%和34%,这是因为phen与PCA上芳环堆积受着PCA的(-CH₂)_n链的调节,n值太小或太大,都会导致PCA芳环偏离与phen环的接触机会。(2)溶剂效应。目前研究的体系除水以外尚有乙醇和二噁烷溶剂,一般说来,有机溶剂的存在会促进分子中堆积异构体的形成,因为有机溶剂使溶液的极性降低,金属离子的水合作用减弱,从而增强配体对金属离子的亲合性。但当有机溶剂超过某一限度时,它们有可能将参与堆积的两个芳环分隔开来并使之单独溶剂化,此时金属离子水化层进一步变小,开式异构体形成几率增加,堆积异构体随之降低。H. Sigel等在对Cu²⁺、Zn²⁺-phen-PCA体系分别在水、乙醇和二噁烷溶剂中的研究充分证明了这一点。不过,溶剂效应对堆积作用的影响是比较复杂的,研究结果有时常有例外。(3)金属离子的作用。金属离子对配体间堆积作用十分重要,若金属离子在两个配体间起桥联作用,表明两个配体均已配位在其周围,将会可能提供堆积需要的有利空间,如Zn(phen)(PCA)⁻在80%(v/v)二噁烷中堆积异构体已占27%,而在Zn(phen)(BzOH)²⁺中由于Zn²⁺没有在两个配体phen与BzOH间架桥,其在上述体系中堆积异构体仅占0.1%。应当指出,金属离子的配位物几何构型对堆积作用有着重要的影响,在Cu²⁺和Zn²⁺与bpy和苯甲酸(Bz)及其衍生物形成的混配配合物Cu(Zn)(bpy)(Bz)⁻分子中,两种配合物的堆积型异构体几乎相等,前者为34%,后者为32%,但在苯甲酸的对应位上有甲基(MBz)或硝基(NBz)时,Zn²⁺的配合物中%st几无变化,而Cu²⁺配合物中却大幅度分别降到24%和15%,这主要是受着Cu²⁺的平面构型和Zn²⁺的四面体或八面体构型不同的立体因素支配的结果。这种情况在作者研究的Cu²⁺(Co²⁺、Ni²⁺)-phen-PCA体系中同样亦被清楚地观察到。(4)温度的影响。温度升高对堆积作用是不利的。这在Pd²⁺和一系列二肽与芳环二胺组成的混配配合物的稳定性随温度升高而降低的实验所证实,这里有两方面的原因,一是堆积作用的能量贡献较小,如芳环堆积时的自由能变化ΔG°≈-6kJ·mol⁻¹,即使像配合物Cu(phen)(HtrpOH)中的phen环与HtrpOH(5-羟基-L-色氨酸)中咪唑环间堆积的ΔG°是-12.7kJ·mol⁻¹。另一方面是与二肽分子中氨基酸的几何构象有关,随着温度的升高,氨基酸分子中与芳环二胺间的优势堆积构象与劣势堆积构象间的相互转化加速,这一现象的产生便直接导致配体间堆积作用的减弱。

配体间堆积是正常的自然现象,是生物分子自组织的重要基地,也是生物分子结构有序性的重要表现之一。迄今的研究虽然大部分还处于模拟阶段,并且在确定堆积度时选用开式异构体参考标准方面仍无精确的方法,常是要用多种方法联用加以比较。但金属离子(包括必需的和有害的)在生物体内的地位已经毋庸置疑,因此研究混配配合物分子内配体间的堆积作用,对于搞清金属离子在生物体内的作用机制、存在形态以及模拟配合物处于生物识别位置上的立体化学等无疑仍是十分重要。此外,配体间

的疏水堆积作用亦是一个重要问题,这方面的报道正在逐渐增多,其中蛋白质分子中的疏水堆积占有非常重要的地位,特别是氨基酸分子中烷基支链化程度对疏水堆积十分有利,有关这方面的研究需要继续深入。

参考文献

- 1 Mitchell P R, et al. *Helv Chim Acta*, 1979, 62: 1723~1735
- 2 Sigel H. *Stability, Coord Chem*, 1980, 20: 15~45
- 3 Yamauchi O, et al. *J Am Chem Soc*, 1985, 107: 5938~5945
- 4 Odani A, et al. *Inorg Chem*, 1986, 25: 62~69
- 5 龚钰秋,等. *科学通报*, 1990, 35: 915~918; 1991, 36: 1231~1233

(杭州大学龚钰秋教授撰)

碳立体化学 carbon stereochemistry

1984年美国 E. A. Rohlfing 等在激光气化的石墨蒸气中首次获得比较完整的碳原子簇的飞行时间质谱图(TOF),但试图通过有机合成的方法制备 C_n 分子的努力尚未奏效。TOF 图清楚地表明,在 $C_2 \sim C_{30}$ 范围内, C_n 分子以 n 为奇数时最为稳定($n=3, 7, 11, 15, 19, 23$),间隔为 4;而在 $C_{40} \sim C_{120}$ 范围内,仅出现核构型为偶数的 C_n 分子,且其丰度分布近似于以 C_{60} 为最稳定结构的高斯分布。此图发表不久,英国 H. W. Kroto 和美国 R. E. Smalley 等(1985)很快通过改变蒸发条件得到以 C_{60} 占绝对优势的 C_n 原子簇分布。其质谱图中, C_{60} 峰强是 C_{70} 的 10 倍,是相邻其它峰的 40 倍之多。为了解释 C_{60} 的高度稳定性, Kroto 等大胆地提出了著名的碳球假说,即 C_{60} 具有五元和六元碳环相间分布连接而成的空心球状结构。其后大量理论计算表明碳球假说是 C_{60} 结构的最合理描述,但人们一直未能从实验上制备出宏观量的稳定 C_{60} 样品。1990 年底,德国 W. Krätschmer 和美国 D. R. Huffman 等首次成功地从石墨放电产生的松烟中分离出主要含有 C_{60} (含少量 C_{70})的固体样品,并测定了其 X-射线和电子衍射光谱;与此同时, Kroto 领导的英国 Sussex 大学研究小组首次实现了 C_{60} 与 C_{70} 的色谱分离,并且测定了其纯样品的质谱、核磁、红外、紫外光谱。至此,人们制得了除网状的金刚石和层状的石墨之外的第 3 种形式碳——球状碳。各种制备条件和电离化技术已经证明,比较稳定的碳原子簇存在一个幻数序列: $C_{24}, C_{28}, C_{32}, C_{36}, C_{50}, C_{60}, C_{70}, C_{84}$ 等。其中, C_{60} 最稳定, C_{70} 次之, C_{50} 再次之。这些碳原子簇分子均具有由五元和六元碳环彼此相连构成的空心笼状结构,统称为富勒烯。 C_{60} 的发现开辟了碳化学研究的新领域。

C_n 分子的核构型由线状、环状($n < 20$)向球状以及单质碳由层状、网状向球状分子的密堆积的结构变化,反映了元素由单个原子 X,经过原子簇 X_n 的结构过渡,核构型逐渐向稳定单质的固体结构 X 变化的典型图象。

$C[2s^2 2p^2]$ 是周期表中第 4 主族的第 1 个元素。与本族其它元素相比,在成键性能方面具有明显特性。由于 $2s, 2p$ 轨道能量相近,原子易于形成 sp, sp^2 及 sp^3 杂化轨道,所剩余未饱和的 P 轨道也极易与相邻原子的 P 轨道形成离域性大 π 键。典型的例子是金刚石(sp^3)及石墨晶体(sp^2)中的成键。这些特性在 C_n 原子簇的几何构型和电子结构中也得到充分体现。 $C_2 \sim C_{20}$ 范围内的分子只在极端条件下的蒸气相中观察到。虽然已经得到部分分子的振动光谱,但对其结构研究还基本停留在量子力学计算水平上。当 n 为奇数时, C_n 分子的基态是单重态的多烯直线状分子,如 C_3 为: $C=C=C$; C_5 为: $C=C=C=C=C$ 等。显然, C 的 sp 杂化轨道和线状大 π 键的形成是维系其线性结构的根本因素。当 n 为偶数时, C_n 分子稳定基态是平面环状结构。这里正 n 边形已发生畸变, n 重轴消失, C_n 分子点群为 $D_{nh}(m=n/2)$, 以形成更有效的大 π 键。其中, C_4 为一双环结构(其菱形结构的短轴方向存在微弱双键,其余均为单环。从头计算还表明,线状 C_8, C_6 , 尤其是 C_4 也相当稳定,如线型 C_4 ($C=C=C$) 与环状 C_4 几乎是等能量异构体。在这些分子的电子结构中,形成了覆盖于环上下两方的环形离域大 π 键。当 n 大于等于 10 时, C_n 倾向于

形成环状结构,预计较稳定的核构型为 C_{11}, C_{15}, C_{19} 及 C_{23} 等,满足 $4m-1$ 规则。值得指出的是,由于光离化过程的影响, TOF 的质谱分布可能有所不同。另外在 $n=30 \sim 40$ 范围内, C_n 质谱峰消失。这一区域被称为碳原子簇的“死寂区”,其结构机制尚不清楚。

大的碳原子簇 $C_n(n > 40)$ 中, C_{60} 是典型代表。可以对碳原子簇 C_n 进行结构分区: $C_2 \sim C_3$, 稳定线性结构区, sp 杂化; $C_{10} \sim C_{28}$, 稳定单环结构区, sp^2 杂化; 其间, $C_4 \sim C_9$ 实现两区间的结构过渡。可以想见,随着 n 的增大,单环的柔性增加,环上原子偏离对称面,沿环分布的大 π 键遭到破坏,体系稳定性降低,因而出现 $C_{30} \sim C_{40}$ 范围内 C_n 结构上的“死寂区”。进一步增加碳原子数,因环波曲折而偏离环平面的碳原子之间,甚至是环对面的碳原子之间,可能直接成键,以至闭合成笼,这样不仅增加了 σ 键(sp^2 杂化)的数目,而且原来沿环分布的大 π 键可以进一步贯通,形成覆盖笼状结构内外两侧的球面(或畸变的球面)离域 π 键。显然,这一超共轭键的稳定化作用将随碳球骨架的张力分布而变化。表面曲率均一、张力最小的空心笼状结构将产生最稳定的 C_n 分子,它便是 C_{60} 。据此,可以划出 C_n 结构分布的第 3 区。 $C_{40} \sim C_{100}$, 稳定碳球结构区, sp^2 。在此之前的 $C_{30} \sim C_{40}$ 则是单环结构与球状结构的过渡。

C_{60} 是在石墨蒸气中经氦气(100 Torr)冷聚形成的。在六元稠环的相互融合并最后形成闭合的球形的过程中,必须引进五元环,这是由欧拉网闭合条件决定的。

$$12 = 3n_3 + 2n_4 + 1n_5 + 0n_6 - 1n_7 - 2n_8 \dots \quad (1)$$

其中, n_k 为 k 元环的数目。对碳来说,六元环最稳定,五元环次之,四元和七元则极不稳定。所以(1)式中,六元的数目不受限制,而 12 个五元环是必需的。

空心笼状结构的稳定存在有赖于沿其表面分布的离域 π 键的形式。在球面曲率越大的地方,由于相邻碳原子的 p^2 轨道的不平行度增大, π 键越弱,甚至出现阻断,导致碳球破裂。

构造碳球系列的一般原则可以总结如下:碳球表面只由五元环和六元环组成;闭壳层电子结构原则;芳香性原则;表面张力对称分布原则;五元环尽可能不相邻原则;欧拉网闭合条件原则(1),即最少含有 12 个五元环,六元环数目不受限制。 C_{60} 是唯一能够满足所有这些条件、对称性最高(I_h),且所有碳原子上等价的 C_n 分子,它也是能够满足成键要求和美学标准的最经济分子。 C_{60} 具有 20 个六元环, 12 个五元环,只要在足球球面的 12 个黑色五边形的顶点上各放置一个碳原子,便是 C_{60} 的形象。在 C_{60} 表面上有两种 C-C 键长:由相邻六元环共用的键略短 $r_{6-6} = 1.40 \times 10^{-10} \text{m}$, 而由五元和六元环共用键略长 $r_{6-5} = 1.46 \times 10^{-10} \text{m}$ (Jr. W. Wilson 等, 1990)。

根据以上原则,可以构造整个碳球系列: $C_{24}, C_{28}, C_{32}, C_{50}, C_{60}, C_{70}, C_{84}$ 等。其中 C_{60} 最稳定,是第 1 个可以避免两上五元环相连的最小分子; C_{70} 在轴向略有拉长,状似橄榄球,性质次稳定; C_{50} 再次之,它是可以避免 3 个五元环相连的最小分子; C_{28} 是第一个可以避免 4 个五元环相连的最小分子; C_{20} 为最小可能存在的中空笼分子。

C_{60} 及 C_{70} 的实验室制备及光谱性质测定(红外,紫外,核磁,质谱, X-射线,中子射线及电子射线衍射和电镜扫描谱)均在 1990 年底 1991 年初完成。虽然未能制得长程有序的 C_{60} 分子单晶,因而无法精确测定其键长、键角等分子结构参数,但碳球假设已确信无疑,而且电镜扫描亦已直接拍摄了球状 C_{60} 和椭球 C_{70} 的照片(R. J. Wilson, 1990)。 C_{60} 和 C_{70} 键参数的最终测定只是一个时间问题。从研究进展来看, C_{60} 和 C_{70} 在有机、无机合成及材料科学的许多领域,已展现出令人鼓舞的前景。

六方密堆积(hcp, $a = 10.02 \times 10^{-10} \text{m}, c = 16.36 \times 10^{-10} \text{m}$), 面心立方(fcc, $a = 14.198 \times 10^{-10} \text{m}$) 和更普遍存在的多晶 C_{60} 是 C_{60} 的稳定存在形式。在前两种密度堆积形式中, C_{60} 与最邻近 C_{60} 的球心间距约为 $10.02 \times 10^{-10} \text{m}$ 。理论估计 C_{60} 球的分子直径约为 $7.1 \times 10^{-10} \text{m}$ (H. W. Kroto 等, 1985) 因而在晶体中 C_{60} 球面间的距离约为 $3.1 \times 10^{-10} \text{m}$, 比石墨层间距 $3.35 \times 10^{-10} \text{m}$ 略短。

理论计算表明,面心立方 C_{60} 晶体的单分子结合能仅为约 1.6eV,可见 C_{60} 分子晶体依赖于微弱的范德华力维系。S. Susumu 等 (1991) 的研究还表明, fcc C_{60} 是一种能隙为 1.5eV 的半导体材料。

C_{60} 的空腔 ($R \approx 7.1 \times 10^{-10} \text{m}$) 可以容纳各种金属离子,形成包合物 $C_{60}M^{n+}$, 其表面上高度未饱和的碳原子又可能与各种有机或无机基团连接,形成结构特殊,功能奇异的分子。因而 C_{60} 可以像分子反应器一样,充当化学合成的底物。据报道, $C_{60}K^+$, $C_{60}Li^+$ 及 $C_{60}C_2^{2+}$ 等均已合成出来,并具有较好的超导性能;北京大学已合成了 T_c 值为 37K 的 $C_{60}S_n$ 超导体。美国加州大学伯克利分校则已测定了 $C_{60}O_4 \cdot (4-M_2C-C_5H_4N)_2$ 加合物的单晶结构,其中, O_4 的两个氧原子加成到 C_{60} 表面的两个毗邻碳原子 C_1, C_2 上,但 C_1-C_2 键并未断裂;碳球上其余 C-C 键的平均键长为 $r_{6-6} = 1.388 \times 10^{-10} \text{m}$, $r_{6-5} = 1.421 \times 10^{-10} \text{m}$ 。另外, $C_{60}F_{60}$ 氟化物可能是一种高温润滑剂 (H. W. Kuoto 等, 1985)。

C_{60} 可以被氢化为 $C_{60}H_{36}$ 及 $C_{60}H_{18}$, 后者又可以可逆地被氧化为 C_{60} ; 循环伏安法研究表明, C_{60} 可高度可逆地转化为 C_{60}^- 和 C_{60}^{2-} 。这一反应可能为新一代可逆电池提供原料。

C_{60} 本身是在模拟星际空间的碳化学反应的过程中发现的。据悉, C_{60} 或其衍生物广泛存在于富碳星附近; 另外, 碳球还可能存在于人类生活的各个角落, 因为碳球与火源伴生。

(山西运城高等专科学校李恩殿教授撰)

化学振荡反应 chemical oscillating reaction 在某些化学反应中, 一些反应参数 (如物质的浓度, 反应热效应等) 随时间呈现周期性的变化, 这种反应称为化学振荡反应。研究化学振荡反应, 不仅可以深化化学动力学的研究, 还可为非平衡态热力学及耗散结构理论提供实验依据, 而且还有助于探索复杂的生物振荡现象, 如生物钟, 新陈代谢, 呼吸等, 同时在实际应用, 如表面张力的测定, 模拟生物体内复杂的代谢循环反应及某些疾病的临床检测等方面均具有重要意义。

1873 年就发现化学振荡现象。但由于受到当时实验条件的限制, 尤其是受经典热力学的束缚, 这类现象一直未能引起重视。直到 1959 年, 苏联别洛索夫 (B. P. Belousov) 在实验室首次完成第 1 个均相化学振荡反应实验后, 才引起了人们的重视。60 年代, 普里戈津 (I. Prigogine) 等人提出了非平衡态热力学及耗散结构理论, 为化学振荡反应的研究提供了热力学依据, 从此该领域研究得到迅速发展, 已形成了一个新兴的学科, 每年都有上百篇有关这方面的论文发表。中国的研究工作起步较晚, 1978 年, 胡家传的“化学振荡”一文为中国的首例报导, 目前, 国内对化学振荡反应的研究也正在蓬勃展开。

化学振荡反应的研究, 主要分为两大部分, 一是化学振荡器的设计及振荡现象的描述; 二是化学振荡反应机理的研究。

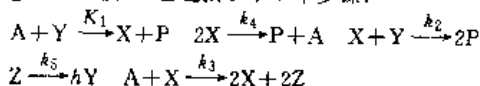
要研究并利用化学振荡反应, 首先必须要设计出化学振荡器, 即可以发生振荡反应的体系。目前已发现了数百种化学振荡器。化学振荡器有多种分类方法, 如按反应器的不同可分为间歇釜振荡器和流动振荡器。按照氧化剂的不同, 可分为以下 5 类: (1) 以溴酸盐为氧化剂的化学振荡器: 在这种振荡器中, 一些有机物在酸性介质中被溴酸盐氧化时, 可产生化学振荡反应, 习惯上称为 B-Z (Belousov-Zhabotinsky) 振荡器。(2) 以碘酸盐为氧化剂的化学振荡器: 在这种振荡器中, 一些有机物在酸性介质中被碘酸盐和过氧化氢氧化时, 可产生化学振荡反应, 习惯上称为 B-R (Briggs-Rauscher) 振荡器。(3) 以亚氯酸盐为氧化剂的化学振荡器: 在这种振荡器中, 一些有机物或无机物在酸性介质中被亚氯酸盐氧化时, 可产生振荡反应。(4) 以高锰酸盐为氧化剂的化学振荡器: 在这种振荡器中, 一些有机物或无机物在酸性介质中被高锰酸盐氧化时, 可产生振荡反应。(5) 其他类型的化学振荡器: 近年来陆续发现, 一些有机物或无机物在酸性介质中被 IO_4^- , O_2 , $S_2O_8^{2-}$ 或 $Cr_2O_7^{2-}$ 等氧化时, 均可产生振荡反应。

B-Z 振荡器及 B-R 振荡器既可以在间歇釜中产生振荡反应, 又可以在连续流动搅拌反应器 (CSTR) 中产生振荡反应, 但后面几种类型的振荡器均只能在 CSTR 中才能发生振荡反应。

在上述振荡器中, 目前研究最完整的是 B-Z 振荡器, 已发现了大量振荡体系, 它又可以分为: (1) 经典 B-Z 振荡器: 在酸性介质中, 一些易溴代的有机物 (如丙二酸) 在一种金属离子 (常见的是铈离子, 锰离子等) 催化下, 被溴酸盐氧化时, 产生的化学振荡反应; (2) 非催化 B-Z 振荡器: 不需金属离子催化, 就可发生振荡反应的 B-Z 振荡器; (3) 双催化 B-Z 振荡器: 需二种金属离子同时作用才能产生振荡反应的 B-Z 振荡器; (4) 耦合 B-Z 振荡器: 需二种有机物构成混和底物才能发生化学振荡反应的 B-Z 振荡器。其中一种有机物系易氧化但难溴代, 在振荡反应中作还原剂, 另一种有机物系易溴代但难氧化, 在振荡反应中作溴代剂, 它也可以用惰气流 (如 N_2) 代替。

化学振荡现象非常复杂, 种类繁多, 同一个振荡体系, 如果采取不同的研究方法, 可得不同的振荡现象, 一般可以分为以下几种类型: (1) 均相化学振荡: 当反应体系均匀搅拌, 此时所观察到的振荡现象是整体的周期性变化, 如溶液颜色的周期性变化, 这种现象通常可以用铂电极或离子选择性电极和离子活度计, 采用合适的参比电极 (如硫酸亚汞电极) 测定电势 (E) 随时间 (t) 的变化进行观察, 由函数记录仪记录的 E-t 曲线称为振荡波形, 根据振荡波形的不同, 又可分为简单振荡, 连续振荡, 双周期振荡, 复杂振荡以及混乱振荡等。(2) 空间振荡: 当反应体系静止放置, 并加入某种颜色指示剂 (如铁与邻菲罗啉的络离子), 所观察到的振荡现象为一系彩色波纹, 称为化学波, 在一维空间, 化学波以一定速度呈柱状向外扩展, 在二维空间, 化学波成环状向外扩展, 形成各种同心圆状花纹, 一定条件下也可形成螺旋状的花纹。这种振荡现象可通过在各个规定时间间隔内拍摄照片, 进行观察与研究。(3) 界面振荡: 这种振荡器的主要组成是两种互不相溶的液相 (如水和硝基苯), 在水相中加入表面活性剂 (如十六烷基三甲基溴化铵) 及其他添加物, 在有机相中, 加入有机电解质 (如苦味酸), 当两相接触形成界面后, 可发生界面振荡。这种振荡现象可通过二支插入离界面两侧 3mm 左右的铂电极 (或银-氯化银电极) 联接离子活度计测定电势 (E) 随时间 (t) 的变化进行观察, 用函数记录仪记录 E-t 曲线可获得界面振荡波形图。

在化学振荡反应机理的研究方面, 因化学振荡反应非常复杂, 所以研究其反应机理极为困难, 至今尚未有完美的反应机理。1972 年, 诺伊斯 (R. M. Noyes) 等人在总结了一系列丙二酸振荡反应实验的基础上, 提出了较为成功的反应机理, 称为 FKN 机理, 对上述振荡现象作了较为成功的解释, 在此以后, 又逐渐提出了其他一些体系的振荡反应机理, 但这些机理都相当复杂 (至少含 11 步基元反应步骤), 无法进行数值模拟, 而且, 随着振荡器数目的不断增多, 迫切需要一既简单又普遍适合的数学模型, 历史上也提出了多种数学模型, 其中, 最著名的是俄勒冈 (Oregonator) 模型, 它包括以下 5 个步骤:



对于 B-Z 振荡器, $A = BrO_3^-$, $X = HBrO_2$, $P = HOBr$, $Y = Br^-$, Z 为氧化态的金属离子, h 为待定因子, 引进合适的速率常数, 对上述模型作数值模拟, 可以得出双稳态及振荡波形。实验及数值模拟证明, 该模型不仅适合于绝大多数 B-Z 振荡器, 而且, 稍作修改后, 也可适合其他类型的振荡器, 被公认为化学振荡反应的一般机理。

然而数值模拟结果的正确与否, 只能作为验证机理正确与否的必要条件, 但不是充分条件, 要完整描述反应机理, 还需确定各反应中间体及测定基元反应速率常数, 俄勒冈模型虽成功地解释了许多振荡现象, 但仍存在一定的局限性, 新的振荡现象 (如化学波, 界面振荡, 电化学振荡等) 又迫切需要产生新的振荡机理, 因此, 化学振荡反应的机理还需进一步完善和发展, 最近又提出了

一些新的振荡机理(如 Br_2 -水解控制模型等)。

化学振荡反应研究经历了萌芽期、孕育期两个阶段,目前正在迅速发展阶段,研究新趋势主要表现在:(1)新的化学振荡器的设计,并逐步用理论方法指导这一工作;(2)化学振荡反应机理的研究,采用电子自旋共振光谱研究振荡反应的中间体(如自由基),解释复杂振荡反应(如连续振荡反应及混沌态等),对原有振荡机理进行修改,提出新的数学模型;(3)探索化学振荡与生物振荡的内在联系,用化学振荡模型解释复杂的生物振荡现象;(4)开拓化学振荡器的应用,已发现用强制振荡可大大提高反应产率和选择性,最近李和兴等把化学振荡器应用于临床检测,取得了令人满意的效果。

参考文献

- 1 Belousov B P, Shornik Referatov po Radiatsine Medgiz, Moscow, 1958, 145
- 2 Field R J, et al. J Am Chem Soc, J Am, Chem Soc, 1972, 94, 8649
- 3 Briggs T S, et al. J. Chem Educ, 1973, 50, 496
- 4 Epstein I R, et al. Sci Am, 1983, 248, 3, 112
- 5 Troy W C. Oscillations and Travelling Waves in Chemical Systems, 1985, 146~148
- 6 Field R J. Oscillations and Travelling Waves in Chemical Systems, 1985, 55~93
- 7 Christopher J D, et al. Newly Designed Permanganate - Reductant Chemical Oscillators, 1991, 113(20), 7484
- 8 李和兴,等.化学学报, 1991, 49, 451
- 9 邱志新,等.化学研究和应用, 1992, 4(1), 103

(上海师范大学李和兴副教授撰;邱志新审)

化学反应体系的随机热力学

stochastic thermodynamics of chemical reaction systems 随机热力学是介于宏观非平衡态热力学与非平衡统计之间的中介学科,是中观层次上的非平衡态统计理论。以局域平衡假定为经典的非平衡热力学充分考虑了非平衡态力与流的效应,在相当大的程度上反映了非平衡态的热力学特征。但是从平衡态向非平衡态的转变还伴随着分布函数的蜕变,对理想化学反应体系分布函数将由 Poisson 型向 Gauss 型、非 Gauss 型,甚至多峰型分布转变;而局域平衡假定则认为 Gibbs 公式在高平衡态不远的非平衡态仍然成立,相当于认定在非平衡态 Poisson 分布仍得以保持,从而掩盖了与分布函数非 Poisson 化相关的一切非平衡效应,成为经典非平衡热力学(或局域平衡热力学)难以普适的先天障碍。随机热力学彻底摒弃了局域平衡假定,充分地同时考虑了非平衡态力与流及非平衡态分布函数非 Poisson 化的热力学效应,成为一种更为彻底地反映一切非平衡效应的热力学理论体系,尤以化学反应体系的随机热力学发展最为完整。研究由涨落引起的热力学量变化最早可追溯到 20 世纪初, Einstein 1903 年所提出的著名公式,首次在平衡态涨落分布与涨落引起的熵变之间架起了桥梁。60 年代 I. Prigogine, G. Nicolis 及 A. Babloyantz 等进一步致力于寻求适当势函数,把 Einstein 理论推广至非平衡定态,但除线性化学反应体系外一切努力皆归于失败,表明以 Gibbs 关系为基础的热力学量与非平衡涨落之间难于建立联系。于是,70 年代伊始,不少学者便转而致力于以随机态变量为基础,直接把热力学量作为分布函数之泛函,彻底放弃与平衡态对应的 Gibbs 公式,去开拓热力学的随机量度(Stochastic Measure),充分揭示涨落在非平衡态热力学中的作用,最终导致了随机热力学这门新兴学科的诞生。在这一发展进程中最有代表性的是 F. Schlogl, C. W. Gardiner 及 J. Schnakenberg 等人的工作。

随机热力学的理论基础是马尔可夫过程理论,按照引入随机熵的方式及建立随机熵平衡方程(即演化平衡方程,下同。)所依据的分布函数随时间演化方程的不同,目前已建立多种随机热力学理论体系,比较活跃的分支是:遵从 Master 方程系统的随机热

力学;以随机位(又称广义熵或 Σ 泛函)为基础的随机热力学;遵从 Fokker-Planck 方程系统的随机热力学;以及遵从 Langevin 方程系统的随机热力学等,其中尤以前 3 个分支发展得最为成熟,最具有代表性。

遵从 Master 方程系统的随机热力学 对化学反应-扩散体系等其中之过程可模拟为生灭过程、自由行走过程或其它非连续马尔可夫过程的体系,其状态分布函数随时间的演化遵从 Master 方程。以此为基础已建立这类系统随机熵之平衡方程;分出了随机熵产生及随机熵流,它们都以特定的形式关涉到体系状态分布函数与沿马尔可夫链的转移概率。对理想化学反应-扩散体系已经普遍证明,对 Poisson 分布(平衡态及线性反应体系定态)随机熵产生还原为 Gibbs 熵产生,完全等价于局域平衡热力学。但是,当分布函数非 Poisson 化时,随机熵产生则偏离于 Gibbs 熵产生,其附加部分为非 Poisson 涨落的贡献,称为涨落熵产生,它既决定于分布非 Poisson 化的程度,也决定于演化机制非线性的程度。这正是局域平衡热力学所遗漏,而在随机热力学中占有重要地位的随机热力学量。在这一基础上已建立很完整的适用于 Gauss 分布的非平衡态热力学随机理论,不但成功地将 Prigogine 所提出的普适性演化判据及最小熵产生原理推广到马尔可夫过程的范畴,而且进一步论证了在线性非平衡区非 Poisson 涨落对定态稳定性的双重强化效应:降低位谷,并加快从扰动态返回定态的速度。但是,在这一理论框架中,Glansdorff-Prigogine 稳定性判据的随机推广未能得到满意的解决。

以随机位为基础的随机热力学 随机热力学这一分支的理论核心,是假定联系热力学量涨落与分布函数的 Einstein 公式在非平衡定态的适用性,从而使 Gibbs 熵的概念得以延拓。这一理论框架同样扬弃了以 Poisson 分布为基础的局域平衡假定,但目前仍局限于 Gauss 分布的范畴。这一分支在发展非平衡态热力学随机理论的主线索方面,圆满地解决了 Glansdorff-Prigogine 稳定性判据的随机推广,找出了与 Gibbs 超熵产生相对应的随机量-随机超熵产生速度。这一随机热力学理论体系很快被用于化学反应-扩散系统中观层次上的非平衡统计问题研究,已创立了较完整的化学热力学随机理论,与 Gibbs 热力学之间存在较紧密的对应关系。现在采用的表述体系仍为随机位或广义熵概念与 Master 方程理论框架的结合,但这一理论体系在展示非 Poisson 涨落的热力学效应方面,目前稍逊色于前一随机热力学分支。

遵从 Fokker-Planck 方程系统的随机热力学 对连续马尔可夫过程(如激光系统中进行的过程),其分布函数的演化遵从 Fokker-Planck 方程,前面两类中观层次上的非平衡热力学理论便不能使用。实际上,从 70 年代开始就有学者致力于遵从 Fokker-Planck 方程系统的随机热力学的开拓工作。最早期的理论体系是以 Schlogl 随机熵(相对于定态的信息熵)的概念为基础拓展的。创立了完整的随机熵平衡方程及随机熵产生平衡方程。这一随机热力学理论体系也完全排除了局域平衡假定的前提,但熵产生及超熵产生等核心量都是以态空间中的源项的形式引入的。因此,这些量与 Gibbs 热力学量的对应关系留于形式,实质上的联系尚未加以透彻的论述。虽然如此,这一随机热力学理论体系已被初步用于激光系统稳定性的研究,成为一种有探索价值的中观稳定性分析方法。与此同时,还进一步借助 Fokker-Planck 方程的变分性质把遵从此演化方程系统之热力学性质纳入了统计力学框架(Onsager 及 Prigogine 型的变分原理),并用于布朗运动及激光研究,显示出应用价值。

随机热力学作为非平衡态热力学的一种有希望的发展方向,作为中观层次上的非平衡统计理论,正处在以多种形式蓬勃发展的中其方兴未艾之势不但孕含在上述较成熟的变革性理论成果之中,还体现在探索性成果累累的极其活跃的发展前沿,现在已初步证明,遵从 Fokker-Planck 方程系统的随机熵产生有希望成为偏离细致平衡的中观不可逆性的量度。同时,对于受 Master 方程控制的化学反应体系,借助扰动按分布参数分离法及 Kramers-Moyal 展开法已初步证明,随机熵相应于对最可几路

径偏离的偏超量之时间导数与体系对外部扰动的响应性直接相关。该演变速率等价于偏超随机熵产生,并与根据随机位方法提出的随机熵产生速度等效。对 Poisson 分布,该量表现为 Gibbs 超熵产生的等价量。局域平衡假定失效后,化学反应体系的宏观稳定性即决定于这个新的随机量。至于以随机位为基础的随机热力学分支,通过引入非平衡化学势已开始全面渗入物理化学的各个领域。它正在成功地取代原有以平衡态统计及平衡态热力学为基础的各种物理化学理论系统,积极推动着非平衡系统物理化学的建立,显示了随机热力学理论方兴未艾的发展势头和蓬勃的生命力。

参考文献

- 1 Schnakenberg J. Rev Mod Phys. 1976, 48, 571
- 2 Keizer J. (a) J Chem Phys. 1976, 65, 4431; (b) Acc Chem Res. 1979, 12, 243; (c) J Chem Phys. 1985, 82, 2715
- 3 Hasegawa H. Prog Theor Phys. 1977, 57(5):1523
- 4 Luo J. Vanden Broeck C. Nicolis G. Z Phys. 1984, B56:165
- 5 Luo J. Ph D dissertation Université Libre ed Brxelles, 1984
- 6 Mou C, Luo J, Nicolis G. J Chem Phys 1986, 84(12):7011
- 7 Luo J. CJCU, 1990, 6(4):360
- 8 罗久里,李琳丽.非平衡统计物理研究进展.成都:四川大学出版社,1993.186~189

(四川大学博士生导师罗久里教授撰)

热化学动力学 thermochemical kinetics 物理化学中的一个分支。“热化学动力学”一词,最早来源于1968年美国本森(S. W. Benson)的一本书名。这本书总结了热化学和化学动力学的大量研究成果,并提出了使反应动力学现代化的许多新思想。因此这本书对热化学、化学动力学、物理有机化学、计算化学和化学数据库的发展产生了很大影响。

在做化学实验之前,许多化学家都希望事先知道该拟定反应的速度与产率、最佳温度、压力与溶剂条件。热化学动力学就是以它们为研究目的,力图阐明各种反应物种(原子、分子、自由基和离子),在不同温度与压力下的气相、液相和固相反应的热力学数据(焓、生成热、比热)与动力学参数(A因子、活化能)联系,用于预测大量未知物,未知反应,未知性质。包括反应机理分析,基元反应的实验测量与热力学平衡测量,共同构成了热化学动力学的实验基础。统计热力学、量子力学的从头计算与化学键理论等都为热化学动力学提供了理论方法。所以,热化学动力学理论被认为是理论思想的松散集合。下面简单介绍热化学动力学理论中的几项重大进展和实际应用。

热力学参数的估算 这个课题长期受到重视。主要原因:一是化合物的数量多达600万种以上,人们不可能逐个测量;二是纯样品的制备往往非常困难。30多年前,本森等人提出了原子团加和方案。这一方案比较简单和直观,几乎适用全部有机和有机金属化合物,温度范围从室温到1200°C。原子团加和方案已被美国国家标准局计算机程序化。利用这一软件,可以很快预测热化学参数。过去,原子团参数值只能纯经验确定。现在,一部分原子团参数值已经能用半经验公式计算。这对于有机金属化学和超导研究很有价值。

化学键离解能的预测 化学键离解能是化学科学中最基本的能量参数,因为任何化学反应都包含化学键的断裂或生成,化学能的释放或吸收。自从发现自由基与链反应机理以及离子反应机理以来,化学键的均裂与异裂的离解能是人们理解与开发许多重要化学过程的关键知识之一。直接测量多原子分子中的化学键离解能,非常困难。本森和他同事们,测量了近30年,才给出甲烷中碳氢键离解能的精确值。甲烷是最简单的有机分子,要测量比较复杂的分子,工作当然更困难。所以,半个世纪以来,世界上几百个研究小组力图预测多原子分子中的化学键离解能,但成效不大。1988年,本森和笔者开创了一条新路,找到了预测有机和有机金属化合物中化学键均裂离解能的可靠方法。现在,有机和有

机金属化合物中的化学键异裂的离解能,也可以成功预测了。

固态无机化合物的热化学 直到最近,固态无机物的热化学数据都是观测值。这远不能满足固态和表面化学发展的需要。本森等人研究了5年,已找到描述固态无机化合物生成热的一系列经验公式。这些经验公式关系,适用于周期表中几乎全部主族金属和非金属元素、过渡金属元素形成的固态无机化合物。这些经验公式正用于指导复合催化剂设计。

化学力与过渡态 根据过渡态中活化键长与分子中正常键长的相对值,本森把过渡态分为“疏松”,“紧密”和“接触”等三大类。过渡态的“松”与“紧”,取决于控制活化键的化学力性质。疏松过渡态受范德华(Van der Waals)力控制,接触和紧密过渡态受价键力控制。自由基重合与键离解反应的过渡态是疏松的,活化键长远大于原子团之间的范德华半径,活化键两端的原子或原子团可以自由转动。反之,在紧密过渡态内,活化键两端的原子和原子团不能自由转动。位于中间情况的是接触过渡态。自由基取代和加成反应的过渡态都是紧密的,自由基歧化反应的过渡态是接触的。研究化学力性质与过渡态的“松”与“紧”,可以帮助估算活化络合物的比热、生成热、自由能等,更进一步估算出该反应的动力学参数。这在热化学动力学的理论中,是最精彩的内容之一。

A因子的估算 本森把过渡态理论看成半经验性的,并用热力学语言描述反应速度常数与温度的关系。在这样的关系式中,速度常数中的A因子取决于从反应物到过渡态的活化熵变化。为了估算活化络合物的熵值,他利用了统计热力学中的一条规则:结构相似的分子的熵值是相近的。本森等人仔细地考虑了活化络合物相对结构相似的稳定分子的修正,它们包括自旋、内转动、反应坐标反对称伸缩、活化键弯曲、对称数变化等。本森的这一方法,已被广泛应用。

应用举例 燃烧化学是与流体力学,化学热力学,化学动力学和计算数学等紧密相关的一门综合的应用科学。由于热化学动力学方法能够预测化合物与化学反应热力学和动力学参数,所以热化学动力学在理解燃烧反应的机理时,相当重要。根据碳氢化合物的热化学数据分析,本森认为,目前流行的有机物氧化和燃烧的经典机理是不正确的。为了解释碳氢化合物低温(~150°C)氧化,中温(~300°C)冷火焰及诱导期,高温(>600°C)热自燃等不同反应特征,本森提出了有机物氧化与燃烧的新机理。为了解释汽油燃烧的“敲缸”,本森根据各种含铅化合物的生成热与化学键的离解能数据,提出了链支化与反支化机理。反支化的概念,在自由基链反应理论中是全新的观点。

化学正由描述性走向推理性,由定性描述走向定量描述,由宏观研究走向微观研究。20多年来,热化学动力学的诞生与发展,为上述“走向”的观点,提供了一个好例证。所以,在研究许多重要化学过程(如象石油炼制、煤转化、空气污染、有机物燃烧、有机物氧化合成等)时,如果引入了热化学动力学方法,研究局面将大为改观。

参考文献

- 1 Benson S W. Thermochemical Kinetics, 2nd, Ed, 1976
- 2 罗渝然, Benson S W. 化学通报, 1989, 10, 22~25
- 3 Luo Y R(罗渝然), Benson S W. Acc, Chem Res, 1992, 25, 175~381

(中国科技大学罗渝然教授撰)

吸附热化学 adsorption thermochemistry 化学热力学中的一个分支。主要任务是通过各种实验手段获取吸附体系的热力学数据,从而对不同类型的吸附现象进行热化学的表征和研究。吸附现象非常普遍,类型也很多,但以与催化过程有关的吸附现象(主要是气/固吸附)最为重要。许多有关吸附的研究都是催化研究中的重要环节,所以不同固体表面上的吸附热、吸附熵和吸附层热容的测定及研究颇为重要。从吸附体系的热化学数据可以直接表征吸附质与固体表面之间及吸附质与吸附质之间的相互作用,描述吸附质在固体表面上的吸附量和所成吸附键的键合

强度以及与温度、压力变化的关系;推演吸附过程的机理及吸附层的结构、形态及其变化等。

对一个吸附体系的热力学描述,通常是在一定温度(T)、压力(P)下测定气体在固体表面上的吸附量(由此确定吸附质在固体表面上的表面复盖度 θ 亦即表面浓度)及吸附热(ΔH),此外还测定该吸附体系在一定温度范围内的热容(C_p)。然后,通过一些热力学关系式来计算该吸附体系的其他热力学量。

在测定这些热力学量的各种方法中,以量热学的方法最为直接可靠。由于吸附现象非常复杂,且种类繁多,故需根据不同对象、要求来设计或选用不同类型的量热计。这主要有热流式的微量量热计;金属膜或金属丝量热计,等温相变量热计和自动绝热量热计等。在这些量热计中,热流式的微量量热计应用范围最广。它是法国科学家 A. Tian 于 20 世纪 30 年代提出。后来,他的学生 E. Calvet 又从结构原理上予以改进,解决了由近千对热电偶组成的示差热电堆的布局、安装问题,随后又逐步完善,到 50 年代才成为商品。现已成为热化学领域中很重要的一类商品仪器。法国的 P. C. Gravelle 用这种仪器在吸附热化学方面做了大量系统的工作,对一些金属氧化物或不同催化剂表面上的吸附机理、反应动力学等全面进行了研究。他的评述“吸附和多相催化研究中的量热学”在 1972 年第 5 届国际催化报告会上作为邀请报告来介绍。金属膜或金属丝量热计则适于研究气体在洁净表面上的吸附行为,需要在超高真空条件下工作。S. Cerny 等将金属铂或铂蒸镀到特制的薄壁玻璃容器上,制作了一个精致的金属膜量热计,用它测定了一些烷烃、烯烃在金属铂和铂上的吸附热。再结合其他吸附热的数据,对这些烃类在金属表面上的吸附机理及吸附物种(Species)等进行了探讨。自动绝热量热计是一种在热化学中广泛用来测定不同体系真实热容的量热装置,它的使用温度范围广、灵敏度也很高。J. A. Morrison 等人用这类仪器及其他方法测定了一些吸附体系的热容,对固体表面的吸附层进行了研究。他们指出,吸附层的一些性质将随其厚度的增加而由二维表相向三维体相过渡。

由于量热法得到的数据只是一个宏观统计的平均结果,所以现今吸附热化学的研究中十分注意与一些能反映分子、原子运动情况的现代物理方法相结合,以期综合宏观和微观的信息,更深入的探讨吸附现象。其中,最常见的是量热与红外光谱测定相结合。现在,许多有关固体表面热化学性质的研究报告,多用与其他分析测试方法同时进行观测以互相补充并验证其结果。

随着许多近代物理方法的引用,有关吸附过程的研究已深入到原子层次。为此,吸附热化学的研究今后会在以下几个方面发展。

单分子吸附层的微量热化学研究。单分子层以下的吸附研究最能直接反映吸附质分子和固体表面的相互作用。而吸附热的微量量热测定,其最大优点也就是测定低复盖度(单分子层以下的)的微量吸附热并推导出初始微量吸附热,直接从能量的角度来表征固体表面的不均匀性,阐明不同活性中心的作用。这对于催化和吸附研究很有意义。以前由于一些吸附研究装置的灵敏度低,所需试样量大,往往使得一些很有意义的实验结果被“淹没”,难以从真实表面这一层次来揭示吸附质与固体表面相互作用的规律。而用高灵敏的微量量热计着重对单分子层以下的吸附行为进行仔细地观察可能会发现一些新的现象和规律。例如, J. Rouquerol 等人用具有 2 000 个结点的示差热电堆的微量量热计研究了氩、氮等气体在一些固体表面上的吸附,他们以约 1ml/h 的进气速度进行实验,结果发现在这些吸附量热曲线上都有一个小的峰,这个小峰又与用高灵敏装置获得相应的吸附等温线上一个亚台阶(Sub-step)相对应。他们用固体表面上的二维相变来解释这一现象。

吸附层的热容及相变研究。当固体表面上吸附层只有几个分子层厚时,可视之为二维表面相,它的热力学性质在许多方面与正常三维体相有所不同。这方面以前已经做过一些工作,但有关理论尚不成熟,且由于试样预处理的不同,许多结果也不便相互

比较。近来,周立幸等系统测定了水蒸汽吸附在不同表面结构及组成的氧化铝、硅胶和分子筛表面上的热容。结果发现水蒸汽能以 3 种形态存在于这些不同的固体表面上,即表面吸附态、表面分散状液态和表面分散状固态。当体系的温度、压力和表面复盖度改变时,这 3 种形态能互相转化。由于这一相变过程是在固体表面上的吸附层内进行,故称之为二维相变,其相变热、相变温度均比正常体相水要低,且随气体的吸附量,固体表面的化学组成及孔结构等不同而变化。由此还得到了表面吸附水层的状态图。一些表面物理学家对这类现象一直颇有兴趣,有关理论研究正在深入。

多孔固体表面上吸附层的分形热化学研究。分形及分维的概念(Fractal)是 20 世纪 70 年代提出。按照分形的理论,多孔固体表面是一个处于二维至三维之间的复杂空间,而吸附、催化过程就在这一复杂空间中进行。不同表面有不同的分维。但是,由于固体表面上的孔结构十分复杂,所以,如何确定多孔固体表面和吸附层的分维数;吸附层结构、性质、状态与固体表面的分形有什么关系;用分形理论来描述多孔固体表面与用传统的 BET 方法比较,各有何优缺点等都是很有意义的课题。目前,国内外这方面的研究首先集中在建立一个合理的模型,以探求多孔固体表面分维的测定及表征的切实可靠的方法。然后再进行有关的比较和关联。这里,一个重要的问题是确定一个单分子层吸附容量的实验判据。而这一问题可能通过吸附层热容的测定及研究得到解决。

微量吸附量热学的研究。量热学是吸附热化学的主要手段。由于表面科学已向原子层次深入,且新体系研究也不断出现,这就促使在吸附量热测定中,对试样量的要求越来越少,对量热测定的灵敏度要求则越来越高。同时,又由于吸附量热实验通常是在一定表面复盖度或一定温度范围内进行,延续时间颇长,实验数据的处理也很繁琐,所以,今后发展的吸附量热计应是试样用量少,灵敏度、稳定性以及包括数据处理在内的自动化程度都很高。目前,在量热测定方面,其检测灵敏度可达 μJ 级或更高,在吸附量测定方面,已有一种石英晶体微量天平(QCM)的器件用于表面吸附研究,其重量检测灵敏度可高达 10^{-9}g 。若能将这两个器件很好地组合起来,吸附量热学的研究将跨上超微量研究的这一台阶。

随着一些新的实验方法和高性能的仪器装置的开发应用,吸附热化学的研究工作一定会不断扩展和深入,大量热化学数据也将不断产生。在此基础上,关于吸附热数据库的工作可能得到发展,一些涉及到吸附热化学方面的规律也可能发现。

参考文献

- 1 Gravelle P C. Calorimetry in adsorption and heterogeneous catalysis Catal Rev, 1977, 16(1): 37
- 2 Cerny S. J Catal, 1977, 47(2): 178
- 3 Morrison J A. Pure and Appl Chem, 1987, 59(1): 7
- 4 Zhgu Lixing, et al. Chinese Sci Bull, 1989, 34(22): 1874
- 5 Rouquerol J, et al. J Colloid and Interface Sci, 1990, 77(2): 580
- 6 Jaroniec M, et al. J Chem Phys, 1990, 92(12): 7589
- 7 Shustorich E, et al. Advan in Catal, 1990, 37: 101

(中国科学院大连化学物理研究所周立幸研究员撰,郑祿祿研究员审)

添加剂对阳极氧化过程动力学的影响

用分解极化曲线法研究添加剂对阳极氧化过程和与之相伴的氧的析出过程动力学的影响。添加剂及其氧化产物在阳极表面的吸附,改变了电极表面状态或双电层结构,或参与电极反应起催化剂的作用,从而对这些平行的,个别反应动力学发生影响,研究它们对电极反应催化与阻化作用机理,以便实现催化所需反应,阻化不需要的反应,这对电解合成或能量转换,提高电能与电流效率,降低电耗具有很大的理论与实际意义,而且对了解离子反应机理、异

相催化过程也有重要意义。

某些重要的阳极氧化反应,例如: $S_2O_8^{2-}$ 、 ClO_4^- 、 $C_2O_8^{2-}$ 、 BO_3^- 、 $P_2O_8^{4-}$ 、 O_3 、 $Cr_2O_7^{2-}$ 、 Mn^{3+} 、 CO_3^{2+} 、 Ce^{4+} 等的阳极形成或类似 Kolbe 合成的阳极氧化二聚反应,在阳极上可能发生其他一些平行的副反应,其中主要的是氧的析出,如果不仔细地研究不同电极材料上这些平行的、个别反应的动力学,就不能严格论证这些反应的机理以及它们之间的相互关系,也不能理解电极材料以及添加剂阳离子或阴离子的催化或阻化作用的机理。在19世纪50年代以前,电化学工作者,大都仅测量这些阳极氧化反应“总的”极化曲线,其中电流密度只是那些平行的反应速度的总和,因而不能对个别反应动力学得出结论。1958年,在中国朱荣昭、糜天黄首次用分解极化曲线法研究了铂电极上 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极形成动力学。研究结果表明,铂电极上 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极形成是通过 SO_4^{2-} (或 HSO_4^-) 离子直接放电,是不依赖于氧的析出的独立的电化学过程。添加剂 SCN^- 、 F^- 、 Cl^- 等强烈地阻滞氧的析出而几乎不影响 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极形成。 K^- 、 NH_4^+ 、 Cs^+ 等阳离子对 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极形成有加速作用,而对电位突跃区氧的析出有阻滞作用。因而它们能有效地提高 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极电流效率。碱金属离子对氧阻滞作用顺序是 $Cs^+ > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > Li^+$ 。1959年朱荣昭、金世雄等研究了某些添加剂对 $S_2O_8^{2-}$ 阳极形成过程的影响,发现几种离子的混合添加剂 (SCN^- (或 $(NH_2)_2CS$)、 F^- 和 Cl^-) 在铂电极上的吸附,它们对于氧的阻滞作用大于它们单独使用时的作用,能有效地提高铂电极上 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极电流效率,其作用较为稳定而又持久,并发现 NH_4^+ 离子对突跃后的 O_2 和 $S_2O_8^{2-}$ 均有加速作用,但对后者的加速作用大于前者,因而, NH_4^+ 离子能提高 $S_2O_8^{2-}$ 的电流效率。1961年朱荣昭、金世雄等研究了铂电极上 ClO_4^- 阳极形成动力学,得出了铂电极上 ClO_4^- 阳极形成是通过 ClO_3^- 离子的直接放电形成;氧的析出是通过 ClO_3^- 放电形成的中间基氧化水分产生了。1963年朱荣昭、王宝忱等研究了某些阴离子 (ClO_4^- 、 $S_2O_8^{2-}$) 对铂电极上 ClO_4^- 阳极形成动力学的影响。结果表明, ClO_4^- 使氧析出减慢,但几乎不影响 ClO_4^- 阳极形成动力学; $S_2O_8^{2-}$ 使 O_2 的析出加速,并使 ClO_4^- 的阳极形成速度减慢,从而使电流效率降低。1962年金世雄、朱荣昭等研究了二氧化铅电极上 ClO_4^- 阳极形成动力学及其添加剂的影响。结果表明, F^- 、 ClO_4^- 、 BrO_3^- 均使 O_2 和 ClO_4^- 阳极形成速度减慢,但由于对 O_2 的阻滞作用大于对 ClO_4^- 的阻滞作用,从而使电流效率提高。 IO_4^- 、 SO_4^{2-} 、 $Cr_2O_7^{2-}$ 、 MoO_4^{2-} 、 $P_2O_7^{2-}$ 等离子对 O_2 有加速作用,对 ClO_4^- 有阻滞作用,它们均使 ClO_4^- 的电流效率降低。 $B_4O_7^{2-}$ 离子对氧的析出有阻滞作用,对 ClO_4^- 阳极形成有加速作用,从而使电流效率提高。 $Fe(CN)_6^{4-}$ 离子对 O_2 和 ClO_4^- 均有加速作用,但对前者的加速作用大于后者,因而使电流效率降低。动力学数据还表明,二氧化铅电极上 ClO_4^- 的阳极形成是通过有 OH^- 基参加的 ClO_3^- 离子电化学放电。它与铂电极上反应机理不同,因而添加剂对过程动力学的影响亦有所不同。在双电层和迟缓放电理论基础上,通过阳极氧化过程动力学的研究成功地从反应动力学和分散双层电位降 ϕ_1 电位以及反应中间基吸附热对过程活化能影响的观点解释了上述现象。

1978年石崇铁、朱荣昭研究了二氧化铅电极上 O_2 和 $S_2O_8^{2-}$ 阳极形成动力学,表明了 PbO_2 电极上 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极形成是通过有 OH^- 基参加 HSO_4^- (或 SO_4^{2-}) 离子的电化学氧化,它与铂电极上机理不同,因此添加剂在这两电极上对过程的影响亦有所不同。例如, PbO_2 电极上需要添加大量 F^- 离子,才能提高 $S_2O_8^{2-}$ 的电流效率。又 NH_4^+ 离子并不能提高 PbO_2 电极上 $S_2O_8^{2-}$ 的电流效率。

用分解极化曲线法研究阳极氧化过程动力学及添加剂对它的影响,首创于中国。此后,其他国家也先后开始采用。例如,1971年斯米脱 (W. Smit) 等和1980年巴列吉 (Balej Jan) 等都先后开始应用分解极化曲线法研究添加剂对 $S_2O_8^{2-}$ 阳极形成过程动力学的影响,也得到了与糜天英、朱荣昭相类似的结果。1984年柯

罗特金 (Я. М. Кодотыркин) 等报道了添加剂 $(NH_2)_2CS$ 、 SCN^- 、 NH_2CH_2COOH 、 F^- 等使氧析出减慢,但对铂上 $S_2O_8^{2-}$ 的阳极形成具有加速作用。1978年卡沙脱金 (Э. В. Касаткин)、米勒尔 (П. Б. Миллер) 等报道了 F^- 离子对 $P_2O_8^{4-}$ 的电解合成具有提高电流效率的作用。1987年秋里科娃 (О. Г. Тюркова)、卡沙脱金 (Э. В. Касаткин) 等报道了 SCN^- 、 Cl^- 、 F^- 、 $(NH_2)_2CO$ 、 $(NH_2)_2CS$ 、 SO_3^{2-} 等添加剂对 $P_2O_8^{4-}$ 的阳极形成有加速作用,而对氧的析出有阻滞作用;因此,它们能使 $P_2O_8^{4-}$ 的电流效率提高。

1992年金世雄、冯海霞、许磊用分解极化曲线法研究了 $C_2O_8^{2-}$ 、 $P_2O_8^{4-}$ 的阳极形成动力学以及添加剂的影响。结果表明,在 $C_2O_8^{2-}$ 的电解合成中, O_2 和 $C_2O_8^{2-}$ 的形成均是通过 CO_3^{2-} 离子放电产生的中间基分别电化学氧化 OH^- (或 H_2O) 和 CO_3^{2-} 离子形成;磺酸对 O_2 和 $C_2O_8^{2-}$ 的形成均有加速作用,但对后者加速作用大于前者,故使 $C_2O_8^{2-}$ 的电流效率提高。 F^- 离子,当添加少量 ($0.05 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 以下) 时对 O_2 有阻滞作用,对 $C_2O_8^{2-}$ 有加速作用;当添加量较大 ($> 0.5 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$) 时,则对两者均有加速作用。 $B_4O_7^{2-}$ 离子在高电位区对 O_2 和 $C_2O_8^{2-}$ 均有加速作用,但对后者的加速作用大于前者,故使电流效率提高。 Cl^- 和 $Cr_2O_7^{2-}$ 离子对 O_2 和 $C_2O_8^{2-}$ 均有阻滞作用,对前者的阻滞作用大于后者,使电流效率提高。 OH^- 离子对 O_2 有加速作用,而对 $C_2O_8^{2-}$ 有较大的阻滞作用,故使电流效率下降。碱金属离子 K^+ 与 Na^+ 相比, K^+ 离子对 O_2 和 $C_2O_8^{2-}$ 均有较大的加速作用。

在 $P_2O_8^{4-}$ 的电解合成中,添加剂 $(NH_2)_2CS$ 、 SCN^- 、 Cl^- 等对 O_2 有阻滞作用,对 $P_2O_8^{4-}$ 的形成有加速作用,当它们混合添加时,其效果大于当它们单独添加时的作用,能有效地提高 $P_2O_8^{4-}$ 的电流效率,这与过硫酸盐的电解合成的情况相类似。 F^- 离子的作用,需添加较大量时,才能提高电流效率。在低极化区, F^- 离子使 O_2 和 $P_2O_8^{4-}$ 均加速;在电位突跃后的高极化区,则使 O_2 和 $P_2O_8^{4-}$ 均减慢,由于前者的阻滞作用大于后者,故使 $P_2O_8^{4-}$ 的电流效率提高。

近年来,许多作者研究了某些阳离子的阳极氧化反应,由于它们受到阳极表面电场的排斥效应,在反应机理上往往与阴离子有所不同。1987年石志超、糜天英、朱荣昭研究了铂和二氧化铅电极上 Cr^{3+} 阳极氧化为 $Cr_2O_7^{2-}$ 的动力学与机理。金世雄等研究了在浓硫酸溶液中 Pt 和 PbO_2 电极上 Mn^{2+} 和 Co^{2+} 分别阳极氧化为 Mn^{3+} 和 Co^{3+} 的动力学与机理。研究结果表明,它们最可能的是通过阳极表面 OH^- 基氧化的机理。添加剂 Ag^+ 离子对上述过程均有加速作用。

利用近代波谱测试手段,研究反应中间基形态以及添加剂的吸附状态,从分子水平上弄清其催化或阻化作用的机理,是近代电化学研究的热点。在阳离子、阴离子或中性分子吸附情况下,研究它们对于阳极氧化过程动力学的影响,以及对氧析出过程的影响,阐明这两过程的机理以及各种添加剂的作用机理,这不仅对于弄清反应机理,催化所需的反应,阻化不需要的反应是有现实意义,而且这一领域的研究对于了解离子反应机理、异相催化过程也将是有益的。

参考文献

- 1 朱荣昭,糜天英. 科学记录(新辑),1958,2(12):495
- 2 糜天英,朱荣昭. 科学记录(新辑),1959,3(2):66
- 3 朱荣昭,金世雄,王宝忱,等. 中国科学院应用化学研究所集刊,1966,16:1~33
- 4 Smit W, Hoogland J G. *Electrochim Acta*, 1971, 16:1~993
- 5 石崇铁,朱荣昭. 应用化学,1978,4(4):35~39
- 6 Kasatkin E V, et al. *Dvoinoi Sloi Adsorbtsiya Tverd Elektrodakh*, 1978, 5:81~84
- 7 Balej Jan, Kaderaek Martin, collect Czech Chem Commun, 1980, 45(8):2272~2272
- 8 金世雄,朱荣昭,许磊,等. 南开大学学报(自然科学),1984,1:86~96

- 9 Kololyrkin Ya M, Yakovleva A A, Kuvina I L. J Electroanal Chem Inter Electrochem, 1984, 180(1/2), 241~256
- 10 金世雄, 孙丰. 物理化学学报, 1993, 9(4), 538~541
(南开大学金世雄教授撰; 康天黄审)

溶剂萃取动力学 solvent extraction kinetics 溶剂萃取作为一种分离技术, 已广泛应用于化学、湿法冶金以及原子能工业等各个领域, 并逐渐形成为一门学科——溶剂萃取化学。溶剂萃取所涉及到的被萃取物质中大多是金属离子, 近年来对无机酸和氨基酸等的萃取动力学也时有报道。通过对一些慢萃取体系的考察, 期望查清萃取速率低的原因, 寻找加速萃取动力学过程的途径; 借助于被萃取物种在萃取速率上的差别, 探讨分离被萃取物种的可能性。

从 1942 年以来, 人们陆续发现了打萨踪萃取 $Zn(II)$ 、 $Cu(II)$ 、8-羟基喹啉萃取 $Al(III)$ 等一些萃取速率很慢的例子。到 20 世纪 60 年代初, 开始了从化学反应动力学的角度对一些典型的慢萃取体系进行定量研究。自 1958 年路易斯(J. B. Lewis)首次用恒界面搅拌池装置研究萃取动力学以来, 相继出现了高速搅拌池法、单液滴法、短时间相接触法、旋转扩散池法、液膜法(包括乳液膜、支撑液膜和有机液膜)以及电化学方法等一系列实验技术。在取得萃取速率与物种浓度关系数据的基础上, 结合对萃取体系流体学条件、温度以及界面区结构等因素的考察, 提出了各式各样的萃取动力学机理, 加深了对萃取体系的认识, 推动了这一分支领域的发展。

下面简述自 70 年代以来在萃取动力学实验装置、界面结构、萃取动力学模式判定以及萃取动力学催化作用等方面的研究成果。

萃取动力学理论模型的建立和发展始终与实验技术(或装置)的设计, 改进密切相关。对于最早使用的恒界面搅拌池法, 虽有两相界面恒定的优点, 但界面更新差, 界面上表面活性剂的吸附、金属离子的水解等因素在界面附近形成结构性机械障碍, 有限的两相搅拌强度不足以消除这种障碍, 因此难于准确判断扩散对传质的影响。1976 年艾伯赖(J. W. Albery)首先用旋转扩散池装置研究两相间溶质的传输, 并相继开展了对金属—萃取剂体系的动力学研究。该装置使用一个薄多孔膜滤器使两相保持接触, 薄膜被固定在旋转圆盘上, 使膜两边有固定的流体条件, 该技术能准确地测定界面面积和区分扩散对传质的影响, 对确定萃取动力学模式有重要的指导意义。1977 年雅高丁(G. A. Yagodin)用短时间相接触技术研究金属离子的萃取动力学, 认为几乎在所有条件下, 两相短时间接触时都能测定靠近界面水相一边的金属离子浓度的明显变化。并认为在两相非搅拌条件下能严格说明相内各物质的传输; 由于两相接触时间短, 降低了扩散阻力, 突出了化学反应的阻力对萃取速率的影响。高速搅拌法虽能较好地消除扩散对萃取速率的影响, 但不能有效地估算两相接触的总面积, 影响了对萃取模式的鉴别以及对速率步骤的确认。1982 年弗瑞泽(H. Freiser)在原来的高速搅拌系统安装了一个聚四氟乙烯微多孔相分离器, 该分离器能在两相高分散下选择性地抽滤出本体有机相, 然后分析有机相中萃取剂或萃合物浓度随各种实验条件的变化。借助于相分离器能有效地测定高速搅拌下两相接触的总界面面积, 有可能区分化学反应与扩散传质对萃取速率的影响。通过测定搅拌强度对萃取剂两相分配平衡的影响, 有助于揭示萃取剂在液—液界面上的表现以及界面在萃取动力学过程中的作用, 使区体相反应和界面反应成为可能。

由于液—液界面的物化性质与体相有明显的差别, 而两相间的传质又必须通过界面进行, 所以关于液—液界面的行为一直为萃取动力学研究者所关注。大约到 1970 年, 认识到界面不仅仅是一个单纯的平面, 而是一个三维的静置层。到 1980 年, 就认识到了液—液界面是一特殊的分子环境。界面处既保持着本体水相的化学性质, 在物理性质上界面水又有一种“类冰”结构。丹尼斯(P. R. Danesi)1980 年明确指出, 这一分子环境是萃取过程中络

合生成速率低的原因。萃取剂的界面浓集既有利于界面反应的进行, 当这种反应足够慢时, 又表现为一种界面阻力。借助于萃取速率和两相搅拌转速的关系, 再结合体系的一些物化性质, 有可能对萃取动力学的模式作出判定。例如提出了界面化学反应机理, 传输机理以及传输和水相反应同为速率步骤的机理等。1984 年雅高丁认为两相交界处有凝聚膜生成, 界面层有过饱和现象; 无关的表面活性剂降低了 i 组分占有界面的份额, 有时导致萃取速率的降低, 界面膜的生成往往又是恒界面搅拌池中萃取速率与两相搅拌转速无关的原因, 这一现象过去曾被认为是确定界面反应速率步骤的可靠证据; 膜的生成对传质既造成阻力, 同时也改变了界面的反应条件, 界面层的微多相区起到结构势垒的作用。作者最后指出, 目前仍无好的办法直接测定界面区中间产物的浓度, 所有关于反应区的信息, 似乎都还停留在讨论阶段。这期间中国都强等也提出了“界面排斥效应”等概念。1990 年丹尼斯在国际溶剂萃取会议上, 提出要“利用传统上属于实验的和理论物理的方法测定和了解液—液界面的性质”。他指出: 为了提高我们对萃取动力学、液膜渗透以及溶剂萃取的其他有关非平衡方面的认识, 这方面的信息是非常重要的。

关于萃取动力学模式的判定, 1980 年丹尼斯对于用萃取速率与两相搅拌转速的关系判定萃取动力学模式进行过评述; 1984 年雅高丁也倡导用短时间相接触技术来判定模式; 1984 年休斯(A. Hughes)提出了适用于有机酸萃取二价金属离子时动力学模式判定的通用模型。模型涉及到各种厚度的反应区, 使得界面反应以及扩展到界面水相一边的扩散膜中的反应都适用于该模型。包括扩散伴随膜反应, 扩散伴随膜中平衡, 扩散伴随界面反应, 界面区的扩散和平衡等几种类型。速率步骤的位置(地点), 据认为可以发生在水相本体、扩散膜或界面区。昂纳克(Honaker)弗瑞泽认为双硫踪萃取时速率步骤是水相中的反应, 而福来特、尼茨(Nitsch)和克瑞斯(Kruis)则认为界面反应为速率步骤。最近有人提出速率步骤是邻近界面的水膜内的化学反应。1980 年泽古认为, 若将萃取剂两相分配的结果, 溶于水相的界面通量与传统的传质速率结合起来, 可以准确无误的确定速率步骤位置。

自从 1973 年福莱特(C. D. Flett)发现 α -羟肟(LIX63)对 β -羟肟(LIX65N)萃取 $Cu(II)$ 有动力学加速作用以来, 1981 年都强等在研究 HDEHP[二(2-乙基己基)磷酸]和 MEHPA(二元烷基磷酸萃取 $Fe(III)$)时, 发现 MEHPA 是动力学协萃剂。1983 年驹泽勇夫发现羟肟萃取 $Cu(II)$ 时 HDEHP 对其有相转移催化作用。1988 年鲍尔(D. Barer)发现在二烷基硫醚萃取 $Pd(II)$ 时, 加入长链胺(三辛胺)可以使萃取速率加快, 并对加快的机理作了分析, 认为硫醚由于表面活性小, 难于在界面区与 $Pd(II)$ 接触, 活性大的胺盐在界面区首先与 $Pd(II)$ 形成不太稳定的中间络合物, 进入有机相以后, 进而和硫醚生成更稳定的络合物。1984 年马恩新等研究了 β -羟肟萃取 $Pd(II)$ 时, 也发现了胺的动力学催化作用。1990 年高宏成等用三辛胺萃取 U(VI)时明确了三辛基膦氧的动力学协同萃取作用。1991 年道德(J. A. Daoud)等用 HTTA(噻吩甲酰三氟丙酮)萃取 $Eu(III)$ 时发现, 体系加入的 Ph_3AsO (三苯基砷氧)不进入萃取速率方程式, 但 HTTA 与 Ph_3AsO 同时进入萃合物。1991 年孙思修等在考察 N1923 萃取 $Au(III)$ 的动力学时, 也发现了萃取热力学和动力学的双重协同作用, 并首次对动力学数据进行了定量处理。有关这方面的研究目前尚处于起步阶段。

今后相当一段时间, 人们将利用不断发展的仪器设备和检测手段, 努力去考察界面区的结构, 萃取剂和被萃取物种在界面区或体相内的物理化学表现, 以求弄清萃取动力学的机理, 寻找加速(或减慢)萃取过程的途径。

参考文献

- 1 Flett D S. J Inorg Nucl Chem, 1973, 35(7): 2471~2487
- 2 Danesi P R, et al. One Critical Reviews in Anal Chem, 1980, 10(1): 125
- 3 Yakodin G A, et al. Solvent Extraction and Ion Exchange.

- 1984, 2(2): 139~178
- 4 Hughes M A. Faraday Discuss Chem Soc, 1984, 77: 7
 - 5 Dreisinger D B. Solvent Extraction and Ion Exchange, 1986, 4(1): 135
 - 6 Froiser H. Chem Reviews, 1988, 88: 611
 - 7 Bauer D, et al. ISEC'88 (International Solvent Extraction Conference), Moscow, USSR, 1988, 2: 3~82
 - 8 Danesi P R. Solvent Extraction and Ion Exchange, 1990, 8(6): 741~757
 - 9 Daoud J A. Solvent Extraction and Ion Exchange, 1991, 9(1): 137~151
 - 10 孙思修, 等. 化学学报, 1993, 51: 30~35

(山东大学高自立、孙思修教授撰; 沈静兰审)

MOCVD 法生长 III-V、II-VI 族化合物用新前体

金属有机化学气相沉积(MOCVD)工艺经过多年的发展已成为先进的外延生长技术之一,并在 III-V 族化合物半导体及其固溶体为基础的电子和光电子器件工业生产中得到了应用。目前最广泛使用的生长 III-V 族和 II-VI 族化合物半导体的前体(常称为源)是 II、IV 族金属和稀的甲基或乙基化合物及 V、VI 族的氢化物。这些经典前体的纯度经过人们多年努力已有很大提高。并且仍在设法进一步减少有害杂质含量。另一方面,人们也认识到需要在更广泛的金属有机化合物中选择新前体以满足 MOCVD、MO-MBE、CBE 等工艺的发展需要。这些需要可概括为提高外层的纯度和晶体完整性;提高外延层厚度及组分均匀性和重现性;降低外延生长温度;降低前体的毒性和易燃性;合成含主体元素的新前体作为掺杂剂或用于生长新的材料体系,如高 T_c 超导薄膜和铁电薄膜。

在 MOCVD 工艺中,前体的物理化学性质在很大程度上决定了生长条件、生长层的质量以及生长装置的某些结构特征、生长过程的安全性和成本。发展一个新前体包括一系列研究工作:分子结构研究、前体合成与提纯研究、前体的物理与化学性质用毒性测量、还有外延层生长特性及电学光学性质研究,器件结构的生长和器件性能测量等。显然,发展一个新的前体要综合许多学科研究,花费相当长时间才能完成。一般来说,对前体的具体要求如下:(1)室温下为液体。(2)有确定且稳定的蒸汽压,对于 II、III 族前体,蒸汽压在 20~1 000 Pa 范围内为宜,对于 V 族前体,由于通常要维持 $V/III=30\sim 50$ 或更高,其蒸汽压在 $10^3\sim 10^5$ Pa 范围内为宜。较低蒸汽压的前体适用于低压 MOCVD、MO-MBE 及 CBE。(3)适宜的热分解温度,以保证前体在长期贮存和运输条件下的稳定与安全。同时,在生长温度下有足够高的热分解率。(4)反应活性较低,在反应室内与配合使用的其它前体间没有预沉积等不希望的预反应。有适宜的外延生长温度和较宽温度范围的生长速度扩散控制区;最好对氧和水蒸汽不敏感或不起作用。(5)易于合成、提纯至高纯度。(6)低的本底碳沾污或组成前体的其它元素(例如氮)的沾污。(7)较低的毒性。(8)可接受的价格。这点对于新前体能否取代 AsH_3 和 PH_3 尤其重要。

MOCVD 前体所涉及元素已超过 30 种,可提供商品的前体已超过 70 种,而且正在合成更多的金属有机化合物新前体。下文仅就 III-V 族和 II-VI 族化合物 MOCVD 用新前体的发展现状做简要评述。

经典的 III 族前体是其三甲基和三乙基化合物。III 族金属最外层的 1p 和 2s 电子形成 sp^2 杂化轨道,成为一个平面三角形分子,键角为 120° ;同时还有一个垂直于这一平面的未填充的 p 轨道,它吸引电子。因此,III 族烷基化合物是电子受体,或者说是 Lewis 酸。这种配位未饱和的烷基物与电子施主分子——Lewis 碱有高度的反应活性。这意味着它与 V 族前体易于发生不希望的预反应和易被电子施主杂质所沾污。

1. 铝前体。已较广泛使用的铝前体为 TMAL。TMAL、

TMGa 与 AsH_3 配合生长 GaAlAs 外延层的主要问题是高浓度碳($10^{18}cm^{-3}$)和氧($10^{21}cm^{-3}$)沾污问题。普遍认为引入碳的原因是生长表面存在 $Al-CH_3$,故采用 TEAL、TEGa 和 AsH_3 制备 GaAlAs 可降低碳的沾污,这与乙基化合物的 β 消去反应有关。但是乙基化合物的缺点是蒸汽压低,且更易与 V 族氢化物发生寄生反应,从而导致生长层的组分与厚度不均匀。因此,人们在寻找即能减少 C、O 沾污又无寄生反应的新的铝前体。在分子中引入氢,可望在分解过程中提供活泼氢以降低外延层中的碳含量。用 DMALH 取代 TMAL 生长 ALGaAs 层时,光荧光数据表明碳浓度显著降低。 $AlH_3N(CH_3)_3$ (TMAA)的特点是在分子中无 $Al-C$ 键,同时在生长表面释放的活泼氢也有助于降低外延层中的碳含量。它与水蒸汽反应产生 Al_2O_3 和甲胺,而不像 TMAL 那样产生挥发性的烧氧基物,因此可望降低氧沾污。在 MOMBE 法生长 $Al_{0.53}Ga_{0.47}As$ 时,已证明使用 TMAA 可把氧浓度从 $10^{21}cm^{-3}$ 降到 $10 \times 10^{18}cm^{-3}$,碳浓度从 $3 \times 10^{18}cm^{-3}$ 降到 $2\sim 3 \times 10^{17}cm^{-3}$ 的检测限以下。然而,在常压 MOCVD 装置中以 TMAA、TMGa 和 AsH_3 配合使用生长 GaAlAs 效果很不理想, Me_3Ga 与 AlH_3NMe 之间的均相气相反应导致了 $Al-CH_3$ 和 Me_2GaH 、 $MeGaH_2$ 的形成,前者造成外延层中碳沾污,后者不稳定化合物与 AsH_3 反应在反应管壁上生成大量 III-V 族淀积物,并使衬底上铝组分沿气流方向升高。在 LP-MOCVD 中,上述副反应得到抑制,外延层中铝均匀性得到改善,但碳沾污仍然存在。当用 TEM、TMAA 与 AsH_3 配合使用时,碳沾污才得以降低。

探索铝和其它 III 族前体的另一个方向是合成配饱和化合物。L. Pohi 等(1990)选用氮作为强电子施主以形成分子内和分子间的配位化合物。这些前体不自燃,与氧、水蒸汽作用缓慢或不作用,易于处理和纯化,不与 V 族氢化物或有机前体发生预反应。这是一个很有吸引力的方向。初步实验结果表明,使用 $(GH_2)_2Ga(CH_2)_3NMe_2$ 、 $(CH_2)_5Al(CH_2)_3NMe_2$ 与 TMAAs 配合生长的 ALGaAs 为 n 型,77K 下电子迁移率为 $15\ 000cm^2/V \cdot s$,且光荧光强度比用 TEGa、TEAL 为前体时提高近 10 倍,光荧光谱未显示出有氧和氮的并入。

2. 镉前体。最通用的镉前体是 TMIn,其熔点为 $88^\circ C$,由于在使用温度下,(例如 $25^\circ C$)为固体,其蒸发速率不稳定,影响外延层中镉含量的准确控制。因此,寻找新的液态镉前体是非常重要的。如果考虑到金属有机化合物的熔点与分子间作用力的关系,那么减少分子的对称性、增加无序或生成配位化合物都可能降低熔点。例如 TMIn 分子中的一个甲基被乙基取代形成 EDMIn,熔点为 $5.5^\circ C$ 。分子内配合物 $Me_2In(CH_2)_3NMe_2$ (DADI)的熔点为 $12^\circ C$ 。分子间配合物 $Me_3In-PMe_3$ 熔点为 $43^\circ C\sim 45^\circ C$,而 Me_3InPMe_2Et 的熔点则为 $15^\circ C$ 。EDMIn 的蒸汽压与化学性质均与 TMIn 相近。用 EDMIn 与 PH_3 生长的 InP 外延层其 77K 电子迁移率已超过 $1 \times 10^5 cm^2/V \cdot s$ 。P. K. York (1989)等人用 EDMIn 和 TMGa 生长 InGaAs-GaAs 应变层激光器时,在长达 6 个月的时间内,发现 $In_{0.25}Ga_{0.75}As$ 的生长速率是稳定的,但仍有 EDMIn 是否稳定的争论,因为在较高环境温度下($>10^\circ C$)通过分子间有机基团的交换反应可能生成 Me_3In 、 Et_3In 、 $MDEIn$ 等一系列化合物;从而影响其蒸汽压的长期稳定性。配位饱和的 $TMInHNiPr_2$ 和 $(CH_3)_2In(CH_2)_3NMe_2$ (DADI)都是不自燃、对空气不敏感的液体。用这两种前体生长的 InP 外延层,其 77K 电子迁移率也都超过 $1 \times 10^5 cm^2/V \cdot s$,且适于与有机 V 族前体配合使用。DADI、TEG 和 AsH_3 组合生长 GaInAs 时可获得表面形貌好、组分均匀的外延层。但实验发现 DADI 与 $(C_2H_5)_2Ga(CH_2)_3NMe_2$ 和 AsH_3 一起使用生长 GaInAs 时,镉的含量向低浓度漂移。另一类镉前体是一价茂基镉 C_5H_5In ,它本身有一孤对电子,是 Lewis 碱,故与 PH_3 不会发生聚合。其缺点是蒸汽压较低。用 C_5H_5In 与 PH_3 组合已生长出 InP 外延层,其 77K 电子迁移率为 $3.2 \times 10^4 cm^2/V \cdot s$ 。

3. 镓前体。最广泛使用的镓前体是三甲基镓。在 AsH_3 大量

过量的情况下,来自 TMGa 的碳沾污受到抑制。GaAs 外延层的 77K 下电子迁移率达 $1 \sim 1.5 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的水平,可满足大部分器件应用的需要。TEGa 由于经过 β 消除反应分解出乙烯,外延层中碳浓度更低,77K 下电子迁移率高达 $2.1 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。基峰迁移率(38K)达到 $3.35 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。新的镱前体的研究工作较铝和镉为少。GaH₃·NET₃ 可能性应用于 CBE 以减少外延层中碳沾污,其缺点是热稳定性差和室温下为固体。分子内配物(CH₂)₃Ga(CH₂)₃NMe₂ 是不自燃液体,可望降低氧沾污。用含氯的镱前体 Et₂GaCl 在选择外延生长时可避免在掩膜上的沉积而只在窗口区生长,但其蒸汽压较低。

V 族前体研究的主要动力是 PH₃,特别是 AsH₃ 的毒性和贮存于高压钢瓶中带来的危险性。早期工作表明,有机 V 族前体 R_nAsH_{3-n} 和 R_nPH_{3-n} 中氢原子的存在对减少外延层中的碳沾污起重要作用,虽然随着分子中氢原子数目增加其毒性也加大,只要它们在常温下是液体,在实际使用时的危险性要小得多。砷前体的相对热稳定性按以下顺序递减:AsH₃ > Me_nAsH_{3-n} > Et_nAsH_{3-n} > t-Bu_nAsH_{3-n}。这一实验结果与 Markovnikov 规律相符。另一方面,分解所形成的有机集团的稳定性以相反顺序递减,即 t-Bu 原子团比 Me 原子团更稳定。因此,从减少碳沾污的角度考虑,应选择稳定的乙基、叔丁基或苯基等。

已用叔丁基二氢砷(TBAs)与 TMGa 组合生长的 GaAs 膜其室温电子迁移率已达 $6\ 000 \sim 7\ 500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,77K 下为 $80\ 000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。当用 TEGa 做 IV 族前体时,77K 下电子迁移率为 $159\ 000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。并且可得到极好的表面形貌,然而 tBAsH₂ 比 AsH₃ 有更强的生成配合物和其它中间产物的倾向。这导致在生长速度与生长温度关系的 Arrhenius 图上不出现典型的扩散控制区,并且使 GaAs 的生长速度不易控制,生长多元化合物时易产生组份不均匀现象。据 T. Kikawa 等(1990)报导,在水平常压反应室中,将衬底倒置,由于消除了反应室内热对流,显著改善了 ALGaAs 外延层厚度及组份均匀性。在上一节中已经提到,使用配位饱和的 III 族前体也可以抑制其与 t-BuAsH₂ 之间的预反应。总之 t-BuAsH₂ 已经成功地用于电子和光电子器件结构的生长中。

另一有机砷候选物是单乙基二氢砷 EtAsH₂,它的蒸汽压比 t-BuAsH₂ 高、碱性比 t-BuAsH₂ 弱,可望减少或消除寄生反应。在分解时产生稳定的乙烯和乙烷,预期可减少对外延层的碳沾污。由于合成比较容易,因此可望其成本比 t-BuAsH₂ 低。Speckman 等人(1990)报导,在 V/III = 40 时,用 EtAsH₂ 生长出了 77K 下迁移率为 $55\ 000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的 GaAs 外延层。

叔丁基磷化氢(t-BuPH₂)是一个很有希望的 PH₃ 的代替物。它与 TMIIn 的组合已经获得 77K 电子迁移率为 $1.23 \times 10^5 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的 InP 外延层。利用 TMGa/TMIIn/TBP 组合,在 GaP 衬底上已经生长出全组分的 GaInP,其厚度和组份均可以很好地控制。异丙基磷化氢 i-PrPH₂ 有较高的蒸汽压,然而由于生成加合物的倾向强,在与 TMIIn 组合使用生长 InP 时,在 Arrhenius 图上的扩散控制区后,生长速度再次随温度的上升而增加,即所谓的二次动力学控制现象。

对镱前体的研究较少,最常用的是 TMSb,目前正在研制低分解温度的镱源。

经典的 II 族前体是锌和镉的二甲基或二乙基化合物。当它们与 H₂S 和 H₂Se 配合使用生长宽带 II-V 半导体时,主要的问题是很难得到大面积均匀生长及好的表面形貌。例如,生长 ZnSe 时,DMZn 与 H₂Se 室温下就发生强烈的预反应,以致必需分别将它们导入反应室,使其在衬底上方几厘米处混合,这就造成 ZnSe 薄膜厚度不均匀。二甲基锌与乙胺的配合物 Me₂Zn(NEt₃)₂ 和 Me₂ZnNET₃,完全消除了与 H₂S 和 H₂Se 的预反应,可在 300~350℃ 的较低温度下生长 ZnSe,并可获得很好的电学与光学性质。用 Me₂ZnNET₃ 和 H₂Se 生长的 n 型 ZnSe,77K 下电子迁移率已高于 $8\ 000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。进一步的研究表明,Me₂ZnNet₃ 并不很稳定,在气相已充分地分解。据推测是 NEt₃ 俘获了 DMZn 分解

出的高反应性中间产物,如 [CH₃-Z]⁺ 自由基,从而切断了与 H₂Se 的反应。使用 Me₂Cd·NET₃ 可减弱但不能全部消除与 H₂Se 的预反应,因此,它不是理想的宽禁带 II-V 族化合物新前体。对于窄禁带 II-V 化合物(主要是 CdTe 和 HgCdTe),因为使用有机镱前体,故 ME₂Cd 目前最通用前体。

VI 族前体主要有两类。

1. 硫与硒前体。宽禁带 II-V 族化合物 MOCVD 技术通常使用 H₂S 和 H₂Se 分别作为硫和硒的前体。这两种气体都是剧毒的,尤其是 H₂Se,它的 8h 允许接触浓度与 AsH₃ 相同。这两种前体与 DMZn、DMCd 有强的预反应,因此很难得到大面积均匀生长。这些硫与硒的前体如 DESe 不会与 DMZn 或 DMCd 发生预反应,但由于它们分解温度使外延生长温度从使用氢化物前体的 300℃ ZnSe 的上升到了 500℃。制得的外延层的厚度均匀性虽然得到改善,但总得到高阻外延层,在低温荧光光谱上出现深能级峰。比较 DESe 用 HAsSe,后者给 ZnSe 外延层造成严重的碳沾污,前者可得到较纯的外延层,是较好的新硒前体。

避免使用剧毒 H₂Se 高压钢瓶造成的危险性的另一途径是原位发生 H₂Se。由于 H₂Se 的热稳定性好,用元素硒蒸汽与氢气在 650℃ 下直接反应就能生成 H₂Se。MOCVD 系统仅在外延生长时才有少量 H₂Se 存在,一旦反应完结,系统中只有固态元素硒。这一方法的另一好处是产生的 H₂Se 纯度极高。用此法制备的 H₂Se 与 DMZn 生长的 ZnSe 膜的电子迁移率在 77K 下高达 $9\ 250 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。锌的配位化合物前体的进展,已经完全消除了与 H₂Se 的寄生反应,因此 DMZnNET₃ 与原位产生的 H₂Se 的组合有着诱人的前景。H₂S 的热稳定性更好,因此也可能原位产生。

2. 碲前体。用来生长 HgTe、CdTe 和 HgCdTe 的经典碲前体是 DETe。由于它的热分解温度高,外延生长温度大约为 450℃,人们希望能找到降低生长温度的碲前体。因为在较低外延温度下更利于获得陡峭界面,减小汞空位浓度,降低自掺杂,可能获得 n 型材料。在 R₂Te 分子中,热解阈值温度顺序如下:R = 甲基 > 乙基 = 正丙基 > 异丙基 = 另丁基 > 特丁基 > 乙炔基。这表明当有机部分空间体积增加。或者当与碲关联的 β 氢原子数目的增加都可能导致分解温度的降低。以生长 HgTe 为例。使用 DETe 时生长温度为 450℃,用 i-Pr₂Te 时降到 350℃,用 DBTe 在 200℃ 就能生长,当用 DATe 时报导的最低生长温度为 180℃。但 DATe 在 0~30℃ 的温度范围内热稳定性差。因此,前两者是很有希望的新碲前体。其中 i-Pr₂Te 的蒸汽压较高更为吸引人。在 350℃ 下与 Me₂Cd 和汞配合生长的 Cd_{0.2}Hg_{0.8}Te 在 77K 下空穴浓度为 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,迁移率为 $750 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,均优于在 410℃ 用 DETe 生长的材料,且外延层组份均匀性也得到改善。对碲前体的分子量和分子结构的考察可以看出,前体的蒸汽压随着分子量的增加而降低。在分子量相近时,有机基团结构复杂时,其蒸汽压较高。一般来说,较高级的多分支结构分子间作用力较弱,因而蒸汽压较高。

随着 MOVPE 技术应用范围日益扩大并开始进入商业应用领域,对其前体的研究越来越活跃。一方面当前广泛使用的经典前体(主要是甲基、乙基化合物和氢化物)的纯度不断得到提高,另一方面寻找新的性能更好的前体工作日益扩展、深入。对前体分子结构与性能之间关系的探讨,热分解机理的研究和新前体外延生长行为的研究及外延层质量的检验加速了新前体研究工作的进程。对 O₂、H₂O 不敏感的 II、III 族配合物前体值得注意,它们对制备低 O、C 含量的铝化物有利,且减小了危险性。目前已发现的一些有前途的代替 V 族和 VI 族氢化物的有机前体,但尚需进一步提高纯度和降低价格。氢化物的原位发生是避免使用高压剧毒气体钢瓶的另一途径。发展新前体的工作包括研究分子结构与前体物理、化学性质之间的关系,前体的合成与提纯,前体的分解特性与分解机构的研究和外延生长研究。新前体的发展是涉及许多科学工作,因此发展一个新前体需要相当长的时间。

(中国科学院半导体材料物理开放实验室陆大成撰)

同位素的电磁分离 the electromagnetic separation of isotope 原子核,与质子数相同而中子数不同的一类核素称为同位素。自1912年汤姆逊(Thomson)用 α -射线分析器观察到氦-20和氦-22证明了一般元素存有稳定同位素之后,人们便对同位素的分离产生极大兴趣。因为这不仅需要认识它的性质和规律,而且它还具有极其重要的应用价值。电磁法分离发现较早,它对核科学技术的发展起过重要作用,现在仍然是分离轻重元素之间金属同位素的重要方法。

1919年阿斯顿(Aston)研制成功了第1台质谱计,首次发现了氮、氧、氩、氙和氯的同位素,证明了电磁原理能有效地把不同质量数的同位素区分开,为以后的电磁法分离同位素奠定了基础。1934年奥利普汉(Oliphant)设计了一台利用交叉电磁场的分离器,用热发射离子源分离出锂的同位素。1937年瓦尔切(Walcher)建造成可谓之实验室型电磁分离器原型,制备出薄的同位素靶。1944年科赫(Koch)和尼尔森(Nielsen)又建成了第1台斯塔的那维亚型现代实验室电磁分离器,磁分析器是 90° 扇形均匀场,离子中心轨道半径为80cm,加速电压40kV,离子束流达到几百微安。该仪器分辨率高,利用它制备能谱学实验用的 β 、 γ 放射源和核反应用的靶。

第二次世界大战期间,核物理学家认识到铀-235裂变在战略上的重要地位,1941年贝克莱辐射实验室在劳伦兹(Lawrence)的领导下在经过改造的回旋加速器上用强流离子源实现了以较高的速率分离铀-235的目的。这一结果促使美国很快在橡树岭建了电磁分离工厂,在第二次世界大战高潮时期大约有1100多台称作Calutron的大型电磁分离器投入运行,离子束流达到上百毫安,生产出kg量级的浓缩铀-235用于核武器。此后,苏联、法国和英国也相继建造了类似于Calutron的大型电磁分离器。然而,分离铀的工艺很快被气体扩散法所取代,生产型的电磁分离器便转为分离轻重元素之间的多种稳定同位素。

由于科学技术的迅速发展,稳定同位素的应用领域日益广泛,涉及到核物理、核工程、放射和非核化学、核医学、地球科学和生命科学等诸多方面,物理学是应用稳定核素全部品种的唯一领域。仅电磁法40年来就分离了周期表中60多个元素的200多种稳定同位素,橡树岭国家实验室和库尔治托夫研究所是大量稳定同位素的供应者。

电磁分离器主要由离子源、磁分析器和收集器3部分组成,一般把它们分成实验室型和生产型两类。

普通的电磁分离器在提高离子流强和浓缩同位素纯度等方面仍在不断改进和完善。1965年基莱斯(Gilles)把大型电磁分离器的条形垫片改为场指数 $n=0.5$ 的非均匀场成为一种双聚焦的磁分析器,提高了质量色散,改善了离子束的聚焦,对铀的同位素分离实验结果表明束流和浓缩系数均有明显提高。橡树岭实验室也把大型电磁器部分地改为 255° 和 180° 非均匀场,都取得较好效果。1970年科普朗(Complan)发表了取名为Sidonic的非均匀场实验室型电磁分离器,磁分析器设计场指数为0.523的 135° 扇形磁铁,离子源、接收器与磁铁的距离是107cm,离子中心轨道半径为85cm,接收同位素离子流达到5mA,用于超铀和高纯同位素分离。1960年贝尔纳斯(Bernas)建造了第一个两级电磁分离器,分离同位素铟-53、铯-173和铀-235的质谱分析数据表明,浓缩系数从一级的几百提高到二级的数万量级。1972年怀特黑得(Whitehead)又设计了RPI三级电磁分离器,每一级都用场指数为0.5的 180° 非均匀场,对各种元素的离子流可以达到 $500\sim 1000\mu\text{A}$,用于分离毫克量级的超纯稳定同位素。

在核物理研究中,人们感兴趣的一个方面就是大量的远离 β 稳定线的不稳定核,遇到的主要困难是这些核的短寿命和大量不同质量同位素的产生。对此,同位素的电磁分离起到了关键作用。为研究远离 β 稳定线的核及测量裂变、散裂瞬发产额就必须把电磁法分离器跟加速器或反应堆联在一起,即把所要研究核的产生和分离、测量安排在一个连续过程中形成一个链,

加速器、反应堆 → 靶 → 传输 → 同位素分离 →

接收 → 探测器

这就是在线电磁分离器系统。早在1951年哥本哈根研究小组就做过裂变产生的氪-91($T_{1/2}=10\text{s}$)的实验,但作为一个在线电磁分离器系统还是由波哥(Borg)等人建立起来的。雷文(Ravn)简要评述了近20多年在线电磁分离器的发展,在世界各国的重粒子加速器、反应堆或中子发生器和高能加速器旁已装备了37个在线分离系统,产生和分离大约有82种元素的1200个核素的离子束,这种方法已成为现代核物理实验的重要手段。

在电磁法分离同位素中,有人在探索等离子体分离效应,为证实这一概念的可能性,曾做过许多理论和实验研究工作,旋转等离子体和离子回旋共振被认为是最有希望的方法。

旋转等离子体由于可望达到 10^8m/s^2 量级的离心加速度,有可能获得比机械离心机大的分离效应,这已被氦、氩、氪和铀的同位素分离的初步实验所证实。1987年普拉赛得(Prasad)报导了用真空一弧离心机浓缩钙-48和铀-203的实验结果,预测能耗将远低于其它装置。

离子回旋共振更加引人注目,将电场的频率处于所需同位素回旋频率附近,当能量增加时,离子将在更大的回旋半径上循环,这就能够将其它同位素组份分离出来。道森(Dawson)等人在Q机器上的实验表明,有可能将钾离子加速到50eV的温度,实现对收集在处于正偏压冷阱带上钾样品的质谱分析,钾-41/钾-39的丰度比为4,远大于0.07的天然比值。

至今得到的实验结果与理论预测基本上是一致的,这些结果证实了理论预言的高分离系数和分离功。但是,现在人们还不能确定所观察到的分离效应能否发展成一种经济实用的工艺,正在进行的所有研究工作主要还是进一步搞清物理机制,这是由于牵涉到的物理内容比现代各种浓缩同位素技术都要复杂。

参考文献

- Gilles J, et al. Nuclear instrument and methods, 1965, 38: 128
- Wilson whitehead T, et al. Nuclear instrument and methods, 1972, 103: 437
- Dawson J M. et al. Phys Rev Lett, 1976, 37: 1547
- Prasad Rahul R, et al. Nuclear instrument and methods in physics research, 1987, B26: 65
- Ravn H L. Nuclear instrument and methods in physics research, 1987, B26: 72

(中国原子能科学研究院苏士俊撰)

不对称催化 asymmetric catalysis 手征性是区分生命物质与非生命物质的主要标志。生物体内蛋白质肽链的严密结构要求生物活性物质必须在空间结构上与其匹配才能充分显示生理活性。因此这些手性物质必须具有特定空间构型,其对映体常无活性甚至有截然相反的性能。长期以来人们只能从生物体提取手性物质;用生物酶制备手性物质;或从一种天然手性物制备另一种手性物质。用普通化学方法只能得到两种或多种对映体含量相等的外消旋体,需经拆分方可得到旋光物质,操作繁琐资源浪费。化学计量不对称合成可得手性产物,但要消耗大量手性试剂或辅助试剂。不对称催化的出现开辟了制备手性产物新途径,仅用少量手性催化剂即可将大量前手性(Prochiral)底物对映体选择性地转化为手性(Chiral)产物。

不对称催化又叫催化不对称合成或手性催化,是催化和有机合成中一个新的分支。它充分发挥了络合催化高选择性优点,达到对映体选择性催化。1966年Nozaki首次用铜-手性席夫碱实现不对称环丙烷化反应。1968年Horner和Knowles几乎同时将手性膦引入了Wilkinson催化剂 $\text{RhCl}(\text{PPh}_3)_3$,实现不对称氢化反应。自那时起不对称催化从无到有迅速发展。已合成几百种手性配体,研究了几十种反应。并已获得工业应用。1986年第1本不对称催化专著问世,不对称合成丛书也出版了手性催化专集。

不对称催化剂的光学选择性主要来源于催化剂特别是配体与底物的空间相互作用,因此合成高选择性手性配体成为不对称催化首要任务。起初认为手性中心应尽量靠近催化剂的金属原子,因此合成了手性磷原子配体,如 $P^*MePrPh$ 即 MPPP 等。合成中必须经过拆分才能得到这类手性配体,所以合成较难。后来研究表明,手性中心在磷配体取代基的碳原子上同样有光学选择性。1971年 Morrison 第1次合成了带手性碳的磷配体,标志着不对称催化前进了一大步,从此可以用便宜易得的天然手性化合物,如酒石酸、樟脑、薄荷醇、氨基酸、糖类等,作为原料合成各种手性配体。首先合成了手性碳原子单磷配体甲基基基苯基磷 MMPP 等。单磷配体制成过渡金属络合物催化剂构型易变,光学选择性不高,故转向合成手性双磷配体。Kagan 等首先以酒石酸为原料合成了双磷配体 DIOP,其他学者从乳酸合成了

PROPHOS,从2,3-丁二醇制得 CHIRAPHOS,从1,3-丁二醇制得 CHAIRPHOS 等。后来合成了 PNNP 型双胺磷配体,既有手性中心又有手性面的二茂铁型配体 BPPFA,由于旋转受阻而产生手性轴的联萘配体 BINAP 等,都表现出很高的光学选择性。

不对称催化研究已遍及所有重要反应,研究最多的是氢化反应, α -酰氨基丙烯酸衍生物常作为通用底物用于评价各催化体系的光学选择性。底物烯烃上电负性取代,可与催化剂形成第二个配位键,有利于提高光学选择性,Z式异构体优于E式。综合反应络合物X-射线分析,低温 ^{31}P 、 ^{13}C -NMR谱数据及动力学研究,Halpern 基于结构差异提出了动力学控制对映体选择性的机理,当R,S二对映体活化自由能之差 $\Delta\Delta G^\ddagger=12kJ/mol$ 时,光学选择性可达99%ee。各类不对称催化反应已达到的光学选择性见表1。

表1 不对称催化反应


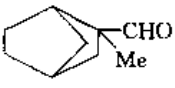
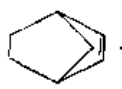

反应名称	底物	产物	催化剂	%ee
氢化	$PhCH=C(NHAc)COOH$	$PhCH_2CH(NHAc)COOH$	Rh-BINAP	100
			Rh-CHIRAPHOS	100
			Rh-DPCP	100
氢甲酰化	$PhCH=CH_2$	$PhMeCHCHO$	Pt-DIOP	80
格氏交联	$PhMeCHMgX +$	$PhMeCHCH=CH_2$	Ni-LOUPHOS	94
	$BrCH=CH_2$			
环丙烷化	$PhCH=CH_2 +$	$Ph \begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \text{CH} - \text{CH} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2 \end{array} CO_2R$	Cu-L*	94
	N_2CHCO_2R			
氢硅烷化	$PhCOMeHSi\equiv$	$PhMe + CH-OSi\equiv$	Rh-L*	80
环氧化	$R'R''C=CRCH_2OH$	$R'R''COH COHR CH_2OH$	Ti(O-Pr) ₄ - Tartrate	95
			Mn-Schiff base	92
			Rh-BINAP	96
异构化	$R'R''C=CRCH_2R''$	$R'R''CH CR=CHR''$	Rh-BINAP	96
氢氰化	$RCH=CHR'$	RCH_2CHRCN	Pd-DIOP	35
双烯加成	 + $CH_2=CMeCHO$		Al-L*	72
乙烯基化	 + $CH_2=CH_2$		Ni-DMIPP	80

表2 不对称催化工业应用

公司	反应	产物	催化剂	%ee
Monsanto	氢化	L-DOPA	Rh-DIPAMP	96
	氢化	Naproxen	Rh-L*	96
Arco	环氧化	心得安	Ti·L*	96
住友	环丙烷化	酶抑制剂	Cu-L*	92
Baker	环氧化	环氧十九烷	Ti-酒石酸	95
高砂	异构化	薄荷醇	Rh-BINAP	95
Anic	氢化	甜剂	Rh-PNNP	98

如果说过去的研究多数是探索性基础研究,那么今后将是越来越多的应用开发研究。因为不对称催化是应用前景广阔的手性催化实用技术。其诞生不久 Monsanto 公司于1973年将其用于生产治疗帕金森(Parkinson)病的药物左旋多巴胺(L-DOPA),成为化学工业中划时代的事件。最近又开发了制备消炎解热镇痛药萘普生(Naproxen)的不对称催化技术。Arco 公司应用不对称环氧化反应制备了药物心得安(propranolol)。信友公司应用不对称环丙烷代制备了酶抑制剂。Baker 公司应用环氧化反应生产昆虫信息素环氧十九烷。高砂公司生产了L-薄荷醇。Hoffman-LaRoche 公司生产了 Anic 甜剂以及氨基酸等(见表2)。

上述例子充分说明不对称催化工业应用已经开始,它在合

成医药、农药、香料、食品添加剂等方面已显示出日益增长的重要性。1984年美国第150届科学振兴会化学前沿讨论会已把不对称催化列为四大课题之一。1991年12名著名的催化专家认为化学将进入手性时代。可以预见,不对称催化在某些方面必将逐步赶上酶催化成为生产具有生理活性的旋光性物质的重要手段。

参考文献:

- 1 Nozaki H, et al. *Tetrahedron Lett.* 1966, 5239
- 2 Horner L, et al. *Angew Chem Int Ed, Engl.* 1968, 7: 942
- 3 Knowles W S, et al. *J Chem Soc, Chem Commun.* 1968, 1445
- 4 Morrison J D, et al. *J Am Chem Soc.* 1971, 93: 1301
- 5 Kagan H B, Dang T P. *J Am Chem Soc.* 1972, 94: 6429
- 6 Chan, A S C, Pluth J J, Halpern J. *J Am Chem Soc.* 1980, 102: 5952
- 7 Morrison J D. *Asymmetric Synthesis.* Florida: Acad Press, 1983, 5
- 8 Bosnich B. *Asymmetric Catalysis.* Boston: Martinus Pub, 1986
- 9 杨振云, 等. 均相催化进展. 北京: 化学工业出版社, 1990. 134
(中国科学院大连化学物理研究所
杨振云研究员撰)

负载型铂锡催化剂 supported PtSn catalyst 对负载型双组份催化剂的研究, 最初基于双金属合金催化剂的研究。

20世纪50年代初, 科学家的注意力主要集中在合金催化剂的电子结构与其催化性能间的关联上, 研究比较深入的是Ⅷ族金属元素与IB族金属元素间的合金。因为根据金属的电子能带理论, Ⅷ族过渡金属具有未完全充满的d能带, IB族金属d能带完全被电子所占据, 当Ⅷ族金属与IB族金属形成合金时, IB族金属d能带的电子将向Ⅷ族金属d能带迁移。这样就可以通过改变合金的组成来改变合金的电子结构, 从而与反应活性相关联。这种能带理论认为, 形成合金的两种金属组份间的化学性质已没有差别, 合金催化剂性能的决定因素是其整体电子结构。但是, 现在我们已经知道, 催化剂活性是其表面活性中心定域的化学键效应决定的, 因此应用能带理论解释金属催化作用还存在许多问题。另一方面, 对合金催化剂选择性的解释, 常用的概念是集团效应。集团效应所依据的假设是: 为了形成化学键, 不同的吸附中间物需要的表面原子数不同。集团大小决定吸附中间物的形成, 而吸附中间物的数量则控制着合金催化剂的选择性。

低载量、高分散负载型双组份催化剂, 比非负载的双金属合金催化剂更复杂。这是因为对负载型双组份催化剂在大多数情况下是否有合金生成一直有争议(R. J. Best, W. W. Russel, 1954), 有些情况是否有金属态生成也颇有疑问, 载体影响有时也不容忽视。

对负载型双组份催化剂的研究, 由于受当时合金催化理论研究热潮的影响, Kluksdahl(M. E. Kluksdahl, u. s. pat. 1968)将PtRe/Al₂O₃催化剂的独特催化性能归结为PtRe合金的形成。Sachtler等研究结果表明, PtSn/Al₂O₃催化剂的反应性能(F. M. Dautzenberg, J. N. Helle, 1980)和H₂化学吸附特性(H. Verbeek, W. M. Sachtler, 1976)与非负载的PtSn合金催化剂的反应性能及H₂、O₂化学吸附特性相类似, 从而得出PtSn/Al₂O₃催化剂中存在PtSn合金, 并可应用合金催化理论中的集团效应概念来解释PtSn/Al₂O₃催化剂的反应性能。Sinfelt(J. H. Sinfelt, 1983)从烃类在各种负载双组份催化剂上转化反应结果中得到, 不能形成体相合金的负载型Os—Cu系及Ru—Cu系催化剂的氢解性能与能形成体相合金的Ni—Cu系催化剂相似, 由此认为负载型催化剂组份间是否形成合金并不是决定催化剂性能的主要因素。

林励吾等对PtSn/Al₂O₃催化剂的反应性能, 积碳行为(L. W. Lin, T. Zhang, J. L. Zhang, 等, 1990)及表面结构的研究做了

大量的工作。前期工作主要依据催化剂的反应特性, 指出在PtSn/Al₂O₃催化剂表面上可能形成Pt_xSn_y原子簇, 认为Pt—Sn间的电子转移改变了Pt脱氢反应的能量因素, 抑制了深度脱氢反应, 提高了催化剂的选择性及稳定性。还利用乙烯—氢滴定方法定量地测定了PtSn/Al₂O₃催化剂表面结构, 提出了PtSn/Al₂O₃催化剂表面存在着以Pt原子簇为主的多Pt中心(M₁中心)和以Pt为中心周围结合锡组份的单Pt中心(M₂中心)模型, 解释了正庚烷在其上转化反应的特性和积炭行为。近年来, 又对PtSn/Al₂O₃催化剂中锡组份的原位存在状态进行了表征, 并将其与丙烷脱氢反应结果相关联, 结果发现, PtSn/Al₂O₃催化剂中锡组份一般均以氧化态存在, 并且只有氧化态锡才有利于催化剂性能的改善。

随着近代物理测试手段的发展和各种化学表征方法的建立使人们对负载型双组份催化剂中组份的存在状态的描述已发展为将反应数据与各种表征结果结合起来进行综合分析, 从而得到有关负载型双组份催化剂中组份存在状态的更为清晰的图象, 并对其反应行为给予更为合理的解释。

对PtSn/Al₂O₃催化剂而言, 有关催化剂中锡组份存在状态的表征已有大量文献报道, 其主要分歧在于催化剂还原后是否有零价锡生成以及生成的零价锡是否与Pt形成合金。Bacaud和Lieske等应用TPR及H₂、O₂化学吸附等方法对PtSn/Al₂O₃催化剂中锡组份存在状态的研究结果表明, PtSn/Al₂O₃还原后有部分氧化态锡被还原为零价锡, 但大部分锡组份仍以氧化态存在。章素、Gray、Kuznetsov李永希等应用Mössbauer谱及Pakhomov应用XPS对还原后PtSn/Al₂O₃催化剂进行了表征, 其结果直接证实了有少量零价锡生成, 但同时指出生成零价锡数量与锡组份载量、还原条件、催化剂制备方法及其它组份存在与否等因素有关。另一方面, 近期的研究成果证明PtSn/Al₂O₃还原后, 锡组份至多被还原为Sn¹⁺, 载体Al₂O₃可以稳定Sn¹⁺使其很难进一步还原为零价态。此外, Bouwman等应用XPS表征手段研究了还原后PtGe/Al₂O₃催化剂中锗组份的存在价态。结果指出催化剂在350℃还原时只存在Ge⁴⁺、Ge²⁺, 只有当还原温度升高至650℃时, 才发现有PtGe合金生成。同样, 有证据表明PtRe/Al₂O₃催化剂中铼组份是以氧化态存在, 并不能与Pt形成合金。综合上述表征结果可以看出, 氧化铝负载铂系双组份催化剂还原后, 其组份并非全部以金属态存在。在多数情况下, 其中第2组份基本以氧化态存在。

应用原位Mössbauer谱研究各种载体负载的铂锡催化剂480℃还原后锡组份存在状态的结果是: PtSn/AC(活性炭)催化剂还原后有零价锡生成, 此时生成的零价锡以游离态存在; PtSn/SiO₂和PtSn/MgO催化剂还原后生成的零价锡与铂形成了Sn⁰/Pt合金; PtSn/Al₂O₃催化剂还原后, 锡组份仍全部以氧化态存在。因此, 通过改变载体就可调变催化剂还原后锡组份的存在状态; 通过对其催化性能的评价就可以了解到负载铂锡催化剂性能与其锡组份状态间的关系。

由丙烷在负载型铂锡催化剂上氮气中脱氢反应结果得到: PtSn/AC催化剂活性基本不受Sn/Pt原子比变化的影响; PtSn/SiO₂和PtSn/MgO催化剂活性随Sn/Pt原子比增加而下降; PtSn/Al₂O₃催化剂活性随Sn/Pt原子比增加而明显升高。由此得出, 游离态锡对催化剂性能影响不大; 与铂形成合金的零价锡使催化剂中毒而部分失活; 只有氧化态锡才有利于催化剂性能的改善。

有关负载型铂系双组份催化剂中金属铂组份与氧化态组份间的协同催化作用一般是指某一反应首先在催化剂的某一活性中心上活化形成中间体; 然后此中间体在催化剂的另一活性中心的作用下转化为产物。在丙烷脱氢中, PtSn/Al₂O₃催化剂的金属铂组份与氧化态锡组份间存在着协同催化作用。原位Mössbauer谱结果表明, SnO₂/Al₂O₃能够与反应物分子丙烷作用形成活化中间体。活化中间体可以通过升温热分解而部分转化为SnO/Al₂O₃及丙烯; 也可以通过加入Pt/Al₂O₃而完成分解, 除生成丙

研究员、林励吾院士撰)

物丙烯外,锡组份几乎又全部恢复到 $\text{SnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (98.1%) 状态。因此,在丙烷脱氢中, $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂中金属铂组份和氧化态锡组份的作用被认为是 $\text{SnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 中心用于活化丙烷形成活化中间体, $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 中心则用于从活化中间体上通过反溢流过程移去 H_2 ,使其分解生成 $\text{SnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 及脱氢产物丙烯,从而使丙烷催化脱氢过程得以循环进行。这就是所谓的 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂中金属铂组份与氧化态锡组份间的协同催化作用。

负载型铂系催化剂表面积炭可分为两类,一类是金属表面积炭,其 H/C 比较高;一类是载体表面积炭,其 H/C 比相对较低(有时接近石墨)。部分程序升温氧化及反应结果证实了载体表面积炭对催化剂活性影响不大,这一结果意味着通过增加载体的相对积炭量就可制得具有较好抗积炭性能的催化剂。

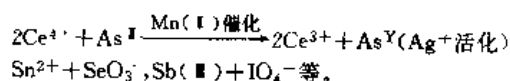
$\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂表面积炭是个动态过程。积炭前身在催化剂表面随着反应进行而改变其化学状态和位置。第 2 组份锡的加入削弱了烃类分子在 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂金属铂表面上吸附,促进不饱和含炭物向载体表面迁移,使 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂表面积炭更多地沉积在载体上。因此,在与 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂有相同积炭量(甚至更高)情况下, $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂仍具有较高的金属表面裸露度,表现在催化性能上则是 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂比 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂具有更高的活性及稳定性。催化剂表面积炭一般认为是一种非永久性中毒过程,通过控制氧化再生可以将其除去而使催化剂恢复活性,多次循环再生容易引起两种主要的永久性中毒过程。其一是活性金属组份烧结,其二是活性表面结构破坏。林励吾、范以宁等根据催化剂活性评价及 H_2 吸附结果指出,晶粒烧结是 $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂在再生中失活的主要因素。但 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂经多次循环再生后,其脱氢活性及氢吸附量急剧下降,与铂晶粒变化趋势不相一致。由此认为,催化剂活性表面结构破坏将是 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂在循环再生中失活的主要原因。

积炭后的 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂除 Pt 晶粒表面存有积炭外,大部分炭位于 Pt 晶粒周围由氧化态锡所构成的活性表面。金属表面积炭与晶粒底层以氧化态锡存在的锡组份并非紧密接触,因此部分炭炭与无积炭直接氧化一样对氧化态锡与载体间键合作用破坏程度较小;而载体上大量积炭直接坐落在由氧化态锡构成的活性表面上,高温烧炭所引起的局部升温及所释放的气氛(H_2O 、 CO)等严重破坏了氧化态锡与载体表面间的键合作用,使其在活化还原时容易生成零价锡并与铂形成以非活性金属锡为表面富集元素的铂锡合金,最终导致 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂在循环再生中逐渐失活。因此,如何使锡组份稳定在氧化态将是制备高稳定性 $\text{PtSn}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 催化剂的关键。

(中国科学院大连化学物理研究所杨维慎

锰的催化动力学分析法 利用 $\text{Mn}(\text{I})$ 对某些氧化还原反应的催化效应。反应中的氧化剂主要有高碘酸盐、过氧化氢、过硫酸盐和溶解氧,少数文献报道用铈(IV)盐。还原剂除 $\text{Mn}(\text{I})$ 本身外,尚有次亚磷酸盐(H_2PO_2^-)、As(III)、Sn(II)、Sb(III)等少数几种无机物。而绝大多数反应体系使用有机物,其中多为有机染料。此外,还有用草酸盐($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$)、EDTA 等。锰作为催化剂加入时,都为 $\text{Mn}(\text{I})$ 。在许多指示反应中,加入了活化剂,如邻菲罗啉(o-Phen)、2,2-联吡啶、氨三乙酸(NTA)等,均可大幅度提高测定灵敏度。测量反应速度的方式主要是光度法(含流动注射分析光度法),其次为荧光法和化学发光法。

D. P. Nikolelis(1977)提出次亚磷酸盐与高碘酸盐的反应受 $\text{Mn}(\text{I})$ 催化而加速。王尊本等(1986)在该体系中引入 NTA 作活化剂,并将该方法付之应用。此外,还有文献提出以下指示反应:



在 $\text{Mn}(\text{I})$ 的催化反应中,高碘酸盐是使用得最多的氧化剂,使用最多的有机染料是孔雀绿。若在该体系中加入活化剂 NTA、o-Phen,可将检出限分别降低至 $2 \times 10^{-11} \text{g/ml}$ 和 $1.5 \times 10^{-10} \text{g/ml}$ 。对于 Fe 和 Al 的干扰,多以氟化物消除。此方法已应用于单矿物、岩石、海洋沉积物、自来水、雨水、白酒和铝箔等样品中痕量 Mn 的测定。这类指示反应所使用的其它有机化合物有:二乙氨基苯、对乙氧基苯胺、联邻甲氧基苯胺、对甲氧基苯胺、o-Phen(KI 存在)、百里酚蓝、乙酰丙酮、乙醇胺、对-品红无色母体及该体系加入 NTA、对氨基苯磺酸、N,N-二乙基苯胺、次甲基绿、甲基紫、二甲苯蓝 FF(o-Phen 活化)、二甲酚橙(o-Phen 活化)、溴酚蓝(o-Phen 活化)、亮绿 SF 等。上述反应的灵敏度一般均能达到 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{g/ml}$,有的达到 10^{-11}g/ml 。应用的测定对象也比较广泛,包括工业品、化学试剂、水、饮料、食品、矿石等。

过氧化氢是仅次于高碘酸盐使用较多的氧化剂。这类反应使用的有机化合物也很多,已报导的有靛红(乙烯二胺存在、o-Phen 存在)、茜素 S、葱醌、o-Phen、酸性蓝(C. I. 45)、H-酸、荧光试镁灵、水杨醛脒、靛蓝、偶氮玉红 S(二蓝光酸性红)、钛试剂、邻联茴香胺(o-Phen 和钛试剂存在)、水杨脒基胍、邻苯三酚红(2,2-联吡啶活化)、3-(2-羟基偶氮)吡啶-2,6-二醇、铬蓝黑 R、酸性铬蓝 K、钙红[2-(2-羟基-3-羧基苯基偶氮)萘酚-4-磺酸钠盐]等。这类反应的灵敏度与高碘酸盐作氧化剂的反应相当,应用范围也颇广。

表 1

Mn(I) 的若干催化荧光法和催化化学发光法

体系或试剂	$\lambda_{\text{激发}}$ (nm)	$\lambda_{\text{测量}}$ (nm)	检测限或测定范围	应用范围
水杨醛硫代缩氨基脒 + H_2O_2 (碱性介质)	365	440	$(2 \sim 9) \times 10^{-9} \text{g/ml}$	
	390	450	10^{-10}g 级	葡萄酒、白兰地酒
吡哆醛, 2-吡啶脒 + H_2O_2 (碱性介质)	355	425		乳制品、大麦糖
桑色素空气氧化(碱性介质)			$7 \times 10^{-8} \text{g/ml}$	
鲁米诺 + H_2O_2		425 发光	10^{-9}g/ml	
H^+ 浓度 2nmol/L			$10^{-9} \sim 10^{-6} \text{g/ml}$	
鲁米诺 + IO_4^-		425 发光	$8 \times 10^{-12} \text{g/ml}$	井水、人发
			$10^{-11} \sim 10^{-7} \text{g/ml}$	

利用溶解氧或自动氧化的指示反应相对较少。F. Grases 等(1983)提出了琥珀酰亚胺二脒的自动氧化反应,反应产物的最大吸收分别位于 695nm 和 310nm,测定范围为 $0.2 \sim 12 \mu\text{g/L}$,已用于分析试剂中锰的测定。俞汝勤等(1983)以 $\text{Mn}(\text{I})$ 催化氮溶

液中溶解氧氧化 1,5-二(2-羟基-5-氨基)-3-氨基甲脒,可测定 $1 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-7} \text{mol/L}$ 的 $\text{Mn}(\text{I})$,已用于天然水。S. Nakono 等(1985)提出了用溶解氧氧化 N,N-二甲苯胺和 3-甲基-2-苯并噻唑啉-2-酮脒的偶合反应,并以 o-Phen 作活化剂,在 590nm

处测量吸光度。此外,还有邻羟基苯基硫脲的自动氧化反应(乙二胺可提高灵敏度),在 H^+ 浓度 $0.126nmol/L$ 的碱性介质中, $Mn(II)$ 催化铬黑 T 溶液由蓝色转为黄色,在 $611nm$ 处测量吸光度,其降低程度与 $0\sim 10ng/ml$ $Mn(II)$ 成正比,灵敏度为 $1.07 \times 10^{11}g/ml$ 。

除上述 1 种类型反应外,还有一类较为简单的指示反应,例如 $Mn(II)$ 催化草酸盐与高锰酸根的反应和 EDTA 与重铬酸盐的反应等。它们同样被用来测定痕量锰。

自 1975 年 Ruzicka 等提出流动注射分析后,已得到长足的发展,国内外均有综述发表。此技术应用于锰的动力学分析亦见报道,所利用的指示反应仍是氧化还原反应。例如光儿茶酸与过氧化氢反应,在 $480nm$ 处测定,检出限为 $10^{-9}g/ml$,测定范围为 $0\sim 40ng/ml$ 。利用 F. Grases 等(1983)报导的反应(在 $695nm$)结合流动注射技术的方法已应用于化学品、咖啡、稻米中锰的测定。再如, A. A. Alexiev 等(1985)报导的体系亦被引入流动注射分析,在 $475nm$ 处可检测 $0.1\sim 0.4ng/ml$ 的 $Mn(II)$ 。实际上,流动注射分析用于催化光度法将有利于测定的速度和精密度的提高。

锰(II)催化荧光法和催化化学发光法都已有许多专著和评论。(表 1)

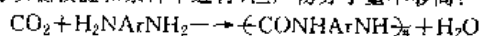
(江西大学张振辉撰)

二氧化碳作为聚合反应单体 carbon dioxide as a monomer for polymer Synthesis

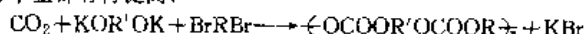
地球上二氧化碳贮量超过煤和石油总和的 10 倍,发展二氧化碳聚合物化学对增加人类的财富和改善地球环境有积极意义。从二氧化碳合成高分子化合物通常不必经过还原反应,比从二氧化碳合成许多小分子产物在能量上更为有利。

二氧化碳很稳定,难以活化,至今未发现其均聚物,虽可与其它单体共聚,但往往要消耗大量能量和催化剂。这方面的研究工作从 1969 年后才活跃起来。20 年后才取得接近实用化的进展。

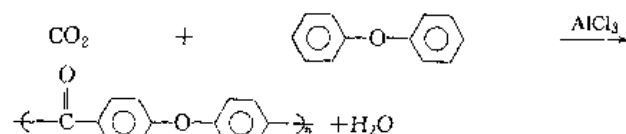
二氧化碳是碳酸的酸酐,可以象一些二元羧酸及其酸酐那样作为共缩聚单体。例如,在高温高压下可与二元胺缩聚产生聚脲。山崎升发现,某些磷化物如 $HOP(OPh)_2$, $PhOPCl_2$, 或 $(EtO)_2PN(Me)COMe$ 等可以吸收缩聚产生的水分子,从而使反应得以在较温和条件下进行,但产物分子量不够高:



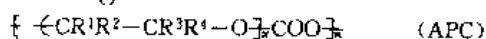
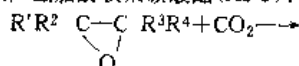
曾我和雄发现以冠醚作催化剂时,二氧化碳与酚钾反应生成的有机碳酸钾盐与二卤化物缩合可得到聚碳酸酯,但反应产率与分子量都有待提高:



在路易斯酸存在下, CO_2 还可与二苯醚缩合生成聚脲:



二氧化碳含有 $C=O$ 不饱和键,是一个加成聚合单体。井上祥平发现,在阴离子配位催化剂作用下,二氧化碳可与环氧化物共聚产生脂肪族聚碳酸酯(APC):



其中, $R^1\sim R^4$ 为氢、烷基、环烷基、芳基等。重要的催化体系如表 1 所示。其中许多体系倾向于产生交替共聚物(碳酸酯单元分数 f_c 接近于理想值 0.5)。

表 1 合成脂肪族聚碳酸酯的重要催化体系

催化体系	温度 °C	时间 h	\bar{M}_n 10^{-4}	f_c	催化 效率
$Zn(OAc)_2$	60	40	2.0	0.5	98
$ZnEt_2 + H_2O$	30	48	—	0.47	309
$ZnEt_2 +$ 连苯三酚	35	44	23.5	0.5	1811
$(ZnCl_2 + \text{P})COONa + AlEt_3$	60	24	5.5	0.45	1600
$TPP \cdot AIOR + PPh_3$	30	168	2.0	0.5	$>10^4$
$Y(P_{204})_3 + iBu_3Al +$ 甘油	60	17	9.2	0.3	3064
戊二酸锌	85	4	11.6	0.5	5082
PBM	70	6	2.0	0.43	$>10^4$

表中催化效率以每摩尔主要催化剂金属产生聚碳酸酯的克数表示(\bar{M}_n 为苯乙烯-丙烯酸共聚物); TPP 为四苯基卟啉, OR 为 $\text{-(OCHMeCH}_2\text{)-}nCl$; P_{204} 为 $(n-BuCH(Et)CH_2O)_4P(O)OH$; PBM 为 $\text{C}_6\text{M}^II\text{Cl}_5[\text{Fe}(\text{CN})_5]_{2-3b}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{KCl})_d$, M^II 为 Zn 或 Co, P 为聚醚。表中数据表明,采用金属有机催化剂或卟啉金属络合物,采用一定的双金属搭配,及采用一些聚合物载体对提高催化效率都有一定的作用。陈立班等制备的聚合物负载双金属催化剂 PBM 催化效率高,产物成本低,适于工业化生产。动力学研究表明,共聚过程是 PBM 催化剂首先与环氧化物络合,然后两种单体轮流插入活性中心,如果两个二氧化碳分子同时与一个催化活性中心络合,可使其封闭而失去活性。因此聚合反应速度分别与环氧化物浓度的二次方、催化剂浓度的一次方、二氧化碳浓度的一次方成正比。

先将二氧化碳与环氧化物相互作用生成环状碳酸酯,如 $\text{CH}_2\text{CH(Me)OCOO}$, 然后使后者在三水合锡酸钠等的作用下

开环聚合亦可得到脂肪族聚碳酸酯,不过并非交替共聚物,其中碳酸酯单元分数仅为 $0.1\sim 0.2$ 。

氧杂环丁烷在 $AlEt_3-H_2O-acac$ ($acac =$ 乙酰丙酮)作用下,甲醛在叔胺催化作用下也可和二氧化碳共聚,产物也都是脂肪族聚碳酸酯。

APC 具有较好的机械性能,可望在塑料、橡胶、胶粘剂、涂料、生物降解材料和隔热材料等方面得到广泛应用。它可与丁腈橡胶共混而制成高强度耐油橡胶,与环氧树脂共混而起增韧作用。但 APC 的热稳定性不够理想,在 170°C 以上加工即有热分解发生,特别是容易从链端逐个脱出环状碳酸酯分子(“解拉链式”降解)。一种改进的办法是将 APC 用酰氯、酸酐、异氰酸酯等处理,“封闭”其末端的羟基,可将其热分解温度提高到 250°C 左右。

库仑(Witold Kuran)等发现用三元环硫化物或环氮化物亦能与二氧化碳共聚,产物分别为硫代聚碳酸酯和聚氨基甲酸酯。

一些烯类单体如乙烯基醚类,也可与二氧化碳共聚,但产物分子量及碳酸酯分数较低,结构也不确定。共轭双烯与二氧化碳共聚可能得到不溶性产物。二氧化碳与双炔单体共聚得到一种七链含环状内酯单元的共聚物。

二氧化碳,环氧化物可以和第三单体共聚得到一系列三元共聚物。陈立班等发现,二氧化碳,环氧丙烷,顺丁烯二酸酐共聚得到一种新的不饱和聚酯聚碳酸酯;二氧化碳,环氧化物,异氰酸酯共聚可得到一种新的聚亚胺碳酸酯;二氧化碳,环氧化物和烯类单体(如甲基丙烯酸甲酯、苯乙烯、丙烯腈等)共聚也可得到相应的三元共聚物。三元共聚的方法可以明显改善共聚物的热稳定性并赋予它各种新的性能。

利用上述反应可以制备一些含二氧化碳单元的嵌段共聚物。在二氧化碳-环氧化物等的共聚中加入含若干个活泼氢的调节剂可以控制其分子量及其端基官能度,进而制备聚氨酯。

以二氧化碳作为聚合单体的研究历史虽不长,但已构成一个广阔的研究领域并展示了良好的应用前景,将对人类文明产生不容忽视的影响。

参考文献

- 1 Yamazaki N, et al. in Organic and Bioorganic Chemistry of Carbon Dioxide. Inoue S, Yamazaki N et al. Kodansha Ltd; Tokyo, 1981,4:153~184
- 2 Rokicki A, et al. J Macromol Sci Rev Macromol Chem, 1981,C21:135
- 3 Aida T, et al. Macromolecules, 1986,19:8
- 4 Daniels J A, et al. EP 388 030;1990
- 5 陈立班. 中国发明专利(ZL 891 00701,1993,ZL91109459.8, 1996)
- 6 陈立班. 高分子通报,1991,1:46
- 7 Motika S A, et al. US 5' 026 676, 1991
- 8 Chen X H, et al. Macromolecules, 1991,24:5305

(中国科学院广州化学研究所陈立班
研究员撰;杨淑英审)

新型薄层反应器 thin bed reactor 反应在较薄的催化剂床层区中进行,避免二次副反应发生,并利用反应器本身良好的轴向导热性能,将强放热反应的反应热移出,同时用此反应热预热反应原料,使反应平稳和持续地进行,以防止反应器中催化剂床层超温,是多相催化反应中近期正在探索的一类新型固定床反应器,在反应温度高、速度快的强放热型催化反应中有广阔的应用背景。

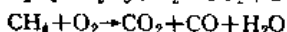
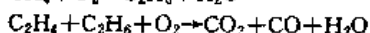
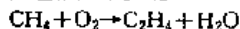
众所周知,许多催化反应常需要在较高温度下进行,并伴有强烈的反应热放出,这些因素使得普通固定床反应器的操作和控制变得非常困难,极易造成体系的飞温现象,使反应器的材质选择十分困难,同时使催化剂烧结失活,选择性下降。因此为了获得最佳的反应效果,除了应开发具有优异性能的催化剂外,人们还在新型催化反应器的理论研究、设计和开发上作了大量工作。

对于强放热反应,过去应用较多且比较成熟的反应器为流化床反应器和列管式反应器。对于流化床,由于增加了流体与催化剂颗粒之间的传热和传质面积,反应热可较快移出,避免了局部过热和反应飞温。但是返混现象使反应的选择性有所下降,催化剂强度不好时,磨损现象将十分严重,因而在使用流化床时,许多方面均受到限制。列管式反应器也是适用于放热反应的一类反应器,这类反应器中,气体在床层中接近活塞流,无返混现象,有利于提高反应的选择性。但是由于其结构复杂,特别是对在高温下发生的强放热反应,热交换介质的选择倍受限制,其加工制造较不方便。

薄层反应器的概念在已工业化的许多生产过程中已有所应用。例如,工业上由氨氧化制硝酸的第一步反应: $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}$ 是一个强放热反应,反应在低温时,选择性不好会发生氨分解的副反应,一般需要反应温度大于 800°C ,由于反应温度很高,而且又是强放热反应,催化剂床层易超温,作为催化剂的 Pt-Rh 合金网容易损坏。因此,工业上采用仅由约十层左右 Pt-Rh 网构成的薄层催化剂床层,反应于 $800^\circ\text{C} \sim 900^\circ\text{C}$ 进行,在 $0.001 \sim 0.0001\text{s}$ 中即可完成。

采用薄层反应器的工业化过程,类似的还有由氨、甲烷氧化制氢氰酸的过程,甲醇氧化制甲醛的过程等。

近年来,如何利用丰富的天然气资源(主要是甲烷)制取有用的化工原料已成为当今全世界瞩目的热点课题。1982年开勒(G. E. Keller)等首先报导了甲烷偶联制乙烯的催化过程,该过程主要包括如下反应:



总包反应为一个强的放热反应,甲烷转化率为 25% 时,绝热反应温升可达 1000°C 以上,如何使反应平稳发生,并能取得较好的 C_2H_4 、 C_2H_6 收率是当前面临的一个关键问题。筛选开发出活性

高选择性好的催化剂是实现这个目标的一个方面,而另一方面,反应工艺过程的研究(主要是反应器的设计)对于提高反应的选择性也是至关重要的,这方面的研究现已受到了人们的高度重视。

如前所述,由于甲烷氧化偶联制乙烯是一个强放热反应,使用简单的固定床反应器实现工业化,几乎是不可能的。而对于流化床及列管式反应器,也存在着上面所述的诸多限制。在这种情况下,美国雷生(D. W. Leyshon)在吸取了已工业化生产的氨氧化等过程成功经验的基础上,于 1989 年底提出了新型薄层反应器的概念,即在这类反应器中,不光催化剂的床层较薄,而且利用反应器本身良好的轴向传热性质,将反应区内的反应热移出,并用这部分热量来预热低温区的反应原料,使反应器内的温度分布比较均匀,防止催化剂床层局部超温,使反应平稳进行,从而获得较好的反应结果。初步的实验结果表明,在雷生所设计的薄层反应器内(催化剂装量达 72g),甲烷氧化偶联反应的甲烷转化率、乙烯和乙烷的总选择性及收率分别达到了 26.1%、71.5% 和 18.6%。在这样大的反应器规模下,获得了如此高的乙烯和乙烷收率在现阶段已属于国际领先水平。同时该类反应器还有如下优点:由于该反应器内利用了反应放热来预热反应原料,所以在反应时,不需要高温的原料预热器;由于催化剂床层较薄,反应的压力降低;由于反应区内温度分布均匀,反应中所需添加的水蒸气明显减少。

在国内,笔者所在的课题组,从 1991 年初开始,进行了新型薄层反应器的探索及其在强放热反应中的应用的研究,现已取得了初步的进展,结合甲烷氧化偶联制乙烯这个强放热反应,在 $30 \sim 40\text{ml}$ 催化剂装量规模的反器内已取得了甲烷转化率 25%~30%,乙烯乙烷总选择性约 60%,乙烯乙烷总收率 15%~17% 的较好结果。反应器利用不锈钢本身的良好传热性能将甲烷氧化偶联的大量反应热轴向传导至低温原料区,预热反应原料,使反应器内催化剂的床层温度分布较为均匀,从而使反应的选择有了较明显的改善。

新型薄层反应器的研究,现仍处于初始阶段,许多问题还需深入系统地研究。例如,反应器内的温度分布和浓度分布规律,传热传质规律等。搞清这些问题,可使薄层反应器尽快应用到甲烷氧化偶联制乙烯的工业放大性实验中去。可以预计,新型薄层反应器不光在甲烷氧化偶联制乙烯的反应中有明显的应用前景,而且在其他高温下发生的强放热反应中也有广阔的潜在应用前景。

参考文献

- 1 王文兴编著,工业催化. 北京,化学工业出版社,1978,198
- 2 Keller G E, et al. Journal of Catalysis, 1982, 73: 9
- 3 Annomiya Y, et al. Catalysis Review-Science and Engineering, 1990, 32(3): 163
- 4 Leyshon D W. U S Pat, 4, 886, 932
- 5 Leyshon D W. Study in Surface Science and Catalysis (A. Holmen et al, Eds). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B V, 1991, 61: 497

(中科院大连化学物理研究所张涛
研究员撰;徐竹生审)

直流电弧放电中的高温化学反应 自从电感耦合等离子体光源(ICP)用于发射光谱分析后,ICP 在原子发射光谱光源中的优势已被大量的文献所证实。经典光源(电弧/火花)的性能也不断改进,光源的可控性和稳定性得到了一定改善。直流电弧用于矿物、难熔及陶瓷等物料的分析仍然在增加,由于该激发光源可以满足固体粉末样品的分析要求,因此,以电弧为激发光源的光谱分析法仍然具有不可低估的重要作用。

直流电弧放电中的高温化学反应研究一直是发射光谱分析中的活跃课题。人们利用电极高温,使电极孔穴中的待测组份或基体与加入化学试剂(热化学反应剂或载体)之间的发生高温化

学反应,改变待测组份或基体的挥发性,实现待测元素与基体间的分馏,从而明显改善分析方法的灵敏度和精密性。其高温化学反应能否发生以及反应进行的程度,可根据反应的 Gibbs 自由能变化 ΔG° 值来进行估计。若 $\Delta G^\circ < 0$, 则该化学反应可能进行。但在实际工作中,人们往往采用 X 射线和热重分析对电极孔中残留物的化学组成及结构进行分析,以判断电极化学反应发生的可能性。影响电极化学反应的因素有电极温度、电极形态、化学反应剂的用量以及发生该化学反应所需的最低温度以及试样物质疏松温度和反应剂的分解温度,但不能使试样烧结或熔融。游离态卤素在高温下能与许多金属或其氧化物作用形成较易挥发的卤化物,因此卤化反应的研究和应用也最为广泛。

氟化反应 在高温下氟能与一些结合得非常牢固的氧化物(如 TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 等)和碳化物(B_4C)作用,形成较易挥发的氟化物。最常用的氟化剂有 NaF 、 LiF 、 CaF_2 、 BaF_2 、 SrF_2 、 PbF_2 、 ZnF_2 、 NH_4F 以及聚四氟乙烯(PTFE)等。氟化反应既可用于难熔基体中的中等和易挥发元素的测定,也可用于难熔基体中难挥发杂质的分析。N. I. Zolotareva 等(1986)报道以 ZnF_2 为氟化剂,测定了 NiO 中难熔元素 Ti、Mo、W、Zr,检出限达 $0. X \mu g/g$ 。王植桓等(1983)报道了 AlF_3 作氟化剂,反应产物 RE_3F_3 的沸点较 FeF_3 低,借此分离 RE 和 Fe。吴景铤等提出将分析物先用 HF 煮解,再在电弧中继续进行氟化反应的方法。此法分析硅酸盐试样时不仅可使杂质元素的蒸发加快,而且可减少 Si 的分子光谱干扰,但试样中含 B 时,有 B 的挥发损失。PTFE 是一种高效有机氟化剂,尽管它受热分解时易飞溅,但它具有分解温度低($\sim 415^\circ C$)、不熔融、含氟量大和不影响弧温等优点。A. Delijiska 等(1984)及 C. Prauceva 等(1989)以 PTFE 为氟化剂研究了石墨粉中 Al、Be、B、Mo、V 等的蒸发率行为,发现 PTFE 的存在,使这些元素的蒸发大大提高,而碱金属元素和 Fe 由于形成相对难挥发的氟化物而使蒸发速度减慢。作者测定了标准样品中的 V、Mo、Ti 等,结果和参考值吻合。T. Kantor 等(1980)利用载气引入易挥发的碳卤化合物(CCl_4 、 CCl_2F_2)使之与难熔元素发生异相卤化反应,提高了难熔元素的挥发率,谱线强度增强近 50 倍。该法还有一特点是不存在试剂的污染。胡斌等认为 $CuF_2 \cdot 2H_2O$ 和 $CuOHF$ 是较之 NaF 、 CaF_2 更为有效的氟化剂,对氟化反应机理和影响氟化反应的因素进行了深入系统的探讨,并以 $CuF_2 \cdot 2H_2O$ 为氟化剂分析了谷物试样和高纯 Y_2O_3 中痕量非稀土杂质,取得了令人满意的结果。总之,氟化反应对 B 和难熔元素 RE、W、Mo、Zr、Hf、Nb、Ta、Ti、Cr、Si 等的测定十分有效。

氯化反应 常用的氯化剂有 $AgCl$ 、 $CuCl$ (Cu_2Cl_2)、 $PbCl_2$ 和聚氯化乙炔等。有文献指出,碱金属、碱土金属以及 I B、II B、过渡金属的氯化物的存在不同程度地提高了稀土的谱线强度,增大了元素的蒸发率。胡斌等认为这是由于氯化物与待测元素在电弧放电过程中发生了氯化反应,且这一反应具有异相反应的特征,卤素阴离子的作用还依赖于基体的组成,而碳粉是测定稀土元素最有效的基体。陈见微等认为稀土基体存在时氯化物对非稀土元素谱线的增强起着重要作用,杂质元素谱线增强与其同氯化物的氯化反应有关,但电弧的温度主要由基体支配,载体的影响不明显。Florjan 等研究了添加物对电弧主要性能参数的影响,发现 $CuCl$ 可以提高精密性,这与 $CuCl$ 是强氯化剂且 Cu 高电离电位有利于电极孔中化学反应发生有关。值得一提的是,有人以聚氯化乙炔氯化剂利用弧烧过程中稀土发生氯化反应的差异,使轻重稀土之间发生分馏。该法已应用于高纯 Y_2O_3 中轻稀土杂质的测定。氯化反应在矿物原料在分析中应用最广泛。陈寿根等以 $CdCl_2$ 为热反应剂测定了锆英石、独居石、黑钨矿等复杂矿物中的 Nb 和 Ta,仅需 $5mg$ 试样,使用一套标准可测单矿物中 0.04% Nb 和 0.025% Ta。此外对氯化反应在矿物原料中的分析应用进行了一系列研究,取得了较好的效果。林昌森等以 $CdCl_2 + AlF_3$ 为热反应剂测定了土壤中的 14 个杂质,其测定下限从 $0.01 \mu g/g$ Ag 到 $1 \mu g/g$ W。

碘化反应 相对来说,碘化反应的研究和应用较少,碘化剂

可采用碘或碘化物。有人将电弧中蒸发和激发过程分开,考察了碘的作用,认为 I_2 的存在仅仅影响元素的传质过程。陈礼宽等报道以 $ZnO-I_2(9:1)$ 为载体,提高了 Au 与基体元素的分馏效应,方法可用于矿石中的 $0.03 \mu g/g$ Au 的测定。有人以 $CuI_2 + CdI_2$ 为碘化剂测定岩矿中 Br、In、Tl,检出限分别为 0.05 、 0.3 、 $0.3 \mu g/g$ 。应用碘化反应测定地质试样中多种痕量元素的方法也见报道。陈寿根等用 $NH_4F + LiI$ 混合卤化剂分析岩石中 Ge、Sn、Br、Tl,此混合卤化剂较之单一的要好。

硫化反应 常用的硫化剂有硫磺粉、 Sb_2S_3 和有机硫化剂 NaDDTC。有文献应用热力学方法对晶体硫、 Sb_2S_3 、 $CuCl_2$ 、 $AgCl$ 、 NaF 等热反应剂与 WO_3 和 Fe_2O_3 在碳电极中可能发生的反应,按 $800K$ 和 $1600K$ 计算反应前后的 ΔG° ,结果表明: $1600K$ 时除 NaF 外,其余热反应剂都能与 WO_3 和 Fe_2O_3 进行反应。计算值和实验结果还表明,当使用晶体 S、 Sb_2S_3 作热反应剂时,可使 W、Fe 在蒸发时间上得到分离。Morgulis 等探讨了 CdS 和 Sb_2S_3 作载体时对痕量元素从电极孔中蒸发,谱线强度以及减少基体效应的影响。文献还指出 HgS 和 CuS 对 Pb、Rh、Cd、Cr、Zn、Ca、Ba、V 有增敏作用。有的以 Sb_2S_3 作硫化剂,在较低的温度下($550^\circ C$)试剂分解出对 Fe 蒸发起抑制作用的游离硫,并与 W 形成易挥发的 WS_2 ,明显地改善了 W 的检出限,其测定下限达 $\mu g/g$ 级。该法对基性岩和铁矿样品中 W 的测定特别适用。此外,以 $K_2S_2O_7$ 为硫化剂测定地质试样和黄铁矿中痕量的 Ge、Iu、Tl、As、Sb、Bi 等的方法也有报道,测定下限为 $0.1 \sim 10 \mu g/g$ 。

碳化反应 在高温下许多金属氧化物均可被碳还原生成低价氧化物或碳化物(如 REC 、 WC 、 ZrC 等)。碳化反应主要用于某些能形成难熔碳化物的基体中杂质元素的测定。利用 W 的碳化反应,可以提高测定 WO_3 中许多杂质元素的灵敏度。

氧化反应 氧化反应对于测定那些金属呈难挥发,而氧化物易挥发的元素(如 Re、Mo、W 等)是很有效的。有文献报道以 $PbO + K_2SO_4(95:5)$ 为化学反应剂,使 Re 以 Re_2O_7 或 ReO_2 形式蒸发进入等离子体,方法的检出限达 $20ng/g$ 。

(武汉大学胡斌、江祖成、廖振环、曾云鹤撰)

光诱导电子转移 photoinduced electron transfer

是研究受光激发的分子与基态分子间发生电子转移,生成激基复合物以及其后竞相发生的各种反应过程;包括电子逆转,反应物回到基态;电荷分离产生离子自由基;电荷复合重新形成反应物激发态或生成其它电荷转移中间体以及生成稳定的产物等。

光诱导电子转移的研究始于 60 年代初。1963 年 Weller 等报道了吡与二甲苯胺复合物的发光,并认为这种复合物是由激发单态的吡与基态二甲苯胺间的电子转移反应而成,称之为激基复合物(exciplex)。激基复合物的形成与组成它的两个组分的氧化还原电位相关,当然也和激发光子能量大小有关。激基复合物的电子结构几乎与离子对相同,极性甚大,偶极矩一般为 $(3.3 \sim 5) \times 10^{-30} C \cdot m$ 。激基复合物的生成一般会出现新的荧光发射峰或类似于离子自由基的瞬态吸收峰。激基复合物发射峰的位置随溶剂的变化可表示为:

$$V_{max} = V_0 - \frac{2\mu^2}{hca^3} \left(\frac{\epsilon - 1}{2\epsilon + 1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{n^2 - 1}{2n^2 + 1} \right)$$

式中 V_{max} 是激基复合物在不同溶剂中的峰值发射波数, V_0 为在气相中的峰值发射波数, μ 是其偶极矩, h 是普朗克常数, c 是光速, a 是激基复合物中电子给体及受体间的距离, ϵ 是溶剂的介电常数, n 是溶剂的折射率。以 V_{max} 对 $\left(\frac{\epsilon - 1}{2\epsilon + 1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{n^2 - 1}{2n^2 + 1} \right)$ 作图能得到一条直线,从直线截距可估算出 V_0 , 从斜率则可计算出激基复合物的偶极矩。

电子转移的极端情况是电荷分离为自由的离子。用时间分辨的激光闪光光谱技术可直接观测到离子自由基的吸收光谱,另外电子顺磁共振(ESR)与光化学诱导动态核极化(Photo-CIDNP)也是研究其反应机制及动态学的有力工具。在极性环境

中,由于离子与溶剂相互作用可降低离子自由基的能量。由于光诱导电子转移是在分子被激发条件下发生的,因此它也是荧光猝灭现象的重要机制之一。对于这一现象如果电子给、受体化合物在基态时没有电荷转移络合物生成,它们之间的荧光猝灭应该符合 Stern—Volmer 方程:

$$I_0/I_Q = \tau_0/\tau_Q = 1 + K_q\tau_0[Q]$$

式中 I_0 与 I_Q , τ_0 与 τ_Q 分别为给体(或受体)化合物在不加受体(或给体)化合物的荧光强度与荧光寿命。 $[Q]$ 为作为猝灭剂加入的受体(或给体)化合物浓度, K_q 是电子转移荧光猝灭速度常数,由于猝灭是通过分子在溶液中相遇发生电子转移而引起的,因此该值与扩散常数相近。电子转移过程中的自由能变化(ΔG)可用 Weller 提出的公式计算:

$$\Delta G = E(D/D^+) - E(A/A^-) - \Delta E_{0,0} - e^2/a\epsilon$$

式中 $E(D/D^+)$ 为电子给体化合物的氧化电位, $E(A/A^-)$ 为电子受体化合物的还原电位, $e^2/a\epsilon$ 项是指在介电常数为 ϵ 溶剂中将两个离子自由基带到相距为 a 时体系所增加的能量,一般小于 8.4kJ/mol, $\Delta E_{0,0}$ 是电子给体或受体化合物的激发能。将上述热力学计算的 ΔG 值与分子间电子转移动力学实验中得到的 K_q 数据相联系,可以发现随 ΔG 值的降低, K_q 会不断增大到极限值,这一结果和 Rehm, Weller 提出的理论曲线相符,可用以检验光诱导电子转移的发生。早在 1956 年, Marcus 研究电子转移速度时曾推导出一个简单的数学式表达反应的活化能 ΔG^\ddagger 与自由能变化间的关系:

$$\Delta G^\ddagger = \Delta G^\ddagger [1 + \frac{\Delta G}{4\Delta G^\ddagger}]^2$$

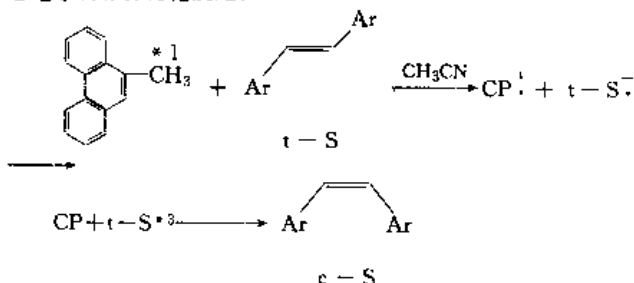
上式表明,反应的始态与终态势能面的交叉点随反应自由能(ΔG)的降低,先降低,又转而升高,即电子转移反应速度随 ΔG 的降低先增快,后又减慢,呈抛物线形,减慢部分形成了一反转区。需要注意的是,当 ΔG 改变时,电子给、受体间的距离必须保持不变。这种实验要求长期难以满足,由 Rehm 和 Weller 研究的分子间电子转移反应中,扩散速度掩盖了电子转移速度,也无法观测到反转区的存在。直到 1984 年 Miller 和 Closs 在研究了一系列电子给、受体用刚性间隔基团(距离固定在 $\sim 10\text{\AA}$)联接的分子内电子转移反应才首次证实了 Marcus 电子转移速度反转区的存在。毫无疑问,深入研究电子转移理论对详细了解反应规律,掌握运用光诱导电子转移反应大有裨益。

70 年代,有机化学家发现了光敏电子转移反应能产生离子自由基的现象。光敏作用能扩充反应体系的有效吸光波长范围,提高反应效率;因此在合成化学、太阳能转换与存储等方面都占有重要地位。对一个好的电子转移敏化剂有如下要求:(1)敏化剂吸光范围内,反应底物、产物、中间体及副产物都不吸光;(2)光化学、热化学稳定性好;(3)有合适的激发态寿命;(4)与反应底物的前沿轨道匹配,以免其它失活途径与电子转移反应竞争;(5)要有合适的氧化还原电位,使激发态光敏剂的氧化还原性质与基态底物的相匹配,从而使反应中自由能变化 ΔG 小于零。下表列出一些常用电子转移敏化剂及其氧化还原电位与激发能数据:

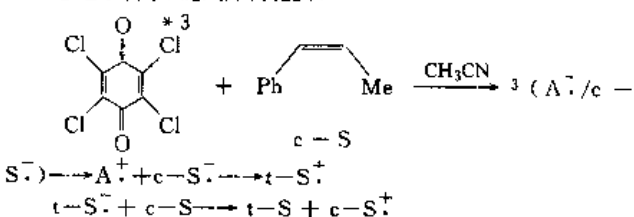
敏化剂	氧化还原电位 $E_{1/2}V_s \cdot SCE(CH_3CN)$	激发能 eV
2,6,9,10-四氧基萘	-0.45	2.82
1,2,4,5-四氧基苯	-0.45	3.83
9,10-二氧基萘	-0.89	2.88
1,4-二氧基萘	-1.28	3.45
9-氧基萘	-1.39	2.96
9-氧基菲	-1.88	3.42
1-氧基萘	-1.98	3.75
9-甲基萘	0.96	3.17
萘	1.16	3.28
苝	1.27	3.35

敏化剂	氧化还原电位 $E_{1/2}V_s \cdot SCE(CH_3CN)$	激发能 eV
2,3-二甲基萘	1.39	3.86
菲	1.58	3.58
蒽	1.62	3.97
联苯	1.80	

光敏电子转移过程可在多种光化学反应中发生,如异构化、重排、二聚、加成、取代、还原、C—C、C—O、C—S 键断裂、消除、氧化以及引发聚合等反应。反应可经过多种途径,如可通过敏化剂的单重态或三重态与基态底物发生电子转移,尔后经电荷分离或电荷复合产生底物三重态,或自由基链反应等历程得到产物,如单重态电子转移异构化反应:



三重态电子转移/链式异构化反应:



光诱导电子转移过程在含有电子给体、受体基团的共轭或非共轭的分子内及超分子中普遍存在。如共轭 D—A 化合物受光激发后,在极性介质中可发生分子内电荷转移,尔后 D, A 两部分通过绝热反应使轨道相互垂直,去偶,动态弛豫到扭曲的分子内电荷转移态(TICT 态)。这类分子对周围环境极敏感,有奇特的光学、电学性质。这种现象在光电子材料及生物分子内普遍存在。对这一问题的研究刚刚开始。再如 Wasielewski 等研究了胺—吡啶三元分子的分子内电子转移反应。被光激发的吡啶将一个电子转移给胺,胺再转移一个电子给吡啶,得到了长寿命的胺正离子自由基与胺负离子自由基。预期用该分子制成的分子电池能产生 1.5V 的光电压。

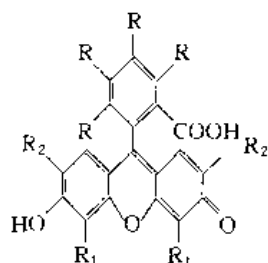
总之,光诱导电子转移反应在合成化学、聚合反应、光疗、太阳能转换以及现代高新技术的诸多领域中都占有重要地位。而最为重要的是地球上所有生命现象赖以存在的化学能也是经光诱导电子转移反应由太阳能转换得到的。

参考文献

- 1 Kavarnos G J, et al. Photosensitization by irreversible electron transfer: Theories, experimental evidence, and examples
- 2 Fox M A, et al. Photoinduced Electron Transfer Part A, B, C, D, Elsevier, 1988
- 3 Balzani V, et al. Supramolecul Photochemistry Ellis Horwood, 1990

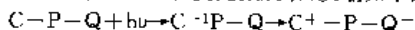
(中国科学院感光化学研究所张宝文教授、吴世康教授撰)

用占屯染料模拟光合作用 imitating photosynthesis using xanthene dyes 占屯(xanthene)染料的通式如下:



典型的占屯染料有荧光素($R=R_1=R_2=H$), 曙红($R=H, R_1=R_2=Br$), 赤鲜红($R=H, R_1=R_2=I$), 玫瑰红($R=Cl, R_1=R_2=I$)等。用占屯染料模拟光合作用的意义在于: 作为光敏剂, 这类染料合成方便, 稳定性好, 性能富于变化, 如需要单重态丰富的可选荧光素(荧光量子产率 $\phi_F=0.92$, 系间穿越量子效率 $\phi_{ISC}=0.03$), 而玫瑰红($\phi_F=0.09, \phi_{ISC}=0.77$), 赤鲜红($\phi_F=0.11, \phi_{ISC}=0.60$)等则以三重态为主, 要兼顾单重态和三重态可选曙红($\phi_F=0.48, \phi_{ISC}=0.32$)。

在人工模拟天然光合作用的光化学反应中心的研究中, 1987年Gust和Moore等人把类胡萝卜素(C)作为给体, 把醌类(Q)作为受体, 同时共价连接到光敏染料卟啉(P)上, 形成C-P-Q三元分子体系。在受光激发后, 发生如下的光致电子转移:



其寿命为2~3 μ s(原则上这就是可以被利用的化学势能), 量子产率在好的情况下近于0.3。1985年Seta等把这类分子装入双层类脂膜, 照光以后就能观察到稳定的光电流。在能量关系方面, 类胡萝卜素的单重态能量可传给卟啉, 表现了给体的天线作用。另一方面, 卟啉的三重态能量又可返回给类胡萝卜素, 这样就可避免三重态的卟啉与空气中的氧气作用形成破坏力很强的单态氧对体系的破坏作用, 这就是所谓的给体的保护作用。1990年Gust等又合成了四元体系和五元体系, 光致电子转移效率得到了进一步的提高, 而寿命已长达55 μ s。

沈涛等长期从事占屯染料的研究, 在模拟光合作用的光电转换方面已做了相当的工作。

用占屯染料模拟光合作用的课题, 今后的研究内容是合成多元占屯染料体系, 研究它们在溶液中的构象, 测定它们在溶液中的能量传递和光致电子转移的效率, 电荷分离产物的寿命等光物理数据, 同时把这些多元分子组装入LB膜、双分子类脂膜(BLM)或薄层电池上, 检验它们的光生电压和光生电流, 相关这些性能, 特别是光电转换性能与结构因素的关系。这些结构因素包括: (1)占屯染料的性能, 如单重态能量, 三重态能量, 氧化还原电位, 荧光量子产率, 荧光寿命, 系间穿越量子效率等; (2)给体的性质, 如氧化电位, 单重态能量, 三重态能量等; (3)受体的性质, 如还原电位, 单重态能量, 三重态能量等; (4)连接链的长度和刚性(与人分子的构象有关); (5)连接的基团, 如酯基, 酰胺基, 醚基, 胺基等的影响; (6)发色团的个数, 如三元, 四元, 五元等; (7)发色团的次序, 如D-S-A, S-D-A, S-A-D等。

用占屯染料模拟光合作用的研究, 预期应用比较简单的占屯染料与给体和受体的组合在性能上能接近国际先进水平, 并注重应用背景, 希望能够更加实际一些。通过优化设计和合成, 以期最终找到几种性能优良的、比较实用的光电转换功能分子。

参考文献

- 1 Seta P, et al. Nature, 1985, 316: 653
- 2 Gust D, et al. J Am Chem Soc, 1987, 109: 846~856
- 3 Shen T. Dyes and Pigments, 1987, 8(5): 375~380
- 4 Shen T, et al. J Photochem Photobiol, A, 1989, 47: 203~212
- 5 Zhao Z G, et al. Spectrochimica Acta, 1989, 45A: 1113~1116
- 6 Gust D, et al. Science, 1990, 248: 199
- 7 Zhou Q F, et al. J Photochem Photobiol, A, 1990, 51: 229~

235

- 8 Zhao Z G, et al. Chinese Chem Letters, 1990, 1: 19~20
- 9 Zhao Z G, et al. J Photochem. Photobiol, A, 1990, 52: 47~53
- 10 Zhao Z G, et al. J. Photochem Photobiol, A, 1991, 56: 73~80

(中国科学院感光化学研究所博士生导师沈涛研究员撰)

螺 噁 嗪 类 光 致 变 色 化 合 物 photochromic compounds

kelongin spirooxazines 螺噁嗪是以1,3-二氢-1,3,3-三甲基[2H-咪唑-2,3'-[3H]萘并[2,1-b][1,4]噁嗪](又称母体化合物)为典型代表的一类光致变色有机化合物的简称, 在众多的光致变色化合物中, 螺噁嗪以优良的光敏性和耐疲劳性而著称, 因而在光信息记录介质, 伪装、防护以扩装饰等方面应用开发前景十分诱人。

1961年R. E. FOX首先报告了螺噁嗪的光致变色作用。但正式见于文献报道却始于小野久武和长田千秋在1971年获许的两篇美国专利。他们使等摩尔5-R-1,3,3-三甲基-2-亚甲基咪唑啉($R=H, CH_3, CH_3O, Cl$, 俗称费歇尔碱)与 α -亚硝基- β -萘酚在乙醇中回流或用类似的1-(β -羧乙基)-3-H-咪唑溴化物在三乙胺存在下与亚硝基萘酚在乙醇中回流或用类似的1-(β -羧乙基)-3-H-咪唑溴化物在三乙胺存在下与亚硝基萘酚反应制得取代的螺噁嗪。为浅黄色结晶体, 产率10%~30%。在常见有机溶剂或树脂溶液中近于无色, 紫外光照射显蓝色, 停止照射便迅速回到原来的无色状态。1973年Y. Toshio按类似方法以亚硝基萘酚二磺酸(盐)为原料最先制得水溶性光致变色螺噁嗪。后来有人考察了1-苯基螺噁嗪在石英载体上的光致变色作用, 1980年R. T. Hovey取得了以螺噁嗪为活性物制造光学元件的专利。

80年代以来, 人们发现螺噁嗪类在性能上某些不足点只要将其环结构略加改变就能得以改善, 于是对螺噁嗪的兴趣迅速增加。根据美国化学文摘提供的资料, 若以1972—1981年发表的文章作基数, 1982~1986年增加了4倍, 而1989年一年已超过10倍。

1983年N. Y. C. Chu发表了对螺噁嗪母体光物理性质研究的结果, 主要内容包括无色和着色亚稳形式紫外可见吸收光谱(λ_{max}^{OH} : 345, 317, 297, 238, 203nm; 612, 578nm)的阐明, 电子能级(无色体三重态能级 $2.4 \times 10^4 \sim 2.1 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$), 着色形式热褪色动力学及热力学参数(平衡的标准焓 $\Delta H^\circ = 1.5 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$, $\Delta H^\circ = 6.7 \times 10^3 \text{cm}^{-1}$)等。1987年S. Schnieder等的实验表明, 螺噁嗪从激发态形成到C-O键断裂的时间不足2ps, 初始光解产物X*保持底物的正交构型(寿命依赖于溶剂和取代基, 在3~11ps内), 然后衰变为平面构型的各种部花菁结构。1988年吉武顺一等考察了长链烷基($C_8H_{17}, C_{14}H_{29}, C_{18}H_{37}$)取代对螺噁嗪在溶液中和固体状态下光致变色性能的影响, 指出无论在何种状态长链取代都对热平衡中的着色体有利。着色体的热褪色按一级动力学进行并随烷基碳链的增长而减慢, 在非极性介质中着色体有聚集现象, T_g 值在很大程度上也决定于烷基链的长度, 在 T_g 以上光致变色行为与溶液中类似。随后E. Pottier等进一步考察了取代基、杂原子和溶剂的影响。1989年A. Kellmann等提出了螺噁嗪光致变色的单重态机制, 并认为着色体更倾向于醌式结构。1990年C. Bohne等利用分步双激光技术(Two-Laser Two-Colour Techniques)对螺噁嗪的光致变色过程进行了更仔细的研究。所有这些都对螺噁嗪变色详细机理的阐明以及可能的工业应用无疑是具有意义的。

螺噁嗪中间体和目标分子的合成已进行过大量的工作。关键中间体之一是2,3,3-三甲-3H-咪唑或2,3-二甲基咪唑, 有3种制备的方法(1)费歇尔法: 由苯胺和3-甲基-2-丁酮经缩合和环化反应制备, 催化剂常用无水氯化锌, 醋酸, 盐酸和硫酸等, 以用硫酸的产率为最高(>90%)。(2)比希勒(Bischler)法: 由苯胺与3-R-3-甲基-2-丁酮($R=X, OH$)反应制备, 最好产率也可达90%

以上。(3)P. G. Gassman 等用叔丁氧基对苯胺进行N-氯化,然后与3-甲硫基-2-丁酮反应,并将所得盐用三乙胺关环,再经钨钼化氢还原,得到2,3-二甲咪唑。相比之下,前两种方法用得较多。取代的3H-咪唑也可用这些方法制备。但无论在何种场合,合成目标分子前,都得把3H-咪唑用卤代烷转化为相应季铵盐。又由于实际起反应的是费歇尔碱,因此采取了将季铵盐先用碱处理或使反应在三乙胺存在下进行的步骤。另一个必不可少的中间体是亚硝基酚,包括邻亚硝基苯酚,1-亚硝基-2-萘酚,1-亚硝基萘酚或菲酚等。其中用得最多的是亚硝基萘酚类,用它们合成的螺咪唑约占总数一半。这些亚硝基萘酚多用相应酚的亚硝化制备,也有用波底架(Baudisch)反应由芳烃制备的。有时,可有1,2-二酮单肟替换亚硝基,例如由9,10-菲醌与羟胺反应制成的菲醌单肟就是其中之一。用以上所述中间体进行适当搭配,选择合适的反应和纯化条件,就可得目标分子螺咪唑。合成目标分子的另一个途径是使咪唑肟与1-氨基-2-萘酚反应,所需肟是由费歇尔碱或相应季铵盐按对酚同样的方法亚硝化再经重排得到的,这条路线的优点相对产率较高,但可惜的是原料价钱贵来源不便。在合成螺咪唑并咪唑时T. Va. Vlasenko 等用高沸点醇作反应介质,得到了比用乙醇高10~15倍的产率。但总的来说,如何提高螺咪唑的合成收率仍是今后急待解决的问题。

已知螺咪唑着色体的吸收波长(λ_{max})大多在550~610nm左右,颜色不够多样。为了改变这种状况,人们正从以下两方面进行新的合成工作,一是变化螺环体系,例如把咪唑部分换成苯并咪唑,苯并咪唑或咪唑,噻吩,吡啶等并合的咪唑;把萘环或蒽,菲环部分换成二苯并咪唑,二苯并噻吩以及咪唑等杂环。这种改变骨架的办法主要着眼于增大(减小)共轭体系;另一方面是向螺环上导入适宜的取代基,可在制备中间体阶段导入,也可在螺环建立后导入。这种办法一般只能产生几个纳米的波长变化,唯向2-位导入胺基效果明显(如从550nm变到610nm),但其原因至今尚不明了。向2-萘酚的3-位导入咪唑或苯并咪唑,以便最终把这些杂环基引入目标分子中是又一项有新意义的合成工作,因为它不仅在于改变吸收波长,而且还可以提供配位杂原子,从而使开环体有可能与金属离子形成螯合物。这正是提高着色体热稳定性的重要途径。

虽然光致变色螺咪唑高聚物已进行过大量研究工作,但类似的螺咪唑报道却极少。已知合成螺咪唑单体的方法有以下几种。(1)直接导入含“—CH=CH—”的基团,例如利用对乙烯基氯苯的方法;(2)间接导入,如先导入羟丙基,再使之与丙烯酰氯反应;(3)导入环氧丙基,这是进行开环聚合的常用官能团。有了这些不同形式的单体,实现螺咪唑的高分子化就比较容易了。

就应用来说光稳定性或使用寿命是至关重要的。H. Dürr 曾用“sun test”仪测定了各类光致变色化合物的寿命($t_{1/2}$),结果是螺咪唑1~4h,螺咪唑10min,而螺咪唑可达到200h以上。尽管如此,人们还希望有进一步的提高。提出的方案是加入添加剂(主要是光稳定剂,抗氧剂或单线态氧猝灭剂)。现证明比较有效的添加剂有:(1)有机镍光稳定剂如Cyasorb UV24和Tinuvin P,它们可使螺咪唑耐光疲劳性能成倍增加而不影响其着色性能;(2)硫代双酚类如Sumilizer WX-R,经在老化机上测试,它可使螺咪唑经受住2000h以上的考验;(3)其它如受阻胺(Tinuvin-770)和含氮醇类也有使用。由螺咪唑制成的工业产品和防护用的光致变色太阳镜,防伪印刷用的光致变色油墨以及光致变色涂料,玩具、化妆品、纺织品(窗帘,汗衫)等均有不少专利报导,但人们更期待着在非线形光学器件,高分辨光信息贮存和再现以及在生物探针方面的应用能尽快取得突破性的进展。

参考文献

- 1 Chiu N Y C. Can J Chem, 1983, 61:300
- 2 Chu N Y C. Solar Energy Materials, 1986, 14:215
- 3 Kellmann A, et al. J photochem photobio A Chem, 1989, 49:63
- 4 Dürr H. Angew Chem Int Ed Engl, 1989, 28:413

- 5 吉武顺一,等.日本化学会志,1989,1,127
- 6 Bohne C, et al. J Chem Soc, Chem Commun, 1990, 7:571
- 7 Vlasenko T Va, et al. Izv Akad Nauk S S S R, 1990, 7:1521
- 8 中村正孝,等.有机合成化学,1991,5:392

(西北大学李仲杰教授、马引民撰)

光致变色的螺二氢咪唑 photochromic spiro[1,8a-dihydroindolizines] 螺[R-[X,1]-[1,8a]-二氢咪唑]简称螺二氢咪唑(Spiro[1,8a-dihydroindolizines]),在紫外光照射下螺环开裂,形成由共轭碳(杂)环带负电荷,咪唑环带正电荷的两性离子结构(着色体),吸收光谱由紫外区移向可见区。受热或用可见光照射两性离子结构,经1,5-电环化回到起初的螺环结构,颜色褪去。这是最近发现的一类性能优良的光致变色化合物,在辐射强度控制和测量,信息记录和储存,太阳能转换以及装饰材料等方面都有应用前景。

70年代在德国H. Dürr等在实验室发现第1个光致变色螺二氢咪唑。他们在氮杂环存在下,用螺环丙烯衍生物进行实验时得深绿色溶液,光照下溶液颜色保持不变,避光颜色逐渐褪去。从该溶液中分离出一种淡黄色固体,溶解在有机溶剂中可重复上述光致变色现象。经结构测定,证明是具有螺环结构的二氢咪唑。进而,用取代的吡啶、咪唑和吡嗪与螺环丙烯衍生物反应,得到一系列具有光致变色性质的螺二氢咪唑类化合物。它们一般为无色或淡黄色晶体,其溶液的紫外吸收光谱 λ_{max} 分别在240~250nm,和360~410nm。两性离子结构中导入不同取代后基 λ_{max} 在505~726nm之间,呈蓝、红、紫和绿等各种不同的颜色。这类化合物的着色反应绝大多数为光诱导,只有极少数为热开环反应;褪色反应是热或光反应。分子结构的不同部分对性能的影响有所不同。螺环上的取代基对两性离子结构的热褪色反应速度影响较大,当取代基为二苯甲基,苄基,萘基,四苯基环戊二烯基和蒽基时,褪色速度依次加快。咪唑2-位和3-位上的取代基对螺环结构光着色量子效率影响较大。在同样环结构情况下,以氰基取的光着色量子效率为最高(约为0.8)。咪唑环部分对光学稳定性影响较大,用咪唑代替吡啶可使光学稳定性提高10倍左右。热褪色反应活化自由能(ΔG^\ddagger)为20~30kcal·mol⁻¹,自由焓(ΔS^\ddagger)均为负值(-14~-25kcal·mol⁻¹·K⁻¹),自由焓(ΔH^\ddagger)随结构不同而不同。变色寿命一般为10³~10⁴次。

螺二氢咪唑主要有三种制备方法。(1)环丙烯法:缺电子的环丙烯与六元氮杂环(吡啶、咪唑、吡嗪等)衍生物在非极性溶剂(乙醚、二氧甲烷和四氢呋喃等)中,室温、避光下进行亲核加成反应,通过中间体环丙基阴离子裂解成烯丙基阴离子,同时在氮杂环上形成正离子,然后进行1,5-电环化反应生成螺二氢咪唑,产率较高。(2)吡啶法:在合成2-位和3-位上有强吸电子取代基(氨基,三氟甲基等)的螺二氢咪唑时,由于相应取代的环丙烯稳定性差,用方法(1)难以得到预期产物。采用先合成取代的螺吡啶衍生物,然后与六元氮杂环衍生物在非极性溶剂中共同进行光解,可直接得到螺二氢咪唑。(3)重氮物或乙烯基卡宾法:方法(1)和方法(2)适用于合成2-和3-位上具有相同取代基的螺二氢咪唑。对于2-位和3-位上有不同取代基的情况可先制备相应取代的乙烯重氮物,它在光作用下经由乙烯基卡宾可形成螺环丙烯衍生物,然后再与六元氮杂环进行热或光反应即可得到预期的螺二氢咪唑。

鉴于光致变色高聚物的实际应用上的重要价值,利用物理的特别是化学合成的方法在主链或侧链上以共价键接上光致变色基团的工作普遍受到人们的关注。已经表明高分子体系的螺二氢咪唑可通过不同途径获得,最简单的是将螺二氢咪唑溶解在高分子(聚甲基丙烯酸酯、聚碳酸酯、氯乙烯丙烯腈共聚物,苯乙烯丁二烯共聚物等)溶液中,挥发除去溶剂,即得到具有不同用途的光致变色高分子材料。另一种方法是将螺二氢咪唑附着或吸附在高分子材料(如透明的CR-39, diethylene glycol-bis-alkyl carbonate)的表面,所得光致变色材料适用于滤光器的制作。上

述高分子材料的光致变色性能与相应变色剂在溶液中的变色性能相比,褪色速度变慢,变色寿命增长。前者是由于高分子的刚性所致,后者是因高分子体系内不存在能使两性离子结构分解的单线态氧。由于螺二氢吡喃的螺环结构对酸、碱等常用催化剂不稳定,采取将螺二氢吡喃与高分子单体共聚或与带有活性基团高分子进行反应的方法制备光致变色高分子有一定困难。但寻求一种合适的方法,如先将螺二氢吡喃的中间体与高分子单体共聚或与带有活性基团的高分子反应,而把生成螺环结构放在整个合成过程的最后一步,这一困难就完全有可能得以克服,这是现今人们所热衷研究的问题。

一个光致变色剂性能的优劣,要从它的光谱特性、灵敏度及耐疲劳性等多方面进行分析评价。螺二氢吡喃的两性离子结构中存在的氮正离子,在空气中容易被氧化,提高其耐疲劳性仍是待研究的一个重要课题。进行这方面的工作,除对螺二氢吡喃进行新结构设计和修饰外,利用环境效应及超分子效应也是一个有发展前途的途径。

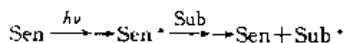
开发螺二氢吡喃的应用是另一个重要研究方面,尤其是在高技术领域的应用。马引民等认为,将螺二氢吡喃相嵌在聚乙烯共轭链中作为分子开关,聚乙烯链本身作为分子导线,自由基或离子自由基作为信号载体,有可能构成一种分子电路。通过光触发开关,螺二氢吡喃处于两性离子结构状态时,开关关闭;处于螺环状态时,开关打开。这种处于双重态的开关正是对双稳态体系所期待的。

参考文献

- 1 Groß H, Durr H. *Angewandte Chemie*, 1979, 91(12):1010
- 2 Groß H, Durr H. *Angewandte Chemie*, 1982, 94(3):204
- 3 Durr H. *Angewandte Chemie Int Ed Engl*, 1989, 28:413
- 4 Durr H. Elsevier, Amsterdam 1990, 6:210
- 5 Durr H. *Praxis der Naturwissenschaften—Chemie*, 1991, 40(4):22

(西北大学马引民、德国萨尔大学 H. Durr 教授撰)

光敏化 Photosensitization 是指在一光化学反应中,来自光源的光量子不是直接被反应分子吸收引起反应,而首先被作为敏化剂的分子所吸收,然后通过分子间的能量传递或电子转移,使反应物分子发生光化学反应的一种现象。由于光敏化可用以扩充光化学反应的有效吸收波长范围、提高光化学反应的效率和改善光敏材料的性能,因此,光敏化,特别是敏化机理已成为光化学中十分重要的研究课题。利用能量传递来敏化光化学反应已有较长历史。如果把 Stern-Volmer 对荧光猝灭的观察作为能量传递研究的开始,那么距今已有 70 年了。它是通过将激发的敏化剂(sen)分子能量转移给反应底物(sub)分子而实现以下反应:



为了能有效的进行能量传递,敏化剂分子应满足下列基本条件:(1)作为能量接受体的反应物分子,其激发所需的能量应小于作为能量给予体的敏化剂分子激发态的能量。这是应当满足的热力学条件;(2)被激发的敏化剂分子可通过多种途径发生衰变,回复到基态,因而具有一定的寿命。作为有效的敏化剂分子,其激发态寿命必须长到能使其能量转移至反应物分子所需时间的程度。这是敏化剂应具备的动力学条件。

根据上述基本条件可以想到:在能量传递敏化过程中,敏化剂分子三重激发态的性质是研究中的一个重要环节。由于光子能量和光的波长成反比关系,因此当敏化剂的吸收波长被扩展至较长波段时,敏化剂激发态的能量降低,在这种情况下,如反应物分子仍要求较高能量才能激发,则处于较低能位的敏化剂激发态分子就不能将能量转移给反应物分子,为此必须通过三重态和三重态间的能量转移途径。这是由于不同化合物分子单重激发态(S*)和三重激发态(T*)间的能隙是不同的。如敏化剂分子的S*态和T*间的能隙很小,即激发的敏化剂分子单重态,通过系

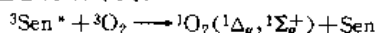
间穿越形成敏化剂激发三重态,但其能级高度下降不多。相反,如反应的分子的S*态和T*间能隙较大,即三重激发态处于较低能位,这就可以通过下列三重态间的反应,实现敏化剂在长波长吸收条件下的能量转移:



一个典型的例子是蒽和二苯酮间的能量传递,已知蒽的单重激发态和三重激发态的能级高度分别为 385kJ/mol 及 255kJ/mol,而二苯酮的则分别为 301kJ/mol 及 289kJ/mol,如果以蒽为敏化剂则可通过单重态间的能量转移将蒽激发态的能量传递给二苯酮,使二苯酮分子激发,相反如以二苯酮为敏化剂则可通过三重态间的能量转移将能量转移给蒽。可以看出:正是由于二苯酮单重激发态和三重激发态间的能隙甚小,因此可以实现如上述的三重态间的能量转移。必须指出:三重激发态寿命和单重态寿命相比一般较长,这就有利于能量转移的实现,即在此条件下比较易于满足敏化剂所要求的动力学条件。下表中列出的是一些常用三重态敏化剂的重要光物理参数。

敏化剂	单重态能 量 (kJ/ mol)	三重态能 量 (kJ/ mol)	单重态寿 命(s)	三重态寿 命(s)	系间穿越 量子产率
丙酮	~356	~327	10 ⁻⁹	10 ⁻⁵	1.0
苯乙酮	~331	~310	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁴	1.0
二苯酮	~314	289	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁴	1.0
4-苯基 二苯酮	322	255	—	10 ⁻⁴	1.0
蒽	385	255	10 ⁻⁷	10 ⁻⁴	0.7
2-乙酰 蒽	327	239	—	10 ⁻⁴	1.0
	331	239	5×10 ⁻⁸		0.5
苝二酮	251	230	10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	1.0
比	322	205	10 ⁻⁸		0.3
葱	318	197	5×10 ⁻⁹	10 ⁻⁴	0.7

可以看到:大量的酮类化合物都有着较小的单重激发态与三重激发态间的能隙,同时又有较长的寿命,这说明为什么许多酮类化合物都可作为优良敏化剂使用的原因。能量转移光敏化过程广泛地被应用于不同的科技领域,如在作为光致抗蚀剂聚乙炔醇肉桂酸酯的光二聚化和叠氮化合物的光分解反应中,它们的敏化作用都是通过敏化剂分子的三重激发态向反应物分子进行能量转移而实现的,例如 5-硝基苊, N-乙酰-4-硝基萘胺以及米蚩酮等都是聚乙炔醇肉桂酸酯光二聚的有效敏化剂,加入 5-硝基苊可使其感光波长从 300nm 扩展至 450nm,和不加敏化剂的聚乙炔醇肉桂酸酯相比感光度约提高 500 倍。三重态敏化剂还可以敏化产生单重态氧用来研究光氧化反应,由于基态的氧分子是三重态的,因而所用光敏化剂的三重激发态能量在大于 40 167kJ/mol 时,就可通过能量转移产生主要为 1Σ_g⁺ 态的单重态氧,而当敏化剂的三重态能量为 22~38167kJ/mol 时,则生成的仅为 1Δ_g 态的单重态氧,如下式:



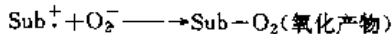
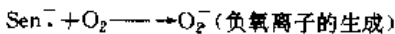
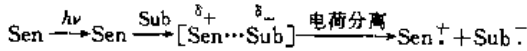
已知一些染料如亚甲兰、曙红和孟加拉玫瑰等都是良好的产生单重态氧的敏化剂。能量转移的光敏化过程还广泛用于研究光异构化反应,光碎片化反应及光交联反应等。

利用电子转移过程敏化光化学反应是近年来迅速发展起来的一种新的敏化机制。50 年代 Mulliken 提出电荷转移络合物的概念,指出这种两组分的络合物是由电子给体化合物和电子受体化合物通过电荷转移而形成的,当光电子给予体的电离势愈低而电子受体的电子亲和能愈高愈易于形成电荷转移络合物

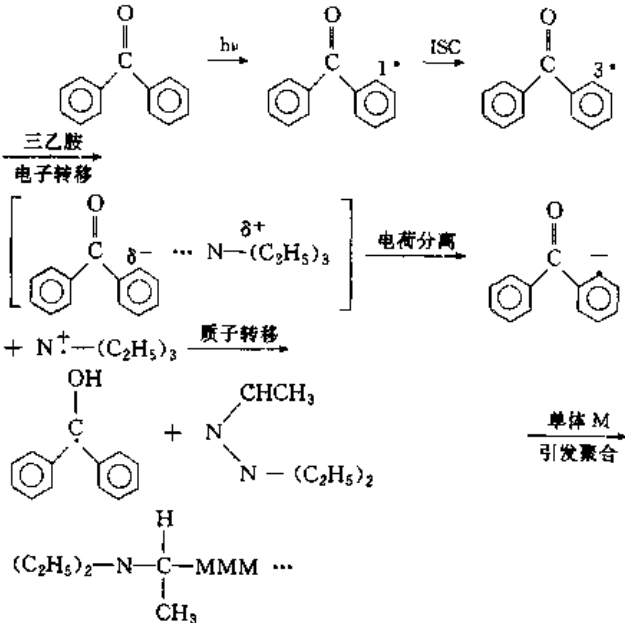
(CTC)。以后, Weller 又发现了二甲基苯胺在光照下可生成激基复合物, 并指出这是因为光诱导电子转移的结果, 他们提出了如下的热力学公式:

$$\Delta G = E_{(D/D^+)} - E_{(A^-/A)} - \Delta E_{O,O} - e^2/a\epsilon$$

式中 ΔG 是指发生在电子转移反应时, 体系自由能的变化, $E_{(D/D^+)}$ 为电子给体化合物的氧化电位, $E_{(A^-/A)}$ 则为电子受体化合物的还原电位, $e^2/a\epsilon$ 项是指在介电常数为 ϵ 的溶剂中将两个离子自由基引至相距为 a 时体系所增加的能量, 对一能自发进行光诱导电子转移的体系, 其 ΔG 应为负值, 反之, 则不能发生光诱导电子转移。从上面的讨论中可以看出: 电子转移光敏化反应和能量转移光敏化不同的是在电子转移敏化反应中不要求敏化剂有较高的激发单重态或三重态的能位, 而仅要求如敏化剂为电子给体时应有较低的氧化电位, 或为电子受体时应有较高的还原电位, 以保证过程的 ΔG 为负值。正因如此, 这就给要求扩展辐照波长范围的光谱敏化带来很大的方便。但是在另一方面和能量转移敏化不同的是在能量转移过程中, 涉及的仅为光物理问题, 即通过敏化过程后, 被激发的敏化剂分子回到基态, 而不会引起敏化剂发生化学变化, 相反在电子转移敏化中, 敏化剂可以是电子给体或电子受体, 当敏化剂为电子给体时, 通过电子转移就生成了敏化剂的阳离子自由基, 而当敏化剂为电子受体时, 则通过电子转移反应就生成了敏化剂的负离子自由基, 即过程中生成了新的化学物种, 它们有可能不能回复到起始的敏化剂状态。电子转移光敏化过程可以在不同的光化学反应中得到应用。例如在光氧化反应中通过电子转移可以实现对某些不易被单重态氧氧化的底物发生氧化反应, 如以电子受体化合物为敏化剂则有如下反应历程使底物发生氧化。



电子转移敏化还大量的应用于光敏引发聚合体系, 最熟知的是二苯酮/三乙胺体系引发烯类单体的聚合, 反应如下式:

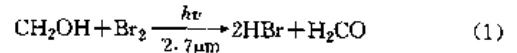


从式中可以看见, 通过激发的二苯酮和三乙胺间的电子转移生成了正、负离子自由基, 再经质子转移过程, 产生了能引发单体聚合的活性自由基, 使单体聚合。电子转移敏化反应还广泛的在光还原反应中得到应用, 通过由不同色素为敏化剂所构成的多组分光还原反应体系可在太阳能光解水制氢工作中起到作用。此外, 值得提到的是由能量迁移、能量转移以及电子转移等一系列过程所组成的综合的光敏化体系在自然界光合作用中起到关键的作用。

(中国科学院感光化学研究所吴世康教授、张宝文教授撰)

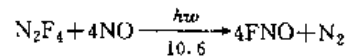
激光催化 laser catalysis 20世纪80年代以后, 人们对应用激光化学寄予了很大希望, 激光催化则是激光化学中较为活跃的研究课题。催化的主要作用是选择性地加速反应速率和选择性地降低定向反应的活化能。由于激光的特性——高强度、单色性, 可以方便地用激光引发产生自由基, 从而在均相催化体系及气相反应中引发反应。所以激光在这些反应中, 从某种意义上讲起到了催化剂的作用。这类反应的特点之一, 就是激光的频率必须与分子中某一基团的特定振动频率相匹配。

激光引发化学反应的工作开展的比较多, 早在20世纪70年代初, Mayer 用连续的100W HF 化学激光(2.7 μm)辐照 $\text{CH}_3\text{OH}-\text{CD}_3\text{OD}-\text{Br}_2$ 气体混合物, 由于OH基的伸缩振动频率为 3681cm^{-1} , 正好与HF激光频率 3704cm^{-1} 匹配, 发生共振吸收, 处于振动激发态的甲醇分子可以和 Br_2 分子在室温下进行反应:



从反应产物可以看出, 此反应是从 Br_2 分子进攻活化的O—H键处开始的。与此相对应, CD_3OD 分子中的OD基伸缩振动频率为 2724cm^{-1} , 不吸收2.7 μm 的光子, 得不到激发, 因此不能与 Br_2 反应。于是, 可用一般的蒸馏法将已反应产物分离出来, 从而使 CD_3OD 含量得到浓缩。这也是激光分离同位素的关键所在。据报道, 用100W的连续激光照射1min, 可使混合物中 CD_3OD 的含量从原来的50%提高到95%以上。

可见红外激光选择活化F—N键所诱导的化学反应产物与加热反应产物有很大的不同, 其原因就在于红外激光选择活化一个化学键(N—F键)引起化学反应, 而加热反应总是在键能最小的地方(N—N键)首先开始反应。这个激光选择性活化化学键引发化学反应的例子有力地说明了激光在这类反应中的特殊选择催化作用。Basov(1974年)等人用连续的 CO_2 激光激发 N_2F_4 分子的F—N键, 反应为:



与热反应比较时观察到在300℃高温条件下, 短时间不反应; 此温度维持5~10分钟, N_2F_4 开始分解, $3\text{N}_2\text{F}_4 \xrightarrow[300^\circ\text{C}]{\Delta} 4\text{NF}_3 + \text{N}_2$, 活化能 $E_a = 83.68\text{kJ/mol}$, N_2F_4 分子的对称振动频率 $\nu_2 = 934\text{cm}^{-1}$, 反对称振动频率为 $\nu = 958\text{cm}^{-1}$, 与 CO_2 激光频率共振。分子吸收的激光能量, 约80%集中在N—F键的键伸振动, 剩下的集中在键角振动, N—N键实际上不激发。激光引发的反应与激光强度、分子比、 N_2F_4 的分压及其它因素有关。反应伴随有可见荧光($\text{F} + \text{NO} \rightarrow \text{FNO}^*$), 说明反应是由N—F键断裂后, 由F原子引发的反应。

激光的这种催化作用, 不但对于普通的化学反应有效, 而且对于特定的化工生产具有潜在的应用前景和工业应用价值。如Chin(1976)在室温下利用高功率TEA CO_2 激光, 辐照高压下的乙烯单体, 激光功率100MW, 乙烯压力范围1.72~6.21MPa, 观察到的聚合物为正十四烷— $\text{CH}_3(\text{CD}_2)_{12}\text{CH}_3$ (约80%)和十八烷— $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$ (约20%)。他们认为这是由于多光子吸收产生的自由基引发的聚合反应。大家知道, 纯乙烯需要在很高的压力下才能聚合, 中压法和低压法生产聚乙烯都是在催化剂作用下进行的, 其产物尚需进行溶剂分离、精制等步骤。由此可见, 红外激光引发聚合可大大降低反应的压力, 而且有可能生产高纯度的聚合物。

作为激光催化的另一例子是生产氯乙烯单体(明长江、徐俊、王文鹤, 1987)。利用激光诱发的自由基生产氯乙烯单体可采用二氯乙烷的原料, 它每吸收一个紫外光子(KrF激光器, 248nm)可以得到 10^4 氯乙烯单体, 此法具有回收率高、能量消耗低等特点。通常氯乙烯单体的生产, 最终一步是中间体二氯乙烷在 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 和 10^6Pa 下通过裂解法进行, 其收率只有

58%，还有许多副产物。而激光诱发自由基生产氯乙烯单体，其收率提高到70%~80%，温度下降至150℃时收率也可达到60%左右，产品的纯度可达99.9%，而能量消耗为现行方法的十分之一。此外，这类反应还可以用于制造各种卤化物，特别是可以用于制造比氯乙烯价值高的氟化物。前联邦德国已建成年产1000t的中试装置，其激光器功率为15W，如果改用50W的激光器，就有实现工业化的可能。

大量的工作表明，利用激光技术进行超精细粉末的合成是比较经济的。这种超精细粉末具有颗粒小、粒度分布窄、比表面积大、强度高、寿命长等特点。Gupta和Yardley采用激光法合成了高效能的Fe/Si/C系列催化剂，这种催化剂可以使合成气(CO+H₂混合物)有效地转化为低分子量的烯烃(主要为乙烯、丙烯和丁烯)，烯烃的选择性很高，在最佳反应条件下，CO的转化率为40%，产物中烯烃的选择性为87%(按重量比)。Fe/Si/C粉末催化剂显示了较高的活性和稳定性，是C₁化学的理想催化剂。实践表明，这种比表面积大的超微粉，作为高效率的催化剂是很合适的，尤其用于浆态床(R. A. Flato等, 1987)。另外，还特别适用于消耗型催化反应，即直接使超微粉催化剂向溶液和气体反应体系进行分散并加以利用。这种超微粉作为一种新型的机敏性高分子材料，已引起人们的重视。与此相类似，Danen等人用连续CO₂直接照射Ca(OH)₂制备的用于正丁烯的异构化反应的CaO催化剂，具有高活性和高选择性。制备CaO催化剂时，照射时间对催化剂的影响与常规法的温度相类似，用14W的CO₂激光照射10~15min，相当于在500℃的高温下处理数小时。可见，选择合适的激光波长来制备催化剂要比常规法方便得多。

在实现多相催化作用时，必须尽可能地增加催化剂与反应物之间的接触面积，为此，通常使用小粒状或粉末状的催化剂，还可以使用其它方法，例如使用被称为扩展表面的催化剂(其实表面积数倍于几何表面积)去增加表面积。实验表明，对于特定的催化剂，使用激光法进行改性可大大提高催化剂的有效表面积。前苏联科学家发现，经激光改性后的V₂O₅为多孔性的管状晶体网，其管截面积为10~10³μm²，长0.1~0.5mm，特征孔径为0.5~1μm。估算表明，由于激光作用，可使V₂O₅晶体的有效表面积增加到10³~10⁴倍。

另外，用KrF激光辐照金属络合物催化剂五羰基铁[Fe(CO)₅]，使之生成催化活性中心，进行烯烃的异构化反应，也是激光改性催化中比较有前途的。

众所周知，激光与固相催化剂都具有加强化学反应选择性的特性。激光表面过程的影响取决于表面性质、表面上吸附质的电子和振动结构、激光光束的特性及受激分子的物化特征。

由于激光技术具有高选择性、高光亮度及单步骤性、空间分辨率接近于1μm，故激光与表面特性结合，可使表面反应速率有大幅度地增长。激光对气-固表面反应影响的第1个实验是Bass等人所做的N₂O与Cu表面的反应在77K下，用连续CO₂激光(~90mW)选择激发N₂O分子U₃模，受激的N₂O分子与Cu表面发生反应。实验表明，在激光作用下的该反应速率比无激光时增加10³倍，激光对表面反应的加强作用。Umstead等人研究了激光辐照下HCOOH在Pt表面的分解反应，发现选择性地激发HCOOH分子，不仅影响反应速率，而且使两个反应通道随激光条件和表面性质的变化而改变。另外，又研究了NO₂同C₂H₂在Pt表面上的光照选择性反应，用Ar⁺激光(488nm)辐照，发现CO₂产量明显增加。由此可见，激光诱导的多相反应具有明显的选择性；激光与催化剂的共同作用，可导致反应通道的改变，甚至产生新的反应。

总之，激光的出现促进了催化的发展，给化学界带来了一场革命。激光诱发化学反应、用激光法合成和改性催化剂以及激光参加复相催化反应都是很好的研究领域，同时，激光催化工业化生产尚有相当远的距离，仍需要在基础研究方面努力进行新的探索。

(北京化工大学郭广生副教授撰)

均分散颗粒体系 the system of monodispersed

particles 是由形状相同、尺寸分布很窄的细微颗粒组成的分散体系，颗粒的尺寸一般在胶体粒子范围之内，因此颗粒在介质中的分散体系具有胶体性质。自然界中有一些均分散颗粒体系，如某些蛋白质、细菌组成的分散体系。1906年齐格蒙第(R. Zsigmondy)制备的金溶胶由直径6nm左右的金颗粒组成，这是最早由人工制成的均分散颗粒体系。此后，相继有人制成功由形状相同、尺寸相近的硫、硒、银、二氧化硅、硫化铍、辛酸及聚苯乙烯等颗粒组成的均分散溶胶或胶乳。1969年马特捷维奇(E. Matijevic)领导的实验室制成了Cr(OH)₃均分散水溶胶。此后，该实验室制备了Al、Cu、Fe(III)、Fe(II)、Ti和Co等一系列金属氧化物或水合氧化物的均分散颗粒体系，并用这种体系进行了金属腐蚀过程的模拟研究及优质磁性材料的开发。从此，均匀分散颗粒体系引起了学术界及产业部门的注目。

只有在严格控制的条件和操作方式下才可能形成均分散颗粒体系。不同物质，甚至同种物质不同形状颗粒的均分散体系的制备方法各不相同。归纳起来有以下几类制法：(1)升温水解法：金属盐溶液在严格控制的条件(浓度、酸度、温度及添加剂等)下发生水解反应，形成均分散颗粒。(2)控制沉淀组分浓度法：调节通气速率或让添加物缓慢分解等方法控制金属离子沉淀组分的浓度，以达到控制沉淀形状与尺寸的效果。(3)包封法：用细微的均分散颗粒作为晶核，预置于可发生沉淀反应的溶液中，使沉淀均匀地包封在预置颗粒上。(4)气溶胶法：反应组分在气溶胶状态下发生化学反应，以形成均匀的细微颗粒；(5)乳液液或微乳液法：让沉淀反应在乳液液或微乳液中进行，以制得均分散颗粒体系。

已提出的均分散颗粒体系形成原理是：沉淀的成核与生长过程分开，即拉默(V. K. LaMer)模型；让所有颗粒同步长大及分隔沉淀区域以限制颗粒的尺寸等。要完全弄清形成机理并在理论指导下设计均分散颗粒体系的制备方法尚有许多工作要做。

到1990年为止，制成的均分散颗粒体系已近百种，其中包括一些单质、各种金属的氧化物、水合氧化物、氢氧化物、硫化物、硒化物、难溶盐及某些高聚物等。均分散颗粒体系的品种正在不断增加。1986年以后，出现了制备同时具有不同化学组成的均分散颗粒体系。这种体系的应用前景是很广阔的。

均分散颗粒首先在理论研究及仪器校准等方面获得了应用。佩林(J. Perrin)，用藤黄的均分散颗粒体系测定阿弗加德罗(Avogadro)常数并验证了沉降平衡理论。马特捷维奇通过铁氧化物均分散颗粒体系的制备，模拟了金属腐蚀机理。彼得(J. Peter)和得蔡利克(G. Dezelic)用纺锤形均分散颗粒对光散射理论进行了成功的检验。聚苯乙烯均分散颗粒已作为校准电子显微镜的基准物；几种金属氧化物及硫化物的均分散颗粒已作为颜料色度的基准。预计均分散颗粒在验证胶体稳定性、动力学性质及吸附理论等方面会有重大作用。

均分散颗粒体系的使用前景十分诱人。细微而均匀的颗粒可以满足高质量磁性记录材料、颜料、油墨及高速摄影胶片等的技术要求。比表面大和均匀性好可以提高多相催化剂的活性及选择性。用均分散颗粒作为陶瓷填料有可能烧制出高韧性的工程陶瓷和具有特异功能的电子陶瓷。均分散颗粒也是纸张、橡胶和塑料的优质填充料。但是要让均分散颗粒投入使用，首先要解决制备规模工业化的难题。如何使这种材料的制备条件简化、工艺连续化，以便扩大到工业生产规模，这仍是亟待解决的重大研究课题。

参考文献

- 1 Laker V K, Dinegar R H. J Am Chem Soc, 1950, 72, 4847~4854
- 2 Matijevic E. Ann Rev, Mater, Sci, 1985, 15, 483~516
- 3 Sugimoto T. Adv Colloid Interface Sci, 1987, 28, 65~108
- 4 陈宗洪, 王光信, 滕弘霓. 化学通报, 1990, 1, 23~26

(青岛化工学院王光信教授撰;陈宗淇审)

电负性 electronegativity 电负性是构成分子的原子对成键电子的吸引能力的度量。元素的电负性越大,其原子吸引电子的能力越强,在形成的分子中就得到或靠近成键电子成为负电荷的一方;相反,元素的电负性越小,其原子吸引电子的能力越弱,在所形成的分子中就失去或远离成键电子成为正电荷的一方。1932年鲍林(Pauling)首先提出电负性的概念,经化学家和物理学家长期运用与研究,其定义、计算方法、应用范围和理论根据等都得到广泛发展与成功改进。有原子、原子轨道、原子团或分子、分子轨道电负性,以及电负性均衡原理几个方面。

1932年鲍林在研究键能变化规律时发现,任何一个原子的电负性都可由含有这个原子的分子的键能或化合物生成焓等热力学数据求得。如果在AB型分子中成键电子是均等分配,则它的键能应相当于A₂和B₂分子的键能平均值,但实验结果几乎总是大于这种平均值。如H₂和F₂的键能分别为432.0和154.8 kJ/mol,两者的几何平均值为258.6 kJ/mol,算术平均值为293.4/mol原子,而HF键能实测值为565.0 kJ/mol。鲍林用共振的观点解释为,AB分子A和B,两电负性不同,使分子在离子和共价两结构之间共振,分子的波函数表示为: $\Psi_{AB} = a\Psi_{A-B} + b\Psi_{A^+B^-} + c\Psi_{A^-B^+}$,*a*代表共价结构A-B的成分,*b*和*c*分别代表离子结构A⁺B⁻和A⁻B⁺的成分(原子电负性前者B>A,后者A>B)。如果A-B分子是以共价键为主,离子结构的贡献要比共价结构小,*a*>*b*(或*c*)。由于离子结构和共价结构之间的共振,产生了共振能。共振能来源于离子结构的静电吸引力,其数值等于额外键能(Δ), $\Delta = E(AB) - \sqrt{E(A_2) \times E(B_2)}$, Δ 与键的极性有关,是由于两异核原子的电负性不同导致成键后二者共用价电子不平均造成的。实验表明,A和B原子的电负性差越大, Δ 值也越大。鲍林把 Δ 与原子的电负性联系起来, $[X_p(A) - X_p(B)] = 0.102 \sqrt{\Delta}$,式中X_p(A)和X_p(B)分别为A和B原子的电负性,0.102为每摩尔千焦与电子伏特换算系数,用 $\sqrt{\Delta}$ 是由于它有加和性。并规定H的电负性值等于2.1为标度基础,得出其它元素电负性的相对值。鲍林电负性单位是(能量)^{1/2},物理含义不十分明确,但电负性值可由键能的热化学或光谱数据求出,可信度较大,被广为采用。

1934年密立根(Mulliken)提出用原子形成正或负离子的倾向,即原子的价态电离能(IEV)和价态电子亲合能(EAV)标度电负性。以电子伏特作单位,经验计算公式为: $X_M = 0.168(IEV + EAV - 1.23)$ 。不同价态轨道有不同的IEV和EAV值,从而把原子价态轨道和杂化态与电负性联系起来,称为原子轨道电负性。例如,C原子以纯p轨道键合时,X_M值为10.93eV,sp³杂化态时13.27eV,sp²杂化态时13.67eV,sp杂化态时14.08eV。由于s轨道较相同主量子数的其它轨道的能量低,对电子的吸引能力强,所以杂化轨道中s成分增加,电负性也增大。IEV和EAV不能直接由实验测得,但可由基态原子的电离能、电子亲合能以及价态激发能进行计算,贾菲(Jaffe)在这方面做了很多工作,因此X_M也称作密立根-贾菲电负性。密立根电负性和鲍林电负性的换算关系为: $X_p = 0.34X_M - 0.2$ 。密立根电负性值不再是分子中原子吸引电子的能力,而是根据光谱实验测得电离能和电子亲合能计算的绝对值,是中性原子本身的性质,多为化学理论研究所采用。

分子中的原子可能是阴、阳离子、原子团或带部分电荷。1961年Iczkowski等认为电荷对原子的电负性也有影响,原子的各级电离态的能量E与电荷(或部分电荷)q存在函数关系: $E(q) = \alpha q + \beta q^2$, α 和 β 是系数。将电负性定义为: $X_I = \frac{dE(q)}{dq} = \alpha + 2\beta q$,并证明这种电负性标度与密立根电负性是一致的。当电荷为0时,X_I= α 即等于中性原子的密立根电负性值。2 β 称为电荷系数,用以衡量电负性随电荷改变的速率。大而软(易极化)的

原子的 β 值较低,小而硬(难极化)的原子的 β 值较高。Iczkowski把原子上的部分电荷看作一个连续可变函数,反应了分子中原子电荷迁移的非整数性,并隐含了电负性是能量的密度泛函变化率的性质。1964年麦克丹尼尔(Mcdaniel)等从热化学循环半经验地得到酸根的电负性X_L、电离常数PK_a及氧化电位E°之间满足如下关系: $0.059PK_a - E^\circ = (X_L - X_H)^2$,其中X_H表示氢原子的电负性。1965年Huheey认为原子团的电负性由具有自由价中心原子表现出来。1976年杨金(Younkin)等的实验证明共轭有机体系的电子亲合能E_{AV}与分子的最低空轨道的能级 ϵ_{LUMO} 相关。 $E_{AV} = -\epsilon_{LUMO} - \delta$,其中 δ 为改组能。最高占领轨道的电离能IEV类同于上式。所以根据密立根电负性经验式,可由前线轨道能量平均值来计算共轭分子的电负性。

1977年约翰逊(Johnson)定义分子轨道电负性等于该轨道能量 ϵ_i 的负值: $X_J = -\epsilon_i = \frac{\partial E_m}{\partial n_i}$,式中E_m是体系总能量,*n_i*是*i*轨道占领数。1968年克洛普曼(Klopman)用微扰分子轨道方法,得到酸碱类分子轨道电负性。

电负性的静电标度法表达式很多,其本质都是将电负性作为原子电荷和半径的函数,以体现原子在分子中吸引电子能力这一物理意义。1957年李世璿提出 $X = \frac{0.11Z^*e^2}{r} + 0.64$,表明电负性随有效核电荷Z*增加而增大;随单价离子半径增大而减小。1958年奥尔雷德-罗周(Allred-Rochow)提出直接用原子核对键合电子的静电引力 $F = \frac{Z^*e^2}{r^2}$ [Z*是用斯莱特(Slater)规律确定的有效核电荷]衡量电负性大小, $X_{AR} = 0.35 \frac{Z^*}{r^2} + 0.744$,*r*为单键共价半径,发现 $\frac{Z^*}{r^2}$ 值和鲍林电负性值有直线关系。1960年利特尔(Little)等对X_{AR}值作了补充计算。1974年温元凯改进了屏蔽常数的计算方法,提出 $X_W = 0.34 \frac{Z^*}{r^2} + 0.63$,所得电负性值与鲍林值比较接近。X_{AR}和X_W标度把元素的电负性与分子中原子的两种基本性质参数Z*和*r*联系起来,充分体现了电负性不是孤立的基态原子的性质,而是受其周围原子的环境所影响这一物理图象。

1952年桑德森(Sanderson)发现原子的电子密度 $ED = \frac{3Z}{4\pi r^3}$ (Z为原子序数,*r*为共价半径)随其电负性值而改变。提出用原子的ED值除以等电子惰性气体元素的ED'值作为电负性标度(X_s),桑德森电负性值与鲍林值的关系是: $X_p = (0.25X_s + 0.77)^2$ 。桑德森电负性较成功地讨论许多问题,在现代化学中应用较广,是颇有发展前途的一种标度法。

1952年桑德森提出电负性均衡原理,认为若原子A的电负性大于B,当A、B沿反应坐标接近至发生相互作用时,B将有部分电荷向A迁移,使A的有效核电荷减小,降低它的电负性;相反,B由于失去部分电荷而增加其有效核电荷,升高它的电负性。成键原子自动调整各自电负性的初始值,直至电负性趋于均等。1978年帕尔(Parr)和波利策(Pollitzer)等根据量子化学计算结果也得出相同结论,并被理论化学工作者普遍接受。这一原理的重要性在于它指出了键电荷迁移的动力、方向和限度,有助于了解键合过程中的机制,并为用电负性定量地处理化学问题提供了条件。

参考文献

- 1 鲍林著,化学键的本质,卢嘉锡等译,上海:上海科学技术出版社,1966.79
- 2 Huheey J E. Inorganic Chemistry, 2nd ed, New York, 1978, 160~173
- 3 Bratsch S G. J Chem Educ, 1933, 65(1), 34~41
- 4 Sanderson R T. J Chem Educ, 1988, 65(2), 112~118
- 5 Sanderson R T. J Chem Educ, 1988, 65(3), 227~231
- 6 孙家跃,石春山. 化学通报, 1990, 11, 1~10

(抚顺石油学院孙家跃教授撰;孙桂大审)

电致化学发光 electro-generated chemiluminescence

ECL 是指电解溶液中电极表面产生的反应物,在溶液中进行高能电子转移反应而生成激发态分子的化学发光过程。它既具有化学发光法的高灵敏度,又有根据电位进行分离的高选择性,在化学、生物、医学及环境科学等领域的应用日趋广泛;此外,研究 ECL 的过程及机理对于人们深入了解电子转移过程具有重要的科学价值。

1929年, N. Havery 在电解碱性鲁米诺(3-氨基苯二甲酰肼)水溶液时首次发现电极附近有发光现象。然而,当时这一发现并没有引起人们的足够重视。直到 60 年代,随着半导体和电子技术的发展才认识到 ECL 是溶液中电子转移的过程。一些化学工作者开始对以葱及其衍生物为中心的芳香族有机化合物(葱、芘、吡啶、鲁米诺及它们的衍生物等)的电致化学发光行为、发光机理及影响因素进行初步研究。1963年,荷兰 Hoijtink 首先报导了葱的 ECL 行为,并指出电解产生的 $\text{DPA}^{\cdot+}$ 和 $\text{DPA}^{\cdot-}$ (DPA 为 9, 10-二苯基葱)之间存在着化学发光反应。随后,美国 B. Epstein 等人用三电极系统和脉冲信号研究鲁米诺及其同类物的 ECL 的动力学过程和发光机理,并测定了动力学参数。美国 A. J. Bard 和 M. D. Maibin 等人分别研究了磁场对 DPA 的 ECL 的影响和质子给予体对 DPA 的 ECL 的湮灭作用。前民主德国的 A. Zweig 等人对自己合成的芳香取代的苯并咪唑(aryl-substituted isobenzofurans)和异吡啶(isoidoles)等化合物进行了 ECL 的研究,计算了对应正负游离基离子的寿命和发光效率,并展示 ECL 光谱。1969年 Fleet 最先把 ECL 现象作为痕量成分定量分析研究工作,测量了 10 多种多环芳烃的 ECL 的最大发射波长、检测极限及所加交流电频率的频率等参数。这一时期, ECL 研究中所采用的电极主要是固定金属电极(Pt 和 Au)和滴汞电极,所用电信号为直流电、正弦交流电、脉冲和线性扫描。

70 年代, ECL 技术有很大改进和提高,在电极方面,美国 A. J. Bard 等人首次使用旋转圆盘电极(RRDE)研究 DPA 的 ECL 行为,指出这种电极的参数与发光强度存在着一定的关系。1973年 E. M. Grabner 第一次把 n -type 半导体电极引入 ECL 中,当时这类电极还有 n -ZnO、 n -CdS、 n -GaP、 n -SiC 和 n -TiO₂。J. D. Luttmmer 等人对 n -TiO₂ 半导体电极在 ECL 中的作用机制进行初步研究。在电信号方面,出现了三角波、正负矩形脉冲、双阶跃脉冲等。另外, K. Balcerowicz 把电子自旋共振(ESR)的方法应用于光淬清(Lucygenine)的 ECL 研究中,以探明电极表面作用情况。R. M. Measure, Tamotsu, Matsumoto 和 A. J. Bard 等人分别把激光技术、低温技术和真空技术应用到芳环化合物的 ECL 研究中,这大大地丰富了 ECL 研究内容,为后来 ECL 理论的形成奠定了基础,同时也拓宽了 ECL 研究范围。这个时期,芳香族化合物仍然是 ECL 研究的主要对象。人们逐步开始探讨一些无机离子(UO_2^{2+} 、 Tb^{3+} 和 Dy^{3+} 和配合离子($\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$)的 ECL 行为,其中研究最多的是 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ 。美国 L. R. Faulkner 等人在自己工作的基础上,结合其他人的研究结果指出, $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ 的 ECL 是一类动力学过程的典型代表。

进入 80 年代以来, ECL 的研究更加普遍,更加深入,出现了一些有影响的代表人物。如 A. J. Bard(美国)、L. R. Faulkner(美国)、R. A. Marcus(美国)、H. Schaper(前联邦德国)、F. Pragst(前民主德国)、K. E. Haapakka(芬兰)和佐藤昌宪(日本)。其中 A. J. Bard 及其合作者的研究工作对 ECL 的发展做出了突出贡献。10 多年来, ECL 研究有以下几个显著的特点。

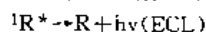
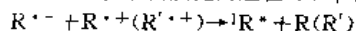
1. 继续广泛地研究新体系的 ECL 行为以及 ECL 的各种参数,这对丰富 ECL 理论,推动 ECL 理论向前发展起到了积极作用。涉及到的新体系有配合物 $[\text{Os}(\text{bpy})_3]^{2+}$ 、 $[\text{Cr}(\text{CN})_6]^{3-}$ 、 $[\text{Cr}(\text{bpy})_3]^{2+}$ 、 $\text{Mo}_2\text{Cl}_4(\text{PMe})_4$ 、 Mo_2Cl_4 、 $\text{P}(\text{Thpy})_2$ 、硅酞菁和硅酞菁染料和反式芪衍生物。这些体系研究表明它们都是单电子转移的 ECL。(2)吸收高新技术,提高 ECL 的实用价值。H. Schaper

等人发明一种薄层流动池(TLC),这种池子具有体积小,取液少,易真空,寿命长等优点。TLC 被用于 ECL 中,使得 ECL 与高效液相色谱(HPLC)联用得以实现,并用于监测某些痕量(25pg)物质(如并四苯)。这一时期, ECL 的电极种类越来越多,出现氧化膜电极(In_2O_3 、 Sn 、 SnO_2 、 Sb)、光纤纤维微电极和修饰电极(Nafion 修饰电极)。这些电极具有体积小,选择性好,使用方便等优点。1988年, J. Bard 等人研究了在半导体及金属电极表面用 Langmuir-Blodgett 方法涂上 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ 的表面活性剂衍生物的单分子层的 ECL 情况,发现半导体电极的发光比金属电极强 $10^2 \sim 10^3$ 倍。过去人们用仪器难以检测极弱的 ECL,难以测绘快速 ECL 发光谱,芬兰 S. V. Pihlajamaki 等人设计了一种自动测定光谱系统,它运用光子计数器大大地提高了灵敏度,而且扫描时间可达 ms 级,在一定程度上克服了上述两个方面的困难。日本 Hiroyuki Kojima 等人用向列的液晶(4-Cyano-4'-n-pentylphenyl)作为媒介,研究红荧烯(rubrene)的 ECL 行为。他们发现这一 ECL 过程几乎无噪声,且光发射相当稳定,这为人们研究低噪声、高稳定性的 ECL 提供了有参考价值的实例。

ECL 的理论的进展主要有以下几个方面:(1) Marcus 学说(激发态产生的理论)。氧化还原反应发生在一个 Frank-Condon 的时间标度内,在此期间反应物一定要转变成生成物所能存在的构型,其跃迁态处于反应物及产物的多元空间位能面的交叉区域。他还导出了 ECL 电子转移的速率常数公式。

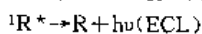
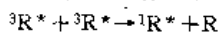
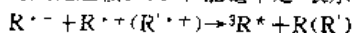
2. 由反应能量判断一般的反应机理。对给定的 ECL 发光机理的认识来自游离基离子的湮灭,从而产生发光体基态的过程中所释放能量的计算。设 R 及 R' 为不同的多环芳烃分子。在电解溶液中交流电压的作用下,可交替地产生阴、阳离子游离基 $\text{R}^{\cdot-}$ 及 $\text{R}^{\cdot+}$ ($\text{R}'^{\cdot+}$)。

S 途径—反应释放的能量足够使产物(发射体)分子达其某一电子单重激发态而发光的途径,又叫“能量足够”,表示如下:



$\text{DPA}^{\cdot+}$ 和 $\text{DPA}^{\cdot-}$ 的反应被看作为此类的典型例子

T 途径—反应释放的能量不足以使发射体分子达其某一单重电子激发态而能达其某一三重激发态,再经过三重态与三重态湮灭的发光途径。又叫“能量不足”表示如下:



四甲基对苯二胺的阳离子游离基 $\text{TMPD}^{\cdot+}$ 与 $\text{DPA}^{\cdot-}$ 反应属于此种类型。

3. 总结出判断反应途径的 3 种基本手段,即磁场效应、三重态截获和光衰减曲线的分析。3 种手段的提出对指导研究工作有重要作用。实际上整个现有 ECL 的文献都是以此为基础的。

1988年 Faulkner 等人对 DPA 的 ECL 的反常短行为进行了研究,指出支持电解质的阴离子和电极预处理及电生的氧化物的作用都是控制 ECL 的因素。

4. 近年来, ECL 的应用价值充分显示出来。F. Pragst 等人运用 ECL 手段研究电有机反应的中间体、游离基离子。他们发现在 DMF 中,双(2,4,5-二苯咪唑)1,2'(L₂)和一些芳香族化合物同时在阴极上还原,且有 ECL 行为,这一研究为 L₂ 的阴离子碎裂的 ECE 机理提供了有力的证据。ECL 被应用于分析化学中,形成一种快速、灵敏、高选择性的分析方法,即 ECL 分析法。用该法可对废水、矿样、天然水、生物等样品中某些成分进行定量测定。美国 R. J. Massey 等人用 $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ 和 $\text{Os}(\text{bpy})_3^{2+}$ 作为标记物标记抗原、抗体,用 ECL 进行免疫分析测定,创立了免疫分析新方法(ECLIA)。这一阶段还相继出现了电生物发光技术(EBL)和电致化学发光图象法(ECLI)。

随着 ECL 继续深入的研究,各种新技术的发展以及学科之间的相互渗透, ECL 将在以下 4 个方面得到发展。(1)研究新体系的 ECL 行为,扩大 ECL 法分析测定的无机物及有机物的范

围,尤其是研究灵敏的、特效的,用于环境监测和临床分析的分析方法。(2)运用微机控制系统、流动技术和多功能电解池,实现ECL研究的自动化、多样化。(3)研制更加灵敏的检测器和性能优越的微电极。研究电极材料,改变电极表面状态及电子转移速率,以提高光强。单分子层的手段可提高灵敏度,有希望制成ECL的探针。(4)通过对各种类型的反应机理的研究,使ECL理论日趋成熟。

参考文献

- Marcus R A. *J Chem Phys*, 1956, 24(5): 966~978
- Private communication by Professor Hi jink to Chandross E A and Sonntag Hill N J, ;see Chandross E A and Sonntag F I *J Am Chem Soc*, 1964, 86: 3179
- Luttmer J D, et al. *J Electrochem Soc*, 1978, 125: 1423
- Haapakka K E, Kankare J. *J Anal Chim Acta*, 1980, 118: 333~340
- Pragst F, Kaltofen B. *J Electroanal Acta*, 1980, 112: 339~345
- Schaper M J. *Electroanal Chem*, 1981, 129: 335~342
- Rubinstein I, et al. *Anal Chem*, 1983, 55: 1580
- Hiroyuki Kojima, et al. *Electrochimica Acta*, 1988, 33(12): 1789
- 严凤霞, 王伦, 等. *光谱学与光谱分析*, 1991, 10(6): 45~48
- 安镜如, 林金明. *新试剂 5-(对-苯胺偶氮)-2,3-二氢-1,4-咪啉二酮的电化学发光研究*, 1991, 19(3): 317

(安徽师范大学王伦副教授撰; 严凤霞审)

激发态分子的电荷分离过程 the charge separation

process in the excited state 电荷分离过程是人类赖以生存的过程之一,如有机导体和超导体的电流的产生及存贮,特别重要的是,几乎地球上所有的生命存在形式都是直接或间接地将太阳能转变为化学能,这其中包括电荷分离过程,因而研究激发态分子的电荷分离过程有着非常重要的意义。研究激发态电荷分离的重要手段之一就是利用荧光发射光谱,因为通过荧光光谱可以得到分子的热力学,动力学,光物理以及光化学方面的详细信息。许多简单的带有双生色团的有机分子能显示典型的电荷分离的特征,因而是合适的模拟激发态电荷分离过程的体系。构成分子的双生色团分别具有给体和受体的特征,当处在激发态时,最有利于电荷分离过程的是分子处于扭曲的构型,这时,发生电荷分离的两个部分——给体(D)和受体(A)处在轨道去偶合状态,即接近互相垂直的状态,称之为“分子内扭曲的电荷转移态”(Twisted intramolecular charge Transfer (TICT)states)。

1962年,李波特(E. Lippert)等就发现对-N,N-二甲苯基甲脞分子表现出特殊的荧光发射光谱——双谱带。他们假定,这两个谱带的来源,一是属分子本身的正常发射谱带(B谱带),是正常的苯的衍生物的发射谱带。另一个能量较低的谱带(A谱带)则属于荧光分子与溶剂分子间特殊相互作用的结果。1973年,洛克韦兹(K. Rotkiewicz)等人首先提出了A谱带是与生色团的弛豫过程有关,脞基与苯环上的 π 电子处于共平面,但二甲氨基氮原子上的孤对电子转移而远离此平面,因而构成分子内的扭曲,产生电荷转移态。后来,一系列的实验证明了分子内扭曲现象的存在,如通过荧光偏振实验,设计和合成各种不同的模型化合物等;通过荧光光谱的温度效应来研究两个谱带的动力学过程,并能求出它们的转移速率,结果表明其速率常数受复杂因素的控制,如分子的柔顺性,转动基团的对称性,溶剂极性及其溶液中的自由体积以及基态下分子的扭曲程度等。80年代,雷廷希(W. Rettig)和洛克韦兹等人发现,TICT现象在气相中也能存在,因为有些化合物的给体和受体部分在基态下已处于扭曲状态。这就进一步证明了分子中的双荧光发射谱带并非来自于溶剂分子与荧光分子的特殊相互作用,从而确定了TICT现象的存在。

当前,已发现能形成TICT态的化合物品种和数量越来越

多。特别值得指出的是中间由 δ 键联接的双对称芳烃化合物,在基态下是高度对称的,但在激发态却能形成极性高的TICT态。还发现,许多激光染料分子也具有TICT态,如染料分子罗丹明(Rhodamine),其TICT形成的速率随分子中给体基团性质的改变而改变。能形成TICT的分子并不只限于有机化合物,许多硅、硼化合物也呈现出特殊的荧光性质,金属有机化合物也有TICT态存在。TICT态最重要的特点是电荷分离,精确的量子化学计算表明电荷转移量可达0.8电子电荷。可通过实验来测定电荷转移量。TICT另一主要特点是分子内的扭曲角度。为什么平面型的分子在激发态会伴随着分子内的扭曲,量子力学计算结果预见到了扭曲的发生,由价带模型给出了满意的解释并由此得出“最小重叠规则”,由势能面和扭曲角度的关系图可以看出处于互相垂直的几何构型时能量最低,此时TICT态的辐射跃迁包含了两个不同的 π 轨道,而处于互相垂直时是禁阻态——跃迁几率最小。故TICT的量子效率是很低的。然而,通过适当的振动偶合,可以使这种跃迁变成允许的,因而能得到较高的量子效率。实验还发现,TICT的辐射跃迁常数随温度的升高而增加,这和振动偶合是一致的,因而所观察到的TICT荧光是从高振动能级发现的,故又称之为“热荧光”。TICT态荧光与激基缔合物(excimer),激基复合物(exciplex)荧光有许多相似之处,它们之间最主要的区别在于激基缔合物和激基复合物是遵循电子云的最大交叠规则,即它们的夹心结构;与此相反,TICT是电荷分离和失去对称结构,遵循电子云的最小交叠规则。

对于形成TICT态的分子,其TICT潜带能量可以近似地表示为: $E(\text{TICT}) = IP(D) - E_A(A) + C + \Delta E_{\text{SOLV}}$ 其中 $IP(D)$ 为给体基团的电离势; $E_A(A)$ 为受体基团的电子亲和势; C 为体系稳定的库仑能; ΔE_{SOLV} 为自由基离子或极性TICT态溶解后的能量变化。

目前,有关TICT研究的热点主要有:(1)研究TICT态的动力学过程,如利用毫微秒或微微秒瞬态荧光技术来观察TICT态的上升时间,同时伴随着正常荧光谱带的衰减,以及TICT速率常数与那些因素有关,如荧光分子本身的性质,分子结构,基态的扭曲度,生色团的转动体积,分子的刚性等;溶剂分子的性质如粘度,极性。(2)寻找和设计高效率的新型激光染料和荧光化合物,如利用控制TICT态的形成。因TICT态的形成经常伴随着分子内的荧光猝灭,故可通过提高分子的刚性,阻止最小交叠的形成及提高TICT能量等来提高荧光量子产率。另外TICT态能量低因而发出的荧光波长移向长波区,所以可利用形成TICT态来得到近红外波段的激光染料。(3)因为TICT荧光对微环境是很敏感的,因而可利用来研究溶剂的极性,微观粘度及自由体积等性质和生物大分子的特殊性质等。此外电荷分离过程也是视觉过程和光合作用过程中重要的一步,因此研究TICT过程为模拟光合作用,合成新的太阳能转换材料也都提供了重要的依据。(4)利用TICT性质设计分子电子器件,如双稳态分子开关,快速光二极管,甚至分子计算机等等。总之,对于TICT现象的研究和应用还刚刚开始,随着激光等现代化研究技术的发展,有关激发态电荷分离过程的研究必将迅速发展起来。

参考文献

- Rettig W. *Angew. Chem Int Ed Engl*, 1986, 25: 971~988
- Gilbert E, Lapouyede R, Rulliere C *Chem Phys Letters*, 1988, 145(4): 262~268
- Rettig W. *Appl Phys*, 1988, B45: 145~149
- Rettig W, Haag R, Wirz J *Chemical Physics Letters*, 1991, 180(3): 216~221
- Rettig W. *EPA Newsletter* 1991, 41: 3~19
- Lueck H, Windsor M W, Rettig, W *J Lumin*, 1991, 48~429

(中国科学院化学研究所白凤莲研究员撰; 吴世康审)

高温电化学氧传感器 high temperature

electrochemical sensors 高温氧传感器是以掺入 8%~12% mol Y₂O₃ 或 CaO 的稳定 ZrO₂ 作固体电解质,在 600℃ 以上它对氧离子有较高的传导能力,用化学涂制烧结法,厚膜印刷技术或真空薄膜溅射法在 ZrO₂ 两边制成多孔铂电极,氧在两电极上分别发生氧化、还原反应,用所产生的电压或电流信号检测环境气氛中氧浓度的变化,如工业燃烧炉的烟道气,特别对汽车排放尾气检测及空-燃比的自动控制最有应用前景。

高温氧传感器经历了两个发展阶段,第 1 阶段从 60 年代初到 70 年代末,国外广泛而深入地进行浓差型氧传感器的研究和应用,1961 年美国西屋电气公司的 Weissbart 和 Rrka 研制出第一个浓差型氧化锆氧传感器,并将其应用于工业炉窑烟道气中氧的检测显示了传统测氧方法所不可比拟的优良性能。之后,Bosh 公司于 1976 年首次将浓差型氧传感器应用于汽车发动机的燃烧控制。在此期间发表了许多专利文献并相继研制生产,迅速拓宽了它的应用领域,如用于炼钢工艺实现了钢液中氧的原位测量和控制,使特种钢的产量提高一个数量级,这一发明被誉为当代钢铁冶金领域的三大发明之一。此外,氧传感器用于测定氧化物的标准生成自由能、合金组元的活度,氧在金属中扩散系数及催化反应动力学方面的研究取得了令人瞩目的成绩。中国从 70 年代中期开始了这方面的研究,中国原子能科学院申请了国内第 1 个关于固体电解质浓差型氧传感器应用于炉窑燃烧控制的专利,首钢电子工程公司、中科院上海硅酸盐研究所、湖南大学等单位也在此研究领域取得了成果。第 2 阶段自 70 年代末开始的至今正在欧美日等国家进行深入研究的,以扩散控制为理论依据的极限电流型氧传感器,1982 年 Takeuchi 等人申请了用于燃烧过程控制的专利,近 10 年来这类传感器在愈来愈多的领域内发挥着作用,目前,主要集中在器件的制作工艺,如微电子技术,光刻蚀工艺、厚膜印刷和真空溅射的薄膜工艺,利用这些先进的技术从而实现器件的微型化,集成化以及批量生产产品性能参数的一致性。

浓差型氧传感器是以浓差电池 Nernst 方程为依据,电池表示如下:

参比电极 P₁, O₂(P_参) | Y₂O₃-ZrO₂ | O₂(P_测) P, 工作电极

电极反应: 阳极(正极): O₂(P_参) + 4e → 2O

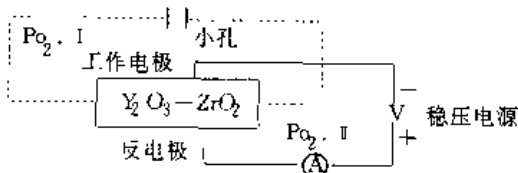
阴极(负极): 2O - 4e → O₂(P_测)

整个电池反应为: O₂(P_参) → O₂(P_测)

电池电动势可以 Nernst 方程式表示:

$$E = RT/4F \cdot \ln(P_{参}/P_{测})$$

由上式可知,在一定温度下,当氧传感器管内与参考气体接触,管外与待测气体接触,当氧从固体电解质的高氧分压端向低氧分压端迁移在两电极间测得的电动势就可求得待测气体中的氧分压。虽然浓差型氧传感器有较低的测量下限(10⁻⁶级),在冶炼工艺中的应用有其它测氧方法所无法替代的优点,但它有不足之处,如在制作器件时必须带有参考气体,造成器件的体积大且难以微型化,作为测量信号的电动势值严重地受到所选参比气体氧分压大小的影响,而且分辨率低,测量氧浓度限于 32%,由于这些原因研究者们对浓差型氧传感器进行各种改造以改善它们在某些应用领域的性能,但这些努力并没有从本质上解决问题。70 年代末,科学工作者提出了一种从理论依据和器件本身的结构完全不同于浓差型氧传感器的新型极限电流型氧传感器,在国外已研制出两种类型,一类为针孔型氧传感器;另一类为多孔层型氧传感器。



工作电极为阴极,反电极为阳极,当把固体电解质 Y₂O₃-ZrO₂ 置于测量气氛中(氧分压为 P_{O₂, I}),电解质的两侧电极加一外加电压形成一抽氧泵电池,其电极反应如下:

阴极(工作电极): O₂(P_{O₂, I}) + 4e → 2O

阳极(反电极): 2O - 4e → O₂(P_{O₂, II})

总泵电池反应为: O₂(P_{O₂, I}) → O₂(P_{O₂, II})

由于阴极表面上针孔或多孔扩散层限制氧的扩散使小室内氧分压减小,即 P_{O₂, II} > P_{O₂, I}, 故在极限电流型氧传感器中,氧气从低氧分压泵至高氧分压。实验发现,在低电压时电流几乎与电压成正比,随着电压增加,由于氧在阴极表面针孔或多孔涂层的扩散速度跟不上电极反应速度,此时气体扩散成为控制步骤,到某一电压时,电流不再随电压而增大,泵电流达到饱和值,称为极限电流,它与氧浓度呈线性关系。

气体在小孔中的扩散遵循 Fick 定律:

$$J = -D \times (dc/dx)$$

式中 J 为扩散通量,即单位时间通过单位面积的物质质量, D 为扩散系数,小孔面积 A, 长度为 L, 通过小孔扩散的物质质量为 Q,

$$Q = J \times A = -DA \times (dc/dx)$$

设气体为理想气体,当 T 一定时,

$$Q = -DA \times (dp/RTdx), \quad Qdx = -DA \times (dp/RT)$$

设扩散系数与氧分压无关,对上式积分,得

$$\int_0^L Q dx = -(DA/RT) \times \int_{P_{O_2, I}}^{P_{O_2, II}} dP$$

Q = -(DA/LRT)(P_{O₂, II} - P_{O₂, I}) 每摩尔氧发生电化学反应所产生的电流为 4N₀ · e, 则 Q 摩尔氧产生电流为

$$I = 4N_0 \cdot e \cdot Q = 4F \cdot Q$$

$$= (4DFA/RTL) \times (P_{O_2, II} - P_{O_2, I})$$

即 I = K × (P_{O₂, II} - P_{O₂, I}), K = 4DFA/RTL

当氧传感器上加一直流电压,阴极的氧逐渐减小,达到极限电流 I₂ 状态, P_{O₂, I} 可近似看作为接近零,则 I₂ = K × P_{O₂, II}

对极限电流型氧传感器测得极限电流就可知气体浓度大小,是成正比关系,而浓差型氧传感器输出电动势与氧分压呈对数关系, E ∝ ln P_{O₂}, 所以前者对氧的灵敏度高于后者。极限电流型氧传感器的更大优点在于它正比于环境气氛中的氧百分数而不是氧分压,在总压可能变化的环境里,人们可以得氧含量的明确测定。

在通常压力下各种气体服从分压定律,即 P_{O₂, II} = a × p, a 是气氛中氧的摩尔分数,如果令 b = a × 100%, 则 b 就是待测气氛中氧的百分数,代入上面电流公式,得

$$I_2 = (4DFA/RTL) \times a \times p$$

从扩散系数 D 的推导可知, D ∝ 1/P; 所以 I₂ ∝ b · f(E, T)。如果 T 保持一定, E 值较小时, I₂ 随 E 的增加呈指数函数增加。

据文献报导,当 E > 0.5V 左右, I₂ 基本不随 E 而变了达到极限值。此外,极限电流型氧传感器还具有结构简单,不需要参比气体,响应快,分辨率高,测试氧浓度范围广等优点,但难点在于阴极多孔涂层的制作,要求有一定的孔径才能达到努森扩散控制,使氧分子通过针孔或多孔层的扩散成为整个过程的控制步骤才会有极限电流的出现。一些发达国家已将其应用于汽车、炉窑、安全管理等领域,特别用于汽车发动机的自动控制,不仅实现了空-燃比的闭环电子喷油技术改变了过去的雾化喷油技术,而且减小汽车尾气有毒气体,如一氧化碳,烃类及氮氧化物的排放。

参考文献

1. Eisenberg A O. Japanese laid-open Patent 52-69690, 1977
2. Dietz H. Solid state Ionics, 1982, 6, 175
3. Michaels J N, Vagenas C G. J Electrochem SOC 1984, 131, 2544~2550
4. 张仲生, 郭士海, 等. CN85100958A
5. Takeuchi, et al. U S P, 4510036

- 6 Aifan Chen, Ruixian Luo, Chung - Chium Liu. Sensors and Actuators, U. S. A 1990, 34, 240~245
- 7 Luo Ruici, Chen Aifan, Chung - Chium Liu. Science in China (Series A), 1990, 34, 240~245
(北京化工大学罗瑞贤教授撰)

热导率 thermal conductivity 指热流量 J_q 与温度梯度成正比:

$$J_q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial X} \text{ (一维流量)}$$

式中,比例常数 λ 定义为热导率。

在国际会议上经常指出,电解质的热导率在科学研究上和工程应用上的重要性。例如,研究盐溶液的致冷作用时,必须测定溶液的热导率,在此基础上,才可选择合适的盐溶液作为致冷剂。历年来,大量的研究者对许多电解质水溶液的热导率进行了研究,并取得了卓有成效的成果。

1948~1951年, Riedel 研究了强电解质水溶液的热导率,计算了稀的和中等浓度的溶液在 20°C 时的热导率

$$\lambda_{\text{溶液}} = \lambda_{\text{H}_2\text{O}} + \sum a_i c_i$$

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$ 是纯水的导热率, C_i 是电解质 i 的摩尔浓度, a_i 是与离子性有关的系数,其计算值与实验值相同。

1956年, Vargaftik 和 Os'minin 提出了稀溶液的热导率与温度关系的近似值为 $(\lambda_r/\lambda_{20^\circ\text{C}})_{\text{溶液}} = (\lambda_r/\lambda_{20^\circ\text{C}})_{\text{H}_2\text{O}}$, 即 20°C 与 $t^\circ\text{C}$ 的稀溶液的热导率比近似等于纯水热导率比。如 80°C 热导率可由下式计算

$$\lambda_{\text{溶液}} = (\lambda_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2\text{O}}/\lambda_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2\text{O}}) \cdot (\lambda_{\text{溶液}}^{\text{H}_2\text{O}})$$

其误差仅为 -0.9%。对大多数电解质溶液,热导率随温度增加而增加,大约在 130~140°C 达到极限值。Vargaftik 和 Os'minin 又提出了溶液的相对热导率,即溶液的热导率与纯水的热导率的比值 $(\lambda_{\text{溶液}}/\lambda_{\text{H}_2\text{O}})$ 其表达式为:

$$\frac{\lambda_{\text{溶液}}}{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{C_{\text{溶液}}}{C_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{d_{\text{溶液}}}{d_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{M_{\text{溶液}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

式中分子量比率可由下式计算:

$$\frac{M_{\text{溶液}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\text{摩尔}\% \times M_{\text{盐}} + (100 - \text{摩尔}\%)M_{\text{H}_2\text{O}}}{100M_{\text{H}_2\text{O}}}$$

1956年, Kapusinskii 和 Ruzavin 提出表观摩尔热导率 (Φ_λ) , 其与溶液的热导率和纯水的热导率的关系为:

$$(\Phi_\lambda) = [(1000 + C_2 M_2) \lambda_{\text{溶液}} - 1000 \lambda_{\text{H}_2\text{O}}] / C_2$$

表观摩尔热导率与电解质浓度关系为 $\Phi_\lambda = A + BC\sqrt{c}$ 式中 A, B 为实验常数,当 $C\sqrt{c}$ 为 0 时,可得到无限稀释时的表观摩尔热导率 Φ_λ^∞ , 称为极限表观摩尔热导率。正、负离子的表观极限摩尔热导率具有加和性 $\Phi_\lambda^\infty = \Phi_{\text{正离子}}^\infty + \Phi_{\text{负离子}}^\infty$, $\Phi_{\text{正(负)离子}}^\infty$ 决定于每个离子的电子数, $\Phi_{\text{离子}}^\infty = 2.33 \times 10^{-3} n$ 。

1960年,在 Purdue 大学发表了第一版关于热物理性质的专著。1964年, Jamieson 和 Tudhope 提出了海水的热导率与海水的温度与盐度的关系:

$$\ln \lambda_{\text{溶液}} = \ln(\lambda_{\text{H}_2\text{O}} + X) \left(2.3 - \frac{G}{T} \right) \left(1 + \frac{T}{T_\sigma + Y} \right)^{0.33}$$

式中, $X = 0.0002(\text{盐度})$, $Y = 0.03(\text{盐度})$, $G = 343.5 + 0.37(\text{盐度})$, $T_\sigma = 647\text{K}$ (纯水临界温度), $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 240\text{m}\Omega^{-1}\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (水在临界点时热导率)。

1965年 Missenard 提出下列无机化合物水溶液的相对热导率 ($\text{H}_2\text{SO}_4, \text{H}_3\text{PO}_4, \text{HNO}_3$ 等):

$$\frac{\lambda_{\text{溶液}}}{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}} = 1 + W_{\text{r}} \left\{ \frac{1 - (\lambda_{\text{H}_2\text{O}}/\lambda_{\text{液体}})}{1 - W_{\text{r}}^2 [1 - (\lambda_{\text{H}_2\text{O}}/\lambda_{\text{液体}})]} \right\}$$

式中 $\lambda_{\text{溶液}}$ 是电解质溶液的热导率, $\lambda_{\text{液体}}$ 是纯无机液体的摩尔热导率, W_{r} 是无机化合物的重量分数。上式能有效地计算无机化合物水溶液的相对摩尔热导率比值。

1975年, Yusufova 用电子计算机计算了三参数方程,测定了 NaCl 和 Na_2SO_4 溶液在较大浓度和温度区间的热导率,其表达式为:

对 NaCl 溶液:

$$\frac{\lambda_{\text{溶液}}}{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}} = 1 - (2.343 \times 10^{-3} - 7.924 \times 10^{-6} t - 3.924 \times 10^{-9} t^2) S + (1.06 \times 10^{-5} - 2.0 \times 10^{-8} t + 1.2 \times 10^{-10} t^2) S^2$$

式中, t 是摄氏温度 ($^\circ\text{C}$), $S = 5855.3 m_2 / (1000 + 58.443 m_2)$, m_2 是 NaCl 的重量摩尔浓度 ($\text{mol} \cdot \text{Kg}^{-1}$), 上式可适用温度为 20~330°C, 浓度为 5~25wt%。

对 Na_2SO_4 溶液:

$$\frac{\lambda_{\text{溶液}}}{\lambda_{\text{H}_2\text{O}}} = (1 - a_1 + a_2 t + a_3 t^2) S + (b_1 + b_2 t + b_3 t^2) S^2$$

式中 $a_1 = 4.6563 \times 10^{-3}$, $a_2 = -1.6119 \times 10^{-5}$,

$$a_3 = 5.031 \times 10^{-8}, b_1 = 4.26 \times 10^{-5},$$

$$b_2 = -8.55 \times 10^{-7}, b_3 = 2.16 \times 10^{-9}.$$

上式可适用的温度和百分浓度范围和 NaCl 溶液相同。标准误差差不超过 2%。

1977年 8 月在 Othaw, Ontario, Canada 举行的 15 届热导率的国际会议上,将有关科学论文汇编成论文集发表。

1978年在 Lantinit 和 Pacetly 的会议上,发表了过去不十分注意的一些临界参数,经实验测得的大量电解质水溶液的热导率发表在书和书评中。这样,研究者对电解质溶液的热导率在理论上与实际应用上均取得了重要的进展。

1981年 Abelson 应用近代计算法所得的结果,综合汇编超过 200 册。

1982年, Chaney 发表了第 2 版混合物和电解质溶液的热导率的研究成果。由上可知,在 80 年代研究者在理论上与应用上研究热导率已成为热点。

参考文献

- 1 Missenard A. Conductivite thermique des solides, Liquides, Gas at Leurs M'elanages. Paris: Editions Eyrolles, 1965
- 2 Latoni G, Paceti M. Proceedings of the 15th International Conference Thermal Conductivity (V. V. Mirkovich, Ed), Plenum Press, New York, 1978
- 3 Abelson P H. Proceedings of the 7th International CODATA Conference >. Kyoto, Japan, Pergamon Press, Oxford, 1981
- 4 Chaney. Thermophysical Properties Research Literature Retrieval Guide. New York, 1982
- 5 Horvath A L. Handbook of Aqueous Electrolyte Solution, 1985

(华东师范大学张挺芳教授、陆嘉星讲师撰)

光谱电化学 spectroelectrochemistry

在 20 世纪 60 年代以前,物理化学(电化学)家就尝试运用各种波谱方法来表征电极过程和检测反应产物,但直到 60 年代末和 70 年代才逐渐形成了现代光谱电化学,即以现场 (insitu) 电磁波谱和非现场 (ex situ) 电子能谱研究固/液界面电化学过程为核心的交叉学科。

传统电化学方法是以电信号作为激励和检测手段,得到电极/溶液界面和电极表面上的各种平均信息,从而宏观和唯象地描述电化学过程,光谱电化学则是在传统电化学方法之上,引进各种不同能量的光子或电子作为探针,现场或非现场地检测电化学过程中原子和分子水平上的微观信息。

电极表面紫外可见光反射光谱是最早实现的固/液界面电化学反射光谱方法,1966年 J. Feinleib 报道了有关研究结果。这种利用电反射效应来研究电极/电解质溶液界面中金属的表面态,表面等离子体振动,半导体电极表面能带结构,双电层结构,

以及化学吸附和各种膜生长的方法从一开始就显示出能提供原子和分子水平上信息的能力。1974年 M. Fleischmann 等人报道吡啶吸附在经过电化学粗糙的银电极上其拉曼散射信号可增强5到6个数量级,这种后来称为表面增强拉曼散射现象的发现,不仅使拉曼光谱研究电极(主要是银、铜、金)/电解质溶液界面电化学过程成为可能,而且使对表面增强拉曼散射机理的研究成为当代物理学、化学、材料科学以及线性和非线性光学等领域中活跃的课题。1980年 A. Bewick 等人才报道成功地将红外光谱应用于固/液界面电化学现场研究。其主要原因一是固/液界面溶剂分子(如水)对红外的大量吸收,二是电极表面吸附物(分子或基团)数量少(单层仅 $10^{14}\sim 10^{15}$ 数量级)信号微弱,再加上红外反射能量损失等。上述问题的克服在于设计薄层电解池,取电位调制差谱以及采用各种提高检测灵敏度的方法和措施,由于红外光谱在检测表面吸附物种、成键方式等方面有独到之处,特别是现场红外光谱几乎能在所有的固体电极(金属、非金属和表面修饰电极)表面上获得,这一方法在它诞生后的10余年中得到了广泛的应用并渗透到电化学研究的各个领域。除上述3种光谱外,还有多种谱学方法已经用于电化学现场研究,如电子顺磁共振谱,核磁共振谱,椭圆光谱,光电流谱,非线性光谱(二次谐波,总频率发生),微分电化学质谱,穆斯堡尔谱,光声和光热光谱等等。这些电化学现场光谱方法,以各自的特点从不同角度研究固/液界面上发生的各种电化学过程,使电化学研究从宏观和唯象深入到分子水平。

另一类应用电子能谱研究电极表面的光谱电化学方法,需在超高真空($<10^{-9}$ Torr)体系中进行。虽然将样品从电化学体系(常压)向超高真空室转移过程中会损失电极表面的部分信息,但已经实现的各种转移操作系统将电化学室和超高真空室联为一体,允许几分钟内将样品在洁净的环境中在两者间转移,从而获得各种条件下电极表面结构(化学组成,几何原子排列结构,电子结构等)的信息。例如, P. N. Ross, 等利用低能电子衍射,跟踪 Pt(100)单晶电极表面结构在各种条件下的变化,发现洁净的 Pt(100)呈现一种(5×20)的重组结构,一旦与电解质溶液(0.3 mol HF)接触则转变为(1×1)结构,当电极在无氧吸附的电位区间扫描时这种(1×1)结构可保持不变,但当电位升高导致电极表面有氧吸附时则检测到各种表面随机(random defects)缺陷的产生。常见的非现场电化学能谱方法有:检测表面化学组成和电子结构的俄歇电子能谱、X-光电子能谱,紫外可见光电子能谱,检测电极表面强吸附分子成键情况的电子能量损失谱和研究电极表面氧化膜结构的外延 X-射线吸收精细结构谱等等。

光谱电化学的内容还包括使用光透明电极的各种现场透射光谱。但更重要和大量应用的则是各种现场反射光谱方法。这些现场光谱方法不仅在分子水平上丰富了固/液界面电化学过程的研究内容,而且还推动了其它相应学科的发展以及获得新的理论认识。电磁波在固/液界面与电极表面相互作用的规律决定了各种电化学现场反射光谱的局限和特殊性,如反射红外光谱和表面增强拉曼散射光谱的表面选择律,就是根据电磁波的两个分量(垂直于入射平面的 s 分量和平行于入射平面的 p 分量)在电极表面反射时的不同作用情况(IR)、或根据电极表面吸附(或附近)分子引起的局部场的两个增强分量对谱带强度改变的不同影响(SERS)提出的。这些附加于由量子力学导出的光谱选择律的表面选择律,为研究电极表面吸附分子或基团的取向提供了依据。

随着现代科学技术的发展,新的研究手段如扫描隧道电子显微镜(STM)等不断出现,各种谱学仪器的性能进一步提高(如利用回旋加速器提供各种能量的电子,和产生辐射信号更强、变化更连续一致的各种波段的同步辐射电磁波,以及使用更灵敏的各种检测器等)使得光谱电化学的内容更加丰富,对固/液界面电化学过程的研究也将进一步深入。光谱电化学的发展趋势可以概括为如下方面:(1)建立和完善高灵敏度的快速时间分辨现场光谱方法,研究电极表面原子和分子水平的反应动力学;(2)对一些重大的基础问题联用多种现场光谱和非现场电子能谱方法进

行研究,并结合进行量子化学理论分析,进一步发展光谱电化学理论(如 SERS 机理,紫外可见反射光谱的各种理论模型等);(3)使用金属单晶电极,研究在表面原子排列结构明确的电极发生的吸附、成键、解离等分子过程,揭示反应分子与电极表面相互作用的本质和规律;(4)扩大研究和应用体系,如将 SERS 扩大到除银、铜、金以外的金属电极,使用光纤技术使恶劣条件下(腐蚀、危险体系)的现场光谱检测(在远距离下进行)成为可能。

参考文献

- 1 Feinleib J. Phys Rev Lett, 1966,16:1200
- 2 Fleischman M, et al. Chem Phys Lett, 1974, 26:163
- 3 Bewick A, et al. Electrochimica Acta, 1980, 25:465
- 4 Robinson J, the Royal Society of Chemistry, London, 1984, 9
- 5 Ross P N, et al. Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, 1984, 13
- 6 Gale, R J. Spectroelectrochemistry - Theory and Practice. Plenum Press, 1988
- 7 Hubbard A T. Chem. Rev., 1988, 88:63
- 8 林仲华等编, 电化学中的光学方法. 北京:科学出版社, 1990
- 9 Nichols R J, et al. J. Electroanal. Chem. & Interfacial Electrochem., 1991, 313:109

(厦门大学博士生导师孙世刚教授撰)

表面电化学 surface electrochemistry 固/液界面广泛存在于自然界中,对以在该界面上发生的电子传递,化学反应,特别是电场作用下固体表面上的吸附,脱附,相变,扩散,表面结构及其重建等过程为主要研究内容的表面电化学,涉及到现代工业乃至生命科学的各个研究和应用领域。

表面电化学的研究对象可概括为膜表面,金属及其氧化膜表面,氧化物表面,半导体表面,以高聚物或其它原子和基团修饰的电极表面,非金属固体表面(如碳)等等。特别是1965年 Will F. G. 首次使用铂单晶作为电化学研究对象以来,对金属单晶表面的研究得到了迅速发展,使得表面电化学的研究深入到电极表面原子排列结构的层次。

表面电化学主要研究固/液界面中各种电极表面的化学组成,表面原子排列结构,表面电子结构等与电极性能的关系,以及在电场作用下电极表面本身物理化学特性的变化。这就需要用到现代科学技术各种可能的实验手段进行研究。1960年以后超高真空电子能谱作为表面研究最有效的手段得到了迅速发展,这一技术也在70年代末由 A. Hubbard 等人先后应用于研究电化学表面。20世纪80年代以来,已经运用 LEED, AUGER, XPS, EELS 等多种表面物理技术对电极表面原子排列结构及电子结构在各种强吸附物质以及电场作用下的变化,电化学沉积层的组成和结构,电化学腐蚀和钝化过程中电极表面状态,以及有机分子在电极表面强吸附成键情况等成功地进行了研究,并取得了大量分子水平和表面原子排列结构层次上的结果。由于各种电子能谱的检测需在超高真空($<10^{-9}$ Torr)下进行,而固/液界面只能在常压下存在,所以电极表面在转移到超高真空体系中进行电子能谱检测时要经过抽真空处理,这就难免要损失许多表面信息,因此运用超高真空电子能谱检测电化学表面只能是非现场(ex situ)的。

对电极表面各种吸附过程和成键机制以及电子结构的研究还借助于应用各类现场(或原位)光谱。特别是表面增强拉曼散射光谱,红外光谱,紫外可见光反射光谱和椭圆光谱等。这些光谱以不同能量的光子为探针,现场探测固/液界面中电极表面在电场作用下的变化(如单晶表面结构重组,表面氧化膜的形成和生长等),检测表面吸附物的化学本质及其成键情况等,使对固/液界面的认识从宏观深入到分子水平。

70年代以来,电极表面的导电高聚物修饰,金属原子欠电位沉积(UPI)和金属单晶电极表面结构及其过程的研究成为表面电化学中最为活跃的研究课题。特别是对不同原子排列结构单晶表面的电化学现场表征,研究其在电场作用下表面结构重建,电

化学吸、脱附特性以及电催化性能等方面取得了重大的进展。A. Hamelin 等长期致力于对贵金属及 sp 金属(金、银、铜等)单晶电极界面结构及其性能进行研究,应用双电层微分电容曲线表征不同原子排列结构的单晶电极/电解质界面结构,并且对每种单晶电极的零电荷电位进行了详细研究。指出,对某种金属来说其零电荷电位随单晶电极晶面指数的变化规律类似于在真空中测得的表面电子脱出功的变化趋势,从而给出了不同单晶表面电催化性能差异的电子结构方面的原因。金、银等金属基础单晶面((100), (111), (110))在电解质溶液中的表面态电子结构还可由紫外可见反射光谱的研究得到,其结果与固体物理的理论计算一致。

在单晶电极的电催化性能研究方面,铂因其优异的电催化性能得到了最广泛的研究。J. Clavilier 等创造的火焰法清洁单晶电极表面,使电极表面每次实验都能处于相同的初始状态(即表面结构与晶体内相同定向晶面一致),因而使研究结果达到高度的重现性的可靠性。由于氢的电化学吸、脱附过程对铂单晶电极表面结构非常敏感, J. Clavilier 和 S. Motoo 对这一过程循环伏安研究的结果已被作为每个晶面结构的特征伏安图谱,用于现场检测铂单晶电极表面结构,和研究在电化学条件下因电场改变,吸、脱附过程引起的表面结构重建。此外对各种单晶电极表面上进行的金属原子欠电位沉积过程的研究,还在原子水平上深化了对表面相变这一物理化学过程的认识。

80 年代初实现的扫描探针显微(SPM Scanning Probe Microscopes)技术,以量子理论隧道效应为基础检测样品表面结构,给表面科学的发展带来了广阔的前景。1986 年 J. Gómez 等人率先实现了电化学表面的 STM 现场观察。K. Sashikata 等则运用这一方法直接“观察”到铂、铱和钌单晶(111)面在电场和氧吸附作用下发生表面结构重建时的原子尺度上的结构变化图象。

表面电化学是当今发展得最快的学科之一。今后的研究仍将继续集中在对电场作用下固/液界面上固体表面的化学组成,几何原子排列结构和表面态电子结构的表征,研究它们在电场作用下的变化及其与电化学反应性能的关系,特别是使用单晶电极,运用电化学现场光谱和非现场能谱以及建立更加完善的电化学现场 STM 方法等,不仅将在更深的层次发展表面电化学学科的基础研究和理论,而且对其他相关学科的发展也将起推动作用。

参考文献

- 1 Will F G. J Electrochem Soc, 1965, 112(4), 451
- 2 Kolb D M. Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, 1978, 11, 125
- 3 Hamelin, A, et al. J Electroanal Chem & Interfacial Electrochem, 1983, 145, 225
- 4 Liu S H, et al. J Electroanal Chem & Interfacial Electrochem, 1984, 176, 325
- 5 Hammond J S, et al. Comprehensive Treatise of Electrochemistry, 1984, 8(8)
- 6 Gómez J, et al. Nature, 1986, 323, 612
- 7 Motoo S, et al. Ber Bunsengens Phys Chem, 1987, 91, 457
- 8 Hubbard, A T. Chem Rev, 1988, 88, 633
- 9 Clavilier J, et al. Chemical Physics, 1990, 141, 1
- 10 Sashikata K, et al. J Vac Sci Technol B, 1991, 9(2), 457

(厦门大学博士生导师孙世刚教授撰)

电催化催化 electrocatalysis 1928 年曾有文献报导电极的催化效应,但直到 1963 年 W. Grubb 明确提出电催化催化后,这一概念才得到广泛的承认和应用。

电催化(或电催化)可以定义为反应物或产物在催化剂/电解质溶液界面上有电子传递的异相催化作用。与异相催化剂一样,电催化剂的活性也主要由表面化学组成、表面结构(几何原子排列和电子结构)等因素决定。在电化学条件下,通过改变电

极电位可方便地改变反应体系的能量来控制反应的方向及进度,但由于电解质溶液中溶剂分子和反应或产物的吸附,以及电催化剂表面结构在电场作用下重建等因素而使电催化较之异相催化的研究更复杂一些,起步也较晚。电催化广泛存在于涉及电极表面吸、脱附的电化学过程中,比较典型的如氢电极过程,氧电极过程和氯电极过程等。在氯碱化学工业,有机电化学合成,电化学能源转换,特别是燃料电池工业等方面,电催化问题的解决往往具有举足轻重的关键作用。

常用电催化剂的各种材料一般都涉及过渡金属。S. Trasatti 比较了氢在一系列金属电极上的析出反应,指出当吸附中间态粒子具有适中的能量(适中的吸附键强度和覆盖度)时往往可以有最高的反应速度。将氢在每种金属上析出交换电流密度对每种金属表面吸附氢键(M-H)的强度作图,可得著名的“火山形”曲线,铂由于活性最高而处于“火山口”上。

电化学催化的研究一直在两个有机联系的方面进行。一是研制高选择性、高效和高性能的电催化剂,另一方面则是研究各类反应的电化学催化机理,这两个方面的研究不仅丰富和发展了电化学催化理论,而且也推动了其它相关学科如表面科学、光谱学等的发展。

大量对电催化剂性能的研究工作都集中在组成电催化剂的材料上,各种纯金属或非金属材料,以碳材料(玻璃碳或石墨)为载体沉积高度分散的电催化剂物质,金属氧化物或金属氧化膜,各种二元或多元合金,非晶态合金等等都已在各种电催化过程中得到研究和应用。对于两种或两种以上不同材料的组合因“协同效应”表现出较高的活性,以及实际应用中要求高效低成本的电催化剂是对上述材料进行大量研究的动因。事实上,电催化剂的作用主要发生在表面,因此自 60 年代以后,对电催化剂研究的兴趣更集中在其表面结构(表面化学组成,表面原子几何排列以及相应的电子结构)上。R. R. Adzic 等人在铂上以欠电位沉积(UPD Under Potential Deposition)亚单层的铅原子,可使其对甲酸电催化氧化的活性增加近一个数量级。许多重金属元素以及非金属元素在 Pt 和其它电极上的 UPD 过程以及它们在电催化过程中的作用都已得到研究。S. Motoo 等按其作用特性分为两类:(1)氧吸附 UPD 原子,如 Ge, Sn, As, Sb 和 Ru,当 Pt 电极上有这类 UPD 原子修饰时,氧在电极上的吸附电位降低而使电极活性升高;(2)Bi 组 UPD 原子,如 Bi, Te, Se, S, Ti, Ag, Hg 和 Pb,它们仅占据 Pt 电极表面位,从表面结构方面增强电极活性。虽然对 UPD 原子增强电催化剂活性的解释还有 Angerstein-Kozlowska 等在 1973 年提出的“第 3 体”效应,但 UPD 原子修饰电极表面时电子结构的变化等更深层次的内涵仍是前沿课题。

有关电催化剂表面研究的一个重要的进步是 J. Clavilier 等于 1980 年率先研究在金属单晶面上发生的电化学催化过程。由于金属单晶表面原子排列结构已知,对于在各种特定表面结构上进行的电催化中的吸附、解离反应等过程就有了更清晰的认识。使用金属单晶电极并关联电化学和其它方法(如超高真空电子能谱、现场(或原位)光谱、扫描隧道显微谱等),可望取得对电催化剂表面结构与其性能的关系更深入的认识。

在各类电催化反应的机理研究方面,捕捉和鉴别各类反应中间体具有特别重要的意义。自 1935 年 A. N. Frumkin 成功地尝试研究固体电极表面吸附过程以来,许多有机物在铂族金属或其它金属表面上的化学吸附过程特别是“强吸附物质”得到诸如放射电化学方法、脉冲电位法或脉冲电流法的研究。由于这些方法仅能给出宏观统计信息,所以早期的研究结果大多是定性和唯象的。80 年代以来,应用各种电化学现场光谱方法探索有机小分子燃料电池阳极过程机理一直是活跃的研究领域。1980 年 A. Bewick 等在应用电场调制红外光谱(EMIRS Electromodulated Infrared Spectroscopy)研究甲酸、甲醇等在铂、铱、钌等电极表面吸附过程中,检测到线性和桥式吸附的一氧化碳。1986 年孙世刚等首次报道了在光滑铂电极和铂单晶表面捕捉到各类有机小分子的解离吸附产物,并运用程序化电位扫描

研究这些物质单独的电化学氧化特性,利用电化学现场红外光谱鉴定出这些解离吸附物种是各种形式吸附的一氧化碳。这些研究结果确立了有机小分子燃料电池阳极过程的双途径机理。其它电化学原位谱学方法,例如差减归一化界面傅立叶变换红外光谱(SNIFTIRS Subtractively Normalized Interfacial FTIR Spectroscopy),反射吸附红外光谱(IRRAS InfraRed Reflection Absorption Spectroscopy),电化学微分质谱(DEMS Differential Electrochemical Mass Spectroscopy),表面增强拉曼散射谱(SERS Surface Enhancement Raman Spectroscopy)以及紫外可见光反射光谱(Ultraviolet and Visible Reflectance)等等,都已被广泛用于各类电催化过程的跟踪,中间及反应产物的确认,以及表面吸附成键机制等方面的研究,从而发展和丰富了分子水平上的电化学催化机理。进入90年代以来,上述现场光谱方法向快速时间分辨方向的发展,为研究电催化剂表面分子水平上的反应动力学提供了可能。

参考文献

- 1 Grubb W. Nature, 1963,198:883
- 2 Damaskin B B, et al. Adsorption of Organic Compounds on Electrodes, New York: Plenum Press, 1971
- 3 Trasatti S. Electroanal Chem & Interfacial Electrochem, 1972, 39: 163
- 4 Angerstein-Kozłowska H, et al. J Electrochem Soc, 1973, 120(6): 756
- 5 Clavilier J, et al. J Electroanal Chem & Interfacial Electrochem, 1980, 107: 205
- 6 Motoo S, et al. J Electroanal Chem & Interfacial Electrochem, 1982, 139: 119
- 7 Adzic R R. Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, 1984, 13: 159
- 8 孙世刚. 法国国家理学博士学位论文, 1986
- 9 Parsons R, et al. J Electroanal Chem & Interfacial Electrochem, 1988, 237: 9
- 10 Ross P N. Electrochimica Acta, 1991, 36(14): 2053

(厦门大学博士生导师孙世刚教授撰)

铅电极上氧化铅层的电化学性质

electrochemical properties of the PbO film on Pb 研究铅电极上氧化铅层结构、动力学性质不仅是深入了解铅酸蓄电池正极板栅腐蚀机理、阳极膜结构、充放电过程动力学性质的关键课题之一,还可望使铅酸蓄电池能在提高电池比能量和极板活性物质利用率以及延长电池寿命方面获得突破,同时也是深入了解电化学体系中固体电极/溶液界面电极过程动力学、高电场作用下的离子传质共性、半导体氧化物的电化学性质的重要基础研究。

铅电极在硫酸溶液中阳极氧化时形成多层的阳极膜结构。1951年德拉海(P. Delapay)从热力学角度用电位-pH图预言了不同电位和pH值下的阳极膜组成,更为精确的电位-pH图是1964年由路茨基(P. Ruetschi)提出,他预言了 $PbO \cdot PbSO_4$ 、 $3PbO \cdot PbSO_4 \cdot H_2O$ 、 $5PbO \cdot H_2O$ 在阳极膜中的存在。1959年伯班克(J. Burbank)和1964年路茨基根据热力学平衡反应分别提出了铅电极上的实际阳极膜结构模型。铅电极在低于-0.4V(对 Hg/Hg_2SO_4 参比电极,下同)下阳极极化时,只生成硫酸铅钝化膜;高于-0.4V时,由于 SO_4^{2-} 、 Pb^{2+} 离子难以穿透硫酸铅钝化膜而产生很大的欧姆电位降,在强电场作用下, OH^- 离子向内层迁移,而 H^+ 离子向溶液方向迁移,使阳极膜内层pH升高,为碱式硫酸铅、氧化铅的生成提供了碱性环境。1970年帕弗洛夫(D. Pavlov)采用X-射线衍射法证实了四方、 $PbO \cdot 3PbO \cdot PbSO_4 \cdot H_2O$ 和 $PbO \cdot PbSO_4$ 在阳极膜中的存在,并观察了不同电位下的生长过程。铅电极在-0.3~+0.9V电位范围阳极极化时,除了硫酸铅钝化膜以外,阳极膜主要是氧化铅层的生长,内层只包含少量的碱式硫酸铅。1973年路茨基提出了阳极膜中

扩散电位的概念,使实验测量电位值同理论计算值相联系,进一步完善了阳极膜的结构。四方氧化铅是具有能带差 E_g 为1.9~2.0eV的n型半导体,在光照下可促进 $PbO \rightarrow PbO_n \rightarrow PbO_2$ 的氧化过程。

由于铅在阳极氧化或腐蚀过程中,铅处于热力学不稳定状态而不断地被氧化,所以近些年一方面是采用现代表面物理分析技术进一步研究氧化铅层的结构和组成;另一方面更着重于研究阳极膜的结构变化,不同过程的动力学性质。

X-射线是用于鉴别阳极膜结构组成的最常见方法。由于硫酸铅晶体的衍射峰较强,数目多,明显地干扰了其它二价铅化合物的衍射,特别是在阳极膜中碱式硫酸铅量少,晶粒尺寸可能也比较小,使衍射峰强度非常低,研究碱式硫酸铅的生长过程较困难,四方氧化铅在 $d=3.12 \times 10^{-10}m$ 的最强衍射峰同 $\alpha-PbO_2$ 、 $PbO_n \cdot 3PbO \cdot PbSO_4 \cdot H_2O$ 及Sb的特征峰相重叠,阳极膜中少量的其它组成,如斜方氧化铅,就更难以被识别。在这一方面做工作最多的是帕弗洛夫。激光拉曼对氧化铅及碱式硫酸铅的散射较硫酸铅灵敏,是鉴别它们的较好手段。1983年布洛克(K. R. Bullock)在阳极膜内层发现了斜方氧化铅,它的形成优先于四方氧化铅,并保持较少的量,阳极膜的生长主要是四方氧化铅量的增加,这是否是斜方氧化铅转化为四方氧化铅,其原因还不清楚。激光拉曼散射的优点是可以现场实验,缺点是讯号较弱。1987年帕弗洛夫采用电子衍射也发现在正极放电过程中可形成斜方氧化铅,他认为这是由于 SO_4^{2-} 离子难以进入活性物质深处, PbO_2 继续放电的结果,该过程可提高正极活性物质的利用率。铅在阳极氧化过程中形成的氧化铅膜结构在电极停止极化后仍发生不断地变化,所以非现场实验的阳极膜结构发生了改变,而上述的实验特点是大部分为非现场,讯号弱,相互干扰大。所以现场光电化学方法,新的电化学测试技术,结合上述测量表面膜结构的现代表面物理测试新手段,是进一步研究铅阳极膜结构和组成变化的有效方法。

电化学方法仍是研究阳极膜结构的主要手段。电极在阳极动电位扫描过程中,由于硫酸铅膜的钝化作用,不能观察到氧化铅和碱式硫酸铅的形成峰,但在-0.8V左右可观察到一个还原峰。很多作者对该峰看法不一,帕尼萨(H. S. Panesar)认为是 $\alpha-PbO_2$ 还原为Pb,周伟舫和伊乔玛(M. N. C. Ijomah)认为是 $PbO \cdot PbSO_4$ 还原为Pb。巴拉达斯(K. G. Barradas)和帕弗洛夫等认为是 PbO 的还原。作者采用现场电化学方法,结合X-射线衍射,激光拉曼现代表面分析技术,对该峰性质进行了详细研究,发现在铅、铅钙合金电极上该峰是四方氧化铅的还原峰,而少量四方氧化铅在其还原过程中将转化为碱式硫酸铅。对于铅锡合金电极,在阳极氧化过程中,由于合金中锡的溶解,多孔的阳极膜增加了 SO_4^{2-} 离子的来源,使四方氧化铅很容易转化为碱式硫酸铅,因此在一定条件下,可观察到 PbO 、 $3PbO \cdot PbSO_4 \cdot H_2O$ 及 $PbO \cdot PbSO_4$ 的3个还原峰。但是在通常情况下,只观察到 PbO 一个还原峰。

由于阳极氧化过程形成的氧化铅层性质必须从它的还原峰来研究。所以作者对不同电极上形成的氧化铅层的还原过程动力学进行了系统地研究,发现氧化铅是通过溶解-沉积机理被还原,并且 OH^- 离子通过扩散离开氧化铅层,其还原速度是受金属铅电结晶缓慢步骤及 OH^- 离子通过硫酸铅钝化膜扩散步骤的控制。当还原过电位较小时,金属铅的电结晶主要是二维的瞬间成核的生长过程,垂直于金属表面的第三维方向上的生长速度很慢,然而当还原过电位增加时,此生长速度及成核速度显著增加。氧化铅的还原峰电流随扫描速度增加而增大,峰电位明显负移,同完全不可逆电极反应过程的变化规律相一致。

阳极膜的生长过程已有不少研究。1977年瓦雷尔特(E. M. L. Valerote)提出了不同电位下阳极膜的生长模型,根据碱化理论,描述了硫酸铅钝化后氧化铅层的生长及进一步被氧化的过程。周伟舫详细研究了铅锡合金电极上阳极膜的生长过程动力学,提出了生长速度受氧原子扩散控制,测得氧原子扩散系数为

$10^{-13}\text{cm}^2/\text{s}$,并讨论了合金元素对阳极膜生长的影响。江志猛也研究了合金元素对腐蚀过程的影响,提出富铋相及晶间优先发生腐蚀的机理。1984年巴拉达斯和1986年杭期也采用电化学及光电化学方法研究了氧化铅层的生长过程动力学,并讨论了低温对氧化铅层结构性质的影响。

1978年帕弗洛夫提出氧化铅层的生长是由于 O^{2-} 离子穿过氧化铅晶格运动的结果, O^{2-} 离子运动则是靠空位机理来实现。当铅氧化为 Pb^{2+} 离子时,形成氧空位,在电场作用下,氧空位向溶液方向迁移,然后同水反应生成氧化铅和 H^+ 离子。在更高电位下,帕弗洛夫用光电化学方法解释了氧化铅层的继续氧化过程。当 PbO 被光照射时,产生成对的电子 e^- 和空位 PbO^+ ,空位同 OH^- 离子反应产生 OH^- 原子团,它的相互作用可产生 O_2 原子,然后 O_2 原子将氧化铅进一步氧化成 PbO_2 。关于合金元素对 PbO 层形成及氧化为 PbO_2 、 $\alpha\text{-PbO}_2$ 过程动力学性质的影响的报道不多,还缺乏深入系统地研究。

1992年郭永柳根据热力学平衡数据,结合实际阳极膜的情况,提出了一个新的电位-pH图,发现 SO_4^{2-} 、 H^+ 离子浓度从溶液到阳极膜内层逐渐降低, OH^- 离子浓度分布则相反, Pb^{2+} 离子浓度分布比较复杂,在 $\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ 和 $3\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 层中分别出现一个最大值和一个最小值。在不同极化电位下的阳极氧化过程中, H^+ 、 SO_4^{2-} 离子的迁移数不同。在不同相交界面上的电位降最大,电场强度也最强。根据这个模型还讨论了氧化铅和硫酸铅的初始形成过程,并进行了实验验证。

由此可见,铅的阳极膜结构,特别是氧化铅层的动力学性质非常复杂,需要深入研究氧化铅层在金属铅和二氧化铅或硫酸铅层之间的生长过程动力学以及合金元素的影响,这是提高活性物质利用率和延长电池寿命的捷径。结合X-射线衍射、电子衍射、微区激光拉曼散射、红外吸收光谱等分析物质结构的表面物理测试技术,采用新的现场电化学测试和现场光电化学方法等是研究氧化铅层性质的重要手段。

参考文献

- 1 Ruetschi P, et al. J Electrochem Soc, 1964
- 2 Pavlov D, et al. J Electrochem Soc, 1970~1987
- 3 Valeriotte E M L, et al. J Electrochem Soc, 1977
- 4 Bullock K R, et al. J Electrochem Soc, 1983~1986
- 5 Barradas R G, et al. Can J Chem, 1984, 62, 596
- 6 周伟妨,等. 化学学报, 1985~1989
- 7 Guo Yongliang. J Electrochem Soc, 1991~1992

(山东大学郭永柳副教授撰)

薄层电化学技术 thin-layer electrochemical techniques 指在薄层电解池中(或在薄层条件下)进行电化学测量的实验技术,已广泛用于无机、有机和生物氧化还原体系的热力学测定、反应机理和动力学研究或成分分析。

薄层电解池结构为工作电极提供的溶液层厚度极小、典型值为 $2\sim 100\mu\text{m}$,这一数值小于电化学测量用的常规电解池中电极/静止溶液界面附近的扩散层厚度。理论分析表明:只要液层厚度 $l \ll (2Dt)^{1/2}$ 电解池内的传质影响即可忽略,这里 $(2Dt)^{1/2}$ 为给定实验时间 t 内应有的扩散层厚度, D 为电活性物种的扩散系数。因此,在薄层电解池中工作电极上的暂态过程是由整个液层中反应粒子的浓度变化所引起的。与此相反,在常规电解池中工作电极上发生半无限扩散的传质,因为在该体系中扩散层只占整个溶液层的一小部分,在理论处理时假设电极附近的溶液具有无限大的厚度是合理的。

薄层电化学技术的应用始于20世纪60年代初,有关薄层电解池的结构和相关实验技术的理论基础已有综合评述。最常用的实验方法如下。

电位阶跃法 薄层电解池装满试验溶液后,先使工作电极的电位维持在某一数值,不让任何电极反应发生,接着瞬时输入能引发电解反应的另一电位值,并立即跟踪电流密度 i 随电解时

间 t 的变化。这种利用 $i\sim t$ 关系获取研究体系信息的方法有时称计时电流法。电流对时间积分得到电量 Q ,而利用 $Q\sim t$ 关系获取研究体系信息的方法称为计时库仑法。 i (或 Q)随 t 的变化规律与过程机理和动力学有关。若电解时间足够长,溶液中指定的电活性物种将完全转化,电解消耗的总电量 Q_T 可表示为:

$$Q_T = \int_0^{\infty} i dt = nFVC^b$$

式中 F 为法拉第(Faraday)常数, V 为溶液体积, n 为电极反应电子数, C^b 为电活性物种的体相浓度。薄层技术的优点之一是它能在极短的时间内实现完全电解。由于工作电极所在薄层室的溶液体积只有微升的数量级,当电解电位选用合适数值时溶液中指定物种实际上在几秒至几十秒的时间内完全转变。由上式可知,如果已知 n 和 V ,由测得的 Q_T 值可直接确定 C^b 。因此库仑法是一种方便的分析手段,它以无需预先制作校正曲线而独具特色。在电极反应机理研究中则根据上式确定反应电子数 n 。

循环伏安法 在工作电极上周期性地输入对称的三角波电位扫描信号,并记录电流密度 i 与电位 E 的关系。为了满足薄层条件,电位扫描速度 U 不宜太大,对 $50\mu\text{m}$ 厚的薄层电解池而言,要求 $U \leq 20\text{mV/s}$ 。如果电活性物种的氧化还原转变非常可逆,可导出:

$$i_p = \frac{n^2 F^2 U V C^b}{RT} \cdot \frac{\exp[nF(E - E^{\circ})/RT]}{\{1 + \exp[nF(E - E^{\circ})/RT]\}^2}$$

上式被视为薄层行为的伏安特征,表明在可逆体系的循环伏安图上出现对称的阳、阴极电流峰,它们的峰电流 i_p 相等且峰电位均为标准浓度电位(standard formal potential) E° 。由上式可得出:

$$i_p = n^2 F^2 U V C^b / RT$$

电流响应正比于扫描速度 U 和 n^2 是薄层行为的另一种表现。

脉冲库仑法和阶梯库仑法 在工作电极上分别输入脉冲电位信号和阶梯电位信号,记录电量 Q 随电位 E 的变化。随着脉冲电位或阶梯电位的变化,薄层电解池中氧化态物种 O 和还原态物种 R 很快达到与各电位值相对应的平衡,而它们的浓度 $[O]$ 和 $[R]$ 可由电量确定,根据奈恩斯特(Nernst)方程,

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[O]}{[R]} = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{Q_T - Q}{Q} \right)$$

Q_T 为 O 全部转变为 R 所需的电量。脉冲库仑法中的 $Q\sim E$ 曲线类似于经典极谱图,而阶梯库仑法中的 $Q\sim E$ 曲线类似于微分脉冲伏安图。上式可用于 E° 和 n 的测定。

薄层光谱电化学技术 这是将电化学方法和光谱方法相结合的实验技术,与前述诸种纯粹的电化学实验相比,最大差别是允许对溶液薄层进行光谱测定。由于能够在电化学原位(in situ)条件下获得光谱数据,这种技术提供了反应物(或中间物)的分子信息,便于跟踪反应物和产物的消失或出现,从而能更有效地鉴别反应机理。薄层中的光谱测定主要是吸光度测定。薄层电解池所需试样量很少,易于获得平衡体系的光谱,特别有利于生物氧化还原体系的研究,对了解它们在活体中(in vivo)的化学性质很有帮助。

薄层光谱电解池中的工作电极应是透光电极,文献中常把它与薄层溶液容器的组合总称为透光薄层电极(缩写OTTLE)。透光电极材料分两类:(1)导电材料(Pt 、 Au 、 SnO_2 或碳)的薄膜($10\sim 500\text{nm}$),它们直接沉积在玻璃或石英等透明基体上,透明度为 $20\%\sim 85\%$;(2)金属(Au 、 Ni 、 Pt 或 Cu)网栅电极; 1cm 有 $40\sim 1000$ 条金属丝,透明度 $20\%\sim 80\%$ 。透射光谱法较常用网栅电极,为使电极可在较负的电位区工作,可将金属网架齐化。此外,为了增大光程,提高灵敏度,溶液薄层厚度稍大,一般为 $50\sim 200\mu\text{m}$ 。根据某些生物体系研究的需要,已设计了可在厌氧条件下或在低温下工作的OTTLE以及保留薄层特征但光程可达 1cm 的电解池。此外还设计了用于非水体系和熔盐体系的OTTLE。薄层光谱电化学实验中紫外可见光谱较为常见,但已出现利用红外光谱、荧光光谱或圆二色谱进行测定的技术。

单电位阶跃计时吸光法是薄层光谱电化学测定中最常见的

一种,其操作与计时电流法相似,但这时记录指定波长下的吸光度 A 随时间 t 的变化。对平衡体系而言,可导出:

$$E = E^{\theta} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[O]}{[R]} - E^{\theta} + \frac{RT}{nF} \ln [(A_R - A)/(A - A_0)]$$

A_R 和 A_0 分别是电活性物种完全以还原态或氧化态存在时的吸光度。理论上,薄层光谱电化学技术与纯粹电化学技术方法存在着对应关系。除本例外,微分循环电位吸光法与薄层循环伏安法相对应。

必须指出,薄层电化学技术的原理不仅适用于薄层电解池的场合,而且适用于涉及表面薄膜的许多电化学体系。在溶出伏安法中金属以汞齐形式电沉积在汞膜中随后将它溶出,其理论基础属于薄层问题。在氧化物层、吸附层或沉积层等薄层中的电化学氧化或还原,以及化学修饰电极上固定化电活性物种的氧化还原转变等,也都遵循着薄层技术的理论,因为在所有这些过程中传质影响均可忽略,符合前述的薄层条件。

薄层电解池可用在流动体系中,已被作为流动注射法分析和液相色谱的检测器件。为了保持薄层特性,必须控制流动条件。例如当液层厚度 $l \leq 50 \mu\text{m}$, 体积流速不得超过 $1 \mu\text{l/s}$ 。

薄层电化学技术虽有广泛用途,但在动力学参数测定方面却受到某些限制。由于在薄层电解池中辅助电极和参比电极往往置于容纳工作电极的薄层室之外,因此电流分布不甚均匀,存在较大的未被偿 IR 电位降,这给动力学参数的准确测定带来困难。

参考文献

- 1 Christensen C R, et al. Anal Chem, 1963, 35: 205~209
- 2 Bubbard A T, et al. Electroanalytical Chemistry (ed Bard A J). New York: Marcel Dekker, 1970, 4: 129
- 3 Kadish K M, et al. Electrochemical and Spectrochemical Studies of Biological Redox Components. Washington: American Chemical Society, 1982, 1~68
- 4 Woodard F E, et al. Comprehensive Treatise of Electrochemistry (ed Yeager E et al). New York: Plenum Press, 1984, 9: 351~443
- 5 Heineman W R, et al. Electroanalytical Chemistry (ed Bard A J). New York: Marcel Dekker, 1984, 14: 1~113

(厦门大学吴宝璋副教授)

导电聚合物修饰电极

modified electrodes of conducting polymer 化学修饰电极就是在电极表面有目的的赋予具有某种功能的外来化学基团,使电极具有特定的性质。即对电极表面进行结构建造或结构裁剪,而使电极显示固定化分子的化学、电化学、光学和其他方面的性能,对于控制和促进电极界面电化学反应,无论在电化学理论的发展或实际应用均具有重要的研究意义。

1973年 Lane 等首先用强吸附法在铂电极表面引入烯烃功能团。从此,利用化学修饰来改变和控制电化学反应的研究与日激增。在众多的化学修饰电极中,有活性的导电聚合物修饰电极尤为重要,导电聚合物的种类广,把半导体和金属的特性以及塑料性能结合起来,它已成为目前电化学研究中最活跃的领域之一。主要研究内容有电极表面的修饰方法;修饰物的种类;表征技术;基础理论和实际应用 5 个方面等。

自从报导掺杂的聚乙炔具有像金属那样的导电性的论文以来,导电聚合物修饰电极的研究迅速发展。聚乙炔、聚吡咯、聚噻吩、聚苯、聚苯胺及其衍生物等都是重要的导电聚合物。电子导电性是借助离域能带结构使电子传输穿过聚合物。对电子导电聚合物,溶解于溶液中的组份,原则上会在聚合物溶液界面上,于组份各自的特征电位下发生电化学反应。多种导电聚合物表现出聚合膜的净氧化或还原所固有的电化学反应,这可能强烈地改变聚合物的电导率。基底上的聚吡咯膜在氧化态是电子导体,而在还原态却是绝缘体。还可能把分子态的氧化还原组份接着于导电

聚合物上,而使之具有催化活性。

制备 导电聚合物修饰制备简单,对基底本身无苛求。主要有铂、玻璃和半导体等基底。电化学技术可方便地控制厚度。用电引发在 Ni、Cu 金属电极上成功地制备附着良好且厚度可控的聚乙炔膜,以无水 Lewis 酸为催化剂,在硫酸中,从苯制备均匀柔韧的聚对苯。在水溶液中,噻吩的电聚合只能采用高酸度的高氯酸溶液。噻吩先经历化学低聚反应,低聚物可在较负的电位下阳极氧化成膜。

检测技术 表面检测技术可检测电极表面的功能团、表面密度、覆盖度、结构状态和形貌。(1)X 射线光电子能谱:聚邻氨基酚和聚邻苯二胺膜存在着 C、N 和 O 等元素,而不存在 S 元素,这意味着在聚合过程中离子 (SO_3^+) 不嵌入膜中。这可能就是膜导电性较差的原因。聚邻氨基酚— Ni^{2+} 膜的 N 的结合能正移 (1.4 eV), Ni^{2+} 确已与 N 络合。该膜多孔性较好。 Ni^{2+} 渗入后,可能形成多层立体络合物。(2)拉曼光谱:现场跟踪了苯胺在金基底上的氧化聚合过程,在 $0 \sim 0.6 \text{ V}$ 电位区间,在基底表面上的物种既非单体也非高聚体。这可能是初始聚合阶段—低聚体苯胺的形成。聚苯胺膜内的 Ag 物种还原后具有明显的负价态现象。在金基底上电化学聚合形成的聚吡咯薄膜存在表面增强共振拉曼散射效应。光照下吡咯的电化学聚合电位显著降低(约 300 mV)。(3)红外光谱:聚苯胺膜具有 Emeraldine 八聚体结构。与聚苯胺一样,聚邻苯二胺和聚胺基酚也按 1:4-对位偶联。实际上, 821.8 cm^{-1} , 850.0 cm^{-1} 的双峰和 765.6 cm^{-1} 的峰正是 1,2,2-取代苯环的特征峰。(4)电化学反射光谱:现场研究酸性水溶液中聚噻吩的电显色,反射率变化可衡量电变色性能。这种测量方法可较准确地评价电变色的响应时间,电位区,寿命和色保留时间等重要参数。(5)顺磁共振:聚苯具有高电导率和相对低的自旋磁化率,极化子与偶极子为主要导电者,并在一定的电位下相互转化。自旋粒子有很高离域性,膜中链与链之间可能存在部份氧桥结构。(6)扫描电镜:扫描电镜观察到两种不同的结构图像。在邻氨基酚电聚合过程中,按 $Q \sim N^n$ 作图, $n=1$, Q 与 N 成线性关系,膜具有致密结构, $n=2$, Q 与 N^2 成线性关系,膜具有张开结构。

电化学特性 (1)电聚合机理:聚吡咯(PP)膜的氧化态结构 (PP^+) 对吡咯的氧化聚合具有电催化活性,因而吡咯在 PP 膜上更易聚合。在光照射下,聚合物单体先形成低聚物,再聚合成膜。

单体→低聚物→聚合物膜

光可促进低聚物的形成。吡咯、噻吩第一步是慢步骤,苯胺第二步是慢步骤。膜形成后又可加速低聚物的成膜速率。(2)氧化还原峰: Ni^{2+} 离子可与聚 8 羟基喹啉、聚邻氨基酚、聚邻苯二胺和聚苯胺等络合。聚合物— Ni^{2+} 膜电极的循环伏安图有明显的氧化还原峰,和彼此相应的电化学特性。聚 8 羟基喹啉、聚邻氨基酚和聚邻苯二胺等可用以交换 Ni^{2+} 与 H^+ 和分离 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 和 Fe^{2+} 离子。(3)H⁺ 浓度 $10^{-10} \sim 10^{-4} \text{ mol/L}$ —电位关系:聚邻氨基酚和聚邻苯二胺均有氢功能,响应时间快,重现性好,选择性好。在 H^+ 浓度 $10^{-10} \sim 10^{-4} \text{ mol/L}$ 之间膜的性能稳定。(4)光电流响应:聚苯胺膜在酸性溶液中具有光电流响应。电位导致正、负光电流的可逆变化。此特性涉及膜的 p、n 型半导体结构的转化。 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-/4-}$ 、 I^- 和 Cu^{2+} 可掺入膜内,并参与光电流响应。光电流的特性、响应时间、强度和转折电位都发生较大的变化。

应用 (1)光刻效应:光照下活化吡咯的电聚合反应,可形成光照点的聚吡咯膜。此光催化作用可望制备新型有机器件。(2)电显色:聚噻吩膜在酸性水溶液中能获得良好的电显色效应。转换时间 $10 \sim 20 \text{ ms}$, 寿命 10^4 次,保留时间数分钟,是一种较好电学变色显示器。聚邻苯二胺在硫酸中有明显的变色效应。当电位在 $-0.2 \sim +0.5 \text{ V}$ 间扫描时,膜颜色可在浅绿色—紫红色变换。在 100 ms 的方波周期内变色寿命可达 5×10^4 次。(3)电催化:聚邻氨基酚— Cu^{2+} 膜对双氧还原具有明显的电催化作用,双氧还原经历过氧化氢步骤,反应电子数 $n=2$, 反应速率

常数 $k=4.3 \times 10^2 \text{L/mol} \cdot \text{s}$ 。聚邻氨基酚— N^{2+} 膜也可催化乙醇的氧化。(4)化学电源:导电聚合物的嵌脱过程可构成化学电源的电极,充放电时只有晶格常数的变化,无新相和晶粒消长。聚乙炔,聚噻吩,聚苯和聚苯胺等都可做为化学电源的新型电极材料。

导电聚合物修饰电极的出现,使电化学、高分子、催化、有机和生物等融为一体。日益增多的导电聚合物体系将导致繁多的新掺杂物的出现。电化学现场光谱技术的建立将有助于深入了解膜表面的分子排列、键、结构,电子转移机理,发展电荷传输的理论。抗氧性高、稳定性好、有特殊功能的导电聚合物膜将在实用上开辟广阔的前景。

参考文献

- 1 Royce W. Murray *Electroanalytical Chemistry*, 1984, 13: 193~368
- 2 Chen Yanzhen, Huang Haitao, Tian Zhaowu *Chem. J Chinese Univ*, 1987, 3(1): 13~20
- 3 Ye J H, Chen Y Z, Tain Z W *J. Electroanal Chem*, 1987, 229: 215~222
- 4 田中群,雷才育,景遐斌. *物理化学学报*, 1988, 5(4): 458~460
- 5 钟传键,田中群,田昭武. *中国科学(B辑)*, 1989, 12: 1233~1238
- 6 马福元,陈衍珍,田昭武. *物理化学学报*, 1989, 4(5): 452~456
- 7 陈衍珍,李容芬,田昭武. *物理化学学报*, 1991, 7(2): 158~162

(厦门大学陈衍珍副教授撰;林仲华审)

磁化学 magnetic chemistry 也称磁性化学或磁场化学。

它是研究分子磁性与化学结构和磁场效应与化学反应的物理化学中一门分支学科。一方面,它研究物质在磁场中显示出的抗磁性、顺磁性和铁磁性,它们产生于组成物质中的原子或分子中的电子的轨道磁矩,电子的自旋磁矩和核子的自旋磁矩在空间的定向以及它们相互间的作用。从这些磁矩的定向和相互作用出发,研究分子的组成、分子的价键性质、分子中电子的价态、分子的结构、分子的空间构型、分子运动的力学性质以及分子间的相互作用等化学问题。另一方面,它也研究外磁场对化学反应的影响,根据量子力学,化学变化应该取决于化学粒子的电子自旋。凡是参加化学反应的含有未成对电子的原子或原子团处在磁场之中,其未成对电子自旋的性状受到磁场的影响而发生变化,从而影响了化学反应体系的有序与无序,导致体系熵的变化,必然影响化学反应速度,改变反应产物的构成以及影响整个化学反应的进行与结果。上述内容总称为磁化学。

研究磁化学的实验方法和主要设备有:磁天平(MB)、电子顺磁共振谱(EPR)、核磁共振谱(NMR)、铁磁共振谱(IMR)、穆斯堡尔谱(Mössbauer)、超导量子干涉磁强计(SQUID)以及各种类型的磁场,如电磁场(1~3T[特斯拉])、水冷磁场(8~23T)、超导磁场(5~15T)、混合磁场(16~32T)、脉冲磁场(40~150T)等。

磁是被人类认识和利用最早的自然现象之一,磁化学的发展已有100多年的历史。早在1890年冯希(A. B. Faunce)提出了以电池为电源,防止锅炉结垢的电磁处理专利(US 438579)。1891年法国比埃尔·居里(P. Curie)发现在某一特定温度时物质的磁性会发生变化,该温度称为“居里温度”。1921年美国斯特恩(O. Stern)实验证实银原子在磁场中的空间量子化,并测定它们的磁矩。1929年波哈达哥尔(Bhatagner)等人把磁场对化学反应速度的影响做过详细地评述。1932年德国范弗雷克(J. H. Van Vleck)发表了电极化率和磁化率理论。1944年苏联札沃依斯基(E. K. Завойский)发现了电子磁共振现象,从而产生电子自旋磁共振法(EPR),并测定了液相链反应中的自由基。1946年美国普

塞尔(E. M. Purcell)和布洛赫(F. Bloch)分别发明了磁共振吸收法和磁感应法,而且在通常状态的液体和固体物质中能观察到共振吸收现象,从而发展了核磁共振法(NMR),成为测定有机化合物结构的有力工具。到目前为止,NMR与其它仪器相配合,已经鉴定了十几万种以上的化合物。1948年法国奈耳(L. Neel)发现亚铁磁性,并根据点阵中不同原子位置上的电子自旋的不同,正确地解释亚铁磁性现象。1956年塞尔伍德(P. W. Selwood)所著的《磁化学》一书,首次较为系统地叙述了磁化学的概念及其研究内容。1964年塔巴塔(Y. Tabata)等人进行了在 γ 射线辐照下,磁场对聚合速率和产率的研究。1973年勒波尔(A. R. Lepley)等人的《化学诱导产生的磁极化》一书出版。1983年中国科学院长春应用化学研究所研制成功我国第1台傅立叶变换NMR谱仪(CH-100型,电磁铁,100兆赫)。1986年苏联的莫林(Ю. И. Молин)等人以一系列的理论计算和实验结果,证明了磁场能够影响化学反应。这种化学变化是取决于化学粒子的电子自旋,从而改变反应系统的熵,影响化学反应的进行。他们撰写的《化学反应中的磁场和自旋效应》的论文,荣获1986年度的列宁奖金。1989年斯坦内尔(V. E. Steiner)等人在 *Chemical Reviews* 杂志上较为详尽地论述了化学动力学及相关现象中的磁效应。

分子磁性与化学结构的研究一直引人注目。美国杰琳斯基(Lynn W. Jelinski)在1990年系统地评述了近2~3年间NMR在技术、仪器和应用方面的进展。介绍了NMR法在体液、蛋白质、聚合物、液晶、超导体、簇合物、各种(有机、无机、生物)材料、化学位移和化学位移张量、化学诱导核极化和动态核极化、取向分子及有机金属与相关的化合物等43个方面的研究及应用概况。还为液体NMR实验推荐出1.41T高分辨的NMR波谱仪。

1990年中国科学院武汉物理所的科研人员采用偏振激光束照射80兆周和200兆周NMR谱仪,成功地观察到了稀薄氙(Xe)气的NMR讯号,这在国际上尚属首次。

同年,美国国家卫生研究所路易斯(Lewis)等人利用四维NMR技术研究蛋白质结构,能准确地测量其分子量达25000道尔顿。目前国内外学者正向多维NMR方向发展。

稀土元素在周期表中是一族有效磁矩和顺磁磁化率较大的元素。国外主要是从物理方面进行研究,而从磁化学角度研究得很少。中国科学院长春应用化学研究所的科研人员,从磁化学的角度开展了稀土与镓的研究,即通过参数的测定与计算以及磁场效应的影响所获得的信息,来研究它们的化学组成、价态、结构、取向、反应速度、反应产率与磁性的关系。如根据稀土离子的4f电子的排列,提出总自旋量子数S、总轨道量子数L和总量子数J以及朗德劈裂、g因子随原子序的递变规律,并由此阐明了稀土离子的有效磁矩和顺磁磁化率随原子序的递增呈现双峰的周期性变化,指出重镧系周期的有效磁矩和顺磁磁化率大于轻镧系周期的原因。另外,首次合成出钙钛矿型镧、铈、铈的硫酸盐晶体及含过渡元素Fe³⁺离子的钙钛矿型稀土硫酸盐的多晶粉末,测定并计算有关参数,提出和论述它们的顺磁磁化率、奈尔温度与过渡元素的离子浓度、温度、磁场强度之间的变化规律。同时设计和研制了重约4t的折双轴型带孔电磁铁(DKDCT-1型),最高场强可达2.2T以上。因此,从化学角度研究稀土的磁性,必将发展成为一门崭新的稀土磁化学。

磁场对化学反应影响的研究,当前也是十分活跃,国内外学者主要集中于如下几个方面。

聚合反应 磁场可直接影响有机高分子的聚合速度、聚合产率、平均分子量、分子量的分布和化学接枝率等。苯乙烯在磁场中聚合的时间,由无磁场的20h,缩短为6h。聚甲基丙烯酸甲酯的平均分子量,随磁场强度的增加按指数关系增长。

光化学反应 磁场往往可以改变反应生成物或中间产物的光学活性以及其它行为。海达(N. Hata)证实异噻啉氮化合物的光化学异构物(1-异噻啉)的产率与外加磁场有关,当场强为0.9T和1.35T时,产率达到极大值,而在0.72T时,产率则是极小值。

电化学反应 外磁场可显著地影响极化行为、电流效率和反应产物等。在电解、电镀、电化学表面处理等方面产生了实际效果。在 0.03T 磁场存在下,电解槽中电镀镍的沉积速度提高 20%~25%,镀层厚度可提高 27%。

同位素富集反应 选择适当的磁场强度可使同位素有效地分离并能导致产生分离同位素的新方法。由于同位素的竞争化学反应与核磁矩和核自旋有关,因此某些同位素分离反应的效率取决于外磁场。美国的图罗(N. J. Turro)在光解二苯基酮时,¹³C 的富集百分率,可由无磁场时的 47.6%,增到地磁场中的 63.7%,在 0.05~0.03T 的磁场中则达最大值;在 1.5T 的磁场中降为 55%,若磁场强度增至 10T,则富集百分率小到可以忽略的程度。

晶体生长化学反应 硅和砷化镓等单晶体的生长中,若有外磁场,对抑制熔体的对流,缩小温度波动的幅度,减少不规则生长条纹及杂质,提高晶体质量,控制缺陷和位错等均有一定的效果。日本光技术共同研究所的福田承生用超导磁铁做外加磁场的提位装置,场强为 103.5kA/m,成功地制备出 5cm 直径的砷化镓单晶,且晶体质量得到较大的改善。

油田化学反应 磁场用于原油的生产过程显现出有防蜡、降粘、防垢、增输、增注、节油、减轻腐蚀、稠油破乳和改变燃油状况等效果。美国海湾石油公司(Gulf Oil Company)在外径的管线上安装 4 个 C-8 型磁处理装置,取代清蜡化学溶剂处理,可使产量和压力均保持稳定,无蜡沉淀现象。这是由于磁处理装置使水和烃类分子磁化,造成清蜡破乳的效果。

酶的反应 人们发现磁场可以影响某些酶的活性。利用外磁场可以提高固氮酶活性 4~5 倍。也可以使胰脏酶的极性侧链通过氢键有次序地排列起来。若在 0.8~1.5T 磁场作用下,胰蛋白酶的活性可提高 23%。最近又发现恒定磁场(CMF)能直接激发和抑制 α-淀粉酶的活性,而且在 CMF 中的 α-淀粉酶促反应过程仍很好地服从 Michaelis-Menton 方程。这给研究其它因子对酶促反应的影响及酶促反应机理提供了有价值的参考。

水的化学反应 水经磁处理后的溶液在 200nm 附近出现特征吸收峰,它和 HCO₃⁻ 或 CO₃²⁻ 的特征峰相当。当证明水经过磁化后发生下列物质的反应动力学变化: H₂O + CO₂ ⇌ H⁻ + HCO₃⁻; HCO₃⁻ ⇌ H⁻ + CO₃²⁻, 因而磁处理过的水能防止锅炉结垢。水经磁化使水发生离子化,因此它的物理化学性质如表面张力系数、渗透压、介电常数、H⁻ 浓度、电导率、粘度系数和浸湿性等发生变化。有关磁场处理水的机理有人提出水通过磁场时,受洛仑兹力的作用,正负离子做相反方向的旋转时,就必然会将连接在它们之间的氢键扭断,使得水的溶液内部结构跟原来大不一样。苏联达维多夫(A. С. Давыдов)的孤子模型指出,磁场对水分子片段之间的氢核迁移几率可能发生改变,用逾渗理论来分析研究这些迁移的可能性是有重要意义的。

化学反应机理 磁场影响化学反应机理的研究,概括起来提出如下:自由基对机理(其中包括 Δg 机理、超微细机理和松弛机理);磁流体力学(MHD)机理;电磁场影响化学平衡理论;正氢和仲氢互相转化的理论模型;1991 年中国科学家把磁力键的概念引入化学反应之中,即磁体之间相互以磁力键结合,从而产生化学反应等。虽然有上述各种机理或理论,但是要想真正获得一种普遍的理论来做指导,还有待于深入系统地开展磁化学的研究,从大量的实验现象和数据中,总结出规律,提出理论的模型与解释,并能预言新的现象的发生。

随着高新技术的发展,磁化学已变成一个崭新的研究领域,是一门基础与应用基础性很强的分支学科,有着广泛的应用前景,这类研究被誉为“开辟世界化学科学新方向的杰出科学研究”,曾有人预言,磁化学的研究将对各国的经济发展产生较大的影响。

参考文献

- 1 Turro N J, et al. J A C S, 1981, 103: 3886~3891
- 2 [日]福田承生,等.应用物理,1984,53(1):42~47

- 3 苏翎,等.中国稀土学报,1985,3(3):33~37
- 4 Norisuke Hata, Bull. Chem Soc Jpn, 1986, 59: 2723~2728
- 5 Малыш Ю. Н. Магнитные Эффекты в Химических Радикальных Реакциях. Вестник Академии Наук СССР, 1981, 8: 12~21
- 6 Семидина Л. П. и др. Влияние Слабых Магнитных Полей на Свойства Воды и Лда. Известия ВУЗ Физика, 1988, 5: 13~17
- 7 [日]谷本能义.药学杂志,1989,109(8):505~522
- 8 Lynn W. Analytical Chemistry, 1990, 62(12):212~223
- 9 Yang Jianmei, et al. Proceedings of the 2nd International Conference on Rare Earth Development and Application. China Beijing 1991, 1: 164~166
- 10 蒋秉植,等.化学通报,1991,10:11~15
(中国科学院长春应用化学研究所蒋秉植副研究员撰)

等离子体化学 plasma chemistry

1929 年朗缪尔(Langmuir)在观察气体放电正柱中带电粒子的振荡现象时,把具有自由的正、负带电粒子密度相等的正柱称之为等离子体。实际上,它是部分电离或完全电离了的气(汽)体,通常称为物质的第 4 态,一般是电子(有时存在负离子)、正离子、原子(或分子)、原子团(活性基)、激发的原子(分子)以及光子等粒子的混合物。

早在 200 多年前,人们就注意到在气体放电中会产生某些特殊的化学反应。1758 年探测到在空气的火花放电中会形成臭氧;1785 年通过气体放电制备氧化氮(NO);1859 年让氮和氧的混合气体通过两碳电极间的电弧放电获得了氢氰酸(HCN);1963 年由氢气通过两碳电极之间的电弧而合成乙炔。在 20 世纪 60 年代前,曾使用过“气体放电化学”的名词。随后,逐渐应用了“等离子体化学”一词。

所谓等离子体化学是研究在等离子体中的各种化学反应,包括等离子体内粒子间的反应;粒子与置于等离子体中固体间的反应。应该说,它是涉及到化学、物理以及真空、材料等工程科学的一门分支、交叉学科。它是由等离子体物理渗入化学领域后形成的,它的应用从半导体、集成电路开始,逐渐扩大到材料科学、薄膜器件等方面。

通常等离子体化学主要是指低温等离子体化学。在低气压下,等离子态属非平衡态,而在较高气压下,则属平衡态。随着气压的增加,等离子体由非平衡态向平衡态过渡。等离子体化学的特征是:等离子体中,具有各种高能粒子,而且能量分布范围较宽。从而,可获得比化学燃烧高 5 倍以上的温度,加热速度比化学燃料快 10 倍,这就减少了反应中的热损失;物料离开等离子体时能以高速冷却,这种骤冷作用促使生成物“冻结”,从而变得稳定;由于高能粒子的参与反应,反应速度加快,时间可从几小时缩短到几分之一秒。利用等离子体化学有可能进行通常热化学较困难,甚至不可能进行的化学反应。等离子体化学的另一特征是,由于具有多能量、多种类别的粒子,因此难以对化学反应进行选择性地控制。

低温等离子体又分为属平衡态的热等离子体与属非平衡态的冷等离子体。利用热等离子体化学可以制备超微粒材料,所谓超微粒,一般是指粒径小于 1μm 的超细粉末。由于等离子体与周围区域间有着大的温度梯度,加热后的材料急速冷却,形成超微粒材料。SiH₄ 或 SiCl₄ 和 CH₄ 的等离子体中,进行分解反应,从而获得 SiC。用类似的方法,可合成 WC、TiC、MoC、TaC 和 NbC 等碳化物, TiCl₃ 可在氧等离子体中进行氧化,获得 TiO₂,用同法也可获得 SiO₂。用纯金属在等离子体中蒸发后进行氧化,从而获得氧化物的超微粒。在氧化物和氮或氨的等离子体中可合成氮化物如 Si₃N₄、TiN、BN 和 AlN 等。如把 TiCl₃ 和 BCl₃ 送入氢的等离子体中,也可合成 TiB。将 ZrSiO₄ 送入等离子体中,经熔融后进行急速冷却,生成 ZrO₂ 和 SiO₂,经湿式处理后可获得高纯度的 ZrO₂ 微粒。

利用冷等离子体化学可以进行等离子体化学气相沉积,制备各种薄膜材料。它最早应用于半导体工业上,如利用有机硅化

合物在半导体材料的基片上沉积出 SiO_2 。继后又沉积出 Si_3N_4 、 Si 、 SiC 、磷硅玻璃等。根据不同的功能,可制备出各种不同用途的功能薄膜材料。如用于太阳能电池的 $\alpha\text{-Si:H}$,其他还有 $\mu\text{-Si}$ 、 $\alpha\text{-SiC}$ 、 H 、 $\alpha\text{-SiGe}$ 、 H 等材料。还有,作为硬质膜和装饰膜的 TiN 、 TiC 等;作为保护膜的 Al_2O_3 、压电膜 ZnO 等。近年来,对超薄膜和金刚石薄膜的研究开发引起人极大注意,特别是金刚石薄膜,它具有多方面的优异特性。

在冷等离子体中,大多数的有机化合物都可以发生聚合反应,它以不饱和化合物和芳香化合物的聚合速度为最快。聚合物薄膜可沉积于玻璃、石英等非金属基片上,也可在 Al 、铜以及其它金属或合金表面上沉积。许多用通常方法不发生聚合的单体(如全氟丁烷、苯胺、三氯乙稀等)在等离子体作用下也都发生了聚合。聚合膜可用于半导体、环境保护、装饰、光学、生物以及传感器等方面。

固体材料在等离子体中可以进行表面处理,在无机材料方面,如金属、半导体表面的氮化和氧化。铜在氮或氢的等离子体中进行处理,表面生成几 μm 的氮化物,它被认为是 Fe_4N 或 $\text{e-Fe}_2\text{-}_3\text{N}$,其硬度为铜的 2 倍。同样在 Ti 和 Zr 的表面可生成 TiN 和 ZrN ,其硬度高达 1500kb/mm^2 以上。硅在氮或氮和氢的等离子体中,其表面可生成 Si_3N_4 。 Al 、 Ta 和 Si 等在氧的等离子体中可生成不同的氧化物。

在有机材料方面,较多的是利用等离子体对高分子材料进行表面改性(改质),以获得各种表面功能。如聚四氟乙稀、聚脂、尼龙等表面的粘着性;纤维等高分子材料的染色性、印刷性;聚乙烯、硅树脂等的亲水性等。

利用等离子体还可以进行材料表面的刻蚀。如 Si 、 Si_3N_4 在 CF_4 的等离子体中; SiO_2 在 CF_4 与 O_2 的等离子体中的刻蚀。

至今,对于等离子体化学的理论研究落后于它的应用。研究的困难主要在于等离子体中存在着各种活性粒子,而且它们的能量分布较宽,难以控制单一反应的进行。并且,需要较好的检测手段,包括气相中的和对固体表面上的反应过程检测。根据实验检测获得的信息,进行理论分析研究,从而搞清等离子体化学反应的机制;反应和反应参数之间的关系;研究如何控制反应的进行。另一方面需要研究等离子体的参数(如电子温度、电子密度)的检测和它们与放电条件间的关系(如功率、气压与流量、频率及装置的结构等)。随着理论与实验研究的深入,等离子体化学的应用必将有更广泛的前景。

参考文献

- 1 Hollahan J R, Bell A T. Techniques and Application of Plasma Chemistry. New York: John Wiley and Sons, 1974
- 2 穗積政一郎. 化学の领域增刊 111 号. 南江堂, 1976
- 3 Engel A. Electric Plasmas - Their Nature and Uses. London: Taylor and Francis, 1983
- 4 李学丹. 化学通报, 1991, 5: 17~19

(浙江大学李学丹副教授撰)

膜分离及膜反应器 membranes separation and membraneous reactor 膜分离是利用具有选择性透过混合物中某种组分功能的薄膜而有效地进行物质分离、浓缩、提取、纯化等的一种现代技术。它能降耗少、可连续化生产、设备比较紧凑、对于一些利用传统分离工艺难以分离的物质都能实现有效分离,因而在诸如海、咸水淡化,城市污水和纸浆、食品等工业废水再利用及有用物质回收,海水浓缩制盐或价值物质提取,纯水制造,重金属除去或回收,食品、药品或精细化工产品浓缩、精制,氧富集,氮、氧、二氧化碳、烯烃等分离,细菌去除等等领域得到广泛的应用。

膜技术的一切可以追溯到 19 世纪中叶。1855 年 Fick 以硝酸纤维素乙醚溶液浸渍陶瓷管制得用以透析生物学流体溶液的囊袋型“超滤”半渗透膜。1891 年 Sanarelli 应用这类膜于血浆过滤等进行细菌研究,但系统的膜技术研究,始于 20 世纪。1907 年

Bechhold 发表第一篇关于滤膜性质的系统研究报告,指出可以制得平整的膜,通过改变硝酸纤维素溶液的浓度来控制滤膜孔径的大小。1921 年, Zsigmondy 最先提出“膜滤器”名词,获得关于商品规模生产硝酸纤维素滤膜的专利。而第 1 个膜滤器公司是于 1927 年在德国哥丁根成立的。二次世界大战期间,德国人就利用 $0.5\mu\text{m}$ 孔径的滤膜检查因受轰炸破坏的城市给水系统中的大肠杆菌。战后,美、英等国相继成立膜滤器工业生产机构,生产硝酸纤维素滤器用于水质及化学武器的检验等。60 年代,硝酸醋酸混合纤维素滤膜和再生纤维素滤膜因其具有更好的制备和使用性能而成为应用最广、产量最大的滤膜类型,其它各种类型的滤膜也相应得到开发和应用。而今,西方先进国家膜滤器生产均已形成颇具规模的独立工业体系。

分离膜一般可分为均质膜和多孔性膜。前者是通过高分子链或链段运动形成一连串无序的、其位置、形状、大小都连续变化着的孔隙或通道,低分子物质藉着溶解-分子扩散-脱溶解而实现对均质膜的透过,透过系数既与压力无关,也与低分子物质本身的粘度或分子量无明显依赖关系;但受到溶解度系数和扩散系数的直接影响。多孔性膜顾名思义,因此低分子物质有可能以“块状”的形式或是存在于、或是通过膜体所存在着的宏观孔隙或通道。显然,透过是一个粘性流动过程,所以,与粘性流动有关的低分子物质的分子量、粘度便成为决定分离速率与效率的重要因素。

均质膜主要用于气体分离,要求既具有高的透气速率,又具有专一的选择性。一般认为,前者与膜体的自由体积有关,后者则与膜材料分子链的刚性有关。例如 1983 年美国孟山都公司报道,利用表面涂有 α -甲基苯乙烯-二甲基硅氧烷嵌段共聚物的聚砜多孔性中空纤维,开发 Prism 膜分离组件系统,对合成氨尾气中氮的回收率达 94%,回收氮纯度为 36.5mole%;同一时期,美国 Qxygen Enrichment 公司、日本帝人公司、日本旭硝子公司都制成氧富集器,可直接由空气获得含氧 40% 以上的富氧空气,用于医疗与深水作业的助呼吸以及锅炉、发动机的助燃烧。

均质膜还用于渗透汽化膜过程,其主要目标是分离分子大小相近的液体混合物(例如醇-水,苯-环己烷)和沸点相近的有机混合物(例如共沸混合物,异构体混合物)。1983 年日本旭硝子和旭化成公司连续获得一系列渗透汽化膜材料的专利。据介绍,由生物发酵所得到含醇量 5%~10% 的醇水混合物经蒸馏后使乙醇含量提高到 75% 以上,可在 80C 、 $2.7 \times 10^4\text{Pa}$ 下经渗透汽化膜分离获得 99.5% 无水乙醇。

多孔性分离膜用于微滤、超滤及反渗透过程。它们分离对象分别是 $2 \times 10^{-5}\text{mm}$ 以上的溶质或微粒、 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-5}\text{mm}$ 的溶质和 $1 \times 10^{-6}\text{mm}$ 以下的溶质;工作压力分别是 $9.8 \times 10^4\text{Pa}$ 以下、 $9.8 \times 10^4\text{Pa} \sim 1.98 \times 10^6\text{Pa}$ 和 $1.98 \times 10^6\text{Pa}$ 以上。理想的多孔性膜应当是完整无缺陷的,还应当有严格的孔径、狭窄的孔径分布和合适的孔隙率,制膜工艺的完善尚有待于相关基础理论研究的不断深化。一般认为,膜孔有网络孔、聚集孔和相分离孔 3 种成孔机理。

反渗透法从 50 年代后半期作为海水淡化方法之一开始被研究。1953 年由 Reid 提出的这一研究是在美国内务部盐水局进行的,1957 年发表的结果表明,醋酸纤维素具有排除 96% 以上食盐的能力。1960 年 8 月 Loeb 和 Sourirajan 对醋酸纤维素制膜液组成作了改进,使反渗透法向实用化阶段飞跃有了可能,随之而起是工业规模装置的开发和实用化试验。1973 年杜邦公司用聚酰胺系材料制成中空纤维式组件,使海水一段脱盐得到成功,在回收率为 30% 的情况下能从 30000mg/L 食盐水中得到 500mg/L 以下的淡水。反渗透法作为地下咸水和工业用水的脱盐法 70 年代初使在日、美进入实用化阶段。

超滤膜具备以浓度为驱动力将异种分子分离的渗透膜功能,而以压力为驱动力使固体与液体分离的过滤膜功能。利用超滤处理水也是在 70 年代初期进入实用化阶段。例如美国、新西兰、澳大利亚、法国、德国等干酪乳清的超滤处理已广为应用,日本则用

于处理大豆乳清,既回收蛋白质,又减少排放液的污染。超滤技术不存在相转换,不需加热,消耗少,操作条件温和,不添加化学试剂,不损坏热敏性物质,这些是通常采用的分离方法所不具备的。

多孔性膜过程值得认真研究的问题是膜污染和浓差极化。膜污染是指由于物理或化学的原因造成膜孔不可恢复的堵塞,透过流率不可逆的降低。浓差极化是指分离过程因被截留组分在膜的一侧积聚而形成膜面附近区域一个稳定的浓度梯度,致使膜面浓度高于主体浓度而引起边界层流体阻力的增加或局部渗透压的增加。对膜的表面处理使其特性变化,例如引入荷电基团或亲水基团、表面氟化或活性剂处理等等,被认为是有效的方法之一;合适的工艺参数(尤其是物料流速)对于避免渗透流率的下降也甚为重要。

新型的膜分离过程,除上述的渗透汽化外还有诸如把膜技术与萃取过程相结合的“膜萃取”(含被萃组分由水相主体到膜面、扩散通过膜体和由另一膜面到有机相主体3个过程,多用于金属的萃取)和把膜技术和蒸发过程相结合的“膜蒸馏”(主要用于纯水制取和溶液浓缩)。此外,还有集反应与分离于一身的“膜反应器”。1970年C. Histolyticium报道,直接在发酵罐中装上超滤膜,既能够及时进行大分子的浓缩,又能够随时除掉小分子代谢物,从而提高发酵过程的反应率。例如在用酶使淀粉糖化的过程,可使发酵50h的干燥菌体重量提高2倍,酶活性提高近10倍。近年来中国膜科技工作者也陆续报道了一些有关膜反应器的研究成果,例如使环己烷催化脱氢反应的转化率由18.9%提高到几乎是100%;使乙苯脱氢反应的转化率和苯乙烯的选择性同时得到提高,从而使相对产率增加8%;使环戊二烯加氢反应在转化率相同(特别是高转化率)的情况下提高环戊烯的收率等等。目前,用于生物催化转化、微生物发酵、动植物细胞培养等生物反应系统中的膜反应器已侧重于解决产物抑制、底物选择性供给、生物催化剂再利用、细胞生长成面提高、高密度负载等方面的问题,而至少不再以超平衡转化率和反应选择性的提高为主要目的了。

中国膜科学技术的发展以1958年离子交换膜的研究为起点,经历了80年代较快的发展阶段,在电渗析、反渗透、超滤、微滤等各个方面都有了较大规模的应用,气体分离膜也得到迅速开发,其它一些新的膜过程也进入不同的研究阶段。但是,与发达国家相比,还是有比较大的差距。

膜分离作为一项高新技术,将对21世纪的工业技术改造起着重要战略作用。今后膜分离技术发展的关键仍然在于高效分离膜材料的开发,要求兼有高通量和高选择性,同时还要求耐温、耐溶剂、耐化学品、抗污染、高强度、长寿命和易清洗。围绕上述目的深入开展相应的基础研究,尤其研究高分子膜材料的构效关系是至关重要的。

所谓的集成膜过程,即不是用单一的膜过程,而是综合多种膜过程来达到一个具体的目的,正在受到越来越多的重视。例如利用膜反应器、膜蒸馏、反渗透或分馏以及渗透汽化这样一些膜过程的联合,便可以由生物发酵制得无水酒精。此外,无机膜品种的开拓、膜超薄化技术的提高、新型膜过程的探索,尤其特殊功能高分子膜材料的设计和合成等等,将为膜科技事业带来春天。

参考文献

- 1 Souriraja S. Reverse Osmosis. New York: Academic, 1970
- 2 Lonsdale H K, et al. Reverse Osmosis Membrane Research. New York-London: Plenum Press, 1972
- 3 Kesting R E. Synthetic Polymeric Membranes. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1985
- 4 Cheryan M. Ultrafiltration Handbook. Technomic Publishing Co Inc, 1986
- 5 Sedlacek B, et al. Synthetic Polymeric Membranes. New York: Walter de Gruyter & Co Berlin, 1987
- 6 日本膜学会著. 膜分离过程设计法. 王志辉译. 北京: 科技文

献出版社, 1988

- 7 Potter M K. Hand book of Industrial Membrane Technology. Noyes Publications, 1990
- 8 中国科学院. 第1届全国膜和膜过程学术报告会文集. 大连, 1991(10)

(厦门大学丁马太教授、夏海平副教授)

界面张力 interfacial tension 物质的相与相间的分界面

即为界面,它可以是单分子层或几个分子层厚。物质一般气、液、固三态,相应气、液、固三相,可以组合成气-液,液-液,气-固,液-固及固-固五种界面类型,习惯上把有气相组成的界面称为表面。由于界面上存在着界面张力,表面压力,界面粘度和界面电场力等一些特殊的作用力,因此在界面上会产生各种特有的现象。在多相体系中,界面上的物理化学过程往往起着决定作用,因而对界面现象的认识和研究具有重要意义,在众多的界面现象中均涉及到界面张力,它是最基本的也是最重要的热力学性质之一,由此出发,根据热力学推导,可以得到下述3个界面化学中重要的基本公式:(1)描述作用于气-液-固系统的三相交界线上的3种界面张力之间关系的Young公式(1805年由T. Young首先提出);(2)描述界面曲率与界面张力之间关系的Laplace公式(1806年由P. S. de Laplace导出);(3)描述溶液的表面张力与溶液浓度及表面吸附量之间关系的Gibbs吸附等温公式(1876年由W. Gibbs提出)。W. Thomson于1871年从Laplace方程出发导出了描述界面曲率与液体饱和蒸汽压之间关系的Kelvin公式,而Laplace公式又为界面张力的实验测定提供了理论依据。

界面张力精确测定,特别是当前3次采油化学的进展要求对超低界面张力的精确测定,一直是本研究领域的热门课题之一。常见的界面张力测定方法见表1、表2。

表1 气-液和液-液界面张力测定方法

方法	计算公式	精度	适用范围
滴法或 沾泡法	$\sigma = \frac{\Delta \rho g b^2}{\beta}$ β 和 b 可查表	0.1%	熔融金属表面张力 及液体表(界)面张力
悬滴法	$\sigma = \frac{\Delta \rho g d r^2}{H}$ H 可查表	千分之几	液体表(界)面张力, 高温液体或具有反应活性的系统
停滴法	$\sigma = \frac{\Delta \rho g h^2}{2}$	千分之几	大液滴或大气泡
毛细管 上升法	$\sigma = \frac{\Delta \rho g a^2}{2}$ $a^2 = r h$, 查表迭代求取	最准确的 绝对方法	液体表面张力
最大气泡 压力法	$\sigma = k h$ k 是毛细管常数,需标定	千分之几	熔融金属表面张力, 表面平衡较快的液体 表面张力
滴重量法	$\sigma = \frac{m g}{2 \pi r f}$ f 需查表	0.1%	纯液体表面张力或表 面平衡较快的溶液的 表面张力
滴体积法	$\sigma = \frac{V \Delta \rho g f}{r}$ f 需查表	0.1%	纯液体表(界)面张力 或界面平衡较快的溶 液表(界)面张力
环法	$\sigma = \frac{P}{4 \pi R f}$ f 需查表	0.1%	液体表(界)面张力
吊片法	$\sigma = \frac{P}{2(l+V)}$	0.1%	液体表(界)面张力
旋滴法	$\sigma = [G_1 - H_1 (\frac{G_1}{H_1} - \frac{G_2}{H_2})]^{\frac{1}{2}}$ $G = \frac{3 \pi \gamma}{2} (\frac{\Delta \rho \omega^2}{4})^{1/3}$ $H = \frac{\Delta \rho \omega^2}{4}$		液体表(界)面张力和超 低界面张力

表2 气-固和液-固界面张力测定方法

方法	实验方法
外推法	将固体加热熔化,测液态表面张力与温度关系 $\sigma = f(t)$, 作图外推至凝固点以下, 估算固体表面张力
应变速率法	拉伸加热的固体, 在低应力下, 固体应变速率与应力呈直线关系, 将直线延伸至应变速率为零, 这时应力与固体周边上表面张力相等
溶解热法	测定具有不同比表面的同一晶体的溶解热, 从差值能估算表面能和表面自由焓
晶体平衡外形法	在接近熔点时退火, 使小晶体趋于具有平衡外形, 可估算各晶面的相对表面自由焓
劈裂法	测量固体被劈成两半时所需的功, 估算表面能
接触角法	测定液体和固体接触角, 能得到气-固、液-固界面自由焓信息
临界表面张力法	将不同液体的表面张力对液-固接触角的余弦作图, 并外推至 $\cos\theta = 1$, 此时的表面张力值是反映固体表面极性的一个特征值

界面张力研究的另一项主要内容是通过混合物中各纯组份的物性及组成来预测界面张力。由于对固体表面特性的研究还很

表3 常用预测溶液表面和界面张力方法

界面类型	计算公式	
气-液界面	$\sigma^L = \frac{P_m(\rho_L - \rho_v)}{M_m}$	P_m —溶液平均等张比容 M_m —溶液平均分子量
	$\sigma^L = \rho_m \sum_i x_i \sigma_i^L / \rho_i$	适用于低压系统 ρ_m —溶液平均密度 X_i — i 组份摩尔分数 σ_i — i 组份表面张力
	$\sigma^L = \alpha_w \sigma_w^L + \alpha_o \sigma_o^L$	适用于有机物水溶液 α_w, α_o —水, 有机物表面体积分数
	$\sigma = \frac{A_i}{A_i^0} \sigma_i + \frac{RT}{A_i^0} \ln \frac{a_i}{a_i^0}$	A_i — i 组份在纯物质表面相的摩尔横截面积; A_i^0 — i 组份在溶液表面相的偏摩尔横截面积; a_i, a_i^0 — i 组份在表面相及主体相中活度
	$\sigma = \sum_i \frac{x_i \sigma_i}{\sum_j x_j f_j}$	f —可调参数
	$\sum_i \sum_j \frac{x_i x_j \sigma_i \sigma_j }{\sum_k f_k x_k \sum_l f_l x_l}$	
	$(\sigma_A A_m)^{2/3} = \sum_i x_i$	
	$\left[\sum_i x_i D_i (\sigma_i A_i) / \sum_k x_k D_k \right]$	D —可调参数
	$(\sigma\Phi)_m = \sum_i x_i (\sigma\Phi)_i$	$(\sigma\Phi)$ —对比表面张力 力 $\sigma = T_c^{-1} V_c^{2/3}$ $\Phi_m = T_c^{-1} V_{cm}^{2/3}$
	液-液界面	$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 - 2 \sqrt{\sigma_1 \sigma_2}$
$\sigma = \frac{1}{A_i} (RT \ln \frac{r_1 x_1}{r_1 x_1} + \frac{\partial \Delta F^1}{\partial n_i})$		r^1 —表面活度系数

不充分, 同时, 也缺乏精确, 可靠的实验手段来直接测定固体的表面张力, 因此, 迄今为止, 对界面张力的理论预测仅限于气-液和液-液相界面。表3 所列常用的预测液体混合物表面张力及液体混合物相间界面张力的方法。

就气-液表面张力的关联和预测而言, 对二元混合物已能提出在精度上和普遍性上都非常满意的方程, 对三元及三元以上的混合物, 也可通过各二元系的实验数据来关联和预测。但对于组份间极性差异较大的多元系及含水体系的表面张力预测, 目前尚无满意的结果, 其关键仍在于界面相的非理想性的影响及分子的取向, 这是今后有待进一步解决的问题。

与气-液表面张力的计算相比, 液-液界面张力的计算要复杂得多, 各组份的分子结构和分子间复杂的相互作用所造成的分子在界面上的取向和溶质分子在界面上的吸附成为影响界面张力的主要因素, 由于目前溶液理论还很不完整, 对各种溶液的处理带有很大局限性, 因此, 对液-液界面张力的预测大多限于二元系, 并能得到较满意的结果, 但对三元系则限于半经验的关联, 并且预测精度不高, 尚需建立更好的预测方法或精度更高的普遍化方程, 其关键仍在于考虑分子在界面上的取向及分子结构和分子间相互影响。

界面张力理论计算的统计热力学方法是界面张力研究领域又一个十分活跃的课题。对球形简单分子, 1949 年 J. G. Kirkwood 和 F. P. Buff 提出表面张力计算公式:

界面类型 计算公式

$$\alpha = QZm(1 - k_{12})W_{12}(\Phi'_1\Phi''_1)^2$$

$$\sigma = d'_0(C - C_0)^{1.57}$$

$$\sigma = \frac{KRTX}{3.00 \exp(x)(x''_1q_1 + x''_2q_2 + x''_3q_3)}$$

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{x}{x_0}\right)^B \cdot C^X$$

$$\sigma = \left(\frac{\pi}{8}\right) \rho^2 \int_0^2 g(r) \epsilon(r) r^4 dr$$

现在在界面张力的处理上已取得相当的理论进展,可采用平均密度来代替难以得到的径向分布函数 $g(r)$ 。由于分子间势 $\epsilon'(r)$ 和径向分布函数 $g(r)$ 的局限性,上述方程只能用于非常简单的体系,对于比较复杂的体系,必需进行适当的简化处理,即使这样,得到的方程对于计算实际体系的表(界)面张力仍显复杂。因此,统计热力学方法虽具有比较严格的理论基础,但到目前为止,还远远没有进入实用阶段。可以预见,随着溶液理论的发展和完善,界面张力的理论计算必将建立在统计热力学的严格理论基础之上。

参考文献

- 1 Wu Souheng, Polymer Interface and Adhesion, New York: Marcel Dekker, Inc. 1982
- 2 王子锦,傅萃孚. 化工学报, 1986, 41(2): 248
- 3 Reid R C, Prausnitz J M, Sherwood T K. The Properties of Gases and Liquids. 3rd, New York: McGraw Hill, 1988
- 4 Li Buqiang, Fu Jufu. Chem. Eng. Sci., 1989, 44(7): 1519 ~ 1527
- 5 Backes H M, et al. Chem. Eng. Sci., 1990, 45(1): 275 ~ 286
(上海科学技术大学朱宪副教授)

有机光导体的结构 the structure of organic

photoconductor 大多数的有机半导体都具有显著的光电导性,称作有机光导体。如:稠环芳香族化合物蒽、苝……等分子晶体,酞菁、份菁……类染料,四氰基对二亚甲基苯醌(TCNQ),四氰基乙烯(TCNE)……一类分子络合物以及聚丙烯腈、聚吡咯、聚苯胺、聚乙炔……之类高聚物等。它们的共同结构特征是这些固体是由具有共轭双键系统的分子形成的,其性质很大程度上取决于分子间的相互作用和有序排列。对此研究不仅能探明有机体系的一些特殊的电磁性质,而且若干有机光导体已用作静电复印中的感光鼓,同样在一些辐射探测器及太阳能电池之类光电转换器件中,有机光导体也已显示端倪。

1906年意大利 Pochettino 发现了固体蒽的光电导,1960年之后它仍作为一类典型的有机光导体被人们持续研究着。1948年英国 Eley 研究了热稳定的酞菁 β -H₂Pc 得出它的电导(σ)与温度(T)关系符合半导体规律:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_{act}/KT) = \sigma_0 \exp(-\Delta E / 2KT)$$

其中活化能 $E_{act} = \Delta E / 2 = 1.2eV$, ΔE 即为能隙,它相当于基态满轨道至第一激发态空轨道间距离。自此,日本赤松、井口等教授对一系列的稠环化合物例如蒽烯紫(Violanthrone)等进行了

QZm—晶格参数群
W₁₂—分子间相互作用交换能
 $\Phi'_1\Phi''_1$ —组份在两相中的节体积分数
 k_{12} —界面上分子取向因子

C—浓度 C₀—参考浓度 d'₀—标量因子

$x = -\ln(x''_1 + x''_2 + x''_3)$
A_{mn}—标准节的范德华表面积
q—面积结构参数
K—实验回归参数
 x''_1 —组份 1 在贫相摩尔分数
 x''_2 —组份 2 在贫相摩尔分数
r—富相

B, C—可调参数
 $X = -\ln(x''_1 + x''_2 + x''_3r)$
 σ_0, X_0 为 $r_3 = 0$ 时的 σ 和 X

半导体物性研究,开拓了一系列有机光导体。1954年,他们又和松永教授一起发现了此一碘电荷转移复合物(分子络合物)为良导体。1973年 Ferraris 和 Coleman 等发现了高电导的电荷转移复合物(TTF-TCNQ,它们是电子施主(donor)和电子受主(accepter)经过部分电荷转移而形成的。它的晶体结构是由电子受主 TCNQ 和电子施主 TTF 各自层叠成分列柱,柱内由于 π -电子云的交叠 TTF 与 TCNQ 柱间有部分电荷转移有利于载流子的迁移。这类电荷转移复合物具有光电导,而且迁移率与单一分子晶体大体相同。在同一时期,人们对高分子有机光导体也做了大量的工作。其中,具有大 π -共轭体的乙烯基聚合物是至今研究得最多的一类,这一类最典型的代表即 1959 年 Hoegl 等发表的聚 π -乙烯基卡唑(PVC₂),这是此领域内现仅有的达到应用化程度的高分子。此外还有面状共轭高分子如聚一萘酞白自基聚合物,热处理聚丙烯腈,以及线状共轭高分子如 1977 年 MacDiarmid 等发现的掺杂聚乙炔,其电导可从 $10^{-13}S/m$ 提到 $10^5S/m$,再如聚联乙炔、聚炔烃……等。

有机光导体发展早期就有着很强的实用背景,如 1938 年美国 Carlson 发明的静电复印 Xerox 过程即是用蒽作为光导体,然后才为硒所取代,但然后有机光导体 PVC₂ 也已在这方面付诸实用。同样的原因,具有平面大环共轭结构的酞菁类化合物在作为一种典型的有机光导体研究数十年之久,现在由于它的光谱响应适合于以半导体发光管为光源的激光打印机及印刷工业发展等需要,仍在作广泛的研究。例如:络合不同金属离子的酞菁染料及若干新型的酞菁化合物——氯铝酞菁、氧钒酞菁之类的开发研究,用它们作为光导体能得到更为优异的静电复印性能,再如金属酞菁的高分子化合物 $[M(Pc)O]_n$ 是属于金属大环高度规则地排列成“面对面”结构,而酞菁环之间的距离取决于中心金属离子半径, $[M(Pc)O]_n$ 高分子被卤素或其它氧化剂氧化(即“掺杂”)之后的电导可达 $1.4\Omega^{-1}cm^{-1}$,且对空气稳定。这些都是以静电复印为目标的有机光导体研究的进展;还有一类是和生命科学相关联,以阐明生物高分子中的能量转移为目标的工作,如对于 NaDesoxyribonucleate(NaDNA)及 Ribonucleic acid(RNA)的工作得出其暗电导为 $2 \times 10^4 S/m$,能隙为 2.36eV。此外,在有机太阳能电池研制以及用于激光光盘记录介质等新技术中,尚开发有方酸染料(Squarylium dyes)及苝四甲酰双亚胺染料(perylenetetracarboxylic derivatives)之类的新有机光导体,前者结构稳定且其光谱范围宽广,更适合于用太阳光谱相匹配;后者不仅稳定性好,而且具有更高的光电转换效率。各种新类型的有机光导体正在蓬勃地发展之中。

参考文献

- 1 Eley D. Nature, 1948, 162: 819
- 2 Akamoto H, et al. Nature, 1954, 173: 168
- 3 Hoegl H. et al. Ger Pat 1959, 1068115

- 4 Ferraris J, et al. *J Am Chem Soc*, 1973, 95: 948
- 5 Coleman L B, et al. *Solid State Comm*, 1973, 12: 1225
- 6 MacDiarmid A G, et al. *phys Rev Lett*, 1977, 39: 1098
- 7 Dirk C W, et al. *J Macromol Sci Chem*, 1981, A16: 275
- 8 黄翎羽, 等. *太阳能学报*, 1985, 6(4): 444

(华东理工大学黄翎羽教授撰)

分析化学

活化分析 activation analysis 一种灵敏度高、准确度和精密性好、非破坏性、具多元素测定能力的核分析方法。该法的基础是核反应。用一定能量和流强的中子(热中子、共振中子或快中子)、带电粒子(质子、氘子、氦-3、氦-4或重离子等)或者高能 γ 光子轰击待测试样,然后测定由核反应生成的放射性核素衰变时放出的缓发辐射或者直接测定核反应中放出的瞬发放射,从而实现元素的定性和定量分析。活化分析法在生命科学、环境科学、地学、宇宙学、材料学、考古学和法学等领域内已获得应用,具有重要意义。

1936年,海维希(H. Hevesy)首先建立了活化分析法。初期,活化分析只是作为核科学技术发展进程中的一种副产物,而今天已成为超痕量、痕量、半微量乃至常量分析中的一种重要手段。活化分析的发展简史大体上可分为4个阶段:(1)开创阶段(1936~1948)。这一阶段的主要标志是同位素辐射源和基于电离的探测器。(2)巩固阶段(1948~1959)。1942年建成了可提供比同位素中子源的中子通量高得多的核反应堆。1948年又出现了分辨率良好的NaI(Tl)闪烁探测器。这两大技术提高了活化分析的水平。1951年,雷第考脱(G. W. Leddicotte)等人首次用反应堆作了热中子活化分析,从而使热中子活化分析成为在当时具有最高灵敏度的分析方法。与此同时,中子发生器和多道能谱分析器等作为工业产品大量生产,为活化分析的发展奠定了物质基础。(3)发展阶段(1959~1970)。60年代初出现的半导体探测器的 γ 能谱分辨率比NaI(Tl)晶体改进了几十倍,从而使活化分析的传统工作方式发生了重大的变革,原来繁琐冗长的放射化学分离操作让位于简单的组分分离,并出现了不破坏样品的可能性。此外Ge(Li)探测器的应用还使活化分析测定元素的潜力得到了充分的开发,一次照射可同时测定四五十种元素,从而提高了活化分析与其它分析方法的竞争能力。这一阶段的另一重大进展是计算机的引入,在自动化组分分离、脉冲中子活化、带电粒子活化、瞬发辐射活化分析等方面也有了长足进展。(4)应用阶段(1970~)。活化分析大规模地应用于环境、生物医学、地质、材料等领域中,每年有关活化分析的应用性论文逾千篇。根据最近5年的统计,活化分析的应用主要集中在生物、环境和地学中,大致比例为30%、27%和30%,这是和当前边缘交叉学科(无机生物化学、元素地球化学等)的迅速发展分不开的。地质界线异常的寻找及其对地球演化和生物进化的启示、微量元素生物效应、元素在环境中的分布、迁移、转化、蓄积及其形态研究是当前极活跃的研究课题,它们对活化分析有极大的依赖性,也促进了活化分析的发展。

1986年,海登(K. Heydorn)指出:“活化分析尽管已趋成熟,但仍和以前那样充满活力。”当前活化分析的前沿领域和重点研究方向是:(1)分子活化分析。一般情况下,活化分析只能测定元素的总量。然而,近年来国际上一些著名的活化分析实验室纷纷开展了分子活化分析的研究。典型的成果有动物组织中硒的化学形态的研究、白垩纪—第三纪界线地层样品中异常铀的贮存状态的研究、生物样品中汞的化学形态的研究、天然水样中砷的化学形态研究等。这一新的研究方向拓宽了活化分析的应用领域。(2)短寿命核素的活化分析。以往的活化分析法只能测定半衰期为秒级以上的核素,现在随着自动化程度的提高及超高速传输系

统的建立,活化分析已用于半衰期为ms级的核素测定。尼尔森(H. K. Nielson)等用半衰期为12ms的 ^{12}B 测定了标准参考物质和肥料中的硼。短寿命核素活化分析中的难题是很高计数率下的信号处理。(3)体内活化分析。仍是迄今为止可测定活体组织中元素含量和分布的唯一手段。体内活化分析现正在从测定活体中的常量元素(如N、Ca、P、I等),发展到对活体中微量元素(如Hg、Cd等)的分析,从而提高了体内活化分析的临床诊断价值。(4)冷中子活化分析。林德斯罗姆(R. M. Lindstrom)等叙述了该法的基本原理。这种方法由于使用能量较低的中子,因此有效反应截面高。此外,利用中子导管将冷中子引自离堆芯数十米远的靶站照射样品,从而显著降低了快中子和 γ 辐射的本底。利用冷中子源诱发的瞬发粒子反应,可测定固体介质中轻元素(如He、Li、B和N等)的深度分布。这种方法目前的困难是获得优质、高强度的冷中子束。美国国家标准和技术研究所(NIST)现达到的指标是可将 10^{14}n/s 聚焦到小于 1cm^2 的面积上。另一个有意义的进展是,尼可劳(G. E. Nicolaou)等利用瞬发活化分析法展示了样品中元素的二维分布。(5)新型辐照装置。首先应当提到的是,由中国自行设计和研制的中国原子能科学研究所的微型反应堆,其中子注量率与加拿大的SLOWPOKE堆相当,为 $1 \times 10^{12}\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$,该种堆型适合于短寿命核素和生物样品的分析。美国西北太平洋实验室改进了以 ^{252}Cf — ^{235}U 为燃料的次临界中子倍增装置,注量率约为 $10^8\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。(6)可活化示踪剂的利用。利用可活化示踪剂(尤其是经富集的稳定核素)大大扩展了中子活化分析的应用范围,可用于解决在一般情况下无法解决的分析问题。加纳姆(L. M. Ghannam)等用三(2-苯甲基)镭可活化示踪剂模拟高毒有机化合物的化学行为。钱琴芳等利用富集 ^{58}Fe 稳定核素研究缺铁性贫血与运动量之关系。在昆虫学、农学、大气污染监测等方面,可活化示踪法都起了重要作用。现已尝试用示踪法来研究元素的化学形态。(7)放射化学分离技术。为了提高分析灵敏度,与其它痕量分析方法竞争,更由于分子活化分析的需要,配合有前后化学处理的活化分析得到迅速发展。例如牛肾中亚细胞组分中与蛋白质结合的痕量元素的测定、尿中硒化学状态等。衍生活化分析可测定常规中子活化法难以测定的元素,如磷和铀。(8)数据处理。最引人注意的是“计算机预报程序”(APCP),该程序考虑了核性质和康普顿连续贡献,从而可预先估算仪器中子活化分析的探测极限以及最佳照射、衰变和计数时间。与此相应的是中子活化分析专家系统的建立。企图完成从相对法往绝对法过渡的 K_0 因子法继续发展。

活化分析的未来动向是方法的交叉和学科的交叉,即活化分析与其它核方法和非核方法的交叉,以及活化分析与生命科学、地学和环境科学的结合,在学科交叉的边缘中,将能发现许多有重要学术意义和应用价值的活化分析课题。

参考文献

- 1 柴之芳. 活化分析基础. 北京:原子能出版社,1983
- 2 Kolthoff I M, et al. *Treatise on Analytical Chemistry*, 1986
- 3 Ehmman W D, et al. *Anal Chem*, 1988, 60, 42~52
- 4 柴之芳, 等. *分析试验室*, 1989, 6: 52~62
- 5 柴之芳. *核化学与放射化学*, 1990, 12, (1): 26~39

(中国科学院高能物理研究所博士生导师柴之芳研究员撰)

圆二色性 circular dichroism 圆二色性(CD)和旋光色散(ORD)都用于测定分子的立体结构。旋光色散是利用不对称分子对左圆偏振光、右圆偏振光折射的不同进行结构分析,而圆二色性则利用不对称分子对左圆偏振光、右圆偏振光折射的不同来进行结构分析。

振动方向在同一平面内的电磁波为平面偏振光。两束互相垂直,振幅相等的平面偏振光,其位相相差四分之一波长时,它的合成矢量 E 的末端轨迹沿着螺旋形旋转,如果对着光的传播方向观察,电矢量的末端轨迹为一圆,这就是圆偏振光。电矢量顺时针旋转时称为右圆偏振光,逆时针方向旋转时为左圆偏振光。

振幅相等的左圆偏振光、右圆偏振光合成平面偏振光,其振动方向由左圆偏振光、右圆偏振光的位相决定。振幅不等的左圆偏振光、右圆偏振光合成椭圆偏振光。椭圆偏振光常用主轴方向和椭圆度来表征它的特性,主轴方向即椭圆长轴的方向,是由左圆偏振光、右圆偏振光的位相决定的。椭圆度是一个角度,用 θ 表示。这个角度的正切是椭圆的短轴与长轴之比。

当左圆偏振光、右圆偏振光射入物质时,光学活性物质分子对左圆偏振光、右圆偏振光的吸收 A_L 和 A_R 不同,其吸收差 $\Delta A = A_L - A_R$ 就是圆二色性。如果 $A_L - A_R > 0$,则CD为“+”,相应于正科顿(Cotton)效应;如果 $A_L - A_R < 0$,则CD为“-”,相应于负科顿(Cotton)效应(见“旋光色散”条)。由于这种吸收差,造成矢量振幅差,所以从介质出来的光将是椭圆偏振光,常用椭圆度 θ 或吸收差 ΔA 表示, θ 和 ΔA 可用圆二色仪测定。实际工作中常用以下定义和符号:比椭圆度 $[\psi]_\lambda$ 和摩尔椭圆度 $[\theta]_\lambda$,下式中C为旋光物质的浓度。

$$[\psi]_\lambda = \frac{\theta_\lambda}{C \cdot d}$$

摩尔椭圆度 $[\theta]_\lambda$ 与圆二色性 ΔA 之间的关系为:

$$[\theta]_\lambda = 3.300(A_L - A_R)_\lambda = 3.300\Delta A_\lambda$$

圆二色谱和旋光色散谱本质上是相同的。利用克洛尼-克拉玛(Kronig-Kramor)关系式可将圆二色谱和旋光色散谱进行换算。实际上CD与ORD谱的相互换算主要在于理论意义,实际意义不大。从光学活性物质的吸收光谱、圆二色谱和旋光色散谱可以看到它们的相互关系。同一个光学活性物质的吸收峰和CD峰的峰位相同,即在此波长的吸光度A和椭圆度 θ 均为最大,而在此波长的旋光度却等于0,与吸收峰不一致,如果包含一系列复杂的旋光带就很难分辨,图谱解析就十分困难。这也就是为什么旋光色散法已被圆二色性法替代的原因。

圆二色仪由于需要将平面偏振光调制成左圆偏振光、右圆偏振光,并以很高的频率交替通过样品,因而设备远较旋光色散仪复杂,完成这种调制的是CD调制器。CD调制器早期用Pockel's cell,是由磷酸二氢钾或磷酸二氢铵晶体制成的。晶体易潮解,维护比较困难,改进后的压电晶体调制器和光弹性调制器克服了Pockel's cell的缺点。圆二色仪一般采用氙灯作光源,其辐射通过由两个棱镜组成的双单色器后,就成为两束振动方向互相垂直的面偏振光,由单色器的出射狭缝排除一束非寻常光后,寻常光由CD调制器调制成交变的左圆偏振光、右圆偏振光。这两束圆偏振光通过样品产生的吸收差由光电倍增管接收检测。由于CD分析对检测重叠的多带、弱带和具有正、负Cotton效应带的样品,比ORD分析简单可靠,而且CD提供的信息多而明确,所以虽然圆二色仪比旋光色散仪复杂而且昂贵,但在CD仪器制成后,已逐渐代替ORD分析。CD和ORD是研究分子的立体结构和溶液构象的有力手段,如通过对激素、抗生素和一些药物的结构分析可进一步搞清这些药物的分子药理机理,从而设计和制造新的药物。在分子生物学和生物化学的研究中,主要用于测定生物大分子的二级结构,如蛋白质的 α -螺旋、 β -折叠、无规卷曲、核酸的双螺旋和碱基堆积等,不同的构象有不同的CD谱。

氨基酸的 α 碳是不对称碳,具有光学活性。在蛋白质分子中,每个残基的 α 碳仍然是不对称碳,此外主链构象也是不对称结构,因此也有光学活性。根据蛋白质的CD谱将其与模型多肽或与从X射线衍射技术得到的参数加以比较和计算,就可得到蛋白质大分子各种二级结构的量,并从大分子二级结构的情况,可以推测其结构与功能的关系,如酶与底物、小分子与大分子的相互作用等。

RNA和DNA的碱基呈平面状,无旋光性,但核苷和核苷酸则有旋光性,其旋光性与碱基的性质及核糖或脱氧核糖的核苷键有关,表现为正的或负的Cotton效应。在核苷酸键合成多核苷酸时,旋光强度增大,ORD和CD是测定多核苷酸结构变化最灵敏的方法,如单体到多聚体,碱基堆积或由于温度、pH引起的多聚体的螺旋变化,都会在CD和ORD谱上有明显的反映;除以上内

源Cotton效应以外,在核酸研究中还广泛应用外源Cotton效应,如氨基酸与DNA的作用。

随着远紫外圆二色技术、磁圆二色技术的发展以及计算机、激光等的引入,圆二色技术的灵敏度将更高,应用范围也更广。

参考文献

- 1 斯科洛D A,等.仪器分析原理.上海:上海科学技术出版社,1980
- 2 张英等.生物物理学报,1986,2(2):88~93
- 3 Guo Yaojun, et al., *Chemica et Biophysica Acta*, 1987, 894(1):11~15
- 4 翁子贤,等.圆二色性和旋光色散在分子生物学中的应用.北京:科学出版社,1987
- 5 郭尧君.生化仪器指南.北京:科学出版社,1988
- 6 郭尧君,等.生物物理学报,1988,4(3):211

(中国科学院生物物理所郭尧君研究员撰)

元素的价态分析 valence analysis of elements

当前分析化学研究的前沿,仅作元素总浓度分析已不能满足当前科研和生产的需要,如铬、砷、硒是常见的多价元素,不同价态的化合物具有不同的毒性和化学活泼性。如铬(Ⅲ)是人体的必需元素,它在细胞表面有专门受体,并能调节胰岛素正常代谢,但铬(Ⅵ)对人体有高毒性,并能致癌。

研究元素价态始于20世纪70年代末,后在国内外渐成为重要的研究课题,研究领域包括环境监测、冶金、食品、材料催化剂等。

元素的价态分析,其最终的测定方法,与以往的总量测定相同,也有先作前处理,即采用化学分离法把同一元素的不同价态进行分离。方法有机溶剂萃取法,离子交换树脂分离法和氢氧化物共沉淀法等,然后根据各元素的不同性质可用分光光度法、原子吸收光谱法,电化学分析法,气相色谱法等测定。

在环境水样中的铬(Ⅵ),早期报道用异戊醇,萃取条件为0.5mol/L硫酸,用分光光度法测定。俞穆清等提出了 N_{245} -MIBK体系萃取铬(Ⅵ),TTA-乙醇-MIBK体系萃取铬(Ⅲ), $Na(PO_3)_2-N_{245}$ -MIBK体系萃取总铬,用原子吸收光谱法测定。尚邦懿等研究在水样pH=8的条件下,以氢氧化铝作载体沉淀铬(Ⅲ),而铬(Ⅵ)留在溶液中,以Cr(Ⅵ)-DPC反应物光度法测定。高松等利用Dionex model 10离子交换树脂-离子色谱法测定底泥中砷(Ⅲ)和砷(Ⅴ)。汪治雄等应用氢氧化铝作载体共沉淀水样中的砷(Ⅲ),而砷(Ⅴ)留在溶液中,将沉淀中的砷(Ⅲ)用盐酸溶解和滤液中的砷(Ⅴ)分别以硼氢化钠还原为砷化氢,通入AgDDC-氯仿吸收液进行测定。高泉生曾用APDC-MIBK-环己烷萃取分离富集海水中硒(Ⅳ)和硒(Ⅵ),以铜作稳定剂,用石墨炉原子吸收法测定。王顺荣探讨了在不同酸度条件下用4-硝基邻苯二胺-甲苯分别萃取硒(Ⅳ)和硒(Ⅵ),然后用气相色谱法测定。

近年来随着高精仪器的出现,新的有机试剂的合成,及计算机在分析中的应用,使分析元素价态的方法日趋简单、快速、准确,并提高了灵敏度。一般不需用化学分离技术,在试样中直接连续测定同一元素的不同价态,或测定分别具有不同价态的多种元素。

王怀公等提出光度法测定锌电镀液中痕量铬(Ⅵ),依据是在 H^+ 浓度为 $1.59 \times 10^{-6} mol/L$ 时,Cr(Ⅵ)-BPR-CITAB生成共色络合物,铬(Ⅲ)不显色,此法选择性好,灵敏度高。庞叔薇及其同事研究环境样品中亚砷酸盐,砷酸盐,甲基砷酸和二甲基砷酸,这些砷的形态通过 KBH_4 还原为相应的砷化氢,砷化氢和甲基砷化氢与AgDDC形成两种不同颜色的络合物,可测各种形态砷的含量。山田秀和等提出了测土壤中的无机硒(Ⅳ)、(Ⅵ)和有机硒,依据是用HPLC-荧光检测器测硒(Ⅳ),溴化钾-盐酸-铜离子还原硒(Ⅵ)为硒(Ⅳ),按同法测无机硒总量,用差减法求得硒(Ⅵ),在试样中加入氧化剂,按同法测硒总量,用差减法

(青岛化工学院江淑英教授撰;袁有宪审)

得有机晒。王保宁等推荐用 5-Br-PADAP 为显色剂,在乙醇存在下一次显色及 CPA 矩阵法同时测量铁(Ⅰ)及铁(Ⅲ)。颜科等建立了测定玻璃等硅酸盐材料中铁(Ⅰ)和总铁含量的新方法—Phen 吸光光度化学还原测铁法。其方法是,用同一份试样溶液,避光显色,测铁(Ⅰ),再将试样光化还原,测总铁。菊田芳和等应用化学方法及 XRD 测定氧化铜催化剂中金属铜,氧化亚铜和氧化铜的含量。江淑英研究光催化反应过程中铜的价态,有铜(Ⅱ)存在下,在 H^+ 浓度为 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{ mol/L}$,以 TZ-100 为增溶剂,用新铜试剂测铜(Ⅰ)。张祖训等用玻璃碳汞膜电极阳极溶出伏安法对水中“自由”铅离子和络合铅离子及铅总量的测定作了研究。三桥隆夫发现用 $NaBH_4$ 只能还原无机汞,而 $Fe(Ⅲ)-NaBH_4$ 体系则不但可发生无机汞,而且可以破坏 CH_3HgCl , $PhHgAc$ 等有机汞化合物并将其还原,可分别用这两种方法在 H^+ 浓度 10^{-10} mol/L 和 H^+ 浓度为 $10^{-8} \sim 10^{-2} \text{ mol/L}$ 下测定无机汞和汞的总量。刘立行等研究在水样 H^+ 浓度为 10^{-7} mol/L 条件下,用多波长线性回归—阶导数光度法同时测 NO_3^- 和 NO_2^- 。张有贤等指出在浓硫酸介质中,以间苯二酚为显色剂,用导数三波长光度法同时测定肉制品中硝酸盐和亚硝酸盐。陶大钧等拟定了以铋(Ⅲ)—草酸铵—硒(Ⅳ)为底液的催化极谱法测定铋(Ⅲ),用亚硫酸钠还原铋(V)为铋(Ⅲ),按同法测定,以差减法求出铋(V)的含量。孙群等用离子色谱法,在其他大量阴离子存在下,把紫外/可见光检测器和电导检测器串联使用可同时分离并测定环境样品中砷(Ⅲ),砷(V),硒(Ⅳ)和硒(Ⅵ)。代大煜等根据 $V(Ⅳ)/V(Ⅴ)$, $Fe(Ⅲ)/Fe(Ⅰ)$ 两电对在不同浓度磷酸介质中电位值的测定,提出了选择性电还原 $Fe(Ⅲ)$ 的方法,然后用联合测定的方法分别测定各价态组分的含量的可行性。迟锡增应用 APDC—MIBK—GFAAS 法测定砷(Ⅲ),砷(V),硒(Ⅳ),硒(Ⅵ),铋(Ⅲ)和铋(V)。

目前,有关在水相中同时多元素的价态分析报道较多,但在冶金,化工方面,多种价态共存的复杂样品的价态分析,国内外报道甚少。因试样在分解的同时,需保持各价态离子彼此共存,在待测价态离子基本不变情况下消除其它价态离子对测定的干扰,这是价态分析中存在的主要困难。代大煜等研究在 $Fe(Ⅲ,Ⅰ)V(Ⅳ,Ⅴ)Ti(Ⅳ,Ⅲ)Mn(Ⅳ,Ⅱ)$ 体系中钒价态分析溶样条件,认为选用一定浓度的磷酸作溶剂,同时加入固体亚硫酸钠,可避免体系中 $V(Ⅳ,Ⅴ)$, $Fe(Ⅲ,Ⅰ)$ 的价态变化,在此条件下可测钒的价态,并同时研究了选择性电还原的方法用于多元素多价态体系某组分的还原和分析。预期此法可用于实际样品的分离和分析。

自 70 年代以来,光化学反应在分析化学中的应用日益增多,利用光化学还原法进行元素价态分析有其优点,即用紫外光源代替还原剂,可避免由于加入化学还原剂而引起的干扰,操作简便、快速、结果准确。有关铁的价态分析,此领域有待进一步开发。

参考文献

- Osaki, et al. The effect of organic matter and colloidal particles on the determination of chromium (VI) in natural waters. *Talanta*, 1983, 30(7):523
- 王怀公,等. 分析化学, 1983, 11(4):291~293
- Krull, et al. *Analyst*, 1986, 111(3):345
- Yamada, et al. Selective determination of soluble inorganic selenium (Ⅳ), (Ⅵ) and organic selenium in soil *Bunski Kagaku*, 1990, 39(3):151
- Kikuta, et al. Fractional determination of metallic copper, cuprous oxide and cupric oxide in copper oxide catalyat. *Bunski Kagaku*, 1990, 39
- 庞叔薇,等. 分析化学, 1990, 18(2):146~149
- 颜科,等. 理化检验, 1990, 26(6):350~352
- 江淑英. 分析化学, 1991, 19(1):77~79
- 孙群,等. 化学通报, 1991, 9:42~44
- 代大煜,等. 理化检验, 1991, 27(1):12~15

离子选择电极分析中电脑数据处理的计量化学原理

chemometric principles in data processing of ion selective electrode potentiometry 离子选择电极分析中对所测数据要进行一些计算才能给出结果。为了方便实验,准确地处理所测数据以及从中得到更多的有用信息,则必须进行电脑数据处理。为此,国内外展开了一系列的研究工作。各种各样的处理方法在实验中得到了成功的应用。但就国外所发表的各种方法而论,它们基本上都是经验性的。判定方程有解无解要靠经验猜测,迭代公式与近似初值的选取要靠经验试探,若计算结果不正确,要判定是处理方法的毛病,还是实验有误,此时便束手无策;一些重要的图算方法(如格氏图 G. Gran's Plot)需要电脑化,但它们的数学性质还甚含糊,所以有时出错,等等。显然,这些问题对进一步提高数据处理的质量是十分不利的。为了改变这种状况,必须利用三种基本的数学方法来展开数据处理的计量化学研究,才能完满地解决上述经验性的问题,使数据处理迈上一个新水平。

压缩映像原理 把方程 $f(x)=0$ 变为便于迭代的形式 $x=\Phi(x)$,如果①对于任何 $x \in [a, b]$, 都有 $\Phi(x) \in [a, b]$; ②对 $[a, b]$ 中任意两个点 x_1, x_2 , 都有 $|\Phi(x_2) - \Phi(x_1)| \leq L|x_2 - x_1|$, 正常数 $L < 1$, 则任选近似初值 $x_0 \in [a, b]$, 由 $x_{n+1} = \Phi(x_n)$, ($n=0, 1, 2, 3, \dots$) 产生的迭代序列 $\{x_n\}$ 收敛于方程 $x = \Phi(x)$ 的唯一解 x^* 。这便是压缩映像原理,它常用于迭代法求解非线性方程的根。利用这个原理为下述各种分析法设计了电脑数据处理方法:二次标准增量法、减量法;离子强度校正的二次标准增量法;二次样品溶液增量法、减量法;可溶固相增量法、减量法;非线性响应双对数电脑作图法,等等。所设计的数据处理方法经过严密的数学证明与大量的实验数据处理的考验,程序简单,应用方便,甚至带有公式储存的程序计算器也能胜任这种计算工作。它们既可用于脱机处理数据,也可作为软盘式智能离子计(如 Apple I—ISE 型)的工作算法而存入软盘之中,当然,也可固化在板键式智能离子计的 ROM 之中。

除了设计新算法外,用压缩映像原理还能对一些常用经典算法进行深化研究工作。布兰德(M. J. D. Brand)等曾设计了一个二次标准加入法的迭代算法(简称 BR 算法),但是宣家祥最早指出 BR 算法有时发散,曹履诚按 BR 算法编制程序,计算收敛。经压缩映像原理的深化研究,得到了 BR 算法的迭代公式、收敛条件与近似初值的最佳选择,从而加深了对 BR 算法本质的认识。

摄动原理 在分析过程中,由于溶液的加入,导致活度系数等发生变化。为了排除这种变化对测试结果的影响,人们做了大量研究工作。目前大体上有两类方法,一是平行地加标准液与空白液(可用压缩映像原理研究其数据处理方法),二是用摄动原理进行数学处理。

以多次标准增量法为例,由于标液的加入, E_0 便有一个微小的变化(摄动),要严格地求出这种变化的解析表达式是十分困难的。但取其一级近似 $\alpha \left(\sum_{j=1}^i V_j \right) \approx k \sum_{j=1}^i V_j$, 并把它代入到能斯特(W. H. Nernst)方程中得:

$$E_i = E_0 + k \sum_{j=1}^i V_j + \text{slog} \frac{C_x V_0 + \sum_{j=1}^i C_j V_j}{V_0 + \sum_{j=1}^i V_j}, \quad i=1, 2, 3, \dots, n$$

对于参量 E_0, k, s 及 C_x , 用四参数非线性最小二乘拟合,便可将它们的值计算出来。也可以先计算 $E_i - E_1, i=2, 3, \dots, n$, 于是消去了 E_0 , 便可用三参数非线性最小二乘拟合求出参量 k, s , 及 C_x 的值。当然,也可用各种最优化方法求出各参量的值,但目标函数的凸性区域不明,所以仍要求初值应有较高的精度。

格氏图的坐标系原理 电脑化的格氏作图法,要根据实验数据的范围画出恰好包含它的 Gran 坐标系。Gran 坐标系是一种曲线坐标系,除奇异点(-1,0)外,处处正则。由于它不满足柯西-黎曼(A. L. Cauchy - G. F. B. Riemann)方程,所以 Gran 坐标曲线是非正交的。实际分析实验中只用到 Gran 坐标曲线的一小部分,它远离奇异点。用 BASIC 语言,在 PC-1500、Apple II 及 IBM PC/XT 计算机上均实现了 Gran 作图的计算机化。以 CE-150 绘图式打印机为例,它绘出的 Gran 图有以下几个特点:彩色线条细致清晰,刻度精确可靠;不必作斜率校正,只须把实测斜率输入计算机即可,计算机自动绘出对应于该斜率的 Gran 坐标系;体积稀释校正不是固定为每大格代表 1%,而是设置一个称为稀释因子 D 的变量,根据实验的需要选择最佳稀释校正因子,比如每大格代表 1.5%,把它输入计算机,计算机自动绘出对应于该稀释因子的 Gran 坐标系;对于二价离子,纵坐标每小格仍代表 1mV,这样容易读数,不易出错;根据电位变化范围,计算机自动调整 Gran 坐标的刻度范围而正好包含电位变化范围,横坐标刻度范围也正好包含总的稀释量,这样的图形位置适中,结构合理;不但有图形输出,而且试液浓度 C 也被计算与打印出来,即电脑化的 Gran 法既有图形直观的特点,又有最小二乘计算及统计处理精确的优点。

离子选择电极分析法还在不断地发展,相应地计量化学的研究必将取得进展。

参考文献

- 1 Gran G. *Analyst*, 1952, 77(11): 661.
- 2 Brand M J D, Rechnitz G A. *Anal Chem*, 1970, 42(11): 1172~1176
- 3 王基谔. *分析化学*, 1986, 14(5): 329~332.
- 4 Jirong Wang. *Analyst*, 1990, 115(1): 53~56

(中国科技大学王基谔副教授;程伟基审)

示波极谱滴定法 oscillographic titration method

在滴定分析中,如遇到有色物质或极弱的酸(碱)或有沉淀产生,这都是指示剂法所不能解决或难以解决的问题。而示波极谱滴定法,是根据示波图形突变或出切口来确定终点,终点直观,从而拓宽了滴定分析的领域,可以解决生产实践中多年难于解决的问题。而且该法终点直观、选择性强,沉淀、颜色、药物制剂中的赋形剂对测定均无影响,可省略分离步骤,简化测定程序,快速准确,检样量小,可节省大量药品;灵敏度高,可取代非水滴定、节省有机试剂,防止污染环境、有利于人类健康。

第一篇示波极谱滴定的文章出现于 1957 年,捷克 Treindl 在 1 mol/L 硫酸铵底液中,利用 EDTA 滴定铜镉混合液中铜、镉,不干扰铟的测定。由于当时使用滴汞电极并用作图法确定终点,这种方法并未受到重视。1962 年 E. Szyszho 在 H⁺ 浓度 6.31 × 10⁻⁶ mol/L 的醋酸-醋酸钠缓冲液中用 Pb²⁺ 滴定磷酸根,并测定了食品中磷含量,但他仍使用滴汞电极并用作图法确定终点,所以该法仍未受到关注。1966~1968 年南斯拉夫 Stefanovich 等突破了滴汞电极而用球形微铂电极作指示电极,用饱和甘汞电极作参比电极,成功地用 NaOH 滴定 HCl,用 AgNO₃ 滴定了 NaCl 用 EDTA 滴定 Ni、Zn、Mn、Mg,用 KBrO₃ 滴定了 As₂Cl₃,用 I₂ 滴定了 Na₂S₂O₃ 等。

从 1964 年开始,中国高鸿从事这个领域的研究工作,现已全面系统地健全和发展了示波极谱滴定的理论及分析方法,并成功地将示波谱滴定应用于各类型的反应中(沉淀反应、络合反应、中和反应和氧化还原反应)。现已广泛应用于冶金分析与药物分析中。在示波极谱滴定这个领域,中国已居世界领先地位。

在沉淀反应中的应用,由于缺乏合适的指示剂,沉淀反应应用于滴定分析的为数甚少,示波滴定将大大改变这种状况,将使大量的沉淀反应应用于滴定分析。以铬酸钾为滴定剂进行示波滴定的方法称为铬酸钾滴定法。在醋酸铵底液中,铬酸钾有切口。铬酸钾滴定铅,用于铅铝合金中铅的测定。铬酸钾滴定钡,用于钙、

钡、钡混合碳酸盐中钡的测定,还可间接测出石膏中硫酸根含量以铅标准溶液为滴定剂进行示波滴定的方法称为铅滴定法。铅的示波极谱图上有敏锐的切口可直接指示终点。铅可用于滴定铬酸根、钼酸根、钨酸根等,用于钨铝合金中的测定,钨铁合金中钨的测定。以丁二酮肟标准溶液为滴定剂进行示波滴定的方法称为丁二酮肟滴定法。在氨性底液中,丁二酮肟是示波活性物质,利用丁二酮肟切口出现指示终点,可直接滴定镍,变重量分析为滴定分析、方法准确快速,用于不锈钢中镍的测定。以四苯硼钠标准溶液为滴定剂进行示波滴定的方法称四苯硼钠滴定法。四苯硼钠是示波活性物质,可用于测定一些无机离子和大量的有机物。以锌标准溶液为滴定剂,进行示波滴定的方法称锌滴定法。锌在氨性缓冲液有敏锐切口,可直接用来滴定 EDTA、EGTA,可间接测定许多金属的含量。以银标准溶液为滴定剂,进行示波滴定的方法称银滴定法。此法用于依地酸、磺胺类药物的测定。

在络合反应中的应用,示波滴定法终点直观、选择性强、不受颜色及沉淀的影响,可不必分离,简化测定程序,快速准确。

EDTA 测定铍,铍在 1 mol/L (NH₄)₂SO₄ 底液中有敏锐切口,可直接指示终点。可用 EDTA 直接滴定铍,少量的 Al³⁺、Bi³⁺、Sb³⁺、Ti⁴⁺ 不干扰。EDTA 测定钙,采用示波滴定, Ca²⁺、Mg²⁺ 比例可达 1:40, Fe³⁺、Al³⁺ 生成沉淀,不必分离,快速准确。可用于石灰石矿样的分析。EDTA 测定锌,采用指示剂法测定锌矿中的锌, Fe、Mn、Al、Pb、Cu、Cd 等干扰,须事先沉淀分离,手续繁琐,而示波滴定则方便易行。EDTA 测定铝,用锌标准液回滴 DETA,用 Zn²⁺ 的切口出现指示终点。钒与 EDTA 络合物有很深的颜色、干扰指示剂法,但不干扰示波滴定法。

在中和反应中的应用,示波法有独特之处,不受颜色及沉淀的影响并且灵敏度高,可取代非水滴定,节省有机试剂,防止污染环境。有色物质的测定,荧光素钠呈橘红色,在 KCl 底液中有敏锐切口,可用标准盐酸溶液直接滴定。弱酸与弱碱的滴定,由于 H⁺ 浓度突跃很小,指示剂法无能为力。在含有 NH₄Ac 和 KCl 的底液中,刚果红的切口在 H⁺ 浓度 1.12 × 10⁻⁷ mol/L 时消失,示波法则很容易解决。极弱的酸的测定,例如硼酸(K_a = 5.9 × 10⁻¹⁰)指示剂法无能为力,苯胺在 H⁺ 浓度为 3.98 × 10⁻¹² mol/L 出现切口指示示波法的终点,终点明晰、结果准确。

在氧化还原反应中的应用,1985 年高鸿教授等又报道了利用溴酸钾测定奎宁,利用亚硝酸钠测定盐酸普鲁卡因,胃复安等。1987 年高鸿教授等又报道了不用切口的示波极谱滴定,更进一步扩大示波滴定的应用范围。1986 年程光炳等报道了示波药物分析中常见的类型有:四苯硼钠法、中和滴定法、金属离子滴定法、亚硝酸钠滴定法、溴酸钾滴定法。自 1987 年以来,战永复在示波药物分析领域中进行了系列研究,在络合、酸碱、氧化还原、沉淀各类型反应中的应用均有报道,并对近百种药物及其制剂建立了示波药物分析法。

提高示波极谱滴定分析的灵敏度、拓宽其应用范围,将是今后研究的热点。由于示波极谱滴定法终点直观、选择性强,沉淀、颜色、药物制剂中的赋形剂对测定均无影响,可省略分离步骤、简化测定程序,比内指示剂法优越、比外指示剂法准确;不需作图即可确定终点,比电位法简易;电极上加交流电,电极不易钝化,比永停法好;灵敏度高可取代非水滴定,节省有机试剂,防止污染环境;检测量小,可节省大量药品。又根据科技为经济建设服务的方针,可以予示该法在冶金分析、药物分析、临床分析、环境监测中的应用和推广显然有着极为广阔的前景。

参考文献

- 1 Treindl L. *collection czechoslov chem Communs*, 1957, 22: 1574
- 2 Szyszho E. *Chem Zvesti*, 1962, 16: 273.
- 3 高鸿. *化学学报*, 1965, 31: 428.
- 4 Stefanovic D, et al. *Glas Hem Drus Beograd* 1968, 33: 377~457
- 5 高鸿. *高等学校化学学报*, 1981, 1: 37~42

- 6 高鸿. 分析化学, 1981, 9(6): 669~671
 - 7 高鸿. 化学通报, 1982, 3: 7~12
 - 8 战永复. 化学通报, 1989, 2: 40~42
 - 9 战永复. 分析测试学报, 1992, 20(2): 199~201
 - 10 战永复. 分析测试通报, 1992, 11(4): 61~63
- (吉林师范学院战永复副教授撰; 徐书绅教授审)

用扩散管作为采集气态组分的工具 denuder

tubes for sampling of gaseous species 传统的大气采样方法一般使用滤膜法和液体吸收法。然而, 这种方法在采样时可能导致样品出现膜象。如果在采样前, 先使气态组分与颗粒相分开, 则可避免膜象的发生, 利用气体和颗粒物之间扩散系数的差异就能从气溶胶中选择性地分离出气态组分。自从 1949 年 Gormley 和 Kennedy 根据气流连续流过一次圆柱形的管子推导出描述气体的扩散方程以来, 许多环境科学家开始注意到用扩散管可以分离气态污染物。常用的扩散管分为圆柱形和环形两种, 其表面用适宜阻留欲测气体的吸收剂涂覆, 当环境空气层流地通过扩散管时, 气态组分通过扩散运动与内壁接触而起作用。使用选择性地涂料, 还可以将扩散管设计成分离空气中特殊气态组分的装置。然而, 直到 1979 年, Ferm 才把扩散管作为气体收集装置使用而不仅仅作为解吸某些气态组分样品的仪器。80 年代初, 扩散管技术已经成为从颗粒物中分离气态污染物并单独测量其浓度的有效工具。

环境空气层流地通过圆柱形扩散管时, 气体分子将扩散到管壁上, 而颗粒物不受影响一直通过扩散管。如果速度分布图完全展开, 并且管壁是欲测气体的理想交换器的话, 那么, 按照 Gormley 和 Kennedy 推导出的方程可以计算出扩散管的效率。

$$C/C_0 = 0.819 \exp(-14.6272\Delta) + 0.0976 \exp(-89.222\Delta) + 0.01896 \exp(-2124\Delta) \quad (1.a)$$

上式中, C 为留在扩散管中的平均气体浓度; C_0 为进入扩散管中的气体浓度; 其中 $\Delta = DL/rRe\delta$; L 为扩散管的涂覆长度 (cm); D 为气体的扩散系数 (cm^2/s); d 为扩散管的内径 (cm); r 为空气的运动粘度 ($20^\circ\text{C}, 10^5\text{Pa}$ 为 $0.152\text{cm}^2/\text{s}$); Re 为雷诺数。在实际应用中, 当 $\Delta \geq 0.05$ 时, 方程 (1) 中只有第一项有意义, 因此, 方程 (1) 可简化为:

$$C/C_0 = 0.819 \exp(-14.6272\Delta) \quad (1)$$

然而, 圆柱形扩散管具有一些局限性, 其主要的缺点是, 以高空气流速的极限范围达到允许的吸附效率, 并且由于减小表面积而降低吸附容量。因此, 只有当空气流速不超过 $1 \sim 2\text{l}/\text{min}$ 时, 才可以使用一只这种类型的扩散管。然而, 当需要收集足够的颗粒物以便分析水溶性部分的 H^+ 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 时, 经常需要较大的流速。当需要获得有关扩散管中不同颗粒径范围内化学污染物分布的详细数据时, 在高流速下操作扩散管的可能性显得特别重要。

为了满足扩散管的性能, 1983 年 Possanzini 等人提出了一种环形扩散管技术, 这种扩散管是由两只同心的圆柱形管子组成的, 以便强制性地使空气通过环形空间, 当空气层流地通过环形空间时, 可以用另一种理论方程表示 C/C_0 。在这种情况下, 必须用环形管的当量直径 δ 代替方程 (1) 中的直径 d :

$$\Delta_a = DL/rRe\delta \quad (2)$$

角注 a 指环形扩散管。当 L/δ 较大时, 第一项正好完全近似方程 (1a) 或:

$$C/C_0 = A \exp(-a\Delta_a) \quad (3)$$

方程 (3) 中的系数 A 和 a 必须由实验确定。其中方程 (2) 中的物理参数为:

在空气流过固定横截面的通道中, 雷诺数定义为:

$$Re = \bar{V} \delta / r \quad (4)$$

式中, \bar{V} 为空气的平均速度; δ 为通道的“当量直径”, 其定义为 4

倍水力半径 r_H 或通道与其周长的截面积的比。

对于一只环形扩散管 $\delta = d$, 并且, 如果将流速 F 代入方程 (4) 中, 则有

$$Re = 4F/r\pi d \quad (5)$$

将方程 (5) 代入方程 (2) 则有

$$\Delta = \pi DL/4F \quad (6)$$

式中 Δ 只取决于参数 L 和 F, d 值的选择服从下述条件:

$$\begin{cases} Re \leq 2000 \\ L \geq 0.07dRe \end{cases} \quad (7)$$

式中 L 是管子未涂覆部分的长度

在两只同心的管子中, r_H 为:

$$r_H = \frac{d_2 - d_1}{4} \quad (8)$$

式中 d_1 和 d_2 分别是环形通道的内、外径。因此, 环形通道的当量直径为内、外径之差:

$$\delta = d_2 - d_1 \quad (9)$$

方程 (9) δ 代替并引入流速

$$F = \frac{\pi V (d_2^2 - d_1^2)}{4}$$

方程 (4) 变为

$$Re = \frac{4F}{r\pi(d_1 + d_2)} \quad (10)$$

将方程 (10) Re 代入方程 (2) 则有:

$$\Delta_a = \frac{\pi DL}{4F} \frac{d_1 + d_2}{d_2 - d_1} \quad (11)$$

因此, 层流通过环形通道时, 改变管子长度和空气流速以及环形部分和内管直径可以使 Δ_a 成为最佳状态, 并可看出: 减小环形当量直径和增大内径得到的 Δ_a 值比相应的 Δ 值 (在给定 F/L 时) 大的多。此外, 短环形扩散管可以产生较大的 Δ_a 值, 即使在较高的流速时也不会改变任何层流状态, 因为 Re 取决于环形通道的内径。应该强调的是方程 (3) 中的系数 A 和 a 取决于不状通路的直径。

如果 $d_2 - d_1 \ll d_1$ 时, 那么, 通过环形截面的速度分布图近似于并联的平行平板间的速度分布图, 因此, 在该条件下, 可以把 A 和 a 看作常数。

对扩散管的涂料选择及性能应考虑: 涂覆材料必须是欲测气体的最佳吸收剂, 并且反应物必须稳定地保留在其表面上; 涂覆材料必须尽可能是选择性的; 采样期间或采样后, 欲测气体与涂覆层间反应产生的分析物不应进行二次反应; 必须有足够高的有效容量。

此外, 研究表明使用玻璃材料制成的扩散管时, $0.3 \sim 13\mu\text{m}$ 颗粒物的沉积最少。设计扩散管应考虑在一定的长度和流速内必须具有最佳的效率。扩散管在确定的条件内吸收容量必须尽可能的大。扩散管的内表面必须是相当光滑的, 以免在空气流中引起湍流。因为湍流可能导致欲测气体出现显著的损失 ($>10\%$)。扩散管中的涂层必须稳固地涂覆在壁表面上。

使用扩散管时必须满足一系列要求, 分离欲测物必须对样品没有影响, 气体流速必须是稳定的、层流的, 在气体流速范围内的粘滞度和温度分布必须是均匀的。采集气体的任何轴向扩散与样品流速相比必须是很小的, 收集表面应是无限大, 而且是欲测物的理想交换器。在扩散管内, 气相中的被吸附物应既不能产生也不能消失。

以层流 ($Re < 200$) 的速度将空气抽过扩散管的中心或环形空间, 在距入口很近处达到层流。按照下式可以计算出直径 d 的管子中消减带的长度 L : $L = 0.07dRe$ 。

由于层流可以保证径向混合只发生扩散过程, 所以, 确保层流是很重要的。实际中经常使用 PTFE 膜作进气口装置确保层流。分子通过层流扩散到收集表面, 分子组分经历了不可逆地吸收或化学结合被固定在收集表面过程。颗粒物在扩散管中具有很低的扩散速度, 在其滞留时间内不可能迁移到管壁上, 因此, 只要

物的沉降将干扰扩散管的性能。垂直使用扩散管也可以消除这种影响,并且使用旋风除尘器和有效的冲击采样器从样品中去除大粒径的颗粒物也可以保证扩散管的效率。

目前,测定大气污染物还存在着许多问题,各种污染物之间的动态平衡使测定特别困难。用扩散管分离气体和颗粒相可以避免使用滤膜法时出现的现象。扩散管还具有预浓缩气态被测物的优点,这对使用传统的滤膜法来说是不可能的。扩散管技术为大气采样提供了重要的改进,并且可以辨别大气污染物的日变化和长期趋势。

各种扩散管装置的使用表明它们主要用来测量大气污染中的无机污染物,对于测定大气中有机物的应用还是不多的。由于扩散管具有简单、耐用并经受长期暴露到充满颗粒物的大气中,受气溶胶和颗粒物的干扰最小的优点,所以,今后进一步扩大扩散管的应用范围将是非常广泛的。

参考文献

- 1 Gormley P, Kennedy M. Diffusion from a stream flowing through a cylindrical tube. Proc R Ir Acad, 1949, 52A: 163~169
- 2 Martin Fern. Atmospheric Environment, 1979, 10: 1385~1393
- 3 Possanzini M, Febo A, Liberti A. Atmospheric Environment, 1983, 12: 2605~2610

(唐山市环境监测中心站李力争高级工程师撰)

分析仪器与仪器分析 analytical instrument and instrumental analysis

利用物理学、化学及生物学的规律,可以研制成多种分析仪器(AI)、进行仪器分析(IA),即研究物质的结构与性质,测定物质的成分。

人类从事物质研究的历史悠久,但从定性描述发展到定量研究则是18世纪以后的事。19世纪末到20世纪初,原子论的进一步发展,电子与放射性的发现以及机械工业的振兴,促进了早期的AI试制与IA研究。例如,1857~1882年间,司塔斯(J. S. Stas)利用灵敏度达到0.03mg的分析天平,测定了银、氯、氮等10种元素的原子量;1852年,司托克斯(G. Stokes)利用分光计测定了奎宁和叶绿素发出荧光的波长;1860至1907年间,人们利用原子发射光谱仪(AES)发现了铯、铷、铊等13种元素;1906年,茨维特(M. Tswett)利用经典液相色谱法分离了植物色素;1912年,汤姆逊(J. J. Thomson)利用质谱仪(MS)发现了同位素;1915年,本光多太郎利用第一台热天平进行了热分析研究;1922年,海洛夫斯基(J. Heyrovsky)创立了极谱法,开创了电化分析的新局面。

20世纪30~40年代,由于科技、生产的发展以及二次大战的发生,对IA的要求与日俱增;由于电子管、记录仪等元器件的应用以及仪器制造工业的发展,促使科技先进国家走上AI的工业生产之路。这一时期的AI产品包括pH计、极谱仪、电导仪等电化式分析仪器和比色计、AES、火焰光度计、红外分光光度计(IR)、紫外分光光度计(UV)、非色散型红外线气体分析器等光学式分析仪器以及X射线衍射仪、电子衍射仪、MS等大型分析仪器。1933年,鲁斯卡(E. Ruska)研制成功透射式电子显微镜(TEM);1939年开始,欧美国家相继推出TEM商品,成为微观结构研究的有效手段。电泳现象早在1808年就被发现;1937年,梯塞利乌斯(A. Tiselius)利用电泳法成功地分离了蛋白质,使电泳仪成为生物化学研究工具。1941年,马丁(A. J. P. Martin)等提出气-液色谱理论;1944年,扎弗依斯基(Y. K. Zavoyskiy)发现电子顺磁共振(EPR)现象;1946年,布鲁赫(F. Bloch)与珀塞尔(E. M. Purcell)分别发现核磁共振(NMR)现象。这些工作揭开了发展相应的AI与IA的新篇章。总的说来,这一时期的AI普及率较低,适用于有机分析的仪器尤为缺乏。在分析领域中,化学分析所占份量远大于仪器分析。

20世纪50~60年代为AI与IA发展的黄金时期,在仪器研

制、分析技术的开发与推广应用等方面都有长足进步。有机分析方面,低分辨NMR发展成为快速测定湿度、脂肪等成分的非破坏性方法;高分辨NMR则与IR、UV、MS共同成为有机结构分析的四大谱仪。基于物理化学分离原理设计而成的气相色谱仪(GC),由于分析效果良好、价格适当而获得广泛应用;经典液相色谱法则在徘徊半个世纪后,由于采取了高压泵、高效固定相与高灵敏度检测器等措施而发展为高效液相色谱仪(HPLC),成为强有力的有机分析工具。50年代问世的薄层色谱仪(TLC)在生物化学研究中发挥重大作用。在解决色谱载气分离与质谱快速记录等关键技术问题后,1965年出现气相色谱与质谱联用仪(GC-MS)的商品,充分发挥GC定量与MS定性的优势,开拓了有机分析的新局面。无机分析方面,1955年,瓦尔什(A. Walsh)发表了《原子吸收光谱在化学分析中的应用》论文,奠定了原子吸收分光光度法(AA)的理论基础。AA仪器的灵敏度很高,选择性良好,可测定70多种元素,已在冶金分析、环境监测等领域中发挥重要作用。1958年以商品形式出现的真空火花源质谱仪,可同时检测周期表上所有固体元素,已在半导体、冶金、陶瓷等领域中获得应用。电感耦合等离子体(ICP)装置既是一种强光源,也是一种高效离子源;60年代初期在常规AES中引进ICP,明显地提高了分析灵敏度与线性度,使古老的AES焕发青春。表面分析方面,卡斯坦(R. Castaing)于1951年推出电子探针分析仪,以聚焦的电子束为“探针”射向被分析表面,激发出X射线,成功地实现了表面微区的成分分析。约10年后,卡斯坦又与斯罗德赞(G. Slodzian)共同推出离子探针分析仪,以聚焦离子束射向被分析表面,溅射出次级离子并用MS进行分析。1951年,米勒(E. W. Muller)发明了场离子显微镜(FIM),成功地以原子级的清晰度观察固体表面。随后引进了质量与能量分析器而发展成为原子探针分析仪。1954年,塞格班(K. Siegbahn)等采用高分辨本领的电子能谱仪研究由X射线照射被分析表面产生的低能电子,继而发展成为化学分析电子能谱仪(ESCA),有效地进行有机与无机化合物的结构研究。1957年穆斯鲍尔(R. L. Mossbauer)建立了通常称为穆斯鲍尔光谱法的核 γ 射线共振光谱法,相应的穆斯鲍尔谱仪则发展成为独特的射线式分析仪器。60年代相继出现了多种称为离子选择电极的化学传感器与第一代生物传感器,提供了进行化学、生物研究的新手段。

20世纪70年代以来,IA在分析领域中占据优势,研究热点有:(1)采用新原理、新材料、新工艺,发展新型传感器(例如半导体气敏电极、离子选择电极、酶电极、免疫传感器、光纤传感器)与检测器(二极管阵列、电感耦合器件、微通道板式电子倍增器等),以提高物质信息的获取、转换与检测效率。(2)引进变换技术。例如,在IR、NMR与ICRMS即离子回旋共振质谱等仪器中,引进傅里叶变换(FT)技术,提高了仪器的分辨本领、灵敏度与分析速度;在光谱仪器中引进哈达马(Hadamard)变换技术,改善了图像处理功能与信噪比。(3)应用激光技术。采用多种激光器作为新型光源,大大改善了仪器性能。例如,1928年发现拉曼(Raman)效应后,由于拉曼散射光的强度较弱而难以实际应用;采用激光光源后,使拉曼光谱仪成为研究分子结构的重要工具。利用激光与物质作用产生的光发射、光吸收、光热、光声、光电离以及激光诱导荧光等等效应,为研究多种新型AI并用以进行物质的结构、状态与价态研究、微区与剖层分析、无损检测与遥感遥测开辟了广阔天地。(4)应用计算机技术。在AI中应用计算机技术,不仅便于进行数据处理,实现快速变换等功能,而且可以结合自动进样系统与实验室机器人,实现分析过程全盘自动化。(5)发展联用技术。为发挥各种AI与IA的优点,克服其缺点,有必要也有可能发展联用技术。除上述GC-MS已广泛应用并向小型化、微机化与智能化的方向发展外,GC-FTIR、GC-FTIR-MS、HPLC-MS、SFC(超临界流体色谱仪)-MS、MS-MS等直接联用仪器均已实现商品化。利用同一真空系统,构成包括X射线光电子能谱仪、紫外光电子能谱仪、俄歇电子能谱仪、扫描俄歇微探针、低能电子损失谱仪、二次离子质谱仪等仪器的综合表

面分析系统亦已成为现实,并在推广应用过程中不断改进。(6)发展原子级观察与操纵技术。除上述FIM继续发展外,1982年发明了扫描隧道显微镜,继而出现了原子力显微镜,既可观察单个原子(分子),也可加以操纵,成为纳米显微与纳米加工的利器。(7)发展专用仪器。为适应工业生产控制、环境监测、临床生物化学分析等场合对分析测试的特殊要求,需提供专门的进样系统与专用AI,以实现特定场合的连续分析或自动分析。

参考文献

- 1 Killeffer D H. Rev Sci Instrum, 1942,13(2):49~53
- 2 孙传经.气相色谱分析原理与技术.北京:化学工业出版社,1979.1~8
- 3 [美]威拉德 H. H. 等著.仪器分析法,李树田译.北京:机械工业出版社,1982,26~539
- 4 凌永乐.原子量的测定.北京:科学出版社,1985.58~109
- 5 陆家和,陈长彦,等.表面分析技术.北京:电子工业出版社,1987.1~464
- 6 季欧,李玉桂.质谱分析法(下册).北京:原子能出版社,1988.220~448.
- 7 马树芳,徐国华,彭少华.分析仪器原理与应用.上海:华东化工学院出版社,1990.1~323
- 8 高鸿.分析化学前沿.北京:科学出版社,1991.1~370

(厦门大学季欧教授撰)

分析仪器智能化 intellectualization of analytical instrument 分析仪器种类繁多,参照分析仪器文摘,可分为:光学式分析仪器、射线式分析仪器、电化学式分析仪器、热学式与磁学式分析仪器、色谱仪、质谱仪、波谱仪、能谱仪、物理特性分析仪器。

分析仪器不仅能分析物质的成份和结构,而且能够确定物质的结构细节、微观形貌、络合状态、原子的价态、元素间的联系、元素的微区分布与薄层分布。在分析化学中占据独特地位,而且日益重要。

最初的分析仪器全靠手工操作,输出模拟式的各种物理参量(其中有的是电参量),根据这些输出信号还须进行繁琐的后继处理,如记录、绘图、计算、拟合、辨识、检索、鉴定……等。这类分析仪器被称为模拟式分析仪器。

分析仪器与光电器件及各种传感器结合,导致“电气化”分析仪器的出现,传感器把作为分析仪器输出信号和分析所依据的各种非电学的物理参量(温度、压力、流量、光谱、光学图像干涉图、衍射图、射线……)转换为电参量,为分析仪器同电子技术之结合开辟了道路。

电气化分析仪器与数字化技术的结合,形成了数字化分析仪器,由传感器输出的电参量经由模拟/数字变换器A/D,转换为二进制数码。具有精度高、抗干扰、便于存贮、传送、显示,便于计算机处理等优点。为分析仪器的小型化、微机化创造了条件。

1972年,美国IBM公司率先实现计算机系统的全面商业化,促进了计算机对各行各业的普遍渗透。数字化分析仪器与微型计算机系统相结合,构成了微机化分析仪器。微机化分析仪器由分析仪器(信号源)、传感器、预处理器(包括放大、滤波、采样保持等)、模/数转换器、计算机系统、输出终端、仪器接口及软件组成。其主要功能有:(1)自诊断与故障监控。识别正常与异常状态;确定故障位置,便于检修;自动报警;自动中断,避免故障的蔓延扩大。(2)减小误差,提高精度。校正零点,克服零点漂移;设定满度;校正传感器的不一致性和输出特性的非线性;补偿由温度、压力等外界因素的变化所引入的误差。(3)改善信噪比。除模拟滤波之外,还可针对干扰的特性分别采用不同的数字滤波技术,抑制和消除低(高)频干扰、脉冲干扰、随机干扰和噪声,增强信号。用锁相放大技术,还能将淹没在强噪声中的微弱信号提取出来。(4)计算与数据处理。查找、排序、加减乘除、初等函数、微分积分、实验曲线的函数拟合、相关、卷积、傅里叶变换、自适应等。(5)自动控制。对被控参数进行巡回检测,与设定值相比较,

按PID规律输出控制指令给执行机构,对过程实施控制,使仪器本身处于最优状态;在软件的指挥下,按预定方案,在脱离人工干预的条件下,进行重复性操作,自动记录、绘图、打印、列表输出结果。(6)数字图像处理。用计算机软件对扫描电镜等成像仪器输出的图像进行空间滤波、图象增强、加减、相关、特征提取、特征识别等特殊处理,从中提取有用信息,作出判断和鉴定。

作为以上功能的综合效果,微机化分析仪器具备了高精度、高灵敏度、宽动态范围、强适应性、多功能、小体积、重量轻、低能耗、方便操作等大量优点,能迅速、准确地提供大量分析数据和图象,实现了“最优化”和“自动化”的目的,是智能化的初级阶段。

80~90年代,分析仪器进入智能化高级阶段。多种科学技术的融合与渗透,促使仪器向固态化、高集成化、高效能、强适应性发展,特别是半导体激光器、CCD、光导纤维、集成光学、ASIC电路、DSP芯片将扮演重要角色,分析仪器将最终走出实验室,进入生产现场,进入家庭,进入社会生活的一切领域。激光是高单色性、高准直度、高功率密度、高相干性理想光源,半导体激光还有体积小、功耗低、固态化的优点,是智能化分析仪器的理想光源。电荷耦合器件(CCD)是一种多通道光学检测器,具有光电转换、时间积分、信号存贮及传送功能,可同时获取一定波长范围内的光谱信息或一定空间范围内的图象信息。响应时间快,光谱范围宽、灵敏度高、噪声低、线性度高、空间分辨率高、时间分辨率高、体积小、重量轻、功耗小、全固态,已用于发射光谱、吸收光谱、拉曼光谱、色谱等场合,预计在20世纪末可能最终取代光电倍增管而广泛应用于各种光谱检测。光导纤维(简称光纤Fibre),不仅是光能及光信号的传送工具,而且可以做成各种光纤传感器,它具有抗腐蚀、耐高压、耐辐射、抗干扰、特轻特细的优点。在遥控、遥测、多道分析、流程检测、实时测控、深入人体内脏、恶劣环境等场合特别能发挥作用,与光纤配套的光电转换及光电转换器、光纤耦合器件也有很大发展,已进入实用阶段。

专用集成电路(ASIC),是由分析仪器设计专家用计算机辅助设计(CAD),将分析仪器的各个功能单元,设计为集成电路,向半导体厂家定做,也就是把分析仪器的某些功能单元集成在一块芯片上。

数字信号处理芯片(DSP)。过去,数字信号的实时处理要求大容量、高速度的计算机,这一点一直阻碍着这一技术在分析仪器上的普遍使用,数字信号处理芯片的成功,令分析仪器上不配大容量、高速度计算机就能进行数字信号的实时处理。集成光学(IO),可把复杂的光学系统集成于一块芯片上,其中可以包括传统光学系统的一切功能。

现代分析仪器纵然能够以惊人的速度提供大量准确的分析数据和图象。如果没有相应的有效方法从中提取信息,仍然得不出人们需要的答案。这就需要发展分析化学统计学分析测试与专家系统。化学统计学是由分析数据推断分析结论的系统数学方法。比如,由蒸汽压、折射率、密度与粘度推求混合溶剂的组分;用谱相关和自适应计算,从红外光谱测定复杂样品的组分。专家系统是一种计算机程序,它能体现知识丰富、技艺超群的人类专家的技能,在特定领域高水平地处理问题,作出决策,通常称专家系统为知识库系统,由知识库、数据库以及控制推理程序(规定选用知识的策略与方式)3部分构成。分析测试专家系统的任务有:知识的获取、知识的处理、知识的表达;分析路线与分析方法的设计与优化、谱图解析;谱图库检索。其中谱图库检索是一项亟待解决的主要任务。国内外相继做了不少工作。

将功能互补的分析仪器用接口和计算机联合使用,大型分析仪器并入计算机网络,自动制样及送样装置、机器人进入实验室……,可形成实验室信息管理系统。在此系统中,分析仪器在中心计算机和高功能外围设备的支持下,以更合理的方式、更高的效率,完成更大容量和更高速度的分析任务。

智能分析仪器集数、理、化、生、光、机、电、算众多学科于一身,是典型的技术密集产品,用途广泛,发展迅速,前景广阔。

参考文献

- 1 De Monchy A R, et al. Anal Chem, 1988, 60(23): 1355A~1356A
- 2 Graham R C. Intell Instrum Comput, 1988, 6(2): 46~57
- 3 Wilhamson J M. Appl Spectrosc, 1989, 43(3): 372~375
- 4 McDowell R D, et al. Anal Chem, 1990, 62(21): 1069A~1077A

(四川师范大学郭才陶副教授撰; 罗忠鉴审)

催化动力学分析法 catalytic kinetic method for analysis 由于化学反应速度与反应物浓度有关, 因此与能改变反应速度的催化剂浓度有关, 因此利用反应速度的测量可确定被测物的浓度。由此而建立的分析方法, 即为动力学分析法。动力学分析法较之平衡法具有某些优势: 动力学分析法可利用反应速度慢(或反应平衡常数较小)的化学反应; 避免不希望发生的副反应; 分析速度较快, 且易于实现自动化; 可分析密切相关的化合物(如有机化合物中的同系物及同分异构体)。其中催化法有极高的灵敏度(包括非酶及酶催化), 大多数可达 10^{-6} 级或在 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 间, 不少可达 10^{-10} , 甚至可达 10^{-11} g/ml, 是测量高纯物质中痕量杂质的有效手段, 可用于分析取样量少的试样(如血浆、高纯踪重、宇宙试样等)。因此在动力学分析法中, 催化法是发展最迅速的分支。

动力学分析法的研究虽可追溯到 20 世纪初, 但真正的发展则始于 50 年代后期。最古老的催化法之一是基于碘离子催化 $Ce^{4+} - As^{3+}$ 反应的桑德尔-科尔夫(Sandell-kolthoff)法。1932 年布瑞(W. C. Bray)研究了相应的反应历程。由于催化剂通过降低反应活化能或生成活性中间体而加快反应速度, 并在反应过程中得到再生。催化剂起着一种化学放大的作用, 用这种方式, 可从痕量浓度的待测物产生浓度高几个数量级的产物, 这就是催化动力学法有极高灵敏度的原因, 引起了痕量分析化学家的极大兴趣和广泛研究。早在 1922 年, 哈恩·比尔(Hahn Ber)就提出一种测定催化剂浓度的技术。但因用目视法观察反应, 测定误差较大。而随若跟踪反应过程的实验技术不断改善, 使动力学分析法的准确度和精密度已提高到能与平衡法相比较。从 50 年代后期开始, 动力学(催化)法得到更多的研究与应用, 逐渐成为测定无机和有机物质的一种通用技术。美国《分析化学》第 5 期(A analytical Review)从 1961 年开始, 每两年有 1 篇关于动力学分析的综述。马克(H. B. Mark)在所著的书中, 对动力学领域的工作作了极好的译述。瑞奇里兹(Rechnitz, G)和盖尔波特(Guilbaut, G. G.)曾分别写过动力学在分析中应用的评论。中国最早的综述性文章是任镇璋于 1961 年发表的张树成综述过“催化测定法在痕量杂质分析中的应用及发展”。陈四箴和阮大文的文章对中国催化动力学分析法的发展有较大的影响。

因动力学(催化)法具有的优势, 被广泛用于物质的测定, 尤其是过渡金属元素, 的测定。这方面的报道颇多。如 1980 年多曼罗娃(L. F. Dolmaova)用氢醌+ H_2O_2 为指示反应测定血浆中 10^{-4} μg/ml C. (I)。在稀土元素和贵金属等测定方面的研究也不少。1980 年布莱韦柯夫(A. M. Bravikov)利用对氨基苯乙醚+ 10_4 体系测定稀土元素; 1986 年斯韦兰罗(C. A. Sevillano)用 $S_2O_8^{2-}$ 催化指示反应测定 0.85%~21.36%/ml Ag。催化法也已用于非金属的分析。日本的内海响在所著的“利用催化反应作超微量阴离子的分光光度测定”中, 综述了这方面的内容。在催化法中, 用氧化还原指示反应的占绝大多数。也可利用非氧化还原反应(如配位体反应、同位素交换反应、分解反应、水解反应)。1978 年埃尔多罗夫(N. Jordanov)测镉即是利用 α-糖偶酰二肼的水解。另一类重要的指示反应是酶催化反应。它不仅可测酶的活性, 也能测底物、活化剂和抑制剂的浓度。此法的最大优点是特效性和高灵敏度, 1978 年古德(S. R. Good)用酶方法测定了饮用水和河水中 0.02~0.2 μg/ml 砷; 1984 年格赫(A. M. Ghe)在黄嘌呤催化转化为尿酸的黄嘌呤氧化酶的还原半反应中, 利用金属离子的抑制效率与相对酶活性的关系可选择性地测

定 $1 \sim 10$ nM Ag(I)和 Hg(II)及 $0.1 \sim 1$ μM Cu(II)和 Cr(III)。国外已相当广泛地应用了酶催化分析法。盖尔波特和贝格米叶(H. U. Bergmeyer)分别对测定酶、底物、活化剂和抑制剂的酶分析法作了汇编和综述; 狄克森(M. Dixon)以及朗格(C. Long)将几百种酶及分析方法汇编成书。中国对这一领域的研究较少, 起步也较晚。鉴于酶催化法的重大现实意义, 该领域的研究工作需加以重视。

在催化分析中另一关键问题是反应速度的监测与计算。在实际应用中, 一般是利用起始反应速度法(斜率法、固定时间法、固定浓度法、标准加入法)使反应为一初(或准一级), 或准零级。这样有利于测量和计算。1987 年郑肇生用固定时间法—准零级反应及 KIO_4 -孔雀绿体系测定饮用水中锰。对于反应速度的监测, 有化学法和仪器法两类。1977 年格里荷夫(E. J. Greenhow)即用乙醇和苯酚与乙酸酐的酸催化乙酰化反应来指示用高氯酸滴定钨酸和金属羧酸盐的终点。用仪器法监测反应速度, 用得最多的是分光光度法, 因其应用范围广而具有特殊的地位。此外, 有测量反应体系电性质变化的电化学法, 特别是离子选择电极的应用。1972 年胡森(W. R. Hussein)在硫氰酸酶催化的 $CN^- + S_2O_8^{2-}$ 反应中, 用 CN^- 选择电极跟踪反应过程中 CN^- 浓度的降低, 测定硫氰酸酶的活性。1935 年赫诺夫斯克(J. Heyrovsky,)最早利用催化电流测定低浓度的铋。1991 年孙丕均利用二苯基乙醇酸—二苯胍— $NaClO_3$ 体系中的极谱催化波连续测定岩石中的钨和钼。荧光的测量也是一种有效的手段, 特别是对酶催化反应, 可使酶法分析灵敏度大大提高。1965 年盖尔波特利用心肌黄酶催化的口天青—试卤灵偶合反应荧光法提高了测定 NADH 的灵敏度。1984 年莫瑞罗(A. Moreno)用差式动力学催化荧光法同时测定 10^{-9} 级的铁和锰。其它的监测方法也相继出现。如 1978 年皮利彭柯(A. T. Pilipenko)将化学发光法用于鲁米诺+ H_2O_2 体系, 测定 0.5 ng/ml Ni。化学发光反应的低价出限使人们有兴趣将这一方法用于液相色谱中金属离子的检测。1975 年莫插莱(H. A. Mortla)作过此类研究。1980 年兰克马依(E. Lanknyr)在 HPLC 中用催化价测定原理测定血清中甲状腺激素互变异构体。计算机在动力学分析中的应用, 联机化和自动化的实现, 进一步拓宽了方法的应用范围, 提高了方法的准确度和精密度。1968 年巴德(Bard)等利用计算机建立了均相和多相体系中的实验数据的动力学模型。1969 年插里(E. Toren)讨论了速度的分光光度测量与计算机联结的问题。1990 年奥托(M. Otto)综述了动力学分析的计量化学法。而亚布瑞莫韦克(B. F. Azramovic)则综述了计算机在催化分析中的应用。指出计算机尤其适用于催化分析的模拟、优化和自动化。

随着科学技术的发展, 对分析方法的灵敏度和选择性提出更高的要求。催化法同样面临此类问题。活化剂的研究与应用不公能使催化活性物质的测定灵敏度成倍、甚至数量级地提高, 且常使方法选择性得到改善。1983 年慈文祥研究了邻苯二酚+ H_2O_2 体系测铜, 即用 Cl^- 及 Al^{3+} 作活化剂。研究新的指示反应是提高方法选择性的重要一途。具有较高选择性的指示反应的研究报道也不少。如 KIO_4 氧化金莲橙 60 为指示反应测 Ru, 其它铂系金属不干扰。利用化学物质的催化活性常常被局限在某 pH 范围内这一特点, 可用变动反应介质 H^+ 浓度来改善选择性。亚特米斯克(Ratsmirskii, K. B.)研究的一个典型例子是对碘化物+ H_2O_2 的反应, 铈和铈表现出不同的 H^+ 浓度依性, 故可在两个 H^+ 浓度下利用同一指示反应测混合物中铈和铈。也可利用催化剂的配位球体对催化反应所产生的影响。默勒(Muller, H.)在被 Ru 催化的焦磷酸锰—对苯醌反应中则利用了此效应。利用温度、试剂浓度的变化、掩蔽剂、缓冲液、有机溶剂的影响及萃取—催化法等也可提高选择性。奥托、阮大文对这方面已有综述。反应机理的研究是催化法得以进一步发展的关键, 有指导性意义。但由于测定瞬时产物的困难, 使这方面的工作还太少。催化动力学分析的进一步研究和应用是很有意义的课题。

参考文献

- 1 慈云祥. 北京大学学报, 1983, 6: 57
- 2 Mottola H A. Anal Chem. 1986, 58(5): 264R~279R
- 3 阮大文. 化学通报, 1986, 9: 67~70
- 4 Mottola H A. Anal Chem. 1988, 60(12): 181R~200R
- 5 Otto M. Analyst(London), 1990, 115(6): 683~685
- 6 Abramovic B F. Analyst(London) 1990, 115(6): 705~713
- 7 Mottola H A. Anal Chem. 1990, 62(12): 441R~461R
- 8 李方. 理化检验(化学分册), 1991, 27(5): 286~288
- 9 孙丕均. 分析试验室, 1991, 10(5): 26~27
- 10 李方. 分析化学, 1991, 19(8): 921~923

(四川大学李方副教授撰; 程书麟审)

吸附伏安法 adsorption voltammetry 在一定电极电势下, 将一种化合物吸附富集在电极上, 再以伏安法(线性扫描伏安法或示差脉冲伏安法)将这种物质还原或氧化, 同时记录下呈峰状的吸附物的伏安曲线。根据此曲线的峰电流、峰电势、半峰宽度及峰面积来测定溶液中物质的含量。物理化学参数(如吸附系数、分子相互作用系数、吸附自由能、吸附等温式、表面反应的电子数、对称系数及反应速度常数、配合物的配位数及稳定常数)、判断反应物及产物、确定反应机理的方法称为吸附伏安法。这种方法的特点是可研究低浓度体系, 分析痕量、超痕量的无机离子、有机化合物及生物物质。已报道此方法的检测下限可达 10^{-11} mol/L。

1956年卡尔伏达(R. Kalvoda)观察到, 在滴汞电极上吸附富集化合物后得到的电响应信号比无吸附富集时灵敏。1961年凯姆拉(W. Kemula)等将这种方法首先应用到悬汞电极上。以后这种方法也应用到其它固体电极上(如石墨电极、碳糊电极、玻璃碳电极、铂电极)。在悬汞电极上得到的数据重现性最好。70年代末这个方法才真正引起人们的重视。当时痕量、超痕量物质的分析是分析化学领域中一个十分重要的研究课题。在电分析化学中, 基于形成汞齐的阳极溶出伏安法被公认为是测定超痕量重金属的最灵敏的方法, 然而这种方法的局限性是只能测定电还原后形成的金属能溶于电极材料汞中的某些金属离子。在阳极溶出伏安法的启示下, 人们开始利用无机配合物、有机化合物及生物物质在电极上的吸附性将这些物质富集在电极表面, 然后用伏安法将电极表面上的吸附物质还原或氧化, 就产生了吸附伏安法。这种方法除应用于阳极溶出伏安法能测定的金属离子外, 还可应用于不能用阳极溶出伏安法测定的元素及化合物。即通过配合物测定不能被电还原的金属离子, 能被电还原为金属, 但在汞中的溶解度较小的金属离子; 以及不能被电还原的非金属离子; 也可直接测定有机化合物和生物物质。已报道的用此法测定的有机化合物及生物物质有140余种, 如表面活性剂、染料、农药、药物、激素、维生素、蛋白质、核酸等。测定的无机元素有Al、B、Ba、Ca、Cd、Ce、Co、Cu、Dy、Eu、F、Fe、Ge、Ga、Ho、In、La、Mg、Mn、Mo、Ni、Pb、Pd、Pr、Se、Sn、Sb、Sr、Te、Th、Ti、U、V、W、Y、Zr。

这种方法的发展过程中, 王(J. Wang)研究了一些无机离子的体系及有机化合物的吸附伏安法。在对碳糊电极上的吸附伏安法技术中发现, 由于在吸附富集阶段, 化合物除吸附于碳糊电极表面外还深入到电极的内部, 这种情况下的富集过程为萃取—吸附富集。采用这种方法可以防止部分局外有机物的干扰。柏莱采克(E. Palecek)等提出, 电极从样品溶液中吸附富集生物物质后, 于另一溶液中进行还原或氧化可以减小样品溶液的干扰。他称此法为吸附转移溶出伏安法, 并将此法用于核酸的研究中。范登贝尔格(C. M. G. van den Berg)用吸附伏安法测定了环境样品中一些无机离子。80年代以来, 中国电分析化学工作者对无机离子的吸附伏安法做了大量研究。金文睿等对吸附伏安法理论进行了系统的研究, 推导了吸附富集阶段电极上物质的吸附量的表达式; 推导了可逆、准可逆、完全不可逆表面过程半整数、整数积分和导数线性扫描伏安法中峰值、峰电势、半峰宽度、峰间距的表达式; 提出了用吸附伏安法测定表面电化学反应电子数、对称系数

和反应速度常数、吸附于电极表面上配合物的配位数和稳定常数的方法; 理论上分析了线性扫描伏安法及其导数技术的灵敏度, 并将导数、半导数技术应用于实际样品的吸附伏安法中, 使方法的灵敏度提高一个数量级以上, 首次将吸附伏安法应用到非金属元素F和B的测定及超微电极上。

此外, 一些类似的方法也先后提出。卡尔伏达(R. Kalvoda)等将一些非电活性的有机化合物预富集在电极上后, 用交流伏安法及示差脉冲伏安法测定已吸附富集化合物的电极上的充电电流随电势变化的峰形曲线, 利用其峰值测定非电活性物质, 并称此法为“吸附溶出张力法”。此法的灵敏度为 10^{-6} mol/L。爱斯基森(H. Eskilsson)等在电极上预富集了Co和Ni与丁二酮肟的配合物以后, 通一恒定的还原电流, 同时测定电极电势与时间的关系曲线或时间对电极电势的导数与电势的关系曲线。前者的过渡时间, 后者的峰值与溶液中Co及Ni离子的浓度成正比。金文睿等研究了这种技术的理论, 并应用此技术测定了痕量的Fe、Bi、Be、Cu、B、痢特灵, 并称此法为吸附计时电势法。方法的灵敏度可达 10^{-10} 至 10^{-12} mol/L。同时还研究了在上述方法中用化学试剂代替恒电流的电势法的理论, 将此两种技术统称为吸附电势法。

吸附伏安法在流动体系中的应用也有报道。如果将微电极及其修饰电极中吸附伏安法和类似技术与高效液相色谱(HPLC)、高效毛细管电泳(HPCE)结合起来将是新的有前途的研究方向。

参考文献

- 1 Wang J. Am. Lab, 1985, 17: 41
- 2 Palecek E. Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1988, 20: 179
- 3 Kalvoda R. et al. Pure Appl Chem, 1989, 6(1): 97
- 4 Jin Wenrui, et al. J Electroanal Chem, 1991, 297: 37
- 5 Jin Wenrui, et al. J Electroanal Chem, 1991, 306: 31

(山东大学金文睿撰)

电位溶出分析 1976年瑞典D. Jagner首次在阳极溶出伏安法的基础上提出电位溶出分析法(PSA)。因其具有分辨率高, 测定范围宽, 有机物干扰少, 仪器简便价廉等特点, 而得到迅速发展。

国内外对PSA的理论从多方面进行了研究。中国周端赐和张祖训等人分别推导出旋转玻碳汞膜电极和旋转玻碳金膜电极的PSA的溶出时间与本体溶液中被测离子的浓度方程及电位与溶出时间的关系方程, 并都作出验证; 何广一(1987)对流动注射PSA的理论进行了探讨, 并作出验证; 方禹之等(1981)推导出静止拟微分PSA的理论公式。国外Hussan(1985)等也推导出PSA的电位与溶出时间的方程; Anderson(1982)对流动PSA的理论进行探讨, 推导出理论公式。从这些理论公式, 找出了影响PSA灵敏度的种种因素, 推动了PSA的迅速发展和广泛应用。为了提高该方法的灵敏度, 国内外学者从仪器和方法着手改进, 自Jagner分别于1976年和1978年用pH计和恒电位仪完成PSA试验以来, 各种PSA仪器相继问世, 出现了灵敏度高的微分电位溶出分析仪, 使用的工作电极也不断更新, 出现了微电极和修饰电极, 这些新仪器和工作电极的问世, 使PSA的一些新技术新方法不断出现。Mortensen等(1979)提出多次扫描PSA, 可提高分析灵敏度; Christensen等(1980)提出还原PSA, 可扩大分析范围; Kryger(1980)提出微分PSA; Laber等提出静止PSA, 认为该方法灵敏度比一般PSA提高20倍, 如果测定时加入适量甘油, 可提高50倍; 王曦在此基础上研究了氧化剂汞的用量范围, 认为 $[Hg^{2+}]/[M^{n+}] \geq 10n$ 较合适; Jagner提出流动PSA, 按进样方式不同, 又可分为连续流动和流动注射PSA, 该方法不仅大大提高了分析灵敏度, 同时可以使重叠信号分开, 减少和消除元素间的相互干扰; 方禹之等(1987, 1988)提出的间断多次扫描PSA和拟微分PSA简便且干扰少, 灵敏度高; 另外, 李

德玉等把有机物的吸附作用用于 PSA 中,开拓了有机试剂在 PSA 中的应用;Schulze(1984)将微电极用于 PSA 中,使其可以进行微量样品、活体组织的检测;方禹之(1988)把修饰电极用于 PSA 中,增加了选择性,提高了灵敏度。这些新 PSA 技术的问世,不仅可提高该分析法的灵敏度,增强选择性,而且使该分析法的应用范围大大地扩大,操作也简便了。

PSA 所使用的工作电极种类较多,使用较多的是以玻碳为基体的汞膜、金膜电极。该种电极既坚硬又无微孔,容易更新,分析灵敏度高,重现性好。大多数离子都可在该两种电极上富集。根据玻碳电极上制备汞膜、金膜的方法不同,又可分为玻碳预镀汞膜电极、玻碳同位镀汞膜电极和玻碳预镀金膜电极及玻碳同位镀金膜电极。除此之外,近几年发展起来的纤维电极,也已用于 PSA 中,其中有碳纤维、铂和金纤维电极。纤维电极灵敏度高,分辨率好,适应于微小样品及活体组织的测定,但制作较困难。修饰电极在 PSA 中也得到应用,如 FET、TOPO、Nifion、DMG、聚乙烯吡啶等修饰电极。这些修饰电极灵敏度高,选择性好,宜用于在汞中溶解度小或以汞膜电极难以测定的元素的分析。但修饰电极的制备比较复杂,不如汞膜电极制备那么容易。PSA 还有用汞池电极、银汞涂汞膜电极、铂电极、金电极及玻碳同位镀铂电极。

电位溶出分析法所使用的氧化剂,大多为 $Hg(I)$ 和饱和溶解 O_2 。溶解 O_2 是较强的氧化剂,氧化速度约为 $Hg(I)$ (10mg/L) 的 12 倍,多数适应于酸性溶液,尤适应于灵敏度高的微分 PSA。溶解氧与 $Hg(I)$ 相比,可以克服 $Hg(I)$ 做氧化剂的缺点,但灵敏度不如 $Hg(I)$ 的高,且受温度的影响较大。 $Hg(I)$ 是一种温和的氧化剂,适应于多数金属元素的分析,其氧化速度与 $Hg(I)$ 的浓度呈线性关系,一般使用量为 1~20mg/L。在电解过程中, $Hg(I)$ 有一定量的损失,测定过程中需除氧,耗时长且易受到玷污或干扰。还可利用一些氧化性极强的氧化剂,如 $KMnO_4$ 、 $K_2Cr_2O_7$ 、 HNO_3-HCl 、溴水等,这些氧化剂适用于难以氧化的金属或非金属元素的分析,如 Hg 、 Ag 、 Te 、 As 和 Bi 等。也还有将 $Fe(III)$ 、 $Au(III)$ 用作氧化剂的。

PSA 应用比较广泛,不仅用于无机离子的测定,而且可用于有机物的测定。利用 PSA 可直接测定的无机元素主要有 Pb 、 Cd 、 Cu 、 Zn 、 Bi 、 As 、 Tl 、 Ni 、 Sb 、 Hg 、 Mn 、 Ag 、 K 、 Na 、 Te 、 Sn 、 In 、 Se 、 S 及卤素等。利用 PSA 也可做间接测定,Payad 利用 PSA 在 H^+ 浓 $10^{-2} \sim 10^{-1} mol/L$ 的 HCl 介质中,在 $0.25 \mu g/ml Cd^{2+}$ 存在下,间接测定天然水或污水中 $0.5 \sim 10 mg/L$ 的溶解 O_2 ,检出限可达 $0.1 mg/L$;利用 $Bi(III)$ 同 NTA 及 EDTA 的络合性能,间接测定 NTA 和 EDTA;金利通等利用化学修饰电极还原电位溶出分析测定蔬菜水果中的维生素 C;利用络合置换反应,可间接测定 Sc 及血清中 Ca 、 Mg 等。利用 PSA 也可进行络合物的研究,Mannino 研究了 Pb 和酪蛋白的络合性能,进而研究 Pb 在牛奶中的作用;王国顺等研究了 $Cd(II)$ 与 SCN^- 的络合行为,用 BASIC 语言编写出从电位溶出数据中计算配合物稳定常数的程序;张寿松研究了逐级络合物常数的 PSA 测定方法;Jagner 介绍了 PSA 在络合滴定中的应用,分别对 Pb 、 Bi 进行测定,其测定范围 Pb 为 $0.1 \sim 10 mmol/L$, Bi 为 $0.025 \sim 2.5 mmol/L$ 。

在电位溶出分析法的应用中,不仅金属离子之间相互干扰,而且有些有机物也干扰测定。为消除干扰,近几年进行了一些研究。有人研究用 PSA 测定 Cu 、 Zn 、 Cd 、 Ga 、 Tl 、 In 、 Pb 、 Bi 时的相互干扰,其结果表明金属离子间的干扰可分为 4 种类型。其中最重要的为金属间互化物的形成及干扰离子有类似于氧化剂的作用,如 Cu 和 Cd 的相互干扰,就是这两种类型,建议定量分析要优先使用标准加入法,在混合物中逐个测定比同时测定几个离子要好。 Cu 对 Zn 的干扰一般采用加入大于 10 倍 Cu 浓度的 Ga 而消除。利用金属互化物的形成也可提高溶出分析的分辩率,在 Cl^- 或 ClO_4^- 介质中,PSA 测定金属离子,如 Tl 、 Hg 、 Pb 、 Zn 、 Cd 和 Bi 时,硫酸有一定的影响,当硫酸小于 $1 mmol/L$ 时,络合作用影响灵敏度,硫酸浓度较大时,电子转移占优势。因此浓度选择适当可

控制指定离子的灵敏度,甚至掩蔽某一离子。芳香族硝基化合物干扰 Cd 和 Pb 的测定,加入表面活性剂,干扰即可消除。有人对流动 PSA 用的单点校准进行了评价,认为最大误差是有机表面活性剂和螯合剂的抑制作用,故样品需完全矿化,用标准加入法可以校正重叠峰和金属化合物的影响。

(河南省职业病防治所秦文华、罗晓芳, 郑州大学秦化敏撰)

仪器分析法测定金属材料中铋 近年来,铋的仪器分析方法研究报道日见增多,尤其在冶金材料分析中对微量或痕量的铋的仪器分析研究进展较快。下面综述了原子吸收光谱法、原子发射光谱法、原子荧光光谱法、X 射线荧光光谱法和电化学分析法测定金属材料中铋的进展。

原子吸收光谱法 石墨炉原子吸收光谱法测定镍基体试样和铝、铅、锡、硅共存试样中的铋时干扰的消除研究有了进展。李报厚(1988)考察了铅在试样中的作用,提出用铅作为基体改进剂可消除负干扰。测定下限为 0.0002% ,方法简单、迅速、准确可靠。石墨炉原子吸收法固体试样直接分析技术具有不需要试样分解、分离和浓缩等预处理步骤的优点,因而分析过程短,避免了试样的沾污和损失。然而设计的固体进样品操作比较麻烦和合适的标准试样选择困难,影响固体进样法的广泛使用。柳志龙(1988)等利用自制的固体样石墨确定了石墨炉原子吸收法测定铜及铜合金中铋的最佳条件,无需改动仪器和重新加工石墨管,操作简便,定位迅速,使用寿命长,还采用温度不同的两个原子化相和以含有铜基本的铋标准液绘制检量线,铋的检出限为 $0.059 ng$ 、对 $0.0005\% \sim 0.004\%$ 铋含量的试样,测定的相对标准偏差为 10% 左右。张泰松(1986)报道用石墨炉原子吸收光谱测定银-铜合金中微量铋,基体元素的无干扰化学分离,直接用 5% 硝酸溶样后测定,方法简便迅速,铋的检出限为 1×10^{-5} 。变异系数为 5% ,试验表明,为铅量 50 倍或锡、铋量的 100 倍的铜、镁、铝、锌、铁、镉、钴、镍和锰均无明显干扰,大量氟离子有干扰。罗川等(1989)介绍了固体进样石墨炉原子吸收光谱法测定镍基合金中铋的快速简便方法,对含量为 $0.5 \mu g \cdot g^{-1}$ 铋的样品 15 次测定相对标准偏差为 7.5% ,该法亦采用铋的标准液加残余基体代替已知含量固体样品,解决了固体法中无标样的困难。W. Frech 等(1985)报道了二元腔平台石墨炉原子吸收光谱法测铋,原子化效应应用了 $L'vov$ 平台技术,试验了恒温原子化和应用了高温平衡计算,取得了良好结果。氢化物原子吸收法测定砷、铋等元素具有较高的灵敏度及精度。康继乐等(1988)年利用酸性介质中以硼氢化钾为还原剂,生成不甚稳定的共价氢化物(氯化铋、氯化砷),以氩气流进入热石英管中瞬间进行原子化测定,铋的特征灵敏度为 $0.005 ng/ml/1\%$,相对标准偏差 $< 5\%$,是测定钢铁中 $0.0005\% \sim 0.02\%$ 铋的高选择性方法。宣维康等(1989)研究了微型氢化物原子吸收技术,灵敏度高,装置结构简单,操作方便,应用于钢铁和镍基合金中铋的测定。氢化物发生和电热石英管原子化技术已经成为无火焰原子吸收光谱分析测定铋的一种灵敏方法。但该方法有如下缺点:载气和硼氢化钾(钠)分解产生的氢气对铋的稀释作用;在载气压力下氯化铋从反应溶液中释放不完全;载气压力不利于氯化铋的分解等等。为了改进这些缺点,张宝贵等(1989)采用在负压下产生和收集氯化铋,然后加入少量空气,用真空泵将空气与氯化铋的混合物吸收真空电热,石英管中,在原子化器中,所加入空气中的氧与硼氢钠分解反应生成水,因而消除了氢对测定铋的影响。同时,加氧或加入空气时铋的灵敏度可提高 1 倍左右。银基体存在下氢化物原子吸收法存在严重液相干扰,还可能在一定气相干扰。戴亚明等(1989)用氢氧化铁或氢氧化铝作载体沉淀试样中铋,然后在酸性溶液中测定,由于分离和预富集,提高了测定的灵敏度,且避免了乙炔银的形成及背景吸收。Z. Aneua 采用脉冲吸气技术原子吸收光谱测定纯铂中的铋,检出限为 1×10^{-7} ,相对标准偏差为 $1.4\% \sim 2.4\%$ 。J. R. Castill 等(1986)提出不用载气,采用挥发性共价氢化物直

接火焰原子吸收光谱法测定铜中的铋,检出限 $0.07\mu\text{g}$ 。近年来氢化物发生原子吸收光谱的研究报道较多,并已用于标钢、巴比合金、高纯铋、晒中铋的测定。

原子发射光谱法 周俊诒等报道了以 AgCl 、 CuO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 和硫粉组成混合缓冲剂,以铋为内标元素,采用直流电弧激发,在DGS-2—2米光栅摄谱仪上摄取一次二级光谱,同时测定硅酸盐类样品中微量及中、低含量的铋、锡、铊,具有成本低、简便快速、检出限低、精密度好等优点。有文献报道借氢化物发生感应耦合等离子体原子发射光谱法连续测定低合金钢中的铋、砷、和铋,铋的检出限为 $10\mu\text{g}$,周俊诒等还以 Al_2O_3 - SiO_2 - C - Zn - S - Li_2CO_3 - NH_4HCO_3 (1.5:1:2:1:2:1:1)为缓冲剂,以铋为内标元素,原子发射光谱法测定硅酸盐作基体的同时含有铜、锌、钨、钼、锡等的地质试样中的铋。按IUPAC定义的检出限计算方法测得检出限为 $0.3\sim 10\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。高纯度金属中铋的测定在光谱分析操作条件上有改进,如采用 Al_2O_3 覆盖层蒸馏法测铋,碳酸锂作缓冲剂的二氧化锡粉末法测定高纯铋中铋,以及高纯铋中铋。氢化物原子荧光光谱法分析是近年来发展较快的一种痕量分析方法,郑毅等研究了氢化物发生无色散原子荧光光谱法测定纯铋、铜合金和铸铁等材料中微量铋的各项最佳条件,基体干扰易消除,检出限为 $5.15\times 10^{-6}\mu\text{g}$,RSD为1.8%,有文献报道氢化发生等原子荧光光谱法测定矿石中微量铋,检出限为 $15\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。满瑞林等对氢化物分离富集、X-射线荧光光谱分析作了详细研究,方法灵敏度、准确度较高,可用于铋基、铋基合金等材料中痕量铋、铋、锡的测定。铜材料中微量铋的X-射线荧光光谱法是预先用 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 共沉淀铋, $0\sim 200\mu\text{g}$ 铋有良好线性关系,RSD为3%。另一方法是基于铋萃入软脂酸后用X-射线原子荧光法测定,获得满意结果。

电化学分析法 关于电化学分析法测定金属材料中铋的研究也相当活跃,主要在离子选择电极法、伏安法和极谱法方面取得进展。齐洪范等自制PVC膜四碘铋铋离子选择电极用于测定黄铜、易熔合金、锡合金中的铋,检出范围 $0.007\%\sim 42\%$,对应精度变异系数 $4.0\%\sim 10.1\%$ 。I. Toth等研究了无 H^+ 缓冲剂时硫酸离子选择电极测定铋。方法在抗坏血酸及DCTA存在下的三电极池(玻璃电极、硫酸离子选择电极、参比电极)中以 Na_2S 溶液滴定。测定范围 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{mol/L}$,误差1%,仰蜀薰等探讨了金属膜电极阳极溶出伏安法测定铋的最佳条件,采用以 KBH_4 为还原剂,使铋生成氢化物与基体分离, BiH_3 用水吸收。方法应用于铜和铜合金中铋的测定,检测范围 $0.05\times 10^{-9}\sim 1.5\times 10^{-8}$,变异系数3.1%。C. Locatelli等对二阶谐波交流阳极溶出伏安法进行了研究,在 1mol/LHClO_4 支持电解质中 $E_{\text{H}}=X-0.090\text{V}$,方法应用于铋铋样中铋的测定,检出限 10^{-9}mol/L ,相对标准偏差 $2\%\sim 3\%$ 。W. WKubiak等研究了汞柱阳极溶出伏安法,采用玻璃工作电极,不锈钢辅助电极和 $\text{Ag}-\text{AgCl}$ 参比电极,方法灵敏度高,准确,应用于测定锡基轴承合金中的铋。P. Cruendler探讨了经典的EDTA络合滴定与溶出伏安法相结合的高精度方法,以阳极伏安法滴定确定EDTA络合滴定的等高当点,设计了半自动滴相对标准偏差小于0.01%。A. A. Kaninh对测定磷化铋及铋的阳极溶出伏安法作了研究,以 $0.2\sim 0.3\text{mol/LHClO}_4$ 作支持电解质, $E_{\text{H}}=-0.9\text{V}(\text{vsSCE})$ 。日本学者应用差示脉冲溶出电极伏安法测定镀锌材料中的铋,方法在 $-0.2\sim 0.85\text{V}(\text{vsSCE})$ 记录差示脉冲伏安图,检出限 0.02×10^{-9} ,检出范围 $0.02\sim 4\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。苏雍荣等研究了铋与PAR配合物的极谱催化波,发现在峰电位为 $-0.65\text{V}(\text{vsSCE})$ 出现灵敏导数极谱催化波,铋浓度 $2\times 10^{-2}\sim 6\times 10^{-1}\mu\text{g/ml}$ 有良好线性关系,有用分离富集直接测定铋及磷化铋中的铋。刘立尧探讨了铋的导数极谱法测定,方法在 $1\%\text{VC}-2\%\text{Na}(\text{O})\text{Ac}-0.0001\text{mol/L EDTA}-0.2\%\text{KCNS}$ 体系中测定铋,阴极起始电位为 $-0.3\text{V}(\text{vsSCE})$,动态测范围 $0.1\sim 10\mu\text{g/ml}$ 。方法应用于二氧化锡中铋的测定。保醒群等研究发现5-Br-PADAP与铋形成配合物在强碱性条件下吸附于滴汞电极。峰电位 $-0.45\text{V}(\text{vsSCE})$,经717

阴离子树脂分离可消除多数干扰离子影响,检出限 0.05×10^{-6} 。铋 $0.1\sim 10\mu\text{g}/10\text{ml}$ 线性良好,变异系数5.6%,方法应用于化探矿物、锡精矿、花岗岩中铋的测定。此外李益恒也研究了铋-5-Br-PADAP络合吸附波形成为基础的单扫示波谱法测定铋,应用于纯铅铋的测定。Z. C. Ganzai-a-pere等对差示脉冲极谱法测定铋进行了考察发现脉冲振幅为 -50mV ,分辨能力及灵敏度高,检出限 10^{-8}mol/L 。

(上海第二冶金专科学校马聆聆、华菊如撰)

分光光度法测定铋的显色剂 chromogenic reagents of photometry of antimony 由于光度法具有简便快速、灵敏度高且仪器简单、容易普及等优点,因此铋的光度分析方法一直在进行广泛的研究和应用。随着有机配合物研究的新进展,人们利用不同的有机试剂使光度法测定铋有了新的突破,通过显色剂的选择,可以对光度法的灵敏度和选择性。现从各种显色剂的类型总结,以期对设计和合成高灵敏度、高选择性分光光度测定铋的方法和试剂有所帮助。

在铋的光度测定中,碱性染料显色剂占有特殊的地位。1927年埃格瑞伍(Eagriwe)报道碱性染料显色剂作为络阴离子与碱性染料反应的第一个元素,从此碱性染料光度法测定铋的工作继续发展,碱性染料作为各种元素的显色剂,铋占第一位,约占总文献数的五分之一。继埃格瑞伍之后,各种碱性三苯甲烷染料、碱性占吨染料和碱性醌亚胺染料用于测定铋的文献陆续出现。

分光光度法测定铋的显色剂概括起来有5大类,碱性染料、偶氮染料、酸性占吨染料和酸性三苯甲烷染料、安替比林及其衍生物以及其它试剂。碱性染料萃取-光度法测定铋最为普遍,只有新生态的铋(V)与氯离子形成的 $[\text{SbCl}_6]^-$ 才与碱性染料反应,其余价态的铋以及与这生成的各类化合物均不与碱性染料反应,所以用碱性染料测定铋时,需将低价铋氧化成五价。就碱性三苯甲烷染料而言,甲基绿和溴绿选择性最好,亮绿和孔雀绿选择性较差。但就灵敏度而言,情况恰恰相反,亮绿、孔雀绿和乙基紫等灵敏度较高($\epsilon\geq 10^5$),而溴绿、甲基绿灵敏度较低($\epsilon\approx 4\times 10^4$)。碱性占吨染料也有较高的灵敏度和选择性,碱性占吨染料罗丹明B及其衍生物报道较多(如罗丹明B、罗凡明S、罗凡明6G、和焦宁G)。碱性醌亚胺染料(如碱性蒽花红T、天青I、天青I及亚甲绿、亚甲兰、甲苯胺兰、劳氏紫、烟鲁绿、酚酞花红和耐尔兰)。也可和 $[\text{SbCl}_6]^-$ 形成配合物。碱性占吨染料在碘化钾的硫酸液中(有聚乙烯醇存在)与铋(III、V)形成络合物 $(\text{RB})_2[\text{SbI}_6]$ 可在水相中直接测定,手续简便快速,灵敏度更高,但选择性比前述方法略低。

偶氮染料中吡啶偶氮化合物[如4-(2-吡啶偶氮)-间苯二酚、2-(2-(2-吡啶偶氮)-对甲酚、2-(2-吡啶偶氮)-5-乙基对甲酚、2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5-二乙基苯酚、2-(3,5-二溴-2-吡啶偶氮)-5-二乙基苯酚、2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5-二甲氨基苯酚等],噻唑偶氮化合物[如2-(2-噻唑偶氮)-5-乙基对甲酚和2-(2-苯基噻唑偶氮)-5-乙基对甲酚等],新烟碱偶氮化合物[如4-(2-N-甲基新烟碱偶氮)-间苯二酚]和噻唑偶氮化合物[如1-(2-噻唑偶氮)-2-萘酚],其中大多数不与铋(III、V)反应,但是在酸性溶液中,这些染料的质子化阳离子能与铋(III)的卤络阴离子 $[\text{SbX}_4]^-$ 形成可被有机溶剂萃取的有色离子络合物,一般具有较好的选择杯。1,4-二甲基-1,2,4-三唑(3-偶-4)-N,N-二乙基苯胺则与 $[\text{SbCl}_6]^-$ 生成离子络合物,选择性亦很好。离子络合反应是: $\text{HR}^+ + [\text{SbX}_4]^- \rightarrow \text{RH} \cdot \text{SbX}_4$ (式中R表示上述偶氮化合物分子,X表示 Cl^- 、 Br^- 、 I^- 等卤离子)。

一般来说,铋(III)与酸性中吨染料荧光酮形成的配合物较难溶于水,但又必须保持在溶液中方可测定,故或采取添加聚乙烯醇、阿拉伯胶或动物胶增稳分散微粒的方法,或用与水不混溶的有机溶剂,如四氯化碳、苯甲醇、甲基异丁基酮等萃取配合物的方法加以测定。有文献报道,从强酸性溶液中进行萃取,可使光度测定的灵敏度和选择性明显提高,这类显色剂中荧光酮类有苯

基荧光酮、甲基荧光酮、二溴苯基荧光酮、水杨基荧光酮、9-(4-羟基苯基)-2,3,7-三羟基-6-荧光酮、4,5-二溴邻苯基荧光酮、邻苯基荧光酮、邻硝基苯基荧光酮、3,4-二甲氧基荧光酮和2,7-二羟基荧光酮等。某些三羟基荧光酮在安替比林及酸根阴离子存在下,可形成被有机溶剂萃取的多元配合物,以水杨在荧光酮和 ClO_4^- 及 SCN^- 为最佳。酸性三苯甲烷染料邻苯二酚紫和溴邻苯三酚红用于铈(V)测定的选择性较好。

安替比林及其衍生物[如二甲氨基二苯基安替比林甲醇、四甲基二氨基二苯基安替比林甲醇、4,4'-双-(二甲氨基)-3-硝基二苯基安替比林甲醇、4,4'-双-(二甲氨基)-3,3'-二硝基二苯基安替比林甲醇、4-二甲氨基-4-甲基苯基氨基二苯基安替比林甲醇(和4,4'-双(甲基苯基氨基)-苯基安替比林甲醇)等],在酸性溶液中以质子化的阳离子 HR^+ 存在,它们与 $[\text{SbCl}_6]^-$ 形成离子缔合物,可用于萃取光度法,且选择性好,反应为 $[\text{SbCl}_6]^- + \text{HR}^+ \rightarrow \text{SbCl}_6 \cdot \text{HR}^+$ 。在酸性溶液中,利用二安替比林甲醇的质子化阳离子 HDM^+ 与 $[\text{SbI}_4]^-$ 络阴离子形成的离子缔合物,也可作铈的萃取光度测定。硫代二安替比林甲醇也有类似性质可以应用,反应为 $[\text{SbI}_4]^- + \text{HDM}^+ \rightarrow \text{DAMH} \cdot \text{SbI}_4$ 。除上述几类显色剂以外,还有一些显色剂在文献中也有报道,如8-巯基喹啉、亚铁试剂、甲基红、二苯胺磺酸钠和2-硝基-4-甲氧基苯胺-1,3,3-三甲基-2-甲酰基吡啶高氯酸等,另外还有一些无机试剂磷相兰-碘化钾和碘化物也有应用,其中 $\text{Sb}(\text{III})-\text{I}^-$ 淀粉体系 ϵ 可达 8×10^5 。

综上所述,铈光度分析的显色剂灵敏度都较高,摩尔吸光系数 ϵ 都在 $10^4 \sim 10^6$ 之间,而以乙基罗凡明B和碘化物最高,其次是荧光酮类,和偶氮类,偶氮类以2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5-二乙基苯基酚使用最为广泛。由于各种类型表面活性剂的使用,使显色剂可以在水相中直接应用。在众多的显色剂中使用较多的是偶氮类和荧光酮类,它们在微量、痕量分析方面已取得了一定的进展。但是铈的显色剂一个共同的缺点是选择性不够理想,有时需要进行掩蔽和分离。因此,研究新的选择性好的显色和其它元素的掩蔽剂将是今后研究的方向。高灵敏度铈光度体系的研究和应用在化学分析领域是个富有成果、十分活跃的热点,高灵敏度显色剂的开发与高灵敏度光度体系的研究是高灵敏度光度法研究的两个不可偏废的方面,均应给予足够重视。

参考文献

- 1 Marzenko Z. Spectrophotometry and Spectrophotometric Determination of Elements. Wiley, 1986, 139~148
- 2 岩石矿物编写组. 岩石矿物分析(第1分册). 北京:地质出版社, 1991, 487~495
- 3 郑用熙. 分析试验室, 1992, 10(4): 1~28
(北京科技大学化学系朱腾副教授、戎斌撰;张静审)

单一稀土光度分析 the photometric analysis of individual rare earths

光度分析是普遍采用的简便而实用的分析方法,在稀土分析中占有相当大的比重。随着稀土的不断开发应用,对稀土元素的分析要求也在不断提高,不仅要测定稀土总量及轻、重稀土分量,还要选择性测定组成复杂样品中的单一或某几个稀土元素的含量。但要直接对单一稀土进行光度分析而不经化学分离是十分困难的,这已成为人们所关注的课题。翟庆洲等(1991)在报道La、Ce、Y光度分析后继续报道了其它12种稀土元素Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu的光度分析新进展。

通常用吸光光度法所测数值均为稀土总量。测定单一稀土的有效途径,其方法主要基于稀土的特征光谱及多元配合选择性体系,且多需采用掩蔽剂(如SSA、EDTA-Zn等),但由于掩蔽剂用量对显色反应常有不同程度的影响,难以使灵敏度和选择性都令人满意。任英等(1982)利用Ce-吡啶(STA)-CTMAB三元配合体系(Ce:STA=1:3),在 H^+ 浓度 $1.6 \times 10^{-7} \text{mol/L}$, $\lambda_{\text{max}} = 570 \text{nm}$ 条件下($\epsilon = 8.2 \times 10^4$),选择性测定了轻稀土中千分之几含量的铈,当 $[\text{CTMAB}]/[\text{RE}] > 600$ 时,La、Pr、Nd三

元配合物显色受到抑制。孙淑声等(1984)报道了在 H^+ 浓度 $3.16 \times 10^{-10} \text{mol/L}$ 的硼砂介质中以RE-漂兰6B(ECR)-(5-N-phen)-DTAB体系(配合比为1:2:1:8)选择性测定镧中铈的分析法。该体系灵敏度较高, $\epsilon_{633 \text{nm}} = 1.85 \times 10^5$,当采用双波长时可使灵敏度提至 $\epsilon_{633, 420 \text{nm}} = 2.14 \times 10^5$,该法在 $42 \mu\text{g/La}$ 存在下,铈在 $0 \sim 15 \mu\text{g}/25 \text{ml}$ 符合比耳定律。EG. Maksimiyuk等(1990)采用Lu-MTB-CPC配合体系,于 H^+ 浓度 10^{-10}mol/L , $\lambda_{\text{max}} = 635 \text{nm}$ 条件下,测定了矿质水中的铈。Mori等(1986)指出,Pr与ECR、2,2'-dipy、CTMAB可形成Pr-ECR(2,2'-dipy)-CTMAB四元配合物,配合比为1:2:1:6, $\lambda_{\text{max}} = 610 \text{nm}$,适宜 H^+ 浓度 $2 \times 10^{-10} \text{mol/L}$,体系可选择性测定镧中的铈。杨扬国(1990)研究了以pH6.0~7.2的 $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4-\text{HCl}(\text{H}^+$ 浓度 $3.16 \times 10^{-7} \text{mol/L}$)为缓冲介质的Ce-O-CIPF-CTMAB三元配合体系的光度特性,表明该体系灵敏度较高, $\epsilon_{525 \text{nm}} = 1.51 \times 10^5$,稳定性好(24h吸光度不变),配合物Ce-O-CIPF-CTMAB的组成为1:1:4, CeO_2 含量在 $0 \sim 10 \mu\text{g}/25 \text{ml}$ 时线性良好,100倍铝不干扰铈的测定,方法已用于铝合金中微量铈的测定。K. Yoshimura等(1987)基于铈离子能被交换到Muromac50W-X₁₂阳离子树脂上,借离子交换于 H^+ 浓度 $3.16 \sim 6.31 \text{mol/L}$ 酸性条件下测定树脂上的铈在740.5nm的特征吸收性质建立了稀土矿与合金中的铈的测定方法。此法具有分离与测定相结合的特点,提高了选择性。王献科等(1990)于 H^+ 浓度 $1.6 \times 10^{-10} \sim 10^{-8} \text{mol/L}$ $\text{H}_2\text{BO}_3-\text{NaOH}$ 介质中,利用Y-(5-Br-PADAP)-CPC-OP显色体系完成了Fe-Cr-Al合金及矿物中铈的测定。该体系灵敏度较高, $\epsilon_{580 \text{nm}} = 1.0 \times 10^5$,稳定常数 $\lg \beta = 9.84$,配合物Y-(5-Br-PADAP)-CPC的组成为1:4:3,工作曲线线性范围较宽, $0 \sim 45 \mu\text{g}/50 \text{ml}$ 符合比耳定律。徐钟秀等(1990)基于Gd-CPAPM-TritonX-100在 H^+ 浓度 $3.16 \times 10^{-5} \text{mol/L}$ $\text{HOAc}-\text{NaOAc}$ 介质中形成 β 型高灵敏配合物($\epsilon_{755 \text{nm}} = 1.82 \times 10^5$)性质,以磺基水杨酸钠消除其他稀土元素的干扰,对混合稀土氧化物、镍基合金及矿石中的铈进行了测定。邹时复等(1987)发现,在 H^+ 浓度 10^{-7}mol/L 的六次甲基四胺缓冲介质中, $\text{H}_2\text{QS}-\text{NIN}-\text{Nd}$ 三元配合物使575nm附近的峰红移至589nm,吸收增大7.6倍,建立了混合轻稀土中铈的测定方法。MJ. Hernandez等(1988)借PAN-TritonX-100体系在 H^+ 浓度 $2.5 \times 10^{-8} \text{mol/L}$ 时研究了铈存在下测定铈的可能性,当Pr/Er<20时,0.67 $\mu\text{g}/\text{ml}$ Er的测定误差约30%。该法对镧系元素的干扰借萃取法予以消除,对其他稀土的选择性欠缺,体系灵敏度适中($\epsilon_{535 \text{nm}} = 5.0 \times 10^4$)。目前用吸光光度法作单一稀土实际测定研究多集中于铈,而且测铈较为实用,这与铈(包括Lu、La)无特征 $f-f$ 跃迁以一般分析方法(如有效而简便的导数光谱法)进行测定研究难度较大有一定关系,因此人们往往重点研究其显色反应,从显色体系方面努力研究以期扩大稀土元素彼此间微小差异,从而达到测定铈(包括Lu、La)的目的。

20世纪50年代中期A. F. Giese首先提出导数光度法。任英等(1987)研究表明,在 1mol/LHClO_4 介质中,以铈的270.9(-)nm~276.2(-)nm作四阶导数光谱,可使测定铈的选择性明显提高,灵敏度至少提高了14倍,在15种稀土元素共存下成功地测定了铈。在对混合稀土氧化物中的铈和镧进行测定时,发现 Er^{3+} , 干扰 Yb^{3+} 的测定,但采取校正系数法以 $E_{391.9}^{3+}(-)$ nm导数峰成功地校正铈测定的干扰,同时以DBC-CPA为显色剂借二、三阶导数光谱成功地对轻稀土-钪中间合金中Ce、Pr、Nd进行测定研究。任英等(1990)研究发现在镧系元素 $\text{La}^{3+}(\text{p}^{3+}, \text{Nd}^{3+}, \text{Er}^{3+})-\text{Ferron}$ 体系中加入表面活性剂能形成新配合物,使其 $f-f$ 跃迁吸收谱线增强而峰形显著变化,铈和铈的吸收峰发生劈裂使导数吸收峰的灵敏度与选择性及测定的准确度均明显提高。高锦章等(1990)以 H^+ 浓度 $31.6 \mu\text{mol/L}$ 六次甲基四胺缓冲介质借TTA-TMPY(水相)及PMBP-AMPY二体系分别对混合稀土中的Pr、Nd、Sm、Eu、

Ho、Er 作了四阶导数光谱的直接测定研究,结果表明 Ln^{3+} -TTA-TMPy 体系中性质十分相近的以上 6 种稀土离子彼此互不干扰,而其他稀土在 400~600nm 范围内没有超灵敏跃迁,因而不干扰测定。而 Ln^{3+} -PMBP-YMPy 对 Pr^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Er^{3+} 四阶导数测定适宜,但二体系灵敏度均不高,制定的方法已用于钆富集物及镧钪钪轻稀土富集物中各单一稀土的测定之中,方法实用。N. N. Aleksandrova 等(1987)曾在 HCl 介质中对稀土的导数光谱进行研究,发现 10~300 倍的 Sm、Tb、Dy、Ho、Tm 不干扰钆的二阶导数光谱,可用于稀土中钆的测定,并用于相近量的 Pr、Nd、Dy、Tm 的同时测定,其检测限分别为 0.4、0.2、1.9、0.2mg/ml。V. T. Mishchenko 等(1988)探讨 Ho、Er 共存下(HCl 介质中)用导数光谱法提高测定选择性的可能性,结果表明导数光谱以二阶适宜于分别以 186.45、191.20nm 峰作 Ho、Er 的测定。在作 Ce、Tb 测定研究时发现,EDTA(0.01mol/L)可减小测定铈时铈的干扰。M. J. Mernandez 等(1987)利用 PAN-TritonX-100 体系在 pH9.2 于波长 535nm 处以导数光谱测定了商品玻璃中的钆。邹时复(1988)基于 Nd^{3+} 与 Tiron 配合使特征峰增强性质,建立了三阶导数光谱测定钆的分析方法,制定了适于以钆组为主的轻稀土混合物中钆的测定法,其相对误差小于 3%、较为适用。游文海(1988)研究了 HCl(10%)介质中 Pr、Sm、Eu 的导数光谱特性,建立了 NdCl_3 溶液中的 Pr、Sm 一阶导数光谱测定法及铈的二阶测定法,大量钆不干扰。除对上述导数光谱体系性质研究外,新的数学处理方法应用于导数光谱之中进行多组份同时测定的研究报道日趋增多,这方面研究难度较大。李金和等(1990)报导了以多波长累积法处理 AA-TritonX-100-RE 体系的研究,表明该法处理导数光谱可改善常规处理方法的灵敏度与准确度及检测限。S. F. Garcia 等(1987)研究了 1,4-二羟基萘酚光度法测定铈和铈的 530~590nm 的导数光谱,优化单独测定铈和铈的条件,采用图解法分析了铈(一阶导数)和铈(二阶)浓度比为 1:5~5:1 的混合物。目前在单一稀土测定中,导数光度法取得了较大进展,已提出了许多新体系及新的数学处理方法,除 La、Lu、Y 无特征 $f-f$ 跃迁方法欠缺外,其余稀土的导数光谱分析趋于成熟,尤其在提高方法的选择性方面有其独到之处,但此类方法灵敏度尚不够理想,工作多在毫克级水平的稀土分析,因而对其他稀土有选择性的灵敏度高的分析方法尚待研究。应该提出,目前单一稀土分析中导数光谱是最为实用可取的光度分析法。今后,新的体系导数光度法及将计算数学应用于导数光谱分析之中以解决相互干扰的导数峰的研究工作将会推动导数光谱的发展。

基于稀土元素与某些试剂以及稀土配合物与其他试剂取代反应的速度差异等,可建立动力学光度法测定单一稀土的新方法,但报道不多,工作难度较大。曾云翥等(1987)在研究稀土与 DBC-偶氮胂配合反应的动力学行为时发现,稀土与试剂反应速率常数随原子序数增大而减小,在稀土动力学研究中首先发现“轧断”现象。基于这一性质,王丽莎等(1989)在 0.24 mol/L HCl 介质中借 Pr、Er 与 DBC-偶氮胂反应速率的差异,用线性外推法制定了同时测定 Pr、Er 混合物中的 Pr、Er 的分析法。蔡汝秀等(1989,1991)又进一步研究了稀土与 DBC-偶氮胂配合物同 CyDTA 的取代反应,对多种显色剂及取代剂进行筛选,提出了以 DBC-偶氮胂-CyDTA 体系进行 Sm、Gd 同时测定的分析方法,测定 Sm、Gd 含量比为 1:2~4:1 样品时误差约 10%,同时对反应机理进行了探讨,并且利用停流分光光度法对配位反应动力学机理进行了研究。1991 年又提出了评价速率分析可行性标志——“速率值”的新概念。顾志澄等(1990)在应用 RE-ASN II-CyDTA 体系速率动力学法测定 Dy、Ho、Er、Yb 二元及 Dy-Er-Yb、Dy-Ho-Er 三元混合物中单一稀土时发现,当稀土彼此处于非相邻位置时样品测定的误差较小,而处于相邻位置时则较大,进而他们又将因子分析法用于速率动力学分析中测定了 Dy-Yb、Dy-Er 及 Dy-Er-Yb 重稀土混合物中的单一稀土。陈丹华等(1986)报导了以 TB-ASN 为试剂速率动力学法测定

Ho-Er 及 Dy-Ho-Er 稀土混合物中单一稀土的方法。可以看出,涉及稀土动力学光度分析研究的报道不多,尤其是其他稀土离子存在下组成复杂的样品中多种单一稀土的较为实用的测定方法则更少,且多系探讨性研究。

随着计算机的普及使用,人们逐步将吸光光度法与计算数学法及计算机技术相结合,用现代的数学分离方法代替繁琐的化学分离或掩蔽方法,以期达到多组份同时测定的目的。何锡文等(1988)将改进的因子分析法用于光度分析 MTB-CPB-RE 体系,对二元或三元稀土混合物中单一稀土成功地进行了测定,计算值与理论值一致。Y. Ren 等(1989)采用可变误差多面体法以 DBC-CPA 为试剂,在 658~622 及 590~588nm 共计 25 个读数处(每隔 2nm 测定并包含 548nm)测定吸光度,研究了其他稀土存在时测定铈的可能性,结果表明,在性质十分相似的 Ce、Pr、Nd、Sm 存在下对铈进行测定时误差小于 5%,具有实用性。赵凯文等(1988)在 RE-ASN(III)-EDTA 显色体系中,采用四因子一次回归正交试验以标准系列加入法获得了各稀土浓度对吸收峰高的变化率(偏微商),由回归方程建立偏微分方程组,求解可得单一稀土含量。该法已用于包头及龙南稀土中 La、Ce、Pr、Nd4 种稀土含量的同时测定。此外,尚见多波长回归法及电子计算机处理三波长数据(以 BASIC 语言程序)用于 Pr、Tb、Lu 的同时测定及钆存在下铈的测定的研究报道,用计算光度法进行单一稀土测定的研究极为活跃,方法能用于复杂物质(如混合稀土的分析),具有较高的实用价值,是其他光度分析法(除导数光度法外)不可比拟的,但如何将数学方法应用于光度分析将是该法亟待解决的主要问题。线性规则、因素轮换优选、因子分析、自浮因子分析、正交分解及可变误差多面体法等数学方法,在光度分析中的应用研究报道较多,而其他数学方法仍需进一步研究。

自 1975 年 J. Ruzicka 等发表第一篇流动注射分析 FIA 论文以来,FIA 即被广泛研究。FIA 应用最广的首推光度体系,而将 FIA-SP 方法用于稀土分析尤其是单一稀土分析的研究则很少,这与显色体系(适于 FIA)不易选择有关。陈德朴等(1990)曾研究稀土元素 FIA 的检出与测定,探讨了进样体积、载流及显色液对 FIA 输出信号的影响,对 ASN II、ASAPA、PAR、XO-CTMAB、ECAB 与稀土显色体系进行研究时发现,ASAPA 在流动注射体系中表现适于稀土元素的 FIA 测定。该体系仅 1~2s 即可达吸光度极大值,灵敏度亦较其他体系为高,而 PAR 体系选择性较差,有许多离子干扰测定,甚至对去离子水及试剂的质量要求也较高。XO-CTMAB 体系空白值较高且基线噪声大。ECAB 在手工分析中对稀土的摩尔吸光系数超过 $10^5 \text{L} \cdot \text{mol} / \text{cm}$,但其反应速度慢,因此不适用于在 FIA 中充分发挥其作用,ASN II 体系的灵敏度低于 ASAPA ($A_{\text{ASAPA-sm}} = 0.080$, $A_{\text{ASN II-sm}} = 0.066$)。在 FIA 中体系的选择至为重要,是研究工作中的主要影响因素之一。D. Cheng 等(1989)以 TCA、PF CPA 为试剂,分别用 FIA 对铈进行了测定,方法分析速率 90 样/h,虽然 Fe^{3+} 对铈测定产生干扰,但可用 1%VC 消除。V. Kuban 等(1988)用多道紫外可见二极管阵列检测 FIA 法测定稀土金属氧化物精矿中的 Pr、Sm、Nd,其相对误差小于 5%。此外,翟庆洲等(1991)基于 Jones 试剂还原 Eu^{3+} 至 Eu^{2+} ,借 M. B 还原 $\text{Eu}(\text{I})$ 褪色的原理建立了铈的 FIA-SP 分析法,已成功用于稀土矿中痕量铈的分析测定。由于 FIA 实用性以及光度分析的易于普及性,预计流动注射-光度分析测定单一稀土的研究将会得到进一步发展,在解决某些不稳定体系所存在的实际问题及使分析方法实现自动化,提高工作效率、满足科研与生产需要时将会发挥其特殊作用,尤其在线分析的应用上将会给分析工作以新的推动。此外,荧光光度、化学发光分析等新方法虽各有其特色,但亦有其不足。随着各种分析方法的完善和研究的深入,必将各用其所长使单一稀土光度分析中的难题(主要是提高灵敏度、选择性及工作效率)得到逐步解决,进而有效地推动单一稀土光度分析的不断发

副教授、曲敏高级工程师撰

原子发射光谱分析 火焰以其具有的稳定性好、仪器简单、容易操作等优点在发射光谱领域为人们广泛采用,并且是分析碱金属最有效的方法之一。李宁(1991)为满足生产控制的需要,用火焰光度法测定了 Na_2O 和 K_2O 。倪方荣(1990)从多个方面研究探讨了在用该方法测定血清和尿中的K、Na含量时如何发现和克服各种干扰的问题。杨文炳(1991)研究了用这种方法对钾、钠的测定,并做了与原子吸收法的对比实验。杨奇等(1991)用该方法测定了硝酸铀酰中的微量铯。郭小伟等(1991)用氢化物发生-火焰分子发射光谱法分别测定了水和地质样品中的砷,他们在研究测定地质样品中的砷的方法时,还提出了一种新的分子发射-长缝石英炉,通过实验证明,这种装置进行测定具有方法简单、操作方便、干扰少和线性范围宽等优点。黄慧明等(1990)利用石墨炉原子发射法测定了天然水中的Cs、铊和人造中的Rb,得到了良好的效果。黄朝表等(1990)用石墨炉原子发射法对某些易激发元素(如K、Na、Ba、Al等)的测定进行了研究,发现其灵敏度和稳定性都比石墨炉原子吸收好,并用这种方法测定了饮料中的铝。为了克服早期国产火焰光度计配套的空气压缩机的工作气流不稳定和压缩空气中形成的水珠,蓝荣鹏等(1990)设计制作了一种简单和使用方便的压缩空气缓冲瓶,它兼有稳压和除水珠的双重作用,经使用效果令人满意。除此之外,李传培(1990)介绍了如何延长奥立龙1020钾钠分子分析仪部件寿命的经验,柳友庄(1991)介绍了改进的火焰的光度计。从以上这些可以看出,火焰发射光谱依然是一种非常有生命力的方法,并且依然是一种不可缺少和忽视的分析方式。

电弧发射光谱法仍然是一种十分重要的AES分析方法,并且在基础研究和应用研究方面都取得了一些重要的进展。在过去的粉末电弧法中,用来增强痕量元素谱线的强度的光谱载体通常为易电离元素,许多文章也已经对其机理和应用进行了研究。但陈金忠等(1992)发现难电离元素 Sb ($E_1=8.64\text{eV}$)对交流电弧等离子体中痕量元素的光谱线强度有增强效应,因此他们对此现象进行进一步的研究。实验结果表明,难电离元素对电弧等离子体中的中等和高电离电位痕量元素发射强度的增强比易电离元素存在时有明显提高,并对中等电离元素的增强最佳。游新国等(1991)研究了在氩氮一直流电弧放电中的蒸发行为和激发行为,发现试样蒸发率小,但元素的蒸发率却较高,同时连续背景辐射(在非CN发射区)比氩氮控制气氛的要小。胡斌(1991)对氩氮一直流电弧放电中的氯化反应作了一些探讨,得出了很价值的一些规律。他们通过加入氯化剂对江西谷物试样和高纯氧化钪中的非稀土元素进行了分析,取得了满意的结果。他们还对直流电弧放电中的高温化学反应进行评述,他们对近年来国内外关于直流电弧放电中的氯化反应、氟化反应、碘化反应、硫化反应、碳化反应和氯化反应的应用和应用进展情况作了比较详细的介绍,而这对于电弧发射光谱法来说无疑具有重要的参考价值。

为了改善直流电弧的分析性能,梅二文等(1992)提出了一种用钨丝电热进样Ar控制气氛的直流电弧分析法,该法具有进样体积小、氩气耗量低、灵敏度较高、精密度高操作简单等优点。另外他们还介绍了一种新的微进样装置及激光光源-微电弧(1991)。在电弧发射光谱分析中,样品导入方法有着重要的影响。吹样法具有快速、成本低和重视性好等优点,王延龄(1991)对它的光谱分析特性和分析方法进行了研究,并介绍了一种用AH-2型光谱吹样装置实现的新型粉末电弧光谱吹样法。

利用谱线宽度来测定元素的含量,可以避免谱线自吸的影响,并使测定准确度和精密性得到改善。陈金忠等(1991)在原来宽度法的基础上提出了宽度差法。他们在考察了曝光时间、工作电流和显时间对分析线对宽度差影响后,指出了在测定光谱的定性和半定量组分时利用宽度差方法的可行性。在光谱的定性和半定量分析方面,陈文清(1991)在Q21型摄影仪上通过调整摄谱条件对利用加里宁等著的《光谱图线表》进行全定性含量估

计分析进行尝试。万光珍等(1991)介绍了光谱半定量分析的经验。此外,宁健民等(1991)对元素的共生组合发射光谱分析进行了研究。他通过对元素的地球化学特性,选用一个或多个元素的含量去估计另一个含量较低或检出限较高的元素含量,并提出了估算关系式和应用该式的注意事项。

在仪器的改进方面,杨爱华等(1991)在进口U3312型万用电源上设计并半安装时间自动控制单元从而消除由于手动控制而带来的误差,陈守余(1991)改进了SY-5型微样法光谱分析自动控制装置。

在应用直读光谱仪进行检测过程中,选用合适的高、低标样以校正各元素的分析校准曲线是不可缺少的一环。为使用方便,一般希望只用两个样标就可将10多条曲线一次校正完毕,这样即快速又省事,因此在考虑造标时各元素的含量的高低如何合理搭配是至关重要的。查立敬(1990)对此进行了探讨,指出了在选择标样过程中应注意的若干问题。姚泰焯针对其以前提出的校正干扰效应的数学方法,用BASIC语言分别在长城0520机和PDP-11微机上编定了程序,并改编了美国贝尔德公司DV-1光电直读光谱仪的分析软件,从而实现了样品分析中的联机校正计算。他已用统一的分析校准曲线成功地分析了高、中、低合金钢中的20多种元素,并且还建立了光电直读光谱仪的ACMS软折包(1991)。姚允贵(1991)亦在光谱计的微机改造及在分析中的应用上做了一些很有价值的工作。关于火花发射光谱法在应用方面主要是金属合金的分析。另外,赵秀峰(1992)利用这种方法直接测定了八氧化三铀中的钾和钠。

电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)是我国现代分析化学领域中研究最活跃和发展最快的分析技术之一,原子发射光谱中其所占比重明显增大,并且在各方面都取得了可喜的进展。ICP放电机理的研究是基础理论研究中很引人注目的研究课题。唐咏秋(1991)通过实验研究了造成ICP放电偏离LTE因素及其对分析谱线强度的影响,认为ICP放电对LTE的偏离是由一些不利于能量传递因素造成的,而改善工作条件和尽量消除这些偏离则有助于提高ICP的分析性能。刘志军等选用OH分子旋转谱线法、Boltramann斜率法和Boltzmann-Saha方程法,在不同操作条件下分别测定了等离子体中央通道的气体温度、激发温度和电离温度。他们测定气体温度是3740K,并且得出了电离温度 T_{ion} 、电子温度 T_e >激发温度 T_{exc} >气体温度 T_{gas} 的结果。他们还采用 H_β 的Stark展宽法,测定了在不同操作条件下等离子体中央通道中的电子数密度 n_e ,其值为 $1\sim 5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$,和很多人用其它方法所得到的结果相吻合,这比处于局部热平衡的电子密度 10^{14}cm^{-3} 约大两个数量级。孙大海等(1991)在测定Ca、Cd、Mg、Mn、Zn 5种元素的电离度 α 时,发现利用Sa-ha方程计算结果与Caughlin等测定的结果有所偏离,这也又一次证明了ICP是非LTE体系。显然,以上这些工作对于充分了解ICP的基本性质及激发机理是有很意义的。

干扰问题一直是人们关注的另一个基础问题。干扰机制的研究已受到人们较重视。徐方平等(1992)较系统地研究了钠、铝基体对不同电离能和激发能的谱线干扰效应,其结果干扰效应的大小与干扰剂性质、分析物性质、分析谱线特性ICP操作参数有着密切的关系。他们较详细地讨论了产生干扰的原因,提出了可用于统一表征各类非谱干扰与分析物挥发、D的子化、激化、电离过程依赖关系的“干扰函数”概念。孙大海(1991)发现经典的Ca-Al干扰体系在ICP-AES中仍然存在。这种干扰的纵向空间分布与其它元素的基体效应不同特别在低观察区Ca、Al之间呈现较为明显的相互抑制效应,这表明它们之间产生了溶质挥发干扰。这种干扰可通过优化操作参数使之减至最小。莫国宁等(1991)亦对ICP-AES中钙、镁基体效应及机理进行了研究。孙大海等还测定了Ca、Cd、Mg、Mn、Zn 5种元素的电离度 α 在ICP中的空间分布,观察了基体元素以及正向功率与载气流速对电离度 α 的影响。结果表明元素的电离度与ICP的激发特性没有直接关系;基体元素及操作条件对电离度 α 的影响很小。杜崇明

(1991)对 ICP-AES 中基体效应与激发温度之间的关系进行了探索,由此得出了干扰元素的加入并不能降低激发温度 T_{exc} 的结论。他认为基体效应的产生当属某种尚未被证实的非热效应起作用,并且提出基体干扰元素的加入与否对电子密度 n_e 几乎毫无影响。陈浩等(1992)研究了流动注射-ICP 光谱分析中的基体效应和酸效应,并认为载流中一定量基体元素存在,是消除或降低基体效应的有效方法。叶苑才(1992)观察了用多道 ICP 光谱仪在不同载气流速下 14 条常用的、具有不同特性的谱线信号,研究了它们相关性和变动特征,得出以下结果: E_{exc} (激发能)+ E_{ion} (电离能)相近的谱线信号间存在着很好的相关性;载气流对信号相关性的影响显著,流速越大相关性越差,反之亦然;如用一个内标元素作为具有不同特征性谱线的内标,对提高精密度而言,低载气流速最佳。

测定有机试样中痕量金属元素在 ICP-AES 中占有重要的地位。杨金夫等(1991,1992)对 ICP-AES 在有机试液直接分析中实际应用的进展作了比较全面的评述,并讨论了近年来“有机 ICP”的放电稳定性、激发特性、光谱特性及分析特性的研究概况。另外,他们还研究了乙醇对稀土元素的光谱强度的影响,同时研究了乙醇对 ICP 激发温 T_{exc} 、气体温度 T_{gas} 、电子数密度 n_e 以及易电离元素基体效应的影响,并讨论了“有机 ICP”的局热平衡特性及扩张特性。陈建国等(1991)研究了 ICP 中有机溶剂对稀土元素的增敏效应。杜一平等(1991)考察了在小功率空气-氩气冷却的 ICP 中,以 MIBK 为溶剂时,不同分析谱带随空气含量变化情况,特别是冷空气中含量为 50% 时 ICP 中各种分子谱带对 12 种元素的 28 条灵敏度的影响情况。结果表明,是空气-氩气 ICP 可以有效地抑制 C_2 及 CN 分子谱带的发射(Ar ICP 相比较),减轻或消除它们对分析谱线的光谱干扰,并且不存在有机物在炬管口处造成的碳粒沉积问题。因此他们认为利用空气-氩所 ICP 进行机溶液中无机元素的测定可具有比氩所 ICP 更在的优越性。

在小功率空气冷却 ICP-AES 的性能研究方面,朱世盛等(1991)谱做了许多工作。他们测定了空气冷却 ICP 中 Li、Na、K、Cs、Be、Mg、Ca、Sr 和 Ba 9 个元素的 48 条谱线的信背比 SBR 和检出限 C_L 。结果表明,电离能较低的碱金属也存在离子线优势,并发现波长较长的分析线 C_L 接近于优于全氩 ICP,而短波长的谱线则不如氩 ICP。

ICP-AES 的非光谱干扰效应(或基体效应)多采用补偿法和操作参数的优化来减小或消除,直接校正方法的报导则较少。陈浩曾采用校正因子法来校正 Y_2O_3 基体造成的非光谱干扰。他们考查了 ICP 操作参数对校正因子的影响,详细试验了校正因子的稳定性,并认为它是一种简单可行的方法。

光谱干扰是电感耦合等离子体发射光谱法中最重要的干扰之一,所以人们对此颇为感兴趣。朱世盛等在用小功率空气冷却 ICP-AES 的研究碱金属和碱土金属的分析特性时,为了解可能存在的光谱干扰,测出了 Li、Na、K、Cs、Be、Mg、Ca、Sr、Ba 的灵敏线及 9 个常见共存元素(Al、Ca、Cr、Fe、Mg、Mn、Ni 和 V)的光谱重叠扫描图。李超隆等(1991)研究了基体元素对稀土元素的光谱干扰情况,并提出减小或避免这些干扰可行的途径。郑建国等(1991)发现一些基体如 Ca、Mg、Al 以及一些过渡金属其浓度较高时也会产生连续辐射。为了认识 ICP-AES 中不同基体样品分析中鉴别和校正背景位移干扰及选择最佳操作条件,他们对此进行了研究,揭示了一些连续辐射与基体元素性质的关系,并认为对于所有基体来说,当其浓度较高时,都会产生一定的复合辐射与韧致辐射,尤其是韧致辐射更为普遍。与此同时,为了进一步了解 ICP 中基体连续辐射的机制,他们还考察了不同观测高度、不同功率、不同载气压力及不同横向距离等条件下其连续辐射强度受操作条件影响与 n_e 和 n_m 的变化轮廓是一致的,也是直接相关的,但 T_e 的影响却很复杂。一方面 T_e 的增高使 n_e 和 n_m 增大,连续辐射强度也增大;另一方面, T_e 增高电子动能加大,碰撞复合到原子各能级的几率,从而改变连续辐射强度的波

长分布。

黄志荣(1992)对摄谱分析中用于干扰系数校正光谱干扰的方法进行了研究,测定了钨基体对 14 种稀土杂质元素 20 条灵敏分析线的干扰系数和钨基体对 14 种稀土杂质元素 40 条灵敏线的干扰系数,有效地校正了相应基体造成的光谱干扰,获得了满意的结果。刘宁等(1992)对 40 种元素的光谱进行探讨,并建立了相应的干扰系数表。陈克仁等(1992)将矩阵计算模式用于标准加入法,他们认为在多组份测定时这种方法可使基本影响、光谱干扰及时间漂移同时消除。杨金夫等考察了数值微分技术校正光谱干扰的能力,指出导数光谱和常规光谱法相比,导数光谱法由于其较高的分辨能力而使干扰等效浓度显著减小,并且与传统的干扰系数法和高峰分析法相比它有更大的适用性,当分析物浓度低时这种方法可以得到更准确的分析结果。此外,他们还讨论了数据平滑和扫描步长对导数光谱影响以及产生这些影响的原因,比较研究了导数光谱法常规光谱法的信背比,传统检出限和真实检出限。张卓勇等(1992)将自腹型曲线分辨方法(SMCR)应用于 ICP-AES 谱线重叠干扰的校正,并就测量误差对重叠光谱解析结果的影响作了详细的讨论。他们用此法校正了 Nd 359.259nm 对 Sm 359.260nm 和 V 328.939 nm 对 Yb 328.937nm 的谱线重叠干扰,得到了比满意的结果。杨金夫等利用 Klalman 滤波校正了 ICP-AES 中的线翼干扰。他们通过测定 Y(1.58g/L)基体中的 La 得知,这种方法不仅可以获得可靠结果,而且由于它可以补偿在扫描过程中的波长位置漂移从而还可以减小干扰对真实检出限的影响。孙大海(1992)在 ICP-AES 中光谱干扰计算模拟方面做了大量的工作,这些工作对于预测实际分析中的光谱干扰无疑是十分有益的。与谱线表及极样品预扫描相比,这种“软件”的方法具有许多优越性,但目前它离实际应用还有一段距离。

进样技术亦是比较活跃的研究领域之一,发表的文章比较多。陈建国等(1992)采用脉冲进样研究了分析微体积试样的方法,分析灵敏度可提高 6 倍,绝对检出限也明显优于连续进样法。流动注射技术以其具有微量、密闭、重现、快速等优点已在 ICP 中得取了比较广泛的应用,它和原子光谱分析相结合产生了许多新的进样技术,如在线预浓集、在线稀释、在线分离萃取和梯度校正等。范世华等(1991)介绍了原子光谱分析中几种代表性的流动注射校正方法的原理、操作及应用。彭学军等(1992)对影响流动注射分析信号主要受载液流速、载气流量和进样体积的影响。张卓勇等采用积分测量方式研究了以流动注射进样的 ICP-AES 分析方法以及 NaCl 基体的干扰效应。结果表明,基体在雾化传输过程中的影响不是主要因素,基体效应主要是由等离子体中的气溶胶微粒的蒸发、原子化和激发过程发生的。另外,范世华、彭学军、沈著等、王小茹等、高汉山等都报道了他们在流动注射与 ICP-AES 联用技术方面的应用研究结果。电热蒸发进样(ETV)与 ICP-AES 联用可改善检出限及进行微升体积的样品分析,因而对生物、环境、临床医学等许多领域有独到之处,是一种很有潜力的痕量分析手段。黄敏等对此技术进行了评述。此外,他们研究了其蒸发过程,探索了对分析及平台技术,并用聚四氟乙烯(PTFE)悬浮体为卤化剂测定稀土元素。彭润中(1991)研究了电热雾化器及其在 ICP-AES 联用的蒸发温度、载气流速和蒸发器容积等因素对分析信号的影响,并测定了实际样品中的 Cu 和 Mn,所得结果较好的与 GFAAS 相吻合。为了克服注入石墨液体试样常产生的飞溅现象,张生民等研究了断续喷洒去溶电热法在 ICP-AES 中的应用,探讨了提高其相对检出能力的途径。王廷龄等(1991)利用自己研制的装置对热化学法进样进行了详细研究,其具体做法是在高温下将样品的被测元素通过化学反应转变成低沸点卤化物,而后从样品的基体中蒸馏出来被载气引入 ICP 炬。由于考虑被测元素的蒸馏富集,所以使用的样品和反应剂量比较大,因此他们使用装置与一般的 ETV 有所不同。林添明等(1991)在其原有工作的基础上对 ICP-arc 加长炬管、ICP 加长炬管及常规管的性能作了比较,认为 ICP-arc 加长炬管元素谱线背

遍增强的原因是由于延长了 ICP 通道的高温状态,增强了分析物的停留时间从而提高状态和原子化效率所致。实验表明,这种 ICP-AES 粉末直接进样法基本上消除矿石试的粒度效应。另外,他们还提出了一种 ICP-arc 分析时的微机自控微机装置。氯化物发生法进样技术因可大大改善一些元素的检出限而被人们所采用,张卓勇、增克津等对这种技术中化学干扰研究进展进行了介绍,秦凤州等报导了他们自己设计的小型多用雾化氯化产生器系统,陈治江等介绍用于 ICP 光谱法同时测定氢化和非氯化元素的氯化物发生装置。在本评述年段内有关雾化器方面介绍或研究还有,半自动式卸式循环雾化器,ICP 光谱分析用超声雾化器、耐氢氟酸的 ICP-AES 高盐雾化器、CMK 型停留雾化器、小记忆效应雾化室及 ICP-AES 中气动雾化器和起声器的比较等。

ICP-AES 光谱仪器方面的研究报道,除了黄林玉等、黄本立等和赵永魁对中阶梯光栅光谱仪的原理和发展动态进行了介绍和评述外,其它方面还有:PDA 光谱仪的分析性能、光谱干扰校正器的研究、JY70P 等离子体光谱计通讯的功能的开发、ICP 扫描单色仪的快速找峰系统、简单的 ICP 光电直读光谱仪、Atom Scan 2000 型顺序等离子体发射光谱性能初探、JY50 多道扫描直读光谱仪、Plasma I 型发射光谱仪使用知识介绍、ICP 光谱仪的维修和应用、J A2500 射频发生器及维修、J-All60 等离子体发射光谱仪的故障排除和维修、ARL-ICP 光谱仪的高频发生器的电路简析与故障检测、用国产聚四氟乙烯对进口 ICP 高频线圈的修复、计算在 ICP 光谱计计算分析结果上的应用、用 PC-1500 计算器对稀土元素 ICP-AES 摄谱数据的简便处理、ICPQ-100 光谱仪数据快速处理功能扩展及 ROM 内处理程序读取和列表等。

直流等离子体原子发射光谱法(DCP-AES)应用研究不如 ICP-AES 和 MIP-AES。张俊芬(1992)采用倒“Y”型 DCP 装置和中阶梯光栅谱仪测定了高纯(99.99%)氧化镧、氧化钇中痕量稀土杂质元素。由于仪器具有很高的线色散率,因而方法具有灵敏度高、干扰少的特点。王绪仁(1991)用这种方法基体匹配的条件下直接测定了钆中的杂质,得到了比较好的结果。陈恒武(1992)采用氯化物发生进样装置测定了痕量砷,具有较高的分析灵敏度。

微波感生(或诱导)等离子体原子发射光谱法(MIP-AES)已成为许多元素特别是金属元素和气体元素最有效的测定方法。俞世荣等(1990)比较详细地研究了 MIP-AES 的分析特性,发现等离子体长度随微波功率和载气流量的增大及放电管内径变小而加长,同时水对其放电有较大的影响,而过多的 HCl、有机物和无机物谱会影响稳定性。微波功率较低时,“软线”强度随功率增大而增加的速度较“硬线”快;而较高实验条件的改变,谱线强度与激发温度的变化没有明显的相关性。张金生等(1992)系统地综述了 MIP-AES 在测定痕量非金属方面的应用,并且对此进行了研究,他们用气体发生 MIP-AES 测定了溶液中的 S^{2-} 和 SO_3^{2-} 用 Ar MIP-AES 测定了 I 和 P、He, MIP-AES 测定了 Cl、Br、I 和 P。金钦汉等(1991)对易电离元素(EIE)的研究表明,易电离元素对所有易电离元素的蒸发和去溶都起重要的作用,而对激发过程的影响更大并且复杂。俞世荣等探讨了超声雾化测定铝的条件,检出限为 $0.34 \mu\text{g}/\text{mL}$ 。张寒琦等(1992)提出了一种用于 MIP-AES 的超声雾化-脉冲进样方法,该法与一般超声雾化-连续进样的区别是先关雾化器的电源开关后进样。此种进样方法大大降低了引入 MIP 中的样品量,提高了 MIP 对高盐分溶液的承受能力,从而使检出限和精密度都有所改善。于爱民等(1991)对常压微波等离子体谐振腔进行了改进,改进后的装置较圆柱形和炬管形谐振腔基体效应小。张寒琦等研制 MIP 油光谱分析仪可用于航空润滑油中的一些磨损金属的测定,结果令人满意。富杰等(1991)用二维光学多道分析仪研究了低气压表面微感耦等离子体的光谱辐射特性,经过 Abel 交换后,得到了各种气压和微波功率下等离子体辐射光强和激发温度的空间分布以及其变化规律,并对此等离子体的激发机理进行了讨论。

MIP AES 作为气相色谱(GC)检测器的应用日益广泛。于爱民等提出了一种新型 MIP-AES 检测器(ArMIP 离子化检测器),并用这种装置测定了白酒中的乙酸乙酯,该装置由 Surfatron、石英放电管和检测管构成,由表面激发生产氩等离子体,由于等离子体工作气体不经过检测管,所以减少了对检测信号的影响。这种装置对乙酸乙酯和苯胺灵敏度分别为 $3.3 \times 10^{-11} \text{g/s}$ 、 $2.5 \times 10^{-12} \text{g/s}$ 。贾崇荣等考察了 GC-常压 MIP 等离子体发射光谱系统操作参数及最优化条件,发现 F、Cl、Br、I、和 S 元素应选用较高微波功率;对 C、H、D、O 和 P 元素应选用较低微波功率(50~60W)。而 F、Cl、Br、I、C、H、D 和 O 元素应选用 He 流速,P 和 S 则在大构 $30 \text{mL}/\text{min}$ 的 He 流速时发射信号最强。对大多数元素来说等离子体中心是最佳观测位置。他们还用 GC-MIP 法测定了氙标记激素样品实验式。金钦汉等对他们提出的改进型 MIP 装置(他们称之为“微波等离子炬”MIP,其光学结构和炬管结构都类似 ICP)的基本性质进行了认真地研究,发现激发温度和发射强度在炬管顶部以上 $6 \sim 7 \text{mm}$ 处有极大(二者具有相同的峰值高度),通过对电子温度、电子数密度、气体温度、激发温度和电离度的研究表明 MIP 为非热力学平衡体系。MIP-AES 用于铜、锌、镉、银、汞的测定,检出限均在 ng/mL 数级。

亚稳态能量转移发射光谱法(MTES)的应用已有一些报道。于爱民等提出了一种利用 Surfatron 表面波激发获得活化氮和采用电热蒸发微量进样的装置。他们利用这种装置测定了痕量铅和水样中的痕量汞,在波长 235.7nm 和 283.3nm 处,测得汞和铅的检出限分别为 0.02ng 和 0.12ng 。实验样品分析亦获得满意结果。此外,他们还通过将汞及有机化合物引入活化氮余辉中对 Surfatron 表面激发-活化氮诱导亚稳态能量转移机理进行了初步探讨,发现 Surfatron 激发放电等离子体发射光谱与活化氮余辉发射光谱显著不同。

激光增强电离光谱法(LEIS)属光电流光谱法,其测量信号是激发态电离引起阻抗变化,而不是测量激发态所发射的辐射能,因而与一般发射光谱不同。但其光谱特征与发射光谱相同。其主要优点是噪声低、检出限好(对于火焰 LEIS,检出限可改善 $2 \sim 3$ 个数量级)、光谱简单等优点。晏于模等(1991)用可调谐染料激光器激励火焰中的 Rb 原子,使其从基态跃迁到高激发态下的激光增强电离光谱。范永昌等(1992)采用非干扰实时光谱诊断检测手段,对 SeCl 准分子激光烧蚀沉积 Y-Ba-O 高温超导薄膜过程中等离子体辐射进行了研究。光谱分析结果表明,由靶面射出的沉积粒了仅有 Y、Ba、Cu 原子和 YO、BaO、CuO 分子,而且还有大量的一价和二价钇、钡、铜离子。实验中还探讨了发光辐射与激光能量密度及其充氧压的变化关系。晏于模等观察到空气-乙炔焰中的波长 283.0nm 附近的 OH 自由基化光谱(对应于 $X^2 \Pi \rightarrow A^2 \Sigma (v=0-1)$ 跃迁),对 Pb I 283.305nm 共振激发检测线产生严重影响。因而认为,要发展 LEIS,火焰中自由基激光离化的基础研究是十分重要的。

辉光放电灯(GDL)作为原子发射光谱法激发源及作为原子光谱法离子源的研究越来越受重视。但在本评述年段内,在我国的研究报道则较少。赵惠林等(1991)提出的 Grimm 辉光放电灯发射光谱分析微量溶液样品化学成分和对镀锌板钝化防护层的逐层分析方法是十分有价值的。他们将 $25 \mu\text{L}$ 样品溶液(用腐蚀手段取得微量溶液)滴在直径为 25mm 、厚为 4mm 的铜片上,干燥后用作辉光放电灯阴极,解决了微量样品和不允许表面作较大破坏部件的组分析问题。

电荷转耦合器件(CCD)和电荷注入器件(CFD),是一种类型的固体成像器件。由于具有优越的分析性能而受到发射光谱分析家的关注。闻国钧(1991)对 CCD 作了介绍。杨经国等(1991)采用 2048 无线阵 CCD 为辐射检测器,配以微机而构成光学多道分析仪。该系统可直接打印结果和绘制完整的光谱图,在 $400 \sim 600 \text{nm}$ 波段一次可采集光谱范围对小型光谱仪为 200nm ,对 2m 光栅摄谱仪 40nm 。化学计量学和计算机在 AES 中应用越来越广泛,关于这方面的专门报道还有:插值法处理摄谱数据、分析校准

曲线的相关校准法、ICP-AES 分析的线性回归校准曲线、快速自动测试平面光栅光谱衍射效率曲线的一种新方法、APPLE-1 计算机控制光谱谱板半自动测光及数据处理系统、AES 智能化和专家系统计算机在 AES 定量分析数据处理中的应用。还有对谱线自吸与自蚀的探讨、光谱分析中重大值测光法测光误差的消除、小型“WPL”摄谱仪的改进、垂直对称式平面光栅摄谱仪色散率公式实验修正、WP-075 型平面光栅摄谱仪的主要性能介绍、用单片机做的光谱数据记录装置、摄谱仪面板盒的改装、光谱用电极的研究、光谱用电极再生改装、光谱用电极的研究、光谱用电极再生装置、改进制样方法提高光谱分析稳定性的研究、地球化学统一光谱标准简介等。这些报导提供了 AES 仪器使用和进行分析时值得重视的重要知识和经验。

(南开大学化学系沙传南、黄志荣、陈新坤撰)

激光光声光谱和光热光谱分析 laser photoacoustic and photothermal spectroscopy 广义而言,激光光声光谱和光热光谱分析都是基于测量物质吸收激光所产生的光热效应的一类吸收光谱技术,其灵敏度比一般吸收光谱法高几个数量级。目前激光光声光谱和光热光谱分析已成为气态和凝聚态物质的高灵敏检测技术,在物理、化学、生物、医学、环境、材料等领域有着广泛的研究和应用,其重要性正逐渐为人们所认识。

激光光声光谱分析的基础是光声效应,它是基于物质吸收辐射光,通过无辐射弛豫产生的声波或其它热弹效应。1880 年贝尔(A. G. Bell)发现了光声效应,并正确指出了光吸收与光声效应内在的依赖关系。随后丁铎尔(J. Tyndall)、伦琴(W. C. Rontgen)、梅卡迪耶(M. C. Mercadier)、普里斯(W. H. Preece)等在实验上证实了光声效应。梅卡迪耶和普里斯还对光声效应产生的机理进行了理论探索。此后 50 余年中光声效应的研究进展缓慢,基本处于停滞状态。1938 年维安杰罗夫(M. L. Viengerov)仔细研究了气体的光声效应,在此基础上勒夫特(K. F. Luft)等设计出商品化气体光声分析器,才使光声光谱开始在气体分析中得以应用。但由于微弱信号检测技术的限制,光声光谱的研究和应用仅限在少数气体。激光技术的兴起,使光声光谱技术焕发青春。1968 年克尔(E. L. Kerr)等人首次采用二氧化碳激光器作光声光谱的光源,研究了气体的弱吸收。1971 年克罗策(L. B. Kreuzer)等人用激光器和灵敏微音器检测了多种气体。1974 年出现了定型的激光光声光谱仪。1977 年拉赫曼(W. Lahman)等以氦离子激光器测定了溶液中的 β -胡萝卜素。

激光光源在光声光谱分析中的应用,促进了光声光谱仪器的研制和生产。早期激光光声光谱仪大多采用连续波激光加以斩波,近年来脉冲激光器的使用已占优势。激光光声光谱仪中核心部件为光声池和与之相连的声传感器,已经设计和研制出各种类型的光声池用于气体、液体、粉末、凝胶等样品的激光光声光谱研究,声传感器则多为微音器和压电式传感器。随着气体、液体和固体光声光谱理论的提出和不断完善,激光光声光谱分析广泛用于弱吸收、高光散射、非透明和不均匀样品的检测,用于气体和液体样品的检测灵敏度已分别达 $10^{-10}/\text{cm}^{-1}$ 和 $10^{-9}/\text{cm}^{-1}$ 光吸收。

在气体分析中, SO_2 、 NO_2 、 NO 、 NH_3 甲酸、乙酸和甲醛的激光光声光谱检出限在 ppb 以下, 乙烯等可达 ppt, 已用于大气污染物检测。对固体样品分析, 激光光声光谱不需对样品进行特殊制备, 还可将溶液吸附在固体树脂上进行痕量检测。泽田嗣郎(Y. Sawada)和邓延伟等对液体激光光声光谱分析进行了系统研究, 研究过 Am、Cd、Ce、Co、Hf、Hg、Mn、Nd、Se 等的激光光声光谱检测, 砷-亚硝基萘酚的检测限为 0.64ppt。在生物医学领域, 激光光声光谱分析不仅用于生物分子的测定, 而且用于研究和探讨生物医学方面一些前沿与机理性课题。如对发芽抑制剂的测定为马铃薯储藏提供可靠资料, 对血管组织的层结构分析和深度检测可诊断出正常与病变组织。

1979 年巴雷特(J. J. Barrette)等提出的激光拉曼光声光谱

是将受激拉曼散射与光声检测相结合的一种新的非线性光谱技术, 在气体和液体微弱吸收和痕量分析方面收效显著。1977 年, 古特费尔德(R. J. Von Gutfeld)等人首先将激光光声显微镜用于微区分析和无损检测, 不仅可获得物质表面状态, 而且还能获得物质内部的不规则部份、掺杂物质浓度等信息。已在探测材料表面及介而下层的状态, 不规则部位、裂缝、杂质和范性形变等方面发挥着重要作用。为提高激光光声光谱分析的灵敏度和选择性, 激光腔内光声光谱, 激光光声低温光谱和激光光声时间分辨光谱等研究也比较活跃。阿达玛变换等调制光谱技术用于激光光声光谱成像, 具有分辨率高, 选择性好, 信噪比高等优点。随着激光光声光谱研究的深入, 各种适用于色谱、电泳分离技术的激光光声检测器相继出现, 灵敏度大大高于紫外检测器, 但多数工作仍处于定性、半定量水平。

人们在研究激光与物质相互作用时, 观察到了一些光热效应, 并建立了相应的激光光热光谱分析方法。目前应用较多的是基于热透镜效应的激光热透镜光谱和基于展景效应的激光光热偏转光谱。它们所依据的原理都是检测待测物质吸收激光后通过无辐射弛豫释放热能引起折射率的改变, 不同之处仅在于前者探测折射率的变化梯度, 后者探测光程范围内折射率的曲率变化。1964 年戈登(J. P. Gordon)等发现热透镜效应。1977 年多维厅(N. J. Dovichi)等将其用于痕量分析, 建立了热透镜光谱分析法。1980 年, 博卡拉(A. C. Boccara)等首先将展景效应用于光谱研究, 建立了激光光热偏转光谱分析法。

从 1979 年激光热透镜光谱在分析化学中应用以来, 多维奇、泽田嗣郎、金巨广和邓延伟等人进行了大量的研究。已研究出多种光学构型的激光热透镜光谱测量装置, 并进行了 20 余种金属元素以及 50 余种有机物质的激光热透镜光谱分析研究。灵敏度比传统吸光度法高 2~3 个数量级, 可检测的最小吸光度达 $10^{-7}/\text{cm}$ 。诺兰(T. G. Nolan)等用激光热透镜光谱进行氨基酸检测, 在探测体积中可检测到 50 个分子氨基酸。激光热透镜光谱用于混合物两组份和 H^+ 浓度的同时测定, 也取得了令人满意的结果。时间分辨光谱技术和导数光谱技术用于激光热透镜光谱分析已见报道, 其功能和作用有待进一步开发。激光热透镜光谱与流动注射、液相色谱和毛细管区带电泳等分析技术的联用研究十分活跃, 已显示出良好的应用前景。

目前激光光热偏转光谱的检测分为共线式和横向式两种, 其光学构型则分腔内和腔外。一般说来, 激光腔内光热偏转光谱较腔外光热偏转光谱的灵敏度高, 花菁染料的检测限可达 10^{-11}mol/L 。为进一步提高激光光热偏转光谱分析的灵敏度和选择性, 阿达玛变换激光光热偏转成像光谱、激光光热偏转时间分辨光谱、激光光热偏转低温光谱和加压池激光光热偏转光谱等研究已初见成效。目前激光光热偏转光谱分析研究热点集中在这一技术与色谱、电泳分离技术的联用上, 泽田嗣郎等认为毛细管区带电泳中检测到的激光光热偏转信号不仅与光热效应有关, 还要考虑到毛细管由于激光照射和光热效应产生的温度变化而引起的毛细管振动现象, 并称为激光诱导毛细管振动。

目前激光光声光谱和光热光谱分析有待进一步深入, 加强调制光谱技术和处理技术在激光光声光谱和光热光谱分析中的应用研究以及激光光声光谱和光热光谱与色谱、电泳分离技术的联用, 必将进一步提高激光光声光谱和光热光谱分析的研究和应用水平。新的激光光热光谱分析技术(如光热折射、光热衍射)的功能和作用尚待进一步开发。

参考文献

1. Lai E P C, Chan B L. Appl Spectrosc Review, 1985, 21(3), 179~210
2. Dovichi N J. CRC Crit. Rev Anal Chem, 1986, 17(4), 357~423
3. Couful H. Fresenius J Anal Chem, 1990, 37(7), 835~842
4. Kitamori T, Sawada T. Spectrochim, Acta Reviews, 1991, 14(4), 275~302

5 金巨广, 分析化学, 1991, 19(6): 711~719

6 胡继明, 化学通报, 1992, 2: 3~7

(武汉大学胡继明教授撰; 曾云鹤审)

红外光谱基体隔离技术 matrix isolation technique of infrared spectroscopy 基体隔离技术是对分散在不起化学反应而且光谱学性质截然不同的基质中的物质进行光谱分析的技术。基体隔离技术的基本原理相当简单, 即为试样模拟一个气相条件, 用惰性和光学透明的固体 M 包围试样 S 分子, 使 S 分子之间相互作用象在低压气相条件下一样可以忽略不计。在实验上, 把试样 S 和大量过量的惰性基体气体在冷冻温度下共沉积在一适宜的基底上, 这样 S 分子便被无相互作用的 M 固态基体所隔离。在原则上, 它的光谱等同于在此温度下的 S 气相光谱, 实际上这种情况一般是很好的近似。

自 1954 年惠特耳(E. Whittle)首次报导了基体隔离二氧化氮和氨的红外光谱(IR)以来, MI 已发展成一门重要的光谱技术, 广泛应用于化学和物理各研究领域中。现已有若干专著和综述性文章。这些专著和综述一般偏重于无机化学、简单分子和物理研究方面, 而 1991 年朱晋倡等则综述了 MI 在复杂有机分子的结构研究和复杂体系的定性定量分析方面的应用。

红外光谱基体隔离(MI/IR)实验技术涉及到真空技术、低温技术和光谱技术, 有时还需要高温技术。主要实验设备除光谱仪以外, 还有低温恒温器和真空罩试样沉积装置。双级杜瓦瓶是最简单的低温恒温器, 内杜瓦瓶用液氮(20K)或液氦(4K)为主致冷剂, 内杜瓦瓶及其真空外套被次级致冷剂液氮杜瓦瓶及其真空外套所包围, 早期的 MI 研究均用此法。双级杜瓦瓶装置虽然小很复杂, 但主要缺点是使用高蒸发液体致冷剂消耗费用昂贵。1963 年怀特(D. White)根据焦耳-汤姆森原理设计了一种用于光谱研究的小型的路循环低温恒温器, 标志着在深冷技术方面又取得了重大进展。另一种致冷方法是根据斯特林循环设计的闭路循环低温恒温器, 1965 年科勒(J. W. L. Köhler)曾对这种系统做了极详尽的介绍。适于光谱实验室用的闭路循环低温恒温器虽然起始成本较大, 但由于没有连续的气体损耗, 其运转成本比开路循环系统低得多。不但可以给出较高的致冷效率, 而且还有可能进行长期循环操作。由于商品化的小型闭路循环低温恒温器的问世, 导致了 MI 技术的广泛应用。

MI 技术的最大优点是能够稳定活泼分子和自由基, 被研究的活泼 S 分子一经基体隔离就不再起反应。刚性基体笼子阻止了 S-S 分子双碰撞的发生, 而冷冻低温有效地防止了活化能大于 10~40kJ/mol 的 S 分子的任何反应发生。从而活泼分子和自由基的寿命大大增加, 可以有充分的时间进行光谱研究。活泼试样在基体中的浓度可比在气相中高, 而较长时间沉积可获得足够强的光谱, 从而提高了检测灵敏度。对稳定分子的光谱测量, 基体隔离技术也显示很大的优越性, 这是由于低温条件下被隔离在惰性环境中的单体试样分子间的相互作用被阻止的缘故。在基体中, 除少数小分子如卤化氢、氨等以外, 均不发生转动, 故光谱无转动结构, 比气相光谱更尖锐。那些在气相或在稀溶液中几乎简并重叠的谱带亦可以完全分开。

70 年代以前 MI/IR 尚未应用于定性定量分析。由于要求 20K 以下的低温, 过去只能用液态冷剂或开路循环低温恒温器而难于实现。自从闭路循环低温恒温器商品化以来, 因不消耗液态冷剂, 温度可低至 15K, 所以这一困难已经不存在。MI 低温池一般有三重窗片, 每片都有反射损失, 同时沉积样品一般都有光散射, 所以不容易达到精密分析所需的信噪比。傅里叶变换红外光谱(FTIR)因具有光通量大和多路传输的优点, MI 和 FTIR 相结合极大地提高了检测灵敏度和光谱分辨率从而使 MI/IR 微量定性定量分析得以实现。MI 技术可用于蒸气相和可蒸发而不分解的液体和固体样品, 原则上凡是质谱(MS)、色谱(GC)可分析的样品, MI 光谱法均可分析。MI 光谱样品是冷冻固体, 分子保持气相性的隔离特性, 无转动结构, 故 MI 光谱比气相光谱更尖锐、

简单, 极易区分同位素异构体。而色谱和质谱通常对异构体的分析却无能为力。1970 年洛克肯特(M. M. Rochkind)首次发表了 89 个有机化合物的 MI/IR 光谱, 1982 年马曼托夫(G. Mamantov)和加里森(A. A. Garrison)分别报导了 44 个多环芳烃和 35 个含氮含氧杂环芳烃的 MI/FTIR 光谱, 1987 年斯陶特(P. J. Stout)测量了 12 个硝基多环芳烃的 MI/FTIR 光谱数据, 1986 年葛卡(D. F. Gurka)给出了 22 个四氯(夹)二氯蒽的 MI/FTIR 光谱图及特征频率表。这些多环芳烃都是环保分析中的有害致癌致变物质, 对多环芳烃最强的吸收带是 900~700cm⁻¹的面外 C-H 振动, 在此波数范围内各个多环芳烃有足够差异, 可作定性分析特征带。对于杂环多环芳烃, 除 900~700cm⁻¹的面外 C-H 振动以外, 在 1500~1200cm⁻¹的环伸缩振动也可用作分析特征带。硝基多环芳烃有 1565~1500cm⁻¹的对称和非对称 N-(O)伸缩振动, 以及~870cm⁻¹的 C-N 伸缩振动带。

1976 年海姆波里(D. M. Hembree)应用基体隔离制样方法, 对某些多环芳烃进行了 FTIR 光谱的定量分析。当用微量装置时, 最低检出量一般为 0.5~1μg, 而用超微量装置时, 最低检出量一般为 50~100ng。用微量装置测定蒽在 735cm⁻¹处吸光度一浓度的相关曲线, 符合比尔定律的线性范围为 2~50μg。超过 50ng 时负偏离, 可能是由于聚集效应所致。如用较大样品处理装置, 克努森池和沉积面相距增大到几个厘米, 比尔定律的线性范围可扩展到 1mg。当用超微量装置时, 比尔定律图的线性范围从 20μg~500ng。大小装置结合使用时, 比尔定律线性范围可以扩展。

GC/MI/FTIR 联用可获得高效分离和优异的光谱分辨。1977 年里狄(G. T. Reedy)建立了 GC/MI/FTIR 接口装置, 色谱系统使用填充气相色谱柱和喷嘴分离器, 检测灵敏度为 μg 级。1983 年里狄进一步改善装置, 采用毛细管色谱柱, 检测灵敏度已达 pg 级。该 GC/MI 接口是一个可以收集 32 个级分的多面装置。氮气既作载气又作基体。用反射光学系统, 通过 KRS-5 棒把入射光束导入某一特定的沉积面(镀金无氧高导电铜片), 再反射进入光谱仪检测器。1986 年奥格(R. H. Haug)又设计了沉积面可旋转和垂直移动的 60 面的多面装置。通常光谱灵敏度与扫描次数的平方根成正比。GC/MI/FTIR 联用技术可以方便地先收集各个色谱组分, 然后再进行光谱记录, 其光谱扫描次数不受限制。而对 GC/FTIR 分析系统, 色谱分馏和光谱记录必须同时进行, 接口光谱系统的光谱扫描时间受到色谱保留时间的限制。由此可见 GC/MI/FTIR 联用技术与 GC/FTIR 技术相比其优越性更为突出。1979 年里狄(G. T. Reedy)和波恩(S. Bourne)把 GC/MI/FTIR 联用技术应用于环保定量分析工作, 1981 年海姆波里(D. M. Hembree)用这一技术成功地分析了 NBS 标准页岩样品的极性物质。而 1982 年马曼托夫(G. Mamantov)分析了煤衍生粗油馏分这样复杂的试样, 用 GC/MI/FTIR 联用技术准确地检测出其成分为蒽、1,4-二甲萘、吲哚、2-甲基吲哚、3-甲基吲哚、菲、咔唑、芘等。

惰性气体和氮气是首选基体材料, 因为它们在中红外区无吸收作用, 其化学性质不活泼。卤化烃和某些简单的碳氢化合物(如甲烷、乙烷、乙烯和乙炔等)也是很有用的基体材料, 而 CO、CO₂、SO₂、SF₆、N₂O 及 H₂S 之类分子亦被用于基体研究。显然选择具有不同特性的基体材料将不断拓宽 MI/IR 技术的应用领域。完全惰性的理想基体物质是不存在的, 因有所谓基体效应存在。基体分子和捕俘分子的相互作用使捕俘分子的振动能级受到干扰, 出现谱带位移。由于蒸气快速凝聚成固体, 故不大可能是理想晶体, 当试样分子占据多于一种型式的捕俘位置, 或当两个以上试样分子聚集在一起时, 也会出现红外谱带分裂或位移现象。被捕俘分子还会干扰基体晶体的对称性, 从而使原来不活泼的晶格振动活化, 即产生所谓声子带。基体效应、主体-客体、光子-声子的相互作用, 引起了不少学者的兴趣, 已成为一个新的研究领域, 既可以深入解释 MI 光谱, 又提供固体分子相互作用的信息。基于 MI 光谱与气相光谱的相似性, 1987 年罗杰斯(M.

L, Rogers)曾试图用计算机谱带变宽算法由气相红外光谱数据库建立 MI 数据库。尽管这一结果还不甚理想,但仍显示了计算机技术在该领域应用的巨大潜力。而具有高效分离和高信噪比的 GC/MI/FTIR 联用技术在 MI 定性定量分析和结构化学研究中无疑将发挥越来越大的作用。

参考文献

- 1 Whittle E, Dows D A, Pimentel G C. *J Chem Phys*, 1954, 22 (11), 1943
- 2 Kohler J W L. *Sci Am*, 1965, 212(4), 119~127
- 3 Mamantov G, Garrison A A, Wehry E L. *Appl Spectrosc*, 1982, 36(4), 339~347
- 4 Hauge R H, Fredin L, et al. *Appl Spectrosc*, 1986, 40(5), 588~347
- 5 Stout P J, Mamantov G. *Appl Spectrosc*, 1987, 41, 1048~1052
- 6 林林, 等. 实用傅里叶变换红外光谱学. 北京: 中国环境科学出版社, 1991. 173~220

(中国科学院长春应用化学研究所李黎明
研究员、曾广赋撰; 王文韵审)

紫外光—可见光—近红外分光光度法

uv-vis-nir-spectrophotometry 紫外—可见—近红外分光光度法是各种光谱方法的基础, 经过长期使用和不断发展, 已经成为很多基础理论研究和生产实践所不可缺少的基本手段。它是测定由于物质对紫外(190~340nm), 可见(340~750nm), 或近红外(750~2500nm)区波长的选择性吸收而产生的吸收光谱, 并借助于吸收光谱对被测物质进行定性分析或定量分析。

1. 定性分析的依据。当光进入一种物质后, 可以有两种情况, 一种是进入物质后能量几乎不被吸收; 另一种是能量被全部或被部分吸收。后者在吸收光的过程中, 光能被转移给分子, 但是吸收本身是一种高度专一的现象, 即一定结构的分子只吸收一定能量的辐射。分子吸收光能后就发生能量的改变。每个分子具有一系列严格分立的能级。处于基态的分子受到光能激发时, 它可以吸收特征波长的能量跃迁到较高的能级(激发态)。特定波长的光被吸收, 就产生吸收光谱。如果物质分子吸收的能量越多, 跃迁到激发态的能级就越高, 产生的吸收光谱的波长就越短。据此人们可以根据吸收光谱的形状, 特别是吸收峰的波长位置来对物质进行定性分析。但是紫外—可见—近红外区的吸收光谱常常不是线光谱, 而是宽光谱。宽光谱中常包含复杂的谱带系, 一个谱带系可能有若干个谱带, 一个谱带又由若干谱线组成, 情况复杂, 难以根据吸收峰的位置来确定是某种物质, 所以紫外—可见吸收光谱虽然可以用来作定性分析, 但不是理想的定性分析工具。

2. 定量分析的依据。紫外—可见吸收光谱作为定量分析的基本依据是比尔定律。这是由布格(Buguer)、朗伯(Lambert)和比尔(Beer)分别于 1729 年和 1852 年提出的。他们根据一系列的实验资料证明当一束单色光透过介质时, 吸收的比值(透射光/入射光)和入射光的强度无关, 但和介质的厚度以及介质中分子的数目(即浓度)有关。把它写成公式就是: $A = \lg \frac{1}{T} = abc$ 式中 A 和 T 分别是吸光度和透光度, 常用作纵坐标, a 是吸光系数, 是物质的特征常数, b 是介质厚度, c 是浓度。从公式中可以看出, 吸光度是与介质的厚度和浓度成正比的。这就很容易在紫外—可见分光光度计上通过测定吸光度来进行定量。吸光系数有两种表示方法: 如介质浓度为 1mol/L, 光径为 10mm, 则称为摩尔吸光系数, 用 $E_{1\%}^{1cm}$ 表示, 在生化分析中常用。如样品浓度为 1%, 光径为 10mm, 则称为百分吸光系数, 用 $E_{1\%}^{1cm}$ 表示, 在分析化学中常用。透光度 T 因为与浓度 c 成指数关系, 计算不便, 所以在生化分析中不常用。

紫外—可见—近红外分光光度计一般由光源、单色器、样品

室、检测器、控制线路、结果显示器 6 部分组成, 它们以直线结构排列。(1)光源: 钨灯和碘钨灯常用作可见和近红外范围的光源, 前者可使用的波长范围约为 320~3200nm。后者约为 340~1200nm, 但可增大发光强度, 并延长使用寿命。紫外范围的光源常用氢灯和氘灯, 使用波长范围约为 180~360nm, 但后者在发射强度和灯的寿命方面都比前者要大 2~3 倍, 且氢灯在 300nm 以后能量已很低, 但氘灯可使用到 500nm。(2)单色器: 单色器的作用是将光源发出的白光色散成各种波长的单色光, 从出射狭缝中导出照于样品上。分光光度计中的单色器是一个完整的色散系统, 除了色散元件(棱镜或光栅)外, 还有入射狭缝和出射狭缝以及一组反射镜。(3)样品室: 样品室可以容纳各种光径的吸收池和附件, 如恒温、低温、升温、积分球、薄层扫描等。测定用的吸收池一般分石英和玻璃两种。紫外区一定要用石英池, 可见区和近红外区用玻璃的, 也可用石英的。(4)检测器: 光电管和光电管已被灵敏度大、光谱响应范围宽的光倍增管代替。它实际上是配有两次发射电极的光电管, 使得光电流得到几十万倍乃至几百万倍的放大。1980 年后又发展了光电二极管阵列检测器。(5)放大线路: 单光束分光光度计通常采用光—电转换方法。双光束分光光度计多采用光学零平衡式光—电系统或电学比例记录式系统。(6)结果显示器: 单光束分光光度计用数字显示并连接打印装置。双光束分光光度计除了用记录器外, 还兼有数字显示和打印装置。结果显示发展为屏幕化后, 光谱图、操作条件和数据均可在屏幕上显示, 并且利用计算机还可以将数据进一步处理。

各种类型的分光光度计按它们的波长范围可分为可见分光光度计(比色计)、紫外—可见分光光度计和紫外—可见—近红外分光光度计。按它们的光学系统则可分为单光束、双光束和双波长/双光束 3 种。(1)单光束分光光度计: 单光束分光光度计只有一条光束, 通过变换参比和样品的位置, 使其分别进入光路, 就可在结果显示器上读出样品的透光度或吸光度。没有引入计算机的单光束分光光度计不能扫描吸收光谱。有了计算机, 可先储存参比信号, 再扫描样品, 并在每个波长将样品信号减去参比信号, 就可得到样品的吸收光谱。用光电二极管阵列作检测器的单光束紫外分光光度计, 具有快速扫描的独特优点, 给追踪化学反应过程提供了极为方便的手段。(2)双光束分光光度计: 既可直接读数, 又可扫描吸收光谱, 还可以增添很多附件, 扩大使用范围。(3)双波长/双光束分光光度计: 主要用于测定混浊样品。由混浊样品的溶质颗粒造成的散射光使表现吸光度增加, 甚至光谱产生畸变。美国 Chance 实验室在 1951 年巧妙地利用样品在峰位和峰谷的吸光度之差来准确地测定样品的真实吸光度, 设计了世界上第一台双波长分光光度计。双波长分光光度计常常同时可作双光束测定。

紫外—可见分光光度法以使用方便、准确、迅速、用样量少等优点而被广泛地应用在各个领域, 包括农、林、牧、副、渔、医药、环保、地矿、冶金、物理、化工、钢铁等并成为这些领域的实验室必备的手段。它可用于: (1)未知物质的鉴定: 将未知物质的吸收光谱与标准物质的吸收光谱相比较, 如果吸收光谱的形状完全一致, 就可初步认为是同一种化合物。但含有相同发色团的不同物质, 常有相同的吸收光谱, 所以还必须通过改变实验条件后再测谱比较, 甚至辅以别的方法才能进行鉴定。(2)分子结构的推测: 如在 220~250nm 有强吸收表明化合物中可能含有 C=C-C=C 结构单元。在 260~300nm 有中等强度的吸收则表示可能有苯环存在。(3)定量分析: 紫外—可见分光光度法是定量分析最有效的手段。根据朗伯—比尔定律, 吸光度与浓度成正比的关系可以配一套已知浓度的溶液, 测出吸光度, 画出标准曲线。再测未知溶液的吸光度, 就能从标准曲线上查得未知物的浓度。采用仪器上“浓度直读”的功能定量测定就更为方便。(4)杂质的测定: 将混合物的光谱进行多组分分析, 便可检测杂质的含量。但如采用双波长法或导数光谱法则更方便、准确和灵敏。(5)研究反应动力学: 在固定波长下连续记录反应物的或生成物的吸光度随时间的变化曲线, 可用于各种动力学研究。(6)反射测量: 如

果对固体样品进行色度分析,可用积分球进行测量。(7)差示光度法和差光谱法,如果样品浓度太大,可用差示光度法。如果欲知生物大分子的生色团的环境可用差光谱法。

参考文献

- 1 Richard Alan. *Mortom Biochemical Spectroscopy*. 12, Adam Hilger, London, 1975
- 2 洪吟霞, 范世福, 祝绍箕. 分光光度计. 北京: 机械工业出版社, 1982
- 3 陈国珍. 分光光度法. 北京: 原子能出版社, 1984
- 4 郭尧君. 分光光度技术及其在生物化学中的应用. 北京: 科学出版社, 1987

(中国科学院生物物理所郭尧君研究员撰)

X 射线荧光光谱分析 我国 X 射线荧光光谱(简称 XRF)的分析创建于 50 年代末至 60 年代初, 经历几十年的发展, 现已具有一支相当强的 XRF 专业队伍, 在波长色散 X 射线荧光光谱(简称 WDXRF)等领域, 我国学者在样品制备、数学校正及用于各类试样分析法等方面均有所贡献, 基本上已接近了国际水平。现代 X 射线发射光谱已发展成许多分支, 除 WDXRF 外, 尚能量色散 XRF (EDXRF)、全反射 XRF (TXRF)、同步辐射 XRF (SXRF)、微束粒子(如质子)激发的 XRF (PIXE), 及同位素源激发的在线或可携式 XRF 等。

国外厂家相继推出新一代的谱仪, 在 WDXRF 方面主要有荷兰 Philips 公司的 PW2400、德国西门子的 SRS3000、日本理学 RIX3000 系列、岛津 MXF-2100、ARL8400+ 系列、Oxford QX 等。日本理学株式会社与我国丹东射线仪器公司合作生产的 3070 谱仪仍在继续生产并提高国产化水平。这些仪器各有特色, 性能价格上均有较大差异, 从代表新一代仪器水平的产品(如 PW2400, SRS3000 和 RIX3000 等)介绍来看, 大体具备如下特点: 体积小、操作自动化和高智能化, 分析结果精度高、准确度高, 灵敏度高, 扩大了低原子序数测定范围, 一般均可测定 B、C 有的甚至可定量 Be。在硬件上采用新技术, 缩短了许多元素的测量时间, 有的情况下甚至 2s 即可。在数据处理软件方面普遍提供理论 α 系数、基本参数法在线或离线程序、定性和半定量分析程序、多层薄膜组成与厚度测定的程序以及实验室管理程序等。此外有的厂家将 XRF 与 XRD 组装在一起, 如 ARL8400S 水泥分析仪加一道 XRD 测量道用于分析水泥中游离 CaO 分析, 还有将 X 射线反射 XRF 和 XRD 的掠射装置组装在一台仪器中, 用于多达 50 层的层状厚度、基体材料和界面的粗糙度、层界面内部扩散及二层之间元素分布分析等。中国分析测试协会咨询委员会曾对 1989 年第 3 届 BCEIA 展览会上展出的 XR 200/300、PV 9500、Spectrace 5000 和 6000 等型号产品进行评议。国外还发展了一种新的技术, 应用 EDXRF 可测水溶液 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 级的 Na、Mg; ng/ml 级的 Ca、V、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Ag、Cd、Ba、Tl、Pb、Bi 等元素, 这种仪器一旦进入市场, 无疑是 EDXRF 发展史上一次的突破。

1988 年 10 月我国建成正投产电子对撞机和北京谱仪, 作为国家实验室接待国内外科学家从事研究和开发应用工作。长焦距扫描质子微探针(SPM)系统建立并通过中国科学家组织的专家鉴定, 该系统的工作距离(透镜到试样室之间的距离)比较长, 可容纳多种探测器, 使一次实验能够同时进行 PIXE、RBS、RFS、NRA 和沟道效应的研究, 已在生命科学、材料科学和地球化学领域投入应用。柴之芳就 SRXRF 刻度方法、灵敏度的检测下限空间分辨率和辐射损伤率以及应用与发展趋势作了介绍。陈远盘介绍了 SR 的性质和特点及 SRXRF 的应用等。全反射 XRF 实验装置研制成功并获得 K、Ca、Sc、Fe、Cu、Zn 等元素测量结果, 其检测限达到 ng 级, 用同位素源激发的 TXRF 分析技术也作了可行性研究, 此外一些作者应用 TXRF 分析了地质、水等试样。这些工作者有助于进一步推动我国 TXRF 技术的发展。

西安 262 厂 EJ-2810 管激发 EDXRF 谱仪, 已为一些用

户使用。为满足工业生产现场分析要求, 已推出一批新的产品, 如稀土快速能谱仪已成功用于 Y、La、Ce、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er 和 Tm 等 13 个元素在线分析, TXD-901 多元素分析仪由国家建材总局主持鉴定用于水泥中多元素分析, 两个探头(^{235}Pu 和 ^{238}Pu)同时测定 Al_2O_3 、 SiO_2 、 SO_3 、 K_2O 、 CaO 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 等。XZ-1 同位素 X 射线荧光分析仪由中国科学院上海分院主持鉴定, 并由江苏省电子厅主持进行设计定型鉴定, 该产品已为用户用于保护液中 Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 和 Fe_2O_3 铅锌精矿中 Fe、Cu、Pb、Zn、钢铁和镀 Zn 层厚度等测定; 并成功地用于“海洋 4 号”轮调查船在太平洋海区进行科学调查, 历时半年, 完成全部铀结核中 Mn、Fe、Co、Ni、Cu 5 元素分析, 满足了大洋铀结核调查要求。YH-84X 荧光涂层测厚仪、CYH-86 小面积 X 荧光涂层测厚仪研制成功, 可测直径 2mm 和 0.1mm 的试样, 可用于金镀层、钛涂层、磁盘磁层、手表零件等单层、复合双镀层厚度和成份的测定。用 $^{241}\text{Am}-\text{Ag}$ 源的原油含水分析仪, 可分析原油中水份和天然气含量。成都地质学院相继研制了轻便型、携带式、在线 EDXRF 系统, 此外上海原子核所已可生成 $25\mu\text{m}$ Be 窗厚的封闭式正计数管, 并被用于 SiO_2 、 Al_2O_3 等轻元素的测定。周长新等开展了软 X 射线多层研制已达到实用化水平。

为保证仪器正常运转, 许多用户根据各自仪器的特点进行维修, 积累了丰富的经验, 主要有: 日本理学的 3530 和 3524 多道谱仪故障的排除, 3530 谱仪馈给系统的改进, RAP 分光晶体再生处理, VXQ-150A 计算机系统的改型和开发利用, X 射线晶体分析的综合故障的分析与检修, 3080E3 XRF 谱仪 20 驱动马达不能定位的检修, ASC-24 与主机不能联机的故障排除及热交换器压缩机的改型与安装, 高压失控故障的判断与排除, 流气正比计数管蕊线断裂与焊接, 自制真空隔膜窗, 以及理学 XRF 仪器部分插件国产化。PW1400 谱仪一线维修经验总结; ARL8680 谱仪常见故障的维修; SRS300K802T 型高压发生器电路故障分析与排除及谱仪设置地装置。为扩充仪器功能与现代管理工作的需要, 开发了 3080XRF 谱仪 PDP11/D3 与 IBM 计算机的数据通讯, 分析数据的整理与直方图的绘制, 长城计算机与异种计算机之间通信系统的设计, PW14XX 和 PW16XX 系列谱仪建立的数据文件进行读写的软件功能开发, PW140XRF 谱仪与 IBM-PC 机联机的软硬件的研制。计算机辅助系统的研制。此外介绍理学 3530 和 3270 型 XRF 谱仪安装调试的方法和仪器的主要验收指标, SRS30XRF 谱仪自检程序编定与应用, XRF 谱仪精密度检验依据和方法, 3080 型 XRF 谱仪能检验、技术指标和测量方法, 这些文章对新用户如何验收仪器是很有好处的。

XRF 分析本质上是一种非破坏的、表层(n 个 μm 到 mm)分析方法, 为保证分析结果的质量, 应对获取信息全过程如取样代表性、制样均匀性、分析方法的选择、检测系统的灵敏性、分析结果的准确性等方面予以重视。现代 WDXRF 和 EDXRF 谱仪, 用于常规的定性、定量分析已相当成熟, 仪器测量条件的选择也日益规范化, 保证分析结果质量依然是标样的选择及相应的制样方法与基体校正。我国 XRF 工作者已从提供信息开始向解释和应用这些信息去研究物质性质的方向过渡, 这无疑是一大进步。

早在 60 年代从事 XRF 理论研究的科学家已为元素间吸收增强效应的校正奠定了理论基础, 经过几十年的努力, 随着计算机迅速发展和普及的今天, 各个制造厂家已能提供用于多种目的定性、定量、半定量分析程序。由于我国在 70 年代到 80 年代中期引进的 XRF 谱仪, 软件不能适应工作需要, 为此我国学者在这方面做了大量工作。王基容(1990)揭示了 T. Shiraiwa 及 N. Fujino 推导荧光 X 射线强度公式的思路, 解决了 $\frac{dX_1}{\sin\phi}$ 、 $\frac{dX_2}{\sin\phi}$ 及 $\frac{2\pi\gamma_1 d\gamma_2}{4\pi R^2}$ 等项的物理意义含糊不清的疑团, 指出原公式中人射截面积应为 $\frac{\sin\phi}{\sin\phi}$ 而不是 1 及公式未进行立体角校正等问题。王质彬推导了薄样 SRF 强度理论公式。范钦敏等(1991, 1993)用蒙特卡

面积应为 $\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta}$ 而不是 1 及公式未进行立体角校正等问题。王质彬推导了薄样 XRF 强度理论公式。范钦敏等(1991, 1993)用蒙特卡罗方法对薄膜厚度测定中各种二次相互作用分别给出定量修正, 包生祥(1991)系统地研究了用公共背景法校正基体效应和背景。华佑南(1991)提出理论 α 系数经验修正方法、粉末压片法中“非在线荧光分析物质”项的校正, 他还指出理学提出的理论校正系数在熔融样品体系中对基体效应校正效果不佳的原因是在于考虑散射的影响, 并提出了修正计算方法。数奇(1990)提出层模型结构, 在层状结构样品假设下, 借助算符和矩阵建立非线性数学模型。高志强等(1992)用基本参数法校正放射性同位素源发情况下的吸收-增强效应, 满瑞林等(1991)成功地将 PLS 法用于同位素 XRF 分析中混合谱处理, 而无需对谱进行平滑、解谱、基体校正等计算步骤。白友兆等(1991)在处理同位素 XRF 分析中混合谱时, 以纯元素谱为参考谱用非线性最小二乘法拟合解谱, 并用峰位定位技术。

新的软件有谭秉和(1990)推出的 BKD-XRFA 和无标样法测定薄膜厚度的程序, BKD-XRFA 成功地用于多种钢铁试样分析。陶光仪等(1990)开发了 DRALPHA 程序, 该程序可处理 4 种不同的测量条件, 一次可计算 24 个元素体系的理论 α 系数, 并自动给出消去烧失项理论 α 系数。梁国立等(1990)提出 CVFP 软件, 该软件以基本参数法和 L-T 方程为基础, 引入交互有效法(Cross-Validation), 并依据预报残差方和(Press)的计算, 自动选择特征向量的最佳维数, 剔除了噪声, 提高了准确度。许佩珍等(1990)应用 NRLXRF 程序进行理论 α 系数的快速计算。才书林等(1990)研制了 XRF800X 射线荧光光谱定量分析软件, 实现了 3080 型 XRF 谱仪与 IBM386 计算机的联机自动分析, 该软件既具有传统的内标法、经验系数法, 也包括有理论影响系数法和基本参数法功能, 同时包括了各种数据管理功能及 XRF 分析数据库。Katsora 等(1990)介绍了理学 DATA-FLAX270 软件中多层薄膜基本参数法程序。河野久征介绍了理学定量分析软件, 并以特种黄铜为例, 认为当铅及一些元素在样品中以非均匀状态分布时, 将理论校正系数与非线性回归法结合起来最好。理学应用报告(1991)以岩石分析为例, 论述了在应用“理学在线自动分析程序”与高标准的一定数量标样相结合, 可用于落在曲线外推部分的分组成成分分析, 而不用扩展曲线的有效范围。孙建一(1990, 1991, 1992)介绍了理学 3371 型 XRF 谱仪基本参数法定量分析程序的功能和分析步骤, 以矾土为例, 在相同标样数量下比较了经验系数法、半基本参数法和基本参数法定量分析的准确度, 提出一个经验系数确定对基体元素参加校正顺序的方法, 从一次、二次荧光的理论强度出发导出 Plesch 法中系数 K_1, K_2 的表达式, 并讨论了该法的误差来源; 还以粉末压片法为对象, 考查用理论 α 系数 A_i 与平均含重 \bar{w}_i 之积的绝对值大小确定经验系数法基体元素参加回归顺序的方案的可行性, 并对最快速下降法校正回归顺序的方法的可行性, 并对最快速下降法确定最佳参加校正元素组合的结果作比较。此外李国会(1991)比较了不同数学模式的理论 α 系数对硅酸盐分析结果的影响, 丰梁垣等 FFP、FP-AIPHAS、XRF-11、NBSGSC、EXACT 等程序作为比较。罗立强等(1991)介绍了国外定量分析、解谱和专家系统的研究近况, 陶光仪(1992)从定性、专家系统、定时和半定时分析角度阐述了国内外软件的进展 Norrish 和陶光仪(1992)提出用于计算 X 射线特征谱线和吸收限的经验化公式, 减少了计算过程中出错次数。

吉昂认为在应用基本参数法和理论 α 系数众多软件时, 应了解各种软件的特点和应用范围, 应谨慎地选用所需软件, 并在实验中予以验证。

制样除少数者外, 均结合具体分析对象研究制样方法, 而制样又往往受样品的来源和物理形态所制约, 这是一种技术性较强的工作, 但又是影响分析质量的关键之所在。标准物质对 XRF 工作是必不可少的, 金兼慧(1992)重点介绍了我国已颁发的岩石、土

址、水系沉积物、矿石、地球植物以及用于诸多如稳定同位素、地质年龄、发射光谱、电子探针等专门用途的地质标准物质共 247 种, 上海利达标准样品服务部冶金产品标准样品目录列举了生铸铁、铁合金、矿物原材料、谱碳钢、低中合金钢、精密合金、高温合金、纯金属、有色金属及光谱分析和气体分析用的标准样品。颜茂弘等(1991)探讨了用 XRF 法对标准物质均匀性检验的一些问题, 所提出的问题不仅可对单元间的一致性, 单元内的均匀作方差 F 检验, 而且给出了物质不均匀程序的定量量度, 从而判断所研制的对象能否满足岩石分析的要求。压片法是一种常用的方法, 但要考虑颗粒度及矿物效应, 这些影响与待测元素的波长有关。朱见英等(1992)以分析含氟重熔渣为例, 研究了粉末试样制样技术, 认为 P·T·A 涤纶(精-对苯二甲酸)是一种较理想的粘合剂。张万宝(1991)探讨了研磨时间与元素强度之间的关系。李国会等(1990)在分析动物肝和人发时, 将动物肝于 80℃ 烘干后研成粉末, 再与纤维混合研磨压片, 对人发则先灰化, 将残渣与纤维素混均后压, 均以植物标样当作标准。王连池等(1991)研究了植物样品的 8 种分解方法及灰化、温度与元素损失之间的关系后指出, 灰化温度应在 500℃ 保持 5h 以上。灰化后可用 1:1 硝酸分解。杨丽华(1991)解决了细棒样品的制样问题, 她以铝合金为例, 先将细棒截成几段, 镶嵌在孔径为 $\phi 35\text{mm}$ 合金钢模中, 排列整齐均匀, 以空气锤加压力冷锤, 车平磨光, 即为平面状。陈永君等(1991)在分析铈和稀土单矿物时, 用熔剂熔融 20mg 样, 再粉碎压片, 制成薄样, 可测定 26 个元素。熔融法的优点可消除颗粒效应和矿物效应, 同时可降低元素间吸收增强效应, 可获得高度准确的结果。对磷酸盐体系制样已有多人作过系统研究, 近年来茅祖兴等(1990)研究了熔融温度、熔融时间和脱模剂的加入量对分析结果的影响。邓志平讨论了如何制作熔融样片。李国会等(1991)在制定硅酸盐岩 XRF 法测定主、次元素量标准方法时推荐试样与溶剂重量比为 1:8, 溶剂为 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 并加氧化剂 (NH_4NO_3)、助熔剂 (LiF) 和脱模剂 (LiBr)。Tour 推荐使用混合溶剂 (47% $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 36.7\% \text{Li}_2\text{CO}_3 + 16.3\% \text{La}_2\text{O}_3$ 混合熔融, 冷却后贮存), La_2O_3 为重吸收剂, 试样与溶剂稀释比通常为 1:5 或 1:9。理学应用报告指出, 试样与溶剂 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 比 1:10 较 1:5 好, 焙好高含量 CaO 时要延长焙时间, 并导致 Na_2O 的结果低 10%, 乐群(1991)以熔融方法制备稀土试样时, 加入一定量的 SiO_2 , 促进玻璃体的形成, 袁汉章等(1990)讨论了高含量铜的硫化物矿的制样方法, 以 4.4 克 $\text{LiBO}_2 + 2.4$ 克 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + 10$ 克 NaNO_3 作为熔剂, NH_4Br 为脱膜剂, 采用低温予氧化, 高温熔融方法制样, 冯德友探讨了 LiBO_2 制备方法。薄样法通常制样方便, 并可与化学富集方法如萃取、吸附和离子交换等方法相结合, 提高测定下限。我国学者一般以滤纸片、纤维素或交换膜作为载体。梁钰(1990)曾对薄样的支撑物质之一滤纸的纸质、外形、尺寸进行较系统的研究, 探讨了溶液离子在滤纸表面的扩散行为, 提供了优化条件。以聚酯薄膜-滤纸片法测定低浓度溶液中微量稀土元素。在 10% 氨水-4% EDTA 溶液中, 用水合联氨还原沉淀银, 薄样测定, 以 Er 为载体并作内标, 在盐酸介质中苯萃磷酸选择性沉淀钼, 测定稀土中微量钼。以 N_{7403} -MIBK 萃取测定岩石、土址 En、Pb、Cu、Cd、Mo、Bi、Sn 等痕量元素。还有用薄样法测定金属镀层中 Ni、W、P, 闪锌矿和黄铜矿的单矿物, 铀铁尾矿萃余液中微量 Sc。

在冶金、地质样品量大、组成复杂多变, 为快速、准确、经济地提供数据, 我国学者做了许多有益的工作, XRF 已是这些单进行常远见分析的主要手段之一。理论 α 系数和基本参数法在这一领域获得广泛应用 NBSGSC、DRALPH、FLY-FPM 和 XRF-11 等软件及一些自编的程序是主要使用程序。已用于焊锡、锰结核、铁矿、钛合金、钢铁、钒钛磁铁矿、锌精矿、重稀土分离过程中稀土元素分析、氧化锆富集物中稀土元素、铸造碳化钨中主成分和杂质分析、DE-4 合金、非晶镀层、地质样品、铝硅耐火材料等。将经验系数法用于基体校正仍然是行之有效的办法, 特别是不需要对试样进行全分析, 且标样又足够多, 标样组成含量又能

复盖所分析样品组成含量时,是可获得的的结果的。有时对偏析、颗粒度等效应的修正也起相当大的作用,故为许多实验室所采用。如矾土、天青石、铬铁及铬铁矿、焊条及原料、铁矿、镁质耐火材料、铅石英质耐火材料、钢铁、稀土及稀土富集物、高冰镍、硅铬合金、氧化铝中 Fe、Na、Si、锡黄铜中 Cu、Sn、As、氧化铁中杂质、磁性材料中微量玻璃、碳锰铁合金、钨选矿中钨和钼、钛铁矿选矿、镍选矿流程中的 Ni、Cu 和 MgO、铝上矿和赤矿和赤泥、钾长石、岩石地球化学样中 25 个元素的测定,此外一些作者还应用内标法和增量法对铁氧体吸收材料、矿石中砷、锌和铜进行了分析。孟胤宗等(1991)在分析 Ba-Ti-Sr-Y-Si-Mn 氧化物物质中时以 $\frac{C_i}{C_{Ba}}$ 和 $\frac{I_i}{I_{Ba}}$ 作图,并归一,可获得很高的准确度和精密度。此外还有单背景扣除法测定钢中残铁。

在石油化工方面的应用, WDXRF 已成功用于重油中硫、柴油中铁、润滑油中 Fe、Ca、Ba、Cr、En、P、Cl、S 等,加氢裂化油中砷、催化剂中 Sb 树脂 Pd、塑料中 Al、Ti、Fe、Mg、燃油锅炉受热面的灰渣成分、磷石膏和磷矿中主、微量元素,有机液中稀土元素、中温交换催化剂的主要成分、苯二甲酸精制催化剂(Pb/c)、甲基丙烯酸三丁基甲酸和甲基丙烯酸甲酯共聚参数的分析,以及用 PLXE 分析三苯基磷基铑催化剂中磷和铑。

在生物和环境样品方面的应用, WDXRF 参与制定植物、人发、土壤等标准物质的定值分析,并用于空气悬浮粒中微量元素、贻贝中 Zn、Mn、Ca、Mg、K、Sr、西沙群岛贝壳中 Ca、Al、Fe、Si、P、Sr、Zn 钙质贝壳中 Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ba、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Pb 和 Sr、石珊瑚中 Ca、Si、P、Al、Fe、Sr、植物样品、面粉和米中微量元素穿山甲片中 Al、Br、Ce、Cl、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Na、Ni、P、S、Si、Zn 等、中药胡芦巴磷脂、人发中 13 个元素分析等,以及测定煤灰中痕量元素、土壤及土壤环境背景值、黄河水悬浮沙中金属元素、麦饭石中 25 个主次量元素等, PIXE 分析技术用大气溶胶的研究,可获得元素浓度和粒径分布、元素浓度随时间变化及元素浓度间相关性等信息,分析食品中 K、Ca、Cu、Fe、Zn、Mn、Rb、14 种果品中 K、Ca、T、V 等 12 个微量元素、不同产地蜂胶中 K、Ca、Fe、Ti 等,分析了两类 30 个传统中药组成、人脑脊液中 K、Ca、Cr、Mn、Fe、Cu、En、Br 等,研究了抗坏血酸钛染毒后大鼠体内的钛及其它浓度变化,通过研究急性白血病患者和正常人全血中多种元素后,揭示了白血病患者与微量元素相关性,测定痛病患者和正常人细胞中 Sr、Ca、Fe、Zn、P、Cu、Au 等。PIXE 和 PIGE(质子激发 γ 射线分析)相结合可有效地扩大元素分析范围,并成功地用于生物和新疆牧草分析,并揭示了羔羊搔痒病病因。

黄金首饰、考古物的分析。许文渊(1991)曾就黄金首饰的组成特点及成色鉴定的 4 种方法(比重法、电子探针、XRF、肉眼鉴定)作了较全面的介绍,提出各种方法的特点及适用范围,XRF 适用于结构复杂的纯金饰品如项链、手链等整体饰品的平均成色分析。孙平蕙等(1991)报道了 XRF 测定道饰的结果,但未介绍方法。魏成连等(1992)以 ^{241}Am 源散射线作内标,以 Si(Li)探头测定黄金首饰中黄金 K 值,最佳准确度为 0.29%。何裕国(1991)放射源 X 射线荧光仪作为金成色检测仪的可能性。毛振伟(1991)介绍了在考古分析中 XRF 定性、定量分析的目的和方法,并列举了应用实例。他还用理论 α 系数法分析古青铜币。

微束 XRF 光谱的应用研究。XRF 作为整体分析已相当成熟,而微 XRF 分析则正兴起,马鑫培等(1991)应用 PIXE 和 PIGE 分析了不同地质环境的 14 个磷灰石样品中的主体元素和替代元素的含量,他们还测定了绿祖母宝石中主体元素和微量元素浓度,并以此为依据应用数学统计方法作指纹分析。朱节清等(1991)研究了矿物质微区元素分布,并展望 SPM(扫描质子探针)在我国地质科学研究中的应用前景。冯松林等(1992)以 PIXE 微分析技术测定球墨铸铁中反球化元素和杂质含量,与电探针相比,其测定下限可提高 3 个数量级。安庆骥等(1990)也比较了微 XRF 扫描成分法与是电子探针、常规 XRF 法,钱琴芳

等(1991)用 SRXRF 法研究运动员头发中微量元素,结果表明运动员头发中铁含量与运动量有关。以 SRXRF 微探针测定岩石的元素分布,南丹铁陨石的分布,硅中掺杂元素 As 的分布均匀性。

现场分析和放射同位素激发的 XRF 谱仪的应用研究。现场分析具有明显的经济效益,已引起用户广泛注意。陈世民(1991)等论述了钙铁分析仪在线和离线分析误差起因。管沛林评述了大型 XRF 谱仪在稀土分析现场中的应用。俞明山(1991)介绍了 BYF-3 载流 SRF 仪器的应用现状,并探讨了如何直接测定人体甲状腺碘,用于合金分类、锡矿中锡、白金成分分析等。测定铀钼矿床中钼含量,研究了人发微量元素相关关系和用于判别疾病。周世春等(1990)以各类铜矿床的地球化学异常时元素组分为依据,用国产便携式 XRF 勘查不同类型矿床的方法与技术。丁雪心(1992)用 XRF 粉末法监控蓝晶石生产流程。此外,陈永岩等(1992)采用标准方法对电流、电压、仪器性能、条件变化以及测量条件的改变等影响所具有校正作用,同时对分析方法在同类型和不同类型谱仪上的通用性作了探讨,还验证了同一制样条件下形成的分析方法,用于测定另一制样条件样品均获得满意的结果。尤斌军(1992)通过对中碳锰铁 XRF 质量控制的阐述,提出了一种适用于粉末压片标准化的方法,即以两点管理样为控制标准进行标准化,这样不仅可以校正仪器漂移,同时也可克服操作者之间压片上的差异。上述的研究工作有助于开展定量分析的研究和定量分析专家系统的建立。罗立强(1992)讨论了 XRF 分析中误差,计算了在检出限与测定限附近用 XRF 法测定痕量元素的误差分别为 67% 和 20%,其值略低于文献值。

卓尚军等(1992)提出一种 XRF 法同时对常见及较常见的 40 多种元素进行快速定量分析的方法,该法的 XEME-QUAN 软件由 FORTRAN77 语言编定,在 IBM PC 机上运行,适用于 $\text{LiBO}_2 + \text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 熔融体系,陶光仪等开展了定性扫描之后建立相应专家系统的研究,这一工作是在定性扫描之后建立相应扫描文件基础上,这一工作是在定性扫描之后建立扫描基础上,对谱图进行数据处理。屠田国等提出了采用 DFP 方法实现重叠谱峰的分解,重叠峰的判别等方面的研究。王静等从数值和符合两个方面论述了 XRF 光谱谱图的处理,在数值处理方面,就噪声的平滑、重叠峰分解等方面进行了较为详细的研究,在符合处理方面,总结 XRF 定性解释规律基础上,研究了该领域知识的“谓词-规则-过程”表示法,依据领域问题的特点,提出专家系统工作数据库的“主-支”链数据结构,进行了专家系统应用该领域时推理机制和控制策略的研究。

基于材料的性能与元素材料中化学状态有着密切的关系,作为一种非破坏分析手段,XRF 进行化学形态分析日益受到重视,近年来,对许多元素的状态测定已从定性定量分析过渡,并与拉曼、红外、光电子能谱等相结合,相互补充,为材料性能的研究提供有用信息。吉昂等测定 PW1404,高分辨率 3070XRF 谱仪的分辨率,在比较了不同状态的硅、铝和铜的化合物的化学转移,潜形变化后,并对普通谱仪获得的化学态分析结果进行验证,在此基础上,论述了普通 XRF 谱仪在化学态分析中应占有一定的地位。还研究了无碱多元系统磷酸盐玻璃中 SiK_α 、 SiK_β 和 SiK_γ 的化学位移与该玻璃体系中 P_2O_5 含量间的关系,并对 P_2O_5 使玻璃分相作了定性解释。提出了定量测定玻璃($\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 体系, $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 体系与 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Si}_3\text{N}_4$)中 Si-O 键和 Si-O⁻键的方法,其结果与 XPS 所测得结果基本一致。侯浩波等对液态渣玻璃中 Fe^{+3} 、 Al^{+3} 配位状态,用 XRF、穆斯堡尔谱、红外光谱进行了研究,对它们共存时产生的结构效应及液态渣水硬活性的影响进行分析。李小定研究了玻璃中 Al、Zn 和 Ti 的配位状态。秦广雍等以 XRF、XRD 等综合技术,通过对骊山粘土热变化的研究,确定了骊山粘土为秦皇兵马俑的原料来源。裴立文等以 MnK_{β_3} 的二级衍射线的峰位变化,确认了大洋锰结核中锰主要有 4 价存在,并揭示了试样烧失增量的原因,确认了不同价态的锰在熔融成玻璃片后,均具有同一谱形,消除了价态对分析结果的影响。吉昂和梁钰探讨了钢铁中酸溶铝和酸不溶铝的测

定的可能性。郭芳用滤纸片法测定了钢中酸溶铝。邱林友以银型活性碳纸富集法测定废水中 As^{3+} 、 As^{5+} 。王庆广等应用高分辨率双晶 XRF 谱仪测定了环境样品中硫的价态,为研究污染物来源、迁移转化,归宿及生态环境效应提供了重要的信息。王修德等测定了土壤中可提取的态硫酸盐。

谱处理技术是获得化学态分析结果的关键之一,基于元素在物质中的化学状态是未知的,峰位、谱形也是变化的,描述谱形的 3 个参数(谱位、半宽度、峰高)均是变化的,这给谱处理技术还来了许多困难。靳新娣应用快速富里哀变换退卷积方法分解重叠峰是有效的;李醒等提出一种新的变迹函数可以使退卷积方法在提高分辨率的同时使信噪比基本保持不变,并成功地用于处理 FeL_{α} 、 FeL_{β} 时实验谱线,解谱后得到的 L_{α} 、 β 之间的许多短波伴线,与理论计算值符合很好。宫清等用 PLS 法测定了不同价态的硫,李志良等还用卡曼波法测定不同价态硫。

(中国科学院上海硅酸盐研究所吉昂研究员撰)

荧光分光光度法 fluorescence spectrophotometry 荧光分析法具有灵敏度高,选择性强,用样量少和方法简便等优点,不但是基础理论研究的有效工具,而且在工、农、医、环保、化工、冶金、地质等领域也是重要的分析方法之一。

当用一种波长的光照射某种物质时,这个物质会在极短的时间内发射出较照射波长为长的光,这种光称为荧光。早在 16 世纪,人们就注意到植物抽提液和矿物的荧光发射。1852 年,斯托克斯(Stokes)阐明了荧光发射的机制。荧光的产生是由于某些物质分子吸收电磁波能量,由基态跃迁到较高的能级(激发态)后,首先通过内转换过程损耗一部分能量,回到第 1 电子激发态的最低振动能级,同时以光量子的形式发射能量,即为荧光。荧光发射的量子能量小于入射光子能量,所以荧光波长大于激发波长。产生荧光的过程很快,约在 10^{-8} s 内完成。一旦除去激发光(入射光),荧光也随之消失。

荧光分析能提供较多的参数,从各个角度反映分子的发光特性。通过对这些参数的分析,不但可以做一般的定量测定,而且还可以推断分子在各种环境中的构象变化,从而了解大分子的结构与功能关系,这些参数包括:

1. 激发光谱和发射光谱。这是荧光光谱的两个最基本的参数。激发光谱是引起荧光的激发辐射在不同波长的相对效率。发射光谱即是分子吸收光能量后再发射的结果。根据激发光谱和发射光谱的形状和强度可对物质进行定性和定量分析。如欲得到物质的真实荧光光谱(又称校正荧光光谱),必须设法消除仪器中光源、单色器、检测器等光学元件的光谱特性对物质的荧光光谱的影响。

2. 斯托克斯(Stokes)位移。Stokes 位移 $= 10^7 \left(\frac{1}{\lambda_{em}} - \frac{1}{\lambda_{ex}} \right)$ 单位是 cm^{-1} , λ_{ex} 和 λ_{em} 分别是校正后的最大激发波长和最大发射波长,单位是 nm。

3. 荧光强度和总荧光量。荧光强度用来表示荧光的相对强弱,所用的是任意单位,测定一个物质的相对荧光强度 F 与很多因素有关, $F = K\phi_f I_0 (1 - e^{-\epsilon b c A}) = K\phi_f I_0 (1 - e^{-A})$ 这里 K 是仪器常数, ϕ_f 是量子产率, I_0 是激发光强度, ϵ 是摩尔吸光系数, b 是样品池的光径, c 是样品的浓度, A 是样品的吸光度。当 A 很小时, $F = K\phi_f A$ 。当 A 增加至一定值时, F 不但随 A 的增加而增加,甚至随 A 增加而减少,这就是所谓的浓度淬灭现象。总荧光量即发射光谱的面积。

4. 量子产率。表示物质发射荧光的本领,用 ϕ_f 表示。其定义为发射量子数与吸收量子数之比。浓度、温度、溶剂、激发波长和荧光标准的选择都会影响量子产率测定的准确性。1924 年,惠维罗(Wawillow)首先进行量子产率的测定。20 世纪 50 年代前后大多用绝对法来测定,方法繁琐,容易引入误差。现在大多用派克(Parker, 1960)和陈(R. F. chen 1965)提出的相对法。

5. 荧光偏振。如果将一个荧光物质放在荧光仪的起偏器和

检偏器之间,就能测出它旋转电矢量的能力。由此可以计算分子的形状、大小、运动状态等。 $P = \frac{F_{\parallel} - GF_{\perp}}{F_{\parallel} + GF_{\perp}}$ 荧光偏振用 P 表示, F_{\parallel} 是起偏器和检偏器的矢量方向互相平行时测出的荧光强度, F_{\perp} 是它们的电矢量方向互相垂直时测出的荧光强度, G 为校正因子,是水平偏振光对垂直偏振光的透射效率之比。

6. 荧光寿命。当去掉激发光后,分子的荧光强度(I_t)降到激发时最大荧光强度 I_0 的 $1/e$ 所需要的时间(τ),称为荧光寿命,常用 τ 表示。 $I_t = I_0 e^{-t/\tau}$ 荧光分析仪器大致包括荧光分析灯、滤片荧光计和荧光分光光度计三大类。它们通常由光源、激发单色器、样品室、发射单色器、检测器、放大器和记录显示装置组成。(1)光源:荧光分析灯和滤片荧光计的光源通常采用汞灯或氙灯和钨灯。但荧光分光光度计的光源通常用氙灯,它发射从紫外到近红外的连续光谱。(2)单色器:荧光分析灯和滤片荧光计采用滤片作为单色元件,因而只能得到发射光谱的总荧光量,不能扫描荧光光谱。荧光分光光度计大多采用光栅作为分光元件。单色器的单色性影响光谱分辨率。(3)样品室:样品室中安放各种荧光池。由样品发射的荧光通常在与入射的激发光成直角方向被检测。(4)检测器:简单的荧光分析器常用光电管作检测器。荧光分光光度计则用光电倍增管作检测器,它把微弱的荧光信号转换成电信号且放大数十万乃至数百万倍,以供定性定量测定。(5)放大及记录显示:把光电倍增管输出的电信号送到前置放大器和主放大器放大,最后用表头、记录仪或屏幕显示其光谱或数据。

荧光分析的灵敏度很高,它比吸收光谱法灵敏度高 2 到 3 个数量级,能检测 10^{-12} g 的物质。利用荧光物质本身的荧光可以直接进行检测,称为直接测定法或内源荧光法。有些物质本身不发光或量子产率低,不易测定。这时可以利用外源荧光法(也称荧光探针法、间接测定法)进行测量,这是利用某些荧光探针使其与荧光较弱的或不显荧光的物质共价或非共价结合,以形成发荧光的络合物再进行测定。大部分生物物质荧光量子产率很低(如蛋白质、酶)或不发光(核酸),所以利用外源荧光法才可灵敏地进行定性和定量分析。此外,利用外源荧光法还可以研究大分子的溶液构象。如为了研究药物与受体、抗体与抗原、酶与辅基等重要生物活性物质的结合状态,可测定结合时小分子或大分子的荧光参数的变化,根据荧光探针和大分子或膜结合时的荧光变化,可以探测大分子或膜的构象,也可以了解微环境的疏水性、微粘度、化学基团之间的距离、变构效应、二级结构变化、测定二硫键等。因此,荧光分光光度法在分子生物学中得到广泛的应用。

由于荧光分析灵敏度很高,因此对血液、尿和组织取样量很少。例如用一滴血就能测定血液中葡萄糖的含量。用荧光法进行酶的定量分析,灵敏也很高。如采用荧光法代替比色法化验肝功能的转氨酶,抽血量可减为 $1/1000$ 。甾族化合物用荧光测定的灵敏度很高,如雌酮能测到 1×10^{-11} g,孕酮能测到 1×10^{-10} g。许多药物能用荧光法进行分析和鉴别,如有些药物注射剂量很小,有时低到 $100\mu\text{g/L}$ 水平,用荧光法能化验出它自体内的排泄量,例如阿司匹林可测到 10^{-10} g,青霉素可测到 5×10^{-9} g,链霉素可测到 1×10^{-9} g。

在环境保护和卫生防疫工作中,荧光法也得到广泛的应用,可用测定空气、水源和食物的污染,其中有些是致糖物质,例如存在于废气、香烟烟雾、某些水源和食物中的 3,4-苯并芘是一种强致癌物质,用荧光法测定灵敏而可靠。又如发霉的花生和烟叶中的黄曲霉毒素也可用荧光测定。污水中一些有害的重金属离子,也可通过间接方法测定其含量。如铅可测到 5×10^{-8} g,汞可测到 1×10^{-9} g。

参考文献

- 1 陈国珍. 荧光分析法. 北京: 科学出版社, 1975
- 2 郭尧君. 荧光实验技术及其在分子生物学中的应用. 北京: 科学出版社, 1979
- 3 Wehry E L. Modern Fluorescence Spectroscopy. Plenum

Press, New York, 1981, 1~4

4 陈国珍, 等. 荧光分析法. 北京: 科学出版社, 1991

(中国科学院生物物理所郭尧君研究员撰)

旋光色散 optical rotatory dispersion 1981年鲍特(Biot)发现石英能使偏振光的偏振面旋转,并在发现这种旋光现象的同时,在电气石中观察到圆二色性。后来科顿(Cotton)发现这两种现象的相互关系,称之为Cotton效应。1934年,罗莱(Lowry)发表了第1本有关旋光色散的书,但直到1953年在特建西(Djerassi)实验室有了第1台旋光仪后,旋光色散法才被广泛应用于研究有机分子和生物大分子。

旋光是指有光学活性的分子使平面偏振光的振动方向旋转的现象,其旋转程度与波长的关系称为旋光色散(ORD)。

光是一种电磁波,而且是一种横波,波的振动方向与传播方向互相垂直,电磁波可以用它的电矢量或磁矢量的振幅和方向来表征它的特性,电矢量方向一定的光称为偏振光,各种方向的偏振光均匀混合即组成自然光。自然光通过一个偏振器后,就只有一个振动方向的电磁波能透过,其余的全部被滤掉,这种只具有一个电矢量方向的光波称为平面偏振光或线偏振光。

平面(线)偏振光通过物质分子后发生两种情况:一种是偏振光射入物质分子后,其振动方向不改变,这种物质不是旋光物质。另一种是由于物质分子的不对称性,因而具有能使平面偏振光振动方向旋转的能力,这样的物质称为旋光物质或光学活性物质,如石英、糖、氨基酸和一些药物都是具有旋光性的旋光物质。

当一束光进入物质时,电磁波的传播方向和传播速度会发生改变,这种改变叫作光的折射。折射程度用折射率表示。不同物质的折射率不同,且随波长(λ)而异,它反映分子的电子结构和几何排布的不同。

一束平面偏振光可以看作是由一束左旋圆偏振光和一束右旋圆偏振光组成的。当一束平面偏振光进入非旋光介质时,介质对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光具有相同的折射率,则透射的平面偏振光的振动方向与入射的相同。但当一束平面偏振光进入旋光介质时,介质对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光具有不同的折射率。由于平面偏振光通过介质时产生相位差,因此在离开介质时,它们合成的平面偏振光的振动方向将和入射的平面偏振光的振动方向成一角度而产生旋光,这个角度称为旋光度,用 α 表示。 α 是 λ 的函数。

旋光物质使平面偏振光振动方向旋转的能力,除与它本身的性质有关外,还与偏振光通过分子的数目(浓度,半径)有关。旋光物质在不同波长下的旋光度 α_λ 可由旋光色散仪测得其读数。但在大部分工作中,旋光色散谱的纵坐标常用比旋度 $[\alpha]_\lambda$ 和摩尔比旋度 $[\Phi]_\lambda$ 表示:

$$[\alpha]_\lambda = \frac{\alpha_\lambda}{d \cdot C}$$

$$[\Phi]_\lambda = \frac{\alpha_\lambda M}{100d \cdot C}$$

式中 α_λ 为在一定波长下的旋光度,用度表示; d 为光所通过的介质长度,用 dm 表示; C 为浓度,用 g/ml 表示; M 为分子量。

在生物化学中,还常使用平均残基旋光度 $[m]_\lambda$:

$$[m]_\lambda = \frac{\alpha_\lambda M_0}{100dC}$$

式中 M_0 为平均残基分子量,即用总残基数除分子量所得之值。

如果以波长为横坐标,旋光度(或比旋度、摩尔旋光度等)为纵坐标,画出某一物质的比旋度随波长的变化关系即为旋光色散谱。旋光色散谱有以下几种类型:(1)平滑型曲线:这类曲线没有高峰和低谷,表明样品在测定波长范围内不具有光学活性的吸收带。随着波长的减短,旋光增加的是正型曲线,反之则为负型曲线。(2)单Cotton效应曲线:在生色团特征吸收的波长附近产生峰和谷的曲线,称为Cotton效应曲线。Cotton效应是由于左圆偏振光、右圆偏振光在介质中不但折射率不同,而且被介质吸收

程度也不同形成的结果,Cotton是发现这一现象的学者。长波处有峰,短波处有谷,称正Cotton效应,反之则为负Cotton效应曲线。(3)复Cotton效应曲线:有不止一个的峰和谷的曲线。

测定化合物光学活性的最简单的仪器是旋光仪。使用钠灯作光源,取其D线(589.3nm),用滤光片滤去其它波长的光后,由起偏器使其变成平面偏振光。此面偏振光经过样品管和检偏器后射到光电管上,产生光电信号,即可检测样品的旋光度。这样的旋光仪至今仍然被用来鉴定旋光异构体、化合物的纯度,测定糖分度、糖尿病人的血糖浓度等。

旋光色散仪结构与旋光仪相同,只是光源采用强度更大、波长范围更宽的氙灯或氦灯和钨灯,并使用单色器将其色散为单色光。偏振器由尼科尔(Nicol)棱镜发展到罗琼(Rochon)棱镜,检测器也由光电倍增管代替光电管以使测定灵敏度更为提高,通过旋光色散仪可以测定分子的立体结构和生物大分子的溶液构象,如计算蛋白质 α -螺旋、 β -折叠等。虽然旋光色散仪结构简单,但由于旋光色散的图谱分析和数据处理比较复杂和困难,所以20世纪70年代后,这种仪器已趋淘汰,而由圆二色仪及其技术代替(参见“圆二色性”条)。

参考文献

- 1 Schechter E. An Proc Natl Acad, USA 1964, 51: 695-702
- 2 斯科洛 D A, 等. 仪器分析原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1980
- 3 鲁子贤, 等. 圆二色性和旋光色散在分子生物学中的应用. 北京: 科学出版社, 1987

(中国科学院生物物理所郭尧君研究员撰)

荧光钙探针试剂 fluorescent probes for calcium 细胞和体液中的钙离子调节着许多生物化学反应,例如酶促反应的激活与抑制,激素的分泌释放,收缩蛋白运动的控制以及离子通道的开与闭等。除此以外,细胞内钙也参与疾病的形成与发展。钙离子起着如此重要的作用自然就提出了怎样标记和无损伤测定钙离子浓度的问题。

目前测定细胞内钙离子浓度有各具特色的不同方法。80年代荧光钙探针试剂的发现使荧光钙探针试剂法测定钙的选择性和灵敏度在各种方法中显出特点,而且可以用无损细胞的方法测定细胞内游离钙的浓度,因此受到普遍重视并进入实用阶段。

无损测定细胞内游离钙的浓度困难在于要求有某种钙探针试剂能够通透细胞膜并在细胞内与钙离子发生作用,且反应灵敏度足以达到准确测定的要求,以及 $10^{-3}m/L Mg^{2+}$ 不干扰测定等。近年来合成的一系列新荧光钙探针试剂的应用使问题得到了比较满意的解决。

要获得一种选择性好的荧光探针试剂,确定选择性功能团是重要的一步。Tsien RY等合成和应用的一系列荧光钙探针试剂当中优选了EGTA为新荧光钙探针试剂的络合功能团。现在常用的Fura2等荧光钙探针试剂采用EGTA为选择性功能团是试剂获得成功的重要因素之一。由于选择性功能团EGTA的确定,使Fura2类似物具有优良的选择性,为新型荧光钙选择性探针试剂的研究打下了基础。

EGTA是 Ca^{2+} 的选择性功能团,但是不能成为钙的选择性荧光探针试剂。显然这主要是因为荧光强度低以及酸效应太大。

由此可见,保持EGTA功能团结构,引入苯环改变体系的电子云密度,增加发色团和增大发色分子的共轭体系是很好的方法。因此人们在BAPTA分子结构中引入荧光很强的芪得到Fura2类似物,取得重大的研究进展。

Fura2类似物的确在选择性、响应时间,无损细胞的通透方式等方面具有先进性。然而Fura2等试剂结构中尽管引入了吸电子取代基-CN, -COOH,但激发和发射波长红移不多,仍工作在紫外光区。为此A. Minta, J. P. Y. Kao和Rr Tsien提出引入荧光酮和罗丹明类化合物到新型荧光钙试剂结构中,使新的荧光钙探针试剂工作在可见光谱区域内。目前以Fluo3受到重视。

为了增大发色分子的截面积,改善发色系统及合成荧光酮结构的新荧光钙探针试剂,陈震华,喻忠义,尹权设计并合成了一组新荧光钙探针试剂,其中已合成的 Wuro 4 在 H^+ 浓度 $5.62 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$ 时能穿透鼠肝细胞进行荧光标记。

选择性钙探针试剂也能改造成显色剂和发光试剂。喻忠义,陈震华,尹权设计和合成的 Wazo 类显色剂可作荧光钙试剂使用,Wazo 1 已用于血清中钙含量的测定,结果令人满意。

S. R. Adams 等从乙撑上进行试剂改进得到 Ca^{2+} 的发光试剂,其中 Nitr2 被认为是较好的一种。

目前中国已合成 Fura2, Fura3 和 Wazo Wuro 4 供应用和基础研究。一般来说,试剂合成反应步骤多,纯度要求高使得荧光钙探针试剂的合成有相当难度,因此设计并合成新型荧光钙探针试剂以及研究反应机理,提高反应产率,减少反应步骤,保证试剂的纯度自然成为生化试剂工作者关注的目标。

以酸盐盐提供的荧光钙探针试剂由于不亲脂,通透细胞困难,因此常常将荧光钙探针试剂做成亲脂的乙酰羟甲基酯以增强其通透细胞的性能,例如常用的 Fura2-AM 等。在细胞内酯酶能将酯类化合物水解成易与细胞内游离钙形成络合物的游离酸或其盐。曾有报导,将纯度 99.4% 的 Fura2-AM 在 -30°C 保藏,定期解冻以高效液相色谱分析,实验证明保藏近一年测得纯度为 99.1%,几乎没有改变。对于试剂的水溶液,通常只宜保存 30d 左右。长时间贮存其水溶液,EGTA 功能团有分解的可能。

新型荧光钙探针试剂的重要用途之一是用荧光显微镜测定单个细胞内钙的浓度,目前已能定量测定多种动物细胞内游离钙的含量。对于植物细胞来说,荧光钙探针试剂穿透能力相对来说弱得多,因此测定植物细胞内游离钙含量正成为研究热点之一。

以荧光分光显微镜测定单个细胞内的游离钙含量,能观察细胞内不同部位 Ca^{2+} 浓度的变化情况,方法准确可靠。此外,这类试剂也用于荧光标记和临床分析。

参考文献

- 1 Tsien R Y. Nature, 1982, 298: 478~483
- 2 Gryniewicz G, Poenie M. Tsien R Y J, Biol Chem, 1985, 260, 3440~3450
- 3 吴兰. 化学试剂, 1988, 10: 273~282
- 4 カルシウム研究会, 株式会社同仁化学研究所. 細胞内カルシウムの測定法(講演要旨集), 1988
- 5 Adams S R, et al. J Am Chem Soc, 1988, 110: 3212~3216
- 6 Minta A, et al. J Biol Chem, 1989, 264: 8171~8174
- 7 中国医学科学院药物研究所. 钙拮抗剂研究和细胞内游离钙的测定方法, 1990
- 8 邓必阳, 陈震华, 尹权. 化学试剂, 1992, 14: 40~45.
- 9 喻忠义, 陈震华, 尹权. 第 1 届全国生物分析化学学术讨论会论文集, 1992, 291~294
- 10 陈震华. 分析科学学报, 1993, 3: 73~78

(武汉大学陈震华副教授撰)

激光电离光谱分析 laser ionization spectroscopy 可调谐激光器的问世和发展,促进了电离光谱分析和应用,以可调谐激光器作选择激发光源,可大大降低背景和减小线宽,提高了电离光谱分析的分辨率和选择性,其灵敏度可达到单原子和单分子检测。经过 10 余年各国学者的不断研究,提出了多种激光电离光谱分析方法,在无机、有机、生物物质的痕量和超痕量分析中大显身手。目前在分析化学中应用较多的激光电离光谱方法有激光增强电离光谱法,激光共振电离光谱法和激光质谱法。

激光增强电离光谱法是光电流光谱法的一个分支,其基础为 1928 年彭宁(F. M. Penning)发现的光电流效应。1976 年格林(R. B. Green)采用可调谐染料激光器和锁相技术,第一次把光电流效应应用于普通的火焰原子分析中,观察到当激光波长与火焰中待测原子的分析线共振时原子由基态跃迁到激发态,引起火焰

碰撞电离增加。由此产生的电流信号与待测原子的浓度呈定量关系,可用于金属元素的测定,因而发展成一种新的激光增强电离光谱法。由于不需要光学检测系统,直接测定加在原子化器上的电场因元素电离而产生的信号。不仅省略了许多光学元件,也避免了一般光学检测所遇到的光散射、背景发射等干扰,使选择性得到显著改善和灵敏度大为提高。特克(G. C. Turk)和金钦汉等人在激光增强电离光谱分析方面进行了一系列的研究工作。采用此法研究过的元素已达 40 余种,大多数元素的检出限在 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ 之间,明显优于其它许多原子光谱方法,用于某些合金和地矿样品的分析,结果令人满意。

非火焰原子化器(如各种型状石墨炉)在激光增强电离光谱分析中的应用,使全部样品进行原子化,提高了样品的利用率,具有取样量少、灵敏度高等特点。微波等离子体用作激光增强电离光谱分析的原子化器,扩大了激光增强电离光谱的研究范围。采用两束不同波长(可见或近紫外)激光对待测原子激发,可使原子分步吸收两个光子跃迁到单光子激发所不能达到的高激发态能级。既能提高电离速率、增强信号强度,其检出限可降低 2~3 个数量级;同时对高电离电位元素又起到真空紫外激光激发的作用,还能提高选择性。激光增强电离光谱用于液相色谱检测沉积物中的烷基锡,检出限可达 0.06ng。

共振电离光谱是待测原子和分子吸收 1 个或多个光子到某一激发态,然后再吸收 1 个光子使之电离并检测电离后产生电荷的电流。此方法具有很高的灵敏度。1975 年赫斯特(G. S. Hurst)等人首次提出共振电离光谱法,1977 年他们采用这种方法在 10^{19} 氢原子中检测到 1 个铯原子,第一次实现了单原子检测,此后他们在这方面进行了一系列的研究工作,使共振电离光谱分析的研究范围不断扩大。目前共振电离光谱除用于无机元素测定外,在 DNA 序列测定、基因工程和有机分子检测中大显身手。利用两个激光器或 3 个激光器的双波长或多波长多光子电离光谱研究比较活跃,就灵敏度和信噪比而言,三波长激光多光子电离光谱高于双波长激光多光子电离光谱。随着激光电离光谱分析研究的深入,涌现出多种用于色谱检测系统的激光电离光谱检测器。色谱与激光电离光谱联机的理论与实践日益受到重视,已成为一个颇为有趣而又十分活跃的研究领域。

激光质谱所具有的优良性能已引起质谱学家的广泛重视,其分析范围涉及无机、有机和生物领域,样品形态可以是固态、液态或气态。化学元素周期表中的所有元素(包括二次离子质谱也难分析的氢元素)均可采用激光质谱测定,灵敏度可达 10^{-20} g ,因此激光质谱分析已成为迄今唯一能够分析固、液、气各种物态的无机、有机甚至分子量高达 30 万的生物大分子物质的综合分析技术。

1963 年赫尼希(R. E. Honig)首先把激光引入质谱分析,并发表了题为激光质谱研究的论文。早期激光质谱研究工作可分为两类,一类是着眼于激光脉冲与被研究物质所产生离子流脉冲在微秒量级的瞬时过程,多采用能记录这一瞬态过程的飞行时间质谱仪来进行研究。但由于当时记录技术不够完善,故多限于现象的研究,分析应用实例不多。另一类工作是在已有的磁式质谱计的基础上,装上激光离子源进行实际分析应用与研究,这方面的工作对激光质谱应用于固体分析的研究,起到了一定的推动作用。更多的研究工作则是在马-赫型固体火花双聚焦质谱仪的基础上开展激光质谱学研究,这方面的主要代表为前苏联科学家彼柯夫斯基(Yu. A. Bykovskii)等。他们通过理论分析和实验,提出了激光离子源中形成的等离体能量分布、电荷分布、角分布、离子复合过程等与激光功率密度、束斑直径的相互关系,并采用新离子源和选择适当参数,先后发表了三组份化合物的主成分和固体杂质成分无标样定量分析报告,奠定了激光质谱定量分析的基础。1975 年,希尼坎普(F. Hillenkamp)等提出的激光微探针质谱开拓出激光质谱在微区定性分析领域中的应用,其灵敏度较电子探针高几个数量级,并已有商品化的激光微探针质谱仪销售。近年来,激光解吸和共振电离质谱的研究风起云涌,来势凶猛。

激光解吸已成为应用质谱技术研究凝聚相中热不稳定和难挥发性化合物的一种有效软电离手段。共振电离质谱是1982年首先由多诺霍(D. L. Donohue)等提出的,它是共振电离光谱技术在质谱中的应用。其基本原理是:待测样品蒸发出的气态原子或分子在共振吸收波长吸收一个或多个激光光子跃迁至激发态,尔后再继续吸收激光光子发生电离。共振电离光谱探测电子,共振电离质谱则用来探测离子。共振电离质谱有很好的选择性,既能克服无机质谱分析中同质异位素的干扰;也为有机质谱分析提供了新的研究手段,通过激光波长和能量的选择,可控制分子的能量、减少碎片,以致只观察到分子离子峰。如将激光解吸、超声喷射与共振电离质谱联用,对某些热不稳定生物样品以可调谐激光器进行波长扫描,可得到二维光谱—质谱图。这种多维图谱不仅可获得生物分子光谱方面的结构信息,还可获得生物分子质谱方面的结构信息,是一种多功能的结构分析手段。

激光电离光谱分析技术是一种新的分析技术,具有高灵敏度和高选择性,因而有其特殊的应用价值。进一步加强应用基础和仪器商品化的研究,推进激光电离光谱分析与其它分析技术的联用,必将扩大激光电离光谱分析的应用范围。探索降低电离和光谱干扰的途径,提高激光电离光谱分析的准确度和测试精度,完善激光电离光谱定量分析技术仍将是今后的重要研究课题。

参考文献

- 1 任玉林. 光谱学与光谱分析, 1986, 6(4): 56
- 2 Sekreta, et al. Spectrochim. Acta, 1988, 43B(415): 679~686
- 3 Hurst G S, et al. Spectrochim. Acta, 1988, 43B(617): 713~726
- 4 Young J P, et al. Anal Chem 1989, 61(22): 1271A~1279A
- 5 Karas M, et al. Trends Anal Chem, 1990, 9(12): 321~325
- 6 赵善楷. 分析测试通报, 1991, 10(3): 62~69
- 7 胡继明. 化学通报, 1992, 2: 3~7

(武汉大学胡继明教授撰; 曾云鹤审)

激光拉曼光谱分析 laser raman spectroscopy 激光拉曼光谱与红外光谱相辅相成, 是进行分子振动光谱和分子结构研究的有力工具, 已广泛应用于无机、有机和生物物质的鉴定和分子结构研究。据不完全统计, 每年发表激光拉曼光谱方面的论文已超过千篇, 并出版了不少激光拉曼光谱的专著和标准谱图。

1928年, 印度拉曼(C. V. Raman)首先发现单色光作用试样产生的散射光中除了与入射光频率相同的瑞利光以后, 还发现有一系列对称分布在瑞利散射光两侧, 但其强度大大弱于瑞利散射光的其它频率的光——即拉曼散射效应。随后, 法国和苏联科学家也相继发现了这种效应。到1928年底, 关于拉曼效应的论文已达60篇之多, 引起世界范围的广泛关注和研究, 拉曼由此获得了1930年的诺贝尔奖。开始拉曼光谱所用的光源一般是高压汞弧灯, 从1928~1940年间发表了2000篇左右关于拉曼光谱的论文, 报道了大约4000种化合物的拉曼光谱图。1946年以后双光束红外光谱仪的出现使红外光谱研究物质分子结构的方法迅速发展, 而拉曼光谱却处于停滞状态。1953年绍雷金(P. P. Shorygin)等根据前人的预测, 在实验中观察到共振拉曼散射(RRS)—激光光频率与样品分子某一电子吸收峰接近或重合时拉曼信号强度增加的效应。1962年激光器开始用作拉曼光谱的光源, 并推出了商品化的激光拉曼光谱仪, 此后激光拉曼光谱分析的研究蓬勃展开, 提出了一些新的激光拉曼光谱技术和方法。1963年特休恩(R. W. Terhune)等首先观察到一种非线性拉曼效应——相干反斯托克斯拉曼散射(CARS), 它的灵敏度较普通拉曼光谱可提高3~5个数量级, 但当时并未引起重视。高峰值功率可调谐激光器的出现, 为它的发展提供了有利条件。1974年弗莱希曼(M. Fleischman)等首次进行了电化学池中银电极表面吸附吡啶分子的拉曼散射实验, 观察到表面增强拉曼散射(SERS)。自从弗莱希曼发现SERS效应以后, 许多研究工作者对这一

效应进行了大量的研究。研究主要集中在探讨SERS的理论模型、寻找新的体系和实验方法以及SERS的应用。关于SERS产生的机理, 现已提出10余种理论模型。物理类模型有镜像场模型、表面感应共振拉曼模型、调制反射模型、表面电磁理论模型、天线共振子物理模型和放电棒模型等。多数物理类模型认为表面增强源于金属表面区域电场的增强, 但增强倍率大都只能在极端条件下达到 10^6 数量级。化学类模型主要有活位模型和电荷转移模型, 将增强原因归于金属表面的某些特殊位置和散射过程间电荷转移态的共振, 难以定量估算出拉曼散射截面。张翔翔等人提出一种同时兼容物理和化学增强的模型, 试图解释所有的表面增强现象。尽管如此, 要得到一个普遍适用的完善模型尚需进行大量实验和理论工作。随着SERS研究的深入, 新的表面增强活性载体和具有SERS活性的物质不断涌现。除了早期的金属电极外, 至今已发现金属溶胶、模拟银溶胶和岛状膜等均可呈现SERS。SERS已广泛用于氨基酸、蛋白质、染色体和神经传递素等分子在银胶或银电极上的分子构型、吸附状态、界面行为和电极反应动力学以及药物、染料、农药和环境污染物的痕量检测。感蓉生等在生物分子的SERS及SERS与其它分离技术联用方面的工作尤为突出。

可调谐染料激光器的出现, 给RRS带来了福音。与正常拉曼光谱相比, RRS灵敏度高, 可用于低浓度和微量样品检测。由于许多生物分子的电子吸收峰位于紫外区, 近年来紫外RRS在生物分析中的应用比重明显增大, 可不加处理也得到人体体液的拉曼光谱图, 已用作流动注射分析和液相色谱的检测器。萨列欧(F. Sureau)等人采用紫外微型拉曼光谱仪, 在1990年首次测得单个活细胞的RRS。利用RRS对某些谱带的选择增强, 可得到分子振动与电子运动相互作用和大分子结构的信息。采用共振拉曼偏振测量技术, 还可得到正常拉曼光谱中不能得到的有关分子对称性的信息。因而, RRS在无机、有机、生物大分子、离子乃至活体组成研究中发挥着重要作用。

CARS是将频率为 ω_1 和 ω_2 的两束强激光束按相位角 Q 同时聚焦于拉曼活性样品上, 经三阶非线性极化在频率 $\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2$ 处产生反斯托克斯相干辐射, 其量子效率可达1%, 散射强度比正常拉曼效应提高 10^5 倍以上, 并具有高分辨率和高抗荧光干扰的能力。1973年雷尼尔(P. R. Regnier)等人首次将CARS用于气体浓度检测, 已有报道将其用于气体污染物环境监测。在生物领域中, CARS已成为探测生物分子结构的有效工具。如与液相色谱联用, 其鉴别难挥发性化合物的能力可与色—质联用技术相媲美。

1974年罗萨斯科(G. J. Rosasco)等将显微镜用于激光拉曼光谱分析, 使所测样品微区的拉曼光谱具有较高的精确性, 可用来获得微区样品的化学成份、晶体结构、分子间相互作用及分子取向等各种信息, 已用于矿物夹杂物、环境污染物和催化剂的成份鉴别、材料非均匀性和产品结构的在位及无损检测。

将光学多道探测和时间分辨光谱技术应用于激光拉曼光谱, 使时间分辨拉曼光谱的研究日趋活跃。多道探测的时间分辨拉曼光谱, 时间分辨共振拉曼光谱和时间分辨相干反斯托克斯拉曼光谱大大提高了激光拉曼光谱分析的选择性和分析速度, 在高荧光、易光解物质和瞬态物质的拉曼光谱研究中发挥着重要作用。

近年来, 基于光学调制方法的调制光谱技术在激光拉曼光谱研究中显示出特有的魅力。1986年蔡斯(D. B. Chase)等将迈克尔逊干涉仪替代激光拉曼光谱仪的单色仪, 成功地实现了拉曼光谱的付里叶变换。1987年沃特斯(D. N. Waters)等将阿达玛变换用于激光拉曼光谱, 较好地消除了瑞利散射的干扰。付里叶变换拉曼光谱和阿达玛变换拉曼光谱可对样品的拉曼光谱进行多波长同时检测, 在易光解物质的快速鉴定和多极拉曼谱带的同时观察方面具有明显的优势。

激光拉曼光谱和许多研究工作尚处于开发阶段, 它的分析应用还有待进一步扩展。可以预料, 提高SERS的重现性, 加强

SERS 和 RRS 与流动注射分析、色谱、电泳分离以及电化学技术的联用将成为当前的研究热点,同时 SERS 和 RRS 微探针和遥感遥测技术将有较大发展。为克服吸收过程、荧光背景、热透镜效应以及样品光分解和热分解对 RRS 测定的影响,今后一段时间内,拉曼差示,样品旋转以及时间分辨光谱技术仍将是 RRS 的研究重点。付里叶变换拉曼光谱和阿达玛变换拉曼光谱的研究将会进入广泛的实用阶段。并且随着激光技术、实验方法和仪器的进一步发展,CARS 和其它非线性拉曼光谱分析应用研究将有广阔的发展前景。

参考文献

- 1 吴征铠. 光谱学与光谱分析, 1983, 3(2): 65~71
- 2 Jones C M, et al. Trends Anal Chem, 1985, 4(3): 75~80
- 3 Levin I W, Lewis EL. Anal Chem, 1990, 62(21): 1101A~1111A
- 4 Cotton T M, et al. J of Raman Spectrosc, 1991, 22: (12) 729~742
- 5 胡继明. 化学通报, 1992, 2: 3~7

(武汉大学胡继明教授撰, 曾云鹤审)

激光诱导荧光光谱分析 laser induced fluorimetry

激光光源和微弱信号探测技术在荧光光谱分析中的应用,使激光诱导荧光光谱达到光谱分析的灵敏度极限—单原子和单分子检测。激光诱导荧光光谱分析在生命科学、环境科学等领域中扮演着极其重要的角色,已经吸收众多科学家探索这一迷人的前沿领域,并取得重要进展。

荧光可分为分子荧光和原子荧光,有关荧光现象的观察可以追溯到 16 世纪。1575 年西班牙马拉德斯(N. Manardes)在对一种“Lignum Nephriticum”的木头切片溶液的观察后,首次记录了分子荧光现象。1832 年斯托克斯(G. G. Stokes)阐明分子荧光发射的机制,并提出将分子荧光作为分析手段。此后,人们对分子荧光现象和分子荧光分析开展了大量的研究。1968 年罗宾逊(J. W. Robinson)等用二氧化碳激光器研究气态有机化合物的红外荧光光谱,开始了激光诱导分子荧光光谱分析的研究,由此而引起分析化学家们的极大兴趣和广泛研究。

早在 20 世纪初,物理学家就开始了原子荧光的研究,但直至 60 年代才取得较快发展。1962 年阿尔克梅德(C. T. J. Alkemade)采用原子荧光法求得 Na 589.0nm 线的量子产率。威恩福特纳(J. D. Winefordner)等人在 1964 年首次研究了原子荧光的可能性,并建立了第 1 台原子荧光光谱分析实验装置。1971 年,威恩福特纳、梅姆斯特塔(H. V. Malmstadt)和库尔(J. Kuhl)等几乎同时开始将激光作为原子荧光激发源的研究。目前激光已成为原子荧光光谱分析的理想光源,但研究深度和广度不及分子荧光光谱分析。

各种类型的气体、固体、半导体、准分子和染料激光器已在激光诱导荧光光谱分析研究中广泛采用,Boxcar 取样积分器、光学多道探测器和时间相干单光子计数等检测技术在提高激光诱导荧光光谱分析灵敏度、选择性和实现多波长同时检测等方面发挥着重要作用,并已研制和生产出多种激光诱导荧光光谱分析仪器和装置。由于脉冲激光器具有脉宽窄和能量高等优良特性,加之激光可聚焦成很小光斑,取少至零点几微升样品即可测定,使其成为生物样品分析的有力工具。激光诱导荧光光谱分析不仅在氨基酸、蛋白质、核酸、胆色素、DNA 碱基序列、代谢产物、细菌病原体和酶的测定中发挥着重要作用;而且根据生物的激光诱导荧光信号特征与品种经济属性的关系,为优良品种的选择提供依据。70 年代发展起来的流式细胞计使染色细胞在稳定液体流动中恒速通过激光束的椭圆聚焦区,所产生的激光诱导荧光信号和散射信号与细胞体积、DNA 和 RNA 的含量有关,可提供细胞的基本信息,从而了解生物物质内在的本质变化。在肝细胞倍体及混合细胞群中各亚群细胞 DNA 含量测定,癌细胞动力学研究和化疗癌病患者治疗监测等方面均已获得应用。激光的高能量使分

子的双光子或多光子吸收与荧光现象的观察成为可能,为研究分子特性和提高荧光分析选择性开辟了新途径。1984 年多维奇(N. J. Dovichi)等将激光诱导荧光光谱用于流动液体中罗丹明 6G 的检测,其检测限可达到单分子。

激光诱导荧光光谱在稀土配合物的发光机理和分析应用研究中十分活跃。胡继明等人对稀土与 10 余种配体形成的二元和三元配合物分子的激光诱导荧光特性进行了系统的研究,首次观察到某些 β -二酮分子在表面活性剂胶束溶液中的室温磷光发射,提出了稀土配合物荧光发射的能量传递模型,并导出速率方程、定态解和配体三重态向稀土离子激发态进行有效能量传递的三条件。推导出新的荧光强度公式,用子描述激光能量、配体浓度与配合物荧光强度的关系。单个激光脉冲产生荧光的工作曲线则定下限可达 $\mu\text{g/mL}$,如采用脉冲光子计数器作检测装置,检出限可达 fg/mL 。不用分离,直接用子高纯稀土氧化物等样品痕量稀土杂质的测定。

激光低温光谱的基础是 1952 年原苏联什波尔斯基(E. V. Shpol'skii)发现的 Shpol'skii 效应,即分子的吸收光谱和荧光光谱低温窄化,由峰状光谱变为线状光谱的效应。1972 年波塞诺夫(R. I. Personov)等首次将激光引入低温荧光光谱研究。由于致癌化合物—多环芳烃(PAH)痕量检测的需要,分析化学家对激光低温光谱进行了许多卓有成效的研究。激光低温光谱可分为冷却溶液光谱,基质隔离光谱,荧光窄线光谱和超声喷射光谱,它们被称为分子光谱的指纹识别法,已用于 PAH 的同分异构体及代谢产物的测定和探讨 PAH 的致癌机理。一般说来,这些方法对所用溶剂有严格要求,加之需冷却到 77K 或更低温度,使其应用范围受到一定限制。

时间分辨荧光光谱是依据待测组份的荧光衰减特性的差异进行选择测定的一为方法,即可消除瑞利和拉曼散射的干扰,也可根据荧光寿命差异对荧光光谱重叠组份进行测定。随着激光器件的进展,时间分辨的下限已达 10^{-15}s 。稀土配合物的激光诱导时间分辨荧光光谱受到分析化学工作者的重视。1982 年小川禎一郎(T. Ogawa)等采用氮分子激光器和脉冲门光子计数器,首次实现了铈和钆的激光诱导时间分辨荧光光谱测定。陈观铨等对激光诱导时间分辨荧光光谱分析技术进行了研究,首次提出时间分辨窗口技术用于长寿命组份存在下短寿命组份的测定,并将导数技术、三维光谱技术和卡尔曼滤波技术用于时间分辨荧光光谱,实现了多组份同时测定。他们还将协同发光体系用作激光诱导时间分辨荧光免疫法的增强溶液,进一步提高了荧光免疫分析的灵敏度。

激光诱导荧光光谱与色谱、电泳和流动注射分析联用,使其兼有色谱、电泳分离的高选择性,流动注射分析的高速度和激光诱导荧光光谱的高灵敏度。如结合光学多道探测器的使用,可实现光谱的快速扫描,使其提供的信息量大幅度增加,目前正朝仪器化和计算机化方向发展,激光诱导荧光光谱用于遥感检测和病变组织的早期诊断也取得了可喜的进展。

用于痕量元素测定的激光诱导原子荧光光谱法有共振荧光和非共振荧光两种,其中非共振荧光的研究较为活跃,威恩福特纳等人做了大量系统的研究,可以测定的元素已达 60 余种,大多数元素的检出限为 ng/mL ,某些元素的检出限在 $\mu\text{g/mL}$ 以下。1978 年盖尔布瓦克斯(J. A. Gelbwachs)等人将激光饱和激发与非共振荧光检测相结合,提出了一种单原子检测的饱和光学非共振荧光光谱法,已用于钠原子的测定。激光诱导原子荧光光谱法用于超纯水,高温超导材料和生物组织等样品中痕量元素的测定,获得了满意的结果。

激光诱导荧光光谱分析在解决许多现代分析测试问题中表现出特有的魅力,进一步的工作将集中在推进激光诱导荧光光谱分析与其它分析技术的联用研究以及开发调制光谱技术和光谱处理技术(如付里叶变换光谱、阿达玛变换光谱、时间分辨光谱、多维光谱、导数光谱)等在激光诱导荧光光谱分析中的应用。激光诱导荧光光谱仪器化的研究不仅将促进对激光诱导荧光光谱

分析基础研究,而且将会大大拓宽它的应用范围。激光诱导时间分辨荧光免疫法的研究仍要进一步深化和开发。

参考文献

- 1 Pinkel D. Anal Chem, 1982, 54(3):503A~519A
- 2 Dsilva A P, Fassel V A. Anal Chem, 1984, 56: (8)985A~1000A
- 3 王文韵, 应用化学, 1988, 5(3): 1~8
- 4 Omennetto N. Spectrochim Acta, 1989, 44B(2): 131~146
- 5 胡继明, 等. 分析化学, 1992, 20(3): 356~362

(武汉大学胡继明教授撰; 曾云鄂审)

激光解吸质谱学 laser desorption mass spectrometry

激光解吸质谱学使用脉冲激光,以一定功率密度(通常为 $10^6\sim 10^7\text{W}/\text{cm}^2$)辐照质谱仪离子源室内的样品(通常为有机化合物,高聚物和生物大分子化合物),使其解吸电离形成气态离子,并经质量分析和检测,以质谱图的形式输出结果。由于激光脉冲宽度一般只有 $10\sim 100\text{ns}$,所产生离子流脉冲一般也只在微秒量级,因此不能使用常规质谱仪,而只能使用能迅速记录其全谱的飞行时间质谱仪或傅立叶变换回旋共振质谱仪。由于前者可检测万以上道尔顿的大分子,因此目前激光解吸质谱仪大都采用飞行时间质谱仪。这种仪器兼有结构简单,价格便宜和灵敏度极高等优点。在80年代末期, F. Hillenkamp 研究成功了基体帮助激光解吸生物大分子新方法,实现了大分子物质分析的重大突破,引起了质谱学界和生物化学界的高度重视,并已在这几年内得到迅速发展。为分子量高达几十万的诸如蛋白质,核苷酸,多糖类生物大分子物质及高聚物的分析测定展示了光辉前景。

1968年 Vastola 等首次使用激光质谱法研究如氨基酸,单糖等小分子有机物。但由于使用慢速扫描磁式双聚焦质谱仪,不能获得满意结果,只是到了1975年 Hillenkamp 等人研制并应用激光微探针飞行时间质谱仪于生物、医药的研究。使激光解吸质谱分析有机物进入了实际应用阶段。1980年 Hercules 等人应用激光微探针飞行时间质谱仪对高分子化合物开展了研究工作,使激光解吸质谱分析进入了高聚物研究领域。1981年 Hillenkamp 等研制成功了反射式取样激光微探针飞行时间质谱仪,为此后激光解吸质谱分析提供了最合理仪器结构基础,从而大大推动了激光解吸质谱学的发展。1982年 Gross 等人应用傅立叶回旋共振质谱进行激光解吸有机物的研究,建立了激光解吸质谱研究的新分支, Wilkins 利用这一技术对许多不易挥发,热不稳定生物有机物质,如多肽,金属有机配合物,糖类,核苷酸等进行了一系列研究,取得了很多有意义成果。在激光解吸机理的研究方面 Hillenkamp 进行了较系统的研究工作并先后发表了多篇论文,对其机理作了较为深入的探讨,阐述了激光解吸过程中对有机分子光电离和光化学电离的过程,以及有机物样品共振吸收能量的集合作用。但也同时指出有关机理仍有待深化和进一步探讨。激光解吸质谱学发展史中最重大事件是1988年 Hillenkamp 和 Karas 人研究成功了用尼古丁酸固相基体帮助激光解吸分子量高达几万道尔顿的大分子蛋白质新方法。这种快速(只需几分钟测定一个样品),精确(分子量测定准确度可高达万分之一)和高灵敏度(能测定皮克量级大分子物质)分子量测定方法,是经典方法根本无法比拟的,因而受到了高度的重视。经这几年的发展,目前世界上重要质谱仪厂家都竞相生产这种仪器,可以预计在两三年内它将成为生物大分子物质分子量测定常规使用仪器。

目前使用这一方法测定最大分子量记录是 Hillenkamp 等所完成的刀豆脲第4个氨基的测定,其分子量为274 000。分子量测定准确度的最好结果是 Chait 所发表的对细胞色素C等蛋白质分子量测定,其绝对误差为 $\pm 0.01\%$ 。在帮助激光解吸的基体研究方面也取得不少成果, Chait 和 Hillenkamp 对此都进行了系统研究。已经发现适于使用的基体有几十种,其中最为有效的除尼古丁酸外,还有3种,这些基体是:二羟基内挂酸,2,5-二羟基苯甲酸,芥子酸,这些基体的特点都是对四倍根镨铈钪铝石榴石激

光器波长(266nm)或氮激光器波长(377nm)有共振吸收。由于使用了红外波长激光器, Hillenkamp 等人发现尿素、甘油,甚至结冰的纯水作为基体也具有帮助激光解吸大分子的作用。在基体研究工作中,中国赵善楷于1989年研究成功了把广泛应用于快原子轰击质谱技术的液相基体引用于激光解吸的新方法,即液相基体·细纤维物质基底方法。并以此为基础进行了一系列研究工作。如应用溶液化学规律进行的传荷衍生作用以及溶液 pK 值的测定都使用了上述方法成功地得到了验证。这一新方法应用于大分子物质分析也获得了显著效果。由于待分析物能在液相基体表面得到不断补充,已经发现其分析结果比固相基体有更好重现性,并有高一个数级的灵敏度。更有意义的是利用这一新方法第一次成功地对凝胶电泳分离蛋白质的分子生物量进行了测定,广泛应用于生化领域的凝胶电泳分离技术与快速、精确、高灵敏度分子量测定新技术的成功结合,开拓了激光解吸质谱学十分诱人的前景。

目前,基体帮助激光解吸新方法已成功应用于多糖和核糖酸、脱氧核糖核酸类化合物的分析。但对多糖类化合物的分析仍存在问题分子量还未过万,对核糖核酸类化合物分析的分子量最高也只能达到4万,关于其序列信息的获得还有待进一步研究。

激光解吸质谱学的研究热点仍在于大分子生物物质分析测定方面的应用。从这一新技术发展历史看,目前只是处于初始阶段,有关的机理还没定论,还需探索。它在多糖类,核糖核酸类大分子生物物质应用方面还待改进,人们迫切希望这一新技术能对核糖核酸的顺序信息的测定取得突破性的进展。这一新技术与其他分析方法的联用,特别是与有效分离技术的联用,如二维凝胶电泳方法,毛细管电泳方法的联用是化学家十分感兴趣的课题。

飞行时间质谱仪的流通率高达90%以上,比常规使用四极质谱和磁式双聚焦质谱仪的流通率高出3~5个数量级,它具有极高灵敏度,又由于在理论上仪器可以检测的质量范围是无限制的,而它过去固有的缺点,即低的分辨率,也由于技术改进,已经得到克服,分辨率上万的仪器已经问世,因此已经有人预言,兼有电子轰击和激光解吸的飞行时间质谱仪,由于结构相对简单,有极高灵敏度,以及大的质量范围,将可能成为新一代被普遍使用的有机质谱仪。而用于作为研究型的仪器,如序列式激光飞行时间质谱仪,附加激光后电离部件,以及脉冲气体碰撞池附件等的应用研究也已经成为激光解吸质谱学家们的研究课题。

参考文献

- 1 Hillenkamp F, et al. Nature, 1975, 256: 119~120
- 2 Hercules D M, et al. Spectroscopy Letters, 1980, 13(6): 347~360
- 3 Gross M L, et al. Anal Chem, 1982, 54: 1435~1437
- 4 Hillenkamp F. Series in Chem Physics 1983, 190~205
- 5 Karas M, Hillenkamp F. Anal Chem, 1988, 60: 2299~
- 6 Li Bahr F, Hillenkamp, et al. Advances in Mass Spectrometry. P Lonquevalle Ed Heyen & Son, 1989, 318~319
- 7 赵善楷, 中山大学学报(自然科学版), 1990, 100A: 96~99
- 8 Shankai Zhao, et al. Anal Chem, 1991, 63: 450~453

(中山大学测试中心赵善楷教授撰)

同位素质谱和无机质谱分析 同位素质谱是质谱学中最老的学科,该学科的应用领域不断扩大。

地质科学是同位素质谱应用最广泛的领域,多方面的开发与基础研究都很活跃。在同位素地质年代学、无机和有机稳定同位素地球化学、宇宙化学及矿床同位素地球化学等方面进展尤为迅速。

1. 同位素地质年代学。传统的K-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, U-Th及U-Th-Pb等成熟的方法,其本身并无重大发展。但应用方面有了新趋向,传统的地质年代学多以研究大地质

环境、同素年代学和宇宙化学为主,而我国诸多的同位素地质工作者将其研究转向矿床的成矿环境、矿化年代、成矿特征和成矿机制,直接为矿物勘探服务。在 Au、Ag、Cu、Ni、Fe、Mg、U、Pb—Zn、Au—Ag、Ag—Pb、Ag—Pb—Zn、S—Fe—Au、萤石、锆石等矿物勘探中发挥重要作用。在方法作用方面也发生了变化。原来以质量数较小的同位素 K、Ar、Rb、Sr 为主,随着高水平大型同位素质谱计增多和使用水平,更多的人掌握了难电离的重金属元素的质谱分析技术,所以 U—Pd 法、U—Th 法、U—Th—Pb 法以及分析难度较大的 Sm—Nd 法所占比重迅速增加。Ba—Sr 法、K—Ca 法、Lu—Hf 法、La—Ba 法也逐渐有人采用。地质工作者欲获得的已不仅仅是年龄信息。为了多种地质信息综合开发和利用往往需要测定多种元素。李兆福(1991)进行火山研究测定过 Rb、Th、Ta、Nb、Na、Zr、Hf、Y、S、Pb 等元素,牟保磊(1992)测定了碱性杂岩中 U、Th、Nb、Ta、Zr、Hf、Ba、Cr、Rb、Sr、K、Ar 及多种稀土元素,闫保瑞(1992)测定了微生物金属结核中的 Ni、Cu、Pb、Zn。

2. 稳定同位素地球化学。这是发展最快的学科。它是通过测定 C、H、O、S、He、Ar、B、Be、K、Ca、Cl、Pb、Sr 等元素的同位素的微小变化提供地质信息,其用途非常广泛。除了用于宇宙化学、地幔、沉积岩、变质岩、火成岩、矿床、水文、海洋、湖泊等方面的研究外,近两年在石油、天然气和煤的勘探中的应用急剧增加。新发展起来的石油稳定同位素地球化学 C 同位素被当一种守恒的示踪同位素加以应用。H 同位素研究也取得可观的进展。90 年代的主要研究成果是证明了煤和干酪根 C 同位素组成的变化主要与其类型和沉积环境有关,而与其演化阶段无关,根据模拟 A、原油及其族组分 C 同位素相似可准地进行油源对比;应用天然气组分的 H、O 同位素组成能有效地判识天然气的成因类型、成熟程度和进行油气源岩对比;应用 C 同位素数据能判识地表油气化探烃气异常的成因和来源(廖永胜,1992)。

质谱在核科学家、农学和医学等方面的应用主要是同位素分析、同位素示踪和同位素稀释。

1. 同位素分析。主要应用领域为核科学和核工业、地震学及基础科学等。应用范围在扩大,例如煤矿安全、海洋生物和沉积岩研究等。

2. 同位素稀释分析。该法以灵敏、准确的优势广为人们重视。应用和方法本身的研究都很活跃。

3. 同位素示踪。该法主要用于农业和医学。它直接服务于粮、棉、油、水果、蔬菜及多种经常作物生产,用于多种基础研究和若干种疾病的临床诊断。

20 世纪 60~70 年代我国研制了第 1 代大型同位素质谱计 ZhT—1301、ZhT—02、ZhT—03、ZhT—05 等,在核科学、地质及逐学等方面发挥了重要作用。当时与国际水平,差距并不很大。70 年代中期以后,大批外国同位素质谱涌入中国,垄断了中国市场,迫使中国质谱计制造厂家全部停产,大型质谱计研制陷于停顿。在非常困难的条件下同位素质谱工作者进行了大量研究,成绩突出。

1. 小型专用质谱计的研制。国内质谱工作者在型仪器失去竞争实力后立即选定小型专用质谱计作为突破点赶超先进水平。这类仪器投资少、见效快,孔令昌研制的新型离子光学惰性气体质谱计分辨能力高、分析室体积小, $\phi_m = 130^\circ$, $\epsilon = 56^\circ$, $R = 8\text{cm}$ 。这种大斜角出射的新型离子光系统在同样条件下比传统离子光学系统质谱计分辨能力高 1.4 倍。该仪器通过气体中 He、Ne、Ar 的测定成功地预报 3 次地震。邱纯一研制的水 He。俞恭谦研制的用于铀矿、石油及天然气勘测的小型四析质谱计和信通集团科仪公司研制的用于农业、医学和 IDMS 分析的离子质谱计体积小、性能佳、使用方便、快速,有广阔的应用前景。我国研制的航天和潜艇用单极质谱计水平也较高。此外,过程分析质谱计也有报道。

2. 进口质谱计的改进。大量进口质谱计带来一系列困扰用户的难题,许多零部件老化急需更新。霍卫国等研制的铯—铝泵

—钛泵组合高真空系统将真空吸附泵与溅射串联组合,成功地取代了进口质谱计上 MTA 系裂的涡轮分子泵高真空系统。不仅提高仪器的真空度,而且无污染、无噪声、泵芯更换方便、维修简单。黄耀生研制的三带源灯丝组件只有英国 VG 公司的 1/10,而使用寿命提高了 1~3 倍。桑海青等将英国 MS10 质谱计进行了改造使达到 80 年代中期水平。更值得称道的是计算机的研制。进口质谱计上的 HP9825 和 HP9835 型微机性能低、价格贵、维修困难。潘万德等研制的新微机系统功能增多,内外存增加、维修方便,而价格还不到 HP9825 的一次维修费。段艳杰研制的动态接收器测量软件及其他一些程序控制软件、接口软件都超过了原进口仪器的水平。

3. 制样系统的研制。制样是质谱分析的关键之一,这一点正日益为人们所认识。前些年得各国争相研制大型高水平质谱计,经过十几年的发展,仪器已比较完善,分析灵敏度和精密度已能充分满足多方面分析需求。现在质谱分析的成败和水平往往受限于制样系统和化学处理水平。不少外国公司已把开发重点转向制样设施和辅助系统的研制。近 2 年国内研制了不少高水平制样装置,受到国外大公司重视,有的争相与国人商谈使用。孔令昌研制的 NG—1 型全金属稀有气体制备和纯化系统,廖永胜等研制的 C、O 同位素分析制样系统均属此列。此外 Ni 反应器和取样装置的研制也很成功。

负离子,尤其是 Cl^- 、 Br^- 、 I^- 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 CN^- 等常见负离子的测定是用途极广的分析课题。以前国内这方面的工作很少,现在已引起较广泛的关注。肖应凯等以 Cs_2Cl^+ 和 Cs_2Br^+ 正离子形成成功地测定了盐湖试样中 Cl^- 和 Br^- 含量,相对标准偏差仅为 0.034%。这是一个非常好的方法。过去有人用 CH_3Cl^+ 的形式测定 Cl^- ,但分析结果受 H 和 C 同位素的影响,需要校正。而 C 单同位素元素它不影响 Cl^- 的分析结果。

发射剂是提高难电离元素的电离效率,获得高而稳定的离子流的重要手段。国内一直有人从事这方面的研究。肖应凯等研制的石墨—乙醇—水低温发射剂,分析 B 时能使信号强度提高 100 倍,而且离子流高度稳定,测定精密度达 0.0056%,受到国内外同行的重视。IDMS 法同时测定多元素研究,在稀土分析方面又有新进展。

自从 1939 年 Alvarez 利用回旋加速器发现自然界有 ^3He 存在以来该法在自然界长寿命核素测定中一直起重要作用。70 年代末发展起来的加速器质谱(AMS)具有特别高的灵敏度。它可用少至几十微克的样品分析天然丰度低至 10^{-15} 的同位素。该法可利用正负离子技术鉴别同量异位素。例如 ^{14}C — ^{14}N 、 ^{26}Al — ^{26}Mg 、 ^{36}Ar — ^{36}Cl 、 ^{129}I — ^{129}Xe ,它们的质量差别很小,用常规质谱计算无法区分,而 AMS 可以鉴别它们。AMS 还可以通过测定 Re 和 Os 同位素的微小变化推算地质年龄和用于海洋地质研究。中国原子能研究院已用 AMS 测定了 ^3H 、 ^3He 、 ^{10}Be 、 ^{36}Cl 和 ^{129}I 等核素。

激光共振电离质谱(RIMS)灵敏度高达 10^{-12}g/g 以上,被称为最有潜力的分析仪器。国内已开展这方面的研究。

同位素稀释质谱分析已广为应用而非同位素稀释质谱分析却鲜为人知。朱凤蓉等用 ^{235}U 作稀释剂测定了 ^{237}Np ,测定结果与标样值符合较好。该种分析难度很大,非同位素作稀释剂进行电离行为、化学行为等多种校正,并需进行全电离过程积分测定。但这毕竟是一种方法,不得已时可用之,可解决疑难分析问题。

综上所述,同位素质谱应用得到进一步发展,又出现了一批高水平的研究成果,如 38 亿年中国迄今最古老的岩石的发现、石墨发射剂研制成功、Ir 和 Sb 原子量的测定结果被国际原子量委员会采用等,同位素质谱计的研制出现了新转机。应抓住以发展小型专用仪器和样品制备装置为主的国际动向,利用我们在这方面的技术积累开展与国外合作,把我国同位素质谱计研制水平提高一步。

无机质谱中近 2 年火花质谱呈下降趋势,而离子探针和等离子体质谱发展较快。国内第一台激光等离子体质谱计在厦门大学

诞生。

世界上几乎所有生产火花质谱(SSMS)仪器的公司都已停止生产,仪器备件和消耗材料来源已非常困难,所以其应用日益减少。刘贤德等测定了CA-4标样中Cr、Ga、Ge、Ag、Sn、Sb、Pb、Bi,李柄林等用IDSSMS法测定了茶叶中的Cu、Zn、Pb、Rb、Sr、Ba、Ce、Tb、La。史广昭等测定了 Y_2O_3 和 Eu_2O_3 中的14个稀土元素,检出限为 $(0.06\sim 0.6)\times 10^{-6}g/g$ 。马树钦等测定了纯金中几十个杂质元素。由于前述原因估计今后SSMS法不会再有新发展。

随着冶金、电子工业的发展,尤其是许多高技术领域材料分析日益增多,国内二次离子质谱(SIMS)和离子探针(IMS)的研究和应用开发很受重视。游俊富等用ID-SLMS法测定了 Y_2O_3 等粉末试样中的Fe、Ni、Cu和 Al_2O_3 中的B,他们测定了 $LiNbO_3$ 结晶材料中的He、Li、B、N、O、F、Fe、Nb、Xe。薛正贤用IMS-300型仪器研究了钢铁中Si、Mn、Cr、V、Mo、Ti、Al、As灵敏度系数,并进行了Fe和 Fe_2 的校正,使测定多数元素的SD达到±20%。刘中豪等用IMS法研究过钢铁中H₂的扩散和渗透行为。

等离子体质谱(ICP-MS)与其他当代分析技术相比有明显的优越性。在地质、冶金、石油、海水水质及临床分析超纯试剂分析、岩矿分析及海洋分析中应用已较普遍。国内不断有人探索该法在环境分析中的应用。彭子成用该法测定了水中Se、Sb和Ni,灵敏度达0.1 $\mu g/L$ 。杜安道等用ICP-MS法进行Re-Os年代学方法研究。北京矿冶研究院在地质试样中痕量稀土元素测定中作了不少工作。激光等离子体质谱(LICP-MS)是80~90年代刚发展起来的新技术。国外有人用该法测定了 $10^{-11}g/mL$ 的稀土元素。厦门大学以郑兰荪教授为首的研究小组成功地制出我国第一台LICP-MS,并且在岩样化学成分分析中做了不少研究。测定了火山口玄武岩、多金属共生岩、花岗岩等试样的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Rb^+ 、 Zr^{4+} 、 ZrO^{2+} 、 $HfZrO_2^+$ 、 Sr^{2+} 、 U^{4+} 、 Th^{4+} 、 La^{3+} 、 Ce^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Tb^{3+} 、 Gd^{3+} 、 Dy^{3+} 、 Y^{3+} 、 Lu^{3+} 、 Tl^+ 、 TiO^+ 及 PO_2^+ 、 PO_2^- 、 SiO_3^+ 、 Si_2^+ 、 SO_4^+ 、 Cl^- 、 S^- 、 $SiO_2O_3^+$ 、 $Si_2O_4^+$ 、 F^- 、 O^- 、 OH^- 、 AlO^- 、 AlO_2^- 、 TiO^- 等离子信号,他们在LICP-MS仪器研制和应用开发方面做了大量工作。

总之,我国无机质谱分析开始走出低谷,SLMS、IMS的应用增多;ICP-MS的研究和应用正迅速增加;LIPS-MS的研究已有了一个较高水平的开端,这是我们在大型分析仪器研究方面与国外差距最小的项目。

(北京化工冶金研究院孟宪厚高级工程师撰)

电感耦合等离子体原子发射光谱

电感耦合等离子体光源(ICP)是指高频电流通过感应圈耦合到等离子体所得到的—种外观上类似火焰的高能量激发光源。1961年里得(T. R. Reed)研制成功ICP,他采用切线方向引入炬外管气体,得到了稳定的ICP光源,1962年英国的格林菲尔得(S. Greenfield)及美国的法塞尔(V. A. Fassel)各自独立地开展了以ICP为原子光谱分析光源的应用研究,并于1964年及1965年先后发表了他们的分析结果,但他们所获得的元素检出限均不及火焰原子吸收光谱法。直到1969年法塞尔等利用高频电流的趋肤效应及快速注入载气流使ICP形成环状结构,克服了以前的实心泪滴状等离子体的缺陷,使样品可通过环形中心通道有效地导入等离子体,许多元素的检出限才降低至0.1~10 $\mu g/mL$ 水平。1974年出现了第一台ICP原子发射光谱仪,几年后以500台/年的速度增长,这是其他任何分析仪器所没有的。这期间从事研究及应用ICP原子发射光谱分析(ICP-AES)的学者日益增多,他们发现这一具有环形结构的ICP具有许多独特的性质:样品在ICP中停留时间长;ICP中心通道分析物自由原子和离子表现为光薄发射源;具有连续的温度梯度(从9000K至6000K);以及原子和离子处于化学惰性环境中。这些性质使ICP成为一个十分有用的蒸发—原子化—激发—电离源,而且基体效应比经典的电弧、火

花光源小得多。目前ICP-AES被公认为一种有力的多元元素成分测定的原子光谱分析技术,它可以应用于各种类型的样品分析;可测定周期表中除Ar外的元素;在不改变实验参数情况下可对样品中从主量到超微量元素作同时或快速顺序多元元素分析;基体效应较小,线性动态范围达5~6个数量级;检出限一般为 ng/mL 级水平,精密度在0.5%~5%范围。目前已广泛应用于地质、冶金、环境、医药、临床、食品、生物及农业等各个领域。

随着ICP-AES的发展,其潜在缺点逐渐被发现。早期认为ICP基体效应极小,可忽略。但不少学者报道溶剂效应以及碱金属和碱土金属引起的基体效应普遍存在,而且随实验参数而异。在这种情况下,为消除基体效应,标准与分析样品组分必须相匹配。研究表明,由于ICP-AES中分析线强度是几个实验参数(如等离子体的入射功率,载气流量以及光谱测定的观察高度等)的复杂函数,可以通过优化这些参数来降低或消除基体效应。

由于ICP的尚未明晰的特殊激发机理,元素谱线比经典光源获得的丰富。ICP中微粒之间相互碰撞及较高的激发温度导致了谱线变宽,使光谱干扰变得更为复杂。法塞尔等的“谱图信息”及鲍曼斯(P. W. J. M. Boumans)等的“ICP-AES谱线重叠表”均可帮助选择不受干扰或少受干扰的谱线。近几年,计算机模拟光谱可帮助事先了解分析谱线受到的干扰情况,从而作出最佳选择或提出最佳的校正光谱干扰的方法。解决光谱干扰最根本和最有效的措施是使用高分辨率光谱仪,因为谱线重叠干扰只是相对于光谱分辨率而言。高分辨率仪器正向两个趋势发展:一是中阶梯光栅光谱仪,其分辨率在紫外区达 5×10^5 ;二是傅里叶(Fourier)变换光谱仪,在200nm处的分辨率可达 10^6 ,这两类仪器均已商品化。其次,由于计算机的广泛应用,使仪器在处理干扰方面能够实现智能化:一是干扰预测智能化,一套完善的软件建立后,只要输入样品类型及一定参数便可在计算机屏幕上观察到分析线受干扰的情况;二是干扰校正智能化,光谱仪在计算机控制下可自动进行寻峰,背景校正及峰强度的计算。

Ar ICP-AES运转费较高,这在一定程度上阻碍了它的广泛应用。为了降低运转费用,许多学者已研制出 N_2 -ICP、 N_2 -Ar ICP、空气-ICP,乃至水冷炬外管-ICP,此外还设计了低气流—低功率ICP。但目前上述措施尚未商品化,许多仍停留在实验室阶段。ICP-AES仪器已获得很大的发展,目前,结构紧凑、价格较低廉、分析性能好的计算机控制单道扫描光谱仪已占居主要市场。急需解决的固体样品直接分析现已有了较大的进展,其中以悬浮液直接引入、电热石墨炉以及激光烧蚀等产生的样品气溶胶引入ICP都是很有发展前途的方法。

ICP放电中分析物激发、电离机理尚不完全清楚,至今还没有一个能统一解释所有实验现象的理论模型。大量实验结果表明,在各种不同的实验条件下,不同元素谱线强度的空间分布以及ICP电子温度、激发温度、电子数密度等的空间分布是不同的,许多学者认为ICP放电存在着偏离局部热平衡(LTE)状况,但是对偏离原因彼此看法不一。1992年希夫叶(G. M. Hofstje)总结了一些先进的光谱诊断技术,他认为只有采用可靠的光谱诊断技术才有可能深入探讨ICP激发机理。许多学者提出气溶胶雾滴大小会直接影响其中待测组分的蒸发、原子化和激发过程。因此了解气溶胶的产生、传输及其与等离子体相互作用,对于弄清基体效应和激发过程具有重要意义。

级联光源如ICP-ICP、ICP-微波诱导等离子体以及激光烧蚀-ICP是进一步发展原子发射光谱的新动向,不少学者报道由具有较强原子化能力的热光源和激发能力强的非热激发光源组成的级联光源十分接近理想光源。

ICP不仅是AES的优良光源,也是质谱、荧光等的优良光源。1980年法塞尔与豪克(R. S. Houk)提出将ICP与质谱(MS)相结合,研制出第1台ICP-MS仪器,并对它进行了深入研究。目前该方法正以惊人的速度发展。ICP-MS迅速发展的推动力是它具有极好的检出限,大多数元素的检出限在10~100 $\mu g/mL$ 的范围内,某些元素可达1 $\mu g/mL$;元素质谱图要比AES光谱图

单得多;此外,可作同位素快速分析和多元素同时测定。如果质谱检测部分的成本能大幅度降低,例如使用时间飞行质谱技术,那么它将是一种很有前途的超痕量元素成分的分析技术。

参考文献

- 1 Reed T B. J Appl Phys, 1961,32:821~824
- 2 Fassel V A, et al. Anal Chem, 1969,41:1021~1024
- 3 Houk R S, et al. Anal Chem, 1980,52:2283~2289
- 4 Horlick G, et al. Spectrochim Acta, 1982,37B:999~1008
- 5 Boumans P W J M. Line coincidence tables for inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. New York, Pergamon Press, Elmsford,1984,2
- 6 Fassel V A. Anal Chem, 1986,324:511~518
- 7 Winge R K, et al. An atlas of spectral information. New York, Elsevier, 1985,12
- 8 Blades M W, et al. Spectrochim Acta, 1985,40B:579~591
- 9 孙大海,等. 全国第2届等离子体光谱学术研讨会议文集. 北京,北京大学出版社,1989,34~42.
- 10 Hieftje G M. Spectrochim. Acta., 1992,47B:3~25

(中山大学张展霞教授撰)

逆流色谱的基本关系式 逆流色谱(CCC)是一种特殊形式的液-液分配色谱。它不使用固体支持介质,柱材料中空的聚四氟乙烯管(PTFE)或玻璃管。选用不相混溶的两相溶剂系统,其中一相作为固定相并依靠重力或离心力保留在柱中,另一相则作为流动相。被分离的条组分依据其在两相中的分配系数的差异得到分离。由于CCC不使用固体支持介质,因而避免了因不可逆吸附而引起的样品损失、失活变性及失真等,使得样品可以全部回收。

CCC的发展最早可以追溯到1934年,R. D. Cornish等研制了一种室状CCC柱并用来纯化油性维生素。1944年L. C. Craig发明了不连续的逆流分配(CCD)装置并应用到有机化学及生物化学领域。到1966年日本的Y. Ito等人将离子力引入CCD仪器系统而研制出螺管行星离心CCC装置,从而推动了CCC的发展。进入70年代后,CCC技术发展迅速,约有十几种CCC仪器相继问世,其中应用最为广泛的是液滴逆流色谱(DCCC),它主要用于天然产物的制备分离。80年代初期,新的流体力学现象的发现促使高速逆流色谱HSCCC问世。不论是分离效率还是分离速度,HSCCC都比其它CCC有很大提高,甚至可以和制备HPLC相媲美。CCC已发展成为用于分析目的的制备型CCC系统和用于分析目的的分析型CCC系统,以及适用于蛋白质等生物大分子分离的泡沫逆色谱系统等,成为HPLC的重要补充。

一般来讲,色谱各参数的定义及其相互间的数学关系可以直接用于CCC。但是,CCC与其它色谱的区别又决定了CCC理论中部分参数之间的独特关系,

1. 容量因子 k' 。同其它色谱一样,CCC的容量因子 k' 定义为固定相中溶质的量(Q_s)与流动相中溶质的量(Q_m)之比

2. 柱效 n 。CCC的柱效应用理论塔板数 n 表示:

$$n = 16 \left(\frac{V_R}{W_b} \right)^2 = 16 \left(\frac{t_R}{W_b} \right)^2$$

式中 W_b 为色谱峰的基线宽度, V_R 、 t_R 分别为溶质的保留体积与保留时间。

3. 分离因子。分离因子 α 被定义为需分离溶质对的分配系数 K_1 、 K_2 ,容量因子 k'_1 、 k'_2 ,调整保留时间 t_{R1}' 、 t_{R2}' 或调整保留体积 V_{R1}' 、 V_{R2}' 的比率,表示为

$$\alpha = \frac{K_1}{K_2} = \frac{k'_2}{k'_1} = \frac{t_{R2}'}{t_{R1}'} = \frac{V_{R2}'}{V_{R1}'}$$

其中, $K_2 > K_1$, $k'_2 > k'_1$, $t_{R2}' > t_{R1}'$, $V_{R2}' > V_{R1}'$

4. 分配系数。CCC由于消除了固体支持介质,使用不相混溶的两相溶剂系统,分离完全取决于液-液分配。因此分配系数

K 是它的最基本参数。溶质的保留可以通过溶质的分配系数及柱中流动和固定相的体积来预测分配系数 K 的定义为 K =固定相中溶质的浓度(C_s)与流动相中溶质的浓度(C_m)之比。 K 与 k' 的关系可表示为:

$$K = \frac{Q_s/V_s}{Q_m/V_m} = \frac{Q_s}{Q_m} \cdot \frac{V_m}{V_s} = k' \frac{V_m}{V_s} \text{ 或 } k' = k \frac{V_s}{V_m}$$

式中 V_s 和 V_m 分别是在CCC柱内两相达到平衡时固定相和流动相的体积。

5. 固定相占柱总体积的分数 S_F 。设柱子的总体积为 V_c ,则 $V_c = V_s + V_m$ 于是得到:

$$S_F = \frac{V_s}{V_c} = 1 - \frac{V_m}{V_c} \quad K = k' \frac{1 - S_F}{S_F}$$

6. 溶质保留时间 t_R 与保留体积 V_R 。设溶质经过整个柱子所需时间(即溶质保留时间)为 t_R ,其中在流动相中的时间为 t_m ,在固定相中的时间为 t_s ,溶质的保留体积为 V_R ,

$$\text{则 } t_R = t_m + \frac{K t_m S_F}{1 - S_F}, \quad V_R = V_m + \frac{K V_m S_F}{1 - S_F}$$

7. 分辨率 R_s 。在CCC中,相邻两峰分辨率 R_s ,定义为

$$R_s = \frac{2(V_{R2} - V_{R1})}{W_{b2} + W_{b1}} = \frac{2\Delta V}{W_{b2} + W_{b1}} = \frac{2\Delta t}{W_{b2} + W_{b1}}$$

式中 V_{R1} 与 V_{R2} 分别为两溶质的保留体积,且 $V_{R1} > V_{R2}$, ΔV 与 Δt 分别为两溶质的保留体积差和保留时间差, W_{b2} 和 W_{b1} 分别是两溶质峰的基线宽度。根据色谱的 K_{max} 方程,Conway和Ito从分辨率的定义可以导出CCC的分辨率方程为

$$R_s = \frac{1}{4} (\alpha - 1) \sqrt{n} \left[\frac{K_1}{K_1 \left(\frac{\alpha + 1}{2} \right) + \left(\frac{1 - S_F}{S_F} \right)} \right]$$

其中 K_1 是所需分离溶质对中的第1个溶质的分配系数。当 S_F 减小时,由于 V_s 也减小,这就使得 $K < 1$ 及 $K > 1$ 的溶质峰移向位置不变的 $K = 1$ 的溶质峰,使 R_s 降低。在极端情况下 $S_F = 0$,也就是 $V_s = 0$,柱中只含单一相——流动相,所有溶质峰将出现在 V_c 处, $R_s = 0$ 。相反,当 S_F 增大时, $(K_1 - K_2)V_s$ 也增大,使 R_s 提高。 S_F 对 R_s 的影响是通过影响 k' 值而实现的。在现代CCC装置中, S_F 值一般在0.4~0.9之间。

为了使分离所需时间减至最小,HPLC中的 k' 值的最佳范围通常认为是1~5,理想值是2。它同样也适用于CCC。对于 $S_F = 0.4$, $K = 1.5k'$ 而言, K 值最佳范围为1.5~7.5,最佳值为3;对于 $S_F = 0.8$, $K = 2.5k'$, K 值最佳范围为0.25~1.25,最佳值为0.5。无论怎样,好的CCC分离总是用较低的 K 值在较短的时间取得成功的分离。

8. 分离所需的理论塔板数 n_{req} 。不同 K_1 、 α 及 S_F 值时达到不同分辨率所需的理论塔板数 n_{req} 为

$$n_{req} = \left(\frac{4R_s}{\alpha - 1} \right)^2 \left[\frac{K_1 \left(\frac{\alpha + 1}{2} \right) + \left(\frac{1 - S_F}{S_F} \right)}{K_1} \right]^2$$

9. 分离所需的分离因子 α_{req} 。

$$\alpha_{req} = \left(\frac{4R_s}{\sqrt{n} - 2R_s} \right) \cdot \frac{1 - S_F}{K_1 S_F} + \frac{\sqrt{n} + 2R_s}{\sqrt{n} - 2R_s}$$

$$= \left(\frac{4R_s}{\sqrt{n} - 2R_s} \right) \cdot k'_i - 1 + \frac{\sqrt{n} + 2R_s}{\sqrt{n} - 2R_s}$$

W. D. Conway(1988)利用这两个方程计算出不同 k'_1 (或 K_1)、 S_F 和 n 时达到基线分离($R_s = 1.5$)所需要的分离因子。当 K_1 和 n 一定时,随着 S_F 的增加, α_{req} 降低;随着柱长变小 n 的降低, α_{req} 将增大。据此选择适合特定样品分离的CCC的溶剂系统。

从CCC的基本理论可以看出,分配系数 K 、固定相所占柱总体积的分数 S_F 及分离因子 α ,是CCC的最基本参数;由 K_1 、 S_F 及 V_s 可预测溶质的保留参数;由 K_1 、 S_F 、 α 及 n 可预测两溶

质峰的分辨率;根据 R_f, N_{ref}, a_{ref} 等的方程可选择适合特定样品分离的 CCC 仪器和溶剂系统。

(中国科学院兰州化学物理研究所杨福全撰)

色谱分离技术 *technique of chromatographic separation*

色谱学已有 80 年的历史,而在实验室中作为工具使用开始于 30 年代初。从 60 年代末到现在,色谱分离技术广泛用于有机化学、生物化学、药物学和环保学等而倍受重视。1952 年英国 Martin 和 Synges 因发展了分配色谱而获得诺贝尔奖。此外,色谱分离技术在一些获得诺贝尔奖项目中起着关键的作用。例如:1937 年类胡萝卜素化学、维生素 A 和 B,1950 年性激素化学及其分离,肾上腺素化学及其分离,1958 年胰岛素结构测定,1972 年核糖核酸化学酶结构的研究都使用了色谱分离方法。

色谱法是一种以分配平衡为基础的分离方法,在所有分离技术中它具有快速、简便、纯度高等优点。有机化学家用此技术进行分离、纯化所合成的产物和中间体,该法是目前认为最有效的方法,特别是对天然物主要化学成分的微量分离、微量合成产物的分离,或一些立体异构的分离,样品往往只有几十毫克到几百毫克,用常规的方法是无法达到分离纯化的目的。

现代液相色谱有液-固、液-液、离子交换和凝胶渗透四种不同类型,其中液-固色谱是用得最多的一种。从操作方式看,液-固色谱又分为洗脱法,前沿法和取代法。目前高效液相色谱(HPLC)主要采用洗脱法。近年来,前沿法也开始受到重视。

制备型高效液相色谱(HPLC) 制备型高效液相色谱是近年发展起来的新颖快速分离技术,它的分离速度比经典的液相柱层析法快上百倍。在色谱分离技术中,要求在尽可能短的时间内以最大的分辨率,将混合样品中各组分分开,关键是做到色谱分离条件的优化,以达到最佳柱效和最有效的分离的目的。

制备色谱的几个关键技术是:(1)色谱柱的选择:一种为半制备柱,内径 9~10mm,长 250~500mm,填料常用硅胶或氧化铝,其粒度直径是 5~10 μ m,柱效可达到 15 000 左右,每次注入样品 5~10mg,这种柱适于微量样品的分离。一般用的制备柱内径 20~22mm,长 250mm,装入较粗的填料(20~30 μ m),这种柱的柱效较低,但样品处理量大。(2)对色谱仪部件的要求:高压输液泵一般流量为 30~100ml/min,工作压力为 100kg/min。进样器的样品环管要细而长,检测器要求线性响应范围宽,最常用的是示差折光检测器,馏分收集器可用手动或微机控制收集同一色谱峰的纯组分。(3)每个色谱柱的容量有限,当不断增加进样量时会使色谱分离度变差,可切割部分未充分分离的色谱峰,用 TLC 检查其纯度,然后确定是否需进一步分离。为解决由于样品过载使原来可以分开的色谱峰重叠,可采用串连延长色谱柱或再循环的办法,后者通过一个四通阀将柱流出液再导入色谱柱再次进行分离,循环 4~5 次为限,每次可提高柱效 $\sqrt{2}$ 倍。对于一些复杂的生化样品,分离纯化所遇到的难题,也是采用色谱峰分段切割的方法,从中取得某些纯组分。(4)进样前的准备工作,粗产物要用适当方法加以精制。洗脱液通常采用石油醚(30~60 $^{\circ}$ C)与乙酸乙酯按一定比例配成的混合溶剂,其配比大小最好先用薄层色谱(TLC)试验来调节洗脱液的极性大小。溶液也要事先过滤才进入仪器。

制备型超临界流体色谱(SFC) 近年来,制备型洗脱色谱又有了新的进展,称为制备型超临界流体色谱(Preparative Supercritical Fluid Chromatography),简称 SFC。它所用的仪器设计,包括分析填充柱都与 HPLC 相似,唯一不同是馏分的收集方式更完善,可以在常压、高压下用溶剂洗脱吸附在固定相上的官能团化合物,并直接把它们从洗脱液中分离出来得到纯组分。这样,制备 SFC 成为分离技术中一个相对容易和有用的工具。它可以小规模制备纯产物在 10⁻³~1g,用于天然产物的结构分析或分离鉴定微量合成的有机产物。这种色谱的应用范围比气相色谱(GC)宽,(扩大到重化合物),操作时间比 HPLC 短,特别是用

减压的方法令洗脱液与产物分离而得到纯组分,使制备 SFC 成为一个分级分离的定量方法。大规模的制备 SFC 样品处理量在 1g/h~1kg/h,它可作为最终纯化产品方法或把化学合成的和天然物分级分离方法向着工业化发展,看来是很有前途的,因为它不像 GC,不能处理重的和热不稳定化合物,也不像制备 HPLC,产物要从溶剂中回收,而是直接可用于试验、反应或其它用途。因此,到了 80 年代,SFC 作为一种分析工具对 GC 和 HPLC 的补充,而制备 SFC 则以生产规模跟现代制备 HPLC 正在平行发展中。

快速柱层析技术(Preparative Rapid Chromatographic Technique) 经典的柱层析技术由于分离速度慢而曾一度减低了人们对它的兴趣。然而,70 年代后期发展起来的快速柱层析技术已成为一种常规分离纯化方法而深受有机化学工作者欢迎。它的特点是用短柱,在洗脱时用压缩空气在柱上端加中等压力,使洗脱液流速在 5cm/min 左右。用硅胶 60 作柱填充剂,粒度为 70~230 目,用量一般是样品重的 20~50 倍,床高 13~16cm。洗脱液用乙酸乙酯和己烷(或 30~60 $^{\circ}$ 的石油醚)的混合溶剂,这样可把在 TLC 上 $\Delta R_f \geq 0.15$ 的两个混合组分分开,达到中等的分辨率。通常 0.01g~10g 样品分离可在 10~15min 内完成。

分离技术的关键在选用不同直径大小的色谱柱时要视样品量而定,样品量愈多,柱直径要愈大。此外混合溶剂配比(即洗脱液的极性)要由混合组分的 ΔR_f 值来决定,因此,在样品分离前需在薄层硅胶板上点样,然后在适当配比的混合溶剂中展开,计算出 ΔR_f 值后确定洗脱液的配比及色谱柱直径的大小。收集洗脱出来的每个馏分体积大小也由样品量而定。由于应用中各种样品结构性质各异,需在实践中摸索出最佳条件。例如:200mg 的苯醇纯化的标准条件是用 40~63 μ m 粒度的硅胶 60 装入直径 20mm 的色谱柱,床高 15cm,洗脱液是 25%的乙酸乙酯/石油醚混合溶剂。

快速柱色谱分离技术是目前公认的最经济而简便的分离纯化方法,样品回收率在 95%以上。此方法将更为广泛地应用在有机合成、药物合成和天然物研究等各个领域。

参考文献

- 1 Clark W S, et al. *J Org Chem*, 1978, 43(14): 2973
- 2 Snyder L R, et al. *Introduction to Modern Liquid Chromatography* 2nd ed, 1979
- 3 谢光华,等. 现代液相色谱, 1989
- 4 Derek A H. *J of Chromatography*, 1990, 523: 11~21
- 5 Berger C, et al. *J of Chromatography*, 1990, 505: 37~43
- 6 Matsuta R, et al. *Chromatographia*, 1991, 32(3/5): 233~237
- 7 李淑珪. 化学通报, 1991, 5: 28~30

(华南师范大学李淑珪教授撰)

色谱的联用技术 *coupling techniques of chromatography* 由一种分离方法和一种结构鉴定方法组成的联用技术,是复杂混合物分析的有效工具。联用可提高分析的灵敏度、准确度,增强对混合物的分辨能力,获得分别单独使用这两种方法时所不具备的功能。

1957 年霍姆斯(J. C. Holmes)和莫尔(F. A. Morrell)首次在实验室实现了气相色谱-质谱联用(GC/MS),并充分显示了联用技术在复杂混合物分析中的强大能力以来,随着色谱学技术的发展,色谱的各种联用方法相继迅速发展起来。1966 年洛(M. J. Low)等尝试气相色谱-傅里叶变换红外光谱联用(GC/FTIR)获得成功。1975 年和 1977 年凯瑟(K. L. Kizer)和格里菲斯(P. R. Griffiths)等分别进行了流动池型和溶剂去除型的液相色谱-傅里叶变换红外光谱联用(LC/FTIR)实验。1973~1975 年间,洛文斯(R. E. Lovins),阿皮诺(P. Arpino)和霍宁(E. C. Horning)等先后发展了不同接口型式的液相色谱-质谱联用(LC/MS)方法。1978 年渡边等进行了停流式液相色谱-核磁共

液相色谱联用(LC/NMR)实验。1979年,连续流式LC/NMR由拜尔(E. Bayer)等在实验室实现。1982年施密斯(R. D. Smith)等首次报导了超临界流体色谱—质谱联用(SFC/MS)实验。夏非(K. H. Shafer)和格里菲斯等分别于1983年和1984年实现了流动池型和溶剂去除型的超临界流体色谱—傅里叶变换红外光谱联用(SFC/FTIR)。1987年奥利弗斯(J. A. Olivares)等首次开展了毛细管电泳—质谱联用(CE-MS)的研究。目前,色谱法几乎已实现了同所有结构鉴定方法的联用,而且新的联用方法还在不断出现。

联用系统中,色谱单元相当于谱仪的一个样品预处理(分离)和进样装置,谱仪则相当于色谱的定性检测器。联用的关键在于把这两者有机地联接起来的接口技术。在众多的“色谱定性检测器”中,质谱具有最好的与气相色谱(GC)联用的适应性和灵敏度,因而最早得以发展。目前,GC/MS在技术上已成熟,在方法上尚无重大改进。其接口已定型。各种分子分离器接口被用于填充柱系统(如喷射分离器,微孔玻璃分离器,硅橡胶分离器,半透膜分离器等)。毛细管系统则使用直接进样法或开口分流接口。1988年伯恩(S. Bourne)等又开发了一种新型接口—交孔开口分流接口,其效率已达100%。用毛细管柱GC/MS分析含上百个以至几百个组分的混合物并不困难,而所需样品总量仅几毫克。GC/MS是目前复杂有机混合物的最常用和最有效的在线分析方法。另外,1987年以来格罗斯曼(P. Grossman)等还开展了GC与傅里叶变换质谱(FT-MS)联用的研究。由于FT-MS的巨大潜力,已有不少研究集中在这一联用方法上。具有高灵敏度、快速扫描速度等优点的傅里叶变换红外光谱仪的出现,使GC/FTIR得以实现。而光管技术和高灵敏度汞镉碲(MCT)检测器的问世,使联用进入了实用阶段。目前广泛采用的接口仍是由阿扎拉嘎(L. V. Azarraga)于1980年开发的,而由格里菲斯在理论上进行了优化的内壁镀金的硼硅玻璃光管。商品光管现有两种:一种供填充柱用,另一种供毛细管柱用。GC/FTIR技术上已趋于成熟并已商品化,已可对约10ng含量的组分进行在线分析,是GC/MS的常用互补方法。许多实验室在致力于提高GC/FTIR的灵敏度。其中在光学方面的改进似乎已达极限。提高灵敏度的另一有效方法是大容量进样。而其带来的大量溶剂的干扰,已有人采用双冷阱进样和预柱技术等加以去除,然而尚无通用的方法。另外,1984年伯恩等在GC/FTIR中使用了一种不同于光管的接口—基体隔离技术(MI/FTIR)。两年后,夏菲等则发展了用红外显微镜附件检测的直接沉积式接口。这种原理的接口已商品化,其检出限已达50pg以下。

高效液相色谱法(HPLC)联用技术的主要障碍在于溶剂的强烈干扰。但这对于LC/FTIR和LC/NMR尚有方便之处。已发展的用于LC/FTIR的接口主要有两类。一类是凯瑟和泰勒(L. T. Taylor)等人发展和完善的流动池型。1985年约翰逊(C. C. Johnson)等把流动萃取法用于这种接口,使反相柱LC/FTIR分析得以进行。采用这类接口,即使使用微柱或氘代溶剂,溶剂的干扰仍很大。因此人们普遍倾向于另一类接口,即在红外检测前去除溶剂,然后进行离线检测。目前,这类接口中较成功的有神野、卡拉辛斯基(K. S. Kalasinsky)、藤本、盖革(J. J. Gage)和卡斯特勒(M. A. Castles)等人研究的缓冲存储式接口和各种形式的雾化式接口。但是,这类接口在技术上尚不成熟。1987年罗伯特逊(R. M. Robertson)等发明了一种较理想的接口—单分散气溶胶发生器(MAGIC),可用于正相、反相及梯度淋洗系统。然而,尚未商品化。核磁共振波谱法是有机结构分析的最有效方法,特别是二维谱技术,可准确确定分子中各基团的相互连接方式。遗憾的是该法的灵敏度太低。因而,要实现快速、高灵敏度的LC/NMR直接联用十分困难。已在实验室开发的接口有停流式和连续流式两种,并在正相柱和反相柱中均获得了较成功的应用。柯恩(S. A. Curran)等曾对后一种接口进行了优化。阿伯特(K. Albert)等使用了一个改进的连续流接口获得了较好的分辨,其灵敏度达使用旋转管时的60%。另外,1988年阿伦(L. A.

Allen)和威尔利(F. W. Wehrll)与拜尔等还分别开展了LC/¹⁹F-NMR的研究和质子核磁共振成像技术在反相柱LC中应用的研究。由于灵敏度的原因,LC/NMR的研究一直进展缓慢。溶剂量较少的微柱的使用,促进了LC/MS的发展,但微柱的分析速度较慢。1980年前后出现的接口方法有梅拉拉(A. Melera)、麦克法登(W. H. McFadden)和布莱克利(C. R. Blakeley)等人分别发展的直接液体导入法(DLI),传输带法(MB)和热喷雾法(TSP)。这些接口几经改进,现仍被采用。1988年勃朗纳(R. F. Browner)等研制出一种改进型的MAGIC接口,部分地克服了上述三种接口的局限性,既可用于EI和CI源,又可对难挥发和热极不稳定物质分析。值得注意的是近来出现的一些较理想的商品化接口。其中,由艾托(Y. Ito)等于1985年发展的流动式FAB源的研究最为活跃。据报其用于微柱LC-MS,已使得可对fmol浓度的多肽溶液进行在线分析。其他尚有等离子体喷雾(PP),电子喷雾(ES),离子喷雾(IS),粒子束(PB)接口等。如PB接口不仅可用于EI,CI和FAB电离方式,还可与铯离子源联用。1989年莫斯利(M. A. Moseley)等使用了一种同轴流动式FAB接口,从而使联用可用于填充微毛细管柱和开管柱。质谱在生物大分子分析中的应用,使LC/MS成为联用技术中十分活跃的领域。

1980年前后出现的超临界流体色谱法(SFC)可有效地弥补GC与HPLC的不足。其另一优点是其检测器的通用性。目前,这种联用技术发展得很快。由于SFC的分子量范围一般均超过了为GC/MS发展的常规四级杆质谱仪的质量范围,许多研究都在致力于开展具更高质量范围的电磁扇面和四级杆质谱仪的联用研究。首先使用的接口是直接流体导入(DFI)型的。为使其可用于具有较大流量的柱系统。阿皮诺和施密斯等对其进行了改进。1986年巴里(A. J. Barry)和松本等又分别对原为LC/MS发展的MB和真空雾化接口进行了改进,成功地用于填充柱SFC/MS中。1988年黄(E. C. Huang)等研制了一种加热式的直接导入接口,其后又对其进行了改进。这种接口在使用微孔柱和毛细管柱时可成功地用于EI源和NCI源系统。莱因豪德(V. N. Reinhold)等还使用了一种改性的解吸/化学电离接口,效果也不错。李(E. D. Lee)等把电荷交换离子源(CE)用于联用中,其灵敏度比使用EI源时高一个数量级。另外,1987年李和维尔金斯(C. L. Wilkins)等还采用了一种双池型接口实现了SFC/FT-MS。目前,商品化的SFC/MS已开始出现。用于SFC/FTIR的两类接口大多是在LC/FTIR接口的基础上发展起来的。1988年维伯特(R. C. Wieboldt)等改进了早期的高压流动池,使其既可用于填充柱,又可用于毛细管柱。据称,其检测限可达10ng。然而,流动相的干扰仍是这类接口的主要问题。格里菲斯和神野先后分别发展了几种溶剂去除型接口。福克(R. Fuoco)等还对使用这类接口时的6种红外取样技术进行了比较,并证明用透射检测法可能更好。这类接口优点是可用于改性流动相和压力程升系统。1988年雷默(J. H. Raymer)和格里菲斯等还分别把基体隔离技术和改型的GC/FTIR直接沉积式接口用于SFC联用中。

1990年前后迅速发展起来的毛细管电泳法(CE)兼有高压电泳的高分辨率及HPLC的高效率优点,特别适于生物大分子的分离。1987年奥利弗斯首次采用电子喷雾(ES)接口进行了CE/MS实验。1988年,施密斯对这种接口进行了改进。李等则成功地把离子喷雾(IS)接口用于了三级四级杆质谱系统,对多肽的检出限达24fmol。莫斯利等于1989年把流动FAB接口用于CE/MS中,其结果说明这种接口型式是较理想的。CE与傅里叶变换拉曼光谱的联用(CE/FT-Raman)已开始尝试。

另外,用于光热性质研究的光声光谱法(PAS)也先后实现了同GC, TLC, HPLC的联用,其灵敏度均优于紫外检测器。以流动池为接口的微孔柱LC与共振拉曼光谱法的联用也已在实验室内实现。其结果证明在鉴别难挥发性物质的能力方面有可能与LC/MS, SFC/FTIR相比。在无机分析方面,等离子体原子光谱法(ICP)与GC, LC, SFC的联用研究也颇受重视。用ICP/MS作

为色谱分析检测器的技术,近年来也得到了很快的发展。总的说来,除GC/MS和GC/FTIR外,色谱的其它联用技术正处在不同的发展阶段。其中,已成熟的技术,目前主要是向小型、台式方向发展,以进入普通实验室。例如,已商品化的高级三级四极杆GC/MS仪,其体积只有普通四极杆质谱仪的1/5,但仍保持了四极杆GC/MS的全部性能。对于那些尚未成熟的联用方法,发展理想的,实用型的接口的努力正在进行中。其中最活跃的是LC/MS,SFC/FTIR和CE/MS的研究,有可能在不久的将来获得突破性进展。联用技术的另一个值得注意的发展方向是多机联用以及多维色谱的联用。GC/FTIR,MS已商品化,GC/MS/MS也已从研究型逐步走向实用型。LC/GC/FTIR,SFE/SFC/MS,GC/GC/MS等已实现。今后将有更多的这类联用方式问世。

复杂混合物,特别是环境、药物、生物化学等中的复杂混合物的分析是现代分析化学面临的难题,因而,在复杂混合物分析中具独特作用的联用技术是并仍将是仪器分析和分析仪器发展的热点之一。

参考文献

- 1 Bourne S, et al. *Anal Chem*, 1988, 60(19): 2172~2174
- 2 Vekey K, et al. *J Chromatogr*, 1989, 488: 73~85
- 3 Moseley M A. *J Chromatogr*, 1989, 480: 197~209
- 4 Albert K, et al. *J Chromatogr*, 1989, 463: 355~363
- 5 White R. *Chromatography/Fourier Transform Infrared Spectroscopy and Its Applications*. New York and Basel: Marcel Dekker, Inc., 1990, 43~136

(中国科学院大连化学物理研究所黄威东
副研究员撰;张乐津审)

超临界流体色谱 supercritical fluid chromatography

简称SFC,是以超临界流体做流动相的色谱过程。超临界流体是指物质高于其临界点,即高于其临界温度和临界压力时的一种物态。它既不是气体,也不是液体;但它兼有气体的低粘度,液体的高密度以及介于气液之间的扩散系数的特征。从理论上讲,用超临界流体做流动相的色谱过程,既可分析气相色谱不适应的高沸点、低挥发样品,又比高效液相色谱有更快的分析速度和更高的柱效。超临界流体色谱可以选用气相色谱或高效液相色谱用的检测器,和质谱、富氏红外光谱在线联用也较方便,从而使其在定性、定量方面有较大的选择范围,成为80年代后近代色谱学发展中的一个重要领域。

早在1879年亨内伊(Hannay)等就发现用超临界的乙醇可溶解金属卤化物,压力愈高,溶解度愈大。1958年有人就提出了用这种超临界流体做流动相的色谱过程的设想。但直到1962年克利斯珀(Klesper)等才发表第一篇超临界流体色谱方面的论文,即用超临界的二氯二氟甲烷、一氯二氟甲烷等分离肾上腺异构体。1966年已经开始使用超临界二氧化碳和正戊烷做流动相,分析了多环芳烃、染料和环氧树脂等;1968年吉丁斯(Giddings)等用超临界的氮和二氧化碳做流动相(最高操作压力为202.6MPa)分析了核苷、糖类、氨基酸、甾醇、类固醇、类胡萝卜素等,并提出了“压力阈值”(threshold pressure)的概念,指出在一定温度下,只有当流动相的压力达到一定值时,溶质才被溶解,并在色谱柱内移动。1978年克利斯珀等在分离分子量最高为2200苯乙烯聚合物时,首次采用了程序升压技术,使超临界流体色谱法更趋完善。早期开创性的工作充分显示了超临界流体色谱法有很强的溶剂化能力。但总的来说这一阶段发展是缓慢的,究其原因主要有:高效液相色谱的兴起和发展,引起了分析化学家和仪器制造商更大的兴趣;超临界流体色谱本身在技术上和仪器化方面遇到的困难如系统耐高压问题等,在当时没有很好解决;有关的超临界流体的热力学和动力学数据十分缺乏,色谱分离缺少理论上的指导。

1980年后,超临界流体色谱法重新获得迅速发展,特别是毛细管超临界流体色谱法迅速发展起来。随着细内径(内径 \leq

100 μm)毛细管柱和微粒填充柱(填充颗粒直径为微米级)制备方法的不断改进,进样和限流技术的发展,流动相的改性、检测和联用方法的研究以及自动化商品仪器的出现,极大地推动了超临界流体色谱的应用范围。在基础研究工作方面,吉里(Gere)等发现与高效液相色谱、气相色谱相似,表征理论塔板高度的范·底姆特(Van Deemter)方程和戈雷(Galay)方程在超临界条件下仍然适用。马尔蒂里(Martire)等人从统计热力学均匀场晶格模型出发,提出了较为完整的保留值方程,并在一定压力范围内,用非极性和弱极性相互作用体系做了验证。超临界流体色谱法的应用也迅速渗透到齐聚物、高聚物,高聚物中的添加剂、农药、油脂、糖类、染料、金属有机物、药物、高碳烃及其模拟蒸馏曲线,生化样品以及对映体等的分离。进一步体现了超临界流体色谱法和高效液相色谱法相比有分离效能高,分析速快,定量方便以及与质谱,富氏红外光谱在线联用、鉴定复杂样品方便等优点;和气相色谱法相比,它有可分离测定热不稳定,高沸点,极性样品等优点。超临界流体色谱不会替代高效液相色谱和气相色谱,但它是和后者相互补充的一种新的有生命力的色谱过程。

要不断开拓超临界流体色谱的应用范围,扩大可选择的、实用的流相种类有十分重要的意义,这就包括采用不同极性的流动相和流动相里添加不同的改性剂(Modifier)以改变流动相的化学性质、研究样品在流动相的溶解度和它在流动相和固定相之间的相互作用也已成为急需深入了解的问题。高容量、高效而又能适应不同或特定样品对象的毛细管柱、填充柱、微粒填充柱仍是今后要不断深入研究的课题。把超临界抽提或超临界色谱作为样品预处理和进样装置和其它色谱法或其综合分析方法联用,现已成为研究工作中热点问题之一。适当改变操作条件,在超临界色谱仪上又能进行气相色谱和高效液相色谱分离,无疑会适应更广泛的样品对象,随着对超临界流体物理、化学性质和这个新方程的更深入的研究,它在食品、药物、生化、煤化学以及重石油化工产品分析测定、提纯制备方面将会有更大的发展前景。

参考文献

- 1 Klesper E, Corwin A H, Turner D A. *J Org Chem*, 1962, 27: 700~701
- 2 Giddings J C, Meyers M N, McLaren L. *Science*, 1968, 162: 67~73
- 3 Klesper E. *Angew Chem*, 1978, 17: 738~746
- 4 Gere D R. *Science*, 1983, 222: 253~259
- 5 Hannay J B, Hogarth J. *Proc Roy Soc. London*, 1987, 29: 324~326
- 6 Martire D E, Boehm R E. *J Phys Chem*, 1987, 91: 2433~2446

(中国科学院大连化学物理研究所博士生导师
周良模研究员撰)

高效液相色谱法 high performance liquid chromatography

简称HPLC,是以液体作为流动相的柱色谱分离方法,其原理是基于样品在两相之间的不同的分配,其一相是涂在载体上的液体或表面积较大的键合不同功能团的固定相,它在色谱过程中是相对静止的;另一相是有各种修饰的液体流动相。该技术是分析和分离非挥发性化合物、热不稳定的化合物及离子化合物的重要手段和方法。

柱液相色谱是1903年俄国茨维特(Tswett)发明并用于动植物色素分离。1941年马丁(Martin)等进一步提出了液-液分配色谱法,成功地用于蛋白质基本单元氨基酸分离,开创了分配色谱的新阶段,马丁等并由此获得1952年诺贝尔(Nobel)化学奖金。早期色谱填料的直径一般是100~200 μm ,流动相的流速通过重力来控制,一般只有0.01cm/s,因而色谱柱的柱效每米只有200左右的理论塔片数。1956年范·底姆特(Van Deemter)等创立了色谱分离的速率理论,建立起色谱柱柱效与流速、载体粒度及溶质扩散系数之间的关系,这个理论不仅促进了气相色谱的

高速发展,而且直接导致了高效液相色谱法的出现。在此期间,吉丁斯(Giddings)的理论研究最具代表性,当时他指出:如果在液相色谱中,载体的颗粒如能细到 $2\sim 20\mu\text{m}$,流动相的线速能达到 1cm/s ,则能获得与气相色谱相比拟的柱效和分离速度。之后,人们研制出可在 41.3MPa 压力下输送流动相的高压泵,这样液相色谱柱就可以达到每米1万块以上的理论塔板数和35块塔片/秒的分离速度,这就是现代的高效液相色谱法。

高效液相色谱的研究主要集中于色谱理论、色谱柱、固定相、检测器及其联用技术等方面。色谱理论研究分离物质的热力学保留行为和动力学关系,主要集中在分离物质的热力学参数、分子结构与保留值的关系等方面,为发展高选择性色谱固定相提供理论基础;动力学方面研究分离过程中的溶质的传质、扩散和色谱流出曲线的峰形规律,为发展高效能色谱柱和分离条件的优化选择提供理论依据。在色谱柱和固定相的研究方面,现在的工作主要集中在新型选择性(键合或涂敷)柱,高效微型柱,分离手性物质以及用于蛋白质,多肽,核酸等组分分离的专用柱等。用液相色谱法制备纯化物的研究,包括固定相、色谱过程和非线性色谱理论的研究也引起人们的重视。检测器的研究同样是高效液相色谱中活跃的领域,其中电化学检测器特别是微电极以及激光诱导荧光、光二极管阵列、电荷耦合阵列等是近年研究最多的检测器。联用方法,特别是和质谱、富氏红外、核磁在线联用已成为色谱流出峰定性、结构测定的重要手段。

高效液相色谱法广泛地应用于各个学科领域,如在材料、化工、环保、食品、药物以及无机物的组成和状态分析等,在生命科学中正日益显示出它的突出地位,如应用于多肽、蛋白质及核酸等大分子的分离和分析。

今后,高效液相色谱在理论研究,色谱柱与固定相及仪器的智能化方面有大量的工作要做,当前,生物大分子分析方面还有大量的理论和实际问题要解决,比如生物大分子分离机理的研究,合成对某种化合物有特殊选择性的载体,研究对生物分子不失活的分离条件等。另外,在已有的色谱理论和实践的基础上,发展具有人类专家部分智能的色谱仪,包括色谱分析方法的推荐,操作条件的优化,定性和定量工作等都将有十分广阔的前景。另外,把液相色谱过程和其它分离过程,如膜分离过程,有机地结合起来,发展一些新的分析、分离方法,也将有十分重要的意义。

参考文献

- 1 Tswett M S. Ber Dtsch Bot Ges, 1906, 24, 316~323
- 2 Martin A J P, Synge R L M. J Biochem, 1941, 35, 91~121
- 3 Van Deemter J J. Zuiderweg F J & Klinkenberg A, Chem Eng Sci, 1956, 5, 271~289
- 4 Giddings J C. Anal Chem, 1963, 35, 2215~2216.
- 5 Snyder L R, Kirkland J J. An Introduction to Modern Chromatography. 2nd Ed. New York Wiley Interscience, 1979, 1~5

(中国科学院大连化学物理研究所黄红心博士、博士生导师周良模研究员撰)

气液色谱固定液 stationary phases for gas liquid chromatography 气相色谱仪的心脏是色谱柱,而色谱柱的灵魂是固定相,气液色谱的灵魂就是固定液。气液色谱(简称GLC)研究和使用的固定液有千余种,而常用的却只有20多种。自从GLC诞生以来人们就不断寻找研究各种化合物用作GLC的固定液,以适应分离各种难分离物质对的需要,1972年在ASTM 25 A S-1中列举了700多种。与此同时为了便于在实用中选择合用的固定液,又千方百计地优化减少可选择固定液的数量,最有代表性的研究是McReynolds对226种典型固定液以10种具有代表性作用力的溶质研究了这些固定液的保留性能,以便减少待选固定液的数量。1973年美国Hawkes等在广泛地调查研究基础上提出一组建议使用最常用和较常用的固定液。(1)最常用的固定液,OV-101(SE-30),OV-17,PEG(MW>4000);

DEGS; Silar 10C; OV-210。(2)常用固定液:角鲨烷; OV-101; 阿皮松-L; Dexsil 300GC; OV-7; 邻苯二甲酸二丁酯, OV-17; UCON LB-550X; OV-210; 聚苯醚; AN-600(25% 2-氟乙基甲基聚硅氧烷); OV-225; Igal CO-880; 丁二酸环己二醇; Silar 5CP; PEG; 丁二酸丁二酯; Silar 7CP, DEGS, Silar 10C, 1,2,3-三(2-氟乙氧基)丙烷, OV-275, N,N-二(2-氟乙基)甲酰胺。

毛细管色谱柱所用固定液与填充柱的有所不同,一方面由于它的柱效高只需要为数不多的高质量(粘度高,热稳定性好,成膜性好,易于交联)的常规固定液,曾有人提出用3支毛细管柱(OV-101, PEG 20M, OV-210)就可以解决大部分的分析问题,当然在实际工作中,毛细管色谱柱所用的固定液也不止这3种。另一方面为了适应工业和科研的要求,近年来发展了高选择性和耐高温的毛细管柱用气相色谱固定液。

常规高性能毛细管柱用气相色谱固定液 SE-54(含5%苯基的聚甲基硅氧烷); OV-7(含20%苯基的聚甲基硅氧烷); OV-1701(含7%苯基和7%氟丙基聚甲基硅氧烷); OV-17(含50%苯基的聚甲基硅油); OV-17(gum)(含50%苯基,2%乙烯基的聚甲基硅橡胶); OV-25(含75%苯基的聚甲基硅油); OV-210(含50%三氟丙基的甲基硅油); OV-215(含50%苯基,2%乙烯基的聚甲基硅橡胶); UCON HB 5100(约50/50的聚乙丙基醚); OV-225(含25%氟丙基,25%苯基的聚甲基硅油或硅橡胶); Superox-4(高分子量的聚乙二醇,使用温度可到 300C); Superox-0.1(聚乙二醇,使用温度可到 280C); Superox 20M(聚乙二醇,使用温度可到 300C); PEG-20M; Silar 5CP(含50%氟丙基,50%苯基的聚甲基硅油); SP-2340(含75%氟丙基的聚甲基硅油); Silar 10C(含10%氟丙基的硅油); OV-275(含100%氟乙基的硅油)。

80年代中期又为毛细管色谱柱合成了一些极性高热稳定性好的苯基或氟基含量高又可以交联的、粘度高的固定液,如:(1)含70%苯基和4%乙烯基的聚甲基硅氧烷(使用温度可达 400C);(2)含50%苯基的聚甲基硅橡胶;(3)含33%苯基和33%氟丙基的聚甲基硅橡胶;(4)含50%氟丙基和25%苯基的聚甲基硅橡胶;(5)含95%氟丙基的乙烯基硅橡胶;(6)含90%氟丙基和10%苯基的聚硅氧烷硅橡胶。

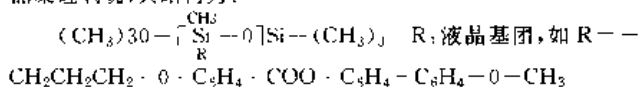
耐高温的毛细管气相色谱固定液 为了适应石油的模拟蒸馏,食品中甘油三酸酯和吡啶及金属吡啶化合物的分析,研制了一些耐高温气相色谱固定液。

毛细管柱用特殊选择性气相色谱固定液 在气相色谱发展的早期曾使用过硝酸银,氯化镉,硬脂酸以及有机皂土之类的特殊选择性固定液,但是这些固定液可使用的温度不高,而且在毛细管中也难以涂渍,近年来研究开发了多种热稳定性好选择性高的气相色谱固定液,用于毛细管柱的涂渍,这类固定液有:低分子液晶;高分子液晶;低分子冠醚;高分子冠醚;以二胺为侧链的聚硅烷手性固定液,以及最近迅速发展的环糊精和环糊精衍生物涂渍的毛细管柱。这些固定液都是为了分离位置异构体和对映异构体而研制的。

(1)低分子液晶:用低分子液晶作气相色谱固定液是由Kelker在1963年首先提出的,30年来研究和使用了200多种低分子液晶作填充或毛细管柱的固定液,用以分离各种几何异构体,在70年代中期科威特Jinini合成和研究高温芳叉类液晶,如BPhBT($\text{C}_6\text{H}_5-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_5-\text{N}=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}_6\text{H}_5$),用它涂渍的填充柱可在 $270\sim 290\text{C}$ 下分离5~7环的多环芳烃几何异构体。中国的李国镇和傅若农等则进行了用芳酸酯类液晶作气相色谱固定液的研究,这类液晶,如PBHB($\text{C}_7\text{H}_5-\text{O}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{OOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}_7\text{H}_5$)对二元取代苯异构体有很好的分离作用。

(2)高分子液晶作毛细管气相色谱固定液:由于低分子液晶在毛细管柱上难以形成稳定的液膜,1982年Finkelmann把端烯基液晶单体用铂催化硅氢加成接枝到聚硅氧烷链上,形成侧链液

晶聚硅氧烷,其结构为:



这类固定液具有很好的成膜性和热稳定性,制备出耐高温的交联毛细管柱它可程序升温到300℃,对多环芳烃异构体有很好的分离性能。北京理工大学和华东化工学院在这一领域作了很多工作,取得了类似的结果。

(3) 高分子冠醚固定液:1985年中国李如松和国外的Fine D. D. 分别提出用低分子和高分子冠醚作气相色谱固定液。1988年美国Rouse等人把端基冠醚基团用钨催化硅氢加成的方法接枝到聚硅氧烷链上,涂渍成的毛细管柱其分离性能和热稳定性都优于PEG-20M。武汉大学和北京理工大学分别制备了各种类型的侧链冠醚聚硅氧烷固定液,并涂渍成弹性石英毛细管柱,这类固定液具有热稳定性好,成膜性好和选择性优良的特点,并可以制在交联柱,用这种固定液涂渍成的毛细管柱对甲酚和二甲酚异构体具有很好的分离能力,这类固定液的结构如下:

(4) 环糊精及其衍生物作气相色谱固定液,环糊精是由6,7,或8个吡喃葡萄糖单元组成的环状寡糖化合物,分别为 α -环糊精(α -CD), β -环糊精(β -CD), γ -环糊精(γ -CD),60年代初就把这类化合物用作气相色谱固定液,但是效果不佳。1987年匈牙利Juvancz和Szejtli等首先把全甲基化的 β -CD用作毛细管气相色谱固定液。同年联邦德国Schurig使用全甲基化的 β -CD和OV-1701一起共同组成混合固定液涂渍在玻璃毛细管柱上分离各种光学异构体。1988年后联邦德国的König系统地研究了用各种CD衍生物涂渍成的毛细管柱分离各种光学异构体的性能并形成4种商品柱,称为Lipodex A, Lipodex B, Lipodex C, Lipodex D。1990年美国Armstrong又合成了2,6,12-0-成基3-0-三氟乙酰基环糊精,并制成毛细管柱,商品名称为DP-TFA- α , β , γ -CD,用这类毛细管柱研究了150多种光学异构体的相对保留值。Armstrong实验室所研究的各类CD衍生物都形成了商品毛细管柱,分别称为:CHIRADEx-A-PH, -B-PH, -G-PH; CHIRADEx-A-DA, -B-DA, -G-DA; CHIRADEx-A-TA, -B-TA, -G-TA; 这些毛细管柱由美国的ASTEC公司出售。

参考文献

1. McReynolds W O. J Chromatogr 1970, 8: 685
2. Hawkes S, et al. ibid, 1973, 13: 115
3. Leibrand R L. J Chromatogr Sci, 1975, 11(11): 556
4. 傅若农, 常永福. 气相色谱和热分析技术. 北京: 国防工业出版社, 1989, 60~92
5. 傅若农, 刘虎威. 高分辨气相色谱及高分辨裂解气相色谱. 北京理工大学出版社, 1992, 125~166

(北京理工大学博士生导师傅若农教授撰)

离子色谱法 Ion chromatography 离子色谱法简称IC。

是1975年美国H. Small等首先提出的。离子色谱法融合色谱分离和分析为一体,是一种具有高速度、高灵敏度、高精度、全自动化可同时测定多种无机阴离子、无机阳离子、有机化合物,以及分析离子价态、化合物形态和金属配合物组成的高效分析方法。离子色谱法在分析化学中占有极其重要的地位,在环境保护、物理化学、生物医学、地质冶金、化工生产、纺织、造纸、能源、农业等领域得到广泛应用。离子色谱法是现代分析技术的一大进步,其发展速度十分迅速。

离子色谱的早期研究可追溯到1935年B. A. Adams和E. L. Holmes合成了离子交换剂,这是离子色谱的一个重要里程碑。继后对Adams和Holmes工作的改进,以及1945年E. F. D. Alelio合成螯合树脂的专利,奠定了新型离子交换剂研究的基础,无论欧洲还是北美的许多公司也都为此作出了努力。20世纪40年代初,离子交换特别是离子交换色谱得到了高度的、富有

成果的发展。1947年《美国化学会杂志》的一个特集中作了报道。其中论述离子交换树脂的理论和应用的专集是离子交换研究文献中的一本经典著作。从中还可见到F. H. Spedding和E. R. Tompkins等人用离子交换色谱法分离稀土的首次报道,从而成为当今许多金属离子色谱法分离的先驱。W. C. Bauma和J. Eichhom以及R. Xunin和R. J. Myers将质量作用概念引入离子交换过程;G. E. Boyd, A. W. Adamson和L. S. Myers阐明了离子交换的扩散过程;S. W. Myers和E. R. Tompkins首次解决了描述离子交换分离过程的复杂理论问题;J. A. Marinsky, L. E. Glendenn和C. D. Coryell首次将离子交换色谱用于放射性物质的分离,并将其与辐射测量仪联用。这些研究丰富了离子交换内容,为色谱法的发展作出了巨大贡献。

二次世界大战结束,进入了离子交换研究的黄金时代。其中的重大事件是1951年由S. Moore和W. H. Stein所作的氨基酸色谱分离和自动检测,此项研究成果获得1972年诺贝尔化学奖。该成果和继后P. B. Hamilton及其合作者的工作,预言了现代液相色谱方面的许多事实,其中之一就是色谱分离和检测器的联用。在此期间,E. Glueckauf提出了现代高效液相色谱的许多理论概念。离子交换取得的进展对有机物的分析产生了深远的影响。一种快速、选择性好、灵敏度高、用于挥发性有机物复杂分析的气相色谱应运而生。随着液体流动相的出现,色谱分离就扩展到了全部有机物。

色谱分离成功的另一个关键是自动检测器的应用和发展。在20世纪70年代以前,在许多情况下,“色谱分离”同时包括“分离”与“检测”两个概念。由于许多有机化合物对紫外光产生强烈的吸收,用于这类有机物分析的检测器首先是紫外光度计。例如对蛋白质、染料、药物和合成聚合物的检测。紫外光度检测更多用于高效液相色谱分析。除此之外,对于某些没有光吸收的化合物,可以通过柱后反应生成具有可见光吸收的“发色物”,然后用可见光度计作为检测手段。荧光检测和电化学检测也被采用。折射率是物质的一种普遍性质,但根据其原理制成的检测器缺乏足够灵敏度。

无机物的分离和分析,通常讨论的都是水溶液中的电解质,这对离子交换来说是十分方便的。因此,离子交换色谱系统被设计用来实现无机阴离子和无机阳离子的完全分离。一般说来,20世纪70年代以前,色谱分离用于无机物的分析是很少的,仅作为化学法分离解决干扰的一种辅助手段,并且分析速度也很慢。当光学检测器和电化学检测器逐渐被使用后,开始应用到过渡金属和镧系金属的分析,许多常见的无机物如碱金属和碱土金属的氟化物、氯化物、硫化物、磷化物等不能有效地吸收紫外光。其他如溴化物、硝酸盐、亚硝酸盐和碘化物虽有光吸收性质,但其波长范围对最早的紫外光检测器是无能为力的。再者这些常见的离子还缺乏荧光和电化学性能。因而缺乏一种性能良好的、通用的无机离子检测器。

1971年,美国DOW化学公司开始用离子交换为分离手段,电导检测为分析方法定量地对无机离子和许多有机离子进行分离分析研究。但在总的程序中要用两根色谱柱(双柱法),即分离柱和抑制柱,后者用来消除分离物中的背景影响,这样,就解决了在高电导率流动相的背景条件下检测少量导电物的问题。1975年,DOW化学公司H. Small等人对上述研究工作做了首次报道。1975年初,DOW化学公司申请了专利,并给Dionex公司发放了制造、销售仪器的许可证,同时将这项技术称为“离子色谱”。于当年秋季在芝加哥召开的美国化学会上展览了该设备。1976年,Dionex公司将仪器商品化。就在离子色谱仪市场逐渐扩大的同时,也出现了完善离子色谱技术的其他方法。如1979年D. T. Gjerde和J. S. Fritz等提出的无抑制柱的离子色谱法(单柱法)。采用该技术制造的离子色谱仪也很快商品化。

至此,“离子色谱”的概念也发生了进展性变化。离子色谱法包括了用来测定离子的所有色谱方法。离子色谱仪已完全使用微机程控系统。实验参数如仪器调零、进样、恒压、调温、流速控制、

梯度淋洗、测峰高、测峰面积、测保留时间以及数据处理都完全自动化。离子色谱法的测定范围扩展到无机阴离子、无机阳离子、离子价态、化合物形态、配合物组成等方面。离子色谱法的应用涉及到许多领域。

离子色谱技术引起了中国科学工作者的极大兴趣和重视。1980年就有研究论文发表；国外早期的离子色谱分析及应用专著已翻译出版；《离子色谱》和《离子色谱分析及应用》以及《离子色谱原理》已由中国学者编辑出版；国家自然科学基金资助专项研究。目前，中国不少单位都拥有进口和国产离子色谱仪，并在各个领域开展了广泛的应用研究工作。大量的论文也在各种杂志上陆续发表。

离子色谱在今后的研究课题是：(1)发展新的色谱柱填料，研究不同结构、不同性能的离子交换剂，提高分离柱的选择性、稳定性、重现性达到高效分析。(2)完善和扩大紫外可见光检测器、电导检测器、安培检测器应用范围，并研制新的检测器以便解决 pK_A 或 $pK_B > 7$ 的电解质的分析问题。(3)引入微型离子色谱技术、浓度梯度洗脱技术、温度梯度技术以缩短分析和改善分离效果。(4)扩大应用范围，随着现代电子、光学技术的发展，离子色谱分析的性能将进一步提高，在应用方面出现广阔的前景。

参考文献

- 1 Adams B A, Holmes E L. J Soc Chem Ind, (London) 1935, 54: 1~6
- 2 Alelio G F D. Ion Exchangers, 1944, 2(366): 007
- 3 Spedding F H, Voight A F, et al. J Am Chem, Soc 1947, 69: 2777~2781
- 4 Moore S, Stein W H. J Biol Chem, 1951, 192: 663~681
- 5 Small H, Stevens T S, Bauman W C. Anal Chem, 1957, 47: 1801~1809
- 6 Gjerde D T, Fritz J S, Schmuckler G J. Chromatogr, 1979, 186: 509~519
- 7 牟世芬, 等. 离子色谱. 北京: 科学出版社, 1986
- 8 张新申. 离子色谱分析及应用. 成都: 四川科学技术出版社, 1986
- 9 张振森, 陶恭益. 离子色谱原理. 北京: 北京大学出版社, 1990
- 10 沈定米, 等. 冠醚树脂的特性及离子色谱应用研究(国家自然科学基金资助项目), 1989~1991

(四川大学沈定米副研究员撰)

离子色谱填料 the filling of ion chromatography 即离子色谱固定相，是离子色谱系统的关键组成部分。它将确定离子色谱的分离机理、流动相的组成与选择以及检测所用的方法，对离子色谱仪有举足轻重的影响。目前，市售的填料大多是专利产品，制备方法往往保密。科学工作者和仪器制造厂商都十分重视新品种的研究。

离子交换剂广泛用作离子色谱分离柱、抑制柱、前置柱和捕集柱的填料。它们具有迅速交换离子的能力；在广泛的 H^+ 浓度范围内有良好的化学稳定性；机械强度和渗透性好；高温不变形等特性。现代离子色谱中以苯乙烯基和硅胶基的离子交换剂最为重要，前者有更为理想的稳定性。苯乙烯基交换剂的制备通常是首先合成一种中性的苯乙烯聚合物，然后将其改性并引入功能团；或者使具有功能团的单体与适宜的交联剂一起聚合。后者一般不用作离子色谱填料。

阳离子交换树脂：高容量的阳离子交换树脂其容量大约为 $5mmol/g$ (干)。在现代离子色谱中有两个主要用途，其一是作为排斥色谱的固定相，其二是作抑制柱填料，但随着微膜抑制器的出现，这种用途正在缩小。低容量的阳离子交换树脂最适宜作为离子色谱填料，可采用将聚苯乙烯-二乙烯基苯小球的磺化限制在一个很薄的表面层的方法来制备。1978年，T. S. Stevens和H. Small报道了这一制备过程，其容量范围大约是 $0.01 \sim 0.05mmol/g$ (干)。另外，也可以用粘合剂将阳离子交换树脂(或阴离

子交换树脂)微粒粘到粒度为 $15 \sim 50\mu m$ 的小玻璃球上，从而制得薄壳型的阳离子交换树脂；亦可将玻璃球体表面用氢氟酸处理后用苯乙烯和二乙烯基苯单体色复，然后再磺化制成阳离子交换树脂。

阴离子交换树脂：带季胺基团的离子交换树脂是离子色谱中主要的阴离子交换树脂。将苯乙烯-二乙烯基苯聚合物先氯甲基化，随后季胺化制得的高容量阴离子交换树脂，在离子色谱中作阳离子分析的抑制柱填料，自微膜抑制器出现后已不常用它。低容量的阴离子交换树脂是将充分氯甲基化的凝胶型树脂表面季胺化来制备，使产品性能差，容量控制困难。1983年，R. E. Barron和J. S. Fritz用大孔型离子交换树脂作为起始材料，将其氯甲基化和季胺化制得低容量离子交换树脂，有良好的性能。表面附聚法是制备低容量离子交换树脂的典型工艺。1975年H. Small, T. S. Stevens和W. C. Bauman将表面磺化的苯乙烯-二乙烯基苯共聚物(粒子直径为 $5 \sim 50\mu m$)与悬浮的胺化阴离子交换树脂胶乳(粒子直径为几百 $\times 10^{-10}m \sim$ 几千 $\times 10^{-10}m$)相接触，具有阳离子功能的小粒子附着在较大粒子表面的阴离子磺化基团上，并建立了一个非常强的附加电场。由于静电作用，胺化阴离子交换树脂微粒固定在磺化基体上，从而制得低容量阴离子交换树脂。在离子色谱的早期工作中，阴离子交换树脂是由市售的大颗粒Dowex1和Amberlite IRA400树脂研磨而得。1976年H. Small和T. Solc报道了制备阴离子交换树脂更有效和更可控的方法。表面附聚法可对离子交换树脂的几个重要性质进行控制，如对交换容量的控制就有3种途径：基体粒子的粒度、胶体粒子粒度以及基体粒子被胶体粒子复盖的程度。色谱柱效率也受基体粒子和胶体粒子粒度的影响。最早的树脂基体直径大约为 $20\mu m$ ，胶体粒子直径为 $1000 \times 10^{-10}m$ ，现在的树脂基体直径小于 $10\mu m$ ，胶体直径小到几百 $\times 10^{-10}m$ 。1982年T. S. Stevens和M. Langhorst发现，基体直径为 $15\mu m$ ，胶体直径为 $200 \sim 1000 \times 10^{-10}m$ 的树脂作离子色谱填料，柱效比原来提高2倍。Dionex公司扩展了制备方法。现代离子色谱填料可在广泛的范围内选用柱容量和柱效率。

硅胶基和丙烯酸酯基离子交换树脂：1974年，在J. N. Done, J. H. Knox和J. Loheac的专著中对早期的硅胶基离子交换树脂用于色谱分析作了介绍。1979年，L. R. Snyder和J. J. Kirland报道了在硅胶基上形成低容量离子交换树脂的方法，是将磺化型和季胺型离子交换树脂连结在硅胶微粒上。这样制得的交换树脂有良好的传质性能。硅胶基离子交换树脂的缺点是，对现代离子色谱中使用的某些典型淋洗剂的稳定性差；交换树脂的容量、交联度和选择性等方面缺乏灵活性。由Toya Soda公司制造的丙烯酸酯基离子交换树脂的应用正日益广泛。尽管对其制备和结构方面的细节了解甚少，但作为离子色谱填料使用其性能优于硅胶基离子交换树脂，稳定性则次于聚苯乙烯树脂。由Dionex公司制造的某些阴离子交换树脂，为了形成薄膜层采用了丙烯酸酯胶乳，与聚苯乙烯树脂相比有其独特的优越性。

带弱性基团的树脂：现代离子色谱中使用的大多数离子交换树脂都是含强酸性基或强碱性基，它们在广泛的 H^+ 浓度范围内保持高度离子化。但仍有一些离子交换树脂含有弱性基团。例如含有羧酸基团的树脂是弱阳离子交换树脂的代表。而伯、仲、叔胺基团的树脂是弱阴离子交换树脂。对于弱酸性离子交换树脂，其容量随 H^+ 浓度的增加而增加，而弱碱性离子交换树脂的情况正好相反，因此，可以通过改变环境 H^+ 浓度来控制含有弱性基团离子交换树脂的容量。与强离子交换树脂相比，弱性离子交换树脂的使用是有限的。

螯合树脂：带螯合基团的离子交换树脂常常作为分离金属离子的填料受到检验。1967年，H. Small等人报道了这方面的研究工作。螯合树脂有较好的选择性，但有两个原因未能广泛使用。其一是螯合树脂的动力学性质不如传统的离子交换树脂；再则，螯合剂作为流动相与传统的离子交换树脂一起才能有效地分离金属离子，而螯合剂的品种多，选择性灵活。尽管这样，螯合树

脂在整个离子色谱中仍占重要地位。它们的高选择性能将某种金属从高背景离子中浓缩出来,对常见的碱金属及碱土有强的亲和力,并具有从高盐环境如海水和海水中浓集金属离子的出色能力。近年来,含有冠醚基团的树脂用作离子色谱填料,用水作淋洗剂就将碱及碱土金属及其他金属离子进行有效的分离。

中国的科学工作者对离子色谱填料的研究非常重视。1985年,中国科学院北京化学研究所研制的 SINOPAK-L-OLA 以及北京第五研究所的 YSA 系列属于表面多孔复盖型离子交换树脂。1988年,北京第五研究所研制出 YSC 系统填料属于薄壳型离子交换树脂。用含冠醚的硅藻土填料,用苦味酸作淋洗剂离子色谱法分离分析碱金属离子也有报道。

离子色谱填料在今后的发展主要是以下几个方面:(1)研究新型离子色谱柱填料,以便获得高分离效能、高分析速度、重现性和稳定性均好的效果。(2)改进离子交换剂基体结构和表面性质,提高柱效。(3)发展硅胶基离子交换树脂。(4)合成各种螯合树脂,特别是将具有高选择性、热力学和动力学性质良好的冠醚基团引入树脂中,使离子色谱填料的品种有新的突破。

参考文献

- 1 Done J N, Knox J H, Loheac J. Applications of High-Speed Liquid Chromatography. New York: John Wiley and Sons, 1974
- 2 Small H, Stevens T S, Bauman W C. Anal Chem, 1975, 47: 1801~1809
- 3 Stevens T S, Small H J. Liq Chromatogr, 1978, 1(2): 123~132
- 4 Igawa M, Santo K. Anal Chem, 1981, 53: 1942.
- 5 Guyot A, Bartholin M. Prog Polym Sci, 1982, 8: 277~332
- 6 Barro R E, Fritz J S. React Polym, 1983, 1(3): 215~226
- 7 苏天升,等.化学通报,1985,9:12
- 8 袁期鸣,等.化学通报,1988,4:34.
- 9 沈定米,等.分析化学,1991,19(11):1229~1233

(四川大学沈定米副研究员撰)

氟的离子色谱测定法 氟是环境化学和生命科学研究中常见的元素。与其它测定方法相比,离子色谱法测定氟具有灵敏度较高,测速较快,较准确并能作形态分析等优点。1975年 H. Small 等首先用离子色谱法测定氟,此后出现商品化仪器。本文就氟的分离、检测、样品处理等方面进行讨论。

分离 (1)离子交换分离:离子交换是离子色谱最通用的分离方法。测定氟时采用阴离子交换树脂(低交换容量的季铵盐型)。若用抑制电导检测,则采用低浓度的碱性淋洗如 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 、 Na_4BO_4 、 NaOH 、 NaHCO_3 等,也有采用两性离子如氨基酸等淋洗。对单柱型离子色谱,以苯甲酸或苯二酸及其盐淋洗为佳。采用离子交换对氟离子分离时,由于保留很弱,只适合比较简单的样品;对于基体复杂的样品(特别是有机酸盐较多的),必须在测定前预处理,如用离子交换树脂和反相树脂除去阳离子和有机酸根。(2)离子排斥色谱分离:离子排斥色谱分离可以包括 F⁻ 在内的弱酸分离,该固定相采用高交换容量的阳离子交换树脂,流动相为稀的强酸。这种分离方式保留较长,不仅强酸的阴离子不影响分离,而且可以与有机酸根分离,特别适合于复杂基体样品的分析。(3)离子对色谱分离:离子对色谱可双分析亲脂性比较强的离子,也能用于无机离子如 F⁻ 等一价阴离子的分析,该分离时,多价阴离子保留很长,对测定不影响,因此选择性很强。该分离采用大孔苯乙烯树脂为固定相,以烷基季铵盐对离子淋洗。(4)反相色谱分离:用动态涂布的反相色谱柱可以分离 F⁻ 等阴离子,PRP-1 聚丙烯苯树脂动态涂布水杨酸四丁基铵后,用 7% 乙腈水杨酸、苯甲酸或苯二酸淋洗分离。

检测及有关仪器和参数 (1)抑制电导:通过化学抑制法降低背景电导,对离子检测是离子色谱最通用的检测方法,对 F⁻ 测定有很高的灵敏度。目前,抑制器已经从原始的抑制柱发展成

可连续再生的纤维抑制器和微膜抑制器,使操作更方便,只要选择合适流动相就可与任何分离方式联用。(2)直接电导:采用低浓度的弱酸作淋洗,背景电导很低,不经化学抑制就可以直接进行电导检测。这种检测方式结构简单,但对 F⁻ 测定时易受基体干扰。(3)间接光度:F⁻ 在 200nm 以上紫外区波长无吸收,因此采用有紫外吸收的淋洗剂,通过检测器变成一个常数信号,当 F⁻ 洗脱时,检测器响应值减少,从减少值间接地得到 F⁻ 的含量。(4)离子选择电极:将氟离子选择电极连在分离柱后,可对 F⁻ 进行检测,该检测方法有很强选择性,但线性关系和准确度不易控制。除了氟离子选择电极外,一些通用的活性电极也能对 F⁻ 等卤素、类卤素离子进行同时测定。(5)库仑法:通过碳膜工作电极和 Ag/AgCl 对电极之间的常量电势以及 F⁻ 与苯醌之间的反应,用库仑法对 F⁻ 测定。

应用 (1)水中氟的分析:水中 F⁻ 的离子色谱测定,有许多文献已经报道。对一般样品,可直接注射或稀释后注射。对基体较复杂的样品须预分离,有机物特别是有机酸对 F⁻ 测定影响最大,可以用反相树脂分离除去,也可以用电化学的方法除去。阳离子对 F⁻ 测定也有干扰,对高含量的阳离子,须用阳离子交换树脂和电化学方法去除。F⁻ 也易与 Al³⁺ 等金属离子络合影响测定,因此加入柠檬酸、磺基水杨酸来掩蔽金属离子。低浓度的 F⁻,可用浓缩柱富集,使检测限达 $0.02\mu\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$,适合于高纯水的分析。(2)气体和土壤中氟的分析:对大气和气溶胶中的 F⁻ 测定,只要将气体通过碱性吸收液,便可分析。测定的关键在选择合适的吸收液,以达到好的回收率。对土壤中的氟,一般离子色谱仅测定其有效氟的含量,即浸出液 F⁻ 含量。由于浸出液基体复杂,须用 $0.45\mu\text{m}$ 的膜过滤,必要时加适当的前处理。其他固体样品,如牙膏中的 F⁻,也可用类似的方法分析。(3)有机化合物中氟的分析:有机化合物包括一些植物体的氟的测定一般采用氧瓶燃烧法处理样品,即氧瓶加入样品,内通氧气后燃烧,用合适碱性吸收液吸收后测定。该分析得到的测定结果与化学分析一致,所用样品量少,分析速度快。有机化合物还可以用钠熔和灰化分解样品,对 F⁻ 进行测定。(4)矿石灰质中氟的分析:矿石等地质样品中的氟含量测定难度最大,测定的关键是样品的分解。采用熔融法,即加入碱性无机盐,加热熔融,使不溶于水的氟转化为水溶性的 F⁻,然后用离子色谱测定。最常见的熔融剂为氢氧化钠、过氧化钠和碳酸钠。样品分解也可以用热水解法,即将样品放入管式炉,加热至 1000℃ 以上,通饱和水蒸气后,用碱性吸收液吸收,然后离子色谱测定。管式炉中往往加入 MoO_3 、 V_2O_5 等物质加速分解,用这种方法处理的样品,基体比较简单,可直接进样测定。矿石等地质样品,也可以用磷酸在小型冷凝管内消化样品,消化液加碱性溶液,即进行离子色谱分析,由于 F⁻ 与 PO_4^{3-} 的保留时间相差较远,因此仍能得到良好的分析结果。

(浙江省测试技术研究所朱岩,杭州大学徐素君、徐行达撰)

环糊精色谱固定相及其在手性化合物分离中的应用 随着生命科学尤其是生物化学和药物化学的发展,已经认识并开始重视手性药物异构体在生物体内代谢和药理作用的差别。

为适应科学发展的需要,科学家们已经把注意力集中在手性化合物的色谱分离方法的研究上。1988年6月在巴黎召开的第1届国际手性分子分离会上,即有90%的文章涉及到色谱。1989年9月在维也纳召开的第17届国际色谱会上,有关对映体分离的报告竟占大会报告的15%。由此可见,色谱技术已成为当前手性分子分离的主要工具,手性分子的分离也成为色谱科学研究的一个重要对象。

关于手性分子的色谱分离和环糊精(CD)固定相的早期发展已有综述。1992年,傅若农又评述了环糊精及其衍生物气相色谱固定相。

1. CD 的结构特征。CD 是多个葡萄糖分子以 1-4 甙键相连的环状低聚糖化合物,至今已分离出六聚体、七聚体、八聚体和九聚体,它们分别称为 α -、 β -、 γ -和 δ -CD。CD 分子具有中空并呈“V”型圆筒状构造,筒内呈疏水性,筒外呈亲水性。组成 CD 的每个葡萄糖单元有 5 个手性碳原子,由 m 个葡萄糖单元构成的 CD 分子将有 $5m$ 个手性中心,因而作为主体分子能够提供于客体分子一个良好的不可多得的不对称环境,而且 CD 衍生物在高达 300°C 时仍不消旋。CD 具有模拟酶的功能。

由于 CD 独特的结构,能够选择性地包结多种客体分子,形成具有不同自由能的包结配合物。作为固定相,其保留行为将呈现差别。若客体分子是对映异构体,则将形成非对映的包结配合物,呈现对映体选择性,这是 CD 固定相分离手性化合物的主要依据。不同的 CD,其腔尺寸大小不同,因而对与其形成包结配合物的客体分子大小有选择性。原则上讲,较大的腔尺寸适合于较大的客体分子。目前, β -CD 固定相适合于许多中等大小的分子,特别是芳香族化合物的对映体分离。

2. CGC 用 CD 固定相及其应用。在手性 CGC 固定相研究中,1966 年 Gil-Av 报道了用 N-三氟乙酰-L-异亮氨酸月桂醇酯作为固定相,在玻璃毛细管柱上完成了 N-三氟乙酰- α -氨基酸酯的手性分离。随后,各种肽、酰胺、二酰胺型的手性固定相也相继研究成功。但是,这些固定相中的大多数仅能在较低温度下工作,选择性有限,应用也受到限制。乙酰化的 CD 固定相早在 1961 年就被用于脂肪族酯化物的分离,以后又主要用于各种几何异构体的分离。由于天然 CD 具有高达 290°C 的熔点,可涂性差,制备的毛细管柱效低。近年来,科学家们致力于 CD 的烷基化和醚基改性,随着 CD 分子上烷基长度的增加,使改性产物的熔点降低,柱效上升,可达 3 000 塔板/m 以上,取得了较大突破。用来在聚硅氧烷中稀释 CD 的方法也可提高柱效,但同时也损失了选择性。

Juvancz, Schurig 和 Venema 等制备了全甲基 β -CD 玻璃和石英毛细管柱,分离了多种不同类型的对映异构体。Koenig 等制备了全戊基 α -CD 和 β -CD 固定相,分离了手性羧基化合物、糖类、烯烃和卤代烃。中国万宏等也合成了全戊基 β -CD,分离了卤代烃和酯。Armstrong 等合成了 2,6-O-二戊基- α -CD- β -CD 和 γ -CD 的(S)-羟丙基衍生物固定相,成功地分离了 70 对对映体。烷基化 CD 固定相使用温度可达 200°C。

Koenig 等发现,在组成 CD 的葡萄糖结构单元上的 C-2 位和 C-6 位与 C-3 位上的羟基的反应活性存在差别,并利用此差别制备了戊基和醚基改性的 α -、 β -和 γ -CD,用于 CGC,成功地分离了手性醇、胺、氨基醇、内酯、卤代烃等。Schurig 等制备了甲基和三氟乙酰或七氟丁酰改性的 β -CD,分离了多种手性化合物。Armstrong (1990) 研究成功用戊基和三氟乙酰改性的 α -、 β -和 γ -CD,制备的石英毛细管柱具有高达 3 600 塔板/m 的柱效,在 10m 长的柱上分离了 150 多对不同类型的对映异构体。采用全甲基- β -CD 为固定相的超临界流体色谱法能分离许多药物、杀虫剂和除草剂对映体(1991)。烷基和醚基化 CD 固定相使用温度也可达 200°C。

3. HPLC 用 CD 固定相及其应用。1988 年,Armstrong 和 Issag 曾评述了 CD 键合相在 HPLC 中的应用。CD 囊合物固定相由于低柱效,仅仅用于传统的柱色谱技术。目前,用于 HPLC 的 CD 固定相以硅胶键合相为主流。

Fujimura 和 Kawaguchi 首先通过不同的乙二胺链节把 CD 键合在硅胶上,用于芳香族化合物的分离。1985 年,Armstrong 成功地制备了不含氮原子的 CD 键合固定相,此种键合相抗水解,稳定,可用于反相和正相的系统,具有高选择性,用于光学异构体、几何异构体和结构异构体的分离。旷昌渝(1989)、黄天宝(1991)等以不同的合成路线制备了不含氮的高固含量的 CD 键合固定相,并用它分离了位置异构体和对映体。Tanaka 等制备了醚基化的和甲基化的 CD 键合固定相,实现了对映体和芳香族化合物的分离。Hattori 合成了氨基改性 CD 键合固定相。

Fujimura(1952)合成两种新型的带氨基甲酸酯链节的 CD 键合固定相,光学分离了苯乙醇衍生物。1990 年,Astrong 制备了一系列醚基和异氰酸酯改性的 β -CD 键合相,不仅用于反相系统,而且用于正相系统分离对映体。由于引入新的可成 π - π 、氢键和偶极相互作用的基团,显示出广泛的对映体选择性,并且认为在这些新的键合固定相上,对映体分离机理与包结作用无关。此外,还评价了 2-羟丙基- β -CD 键合相(A. M. Stalcup, 1990)。

CD 固定相在手性化合物的色谱分离中选择性高,应用范围广,为其他手性固定相所不及,CD 和改性 CD 固定相在对映体分离中的应用将会越来越广泛。但是,CD 固定相分离对映体的机理还有待于进一步深入研究。不同的 CD 固定相的对映体选择性亦呈现差别,仅按其腔尺寸大小的解释还不尽人意。可以预料,新型的 CD 衍生物固定相的研究会成为热门的研究课题之一。

(中国科学院成都有机化学研究所黄天宝
研究员、龙远德、王红撰)

离子排斥色谱用于低分子羧酸分析

低分子羧酸在电力工业、化学工业、食品工业、环境保护、生物化学、生物医学和生命科学等领域中有着重要的分析价值。低分子羧酸的高效液相色谱法有反相色谱法和离子对色谱法等。离子色谱是根据离子色谱分离低分子羧酸的机理,大致可以分为离子交换色谱分离法(HPIC)和离子排斥色谱分离法(HPIEC)两大类。20 世纪 70 年代后期,由于弱离子化低浓度有机酸定量分析的需要,导致以离子排斥色谱为基础的离子色谱分离方法的发展(W. Rich 等, 1979)。20 世纪 50~60 年代 R. M. Wheaton 和 W. C. Barman 建议使用离子交换树脂将溶液中的离子化组分与非离子化组分分离,并且首先将离子排斥概念用于这一分离方式。G. R. Harlow 和 D. H. Morman 用离子排斥分配色谱方法,研究了 50 多种不同结构的酸在 H 型阳离子交换树脂上,以水为淋洗剂的洗脱特性。指出酸的电离常数(pK_a)、酸在水中的溶解度和酸的分子量都是影响在离子排斥色谱中分离的重要因素。P. Jandera 和 J. Curacek 对 60 年代有机酸阳离子交换树脂上分离的有关报道进行了评论。1979 年 K. Tanaka 等使用阳离子交换树脂,以水作淋洗剂,采用 HPLC 技术和流动库仑检测、电导检测、紫外和荧光检测等方法,进一步研究了 22 种不同强度酸的离子排斥色谱保留特性,计算了它们的分配系数。

1979 年 Tanaka 等首先发现酸的保留体积 V_R 取决于它们的 pK_a 值。B. H. Clod 和 W. Kemula(1986)用电动势学检测方法测定了色谱柱的空体积 V_0 、内部体积 V_1 并且计算了被分离酸的电离常数 K_a ,认为强酸($pK_a < 2.5$)和弱酸($pK_a > 6.5$)在离子排斥色谱中不易被相互分离洗脱。中等强度的酸($2.5 < pK_a < 6.5$),其保留体积与它们的 pK_a 值呈正比。

但是,另一种观点认为,某些酸在离子排斥固定相上的保留,主要是这些酸分子在碳链一侧即疏水部分同“树脂相”之间存在范德华力作用所产生的疏水吸附(江头晓,1973)。1987 年 K. Kihara 等研究脂肪酸在强阳离子交换树脂上的洗脱特性。认为羧酸保留行为是 Donnan 电势、排阻和疏水性等几种作用力相互影响的综合结果。他们用离子色谱方法,研究了一价和二价脂肪酸在碱金属和氮离子型树脂上的保留行为,指出羧酸的洗脱特性以碳数为顺序,不同分子量羧酸其保留机理可能不尽相同。1989 年赵国梁等导出了关联分配系数与酸解离常数及吸附常数的关系式,认为 $\ln K$ 与脂肪酸的拓扑参数 X 之间具有良好的线性关系。

在阴离子 HPIEC 中,由于使用了非常稳定的,聚苯乙烯-二乙烯苯微粒、粒度均匀的填料,改善了固定的刚性和分析的重现性。这些填料可以满足 HPIEC 淋洗液流速的要求,它们在 H^+ 浓度 $10^{-14} \sim 0 \text{ mol/L}$ 范围内都是稳定的,并且有较长的寿命。1987 年 P. E. Buell 和 J. E. Girard 介绍了有机酸和其它弱酸性化合物 HPIEC 最常用的分离柱、填料。硅胶离子交换材料和薄壳凝胶微粒虽然也有用于 HPIEC 的,但是由于它们存在通用 H^+ 浓

度范围受限制和离子排斥分离效率等问题,使用比较少。

1987年苏天升等研究了高效率离子排斥色谱用的多孔磺化树脂的制备方法。他们认为,欲加速 Donnan 膜的平衡过程以达到高效分离,基质树脂必须具有较大的孔径,在适当的淋洗条件下,以联度为 20% 的磺化树脂为填料,可使几种有机酸得到较好的分离。Buell 和 Dirad 则指出,较低交联度(8%)的有机聚合物树脂最常用于 pK_a 值为 2~4 的酸的有效分离。

1988年 P. Wlaser 介绍了一种适膈羧酸 HPIEC 分离的 PRP-X300 阳离子交换树脂柱,该柱可以在 5min 内使短链羧酸得以分离。PRP-X300 与典型的离子排斥色谱柱相比,其磺化速度属于中等。J. I. Toei 使用带顶柱的凝胶阳离子交换树脂柱系统,实现了高碱性溶液中低分子有机酸的分离和检测。从总体上看,水、稀矿物酸、有机酸这三类淋洗剂的选用与分离柱的特性、抑制器的类型和检测方式有很大的关系。用水作淋洗剂最大的优点是背景电导低,但淋洗强度较弱。用稀矿物酸作淋洗剂通常都有柱后抑制系统并采用电导检测方式,否则为非抑制系统光度检测方式或者是其它检测方式,例如质谱(MS)、折光等。在这一类淋洗剂中,有一些采用较低浓度,以降低淋洗液背景电导实现非抑制分离检测,用酸性较弱的无机酸如硼酸作淋洗剂的目的也是降低淋洗液背景电导。降低淋洗液背景电导的另一途径是选用低本底电导的酸作淋洗液,例如 TDFHA、烷基磺酸和总体氟化的羧酸等。1984年杨泽蓉和金吉祥利用乳酸和硼酸分子间的络合反应,在稀硝酸中加入硼酸,提高了乳酸和甲酸分离的选择性。

对于低分子羧酸 HPIEC 分析方法,柱后抑制有两个作用:一是降低背景电导,二是改变分离组分的离子化程度,使之更利于检测。阴离子 HPIEC 柱后抑制经历了沉淀反应、粒状离子交换树脂柱,中空纤维和微膜抑制器这样一个发展过程,抑制反应以离子交换为主,其它抑制反应也有所采用。

离子交换柱后抑制开始仅涉及简单的离子交换反应即把 H 离子转变为其它离子如钠、钾离子,从而降低背景电导。后逐步发展到使用辛烷基磺酸,十三氟代庚酸或全氟丁酸等作淋洗剂,经阳离子交换膜抑制器将 H 离子交换为 NBu_4^+ 。一种磺酸盐离子交换纤维抑制柱,用烷基磺酸盐作淋洗液,氢氧化四丁基胺(TBA)作再生剂,可以得到较低的背景电导。1988年 T. Murayama 等用 2mmol/L 硫酸作淋洗剂,中性盐或强碱溶液作“放大试剂”。使淋洗液流经阳离子中空纤维抑制器后 pH 值升高,放大了色谱峰,抑制了背景电导。对于大多数一价和二价羧酸,使用硫酸钠或硫酸钾作放大剂,色谱峰可增高 30 倍以上。1988年 J. Haginaka 等描述一个类似的方法,随着强碱溶液浓度的不同,可以出现正或负的色谱峰。大多数羧酸的响应值可放大到 16~83 倍,而且负峰的放大倍数比正峰高 1.8~3 倍。T. Okada 和 P. K. Dasgupta (1989) 使用全氟磺化膜抑制器,并用高浓度(0.1~1.0mol/L)氯化钠(有时加 < 1mmol/L NaOH)作再生剂,使弱酸经抑制器后转变为相应的钠盐,导致 H^+ 浓度下降,再加入酸碱指示剂(4-硝基酚,波长=400nm,碱式测定)进行光度检测。T. Okada 开发了一种氧化还原柱后抑制反应,以氢碘酸作淋洗剂,与氧进行柱后氧化还原反应,用于弱羧酸 HPIEC 分析,可使色谱峰高比无抑制系统时提高一个数量级,并且可以比常规离子交换抑制器更有效地降低背景电导。此系统特别适合于高酸性淋洗液的柱后抑制。

低分子羧酸 HPIEC 的检测方式主要是电导检测,其次是其它电化学检测方法。紫外和可见光度检测方式虽然也采用,但检测灵敏度较低。1974年高田芳矩等将阳离子交换树脂用于脂肪酸的快速分离,并首创库仑电解检测方法。1980年谢光化等在国内首次报道对一元和二元有机酸直接进行离子排斥分离。用库仑恒电位检测器检测的分析方法。1983年侯纯善用库仑检测法分析了火电厂热系统水、汽样品中的低分子有机酸。Okada 和 Dasgupta 作用膜抑制器和高浓度 NaCl 再生液,使被分析的弱酸转变为相应的 Na 盐,导致淋洗液的 H^+ 浓度下降,然后加入酸碱

指示剂 4-硝基苯酚在 400nm 处以碱式测定,可使中等 pK_a 的弱酸获得较高灵敏度。F. Pacholeec 等研究了离子排斥-质谱系统,由此获得的质谱数据,可以提供一元有机酸混合物未知组分有价值的分子量信息。

在 HPIEC 中,紫外吸收是常用的检测方式,但在多数脂肪酸的分子中缺乏强发色团,从而使紫外吸收检测方法受限制。与紫外吸收光变法相比,化学抑制型电导检测对羧酸的检测灵敏度至少要提高一个数量级(牟世芳,1987),就离子色谱分离和检测技术而言,一般认为化学抑制型电导检测用于低分子羧酸离子色谱分析灵敏度较高。Johnson 对抑制型离子色谱常见阴离子分析检测限作了专门评论。他指出,在一般进样体积(50 μ l)下,以 3 倍于基线噪声的检测信号作为检测限,甲酸、乙酸、丙酸的检测限一般分别为 0.5×10^{-6} , 1.0×10^{-6} , 1×10^{-6} — 2×10^{-6} (V/V)。

阴离子排斥色谱分离-电导检测的灵敏度,除了与淋洗背景抑制情况有关外,还取决于样品离子的离子化程度,因此,间接地与淋洗液的 H^+ 浓度有一定关系。Arthur 等指出,使用 100 μ l 进样时,离子排斥色谱分离(柱后抑制电导检测,对于大多数短链有机酸的检测限为 100×10^{-9} (V/V)。若要实现低于此限有机酸的测定,需要进行柱前预富集。Bachman 和 Peden 使用由分离柱和抑制器组成的双柱 HPIEC 系统,对雨中的甲酸、乙酸和柠檬酸进行了定量分析,方法的检测限为 0.03mg/L(S. R. Bachman 等,1987)。

(浙江大学严晋婴、施荫玉撰)

冠醚类试剂分离铷和铯 铷和铯在自然界常共生于含钾的物质中,且含量低,直接取样测定时灵敏度一般达不到要求,且大量基体背景的干扰无法克服。铷和铯的分离已逐步从分级结晶过渡到特效的沉淀法、无机离子交换和溶剂萃取,其分离试剂正从非冠醚类试剂向冠醚类试剂过渡,原子吸收法与火焰发射法仍是重要的常规分析手段。

1967年 C. J. J. Pedersen 首先发现冠醚对某些金属离子有特效的络合性质,此后这类化合物的研究发展很快,在分析化学、特别是在碱金属分析中的应用显示了良好的前景,被称为第二代金属离子特效分离剂。从金属离子的分离来看,不仅可以利用其孔穴的大小和取代基的变化来适应各种不同大小的阳离子,而且还可以借其特殊的立体构型特定的金属离子囊包起来,以达到分离的目的。含有官能团的冠醚化合物作为主体分子对金属离子的选择络合作用也已受到人们的普遍重视。连结在冠醚芳环上的官能团指向冠内腔,由于其具有特定的电子效应和空间效应,常可以调节主体分子的空腔大小,增强对金属离子的络合选择性,还可参与对金属离子的配位,使主体分子对金属离子的络合稳定性有所提高。

铷和铯的离子直径分别为 0.298 和 0.33nm。1986年黄级采等的研究表明,单冠醚环的孔穴与金属离子大小相近,生成的络合物较稳定。研究用双环-己基-18-冠-6 和双环己基-24-冠-8 对铯的萃取特性,发现较大的王冠空腔对铯的选择性增加 ≥ 4 倍。孔穴较大,并与铷和铯的离子直径相近的 DB-21-C-7 和 DB-24-C-8 只对半径较大的 Rb^+ 和 Cs^+ 离子显示萃取作用, Rb^+ 和 Cs^+ 离子直径比同族的碱金属元素的离子半径要大,因此选择具有较大孔径,并与 Rb^+ 和 Cs^+ 离子直径相接近的冠醚化合物,对萃取铷和铯较为有利。

冠醚络合物属于缔合型络合物,具有一定的极性,因此在极性溶剂中的溶解性能比在非极性的溶剂中好。但为了使金属离子自水溶液转移到有机溶剂中,则要求有利于络合离子之间发生缔合作用的介质,即要求极性较大的硝基苯等更好。由于冠醚与金属离子作用后生成亲脂性的、大体积的阳离子,在进入有机溶剂时,必须匹配亲脂性的、软的大阴离子。试验表明,有机酸离子一般比无机酸离子更有利于冠醚对金属离子的萃取。有机酸的憎水性越大,萃取能力也越大。

双冠醚是 1975年 M. Bourgin 首先合成的一类新型化合物,

它们的分子中含有两个冠醚结构单位,中间用链状或环状连接起来。双冠醚能与离子半径较大的 K^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 形成分子内夹心络合物,离子的周围都是亲脂性的有机基团,因此它的新脂性比单冠醚大的 1:1 络合物好。离子易从水相萃取到有机相,所以双冠醚溶剂萃取能力比单冠醚大,可作为有效的萃取剂,选取双冠醚化合物萃取铷和铯较单冠醚化合物更为有利。

1980年 K. Kimura 研究发现,立体化学结构对双冠醚的萃取能力有很大影响,如双冠醚 A 萃取 $1 \times 10^{-2} \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碱金属苦味酸盐的水溶液,所得的萃取常数显示,顺式异构体的萃取能力要强于反式异构体的萃取能力强。研究发现,顺式异构体对离子半径稍大的 K^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 都是形成分子的内夹心络合物,反式则不能,所以顺式异构体对 K^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 的萃取平衡常数均比反式大。因此使用冠醚类试剂萃取铷和铯时,应注意其外部条件,使其尽可能在顺式结构下完成萃取。

冠醚类试剂用在色层分离技术上,对铷和铯也有较理想的分离效果。W. H. Delphin(1978)等将碱金属离子吸附在 Dowex X50 阳离子交换树脂上,以 DCH-18-6(A, B 异构体)的盐酸-80% 甲醇溶液淋洗,测定 H^+ , 冠醚及 H_2O 的浓度对 M^+ 在树脂相和溶液中分配比 K_D 的影响并计算 K_D 值及分离系数 β 值: $\beta_{A(A)} = 2.9$, $\beta_{A(B)} = 3.4$, Cs^+ 可以与 Rb^+ 以及其他碱金属分离。

冠醚类试剂虽在金属分析中展现良好地前景,但在实际应用中却碰到不少困难,至今未能很好地解决。如用均一二苯基-16-冠-5 氧代乙酸萃取碱金属。在单个离子萃中最易被萃取的是 Cs^+ 和 Rb^+ ,但在多种离子共存情况下,其竞争效果不如 Na^+ 或 K^+ 。这说明将单个离子萃取结果,外推至多元竞争萃取系统是不可靠的。若只考虑冠醚空腔和阳离子直径,此化合物对 Na^+ 应有最好的选择性。但研究结果表明,萃取能力由空腔和羧基间的平衡控制。在碱性条件下,对 Na^+ 或 K^+ 的选择性好,而在酸性条件下,羧基部分起主要作用,此时对萃 Cs^+ 或 Rb^+ 较有利。同样在单个离子萃取中, Cs^+ 或 Rb^+ 与羧基部分有更强的作用,萃取效果较好。但在竞争萃取中,由于其他碱金属离子能与络合剂的两部分同时发生作用, Cs^+ 和 Rb^+ 的竞争能力则降低。虽如此,近几年来用于分析分离铷和铯的新型冠醚类试剂,被不断地合成出来,且性能显著提高。K. K. J. Luk(1984)研究了冠醚-磷酸盐沉淀的阳离子交换性能,铯的含量可以用原子发射法测定,所用冠醚明显影响,离子交换材料的阳离子选择性。B. S. Mohite(1985)提出用二环己醇-18-冠-6 萃取分离铷,检出限为 $0.25 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。铷的光度测定可用 H. Nakamura 等(1979)合成的 4-间三硝基苯氨基-15-冠-5 来实现。能同时用于铷和铯测定的生色 16-(2,4-二硝基苯偶氮)-3,6,9,12-四噻 [1,2,3,1] 十八-18), 14,16-三烯醇[18], 在氯仿介质中可分别在波长 575, 580nm 处测定铷和铯,其符合比耳定律的浓度范围分别为 $0.03 \sim 2.5 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.25 \sim 3 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

从目前情况看,已有许多的冠醚试剂较成功地用于 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 的分离和分析,而对 Cs^+ 和 Rb^+ 较成功的分析方法还很少,特别是在多种离子共存的复杂体系中,困难更多。但冠醚类试剂的研究和发展方兴未艾,可以肯定 Cs^+ 和 Rb^+ 的分离和分析方法,也会随着冠醚类试剂的发展而日趋简便、快速和完善。

(中国科学院盐湖研究所邵鲁安撰)

高效液相色谱检测技术

高效液相色谱法适用的范围很广,在医药学及生命科学中已成为一种主要的分离检测手段。近年来高效液相色谱检测技术从最常用的紫外可见分光光度检测器和差示折光检测器开始,已经发展了诸如能够实时定性和定量的二极管阵列紫外可见分光光度检测器,能够快速扫描和光谱分辨率更高的色散型紫外可见分光光度检测器以及适用于生物化学的电化学检测器等等,各种联用检测手段如与质谱联用的热喷雾和粒子束接口等已日趋成熟,与傅里叶变换红外光谱和拉曼光谱的联用技术亦在发展中。各种检测器的灵敏度、线性范围、

稳定性和重现性等主要指标日益提高。许多新的检测手段已为科技工作者所熟悉和使用。目前比较引人注目和发展较快的为手性化合物的直接检测和通用型质量检测技术。

1. 手性化合物旋光检测器 药物的疗效及其在体内代谢的机理对如何发挥药物的最大作用和减少副作用愈来愈引起重视。在研究中,人们发现了光学对映异构体对生理作用的重要性。

目前手性化合物的高效液相色谱分析方法通常有:

(1)用手性固定相分离,即将其旋光活性的手性基团键合至固定相上。利用极性相互作用、氢键键合、 $\pi-\pi$ 键相互作用、手性空穴及结合在硅胶上蛋白质的疏水或极性相互作用等可对手性化合物进行选择分离。

(2)在流动相中生成对映体,被分析物与手性对离子生成离子对,用普通条件进行分离。但此法要受到对离子的化学性质、纯度和在流动相中溶解度等条件的限制,特别是反应的平衡时间长,重现性也有限。

(3)通过衍生化生成对映体分离,即用柱前手性衍生化试剂生成衍生物用普通条件进行分离。例如,含羟基化合物可用 1-(9-苄基)乙基氯甲酸酯(FLEC)等衍生化、氨基酸等与邻苯二甲醛和 N-乙酰基-L-半胱氨酸结合的试剂衍生化而进行分离。

上述方法的顺利与否取决于固定相、试剂和条件的选择,而且分析步骤是否严格重现和外来干扰能否有效排除等也有影响。

以偏振计(旋光计)作检测器,用普通分析手段检测手性化合物的想法始于 70 年代。1982 年据此出现了相应的仪器,但由于使用的是气体放电光源的机械旋光计,灵敏度很低,且光源稳定性差,达不到要求,致使这种检测方法未被正式采用。

1989 年 Lloyd 等用二极管激光器作光源,研制了二极管激光器高效液相色谱旋光检测器。与其他检测器结合使用可以在部分或无手性分辨条件下测定对映体的纯度。

旋光检测器对手性化合物检测的专属性好,激光光源的波长适用于各种化合物,无需与吸收带的波长相符合。由于激光束的直径及发散度很小,因此可以用小孔径长光程液相池同时满足池容积小而灵敏度高的要求,可测旋光的灵敏度低达几个微弧度,定量的线性范围可达 $50 \mu\text{g} \sim 50 \text{mg}/\text{ml}$ 。根据理论,通过增加比旋度及减小色谱峰宽可以进一步改善检出限。

旋光检测器测得的旋光度对手性化合物分子有如下关系:

$$\alpha = [\alpha]CL \quad (1)$$

式中, α = 测得的 (+)-对映体旋光度, $[\alpha]$ = 手性化合物 (+)-对映体的比旋度, C = 手性化合物 (+)-对映体的浓度, L = 液相色谱池光程长度。

旋光对映体混合物的旋光度与浓度关系如下:

$$(+)\text{-对映体: } \alpha = [\alpha]LCX \quad (2)$$

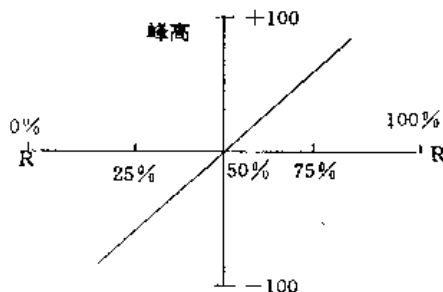
式中 X = (+)-对映体的克分子分数。

$$(-)\text{-对映体: } \alpha = -[\alpha]LC(1-X) \quad (3)$$

混合物中 (+)-对映体的旋光度为

$$\alpha = [\alpha]LC(2X-1) \quad (4)$$

即仪器给出的旋光信号与对映体的相对比例有关,可由下图的校正曲线说明。



由于仪器给出的信号只代表该浓度时两种旋光对映体的比值,因此当两者比例趋近相等时,旋光读数即行减小,直到完全消旋时,旋光值等于零。因此该化合物的总浓度需要用常规的液相

色谱检测器如紫外可见光吸收检测器或差示折光检测器等串联测定,同时给出旋光信号及常规检测器测定信号。旋光检测器及常规检测器的信号与浓度关系为:

$$a \propto C(2X-1) \text{ 及 } A \propto C$$

因此 $a/A \propto 2X-1$ (5)

将标准品与未知样品的检测器响应加以比较可得出如下关系:

$$\frac{(a/A)_u}{(a/A)_s} = \frac{2X_u-1}{2X_s-1} \quad (6)$$

式中下标 u 代表未知样品, s 代表标准样品。

从应用角度来说,其应用范围及寿命也有限。其他如衍生化反应有反应不完全导致分析结果不准确之虞。应用本文所述检测器则不受一切条件的限制,且完全不必改动原来的液相色谱系统,仅在所用检测器前或后再串联一个旋光检测器即可。使用双通道色谱数据处理机可同时得到两个检测器的结果。在可用高级语言编程的处理机上,可通过执行程序将结果直接计算出来。另一个优点是检测器没有可动部分,因而无机械磨损等故障发生。

旋光检测器逐渐引起人们的重视,目前已有多方面的应用,药物分析,食品分析,农药分析,其他。

2. 蒸发型质量检测器。目前常用的通用检测器为差示折光检测器,但这种检测器对梯度洗脱及温度变化极为敏感,不适于很多色谱条件。再者,由于紫外吸收和差示折光检测器对某些化合物不敏感,有些溶剂和溶质的组合不适用于上述检测器,因此不能达到真正通用型检测器的要求。

蒸发型质量检测器结构简单,用光散射技术检测时样品结构不需具备紫外发色团和合适的折光率,并对梯度洗脱和流动相系统温度变化不敏感,由于属通用型,因此对被分析组分或杂质均有响应,可在一次分析中予以检出,对未知组分的鉴定更为有利。

质量检测器在通用性及对梯度洗脱不敏感等方面优于其他检测器,已在食品、油脂、高分子化合物及药物分析等领域中得到成功的应用。其通用性还表现在对各种物质均不几乎相同的响应因子。且质量检测器在分析前不需校正,便可将各种组分一次测出。在药物分析中,质量检测器十分适用于杂质检查、参考标准质量分析和作为降解机理研究的工具。质量检测器的应用有:药物分析;生物物质测定;其他。如用质量检测器的凝胶色谱法可以满足各种高聚物分子量的测定要求等。

总之,手性化合物旋光检测器和蒸发型质量检测器等液相色谱检测技术的发展给予高效液相色谱法以许多新的功能,扩大了高效液相色谱法在各方面的应用,对高效液相色谱法的本身的发展也有一定的促进作用。

(上海市药品检验所张叔良撰)

分子荧光分析法 molecular fluorimetry 分子在吸收一定的辐射能量之后跃迁至较高的电子能级而处于激发态,激发态分子不稳定,迅速经历振动弛豫和内转化过程而丧失一部分能量,衰变到第一电子激发态的最低振动能级,分子荧光是处于这一激发状态的分子在经历辐射跃迁衰变到基态的过程中所伴随的发光现象。分子荧光具有激发光谱、发射光谱、荧光强度、荧光寿命、荧光量子产率和荧光各向异性等种种特性。利用分子荧光来进行物质的定性或定量测定以及获取其它有关信息的方法,称为分子荧光分析法(简称荧光分析法),如今已发展成为一种重要且有效的光谱化学分析方法。

1575年N. Monardes首次发现荧光现象,此后在17世纪和18世纪中,虽然陆续发现了一些发荧光的物质,但对荧光现象的解释却几乎没有有什么进展,直至1852年Stokes才初步揭示了荧光现象的本质,判明荧光现象并非光的漫射作用,而是物质吸收光能后产生的光发射。他还由发荧光的矿物“萤石”推演而提出“荧光”这一术语,并指出荧光现象可能用来作为分析手段。1867年Goppelsroder应用铝-桑色素配合物的荧光进行铝的测定,

是历史上首次的荧光分析工作。1880年Liebman最早提出了有关荧光与化学结构关系的经验法则。进入20世纪这后,又陆续观察到共振荧光、电子冲击发光和敏化荧光等现象,并进行了荧光量子产率和荧光寿命的测定。与此同时荧光测定的仪器也有了相应的发展,1928年第1台光电荧光计问世,1948年推出了第1台自动光谱校正装置,1952年已有了商品化的校正光谱仪器。

尽管首次发现荧光现象至今已有400多年的历史,但荧光分析法的蓬勃发展和广泛应用于各个领域还是近几十年的事。尤其是本世纪70年代以来,在其它学科迅速发展影响和推动下,随着激光、计算机、电子学和光导纤维等新的科学技术的引入,使荧光分析法进入一个迅速发展的时期,至今方兴未艾。随着激光光源、光学多通道检测器、光子计数、光源调制和相敏检测以及微机联用和软件开发等方面的不断改善,各种新型荧光分析仪器不断涌现,在灵敏度、分辨率、稳定性、扫描速率、自动化程度等方面水平不断提高,测定功能不断扩展。与此相应,各种荧光测定新方法、新技术也迅速兴起和发展。荧光分析法由于灵敏度高、线性动态范围宽、选择性较好且仪器易于普及、操作简便快速,因而在工农业、医药卫生、环境保护、公安情报和科学研究等部门得到了日益广泛的应用。

在测定的灵敏度方面,随着高灵敏荧光试剂和增效分析试剂的应用和测定仪器性能的改善,常规荧光分析法的灵敏度日益提高。近年来随着激光光源的应用和微弱信号检测技术的进展,在有些情况下激光荧光光谱分析法已可实现单原子或单分子检测,达到了光谱分析的灵敏度极限。

复杂试样中单一组分的选择性测定或多组分同时测定的需求,促进荧光测定的某些新技术(包括与其它分析手段的联用技术)的产生和发展。在开拓利用各组分荧光特性的差异的基础上,产生了诸如利用激发光谱或/和发射光谱方面的差异(即光谱的选择性)而建立的同步(扫描)荧光测定、导数荧光测定、导数-同步荧光测定和三维荧光光谱技术;利用荧光寿命的差别而建立的时间分辨荧光测定;利用荧光寿命的差异及调制激发时所产生的调制发射在相角上的差别而建立的相分辨荧光测定;利用荧光体转动扩散速率的差异而导致恒态荧光偏振的差别而建立的荧光偏振测定,等等。某些有机化合物(如多环芳烃致癌物)彼此化学结构颇为相似,又各存在多种同分异构体和衍生物,它们的室温荧光光谱呈宽带状又相互重叠,导致表征和鉴别上的困难。低温下可使分子光谱的谱带窄化,是提高测定选择性的有效途径之一,从而促进种种低温荧光测定技术的研究和发展。

80年代末提出的荧光各向异性选择性技术,显示了荧光分析法在选择性方面的内在优势。这一技术采用频域测量的办法,配合计算机数据处理,使得两种组分即使光谱相似、荧光寿命相同且极限各向异性数值相近,只要它们的转动相关时间有差异,也可直接加以分辨。这给蛋白质和酶模拟体系的荧光探针法研究提供了一种有效的测定手段。

圆二色性是一种手性测定方法。许多生物分子由于具有手性而给测定带来了附加选择性。测定圆二色性以往通常采用吸光光度法,70年代提出了圆二色性的荧光检测,除使检测的灵敏度提高之外,因可同时测定总荧光强度,增多了潜在的信息内容,此法已开始用作高效液相色谱和毛细管电泳等分离技术的检测手段。

化学计量学的兴起,也为荧光分析法选择性的改善开辟了新的途径,在背景校正、光谱分辨、多维信号量测及多组分同时测定等方面,收到了明显的效果,日益吸引人们的研究兴趣,在荧光分析中的应用将会越来越多。

近年来,致力于发展各种荧光测定方法间的结合技术以及荧光测定与其它分析方法联用技术的研究工作日益增多,旨在进一步提高方法的选择性或/和灵敏度。最简单易行的一种结合技术是导数-同步荧光测定,它同时发挥了同步荧光和导数荧光两种测定方法的优点,已成功地应用于多组分的同时测定。相分辨荧光测定与同步激发技术的结合,已成功地应用于多组分芳烃的

测定。时间分辨或相分辨荧光测定这一类发光的动态测量技术,近年的研究进展很快,有效地应用于光谱重迭的混合物分析。利用多维数据阵列将激发、发射、时间(或频率)等因次作为选择性参数结合起来,对混合物的分析将大有裨益。超声喷射光谱与同步荧光测定的联用,获得的多环芳烃的荧光光谱接近于线状光谱,分辨率大为提高。许多天然荧光物质具有相似的荧光光谱,某些荧光物质具有不稳定性,更有许多物质本身并不发荧光,这些因素使荧光分析法的应用受到限制。由光化学反应和荧光检测相结合而产生的光化学荧光分析法,在很大程度上克服了上述的局限性,且不同能量的光子将诱发不同的光化学反应,这种专一性对提高分析方法的选择性很有意义。荧光测定与动力学分析(尤其是速率动力学分析)以及停流技术联用,同样有利于提高测定的灵敏度和选择性。荧光检测与色谱、电泳等分离手段联用,兼有色谱(或电泳)的高分离效率及荧光检测的高灵敏度,在解决化学性质相近的组分(如氨基酸、多肽、核酸及多环芳烃等)的分离分析方面收到显著的效果,在生命科学和环境科学中有着广泛的应用前景。

荧光免疫测定和光纤化学传感器这两方面的近年进展,十分引人注目。为克服放射性标记所带来的问题,现已开发多种非放射性标记的免疫分析方法,荧光免疫测定有希望成为比较理想的一种方法。荧光免疫测定虽然存在背景荧光干扰和荧光猝灭的问题,但应用时间分辨测量技术及采用荧光寿命较长、Stokes 位移较大的标记物,已经可以加以解决。稀土金属(铕和铽)的螯合的,是目前常用的比较理想的一种标记物。Diamandis 等人在以 Eu^{3+} 与 4,7-双(氟磺苯基)-1,10-菲咯啉-2,9-二羧酸(BCPDA)的螯合物为标记物的基础上,提出一种新的通用免疫分析试剂,使得多重标记手段不仅不引起浓度猝灭效应,而且能有效地提高灵敏度,理论上的放大系数约达 10^4 。荧光免疫测定已越来越多地被应用于蛋白质、激素、病毒抗原、药物及 DNA 杂交体的分析。光纤化学传感器的发展与应用,为小量试样的痕量组分提供了简单、快速和现场的分析手段。光纤化学传感器的重要组成部分是固定化试剂相。为了高选择性地检测某些痕量组分,人们已将免疫反应的原理应用于荧光检测的光纤化学传感器的设计,如将标记的抗体或抗原共价偶联到石英光纤末端的表面上,或者将标记的抗体(或抗原)与用另一种标记物标记的抗原(或抗体)一起密封于由渗透膜构成的反应室里(这两种标记物之间会发生均相荧光能量转移),以构成光纤荧光免疫传感器。新近已研制出可再生的光纤的或平面波导的荧光免疫传感器。

新的荧光试剂的发展,表面活性剂和环糊精等一类增效分析试剂的应用,使荧光分析法的灵敏度和选择性以及实验条件的宽容性得到很大的改善。合成新型增效分析试剂,开拓增效分析试剂配用的有效体系,研究增效作用的机理,以及设计合成各种灵敏度高、选择性好的新型荧光试剂等等,仍然是一个有吸引力的研究领域。

荧光分析法在生物、医学和生物化学的研究中,近年来的重要应用有如恶性肿瘤的激光诱导荧光诊断和光化治疗,激光微荧光法研究抗癌药物与癌细胞的相互作用情况,荧光探针法研究蛋白质的构象及其变化、蛋白质与配体间的相互作用及其动力学,以及荧光法用于 DNA 的测定与测序、研究多环芳烃致癌物与 DNA 之间的相互作用等等。

时间分辨光谱学在近 20 年来一直是十分活跃的研究领域,越来越多地应用于改善定性分析和定量分析方法,提供结构和动态的信息。时间分辨技术的发展已产生了超快速光谱学,其时间标度约从 10fs 到 100ps,而采用光学的时间分辨手段,已有可能达到 200fs 的分辨能力。超快速光谱学的发展,必将推动对分子荧光的有关理论的进一步深入研究。当时间标度达 10ns 时,人们可以研究荧光的衰变;时间标度达 100ps 时,可以研究荧光各向异性随时间的变化;达 1ps 的时间标度时,可以研究溶剂松弛过程。随着时间标度达到更小的数值时,便能观察到荧光光谱的某些重要特征:(1)没有松弛的荧光。因为达到 fs 的标度时,振

动松弛相对来说就显得慢了,这样便可能观察到来自振动态的荧光;(2)根据 Heisenberg 不确定原理,具有数百 nm 带宽的每一跃迁,必定与寿命至少有 fs 级的某一状态相联系,而有吸收就应有发射,尽管其效率有差别。从这个意义上来说,每种物质实质上都会发荧光。

荧光分析法今后的发展,仍将不断得益于激光技术、计算机技术、微弱光信号检测技术和光导纤维技术的发展与提高,以及荧光试剂、增效试剂和荧光标记物的进一步开拓。随着时间的推移,此法的应用潜力也将得到进一步的发挥,尤其在生命科学领域中,展现了十分广阔的应用前景。

参考文献

- Bright F V. *Applied Spectroscopy*, 1988, 42, 1245~1250
- 陈国珍,黄贤智,郑宋祥,等. 荧光分析(第 2 版). 北京:科学出版社, 1990, 190~325
- McGown L B, Warner I M. *Anal Chem*, 1990, 62, 255R~267R
- Wirth M J. *Anal Chem*, 1990, 62, 270A
- 高鸿主编. 分析化学前沿. 北京:科学出版社, 1991, 12~17, 31~64
- 陈国珍,黄贤智,许金钧. 荧光分析进展. 厦门:厦门大学出版社, 1992
- 许金钧. 岩矿测试, 1992, 11(1-2): 52~57
- Warner I M, McGown L B. *Anal Chem*, 1992, 64, 343R~352R

(厦门大学博士生导师许金钧教授撰;
博士生导师陈国珍教授审)

粒子激发 X 荧光分析 particle induced X-ray

emission (PIXE) 利用带电粒子(通常指质子,也包括 α 粒子和氦核甚至重离子)激发元素所发射的特征 X 射线来进行元素分析的一种手段,记为 PIXE。它具有高灵敏度、非破坏性、多元素定量分析等特点,在生物医学、地矿学、环境保护和考古学等诸多研究领域有重要应用。

特征 X 射线的发现和利用 X 荧光光谱来作元素成分分析的基础。用 X 光管激发的 X 荧光分析早已成为实验室和工矿企业的常规分析手段。随着激发源和 X 射线探测技术的研究进展,激发源已从原有的 X 光管、放射性核素源发展到用粒子加速器加速得到的带电粒子束;近年来又发展了从同步辐射装置或正负电子对撞机得到的同步辐射源。X 射线探测器也已从晶体和正比计数管等发展到半导体 Si(Li)探测器。

1970 年,瑞典物理学家约翰逊等人(Johansson et al.) 实验发现,由质子激发的 X 射线和 Si(Li)探测器相配合,能成为一种高灵敏度、多元素定量分析的有力手段。随即发现, α 粒子、氦核甚至一些重离子也可用于同一目的。同电子激发相比,粒子激发的最大好处是粒子的初致辐射强度比电子的降低了 6~7 个数量级,分析灵敏度可提高到 10^2 到 10^3 倍。常用的带电粒子能量范围为几百千电子伏到几兆电子伏。它们能同时激发样品中的多种元素的特征 X 射线,最适于做多元素分析。带电粒子束还能聚焦成细束,组成微探针装置,对样品作微区分析。

用重离子作为激发源时,激发效率高,有确定的激发阈,可用作选择性激发。但重离子在样品表面产生的溅射和在样品内部引起的辐照损伤都比较大,由它激发产生的 X 射线谱也比较复杂。目前用得最多的激发源还是质子。

探测 X 射线的基本方法有两种:一是记录 X 射线波长的波长色散法,二是记录 X 射线能量的能量色散法。波长色散探测系统的分辨率高,但探测效率低。除了在早期用于元素分析外,目前主要用于 X 射线谱精细结构研究,例如原子化学环境引起的 X 射线能量位移(化学位移),重离子激发的 X 射线多线测量等。能量色散探测系统由 X 射线探测器和电子学仪器两部分组成。它的探测效率高,能量测量范围广,已广泛应用于多元素的

定性和定量分析中。

常用的 X 射线探测器有密封式正比计数管、流气式正比计数管、薄 NaI(Tl) 和 CsI(Tl) 闪烁计数器、Si(Li) 半导体探测器。密封式正比计数管用铍或云母作为 X 射线的入射窗,用 Xe 和 Kr 作为工作气体,适用于测量短波区 X 射线。流气式正比计数管用薄塑料(例如 3~6 μm 厚的 Mylar 膜)作为入射窗,用 Ar 和甲烷混合气体作为工作气体,适用于测量长波区 X 射线。对于超长波区 X 射线的 X 射线,应使用更薄(1 μm)的聚丙烯窗。闪烁计数器的晶体厚度为 2~5mm,用薄的铍箔(1 μm)兼作晶体包装和 X 射线入射窗。Si(Li) 探测器要在液氮温度(77K)下工作,探头封闭真空中,要用很薄的铍窗使其与大气隔开。目前市场出售的 Si(Li) 探测器,它对 5.9KeV 的 X 射线的能量分辨率为 160eV 左右。

由 Si(Li) 探测器配上电子学仪器组成的 Si(Li) 谱仪在实验室中使用普遍。它的计数率特性很重要,因为在高计数率下它的能量分辨率会变差,能谱的峰位会发生移动。因此电子学测量系统中必须采用“抗堆积电路”和“极另”补偿网络。近年来出现一种“按需激发方式”可以大大提高系统的计数率特性。对于一定的信息量来说,用了“按需激发方式”后,样品受到的辐照损伤最小,所以它特别适用于易损伤样品的分析。

由粒子激发 X 荧光分析得到的 X 射线能谱比较复杂,存在多重性、相互重叠和本底干扰等特点。实验样品以粒子在样品中的能量损失能否忽略而有薄靶与厚靶之分。薄靶的测量常使用内标或标样,处理相对简单;厚靶因为要考虑粒子的能量损失以及增强效应等,能谱的分析和计算要复杂得多。无论是薄靶还是厚靶,只有藉助于计算机程序,才能实现既快速又准确的分析。

粒子激发 X 荧光分析一般在真空靶室中进行。为了测量较大的样品,还发展了外束 PIXE 技术,即把真空管道中的粒子束通过出射窗(例如 Kapton 膜)引入大气或 N、He 等气体气氛中,再对样品进行分析。复旦大学等单位曾用外束 PIXE 技术分析了在 1965 年出土的越王勾践剑。此剑长 64.1cm、宽 5cm,已在地下埋藏了近 2500 年,仍光彩夺目,堪称国宝。

人发中的微量元素能反映人体内某些元素在新陈代谢过程

中的变化情况。粒子激发 X 荧光分析曾被用于分析 GaAs 半导体材料车间工人的头发,以监察工人的 As 中毒情况;曾被用于对比低能儿与正常儿童、孕妇生育前后头发中的微量元素分布;也曾被用于探讨我国一些地方病(例如大骨节病)发病地区的病人与正常人头发中的微量元素分布有何区别。粒子激发 X 荧光分析的另外一些例子有动物或人体的血清样品分析,环境保护领域中的大气气溶胶(即飘尘)的监测分析,工农业生产领域中的各种材料(例如钢材或矿物)和农作物的成分分析等。

把带电粒子束聚焦成直径为微米级的细束,可以对样品作微区分析。除了粒子激发 X 荧光分析技术以外,微束技术还能与背散射或核反应等技术相结合,成为离子束分析的有效手段。这样的核微探针装置全世界已有 100 台左右。聚焦质子束的电流密度可达 200 微微安/微米²,能用以扫描分析几十到几百平方微米区域内的许多种元素的分布。例如,曾用扫描质子微探针探测癌变细胞在发生形貌变化以前,细胞内部微量元素分布的变化情况,为癌症早期诊断和治疗提供依据。扫描质子微探针还被用来分析矿样(例如金矿样)中的某些元素在微区布内的相关性,用以研究元素的共生现象在宏观和微观尺度上有什么变化,有助于分析矿物的成因。用微米级的 α 粒子与背散射技术相结合,在大规模集成电路分析中正在发挥重要作用。

参考文献

- 1 Johansson T B, Akselsson R, Johansson S A E. Nucl. Instr and Meth, 1970, 84: 141
- 2 赵国庆, 任焯刚. 核分析技术. 北京: 原子能出版社, 1989
- 3 Zeng Xianzhou, Li Xiaomei. Nucl. Instr and Meth, 1987; B22: 99
- 4 Chen Jianxin, Li Hongkou, Ren Chigang, et al. Nucl. Instr and Meth., 1980, 168: 437
- 5 Chou Jianxin, Gu Yuanzhuang, Li Hongkou, et al. Nucl Instr and Meth, 1981, 181: 269
- 6 Zhou Shijuan, Ren Chigang, Huang Fayang, et al. Nucl Instr and Meth, 1991, B58: 109

(复旦大学博士生导师汤家镛撰)

天 文 学

天文观察设备与时间

天文光学望远镜 optical telescope for astronomy

望远镜是观测远处物体的仪器。光学望远镜是接收辐射波长介于 $0.3\sim 30\mu\text{m}$ 的天文望远镜(通常把专为 $1\sim 30\mu\text{m}$ 波段设计的带摆动副镜的自身热辐射很小的望远镜叫作红外望远镜)。天文光学望远镜的主要作用有二:一为聚集尽可能多的来自待测天体的光能;一为提高对天体细节的分辨能力。典型的天文望远镜由3部分组成,镜筒、镜架和电控驱动系统。镜筒的作用是保护和固定物镜及其它光学元件,使它们形成精密可靠的光学系统;镜架起支撑镜筒并提供指向和跟踪目标所需的机械结构,是一个巨大的精密钟表机械;电控驱动系统使望远镜能够在两个互相垂直的方向上作各种不同速度的运动,并可按命令自动定位和自动跟踪目标,包括改正各种误差。

望远镜的光学系统有只用透镜的折射型、只用反射镜的反射型和两种镜子都用的折反射型。第1架天文光学望远镜是伽利略(Galileo)在1609年创制的,是在镜筒的前端放一组较大的聚光透镜(物镜),在镜筒的后端位于物镜的焦点内少许放一块较小的负透镜作(接)目镜组成。通过望远镜看到的像是天空的正像。为了提高放大倍率(物镜焦距与目镜焦距之比),并便于在物镜焦面上加装测微十字丝以精确测定天体的位置和角距离,开普勒(Kepler)把目镜改为放在物镜焦点外少许的正透镜而成倒像。由于质量优良的大块玻璃很难制造,折射望远镜的最大直径是1.02m,即美国耶凯士(Yerks)天文台的大折射望远镜。常规意义上的折反射型有两种,在球面主镜之球心有一块薄非球面改正板的施米特(Schmidt)型和在焦点外不远处加厚弯月形改正镜的马克苏托夫(Maksutov)型。前者是施米特在1930年发明的,它的视场大(通常约5度)而像质好,得到了较大的发展,其直径最大的为德国的134/200/400,以及对近代天文学作出重大贡献的英国安放在澳大利亚赛丁泉(Siding Spring)峰的122/154/305UKSchmidt和美国帕罗马山(Mount Palomar)的122/150/350。后者是马克苏托夫于1940年发明的,直径最大的为俄罗斯阿巴斯图马尼(Abastumany)天文台的70/98/210。上述两种望远镜都不能作得很大,因而反射望远镜成为最普遍的天文光学望远镜。它是由格雷果里(Gregory)于1663年提出的。它的物镜通常用真空镀膜铝的凹旋转二次曲面玻璃反射镜(初期直接用抛光的铜锡合金,1850年后改用化学镀银的玻璃镜面)。有几种不同的焦点,直接使用大凹反射镜(主镜)焦点的主焦点;在主焦点前加一块与光轴成45度角的平面镜,把焦点引到镜筒外侧以便于观测的牛顿(Newton)焦点(牛顿1672年发明了抛光铜锡合金的方法,造出了第一架反射望远镜,就是用的这种焦点);在主焦点之前加小凸反射镜(副镜)得到的合成于主镜背后的卡塞格林(Cassegrain,1672年发明)焦点;在此二反射镜之间和镜筒与镜身连接轴与光轴交点处加一块45度平面镜,而获得位于镜身之外的耐卡焦点和用1~5块平面镜把光线引到一个不随望远镜转动的折轴焦点。现代大型光学望远镜一般都具有这些焦点,焦距与直径的比为焦比。主焦点的焦距最短,焦比一般小于3,且为了减轻望远镜的重量与造价,焦比也越来越小,尤其是直径越来越大的下一代大望远镜。由于像质优良的视场很小(若主镜为抛物面,像斑由彗差限制的小于0.5S的视场为 $F^2/11^{(1)}$)或零(若主镜为球面或双曲面),因而必须加像差改正器。通常为一组透镜,

因而也可看作折反射型,只是直径比主镜小得多。该焦点的焦比最适合于光纤引光,从而像场改正器越作越好,视场也越来越大,直到2度。由于主焦点位于镜筒中间而不便于接近,因此在自动控制不够成熟的时代,只有直径大到允许加载主镜而不引入过大的光损失时才用主焦点,否则用牛顿焦点。卡塞格林焦点的焦比早期约为13~18,主镜为抛物面,副镜为双曲面,可用视场受限于彗差而为 $F^2/11^{(1)}$ 。60年代鲍恩(Bowen)认为,对照相来说,焦比在8左右最好,且宜改为里奇克里基安(主、副镜均为双曲面)光学系统。因为它是消彗差的,虽然一般也要加像差改正器以获得约1到3度的视场,但与经典卡焦相比,改正器要容易作些,且不加改正时的可用视场也要大些。折轴焦点的好处是固定不动,因而可以放置大而重的光分析仪器,且可以保持温度恒定,但焦距很长而视场不能大。由于卡焦与折焦的焦比相差很大,彼此转换时要换用不同的副镜,很麻烦。为此,60年代美国国立天文台的2.13m镜首次使用把两块副镜背靠背地安放在同一转盘的两边,以借翻转此盘来更换副镜,苏定强等采用了在板轴中另加一块再成像扁球镜的方法,更换焦点时只须在镜筒中加入一块45度平面镜就可以了。

光学系统设计中的主要问题,是如何用最少的光学元件、最简单的结构、最容易的加工工艺和最普遍的材料去获得足够大的像质优良的视场,并满足一些其它的使用要求。

目前直径大于3.0m的光学望远镜有17架,最大的是美国1993年建成的9.82m望远镜,其次是前苏联1970年美国1948年建成的6.10m望远镜。安装在夏威夷高4200m的莫纳基峰上的9.82m Keck望远镜的物镜,是由36块1.8m的六边形小反射镜拼合成的,在全部竣工之后还建了一台并组成干涉阵。欧洲南天天文台正在研制4台直径8m的望远镜,并计划把它们组合成一架等效直径为16m的大望远镜,叫作甚大望远镜。欧美各国还在计划建立几架8m级的大望远镜,日本也要在夏威夷造1台8m镜。镜架可分为赤道式和地平式两大类。中国古代发明的赤道式,对中小望远镜非常合理,因为在一般的工作要求下它只要绕赤经轴作每天一周的匀速运动就行了。但是这种装置的重力负荷对转动轴是不对称的,必须添加无其它用途的平衡重从而增加总重和造价。此外,赤道式的主轴必须与地球的自转轴平行,因而对不同的地理纬度镜架的结构亦不同,对高纬度多用圆盘叉式或其变种,低纬度多用双柱拱式;在中纬度地方可根据望远镜的大小和用途而选用双柱(英国)式、单臂德国式、叉式及其变种马蹄式。地平式的主轴直指天顶,因而不随纬度而变。地平式镜架在补偿地球自转而跟踪天体时,必须同时绕水平轴和垂直轴作变速运动,这在没有可靠的电子计算机时代是很难使用的。80年代以后,大型望远镜全用地平式。

望远镜的电控系统越来越现代化,可使观测者坐在与望远镜完全隔离的控制室内的控制台前,一边监视仪表,一边操作按键来完成预定计划进行的观测。在欧洲南方天文台和英国爱丁堡天文台已实现了用卫星通讯进行远距离遥控观测。望远镜的两根转轴上均安装有高精度轴角编码器,在计算机的控制下可使指向目标的精度达到 $1''$ 、跟踪精度达到 $0.1''$ 。一些全自动化望远镜和空间望远镜,更是充分地利用了遥测遥控的一切先进成果。

为了观测越来越遥远而暗弱的天体,望远镜作得越来越大,传统技术已不现实。新的技术层出不穷。主要有:(1)用尽可能薄而焦比小的镜面以减轻重量,为此要用主动光学技术补偿镜面所受的重力形变而保持优良的光学质量;或用小镜面拼成大镜面以减轻重量(如Keck9.82m),或用几个小镜筒架在同一台镜架上

构成一架短而粗的大望远镜(如美国1975年在霍普金斯山建成的多镜面望远镜,用6个直径1.8m的小镜筒组成一架等效直径4.5m的望远镜);或用几架独立的望远镜合成一架等效大望远镜(如欧洲南天天文台的甚大望远镜将用四架8m望远镜合成一架16m望远镜)。(2)用地平式镜架加坐标变换以减轻重量(3)用斑迹干涉和自适应光学克服大气湍流的不利影响以获得光学衍射分辨率能力。(4)用长基线光学干涉法获得毫角秒级及亚毫角秒级的角分辨率。(5)发展光学综合孔径成图以同时获得大的聚光面积、适当的视场和极高的角分辨率。(6)发展高光效镀膜技术以减少系统的光损失(60年代加拿大的理查逊在设计一架1.2m镜的折轴系统时首次采用高反射膜层)。(7)发展大气外空间轨道天文台和月球天文台以免除地球大气的吸收和干扰,如1983年发射的IRAS(红外天文卫星)和正在太空运行的美国的2.4m哈勃空间望远镜。(8)研究新的轻质高强低胀大块坯浇铸和精密面形加工方法。

光学望远镜是十分精密、昂贵但易损的大型仪器,必须有专门设计的既能起保护作用又方便望远镜观测不同方位天体的观测室。赤道式望远镜的观测室,多为带可启闭天窗的半球形旋转屋顶建筑,叫作圆顶。它的高度取决于当地地表湍流元上升的高度,直径取决于望远镜的大小和镜身的种类,顶部及柱墙均采用带空气夹层的双层结构且选用隔热性能优良的材料,其表面还必须涂反光白漆,必要时还要加装强力鼓风机以使室内气温低于或等于室外气温,以保证不破坏当地的自然大气宁静度。此外,圆顶上还必须能起吊足够重量的吊车供安装及平时使用,以及真空镀膜机和其它一些专用设备。近年来,观测室的形状已大有变化,方顶和全开放式均有,为的是改善视宁度和降低造价。

参考文献

- 1 King C H. The History of the Telescopes. Dover Publ. Inc., 1955
- 2 Crawford D L ed. The Construction of Large Telescopes. D. Reidel Publ Co., Dordrecht, Holland, 1967
- 3 Robinson L B ed. Instrumentation for Ground Based Optical Astronomy. Springer-Verlag New York Inc., 1988
- 4 Kogure T, Tokunaga A T ed. The Proc of the International Symp on Large Telescopes, 1988~1989

(北京天文台蒋世仰研究员、潘君骥撰;路声东审)

时间计量 time measurement 时间是物质存在的基本形式之一。任何物质的运动、变化或发展过程都离不开时间。时间计量在科学研究、生产实践和日常生活中都是非常重要的。时间计量包含时间间隔和时刻的测定,两者既有差别又有联系。时间间隔是指客观物质运动过程中的两个不同状态(称为事件)之间所经过的时间历程。时刻是客观物质运动过程中某一事件发生的瞬间,通常以对于取作时间零点的瞬间的时间间隔来表示。

时间计量必须以物质运动为根据。选定某种具体的物质运动形式作为时间计量基准,取一定长度的时间间隔作为计量单位,再选定一个瞬间作为计量的起点(称为初始历元),便可建立一定的时间计量系统。时间计量工作包括测时、守时和授时。测时就是用一定的仪器和方法观测时间基准以获得时间;守时就用计时设备把测得的时间记录下来;授时就是用各种传播手段把时间发布出去供用户使用。研究时间计量的目的在于探索更加完善的计量基准,改进并发展计量工作,致力于提高计量的精确度。

计量相差巨大的时间间隔,必须根据实际对象选择不同的计量手段。例如,天体的年龄以亿年计,是根据天体的质量和能量损耗率,通过质能关系式来估算的。地球的年龄、地质时期的绝对年龄采用放射性元素衰变法,可测定数千年到数10亿年之间的时间间隔。利用古生物化石可以推断古生物生存的地质时代等等。

通常意义下的时间计量,是指在天文机构或物理实验室中对日及日以下的时间间隔的计量。

1960年以前的时间计量基准是地球自转。地球自转的角度用地方子午线相对于天球上的基本参考点的运动来度量;这个角度的大小相应于时间间隔的长短。由于所选用的参考点不同而形成不同的时间计量系统。

从远古时代起,人们就以太阳作为这种参考点,即以太阳在天球上视运动的位置变化来计量时间。太阳在同一子午线连续两次中天的时间间隔为1d。太阳的视运动除了反映地球自转的周日视运动外,还包含反映地球公转的周年视运动。以太阳为参考点的“真太阳时”是不均匀的。

在天文观测和研究中长期以来用春分点作为参考点,以春分点的周日视运动确定时间,这就是恒星时。恒星时的基准也是地球自转。春分点在天球上没有明确标志,实际上观测恒星来间接地推算春分点位置。春分点本身受岁差章动影响并不固定。恒星时也不是一种均匀的时间系统。

1895年美国纽康(S. Newcomb)研究了真太阳的视运动后定义了一个假想的平太阳。设想天球上有一个虚构的点,它的赤经靠近真太阳黄经,并在赤道上作均匀的周年视运动,其速度为真太阳在黄道上视运动的平均速度。这个虚构的点称为平均赤道太阳或简称平太阳。当把平太阳作为参考点时,就得到平太阳时,在格林威治子午线上的地方平太阳时,称为世界时(UT)。平太阳连续两次在同一子午线中天的时间间隔为1平太阳日,这是世界时的基本单位。世界时的秒长是1平太阳的 $1/86400$ 。事实上,世界时的秒长并不是一个定值。世界时和恒星时之间有明确的换算关系。传统的世界时测量就是以天文方法观测恒星,测得恒星时,通过换算求得世界时。

20世纪30年代从天文观测中发现了地球自转的不均匀性,从而证实了世界时不是一种均匀的时间计量系统。1953年国际天文学联合会(IAU)决定对于世界时引进两项小的修正。一项是因为地极移动引起的地方经度变化,加这一修正后为UT1;另一项是地球自转速率季节性不均匀的影响,加以上两项修正后为UT2。但是因为并没有考虑地球自转不均匀的全部影响,UT2只是一种准均匀时系统。UT1有明确的天文和地球物理学的意义,即它代表了地球自转速率。1980年国际时间局(BIH)在UT1上又加日月潮汐短周期项修正,给出UT1R,其目的仅在于平滑地球自转速率。

根据IAU的决议,从1960年起用历书时(ET)代替UT2。历书时是把动力学理论应用到地球的公转运动而得到的一种时间计量系统。历书时的秒长规定为1900年1月0日12时正到同年长度的 $1.31556925.9747$,这是一个定值;其初始历元是这样规定的:在1900年岁首附近,太阳几何平黄经为 $279^{\circ}11'48''.04$ 的瞬间为历书时1900年1月0日12.0时正。历书时在理论上是均匀的,但观测误差太大,难于高精度地得到,不能满足各种科学技术工作的需要。

1967年10月举行的第13届国际度量衡大会通过决议,以原子时(AT)代替ET,规定:位于海平面上的铯¹³³原子基态两个超精细能级间在零磁场中跃迁辐射振荡9192631770周所持续的时间为1原子时秒,初始历元定在1958年1月1日0时。这样定义了原子时系统。由全球约60个实验室的200多台原子钟经过时间讯号传输或其他方式的比对,汇总到巴黎,早先由BIH,1988年起由国际计量局(BIPM)统一处理后得到的原子时称为国际原子时(TAI)。

由于地球自转不均匀的影响,目前世界时的秒长已比原子时秒长约长 3×10^{-8} ,一年的累积量可达1s左右,这种累积量将越来越大。可是人们在实用上离不开世界时时刻。为了协调世界时时刻和原子时秒长,自1972年1月1日起采用协调世界时(UTC)。它的秒长严格等于原子时秒长,但在时刻上则要求尽量与世界时接近,规定两者的差值小于0.9s。为此,可能在每季度最后一天对UTC时刻作1整s的调整,这称为跳秒。跳秒多在每年的12月31日23时59min60s时进行。何时必须跳秒,由BIH(1988年后改组为国际地球自转服务,IERS)计算并发布。

时间计量系统的发展与测时和守时手段的发展紧密相关。天文测时的方法和设备在 20 世纪 50 年代以前主要是用带有望远镜的目视仪器。50 年代起新仪器在全球迅速普及。早在 1934 年美国的威利斯(J. E. Willis)改进了照相天顶筒用于测时。1946 年前苏联的巴甫洛夫(H. H. Павлов)发明了光电中星仪。1952 年法国丹戎(A. -L. Danjon)研制成超人差棱镜等高仪。1972 年中国首次研制的光电等高仪投入使用。60 年代起,这些仪器逐步实现用计算机控制的自动观测和处理。至此,世界时测定的全球综合结果精度达 0.001s。60 年代末又出现了甚长基线干涉测量(VLBI)、月球激光测距(LLR)和人造卫星激光测距(SLR)等新技术,世界时测定的精度可达 0.0001s 的水平。80 年代前半期这类新技术已在全球全面取代了光学观测。

20 世纪 30 年代以前的天文守时工具主要是精密的天文摆钟。1927 年第 1 台石英钟问世,它是用高度稳定的石英晶体振荡器通过分频做成的。1932 年以后,石英钟广泛地用于守时和精密时间测量。当前最好的石英钟的时间测量精度可达 10^{-11} 。1949 年美国国家标准局利用氮的吸收谱线制成氮分子钟。不久,美国和前苏联分别利用氮的发射谱线制成了脉泽型氮分子钟。1955 年英国皇家物理实验室首次研制成功了铯束原子频率标准。此后利用其他元素制造的不同类型的原子频率标准相继出现,并以它们为基础制成了各种原子钟,如铯钟、铷钟、氢钟等。原子钟不仅其计时精度极高(当前最好的氢钟达 10^{-14})而且是建立原子时的基础。它使时间计量从天文学范畴进入物理学范畴,从而产生了质的改变。由于原子钟计时的高精度,还必须考虑原子运动的狭义相对论效应和原子钟在重力场中的广义相对论效应。

传统的授时工作是由测时台站以短波无线电时号发播时刻和频率。随着技术的发展和対时间同步要求的提高,发播时频讯号的波段发展到长波和所有的无线电波段。传递讯号的机构和媒介也扩展到远距离无线电导航台、电视台、直播电视卫星、导航卫星、通讯卫星、VLBI 和全球定位系统(GPS)的卫星网等等。当前中国的主要授时中心是陕西天文台,在 5 个短波标频上发播时号,呼号为 BPM,还以呼号 BPL 发播长波时号。

20 世纪 70 年代以来,随着观测精度的提高,天文工作中开始考虑时间尺度中的相对论效应。1976 年 IAU 大会作出决议正式在天文学中引进了相对论时间尺度。经典的时间和空间距离不再被视作绝对量,而依赖于所采用的参考系。1989 年 IAU 成立了关于参考系的工作组,其中第 3 组是关于时间的分组。工作组于 1991 年 1 月提出了关于广义相对论框架内时空坐标系的 9 条建议。其中,对于在此框架下的若干时间尺度提出了明确定义和相互关系。还特别指出,当前在许多情况下,TAI 可以代替视地心历表的时间尺度“地球时”(TT)。

在时间计量的领域内当前的热点为:(1)高精度时钟的研制。除了铯、氢等已经付诸实用的频率标准外,新的频率标准的研究正在不断进行,如离子囚禁标已接近连续工作阶段,激光抽动铯标准也有很大进展。(2)毫秒脉冲星的研究。PSR1937+21 的连续观测显示其周期测量的精度达 $\pm 5 \times 10^{-17}$ s,稳定性为 10^{-19} s/s。研究脉冲星的计时观测结果,可以为检验原子钟的稳定性提供可靠的频率标准。(3)时间同步和比对。今后精密的时间同步和比对主要是 GPS 共时比对法和应用扩频等技术的卫星双向比对法,其精度为毫微秒量级。(4)授时方面。授时台因不同用户的要求而采用不同波段的发播方式,电波在传播过程中受电高层、地形和各种传播介质影响引起的传递时间的改正日趋精密。(5)时间在相对论框架内的研究。时间计量与坐标系选择的关系,和时间作为时空坐标系的一维在定义天文参考架中的意义等方面,正在深入研究之中。

参考文献

- 1 Woolard E W, Clemence G M. Spherical Astronomy, Academic Press, New York, 1966
- 2 Kamas G. NBS Technical Note, 1977, 695
- 3 Guinot B. Astronomie, 1978, 92, 227~229

- 4 IAU Working Group on Reference Systems, Recommendations of the WGRS, 1991
- 5 Fairhead L. Astrometric analysis of timing observations of the fast pulsar PSR Astron, Astrophys, 1991, 241, 289~296
(南京大学萧耐副教授撰,张承志教授审)

时间频率计量 time and frequency measurement 时间是物质存在的基本形式之一,它表示物质运动的连续性。物质运动的先后和久暂就构成了时间的概念。在单位时间内周期运动重复的次数称为频率。

时间基本单位秒的定义大体经历 3 个发展阶段。1960 年以前为平太阳秒,只能准到 10^{-8} 量级。1960~1967 年期间为历书秒,其定义以地球公转为基准,地球绕太阳公转一周称为一个回归年。1960 年国际计量大会决定,取历元 1900.0 的回归年长度的 3155625.9747 分之一作为新的时间基本单位,称为历书秒。历书秒要经长期天文观测才能发现,3 年时间能得到 10^{-9} 的复现精度。由于观测复杂、时间较长,所以历书秒只沿用到 1967 年,随后就被新的更稳定的周期性运动——原子振荡取代。1967 年的第 13 届国际计量大会正式决定于新的秒的定义:“秒是铯-133 原子基态两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间”。这种以微观粒子的量子跃迁导出的时间单位比以宏观天体运动导出的时间单位,准确度提高了 4~5 个数量级。

时间有两个含义:一是时间间隔,二是时刻。人们为了标定一些事件、现象以及运动过程发生的迟早关系,就需建立一个时间坐标,称为时标。目前世界上主要存在 3 种时标,即世界时(UT)、历书时(ET)和原子时(AT)。

各国为了有一个统一的时间标准,成立了巴黎国际时间局(BIH),它把世界各地的地方原子时联系起来,并根据各地大铯钟的相互比对、归算而保持的一种原子时系统即国际原子时(TAI),目前 TAI 的准确度为 1×10^{-13} ,稳定度为 10^{-14} 量级。

世界时的时刻准确地反映着地球自转的角位置,为天文、大地测量等许多方面所需要,但它给出的时间间隔不够稳定。在许多科研和无线电通讯等领域要求更稳定更准确的时间间隔,不要求准确的时刻。为了统一,产生了协调世界时(UTC),其特点是:所给出的时间间隔稳定性和准确度与国际原子时相同,但所给出的时刻与世界时靠近。协调世界时的起点是 1960 年 1 月 1 日零时。从 1972 年起,改为它的秒与原子秒保持严格一致,而时刻与世界时的差控制在不超过 ± 0.9 s。当有可能超过时,就通过增减 1 整秒(闰秒)的办法进行协调。1974 年,国际会议决定把协调世界时作为国际法定时间。

目前世界各国用于复现和保持时间单位秒的基准是铯原子束时间频率基准(简称铯基准)。在这种基准的世界各国中以原联邦德国(PTB)、加拿大(NRC)、美国(NBS)达到的准确度最高,其中 PTB 为 2×10^{-14} ,NRC 为 5×10^{-14} ,NBS 为 8×10^{-14} 。它们的稳定度都在 1×10^{-14} 以上(指平坦区)。其它如英国、日本、原苏联等国的原子频率基准准确度在 $(2 \sim 5) \times 10^{-13}$ 量级。中国于 1981 年建立铯束频率基准,频率的不确定度为 $\pm 8 \times 10^{-13}$,从 1984 年至 1986 年 12 月对频率基准全面改进,改进后的铯束频率基准,频率准确度优于 3×10^{-13} 。

小型商品铯束原子频率标准是使用最广泛的原子频标,准确度为 $(0.7 \sim 1) \times 10^{-11}$ 。主要技术关键是制造密封的长寿命铯束管。

原子频标准除铯标外,还有氢频标、铷频标等。国外最好的氢频标,其稳定度已达 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 量级。但由于“壁移效应”带来频移,使其不确定度只有 10^{-12} 量级,还未被国际计量大会采纳作为时间频率基准。铷汽泡型原子频标的准确度一般为 1×10^{-11} ,各国均已作商品生产。

在新的原子频标研究方面,国外正积极开展对未来基准的开拓性研究,已发现光选态的铯束装置和激光冷却的离子贮存较

有可能成为未来的基准,不确定度可望降低到 $10^{-14}\sim 10^{-15}$ 。中国近年来开展的激光选态铯束装置的研究迈出了对未来时频基准探索的第1步。

石英晶体频标是在时间频率计量中获得广泛应用的频率标准,它主要由高性能石英晶体谐振器、稳定的振荡电路和结构完善、控温良好的精密恒温箱组成。为了得到石英晶体谐振器的良好谐振效果,晶片必须严格按照一定方位切割,广泛采用的切型是AT切型。国外在石英谐振器研制上有较大的突破,研制出一种称为BVA(无极型晶体)谐振器的新结构。晶体的支撑也不用金属而改用石英,它把晶体振荡器的老化率、幅度——频率效应以及对加速度的灵敏度降低了近一个数量级。此外,人们还研制出更加理想的SC切型,该晶体具有综合优良性能的谐振器,它是石英晶体谐振器发展的一个重要标志。近年来,采用了束致薄技术,可大大地提高石英片的基频,为微波晶振提供精密石英晶体谐振器。利用离子束致薄技术,已制造出基频为100~300MHz甚至更高频率的谐振器。

由于高Q值的晶体决定晶体频标具有优良的频率稳定度,目前可供使用的最好的晶体频标,其稳定度 $\sigma_y(\tau)$ 可达 10^{-13} 量级($\tau=1s\sim 1d$),日老化率达几乘 $10^{-12}/d$ 。中国从1980年开始的2年一度的全国高稳晶振比对情况研讨,反映了在高稳晶振生产、研制上达到较高水平,其中最好的在老化率和短期频率稳定度(秒稳)方面已接近国外先进水平,老化率为几乘 $10^{-12}/d$, $\sigma_y(\tau)$ 可达 10^{-13} 量级($\tau=1s\sim 1d$),相位噪声谱 $L(f_m>10kHz)$ 优于 $-150dB/Hz$,非谐波抑制能力优于 $-70dB$ 。

时间频率标准信息可通过电磁波传播。很多国家建立了专门发播标准频率和时间信号的无线电台,这些发播台按载频可分为高频、低频、甚低频和甚高频。

罗兰C是美国海军的双曲线定位导航系统,它的信号时刻和美国海军天文台的UTC进行精密同步。它在全球有7个链,每个链由3~4个台站组成,用其地波传播给出微秒级的定时精度,频率同步精度为 $1\times 10^{-12}s/d$ 。目前我国已建立了与罗兰C相仿的授时导航兼用台——中国科学院陕西天文台负责的BPL长波授时台(兼导航链中的主台)。

随着电视技术的发展,利用电视传递时间频率信息是当今的重要手段。1967年捷克Tolman等人提出利用电视信号中某行同步脉冲作为参考信号,进行时刻同步,称为无源电视同步。中国于1974年建成了无源电视同步系统。随后,采用有源电视时间同步,将标准时刻、标准频率以及编码插入行同步信号中去,用户利用有源电视接收系统和译码器将时码和1PPS用于精密时间比对,还可取出1MHz标准频率进行频率比对。中国从1981年开始,由中国计量科学研究院与中央电视台合作,在中央电视台放置一台准确度优于 $\pm 2\times 10^{-12}$ 的铯原子频标,由它产生电视广播的副载频,然后通过电视网络传到全国各地,用户利用彩色电视副载频校频仪进行校频,30min的取样时间可把本地频标校准到 5×10^{-12} 。

自从1957年第1颗人造卫星上天以来,利用卫星进行标准时间频率传递和精密测量是一种主要的途径,是建立全国统一的时间频率服务及国际远距离时间频率比对的有效方法。中国于1979年通过“交响乐”卫星与西德比对,时间同步精确度(1 σ)达10ns,准确度(3 σ)达80ns。与法国进行比对,时间同步精确度(1 σ)为10ns,准确度约为100ns。近年来,通过我国自行发射的通信卫星,利用数字信道,得到的时间同步精度为1ns。

目前,美国研制GPS(Navstar Global Positioning System)是导航性全球定位系统,是80年代高技术应用传递时间频率一种新方法。该系统不仅能实现全球的高精度定位和测速,同时用于全球高精度的定位和测速,同时用于全球高精度的时间频率同步。三维定位精度可达16m,单站接收时间同步准确度优于100ns,时间同步的稳定度优于15ns。GPS建成后的空间星座包括均匀分布在3个圆形轨道上的21颗工作卫星和3颗备用卫星,它们绕地球的周期为12h。具有三维定位的高精度的时间传

递和时间同步。1985年5月第10届秒定义咨询委员会正式通过决议,今后采用GPS共视法作为国际时间频率比对的手段。中国于1987年在北京——西安首次进行了GPS共视法时间同步试验,经试验表明,单站接收一颗GPS卫星可实现25ns以内的时间同步,经平滑处理后,可实现15ns的同步。两站共视一颗GPS卫星,可实现15ns以内的时间同步,经平滑处理后,可实现10ns的时间同步。

频率稳定度是时间频率标准的重要特性指标,美国从50年代开始研究,在70年代初就取得了成效,提出了用频域和时域表征频率稳定度特性。国际上在1982年对频率稳定度特性表征提出推荐意见,频域用 $S_y(f)$ 、 $S_\phi(f)$ 、 $S_\phi(f)$ 和 $S_x(f)$ 中任何一个均可作为频域量的频率稳定度的定义;时域是以相对频率起伏的采样方差,推荐 $N=2$, $T=z$ 的阿仑(Allan)方差,记为 $\sigma_y^2(\tau)$ 。从方差与相位噪声谱密度之间关系表明,调相白噪声和调相内变噪声的斜率一致,这意味着使用阿仑方差不能将这两种噪声区别开来。为了解决此模糊点,提出了修正的阿仑方差,进一步完善了阿仑方差的理论。

频率和频率稳定度测量是时间频率计量的主要内容,时间频率测量用电子计数器来实现的。电子计数器自50年代初问世以来,随着电子元器件和计算技术的发展和运用,电子计数器向着提高频率上限,采用大规模集成电路、扩展功能、程序控制以及采用多周期同步技术、模拟内插技术、数字激励内插技术、自动触发和计算技术等,并研制和生产了高速计数器、计算计数器、等精度计数器、毫赫计数器、高精度时间间隔计数器以及自动微波计数器。频率稳定度时域测量利用频差倍增技术、鉴相方法及比相方法等,并随着低噪声混频器应用,还广泛采用差拍和鉴相测量方法。美国HP公司相应地研制和生产了HP5390A和HP3047A频率稳定度分析仪。美国阿仑提出了DMTD系统即双混频时差测量系统,该系统测量灵敏度为 $1\times 10^{-13}\tau^{-1}$,是目前国际上最高的测量系统,频域测量采用鉴相法。据1976年报导,噪声底部可达 $-176dB/Hz$,利用相关技术,还可改善为20~40dB。我国频率稳定度测量进展较快,已经建立了国家标准,时域测量达 $10^{-13}\tau^{-1}$ 量级,频域测量优于 $-170dB/Hz$ 以上,已接近国外先进水平。在生产频标比对器方面,已经达到 $10^{-12}\sim 10^{-13}\tau^{-1}$ 量级的测量灵敏度,对相关技术应用频域测量也有所进展,并研制了对射频脉冲信号频率稳定度测量的测量系统。

参考文献

- 1 Barnes J A, et al. IEEE Trans, 1971, 5(2): 105~120.
- 2 Wall F L. freq cont, 1976, 269~247
- 3 Allan D, Barnes J, Frequency control, 1981, 5: 470~476
(中国计量学院杨大豪副教授撰)

天体力学

天体力学 又称理论天文学、动力天文学,是天文学的一个老分支,研究天体的运动和形状。现在所研究的天体范围,已扩大到太阳系和恒星系统的所有自然天体和人造天体;所研究的运动是指力学运动,包括天体在空间的移动和绕自己质量中心的转动。对一般课题,是以牛顿力学为基础进行研究的,但对一些精度很高的课题,要用广义相对论或其它新的引力理论为基础,这是新形成的研究领域“相对论天体力学”的内容。天体力学是一个二级基础学科,但有广泛的应用;除传统的编历用于航海航空外,人造天体的运动理论已成为航天学科和大地测量学的一项基本内容,在军事和经济建设中都有大量应用。

牛顿(I. Newton)以前的天文学,主要研究天体(日、月和行星为主)在星空中的视位置和视运动规律,是经典天体测量学领域。经过对大行星视运动的长期观测研究,逐步总结出行星绕太阳的一些运动学规律;1609~1619年间,开普勒(J. Kepler)提出了最精确的运动学规律,即著名的开普勒“行星运动三大定

律”，行星绕太阳运动轨道为椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点；行星向径扫过的面积与时间成正比；行星轨道半长轴立方与公转周期的平方成正比。另外，在中世纪结束后出现了力学萌芽。达·芬奇(L. da Vinci)在机械研究中肯定了力的存在，伽利略(G. Galileo)在实验中得到力学的一些基础量和重要结果，惠更斯(C. Huygens)进一步研究了曲线运动，给出离心力公式。在这样的历史条件下，天体力学理论的出现成为必然。

1666年，牛顿认为行星绕太阳运动的原因是相互存在引力，而且推出行星在圆轨道上运动时，引力应同离心力平衡，利用开普勒的三定律可得到引力大小与距离平方成反比。这就是万有引力定律的主要内容。但牛顿认为还有两个问题未解决：行星轨道不是圆而是椭圆；行星不是质点而是大物体，地球半径未测准而不能准确解释月球运动。直到1685年，牛顿用新数学方法推出了椭圆轨道也符合引力与距离平方成反比的规律；球对称大物体的引力与质量集中在质心的质点相同，并用新的地球半径验证月球轨道也符合较好。故在惠更斯鼓励下，又在哈雷(E. Halley)的资助下，于1687年出版了历史性名著《自然哲学的数学原理》。牛顿力学正式诞生，用它研究天体的运动和形状的天体力学也同时诞生。但牛顿并未提出天体力学这个学科名称，只在二体问题范围内得到普遍的圆锥曲线轨道，用于解释行星和彗星的运动。从地球的自转肯定了扁球体形状，从月球轨道的变化萌发了摄动的概念，但这已标志着天文学从研究天体视运动发展到研究天体真运动，是天文学发展史上的第1次大飞跃。

18世纪后期到19世纪初是天体力学的奠基时期，主要代表为欧拉(I. Euler)、克莱洛(A. C. Clairaut)、达朗贝尔(J. D. Alembert)、拉格朗日(J.-L. Lagrange)和拉普拉斯(P. S. Laplace)，最后由拉普拉斯集其大成，建立起经典天体力学。其主要内容：摄动理论；并对当时已发现的各类天体分别提出了运动理论和历表计算方法，精度符合当时的观测水平。

拉普拉斯在1798年第1次提出了天体力学这个学科名称，他写道：“用万有引力定律研究太阳系及宇宙中类似系统的固体和流体的平衡和运动的理论，组成了天体力学”。他在1799~1825年内出版的历史性巨著《天体力学》(Mecanique Celeste, 共5卷16册)就是经典天体力学的代表作。到此为止，天体力学奠基完成。不久(1846)，由勒威耶(U. Leverrier)用天体力学理论计算而发现了海王星，标志天体力学已初步成熟，成为当时天文学的主流。

19世纪后半叶，有3个因素促进这段时期成为发展高潮：(1)照相和分光技术用于天文观测，使天文学不仅能研究天体的力学运动，也能研究天体的物理本质，由此诞生了天体物理学，是天文学发展史上的第2次飞跃；(2)发现大量小天体包括小行星、彗星和天然卫星，研究大行星的摄动理论不适用，要求改进研究方法；(3)航海和大地测量精度要求提高，需要更准的天文历表。这次高潮延续到20世纪初，主要成果有：(1)建立了适用于各种类型天体运动的新摄动方法，具体内容参看摄动理论条；(2)创立了历书天文学，包括建立各大行星和月球的摄动理论及相应的运动表，还有天文常数系统的建立，是天体力学和天体测量学的共同研究领域；(3)创立了天体力学定性理论，即以数学定性理论为基础，用于研究天体运动和形状的定性课题，如轨道和形状稳定性，周期轨道的存在性，终结轨道等；(4)形成天体力学数值方法，即用数值解法来解出天体运动方程和其它关系式，逐步成为与摄动理论、定性理论并列的第3种基本研究方法。这个历史时期的主要代表人物为德洛内(C. E. Delaunay)、汉森(P. A. Hansen)、希耳(G. W. Hill)、纽康(S. Newcomb)和庞卡莱(H. Poincare)，前3人是新摄动理论的创立者代表，后两人为历书天文学、天体力学定性理论创始人。庞卡莱为集大成者，他的《天体力学新方法》(Methodes Nouvelles de la Mecanique Celeste, 3卷, 1892~1899年出版)为这段时期的代表作。

自20世纪50年代以后，3个因素又使天文学(包括天体力学)的发展形成高潮。一是人造天体出现，不仅天体增加了新成

员而且航天技术成为天文观测的新手段，在大气层外可得天体全波段辐射，诞生了空间天文学；这是天文学发展史上的第3次飞跃。研究人造天体的轨道设计和运动理论，形成了天体力学的新领域——天文动力学。二是快速电子计算机的广泛应用，使大量天体的短时期定轨和预报课题可直接用数值方法算出，而且还促进了摄动理论和定性理论的进一步发展。三是新观测技术的出现，如甚长基线干涉(VLBI)技术、多卜勒(Doppler)测速技术、激光(Laser)测距技术等，测量精度比原有的照相定位技术提高2~4个量级。原有天文历表精度都不符合要求，必须更新，并扩大了天体力学的应用范围。按现存的本学科内容，现代天体力学可划分为下列10个研究领域(或三级学科)：(1)摄动理论：已比经典天体力学的分析方法有重大发展，具体内容参看摄动理论条。(2)天体力学定性理论：20世纪60年代以来结合动力系统的定性研究，在特解的稳定性、稳定区、轨道演化、运动范围、周期解族等课题研究中进展迅速。特别是由科耳莫哥洛夫(A. N. Kolmogorov)、阿尔诺德(V. I. Arnold)和莫泽(J. K. Moser)创立的KAM理论以及由厄隆(M. Henon)等创立的数值探索方法，是最突出的成果，带动大量课题更快发展。(3)天体力学数值方法：随着计算机的迅速改进和普及，天体力学中大量课题用数值方法可以解决，加快了这个领域的发展。主要内容是研究专用计算方法，对各重要课题建立软件包，还针对奇点附近情况以及长时间计算建立正规化和稳定化技术，而且还同分析方法结合建立了半分析方法。(4)天体形状和自转理论：由于人造卫星轨道研究不断精确，空间探测资料大量积累，近几年来对地球、月球和行星的形状、内部结构以及自转的研究不断深入，形成了行星(包括大卫星)动力学。另外，行星环多次发现，又为天体形状理论增加新内容。(5)天文动力学：是人造天体出现后的新研究领域，研究人造地球卫星、月球火箭、行星际飞行器等人造天体的发射段、过渡飞行段、轨道被动飞行段以及返航回收段的设计，运动理论和导航方案等课题。60~70年代形成发展高潮，成为航天科学的一个重要分支，并在大地测量学、地球物理学、空间天文学以及军事科学中广泛应用。(6)历书天文学：60年代以后有重大发展，由于新技术提高了观测资料的精度，以及行星际航行和长距离导弹导航的需要，欧美各国用20年时间完成了新历表系列。美国完成的DE200/LE200行星和月球历表，已在1984年起为很多国家(包括中国)采用；法国和比利时研制的ALE2000月球历表和VSOP82行星历表已在1986年采用。现在仍不符合最新精度要求，都在继续改进。同时有关在相对论框架下建立更精确的动力学参考系及相应天文常数系统等，也是当前热门课题。(7)多体问题：即牛顿引力下的质点组动力学，是天体力学和一般力学以及应用数学的共同研究领域，具体内容参见多体问题条。(8)恒星系统动力学：研究双星、聚星、星团、星系等的动力学课题，是与天体物理学的共同研究领域。(9)动力演化：研究各类天体及天体系统在力学作用下的运动演化，也是天体演化学的一个领域。(10)相对论天体力学：研究天体在广义相对论或其它新引力理论框架下的运动和形状课题，是1972年前苏联学者勃龙别格(V. A. Brumberg)首先提出此学科名称，80年代后得到承认，有较快发展，但整个学科基础理论尚在建立过程中。

参考文献

- 1 Hagihara Y. Celestial Mechanics. MIT Press, Massachusetts USA, 1970, 1, 15~104
- 2 易照华, 孙义熾编著. 摄动理论. 北京: 科学出版社, 1981. 1~50
- 3 Brouwer D, Clemence G M 著. 天体力学方法. 刘林, 丁华译. 北京: 科学出版社, 1986. 1~150
- 4 易照华编著. 天体力学基础. 南京: 南京大学出版社, 1993. 1~20

(南京大学博士生导师易照华教授撰)

多体问题 是牛顿万有引力作用下的质点组动力学。一般

用 N (或 n) 表示质点数目, 又称 $N(n)$ 体问题, 是天体力学、一般力学和应用数学的共同研究领域。牛顿本人提出并解出二体问题, 得到圆锥曲线轨道的通解。但逆问题, 即用观测算出相应圆锥曲线轨道, 至今还解决得不够完善。三体问题到现在已研究 300 多年, 尚未真正解决, 为多体问题中研究得最多的课题。

三体问题 按类型又可分为一般三体问题, 即三体质量任意; 限制性三体问题, 三体中两体质量很大, 另一体质量很小, 可忽略对两个大质量体的引力; 另外还有一些特殊问题。

一般三体问题。在 18~19 世纪中主要求它的积分和特解。它是 18 阶方程组, 在 18 世纪中期已知有 10 个独立的经典积分。1843 年, 雅可比 (K. G. J. Jacobi) 证明, 只要能求出 16 个独立积分就可以解出来。可是一直到现在, 一个新积分都没有找出, 反而有一些否定结果, 证明用代数函数或单值解析函数表示的新积分不存在。在特解方面, 1772 年拉格朗日 (J.-L. Lagrange) 证明, 只要初始条件恰当, 三体可永远保持等边三角形或共线, 这就是著名的拉格朗日等边三角形特解和共线特解, 又称定型特解。1912 年宋德曼 (K. Sundman) 证明, 除极少数初始条件外, 一般三体问题的解可表达为时间的收敛幂级数, 从理论上肯定了解的存在性, 可惜不能实用。50 年代以后, 除数值解法外, 大量论文是研究一般三体问题的定性特征, 主要有: 某些初始条件下相应的运动区域; 解空间的拓扑结构; 周期轨道特解的存在性和稳定性; 终结轨道特性; 奇点和正规化, 碰撞和交换等课题。

限制性三体问题。质量很小的称无穷小体, 另一体称有限体。由于二有限体只在相互引力作用下运动, 是二体问题, 轨道为圆锥曲线。按不同曲线又把限制性三体问题划分为不同类型: 圆型、椭圆型、双曲线型和抛物型限制性三体问题。圆型和椭圆型限制性三体问题的天文背景广, 如小行星、卫星、彗星、人造天体、双星附近小质点的运动等。拉格朗日定型特解仍然存在, 其中等边三角形特解已找到实例。20 世纪以来, 已发现 200 多颗小行星, 处于太阳和木星组成等边三角形的顶点附近, 称为脱罗央 (Trojan) 群小行星。现已证明, 等边三角形特解一般是稳定的; 共线特解附近至今未发现天体, 因为轨道不稳定。现代研究圆型和椭圆型限制性三体问题的论文仍很多, 主要有: 运动区和稳定区, 碰撞奇点的正规化, 周期轨道的存在性和稳定性以及周期解族, 可积性的数值探索, 俘获和交换等。

特殊三体问题。近年研究较多的有: (1) 双不动中心问题, 即限制性三体问题中, 二有限体不动, 研究无穷小体在此二固定体引力下运动。这是可积系统, 解为超越函数。有人把它的解作为中间轨道用于研究人造卫星的运动。(2) 西特尼科夫 (Sitnikov) 问题, 即二有限体质量相等, 作圆轨道绕联线中点运动, 研究无穷小体在通过二体联线中点并垂直此联线的平面内的运动, 又称为等腰三体问题。(3) 毕达哥拉斯 (Pythagoras) 问题, 即三体 P_1 、 P_2 、 P_3 质量之比为 3:4:5, 在初始时刻, 三体静止在直角三角形顶点上, 三边 P_2P_3 、 P_3P_1 、 P_1P_2 之比也是 3:4:5。70 年代用数值计算探讨此三体运动轨道情况, 经长时间计算绘出三体轨迹, 发现三体轨迹非常复杂, 无法用已知曲线逼近。最后有两体靠近, 相互绕椭圆轨道运动; 而另一体远离而去。有趣的是, 西欧和美国各用一组同样程序和同一类型电脑计算, 结果虽然一样, 但三体顺序不同, 一组是 P_1 、 P_2 靠近, P_3 远离; 另一组是 P_2 、 P_3 靠近, P_1 远离。

多体 ($N \geq 4$) 问题 一般多体问题。 N 体质量没有限制, 现代主要研究定性特征, 有两种途径研究: 数值模拟, 用一些特殊计算方案直接解 N 体的运动方程, 探讨恒星系统的结构稳定性, 结构演变规律、聚集成分散、星系旋臂形成等, 用于研究聚星、星协、星团、星系的动力演化。定性方法, 直接从运动方程和已知积分讨论 N 体系统的特征, 如运动区域、结构稳定条件等。其中一个特殊课题是把三体问题的拉格朗日定型特解推广到 N 体情况, 称为中心构形。目前只讨论共线 (又称直线 N 体问题) 和多面体特解, 共线解结果较可靠。

限制性问题。是限制性三体问题的扩充。有限体扩充到 N

个, 无穷小体增到 K 个。只考虑有限体之间有限体对无穷小体以及无穷小体之间的引力作用。研究无穷小体的运动情况, 80 年代后引起重视, 针对小行星卫星、小行星族、共轨卫星等实际天体的运动。

除天体力学外, 其他学科也有多体问题, 但都加以申明。如量子力学多体问题、相对论多体问题、后牛顿多体问题等。

参考文献

- 1 Sternberg S. Celestial Mechanics. New York, USA: W. A. Benjamin Inc., 1969, 2: 225~293
- 2 Brouwer D., Clemence G. M. 著. 天体力学方法. 刘林, 丁华译. 北京: 科学出版社, 1986. 283~309
- 3 易照华编著. 天体力学基础. 南京: 南京大学出版社, 1993. 185~236

(南京大学博士生导师易照华教授撰)

摄动理论

perturbation theory 是天体力学中最早的研究领域。牛顿力学建立后, 首先用于一个行星同太阳相互引力下的运动, 即二体问题。牛顿求出了二体运动方程的通解, 轨道为圆锥曲线, 又称为开普勒 (Kepler) 轨道。但其他行星也有引力, 可使所讨论行星偏离开普勒轨道, 牛顿称此现象为摄动 (或译为扰动)。使天体偏离开普勒轨道的所有作用力都称为摄动力; 研究天体在各种摄动力作用下的运动, 就是摄动理论。经典天体力学在 19 世纪初期奠基完成, 摄动理论是主要内容, 当时是用近似分析方法求出天体在有摄动力作用的运动方程的解。除其他天体的引力外, 还有多种摄动会使天体偏离开普勒轨道。以人造卫星为例: 在地球作为质点 (或密度分布为球对称) 的引力作用下, 人造卫星沿开普勒轨道运动; 但地球不是球对称, 形状和内部密度分布很复杂, 实际地球对卫星的引力与看作质点的引力有差别, 这个引力差也是一种摄动力, 称为形状摄动 (力); 此外, 由大气阻力产生的阻尼摄动, 日月引力产生日月摄动, 太阳光压力产生光压摄动; 还有潮汐摄动, 坐标系摄动等; 各种摄动使人造卫星的轨道非常复杂。后来在量子力学中也建立了摄动理论 (或扰动理论, 微扰理论); 数学上微分方程中, 在已能解出的方程加上一些项, 称为摄动项, 解带有摄动项的微分方程也称为摄动理论。如摄动项含有小参数 (天体运动是这样), 可用级数方法求出近似解, 这就是摄动理论的小参数方法; 如摄动项没有小参数, 解这种方程称为强摄动方法。

在 19 世纪后期的天体力学发展高潮中, 针对小行星、彗星和天然卫星等小天体, 建立起很多种相应的摄动新方法, 其中至今仍有价值的代表性方法有: 德洛内 (C.-E. Delaunay) 方法, 是以正则变换为基础, 后来形成解正则方程组的一种原则性解法; 汉森 (P. A. Hansen) 方法, 是在他提出的理想坐标基础上, 把问题归结为求 3 个摄动量, 并在摄动函数展开中引入调和分析方法, 是半分析方法的首创; 希耳 (G. W. Hill) 方法, 是在月球运动简化模型中得到一种周期解, 在此基础上加上摄动, 再求出月球运动更好的近似解, 也是一种半分析方法; 后来称所用简化模型的周期轨道为中间轨道。此外, 庞卡莱 (H. Poincare) 在更新的数学、力学水平上提高, 建立起摄动理论的小参数方法理论基础; 纽康 (S. Newcomb) 和希耳等改进大行星的摄动理论, 完成了太阳系历表, 奠定了历书天文学的基础。

现代天体力学中的摄动理论又有很大发展, 人造天体的出现和电脑普及提高, 形成研究摄动理论的一些新途径。

正则变换法 以上述德洛内方法为基础, 1916 年蔡佩耳 (H. Von Zeipel) 提出一种隐函数形式的正则变换, 可降低运动方程阶数, 但未实用。1959 年, 美国布劳威尔 (D. Brouwer) 进一步完善并用于讨论人造卫星的地球形状摄动成功, 常称为德洛内-蔡佩耳-布劳威尔方法, 60 年代以后, 用李 (Lie) 级数形式的正则变换出现, 是显函数。日本堀源一郎 (1966) 和美国德普里 (A. Deprit, 1969) 给出了能实用的结果, 用于人造卫星运动有效。70 年代后证明他们的方法等价。另外, 阿尔诺德 (A. I. Arnold) 等用

现代数学观点,在辛流形(Symplectic Manifold)上讨论正则方程和正则变换,建立了现代哈密顿(Hamilton)力学;80年代后,中国冯康等提出哈密顿流(正则变换)上的辛算法,使摄动理论的数值方法迅速发展。

中间轨道法 为上述希耳方法的推广。取接近天体实际运动又能用分析式表达的一种轨道,称为中间轨道,在它的基础上讨论摄动,就叫中间轨道法;希耳方法是成功的例子。20世纪50年代以后,前苏联切巴塔廖夫(G. A. Chebatariov)用共振区周期轨道作中间轨道研究小行星运动;美国文悛(J. P. Vinti)和前苏联阿克塞诺夫(E. P. Aksenov)用双不动中心问题、伽芬克(B. Garfinkel)用旋转椭圆作中间轨道研究人造卫星运动,都获得一定成功。

现代分析和半分析方法 电脑技术的提高为摄动理论发展提供新工具,用电脑能进行两种方法:(1)纯分析方法。即用级数形式表达天体带摄动的运动方程的解。在天体力学中的这种级数叫达朗贝尔(D. Alembert)级数,是一种混合级数,即三角级数中的引数为时间 T 的显函数,系数为时间和小参数的幂级数。求解过程就是这种达朗贝尔级数的各种运算,可全部用电脑完成。每一课题形成一个专用软件包。这种方法从1968年起在天体力学中开始应用,现已广泛普及。目前最大的课题是法国和比利时合作完成的大行星分析历表,代号为VSOP82,已在1986年起在西欧一些国家采用作为天文年历编算基础。(2)半分析方法。类似于上述汉森方法,将解展开为三角级数,其中引数为时间的显函数,系数为算出的数值。

20世纪80年代以来,先后建立起月球历表ALE-2000(法国),以及很多人造卫星的运动理论,已投入使用。

参考文献

- 1 Sternberg S. Celestial Mechanics. New York; W. A. Benjamin Inc, 1969, 2: 1~220
- 2 Hagihara Y. Celestial Mechanics Massachusetts, USA; MIT Press, 1970, 1: 60~103
- 3 易照华,孙义燧编著. 摄动理论. 北京:科学出版社, 1981, 1~370

(南京大学博士生导师易照华教授撰)

$$H_{ir} = A(y) + \epsilon B(y) \cos x \quad (1)$$

其中 ϵ 是小参数, x, y 这对正则共轭变量实为一对共振变量, x 即小行星和木星相对太阳的会合经度。当满足共振条件时(即通约情况),系统(1)可给出平衡解 $x = x_c, y = y_c$,在其周期(即共振区域内),会合经度 x 的变化受到一定限制,呈振动状态,而不像非共振情况那样呈现循环状态,这种共振特征即天平动。在深振区,小行星的轨道很稳定,而在共振区域的边缘,相应的轨道变化却很大,呈现一种不稳定状态。但是实际运动对应的Hamilton函数为

$$H = H_{ir} + \Delta H \quad (2)$$

尽管 ΔH 较小,但其形式极其复杂,增加该项后,上述共振特征是否能保持,这就涉及到共振结构的稳定性问题。该问题的难度极大,目前进展不大。大量的研究工作主要是在一定近似条件下,从不同角度来探索共振运动的特征,或依靠计算机进行长时间的数值探索。这些研究要解决的问题主要有两个方面:一是共振效应所起的作用,对小行星动力演化的影响;二是在共振条件下(或在共振区域附近),运动有否新的特征,如非线性现象中的混沌(chaos)态等,即运动的有序到无序的过渡。

不难看出,关于共振效应的各种研究,都与小行星的空间分布特征—空隙与聚集密切相关,因此,这一领域的研究课题,不论是过去还是现在都将是动力天文和非线性科学中的一个热点,而且有可能在共振态的演化和非线性现象方面,会随数学(特别是非线性科学)和计算技术的高度发展,获得更新的成果,必将有助于对太阳系动力演化认识的深化。

参考文献

- 1 Roeschle C, Scholl H. Astrophys, 1976, 48: 389~393
- 2 Greenberg R, Scholl H. Resonances in the asteroid belt, in Asteroids, ed. Gehrels, University of Arizona, Tucson, 1979, 310~333
- 3 Henrard J, Lemaître A. Celest. Mech, 1983, 30: 197~218
- 4 刘林, 廖新浩. 天文学报, 1989, 30: 117~125
- 5 Sidichovskiy. Celest Mech., 1990, 49: 177~196

(南京大学刘林教授、廖新浩博士撰)

天体物理学

小行星的空间分布与轨道共振 the space

distribution and orbital resonance of asteroids 太阳系中的小行星基本上分布在火星和木星轨道之间,形成小行星带,大量小行星集中在主带(轨道半径 a 在 $2.0 \sim 3.3A$ 之间),在内带中($a = 1.5 \sim 2.0A$)几乎没有小行星,在外带中($a = 3.3 \sim 5.2A$),只有 $a = 3.9A, 5.2A$ 附近存在两族小行星, $a = 4.3A$ 处存在几颗小行星。值得注意的是,在主带中某些位置上,如 $a = 2.5A, 2.81A, 2.95A, 3.3A$ 都呈现出明显的空隙,此即Kirkwood空隙。主带有空隙,外带有几处呈现一定程度上的小行星聚集,这种分布涉及到太阳系的形成与演化,搞清这一特征的力学机制意义重大。

为了解释Kirkwood空隙的形成,曾出现过多种假说,归纳起来主要有4种,即统计假说、宇宙起源假说、碰撞假说和引力假说,但都未能令人满意地解释小行星分布的特征。而上述现象都对应小行星绕太阳运动的周期与木星绕日运动的周期处于通约状况,通约将引起力学上的共振,此即轨道共振。因此,这就将小行星的空间分布特征(空隙与聚集)和轨道共振联系起来,形成了轨道共振的研究热,特别是近10多年来更是如此。

关于共振效应,一是上述由快变量(天体平运动)引起的轨道共振,还有一类称为长期共振,即次级共振或由慢变量(天体轨道的慢变参数)引起的共振。无论是轨道共振还是长期共振,在数学上所遇到的困难即通约引起的小分母问题,直到目前,彻底解决此问题的数学工具还不够。如果仅考虑共振主项,则可将太阳、木星和小行星这一动力系统中小行星运动的动力模型简化为一个自由度系统,此即理想共振模型,相应的Hamilton函数为

分子天体物理学 molecular astrophysics

现代天体物理学的一个分支,它自星际分子大量发现后崛起,是通过宇宙分子及其辐射来研究星际及天体的分子区域和分子过程规律的一门学科。

星际介质尤其是其相对稠密部分的显著特点是光学消光,这由其所含尘埃对可见光的吸收及散射引起,对其探测光学天文无能为力。1951年氢原子 21cm 谱线发现后(H. I. Ewen)曾用于广泛观测,结果表明星际气体中的原子H凝聚为云状,H的发射与云的消光相关,但当消光大于一个星等时相关性被破坏,这是气体中 H_2 所致(L. Spitzer, 1978)。星际气体的90%是氢,而分子氢占一半以上。要了解星际介质必须对分子氢进行探测。但是由于 H_2 转动惯量极小,无永久偶极矩,无射电波段谱线,冷的 H_2 也无可见光谱,从这两个大气窗口就不能观测分子区域(A. Dalgarno, 1985)。然而在这些区域中发现了各种分子,尽管其含量大大低于 H_2 ,但由于其易激发、光薄等特点,并常常与 H_2 成协,它们可以作为 H_2 的示踪剂。一氧化碳(CO)、甲醛(H_2CO)、氨(NH_3)以及硫化碳(CS)等均已证实为各具特色的 H_2 气体的优良探针。由于多数分子区域不存在局部热动平衡,分子谱线的强度、轮廓、位移及速度分布等均依赖于辐射区域的局部参量,运用原子物理、量子力学和辐射传能理论对分子谱线所作的分析(C. H. Townes等, 1975),成了决定这些区域的温度、密度、质量、尺度及其他动力学参数和同位素丰度的最重要手段,并且导致了分子天体物理学的迅速形成和发展。

揭开恒星形成的奥秘是人类的古老目标,射电分子谱线的应用使得这一领域有了突破性的进展。在长时期中以为恒星在星际云之外形成,后来原子氢 21cm 谱线所测到的介质条件对孕育恒星温度太高($\sim 100\text{K}$)、密度太低($\sim 1\text{cm}^{-3}$) (M. L. Kutner, 1984)。现已探明恒星诞生于分子云之中。云的温度一般是几 K 到几十 K,密度在 10^3cm^{-3} 以上 (G. Winnewisser 等, 1979)。所测到的大批与电离氢区(H II)及红外源成协的巨分子云复合体,往往是大质量原恒星存在及活动区域。太阳系邻近的暗星云稠密核是低质量星形成区。红外天文卫星在星际云中测到的红外源有一半多是潜在的原恒星 (C. A. Beichman 等, 1986)。分子云的物理条件、化学成分、能量平衡及动力学过程的实际观测和模型分析,已构成有丰富内容的分子云物理和化学 (N. J. Evans I, 1980)。1975 年 B. Zuckerman 等由 CO 谱线在年轻星体附近发现了双极分子外向流及 2μ 辐射,射电连续辐射,以及具有高的亮温、窄的线宽及强的偏振等特征的天体脉泽,极大地促进了原恒星和其活动的研究,发展了恒星形成的理论图景 (F. Shu, 1987)。现普遍认为恒星形成历经下列过程:分子云失去动力学(湍动、旋转、热压力或磁场等)支撑,坍塌形成云核;原恒星及其吸积盘形成;星风爆发激起双极外向流以及新的恒星和拱星盘的出现。

处在晚期演化恒星周围的气尘壳层,是另一类分子区域 (S. Kowk, 1986)。在各类晚期星的包层中已测到分子 40 多种,而且有 12 种还只在这类区域中测到;还测到了多种恒星脉泽:OH, SiO 和 H_2O 等。分子及脉泽谱线结合红外资料,可确定包层的物理参数、运动学结构及中央星体的质量损失率,并为其演化过程和辐射形成机理提供观测依据。在光学可见的行星状星云中的残留分子,可为 AGB 星系的演化序列提供重要的信息 (S. Torres - Peinbert, 1987)。在这一阶段还发现了过 AGB 星 (Post - AGB)、原行星状星云 (PPN) 及快速星风和双极分子外向流等,均为目前的研究热点。

银河系结构是光学天文长期以来未解决的问题。原子氢 21cm 谱线曾获得了介质分布的图景,并证实了旋臂结构的存在。星际分子大批发现以后,人们用 CO 谱线进行巡天,结果与原子谱线测得的分布有明显的差异 (T. M. Dane 等, 1987)。氢分子气体高度聚集在径向距银心 1kpc 的范围内和 3~7kpc 的环中 (N. Z. Scoville 等, 1987)。在距银心 400pc 以内存在分子氢分布峰值,而分布较平坦的原子氢在银心附近却有急剧下降,此区 H_2/HI 为 20。在 3~7kpc 的分子环中,与 HI 的比例为 3。在银河系, H_2 和 HI 约占相同含量 (H_2 略高),有 90% 的 H_2 分布在太阳圈内,而分布于该区域的 HI 只有 33%。银面上不同银径处的 CO 光谱表明, H_2 多存在于分立的云之中。故关于 H_2 分布所显示的旋臂结构与分子云的起源和演化有关。如果云可以跨越几个臂存活,臂上和臂间的对比度与 HI 显示的类似;否则,若云是短寿命的,则会有较高的对比度,这有待于进一步研究。

分子的光学以至紫外及红外和射电谱线,还用于研究恒星及太阳大气和行星卫星系统,探测大气元素,获取核聚变反应以至原始物质分布和太阳系起源的信息 (J. H. Black, 1985)。在彗发和彗尾中已测到 CN、 CH_3CN 、 CH^+ 、 H_2S^+ 等近 30 种分子,可能从中得到彗究竟是形成于太阳系或来自星际空间的依据。在有超新星、膨胀电离氢区或星风所产生的激波区域,CO 高 J 转动跃迁、 H_2 四极转动跃迁和各种振动跃迁,测到了这些区域的相对高温 ($\sim 2000\text{K}$) 和高密 (约 $10^7\sim 10^8\text{cm}^{-3}$) 等环境参数。紫外抽运产生的 H_2 荧光还可能是测量 HD 的灵敏示踪剂。在星系中,不仅测到了各种具有强辐射的分子,而且测到了超脉泽源。这些分子谱线已用于研究星系中恒星的形成、星系的状态、结构和动力学过程。分子谱线带来的丰富信息,可研究宇宙的各种化学现象,进一步揭示物理过程的实质或本源,并窥视特殊条件下的化学规律 (R. L. Dickman 等, 1988)。离子分子可用于研究分子的形成或解离;各种分子同位素丰度比,可以分析环境特点以及热核反应历程,并探索星系化学演化史。

分子辐射时天体及其环境的探测和研究获得了许多喜人的

成果。然而宇宙分子的作用不仅仅在于它是一种探针,还在于它本身作为体系的一部分参与天体过程 (A. Dalgarno, 1985)。众多的宇宙分子具有丰富的能态结构。通过与气体主要成分 H_2 及尘埃的作用,与星体及辐射场相关,常常控制着系统的热化及电离状态,它们从尘埃和星体及星际辐射场获得能量,或者加热气体自身,使之维持平衡,或者以电磁辐射冷却其存在于中的介质,使得大质量天体形成的凝聚过程得以始发,对体系的演变起着关键性的作用。

分子天体物理学在分子搜寻和谱线证认中促进了分子微观结构、跃迁规律、微波辐射的量子分析和实验测定 (G. Winnewisser 等, 1979)。它与生命起源学说也密切相关,多原子分子特别是能构成酶的大分子的发现,是地外可能存在前生命化合物的最有力依据之一。

分子天体物理学将天体物理环境与分子存在条件结合起来,将辐射的相互作用与分子的散射、吸收和发射结合起来,将碰撞过程与分子辐射与传能结合起来,并且以理论、实验和观测相结合的手段进行研究,对天体及其演化的探索作出了巨大的贡献。它还处在年轻时期,许多新现象,例如稠密云核坍塌、恒星形成从触发到产生率和晚期演化阶段各类天体的独特性质的解释,均有待进一步的观测证实和理论分析 (E. Falgarone, 1990)。高度稠密区域的探测是面临的巨大挑战 (O. E. H. Rydback, 1985)。为取得分子云内核及原恒星盘结构的依据,需要能观测大于 10^{10}cm^{-3} 条件下能激发的光薄分子的发射 (A. P. Boss 等, 1989)。毫米波干涉仪的应用,亚毫米波段的开发和空间探测的发展,有可能突破这一关,使分子天体物理学在更深的层次上延拓天文学的研究。

参考文献

- 1 Townes C H, Schawlow A L. Microwave Spectroscopy, Dover Publications, Inc, 1975
- 2 Spitzer L. Physical Processes in the Interstellar Medium. John Wiley, sons, Inc, 1978
- 3 Winnewisser G, Churchwell E, Walmsley C M. Modern Aspects of Microwave Spectroscopy. Academic Press, 1979, 313~503
- 4 Evans N J I. Interstellar Molecules. IAU Symp Andrew, B H, D Reidel Publishing Company, 1980, 87, 1~19
- 5 Kwok S, Pottasch S R. late Stage of stellar Evolution. D Reidel Publishing Compang, 1986
- 6 Shu F H, Adams F C. LIZANO S Aon Rev A. Ap, 1987, 25, 23~81
- 7 Hartquist T W, ed. Molecular Astrophysics - A Volume Honouring Alexander Dalgarno. Cambridge Un; V. Press, 1990
- 8 Zhou S. Ap J, 1992, 394, 204~216
- 9 Sun J, Kwok S. A Ap. J, 1987, 185, 258~266
- 10 Wu Y, Evans N J I. Ap J, 1989, 340, 307~313

(北京大学吴月芳副教授撰;周体健审)

脉动理论进展

progress in pulsation theory 脉动理论是 20 世纪 20 年代由英国爱丁顿 (A. S. Eddington) 为了揭开变星脉动的物理本质而首先创立的。巨星与超巨星的不规则光变性质是长期以来争论的问题,其物理机制究竟是什么?弄清它们对研究宇宙的尺度、星体的物理性质以及推动物理学理论的发展都将有重要的意义。脉动变星自身在不断膨胀、收缩或发生变形运动,其光度、颜色、光谱型以及视向速度也随之发生变化,在某些脉动变星中还发现有多重周期的脉动现象,甚至显示出复杂瞬时变化,产生不易辨别的傅里叶频谱。最初人们是用双星假说来解释脉动,到 20 年代,爱丁顿摒弃了双星假说,而用脉动假说来解释造父变星的亮度变化和视向速度变化。早期的脉动理论是线性绝热径向脉动理论,人们利用它研究了各种简单恒星模型的绝热

脉动和准绝热脉动。理论的进一步发展是线性非绝热径向脉动理论,它能解释赫罗图上脉动不稳定区蓝端边界位置以及脉动变星的光变曲线同视向速度曲线的相移关系。到1962年,非线性脉动理论的诞生,使脉动理论有了新的进展,从该理论推得的光变曲线形状、振幅都能与观测符合,除了以上径向脉动模式外,有的星球上所观测到的现象需要用非径向脉动模式。对于简单的恒星模型,非径向脉动的本征振动可分为 P 模式、 g 模式和 f 模式,然而对复杂的恒星模型,已不可能将它分类了。脉动的物理机制至今未能彻底解决。

近来,一种新的思想被引进脉动理论中,混沌理论开始应用来研究变星的脉动,取得了突破性进展。目前所观测到的大多数变星都或多或少地呈现出不规则的光变曲线,理论与观测都表明在这些脉动星中,非线性效应起主导作用,甚至一些过去认为是周期脉动的,随着观测精度的提高及时间序列的延长,也呈现出多周期的或不规则的。可以相信这些光变曲线的不规则性与混沌脉动有关。

自1980年以来,为了获得脉动变星的确切可靠的多周期解,兴起了全球多台址24h变星光度联测,后来又发展为光谱多址联测。中国蒋世仰(Jiang Shiyang)等参加了联测,在多周期解方面作出了重要贡献,发现即使是被认为典型单周期的AD CMi,它的相邻光度极大时刻的间隔实际上也并不严格相等,起伏达士1%~3%个周期,这些现象说明在恒星脉动中存在着明显的非线性效应。

80年代末期,混沌、分形的概念陆续被应用到脉动理论中,形成了活跃的研究领域。系统从定态演化到混沌的道路,目前已知主要的有3条,即倍周期级联分岔、准周期和锁频以及阵发混沌。其中以倍周期分岔最容易从傅里叶频谱中分谱波的脊而在得到证实,因而近年来国外研究混沌脉动用的最多的就是倍周期分岔。布彻勒(J. R. Buchler)等人于1987年发现在低表面引力的流体动力学模型中恒星脉动的切分岔的存在,接着他指出仙女座W星存在倍周期分岔,这种分岔的结果使恒星进入混沌脉动。西蒙(N. R. Simon)及伍因格特(D. Winget)等人于1988年对许多白矮星作测光观测,发现在它们功率谱中显示出周期、准周期和不规则运动,接着有不少人用非线性动力学解释所观测到的白矮星的变光特性,这些工作主要是把非线性振子或这些振子的弱非线性耦合看作是被观测到的复杂特性的模型。

1988年,戈培尔(M. J. Goupil)等人研究大熊座的变光白矮星PG1351+489及G 191-16时,发现功率谱中除了基频外,还有分谐波频率,认为倍周期分岔通向混沌可能是这些星的合适的物理机制,从而断定它们正面临着混沌状的脉动。他们选择变光白矮星只是因为变光白矮星具有最短周期,大约200~800s,在一夜观测中可以得到40多个周期。如果脉动频率为 γ_0 ,发现还存在分谐波频率 $\gamma_0/2, \gamma_0/4, \dots$,开始时恒星按单一的规则的周期振荡,光度曲线的变化也按这个基本频率 γ_0 重复出现,以后可能由于冷却,光度曲线的一个完全循环周期加倍,出现 $\gamma_0/2, \gamma_0/4, \dots$,以及它的倍数,这一级联分岔现象意味着趋向混沌振荡。戈培尔等人认为这种混沌振荡在变光白矮星中可能是个普遍现象。

塔可提(M. Takeuti)等人于1988年发现,罗斯勒(Rössler)方程的 Z 分量吸引子的基本结构与R Scuti光曲线的基本结构之间有惊人的类似,罗斯勒方程是最简单的非线性微分方程,通过倍周期分岔出现混沌特性。从R Scuti光曲线计算的轨迹和从罗斯勒模型计算的轨迹之间的类似表明R Scuti的光变性质是由低维混沌引起,研究指出,R Scuti吸引子的维数比罗斯勒模型的维数高。

1989年,赛托(M. Saitou)等人完成了简单恒星模型的全非线性研究,成功地指出,随着不透明度的非线性的增加,将出现倍周期分岔,他们得到弗振帮(Feigenbaum)树枝分岔,从而证实了混沌性质确实存在。雅马卡瓦(F. Yamakawa)等人于1990年指出,鹿豹座VZ星将处于混沌状态。1989年,中国的熊大因

(Xiong Darun)提出了一种独立的恒星对流理论,成功地用于研究恒星的脉动、内部结构和演化。

1991年,印度的达斯(M. K. Das)等人提出了另一种方案来解释白矮星功率谱中分谐波的存在,即用二维环面上的准周期运动来研究变星脉动。他从许多白矮星所得到的高速测光数据,证明在它们的功率谱中存在分谐波频率,许多白矮星显示出多重周期结构。达斯指出,准周期运动的失稳,会导致功率谱中出现类似的分谐波成分。他认为准周期运动比戈培尔提出的倍周期分岔的方案更为普遍。准周期运动与近代流体中的实验一致,功率谱中通常先看到两个不可比的频率带,然后突然出现宽的噪声带,事实上由于锁频,耗散系统中不可能无限制出现不可比新频率,相近频率会突然靠拢并锁住,频谱中只剩下较少的独立频率,只要二维环面上的准周期运动就可以直接失稳而成为奇怪吸引子。在功率谱中由于噪声的存在,只能观测到头几个谐波,这同样可以用环面的瓦解来解释,当非线性耦合增强时,准周期运动瓦解,最终导致混沌运动。

戈培尔等人于1991年已将于波分析方法用来研究变光白矮星G191-16及PG1351+489的光变曲线。这种子波分析适用于研究不稳定信号,把光变曲线分解为不同振荡分量,因而可以各自研究它们的瞬时特性,根据这两颗白矮星光变曲线的子波分析,证实了这两颗星脉动除了一个主要的大振幅振荡外,还由一些小振幅振荡和不同频率交替振荡组成,而且光变曲线的频率是不会全部符合脉动模式的,因为一些频率是由非线性效应产生的。他们确实发现G191-16的两个振荡的振幅被同一拍频周期所调制,同时还观察到陡的短寿命的振幅变化。事实表明,这些振荡频率不可能都是非径向 g 模式,更有可能与非线性效应有关。

1992年,陈福生(Chen Fusheng)与蒋世仰(Jiang Shiyang)等人发现恒星结构基本方程本身的内在随机性,从而提出阵发混沌机制可能是某些变星脉动的物理本质,并求出了穿越“走廊”(narrow channel)的时间。当一个叠代点恰好落在一个“走廊”附近时,就好像叠代往不动点收敛,在“走廊”中多次叠代后,从“走廊”的另一端离去,这相当于在某些脉动变星中所观测到的近乎周期的运动;当叠代点离开某一“走廊”经过一些大幅度的跳跃之后,又可能来到另一个“走廊”附近,在不同“走廊”之间的跳跃对应于混沌运动。这相当于在脉动变星中所观测到的纯随机运动,整个过程看起来就好像是周期运动中随机地夹杂了一些混沌运动。观测到的巨星、超巨星的不规则光变性质就很像这种情况,在它们光变曲线中出现多周期、纯随机或两者结合运动,都可以用阵发混沌机制来解释,从而在前人已做过的“倍周期级联分岔”和“准周期运动”外,又填补了“阵发混沌”的机制。

1992年1月在日本召开国际(ASP)讨论会,议题为“变星中的非线性现象”,根据会议精神可以看到该领域在20世纪内的研究热点是:(1)继续坚持多址联测,积累大量高精度测光资料,从观测与理论两方面并进;(2)脉动现象的非线性效应,将被深入研究;(3)应用倍频分岔、准周期运动以及阵发机制来研究脉动可能成为热点;(4)由光曲线导出的轨线的准确分维,至今未能计算出来,因而分维理论以及子波分析理论都将在今后的几年得到进一步发展和应用;(5)双模脉动问题至今未能解决,希望至2000年双模造父变星之谜能被非线性理论所解释。

参考文献

- 1 Auvergne M, et al. *Astro Astrophys*, 1985, 142, 388~392
- 2 Goupil M J, et al. *Astro Astrophys*, 1988, 196, L13~L16
- 3 Auvergne M, et al. *Vistas in Astronomy*, 1990, 33, 399~411
- 4 Kollath Z. *Mon Not R Astr Soc*, 1990, 247, 377~348
- 5 Chen Fusheng, et al. *Astrophys Space Sci*, 1992, 195, 341~348
- 6 Das M K, et al. *Astrophys Space Sci*, 1992, 188, 137~142
- 7 Takeuti M. *ASP Conference Series*, 1992, 11, 279~282

(南昌大学陈福生教授撰)

空间 γ 射线谱 空间 γ 射线谱所包容的生物内容亦称之为 γ 射线天体物理学。 γ 射线谱是研究宇宙空间的新窗口之一, 具有许多天体物理部位所发生的核过程的特征标志, 用它来探索宇宙中所存在的潜隐现象, 其功效相当于或者超过了原子、分子光谱和 X 射线谱。由于它不带电荷, 不受磁场所偏转, 故可由探测方位推溯其源区。由于它的穿透力强, 故可用来研究其射线所不能观测到的过程和区域, 能直接揭示以前只能间接研究的许多天体物理过程; 可提供元素核合成的所在部位及其模式的直接信息。例如, 用 γ 谱引力红移量来探测中子星和黑洞表面的性质, 通过和寿命放射性核的合成 γ 射线反其衰变的测量来揭示银河系中超新星爆发的动力学过程; 弥散 γ 射线谱可给出其他方法所不能观测宇宙线低能成分源的强度和空间分布; γ 射线谱还有助于测定银河系尺度上的星际介质的成分而不须预知物质的电离态和分子态。线宽只有几 keV (几 MeV 的谱线) 的非常窄的 γ 谱线可用来直接探测星际尘的成分、大小和空间分布。 γ 射线的衰减系数小, 使人们有可能研究星际云深处的用其他波段的射线所不能观测到的星体形成中的最早星态, 总之可以用来研究宇宙空间普遍存在的现今和远古的环境状态。

N. Gahrel 等(1988)根据观测提出, 宇宙中可见亮物质仅占全宇宙质量的 10%, 尚有 90% 的物质为观察不到的暗物质。现有的宇宙学理论和引力观测也确认应有大量暗物质的存在。1991 年 Gahrel 等又提出应用暗物质的正反粒子湮没 γ 谱的设想, 认为质量为 30~80 GeV 的重中微子可能是暗物质的候选粒子, 其湮没截面相当大, 生成的 50 GeV γ 射线信号明显地高于银河 γ 本底, 已有理论预估和高能 γ 射线的望远镜的设计。

在月球和太阳的观测中亦已展示了 γ 射线的巨大功效。例如 Appollo 月轨 γ 射线谱仪对月球表面作了全球观测, 发现了异常富集的 Fe, 放射性 K, Th 和 U 的区域, OSO-7 卫星探测器的首次发现了 1972 年 8 月 4 日和 8 月 7 日耀斑的 γ 射线。由于它不受磁场的影响, 带有加速粒子特征及其所作用的环境介质中同位素成分的未经改变的信息, 故其强度首次给出了耀斑区含能核的加速时间、能谱和总核数, 这些数据对太阳耀斑含能粒子的加速和逸出模型, 以及耀斑的全过程给予了新的重要的制约和限定, 至今太阳耀斑 γ 射线谱的观测仍方兴未艾。

总之由于激态核能级的寿命远小于 I_s (同质异能核除外), 所以研究耀斑或其它宇宙源中退激核所生成的 γ 射线谱的强度、能谱以及强度随时间变化的特征, 可提供生成这些核激态的核反应的时间历程数据, 而这些数据又直接反映了太阳含能粒子与太阳大气相互作用时其能谱随时间变化。因此通过瞬间 γ 射线谱的观测研究可望对耀斑粒子加速过程有一深入阐释。

100 keV 至几十 MeV γ 射线谱的主要发射过程有: 核退激、放射性俘获和正反粒子湮没。

核退激的瞬发 γ 射线。 核能级的激发方式有: 直接来自质子、 α 粒子、中子的非弹性散射, 如 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}')^{12}\text{C}^*$, $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha')^{12}\text{C}$, $^{12}\text{C}(\text{n}, \text{n}')^{12}\text{C}^*$; 间接来自散裂反应, 留下激态散裂核, 如 $\text{O}(\text{p}, \text{Pa})^{12}\text{C}$, $^{16}\text{O}(\alpha, 2\alpha)^{12}\text{C}^*$, 或来自放射性衰变到非基态的能级, 如 $^{12}\text{N}(\beta^+)^{12}\text{C}^*$, 这些激态核退激时生成瞬发 γ 射线谱。放射性俘获的 γ 射线 (以中子的放射性俘获为主), 若环境密度足够高, 例如 $10^{16}\text{H}\cdot\text{cm}^{-3}$ 或更高, 中子在衰变掉以前就有足够的机会被质子俘获, 故 $^1\text{H}(\text{n}, \gamma)^2\text{H}$ 反应的 2.23 MeV γ 射线谱最强的, 中子亦可被重核俘获, 如 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \gamma)^{57}\text{Fe}$ 的 1.646, 7.632 MeV γ 射线也很重要, 此类 γ 射线不包括质子、 α 粒子的俘获辐射, 如 $^2\text{H}(\text{p}, \gamma)^3\text{He}$ 的 5.494 MeV γ 射线, $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}$ 的 1.944 MeV γ 射线。

正反粒子湮没的 γ 射线。 正电子与电子直接湮没, 谱自由态湮没为 1.02 MeV 单个 γ 光子, 而以两个相距 180° 的 0.511 MeV γ 光子为主。正电子可在形成电子偶素 ($e^+ \cdot e^-$, PS, 变称类 H 原子) 后再进行湮没, 称之为束缚态湮没, 束缚态有自旋相反的单态和自旋平等的三态。单态湮没时生成两个相距 180° 的

0.511 MeV 的 3 个 γ 光子。三态的形成几率为单态的 3 倍, 而三态湮没速率为单态的 $1/1115$ (两者的寿命比值), 这样三光子湮没发生的几率为二光子湮没的 $\frac{1}{1115} = \frac{1}{372}$, 但束缚态二光子湮没的几率只及直接二光子湮没的 $\frac{1}{4}$ 。在 $T < 10^6\text{K}$, 和密度 $< 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 的环境中, PS 湮没为正电子湮没的主要方式, 若 $T \sim 10^6\text{K}$, 密度 $> 10^5\text{cm}^{-3}$, PS 与环境介质碰撞而分解, 此时自由态正电子湮没速率正好等于 PS 形成速率。在一些天体物理环境中, 如 γ 爆源、黑洞或中子星上的吸积盘和类星体中存在有相对论性热的等离子体, 其中粒子平均能量超过了电子的静止质量能, $m_e c^2 = 0.511\text{MeV}$, 相当于 $5 \times 10^9\text{K}$, 于是生成了电子对 (e^+, e^-)。 γ 射线在此被吸收, 也生成 (e^+, e^-) ($\gamma + \gamma \rightarrow e^+, e^-$), 这样就有大量的自由态 e^+ 在湮没过程发生。正反质子如能直接湮没, 它生成的 γ 射线光子能量应有 $2m_p c^2 = 2 \times 1838.63 \times m_e c^2 = 1.879\text{GeV}$, 但实际上并无直接湮没的而是相互作用生成的 π^0 介子衰变所产生的 γ 射线, 其光子能量决定于 π^0 介子的能量分布, 因而又决定于天体物理的环境状态。P-P 静态湮没时最低的 γ 射线能量约为 5 MeV, 最高能量为 919 MeV, 强度极大值所对应的光子能量为 $m\pi^0 c^2/2 = 69\text{MeV}$ 。正反粒子湮没过程在宇宙的稳态学说中具有的重大意义, 为了保持宇宙膨胀时的平均密度不变, 假设了宇宙中自发生成正反粒子的速率为 $10^{-22}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ 。此学说的结论之一就是应有大量的反物质迄今仍然存在, 它们会与正物质发生湮没而产生 γ 射线, 故只有 γ 射线可以用来探索宇宙中的反物质。因此近年来出现了正电子天体物理学新分支学科。

热核分裂反应。 W. Gahrel 等(1988) H. Keibel(1989) 提出在有些天体物理相论性等等离子体中, 由于热能高达 1 MeV 以上 ($> 10^{10}\text{K}$), 热的质子、 α 粒子和光子可以直接分裂其中的轻核和较重核, 如: $\text{p} + ^2\text{H} \rightarrow \text{p} + \text{p} + \text{n}$, $\text{p} + ^4\text{He} \rightarrow ^3\text{He} + \text{d}$, $\text{p} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^9\text{B} + \alpha$, $\text{p} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{13}\text{N} + \alpha$, $\text{p} + ^{24}\text{Mg} \rightarrow ^{21}\text{Na} + \alpha$, 这样改变了等离子体中原有元素核丰度, 因而会改变核退激的 γ 和俘获性 γ 的发射, 故在大于 0.5 MeV 的温度等离子体中, 必须考虑热核分裂反应的重要性及其与天体物理环境的关系和应用前景, 此时应首先考虑这些反应对 γ 射线发射谱产生的影响, 热核分裂核反应比之散裂反应、俘获核反应以及退激核反应, 相形之下重视不够。在 70 年代, 研究星体演化和核合成中的 p-p 链和 CNO 热核反应时, 仅考虑了俘获质子的 γ 射线, 但未论及热核分裂反应及其对 γ 射线发射度的影响。正电子湮没和热核分裂已成为相对性等等离子体天体物理中两大重要研究领域。

超能级的 γ 射线 (T. C. Weekes, 1988)。 VHE ($10^{10} \sim 10^{14}\text{eV}$), UHE ($10^{14} \sim 10^{17}\text{eV}$), EHE ($10^{17} \sim 10^{20}\text{eV}$) 的 γ 谱的发射过程计有: (1) 逆康普顿效应, 例如在天鹅座 X-3X 射线源中 PeV 高能电子与 X 射线光子的逆康普顿作用而生成 PeV γ 射线。(2) 韧致辐射亦称同步辐射。当电子或正电子的运动方向与磁力线成一定角度时, 即投掷角不为零时, 由于洛伦兹力使之绕磁场方向而螺旋加速, 不断辐射出连续的电磁能, 与同步加速器中由磁场偏折使加速的电子束不断产生的连续谱辐射生成机理相同, 故称为同步辐射。若高能电子磁力线的弯曲, 产生电子的角加速度而辐射电磁能, 称之为曲率辐射。以上这些过程均属非核的机理, 都是由超高能加速的电子所产生的。粒子竟然加速到人类粒子加速器尚不能达到的能量。尽管尚无满意的机理足以从理论上予以合理的阐述, 但 TeV-PeV 观测数据是可信的, TeV-PeV 过程是公认存在的。故 γ 射线天体物理学所论及的问题乃是有关最大能量粒子在宇宙中的发生和传输问题。用无线电、光学或 X 射线望远镜来观察上述高能过程, 我们固然可以得到宇宙中最大能量过程的非同一般的细致观貌, 但是这些光子都是远离这些粒子本身而发射 (副产物除外), 唯有当我们用 γ 射线来观察时, 才能直接深入到过程的真实核心, 开始感觉到它的功效。用低能光子, 就如同我们只能看到燃烧的烟雾, 因而不可能了解爆燃的本质。近年来在太阳耀斑、超新星、新星、脉冲星、天

成区的物理环境提供有价值的信息。

1. γ 射线出现时间与粒子加速阶段。在一阶段加速的简单模型中,粒子由环境能量升至最后能量的全部加速过程很快完成,其机理为费米加速,即荷电粒子被迎面来的、与击波阵面相联系的运动着的磁化区所反射,并在此获得能量而加速。在二阶段加速理论中,首先有第1次适度加速,使粒子能量平均达到 $10^6 \sim 10^8 \text{eV}$,第1阶段加速时间在某些理论中有长达几天之久,在其他理论中可短至几分之一分钟,所有的第2阶段加速理论都推论加速粒子最终达到的能量一般要增加1~2个量级,而且为时很短,二阶段加速理论优点是粒子平均每增高一次能量不需要像一阶段加速那样大。根据瞬发 γ 射线的发射时间相对于硬X射线发射时间的滞后,来区分耀斑粒子加速的第1阶段和第2阶段。例如,最早的耀斑 γ 射线观测表明,硬X射线比瞬发 γ 射线早出现1min,对此可解释为离子(质子、 α 粒子及重核等)的加速晚于电子加速1min,这样耀斑粒子分阶段加速理论似乎已经有了观测数据的支持。然而较近的多次数耀斑观测(1980~1981)发现耀斑瞬发 γ 射线比硬X射线仅迟后2~20s。这种大大缩短的滞后可以解释为不同的加速机理,也可能来源于质子的传播过程。这是致使粒子加速问题复杂化的 γ 射线观测事实之一。1984年,有人将耀斑 γ 射线观测所得的与加速粒子发生作用的离子数和同一耀斑的行星际观测所得的离子数进行比较,发现所有已经进行 γ 射线观测的大多数耀斑中经受相互作用的离子比逸出的太阳的离子多得多。这说明生成 γ 射线的离子与质子、 α 粒子等一道先被加速,接着又捕获(陷阱)于封闭的磁结构中,耀斑磁环最易具有此种作用,它是粒子加速接着阱聊并传输到低层大气而产生 γ 射线合适结构部位。这些观测事实有助于加深人们对耀斑粒子加速、传输、相互作用模型的认识,这是其二。2. 223MeV γ 射线与149~203KeV硬X射线的时间滞后达30s~3min,这较清楚表明,这个滞后时间就是中子在光球层中传播和阱聊的时间,此时间的长短决定于中子的能量和传输所经历了介质密度的大小。实际上耀斑中产生的大于30MeV的质子与产生的硬X射线可能同时被加速。这是促使人们重新考虑原有粒子加速模型和传输模型的 γ 射线,这是观测事实之三。这样,原来认为较清楚简单的粒子分阶段加速问题变得复杂起来,成为专攻的焦点。新近有人试图将 γ 射线的生成模型(如前述的厚靶、薄靶),与发射 γ 射线的相互作用粒子的加速机理和传输过程同太阳低层大气中磁场几何结构联系起来,进行综合考虑,以完善耀斑动力学模型。

2. γ 、X射线时间差与磁场通道粒子传输模型。在耀斑的日冕区中,磁场强度只有50~100Gs,而在光球层中,磁场强度却高达1~2kGs,即开放磁场随太阳大气深度而逐渐全聚,构成磁道能量管。在管亦即磁环的根部,由于磁镜力的作用可使其中的含能粒子(电子和质子)在磁镜点来回跳跃而得到加速,并由于它与太阳大气介质相互作用而不断改变与磁力线所成的投掷角,这样使耀斑加速的粒子从冕区落入损失锥内,流入低层大气(光球和色球),与高密度的介质相互作用生成 γ 射线和硬X射线,而粒子本身逐渐消失。故可根据磁镜力和损失锥分布来研究粒子(离子)的传输问题。例如,1980年6月7日耀斑的SMM观测显示4~6MeV γ 峰比硬X射线峰滞后2s,这可能来自含能质和电子由磁环顶部运动到磁环根部的传输时间差,因为能量约10MeV的质子相对于100keV电子流过 10^{10}cm 长的磁环能量管所应有的滞后的正好为2s。

3. γ 、X射线时间差与中性束模型。1986年,Simentt提出了中性束的假说,即耀斑磁能为质子束所传递,大部分能量贮存于0.1~1MeV质子束中,以此作为主导的传输磁能的机理,而电子流则伴随质子以同方向运动而构成中性化粒子散射。质子则继续下沉,于是形成碰撞而使电子散射,质子则继续下沉,于是形成双层,产生电场。在电场作用下,电子得到加速,产生韧致辐射式的硬X射线,其源位置处于色球层中,而 γ 射线的源位置按厚靶模型应位于光球层。光球层位于太阳圆面,厚约500km,其上即为色球层,厚约2000km。两相邻层次的源位置与 γ 射线相对

硬X射线的秒级滞后这一观测事实相吻合。这也说明生成更X射线的中性束模型与 γ 射线的厚靶模型互相一致。若能有更高的时间分辨观测数据,也许可以获得更为精细的信息。

(南京大学物理系固体微结构物理国家重点实验室王广厚撰)

γ 射线暴 gamma-ray bursts 这是一种短时标、突然的高能 γ 射线暴发现象。它的发现完全是偶然的。1963年美国和前苏联签署了禁止核试验条约,为了监视这个条约的执行情况,美国研制了能探测突然核爆炸中放出 γ 射线的探测器,并将它们安装到Vela系列军事卫星上,送入轨道。1967年Vela卫星已经探测到并非来自地球,而是来自宇宙空间的 γ 射线暴。但直到1973年,Klebesadel等才在美国天体物理杂志上公开发表了观测到16个 γ 射线暴的事例,宣布这一新的天体现象的发现。70年代末,前苏联将高灵敏度的 γ 射线探测器安装到Venera卫星系统上,对 γ 射线暴进行了系统的观测,并取名KONUS实验。前列宁格勒约费技术物理研究所的Mazets小组将KONUS在1978年9月~1980年2月的观测结果汇编成一份详细资料,公布了在这期间所观测到的143个 γ 射线暴的发生时间、暴的方位、时间特性、能谱和流量及其变化等数据。1973年以来,PVO,HEAO1和3,SMM,ICE,Prognog,Helios2,Hakucko,Hinotori,Ginga,phobos以及GRO等宇宙飞行器上都安装了 γ 暴探测器,对 γ 射线暴进行了大量的观测和研究。虽然至今已观测到1000多个 γ 射线暴,但是还没有一个能完全确定无疑地与已知天体对应起来(1979年3月5日暴的方位与大麦哲伦云中N49超新星遗迹一致,但也不能完全断定这次暴来自那里),因而无法确定这些暴源的距离。由于 γ 射线暴持续时间短,来不及搜索和跟踪,又发生在无法预测的位置上,以至无法采用窄视场、高灵敏度的探测器,而必须采用广角探测器。由于大气对高能 γ 射线的吸收,必须将探测仪器装在卫星上等原因,致使对 γ 射线暴的起源和形成,以及暴源离我们的距离、能源的产生、辐射机制、能谱的形成等很多问题尚未了解清楚,有待于进一步的观测和研究。

已经观测到的1000多个 γ 射线暴大体上可以分成两类。一类是所谓经典暴,绝大多数 γ 射线暴都属于这一类。它的特点是暴的持续时间较长,从几百ms到1000s,平均持续期是15s,时间特性中具有多峰结构;能谱较硬并有线特征而且随时间变化;在几年之内没有观察到重新暴发现象。另一类是所谓软暴,至今只观测到3个。这类暴持续时间短(一般小于1s);时间特性简单;能谱较软又无线特征(除1979年3月5日暴外),而且不随时间改变。软暴有明显重复现象,这3个暴已观测到100多次重复暴,其中1979年1月7日暴已经重复了110次。

γ 射线暴辐射能量几乎全部都集中在 γ 射线能量范围内。已经观测到的暴的能量范围从几keV到100MeV。其中10keV以下(属于X射线)能量只占总能量的2%左右。KONUS观测的能谱范围在30keV到1MeV之间。1985年SMM卫星 γ 射线谱仪观测到大多数 γ 射线暴能量范围一直延伸到10MeV或者更高。对小于1MeV的连续能谱已采用了热韧致谱、热同步谱和逆康普顿谱进行拟合,它们都能拟合得很好。1MeV以上的谱则可以用幂律谱拟合,幂律指数取为-1.5到-3之间。

经典 γ 射线暴能谱中除连续谱外还有线特征。在KONUS实验中,有20%~30% γ 暴在20~60keV能量范围内存在着吸收线,这些吸收线通常被认为是强磁场中第1朗道能级回旋吸收线。由此得出磁场范围在 $(2 \sim 5) \times 10^{12} \text{G}$,这大致是中子星表面磁场强度。但多年来对回旋吸收线的真实性一直有争议,认为同时还应观测到更高朗道能级的吸收线。1987年Ginga卫星上 γ 射线暴探测器观测到了1987年3月3日暴在20keV和40keV处有两条吸收线,而后在1988年2月5日暴上也发现了类似的两条吸收线。它们被认为是第1和第2朗道能级的回旋吸收线。

除吸收特征外,约有15%~20%经典暴在350~450keV范围内有发射线特征(1979年3月5日软暴也有发射线特征)。这些发射线被认为是由正负电子对湮灭成两个能量为511keV光

子,然后经过中子星表面强引力场红移而形成的。连续谱和线特征都会随时间快速地变化。 γ 射线暴中没有探测到光学和射电波段的辐射,但在查阅过去光学暴的档案中,发现在确定 γ 暴方位的误差范围内曾有过光学闪烁。

目前普遍认为 γ 暴起源于中子星,主要理由是:(1)由吸收线确定的磁场强度 $\geq 10^{12}G$,和中子星表面的磁场强度符合;(2)由发射线红移确定的引力场势和中子星表面的引力势一致;(3) γ 暴上升时标可以短到毫秒量级,由此得到源的线度应在几十km左右,与中子星的大小相当;(4)1979年3月5日暴有明显的8s周期,这是迄今发现的最强一次 γ 射线暴,它的方位与大麦哲伦云中超新星遗迹N49一致,8s周期认为是遗迹中中子星转动周期;(5)如果认为暴源在银河系内,则暴的总能量应在 $10^{38}erg$ 左右,中子星是完全可以提供这些能量的。

γ 暴的能源问题已经提出了很多的理论模型,主要有热核爆炸、星振、偶然吸积和中子星转动等模型。热核爆炸(或闪燃)模型通过磁化中子星(磁场 $\geq 10^{12}G$),以较低的吸积率($10^{17} \sim 10^{18}g/a$)吸积星际物质或伴星物质。当吸积物质超过某一临界值时就会引起氢的燃烧,使吸积物质温度升高,产生 3α 过程,即氢燃烧,又可产生氦,同时提供 γ 暴的能源。热核燃烧可以提供的 γ 射线暴能量大约在 $10^{38} \sim 10^{40}erg$ 。

星震模型可以是星体表层震动,中子星转速突然加快(glitches现象),或者星体核心震动三种情况。表层震动类似于地震,若这种震动引起中子星磁场改变,由此释放能量大约是 $10^{34}erg$;如果震动引起星体半径改变,释放的结合能可达到 $10^{46}erg$,glitches现象是中子星超流核心和固体表层角动量的突然转换,由此释放的能量大约在 $10^{42} \sim 10^{43}erg$ 。核心震动是中子星核心态的相变(π 凝聚,夸克相变等)引起的。释放的结合能可以达到 $10^{42} \sim 10^{45}erg$ 。

彗星或者小行星与中子星的偶然碰撞或者中子星偶然吸积彗星或小行星,也可作为 γ 暴产生的能源。如果要产生 $10^{38}erg$ 的 γ 暴能量,要求彗星的质量 $\sim 10^{17}g$ 。

中子星转动变慢,将能量转换成 γ 暴而辐射出去也是可能的。对于磁场 $\sim 10^{12}G$,转动周期 $\sim 0.1s$ 中子星将会提供 γ 暴 $10^{35} \sim 10^{36}erg$ 的能量。

上述各种能源模型各有特点,由于还不知道任何一个 γ 暴源的确切距离,因此还不能确定哪些模型更合理些,哪些是应该放弃的。

为了进一步研究 γ 射线暴的性质,探索暴源的位置和空间分布,1991年4月美国Atlantis号航天飞机将Compton γ 射线天文台(GRO)送入太空。其中安装了探测 γ 暴的仪器,它的灵敏度比以往的提高了一个量级,因而能探测到更多的弱暴,这个实验取名为BATSE。该小组主任Fishman在1992年1月美国天文学会上宣布,到1991年12月31日,BASTE已经探测到210个 γ 射线暴。这些暴在空间的角分布是各向同性的,即不论沿银道面或银心方向都没有明显的集中分布倾向。他们测得 $\cos\theta$ 平均值

$$\langle \cos\theta \rangle = 0.002 \pm 0.006$$

其中 θ 是暴源和银心间夹角,这显示 γ 暴的角分布有很好的各向同性,而同时又发现暴源沿径向分布却是不均匀的。他们用 V/V_{max} 的平均值表示沿径向分布均匀性。其中 V 是以地球为中心延伸到暴所在处的体积, V_{max} 是同一个暴延伸到仍可被探测器探测到的最大体积。对于均匀径向分布的情况,平均值 $\langle \frac{V}{V_{max}} \rangle$ 应是0.5。但BATSE观测结果是

$$\langle \frac{V}{V_{max}} \rangle = 0.348 \pm 0.024$$

表明暴源沿径向分布很不均匀,而且弱暴明显减少。BATSE这一重要观测结果使对 γ 暴分布成为有明显争议问题,因为在已知银河系的天体中没有这种分布。银盘模型明显不行,它既不是角分布各向同性,又不符合径向观察结果。银河系暴模型,由于地

球并不位于银心处,因此至少要求暴的半径应大于50kpc。由于 γ 暴事例几乎每天可以观测到一个,因此这个模型要求的中子星数目比通常知道的要多得多。宇宙模型自然可解释暴源各向同性分布,由宇宙学红移也可说明径向分布不均匀性,但这个模型要求暴源离我们距离达几十亿光年,这就要求每次暴必须释放出大约 $10^{51}erg$ 的能量。什么样过程能在突然暴发中释放出如此巨大能量是一个未解决的问题。宇宙模型的另一个问题是存在能谱中特征在如此遥远天体的情况下根本不可能观测到。

总之, γ 射线暴研究从观测到理论都有待于进一步深入和发展,这一新的天体现象之谜终究将为人类所揭开。

参考文献

- 1 Klebesadel R W, et al. *Astrophys J (Letters)*, 1973, 182, 85
- 2 Mazets E P, et al. *Nature*, 1981, 290, 378
- 3 史天一. *天文学进展*, 1991, 9(2): 96
- 4 Meegan C A. *Nature*, 1992, 355, 143

(北京师范大学史天一教授撰)

恒星物理 stellar astrophysics

恒星是宇宙中最多种的一种天体,仅银河系大约就有 10^{11} 颗,而宇宙中像银河系这样的星系有成千上万个,它们都主要是由恒星组成。宇宙中的物质绝大部分集中在恒星里。恒星是高温灼热的气体球,它们的内部温度可高达几千万度,密度很高,能够产生能量而向外发出电磁辐射。

恒星物理是以恒星世界为其研究对象,是运用现代物理学的知识,以观测事实为基础,研究恒星内部和表面的各种物理状态、产能机理、化学组成、运动规律,并进而探讨恒星的形成和演化的一门学科。

恒星物理的发展已有100多年的历史,经过艰苦观测和理论探索,人们发现恒星的种类繁多,已经知道的有比太阳直径大几百倍的巨星和超巨星,有和地球大小相仿而密度极高的白矮星,有双星、变星,以及有大量物质损失或爆发现象、或发出X-射线、 γ 射线的各类特殊恒星。

近代恒星物理的高速发展阶段大约开始于1960年前后。由于原子物理和量子力学迅速发展,大型电子计算机在天体物理中开始广泛应用,特别是由于实测恒星物理已积累了大量丰富资料,发现了赫罗图,以及恒星在赫罗图中分布的许多规律和其它许多经验规律,使得理论恒星物理产生一个迅猛的发展,1960~1975年的10多年时间内就已建立起一个初步完整的恒星结构和演化理论,它是以研究恒星内部的物理结构、物理过程和演化规律为内容。它可以说明恒星如何形成、演化到死亡,能够说明天空中各类不同恒星和现象是不同质量的恒星在不同演化阶段的天体和现象,可以解释赫罗图中各种恒星分布的规律和其它观测得到的经验规律。同时又建立起一个初步完整的恒星大气理论,它是以研究恒星表面大气层的物理状态、化学组成以及辐射转移的规律为内容,它可以解释各类恒星的光谱特性。此外,还建立起一个初步完整的恒星振动理论,它是以研究恒星内部动力学非稳定性、辐射能如何转变为机械能从而产生径向的和非径向的振动,以及振动的性质为内容,它可以解释各种变星的脉动。

1975年以后,由于天文观测技术的迅速发展,特别是各种不同波段的天文卫星的发射,大型光学和射电望远镜的使用,以及高灵敏高效率电子接受设备的应用,使实测恒星物理进一步发现了许多过去没有探测到的现象和天体。例如发现了大质量星和红巨星有强大的星风物质损失;发现有X-射线发射或X射线爆发的天体是含有一颗致密天体(白矮星或中子星)的双星系统,并且在致密天体的周围有一个物质吸积盘;发现有不少恒星,包括太阳在内有非径向振动现象;发现接近巨星分支的恒星(简称AGB星)有强烈星风和振动现象,同时在大气层内出现了比铁还重的元素(称为S-过程元素);发现一些温度和质量与太阳相近的恒星,表面大气层也有黑子、耀斑等现象等等。实测恒星物理众多的发现,其中很多都是原来的恒星结构和演化理论,恒星大气理论和恒星振动理论无法解释或相矛盾的。因此,从1975年到

现在,又使理论恒星物理十分活跃和发展。目前已经取得进展的有:(1)原来的恒早结构和演化理论是建立在假设恒星总质量守恒的基础上,这10多年人们对大质量星有星风物质损失的结构和演化进行了研究并取得重要进展,不仅基本上可以解释观测到的大质量恒星的赫罗图,而且还证实了温度高、光度高和星风强烈的沃尔夫-拉叶型星是大质量恒早有星风物质损失将其外壳丢失而暴露出来的星核(C. Chiosi, 1986)。(2)原来的双星演化理论是建立在假设总质量和总角动量守恒基础上的,近年来通过对双星中物质损失的机理,以及物质损失与角动量损失的关系的研究,发展了非守恒双星演化理论,它能够解释X射线双星、灾变双星、沃尔夫-拉叶双星等一些激烈活动双星的演化形成(R. Q. Huang, 1990)。(3)在热核反应理论方面,原来的恒星结构和演化理论中认为恒星内部在氢燃烧阶段只需考虑氢和氦元素丰度的变化和对产能率的贡献,在氦燃烧阶段只需考虑 ^4He 、 ^{12}C 、 ^{16}O 等元素丰度的变化和对产能率的贡献,但是通过对沃尔夫-拉叶型星和AGB星的光谱分析,人们认识到,在氢燃烧阶段还必须考虑 ^3He 、C、N、O等元素丰度的变化和对产能率的贡献,在氦燃烧阶段还必须考虑 ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{18}O 、 ^{22}Ne 、 $^{25-26}\text{Mg}$ 等元素丰度的变化和作用,特别是在反应过程中产生中子源的作用。此外,最近的核物理实验证明, $^{12}\text{C}(\alpha, n)^{15}\text{O}$ 反应的速率比原来的速率应该增大3~5倍。热核反应理论方面的这些进展,不仅解释了沃尔夫-拉叶星和AGB星表面出现的元素丰度,而且对恒星结构和演化性质,特别对后期的演化性质有重要的影响(W. D. Arbett, 1985)。(4)原来的恒星振动理论是建立在流体力学基础上,其基本假设是认为气体和辐射场无论何时都可看作同一个热力学系统,因而有同一的温度和热力学参数。近年来人们认识到,当恒星内部发生快速振动的情况下,这个基本假设是不正确的,因而建立了以辐射流体动力学为基础的新的恒星振动理论,将气体和辐射场看作两个热力学系统,可以有不同的温度。新的恒星振动理论对于解释一些恒星振动的性质方面得到了比原来理论更符合于观测实际的结果(Y. Lie, 1992)。(5)吸积盘理论发展十分迅速,人们认识到物质吸积是天体物理中一种更高效率的释能机制,因此吸积盘理论已经不仅仅用在双星演化理论中,而且已在星系物理学中用来解释活动星系核极高能源(J. Frank, 1985)。(6)对恒星结构和振动性质有重要影响的对流理论,过去是以局地混合程理论为基础,然而局地混合程理论对于对流过程的处理仅仅是一种唯象的处理,十分不严格。近年来发展了各种非局地的对流理论,并且证明对恒星的结构和演化、恒星的振动性质有重要的影响(N. H. Baker, 1987)。(7)恒星物质的不透明度和物态方程对于恒星结构和振动性质有重大影响。近年来人们认识到重元素特别是铁元素对不透明度的贡献十分重要。在物态方程的研究中,人们认识到压强电离效应和非理想效应的考虑十分重要,而物态方程对不透明度、及产能率的影响又很明显。由于这些进展,使得长期存在的太阳中微子问题、仙王座 β 星振动机制问题基本上得到解释(C. A. Iglesias, 1991; D. G. Hummer, 1988; D. Mihalas, 1988和W. Dappen, 1988)。

理论恒星物理取得了一些进展,但是至今仍然还有许多问题没有得到满意的解决,它们可能成为未来恒星物理主要热门的研究课题,这些问题有:关于星风的机制,特别是晚型温度较低的红巨星的星风机制;关于红巨星例如Mira星以及AGB星的振动机制;关于相接双星中的物理过程如能量交换、物质的运动及演化的性质;关于一些O、B型星突然产生气壳的机理;目前有多种非局地对流理论,并且得到的超射的程度很不相同;类太阳恒星表面大气层中产生大面积黑子、耀斑等活动现象的机理等等。

参考文献

- 1 Arbett W D. Thielemann F-K, Ap J, 1985, 295, 589
- 2 Frank J, King A R, Raine D J. Accretion Power in AstroPhysics. Cambridge University Press, 1985
- 3 Chiosi C. Maeder A. Ann Rv Astrophys, 1986, 24, 329
- 4 Baker N H. Physical Processes in Comets, Stars and Active

Galaxies. Berlin: Springer-Verlag, 1987

- 5 Däppen W, Mihalas D, Hummer D G. Ap J, 1988, 332, 261
- 6 Hummer D G, Mihalas D. Ap J, 1988, 331, 794
- 7 Mihalas D, Däppen W, Hummer D G. Ap J, 1988, 331, 815
- 8 Huang R Q, Taam R E. A Ap, 1990, 236, 107
- 9 Igciasias G A, Rogers F J. Ap J, 1991, 371, 173
- 10 Lie Y A. Ap, 1992, 257, 133

(云南天文台黄润乾研究员撰)

吸积盘 accretion dish 当今,在天体物理研究的众多领域中,包括原始太阳星云、恒星形成、双星系统、类星体和活动星系核等,都可遇到吸积盘,它对解释许多观测现象正显示着重要的作用。

吸积是大体因自身引力俘获周围物质的过程。相对于中心天体,当物质没有角动量时,应沿径向向它下落。但如果有很大角动量,物质应在其周围绕转,形成一个盘。绕转遵循开普勒定律,角速度向外递减。由于物质有粘滞性,较差旋转的盘相邻层之间产生切向应力,在其作用下,盘内每一层物质的角动量向相邻的外层转移,结果盘内任一物质元的角动量在减小,它的开普勒轨道缩小,物质螺旋式地逐渐掉向中心天体。这种在天体周围由绕它旋转、并逐渐向它下落的物质形成的盘状结构物称为吸积盘。

在物质螺旋式地向中心天体下落的过程中,物质的引力势能转换为动能和热能。因此吸积盘提供了一种提取引力势能并转化为辐射的机制,提取的能量等于盘最里面轨道处的引力势能的一半。对于致密天体周围的吸积盘,可提取的能量是巨大的。引力势能的转换常以静质量转换为能量的形式表示。对于中子星,转换效率约为10%;对于黑洞,约为10%~40%。作为对照,4个氢原子核聚变为一个氦原子核的转换效率仅为0.7%。于是,致密星吸积周围物质可释放出比核反应大得多的能量。

对吸积重要性的认识最初是与太阳系起源的研究相联系的。20世纪60年代类星体和X射线源的发现,促使天文学家开展了对致密天体吸积过程的广泛研究。1964年,沙皮特(E. E. Salpeter)和柴道维奇(Ya. B. Zel'dovich)最早考察了大质量黑洞吸积产生类星体巨大光度(~ 10^{12} 太阳光度)的可能性。1967年,史克洛夫斯基(I. S. Shklovsky)提出,明亮的银河X射线源天蝎座X-1可能是包含一个正在从其伴星吸积物质的中子星的双星。1968年普莱特盖斯特(K. H. Prendergast)和伯比奇(G. R. Burbidge),以及1969年林登塔尔(D. Lynden-Bell)分别指出,在X射线源和激变变星的双星中以及银河系中心的大质量黑洞周围吸积盘的重要作用。1972年普林格(J. E. Pringle)和里斯(M. J. Rees),1973年夏库拉(N. I. Shakura)和逊雅也夫(R. A. Sunyaev)详细讨论了吸积盘的结构并计算了辐射谱,奠定了吸积盘的理论基础。

为了研究吸积盘的结构,必须建立一组方程,包括描述质量守恒、角动量守恒、能量守恒的方程以及输能方程、垂直盘面方向的流体静力平衡方程、物态方程。由气体的粘滞性产生的切向应力作简化的处理。在吸积盘理论中,最初研究的是稳恒薄盘模型,即盘的结构不依赖于时间,任一点处盘的厚度比到盘心的径向距离小得多,并且在垂直于盘面方向上是光学厚的。对这种最基本和简单的模型,上述的方程化成一组代数方程,并可求得各个物理量(温度、密度、压力、径向速度等)在盘内分布的分析解。在假定盘内每一面元都象黑体那样辐射的近似下,计算整个吸积盘发射的累积连续谱,在能流最大的中介频段区,谱具有幂律的形状,频谱指数为1/3,这被看成是稳恒吸积盘模型的特征谱。从观测上验证吸积盘的存在和理论的最佳途径之一,是在相当宽的波段(从紫外到可见光红区,甚至红外)分别用卫星和在地面上观测,同时获取矮新星的光谱。由于矮新星是变星,同时观测至关重要,以至这类资料颇为难能可贵。迄今已发现有几颗矮新星的连续谱与吸积盘的特征谱符合。对于作为双星系统的轨道倾角很

大的那些矮新星,伴星如果遮掩白矮星周围的吸积盘,则光变曲线能反映出盘的亮度分布,也即温度分布,从而带来有关吸积盘的最详细的信息。对矮新星蝎星Z在爆发阶段的掩食观测,已证实了盘的温度分布与稳恒薄盘模型的理论温度分布很接近。在有些类星体和活动星系核的紫外光谱中也观测到应属于吸积盘的成分。

稳定性问题是吸积盘理论的一个重要研究课题,它是研究稳恒模型对小扰动是否稳定的问题。稳恒模型有两个重要前提:其一是热平衡;其二是吸积率不变。使这两个前提受到破坏的扰动分别称为热扰动和长期扰动,由此产生的不稳定分别称为热不稳定和长期不稳定(或粘滞不稳定)。1973年,普林格、里斯和帕乔捷克(A. G. Pacholczyk)得出吸积盘外部光学薄且气体压力占优势的区域是热不稳定的,应很快过渡到光学厚的区域。1974年,赖特曼(A. P. Lightman)和厄特莱(D. M. Eardley)最先指出,光学厚且辐射压力占优势的吸积盘最里面的部分是粘滞不稳定的,薄盘应隆起,形成光学薄、几何厚的内区。用粘滞不稳定性可定性解释矮新星的宁静和爆发两种状态之间的演变。

对类星体和活动星系核采用的大质量黑洞模型中,为了解释巨大的光度,吸积率必须很大,以至在吸积盘内邻近黑洞的部分辐射压力占优势,盘的厚度与径向距离达到同一量级,薄盘近似破坏。1980年,帕钦斯基(B. Paczynski)、维塔(P. Wita)、雅洛捷斯基(M. Jaroszynski)和阿勃拉莫维茨(M. A. Abramowicz)等最先提出了厚盘模型。与薄盘模型相比,厚盘模型无论就物理因素而言,还是数学处理,都复杂和困难得多,目前理论发展还处于初级阶段,但它有可能解释类星体和活动星系核的超爱丁顿光度和喷流等重要现象。

研究具有强磁场的中子星($\sim 10^{11}$ mT)和白矮星($\sim 10^5 - 10^6$ mT)的吸积过程组成了吸积盘理论中另一大难题,它涉及强磁场中等离子体的行为,对于解释X射线脉冲星和磁激变星的一些观测特征起重要作用。

吸积盘还出现在原恒星和主序前恒星的研究领域。在恒星形成的过程中通过在星周形成一个盘来摆脱恒星本身过大的角动量。金牛T型星的红外超现在一般归因于这种盘的存在。观测表明,与致密星周围的吸积盘不同,由于吸积率低,原恒星周围的盘自身产生的能量很少,主要受中央星辐射的加热而发光。

吸积盘理论中最不确定的因素是对产生盘粘滞的机制,从而如何相应地描述粘滞应力缺乏可靠的了解,这在很大程度上影响着吸积盘的结构。由于理论探讨本身的难度,且观测上难以验证,致使这方面的研究进展缓慢。目前认为,磁流体湍流是重要的机制。厚盘理论,对类星体和活动星系核以及对主序前恒星喷流的解释、强磁场天体的吸积和辐射过程、粘滞性机制的探讨等,将成为推动吸积盘理论发展的关键。

参考文献

- 1 Prihgle J E. Ann Rev Astron Astrophys, 1981, 19: 137~162
- 2 Franh J, King A R, Raine D J. Accretion Power in astrophysics. Cambridge University Press, 1985, 72~109
- 3 Treues A, Maraschi L, Abramowicy M. P. A P, 1988, 100: 427~451

(南京大学朱慈盛副教授撰)

新星 nova 是亮度突然激增超过10个星等,即增亮1万倍以上,随后又逐渐减弱,慢慢恢复到原来的亮度水平的一种类型的激变变星。新星并非顾名思义的新诞生的星,也不是新出现又复消失的星。

在中国河南殷墟出土的甲骨中,有一段卜辞:“七日己巳夕出新大星并火”,还有一片刻有:“辛未毁新星”。天文学史家认为这两段文字记载的是,3300多年前的商代在天蝎座心宿二附近天区得见的一次新星爆发事件,以及随后的亮度减弱而不复见的天象记录。中国古代将新星称为客星或星学。在两千多年的编年史中,有丰富的新星现象的记录。《汉书·文献通考》中有:“汉高

帝二年七月有星孛于大角,旬余乃入”;《汉书·天文志》中有:“汉元光元年六月客星见于房”。现公认此乃公元前204年于牧夫座大角附近和公元前134年于天蝎座天区发生的两次新星事件。自汉代以来,对客星的观测和记录已成为中国天文学家的一项重要职责。到17世纪末,二十四史中可靠的客星记录达60多项,其中多是新星。

根据新星的光变特征,可分为快新星、慢新星和极慢新星三大类。快新星通常在几日之内,亮度骤增 $10^4 \sim 10^5$ 倍,到达极大亮度后,随即亮度减弱,经过几个月后,亮度恢复到爆发前的水平。慢新星的亮度上升和下降的速度都比快新星要慢得多,而极慢新星的减弱过程甚至长达几十年。典型的光变曲线可分为爆前、初升、极大前停滞、终升、亮度极大、初降、过衰期、终降和爆后共9个阶段。新星的亮度突变是一种爆发过程,其能量释放平均达 $10^{45} \sim 10^{46}$ erg/s。抛射的物质约为 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 太阳质量,抛射速度 $500 \sim 2000$ km/s。根据爆发损失物质的量,可知新星的激变并非整体爆发,仅是损失了极少一部分物质。由于新星是变光之星,所以新星的取名从19世纪60年代起纳入变星命名系统。例如,1901年英仙新星定名为英仙GK;1975年天鹅新星定名为天鹅V1500。

一般而言,新星都具有典型的光谱演变规律。大致可划分为爆前谱、极大前谱、主谱、漫强谱、猎户谱、星云谱和爆后谱,共七个阶段。新星光谱的主要特征是发射线很宽、吸收线紫移很大。爆前谱呈高温连续谱。极大前谱出现吸收线和弱发射线,谱线宽。主谱则有显著发射线,膨胀速度加大。漫强谱中的谱线位移更大。猎户谱显示出更高的激发度和电离度,膨胀速度达到极大值。进入星云谱阶段的特征是连续谱消失,出现氧、氮等离子的禁线。爆后谱则往往出现类似白矮星的宽吸收线。

新星的爆前天体是一种类型的密近双星,其中一个子星是冷红星,另一个子星是白矮星。在演化过程中,白矮星吸积冷红星的物质,吸积率为每年 10^{-3} 太阳质量。红星物质在白矮星表面形成富氢的气壳。气壳底部受压而加热,发生热核反应,导致表层爆发,亮度骤增,遂出现新星事件。

根据统计资料,银河系每年出现25~50个新星事件。由于新星多诞生于银道面附近的恒星密集天区,星际消光和距离遥远等因素的影响,藉助星空照相巡视以及利用望远镜的目视搜寻,在地球上每年发现的新星多则5~10个,少则仅2~3个,其中极大亮度达到肉眼可及者就更少。20世纪头90年,观测到的极大亮度可与北极星相比的只有1901英仙GK、1918天鹰V603、1920天鹅V476、1925绘架RR、1934武仙DQ、1936蝎虎CP、1942船尾CP、1946北冕T和1975天鹅V1500共9个,平均每10年才有一个。所以,亮新星确是罕见的天象。

在激变变星中,还有几种爆发天体,它们的光变特征、光谱演变和爆发机制均和新星相似,即再发新星、类新星、矮新星、X射线新星和射电新星。再发新星是观测到不止一次爆发的新星。两次爆发的时间间隔多为十几年或几十年。爆发时的光变幅比新星的小。现公认,作为再发新星的爆前天体的密近双星中的红巨星的物质损失率高于新星中的,白矮星的物质吸积率也快于新星中的。现代天文学已记录到的再发新星仅十几个,其中著名的如北冕T、天蝎U、凤凰T、宝瓶VY、蛇夫RS、麒麟V616、人马V1017、天鹅V404。类新星的光变幅度比新星和再发新星的都小,两次亮度激变的时间间隔更短而不规则。它们往往具有一个红巨星和一个蓝星的叠加光谱,所以也称共生星,其典型代表是仙女Z、天鹅BF、英仙AX。矮新星是爆发规模更小,爆发持续时间只有几日、两次光变的时间间隔仅有几周或几个月的激变变星,其典型代表是天鹅SS、双子U。X射线新星则是在X射线波段出现类似新星光变特征的偶现源;射电新星是在射电波段辐射爆发的偶现源;这两种非光学新星的光学对应体也都是密近双星。正因为激变变星中有多种类似新星的的天体,所以往往将新星称为经典新星,以区别于其他的银河新星。

国际天文数据中心(CDS)公布的“银河新星总表”,记载到

1987年底止观测到的经典新星、再发新星、类新星、矮新星和X射线新星共277个。

参考文献

- 1 Payne Gaposchkin C. Galactic Novae, 1957
- 2 Friedjung M. Novae and Related Stars, 1977
- 3 Duerbeck H. W. A Reference Catalogue and Atlas of Galactic Novae, 1987
- 4 Bode M. F. et al. Classical Novae, 1989

(北京天文台博士生导师李竞研究员撰)

超新星 supernovae 1934年,瑞士兹威基(F. Zwicky)和德国巴德(W. Baade)根据13个河外星系内的爆发天体的观测资料的分析,确认宇宙中有比新星更激烈、释放能量更大、抛射物质更多、光变幅更大的恒星质量的星体的突变爆发,并将这种天体取名为超新星。

一个恒星爆发成为超新星过程中,当光度极大时,达到 $10^7 \sim 10^{10}$ 个太阳光度,即可和整个星系的光度相当。超新星爆发时将恒星物质以百分之几的光速抛向星际空间,带走 10^{51} erg的动能,相当于 10^{14} t TNT的能量。其电磁辐射仅占爆发释能的一小部分,99%以上的能量由中微子携带散掉。超新星的光学观测表明,爆发之后2~3周内,光度达到极大,光变幅超过17个星等,即增亮了千万倍至上亿倍。随后,在几个月内或更长的时间,暗弱下去,不复见。超新星将核心内部在演化过程中经热核反应合成的重元素抛向空间,加速了银河系的化学演化。有的超新星将恒星物质全部抛散,也有的只抛射了外层,形成星云状的超新星遗迹,成为射电源和X射线源,而内核物质经引力坍缩成为白矮星、中子星或黑洞。超新星为宇宙中的一个短暂天象。

中国历代史书中载有极其丰富的天象观察资料,30~40年代,相继确认1054年天关客星、1572年阁道客星(西方称“第谷新星”)和1604年尾分客星(西方称“开普勒新星”)都是超新星。随着射电天文兴起之后,进一步证实这几颗历史上的超新星的遗迹至今仍是强射电源。386年东晋南斗客星、393年东晋尾中客星、1006年北宋周伯星和1181年南宋传舍客星等中国历史文献中的天象,均为银河系内的超新星事件。此外,还发现强射电源仙后A是迄今已知的最年轻的银河系超新星遗迹,估计爆发于1680年前后,但当时北半球的东西方天文学家均未曾得见。

1936~1941年,美国帕洛玛山天文台在兹威基主持下,用口径45cm/65cm施密特望远镜系统地巡视北天星系选区,发现了19个河外星系超新星,积累了较完整的光度变化和光谱特征的实测资料。从1958年起,又用口径120cm/180cm施密特望远镜搜寻河外星系超新星,这项超新星巡天课题一直延续到1975年。1961年,在国际天文学联合会上组建了超新星巡天组织,先后有美国、匈牙利、意大利、瑞士、俄罗斯、智利等国的十几个天文台参加。从1885年到1992年底的百余年间,共记录到河外星系超新星887个。主要的统计结论:(1)每个平均亮星系每290年出现一个超新星,每个亮星系团的成员星系每240年出现一个,随着自动化巡天技术的进步和推广,搜寻过程中人为的遗漏现象的减少,诞生率数值将会有所提高,但超新星为罕见天象的结论仍将不变。(2)存在超新星诞生率偏高的星系,它们多系巨型旋涡星系,例如银河系的超新星诞生率可能高达每50年1个。(3)根据光谱分析和光变特征,超新星分为I型和II型两类。I型超新星,光谱特征为贫氢,其前身为星族I老年恒星。根据硅、氧、氮的丰度,又可分为Ia、Ib和Ic 3个次型。II型超新星,光谱特征是富氢,其前身是星族I年轻的大质量恒星,根据光变曲线和连续谱的形态,细分为II₂和II_p两个次型。

恒星的演化学说和能源理论指出,恒星从星前体和原恒星演化为一个主星序恒星的主要标记,是以内核中氢原子聚变为氦原子的核反应为能源。这一阶段在恒星演化史上持续时间最长,占90%以上。当恒星内核的氢燃烧尽后,核心区收缩,致使核心区外围温度增高,重又点燃外围区域的氢氦聚变。同时,核心

区也因收缩而增温,逐次出现氮变成碳,碳变成氮、氧和硅。最后,硅聚合成铁。此时,形成一个不再放热而是吸热的铁核。恒星最终收缩为一个不再产能只是释放余热的白矮星。一个稳定的白矮星的质量极限是1.4个太阳质量,超过极限质量则将坍缩为中子星或黑洞。

现代超新星理论认为,I型超新星的前身是由一个白矮星和一个小质量伴星组成的密近双星。当伴星的物质为白矮星吸积,伴星流失的物质逐渐增加白矮星的碳氧核心质量,破坏了稳定性,碳在白矮星的核心被点火而爆炸,致使白矮星完全被炸毁。释放出超过 10^{51} erg的能量,以每秒超过10 000km的速度将白矮星所含的多种重元素及其同位素抛向星际空间,这一理论所描述的I型超新星爆发图象,已为测光和分光观测资料所支持和验证。

II型超新星的前身则是质量大于8个太阳质量的大质量、高光度的星族I恒星。当演化到铁核心的质量大到接近1.4个太阳质量时,热核聚变速率加快,在时标短于1d的时间内,形成的核心区在时标为0.1%的瞬间坍缩,坍缩的速度达到1/10光速。坍缩核之内,在时标为1%的瞬间,产生出大量的中微子,总数可达 10^{58} 个,将坍缩形成的引力能的大部分,以接近光速的高速度带出恒星,射向宇宙四方。此刻,呈现的天象是诞生了一个转瞬即逝的中微子星。当坍缩核的密度达到 2.7×10^{14} g/cm³,即成为一个中子星。恒星外层下落的物质碰到致密核后,向外反弹,产生激波,经过几个小时或几天后到达恒星表面,把大质量恒星的某个半径以外的七层物质全部以每秒百万千米的速度四向抛射。同时,光度骤增,成为一个光学波段得见的II型超新星。大质量恒星爆发成为超新星的理论也得到了实测的考验。

超新星在极大光度时刻的巨大光度,即便它处在100Ms差距(约3亿光年)的遥远天边,仍可见,是为光学波段可见的最远距离的单个天体。半个世纪的超新星巡天得到的一个共识是超新星,特别是I型超新星,在光度极大时刻的本徵光度的弥散不大,其平均光度约为绝对星等-20.0。可将之作为指示距离的标准烛光,并用之订正哈勃常数,为修订宇宙距离尺度作出贡献。

参考文献

- 1 Zwicky F. Supernovae, Handbuch der Physik, 1958, 766
- 2 Zwicky F. Supernovae, Stellar Structure, 1965, 301
- 3 Maza J. et al. Astrophysical Journal, 1976, 204, 519
- 4 Clark D. H. et al. The Historical Supernovae, 1977
- 5 Bartunov O. S. et al. Astrophysics and Space Science, 1986, 122, 343
- 6 Wheeler J. C. et al. Supernovae, 1990
- 7 Arnett W. D. Astrophysical Journal, 1982, 254, 1

(北京天文台博士生导师李竞研究员撰)

大麦哲伦云超新星 1987A supernova 1987A in lmc

1987年,南半球的观测者得见的大麦哲伦云中出现了肉眼可见的超新星,命名为SN 1987A。这是自从望远镜于1609年发明以来,在地球上能见到的最亮的超新星。天文学家最近的一次观察到的银河系超新星是1604年,出现在蛇夫天区的尾分客星。那时,望远镜尚未问世,留给后世的只是肉眼观察的描述记载。1885年,在仙女大星云中发现的超新星,最亮时可达4.3视星等。当时,既不知道该星云是银河系以外的旋涡星系,也尚未认识超新星的本质。这个在现代天文学史中的第1个记录到的河外星系超新星也只有藉助理望远镜的目视测光资料。大麦哲伦云是银河系之外的最近的一个伴星系,距离我们50 Pm差距(约合16万光年)。它在天球上投影在南天极附近,远离恒星密集的银道带,受到的星际消光影响很小,具有远比处在银道带附近的银河系天体更优越得多的观测条件,成为第1个在光学、红外、紫外、射电、X射线和γ射线波段均有观测资料的全波段探测的超新星。大麦哲伦云是一个矮星系,质量仅及银河系的1/10。它的超新星诞生率比银河系小得多,平均每1 000年出现1个。所以,大

麦哲伦云中超新星爆发是千载难逢的罕见天象。可以说, SN1987A 的探测和研究是现代天文学史上的重大事件。

1987年2月23日夜,设在智利的美国拉斯坎帕纳天文台的两位天文学家和新西兰奥克兰的一位天文爱好者,各自独立地发现了出现在大麦哲伦云中的超新星 1987A。次日,国际天文学联合会(IAU)天文电信中央局向全世界的天文台站和机构发出电传和电报,通报这一天象的发现。当时,SN1987A 的视亮度正从 6 星等上升到 5 星等,再增亮至 4 星等,已成为大麦哲伦云中最亮的天体。最初的分光观测表明它是一个富氢 I 型超新星。接着,许多北半球的天文学家飞往南半球的天文台站,和那里的天文学家启动一切适宜的天文仪器对超新星连续跟踪探测。

SN1987A 爆发后的观测资料 and 爆发前的该天区的照相天图及光谱档案的对比研究,得知爆前天体是一个蓝超巨星 Sk-69 202。爆发之前,它的亮度为 12.3 星等,光谱型 B3(即是表面温度高达 $1.6 \times 10^4 \text{K}$),光度级 Ia(即亮超巨星,比太阳亮 11 万倍),半径比太阳的大 40 倍,质量是太阳的 19 倍。这一证引引起极大兴趣。在此之前,超新星的爆发机制理论认为, I 型超新星的爆前天体是大质量的红超巨星。SN1987A 事件却表明,大质量年青恒星还可能在红超巨星阶段宁静地以星风形式抛射掉富氢外壳,先演变成蓝超巨星,再爆发成为 I 型超新星。1988 年, SN1987A 爆发一年后,观测到爆前天体抛射到星周空间的恒星物质的环状反射回光,证实了上述的红超巨星先演变成蓝超巨星再爆发的推论。

按照 I 型超新星的爆发理论,当一个质量大于 10 个太阳质量的恒星其内核中氢和氦都燃烧殆尽时,中心区聚合成铁核。如果铁核的质量大到接近 1.4 个太阳质量时,核心区在时标为 1/100s 的瞬间坍塌。坍塌核之内,在时标为 1/1 000s 的刹那产生出大量的中微子,总数多达 10^{53} 个。中微子将坍塌所释放的引力能的大部分,以接近光速的高速带出恒星,射向宇宙四方,在几十秒内,一轰而散,于是出现在宇宙中的首先是一个中微子星。在地球表面上每平方厘米的土地上,海洋上和人体上均有上百亿个中微子穿过。与此同时,外部核继续坍塌,与内部核碰撞,产生激波并向外反弹,冲破外部核,以 1/10 光速的速度继续向外冲,贯穿整个恒星,将恒星物质加热到几十万度,使恒星整体膨胀,成为超新星。最早记录到 SN1987A 开始增亮的时间是 2 月 23 日世界时 10h35min。在此之前 3h,即世界时 7h35min,世界上 3 个高能粒子实验站分别记录到来自宇宙远方的 11.8 和 3 个中微子,前后历时 12.5、5.5 和 10s。这是天文学史上第一次直接检测到一个超新星爆发之前一瞬间,内核坍塌产生的中微子。它们带走的能量约 $3 \times 10^{53} \text{erg}$ 。

在发现后的最初几个小时,视亮度从 6 星等升 5 星等、4 星等,随后稍微变暗,到 3 月初,亮度回升。到 5 月 18 日,即爆发后第 84 日,亮度增至极大值,达 2.9 日视星等。往后,以每日 1/100 星等的减光率,缓慢而持续地变暗。SN1987A 的光变曲线可以用内核抛散 0.07 个太阳质量的 ^{56}Ni 和 ^{56}Co 同位素的衰变释能加以描述。在爆发两年之后的光变曲线上显示出可能还有 ^{57}Co 、 ^{44}Ti 、 ^{22}Na 等慢衰变元素的释能。SN1987A 以光子形式辐射的能量为 $1 \times 10^{29} \text{erg}$ 。到 1992 年底,即爆发 5 年多,SN1987A 的视亮度已暗弱到 19.9 星等,只及极大亮度的六百万分之一,为爆前天体亮度的千分之一。

SN1987A 的光谱分析提供了抛射物质的速度和化学组成的信息。爆发的最初时刻,光谱反映的是最外层的抛射物质的动态,速度达 20 000~40 000 km/s。随着外层逐渐稀薄,光谱开始揭示 3 000~5 000 km/s 的较慢速度的深层。SN1987A 继续膨胀,光球消散,演变为一片星云。到 1987 年 11 月,已得见来自深层的重元素镍、钴和氢的离子发射线。根据完整的光变曲线和丰富的光谱资料,求出爆发抛射了 13 个太阳质量的恒星物质,爆发动能达 $1 \times 10^{51} \text{erg}$ 。

SN1987A 爆发后的最初几周,首先在射电波段探测到与星周物质相互作用而形成的同步加速辐射。由于 SN1987A 的膨胀

气壳、星周物质、大麦哲伦云的星际物质、大麦哲伦云和银河系之间的星系际物质,以及银河系的星际物质具有彼此不同的相对运动速度,根据超新星的光学、紫外和红外光谱中谱线轮廓和多普勒位移,可以探测观测者和 SN1987A 之间,沿视线方向的各个部位的星际物质的化学成份、物理状态、空间分布、运动速度等信息。最靠近 SN1987A 的星周是爆发之前的蓝超巨星流失的速度为 500 km/s 的低密度星风物质。再向外则是红超巨星阶段流失的速度为 10 km/s 的高密度星云物质。高密度气壳的内缘受到蓝超巨星的快速星风挤压,而高密度气壳的外缘因演化成红超巨星之前的主序星流失的 1 000 km/s 的高速度星风的吹压,形成一个星际物质稀薄区。SN1987A 爆发一年之后,照相观测得见星周呈现出两个膨胀的同心光环,这是星周物质相互作用而形成的星际尘埃反光回波。内环半径 120s 差距,外环半径 320s 差距。到爆发第 2 年之后,又在地面和空间检测到更靠近 SN1987A 的反光回波。

到 1992 年 2 月底,即 SN1987A 进入爆发后第 6 年时,它已从一个由重元素的放射性衰变而发光散热的超新星逐渐演变为与星周物质相互作用的超新星遗迹。按照 I 型超新星的爆发理论,内核坍塌将形成一个致密天体,或是中子星,或是黑洞。如果是前者,它将表现为一个脉冲星。然而,在射电波段和光学波段的巡视、搜索,却始终未能发现理应存在的致密天体。这个谜尚待进一步揭晓。

SN1987A 的发现和观测提供一个充分利用现代天体物理的技术和方法,全波段和全过程地研究超新星的极为难得的机会。现有的恒星演化最终阶段的理论,超新星爆发机制以及超新星爆发后的演化学说,均经历了考验,并得到了完善和丰富。

参考文献

- 1 Woosley S E, et al. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1986, 24: 205
- 2 Arnett W D, et al. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1989, 27: 629
- 3 Danziger I J, et al. SN1987A and other Supernovae, 1991
- 4 Staveley-Smith L, et al. Birth of a Radio Supernova Remnant in SN 1987A, Nature, 1992, 355: 147
- 5 Chevalier R A. Supernova 1987A at 5 years of age. Nature, 1992, 355: 691

(北京天文台博士生导师李竞研究员撰)

白矮星 white dwarfs 一类低光度、高密度、简并态的小体积恒星,恒星演化的晚期产物,是“死亡了的”恒星。根据恒星演化理论,当恒星经历体积膨胀,物质稀薄的红巨星阶段,抛射出大量物质后,其核心区的核能燃烧殆尽,它在自引力的作用下,突然坍塌,同时可能伴随大量的能量释放和物质的抛射。其结果,如果留下的中心部分质量小于 1.4 个太阳质量(m_{\odot}),则该恒星就成了白矮星。在白矮星内部,核反应已经停止,靠引力能转化为热能维持其能量辐射,并且缓慢地冷却。白矮星是处于稳定状态的恒星,在赫罗图上位于主星序下的左下角的广阔区域。它的典型的物理参数是:质量为 $0.6 m_{\odot}$,半径为 0.01 太阳半径(R_{\odot}),大小与地球相仿,密度为 $10^5 \sim 10^7 \text{g/cm}^3$ 。确定白矮星的主要要素是它们的半径大小。

白矮星的体积小,因而很暗。它们中的大部分表面温度高达 10 000 C 以上,辐射在可见光部分最强,因此呈白色。某些白矮星较冷,它们呈黄色乃至红色,但按其物理性质仍属白矮星。要观测到白矮星是相当困难的,自 1914 年发现第 1 颗白矮星,到 60 年代初,发现和研究工作进展不大。随后由于观测技术和处理方法的改进提高,白矮星发现的数目才迅速增加,到 1977 年底,已经达 500 颗左右。现在除了地面观测以外,还用 1978 年发射的国际紫外探测卫星(IUE)来发现白矮星。至今已经发现的白矮星有 1 000 颗以上(Shipman, 1989)。用分光法证认过的 500 余颗白矮星,已经编成专门星表(McCook, 1989)。这些白矮星有的是孤立

的单星,有的是星团成员星,有的是双星或聚星系统中的伴星,有的双星的两个子星都是白矮星。现在尚难估计银河系中白矮星的总的数量,据理论预测可能占到恒星总数的10%。

在白矮星研究早期,对于白矮星上的物质密度为何可达那么高难以解释。直到1926年福勒(R. H. Fowler),特别是1935年钱德拉塞卡(S. Chandrasekhar)才给予阐明。白矮星内部的物质处于简并态,引力坍缩可使白矮星内部达到 10^7K 的温度,在此高温下,原子的壳层电子全部被剥离,大量的自由电子与原子核紧密地挤合在一起,所以密度特高。白矮星的质量愈大,半径愈小(与主序星相反),物质密度愈高。据推算,无自转的白矮星的质量上限值为 $1.44m_{\odot}$ 。若白矮星具有快速自转的核,则此极限值稍大些,质量上限值还与化学组成有关。后来把 $1.44m_{\odot}$ 称作钱德拉塞卡极限。钱德拉塞卡由于在恒星内部结构和演化研究上的卓越贡献,获得了1983年度的诺贝尔物理学奖。

白矮星由于其物质密度极高,表面重力加速度也特别大,所以非常适合于用来检验广义相对论中光线的引力红移。白矮星作为恒星演化晚期的产物,是银河系中最老的恒星之一,我们可以寻找最冷的白矮星,计算它的冷却速率来确定银盘的年龄。近年来,有许多学者,如开帕尔(Kepler et al., 1991a, b)、方泰因(Fontaine et al., 1991)、伊坎(Isern et al., 1992)等人在白矮星冷却速率的计算方面做了大量工作,由白矮星测定的银盘年龄,采用不同模型得到了不同的结果。

白矮星按化学组成的不同,一般分为DA星(具有富氢光球)和非DA星(具有富氦光球)两大类。D表示简并态,A表示谱线中最强的是氢线。非DA星中,有DB,DO,DQ,DZ,DC,DP等类型,其中B表示有最强的氢谱线,O表示有电离氢线,Q表示有碳线,Z表示有其它元素,如金属谱线,C表示没有清晰的谱线,P表示谱线偏振,恒星有强磁场。这里所说的化学组成仅仅是对恒星外层大气而言,DA星因其外层吸积了足够的氢而显示出强的氢谱线。但是由于DA星与非DA星在质量和运动方面没有明显的区别,因此在吸积机制方面不应该有所不同。白矮星的微量元素,诸如C,N,O,Si,Ca和Mg等,它们的含量不同是极常见的。在冷的DA白矮星的大气中也发现了氮,当表面有效温度接近 11500K 时,氢层和氮层可对流而混和,有时候丰度 $N(\text{He})/N(\text{H})$ 高达20;而在表面有效温度处于 7500K 与 $1.15 \times 10^6\text{K}$ 范围内,则几乎没有富氮的白矮星(Bergeron et al., 1990)。

近来的研究表明,白矮星的质量分布范围是非常窄小的,平均值接近 $0.53m_{\odot}$,变化范围为 $0.43m_{\odot} \sim 1.05m_{\odot}$,DA与非DA星在质量上没有差别。白矮星的前身恒星质量可达 $8m_{\odot}$,白矮星的温度可用红外、可见光和紫外外观测来确定。至今测到的最热的白矮星是H1504-65,表面温度达 160000K ,DB白矮星的温度一般在 $24000 \sim 29000\text{K}$ 间,冷的白矮星温度很难测定,这一方面是因为冷的白矮星光度低,另一方面,更重要的是因为它们的光球处于部分简并态,对这类白矮星的模型大气,不能用理想气体状态方程计算。迄今搜索到的最冷白矮星是LP701-29,表面温度 4500K 。很少的(只占总数的百分之几)白矮星具有强磁场,强度范围在几个MG~几百个MG。已知磁场最强的白矮星是PG1031+234($>500\text{MG}$)。对某些白矮星能检测到小于 10^6G 的弱磁场,但测定很困难,为此已选定了一些这样的白矮星,专门检测它们的磁场强度。据理论推测,白矮星有像中子星那样的很高的旋转速度。假设像太阳那样的主序星,即质量为 $1m_{\odot}$,旋转周期为一个月,当它坍缩成为 $0.6m_{\odot}$ 、 $0.012R_{\odot}$ 的白矮星时,那么该星的旋转周期仅为 6min (赤道速度为 140km/s)。磁白矮星的旋转速度可由其磁场的变化来测定,这种变化表现为偏振图样的变化或谱线的变化(如塞曼位移变化)或者以上两种变化同时出现。但是有的白矮星,它们的旋转周期长达100余年,几乎不旋转(Schmidt等,1991)。

白矮星降温的机制问题还没有很好解决。目前认为,白矮星内充塞着的简并电子产生的电子气体压力与白矮星的自引力平衡,简并电子既阻止恒星的坍缩,使恒星处于稳定状态,又是热的

良导体,使白矮星几乎是一个等温体。白矮星的进一步演化仅是逐渐冷却,大小没有大的变化。在白矮星早期,其内部深处产生大量中微子,它一产生就立刻离开并带走能量,从而使恒星温度降低。当温度降到一定程度时,不再产生中微子,这时由光子向外传输能量。温度继续下降,外层对流开始了,对流又使物质很好混和而且深入到较内层,同时较低的温度引起简并电子范围的扩大,使对流层和简并电子层的两个边界相遇,电子向外迅速传递能量,简并带向外移动,对流线向表面退缩,直至恒星完全冷却。

白矮星内部的物质是层化的,由高密度产生的极大自引力导致其内部的物质分层排列,轻的元素诸如氢留在表面,重元素则下沉,核心呈晶体结构,即晶体化。引力作用净化了白矮星的外层,所以其谱线显示单纯的某一元素。

白矮星的起源问题还需进一步研究。行星状星云对白矮星的形成起着重要作用,这种星云被看成由红巨星坍缩成白矮星时抛出的壳层形成,但白矮星是否都有行星状星云产生呢?没有统一结论。近年有些人认为热的亚矮星类恒星也可以演变成白矮星,这类恒星没有行星状星云产生,在赫罗图上,它们位于行星状星云中央星与白矮星之间(Kawaler, 1987)。

白矮星的寿命为几十亿年,在此期间,白矮星将其核内贮藏的热量缓慢地辐射到空间,最终冷却成一个废躯,变成一颗黑矮星真正的恒星尸体。太阳从形成一颗恒星起,至今已有几十亿年历史,它变成一颗白矮星还需几亿年,到达黑矮星则需再经过几十亿年。

参考文献

- 1 Kawaler S D, et al. Sky, Telescope, 1987, 134
- 2 McCook G P, et al. The Astrophysical Journal Suppl., 1987, 65: 693~671
- 3 Shupman H L. Planetary Nebulae, IAU Symp. Kluwer Academic Publishers, 1989, 561
- 4 Bergeron P, et al. The Astrophysical Journal Letters, 1990, 351: L21
- 5 Fontaine G, et al. White Dwarfs. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991, 143
- 6 Kepler S O, et al. The Astrophysical Journal, 1991, 378: L45
- 7 Kepler S O, et al. White Dwarfs, Dordrecht. Kluwer Academic Publishers, 1991b, 143
- 8 Schmidt G D, et al. The Astrophysical Journal, 1991, 356: 270
- 9 Isern J, et al. The Astrophysical Journal Letters, 1992, 392: L23

(中国科学院上海天文台储宗元研究员、王家骥副研究员撰)

脉冲星 pulsar 是20世纪60年代天文学四大发现之一,它使得长期以来关于中子星的理论揣测成为观测事实,并使得致密星理论及恒星演化理论发展到一个新的阶段。脉冲星研究对于射电天文学、X射线天文学、宇宙射线天文学均产生重要影响,此外,它还成为星际空间研究及引力波探测提供了新的可能的观测手段。

1932年,查德威克(Chadwick)发现中子,同年,朗道(Landau)提出中子星设想。1934年,巴德(Badde)与兹威基(Zwicky)指出超新星爆发后的遗迹可能就是中子星。1939年,奥本海默(Oppenheimer)与沃尔科夫(Volkoff)建立了简并中子气的中子星模型。1967年,在脉冲星发现前夕,帕西尼(Pacini)提出了自转轴与磁轴相互倾斜的磁中子星模型。尽管如此,中子星研究长期以来还是没有受到普遍重视。

1967年,休伊什(Hewish)领导剑桥大学射电天文台进行一项射电流星际闪烁的研究。同年8月,贝尔(Bell)观测记录到一串来自天体的规则脉冲信号,这就是第1颗被发现的脉冲星PSR1919+21。休伊什等至1968年2月宣布了这一发现,立即便

轰动国际天文界。此后,多颗脉冲星相继被发现,掀起了一股巨大的观测与研究脉冲星的热潮。

迄今为止,发现的脉冲星已逾 500 颗,多集中于银道面附近。脉冲星具有高度稳定的周期,大多数介于几十 ms 到几 s 之间。此外,绝大多数脉冲星周期缓慢增长,周期变率约为 $10^{-13} \sim 10^{-15}$ 。脉冲星射电辐射呈高度偏振性,具有幂律谱。根据脉冲星的观测特征,戈尔德(Gold)于 1968 年令人信服地论证了脉冲星即高速旋转的磁中子星,使得多年来关于中子星的理论预言终于被证实,这也正是脉冲星最重要的意义所在。

脉冲星表面磁场为偶极磁场,场强高达 $10^{11} \sim 10^{13} \text{G}$,内部密度达 $10^{14} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。通常自转轴与磁轴相互倾斜,由此形成射电辐射的“灯塔效应”。其射电辐射性质为非热致辐射,能量主要来源于自转能的消耗,因而引起自转周期的缓慢增长。关于灯塔效应的几何结构,主要有两类模型,一类是极冠模型,另一类是相对论成束模型。前者认为辐射源位于脉冲星磁冠区,并沿接近磁轴方向产生辐射。后者认为辐射源位于光速圆柱附近,例如位于光速圆柱与磁赤道面交汇处。从近年的观测资料与研究趋势看,极冠模型逐渐取得主导地位。

关于中子星磁场理论,早期为真空磁偶极场模型(如帕西尼模型)。1969 年,哥德雷西(Goldreich)与朱林(Julian)提出了等离子体磁层模型,后被普遍称之为“标准模型”。该模型认为,高导电性的旋转磁中子星,在磁场方向非平衡静电力的作用下,会产生表面电荷,导致沿磁轴及开放磁力线方向的高能粒子流,产生稳定的星风,并进而形成等离子体磁层。按准直模型(磁轴与自转轴平行)估算,星风携带的能量大体与垂直脉冲星真空场磁偶极辐射能量相当。当然,所谓标准模型并非成熟的脉冲星理论,持异议者大有人在。如迈克尔(Michel)认为,磁场中电荷分布最终将使非平衡电荷消失,因而一个准直模型将是一个丧失辐射机制的“死模型”。

贝克尔(Becker)与朗金(Rankin)等人发现脉冲星射电辐射束结构包含两种成分:狭窄的核心束及中空的锥面辐射。进一步分析表明,锥面辐射是极冠发出的相对论粒子沿磁力线运动所产生的相干曲率辐射。这种辐射具有高度偏振性,偏振面平行于磁子午面。随着脉冲星的高速自转,磁子午面也相应旋转。莱恩(Lane)与曼切斯特(Manchester)利用这一特性成功测量了 100 余颗脉冲星的倾角。朗金还指出,核心束宽度等于极冠区开放磁力线的张角,这一性质同样可用来测量脉冲星的倾角。从报道看,以上两种方法的测量结果有很好的-致性。

迄今没有发现周期很长及磁场很弱的脉冲星。1986 年,劳莱(Rawley)等人根据观测统计结果指出,脉冲星存在的临界条件为 $B/P^2 \sim 2 \times 10^{11}$ 。这样的临界条件在 $\lg - \lg P$ 分布图上对应于所谓“死线”(dead line),死线以下为脉冲星空白区,称为“死区”(grave yard)。司徒劳克(Sturrock)、鲁德曼(Ruderman)及贝斯金(Baskin)等人提出,脉冲星的射电辐射主要起源于极冠区正负电子对的簇射过程。由此也可导致临界条件,且理论估值与观测结果比较接近。

关于脉冲星的演化,最重要的参量就是周期变化率。对于孤立的常规脉冲星,由于能量消耗,周期缓慢延长,因此可由周期及其变化率估算脉冲星年龄。甘(Gunn)与奥斯切克(Ostriker)定义脉冲星减速年龄(Spin-down age)为

$$\lambda = P/2\dot{P}$$

他们测量了 14 颗脉冲星的减速年龄与磁场,表明磁场随年龄的增长而减弱。

另一类演化参量是银面距 Z 及其变化率 \dot{z} 。根据统计结果,通常认为,绝大多数脉冲星都是诞生于银道面附近,此后将向两侧高速运动,总体平均速度约为 $200 \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。莱恩等人由此定义脉冲星的动力学年龄(kinetic age)

$$t_k = z/\dot{z}$$

通常假定脉冲星磁场随时间作指数衰减。设时间常数为 t_d ,它可由年龄数据推出。莱恩等人比较了一些脉冲星的减速年龄与

动力学年龄,得出结论:要使这两种年龄数据与理论曲线拟合,磁场衰减常数应为 $2 \times 10^6 \sim 10^7 \text{a}$ 。目前大多数文献采用的典型数值为 $5 \times 10^6 \text{a}$ 。当然,也不能排除磁场不是按指数律衰减的可能。

两种年龄的差异,显示了减速力矩的衰减,通常将其归因于磁场的衰减。但不少人持有异议,如昆特(Kundt)、坎迪(Candy)、布莱尔(Blair)及贝斯基等。如脉冲星辐射以磁偶极辐射为主,则减速力矩可表示为

$$N = I\dot{\Omega} = \frac{2}{3c^2} B^2 R^6 \Omega^3 \sin^2 \alpha$$

式中, I 为转动惯量, Ω 为角速度, α 为倾角。此式表明,减速力矩除磁场外,还与其他因素有关,如倾角。因此减速力矩的减小,可能意味着脉冲星的自转轴与磁轴有渐趋平行的演化趋势。莱恩、曼切斯特及朗金用不同方法测量了一批脉冲星的倾角,从他们的共同样品看,测量结果比较一致。但为假设倾角按指数律减小,要与测量数据拟合较好,时间常数须达 1 000 万年,这显然不足以对减速力矩的衰减产生足够贡献。

若非单纯磁偶极辐射,则减速力矩可一般表示为

$$N = \frac{2}{3c^2} B^2 R^6 \Omega^3 f(\alpha)$$

或改写为

$$PP' = \left(\frac{8\pi^2 R^6}{3c^2 I} \right) B^2 f(\alpha)$$

后一式可与观测相比较。仍然是莱恩、曼切斯特与朗金等人的结果表明, α 与 PP' , 因而与 N 无明显相关性。这表明,减速力矩的减小确实主要起因于磁场的衰减,因而也否定了倾角逐渐减小的演化趋势。

张家铝等人认为,晚期恒星的坍缩过程中,两轴平行的状态不稳定,有倾角增大的趋势,这一观点可从莱恩等人的结果中得到一定程度印证。

近年来脉冲星研究的热点逐渐转向毫秒脉冲星、X 射线脉冲星及脉冲双星。迄至 1991 年,已发现的毫秒脉冲星与脉冲双星共 40 多颗,已确认的 X 射线脉冲星 30 多颗。近年的观测表明,毫秒脉冲星、脉冲双星及 X 射线脉冲星之间有着强烈的相关性。首先,它们有一些共同的观测特征,例如周期通常较短,表面磁场通常较弱,并常伴有 X 射线辐射。在 $\lg B - \lg P$ 图上,它们大多远离一般脉冲星密集区。特别是,它们的脉冲周期普遍有稳定减小的趋势,这与大多数脉冲星情况相反。进一步统计分析还指出:除毫秒脉冲星外,已知脉冲双星中约有一半周期短于 30ms,而全部脉冲星中,约有 97% 周期大于 30ms;大多数脉冲双星与全部毫秒脉冲星,表面磁场 $B < 4 \times 10^{11} \text{G}$,而全部脉冲星中,约 96% $B > 3 \times 10^{11} \text{G}$;已知毫秒脉冲星中,约有一半为双星系统,而全部脉冲星中,只有约 3% 为双星;约有一半的脉冲双星及超过一半的毫秒脉冲星位于球状星团中,而全部脉冲星中,只有约 3% 是在球状星团中发现。此外,约有相当一部分毫秒脉冲星与脉冲双星同时也是 X 射线源。

以上事实表明,毫秒脉冲星,脉冲双星及 X 射线脉冲星可能有着共同本源。现在普遍认为,在双星结构中,一颗趋于衰亡的脉冲星可能通过对伴星的吸积过程而重新加速。这一设想于 1974 年最初由别斯诺娃(Bisnovatyi)等人提出,两年后被斯马尔(Smarr)等人的观测所证实。

总结近年的研究结果,可大体得出如下结论:(1)迄今所知的大多数脉冲双星与毫秒脉冲星,可能都经历了由双星吸积所导致的再加速过程,它们可分为两大类:起源于大质量的 X 射线双星,其伴星可能是一个较大质量的白矮星或中子星。多数情况下,主星在吸积过程中可能旋入伴星而消亡;也可能因第 2 次超新星爆发而使双星结构崩溃,遗留下一个孤立的脉冲星。起源于较小质量的 X 射线双星,伴星为一较小质量的白矮星。这类双星可能因为伴星的“蒸发”而演化成为孤立脉冲星。(2)球状星团中孤立毫秒脉冲星发现率较高,可能是由于:球状星团中密近双星数目较多;星风强度较大;星际碰撞频率较高。后两个原因使得

脉冲星的伴星更容易瓦解。(3)脉冲星磁场的衰减,可能是由于吸积物质对表面性质的影响,或者是由于内部量子流体对星体自转的影响。

自脉冲星发现以来,脉冲星研究已取得广泛进展。但是,仍有许多问题没有解决或没有完全解决。这些问题包括:中子星的结构,特别是深层结构,中子星磁场起源及演化,脉冲星速度与磁场的关系,快速脉冲星磁场衰减的原因,辐射完整机制及能量转换机制,中子星双星起源,两类X射线双星的演化,伴星消亡的确切机制与条件,球状星团中脉冲星起源与数目,个别脉冲星周期反常突变等。此外在观测上,样品的不足,测量数据的缺乏,(特别是时变数据的缺乏),统计取样中的选择效应等,也都是有待解决的问题。脉冲星研究涉及到射电天文学、X射线天文学、相对论及高能天体物理,随着这些领域的不断发展,可望脉冲星研究在较近期内取得突破性进展。

参考文献

- 1 Hewish A, Bell J, et al. *Nature*, 1968, 217, 709
- 2 Pacini F. *Nature*, 1967, 216, 567
- 3 Gold T. *Nature*, 1968, 218, 731
- 4 Goldreich P, Julian W H. *Astrophys. J.*, 1969, 157, 869
- 5 Bisnovatyi G S. *Kogon, Astron. Zh.*, 1974, 51, 373
- 6 Smarr L L, et al. *J. Astrophys. J.*, 1976, 207, 574
- 7 Backer D C, et al. *Nature*, 1982, 300, 615
- 8 Michel F C. *Nature*, 1987, 329, 310
- 9 Lane A G, et al. *Nature*, 1990, 347, 650
- 10 Bhattacharya D, et al. *Physics Reports*, 1991, 203

(安徽师范大学王家庆副教授撰)

黑洞 black hole 是广义相对论所预言的一种特殊天体,是引力场极强的时空区域,它的边界称为事件视界(event horizon)。对黑洞的研究形成了由广义相对论、量子场论、统计热力学、高能天体物理及X射线天文学诸学科相交叉的新兴分支学科,主要研究内容包括黑洞的经典理论、黑洞的量子理论(弯曲时空中黑洞的量子力学)、黑洞热力学、黑洞的天体物理及吸积过程,以及对黑洞的探测。

米歇尔(R. J. Michel)于1783年提出黑洞概念,他根据牛顿引力定律和逃逸速度不超过光速,预言存在一种特殊天体,一切物质(包括光)都不能逃离这类天体。他指出,双星中的不可见伴星可能就是这种天体。1798年,拉普拉斯(P. S. Laplace)也独立地作出过类似的计算。1916年,史瓦西(K. Schwarzschild)求得爱因斯坦方程的静态球对称解,总质量为 M 的球对称星体,若其半径 $R \leq R_s$ (称为引力半径) $= 2GM/c^2$,其中 G 为万有引力常数, c 为真空中的光速,则称该星体为史瓦西黑洞,半径为 R_s 的球面是黑洞的边界。1931年钱德拉塞卡(S. Chandrasekhar)、1939年奥本海默(J. R. Oppenheimer)等相继得出白矮星和中子星的质量上限约分别为 $1.4M_\odot$ 和 $3M_\odot$ (其中 M_\odot 表示太阳质量)。进一步的研究指出,更大质量的天体将发生引力塌缩,其最终产物是黑洞。1963年克尔(R. P. Kerr)求得具有 M 和 J (总角动量)的黑洞(称为克尔黑洞)解。1965年纽曼(E. T. Newman)等求得具有 M, J 和 Q (总电量)的黑洞(称为克尔-纽曼黑洞)解。1973年霍金(S. W. Hawking)等证明了黑洞的唯一性定理:一个黑洞的外部时空唯一地由其 M, J 和 Q 确定,所有的黑洞解均归结为上述三类解。同时,黑洞动力学三定律也已建立。在此基础上,1973年贝肯斯坦(J. D. Bekenstein)提出黑洞熵的概念并开创了黑洞热力学。1974~1975年,霍金、潘罗斯(R. Penrose)和瓦尔德(R. M. Wald)等建立了黑洞的量子力学,从而预言了黑洞发射粒子的量子效应。黑洞附近的真空被极化,将产生粒子对,若负能(相对于无穷远观察者)粒子进入黑洞,则正能粒子远离黑洞而形成黑洞的粒子发射(又称霍金辐射或黑洞蒸发)。对于史瓦西黑洞,其温度 T 为 $hc^3/8\pi GkM$,其中 h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数,黑洞发射的能谱与温度为 T 的热辐射

一样,由于黑洞的温度与其质量成反比,所以质量越小,蒸发越快。

近期,在黑洞的理论研究方面有重要进展,也存在许多难题。1990年恩诺(W. G. Unruh)根据黑洞附近的引力场中粒子的产生得出,粒子是粒子探测器与场相互作用的结果,粒子的概念是导出概念,因而只有场论才是物质的基本理论,该论点无疑对物理学理论具有根本性的影响,但是,该论点的确立还需要在更广的范围内得到论证。在黑洞热力学方面,从近年瓦尔德、张镇九(Zhang Z.)等的研究看来,黑洞热力学定律就是普通热力学定律应用于包含黑洞的体系,而且 $A/4$ (其中 A 表示黑洞视界的面积)就是黑洞的物理学熵,但是,作为普通热力学基础的各态历经概念可否应用于黑洞系统,如果不能,应用什么概念来代替,目前仍然是难题。在黑洞物理中,除了奇点问题和量子发散没有一个一致的消去方案外,更根本的难题还在于,现有的量子论,其引力场(即弯曲时空)还没有被量子化,还没有一个成功的量子引力理论。当前对黑洞感兴趣的一个重要原因在于黑洞附近的强引力场和微观粒子对的产生在小质量黑洞的蒸发中同时起着重要作用。对这一问题的深入研究,可能为建立量子引力理论,甚至为建立统一所有相互作用(包括引力)的理论,提供重要的依据。但是,与其它相关研究一样,都同样在一系列基本概念问题上遇到困难,例如,在广义相对论中如何引入不确定关系,对于加速观察者如何引入可观测量概念和如何解释波函数的意义等,这些问题都是黑洞理论研究的热点。

在黑洞的探测方面,根据理论预计,宇宙中可能存在3种不同类型的黑洞。第1种是质量约为 $10^{-16}g$,在极早期宇宙中形成的微黑洞,现正处于激烈蒸发阶段,因而可能与天文观测到的 γ 射线爆相关;第2种是质量 $M \sim 3M_\odot$ ($\sim 10^{33}g$),由恒星经过引力塌缩而形成的黑洞,这类黑洞吸积物质,在其周围形成吸积盘,在吸积过程中将辐射X射线,通过对天体X射线源的探测和分析,已发现了一系列黑洞的候选者,70年代以来,发现在天鹅X-1双星中的一颗看不见的伴星,辐射X射线,质量为 $6-8M_\odot$,经过过年的反复证认,是一个重要的黑洞候选者。第3种是具有极大质量($\sim 10^6-10^9M_\odot, \sim 10^{39}-10^{42}g$),存在于星系和类星体中心的黑洞,1992年初由哈勃空间望远镜在M87星系中心观察到了这类黑洞的候选者,支持了以前的地面观测。今后,对广义相对论性的黑洞吸积的研究和利用X射线探测卫星,空间望远镜等为黑洞的存在提供观测证据,无疑是黑洞天体物理和黑洞观测研究的热点。

参考文献

- 1 Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. *Gravitation*, San Francisco: Freeman, 1973, 872~915
- 2 Hawking S W, Ellis G F R. *The Large Scale Structure of Space - time*, Cambridge: Cambridge University Press, 1973, 299~347
- 3 Sorkin R, Wald R M, Zhang Z (张镇九). *Gen Rel Grav*, 1981, 13(12): 1127~1146
- 4 Birrell N D, Davies P C W. *Quantum Fields in Curved Space*, Cambridge: Cambridge University Press, 1982, 249~291
- 5 Chandrasekhar S. *The Mathematical Theory of Black Holes*, Oxford: Clarendon Press, 1983, 1~646
- 6 Wald R M. *General Relativity*, Chicago: The University of Chicago Press, 1984, 298~339
- 7 俞允强. 广义相对论引论. 北京: 北京大学出版社, 1987, 116~142
- 8 张镇九. 现代相对论及黑洞物理学. 武汉: 华中师范大学出版社, 1988 修订版, 1~404
- 9 Sabbata V, Zhang Z (张镇九). *Black Hole Physics*, Dordrecht: Kluwer, 1992, 1~426

(华中师范大学张镇九教授撰)

白洞 white hole 广义相对论预言的一种特殊天体,它可看成是黑洞的时间反演。白洞被用来解释宇宙中存在的一些高能天体现象,目前尚无确切证据表明在宇宙中存在白洞。对白洞的天文观测和理论研究可以判断白洞在宇宙中是否确实存在,并对引力系统的时间反演不变性和 CPT 不变性等基本物理问题的解决提供新的线索。

白洞的边界是过去(事件)视界。过去视界是向外的单向膜,任何物质只能从白洞内部穿出过去视界向外运动,而不能从外部落入白洞。白洞的视界位置,与具有相同参量(质量、角动量、电荷)的黑洞相同。例如不带电的球形白洞也由史瓦西度规描述,其半径也是史瓦西半径。白洞与黑洞的区别在于前者的边界是过去视界,后者的边界是未来视界;且白洞内每一层球面都是向外的单向膜,而黑洞内每一层球面都是向内的单向膜。白洞外部的引力场与黑洞相同。白洞是一个强引力源,可把周围物质吸引到白洞视界外形成物质层。远处观测者观测白洞发光的谱移要受二重因素的影响:白洞外喷的物质向观测者运动,多普勒效应使外喷物质发光的波长变小,产生蓝移;白洞发出的光线由引力场较强的位置向引力场较弱的方向传播,产生引力红移。远处观测者测得的净效应将依赖于白洞爆发的动力学细节。

白洞奇点附近高密物质的起源,是白洞在宇宙中是否存在的关键问题。1964年洛维科夫(I. D. Novikov)、1965年尼曼(Y. Ne'man)等人认为由于宇宙大爆炸的不均匀性,部分宇宙奇点可能残留下来成为延迟核。延迟核的晚期爆发形成现在可能观测到的白洞,并可用来解释类星体等高能天体现象。霍伊耳(F. Hoyle)认为数量级为 10^{14} 恒星质量的超大白洞爆发后可能形成巨星系或超巨星系云。1983年,纳里卡(J. Narlikar)猜测塞佛特星系的星系核可能存在白洞,银河系中的某些瞬变 X 射线源和 γ 射线爆则可能与恒星量级的白洞有关。1976年,霍金(S. W. Hawking)讨论了黑洞的量子效应,指出黑洞存在量子辐射效应。宇宙早期形成的微黑洞,晚期以极高的温度向外辐射,将与白洞不可区分。但霍金的这种假设并未得到天文观测的支持。1971年,热尔多维奇(Y. B. Zeldovich)等提出耳世界的概念。根据爱因斯坦场方程克尔或克尔-纽曼解的最大解析流形时空图,从一个宇宙中的黑洞落入的物质会从另一个宇宙中的白洞喷发出来。在另一个宇宙中坍塌形成的黑洞可能在我们的宇宙中作为白洞出现。1989年托费维科(A. P. Trofimenko)讨论了这种解析延拓流形中的白洞并认为类星体、活动星系核、喷流、星系间的 X 射线、宇宙空洞和重化学元素的形成都可能与这种白洞的遗迹有关。1991年,托费维科讨论了来自超新星 1987A 的引力辐射爆和 γ 射线爆的源是白洞的可能性。

1974年,厄德利(D. M. Eardley)通过对经典广义相对论的计算,指出白洞存在随指数增长的不稳定性,是极不稳定的天体。白洞周围的物质会迅速被白洞引力场吸引而在白洞表面形成兰层,兰层的出现导致在白洞的过去视界外面出现一未来视界,使白洞在小于 $2 \times 10^{-3} (M/M_{\odot})s$ 的时间内变为黑洞。1974年热尔多维奇等人考虑了白洞奇点附近粒子产生的量子效应,指出白洞会在 $t < r_g/c$ 的时间内完全爆发掉。1980年,瓦尔德(R. Wald)等讨论了白洞时空中的粒子产生,在量子水平上支持了厄德利关于白洞不稳定性的结论。1989年,托费维科指出延拓时空流形中的白洞仍可能是稳定的。

白洞的存在可能会导致原则性的理论困难。1979年,彭罗斯(R. Penrose)指出,白洞的奇点是裸奇点,白洞系统的初始柯西面会“碰上”或非常接近奇点,使我们丧失预言未来的能力,破坏因果性原理;白洞可能是一个反热力学的客体,白洞的演化会导致热力学第二定律的破坏。1980年,瓦尔德论证了量子引力不可能具有时间反演不变性和 CPT 不变性,理论必然要引入一个“时间箭头”,黑洞可能存在,但白洞不可能存在。1987年,桂元星指出黑洞量子辐射的时间反演是白洞的量子吸收效应;在经典广义相对论和弯曲时空量子场论的框架中,一定条件下白洞可能遵从

广义热力学第二定律。这为白洞的存在提供了理论上的可能性。

白洞在宇宙中是否确实存在最后要由天文观测的结果来判断,而白洞的天象特征依赖于具体的理论模型。与天文观测密切联系的理论研究是今后的工作重点,特别是判决性的白洞观测特征有待提出。在目前能源机制已知的天体中,黑洞的产能率最高。白洞也是一个强引力源,其外部会存在与黑洞类似的吸积现象。白洞内部高速喷发的物质与外部物质的猛烈碰撞,会释放出巨大能量。与同质量的黑洞相比,白洞应具有高得多的产能率。如天文观测发现存在这种超高产能率的天体,白洞将是对这种天体的适当解释。

参考文献

- 1 Ne'man Y, et al. *Astrophys J*, 1967, 150: 755
- 2 Zeldovich Y, et al. *Sov Phys JETP*, 1974, 39: 933
- 3 Eardley D M. *Phys Rev Lett*, 1974, 33: 442
- 4 Hawking S W. *Phys Rev D*, 1976, 13: 191
- 5 Penrose R W, et al. *CNIVERSITY ONBRIDGE*, 1979, 581 ~ 638
- 6 Wald R W, et al. *Phys Rev. D* 1980, 21: 2736
- 7 Narlikar J V. *New Scientist*, 1983, 97: 516
- 8 桂元星. *天体物理学报*, 1987, 7: 177
- 9 Trofimenko A P. *Space Sci*, 1989, 159: 301
- 10 Trofimenko A P, et al. *Space Sci*, 1991, 178: 217

(大连理工大学桂元星教授撰)

恒星天文学 星系天文学 宇宙学

深空天图 deep sky survey 用天文望远镜,并用照相方法、射电天文方法或空间技术,对全天或大片天空的全色光、单色光或某一波长辐射的记录称为天图。探测的空间范围深远,并能记录到微弱宇宙辐射的天图叫作深空天图。用目视方法观察和用照相方法拍摄的星空图象也称星图。

照相天图 现代天文学中所应用的天图,历史最悠久的是照相天图,已有百余年。1838年,法国达盖尔(L. J. M. Daguerre)等人发明了照相术。照相方法一问世,随即引起天文学界的注意。1840年,美国德雷伯(J. W. Draper)成功地获得了月球照片。这是天文学史上的第1幅天体照相。1885~1891年间,英国吉尔(D. Gill)和荷兰卡普坦(J. C. Kapteyn)合作,在南非好望角天文台用口径15cm的天体照相机,完成了南天巡天照相天图,共覆盖612个天区,每个天区 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$,极限星等为9.5星等。这是近代天文学史上第1部整片天区的照相天图。卡普坦主持测量了照相天图上的45万多个恒星的方位和亮度,汇编成方位星表,分批于1896~1900年发行问世,取名为好望角照相星表,简称CPD。1887年,法兰西科学院召开了名为“天体照相大会”的国际天文协调会议,拟定了命名为“天图(Carte du Ciel)”的计划和规划,将全天划分为22 000多个天区,分配给全世界参加这一大协作的20多个天文台。推荐采用法国亨利兄弟(Paul Henry, Presper Henry)发明的天体照相机作为国际通用望远镜。该仪器的主镜为口径34cm二元件复合透镜,可获得 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的优良视场,极限星等为14星等。这一国际合作事业一直有条不紊地进行到60年代末。

为了在更大的视场内获得良好的成像,在二元件复合透镜问世之后的几十年间,又研制出许多类型的多元件复合透镜。这样,能提供几十平方度、甚至上百平方度的大视场天体照相机相继产生,为照相天图的摄制创造了节约观测时间的有力工具。20世纪完成的照相天图有10多部,其中著名的有《哈佛天图(Harvard Sky)》(1903)、《帕利萨-沃尔夫星图(Palisa-Wolf Charts)》(1904~1914)、《弗兰克林-亚当士星图(Franklin-Adams Charts)》(1914)和《法尔考天图(Falkauer Atlas)》(1962~1965)。这些不同天区覆盖范围、不同视场大小、不同比例尺度

以及不同极限星等的天图集的问世,为大面积天区的系统化的天体方位测量,照相亮度测量,星云、星团、星系和星系团的发现、证认、计数、形态和分布等方面的研究,提供了重要的、决定性的资料。

1930~1932年间,德国施密特(B. V. Schmidt)发明了一种以球面反射镜为主镜,一个接近平行平板的非球面改正透镜组成的大视场和强光力的光学系统。除了场曲和微量的色差外,没有其他像差。和相同口径、相同焦距的其他类型光学系统相比,施密特的发明具有更良好的成像和较大视场的特征。用这种光学系统组成的望远镜统称为施密特望远镜。施密特于1932年研制的用于照相观测的口径36cm/44cm施密特望远镜,获得了 $5^{\circ}\times 5^{\circ}$ 视场的高质量星空照相,天文学界从而意识到施密特光学系统是迄今最理想的大视场照相巡天的基本仪器。1948年,美国帕洛玛天文台建成一台至今为止仍是世界上最大的120cm/180cm施密特望远镜,该天文台为这台威力空前强大的星空照相仪确定的第一项,也是压倒一切的优先任务是拍摄深空天图。此项卓有远见的庞大计划得到国家地理学会的财政资助。经过短期的实验,星空的照相观测从1950年正式开始,历时8年的努力,于1958年全部完成。天图的全称是国家地理学会——帕洛玛天文台巡天,简称帕洛玛天图,简称PSS或POSS。天图覆盖天球南赤纬 33° 以北的936个天区。每个天区分别用蓝光和红光拍摄。这样,比较同一天区的两个颜色的天图,可以容易地检视出偏红的和偏蓝的大色指数天体。PSS的最大优点是它的极深的星空深度:蓝天图和红天图的极限星等分别达21和20星等。PSS的问世对天文学界有很大的吸引力。全世界的许多天文机构,包括紫金山天文台、上海天文台、北京天文台和云南天文台,都订购了PSS的复印件。一版再版的PSS已成为天文基本文献。PSS完成之际,正值射电天文兴起,遂应运成为寻找和证认宇宙射电源的光学对应体的必不可少的依据。被用来证认出一批又一批的星系和星系团、星云和超新星遗迹。60年代以来,PSS更继续为寻找宇宙X射线源、 γ 射线源和红外源的光学对应体提供第一批信息,对全波段天文学的发展做出难以估量的贡献。30多年来,应用PSS编制了多种天体表。例如,星团和星协表、行星状星云表、亮星云表、暗星云表、反射星云表、电离氢区表、星系和星系团表、富星系团表、星系形态总表、相互作用星系图谱、特殊星系图谱、致密星系和爆后星系表。此外,PSS还为一批爆前新星提供了亮度和颜色的信息。1972年,欧洲南天天文台(简称欧洲台,简称ESO)和英澳天文台(简称AAO)相继建成了大型施密特望远镜。ESO的口径100cm/150cm,AAO的口径120cm/180cm。从1974年起,ESO和AAO联合摄制南天深空天图。天空覆盖是从南赤纬20度以南的半天,共606个天区。每个天区也分别用蓝光和红光拍摄,它们均达到前所未有的深空限度。南天天图的简称是ESO/SERC天图,到1992年底,基本上完成,其复制品也成为天文界的新财富,正在为开拓南天深空发挥重要作用。

向近红外延伸 20世纪70年代,新型照相乳胶材料以及乳胶敏化技术的进展,在地基天文台也可以用照相方法拍摄近红外波段的深空图象。帕洛玛天文台于1976~1979年间,用120cm/180cm施密特望远镜,完成了北银道带红外天图,也是双色,其一可得国际测光系统的红星等,另一得红外星等。英澳天文台从1979~1984年用120cm/180cm施密特望远镜,拍摄了南银道带红外天图,它的双色系统和帕洛玛天文台的北银道带照相一致。在天文学飞跃进展的新的时代背景下,帕洛玛天文台决定从1985年起研制POSS的第2版,简称POSS-1,预计90年代中期完成,共覆盖北天894个天区。新版扩充为符合国际测光系统的蓝、红和近红外三色。极限星等将比初版更向暗端延伸1.5个星等,达到前所未有的空间深度。英澳天文台也在筹划将南天图全部606个天区均增补上一个近红外光照相。

射电天图 在射电波段和毫米波段,记录到的宇宙辐射大致可分为两类:一类是来自银河系中温度不足100K的冷天体,例如星际气体和尘埃、各种分子云;另一类则是银河系内和外的

处在激烈活动的天体的非热辐射,例如超新星遗迹、脉冲星、射电星系、类星体。然而,射电望远镜和光学望远镜不同,接收的是来自天体和宇宙的一束狭窄波段的射电,是一维的辐射强度,而不是二维的图象。所以,要完成低极限流量密度的大片天区测量,需要很多的扫描观测时间。迄今为止,覆盖面积大于全天之半,检测出射电源超过1000个的只有几部射电巡天。其中,美国俄亥俄大学编制的1415MHz巡天检测出的射电源数最多,近2万个,探测的空间也最深,每球面度2240个源。英国瑞尔(M. Ryle)于50年代初发明了综合孔径干涉技术,英国、美国、澳大利亚、中国等国相继建设了可以成图的综合孔径射电望远镜。北京天文台正在利用这一射电天文方法编制232MHz北天米波射电天图。

高能天图 由于地球大气的吸收,比近紫外波长更短的宇宙辐射不能到达地球表面,比10 μ m波长更长的远红外辐射也难以透过地球大气。60年代以来,X射线、极紫外、红外和 γ 射线空间探测器和空间望远镜陆续升空。例如,1983年发射的国际红外天文卫星IRAS用12、25、60和100 μ m的波长巡视了全天,探测出30万个宇宙红外源,从深空照相光学天图上证认出它们的光学对应体计有正在形成的恒星、红外辐射异常的特殊恒星、银河系内的氢云和尘埃云,以及有着激烈活动的河外天体。又如,Uhuru、HEAO-2、Exosat、Rosat等多个X射线天文探测器为现代天文学展示各种不同深度的高能天空图像,揭示宇宙中的多种高能现象。

天图的数字化 除了在宇宙中可能存在的不可视的暗物质之外,现代天文学仍认为宇宙物质的主要表现形式是发光的恒星和主要由恒星组成的星系。可以认为,光学波段能提供的宇宙信息的量最大。例如帕洛玛天图和南天天图,在银道带,一个天区内记录到的星像数量可达100万个。为了充分地开发并提取天图的蕴藏,从70年代末相继建成了多种图像数字化设备,像英国的Cosmos、Galaxy、APM、美国的PDS等,它们均能将照相底片上的天体图像转化为可供微机计算机处理的数字信息,使深空天图进入数字化新时代。80年代,世界各国天文台都已广泛地用CCD做为光学和红外的辐射探测元件。CCD是电荷耦合装置的简称,是一种量子效率很高的固体器件。照相乳胶的量子效率不到2%,光电元件小于20%,而CCD的则超过80%。此外,CCD对辐射的响应是线性的,这正是照相乳胶所不具备的优点。

近几年来,由于大尺寸CCD的商品化,探测信息的高密存储和存档保管技术的进步,用反射望远镜从事数字化巡天已开始起步。可以认为,CCD和其他数字化探测器将可能最终取代经典的照相底片。

参考文献

- 1 Van Biesbroeck G. Basic Astronomical Data, 1963, 471
 - 2 Minkowski R L, et al. Basic Astronomical Data, 1963, 481
 - 3 Babner K. Handbrch der Physik, 1967, 29, 273
 - 4 MacGillivray H T. New Results with the Cosmos Machine. Vistas in Astronomy, 1984, 27, 433
 - 5 Digitised Optical Sky Surveys. Newsletter, 1990, 11(2)
- (北京天文台博士生导师李竞研究员撰)

赫罗图 HR diagram 是用恒星的表面温度和光度两个天体物理量反映恒星的序列性的图,因发现者的姓氏而得名。恒星的表面温度,即根据斯特藩定律求出的所谓的有效温度,可以用恒星的光谱型表示,也可以用色指数,即恒星表面的颜色表示。光度则是恒星每秒中的总辐射量。所以,赫罗图也称光谱型—光度图或色指数—光度图。对于同一个星团或同一个星系内的成员恒星而言,可以认为它们均处于同一距离上,能用观测到的亮度大小来反映成员恒星的真实的光度高。在此前提下,赫罗图也称为颜色—星等图。

1905~1907年,丹麦赫茨普龙(E. Hertzsprung, 1873~1967)根据恒星辐射的研究,首次指出恒星有高光度的巨星和小

光度的矮星之分。1907~1912年,他分析了银河系的几个疏散星团的成员恒星的色指数和亮度的观测资料,发现昴星团中的恒星在用色指数和亮度这两个观测量绘制的图上排列有序,构成一条相当连续的曲线。在毕星团和鬼星团中,除均有类似的恒星序列外,还有光谱型很晚,但光度很高的红巨星。赫茨普龙的疏散星团颜色-星等图是天文学史上第1批揭示恒星的表面温度和光度的内在关系图。美国罗素(H. N. Russell),从1907年起独立地研究已测定距离的恒星的光谱型和光度之间的统计关系,于1913年发表了300多个恒星的光谱型和光度的关系图,发现它们排列有序;大部分恒星密集在从图的左上角(光度大、温度高)到右下角(光度小、温度低)的斜带上。后世称之为主星序,并将主星序上的恒星称为主序星。太阳在图上位于主星序上,为一个G光谱型的主序矮星。在图上还分布着从左上到右上(光度高、温度从高到低)的水平带的巨星,称为巨星序,以及零散在左下角(光度小、温度高)的白矮星。这是天文学史上第1幅光谱型-光度图。到1933年,天文文献中才正式地将赫茨普龙和罗素各自独立地发现用恒星的表面温度和光度为参数绘制的用以揭示恒星的基本特征的图称为HR Diagram,中文名为赫罗图。

近半个世纪,随着观测技术和方法的改进、更新以及观测资料的日益丰富(这主要是指恒星的距离测定、恒星的光度测量和光谱分类、星际消光的研究进展),在赫罗图上陆续发现新的恒星序列:超巨星、亚巨星、亚矮星等分支。浏览一下赫罗图上的恒星分布,便能领略恒星世界既是形形色色、五花八门,又具有序列和规律,表面温度从低于3000度的光谱型为晚M型的红星,到2.5万度以上的光谱型为O和B型的蓝白星,光度从不及太阳光度千分之一的红矮星,到比太阳亮一万倍的高光度星;质量从不到1/10个太阳的矮星,到近百倍于太阳的巨星;直径从只有太阳1/10的白矮星,到比太阳大千倍的超巨星。恒星为什么会在赫罗图上排列有序?自从1920年之后,由英国爱丁顿(A. S. Eddington)奠定了基础的恒星结构学说,1937~1939年经德国魏茨泽克(C. F. von Weizsäcker)和美国贝特(H. A. Bethe)建立的恒星能源的热核反应理论,特别是1958年美国史瓦西(M. Schwarzschild)将恒星结构和演化结合起来的研究,使我们得知,恒星的结构取决于质量和化学成份。若化学成份给定,每一恒星的质量,对应于一定的光度和温度。所以,当化学成份不同时,在赫罗图上要出现不同的序列。另一方面,随着时间的推移,恒星的内部结构逐渐演变,并反映到光度和表面温度,从而改变恒星在赫罗图上的位置。银河系内,绝大多数恒星的质量在十分之一和十倍于太阳质量的范围内。化学成份的差异也不大,按质量计,氢占70%~80%、氦占20%~30%、其他元素占0.1%~2%。所以,恒星在赫罗图上有明显的规律性。恒星最密集的主星序表示演化的缓慢阶段,占一个恒星整个存在期的90%的岁月。1944年,德国巴德(W. Baade)发现银河系内的天体按年龄、化学成份、空间分布和运动特征,可划分为不同的两个星族,称为星族I和星族II。前者年轻,后者年老。1957年,后人又细分为5个星族,即臂族、中介星族I、溢族、中介星族II和星族。太阳附近的恒星多属星族I,太阳也是星族I中的一个。罗素早期的光谱型-光度图反映的正是星族I的特征和规律。当探测到银河系的更远的空间,更发现星族I和星族II的赫罗图不一致。虽然都有各自的主星序,但在图上的位置并不重合。星族I是除氢和氦以外的其他元素含量较多的年轻恒星,而星族II则是其他元素含量较少的老年天体。

赫罗图还是表明恒星的起源、演化和消亡的写照。所有的恒星都有有限的存在期。恒星起源于星际物质的聚合。当星前天体的密度足够大时,因引力坍缩而变成星胚,即是星前体。随着密度增大、内核温度增高,开始发光发热。星前体遂出现在赫罗图上,弥散地分布在主星序的右侧。当星前体的核心温度高达1000万度左右,热核反应成为发光的主要能源,一个真正的恒星诞生。它在赫罗图上从右向左进入主星序的行列。一个太阳质量的天体,走完星前阶段,得几百万年;质量5倍于太阳的天体,只需几

十万年。恒星停留在主星序阶段长达几十亿年到上百亿年。当恒星的核心能源耗尽,核心区的核反应终止,恒星因结构失衡而体积增大、表面温度降低。在赫罗图上,从主星序移向右上方的巨星分支,变成红巨星。随后,出现一个不稳定阶段,在图上从右往左横移。再往后,可能变成行星状星云。最后,星云外壳消散,剩下的是没有能源的白矮星。最末了,余辉散尽,结束恒星的一生。所以,赫罗图上的序列反映的是不同质量、不同重元素含量及不同年龄的恒星所处的演化阶段。

在银河系中还有一定数量的变星。除了因交食、屏遮等外因造成的亮度变化者外,凡因物理原因引起光变的变星,多是处在不稳定状态下的天体。变星的演变时间尺度大大短于正常恒星在主星序上留驻的时间。一般而言,变星是恒星从量变到质变的演化转折。星前体阶段有变星,主星序上也有变星,更多类型的变星是处在离开主星序之后的演化后期阶段。变星在赫罗图上的位置也是揭示变星本原的线索。

如今,每当将精确测定的恒星光度的新数据和光谱型或色指数的新资料标定到赫罗图上,立即能对该天体作出多方面的判断和了解。例如,是巨星还是矮星?是星族I还是星族II的成员?是正常星族I主序星还是化学元素反常的天体?是处在哪个演化时期的恒星;主序前阶段?已离开主星序进入演化后期还是已成为演化晚期的天体?如果结论与预期的有所差异,甚至截然不符,那么也许是真的发现了新的天象;也许是因距离测定有误或光谱型的分类失当,这就又为改进观测数据的集录做了启示。赫罗图从它的雏形问世以来已日趋成熟,并经历了80年的时代考验。时间的流逝,不仅没有使赫罗图变成历史陈迹,反而随着天文学家对它在反映恒星的结构和演化的内涵的不断再认识,成为了解恒星的得心应手的工具。然而,为了完善一幅能够做为定标之用的赫罗图,精确测定大样本的各类恒星的距离,从而取得精确的恒星光度和颜色的数据,始终是恒星天文学家的重要任务。1989年8月,欧洲诸国和美国联合研制的“依巴谷”天体测量卫星成功地发射上天。卫星载口径30cm反射望远镜,它的任务是在2~3年的有效飞行期间,对全天的亮于12.4视星等的恒星进行位置和亮度测量,完成载有12万个恒星的完备样本天体测量星表。每个恒星的方位、视差和自行的测量精度均不超过0.002[″],这样,依巴谷天体测量卫星不仅将150年来累积的恒星三角视差(即恒星距离的直接测量值)的数量扩大10倍,还将测量精度提高10~20倍,从而将提供一幅星数多、精度高的赫罗图,为恒星天文学的研究进展做重大贡献。

参考文献

- 1 Hertzprung D. Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie, 1905, 3: 429. 1907, 5: 86
- 2 Russell H N. Popular Astronomy, 1914, 22: 275
- 3 Eddington A S. Nature, 1920, 106: 14
- 4 Bethe H A. Physical Review, 1939, 55: 434
- 5 O'Connell D J K. Stellar Populations, 1957
- 6 Schwarzschild M. Structure and evolution of the stars, 1958
- 7 Philip A G D, et al. IAU Symposium, 1978, 80
- 8 Perryman M A C. European Space Agency, 1985

(北京天文台博士生导师李竞研究员撰)

X射线双星 X-ray binaries 是由致密强X射线源和一颗光学伴星组成的密近双星系统。其中的X射线源一般认为是中子星,有极少数可能是黑洞。产生X射线辐射的能量来自伴星的质量流被吸积到致密星上所释放的引力能。对中子星,吸积过程的能量释放效率可高达10%,比热核反应还要高十几倍。与以热核反应为能源的正常恒星辐射相比,致密源的X射线辐射具有体积小、强度高、变化快等十分不同的特征。研究它的辐射机制、辐射强度、光变特性以及光学对应体等,对揭示X射线双星的物理本质;了解双星系统的相互作用机制和演化过程;检验有关中子星、黑洞这类奇异天体的理论模型等,都具有重要

的意义。

1949年弗里德曼(H. Friedman)第1次探测到太阳有很强的X射线辐射,但相对强度仍不到太阳光学辐射的 10^{-9} 。1962年美国的贾科尼(R. Giacconi)等发现了太阳系外的第一颗强X射线源ScoX-1。1966年又证认出它的光学对应体,但光学辐射强度约只有X射线的 10^{-3} 。进一步的观测还表明,它的X射线辐射也不具有正常恒星辐射那样的稳定性,而是呈现出短时标的剧烈变化。这些发现引起了天文学家的广泛关注,它们必定是完全不同于正常恒星的新型天体。1967年什科尔夫斯基(I. S. Shklovskii)首次提出关于致密强X射线源的双星吸积模型,其中致密的中子星通过吸积来自伴星的质量流将引力能转换成X射线辐射。1970年底,由贾科尼设计并指导的第1颗X射线天文卫星乌呼鲁卫星发射升空极大地推动了X射线天文学的发展。它不仅使X射线源的数目大为增加,也提供了这些源更为丰富的观测资料。1972年斯雷尔(E. Schreier)等对CenX-3观测资料的分析表明它的X射线辐射具有4.8s的脉冲周期和2d的交食周期,从而首次确认了X射线双星系统的存在。同年韦伯斯特(B. Webster)等对CygX-1光学对应体的分析不仅表明它是一个双星吸积系统,而且致密星的质量大于 $5M_{\odot}$,超过了稳定中子星的质量上限($\sim 3M_{\odot}$),这导致了把CygX-1解释为黑洞的结论。这类X射线双星系统的发现和更细致的观测研究,有力地支持了双星吸积模型,从而也进一步推动了对这一模型的深入研究。

按照光学伴星提供质量流的方式不同,吸积系统可分为盘驱动(disk driven)和风驱动(wind driven)两类。前者是指伴星以洛希(Roche)溢出流等方式提供具有足够角动量的气体流,并通过粘滞作用逐渐向内旋进到致密星上,从而形成一环中子星或黑洞的吸积盘,而后者致密星主要是通过捕获伴星的强烈星风或质量抛射来获得吸积流。由于其角动量一般很小,捕获后将直接落到致密星上,因而不会形成吸积盘。X射线双星系统也可以根据光学伴星的质量分为高质量X射线双星(HMXB)和低质量X射线双星(LMXB)两大类。前者的伴星一般是质量大于 $10M_{\odot}$ 的OB型年青星,光学光度和X射线光度之比大都在 $0.1\sim 10^5$ 之间。后者的伴星一般是质量低于 $1M_{\odot}$ 的晚于A型年老星,光学和X射线光度之比在 $0.1\sim 10^{-4}$ 之间,而且光学光度中有很大一部分来自X射线加热引起的次级辐射。

绝大多数HMXB都是脉冲型X射线源,脉冲周期从几十ms到数百s不等,并和射电脉冲星类似,也被解释为磁化中子星的自转周期,但周期的演化较复杂,有些变短有些变长或在两者间往复,主要决定于吸积流的角动量对中子星的力矩方向,有一部分HMXB的交食周期较短大都在 $1.4\sim 10d$ 之间,轨道也近于圆形,伴星为充满或接近充满洛希瓣的O型超巨星。它们的X射线光变特征与平均光度有关。在低光度系统($L_x\sim 10^{36}\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}$)中一般都有时标约几十分钟的无规闪烁活动,光度幅度近100倍,而在高光度系统($L_x\geq 10^{37}\text{erg}\cdot\text{s}^{-1}$)中则没有这类变化。分析表明低光度一般和风驱动系统相应,而闪烁现象可能反映了恒星风中的不均匀性,不过这是否是风驱动系统普遍的特征尚不清楚。高光度一般和吸积流更强的盘驱动系统相应,而吸积盘内的粘滞过程可能已抹匀了初始质量流中的不均匀性。另外一类HMXB的轨道周期都长于15d,轨道偏心率也较大,伴星主要是快速旋转的B型星。其中不少伴有瞬变和爆发现象,这可能是由于Be星的快速旋转引起赤道区不稳定而导致突发性物质抛射所造成的。1984年柯伯特(R. H. D. Corbet)首先注意到这类HMXB的脉冲周期和轨道周期间有正相关,而前一类中则没有。1989年瓦托斯(I. R. Waters)等指出这种差别可能是由于两类系统中恒星风分布的不同所致。根据范登赫维(E. van den Heuvel)1972年提出的模型,HMXB可以由在质量双星系统经质量交换和超新星爆发后演化而成。而LMXB的形成可能要复杂的多,因为低质量双星系统的超新星爆发极易导致双星系统的瓦解。1975年克拉克(G. W. Clark)提出由沉到球状星团中心区

的中子星通过俘获伴星而成为LMXB。1983年拉贝(J. Labay)等提出激变变星中的白矮星通过吸积而进一步演化成LMXB。

在LMXB中虽未检测到X射线的规则脉冲,1984年范德克利斯(M. van der Klis)等却意外地发现了一种准周期振荡(QPO)现象。到1989年,据报道已在11个X射线双星系统中检测到QPO现象,其中10个属LMXB。形成QPO的可能机制已提出多种,其中有1983年范德克利斯等率先提出的掩食模型;赫缪利(J. M. Hameury)等提出的热斑模型;阿尔帕(M. A. Alpar)等提出的差频模型;以及1986年波义耳(C. B. Boyle)等提出的晃振荡模型。1987年潘琴斯基(B. Paczynski)又指出广义相对论效应也能引起QPO现象。不过这些模型尚不能圆满地解释已观测到的QPO现象。在LMXB中也未观测到交食现象,1978年米尔哥罗姆(M. Milgrom)指出这可能是由于环绕X射线源的厚吸积盘的遮蔽效应。怀特(N. E. White)1981年和1982年先后发现某些LMXB有X射线偏食(Partial eclipses)和周期性吸收凹陷(absorption dips)现象。据分析认为它们可能分别起因于来自中心源的X射线经吸积盘冕区的散射和来自伴星的气体流与吸积盘在流入点的相互作用。LMXB的光变特征比较复杂,有许多都表现为无规爆发,爆发间隔从几小时到几天不等。分析表明,当吸积率在一个适当范围($10^{15}\sim 10^{16}\text{g}/\text{s}$)内时,中子星表面附近吸积物质的积累有可能引起突发性的热核反应而形成爆发。在LMXB中有一个较为特殊的天体是HerX-1,其伴星是质量为 $2M_{\odot}$ 的A型星,但和HMXB类似地有周期为1.2s的规则脉冲和周期为1.7d的交食现象。另外还发现它有一个为0.35d的变化周期,其中11d有X射线而另24d则探测不到。据认为这可能是由于中子星自转轴或吸积盘的进动所致。

X射线天文学中最有魅力的课题之一就是某些X射线双星系统中的致密源可能是黑洞。早在1939年,奥本海默(R. J. Oppenheimer)等就提出过大质量天体经引力坍缩形成黑洞的理论模型。1964年泽尔多维奇(Ya. B. Zel'dovich)等指出,黑洞的引力吸积过程可以作为比热核反应更有效的天体能源。1966年又进一步建议在双星系统中寻找黑洞。根据双星系统的轨道参数可以确定其中不可见伴星的质量,如果超过稳定中子星的质量上限($\sim 3M_{\odot}$)就有可能是黑洞,X射线双星系统的发现更激发了人们探寻黑洞的热情,因为X射线辐射是黑洞吸积的重要标志之一。到1989年,根据质量判据发现X射线双星系统中的黑洞候选者除CygX-1外还有LMCX-1和A0620-00两个,规则的快速脉冲可以看作是磁化中子星的特征标志。探讨黑洞吸积的辐射特征也吸引了许多研究者的兴趣。当CygX-1被证认为黑洞候选者后就有人提出黑洞吸积所产生的X射线辐射应具有快速闪烁和由超软谱高态与硬谱低态组成的双峰行为这两个特征。但在后来被证认为非黑洞的X射线双星系统(如CirX-1)中也发现有类似特征,因而不能作为黑洞吸积的特征标志。黑洞吸积区别于其他致密星吸积的观测特征的研究仍是一个有待解决的问题。

从质量吸积到发出X射线辐射还有一连串极为复杂的中间过程,虽然已做了大量的研究工作,但对它们的本质理解还很不清楚,仍需作进一步的研究。致密X射线源的重要特征之一,就是具有复杂的光变行为,在爆发源中还观测到一种间隔短至数秒的快速爆发现象和持续几分钟甚至几小时的瞬变过程,其物理本质尚不清楚。未来有关光学和X射线光变的时变性观测资料的进一步积累,将会对理解这类复杂光变行为的机制提供重要信息。QPO现象的发现,为研究X射线双星系统的吸积过程以及吸积流与致密星的相互作用开拓了一个新的领域,有关这一现象的观测资料的进一步整理和理论模型的深入研究将是近期的研究热点。

参考文献

- 1 Giacconi R, et al. Phys Rev Letters, 1962, 9: 439~443
- 2 Shklovskii I S. Sov Astron, 1968, 11: 749~753
- 3 Schreier E, et al. ApJ, 1972, 172: L79~89

- 4 Van den Heuvel E. et al. *Nature Phys Sci.* 1972, 239: 67~69
- 5 Lewin W H G. et al. *Accretion - driven stellar X - ray sources.* Cambridge Univ, 1983
- 6 Frank J. et al. *Accretion Power in Astrophysics.* Cambridge Univ, 1985
- 7 Leung K C. *Observation vs physical models for close binary systems.* New York: Gordon and Breach, 1988
- 8 White N E. *Astron. Astrophys Rev.* 1989, 85~110
- 9 周体健, 等. *天文学进展*, 1991, 9(2): 124~133

(芜湖师范专科学校吴德金撰)

相接双星 contact binary stars 两子星光球表面位于洛希(Roche)模型的内外临界等势面之间的双星称谓相接双星。目前,在银河系中已发现了大约六百颗相接双星。精确地测量子星的质量、半径和光度等基本天体物理量;观测分析它们的活动性;研究它们的演化阶段和能量转移机制;构造相接双星结构和演化的理论模型等是这一领域的基本研究内容。由于相接双星子星之间强而复杂的相互作用,这类天体近 20 多年来引起了广泛的研究兴趣。

1950 年以前,普遍猜想大熊 W 型食变星应该是相接双星,且两子星质量相同。因为只有这样,才能解释这类双星光变曲线在整个周期内连续变化和主次食深几乎相等的测光性质。1941 年,古珀(Kuiper)根据洛希模型的几何性质预言不可能存在两子星质量不同的主序相接双星。然而,30 年代以来的观测却表明,大熊 W 型双星是主序星,且质量比的典型值是 0.5。这一所谓古珀伴谬和光变伴谬令人十分困惑。60 年代,依根(Eggen)发现大熊 W 型相接双星的周期同颜色之间在一定范围内存在确定的依赖关系。本宁迪吉克(Binnendijk)发现在大熊 W 型双星中存在着性质明显不同的 A 次型和 W 次型。随后的观测和分析表明, W 次型有许多令人费解的性质,被称作 W 现象。同时还发现,大熊 W 型双星光变曲线的两个极大不对称即奥康内尔(O'Connell)效应。70 年代以来,用现代综合光变曲线法求食双星的测光轨道要素,从所得到的几何形态发现,在各种光谱型和光度型中均有相接双星存在。1968 年,露希(Lucy)提出了第 1 个试图解释古珀伴谬和光变伴谬的大熊 W 型相接双星的结构模型。尽管他的理论有缺陷,但是他的等嫡对流公共包层模型为接着出现的分析食双星测光解的综合光变曲线法奠定了理论基础,同时,也把相接双星的理论研究推向了高潮。70 年代出现的关于相接双星结构理论的两个著名学派(TRO 和 TCO),以及 80 年代以来关于能量转移机制的理论都没有超出对流公共包层的基本框架。

近年来,使用现代综合光变曲线法和交叉相关函数新技术测量了大约 40 颗相接双星的质量、半径和光度等基本参量。这些数据是检验理论模型的主要依据。希尔迪契(Hilditch)使用新的资料分析了大熊 W 型相接双星的演化阶段,得到同以前的结果相似的结论:浅相接度 W 次型的主子星是零年龄主序星,深相接度 A 次型的主子星是主序终端星,并且 W 次型的次子星的半径比同质量主序星的半径大 1.5 倍, A 次型的大 3 倍。次子星的这种超体积现象是核演化的结果,还是来自主子星影响的某种效应目前尚不清楚。随着相接双星观测精度的提高和被发现的数量的增加,合理的分类将有益于更加深入的研究。1990 年,梁德澄根据公共光球的性质,把相接双星分成 4 类:(1)具有公共对流光球的晚型小质量相接双星(大熊 W 型);(2)具有公共辐射光球的早型大质量相接双星;(3)由一个晚型小质量对流光球子星和一个早型大质量辐射光球子星组成的混合型相接双星;(4)具有很深的公共对流光球的超巨星相接双星。一般的晚型相接双星的光球上可能有黑子活动。近年来发现的若干颗大熊 W 型双星(如 TZBOO)的光球上肯定存在强烈的黑子活动。否则无法解释它们古怪的光变(以几年的时标在 A 次型和 W 次型之间转变)。尽管大熊 W 型双星的反罗斯拜(Rossby)数很大,但是,色球和转移区的活动与同型单星的水平相近。不过, X-射线和射电波段观

测表明,冕区活动水平比同型单星低得多。这可能意味着大熊 W 型相接双星没有磁环结构。

构造相接双星的结构模型至少要能解释古珀伴谬和光变伴谬。露西 1968 年的等嫡对流公共包层模型很好地解释了这两个伴谬。然而,他的模型却不能解释周期-颜色关系。于是他修正了最初的模型,并形成以他为首的 TRO 学派。他们放松了露希最初提出的等嫡约束并且假设两子星是非热平衡的。这就必然导致相接双星出现演化上的振荡行为,相接-断裂-相接循环不止。每一形态位相时标依赖于初始条件,典型值大约是 1 000 万年。断裂形态的相接双星在观测上尚未发现,至少在数量上难以支持 TRO。同期,以舒(Shu)为首的 DCO 的学派提出另一结构模型。DCO 假设在公共包层底部至少有一个子星的某些流体力学和热力学参量是不连续的。这就为拟合观测性质提供了更多的自由度。虽然这种假设在物理上很难被接受,但是 DCO 学派极力证明参量的不连续性是必然存在的。且不管 TRO 和 DCO 各自的困难,它们都是建立在物质和角动量守恒基础上的静态结构模型。观测表明,大熊 W 型相接双星有大量的角动量损失。1981 年,莫契纳克(Mochnach)在 TRO 的结构框架下,考虑角动量损失,提出了新演化模型,后来发展成 AML 理论。这个理论能避免相接双星断裂形态的出现,能解释相接双星向小质量比演化的观测事实,并预言大熊 W 型双星将演化成单星。

构造相接双星结构和演化模型的主要困难是能量转移机制问题。第 1 个能量转移机制模型是黑兹莱赫斯特(Hazlehurst) 1973 年提出的。他设想在公共包层内水平方向有一大尺度环流(也称作“横向对流”),驱动力来自压力梯度。但这一理论很快就受到了批评,因为这种大尺度环流很容易被垂直方向的对流和科尔力所破坏。1985 年,黑兹莱赫斯特又提出了一种新的能量转移机制——耗散机制。其基本思想是,能量转移发生在绝热层深处,当热载体元在两子星压力差驱动下从主子星移向次子星后,由于载体元的嫡比它周围物质的嫡大而上浮,直到次子星对流层顶部。在上浮过程中大部分热能变成机械能,最终由于流体阻力效应,这些机械能又转变成热能,从而增加了次子星的表面光度。但是,1990 年辛迦布(Sinjab)等利用这些思想进行数字模拟,得到的结果并不乐观。最近,周道琪和梁德澄证明,静态模型不可能而环流机制不可避免。他们提出了一个稳固环流模型。这个模型的优点是能够解释早型和晚型两类相接双星的情况,他们还试图用这个模型解释 O'Connell 效应。但是,在进行数字模拟之前,还很难断定这个模型将会有怎样的命运。

至今,尚没有一个能较好地解释晚型相接双星的 W 现象的理论模型。产能低的次子星的有效温度反而比主子星高,它们的奇特活动性可能正是真实的能量转移机制所导致的结果。观测表明这类双星肯定有较强的磁场,因此,精确地监测这类相接双星的活动,构造有磁场作用的新的理论模型可能是今后工作的目标之一。另外,观测更多的超巨星相接双星,研究 B 情况和 C 情况质量交流的演化过程将会引起人们的重视。如果今后能解决测量相接双星大气化学元素丰度的技术难题,探讨相接双星子星间很强的相互作用对子星核演化的影响将是很有意义的。

参考文献

- 1 Kuiper G P. *J Ap.* 1941, 93: 133
- 2 Eggen O J. *Mem R A S.* 1967, 70: 111
- 3 Lucy L B. *J. Ap.* 1968, 151: 1123
- 4 Binnendijk L. *Vistas in Astronomy*, 1970, 12: 217
- 5 Lucy L B. *J Ap.* 1976, 205: 208
- 6 Shu F. Lubow S H, Anderson L. *J Ap.* 1976, 229: 223
- 7 Hazlehurst J. *Astron Astrophys.* 1985, 145: 25
- 8 Mochnacki R. *Interacting Binaries.* Dordrecht; D. Reidel, 1985, 51~82
- 9 Hilditch R W, King D J, Mcfarlane T M. *M N R A S.* 1988, 231: 341

(中国科学院云南天文台刘清耀副研究员撰)

银河系结构 galactic structure 银河系的本原和结构的探索是一项古老的天文课题。从18世纪英国赫歇尔(W. Herschel)建立的第1个银河系结构模型算起,已有200年的历史。他根据恒星计数的统计分析,确认银河系是一个扁而平、太阳居于中心位置的恒星系统,规模大小均为1~2kpc(约合3 000~6 000光年)。到20世纪初,荷兰(J. C. Kapteyn)的银河系模型已扩大到12kpc,但关于银河系结构的轮廓依然是赫歇尔图象的反映。1927年,美国沙普利(H. Shapley)根据他所测定的69个球状星团的距离和空间分布,建立了新的银河系结构概念。他的模型是一个透镜形结构,太阳不在银河系中心而在外围地带。60多年来的观测实践和理论研究一再证明,沙普利所揭示的透镜形恒星系统正是我们银河系的真实写照。20年代初,根据恒星运动的不对称性,提出了银河系整体自转的设想。1927年,荷兰奥尔特(J. H. Oort)建立了银河系较差自转动力学,并依据恒星光谱观测资料证实存在理论所预期的较差自转。30年代末以来,银河系结构的研究取得了飞跃的进展。在这个历史性进程中,有四个重大的成就:(1)是证实星族的观念,1944年德国巴德(W. Baade)根据河外星系观测资料指出,包括银河系在内的旋涡星系的成员星,按年龄、化学组成、空间分布和运动特征,可分为星族I和星族II两类,我们的太阳属第I星族。1957年,又进一步把银河系的次系划分为臂族、中介星族I、盘族、中介星族II和星族。 (2)50年代用射电天文方法探测星际气体,描绘出旋涡结构,认识到星际物质在恒星的起源和演化,以及银河系结构和演化之中所起的不容忽视的作用。(3)随着观测波段的开拓,探测目标之所及已深入到银心的核心区 and 广泛的银晕。(4)兴起了银河系和近距星系的对比研究,加深了对银河系本身的认识和了解。银河系结构的宏观图象大致如下。

银盘 银河系的中央平面结构叫银盘,它的直径约为25~30kpc,即约8~10万光年。构成银盘的天体称为盘族,它的成员主要是恒星。太阳位于银盘中,距银心8.5kpc,约合2.5万光年。银盘整体自转,太阳和太阳附近的恒星以每秒220km的速度绕银心运动,公转1周约2亿年。盘族中除恒星外,还有星际物质,主要是气体云。用射电天文方法发现,除中性氢外,还有分子氢。它们集聚成大型分子云,直径达20~80pc,多分布于距离银心4~8kpc的环带中,估计约有5 000个这种大型分子云。在银盘中,还有不同类型的非热辐射源。近20年,在射电波段发现了约150个超新星遗迹,基本上分布在沿银道面的一条狭窄天区内。脉冲星也是分布在银道面上下的非热射电源,自从1967年发现迄今已确认了500多个。

旋涡结构和旋臂 1951年,美国摩根(W. W. Morgan)等人根据O-B型恒星、电离区等高光度天体的空间分布,第1次描绘出太阳附近的旋涡结构,在半径为3kpc的空间,得见猎户、英仙和人马3条旋臂。与此同时,荷兰、美国、澳大利亚的几个研究小组开展了中性氢21cm射电波的巡视。1953~1954年,米勒(C. A. Muller)、奥尔特等人利用他们测定的中性氢的距离资料,描绘出银河系旋涡结构宏观图象。1976年,藉助电离氢区的光学观测资料和中性氢的射电观测数据,追索出的旋涡结构几乎概括了大半个银盘。计有4条旋臂:人马—船底主臂、盾牌—南十字中间臂、短尺内臂和英仙外臂。这一幅旋涡结构图象迄今广泛采用。

核球和银心 核球是银河系中央隆起的椭球状结构,长轴约4~5kpc,厚约4kpc,银心是指核球中心区的大质量的致密核。核球是恒星和分子云的密集区,结构复杂,其中既有星族II的老年恒星,也有星族I的高光度巨星。银心则是一个具有多种激烈的、高能的活性区域。那里有致密的射电源、红外源,还是一个强X射线源和偶发 γ 射线爆发源。关于银心的本原及其在银河系结构中所起的作用和在银河系起源与演化进程的地位均有待进一步认识和了解。

银晕和银冕 以银河系中心为球心、恒星和星际物质的密

度均比银盘为小的球状系统叫银晕。长轴超过3Mpc,即约10万光年以上。其中稀疏地分布着球状星团、星族II的其他类型老年恒星和星际物质。银冕则是笼罩在银晕之外的物质密度更为稀薄的球状结构。银冕的长轴可能超过5Mpc。根据中性氢和星际一氧化碳的射电观测,求出的银河系自转曲线表明,自转速度并不随着距离远离银心而显著减慢,这意味着银河系外围该有更多的物质。按照光学波段的探测,银河系的总质量为1 000亿太阳质量,即银河系内约有1 000~2 000亿个恒星和约占总质量1/10的星际物质。所以,银晕和银冕是否存在暗物质仍是一个谜。

银河系距离尺度 恒星和银河系内其他天体的距离测量是确定银河系结构的大小和规模的基础。天体距离测量的基础是三角视差法,但这种直接测量的适用范围有限,只在不超过100pc的近期空间有效。100pc这段距离和以kpc为计的银河系空间相比是微不足道的一个小量。所以,凡超过三角视差精度极限的一切距离测量,都不得不使用其他间接测量方法。现代天文学所应用的距离尺度中精度最高的计有毕星团的距离、天琴RR型变星的平均光度等有限几种。随着天文学的进展,距离尺度也不断改善和修订。例如,1952年之后,毕星团的距离值取为40pc(130光年),1974年修订为44pc(144光年),1978年又订正为46pc(150光年)。所以,凡是以往以毕星团距离作为尺度的距离测量,25年内都变动了4.5%~15%不等。这样,就牵动了银河系大小,太阳和银心的距离等基本参量。1964年,国际天文学联合会确定,银心距 $R_0=1\text{Mpc}$,太阳绕银心的圆轨道速度 $\theta_0=250\text{km/s}$ 。1985年,该国际组织建议的新值是 $R_0=8.5\text{kpc}=220\text{km/s}$ 。用新值求出的银河系结构宏观图象,其银盘直径小了15%,自转速度慢了10%,太阳和银心之间的银河系内围质量少了1/3。这样,随着天文学的进步,对银河系结构的认识也将不断地深入和更新。

参考文献

- 1 Morgan W. W. et al. *Astronomical Journal*, 1951, 57, 3
- 2 Oort J. H. et al. *Monthly Notices*, 1958, 118, 379
- 3 Blaauw A. et al. *Stars and Stellar Systems*, 1964, 5
- 4 Bok B. J. et al. *The Milky Way*, 1981, 5
- 5 Van Woerden H. et al. *The Milky Way Galaxy*, 1985
- 6 Gilmore G. et al. *The Galaxy*, 1987

(北京天文台博士生导师李竞研究员撰)

球状星团 globular cluster 由数千至数十万颗恒星在引力约束下聚集在半径为10~100pc的球形区域内组成的致密恒星集团。它们结构单纯而明亮,可以根据它们在银河系和邻近星系中的空间分布、元素丰度和运动特性的相关性等,研究星系的结构和组成,作为引力相互作用下长期稳定的多体系统,它们是研究恒星集团动力学演化的理想目标。球状星团中的大量恒星年龄和初始化学组成相近,是研究恒星结构和演化理论的重要观测基础。银河系球状星团是最古老的的天体,可以用来估计宇宙年龄,并有助于研究星系的形成过程。

北半球肉眼可见的球状星团只有M13。早在1784年梅西叶(Messier)天体表中就列入了数十个球状星团。目前银河系内共发现球状星团134个左右。在本星系群和室女星系团一些星系中观测到了数千个球状星团。

1918年美国沙普利(Shapley)研究了当时已知的约100个球状星团的空间分布,发现有1/3集中在人马座内,90%以上位于以人马座为中心的半个天球上。借助勒维特(Leavitt)等人确立的造父变星周光关系,他估计了到各球状星团的距离,结果发现,由各球状星团所组成的系统的中心即银河系的中心并不是太阳。这是继哥白尼(Copernicus)否定地球为宇宙中心之后又一重大发现。

自1911年和1913年赫茨普龙(Hertzsprung)、罗素(Russel)分别独立发现诸恒星的光度和颜色分布的规律性(赫罗图)以及1958年史瓦西(Schwarzschild)完成了恒星结构和演化的系统理论以来,球状星团赫罗图的观测及与理论模型的比

较,一直是球状星团研究的重点。因为球状星团包含大量恒星,它们离我们距离相近,年龄相近,初始化学组成也相近。因此星团赫罗图很易于与恒星演化理论比较,球状星团赫罗图与多数疏散星团的赫罗图显著不同。球状星团中没有绝对星等亮于-3等的恒星,而且最亮的星中没有蓝星,而是黄红色巨星。主序星都晚于F型。这些特征表明,球状星团是比疏散星团古老得多的恒星集团,可能是银河系中最初形成的一批天体。60年代和70年代中有关巨星支、亚巨星支、水平支等一些理论预言陆续通过了观测的检验。

球状星团是在引力约束下长期稳定的多体系统,是研究N体系统动力学演化的理想天体。观测表明,球状星团的光度分布规则而稳定,一些更大的球状系统如旋涡星系的核球和椭圆星系,甚至包含多个星系的一些星系团,其光度分布规律也与球状星团类似,表明它们都是经过充分弛豫的系统。1966年由金(King)提出了成功描述光度分布规律的动力学模型,假定通过恒星间两体碰撞弛豫过程,诸恒星的速度分布趋于高斯分布,但高速运动的恒星将能逃逸出球状星团的有限引力势阱,从而使高斯分布高能尾有截断。根据这一动力学模型,球状星团的光度分布可以由一个无量纲参量完全描述,最常用的参量为球状星团的致密度C,它反映诸恒星向中心区聚集的程度,C值愈大,系统愈致密。虽然目前已发现金模型的不少缺点,但由于它简单并且易于观测比较,目前仍是最常用的模型。

球形多体系统演化至规则的光度分布,需要有效的弛豫过程。虽然对较为密集的古老银河球状星团,两体碰撞弛豫时间短于系统的年龄。但是,当讨论光度分布类似的更大球形系统时,两体碰撞弛豫时间远远超过宇宙年龄,1967年林德-贝尔(Linden-Bell)首先提出了球形系统早期坍缩时会发生剧烈弛豫过程,可以在坍缩时间的量级上,建立起充分弛豫的光度分布。这一研究成果,对理解巨大的球形恒星系统的形成过程有重要的意义。

球状星团的年龄,远远大于两体碰撞时标,这时需要考虑球形系统的长时标演化。早在60年代理论工作已经指出,球形系统在核心足够密集时,会出现核坍缩现象,这时光度分布不能再用金模型描述。70年代中期,只发现了M15一个球状星团与金模型明显不符。80年代中期以后,CCD等新型探测器投入观测,可以观测到角秒量级的中心区域光度分布,结果德约果夫斯基(Djorgovski)等在127个研究过的球状星团中,发现了近1/5(26个)球状星团中心有核坍缩现象,证实了早期的理论预言,推动了长时标动力学演化的研究工作。

80年代中期以后,球状星团赫罗图的研究也进入了一个新的时期。首先是由于CCD等新测光设备可以测到更暗恒星,从而提供了大量银河球状星团的可靠的赫罗图和光度函数的资料。同时,大小麦哲伦云中球状星团的观测提供了年龄相差很多、丰度也相差很多的球状星团的资料,这就为较为年青和各种丰度的恒星演化模型提供了观测检验的可能。另一方面,恒星演化理论的进展和大型计算机的应用,使恒星演化模型的计算更为准确,也扩展到了主序之后的红巨星支、水平支、渐近巨星支等各晚期演化阶段。因此理论与观测赫罗图和光度函数比较时,不再局限于个别观测特征,而需要考虑总体特征的相符。新观测表明,球状星团主序折向点的(B-V)范围非常狭窄(只有0.01等),因此排除了由磁场、旋转,主序阶段大的质量流失等非经典因素为主的可能性。同时,由红巨星支的颜色,水平支的颜色分布,渐近巨星支的最亮光度等一些特征,又可以把混合长标高,红巨星阶段表征质量流失效率的参数 η 等作出相当精确的定标。麦哲伦云中年龄小于 4×10^9 G(折向点恒星质量大于 $1.6 M_{\odot}$)的球状星团的观测,肯定了较大质量恒星演化中对流起着相当重要的作用,它将使得主序星寿命加长,光度增加,同时减低He燃烧时间,从而显著改变星团的光度函数。这些参数的准确定标,不仅深化了对恒星演化的理解,而且确定星团年龄、丰度等特征量时可以达到更高的精度和可靠性,从而可以更广泛地应用恒星演化理论于

各种天体物理问题。

球状星团研究对宇宙学最重要的贡献是宇宙年龄的确定。年龄确定的基本原则是观测赫罗图特征与恒星演化理论计算的对比,目前认为误差最小的方法是测量折向点与水平支绝对热星等之差 Δm ,这种方法对重元素丰度的依赖性较弱,结果表明,几乎所有银河球状星团年龄都相近,约为 $(16 \pm 3) \times 10^9$ 年。这与哈勃常数测定给出的宇宙年龄,与放射性同位素测定给出的宇宙年龄基本相符。进一步提高年龄估计的精度,是目前研究的重要方向。

球状星团在星系中的位置、丰度、运动特征之间的关联,是探讨星系形成过程的重要线索。银河系中没有年青的球状星团,而麦哲伦云中有,这一重要事实对星系形成理论也有重要意义。自1985年弗尔(Fall)等提出第一个球状星团形成模型以来,球状星团的形成机制已成为当前研究的前沿之一。

美国哈勃空间望远镜发射成功后,分辨率和灵敏度都比地面最大望远镜优越许多。球状星团的研究是空间望远镜计划的重要部分。预计在赫罗图特征和光度函数、球状星团中心区光度分布、邻近星系中球状星团特性研究等方面都会取得大量新资料,大大推动球状星团研究的进展。

参考文献

- 1 Fall S M, et al. Ap J, 1985, 298: 18
- 2 Djorgovski S, et al. Ap J, 1986, 305: L61
- 3 Freeman K. A R A & A, 1987, 25: 603
- 4 Renzini A, et al. A R A & A, 1988, 26: 199
- 5 Chiosi C, et al. A Ap, 1989, 219: 167
- 6 马骥, 等. 天文学进展, 1990, 4: 317
- 7 马骥, 等. 天文学进展, 1991, 1: 22
- 8 Lauer T R, et al. Ap J, 1991, L45

(中国科学院北京天文台马骥研究员撰)

疏散星团 open star cluster 是一种结构比较松散、外形较不规则的恒星集团,通常由几十颗至数百颗恒星组成。因其大多位于银道面附近,曾取名银河星团。疏散星团的研究,对于天体物理学、银河系天文学,特别是对恒星演化、恒星动力学及银河系结构研究有着重要意义。主要内容包括星团成员判别,基本参量确定,光度函数,团内恒星的演化,团的形成、结构、内部运动和动力学性质等。

确定星团成员是疏散星团全部工作的基础。早期,仅仅根据恒星在天球上的投影位置来作成员判别,后期则引入了物理学和运动学数据。目前应用最广泛的观测资料是恒星自行。1971年,桑德斯(W. L. Sanders)的工作为星团自行成员确定奠定了较为严格的数学基础。嗣后,不少人对桑德斯方法又作了一些重要的改进,使疏散星团成员的确定更为合理。

年龄是疏散星团最重要的基本参量之一。随着恒星光谱精度的提高,使获得高质量的星团颜色-星等图成为可能,从而为确定星团的年龄提供了有用的工具。20世纪50年代曾利用主序折向点作为标龄参数以估计疏散星团的年龄。另一种早期广泛使用的方法是复合HR图。这两种方法所得出的星团年龄的精度比较低。随着恒星演化理论的进展,目前常用的是等龄线法,即把疏散星团的观测颜色-星等图与理论演化模型的等龄线相比较来确定团的年龄,可以得到较为准确的结果,如范登伯格(Vanden Berg)的工作。另一种更为准确的方法是帕罗斯(Palous)于1977年提出的演化迹线法,不过由于其复杂性而尚未得到广泛的应用。

疏散星团的另一个重要基本参量是团的质量。通过观测得到团内恒星的速度弥散度并利用位力定理,可以求得团的位力质量。另一方面,由观测得出的团内各别恒星的质量之和可以确定星团的光度质量。在计算光度质量时,需要确定团内恒星按星等的频数分布-光度函数,并考虑双星、暗星等因素的影响。位力质量一般明显大于光度质量,通常认为这一差异是由光度函数的

不完整性以及团内存在未能观测到的暗物质而引起的。光度函数本身的研究对于认识星团的形成和演化是十分重要的。目前这方面的工作主要在于比较团星和场星,以及团内不同区域恒星的光度函数,但迄今尚未得到一致性的结论。

通常认为星团成员星是在同一时期内形成的。由于不同恒星有着不同的质量,而恒星演化进程的快慢又取决于它们的质量,因而不同年龄疏散星团的颜色、星等图便为检验恒星演化理论提供了极好的工具。有关恒星演化模型及相应的恒星演化迹线和等龄线方面的工作,近年来有引人注目的改进,包括采用新的恒星物理学数据,考虑恒星风导致的质量损失,以及特别是关于恒星内部对流理论的进展,现已认识到恒星核区对流对冲击效应对于恒星的演化进程有很大的影响,乔西(Chiosi)和贝塔里(Bertelli)等人的工作代表了这方面的最新成就。有关疏散星团中恒星演化的问题,新的热点表现在对兰离散星、主序空缺和双重重主序等现象的深入研究。鉴于问题的复杂性,目前对这些现象尚未达成一致性的认识。一些解释涉及到团内双星的存在,恒星演化的细节,以及团内恒星的两次或多次形成,后者对星团恒星同时形成的传统观念提出了严重的挑战。这些新问题的研究可望在90年代有较大的突破,并将促使人们对恒星演化理论有更深入、全面的认识。

疏散星团的基本特征是一种小数目的恒星系统,成员星数通常不超过1000个,这就给恒星动力学理论的应用造成了很大的困难。对于星数众多的球状星团来说,动力学演化时间远大于恒星通过能量交换而使系统趋于平衡所需要的时间弛豫时间,而后者又远大于系统内一颗典型恒星穿越整个恒星系统的时间一穿越时间,这给球状星团的动力学研究带来了很大的方便。但是,疏散星团的演化时间、弛豫时间和穿越时间三者之间不存在上述关系,因而迄今还未能象球状星团那样由恒星动力学统计理论得出普遍性的动力学模型。目前,有关这方面的理论知识大多来自N体数值模拟对星团演化期间动力学演化过程进行跟踪和描述。另一方面,由于疏散星团一般离开我们比较近,加之有较宽的恒星质量范围,可以比球状星团更为仔细地研究团内的小质量暗星、双星以及内部运动和某些动力学问题。

星团的恒星投影数密度分布为研究星团结构提供了重要的观测资料。老年富疏散星团的数密度分布类似于球状星团,可以用多质量King模型作很好的拟合。在结构上,疏散星团普遍表现出不同程度的空间质量分层效应,即大质量恒星较之小质量星有更明显的向团中心密集的趋势。N体模拟也证实质量分层必然出现。近期的研究进一步证实疏散星团实际上由团核和外部团冕两部分构成,团核主要由大质量亮星组成,团冕则包含了大量的暗星。同时证明团冕是团所固有的一部分,它是在星团形成初期与团核同时诞生的,从而否定了团冕由团核中恒星向外逃逸而形成的观点。但是,团冕的观测以及成员判别相当困难,因而它们的研究并不充分。这也是近年来有关疏散星团研究的热点之一。

随着观测资料质量的提高和数量的积累,最近几年来对疏散星团内部运动的研究逐渐增多。疏散星团的内禀速度弥散度一般都很小,通常在1km/s左右。对速度弥散度与恒星质量间关系进行研究,发现疏散星团的速度质量分层效应很不明显,甚至完全不存在。从动力学观点上来讲,这一点与上述空间质量分层颇有矛盾,从而引起了研究者的注意。

恒星和星团的形成起始于分子云的坍缩。从分子云中诞生的恒星系统可能是引力束缚系统,也可能是引力非束缚系统,其主要取决于分子云中的恒星形成效率和气体驱离时间。当恒星形成效率过低、气体驱离时间过快时,所形成的通常为引力非束缚系统。相反,较高的恒星形成效率和较慢的气体驱离过程则有利于形成束缚星团,外部因素对束缚系统的形成也有着不可忽视的影响。如银河系潮汐力场作用使星团的线度不会超过一定的限度,否则系统就不可能稳定。此外,过大质量的分子云很可能形成非束缚恒星系统。普遍的观点是,团内恒星的形成是一种持续

的过程,其时间跨度通常为 $10^7 \sim 10^8$ 年。最近,伊格恩(Eggen)和依本(Iben)认为年轻星团中可能发生过多次间隔式的恒星爆发式形成事件,并用此解释年轻星团中的兰离散星现象。

疏散星团形成后,长时标动力学演化后的最终结局可能是团的完全瓦解。从观测上来看,疏散星团的数目随年龄的增大而明显减少是一个证明。另一方面,理论研究和N体模拟工作表明,很多因素会影响到疏散星团的动力学演化,并最终导致团本体的瓦解。这里,内部因素包括团内恒星间的交会、有序后恒星的质损损失、双星的存在等;外部因素有银河系潮汐力场以及近邻星际云的潮汐激波。

疏散星团作为一种恒星系统,在银河系天文学的研究中有着其独特的重要地位。应该指出的是,若干问题,比如动力学理论模型、兰离散星等现象的解释、光度函数和质量函数的普适性等,至今尚未得到最后的解决,这将推动天文学家从观测和理论两个方面去作深入的研究。

参考文献

- 1 Sanders W L, AAp, 1971, 14, 226
- 2 Paloni J, et al, AAp, 1977, 61, 27
- 3 Terlevich E, MNRAS, 1987, 221, 193
- 4 Chiosi A C, et al, AAp, 1988, 196, 84
- 5 Eggen O J, et al, AJ, 1988, 96, 635
- 6 Bertelli G, et al, AAp Srpp Ser, 1990, 85, 845
- 7 Bonfanti A, et al, MNRAS, 1990, 245, 15
- 8 Dandey A K, et al, AJ, 1990, 49, 617
- 9 Marco M, et al, AJ, 1990, 100, 469

(上海天文台赵梓亮研究员撰)

河外 X 射线源 X-ray sources outside the galaxy

主要有活动星系核和星系团两大类。前者大都是尺度小于0.1pc的致密源,主要包括塞佛特星系、射电星系、BL Lac型天体和类星体等,其X射线辐射与星系核的活动性有密切联系。后者一般是尺度在0.1Mpc~1Mpc范围内的延伸源,其X射线辐射和星系团内的物质分布有关。研究它们X射线辐射的辐射机制、亮度分布、光变特性以及与其他波段辐射的相关性等,对揭示活动星系核的物理本质,探索星系、星系团的结构起源与演化,了解宇宙早期的演化历史等都具有重要的意义。

正常星系是主要由 $10^7 \sim 10^{11}$ 颗恒星所组成的集合体,它们在引力稳定形态下主要通过热平衡过程进行演化,自20世纪40年代以来,美国塞佛特(C. K. Seyfert)等先后发现了一系列显示有整体性的力学不稳定性或非热平衡过程的活动星系,其活动性主要起源于尺度极小的星系核中。1958年前苏联安巴楚勉(V. A. Ambartsumian)甚至进而提出星系中心可能就是星系的诞生地的大胆设想。1962年,荷兰斯密特(M. Schmidt)等发现了活动性最强也是最遥远的一类致密天体,即类星体。据认为它们可能也是活动星系的核,只是距离更加遥远因而处于宇宙演化的更早期阶段的活动星系核。在1970年以前的探空火箭发现的X射线源中,河外X射线源只有射电源VirA、CenA和类星体3C273等少数几个。1970年12月,由贾科尼(R. Giacconi)设计并指导的第一颗专门用于X射线探测的天文卫星“乌呼鲁”发射升空,从而揭开了X射线天文学的新篇章,也极大地促进了河外X射线源的观测研究。在它记录到的200多个X射线源中有半数左右的源位于大于 20° 的高银纬区,其中的绝大多数都是河外X射线源。早期的研究工作主要集中在这些河外源的认证上。1971年古斯基(H. Gursky)等在X射线波段探测到第1个塞佛特星系NGC4151。1976年属BL Lac型天体的MK421和MK501也相继被认为X射线源2A1101+38和4U1651+39。随着X射线空间探测技术的提高,尤其是自1978年11月美国发射的爱因斯坦卫星上天后,不仅使河外X射线源的观测认证工作取得了巨大进展,而且也使理论研究工作向前迈进了一大步,开始由一般认证转向更深入的理论分析阶段。

正常星系的辐射主要由其恒星辐射累积而成,因而辐射谱近似于温度为 $5\,000\sim 10\,000\text{K}$ 的黑体谱,辐射能量主要集中在光学波段。其X射线辐射光度一般很低,约只有光学辐射的 10^{-5} 。活动星系的一个显著特征就是在其连续辐射谱中有由于非热过程引起的超额红外、紫外、射电和X射线辐射,其X射线光度可达到近千甚至超过光学光度。这些超额辐射具有明显的非恒星起源特征。一般认为射电辐射主要是由于相对论性的高能电子在星系磁场中的同步辐射所产生的。而统计分析表明,活动星系核的X射线辐射和射电辐射间存在明显的相关性。1981年查莫拉利(G. Zamorani)等首先注意到对于一定的光学光度,射电亮类星体的X射线辐射量约为射电宁静类星体X射线辐射量的3倍。1983年焦亚(I. M. L. Gioia)等发现在X射线选择的类星体中认为射电源的概率及其射电光度均高于光学选择的类星体。这种相关性意味着在X射线辐射中一定存在有与射电辐射过程相关联的成份。射电辐射和X射线辐射都是高能过程,产生X射线辐射的机制主要有温度为 $10^6\sim 10^{10}\text{K}$ 的热辐射、能量为 $50\sim 5\,000\text{GeV}$ 的极端相对论电子在星系磁场中的同步辐射,以及能量为 $5\sim 500\text{MeV}$ 的相对论电子在恒星光子场中的逆康普顿散射。在一些活动星系核中所观测到的X射线谱很接近于幂律谱,这排除了由高温等离子体的热致辐射直接形成X射线谱的可能性。1984年乌波蒂尼(P. Ubertini)等指出同步自康普顿模型可以用来解释谱形较陡的BLLac型天体的X射线辐射。目前比较流行的看法认为活动星系核的X射线谱主要是由韧致或同步辐射过程所产生的低频光子经相对论性电子散射成高能光子的逆康普顿过程所形成的。

活动星系核的重要特征之一就是普遍存在有时标为小时到年的光变行为,而且不同波段的光变时标和光变特征很不相同。这可能意味着它们产生于活动星系核中的不同区域。对于大幅度的光变行为,辐射区域的尺度一般不可能大于光波在光变时标内的传播距离。在许多塞佛特星系和一些低光度类星体中都观测到有时标为小时的X射线光变,相应的尺度相当于质量为 $10^6\sim 10^8M_{\odot}$ 的黑洞半径。1986年巴(P. Barr)对部分塞佛特星系和类星体的X射线光变时标与X射线光度间所作的分析表明两者间存在明显的正相关,这被看作是X射线辐射来自活动星系核中心的大质量黑洞吸积过程的证据。有关活动星系核物理模型的理论分析也表明在它的中心存在有大质量黑洞。

很早人们就已发现星系也和恒星类似地有聚集成团的现象。1933年瑞士兹维基(F. Zwicky)最先注意到星系的维里质量总是大于它的光度质量,此后进一步的观测研究表明这是一个普遍现象。星系团的维里质量约为光度质量的10倍。这一现象作为著名的“短缺质量”问题已引起天文学家们的广泛注意。可能的解释之一就是短缺质量由不发光的星系际气体构成。星系团X射线辐射的发现为这类气体的存在提供了最直接的证据。1962年兹维基发现在后发星系团后面观测到的星系团数少于其附近天区中的星系团数,他认为这是后发星系团内星系际物质消光的结果。1971年古斯基等首次在后发星系团中确认了星系团X射线辐射的存在。随后,在X射线波段观测到的星系团的数目不断增加,理论上的研究也不断深入。星系团X射线源不仅都是延伸源,而且它的辐射强度也比其内所有成员星系的X射线辐射的累积强度高 $10\sim 100$ 倍。这表明星系团的X射线辐射不是由其内的成员星系发出的,而是由星系团内的星系际气体所发出的。这些星系际气体可能来自成员星系的质量损失,也可能来自落入星系团内的宇宙介质。在星系团谱中还发现了近似于太阳丰富度的铁发射线,这进一步证明星系团中存在有星系际物质。同时,这也说明了至少在 10keV 以下的X射线辐射主要是由温度在 10^8K 左右的高温气体的热致辐射所产生的。星系团X射线辐射的另一个可能机制是由宇宙线电子与微波背景光子碰撞引起的逆康普顿辐射。不过,这两种机制都还有待进一步的观测支持。

在X射线观测中还发现有不能分辨成分立源的弥散成份存

在,称为宇宙X射线背景,它具有近似各向同性的分布特征。进一步的观测分析表明 2keV 以上的X射线背景主要产生于银河系外,而 1keV 以下则大部分产生于银河系内。河外背景X射线的辐射机制尚无定论,主要有两种观点,一是认为宇宙间普遍存在有温度高达 10^8K 左右的高温热等离子体,它们的热致辐射形成了宇宙X射线背景。另一种观点认为X射线辐射背景是由分立X射线源的辐射累积而成的,于是计算河外X射线源对X射线背景的贡献也是河外X射线源研究的重要课题之一。1979年贾科尼和1981年莫瑞(S. Murray)根据流量计数法估算活动星系核对X射线背景的贡献为35%左右,而1984年麦克卡罗(T. Maccacaro)等用光度函数方法得到百分比高达80%。尽管两种方法的结果相差近一倍,但都表明宇宙X射线背景辐射中有相当一部分来自活动星系核的贡献,而星系团的贡献要小得多。1980年麦基(J. D. McKee)等在确定了星系团的X射线光度函数后发现它们对X射线背景的贡献仅为4%~9%。至于银河系内弥散X射线的起源一般认为是宇宙线和星际介质相互作用的结果,但据认为也有20%的成份来自弱X射线点源的贡献。

在河外X射线源中还存在着一些未证认出光学对应体的源,它们可能是距离太远而看不到光学对应体,由此估计其X射线辐射将至少比光学辐射强100倍。这种异常天体对于研究星系演化和宇宙的早期条件无疑有着重要的意义。

河外X射线源的研究,涉及到从活动星系核的理论模型到宇宙早期演化历史等一系列重要的天体物理问题。诸如活动星系核中高能电子的来源和加速、X射线光变的物理机制、星系团和宇宙中高温气体的加热机制和分布状态等都只是推测性的,进一步的理论依据需要高精度、高分辨率的X射线观测,1990年发射的X射线卫星ROSAT和即将发射的高级X射线天体物理设备AXAF等正是这种努力的一部分。预计它们的发射将会和乌呼鲁卫星及爱因斯卫星一样给河外X射线源的研究带来巨大进展。

参考文献

- 1 Brecher K. et al. comments *Astrophys, Space Phys.*, 1970, 2: 75
- 2 Lea S M. et al. *ApJ*, 1973, 184: L105
- 3 Kellogg E. *X-ray Astronomy*, 1974, 321
- 4 Takahara F. et al. *ApJ*, 1981, 251: 26
- 5 Forman W. et al. *Ann Rev Astron Astrophys*, 1982, 20: 547
- 6 Brinkman W. et al. *X-ray and Uv emission from quasars and Agns*, 1984
- 7 Zamorani G. *ApJ*, 1985, 299: 814
- 8 Danese L. A. A., 1986, 161: 1
- 9 Dan Mc Cammon. *Ann Rev Astron Astrophys*, 1990, 28: 657

(芜湖师范专科学校吴德金撰)

活动星系 active galaxy

20世纪40年代后期,射电天文兴起和应用了新的测光技术以后,天文学家相继发现了一系列有激烈活动的河外天体,如赛弗特星系(Seyfert galaxy)、N星系(N galaxy)、类星体(Quasar)、蝎虎座BL型天体(BL Lac object)和射电星系(Radio galaxy)等。这些天体的一个共同特点是:从一个很小的、直径几光年,甚至只有太阳系那么大小的亮核心中发射出巨大的能量—太阳光度的 $10^{12}\sim 10^{14}$ 倍,即比我们银河系的光度大 $50\sim 5\,000$ 倍。除类星体外,人们习惯上将这些天体概称为活动星系,亦称扰动星系。近年来,许多观测事实表明类星体是遥远的I型赛弗特星系的核,因此,类星体亦可归纳在活动星系的行列之中。相对说来,哈勃当年发现的一些核心活动不太剧烈的椭圆星系、旋涡星系、棒旋星系和不规则星系等则总称之为哈勃类型的正常星系(Normal galaxy)。这两大类星系之间,除射电星系具有对称的巨大射电瓣之外,从外形上说,基本上没有太奇特的区别,主要在于星系核输出能量的大小。因此,说到活动星系应着重剖析其核心的活动情形。

活动星系核(Active galactic nucleus, AGN)的物理特征,通常涉及光度大小,射电输出的功率,有无宽发射线(例如, I 型赛弗特星系发射线的宽度相当于每秒几千公里核心气体的运动速度),有无高激发态的窄发射线(例如, I 型赛弗特星系禁线的宽度只相当于每秒几百公里核心有关气体的运动速度),光度的激变程度,红外、紫外及 X 射线发射的相对强度,连续谱与发射线强度之比以及辐射偏振的大小等等。经过多年的研究,对 AGN 的特征大体上可以概括为下列 4 条:①与相同哈勃类型正常星系的核心相比,具有更亮的致密核心;②非热辐射的连续谱发射;③其发射线表明它们来自恒星的激发机制;④变化的连续谱和/或发射线。许多赛弗特星系、射电星系及类星体都表现出这 4 个特征,而蝎虎座 BL 型天体(以下简称蝎虎天体)则明显地具有①、②及③ 3 个特征。还有一类由赫克曼(T. M. Heckman)在 1980 年命名的活动星系核:低电离核区(LINER, Low ionization nuclear emission region)则显示有特征③,有时有特征②或④。在已知的全天亮星系中,约有 1/3 在其中心核球区,都表现出一定大小的低电离核区。有些学者认为,低电离核区与星系中的电离氢区(H II 区)和赛弗特星系核的区别在于二者是分别由激波、热星和幂律源所电离的。

多年来,困扰着天文学家的难题之一是 AGN 的能源机制问题:在一个亮度和发射区都急速变化着的直径约几光年大小的体积中怎么会发射出如此巨大的能量呢?虽有种种假说,如超大质量恒星说,超大质量磁核说等,但目前流行的仍旧是所谓超大质量黑洞模型,即在星系中心存在着一个 $10^6 \sim 10^{10}$ 倍太阳质量的大质量黑洞。能量的产生和运输是由某种涌入星系中心的气体和连接黑洞与更远方气体的磁场的结合来完成的。一或二个从 AGN 向外的准直得较好的粒子、场及光子喷流以近乎光速的速度向外喷射。用变化各种物理参数的办法来适应不同种类的 AGN,这些参数有黑洞的质量、入射气体的速度、磁场的强度和方向、周围气体的几何形状、喷流准直的机制和精度、喷流的主要成分(电子及正电子或电子和质子组成的等离子体、磁场、光子等)以及喷流与我们视线间的夹角等等。

1987 年,英国劳伦兹(A. Lawrence)在对观察到的各种活动星系的现象进行分析后,提出了对 AGN 统一的看法:(1)遮蔽着星系核尘埃的多少导致 I 型和 II 型 AGN 的区别,他把 I 型和 II 型赛弗特星系的概念推广应用到处星体和其他 AGN。由于罗旺-罗宾逊(Michael Rowan-Robinson)等人对 AGN 附近尘埃的研究,人们相信 I 型赛弗特星系的宽发射线和 II 型赛弗特星系的窄发射线是分别由两种不同区域之气体造成的:宽线区的气体离星系核只有几光年,这些气体运动得很快,而窄线区的气体离星系核较远且比宽线区气体大 1 000 倍,其中所含尘埃也较多,如果小的宽线区气体被尘埃所遮挡,则观测到的现象主要反映了窄线区气体的活动,如果宽线区气体未被尘埃所遮蔽,则将观测到宽发射线,总之,宽线与窄线的对比被尘埃遮蔽的程度而定;(2)对相对论性喷流,视角度的不同产生布莱札(Blazar)和 I 型 AGN 的区别。布莱札是蝎虎天体和光学激变类星体 OVV (Optically Violent Variable Quasar)的合称,这些天体在亮度上变化得很快,有强偏振,并具有一个在所有波长上等强辐射的致密射电源和在可见光及近红外波段有平滑的连续谱。

1989 年初,荷兰巴瑟尔(P. Barthel)提出了一个统一类星体和射电星系的模型。他是在比较了红移值在 0.5~1.0 之间的 30 个射电星系和 12 个类星体的性质后提出这一模型的,围绕着活动核中心“发电机”的,是一浓密尘埃云“面包圈”。从星系核发出的喷流沿圈轴向星系两侧射出。若圈壁正对着我们,由于尘埃圈挡住了星系核,观测者只见到从核心伸向远方的射电瓣,天文学家乃将其归入射电星系类;如果“面包圈”侧向着我们,观测者能直接见到亮核,这便是类星体了。

在尘埃圈斜对着我们的情形,一个喷流迎面而来,另一个喷流则远离而去。按照爱因斯坦相对论,从一快速运动物体发出的辐射在朝前方向上被“聚束”,使迎面而来的喷流显得比离我们远

去的喷流亮几百倍,因而在望远镜中只看到从类星体发射出来的一个亮喷流。而在射电星系的情形,两个喷流基本上都与我们的视线垂直,因而都能见到,但比起类星体的亮喷流却要暗弱得多。该模型还能解释一些类星体中心喷流向外运动速度的超光速之谜。如果沿喷流方向向发出强光和射电的源看去,强光将淹没来自源中气体的谱线,则我们见到的便是蝎虎天体了。由此可见,按照巴瑟尔模型,射电星系、类星体和蝎虎天体乃是同一类天体,只是由于我们所见到的是不同的侧面,乃出现 3 类性质有所不同的天体。

欧洲南方天文台的塔德亨特(C. Tadhunter)和特斯维托努夫(Z. Tsvetanov)摄得的室女星座 I 型赛弗特星系 NGC5252 的 CCD(电荷耦合器件)像是对巴瑟尔模型的支持。该星系二次电离氢发射线的 CCD 像显示出从星系中心发出的对顶的两束光锥,每个光锥长约 10 万光年,光锥中还显现出一系列的“亮层”,如果星系盘中的星际介质被从星系核发出的但不是均匀地射向所有方向的射线所照亮的话,就会出现上述现象;另一幅按氧发射线和红色的氢 α 线一定强度之比的 CCD 像在星系中心显示出一道与上述光锥方向垂直的暗带。两位科学家相信此暗带就是巴瑟尔模型中“面包圈”的投影,它约束着从星系核发出的质点或光线的方向。

活动星系与正常星系的区别,除星系核输出能量的大小外,还有个演化序列问题。现在流行的看法认为,蝎虎天体可能是椭圆星系的早期演化阶段,而赛弗特星系是类星体向正常旋涡星系演化的中间过程。随着观测手段的扩大和更新,新的观测结果不断涌现,活动星系中也不断出现新的名字,如马卡良星系(Markarian galaxy)、星爆星系(Starburst galaxy)、双核和多核星系(Double and Multiple nuclei galaxy)等。对于各类活动星系,在观测和理论探讨两方面,中国天文工作者都做了可喜的贡献,其丰盛的内容从 1987 年以来出版的中国天文学文摘所载可见一斑。

参考文献

- 1 Berman L, Evans J C. Exploing the cosmos, 1983, 386 及 449
- 2 Lawrence A. PASP, 1987, 99(5): 309
- 3 Ptak R, Stoner R. Comments on Astrophysics, 1987, 111(2): 99
- 4 Trimble V. Nature, 1989, 337(6204): 212
- 5 Barthel P D. Astrophys J, 1989, 336: 606
- 6 Sky & Telescope, 1990, 79: 18
- 7 程福臻. 天文学进展, 1989, 7(3): 241

(北京天文台许霖高级工程师撰)

星系团 galaxy cluster 一种由十几个、几十个以至成百上千个星系集聚而成的星系集团,作为尺度是比星系更大一级的天体层次,在天文学研究中有着其特有的重要地位。有关星系团的研究不仅能揭示星系团本身以及组成星系团的成员星系的各种物理性质,而且对星系的形成和演化以及宇宙学研究也有着重要的意义。主要内容包括团的发现和成员确定,团的光度函数和短缺质量问题、次团结构、星系团动力学、团内星系的演化,以及团的 X 射线性质等。

通常,星系团是根据团所在天区内星系投影数密度较之背景星系数密度的增高来发现的。同时,还需考虑它们的角范围、星等范围和红移(距离)范围。目前,应用得最为广泛的星系团表是艾贝耳(Abell)表和茨维基(Zwicky)表,其中艾贝耳表中列有 2 712 个含星系数相当多的富星系团,并已扩充到南部天空。星系团的发现仅仅是把有团存在的天区挑选出来,然而在这些天区内的所有星系并非全是星系团的成员,可能因投影效应而混淆了一些前场或背景星系。正确地判定星系团成员是有关星系团的全部研究工作的基础,用于星系团成员确定的观测判据有团所在天区星系的视位置,星系的视星等,星系团的颜色-星等图,以及星系的视向速度。位置和星等判据对剔除场星系不很有效,颜色

一星等图的应用有其局限性,最重要的判据是星系的视向速度。随着星系视向速度观测资料的不断增多,这一判据已逐渐得到广泛的应用,并开始提出以合理数学模型为基础的统计方法,定量地确定团内各别星系的成员概率。鉴于这一问题的困难和重要性,确定星系团成员的方法仍在不断探索和改进之中。

团内星系光度函数的研究,对于认识团和团星系的形成和演化有着重要的意义,而且可以从寻求宇宙大尺度距离上的标距参数,后者对于宇宙学研究是至关重要的。早期主要集中于光度函数的普适性问题,其中以歇克特(Schechter)提出的光度函数形式为大部分研究者所采用。大量的工作发现,不同形态星系团中最亮星系的光度差别很小,因而它们可以用作确定星系团距离的标距参数。但是,对于造成这一结果的机制至今尚无明确的一致性意见。近期的工作着重于研究光度函数随星系团不同性质的变化,即与一阶普适光度函数的二阶差异。已发现一些团的动力学演化过程会影响光度函数的形式。至于光度函数随团的富度、类型、速度弥散度以及团内、外区域的变化,则尚未得出明确的结论,因而成为星系团研究中的一个重要热点。

短缺质量是有关星系团质量研究的最重要问题之一。由位力定理、团与团之际的引潮力等所确定的星系团的所谓力学质量,通常为 10^{15} 太阳质量的量级。另一方面,由团内各别星系质量之和所得到的所谓光度质量要比力学质量小得多,即使加上由X射线观测所表明的团中热气体的质量,也只及力学质量的20%左右,这就是短缺质量问题。目前认为未能由观测探测到的这部分短缺质量可能是大量恒星级的暗天体,包括中子星、黑洞等,以及稳定的弱相互作用基本粒子,如有质量中微子、磁单极子等,但不可能是低光度的星系。通常认为短缺质量很可能以连续分布的形式分布在团的整个空间范围内,并与团内星系的分布相一致。这一问题远未得到解决,它一直是天体物理学研究中最重要的问题之一。

分层效应可以有效地反映团内两体弛豫过程情况及团内星系演化过程情况,因而近年来成为星系团动力学研究中颇受注意的一个问题。所谓分层效应是指不同形态、光度、质量的星系在空间分布和速度分布上的差异。形态分层的工作做得很多,无论规则团或不规则团,都已发现不同程度的空间和速度分层。早型星系较之晚型星系,空间分布上更向团中心集聚,且有较小的速度弥散度。由此说明晚型星系仍处于下落阶段,或是在近期才落入团内。最近发现,团的形态空间分层与团的集聚度有关。关于质量分层的工作,早期仅限于讨论光度分层,并以团的光度分层表征质量分层。近期已发展到直接探测团内星系的质量分层,并发现直接讨论质量分层比仅限于讨论光度分层更能得出明显的结果。规则团的质量分层要比不规则团来得显著些,从而说明前者有着较长的动力学演化时间。

次团结构是有关星系团动力学研究的又一个重要课题,所用的观测资料是团内星系的投影面分布及视向速度。就目前来看,大约有三分之一的星系团存在次团结构,甚至在非常富而又弛豫的团中也发现次团结构。但是,次团结构大多位于离团中心较远的区域。对于这一问题研究上的困难主要在于对次团结构很难作出明确的定义,因而即使对同一个星系团不同研究者也会得出很不相同的结论。也正因为如此,近年来有关次团结构的研究相当活跃。

星系团按其形态大致可分为规则团和不规则团两大类。在规则团内部,椭圆星系和透镜星系要比旋涡星系多得多,而在不规则团中情况则刚好相反。为了说明这一现象已提出了许多种理论解释机制,其中最有影响的是环境影响理论。这种理论认为,许多旋涡星系在星系团的环境中因某种原因使内部气体被剥离而演变为透镜星系。此外,星系形成的各种初始条件也可能对星系形态有较大的影响,不过这又直接与星系形成的理论有关。应该指出的是,各种理论对观测现象的解释都还存在一些困难。

银河系以外的X射线辐射源中,有许多是星系团。星系团X射线辐射的研究不仅对团本身,而且对X射线天文学的发展都

有着重要的意义。随着X射线天文卫星的陆续发射,这方面的工作已取得很大的进展。星系团X射线观测的内容有团的X射线谱,包括连续谱和谱线,以及团内X射线的空间分布。研究工作涉及团的X射线性质和光学性质的关系,X射线的辐射理论等。目前已确认团X射线辐射机制为团中气体的热致辐射,它可以很好地说明所观测到的团的X射线性质。在有关团的X射线研究中,冷流现象占有非常重要的地位。所谓冷流是指团内冷气体因不能与周围热气体保持流体静力学平衡和热力学平衡,受热气体的压力而向团中心流动的现象。有关冷流的最基本问题是它的起源、动力学状态和归宿。鉴于星系团内冷流的存在只有间接的观测证据,如团中心软X射线表面亮度有峰值等,但迄今还没有直接观测到冷气体向团中心流动,许多问题尚很不清楚。人们期待着新发射的ROSAT的观测资料会大大改善这种状态。

参考文献

- 1 Schechter P. L. ApJ, 1976, 203, 297
- 2 Sarayin C. L. X-ray Emission from Clusters of Galaxies. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 1988
- 3 Abell G. et al. ApJ Suppl, 1989, 70, 1
- 4 Salvador-Sole E. et al. ApJ, 1989, 337, 636
- 5 赵君亮,等.天体物理学报, 1990, 10, 315
- 6 West M. J. et al. ApJ, 1990, 350, 36

(上海天文台赵君亮研究员撰)

暴涨宇宙 inflationary universe 是经典大爆炸理论的延伸与发展,它于1981年由古斯(H. Grth)首先提出,并经林德(A. Linde)等人逐步加以完善与发展的,是现代宇宙学与大统一理论相结合的产物。

经典大爆炸理论自20世纪60年代重振以来,得到迅速发展并获得巨大成功:它可以很好地解释一系列观测事实,并大体上可以对宇宙演化历程给出合理而详尽的描述,直至上溯到大爆炸之后的 0.001 s。但经典大爆炸理论也存在着一些严重困难以致不能应用于更早期的宇宙,正是这些困难,直接导致了暴涨宇宙论的诞生。

(1)视界困难。经典大爆炸理论包含着初始类空奇异性,因而存在粒子视界。在以辐射为主的宇宙极早期,视界距离会远小于宇宙尺度,于是极早期宇宙会被分割为许多个无因果关联区。由此将导致宇宙大尺度不均匀性,与背景射电辐射等观测事实不能相容。

(2)平直性困难。如所周知,我们至今仍不能断定我们的宇宙究竟是开放的抑或是闭合的。有关观测结果表明,现今宇宙平均物质密度 ρ_0 与临界密度 ρ_{c0} 相差不大

$$0.9 < \frac{|\rho_0 - \rho_{c0}|}{\rho_0} < 100$$

这一比值看起来并无特异之处,但由此出发推算到宇宙极早期,例如普朗克时刻,便得到惊人的结果

$$\frac{|\rho_p - \rho_{c,p}|}{\rho_p} < 10^{-58}$$

上式表明,在普朗克时刻, ρ_p 与 $\rho_{c,p}$ 极为精确地吻合,或者说宇宙被微调到极为平直。显然这不能看作是大自然的偶合,那么是什么样的物理机制使这一结果成为必然?这就是所谓平直性困难。

(3)磁单极困难。这是将大统一理论应用于宇宙极早期所产生的问题。按照大统一理论,例如 SU_5 理论,在宇宙极早期当 $T > T_c = 10^{19}K$ 时,宇宙处于高对称态 SU_5 。当 $T = T_c$ 时,发生大统一相变,对称性自发破缺

$$SU_5 \rightarrow SU_3 \otimes U(1)$$

依据特霍夫特-波利亚可夫('tHooft-Polyakov)理论,作为拓扑孤子解,相变中有磁单极子产生,其质量约为 $10^{16}GeV$,半径约为 $10^{-28}cm$,最小磁荷为 $g = 1/e$ 。

从物理图象上说,相变表示对称的真真空态跃迁到非对称的简并真空态。由于简并真空态的随机分布,宇宙形成畴状结构

(真空泡),这种情形与铁磁体的畴畴结构非常相似。磁单极子产生于真空畴交界处,而真空畴线度应小于视界距离,由此可推出理论上磁单极子密度下限

$$n_m/n_B \geq 10^{-4}$$

其中, n_m 为磁单极子密度, n_B 为重子密度。

实际上,至今连一个磁单极子也没有观测到。作一个极端的估计,即使今天的宇宙全部由磁单极子构成,由于磁单极子质量极大,得到的密度上限也只有(设 $\rho_0 \approx \rho_m$)

$$n_m/n_B \leq 10^{-15}$$

观测上限与理论下限相差悬殊,根本无法调和,这就是磁单极子困难。

为了解决上述困难,1981年古斯首先提出暴涨宇宙模型。其基本思想是:大统一相变是一级相变而非二级相变。在达到临界温度时,相变并不立即发生,而是过渡到一个过冷状态。此时真空仍是对称的,然而是不稳定的,称为假真空。不稳定态相对于稳定态有一势能差,且随温度降低,势能差越来越大,这相当于假真空宇宙含有一个大宇宙项,或强斥力场,因而宇宙将以指数形式急剧膨胀,这就是暴涨宇宙论的最初形式。

暴涨宇宙模型可以方便地消除视界困难与平直性困难。按这一模型,暴涨前的早期宇宙尺度较之经典大爆炸模型预言值小得多,不再可能包含大量的无因果关联区。此外,一级相变释放大量潜热(由真空能转化而来),使宇宙熵激增,这样即使在暴涨前宇宙是不平直的,也会在相变过程中自然地趋于平直。

古斯最初的暴涨模型认为大统一相变发生在暴涨之后。随着温度降低,势能增高,稳定的真空泡通过量子隧道效应在假真空背景中产生,于是相变发生,暴涨也随之停止。相变过程中通过真空泡之间的碰撞,使宇宙重新热化,此后便按经典大爆炸模型继续演化。

这种初始暴涨模型立即遇到了一系列困难。首先它没有给出退出暴涨的适当机制,也没有解决磁单极子困难。此外,这一模型虽然消除了由视界引起的不均匀性,却又产生了由真空泡随机分布引起的不均匀性。若要缓解上述困难,须降低真空泡产生率,但这样会推迟热化时间,与后期的宇宙热历史难以衔接。

1982年,林德(A. Linde),阿尔布莱赫特(Andreas Albrecht)与斯坦哈特(Paul J. Steinhardt)等人对古斯的暴涨模型作了重要修正,主要有:(1)暴涨与相变是伴随发生的,而不是截然分开的两个过程。在真空泡出现之后的一段时间内,宇宙仍以指数形式膨胀。(2)相变未必是通过隧道效应而发生,至少不是完全如此。极有可能对称真空态通过量子跃迁越过势垒滚动到稳定的简并真空态。当温度足够低时,势垒高度很低,仅凭量子涨落便可以越过势垒。(3)相变发生后,真空泡围绕稳定真空态作阻尼振荡,真空能耗散,暴涨阶段结束。阻尼振荡对应于粒子的产生,宇宙热化机制主要是粒子间相互作用,而不是真空泡间的碰撞。由于真空泡产生后,暴涨仍在继续,因而一个泡的尺度在暴涨后可能超过观测宇宙范围。换句话说,我们今天的宇宙当初可能只由一个真空泡生长而成。由此可一举消除视界困难、平直性困难与磁单极困难。此外,衰减振荡也提供了一个退出暴涨的可能机制。古斯模型的缺陷得到了初步修复。但是,暴涨引起的能量密度涨落仍然过大。

1983年,林德提出混沌暴涨理论。他认为真空标量场的初始值不应是单一的,而应具有一种随机分布。这样,早期宇宙无须经过真空相变便呈现包含许多微宇宙泡的畴结构。须注意,微宇宙泡不同于相变产生的真空泡。同样,我们今天的观测宇宙可能是由单个宇宙泡长成。混沌暴涨避开了早期宇宙的整体条件及高温修正效应,将暴涨理论建立在更为合理的初始条件基础之上。但是,由混沌暴涨得到的能量密度涨落仍然偏大。

从1984年起,一些天体物理学家尝试将超对称性引入暴涨理论。这方面的工作主要是在超对称势的基础上构成合适的标势,以使得理论结果与观测事实尽可能拟合。如1986年瑞兹一阿尔塔伯(M. Ruiz-Altaba)和霍尔曼(R. Holman)提出的

SUSY 暴涨模型,得到了充分大的暴涨指数与较小的能量密度涨落,与观测拟合较好。1989年,德·拉(D. La)与斯坦哈特等提出了延伸暴涨理论(extended inflation)。该理论引入了 Brans-Dicke 标量场与暴涨场相耦合,通过真空泡的集结并适当调节耦合参数,可能较好地解决暴涨退出问题。随后一些作者对这一理论的细节作了进一步探讨。如温伯格(Weinberg)认为,一定条件下真空泡可能生长过大,热化时间延长,从而与核合成等后续图象发生矛盾。1991年,哥德维斯(Goldwirth)与查格洛尔(Zaglauer)应用薄壁近似分析了泡的演化过程。他们指出,由于 B-S 场在泡壁上的连接条件对内部度规的限制,可排除平坦度规或 R-W 度规,对于四次耦合的暴涨场,引力会导致泡的再收缩,阻止大泡的生长。这样相变通过小泡便可完成,因而热化与均匀性问题均比较易于解决。

暴涨宇宙作为宇宙演化的一个独特阶段,它的存在已得普遍承认,它的重要性在于它决定了今天宇宙的基本特征。如前所述,暴涨宇宙论业已取得巨大成功,但它也面临着不少问题。首先,迄今还找不到一个决定性的令人信服的验证方案。一些有关的观测结果如宇宙平均密度、磁单极子密度、背景射电辐射等都不能作为认定性判据,这或许是暴涨理论的先天性缺陷。今天所能做的,实际是将暴涨模型与经典大爆炸模型尽可能平滑地衔接起来,而这一方面的工作至今也还不尽如人意。此外,也要考虑与量子创生阶段的衔接。总之,只有将暴涨宇宙作为宇宙演化整体的一部分来研究,才有可能获得圆满解决。看来,这已经超出宇宙学的独家研究范围,它有赖于粒子物理学的进一步发展,有赖于量子引力理论与统一场论的最终成功。

参考文献

- 1 Guth A H. Phys Rev D, 1981, 23: 347
- 2 Linde A D. Phys Lett B, 1982, 108: 389
- 3 Albrecht A, et al. Phys Rev Lett, 1982, 48: 1220
- 4 Linde A D. Phys Lett B, 1983, 129: 177
- 5 Lad, et al. Phys Rev Lett, 1989, 62: 376
- 6 Goldwirth D S, et al. Phys Rev Lett, 1991, 67: 3639

(安徽师范大学王家庆副教授撰)

原始火球 primeval fireball 按照大爆炸宇宙学,宇宙物质最初聚集在一个极小的原始“原子”里,原始原子爆炸后诞生了今天的膨胀宇宙。原始原子爆炸时温度极高,因此叫作“原始火球”。

1927年,比利时的勒梅特(A. G. Lemaitre)以爱因斯坦(A. Einstein)的广义相对论为基础,建立了大尺度空间随时间膨胀的概念;1929年,美国哈勃(E. P. Hubble)发现河外星系退行速度与距离成正比的关系;1930年,英国爱丁顿(A. S. Eddington)将二者结合起来,提出了膨胀宇宙模型。在发现了太阳的巨大能源来自热核反应后,1948年美国伽莫夫(G. Gamow)等人把宇宙膨胀模型和基本粒子的运动相结合,建立了大爆炸宇宙学的理论雏形。后来经一些科学家进一步发展成为大爆炸宇宙学,又称“原始火球理论”或“ $\alpha-\beta-\gamma$ 理论”。

大爆炸宇宙学最初提出时,并未受到重视。1965年,美国彭齐亚斯(A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)发现了微波背景辐射,证实了伽莫夫的预言,使地位平平的大爆炸宇宙学上升为正统的宇宙学理论。除了微波背景辐射,大爆炸宇宙学还有3个重要的观测支柱:观测到河外天体有系统性的谱线红移,而且红移与距离大体成正比,用多普勒效应解释,红移就是宇宙膨胀的反映。迄今用各种独立方法对不同天体测定的年龄均与哈勃定律推算的宇宙年龄150~200亿年相洽,它们均可按良好的时序纳入大爆炸宇宙学整体演化的框架中。在各种不同天体上,氦丰度大多为30%左右,用恒星核反应机制不足以说明为什么有如此丰富的氦,而根据大爆炸理论,早期温度很高,产生氦的效率也很高,则可以说明这一事实。

在各种宇宙模型中,大爆炸宇宙模型说明的观测事实最多,

理论也最完善,但仍有难以逾越的困难。譬如,由于大爆炸宇宙学表明观测到的宇宙在时间上有起点,空间上有边界,而一再引起哲学上关于宇宙有限无限之争。按照大爆炸宇宙学,宇宙的年龄是以原始大爆炸的时刻为起算点的,然而在此时刻及其以前的情况,现代物理学皆鞭长莫及。大爆炸后的 10^{-44} s称为普朗克时期,对这一时期的宇宙应当用量子引力理论来处理,但这套理论尚未健全,因此谈论这一时期宇宙的状态几乎完全是猜测。另外,在解释可观测宇宙大尺度均匀性时所遇到的视界问题,讨论宇宙空间曲率时碰到的平直性问题,在宇宙相变过程中出现的磁单极短缺问题,以及星系形成和重氢起源等问题,都是大爆炸宇宙学无法解释的。

60年代末期,美国的格拉肖(S. L. Glashow)、温伯格(S. Weinberg)和巴基斯坦的萨拉姆(A. Salam)建立了弱电统一理论,即把弱作用力和电磁作用统一在一种数学表达式中,推动了当代粒子物理学的迅速发展,使宇宙学家有可能对极早期的宇宙演化过程在物理学的范畴内作比较完善的描述。

随着弱电统一理论的建立,1980年美国古斯(A. Guth)对大爆炸宇宙模型进行了第1次修正,提出了暴胀宇宙模型。该模型提出在宇宙演化的极早期的不稳定真空状态存在宇宙按指数膨胀的阶段,这个阶段称为暴胀阶段,它比大爆炸宇宙模型中出现的膨胀要快得多,暴胀的结果是宇宙极为剧烈地发生冷却,经历如同水变为冰那样的相变。暴胀结束后,形成对称破缺阶段,从而导致假真空能量密度的分解,产生大量粒子,区域再次加热,宇宙在此以后的演化同大爆炸模型完全一样。古斯的暴胀模型排除了视界问题,因为根据这个模型,我们观测的宇宙的演化开始于比大爆炸模型范围小 10^{60} 倍的空间,所以,在暴胀阶段开始以前,可观测的宇宙部分的一切点都位于一般视界的界限之内,是有因果关系的,可以靠相互作用达到均匀和热力学平衡的状态。暴胀以后,宇宙应变成相当理想的平宇宙,因此平直性问题也迎刃而解,暴胀模型还解释了磁单极子少的原因:由于快速膨胀,磁单极子的密度变小,以致今天观测不到它。但深入研究发现古斯的理论存在着新的困难,即宇宙急剧膨胀时期平稳结束的困难,另外,新阶段小气泡的混乱产生会导致宇宙产生大的不均匀。

1983年,前苏联林德(A. Linde)在古斯模型的基础上,提出新的暴胀理论。他利用科尔曼和温伯格1974年提出的C-W势,消除了把假真空和真真空分隔开的势垒,因此在量子起伏和热扰动下,整个宇宙可沿着势曲线滚入到真真空态,从而避免了古斯理论中的隧道之辙。并且,在上述过程中整个宇宙只有一个泡,因此也就不存在众多泡相撞而产生的不均匀性了。两年后,林德又提出了混沌暴胀理论,他认为具有一定取值范围的标量场,在真空对称破缺后,都可在时空中形成宇宙泡,每个宇宙泡在暴胀后形成一个“微宇宙”,每个微宇宙在暴胀后的大小都超过我们对宇宙的可观察尺度。因此,整个空间在暴胀前可以是不平直的,这样便解决了暴胀产生必须以空间原来已平直为前提这一难题。以后,又有理论物理学家进一步采用最新的粒子物理理论——超对称理论来构造更理想的势曲线,以代替C-W势。

应该说暴胀理论是成功的,它发展和完善了大爆炸宇宙模型,使宇宙有了相当完整的演化图:大约200亿年前,宇宙起源于一个极其致密高温的状态——奇点,奇点的不稳定性导致时空超光速激烈膨胀——暴胀,物质开始创生。在宇宙年龄 $t=0.01$ s,温度 $T=10^{12}$ K时,夸克和轻子形成。 $t=100$ s, $T=10^9$ K时,氢核和氦核形成,核合成结束。膨胀渐缓,宇宙随之冷却下来。物质形式开始从早期的辐射状态向重子状态过渡。在 $t=50$ 万a, $T=10^4$ K时,电子与原子核复合成为原子,引力的不稳定性使冷却下来的原始星云凝聚为星系和恒星。经过漫长的岁月,演化成为今天看到的星空世界。暴胀理论还有待于进一步完善:在粒子物理中,是否能直接发现引至相变的标量场粒子,在宇宙学中,研究暴胀结束时,能否给出正确的粒子生成和非均匀初始条件,同后续的膨胀正确地衔接起来。

有暴胀阶段的宇宙大爆炸模型已能说明大部分观测事实。

但近几年,随着探测的空间深度的扩大,发现星系凝成结构的尺度远大于暴胀宇宙论的预言。“星系长城”是最巨型结构,绵延了170Mpc,最近得到的红外星系红移样本均揭示“长城”和“巨洞”的存在是星系大尺度分布的共同特征。当这些结构形成于宇宙早期时,它们理应在宇宙微波背景上留下印记。但20多年来的观测表明,微波背景辐射具有很好的各向同性,1989年美国发射的宇宙背景探测器(COBE)做了迄今最精确的测量,也未在辐射中发现不均匀的证据。

为了解释宇宙早期结构的形成,大爆炸宇宙学家提出了星系形成冷暗物质模型,但这种模型仅能成功地说明尺度小于3000万光年的成团结构,对尺度超过它十几倍的星系长城却无能为力。如果采用热暗物质模型,虽然能说明大尺度结构,但在说明较小尺度的星系和星系团时又有回避不了的问题,看来要合理地解释星系的成因,大尺度结构的形成,可能不只需要一种暗物质。暗物质是目前宇宙学研究中的一个热点。

1990年4月24日,美国发射了哈勃空间望远镜。空间望远镜以哈勃命名寓意是深远的,哈勃定律导致了40年代末大爆炸宇宙学的诞生,90年代哈勃空间望远镜将把大爆炸宇宙学大大向前推进一步。哈勃空间望远镜能使哈勃常数的确定误差小到10%以内,可以准确地定出到星系的距离,定量地研究大爆炸的性质。通过观测手段,寻求对宇宙起源这个问题的基本答案。另外,利用望远镜作时间机器,直接观测星系的过去,追踪星系随时间的演化。

作为第1只探测宇宙早期现象的卫星——COBE的巡天观测,也将获得越来越多的关于宇宙早期结构和演化的宇宙学参数。

可以预期,通过理论的研究,通过哈勃空间望远镜和COBE卫星给观测宇宙学带来的突破,宇宙学将得到更深的领悟。宇宙学家希望将来能建立一种更好的理论,把大爆炸模型作为可观测宇宙的某种近似而包容进去,就像爱因斯坦的引力论包含并推广了牛顿的引力论那样。

参考文献

- 1 Rowan—Robinson M. Cosmology, 1978
- 2 Simon M. 'Hot' Big Bang Confirmed Astronomy Now, 1990, 5: 15
- 3 Jayant N. What if the big bang didn't happen? New Scientist, 1991, 3(2): 48
- 4 马耳, 重任在肩的哈勃空间望远镜. 科学, 1991, 1: 22
- 5 卞毓麟. 宇宙学——来自“不同见解”的反诘. 科学, 1991, 3: 205
- 6 蒋元方, 等. 宇宙极早期的剧变. 现代物理知识, 1992, 1: 46

(北京天文馆李芝萍撰)

微波背景辐射 microwave background radiation 又称宇宙背景辐射,来自宇宙空间背景的各向同性的微波辐射。1965年,美国彭齐亚斯(A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)在波长7.35cm上首次发现。因为这种辐射是温度近于2.76K的黑体辐射,所以习惯上又称为3K背景辐射。在X射线和γ射线波段上也观测到背景辐射,但在微波波段的辐射超过其他所有波段的背景辐射的总和。大多数宇宙学家认为微波背景辐射是原始火球大爆炸的余烬辐射,是人类能观测到的宇宙中最古老的信息。微波背景辐射的发现被认为是20世纪天文学上的一项重大成就,它对现代宇宙学所产生的影响可与河外星系的红移的发现相比拟,如果说哈勃的发现开启了探讨宇宙整体时空结构的大门,那么,彭齐亚斯和威尔逊的发现便是打开了研究宇宙整体物性演化的大门。为此,彭齐亚斯和威尔逊获得1978年度的诺贝尔物理学奖。

1948年,美国伽莫夫(G. Gamow)等人根据爱因斯坦(A. Einstein)的广义相对论,把当时的核物理和基本粒子的知识同宇宙膨胀模型相结合,提出了大爆炸理论。该理论认为宇宙起源于

一个温度极高、体积极小的原始火球,在距今约200亿年前,火球爆炸了,膨胀成为今天的宇宙,并预言现在的宇宙空间应充满着残余辐射,其温度大致为几K或几十K。

60年代初,美国的迪克(R. Deke)出于对膨胀宇宙开端的考虑,沿着类似伽莫夫的思路,也得出了原始火球的概念,并领导一个研究小组着手制造一架射电望远镜寻找原始火球的辐射遗迹。

差不多与此同时,彭齐亚斯和威尔逊为了改进卫星通讯,建立了高灵敏度的号角式接收天线系统。1964年他们用它测量银晕气体射电强度时,发现总有消除不掉的背景噪声,噪声的信号强度等效于温度3.5K的黑体辐射,是各向同性的、无偏振,而且没有季节变化,这是什么原因造成的呢?他们无法作出解释。在别人的建议下,他们与迪克取得了联系,双方进行了互访。迪克及其研究小组最后确信,这种消除不掉的噪声,正是他们所预言并准备寻找的东西。1965年贝尔电话实验室和普林斯顿大学的科学家在美国《天体物理杂志》上同时发表了观测结果和理论解释。

为了确证彭齐亚斯和威尔逊的发现,普林斯顿大学和其他地方的射电天文学家紧接着在0.3~75cm波长上进行了一系列的测量,所得结果都符合于温度2.7~3.0K的黑体辐射的普朗克分布。进入70年代后,英国和英国科学家用气球将红外探测器送入高空,测量了0.6~2.5mm波长上的辐射,除此之外,还利用星际空间中的分子,间接地测定短波范围的背景辐射强度,观测精度不断提高。1985年公布了1983年利用改进了的新辐射计和其他检测装备在0.33,0.9,3.0,6.3和12.0cm波段的巡天测量,求得的宇宙背景辐射的加权平均值是2.73±0.05K,与过去的结论一致。黑体谱现象表明,微波背景辐射是起源于很久以前的极大的时空范围内的事件。观测还表明,微波背景辐射具有很好的各向同性,来自不同方向的辐射的温度十分一致,定量地说各向异性不大千分之一,如此高度同性的现象一方面说明这种辐射是属于宇宙的,支持了宇宙学原理,另一方面说明,在各个不同方向上,在各个相距非常遥远的天区之间,应当存在过相互联系,这和大爆炸理论将微波背景辐射解释为“原始火球”的辐射遗迹的论点是吻合的。

1970年,前苏联泽尔多维奇(Y. Zel'dovich)等人通过研究宇宙中的过程,指出微波背景辐射应当存在微小的非各向同性。探测微波背景辐射的各向异性是一个重要的观测宇宙学课题。

1978年威尔金森(Wilkinson)和斯莫特(Smoor)发现了微波背景中存在偶极各向异性,即在一条过地球的直线的两个方向上辐射温度有千分之几的差异。但这种现象并未动摇各向同性的标准宇宙模型,它被解释为银河系正以每秒600km的速度朝室女座方向运动,那里有超星系团存在。

1979年,梅尔奇奥里(Melchiorri)又在微波背景中发现了幅度为1毫度的四极各向异性。这种各向异性不能再归因于观测者本身的相对运动,而必然要涉及宇宙本身的结构。然而,1983年鲁宾(Lubin)、费克逊(Fixsen)分别在北天和南天、北大所做的背景辐射测量结果都没有证实四极各向异性的存在。目前还不能断定是否有四极各向异性,但已可肯定四极各向异性的幅度一定小于以前得到的结果。以前过高估计四极各向异性的原因,可能是没有考虑尘埃的影响。

背景辐射的各向异性大小直接表明宇宙早期的均匀程度,并且对于检验各种大尺度结构形成理论是个重要的约束。现在已知的各向异性上限为十万分之五。

然而,与微波背景辐射的性质相反,今天宇宙中的物质是相当不均匀的,本星系群周围的局部空间,星系分布明显不均匀,这是演化的后果,与反映早期宇宙特征的背景辐射不矛盾,但是如果存在100Mpc(Mpc为百万秒差距,1Mpc约等于300万光年)为尺度的结构不均匀,就要对传统概念提出挑战了。80年代后期根据若干选区的星系和星系团的三维空间分布,发现的延绵大约170Mpc,由星系和星系团聚集成的长城式链状结构,以及星系和星系团极稀少的空间巨洞,大尺度速度流等一系列现象都和微波

背景辐射的各向同性,是标准的大爆炸宇宙学的一个基本的出发点,是宇宙在大尺度上均匀各向同性的一个最重要的“物证”的观点相驳。

一些问题摆在宇宙学家面前:为什么宇宙中的发光物质在目前可见的所有范围内都表现出高度不均匀的各种结构,而反映更早期宇宙情况的微波背景辐射却是高度各向同性的?目前观测到的年龄最老的恒星包含了过量的重元素,其中至少有一部分应来自第1代恒星,第1代恒星应在红外波段有背景辐射,但为什么没观测到?宇宙微波背景辐射对黑体辐射谱的偏离反映了宇宙复合时期的物理过程,这些过程是怎样的,此外还有大尺度结构的起源和演化、大尺度流的起源、星系的起源和演化、暗物质的种类和分布等等,这些问题几乎都与宇宙背景辐射的更为广泛和细致的观测有关。

1989年11月18日,美国国家宇航局用火箭将第一只探索宇宙早期现象的宇宙背景探测器(COBE)送到600km高的环地轨道。它载有3套设备:微波辐射计用来测量宇宙微波背景辐射在大尺度上的各向异性,精度可达 10^{-6} ,比目前的精度高一个量级;远红外分光计的波段幅度从 $100\mu\text{m}\sim 10\text{mm}$,可以发现宇宙背景辐射与黑体辐射谱是否存在哪怕小到1/1000的差别;红外弥漫背景辐射计的通道范围为 $1\sim 300\mu\text{m}$,用以测量这一波段范围天空的绝对亮度,以期发现第1代恒星及其他一些源的红外辐射和它们的物理性质。

1990年,COBE发回来的第一批探测资料就表明,微波背景辐射的分布与温度为2.73K的黑体辐射曲线的吻合程度达99.75%,可以倾向地认为,偶极不对称性不是宇宙的固有特征,而是银河系以每秒300km的速度朝向狮子座南一点的方向运动的结果,COBE获得的初步结果是很有意义的,譬如,它排除了用热星际介质来说明宇宙X射线背景的可能性,对复合时期的一些物理过程的强度也加上了严格的限制。

由于COBE的仪器在较长的波长上不是很灵敏的,所以还不能放弃地面观测。美国和意大利已选择南极作为观测点,于1989年底在阿蒙森-斯科特南极站建立了工作波长在 $4\sim 36\text{cm}$ 的5个分立天线。可以预期COBE的巡天观测和地面高质量望远镜所作的微波测量,将使宇宙学家推求出高精度背景温度,算出更精确的宇宙学参数,为现代宇宙学理论模型的建立和完善提供新的观测判据。

参考文献

- 1 李亮. 天文爱好者, 1986, 2: 5
- 2 Simon M. Astronomy Now, 1990, 5: 15
- 3 Joseph S. Sky & Telescope, 1990, 6: 600~603
- 4 潘容上. 科学, 1991, 1: 59
- 5 李亮. 现代物理知识, 1992, 2: 23~26

(北京人文馆李芝萍撰)

宇宙弦 cosmic string 1972年以来,一些科学家提出,当宇宙从原始热大爆炸状态冷却下来,电弱力与强力的对称性遭到破坏,约在“大爆炸”后的 10^{-35}s 时,在空一时结构上会产生“裂隙”,犹如池水在冬季结冰时;起初,水面是均匀的液体,随着气温的下降,小块小块的冰开始分散地长出来,但不同地区的冰晶不一定都有相同的取向,因此,当冰块长大互相挤压时,就会出现裂缝和断层等“缺陷”一样。这种由某些基本粒子物理学的大统一场论所预言的空一时缺陷有零维(点)、一维(线)和二维(面)3种;零维的是磁单极子(Magnetic Monopole),二维的叫畴壁(Domain Wall),一维的便是宇宙弦。

理论学家赋予宇宙弦下列两个特性:(1)宇宙弦无始无终,要末伸展到无穷远处,要末形成闭合的环圈,大约宇宙弦长度的20%已形成小的宇宙弦环,其余80%在宇宙中延伸,但它们并非笔直,而是弯弯曲曲的。全部宇宙弦,包括环圈,在宇宙间形成一个网络,弥漫于整个空间;(2)宇宙弦非常纤细,但却十分重;直径比原子还要小,细到 10^{-30}cm ,质量完全决定于其张力,拉得越

长、缠得越紧,质量越大,其线密度可高达每厘米 $10^{22}g$ 。

1985年,维伦金(A. Vilenkin)、韦顿(E. Witten)等人提出了超导宇宙弦的概念。他们认为,宇宙弦可以携带巨大的电流,这是由于整个宇宙弦是均匀的,所以带电粒子可以在其上自由移动,使宇宙弦成为超导体。但当电流变得很大时,例如,高达 10^{20} 安培时,粒子的能量便高到足以脱离宇宙弦,弦本身乃失去超导性,变为正常的宇宙弦,同时产生能量粒子的灾难性爆发。

宇宙弦这一概念不但可以说明星系的诞生和宇宙大尺度结构的形成,类星体的能源以及关于银河系附近许多高速星系相对于宇宙背景辐射的运动等,它还可以起到引力透镜的作用,产生远方光源的双像。

许多天文学家,包括前苏联泽尔多维奇(Я. Б. Зельдович),曾设想星系和星系团确系在我们宇宙的极早期遗留下来的宇宙弦圈上生成,以后当宇宙演变为膨胀时期急剧长大的。这一宇宙弦圈“播种”星系的问题在超导宇宙弦的概念提出后有了新的发展。如果在早期宇宙中存在过原始磁场,则当超导宇宙弦圈形成时磁场将在圈中诱导起强大的振荡电流,从而发射出功率极强的电磁辐射。一根典型的弦圈在极短时间内将释放出 $\approx 10^{61}erg$ 的巨大能量,它们以热能形式倾注于星系际气体或前星系际气体之中,将原始物质推开,在宇宙空间中吹出许多直径 ≥ 65 兆光年的巨大气泡,当诸气泡碰撞时,其中的物质被压缩成气泡壁,而星系和星系团就在这些狭壁中形成。这一假说能够解释天文学家近 10 多年来观测到的星系在空间中的泡沫状分布结构。但米歇尔(D. Mitchell)和屠罗克(N. Turok)的研究结果却认为一切宇宙弦都将被切断为尽可能小的圈,从而否定了长宇宙弦与弦圈平衡构形的存在,这意味着宇宙空间不可能由宇宙弦所主宰,这对星系形成的宇宙弦学说是—记否定。

维伦金和费尔德(G. B. Field)提出了将超导宇宙弦圈作为类星体中心发电机的建议。从原理上说,宇宙弦振动时极易形成尖角,从尖角发射出来的高度准直的强射束足够将束中的粒子加速到超相对论性速度,以至于能在周围的等离子体中切开一条沟道,与河外射电源的相对论性喷流相似。这一理论模型可以代替由来已久的类星体能源来自其中大质量黑洞的概念。但霍根(C. J. Hogan)提出了来自宇宙弦的辐射是不对称的观点,它们有如被“火箭”推进着的以高速在宇宙空间内游荡的圈环。如果大多数宇宙弦圈是在宇宙空间中飞行的话,则不可能用这样的弦圈来说明从类星体发射出来的喷流。

大卫·伯恩斯坦(D. Burstein)等人对均匀分布在天空的 400 余个椭圆星系的退行速度及距离做了为期 6 年的探测,初步弄清了包括我们银河系在内的、一个直径为 3.5 亿光年大球内的众多星系的随机运动或本动。他们发现:我们南面的长蛇—半人马超星系团(以及趋向于它的室女星系团和向室女星系团落去的我们银河系)、北面的英仙超星系团和孔雀座—印第安座天区的众多星系,除参与由热大爆炸决定的均匀宇宙膨胀运动外,还以每秒 700km 的速度(相对于 3K 宇宙微波背景)涌向同一方向——南十字星座。屠罗克等人认为,这是由于在早期宇宙中大质量宇宙弦圈所产生的足够强的引力拉曳作用导致了一直到今天我们观测到的这一星系流的整体运动。

按照爱因斯坦相对论,在普通物质附近的空一时结构中会产生一个“引力凹坑”,但在巨大能量的宇宙弦附近,却产生一个顶点在弦上的锥形畸变,也就是说,宇宙弦局部地从空间移去了一个尖劈状的截面并将其裸露的两侧连接起来。这一效应的明显后果是围绕着宇宙弦的圆周所含角度小于 360° ,在合理假设下,所缺少角度可达 10 弧秒。这一畸变将使来自运动着的宇宙弦后面的光线掠过弦旁时被折射产生光源的双像。1985 年 10~12 月,夏威夷大学的胡(Esther M. Hu)和考伊(Lennox L. Cowie)用该校的 2.2m 的望远镜在 R(红光)波段拍摄得类星体 UM679 附近一个小天区的 CCD(电荷耦合器件)像,该像显示有 4 对“孪生”星系,双像的角距均大于 2 角秒。为了分辨出所探测到的每对星系的两个像是一个星系的双像还是互相绕行的两个

不同的星系,胡决定在这一“双星系群场”内继续搜寻新的孪生星系,并在 B(蓝光)及 I(近红外)波段比较它们的星等和颜色,结果在此纵横各不到 2 角分的星系场内的 144 个星系中又找到另外 4 对孪生星系,各对星系的亮度及颜色两者均很接近,在原先的 4 对中删除了亮度差别稍大的一对,她认为类星体 UM679 附近天区的这 7 对孪生星系的发现可初步证明可能是宇宙弦所产生的远方星系的双像。

如果星系确是以宇宙弦圈为“种籽”并围绕着她诞生的话,则弦圈将越来越小,终于消失,而在此过程中将爆发出引力波。英、美及德国的一些科学家正在建造灵敏度更高的引力波探测装置,来自宇宙弦的引力辐射将作为其他引力波(如来自超新星爆发时的引力波)的背景辐射被这些装置探测到。

中国学者在宇宙弦的研究上近几年来也做了不少工作,他们在用宇宙弦概念探讨星系形成、星系成团、宇宙的大尺度结构以及宇宙弦的引力透镜效应等方面都做出了自己的贡献,特别是中国科学技术大学天体物理中心所探讨的有宇宙弦的热暗物质宇宙中的成团问题的研究为国际天文界所瞩目。

参考文献

- 1 Vilenkin A. Phys Rev Lett, 1982, 46: 17
- 2 Witten E. Nucl Phys, 1985, B246: 557
- 3 Mitchell D, Turok N. Phys Rev Lett, 1987, 58: 1577
- 4 Vilenkin A, Field G B. Nature, 1987, 326: 772
- 5 Hogan C J. Nature, 1987, 326: 853
- 6 许焜. 天文爱好者, 1986, 12: 27
- 7 Shellard E P S, et al. Nature, 1987, 326: 672
- 8 Cowie L L, Hu E M. Astrophys J, 1987, 318: L33
- 9 Hu E M. Astrophys J, 1990, 360: L7
- 10 New Scientist, 1990, 1728: 32

(北京天文台许焜高级工程师撰)

星际分子 interstellar molecules 广泛存在于各种天体环境中的分子,包括无机分子、有机分子及离子分子和自由基。星际分子的大量发现是近 30 多年来电磁辐射观测特别是射电和红外技术发展的结果,它为宇宙现象的研究开辟了分子天文这一崭新的领域。

星际分子最初由光学发现,这就是 1937 年杜哈姆(T. Jr. Dunham)等用威尔逊山天文台刚刚问世的折轴摄谱仪测到的 CH 和 CH⁺,以及 1940 年由梦凯勒(A. Mckeller)预言和亚当斯(W. S. Adams)测到的 CN。此后即是 20 世纪 60 年代射电波段的大量发现,其中首先是羟基。1948 年什克洛夫斯基(I. S. Shklovskii)预言了 OH、CH 等分子转动谱的 Λ 双重分量间跃迁产生的谱线在星际空间的存在,并在 1955 年得到汤斯(C. H. Townes)计算的支持。1959 年埃伦施泰因(G. Ehrenstein)等在实验室相当精确地测定了 OH 基态两条主线的频率各为 $1665.46 \pm 0.10MHz$, 和 $1667.34 \pm 0.03MHz$,并在 1963 年 10 月由温雷泊(S. Weinreb)等用密尔斯顿(Millstone)坡的 84ft 抛物面天线和自相关辐射仪,在 Cas A 测到。1964 年巴尔顿(J. G. Bolton)等在精确计算的基础上,在地面尚无实验测定的情况下,测到了 OH 基态的两条子线: 1720.56MHz 和 1612.20MHz。1965 年韦弗(H. Weaver)等使用哈特克里(Hat Creek)85ft 天线及可调参量放大器及噪声温度为 130K 的接收系统,在 W3 的 H I 区测到了 OH 的 Maser 1665MHz 谱线,这就是人类测到的第一个天体脉泽。

以上所述分子均属于基,真正的分子在星际空间首次探测到的是 NH₃。这是 1968 年邱格(A. C. Ceung)等用哈特克里 24ft 望远镜测到的。次年斯奈德(L. E. Snyder)等测到了另一个分子 H₂CO 的 1₁₁-1₁₁ 跃过的超精细结构谱线(4829.66MHz),所用的是格林班克(Green Bank)的 140ft 天线。在这一年,邱格等还用发现 NH₃ 分子的哈特克里 24ft 望远镜,在 Orion 和 W49 中,测到了水分子的 1.35cm 谱线。

这些分子具有不同的位形和结构;它们与OH脉泽,均为研究分子区域的重要工具。从这时候开始,人们不只是搜寻分子,而且运用分子及其辐射,对星际介质及天体运动进行研究。特别是1970年,彭泽亚斯(A. A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)用基特峰天文台的36ft望远镜,在115GHz的频率上发现了CO分子。由于C、N、O和S等重原子中任何两种构成的双原子分子,其基态转动谱均落在50~150GHz频段,CO(1-0)谱线的测到预示星际分子发现进入高峰,CS、SO、NS、HCN及HCO⁺等等,相继在70年代初测到,由于CO等分子的丰度和共存的同位素,由于毫米波对星际尘埃和气体的穿透能力,对天体过程及其研究有重要作用,分子天体物理学的核心部分——毫米波分子天文学应运而生。

70年代更多的大型射电望远镜及高灵敏度接收设备投入使用,使星际分子探测更加广泛进行。无选择性的宽频率范围的巡天先后完成多次,例如约翰逊(L. E. B. Johansson)等1984年发表的对Orion和IRC+10216的72~91GHz的搜寻;萨顿(E. C. Sutton)等1985年发表的对Orion所作的215~247GHz搜寻;卡明斯(S. E. Cummins)等1985年对SgrB2的70~150GHz的搜寻,以及布莱克(G. A. Blake)等同期对Orion 247~263GHz的搜寻及海部等1987年对FMC1的22~24Hz和36~50GHz的搜寻等。每次这样的巡天,均获得几百条谱线,当时证认率在90%以上。均有新分子辐射、新分子甚至分子序列发现。未获证认的,即U-谱线,至今还有,人们或以更高的灵敏度探测,或以量子结构的实验和计算,并结合宇宙中丰度和化学过程来进一步识别它们。

除了在银河系的不同区域,在星系中也发现了星际分子1971年维拉切夫(K. Weibachev)在旋涡星系NGC253和不规则星系M82中测到了OH,其他具有较强辐射的银河系分子如CO、H₂、CH、CS、HN₃、HCO⁺、HCN等均已测到,并且观测到了河外OH、H₂O、H₂CO及CH超脉泽源。

在此期间,红外、光学和紫外探测技术也有极大发展,测到了多种非射电波段的分子辐射。例如CH₂于1978年由霍尔(D. N. B. Hall)等用富利叶变换谱仪及梅亚尔(Mayall)4M折轴系统,在3.3um上从IRC+10216中测到。在同一源区,贝茨(A. L. Betz)1981年用基特峰1.5m太阳望远镜在28THz上测得C₂H₄;戈德哈伯(D. M. Goldhaber)等1984年用莫纳克亚天文台的3m红外望远镜在27.5THz上测到SiH₄。C₂S₂由黎德韦(S. T. Ridgway)等1976年在IRC+10216中测到后,1989年由莱恩(J. H. Lacy)等在星际云CL2591、W3IRS5和OMC-1RC2中发现。光学上又发现了C₂等分子。1977年赛韦格(B. D. Savage)等还用哥白尼紫外望远镜对H₂进行了巡天,来直接获取发射区域的气体密度分布。

截止于1992年1月,已发现的星际分子列于表中。“*”表示相应分子还只在拱星包层中测到;“?”表示相应分子的证认还未确定。由表可见,即使不包括暂时认定的7种分子,已发现分子也达95种,这确实是惊人的。这些分子几何形状、对称性均不同,原子数最多达13。它们中有常见分子,也有极不稳定的分子。按化学性质分类大致如表所列。各类分子所占比例约为:无机分子33%,自由基20%,离子分子10%,有机分子37%。发现区域包括银心、巨分子云、冷暗云、弥散云及拱星包层与河外星系。说明在从前星系到流失质量包层这样极其不同的天体环境中,均有分子存在。有些分子在地球上还未找到,甚至在实验室也难以制成,有的分子还未定出合适名称。这类分子即非地球分子或奇异分子,它们还往往是天文学的意外发现。例如1970年泊尔(D. Buhl)等在巡测HCN分子时意外地测的U89.190GHz线,1974年瑞楠(B. E. Turner)发现的U93.174GHz线,均是几年后实验测定分别为HCO⁻和N₂H⁺的转动谱的。

与这些分子共存的,还有各种同位素分子,其发现总数仅略少于主元素分子,每种分子。一般均有多种跃迁发现,如今测到的谱线已有几千条,它们或为吸收,或为发射,连同两千多个星际

及恒星脉泽源的辐射,构成了庞大的谱线体系,广泛应用于天文研究。

分子谱线的丰富特征,带来了它们存在环境的各种讯息,使人类对宇宙现象的认识,达到了原子谱线和连续辐射所不能及的境地,同时揭示了分子在天体过程中的特有作用,深化了对天体演变过程的认识。

由于搜寻频段及天区的覆盖,新分子或其辐射探测就更困难,这是70年代星际分子发现高潮后出现的耽心。星际分子1969年及其以前发现7种,1970~1980年这11年中发现46种,而1981~1991年新发现的比前一个11年有增无减,这确实是谁也不能不感到意外的。星际分子探测及其研究的每一小深入,都对应着技术的进步。目前,地面和空间设备在不断进步,亚毫米波段的观测将使探测区域由冷而密转向热而密;空间致冷红外望远镜的建造和使用将强化10~600μm的窗口作用;光学、紫外现代技术的应用将使分子吸收线成为厚层分子区域的重要探针,在这些革新促进和深化人们对于介质、恒星和星系的理介的同时,事实还会再提醒人们:星际分子的发现常常是超出期望的。

表1 已发现的星际分子

双原子分子	基	C ₂ H ₂	乙炔
H ₂ 分子氢	CH 次甲基(甲?)	H ₂ O 水	甲酸
O ₂ 双原子氧	CN 氰基	HNCO 异氰酸	异氰酸
CO 一氧化碳	OH 羟基	HNCN 氰化氢	氰化氢
CS 硫化碳	NH 氨基	现代甲醇	现代甲醇
HCN 氢化碳		H ₂ CS	甲酸
	CHO 甲酰基	HCOOH 乙醛	乙醛
N ₂ 氮分子	CH ₂ 亚甲基(甲?)	CH ₂ CO 丙酮	丙酮
NS 双生氮	C ₂ H 乙炔基	HC ₃ N 氰基	氰基
SiC 碳化硅,金刚石	C ₂ S 二硫化碳	CH ₃ CN 氨基	氨基
SiO 氧化硅	SiH ₂ 亚甲基	NH ₂ CN 甲腈	甲腈
SiS 硫化硅	C ₂ H 次甲基(甲?)	CH ₂ NH 甲胺	甲胺
SO 氧化硫	C ₃ N 氰基乙炔基	CH ₄ 甲烷	甲烷*
PN 氰化磷	HCCN 氰基乙炔	SiH ₄ 硅烷	硅烷*
CP 氰化磷*	C ₂ H 乙炔基	C ₂ H ₄ 乙烯	乙烯*
NaCl 氯化钠*	HCCNC 异氰基乙炔	CH ₃ OH 乙醇	乙醇
AlCl 氯化铝*	HNCNC 氰基乙炔的互变异构体	CH ₃ CN 异乙腈	异乙腈
KCl 氯化钾*	H ₂ CCC 亚丙二炔基	CH ₃ NC 甲腈	甲腈
AlF 氟化铝*	(CH ₂) 亚环丙炔基	CH ₃ SH 甲硫醇	甲硫醇
SiN 氮化硅	C ₂ H 乙炔基	NH ₂ CHO 丙醛	丙醛
CS ₂ 二硫化碳	C ₂ H 乙炔基	HC ₃ HO 丙炔醇	丙炔醇
HNCO 异氰基	H ₂ CCC 亚丙二炔基	CH ₂ HCN 丙炔	丙炔
H ₂ O 水	离子分子	CH ₃ C ₂ H 乙腈	乙腈
H ₂ S 硫化氢	CH ₂ 次甲基离子	CH ₃ CHO 丙醛	丙醛
OCS 氧硫化碳	NO ⁺ 亚硝基离子	CH ₂ NH ₂ 氨基乙炔	氨基乙炔
SO ₂ 二氧化硫	H ₂ D ⁺ 氘代质子化氢	HC ₃ N 氰基乙炔	氰基乙炔
SiC ₂ 碳化硅(硅基丙炔)*	HCO ⁻ 甲酰离子	HCOOCH ₃ 氨基甲酸	氨基甲酸
C ₂ O 氧化二碳?	HOC ⁺ 异甲酰离子?	CH ₃ C ₃ N 1,1-二炔	1,1-二炔
C ₃ 三原子碳*	N ₂ H ⁺ 质子化的氮	CH ₃ C ₂ H 甲乙炔	甲乙炔
NH ₃ 氨	HCS ⁺ 硫甲酰离子	CH ₃ OCH ₃ 丙酮	丙酮
CO ₂ 二氧化碳	HCOO ⁺ 质子的二氧化碳	CH ₃ C ₂ CN 乙腈	乙腈
C ₃ O 氧化三碳	H ₂ NH ⁺ 质子化的氨基	CH ₃ CH ₂ OH 氨基乙二炔	氨基乙二炔
C ₂ S 二硫化碳	H ₃ O ⁺ 水合氢离子	HC ₂ N 2,2-二炔	2,2-二炔
C ₄ S ₂ *	有机分子	CH ₃ C ₂ C ₂ N 丙腈	丙腈
C ₂ 双原子碳*	HCN 氰化氢	CH ₃ CHSCO 氨基乙二炔	氨基乙二炔
C ₂ O 氧化二碳	HNC 异氰化氢	HC ₃ N 氰基乙炔	氰基乙炔

参考文献

- 1 Adams W S. Ap. J., 1941, 93: 11~23
- 2 Weinreb S, Barrett A Jr, Meeks M L. Nature, 1963, 200: 829~831
- 3 Cheung A C, Rank D M, et al. Physics Rev. Letters, 1968,

- 21:1701~1705
- 4 Wilson R W. Ap. J. (Letters), 1970, 116: L43~L44
 - 5 Turner B E, Zuckerman B, et al. Ap. J. (Letters), 1975, 198: L125~L128
 - 6 Andrew B H. Interstellar Molecules, D. Reidel publishing Company, 1980, 87
 - 7 Kaifu N, Suzuki H, et al. Ap. J. A. (Letters), 1987, 317: L111~L114
 - 8 Li S, Moncrieff D, et al. Chem. Phys. Letters, 1988, 151: 403~408
 - 9 Van Dishoeck, Blake, et al. Protostars and planets II, Tucson: Univ. Ariz. Press, 1991.
 - 10 A Table of Interstellar Molecules, Köln Univ. Gornegrat olos. Press, 1992

(北京大学吴月芳副教授、邢骏副教授撰, 罗先汉审)

分子外向流 molecular outflows 年轻星体附近的冷(T 约 $10\sim 100\text{K}$)分子气体高速外流,由星际CO分子的 $J=1-0$ 转动谱线测到,表现为异常的谱线零强度(天线温度 $0.1\sim 0.2\text{K}$)全宽,可达每秒 100km ,几何尺度约 $0.1\sim 4\text{pc}$ 。成协特征有天体水脉泽、氢分子 2μ 辐射或HH天体和光学喷流等。分子外向流由星体产生的强劲星风与环境气体相互作用所引起,它的发现进一步揭示了星体在它生命的最初阶段(约 10^5a),存在质量抛射,辨认出了恒星演化进程中的一个新阶段。

分子外向流的基本特征是流速超过周围气体的超声速运动。由于分子云的大部分区域温度 $\sim 10\text{K}$,声速一般只有每秒几百米,云的坍塌、旋转和湍动也可以超声速。因此外向流的证认要排除这几种可能性。用系统坍塌解释分子云中CO发射线的半宽($\sim 1\sim 3\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)时已导致恒星形成率过高,以此解释包括高速翼的全宽,矛盾就更突出;自转可用云内部质量对引力的限制来排除,而湍动,由于无能源补充也不可能引起如此高速。此外,速度场结构和谱线翼外形是否光滑延伸等也用于识别外向流。

1975年,朱克曼(B. Zuckerman)等以宽带高灵敏度观测方法,在恒星形成区Orion中测到第1个分子外向流。在其红外源附近的小区域($<1'$)内CO线翼延伸达 $150\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。接着在其他几个区域中也测到了这种高速流,其中有斯内尔(R. L. Snell)等在1980年发现的外流源L1 551,此源发射区大,对它获得了与中心红外源成对称分布的红、蓝两瓣天图。此后外向流的搜寻和研究如雨后春笋蓬勃开展。无论在高质量原恒星凝聚体和低质量年轻星体周围,均测量到了高速外流。到1985年,拉达(C. J. Lada)的评述中已有67个。此后巡测仍不断进行,尤其是傅国义等测到了近50个。到1991年底根据吴等的统计,已有202个,发现的数量惊人。这些源分布在不同区域,最远的W49距离 14kpc 。但主要的还是集中在太阳系附近,有147个源在 1kpc 距离范围内。这一区域的产生率达到 $47/t\cdot\text{kpc}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。其中 t 为寿命,按其一般值 $5\times 10^4\text{a}$ 算,产生率 $\sim 9\times 10^{-4}\text{kpc}^{-2}\text{a}^{-1}$,这和 $\sim 1M_{\odot}$ 的恒星的形成率已十分接近,说明恒星形成过程中喷流的普遍性。

外向流形态各异,但一般具有双极结构和大的空间延伸。这两个特点加上高速,说明流动是爆发性的,这也是区别于非各向同性坍塌、湍动和自转的进一步特征。在现有已知极性的183个,有145个是双极的,其余是单极或各向同性,有一个具有多重叶。极性源的准直程度不同。巴利(J. Bally)等在1983年用外流所及区域的长短、轴的比值 $R_{\text{coll}}=R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$ 来定量描述。用这一方法对已有源的计算结果是多数源的 R_{coll} 在 $1.5\sim 2.5$ 之间,高度准直($R_{\text{coll}}\geq 3$)的占18%,准直性差($R_{\text{coll}}< 1.5$)的占23%,吴等1991年的统计还表明大质量外流源(外流气体质量 $M_{\text{g}}\geq 2M_{\odot}$ 或光度 $L_* > 100L_{\odot}$)和小质量外流源($M_{\text{g}} < 2M_{\odot}$ 或 $L_* < 100L_{\odot}$)的准直性不同,57个大质量源的 R_{coll} 平均1.8,而52个小质量源 R_{coll} 平均2.6。这与分辨率有关,因外流气体

质量小的源都比较近,观测事实也证明了这一点。例如对S140,巴利等1983年用 7m 射电镜测得为蓝翼稍强的各向同性源, $R_{\text{coll}}=1$,而哈亚西(M. Hayashi)等1987年用 45m 射电镜测得的为与红外源对称的双极源, $R_{\text{coll}}=1.4$;NGC7538,坎普贝尔(B. Campbell)等1984年用 11m 射电镜测得的源给出 $R_{\text{coll}}=1$ 。而卡迈亚(O. Kamaya)等1988年用 45m 镜在此源区测到了4个外流源,其中有一个 $R_{\text{coll}}> 1$ 。但也有角径小的源准直性很好,说明准直性还是外流源本身因素决定的。

由CO谱线高速翼及其强度分布和外流区域等,可求得外流的各项物理参数及动力学参数。1991年的统计表明有关参量的取值范围为:质量 $10^{-3}\sim 10^2M_{\odot}$ 动量 $10^{-2}\sim 6\times 10^2M_{\odot}\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 动能 $10^{41}\sim 10^{47}\text{erg}$;机械光度 $10^{-4}\sim 10^3L_{\odot}$ 演化时标 $0.2\times 10^4\sim 4\times 10^5\text{a}$ 。外流气体质量不同的源的参量也有差异。总的是小质量源较弱,能量为 $10^{41}\sim 10^{43}\text{erg}$,比大质量源小2个量级,机械光度也是如此。但小质量源却有较长的演化时标,平均为 $7\times 10^4\text{a}$,而大质量的为 $\sim 2\times 10^4\text{a}$ 在外流源的不同参量之间已发现一些相关性。例如吴等1991年发现外流气体的质量大的对应中心源的光度也大;拉达1985年得出外流源的机械光度均小于辐射光度,表明其星体辐射出的能量比存于外流的能量要多。但星体辐射所能给的驱动力与外流源对驱动的需要比较说明辐射压却不能驱动外向流,其原因尚待研究。

伴随外向流的有一系列高能激发现象。1978年贝克威思(S. Beckwith)等在Orion测到的 2μ 辐射,是介质受高速流冲击的结果;1977年金恩泽尔(K. Genzel)等就作过总结的 H_2O 脉泽源,被强劲的星风加速至 $> 20\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$;1980年洛杰齐兹(L. F. Rodriguez)等指出径向速度可达 $100\sim 200\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的HH天体与 H_2O 脉泽类似,可能是处在外流不同阶段的天体。HH天体有氢巴尔末线及其他中性原子的发射线,也是受激波作用的佐证。最引人注目的光学特征是光学喷流,麦迪(R. Mundt)1988年指出它们张角小($\sim 5^\circ$),高度准直(长宽比 $10\sim 20$),速度 $100\sim 400\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,也有冲击波激发的发射线。斯托克(J. T. Stoker)等的光谱分析表明,在L1 551中光学喷流(HH天体串)是两种风之间的弓形激波面:一种是星风速度 $440\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,另一种风可能发自吸积盘内层,速度 $160\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$,虽风速较低但更弥散,足能驱动气体外流。有的源中还有类似巴根(J. H. Bieging)等1984年测到的连续谱辐射区,位形与光学喷射,HH天体动向及CO瓣延伸吻合。这些多波段特征构画出了物质喷射的壮观图景,也表明外向流由星风在环境气体中激起。

星风对外向流的驱动方式可能有两种:一种是斯泰格曼(G. Steigman)等1975年提出的动量驱动,但红外谱线及射电连续谱测到的星风动量供应率小于外向流所需;另一种是卡斯顿(J. I. Castor)等同年所提出的能量驱动,这要求星风的机械光度大于外流的机械光度,但许多源却不满足,这个问题还在探讨之中。至于星风如何产生外流源的双极性和准直性则争论更大。1982及1986年康尼格尔(A. Konigl)等、奥库达(T. Okuda)等分别在提到星风本是各向同性的,是周围介质的压力梯度或磁场使之产生双极并得到准直,1983年德雷尼(B. T. Draine)、普杰兹(R. E. Pudritz)等提出星风在吸积盘中产生时就具有双极结构,由扭曲磁场或原恒星和吸积盘间的束缚层的热不稳定性引起,而1987年博斯(A. P. Boss)认为旋转可以是双极及准直机制。近年来稠密分子区探针 NH_3 , CS等用于外流源观测,1984年海部等人在L1551中获得轴向平行于喷流方向的盘结构,可能是吸积盘与极性及准直性有关的依据。

外向流对恒星形成、分子云演化及其研究有重要意义。拉达1985年指出深嵌在分子云中的红外源周围外流出现频率大大高于可见源区,说明外流阶段是恒星演化中最早可用观测证认的阶段。1989年傅国义在对L1 641中外流源及T. Tauri星的分析中得出外流发生在源恒星的主要的吸积时期。外向流对分子云的动力学过程有重要影响,它对分子云中湍动的维持是一个诱人的能源。1988年迈尔斯(P. C. Myers)等比较了低质量外流源的动量

与相应氢核的质量及弥散速度积,发现外流源可以抵制引力束缚甚至驱散云核;1989年傅国义综合分析了 Orion-S、及依瓦泰(T. Iwata)等1989年测得的 S287 和 马古利斯(M. Margulis)等1988年测得的 Mon1 的外流动量,表明外流可以支撑分子云,但这使恒星形成率出现过高。另外,吴等1992年注意到完全以外流解释有无红外源的两类云核中的谱线宽度之差还需再考察,源在云核中形成的过程也与致密相关。

分子外流的现行解释还不够成熟。它们的始发机制尚无定论,最后结局还不清楚。还有在恒星形成中角动量的转移,原恒星质量函数的确定等基本问题中,外流的作用尚无最终估计。在观测方面,以更高的分辨率和灵敏度获取其速度分布、密度结构及成协天体的多波段特征,对多数源均十分迫切,目前甚高速气体的发现证实了这一点。由于已巡测天区只占很小部分,而且多位于北天,所以系统的、无选择性的搜寻也仍然大有可为并十分必要。

参考文献

- 1 Zuckerman B, Kuiper T B H, kuiper E N R. Ap J (Letters), 1976, 209: L137~L142
- 2 Snell R L, Loren R B, plambeck R L. Ap J (Letters), 1980, 239: L17~L122
- 3 Bally J, Lada C J. Ap J, 1983, 265: 824~847
- 4 Lada C J. Ann Rev A Ap, 1985, 23: 267~317
- 5 Hayashi M, Hasegawa T, et al. Ap J, 1987, 312: 327~336
- 6 Mundt R, Ray T P, Bührke T. Ap J (Letters), 1988, 333: L69~L72
- 7 Myers P C, Heyer M, Snell R L, et al. Ap J, 1988, 324: 907~909
- 8 Fukui Y. ESO Workshop on Low Mass Star Formation and Pre-Main Sequence objects, 1989, 95~117
- 9 吴月芳. 天文学进展, 1990, 8: 291~302
- 10 Wu Y, Zhou S, Evans N J. Ap J, 1992, 394: 196~203

(北京大学吴月芳副教授撰;胡景耀审)

量子宇宙学 quantum cosmology 宇宙学作为一门自然科学的理论,它所探讨的是宇宙中的物质运动规律及时空的整体特性。也就是说,宇宙学是研究存在的整体的大尺度空间结构和演化的科学。现代宇宙学是20世纪20年代由爱因斯坦(Albert Einstein)开创的。尔后在求解爱因斯坦引力场方程的基础上,建立了各种相对论宇宙模型。在40年代后期和80年代初期结合核物理学与粒子物理学方面知识又分别提出了热大爆炸宇宙模型和暴涨宇宙模型。可以说,暴涨宇宙论已经把把我们领到了宇宙的开端。但是,作为宇宙的时间、空间和真空又是如何产生的呢?这就是量子宇宙学中所企图回答的问题之一。

量子宇宙学是量子理论和引力理论在宇宙学课题上的结合。当把量子场论的方法应用到引力理论中,从而奠定和确立了量子引力的方向以后,自然也就产生了把量子引力理论应用到宇宙学上面的想法和探索,从而诞生了“量子宇宙学”,以及由此建立的量子宇宙模型。量子宇宙学所考虑的时间区域是普朗克时期至 10^{-23} s之间的极其短促的一刹那。它涉及主要研究为我们宇宙创生时空拓扑结构,时空维数,宇宙最小半径等重要问题。显然对这些问题的正确理解与深入探讨,对我们完整、全面、深刻地认识宇宙特性,特别是宇宙极早期特性是具有重要意义的。

一个完备的量子宇宙学理论的建立需要成熟的量子引力理论。但是,迄今为止,人们还未能找到满意的量子引力理论。尽管如此,量子引力的某些特征已为人知,依赖这些特征可对普朗克时期的宇宙作出一些合理的描述。在 10^{-43} ~ 10^{-23} s的“量子”时期,我们可用半经典近似处理方法。因此,目前所讨论的量子宇宙学,应该是一个更为完善的理论前奏。

量子宇宙学的研究,从Misner开始至今已有多20多年了,但以往的研究着眼点集中于避免奇异性的产生;自1982年,英国剑桥

大学召开的一次极早期宇宙学讨论会开始,量子宇宙学研究着眼于宇宙的创生问题。目前在宇宙创生问题上,主要有两种研究方法:一是Hartle-Hawking的欧氏(其中时间为纯虚数)路径积分波函数 Ψ_{H-H} ,另一是Vilenkin隧道波函数 Ψ_V 。 Ψ_V 是选择尽量接近于量子力学中的隧道解,初始能量密度大,“隧道”波函数亦大,对应的初始能量密度小,“隧道”波函数亦小;这意味宇宙有甚高的几率,是起始于大的初始能量密度。

Ψ_{H-H} 是选择欧氏路径积分产生的解,这路径积分所积路径为无边界的四维几何(时空的各种几何),这种“无边界”波函数极度集中在任意小的初始能量密度上,从此意义上说,它与隧道波函数正好相反。

近年来,由于Astekar在量子引力理论中成功地引入新正则变量方法,促使人们考虑把新正则变量方法应用于量子宇宙学的研究中,虽说目前这方面研究工作尚少,但这是一个值得注意的研究方向。

自1983年Hartle-Hawking提出他们的自足的(Self-Contained)量子宇宙学模型以来,这方面的研究如雨后春笋。在这些研究中分别求出了各种模型的宇宙波函数(按照量子理论,一个体系的全部性质都由它的波函数所描写,因此,问题的关键是求得宇宙的基态波函数)和探讨了宇宙学中的各种重要问题。

由于宇宙波函数求解并非易事(它需求解一个二阶的无穷维的泛函微分方程—Wheeler-DeWitt方程)。因此,只是在微超空间中的一些特殊模型下给出了结果。它们是de Sitter模型,有质量的标量场模型、有 R^2 项的引力理论模型、暴涨标量场模型、电磁场模型、旋量场模型、各向异性的Bianchi-III、Bianchi-III和Bianchi-I型模型、具有复Higgs Φ^4 场与 $O(N)$ 对称的Higgs Φ^4 场模型、双标量相互作用场模型、标量-旋量相互作用的 σ -模型、Kaluza-Klein理论模型、Brans-Dicke理论模型和诱生引力理论模型。

已被讨论过的宇宙学中一些较重要的问题是:宇宙各向同性问题、宇宙均匀性问题、宇宙号差问题、宇宙平直性问题、宇宙整体转动问题、宇宙时间箭头问题、宇宙中原初黑洞生成问题,宇宙的维数问题、宇宙在 $a=0$ (a 为标度因子)处出现的几率问题、宇宙的最小半径问题、宇宙在普朗克时期的时空拓扑结构问题和Baby宇宙与Parent宇宙关系问题。

最近几年来,由于量子宇宙学的广泛研究,引起了对时空拓扑的深入讨论。从而引进了一系列的崭新概念,诸如:Baby宇宙(四维时空中的一个小的空间不连通部分,它本身组成一个闭宇宙,称作Baby宇宙),虫洞(虫洞是一种时空流形的拓扑涨落,是两个大的、彼此不同的光滑时空区域之间的微观联系)、“三次量子化”宇宙量子场论(用Wheeler-DeWitt超空间量子场论来描述具有相互作用的多个宇宙系统,它可以产生和湮灭单个宇宙的量子化态)。目前国际上对上述内容研究,正方兴未艾,这也是当前量子宇宙学研究的前沿。

参考文献

- 1 Hartle J B, Hawking S W. phys Rev, 1983, D28: 2960~2975
- 2 Halliwell J J. Preprint NSF-ITP-88-131
- 3 沈有根. 天文学进展, 1991, 9(3): 182~191

(中国科学院上海天文台沈有根撰)

宇宙背景辐射 cosmic background radiation

是指来自全天空四面八方“不能分解”的辐射,也就是说,来自宇宙空间的各个方向,但未寻找到其对应发射“点源”的辐射。1965年,美国彭齐亚斯(A. Penzias)和威尔逊(R. W. Wilson)在波长7.35cm处发现的宇宙微波背景辐射大大促进了近代宇宙学的发展。1989年11月18日美国宇航局发射的宇宙背景探测者卫星(COBE)是专为在更高精度上探测该背景辐射的各向异性而设计的。关于这一极其重要的宇宙背景辐射本书另有条目专门叙述,下面分别介绍红外、X射线、 γ 射线、远紫外及射电背景辐射。

宇宙红外背景辐射 关于近红外(波长0.7~25 μ m)背景辐射

射的来源,学者认为主要来自宇宙诞生时期的“化石”,如原星系,其中大质量星形成时初始爆发产生的辐射;星系前的特大质量恒星(星族Ⅲ恒星);星系中心大质量黑洞吸积气体时产生的辐射;宇宙创生大爆炸的残余基本粒子的衰变辐射;宇宙大尺度结构形成时星系前的一些爆发的星。但更多的宇宙红外背景辐射则是来自我们周围的宇宙尘粒,1983年,国际红外天文卫星(IRAS)发射上天,查明了在 $10\sim 200\mu\text{m}$ 波长范围内,红外背景辐射主要来自黄道光、银河系尘埃和红外薄纱卷云;而在 $12\sim 60\mu\text{m}$ 波段,来自黄道光的红外背景辐射占主导地位。1983年以来,几个天文小组用火箭飞行等空间观测手段也获得了亚毫米波段($100\mu\text{m}\sim 1\text{cm}$)的红外背景辐射的一些数据。中国云南天文台的吴建新和谢光中利用由星际的硅酸盐粒子和石墨粒子构成的宇宙尘埃模型得到了日本Matsumoto所观测到的亚毫米波段的过量辐射,结论是:星前的极重天体(VMO, Very Massive Object的缩写)推测是正确的;VMOs的产生年代可能是在红移值 $Z=80$ 附近;中性氢含量很少;在宇宙中,尘埃的主要成分是硅酸盐粒子,碳微粒是第2组成成分。

宇宙X射线背景辐射 从1962年开始,人们就已察知天空中各部分都均匀地发出X射线。近年来,利用各种X射线卫星获得的数据,天文学家对 $2\sim 10\text{keV}$ 的弥漫X射线进行了空间分布、强度及能谱特性等方面的研究,发现绝大部分是宇宙起源的,似乎是遥远的分立X射线源(如活动星系、类星体和星系团)的辐射迭加的结果;不到10%是银河系起源的,一般认为是宇宙线及星际介质作用的结果,但也有一小部分是X射线点源的贡献。

由英、美、德三国合作研制的X射线卫星(Rosat)于1990年6月发射升空,其X射线望远镜的分辨率为半角分,灵敏度比过去所发射探测器的灵敏度高100倍以上。该卫星已于1991年1月完成全天空巡查任务。从其对时钟星座7个小时所得的巡天照片,英国斯图尔特(G. C. Stewart)认为,照片显示的微弱分立源几乎对应于一半“软”(低能)X射线背景辐射。在获得这些源的光谱后,尚克斯(T. Shanks)认为它们是遥远的类星体。北黄极附近的X射线照片也显示出同样的情况,除分立的类星体外,照片还显示有弥漫X射线辐射的小“云”,德国哈辛格(G. Hasinger)认为这些是类星体群,由于它们太遥远而难于逐个分辨出来。

即使类星体可以说明半数的软X射线背景,但它们还不能提供足够能量的光子来说明“硬”(高能)X射线背景,美国空间望远镜科研所的格里菲思(R. Griffiths)和帕多瓦尼(P. Padovani)认为星爆星系可能是硬X射线背景辐射的源泉。这些星系正经历着一个激烈的恒星形成时期,诞生了许多大质量的双星,一些双星系统中的一员演化到子星或黑洞阶段,当伴星上的物质被吸引涌向它们使其达到几百万度K的高温时便会发出“明亮的”X射线。同时,由于新生恒星对其周围星际尘埃的加热作用,也发出强烈的红外辐射。格里菲思和弗鲁西奥尼(A. Fruscione)摄取了在X射线和红外波长均明亮的一些星系的光谱,发现确有部分星系显示存在着大质量年轻恒星的特征谱线,从而证实了这些星系确实是星爆星系。

Rosat还在天龙星座方向的X射线气体的前景中“看到了”冷氢云的清晰轮廓,距离地球约12000光年,位于银道面之上 $600\sim 1000$ 光年,因此,在它后面的热气体一定更远,有可能在银晕之外。

宇宙γ射线背景辐射 人们已观测到了来自银道面上下银纬 $\pm 15^\circ$ 之间以及银心方向的弥漫γ射线。来自银面的高能γ射线大概是宇宙线粒子与星际气体作用的结果,有证据表明其中的一部分来自谷德带(太阳系南面不远的一条亮星集中的带状区域,因1879年美国谷德(B. A. Gould)首先发现而得名,带内约有20万颗星(主要是B型星),带长2300光年,宽230光年)。还探测到了低能($0.5\sim 10\text{MeV}$)γ射线辐射,其中既有分立源也有弥漫辐射。银心区域是电子-正电子湮没辐射的强发射源,自1970年以来,该天区的 0.511MeV 谱线被一系列的气球实验所探测到。人们还探测到了来自四面八方、基本上是各向同性的,

从0.1到大于 100MeV 的宇宙γ射线背景辐射,有人认为它们是河外活动星系贡献的总效果,也有人认为这是宇宙空间一些粒子相互作用的产物。

远紫外及射电背景辐射 在银道面内的星际云中发现了能量小于 280eV 的远紫外背景辐射,它们大概是来源于这些云中的热等离子体。

星际介质中充斥着宇宙射线粒子,它们绕强度为几个微高斯的银河磁场磁力线行进时所引起的同步加速辐射,导致了人们所观测到的银河射电背景辐射。从绘制得的射电天图可见这种辐射绝大部分局限于银道面内,但也有若干差不多与银道面垂直的“径迹”,例如北银径迹就是一个引人注目的巨大气体碎裂环的片段,该气壳可能是一个较近的老超新星遗迹。

参考文献

- 1 谢光中. 天文学进展, 1989, 7: 210
- 2 Robinson Leif J. Sky, Telescope, 1984, 67: 4
- 3 吴建新, 谢光中. 云南天文台台刊, 1989, 4: 41
- 4 Giacconi R, Gursky H, Paolini F R, Rossi R B. Phys. Rev. Lett, 1962, 9: 439
- 5 Sky, Telescope, 1991, 81: 466
- 6 李萌. 天文爱好者, 1992, 2: 30

(北京天文台许霖高级工程师撰)

宇宙距离尺度 cosmic distance scale 天体的距离是天文学中最重要的一个参数。只有知道了天体的距离,才可能揭示和了解该天体的本原和真象。太阳和月球投影在天球上的角直径都是30角分左右,看上去差不多大小。日地平均距离约是地月距离的400倍,所以太阳的直径实际比月球的大400倍。天体的距离测量不仅直接涉及对恒星的了解,也影响到对银河系的大小、河外星系的本质以及可观测宇宙的规模的认识。离我们最近的恒星的视差是 0.772 角秒(折合成长度是4.2光年),也就是说除太阳之外,所有的恒星的视差均小于1角秒。现代地面天文三角视差测量的精度最高是 $0.01\sim 0.02$ 角秒,因此,有效的测量的空间范围是 $50\sim 100\text{pc}$ (约合 $150\sim 300$ 光年)。银河系的圆盘结构的直径约是 25kpc (约8万光年),距离的直接测量只局限于太阳附近的很小空间。自从1838年利用三角视差法测出第1个恒星的距离以来,在150年间,经几代天文学家的努力,已取得三角视差测量值的恒星总数还不超过一万个,这和银河系成员恒星总数约为 $1000\sim 2000$ 亿个相比,仅是极小的一部分。所以,尽管恒星距离测量的基础是三角视差,但更多更远的天体的距离资料出自非直接的测量方法。

天文学中习惯地将视差和距离视为同义语,凡用间接方法取得的恒星距离也被称为视差。根据移动星团(例如毕星团)在天球上投影的几何方法取得的星团距离称为星群视差;利用食变星的轨道运动称为力学视差;用赫罗图主星序拟合合法求出的距离叫测光视差;利用同一光谱型的巨星和矮星的谱线差异测定的距离叫分光视差;根据恒星自行测定的距离称为平均视差;借助天体光谱中叠加的星际谱线测定的距离叫星际视差;等等。

在宇宙距离测量领域遵循的原则有两条:一是同类者相同,二是远近者相同。前一条说的是同一类天体,具有同样或相近的天体物理特征。例如,凡是太阳型恒星均有和太阳相同或相近的质量、光度、化学丰度、年龄等等;凡是天琴RR型变星均有和天琴RR相似的质量、平均光度、光变特征等等。后一条指的是宇宙内的物质和物质的表现、分布等特征,无论在近处的,还是在远处的均相同,在过去的和现在的也相同。例如,银河系内的发光物质的主要表现形式是恒星,其它星系中也如此;银河系附近的各种宇宙物质的丰度分布和遥远空间内的一样。有了这两个前提,才能建立起宇宙距离测量的基本手段,即由近及远的阶梯法。首先测出太阳附近空间内的各种类型天体的距离,然后在遥远空间内证认出同种类型天体,比较二者的亮度等观测数据,按距离和亮度成反比的基本定则求出远处天体的距离。

银河系内天体距离的测定 除了上述的三角视差法和其他间接测量法之外,在银河系内最佳的可作为指示距离的标准烛光是天琴 RR 型变星和造父变星。1895 年,美国贝利(S. I. Bailey)在几十个球状星团中发现了 1 885 个变光天体,其光变周期多在 0.2~1.0d 之间。在同一星团内,这些变星无论其周期长短,平均亮度一致,差异不超过 0.1 星等。1899 年,美国弗莱明(W. Fleming)发现并确认一个脉动变星天琴 RR。1908 年,她证认出贝利发现的球状星团变星是和天琴 RR 为同类天体,遂称为天琴 RR 型变星。1914 年,美国沙普利(H. Shapley)利用自行法,求出天琴 RR 型变星的平均光度为 0.0 星等,这是天文学史上第 1 个做为标准烛光的的天体。沙普利利用天琴 RR 型变星测量出凡拥有这类变星的球状星团的距离,并根据球状星团的空间分布求出银河系的规模大小。将天琴 RR 型变星的平均光度定为 0.0 星等,意味着确定了距离的尺度。若尺度定得比客观实际值大些,则用该指示距离的天体测定的距离值比实际值近些;反之,尺度小些,则比实际值远些。1991 年,欧南天文台的天文小组发现天琴 RR 型变星的平均光度与金属丰度有关。金属丰度少者,光度大。新求出的平均光度是 0.20~0.38 星等,比以前公认的 0.0 星等要暗些,即距离尺度更大些。用这个新测定的尺度,求出的天体距离值比以前用平均光度为 0.0 星等的尺度测出的距离值近 10%~20%。造父变星也是一种最佳的指示距离的标准烛光。1908 年,美国莱维特(H. S. Leavitt)分析她在小麦哲伦云中发现的 25 个造父变星的观测资料。它们的光变周期最短的 1.25d,最高的 127d。莱维特发现,造父变星的光变周期和亮度呈线性关系,即光变周期越长者,亮度越大。因为这 25 个造父变星都是小麦哲伦云中的成员,可以认为它们和观测者之间的距离都是相等的。所以,亮度大小反映的就是光度大小。后世称之为造父变星的周光关系。1913 年,丹麦赫茨普龙(E. Hertzsprung)根据银河系中的 13 个造父变星的自行,求平均视差,确定了周光关系中的光度零点。赫茨普龙以造父变星的周光关系作为标准烛光,求出小麦哲伦云的距离,发现它原来是银河系之外的河外星系。

对银河系外天体距离的测定 由于造父变星为高光度天体,在 4Mpc(约 1 200 万光年)的距离上,仍可见得。因此,可以用周光关系作为距离指示物去丈量银河系附近凡能观测到造父变星的星系的距离。问题的关键是距离尺度的定标。1918 年,沙普利认为造父变星周光关系的暗端(即周期短到 1.0d 的一端)的光度和天琴 RR 型变星的平均光度相同,从而为周光关系确定了零点,使之成为测量凡可见造父变星的近距星系的距离的标准烛光。从此,这个被公认的距离尺度一直沿用了 30 多年。1952 年,旅美德天文学家巴德(W. Baade)证明,虽然造父变星和天琴 RR 型变星都是脉动变星,但属于不同的星族。二者的光度没有天体物理上的联系,光变周期最短的造父变星的平均光度不是 0.0 星等,而是 -1.5 星等,即光度应是 0.0 星等的 4 倍。这样,距离尺度应缩短 1/4。用这个新定标的距离尺度去度量河外星系,求出的距离值比以前的值远上一倍。星系的直径也相应的要加上一倍,将作为标准烛光的造父变星去标定更高光度的天体的平均光度,例如,星系中的最亮星的亮度、行星状星云的角直径、电离氢区的角大小、超新星的极大光度,等等,从而将距离的测量范围阶梯式地扩大到宇宙深处。由于造父变星的周光关系是从银河系内过渡到银河系外的标准烛光,所以,使这一距离尺度更准确反映宇宙真实面貌始终是现代天文学的重要课题。

宇宙距离尺度的建立和订正 对于比 30Mpc(约 1 亿光年)更遥远的河外天体而言,现有的由近及远的阶梯法不能精确地测定其距离。1929 年,美国哈勃(E. P. Hubble)根据前人于 1912~1926 年期间测定的 46 个星系的视向速度以及他本人测定的这些星系的距离,发现星系的退行速度和距离成正比,即 $V=HD$,式中 V 是 km/s 表示的退行速度, D 是以 Mxpc 为单位的星系距离, H 是比例常数。后人将此经验关系式称为哈勃定律,将 H 称为哈勃常数。 V 值是观测值,在确定了 H 值后,即可将哈勃定律作为距离指示物,求出星系的距离 D 。 H 值的测定基础仍是恒星

的三角视差,天琴 RR 型星的平均光度、造父变星的周光关系等一系列由近及远的标准烛光。1929 年,哈勃常数 H 值测定为 500km/s.Mpc。60 多年来,历经几代天文学家订正,今日使用的 H 值有两个,其一是 50km/x.Mpc,另一是 100km/x.Mpc。前者为一较小的距离尺度,用之测出的距离远;后者,尺度较大,测出的距离近。二者相差一倍。也就是说,用小尺度求出的可观宇宙要更深一倍。1990 年,美国用航天飞机放送哈勃空间望远镜(HST)上天。这个口径 2.4m 的反射望远镜的一项主要任务是研究星系中的距离指示天体,从而更精确地求出哈勃常数 H ,以期用改善的距离尺度描述我们周围的宇宙。

参考文献

- Hodge P W. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 1981, 19: 357
- Rowan-Robinson M. Cosmological distance ladder, 1985
- Van den Bergh S, et al. Extragalactic distance scale, 1988
- Clementini G, et al. The absolute magnitude of RR Lyrae stars, Messenger, 1991, 65: 27
- Madore B, et al. Cepheid distance scale, Publications of Astronomical Society of the Pacific, 1991, 103: 933

(北京天文台博士生导师李竞研究员撰)

射电天文学

射电参考系 radio reference frame 由有精确射电位置的射电源组成的射电源星表来实现的。许多射电源是距离我们很遥远的类星体、河外星系等河外天体。河外射电源的自行很小,不超过 10^{-5} "/a,所以在相当一段时间内,可以认为射电源是“不动”的。在这样的参考系中测定天体位置或研究其运动,不会产生由于参考系本身的不完善而引起的附加运动。因此早在 18 世纪赫歇尔(F. W. Herschel)和拉普拉斯(P. S. Laplace)就已指出,河外星系是最适合于作为天球参考系的参考点。但是由于河外射电源的光学亮度大都暗于星等 17 等,不易为一般光学望远镜所观测到。直到 1967 年甚长基线射电干涉测量(VLBI)获得成功,并得到发展后,才使对这些射电源进行高精度测量成为可能。

到 20 世纪 80 年代初,射电源星表的观测精度为几十毫角秒,而到 80 年代末,已提高到 1 毫角秒,甚至更高。表 1 为近代几个精度较高的射电源星表。

为了尽可能消除观测星表间的系统差,1986 年瓦尔特(H. G. Walter)、1988 年王叔和等与艾里斯(E. F. Arias)等分别研究了射电源星表综合问题。根据研究的结果,综合方法现在有两种,一种是各观测源星表的共同源,在相对于平均系统差之和为零的条件下,求得共同源在平均系统中的综合值,然后将个别观测射电源星表归化到平均系统中去。另一种也是利用共同源,由关系式:

$$A(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\cos\alpha_{ij}+A2(i)\operatorname{tg}\delta_{ij}\sin\alpha_{ij}-A3(i)+\alpha_{ij} \\ -A1(i)\sin\alpha_{ij}+A2(i)\cos\alpha_{ij}+\delta_{ij}=\delta_{ij}$$

表 1 几个射电源星表

作者/星表名	射电源数量	赤经误差 (0".001)	赤纬误差 (0".001)
Fanselow 等(1984)	117	3.6	3.8
Ma 等(1986)	82	1.2	2.8
Robertson 等(1986)	26	0.4	0.6
JPL1986-2(1986)	120	1.6	1.9
Sovers 等(1988)	106	1.3	1.6
Ma 等(1990)	182	≤1.0	≤1.0

解得共同源在综合系统中的综合值。式中 $A1(i)$ 、 $A2(i)$ 、 $A3(i)$ 为个别观测星表；相对综合射电源星表的转角， α_j 、 δ_j 为共同源 j 在个别观测星表 i 中的值， α_j 、 δ_j 为共同源在综合射电源星表中的综合值。表 2 列出自 1990 年到 1992 年由国际地球自转服务组织 (IERS) 所给 RSC (IERS) 系统综合射电源星表的概况。

表 2 IERS 综合射电源星表 精度 ($0''.001$)

星表名 RSC (IERS)	共同源		次级源		补充源	
	射电源数	源数 精度	源数 精度	源数 精度	源数 精度	源数 精度
90 C 01	228	51 0.3	40 2.4	137 4.6		
91 C 01	396	57 0.3	120 2.4	217 2.2		
92 C 01	422	65 0.2	152 2.11	205 1.93		

1991 年艾里斯等和瓦尔特研究表明，各射电源星表间存在系统差，系统差的部分来源是岁差常数和章动理论的误差，以及星表本身的系统差。在甚长基线射电干涉测量的高分辨率下，大多数射电源呈现一定的结构，而且是变化的。其结果将引起观测位置的微小变化，在洲际基线上，毫角秒量级的射电源结构变化，会引起厘米级的测地误差。1979 年科都 (W. D. Cotton)、1988 年夏洛 (P. Charlot) 的研究都表明，对精确的天体测量和测地工作中，应考虑射电源结构的变化。1991 年苏佛尔斯 (O. J. Sovers) 等认为考虑射电源结构、动态对流层变化等影响后，观测精度可减小到 0.1 毫角秒水平。

现在的射电参考系有以下三方面问题：精确测定位置的射电源还不多，特别是共同源极少；这些射电源的全天分布不均匀；南天射电源位置精度一般低于北天的射电源位置精度。因此需要增加有精确位置的射电源数量，特别是共同源的数量，增加南天源的观测次数，同时要研究和监视射电源结构及其变化，通过星表间对比，研究观测误差起因，降低观测误差。为此，1984 年阿乌克 (A. N. Argue) 等给出有 233 个河外射电源的星表。1988 年约翰斯通 (K. J. Johnston) 等提出有 489 个射电源的加密观测计划，其中 65% 为类星体、10% 为 BL LAC 型天体、10% 为致密河外星系。这两个观测计划都在进行中，除进行射电观测，同时还用大型光学望远镜进行光学观测，另外还利用 CCD 观测射电源结构等。

为了重新整理和深入研究长期积累的天文光学观测资料，射电参考系还需要和光学参考系联系，联系一般用射电源的射电观测结果，以及其光学对应体的光学观测相比较来进行。所以用作建立射电参考系的射电源，要求是小于 1 毫角秒的致密源，射电频谱为坦谱，且有相对应的光学对应体。随着甚长基线射电干涉测量灵敏度的提高，由于可检测的射电源数目和射电辐射流量的 (-1.5) 次方成正比，可作为参考系用的射电源将大大增加。1991 年马 (C. Ma) 等预计用甚长基线阵 (VLBA) 将会达到每平方度一个射电源。另一类是利用射电星，即河内射电源。这类天体的光学亮度比较亮，可用一般光学望远镜观测。射电星有一定的射电辐射强度，而且辐射是致密的。通过射电星可以将射电参考系直接和光学基本参考系联系。但两种手段都有其困难之处。对射电源，因光学亮度很暗，光学观测较困难，而且要从光学基本系统通过多级联接，才能将射电源光学对应体联接光学基本参考系中去。这样因星表联接而引起的误差，将是主要的误差来源。对射电星，则因其射电辐射都很弱，在射电观测方式上一般采用高灵敏度大型综合孔径射电望远镜如甚大天线阵 (VLA) 等。1985 年莱斯脱拉特 (J. F. Lestrade) 等以及 1987 年尼尔 (A. E. Niell) 等利用多个天线组成的甚长基线网，同时采用 VLBI 相位基准法 (phase referencing) 成功地观测到了射电星的射电位置。但该方法仅适用于在射电星近旁 ($<5^\circ$) 有射电源的情况。另外，1970 年夏四罗 (I. I. Shapiro) 和 1985 年伯托尔 (N. Bartel) 等

分别从理论和实验研究表明，可利用脉冲星来进行射电和光学参考系的联系。

1985 年佛里克 (W. Fricke) 指出，对射电参考系和光学基本参考系间的严格比较，需要有足够的共同源，需要有共同源的光学位置和射电位置，而且两者有可比较的精度。实际上现在离开这个要求，还有一定距离。因而需要相互协调，首先建立好射电和光学和参考系统，并进行多种方式的相互比较和校验，以便进行射电和光学参考系的精确联系。射电参考系的建立，射电和光学参考系的联系，将影响到天文学、地学等有关科学和研究和发展，因此是国际天文学界十分重视的一个前沿研究工作。对这个问题，无论在理论研究，还是具体实践上，都仍将有很大的发展前景。

参考文献

- 1 工叔和, 须同祺, 陆佩珍. 上海天文台年刊, 1988, 9: 128~137
- 2 Arias E F, Feissel M, Lestrade J-F. IERS Technical, 1991, 7
(上海天文台须同祺研究员撰; 金文敬审)

甚长基线射电干涉测量法 very long baseline

interferometry, VLBI 是射电天文的一种观测方法。用两个天线同时观测一个射电源目标，再将两天线收到的信号联系起来，进行无线电波干涉，测量收到信号间的相位差。这种干涉测量方法有两种型式：一种是常规型的，两天线间用电缆或微波传输来联结，干涉测量中两路信号的相位差可“实时”测定。这种干涉当两天线间的基线很长时，由于本振和传播介质引起的随机相位起伏，干涉测量系统的相干性丧失，不能正常工作。为解决这一问题，就产生了另一种现在得到广泛实际应用的甚长基线射电干涉测量 (VLBI)。该方法是两天线分别使用独立的高稳定度的原子钟作本地振荡，将观测信号记录在各自的宽频率磁带上，并在事后用相关分析法得到干涉测量的条纹幅度和时间延迟等有关测量。这种方法的优点是去掉基线的实时联结，使两天线间的基线可以任意长，这也相当于望远镜口径加大，从而极大提高分辨率。甚长基线射电干涉测量现在已在天体物理学、天体测量学、地球物理学和地球动力学等许多学科得到广泛的应用。

1967 年，首先于加拿大阿贡金射电天文研究所在 448MHz 上，用口径分别为 46m 和 10m 的天线，完成了独立本振的磁带记录干涉实验，其基线长 200m。同时，美国国立射电天文台在 610MHz 上，以相距 650m 的口径分别为 26m 和 42m 天线，也得到了干涉条纹。从此开始了甚长基线射电干涉测量及其应用的研究。

甚长基线射电干涉测量的发展，始终和技术方法相联系。目前甚长基线干涉测量所能进行常规性观测的波段有 50cm、18cm、6cm、2.8cm 和 1.3cm，以及近年增加的 90cm、3.5/13cm 波段，还有特别组织的毫米波甚长基线射电干涉测量。在分辨率上地面甚长基线射电干涉测量能分辨的区域是宽线发射区 1pc，相当于 $10^{17} \sim 10^{18}$ cm。灵敏度用 MK II 记录系统约为 0.7Jy ($1\text{Jy} = 10^{-26}\text{W}/\text{M}^2 \cdot \text{Hz}$)，用 MK III 记录系统约为 0.1Jy。动态范围，即射电源图像中最亮特征和离源 (off-source) 噪声的比值从 20:1 到 1000:1。同时还发展了甚长基线射电干涉测量特有的成图法。这些进展得到了如 H_2O 脉泽自行、超光速运动图像和大陆漂移的测量等重要结果。

虽然甚长基线射电干涉测量取得了很大进展，但仍有不少有待解决的问题。主要为灵敏度仍感不足，许多目标如脉冲星、恒星的流量都在 10mJy 量级，常常要用少数大天线加上 MKIII 记录终端才行，而一般天线只能观测强源；“转移函数”或 (u, v) 平面图覆盖还不够满意，加上动态范围不足，进一步限制了图像中弱特征的检测；在长基线上合适的校准源很少，因此校准很困难；计算处理很费时。所以现代的甚长基线射电干涉测量主要是改善观测能力，改善 (u, v) 图的覆盖条件，提高灵敏度和提高多基站同时处理的能力。

90 年代的甚长基线射电干涉测量正向 3 个方面发展：(1)毫

米波甚长基线射电干涉测量 目前地面上已做到最高分辨率用100GHz为50 μ s,其线分辨率为 $10^{16}\sim 10^{17}$ cm,相当于黑洞模型的吸积盘尺度。毫米波成图技术是当今的一个研究热点。(2)地面甚长基线射电干涉测量网的建立 这方面主要有美国的甚长基线阵,它是多用途的,可用于天体物理学、天体测量学和地学等学科。现有10个天线组成,记录系统比MKIII更先进,并备有同时处理20个台站的相关处理机,使效率大为提高。欧洲甚长基线射电干涉测量网有8~13个天线,采用和美国甚长基线阵一样的记录终端,也计划做同时处理20个台站的相关处理机。这个网主要优点是天线大,因而灵敏度较高。(3)空间甚长基线射电干涉测量卫星 现在实施中的有两个:一个是射电天文空间甚长基线射电干涉测量计划(Radioastron),这是1985年前苏联科学院支持的项目,这个卫星的轨道较扁,在厘米波段的分辨率比地面甚长基线射电干涉测量高10倍,其灵敏度当和地面一个70m天线组合时,用300s积分时间,在1.35cm波段约100mJy,在6和18cm波段约50mJy;另一个是甚长基线射电干涉测量空间天文台计划(VSOP)。这是由日本支持的研究项目,预计将发射一个带有8m左右口径的卫星,其最长基线30000km,分辨率达100 μ s,成图质量较高。

随着分辨率和灵敏度的提高,甚长基线射电干涉测量将对研究产生致密射电源的天体物理过程,致密射电源的精细结构及其变化,其精确度在毫角秒以下以至微角秒的遥远天体的位置及自行等给出答案。地面甚长基线射电干涉测量网的进展和空间甚长基线射电干涉测量计划的开始,将会引出更多重要的研究领域。

参考文献

- 1 Christansen W N, Hogbom J A. Radio Telescope. Cambridge Univ Press, London, 1969
- 2 Thompson A R, Moran J M, Swenson Jr G W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. A Wiley-Interscience Publication, 1986

(上海天文台须同祺研究员撰;万同山审)

空间天文学

远红外天文观测 far infrared astronomical observation 由于水蒸气、二氧化碳和臭氧等大气中的少量气体吸收红外线,使得来自宇宙天体的远红外辐射不能到达地面。如果要接收来自天体的远红外辐射,必须把仪器送到大气层以外,放在人造卫星、航天飞机、火箭和高空气球上观测。因此红外天文属于空间天文范畴。

1800年英国赫歇尔(Herschel)在观测太阳光谱时,偶然发现了红外线。如果说这也算是初始的红外天文观测的话,那么已将近200年的历史了。但是红外天文,特别是远红外观测的兴旺,是在人造卫星上天以后的事。如果回顾历史,有意识的红外天文观测是1869年美国的罗斯(Rosse)第1次在90cm直径的望远镜上观测月球的红外辐射。后来,经历了漫长的岁月,到1939年才成功地进行了月全食的红外观测。在这段漫长的空白时期,虽然也有人进行过红外观测,但由于技术上的困难和理论的不完善,都没有获得象样的结果。而这次观测,记录到月食的全过程,月面温度变化达170 $^{\circ}$ C以上,从而证明月球表面没有大气,而且还推算出月面物质的导热性能。但这些都在近红外波段,在波长大于14 μ m的远红外,几乎都被地球大气吸收。

19世纪末20世纪初,物理学家面临的主要问题之一,是如何解释热辐射体的光谱能量分布。当时经典物理在解释这个问题时,遇到了困难。1860年基尔霍夫(Kirchhoff)提出:当温度一定时,任何物体的发射率和吸收率相同。也就是说,一个好的热吸收体,也一定是一个好的热辐射体。1894年出现了维恩(Wien)定律,他认为物体的绝对温度与辐射能量的峰值波长的乘积是一

个常数。可惜这个规律只与低温时短波段实验数据相符。1900年瑞利(Rayleigh)导出了与高温时较长波段实验数据相吻合的表达式,它可以描述为:物体表面的辐射能量与绝对温度成正比,与波长的4次方成反比。遗憾的是按此式推算,能量随波长的减小而无止的增加。因此,人们开玩笑地称这个规律叫“紫外灾难”。

1900年10月19日,德国普朗克(Planck)发表了论文,并公布了他著名的普朗克公式,这才解决了所有波长和温度范围的热辐射体光谱能量分布问题。到20世纪初爱因斯坦(Einstein)建立了量子论。如果将普朗克公式的能量辐射从零到无穷大的波长积分,就得到黑体辐射定律,即黑体辐射的总能量与它的绝对温度的四次方成正比。至此,红外辐射的光谱能量分布理论解决了。但红外辐射本身的物理机制还不完全清楚,这不影响红外技术的发展。

20世纪40年代后,制成了各种光导型红外探测器,1947年开始用于天文观测。60年代起,红外天文工作有了长足的进展。红外辐射是一种热辐射,来自天体的红外辐射是非常微弱的,背景噪声比讯号大得多。因此,接收天体的微弱讯号,就等于在的大海噪声背景中去捕捉一条小鱼,并测量其大小。为了要在强背景中选出弱讯号,红外技术都采用调制技术和低温致冷。

地球大气的吸收和散射,使地面上的红外天文观测受到限制。但波长大于5 μ m,大气散射是次要的,而大气本身发射要大得多。因此,大于5 μ m的红外天文观测,白天和晚上都一样,就整个红外波段,大气的吸收是主要的,其中以水蒸气、二氧化碳和臭氧吸收最为严重。但是,也给我们留下几个近红外的小窗口,波长为1~2.7 μ m,3~5 μ m,8~14 μ m以及16~22 μ m可少量通过。

实测表明,在28km以上高空,上述3种成份的吸收大大减少,可以观测到25 μ m的远红外。大约35km以上,可以接收到100 μ m的远红外。因此,许多远红外观测,都在飞机、探空火箭和高空气球上进行。特别是高空气球,虽然它是已有200多年历史的古老工具,但在航天时代的今天,人们还是大量使用这种工具。主要原因是:气球比人造卫星便宜;发射、控制和回收技术,相对比卫星简单;对远红外观测一些高能天体和高空大气物理来说,气球高度已可做许多研究工作;卫星载仪器,可在气球上预演。

今天的高空气球比200年前当然大不相同。不久前的记录是:球体大到140万 m^3 ,载重达5t以上。飞高记录为52km,飞行时间长达762d。利用现代化的高空气球,进行红外天文观测,开始于1964年,一个载有30cm口径的望远镜和红外光度计的气球仪器吊舱,飞高26.5km,观测了金星的红外光谱;另一个名叫“同温层望远镜”的91km望远镜,对6个红巨星以及木星、月球进行了光谱观测。这两次初具规模的观测,开创了近代高空气球红外天文工作的先例。

第1次远红外高空气球观测,是由德国霍夫曼(Hoffman)在1969年做的,球载望远镜口径30cm,在波长100 μ m的远红外波段对银河中心进行了观测。为了使背景噪声尽可能低,不仅探测器要用液氮致冷到4K,甚至更低,就连光学系统也要致冷到4~10K左右,才能接到宇宙天体的微弱的远红外讯号。

1983年1月25日由美、英、荷兰3个国家联合研制的远红外天文卫星(IRAS)发射成功,是红外天文技术水平达到了前所未有的程度。卫星上装有一架致冷到10K有效口径为57cm的红外望远镜,4个致冷到2K的红外光度计,波段分别为12 μ m、25 μ m、60 μ m和100 μ m峰值波长以及一台波段从7.7 μ m到22.6 μ m的低分辨率光谱仪。

在10 3 Pa的液氮沸点为4.2K,要使探测器降到2K,必须使液氮在低于10 3 Pa下工作,这就要有一个特制的装置,使液氮慢慢向太空的真空中流失。预计7个月流失完,实际工作了10个月。

在此以前,卫星远红外观测的探测器,只致冷到12K左右,这个卫星致冷低到2K,讯噪比提高了2个量级。另外,红外源的温度愈低,辐射出的波长愈长,即愈是远红外。红外天文卫星最

困难的关键技术,在于它必须在太空无人的条件下,实现主要仪器接近绝对零度下工作,因此,红外卫星的研制工作长达10年之久。

IRAS卫星的轨道也是经过精心设计的,圆形轨道周期为103min,高度900km,轨道岁差为每年 360° ,与太阳同步。发射时间的选择是使卫星进入“晨昏轨道”(twilight orbit),即卫星沿着地球的昼夜分界线运动,这可使卫星尽量少的进入地影,同时可对天空任何区域观测。这样,轨道缓慢进动使望远镜的指向永远与太阳方向成直角;而与望远镜筒平行安装的太阳能电池帆板永远对向太阳。

IRAS卫星以前所未有的巨大能力,在4个波段扫描观测了25万颗远红外天体,并记录了5600多个源的低分辨率的光谱。它用 $100\mu\text{m}$ 的探测系统,揭示了被尘埃和气体遮住的银河中心的细节,也观测到宇宙背景辐射。在太阳系内还发现了5颗彗星和5颗小行星。特别是发现织女星周围正在形成“太阳系”,织女星周围的大量大于几个毫米的尘粒,将来将形成行星。类似织女星的情况,被IRAS卫星探测到50多颗。

参考文献

- 1 Richard D, Hudson J R. *Infrared System Engineering*. John Wiley and sons, INC, 1969
- 2 Setti G, Fazil G. *Infrared Astronomy*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, held at Erice, Sicily. D. Reidel Publishing Company, 1977, 7: 9~12
- 3 IRAS, Explanatory Supplement, R S. Government Printing Office, Washington, D. C, 1985
- 4 邹惠成, 徐春娟, 等. 可见光外天文学. 北京: 科学出版社, 1986
- 5 Noguchi K. *Publ Astron Soc, Japan*, 1990, 42: 419
(上海天文台邹惠成副研究员撰)

紫外天文学 ultraviolet astronomy 是研究天体的紫外连续谱和谱线辐射的科学,具体涉及的波长范围为 $4000 \times 10^{-10}\text{m} \sim 50 \times 10^{-10}\text{m}$ 。通常把 $4000 \times 10^{-10}\text{m} \sim 3000 \times 10^{-10}\text{m}$ 的辐射称为近紫外, $3000 \times 10^{-10}\text{m} \sim 1000 \times 10^{-10}\text{m}$ 的为中、远紫外, $900 \times 10^{-10}\text{m} \sim 50 \times 10^{-10}\text{m}$ 的为极端紫外。其研究对象遍及各类天体;行星、太阳、恒星、星际介质、星系以及宇宙紫外背景辐射。由于地球大气层的强烈吸收,只有近紫外能在地面上进行观测,而其余的紫外辐射的观测只能在大气层之外的空间进行。

中、远紫外的天文观测经历了气球、火箭、人造卫星阶段。1946年由火箭送入250km高度的光谱仪首次得到了太阳的中、远紫外光谱,1957年利用火箭得到了恒星的紫外光谱,60年代利用陀螺仪固定指向得到了谱分辨率为几埃的恒星紫外光谱。人造卫星的发射开辟了空间科学的新纪元,空间天文学也随之而发展。1968年的轨道天文台(OAO-2)和1972年发射的Copernicus号天文台(OAO-3),都是以研究恒星和星际介质的紫外光谱为目的的。尤其是Copernicus号天文台取得了谱分辨率为 0.05A 的恒星紫外光谱,其重要发现之一是星际介质中存在冷、热气体的二相结构,从而导致了星际气体的新认识。

1978年由美国航空航天署(NASA)、欧洲空间局(ESA)和英国科学工程研究协会(SERC)三者共同研制和发射的国际紫外探险者(IUE)在紫外天文学上起很重要的作用。该卫星首次实现了实时观测;由于高轨道可以实现不间断的观测,这对研究活动天体的光变尤其重要;采用了新的卫星控制思想及对所有天文学家开放的政策极大地提高了它的使用效率。原计划运行3年,到1992年已运行了14年仍非常有效。在此期间,该卫星第1次实现了对单个天体的长期监测;首次与其他波段的地面或空间望远镜联合进行同时性观测,如IUE/ROSAT/Ginga地面光学项目,IUE/EXOSAT同时性观测等,开辟了多波段天文研究。目前已在多个领域取得了很大的成绩;揭示了恒星色球的结构;在相互作用双星系统中发现了吸积和热区,发现一些冷星具有热的伴

星并由此研究冷星的大气以及揭示双星质量损失;早期恒星的星风过程;活动星系核的紫外连续谱和谱线过程,特别通过研究光变揭示活动星系核核心部分的结构。1990年5月发射上天的Hubble空间望远镜(HST)具有更高的紫外能力,它的谱分辨率高于IUE,对于光源 $\lambda/\delta\lambda$ 可达 10^5 ,暗弱源 $\lambda/\delta\lambda=2000$;它能观测到比IUE观测极限暗几十倍的天体的紫外光谱。这是通过紫外吸收线研究宇宙气体云团的分布、状态和元素丰度的强有力手段;HST的快速光谱能力为研究活动天体短时标的谱光变提供条件;HST具有很高的紫外成像能力,这很适合于研究恒星的环境、行星大气的结构、双星系统、河外源的引力透镜、超新星遗迹、银河系的热气体的分布、星系核区的结构等。成像能力还为紫外巡天提供了条件;HST具有测量紫外偏振的能力,适合于研究天体的磁场分布和强度。HST的远紫外巡天计划可能会发现新的远紫外辐射源。

由于气体对极端紫外辐射(EUV)的吸引更加强烈,不只地球大气层而且稀薄的星际介质都可能对极端紫外辐射不透明。幸运的是星际气体分布不均匀,存在着许多空洞,在其中气体的密度比星际气体的平均值低得多,太阳处于大约300光年大小的局域空洞的中心,较远天体的极端紫外观测是透过这些空洞进行的。极端紫外观测的另一问题是由于太阳对地球上层大气的电离而在地球周围产生极强的极端紫外背景辐射,所以一般EUV卫星的观测是选择卫星进入地球的阴影时进行。1957年(S. Bowyer)在Apollo-Soyuz使命时首次进行了EUV观测,测到2个白矮星,一个闪耀星和一个灾变双星。德国X-射线卫星Rosat上搭载的英国宽视场EUV望远镜的工作波长 $60 \sim 300 \times 10^{-10}\text{m}$,主要功能成像,该卫星于1990年发射上天,巡天的结果表明在一些方向上(约5%~10%面积的天球)看河外天体也是明朗的,为将来的河外的EUV观测作了很好的准备。

1992年6月NASA发射了极端紫外探险者(EUVE),它的工作波长 $70 \sim 760 \times 10^{-10}\text{m}$,具有成像和光谱能力,预计运行时间3年,开头的6个月用于巡天,确定银河系的气体分布和远紫外的透明方向,找出极端紫外源的分布和发现新的在这个波段上辐射的天体。接下来的时间用于观测个别天体,对象是白矮星、活跃冕恒星、激变变星、行星的极光、星系内的气体分布、河外活动星系核等高温天体。由于极端紫外是一刚刚开始的新观测窗口,以后的发展方向是无法预料的,但是新的现象和新的天体的发现是必然的。

正在设计之中的NASA远紫外光谱探险者(FUSE)、ESA的赖曼计划,以及宇宙飞船、航天飞机搭载的望远镜的小型项目和现有的紫外观测卫星,是今后10年紫外天文的主要手段。

参考文献

- 1 Doald G, et al. *Ap J*(Letters), 1974, 193, L127~L131
- 2 Clavel J, et al. *Ap J*, 1991, 366, 64~81
- 3 Kinney A R, Maran S P. *Pub of Astr Soc Pac*, 1991, 103, 1237~1249
- 4 Malina R F, Bowyer S. *Extreme Ultraviolet Astronomy*. New York: Pergman, 1991, 397
- 5 Maran S P, Kinney A R. *Pub of Astr Soc Pac*, 1993, 105, 447~462
- 6 Pounds K, et al. *Mon Not Roy. Astr Soc*, 1993, 260, 77~102

(中国科学技术大学王挺贵博士撰)

紫外天文观测 ultraviolet astronomic obsetvation 地球大气层将大部分电磁波谱挡在大气层外,只允许可见光、射电波和少部份红外线、紫外线通过。短于 $3000 \times 10^{-10}\text{m}$ 的紫外、X射线都被大气层中的各种成份所吸收。但是,宇宙中许多天体的大量讯息,都包含在被吸收的这些波段中。所以,紫外天文必须到大气层外,利用高空气球、卫星或其他航天器进行观测。紫外天文也就属空间天文范畴。

一般地说,紫外波段可以从 $100 \times 10^{-10} \text{m}$ 起到 $4000 \times 10^{-10} \text{m}$ 止。其中 $3000 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $4000 \times 10^{-10} \text{m}$ 可以透过大气层,被地面观测到,而 $100 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $900 \times 10^{-10} \text{m}$ 有严重的星际吸收,属于氢原子莱曼连续区吸收。

1801年德国里特(Rydberg)证实太阳光谱中紫外线的存在,但经过150年后,在1946年美国海军才用火箭观测到像样的太阳紫外光谱。1968年美国发射了第1颗紫外天文卫星——“轨道天文台2号”(OAO),以后在其他天文卫星上,都有紫外天文观测仪器,包括最近上天的“空间望远镜”,其中特别值得提到的是1978年发射的“国际紫外探测器”卫星(International Ultraviolet Explorer, IUE)。

Herbig-Haro天体又称“HH天体”,公认是由红外源发出的激波物质与星际介质碰撞产生的亮区域。这些亮区域可能是深嵌在胎盘云中的主序前星,只能在远红外看到。因此这种天体是恒星形成初期的可见物。IUE卫星惊奇地观测到丰富的高激发发射谱线和很强的紫外连续谱,并证明是由于碰撞而增强的双光子氢连续谱。有科学家认为在好的条件下,2000K分子氢可能与莱曼- α 线产生荧光激励,波长在 $1050 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $1700 \times 10^{-10} \text{m}$ 之间发射。这一过程已被IUE卫星在“HH43”天体中明显地观测到。

从60年代初开始,安装有紫外天文观测仪器的卫星有很多,其中有“太阳辐射监测卫星”系列(SOLRAD)、“轨道太阳天文台”(OSO),以测量近地空间的紫外背景为主;“宇宙”(COSMOS)215号,“双子座”(GEM)10、11和OSO-2号进行了恒星紫外观测;1968年发射的“轨道天文台”(OAO)2号,全部11架仪器都用于紫外观测。主要用于巡天,编制了紫外星表,包括5068颗紫外天体的星等、位置和光谱型。“荷兰天文卫星”进行了紫外光谱的多普勒频移观测,企图通过不同距离处的类星体频移比较,来验证宇宙膨胀速度有无变化,从而说明宇宙脉动理论。另外,OAO-3号和哥白尼号(Copernicus)卫星都获得了类似的紫外讯息。IUE紫外卫星上安装有口径45cm的望远镜和紫外光谱仪,波段为 $1150 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $3200 \times 10^{-10} \text{m}$ 。对天鹅X-1,天蝎座X-1以及几个黑洞候选体,X射线源的紫外辐射进行了研究,对某些天体进行了紫外成像观测,获得了81个类星体,一些脉冲星,X射线源和塞弗特星系的低分辨率的紫外谱。其中包括积分时间长达5.5h,记录下的一个15等的类星体。所以IUE是迄今最成功的一颗紫外天文卫星。

紫外望远镜比光学望远镜要求高,其反射镜面材料早期用银,后来用微晶玻璃、熔石英等。主要要使“强度/重量”比值要高,温度膨胀系数小。紫外区的反射镀层主要是铝,但为了防止铝的氧化,再涂以 $400 \times 10^{-10} \text{m}$ 厚度的氟化镁和氟化锂保护膜,他们的短波截止波长分别为 $1050 \times 10^{-10} \text{m}$ 和 $1130 \times 10^{-10} \text{m}$,而铝的反射率在 $1000 \times 10^{-10} \text{m}$ 以上为80%,到 $1000 \times 10^{-10} \text{m}$ 时突然下降到15%,综合以上条件,这种结构的望远镜反射率的短波限为 $1200 \times 10^{-10} \text{m}$,所以到目前为止,发射的卫星,包括去年上天的“空间望远镜”(HST),观测和研究波长,短波方向大都截止在 $1200 \times 10^{-10} \text{m}$ 。HST上用了2个紫外波段的光子计数多极微通道阵列探测器(Photon-counting Multi-Anode Microchannel Array Detectors),简称MAMA探测系统,波段为 $1050 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $1700 \times 10^{-10} \text{m}$, $1700 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $3000 \times 10^{-10} \text{m}$,但实际使用都从 $1200 \times 10^{-10} \text{m}$ 开始。HST仍是当今最新探测器。

要进行短于 $1000 \times 10^{-10} \text{m}$ 的远紫外,都采用掠射望远镜。1973年发射的“天空实验室”(Sky Lab)曾用一架焦距为1m的掠射望远镜,由偏轴抛物面镜收集太阳远紫外辐射成像,再通过薄铝滤光片,留下 $171 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $630 \times 10^{-10} \text{m}$ 紫外波段,再用紫外阴极转换成可见光,获得分辨率为40的太阳单色象。

为了探测 $900 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $1200 \times 10^{-10} \text{m}$ 紫外谱区的宇宙讯息,目前正在准备另一个紫外天文卫星计划,称莱曼(Lyman)计划。该计划由美国、澳大利亚、加拿大和欧空局(ESA)提出,其科

学目标为继IUE和HST后研制和发射一个新的紫外天文卫星,要求是:(1)观测 $900 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $1200 \times 10^{-10} \text{m}$ 波段为主,分辨率要达到能分辨氢同位素的谱线,灵敏度要接收到最邻近的星系中最亮成员星和几个红移为2的类星体;(2)在保证上述指标下,争取附加观测波段 $1200 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $2000 \times 10^{-10} \text{m}$ 和 $100 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $900 \times 10^{-10} \text{m}$;(3)卫星寿命大于5年。

宇宙中的物质在特殊条件下的许多发射线,如氢、氮、碳、氮、氧、硅等的同位素电离发射线,都落在 $900 \times 10^{-10} \text{m}$ 到 $1200 \times 10^{-10} \text{m}$ 波段上。通过对这些谱线的研究,企图搞清早型星(如金牛座T型星)远紫外和X射线发射的机制;太阳和冷恒星中日冕的非辐射加热;明亮早型星的大气层快速膨胀和质量损失;亚矮星大气化学组成;行星状星云核星的高速星风;新星爆炸过程中的传能机制以及X射线双星的紫外辐射等等。此外对太阳系天体的观测,不存在远紫外星际吸收的问题,行星、卫星、彗星都有紫外发射,对它们的研究可以搞清一些特殊问题,例如“土星”第6个卫星表面有很厚的氮气层,至今还不清楚是否原始就存在的。

测定宇宙中氦和氘的原始丰度,对宇宙学的大爆炸理论具有重要意义,对存在于星系之间的氦丰度的研究,已作为莱曼计划的主要任务之一。

莱曼卫星的主要仪器为一架口径为80cm的掠射式望远镜和远紫外极远紫外光谱仪,卫星轨道周期为2个恒星日,约48h,近地点1000km,远地点120000km,偏心率0.9,轨道倾角7度,这个轨道的优点是观测有效时间超过70%,低轨道卫星一般为35%。再有,轨道的80%在地球辐射带以上;卫星大部份时间离地面很高;在地影中的时间短;最长的积分时间(对同一天体)可达38h。

高空科学气球在紫外天文观测中起着很大作用,由于经费省,技术方便至今还在应用。Mg I的双重自反转谱h和K线,因为波长在 $2800 \times 10^{-10} \text{m}$,中紫外波段,地面上无法观测到,首先是在气球上观测太阳色球谱中发现的。

今后会利用气球、卫星对紫外、X射线和 γ 射线联合探测宇宙天体的高能辐射,对空间天文学的发展将有重大意义。

参考文献

- 1 Ayres T A, et al. Ap J, 1976, 205(874); 5
- 2 Mathis J L, Exploring the Universe with the IUE Satellite, Y Kondo Reidel, Dordrecht, 1987, 517
- 3 邹惠成, 徐春桐, 等. 可见光外天文学, 北京: 科学出版社, 1986
- 4 Dopita M A, et al. Science Working Group, Proc. ASA 1988, 7(3)
- 5 Turner M S. The Early Universe, eds W G. Unruh and G W Semenoff (Dordrecht, Reidel), 1988

(上海天文台邹惠成副研究员撰)

天文卫星 astronomical satellite 将望远镜和其他天文仪器放在人造卫星上,进行空间天文观测,这就是天文卫星。根据观测对象和任务不同,天文卫星可分为太阳观测和非太阳观测。世界上第1个天文卫星是美国1960年发射的“太阳辐射监测卫星”。从1960年至今,美国、欧空局、日本、法国、荷兰、德国、东欧国家以及前苏联,共发射天文卫星和航天器总数已超过200个。美国的天文卫星占空间应用的7.5%;欧空局的天文卫星占科学卫星的13.7%;日本约为10%。到1966年,美国发射了第1个非太阳观测的天文卫星——轨道天文台(OAO),观测恒星、星系和星际介质的紫外和X射线。OAO-3命名为哥白尼卫星。这些卫星的名字,都代表着好多个同类卫星,也即系列卫星。例如“太阳辐射监测卫星”系列,从1960~1976年间共发射了13次,其中3次失败,10颗入轨。

除了绕地球轨道飞行的人造卫星,还有许多载有天文仪器的行星际飞行器,用于天文观测。研究月球表面,近月空间的就

有美国的徘徊者(Ranger)系列、月轨环行器(Lunar-Orbiter)、月球勘测者(Surveyor)和阿波罗(Apollo)等系列;前苏联的月球号(Luna)系列等。探测行星和行星际空间的星际飞行器有美国的先驱者(Pioneer)、水手号(Mariner)、海客号(Viking)、旅行者(Voyager)、太阳神(Helios)等。另外,在载人空间站上也进行一些天文观测项目,如“天空实验室”(Skylab)、阿波罗(Apollo)、美、欧、日本、加拿大联合发展的永久性国际空间站“自由号”,欧空局发展的“哥伦布号”,日本拟发展的“日本空间站”,前苏联的“礼炮号”、“和平号”等。前苏联也发展了行星际探测的宇宙飞船系列,如“金星号”(Venus)、“火星号”(Mars)和“探测器号”(Zond)。

有许多天文卫星是多用途的,或其他系列卫星也要用来探测一下宇宙空间,而为本系统服务,因而卫星又编入其他系列。如美国的IMP卫星,由10颗探险者系列卫星组成;RAE卫星也由探险者系列中的38号和49号组成。HEAO-2又称爱因斯坦天文台等等。

由于天文卫星的观测对象和要求不同,对卫星的轨道有各种特殊的设计。例如“红外天文卫星”(IRAS)必须观测温度很低的恒星的远红外讯号,讯号非常微弱,望远镜和仪器必须致冷到10K以下,当然不允许将望远镜扫过太阳。因此,设计轨道参数,使其岁差等于每年 360° ,与太阳同步。发射时间的选择,使卫星进入近极的“晨昏轨道”(twilight orbit),即卫星沿着地球的昼分界线运动,也就是轨道的缓慢进动使望远镜的指向永远与太阳方向成直角,而与望远镜筒平行安装的太阳能电池帆板,永远对向太阳。轨道高度为900km,卫星既避免了地球大气的影响,又躲开了地球辐射带的冲击。又如90年代即将发射的紫外天文卫星莱曼号(LYMAN),设计轨道是这样的:先用欧空局的亚里安娜火箭,将卫星送到近地点为200km,远地点为36000km,周期为10h的同步转移轨道;然后由轨道控制系统点火驱动卫星,使其进入周期48h左右(实际为2个恒星日)的“近同步轨道”,近地点为1000km,远地点 12×10^4 km,偏心率为0.89,倾角7度。轨道成为一个拉得很长的椭圆。其优点是:观测有效时间长;轨道的80%高于 5×10^4 km,在地球3个辐射带以上,而穿过带电粒子区的速度快,时间短;对某个天体的连续观测时间可长达38h;大部分轨道时间离地面很高,减少由于地冕LYMAN- α 散射所引起的紫外背景噪声;穿过地影的频率少,在地影中的时间只占整个寿命2%,温度环境是相对稳定的。

莱曼卫星也是90年代重要的天文卫星之一,另外还有欧空局的红外天文卫星ISO,它们都是新一代的天文卫星。

参考文献

- 1 Pfaffe H, Stache P. Raumschiffe Raumsonden Erdsatelliten. Berlin, VEB Verlag für Verkehrswesen, 1970
- 2 Martin V, Zombeck. Handbook of Space Astronomy and Astrophysics. Cambridge University Press, 1982
- 3 Neugebauer G, et al. *Astr J*, 1984, 278: L1~L6
- 4 Syunyaev R A. *Astrophysics and Space Physics Reviews*, 65
- 5 Mathis J L. *Exploring the Universe with the IUE Satellite*. Y Kondo Reidel, Dordrecht, 1987
- 6 Dopita M A, et al. The Phase A Science Report of the Australian Lyman Science. Working Group Proc ASA, 1988, 7(3)

(上海天文台邹惠成副研究员撰)

弥散宇宙 γ 射线源 diffuse cosmic γ -ray sources

宇宙 γ 射线是除太阳以外的宇宙空间产生的 γ 射线,包括弥散源和点源,其能量在 10^6 eV以上。弥散宇宙 γ 射线弥漫分布于宇宙空间,主要产自银道面里初级宇宙线带电粒子的传播过程。弥散宇宙 γ 射线是宇宙线天体物理、高能物理和天文学的综合性学科。

弥散宇宙 γ 射线理论涉及到初级宇宙线的起源、能谱、空间

分布、高能相互作用机制和星际空间弥漫物质分布;实验涉及到高能 γ 光子探测器、探测方法、数据获取、数据的数学处理和物理解释。因此这一学科的研究对于弄清有关的物理现象和物理机制,对于促进新探测器的研制,推出新的探测方法以及数据处理方法均具有重要意义。另外由于 γ 射线不被星际磁场偏转,它们从产生地点沿直线到达观测仪器,因此可用来探索宇宙空间,帮助解决宇宙线分布和星际物质分布等长期悬而未决的基本问题。

弥散宇宙 γ 射线的通量很低,能量越高通量越低,实验观测越困难。相比之下,低能区的观测容易实现。但对能量低于 10^{12} eV的 γ 射线为避免大气层的吸收,观测必须在大气层之外进行并且需要长时间的观测以便获得足够的统计精度。因此较为理想的是卫星或飞船观测。70年代初由阿波罗16(Apollo 16)飞船实验获得低于 2×10^8 eV的观测结果。随后,卫星实验SAS-2在 10^8 eV附近获得观测结果。70年代末, γ 天文卫星COS-B在 7×10^7 eV~ 2×10^9 eV能区获得重要观测结果。另一方面,70年代里有许多与弥散宇宙 γ 射线相关的物理成果出现。布卢门撒尔(G. B. Blumenthal)总结了适用于宇宙线传播理论计算的电磁相互作用规律,加速器实验得到了足够精确的高能质子-质子碰撞的 π^0 介子产生截面,射电天文学得到了银河系空间的弥散氢等物质的分布值,宇宙线物理得到了高能初级宇宙线质子谱和电子谱,弥散宇宙 γ 射线理论研究的条件成熟。于是人们在80年代围绕 γ 能谱、 γ 产生机制、初级宇宙线源和宇宙线分布、星际弥漫物质分布、新的实验观测方法等重要问题,进行了大量的系统的研究,并获得了大量研究成果。

在初级宇宙线起源方面,现在一般相信超新星爆发,脉冲星、双星和类星体等高能活动天体是宇宙线的起源。宇宙线带电粒子(核成分和电子成分)在产生之后由某种强大的天然加速机制(如电磁加速、费米(E. Fermi)加速、激波加速等)把它们加速到高能状态,形成所谓初级宇宙线带电成分。

在弥散宇宙 γ 射线的起源机制方面,已经有了比较统一的物理模型和认识。由于银河系空间分布着弥漫物质氢、氦、星光和2.7°K背景辐射,当高能宇宙线带电粒子在其中传播时,必然与这些星际物质发生核作用或电磁相互作用,产生弥散宇宙 γ 射线。根据奈芬(D. A. Kniffen)、萨切尔(W. Sacher)、斯特科尔(F. W. Stecker)和斯蒂芬斯(S. A. Stephens)等人的研究可以得到如下的一些结论:弥散宇宙 γ 射线主要来自核反应产物 π^0 介子的衰变,电子的韧致辐射和逆康普顿散射。经由 π^0 衰变的过程是宇宙线核成分 π^0 介子 \rightarrow 核反应 $\rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 。这一机制产生的 γ 射线在 π^0 介子静止能量的一半处($\sim 7 \times 10^7$ eV)有峰值,峰的两边 γ 强度下降很快。 π^0 衰变过程是能量高于 7×10^7 eV的弥散宇宙 γ 射线的主要来源。韧致辐射过程是宇宙线电子 \rightarrow 星际物质的核库仑场 \rightarrow 韧致辐射 $\rightarrow \gamma$ 。这一机制产生的 γ 射线谱随能量单调下降。韧致辐射是能量低于 7×10^7 eV的弥散宇宙 γ 射线的主要来源。逆康普顿散射是高能宇宙线电子把能量交给星际弥漫低能光子的过程,即宇宙线电子 \rightarrow 低能光子 \rightarrow 逆康普顿散射 $\rightarrow \gamma$ 。这一机制产生的 γ 射线谱也随能量单调下降,能量低于 $\sim 3 \times 10^8$ eV时,其贡献低于韧致辐射,超过 $\sim 3 \times 10^8$ eV时,贡献高于韧致辐射,在 10^{10} eV量级时大大超过韧致辐射成为 γ 射线的主要贡献之一。

关于宇宙线质子、电子能谱和它们在银河系中的强度分布,在不同的作者和不同的模式中有各不相同的值,目的在于给出和观测 γ 谱相近的理论 γ 谱。宇宙线分布问题与宇宙线起源问题密切相关。李惕碛、萨切尔、斯特科尔和布洛意门(J. B. G. M. Bloemen)分别提出了有代表性的几种宇宙线分布模式。可以利用地球到银心方向和地球到反银心方向的弥散宇宙 γ 射线观测能谱与理论计算谱之间的比较来判断各种宇宙线分布模式。根据周大庄的计算比较发现李惕碛提出的宇宙线分布值最佳。按此模式,当银道面内的银心距离 $R < 5$ kpc时,宇宙线强度分布随 R 增加,当 $R \sim 5$ kpc时达最大值,当 $R > 5$ kpc时,随 R 的增加迅速减小。

星际氢分布值也是计算弥散宇宙 γ 射线谱的重要参量,不同的作者也使用了不同的氢分布值。过去人们曾经广为引用的星际氢分布的戈登(M. A. Gordon)值来源于70年代的射电天文学。通过深入研究弥散宇宙 γ 射线,人们发现戈登的原子氢密度值是正确的,但是分子氢密度被过高地估计了。如果不加修改地引用戈登的氢分子密度,理论 γ 谱将大大高于观测谱。根据李杨碚的研究,合理的分子氢密度分布值应当是戈登值除以 $2(M/M_0)^n$,式中的 M_0 是 $R=10\text{kpc}$ 处的氧氢比值, M 是 R 处的氧氢比值, $n=1\sim 2$ 。

实验方面,由于宇宙 γ 射线的能量范围极广,对不同的能区应当使用不同的观测仪器和观测方法。 $10^8\sim 10^{12}\text{eV}$ 的 γ 射线只能用卫星仪器观测,可使用火花室测量初始 γ 光子产生的正负电子对。其主要限制是探测器的面积有限,如COS-B的 γ 探测器,其灵敏面积是 500cm^2 ;1991年春天发射的GRO,其灵敏面积是 2000cm^2 。卫星仪器使用反符合计数法鉴别 γ 射线和带电粒子强本底。其高能($10^{12}\sim 10^{14}\text{eV}$) γ 射线可用切仑柯夫(P. A. Cherenkov)望远镜阵列观测。初始高能 γ 光子与上层大气物质作用产生电磁级联簇射,簇射中的电子成分产生切仑柯夫光,使用地面光学系统收集切仑柯夫光供光电倍增管放大记录。超高能($> 10^{14}\text{eV}$) γ 射线的观测也使用探测器阵列观测,如切仑柯夫探测器、塑料闪烁探测器、 μ 子探测器。由于这一能区的初始粒子引发的簇射粒子能够到达地面,可在地面直接进行观测。一个重要的问题是如何区分由 γ 射线和由重带电粒子引发的簇射。常用方法是采用 μ 子产量作判据。这是因为由 γ 射线引发的电磁簇射的 μ 子产量至少比质子引发的簇射的 μ 子产量低一个量级。

COS-B卫星实验结果显示,弥散宇宙 γ 射线直到 $5\times 10^9\text{eV}$ (其 γ 探测能量上限)仍显示出增强趋势。进一步期待的是GRO卫星观测结果,GRO可把 γ 射线探测能量上限提高到 $3\times 10^{10}\text{eV}$ 。在天体物理方面观测更高能量的弥散宇宙 γ 射线尤其重要。例如观测河外超高能质子($> 10^{16}\text{eV}$)与 2.7K 背景辐射光子的相互作用,这种相互作用产生均匀分布的弥散 γ 射线,其能谱在 10^{14}eV 附近应当变平坦。为了检测这一物理效应,观测大气簇射的 γ /重粒子鉴别能力必须达到 10^4 量级。洛伦茨(E. Lorenz)等人最近提出了一种观测广延大气簇射的新方法并正在西班牙的帕尔马(Palma)岛建立观测台站。这种方法联合使用切仑柯夫探测器阵列、塑料闪烁探测器阵列和 μ 子探测器,其 γ /重粒子鉴别能力可超过 10^3 ,适于观测研究甚高能和超高能弥散宇宙 γ 射线。随着观测方法的不断更新、观测能量的不断提高,弥散宇宙 γ 射线的研究将为空间天文学作出新贡献。

参考文献

- 1 Stecker F W, et al. *Astrophys. J.*, 1977, 217: 843
- 2 Knuffen D A, et al. *Astrophys. J.*, 1981, 250: 389
- 3 Li Tipei, et al. *J Phys. G, Nucl Phys.*, 1981, 7: L157
- 4 Stephens S A. *trophys. Space Sci.*, 1981, 79: 419
- 5 Li Tipei, et al. *J Phys. G, Nucl Phys.*, 1982, 8: 1141
- 6 Sacher W, et al. *Astrophys. J.*, 1984, 279: 817
- 7 Bloemen J B G M, et al. *Astrophys.*, 1986, 154: 25
- 8 周大庄. *天体物理学报*, 1990, 10: 106
- 9 周大庄. *天体物理学报*, 1991, 11: 220
- 10 Lorenz E, et al. *Nucl Instr and Meth*, 1992, A315: 236

(中国科学技术大学周大庄副教授撰;李杨碚审)

太阳系

太阳系起源与演化 origin and evolution of the solar system

太阳系是由太阳、九大行星、64颗卫星、众多小行星和彗星及行星际物质组成的天体系统。太阳系起源与演化是天体演化的首要问题,包括研究太阳系从何时、由什么形态物质、经过什么方式和过程形成的以及如何导致其现有的各种特征及各成员

之间的差别。人类居住的地球是九大行星之一,研究地球的起源与演化有更重要的科学和实际意义。

1644年笛卡尔(R. Descartes)在《哲学原理》中提出涡流说,认为太初混沌中出现涡流而形成太阳、行星和卫星。1745年布丰(G. L. L. Buffon)提出第1个灾变说,认为一颗彗星撞出的太阳物质形成行星。这两个假说虽科学价值不大,但向上帝创世观提出挑战,有启蒙作用。真正在僵化自然观上打开第1个缺口的是康德(I. Kant)和拉普拉斯,他们分别于1755年和1796年各自独立提出星云说,两者虽然内容不同,但主要观点相同,都认为太阳系由同一个原始星云形成的。康德-拉普拉斯星云说的致命缺点是无法解释太阳系角动量分布(占太阳系总质量99%以上的太阳,其角动量只占1%不到)。19世纪末到20世纪初先后提出多种灾变说,曾流行的有张伯伦(T. C. Chamberlin)、摩耳顿(F. R. Moulton)的“星子说”和金斯(J. H. Jeans)的“潮汐说”,认为有颗走近恒星引起太阳的潮而分出物质,或凝为固体星子再聚成行星(星子说),或断开几团而聚为行星(潮汐说)。杰弗里斯(H. Jeffreys)甚至认为恒星撞出太阳物质而形成行星。灾变说用走近恒星赋予太阳分出物质(因而所形成行星的)角动量,但后被批评其分出过程不够有效且分出的热物质易扩散而难聚成行星。随后再兴起星云说,魏茨泽克(C. F. Weizsacker)的“旋涡说”认为星云盘形成旋涡规则排列而在次级旋涡中形成行星;柯伊伯(G. P. Kuiper)的“原行星说”认为星云盘中先形成巨大的气体原行星,再失去外部气体而演变为行星;施密特(O. K. Schmidt)的“陨星说”认为太阳从它经过的星际云俘获物质,凝为陨星,再聚成行星和卫星。

由于迄今只直接观测到唯一的太阳系,且了解到的是其现状,缺乏其早期信息,因此探讨久远过去的太阳系形成演化是极困难的。可以通过两种途径来克服这一困难:一是从太阳系现有资料出发来逆推其过去的形成演化过程;二是借鉴恒星形成演化的研究成果来推断恒星一员——太阳的形成环境和演化过程,行星系是此过程的伴生品或副产品。20世纪60年代以来,随着航天探测和现代天文观测及理论的发展,太阳系起源与演化研究越来越活跃,提出了几个现代学说。这些学说都综合了很多资料,不仅论述了太阳系起源的两个基本问题——行星的物质来源和行星形成方式,而且在不同程度上定量地阐明以下的重要问题:原始星云或行星物质的特性,如物质密度与温度的分布、化学成分等;原行星或星子的形成过程;类地行星(水星、金星、地球、火星)、巨行星(木星、土星)、远日行星(天王星、海王星、冥王星)的形成过程,及它们在大小、质量、密度上的差别;行星轨道运动的方向性、近圆性和共面性;太阳系角动量分布;行星自转;行星的距离规律(提丢斯-波得定则);卫星及环系的形成演化;小行星和彗星的起源演化;地(球)月(球)系的起源与演化。

现代学说中都反映了有关研究得到的一些共同认识:(1)太阳的形成与早期演化。恒星的观测研究表明,某些星际云自吸引收缩变密,发生不稳定性而瓦解成多个小云,各小云又收缩演化为原恒星。原恒星内部温度升高,发出辐射,成为年轻恒星,当温度达 1500 万度时发生热核反应,成为主序星。恒星质量越大,形成演化过程越快。若小云的初始角动量很大,则演化为双星或聚星;若小云的初始角动量不太大,则演化为一个中心恒星和外面的转动盘,盘演化为行星系。由恒星演化理论算出,太阳年龄约50亿年,它是几千太阳质量的星际云瓦解的小云之一——原太阳(原始星云)形成的,经历7500万年引力收缩而成为主序星。主序前的几百万年经历“金牛T阶段”,其表层有剧烈活动和物质抛射(星风——太阳风),行星系在年轻太阳周围的转动盘中形成。(2)比较行星学和陨石提供的信息,各行星和卫星的演化程度不同,从比较行星学可提供一些演化信息。例如,古老陨击坑可解释为星子聚集过程的“尾声”;木星和土星的卫星系好像是小规模行星系,说明卫星系与行星系有某些相似的形成过程;地球、月球和陨石的放射同位素年龄表明,它们都在约46亿年前的几百到几千万年内形成。陨石较多地保留了其形成时期的遗迹,

从陨石分析得到其形成温度为 400~600K 和其热演化史。小行星是行星形成过程的中间半成品。彗星是外太阳系的最好考古样品。(3)化学演化。从原始星云到行星的形成演化过程中,发生一系列物理变化和化学变化,导致所形成天体在化学成分和结构方面的差别。一些证据说明太阳系天体的物质同源性和化学均匀性,例如,碳质陨石的非挥发元素丰度跟太阳大气相同,木星、土星、天王星、海王星的大气中氢和氦含量跟太阳大气相近,很多同位素的丰度比也相近。少数元素和同位素的丰度差别可用各天体的形成演化环境不同来解释。但是,在陨石中发现不能作这样解释的化学同位素异常(如,富集 ^{16}O 、 ^{26}Mg),说明局部小区域未完全化学均匀,归因于外来成分,估计约 2% 质量是超新星爆发物质注入原始星云。已提出原始星云的三类化学演化模型:一是热凝聚模型,认为原始星云温度很高,物质全部是气态,随后冷却中发生化学反应和凝聚,拉里莫(J. W. Larimer)和安德斯(E. Anders)研究了快冷却和慢冷却的凝聚物;巴谢(S. S. Barshay)和刘易斯(J. S. Lewis)研究了平衡与非平衡的凝聚物,类地行星的成分和密度可较好地用平衡或慢冷却凝聚说明,外行星可用非平衡或快冷却凝聚解释;伍德(J. A. Wood)研究了矿物平衡凝聚。二是克莱顿(D. D. Clayton)提出冷凝聚模型,认为原始星云没有经历高温阶段,原来的星云气体和尘埃已有分馏,星云盘中仅挥发物蒸发和再凝聚,因而导致化学同位素异常,小沼直树认为注入的超新星爆发物在原始星云的高温、对流和低温三区域有不同的混合。三是阿尔文(H. Alfvén)和阿瑞尼斯(G. O. S. Arrhenius)提出等离子体凝聚模型,给出磁化等离子体不均匀、非平衡凝聚物。在陨石、彗星、月球等样品中都发现了前生命有机分子,而实验室模拟宇宙条件由无机物或简单有机分子生成了复杂的前生命有机物,如米勒-尤里(Miller-Urey)实验。

近年流行的几个星云说都认为整个太阳系由同一个原始星云形成,其主要成分是气体并含 1%~2% 尘埃,有初始自转,自吸引收缩,中心部分形成太阳,外部扁化为星云盘,盘中凝聚物聚集形成行星和卫星等天体,部分气体也参与外行星,但各家对原始星云的物理-化学条件、结构和演化过程的论述不同。卡米隆(A. G. W. Cameron)的原始星云大到 2 倍太阳质量,通过原行星方式形成行星;萨弗隆诺夫(B. C. Сафронов)、林忠四郎、普伦蒂斯(A. J. R. Prentice)和戴文赛学说中原始星云质量小于 1.2 太阳质量,通过星子聚集方式形成行星和卫星,这几个学说的具体内容和理论分析有不少差别,各具有特色。此外,乌尔夫逊(M. M. Woolfson)主张俘获说,太阳从走近的原恒星俘获物质,通过原行星方式形成行星。阿尔文和阿瑞尼斯主张电磁说,认为太阳早期有很强的偶极磁场,向它降落的物质发生碰撞电离而形成其周围四个电离云,由等离子体过程凝聚出颗粒喷流,再通过星子方式聚集成行星。还有一些独具特色的专题理论研究,例如林潮对星云盘粘滞过程与行星形成的研究。

虽然现在对太阳系起源与演化已有了一些公认的总看法,但是在具体过程和情节上仍有很多疑难未解决。例如,从星际云祖传下来怎样的化学同位素不均匀性及原始星云中的异常分布,非平衡的气相及气相-颗粒的反应率及分馏效应,星云盘各区域形成怎样形态和结构的凝聚物,颗粒如何聚集成星子,年轻太阳与星云盘的相互作用,盘中物质和角动量的实际转移过程,盘中发生怎样的不稳定性,星子怎样聚集成行星,各行星形成的先后及所用时间,行星如何吸积气体,小行星区为何未形成大行星等。为解决这些疑难,一方面需要新的观测资料,另一方面需综合和发展现有理论。太阳系起源与演化是当前热门研究课题,正汇聚多学科学者共同探讨,可望取得太阳型恒星及其行星系的新资料,在陨石等样品的分析研究上得出更多新结果,行星科学的研究有更大的发展,太阳系的空问新探测带来新信息,综合大量有关资料作为约束条件,将动力学和化学演化等理论紧密结合起来,以及进行模拟实验,解决现存的疑难,从而使这一领域研究得到重大发展。

参考文献

- 1 康德. 宇宙发展史概论. 上海:上海人民出版社,1972
- 2 拉普拉斯. 宇宙体系论. 上海:上海译文出版社,1978
- 3 戴文赛,等. 太阳系演化学. 上海:上海科学技术出版社,(上册)1979,(下册)1986
- 4 Black D C, Mathews M S. Protostars, Planets I. Tucson: The University of Arizona press, 1985
- 5 Suess H E. chemistry of the Solar System. New York: John Wiley & Sons, 1987
- 6 Nuth J A, Sylvester P. Workshop on the origin of the Solar System LPI Technical Report. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1988, 88(4)
- 7 Cameron A G W. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1988, 26, 441~472

(南京大学胡中为副教授撰)

太阳活动预报 solar activity prediction 太阳活动是指太阳大气发生的缓变和瞬变现象,而太阳大气的瞬变扰动对地球环境的影响尤其引人注目,这种扰动一般与耀斑爆发有关,其扰动大小常由增强的 X 射线辐射度量。

太阳耀斑的电磁辐射和粒子辐射通过日地空间传播,其高能光子和高能质子使地球电离层电离急剧增强,干扰通过电离层传播的无线电波,甚至使短波通讯中断。高能质子能暂时或永久地损坏宇宙飞行器的电子元器件,威胁宇航员的健康乃至生命。耀斑的激波挤压日昼侧的地球大气层,引起地磁场扰动和磁暴,在动力输电线中感应电流,导致过载而断电,一些耀斑前后还抛出日冕外层物质,以磁云形式抵达地球,除引起地磁扰动外,还可破坏地球磁层。太阳紫外和 X 射线发射的周期性变化,使地球高层大气的温度和中性密度发生变化,导致低轨卫星、导弹等飞行器的轨道发生变化,甚至离轨,降低飞行寿命。太阳活动的长期变化除了会影响地球气候外,还与自然灾害有一定联系。太阳活动对人体健康的影响正受到人们关注。因此,不仅太阳物理、地球物理和空间物理的研究,而且气象、水文、地震、通讯、航天和地质勘探等部门都十分关心重视太阳活动预报。

早在 1931 年,当时的国际无线电科学联合会(URSI)主席费里(G. Ferrie)在法国率先建立了太阳活动和地球物理资料的每天广播服务,实时研究太阳活动对电波传播的影响。随着气候灾害、地球物理现象的异常与太阳活动有关的记载日益增多、日地关系研究的深入,一些国家相继建立了类似的广播和日地警报中心,实时通报重大太阳活动及后随现象,并于 1965 年开始作提前几天的耀斑预报。太阳活动预报需要国际合作,以便获得完整的观测资料,1962 年国际无线电科学联合会资料和世界日服务局(IUWDS)成立,旨在促进和协调国际间日地观测资料和预报的快速交换,指导全球性日地环境观测、研究和预报,于 1979、1984、1989 和 1992 年召开了日地环境预报国际学术讨论会,会议文集集中反映了近年来日地预报的研究工作和进展。美国科罗拉多州波尔多市空间环境服务中心,每天向其它区域警报中心(RWC)和用户通报每天太阳和地球物理活动,并发布提前 1~3d 的预报。中国于 1991 年成立了与 IUWDS 相应的中国日地物理预报中心,定期向用户发布资料和预报。

太阳活动预报通常按预报提前时间可分为短期、中期和长期预报。

短期预报 一般是提前 1~3d 甚至短至几十分钟的预报,预报爆发耀斑的活动区、耀斑级别以及质子事件。由于日前对耀斑的认识尚不完全,预报还没有可依据的可靠物理模型,同时耀斑发生在太阳大气的高温低密度区,还没有耀斑触发的直接观测资料,因此只能是经验和统计预报,预报水平取决于预报员的经验。

目前每天的观测资料最适于提前几天的预报,短期预报相对地说是准确的。根据活动区黑子形态的复杂性,活动区磁场及其演化等资料,现已能正确识别会产生耀斑的活动区,几乎可达

95%。人们根据大量观测资料,用各种统计分析方法,诸如回归分析、多元识别分析、模糊聚类分析和识别等,总结出了一系列短期预报判据并用于专家系统。齐林(H. Zirin)提出的判据主要是:在相反极性黑子对中出现被拉长的本影,很亮的Ha谱斑遮盖了黑子本影或沿磁中性线分布;以纵向磁场梯度大和半影纤维平行磁中性线为标志的强磁剪切,中性线扭结;强 δ 结构或极性颠倒;新浮现的前导黑子正向相反极性黑子移动或黑子突然离开 δ 结构;黑子周围有旋转暗条等。提前数十分钟的预报,主要前兆是活动区出现异常现象如沿中性线的暗条活动,由磁通量突然变化引起的微波偏振变化,由耀斑区域预热引起的X射线、Ha、EUV和微波增亮等。对于用每天观测资料作前一天的预报,预报耀斑发生的频率几乎是预报时间间隔的倒数,因而预报是病态的,而且还受短时间耀斑活动随机性的限制。

新近研究表明,活动区光球横向磁场和横向速度场与耀斑产生密切相关,磁场和速度场的剪切对于耀斑的建立过程是基本的。预计应用磁场速度场的观测分析,加上从空间得到的中等分辨率的软X射线象,将有助于短期预报的改进。准确预报有赖于太阳大气各层次的磁场和等离子体的高分辨率空间观测。

中期预报 通常是指提前3d以上,一个自转周乃至几个月的预报。以预报耀斑和太阳指数如10cm射电流量和黑子数为主,实际上是预报新活动区的产生以及新老活动区产生耀斑的能力,但目前人们对活动区演化规律的认识还较贫乏,要可靠作出预报还比较困难,只能给出趋势预报,方法仍属经验统计预报。

目前主要利用太阳现象的27d重现,例如特定经度的分布特征及其统计性质,反映太阳活动大尺度特征的太阳综合图,以及对老活动区回转变力的分析估计等经验方法。由于太阳现象的重现在整个太阳周是变化的,于是还应考虑长期预报的结果,在太阳周上升段,活动区寿命短,特定经度尚未形成,这时预报精度较差。其次利用太阳活动的周期性,如里格(E. Rieger)发现的154d周期,尽管该周期在整个太阳周中的振幅、持续时间及其分布还有待研究。此外,中国天文工作者根据观测资料,拟定能表征太阳活动的综合指数,用时间序列分析方法得到的模型作预报,效果还不错。

常规观测大尺度对流环流分布,识别将导致磁通量浮现或组合形成新活动区的磁场会聚或长寿命剪切区。用正在研制中的声学层析成像法,测绘日面下磁场和速度场结构,来揭示将要形成的活动区。用非线性时间序列分析方法于表征太阳活动的参数序列,这些方法将会有效地改进中期预报。

长期预报 是指提前1年或几年以上的预报,以预报太阳指数如黑子数的变化,特别是太阳周的特征值为主。太阳周的预报受两个因素影响:一是太阳本身固有的变化,观测表明太阳黑子数的变化不存在严格的周期,还具有混沌系统特征,这种特征最好要用奇异吸引子描述。另一是观测资料的质量。因此,目前太阳周的预报是粗略的。

有两种较可靠的方法,预报的太阳周峰值与观测值仅相差10%左右。维廷斯基(I. Vitinskii)曾总结了20世纪60年代前的各种统计方法,包括著名的麦克尼希-林肯(MacNish-Lincoln)方法。但是,1849年前的黑子数据并不完全,使前十个太阳周的振幅和长度有很大误差。此后的数据虽是可靠的,但却十分有限,用纯粹统计方法预报太阳周可靠性较低。直至太阳周实际已经开始一年或更长时间,通过对黑子数上升速度的估计能作出较好的预报,但预报提前时间较短。另一方法基于太阳发电机理论,沙顿(H. Schatten)等人认为,太阳较差自转使太阳周开始时出现在极区的角向磁场扭绞起来,形成中低纬处太阳活动的环形磁场,太阳周的强弱与该角向磁场线性相关。另外,奥尔(L. Ohl)发现太阳周后期复现的地磁活动与下个太阳周的强度有极高的相关性,这里的地磁活动可看作太阳极区角向磁场的一种间接表示。这种方法的预报值较接近实测值,且可较早作出,但不能预报峰值时间。

根据目前扩展太阳周概念,在太阳周正式开始之前就已存

在太阳周的信息,寻找这些信息及其它有效指标,如扭绞振荡的振幅、探讨日冕绿线($5303 \times 10^{-10}m$)的强度与太阳周大小的关系、研制更复杂的太阳发电机模型等,都有可能改进太阳周的预报,随着用太阳对流产生的低频声波来探测太阳内部结构的日震学的进展,在认识太阳周方面可能会有关键性突破。

展望未来,太阳活动预报将象气象预报一样为人们所需要,它的进展有赖于对耀斑、活动区和太阳周观测研究的进展和突破。

参考文献

- 1 Vitinskii I. Solar-Activity Forecasting. London: Oldbourne Press, 1965
- 2 Donnelly F. Proc of Solar-Terrestrial Predictions Workshop 1979. Boulder: NOAA, 1980
- 3 Simon A. et al. Proc of Solar-Terrestrial Predictions Workshop 1984. Boulder: NOAA 1986
- 4 Rieger E. et al. Nature, 1984, 312: 623
- 5 Thompson J. et al. Proc of Solar-Terrestrial Predictions Workshop 1989. Boulder: NOAA, 1990
- 6 Zirin H. et al. Solar Physics, 1991, 131: 149.
- 7 McIntosh S. Sky, Telescope, 1991, 81: 21

(云南天文台张勤副研究员撰,张柏荣审)

太阳活动

solar activity 距地球 $1.5 \times 10^8 km$ 的太阳,是一团直径约 $1.4 \times 10^6 km$ 、中心温度1500万度、表面温度约5000度的炽热气体球。它主要由氢和氦构成,各占73%和25%,其它各种元素合计不足2%。太阳辐射的能量来自中心区域由氢原子核合成氦核的聚变核反应。从整体和宏观上看,现阶段太阳是一颗球对称的、均匀地向四面八方辐射的稳定恒星。对太阳的演化研究表明,它以目前的面貌存在已有 5×10^9 年,从理论上估计,太阳还将以这种整体和宏观稳定的状态持续存在 4×10^9 年。但是另一方面,天文学家借助望远镜和专门的太阳观测设备,却又发现在太阳表面经常会发生一些事件。例如在它的低层大气(光球层)常会出现许多黑子(Sunspot)和光斑(Facula),而在高层大气(色球层和日冕)中常出现谱斑(Filiculus)和日珥(Prominence),有时还发生耀斑(Flare)。太阳黑子是光球中的低温区,因而显得较暗,它们的温度一般比周围区域低1500~2000K。黑子本质上是太阳的局部强磁场区,磁场强度高达0.1~0.4T。光斑则是色球中的高温区,因而显得较亮,其温度比周围高几百度。谱斑是色球中的亮区,它们基本上是光斑在色球中的延伸。日珥是从太阳色球伸向日冕的火焰状突出物。耀斑则是发生在色球和日冕中的爆发现象。黑子、光斑、谱斑和日珥的寿命只有几天至几个月,耀斑的寿命只有几分钟至几小时。人们把所有这些出现在太阳表面局部区域,而且存在时间比较短暂的现象,通称为太阳活动(Solar Activity),并把忽略太阳活动的理想太阳称为宁静太阳(Quiet Sun)。因而,可以把真实的太阳看成附加上太阳活动的宁静太阳或活动太阳。

各种太阳活动现象有着复杂的物理过程和机理,对它们的研究涉及等离子体物理和磁流体力学、原子和辐射等诸多物理领域。而且,剧烈的太阳活动现象,如耀斑和爆发型日珥,发射X光、紫外光和高能粒子流,污染日地空间环境,冲击地球磁层和电离层,造成地球轨道附近高能粒子流密度增大,产生磁暴、电离层骚扰、极光、平流层升温以及其它地球物理效应,影响到航天、无线电通讯、电力、探矿、航海以及气候、水文等国防和国民经济领域。因此,对太阳活动现象进行观测和研究,探明它们的机理和出没规律,以至进行预报,不仅有理论意义,还具有重要的实用价值,受到各国太阳物理学家的重视。

太阳黑子倾向于成群出现,而其它各种活动现象又倾向于集中在以黑子为中心的局部区域,称为太阳活动区(Active Region)。黑子附近总有光斑,它们上空的色球中总有谱斑,黑子群愈大,谱斑愈亮,面积也愈大,其附近常有日珥,而耀斑则发生

在潜斑区中。这样,太阳黑子就成了活动区的标志。一般来说,黑子群和黑子数目愈多时,其它各种活动现象也愈频繁。换句话说,可以用黑子群和黑子数目来衡量太阳活动的平均水平。

国际上用所谓太阳黑子相对数 r (Sunspot Relative Number) 来代表每天的太阳活动水平,其定义为 $r = 10g + f$, g 和 f 分别为当天日面上出现的黑子群数目和黑子个数。这一定义是 1848 年瑞士吴尔夫 (Rudolf Wolf) 首先提出的,因而也称为吴尔夫数。黑子相对数的观测记录已近 300 年。对这些资料的研究表明,每天黑子相对数 r 的年平均值 R 具有 11a 左右的周期性变化。 R 变化曲线中极小值和极大值所在的年份分别称为太阳活动极小年和极大年,相邻两次极小年之间称为一个太阳活动周 (Solar Cycle)。由 1700 年以来的记录可见活动周的长度在 8.2~13.6a 之间,平均为 11.1a。在极小年附近,太阳上黑子很少,有时无黑子;反之,在极大年附近,太阳上常有很多黑子,尤其有许多大黑子。国际上还统一规定以 1755 年(极小年)起算的太阳活动周为第 1 周,目前我们正处在从 1986 年开始的第 22 周。这 1 周的极大年是 1990 年,大约在 1997 年附近结束。

太阳活动除了具有明显的 11a 周期外,可能还存在更长的周期。若把 1700 年以来的每个太阳活动周中黑子相对数年均值的极大值 R_M ,按每相邻 4 周滑动平均,得到的相对数极大值的均滑值 \bar{R}_M 的曲线,表现出似乎存在长度为 80a 的周期。至于更长的周期,由于已无可靠的望远镜观测的黑子记录,不同研究者利用其它各种资料 and 不同方法得到的结果不尽相同,尚无一致的看法。利用史上的目视黑子记录和与太阳活动密切相关的极光频数记录,以及古树年轮中碳同位素 (C^{14}) 含量的分析结果,可以粗略推测几百年甚至几千年以来的太阳活动大致情况。这些研究表明,约在 1645~1715 年之间,太阳活动水平较低,现已称为蒙德极小期 (Maunder Minimum)。此外,在 1460~1550 年间,似乎也存在活动低潮,称为斯波勒极小期 (Spörer Minimum)。

在所有太阳活动现象中,最为剧烈和对地球影响最大的就是耀斑。耀斑实际上是黑子附近的太阳大气局部区中由磁性等离子体不稳定性所触发的大规模能量释放过程,因而也称太阳爆发。一次耀斑事件释放的能量估计达 $10^{29} \sim 10^{32}$ erg。通过望远镜所看到的耀斑表现为黑子附近潜斑区中的突然增亮。小耀斑的寿命只有几分钟至十几分钟,面积约一个地球大小;大耀斑可持续几十分钟至一二小时,增亮区面积达十几个地球大小。太阳上发生耀斑时,从耀斑区发射出强 X 光、紫外光和高能粒子流。X 光和紫外光于 8min30s 后到达地球,破坏地球电离层的正常结构,主要是 $1 \times 10^{-10} \sim 10 \times 10^{-10}$ m 的 X 光使低电离层 (D 层) 的电离度增大,使其对高频无线电讯号的吸收增强,导致无线电通讯受到干扰,甚至中断。另一方面,来自耀斑区的高能粒子流(主要是质子)于几小时后到达地球,它们将对航天器和宇航员造成损害,甚至会威胁到通过极区飞行的高空飞机。更大量的慢速粒子流则于 1~3d 后到达地球,冲击磁层和电离层,引起磁暴和电离层暴,破坏无线电通讯和高纬地区的电力系统,并影响到地球物理探矿和航海方面。这些沿着地磁力线运动的粒子还将冲击地球极区的高空大气,使大气原子受激,产生极光。例如 1989 年 3 月和 8 月的几次大耀斑,都曾造成无线电通讯中断和强烈磁暴,以及其它地球物理效应。除了耀斑以外,其它某些活动现象,如爆发日珥和亮斑等,也有 X 光、紫外光和高能粒子发射,其强度较弱,但它们的累积效应也会对地球产生影响。太阳耀斑和其它活动现象发射的 X 光、紫外光和高能粒子对地球高层大气的作用,还会通过垂向环流系统向下传递到平流层,造成平流层升温,并且进一步向下传递到对流层,影响气候变化。统计研究表明,地球上某些地区的气象和水文参数,如气温、气压、降水、港口水位、大河流量、水旱灾害等,的确与太阳活动密切相关。至于其它方面,如农业生产和医学上某些疾病的发病率与太阳活动的相关,其机理比较复杂,有些可能与太阳活动的紫外辐射增强有关,有些可能是通过气候变化间接起作用。

宏观上稳定的太阳为什么会会出现太阳活动现象,一直是太

阳物理学家的热门研究课题。1961 年美国巴布科克 (H. W. Babcock) 提出,太阳活动起源于太阳原有的弱磁场(许多天体,包括恒星和行星都有磁场)与太阳自转相互作用的结果。太阳的自转很特殊,即赤道的自转较快(约 27d 转 1 周),两极较慢(约 34d 转 1 周),形成所谓较差自转。理论研究表明,正是这种较差自转,能够把太阳内部的微弱磁场拉伸放大,形成管状的强磁场(称磁流管),并借助磁浮力上升。当磁流管与太阳表面碰撞时,即成为黑子。其它形形色色的活动现象,则是黑子区的强磁场与太阳大气中运动等离子体相互作用的结果。

太阳活动虽然强烈,但它们发射的能量与整个太阳的辐射能相比,则是微不足道的。例如,大耀斑的总发射能量估计为 4×10^{32} erg,若其持续时间为一个多小时,则可算得其发射功率为每秒 10^{29} erg,这与整个太阳总辐射功率每秒 3.826×10^{33} erg 相比,是可以忽略的。因此,存在太阳活动丝毫无损于把太阳视为一颗稳定的恒星。大功率的稳定辐射叠加上小功率的周期性的太阳活动,这正是现阶段太阳的主要特征。

参考文献

- 1 Tandberg-Hanssen E. Solar Activity, D. Reidel Publishing Company, 1967
- 2 Zirin H. Astrophysics of the Sun. Cambridge University Press, 1987, 303~404
- 3 胡文瑞等编. 太阳耀斑. 北京: 科学出版社, 1983

(北京天文台林元章教授撰)

太阳耀斑 solar flare 又称耀斑爆发,是太阳大气中最激烈的一种活动现象。由于某种不稳定过程,触发局部区域中的等离子体物质,在 100~1000s 的短时间内,突然释放出高达 $10^{29} \sim 10^{33}$ erg 的巨额能量,从而使物质粒子加速,并引发电磁波谱各个波段——从射电波、可见光到 X 射线、γ 射线的辐射急剧增强,有时还可能伴随物质的抛射。这些粒子和电磁波的增强辐射会强烈影响日地间的空间环境,甚至会引发诸如极光、磁暴、电离层骚扰、质子事件、气象变化等一系列的地球物理效应,还可能进而影响人类的活动。

耀斑最初是 1859 年 9 月 1 日由卡林顿 (R. Carrington) 和霍格森 (R. Hodgson) 发现的。那是一个用肉眼就能在日面背景上看到的突然闪亮的光片,而且还是一个罕见的白光大耀斑,它在可见光波段发出强烈的连续谱辐射。

一般来说,在可见光波段耀斑只有相应于色球层辐射的发射线光谱。因此,长期以来,耀斑也一直被认作仅是一种色球层中的现象,而被称为是色球耀斑或色球爆发。60 年代之前,耀斑观测主要就是用的氢的 H_2 ($\lambda 6563 \times 10^{-10}$ m) 和 Ca I 的 H 线、K 线等几条谱线进行的。因而关于耀斑的尺度、形态、寿命、强度等的特征,也主要是根据色球层观测资料总结或推断出来的。在此基础上,1966 年国际天文学联合会 (IAU) 采用了一种两参数的耀斑级别分类法,其中一个是指面积的大小,另一个则是亮度的强弱。这种分类法一直沿用至今,但它只是表现性的,未能反映耀斑深刻的、真实的物理本质。

20 世纪 60~70 年代,美国专门用于太阳观测的系列卫星轨道太阳天文台 (OSO) 以及天空实验室 (Skylab) 和国际日地探索者—3 (IEE—3) 等探测器相继上天,携带了多种仪器设备对太阳活动进行了广泛的观测研究。观测的主要特点是波段扩展到了紫外、X 射线等高能部分,还有高能粒子辐射的观测。而高能辐射原先在地面基地上由于大气的阻挡是无法观测到的。1972 年,OSO—7 卫星的观测发现,某些耀斑还有能量极高的 γ 射线辐射。对耀斑的观测研究从此进入了全波段的新时期,一系列新的发现使人们对耀斑的认识有了极大的改观。

耀斑不再被简单地认为是一种色球现象,它也是日冕中的一种不稳定过程。耀斑的基本结构是一种拱桥状的环带或环系。关于耀斑环 (Loop) 的概念,最早在 1964 年由 A. Bruzek 提出来的。耀斑环的根部位于色球层中磁场极性不同的两个区域,而

顶部则耸入日冕区内。耀斑环的上部温度较高,可达 10^7K ,称为高温部分,它发射出X射线等高能辐射和射电波;下部温度较低,只有 10^4K 量级,称为低温部分,相应于色球耀斑,可见光辐射就是由这一部分发出的。低温部分与高温部分有着密切的联系,但物理特性却明显不同。原先的IAU的耀斑级别分类法,主要只是反映了色球耀斑的特征。作为修改和补充,70年代又提出了X射线的和微波辐射的分类方法。

70年代末期,帕拉西维尼(R. Pallavicini)等提出,根据环系的不同,耀斑可以分为显然不同的两类,一类是单环耀斑,它们在色球 H_α 谱线中发亮的形态较为简单,其上只有少数几个环带。环带在耀斑之前就存在,在爆发过程中又是稳定的,因而被称为是静态耀斑。另一类是双带耀斑,它们在色球中的形态是两条大致平行于磁场中性线的亮带,分别位于中性线的两侧。耀斑双带只是整个耀斑体中很小的一部分,它们被一个复杂的环弧体系联结着,在耀斑过程中,环系缓慢地向日冕扩张,形成最具特征性的所谓耀斑后环;相应地,双带的位置也渐渐偏离中性线而向两侧位移。这类耀斑又叫做动态耀斑。

研究者们也开始认识到耀斑与磁场有着密切的联系。1938年,沃尔特米欧(W. Waldmeier)等就已发现,在一个活动区的同一位置上,耀斑往往会重复地出现,而且与先前出现过的耀斑在形态上极为相似。60年代以来磁像仪的观测发现,原来耀斑的轮廓形态乃是由磁场位形决定的。磁场被冻结在太阳大气的等离子体物质中,并且随着物质的运动而渐趋复杂。当磁力线被高度扭曲、磁场发生剪切和挤压时,就有可能在中性线附近出现耀斑爆发。随后,磁力线松弛,磁场又往往会恢复到原先的位形。

Skylab的X射线观测还发现,日面上相距较远的不同的活动区还常常被一些大尺度的日冕磁环联结着,这些磁环的位形正显示了磁场的位形;同时也为日冕等离子体物质的种种扰动提供了行进和传播的通道,而使不同的活动区中可能会大致同时地出现耀斑事件。这就是1951年理查德森(R. Richardson)早已注意到的共振耀斑或相应耀斑。这表明,耀斑事件的触发也与磁场有着密切的关系。

在太阳活动第21周(1976~1986)的峰年期间,国际上制定了一个“太阳极大年(SMY)”的计划,主要就耀斑的3个基本问题——能量的储存、释放及其在行星际空间传播——进行世界性的联合观测研究。这期间,许多国家动用了空间和地面的各种太阳观测设备,特别是日本专门发射了“火鸟(Hinotory)”、美国则发射了“太阳极大年使节(SMM)”等卫星,在各个波段和能段(主要还是X射线和高能粒子等高能部分)上进行了全面的观测研究。1980~1982年期间,SMM还发现了耀斑的中子辐射。与70年代相比,这些观测的空间分辨率大有提高,达到几十甚至几个角秒;时间分辨率也达到几十甚至几毫秒的量级。

21周峰年期的观测使人们对于环弧结构的建立、初始能量释放(触发)的位置、粒子的加速及其传播过程、磁重联和电流环系在耀斑过程中的重要作用等问题的认识都上升到了一个新的台阶。从而已能勾勒出一幅较为简明的耀斑图象了。

目前一般认为,耀斑过程可以分为预相、闪光(爆发)相和主(渐变)相3个阶段。耀斑的能量来源于磁能,通过磁对消和磁重联的过程突然释放出来。由于某种其机制尚未明了的扰动触发磁环中的某处(一般在上部,但也有例外),形成一个超高温($\geq 10^7\text{K}$)的耀斑核心。核心处的等离子体物质受到脉冲式的加速,然后沿着磁环两侧向下轰击,与磁环中各不同高度上的环境等离子体相互作用,激发起各种波长的射电波、XUV和X射线等辐射,而在环足处又形成色球的 H_α 光学耀斑。

耀斑现象是一种极其复杂的综合性事件。为了解释耀斑现象,研究者们已提出了许许多多的理论模型。这些模型都和磁场的的作用有关,但可以大致按磁场是起着主动的还是被动的的作用而分为两类,不过迄今还没有哪一个能够全面地说明耀斑的所有特征。

自1986年以来的太阳活动第22周期间,许多国家又制订了

不少峰年期的观测计划,例如国际性的“耀斑—22周(Flare—22)”、美国的“Max91”等。进一步用空间卫星(特别是日本发射了专门的“阳光—A(Solar—A)”与地面的各种设备在各个波段和能段上进行世界性的或区域性的联测,对耀斑的几个基本问题继续进行广泛而深入的探索。与21周相比,观测的空间分辨率和时间分辨率更有提高。现今,各国研究者正在深入地分析研究这些资料,对耀斑的许多认识已更有深化,但也发现了不少具有挑战性的新现象。而且总的说来,现今对耀斑的理论认识还远跟不上观测资料的爆炸或增长。

近年来,出现了“比较耀斑研究”的观念。观测表明,对于同一耀斑事件,虽然各个波段上的辐射都有着共同的特征,但从细节上看,却没有哪两个波段是完全相同的,因此,只有进行全波段的观测和分析比较,才可能对耀斑有全面的了解,此外,对耀斑的研究已深入到相当细致的微过程了,因而,今后主要的方向将是全波段的高空间($\leq 1''$)、高时间($\sim 1\text{ms}$)和高频谱、高能谱分辨率的观测研究。目前许多国家都已在积极筹划建造更加大型、更高性能的太阳仪器设备。预期在下一个太阳活动峰年期间,对耀斑的认识将会有新的突破。

参考文献

- 1 Smith H J, et al. Solar Flares, Macmillan, New York, 1961
- 2 Bruzek A. in W N Hess, AAS—NASA Symp
- 3 Švestka Z. Solar Flares, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht—Holland/Boston, USA, 1976
- 4 Pallavicini R, et al. Solar Physics, 1980, 67: 127
- 5 Sturrock P A. Solar Flares, Colo Ass Univ Press, Boulder, USA, 1980
- 6 Tanberg—Hanssen E, et al. The Physics of Solar Flare, 1988: Cambridge Univ Press
- 7 章振大. 太阳物理学, 北京: 科学出版社, 1992. 425~560

(紫金山天文台刘炎副研究员撰)

太阳黑子 sunspot 是经常出没于太阳表面的一些暗黑斑点,一种基本的太阳活动现象。人类对黑子的观测已有长达几千年的历史。古代人仅凭肉眼观测,因而只能看到黑子的一些肤浅的表面现象。直到望远镜的诞生,特别是太阳光谱仪和磁象仪的发展,人们才开始对黑子的内在本质进行系统的研究。

黑子大小不一,形态各异。比较大的黑子通常由较暗的核(本影)和围绕它的较亮的边框(半影)组成,形状似一个浅碟。此外,黑子中还存在着各种精细结构,如本影中有本影点和本影闪耀,半影中有半影纤维等等。当黑子位于日面边缘时,远离边缘的半影宽度比靠近边缘的半影宽度要窄得多,这就是Wilson于1769年发现的Wilson效应。

黑子是磁场高度集结的区域。本影中的磁场强度通常达到 $0.1\sim 0.4\text{T}$ 。在本影中心,磁场方向基本是径向的,但到了半影边缘,磁场方向有可能平行于太阳表面。黑子磁场是Hale于1908年根据光谱线的塞曼分裂观测发现的。

黑子光球层的温度明显较非扰区域低,本影光球温度通常要低 1000K ,半影则介于本影和非扰区域之间。这是人们看到黑子比较暗黑的直接原因。近来对黑子非局部热动平衡模型的研究表明,在色球层温度并不一定低于非扰区域,有时甚至还略高一点。这反映在某些色球谱线(如电离钙的共振线)在黑子区域反而增强了。1909年Evershed从谱线的多普勒位移和不对称性推测黑子区域存在较明显的物质流动。后来的观测也证实了,黑子在下层有物质流出,而在上层则流入。由于沿深度方向物质密度的梯度极大,因而物质流动的净结果是向外的。这个现象即为著名的Evershed效应,关于它的成因目前还存在争论。

黑子在大多数情况下是成群出现的。每个黑子群由几个至几十个黑子组成。一般说来,黑子群中有两个主要黑子。按太阳自转方向,出现在西面的黑子称为前导黑子,而在东面的黑子则

称为后随黑子。前导黑子和后随黑子的磁场一般具有相反的极性。鉴于黑子群的复杂性,现已提出了几种黑子群的分类方法,较为常见的有磁分类法和苏黎世分类法。

黑子具有既复杂又有规律的周期变化。1848年, Wolf 提出了黑子相对数的概念,利用数百年的黑子数观测资料,证明了黑子数的年平均值随时间有一变化周期,大小约为 11a。每个周期中,黑子数极大的年份称为太阳活动峰年或极大年。从 1755 年开始的第一个变化周期为第一太阳活动周,依次往后对各个活动周计数。

黑子在日面上的分布具有一定的规律性。首先,黑子在日面东半部和西半部的分布具有不对称性,这表现在日面东半部的黑子比西半部多。其次,黑子的日面纬度分布有一周期性。每个周期开始时,黑子一般出现于纬度 $\pm 30^\circ$ 附近;而在黑子数极大年份,黑子则较多出现在纬度约为 $\pm 15^\circ$ 处;当这一周期结束时,黑子靠近赤道并逐渐消失,进而开始新的周期。黑子日面纬度的这种变化规律称为 Sporer 定律,平均变化周期也是 11a。

黑子的磁场极性也呈现出有趣的分布和变化特性。在同一太阳活动周中,北半球前导黑子的极性几乎相同,而南半球前导黑子的极性正好相反。在紧随着的下一个活动周中,前导黑子和后随黑子的极性分布则全部反过来。也就是说,黑子的磁场极性具有大小约为 22a 的变化周期。这就是 Hale—Nicholson 定律。

为阐明黑子是通过何种途径达到冷暗状态的,学者们提出了种种理论。1941年 Biermann 提出了一种理论,指出黑子中强磁场的存在可以阻止光球深处的能量通过对流向上传输,从而使黑子区域变冷。这个机制的困难之一是必须合理解释黑子中的致冷和谱斑中的加热之间的区别。因为谱斑也是磁场集结区域之一,只不过磁场强度较黑子区域稍低。1974年 Parker 提出另一种理论,认为黑子区域存在较强的磁流体力学波,波动将能量往外传输并使黑子得到冷却。这个机制同样存在一些困难,例如这些非辐射能究竟转移至何处,目前在观测中尚无发现任何迹象。除此以外,还有许多不同的理论,均有待于进一步探索。

参考文献

- 1 Bray R J, Loughhead R E. Sunspot. Great Britain: Pitman, 1964, 1~303
- 2 Priest E R. Solar Magnetohydrodynamics. Dordrecht, D. Reidel, 1982, 280~324
- 3 Zirin H. Astrophysics of the Sun. Cambridge: Cambridge University, 1988, 303~333

(南京大学丁明德博士撰;方成审)

太阳黑子磁场 magnetic field in sunspot 太阳黑子的主要特征之一是它具有很强的磁场。1908年美国海耳(G. E. Hale)利用光谱线的塞曼(Zeeman)效应发现黑子存在较强的磁场。由于在磁场中光谱线的裂距 $\Delta\lambda$ 与磁场强度成正比,谱线的偏振状态与磁场方位有关,因此通过测量谱线的裂距和偏振状态可确定在太阳黑子大气中谱线形成层次的磁场强度和方位。大量的观测表明,小黑子的磁场强度约为 0.1T,大黑子的磁场可达 0.3~0.4T。

黑子的本影是黑子中磁场最强的部分。由于黑子的磁压是其总压强的重要部分,所以黑子本影内的气体比周围透明,我们可以看到黑子较深的层次,即黑子的威尔逊(Wilson)效应。

在太阳表面,黑子通常以群的方式出现。在一个黑子群中通常有两个主要黑子,它们的磁场极性相反。如果前导黑子是 N 极,则后随黑子的磁场是 S 极。在同一半球(北半球)各黑子群的磁场极性分布大体相似,而在另一半球(南半球)则相反。在一个太阳 11a 周期将要结束时,标志一个新周期开始的黑子群出现在太阳高纬,它们的极性分布则反过来,因此,每隔 22 年黑子磁场的极性分布经历一个循环。

强磁场是黑子的基本特征,太阳黑子群的浮现、发展和消失与它们的磁场密切相关。通常的观点认为,在太阳光球下面存在

着一个偶极磁场,这个磁场冻结在太阳物质中。由于太阳较差自转(赤道附近的转速快于两极),磁力线逐渐地在太阳光球层下面缠绕起来。这时,由于局部区域气体湍流运动形成磁力线束。磁力线束的强度可达几百毫特斯拉。在磁浮力的作用下,磁力线束向上浮现,形成具有偶极磁场的黑子群。观测发现在黑子磁通量浮现过程中,小尺度的偶极磁结构在活动区纵向磁场中性线附近出现并向相同极性的黑子强磁区运动,黑子磁场不断增强。

太阳黑子群上层色球,尤其是日冕磁场的观测存在着较多的困难,只有少数谱线可进行色球磁场测量。由于太阳色球大气处于非局部热动平衡状态,利用塞曼效应观测磁场所获结果的解释存在着一定难度。日冕磁场直接观测的手段就更少了。由于太阳色球和日冕物质冻结在磁场中,通常以形成在太阳色球谱线的单色像和日冕的精细结构来推断黑子群上空磁场分布状态。另一方面,以观测到的光球层磁场为边界条件,从理论上外推太阳上层的磁场的可能结构也是一件很重要的工作。

普遍认为黑子的形成和变暗与磁场相联系。早在 1941 年比尔曼(L. F. Biermann)就首先提出,黑子的变暗是由于强磁场抑制光球深层热量通过对流向上传输造成的。1974 年帕克(E. N. Parker)提出黑子变冷是由于沿黑子磁力线的非辐射能量向黑子之外传输的结果。

同时应当指出,在同一黑子群中,黑子的磁场的分布呈现复杂的结构,有时在同一黑子半影中会存在着不同磁极性的黑子本影,这可能是磁力线束在黑子群中被严重扭曲的结果。太阳耀斑的出现一般和这种磁场结构相联系。观测和理论研究的结果指出太阳耀斑是黑子群上空异极性磁力线之间重联的结果。

太阳黑子的消失和黑子磁场的衰减紧密联系。大量高分辨的观测事实表明磁场以两种基本形式从黑子向外运动。一种形式为在黑子半影的外边缘存在着小尺度以每秒 1~2km 的速度向外运动的偶极磁结构,称为运动磁结构。另一种形式是和黑子同极性的磁块从黑子向外运动,较大的磁块向外运动的速度较慢,通常认为后一种形式为黑子磁场衰减的主要形式。

太阳黑子磁场研究中的大量问题有待于解决。从观测上来说,观测仪器的空间分辨率有待于提高,例如为了克服地球大气的影响选择优良的地面观测地址或进行空间观测,以获得小于一角秒空间分辨率的太阳黑子磁场精细结构资料,确定黑子磁场的基本分布形式。对太阳大气中黑子磁场的多层次同时观测是非常必要的,以使人们更好地认识黑子群磁场的空间结构和它的演化过程。另外,太阳耀斑和黑子群磁场结构之间的关系并没有完全搞清楚,尤其是太阳黑子活动区磁场的空间结构在耀斑前后的演化过程并没有足够的观测证据和完全有说服力的理论。

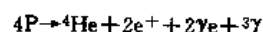
参考文献

- 1 Bray R J, Loughhead R E. Sunspot. Dover Publ Inc, New York, 1964
- 2 Priest E R. Solar Magnetohydrodynamics. Dordrecht: Reidel, 1982
- 3 Zirin H. Astrophysics of the Sun. Cambridge University Press, 1988

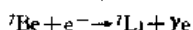
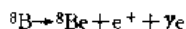
(北京天文台张洪起研究员撰)

太阳中微子之谜 the enigma of solar neutrinos 太阳中微子短缺问题,是当天文界著名的悬案之一,它对恒星物理、太阳物理以及粒子物理等都是一个严重的挑战。

根据贝特(Bethe)等人提出的理论,恒星在主序星阶段主要能源机制来自于一系列核反应,其中最重要的是 P—P 反应与 C—N—O 循环,前者主要适用于质量较小恒星(如太阳),后者主要适用于质量较大的恒星。二者中间过程不同,但最终反应式相同

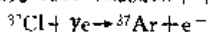


反应中有中微子产生,这是恒星内部许多核反应的特征,此外例如



均有中微子产生。因此,定量检测来自太阳的中微子,是对上述恒星理论的直接验证。

自20世纪50年代起,美国戴维斯(R. Davis)等人就开始进行这一实验。他们在南达科他州的一座深1500m的废矿井中放置520 t C_2Cl_2 (后增加为610t),观测如下中微子反应



而 ${}^{37}\text{Ar}$ 不稳定,可通过逆 β 反应还原为 ${}^{37}\text{Cl}$,同时伴随有欧歇效应发生。用比例计数器检测欧歇电子,可以探测到中微子俘获事件。

这一实验可检测的中微子能量下限为0.81MeV,因此只能探测到高能中微子,主要是 ${}^8\text{B}$ 及少量 ${}^7\text{Be}$ 反应的中微子。理论预计,该实验中微子捕获率约为7SUN($\text{ISUN} = 10^{-46}$ /每个靶粒子·s)。1968年,戴维斯等公布首批实验结果,捕获率小于3SUN,1973年发布结果小于1SUN,1978年公布小于2.2SUN,实验结果与理论值相差悬殊,这就是所谓太阳中微子短缺之谜。

1989年,戴维斯等发布了自1968~1989年的实验结果。22a中共进行了109次单元测试,平均每单元俘获事件不超过17次,大约每天0.46次;而理论预期值约为每单元60次,每天约1.5次,仍然相差甚远。

另一项关于太阳中微子的测试结果则属于意外收获。日本建造了一座容量为3000t的水切仑柯夫探测器,用来探测大统一理论所预言的质子衰变事件,称为Kamiodande。多年来,并未肯定观测到质子衰变事件,却观测到电子被中微子散射现象。根据1990年发布的结果,可得出两点结论:(1)所测中微子确实来自太阳;(2)如将能量下限定为7.5MeV,则所得中微子捕获率与戴维斯实验结果相近。两项互不相干的实验互相印证,表明中微子短缺问题确实存在。

戴维斯等人的实验结果使得天文学界大为困惑。多年来,形形色色的理论解释相继提出。这些解释大体可分为两类,一类主要归因于太阳模型,另一类则在现行粒子物理学中寻求突破。第一类解释的基本点就是降低太阳中心温度,从而使高能中微子流减弱。但这将与太阳模型的一些基本假设相抵触。例如,温度降低将会破坏太阳整体流体力学平衡。对此有人提出,太阳中心可能处于高速自转,离心力可补偿力学平衡。这一观点目前尚无任何观测证据支持。另一种模型设想,如太阳内部重元素丰度降低,则不透明度随之降低。这样在维持光辐射不变前提下,可降低中心温度。但计算表明,要定性解释戴维斯实验结果,内部重元素丰度须比表面低一个数量级,这显然是不可信的。如前指出,主序星阶段主要能源应来自核反应。但如果存在其他不可忽视的能源,则中微子短缺矛盾似也可得到解释。这方面有人提出中心黑洞模型、双层模型等,但均与有关观测事实有矛盾。如黑洞模型给出的坍缩时标远小于太阳寿命。

还有人推测,如太阳中心与外部充分对流,则反应消耗的H可得到不断补充,这样可在较低温度下维持较强的P-P反应,从而保持光辐射不变。也有人提出外部 ${}^3\text{He}$ 周期性混入反应区,使反应区温度因 ${}^3\text{He}$ 燃烧膨胀而周期性冷却。但已知的理论不能给出这种混合的力学机制。

此外,有人认为太阳中心温度变化与太阳系在银河系中运行位置有关,并将运行周期与地质史上冰河期联系起来。这种推测看来也相当勉强。必须要指出,已有实验(如SAGE)报告了低能太阳中微子短缺。如果证实,则对上述种种解释(归咎于太阳模型)可能是一个打击。

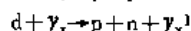
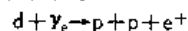
另一类解释则是对现行的粒子物理提出质疑,主要是对中微子自身性质作了一些新的假设。现行粒子理论认为,中微子有3类: $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\lambda$,皆为左旋,静质量、磁矩皆为零。如果中微子静质量不为零,其性质将会发生一系列不寻常变化。有人认为,中微子将因此可能在传播途中衰变为其他粒子。但近年观测结果否定了这种可能。著名超新星1987A爆发期间,人们探测到它所发射

的中微子。1987A距地球约 1.6×10^7 光年,而日地距离只有8min光程,在这样短的路程上,中微子不可能发生衰变。

另一流行的解释是所谓“中微子振荡”。如果中微子静止质量不为零,且质量本征态与“味”本征态不同,那么由于传播过程中不同质量态发生相对相移,中微子可能由一种“味”转化为另一种“味”。简单说, ν_e 可能转变为能量较低的 ν_μ, ν_λ 。但要定量解释戴维斯实验结果,要求初始混合为等量混合,这未免太苛刻了。1985年,米克赫也夫(Mikheyev)与斯米尔诺夫(Smirnov)提出“MSW振荡”理论。他们认为,由于 ν_e 与电子相互作用概率(通过CC与NC)大于 ν_μ, ν_λ (只通过NC),因而在通过电子介质时获得附加表现质量不同。这种差异使得即使对于微小的质量本征态的混合,也可能激起“共振”,这样可避开初始的等量混合。

此外,如果中微子磁矩不为零,那么它与太阳磁场相互作用,可能改变自旋方向,即由左旋变为右旋,而戴维斯实验只能探测到左旋中微子。这一假设有个有趣的推论:由于太阳磁场是周期性变化的,因而中微子捕获率也应是周期性变化的。从戴维斯实验数据看,似乎存在着周期性相关迹象,但不足以确定。

关于太阳中微子的理论解释尚有很多,不再赘述。另一方面的研究工作是在实验方面,包括增大规模,提高精度,提出新的实验方案,这方面动态相当活跃。(1)Cl实验。除戴维斯实验外,一座容量更大的3000tCl探测器已在前苏联Baksan地下实验室建造。(2)I实验。可用I代替Cl,原理相似,但可大大提高中微子计数率。此实验也在计划之中。(3)F实验。 ${}^{19}\text{F}$ 是电子-中微子CC相互作用的良好靶材料。一个试验型F探测器已于1990年在前苏联开始建造。(4)超Kamiodande实验。日本1988年批准建立45000t水切仑柯夫探测器。与Kamiodande实验相比,计数率可提高30倍以上。此外澳大利亚也正建造250t水切仑柯夫探测器,称为Sunlab,1988年完成了容量为27t的试验型。(5)低能中微子探测。是太阳中微子实验一个重要方向,对于判断太阳模型有更为直接的意义。(6)SAGE。低能中微子探测器,用 ${}^{71}\text{Ga}$ 作靶材料,捕获能阈为233keV。这是一项前苏联和美国的合作项目,设立在高加索山区的地下实验室,拟使用60t含量40%的Ga矿。1990年发布了30t容量的试验型报告,初步表明,捕获率远低于理论值。(7)GALLE。也是 ${}^{71}\text{Ga}$ 实验,为欧美合作项目,设置在罗马附近的Gran Sasso隧道中。这一实验已于1990年夏开始,实验结果将与SAGE相对照。(8)In实验。用In作靶材料,也对低能中微子灵敏。但In具有天然放射性,付诸实施有一定困难,此实验正在研究之中。(9)d实验。1985年陈(H. H. Chen)及其同事提出,用d(${}^2\text{H}$)作靶粒子



第1个反应为CC反应,第2个反应为NC反应。这里 ν_x 表示任一类中微子, ν_x^1 表示另一类。测量这两个反应的相对比率,可推估太阳中微子组分,并对中微子振荡理论作出判断。(10)SNO实验。为美、英、加拿大等国合作项目,容量为1000t的重水切仑柯夫探测器设置在安大略州Sudbury附近2000多米深的矿井中。该装置1996年开始运行。(11)Borex。 ${}^{11}\text{B}$ 可代替 ${}^2\text{H}$,测量中微子CC与NC反应比率。Borex为2000t的B探测器,将于Gran Sasso建立。(12)Borexino。为Borex试验型,容量为100t。(13)Icarus。同类型实验,用液态Ar作靶材料,也为Gran Sasso计划项目。(14)Mo-Tc实验。 ${}^{98}\text{Mo}$ 俘获中微子可产生 ${}^{98}\text{Tc}$,后者非天然核素,半衰期为 $4.2 \times 10^6\text{a}$ 。因此测出Mo矿中 ${}^{98}\text{Tc}$ 的含量,便可估算太阳中微子累积流量。Los Alamos国立实验室的一个小组正在对科罗拉多州红山的一个 MoS_2 矿在100~1500m深度范围内进行这项测试。(15)TI-Pb实验。与上类似, ${}^{205}\text{TI}$ 受中微子CC作用,变为 ${}^{205}\text{Pb}$,这也是非天然核素,半衰期 $1.4 \times 10^7\text{a}$ 。德国与前南斯拉夫已在Alchar一座矿井中研究实验方案。

综上所述,关于太阳中微子短缺问题,其重要性毋庸置疑,它的存在基本可以肯定。从当前研究动态看,至20世纪末前后,

这一问题可望显现比较清晰的眉目。

参考文献

- 1 Davis R Jr, et al. Phys Rev Lett, 1968, 20: 1205
- 2 Mikheyev S P, et al. Nuovo Cimento, 1986, 9C: 17
- 3 Chen H H, et al. Phys Rev Lett, 1985, 55: 1534
- 4 Davis R Jr, et al. Proceedings of the 13th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics. Boston, 1989. 518
- 5 Elliott S R, et al. Contemporary Physics, 1991, 32: 251

(安徽师范大学王家庆副教授撰)

日珥 solar prominences 是突出在日面边缘之外的炽热的发光物质,是太阳活动的标志之一。它同其他太阳活动现象(如太阳黑子、谱斑、耀斑和日冕活动等)互相关联,并都受太阳磁场支配。因此,研究日珥的物理状态、化学成分和形成机制必然有助于探讨太阳活动区的物质结构、运动规律和磁场结构。当然,对进一步研究太阳活动规律及太阳本身也是有意义的。

中国早在远古的商代(公元前16世纪到公元前11世纪)甲骨文上就记载有“三焰食日大星”(意指3条火焰吃掉太阳,大星出现);战国时代的甘德、石申也曾注意到日全食时,日面边缘有像“群鸟或白兔”的东西,这些都是日食时对日珥形态的描述。到公元前1世纪,京房更明确地提出了日珥的概念“日以甲乙有四珥而蚀……”,在日全食时看到好几个日珥。

由于日珥的光度很弱,一般情况下淹没在日冕中,在太阳分光仪等近代仪器发明之前,即使在日全食时也只能看到它的形态。到19世纪中叶,照相术、分光术等应用到天文观测中来,产生一门新学科——天体物理学,同时把太阳的观测和研究推向一个新阶段。1860年7月18日,日全食时第1次拍摄了日珥的照片。1868年8月18日,法国詹逊(L. Janssen)和英国洛克耶尔(J. N. Lockyer)在印度观测日全食时,拍到日珥的光谱,确定日珥的主要成分是氢。同时,他们还发现在日珥光谱中有波长为 $5.876 \times 10^{-10} \text{m}$ 的黄色发射线。但当时在地球上从未见过这条谱线,便认为它是太阳上的物质发出的,并命名这种物质为“氦”(Helium),此字源于希腊语Helios(太阳),意即太阳元素。到1895年,英国雷姆塞(H. W. Ramsay)在矿物中分离出氦,证实地球上也有氦。氦的发现对原子核物理、恒星(首先是太阳)的能量理论和天体演化模型有重要意义。

1889年美国海耳(G. E. Hale)提出太阳单色光照相机原理。1892年成功地拍到太阳单色像,第1次在非日食时看到日珥。1933年法国李奥(B. F. Lyot)发明了干涉偏振滤光器,并于1950年应用于太阳单色光照相观测,同时得到整个日面的单色像。此后,色球望远镜、太阳多波段光谱仪等观测仪器日趋完善,人们从此摆脱了日食的限制,积累了丰富的观测资料,对日珥的物态、运动、分类及模型等进行了大量的研究。近几十年来,光电和光电成像(特别是Reticon和CCD等新器件)等新技术的发展,计算机和图像处理系统的广泛应用以及射电天文、空间技术的发展,不但把对日珥的观测扩展到射电和紫外、X射线波段,而且大大提高了观测的时间分辨率和空间分辨率,为日珥的理论研究提供了可靠的观测资料和计算工具。从此对日珥的观测和研究进入了高精度、高效率、全波段的新时代。

光谱分析是研究日珥物理状态、化学成分和结构模型的重要手段。在20世纪70年代以前,主要采用经典方法,即由谱线轮廓半宽或对数轮廓来求一系列物理参数,那时只能得到日珥的平均参数。近10年来中国有些人对数据处理方法作了不少改进。诸如二次对数轮廓方法,最小二乘法,完全线性化方法等。并采用计算机处理,提高了精度,加快了收敛,为大量处理日珥光谱资料提供了很大的方便。另外,在求爆发日珥的电子密度及其它物理参数时,还提出一种方法,即对巴耳末线系的谱线致宽因素,除考虑多普勒致宽和斯塔克致宽外,又加入等离子体湍动致宽的影响,取得了有意义的结果。70年代以后,随着计算机和计算方法

的改进,日珥大气模型的计算方法开始发展起来,人们不仅能够用非局部热动平衡(N-LTE)理论计算不同物理条件下的日珥大气模型,还可以得到同观测轮廓符合得很好的日珥半经验模型。配合高分辨率的观测,可以细致地研究日珥物理参数的二维分布、谱线加宽机制、日珥的能量函数、辐射损失及能量来源等基本问题。1975年6月21日美国发射的第8号“轨道太阳观测站”第1次突破地球大气的限制,拍到了日珥的远紫外光谱——氢的莱曼线系的前两条谱线Lya和Lyβ,这是日珥光谱的观测和研究的一个重大进展。

经过许多人的努力,现在对日珥物理条件的研究已比较成熟。比较一致的看法认为,日珥的主要成分是氢,另外有氦及钙、镁、铁、钛等许多金属。日珥由上升到日冕的色球物质凝聚而成,然后向光球回落。此外,近年来的高分辨率观测发现,日珥由大量细长纤维组成,各处的物理状态(温度、压力、电子密度和速度等)很不均匀。在1990年国际天文学会第117次会议上专门讨论了迄今为止日珥研究的最新成果,认为:(1)不同类型的日珥,其物理参数大不一样,平均来说,宁静日珥的电子温度约6500K,湍动速度约6km/s,电子密度约 $10^{10.8}$ 个/cm³等等。而活动日珥的电子温度为7000~20000K,湍动速度为20km/s,电子密度约 $10^{11} \sim 10^{12.8}$ 个/cm³。(2)宁静日珥的物理参数随空间变化。从日珥的中心到边缘,电子温度从4300~8500K,湍动速度从3~8km/s到10~20km/s,电子密度由 $10^{11.1} \sim 10^{11.7}$ 个/cm³。这些从中心到边缘的变化,可能是由于边缘受日冕高温的影响。由此,日珥和日冕的分界面成为近年来天文工作者关注的区域。

磁场对日珥的形成、维持、运动和演化有重要意义。对太阳磁场的测量,最初是海耳在1908年利用光谱线的塞曼效应对黑子进行的。自1953年巴布科克(H. D. Babcock)研制成太阳光电磁象仪以后,随着各种类型的太阳磁象仪的研制成功,逐步开展了对太阳磁场(包括局部活动区及普遍磁场、整体磁场)的全面测量。对日珥磁场的测量表明,宁静日珥或暗条(日珥在日面的投影)基本上位于太阳局部磁场的中性线上,暗条走向的曲折程度在一定程度上反映了局部磁场结构的复杂性。宁静日珥的磁场强度约0.001T,磁力线基本上与太阳表面平行。而活动日珥的磁场强度大致为0.002~0.0015T,最大可达0.02T,其磁场结构比较复杂。各种各样的磁场结构和日珥凝聚物质的来源,形成了形状、大小和寿命各异的日珥。

日珥的形成和演化是当今日珥研究的重要课题。近年来比较流行的理论认为,日珥出现在日冕磁力线顶端的凹陷处。与磁场冻结在一起的色球物质沿磁力线向上运动,有一部分留在这样的“磁坑”中,而后,承载日珥的磁力线由于引缩效应而出现再联结,使日珥与下面的磁力线断开,色球物质不再输入,于是日珥便独立地悬浮在日冕中。这就是宁静日珥成因的“Kippenhahn—Schlüter”模型(1957年提出)和“Kuperus—Raadu”模型(1974年提出)。至于爆发日珥,则认为是由于磁力线受到某种扰动(如耀斑波的扰动)后上浮,把日珥物质弹射出去而形成的。由于磁力线再联结区域很小,目前还无法直接观测到,所以这些理论还有待观测来证实。

参考文献

- 1 叶式辉. 中国大百科全书(天文学卷). 北京:中国大百科全书出版社, 1980. 265~267
- 2 张其洲,等. 天文学报, 1986, 27(1): 30~37
- 3 叶式辉. 百科知识, 1987, 7: 58~60
- 4 Zhang Q Z, et al. Solar Physics, 1987, 114: 245~252
- 5 方成,等. 中国科学, 1988, A辑(4): 413~420
- 6 Jensen E. Proceedings of the NO. 117 Colloquium of the I. A. U., 1989. 129~149
- 7 Priest E R. Proceedings of the NO 117 Colloquium of the I. A. U., 1989. 150~189
- 8 Hirayama T. Proceedings of the NO 117 Colloquium of the I. A. U., 1989. 187~205

9 胡菊,等.天体物理学报,1990,10(2),163~172
(南京大学胡菊副研究员撰;王振一审)

日冕振荡 coronal oscillations 太阳大气是等离子体物理的天然实验室。在耀斑期间被加速的电子束流可看成扰动探针激发等离子体振荡,从而研究日冕中等离子体的物理性质。高温等离子体在磁场中的行为是人类认识自然的前沿问题之一,因为在磁场中约束并加热轻原子核是点火可控核聚变的关键性问题。

扰动产生波及波的传播过程是数学物理方程研究的经典问题之一。地震学中地震波波形分析带来了大量关于震源机制和介质参数的信息,成为诊断地壳和地层结构的有力手段。用类似的数学方法研究日冕磁环的磁声振荡,在一定条件下所研究的方程可简化为地震学和海洋学中熟悉的方程,进而可用类似的方法研究太阳大气中磁流管内外等离子体参数。高能粒子在磁流管中的行为是理解太阳耀斑物理的关键环节。

振荡常发生在高密度的闭合磁环里或者开放磁结构的日冕凝聚区里。振荡可以是闭环中的驻波或脉冲状的扰动波。1911年洛夫(Love)简化了波动方程,在地震学应用中描述了这种波的传播过程及分析方法;这就是非对称扰动的 Love 波。1948年派克(Pekeris)在海洋学中研究了对称传播的 Pekeris 波,在磁流管中对称传播的 Sausage 波与 Pekeris 波相似。

IV 型爆发是一种强能量的太阳射电爆发,有时在这种爆发中存在着准周期的脉动现象。日冕磁声振荡的波形分析为确定磁流管中的物理条件提供了有用的判断依据。从它可计算出阿尔芬波的速度以及不均匀区的直径或宽度,即可测算出太阳活动区磁流管的直径。通过对耀斑前日冕微小振荡演化过程的研究,可探讨微振荡与耀斑触发过程的关系。

实际观测资料提供的证据表明,日冕振荡的时间尺度有两种或多种。太阳耀斑和射电资料提供了大量的证据,说明存在着 1s 左右周期的短周期振荡。1979 年克鲁吉尔(Kruger)评述过这方面的许多事实。许多作者报告过,在 IV 型射电爆发期间存在着短周期振荡。例如,鲁森别尔格(Rosenberg)在 1970 年;哥特涅斯(Gotwols)在 1972 年;门克宁(Mclean)和薛里丹(Sheridan)在 1973 年;阿克翁(Achong)在 1974 年;皮克(Pick)和特太特(Trotter)在 1978 年;塔平(Tapping)在 1978 年以及 Trotter 在 1981 年都报告过短周期振荡,它们的典型周期是 0.5~3.0s。在微波段(Gaizauskas, 1980 年),硬 X 射线波段(Orwig, 1981; Dennis, 1981 和 Kiplinger, 1983)以及同时在硬 X 射线波段和微波段(Takakura, 1983 和 Kane, 1983)上都报告过短周期振荡现象。本兹(Benz)在 1980 年 3 月 29 日在 303~343MHz 频段上曾记录到典型的秒级周期振荡。

1979 年特太和皮克报告了长周期(1min)的射电脉动,那些振荡发生在一次活动日珥上升之后 10min 时,振荡源位置在一个大的磁弧里。1983 年柯契迈(Koutchmy)、朱格直达(Zhugzhda)和劳坎斯(Locans)报告了 43s、80s 和 300s 周期的振荡。斯特劳斯(Strauss)、考夫曼(Kaufman)和奥弗尔(Opher) (1980)注意到在环状日珥里出现过 5.6min 振荡。

在太阳日冕不均匀区里,即在磁环里,磁声振荡有两种不同周期,其原因是一种振荡与声学特征(慢模)有关,另一种振荡与阿尔芬波特征(快模)有关。

在解释磁流管磁声振荡的周期从数秒至数分钟的变化时,既要考虑驻波也要考虑行波。在上述两种情况下,扰动都被约束在日冕的致密区里。驻波发生在冕环里,其端部镶嵌在高密度的色球层中。行波发生在冕环里或者开放磁场区里。

1970 年鲁森别尔格提出磁流管中的振荡理论时作了较大的简化,他忽略了磁环周围环境的影响,并仅仅考虑径向模式。1978 年迈尔森(Meerson)等进一步分析了鲁森别尔格的模型,但他们的注意力仍局限于辐射模式,忽略了振荡的自由模式,直到 1984 年英国罗伯特(Roberts)等在处理振荡的自由模式上作了

开拓性的工作,支持了鲁森别尔格的结论。

磁环根部通常驻足于高密度的色球层中,扰动可能在磁环中来回反射形成驻波,此时快速 Kink 波的周期与磁环长度 L 成正比,快速 Sausage 波的周期与磁环直径成正比。振荡周期与磁流管内外磁场强度、等离子体密度之间的关系也确定了。对于行波的情况,脉冲状的扰动分为 3 个阶段,即周期相、准周期相和衰减相。行波的周期也与磁流管直径成正比。当快速 Sausage 波被脉冲状激发时(例如在太阳耀斑期间被加速的电子束),假若磁流管内等离子体密度为 $10^9/\text{cm}^3$, 磁场强度为 0.004T, 磁流管直径 2000km, 由这些参数计算出振荡周期为 1s。

1987 年阿西万登(Aschwanden)比较详细地研究了在射电、微波和 X 射线各频段上观测到的准周期精细结构现象,并根据其触发机制进行了分类:磁流管振荡(俘获的粒子被驻波或 MHD 行波调制);等离子体不稳定性引起的振荡(波-粒,波-波相互作用);加速过程的调制(粒子在加速过程或注入源区时被调制)。

近些年来中国国内各太阳射电观测设备的时间分辨率已大大提高,观测到若干毫秒级周期的振荡现象。云南天文台的射电频谱仪时间分辨率已提高到 2ms, 频率分辨率已提高到 0.25MHz, 观测记录到了周期为 10ms 级的日冕振荡现象,并对其精细结构频谱特性进行了分析研究,对于分析日冕磁场百公里量级精细结构能起到重要作用。

参考文献

- 1 Zhao R. Solar Physics, 1990, 130: 151~160
- 2 Roberts B. The Astrophysical Journal, 1984, 279: 857~865
- 3 Aschwanden M. Solar Physic, 1987, 111: 113~136
- 4 张衡,等.科学通报,1991,10:760~763

(云南天文台夏志国副研究员撰)

冕洞 coronal holes 是日冕上辐射较弱、亮度比周围暗得多的区域,它的发现使持续 40 年之久的 M 区之谜得以解开,即原来 M 区就是冕洞。

20 世纪初,从长期的地磁和电离层资料中发现,地磁扰动可分为偶现性和重现性两种。后者周期为 27d,大致和太阳赤道附近的自转周期相同,这似乎表明地磁扰动与太阳黑子有密切联系。因此恰普曼(Chapman)提出,太阳黑子区有一股连续发射的粒子流射向地球,当它同地球相遇时就引起剧烈的地磁扰动。这股粒子流随太阳自转,每 27d 与地球相遇一次,因而重现性地磁扰动具有 27d 周期。但是,粒子流与日面上的大黑子群和其他光学活动似乎没有联系,因此这种重现性地磁扰动源固定在日面上某些特殊区域。1932 年比利时巴特尔斯(Bartels)把这些区域称为 M 区,意思是神秘的区域。

1950 年,瑞士瓦尔德迈尔(Wardmeier)从地面观测的单色光综合图上首先发现日冕上某些区域谱线强度总比别的区域弱,他称这些区域为“洞”。60 年代初,一些探空火箭拍摄的太阳软 X 射线像和极紫外线(EUV)像上也显示“洞”的结构。60 年代后期,美国发射的 3 艘“轨道太阳天文台”(OSO-4, OSO-6 和 OSO-7)对日冕强度大尺度减弱进行了定期观测。大量资料表明,瓦尔德迈尔所说的“洞”是真实的客体,这就是冕洞。

1973 年,美国发射的“天空实验室”(Skylab),对冕洞研究的发展起了关键作用。“天空实验室”发射了 4 颗,其中 5 月 25 日发射的“天空实验室”-2 号用 8 台仪器对太阳观测了 81h,获得了 3 万张软 X 射线和 EUV 太阳像。根据这些资料,在太阳活动周下降期间有 3 种冕洞,一是极区冕洞,位于太阳两极地区,常年都有;二是延伸冕洞,分别由南向北延伸和由北向南延伸;向北延伸的,由南极区伸到北纬 20°左右,向南延伸的,由北极区伸到南纬 20°左右,延伸冕洞和极区冕洞相连,面积较大;三是孤立冕洞,位于低纬地区,面积较小。这些冕洞具有以下特征:(1)面积:日面上所有冕洞总和占太阳总面积 20%,其中极区冕洞面积较大;单个极区冕洞面积占太阳总面积的 6%~10%,所有极区冕洞面积

和占 15%。非极区冕洞大小不等,大的占 5%,小的只占 1%。(2)寿命:冕洞是太阳日冕里长寿命现象,最短的持续 1 个太阳自转周期,长的达 8~10 个,最长的 1 年。平均是 5~6 个太阳自转周期。(3)分布:凡是观测到的冕洞几乎都跟同一太阳半球的极区冕洞相连,因此低纬冕洞可以认为是极区冕洞在低纬的延伸物。极区冕洞与低纬冕洞连接时间,有的在低纬的冕洞形成的初期,有的在此之后几个太阳自转周期。(4)旋转:冕洞相对于太阳基本不动,近似地同太阳一道作刚性旋转。没有或只有很小的较差自转。(5)密度:冕洞是日冕中密度较低的区域,计算表明,冕洞密度约为宁静区密度 1/3,冕洞中心密度只有其周围的 1/10。(6)演化速度:冕洞演化比较慢,面积增长和衰减速度大体相同,即每秒改变 $(1.5+0.4) \times 10^4 \text{ km}^2$ 。有些冕洞的面积甚至在 2 个太阳自转周期内没有变化。(7)冕洞同太阳磁场的关系:冕洞只存在大单极磁场区里,与大尺度磁图的中性线不相交。冕洞总出现在与同一半球有相同极性的磁区里。不同的冕洞磁场强度不相等,从零点几到几十高斯的都有;同一个冕洞,洞内磁场是不均匀的,洞内外磁场强度则相差不大;活动区磁场比冕洞磁场强。根据冕洞下面单极磁元的极性,冕洞可分为正极型和负极型两种。(8)冕洞同太阳风有极其密切的关系:第一,当极区冕洞向南或向北延伸通过日心半径时,总能观测到两种现象:在地球轨道附近观测到高速太阳风流,在地球周围观测到重现型地磁扰动。这两种现象的东西宽度和磁场极性都暗示冕洞是高速太阳风起源的,行星际磁场位形和太阳风流是冕洞中磁场位形和物质流在行星际空间的反映。第二,鉴于冕洞里所有辐射都较弱,看来冕洞的能量损失主要取决于太阳风。第三,冕洞同太阳风流的速度有关:低纬的小冕洞同地球附近每秒 500km 的太阳风相关得很好;高纬冕洞,特别是极区冕洞可以产生高速太阳风,但这种太阳风一般到不了地球;大冕洞即便出现在中纬地区,也与地球周围每秒 700km 以上的太阳风有很好的相关关系;长寿命赤道冕洞是太阳风风源,同时根据地磁扰动的关系,它也是地磁扰动之源。

80 年代以后,冕洞研究主要集中在所谓“冕洞结构上”,即太阳磁场进入行星际空间的地方在低日冕的一部分结构上。主要内容有:(1)冕洞参数同太阳活动周相位的关系。希里和哈维 (Sheeley and Harvey) 发现,在太阳活动上升期间,同冕洞有关的太阳风流的最高速度在下降,由第 20 周太阳活动下降时期的每秒 600~700km 降到每秒 500~600km。在太阳活动极大和极小附近,低纬冕洞的面积虽然没变,但极大附近的磁流却比极小附近的大 3 倍。平均磁场强度从极大附近的 0.0003~0.0036T 降到极小的 0.0001~0.0007T。卡勒 (Kahler) 指出,在 1974~1981 年之间,在 HeI λ 10830 和软 X 射线上冕洞的差异减小。这些都表明冕洞的开放和封闭磁力的混合可能同太阳活动周的相位有关。(2)向外流动的等离子体及有关问题。1981~1983 年期间,奥拉尔 (Orrall) 等曾经尝试探测冕洞内系统的等离子体往外的流动,发现在低纬冕洞内,过渡区和低日冕的 EUV 线相对于日面其余部分有蓝移。移动速度随谱线形成的温度升高而增加;在 OV λ 629 谱线形成的温度下,移动速度是每秒 7km,在 Mg \times λ 625 谱线形成的温度下是每秒 12km。在极区冕洞里,在 Mg \times λ 625 谱线形成的温度下是每秒 8km。维玛 (Verma) 研究了日冕质量抛射 (CME) 事件同太阳和冕洞的联系,发现 CME 同太阳耀斑没有统计联系,而同冕洞有联系。他比较了 1979~1982 年观测的冕洞和 CME,在 79 个 CME 中 48 个同冕洞有关,占 61%。维玛认为,这可能是概括了在耀斑和活动日珥期间抛射的质量沿冕洞开放磁力线运动的 CME 的面貌。(3)太阳风流加速机制问题。虽然一些形式的 MHD 波沉降的动量被看作主要的候选机制,但加速问题仍然没有解决。以前在研究太阳风流加速因素中快模 MHD 波都被忽略了,夫雷等讨论了快模波向外传播中在超声速太阳风中沉降能量和动量的可能性后指出,如果这个系统工作,那么在阿尔芬速度随高度减小的区域一定产生快模波。另一方面,在低日冕里正高度梯度的阿尔芬速度有把冕洞底部和侧面的波往外

推的倾向,离开的动量将用来加速。(4)冕洞内部结构和瞬时行为。哈伯 (Habbal) 等比较了冕洞里和宁静区里日冕亮点的形状结构和时间行为。(两个区域的日冕亮点都位于网络上,覆盖区域都是 $10^\circ \sim 14^\circ$),发现在给定的亮点上, Mg \times λ 625, Ov λ 1032, Orv λ 554, C λ 977, C λ 1355 和 Ly λ 1216 这 6 条不同谱线的峰值辐射不是总位于同一空间,这表明冕洞中的亮点是由不同温度的小尺度磁环组成的复合物。在 6 条谱线上两个区域的亮点强度也有明显的时间变化。

迄今为止,在冕洞研究中仍有许多谜底没有揭开。例如在一个太阳活动周中冕洞出现频率有何规律?冕洞边界如何变化?太阳风流是如何加速的?冕洞是怎样形成的?这些问题看起来纯属理论问题,但问题解决了日地关系研究的进展大有好处。所以这些理论问题具有重要的实用价值。过去解决这些问题的重要困难在于所有资料都在地面和由近地卫星取得的,没有高日心纬度的辐射资料。1989 年 10 月 6 日,发射成功了“尤里西斯” (Ulysses) 太阳极区探测卫星,它用 9 架仪器研究太阳风、太阳与太阳风交界面的结构和日球磁场等。“尤里西斯”将在获取太阳极区辐射的资料方面荣立头功。估计在“尤里西斯”资料发表后,冕洞研究将有巨大进展。

参考文献

- 1 Harvey K L, et al. Solar Phys. 1982, 79, 149~160
- 2 Kahler L, et al. Solar Phys. 1983, 87, 47~56
- 3 Verma V K. Basic plasma processes on the sun. 1990, 450~451
- 4 Habbal S R, et al. Ap J, 1990, 352, 333~342

(紫金山天文台徐水焯副研究员撰;刘麟仲审)

太阳风 solar wind 从日冕不停地向外抛射到行星际空间的等离子体流称为太阳风。日冕因高温而膨胀,其大量的质子、电子等粒子就不断地向外抛射,形成高速向外的微粒流——太阳风。

离子彗尾中的等离子体以 10~250km/s 的速度在反太阳方向离开彗星,其加速度达到太阳引力加速度的 100~1 000 倍。为寻找这样巨大的速度和加速度的产生原因,1951 年德国贝尔曼 (L. Biermann) 提出了太阳风这一概念。他认为,是太阳风的质子和电子高速离开太阳时在长库仑力作用下带动彗尾中的等离子体,使其获得如此巨大的速度和加速度。

从 20 世纪 50 年代末人造卫星上天以后,有许多卫星和飞船测量了地球和月球附近的太阳风参数。例如,前苏联发射的“月球”号飞船中的某些飞船,“预报”号卫星的所有 7 颗卫星,美国发射的“探险者”号卫星中的某些卫星,“水手”号飞行器中的某些飞行器,“维拉”号卫星中的某些卫星,“轨道地球物理观测台”号卫星的所有 6 个卫星,“先驱者”号飞行器中的 6、7、8 和 9 号飞行器,“行星际监测台”号卫星的 10 个卫星,“太阳风”卫星,美国和联邦德国联合发射的“太阳神”卫星 1 号和 2 号,美国宇航局和欧洲太空局联合发射的“国际日地探险者”号卫星的所有 3 颗卫星等等。美国发射的“阿波罗”飞船 11 号、12 号、14 号和 15 号还在月球表面观测了太阳风。

在磁场“冻结”情况下,太阳风中带电粒子流带着磁力线跑,把一些太阳磁场带到行星际空间中去,构成行星际磁场。行星际磁场磁力线呈螺旋线形,大尺度上具有扇形结构。根据卫星和飞船的探测结果,到达地球轨道附近时太阳风的平均速度为 400km/s,平均粒子的数密度为 5 个质子/cm³、5 个电子/cm³,平均磁场强度为 5nT,平均电子温度为 20 000K,平均质子温度为 10 000 K。

当太阳风处于宁静状态时,或由太阳表面宁静区域发出的太阳风称为宁静太阳风,又称低速太阳风或背景太阳风,其速度只有 340km/s,质子和电子密度各为 8 个/cm³。太阳活动区域发出的太阳风称高速流,它的速度比宁静太阳风大,达到 750km/s。高速流压宁静太阳风,在其前缘形成密度较高的壳层,称受压

太阳风。在受压太阳风中,质子和电子的密度急剧上升,高达 60 个/cm³,而太阳风的速度只有 350km/s 。受压太阳风和宁静太阳风的界面是一个激波面,高速流的后方粒子密度比宁静太阳风还低,其质子和电子密度各为 3 个/cm³,这个区域称为稀疏区。每次高速流通过地球时,其前沿通过要 1d 时间,而后 $3\sim 4\text{d}$ 是稀疏区通过,整个高速流持续约 $4\sim 5\text{d}$ 时间。现在认为,高速流是由太阳表面的 M 区发出的,所以高速流也称 M 流, M 区即冕洞。

太阳风中除了含质子和电子外,还含少量的氦,其它元素则微乎其微。太阳风的平均流量为 2×10^8 个质子/cm²·s 加 2×10^8 个电子/cm²·s。如果假定太阳风是球对称的且均匀的,采用这种无结构的太阳风理论模型,不难算出,太阳每年抛射出的太阳风总质量为 $3\times 10^{16}\text{g}$,超过太阳总质量的 10^{14} 分之一。

观测表明,太阳风并不完全是从太阳径向向外流,而是在顺太阳自转方向(向东)与径向偏斜 1.5° 。与太阳自转顺向抛射微粒流将使太阳自转速度降低,这种效应叫太阳被制动(Solar braking)。

太阳风能达到的最远距离处称为太阳风的边界。当太阳风的动压力与星际压力(星际气体压力+银河系磁场的磁压+宇宙线压力)相平衡时,就达到了太阳风的边界。太阳风边界离太阳大约 $50\sim 100$ 天文单位远。

太阳风的宏观性质可用流体模型来描述,美国帕克(E. N. Parker)最先完成了其初级理论。近期的理论发展主要集中在两种不同的理论模型上,它们分别是单流体模型和双流体模型。

当太阳风中电子和质子的碰撞相当频繁时,电子和质子具有相同的温度,此时可把太阳风看成由单一成分组成的流体,这种模型称为太阳风单流体模型。在日冕的底部库仑碰撞频繁,单流体模型能很好解释日冕膨胀。在远离太阳的区域,电子和质子之间的碰撞稀少,这种模型不再适用。在地球附近,电子温度和质子温度相差甚大,太阳风参数与这种理论模型所预言的值差距较大。

若把太阳风看成是由电子和质子两种流体所组成,两种流体有着不同的温度,这种模型称之为太阳风双流体模型。在离太阳稍远的地方,太阳风中电子和质子碰撞不频繁,虽然电子和质子之间有热交换,但不强烈。电子间通过热传导而从日冕向外传输热量,从而电子被强烈加热。质子之间热传导率不高,它们一边从热传导获得一些日冕的热量,一边又从与电子的库仑碰撞中获得一些电子的热量。其结果是电子温度比质子温度高。采用双流体模型往往比单流体模型接近真实情况。

当太阳风吹到有固有磁场的行星附近时,例如,吹到水星、地球、木星、土星、天王星或海王星附近时,太阳风前进受到阻碍。太阳风的粒子和磁场与行星的固有磁场和大气粒子相互作用,在行星周围形成阻碍太阳风前进的结构复杂的磁层,在背日方向从这些行星伸出长长的磁尾。磁层物理是当今的热门研究课题。现今研究结果表明,磁层最外边是磁顶,它外边是太阳风等离子体,里面结构复杂,有等离子体层、辐射带、等离子体片、尾瓣和等离子体幔等等等离子体聚集之区域。磁层里面的磁场是行星固有磁场,其磁力线能连到行星上。磁层的上游有一弓形激波面,它使太阳风减速并偏转。磁顶与弓形激波面之间区域称磁鞘。

当太阳风吹到金星这类没有固有磁场或行星固有磁场很小的天体附近时,金星大气层足以在其上游产生一个弓形激波,而金星的电离层仅能或多或少地阻挡太阳风吹入,金星电离层等离子体虽然由磁鞘薄层与太阳风等离子体分开,但金星不能形成像地球那样的完整的磁层结构。太阳风与金星电离层的相互作用产生了金星的感生磁场。大多数行星科学家认为,这个由太阳风而形成的磁场就是宇宙飞船测量到的金星之微弱磁场。

太阳风吹到月球或小行星这类天体时,由于它们既无固有磁场(或很小很小),又无大气(或很少很少),太阳风等离子体基本上是无障碍地通过,仅在有些天体表面才绕道通过。

太阳风与彗星作用也很复杂。当彗星走到太阳附近受阳光加热而升华出大量的气体分子时,太阳风中的质子与彗星中性气体分子的电荷交换以及太阳风中的电子与彗星中性气体分子的碰撞,均是彗星气体分子电离的原因。太阳风携带之行星际磁场的磁力线挂到彗星电离层上,使彗星离子沿这些磁力线跑,从而形成等离子体彗尾。瑞典阿尔芬(H. Alfvén)1957年提出的这种太阳风与彗星相互作用的模式为研究彗星等离子体的结构和运动奠定了基础。1967年,贝尔曼等人又研究了太阳风与彗星相互作用的模型。他们得到这样的理论模式:在彗星的上游有一弓形激波面,它使得吹到彗星附近的太阳风减速与偏转;在弓形波面与彗核之间有一个接触间断面,它把太阳风等离子体与纯彗星起源的等离子体分隔开。1986年哈雷彗星回归到太阳附近时,前苏联发射2艘“维加”(Vega)飞船、欧洲空间局发射的“乔脱”(Giotto)飞船,以及日本和美国的共6艘飞船相继飞到哈雷彗星附近对其观测,证实了上面那些理论分析是正确的。

正当太阳风的研究在深入时,恒星风、星系风的研究又开始活跃起来了。

参考文献

- 1 Biermann L. Zeit Astrophys, 1951, 29: 274
- 2 Alfvén H. Tellus, 1957, 9: 92
- 3 Biermann L, et al. Solar Phys, 1967, 1: 254
- 4 Sonett C P, et al. Solar wind, 1972
- 5 中国空间科学学会编. 空间科学词典. 北京: 科学出版社, 1987
- 6 陈道汉, 刘麟仲著. 现代行星物理学. 上海: 上海科学技术出版社, 1988

(紫金山天文台刘麟仲副研究员撰)

月球 moon 俗称月亮,是地球唯一的固态天然卫星。月球本身不发光,有周期性的朔望位相变化,该周期称朔望月,长约 29.53d 。月面平均反照率为 0.07 ,满月的亮度相当于一 12.7 星等,在地面上的照度为 0.22Lx ,但上、下弦半月时的亮度只有满月的 $7\%\sim 8\%$ 。月球的直径 3476km ,质量为 $7.35\times 10^{22}\text{kg}$,平均密度 3340kg/m^3 ,表面重力加速度 1.62m/s^2 ,分别相当于地球的 27.3% 、 1.23% 、 60% 及 16.5% 。除陨星、流星外,它是离地球最近的天体,平均距离为 $384401\pm 1\text{km}$,因其公转轨道是椭圆,月地距离有 11% 的变幅。在潮汐摩擦的长期作用下,它的自转周期与绕地球的公转周期相同(称为恒星月),约为 27.32d ,这使地球上始终只能见到它的正面半球,但由于一些力学及物理原因造成的天平动,使地面上实际可见月表的 59% 左右。

1609年意大利伽利略(G. Galileo)首先用自制的望远镜观测月球,成为见到月球实际地貌的第1人,他还画下了人类第1张月面图。此后,赫维留(J. Hevelius)、施罗特(J. H. Schröter)、洛尔曼(W. G. Lohrmann)和穆尔(J. H. Moore)等人先后利用大望远镜及照相等方法,绘制了350多幅更加详尽、准确的月面图,其中最大的直径达 7.5m 。1959年10月,前苏联“月球”3号探测器首次拍摄到月球背面的照片,使人类对整个月面有了全面的了解。60到70年代,美苏两国发射了几十枚各类月球探测器,实施了逼近飞行、绕月飞行、硬着陆、软着陆等计划,美国还成功地完成了“阿波罗”探月工程,让21名宇航员作了绕月飞行,其中12人先后6次登上月球表面。他们在月面上挖沟钻洞,采集岩石、土壤标本,安置科学仪器,进行了包括制造人工月震、发射月球子卫星等几十项科学试验,拍摄了1.5万多张清晰度的月球近距离照片,长达几十千米的电影胶卷,带回数百千克的月岩和月土,使人类对月球的研究达到了空前的程度。

月面上最显著的特征是星罗棋布、重重迭迭、大小不一的环形山,其外形酷似地球上的火山口或陨星坑,但在它圆形山壁的底部还常有一个小小的中央峰。大环形山的直径可超过 200km ,最大的达 295km ,小的只是一个浅坑。直径在 1000m 以上的环形山有 3.3 万个,约占月球表面积的 $7\%\sim 10\%$ 。一般认为它

们大多是因陨星轰击造成的。环形山多以科学家名为名,较著名的有哥白尼、开普勒、第谷等,在月背面有5座直径几十千米的环形山以中国古代科学家命名:石申、张衡、祖冲之、郭守敬、万户。月面上也有类似地球上的高山和山脉,且常借用地球山之名,如阿尔卑斯山、高加索山等。最高的月山高9000m,与珠峰相当。有些月山还形成了长达数百千米的悬崖峭壁——月堑。月面上大片暗黑的区域称为“海”,实际是根本没有水的大盆地,可能是由早期月球火山活动的熔岩形成的。月海共有22个,其中15个在正面,4个跨占正、背两半球,月背仅有3个较小的海。最大的海称为风暴洋,面积达500km²。另一个月面特征是壮观的辐射纹,这是以环形山为辐射点,呈放射状向四方延伸的亮带。如第谷环形山有12条长亮带,其中最长的达1800km。

月球上没有大气层,仅有极微量的氦、氩等原子,其数密度为 $3 \times 10^7 \sim 6 \times 10^{10}$ 个/m³,比地球大气至少稀1万亿倍。因此月面上没有任何风云雨雪等气象现象,即使在阳光普照的白天,黝黑的天空中万千恒星依然十分明亮。月球上没有空气、没有水,当然不会有生命,是个死寂的世界。没有大气不会有散射光,所以月面上黑白反差特别强烈。月面表层物质的导热率很低。60年代佩底特(E. Pettit)和尼科尔森(S. B. Nicholson)用雷达测得月食前后其表面温度从71℃很快降至-79℃。月球上一昼夜长达1期望月,故白天、黑夜都长达2星期多,因而白天在阳光直射下的月面上,温度可高达130~140℃,而到深夜,则会骤降至-150~-180℃。

月球内部自外向内可分成壳、幔、核三大层。月亮平均厚65km,比地壳几乎厚1倍,月背面的壳层更厚,最厚处达150km,平均为80km。月岩主要有3类:富铝的斜长岩、富铁的玄武岩及含放射性元素和难熔微量元素的苏长岩,前2种分别是月陆和月海的主要成份,后者的分布较广。已发现的月矿有80多种,其中有6种矿物是地球上没有的。1968年美国的月球轨道探测器在绕月飞行时发现在月球内部有12个“月瘤”,又称“质量瘤”,实际是重力异常区,它们无一例外均位于正面的月海区域。月核较小,半径约700km,中心温度约1600℃,可能由半熔融的硅酸盐和硫化铁组成。处于中间的月幔呈刚性,因此月球没有地球那样的板块构造。登月宇航员的实测表明,月球没有明显的磁场,因而不存在磁层和辐射带。这也说明月球内部没有金属核心,但从月岩中有些剩磁可以认为,在月球形成后的某段时期,它也曾有过磁场。

10多亿年来,月球总体上并无多大变化。但50年代英、苏两国天文学家先后证实,月面上至今仍有一些局部的变化与活动。英国穆尔(P. Moore)将此命名为“月面暂现现象”(TLP),它包括:短暂的奇异辉光、突发的少量气雾、局部地区的色彩变幻、环形山的直径变化、突然出现或消失等。最早的记录可追溯到1178年。英国威廉·赫歇耳(F. W. Herschel)1783、1787年的两次观测报告使它引起广泛注意,1958年前苏联科兹洛夫(B. B. Козлов)成功地拍得了月面辉光的光谱。1969年7月,第1个登月的阿姆斯特朗(N. Armstrong)在登月前作绕月飞行时也见到阿里斯塔克环形山区域正在发出淡淡的荧光。多数人认为月面辉光可能是地球的潮汐力所致,而环形山的变化则与陨星的轰击有关。关于月球起源现已有4种理论:(1)潮汐分裂说。1880年英国乔治·达尔文(G. Darwin)提出了第1个月球起源假说,认为地球最早时的自转速度是现在的6倍,在太阳潮汐力和地球自转离心力的共同作用下,在现太平洋赤道区域分裂出一大块物质,它在空中慢慢形成了今天的月球。后来许多人进一步丰富、充实他的理论,如1936年怀斯(D. U. Wise)、1970年奥基夫(J. A. O'Keefe)等详细描绘了整个分裂过程,作了半定量计算,并推算出分裂物的初始质量为地球质量的10%。(2)俘获说。尽管具体的俘获机制,过程各不相同,但中心思想是,月球本是一个独立天体,只是在偶尔接近地球时才被俘获而成为地球的卫星。俘获说最早是格斯腾孔(H. Gerstenkorn)于1955年提出的,而目前最有代表性的则是瑞典电磁理论家阿尔文(H. Alfvén)60年代提出

的、70年代完善的理论。他认为,月球原来形成于火星区域,在7亿多年前,它运动到离地球17万km(相当于地球半径26倍)处时,由于共振作用而改变轨道,成为地球卫星,再逐渐演化为今天的月球。(3)共同形成说。现代太阳系起源星云说都认为地球和月球是同一块行星尘埃云凝聚而成的,但也有许多不同的流派,较有影响的有奥·尤·施米特(O. I. Шмидт)、鲁斯科尔(E. U. Ruskol)、奥罗万(E. Orowan)、灵伍德(A. E. Ringwood)、卡梅伦(A. G. W. Cameron)等。(4)大冲撞说。由于上述3种假设虽然都能说明不少问题,但也都有其难以逾越的困难,从1975年起开始出现新的观点,经过10多年的发展日趋成熟,1986年由美国本兹(W. Benz)、斯莱特里(W. L. Slattery)及卡梅伦等共同提出,认为在45亿前地球刚形成不久,一颗质量大约为地球14%的大星子以5~12km/s的速度与地球猛烈相撞,这不仅使原始地球的自转轴发生倾斜,也使大星子完全破裂,不少物质逃逸到太空,也有许多物质落向地球,而留于周围的物质则形成气体尘埃云,并进而凝聚成月球。由于这种理论可以比较满意地解释许多地、月特征,因而得到了越来越多人的支持。

参考文献

- 1 Alfvén H, et al. The Moon, 1972, 5: 210~215
- 2 Pasachoff J, et al. University Astronomy, W. B. Saunders Company, 1978, 383~398
- 3 Kaufmann W J. Exploration of the Solar System. Macmillan Publishing Co Inc, 1978, 236~288
- 4 中国大百科全书(天文学). 北京:中国大百科全书出版社, 1980, 528~531
- 5 Whipple F L. Orbiting the Sun. Cambridge, Mass., Harvard University Pr, 1981, 133~139, 301~303
- 6 Beatty J K, et al. The New Solar System. Sky Publishing Corporation, 1982, 71~82
- 7 戴文寿, 胡中为, 等. 太阳系演化学(下册). 上海:上海科学出版社, 1986, 46~67
- 8 Benz W, et al. Icarus, 1986, 66(3): 515~535
- 9 张明昌, 肖耐园. 天文学教程(上册). 北京:高等教育出版社, 1987, 206~225
- 10 Maley P D. Icarus, 1991, 90(2): 326~327

(南京炮兵学院张明昌教授撰; 宣焕灿审)

行星科学 planetary science 是天文学、地球科学、空间科学等多学科的边缘交叉新兴学科。它的研究对象是以九大行星为代表的太阳系天体,但不包括太阳。它的研究内容很广泛,从这些天体的内部到表层及大气的结构,从它们的形状、引力场、磁场与磁层、运动特性到组成物质的物理和化学性质,以及各种活动现象与演化过程。应用各种可用的技术方法,对这些天体进行地面和航天的遥测,对样品进行实验分析,取得实际资料,进而作系统的综合理论研究,以了解它们的普遍性质和演化规律及差别的原因,帮助更好地认识地球过去、现在和未来。从不同的侧重角度,常以“行星物理学”、“行星地质学”等来代表行星科学。

古代人已见到在众多的恒星之间游荡的5颗行星——水星、金星、火星、木星、土星,约在公元前140年,托勒密(C. Ptolemaeus)提出地心体系(或地心说),认为五大行星和太阳、月球都绕地球转动,这一体系长期被宗教利用来禁锢人们思想。1543年哥白尼(N. Copernicus)在《天体运行论》中提出日心体系(或日心说),论述了地球也是一颗普通行星;它一方面自转,一方面跟其它行星一样绕太阳公转,月球是地球的卫星,绕地球转动并随地球公转。这个日心体系就是太阳系。17世纪初,开普勒(J. Kepler)得出行星运动三定律。1687年牛顿(I. Newton)提出万有引力定律,随后哈雷(E. Halley)计算彗星轨道。17世纪初,伽利略(Galileo)开创望远镜观测天体,发现了木星的4颗卫星、金星的位相变化及月球表面特征。1781年赫歇耳(F. W. Herschel)发现天王星。1801年皮亚齐(G. Piazzi)发现第1颗小

行星——谷神星,随后又发现几颗小行星。海王星是1846年亚当斯(J. C. Adams)和勒威耶(U. J. J. LeVerrier)各自独立推算预言而由加勒(J. G. Gale)观测到的。冥王星到1930年才由汤博(C. W. Tombaugh)发现。太阳系的早期研究,主要是行星和卫星的天文观测和推算轨道、质量及大小、描述观测到的表面特征。19世纪中叶以后,随着天体物理学的诞生和发展,作了行星和卫星的物理观测和研究,从光度测量推求它的表面的反照率和温度,从偏振测量了解它们表面性质,用光谱方法测定它们的大气成分和自转周期,观测它们的红外和射电(无线电)辐射,研究它们的内部结构。

航天开始以来,太阳系探测进入黄金时代。自1959年首次发射月球探测器、1962年“水手”2号飞船飞掠金星以来,已有100多艘月球和行星探测器先后飞临除冥王星之外的各行星及其卫星系和哈雷彗星。同时,现代的地面望远镜也大力开展太阳系天体的多种观测。行星等太阳系天体不只是天文学的,也是地球科学(地质、地球物理、地球化学、大气科学)、物理学、化学、空间科学及生物学等的共同研究对象,从而新兴一门边缘交叉学科——行星科学。几十年来取得的太阳系资料远远超过过去几千年资料的总和,新发现纷至沓来,这些过去在望远镜中看到的模糊斑点,现在都展现为大千世界,使人们对它们的认识大为改观。下面仅举一些事例,人们现在可以看到过去从未见到的月球背景照片,先后有12名宇航员登上月球考察,采回380多千克月球样品作实验分析,绘制出详细的月球地质图,对月球演化历史的了解比地球演化史更清楚。水星表面象月球一样布满大小小陨击坑,全球收缩产生的叶状悬崖,表明水星和月球一样很早就已是地质上不活动的了。金星有浓厚大气,表面气压达90b,大气主要成分是 CO_2 ,很强的“温室效应”使表面温度高达485℃,浓厚的酸云笼罩其全球。金星自转方向跟地球自转相反,自转周期长达243d。号称地球姐妹行星的金星虽然在大小和质量上跟地球差不多,但其状况跟地球大不一样。火星表面南北半球有很大差别,南半球古老且多陨击地貌,而北半球是较年轻的火山单元多,几个盾形火山很大。火星上有巨大的“水手”谷系和许多干涸河床,两极地区有随季节变化的干冰(CO_2)极冠,火星大气稀薄却经常发生大规模尘暴。木星、土星、天王星和海王星的大气非常浓厚,大气主要成分是氢和氦而且其含量跟太阳大气相当,浓厚大气下部过渡到液态氢外层,却没有固态表面,呈现较差自转。这4颗行星的质量和半径都远比类地行星大,都有很强的磁场和很大的磁层。天王星和海王星的磁轴不仅跟自转轴夹角大(分别为57°和47°)而且偏离质心。这4颗行星各自都有很多卫星组成的卫星系,俨然是小规模行星系,各卫星情况不同,木卫一有正喷发的活火山,海卫一有冰火山(喷发 H_2O 、 NH_3)特征,土卫六有浓厚的富 N_2 大气,许多卫星上有大量陨击坑。这四颗行星各有不同的环系,打破了土星独有光环的旧观念。木星和土星内部高压条件下呈金属态。木星、土星和海王星都有内部热源,而天王星几乎没有热源。1978年克里斯蒂(J. W. Christy)发现冥王星的卫星,从而可算出冥王星的准确质量仅是地球质量的1/400,冥卫与冥王星的质量比为1/8,可谓之“双行星”。

每一行星和卫星的新资料,不仅有助于整个太阳系的认识,还启发对其他行星和卫星等的认识,尤其是帮助了解地球。行星及卫星等的比较研究是很有用的方法。1959年伽莫夫(G. Gamov)在《地球传》中首先使用“比较行星学”术语,他指出比较行星学会帮助更好地了解地球。1975年萨根(C. Sagan)列举了几个比较行星学实例(金星与地球的温室效应,火星与地球的古气候,类地行星和月球的陨击坑等)后说,比较行星学的最终目标有点象一个巨大的计算机程序,输入几个参数可导出完整的行星演化史。当然,实际情况极其复杂,离得出满意结论尚远,但比几十年前预想的要近得多了。地球经历了剧烈演变,其早期遗迹已丧失殆尽,而地球科学的很多重大问题(如大气起源、海陆起源)都要追溯其形成和早期演化,要了解地球的过去就需要借助比较行星学,尤其是类地行星和月球的比较研究,因为它们的演化程

度不同,保留下一些早期遗迹,从比较研究看出一些共同演化规律。例如,它们早期普遍经历过严重陨击,地球早期也应如此,只是这些陨击地貌已完全丧失了;金星的温室效应和火星的尘暴警告人类要注意地球的环境保护。

行星科学正处于发展兴盛时期。一系列新的空间探测计划已提出,有的正开始实施,1989年8月“麦哲仑”金星探测器进入环绕金星的轨道,它上面的成像雷达在10个月内完成了金星表面82%的扫描测绘,可分辨200m的细节,发现很多陨击坑、火山及构造特征,从1991年开始第2轮扫描,从而揭示金星表面真面目。1989年10月发射了“伽利略”木星探测器,将于1995年12月到达,环绕木星飞行,对木星及其几个卫星作2年半考察,还放下着陆器,首次穿入过去见不到的木星大气深处作一连串探测,它在1991年10月29日飞临小行星伽斯帕时,从1600km远拍摄这个大小 $18 \times 10\text{km}$ 、形状不规则小行星的多幅像。1990年10月发射的“尤利西斯”太阳探测器已摄得月球的X射线像。1990年4月进入空间轨道的哈勃空间望远镜的头3年项目中有50个属于行星科学,包括拍摄水星表面30km细节特征,观测金星高层大气,观测木星、土星和天王星及它们的卫星和环系,尤其是木卫一的火山活动,观测冥王星及其卫星、观测小行星的卫星等。还有火星探测、地球环境探测、彗星取样等计划,以及地面搜寻近地小行星、观测彗星等计划。同时,对已取得资料及将取得的资料进行广泛深入的理论研究。

参考文献

- 1 Cole G H A. Physics of Planetary Interiors. Bristol: Adam Hilger Ltd. 1984
- 2 Veverka J. Planetary Geology in the 1980s, NASA, 1985
- 3 格拉斯 B P 著. 行星地质学导论. 陈书田, 等译. 北京: 地质出版社, 1986
- 4 Kivelson M G. The Solar System (Observations and Interpretations). New Jersey: Prentice-Hall, 1986
- 5 Baugher J F. The Spaceage Solar System. John Wiley, Sons Inc, 1988
- 6 陈道汉, 刘麟仲. 现代行星物理学. 上海: 上海科学技术出版社, 1988
- 7 Beathy J K. et al. The New Solar System. Sky Publishing Corporation, Cambridge University Press, 1991, 3

(南京大学胡中为副教授撰)

行星的磁场和磁层

planetary magnetic field and magnetosphere 地球有其自己的磁场,称为地球的固有磁场。早在战国初期,中国就发明了指南针,利用地球磁场的特性来确定方向。地磁场可近似地看成是偶极场,有南、北两个地磁极,南地磁极位于南纬79°东经110°,北地磁极位于北纬79°西经69°。地球磁轴与自转轴有11°多的交角。在地面上,赤道附近的磁场较弱,磁场强度变化在29~40 μT 之间,平均为31 μT 。磁极附近磁场较强,北地磁极处为61 μT ,南地磁极处为68 μT 。目前,地磁场磁矩为 $7.9 \times 10^{21} \text{T} \cdot \text{cm}^3$,它每年减少 $4 \times 10^{18} \text{T} \cdot \text{cm}^3$ 。

地磁场强度向量 B 的水平分量 $|H|$ 、磁偏角 D (水平分量 H 与正北方向的夹角)、磁倾角 I (H 与 B 的夹角)合称地磁三要素。500多年前,个别地磁台就开始对磁偏角 D 和磁倾角 I 进行测量。1635年,Gellibrand发现磁偏角 D 随时间有长期变化。后来,发现地磁三要素均有长期变化。人们把地球表面上磁场水平分量 H 为0之处称为磁极或磁倾极,南北两磁极的位置在缓慢地移动。古地磁研究表明,在漫长的地质年代中地球磁场的极性已经历了多次来回变更。

太阳系九大行星中,水星、木星、土星、天王星和海王星也具有固定磁场。

1974~1975年,水手10号飞船曾3次对水星磁场作过探测,发现水星有较弱的固有磁场。它大致也是偶极场,磁矩为 $5.2 \times 10^{18} \text{T} \cdot \text{cm}^3$,是地球的1/1600。在水星表面上,赤道处磁场强

度为 $0.4\mu\text{T}$, 两极约为 $0.7\mu\text{T}$, 水星磁轴与它的自转轴有 12° 之夹角。

木星的磁场最初是由射电天文学家们得出的。木星有较强的射电辐射, 它主要分布于 10m 区和微波(分米波区), 在这两个波段上, 辐射是非热偏振的。 10m 区与木卫一的位置有关, 而微波辐射则是连续的, 有周期性的变化。由它的强度和偏振测量, 表明它是木星辐射带中相对论性带电粒子的回旋辐射或同步加速辐射, 这就说明木星有磁场。Carr 等人最先推算出木星的表面上大约有 0.7mT 的磁场。后来, Warwick 从木星的 10m 辐射得到木星的磁矩为 $0.4\text{T}\cdot\text{cm}^3$, 木星赤道面上的磁场强度约为 10Gs , 木星磁轴与它的自转轴约有 10° 倾斜。先锋 10 号和 11 号飞船 1974 年飞经木星附近时, 对它的磁场进行了测量。在远离木星处, 木星磁场呈偶极场, 磁场极性正好和地球相反。木星磁轴与自转轴之夹角为 $10^\circ.8$; 在靠近木星处, 磁场结构比较复杂, 在赤道面上, 磁场强度为 0.41mT , 在两极约为 0.8mT 。木星磁矩为 $1.4\times 10^{32}\text{T}\cdot\text{cm}^3$, 比地球大 170 亿倍。奇怪的是木星非热射电辐射所确定的木星自转周期和由木星内层大气所确定的木星自转周期不相同, 这意味着木星的磁偶极子相对于行星本身有进动。

先锋 11 号飞船飞经土星时, 发现它也有磁场。测量结果表明, 土星磁场是偶极场。磁矩为 $4.6\times 10^{24}\text{T}\cdot\text{cm}^3$, 比地球大 600 倍。土星磁轴几乎与它的自转轴平行。夹角只有 $0^\circ.7$ 。磁轴中心与土星中心有一点偏离。在土星的赤道上, 磁场强度为 $21\mu\text{T}$ 。旅行者 1 号飞船飞经土星时, 对先锋 11 号飞船的观测作了证实和修正。由它的观测证实土星磁场不完全是偶极场。在小于 10 个土星半径处, 观测到的磁场强度比偶极场的强度要小; 大于 10 个土星半径处, 观测到的磁场强度比偶极场的强度要大。

1986 年 1 月, 旅行者 2 号飞船飞经天王星, 发现它也有磁场。天王星磁场的磁轴与它的自轴转夹角为 55° , 磁轴中心与天王星中心偏离。

1989 年 8 月, 旅行者 2 号飞船飞经海王星, 发现它也有磁场。像天王星一样, 海王星之磁轴与它的自转轴夹角也较大, 大于 50° , 磁轴中心也偏离行星中心。如何解释这 2 个行星的这种磁场异常, 是一个很有趣的问题。

1962 年水手 2 号、1967 年金星 4 号和水手 5 号、1974 年水手 10 号、1975 和 1976 年的金星 9 号和 10 号等飞船, 相继对金星进行了考察, 均未发现金星有磁场。Russell 认为, 金星的固有磁场很弱, 只有 60nT 。更多的人认为, 金星根本就没有固有磁场, 是太阳风把行星际磁场吹到金星附近, 而形成的几 nT 的微弱磁场。

根据 1972 年火星 2 号和 3 号以及 1974 年火星 5 号宇宙飞船飞经火星时所得到的观测资料, Dolginov 等人认为火星有固有磁场。它基本上也是偶极场, 其极性正好与地球相反。磁轴与自转轴之夹角为 15° 。火星固有磁场的磁矩为 $2.5\times 10^{18}\text{T}\cdot\text{cm}^3$ 约为地球的 $1/3000$ 。在火星赤道上磁场强度为 60nT 。Russell 重新分析了火星 3 号和 5 号飞船的观测资料, 认为火星没有固有磁场, 所观测到的微弱磁场是太阳风吹达到火星表面的行星际磁场。这样, 火星上是否有固有磁场至今尚是一个谜。

* 冥王星离地球太远, 至今尚未有飞船去考察过, 不知它是否有磁场。

太阳系中至少有 6 个大行星具有固有磁场, 是什么物理机制来维持住行星的磁场呢?

行星是一个永久大磁铁的概念是无法被人接受的。行星内部结构研究表明, 行星的核心具有很高的温度, 超过那儿的居里点温度, 因而, 行星磁性无法长期保持。行星由于自转而具有磁性概念似乎没有任何说服力。现在被人们普遍接受的是发电机理论, 认为行星固有磁场是行星核或幔中导电液体的运动所造成的。行星中心放射性物质加热, 造成其液体的对流运动, 构成一个自激发电机。导电液体穿过磁力线运动时形成感生电流, 靠这个感生电流来维持行星磁场不衰减。行星发电机理论有许多具体

模式, 至今尚没有一种模式被人们所普遍接受。

当一个行星具有固有磁场时, 其附近的空间受到行星磁场的强烈影响。行星固有磁场同太阳风相互作用, 挡住太阳风前进的路, 在太阳风场中“挖开”一个腔。行星际磁场的磁力线被禁锢在这个腔内, 而太阳风则不能进入腔中, 这个腔区称为行星磁层。由于太阳风与行星磁场的相互作用比较复杂: 一方面, 小部分太阳风等离子体渗透进磁层; 另一方面, 行星磁场也不全禁锢在腔内, 有少部分磁力线和太阳风的磁力线联接起来。因此, 上面关于磁层的定义只能说是一种近似的定义, 要精确定义行星磁层是比较困难的。一般来说, 在向日面, 行星磁层的边界比较清晰, 此处行星磁场的磁力线与外面太阳风吹过来的行星际磁场的磁力线之间有明显的界线, 其界面位于太阳风的动压与行星磁场的磁压相等之处; 在背日面, 磁层的边界模糊不清。行星磁场的磁力线与太阳风中的行星际磁场磁力线连在一起, 形成结构复杂的磁尾。

磁层的边界称为磁层顶(简称磁顶)。向日面磁顶大体上呈半球形, 半球面的短轴指向太阳。背日面, 长长的磁尾延伸到很远很远。向日面磁顶的前面有一弓形激波面, 它是超过 Alfvén 速度的太阳风等离子体流与行星磁层相互作用而形成的。弓形激波面与磁顶之间的区域叫磁鞘。在行星磁层中等离子体的行为主要受行星固有磁场约束。行星磁层中等离子体有几个聚集的区域, 分别称它们为极尖区、等离子体层、辐射带、等离子体片、尾瓣和等离子体幔。等离子体幔正好就位于磁顶的内侧。磁尾赤道附近磁场为 0 处称中性片, 它将磁尾分成南北两个尾瓣, 两个尾瓣磁场方向正好相反。中性片的两侧是等离子体片。行星磁层不但有如此复杂的结构, 每当太阳活动激烈时, 它还要经受剧烈的扰动。

参考文献

- 1 George W. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1983. 11
- 2 中国空间科学学会编, 空间科学词典, 北京: 科学出版社, 1987
- 3 陈道汉, 刘麟仲著, 现代行星物理学, 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 243~338

(中国科学院紫金山天文台刘麟仲副研究员撰)

金星 Venus 从太阳向外数的第 2 颗行星。中国民间称为“太白星”或“太白金星”。金星是地内行星, 故有时为晨星, 有时为昏星。在中国史书上, 分别称晨星为“启明”, 昏星为“长庚”。除太阳、月球外, 它是天空中最亮的星, 最大亮度为 -4.4 等。普通人很容易用肉眼看到金星。

在天文学史上, 金星起过重要作用。1610 年伽利略用望远镜观测金星几个月后, 发现金星有如月亮那样的位相变化, 且观测到金星的视大小与其位相紧密相关。当金星呈现月牙相时, 它特别大; 几个月之后, 当金星呈现凸圆相时, 其圆面特别小。这一发现成了支持哥白尼日心说的有力证据。

金星同地球十分相似, 也是一个有大气层的固体球。它的大小、质量和密度都同地球非常接近。其平均直径为 6051.4km ; 质量为地球的 81.5% , 相当于 $4.87\times 10^{27}\text{g}$; 平均密度约为地球的 95% 。

金星的轨道实际上是圆形的, 金星自转轴几乎垂直于其公转轨道平面, 导致难以观察的季节性变化。金星没有卫星。金星总是全部被云层包围着, 而地球只是部分被云层所覆盖。金星上没有磁场, 也没有发现辐射带。根据金星模型, 它可分 3 层: 外面为 16km 厚的壳; 深度到达 3224km 的硅质幔; 半径为 2826km 的铁质核。金星幔的矿物成分与地幔的相近, 金星内部铁的相对含量与地球相同。金星的岩圈之下是否存在软流圈, 至今尚无定论。

直到 20 世纪 60 年代初期, 我们只能在地球上看到金星的云层顶部, 所以对金星的了解甚少。在可见光谱段, 看上去它是淡

黄色的天体,无表面特征。微波能穿透云层。前苏联和美国的科学家用跟踪卫星的射电天线向金星发出雷达波束,它很易穿透金星云层,并从金星表面反射回来。通过雷达回波,测出金星自转非常缓慢,自转周期243d,且是逆向的。从金星上看,太阳是西升东落。同时,利用雷达回波,推断出金星表面的一些特征。

进一步了解金星,只能依靠空间探测。前苏联和美国向金星发射的宇宙飞船数目不少于向火星发射的数目。其中水手2号,水手5号,水手10号,金星4、5、6号,金星9、10号,先锋-金星号,金星11、12号,金星13、14号,Vega 1、2号,金星15、16号以及麦哲伦(Magellan)宇宙飞船都对金星探测作出过贡献。1962年水手2号首次从金星旁边飞过,发现金星大气的温度高达670K,竟会比水星还要热。60年代末,水手5号,金星4、5、6号4次飞行带来金星大气更详细的资料;得到金星大气温度随高度而变化。在离金星表面65km处的云层顶部,温度高达230K,向下进入云层,随高度下降温度急剧升高。到金星表面,温度高达730K。除高温外,金星大气压强非常大;在50km高度处为101325Pa,在金星表面高达9.11925MPa。探测发现,金星大气几乎全由二氧化碳组成。还包括氧原子(O)、一氧化碳(CO)和分子氮(N₂)等。在金星较低层大气中,CO₂占了95.5%,分子氮占3.5%,只有1%是其他气体。

1974年2月,水手10号在飞往水星途中飞经金星,得到大量照片,看出金星云层的结构和金星大气中激烈的湍流。这些特征仅在紫外光谱中观测到,金星云或大气一定含有在紫外波段表现为弱吸收的成分,它可能是硫酸。从紫外波段观测到的一些暗带,推出高度50~70km上层云层浓密大气的自转速度比固体金星快6倍。1979年2月,先锋-金星号轨道器已证实这种超自转(Super-rotation);在上述高度相当于100m/s的风速。这种超自转也是逆向的,自转周期为4d。

• 1975年10月,金星9号、10号先后在金星表面着陆,向地球发回着陆点周围景致的照片;着陆点周围都是棱角分明的岩石。这两艘飞船也测量了金星表面的温度与压强,还测出金星表面的风速仅为3.5m/s。

1978年12月金星11、12号,1982年3月金星13、14号,1985年6月Vega 1、2号和1983~1984年金星15、16号8个着陆器以及先锋-金星号和1990年8月麦哲伦(Magellan)飞船等,对金星的探测主要集中在金星大气(成分、结构、温度、压强)、云层、金星地形和表面结构、金星电离层、金星闪电等方面,取得了丰硕成果和一些更精确更翔实的数据。

金星大气有两个特征:一是有很大的大气压强,表面温度极高;二是在47~65km存在云层。金星云的特征:雾的质量密度不超过金星大气几mg/cm²;雾粒的直径不超过10μm。金星云可分为3个层次,且覆盖整个行星。由于20km厚的云带,产生很大的光学吸收。在云层之上70~90km高度,存在光学吸收小100倍的薄雾层,是由直径0.25μm的硫酸粒子组成的。据新近的数据,得知金星大气中除CO₂外,还有水蒸汽、SO₂、CO、N₂、H₂S、CoS等成分。水蒸汽和SO₂作用形成硫酸。还发现,金星大气中水蒸汽、SO₂等成分浓度随高度而变化。

金星内能到达金星表面仅为0.6W/m²,到达金星表面的太阳辐射能为20W/m²。金星表面的高温主要是由于太阳能,而使金星表面处于730K高温的机制是金星大气的温室效应。水蒸汽、CO₂以及SO₂对红外辐射的不透明性,对温室效应作出了贡献。这些气体阻止入射光能到达金星表面,但也防止了表面辐射的能量散失到星际空间。在金星某一演化时期,金星低层大气层到达某临界温度,金星上的全部水和CO₂都回到大气中,使温室效应不可逆转。从那之后,表面温度从未降低到使温室效应中断。

金星大气环流和极区环流是金星大气的另一特征。大气纬向环流理论早在1960年由查理斯·波义尔(Charles Boyer)和亨利·卡米歇尔(Henri Camichel)观测到金星圆面暗斑而得到证实。现已查明金星大气超自转起始于10km高度,速度为几米

每秒,而在云顶(68km),速度可高达150m/s。超自转高度可达95km(在此高度,风速已降为零)。从着陆器得知纬向风的存在,且在云层之下产生垂直梯度。为解释超自转,人们假设角动量通过大气转移。风的垂直梯度能否保持超自转?小尺度的垂直湍流扩散也许会在数月内抵消较差自转。可是,由于存在子午方向轴对称的哈德雷(Hadley)环流,能补偿湍流扩散效应。同时,旋涡机制能平衡哈德雷环流引起的子午方向的传输损失。还发现,在高于96km高度上有热空禁区,而在赤道上有过热区,热量通过哈德雷环流由赤道流向两极。极区环流表明,最初认为在64km最高云层绕金星均匀分布的理论并不正确。在北极区存在显著的低气压;在北纬53°~70°,存在较暗的拱极区,对应较低温度(205~225K)。相联系的两个亮带形成偶极区,对应的亮温度250K,且自转极快,周期2.7d;且发现亮带云顶高度降低15km。

金星地形和表面结构是借助地面雷达和船载雷达用测高计得到的,只是它们的分辨率和可测的表面区域不同。先锋-金星号探测器以200m分辨率测过金星表面的93%。金星15、16号着陆器的分辨率为50m,可测到北极区。它们携带的综合口径雷达实现了1~2km的分辨率。现已发现,金星表面较为平坦,以6054.1km作为参考半径,70%的表面不会偏离500m。与70%的平原相比,有两个高地:阿芙洛蒂特(Aphrodite)高原和伊希太(Ishtar)高原,占金星表面的10%。低于平原的地形占20%,其上有近似圆形结构,很像月球盆地,不像地球上的海洋,因为高度差不超过3km。还有几个尺度较小的高原散布于表面各处:α、β、Alta和Phoebe区域。阿芙洛蒂特高原沿赤道伸展达9600km,大如非洲。依希太高原包括Lakshmi高原和与之相连的Freyja、Akna和Maxwell山脉。Maxwell山脉高出平原6km,其最高峰达11.1km,为金星的最高点。Maxwell山脉上有一直径100km、深度1.5km的陨击坑(Cleopatra Patera);其中心还有一个陨击坑,直径55km,深1km。这无疑是在撞击而成。在此陨击坑西部,有直径5~10km的连续陨击坑,延伸达数百km,散布在400km×200km的椭圆形区域。β区为一椭圆形高地,高5km,长2000km,位于北纬25°、经度280°。其上有两个规则火山结构:Theia和Rhea山系,形状如盾形火山。Theia基底300km,高出高地2.5km,周围为深峡谷,有年轻的熔岩流出的痕迹。β区和Phoebe区有暗槽,与非洲裂谷峡谷相似,表明金星壳已断裂。在依希太高原东西,到处可见大量的浅圆特征(200~600km),这些坑的成因还是未解之谜。北半球大约有150个直径10~40km的陨击坑,这种陨击坑在近赤道区也有,但较小的陨击坑不存在,可用大气屏蔽效应或分辨率不够高来解释。由这类陨击坑估计的表面年龄为10亿年。

金星上已识别出3个裂谷系:①从β区向西延伸至阿芙洛蒂特高原西端,长约20000km;②从Themis区起向西北延伸并穿过Alta区,长14000km;③在β区与Phoebe区之间沿南北延伸,长8000km。

从金星岩石中某些放射性元素铀、钍和钾的X射线光谱分析,以及其他元素如硅、钙、铁、镁和硫的X射线荧光的化学分析,加上对金星土壤照片的地球化学解释,使我们能对金星岩石分类,说明它们的起源,并了解发生在金星土壤中的化学和物理过程。

从所收集到的岩石取样表明,金星的岩石类型相似于玄武岩或介于玄武岩和花岗岩之间。某些岩石具有被新近的火山活动改变过的矿石成分。金星13、14号首次分析了金星土壤的基本化学成分,表明属硅酸盐性质。在β区和Phoebe区有熔岩流动的火山结构,是以其玄武岩成分的火成岩石为特征的。

金星表面经历众多的侵蚀过程。化学侵蚀是很重要的过程。金星大气中的H₂SO₄、HCl和HF,由于金星表面的高温高压,将与表面相互作用。在20~50km的SO₂浓度较高,可解释为火山事件频繁发生的结果。支持金星上有瞬间火山活动的另一种证据是金星11、12号检测到大气闪电。先锋-金星号飞船也观测到与闪电有联系的现象。

当前对金星研究的热点是:(1)Magellan 飞船等研究了金星的火山机制和陨击坑,探讨金星在地质上是个很活跃的行星;(2)金星电离层的结构和磁场;(3)继续探讨金星的地形结构和地质演化,以更高的分辨率描绘金星地形图等。

参考文献

- 1 Karfmann W J 著,何妙福译.行星和卫星.北京:科学出版社,1987.35~50
- 2 Audouze J, et al. The Cambridge Atlas of Astronomy. Cambridge Cambridge University Press, 1988, 2, 70~81.
- 3 Burkhardt G, et al. Astronomy Astrophysics Abstracts, 1991, 53A, 609~616, 1991, 54A, 592~601

(中国科学院上海天文台刘金铭编撰)

金星自转的动力学演化 dynamical evolution of the rotation of venus 在考察太阳系天体的若干特征时,人们注意到,大行星(特别是其中体积较大的巨行星)以及已测定出自转周期的一些小行星,尽管质量彼此悬殊,但是它们的自转周期却在几小时到一天左右,这种自转周期的相似性常称为“等周律”。另外,多数行星的自转方向与其公转方向相同(即顺向),也就是说,轨赤交角小于 90° 。由此可以推论,行星的自转状态与它的起源和演化有着密切联系。不过,与各行星自转具有共性的同时,也发现存在着不规则性的一面。在太阳系天体中,金星以其缓慢逆向自转而引人瞩目;它的自转周期等于243d,轨赤交角约为 178° 。这样一来,对金星自转动演化演化的探讨,就成了人们关注的一个课题,它在太阳系起源和演化的研究中也具有重要的理论意义。

长期以来,人们对金星自转的状况一无所知。这是因为金星被一层浓密的大气覆盖着,无法通过地面光学观测来确定它的自转周期。1959年11月当金星下合时,在美国成功地进行了第一次雷达观测,对观测资料的分析表明,金星的自转是极其缓慢并可能是逆向的。60年代初期,美国科学家曾对金星进行过一系列雷达观测,初步确定金星的自转周期约等于240d(逆向)。1979年美国夏皮洛(L. I. Shapiro)等重新处理了1964~1977年的雷达观测资料,定出金星的自转周期为 243.01 ± 0.03 d,轨赤交角近于 180° 。理论分析表明,如果自转周期等于243.16d,那么在金星每次下合时,都将以同一面朝着地球,这种一个行星的自转与另一个行星的公转相互制约的现象,称为会合共振。新的观测事实的出现,势必引起人们对这种罕见现象的成因进行理论探索的兴趣,1967年戈尔德里奇(P. Goldreich)和皮尔(S. Peale)建立了用来解释金星自转特征的理论模型。随后又有不少理论研究结果相继发表。

由于太阳作用在金星上的固体潮扭矩大约是地球对金星永久形变部分引力扭矩的100倍,因此在固体潮影响下,金星的原始自转将因潮汐摩擦作用而长期减慢,最终演化成自转周期224.701d,轨赤交角近于 0° 的轨道共振态(即自转周期和公转周期通约的状态)。显然,为了能对金星自转处于会合共振态做出圆满的解释,就必须找出在金星自转演化中起过作用的其他因素。大家知道,金星以其大气层的特殊结构而不同于其他类地行星,在金星自转的动力学演化中,金星大气热潮汐应扮演过不容忽视的角色。理论分析表明,与固体潮扭矩相反,大气潮扭矩对自转速率起加速作用,同时又使轨赤交角朝 180° 演化。除此以外,如果在金星内部的核与幔之间存在较差自转,那么通过核幔边界处的粘滞性摩擦作用,也会产生一个使自转变化的扭矩,它对自转速率演化的贡献与固体潮的作用相同,而对轨赤交角的影响却与大气潮相一致。由上述定性分析可知,在讨论金星自转的动力学演化时,必须综合考虑固体潮扭矩、大气潮扭矩、核幔粘滞性耦合作用,以及地球对金星永久形变部分的引力扭矩等的共同影响。

把金星的大气层和行星本体部分视为一个力学系统,该系统的哈密顿函数 H 可以表示为:

$$H = \frac{1}{2} C \Omega_p^2 + U_1 + U_2 + U_3 + U_4 \quad (1)$$

这里, C 为金星的极主惯性矩, Ω_p 为其自转角速率, U_1 为固体潮势, U_2 为大气潮势, U_3 为地球对金星赤道永久形变部分的引力势, U_4 代表核幔粘滞性耦合作用。其中 U_2 的计算涉及金星大气密度的潮汐振荡,为了估算出由 U_2 产生的大气潮扭矩,就必须对金星大气的状态进行实测,并建立适用于金星大气热潮汐的模型。因此,如何计算大气潮扭矩就成了建立金星自转演化理论模型过程中的主要难点。

自20世纪60年代以来,前苏联和美国对金星共发射了30个空间探测器,获得了大量有关金星大气基本状态的实测资料,用来建立温度场、压力场、和密度场在金星大气层中的分布。利用数值方法对决定大气潮的流体动力学方程组求解后,可得到金星大气潮中各主要潮波(半日潮和全日潮等)的振幅,然后按全球积分就能求出对金星自转演化有贡献的长期项分量。

金星自转角速率 Ω_p 和轨赤交角 β 的变率与哈密顿函数 H 的关系可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Omega_p}{dt} &= -\frac{1}{C} \times \frac{\partial H}{\partial \gamma} \\ \frac{d\beta}{dt} &= \frac{1}{C \Omega_p \sin \beta} \left(\frac{\partial H}{\partial \alpha} - \cos \beta \frac{\partial H}{\partial \gamma} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 α 为进动角, γ 为自转角。已知(1)式中的各项后,通过选配金星的有关物理参数(诸如极主惯性矩 C ,潮汐洛夫数 k ,核幔边界处的运动学粘滞系数,金星的品质因子 Q 等),易于对一阶线性微分方程组(2)式数值求解。

为了寻找能说明当前金星自转特征的某种机制,并探讨在45亿年期间金星自转演化的可能途径,1988年张承志等引进下述两条假定:(1)当前金星的自转已处于稳定状态,且该状态的时间尺度可取为10亿年左右;(2)金星大气是在约35亿年前形成的,此后它的物理和化学状态基本上保持不变。然后,利用变步长的七阶龙格-库塔方法对方程组(2)式数值求解,只要对数值计算中所需的若干参数选配合理,计算结果表明金星目前的缓慢逆向自转状态是长期演化的结果。金星的初始自转周期在 7^h-2^d 间(满足等周律);而初始轨赤交角落在 $90^\circ \sim 100^\circ$ 间,这也就是说,金星的逆向自转是具有宇宙成因的,而不是由顺向演化成逆向自转的。这些计算还表明,大约在距今10亿年前,作用于金星上的固体潮扭矩、大气潮扭矩,以及核幔粘滞性耦合作用已基本能相互抵消,因此通过地球对金星永久形变部分的引力扭矩可以把金星俘获到轨道共振态,目前金星仍处于这一共振态中。这就是说,上述理论研究对金星是否处于会合共振态做出了肯定的回答。但是,上述理论计算只给出了关于金星自转演化途径的某些可能的图象;遗憾的是金星自转的实测值毕竟与其会合共振的理论值相差约0.2d,这是否表明金星尚未进入(或已脱离)会合共振态呢?对金星在45亿年前形成后就是逆向自转又如何解释呢?看来,还有不少问题等待着今后的理论研究做出回答。

1990年夏皮洛等分析了美国阿雷西博天文台于1964~1983年对金星的雷达观测资料,求出的金星自转周期为 243.026 ± 0.006 d(逆向);自转极的位置是: $\alpha_0 = 272^\circ.25 \pm 0^\circ.09$, $\delta_0 = 67^\circ.10 \pm 0^\circ.09$ 。同时,斯莱德(M. A. Slade)利用美国戈德斯通射电天文台于1972~1982年的雷达观测资料,独立地得到金星的自转周期为 243.022 ± 0.003 d(逆向);自转极的方向为: $\alpha_0 = 272^\circ.816 \pm 0^\circ.14$, $\delta_0 = 67^\circ.218 \pm 0^\circ.05$ 。这些结果表明,不仅自转周期的测定值与会合共振理论值相差约0.15d,而且自转轴的方向既不平行于金星轨道角动量方向,也不平行于太阳系总角动量方向。鉴于上述两组数值符合甚好,这就使人们有理由对金星是否处于会合共振态提出怀疑。

继续提高金星自转矢量检测方法(包括地面雷达和空间探测)的精度,不断改进金星大气潮扭矩的计算方法和理论模型,将会对揭示金星自转的演化途径起积极作用。

参考文献

- 1 Goldreich P, Peale S, Astron J., 1967, 72, 662~666
- 2 Shapiro I I, et al. Ap J Lett, 1979, 230: L123~L126
- 3 Shen M, Zhang C -- Z. Earth, Moon, and Planets, 1988, 43: 275 ~287
- 4 Shen M, Zhang C -- Z. Icarus, 1990, 85: 129~144
- 5 Shapiro I I, et al. Astron J, 1990, 100: 1363~1368
- 6 Slade M A, et al. Astron J, 1990, 100: 1369~1374

(南京大学张承志教授撰)

火星 mars 中国古代又叫“荧惑”，它是从太阳向外数的第4颗行星。只有这颗行星，才能在地面望远镜中看到其固体表面。这颗略带红色的行星，有些特征与地球相似，是多年来寻找地外生命的星球。火星上也存在着稀薄的大气，表面气压仅约700Pa。20世纪50年代，柯伊伯(G. P. Kuiper)通过分光观测，确认火星大气的主要成分是CO₂，还有极少量的CO和水蒸汽。尘暴是火星大气中显著的现象，它是由火星低层大气中卷着尘粒的风构成的。大规模的尘暴几乎每火星年都发生一次。火星是一个三轴扁球体，两个半主轴为3394.6km和3393.4km。极半径比赤道半径短18km。火星的质量为 6.421×10^{23} kg，平均密度3.95g/cm³。铁约占火星成分的25%。火星有微弱的磁场，为地磁场强的2%。火星可能有金属铁核，是发电机机制的中心。火星内部可分成3个基本圈层：壳、幔和核。壳厚度150~200km，核幔交界的深度1600±200km。幔分为橄榄石带、过渡带和熔岩带。铁核可能处于液态，混杂成分是硫和铁。

1965年以前，只在地面上进行火星观测，包括目视、照相、分光、光电和偏振观测等。第1张火星图是1659年由Christian Huygens根据地面观测绘制而成。1867年Richard A. Proctor和1877年Giovanni Schiaparelli的火星图，是根据火星反照率绘制的。从18世纪末，天文学家就观测到火星表面的季节性变化。火星上有两个白色极冠，这与地球相似。它们在冬季扩大，在夏季缩小，甚至消隐不见。火星表面有一些深色暗斑，也显示出季节性变化。它们在火星红色土壤反衬下，呈现绿色，于是，人们联想到这可能是火星上的植被。从19世纪以来，曾猜测火星上有生命。

火星的自转周期24h37min，其赤道面与轨道平面的交角25°19'。火星绕太阳公转一圈(火星年)相当于687.98d(地球)。火星上也有四季变化。火星轨道偏率较大，每次冲日时它到地球的距离变化较大(5500~10100km)。火星在近日点附近的冲日，叫火星大冲，这是地球上观测火星的最佳时机。1877年火星大冲时，意大利人夏帕雷利(G. Schiaparelli)在火星表面看到一些纵横交错的线条，称它们为“canali”，后来误译成英文“canals”(“运河”)。当时，人们推测火星上存在着有智慧的生命。美国洛威尔(Lowell P.)，为此花费自己的财产在亚利桑那州建造了一个天文台，观测火星十几年，拍摄了几千张照片，绘制了几百条运河，主张火星上有生命。但是不少人持不同的见解。

直到1965年，一系列宇宙飞船探测火星后，才使这些长期有争议的问题得到澄清。探访火星的宇宙飞船有1965年水手4号，1969年水手6、7号，1971年水手9号和1976年海盗1号、2号等。水手4号从离火星不到10000km处飞过，发回22张远距离照片，揭示出火星是个陨击坑遍布的世界。它很像月球，只是火星上陨击坑的底部平坦，因时常发生风暴，底部填满了灰尘。火星上最大的陨击坑是海拉斯(Hellas)盆地，不很圆，长径和短径分别为2000km和1600km。1969年7月和8月，水手6号和7号对火星进行近距离观测。它们共发回200张照片，显示出火星上除陨击坑外还有丘陵地带和一些大平原。这3艘宇宙飞船的探测表明，火星是一处不毛之地。可是水手4、6、7号飞船仅从火星近旁飞过，未能再返回。1971年11月，水手9号探测器，每12小时绕火星一周，共向地球发回7329张照片。其上装有2架电视摄像机，广角摄像机的分辨率1km，窄视场的分辨率达100m。

同时，用紫外、红外光谱仪研究了火星大气的成分、温度和密度。红外光谱仪还测量表面的温度和物理特性。

水手9号发现火星极冠是由干冰组成的，是从火星大气凝结出覆盖在极区的CO₂。海盗1号、2号又探测出火星两极地区在CO₂雪层下面永久存在着由水冰组成的极冠。水手9号揭示出火星表面南北半球地形和地貌的不对称性。从地貌上看，其南半球是有大量陨击坑的古老地形，类似于月球高地，而北半球则是陨击坑稀少的年轻平原。从地形上看，南北半球存在高度差，北半球比南半球低些。位于北半球极冠周围的大平原，一般比南半球的古老地形低2~3km。火星两半球的不对称性对应于其外壳的厚度差。水手9号到达火星上空时，恰遇火星大尘暴。尘暴平熄后，拍摄到Olympus大盾形火山的照片，其底部直径600km，火山口直径达70~80km。它与另外3座大的盾形火山在一起组成火山群，聚集在赤道北侧的Tharsis地区。5000km之外还有一个火山群，位于Elysium地区。火星上的火山活动，几乎全部集中在北半球，而底部平坦的陨击坑，则大多位于火星赤道的南侧。水手9号揭示出一条大峡谷——水手谷(Valles Marineris)，长5000km，宽200km，深6km。它基本上平行于赤道。由火山和峡谷这些地貌特征，人们相信火星上从未发生过构造板块运动。水手谷或许是几十亿年前两个板块分裂留下的巨大裂隙。既然无板块运动，火星地幔深处的热斑便开始在同一地点将熔岩喷出到表面，形成少数大火山。水手9号发现了干涸河床似的地貌特征，这是最有争议的特征。火星上十分干燥，找不到水，怎么会有水流冲刷的痕迹。海盗号探测器找到了“失踪水”的去处。

1877年大冲期间，美国霍尔(A. Hall)首次在近火星处看到了两个微弱的亮点，他把这颗卫星取名为Phobos(火卫一)和Dimos(火卫二)，分别是“恐惧”和“惊慌”之意。水手9号第1次从近距离观察火卫一、火卫二，各得27张和9张照片。发现它们是两块凹凸不平、坑穴斑斑的岩石。火卫一的尺寸为27km×21km×19km，火卫二的尺寸为15km×12km×11km。两颗卫星都以同一侧面对着火星。

1976年海盗1号、2号探测器的主要目标是使两个自动站在火星上着陆。基本科学目标之一是试图回答“火星上是否有或存在过生命”。1号、2号飞船各有一个轨道器和自动站。海盗1号轨道器绕火星的轨道由远到近作过调整，由15000km到2900km。为自动站寻找着陆点，并尽可能飞近火卫一。海盗2号轨道器以极低的高度飞越极区，并近距离飞过火卫二。海盗1号、2号轨道器各工作了4年和2年，而1号、2号自动站各工作了6年和2年。两个海盗轨道器载有两架电视摄像机、红外光谱仪、热辐射计，得到了水蒸汽分布图、地面热分布图。两个自动站在下降过程中，研究了火星电离层和高空大气。一到火星表面，它们就分析了火星大气，进行了气象观测。最重要的是用照相机观测火星的景观，实时地分析火星表面取样。同时研究了取样的物理性质、矿物成分以及寻找可能存在的有机分子。还备有两架地震仪。海盗号发回50000多张照片，分辨率100~150m。由这些地形地势图标有千米级等高线和地名细节。海盗号在Tharsis区域周围发现大的火山构造，但这些火山今天已不活动。最壮观的是大盾形火山，底部达数百km，如Olympus、Elysium、Ascraeus、Pavonia和Arsia盾形火山。还有大量直径数百米的小陨击山。大多数火山集中在赤道的Tharsis区和北半球平原上的Elysium区。Arsia、Ascraeus和Pavonia3个盾形火山排成一行，形成Tharsis链，高度均达27km。盾形火山是液态岩溶连续喷射而成。Tharsis区的火山相当年轻。火山活动机制是岩浆和岩石间的密度差产生的水压。火山活动仅局限在Tharsis区和Elysium区。水手谷东端有洼地，巨砾，许多河床起源于此。西端有曲折的地堑。火星北半球平原上显出河床的网络，呈现出3类河床：径流河道、侵蚀河道和外流河道。径流河道表明在火星早期历史上有过气候潮湿的时期，发生过水流动现象。外流河道是由洪水泛滥造成的。洪水的起源仍有争议。火星两极最年轻，观测到成层结构。荧光光谱仪对大量土壤样本的分析，没有发现表征生命活动

的有机物。火星土壤起源于富镁、铁的熔融混合产生的岩石。火星岩石与地球岩石相比,富镁、铁、钙和硫,而钾、硅、铝含量较少。这种组分说明它们来自其幔部分熔融的物质。火星土壤含有磁性矿。磁赤铁矿呈橘黄色或淡红色,故火星土壤呈微红色。海盗号研究了火星大气和火星表面的变化,如大气中云的形成及演化,大气透明度的变化等。火星表面作为易挥发物质(特别是水和 CO_2)的贮存库是有效的;极冠中的干冰、地下冰(永冻土);水嵌在组成风化层的磁性物质结构中。表面物质对大气中水和 CO_2 气体的吸附机制亦随时间变化。大气中水蒸气浓度随地面位置、高度和季节而变化。在一些地区出现晨雾和夜霜,这是大气微粒(大气中尘埃、水和 CO_2 凝聚成的水冰晶粒)造成的。火星气象也有很大变化,如大气压和风的周日、半周日变化。最壮观的是季节性地形成大卷白云,主要在下午形成,发生在Tharsis地区,高度仅几千米,是山岳地形成因。火星云不如地面云壮观,可分成4类:对流云、山岳云、波动云和雾。

当前研究热点和今后探测计划:(1)继续研究火星的火山机制、构造地质和易挥发物质的演化。海盗号已否定火星上存在生命,可是有证据表明火星历史上有过大量的水和出现过潮湿而温暖的时期长达100万年之久,有人提出火星上有可能出现过原始生物。(2)1989年,前苏联Phobos-2号飞船以及前些年发射的Mar-2、3、5号飞船,研究了太阳风与火星的相互作用,发现了行星顶(planetopause),太阳风与火星中性大气间有电荷交换,使太阳风中的质子减少。火星偶极磁场受太阳风控制。发现了火星冕。(3)未来的探测计划有1996~2000年火星活动年。2001~2005年火星载人飞行准备。2006年火星载人发射。前苏联与西方合作的Mars-94/96计划,包括轨道器和一组下降舱:气球、小型自动站、穿透舱、小型活动车等。主要的目的是研究火星大气、地下水及表面氧化层。日本也拟于1996年发射planet-B到火星,探测火星大气、磁场和表面。

参考文献

- 1 Kaufmann W J 著,何妙福译.行星和卫星.北京:科学出版社,1987.88~111
- 2 Audouze J, et al. The Cambridge Atlas of Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 1988, 2: 124~151
- 3 Burkhardt G, et al. Astronomy Astrophysics Abstracts, 1991, 53A, 626~644, 1991, 54A: 612~622
- 4 Tomas D J, et al. Icarus, 1991, 93(2): 199~206
- 5 Breus T K, et al. Cosmic Res, 1991, 29(5)

(中国科学院上海天文台刘金铭编审撰,胡中为审)

彗星 comet 俗称“扫帚星”,这类天体多数沿扁长轨道绕太阳运行,离太阳很远时只是不大的“脏雪球”彗核,近时蒸发出的气体和尘形成外貌奇异的彗发和彗尾。彗星较好地保留了形成时期的状况,可作为“太阳系起源与演化”的考古样品。彗星陨落地球上,尤其早期陨落多,带来大量挥发物及有机分子,对地球大气的形成演化和地质变化有重要作用。研究彗星的性质和现象、其物理—化学过程、彗星跟太阳辐射及太阳风的相互作用有重要科学意义。

古代人偶然见到外貌奇异的彗星出现,感到惊慌和恐惧,看作是战争、灾荒等不吉祥的征兆,实际上,彗星的出现完全是一种自然现象,其本质逐渐被认识。欧洲人长期认为彗星是地球大气中的燃烧现象,中国古代就有了较正确的见解“彗体无光,傅日而为光,故夕见则东指,晨见则西指。在日南北,皆随日光而指。顿挫其芒,或长或短……”。1577年第谷(Tycho Brahe)测出当年一颗彗星比月球远。牛顿研究过1680年彗星的轨道。1705年哈雷(E. Halley)算出24颗彗星的轨道,发现1531、1607和1682年出现的3颗彗星的轨道相似,认为是同一颗彗星三次回归,并预言它76年后再次回归,果然应验了,它被命名为哈雷彗星,其实在历史上已多次看到它,以中国古书上的记载最早和最多。中国古书上记载为孛星、妖星、长星、彗星、彗星等的也是彗星,这些珍

贵记录至今仍有研究价值。彗星的早期研究主要是测定轨道和预报回归,描述和解释其形状。1836年贝塞耳(F. W. Bessel)提出彗星排出质点并受到太阳的辐射斥力,1903年勃烈基兴(Ф. А. Бредихин)发展成彗尾形状的力学理论。

19世纪后期出现照相术、测光术和分光术后,开始彗星的物理观测研究,例如,测定彗星亮度随其到太阳和地球距离的变化规律,从彗星光谱特征证认其化学成分等。虽然彗发体积有时比太阳还大,但它掩恒星时星光几乎毫不减弱,说明其所含物质极其稀少。彗星的主体是彗核,从观测资料推算出彗核质量一般为 $10^{10}\sim 10^{16}\text{kg}$,也有少数更多些或更少些。彗核很难直接观测到,从观测资料间接推算出彗核大小一般为几百米至十几公里,只有哈雷彗星由飞船近距观测得出其土豆形彗核大小为 $16\text{km}\times 8\text{km}\times 8\text{km}$ 。曾提出多种彗核结构模型,大致分两类:一类是“砂砾模型”,认为彗核是一团固体质点的松散集合体,直到1963年仍有人持此看法;另一类是“致密核模型”,认为彗核是整体的冰块或石块,这类模型中最好的是惠普尔(F. L. Whipple)1949年提出的“冰冻团块模型”,即彗核是由冰和尘冻结在一起的“脏雪球”。但是,对彗核的内部具体情况仍不完全清楚,有均匀与不均匀等看法。1981年德尔塞姆(A. H. Delsemme)综合多种观测资料,提出彗核的元素丰度模型,除氢、碳、氮的丰度小之外,其余主要元素跟宇宙丰度一致,主要化学成分是 H_2O 和 CO_2 冰及尘埃。彗核表面的蒸发是不均匀的,有时从某个小区域抛出物质“喷流”并发展成“包层”或“晕”,惠普尔和塞卡尼纳(Z. Sekanina)等由这些近核现象的观测资料推算出50多颗彗星的自转周期,一般为几小时到几天。

彗发光谱的分析研究表明,彗发中有尘埃、原子、分子和离子,有些是从彗核直接蒸发出来的母分子(如 H_2O 、 CO_2 、 CO 、 HCN 、 CH_3CN),有些是母分子解离的子分子(离子、原子),其中有地球条件下不稳定的“基”分子(如 OH 、 NH)。太阳辐射对彗星的物理—化学过程起重要作用。霍布诺(W. F. Huebner)等计算了彗星中上百种反应过程和彗发结构模型。史瓦西(K. Schwarzschild)等提出,彗星分子吸收太阳辐射并再辐射(荧光过程),产生彗发光谱的发射线。德尔塞姆等研究了彗核的蒸发理论,利用彗星亮度观测资料,可求出蒸发率。哈舍(L. Haser)、费斯托(M. Festou)等提出分析彗发亮度的理论模型。1968年比尔曼(L. F. B. Biermann)预言彗星有巨大的“氢云”(或H彗发,发射L_α辐射),从1970年始在一些彗星的空间观测得出证实,氢云半径达 10^7km 。1968年芬森(M. L. Finson)和普洛斯坦(R. F. Prostein)发展了贝塞耳——勃烈基兴理论,用彗星的等亮度线资料可求出彗星尘埃的大小分布、尘埃和气体的流出率,一般为 $10^5\sim 10^7\text{g/s}$ 。

彗星常出现几条彗尾,按弯曲程度分为I、I和II型。光谱分析表明,弯曲的I、II型彗尾主要由尘埃组成,现常称作“尘埃彗尾”,II型彗尾更弯曲是由于尘粒大、受到斥力小的缘故,斥力的本质是太阳的光压,彗星尘受到的斥力可达太阳引力的2倍多。直的I型彗尾由离子气体(CO^+ 、 N_2^+ 、 CH^+ 等)组成,故又称作“气体彗尾”、“离子彗尾”、“等离子体彗尾”,离子受到的斥力可达太阳引力的几十倍到百倍以上,无法用太阳光压解释。1951年比尔曼为解释I型彗尾而提出推测,认为太阳流出带电粒子流给彗星离子很大斥力,这种粒子流就是后来空间探测到的太阳风,因此,等离子体彗尾是太阳风的“天然探测器”。

1967年比尔曼等首先研究太阳风与彗星的相互作用,以后发展为内容丰富的当代重要课题,彗星的形貌类似于“地球磁层”,太阳风与外流的彗星气体相遇而形成弓形激波面,离彗核约 10^6km ;在此激波面与彗核之间还有接触间断面,离彗核约 $10^3\sim 10^4\text{km}$,分开近彗核的纯彗星等离子体与外面的太阳风—彗星混合等离子体。在混合等离子体区发生复杂的等离子体过程和现象。I型彗尾常出现多种大尺度现象:尾射线、扭折、螺旋和波结构及断尾事件等。阿尔文(H. O. Alfvén)提出,太阳风磁力线遇到彗星阻碍发生悬挂而呈折叠伞状,从而受磁场约束的彗星等离子

体流形成尾射线并向尾轴折转。布兰德(J. C. Brandt)等提出,太阳风磁场扇形边界经过彗星折叠时,边界两侧极性反向的磁力线重联,使原来彗尾断开并远离;叶水焯等认为,断尾事件是高速太阳风造成彗星等离子体不稳定性结果,焦克斯(K. Jockers)等提出,太阳风的变化导致彗尾扭折。布兰德、门迪斯(D. A. Mendis)等分别用各种等离子体不稳定性解释螺旋和波结构。

彗星每次回归都蒸发损失掉物质,一般损失掉0.1%~1%。多布罗沃尔斯基(O. B. Добровольский)等得出,彗星回归几百到几千次后就耗尽了。彗星还会发生爆发和分裂,因而其寿命有限。彗星散落的物质成为行星际物质,彗星尘形成彗星轨道附近的流星群,地球穿过流星群时出现流星雨。

迄今已观测到1600多颗彗星,1950年奥尔特(J. H. Oort)作了彗星轨道统计研究,提出在离太阳3万到10天文单位有球层式的彗星库——奥尔特云,估计那里有千亿颗彗星,走近的恒星扰动某些彗星,使其轨道改变而成为进入内太阳系的“新”彗星。最近又提出可能存在较近的内奥尔特云及柯伊约(Kuiper)带。

哈雷彗星1985~1986年回归时进行了大规模国际联测,从地面到空间,从可见光到紫外、红外及射电波段作了多种观测,并有6艘飞船莅临探测,取得大量资料 and 发现。例如,首次见到彗核真面目,其形状不规则,表面象煤一样黑,象陀螺一样又转动又进动;发现多种原来未知成分(如 H_2O^+ 、 N_2H_4 、 C_2H_2 、 NH_3);微尘很多,有富含CHON尘,有富H或C的类球粒陨石尘,有富含Si、Mg、O、Fe尘;测量了磁场和多种等离子体现象;观测到多次爆发和喷流及彗尾大尺度现象,验证了以前的某些推测和理论,解决了某些争议又提出很多新问题。哈雷彗星的大量成果标志彗星的观测研究进入新时代。彗星现象丰富而复杂,需要开展更多更深入的观测和理论研究,已提出用飞船采彗核内部样品等计划。

参考文献

- 1 Wickning L L. Comets. Tucson, University of Arizona Press, 1982
- 2 Swamy K S K. Physics of Comets. Singapore, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1986
- 3 Mendis D A. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1988, 26, 11~49
- 4 叶水焯, 吕保维主编. 空间物理学进展. 成都: 四川科学技术出版社, 1988. 1~88
- 5 McNally D. Reports on Astronomy, 1991, 21A, 137~149
- 6 Newburn R L, Neugebauer M, Rahe J. Comets in the Post-Halley Era. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1991

(南京大学胡中为副教授撰)

流星观测 meteor observation 流星体是太阳系内物质,流星是流星体与地球大气分子撞击而产生的发光现象,因此通过观测流星,既能为太阳系起源、演化、结构等理论课题提供实测数据,又能为地球大气、空间参数和宇航等应用研究提供有价值的信息。现代的流星观测有目视、照相、雷达、电视及直接测量等方法。

目视 指用肉眼直接观测或用望远镜观测。目视观测自古以来有着丰富的记录。在公元前16世纪中国就有“帝癸十五年,星孛行,夜中星陨如雨”的记载。在20世纪30年代以前,观测流星大都用目视,取得不少成绩。如18世纪末,由双站测定出流星高度和速度。1833年的狮子座流星雨,使人们发现了辐射点。根据目视观测结果,研究了流星的物理特性、流星群结构、轨道演化,建立了流星与彗星的亲缘关系。

肉眼一般可看到亮于5等的流星,用望远镜可看到更暗的,且精度高,但视场小。观测时记录内容有时间、地点、观测者、流星出现时刻、星等、方位、仰角、颜色、路径、持续时间、快慢、归属(属哪个流星群,或是偶发流星)、特性(爆发、分裂、余迹)等。由

这些数据确定流星数随星等的分布、出现频率、空间密度、流星群辐射点位置和位移、弄清新辐射点及失踪流星群的搜寻等问题。

为了协调全世界的流星观测,1989年10月成立了国际流星组织IMO,该组织于1990年4月公布了目视流星观测规范。IMO建有目视流星数据库,存储各国目视流星观测结果。我国也参加了IMO,并报送了一些资料。

照相 第1张流星照片是1885年在布拉格拍得的。1894年W. L. Elkin在耶鲁天文台开始基线照相观测,首次成功地在相机前安装了旋转快门,于1899年拍得了有间断点的流星余迹。这一方法后被研究者普遍采用。由于流星现象的视差效应显著,因而基线照相是很有价值的。就是在距离较远的两点同时观测高度为80~100km的同一区域,两点间距离以30~40km为宜。

为测流星速度在镜头前装设的旋转快门,是一个有切口或叶片的圆盘,以恒定速度旋转,周期地遮住相机镜头(每秒几十次),使照片上的流星余迹有一系列断口。所拍得的流星数与相机口径、焦距及视场大小有关。要求相机光力强,视场大,底片灵敏度。用瞬间露光法可得“精细”的流星像。在镜头前装棱镜或衍射光栅可得流星光谱。为提高效率,可用由多个相机组成的装置,以便扩大所拍照的天区。

比金星(-4等)还亮的流星叫火流星。用一般方法拍照流星飞过的机会非常之少,为扩大记录火流星的可能性,采用增加相机视场和扩大覆盖天区的方法,即建立火流星网。目前,欧洲、美国、加拿大及英国等设有火流星网,有近百个观测站,覆盖流星区面积达数百万平方公里。

雷达 流星余迹能反射电波,因此可用雷达观测。它与目视、照相、电视等方法的本质区别在于后者记录的是流星本身辐射的能量,而雷达记录的是流星余迹散射或反射雷达站发射的电磁能。虽然流星本身也能发射电波,但太弱。非常强的雷达能“看”到直径达米数量级的大流星体,但这种情况极其稀少。另一方面,即使非常小的流星体,它所产生的离子尾也往往长达几十千米,用中等功率的雷达就能观测到回波。

20世纪30年代早期,在研究电离层时,人们发现电离密度在短时间有不寻常的增高,看起来是突然出现的大量电子引起的,有人把它归因于流星。在1931年及1932年狮子座流星雨期间,美国A. M. Skellett发现电离层有很强的骚动,其极大与目视观测流星结果符合。1945年,英国J. S. Hey和K. A. Stewart首次用雷达观测流星,并由3座雷达站的资料测定了流星群辐射点。从1946年开始就用这种新方法进行系统的观测了。这年10月天龙座流星雨更进一步推动了雷达观测。在欧洲与北美,对这个流星雨除用目视和照相方法外,还用了第二次世界大战时的雷达,发现很多回波爆发。欧洲观测到的峰值与北美的极大符合,并首次用雷达测量了流星速度。自50年代以来,一些发达国家都非常重视用雷达研究流星,其中心在美国,还有加拿大、原苏联、英国、法国、日本、澳大利亚、新西兰、瑞典、捷克和印度等。1980年根据全球流星系统观测纲要,进行了内容广泛的研究。1982年建立了全球流星雷达观测网。

为了避免电波湮没于各种电离层现象,并避免穿透流星余迹,雷达工作频率以30~60MHz为宜。现在世界上有30多部流星雷达在运行,其发射类型有两种,即脉冲式和连续波式,每小时最小检测的流星数从十来个到数百个。用雷达测量流星余迹,是详细研究流星区大气情况,如风速、风向等的一个方法。近来,利用流星余迹通信也重新受到重视。

电视 是由光电观测发展来的。光电设备反应快、强度大,这为捕捉变化不定的流星提供了诱人的前景,但它分辨率低,因此人们想到把电视技术与光电转换技术结合起来。70年代出现了CCD和SIT等高感度像元件,能够检测出远为微弱的光,因而在天文上得到广泛应用。

1960年末,在美国天文年会上, J. Spalding和C. L. Heimenway首次报告了由电视系统所记录的流星观测结果。以后又有加拿大、英国,70年代苏联和80年代日本等都相继开展了

流星的电视观测。

电视系统的优点是星象对比度好,分辨本领高,可以观测到相当宽的光谱区,记录流星星等可达+7到+8等,流星光谱达+3到+4等。

完整的电视装置是由摄像机、通信电路和接收机(电视机)组成的。但一般摄像机是在明亮光照条件下拍摄的,而天文观测大多在黑夜,因此一般摄像管的灵敏度不够,必须有亮度放大设备。这就是图像变换器,由它把光学上的像转换成电信号,经放大后再转换为光学像,使亮度扩大 $10^3\sim 10^4$ 倍以便可对其录相和进行电视监视。电视方法能够观测到比照相方法亮3~4个星等的流星,记录时刻精度也较高,便于测定流星的视速度,省去了底片冲洗过程,开辟了用计算机直接对录相带进行自动处理的可能性。

直接测量 微流星体(质量小于 $10^{-7}g$)由于面积/质量比很大,进入大气时达不到熔化程度,因此不发生流星现象,只能在高空对它们直接测量。探测内容有各质量段流星质点群密度的估计、速度向量的测量、流星物理化学性质等,可检测到质量为 $10^{-11}\sim 10^{-15}g$ 的小流星质点,这在地面上是无法进行的。

直接测量是由装在火箭、人造卫星或航天器上的传感器记录流星体撞击情况的。用于探测的传感器有多种,如压电传感器可将流星体撞击产生的振动转换为电脉冲,由脉冲振幅可估计出流星体质量;流星体撞击障碍物时伴有闪光,可由光传感器记录下来;电击穿传感器由厚度十几微米的线圈组成,撞击时打断路,可由测量仪器记录下来。

由直接测量得到了直到火星轨道和木星轨道的微流星体分布的信息。特别一提的是发现了两组微流星体,它们相对太阳的轨道性质不同,一组质量很小(小于 $10^{-13}g$),在太阳光压作用下沿双曲线轨道运动,另一组质量较大($10^{-12}\sim 10^{-7}g$),以螺旋状轨道趋向太阳。

流星研究是当代活跃学科之一,从发展趋势来看,下述问题有待提高:(1)提高观测精度,增加每次观测所得资料数;(2)尽量实现观测过程自动化和资料处理自动化;(3)为了得到更丰富的资料,观测点要多,分布范围要广;(4)扩大国际间协作,观测方式、内容、目标纳入国际合作纲要,采用统一的规范。

参考文献

- 1 Mckinley D W R. Meteor science and engineering, 1961, 5~104
- 2 长识工, 神田泰, 东京天文台报, 1986, 20(4): 595~603.
- 3 杨克俊, 陕西天文台刊, 1989, 12(1-2): 21~33
- 4 Ralf Koschack, et al. W G N, 1990, 18(2): 44~58
- 5 Ralf Koschack, et al. W G N, 1990, 18(4): 119~140.

(南京紫金山天文台舒英发高级工程师撰)

流星天文学 meteor astronomy 是流星研究学科的一部分,是天文学的一个分支。它研究流星体的绕日运动,研究各大行星和太阳辐射对这种运动的影响,探讨流星体与彗星、小行星等母体的关系,研究流星体轨道的分布状况、剖析流星群内部和太阳系流星物质综合体的结构,包括流星体按质量大小的分布比例等。通过以上研究增进人们对行星际固体颗粒的来源、演化过程和分布状况的了解,不但有益于太阳系的总体研究工作,而且有益于估算地球轨道附近以至太阳系深远空间的固体颗粒分布状况,为宇宙飞行器的轨道设计提供环境资料。

中国古代天象记录中载有大量流星资料。但流星的本质曾被长期错认为从地面上的燃烧发光物。牛顿(I. Newton)、赫拉德尼(Э. Хладни)等关于流星来自地外空间的正确观点得不到公认。1833年,壮丽的狮子座流星雨震惊了科学界,人们看到成千上万的流星从天空中同一点辐射出来,这才相信流星是来自地外宇宙空间的物质,这才诞生了流星天文学这门学科。但是,流星体主要是来自太阳系内部还是来自太阳系以外的星际空间,仍是一个长久争论的问题。在20世纪30年代,以厄匹克(E. J. Opik)

为首曾认为大多数偶发流星以及某些流星群具有双曲线形的日心轨道,因而是来自太阳系以外的物质。到50年代,随着流星的精密照相资料和雷达观测资料的积累,人们才得出结论:绝大多数流星体具有椭圆形的日心轨道,因此都是太阳系内的物质;至于具有双曲线形轨道的外来流星体,如果确实存在的话,也不会超过百分之二的比例。

自20世纪50年代以来,通过列文(Б. Ю. Левин)等人的理论工作和雷达观测以及空间探测资料的积累,对于地球轨道附近流星体的分布,已经给出了定量的模型,估计出地球平均每年接受的流星物质总量可达16 000t。至于整个太阳系的流星体分布,1955年惠普勒(F. L. Whipple)开始提出理论模型。由于迄今所观测的流星体,绝大部分是其轨道能与地球交会者,这只占太阳系流星物质的一小部分,对于太阳系深远空间的尘粒分布,还需通过黄道光观测和空间飞行器探测等手段,在今后进一步探究。

流星群是沿着母体彗星或小行星的日心轨道运行的平行或接近平行的颗粒流。它们与地球交会,便在地球大气层中形成流星雨。在一定日期出现的较强流星雨,现有20多个。流星群对地球的质量注入总量并不占重要地位,例如,两个常年最强流星雨,双子座流星雨每年注入15t,英仙座流星雨每年只注入2.6t。但它们在每年的几星期或几天内集中注入,有的流星群且富有火流星,因此对宇宙航行和地球环境有重要影响。流星群的起源和演化的主要概念早在19世纪就已形成。某些流星群轨道与彗星轨道相似,启示了流星群的彗星起源。1799和1833年,极强的狮子座流星雨恰在母彗星回归的年份出现,比拉彗星在1846年分裂而在下一个回归年份转变为仙女座流星雨,都进一步证明流星群起源于彗星。至于流星群形成与演化的力学机制,首先归功于惠普勒在1951年给出了尘埃颗粒从彗核喷出时的速度表达式。由于初始速度的微小差异,这些颗粒在继续运行中逐渐扩散到彗星轨道的越来越长的区段上,乃至整圈轨道上,形成封闭的环状颗粒流。这些颗粒还因大行星的引力摄动和太阳光压等非引力摄动而进一步演化。自50年代以来,许多作者进行了动力学计算,与流星雨观测事实做比较。所用方法分两大类:一是取流星群的平均轨道进行计算;二是取流星群中一批典型的流星体做为代表,分别计算它们各自的运动,然后加以综合。两类方法都得到了与观测相符合的很好结果。因此可以说,流星群形成与演化的动力学骨架已经建立起来了。但按照威廉斯(I. P. Williams)1989年的看法,在以下几个问题上,还待今后取得进展:(1)流星群轨道精度及轨道表述方式问题——要进行动力学计算,考虑大行星引力、太阳光压等摄动因素,首先要测定流星体的实际轨道或流星群的平均轨道。但有些流星群至今没有测得足够精确可信的轨道,例如麒麟座流星群。甚至连著名的宝瓶 η 流星群的轨道,近年来也在重新测定中。此外,以象限座流星群为例,其中有的流星体轨道半长径是2AU,还达不到木星轨道,而又有的是8AU,其远日点远达土星轨道以外,所受行星引力摄动大不相同。这样,用平均的概念来表述流星群轨道,对于动力学计算是不合适的,这就要求改革流星群轨道的表述方式。(2)流星群演化的动力学模型问题——流星体分布在彗星轨道的不同区段上,当大行星接近彗星轨道某一区段时,只有这一区段上的流星体受到较强的引力摄动,其他区段上的流星体,在长时间内也许会经受同样的引力摄动,也许始终经受不了。因此,把同样的摄动加于整个流星群的做法,有时是不适宜的。威廉斯建议用假想母体经受摄动而把尘粒喷撒在略微不同的轨道上的模型来取代流星体经受摄动的模型。(3)强流星雨(或称流星暴雨)的形成条件问题——彗星在一次回归中喷撒的尘粒,在较短时期(例如彗星绕日运行的几圈)之内,还来不及扩散开,而在彗星本体附近的轨道区段上形成稠密的尘粒区域。当地球穿过这种区域时,会出现很强的流星雨,例如狮子座流星雨、天龙座流星雨以及1991年和1992年英仙座流星雨的短时间爆发。按照惠普勒1951年给出的速度表达式,较小尘粒的喷出速度较大,所受太阳光压的影响也

较大,故半长径较大,因此较多分布在彗星本体后方轨道外侧。狮子座流星雨证实了这一点,但理论计算所得数量规模与观测事实尚有不符。反之,天龙座流星暴雨却是在地球穿过彗星轨道内侧时出现的。(4)双子座流星群的形成机制问题——双子座流星群是长期以来引人注目的强流星群,因为它的近日点比水星更近太阳,且长期未能找到它的母体。1983年,格林(S. F. Green)发现了它的母体,竟是一个小行星(3 200 Phaethon),这就使它更加引人注目。关于这个小行星怎样撒出大量物质而形成强大的双子座流星群,在机制的解释上存在困难,以至3 200 Phaethon本身究竟是小行星还是已死的彗核,也还在争论探讨之中。

参考文献

- 1 Whipple F L. *Astrophysical Journal*, 1951, 113: 464
- 2 Lovell A C B. *Meteor Astronomy*. Oxford Univ Press, Chapters XI & XX, 1954
- 3 Whipple F L. *Astrophysical Journal*, 1955, 121: 750
- 4 Yeomans D K. *Icarus*, 1981, 47: 492
- 5 方仁,等. *天文爱好者*, 1987, 11: 22
- 6 Williams I P. *Asteroids, Comets, Meteors* ■. Proceedings of a meeting held at Uppsala, 1989. 585
- 7 Brown P, et al. *WGN*, 1992, 20: 192

(紫金山天文台徐品新研究员撰)

地球物理学

大地测量学 geodesy 是确定地球的形状、大小和重力场,建立和维持国家与全球三维地面控制网,研究与地面点位和地球重力场随时间变化有关的地球动力学现象的学科。

通常将大地测量学的任务划分为科学的和技术的两类,其主要的科学任务是确定地球形状参数(即它的形状和大小)与重力场以及它们随时间的变化。所谓地球形状的概念是多义的。现代通常把地球的真实形状理解为它的自然表面,即大陆地面和无干扰的海洋表面,但在科学研究和实际应用中,传统上将大地水准面作为地球形状的定义,它是和无干扰的海洋表面相重合并延伸到整个大陆下面的一个重力位水准面。为了建立地球坐标系,还必须确定一个足够简单的能充分代表地球形状的数学近似面作为参考面。最方便同时又具有确切物理意义的是地球椭球,它是一个和大地水准面相接近的旋转椭球。所谓地球重力场是由地球的引力和地球自转产生的离心力之合力所形成的力场。确定地球重力场同研究磁场和其它物理场一样,实质上是一个地球物理学问题,但是考虑到大地测量学是从综合的数据处理中同时确定地球形状的参数和地球重力场元素,而后又利用这些参数和元素解决大地测量的许多理论的和实际的问题,所以研究地球重力场也就成为大地测量学的基本科学任务之一。所谓地球动力学现象,是指在地球内部及其表面所进行的物理过程的作用下地球的岩石圈板块产生缓慢的运动,地壳产生弹性应力,地球表面发生形变,地极发生移动,地球自转速度发生变化等等现象,所有这些现象都会引起地面点位置和地球重力场随时间的变化。因此大地测量学的另一个基本的科学任务是利用大地测量方法获得以上这些现象的客观定量数据,用以探索其力学机制,进而掌握其发生和变化的规律,预测其发展趋势,这将导致更正确地理解大地构造过程,确定海平面升降,准确地预报地震灾害和全球性气象活动,查明地球内部构造和物质分布,寻找有用的矿藏等等。

大地测量学的主要技术任务在于建立全球的和区域的高精度大地测量控制网,所谓区域控制网,是指一个地区或一个国家的天文大地控制网(通常是二维平面控制网)、水准网(即高程控制网)以及重力网。这几种控制网之间相互联系相互补充。综合采用由这些网所得到的天文大地、水准和重力等观测数据可以在统一的地区或国家坐标系中确定地面点的位置(即水平坐标和高程),以及表示地球形状和重力场特征的诸元素。这样建立的高精度大地测量控制网,是将点的水平坐标和高程视为互不联系的元素从两种控制网分别测定,分别处理。事实上水平坐标和高程是一个有机的整体,它们相互之间是有联系的,所以现在总是建立全球的和国家的精确三维地面控制网,在这个网中点的几何位置是用一个以地球质心为原点的空间直角坐标系中的三维坐标来表示。为了建立和进一步改善大地测量控制网,要解决大量的科学技术问题,其中包括采用最新大地测量科学技术成就建立高精度大地测量控制网的有科学依据的理论和方法;将大地测量控制网可靠地固定在地面上并能长期保存的手段和方法;为建网进行高精度天文、大地、水准、重力以及其它种类观测所需要的最完善的方法和精密仪器;为确定外界因素对天文、大地、水准、重力等观测数据的影响所采用的最有效的手段和方法;为采用这些观测数据推求地面点高精度水平坐标、高程以及地球形状和重力场参数的有效的、严密的数据处理理论和方法。大地测量的科学和技术任务互相之间紧密相关,不知道地球形状和重力场参数就不可能从数学上严格地根据各种不同的大地测量观测数据推求地面点在统一坐标系中的坐标,相反地,为了研究地球形状及重力场则必需有统一坐标系中的大地测量控制网。

在17世纪以前,大地测量只是处于萌芽状态。公元前3世纪,亚历山大人埃拉托斯特尼(Eratosthenes)在地球为球形假设之下首先应用几何学中圆弧上一段弧长所对应的中心角同圆的半径的关系估计了地球的半径长度。由于圆弧的两端大致位于同一子午圈上,所以以后在此基础上发展为子午弧度测量。公元724年,中国唐代的南官说等人在张遂(一行)的指导下,首次在今河南境内实测了一条长约300km的子午弧,这是人类试图测定地球大小的初步尝试。这种把地球当成圆球的弧度测量一直延续到17世纪,而且相应地在研究方法和仪器技术方面有了重大进步。1589年丹麦的布腊海(Brahe)提出三角测量的原理并为荷兰的斯涅耳(W. Snell)所应用,1611年出现了开普勒(Kepler)望远镜,开始了三角测量光学仪器的发展。

在16和17世纪,由天文学和物理学产生的一些新的概念和进行的观测,使人类对地球形状的认识有了较大的突破。继牛顿(I. Newton)于1637年发表万有引力定律之后,荷兰的惠更斯(Ch. Huygens)于1690年在其著作《论重力起因》中,根据地球表面的重力自赤道向两极增大的规律得出了以物理学观点为基础的地球外形为两极稍扁的扁球体的论断。到1743年,法国的克莱洛(A. C. Clairaut)发表了《地球形状理论》,创立了以他的名字命名的定律。这个定律是可按重力测量结果计算出地球的扁率,这就成功地吧物理学和大地测量学两方面的理论综合起来,建立了地球形状为椭球形的理论根据。

到18世纪初,为了满足精密测图的需要,继法国之后,欧洲的其他国家也都先后开展了弧度测量工作,并把布设方式由沿子午线方向发展为纵横交叉的三角锁或三角网,因此这种工作不再称弧度测量,而称为天文大地测量。中国清代康熙年间(1708~1718)为编制《皇舆全图》,曾实施了大规模的天文大地测量。

19世纪起,许多国家不仅为了推求地球椭球的大小和形状,更主要的是为测制全国地形图的工作提供大量地面点的精确位置,相继开展了全国的天文大地测量工作。为了检校天文大地测量的观测数据,消除其间的矛盾,并由此求出最可靠的结果并评定观测精度,法国勒让德(A. M. Legendre)于1806年发表论文《论最小二乘法》,由此产生了测量平差。1828年,高斯(C. F. Gauss)在《曲面通论》中提出了椭球面三角形的解法,以此在椭球面上推算大地坐标。由于天文大地测量观测精度不断提高,这时把地球当成椭球的假设已经不够了,也就是说不能忽略与测量相关联的地球重力场的垂线同椭球体法线之间的偏差,这种偏差使得天文大地测量结果出现远远超过观测精度的不符值。直到19世纪中叶,为了确定地球椭球的大小,在进行大量的测量平差时把这种由地球的物质引起的并具有系统性成份的垂线偏差当作观测值随机误差进行处理。德国赫尔默特(F. R. Helmert)根据大地测量学的定义并引用大地水准面建立了现代的地球形状的观念,从此在计算地球椭球参数和推算椭球面上的大地坐标时均应顾及垂线偏差的影响。目前使用的“大地水准面”这一术语,是由李斯廷(J. B. Listing)1872年提出的。确定大地水准面形状的重要理论是1849年英国斯托克斯(Sir. G. G. Stokes)提出的斯托克斯定理。根据这一定理,可以利用重力测量结果研究大地水准面的形状,但它要求将地面上的重力测量结果归算到大地水准面上,这就必须已知地球内部的密度分布,这是比较困难的。大约100年后,为了解决斯托克斯定理在理论上的困难,1945年前苏联的莫洛斯基(M. C. Моисеенский)提出了直接利用地面重力测量数据严格确定地球自然表面而无需归算到大地水准面上的理论,这就避免了要已知地球内部的密度分布问题,这个理

论称为莫洛斯基定理。利用这种理论,可把大地测量的地面观测值准确地归算到椭球面上,使大地测量成果不致带有由于归算不准确而产生的误差。

1957年,前苏联第1颗人造地球卫星发射成功之后,利用卫星观测理论和方法完成大地测量学的科学和技术任务成为现实,这就形成了卫星大地测量学,使大地测量学发展到一个崭新的阶段。近十几年来,由于地球动力学、地震预报、国防科学以及其它科学发展的要求,卫星大地测量学由最开始对卫星进行摄影观测发展到1964年美国海军武器实验室建成“海军导航卫星系统”,它是一种卫星多普勒定位技术。为了快速而精确地测定地面点的坐标,1973年美国国防部正式开始组织海陆空三军,共同研究建立新一代的卫星导航和定位系统的计划,这就是“授时与测距导航系统”,通常简称为“全球定位系统”(GPS),它用于大地测量,具有定位精度高、观测时间短、操作简便、全天候作业,并可提供全球统一坐标系的三维坐标等特点。与以上卫星导航定位技术发展的同时,激光测卫(SLR)和甚长基线射电干涉测量(VLBI)等空间测量技术开始出现,由于它们可以高精度测定地心坐标和空间距离而得到迅速的发展。另外利用卫星雷达测高技术测定海洋大地水准面的起伏也取得很好的成果。鉴于以上这些空间测量技术不只局限于对人造卫星进行观测,所以卫星大地测量学现在演变成空间大地测量学。

有了空间大地测量学这一新的分支学科,再加上惯性测量(INNS)、电磁波测距以及声纳等新技术的应用,使大地测量学提高了观测精度,缩短了观测周期,扩大了跨越范围,从而为研究地球动力学现象开辟了广阔的和更为可靠的新信息源。同时由于观测精度的提高,为了以厘米级精度解释观测结果,必须从大量各类的观测结果中分离出各种动态效应,建立它们的数学模型,并进而找出它们的激发机制,为此,必须了解地球内部构造及其动力学过程,于是又形成了动力大地测量学。

与大地测量学中新的观测理论、观测方法和观测结果相适应,大地测量学的数据处理呈多向性发展趋势。函数模型进一步向严格、统一、精确、动态化方向发展;估计原理出现了质的飞跃;新的数学理论与测量数据处理理论互相渗透,导致许多新的分析理论和计算方法的出现,例如在函数模型方面出现了整体大地测量和非线性模型等,而在估计原理方面出现了一种源于最小二乘而又回异于最小二乘的新的“抗差估计”原理。近年来,由于数学理论不断发展,许多新的数学方法也不断被引入到大地测量数据处理中,例如方差分量估计、样条函数、有限元法以及快速富里哀变换(FFT)和哈特莱快速变换(FHT)等。

大地测量学今后发展的方向是:(1)空间大地测量学的各种手段向着有利于地壳运动监测的方向发展,继续研究如何提高精度,扩大空间尺度和降低费用;(2)采用地面的和空间的多种手段获取地球重力场的各种信息,研究提高确定地球重力场参数的精度和分辨率;(3)进一步发展大地测量学的理论,包括边值问题理论和相对论效应等;(4)研究大地测量学在地学领域中的应用,例如对板块大地构造学说的贡献、海平面的上升以及地震预报等。

参考文献

- 1 Пеллинен Л П 著.大地测量学.丘其宪、宁津生、管泽霖译.(理论大地测量学).北京:测绘出版社,1983
- 2 Torge W 著.大地测量学.周琪杰、薄志鹏译.北京:测绘出版社,1984
- 3 Яковлевич В.В. Геодезия. Москва, Недра, 1989, 5~9
- 4 胡明城.全国大地测量学术讨论会论文集,1989,6:1~4
- 5 胡明城.大地测量论文集,1989,10:78~81
- 6 Moritz H. 地球形状——理论大地测量学和地球内部物理学.陈俊勇、左传惠译.北京:测绘出版社,1992
- 7 陈俊勇,宁津生,胡建国,等.地球科学进展趋势,发展战略研究.1992,12:53~66
(武汉测绘科技大学宁津生院士、晁定波教授撰,金标仁教授审)

探地雷达技术 随着探地雷达的应用领域迅速扩大,它要求探地雷达系统具有更高的分辨率,更大的穿透深度,能够提供更多的地下信息,仪器更轻便等等。雷达技术也有长足的发展,在硬件方面,出现了更高频率的天线、变频天线、多道雷达系统、三维雷达系统等;在软件方面,雷达数据的处理软件也日益完善,为解释人员提供了高信噪比、更清晰、更直观的图件。

变频天线具有改变中心频率的能力,因此整个雷达系统可以根据现场工作情况随时调整工作频率。此外,应用变频天线还有其它一些优点:使整个系统更加轻便,在体积小而轻便的天线上可发射出较低频率的信号,利用各种频率进行扫描,不但可以得到更丰富的地下信息,还使薄层的识别成为可能。

雷达信号的发射电路一般只能输出固定形态的脉冲,这个输出脉冲经过天线,以宽频带并具有一定的辐射特性和中心频率的电磁波脉冲形式辐射出去。因发射信号的中心频率与天线的尺寸有关,所以为了改变发射脉冲的频率谱,可改变天线的尺寸。由于辐射脉冲包含较宽的频率成分,而其频率成分与脉冲的宽度有着密切关系,因此通过改变发射电路输出脉冲的宽度,从天线辐射出去的电磁波脉冲信号的中心频率就会发生变化。变频天线就是根据这个原理设计的。

多道雷达系统可以同时多个天线进行操作,每道既可接相同频率的天线,也可接不同频率的天线。每一道的参数可单独设置,也可统一设置。多道雷达系统克服了单道雷达系统在面积性扫描中的缺陷,并可实现时间倾角扫描叠加技术,也使地下目的体高质量三维成像的实现成为可能。多道雷达系统一般有两种工作方式:(1)顺序方式,即逐道扫描。所得到的各道扫描用以一次完成探测范围的扩大,或者可叠加到一起,以提高系统的性能。在采样过程中,各道采样在时间上是错开的,以保证相邻道信号不相互干涉。(2)同步方式,即各道同时扫描。利用时间延迟器延迟各道信号的发射和接收,可以形成波束,这种波束具有几个较好的特性。发射信号的波形是随辐射角变化而改变的,因而,接收信号的方向可以通过接收信号的波形形态推断出来,如果所有道同时接收,则只有在孔视方向上信号才能得到加强,而离开孔视方向,信号就会迅速减弱,直到表现出为单个天线的信号分量。另外,按特定的几何形态排列天线,有可能形成可控制或聚焦的复杂雷达信号。研究表明,聚焦的程度是单个天线间距离的函数。

三维探地雷达是J. K. van Deen等提出的一种雷达系统。这种雷达系统目前仍处于研制阶段。该雷达系统以多道雷达系统为基础,以大量的模型为核心,模型刻划了天线与地下介质的耦合情况。J. K. van Deen等将三维探地雷达总结为如下几个要素:(1)反映电磁波在地下的传播以及天线和界面耦合的模型控制整个系统;(2)根据模型的反馈信息,现场联机设置有关信号形成和数据采集等参数;(3)在测量过程中,可现场联机显示二维横截面图像;(4)综合横截面的信息,形成地下三维图像。他们还从硬件、处理软件和模型3个方面提出了一个发展战略。在硬件方面,采用隔离技术改进天线,使发射信号较少受地表影响。另一方面,发展脉冲形成系统,这种系统可根据反馈信息对脉冲的形成进行控制。在处理上,第1步需要构造一个物理聚焦算法,以形成二维横截面;第2步则将已有的地震偏移软件移植到探地雷达的处理系统中;第3步是改进偏移处理算法以便进行三维偏移处理。在模型方面,则要构造一个模型,以满足控制数据采集过程中设置参数的需要。模型的发展与脉冲形成器的发展是并行的,形成的模型常可验证聚焦法及二维和三维偏移算法。

探地雷达系统的软件分两种。一种是控制软件,用于控制仪器,这种软件随着系统硬件的发展而不断更新。另一种是处理软件,包括带通滤波、频率一波数($f-k$)滤波、偏移和反褶积等。处理软件的发展主要还处于移植地震处理的阶段。

带通滤波可以滤掉信号中的低频振荡和高频噪声等成分。水平滤波则可以消除背景噪声。滤波器的参数主要根据对反射信

号宽度和子波长分析而设定。由于信号和噪声一般可在一维空间重叠,但不会同时在频率和波数二维空间上都发生重叠。因此, $f-k$ 滤波效果更好。另外, $f-k$ 滤波还可以消除由于地表类点状反射体和测量装置引起的斜反射。总的说来,滤波处理对消除雷达数据的噪声是比较有效的。反褶积是一种特殊的滤波方法,它可以消除天线的瞬变和多次反射,提高数据的垂向分辨能力。但是 Pekka Maijala 却指出,由于地下介质的复杂性和噪声影响,反褶积处理的效果较之原始数据并没有较大的提高,并且反褶积处理中还存在着寻找适当的处理参数问题。当然,对于简单的层状结构物,有可能得到适当的参数,从而获得较好的处理结果。Maijala 还认为,反褶积处理只有助于 GPR 剖面上半部分的解释。偏移处理是用于消除在数据采集过程中引起的畸变的二维成像处理方法。这种畸变是由于天线具有一定的辐射波束宽度,造成似点状反射体所出现的剖面上双曲线形态,并使斜界面比真实的更倾斜些,偏移可以把双曲线两叶上的能量回归到顶点上,偏移方法对于地下介质比较均匀的雷达剖面,有较好的效果。但对于一个长的雷达剖面来说,由于地下介质在侧向和垂向方向上都有较大的变化,偏移处理的实用价值还是有限的。

(中国地质大学左峥嵘撰)

三维速度结构研究 地球结构是地球物理学的一个重要的重要的基本研究内容,其中地震波速度结构是这类研究中最重要的一方面,因为在所有地球物理方法中,地震学能够提供最高的分辨能力,而且也描述地球内部结构的细节提供最大的潜力。地球结构的问题,人为地分为两类:“平均”地球性质的研究和横向不均匀性的研究。有关“平均”地球性质的研究主要是需要致力于更好地确定断面附近波速和密度的变化。断面处这些性质变化的知识,对于阐明地球内部化学组成的径向变化是至关重要的。众多的研究表明,在地球的绝大多数地区,其横向不均匀性是如此重要,以致地球对称的模型只能认为是一种数学抽象。横向不均匀性的研究同地震成因及其预测的研究有关,它不仅关系到震源图像,而且直接影响到能否进行有意义的地震预报。横向不均匀性研究成果,为地球动力学、岩石学和地球化学的研究提供了急需的关键数据。三维速度场可描绘出地幔对流的瞬态图像。地学中的许多基本问题可能取决于解决介质特性横向变化的能力。

全球尺度的三维速度图像研究,最有影响的工作是美国 D. L. Anderson 和 A. M. Dziewonski 两人的研究,他们试图解决一些仍有争议的基本问题。尽管所得到的结果由于条件所限仍不尽人意,但却具有重要意义。例如:(1)100~150km 深度的图像与地表已知的构造特征明显相关,洋中脊是低速区,大陆地盾(加拿大、西伯利亚、非洲、澳大利亚)为高速区,古老洋盆的速度也为高速。波速异常比只根据温度解释的结果要大些,这表明在此深度下必然还有一些尚未确定的矿物成分或地幔熔融程度的变化。(2)揭示了 300km 深度以下直至核幔边界的一些鲜为人知的特性。结果表明,那种认为表面构造决定深部物质性质的假设应予放弃,地表构造与深部物质的相关性到 200km 深度已有显著变化。(3)Dziewonski 和 Clayton 等各自得到的结果表明,最大的速度异常出现在核幔边界附近,这些结果对地幔对流的流型可能会产生重大的影响。

大尺度的三维速度图像研究,最早是日本 Hirahara (1977) 对日本岛和日本海的研究,使用了 20 个中深度源地震在 330 个台站记录到的 3 500 个 P 波到时,分块尺寸为 $2^{\circ} \times 2^{\circ} \times 100\text{km}$,用 ACH 方法研究了该区直到 650km 深度的三维速度结构,主要结论是:(1)清楚地识别出对应于太平洋沉降板块的高速区,特别在北本州弧。(2)中源和深源地震都发生在沉降板块 100km 厚的上部。(3)沉降板块内的高速随深度从 +5%~6% 降到 +2% 不等。1980 年 Hirahara 又根据这 20 个中、深源地震在日本台站记录到的 1 286 个 P 波到时和 232 个国外台站得到的 2 292 个 P 波到时(分块尺寸为 $1^{\circ} \times 1^{\circ} \times 100\text{km}$ 或 $1^{\circ} \times 1^{\circ} \times 50\text{km}$),采

用相同的方法重新解释。主要新发现是,沉降的太平洋板块相对于周围的低速区板上部速度对比尖锐,板片下部表现为过渡特征。

另一个著名的大尺度工作是 Romanowicz (1980) 对西欧上地幔的研究。她使用了 1964~1973 年间 114 个台站 ($30^{\circ} < \Delta < 100^{\circ}$) 上记录得到的 1 157 个 P 波到时,平均分块尺度为 $5^{\circ} \times 5^{\circ} \times 250\text{km}$ 。由于第 1 层深度为 (0~250km),不可能给出 Moho 面等的变化,但各层的平均数值仍然有意义;其主要结果是:(1) 250km 深度以上,波罗的海地盾速度最高,而阿尔卑斯最低。(2) 450~700km 深处的速度在地盾下再次达最高值,并向大西洋方向衰减,但在阿尔卑斯却相当平缓。地盾和地台下 500~600km 深度范围内的高速正像在北美和欧洲观测到的那样,可能具有普遍性。

刘福田等对中国大陆的研究也得到了一些有益的结果,主要是:(1)揭示了中国大陆及其邻近地区的地壳和上地幔速度存在明显的横向不均匀性,这种不均匀性直到下地幔 1 100km 深度处还依然存在。上地幔的速度图像同地表已知的地质构造特征的相关性可追踪到 110km,从 220km 以下很难找到它们之间的明显关系。(2)45~*km 和 45+*km 深度处的速度图像鲜明地显示出,中国的地壳厚度大约以 102.5°E 为界分为两部分,其东部地壳薄,厚度小于 45km;西部有一条自若尔盖—松潘 (34°N, 102.5°E 附近) 向北西沿 38°N 往西至塔里木盆地南缘的分界线,其南部除滇西南之外,整个青藏高原的地壳厚度都大于 45km,北部除天山山脉之外,地壳厚度一般不大于 45km。(3)110km 深度处的速度图像表明,速度异常呈块状分布。同中国大地构造分区略图比较后发现,其中扬子准地台和塔里木地台对应于高速区,中朝准地台则大都表现为低速异常;华南褶皱系为低速区,青藏高原南缘喜马拉雅和冈底斯念唐古拉褶皱系则表现为高速异常。(4)220km 深度处的速度图像表明,中国大陆相当多的地区软流层有明显的显示。(5)同 45~*km 和 45+*km 的速度图像一样,400km 和 600km 的速度图像都表明,102.5°E 附近约 200km 宽的条带为中国大陆东西两部分不同构造单元的分界。400km 深度处的图像显示出,分界以东的低速带其走向为北北东和南北向;以西的低速带其走向为北北西和东西向。这可能意味着,在地表观测到的地球物理场(例如,重力场和区域磁场)的类似走向特征,具有很深的构造背景。600km 深度的速度图像则显示出,分界以东为高速区,以西为低速区。这些可能表明,中国大陆东西两部分的构造差异存在于整个上地幔。

为了进行比较,刘福田等还研究了日本岛弧—弧后系的三维速度结构。同 Hirahara 相比,结果如下:(1)研究区域所表现出的横向不均匀性直到下地幔还仍然明显,这种不均匀性不仅出现于海洋与大陆的不同构造之间,也出现在各构造单元之内。(2)日本列岛具有 7.6~7.7km/s 的异常上地幔,70~110km 深度处的速度值仍然明显低于平均值,显著低速的地区都伴有高热流值,静冈—系鱼川构造带 (ISTL) 是其构造差异的分界,以它为界,日本东北和西南在速度结构上差异明显。(3)就岩石层的厚度而言,日本海基本上可以分成两大部分:靠岛弧一侧的厚度不大于 70km,靠大陆一侧的厚度不大于 110km。(4)菲律宾较为复杂,四国海盆的岩石层厚度不小于 70km,九州—帛琉海岭东西两侧的结构差异显著,其过渡特征直到 400km 深度仍然明显。(5)将不同深度范围的地震投影在相应深度的速度图像中,结果表明,它们都分布高速带内,即高速带与熟知的深源地震面一致,对应于俯冲带。垂直于日本海沟轴的纵剖面的速度图像清晰地勾勒出消减的太平洋板块的形状,俯冲带内的速度值比它周围的地幔平均约高 5%~8%。根据俯冲板片的几何形状可见,俯冲板片下插于地幔各个不同圈层时其倾角是不同的,它先以极小的倾角离开海沟下插至靠洋一侧的陆坡,然后以 30°左右较陡的倾角俯冲至本州之下,再以 25°左右的角度较平缓地俯冲穿过软流层和上地幔过渡带。如果认为位于下地幔的板状高速体即是俯冲板片,那么,它则是以 48°以上的倾角抵达界面沉降的。(6)成像结

果显示出,在海沟会合处,不同倾向的高速带为低速区所分割,这表明平行于海沟轴的俯冲带很可能在此严重变形甚至断裂。(7)成像结果还表明,太平洋板块沿各个海沟的消减方式可能明显不同;在伊豆一小笠原海沟,俯冲带以大于日本海沟处的倾角下插至110km深度,220~400km深度未发现相应于俯冲带的高速带,直到535km深度高速带才重新出现,这同现有的观测事实是一致的。观测表明,在150~300km深度几乎没有地震发生,看来下插板片像是在俯冲过程中边破碎边下坠。

区域尺度的三维工作要比前两个方面的结果多得多。由于区域尺度的研究更注意细结构,因此所选择的地区大都在台阵或台网密集之处。利用台阵数据研究精细尺度横向速度变化图像的一个例子是美国南加州。南加州台阵在400km×500km范围内布设有200个台站。在此研究中,水平分块为30km×30km,垂直分块为50km。从地表至500km深度,先用200个地震的约1万个P波到时。结果表明,横向往山岭下方高速(3%)物质的岩板在东边下延至250km深度处。这一异常可能是近500万年内,在San Andreas断层大拐弯处岩石层消减的佐证。这是有关无震岩板的首次详细报告。利用同一地区的160个数字化记录台站的数据,Hearn和Clayton用反投影法根据30万个 P_p 波到时和6031个 P_n 波到时,分别重建了上地壳和下地壳的速度图像,清晰地勾画出主要的地壳分块。结果发现,上地壳的横向速度变化与地表构造特征密切相关;在San Andreas、San Jacinto和Garlock断层两侧存在明显的速度差异, San Andreas断层系引人注目地成像在图上; San Jacinto地块有逆掩在浅滑脱面上的Mojave物质。 P_n 波到时的层析成像得到了莫霍面起伏的新信息。表现出与上地壳有显著差异,但未显示出同地表断层的明显相关,这意味着上、下地壳基本上是解耦的,可能是由于脆性的上地壳与韧性的下地壳对构造和均衡应力响应不同所致,滑脱断层一定在分离地壳中起了重要作用。

在中国,自1986年发展华北地区的三维速度图像以来,区域性的研究有了长足的发展。刘福田等利用天然地震数据对华北、南北带、华南和四川等地的研究取得了一些有意义的结果。

随着高性能、宽频带数字化台网的建立,面波数据可用于反演速度和Q值。由于面波通道得到良好而又合理的制约,所以频散和衰减数据本身就很方便地用于层析型分析,采用分区的方法可以确定直到软流层的三维速度和Q的横向变化。有关区域性面波的分析研究可以提到如下实例:(1)利用位于欧亚地区的6个SRO台站得到的43个地震的15~250s周期的Rayleigh波频散数据,得到欧亚大陆深至300km的三维剪切波速度分布。(2)Suetsugu和Nakanishi(1987)利用60~200s周期的Rayleigh波频散数据研究了太平洋上地幔的三维速度图像。结果表明,上地幔150km深度的速度下方低速2%~4%,边缘海的横剖面速度特征各不相同;白令海在100km深度上方、300km深度下方低速1%~2%,150~250km深度则高速1%;菲律宾海和日本海在50~150km深度表现出类似的速度变化。边缘海150km深度以下的高速同地震活动性密切相关。(3)非洲是一个古老的大陆,一个时期以来始终是地球动力学讨论的对象。Hadiouche和Jobert(1988)利用WWSSN、GDSN、IDA和GEOSCOPE台站的记录研究了非洲大陆的三维面波速度,结果表明,克拉通区从西北到东南为高岩石层速度,直至200km深度,西北地区仍为高速,而在此深度东南地区则表现为低速;红海明显低速,且向西扩展深达150km;非洲地壳厚度差异明显,从大陆东部红海附近的20km到中部刚果克拉通的36km。

在中国,宋仲和等利用面波频散数据,全面地研究了中国大陆和东北、华南和东部海域以及青藏地区的三维速度图像。徐果明等发展一种球面Radon变换的方法并用于面波研究,他们从21个台站的近2000张记录中选出107条Rayleigh数据反演了中国东部的结构。

三维速度结构的研究,特别是地震层析成像技术的应用,使绘制地球内部速度的横向变化图像成了近年来地球物理学中一

个关键的研究内容,特别是大动态宽频带三分量数字记录。这一时期的研究表明,要为板块构造和地球动力学,诸如大地构造和地幔对流这样的问题提供直接的地震学证据将是一个长期的目标,这至少要从3个方面去努力;首先,密集的良好空间分布的体波和面波记录是这一研究的根本保证。第二,开展深入的理论研究,提供适合于完成上述目标的成像方法。第三,三维速度成像研究的发展必然要求能够处理巨大内存量和大规模或超大规模数据的计算设备。

除了上述提到的共同问题需要解决之外,中国现有的观测资料可为这一研究提供较广泛的内容。中国主要构造单元的划分;中国大陆东缘、西太平洋俯冲带的地震层析研究;青藏地区层析成像及其地学含义;滑脱推覆构造的地震层析研究及其在前陆逆冲带油气探测中的应用;大地震震害环境的介质特征的研究;非线性地球物理综合反演理论和方法。

(中国科学院地球物理研究所刘福田撰)

强震地面运动的理论地震学研究 是跨理论地震学和工程地震学的课题,它不仅有重要的理论意义,同时又有很大的应用价值。强震地面运动研究的基础资料是地震的近场记录,它提供了在震源周围(数十千米范围之内)地面运动的时间曲线。从物理上讲,它研究的对象是地震震源的作用,把地震扰动从震源传播到地面的媒介(地球介质)的作用,以及由它们产生的地面运动图像。对强震地面运动作定量研究的基本关系式的建立,可追溯到对于弹性介质内表面上的位移间断等效于力系作用的数学证明。由此出发,1964年Burridge等建立了断层滑动与地面上一点的地动位移之间的关系式

$$u(x,t) = \int \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \frac{\partial}{\partial x} (G_p(x,t;\xi,\tau)) c_{ijpq} \Delta u_i(\xi,\tau) v_j d\Omega$$

其中 $u(x,t)$ 是 x 处 t 的时时刻的地动位移, $G_p(x,t;\xi,\tau)$ 是格林函数,它等于 t 时刻作用于断层上的 ξ 处的 X_p 方向的脉冲力在 (x,t) 处产生的位移, c_{ijpq} 是弹性系数, $\Delta u_i(\xi,\tau)$ 是断层面上 ξ 处 t 时刻位错的 i 分量, v_j 是断层面的单位法向矢量, $d\Omega$ 是断层面的面积元。定性地说,地震产生的地面运动可以用地球介质的脉冲响应(格林函数)在时间和空间上与震源函数的卷积表示。震源过程、场地效应和强震地面运动预测是强震地面运动的理论地震学研究的基本内容。

从震源的断层模型出发,许多地震学家做了大量工作,试图根据近场地震记录来定量地推测震源处的运动过程,即上面公式中的滑动函数(震源函数) $\Delta u(\xi,t)$,以及一些动力学参数。在这些工作中,首先要选择初始震源模型,然后用试错或反演方法通过理论地震图与记录波形的拟合来建立描述断层运动图像的震源函数。建立初始模型时,可以由P波初动方向、烈度分布、地质构造等资料来确定断层的几何性质。依据对记录波形的分析,参照断裂动力学的理论研究结果,来考虑断层的运动状态。例如由直达波震相的脉冲宽度及加速度谱的特征频率来判断上升时间的变化范围;由不同方位记录的波形和振幅变化来判断破裂方式等。波形拟合中常用以最大位错分布为待定参数的线性反演方法,此时需要事先规定破裂速度。一般选用从一个或多个位错峰值点向四周不均匀减弱的位错模型;也可选用裂纹模型,用裂纹扩展的断裂动力学解答来表示滑动函数。郑天愉等(1989)注意到上升时间分布对于地面运动的波形,特别是对于频率特性的影响是十分重要的。他们在研究卢龙地震时,采用了与破裂扩展时间有关的上升时间分布,在0~10Hz频率范围内得到了比较满意的波形拟合结果。以最大位错和破裂时间分布为待定参数的非线性反演方法和层析成像震源反演方法,也已用于拟合地震近场记录。在采用这些方法时,利用远场射线解来近似计算格林函数,所得结果在足够高的频率范围内才有效。

通过理论地震图与观测记录的波形拟合建立的震源函数是

时间和空间的函数。它给出了断层的几何参数,如断层的空间位置、取向、形状、大小等;描绘了断层的运动图像,如破裂方式、破裂前沿轨迹、位错的时空分布及上升时间分布等;推断了地震矩、应力降等动力学参数。这些对地震近场记录的研究表明,地震发生时的断层运动是十分复杂的。应力场和断层强度的不均匀可以造成断层面上位错、上升时间和破裂速度的不均匀,甚至发生破裂暂停或多次破裂等复杂过程。断层面上不均匀的破裂过程是产生高频地震辐射的重要因素。郑天愉等(1987)从龙陵余震近场记录资料的分析中看到,加速度谱的高频截止频率 f_{max} 值有随震级加大而减小的趋势。为研究这一现象,他们利用近场理论地震图方法论证了断层面错动时间的下限值是控制 f_{max} 值的一个重要因素。这一认识已被用作建立震源模型的一个约束条件。一系列对于特定地震断层运动图像的描述,使人们对震源过程的复杂性有了具体的认识,并建立了相应的震源模型。由这些模型合成的地震图较好地再现了地震发生时的地面运动状态。

在一些大地震特别是1985年墨西哥8.1级大地震中,因场地条件不同显著加大或减小了地面破坏程度的事实,使得研究复杂场地对地面运动的影响成了当今的热门课题。场地条件的影响包括局部场地土介质条件影响和局部场地非均匀地质构造影响两个方面。在理论地震学中研究土介质条件影响时,采用水平成层介质模型,用理论地震图方法分析地震波穿过土介质时产生的地振场。郑天愉等(1989)利用卢龙地震近场记录,研究了局部场地土介质条件对地面运动的重要影响。这里有一个利用理论地震图作震相分析,判断卢龙地震近场记录中出现长时间规则振动原因的例子。采用没有表土层的介质模型时,主要震相为直达波和来自上地壳的上界面的反射波的贡献;采用覆盖有数十米厚的土层模型后,地震波在表土层中的多次反射造成在该土层的固有频率处地动振幅显著加大,同时也增加了地振动的持续时间,表现这一场地效应的振幅峰出现的周期因土介质性质和土层厚度而异。他们(1990)还通过对1982~1984年唐山强震实验台阵在9个台记录到的3.4~5.7级10个地震200余条记录的频谱资料的分析,获得了场地放大作用受震源性质约束这一重要信息。在利用从小震记录中得到的信息来估计大震的地面运动时,必须考虑震源的影响。

对于局部场地非均匀地质构造的影响,地震学家们做了许多理论分析工作。为了能研究记录资料,正在致力于发展有效的计算方法。对于不规则地形和地质构造对地震波的散射问题,只有对二维椭圆形和三维半球形构造,在平面波入射的简单情况有级数解。要研究实际问题,有赖于数值分析方法。射线方法是一种适合计算高频响应的近似方法。有限元、有限差分法和边界积分方程方法等数值解法在理论上是可行的,但因受计算工具的限制,常用于计算低频响应。为克服单一方法的局限性,发展了同时采用两种(或两种以上)不同算法的混合方法。例如有限元法和边界积分方程方法结合,波数积分方法和直接数值方法结合等。廖振鹏、刘晶波等对人工边界、有限元离散化引起的波动误差等波动有限元模拟的基本问题进行了深入的研究。姚振兴等实现了用广义射线初动近似解计算复杂界面条件下的地震动响应。针对现有的有限差分法中震源多为各向同性源的问题,谢小碧等发展了一种计算点源响应的近似方法。该方法利用二维有限差分方法得到线源的响应,然后再以波形校正和几何扩散校正得到近似的位错点源响应。用该方法所得的点源近似解和用其他两种方法得到的精确解的比较表明,近似点源响应具有较好的波形和振幅精度,可以满足计算复杂介质中天然地震或人工震源理论地震图的需要。对于非均匀地质构造影响问题,除了格林函数计算方法研究外,开展对实际地震资料的分析将是十分重要的。

对于场地的重要性,人们已经有了一致的认识。在实际中经常会遇到一个不大的区域内,不同场地的地质条件和地表介质性质差别很大的情况。需要找出一些有效途径,使人们能从基岩上获得的强震记录,来估计不同土层场地上的地面运动状态,采用平面波入射近似是计算土层的地震反应的一种简单易行的

方法,但是在近场条件下,入射波波阵面曲率的影响不能忽略;而且这类方法又不考虑土层与基底介质的相互作用。在处理实际问题中,它只适用于近似计算切向分量(SH型)的土层地震反应。郑天愉等提出了采用土层场地和基岩场地的格林函数反褶积来计算土层地震反应的一种新方法。由于格林函数是从波方程近场解答得到,这样计算的土层反应中包含了产生地面运动的各种反射、透射和转换波震相,也计入了土层与基底介质的相互作用。将计算的土层反应与基岩上的加速度记录褶积后,可以算出土层场地上垂直向和水平向三分量的地面运动时间曲线。他们把卢龙地震在卢龙台的记录作为基底入射波,与用此方法计算的土层反应褶积后得到了卑家店和滦县的地面运动的垂直向、径向和切向加速度图,并与相应的强震记录进行比较。这些计算结果与记录资料符合得很好,表明这一方法是可行的。工程抗震研究的一个重要问题是如何模拟场地可能经受的强震地面运动,提供设计地震的加速度图。模拟强震地面运动的方法大致归为工程学方法和地震学方法两大类。前者直接依据经验,后者是将地震学的研究成果(如地震震源过程和地震波传播规律的物理解)应用于强震地面运动模拟。地震学方法中又包括理论模拟和半经验模拟两种途径。在用理论模拟方法预测强震地面的研究工作中,姚振兴等以地震危险性分析对二滩地区未来可能发生的地震作出的估计为出发点,采用广义反射透射系数矩阵和离散波数方法计算理论格林函数,通过拟合西南地区加速度衰减曲线和龙陵地震的反应谱来建立震源模型,预测了二滩水电站坝区场地地面运动的时间曲线。

针对确定地球介质细结构以及计算复杂结构的格林函数中遇到的困难,Hartzell提出对于已获得大量小震近场记录的地区,可利用小震记录作为经验格林函数,用半经验模拟方法来预测强震地面运动。用小震记录作为介质响应,需要考虑由于小震和大震事件之间位置、取向不同以及破裂过程不同带来的影响,Kanamori的基本做法是直接小震作为大震的子破裂事件,考虑到方位和震中距影响对地震波振幅进行校正。这就要求小震的断层大小和破裂时间与大震的子事件规模相当,这一条件在实际中较难得到满足,Lrikura以大小地震之间存在相似性为前提,利用远场解近似分析大小地震地面关系,认为可以直接把小震记录作振幅修正后按时间延迟叠加,得到大震的地面运动时间曲线。郑天愉等的研究工作表明,震源破裂过程造成了大震和小震震源谱的显著差别。地面运动是震源和场地效应共同作用的结果,而场地的放大作用又受震源性质的约束。在利用小震记录作为经验格林函数时,需要考虑扣除小震震源时间过程的效应。为此给出了一种新的半经验模拟方法:通过用小震记录与小震震源时间函数反褶积来扣除震源过程影响,构成经验格林函数;同时通过模拟大震的近场和远场记录,来设计考虑复杂破裂过程的大地震震源模型;将由此得到的震源函数和格林函数褶积,算出大震的地面运动时间曲线。他们利用唐山地区的强震资料对这一方法的可行性做了数值检验,对于该方法的实际应用,还需要进一步利用大震资料进行验证。

强震地面运动预测的另一个基本问题是设计未来可能发生的地震的震源模型。在地震危险性分析的基础上,综合地质资料和历史地震资料,可以对预测地区未来可能发生的地震的规模做出估计;对于震源过程,则要依赖于从地震记录中获得的信息。由于大震近场记录很少,地震学家们着眼于利用大地震的远场宽频记录,以及远场长、短周期记录来研究大震的震源性质和破裂过程,并探索建立大震震源模型的途径。

(中国科学院地球物理研究所郑天愉、姚振兴撰)

卫星热红外异常 satellite infrared anomalies 即卫星热红外增温异常,也称卫星热红外增温震兆。最早发现此震兆现象的是俄国戈尔内(В. И. Горнов)和萨尔曼(А. Г. Сальман),他们在1988年前苏联科学院公报第1期,首次提出卫星热红外异常。文中以中亚1984年加兹利7.2级地震前卫星热红外波段所观察

到震前 20d 左右的地面增温现象为例,详细描述此增温现象及与活动断裂分布、相互关系。

当岩石圈物质运动以一种快速破裂运动的地震体现时,必然要导致地球水圈和大气圈的变化,岩石圈中无论是机械能还是化学能,最终必将转为热能,并反映在岩石圈表面和大气低空处。航天技术的兴起,为人类研究地球提供了丰富信息,强祖基、贺常恭等在研究卫星热红外临震异常,首先开发出在震前几天至十天可识别出孕震的热红外增温前兆经验,并投入了短临地震预报,为地震预报开辟了一个新途径。自 1990 年起,在利用卫星热红外增温异常做地震三要素(时间、震级、地点)临震预报取得重大进展,较准而较好地预报了 25 次 5 级以上地震,其中有 1990 年 2 月 10 日江苏常熟 5.1 级、1990 年 4 月 26 日青海共和 7.0 级、1990 年 5 月 11 日日本海(东北深震区)6.0 级、1991 年 3 月 12 日台湾台南 6.0 级、1991 年 5 月 30 日唐山 5.1 级、1992 年 4 月 20 日台湾花莲海外 6.8 级和 1992 年 9 月 14 日南海东沙群岛 5.9 级地震等。1990 年两次虚报中国西部地区强震,并漏报了 1990 年 10 月 20 日甘肃天祝—古浪 6.2 级、1991 年 1 月 29 日山西忻县 5.1 级、3 月 26 日山西大同 5.8 级及 7 月 30 日西藏拉萨北 6.5 级地震等。

临震卫星增温异常如何在卫星红外云图上识别,这是过去俄国人戈尔内等所没有解决的问题。卫星在 10.5~12.5 μm 红外波段接受的辐射是表面(地面或云面等)发射的长波红外辐射(完全忽略太阳辐射)。若不考虑大气辐射和表面(各种界面)对大气向下辐射的反射辐射,那么在实际应用中,可忽略大气其它干扰,这是由于临震前震源区其周围的区域性增温异常背景值要高 2~4K,甚至 7~8K,因此卫星红外异常能迅速地在红外云图上被识别出来。

临震卫星热红外异常是一种震前普遍地质现象,强祖基等总结 1989 年 4 月至 1990 年底发生于中国和邻区的 5 级以上的 20 次地震,加上 1988 年 11 月的云南澜沧—耿马地震,共 21 次地震,发现震前 4~10d 在孕震区周围皆有明显的区域性卫星热红外异常,即临震出现大面积的地表增温现象。

卫星热红外异常随时间的演变和在空间上的展布及迁移所具有的基本特征,反映震前瞬时构造运动及应力传递、集中和发展过程,强祖基等研究认为:在时间上,卫星热红外异常的形成和发展具有持续增温和脉动增温两种类型;5 级以上地震震前热红外异常为持续增温型;小于 5 级的地震热红外异常多具有脉动增温特征。在空间上,温度异常动态多以分散到集中,多受构造控制。

卫星热红外异常形成机制研究,可以说在世界上刚刚开始。过去美国布莱迪、罗威尔(B. T. Brady, G. A. Rowell, 1986)、马特力、斯密斯(G. Matelli, P. N. Smith, 1989)及郭自强等都是通过电磁波辐射来研究岩石大破裂前的光发射。郝建国(1988 年)在北京(首都圈)地震区附近布设低空电场观测台网来捕捉震前低空电场异常,他们都从不同角度来研究地震前发热现象。近来耿乃光等(1992)做了岩石破裂前的遥感观测实验,用了热红外辐射计,也观察到岩石破裂前增温现象,但是离真正卫星热红外异常机制的解决还有一大段距离,仍需进一步深入研究。岩石破裂前导致区域性地面和水面增温的地下气体溢出、电磁场和粒子激发这一系列物理化学过程与实际观察现象是否一致性,需通过周密的物理化学实验来验证。

参考文献

- 1 Qiang Zuji, et al. Proceedings of The 11th Asian conference on Remote Sensing, 1990, 2(6)
- 2 强祖基,徐秀登,贺常恭. 科学通报, 1990, 35(17): 1324~1377

(国家地震局地质研究所强祖基研究员撰)

重磁勘探反演问题 是重磁勘探工作的主要研究环节之一,也是资料处理和解释中的一个难题。从地质角度上说,解

反演问题的目标主要是研究(推断)金属或非金属矿体和地质构造(包括控矿构造,如含油、天然气、煤的构造,以及区域性的深部构造等)。前者可称为矿体类问题,后者称为构造类问题。从地球物理角度上来讲,这一目标可以分为:确定地质体(用几何模型表示)参数,属于矿体类问题;确定物性分界面起伏,属于构造类问题;还有确定物理参数(密度、磁化强度等)的分布。

国内外流行的解反演问题的基本方法大体上是相同的,主要分两步:第一,用一个或一组几何形状简单、密度或磁化强度均匀分布或以某一规律分布的模型体,表示形状复杂、密度或磁化强度分布不均匀的地质体;第二,由观测异常确定模型体的几何参数(位置、大小等)和物性参数(密度、磁化强度等),以此来表示实际的地质体。由观测异常求模型体参数,可以一次完成;也可以多次完成(迭代法)。反演问题研究所面临的几个主要问题是:(1)如何从观测场值中选择适当的点值作为反演用的异常值。无论是重力异常或磁异常,进行反演计算时,首先必须从观测的复杂叠加异常中分离出单纯由反演目标引起的那部分场值。有时不直接采用观测场值,而是先将它们作某些数学变换,例如,求出场值的导数、傅立叶频谱等,然后用变换出的场值作为反演用的原始数据。这也是值得研究的。(2)选择适当的模型体。表示形状不规则的地质体,一般采用一组(多个)模型而不是单个模型,每个模型的几何形状要尽可能简单。在计算时,关键问题是给定模型体的合适初值。(3)应用合适的计算方法。反演计算过程能否快速、收敛并得到精确的结果,除了给定适当的模型体参数初值外,主要还取决于所用的计算方法。应针对不同的问题选择适当的计算方法,而且在计算过程的不同阶段需不断调整、修改所用的方法,才能加快计算速度、节省机器时间,保证计算结果的精度。(4)减少多解性(非唯一性)的影响。反演结果的可靠性是反演方法的“生命”,而位场反演中固有的多解性的存在,严重影响到计算结果的可靠性。应特别强调的是,可靠性主要指的是得到的模型体与地质体的“符合”程度。而绝不能只满足于由模型体算出的理论异常与观测异常的“拟合”好坏。反演问题的研究基本上围绕以上几个问题展开的。

反演问题的解法

1. 确定地质模型体参数。确定地质模型体参数的方法主要有:特征点法、最优化选择法,应用异常的傅立叶频谱等数学变换的方法及人机会话(联作)等。特征点法简单易行,能对地质体做出粗略的估计。最优化选择法的基本原理是从许多理论模型中,选择一个其理论异常同观测异常符合得最好的一个模型表示地质体。应用观测异常的变换值作为反演用的原始数据,具有一定的优越性。例如,位场的复杂表达式、场值与模型体参数间的关系,经变换后可以变得比较简单,而且可以加快正问题的计算速度。目前在解反问题中用得较多的是傅立叶变换、汉克尔变换、梅林变换、希尔伯特变换以及 V. M. Вережкин(1973)提出的规格化总梯度法等。

2. 确定物性分界面的起伏。简称为“界面反演”,实际上也是确定模型体参数。例如,为了求一个密度分界面的起伏,用一组呈二维分布的长方体作模型,固定模型体顶面深度,界面起伏就可以用这些长方体底面深度的变化来表示,界面反演方法大致可分为:迭代法反演、统计分析、频谱展开法、广义矩阵反演、多项式法以及正则化法等。

3. 确定物性参数的分布。根据重磁异常求地下密度、磁化强度的不均匀分布,流行的作法是(以二度问题为例):把地下半空间分为许多大小相等(或不等)的矩形或正方形格子,并设每个格子内的物性分布是均匀的,保持每个格子的大小不变,由异常直接计算出每格内的密度或磁化强度;根据计算出的物性分布,就可以判断是否存在高(或低)密度体,或强(或弱)磁性体。当它们存在时,物性分布可以形象地显示其位置、大小和形态等。目前,求物性分布的方法主要有:Backus—Gilbert 法、线性规划和二次规划法以及傅立叶褶积法等。

国外解反演问题的一些状况

1. 确定地质模型体参数。(1)特征点法。E. A. Мудрецова (1981)叙述了以球体、水平圆柱体、水平物质带、水平半平面、垂直层、倾斜层等为模型体,根据 Δg 、 V_{xx} 、 V_{zz} 及 V_{zzz} 等位场要素曲线特征点,求取模型体参数的方法。(2)最优化选择法。前苏联 E. Г. Булах 等发表了不少关于最优化选择法(极小化方法)的文章。他们在1984年发表的专著系统地论述了多参数泛函的极小化方法及自动化程序的设计等,指出解释复杂的重磁资料,选择法是最有效的,因为只有这个方法才可能考虑所研究地区地质构造的所有先验资料。B. K. Bhattacharyya (1978)评论了当时流行的空间域和频率域最优化方法。他认为,方法效果主要取决于按所研究地区的先验的地质和地球物理资料所选择的简单几何形体,而且直觉和经验仍起主要作用。此外, M. Al-Chalabi (1971)比较系统地讨论了用最优化方法解释重力异常,论述了初始模型给定方法、目标函数的特性和加约束等问题。他指出,在计算的不同阶段应采用不同的最优化方法。P. H. McGrath 和 P. J. Hood (1973)提出用有限薄板引起的磁效应的数值积分,去近似表示诸如有限走向薄岩脉、垂直棱柱、截断台阶、平行六面体等不同形状的模型的磁异常,以实现磁异常的反演。L. R. Lines 和 S. Treitel (1984)从理论上评述了最小二乘最优化算法的显著特征以及在重力问题上的应用等。(3)应用异常的频谱等数学变换。用得最多的是傅立叶变换。较突出的是 D. W. Oldenburg (1974)根据 R. L. Parker (1973)的频率域二度起伏层重力异常快速正演公式提出的一种计算场源体形状(包括界面起伏)的频率域迭代反演方法。在其它的变换方面, D. Patella (1980)把汉克尔变换用于球体、水平圆柱体、垂直杆的重力反演。他表明,对于球体、垂直杆模型,汉克尔变换比傅立叶变换要好。N. L. Mohan (1986)首次提出用梅林变换解释重力异常,导出了球体、二度水平圆柱体以及二度薄层重力效应的水平一次导数的梅林变换表达式,并由此求取模型体的参数。N. Sundararajan, S. V. Seshagiri 和 Rao (1982)叙述了用希尔伯特变换求似二度断层的顶面深度、底面深度以及剩余密度参数的方法。

2. 确定物性分界面的起伏。M. H. P. Bott (1960)提出了一种根据剩余重力异常直接计算已知密度差的二维沉积盆地形状的快速数字计算方法,原理是利用逐次逼近消去剩余值。这一方法为迭代计算界面(特别是盆地)反演打下了基础。L. Cordell 和 R. G. Henderson (1968)根据 Bott (1960)和 Danes (1960)方法的思想提出根据重力异常数据用迭代法求三度地质体(界面起伏)的方法。他们对不同的计算点分别采用直立长方体和直立柱元为模型,以加快计算速度,还对参考面深度的选择进行了较深入的讨论。A. Gerard 和 N. Debeglia (1975)提出的求物性界面起伏的方法,国内用得较多。其计算工作分两步:(1)根据重磁异常的能谱计算两个均匀介质分界面的平均深度和密度或磁化强度;(2)用迭代法计算界面深度的局部变化(起伏)。70年代, L. Cordell (1973)根据 Athy (1930)和 Hedberg (1936)等人对沉积盆地物质密度变化规律的研究结果,提出在沉积盆地中密度随深度呈指数规律增加的关系以及相应的反演方法。后来,又有多篇文章讨论了密度按线性、二次函数关系随深度增加的反演方法。D. B. Rao (1986)用二次函数近似盆地中密度随深度的变化关系,由重力异常来模拟盆地,他指出,二次函数比指数关系更易于计算。H. Gransei (1987)综述了变密度条件下沉积盆地的重力反演,根据密度随深度的指数关系,提出一个基于级数展开式的频率域正演公式,并用快速傅立叶变换实现数值计算。中国 Yufu Chai 和 W. J. Hinze (1988)也提出密度随深度呈指数关系,并用垂直长方体进行重力反演。为提高傅立叶变换的精度,应用了移动取样技术。

3. 确定物性参数的分布。解重磁异常线性反演问题求物性参数分布的文章较少,而且解决实际问题的效果也很不理想。代表性的研究有, W. R. Green (1975)用 Backus-Gilbert 方法研究地下密度构造, J. Mottl 等 (1972)研究用整形线性规划法解二度

水平圆柱体的重力反问题,以及 M. H. P. Bott (1967)用傅立叶褶积法解磁异常线性反问题等。

4. 多解性问题。自从 D. C. Skells (1947)的著名论文发表以来,国外对这个问题有相当多的研究。许多学者认为,限制多解性影响有效而又实用的措施,是尽可能利用已知的地质、地球物理及钻探等资料对反演结果施加约束。M. Al-Chalabi (1971)应用参数超空间详细研究了重磁反演中的非唯一性问题, R. L. Parker (1975)提出了重磁解释的理想体理论,这些研究对于限制多解性的影响具有重要意义。前苏联学者着重于从理论上寻求能得到唯一解的模型、准则和条件, Ю. А. Шацкий (1957), Е. Г. Булах (1984) 等人都发表过文章。

5. 解反演问题的计算方法。西方和前苏联学者对解反演问题所用的计算方法也做了相当多的研究,如在国内应用十分广泛的阻尼最小二乘法 (D. W. Marquardt, 1963), А. Н. Тихонов 的正则化法以及 В. И. Старостенко 的方法 (1978) 等。有些作者还比较了不同方法的优缺点,如 M. Alchalabi (1971), S. E. Hjeit (1973) 以及 В. И. Майер 等 (1985) 等。西方学者在地球物理(重磁)反演理论方面,也有不少研究,如 G. E. Backus 和 J. F. Gilbert (1967, 1968, 1970) 以及前苏联的 В. Н. Страхов 等。国外有代表性的研究成果。

确定地质模型体参数 1974年,桂林冶金地质研究所物探室磁法组与中国科学院数学研究所方程室微二组协作,发表了国内第一篇实现二维磁异常自动选择法反演的文章。1980年,周熙霖等全面而系统地论述了这一方法,特别讨论了目标函数及其性质,以目标函数等值线图分析参数的选择和变化对迭代过程的影响;同时以收敛性和稳定性为标准,评价了一些常用的最优化方法。在频率域反演方法方面,管志宁等 (1985) 探索了用最优化方法实现磁异常的二维反演;侯重初等 (1985) 在 B. K. Bhattacharyya 等的基础上,提出了计算磁性体上顶与下底深度的功率谱法,用人机会话方式实现选择法反演的研究成果发表得还不多。林振民等 (1983) 在微机上用宽行打印机、绘图仪实现一维(剖面)反演,其思想在具有绘图终端的大型计算机上更易实现。

确定物性分界面的起伏 大多数文章涉及单一界面,并假定界面上下物质密度分布均匀,而且不少方法要求界面起伏比其平均深度小许多。A. Gerard 等 (1975)、B. K. Bhattacharyya 及 Parker (1973)、Oldenburg (1974) 的方法在中国得到较多的应用。1977年,刘元龙等提出压缩质面法求深部密度分界面的起伏,其基本原理是用压缩质面去近似二度地质体。先由实测异常,用矩阵法反演压缩质面各单元的面密度,然后由面密度与体密度的关系求得各二维地质体单元的厚度,进而得到各单元的厚度,再由计算出的理论异常与实测异常的差值不断修改得到整个地质体厚度。李国治等 (1980) 及管志宁等 (1984) 在 A. Gerard 等 (1975) 方法的基础上,分别在重力异常及磁异常反演方法上加以改进,在油气区密度界面反演及区域性磁性界面反演上得到比较成功的应用。孙德梅等 (1984) 对重力异常正演公式进行了研究,提出了一个简便的适用于求深部密度界面的方法。冯锐等 (1986) 详细研究了 Parker-Oldenburg 方法,从计算方法、单界面反演、约束条件、密度与界面同时反演方面加以改进。实际的密度不均匀分布对反演计算结果有很大的影响,吴宣志 (1984) 提出了一个密度随深度呈指数关系条件下的频率域反演方法。由 В. М. Верезкин (1973) 提出的用规格化总梯度向下延拓求地质体特征点的方法已证明有较大的实际效果,肖一民等 (1984) 把这一方法用于油气藏,同时讨论了方法的应用条件。求多层密度界面起伏是一个十分复杂的问题,周国藩等 (1984) 探索用一组其上顶深度相同、下底深度不同的两个二度矩形棱柱体为模型,以上下两个棱柱下底深度的变化实现两层界面的反演。反演计算要用很长的机器时间,因此,改进计算方法、加快程序的计算速度成为反演方法能否用于实际资料处理的关键。在这方面,马殿仁 (1986) 提出的在迭代计算中用“分块合一”解线性方程组加快计

算速度的方法是有意义的。

确定物性参数的分布 申宁华等(1983)较系统地介绍了重磁异常反演的线性规划法,做了理论模型计算,用实测异常验证,指出可用此法求场源边界。

除继续开展已有的研究外,从当前的实际需要出发,建议加强下列工作:(1)研究适用于困难地区的单界面重磁异常反演方法。所谓困难地区,系指界面起伏大、断裂十分发育、界面最深可超过10km的地区。在我国的一些油田区存在这样的地段。(2)建立并推广适用于金属矿区或大的岩体构造的人机会话自动选择系统。(3)建立一个评价反演方法的标准(模型)。曾华霖等设想,是否可以建立一个评价不同反演方法的标准模型,对每个反演方法,都用这同一模型加以检验,了解其计算速度、精度和应用条件。这样的模型可以有两个:一组模型体及计算的异常值;一个困难地区的实测异常及地震、钻井推断的结果。

(中国地质大学曾华霖撰)

地电化学法 地电化学是研究地壳内部自然和人工激发地电化学现象的学科。地电化学勘查是一种边缘技术,主要以可移动的离子态元素的迁移、分布规律,以及矿石矿物的激发电化学特征为研究对象。由于该项技术综合了地球化学与地球物理的某些优点,具有对矿体远距离追踪勘查,并直接以矿体物质信息示矿的特点。

目前,俄罗斯的地电化学研究水平居世界领先地位,已经形成应用于不同勘查阶段和矿种,拥有多种分支方法的勘查系列,并在多金属和贵金属等深部隐伏矿产勘查中获得了很好的找矿效果。

20世纪80年代初,欧美国家在多金属硫化矿床上应用了“壤中电导率法”,在厚层覆盖区取得了较好的成果。

中国的地电化学研究起步较晚。80年代初,在铀矿、多金属矿和金矿床上进行了“电提取离子法”的试验和应用,之后又反应应用了“土壤电导率法”。自1985年起,发展了以电提取法为主的多种分支方法,开展了配套仪器设备研制,在矿产普查评价,特别在金矿勘查中获得了明显效果。

1991年,刘吉敏根据与陈玉玺赴苏考察所获资料,结合自己多年的实践,着重介绍方法原理和功能、国内外研究现状和应用效果,以使该项技术在地质找矿中发挥应有的作用。

在地电化学勘查系列中,“元素赋存形式法”(МПФ)、“热磁地球化学法”(ТМГМ)、“扩散提取法”(МДП)、“部分金属提取法”(ЧИМ),以及“壤中电导率法”(K值法),主要用于普查或详查阶段。是基于土壤和其它近地表物质少量金属元素的测量。这些金属在人工和自然电场作用下,以水溶形式的离子和其它活动形式(如气溶胶),或以弱结合的有机化合物(富里酸盐、腐植酸盐)、铁锰氧化物等形式在近地表聚集,提取的就是这些金属元素的“净”含量。

МПФ法是采用选择性溶剂萃取土壤中的富里酸—腐植酸络合物,然后分析测试析出相的金属含量和碳含量。ТМГМ法是使土壤中铁的氧化物和氢氧化物还原成强磁性矿物,然后测定其金属元素含量。МДП法是通过充填有选择性提取液的特制装置,吸附和富集与矿体有关的离子。ЧИМ法是利用多个负极(元素接收器)和一个正极(无限远极)构成大地电路,在电场作用下,处于动态平衡的离子在观测点被元素接收器累积测定。K值法是通过测量土壤样品水悬浮溶液的电导率值,求得土壤的离子总量,由此来圈定与矿化有关的异常。

“接触极化曲线法”(КСЧК)、“非接触极化曲线法”(БСЧК)亦属于地电化学法。这两种方法主要用于勘探阶段,是通过矿体矿物人工激发电化学现象的观测,用反应电位值确定矿物种类和物质成分,按极限电流值判定矿物的数量和矿体规模。

在早期研究中,加拿大和前苏联学者对与硫化物矿床有关的天然“地电池”形成机理作了理论推导的解释,论述了自然电场空间分布的基本规律,提出了硫化矿床的地电模型。

70~80年代中期,前苏联雷斯和普吉科夫等深入研究了金属矿物的电化学反应及其实质,进行了大量的野外和室内试验,进一步发展了地电化学理论,基本上奠定了应用地电化学方法的理论基础。

80年代末至今,前苏联学者对离子运移机制研究又有新的突破。他们总结了多年的经验后发现,在各地区不同地质条件下,新发现的深部矿体异常具有如下特点:在一定的总异常带范围内,相邻测点上含量值剧烈变化,而且总异常带范围和异常最大值往往与异常源的埋深关系不大,在观测点距为20~50m时,一般只能记录一到几个异常点。这种特征显然与厚覆盖区的物探异常特征不同,因而引起人们的怀疑。但是,根据这些异常发现新矿体的事实导致结论:这种异常突变现象应该是地电化学晕的一种特殊形状,离子很可能是以细流形式迁移的。据此,他们在几个异常地段将覆盖物一层一层地剥去,然后进行由上向下和改变点距的追踪观测,获得了令人满意的结果。

综上所述,可对以离子态元素为基础的几种地电化学法机理得出如下认识:在隐伏矿体及其周围介质中,由于介电质电动势、电化学溶解,以及矿物的解离等多种作用因素,导致多种离子的交换和产生,形成以水溶形式为主的活动离子,或者是附着在微气泡上。这些活动物质在自然和人工电场、地下水、热动力等作用下,将以水溶形式和喷气流(射流)形式由其源地到异常地再到达地表。往往有许多看不见的微小裂隙构成离子迁移的通道(细流),这些裂隙通常与异常最大值对应着。可以认为,物质由矿体到地表的运移是以准气态实现的。人工电场等外力作用将加速深部物质运移速度,用经典的离子淌度概念很难解释自然界中离子运移的复杂机制。

总之,国外多年的成果已经展示出地电化学的独特功能;国内亦认识到该项技术在隐伏矿勘查中的作用。今后主攻方向是:(1)提高现有的“土壤电导率法”、“元素赋存形式法”、“电提取离子法”等的研究水平和勘察功能;适当开拓“热磁地球化学法”、“扩散提取法”等新方法技术。(2)扩大应用领域,在油气田勘查中取得进展。(3)深化应用基础理论的试验研究。(4)建立以电提取法为主的地电化学勘查系列,针对不同勘查阶段,采用不同的分支方法,建立综合信息提取和解释的合理模式,使各方法在不同矿种和不同阶段发挥各自特长,最终形成较为合理的方法组合和勘查程序。

(地矿部物化探研究所刘吉敏撰)

地热 geothermals 地球内部的热筒称为地热。火山是最强烈的地热显示,温泉是最常见的地热露头。但是,大部分地热则是通过岩石的传导作用传输向地球表面,所传输的热量称大地热流。火山和温泉最易为人们所感知,因此,中国最早的地理文献《山海经》就有昆仑火山和崆峒温泉的报道。大地热流值(量级为 $\mu\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)则为太阳的辐射热流量(量级为 $10^{-2}\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)所掩盖,长久以来为人类所不知。只有古代的矿工深入到地下的矿井才深感大地热流的威力。

研究地热的科学称地热学(Geothermics)。这一名称1849年由瑞曼(K. F. Naumann)首先提出。实际上有关研究从1644年笛卡尔(R. Descartes)的涡动说的提出已开始,他认为地球自产生之日就处于灼热状态。1676年莱布尼兹(G. W. Leibnitz)曾考察哈尔茨山的矿藏,并赞同地球形成时曾处于熔融状态的假说。1749年法国布丰(G. L. L. de Buffon)提出了地球演化的第1个灾变假说,认为地球是太阳与彗星碰撞而成,把地球的热演化史分成7个阶段。12年后艾皮努斯(F. A. Aepinus)提出了地球的冷演化模式,认为地球是由陨石聚集而成,其后由于太阳能的聚集而变暖。

到了19世纪上半叶,随着物理学的进展,才推动了地球热学的发展,特别是19世纪80年代以后,温度计愈来愈完善,促进了实验热学的发展,有可能对大量钻孔、泉和矿井进行温度的观察。尽管这时地质学经历了水成论和火成论之争,依然未成

为理性的科学,而地热学基本还是一般热学的一部分,但是对区别地球表面热状态的要求显得越来越迫切。当时洪堡(A. von Humboldt)通过安第斯山观察,支持火成论击败水成论,并首次提出等温线和等压线的概念。1829年库普费尔(A. T. Kupffer)利用大量数据编制了地球表面温度图和大气温度图。1830~1833年赖尔(C. Lyell)的《地质学原理》问世,标志地质学进入理性的科学。他根据库普费尔和科尔迪尔(M. C. M. Cordier)等人提供的矿井中测得的温度数据,在书中列出“地温随深度增加”一节,并认为“火山作用可以解释为地球的内热对外壳的影响”;温泉则是“由地球内部所产生的热量所造成的”。

正是人们对自然界温度观察的日益深入和实验研究的不断进展,才促使1849年“地热学”一词的问世。但是直到20世纪30年代以前,地热学依然借鉴固体热传导方面的理论和仪表,集中于地下温度的测量和岩石热物性的研究。这一时期最重要的是1887年在英国科学技术促进会(British Association for the Advancement of Science)中成立了“地下温度委员会”,秘书长为埃弗勒特教授(J. D. Everett),5年以后成立另一个委员会以研究岩石的热导率。这些研究确认地下20~30m以下深度,其温度随深度增加,表明从地球内部有流向地表的热流存在;同时发现岩石热导率随温度有规律的变化,并对热量的传导机制有了更系统的认识。

19世纪末放射性元素的发现使地热学的研究进入新阶段。20世纪初叶,霍姆斯(A. Holmes)用放射性测量方法研究岩石的年龄,1913年提出第1个列出绝对年代的地质年代表,又于1915年利用地球内部温度分布估计了地球的年龄。同时乔利(J. Joly)从含放射性铀石和绿帘辉石的岩石估计地球的年龄,并试图用地球内部放射性衰变产生的热对流来解释地壳的形成。1924年杰弗里斯(H. Jeffreys)根据放射性同位素研究了地球的热历史,认为地球从太阳分离出后在1.5万年内就固结了,而地壳自固结以来已超过30亿年。地球热历史的研究一直持续到现在。

地热学发展的第3阶段是热流测量阶段。早在1935年英国科学技术促进会资成一委员会收集已有的温度梯度和岩石热导率资料,并获取新的资料。1937年由菲利普斯(D. W. Phillips)提交的报告指出,虽然有几个岩石热导率和温度梯度数据,但在世界上那时还没有任何一个地点同时测过这两种量,所以实际上没有一个能知道其热流值。

热流测量首先从陆上开始。1939年本菲尔德(A. E. Benfield)在英国5个钻孔中进行测量;同年克里格(L. J. Krige)在南非测定了6个钻孔的温度梯度,布拉德(E. C. Bullard)测定了钻孔岩心的热导率值,从而获得首批大地热流数据。海底温度梯度测量最初是由佩特松(M. N. A. Petterson)在1949年进行了试验,1954年始由布拉德在大西洋进行热流测量。虽然热流测量自30年代末已经开始,但由于测试技术和方法问题,到1945年全球热流值只有20个,全属陆上的;1955年也不足100个,到1960年也只有200个。到了60年代,板块学说兴起,热流研究特别是海洋热流值的测量才得到极大的发展。第1个完整的热流编目由李(W. H. K. Lee)在1963年作出。1965年李和上田(S. Uyeda)又对1964年以前测得的2000个热流数据(其中大陆仅200个)作了评述。1966年李和克拉克(S. P. Clark)又作了增订,以后又公布了几百个热流数据。1968年西蒙斯(G. Simmons)和宝来(K. Horai)作成全球热流值一览表。1969年宝来和西蒙斯用3000个热流值进行陆地热流的球谱分析。60年代末,国际热流委员会成立以促进国际合作,主办会议和综合资料。1970年李发表了大地热流的综合性专著,其中所列热流值3127个,大洋中为2530个,占81%,文中描述了热流与海底年龄的关系。1976年国际热流委员会公布全球热流值达5417个,其中大洋3718个,占68.5%。到1979年热流值增至7217个,其中大洋4409个,占61%。但是热流测量点分布很不均匀,许多大陆尚属空白。

自60年代末开始,地热流的研究又跨上新的台阶。赫尔岑

(R. P. von Herzen)等对大洋热流的测量和研究,发现洋底热流随地质年龄而减少,为海底扩张和板块构造提供了重要的证据。在陆地上,留比莫娃(E. A. Lubimova)、韦尔玛(R. K. Verma)分别对欧亚大陆和印度作过区域性总结,发现大陆热流和最新构造活动的地质年代也有密切关系,愈老的构造热流值愈小。更重要的是,1968年拉琴布鲁赫(A. H. Lachenbruch)等发现热流和岩石中的放射性元素含量呈线性关系,并将北美分成3个热流省。罗伊等(1970)和沙斯(J. H. Sass, 1971)分别编过北美的热流图。至今为止,热流省的划分仍是地热研究的重要课题。

中国大地热流的研究也始于70年代。1979年公布首批可信度较高的数据(汪集驹等)。到1991年共得数据437个,其中质量高和较高的分别为216和110,占统计总数的74%,质量差的为92个,占22%,还有19个为局部异常值,占4%。但热流测量工作75%集中于东经105°以东地区。另外,台湾于1984年公布了94个数据。

70年代地热学发展的另一特点,是“应用地热学”发展成为一门独立的科学。70年代的能源危机,刺激想寻找一种新的代用能源和改善与保护环境,地热能的研究掀起高潮,受到联合国和世界有关各国的重视。自60年代到80年代初,联合国召开了4次有关地热的讨论会。第1次在罗马(1961),称新能源讨论会,其中只有80篇地热能文章,第2次和第3次都称“联合国地热资源开发利用专题讨论会”,分别在比萨(1970)和旧金山(1975)举行;第4次内罗毕会议,于1981年举行,称“联合国新能源和可再生能源会议”。此外还有许多地区性的地热能会议。鉴于目前已开发的地热田都是以水作为载热体的水热型,因此杰索甫(A. M. Jessop)将其称之为“水文地质学时代”。

自埃弗勒特于1868年提出有关地下温度的第1个报告和1939年测得第1个热流数据以来,地热学取得了长足的进展,但尚遗留甚多重大的问题。如,在一些复杂的地段,如洋脊、陆架、冰帽、火山带等,热流如何测量?在这些地段大地热流这一术语的含意是什么?热流省的意义是什么?海洋平均热流为何与大陆平均热流相近?放射性热产量如何与地表热流相匹配?热和温度如何控制沉积盆地的形成?等等,都还值得进一步研究。

参考文献

- 1 Lee W H K, Uyeda S. American Geophys, 1965
- 2 Buntebarth G. Geothermics, 1984
- 3 Jessop A M. Developments in Solid Earth Geophysics, 1990
(北京大学廖志杰教授撰)

冰缘环境 包括现代冰缘环境和更新世冰缘环境。狭义地讲,现代冰缘环境研究的中心是多年冻土,更新世冰缘环境研究所关心的是正确识别古形式,以便恢复古环境。

多年冻土区特有的几种地貌过程为:广泛的地下冰形成过程,广泛的寒冻裂隙冰楔生长过程,地土冰融化造成的热卡斯特过程,这3个过程的中心点是地下冰。

冰楔的萌芽阶段是以寒冻裂隙的形式出现的。以往的研究表明,地表开裂的气候条件由稍低于0℃~8℃,当然其中含有其他自然条件的影响,如植被、土质类型等。高级地寒冻裂隙及冰楔的生长发育已众所周知。近年来,亚极地的工作表明,在一定的自然条件下,气温以外的指标控制着地表的开裂及冰楔的生长。如加拿大魁北克北部旱地(年均气温为-5℃)的冰楔是森林植被退化的产物(Payette等,1986)。也就是说森林植被的存在减缓了地表土体中的温度梯度,不利于地表开裂,在同样的气温条件下,森林退化(或砍伐)有利于冻结作用的深入,同时造成地表积雪困难,从而促进地表开裂及冰楔生长。

冰楔的多级生长是指在原有冰楔(原级)的上面又有二级甚至三级冰楔产生。这种现象在北极地区相当普遍,这表明多年冻土上限稍有上升,活动层的厚度在减薄。Mackey(1976)的工作表明,从开始多级冰楔仍在生长,活动层的厚度减薄的最大值可达

60% (Harry 等, 1985; Wang 等, 1990)。冰楔再生长为研究全球变化提供了资料, 有人认为冰楔的多级生长是 50 年代以来气候转冷的产物, 而多数人认为现在全球大气中 CO_2 含量在继续积累, 气温处于上升阶段, 并且极地地区比中纬度地区更加敏感, 温度升高也应是中纬度地区的两倍。按照全球变化的观点, 北极地区的冰楔不应是在生长, 而应是退化消融。对冰楔的多级生长可以有几种解释。首先, 如果全球变化的预报正确的话, 全球气温的上升也应是极其缓慢的, 而北极地区的气温本来就很低, 如以 Tuktoyaktuk 地区为例, 7 月份平均最高气温为 14.9°C , 元月份为 -23.6°C , 在短时间内, 全球气候变暖对它没有什么影响。即使气温上升 $2\sim 3^\circ\text{C}$, 其年均气温仍比现在的亚极地区低, 而现在亚极地的许多冰楔在生长 (Burm, 1990), 其次, 当地的地表植被、水分及土质等条件起控制作用, 马更些三角洲的工作表明, 当剖面中泥炭含量高、地下冰发育、土颗粒细时, 冰楔发育的线性密度就明显高, 多级生长的比例也高达 40%, 而在比较干燥的风吹砂占优势的剖面上, 冰楔发育密度很小, 重新生长者更少, 不足 10%, 这说明, 当地的自然条件起主导作用。

习惯上将冰楔分为两类: 共生冰楔和后生冰楔。后生冰楔侧向生长占优势, 所以它的形象往往是矮胖。而共生冰楔侧向和垂向一起生长, 所以它又高又宽, 有的高达 $20\sim 30\text{m}$ (Shumshii, 1964), 甚至达 50m 之多 (前苏联科学院西伯利亚冻土研究所, 1988)。1990 年, Mackay 报道了第 3 种冰楔, 称为反共生冰楔, 生长于斜坡上, 由于坡面土体的移去, 斜坡降低, 在这种情况下, 如果冰冻裂隙和冰脉生长与坡面的降低保持同步, 冰楔便会随着坡面的降低沿垂直于坡面的方向继续往下生长, 伸延。这种生长条件刚好与共生冰楔的生长条件相反。共生冰楔的生长是随着地表土体的加积向上发展, 而反共生冰楔的生长则是由土体坡移和侵蚀作用造成的向下生长。如此发展的结果是: 由于坡面的降低, 原来冰楔的顶部发生融化被截去, 所以这种冰楔是以顶部的损失为代价换来底部的生长。在共生冰楔中, 冰体的年龄由上向下变

老, 而反共生冰楔冰的年龄是由上向下变小。

1966 年, Pewe 指出冰楔生长的必要条件为年平均气温 $-6\sim -8^\circ\text{C}$, 他是根据冰楔在阿拉斯加的分布及其与现代气温的关系而得出此结论的。1985 年, Washburn 认为 -5°C 是冰楔生长的大概临界气温。而 Hamilton 等 (1983) 的研究表明, 在阿拉斯加 Faribanks 附近, 在年平均气温为 -3.5°C 的条件下, 全新世冰楔在活动。加拿大育空地区也有类似现象, 在年增多气温为 -4°C 的条件下, 氦含量的研究表明, 一些冰脉是过去 35 年以来的产物。1990 年, Burn 认为, 地表开裂产生于冬季, 夏季条件不影响冰楔的分布, 而夏季温度对年平均气温的贡献很大, 因此冰楔假形不能指示平均气温。

在古气候恢复中应注意的另外两点为: 首先, 冰楔从生长到融化变为假形是一个极其漫长的过程, 其中包含着气候变化的过程, 因此, 冰楔生成的条件与被保存下来的条件是不同的。其次, 许多地一气因素控制着冰楔生消, 水分、土质及植被条件不同, 地表开裂和冰楔形成的温度就有差别。

研究表明, 冰楔生长并不需要以前所认为的较低的年平均气温, 中国的东北存在冰楔, 到目前, 青藏高原只发现有七楔 (原生), 但毕竟说明高原上曾存在过地表的寒冻开裂阶段。如果高原面上的干燥度高是限制冰楔生长的主要因素, 则可以推测高原上比较潮湿的谷地里也应该有冰楔的存在。当欧洲及北美大部分被更新世冰川覆盖之时, 青藏高原和大兴安岭幸免于难, 而它们却摆脱不了更新世尤其是晚更新世的全球性的低温作用。正因为没有被冰川覆盖, 地表裸露在寒冷气候下的时间长, 冰缘现象发育的可能性就大。

冰楔近几十年来的多级生长使全球变化的格局复杂化。气候变暖通常会促进植被的生长, 而植被是促进多年冻土进化的因素, 也有可能导致冰楔的多级生长。

(中国科学院兰州冰川冻土研究所王保来撰)

气象学

一般气象理论

热带气象学 tropical meteorology 研究南北纬 30° 之间的大气环流、天气系统和天气预报的一门学科,是大气科学的一个分支。热带地区(30°N~30°S)约占全球面积的一半,是全球大气运动的热量、动量和水汽的主要源地。热带大气环流系统既与中高纬度环流系统有明显差异,而且又与它们相互联系、相互制约,所以不仅地处热带的国家,即使地处中高纬度的国家在制作较长时效的天气预报时,也必须考虑热带大气环流和大洋环流的变化。热带大气环流系统的活动与变化不但影响热带地区,而且也影响中高纬地区天气,直接影响这些地区的工农业生产 and 人民生活。因此,热带气象学的研究具有重要的学术和经济意义。

热带气象学是随着生产发展的需要而逐步发展起来的。早在 15 世纪末,阿拉伯人在印度洋的贸易航线上已注意到季风的变化。17 世纪 30 年代,哈得莱(Hadley)发现热带信风环流,并对其作了科学的解释,提出了哈得莱环圈的概念。中国也早在唐、宋年间就有关于“台风”和“飓风”的记载,一些文学家(如苏轼等)还记述了季风现象。对于有关热带气象的研究,中国起步较早,在 20 世纪 20~30 年代,竺可桢、涂长望、李宪之先后对台风、季风等问题进行了研究,但较系统地开展热带气象学研究则始于第二次世界大战期间。在 40 年代,美国里尔(Riehl)发现东风波,提出东风波天气模式,并首先在热带大气环流和热带天气分析等方面作了许多研究,于 50 年代写出了第 1 本《热带气象学》专著。60 年代,郭晓岚提出积云对流参数化方法,查尼(Charney)等提出第 2 类条件不稳定理论(CISK),开创了台风动力学的研究,推动了热带大气动力学的发展。70 年代初,雷梅奇(Ramage)发表《季风气象学》专著,较全面地总结和论述了季风问题。70 年代末,克里希纳穆蒂(Krishnamurti)出版《热带气象学》一书,全面总结和评述了热带气象学的各个领域研究成果,反映了 70 年代以前热带气象学的进展。此外,弗洛恩(Flohn)对热带大气环流的研究,皮叶克尼斯(Bjerknes)对热带海气相互作用的研究,柳井迪雄对热带波动的研究,格雷(Gray)对热带气旋的研究等,都对热带气象学的发展作出了贡献。在这期间,中国叶笃正和陶诗言对热带大气环流的研究,谢义炳对热带波动和湿斜压大气动力学的研究,高由禧对东亚季风的研究,黄士松对副热带高压的研究,朱抱真对东南亚和南亚大气环流和天气的研究等,都对热带气象学作出了重要贡献。陈联寿和了一汇在 70 年代末出版的《西太平洋台风概论》,是迄今最全面阐述台风理论和预报的专著。

在 20 世纪 60~70 年代,在热带地区还相继开展了多次国际综合观测试验,其中包括国际印度洋考察(IIOE, 1963~1965),考察了西南季风及其天气系统;莱恩群岛试验(LIE, 1967),重点研究热带辐合带及其对流系统;大西洋信风试验(ATEX, 1969),研究大西洋 10°N 附近的信风能量收支;巴巴多斯海洋与气象试验(BOMEX, 1969),研究巴巴多斯岛东部洋面的扰动和无扰动信风及海气之间的能量交换;大西洋热带试验(GATE, 1974),主要研究积云与热带大尺度环流的相互作用以及海—气相互作用;气团变性试验(AMTEX, 1974~1975),研究西太平洋的冲绳岛附近洋面的气团变性问题;国际季风试验(MONEX, 1979),研究印度洋和南海地区冬夏季风以及西非季

风的活动。70 年代后期在国内低纬度地区进行了两次较大规模的气象实验,一是 1977~1980 年的华南前汛期暴雨实验,一是 1979 年的青藏高原气象科学实验。通过这些试验,为热带气象研究提供了丰富的资料,促进了热带气象研究的深入开展。

80 年代以来,热带气象学再次成为大气科学研究的重要热点之一,并成为大气科学的一个前沿学科。近年来在热带地区继续进行了多次国际综合观测试验,例如 1987 年的澳洲季风试验(AMEX)和赤道中尺度试验(EMEX),1987 年的台湾地区中尺度试验(TAMEX),80 年代初和 90 年代初进行的台风业务试验和特别观测试验,以及 1985 年开始至今仍在进行的热带海洋和全球大气试验(TOGA)等。通过对一系列热带观测试验资料的分析,揭露了许多新事实,建立了一些更可靠的概念模式。80 年代集中对 MONEX 资料进行分析,进一步揭示了南亚夏季风的建立和变动规律,以及其结构和变动机制,尤其是对东亚夏季风和南海冬季风的结构及其活动规律有不少新发现,提出了新认识,1990 年初陈隆勋等发表的《东亚季风》专著就是这方面研究成果的最新总结。70 年代在热带大气环流研究中发现的 30~60d 低频振荡(也称季节内振荡),自 80 年代以来有了更深入的研究,通过大量观测事实分析和数值模拟研究,进一步揭露了热带大气中季节内振荡的结构和活动特征,对其振荡机制提出了新的解释,例如李崇银提出的移动性 CISK 波、刘家铭的移动性波动—CISK 和张智北的 CISK—Kelvin 波等理论,同时还揭示了这类振荡同厄尼诺和南方涛动(ENSO)的关系,梁必骥发表的《热带大气低频振荡》(1990)和李崇银的《大气低频振荡》(1991)较全面地评述了国内外在这方面的研究成果。80 年代对于积云对流及其反馈作用的研究取得新的进展,进一步揭示出积云对流内部气流的结构,给出了热带飑线和中尺度对流复合体(MCC)的概念模式,许多研究表明,积云对流活动不仅直接影响热带地区的中尺度和天气尺度系统,而且通过其加热反馈可以激发热带低频振荡,可以影响全球大气运动。热带海—气相互作用是近年来的研究热点之一,大量的研究揭示了热带海洋状况对大气运动的重要影响,热带海洋与大气间的热量、动量交换过程和物理机制,尤其是海气耦合的数值模拟,已成功地模拟出一些海气作用的物理过程和现象,显示出对行星尺度海气相互作用和 ENSO 事件等研究的能力,并提出了一些新的观点。例如海—气界面上的蒸发与海温相互反馈和风应力的作用,可能是导致 ENSO 形成和演变的重要物理过程。此外,对热带气旋的结构、发生发展、移动及其预报,中低纬大气遥相关、南北半球环流相互作用、热带平流层大气准两年振荡(QBO),以及热带数值天气预报等方面的研究都取得了重要进展。梁必骥等于 90 年代出版的《热带气象学》一书,全面系统地论述了热带气象学基本原理和方法,重点总结了国内外在 70 年代以来对热带气象研究的主要成果。

热带气象学当前的研究热点和可能的发展趋势是:(1)季风环流及其扰动系统的研究,特别是季风低频振荡和超低频振荡以及季风动力学的研究;(2)热带气旋等热带扰动的结构、发生发展和移动的物理机制及其预报研究;(3)积云对流及其反馈机制的研究;(4)海气耦合模式和海气相互作用的动力学研究;(5)中低纬环流相互作用的研究;(6)南北半球环流相互作用的研究;(7)热带边界层动力学的研究;(8)热带大气环流异常的机理以及 ENSO 发生机制及其预报研究;(9)热带数值天气预报的研究;(10)热带过程对全球大气运动和气候变化的影响研究。

今后,在热带地区将发现更多的新的观测事实,将对一些热

带过程和天气系统提出更可靠的概念模式,对季风和热带气旋等环流系统的形成机制、积云对流反馈机制和热带环流异常机理将提出更合理的解释,季风动力学、台风动力学和积云动力学等都将有新的发展,将建立适用于热带的气海耦合模式和可用于业务的数值天气预报模式,从而促进热带天气预报的发展及预报水平的提高,热带气象学将进入新的发展时期。

参考文献

- 1 Riehl H. Tropical Meteorology. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1954. 1~392
- 2 Krishnamurti T. N. Tropical Meteorology. Geneva: WMO - No. 364, 1979. 1~428
- 3 梁必祺,等. 热带气象学. 广州:中山大学出版社, 1990. 1~383

(中山大学梁必祺教授撰)

大气和地表的定量遥感理论 quantitative remote sensing theory for atmosphere and earth terrain

遥感是指不通过直接接触而进行测量和识别的信息技术。现代遥感技术是通过地对空探测或空对地航空航天等运载手段,利用天线电子学技术和计算机技术,在可见光、红外、微波等电磁波段上,对地球表面、大气和自然环境进行监视、探测、记录、成像,并进行数据和图象的传递、处理和分析应用的综合性的科学技术。遥感技术已成为人类探索自然环境、监视和估计地球资源,了解大气地表海洋全球性物理、化学和生物系统变化的高技术成就和最为有效的手段之一。对大气温度、氧、水汽、气溶胶、臭氧、微量气体成份、风场、云和降水,以及地表的植被、农作物和森林、土壤、冰雪、海冰、海洋等,进行多频段、多通道、全极化、主被动联合的遥感,执行全球范围的连续的多系列的星载遥感计划,从实验走向业务实用,已是现代遥感发展至今的特点。

电磁热辐射和入射电磁波(可见光和红外太阳辐射、激光、毫米波和微波的雷达波等)作为遥感信息载体,通过大气、地表遥感对象及其环境的相互作用,为我们提供了被动和主动遥感的大量数据和图象,要充分理解和利用这些遥感图象和数据所包含的丰富的信息,必须要深入地理解和阐明电磁波与复杂各异的遥感对象和环境相互作用的物理机制,精细地模拟遥感对象及其环境,发展定量的遥感理论和数值计算仿真方法。自然界中的遥感对象(大气、潮流、云雨、土壤、植被、森林、冰雪、海冰、海洋等)可以看成是离散的散射体组成的随机介质,或者是介电常数随机起伏的连续随机介质。比如,雨是大气中随雨强有大小分布的随机水滴粒子,积雪是冰晶粒子和空气的随机混和物,植被是盘状的叶、杆状的茎等组成的随机介质层等等。散射体的介电特性、大小、形状、空间取向及其分布,介电常数的起伏统计方差、相关函数,以及随机介质多层复杂的结构或多成份的混和组成,平坦或粗糙的界面等等,构成了随机介质基本的物理模型。研究这些随机介质中电磁波散射、热辐射及其传输的数学物理学理论及其数值计算方法,可以得到主动遥感中各种极化的后向散射、双站散射,被动遥感中的辐射亮度温度,并建立这些量与遥感对象及其环境本身介电的、几何结构的、以及其它重要的物理生物特征性参数(如湿度、雨强、植被含水量、积雪融解、海冰层厚等)之间的定量的函数关系,为遥感图象和数据定量的数值特征的获取及特征参数的反演、分析和利用,提供理论依据。这就是现代定量遥感理论的任务。它对于进一步发展遥感仪器、提出遥感的新方法新手段也具有十分重要的意义。现今定量的遥感理论主要包括矢量辐射传输理论、波的解析理论和随机粗糙界面的散射理论。作为理论模式的反向问题,则是遥感特征参数的反演方法。

1. 矢量辐射传输(VRT)理论:辐射传输(RT)理论研究电磁辐射强度在随机介质中的散射、吸收、多次散射和传输。它从能量守恒的传输方程出发,考虑辐射强度的迭加,包括了散射体和背景的吸收、多次散射和辐射源的贡献,物理意义明确,并且能计算包括多次散射的数值解。RT理论是由1905年斯恰斯特

(Schuster)在解释恒星谱中吸收和发射线时提出来的。在这之后,主要讨论点散射元的标量的RT理论,在天体物理,中子扩散输运理论、燃烧热辐射的工程热物理、大气中光传播等问题中得到广泛的研究。20世纪70年代以来遥感技术的发展,提出了定量遥感理论的要求。这就促使了研究复杂的随机介质中矢量(极化)辐射传输(VRT)的发展。对于各种遥感对象,建立物理模型,如球形散射粒子(雨、云),多成份混和的非球形粒子层(植被),密集分布的球形粒子(冰雪、多年海冰),或连续随机介质(植被、大气湍流),还包括随机粗糙的下垫地表面、风驱粗糙海面等等。研究这些模型中VRT的求解,比如球形粒子VRT的迭代法、非均匀散射介质的不变嵌入法、球形粒子的离散坐标—特征值特征矢量法、VRT方程关于 Φ 的傅里叶展开求解、散射和辐射的蒙特卡罗(Monte Carlo)法等等,并且讨论多层构造的耦合辐射的VRT方程组、水平非均匀的多维的VRT、散射相子的密集粒子的VRT等等。这些工作已取得了很好成功,对实际大气和各种地表主被动遥感数据作了很好的预言、比较和分析。然而,遥感信息的深层理解要求发展更为精细的复合模型,要尽可能与真实的遥感对象的物理结构相对应,理论中的参数系统是可以测量得到的最感兴趣的生物物理参数(如植被含水量,叶面指数等)。理论要有明确的、较宽的应用范围,参数系统对各类段主被动遥感均应有一致的选取规范。连续随机介质的相关函数和相关长度是比较抽象的统计概念,如何明确复杂各异的各向异性的随机介质相关函数和相关长度,还需进一步的研究。合成孔径雷达(SAR)高分辨率成像是主动遥感和成像技术的重要成就。目前的空间计划,如美国SIR-C、欧洲ERS、日本J-ERS等,都运用了SAR遥感成像技术。研究SAR成像全极化散射的理论分析,以及多成份非球形散射体VRT全极化数值解是十分有意义的工作。目前非球形粒子VRT还仅限于瑞利(Rayleigh)低频近似下的一阶二阶穆勒(Mueller)矩阵解。进一步研究VRT全极化数值解,有大量有意义的工作可做。VRT方程考虑辐射强度的独立迭加,即各粒子散射是不相干的。VRT应用到密集散射粒子介质,如冰雪、多孔岩石等,独立散射的假定就不能成立。从波的解析理论出发,由非线性近似的场阶矩的代森(Dyson)方程,和梯形近似的场二阶矩的倍特—萨尔塔多(Bethe-Salpeter)方程,可推导出包括散射相干的修正的VRT方程。在这种密集粒子VRT(DVRT)中,有效波传播常数考虑了密集粒子散射的相干性。当粒子大小与波长可相比时,如米氏(Mie)球形粒子,散射相干和DVRT的求解还有待于进一步的研究,这对于高频遥感冰雪是十分重要的。随着毫米波、亚毫米波器件和技术近年来的进展,尚未充分利用的毫米波频段的遥感开始引起人们的注意,但这方面的理论研究工作几乎还未开始。此外,蒙特卡罗法、有限元法、矩量法等都可以在VRT中得到应用。

2. 波的解析理论:随机介质中波的解析理论从基本的麦克斯韦方程出发,求解随机介质中平均场和散射的平均场强。它包括了场的相干性,能解释由于场的相干作用而产生的后向散射增强等现象。它作为散射场的基本理论,是VRT的理论基础,也是随机粗糙面散射的理论基础。由平均散射场强的广义玻恩(Born)近似,可以得到一层或多层各向同性或各向异性随机介质一阶和二阶散射场强,得到双站和后向散射系数。并由互易性定理,可计算热辐射发射率。这些理论和方法在地表遥感中有不少应用。同时,波的解析理论也为激光在大气中传播、固体地球物理介质介电廓线反演、逆散射理论等等,提供了基本的理论出发点。对于复合模型的波解析理论,还有大量的工作要做。

3. 随机粗糙面的散射理论:在遥感领域中大致有:适用于高频近似下大尺度起伏的基尔霍夫(Kirchhoff)切平面近似和稳相法的几何光学解,适用于低频近似下小尺度起伏的微扰法;以及迭加这两种尺度起伏成为复合双尺度界面的双尺度法。下垫地界面、风驱动的海面等,都是随机的粗糙面。还有在这些基础上所作的周期性的随机粗糙面,倾斜的随机粗糙面等。利用海面随机起伏波谱函数皮尔森(Pierson)谱的实验研究,双尺度粗糙面

散射已成功地应用于风驱海面的后向散射和热辐射。在这基础上,研究了风场(风速、风向)反演的经验性公式。海面上泡沫白帽散射效应也可由有粗糙界面边界条件的高散粒子的 VRT 方程求解。粗糙界面的潮湿土壤的热辐射,以及在植被积雪等问题中作为边界条件的粗糙土壤界面,常作为高斯(Gauss)型粗糙面来求解散射。随机粗糙面散射的上述理论方法成功地解释了由于界面粗糙对散射和热辐射的遥感数据产生的显著影响。但是,在这些粗糙面散射理论的推导中存在不少的假定,实际参数的选取有令人不满意的地方,对复杂各异的遥感对象的数据尚还缺少较为一致的完善的解释。基尔霍夫近似和微扰法是二种极限条件下的解。双尺度法则仅是将二种尺度的近似迭加起来的一种方便的方法。近些年来,还出现了介于基尔霍夫近似和微扰法二者之间的相位微扰法、用计算机模拟随机粗糙面的散射解、全波法等,但是这些理论与方法还不完善。还有傅利叶变换法,积分方程法等,都还仅限于解析形式的讨论,还无法得到数值解。因此,随机粗糙面散射理论的研究及其在遥感中的应用,有大量的工作可做。

遥感理论的反向问题,是遥感对象特征参数的反演。由于测量误差,参数反演问题往往是一个病态问题,即观察数据的微小的误差,可能引起很大的反演误差。反演方法在大气温度和水汽的垂直廓线、气溶胶粒子分布等问题中得到了相当广泛的研究,并达到了实用阶段。这包括晴空大气温度和水汽廓线线性和非线性反演的光滑法、带初始猜值的逐次迭代的物理反演法、贝克斯-吉尔伯特(Backus-Gilbert)法、统计反演-D 矩阵法等。但是,这些反演方法尚未广泛应用于地表参数反演的问题中。这主要由于地表散射和辐射的 VRT 中参数反演与晴空大气积分 RT 方程反演垂直廓线的问题有所不同。但是,如何应用这些方法研究地表特征参数的反演是值得研究的问题。近年来人工神经网络系统的研究和应用,引起了众多广泛的注意。人工神经网络已应用于遥感图象的识别和分类等,它也极可能应用于遥感参数的反演问题。

发展定量的遥感理论,建立一个进行各种大气地表遥感对象的数据和图象信息的定量预言、信息特征的数值分析和重要参数反演的计算机专家系统一定是可行的。

参考文献

1. Ulaby F T, et al. Microwave Remote Sensing, Artech House, 1986
2. Tsang L, et al. Theory of Microwave Remote Sensing. New York, John Wiley and Sons, 1985
3. 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论. 北京, 科学出版社, 1993

(复旦大学金亚秋教授撰)

高频率相控阵多普勒声雷达 20 世纪 80 年代以来,声雷达在边界层气象研究、污染天气监测、厂矿的选址和大气环境影响评价等方面的应用已比较广泛,在天文台选址和无线电传播的研究中也得到应用。但同时也存在探测高度、测量精度和提供更多信息方面,都提出了更高的要求。一般的多普勒声雷达因采用单喇叭和抛物面天线,使得提高发射功率受到限制,从而限制了最大探测高度。天线的波瓣特性也不很理想。天线系统笨重,用于流动性的观测研究很不方便。又因工作的频率较低,造成表面层和低高度边界层内的资料出现空白。因此,在抛物面天线开始应用后不久,就有人利用较小功率的喇叭构成阵列式无线,以期获得较大的发射功率和较高的探测高度。

声雷达回波信号的多普勒频移 Δf 由下式表示:

$$\Delta f = \frac{2f_0 V}{C} \quad (1)$$

式中, f_0 为发射频率, V 为散射体的径向速度, C 为声速。显然,发射频率愈高则单位径向速度产生的频率愈大,对速度测量的分辨率也愈高,从而可能达到较高的测风精度。提高发射声波频率

可使天线尺寸减小,波束方向性改善。发射频率提高后,可以将发射脉冲宽度 τ 减小,从而空间分辨距离 $\tau C/2$ 可以缩短,最低测高可大大降低。采用 6 000Hz 的频率,最低测高可降到 10m 以下,距离门可达 5m。这是就声雷达工作原理本身而言提高工作频率带来的好处。但另一方面,声波在大气中的衰减也随频率增高而迅速增大。其中分子吸收衰减与频率平方成正比,湍流衰减(湍流衰减)也近似与频率平方成正比。因此一般认为频率也不能选得太高,最后只能折衷。近年来商品声雷达的频率就取在 1 500~2 000Hz 范围内。

但事情并非到此为止。边界层气象的研究希望有新型的声雷达能弥补普通雷达的 60m 以下的资料空白区,而复杂地形条件下的中小尺度气象研究工作更希望有轻便的设备。实际应用中发现,影响声雷达探测高度的常常不是回波信号太弱,而是由于环境噪声使接收到的信号的信噪比太低。自然的和人为的噪声频谱主要集中在音频范围的低端。提高发射频率可以避开噪声能量集中的谱区,从而大大提高信噪比。这就部分补偿了因提高频率而增加的传输衰减损失。

相控阵天线,是一种将许多喇叭按一定间距排列成方阵(或其它几何形状),直接向外发射声波的天线装置。这些喇叭发出的声波在远场合成为一束功率较大、方向性较好的声波。对于波束的指向可以实现电控制和电扫描。当工作在高频时,由于采用多个喇叭大大提高了发射功率,在相当程度上补偿了因提高频率而造成的传输衰减损失。

表 1 列出了几种在边界层气象研究中被用到的高频声雷达的性能。除一般用途外在下列方面表现出它的特殊功能。

表 1 高频率声雷达性能

	阿贡实验室(美)	法国国立电信研究中心*	雅典大学(希腊)
频率	4~12kHz	6 000Hz	4 7000Hz
功率	300W	50W	~50W
波束宽度	3°~4°	13°	10°
距离分辨	5m	8.5m	5m
最低高度	8m	13.6m	7m
最高高度	300m	170m	300m
喇叭数	45	1	16

*非相控阵声雷达

复杂地形的大气研究 复杂地形分布着一些峡谷或河道及山脊,主峡谷的气流与各支流存在着相互作用,各支流又是主峡谷气流的质量来源。地面污染源排放的污染物,在这种复杂地形下的扩散,决定于复杂地形上空的气流和湍流特征以及温度结构。高频声雷达能提供这方面的资料。以阿贡国立实验室的工作为例,他们仅用两人就把声雷达安置到了峡谷中心线的沟里。声雷达波束仅 3 度宽,避免了近处起伏地形对声波的反射。该声雷达每 10s 就能得到一条风廓线。配合系留气球观测,他们发现,在稳定的下泄流条件下,地表有 20~80m 厚的逆温层,温度梯度达每 100m 增加 6°C,再上面是近乎等温层直至谷脊(高出声雷达 500m),在他们观测期间,这种温度结构没有太大变化,但是风速、风向在最低的 200m 层内变化很大。一般说来,可以预计下泄流条件下风是顺坡往下吹的。但是声雷达观测结果是,在整个观测期间,在最低的 100m 层内下坡风所占比例小于 50%,而另有 30% 时间有着上坡方向的风分量。导致这一结果的原因主要是峡谷头上各支气流相互作用的结果,有两条溪沟近乎成直角地汇合,造成了风向的大起伏。风速廓线的变化从 100m 处有一极大值,可变为整个 200m 以下都很静稳。而 200m 以上则是峡谷的下泄流风向或大型天气的风向。声雷达资料发现峡谷中存在一个弱而浅的贴地表的下坡风,但不时地因它的上层气流的起伏而遭到周期性的破坏。

表面层和低高度边界层结构 对于一些高度在 60m 以下的浅层锋面结构、内边界层和重力波等现象,普通声雷达是无法观测的,高频声雷达已经观测到一些过去未曾见到的边界层现象以及这一层的风廓线和垂直速度分布。混合层发展的初期阶段,能

帽逆温以上的空气因卷夹作用和其下的空气相混合,这种运动的尺度在时间和空间上都较小,只有高频声雷达才能观测到。掌握卷夹作用的规律,有助于了解在逆温层顶附近积累的污染物在日出后如何向地面扩散。

热通量测量 对于充分混合层有下列近似关系:

$$\frac{\sigma_w^2}{Z} \approx \alpha^{3/2} \frac{g}{\theta} W \theta_v \quad (2)$$

式中, σ_w 为垂直速度标准差, Z 为高度, $\alpha \approx 1.4$, θ_v 为虚位温起伏量, w 为垂直速度起伏量, θ 为位温。由此可以由声雷达测得的垂直速度标准差廓线求出热通量廓线,将热通量廓线的线性段向下外延至 $Z=0$ 处可得到地面热通量。

边界层气象模式研究需要通量的实测数据。直接测量的通量值只代表一个点,而模式的验证和改进需要面上的通量数据,显然,靠增设地面测量点是不现实的。用卫星遥感资料可以推得热通量,但这一方法尚需证实。同样需要较大尺度范围的通量实测值才能与遥感值相比较。声雷达测的通量约可代表 1km^2 以上面积,若声雷达相隔 $15\sim 20\text{km}$ (视地表特征合理分布) 则是一个验证卫星通量估计或数字气象模式的较好手段。已经做过的声雷达通量和卫星估计的通量对比表明在统计上是相当一致的。

降水物理 降水粒子会对声波产生散射。Little 曾探讨过声雷达探测降水凝聚物的可能性,并给出瑞利条件下单个球形粒子的声截面 $\sigma(\theta)$ 和声雷达反射率 η 的表达式:

$$\sigma(\theta) = \frac{\pi^3 D^6}{9\lambda^4} \left(1 - \frac{3}{2} \cos^2 \theta \right)^2 \quad (3)$$

$$\eta = 0.69\pi^3 \lambda^{-4} v^{-1} \sum D^6 \quad (4)$$

式中, D 为雨滴直径, θ 为散射角, λ 为声波波长。对于声雷达的工作频率范围,瑞利条件是满足的。降雨时,声雷达回波由大气散射波和雨滴散射波构成。其多普勒频移可写成

$$f - f_0 = 2(\bar{v}_v + \bar{v}_R)/\lambda$$

式中, \bar{v}_v 为平均垂直速度, \bar{v}_R 为平均雨滴落速。普通声雷达因发射频率不够高,难以避开噪声影响并清楚地把两部分频谱区分开来,而对于工作频率为 6000Hz 的声雷达,则对应降水粒子的落速范围 $1\sim 5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 可以得到 $36\sim 176\text{Hz}$ 范围的频谱。由频谱和速度谱的关系

$$s(f) = \frac{\lambda}{2} s(v) = \frac{\lambda}{2} (f - f_0)$$

可以推断雨滴落速分布。按照水滴落速公式

$$v(D) = 1.787D^{0.67} (\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$$

可以确立速度谱与雨滴谱的关系

$$s(v)dv = \beta N(D)D^6 dD \quad (5)$$

式中 β 为检定系数, $N(D)$ 为雨滴直径在 D 和 $D+dD$ 范围内的数密度。由此可计算雨强和含水量等重要的降水参数。

为了实现用声雷达测量降水,除了提高工作频率外还要避免雨滴直接打在天线上,解决办法是将天线转向水平方向发射,再用一倾斜 45° 角的平板将声波反射到垂直方向。这样得到的雨滴谱,其数密度大体呈指数分布,许多测量结果一致,求得的降水量和同时进行的雨量计测量结果相比也较相符。

对云的测量尚未见进行。云滴直径很小,其反射率比雨的要小得多。半径为 20μ 的云滴的散射截面只有 4mm 雨滴的 10^{-10} 。潘乃先的观测表明,对于低云声雷达只能收到云底处约 $10\sim 30\text{m}$ 厚的回波。目前,声雷达只能对高度较低、含水量较大的云层底部区域进行探测研究,因此还有待于进一步深入。

(北京大学潘乃先、陈诗闻撰)

气象基本要素

大气中 CO_2 及其同位素组成

近年来,由于大量

使用油气、煤炭等燃料,向大气中排放的 CO_2 增多,因此产生了一系列大气与生态环境问题,早在1958年,美国就在夏威夷岛建立了冒纳罗亚观测站,不停地观测大气中 CO_2 浓度的变化。结果表明,大气中 CO_2 的浓度已由1958年的 $315\mu\text{l/L}$ 上升到1984年的 $345\mu\text{l/L}$,瑞士科学家根据冰川气泡中的空气的 CO_2 浓度,计算出1750~1984年间,大气 CO_2 增加了22.5%,即由1750年的 $280\mu\text{l/L}$ 增加到1984年的 $345\mu\text{l/L}$ 。

随着测试仪器的不断改进和测量精度的不断提高,国外科学家已使用先进的质谱计系统地测定了大气中 CO_2 的碳、氧同位素组成,总结出受污染的原始森林和草地地区的大气 CO_2 与相应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的关系。同时还进行了全球范围的大气 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的研究,取得了丰富的资料。1977年世界气象组织(WMO)在澳大利亚塔斯马尼亚岛西北角建立了大气 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的永久性观测站,已取得一些数据。

尽管大气中 CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的长时间变化规律模式还有待于用进一步的观测数据来证实,但是人类活动使大气中 CO_2 的浓度增大和 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低的认识已为人们所普遍接受。

20世纪50年代初,Craig测定了芝加哥大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$,其平均值为 -0.82% ,星期天工业污染程度低, $\delta^{13}\text{C}$ 值最高达 -0.74% ,平常工作日的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则低达 -0.99% 。他发明的液氮冷冻收集大气 CO_2 的装置,至今仍在用。

Keeling对大气 CO_2 的浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行了广泛而深入的研究。1955~1956年,在不受任何污染的原始森林区,他在实验室抽为真空的5L玻璃瓶采集空气样品。然后在实验室用液氮将空气凝结,冷凝物在干冰温度(-78°C)下由部分蒸馏作用从水蒸气中分离出来,得到的气体就是 CO_2 气体,然后测定其浓度并进行同位素分析。除了测定 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值外,还首次测定了 $\delta^{18}\text{O}$ 值。分析结果表明, CO_2 浓度与其 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈反比关系:

$$\delta^{13}\text{C} = I(13\text{C}) + M(1/\text{CO}_2)$$

式中 M 为经验常数, $I(13\text{C})$ 是增加到大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。大气中 CO_2 的浓度与其 $\delta^{13}\text{C}$ 之间存在着昼夜变化规律。中午 CO_2 浓度低, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏高,夜间则恰好相反。这是由于植物的呼吸作用所引起的。因为中午日照强烈,植物的光合作用也强烈,致使大气中 CO_2 的浓度降低。植物吸收 CO_2 时,较易吸收 $^{12}\text{CO}_2$,故 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏高。同时,大气中 CO_2 的浓度与其 $\delta^{13}\text{C}$ 值还有季节性变化规律。夏季 CO_2 浓度最低, $\delta^{13}\text{C}$ 值最大。因为在夏季,总生物量增加,植物的光合作用加剧。在冬季,有机物的生物化学分解作用占优势, CO_2 回到大气圈中。然而, CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的年变化不超过日变化,且 CO_2 浓度的季节性变化在北半球明显,而在南半球则几乎不存在。

1977年3月至1982年2月,Keeling等在南极和北半球大陆采集了517个样品,进行了更加广泛而深入的研究,探讨了大气中 CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节性变化、纬度变化和长期变化的规律。其间,在1979~1980年,Keeling参加了第1次全球大气圈研究计划的夏威夷至塔希蒂岛的往返考察活动,考察地点在西经 155° 附近,从北纬 20° 至南纬 17° ,共分析了8组样品。分析结果表明,在北半球, CO_2 含量和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节性变化与植物的光合作用和呼吸作用相一致;在南半球,其季节性变化则与空气和海水交换时的同位素分馏作用有关。Keeling等(1984)还指出,要精确测定大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,就必须对空气中的 H_2O 浓度进行校正,他们给出了校正方法。

由于工业的发展,现代城市变成了具有重要地球化学意义的地区。弗里德曼和A.P.艾萨用液氮冷冻法制备大气 CO_2 ,再用气相色谱法提纯它,供质谱分析,经此测定了纽约市商业区的大气 CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值。结果表明,城市大气中约有20%的 CO_2 是由汽车排出的废气所形成的。更为有趣的是,他们测定了帝国大厦一楼和顶楼的大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。帝国大厦共有104层,高400多米。一楼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 -1.023% ,顶楼则约为 -0.77% 。

赖特迈尔研究了土壤层中气体的 CO_2 浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系。结果表明,1974年10月至1975年5月土壤气体中 CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值稳定。 CO_2 浓度平均值为 $317.5\mu\text{L/L}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值平均为 -0.96% ; 7~9月 CO_2 浓度增至 $8511\mu\text{L/L}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值降至 -2.15% ; 9月末至10月初, CO_2 浓度由 $10000\mu\text{L/L}$ 急剧降至 $316.2\mu\text{L/L}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值由 -2.15% 急剧升至 -1% 。这与研究期间连续下雨有关。赖特迈尔和汉肖合作研制了采集土壤气体的设备,研究了土壤气体中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与地下水溶解的各类碳酸盐的关系。

格罗宁根大学同位素物理实验室的 Mook 长期从事大气中 CO_2 的碳、氧同位素测定工作。他参加了1979~1980年进行的第一次全球地球物理实验计划;1971~1982年他和 Keeling 合作,从事全球范围大气 CO_2 的浓度与 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值之间变化关系的研究。在美国制备好的大气 CO_2 样品由轮船送至该实验室,由他测定其同位素组成。1986年他发表了《大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 》,系统地总结了自然界中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化规律以及大气中 CO_2 浓度与 $\delta^{13}\text{C}$ 值的日变化、季节变化以及全球变化的规律。

1982年9月,茨木气象研究所地球化学研究室的科学家,在距东京东北方向60km的筑波科学城随机采集了大气样品。用无扩散红外分析仪自动测量的大气 CO_2 的浓度,用 MAT250 测定其 $\delta^{13}\text{C}$ 值。分析结果表明,大气 CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的昼夜变化显著,中午大气 CO_2 的浓度为 $330\mu\text{L/L}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -0.7% ,到晚上其浓度则约为 $400\mu\text{L/L}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值约为 -0.9% 。

1984年,弗里德利等测定了南极冰川气泡中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。结果表明,400~800年以前形成的冰川气泡中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比1984年大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值高约 0.11% ,前者的平均值为 -0.67% 。这与科学家根据模式估算的结果非常一致。前者的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 -3.14% 。(相对于 PDB 标准),而测得的其它地方大气 CO_2 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为 0% 。氧同位素组成差别较大,可能是 CO_2 和 H_2O 之间发生氧同位素交换反应所致。1984年夏季,内夫特尔等在赛普尔冰川站打了200m深的钻孔,测定了冰川气泡中 CO_2 浓度,其结果与南极其它各站冰川的 CO_2 浓度是一致的。1750年大气中 CO_2 的浓度是 $280\mu\text{L/L}$,1984年实测大气中 CO_2 浓度是 $345\mu\text{L/L}$,主要是人类活动的影响使大气中 CO_2 的浓度增加了 2.25% 。

自1977年10月世界气象组织(WMO)在塔斯马利亚岛建立大气 CO_2 的浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的永久性观测站以来,截止到1980年8月为止,已连续观测了3年,测得3年中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的平均值为 -0.78% ,此观测点没有发现季节性变化规律,仅 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现较弱的降低趋势。

(中国科学院兰州地质研究所 李兆兴、徐永昌撰)

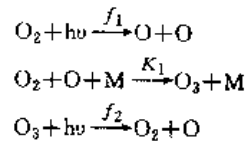
臭氧洞 ozone hole 又名“臭氧窗”。主要指一地区高层大气中臭氧含量比周围其它地区大为减少的现象。根据对20世纪70~80年代初,南极考察基地和卫星观测资料进行的分析,发现南半球春季(9~11月)中纬度地区大气中臭氧量较多,而低纬与高纬地区则较少,形成了一个沿经度线的水平方向臭氧量梯度,中心低值位于南极极点附近。这种水平分布,致使南极大陆由于大气臭氧量少使得对太阳紫外区(波长在300nm附近)辐射的吸收效能大为减弱,形成了类似于人工温室顶打开了天窗,大量紫外辐射透射到地表面,或者说是南极地区高层大气中臭氧层出现了紫外辐射而言的漏洞。这种现象在近些年,年复一年地出现,中心值降低并且范围扩大的程度严重,从而引起全世界的关注。过量的紫外辐射,威胁着人类和生物的生存。原因在于这个波段的紫外辐射,最突出的生物学效应是阻止细胞分裂增生,破坏新陈代谢。其次,臭氧的消平衡循环的光化学反应过程中所释放的热能,是平流层的主要热源。一旦臭氧量较常年减少,平流降温响应,后果就是使得全球大气环流出现异常,从而影响气候。为此,联合国世界气象组织(WMO)早在1978年就发表了题

为“人类活动对臭氧层的影响及一些可能的地球物理后果”的宣言,对臭氧洞现象所产生的生物与气候效应作了一系列的评估与趋势的预测,并出面组织领导制订了国际协调计划,开展全球性三度空间的对臭氧有关的平流层诸要素的观测与研究,即 MAP 计划。并向全世界提出一系列对策性的建议,诸如通过生物技术培育耐紫外辐射的水稻等作物新品种、停止生产对臭氧层具有极大破坏作用的氟氯烃类化合物、研制取代氟利昂的新一代制冷剂与相应的制冷设备等等。

1881年, Hartley 观测到臭氧的紫外光谱吸收带,1913年 Fabry 对太阳光谱的测定分析,进一步证实了大气层中存在有臭氧层。1920年 Fabry 和 Buisson 对大气臭氧作了定量的分析。1929年 Dobson 对分光光度计的研制成功,极大地改善了对臭氧层的观测手段,提高了测定的精度。20世纪50年代以来,世界气象组织曾多次主持组织了国际地球物理年活动,利用地面观测站、施放平流层臭氧探空仪以及气象卫星,对臭氧层实施了三度空间的监测,并将所得结果用公告形式加以发表。大气臭氧的水平与垂直分布以及季节的年度的变化,都有丰富的观测数据,使人们对臭氧层及其时空分布的了解逐渐加深。30~50年代,中国在上海与北京开展过短期的臭氧观测。

1930年 Chapman 创立了臭氧的光化学理论;1954年 Ramauathan 提出了大气臭氧与大气环流关系的论述。他们的研究工作对臭氧层理论的形成与发展,都有着重大影响。

Chapman 于1930年首先提出的是纯氧大气模式,其基本反应主要有:



其中 f_1 为太阳紫外光分解速率系数, K_1 为反应速率系数, $h\nu$ 为紫外光子数(量子效率皆为1)。这是由3组反应构成:氧分子被光分解为氧原子;分子氧与原子氧碰撞结合为臭氧分子,反应过程中由第3体 M(以 O_2 和 N_2 为主)携释放的热量,使正反应得以持续;臭氧分子吸收紫外辐射再次分解,这就是臭氧的消平衡过程。它们的反复循环进行,其物理后果是吸收了大量太阳紫外辐射与提高了平流层的温度。这个经典性的光化理论,阐明了臭氧层的形成和地表面上太阳紫外辐射被中断的事实。

1950年 Bates 和 Nicolet 在 Chapman 理论上,提出了湿洁大气模式,即考虑了水汽经光分解产生的活性基($\text{H}\cdot$, $\text{OH}\cdot$, $\text{HO}_2\cdot$)与臭氧分子反应而消耗了臭氧。1985年美国苏珊·索罗门针对南极上空存在的冰晶云,结合对氟氯烃影响臭氧层的模拟研究,证实了水汽在消耗臭氧的反应过程中起着催化剂的作用。

1955年 Nicolet 认为电离层光分解产生的氮原子与氧分子反应生成一氧化氮,向下输运进入平流层并与氧原子碰撞生成二氧化氮。 NO 与 NO_2 皆可与臭氧分子反应使臭氧消失。同时 NO 与 NO_2 又可与水汽光分解产生的氢原子结合而生成活性基(如 $\text{OH}\cdot$)。也就是说 NO 、 NO_2 既是臭氧直接消耗者又是间接消耗者,这就是氮氢氧大气模式。显然它比较前两类模式又向前发展了一步,更为接近洁净大气的实际。此后一些研究还指出除了大气本底含氮化合物外,还要考虑工农业生产与生物和土壤细菌活动排放的含氮化合物(例如氨、硝酸等),通过对流层向上输运进入平流层,成为臭氧的消耗者。

1974年 Molina 和 Rowland 首先指出氟氯烃是臭氧层遭到破坏的一个重要角色,并于1975年对此作了系统的研究。

70年代以来一些研究着重于寻找臭氧消耗者的来源,发现大多数与人类活动有关。至于火山爆发、核弹试验等,也是大气中含氮与含氟化合物剧增的原因。但南极地区尽管没有工农业,又缺乏植物,地广人稀,可是全球性大气环流仍然可以将中低纬度的臭氧消耗者向高纬度的南极输送,使其成为臭氧洞形成的物质基础。

至于南极臭氧洞成因,从理论角度来说,虽然众说纷纭,但就目前为止,可归为两类学说:(1)动力学效应学说。通常在夜间和极夜时期,各种光分解反应都已停止,唯有粒子之间碰撞反应仍在进行,臭氧量的消耗基本上已停止,故此期间南极(冬季)臭氧洞就不明显。一旦极夜结束,太阳开始照射南极,随着太阳高度逐日加大,臭氧光分解反应逐日加强,所释放的热使臭氧层增温而产生上升气流,携带部分氧原子上升,并在大气环流推动下向中低纬地区输送,使南极臭氧洞逐日形成并加深扩大。这个学说由实测臭氧总量季节变化,得到证实。(2)化学效应学说。由平流层中各种化学反应引起的。由于各种工农业生产排放到平流层中的臭氧消耗物质,逐年增多,导致臭氧洞逐年表现为加深扩大。这个学说也由实测臭氧总量的年际变化趋势所证实。

目前,该领域的研究热点主要有:(1)对平流层中臭氧生成的光化反应的高精度的测定技术,尤其是光分解速率系数的测定技术;(2)氟、氟、氮、氢及其化合物之间关系以及对臭氧层的影响;(3)南极臭氧洞与全球大气环流之间的耦合以及对流层与平流层、平流层与电离层之间的交流过程和它们对臭氧层的影响机制;(4)臭氧总量的时空分布与大气环流之间的相关分析和耦合机制;(5)太阳紫外辐射量的变化对全球生态系统的生物学影响与对策以及人类活动对臭氧层的影响与对策;(6)平流层臭氧量的变化对气候的影响及其反馈效应。

参考文献

- 1 海克伦·丁.大气化学.北京:科学出版社,1983.38~59
- 2 王贵勤,等编译.大气臭氧研究.北京:科学出版社,1985.1~5,425~476
- 3 国立极地研究所编.南极气象学.北京:海洋出版社,1991.21~125,214~217
- 4 叶笃正,等.当代气候研究.北京:气象出版社,1991.266~271

(江西师范大学侯贻生教授撰)

云化学模式 20世纪80年代以来,云化学研究取得很大进展。作为研究手段之一的云化学数值模拟,则使模式包括云的动力过程、热力过程、微物理过程以及化学过程。

云化学模式依赖于云和降水的动力过程及云的微物理过程。一个完善的云化学模式需要将云动力过程、云微物理过程与云化学过程有机地结合起来,云化学模式还必须考虑不同云和降水系统时间、空间尺度的差异。由于时间、空间尺度的不同,这些系统内发生的微物理和动力过程也有很大的不同,从而也影响着发生于其中的化学过程;云化学模式中模式变量,不仅要包括大气动力过程、热力过程、微物理过程,还要包括多种污染物在气相、液相、冰相中的浓度变量。由于云化学模式变量的多样性及计算复杂性,每个模式必须进行简化,但又要使模式能够描述云化学的主要特征。

云中水成物是云中化学反应的主要场所,各种水成物相互转化的微物理过程又决定了水成物中污染物浓度的变化,所以云微物理过程是云化学模式的重要组成部分。

除了水汽,云中包含大小不同、各种形状和密度的多种水成物。由于一些云化学过程强烈依赖于云中水成物的大小,所以对微物理过程进行详细描述是很必要的,但这又增加了计算量。在处理云微物理过程时,常常采用一个简便方法:将水成物分成几类,每类有各自特定的谱分布,并且对每类水成物之间相互转化的过程采用参数化处理。一般将水成物分成5类:云滴、雨滴、冰晶、雪、霰。水面物的谱分布一般选择 Marshall Palmer 分布。但由于云滴、冰晶较小,许多特性,如下降末速度、气体在其中的溶解速率等,不明显依赖于其大小,故可以认为云滴、冰晶大小是均匀的。

云中水成物之间存在多种质量交换和相互作用,例如:凝结、蒸发、冻结—融化,云水向雨水的自动转化,雨滴捕获云滴,雪捕获冰晶和云滴等微物理过程。一般来讲,在建立化学模式中

需考虑这些微物理过程。而另外一些过程,例如:水汽在雨滴或霰上的凝结或凝华,雨滴的破碎及冰晶的蒸发等或相对于其它过程要慢很多,或对云化学模拟影响较小,一般认为可忽略。

云中存在多种污染物,污染物之间发生气相、液相化学反应,而其中只有少数反应是重要的。 SO_2 和 NO_x 是空气污染中两种最重要的化学成分,这里以它们为例说明云化学模式中需要考虑的化学反应。

通过比较 SO_2 、 NO_x 各种反应的速率,可以得出在云化学模式中一般需要考虑以下反应: H_2O_2 液相氧化 SO_2 ; O_3 液相氧化, SO_2NO_2 和 OH 自由基之间的气相氧化反应,生成的 HNO_3 可溶于水; NO 与 OH 自由基的气相化学反应,生成的 HNO_2 溶解于水中; Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 液相催化 SO_2 和 O_2 的反应;如果大气中 MHP 和 PAA 的浓度达到 10^{-9} 的量级, SO_2 被 MHP 和 PAA 的液相氧化。

在描述以上几种反应时,首先要知道反应的速率常数(随温度而变化)。在各种文献中,这些速率常数的选择存在很大的差异,而这些差异又直接影响到云化学模式的计算结果。

在云化学模式中,如果所考虑的云系统(如层云)的持续时间较长,则考虑了较详细的气相化学反应机理。

云凝结核可以由以下几部分组成:(1)硫酸盐,包括 H_2SO_4 和铵盐,其中 H_2SO_4 强烈影响云水的 H^+ 浓度值。(2)碳酸盐来自泥土,由碳酸镁和碳酸钙组成,碳酸盐在云水中起中和酸性的作用。(3)氟酸盐,来自海洋,由 NaCl 和 KCl 组成。(4)痕量金属,包括 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} ,这些离子起催化作用,使云水中溶解的 SO_2 氧化成 H_2SO_4 ,导致云水酸化。

由于云凝结核的成分影响了云水中各离子的浓度,因此气溶胶的成核率(即总的气溶胶质量中成核的比率)是云化学模式中很重要的参数。Jensen 和 Charlson(1984)研究了气溶胶的成核清除过程,详细讨论了气溶胶成核率随一些物理、化学因子(如:上升气流速度、含水量、气溶胶浓度及谱分布)的变化。Flossmann 等(1985,1987,1988)对云中气溶胶清除过程进行了详细研究,结果表明成核清除是云中气溶胶清除的最重要的过程。

许多模式讨论了成核过程对硫酸盐总沉降的贡献,Hegg(1983)运用了参数化方法讨论了雨水的酸化过程,假设成核率为 0.8,则成核过程对硫酸盐沉降的贡献可达 50% 以上。Hegg 等(1984)的计算结果在 20%~60% 之间,Taylor(1989)的结果在 30% 左右。因此,气溶胶成核清除对酸雨的形成及其中的化学成分起重要影响,是云化学模式中必须考虑的重要因素。

一般认为云内气溶胶清除主要是通过成核来完成,尺度小于 $0.1\mu\text{m}$ 的小颗粒不能做为云凝结核,它们主要是通过 Brown 运动和漂移作用被清除掉,但它们的贡献一般是可忽略的。

雨水对云下气溶胶粒子的冲刷是清除大气气溶胶的重要过程,冲刷机制主要是雨滴对气溶胶粒子的惯性重力碰并。雨滴对气溶胶粒子的收集效率依赖于气溶胶的大小,当气溶胶粒子小于 $1\mu\text{m}$ 时,收集效率急剧减小。Hales(1978)指出冲刷过程的处理可以使用类似气体清除的方法,清除系数依赖于降水速率。

Hegg(1983)运用一参数化方程来描述雨滴对云下硫酸盐气溶胶的冲刷。计算结果表明,这部分对硫酸盐总沉降的贡献一般小于 10%,但是如果计算中使用 Radke 等(1980)观测到的气溶胶谱分布,则云下气溶胶的贡献可达 30%。这方面工作之间还存在很大的差别,主要原因可能在于对硫酸盐气溶胶的谱分布了解不够,并且还要考虑湿度对气溶胶大小的影响,因为硫酸盐气溶胶是高度吸湿性的核。

一旦云滴形成,污染气体(如 SO_2 、 H_2O_2 、 O_3 、 NH_3 等)在云滴中溶解、电离并发生化学反应,从而使云滴中污染成分发生变化。在云化学模式中,污染气体从气相向液滴的质量输送过程是一个重要的问题。

气体被液滴的清除主要包括以下过程:气体向气液表面的气相扩散,气体从气液表面进入液滴,气体在液滴中的扩散以及

气体在液相的化学反应。如果考虑液相化学反应的总速率,则必须判断以上哪个过程是速决过程。

要判断气体从气液相表面进入液滴的速率,必须知道气体的容度系数 α 。测量结果表明,室温下 SO_2 气体的容度系数 $\alpha \gg 0.05$,从而说明该过程相对其它过程足够快。由于气体从气相向液相输送的总速率对于大于0.01的 α 并不敏感,故一般在云化学模式中认为 α 足够大,从而可以忽略所有气体在气液表面输送的影响。

气体在液相的输送过程一般都快于气体在气相的输送。对于直径 $20\mu\text{m}$ 的液滴液相扩散的张弛时间为 $8 \times 10^{-3}\text{s}$,对于直径 1mm 的液滴为 20s ,考虑到云化学中液相化学反应的张弛时间一般大于 1min ,所以可以认为气体在液相的质量输送过程是不重要的。

Iribarne和Cho(1989)运用气体在气相的质量输送公式来讨论云化学中几种最重要成分(SO_2 、 H_2O_2 、 O_3 、 NH_3 、 CO_2 、 NH_3)在 25°C 云滴中达到溶解平衡所需要的张弛时间,计算结果表明,对于云滴(直径为 $20\mu\text{m}$),所有这几种气体的张弛时间都低于 10s ,远远小于液相化学反应的张弛时间,所以可以假设各种气体对云滴是溶解平衡的,这就是所谓的云滴的“平衡清除”。

Iribarne和Cho(1989)还讨论了以上几种气体在雨滴中达到溶解平衡所需要的张弛时间。计算结果表明,只有对于难溶性气体,例如 O_3 、 CO_2 ,才能使用平衡清除的概念,而对于可溶性气体,由于张弛时间较长,必须使用气体扩散运动方程来讨论雨滴对气体的清除。

雨滴对云下污染气体的冲刷是开展比较早的工作。1979年,Overton等运用拉格朗日方法研究了各种大小的雨滴对多种污染气体的清除及污染气体在雨滴内的液相化学反应。1985~1986年,Kumar建立了一个云下气体清除的欧拉模式,该模式可以考虑多种污染气体在雨滴内的溶解及相互间的化学反应。

云下气体冲刷对总的酸沉降贡献大小,不同的工作之间差别较大。1983年,Hegg认为雨滴在云下的滞留时间较云内的滞留时间要短得多,所以云下气体冲刷是可略的。但是1989年,Taylor给出云下的贡献可达30%,并指出这是由于相对比较高的云底(3km)和地面附近较高的污染气体浓度引起的。刘仲仁和黄美元(1989)对中国西南地区的酸雨形成机制进行了研究,结果表明该地区的酸雨主要是由于云下气体冲刷造成的。

近几年来所发展的几类云化学模式主要有以下几种。

箱状模式 在云化学模式中最简单的是箱状模式。这类模式把系统做为一个整体,来考虑系统内污染物的化学演变。Hong和Carmichael(1983)把云做为一个flow-through reactor来研究云中硫酸盐的形成。Hong和Lee(1988)又将该模式推广到云内、云下两个系统的酸化过程。Chameides(1984)用箱状模式研究了海洋性层云的光化学反应,其中包括自由基的反应。这种模式虽不能说明系统内部的细节,但在了解系统化学组成的时间演变方面是很有用的。

层云化学模式 层云的性质决定了在层云化学模式中可以将各变量看成是水平均匀的,仅是高度的函数。云内上升速度、气压、温度不随时间变化,在计算中可以预先给定。Qin和Chameides(1986),Qin(1989)建立了一个暖层云降水化学模式来研究云中可溶性气体的清除过程。模式在给定温度、压力、上升速率垂直廓线下,计算了水汽、云水、雨水以及可溶性气体在气相、液相的时间、高度分布。Lin和Chameides(1990)将其推广到包括云下气体的清除过程。模式讨论了云清洗和雨冲刷在可溶性气体清除过程中的相对重要性,计算结果表明,雨冲刷起主导作用。

积云化学模式 积云在空气污染物的化学转化、输送方面起十分重要的作用。近几年来发展了许多积云化学模式来研究积云内发生的化学过程。这些模式所考虑的化学过程都很相似,但由于所考虑的积云动力学过程和微物理过程有很大差别,模式结

果也有很大的不同。

这些积云化学模式的化学过程主要考虑云凝结核的活化过程,其主要成分是 H_2SO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 NH_4NO_3 ,考虑了 H_2O_2 、 O_3 液相氧化 $\text{S}(\text{IV})$ 生成 $\text{S}(\text{VI})$,以及 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 液相催化氧化 $\text{S}(\text{IV})$ 。

在积云微物理过程处理上,多数模式只考虑暖云,有的还包括冰相的存在,由雪和霰组成。Walcek Taylor(1986)和Lee(1986)考虑了非降水云的情形,而Tremblay和Leighton(1984、1986)、徐家骥等考虑了降水云的情形。

在积云动力学处理上,Walcek和Taylor(1986)使用了一个定态的一维模式,假设空气块以均匀速度上升,云空气和云环境之间的相互作用使用云顶夹卷的公式来处理。显然假设空气块以均匀速度上升是很不符合实际的。Tremblay和Leighton(1984)的一维模式中预先给定空气上升的速率廓线,云空气与云环境之间的交换用质量连续性方程来处理。显然,这个模式的动力学处理也过于简单。1986年,Lee(1986)使用了同心圆柱的一维半云模式,而Taylor(1990)的云模式对该云模式进行了修改。徐家骥(1990)等使用了二维面对称积云模式。Tremblay和Leighton(1986)使用了三维云模式,但计算量很大。

近几年来,积云化学模式已取得了许多结果。Walcek和Taylor(1986)的结果表明:在云内 $\text{S}(\text{IV})$ 的各种液相氧化机制中,在云底以上几千米内主要是 H_2O_2 液相氧化起作用。而在云的中高层 O_3 和PAA的氧化起作用。模式结果还表明:为了更好地预测云水的化学组分,必须对云化学参数、云微物理参数、云动力学参数进行更加细致的描述。Tremblay和Leighton(1986)的结果表明:如果云水的 H^+ 浓度很高, O_3 的氧化 $\text{S}(\text{IV})$ 并不重要,云中的 SO_4^{2-} 主要是由 H_2O_2 液相氧化生成的。他还将计算结果与实际观测进行了定量比较,发现模式计算值比实际观测的云水的离子浓度小,有时小到6.2倍,这说明进一步完善云化学模式是很必要的。

中尺度降水系统的云化学模式 中尺度气旋中的雨带是中尺度的降水系统,它的时间和空间尺度都不同于单个积云,对这些系统进行模拟是困难的,主要是目前对它的起源及动力过程还不甚了解。近几年发展的锋面雨带的云化学模式主要有Hegg等(1984)的暖锋雨带的硫化学模式和Rutledge等(1986)的狭窄冷锋雨带的硫、氮化学模式,这些模式都预先给定流场,计算结果给出化学组成在云水、雨水或冰相的二维定常分布。

Chaumerliac等(1987、1989、1990)采用了气流过山的三维中- β 尺度模式来研究气流过山时地形强迫形成的地形云和降水的化学过程,结果表明了在云化学模式中,将云动力过程、微物理过程、云化学过程结合在一起研究的重要性。

长距离输送中的云化学模式 近几年来,国外发展了许多空气污染物的长距离输送模式(LRT)以及三维欧拉酸沉降模式(RADN)。在这些模式中,除了考虑空气污染物的排放、输送、化学转化、干沉降外,还考虑了云以及云内发生的一些物理、化学过程,由于ERT模式的计算量很大,所以在LRT模式中云模式的处理都很简单。

(南京大学刘小红撰)

燃烧 AgI 的丙酮溶液产生冰核气溶胶

AgI是迄今发现的最好的人工冰核物质,它具有成冰调高和成核率高的优点,同时毒性较低,用量少。AgI之所以具有极高的成冰效率,除去它的晶体结构和晶格常数与冰十分接近之外,还因为它能通过高温产生高度分散的冰核气溶胶粒子,从而大大提高了单位质量AgI所产生的冰核数。某些无机和有机物也具有良好的核化冰晶的性质,但在高温下要分解,只能用机械粉碎来分散,产生不了细小的粒子,因而很难达到像AgI那样高的成核率。

AgI气溶胶常用燃烧AgI的丙酮溶液产生。获得AgI气溶胶最常用的方法是将AgI溶于加有增溶剂的丙酮溶液中,再用专门设计的发生器或燃烧炉来燃烧,使用方便。

用于地面人工增雨作业的燃烧炉,常用丙烷(液化石油气)作燃烧气体,同时也作为将 AgI 丙酮溶液喷成雾状的压力源,雾状溶液与丙烷气体同时燃烧。用于飞机上的发生器没有燃烧气体,直接将 AgI 丙酮溶液喷成雾状后燃烧。燃烧时温度在 1000℃ 左右。在燃烧过程中,一部分 AgI 在高温下升华,再冷却凝结成 AgI 粒子;一部分 AgI 在高温下分离为 Ag^+ 和 I^- 离子,再结合成 AgI 粒子,由于碘易逸散,再结合不完全,所以在发生器的器壁上,常附有银的沉积物。

AgI 粒子尺度的大小直接关系到单位质量 AgI 所产生冰核数目的多少,而粒子尺度的大小主要与燃烧温度和气溶胶的排出状况有关。温度过低($<600^\circ C$)容易产生粗粒子,气溶胶排出物不畅,风速太小或 AgI 燃烧率太高,会使发生器周围 AgI 粒子浓度过高而由聚合产生大的粒子团。为防止冰核气溶胶粒子在发生器周围堆积,最好的办法是迅速通风稀释,这将降低局地粒子浓度,减少聚合,降低粒子的平均尺度,从而提高 AgI 的成核率。机载 AgI 发生器工作在通风良好的条件下,飞机的空速通常在 100m/s 量级,有利于产生细微的粒子,发挥 AgI 的效率。国外多数测量表明,燃烧 AgI 丙酮溶液产生的粒子峰值直径约为 0.03 μm ,主要分布在 0.005~0.2 μm 间。

丙酮是一种良好的有机溶剂,但在制备 AgI 丙酮溶液时,仍需先加入增溶剂,才能溶解 AgI。常用的增溶剂有 NaI, KI 和 NH_4I ,它们在溶液中与 AgI 的摩尔比通常取 1:2。

随着冰核研究工作的深入,发现使用不同增溶剂所产生的 AgI 气溶胶性质有很大差别。还发现在配方中加入其它化学成分,能使成冰阈温和成核率提高,于是导致了产生复合冰核的一些研究工作。

AgI 冰核气溶胶粒子入云后与水汽和云滴相互作用,主要通过 3 种机制产生冰晶:凝华核化,凝华-冻结核化和过冷云滴与 AgI 核接触而引起冻结的接触核化。具体通过何种机制产生冰晶,除云的条件外,还取决于冰核本身的性质,如附有吸湿成分的 AgI 核,容易通过凝华-冻结机制产生冰晶。事实上,这 3 种机制在冰核入云后可能同时存在,只是它们的相对重要性不同而已。

模拟自然云条件下对 AgI 气溶胶进行云室检测,比直接测量花费代价小,同样能回答播云催化所关心的问题。检测的可靠性取决于模拟的真实程度。云室的种类很多,测试的条件与程序也有差别,使各家的成核率检测结果的差别高达 1~2 个量级。因此在对不同冰核气溶胶进行比较时,用同一云室取得的资料才有比较意义。还必须注意到,云室检测普遍存在的一个问题是:注入云室的 AgI 粒子的浓度比实际播云时引入的浓度高数个量级,这是为了在有限的云室空间中得到足够的冰晶数目所要求的。其结果,有时会造成云室内的“过量催化”引起云室参数的扰动,还会夸大接触核化的核化速率。尽管如此,云室检测仍是目前研究各种人工冰核性质的通用方法,并给出了很多定量结果。

燃烧 AgI 丙酮溶液是人工增雨的一项重要催化技术。不同配方的丙酮溶液产生的 AgI 气溶胶的成冰性能是不同的,有的配方还形成含其它化学成份的 AgI 复合冰核,具有比纯 AgI 气溶胶更好的成冰性能。

评价和正确使用一种催化剂(或其配方),除了了解它的成冰阈温和成核率随温度的分布外,还应了解它的核化速率和核化机制,并结合催化云的条件和冰核气溶胶在云中扩散情况予以综合考虑。这样才有可能使催化作业更具针对性,提高催化作业的效果。

人工增雨试验作业包括一系列技术步骤,选好和用好催化剂是其中一个重要环节。全面了解催化剂的性能——成核率、核化速率和核化机制,对于作业的设计包括催化剂用量与撒播方式、估计催化后云中冰晶浓度以及预告催化效果和降水分布等是十分重要的。在人工催化影响的云模式计算中,如果引入催化剂核化速率的资料,将可能得到更符合实际的定量结果,最近 Blumenstein 关于山地云催化的模式计算便是一个很好的例子。

(气象科学研究院鄧大雄撰)

动力气象学

大尺度大气动力学 大气运动的不稳定性问题,是一个经典而又困难的问题。非传统的不稳定性理论近年来有了较大发展。Arnold(1965)提出一种的变分方法来求不稳定性判据。Arnold(1965)和 Dikii(1965)给出了二维无辐散模式的带状流或常定曲线的不稳定性判据。Blumen(1968)给出了三维带有等焓下垫界面的地转模式的不稳定性判据。McIntyre 等(1987)对这一理论方法作了推广,Shepherd(1988,1989)应用 Arnold 的不稳定性定理,提出了正压和斜压—基流非线性的普遍关系式。曾庆存(1979,1985,1986,1990)将 Arnold 的定理推广为大气运动中普遍的不稳定的变分原理。得到包括正压或斜压,分层或连续模型,准地转或原始方程组,带状或非带状基流,定常或非定常基流等各种可在大气模式普遍适用的不稳定性判据。特别是他第一次得到了关于非定常流、地形扰动和非地转流的不稳定性判据,具有重要意义。

纬向非均匀气流的稳定性问题正成为大气动力学研究的一个热点,这需要广义的时间正交模理论来处理,近年来提出了不稳定理论及模式结果分析的新的论点。即非纬向气流的不稳定度依赖于绝对不稳定度的存在(Merkine, 1977, 1978, Farrell, 1983)。Pedlosky(1989)进一步研究了纬向非均匀气流的不稳定动力学特征。

Farrell(1985,1988,1989)指出,由含 Ekman 摩擦的 Eady 和 Charney 模式的初值问题的解表明,对于气旋空间尺度和真实的垂直湍流粘性系数值,扰动有大的瞬变增长,但所有的标准模指数衰减,这意味着指数不稳定一般不能解释中纬气旋尺度扰动的发展。Valdes 和 Hoskins(1988)则认为,即使含有 Ekman 摩擦的实际大气纬向平均状态对标准模也是不稳定的,并肯定了 Farrell 注意初值问题的意义。他们认为对单个系统,初值问题和非标准模增长问题是十分重要的,他们得到初始瞬变增长率在初始 1~2d 中比较标准模增长率大两倍。Farrell(1989)则认为他们的 e 折叠时间尺度为 132s 不恰当。看来,单个系统的初始瞬变增长,或非标准模的增长问题已成为当前研究气旋生成机制的一个很重要研究方向。在研究动力学非指数增长的扰动发展时,进一步探讨不稳定理论是很有意义的,这种扰动与变形场有关,一般积分约束条件,观测研究和模式研究一样可用于推广和发展新的设想。这种设想包括与非标准模形式的波动有关过程,在波动和大气环流的能量学中,这种暂时增长的作用,以及它与传统的标准模增长的关系值得进一步研究。

叠加在基流上的小扰动的演变过程是一个经典的理论问题。长时间以来,人们特别注意其中的运动失稳问题,并创造了标准模求解法,但 Case(1960)和 Burger(1966)指出,只有当基流为零时,对应离散谱函数才是完备的;而当基流不为零时,对应于离散谱的谱函数(特征波动)可能是不完备的,仅有离散谱的线性组合,不能表示任意的扰动。曾庆存(1979,1982,1983)、卢佩生(1981)、陈久康(1980),为了克服这一困难,改用波包表示法,指出扰动发展与否的普遍性判据,以及波幅、波长、波速随时间变化的规律性。陈久康(1980)还提出了 β 效应随纬度变化对波演变的影响,首次提出了 δ 效应问题。杨惠君(1987,1988,1989)采用 δ 平面近似,系统讨论了 δ 效应对 Rossby 波包的演变影响问题。

曾庆存、卢佩生等(1986,1990)采用更通用的方法,研究了线性准地转模式、线性原始方程模式的谱及相应的标准波动的性质和结构,给出了正压原始方程连续谱的表达式,并指出在波一流相互作用中连续谱占有重要地位。

Hoskins 等(1981)研究了球面大气对热力和地形强迫的定常线性响应。黄荣辉等(1982)给出了球面 34 层准地转模式对大地形和定常热源的响应。Alpert(1983)、Jaegmin 和 Linden

(1985)、Lin(1983)认为,运用线性理论就可以得到定常波动的主要特征。Nigan等(1986)通过精密的大气环流模式研究,证明了线性理论的适用性,并指出了它的缺陷。雷兆崇(1988)研究了球面多层原始方程模式对大地形和热力强迫的线性和非线性定常响应。认为在纬向平均基本气流相对较弱的区域和层次上,非线性响应与线性响应有明显大的差异。30°N以南的热带区域加热场对中高纬行星波有重要影响,但不如热带外区域加热场及地形动力强迫作用影响大。Linden(1986)也曾对热带加热在强迫高纬定常波中起着主要作用提出质疑,认为PNA型只能说明行星波变化的18%,显然,PNA中热带部分忽略后,并不会对行星波的变化有大的影响。

Eliassen和Palm(1960)、Charney和Drain(1961)提出了关于平均气流和波动相互作用引起平均场变化的无加速理论。这一理论由于Andrews和McIntyre(1976)引进准格朗日意义下的平均气流转换方程和定义新的E-P通量以及余差环流而得以广泛推广。Edmon、Hoskins和McIntyre(1980)将无加速定理推广到任意振幅的扰动,并借此研究定常涡旋和瞬变涡旋对平均气流的作用。Stone和Salustri(1984)则定义E-P通量,同时证明湿空气中的无加速定理。Andrews(1983)、Plumb(1985、1986)则把E-P通量概念推广到三维的情形,并讨论了波与非纬向对称流相互作用守恒定理。Pfeffer(1981)曾把郭晓岚(1956)的平均经圈环流方程引进波一流相互作用的研究中,从而考虑了波一流相互作用时,次级环流的影响。吴国雄(1989)采用类似处理方法,提出了原始方程中的无加速定理。该理论还推广到湿空气中,得到有无凝结作用时,E-P通量有很大不同。

近年来长期天气过程物理机制的研究日益深入,特别对北半球三维遥相关及其物理机制做了不少研究。Wallace等(1981)发现了北半球冬季5个遥相关型,Hoskins与Karoly(1981)把叶笃正所提出的Rossby波频散理论推广到球面大气中,提出了“大圆路径传播理论”。黄荣辉等(1982、1983、1984)利用波的折射指数平方与E-P通量系统地研究了准定常行星波的传播规律,特别是提出了两支波导,引起国内外重视。陆维松(1989)直接从物理直观求得球面上定常波传播的普遍方程。由于准定常行星波在球面大气中的传播,某区域大气环流异常会引起另一些区域大气环流的异常。

Moura和Shukla(1981)、Keshavamurty(1982)、Shukla和Wallace(1983)、Tokicha等(1985)利用数值模拟方法研究了PNA遥相关产生机制,赤道东太平洋海表温度异常增暖,将会引起北半球PNA型大气环流的异常。Gambo、卢理和李维京(1987)模拟了热带大西洋海温异常对北半球欧亚型环流异常的作用,Nitta(1987)、黄荣辉等(1987、1988)从观测和数值模拟指出,西太平洋海表温度异常增暖所引起的菲律宾周围的对流活动异常活跃,会引起盛夏东亚上空西太平洋副高加强和北半球夏季环流异常,黄荣辉等(1985)还模拟了青藏高原夏季热源异常对北半球大气环流异常的作用。

Simmons、Wallace和Branstator认为即使没有发生厄尔尼诺现象,也可能由于纬向非均匀气流的正压不稳定引起PNA型。王国民和黄仕松(1989)通过数值试验提出,时间平均环流的空间结构对低频波的结构特征有重要影响,在急流区上游,低频波沿西北—东南向波导向副热带频散,而在急流出口区,则出现PNA型遥相关。

对于阻塞这种现象,国际上举行了专题研讨会,主要有波一波相互作用,波一流相互作用,外部源、汇作用,线性共振作用等形成阻塞的机制,这是全局性的。另一方面,还有从局地性的孤立子和偶极子来讨论阻塞的形成和维持。在波一波相互作用中,Egger(1987)、Wiin-Nilsen(1986)等提出自由波与地形波非线性共振相互作用是产生阻塞的主要机制,陆维松(1989)提出波的非线性准共振可能产生阻塞,并指出准共振的频率偏离与中低频振荡有关。在波一流相互作用中,Kalnay-Rivas和Merkine(1981)提出基流纬向非均匀性产生的不稳定,可能激发背风波

列的形成,从而使得阻塞产生。Simmons(1983)利用真实纬向非均匀的基流得到其不稳定模对应低频波列。在研究阻塞的许多工作中都包含了外部源汇作用。Linden和Tung(1979、1986)提出了波动与大地形线性共振即可产生阻塞,而Chamey等(1979)开创的多平衡态与阻塞也可看作有外源下基流与波的相互作用。中国朱抱真、朱正心强调了热力作用在产生阻塞作用。纪立人则引入大地形作为强迫项直接研究阻塞。在局地观点中,一种是偶极子,自从Stern(1975)首先提出偶极子解以来,McWilliams、Flierl(1980)等将偶极子用于解释阻塞的形成。为了解释偶极子的成因,Shutts(1983、1986)提出了瞬变涡旋与局地非线性“自由模”——偶极子型的共振是阻塞形成的重要机制。Pierrehumbert等(1984、1985)、Read(1985)也强调这种大尺度涡旋的强迫作用。另一种是孤立波,Maigui和MalanotteRioli(1984、1985)详细研究了弱非线性Rossby波孤立波作为理想阻塞模型,提出涡旋强迫机制维持孤立波。为了说明偶极子和孤立子这样的定常解的激发机制,Hou和Farret(1986)从数值试验和理论分析得到,在无粘Couette流中的一个有限振幅正压波能演变为准定常的永形波,这表明准定常状态能够从缺少直接强迫力的初始条件的区域中产生。他们认为,一个有限振幅波与平均流相互作用能够产生定常解,这是从初值激发闭合的非线性偶极子和孤立波的可能机制。Young(1987)进一步提出,定常解的形式取决于能量与动量平方之比, $\epsilon = EM^2$ 。当此参数 ϵ 小于临界值,最小位涡拟能值解是平行流,而当 ϵ 大于临界值,最小位涡拟能值解是有限振幅Rossby波。此时能量、环流和动量均为常数。值得注意,上述Hou和Farrell的解使用了不适当的通道长宽比,但若利用这个不适当的长宽比,其最小位涡拟能值解可能是平行流。Butchart等(1989)利用位势函数 $A = dq/d\psi$ 将弱非线性的孤立子与强非线性的偶极子联系起来统一考虑,函数A提供了这两种孤立子结构的共同的动力学特征。中国巢纪平等(1980)用非线性椭圆余弦波解释阻塞;刘式达、刘式适(1982、1989)用孤立波来解释阻塞形势;罗哲贤(1989)也作了强迫耗散孤立子与局地阻塞的研究。吕克利(1988)的研究认为,基本气流的经向切变对西风带中Rossby孤立波的形成具有重要作用,较强的切变则能形成类似于阻塞高压的流型。

已经证明,Rossby波也会像重力波一样,有类似的波破碎现象(McIntyre和Palmer,1984),为了探索这种可能的现象,已经分析了中层大气资料(Leory等,1985)。Warn(1976)、Warn和Stewartson(1978)提出了非线性对临界层的作用,得到SWW解。Kilworr和McIntyre(1985)利用SWW解得Rossby波的破碎,并研究了Rossby波临界层的吸收、反射和超反射问题。Maslowe(1986)对切变流中非线性临界层研究的进展作了综述。Held等(1987、1989)提出了球面上正压和斜压切变流上扰动的线性和非线性衰减,在非线性和耗散两种作用下,临界层附近Rossby波破碎,且有可能产生反气旋。非线性临界层和Rossby波的破碎是当前大气动力学的一个很活跃的研究方向。

(南京气象学院陆维松、陈久康撰)

热量平衡 heat balance 是现代气候学的重要分支之一。研究活动而(层)在辐射和热量交换过程中的收支对等状况。在气候研究中,可根据需要建立地面、大气以及地气系统的热平衡方程。地表热平衡方程的形式有:

$$R = LE + P + H_s$$

式中R是地表净辐射;LE是蒸发耗热(潜热);P是湍流热交换量(感热);H_s是土中热交换量。它表明,地面在获得(失去)辐射热能后,以何种途径与大气层及地中进行热量交换。地表热量平衡是气候形成的能量因子,分析、研究地表热状况,可为研究气候形成、气候模拟以及大气环流演变提供重要依据。地表面的热量和水分状况直接影响着人类和动植物的生存,是农业生产的重要气候资源。人类活动对气候的影响也是主要通过改变地表和大气的热平衡状况实现的。

1884年,俄国著名气候学家伏耶依科夫(A. И. Воейков)就指出了研究大气和地面太阳能收支的必要性。后来(1904年)他更进一步阐明了上中和水中热交换对气候形成的意义。

在热量平衡观测方面,净辐射观测从19世纪90年代开始出现日射表起,到20世纪30年代设计生产出净辐射表,经不断改进、完善,至今在技术上已基本解决,只是其中净辐射和长波辐射观测仪器尚不够普及。

蒸发观测是地表热平衡观测的另一重要组成部分。早在19世纪中叶就开始使用简易的土壤蒸发器进行测量。20世纪20年代前苏联波波夫(B. П. Попов)设计了波波夫土壤蒸发器,此后美苏等国相继研制出多种新的蒸发仪器。由于各类土壤蒸发器都存在不同程度的缺陷,且一般只能观测一定时段的蒸发总量,难以解决蒸发瞬时通量的确定。因此,有的就转向研究间接的测定方法,如梯度法和热量平衡法(包文此法)。根据这两种方法,可同时进行地表蒸发耗热和湍流热通量的测定。桑斯威特(C. W. Thornthwaite)和霍尔兹曼(B. Holzman)以及布德柯(M. H. Hудко, 1946)等曾进行过研究。1954年该法被列入前苏联热量平衡观测规范,并在数十个站点进行了系统的梯度观测。中国从1957年开始也在北京等6站进行了热平衡观测。在科学研究中有的还使用湍动相关法对湍流热通量和蒸发耗热量进行直接测定。

土中热交换量的确定,在20世纪60年代以前主要根据简化的公式(如采金公式)计算,现在在野外观测中还使用土壤热流板直接测量。

在陆面蒸发(或蒸发耗热、潜热)气候计算方法研究方面,较多的方法是针对年总量计算的,因为年蒸发量资料可由流域的水量平衡方程余项中得到。20世纪初奥尔捷柯帕(S. M. Олдекоп)和斯莱伯(F. Schreiber)分别从蒸发成因上提出各自的年蒸发量计算式。1948年布德柯把两者结合起来得到新的水热联系方程,该式不仅物理依据充分,且不包含任何经验系数,计算精度较高,深得气候学界好评。此外还有一些其它形式的计算式,如建立在道尔顿公式基础上的各种扩散式,以及巴格洛夫(П. А. Багров)式等。中国傅抱璞(1981)从分析制约蒸发的水分和热量条件入手,从理论上得出年蒸发量计算式。月蒸发量的气候计算要困难的多。在前苏联和中国较多应用布德柯(1950)的迭代法,该法主要建立在月的水量平衡方程基础上,并对蒸发和径流过程作了某些必要的合理假设。巴格洛夫(1954)的月蒸发量计算方法也较实用。另外,以扩散形式表示的经验式在计算海洋蒸发以及各种气候模式中使用较广。

水面蒸发以及充分湿润陆面的蒸发力计算,对揭示各地蒸发潜势具有重要意义。著名的彭门(H. L. Panmen)方法被认为是最好的蒸发力计算方法之一。在气候中常以年降水量与年蒸发力之比作为干旱指数,并以此衡量各地的干湿气候条件。干湿指数常用作气候区划的主要指标。

湍流热交换(感热)的气候计算方法研究较少。有的采用类似于计算蒸发的扩散式,根据平均风速、地面和空气温差以及一个经验参数(拖曳系数)算出,但问题是经验参数不好确定。布德柯(1956)所提的外扩散法实质上与此比较相似。另外,包文此法也较常用。所谓包文比是指感热与潜热的比值,气候计算时可利用此比值与潜热的乘积确定感热,或反过来。70年代后期中国高国栋等在计算全国感热分布时,简单的将其作为热量平衡方程的余项算出。

土中热交换量是地表热平衡中的小项,通常使用各种简单的相关法估算。

在热量平衡气候分析方面,施密特(W. Schmidt, 1915)最先完成了对世界大洋各纬度带热平衡各分量年平均值的计算,并把大洋的热量平衡与水量平衡结合起来。1920年埃斯川姆(A. Angstrom)对瑞典一个湖泊的热量平衡作了计算,并在计算方法上作了较大改进。30年代前苏联学者舒列依金(B. В. Шулейкин)计算了卡拉海的热量平衡,证明暖洋流对该海域温度状况形成起

着巨大作用。

从20世纪40年代开始,前苏联地球物理现象总台对全球地表辐射平衡和热量平衡进行了系统的研究,提出了互相独立的热平衡各分量气候计算方法和客观检验方法。与此同时,阿尔勃利希(F. Albrecht, 1940)也完成了海陆若干站点的热平衡计算。雅各布斯(W. C. Jacobs, 1943)和斯维特洛普(H. U. Sverdrup, 1945)首次绘制出北太平洋和北大西洋海区的热平衡图。1955年前苏联出版了世界上第1本《热量平衡图集》。布德柯的专著《地表面热量平衡》(1956)则对地表热量平衡的气候研究作了总结。60年代前苏联地球物理现象总台研究人员在布德柯领导下根据更多的观测资料继续深入研究,并把研究领域扩展到全球大气和地气系统的热平衡各分量计算。1963年、1978年两次更新出版了《地球热量平衡图集》。迄今上述图集仍被公认为世界上最完整的热量平衡图集,其中某些图幅多次被权威性著作所引用。在热量平衡理论研究的基础上布德柯和塞拉斯(W. D. Sellers)在60年代分别提出研究世界气候变化的能量平衡模式,能较好地模拟出二氧化碳倍增对全球变暖的平均增温值。

中国在70年代完成了对全国热平衡各分量的初步计算和分析。1979年5~8月的青藏高原气象科学实验,首次揭示出高原地表热源性质及其对高原大气环流的作用,出版了《青藏高原地面辐射平衡和热量平衡图集,1979年5~8月》(1984)。现正在河西黑河地区进行的地气相互作用试验研究项目,其主要任务之一也是研究地表对大气的加热作用。有的人还作了起伏地形热量平衡场数值模拟的尝试。

60年代以来随着卫星辐射探测技术的迅速发展,为直接研究地气系统热量平衡提供可能。最新的卫星探测结果更新了人们对地球大气辐射和热平衡状况的认识,主要的结论如:太阳常数的变化是很小的,不足以证明是否具有气候意义;地气系统年平均反射率为 0.30 ± 0.01 ,比早期估计的 $0.33 \sim 0.38$ 要小得多;地球的行星黑体温度为 $235 \pm 2K$,也比以前估计的要高。另外,南北半球的辐射收支是平衡的,从而认为过去关于存在赤道向北的能量输送未与事实相符。

热量平衡研究是当代气候学研究的热门课题之一。国内外学界都非常重视研究海洋、陆面与大气之间的潜热和感热交换及其参数化问题。此外,研究卫星资料在热平衡分析中的应用、研究人类活动对气候的影响、人工措施的局地气候效应等,都将是未来的热门课题;研制精度更高的热平衡观测仪器以及热平衡各分量的气候计算方法则是基础。

参考文献

- 1 Sellers W D. Physical climatology. Univ Chicago Press, Chicago - London, 1965
- 2 Бурдлюк м. п. и др. Тепловоблаане земан. Л., Гидрометеоиздат, 1978
- 3 高国栋, 陆渝蓉. 中国地表辐射平衡与热量平衡. 北京: 科学出版社, 1982
- 4 Landsberg H E. Editor in chief, General climatology 1A, Heat Balance Climatology. Elsevier Amsterdam - Newyork - Tokyo, 1985, 1A

(南京气象学院翁笃鸣教授撰; 缪启龙审)

海洋在 CO₂ 增暖事件中的作用 海洋和大气之间通过海—气界面上动量、热量和水质量的交换而相互作用。因此,大气中 CO₂ 浓度增加所引起的增暖效应,不仅要受到大气中各种反馈过程的影响,而且会引起大洋环流的变化,并受到由此而产生的反馈过程的制约。

Bryan 等(1984)利用单一的大洋模式来模拟海表热异常的传播及其对温盐环流的影响,计算区域为全球,海洋的几何特点比较真实。模式初条件是用规定的表面温度、盐度和风应力所得到的平衡解。表面边界条件是:

$$Q = \rho C_p (Q^* - Q) \Delta Z$$

$$P - Z = -\mu(S^* - S)\Delta Z/S_0$$

其中 ΔZ 是表层厚度, $S_0=35\text{‰}$, $\mu^{-1}=30\text{d}$ 。温度和盐度的表面参考值 Q^* 和 S^* 取自 Levitus(1982)的资料,但沿南极大陆的 S^* 被人为地加大(相当于大陆架的盐水而不是海表盐水),这是为了模拟出海冰的形成。改变 Q^* 的值就相当于在海表加进热异常。

对于大气—海洋耦合模式来说,由于海洋的热惯性很大,即使经过1000a甚至更长一些时间,也不能达到平衡态。因此,虽然用加速收敛的方法可以得到模式海洋对 CO_2 增加的平衡,但更有意义的是它经历的长时期演变过程——“迁延”响应过程。

Bryan等(1982)以及 Spelman等(1984)利用一个耦合的大气—海洋模式(其范围相当于北半球),先对正常的 CO_2 含量积分到一个平衡态,然后将 CO_2 浓度突然增加到4倍,用同步方式进行长时间积分,所得到的时间演变过程称为“第1类迁延响应”。为了将迁延响应和平衡响应(这只能用非同步积分方法得到)加以比较,定义了一个温度的百分比响应

$$R = \frac{T - T_0}{T_\infty - T_0}$$

式中 T 是按面积平均的温度, T_0 是其初始平衡值, T_∞ 是其“最终”平衡值。

Schlesinger等(1988)对OSU海—气耦合模式模拟结果的分析表明,全球温度变化过程首先是大气迅速增暖,接着是海洋和大气的缓慢增暖。这个模式积分了20a,以后又用一个一维的气候海洋模式积分了200a,得到的平衡温度变化是 2.82°C 。对迁延响应的分析表明,海表达到平衡温度响应($1\sim 1/e$)倍的时间大约是75a,而气温达到平衡温度响应($1\sim 1/e$)倍的时间大约是50a。

OSU的海—气耦合模式给出的海洋表面增暖是从热带向两半球中纬度增加的,而且在副热带和中纬度比在赤道地区向下穿透的深度大。从海洋动力学的观点来看,应该提出这样一个基本问题, CO_2 引起的增暖是通过什么途径和哪些物理过程向海洋中渗透的?

为回答这个问题,对模拟的第12年全球的和纬圈平均的热通量(包括经向平流和扩散、垂直平流和扩散、以及对流热通量)进行了分析,并同GFDL模式的第20~30年的结果作了对比。

全球分析表明,由于 CO_2 加倍,海洋获得的热量约为 3W/m^2 ,相当于整个海洋每年增温 0.005°C 。不过这种增暖首先从海表开始,逐渐渗透到海洋内部。到第20年末的增温情况是:0~50m, 1.2°C ; 50~250m, 0.9°C ; 250~750m, 0.5°C ; 750~1550m, 0.1°C ; 1550m以下增暖为0。可以看出,存在着一个全球平均的净的向下的热通量,这主要是由于对流的作用。

OSU模式和GFDL模式的全球平均热输送状况有许多相似之处(虽然GFDL的 $4\times\text{CO}_2$ 试验以及OSU的 $1\times\text{CO}_2$ 和 $2\times\text{CO}_2$ 试验均未达到平衡),特别 CO_2 增加引起的热通量是向下的,而且其中对流输送起到了主要作用,这一点甚至在定量上两个模式也是一致的。

纬圈平均的热收支分析也表明, CO_2 诱发的海洋增暖主要是通过向下的热输送产生的,经向热通量只是第2位的。在海洋表面, CO_2 产生的加热处都是进入海洋的,不过它随纬度分布而不均匀,最大加热产生在 60°N , 35°N , 0 , 40°S 和 60°S 附近。由于冷水上翻的作用,这种加热在热带向下穿透的深度最小。由于质量守恒的约束,在赤道上翻区的两侧的洋流是指向极地的,它们把一部分 CO_2 引起的热带海洋加热向极地方向输送,到副热带地区又被下沉流向下输送。由于两半球西风带和赤道东风带的驱动,副热带地区海流是反气旋性的,摩擦作用使得洋流向反气旋性涡流的中心流动(Ekman输送过程),质量守恒要求产生下沉运动。正是这种下沉流使得从热带海表输送来的热量进入副热带海洋的内部,这就是Charney提出的向下热输送的机理。Charney认为只考虑这种发生在混合层海洋中的过程就可以使

得气候系统的平衡响应被推迟。然而,海—气耦合模拟的结果表明, CO_2 引起的海表加热在两半球的高纬度比其它地方向海洋的穿透深得多。

在高纬地区,受到抑制的对流过程对于 CO_2 引起的加热向海洋的穿透起了重要作用。在正常的 CO_2 浓度下,海洋在热带地区从大气获得热量,又在高纬地区将热量还给大气,后者正是通过对流过程与海表冷却的平衡来实现的。可是,当 CO_2 浓度增加时,高纬地区海表增暖使海洋层结不稳定性减弱,从而减少了对流翻腾的强度。这样就减少了海洋在高纬度把热量还给大气的的能力,或者换句话说,增加了全球海洋获热量的能力。

Washington和Meehl(1989)利用NCAR的九层大气环流模式和四层大洋环流(包括热力学海冰)模式,以同步方式互相耦合研究了海—气耦合系统对 CO_2 突然加倍和逐渐增加的迁延响应。为了将 CO_2 浓度突然增加和逐渐增加这两种情况加以区别,一般称海洋对后者的响应为“第2类迁延响应”。

先将海洋模式用观测的大气强迫积分约50a,其中第一年用观测的随纬度分布的温度和盐度分布来强迫,这种人为的强迫减少了从带状温、盐分布到大体同观测一致分布而所要求的时间。同时,9层大气模式先同一个厚50m的混合层模式耦合,积分15a,然后将9层大气模式和4层大洋(包括海冰)模式耦合,在正常的 CO_2 浓度下积分16a,大气模式提供给海洋的是年平均风应力(在模式的底层上)、降水与蒸发之差以及向下的净热通量;海洋提供大气的是年平均海表温度和海冰范围。大气模式(时间步长40min)和海洋模式(时间步长30min)之间的这种相互作用每天进行一次。在16a积分过程中,海洋的扩散系数有几次调整。

最后,再用耦合模式分别对 $1\times\text{CO}_2$, $2\times\text{CO}_2$ 和 CO_2 浓度以每年1%的速率线性增加这3种情况分别积分30a,得到控制试验、第1类迁延响应和第2类迁延响应。在这过程中,海洋的扩散系数不再改变。

在第30年末, $2\times\text{CO}_2$ 试验中全球平均的地面气温增加了 1.6°C ,而 CO_2 逐渐增加的试验的增温是 0.7°C 。

同先前的用50m深的混合层海洋模式所得结果(平衡增温是 3.5°C)相比,耦合模式的敏感性偏低,这与海温和海冰模拟的误差有关。气候系统对于 CO_2 加倍的实际敏感性可能介于二者之间。

海洋的大部分增暖限于水深1250m以内,而最大增暖则在海表 $50^\circ\text{S}\sim 60^\circ\text{N}$ 之间。第2类迁延响应的第26~30年平均的海洋增暖甚至只限于上层275m以内,增暖范围和幅度比 $2\times\text{CO}_2$ 试验第6~10年的平均状况还小。 $2\times\text{CO}_2$ 试验结果,两半球高纬度盐度降低,副热带盐度升高。高纬度地区暖而淡的表层海水使层结变稳并且削弱了温盐环流,使得响应可在较短的时间内达到较深的海洋中。

虽然第2类和第1类迁延响应有许多相似之处,但也有明显的区别,以海温变化为例,第2类迁延响应的增温仅限于上层海洋的一个薄层内,而且从 30°N 以北都是相对较冷的,最大降冷为 -0.4°C ,在 65°N 附近。这可能同大气—海洋—海冰系统对于 CO_2 浓度逐渐增加的调整过程有关。

当 CO_2 缓慢增加时,它给予气候系统的是一个长时间尺度的连续演变的强迫,结果气候系统中不同时间尺度运动之间可能产生重要的非线性作用。因此,了解 CO_2 引起的气候变化不能完全依靠从 CO_2 突然加倍试验给出的信息。

(中国科学院大气物理研究所张学洪撰)

等熵位涡图的性质 随着大气大尺度动力学理论的发展,业务数值预报分析资料质量的提高以及计算条件的改善,用粗网格($2.5\sim 5^\circ$)业务分析资料制作等熵位涡图即IPV图,运用其守恒性和可逆性去诊断分析大气大尺度动力过程的性质和随时间演变的特征,已经变得可行。用IPV和地面位温的时间序列图,能简明地总结涡度平流、热力平流和垂直运动的综合效应,从

而给出清楚完整的动力学图象,阐明用这些量描述的所有的平衡动力学现象。因此,IPV 图被认为是形象地表示大尺度动力过程的最简单和最有效的方法。

现在应用的位涡,常采用 Ertel 形式,即

$$P = \frac{1}{\rho} (\xi_a \cdot \nabla \theta) \quad (1)$$

其中, ξ_a 是三维绝对涡度, ρ 为密度, θ 为位温。如取静力近似,并作气压坐标(p)和等熵坐标(θ)的转换,可得:

$$P = -g(f + \zeta_\theta) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (2)$$

这里 f 为地转参数, ζ_θ 为等熵面的相对涡度。(2)式是常用的 IPV 的基本表达式。

IPV 有两个基本性质:①在绝热无摩擦运动中,气块的 IPV 具有 Lagrangian 守恒性。当平流过程相对于摩擦和非绝热过程起支配作用时,气块的位涡和位温近似不变。这个性质常用来分析气流的轨迹,追溯气流的源地,判断气团的性质。②在一定条件下,IPV 与运动场和质量场的相互关系具有可逆性。这与在正压模式情况下由涡度分布(通过 $\xi = \nabla^2 \psi$)推算风场的情况有些相似。

关于 IPV 可逆性原理建立和应用,是位涡概念与现代大尺度动力理论结合的重要表现,是用 IPV 分布讨论大尺度动力过程的性质和时间演变特征的基础。

在等熵面 IPV 图上,可以看到与大尺度天气系统对应的高、低 IPV 区,对于某种均一的参考态而言,可看作是具有正或负号的 IPV 距平。对应某种符号的孤立的 IPV 距平的典型气流结构,则是构成所谓“IPV 思想”的基本概念。

设参考态(用下标 ref 表示)水平均一, f 为常数,随位温 θ 的质量分布用静压力 P 表示

$$P = P_{ref}(\theta) \quad (3)$$

使在每个等熵面(或 $P_{ref}(\theta)$)参考态的位涡值为常数,在梯度风和静力平衡条件下,可得出下面的关于圆对称形位涡距平引起的无辐散水平气流的切向速度 $u(r, \theta)$ 的方程。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} \right] + g^{-1} P \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{f_{Loc}}{R} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) = \sigma \frac{\partial P}{\partial r} \quad (4)$$

式中 r 为高距平中心的水平距离, $f_{Loc} = f - 2v/r$ 为两倍的局地绝对角速度,

$$\sigma = -g^{-1} \partial P / \partial \theta > 0,$$

$$R = g / (\sigma N^2 \theta^2) > 0, N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

(4)式是可解的非线性方程,其右端位涡 P 的等熵梯度可看作是强迫函数。结合适当边界条件,它表示 P 与 v 的可逆关系,如设 $f_{Loc} p > 0$,则变为椭圆型方程,问题适定精确可解。

进一步设 $f_{Loc} \approx f + \zeta_\theta \approx f$, $R \approx R_{ref}(\theta)$, $\sigma \approx \sigma_{ref}(\theta)$,则(4)式化为准地转近似的等熵坐标形式

$$\frac{\sigma}{\sigma_{ref}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} \right) + \frac{f^2}{g \sigma_{ref}} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(R_{ref} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) = \sigma_{ref} \frac{\partial P}{\partial r} \quad (5)$$

如 R_{ref} 和 σ_{ref} 取常数,则方程右端为三拉普拉斯算子,根据 Prandtl-Rossby Burger 关系,把垂直坐标尺度化,可得到如下尺度关系:

$$\Delta \theta \sim fL / (Rg\theta)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{参照 } H \sim fL/g) \quad (6)$$

如用 $(f_{Loc} P \sigma)^{\frac{1}{2}}$ 代替 f ,可得更精确的尺度关系

$$\Delta \theta \sim (f_{Loc} P / Rg)^{\frac{1}{2}} L \quad (f_{Loc} P \sigma)^{\frac{1}{2}} L / N \quad (7)$$

(7)式适合于赤道附近地区。(6)和(7)式中 L 表示 P 距平的水平尺度, $\Delta \theta$ 表示引起的气流结构的垂直尺度。(6)式中 $\Delta \theta$ 即是 θ 坐标下的 Rossby 高度,其对应水平尺度就是 Rossby 变形半径。

Thorpe 用较复杂的方法求解(4)式,得出由正负高空 IPV 距平或面 θ 距平引起的平衡结构的精确解。IPV 距平引起的气流结构的定性特征有:(1)相对于地球而言,平衡的涡旋中的环流与引起它的 IPV 距平有同样的意义。即正的 IPV 距平对应气旋

性环流,负的 IPV 距平对应反气旋性环流。(2)IPV 距平引起的气流场的垂直尺度($\Delta \theta$ 或 H),在量级上与(6)和(7)式表示出的尺度关系一致,即与 IPV 距平的水平尺度 L 成正比,与稳定度因子 N 成反比。(3)IPV 距平中的两个分量,即稳定度绝对涡度,与其参考态比较而言,在高 IPV 距平区都很高,在低 IPV 距平区都很低。它们所占的相对比例决定于 IPV 距平的形状,相对于(1)或(7)式的尺度关系而言,宽浅距平以静力稳定度为主,窄深距平以绝对涡度为主。(4)静力稳定度距平在 IPV 距平中心的上下区域有相反的作用,故等熵面向不同的方向弯曲。Charney 和 Stern(1962)第 1 次用清楚的方式表示出充分一般化的可逆性原理,直接应用于随时间变化且 f 可变的非圆周运动。准地转理论导出了在气压坐标下的准地转位涡 q :

$$q = f + \bar{k} \cdot \nabla_p \times \bar{v} + f_\theta \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\theta'}{d\theta_{ref}/dp} \right) \quad (8)$$

θ' 是对 $\theta_{ref}(p)$ 的偏差。在绝热和无摩擦条件下, q 随同不考虑垂直运动的水平地转气流近似守恒, q 在等压面上的变化近似地与 P 在等熵面上的变化成比例:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_\theta P \approx -g \frac{d\theta_{ref}}{dp} \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_p q$$

$$\nabla_\theta P \approx -g \frac{d\theta_{ref}}{dp} \nabla_p q \quad (9)$$

把 q 表示成地转流函数

$$\psi = f_\theta^{-1} (\varphi - \varphi_{ref}(p)) \quad (10)$$

其中 $\varphi_{ref}(p)$ 为参考位势,通过线性化的静力关系 $\partial \varphi / \partial p = -R\theta$, 得出

$$f_\theta \partial \psi / \partial p = -R\theta' \quad (11)$$

其中 $R = R(p) = d\pi(p)/dp$ 。把(11)和地转近似 $\bar{V} = \bar{k} \times \nabla \psi$ 代入(10),并引进参考态 $q_{ref} = f$,可得

$$\nabla_k^2 \psi + f_\theta^2 \frac{\partial}{\partial p} \left(N^2 \frac{\partial \psi}{\partial p} \right) = q - q_{ref} \quad (12)$$

其中 ∇_k^2 是二维水平拉普拉斯算子,

$$N^2 = R d\theta_{ref}/dp = N_{ref}^2 / g^2 \rho_{ref}^2$$

是表示静力稳定度的另一种形式。

由(12)式可见,如已知 q ,则等式右端的 q 距平可知,而左端是一个类似三维拉普拉斯算子,求逆可得 ψ 。如位温在下边界($p_0 = 1000\text{hPa}$)是均一的, $\theta' = 0$,由(13)式可知逆变换的边界条件可取为

$$\partial \psi' / \partial p = 0 \quad \text{当 } p = 0, p_0 \quad (13)$$

如果位温在下边界不是均一的,可通过在(12)式右端增加一个强迫项的办法,保留均一的边界条件(13)。

(12)和(13)式表示在地转平衡下的可逆性,这是相对于准地转理论中假设的参考态,在这种情形下,静力稳定度是水平均一的, f 可度,但在运动的水平尺度上其变化与 f_0 相比是小的。因为这里没有(4)式和(5)式那样的轴对称、稳定运动之类的限制,故可应用于一般的随时间变化的气流。

由 q 通过(12)和(13)式确定了 ψ ,则位势、位温和水平运动场可由(10)、(11)式和地转关系确定,垂直运动可由绝热的热力学方程或准地转 ω 方程算出。

半地转理论是在保持等压(或等高)坐标下,对准地转理论的改进。方法是:采用地转动量近似(Eliassen, 1948),改进对位涡、位温和动量进行平流的风速的平衡条件;通过准 Lagrangian 坐标变换减小水平不均一性(Hoskins, 1975)。这样就使得半地转理论对于可逆性原理的表达在用于水平不均一性很大的问题(如锋生、大振幅的对流层顶变形等过程),比准地转理论有得多的精度。

Salmon(1985)把半地转理论推广到 f 可变的情况,并采用等熵坐标形式,其结果可用于定量地讨论位涡距平(或地面 θ 距平)引起的场,同时证明了第 2 节指出的 4 个定性特征。

摩擦和非绝热过程对引起的切断气旋和阻塞高压的大振幅

IPV 距平的维持和耗散至关重要。

在等熵坐标下,位涡的变化率方程为

$$DP/Dt = -\sigma^{-1} \{ (f\bar{k} + \nabla_{\theta} \times \bar{v}) \cdot \nabla \theta + K_{\theta} \} \quad (14)$$

对于小 Rossby 数,大 Richardson 数气流,近似为

$$DP/Dt \approx -\sigma^{-1} \{ (f + \zeta_{\theta}) \partial \theta / \partial \theta + K_{\theta} \} \quad (15)$$

其中 θ 为非绝热位温源, K_{θ} 为等熵面摩擦力的位涡的垂直分量。

$$D/Dt = \partial / \partial t + \bar{v} \cdot \nabla_{\theta} + \theta \partial / \partial \theta$$

对于考虑非绝热单独出现时的 IPV 特征, (15) 式的方便形式为

$$(\partial / \partial t + \bar{v} \cdot \nabla_{\theta}) P \approx P^2 \alpha (\theta P^{-1}) / \partial \theta \quad (16)$$

或

$$(\partial / \partial t + \bar{v} \cdot \nabla_{\theta}) (P^{-1}) \approx -\alpha (\theta P^{-1}) / \partial \theta \quad (17)$$

上两式左端是 IPV 沿等熵轨迹的变化率,右端是易于计算和讨论的简单形式。

摩擦力的涡度项在边界层内是重要的,在自由大气中, Shapiro (1976) 提出,由于晴空和其他小尺度扰动使位温混合,对于平流层低层强急流的气旋性一侧观测到的异常大的位涡值的产生可能起重要的作用。

(气象科学研究院赵其庚撰)

东亚大气环流和季风

general circulation and monsoon in east asia 20 世纪 70 年代,气象科学进入“实验”科学阶段。诊断分析、数值模拟和近代探测技术结合起来,能对全球大气过程或一定地区的特殊过程进行“实验”性研究。70 年代末期,国际气象界组织了“全球大气研究计划”(GARP),以及“季风实验”(MONEX)、“气团变性实验”(AMTEX)等地区性实验。中国在这期间组织了“华南前汛期暴雨实验”、“青藏高原气象科学实验”(QXPME)以及“梅雨实验”等,通过这些研究,对东亚大气环流和季风的性质和问题有了更深入的了解,并逐步建立了中国现代化的客观分析和数值预报以及大气环流数值模拟。

在季风环流的建立问题中,竺可桢指出:“我国与印度地处毗邻,冬季同受西伯利亚高压之控制;夏季同受中亚低气压之支配,宜二地季风之合若符节”。“西南季风,其来也势猛不出三星期,即满布全印”。“冬季风之来也其势骤,不出 1 月而已弥漫全国矣”。清楚地指出了作为季风背景的大气环流活动中心和季风建立时的突变过程。

东亚冬半年和夏半年的平均环流显著不同。冬季低空受西伯利亚高压,夏季受大陆低压控制;高空平均槽脊有“冬三夏四”之差。早在 40 年代中期,中国赵九章(1945)就曾从海陆差异的力管场,讨论了半永久性大气活动中心形成的动力学问题。50 年代初期,关于冬夏平均环流的形成问题,国际上有两个学说的争论:一是强调地形的动力作用,如 Charney (1949)、Bolin (1950) 等,一是强调海陆热力作用,如 Sutcliffe (1951)、Smagorinsky (1953) 等。在东亚大气环流的研究中,中国学者强调了它们的共同作用。叶笃正(1951)、顾震潮(1953)、黄士松(1955)强调了海陆分布和地形对于大气环流的影响,朱抱真(1957)采用 β 平面 2 层斜压模式提出了大尺度热源和地形对西风带定常波形成的理论,强调了海陆分布的热力效应和大地形动力影响的共同作用,后来的许多国内外研究继续发展了这方面的研究,如 Wiin-Nielsen (1971)、黄荣辉和岸保(1981)、林本达(1981)等;后两个研究扩展成球面大气问题。

在天文季节上,一年四季。但在气象学的自然季节中,冬季和夏季的平均环流显然不同,而春季和秋季是迅速的过渡季节。在 1954 年,叶笃正和朱抱真从大气环流变化讨论东亚过渡季节的来临时,着重指出东亚过渡季节的开始是经过一个突变过程;同年 Sutcliffe 和 Bannon 指出地中海和中亚在 6 月的高空风有一次突变;1956 年,陶诗言和陈隆勋对该年夏季开始亚洲南部大气环流的转变作了一次诊断分析,得到这时亚洲上空的大气环流有一个跳跃性变化。在这些局地环流突变的观测事实的启发下,叶笃正、陶诗言和李麦村(1959)扩展到全球尺度的环流年变,发

现每年 6 月和 10 月全球尺度环流有两次突变,继而明确了大气环流的双元性和季节突变过程。

大气环流的双元性是全球尺度的,但在亚洲季风地区特别显著。在 6 月中旬,冬季平均环流中原有喜马拉雅山南麓的副热带急流迅速北撤,对流层上空强大的青藏高压和东风急流建立,同时印度季风爆发,长江梅雨开始;在 10 月中旬,热带东风突然转变为西风,对流层上空的西风急流南撤到 30°N,同时冬季风在长江流域和华南建立,印度西南季风撤退。

这种大气环流季节突变已在大气环流数值实验中模拟出来。曾庆存、梁信忠和张明华(1988)利用 IAP-GCM 模拟出 6 月和 10 月两次带状环流的突变,ITCZ 的季节位移和东亚雨带的经向位移;认为环流季节突变和大气热源,尤其是凝结加热的相互作用密切相关,并可能在相当大的程度上受海陆和地形影响。在 GCM 上进一步作有无地形作用的控制实验,可以发现在无地形作用时,没有出现风带突然北移,在有地形的作用下,才出现这种突变(Hahn 和 Manabe, 1975)

上述环流季节变化的特征,虽然仅由个别年份的资料分析得到,但从大气环流的整体情况观察,环流体系的双元性及其转变的突变性是鲜明的。

季风的古典概念是作为一个气候学概念而提出的。冬夏海陆之间的盛行地面风相反。人们开始认为它的成因是由于海陆热力差异引起的大型热力环流。但地面观测到的冬季大气活动中心西伯利亚高压并不在大陆中央,也不与气温最冷的地区相合;夏季的大陆低压也不与最热地区一致。到高空观测网建立后,季风的三维结构和高空行星尺度波动有关。这使得季风的成因要从全球尺度考虑,并和行星波动力学联系起来。

海陆分布对大气可以形成不均匀的加热分布,后者和地形都影响大气运动;反过来大气运动又影响海可加热贡献,因此海陆热力作用要通过大气的温度层结,水汽分布等来实现,也就说海陆热力和地形作用与大气运动形成一个复杂的反馈系统。最后在自由大气中由辐射、凝结和地气之间的感热等,组成热源和冷源。50 年代中国气象学者由流体热力学动力学定常方程组,用气候资料计算了北半球冬夏对流层的冷热源分布(朱抱真, 1957)。同时还用简单的物理参数化格式,直接计算了西藏高原和中国平原地区的辐射、凝结和感热分量(叶笃正、罗四维、朱抱真, 1957)。

后来,随着高空观测资料的完善和计算机能力的发展,有关大气热源的计算有很多进展,但精细地确定热源数值仍是没有完全解决的问题。用流体力学定常方程倒算热源,在大尺度分布上是比较好的,但不能了解各个加热分量的情况。70 年代 Yanai (1973)发展的由流体热力学方程、连续方程和水汽方程倒算显热源 Q_1 和显水汽汇 Q_2 , 对这个问题有了一定的解决。特别是由 Q_1 和 Q_2 的比较,可以了解季风现象中很重要的凝结加热的情况,无疑这对季风形成问题的研究是有利的。

丁一汇和 Krishnamurti (1987)用 Q_1 和 Q_2 研究了冬季风的热量收支,并直接计算了各加热分量,讨论了冬季风的 3 个特征问题:(1)西伯利亚高压的热量平衡与高压的发展;(2)冷空气在海面和陆地上的变性;(3)冷涌的发展和海洋大陆的热源。但热力作用只是冬季风过程中的一个重要的物理因素,还有很多动力作用的复杂过程。丁一汇等(1988)对西伯利亚动力结构的研究指出,在高压形成前期,对流层以正涡度为主,低层和高层有弱的辐合,中层是辐散。相应 700Pa 以下是上升,以上是下沉。但当反气旋发展和形成时,中低层出现明显的负涡度和强辐散气流,高层为正涡度和辐合气流。整层为下沉运动。这表明对流层上层的强质量辐合是导致西伯利亚高压发展的一个重要因子。涡度方程的诊断表明,西伯利亚高压区负涡度的出现和加强在中上层主要是负涡度平流和辐合项的作用,而在低层只是辐散项的作用,扭转项的作用很小。这个结果是与大尺度环流系统的配置一致的,因为负涡度平流主要出现在高压脊前和槽后的地区。

早在 50 年代初期,陶诗言曾研究过东亚寒潮与北半球环流变化的联系。指出东亚寒潮过程对应于一次东亚大槽的替换或再

生过程,而这种再生过程又可分为新地岛不稳定小槽发展和乌拉尔阻塞形势崩溃两类。近年来,仇永炎等指出,90%的寒潮中期过程都与北半球倒 Ω 流型的酝酿、建立和衰退相对应。也就是说寒潮以两大洋脊的发展为开端,然后从乌拉尔到西太平洋形成倒 Ω 流型。最后以东亚大槽的重建为告终。因此寒潮的形成前期与欧洲以及乌拉尔地区的阻塞形势有关。

1963年,朱抱真曾由大地形和热源对超长波运行的控制,指出地形可使超长波在固定的地理区域摆动和加强,波脊可在塔察加半岛和黑海西侧滞留,这和上述倒 Ω 流型相合。70年代开始国际上以其共振理论分析阻塞形势,国内也作了有关大振幅阻塞环流形成的动力学研究。朱正心(1983)利用低槽模式讨论地形和热力共同作用下超长波的非线性平衡态,它们表现为两个大洋上的阻塞。这个研究进一步得到地形作用更有利于激发阻塞环流。

大气环流数值模拟更揭露了地形对于冬季风的重要作用,1988年夏友龙和朱抱真利用一个两层球谱大气环流模式,模拟了冬季风过程;地形对大气斜压性加强所伴随的强烈冷平流的发生起了重要作用。后者引起冷空气南侵;地形作用可以影响冷高压移动路径,使高压南侵到 30°N 附近,东移入海;在冷高南侵的过程中,东亚急流、冷涌和东亚局地Hadley环流都迅速加强;地形作用对于热带的对流降水分布也有很大的影响,因而对近赤道的Walker环流和东亚局地Hadley环流发生相互作用。

亚洲夏季风的建立是在每年5月份先在中国南海和东南亚地区盛行西南气流,雨季开始。然后向西偏北推进,6月份到达印度。中国气象学者在访问UCLA期间,与Yanai合作,研究了这两个阶段季风建立的热力过程。

1987年贺海晏等用FGGE资料讨论了高原大气加热对5月份东亚季风建立所起的作用。他们详细分析了季风建立期间200~500kPa气层增暖过程,发现高原外围地区升温的主要机制是下沉运动引起的绝热增温。而高原向大气输送感热和周围地区的辐射冷却所形成的温度梯度,推动着高原上的强烈上升运动及其周围地区的下沉运动。他们认为高原上的感热输送及季风雨的潜热释放对上述升温的直接作用并不大,但热源通过诱发的下沉运动对周围地区的增温起了很大作用,尤其是高原东北侧和西侧的下沉绝热增温,对亚洲季风建立过程和环流演变所起的作用很大一高原诱发的下沉增温是季风建立的主要机制。

1984年罗会邦和Yanai计算了印度季风建立时期各高度的热源 Q_1 和水汽汇 Q_2 ,求得了高原上空热源垂直分布的结构。加热在垂直方向上分布的不均匀性是很重要的特征,而过去的结果只分析了水平分布的差异。从东西剖面可以定性判断高原东西两部份热源性质的差异,西部感热输送十分明显。利用降水资料及辐射气候资料进一步估算出初夏期间高原西部感热远大于潜热,东部则二者比较接近。他们还详细分析了雨季UEJ和雨季期间高原大气热力结构,发现雨季前,1200GMT拉萨上空有一高至400kPa混合层,其位温为336K。在此期间日最高地面位温出现在地方时下午15h,它比1200GMT地面位温高2.1K,所以午后地面空气可以上升到超过400kPa之上,将地面感热输送到深厚的对流层大气中,从加热机制方面解释了上面所得到的 Q_1 和 Q_2 铅直剖面,为何高原西部 Q_1 中心可以伸展到250kPa以上,而相应的 Q_2 却为负值。高原东部在季风建立前的干季,热源最大值所在高度也出现在对流层上部。根据这一水汽收支分析结果,他们提出了高原上通过干对流,热泡可以将感热输送到对流层上部的加热机制。

与此同时,宋正山、朱抱真等(1984)在国内利用QXPMEX资料,独立地揭示了青藏高原西部热力混合层的特征,实际上当热带季风在印度建立后,整个高原上空盛行湿过程,由相当位温的垂直分布,可以发现在500~400kPa之间有一个近中性的相当位温直减率,表示高原大气有一个在垂直方向上发展起来的深厚的混合层,由 Q_1 和 Q_2 的计算分析,可知混合层的形成是高原加热维持的热力边界层。

夏季风热力过程中的一个重要问题是热源的分布及其对季

风环流的动力作用。关于夏季高原热源水平分布的各种计算结果仍存在分歧。

陈隆勋等(1983)使用1961~1974年的资料,用正算法求得7月份热源最大的中心在孟加拉湾东部和缅甸西海岸。罗会邦和Yanai(1984)使用FGGE II-b级资料,用倒算法从逐日计算的5月底到7月份初热源,求得40天平均最大加热中心位于阿萨姆—孟加拉上空。因此新的研究表明,夏季风最大加热中心不在高原上空,而是偏于高原南侧的缅甸附近。

关于热源性质,叶笃正和高由禧(1979)利用高原气候资料,估算了高原大气热源,说明整个高原对大气的感热输送及潜热释放都很重要。高原西部感热远大于潜热,其值在4~7月最大;高原东部则感热和潜热都重要,一直到6月感热大于潜热,7月开始正好相反。陈隆勋等(1985)利用1979年高原实验资料估算的结果表明,雨季前整个高原均以感热为主,6月份高原东部进入雨季后潜热超过感热,高原西部雨季比东部推迟1个月,7月份潜热才开始重要,数值上二者很接近。1988年相伟恩、叶笃正、吴国雄根据研究进一步指出,过去认为西部热源在夏季以地面感热输送为主,潜热很小的结论应予以一定的修改。

中国夏季风降水包括南方的前汛期暴雨、江淮流域的梅雨和北方盛夏暴雨,长期以来它们一直受到中国气象工作者的重视。在50年代的研究主要是大尺度环流条件和天气尺度系统方面(谢义炳,1956;陶诗言,1957),而后由于雷达探测技术和中尺度大气动力学的进展研究已从天气尺度发展到中小尺度的诊断分析和理论研究,同时带动了降水年际变化的研究。

中尺度扰动 梅雨期主要有两种中尺度扰动:一是中- α 尺度扰动。日本气象工作者称为中间尺度扰动。它是梅雨云雨带中水平尺度为几百到100km左右,周期为20h不发展的低压系统。扰动在大气低层明显,具有上暖下冷的热力结构。它们沿梅雨锋相继地向东北方向移动,与中尺度雨带和降水中心有很好的对应关系,它是引起梅雨降水短期时空变化的主要天气系统。中- α 尺度扰动对梅雨期雷暴和暴雨的产生提供了十分有利的条件。包括充沛的水汽供应、暖湿的不稳定条件和强烈的低空辐合。

梅雨期的中- α 尺度系统主要有两类:江淮切变线和低涡。最近的研究表明,江淮切变线实际上是梅雨中尺度云雨带在流场上的表现。切变线是较浅薄的系统,850kPa以下较明显垂直伸展不超过500kPa,具有向北倾斜的斜压结构。低层切变线上方对流层高层为明显的气流辐散带,与中尺度雨带相应的温压场主在表现为低层有明显的温度锋区和露点锋区,但锋区伸展不高,一般只能达到850kPa左右,在低空锋区上方,对流层中高层存在着暖湿空气带,它们与中- α 尺度雨带中的对流加热有关。

目前对这种中间尺度雨带或切变线形成的动力学机制还没有一致的看法,有人认为它可能是一种 $Ri < 1$ 的斜压波,因为平均条件下梅雨锋区的 Ri 数是很小的,很易满足中间尺度扰动最不稳定增长的判据。也有人认为它是一种包含有积云对流作用的不稳定波。陆汉城和王敬伍也提出了类似的看法,认为中间尺度扰动是在斜压-CISK联合不稳定条件下发展的。最近张可苏从理论上进一步讨论了斜压气流的中尺度稳定性,指出在浅薄切变层和小 Ri 数情况下,Edy模态可向中- α 尺度波段延伸,所得的特征仍具有准地转性质。这种机制似可解释梅雨锋中传播型的中尺度扰动。

梅雨锋区的中- α 尺度低涡至少有两类,一类中层为负涡度,另一类上层为负涡度。前者为西太平洋副高西伸脊下方的产物,后者为青藏高原东伸脊的产物。低涡一般出现在低层东风扰动及相伴的冷槽南缘。在经向剖面图上其北方为正环流,南方为逆环流。中- α 尺度涡在逆环流圈下方。金祖辉曾分析了1977年江淮流域一种中间尺度扰动的结构,得到扰动形成于低层的冷锋锋区上,扰动的发生发展与对流层锋区斜压性的位能释放有较好的关系,赵思雄、周晓平等对中- α 尺度低压的生成和发展进行了数值研究,他们得到,中- α 尺度涡可在大尺度天气系统中新生出来。在发生阶段动力因子起着主要作用,但在发展阶段,由

于降水产生的凝结潜热对 α 尺度低涡的维持和加强有重要作用。

低空急流 低空急流主要指低层西南风或偏南强风带。作为天气系统,西南低空急流具有明显的天气学特征。其左侧低层为气旋性切变区和辐合区,高层为反气旋切变区和辐散区;右侧则整层为反气旋切变区和辐散区。低空急流对暴雨的贡献之一就是作为低层水汽和不稳定能量的输送带。这是由湿舌从西南向东北伸展及位势不稳定区的分布特点所决定的。最有利于暴雨产生的地点位于大风核左前方湿舌前端。

在梅雨暴雨时期也经常观测到低空急流的存在,这是对流层下部一支超地转的西南风急流,但是目前对这支急流的形成原因看法很不一致。日本气象工作者认为梅雨区的低空急流是动量上下交换的结果;有人认为低空急流的出现与西侧低压系统的发展和东移有关。也有人认为低空急流是行星边界层惯性振动的结果。Uccellini 和 Johnson 认为低空急流的发展是质量-动量调整的结果,它是与高空急流耦合在一起的。一般在高空急流出口区的质量调整所产生的变压风可使西南低空急流得以发展,但是梅雨期低空急流形成的统计(黄安丽和高坤,1982)和个例分析(斯公望等,1982)表明,绝大部分低空急流(约占76%)不是出现在高空急流出口区,而是出现在入口区的下方,这可能是梅雨暴雨期低空急流的一个特点。

梅雨的年际变化 东亚夏季风降水具有显著的年际变化,而形成中国的旱涝气候。30年代涂长望曾将中国天气与全球大气涛动联系起来,讨论中国夏季旱涝的长期预告问题;60年代张先恭等(1963)利用1901~1960年全国86个台站的降水资料分析逐月的降水量等级,研究了20世纪60年代中国大范围降水异常的问题。

梅雨是东亚初夏时期主要的雨季,它不仅对江淮地区的旱涝状况有重要影响,而且作为夏季风环流的一个组成系统和重要的热源区,对大尺度变化也有明显影响。梅雨的年际变率显著,有的年份出现“空梅”;梅雨的开始也不固定,有的年份出现“早梅”,徐群(1965)曾用1885~1963年资料分析过长江中下游梅雨的长期变化,得到梅雨的年际变动很大,有着2.3a和11~13a的周期,可能和太阳活动有关。

近年来国际上动力气候学的进展,试图寻找影响长期变化的物理因素,人们注意到下垫面性质,如海表温度和大面积海冰积雪的缓慢变化的影响。陶诗言等(1988)从这一观点讨论了梅雨的年际变异,他们利用上海1874~1986年的降水资料所作的降水距平的标准偏差的长期变化,当东太平洋海表温度出现异常时,长江下游梅雨量可能偏多。这个结果和Rasmusson等(1983)利用1875~1979年印度雨量资料研究季风雨年际变化的结果相反,由此也可看到中国季风和印度季风的年际变化可能有着相反的趋势。

积雪及其融化可以影响地表的热量收支及水分收支平衡,因此积雪面积的变化可以影响大气环流。陶诗言等也分析了1967~1977年长江流域6~8月降水量和前冬52°N以南欧亚大陆积雪面积的关系,得到冬季欧亚大陆积雪面积与次年梅雨量有反相关;Hahn和Shukla(1976)也曾指出冬季欧亚大陆积雪面积和次年印度季风降水有反相关,另外,陈烈庭等(1981)又曾得到青藏高原中部冬春积雪与中国江南5~6月降水有正相关,因此有关梅雨年际变化形成的物理因素还要进一步分析研究。

参考文献

- 1 Ding Yihui J. Meteor Soc Japan, 1992, 70(1): 373~396
- 2 Ding Yihui. Monsoon Ovr China. Kluwer Academic Publishers, 1994

(中国科学院大气物理研究所朱抱真研究员、国家气象局气象科学研究所丁一汇研究员、中山大学罗会邦教授撰)

海洋碳循环模式 研究碳循环问题的主要方法之一,是建立碳循环过程的数学模型,这种模型就是碳循环“模式”。利用

它不仅模拟工业革命前各主要碳库的平衡状态,而且在利用某些特殊的观测资料进行校正之后还可用于预测未来大气 CO_2 的变化。国外碳循环模式已经从最初的只用经验关系描写主要碳库之间的交换过程的“箱”模式,发展出包含动力学过程和初步的化学和生物过程在内的三维模式。碳循环模式所涉及的过程比气候模式复杂,因此应当继续发展。

最有代表性的简单碳循环模式,是Oeschger等于1975年提出的“箱”扩散模型,该模式主要考虑大气和海洋两个碳库之间的相互作用,而将陆地生物群对大气 CO_2 含量变化的负反馈作用用简单的参数化公式来表示。大气和海洋混合层中的碳被假定为充分混合的,其平衡值和受扰值分别由 N_a, N_m 和 $n_a(t), n_m(t)$ 表示,深海中的碳量有垂直方向是不均匀的,其平衡值和受扰值分别由 $C_d(Z)$ 和 $c_d(Z, t)$ 表示,大气和海洋混合层之间的碳交换系数 K_{am}, K_{ma} 以及抑制海水对碳的吸收的缓冲因子 ϵ 来控制,而由混合层进入深海的碳则服从一个垂直扩散方程,扩散系数为 K 。控制陆地生物群作用的参数是生物增长因子 ϵ 和迟滞时间尺度 τ 。所有这些参数均是可调节的以便对模式进行“校正”,校正的方法是使得模拟的工业化前大气和海洋中 C^{14} 的分布和观测结果一致。

在对模式中全部可调参数进行校正之后,利用该模式模拟了由于燃料化石引起的大气 CO_2 的增加,假定1860年大气 CO_2 浓度是 $292\mu\text{L/L}$,到1970年人为增加的总 CO_2 是 $55\mu\text{L/L}$,模拟结果表明其中有54%存留在大气中,使得大气 CO_2 浓度达到 $322\mu\text{L/L}$,而陆地生物群、海洋混合层和深海吸收的碳量分别占总增加量的12%、5%和29%。由此可以得出,对于人类活动引起的 CO_2 增加来说,海洋(尤其是深海)似乎是比陆地生物群更重要的汇。应当指出,“箱”扩散模式是一种高度参数化的模式,尽管利用 ^{14}C 的观测资料可以对模式进行“校正”,但模式对某些参数的敏感性仍可能使其结果不确定,例如,Oeschger等人的模式模拟的陆地生物群与海洋吸收的碳量之比是正比于生物增长因子 ϵ 的,即

$$\frac{\text{陆地生物群吸收的过剩碳}}{\text{海洋吸收的过剩碳}} = 1.71 \times \epsilon$$

而生物增长因子 ϵ 是一个很不确定的参数。

“箱”扩散模式是一类很有用的概念模式,但它所能描写的只是各主要碳库之间整体上的交换关系,而且其中可调参数太多,原始过程太少,因此需要发展包含较详尽过程的三维碳循环模式。

1987年,前联邦德国Max-Planck气象研究所的Maier-Reimer和Hasselmann提出了一个基于大洋环流模式的三维碳循环模式,用以研究海洋中 CO_2 的输运和储存问题。这模式只考虑大气和海洋两个碳库之间的相互交换,略去了陆地生物群的作用,其中大气中的 CO_2 假定是充分混合的(至多只考虑由扩散过程控制的沿子午方向的不均匀性),而在模式海洋中则考虑了三维定常流场对总无机碳的输运作用,以及海洋混合层中 CO_2 转化为总无机碳的化学平衡过程。

从海洋进入大气的 CO_2 通量是由海洋混合层 CO_2 分压和大气 CO_2 分压之差按bulk参数化公式给出的,不过没有考虑风的影响。

在混合层内,一部分 CO_2 溶解于水,决定了 CO_2 在海水中浓度,由于溶解度与温度有关,热带地区海温高、溶解度低,因而 CO_2 分压较高,高纬地区则相反。所以,对大气而言,热带海洋是 CO_2 的源,而高纬海洋则是汇。

实际上,水相 CO_2 不仅以中性的 CO_2 (或碳酸)的形式存在,而且以带电荷的碳酸氢根(HCO_3^-)和碳酸根(CO_3^{2-})的形式存在,它们的浓度之和构成了海洋中的总无机碳,即

$$C \equiv [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$$

这3种与碳有关的成分的浓度必须由包括水、 CO_2 、硼以及氮、磷等在内的化学平衡来决定,在无机碳循环模式中,不考虑与营养物有关的氮、磷等成分,可以得出

$$C = \left(1 + \frac{K_1}{h} + \frac{K_1 K_2}{h^2} \right) s,$$

其中 $h = [H^+]$ 是表征酸度的氢离子浓度; $s = [CO_2]$ 是水相 CO_2 浓度; K_1, K_2 等是化学平衡系数, 再借助于碱度方程可以推出

$$\frac{dC}{ds} < \frac{\partial C}{\partial s} = \frac{C}{s}$$

这表明, 化学平衡的结果使得海水中总无机碳的增加小于水相 CO_2 浓度的增加, 即海水的化学性质控制着海洋中总溶解的无机碳量的变化, 这称为“缓冲”作用。

在混合层及其以下的整个海洋中, 总无机碳被海洋环流所输送, 这包括三维的平流过程和高纬度海洋中对流所引起的垂直混合过程, 这些动力学参量都是由大洋环流模式模拟的定常环流给出的。

1990年, 美国 Scripps 海洋研究所的 Bacastow 和前联邦德国 Max-Planck 气象研究所的 Maier-Remer 进一步发展了上述无机碳循环模式, 以非常简单的参数化方式考虑了海洋生物群在碳循环过程中的作用。

为了加进生物过程, 在海洋混合层的化学平衡中不仅要包括总无机碳和碱度, 还要包括作为营养物的磷酸盐和溶解的氧, 在一定的营养物条件下, 海洋混合层中的浮游植物通过光合作用和呼吸作用参与碳循环过程, 其中的一小部分形成大颗粒的有机物向下沉降, 称为“新生产力”。这种大颗粒有机物的下沉速度很快, 以致于海流对它的影响可以忽略, 它们在下沉过程中又不断地分解为无机碳, 从而提供了一种沿垂直方向向下输送碳的生物学机制, 称为“生物泵”。在 Bacastow 等的模式中所考虑的正是这种“生物泵”作用, 而不是生物过程本身, 他们假定混合层中由于大颗粒有机物沉降而减少的碳量正比于“新生产力”的生成速率 P , 而后者则由入射光因子 L 和磷酸盐浓度 PO_4 来决定, 即

$$P = L \frac{R \cdot R_c \cdot [PO_4]}{H + R_c \cdot [PO_4]}$$

其中 R_0 是有机物合成或分解过程中的碳磷化(称为 Redfield 比), R 和 H 是可调参数, 大颗粒有机物在其下沉过程中分解的速率由一组与水深有关的“矿化”系数和在该水深处溶解氧的浓度来决定, 此外还假定到达海底后剩余的有机物再返还至混合层。

尽管这种在海洋碳循环模式中加入“生物泵”的作法只是一种简单的参数化方法, 但却明显地改进了无机碳循环模式的某些不足。利用该模式还作了一个有趣的敏感性试验: 在模式达到平衡态以后突然将海洋环流的强度减小 40%, 再积分到一个新的平衡态, 结果发现大气 CO_2 浓度下降了 $39 \mu\text{L/L}$, 而如果去掉生物泵, 则大气中 CO_2 浓度下降 $21 \mu\text{L/L}$ 。这是因为当环流突然减弱时, 由化学平衡和生物泵所控制的无机碳由海表向深海输送的过程尚来不及减弱, 以致海表损失的碳量必须由大气中的 CO_2 来补充, 因为有证据表明, 北大西洋的深水形成在末次冰期时代就曾经减弱过。

(中国科学院大气物理研究所刘瑞芝、张学洪撰)

厄尔尼诺(ENSO)及热带海—气相互作用动力学

在赤道太平洋地区, 一般是西太平洋的海表水温高, 而东太平洋的海表水温低, 故一般在赤道东太平洋的海平面气压偏高, 而赤道西太平洋地区的海平面气压偏低, 从而造成气流在赤道西太平洋地区上升, 而在赤道东太平洋地区下沉, 在赤道太平洋的海表面附近, 气流从东向西流, 这就是所谓的沃克环流。

1966年 Bjerknes 首先提出了关于 ENSO 现象产生机制的假设, 根据他所提出的理论, 一旦在秘鲁沿岸的赤道东太平洋海表温度(SST)升高, 则赤道东太平洋的气压下降, 于是造成赤道东太平洋的气压梯度变弱, 使得自东向西流的赤道信风减弱, 赤道东太平洋到中太平洋的海水上翻减弱, 最终造成从赤道东太平洋到赤道中太平洋的海表温度异常升高, 于是 ENSO 现象产生相反。如果秘鲁沿岸的赤道东太平洋海表温度一旦降低, 则赤道东西太平洋的气压梯度就变大, 这样就使得从赤道东太平洋到赤

道中太平洋的海水上翻加强, 从而造成赤道东太平洋到赤道中太平洋的海表温度下降。

Bjerknes 在国际上首先提出 ENSO 现象是海—气相互作用的结果, 他的假设无论对海洋科学或大气科学的发展都起到很重要的作用。以后, 许多气象学家及海洋学家都是引用或证实 Bjerknes 的假设。Rasmusson 和 Carpenter(1982)综合了历史上所发生的 ENSO 事件海表温度的演变过程, 给出了 ENSO 事件在不同阶段的海温异常距平分布情况。他指出, 一般 ENSO 现象开始于春季, 这时在秘鲁沿岸的赤道东太平洋海面温度升高; 到了晚夏与初秋, 暖水渐渐从赤道东太平洋延伸到赤道中太平洋, ENSO 现象处于发展时期; 到了晚秋与早冬, 从赤道东太平洋到赤道中太平洋海表温度增暖到了顶点, 这是 ENSO 现象的成熟期; 到了第 2 年的春季, 从赤道东太平洋到赤道中太平洋的海表温度渐渐下降, 恢复正常, 即从赤道东太平洋到赤道中太平洋的海水又渐渐变成冷水。

但是, Bjerknes 的假设中也有缺陷: (1) 没有考虑西太平洋在 ENSO 产生中的作用, 而西太平洋海表温度一般较高, 它是全球大气最大的热量来源, 这里的海—气热交换最剧烈, 可以说是全球海—气系统中一部大热机。显然, 不考虑西太平洋对 ENSO 事件爆发的作用是不行的; (2) 在 Bjerknes 的假设中没有考虑赤道波动的作用, 由于赤道波动是 Matsuno 于 1966 年所发现, 所以在 Bjerknes 的假设中还可能考虑到; (3) 在 Bjerknes 假设中没有考虑赤道东太平洋海水的冷水期与暖水期的关系, 许多观测事实表明; ENSO 现象不仅是一事件, 更重要的是—种循环, 在赤道东太平洋的海水是冷水与暖水交替出现、周而复始的现象, ENSO 现象仅仅是海水异常增暖的时期, 而当冷水期时意味着下一循环的 ENSO 现象正在孕育着。关于这种循环的动力学最近已有不少研究, 尤其是 McCreary(1983)、McCreary 和 Anderson(1984)、Anderson 和 McCresy(1985)较系统地研究了 ENSO 循环的物理机制。他们从观测事实及理论上提出一种关于 ENSO 循环的物理机制, 根据他们的理论, 一旦有暖的 Kelvin 波在赤道太平洋的西岸产生, 它就会沿赤道附近向东传播, 当此暖的 Kelvin 波传播到东太平洋, 就会在东太平洋引起 ENSO 现象。在这之后, 暖的 Rossby 波从赤道太平洋东岸向西反射, 由于暖的 Rossby 波的作用, 海表面上升, 并且由于 Hadley 环流的作用, 使得东太平洋混合层变薄。而混合层变薄, 又会产生 Walker 环流加强, Walker 环流的作用使得赤道东太平洋的海温变冷, 从而 ENSO 现象消失。另一方面, 由于偏离赤道暖的 Rossby 波继续向西传播, 并且由于 Walker 环流风系, 使得大量的海水从东向西运输, 在这两者共同作用下, 使赤道西太平洋海温变暖, 这将产生暖的 Kelvin 波, 为下一个 ENSO 事件的产生作准备。

McCreary 虽然利用赤道波动说明了 ENSO 循环形成的物理机制, 并且也说明了东西太平洋海温的关系, 但是他的理论还是重视东太平洋的作用, 他认为西太平洋水位高是东太平洋 ENSO 衰亡的结果。可以看到, McCreary 所提出的 ENSO 循环动力机制也存在着缺陷。

Schopf 和 Suarez(1988)提出了一个令人信服的机制, 认为一般热带西太平洋的海表温度比较高, 在这里产生暖的 Kelvin 波, 当这个暖的 Kelvin 波移到赤道中太平洋时就会产生剧烈的海—气相互作用。Philander 等(1984)、Philander(1985)、巢纪平等(1988)都提出这种海—气相互作用可以产生不稳定波动。因此, 由于海—气相互作用的结果就会产生大气西风的异常, 从而激起冷的 Rossby 波, 上面所说的 Kelvin 波继续向东传播, 当它移到赤道东太平洋就会产生 ENSO 现象。而由海—气相互作用产生的冷的 Rossby 波向西传播, 当它传到赤道太平洋的西岸, 会被反射产生冷的 Kelvin 波, 这种冷的 Kelvin 波边增边向东传, 当它传到东太平洋就会产生冷的海水, 使 ENSO 现象消失, 甚至会出现反 ELNino 现象。另一方面, 这种冷的 Kelvin 波又会在赤道中太平洋产生剧烈的海—气相互作用, 因而产生暖的 Rossby 波, 这种暖的 Rossby 波在赤道太平洋的西岸反射又产生

暖的 Kelvin 波,从而为下一次 ENSO 事件的爆发提供条件。他们的观点不是注意赤道东太平洋地区,而是注意赤道西太平洋以东的赤道中太平洋地区,其理论从根本上打破了 Bjerknes 的观点。1987 年,Takeuchi 也从观测事实说明了 Schopf 和 Suarez 机制的正确性。

从上面可以看到由于赤道波动及赤道中太平洋海—气相互作用产生了 ENSO 循环,使得赤道东太平洋冷暖海水交替出现。

由于在 ENSO 循环动力学的机制方面搞清楚了一些,因此许多海洋学家与气象学家开始讨论 ENSO 的可预报性。Cane 等(1986)利用海—气耦合模式讨论了 1986/1987 年 ENSO 事件的预报问题。Philander 和 Seiger(1985)、刘雅章(1987)利用一个比较复杂的海—气耦合模式讨论了 ENSO 循环的可预报性问题。刘雅章利用一个 9 层大气环流及一个 27 层的海洋模式耦合计算了 21a 太平洋海温的循环情况。

在大气中存在着 30~50d 周期的低频振荡,刘家铭(1987)提出这种振荡可以激发 ENSO 事件的爆发。Nitta 和 Motoki(1987)、Nitta(1987)、Nakawa(1987)分析了 1986/1987 年 ENSO 事件的对流活动情况。他们发现在 1986 年 ENSO 事件爆发时有大型云团(Supper cluster)向东移动。在 1986 年 11 月初在印度洋发现有超大型云团出现;而到 11 月 10 日起,这种超大型云团在西太平洋猛烈发展并且东移;到了 11 月下旬,这超大型云团移到日期变更线附近,以后一直停留在那里,从而引起 ENSO 事件的爆发,他们指出这种 30~50d 周期振荡的超大型云团活动可以诱导出西风爆发。这种西风爆发对于 ENSO 事件的爆发起了触发作用。Harrison(1987)的分析结果也说明了 Nitta 与 Nakaawa 分析的正确性。引人注意的是从超大型云团的整体来看是自西向东运动,但从每个大型云团的移动来看却是从东向西运动。这些云团的水平尺度为几十万公里,其生命史为 2d 左右,说明这里存在着一种 30~50d 周期的低频振荡与天气尺度系统的相互作用。因此,这种超大型云团活动不仅对于 30~50d 周期的低频振荡起着重要作用,而且对于 ENSO 的触发也起着重要作用。

此外,Keen 发现位于中太平洋的赤道气旋对,对产生与保持赤道区域大气环流的异常起着重要作用,并且指出这种位于中太平洋热带气旋的年际变化与 ENSO 的产生有密切关系,这种热带气旋对之间的赤道西风似乎对于暖水向东传播起着重要作用。Nitta 的分析再一次证明 Keen 的结果是正确的。

关于 ENSO 事件对北半球大气环流异常的作用已有不少研究,如 Horel 和 Wallace(1981)、Rasmusson 和 Carpenter(1982)黄荣辉(1985)等已详细讨论了 ENSO 事件的产生可以引起北半球 PNA 型大气环流的异常。黄荣辉(1986)不仅从观测事实,而且从理论上及数值试验方面说明了冬季赤道上空的标准行星波可以准水平地通过对流层传播到中高纬度地区,从而形成北半球 PNA 型大气环流的异常。

然而,长久以来,关于热带西太平洋海—气相互作用对北半球夏季大气环流异常的作用却研究不多,而热带西太平洋是全球海洋最热的区域,这里的海—气相互作用非常剧烈,它是全球大气的最大热源之一。Nitta(1986)研究表明,热带西太平洋上空的云量存在着很大的年际变化,这种变化与热带西太平洋的海面温度有很大关系,Kurihara 和 Kawahara(1986)也指出同样现象。

黄荣辉首先指出当热带西太平洋海表温度增高时,由于菲律宾海域及印度尼西亚一带对流活动增强,而造成这个区域上空的热源增强。由于准定常行星波的传播,它引起以东亚夏季副热带高压偏北,并且从理论及数值计算方面研究了热带太平洋上空,特别是菲律宾周围的对流活动所引起的热源加强,继而引起的北半球夏季大气环流异常的遥相关型。结果表明,菲律宾周围对流活动的增强不仅可以影响东亚大气环流的异常,而且也可以引起北美大气环流的异常。Nitta(1987)从卫星取得的高云量也得到类似的遥相关型,他特别指出在菲律宾周围的对流活动与日本上空的云量之间存在着“跷跷板”的效应,即“PJ 振荡”。

黄荣辉和吴仪芳(1987)从 30 年观测资料统计得出东亚夏季的旱涝与 ENSO 事件的不同阶段有关。从大量的分析资料表明,当 ENSO 事件处于发展阶段,中国江淮及日本的本州雨量多,在夏季往往发生涝,而黄河流域及华北、江南及日本的九州一带往往雨量偏少,甚至发生旱,而在 ENSO 事件处于恢复阶段,中国江淮流域及日本的本州一带往往雨量偏少,往往发生旱,而黄河流域及华北、江南一带往往雨量偏多。研究结果还表明,赤道东太平洋的海温与热带西太平洋的海温之间存在着“跷跷板”效应,即当赤道东太平洋的海温低,如 ENSO 事件处于恢复阶段,菲律宾周围的热带西太平洋的海温就高,在此海域就有大量的对流活动产生,而造成西太平洋副热带高压的位置偏北,引起江淮一带、日本本州的雨量偏少。黄荣辉和卢里(1988)用数值模拟方法模拟得出当热带西太平洋的海温高时,在菲律宾周围就有大量的对流活动产生,从而引起北半球大气环流异常及降水异常的遥相关型。这些研究不仅引起东亚其它国家的兴趣,也引起了欧美一些国家气象学家的兴趣。

目前,关于 ENSO 事件及热带海—气相互作用动力学的研究热点主要集中在以下几方面:(1)从观测事实来弄清热带超大型云团的结构、特征以及它对赤道西风爆发的作用,从而弄清热带超大型云团在 ENSO 事件发生中的作用。(2)由海—气耦合动力模式,从海—气相互作用的不稳定性来揭示 ENSO 循环的动力机制,并且利用数值模式来模拟 ENSO 循环,从而预测 ENSO 事件的产生。(3)不同时间尺度、空间尺度系统的相互作用对 ENSO 事件产生有作用,即几天的超大型云团、30~50d 周期的低频振荡、准两年周期振荡(QBO)的相互作用对 ENSO 事件产生的作用。(4)热带西太平洋海—气相互作用对 ENSO 事件产生的作用。

(中国科学院大气物理研究所黄荣辉院士撰)

天气预报

1980~1989 年中国数值天气预报进展

1980~1989 年,中国数值天气预报的进展,主要表现在,自动化客观化的原始方程模式分析预报业务系统已建立,设计了各类研究试验模式并投入使用;物理过程从主要引进国外成果的状态进入发展阶段;模式和模式设计、计算方法的研究比过去更深更广;开展了四维同化和产品加工应用。

1965 年,中国建立了北半球 48h 正压过滤模式预报,但直到 1982 年 2 月,北京气象中心才正式建立起包括资料处理、客观分析和北半球 5 层非绝热原始方程模式在内的分析预报业务,发布逐日分析预报和加工产品。目前,数值预报产品已是中短期天气预报的主要参考之一。此外,还发展了几种有特色的有限区域多层原始方程细网格模式,其中包括针对降水、台风路径和热带天气的模式,它们在实际预报中都发挥了良好的作用,特别是降水和台风路径预报。利用数值天气预报产品,全国台站广泛开展了中短期 MOS 和 PP 预报,如低温暴雨和台风路径预报等。其中地方 MOS 方法有中国特色,比较注意吸收预报经验,并采用多种统计模型。实践证明,人一MOS 结合明显优于主观预报。

除了业务预报外,还曾设计过各种不同类型、有不同针对性的模式,提出过设计垂直和水平分辨率的原则,以及分析模式合理性的方法。两层全球模式是中国设计的第一个全球大气环流模式,它包括了全部物理过程,能保持微分方程的重要性质,如能量转换关系等。还设计过采用两种地图投影的 9 层全球模式和两层全球差分模式,以及一些半球谱模式、西南及其毗邻地区细网格模式和 $P-\sigma$ 混合坐标的 5 层原始方程模式。

对于长期预报,有距平滤波、距平大气环流、考虑历史资料的距平和大气环流 4 种模式。巢距平等用距平滤波模式作 8 个月的试验表明:3 层模式高度距平预报普遍高于持续性预报,还用

设计的距平大气环流模式与前一种模式比较,发现二者相差不多,后者低层比前者报得稍好,但所需机时约是前者的200倍。考虑历史资料的距平模式,是把地一气作为统一系统,利用下垫面能量储放,以预报量为已知年变上的扰动的模式。对其线性简化方案的计算表明,其平均预报略高于随机预报水平,是有希望的。还设计过有各种物理过程的7层全球谱模式,其月预报逐日误差比持续性误差小许多,低纬预报也令人满意。

章震越等还建立了11层,格距为30km的细网格模式和准静力、准二维的10层,以及格距为12.5km的中尺度模式。虽然还有不少须待完善之处,但它们对开展中尺度天气过程的研究是有益的。

吴辉庭还设计过行星边界层模式,可以计算地面温度的日变化,其计算结果可以反映实际大气边界层的一些特点。

对于模式大气高度和垂直分辨率的设计,张可苏曾作过比较试验。结果表明:当模式高度取在250kPa时,超长波中心高度比一般观测的显著低,其移速也大为夸大。看来,模式顶取在<10kPa处较好,最好在0.01kPa。还分析了对称不稳定增长率对Richardson数和垂直分层的依赖。结果是:10层以上最好。至于水平分辨率,则给出了在考虑的最短波长和观测误差下的最佳格距公式,还在计算稳定和垂直截断误差与水平截断误差应为同量级的条件下给出了垂直网格距和水平网格距的关系式。陆维松等又进一步给出了新的结果。这样,就减少了模式设计的盲目性,增加了合理性。

曹庆存等还讨论了嵌套网格因计算边界条件产生的伪反射和伪折射。指出:当“超高频条件”满足时,在粗网格一侧会形成四倍格距振幅的放大的波。胡元龙等还进行了辐射边界条件等的比较试验。

张学洪曾就完全的原始方程的算子特性进行研究,指出初始场的作用随时间衰减,因而,设计的模式也应具有这种性质。

国外进行的检验一般还限于用线性条件下简单波解和数值解相比较的方法。在这方面,张学洪曾在弱非线性条件下,给出过正压和斜压大气非线性波的二级近似的解析表达式,并用来和数值解比较;王诗龙等还提出利用大气对称运动的不变性和其他对称和反对称运动的性质来检验的方法。前者是定量的,有一定限制;后者是定性的,限制较少。

物理过程是模式的核心之一,以前主要是引用国外的。1980~1989已有一批令人鼓舞的成果。

在辐射方面,曾对 O_3 9.6 μm 波段的冷却率给出新的近似方法,它和逐线计算结果相比,可以精确处理对波数域、天顶角和大气不均匀的积分。还考虑一般大气红外辐射传输参数化方案精度受大气分层的影响很大,设计了不同分层的参数化方案。计算结果和逐线计算的相比,发现当层数为39和16时,基本上保持同样精度。还提出了计算水汽吸收辐射和气溶胶减弱太阳辐射的方法。还分析了云对地气系统太阳辐射能收支与大气加热率的影响,讨论了不同光学厚度的云反射率与吸收率。还用7层谱模式对云、辐射及动力过程的相互作用作试验。发现云—辐射加强了低纬Hadley环流的上升支;在长期积分中对环流也有影响。还提出过计算水汽和 CO_2 长波面透射率的方法和大气长波辐射冷却率的省时算法。

在积云对流方面曾提出过一个对温度和比湿同时作整层调整的方案,可避免在有限层作调整时所产生的上层静力不稳定现象。还对梅雨暴雨区内的涡度平衡进行研究,发现在对流层下层有涡度积累,在其上层有涡度亏损,积云对流在平衡中起重要作用,还就热带气旋提出在时间和空间尺度上与之相近的积云概念和对流凝结加热方案。还就风切变对积云发展的影响进行了试验,得出了一些有意义的结果。

对于行星边界层,徐大海曾提出过一个大气多尺度湍流交换的K理论,将任一气象要素分解为多尺度的脉动量之和,从不同尺度运动相互作用方程推出了可以随时间和空间变化的K值;在一定条件下可出现负粘性。就Monin—Obuhov相似理论

处理大气表面层梯度观测资料的问题,对近地面稳定大气层结中通量廓线的适用性作了研究,提出选最佳廓线的方法。还用近年的实测风资料,对行星边界层内扩散特征进行过数值研究。

对于地形作用,曾提出过把高原当成静止空气的“软高原”,利用风压场平衡关系,算出各层位势高度的办法。还针对物理过程中参数选择的人为性,提出了模式参数化优化方法。其适用范围相当广泛,具有很好的抗干扰性。

1980年以前,中国分析用的方案逐步订正法外,还有多项式法。四维同化则很少开展,近年来分析用的最优插值法开展得比较广泛。为了避免该法引起的平滑,曾提出对高度分尺度逐次内插的方法。还对东亚5000kPa高度、700hPa温度、露点、温度露点差的方差、协方差,相关函数和结构函数进行了计算,发现了一些统计特征,如各向异性,尺度随纬度和天气形势而变等。对逐次订正法,则用两种滤波方法改进,发现Gauss法比选择滤波有更好性能。

过去认为,风压场观测误差引起的不平衡可以导致虚假的重力惯性波。有文献指出,即使初始值没有误差,由于其和模式不协调,也可以引起虚假的重力惯性波。要处理好初值,必须消除或减少这种不协调,如尽量使资料满足模式的重要性等。于是,提出了一些在总能量守恒和整层无辐射约束下的变分方案。还通过正压原始方程的解析解和数值解,分析了初始风场不同假定对解的影响,提出将方程中反映不同物理过程的项区别处理的方案对于非线性正规模的哈佛函数,也作过试验。汪厚君还提出用地面3h变压作初值化。还研究过次天气尺度和中尺度预报中的初值化问题。从试验发现,用天气尺度的初值,降水和低空急流的加强较慢,而结合次天气尺度的初值则较符合实况;但二者均能把锋生过程,露点锋的加强等预报出来。

对于场的解析表示,有文献曾提出向量经验正交展开的方法。计算表明,它比标量经验正交展开好。这对在资料稀少地区用历史资料插补有好处,还有人用车贝雪夫多项式把资料在非均匀网格上展开。

对于四维同化,曾利用多时刻常规资料和非常规资料进行低纬地区同化试验和考虑观测误差下的试验,指出最优同化频率与观测资料同化过程的长短有关。

1980年以前,中国已对有关计算方法进行过很多研究,但有的还研究得不深(如 σ -坐标系中气压梯度力的计算),有的还是空白(如非线性不稳定)。近年来,在这方面有许多更深的成果,有些空白也填补了。在差分格式方面,曾提出几种时、空差分的完全能量守恒的分解格式,还从标准层对近似下球面斜压原始方程出发,对两类常用的B网格和C网格,各设计出可以保持总动能、总有效位能和总有效表面位能之和守恒的差分格式,使时间积分比过去有更有效的约束。还提出一种浮动的显式差分格式,是无条件稳定的,比国外提出类似格式还早。还对发展方程

$$\frac{\partial F}{\partial t} + AF = 0$$

的格式构造和应用进行了讨论,证明带有非负算子A的弱隐式格式为“绝对稳定”;而带反对称算子A的弱隐式和显式是绝对不稳定。

非线性计算不稳定是数值预报中的一个难题。对此,曾证明时空差分的完全平方守恒格式是长时间计算稳定的最好保证。还讨论过Galerkin有限元近似的非线性计算稳定性问题。同时用Ritchmyer—Shuman方法分析了瞬时差分格式的非线性计算不稳定问题。指出:只要所用网格函数在空间或时间方向变号,就容易出现非线性计算不稳定,从而修正了Fornberg的结论。

在 σ 坐标系中气压梯度力的计算是一个困难。中国气象工作者根据大气各向异性特点及差分—微分—差分相一致的观点推导出一般变换公式,讨论了常用变换公式与一般变换公式在差分计算中的差别;还用一般变换公式设计了几种计算方案。还提出了把位势高度 φ 分解为 $\varphi(\epsilon_0)$ 和 $\varphi'(\epsilon)$ 两部分,用以计算气压梯度力的方法;其中除初始时刻外,只有

$$\nabla[\varphi(t) - \varphi(t_0)]p$$

需要计算,从而使误差大为减小。温压场三维插值方法,在陡坡地区计算气压梯度力有较好效果。陈嘉滨等提出了一种改进的“静力扣除法”可以使散度方程中的地形项由地形扰动项所取代,从而降低低截谱模式中因截谱带来的误差。

上面这些方法对改进气压梯度力的计算都各有一定的特点,也各有不同程度的贡献。但是,它们之间还缺乏比较,需要有统一的标准进行严格检验。

1980年前数值试验和数值模拟开展得很少。目前,它们作为强有力的试验工具,已深入到气象各个分支学科的研究中。对于天气尺度系统,用全隐式6层原始方程模式对地面气旋形成和扰动的发展进行了试验。发现:如初始时有带状环流上加一类似锋区的扰动,则扰动位于低空比位于高空容易发展。还用 $p-\sigma$ 层模式模拟索马里低空急流,发现边界层中气流的发展主要决定于海陆分布不均匀引起的非绝热加热,与地形高低关系不大。还对东亚海岸气旋发展的影响进行研究,发现潜热释放和反馈与由之产生的斜压不稳定是其爆发性发展的主要原因。

不稳定小槽的发展有时和东亚寒潮有关。试验表明,某些小槽有初期以正压过程为主,以后斜压过程才明显起来;而斜压结构的形成则与上游脊的东移发展、北风加强有关。

对于台风的发生发展,曾从辐射、积云动量输送、海温等进行模拟。结果表明:如有辐射,发展得更早更强,考虑积云动量垂直输送,算得的“台风”比考虑Ekman抽吸的结果在结构上更接近实际。

对于梅雨锋上低压和中尺度扰动的模拟,得出:在发生时,动力作用不能忽视,而在维持与发展时,潜热释放重要;但加热过程也应具有中尺度特征;扰动结构变化与降水强度关系密切。对两类气旋线的发展进行模拟的结果表明:因积云对流引起的加热至少对一类气旋线生成重要,在其生成过程中扰动的非线性集中明显。对于暴雨的模拟,发现初始风对它有较大影响。还发现与暴雨伴生的低空辐合线和其上的涡旋、垂直环流等只有用湿模式才能模拟。还对中尺度对流系统的形成进行试验,发现用大尺度场可模拟中尺度系统的形成。

对于适应问题,曾对半球旋转适应和地转适应作过试验。发现如只有一位涡中心,环流将演变为纬圈环流;如有2个以上中心,则都将维持,但不会出现纯粹的纬圈环流,为此进行过次天气尺度系统地转适应过程的试验。在有热源的非线性适应过程中,系统发展以后成为类似于热带气旋的系统。通过试验,发现青藏高原和落基山上空温度和位势高于有明显日变化,温度的日变化振幅随高度减小,而位势高度振幅在对流层中却随高度增大。对于大气的对称和非对称运动,分别用正压和斜压模式进行试验,证明在一定条件下对称运动的不变性。申少华还对沙尘暴的辐射特征及其辐射强迫对海陆风、锋生、局地环流的影响等进行试验,取得了一些有意义的结果。

(国家气象局国家气象中心廖洞贤撰)

短期气候预报测试 Blackmon(1976)、Blackmon(1977)等比较了2.5~6d带通滤波与10d的低通滤波的结果,发现滤波后的要素场在结构、传播及演变特性上都有明显的不同;巢纪平等也指出:海气联合系统中的闭合运动方程组,存在两类在性质上完全相异的运动形式,一类为周期几天的行波,一类是时间尺度为月的长期波,可以把短期波看成是一种“噪音”而滤掉,长周期大气运动主要向初始海温场适应,适应时间不到一个月;Miyakoda等所作月预测试验中就对初始场作了10d滤波,但是也有人认为“噪音”与“信号”场之间的相互作用可以存在一段时间,某些情况下的预测效果不佳,可能与此有一定联系。

关于初始场的另一个问题是:不同机构分析出的初始场有多大差别,用来作初始场对预测有多大影响。Hollingsworth等(1985)认为,应由下列几点来评价初始场分析的质量:分析场与观测资料的拟合程度;能准确地表示个别风暴的结构及天气现

象;与平均大气环流统计结果及其误差量度相容;有利于用该分析实现预告。

Hollingsworth等比较了UKMO、ECMWF、NMC三家分析的结果,认为UKMO分析单层风场与该层风的观测资料最为接近,质量场的分析基本符合,而地转关系则不如其他两家好,分析场的噪音也比较多,ECMWF的分析平衡关系较好,中等光滑,与观测资料的拟合性也不错;NMC在分析中舍弃了一些资料,最为光滑,分析场与观测资料的拟合也不如前两家;将GFDL的分析结果进行比较时,发现GFDL的分析结果小尺度的系统比ECMWF的分析多一些。

Arpe等(1985)通过中期预告分析认为:初始场的分析误差在预告的第5天明显,至少至第10天仍然清楚;Baumhelfner(1984)也得出其影响在热带地区至少到第10d仍很清楚;按照Baumhelfner的意见,赤道带的环流在8d后对温带扰动发生影响,那么,低纬度地区初始场分析的误差将影响中纬度的环流,从而影响短期气候预测的效果,低纬度地区正是观测资料稀少、最容易产生分析误差的地区,为了提高月、季预测的水平,发展并改进观测资料的搜集、分析及四维同化的系统,是十分必要的,这一点正是中国气象科研中的薄弱环节,特别值得加以重视。

作为初值问题预告气旋尺度的天气变化,其预告可能性不超过两周,10d左右气旋尺度的活动作为中期数值天气预报的内容是可行的,但是作为月、季预测的内容,至少在目前大气科学发展的水平上是不能实现的。多年来的分析研究发现了大气活动的许多现象,如“活动中心”、“遥相关”、“环流指数”、“ENSO”等现象,给短期气候预测提供了良好的启示,可以作为月、季预告研究分析的内容,月预告试验分析比较了各个模式对5种遥相关型的预告效果,试验指出:F模式对正的PNA型及负的EA型预告较为成功;FM模式预告WA型较好;E、F模式不能预告正WP型的增长,又错误地夸大了负WP型;这些试验对于短期气候预测是有益的,需要继续进行。

在Miyakoda等人的月预测试验中大都给出了月平均要素场,有时也给出3个旬的平均图;目前月预测的成功与否和初始场的形势有密切关系,初始场是长时间稳定的流型,如阻塞形势维持,则其月预测效果较好;初始场不是稳定形势的其预测效果不佳。

1988年,王万秋、张荣华用IAP2-LAGCM及IAP4-LOGCM分段耦合的方法作了一次月预测试验,用1988年9月月平均大气状态及SSTA(太平洋区域)作10月份的预测,9~10月正是季节转变的时期,北半球亚洲太平洋区域的变化主要表现为:(1)亚洲大陆冷高压加强、范围扩大,中心强度由1 021kPa上升为1 027kPa;(2)阿留申低压加深,中心气压由1 009kPa加深为1 003kPa,向南移动约10个纬度,低压向西伸展至大陆边缘;(3)北太平洋副高南退10个纬度,中心气压略有降低;(4)亚洲南部的低压区分为两个,一在非洲,一在东南亚略向东伸,西面的一个中心略有阻塞。预测的结果是:亚洲大陆冷高压的位置、强度、范围都极为成功,阿留申低压的南压、西伸、扩大的趋势也较为成功,只是低压中心气压预测比实况深5kPa,北太平洋副热带高压的南退也预测得很好,但高压强度不理想,亚洲南部低压的分裂预测中也有反映,这是IAP模式所作第1个月预测试验,从初步分析情况来看是令人满意的。

人们预计,20世纪内季度预测也将受到注意。这将有两方面的问题需要深入研究,其一是大气中缓慢变化过程的机制,主要包括大气内部过程的动力学、外强迫及热带动力学;其二是“信号”场长期演变过程模拟研究方面的努力,包括改进模式、随机过程预测及海气耦合模式的发展。Miyakoda特别强调大气内部动力学研究的重要性,认为这方面过去注意得不够,在数值模拟的发展中也较多地注意了物理过程参数化的研究。在短期气候预测的试验研究中,对如何改进数值模式框架的动力性能以更好地描写大气运动的非线性相互作用及长期演变过程,将会重新受到注意,在这方面IAP模式在动力框架的设计中作了初步尝试,试验

表明对模式的模拟性能有一定的改善。

1985年 Philander 和 Seigel 模拟了 1982~1983 年 ElNino 现象的发生,提出:为了模拟 ElNino 现象海温的形成,需要海洋模式在赤道带有很高的分辨率,能够描写 Kelvin 波,以模拟好赤道东太平洋海水的垂直运动,同时在海洋资料的分析中要保留适量的重力波。Miyakoda 等最近用海洋-大气耦合模式做了一次季度预测试验,大气部分采用 Gordon 及 Stern(1982)的谱模式 R21L9 及 R30L9;海洋模式采用 Rosati 及 Miyakoda(1988)的方案,水平分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,在 $10^{\circ}\text{N} \sim 10^{\circ}\text{S}$ 的赤道带,经度方向的分辨率提高到 $1/3$ 度,垂直方向分为 15 层;由于海洋过程远较大气为缓慢,其资料四维同化比大气部分提前 10 个月进行;以 1979 年 10 月 1 日初始场作 1980 年 1 月的预测,预测的大气状态与实况有相当程度的相似,在 $40^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 区域与实况的相关系数达 0.4 左右,预测的海温距平在日本附近,南、北大西洋及印度洋有过大的负距平,有整个地过度冷却的趋势。

1989 年初,中科院大气物理所又用 IAP AGCM 及 IAP OGCM 分段耦合的方法做了 1989 年夏季汛期的预测,用 1989 年 1 月的月平均大气状态及 SST 作初始场,积分 7 个月,预测即将来临的夏季气候状况;太平洋赤道区的海温直至 1989 年 1 月冷水年状态维持,从现已得知的 2、3 月观测实况来看,SST 继续维持冷水型,但稍有减弱的趋势,预测是成功的,大气部分也基本属于正常年份,与预测一致;预测 5 月份海温的形势将开始变化,夏季将接近正常,赤道西太平洋将有微弱的负距平,同时夏季的大气状态也接近正常年份。

(中国科学院大气物理研究所袁重光撰)

月平均环流的长期数值预报 月平均环流预报是长期预报的最基本环节。一方面以大气动力学及热力学为基础的长期数值预报首先预报的就是平均环流,另一方面经验已经证实月平均环流与月气温、降水距平有密切的关系。因此,通过预报环流来预报气候异常是完全可能的,而且会更好地了解气候异常形成的原因与物理机制,所以目前世界各国均把月平均环流预报做为长期预报的基础。

国外自 20 世纪 70 年代末期就开始做月平均环流预报试验。近几年来世界上几个著名的大气环流模式,均已进行了大量的月预报试验,如美国气象中心(NMC)的动力学延伸预报模式(DERF)就已做了 108 个例子,其它如欧洲数值预报中心(ECMWF)、美国普林斯顿流体动力实验室(GFDL)、英国气象局(UKMO)、美国大气研究中心(NCAk)都发表了实验结果,情况如下:(1)大部分模式采用实际环流初始场,但海温多用气候平均值;(2)一般只做 30 天积分,然后求 30 天平均环流距平;(3)为了克服气候漂移,有的做了系统误差订正,有的使用模式平均做气候平均;(4)绝大多数只做了冬季预报;(5)预报的月平均环流距平与观测值的相关系数约为 0.4。这主要是指 500kPa 月平均高度距平,有人指出海平面气压或对流层下部气温相关值还要高一些,但所做例子较少,尚无定论。因此可以说,目前动力学方法的长期数值预报还没有达到可以在业务预报中使用的水平。但是,数百个例子的试验证明,绝大多数预报结果与实况为正相关,也有一部分相关系数达到了 0.6,这表明月平均环流的预报是可行的。

数值预报是以某个初始场为基础,逐日积分来做预报的,但也不可避免地带有一定误差,因此数值预报带有一定随机性。为了克服这个问题,Epstein(1969)首先提出了一种随机动力预报方法,在预报要素场的同时,还预报其概率分布,因此预报量非常大。后来 Leith(1974)提出了另一种随机动力预报方法,即用一个预报集合来计算统计平均,他认为用 8 个不同初始状态作集合就可以得到可靠的平均值。由于这个初始状态的集合是在观测初始状态上加上随机扰动得到的,因此这种方法称为蒙特卡罗预报(MCF),也有人称做随机扰动预报。这个方法在 ECMWF 于 1979 年召开的随机动力预报会上进行了讨论,当时未得到肯定

结论。后来 80 年代的一些工作证明它对提高中期预报时效有明显的促进作用。Murphy(1988)对集合预报问题进行了理论性的探讨,用 UKMO 5 层模式的 8 个冬季预报例子做了详细分析,每个预报取 7 个不同的初始场,结果发现,预报时效增加 50%。

另一种集合预报方法是 Hoffman 与 Kalnay(1983)提出来的,这种方法是相距 6h 或 12h 的不同时刻初始场分别做预报,然后把预报的相同时刻的结果求平均称为落后平均预报(LAF),具体做法又可分为两种,即不加权或加权,加权时权重根据预报误差决定。Dalcher 等(1988)的研究表明,5d 以上,LAF 已经表现出明显的优越性,预报准确率显著高于个别预报,但是接近 10d 时 aLAF 与 tLAF 已差别不大。Tracton(1987)也指出,由于目前 GCM 的中期预报能力还比较低,所以在 10d 以内,有时集合预报的效果还不如最后一天预报,但在 10d 之后,LAF 效果明显。Molteni(1986)及 Tokioka(1986)也采用 LAF 做了月预报试验。

Dalcher 等(1988)强调 LAF 有许多优点。首先,MCF 所用的随机误差的选择是很任意的,这些扰动在短时间内就会耗散掉,集合的自由度也因之减少,而 LAF 的差是动力学性质的,因此,这些扰动可能反映最难预报的那一部分变化,即预报误差。其次,MCF 是把当前观测分析做为集合平均,但观测分析不一定就是最优的平均,而 LAF 的集合平均是当前观测分析与预报场的平均,可以反映观测误差的分布。根据以前观测所做的预报,能够提供不同于当前观测分析的新的信息,所以 LAF 的平均初始部分可能优于 MCF 的初始态平均,因而有更好的预报效果。当然事实如何还有待于对比实验检验。

无论如何目前的工作已经证明,集合预报对 10~30d 的预报是有益的,因此肯定对月平均环流预报有一定作用,但究竟能对提高月平均环流预报的准确率有多大影响,还需要进一步研究。

月平均环流的可预报性包括两个方面,即月平均环流预报的时效有无上限,以及月平均环流预报准确率有无上限。

如上所述,用气候海温做一个月的平均环流预报已经有了一些成功的例子,但随着预报时效的增长,无疑象海温等因子的作用也会逐渐加大。事实上,一些预报试验已经证明对第 2 个月的平均环流预报、海温异常已经成为不可忽视的因素,特别是热带海温的作用尤其明显,但海温异常虽然持续性很高,却不是一成不变的。所以,为了做 2 个月或更长时期的预报,就不能只用定常下垫面强迫的大气环流模式,而要采用海-气耦合模式。

von Neumann(1955)早就指出,从预报角度来看大气运动可以分为 3 类:第 1 类运动主要决定于初始条件,因此可以从初始条件外推;第 2 类运动几乎完全与初始条件无关,因此可以不考虑初始条件做预报;而最困难的是第 3 类运动,即距初始时刻相当远,初始条件不可能完全决定最终状态,但初始状态的影响又没有小到可以忽略不计的程度。他指出合理的途径是先做第 1 类预报,然后研究第 2 类预报,最后再做第 3 类预报。30 多年来数值预报发展的历史完全证实了 von Neumann 的预见,目前短期预报已经有了良好的基础,10d 逐日预报已成为 ECMWF 的业务预报,而利用 GCM 对气候的敏感性已进行了广泛的研究,对可能设想的 CO_2 变化、太阳常数变化、极冰及海温变化可能导致的气候异常进行了全面的数值模拟,这些模拟一般只采用理想初始场或甚至均匀初始场,利用模式进行调整,然后积分,求出稳定的平衡状态。近十余年才开始作月平均环流预报,即第 2 类预报。从目前试验情况来看,月平均环流用预报时效在 6~12 月。

(北京大学博士生导师王绍武撰)

气候学

“KALMA”表示气候。中国称为“气候”，是因为我国古代根据农业生产把全年分为二十四节气和七十二候。

由于各个阶段对气候的认识和理解不同，也由于研究气候的基础和方法不同，气候学的定义和内容大致经历了以下几个演变阶段。

古典气候学阶段 在19世纪末到20世纪初，气候学最早的一批创建者大多数是地理学家如M. B. 罗蒙诺索夫(Ломоносов)、伏伊柯夫(Воейков)、W. 柯本(Köppen)、A. V. 洪堡德(Humboldt)、汉姆(Haun)、C. W. 桑斯威特(Thorntwaite)以及V. 康纳德(J. Conrad)等。他们认为：“气候是大气的平均状态”，“气候是各种气象现象和气象要素的平均情况”，“气候学是研究某种气象要素的地理分布和年、日变化的学科”，后人称为地理气候学观点，它有两点不足之处：把复杂的气候概念定义得过简单和过于单调；没有反映出气候的变化特征，也没有指出气候的形成因素和相互作用。在气候变化较小的地方，平均状况接近真实状况；在气候变化剧烈的地方，平均状况可以和实际状况相差很大。

早期气候学阶段 在本世纪初到50年代，随着近代天气学的发展，一些学者不满足从要素平均法来反映气候，使用综合归纳天气的方法来表示气候，代表人物如E. E. 费道诺夫(Федосов)、Б. П. 阿里索夫(Алисов)、П. А. 楚布柯夫(Цубуков)、A. A. 米勒(Миллер)、福井一郎等，他们提出：“气候是天气的总和”，“气候是一个地区长时期内天气状态的综合反映”，人们称之为综合气候学派或天气气候观点，这一观点的缺陷在于孤立地用天气现象的机械总和来说明气候，没有触及天气在时间和空间上的特性和变化，也没有涉及要素之间的定量关系。任何地区、任何时间都有好天气与坏天气，而一个地方的气候则是温度、气压、湿度、风、降水……等各种要素的统一反映，不能笼统论其好坏，因而这一概念也是不够完善的。

近代气候学阶段 从50年代到70年代，不少知名科学家如K. И. 卡兴(Кавин)、X. П. 帕哥香(Погожан)、E. C. 鲁宾施钦、O. A. 德鲁兹多夫(Друцков)、H. H. 弗龙(Flohn)、W. D. 塞勒斯(Sellers)等认为应该从气候形成原因和决定因子出发给气候下定义，提出：“气候是地球上大气包围的状况，这个状况是由太阳辐射，下垫面性质和大气环流长年相互作用所决定”，“某一地区的气候，是由太阳辐射，下垫面性质及大气环流过程长期作用下的常见天气情况和特殊天气情况”，这一定义阐明了气候的成因和决定因子，指出了气候的特征与变化性质，也说明了天气与气候的相互联系，因此在近代气候学中得到广泛的应用。由于科学事业迅猛发展及气候与人类生活和生产的紧密联系，气候学在这一阶段发展很快，并形成了很多分支，如统计气候学、动力气候学、辐射气候学、物理气候学及农业气候学、城市气候学、建筑气候学、森林气候学、山地气候学等。

现代气候学阶段 70年代以来，随着人口增加，社会经济发展，人类生活的现代化需求，人们一方面要求更多更快地开发利用自然资源(包括气候资源)，另一方面由于无计划的盲目活动又大大地破坏了提供自然资源的生态环境，如耕地减少、森林缩小、水土流失、CO₂和其他温室气体排放量增加，大气、土壤和水的污染日益严重，酸雨形成、臭氧空洞扩大，温室气体造成地面增暖、降水失调、海平面升高等，导致了气候异常、灾害频发、地球生态系统和人类生存环境已面临威胁，科学界由此对气候学的认识发生了极大的变化。1974年世界气象组织(WMO)和世界科联(ICSU)在斯德哥尔摩召开的联席会议上，讨论了现代气候学的新概念，明确地提出了“气候系统”的观点，从而为大气科学的发展开辟了广阔的视野。现代对气候学的认识，可以归纳为以下几点：

(1)气候并不局限于大气状态本身的特征和变化，而是和那些与大气圈有密切联系及相互作用的地球岩石圈、水圈、冰雪圈及生物圈甚至地球以外的日球圈、宇宙圈所组成的复杂的相互系统的总体行为，是庞大自然科学体系中的一个系统。

(2)气候是多种因素相互作用和综合影响的结果。决定气候特征和变化的因素，主要应考虑：太阳辐射状况，太阳是地球能量的泉源，太阳辐射是气候形成和变化的根源；热量的收支，决定冷暖问题；水分循环和水分收支；决定干湿问题；大气环流条件；决定热量与水分的传输；地理特征 海陆分布，地形、地貌的差异；人类活动的影响。

(3)气候不是地球环境中的一个静态集合，而是在不断变化着的，其变化由多方面因素和多种情况所综合决定，因此是极其复杂的。气候的平均状态只是相对稳定态，变动才是绝对状态，变动有周期性的，也有非周期性的，即使是周期性变动，也不会是简单的重复。

(4)气候是一个综合从某一时刻到数亿年间不同时间尺度和从一点到宇宙的不同空间尺度变化的动力体系，有周日变化、月变化、年变化、年际变化和长年变化等，古气候资料已经证明：过去的二、三百万年中，地球上就发生过大约10万年为时间尺度的冰期、间冰期的准气候变动，这是因为对气候变化有驱动的因素很多，这些因子变化的时间尺度空间尺度各有长短，所以造成千变万化的气候。

(5)气候学的研究方法早已走出资料整理表述和传统统计相关分析的范畴。社会进步和科学发展已拥有强大的理论武器和技术，气候学已成为自然科学群、技术科学群、社会科学群和经济科学群的汇集区，现代科学理论和高新技术对气候学的渗透使之大大得到发展。

(6)气候学的领域已有很大开拓，在气候原理和形成理论方面已有动力气候学、物理气候学、能量气候学及理论气候学等分支。在气候应用方面几乎遍及各个领域，如农业气候学、生物气候学、森林气候学、天气气候学、地理气候学、水文气候学、医疗气候学、建筑气候学、工程气候学、军事气候学、经济气候学等。在气候方法方面，有气候试验、气候模拟、气候诊断、气候评价、气候模式等等，目前气候科学还在向纵深发展。

(7)研究气候学的目的已从被动变为主动，把对气候要素定量分析与资料开发结合起来；把气候变化研究与气候预测预报结合起来；把气候诊断分析与减灾防灾结合起来；把气候灾害研究与环境整治结合起来，为开发资源、改善环境、减灾兴利和发展社会经济造福人类服务。

中国气候学的发展有悠久的历史，它是与生产(特别是农业生产)、军事、医疗、建筑等事业发展密切结合的。在春秋战国时期，中国就有24节气之分，《周逸书》中记录了24节气与72候的自然历，管子用阴阳矛盾解释四季气候变化，汉朝王充用阴阳学说解释了雷雨的年变化，北宋沈括是世界上第1个提出存在气候变化的科学家，史记中还记载了气候变化有6年和12年的周期，元朝《农桑辑要》解释了气候寒暖随南北纬度而变但还要受小地形的影响，所有这些成就都表明中国气候学在历史上的发展远比世界各国领先。

竺可桢先生是20世纪中国气候科学的奠基人。他的《中国之雨量 and 风暴说》发表于1916年，《中国气候概论》发表于1935年。他的《中国气候的几个特点及其与粮食作物生产的关系》，及《中国近五千年气候变迁的初步研究》等论文引起世界重视。稍后如张宝堃、卢肇、涂长望、吕炯、朱炳海、么枕生、相鉴初、徐近之等老一辈气候学者都对对中国气候学的发展和建设作出了极大的贡献。新中国成立后，南京大学气象系首先在1952年成立了中国第一个气候学专业，1960年南京气象学院也相继成立气候专业，对气候事业的开拓和发展作出了很大贡献。

20世纪70年代以来，气候科学以气候系统这一崭新的概念焕发出巨大的青春和吸引力，许多相关学科的科学家参加进入气候学行列，可以展望：未来的气候科学将会得到更大的发展和成就。

参考文献

1. Алисов Б П, Дрозд О А, Рыбушнев, Е С. Курс Климатологии, часть I, Ленинград, 1952

- 2 么枕生, 气候学原理. 北京: 科学出版社, 1959
- 3 朱炳海. 中国气候. 北京: 科学出版社, 1963
- 4 Hohn H. General Climatology, Amsterdam (Elsevier), 1969
- 5 陆渝蓉, 高国栋. 物理气候学. 北京: 气象出版社, 1987
- 6 高国栋, 陆渝蓉. 气候学. 北京: 气象出版社, 1988
- 7 汤懋苍. 理论气候学. 北京: 气象出版社, 1989
- 8 Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate Change, Cambridge New York; port Chester Melbourne Sydney, 1990

(南京大学陆渝蓉教授撰)

世界气候计划与中国气候计划 world climate programme and national climate programme 简称为 WCP and NCP 气候是自然环境的组成部分, 是人类生存和社会发展的的重要因素。气候既能为人类活动和经济发展提供优良的资源和条件, 也可以形成灾害, 造成巨大的灾难和经济损失。

1979年2月, 世界气象组织(WMO)在日内瓦召开了世界气候大会, 对气候问题广泛地进行了讨论, 认为: 随着世界人口的增长和生活标准的提高, 对有限环境资源的要求也在日益增长; 人类活动可以改变气候, 必须研究人类活动的不利影响, 或在不利影响不可避免的情况下如何来安排生活; 气候变化和变迁在所有的时间和空间尺度都可发生, 必须考虑在人类所计划的时、空尺度内气候发生的重大变化; 随着对大气、陆地、海洋探测技术的发展, 理性认识和研究气候系统的能力已有了很大进步。因而一致提出有必要拟定一个世界气候计划(WCP)。这次大会后, 邀请了120名专家分成4组, 研究有关世界气候计划的内容。1980年世界气象大会上, 世界气象组织540号文件正式公布了《1980~1983年世界气候计划提要 and 基础》, 1986年第10次世界气象大会正式批准拟定的《世界气候计划——第2次长期规划(1988~1997年)》。

世界气候计划 由世界气象组织负责全面协调, 它的目标是确定世界气候变化在何种程度上被预测以及人类活动在何种程度上影响气候变化等。整个计划包括如下4个部分。

世界气候资料计划(WCDP) 此计划的目的是保证气候应用和研究能及时获得可靠的、按规定格式加工的、可以交换的资料, 资料范围包括大气圈、岩石圈、水圈、冰雪圈和生物圈等整个气候系统的各种资料。在1988~1997年间, 计划进行以下各项工作: 援助各国改善气候资料管理和服务系统; 资料管理和服务方面转让技术, 通过微机系统实现全面性能要求, 包括计算机硬件、方便用户的软件和培训工作; 统一气候资料要求, 改善气候资料交流; 实施气候资料参考系统; 发展全球和区域系统的气候资料集, 进行图象加工; 提高气候系统监测能力, 每年出版气候监测公报及监测摘要。

世界气候应用计划(WCAP) 此计划的目的是促进对现有气候知识的应用, 范围包括全部人类生产和生活活动。其中粮食、水、能源是优先项目, 城市和建筑气候学、气候与人类健康等领域也要进行, 在抗旱和沙漠化问题上要有实质性进展, 发展气候应用参考系统(CARS)。

世界气候影响计划(WCIP)。此计划由联合国环境署(UNEP)和世界气象组织共同制定。由于世界各地自然环境条件、社会或经济系统的结构和发展水平各不相同, 对气候变率的反应将有很大差异。因此, 需把气候、生态、社会经济等因素综合起来, 探讨气候对人类社会极为重要的问题和影响, 1988~1996年的主要目标是: 温室气体和气候变化问题, 确认二氧化碳和其他温室气体对气候变化的影响和作用及其对人类环境的影响, 包括气温变暖及海平面上升的评价; 气候影响评价方法的应用, 在发展中国家旱灾影响, 气候敏感区域监测 ENSO 及其遥相关的影响; 建立气候影响活动的国际协作。

世界气候研究计划(WCRP)。此计划由世界气象组织及世

界科协组成的国际科学联合会(ICSU)负责, 目的在于改善人类对气候、气候变化及其产生原因的认识, 能够判断气候预报的可能程度和人类对气候影响的程度, 弄清气候预报的可预报性和敏感性。针对建立1~2个月天气距平预报的物理基础; 预报几个月到几年的全球变化及几十年以上气候变化的研究和气候对自然影响及人为影响所作出的反应评价三大目标, 气候研究计划的具体内容有: 全球气候分析与模式发展 包含数值模拟和模式相互比较程序, 全球海面温度资料计划, 全球卫星降水气候学计划和辐射平衡气候学计划; 气候过程的研究包含研究地表水文学和陆地过程、国际卫星云气候学计划, 研究边界层相互作用过程, 关于海冰和气候的研究; 热带海洋和全球大气研究(TDGA)。进行海洋观测, 测量海气相互作用, 发展热带海洋模式及大气模式, 将大气模式与海洋耦合起来; 世界洋流试验(WOCE), 了解世界海洋环流及其与气候的关系; 研究气候制约力, 研究造成气候及气候变化因子的敏感性; 全球变化研究, 弄清地球上陆地、海洋和大气如何通过物理、化学和生物过程互相影响, 生态系统如何吸收、延缓或产生全球规模的变化。

中国气候计划 在世界气候计划的推动下, 许多国家相继成立了国家气候委员会, 制定了各具特色的国家气候计划, 发展了多种形式的双边或多边国际合作。中国于1987年2月成立国家气候委员会, 负责组织协调我国气候工作, 并编制了中国国家气候计划, 分为5个子计划;

国家气候资料计划(NCDP)。中国气候资料与先进国家比较存在3个差距: 缺乏收集资料的先进手段, 气象站密度不足以反映中小尺度气候特点; 信息资料自动化程度与加工处理能力不能适应需要; 资料格式和标准不一致, 管理系统落后。1991~1994年期间的任务是: 成立国家气候资料服务中心, 建立包括极轨和静止卫星在内的气候系统监测网, 引进巨型计算机, 改进气候资料收集和传递系统, 建立国家级气候数据库, 实现计算机快速查阅对话, 培训人才, 提高业务素质。

国家气候应用计划(NCAP)。中国是气候资料丰富而气候灾害频繁的国家, 1991~1995年期间, 气候应用计划有8项任务: 大农业气候资源的利用和气候灾害的防治; 华北降水资源与经济发展的研究; 干旱、半干旱地区气候资源的开发; 气候与能源的关系; 气候与城市规划和建筑问题; 气候与旅游及交通运输; 地区性综合开发中的气候问题; 气候服务问题。

国家气候影响计划(NCIP)。主要项目定为: 建立气候影响的监测系统; 研究温室气体污染物质、森林植被及大型水体变化对我国区域气候变化的影响; 气候变化对农业生态、人口和经济发展的影响; 气候变化和其他环境变化的对策和管理政策研究。

国家气候研究计划(NCRP)。1991~1995年中国气候研究的主要任务是: 主要灾害性气候形成条件、发生规律和预报方法的研究; 西北干旱区形成条件和发展趋势的研究; 气候变化重要过程的研究(包括大气低频变化动力学、海气相互作用、云和辐射相互作用对气候影响、气候与陆地过程及陆地生态系统相互作用, 温室气体对气候的影响等); 近千年中国气候变化的历史和规律的研究; 气候的数值模拟; 物理的气候系统与生物地球化学循环过程之间耦合的研究。

热带海洋与全球大气研究计划(TOGA)。建立海洋气候数据库, 进行海上试验现场观测, 加强海气相互作用研究(包括海气边界层、ENSO事件、海洋上层、热带海洋和季风相互作用、海气物质交换、海气耦合模式等研究)。

中国国家气候计划的制订和实施分4个阶段: 1988~1989年制定计划, 包括子计划的详细方案; 1990年为实施计划准备阶段; 1991~1995年为执行计划的第1阶段; 1996~2000年为第2个阶段。由于气候问题具有明显的地区性, 故在国家气候计划指导下, 各地区应制定当地的气候计划。

参考文献

- 1 WHO Report of the World Meteorological Organization, 1980, 540

- 2 WHO Report of The World Meteorological Organization 1986, 692
- 3 China National Climate Committee Outline of National Climate Programme of China (1991 ~ 2000). China Meteorological Press, 1990
- 4 The state science and Technology Commission, The People's Republic of China, Climate (abridged), Blue Book of Science and Technology of China, 1990

(南京大学陆渝蓉教授撰)

中生代的气候模式和极地森林的形成

在中生代, 南极洲的大部分、澳洲西南部、亚洲东北部及美洲北部等, 有相当广阔的大陆、岛屿和海域曾处于高纬度地区。阿拉斯加北部及澳大利亚南部曾一度临近极点仅数度的距离。

中生代高纬度地区深度的高岭土风化作用, 有大量碎屑岩、粘土岩及含煤沉积, 这是风化剥蚀与沉积作用在高纬度区其为活跃的地质记录。中生代含煤沉积广泛分布于亚洲北部、加拿大北部、阿拉斯加、澳大利亚南部及新西兰等古极圈范围内, 澳大利亚东南维多利亚含煤地层的古纬度高达 85°S (N. M. Chumakov, 1985)。根据 Creber 等 (1983) 的中生代古气候复原图表明, 热带和亚热带扩展到高纬度地区, 寒带则在地球上消失。这都反映中生代的气候温暖, 气候反差小, 高纬度区的自然景观与地质作用跟今日迥然不同。

中生代高纬度区的大陆和岛屿上, 植物群不仅种类繁多, 分布广泛, 而且从木化石年轮宽度所反映的植物生长率来看, 中生代的极地地区植物生长率是很快的。在雅各森岛、格陵兰及维多利亚(澳)等地区发现了丰富的植物群化石, 已辨认出的达 200 多种以上 (W. L. Donn, 1982; A. Hallam, 1985)。维多利亚早白垩世极地森林植物群的组成中以蕨类成分为主, 蕨类中以真蕨为优势。从植物群成分及木化石年轮资料的分析表明, 中生代的极地地区不仅十分温暖, 而且植物的生长期也很长。

动物界对地理环境的反映比植物界更为敏感。中生代高纬度地区的植物界的繁荣带来了动物界的兴盛与发展, 在广阔的高纬度地区曾先后发现多种爬行类及两栖类化石, 如东格陵兰及斯匹茨卑尔根三叠系中的两栖类化石, 埃尔斯米尔岛上白垩统中的爬行类与可疑恐龙化石 (董枝明, 1987), 南极洲三叠系中的水龙兽、肯氏兽及两栖类等 (W. L. Donn, 1982; 董枝明, 1987)。迄今所发现的恐龙化石和遗迹有, 加拿大育空地区 (古纬度 75°) 白垩纪恐龙化石 (徐玖琦, 1980), 阿拉斯加北部的鸭龙嘴化石及斯匹茨卑尔根的禽龙足迹 (董枝明, 1987), 近年来又在南极罗斯岛白垩系中发现了钩龙类化石。以上四足类动物的地理分布是全球性的, 从低纬到高纬度的广阔范围里都十分繁盛, 但种类却很单调, 这是中生代气候温暖、均匀、温差小的表现。据一些学者 (王乃文, 1986; Fraks, 1919; Schwerbach, 1963) 的研究表明, 中生代极区与赤道区的平均温差仅仅是现在极区和赤道温差的一半。

据多种方法估计, 中晚白垩世温暖期地球年平均温度比现今高 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$, 北极地区在白垩纪时年平均温度在 10°C 左右。根据珊瑚礁及同位素资料所得到不同纬度的古温度数据表明, 白垩纪中期高纬度带的温度都出现在显著的高, 赤道和两极的温差则比现在显著减少。中生代高纬度地区的温暖气候虽然是全球温暖气候一部分, 但低纬度地带的温度上升幅度小, 高纬度地带温度上升幅度大, 这是中生代高纬度地区气温变化的一大特征。

中生代是处于晚古生代冰期与新生代第四纪冰期之间的非冰期时代, 虽然其气候曾有过多次小波动变化, 但整个中生代以气候温暖、稳定及气候反差不大为特征。根据地质时期温暖气候的表现特征及其成因因子的分析, 现将温暖气候的形成划分为 3 种模式: 增强型 (温暖气候) 模式、平和型 (温暖气候) 模式及叠加型 (温暖气候) 模式。

增强型模式是指由于全球热能总量增加, 引起全球气温普遍升高而表现的温暖, 它是在地球辐射收入增加或地球反射辐射

损失减少的因子作用下形成的, 因其作用结果导致年平均气温升高, 故称为增强型。增强型温暖气候形成的地外因子主要是太阳光度的变化, 如果太阳光度增强, 地球从太阳所获得的热能则相应增加, 其中赤道及低纬度区增加的幅度大, 极地及高纬度区增加的幅度小, 所以太阳光度增强的直接效应是导致全球气温升高以及气候反差加大。此外新星和超新星爆发也可能引起全球性增温, 但它具有突变性或短周期特征, 其结果与太阳光度增强相类似, 具有造成地球气候反差加大的特点。增强型温暖气候形成的地内因子主要有大气中 CO_2 含量升高, 极地冰盖面积的缩小或消失及海洋面积扩大等, 其变化是通过减少地球的反射辐射损失而使地球保存更多的热能, 结果是导致全球气温升高和气候反差缩小。

平和型模式是指全球热能总量没有变化, 即全球年平均温度保持恒定, 只是由于气候反差缩小 (如冬天不很冷, 夏天不很热) 所表现出来的温暖现象, 它是受气候反差缩小的因子影响而形成的。平和型温暖气候形成的地内地外因子, 主要有洋流、大气环流活动加强及地轴倾斜度 (ϵ 值) 变化。 ϵ 值变化制约着太阳辐射在地球上的纬度分配与季节分配, 同时又不改变地球辐射收支总量, 因而它是形成平和型温暖气候的重要因子。

叠加型模式是增强型与平和型气候因子共同作用形成的, 其气候特点是在地球气温普遍升高的同时, 气候反差明显缩小。以上气候成因模式的划分以及中生代气候成因模式的确定, 可以有助于分析中生代气候成因时, 更有目标地从地内地外复杂的气候因子中, 判别形成中生代气候的主要因子。

关于中生代大气候的成因模式, 目前尚无统一的认识, 有些学者强调地内因子, 一些学者强调地外因子。Doon 和 Shaw (1977) 用数学模式研究了中生代的气温分布, 认为单是中生代的海陆分布就能够解释中生代的气候变暖。地外成因说主要是从太阳光度在地质历史中的变化去考察气候的变迁, 例如 Steiner (1976, 1973) 认为, 从晚古生代末到中生代太阳光度也相应增大, 因而导致中生代的气候十分温暖, 按此观点中生代的气候应为增强型。如果中生代气候的确是太阳光度增大而形成的增强型温暖气候, 那么在赤道及低纬度区的增温将最高, 其结果应造成气候反差加大, 这显然与中生代气候反差的特征不符。不少学者都曾试图从太阳辐射变化因子去探讨地球气候的变迁, 但在解释中生代气候形成时, 无疑是有很大的困难。另一方面, 由于中生代全球气温普遍升高, 也难于用平和型气候因子加以解释。从沉积地层、古生物地理及同位素等资料来分析, 中生代的大气候特征是全球气温显著升高, 同时气候反差也显著减少, 按此特征中生代气候应属于典型的叠加型温暖气候, 它由地内地外多种因子综合作用而形成。

根据中生代的气候成因模式以及高纬度区的地质、古生物、古地磁等方面的资料分析, 中生代极地森林及其它生物界的繁盛, 主要受地轴倾斜度和地理诸因子的影响形成。

地球上的气候带、气候反差、四季、极夜和极昼等的变化, 均受 ϵ 值变化的制约和影响。地球上极夜 (昼) 的分布及极夜昼期长短变化只受 ϵ 值及纬度的制约, 当 $\epsilon=0^{\circ}$ 时, 全球无极夜存在, 若其它条件相同, 全球气候反差为最小值; $\epsilon=90^{\circ}$ 时, 全球各地均有极夜存在, 若其它条件相同, 气候反差达极大值, 地球上的大多数生物将难以在这种剧烈的气候反差条件下生存。当 ϵ 值由 0° 增加到 90° 时, 气候反差由小增大, 极夜区范围则从极点扩大到赤道。生物界的生长和繁殖都需要一定的气候环境, 尤其需要适量的日照, 因此 ϵ 值的变化对生物界的生长和分布都有深刻的影响。目前 $\epsilon \approx 23.5^{\circ}$, 在南北纬度约 66° 以上的纬度区有极夜和极昼出现, 极夜期长短随 ϵ 的减小而缩小, 随纬度的升高而增长。

据目前所知, 中生代极地森林和煤层出现的最高古纬度达 85° 左右, 恐龙化石分布最高古纬度为 80° 左右。按目前的 ϵ 值, 上述地带极夜期长达 4~5 个月, 在这样长期没有阳光及气温相应急剧下降的环境下, 植物难以生长繁殖, 更不可能有各种动物尤其是恐龙类动物生存。一些学者对“核冬天”的研究试验表明, 倘

若在农作物生物初期持续 2 周光照不足,将导致严重减产;如果持续 3 周以上,则生长 6 周的农作物大都濒临死亡。所以很难设想在极夜期长达 4~5 个月的高纬区能有大量动植物生长繁殖。如果在 5° 左右,高纬度区则极夜很短或消失,因而可以为动植物的繁荣提供充足的光照。在地质记录方面,从高纬度中生代木化石年轮分析,当时植物的生长期长,生长速率快,表明 ϵ 值小和日照充足;白垩纪古植物花的光周期研究,也得出 ϵ 值状态是高纬度区极夜期短,并因此可以获得充足而稳定日照的唯一因子,这也是中生代极地森林及其它生物得以繁盛的重要原因。

地理因子是气候形成的基本因子之一。极地森林的形成除了需要一定的光照外,还需要一定的温度条件。从中生代气候模式分析表明,中生代温暖气候形成的主要因子不是太阳辐射因子,而是地表地理因子。在地表凡是能够增加辐射收入和减少辐射损失的各种地理因子,均能促进地球气温的升高。根据中生代的极地生物、古地理环境和气候特征等有关资料分析表明,造成中生代温暖气候的主要地理因子是二氧化碳浓度大、海平而升高、极地反射率低等。

据地球化学模式研究,中生代大气的 CO_2 浓度约比现在高 5~10 倍。大气中 CO_2 浓度变化对气候的影响已在实际观测和模拟实验中得到了证实。一些学者先后采用辐射模式、辐射—对流模式、三维大气环流模式等不同层次的气候数值模拟,得出大气 CO_2 浓度加倍时,全球气温升高幅度依次是 1.95°C 、 2.36°C 、 2.9°C 。其中,高纬度地区气温升高的幅度远比低纬度地区更大,说明 CO_2 浓度增大对高纬度地区的影响最大。据 Manabe(1974, 1975)等采用三维大气环流数学模型研究,当大气中 CO_2 浓度加倍时,地面平均温度在热带升高不到 2°C ,但在北纬 50° 可升高 4°C ,北纬 76° 则可升高 8°C 。虽然目前不同气候数学模型对大气 CO_2 浓度升高的升温效应尚有一定的差异,但升温的趋势是一致的。因此,中生代大气中的 CO_2 浓度大,对于中生代气温升高和气候反差缩小都有重要影响。

海洋比陆地反射率低,热容量又比大陆高,热传导深度也比大陆大。因此,海平面升高能使地表获得、储存更多的太阳辐射能,并成为地球气温升高的热源。中生代是泛大陆分裂解体的时期,随着大陆逐渐分离,新洋脊则不断生成。洋脊系统体积十分庞大,它的生产会导致海洋容积减少,海平面相应上升。如果目前各大洋洋脊全部消失,可使海而下降 300m 左右,所以洋脊的生长和消亡会对海平面升降产生重大影响。中生代泛大陆解体、海底扩张、洋脊生长、海平面升高与气候变暖明显地具有同步关系。据洋底磁异常条带分析,中晚白垩世是海底快速扩张及洋脊迅速生长的时期,特别是距今 110~85 百万年期间(阿尔巴—三冬期),海底扩张和洋脊生长达到高峰,这一时期也是中生代海侵的高峰期和气候最温暖的时期。

中生代极地由于无冰盖存在,可以显著减少辐射损失,大大增加极区的辐射收入,这对于中生代极区气温升高具有很大的影响。目前,北极海冰面已将绝大部分太阳辐射和反射,如果其冰层全部融化,则可大大增加辐射收入,使极区变暖,而使前苏联、美国阿拉斯加和加拿大北部地区,都可以生长温带植物,这一状况和中生代生物化石的地理分布比较近似。

(华中师范大学魏仕俊撰)

气候变化 climate change 既是一个学术名称,又是自然科学的一个重要研究领域。当代气候学的核心问题就是探讨始终处于变化之中的气候及其与人类环境的关系。气候变化问题具有明显的学科交叉,不仅属于大气科学范畴,更与多种自然科学如地质学、地理学、海洋学、冰川学、天文学、古生物学、地球物理学、地磁学、水文学、环境科学等密切相关,而社会科学中的考古学、历史学、经济学、人类学等也与气候变化具有直接或间接的联系。自从 1979 年世界气象组织(WMO)制定世界气候计划(WCP)以来,气候变化问题已经越来越引起世界各国科学家和政府的关注。由于气候变化直接威胁到全球粮食、水资源、能源、

环境和各国经济,而人类活动又对气候有相当的影响,因此人们已经认识到全球气候问题的严峻性和紧迫性。近 10 多年来,全球变暖问题已成为当代国际科学界的重大议题之一。气候变化的研究内容包括:气候变化的规律与特征;气候变化的原因;未来气候变化的预测;气候变化的影响与对策等方面。气候变化研究的途径可概括为下列 3 类:气候观测资料的分析(含各种代用资料或定性资料);各种理论基础上的成因假说和论证;各种动力学、物理学或统计学及其相互结合的数学模式模拟。

人们认识和研究气候变化主要是针对某种时空尺度进行的。从空间范围来说,大致有全球或半球尺度;区域尺度;局地尺度等等。从时间尺度来说,大致有 3 类:现代(指约近 200 年来,由于气象仪器出现而具有定量记录的年代);历史时代(指约近 5000 来,人类有历史文字记载后的年代);地质时代(指 1 万年以上各种时间尺度的远古时代,人类尚未诞生以前或无法从人类活动的记载和遗迹获取气候信息的年代)。上述 3 个时间尺度类别,它们所依据的资料来源、形成原因和所产生的影响都是互不相同的。一般说来,地质时代的气候变化虽然同当前社会的需要关系不太密切,但它却反映了地球上气候变化最本质的部分,是一切时间尺度气候变化的背景;历史时代的气候变化则是现代气候变化的背景;现代气候变化则是当代科学界和社会各界最为关心的。

人类对于气候变化的认识源远流长。世界上最早以气候变化为主题的科学著作,见于 Aristotle(公元前 384~前 322 年)的《气象学》;在古罗马的教科书上,Pliny(公元 23~79 年)所著《自然史》中已提到气候变化的事实。中国最早关于气候变化的记载见于《吕氏春秋·十二纪》,这部著作对气候异常现象作了系统性总结。宋元时期的金履祥曾在他的著作中根据周、秦和两汉时代的栽培方式指出,当时中国气候比他所处时代温暖。北宋沈括早就能根据生物化石追溯古代气候情景,因而推断气候的变化。

关于气候变化的完整认识和现代科学理论研究,则是近代气象学发展史上的一个重要内容。最早研究地质时代的学者 de Geer 曾根据冰川在欧洲堪的纳维亚的沉积物推算 18 000 年前太阳辐射量的变化。Волгодин 曾根据沉积物研究古生代寒武纪(距今五亿年前)气候特征,Neumager 曾根据植物化石群分布来研究中生代侏罗纪(距今 1 亿多年前)的气候,Kerner(1931)则从水陆分布与气温的关系推测侏罗纪各纬带温度。关于地质时代气候问题,中国竺可桢、李四光等曾进行了开创性的研究,将中国古代气候的基本轮廓研究得较为清楚。关于距今 200 万年以来的最后一次大冰川期即第四纪气候,国内外学者研究成果相当丰富。例如,第四纪内的亚冰期和亚间冰期约有每 10 万年循环的规律,已由许多学者从不同的成因理论得到了证实。大致有 3 种理论假说(天文学、地理学、物理学假说)先后对冰期的成因作了种种解释。特别是波兰学者 Milankovich 在 20 世纪 20~40 年代曾对天文学因素(地球轨道参数)解释冰期气候作出了代表性贡献。Bynblko(1974)曾应用气候理论数值模式解释冰期形成的物理机制,也很有代表意义。同期取得成就的科学家还有 Berger(1973, 1975, 1977, 1978), Suarez 和 Held(1976), POLLARD(1978), Ewing, Donn(1958), Flint(1957), Flohn(1963, 1969 等),等等。更有许多学者对第四纪冰川成因与大气中 CO_2 含量变化的关系作了深入的研究。例如,Platt(1956)认为大气和海洋中 CO_2 浓度的自振荡是冰川发育的重要因素。目前对于第四纪冰期规律及成因的研究已取得较为一致的结论。关于这个时期的研究成果,Будыко(1980)在《气候的过去和未来》,以及 Lamb(1979)在《气候:现在、过去和未来》这两本专著中作了最详尽的总结,成为地质历史时代气候变化的代表性著作。

气候变化研究是大气科学中发展最快的一个领域。尤其是关于近代和现代气候变化方面的研究,在规律、成因、预测等主要问题上都已取得重要进展。例如,对近 1 万年或 5000 年来的气候,对近 500 年来的气候问题,许多国内外学者作了详细探讨。竺

可桢在他的研究生涯中曾收集了大量古代气候史料,写出《中国近五千年气候变迁的初步研究》论著;中国气象工作者曾在70年代编辑出版了有研究价值的资料集《中国近五百年旱、涝分布图集》,都标志着我国对历史气候研究的重大成就。当代人们最为关心的是近百年乃至近几十年来的气候变化及其对未来的影响,关于现代气候变化的研究成果更是层出不穷,不可胜数。例如,我国竺可桢、涂长望、赵九章都先后发表过研究成果,顾震潮、叶笃正、谢义炳、陶诗言、么枕生、朱炳海、黄仕松、程纯枢等都为我国气候变化研究领域奠定了基础。近几十年来,国际上气候变化研究已经成为气候科学中最热门的领域之一。可以说,气候变化研究已经进入一个新的阶段,其标志不仅在于采用大型动力数值模拟和观测研究并举,而且在于研究规模十分庞大(国际性合作多、大型研究计划多、研究时空范围广等等),研究的学科交叉性强(天、地、生多学科合作,自然科学与社会科学结合),研究成果的数量和质量都超过以往任何时期。

目前已有的研究表明,近百年来全球气候经历着急剧的变化,总的趋势为全球变暖。一般认为百年来全球平均地面气温已增加了 $0.3\sim 0.6\text{C}$,全球平均最暖的5个年份都在20世纪80年代。与此同时,全球海平面升高了 $10\sim 20\text{cm}$,这种增加既不是时间上平稳的,也不是全球均匀的。根据大多数科学家的研究结果认为,全球变暖与当代人类活动排放过量的温室气体(CO_2 , CH_4 , CFCs , 氟利昂及 N_2O 等)有关。因为温室气体含量增加会加强温室效应,从而使地球表面平均说来有一个额外的增暖。这些研究主要是通过各种有效的数值模式做敏感性试验的途径取得的。例如,政府间气候变化专业委员会在最近的报告中指出,目前温室气体排放量增加状况继续维持,则下世纪内全球平均温度约每10年增加 0.3C ,这将使2025年全球平均温度比现在升高 1C ,而到下世纪末则将升高 3C 。如按其逐步限制排放量的设想,全球平均温度变化率大约每10年 0.2C ,略高于 0.1C 。但是目前预测的结论有一些不确定性,特别是关于气候变化的时间、幅度和区域型式,其原因是多方面的。当前气候变化研究的努力目标:(1)更好地了解与气候有关的各种物理过程,特别是同云、海洋和碳循环有关的过程;(2)在全球范围内改进有关气候变量的观测系统,进一步研究过去已经发生的气候变化;(3)发展更先进的关于地球气候系统的模式;(4)增加对国家的和国际间(特别是发展中国家)的研究活动的支持;(5)促进国际气候资料的交换。

参考文献

- 1 么枕生. 气候学原理. 北京, 科学出版社, 1959, 361~405
- 2 Lamb H H. Climate; Present, Past and Future, Methuen & Co Ltd, London, 1979, 2:1~5
- 3 Будалко М N 著. 气候的过去和未来. 翁笃鸣, 刘惠兰译. 北京, 气象出版社, 1986, 139~254
- 4 IPCC, Scientific Assessment of Climate Change. Report Prepared for IPCC by working Group 1, 1990, 201~281
(南京气象学院丁裕国副教授撰, 屠其璞审)

气候突变 climate jump 尽管气候突变的提出是仅几年的事,但许多气象学家早就揭示了气候突变这种现象。1958年叶笃正等就指出了6月和10月大气环流的突变现象,1963年Loren分析了流运动中的非线性作用,提出著名的Loren系统。首先发现了所谓奇怪吸引子,从而说明非线性作用下产生的令人困惑不解的不可预报问题,波及数学、天文、物理等一系列学科。60年代中期, Thom 创立了突变理论,到70年代中期,兴起了突变研究。

突变理论所关心的是一个系统的状态变量 x , 当其控制变量 μ 连续变化至某一临界区域, 状态变量具有的不连续跳跃现象。按照 Thom 的突变理论, 系统所以出现性质不同的突变类型, 取决于控制变量的数目: $m \leq 4$, 则该系统有7种不同类型的突变, 而且, 其中任何一种突变涉及到的状态变量数 $n \leq 4$ (标准化后的

变化); 不过当 $m=5$ 时, 突变类型增至11种; 当 $m \geq 6$ 时, 突变类型将异常复杂。为此只要找到一组适当的状态变量和控制变量, 那么分析、了解突变现象和找到支配系统的动力学方程就容易得多。突变理论给出了所有的突变类型, 为研究自然界错综复杂的突变现象指明了方向和线索, 它弥补了微分方程描述自然运动的不足, 成为描述自然界从量变到质变的多方面演进过程的有效工具, 目前在物理学、工程力学、生物学、生态学、社会学等各方面得到应用, 预计不久也将在气象学中得到广泛的应用和发展。

Imbrie(1987)根据气候的成因及时间尺度, 把气候突变归成两类, 第1类是简单状态的突变, 即在气候系统结构没发生根本变化的情况下, 或不考虑系统外边界条件任何长期变化的前提下, 可观测到的迅速且显著的气候变化, 这类例子很多, 以年为周期的初霜冻、季风爆发等等。第2类则反映系统边界长期变化中的突变, 这些事件不是有规律地发生的, 如缓慢的大地构造引起的地理变化, 必须要有新的大气和海洋环流与之相适应。再者正如 Flohn(1987)指出的, 几千年尺度上发现过冰期与突然结束以及大约12000年前和5500年前发现过“洪积期”的突然到来, Ghai(1982)就提出了气候突变是冰期的间冰期之间的温度差异的一半。显然此定义过于具体而缺乏普适性, 为此更多的学者通过考察气候统计特征的变化来定义气候突变。

常见的气候突变是把它定义为气候从一个平均值到另一个平均值的急剧变化, 它表现为气候变化的不连续性, 这个定义能够较好地反映一个气候基本状况(特征平均值)的变化, 称为均值突变。不过, 平均值只是反映气候状态的一个基本特征量, 另一个描写气候状态的特征量是它的变率(用方差来表示), 这类气候突变定义为气候从一个方差状态到另一个方差状态的急剧变化, 其平均值却无明显的变化, 称此为变率突变。Saltyman 等(1987)给出的过去150万年同位素氧18的记录就呈现这种突变形式, Maasck(1988)更是通过严格的各种检测, 发现更新世中期的同位素氧18存在方差突变。这里要定义的第3类突变为跷跷板突变, 例如符凉斌等(1986)用复 EOF 分析海温场所得到位相的时间变化即呈这种突变形式。第四类突变定义为转折突变, 即在某一时段持续减少(增加), 然后突然在某点开始持续增加(减少)。Goossens 等给出的高纬地区气温历史记录就呈此形式。

上述4种突变的定义仅是从时间演变角度考虑某一气候变量的特性, 需要指出的是气候要素场空间结构的变化, 同样存在着突变现象。例如旱涝分布的类型、温度距平场的特征向量等, 常常表现出在某一时段内某一类型占优势, 而到另一时段另一类型占优势, 这种相互间的转变在较短的时期内完成。例如王绍武等(1987)分析的中国自公元950年以来旱涝型的分布就可以看出这一类突变的存在, 1278~1282年持续5年的南涝北旱型突然变成南旱北涝型; 再如19世纪60年代末到70年代中从长江流域涝, 其南北为旱型突然变成长江流域旱, 其南北为涝型, 持续4年后又突然变回到长江流域涝, 其南北为旱型。

归结上述几类突变, 符凉斌、王强试图给气候突变的普适定义: 气候从一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)跳跃式地转变到另一种稳定态(或稳定持续的变化趋势)的现象, 它表现气候在时空上从一个统计特性到另一个统计特性的急剧变化。上述气候突变的定义, 还是从一种气候要素来考察突变现象, Rognon(1983)就强调应该综合考虑气候突变的各成分因子(如降水、温度等)来定义气候突变, 这就要求对气候诸要素场进行综合分析。同时, 实际的情形很可能是两种或两种以上的突变类型之复合形式, 因此在检测时要谨慎。

针对气候统计平均值这类均值突变情形, 有以下几种检测气候突变的方法。不过这些检测方法可以仿效地应用到气候的其它突变情形中, 至少对气候要素时空场突变型的检测需要进一步研究。

1. 低通滤波法。它是通过消除高频, 使系统的长期变化更加有效地表现出来, 如果在一段时间序列中存在比较长时间的周期波

动,那么这种方法可以比较有效地重现这种波动。由于仅凭直觉从图中发现其突变趋势,不可能直接给出在哪个点附近产生突变,这未免带来主观性,而缺乏可信度。实际上,在滤波过程中,由于滤波器不可能象函数那样完美,滤波过程中,不同波段的振幅在不同程度上都受到削弱,因此,时常可能达不到预期效果。

2. 滑动的 t 检验法。(MTT)它是用来检验两随机样本平均值的显著性差异。为此可把一连续的随机变量 x 分成两个子样本集 x_1 和 x_2 , 让 μ_i, S_i^2 和 n_i 分别代表 x_i 的平均值, 方差和样本长度 ($i=1, 2$)。其中 n_i 根据需要人为地定义长度。

原假设 $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$, 定义一统计量为

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)^{1/2}} \quad (1)$$

这里 S_p^2 是联合样本方差, $S_p^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}$ 为 σ^2 的无偏估计 ($E[S_p^2] = \sigma^2$), 显然 $t_0 \sim t(n_1+n_2-2)$ 分布, 给出信度 α , 得到临界值 t_α , 计算 t_0 后在 H_0 下比较 t_0 与 t_α , 当 $|t_0| \geq t_\alpha$ 时, 否定原假设 H_0 , 即说明其存在显著性差异, 当 $|t_0| < t_\alpha$ 时, 则接受原假设 H_0 , 要注意的是 n_i 的选择带有有人为性, 因此会带来某种程度上困惑, 具体应用时, 给出具体的需要选择 n_i , 并不断地变动 n_i , 以增进检查结果的可靠性。

3. Cramer 法。它的基本原理同于 MTT, 通过比较某一局部样本序列的平均值 \bar{x}_k , 与总体样本平均值 \bar{x} 的差异, 来判别突变的存在与否。

原假设 $H_0: \bar{x}_k - \bar{x} = 0$, 定义一统计量 t_k 为

$$t_k = \sqrt{\frac{n(N-2)}{N-n(1+t_k^2)}} t_k \quad (2)$$

其中 $t_k = \frac{(\bar{x}_k - \bar{x})}{S}$, S 为总体样本方差, N 为总体样本序列的长度, n 为所选局部样本序列的长度, 则 t_k 服从自由度为 $N-2$ 的 t 的分布, 其检验也同于 MTT。由于其中 \bar{x} 覆盖了所选的局部样本序列, 因此在计算及解释时要谨慎, 再者 MTT 法中所注意的事项这里同样要注意。

4. Yamamoto 法。其原理还是同于 MTT, 不过此法更简单明了, 通过定义一个信噪比:

$$\frac{S}{N} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{S_1 + S_2} \quad (3)$$

其中符号同于 MTT。当 $S/N > 1.0$, 就定义为“突变”, 如果在 MTT 中假定 $n_1 = n_2 = n$, 通过比较 (2), (4) 两式得

$$t_0 > \frac{S}{N} \sqrt{n} \quad (4)$$

如果取 $n=10, S/N > 1.0$ 就相当于 $t_0 > 3.162$, 达到 95% 信度以上的水平, 但是没达到 99.95% 的信度, 要达到此信度水平, 需要 $n=14$, 因此在具体计算时, 时刻注意可信度, 根据不同的对象可以变换其信噪比的临界值。

5. Mann-Kendall 法(缩写 M·K)。此法最初由 Mann 于 1945 年发展, 当时仅用于检测序列的一种变化趋势, Sneyers 则进一步完善了这种方法, 它能大体上测定各种变化趋势的起始位置, Coossens 等把这一方法应用到反序列中, 从而发展了一种能检测气候突变的新方法, 它以检测范围宽、定量化程度高而富有生命力。M·K 法以气候序列平稳为前提, 并且这序列是随机独立的, 其概率分布等同。在原假设 H_0 : 气候序列没有变化的情况下, 设此气候序列为 $x_1, x_2, \dots, x_N, m_i$ 表示第 i 个样本 $x_i (1 \leq i \leq N)$ 的累计数。定义一统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N) \quad (5)$$

在原序列的随机独立等假定下, d_k 的均值、方差分别为

$$\begin{cases} E[d_k] = k(k-1)/4 \\ \text{var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72 \end{cases} \quad (2 \leq k \leq N) \quad (6)$$

将 d_k 标准化:

$$u(d_k) = (d_k - E[d_k]) / \sqrt{\text{var}[d_k]} \quad (7)$$

这里 $u(d_k)$ 为标准分布, 其概率 $\alpha_1 = \text{prob}(|u| > |u(d_k)|)$ 可以通过计算或查表获得, 给定一显著性水平 α_0 , 当 $\alpha_1 < \alpha_0$ 时, 接受原假设 H_0 , 当 $\alpha_1 > \alpha_0$ 时, 则拒绝原假设, 它表示此序列存在一个强的增长或减少趋势。所有 $u(d_k) (1 \leq k \leq N)$ 将组成一条曲线 c_1 , 通过信度检验可知其是否有变化趋势。

通过对中国最近 100 年干旱指数的 M·K 法检测, 发现中国的干旱进程同样存在突变现象, 十分有意义的是突变发生的时间与北半球迅速增暖几乎是同时的。从 1922 年开始, 中国突然进入干旱期, 与此同时, 曾检测到印度季风突然活跃的突变现象, 与中国大陆旱反关系。由此可以描绘出 20 世纪 20 年代经历了一次全球范围的气候突变。符淙斌等曾从机理上对这一现象作过详细的论述。

6. Spearman 法。这实际上同于 M·K 法, 1983 年 Coossens 等曾试验了这两种方法, 结果相一致。不过在序列中各值等同比较多时, Spearman 法似乎更简单, 但这种方法不可能测出突变点发生在序列的开头或收尾几年中。

(中国科学院大气物理研究所博士生导师符淙斌、王强撰)

气候影响评价途径 the way of climate impact assessment

20 世纪 70 年代中期, 关于气候影响评价研究的重点是放在气候对人类活动的影响上, 近年来则更多地强调气候与人类活动之间的相互作用。由此产生研究气候影响的 3 种途径:

(1) 强调影响。这一途径是以气候事件为直接原因和直接影响的假设为基础的。例如短期温度变化作用于一个给定的“裸露单位”(如人类活动), 则可能产生影响或作用, 即气候变化 \rightarrow 裸露单位(即人类活动) \rightarrow 影响。这种研究途径是以建立回归模式来寻找气候和受影响单位之间的统计关系为特征的。由于这种方法几乎不大注意了解两者之间关系的性质, 具有一定的盲目性, 即所谓“黑匣子”。1975 年美国交通部的气候影响评价计划中, 有一些则是利用这种方法估计引起大气中 O_3 减少的可能范围。1980 年美国国防大学也使用回归方法研究长期气候变化对作物产量和农产品的可能影响。这里强调的是寻求气候变化和可能响应之间的相对简单的联系。(2) 强调相互作用。近年来, 更多的研究则是集中在寻找对气候和人类活动之间相互作用的更好了解, 这种途径假定气候事件仅仅是影响“裸露单位”的许多过程(社会和环境)中的一种过程, 即这可用 20 世纪 30 年代干旱对加拿大草原区的影响程度来说明气候与其它因素交互作用对农业经济的影响。由于那时农产品价格低, 干旱开始前草原区许多人的经济已达到危机的困境, 这从根本上增加干旱影响的严重程度。此外, 由于大片土地被开垦, 土壤风蚀加剧, 作物被大量尘土掩埋, 致使产量下降。因此, 经济、天气和农业技术交互作用产生了严重的经济和社会影响, 而且这种影响也许由于非气候因素作用而提前开始了。同样地, 未来各种气候变化的影响都可能受到经济和社会条件的影响, 并在一定程度上增加气候变化影响的恢复力或脆弱性。1981 年国际联合研究所干旱和人类的研究项目中就采用了相互作用的途径。这里强调的是气候变化、社会、经济的综合影响。(3) 强调相互作用次序。相互作用模式可通过考虑阶梯式相互作用达到较理想的结果。阶梯式相互作用模型可从第 1 级生态受影响开始, 通过以企业单位(例如农场、合作社等)受影响为第 2 级到第 3 级(地区级和国家级)相互作用。

1984 年欧洲共同体使用这种途径研究大气中 CO_2 浓度增加引起的气候变化对社会经济的影响。首先, 将 $2 \times CO_2$ 输入到大气环流模式(GCMS)中, 得到温度和降水量可能变化的信息, 然后以这种信息作为输入项输入到包括径流和生物产量在内的模式中, 得到第 1 级影响, 并由此估计第 2 级, 第 3 级的经济相互作用的影响。

从方法论角度看, 气候影响评价方法包括的范围很广, 目前业务和研究中常用的具体评价方法有两类。一类是指数, 一类是

模式。气候指数包括干燥度、气候度、有效积温、降水有效性、度日等,此外还有把对某项经济最有影响的若干个气候变量综合成一个变量,例如评价气候对家庭耗能的影响所采用的人口加权度日。

气候影响评价模式分为经验—统计模式和模拟模式。经验—统计模式系使用统计方法如回归分析,把同时期的经济资料和气象资料进行统计分析,建立一种统计模型。这类模式对估计短期气候异常的影响是最有用的。使用这种模型来评价对某个气候变量高度敏感的经济活动是最成功的。

模拟模式在评价气候变化对农业的影响上应用较多,它是以对植物和作物生长的基本过程和环境因素之间的关系的认识为基础的。与经验—统计模式相比,它具有更坚实的试验观测基础,因而适于对所得结论进行试验验证,特别是考虑气候变化的长期影响时更是如此。但由于模拟模式对输入资料要求高,因需要十分详细的气象和生态资料,多半还在试验研究中,尚未普遍应用到业务中。然而,它毕竟代表着定量评价气候影响的发展方向。

此外,最近出现的气候—作物产量统计模式中,自变量除气候要素(例如降水、温度)外,还有非气候要素(例如肥料、灌溉、价格等),比单纯考虑气候因素的内容要丰富得多了。

目前,气候影响评价已经涉及到社会经济活动的许多方面,诸如农业、工业、交通、水资源、能源、水产和人体健康等等。

农业对气候变化极其敏感。天气和气候变化对农业影响是多方面的,效果也是异常深远的。例如1976年巴西的霜冻导致了世界咖啡市场行情猛涨旋即猛跌的局面;而且还使世界信贷、股票市场紊乱,甚至还造成部分出产咖啡国家政局不稳,国际关系紧张和复杂化,因此气候变化对农业影响的评价工作是个复杂的系统。80年代前,气候影响农业评价工作,大多为经验—统计模式,强调的是类似于平均产量的变化这样简单的第一级影响。近年来,气候影响农业的评价工作有了很大发展,不仅广泛地应用经验—统计模式,还应用了大气—作物—土壤系统模式,大大提高了估计精度,而且还考虑了更深层次较复杂的影响及有关响应策略。

气候变化可能影响以下方面:气候变化影响的空间复杂性和非线性;气候变化对农业的影响具有多重性和累积性;产量和产量响应的变化;农业生产潜力空间型式变化;气候因素之外的其它因素的第一级影响;为适应气候变化,农场必须对农业生产进行相应地调整,比如改变作物品种,改变施肥量及排灌措施;改变农业投入和非农业消费等。

地区级和国家级的政策响应包括改变地区土地利用的分配和国家的农业政策。

鉴于气候变化对农业影响的复杂性和深远意义,评价工作着力于综合研究已非常迫切。气候—农业—经济—社会模式如何耦合和优化,在很大程度上将是未来气候变化对农业影响的评价工作的重点和关键。

水对气候变化和变动非常敏感,历来人们就十分重视气候变化对水影响的评价工作。例如早先设计的水利工程,水利专家们大都考虑了气候变化的影响。只是人们仅研究了气候变化对水的第一级影响,而较少分析间接影响或高级影响。对于气候异常的情况下,水系统的运转状况及其对社会经济系统的影响等方面研究则基本未涉及。近年来,这种状况开始改变。

已大量出现的关于水资源对气候变化敏感性的研究和在区域水平方面的集水区域研究,虽然没有对于气候、水资源、政策方面做系统化的工作,但对水分信息及不确定影响方面进行了恰当的讨论。它们的若干方法、结论无论在理论上还是实践上都是肯定的,尤其在水资源对气候响应意识方面。

在确定气候和水资源的定量关系时,通常把一些气候特征量转换成水资源。其方法有3种:统计、分析和数值模拟。目前在从统计到分析再到数值模拟的发展过程中,其理论基础越来越复杂。统计转换是确定气候波动指标和水资源之间的关系;分析转

换是在简化的物理基础上,从气候要素(如降水、蒸发)和水资源(如径流、土壤水分变化等)的平衡来确定两者之间关系;数值模拟转换是经一些理论模式为基础,比分析考虑的物理过程更详细。例如Langbein(1949)利用统计方法确定了美国部分地区降水、气温和年平均河水量的关系。

通过模式进行气候影响评价一般分3个阶段:确定对气候敏感的水资源管理系统的特殊属性,如水库出水量、地下产水量、异常流量、系统稳定性等;确定影响水资源管理系统属性的气候参数,如径流增加(减少)、径流持续时间、流速变化等;根据影响将气候参数和水资源管理因素间的关系公式化。

1977年Schwarz调查了美国东北部大城市供水系统对气候的敏感性,并慎重地分析了调查结果,确定了气候变化对城市供水系统影响的9个特征因子,描述了技术、经济和管理在供水系统中的作用。

洪涝灾害的模拟是水资源管理的重要方面。芝加哥大学怀特和克罗地亚大学自然灾害研究小组,在这方面的研究中取得了较好的结果。

因为痕量气体的增加,人们对地球增暖时与气候的相互影响也产生兴趣,特别是中纬度大陆地区,如美国大平原。考虑到地形作用,GCM试验认为气温上升将导致降水和土壤水分减少。近年来,Gleick对Sacramento峡谷进行水平衡模拟试验,其气候情景由3种不同的GCM得出。Cohen(1988)分别以GISS和GFDL的GCM试验结果输入Thornthwaite-type经验模式,计算了美国五大湖区水的变化。

中国早已开始气候影响评价,而作为一项全国性的业务工作是从1984年开始的。经多年的努力取得了如下几个方面的进展:(1)对气候与社会经济发展问题的重要性和迫切性有进一步理解。多年来,收集、整理的大量全国性、地区性、地方性的气候影响情报表明,气候对农业、工业、能源、水资源、交通运输、旅游、社会和政治各方面以及社会经济总体都具有重要意义,研究合理对策。对于确定社会经济发展的战略方向,制定规划和基建标准有重要参考价值。(2)探讨气候影响评价方法,气候评价不断走向客观化、定量化。几年来,通过开办短训班、学习班及经验交流会,较系统地学习与气候影响评价有关的理论、方法,并着重介绍国外气候影响评价的先进方法,有力地推动了适合中国实际的方法的研究。目前,不少省级气候影响评价中,应用了自己研究的方法,包括各种指数分析、模式分析,并把近代数学、统计学的技术应用到气候影响评价中,例如回归分析、谱分析、正交多项式、模糊数学、聚类分析和灰色系统等。(3)气候影响评价的研究。近年来,气候影响评价研究进展比较集中地体现在1988年11月在大连召开的《全国气候与社会经济发展关系研讨会》上。会议共收到论文88篇,来自全国各省(市、自治区)气象局、科研院所和院校共44个单位,这说明气候与经济发展关系的专门研究,得到广泛的关注。会议明确地提出了系统理论在气候影响评价中的指导意义。事实上气候对社会经济的影响,不仅气候本身是一个重要因素,而且资源与灾害的形成机制及人类利用这些资源的能力与效率也是极为重要的。当前全国广泛开展的气候评价,系统地总结了各地区各年的个例,为广泛深入地开展气候影响评价研究创造了条件。

模式是表现系统思想的重要科学工具。各级气候影响评价机构都在从事各类气候影响评价模式的探索,包括按行业、事件、地区和方法而建立的不同模式。由于这一问题涉及面广、问题复杂,有关模式目前还只处在探索阶段。

情景研究是模式研究的具体应用。中国在这一方面的研究还不多,仅在个别研究报告中具有情景分析的内容。

另外,对气候影响社会经济过程的研究,如成灾过程和资源形成过程等,也具有重要意义。这种研究不但能加深对气候影响社会经济机制的理解,而且可对采取相应对策提供科学依据

(国家气象中心黄朝迎撰)

气候影响评价 climate impact assessment 以自然和社会的相互作用或自然与人类的关系为研究目标的综合性研究领域。

人类早已意识到气候对社会经济和人类活动的影响,但真正从自然与社会的关系出发作为一项研究领域则是从20世纪才开始的。从早期的研究看,气候被不同的学者看作是对社会影响的不同因子;认为气候是社会的特定环境和背景,或是社会发展的决定因子,气候既是社会的一种自然灾害,同时也是一种人类的自然资源。这些观点从不同的方面反映了人们对气候与社会相互关系的认识。1949年,雷利(Leighly)认为气候是一种稳定的自然背景,即使有变化也是缓慢的。20世纪以来,不少学者开始认为气候也可以是一种自然灾害,如怀特(White, 1945)首先开始注意到并研究了自然灾害(洪水)对人类活动的影响。70年代以后,这一研究领域引起了国际上许多研究人员的兴趣,包括人文学家、经济学家、心理学家、地理学家和社会学家。兰勃(Lamb, 1983)系统地研究了近代一些典型的极端灾害性气候事件,揭示了气候异常有害而可怕的一面,如1910~1915年和1968~1974年非洲干旱,美国30年代中期的大平原干旱(Worster, 1979),非洲南部的1919年干旱(Tanmehill, 1947),以及澳大利亚1902年和1944~1945年的严重干旱(Campbell, 1968)。与气候的灾害论相对的另一论点是认为气候也是一种自然资源,最具代表性的是兰德斯特格(Landsberg, 1946),他认为气候是一种自然资源,是一个国家的收入。然而资源经济学家尚未对气候资源给出明确的定义,只认为它是一种非市场资源,没有价值,无法交易,无法确定其价格,因此佛莱门(Freeman, 1980)把气候称之为“自由资源”。上述种种观点,从不同的角度论述了气候的特点,综合了气候的社会意义及其与社会经济的相互关系,说明了气候影响的重要性。

70年代至80年代初,气候与社会相互作用、气候对社会的影响的综合性研究广泛开展起来,以美国最活跃。美国的气候影响评价包括全球性的,也有区域性的,1976年美国NOAA(海洋大气管理局)正式建立气候影响评价业务系统,重点对前苏联、中国、加拿大、澳大利亚、巴西、阿根廷、印度等主要粮食生产国进行气候评价,以估计世界粮食产量,制定政策。此后不断扩大业务机构规模和评价范围,至1984年已正式形成一个比较完善的日常业务系统。除日常业务部门外,美国一些研究机构和政府部门也进行了气候影响评价的研究。最具代表性有:(1)MIT政策研究中心受美国国际发展署资助,于1973年9月至1974年9月对苏丹一撒哈拉地区的干旱进行研究,以便提出对该地区的长期战略对策意见。内容包括农业发展、经济问题、健康、营养与人口、工业和城市发展、社会政治、科技、教育、运输、水资源、能源及矿产资源等问题。(2)国防部于1976年秋开始的“气候变化—2000年”研究,共有气候变化对农业影响的评价、作物产量与气候变化、世界粮食经济与气候变化对策3个部分。(3)“干旱与人类”研究,是由设在斯德哥尔摩的国际高级研究机构联合会进行的,由美国阿斯本研究所粮食与气候计划负责人主持。这一课题深入地研究了1972年气候异常,尤其是干旱在世界各地的影响以及对粮食生产和库存、包括社会与自然生存环境因素的影响。(4)DOT气候影响评价计划(1971)。(5)美国科学院关于大气化学特性影响的研究(1975)。

1979年5月,世界气象组织第8届代表大会通过了第1个世界气候计划,其中有4个子计划,包括“世界气候影响计划”。按照要求,气候对社会影响的范围应包括人类健康、住宅与建筑、农业、水资源利用、林业、渔业和海洋业、能源供需、工业、商业、交通运输及各种公共事业等,要通过各种相互影响模式、不同学科的理论和方法对上述影响加以评价,最终为社会提供服务,减少异常气候和极端气候事件造成的社会经济损失,并为远景发展规划决策提供参考依据。为了达到这一目的,必须建立相应的气候影响评价业务机构,编辑评价报告和情报资料,建立气候影响评价情报网。借鉴国外气候影响评价研究和业务工作的经验,中国

于1982年开始气候影响评价工作,1985年正式作为全国各级气象部门的日常业务工作。国家级气候影响评价主要包括3个方面的工作,气候影响情况评价,国外气候情报及全球气候信息收集,出版寒潮年鉴等。

目前,中国及国外的气候影响评价业务体系、模式、方法、指标和服务等均已进入成熟发展阶段,主要有3种基本评价形式:(1)现代气候影响评价,重点是有现代观测仪器以来的气候变化对社会经济发展的影响,从而发现气候与社会相互作用的若干关系;(2)实时气候影响评价,着重对当前已出现或正在发生的异常气候和天气状况的社会影响作出评价;(3)展望性和预测性气候影响评价,以未来可能出现的气候与天气状况为依据,作出在未来社会经济水平下的影响评价。这类影响评价难度较大,首先要有较准确的未来气候状况预报,其次还要对未来社会发展作出预测,尤其是前者,目前尚未完全解决。因此,展望性影响评价,目前大多以模式模拟为主,提供一些可能性结果供参考。除上述3种气候影响评价形式外,还有历史气候影响评价,这类评价主要以大量的史料记载中获取有关信息,对历史时期的气候影响作出评价,得出一些结果用于现代研究和业务。

进入90年代以来全球气候异常和环境恶化的趋势仍在加剧,极端气候事件已成为当今主要气候灾害之一。因此,预计今后的气候影响评价的研究和业务工作将更多地深入到灾害领域,进行灾害性气候和天气的预报、损失评估和社会经济影响评价,以便为减轻自然灾害损失服务。

参考文献

- 1 Kates R W, Ausubel J H, Mimi Berberian. Climate Impact Assessment. John Wiley, Sons, 1985
- 2 郑斯中,黄朝迎,等.气候影响评价.北京:气象出版社,1989
(南京大学陈星副教授撰)

核战争的气候效应 climate effects of nuclear war

1982年Crutzen和Birks揭开了“核冬天”研究的序幕。1988年联合国指出大规模核战争将给人类带来灾难性后果,估计全球性的核大战将造成约40亿人的死亡,其中10亿为直接杀伤,30亿为由“核冬天”而使人冻死、饿死和瘟疫而死亡;报告呼吁各国政府共同努力,防止核大战。至此,“核冬天”研究达到高潮。

大规模核战争引起大范围的燃烧爆炸,大量烟尘注入大气层,使大气成分在数周内发生巨大的变化。核爆炸后所产生的烟尘粒子的尺度为次微米,在核大火产生的烟中有90%以上粒子的直径小于 $1\mu\text{m}$;有5%的烟粒可进入平流层。核爆炸引起的尘埃中有相当一部分粒子的直径小于 $1\mu\text{m}$ 。在这些粒子中约有1/2会进入平流层。这些烟尘粒子会在高空停留数月,由于大量核烟尘粒子形成的气溶胶会悬浮于空中,阻挡太阳辐射到达地面而使红外线辐射容易发散到太空,因此,地面辐射平衡遭到破坏。这样,到达地面的太阳辐射通量就不能与地表面放射出来的长波辐射达到平衡,必将导致高层大气升温,地面温度迅速下降乃至到达冰点以下,即核气溶胶对大气产生显著的反温室效应。这就是“核冬天”形成的基本物理机制。

核气溶胶对气候影响持续的时间,取决于它在空气中停留的时间。一般来说,气溶胶粒子从大气中清除的过程主要是重力下降、物体表面粘附以及云雨的冲刷作用,正常大气中在对流层中下层几千米高度以下由于云雨发生,气溶胶粒子有时可在几天内被冲刷掉,而在对流层中上层的气溶胶粒子可滞留几周或更长时间。在平流层很少有云形成,所以核烟尘粒子生命周期可达一年或更长。对流层的烟尘层会使地面温度短期内突然降低,而平流层的细颗粒尘埃则会使地面降温持续一年或更长时间,从而引起长期气候效应。另一方面,当地面温度下降到冰点以后,陆地表面的水将冻结成冰。这时,气候系统中为“温度—冰—反照率”正反馈机制的起作用,从而大大加深了核战争的气候效应。

各国科学家采用不同模式对核战争的气候影响进行了许多模拟研究。其中有TTAPS的核战争分类模式、粒子微物理模式

和一维辐射对流模式、能量平衡模式以及大气环流模式(GCM),在GCM中有美国国家大气研究中心(NCAR)、前苏联科学院计算中心(CCAS)、英国气象局(UKMO)和美国俄勒冈大学(OSU)的三维模式。

下垫面降温 由于核气溶胶的反温室效应必将引起下垫面温度下降,不同模式的物理过程简化和假设不一,其结果仅表现为降温幅度的差异。各类核战所引起的最低陆地温度大约出现在核爆后的20~30d内,对于基本型核战争,大约在20d以后陆地温度可降至-23℃,冰点以下的气温可持续数月之久。海洋上,由于其热惯性大,降温持续时间长,但降温幅度一般小于3℃。由于季节和使用模式的差异,降温持续时间和幅度也有所不同。一维能量平衡模式对全球下垫面降温的模拟结果表明,降温明显地与季节有关,夏季降温最严重,春秋次之,冬季最小,陆地下垫面降温大,降温迅速,但持续时间短,海洋下垫面降温小且缓慢,但持续时间长。地面温度的迅速下降将带来长期的气候影响,这种影响来自下垫面光学性质分布的变化,这些变化会引起反照率、热惯性和蒸发能力的改变。Robock(1984)能量平衡模式对这种影响进行评估,北半球中高纬降温的回升要长达几年才恢复到正常情况,这主要是因为海冰面积增加改变了海洋的热惯性,由核烟尘污染了的脏雪在中低纬对降温影响不大,但在高纬盛夏时影响显著。Mitchell和Slingo研究了土壤深层热通量对降温影响,它可减少地面降温约20%,但大气层结稳定性的效应相反且量级相当,故两种物理因子的温度效应恰好抵消。

高层大气升温 由于大气中的核气溶胶强烈地吸收太阳短波辐射,将使气温升高。TTAPS模拟得出的基本型核战争引起的垂直温度分布随时间的变化,核烟尘对气温的影响使对流层高层温度明显升高,增温80℃,对流层低层温度明显下降。高空升温主要是由于那里的烟尘强烈地吸收太阳辐射,高层大气热容量小,初始温度较低,红外放射小,散失热量少,故造成大幅度增温。由于位于对流层高层和平流层的烟尘粒子可滞留较长时间,所以增温可持续数月甚至1年。

地面太阳辐射通量减少 核大战后地面太阳辐射通量都将急剧减少。对于基本型核战争,核战开始后两周或更长时间内,半球平均的地面太阳辐射通量小于正常值的10%,这时的平均亮度低于阴沉天气的亮度。对于严重型核战,可使北半球约有40天的平均亮度低于光合作用所需光照的最低值,大约在两个月内平均亮度低于只够维持植物新陈代谢光合作用的亮度。

大气环流异常 NCAR和CCAS都对北半球发生核战争以后数周内的经向环流做了模拟。CCAS的结果是,热带地区的Hadley环流会演变成一个单独的强单体,这意味着核爆炸后全球风系发生了深刻变化,这是由于核烟尘吸收太阳辐射被强烈加热,在北半球副热带出现强上升运动所致。NCAR利用其大气环流模式对核战争的环流影响按不同季节进行了更细致的模拟,4月份(春季)的结果与CCAS的年平均情况类似,核战后16~20d,双圈环流已变成巨大的单圈环流,赤道侧的烟尘边界处为上升运动,环流单体上部平均经向风速可达2~4m/s,在30°S出现强下沉运动,但对1月份的模拟结果则不太相同,NCAR模式模拟出的未受影响的1月份经向环流为一强北半球单体,赤道地区上升,北半球副热带下沉,受烟尘影响后,北半球单体大为减弱。这可能是由于1月份30°N以北太阳辐射较弱对环流影响较小。

干旱的出现 大规模核战争后,大气环流和热力结构都发生了巨大变化,降水必然要受到严重影响,由于高层大气升温,大气静力稳定度显著增加,气温升高后相对湿度下降,从而抑制了对流层发展,至少在大陆上是如此。由于下垫面降温较大,将使水汽蒸发显著减少,静力稳定度的增加不利于水汽向上输送,从而抑制了对流和云的形成,随之降水将显著减少,核战争后海陆热力差异显著增强,将导致类似于冬季风的盛行风出现,使大陆出现长时间大范围干旱。海洋上的情况虽有所缓和,但对流可能也只限于边界层,因高层为大气增温所抑制。

“核冬天”可使地面温度持续数月低于冻结温度,低光照、高剂量有毒污染物以及臭氧耗竭使紫外辐射入侵地面,将会对生物圈产生严重破坏。由于各种动植物和微生物约有2/3生活在南北纬25°以内,若出现突然降温,这些生物将面临绝种的危险。在生长季节温度降低1℃~5℃就会使农业产量显著下降,核战后第一个生长季节的农业生产将受到彻底摧毁,其恢复需要很长时间,低温、光照弱对生态系统的影响更是致命性的。由于生态系统是一个相互依存、相互竞争的系统,一旦食物链中断,就会导致另一生物的大批死亡。

“核冬天”研究将对国际政治军事产生转折性影响。因为即使先发制人的第一次核打击取胜的国家,也将在“核冬天”下受到惩罚,而且其严厉程度不亚于敌方。

尽管对“核冬天”还有争议,这是由于数值模拟中还有许多不定因素,但一次全面核战争灾难性后果的总图像已很清楚,像降温等已为观测事实所证实。由于“核冬天”与火山爆发、森林大火、火星上全球性尘暴等相类似,对这类现象的研究将增进对“核冬天”的了解。

参考文献

- 1 气象科技情报所,核冬天,北京:气象出版社,1985
- 2 Cao Hongxing, Wan Yongzhong, Lin Yunmei. Chinese Journal Environmental Sciences, 1993, 5(2): 230~240
(中国气象科学研究院曹鸿兴研究员、刘四臣撰)

季风

monsoon 季风现象是中国气候最显著的特征之一。早在古代,季风就已引起人们的广泛注意。在中国古代,季风有多种名称,如信风、黄雀风、落梅风,在沿海地区又叫船牌风。

季风是大气环流的重要组成部分,季风活动的强弱、出现的早晚,对于季风区的天气和气候状况有着很大的影响,因此,季风问题是现代天气学和气候学中最重要的问题之一。中国有一半左右的领土位于季风区内,这里又是中国主要的粮食产区和人口高密度区,所以季风的研究具有重要的意义。

经典理论认为,季风是指盛行风向随季节转换而有显著变化的现象。据此,高由禧对季风现象进行了全面概括,指出存在着5种季风:行星季风、平流层季风、南北半球季风、海陆季风(经典季风)和高原季风。张家诚认为:季风是一种气候现象,它在形式上的表现是冬夏的盛行风向接近相反或有显著差异,这两种盛行风的变换是由于两种下垫面的热力性质的季节变化所造成,同时这两种盛行风也代表着两种性质不同的气团,能够给有关地区天气或气候的年变化造成明显的影响。据此,他认为上述前3种季风很明显被排斥在季风概念之外,而高原季风是否能满足上述定义各个方面,也值得商榷。

1934年竺可桢撰文《东南季风与中国之雨量》,讨论季风的成因,比较中国季风与印度季风的异同,分析夏季风活动与中国降水的关系,从而开创了我国季风研究的先河,为我国季风研究和长期天气预报研究奠定了重要基础。此后,中国的科学家对季风进行了大量研究,概括起来主要有3个方面:夏季风的爆发和进退及其有关的降水分布,夏季风的低频振荡以及夏季风活动与厄尔尼诺的关系;热源分布及其对季风环流的影响;冬季风的形成、爆发、传播及其对行星尺度的影响,冬季风的低频振荡以及冬季风与厄尔尼诺的关系。

夏季风的研究在中国起步较早。继竺可桢之后,1950年叶笃正等先后指出,中国季风的进退与东亚大气环流的两次突变有关,这两次突变一次在6月,一次在10月。1956年徐淑英在研究夏季风的进退时指出,每当一次夏季风比较显著地北进或南退时,中国上空的气流都有一次较明显的变化。后来,他和高由禧利用候平均雨带位置的季节变化,证明了与季风相联系的大雨带的位移,是以渐进与跃进的方式进行。另外,高由禧等发现,东亚同纬度地区雨季的起迄日期,东边比西边早,这说明亚洲季风的建立是自东向西推进的。1979年陶诗言等指出,夏季在亚洲地区存在着两支季风,即南亚季风(印度季风)和东亚季风。1985年他

又指出,南亚季风与东亚季风的源地和主要环流系统是不同的,东亚季风源于澳大利亚高压而南亚季风源于 Mascarene 高压;影响南亚季风的热源在缅甸和西藏高原一带,而影响东亚季风的热源位于中国南海地区;而且东亚季风的建立早于印度季风。这与高由禧等人的研究结论是一致的。

1957年陶诗言等指出,“季风爆发”是大气环流季节变化的一个反映,在此期间,高空环流亦有一次突变,原在中印半岛上空的反气旋迅速进到青藏高原上空并稳定加强,同时 150°N 左右出现东风急流。后来的研究表明这种突变是成立的。这说明青藏高原在“季风爆发”过程中起了重要作用。1973年,在季风试验期间的季风爆发过程中发现,来自南半球的跨赤道气流对“季风爆发”起了很大作用。另外有人认为“季风爆发”与中高纬度阻塞活动有关。

从70年代末开始,中国进行了东亚夏季季风研究。1980到1982年完成的“东南亚夏季季风研究计划”,在研究中中期振荡、夏季风时期南海和华南的天气系统以及夏季风活动与中国雨带的进退和旱涝的关系等方面取得了很大进展。1984年,中国科学院大气物理研究所(IAP/CAS)制定了“季风研究计划”。研究发现,热带广大地区和中国夏季风及梅雨过程中存在着20~30天和30~60天的低频振荡,并提出了其形成的动力学机制,即第2类条件不稳定波(WAVE-CISK)。

夏季风同厄尔尼诺的关系早就成为气象工作者研究的重要问题。1988年李崇银指出,在厄尔尼诺年印度次大陆西南季风弱,降雨量偏少;在中国大部地区降雨量也偏少。

热源问题是夏季风热力过程中的一个重要问题。1957年朱抱真研究指出,青藏高原在夏季是一个热源,在冬季是一个冷源。1968年Flohn在一个西藏高原区夏季航线气象条件的研究中发现,感热加热在高原西部是重要的,而潜热加热主要是在喜马拉雅山和孟加拉一带。1979年叶笃正等指出,青藏高原西部感热加热主要发生在5~7月份,而东部的潜热加热主要发生在6~8月份。1979年FGGE(全球大气研究计划第1次全球试验)资料的计算表明,夏季最大加热中心在青藏高原的上空,Nitta的计算表明,夏季加热中心在高原东部附近。1981年陈隆勋等指出,夏季季风区的主要加热中心在缅甸上空,同时在中国南海有一个次大加热中心。1984年罗会邦和Yanai根据1979年5~6月初FGGE的资料,计算得到初夏的最大加热中心位于阿萨姆—孟加拉上空,高原上空为次大;高原西部感热加热重要,高原东部及孟加拉地区对流潜热加热重要。同时他们还指出,干热对流对夏季高原的加热也起重要作用。

50年代初,对于东亚寒潮与北半球环流变化的联系就有过许多研究。1957年陶诗言研究了影响中国的寒潮源地和路径,把巴尔喀什湖至新西伯利亚一带确定为亚洲寒潮的关键区。80年代初中国进行了寒潮中期预报的研究,1985年仇永炎等指出,90%的寒潮都与北半球倒Ω型型酝酿、建立和衰退相对应。

近年来,中国开展了对东亚冷涌(即侵入低纬度的冬季风)的研究。1987年陆菊中等指出,在前冷涌主要从台湾海峡进入南海,在后冷涌先从东海向东南进入西太平洋,尔后再向西南经菲律宾进入南海。1988年卢文通等人研究了东亚冷涌向南传播的非地转特征。1989年丁一汇等研究表明,在 1000kPa 上,冷涌主要经东海向西南进入南海,在 107°E 附近越过赤道到达南半球。1988年朱抱真指出,由东亚大陆进入低纬的东北冷涌,可导致局地哈得莱环流和西太平洋瓦克环流的加强。1989年朱乾根等研究,冷涌不仅可使局地哈得莱环流加强,而且可使哈得莱环流南移。

近年的研究发现,东亚冬季风具有明显的振荡现象。1985年仇永炎等指出,寒潮活动周期为20天左右。1989年杨松等指出,弱冷空气活动具有单周期振荡,强冷空气活动具有准40d周期振荡。而智协飞等则研究了北半球低频季节活动与南半球低频夏季风对流的联系。

1988年李崇银根据1910~1934年的资料发现,在厄尔尼诺

发生前的冬半年常有频繁的东亚强寒潮活动。这说明频繁的东亚强寒潮活动是导致厄尔尼诺事件发生的重要因素。厄尔尼诺的发生对东亚冬季风也会产生强烈的影响,1988年郭其蕴、朱乾根等指出,厄尔尼诺事件发生的当年冬季,东亚冬季风偏弱。

今后的季风研究应以世界气候研究为背景,加强对季风的低频振荡、季风活动与厄尔尼诺的联系、低纬冷涌对流中高纬度环流反馈等方面的研究。同时还应该加强诊断分析的研究,以便揭露更多有意义的新事实并探讨其产生机制,从而为中长期天气预报和气候趋势预测提供依据。

参考文献

- 1 高出禧,等. 气象学报, 1959, 30(3): 258~262
- 2 陈隆勋,等. 大气科学, 1979, 3(1): 78~90
- 3 竺可桢. 竺可桢文集. 北京: 科学出版社, 1979. 283~297
- 4 张家诚, 林之光. 中国气候. 上海: 上海科技出版社, 1985. 28~33
- 5 李崇银. 热带气象, 1988, 4(3): 203~215

(河北师范大学郑义亮撰; 郑树恒审)

辐射气候 radiation climate 是气候学的重要分支之一。

从气候学角度研究太阳和地球辐射能量交换规律,各辐射分量的时空分布及其对气候形成的作用。中国古代的廿四节气划分以及古希腊人把太阳倾斜视为气候,都朴素地意识到太阳辐射对气候形成的重要作用。

1884年,俄国伏耶依科夫(A. И. Воейков)提出了研究地球大气和地面太阳能收支的必要性。辐射气候研究的发展是与观测手段的改时以及观测资料的积累紧密相连的。自19世纪90年代第1台日射表问世,至今全世界已拥有约由1000多个测点组成的日射观测网,并积累了大量观测资料。观测项目包括了地表辐射平衡全部分量。从50年代末60年代初开始,又发展了辐射探空和气象卫星辐射测量。

然而,已有的地面实测资料对辐射气候研究来说仍然是不够的。首先从站点数量看,现有日射站数不及地面气象站的1/10,且分布极不均匀,主要集中在北美、亚欧北部,而在整个南半球以及广大不发达地区则站点甚少,海洋上基本空白。此外,在观测项目上绝大多数日射站只进行太阳短波辐射观测。所以进行辐射气候研究时,除充分应用现有各种实测资料外,还需借助气候计算的方法。其基本思想是根据各辐射量与常规气象要素之间的物理联系,通过经验或半经验途径确立统计关系。1922年埃斯川姆(A. Angström)最先提出利用日照百分率计算总辐射的方法。稍后,京波尔(H. Kimball, 1928)、沙维诺夫(C. N. Санников, 1933)又提出利用平均云量与日照百分率相结合作为天空遮蔽度因子的计算公式。70年来各国学者对总辐射的气候计算方法进行了大量研究,包括对公式起始数据及遮蔽度函数形式和结构的改变,证实埃斯川姆公式仍具有较高的计算精度。一般的拟合误差平均不超过5%,已能满足理论研究和实际应用的需要。

关于地表有效辐射的气候计算问题,1916年埃斯川姆最先提出经验式。此后,勃伦特(D. Brunt, 1940)又提出较为简便的公式。1952年别尔梁德夫(M. E. Бердман)和(Т. Г. Бердман)从近似求解大气长波辐射传输方程入手,也得到与勃伦特式完全一致的半经验半理论式,并考虑了由于地面温度与气温之间温度突变所造成的订正。该式在辐射气候计算中曾得到广泛应用。此外,文献中还有一些其它形式的经验式。辐射图解方法也有应用,这实质是一种大气长波传输方程的图解。比较著名的有爱尔萨斯(W. Elsasser, 1942, 1960)、山本(1952)、什赫切尔(Ф. М. Шехтер, 1950)等的图解方法。使用辐射图解需有大气各高度的探空资料,这在一定程度上限制了这类方法的推广。近来也有直接根据大气长波辐射传输方程的近似解或其它模式使用计算机计算。由于有效辐射实测资料很少,且质量较差,所以总的说现有的各类有效辐射气候计算方法还不够完善,计算精度一般不超

过10%，尚需进一步研究。

精确地确定地表反射率对保证地表净辐射气候计算具有重要意义。地表反射率的月、年平均通常参照现有各种典型地面反射率确定，同时还要考虑反射率的年变化。对有积雪地区和季节，则需考虑积雪的重大影响。70年代以来已开始应用行星反射率推求地表反射率的研究，这对确定海洋、沙漠和高原(高山)地区的地面反射率很有用。

地表净辐射一般都以地表辐射平衡方程余项算出。有的曾作过利用其与总辐射的相关性进行直接推算的尝试，效果尚好。中国的辐射研究虽起步较晚(50年代末)，但已先后研制出适合中国特点且精度比较满意的辐射平衡各分量气候计算方法。

在辐射气候分析方面，经19世纪末伏耶依科夫、阿贡(Augot, 1883)等的开创性研究之后，米兰柯维奇(M. Milankovitch, 1930)从理论上计算了太阳辐射在地球大气上界(即不考虑大气影响)的分布，得出其随纬度、季节变化的基本规律。进入40年代后，前苏联地球物理现象总台(ГГО)对前苏联乃至全球地表辐射平衡进行了系统研究，提出辐射平衡各分量的气候计算方法。卡里金(Н. Н. Калигин, 1945)和亨特(I. Hand, 1953)分别绘制出前苏联欧洲部分和美国的总辐射年总量分布图。50年代以来由于国际地球物理年活动(1957~1959)的推动，全球日射站网的迅速发展和大量实测资料的积累，激发了辐射气候研究的发展，大量的研究报告、论文及专著、图集相继问世，其中著名的有布德柯(М. П. Булько)的《地表面热量平衡》(1956)、《热量平衡图集》(1955)、康特拉契夫(К. Я. Кондратьев)的《太阳辐射能》(1954)、《日射学》(1965)等。霍顿(Houghton, 1954)、伦敦(London, 1957)、缪勒尔(F. Möller, 1960)和维涅科夫(К. Я. Винников, 1965)曾先后计算出大气辐射平衡和热量平衡各分量的全球分布。

70年代实行的全球大气研究计划(GARP)，对全球大气和地气系统辐射研究、南极以及青藏高原地面辐射研究起到积极推动作用。1979年5~8月，为配合印度洋季风试验(MONEX)，中国组织了青藏高原气象科学实验。高原辐射观测揭示出许多新的事实，如曾多次测得地表总辐射超过太阳常数的现象，测得地球上迄今最大的地表有效辐射($1\ 348.9\text{W}/\text{m}^2$)和地表净辐射($1\ 113.7\text{W}/\text{m}^2$)。初步了解了高原地面对大气加热作用的特点。80年代我国作者首次绘制出全国坡面辐射平衡各分量分布图。卫星辐射探测进一步加深了人们对全球地气系统以及大气辐射分布的了解，使得对太阳常数的确定更加精确，纠正了对全球行星反射率的偏高估计。确定出全球年平均射出长波辐射为 $240\pm 7\text{W}/\text{m}^2$ ，相当于行星黑体温度 $255\pm 2\text{K}$ ，比之以往的估计要暖和多。

辐射气候是现代气候学研究的热门课题之一，云一辐射及辐射参数化问题被认为是解决当前气候数值模拟的关键之一。卫星辐射资料的反演以及对海洋、高原、沙漠等地区辐射气候背景的进一步研究都将是未来的热门课题。另外，从太阳能资源开发、利用角度来看，进一步研究坡面以及起伏山区辐射场分布也将受到学术界的重视。为此目的，辐射气候计算方法也将继续得到发展和完善，其中尤其是对长波辐射的计算。

参考文献

- 1 Kondratyev K Ya. Radiation in the Atmosphere. New York: Academic Press, 1969
- 2 Бударко М И. Климат и жизнь Л. Гидрометео-издат, 1971
- 3 Iqbal M. An Introduction to solar Radiation. Canada: Academic Press, 1983
- 4 Кондратьев К Я. Радиационный баланс землн. Д. Гидрометеоиздат, 1988
- 5 左大康,等. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991
(南京气象学院翁笃鸣教授撰; 缪启龙审)

山地气候 mountain climate 是气候学的重要分支之一，

研究的内容包括山地气候形成规律、气候要素分布特点及其对周围地区天气气候的影响。就山地本身来说，其气候差异主要表现在随海拔高度、坡地方位、坡度、地形起伏的变化上。

在山地气候研究史中，现代气候学的奠基人洪堡(A. V. Humboldt)、伏耶以科夫(А. И. Воейков)、汉恩(J. Hann)、布鲁克涅(R. Brückner 1927)等都曾作出重要贡献。20世纪20年代德国盖格尔(R. Geiger, 1927)在其专著《近地层气候》中对地形气候首次作了较系统的阐述。此后数十年来气候学界在这方面进行了大量的考察、研究，范围遍及阿尔卑斯山、喀尔巴阡山、高加索山、中亚山地、青藏高原、中国亚热带东部山地、落基山、内华达山等世界著名山区。1981年9月至1982年9月进行的阿尔卑斯山试验是全球大气研究计划(GARP)的重要组成部分，所在山区各国及欧洲主要发达国家和美国都参加了这项工作。试验中对一个900km长、100~200km宽的山区(最高高度4800m)展开了为时一年的大规模研究，动用了卫星、飞机、雷达等先进探测手段，结合加密的地面站网常规观测进行。主要任务是研究阿卑斯山对山区及周围地区的天气气候影响，山地生物气候以及其它应用问题(如航线选择等)。

60、70年代，美国、加拿大在落基山区进行的多次观测试验，对研究山谷环流、山地积云形成及发展，山区辐射场、温度场以及降水量场的分布规律进行了大量研究。中国在1979年5~8月进行了青藏高原气象科学实验，除组织高原及周围7省区223个气象站外，还设置了6个地面热源站、4个探空站和1个雷达站，较系统地研究了高原地面热源状况、高原近地面层特征、高原对大气环流的动力和热力作用等问题。该项工作曾受到国际气象学界的极大重视，1984年曾以此为题在北京召开了国际青藏高原和山地气象学学术讨论会。80年代还在中国亚热带东部山区进行山区农业气候资源开发利用研究，在研究区的十大山系设置了25个剖面91个观测点。进行了历时3年的气象和物候观测。现在已扩展到亚热带西部山区的研究。

在山区气候要素分布规律研究方面，侧重研究了太阳辐射、气温、降水、空气湿度和风等要素的垂直分布规律。中国在这方面的研究较多，积累的观测资料也十分丰富，其中尤以对地表净辐射各分量随高度分布的研究更突出，提出了更符合实际的廓线模式。通过对山区降水随高度分布规律的讨论，更倾向于认为不论在高山区或低山区，其降水廓线一般都可统一用统一的抛物线型表示，存在着一个出现最大降水量的高度。当山体高度较低，且不出现最大降水量高度时，降水廓线与抛物线下部单调上升段相符。国外作者还就低山背风侧降水比迎风侧多的观测事实作出合理解释。

从理论和实测上搞清了坡地方位对辐射分布的影响。翁笃鸣等还系统地研究了坡地辐射平衡各分量的气候计算方法，首次绘制出坡地净辐射各分量的全国分布图，揭示出许多很有意思的结果。如1月份中国北坡(坡度 20°)地表净辐射的零值线在长江流域通过，比之水平地面的零线位置大约南移了10个纬距左右。80年代翁笃鸣等还完成了对起伏地形辐射场和热平衡场的数值模拟。

地形对风的影响比较复杂。罗曼诺娃(Е. Н. Романова, 1977)在总结苏联各山区考察资料基础上，总结出各地段平均风速与开旷地风速的比值随地形和层结稳定度条件的变化。吉野正敏(1975)归纳了地形对风况影响的观测结果。中国大气物理研究所对山谷中的风廓线也进行了观测研究。普兰特(L. Prandtl 1942)最先提出了山谷风的数学模式，从理论上揭示出山谷风的形成、发展机理。傅抱璞(1980)得出更加完整的山谷风解析解。60年代以来数值模拟方法在山地气候研究中得到很大的发展，已能较成功地模拟出山谷风以及与此有关的山区流场和污染物扩散的情况。

山区降水分布也很复杂。对大的山脉、盆地，迎风坡降水明显多于背风坡，盆地周围山地降水也比盆地中心多。小地形的影响则主要通过降水量再分配反映出来。另外，在某些特殊地形

(如喇叭口地形,台阶状地形,面海迎风坡地等)下可造成十分强烈的增雨或屏蔽影响。国内外科学家还提出一些表征地形对降水影响的指标或指数,它们一般包括山地各项几何参数以及盛行风向、风速、水汽含量等。

山地气候资源研究具有明显的应用目的,需依据山地气候基本理论结合专门的野外考察或定位观测,以及应用各种推算方法获取无资料山区的气候信息并提供应用服务。最重要的就是山区农业的气候资源研究。在前苏联各加盟共和国,对山区水热资源和风能资源作了大量研究,绘制了许多专门的山区小气候图。各国普遍重视对山区逆温、暖带的研究,主要用于解决山区经济作物和林木的种植问题。中国在70、80年代曾在各省区普遍开展了山地气候资源调查工作,特别是在亚热带东部山区的农业气候资源考察中,比较全面地揭示出各山区的气候资源,并提出科学的开发利用建议,规划出各种作物的适宜种植高度和地段以及防御山区气象灾害的措施,出版了专著《中国亚热带东部山区农业气候》(1990)和多本研究文集。

结合山区气候资源研究,中国学者较好地解决了山区辐射、气温(包括由此派生的各级农业指标温度)、日照、湿度和风的推算方法问题,还对山区降水的推算方法进行了初步试验,提出了山区短期考察资料的超短序列订证方法。在此基础上,初步绘制出山区各种大比例尺气候图。在山区气候资源分析中,开始使用卫星遥感地面温度资料。

随着人们对全球范围内人口、环境、生态和资源等问题的日益重视,使得研究山地气候的重要性更加明显。从80年代以来历次国际大型山地气象会议报导看,预计在山地大气动力学、山地边界层研究、山地气候数值模拟、山地气象探测技术(包括卫星和飞机探测)研究、山地气候要素特别是降水的推算方法研究、山区气候资料订证延长方法及山区气候图绘制方法的改进都将是热门的课题。

参考文献

- 1 Под ред. И. А. Годыберг. Микроклимат есср. Д. Гидрометеоиздат. 1967
- 2 MacIntyre I. B., Schnelle F. An Introduction to Agropoclimatology. WMO Technical Note, NO. 133, Geneva, 1974
- 3 Yoshino M. M. Climate in a Small Area. Univ of Tokyo Press, 1977
- 4 傅抱璞. 山地气候. 北京: 科学出版社, 1983
- 5 Roger G. Barry 著. 山地天气和气候. 安颂清, 等译. 北京: 气象出版社, 1988
- 6 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候. 北京: 气象出版社, 1990
(南京气象学院翁笃鸣教授撰; 缪启龙申)

气候区划 climatic classification 是根据一定的气候指标,将某一地理区域(如一个国家或一个地区)划分成若干个气候特征相似的区域。它揭示气候的地带性和非地带性分布的特征,反映气候条件在地理区域上的分异规律。气候区划分综合气候区划和单项气候区划(如农业气候区划、建筑气候区划等)。一般意义上的气候区划是指综合气候区划,强调各种气候要素的综合特征和相互关系,强调气候过程与自然地理环境因素的相互作用,表达气候在地理分布上的最主要信息。

相传公元前5世纪的古希腊巴拉门尼德斯(Parmenides)曾从人类居住状况将全球气候区分为热带、温带和寒带。亚里士多德(Aristotle, 前384~前330)曾用回归线和极圈将全球划分为一个热带、两个温带和两个寒带。18世纪以来,地面气象观测项目和站网不断发展和完善,气象资料逐渐积累,气候区划才有了实质性的突破。1874年德坎多尔(Ade Candolle)根据气候对植物的影响,应用植物生态特征(如植物群落、指示性植物等)结合平均气温将全球分为6个气候大区。1936年,德国柯本(Köppen)发表柯本气候分类法,从植物地理分布出发,采用温度和降水的

临界数值作为分界标准,把世界气候划分为A、B、C、D、E五大区,区内又分若干气候区、气候小区等。后得到广泛应用。

苏潘(A. Supan, 1884)、德马东(E. de Martonne, 1909)、阿里索夫(Б. Л. Алисов, 1936)、斯查勒(A. N. Strahle, 1969)等则从气候的成因出发,认为大尺度气候的形成基础是大气环流,并通过风系或气团与区域气候相联系,根据气团的形成、性质及其变化等来区划气候,如斯查勒据此将世界气候划分为三大气候带和高山气候4个气候大区,大区内又根据气团季节变化,降水、气温的特征分为若干气候区。

桑斯威特(C. W. Thornthwaite, 1931)曾提出P-E指数和T-E指数作为区分气候的标准,于1948年、1955年进行了两次修改,以可能蒸散和水分平衡为基础,首先划分了美国气候,进而划分了世界气候。布德柯(М. И. Гудыко, 1948)提出一个类似的,但更为基本的气候区分方法,即用年蒸发力与年降水量比(R/L)即辐射干燥指数,表示一地湿润状况,认为此指数对于热量平衡和水量平衡各组成部分具有决定性意义,因此,他的气候划分与自然地理区域较符合。因为当湿润程度相同,但温度不同时,还可能造成很不相同的自然地理景观。

近20多年来,数值分类法在气候区划中得到广泛应用,其中主成分分析应用最为广泛。如对日本,印度,美国,澳大利亚,中国部分地区气候的区划等均取得较好的效果。气候区划的数值分类法可以综合较多的气候要素及指标法中无法利用的地理参数(如经、纬度,高度,地貌景观等),通过数值分类提取气候特征的分异信息,构成统计量,并以此划分气候区域。威尔莫特(Wilmort, 1977)认为数值分类法可使气候区划向客观数值化方向迈出重要的一步。

中国气候区划始于本世纪30年代。1931年,竺可桢利用当时很少站点的气温和雨量资料,作出了中国最早的气候区划,将中国划分成华南、华中、华北、东北、云南高原、草原、西藏和蒙新等8个区,开创了我国气候区划的先河。涂长望于1936年在竺可桢区划的基础上加以补充,在大区内划出副区,将中国划出10个气候区,区内又分若干副区。陶诗言于1949年以桑斯威特的最大可能蒸发量为指标区划了中国气候,提出了分级区划的思想,第1级为热量区划,第2级为湿润度指数(%),将中国划分为5个大类(一级区)、19个气候区(二级区),与自然景观相当符合。这一区划明确用热量和水分(湿润度指数)状况作为一、二级区划的思想。

为了适应国家大规模的工农业建设,中国科学院于1959年发表了以张宝玺、朱岗昆为主要负责的中国气候区划,把全国划分为8个一级区、32个二级区、68个三级区。该区划吸收了各家成果的优点,用 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温代表热量,用干燥度代表水分。较之用等温线、等雨量线更具实际意义和理论意义。中央气象局(现中国气象局)在此区划的基础上改进区划指标,补充气象资料,于1966年发表了新的“中国气候区划”。采用三级指标系统,结果将中国划分为9个气候带(含18个气候大区,36个气候区)和高原气候区域(含4个气候大区,9个气候区)。自1982年以来,中国各省、地、县都在积极开展本地的气候区划和其他单项气候区划工作,并于80年代末已基本结束。全国和各省、市、自治区的农业气候区划以及大量单项气候区划(如环境气候区划、风能气候区划、水稻气候区划等)的成果已广泛应用于社会经济的各领域(如作物布局、山区资源开发、建筑设计、社会经济发展规划等),并取得较显著的社会效益、环境效益和经济效益。

由于气候特征在地理分布上的复杂性、多样性,以及区划的目的和出发点的不同,气候区划方法繁多。据估计,世界各国先后提出过的气候分类、区划的方法不下169种之多(Borgel, 1969)。各种气候区划方法和结果,在学术界仍存在着一定程度上的分歧,其主要分歧点是区划指标的综合性、代表性及一些气候区域边界确定等在学术界仍存在一定的分歧;在世界气候划分中还有着对季风气候的认识问题。在未来的气候区划中应在下列问题上有一定的进展:(1)在自然景观详细调查的基础上,改

进区划的指标系统,进一步修正气候区域的界限;(2)为适应社会经济发展的需要,进一步完善各种单项气候区划;(3)寻求新的气候区划使气候区划与客观实际更加吻合;(4)将气候区划成果更广泛地应用于社会生产的各个部门,使气候区划成果更有效地服务于社会。

参考文献

- 1 么枕生编著. 气候学原理. 北京: 科学出版社, 1959
- 2 朱炳海. 中国气候. 北京: 科学出版社, 1962
- 3 中央气象局主编. 中华人民共和国气候图集. 北京: 地图出版社, 1979
- 4 周淑贞主编. 气象学与气候学(第2版). 北京: 高等教育出版社, 1984

(南京气象学院缪启龙副教授撰; 翁笃鸣审)

气候资源 climatic resources 有利于向人类提供物质和能量的气候条件, 是一种自然资源, 也是人类自然环境中一支极为活动的组成部分。其水平和质量对社会生产活动有着直接影响, 因此研究和分析世界的(或区域的)气候资源的地理分布和变化规律, 有利于发挥各地的气候资源优势, 达到充分合理利用气候资源, 找出影响气候资源利用的因素, 提出改善利用的途径, 进一步揭示气候资源的潜力。

气候资源与其它自然资源比较, 有如下几个特点: (1) 气候资源具有再生性, 如合理利用可长期受益。(2) 在时间上、空间上均具有不均匀性。除规律性的日变化、季节变化外, 还有年际变化及时间尺度不等的波动, 使气候资源出现量或质的变化, 甚至成为一种气候灾害。地理分布上的差异, 使气候资源变得丰富多彩, 促进了人类的社会经济活动, 产生了气候资源利用的各种途径。(3) 气候资源还具有不可取代性, 即对同一生产部门来说, 任一有利的气候要素不能因其有利而替代另一不利气候条件。(4) 气候资源具有普遍性, 开发利用的广度往往具有超行业性和超地区性。(5) 在现有生产水平下, 人类可以施加某些积极的影响。

气候资源的研究内容包括气候资源特征、气候资源的开发和利用、气候资源的保护等。在中国, 气候资源的研究有着悠久的历史, 文字记载十分形象丰富, 以物候记载的形式, 描述气候资源及其变化。春秋战国时代有了“二十四节气”、“七十二候”。北魏(公元386~534)的贾思勰指出, “顺天时, 量地利”, “农事必知天地时宜”, 这里的“天时”、“地利”即气候资源, 要求充分适应和利用气候资源。后来唐代《四时纂要》、宋代的《通书》、明代的《农政全书》、清代的《授时通考》等许多古籍中都有大量我国古代气候资源及其利用(尤其是农业气候资源及其利用)的记载。

在近代, 由于气象观测的发展和完善, 人们开始了气候资源的定量描述。1817年德国洪堡德(H. V. Humboldt)根据前人和他自己所测定的世界各地温度第1个绘制了全球等温线图, 研究植物与气候的关系, 并根据植物把全世界分为16个区, 这是近代气候资源研究的开始。1840年, 英国阿特金森(J. Atkinson)首先绘制成全球年雨量分布图, 1882年, 美国罗密斯(E. Loomis)首先绘制全球雨量分布图。苏联沃耶依柯夫(A. И. Воейков, 1887), 发表《世界的气候》, 奠定了气候资源研究的基础。第1部公认的世界气候图集(Gotha)出版于1887年。1899年, 巴茨(Buchan)出版了世界气候图集, 它包括400多幅气候图, 分别描述世界范围(包括海洋)各月平均风、温、气压、云量和陆地降水, 在以后的许多年中, 该图作为一部“标准图集”广泛应用于实际。随后很多学者研究了世界气温的纬向经向分布规律、降水分布规律。尤其是柯本(Köppen)于1936年发表了著名的气候分类法, 把全球气候类型在地理上进行了划分, 对认识世界气候资源、利用气候资源有重大意义。前苏联1937年的世界大地图(第1部分)发表了1、7月世界等温线。1953年鲁宾舍什晋(E. C. Рубинштейн)将1、7月温度订正到海平面, 这就是目前全球海平面气温分布图的基础。1954年前苏联布德柯(Бульковский)给出太阳辐射资源的全球分布, 此后又不断修改, 于1978年发表了新的全球辐射资源分布图

和资料, 成为气候资源研究的重要组成部分。

气候资源利用的研究工作自1873年国际气象组织成立之后初步形成, 1929年成立气候委员会以后, 较系统地开展了气候为农业、航海、军事、建筑等服务和研究工作, 40年代国际上采用“应用气候”这一术语。1961~1962年日本出版了《应用气候大全》(富山久尚等著), 自1972年联合国环境大会以来, 气候资源研究和利用引起全世界学术界和社会界的关注。1979年2月, 在日内瓦的第1次“世界气候大会”上提出了世界气候应用计划(WCAP), 其目的是在于推动社会, 提高其完成各项活动的的能力, 在不同的气候资源条件下获得最大的经济和社会利益, 并保持环境的稳定。1990年10~11月召开的第2次“世界气候大会”上进一步修改为世界气候应用和服务计划(WCASP), 提出将气候学同各门技术科学(如农学、能源等)相结合, 以获得社会经济效益。1992年6月在巴西召开的联合国“环境和发展大会”上, 各国政府首脑签署了《气候变化(框架)公约》。极大地推动了气候资源及其应用的研究和气候资源保护的研究。这一时期, 气候资源的研究者致力于对气候资源定性描述迅速发展成定量描述, 尤其是卫星遥感技术的发展及计算机普及应用, 使气候资源研究领域有长足的进展, 气候资源保护的研究也迅速发展起来。

竺可桢的《中国之雨量 and 风暴说》(1916)是中国近代气候资源研究的最早论文。随后《中国之雨量》(1935)、《中国之温度》(1940)、《雨量篇》、《温度篇》、《湿度、云雾及日照篇》(1943, 1944, 1945)、《中国气候图集》(卢肇, 1952)、《中国气候图集》(1979)等问世, 全面、系统地向人们展示了中国气候资源的各个方面, 为中国的社会经济发展提供了科学依据。大其在70年代后期开始, 全国和各地都进行了气候资源的观测、调查、研究、分析, 并进行省、地、县的各级气候区划和单项气候区划, 对充分利用我国气候资源提供了更可靠的资料。张家诚、林之光(1985)、盛承禹等《中国气候总论》(1986)都全面系统地总结了80年代以前中国气候资源各方面的研究成果。尤其是1988年开始陆续出版的《中国气候丛书》按地区共10卷约300万字, 全面总结了气候资源研究的丰硕成果, 详尽地分析了中国各地气候资源的特点和规律性, 阐述气候资源的开发、利用和气候灾害防治的问题。近20多年来, 中国气候资源利用方面也取得重大进展, 如太阳能、风能的利用, 气候与建筑、气候与水资源等, 尤其农业气候资源利用方面最为突出。《应用气候手册》(朱瑞兆主编, 1991)、《中国农业气候资源和农业气候区划》(李世奎等主编, 1988), 全面总结了中国应用气候方面的成果, 系统地介绍了各行业与气候的关系, 以及如何充分地利用气候资源发展生产。

中国是一个多山的国家, 局地气候资源的研究是中国气候资源研究极其重要的组成部分。傅抱璞的《山地气候》(1983)、翁笃鸣的《山区地形气候》(1989), 系统地论述了山地气候资源研究的理论, 介绍了中国部分山地的气候资源特点。1982、1987年的《我国热带、亚热带西部丘陵山区农业气候资源及其合理利用研究》对中国热带、亚热带各大山区的气候资源进行剖面研究和综合研究。

在未来气候资源研究中, 将会注重在: (1) 进行详细地调查、监测, 尤其是利用卫星遥感更详尽地揭示气候资源的空间分布特征; (2) 研究更有效利用气候资源的途径和领域; (3) 气候变化对社会生产影响的模拟; (4) 进行气候变化对气候资源和环境影响的模拟; (5) 人类保护气候资源的途径。

参考文献

- 1 张家诚、林之光. 中国气候. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 559~571
- 2 盛承禹. 世界气候. 北京: 气象出版社, 1988
- 3 中国农业百科全书(农业气象卷). 北京: 农业出版社, 1988. 222
- 4 张家诚主编. 中国气候丛书. 北京: 气象出版社, 1988~1992
- 5 朱瑞兆主编. 应用气候手册. 北京: 气象出版社, 1991

(南京气象学院缪启龙副教授撰; 翁笃鸣审)

水分气候 water climatology 是研究水在地球上的时空分布特征,水的运动和变化状况以及地球上水分在气候形成与变化中的作用与影响的科学。其主要内容包括:地球上的水分含量;地球上的水分输送状况;地球上的水分平衡;地球上的水分循环;地球上的水资源;地球上的水灾害;水分与热量等其他物理量的关系,水分气候区划等等。

在地球外围包围着的一层流动空气称大气圈,地球表层生活着人类和生长着各种动物和植物构成生物圈,地面以下是地壳与岩层即为岩石圈,地球上的水分是以气体、液体和固体3种形态分布于大气、地面、生物体内和岩石中。整个地球系统,可以认为是由大气圈、生物圈、岩石圈和水圈这四个主要方面所组成,其每一个方面又都是在运动和变化,有各自的特点和规律,而相互间又相互依赖、相互作用和相互影响着。

水是人类和生物维系生活和保障生存的生命之泉,也是大气圈、地壳圈、生物圈主要的组成成份和促变因子。水圈的类型划分,按其存在的场所可分为大气水、地表水和地下水3个方面;按其性质可分为:水汽层、水层和冰雪层3种状态;按其成分,可分为盐水和淡水两大类。在千变万化的气候中,水分是最主要的角色,它既是主要的气候资源,又能造成巨大的气候灾害。

地球系统水分的总储量约为14.6亿 km^3 ,其中分布在地表的水占95.8%以上,海洋水就占93.8%,分布在地下水占4.1%。地表水和地下水合占到水分总储量的99.9%,这两部分的水位置较固定,转换周期较长,尤其是地下水,可以稳定到数万年。地球大气中水的含量远比地面和地下水少,仅占总储水量的0.00773%,但是大气中水的滞留和转换期不长。水从地面蒸发到大气中,随着大气环流流向各处,再以凝结形式降落下来,整个滞留转换时间大约8~10d,远比地面和地下水的转换期短得多,所以大气中的水分也是变动最快而又最活跃的部分。

关于水分气候的研究,国外研究也很早。1948年,伏伊柯夫(A. И. Споебков)就作了自然界水分循环的研究;卡明斯基(A. A. Каминский)等1933年计算了苏联欧洲部份的水汽输送;柯本(E. Кppen)1931年利用降水和温度把气候分成多雨、干燥、湿润、雪林及冰雪等气候类型;桑瓦威特(C. W. Thornthwaite)1931年分析了北美气候并于1939年提出有效雨量的观念,并进一步分析水循环中大陆和水面蒸发量的差异提出最大可能蒸发量的观念;其后彭门(H. L. Penman, 1948)、布德科(M. H. Budyko, 1948)、巴斯奎尔(G. Pasquill, 1950)、萨顿(O. P. Sutton, 1953)等许多学者提出了计算蒸发量的方法。20世纪50年代以来,许多学者研究了水、热平衡在气候形成中的作用。如本腾(G. S. Benton, 1950)和布莱克布鲁姆(R. T. Blackbrum)探讨了水分循环在大气环流中的作用;布拉特勃雷(D. L. Bradbury, 1957)进行了各种不同类型气流情况下水分平衡的分析;斯塔(V. P. Starr, 1958)和培霍托(J. P. Peixoto)根据北半球地面到5 \times 100hPa水汽辐合分布图指出:在许多大的河流和流域盆地附近存在着水汽辐合,在大洋和一些沙漠地区存在着强辐散区,他们计算出干燥地区的水汽辐散量大大超过降水量,因而认为干燥地区存在着地下水的补偿。80年代以来,由于人口增长,社会发展和灾害频发,对于开发水资源、进行水利规划、减免自然灾害等方面工作也有很大发展,许多国家相继完成对本国及各主要地区水资源的评估。例如前苏联科学院1975年出版了《苏联水资源》;1978年美国水资源部发表了《美国的水资源》;1980年日本发表了《日本陆地水及其资源》等,许多著名科学家如伦敦(J. London)、奥特(A. H. Oort)及日本名古屋大学水圈研究所的武田乔男等都在水分气候领域内做了不少工作1981年8月在美国牛津召开的《全球水分平衡与变化》科学研讨会就发表了110篇学术论文,近年来几乎年年都有关于水的各种国际学术会议。

中国水分气候的研究工作开展很早,竺可桢在20世纪初就发表了《中国之雨量及风暴说》、《华北之干旱及前因后果》、《东亚季风与中国之雨量》等文章,涂长望、张宝璋、吕炯等老一辈科

学家也做了不少工作。新中国成立后,结合工农业生产和国民经济建设,水分气候的各个方面研究工作有很大发展,例如:(1)在降水气候与旱涝灾害的研究方面,有陶诗言的《中国各地降水需要量的分析》,朱炳海的《中国夏季降水强度、降水变率与旱涝分析》及《中国降水区划》,么枕生的《我国东部境内降水变率》,叶笃正、徐淑英的《黄河流域的急雨》及高由禧的《我国的秋雨现象》等。(2)在大气中水分含量及水汽输送方面,有郑斯中、沈建柱的《中国大陆上空的水汽来源》与郑斯中、相德卿的《中国大陆上空的水汽含量》,邹进上、刘惠兰的《中国大陆上空平均水汽含量及季节变化》与《我国平均水汽含量的基本特点与控制因子》。徐淑英计算了中国东部的水汽输送,谢义炳和载武杰对中国东部地区夏季水汽输送作了个例计算,郑斯中等作了《我国上空水汽输送》及《我国东部地区水汽辐合场》的计算,施永年等又作了“我国东部夏季大气中水汽通量的研究”等。(3)在水分循环与水分平衡方面,有傅抱璞的“大气中的水分循环”,王作述等的“长江上游地区盛夏季节的水分循环”,李玉山的“黄土地区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响”等。朱岗昆在50年代进行了“中国各流域水量平衡的初步分析”,罗绍华等对“我国季风期间大气中的水分平衡”及“我国大陆南部的水分平衡”作了计算研讨等。(4)在水资源方面,中国科学院自然地理编辑委员会1980年出版了地表水专册,水利部水资源研究及区划办公室1981年主持了“中国水资源初步评价”,各地区、各流域都进行了水资源分析,并发表论文,同时还出版了不少有关地下水方面的专著。(5)在水害防治和气候效应方面,为了防治水患,中央领导在解放初就提出“一定要把淮河治好”、“要根治黄河水患”,40多年来葛洲坝、丹江口、龙羊峡等水库及江都提水、荆江分洪等一大批可和世界任何水利建筑媲美的工程相继建成,当前已通过建设三峡水利枢纽工程的决定,对水分气候的改良将有显著成效。

南京大学陆渝蓉、高国栋等从60年代开始,使用近百个探定站、300多个气候站和200多个水文站的资料,验证了国内外专家的计算公式,采用符合中国水热特征且能保证精度的计算模式,计算分析了我国全年各月的降水量、蒸发量、最大可能显发量、流量、土壤水分变化量、大气中的可降水、水汽输送量、水汽辐合辐散量等,从而全面地研究了我国地面及大气中的水分循环和水分平衡的计算方法与时空分布特征,南京大学还和南京气象学院联合研究了“新安江地区水库建成后对周围地区水分气候的影响和效应”。对水分气候学的研究,起了推动作用。

参考文献

- 1 Symposium on Variations in the Global Water Budget. Jointly sponsored by: ICCL, IAHS INQUA; Oxford U. K. 1981
- 2 Lu Yu rong, Gao Guo dong. Advances in Atmospheric Science, 1984, 1(2): 165~178
- 3 陆渝蓉,高国栋. 中国水分气候高集. 北京:气象出版社,1986
- 4 陆渝蓉,高国栋. 物理气候学. 北京:气象出版社,1987

(南京大学陆渝蓉教授撰)

城市气候 the urban climate 是在区域气候背景上由城市特殊下垫面的影响形成的有别于周围乡村的局地气候特征。城市气候特征受两类因素制约,一是太阳辐射、大气环流和地理环境(经纬度、地形、海陆位置等)的大气候和区域气候背景的影响;另一是城市景观本身的特征的气候效应在上述背景上的表现。这两者是相辅相成的。由此表明,城市气候特征不仅随城市的规模、建筑物排列走向、密度、几何形状等的差异而变化,而且因所在区域气候背景不同而各具特色。

研究城市气候及其成因是气候形成理论的重要部分,而且对国民经济建设具有重大价值。城市的形成和发展,是人类活动改变环境的主要内容。环境的变化反馈到大气,引起气候的改变。不同地区的城市气候特点虽有差别,但是它们还有可循的共同规律,掌握这些规律可为气候改造提供科学依据,尤其是在城

市规划、城市建设和环境保护工作中,在充分了解城市气候特征及其机理的基础上,才能做出合理的规划和布局,达到趋利避害造福人类的目的。

自从人类社会出现城市开始,人们对城市景观和空气污染就有所描述。公元前 24 年,罗马 Horace 就曾在诗歌中描述过古罗马城中烟尘蔽日的景象。在中国古籍书中,总是把人口密集的城市写为“人烟稠密”、“尘世”等。著名的罗马工程师和建筑学家 M. Vitruvius 在公元前 50 年左右就建议城市的建造和选址应考虑气候条件。

在欧洲,从 13 世纪起,人们就注意到城市生活产生的特殊气候。例如英国伦敦,由于人口的迅速增长,造成空气污染、火灾频繁和传染病流行。1661 年,John Evelyn 在他的著作中曾描写过伦敦硫磺烟尘蔽日的混浊景象和空气中弥漫着令人窒息的臭味。

自从 18 世纪以来,采用气象观测仪器。气象和气候要素的定性描述转为定量测量,促进了城市气候研究的进展。在法国, L. Cotte 于 1774 年公布了巴黎的最高、最低气温和降水的测量结果;从 1671 年开始, J. D. Cassini 在巴黎观象台地下室(距地面 28m)进行地温观测,为研究城市地温累积资料。在这段时间,关于城市气候的研究陆续发表了一些零散的文章和资料。系统地研究城市气候是到 19 世纪英国的 L. Howard 开始。他分析和对比伦敦市内和郊区的气象记录,在 1818 年发表巨著《伦敦气候》一书,受到世界各国的普遍关注。在 1820 年和 1833 年分别再版该书,作了内容上的补充和修正。他首次提出“城市雾”这一名词,首次发现城市中心的温度比郊区高这一城市气候中特有“城市热岛”现象。并指出,城乡温差 $\Delta T_{\text{城-郊}}$ (又称热岛强度)在伦敦是夜间大,白天小;秋季(11 月)最大,春季(5 月)最小。

1855 年,法国的 E. Renou 汇编了他和一组气象观测人员测得的巴黎气象资料,指出巴黎中心的温度比郊区高 1~2℃,市内风速比郊外小。他还指出,由于工厂烟囱不断排放出污染空气的烟云,使城市上空的大气比乡村混浊、氮化。并且他进一步分析发现,城市减缓了空气温度曲线的陡度,改变了温度的变幅。

总之,19 世纪城市气候的研究内容主要以温度为主,也有少数人涉及到雾和降水的研究,除了上述伦敦城市外,还有法国巴黎。1892 年,德国学者 G. Hellmann 首先讨论了城市对降水的影响。

1917 年,奥地利 W. Schmidt 对城市不同景观地区作微气象观测,在短时间内,可以收集到多个点资料。1927 年,他将汽车装备气象仪器在全城作巡回流动观测,把观测资料经过时间订正后绘出全城的等值线分布图。与此同时,德国 A. Schmass 在分析慕尼黑降水状况时指出,城市的背风侧降水增加;还发现城市与其周围郊区之间有微弱的“城市微风”环流,实际上这就是最早发现的城市“热岛”环流。

第一次世界大战后,德国学者 A. Kratzer 总结了 1930 年以前各国城市气候的研究工作,并于 1937 年写出了第 1 部《城市气候》书,指出在 20 世纪 30 年代以前,城市气候方面的论文和著作以描述城市气候特征和现象为主,阐述的原因是定性的。

第二次世界大战后,工业化高速度发展,城市规模迅速扩大,随之而来的是工厂的烟云严重污染了空气,能见度恶化。这种状况促进了研究工作向纵深方向发展,加速观测仪器和方法的现代化,同时需要进一步揭示城市气候形成的物理机制和寻找减少公害、保护环境的技术和措施。到 20 世纪 60 年代末,除了欧洲和北美洲外,亚洲、非洲、大洋洲和南美洲都陆续发表了许多有关城市气候方面的著作。1968 年在比利时布鲁塞尔联合国世界气象组织(WMO)召开第 1 次国际性的“城市气候和建筑气候学讨论会”。之后,美国若干所高等学校和研究机构于 1969~1970 年共同拟定“METROMEX”(Metropolitan Meteorological Experiment)的大都市气象观测计划,选择美国中部平原地区密苏里州的 St. Louis 城作为试验基地,进行世界上第 1 次大协作的城市气象观测和研究。1981 年,美国 H. E. Landsberg 发表《城

市气候》专著,不久译成多种文字。

1981 年 8 月,在德国汉堡召开国际气象与大气物理协会(IAMAP)的第 3 次科学大会,在这次会议的 CL-3 专题组(人类活动对城市和区域气候的影响组),有一些不发达地区的国家和城市的气候论文在会上宣读。不久,南京大学大气科学系组织大量人力、物力对南京市作规模大、技术新的 3 次城市气候考察,对市中心和郊外分别采用低空探空、小球测风和汽车巡回观测,并对获取的资料作了详尽的分析。同时,上海、北京、广州、重庆、青岛、芜湖等城市,都先后借助于污染调查开展了一些城市气候的观测和研究工作,并从定性描述到定量计算。1985 年,周淑贞、张超编写的《城市气候学导论》和中国地理学会编著的《城市气候与城市规划》著作分别由华师大出版社和科学出版社出版。

最近 10~20 年来,各国学者注重城市气候的理论研究和应用研究,主要在城市气候的数值模拟和新技术新方法的应用方面,开展了许多工作。例如 1970 年, L. O. Myrup 和 W. Bach 由能量平衡方程导出城市热岛的静力学模式; Y. Delage 和 P. A. Taylor 根据 M. A. Estoque 的数值模式经过扩充得到二维城市热岛环流模式,其模拟结果与实际有很多相似之处,但矛盾也不少。1972 年和 1975 年, R. D. Bornstein 提出和发展并命名为 URBMET 的,是用数值方法求解湿度方程而得。后来他和别人对模式的时间步长加以改进,计算结果不仅与实际接近,而且计算工作量也减半了。现在城市气候的数值模拟已从二维空间发展到三维空间。近来由于城市规划和环境保护的需要,城市气候的应用研究也受到了重视。例如,张景哲提出的风的污染指数及其频率在城市总体规划中的利用问题、对城市总体规划中的气候问题作了深刻的分析。

在城市气候的领域内,城市的地面和覆盖层以及边界层的能量收支和热岛的成因的定量研究,成为气候学者极其关注和力求解决的问题,但是目前尚难达到目的,还必须进一步揭示和探讨。

参考文献

- 1 Yoshino M M. Climate in a small area. University of Tokyo Press, 1977, 15~25
- 2 Landsberg H E. The Urban Climate. New York and London: Academic Press, 1981, 1~12
- 3 张景哲. 地理研究, 1982, (4): 10~15
- 4 周淑贞, 张超. 城市气候学导论. 上海, 华东师范大学出版社, 1985, 4~10
- 5 金一镔, 等. 气候学论文集. 南京: 南京大学出版社, 1985, 124~134
- 6 虞静明, 等. 气候学论文集. 南京: 南京大学出版社, 1985, 135~144
- 7 虞静明, 等. 气象科学, 1988, 34~43

(南京大学虞静明副教授撰, 陆渝蓉审)

温室效应及其对气候的影响 CO₂ 的正式观测开始于 1958 年, 但从极冰气泡中的气体, 可以测得十几万年以来大气中 CO₂ 浓度。分析表明, 近千年来 CO₂ 浓度相当稳定, 约变化于 270~290 μL/L 之间。所以, 一般人们把工业化之前的 CO₂ 浓度取为 280 μL/L。1958 年的观测值为 315 μL/L, 1990 年估计为 353 μL/L, 相对于工业化之前已经增加了 79 μL/L 以上, 约占工业化之前浓度的四分之一左右。

大气中 CO₂ 浓度增加的主要原因, 是砍伐森林及燃烧矿物燃料。工业化之前, 从 19 世纪中开始大量砍伐森林, 开垦荒地。由于单位面积未开发森林比农业用地含碳量大 20~100 倍, 因此砍伐森林向大气中排放大量碳、燃烧矿物燃料(煤、石油及天然气)向大气排放碳的数量, 在二次世界大战之后呈指数形式增加。最迅速时排放量每年增加 4%。目前由于砍伐森林每年排放到大气中的碳为 1.9 ± 1.1 Gt, 燃烧化石燃料每年排放 5.7 ± 0.5 Gt, 合计每年排放 7.6 ± 1.6 Gt。每排放 2.12 Gt 的碳约相当大气中

CO₂ 增加 1 μ l/L。但排放到大气中的碳仅有 40% 左右存留在大气中,其余大部分被海洋吸收。所以,目前大气中 CO₂ 浓度的年增量为 1.8 μ l/L。

过去人们研究温室效应时,常用 CO₂ 浓度加倍时气候变化作为标准。一般取 600 μ l/L,即对 1990 年前后的 300 μ l/L 加倍,但也有人严格取工业化前 280 μ l/L 加倍,即 560 μ l/L 来进行气候模拟。后来发现除 CO₂ 外,大气中其它温室气体如甲烷、一氧化二氮,特别是氟氯烃(CFCs)温室效应也很强,甚至按分子计算一个 CFCs 分子的作用相当于一个 CO₂ 分子的 1 万多倍。所以一段时期内人们经常把其它温室气体的温室效应也折合为 CO₂,讨论整个温室气体相当 CO₂ 浓度加倍的情况。但这也不很方便。所以在 IPCC 报告中对温室效应一律用加热率(W·m⁻²)表示。用加热率而不用可能造成的温度变化表示,还避免了气候模式不确定性。

未来加热率的变化,决定于温室气体的排放量。IPCC 设计了 4 种排放方案:①称为正常排放方案,煤为主要燃料,无限制地砍伐森林,照常排放甲烷及一氧化二氮,部分国家参加蒙特利尔议定书。②改用低碳燃料,严格控制一氧化二氮,禁止砍伐森林,所有参加国都履行蒙特利尔议定书。③改用可更新能源,21 世纪后半期用核能代替,逐步淘汰 CFC,并限制农业排放量。④改用可更新能源,21 世纪前半期用核能代替,到 21 世纪中期 CO₂ 排放量减少到 1985 年的 50%。

下面给出工业化前(取作 1765 年)到 2000 年、2050 年及 2100 年各种方案得到的加热率(W·m⁻²):

方案	1765~2000	1765~2050	1765~2100
A	3.22	6.90	10.48
B	3.00	5.40	6.77
C	2.98	4.67	5.23
D	2.96	4.11	4.31

一般认为,大气中 CO₂ 浓度加倍所造成的加热率为 4W·m⁻²。因此,看来无论如何到 21 世纪中之前,大气中各种温室气体的总温室效应已相当 CO₂ 浓度加倍。

近年来,人们一直用各种气候模式估计大气中 CO₂ 加倍后的气候变化。到目前为止,一般公认大气环流模式是最好的工具。20 世纪 80 年代以来,人们普遍接受 CO₂ 加倍时地球表面气温上升 1.5~4.5℃,或者 3.0℃±1.5℃。但是最近的模拟结果表明升温在 3.5~4.0℃之间,接近过去估计的上限。同时,也逐渐认识到这个估计有非常大的不确定性。例如英国气象局的模式,只是改变了对冰云与水云的描述,CO₂ 加倍时的增温就从 5.2℃下降到 1.9℃。海洋则是一个更大的不确定性的根源。在目前的大气环流模式中,仅考虑了 50~60m 深的浅层海水。初步研究表明,海洋对温室效应的延缓作用可能达 50a(GFDL 模式)或甚至 75~100a(OSU 模式)。因此,可能实现的变暖要大大低于平衡模式所得到的结果。

据 IPCC 报告估计,按①方案,21 世纪可能每 10 年平均增温 0.3℃(0.2~0.5℃之间)。这样到 2025 年气温比现在上升 1℃,到 2100 年上升 3℃。但按②、③、④方案,则 10 年平均增温可能只有 0.2℃,0.1~0.2℃及 0.1℃。

大气中 CO₂ 至今比工业化前已增加了四分之一左右,其它温室气体也有明显增长。应该已经造成了相应的气候变暖。因此,近百年来来的气候变化可以成为温室效应理论的试金石。由于温室效应是全球性的,所以要用全球平均气温来进行检验。然而,建立一个对全球或半球有代表性的气温序列是非常困难的。主要困难来自 3 个方面:(1)资料覆盖面问题;(2)城市热岛效应;(3)观测技术的改变。自 1961 年 Mitchell 第 1 次建立了近百年比较可靠的全球及半球平均气温序列以来,有 30 多位作者在这方面进行了研究。现在看来比较好的序列有 3 个:(1)苏联地球物理现象总台维尼柯夫等,从 20 世纪 70 年代就绘制出版了北半球月平均气温距平图,手绘等距平线,对经纬度格点值读数,再按

纬圈平均、加权求北半球平均。过去这份资料由于各单站求距平时所用平均时间不一致,因此受到批评。1987 年又重新统一计算了距平,并用最优插值法内插经纬度格点值,并把序列向前推到 1841 年,成为至今最长的观测序列。但可惜只是北半球平均。(2)英国东安吉利亚大学气候研究中心的琼斯等,在 20 世纪 80 年代建立了可能包括资料最完全的全球及北半球平均气温序列。大约用 2 000 个陆地测站的 1 亿个数据及 6 000 万个海洋观测数据,并注意尽力排除城市热岛效应及观测方法改变带来的误差。计算方法是先插补格点值,然后按纬圈面积加权,求半球及全球平均。这个序列最大的缺点是早期资料覆盖面不全。因为,虽有海上记录,但受航线影响,大部分海上特别是大洋中部及南半球仍是空白。所以,至今仍有一些人认为这个序列主要反映的还是陆地上的气温变化。(3)美国宇航局(NASA)的汉森等,近几年用不同的方法建立了全球的气温序列。他们把全球分为面积相等的 80 个区。每个区再分为 100 个副区,取距每个副区中心 1 200km 以内的站,按记录长短排列。然后,以距中心距离为权重,逐个合并求平均,得到每个副区的平均,再按副区的面积大小加权求区平均。对区加权求纬圈平均,权重为每个区有记录的副区数。

这 3 个序列得到的北半球结果相当一致,但全球平均,美国的序列在 1940~1965 年期间气温下降,而英国的序列则下降不明显。但近百年总的趋势都是变暖,1880 年以来气温上升 0.5~0.6℃。

分析近 100 多年来的气温变化,究竟有哪些事实支持温室效应理论,又有哪些事实与其相违背呢?根据琼斯等的序列,自 19 世纪 80 年代到 20 世纪 80 年代全球平均气温上升 0.6℃,而且南、北两个半球大体一致,从这点来看似乎有利于认为增暖是温室效应造成的。此外,还有一个有力的证据,就是海平面高度上升。经过仔细分析的资料表明,在近 100 多年中,全球海平面平均每 10 年上升 1~2cm。这个数量级与根据海水膨胀及冰川融化所作的估计一致。因此,应该说全球气候变暖还是有一定证据的。

尽管如此,也还有人对变暖的趋势提出怀疑,例如 R. S. Lindzen 就举出微波探测结果,认为从卫星得到的全球平均气温变化,与根据地面观测得到的不一致,可能是地面观测覆盖面不足造成的。因为,卫星观测与美国同时的气温变化就很一致。

不过,即使承认全球的变暖趋势,变暖的步调却与温室效应有所不同。因为,无论从那一个序列都可以看出,过去百年中全球或半球的变暖主要发生在两段时期,即 1920~1940 年期间及 1975 年以后。1975 年之后大约升温 0.2℃。所以,近百年来来的变暖有三分之二发生在 1940 年以前。但是,大气中 CO₂ 增加四分之一,却有一多半发生在 1940 年之后。如果再考虑有些强烈的温室气体,如 CFCs 主要是在近几十年才迅速增长,这个矛盾就更突出了。

第 2 个矛盾是从 50 年代到 70 年代,北半球气温下降。根据汉森等的资料甚至全球都有所下降。显然,这不能用持续增加的 CO₂ 的温室效应来解释。

第 3 个矛盾是变暖的地理分布。根据所有的大气环流模式,CO₂ 加倍时,极区、冬季应该增暖最明显,但事实是北极地区的温度在 30 年代达到最高,此后,到 60 年代显著变冷。80 年代稍有回升,但仍低于 30 年代的高峰。按照温室效应理论应该变暖最明显的地区的温度变化,却与温室气体的增长不一致。这不能不说是这种理论的一个挑战。

第 4 个矛盾是历史性的。气温观测记录开始于 19 世纪后半期,愈来愈多的资料证明,这时仍处于小冰河期的冷期中,或者说是在冷期的后期,因此,从那时起到 20 世纪中气候的变暖,可能有一部分属于自然变化。这样,认为近百年由于温室效应气温上升 0.5~0.6℃,可能估计偏高。

20 世纪以来,中国气温也有变暖的趋势,这是与北半球及全球一致的。但中国从 50 年代到 70 年代气温的下降则更为突出。以 1920~1949 年与 1950~1979 年,两个 30 年对比,气温下降

了 0.45℃,比北半球气温下降明显。20 世纪前半期的变暖则比北半球早。20 年代北半球气温正处于激烈上升的过程中,但在中国已成为近百年第 2 个最暖的 10 年,仅次于 40 年代;另外,80 年代的变暖也不如北半球强烈。从 70 年代到 80 年代,北半球平均气温上升 0.24℃,全球平均上升 0.23℃,但中国仅上升 0.13℃。而且由于 70 年代气温低,因此 80 年代虽较前 10 年有所变暖,但气温仍低于前 70 年代(1910~1979)平均,而不像北半球或全球,80 年代成为近百年最暖的 10 年。显然,类似的局地性气温变化,也不是温室效应能轻易解释的。

检测温室效应,就是要设法证明信号的存在,一般用噪燥比来度量。凡信号强度超过噪声,可证明信号在一定程度上是可靠的。这里检测的是温室效应,所以与温室效应有关的气温变化是信号,而其它原因造成的低频变化则作为噪声。

因为气候模式有很大的不确定性,所以确定信号的强度很不容易。但目前也不是不可能的。例如为了考虑海洋对温室效应的巨大延缓作用,可以采用热平衡模式,或称为“箱—涌升—扩散模式”。这样能估计不同气候敏感度情况下的温室效应。气候敏感度即 CO₂ 加倍可能产生的温室变化。取敏感度为 1℃、2℃……5℃,得到温度变化曲线。与近百年的观测序列比较,敏感度为 1℃及 2℃的曲线与实况较为接近,当然这仅是检测信号的一种方法。工作本身也说明信号检测的不确定性是很大的。

至于噪声,即指低频自然变化。检测噪声的方法有两种:一种是根据观测资料来分析,但这就要设法区分信号与噪声;另一种是用大气环流模式进行长时间的数值模拟,例如用地球物理流体动力学实验室(GFDL)的海气环流对气温变化做了模拟。200 年的模拟表明,在固定边界条件下可以得到与观测相比较的 10 年到百年尺度变化,但未出现气候趋势。而用热平衡模式,在随机辐射强迫下,模拟出 10 年尺度的低频年际变化,这反映了海洋热惯性的重要作用。这两种模拟都表明,目前观测到的温度变化与自然变化有相同数量级。在这种情况下用单一要素来检测温室效应是比较困难的。因此,建议采作“指纹法”,即用多种要素来综合检测。例如,除全球或半球平均气温之外,可以分析对流层、平流层温度变化,全球降水量变化,全球大气中水汽含量变化以及海平面变化等。可惜,这些要素大部分没有足够长的序列,或者很难求全球平均。所以只有海平面高度尚能提供一些较为可靠的信息。

从另一个角度看,如果能对气候的自然变率有所认识,亦可以帮助我们检测温室效应。这就关系到自然变率产生的原因。一般认为对 10 年到百年尺度的气候变化来讲,其自然变化的原因主要有两个,太阳辐射变化及火山活动。

虽然,人们早就怀疑太阳常数不是一个真正的常数,但一直不能得到证实,因为观测到的太阳常数变化与观测及计算误差属于同一数量级~1%。所以直到 80 年代初,风云 7 号卫星上安装了空腔辐射仪,使太阳常数的观测精度提高到 0.05%,才解决了这个 140 年以来悬而未决的问题。证明太阳常数确实不是真的常数,而且太阳黑子逐日变化的峰值与太阳常数的谷值相对应,黑子与太阳常数为负相关。但是,这个结果与大多数气候学家及天文学家的观点是矛盾的,例如有人认为蒙德利尔极小是小冰河期形成的原因,黑子与太阳常数应为正相关。近来的研究认为,高频的(逐日)黑子变化太快,可能对气候影响不大。但太阳黑子多时,光斑及太阳活动区辐射强。已经发现,由于光斑增加的辐照度,高于黑子冷却造成的辐照度下降。因此,太阳黑子与辐照度可能成正相关。1980~1986 年期间太阳黑子减少,辐照度减少了大约 1W·m⁻²,就是一个很好的证明。可惜辐照度观测序列太短,是否如一些作者假定在同 11 年周期外包线平行的 80 年周期,尚需进一步证实。但是,即使存在这一周期,也同变暖的步调不完全一致。因为全球变暖在 40 年代应达到峰值,而太阳活动在 50 年代末才达到 200 多年的最高值。

至于火山活动,虽然已经证明,如 1963 年的阿贡火山爆发及 1982 年的厄、奇冲火山爆发均使太阳直接辐射下降 20%~

30%,但由于散射辐射几乎增加一倍,所以太阳总辐射仅下降 6%左右。近来的研究表明,强烈的火山爆发造成的降温一般也不超过 0.5℃。持续时间最多 1~2 年。然而,气候变暖的 20 年代到 40 年代,正好是火山活动的沉寂时期,以后到 50 年代火山活动又逐渐加强。这个变化趋势是 3 个因素(太阳辐射、火山活动及温室效应)中与温度变化趋势最相似的一个。不过也有矛盾之处,从 70 年代末到 80 年代,全球剧烈变暖,但火山活动并未明显减少。

从过去 100 多年的气候变化来看,以上 3 个因素没有哪一个能独立解释各时期的温度变化。因此,大多数人同意,至少到目前为止,温室效应还没有超过其它两个因素的作用,亦即信号与噪声处于同一数量级。不少用以上 3 个因素拟合温度变化,作统计方法检测温室效应的研究表明,由于温室效应主要影响趋势变化,因此在拟合过去百年来温度变化的总方差中不占主要地位,在拟合的方差中,火山活动占 50%,太阳活动占 30%,CO₂ 只占 20%。但前两个因素主要拟合高频的变化(这只是统计分析)。物理分析的结果表明,前两个因素所能造成的加热率均不大。由于目前温室效应还不十分强,因此,其它两个因素可能抵消或加强温室效应则是无疑的。至少到 20 世纪末及 21 世纪初仍可维持这种情况,但到 21 世纪中期,温室效应已大大加强。那时,特别对低频变化,温室效应将占绝对优势。

虽然大多数科学家都不否认人类活动排放的 CO₂ 及其它微量气体可能造成气候变暖,但其中未解决的问题还很多。甚至从工业化前到现在是否全球变暖也有人怀疑。或者至少未能肯定证明近百年约 0.5℃左右的变暖在多大程度上是温室效应的结果。至于温室效应对一个地区气候的影响,不确定性就更大了。

在这种情况下,我们不仅要开展对全球的研究,更要注意对中国的研究。例如,中国温室气体排放的研究虽已开始,但还有许多事情要做,不仅要测定、估算各种温室气体的排放量,各种源汇以及大气中的浓度,还要研究探讨各种减少排放的方案。温室效应,或者说全球变暖可能对中国气候的影响还研究得很少,对农业、水利、交通、能源乃至对生态环境系统的影响的研究也需要逐步开展。在温室效应本身的研究方面,温室效应的检测是一个重要课题,不仅可以通过气候变化的时空结构进行检测,也可以通过气候变化物理原因的分析进行检测。检测研究对改进、完善温室效应的理论有重要意义。

(北京大学博士生导师王绍武撰)

统计气候 statistical climatology 是气候学的一个重要分支,以气候统计学方法为工具去分析、模拟和预报气候的学科。严格地说,“气候统计”不同于“统计气候”,前者是后者的理论基础,而后者是前者的应用,两者结合统称为“统计气候”已成习惯,并为国际上公认。统计气候与动力气候、物理气候、天气气候、地理气候等学科相比,它在揭示气候现象、模拟气候状态、预测气候趋势方面有其独特的优点,是研究气候的重要途径之一。广义地说,统计气候是一切气候学问题观测研究的基本工具,它也是研究气候成因、气候变化规律以及气候预报的有力工具。

由于概率统计学的发展,自 19 世纪以来,统计气候学科已逐渐形成。20 世纪 20 年代以后,奥地利 Conrad 致力于气候统计方法的研究,于 1944 年完成了世界上第 1 本有关气候统计方法的著作《气候学中的方法》。50 年代中,英国 Brooks 与 Carruthers 写成综合性教科书《气象统计方法手册》,高桥浩一郎(1956)完成了《气象统计》,Panofsky 与 Brier(1958)写出了《统计学在气象学中的应用》等著作。1963 年中国么枕生在多年执教气候学与气候统计学的基础上,完成了中国第一部有关统计气候学方面的论著《气候统计》,该书在经典数理统计学基础上详细阐述了各种气候资料的统计方法,初步总结了多年来统计气候研究的成果并进一步发展和创新。此外,Дроздов(1957)的《气象观测的气候学整理》,Казакевич(1969)的《随机函数论原理及其在水文气象中的应用》两部著作,也是统计气候方面的代表作。

在70年代以前,还有大量的研究成果以论文的形式发表于大气科学的各种学术刊物上。例如,中国史久恩(1964)首次引入逐步回归技术,章基嘉最早应用自相关分析降水韵律,徐尔灏(1950)中国年降雨量的正态性,陈受钧(1962)最早应用波谱分析大尺度天气过程,王绍武和史久恩、徐群等人(1961, 1962)曾分别应用周期图分析中国大气活动中心和长江中下游汛期降水规律,等等;国外学者在这一时期的贡献如 Reynolds(1955)用统计学方法讨论非季节性冷暖期, Lamb(1950)用统计方法研究天气类型与天气时期, Flohn(1951)研究了天气变化趋势, Cihak(1959)研究了日平均气温的概率分布模式, Gandin(1961)研究了站网的合理布局问题,等等。

进入70年代以后,统计气候学进展更为迅速。王宗皓、李麦村(1974)著有《天气预报中的概率统计方法》,首次将天气预报问题纳入概率统计学途径;黄忠恕(1983)、黄嘉佑(1983)分别写成了《波谱分析方法及其在水文气象学中的应用》、《气象中的谱分析》两本著作,促进了中国气象谱分析的发展;其后,么枕生(1984)又出版理论性专著《气候统计学基础》,将统计气候的理论基础进一步深化;屠其璞、丁裕国等(1984)则以理论联系实际的方式编著了《气象应用概率统计学》一书,对促进统计气候应用有一定的贡献。由么枕生首次写成的《气候统计》一书经丁裕国(1990)修订再版,从而使气候统计的内容进一步深化和提高,形成了更加完整的学科体系,该书总结了近20多年来国内外统计气候的最新成果,开阔了应用前景。同期问世的代表作还有《气象统计分析预报方法》(黄嘉佑, 1990)、《车贝雪夫多项式及其在气象学中的应用》(周家斌, 1990)、《气象统计预报中的多元分析方法》(施能, 1992)等。国外著名学者 Essewanger(1976)、Murphy 和 Katz(1985)也曾分别写出专著《大气科学中的应用统计学》、《大气科学中的概率统计和决策》等,极大地丰富了统计气候学研究成果。

由于当代大气科学各个分支学科的迅猛发展,学科之间相互渗透和交叉,加之,90年代以来全球气候观测资料已相当丰富,电子计算机技术和统计学本身的发展,统计气候研究成果大量出现在各种学术会议文集和论文期刊之中,而并不仅仅局限于某些专著,例如,70年代以来,美国已经召开过12次大气科学概率统计会议,其它各国也相继举行过统计学家和气候学家联合发起的国际统计气候会议,在世界气象组织(WMO)和各国气象学会与统计学会支持下,先后举行过5次国际学术会议,研究成果十

分丰富,其内容涉及下列各个方面:气候要素的理论分布模式;气候概率估算模式;气候的多元统计模式;气候变化的诊断与预报模式;随机动力气候模式;气象场的客观统计模式;气候波谱分析,等等。

关于大气科学,历来就有确定论和随机论两种不同的认识观点,相应地形成了动力学和统计学两类研究途径。多年来,如同对天气的研究一样,在气候的研究中,人们试图将统计学观点与动力学观点结合起来,建立动力统计分析、模拟和预报模式。由于非线性动力学揭示了确定性系统的内在随机性,从而提供了实现这一愿望的可能。目前,一方面统计气候学本身不断推陈出新,引进了许多新的技术方法,例如岭回归、稳健回归、Logistic回归与判别、多要素排列法(MKPR)、车贝雪夫多项式基础上的迭代算法、均值生成函数、追踪投影(PP)意义下的主分量分析、判别分析、信息论与气象熵、游程转折点理论、各种广义的 EOFs、方向数据概率模型等等;另一方面来自非线性动力学的各种理论和方法又给统计气候学注入了新的活力,发展了一些新的统计动力相结合的方法,如 Leith 的 Monte-Carlo 动力统计预报、Seidman 的随机初值平均法、Hoffman 等的滞后平均预报方法、灰色系统建模、Epstein 途径的随机-动力预报、施永年提出的随机-动力气候模式、Fokker-Plank 方程意义下的随机模式等等。此外,以混沌理论为基础的统计动力气候也已出现,所有这些研究动态都表明,统计气候学在当代许多新兴学科与技术方法的交叉影响下,正在蓬勃发展。可以预言,在吸取现代概率统计新成果而又不断渗入动力学新成果的基础上,统计气候学科将会以更加崭新的面貌出现于大气科学之林。

参考文献

- 1 Suzuki S I, et al. Developments in Atmos. Sci Elsevier, Amsterdam, Oxford, New York, 1980, 13: 1~10
- 2 么枕生. 气候统计学基础. 北京: 科学出版社, 1984. 4~16
- 3 Houghton J T. The Global Climate. Cambridge University Press, 1984. 1~20
- 4 么枕生, 丁裕国. 气候统计. 北京: 气象出版社, 1990. 1~10
- 5 Steering Committee for International Meetings on Statistical Climatology. Toronto, Canada, 1992, 6(22~26): 1~2

(南京气象学院丁裕国副教授撰; 么枕生审)

地 质 学

动力地质学

现代地壳运动 recent crustal movement

指近代几千年、几百年以至现今正在发生的地壳运动,为地球科学的一支独立学科领域。它是地球运动的一部分,是亿万年地壳运动发展至目前的自然延伸,是地球动力学过程在地壳及其表部的直接反映,因此,它是地球科学,尤其是地球动力学研究的重要内容和基础。现代地壳运动与人类的生活和活动密切相关,后者无时无刻不受到现代地壳运动的影响和制约。地震活动和火山活动是现代地壳运动的重要表现形式,它直接威胁人类的生存、生活和各项建设事业。其它形式的现代地壳运动,诸如水平运动、垂直运动和断裂运动,也关系到矿山建设、水工建设和城市建设的安全性和稳定性。同时,人类的活动反过来对现代地壳运动也有一定影响。

现代地壳运动作为一支独立的学科领域,最早始于20世纪50年代,主要是由前苏联学者首先提出的,引起国际上地质学家、大地测量学家和地球物理学家的关注。1960年,在赫尔辛基召开的第12届国际大地测量和地球物理学会上,正式成立了国际现代地壳运动委员会(CRCM),由前苏联梅谢里亚科夫(Ю. А. Мещеряков)担任委员会第1任主席。以后,大约每隔2年就召开1次国际学术会议,并多次出版了会议论文集。此外,还多次召开了区域性的学术讨论会。

对现代地壳运动这一概念至今尚无统一而确切的认识,一般认为是指几千年、几百年以至现今正在发生的地壳运动。但具体明确的时间界限在何处,却有不同认识,有的主张指最近6000年以来的地壳运动(В. Е. Ханн),也有的认为应指最近几十年(Н. Н. Николаев),还有人主张为第四纪全新世时期(大约相当1万年以来)的地壳运动(А. А. Никонов, С. D. Ollier)。以具体时间来确定现代地壳运动的概念,无疑原则上是正确的,但选择的时间界限必须是客观的、明确的,并有一定的地质含义,而不能是人为强加上去的。可以说,在全新世1万多年以来期间内,目前还很难找出一个符合上述要求的明确的时间界限。当然,也有人以研究的方法和手段的不同来划分,主张以仪器观测为主要手段对地壳运动进行研究的范畴为现代地壳运动。但研究的方法、手段与时间概念无统一必然的联系,故这种主张显然是不明确的。目前,可理解为主要指全新世以来的地壳运动,特别是几千、几百年以至现今正在发生的地壳运动。

从目前世界各国对现代地壳运动的研究来看,其涉及内容是相当广泛的。在学科上,可包括地质学、地球物理学、大地测量学、海洋学、天文学、考古学等各种学科;在研究的问题上,既包括运动学,也包括动力学,以及引起现代地壳运动的各种因素。

50年代至60年代早期,着重以大地测量方法为主,对现代地壳垂直运动进行研究,前苏联学者在这方面做了大量工作,并取得不少有意义的成果。60年代以来,尤其板块构造学说提出前后以来,逐渐重视并开展对现代地壳水平运动的研究,而且这方面研究所取得的大量实际资料和成果,又进一步丰富和完善了板块构造学说。根据地磁和其它地球物理方法并联系对海底地貌的研究,通过观测,证明海洋底部和大陆之间进行着长距离水平运动。通过各种研究手段,对美国西部圣安德烈斯断裂进行了综合观测,证明沿该断裂两侧地块进行着右旋水平运动,每年运动位

移可达数厘米。太平洋西部的日本、新西兰等地区,也开展了现代地壳运动的综合观测和研究,研究结果证明,不仅其地区内部的不同断块存在水平运动,而且太平洋西部的诸岛屿之间也以一定的速度进行着水平运动,如日本就以每年10~20cm的速度向亚洲大陆方向运动。

全球地壳运动和区域地壳运动是现代地壳运动研究的重要方面,全球运动的研究起始较早,可追溯到20世纪初。有人认为现代地壳运动具有全球统一性,并具有周期的统一性。这种全球统一周期的现代地壳运动与作为星球整体的地球本身运动有关,如地球自转、地极运动等。在研究全球的现代地壳运动中,全球升降运动、海平面的观测和研究占有相当重要的地位,尤其从60~70年代以来,越来越引起人们的重视,因为,全球地壳运动势必影响海平面的变化。当然,影响海平面变化的因素很多,但一般多认为海平面的升降主要由气候、地壳运动和重力场决定,因此,目前国际上普遍重视海平面升降变化的实际观测和全球综合分析对比工作。区域现代地壳运动与人类的关系更加直接,不同区域的运动性质、运动方式、运动幅度和运动速率都明显不同,中国东部与西部地区的现代地壳运动就有显著差别,西部地壳运动的强度明显高于东部。总的来看,现代地壳运动在区域上的表现大致可分两类,一类是相对稳定地区,另一类为相对活动的地区,这与不同区域的大地构造位置和属性及其动力学环境有关。

不同尺度的地形变测量仍然是研究现代地壳运动的主要手段,它既可以研究全球块体运动及其位移,又可研究块体内不同区域的现代地壳运动的性质、方式和强度。从60年代以来,各国都相继开展了大范围区域性的水准测量、三角测量、激光测距和重点活动断裂的形变观测工作,并取得了丰富的资料,为现代地壳运动研究做出了重要贡献。从60年代后期,尤其是河北邢台地震以后,中国也全面开展了以预测地震为目的的各种尺度形变测量工作,获得了大量实际资料,不仅对中国现代地壳运动取得了系统认识,而且也探索地震预报积累了经验。80年代以来,利用空间技术观测现代地壳运动,取得长足的发展,其中重要的有激光地球动力学卫星(LAGEOS)激光测距、河外射电源的长基线射电干涉测量(LBI)和全球定位系统(GPS)卫星发射的射电干涉测量。中国目前也正在开展这方面的观测和研究工作。

当前现代地壳运动研究的热点是:(1)利用空间技术进行全球大陆和构造板块间现今运动的观测,如利用全球定位系统(GPS)的连网观测,中国已做为重点项目开展该项工作;(2)地壳稳定性的观测与研究;(3)为预测和减轻地震、火山活动和其它地质灾害而进行的现代地壳运动的观测与研究;(4)人类活动与地壳运动的相互关系的研究,如大规模城市建设、工程建设、矿产资源开采等对地壳运动稳定性的影响;(5)为不同目的而选择典型试验场地进行现代地壳运动的综合观测与对比研究。

参考文献

- 1 Мещеряков Ю А, Синятин М П. Современные Тектонические движения земной коры и методы их изучения, М. Изд-во АН СССР, 1961
- 2 Мещеряков, Ю А. Современные движения земной коры. Визитю ио. 3. М., 1968
- 3 尼科诺夫 А А 著, 全新世和现代地壳运动. 北京: (卢登仕等, 译), 地震出版社, 1984
- 4 国家地震局地壳应力研究所情报资料室. 现代地壳运动. 北京: 地震出版社, 1988
- 5 Klebleyev, A K, Martynovski, S. A., Journal of Geodyna-

mics, 1988, 10(2~4)

6 Gornitz V Seeber. Tectonophysics, 1990, 178(2~4)

(国家地震局地壳应力研究所刘光勋研究员撰)

沉积作用 sedimentation 广义的沉积作用的概念为, 呈层堆积沉积物的作用或过程, 这些作用或过程包括沉积物的来源(风化作用)、搬运作用、堆积作用、成岩作用和石化作用; 狭义的概念为: 沉积作用是沉积物堆积的作用, 是被搬运的物质由于搬运介质的物理化学条件的改变, 呈有规律的堆积现象。按堆积场所或环境, 沉积作用可分大陆沉积和海洋沉积两大类。大陆沉积作用按搬运介质的不同, 可有风、地面流水、地下水、冰川和湖泊等类型。此外, 如按沉积作用的方式来划分, 则有机械的、化学的和生物的 3 种类型。

在沉积学研究中, 目前一般用比较狭义的概念, 即以沉积作用表示沉积物质在地表温度及大气压力下以成层方式进行堆积或形成的作用及过程。因之, 沉积作用所涉及的是地球表面各种环境中的地质的、物理的、化学的和生物的作用, 它包括了沉积物埋藏以前(即成岩作用开始以前), 自风化作用、搬运作用至堆积作用的全过程。

沉积物的最重要来源是古老岩石的风化解离和溶解, 另一重要来源是生物物质, 宇宙物质占比较次要地位。因此, 风化作用是沉积作用过程中最早的一个重要阶段。风化作用包括物理的、化学的和生物的 3 种作用, 它们发生在地球岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的界面交错重叠的表生带内。在地壳深部形成的岩石一旦进入这种表生环境, 便要发生解体, 产生出 3 种物质, 即碎屑(机械破碎的矿物和岩石碎屑)、不溶残余(粘土矿物为主)和溶解物质, 前者为物理风化形成, 后者为化学风化形成。不同的风化作用类型, 以及母岩的性质和母岩遭受风化的程度, 决定了风化产物的性质及各类产物间数量比, 从而决定了堆积物性质及沉积作用(狭义的)类型。一般说来, 较坚硬的母岩经风化后, 只形成碎屑物质, 经机械搬运后, 形成机械沉(堆)积; 象岩盐之类的母岩风化后只能形成溶解物质和残余物质, 而成为化学沉积物。在风化彻底、岩石完全分解的情况下, 可提供成熟的沉积物, 它们在搬运过程中进一步分选, 可分别沉积为成分单一的沉积物; 相反, 风化程度较低, 未完全分解的岩石所提供的是不成熟的沉积物, 产生的沉积物成分复杂, 为稳定的与不稳定的矿物碎屑、岩屑和粘土的混合堆积。

沉积作用另一重要阶段是搬运阶段。不同类型的沉积或沉积方式与搬运阶段的介质性质及其所携带的物质有十分密切的关系。主要的搬运介质或营力是水、大气(风)和冰, 生物的搬运一般说来并不占重要地位。在水中(包括河流、湖泊、海洋等), 沙和泥一类的碎屑以机械方式搬运, 它们大部分沿底部以滚动、挪动和跳跃方式被搬运, 少部分呈悬浮状态随水流搬运。这就是水流牵引的搬运方式或机械搬运, 其最终沉积物的组构和体形尚与流速和携带物的粒度、流体的类型, 以及其它有关的介质力学性质等因素有关; 地下水也可搬运泥沙颗粒, 此类搬运作用发生在渗流带和潜流带, 大都在已沉积的颗粒间进行, 其搬运距离短、数量少, 但可形成一些可鉴别层序及成因的特殊构造。在风力搬运过程中, 由于风力本身和地面结构状况等条件的改变, 所携带的沙、砾等无力继续搬运而停积下来形成风积物, 这便是以风为搬运介质的堆积过程, 亦称风积作用。冰或冰川搬运时, 由于冰的密度大, 又是固体介质, 因此它可携带从巨砾至沙、泥等各种粒级的物质, 而且在搬运过程中不发生分选作用。所以, 无论堆积场所是在大陆还是海洋, 冰积物均表现出分选极差和成分复杂的特征。

母岩风化后转入溶液的物质有胶体物质和真溶液物质, 因而发生的化学沉积有两种情况。当胶体物质(常见的有 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 SiO_2 , 以及粘土矿物、磷酸盐矿物等)在搬运过程中失去稳定性时, 就会发生凝聚作用(亦称絮凝作用), 在重力作用下, 在合适的环境里, 便会逐渐的沉积下来; 当介质呈真溶液状态时, 即氟、硫、钙、钠、镁、钾等呈离子状态溶解于水中, 可溶物质

的溶解、搬运和沉淀与其溶度积常数有关, 即在一定温度下, 组成该化合物的离子浓度(在水中)的乘积大于溶度积时沉淀, 小于溶度积时则溶解。胶体物质和某些真溶液物质从溶液中析出后, 也可能以颗粒形式经过机械搬运再沉积。此时, 这些沉积物受水动力等物理因素控制, 表现出与碎屑沉积物相同的沉积特征, 这些颗粒称为异化颗粒。

生物在沉积和沉积作用的各个阶段都参与了作用, 特别是晚前寒武世以来, 有愈来愈重要的意义。它们通过自己的生机活动, 直接或间接地促使化学元素、有机或无机的各种造岩矿物质进行分解、化合、迁移、分散与聚集, 并在适宜的场所促使形成岩石和矿床。

当前, 对沉积作用研究的热点和趋势是: (1) 由于现代海洋调查发现了海底热(温)泉及其有关沉积物, 便在地质和地球化学领域掀起了热水沉积研究的热潮。热水沉积作用系指沉积界面之下循环流动的热液喷出界面以后发生的沉积作用(陈先沛等, 1992), 以及界面之下的围岩的交代(蚀变)充填作用。热水沉积作用的发现和研究, 在理论上, 可以重新评价热液成矿理论; 在现实意义上, 为在浩瀚的现代海洋底部寻找新的工业矿床开辟了广阔的前景。(2) 从全球角度, 甚至从地球在太阳系的运行规律来考察和研究沉积作用, 并形成新的前沿学科, 如层序地层学就是将沉积作用与全球海平面周期性升降相联系(Wilgus 等, 1988; 李文汉, 1989); 旋回地层学(陆元法, 1989)则是将沉积作用与地球的自转及其在太阳系的运动相联系。

参考文献

- 1 Wilgus C K, et al. SEPM Special publication, 1988, 12: 39~45
- 2 陆元法. 岩相古地理, 1989, 1: 31~40
- 3 李文汉. 岩相古地理, 1989, 6: 32~39
- 4 陈先沛, 等. 沉积学报, 1992, 10(3): 124~131

(地矿部成都地质矿产研究所刘宝坤院士、李文汉高级工程师撰)

麻粒岩相区地质 麻粒岩相是一种高温区域变质作用。它在基性岩石中出现紫苏辉石+单斜辉石矿物组合, 而在泥质岩石中, 原生白云母消失, 生成矽线石+钾长石的组合。麻粒岩相区是以麻粒岩相岩石为主, 但经常伴有高角闪岩相(董中保等, 1986)。麻粒岩是高级变质区的岩石类型之一。麻粒岩相区的研究, 在变质地质学, 特别是前寒武纪地质学中占有重要的地位。

前寒武纪麻粒岩相区及下部地壳 地球表面前寒武纪地壳(露出及埋藏)约占大陆地壳的 72%, 中国华北陆台上露出的麻粒岩相变质产物约占总面积的 10%~15%。世界前寒武纪麻粒岩相变质产物平均占 25%(A. Coodwin, 1989)。中国的麻粒岩相变质地区, 通常认为属太古代, 而目前研究表明, 可能有少部分为元古代的产物(金巍, 1989)。

麻粒岩相岩石通常形成于下部地壳条件(17~31km 的深度), 即使是酸性成分的岩石与变质程度低的岩石相比, 也具有较高的密度, 因为岩石中含有辉石及石榴子石。根据中性麻粒岩的地震波速来看, 将它们作为深部地壳是恰当的(R. C. Newton, 1986)。相对上部地壳而言, 下部地壳的麻粒岩亏损大离子亲石元素如 Th 和 U, 并常与一些上壳岩以及含辉石的中—酸性钙碱性片麻岩伴生, 这只有在地壳有显著的埋深以及相继发生的抬升时, 才能使这些岩性单位共存。在太古代有许多大规模的麻粒岩区域, 在以后的地质时代里也可能有相同规模麻粒岩分布, 由于没有足够时间上升和剥蚀而得以出露。

麻粒岩地体规模大小不一。麻粒岩地体主要出现于太古代和元古代时期, 也有年青的麻粒岩地体, 如白垩纪和第三纪组合中, 中国的麻粒岩杂岩主要出现在太古代和元古代(董中保等, 1986)。无论如何, 作为下部地壳的麻粒岩地体的研究将有助于探讨地壳的形成和演化, 特别是早期地壳的演化, 以及壳幔的相互作用等重要基础地质理论问题。

深成岩浆作用及其与麻粒岩的成因联系也是一个重要的研究内容,对于解决岩浆的起源,特别是花岗岩岩浆及深部地质作用过程都具有重要理论意义。在麻粒岩相的变质条件下,多种主要地壳岩石将会发生部分熔融,许多麻粒岩可能相当于花岗岩类熔体排出之后留下的残留体。因此,花岗岩类岩石与麻粒岩在成因上有密切的联系。

大量的野外地质研究表明:麻粒岩相变质区具有大量的奥长花岗岩——花岗闪长岩等 TTG 系列的岩石,特别是紫苏花岗岩都与麻粒岩相变质岩系伴生,表明其具有一定的成因联系和时间上、空间上的共生关系。

变质作用物化条件 温度和压力条件是变质作用研究的重要内容。目前,对变质作用温压条件的估算,主要是根据共生矿物对地质温度计和压力计方法。近年来的研究有较大的进展,这些研究的特点是将实验及理论计算结果应用于变质杂岩。根据不同地区的研究结果,麻粒岩地体的变质温度一般为 700~900°C,压力为 0.5~1.1 GPa,某些地区可偏高(1.1~1.3 GPa)或稍低(0.3~0.5 GPa)。由于各地区或同一地区研究中采用的方法不同,其所得结果也各有差异。一般认为,二辉石矿物对测定的结果代表高峰期(辉石结晶)的变质条件,而石榴石—黑云母矿物对测定的温压条件为高峰期后的黑云母和石榴石结晶的条件。许多研究者根据不同方法应用和比较后认为:Ferry 和 Spear (1978)及 Perchuk 等(1983)用实验方法拟定的黑云母和石榴石间 FeMg 分配关系,由于未考虑 Ti 及 Ca 的变化,致使它应用于高级变质岩区时,具有一定误差(Newton, 1986),实践证明误差偏低达 30~100°C(李树勋等,1988)。П. И. Церчук(1960, 1970)利用黑云母—石榴石中 $Mg/(Fe+Mg+Mn)$ 值编制的测温图解也偏低近 100°C(斯是琴等,1984)。В. А. Глебовицкий(1977)修正后的上述图解效果较好,它与地质背景相吻合(李树勋等,1988),特别对高级变质岩形成条件的估算更为合适。Lindsley 等(1983)根据实验,对深成岩和变质岩的 $MgSiO_2 - FeSiO_2 - CaSiO_3$ 体系得出一个新的二辉石温度计。P. I. Nabelek, 等(1987)为检验上述方法,应用天然辉石的实验研究,建立了二辉石图解温度计,用以讨论美国 Adirondack 地区变质岩岩的形成条件,二辉石地质温度计是高级变质地体研究中应用最广的测温方法。

石榴石—蓝青石和石榴石—蓝青石—矽线石—石英组合地质温度计也是研究高级变质区应用较多的方法,特别是对孔兹岩系变质作用的研究,更是必不可少的。这是基于反应: $Cord + Ga_{Mg} = Cord_{Mg} + Ga_{Fe}$ 平衡拟定的。

Newton(1983)曾对高级变质岩的地质压力计做过简要的归纳,指出具有 4 次配位 Al 的低密度矿物如长石和蓝青石等,在压力作用下分解形成致密的含 6 次配位 Al 的矿物如石榴石。常用的地质压力计大部分含有石榴石作为平衡共生矿物。

在贫钙的变质泥质岩中应用较多的地质压力计为石榴石—黑云母、石榴石—蓝青石和蓝青石+石榴石+矽线石+石英组合的地质压力计。根据热力学原理建立的石英—矽线石—石榴石—蓝青石组合的地质压力计,也是目前应用较广的方法之一。此外, L. Y. Aranovich 和 K. K. Podlesskii, (1983)利用 Hensen 和 Green(1971)的数据确定了干条件下蓝青石—石榴石—矽线石—石英组合的压力与 N_2 关系图解,用以研究压力与分配系数间的关系。

矿物对地质温压计和实验研究都是变质作用研究不可缺少的方法和手段。然而,更需要的是建立新的和更精确的地质温压计方法和必要的实验校正,提高地质温压计的准确性。

麻粒岩相中变质流体 麻粒岩中流体的研究已成为当前麻粒岩研究中的一个热点。Touret(1971)首先总结了几个麻粒岩地区的流体包裹体资料,为麻粒岩流体的研究开创了方向,此后许多地区开始了变质流体的研究工作。他认为麻粒岩中流体的主要成分为 CO_2 , 其次为 H_2O 。近来的研究表明,在麻粒岩的包裹体中 CO_2 是主要流体成分,同时含有少量 H_2O 、 CH_4 、 SO_2 、 CO

等。对麻粒岩中流体的研究是解决麻粒岩成因机制的关键性问题。牛顿(1980)提出过碳变质作用,认为麻粒岩相变质作用的重要原因是 CO_2 的存在,并认为 CO_2 主要来自地幔。Cameron (1988)认为地幔是一个大量的 CO_2 储层,是 CO_2 流体的主要来源,其它任何来源都不可能提供导致麻粒岩相变质的大量 CO_2 , 而只能导致局部 CO_2 含量的变化。造成 CO_2 其它来源主要是变质过程中脱 CO_2 作用或变质地体中富含碳物质(如石墨)的存在。印度南部地区曾进行过大量流体研究。富 CO_2 流体相外部缓冲假说,部分是此地观察结果而提出的。1988 年在克莱蒙费朗举行的国际麻粒岩会议上集中讨论的问题,包括 CO_2 排气作用, CO_2 与部分熔融之争以及横切角闪岩相和麻粒岩相过渡带体系同位素研究。牛顿(1985)在其对麻粒岩区成因的综合分析中评述了几种不同作用机制,用这些机制可以解释麻粒岩的低 H_2O 活度和富 CO_2 流体包裹体在许多高级变质地区的存在。这些机制包括:地幔 CO_2 排气作用;就地派生的 CO_2 流体相的内部缓冲作用;水的低活度是继承已脱水的岩石; H_2O 不饱和和深熔熔体的排出等。拉姆和瓦利(1985)坚持认为,这些机制中的任何一种都可能在麻粒岩的成因中起作用,而 B. R. 费罗斯特和 C. D. 弗罗斯特(1987)则认为这些作用可能是相互独立的,并可能与熔体穿过地壳有关,虽然 CO_2 排气与部分熔融之争在某种程度上仍在持续,但似乎已接近达到一种一致的认识。表明 CO_2 流体在麻粒岩成因中起了重要的控制作用。

麻粒岩区的地球化学 目前,对麻粒岩地球化学研究,主要包括如下四个方面:常量元素地球化学;微量元素地球化学;稀土元素地球化学及同位素地球化学,也有人按元素之间的共生关系及其性质分为 3 类:亲石元素(LIL);不相容元素和稀土元素(REE);过渡元素。近来的研究表明:大离子亲石元素的亏损是麻粒岩的重要地球化学特征,已为众多研究者在不同地区的研究所证实。中国华北陆台麻粒岩的地球化学研究亦属相似,认为是由于流体的交代作用和部分熔融所致。一些研究者认为 $CO_2 - H_2O$ 体系在高温条件下具有较强的交代能力,可以造成大离子亲石元素的亏损。中国内蒙古乌拉山地区的研究表明,大离子亲石元素 K 与流体中的 CO_2 含量成反比,而与 H_2O 含量成正相关,说明麻粒岩相变质过程中 CO_2 增加是造成大离子亲石元素亏损的重要原因之一。 H_2O 的减少与 K 的亏损呈正相关,说明 H_2O 的转移是与 K 的亏损同时形成的。 H_2O 是大离子亲石元素从麻粒岩中被带出而造成亏损的介质,与麻粒岩相变质作用相伴生的部分熔融过程的吸水作用也是造成亏损的一种原因。

一般认为常量元素在麻粒岩相变质条件下多是活动的,尤其在发生部分熔融的情况下活动是完全可能的。因此,这时它很难代表原岩的化学成分,加拿大某地区在区域变质过程由角闪岩相到麻粒岩相转变时 Si、Na、K、 H_2O , 特别是 Rb、Cs、Th、U 发生明显亏损,而 Mg、Fe 和 Ca 则相对富集。这给研究麻粒岩相岩石的原岩性质和类型划分带来复杂因素。20 世纪 60 年代以来,微量元素的研究日益受到重视。由于它们的化学性质比较稳定,在变质作用和交代作用过程中不易发生变化,因而它对恢复原岩性质和成因具有重要意义。稀土元素也是目前地球化学研究的重要方面,一般认为它在变质作用过程中是不变化的,代表了原岩的稀土元素含量。

同位素地球化学近年来也有深入的发展,特别是 O、H、S、C 等稳定同位素比值的研究已积累了一些资料。对麻粒岩相变质岩石液相包体中 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 值的测定可确定包体为进变质或退变质时所形成。最古老的伊苏阿上壳岩(3.76Ga)中石墨的研究表明,碳同位素有生物成因和非生物成因两种解释。由绿片岩相到麻粒岩相的进变质过程中,岩石中硫的含量随变质程度增高而减少,而硫同位素 ^{34}S 相对富集。同位素地球化学的另一个方面是放射性同位素的研究,它主要用于测定年龄的研究中。除常用的 K—Ar、Rb—Sr、U—Th—Pb、Pb—Pb 法外,近年来 Sm—Na 和 Lu—Hf 法的应用,值得重视。目前应用地球化学来研究探讨岩石成因和演化以及同大地构造环境和地壳演化的关系,是地球化

学研究的重要方向。

P-T-t 轨迹与麻粒岩演化的动力学模式 1985年国际地质对比计划正式增设了“变质过程与地球动力学体制的相互关系”，该项目的宗旨是综合考虑热力学、岩石学、地质年代学、构造地质学、区域构造学和热流研究的成果。力图把变质作用过程与地球动力学环境联系起来，特别是致力于前寒武纪变质岩区的研究。该项目当前的主要任务之一，就是确定各种构造环境中变质岩的P-T-t 轨迹(石宏仁, 1987)。根据目前的资料，麻粒岩的形成和演化主要有以下几种模式。

大陆碰撞模式。A. B. Thompson 等(1984)总结世界各地麻粒岩地区的P-T 资料后，结合造山带变质带热模拟资料，解释了一些地区麻粒岩的形成与演化。在大陆地壳因构造作用(如大规模逆掩)而增厚的情况下，原始地温梯度受到很大的扰动。一旦构造作用结束，由于重力均衡效应增厚的陆壳必然会发生隆起并经受侵蚀作用。在此期间，一方面是受到扰动的地温梯度向稳态地温梯度演变，使地壳被明显加热；另一方面是侵蚀作用导致地壳下部的负荷压力下降。在这种构造环境中，变质P-T-t 轨迹呈顺时针方向的演化趋势，变质温度的升高是在减压条件下发生的。Ellis(1987)研究了南极 Enderbyland 的麻粒岩特征，为大陆碰撞模式提供了一个良好的实例。

大陆拉张模式。在这类构造环境中(如美国盆地—山脉区、爱琴海)，大陆地壳具有异常的高热流值，表明了经受拉张的大陆地壳下部正在经历着麻粒岩相变质作用。特定的拉张机制可以使麻粒岩相变质作用在区域规模上发生。这类推断的变质作用P-T-t 轨迹具有在拉张期间的恒压或降压环境中升温到麻粒岩相条件，在拉张结束之后，恒压或增压冷却的特征。因此这类地体的P-T-t 轨迹明显不同于大陆碰撞体制内变质地体的P-T-t 轨迹。M. Sandiford 和 R. Powell(1986)讨论了不同拉张机制的理论P-T-t 轨迹，并认为岩石圈减薄的范围和形式受拉张机制限制，不对称拉张形式的缓倾斜滑脱带可以导致区域规模的下部地壳麻粒岩相变质。这一模式可以解释某些低压麻粒岩的成因。

大陆弧模式。S. R. Bohlen(1987)认为大多数地区麻粒岩的特征是：麻粒岩“峰期”变质温压值集中在 $0.75 \pm 0.1 \text{ GPa}$ 和 $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ 附近，接近于 Sill-Ky 的平衡曲线，麻粒岩区与角闪岩区经常成对出现；麻粒岩(大部分)区从“峰期”变质条件开始的最初冷却是近于等压的；大多数麻粒岩中 Al_2SiO_5 的多形变体是矽线石，极少数为蓝晶石。麻粒岩的这些共性表明其变质P-T-t 轨迹是具有逆时针方向的演化特点，这与大陆碰撞模式是不相容的。根据 P. R. A. Wells(1980)提出的热模型，这种P-T-t 轨迹起因于，地壳底部的岩浆垫托作用，岩浆侵入地壳和/或岩浆穿过地壳运移。麻粒岩的形成与大量岩浆(可能是幔源的)添加到现存地壳的底部或共内部有直接关系。按这种模式麻粒岩形成机制是地壳在负荷增大之前和期间受到明显的加热作用，可以解释矽线石在麻粒岩中的广泛产出；另外退化变质初期的等压冷却是地壳受到加热之后的一种必然结果，岩浆加热量的重大差异可以用来解释为什么在地壳内埋深相同或相近的情况下会生成与角闪岩相对立的麻粒岩。

Bohlen(1987)认为大陆弧环境所具有的特征非常适合于麻粒岩的生成，大陆弧环境是生成大量岩浆所必须的构造环境，另外大陆弧的地壳厚度以及地温梯度与麻粒岩形成条件相一致。总之，大陆弧环境麻粒岩的形成是地壳中出现异常地热梯度的结果，这种异常地热梯度是由于岩浆活动造成的。逆时针的P-T-t 轨迹有可能是由于岩浆作用面增厚并受热的地壳特征。

构造模式的研究，实质上是关于麻粒岩相变质作用的动力学机制问题。考虑到大陆的生长和成熟过程的复杂性，以及形成前寒武纪麻粒岩地体构造环境的特殊性，无论采用哪一种简单的模式都不可能解释所有的麻粒岩的演化。可以推断，随着动力学研究以及P-T-t 资料的积累，最终可以建立适合于前寒武纪麻粒岩相变质作用的全球性动力学模式，从而了解地壳发展演化

早期阶段特殊的构造环境。

麻粒岩及麻粒岩相区是当前国际地质学界积极研究的重大课题之一。当前国内外专家正以新的思想观念和技术手段，来指导和充实研究工作。可以预料在今后不长的时间内，麻粒岩研究领域将会出现重大理论性突破。

(长春地质学院李树勋、徐学纯、金巍撰)

弧后扩张作用 大洋板块向大陆运动并发生俯冲，主要是软流圈和下伏地幔朝同方向运动的拖曳和驮运的结果，已俯冲板块的牵引和重力作用促使并加强了大洋板块的持续俯冲。

大洋板块下插俯冲，在大陆板块前缘，即海沟陆侧产生挤压应力场形成岛弧和挤压构造；诱发浅源地震，震源机制属逆断层型，挤压轴几乎水平，或微向岛弧下倾斜，轴向平行于俯冲方向。大陆板块的阻挡或抑冲，使大洋板块在行将俯冲的海沟外缘形成隆起。隆起的幅度与挤压力的强度成正比。深部地幔的拖曳、已俯冲板块的重力牵引，在海沟洋壳下弯和外缘隆起产生的拱张效应，导致海沟洋侧发育正断层和地堑，震源机制显示张应力，属正断层型。贝尼奥夫带上层的下倾挤压型地震，是俯冲板块上部与仰冲板块相互作用的结果；由此可见，海沟洋侧的拉张应力场是上述俯冲板块本身固有运动形成的必然产物，两层力学性质相反的地震带在同一贝尼奥夫带上共存，应为俯冲板块的基本特征。在挤压强烈的秘鲁—智利海沟，其洋侧出现双层地震带可为其佐证。

俯冲下沉的大洋板块随深度和温度的增加逐渐熔融，但其运动并未停止。这些已经熔融和正在熔融的大洋板块同软流圈及地幔一起继续向大陆方向运动。于是引起大陆地壳和上地幔内部各圈层尚薄弱面或带分层拆离，发生多层次的水平运动。这种运动可影响到下地幔甚至更深处。各圈层向陆运动的速度不尽相同，从表壳向深部，总体上逐渐加快，可能以软流圈的速度最大。结果在地壳和地幔中出现了深部相对向陆运动，浅部相对向洋推移的总效应。各圈层的相对运动导致层间剪切发生。在各圈层底面产生了向大陆方向的拖曳力或层间剪切牵引。于是，在弧后地区岩石圈上部各圈层出现水平引张，使地壳甚至岩石圈伸展变薄，在薄弱地带形成拉张断陷盆地。

据研究，由地幔对流产生的应力与引起大陆破裂的应力为同一量级。作用在岩石圈板块底部的剪切应力，其大小正比于板块面积。对于大板块来说，由底部剪切应力引起的力可能与作用在它边缘的力差不多，这样的板块与地幔脱离是不可能的。可见，由地壳和地幔各圈层间剪切产生的水平引张力，足以导致地壳扩张裂陷。

上述弧后扩张作用向大陆方向影响的范围可能相当深远。从华北地块新生代张性断陷盆地的发育演化特征来看，其影响可达 $2000 \sim 3000 \text{ km}$ 。通过对大量天然地震资料的研究认为，中国大陆构造活动和地震的应力场主要受周围板块运动的控制。利用卫星重力测量资料反演的亚洲地幔对流模式和壳下应力场也表明，中国东部地块下的整个上地幔对流体在陕西和临汾地区(110°E , 36°N)下降汇聚，形成了汾渭地堑系。于是，在大陆内部广阔的范围内形成了力学性质总体相同、构造特征大致相似的扩张构造。当然，随着距俯冲带距离的增大，弧后扩张的强度有所减弱，各圈层初始运动的方向也可能有所变化。

由弧后扩张作用形成的盆地，总体上由洋向陆时代变新，可分为边缘海盆(如日本海、东中国海等)、近缘陆盆(如松江、渤海湾等盆地)和远缘陆盆(如汾渭地堑系等)。冲绳、小笠原等海槽的形成，标志着又一新一轮的弧后扩张已从新第三纪晚期开始。各类型、各世代盆地平行于俯冲带展布，其扩张规模、地壳变薄程度、沉降幅度、岩浆活动强度和地温梯度(或热流值)总体离洋向陆减弱变小。

俯冲之后的大洋物质持续向陆运动及各圈层间的相互作用，弧后地区的扩张裂陷，均深刻地影响着大陆岩石圈的演化，当然也会显著地改变俯冲带的环境。在滨太平洋地区，地壳和上地

幔在纵向上分层明显,在横向上结构不均一;热流值较高而多变;岩浆活动强烈,波及地域广阔;火成岩的类型和特征复杂多样,但洋向陆仍总体上表现出一定的变化规模。诸如此类,均与上述作用过程有着直接的成因联系。

弧后扩张应力是在地球上部各圈层向大陆单方向差异水平运动的条件下形成的,在弧后地区发现的偏差张应力和压应力可能与此有关。因而,除少数情况(如局部地幔底辟或对流体的出现)外,由弧后扩张所形成的构造往往不对称。华北地块就是由不同级别的翘倾断块相间排列而成。日本海也具西北深、东南浅、中间有不对称大和隆起分隔的特征。美国西部部分盆山岭区亦呈典型的半地堑—半地垒格局。

在边缘海盆发育初期,或远离俯冲带的边缘陆盆,其扩张裂陷中心可能单一或较少。此外,边缘海盆的形成比线性大洋脊扩张产生原始洋盆更具破碎的过程。与海底扩张相比,边缘陆盆的扩张更弱,中心更多,破碎更甚。如海渤湾盆地就有6个拗陷,其中冀中拗陷就有16个凹陷。裂陷扩张主要发生在盆地内,其中以各拗陷最为强烈。各拗陷新生代以来的扩张量一般都在30%左右,高达40%。因而,每个拗陷或凹陷都可看作一个级别不同的扩张裂陷中心。

可见,弧后扩张与海底扩张的方式有所不同。边缘海盆和陆盆一般具有不对称、多中心、微裂陷、弱扩张的特点;地壳虽普遍减薄,但洋壳仅见于边缘海盆的部分地区,其成因为扩张洋壳新生和陆壳沉陷转化并存。因而,多数边缘海盆的地磁异常强度较弱,磁条带对称性差,线性特征不明显,甚至缺乏明显的磁条带。

大洋板块俯冲是形成弧后扩张的必要条件,但并不是充分条件。因为并非一切俯冲带陆侧都有弧后盆地存在。囊括绝大多数现代俯冲海沟的环太平洋地区,东西两岸的地貌特征迥然不同。在南美西海岸,俯冲带之后就没有弧后盆地。

关于东、西滨太平洋地质特征的差异或弧后是否发育边缘海盆,目前已提出不少有益的见解。这些认识对大陆地质及其作用顾及甚少。其中有些看法仍需商榷或进一步验证。刘池洋认为,弧后扩张作用的强度和存在与否,取决于相互作用的仰、俯冲板块双方运动速度矢量(大小、方向)的合成关系,可将其分为聚敛和离散两种极端的类型。海沟的迁移(不是改变)受仰、俯冲板运动速度矢量的组合和由其引起的弧后扩张作用的制约。在两板块相背运动;或任一方相对静止,另一方后退;或运动方向相同,而仰冲的大陆板块向洋运动的速度较小,或向陆运动的速度较大的情况下其运动速度组合属离散型。反之,为聚敛型。在二者之间存在有一系列过渡型。当仰、俯冲板块的运动方向及其与俯冲海沟斜交时,情况较为复杂。

聚敛型组合,仰、俯冲板块实质上表现为显著的相向运动,两板块汇聚力大,大洋板块消减的速度较快。这必然使俯冲带挤压强烈,耦合紧密,沿俯冲带发生构造侵蚀作用,在陆侧出现增生楔形体。在大陆边缘形成挤压强烈的大陆弧或山脉,地壳缩短明显,地形高差悬殊,洋壳向陆壳过渡突然。由于大陆主动向洋运动且速度较大,阻挡了俯冲大洋物质的持续向陆运动,并继续向洋逆掩仰冲,故该区深部地质活跃,弧后无扩张盆地形成,并发育挤压构造。从俯冲带到弧后地区,地震、岩浆活动、成矿作用均明显地显示出挤压应力场。在强烈的水平挤压作用下,陆、洋板块的仰、俯冲,只有在与水平面有尽可能小的夹角的面上才可能进行。所以,俯冲带的倾角一般较缓。这与在水平挤压作用下,逆掩断层和推覆构造均沿倾角较小的面发生机制相同。

离散型组合则不同,陆、洋板块任一方或双方相对于对方而离开俯冲带后退,两板块汇聚力小,大洋板块消减速度较慢。因而俯冲带耦合松弛,大洋板块由于本身的牵引和重力下沉,在俯冲中起显著作用,与拉张作用下形成的正断层相似,俯冲带的倾角一般较陡。在大陆板块前缘较少发育增生楔状体,并遭受塌陷脱落侵蚀作用。弧后和大陆相当宽广的地区扩张显著,发育具张断特征的边缘海盆和陆盆;地壳较薄,洋、陆壳之间有相当宽的过渡性地壳。俯冲板块的运动对大陆岩石圈构造活动影响明显,向

陆波及的范围也比聚敛型组合相对宽阔。

即使一些位于岛弧之后的非扩张成因的边缘海盆,当其弧前发生俯冲,两板块运动速度组合为离散型时,仍会产生扩张。如由于大洋壳圈闭而形成的白令海、加勒比海,在弧前发生俯冲后,白令海出现引张应力场。危地马拉弧和弧后地区也存在许多区域性拉张的证据。

太平洋东(典型者如南美)、西(典型者如马里亚纳)边缘可分别作为聚敛型和离散型速度组合的代表。在俯冲带附近,东太平洋俯冲板块的时代均比西太平洋新,大洋中脊临近美洲板块,甚至俯冲在北美大陆之下,贝尼奥夫带的倾角在南美均较缓,而在西太平洋边缘一般都较陡。这种差异正是仰、俯冲板块运动速度组合类型不同,从而导致大洋板块消减速度快慢不一、俯冲方式和俯冲带应力状况有别的必然结果和有力证据。前述聚敛型和离散型速度组合各自特有的地质现象,分别在东(特别是南美)、西滨太平洋地区均有不同程度地存在。

东太平洋边缘仰、俯冲板块运动速度组合为聚敛型,主要是因美洲板块向西运动速度较快所致。而后者又可能与中新世以来大西洋的快速扩张有关。南、北大西洋张开时间的不同和扩张速度在地史上的变化,可能是造成南、北美洲西部特征差异的原因之一。

(西北大学刘池洋撰)

历史地质学 地层学

地史学 传统地史学往往侧重研究地层学和地质年代学,现代地史学包括研究地球从形成到现在的演化、地球上的生物及其居住环境、各区域地质构造及古地理变化和地球磁极位置的漂移等。概括起来地史学着重研究地球表面的沉积发展史、生物进化史和地球构造运动史。

早在中国战国时期和欧洲希腊时代就曾有个别学者提出地壳变动和海陆变迁的思想。唐朝的颜真卿在《麻姑山仙坛记》(公元1086年前后)提出“高山中犹有螺蚌壳,或以为桑田所变。”11~12世纪中国北宋的沈括在《梦溪笔谈》和南宋的朱熹在《朱子全集》中对化石的形成和海陆变迁均有精辟的论述。这些思想要比西欧的达芬奇(L. da Vinci)类似的认识早三四百年。西方直到工业革命才逐渐形成地质学和地史学的系统知识。18世纪后期德国的沃纳(A. Werner)提出德国南部地层学划分,他认为地球上的多数岩石都是在泛海洋中沉淀形成,称为水成学派,而苏格兰的林顿(Jame Hutton)称为火成学派,他第一个指明岩脉对被侵入岩石的烘烤作用,他认为一个岩体切穿另一岩体,一定比被切穿岩层年青,也是他第一个指出地层的不整合关系和提出以现代地质作用解释古代地质产物,这就是著名的现实主义原理。他相信过去所有的地质作用现有仍然正在进行。对这种地质作用恒定性的信念称为均变论(Uniformitarianism),并受到火成学派的支持和均变论相对立的是法国居维叶(B. G. Cuvier, 1769~1832)为首提出的灾变论(Catastrophism),认为地球的历史为一列列灾变(或突变)形成的,每次灾变之后许多生物灭绝,又重新创造一批或迁来一批新生物。多数灾变论者的假说尽管来自于自然事件的观察,但总的来说由于过分夸张而被歪曲。因此当时均变论得到普遍承认,灾变论逐渐被抛弃。到1830年莱伊尔(C. Lyell)出版著名的《地质学原理》第1册,是用均变论作为统一指导思想编写的。对于地层学的建立,丹麦的斯丹诺(N. Steno)1669年曾提出地层的叠覆(Superposition)定律、原始侧向连续(Original lateral continuity)定律和原始水平(Original horizontality)定律。他指出任何岩层原始沉积未经变动前应为水平,这些岩层,应形成于其下面岩层之后,而早于其上面的岩层,沉积时形成一个连续层位,或因变薄而消失,或者逐渐变为不同成分的岩层。这些思想对后来建立地层系统都有重要影响。

19世纪初至70年代可称为地质时代系统建立的阶段。英国

的史密斯(W. Smith)1793年在英格兰南部采集化石注意到不同层位的岩层含有不同的化石,根据化石可以确定和对比地层,这种方法称为化石层序律(Principle of faunal Succession),这种层序律可以建立严格的相对年代顺序,使后来的地质年表和地壳的历史建立在科学的基础之上。19世纪50年代德国的奥佩尔(A. Oppel)提出了化石带的概念,开创了划分生物地层学的途径,后来又经过许多地质学家的研究,到19世纪70年代已全部建立了现代使用的系一级的地质年代单位。

19世纪70年代至20世纪50年代可称为近代地史学发展阶段。从欧洲建立的较完整的地层系统扩展至世界广大地区,地层对比出现困难,促使格雷德利(A. Gressley)于1838年提出相的概念,他发现岩层追索到一定距离岩性改变,化石也就不同。他认为同时代不同岩相(facies)是由不同环境的沉积物和生物群组成。19世纪末,德国沃尔特(J. Walther, 1894)提出岩相对比理论,他用许多现代环境解释古代沉积,使人们把地层研究深入到沉积、生物特征和沉积条件的内在联系之中,由于认识到沉积环境条件的时空分布规律,为岩相古地理学和生物地理的发展奠定了基础,20世纪初许多地质学家,如卡宾斯基(A. P. Karpinsky)、舒克特(C. Schuchert)和葛利普(A. W. Graban)等对各主要大陆及全球进行了古地理研究。

在这一时期内出现另一个重要的地质理论即地槽概念,在19世纪60~70年代美国的丹纳(J. Dana)和霍尔(J. Hall)已用地槽一名代表美国中东部突然增厚的地层。豪格(E. Haug)发展了地槽理论;卡宾斯基(A. P. Karpinsky)把平缓褶皱相对稳定的地块称为地台;20世纪20~40年代,西欧的斯蒂尔(H. Stille)、前苏联的阿尔汉盖斯基(A. Д. Архангельский)、沙特斯基(H. С. Шатский)以及中国的李四光都创建了不同的大地构造学派。在这个基础上有条件提出地球表面海陆形成及其演变的假说。一方面是以大陆漂移为中心的“活动论”,主张大陆和海洋曾有大规模的位移;另一方面仍然有些学者主张大陆和海洋自生成起位置基本未变称为“固定论”者。在20世纪初,“活动论”者同“固定论”者争论不断,促进了地质学和地史学的发展。

从20世纪50年代开始,地史学发展进入新时期,由于新方法、新技术和新资料的出现,使原有的概念和体系受到巨大的冲击。特别是对大陆斜坡和深海钻探的研究,同位素年龄测定技术的发展,地球物理和古地磁学的发展使大陆漂移、地极迁移和海底扩张等“活动论”学说得到证实,引起了一场地质学上的巨大变革。

大陆漂移和洋底扩张学说的发展,围绕着大规模大陆位移这个概念,地质学家已经探讨了很长时间,早在1858年斯奈德(A. Snider)提出大西洋两岸海岸线的相似是由于大陆灾难性的裂开而造成的。19世纪末澳大利亚徐士(E. Suess)设想曾有过一个拼合的统一冈瓦纳大陆,就是所说的南方大陆,但他并没有提出大陆曾经漂移。德国魏格纳(A. Wegener)于1915年在《大陆与海洋的起源》一书中进一步引证大西洋两岸的岩石,地质构造和化石明显相似的证据,证明大陆漂移,他设想今天分散的大陆曾经是拼合在一起的联合古陆或称泛古大陆,约在22亿年前联合古陆破裂,大陆间宽阔的空隙就为海洋占据。关于大陆漂移的根本原因在以后几年内还缺乏有力的证据。直到1928年英国霍姆斯(A. Holmes)写了一篇文章引进了地幔中的热对流机制,解释大陆漂移的原因。他提出地壳下的热对流拖带被分成两半的原始大陆分离,在对流下降的前缘发生造山作用,在对流上升的裂开处发育海底,他设想在地壳下的玄武岩层起着传送带的作用。霍姆斯的思想差不多已经接近现代用分离和俯冲说明现代板块构造的概念了。60年代早期赫斯(H. Hess)提出海底沿大洋中脊裂谷张开,地幔物质沿裂谷中裂隙上涌产生新的海底,然后新海底往侧向扩张,海底扩张的新理论就这样问世了。在以后几年内根据全球的磁异常调查、地震机制解释、热流测量、海底沉积物的厚度与年龄提供的证据,证实了海底扩张学说。今天大多数地质学家认为地球的岩石圈破裂成约12个岩石圈板块,板块沿大

洋中脊的脊峰诞生,在海沟附近又被推回到地幔中,嵌在岩石圈板块上的大陆板块一起漂移。板块构造学说赋予古老的大陆漂移以新的生命力,地球上的造山带、火山带和地震带都与板块边缘有关。海底扩张和大陆漂移的概念引起地质学家们正在重新考虑地球的历史,按照板块构造体制重新解释造山作用、火山作用、大陆演化和地史格局。

参考文献

- 1 《中国科学技术史》翻译小组译,中国科学技术史,北京,科学出版社(第5卷),1976,270~334
- 2 Reading H G 著,沉积环境和相,周明鉴,等译,北京,科学出版社,1986,5~13
- 3 张守信编,英汉现代地层学词典,北京,科学出版社,1983,66~67
- 4 刘本培主编,地史学教程,北京,地质出版社,1981,2~6
- 5 普雷斯F,锡费尔R著,地球,高名修,沈德富,译,北京,科学出版社,1986,480~560
- 6 Schoch R M. Stratigraphy, principles and methods VNR. New York, 1986, 76~84
- 7 白顺良,翦万筹,等编译,地质历史与板块构造,北京,地质出版社,1984,4~9
- 8 吴瑞棠,张守信等编,现代地层学,武汉,中国地质大学出版社,1989,70~103

(中国地质大学杨式溥教授撰)

地层学 stratigraphy 是地质科学中的一门基础学科,原来是指地层描述的科学。早期着重地层剖面的描述和进行地层的划分和对比。随着科学技术的进步,地层资料的累积,生产实践要求高精度的地层对比,地层学的概念和研究范围也在不断扩大和变化。《国际地层指南》(1976)发展了地层学,它认为地层学不仅涉及岩层的形成顺序和年代关系,而且也涉及岩层的形状、分布、岩性、化石、地球物理性质和地球化学性质,实际上它涉及岩层的所有特征、性质以及根据形成方式和地质历史所作的解释。

地层学萌芽于16~17世纪,丹麦斯坦诺(N. Steno)1669年提出了地层的三大定律,地层叠复(Superposition)定律、原始侧向延续(Original lateral continuity)定律和原始水平(Original horizontality)定律,为地层学的发展开辟了道路。18世纪后期西方工业革命促进地质科学形成一门系统知识。英国的史密斯(W. Smith)长期进行地质测量和填图,广泛应用上述定律,并发现不同地层中含有不同的化石,可以用来划分和对比地层,称为化石层序律(Principle of faunal succession),为建立地层系统奠定了科学基础。19世纪前半叶许多科学家发展了地层学。莱伊尔(C. Lyell)发展了赫顿(J. Hutton)的均变论,提出现实主义原理在古生物地层方面的应用,并建立了第三系地层系统,其后又经过塞奇维克(A. Sedgwick)、默奇森(R. I. Murchison)等研究,到19世纪70年代已全部建立了现代使用的系一级地层单位。奥佩尔(A. Oppel)提出了化石带的概念,开创了详细划分生物地层的途径。

19世纪后半叶地层学一个重大的进展是建立年代地层系统,1906年第八届国际地质大会正式通过包括年代单位与岩石单位的双重分类(dual classification)。时间单位依次为代、纪、世和期,相对应的岩石地层单位依次为群、系、统和阶,其特点是二者在时间上严格等同,这种思想一直影响很深,双重分类有过积极推动地层学的发展作用,但缺点是至今仍有人把岩石单位从属于年代单位。

申克(H. G. Schenck)和米勒(S. W. Muller)1941年提出三重地层分类。他们强调地质时间单位代表抽象的概念,因此另建立时间地层单位代表相应的时间单位所堆积的岩石,第3种术语是岩石成因术语为地方性地层单位而建立。

表1 三重地层分类及其术语

I. 时间术语	II. 时间-岩石术语	III. 岩石成因术语
1. 代	1. 无特别术语	群
2. 纪	2. 系	组
3. 世	3. 统	段
4. 期	4. 阶	
	5. 带	层

(据 H. G. Schenck & S. W. Muller, 1941)

1976年出版的《国际地层指南》认为地层有许多不同属性,根据其任何一种属性,都可以划分地层,因此产生“多重分类”(multiple classification),如岩石地层划分为群、组、段和层;生物地层划分为生物带(包括组合带、延限带、顶峰带等),年代地层有宇、代、纪、世和期等,其他类型还有地震的、环境的、矿物的、磁性的等不同类型的划分,这对地层学的发展无疑是一种突破。因此从20世纪50年代起不断涌现出地层学的新理论、新技术。它们与地层学交叉渗透,特别是新灾变论的兴起和地质事件概念的建立,使地层学蓬勃发展,出现了以下许多地层学新的分支。

生态地层学(Ecostratigraphy) 最早由欣德沃尔夫(O. H. Schindewolf)于1950年命名,它是以群落演化作为地层划分和对比的依据,是古生态学、沉积学和地层学相结合的产物。任务是识别生态群落、解释环境、研究生态系统的时空分布,提高地层划分对比的精确度。生态地层基础性工作如齐格勒(A. M. Zeigler)1965年发表威尔士-英格兰边界志留纪腕足类群落分布。布柯(A. J. Boucot)组织了国际生态地层项目(IGCP, 1974~1984)研究文洛克-吉丁阶群落生态地层学。

事件地层学(Event Stratigraphy) 是利用稀有的突发事件及其地质记录去划分和对比地层,按自然特征确定地层界线,它研究各种事件及其地质记录在地层工作中的应用。地质事件可分为宇宙(地外)事件和地球(地内)事件,如火山喷发、地震、古地磁极反向、板块构造运动、海平面变迁、生物灭绝、气候变化、外星撞击地球等。自从阿尔瓦斯(L. W. Alvarez)等(1970)在白垩-第三系界线粘土层发现铱异常以来,提出系由外星撞击地球造成,后来许多人论证地外灾变事件的可能。事件地层学当前任务是确定地层界线,提高地层年代的精确度和解释地球的演化历史。

地震地层学(Seismic Stratigraphy) 是20世纪70年代诞生的,它主要利用地震方法获取的资料解决地层学问题,它是沉积学、物理学、数学和电子技术相结合产生的。由于油气勘探的需要,地震地层学在寻找有利的油气圈闭和可能的油气藏方面得到广泛的应用。近年来,随着计算机技术的进步,在处理能力、运算速度和显示方式上有了巨大进步,从而扩大了研究的深度,目前通过地震资料的分析不仅可以确定反射的深度和构造的形态,而且可以研究地层的接触关系,划分地层层序,研究海平面相对升降变化,判别古沉积体系和沉积环境,确定各种隐蔽圈闭的类型,推测流体运移方向等,构成一门新的学科即地震地层学。

磁性地层学(Magnetostratigraphy) 是根据岩层中保存的剩余磁性进行地层的划分与对比的学科。自从1853年梅隆(M. Melloni)发现岩石中磁性矿物所具有的剩余磁性是一种类似于化石作用的磁性,它记录了岩石形成时期的地球磁场特征。古地磁学正式发展成为一门独立的学科是在20世纪50年代。1957年柯拉莫夫(Khranov)首次在前苏联一些沉积岩中应用古地磁方法,讨论古地磁学在地层划分中的意义。古地磁学证明在地球历史中,古磁极不是永远固定在一处,而是随时间的推移在变动,这种过去地磁场的极性偏移或倒转现象具有全球性和同时性,所谓磁性地层学就是依据岩石层序中的磁学属性所建立的极性单位,来进行地层层序划分与对比的学科。

层序地层学(Sequence Stratigraphy) 是研究年代地层格架内岩石关系的学科,其原理是从四维时空来认识沉积记录,并将其和全球海平面升降变化与地壳沉降联系起来,从而增强了全

球不同地域、不同时代地层间的可比性和沉积相的可预测性。虽然18世纪便提出层序地层这个术语,但直到1963年斯洛斯(Sloss)才把这一概念严格化和正式化,将层序地层作为岩石地层单元的细分和作图的补充,并划定层序的边界地带为边界不整合,盆地内部则以生物地层学来确定最小间断界线,1977年维尔(P. R. Vail)把这一理论引入到地震地层学中,使地震地层学获得重大突破。

除此之外,还有稳定同位素地层学(Stable Isotope Stratigraphy)。该分支开始于20世纪50年代,基本内容是利用稳定同位素在地层中的变化进行地层划分和对比,并探讨地球历史中发生的重大事件,目前广泛开展的有碳同位素、氧同位素和硫同位素的应用。

参考文献

- Hedberg J W. terminology and usage. 1972.5, 297~323
- Vail P R, Todd R G. Chronostratigraphy and sea level changes from seismic stratigraphy, in Petroleum geology of continental shelf of North-west Europe, 1977, 216~235
- 刘春. 构造地质学进展. 北京: 科学出版社, 1982. 257~267
- 陈锦石. 地层学杂志, 1985, 2: 142~148
- 徐怀大. 地球科学, 1986, 11: 259~265
- 瑞棠, 张守信, 等编著. 现代地层学. 北京: 中国地质大学出版社, 1989. 28~35, 71~132
- 张守信. 理论地层学—现代地层学概念. 北京: 科学出版社, 1989. 1~10
- Schoch R M. Stratigraphy, principles and methods, 1989. 76~84
- 陈源仁. 生态地层学原理. 北京: 地质出版社, 1992. 1~7

(中国地质大学杨式溥教授撰)

地层的接触关系 contacts of strata 指两套不同时代的地层或两个地层组之间的相互关系。研究地层接触关系首先要区分地层的连续(continuity)和地层的非连续(non-continuity)。所谓地层连续,在传统概念中只要没有一定广度的陆地上升的剥蚀作用,导致地层上的广泛缺失,则上下地层之间的接触关系仍然被认为是连续的。因为在自然界任何一个沉积层面都代表沉积的短暂间歇,在海平面以下接近平衡状态的稳定沉积区,沉积速度非常缓慢,甚至有一定时间的沉积中断,在特殊情况下可以发生海底局部冲刷和侵蚀,但这些在传统概念中仍然被认为是连续沉积。即便是在陆地上沉积盆地的边缘或河流沉积的河床部分,有时出现上下地层的斜交关系也都不认为是地层的非连续。因此在同一地区的上下两套岩层若其产状一致,相互平行,证明其上下两套地层之间的沉积和保存过程是连续的,在沉积上和生物演化上都是连续的,则这种关系在地层上称为整合接触(conformable contact),它说明这个地区的地壳运动以相对下降为主,沉积是连续的,其间没有发生足以引起较长时间沉积间断的构造运动。

地层的非连续是指陆上剥蚀形成广大范围内的地层缺失,这样形成的接触关系称为广义的不整合(unconformity),任何不整合都包含有沉积间断、基底上升或沉积环境改变,甚至有陆上剥蚀和再度下降接受沉积的整个过程。两个地层之间不整合或不连续关系可以分为3种类型。

非整合(nonconformity) 该术语为皮尔逊(Pirsson)1915年提出。当成层的沉积地层以不整合关系覆盖于层理不明显的火成岩或变质岩之上时称为非整合。多发育于沉积岩覆盖在深成侵入的岩浆岩或层状变质岩之间的一种不整合。顿巴和罗杰斯(D. C. Dunbar & J. Rogers, 1957)曾提出该术语只限于这种含义,这个术语虽然是一个经典而有名的术语,但实际上并不常用。尹赞勋等(1978)认为“非整合”的具体实质易于理解,而字面含混。建议改用“异合”或“异岩不整合(heterolithic unconformity)”。也有入认为该术语过去曾广泛使用,但现在很少有人使用,可作

为一个包括有角度不整合的一般术语来使用。

角度不整合 (angular unconformity) 当上下两套地层之间不平行并有明显角度变化时可称角度不整合,这是指两组岩层,其中较老的下伏岩层与年轻上覆岩层之间倾角不一致的一种不整合,专指年轻的上覆岩层盖在倾斜或经过褶皱的较老岩层的侵蚀面上的那种不整合。尹赞勋等(1978)建议将这种不整合的汉名改为“截合”。角度不整合代表一个地区较老的沉积物经过上升、褶皱和剥蚀,再受到新沉积物的覆盖。一般认为是赫顿(J. Hutton)首先指出角度不整合的意义,并对苏格兰志留纪和泥盆纪红层之间角度不整合最先作过详细观察。

假整合 (disconformity) 在间断面上下的两套地层层面常常平行的一种侵蚀不整合,所以又称为平行不整合 (parallel unconformity) 或侵蚀不整合 (erosional unconformity),表示正常的沉积顺序有一个明显的中断,通常以一个明显的侵蚀间隔或一个能看见而不规则的侵蚀面为标志。这表明较古老的岩层受剥蚀时或当地壳只简单地垂直升降(不倾斜、不褶皱或错断),使该岩层保持水平的一种不整合。假整合 (disconformity) 一词最早由葛利普(A. W. Grabau, 1913)提出,他指出有两种不整合关系,一种是上下两套岩层相互平行称其为假整合,另一种是两套岩层之间有一定的角度称为角度不整合。所谓假整合是指在短距离内的情况,实际上任何具有长期间断的假整合面在广大范围内都不会是真正平行的。例如中国华北奥陶系顶部在华北各处的层位很不相同,这种长期的间断同时又保持了地层间的大致平行的接触关系。

除去以上划分不整合之外,在地质学中常常强调应结合不整合所代表的时限长短和影响范围大小及两套地层的构造性质的差别。最大的不整合是基底和盖层之间的关系,包含着褶皱、上升、变质和岩浆活动等一系列构造性质;其次还有长时间大范围的假整合,如华北的奥陶系与中石炭统之间的假整合。在地质工作中还有人使用区域不整合 (regional unconformity),指发生和展布于广大地区,其范围可以是一个大陆的不整合,它代表一个较长时间的沉积间断。局部不整合 (local unconformity),指局限于一定地理范围内的不整合,代表一个较短暂的沉积间断。海侵不整合 (transgressive unconformity),指由于海侵超覆作用,使沉积区域不断扩大范围,使后期的沉积岩层超过先期沉积岩层的范围,而超覆在更老的地层组成的基底侵蚀面之上,从而形成局部不整合,其基本特征是相继沉积的岩层,超覆于先期沉积的岩层之上,并依次与基底侵蚀面相接触,而先期沉积的岩层在地层剖面中则表现为朝向沉积区边缘的有规律地逐渐尖灭。应用不整合关系可以确定地质事件,一个时间上的不整合关系可以指示许多重要的地质事件,例如构造事件包括褶皱、断层、陆地升高、岩浆岩侵入和变质作用,也可以指示侵蚀事件、重新沉积事件等。

除去上述类型较常用的岩层接触关系外,还有以下一些术语表示地层的接触关系。

副(准、似)整合 (paraconformity): 顿巴(C. O. Dunbar)、罗杰斯(J. Rodgers, 1957)为一个看不出侵蚀面,或其间的接触面是简单的层理,和间断上下的层平行,模糊或不确定的不整合而拟定的术语。皮尔逊(Pirsson, 1915)以前曾归为假整合,纽厄尔(N. D. Newell, 1967)认为副整合为平行岩系之中的生物地层上的不连续。

小间断 (diastem): 一般用于非常小的沉积作用的一个短暂的小间断,并在上覆岩层沉积之前仅有微小的或无侵蚀作用的临时的相对短的间断,小间断为比副整合还要小的间隙,或为一个时间值非常小的副整合,小间断通常不易单独测量,即使是定量测量,因为缺失的时间过短,它们经常只不过缺乏古生物证据。韦勒尔(W. Weller, 1960)认为任何较小的地层间断,其重要性不足以认为是平行不整合(假整合)就可以叫作小间断。

间断 (hiatus): 指地质记录上的连续性中断,如缺少正常情况下应该存在而现在不存在的地层岩石序列,或者因为本来就

有沉积,或因为同间断相当的地层已被剥蚀掉了。如在不整合处,或两个岩层之间,或地质剖面上永远无沉积层的时间值和无沉积与侵蚀二者之和的时间值。惠勒(Wheeler, 1958)把这个术语当作一次海退—海进时没有沉积造成的缺少部分。

缺失 (lacuna): 一般为间断的同义词,代表地质记录中断的一个时间地层单位,专指不整合处一个下落不明的间断,它代表“沉积间断”(无沉积时期)和“剥蚀空位”(侵蚀时期)之和的一个解释性的空间—时间值。这个名词也表示在侵蚀面上—部分地层记录被破坏,并且在这段时间内永远没有岩石记录。

参考文献

- 1 邓巴 C O, 罗杰斯 J 著, 地层学原理, 杨遵仪, 徐桂荣, 译, 北京: 地质出版社, 1974, 1~20
- 2 Leigh W. Mintz, Historical geology, 1977, 3~221
- 3 张守信编, 英汉现代地层学词典, 北京: 科学出版社, 1983, 38~164
- 4 Conkin B M, Conkin J E., Stratigraphy — foundation and concepts, Van Nostrand Reinhold Company, 1984, 1~20
- 5 Schoch R M. Stratigraphy, Principles and Methods, 1989, 76~84

(中国地质大学杨式溥教授撰)

生物地层单位 biostratigraphic unite 指具有相同化石内容和古生物分布特征的一种地层单位。《中国地层指南》中指出,它是“以化石为基础的三度空间岩石体”,生物带(biozone)是生物地层单位的总称,根据不同的生物特征可以建立不同的生物带,在地层层序中,有许多不含化石的层位,它们不具有生物地层特征,显然不属于生物地层研究的直接对象。

生物地层单位不同于岩石地层单位可以在任何地层中建立,因为任何剖面都具有岩石地层的特征,生物地层单位只适用于含化石的那部分岩层,它也不像年代地层单位和岩石地层单位那样有不同级别的单位和隶属关系,也不象地质年表那样是有严密的系统性,生物地层单位划分的生物带不一定是相互连接的,可以是不连续的,其时间含义可以有间隔,也可以重叠。

生物地层单位分类以生物带为主,但在不同类型的生物带之间没有等级序列关系,生物带的含义是一个具有独特的生物特征并与相邻单位有明显界线的生物地层,构成一个生物带。根据不同类别生物特征,可以建立不同的生物带。《国际地层指南》(1976)认为经常使用的有4种生物带:组合带(assembly zone)、延限带(range zone)、顶峰带(acme zone)和间隔带(interval zone)。其中延限带又包括:分类单位延限带(taxon zone)、共存延限带(concurrent zone),另外有奥佩尔带(Oppel zone)及谱系带(Lineage zone)等。现将主要类型的生物带归纳如下。

组合带 系指一段地层内所含化石群某类化石所构成的一个自然组合整体,以区别于相邻地区内生物组合。这里强调以共生为特征的自然组合,因此又称群集带或共生带(cenozone)。所命名的化石既不要求只限于带内,也不一定在带内到处都出现,以能直接观察到的化石变化或标本的富集,或二者为基础。组合带可以指示生态相或年龄。组合带多少和“动物群带”或“植物群带”的含义相同,但这个术语既包括动物群也包括植物群,也可以是某一类化石的组合带。

延限带 代表某一地层序列内的化石总组合中任一选定类型出现的总延续时限(或范围)的地层体。“延限”既包括垂直也包括水平。一个生物地层的延限带可以代表某个系统分类单元(种、属、科、目等);一组分类单元;一个谱系的分枝。因此延限带可以分为以下两类:(1)分类单位延限带(Taxon range zone),系指某一个分类单位(科、属、种等)的代表生物总延续时限内的地层体,其中以生物种建立的延限带如 Pseudoschwagerina uddeni 延限带或 Calceola sandalina 延限带,以属建立的延限带如 stringocophalus 延限带, Neoschwagerina 延限带;(2)共存延限

带(concurrent range zone),指两个或两个以上特定分类单位时限带的相重叠部分。在选择共存时限带和生物时,应选择时代意义清楚、地理延展范围明显的生物,作为命名的代表。

奥佩尔带 奥佩尔(Albert Oppel)在19世纪中叶成功地建立了著名的侏罗纪化石带。奥佩尔带是Stepanov(1985年)所提出的。这个分带是以多种化石的经常独特共生,且以其时限大体上共存为特征,此带的下部标志着某些属或种的首次出现,上部代表某些种的最后消失,其本身标志这些生物的首次出现和空间范围,它大体上体现了共存时限带的概念,但不如共存时限带要求严格,但使用却较方便。

顶峰带 亦称富集带(abundant zone),代表某类化石极大发育或发育最高峰,可指一种化石数量极丰富或频繁出现,或指一个属的种数十分发育或富集,但不是其总延续时限的地层体。

间隔带 指特定的两个生物地层单位之间的间隔,它本身可以不含特征的化石或只含有不明显的化石,不具有生物地层特征。间隔带也可以说是介于两个明显生物地层面间的间隔,可以用生物地层对比,间隔带的界线可用下伏和上覆生物地层单位中某些化石的首次出现或最后消失来确定。

谱系带 由含有代表一演化线或发育线,或者趋向(指谱系中适应变化的方向)的各分枝化石标本的地层体组成的一种“时限带”类型,其上下界由线或趋向特征改变而确定。谱系带的范围不定,取决于所识别的形态变化的性质和大小。可包括演化系统内若干个连续的分类单元,也可以包括一个分类单元内从首次出现到后代的过渡或灭绝有先后顺序的各个类型。从理论上讲,建立在几个谱系基础上的重叠的带系统给在生物地层学基础上的时间对比提供可靠的保证,但实际上这种保证往往因为演化过程的不确定性、系统分类鉴定的主观性和形态的变异性而逊色,何况还要涉及演化和传播速度的变化问题,谱系带根据标准生物分类单元命名。

生物带能指明地层的相对年龄。由于生物在演化过程中具有扩散的瞬时性,只要有适宜的环境,它可以“瞬时”地扩散至广阔范围乃至全球。所以对显生宙以来沉积地层相对年龄的确定和对比具有重要作用。在20世纪40年代以前,地层时代的确定完全依靠化石,当时生物地层单位与年代地层单位可以是同义语。但生物的分布受环境的严格制约,因环境变更而引起生物迁移,导致生物在横向上的分布明显穿时,同一化石带在不同沉积区的层位界线互有差异。生物地层单位中包括依据各种生物建立的各种类型的生物带,它们的延续时限亦多不一致。这样,生物地层单位界线常与年代地层单位不一致,因而呈现明显的、普遍的穿时现象。这是生物地层单位又一显著特点。

参考文献

- 1 Hedberg H D 著. 国际地层指南. 张守信译. 北京: 科学出版社, 1979. 1~178
- 2 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南说明书. 北京: 科学出版社, 1981. 1~25
- 3 张守信编. 英汉现代地层学词典. 北京: 科学出版社, 1983. 16~17
- 4 刘本培等, 编. 地史学教程. 北京: 地质出版社, 1986. 11~13
- 5 吴瑞棠, 张守信, 等编. 现代地层学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 197~200
- 6 Schoch R. M. Stratigraphy, Principles and Methods, 1989. 182~194

(中国地质大学杨式溥教授撰)

岩石地层单位 lithostratigraphic unite 指以某种岩石类型为主,或几种岩石类型的联合,或者具有其他明显一致岩石特征而统一起来的岩石体。岩石地层单位是根据岩石特征建立起来的地层单位,一个岩石地层单位是由岩性、岩相或变质程度均一的岩石组成,可以由单一的沉积岩、变质岩、岩浆岩,或两种以上这些岩石联合组成。它的划分主要根据岩性的变化及岩性组合

的差别,而不考虑岩层的地质年龄,其中所含的化石只看作岩石的组成部分。岩石地层单位可分为正式岩石地层单位(formal lithostratigraphic unite)和非正式岩石地层单位(informal lithostratigraphic unite)两种。正式岩石地层单位是指符合一个明确建立或传统划分和命名的方案下了定义并命名过的岩石地层单位。习惯上从大到小划分为群、组、段、层4个级别。非正式岩石地层单位指偶尔参考提出的,并无充分资料或无充分证据证明曾被指定为一个正式单位的岩体,例如“砾石层”、“页岩带”、“含矿礁体”、“透镜体”等。在正式岩石地层单位中组是区域地层或岩性地层分类中的基本单位,是地质制图的标准单位,因而所有区域地层序列都应普遍划分为组。群和段的划分有时也是必要的,但不是普遍要求的。

群(group) 是最大的岩石地层单位,或比组高一级的正式岩石地层单位,经常是由相邻的两个或两个以上具有统一岩性特征的组所构成的。虽然组不一定要合并为群,但群一般用于组的组合。一套未分组的巨厚的复杂地层,也可视为一个群。群的厚度巨大,其上下界都是极清晰的,一般都是不整合面。群在必要时可以细分成“亚群”,或合并几个群为“超群”。群名通常取自典型剖面附近的地理名,如菏泽群。

组(formation) 是岩石地层单位划分或分类的基本正式单位。组的重要特征是具有岩性、岩相或变质程度的一致性,也就是以岩性为基础整合各地地层柱的唯一正式岩石地层单位。一个组的岩性可以是一种岩石,或者以一种岩石为主夹其他岩层,或者几种岩石重叠交替组成,也可以是一个或几个沉积旋回,还可能以很复杂的岩石构成。组的上述特征必然导致它具有清晰、明确的界线,可以是不整合面或者是岩性突变的整合面。《国际地层指南》(1976)还规定组可以由沉积岩或喷出的或侵入的岩浆岩或变质岩组成,或者在某种情况下由两种以上这些类型的岩石共同组成。一般组的厚度无固定标准,可以由1米到几千米不等。组在一定区域内侧向延伸较稳定。建组的这些条件,是为了便于填图和描述横剖面。组一般以典型剖面附近某一地理名称来命名。或一个地理名称后跟一个岩石名称组成,如郁江组、三山子白云岩组。

段(member) 是组的次级正式岩石单位,而且总是组的一部分。一个组可以全部划分成段,也可以只将某些部分划分为段。段具有不同于组内相邻部分的岩石特征,段的厚度及延伸范围无固定标准。段可以由一个组侧向延伸至另一个组。组不一定都要划分成段,除非因为某种目的才划分段,有的组也可以完全不分段。段可以用地名、岩石名称或二者相结合起来命名。如岩石岭段、灰岩段等。

层(bed) 是最小的岩石地层单位,级别比组和段低,层是组内或段内的一个特殊的单位层(unite, layer),层由岩性均一的物质组成,其上下界线清楚,与相邻岩层显著不同,通常只有对那些用于对比或特别醒目的层(即标志层)才给予专有名称或当作正式地层单位,如燧石层、结核层。

岩石地层单位具有以下一些特殊性:由于岩石地层单位主要根据岩石或岩石组合特征建立,而地层的岩性是因地而异的,一种岩性或岩石组合不可能在侧向上无限延展,永远不变。这就必然导致岩石地层单位具有地区性、地方性。因此,岩石地层单位又称地方性地层单位。但并非只有岩石地层单位才有这种特性。

岩石地层单位主要根据岩石特征建立,而岩石特征受沉积环境与沉积条件控制,同一时期各地的沉积环境与条件不会相同,随着时间发展又可能发生变化。因此,第一,作为地质历史记录的岩石地层单位的界面,与时间界面往往斜交;第二,它与化石延续时限的界线以及其他任何一种地层单位的界线斜交;第三,一个岩石地层单位的时间间隔也不可能到处相等。这就是岩石地层单位穿时性的基本内涵。

同岩石地层单位有一定共性,但并不完全相同的地层单位是北美地层规范(1983)中在第一大类别的地层单位,即“物质单

位”中新提出的岩层单位(lithodemic unite),这是考虑到岩浆岩和深变质岩的地层划分。岩层单位的定义是一个根据岩石特征区别和划分主要由侵入的,强烈变质或高度变形的岩石限定的岩石体,它划分为3级,由大到小是超岩套(supersuite)、岩套(suite)和岩层(lithodeme),其中岩层为基本单位,前二者可合称为杂岩(complex)。岩层单位同岩石地层单位不同的是这类岩石缺乏原始层理,因此岩层单位不遵循层序律,它与其他岩石地层单位可以呈喷出、侵入、沉积、变质或构造接触关系。

为了保证地层工作有统一认识和共同语言,应当对现有的岩石地层单位经常进行清理。现有的岩石地层单位,普遍存在下面两种情况是清理的重点。一是同义的组、群创名过多,二是混淆岩石地层单位与时间地层单位的概念,过分重视组和群的时间含义,忽视其最本质的岩性特征,以致组群经常随着化石的新发现,而任意被改变、肢解和修改。清理岩石地层单位首先要对地层的沉积相作分析,岩石地层单位通常只侧重于一个标准剖面的岩性及岩相特征,因此清理过程要考虑其侧向变化,分析岩相在沉积盆地中的展布规律,才能从本质上搞清相应层位的不同名称的组、群关系。然后结合地层规范、历史由来、命名法则和传统习惯等作出正确的清理,废弃不合适的名称,保留合理的地层单位名称,必要时还可以另建新名或新的地层单位。

参考文献

- 1 Hedberg H D 著. 国际地层指南. 张守信译. 北京: 科学出版社, 1979. 1~178
- 2 全国地层委员会编. 中国地层指南及中国地层指南说明书. 北京: 科学出版社, 1981. 24~25
- 3 张守信编. 英汉现代地层学词典. 北京: 科学出版社, 1983. 53~62. 95
- 4 刘本培, 等编. 地史学教程. 北京: 地质出版社, 1986. 8~10
- 5 吴瑞棠, 张守信, 等编. 现代地层学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 196~210
- 6 Schoch R M. Stratigraphy Principles and Methods. 1989. 152~179

(中国地质大学杨式溥教授撰)

古生代 palaeozoic era 是显生宙第1个代,可分为早、晚古生代。早古生代包括寒武纪、奥陶纪和志留纪;晚古生代包括泥盆纪、石炭纪和二叠纪。有少数国家将其三分,即早古生代,包括寒武纪、奥陶纪;中古生代,包括志留纪、泥盆纪;晚古生代,包括石炭纪,二叠纪。关于古生代起始时代仍有分歧。W. B. 哈兰德等(1982)所编的地质年代表,把古生代起始时代放在距今59亿年,上限放在距今24.8亿年,这样整个古生代经历了34.2亿年。中国张文佑(1986)、王鸿祯(1986)及张祖还(1991)建议将震旦纪归为古生代最早一个代,一般下限年龄为67亿年。

地球经历了前震旦纪漫长历史的演化,早古生代为加里东构造旋回,当时地球岩石圈板块总构造格局是南半球为冈瓦纳联合地块,北半球形成范围较小的稳定地块及其周边存在相应的活动地槽带,以及被大洋盆地所分隔成的北美板块、欧洲板块、西伯利亚板块和中朝板块。到了早古生代后期尚包括由冈瓦纳联合地块所解体飘移到北半球的塔里木板块和扬子板块。早古生代末期至晚古生代初期,上述诸板块通过汇聚、俯冲、碰撞拼合成联合地块——劳亚大陆。晚古生代为海西构造旋回,在劳亚大陆内出现板内构造特征的手风琴式的裂隙和闭合运动。地处南半球的冈瓦纳古陆,这时一般在古陆边缘发生海侵,到了二叠纪,其内部发生构造运动差异,断裂发育、地形分异明显预示着冈瓦纳大陆的解体和漂移即将到来。

古生代是地球演化史上的一个重要地质时期,在生物演化上更为如此。从元古代的不可靠动物化石进入到震旦纪的含有无硬壳的后生动物化石(埃迪卡拉动物群),20世纪70年代以来,在震旦纪地层中相继发现了阿纳巴尔管螺(Anabrites)、圆管螺(Circotheca)、似牙形石(Prötonertzia)以及较高等皱节虫科

(Sabelliditidae)和萨仑虫科(Saariridae)等蠕虫动物。寒武纪出现了丰富多样的较高级的海生无脊椎动物,如节肢动物、棘皮动物、软体动物、腕足动物、笔石动物都有代表,其中节肢动物门中三叶虫纲最为重要。奥陶纪的生物界较寒武纪更为繁盛,其中笔石、三叶虫、鹦鹉螺和腕足类空前发展。志留纪笔石类、腕足类占重要地位,珊瑚纲进一步繁盛起来,并出现盾皮鱼和棘鱼类,另外陆生植物中裸子植物初次出现。泥盆纪古地理面貌因受强烈而广泛的地壳运动影响较早古生代有了巨大的改变,表现为陆地面积的扩大,陆相地层发育。陆生植物、鱼形动物空前发展,两栖动物开始出现。石炭纪时陆地面积不断增加,陆生生物繁盛。因气候温暖、湿润、沼泽遍布,大陆森林茂密,为煤的形成创造了有利环境。昆虫化石最早发现于泥盆纪。陆生脊椎动物进一步繁盛,两栖动物占据统治地位。晚泥盆世出现最早爬行动物化石——林蜥。二叠纪地壳运动较为活动,世界范围内很多地槽活动带封闭形成褶皱山系,相应陆内某些部位出现局部拉张,形成裂隙槽或裂谷带。二叠纪是生物演化的重要转折时期,除了海生无脊椎动物外,脊椎动物中鱼类如软骨鱼和硬骨鱼获得了发展。早二叠世植物群中以节蕨、石松、真蕨、种子蕨类为主。晚二叠世出现了银杏、苏铁、本内苏铁、松柏类等裸子植物。

古生代全球气候特征:早古生代和泥盆纪气候比现代温暖,但冈瓦纳大陆上震旦纪和奥陶纪有冰川活动。石炭纪和二叠纪北半球以潮湿温暖的气候为主,当时陆生植物繁盛,煤层广泛发育,而在冈瓦纳大陆的石炭纪晚期至二叠纪早期发生大规模的冰川活动。

早古生代沉积矿产有铁、锰、铝土矿、磷、钒等。晚古生代泥盆纪有铁、锰、铝土矿,石炭纪有煤、铁、锰、铝土矿及石膏,二叠纪有煤、盐类、铁、磷等。

今后古生代的研究热点为:(1)起始时代问题 争论焦点是震旦纪时代归属问题,即震旦纪是放在古生代最早的一个纪,还是放在元古代最后一个纪。(2)地层划分问题 石炭系原为三分,现有人提出二分,二叠系原为二分,目前有人主张三分。(3)古生代地壳运动性质 60年代前以固定论槽台学说为主,现在板块学说兴起,并被活动论代替,但这两种学说争论仍未解决。

参考文献

- 1 Harland W B, et al. 地质年代表, 1982
- 2 张文佑, 等. 中国及邻区海陆大地构造, 1986
- 3 中国地质科学院地质研究所, 武汉地质学院. 中国古地理集, 1985, 3~4
- 4 李亚美. 地史学, 1985, 303~305
- 5 王鸿祯. 武汉地质学院学报(地球科学), 1986, 11(6)
- 6 左国朝. 地质科学, 1987, 1: 12~24
- 7 左国朝, 等. 地质科学, 1990, 4: 305~314
- 8 张祖还. 南京大学学报(地球科学), 1991, 3(2): 103~110

(甘肃省地质矿产局左国朝高级工程师撰; 杨式溥教授审)

第四纪地质 quaternary geology 第四纪是地球历史上最新的一个时代。1759~1760年,意大利 Arduino 将地质历史划分为第一纪(相当于现今的晚古生代)、第二纪(晚中生代)、第三纪和第四纪,但未引起广泛注意。1829年法国 Desnoyers 重新起用了第四纪这个词,开始广泛传播。1833年法国 Reboul 用第四纪来代表含现生种化石的地层,以区别于化石都是绝灭种的第三纪地层。1846年英国 E. Forbes 首次将冰期与现代动植物群联系起来。1856年 Morlot 用冰期来定义第四纪。1863年 Ch. Lyell 首先将人类及石器的出现归于第四纪。由此可见,在19世纪的中叶,已经形成了关于第四纪内涵的概念,即第四纪是年青沉积物的时代,大冰期的时代,近代动植物的时代,人类生存及其文化发展的时代。

1839年 Lyell 提出了更新世(pleistocene)一词,其现生种软体化石达70%以上。而其后的一个时期被他称为“现代”(recent),定义为:“所有贝壳及哺乳动物化石全为现生种的地

层”。1869年 Gervais 提出“全新世”(holocene)一词来代替“现代”。后者还逐渐与“冰后期”成为同义语。于是第四纪便由更新世与全新世组成。

早在 1779~1786 年间, H. B. S. de Saussure 便使用过灵生代(psychozoic era)一词称呼第四纪。1806 年 Gruner 提出人类纪(anthropogene)一词。但在前苏联的文献中则多称这一名词是 A. P. Pavlov, 1922 年创立的。

然而, 第四纪究竟从何时开始, 第四纪的下界或第三纪与第四纪的界线(N/Q 界线)在哪里, 却一直在长期争论着, 甚至到现在也没有完全解决。人们所提出的方案大体可归为以下几组: 3.5~3.0Ma. B. P.、2.8~2.4Ma. B. P.、1.8~1.6Ma. B. P.、0.7Ma. B. P. 等, 分歧颇大。关键在于各家所持标准不同。以冰川出现来说, 南极冰盖在 25Ma. B. P. 已经形成。而人类的出现在埃塞俄比亚已达 3.8~2.9Ma. B. P., 并已发现 3.1Ma. B. P. 的石器。1911 年 E. Haug 提出以真牛(Bos)、真马(Equus)、真象(*Elephas*)的出现为第四纪的开始。现已查明, 真马在 3.7Ma. B. P. 已在北美出现, 真象于 4Ma. B. P. 发源于非洲。2.8~2.5Ma. B. P., 二者都扩散到了印度西瓦里克(Lindsay et al, 1979)。1932 年国际第四纪研究联合会(International Union for Quaternary Research, INQUA)决议将此界线划在意大利陆相 Villafranchian 阶与当时认为与之相当的海相 Carabrian 阶的上界面处。相当于英国的 Cromer Forest Bed 和中国的周口店组的下界, 年龄为 0.73Ma. B. P., 1948 年伦敦 18 届国际地质大会将之下移至 Villafranchian 与 Carabrian 阶的下界处(后来证明, 后者只相当于前者的上部)。会议并提出了以“第 1 次气候恶化”为确定第四纪下界的标准。1965 年丹佛 INQUA 第 7 届大会决定以意大利南部 Le Castella 剖面上 Hyaline balthica 之初现层位为第四纪下界。1977 年 Selli 建议以距 Le Castella 18km 的 Vrica 剖面中 Cytheropteron testudo 之初现层位为第四纪下界。1982 年莫斯科 INQUA 11 届大会正式通过了 Pasini 等人的研究报告, 以 Cytheropteron testudo 这个冷水种的初现层位为第四纪下界, 其年龄为 1.7Ma. B. P., 但据 Jenkins(1987)报导, 经 Whitley R. C. 检查, 认为该化石鉴定有误, 它是广泛分布于中新世至现代的深海和半深海的一个介形虫新种, 可能发源于西南太平洋, 因而它也不是“北方种”或“冷水种”。此外对于地中海何时开闭, 冷水种是否与外海同时进入地中海以及该剖面测年数据的解释, 人们颇有怀疑, 看法尚不一致。在国内外, 有相当一部分人采用古地磁年表中松山反向时与高斯正向时的界线(M/G 界线)作为第四纪下界, 年龄为 2.48Ma. B. P., 它是一个大的地磁场转换事件, 不具穿时性而有着全球一致的优越性。在这个界线附近, 气候、古生物、岩性(如红土与黄土)都有较大变化, 还有微玻璃陨石所代表的天文事件等。

更新世分为早、中、晚 3 期, 1973 年 Wenner Grem 推荐以布容/松山(B/M)界线为早/中更新世的界线, 它与传统的 Carabrian, Cromer Forest Bed 和周口店组的下界是一致的, 争议不大。中/晚更新世的界线一般认为以深海氧同位素曲线上第 5/6 阶段的界线为界, 年龄为 0.128Ma. B. P., 它也是末次间冰期的开始和相当时期海平面上升或海进的起始点。但巴哈马和新几内亚最后一个高海面的年龄为 0.15Ma. B. P., 而欧洲的末次间冰期 Eemian 间冰期的下界年龄好像还要早些。因此这个问题还未完全肯定。更新世与全新世的界线, 1969 年 INQUA 全新世研究委员会定为 10 000a. B. P., (^{14}C 半衰期 5 570a)。但主张 11 000a、12 000a 或更早的也不乏其人。

第四纪地质学或第四纪学是研究地球, 包括其岩石圈、水圈、大气圈、冰雪圈和生物圈在第四纪时期发展变化的科学, 是研究第四纪地质事件的科学。就其性质, 它属于历史地质学的范畴。第四纪地质学研究的对象首先就是第四纪堆积物, 它包括海洋沉积、陆相沉积、湖相沉积、风成黄土、洞穴沉积等。大陆冰盖的冰营体也是一种特殊的沉积物。还有火山喷出的岩浆与火山灰以及外星进入地球的陨石等。这些实物便是地质信息的载体。研

究它们的形态、结构、构造、物理、化学特性, 便能恢复古气候、古环境, 阐明各种地质事件。那么, 首要的任务就是把地层的顺序理清, 就要用岩石地层学、古生物地层学和年代地层学等方法进行区域的和全球的地层对比。第四纪地层中含有大量生物化石, 如哺乳动物、软体动物、介形虫、有孔虫、放射虫、钙质超微化石、植物遗体、孢子、花粉和硅质体。于是便有古生物学中各个门类的研究。人类化石和文化遗物具有特别重要的意义, 因而有人类学与考古学的研究。古生物学的研究, 一方面有其生物进化和分类上的意义, 另一方面作为地层划分的工具。例如哺乳动物化石的研究, 无论在中国还是在全球, 都对地层划分起着重要的作用, 是传统第四纪研究中的重要内容, 杨钟健、裴文中在这方面作出了卓越的贡献。近来兴起的现代年代学方法, 如: ^{14}C 、热释光、古地磁、铀系法、裂变径迹法、钾-氩法、电子自旋共振法等, 它们能使用过去用岩石地层学方法和古生物方法所定的时代定量化、数字化, 从相对走向“绝对”, 为研究地质事件变化提供一个精确的时间标尺。

第四纪是人类生活的时代, 包括我们现代人类生活的时期。现在的环境是过去第四纪以来环境演变的结果。所以第四纪古气候、古环境的研究就成为当前第四纪研究中的热点。目前正在执行着一个国际性的庞大研究计划叫作“全球变化”或“国际地圈-生物圈计划(IGBP)”, 有许多国家的科学家参加, 各国政府也都给以大力支持。经过 19 世纪的热烈争论与研究, 1909 年 A. Penk 和 E. Brückner 建立了阿尔卑斯区的 4 次冰期模式, 并被后人发展为 6 次冰期。但经 M. Vrey(1947)、C. Emiliani(1955)和 Shackleton(1967)等人的研究, 从深海氧同位素曲线说明第四纪有 20 次以上冰期和间冰期, 冰期具有 10 万、4 万和 2 万年的周期, 而且各冰期与间冰期气温波动是等幅的。从而证明了南斯拉夫 M. Milankovitch(1920)关于地球气候变化受控于地轴倾角、岁差和地球轨道偏心率的天文学说, 这就为预测未来气候变化奠定了基础。如果说已往的地质学主要运用了“将今论古”(Lyell)的现实主义方法。那么, 我们今天可以根据过去和现在推知未来。为了预测未来, 短周期的 3 万、2 万、1 万、5 000、2 000 和数百年的气候变化的研究就显得十分重要。这里要特别注意人类活动的影响, 如 CO_2 等气体引起的温室效应, 以及氟里昂对臭氧层的破坏等。

海洋学研究, 特别是在近海地区的研究, 也是一个十分活跃的领域。例如, 已经获知第四纪以来海平面曾经多次大幅度变动。中国东部平原曾发生 10 次海进(刘泽纯, 1983), 深入陆地达 250km。海退到可达大陆架前缘, 距海岸 600km, 当 18ka. B. P. 末次冰期鼎盛时, 气候极端寒冷, 海平面下降 150~160m, 大陆架上形成广泛的沙漠, 陆缘海大部出露为陆, 美洲以陆桥与欧洲大陆相连, 为动植物和人类文化的扩散提供了通道。据此, 发展了海平面变化的冰川控制论。冰期时海水大量移向大陆冰盖, 海水体积缩小, 海平面下降, 海岸线后退。间冰期时气候转暖, 发生了相反的过程。化石燃料所生成的大量 CO_2 温室气体, 温暖大气, 促使海面上升, 威胁海滨城市, 雨量增加, 造成洪涝灾害。

中国黄土面积积达 63 万 km^2 , 厚度达 505m, 居世界之冠。黄土发育最典型的黄土高原区, 处于“季风三角”之内, 冰期干冷的冬季风盛行, 形成黄土; 间冰期湿热的夏季风盛行, 形成古土壤。因此黄土与古土壤的交替记录了第四纪气候的变化。现已查明, 黄土是在陆地上最连续的一种古气候记录, 发育古土壤 32 层, 黄土 33 层, 堪与深海沉积媲美。人们正在用各种物理、化学、生物学的指标来发掘这种气候记录, 并使之定量化(如磁化率、铁含量、碳、氧同位素、孢粉等), 进而从季风之变迁、大气环流的运动、青藏高原的影响等方面来深入研究气候变化的驱动机制。黄土研究是中国第四纪研究的一大特色。

火山以其爆发威胁着人类的生存, 火山灰进入大气遮掩阳光形成“阳伞效应”影响气候。地震主要是通过破坏房屋危害人身, 只要能提前预报就可避免损失。我国在世界上首次成功地预报了辽宁海城 1975 年 2 月 4 日 19 日 36 分发生的 7.3 级地震,

大大减轻了损失。活断层与地裂缝对城市、水工、核电站等影响极大,成为近年研究的又一热点。山崩、滑坡、泥石流、河流和海浪的侵蚀等地质作用也常常威胁人类的安全。第四纪沉积物经常成为建筑工程的地基与介质(如隧道),也常常是重要的含水层。在特定第四纪沉积及地理条件下发生的地方病,如克山病、大骨节病、氟中毒症、甲状腺肿大、克汀病等给人民健康造成很大危害。由于人工抽取地下水,天然气和石油引起地面沉降,采矿引起地面塌陷。所有这些就成为火山学、地震学、新构造学、工程地质学、水文地质学、灾害地质学和环境地质学研究的对象。

第四纪地层中常含有一些矿产,如砂金、泥炭、盐矿等,还有一些正在形成的矿床,如大洋中脊海底火山不断喷出形成特殊的热液矿床。这不但提供了一种新的矿产,而且为论证古代矿床的成因提供了证据。由此可见,第四纪科学牵涉到了极其广泛的多种学科,成为一个庞大的科学体系。这是任何其他地质时代的研究所不可相比的。

参考文献

- 1 日本第四纪学会. 日本の第四纪研究, その発展と現状. 东京大学出版社, 1978
- 2 Nilsson T. The Pleistocene—Geology and Life in the Quaternary Ice Age. D Reidel publishing Company, 1983
- 3 王水森, 等. 中国黄土研究的新进展. 西安: 陕西人民出版社, 1985
- 4 杨怀仁, 等. 第四纪地质. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 5 Barnola J M et al. Nature, 1987, 329: 408~413
- 6 Kukla G et al. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleocology, 1989, 72: 203~225
- 7 Shackleton N J, et al. palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 1990, 82: 5~37
- 8 Liu Tungsheng, Loess, Environment and Global change. Science press, Beijing, china, 1991

(西安地质学院孙建中教授撰)

古水文地质 paleohydrogeology

是水文地质学的一门新兴分支学科,它通过研究过去漫长地质时期地下水活动过程所留下来的痕迹,再现古水文地质条件的方法,来研究地下水特别是深部地下水的地质发展史、水文地质环境变迁史、地下水运动史以及地下水化学成分演变史与某些水文地球化学现象发育史等古水文地质问题。

古水文地质研究的主要内容有:划分古水文地质期,古水动力场研究,古水文地球化学场和古水温(及地温)场研究等。通过古水文地质学的研究,可探讨解决地下水的形成和演变过程,查明古封存流体(如原卤水等)和化学元素的迁移过程与地下水成矿的作用,以及正确指导找矿和勘探地下水等重大课题;但古水文地质学的迅猛发展是与预测和评价含油气区密切相关的。实践证明,古水文地质学在预测和评价含油气矿藏,以及丰富金属矿床成矿理论等方面,具有重要的理论和实践意义。

从国外发表的有关文章和资料看,古水文地质学主要是在20世纪60年代形成的。虽然最早的一篇文章“古水文地质学”发表于1933年,但一直到1960年以前,有关这方面的资料 and 文章发表得较少。在1960年以后,古水文地质学的发展速度明显加快,发表的资料及论著也显著增多,尤其在前苏联,公开出版发表了许多古水文地质学方面的文章和著作。

A. A. 卡尔采夫于1969年出版的《古水文地质学》是一本奠基性的著作,它系统地概括了60年代以来古水文地质学的发展概况,古水文地质学的一些基本原理、基本概念和研究方法、运用条件和前景,该书的发表致使古水文地质学比较系统地成为一门技术科学。1975年A. M. 奥弗琴尼科夫发表了《含油气盆地古水文地质再造》一书,较详细地研究了古水文地质在含油气盆地中应用的原理、工作方法和内容,并举出了应用实例,再造了油气生成和油气聚积的古水文地质条件,为普查寻找油气矿床增添了新

的评价手段。1976年E. A. 巴斯科夫出版了《成矿规律的古水文地质研究》一书,提出了几乎尚未探讨过的成矿领域的古水文地质问题,也是第1次将古水文地质分析方法应用于成矿研究,这为丰富金属矿床成矿理论和预测方法增添了新的研究内容,打下了科学基础。

中国古水文地质研究是在引进吸收前苏联一系列论著后从70年代末期才开始的,其中地矿部水文地质工程地质研究所等著的《油田古水文地质与水文地球化学—以冀中拗陷为例》一书,是中国在油田古水文地质方面一本较系统完整的科学文献,反映了中国80年代中期在这一领域的研究水平。随着“七五”科研攻关项目的完成和“八五”科研攻关项目的实施,在金属矿床成矿理论尤其是在油气运移、聚集及油气藏形成、保存的古水文地质研究方面,取得了很大的进展。杨家琦等研究了四川盆地上三叠统、中三叠统的古水文地质条件与油气富集的关系,发表了系列文章,推动了古水文地质学的研究步伐,尤其在古水动力条件的模拟方面,成功地引进了真柄软次的泥页岩压实理论和方法,使得古水动力条件的再造工作趋于模型化并逐步完善。刘方槐等(1991)著的《油气田水文地质学原理》一书更是系统总结了我国80年代古水文地质学在油气田评价预测中的一系列成果。应该说,中国众多学者在成矿领域特别是油气藏形成的古水文地质研究方面走在世界的前列。

总之,古水文地质学分析方法目前已得到广泛的应用和重视,尤其在普查油气评价含油气远景中,显示出强大的生命力并随之而迅速发展。古水文地质学本身也正在形成一些重要的分支科学,如古水动力学、古水文地球化学等。

该领域今后的研究热点是:(1)古水动力模拟技术的研究,应该考虑的古水动力模拟与盆地模拟的结合;(2)古水文地球化学的研究方法和模拟技术,古水文地球化学的研究目前刚起步,但它对成矿模式的建立,成矿作用的历史和环境的再造,以及对古水动力模拟的验证都具有十分重要的意义,矿物岩石中包体和矿液化学成分的研究、水文地球化学形迹的研究、高温高压模拟技术的完善都将促进古水文地球化学的发展;(3)古岩溶的研究。由于中国许多油气藏聚集于岩溶孔洞缝地层中,因此十分有必要查明古岩溶储层的成因类型、形成机制和分布发育规律,这将成为以后研究的重要热点。油气区块预测和评价还将是古水文地质学进一步发展的主要动力源。

参考文献

- 1 Карчев А А ПДР. лалеоидрогеология, Москва, Недра, 1969
- 2 Ходжакулиев Я А. Гидрогеологические, Закономерности, Формирования и Размещения Скопий Газов и Нефти, Москва, Недра, 1976
- 3 程汝南编译. 古水文地质学及其应用, 北京: 地质出版社, 1981
- 4 巴斯科夫 E A 著. 成矿规律研究中的古水文地质分析. 沈照理译. 北京: 科学出版社, 1981
- 5 沈照理, 等. 水文地球化学基础. 北京: 地质出版社, 1986
- 6 刘方槐, 等. 油气田水文地质学原理. 北京: 石油工业出版社, 1991

(成都理工学院王文斌撰;任天培审)

同位素地质学 isotope geology

由放射性同位素地质年代学和稳定同位素地质学两部分组成。前者通过放射性衰变研究地球和地质体的年代;后者通过自然界稳定同位素比值的变化研究地球和地质体的演化规律。因此,同位素地质学在研究地球和地质体的时空变化规律方面有重要意义。

1905年,波尔特伍德(B. B. Boltwood)和卢瑟福(E. Rutherford)首先用化学铅法和氦法测得铀钍矿物的4.10~5.35亿年的数据,从而推翻了地球年龄不大于4000万年的错误观点。1914年,索德(F. Soddy)根据同一元素具有不同质量数的发现,提出了“同位素”这一概念。1932年,尤里(H. C. Urey)

等发现了氢的同位素。接着,人们用统计力学的方法计算了H、O、N、C、S和其他元素的同位素在化学性质上的差异。

1918~1919年,阿斯顿(F. W. Aston)和登普斯特(A. J. Dempster)首先设计出用于同位素分析的质谱计;后来,他们用质谱计发现了周期表中大部分元素的天然同位素,并且测量了它们的质量和丰度。30年代,班布里奇(K. T. Bainbridge)进一步改进了质谱计。30~40年代,尼尔(A. O. Nier)用他设计的质谱计测定了各种矿床中的铅同位素组成,并对太阳系中铅同位素演化和地球年龄进行了探讨。1939年,尼尔和格尔布兰逊(E. A. Gulbransen)首次报导了自然界碳同位素组成的变化。

1935年,尼尔用改进的质谱计分析了铀、钍、铅的同位素组成,建立了比化学铅法更精确的U-Th-Pb测年法。1936年,斯塔里克(U. E. Sturup)根据铅矿同位素组成给出52亿年的地球年龄数据。1947年,霍姆斯(A. Holmes)根据尼尔5个矿物的U-Pb年龄和其间的沉积厚度推算各时代的年龄值,给出了第1个较完整的地质年代表。1953年,豪特曼斯(F. G. Houtermans)根据铅矿同位素组成给出地球年龄为45亿年。1943年,哈恩(O. Hahn)等报导了第1个Rb-Sr法年龄数据。1948年,奥尔德里奇(L. T. Aldrich)和尼尔利用质谱计测定了4个老矿物(正长石、微斜长石、钾盐和无水钾镁矾)的氩含量,证实它们都含有放射成因氩。1950年前后,K-Ar法被前苏联、美国等国家所建立。至此,U-Th-Pb法,Rb-Sr法和K-Ar法都先后发展起来,成为3种最重要的测年方法。

1947年,尼尔研制成功比值质谱计,同位素比的测量精度从1%提高到0.1%,使之可能精确测定D/H, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ 等比值。同年,尤里发表了同位素热力学性质的论文。这些,都为稳定同位素地质学奠定了基础。接着,美、英、前苏联等国先后建立了稳定同位素地质实验室,进行了大量硫、氧、氢、铅、碳等同位素地质的研究。

50年代至70年代,同位素地质学获得了迅速发展。首先,分析技术方法进一步提高和完善。1969年,沃塞伯格(G. J. Wasserburg)等人在同位素质谱计上装配联机计算机系统成功,不仅使分析精度从0.1%提高到0.01%,而且分析效率和自动化程度也有很大提高。韦伯斯特(R. K. Webster, 1960)和穆尔(L. J. Moore)发展了同位素稀释分析技术,使质谱计不仅作为测量同位素含量的工具,而且也是测量微量样品中同位素绝对量的有效手段。

1976年第25届国际地质会议对 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K 、 ^{87}Rb 等同位素的衰变常数及其丰度提出了统一的推荐值。美国国家标准局(NBS)建立了一系列适合同位素地质学需要的世界通用标准样;特别是稳定同位素,O、S、C、H等同位素都有其专用的世界标准,这为同位素地质学测定数据的全球对比创造了有利条件。

同位素分馏理论方面,大本(H. Ohmoto)和爱泼斯坦(S. Epstein)等深入研究了各种物理化学条件对S、O、C、H同位素分馏的影响。奥尼尔(J. R. O'Neil)和克莱顿(R. N. Clayton)进一步发展了这些同位素测定中一高地质古温度的方法。这使上述轻元素的同位素在解决一些矿床和岩石成因问题上得到广泛应用。

在测年中,一些新方法开始建立,主要有 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法、 ^{14}C 法、不平衡U系法和裂变径迹法等。自1956年第20届国际地质会议以来,每届都对同位素地质学进行专题讨论。

80年代至今,分析技术发展的特点是研究微区。1981年,马卢斯基(H. Maluski)报导了用脉冲激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 探针测定地球样品年代的分析技术,此法的优点在于不用分离单矿物,这对那些无法分离的细晶或隐晶测定对象特别有用。同年,约克(D. York)提出用连续激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定单颗粒矿物年代,并不断提高方法灵敏度,到1987年已经可以测定60万年的第四纪单颗粒透长石年龄。1983~1984年,康普斯顿(W. Compston)等人发展了高分辨离子探针质谱计(SHRIMP),它可以测定直径

10~30 μm 微区的锆石U-Th-Pb年龄;应用此种技术已经测得至今岩石圈最古老的年龄为41~42亿年,在这之前人们探知的最老年龄仅38亿年左右。1986年,科伯(B. Kober)提出用双带离子源固体同位素质谱计直接测定单颗粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。一些新方法,如Sm-Nd法测年和Nd同位素地质学,进入了实际应用阶段,在研究古地壳演化方面发挥了重要作用。

稳定同位素地质学发展成3个分支。一是H、O、S、C、N和Si等轻元素的稳定同位素,它们主要用于研究地壳和地表的各种地质作用,特别是在石油、环境保护、农业和医学等方面的应用有较快的发展;二是Pb、Sr、Sm、Nd等重元素的稳定同位素,它们主要用于研究地壳深部和上地幔的地质作用;三是Ar、He等惰性气体同位素,它们主要用于研究大气圈及水圈的演化、油田成因和深部地质演化等。

稳定同位素的综合研究取得了重要成果,如利用Pb、Sr、Nd、He、Ar等同位素的综合研究,证明地幔在水平和垂直方向都是不均一的,从而深化人们对地球结构的认识。

在今后10~20年内同位素地质学将会越来越注重全球性对比研究。研究热点主要有:(1)继续深入研究地幔结构的不均一性以及引起这种不均一性的原因;(2)探讨地壳中各种地质体的同位素特征及其时空演化规律;(3)研究矿床的成矿期和成矿规律以及成矿专属性与原始地球不均一性的关系。

参考文献

- 1 Maluski H, et al. Bull Soc Ge'ol Fr, 1981, 7, 401
- 2 York D et al. Geophys Res Lett, 1981, 8, 1136
- 3 Froude D D, et al. Nature, 1983, 304, 616
- 4 Compston W, et al. J Geophys Res, 1984, 89 Suppl, 525
- 5 Kober B. Contrib Mineral petrol, 1987, 96, 63

(中国地质科学院罗修泉副研究员撰;宋鹤彬审)

构造地质学

逆冲推覆构造 thrust-nappe tectonids 是一种重要的构造现象,这种构造由逆冲断层与推覆体两个部分组成,逆冲断层是低角度逆断层,多层层产出,总体呈铲状;逆冲断层之上的外来系统即推覆体,是顺逆冲断层经远距离运移而来的板状岩体。

逆冲推覆构造的研究具有重要的理论意义和实际意义。地质学家普遍认为,岩石圈是一个动态层圈系统,各层圈之间常常拆离滑脱,逆冲推覆构造就是岩石圈层圈系统的一种主要表现型式。逆冲推覆构造常常掩覆了大片油田和煤田,并对许多金属矿床具有控制作用,因此,逆冲推覆构造掩覆区已成为寻找矿产的重要新领域。

19世纪40年代在欧洲阿尔卑斯发现了逆冲推覆构造,但是当时并未被人们承认。直到19世纪晚期,这种构造才被地质学家承认和关注。1884年盖基(A. Geikie)首次提出了Thrust(逆冲断层)一词。19世纪晚期至20世纪初,地质学家结合造山带的研究,掀起了研究逆冲推覆构造的第1次高潮。海穆(A. Heim)根据造山带中褶皱与逆冲断层的关系,认为在挤压作用下褶皱进一步发展成逆冲推覆构造,建立了褶皱-推覆(Fold-nappe)模式,提出了这类构造的基本结构和形成演化机制。与此同时,人们又发现一些逆冲推覆构造并没有强烈的褶皱伴生,只表现为变形不强的平板状岩席的推移和逆冲,因而安非雷尔(O. Ampherer, 1920)等又提出了冲断推覆(Thrust-nappe)模式。在19世纪晚期和20世纪初期,海穆等认为引起逆冲推覆构造的驱动力和基本作用是侧向挤压,但是夏尔德(H. Schardt, 1893)等提出,重力是引起逆冲推覆构造的基本作用。所以,侧压说和重力说乃成为解释逆冲推覆作用的两种基本观点。

在研究逆冲推覆构造中一直存在一个令人困惑的重大难题,就是巨大推覆体在长距离运移中如何保持完整而不碎裂的问

题。对此,1959年休伯特(M. K. Hubbert)等提出了异常孔隙压力说,他们认为,孔隙液压的浮力效应能使推覆体在运移中保持整体而不碎裂。这个观点越来越引起人们的注意和接受,现在地质学家普遍认为,异常孔隙压力在岩石圈多层圈的拆离滑脱中具有重要意义。

中国的翁文灏(1928)、王竹泉(1928)等在燕山褶皱带和内蒙地轴发现了逆冲构造;继之一些学者在宁镇山区也发现了这类构造;40年代初发现了著名的四川龙门山逆冲推覆构造,新中国成立后至70年代,中国地质学家由于受到升降运动主导论的影响,这方面的研究受到一定制约。80年代初,在国际思潮的影响下,也积极地开展了逆冲推覆构造的研究。

自70年代中期,国际上掀起了研究逆冲推覆构造的新高潮。1974年美国成立了“大陆反射剖面协调组织(COCORP)”,在南阿巴拉契亚造山带及其前陆进行了可控震源的深部构造探测,发现由前寒武纪变质岩系组成的阿巴拉契亚主脉之下是一条近水平的巨大逆冲拆离构造,使前寒武纪变质岩系推覆在下古生界地层之上,在前陆带,也是一套逆冲推覆构造,确证前陆盖层为一薄皮构造。这个发现轰动了整个地质界,既改变了对造山带构造的传统观念,也解决了长期争论不休的前陆构造是否是薄皮构造的问题。由于下古生界可能含有油气,引起人们很大兴趣。与此同时,在落基山前陆带的逆冲断层下发现了大油田,逆冲推覆构造立即成为地质学家瞩目的研究热点。为了总结并推动逆冲推覆构造的研究,国际上于1979年在伦敦、1984年在法国图鲁兹召开了以逆冲推覆构造为主题的学术研讨会。中国于1983年在大同、1985年在南京也召开了以逆冲推覆构造为主题的学术研讨会。研究进展主要表现在以下诸方面。

(1)建立了逆冲推覆构造的比较完整的三维模型。逆冲断层主要表现为由长而平的顺层发育的断坪与短而陡的切层断坡相交替构成的台阶式。逆冲推覆构造或成叠瓦式,或以顶板逆冲断层与底板逆冲断层及其间分支断层和断夹块构成的双重逆冲构造。可以是单层式,更常见的是多个推覆体叠置的堆垛。顺着逆冲方向,逆冲推覆构造可以分为根带、中带和锋带,各带的变形特征、变形性状、应力状态、缩短率、伴生构造等各具特色。逆冲推覆构造的锋带可以显露于地表,也可以隐伏于地下,因作用力的大小和速度、应变速率、岩石力学性质的不同而表现为多种形式。

(2)初步建立了逆冲作用的运动学机制。从逆冲断层系的叠瓦扇或双重逆冲构造的发育过程分析,有前展式和后展式两种扩展式。前展式中各分支逆冲断层自根带向锋带依次顺序产出,每一新的分支逆冲断层增生在先存逆冲断层之上,后展式中各分支逆冲断层自锋带向根带依次产出,每一新的分支逆冲断层发生在先存逆冲断层之上。两种扩展方式中以前展式更具有普遍性。曼德尔(G. Mandel, 1981)等结合实际现象,对逆冲推覆作用中次级逆冲断层的发育机制和扩展进程进行了理论分析和模拟实验,初步建立了相应的模式。

为了查明逆冲推覆构造带的缩短率和位移距,引入了平衡剖面的概念和技术,所谓平衡剖面是指把剖面上的变形构造通过几何原则全部复原的剖面。通过逆冲推覆构造带的长度与地层展平原的原始长度的对比,即可求出缩短量或缩短率;结合被错断的标志层的产出部位,可进一步求出位移距,从而使逆冲推覆构造的研究从定性趋向定量。在确定逆冲推覆的运移方向上,建立了弓箭原则和多种运动学标志。

总之,在研究逆冲推覆构造的运动学方面,通过扩展方式的分析,变形构造与复原展平的对比,几何平衡和能量平衡的相互印证,从变形进程的模拟和计算,已将逆冲推覆构造的研究提高到一个全新的水平。

(3)深化了动力学机制的探索。逆冲推覆构造的动力学涉及到驱动力问题和变形力学问题。在驱动力问题上,从过去的造山挤压说发展为多种力源说。需要提出的是,在这方面的研究中将区域性逆冲推覆构造带的形成与板块俯冲和大陆碰撞联系起来,将表层逆冲推覆与深层构造活动联系起来,将挤压作用与伸展作

用和重力作用联系起来。

(4)认识到逆冲推覆构造的广泛性。过去认为逆冲推覆构造主要发生于变形强烈的造山带及其前陆。现在发现,这类构造广泛发育于不同构造单元之中,甚至变形轻微的地台盖层中亦有逆冲推覆构造产出,不仅产出于地壳表层,在整个岩石圈的各级层圈中均有逆冲推覆构造发育。

(5)修正了逆推覆构造与相关构造的关系的认识。在研究逆冲推覆构造的早期,海穆提出了褶皱发展成逆冲推覆的观点。经研究发现,褶皱发展成逆冲推覆的论断至少是不全面的,尤其在造山带前陆上是逆冲作用引起褶皱。研究还发现,挤压推覆与伸展或重力滑覆常常是密切相关的,这些新发现说明,一些传统观点需要重新认识。

逆冲推覆构造今后研究的趋势可以概括为以下几点:(1)以逆冲推覆构造中各级构造及其相互组合为基础,配合数学模拟和物理模拟,以建立不同构造单元和不同构造环境中逆冲推覆构造的定量的三维几何模型。(2)将流变学、能量平衡等物理概念引入逆冲推覆构造,建立不同层次推覆构造的运动学和动力学特征及自表层到深层的相互联系和变化趋势;探讨构造运移的规律和机制。(3)将活动性不同的构造单元中的逆冲推覆构造进行对比分析,结合各种构造单元的发展演化和构造力源,以解决区域性逆冲推覆构造的驱动力的问题。(4)进一步探索挤压推覆与伸展滑覆的时空关系,揭示这种关系,不仅对查明逆冲推覆构造的演化史和形成机制具有重要意义,而且对认识岩石圈的层圈结构,各层圈的相互关系和发展史亦具有重要意义。

参考文献

- 1 Price N J et al. Thrust and Nappe Tectonics. London: Blackwell Scientific Publication, 1981
- 2 Boyer S E. Thrust System. A A P G Bull, 1982, 66(9): 1196~1120
- 3 MoTliy C K A. Classification of Thrust Front. A A P G Bull, 1986, 70(1): 12~25
- 4 Jamson W R. Geometric Analysis of Flod Development in Overthrust Terranes, F Str Geo, 1987, 9(2): 207~220
- 5 朱志澄. 逆冲推覆构造(第2版). 武汉: 中国地质大学出版社, 1991
- 6 McClay K R. Thrust Tectonics. London: Chapman and Hall, 1992

(中国地质大学朱志澄教授撰)

接触应变作用

contact straining 不能干岩层夹能干岩层,当在水平侧向挤压力作用下发生变形时,由于能干岩层的褶皱和变形引起上下接触的不能干岩层褶皱和变形的现象称为接触应变,这种作用称为接触应变作用。它是一种重要的构造作用,研究它不仅可以正确认识褶皱构造,特别是褶皱转折端的几何形态,分析区域褶皱构造特征,促进褶皱构造形态及其褶皱形成机制研究的新发展,而且对研究深部褶皱形态变化规律、褶皱形态的预测、矿产资料的预测、矿产普查勘探以及工程地质等方面均有重要作用。

1961年, H. Ramberg 较详细论述接触应变概念以来,已引起构造地质学家的广泛注意和研究。1967年, J. G. Ramsay 在《岩石的褶皱作用和断裂作用》一书中详细讨论了接触应变的应变特征,褶皱形态变化规律,并提出了接触应变带的概念。1983和1987年,他从接触应变出发,讨论了多层能干岩层褶皱类型,并进一步分析中和面的变化规律。1971、1972年, D. Roberts 和 K. E. Stromgard 对褶皱转折端应变特征进行了试验研究,指出转折端存在中性点。1986年,俞鸿年等将接触应变作用编入《构造地质学原理》高等学校教材。蔡学林(1986、1988)对接触应变带内的中性三角区作了系统研究,并指出它在找矿勘探以及工程地质中的作用。从目前发展趋势来看,接触应变作用为研究褶皱形态特征及其形成机制开创了新的领域和方向,它将成为研究褶

褶皱构造形态和形成机制的突破口之一,从而促进构造地质学的发展。

接触应变作用的提出和研究是褶皱主波长理论发展的必然结果。通过理论计算数学模拟, M. A. Boit (1957, 1961) 等认为岩层可看作是不同的粘度的粘性固体。当岩层受顺层挤压力作用时,其中粘度较大的能干岩层首先失稳褶皱,并在褶皱发育过程中起主导作用。随着压应力不断加强与变形不断发展,一些不同波长的弯曲都有可能生长发育,但是,在一定范围内只有某一初始波长的弯曲发育最好,波幅增长最快,它控制着褶皱的成长和发育,最后形成褶皱波长,这一初始波长 M. A. Boit (1957) 称为褶皱主波长 (W_1), 其表达式为

$$W_1 = 2\pi T \sqrt{\frac{\mu_1}{6\mu_2}}$$

从上述表达式可知,褶皱初始主波长与能干岩层的厚度有关,亦与能干岩层 (μ_1) 和不能干岩层 (μ_2) 的粘度比有关,但与施力大小、应变速率和应变变量无关。J. B. Currie (1962) 将天然褶皱所见褶皱岩层厚度与褶皱波长的对应关系系统作图,结果清楚地显示二者呈直线关系。1987年, J. G. Ramsay 等较详细地讨论了褶皱主波长与岩层粘度的关系后指出,当粘度比 μ_1/μ_2 大于 50 时,能干岩层形成肠状褶皱,当粘度比 μ_1/μ_2 小于 10 时,形成弧尖褶皱或舌尖褶皱,并认为弧尖褶皱是地壳中最主要的构造形态之一。1989年,蔡学林等首次将这一理论应用于扬子板块内部区域褶皱机制研究、深部褶皱预测以及沉积盆地宽度的恢复,为上扬子板块内部盖层褶皱形态和形成机制提出了一种新的解释。

接触应变作用研究中,起主导因素除纵弯作用力外,就是岩层能干性的确定和岩层组合方式。1983年, J. G. Ramsay 首先提出确定岩层能干性的 4 种标志:有限应变状态对比;劈理与层理关系;香肠构造形态;构造形态的差异。接着他提出了沉积岩、岩浆岩和变质岩能干性序列表,例如,变质岩能干性序列表(按最能干岩石在前,最不能干岩石在后的排列格式)是:变质基性岩;粗粒花岗片麻岩;细粒花岗片麻岩;条带状石英二长云母片麻岩;石英岩;大理岩;云母石英片岩;云母片岩。近几年中国也注意了岩层能干性的研究,陕西地矿局综合研究队(1990)在陕南进行 1:50 000 浅变质沉积岩区填图时,提出了该区沉积岩能干性序列表:白云岩;硅质岩;石英砂岩;杂砂岩;砂砾岩;砂质灰岩;砂屑灰岩;微晶灰岩;泥质灰岩;粉砂岩;粉砂质页岩;泥质岩。多数研究者指出,能干岩层与不能干岩层是相对的,主要取决于它们的组合方式。例如,大理岩与云母片岩呈互层状态时,前者为能干岩层,后者为不能干岩层。大理岩与花岗片麻岩互层时,前者为相对不能干岩层,后者为能干岩层。影响岩层能干性的 4 种因素是:岩层粘度大小;岩层厚度大小;岩层含水量的多少;地质环境的差异。多数研究者认为厚的不能干岩层夹薄的能干岩层是产生接触应变必要的岩性条件。

1967年, J. G. Ramsay 提出接触应变带的概念,他指出由能干岩层褶皱引起与它接触的不能干岩层不均匀应变的区域称为接触应变带,超过此区域属均匀压缩应变区。H. Ramberg 和 J. G. Ramsay 通过实验研究后认为,接触应变带的宽度大体相当于能干岩层褶皱的一个初始主波长。接触应变带内的变形是很复杂的,因而引起的构造形态是多样的。就其接触应变带内褶皱形态而论,也是变化多样的。通常在背斜内由上到下褶皱形态由 I_A 型、I_B 型、I_C 型、II 型到 I 型褶皱,在向斜内正好相反。这一现象的发现和研究所为褶皱形态不协调性提供了一个新的解释。如果是多层能干岩层互层褶皱时,将引起相邻接触应变带应变的叠加和重叠,据此,1983年 J. G. Ramsay 划分出协调褶皱、多协调褶皱和不协调褶皱,并赋予它们新的含义。大量事实表明,上扬子板块盖层中三叠系以上和二叠系以下的褶皱和变形是由二叠系能干岩层的褶皱引起的,由此看来,接触应变具有区域意义。

长期以来,对褶皱中和面的性质以及是否存在有不同的认识, J. G. Ramsay (1983, 1987) 从主波长理论和接触应变角度出发,对褶皱中和面作了深入分析,根据岩层能干性,他将能干岩层

褶皱的中和面划分为 3 类:当 $\mu_1 \gg \mu_2$ 时,能干岩层褶皱内发育中和面;当 $\mu_1 > \mu_2$ 时,能干岩层褶皱转折端处发育“中性线”;当 $\mu_1 > \mu_2$ 时,能干岩层褶皱转折端处仅发育有限中性点。在上述 3 种情况下,他认为在能干岩层褶皱外弧外侧不能干岩层中均发育有限中性点。根据其多年(1984, 1986, 1988)在变质岩区研究发现,接触应变带内存在的另一种重要构造形态就是中性三角区或无应变三角区。中性三角区是中和面在不能干岩层褶皱内的表现型式之一。中性三角区是能干岩层褶皱转折端外弧外侧不能干岩层内为劈理或片理所包围的无有限应变的区域,它以三棱柱体形式平行于褶皱枢纽延伸。中性三角区有大有小,大者只有通过地质填图才能发现,例如,通过填图发现河南桐柏特大型银洞坡金矿就赋存在褶皱转折端中性三角区内。小者在手标本或镜下才能观察到,马杏垣、宋鸿林等(1978)在薄片中发现显微中性三角区。不少研究者探讨了中性三角区形成条件、发育程度和出露大小。在变质岩区,组成褶皱的岩层必须具备以下条件:能干岩层与不能干岩层呈互层状态;能干岩层厚度大大小于不能干岩层厚度;二者粘度比值大,一般 $\mu_1/\mu_2 > 10 \sim 50$;侧向纵弯褶皱作用。通常中性三角区的大小决定于:能干岩层褶皱波长,中性三角区就大,反之就小;能干岩层厚度大,中性三角区就大,反之就小。中性三角区与常称的构造虚脱区是两种完全不同的构造形态,它们在物质组成、岩层组合方式、内部应变型式以及形成机制等方面均有显著的差异。中性三角区内有限应变等于零或近等于零,多数情况下,似乎中性三角区内的岩石首先受到压应变,然后又受到去应变作用,结果形成一个无有限应变的区域,当进一步侧向挤压时,所有褶皱岩层都受到压缩,使不能干岩层内的中性三角区逐渐消失。综上所述,中性三角区是岩层在上述条件下,纵弯褶皱作用发展到一定阶段的产物,中性三角区的发现和研究所不仅在工程地质和地质找矿勘探方面有重要意义,而且在理论上也有重要作用,它提供了纵弯褶皱转折端变形特征和变形机制的某些细节,证明褶皱转折端的应变历史是十分复杂的,并为褶皱内中和面的演化提供了新的论据。

关于劈理与褶皱的关系问题,地质学家提出了各种可能的模式,包括顺层劈理、轴面劈理、正扇形劈理、倒扇形劈理、折射劈理和弧形劈理等。从接触应变理论出发,1983年 J. G. Ramsay 提出与中性三角区相关的三角形劈理(triangle cleavage)术语。三角形劈理是接触应变带内又一重要的构造形态之一。在能干岩层褶皱转折端外弧外侧不能干岩层内发育不同方向的劈理。在靠近能干岩层褶皱转折端外弧外侧不能干岩层内,由于拉伸变形形成平行层理的顺层劈理,向两翼过渡,它们逐渐变为切层的劈理,并与褶皱轴面呈大角度相交, D. Roberts (1971) 称为弧形枢纽劈理(arcuate hinge cleavage)。远离能干岩层褶皱转折端外侧不能干岩层内,发育切层的与褶皱轴面呈一定交角的倒扇形劈理,上述劈理围绕中性三角区构成一种特殊的三角形劈理。它与中性三角区一样分布在能干岩层褶皱外弧外侧的不能干岩层内,系接触应变作用的产物。在能干岩层褶皱转折端内弧内侧的不能干岩层内,因受接触应变的影响可发育正扇形劈理、轴面劈理和倒扇形劈理等。综上所述,劈理的成因是复杂多样的,很难用一种模式概括所有劈理的成因问题。

参考文献

- 1 Ramberg H. Geol Rundschau, 1961, 51: 405~439
- 2 Ramsay J G. 岩石的褶皱作用和断裂作用. 北京:地质出版社, 1967
- 3 Roberts D. Am Jour Sci, 1971, 271: 170~180
- 4 Roberts D, Strömberg K E. Tectonophysics, 1972, 14: 105~120
- 5 武汉地质学院区地教研室. 构造形迹图册. 北京:地质出版社, 1978
- 6 Ramsay J G. 基础地质译丛, 1985, 2
- 7 Ramsay J G, Huber M I. The Techniques of modern structural geology. London: Academic Press INC, 1987.

2:458~465

- 8 马杏垣,等.中国前寒武纪构造格架及研究方法.北京:地质出版社,1987
- 9 蔡学林.地质进展,1988,4
- 10 蔡学林.地质地球化学,1988,10

(成都理工学院蔡学林教授撰;徐开礼审)

深断裂 depth faults 20世纪初W.H.霍布斯(Hobbs)指出地壳具有块断性质。1945年A.B.裴伟(Пейве)首先对深断裂的特点作了概括。1945年黄汲清阐述了我国4种主要构造线及兴安岭构造线问题,他还详细地研究了我国许多中国的深断裂。张文佑及张伯声也都强调地壳构造的块断性质。特别是张文佑,考虑到地壳上不同地段内岩石力学性质不同,决定深断裂的展布方向,着重阐明了我国地台及西部地槽系中有规律分布的剪性深断裂,以及全球性剪性深断裂的分布特点和形成机理。但是不同学者对深断裂的理解不尽相同。

深断裂规模 一般认为,深断裂的长度可由几十到几十千米,甚至可达几百万米。东非深断裂带,南起莫三鼻给赞比西河,北至土耳其的托罗斯山脉,纵贯非洲东部,构成一系列地堑和地垒,延长约6200km。北非的南阿特拉斯深断裂带由大西洋海岸一直向东延伸到加别斯海湾,长达1200km。世界著名的北美加利福尼亚的圣安德列斯深断裂长达1000km,前苏联中亚塔拉斯-费尔干深断裂长达数百千米。在我国呈纬度方向的宣化-承德-北票深断裂,长达1000km。纵贯我国东部的郯城-庐江深断裂,从山东北部向南延伸到安徽南部,约800km。深断裂内部结构是较复杂的,很少以单个断裂形式出现,往往具有破碎带的特点,由一系列大体平行的断裂构成,宽达几千米至几千米。我国的郯城-庐江深断裂带在山东省北部断裂带最宽达120km,中部为70km,向南逐渐变窄为20km,宛如一个向北展开的喇叭形,由几条断裂构成一系列平行的地堑和地垒,自西而东为沂水地堑、潍坊地堑、莒县地堑、掖县昌南地垒等。除以上特征外,深断裂带也受到横向破裂的截割,地堑和地垒在纵向上直接接触,如郯城地堑与潍坊地堑即以汤头一道口横向断裂为界。

鉴定深断裂的深度不外乎两种标志:即沿深断裂分布的岩浆岩体的化学成分,同深断裂活动相联系的地震震源的深度及其分布。拉德克维奇(Е. А. Радкевич)曾经建议按深断裂的深度分为“基性岩”和“酸性岩深断裂”。“基性岩”深断裂控制着基性及超基性岩体的分布;“酸性岩”深断裂,如我国东部沿海地区广泛出露沿断裂的大量中、酸性火山岩喷发。丽水-龙潭-华安深断裂及莲花山深断裂都有中-新生代花岗岩类侵入岩及大规模的以流纹岩为主的喷发岩。它们至少在中生代即已出现,并延续到目前。表明这些控制中、酸性岩浆活动的深断裂是长期活动的。

深断裂活动性 是地壳构造发展中长期活动的一种构造破裂现象。从地球演化观点来看,深断裂不是在地球的任何时期都存在。目前人们对前寒武纪大地构造样式的认识愈益深刻,深断裂作为一种构造类型,古老性愈益明显,其产生时期最早可追溯到晚太古阶段,在此以前地壳很薄,地球表面遍地处于大面积熔融状态,片麻岩穹隆是此时的特征性构造之一,往后,地壳内物质经过改造,演化,花岗岩层已具雏形。至晚太古阶段,局部地方可在早太古时期开始出现狭长形的破碎地槽带,这与深断裂的出现有关。马杏垣根据我国具体实例论证了晚太古阶段,由于地壳遭受褶皱作用,固结面积增大,狭窄的活动带夹于其间。就目前所知,山东沂水深断裂产生于早太古中期泰山群沉积之后,并控制了胶东群及粉子山群的沉积。在国外文献中,记载最早出现的深断裂很多,其中较著名的有前苏联中亚的塔拉斯-费尔干深断裂,产生于元古代,元古代火山岩沿之分布。英国苏格兰的大格林深断裂也于元古代开始活动。

黄汲清特别强调深断裂的多旋回性,并把我国某些深断裂(由于它们具有多期活动)命名为多旋回性深断裂。他指出往往依时间的进程而增加其数目,扩大其范围,丰富其体系,当最新的

断层发生时,最老的断层可能已二次、三次乃至多次活动了。山东沂水木深断裂带研究表明,最早的一条南北向深断裂产生于太古代中期,后经阿森特、加里东、海西、燕山、喜马拉雅等期构造活动时,都有不同程度表现,随着时间的进程,不但深断裂数目不断增加,并且出现东西向的、横向的、新的深断裂体系。从各个具体深断裂的历史资料看,这些深断裂的活动行为是不间断-间断的,不间断是绝对的,而构造运动处于相对静止状态——间断性——则是相对的。

深断裂的继承性活动在某些断裂上表现的很明显。当断裂两盘具有差异性运动并反映在地形上时,那么在沉积物的分布、岩相及厚度变化上就会得到反映,贺兰-六盘山深断裂带自震旦纪以来经历了古生代、中生代的漫长地质时期,西盘不断上升、剥蚀,而东盘连续接受了大量沉积物,广西岑溪-博白深断裂,在整个古生代时期,西北盘不断下降,而东南盘一直以上升运动占优势。

深断裂具有长期继承活动性,这只是其中主要特征之一,比较有趣的另一重要特点就是深断裂活动的新生性。深断裂活动的新生性不但表现在上下运动方向的更替上,也可体现在水平(切线)运动方向的改变上。在上下运动方向上的新生性方面实例很多,湖北大洪山深断裂,在早元古代末期,运动的图景发生了根本改变,北盘开始上升,而南盘有花山群的砾石夹泥质和南沱期的碎物堆积。在东北地区北满地块与华北地台间深断裂具有新生性,此断裂在元古代即已开始活动,断裂的北盘可能在震旦纪及寒武纪时处于上升状态,而南盘则有震旦纪、寒武纪沉积,但至志留纪以后,构造运动状况有了极大改变,南盘转为降起,而北盘开始下降,有巨厚的志留纪至二迭纪的沉积。引人入胜的还有云南小江深断裂。这种“压板式”的块状运动实例愈来愈多地被发现。深断裂活动的新生性,不但在垂直方向上表现为“压板式”的运动,还可能有垂直及水平方向运动更替出现的状况。前苏联中锡特阿林深断裂长达200km,宽约几千米,它分隔了乌苏里山间盆地和锡霍特阿林隆起,控制了中生代火山岩及岩体的分布。在白垩纪的下赛诺曼期(晚白垩纪早期)以水平运动为主,到达宁时期(晚白垩纪晚期)及早第三纪时,代替水平运动的是垂直上下运动。

深断裂在水平(切线)运动方面的新生性表现在平推深断裂在某一段时间中具有左旋平推性质,当进入另一段时间内,左旋平推断层可转为右旋性质。也就是说,某一盘可以推过来,过后,又会被推过去。这是深断裂很重要的属性。如前苏联塔拉斯-费尔干深断裂。根据古生代沉积物岩相分布错开的图景,指出该深断裂为右旋平推断层,平移距是很大的。两盘中一晚泥盆纪沉积物岩相界线错开了进一步的研究,又详细观察了平推断裂伴生的牵引现象,再一次证实该断裂为右旋平推性质。用充填断裂缝的方解石砾中的方解石的定向排列特征,表明断裂有左旋平推性质,塔拉斯-费尔干深断裂除了水平运动外还以垂直上下运动为主。这个深断裂从元古代即已开始活动,并一直延续到现代,沿该断裂分布着许多地震震中。根据古生代沉积物厚度资料,证明沿该断裂的垂直运动幅度达5~7km,另外,在三迭纪和侏罗纪时断裂西南盘下降,接受沉积,东北盘相对上升,遭受剥蚀。但在侏罗纪后,构造运动图景改变,西南盘转为相对上升,而东北盘相对下降。依据断裂附近现代水平方向的变化地震活动特点,确证该断裂在第四纪时期为右旋平推性质。

大陆地震反射法的兴起,为研究深部构造提供了有利条件,在美国等地发现了许多折离体及薄皮构造,有些断裂及基性岩体展布并不表示该断裂具有较深的延伸,而往往是顺层构造,为此,在研究深断裂时要注意地球物理资料所验证,而不要被假象所蒙蔽。

西太平洋毕乌夫带为太平洋板块向西斜插入亚洲大陆下,深达300km以下,地震测深剖面资料充分证实了这一点。毕乌夫带是一超岩石圈断裂。另外根据云南地区地震测深剖面,小江断裂为切穿地壳的断裂,金河-程海深断裂是沿上地幔顶部低速层

滑动的逆掩断裂,属层岩层断裂。而在其西侧的梅雨断裂是沿壳内低速层滑移的逆掩型的壳内深断裂,可能属壳中“基性岩”深断裂。

深断裂的运动方式 (1)深正断裂:以上下运动为主,此处地壳处于引张状态。沿该断裂岩浆活动激烈,多发生在地台区内。如东非深断裂,莱茵深断裂,中国的渭河深断裂及康滇地轴东侧深断裂等。(2)深逆、逆掩断裂:也是以上下运动为主的,但地壳处于挤压状态,可能缺少岩浆活动断裂附近常有伴生构造现象,如邻断裂褶皱、劈理带和动力变质带等。乌拉尔东部深断裂、极地乌拉尔深断裂,中国的广西东南部岑溪—博白深断裂和北京西山深断裂都具有逆及逆掩的性质。(3)平推深断裂(剪性深断裂):深断裂以平推运动为主。目前已知的平推深断裂有美国加利福尼亚的圣安德列斯右旋平推深断裂、英国苏格兰大格林左旋平推深断裂、新西兰的阿尔卑斯右旋平推深断裂、中国的阿尔金—北山深断裂系、玉龙—龙门深断裂系和郯城—庐江深断裂系等。

综合上述,深断裂是地球演化过程中一定时期的产物,深达地球内部的断裂、切割深度不等,达地幔上部,“玄武岩”层或只切到“花岗岩”层中,空间上延伸极远,以几十千米到上百万米,甚至更长。深断裂带内部结构复杂,发育时间悠久,在活动性质上具继承性和新生性,并在地壳构造发展中占有一定重要地位。

深断裂类型 根据深断裂切割地球内的深度可分出超岩石圈深断裂、岩石圈深断裂、壳中“基性岩”深断裂和壳中“酸性岩”深断裂。(1)超岩石圈深断裂:断裂深达地球内部700km,深度借助于沿断裂发生错动时导致的地震震源分布情况而加以确定。这类超深断裂分隔着地壳一级构造单元(大陆壳和海洋壳),如缘西太平洋超深断裂,该断裂可深达地球内700km左右,断面向亚洲大陆内部倾斜,如台湾大纵谷深断裂、雅鲁藏布江深断裂、班么湖怒江深断裂、金沙江—红河深断裂、东昆仑南秦岭深断裂、北祁连、柴达木北缘—北淮阳深断裂、额尔齐斯深断裂和西拉木伦深断裂等。(2)岩石圈深断裂:此类断裂切穿地壳而至地幔层的上部,它的深度范围自莫霍洛维奇界面至地球内。(3)壳中“基性岩”深断裂:它的切割深度一般在几千米至几百米之内,以至地壳中的玄武岩层。(4)壳中“酸性岩”深断裂:估计只切过地壳中的沉积层而达其下伏的“花岗岩”层中,往往它只控制着酸性岩浆活动。

按不同地质构造单元,一般分成地台内深断裂、台缘深断裂、地槽内深断裂、贯穿深断裂、缘大洋深断裂和大洋区深断裂。这5种断裂在文献中都已叙述过,划分出来的大洋区深断裂是指大洋壳地区内的深断裂。例如大西洋中央水下山脊(或称大西洋中央活动带),呈狭窄带状,它是由深断裂活动引起的。此外,又如中印度洋深断裂带和太平洋东部呈纬度方向的4条平行深断裂带,在此带上地震震源深达地下50km。

由于深断裂的存在,地壳的可透性增加,基性、超基性、酸性乃至碱性岩体呈链状、串珠状沿之展布,构成一个有远景的多金属及稀有矿产的聚集地。耶尔莫拉也夫(M. M. Ермолаев)明确地指出以下规律性:(1)由于深断裂本身的长期活动,多期的岩浆作用,通常会构成多种类型矿田的重迭出现;(2)彼此相邻的深断裂,由于各具独特的发展特点,在岩浆作用和成矿特点上迥然不同;(3)活动时期久的与活动时期较短的深断裂在成矿作用上也有差别,前者比后者控制更多的岩体,更有利于成矿;(4)深断裂切割过不同构造单位,使之深断裂有关的矿产可以迭置在其它原有的成矿省之上。

舒博金(C. N. Шубокин)特别强调石油及天然气形成的无机化学作用。在地槽边缘地带、前缘拗陷、山间盆地以及台向斜中存在着巨厚的沉积物,其下往往隐伏着许多深断裂,在地球深处所产生的石油及天然气顺此深断裂迁移到地表浅处。沉积盖层中的构造及其他有利于油气聚集的条件只不过是作为油气聚集的场所罢了。

参考文献

- 1 Глеубе А. В. Глубекие Тупли гудбухбхх раз-ломов, Статбг Иуб АН СССР Сергг геон, 1965, 1
- 2 Леубе А. В. Сблвб осадкоаколлебуг, склад — шлстоту, гллубекие месторождл Месторождллу с гудбухбхху разлоаулу, 1965
- 3 Суботлу С. У. Осбллу Месторождллу Неорту и газл с гудбухбхху разлоаулу На геррлорту УКрлуллу СССР, геологуесклу сборнл лбовоскору г у 7~8
- 4 黄汲清,姜春发.地质学报,1962
- 5 马杏垣,等.地质学报,1963,43(1)
- 6 Хауб В. Е. гудбухбхху разлоубл. Осчлбхе лрлчлку, лрлулул Клуессклукуллу и абулбхе то рлзотлулуземну Корл. Уст. Влсвух Удебху злвблдулу, геологуя лу рлзлвдкл, 1963 (3)
- 7 强祖基.对于深断裂研究的一些看法地质论评,1965,23(5)
- 8 任纪舜,等.中国大地构造及其演化.北京,科学出版社,1980
- 9 强祖基,等.构造地质论丛(3).北京:地质出版社,1984
(国家地震局地质研究所强祖基研究员撰;任纪舜审)

地震地质学 seismogeology 介于地球物理学和地质学

之间的一个边缘分支学科。它主要是运用地质学的理论和方法研究地震与地质之间的关系,从而认识地震活动的规律,为地震预测和抗震减灾服务。

地震地质学作为一独立的分支学科,是20世纪50年代以后在中国发展起来的,60年代后期才逐步成熟并系统化。中国李四光地质学的学科形成和发展中起了重要作用。50年代以来,他对地震地质学的概念、内容、任务作过一系列的阐述,其内容可概括为3个方面:查明和研究活动构造带,尤其是活动断裂带,研究地震活动与活动构造带的关系;在活动构造带上开展地震、地应力、地形变及其它各种地球物理场的实地观测,对以上两方面的观测结果进行综合分析,研究构造应力场与地震的关系,判断地震活动的发展趋势,为地震预测和防震抗震服务。

以地质学的观点和方法去研究地震现象,在中国起始较早。20世纪初期,中国就有少数地质学家和外国学者实地调查了中国几次大地震,如1920年甘肃海原地震、1923年四川泸县地震、1933年四川迭溪地震等,个别地质学家还概略地编制中国地震和强震带分布图,并认识到地震与地质时期活动较新的重大断裂有关。新中国成立后,由于大规模经济建设的需要,地震及其与地质关系的研究才得到长足的发展。1953年中国科学院建立了以李四光副院长为主任的地震工作委员会,在他的组织下,对中国历史地震记载进行了全面系统整理。在此基础上,编制了中国震中分布图、中国地震目录和全国地震烈度统计图,并着重研究了大地构造和新构造运动与地震活动的关系。从50年代后期,由于一系列大型水电工程、交通设施、厂矿建设的设计要求,先后开展了一系列重要课题的研究,如地震烈度鉴定和区划、地震预报、地震灾害预测、地震成因等课题,从此以后,地震地质才真正成为一门独立的学科。

在国外尚没有内涵完全与它相对应的这种独立学科,与之相近的有地震构造学(seismotectonics),但其研究的内容,似乎仅相当地震地质学中的一部分,地震地质学的其它研究内容都分属其它学科。从70年代以来,地震地质学研究内容主要涉及以下方面。

地震构造的研究 主要从空间和成因方面研究地震的分布及其与地质构造的关系,研究地震区、带的划分及其地质条件和环境,进而划分地震危险区。其中重点研究两个方面:一个是强震分布的深部构造、环境和条件;一是强震分布与活动构造尤其是与晚更新世晚期以来活动构造的关系。经研究,已基本查明与强震活动有关的主要活动构造带,以及不同类型活动构造带的性质、强度等方面的特征。同时,对强震与地球深部上地幔隆起、地壳内低速层等关系的研究也获得重要进展。

国外在地震构造研究方面一直非常活跃,如美国对其西部的圣安德烈斯断裂带与地震的关系进行了全面系统观测和研究,在地震与断裂活动的关系方面,取得了丰富的定量资料和具有指导意义的新认识。日本对本国地震活动的构造环境和一些主要活动断裂进行了详细工作,并开展了活动断裂地质填图,在断裂活动类型和活动周期与地震活动关系方面作出了有价值的结论。欧洲一些著名地质学和地球物理学学者综合分析了地质学与地球物理学两方面的研究成果,对喜马拉雅—阿尔卑斯构造带西段和欧洲一些重点地区的地震构造进行了深入研究。

强震形成构造机制及其地震环境的研究 着重分析研究一些强震的特殊地质环境和条件,包括这些强震的结构、构造活动性质、强度及周期。通过研究,已经从不同角度认识并区分出不同强震的结构类型,并提出特征地震的存在及其重要性。中国东部和西部地区的强震构造环境和类型显然不同,并分别作了深入研究,总结出不同的地质标志。同时,对一些典型强地震地区或典型结构类型,在一定介质条件和力学状态下,进行物理模拟、数学模拟,对其强震发生的特有地质环境作理论分析。

强震形成的力学状态与地球动力学关系的研究 地震的发生与区域的地壳应力场的特征和地球动力学过程密切相关,因此,地壳应力场及其与强震的关系成为地震地质学的重要研究内容,尤其是现今构造应力场和现代地球动力学过程成为研究重点。开展不同学科、不同手段方法对现代构造应力场的研究,如根据震源机制解已获得中国和世界范围的大量而丰富的地应力状态的实测数据。近10~20年来,原地应力测量工作也在不少地区开展,陆续积累了不少世界各地的地应力实测数据。利用地质最新时期形成的构造形迹来推断构造应力场的研究工作,也由定性研究逐渐走向定量研究,如近年来利用断层滑动矢量反演构造应力场的方法的出现和开始广泛应用。综合上述实际资料和研究成果,开展了中国和世界地壳应力场分区及其与地震分区关系的研究,对中国和世界范围地壳应力场分区已有了概略认识。

近些年来,地球动力学的研究集中于岩石圈动力学,由马杏垣主编的《中国岩石圈动力学图》和《中国岩石圈动力学图集》集中反映了这一领域综合研究的成果。

古地震的研究 这方面研究开始较早,而且进展很快。因为古地震研究的对象主要是没有文字记载的史前地震,因此主要是通过调查和揭露过去大震所形成并保存遗留下来的地质现象来分析研究,这包括了大震形成的特殊构造形迹、特殊地貌类型和特殊的堆积物。有地震仪器记录才不到百年,有地震文字记载最长也只几千年的历史,由于同一地区大震发生的周期相当长,因此要研究地震活动时间规律,这样短时间的资料显然满足不了要求,所以古地震的研究就显得特别重要,并逐步形成地震地质学研究领域中的一个重要分支。目前,在中国和世界范围内,已发现大量古地震现象,对古地震标志也取得了系统的认识,通过对中国主要活动断裂带上古地震的研究,总结出大震的原地重复时间间隔一般需数千年,为大震活动周期和大震预测的研究提供了坚实的基础。

震害地质及其预测、预防的研究 主要研究地震所造成的各种地质灾害的成因及地质、地貌条件,从而进行震害的预测、预防,达到最大程度减轻地震灾害的影响,包括不同类型地貌单元、不同构造条件(如断裂带)、不同岩石条件对地震动的影响和作用,平原砂土液化形成条件,以及地震所造成的地表次生地质灾害(如崩塌、滑坡、泥石流等)的预测、预防等。

诱发地震的研究 水库、矿山等大型工程的建设会在不同程度上影响当地的地质条件,改变其稳定状态,从而诱发地震发生,如水库地震、矿山水震等。所以近年来,在这方面的研究取得了较大进展,中国已对若干大型水库进行了系统深入研究,为水库建设提供了重要依据,如三峡水利工程诱发地震的综合研究。

地震地质学当前研究的热点大致集中在活动断裂的细结构和具体特征与地震关系的研究;震源区深部地球物理探测和深部地质环境的研究;地壳现今应力场及其分区的研究;全新世古地

震和大震周期的研究等方面。

参考文献

- 1 中国科学院地质研究所.地震地质概论.北京:科学出版社,1975
- 2 李四光.地震地质.北京:科学出版社,1977
- 3 Tapponnier P. Molnar, P. J Geophys Res, 1977, 82(10): 2905~2930
- 4 McKenzie D. Geophys. J R astr soc, 1978, 55: 217~254
- 5 汪一鹏,马宗晋,丁国瑜.地震地质,1979,1(4):1~9
- 6 国家地震局.中国地震烈度区划工作报告.北京:地震出版社,1981
- 7 李善邦.中国地震.北京:地震出版社,1981
- 8 马杏垣主编.中国岩石圈动力学纲要.北京:地质出版社,1987
- 9 国家地震局《中国岩石圈动力学图集》编委会.中国岩石圈动力学图集.北京:中国地图出版社,1989
- 10 国家地震局.中国地震烈度区划图(附说明书).北京:地震出版社,1992

(国家地震局地壳应力研究所刘光勋研究员撰)

造山运动

orogeny 当代地球科学研究领域的一个非常重要的组成部分,集中在与造山运动直接或间接关联的一些问题上,这主要是因为大部分地质历史是如威尔逊(T. J. Wilson)所指出的那样由一系列洋盆的演化旋迴所组成。每一个旋迴均不可避免要导致造山运动,由此形成的造山带通常也就成为这一旋迴唯一幸存的记录。另一方面,造山运动不仅形成了记录地球历史的大量物质,而且还在造山带及其相关的沉积盆地中赋存了大量的矿产资源。

造山运动一词1868年出现,吉尔伯特(G. K. Gilbert, 1890)将造山运动定义为“形成山脉的过程”,人们一般也因此将吉尔伯特视为第1个将造山运动定义为通过构造过程而形成山脉的作用的学者。奥格(E. Haug)1907年则认为造山运动既代表形成地壳起伏的一个时期,同时还代表一种构造作用,其记录保存在褶皱地区内。1919年,德国斯蒂勒(H. Stille)给出了一个在当时最为明确的造山运动定义,即:造山运动是一个改变了岩石结构的幕式过程,也就是说,造山运动产生了肉眼可见的诸如断层、褶皱、逆冲断层等构造变化,其中最为明显的就是角度不整合。森格(A. M. C. Sengör)在1990年则认为造山运动是“一个用以描述所有发生在会聚板块边缘的作用的集合名词”。

自19世纪现代地质学诞生至20世纪60年代板块构造学问世以前这一造山运动研究的经典时期里,地质学家们对造山运动的空间特征的认识经历了这样3个阶段:(1)19世纪前半叶的一维造山运动理论,对原生垂直运动的过分强调使得这一理论的支持者们只看到上升这样的一维运动,这一阶段的主要代表人物有帕拉斯(P. S. Pallas)、布赫(L. F. von Buch)、霍尔(J. Hall)等;(2)二维造山运动阶段,这一阶段主要由罗杰斯兄弟(H. Rogers, W. Rogers)、德·贝蒙特(E. de Beaumont)、丹纳(J. Dana)等欧美学者所开创,到20世纪初徐士(E. Suess)把它发展到鼎盛阶段,“二维”即,缩短—拉张和沉降—上升是这一阶段造山运动理论的主要特征;(3)三维造山运动阶段,阿尔冈(E. Argand)、小徐士(F. E. Suess)等在20世纪初即已注意到与造山带走向平行或近于平行的走滑断层——造山带三维运动的重要性,这一认识到了20世纪50年代得到了进一步的肯定,板块构造学的问世则为人们提供了一个解释所有这些造山运动的理论基础。

造山运动是一个连续不断和循序渐进的过程,还是一个呈幕式发展并且是突然发生的过程?有关造山运动时间特征的认识发展史上的这一重要争论,首先在19世纪的莱伊尔(C. Lyell)和德·贝蒙特之间展开,这一争论的进一步发展,出现了1950年吉鲁利(J. Gilluly)和斯蒂勒之间的著名论战,瑞士华裔学者许靖华1989年在一次讲演中再度挑起这一论战,并将杜伦佩(K.

Trompy)作为站在德·贝蒙特和斯蒂勒阵营中的一名主要反对者,这一阵营在19世纪及20世纪上半叶占主导地位,板块构造学问世后,它在争论中逐步退居次要地位,但有关造山运动的幕式特征和连续性特征的这场争论今天仍在继续进行。

20世纪60年代板块构造学的问世,促使一些学者用这一全新的理论对造山运动重新进行系统解释,并使其成为这一理论的一个重要组成部分。威尔逊(1968)、汉密尔顿(W. Hamilton, 1969)、杜威(J. Dewey, 1970)、伯德(J. M. Bird, 1970)和迪金森(W. R. Dickinson, 1970)等对造山带作了一般性分类,并对造山运动进行了一定的研究,其中如威尔逊在1966~1968年间指出造山运动不仅以巨大的三维活动性为特征,而且还是板块会聚作用的结果。但对造山运动所作的全面而系统的板块构造学解释,则是1975年后才逐步展开的。

美国迪金森(1979)从造山带与沉积盆地相结合的沉积大地构造学角度出发,根据造山带所在的位置将其分为3类:(1)洋内岛弧造山带;(2)大陆边缘造山带;(3)陆陆碰撞造山带。牛津大学杜威(1980)按岛弧造山带的构造性质将其划分为张性、中性、压性三大类,并对各类的构造、火山、沉积特征进行了系统阐述。法国马托埃(M. Matteaur)从研究构造变形入手,对全球若干主要造山带的变形规律及构造层次作了较为细致的阐述。

许靖华(1982)对地槽理论进行了重新审查,他还用其薄壳碰撞造山作用理论,对阿尔卑斯及华南的地质进行了重新解释。英国皮彻(W. S. Pitcher)等对与碰撞有关的岩浆作用的地球化学特征进行了系统研究。土耳其森格(1990)对全球造山带进行了较为系统全面的划分,按主要的会聚作用类型,他将造山带分为转换挤压型、俯冲型、仰冲型、碰撞型等四大类,每一大类再按照消亡洋盆的规模、弧的性质、构造对称性、参与造山运动的一级构造单元的构造性质等特征进行不同规模的分类。森格还对造山运动与全球海平面变化、世界气候及全球生物演化的关系进行了研究。由于传统的显生宙造山运动三分(加里东、海西、阿尔卑斯运动)概念已越来越不适应板块运动所要求的连续性特征,森格、许靖华等建议抛弃这些运动的传统用法。平衡剖面、地体分析等方法在80年代后期已逐渐被应用到造山带研究中,但其有效性仍有分歧。强调造山带的基础野外地质工作,已成为目前国内外造山运动研究者的共识。

今后造山运动的研究热点是:(1)东特提斯造山带的研究,由欧美学者主要以阿尔卑斯山脉等为主要依据发展起来的现代造山运动理论,将在包括中亚、东南亚、中国西部等地区在内的东特提斯造山带的研究中接受检验,并进一步完善;(2)古生代及更早时期的造山带的研究,对现有造山运动理论进行由今溯古的检验,同样将进一步丰富和发展造山运动理论;(3)造山运动与海平面变化、生物群演化、气候演变等全球性问题的关系。各国学者,对造山运动及造山带进行多学科的系统综合研究,已经成为造山运动研究领域一个不可避免的趋势。

参考文献

- 1 Dewey J F, et al. *J Geophys Res*, 1970, 75: 2625~2647
- 2 Dickinson W R, et al. *Am Assoc, Pet Geol Bull*, 1979, 63: 2~31
- 3 Hs K J. *Mountain Building Process*. Academic Press, London, 1982, 263
- 4 Miyashiro A, et al. *Orogeny*. John Wiley & Sons, 1982
- 5 Hs K J. *Geol. Soc London Spec Publ*, 1989, 45: 421~443
- 6 Sengór A M C. *Earth Science Review*, 1990, 27(1/2): 1~201

(同济大学周祖翼副教授撰,劳秋元审)

底辟构造 diapiric structure 为地下深处低密度高塑性体在重力差异的情况下向上运动并刺穿上覆岩层的一种特殊的地质现象,传统概念为产于地应力拉张环境,现在认为也可在挤压和剪切环境形成。底辟构造可进一步分为盐、地幔、岩浆岩、变

质岩和混杂岩底辟等多种成因类型,并涉及与油气、盐和石膏、铅锌多金属等多种矿田(床)的形成和制约以及影响有关水文、工程、环境、灾害地质和基础地质理论等多方面的密切关系。1980年3月伦敦地质学会在伯利兹大学组织了底辟作用和重力构造的国际讨论会,1990年12月由联合国科教文组织资助在伊朗阿巴斯港举办了200多人参加的国际底辟构造会,取得底辟构造研究的重大进展。

底辟构造一般分3部分:(1)底辟核为高塑性体,常呈复杂的塑性变形;(2)核上部分为穹窿或短轴背斜,多被断层所复杂化;(3)核下部分较简单。盐底辟构造又称盐丘构造,为底辟的主要和常见类型,中央有盐柱,呈等轴或他形,直径约1~2km,为地下深处(5~10km)的母盐层上拱刺穿上覆岩层形成。盐柱上有帽岩,为不易溶解的蒸发岩矿物富集所致,与周围地层呈陡壁接触,因而可引起重力和反射地震等物探异常。伊朗扎格罗斯地区分布有180多个盐柱,赋存盐柱的杂岩体主要由石盐及石膏组成。

1962年,兰伯格(H. Lanberge)开始进行其著名的模拟底辟构造研究并将其模型应用于解释造山带内大型构造成因。同时运用板块运动基础上的水平构造观点和底辟作用有关的垂直构造观点,使构造地质学出现了一场革命。狄克逊(Dixon)和萨默斯(Samas, 1975)根据模型试验的各种底辟形态预测了应变形式,论证了由干涉所造成的应变强度变化及应变椭球体K值变化。

盐底辟发育过程中,一般经历了早期拉张和晚期挤压造山环境,珀特威索特(V. Bertvesote, 1980)认为突尼斯盐丘产于早期拉张环境,并平行于基底断层延伸。近年来一些学者逐渐认识到剪切力对盐底辟形成起重要作用,陈郁华(1990)在中国新疆库车盆地发现大多底辟构造的形成受南北向及区域扭应力控制。卡内罗特(J. Karnellote, 1990)对法国西比利牛斯、西班牙伊比利亚及摩洛哥西阿特拉斯断层边缘盐底辟和地球动力学演化进行了研究,对比伊朗扎格罗斯盐底辟构造特征,发现其共同规律:底辟过程涉及萨布哈(Sebkha, 即潮上盐坪)型沉积;基底断裂起作用;阿尔卑斯膨胀期上升运动穿时性;蒸发岩后盖层普遍析离;隔开宽的向斜窄脊下沉;挤压单位叠加在膨胀盐底辟上。从而合理划分盐底辟过程的4个阶段:盐柱(蒙考型),盐底辟的脊与基底断裂相结合;背斜(阿罕萨斯和博斯门迪特型),三叠系蒸发岩刺穿两个副构造中的侏罗系盖层;侵入盐丘(利钱居门迪型),盐构造强烈角砾化;刺穿岩柱(罗基亚格型),蒸发岩向上侵入到赛诺曼复理石沉积物中。这与科克尔(F. Cocker, 1990)对德国西北部盐底辟演化特征和卢瑞甫(1990)在中国西部划分的形成盐丘构造3个阶段也是相适应的。达沃扎代赫(M. Dawozadeher, 1990)认为盐底辟与温度关系极大,盐埋深7000m,即可达底辟所需温度,205°C以上盐具可塑性,反之盐埋藏浅温度低很难形成底辟。弗斯特(M. Forster, 1990)通过卫片研究了扎格罗斯山东南走滑断层与底辟的关系,沿着断裂及伴生的剪切带使邻近岩石碎裂运至地表。他还对盐柱分为3类:不活动盐柱,通常被不同时代漂砾覆盖的负地形;活动盐柱,穹窿状,地下盐的供给速率大于风化剥蚀速率;未裂口盐柱。科伊(H. Coy, 1990)对盐底辟上升速率还作过模拟,在不同地区和不同环境速率各不相同。彼德森(Bedeson)对丹麦盆地中的巴图姆和莫斯盐底辟进行过计算,其最小和最大纯垂直增长分别是735m和1297m以及314m和885m, K₂的最大净增长率为7.78cm/1000a。

现在大陆裂谷、大洋中脊及拉张盆地的研究越来越多地涉及到地幔底辟,并可进一步分为科马提岩、蛇绿岩、二辉杆榄岩-榴辉岩杂体等不同底辟亚类。赫格达斯(E. Heagedas, 1990)对喀尔巴阡山潘诺尼亚盆地进行深震反射、折射、大地电磁等探测,证实盆地地壳很薄,莫霍面仅20~27km,比周围高出20km,软流圈明显抬升。泽克(H. P. Zenke, 1990)等利用地幔底辟上升/剥蚀速率为5~10km/Ma,尼古拉森(Licholson, 1980)认为地幔的快速抬升可能会发生局部爆炸,可产生金伯利岩及大的膨

伏穹窿,例如维尔迪福特。

岩浆岩底辟以花岗岩原地气球式底辟概念,迪芬巴赫(K. Difenbahu, 1990)模拟了花岗岩的形态与密度、粘度的演化关系,并计算了来自上地幔的基性岩浆侵入到地壳产生深熔花岗岩熔体,由于浮力对流出现混杂作用,混杂块状和尖棱角砾岩可视为侵位期间气球式上升的佐证。同时他提出韧性剪切带代表了底辟上升与向下流动边界岩石之间的垂直运动。

拉默雷尔(B. Larmenal, 1990)研究了亚平宁和阿尔卑斯山的陶恩构造窗,指出大洋和大陆变质岩受重力驱动抬升底辟的实例。萨布泽海(M. Sabzenhai 1990)认为由于盐或蛇纹岩体的底辟而重新活动的流体相中的离子活动性,特别是钠活动性,对高压低温的变质组合形成起了关键作用。斯托克林(J. Storking, 1990)认为伊朗莫克兰地区混杂岩穿刺到弱褶皱的第三纪地层,缺少任何优选方向。

很早以前人们发现扎格罗斯山、波斯湾、科威特及中东许多油气田与盐底辟关系密切,形成油气圈闭。盐底辟增长速率对碳氢化合物保存有重要影响,适当的上升速率及较厚的盖层对油气储存有利。而且盐底辟环境是石油和铅锌硫化物聚集的理想场所(F. Gerzebin, J. J. Ogaiwal, 1990)。弗斯特(H. Forster, 1990)对伊朗中部火成岩底辟与铁矿形成关系作了探讨,由火口沉陷组织的环形地堑内的火山通道中有正长岩、角闪岩、磁铁矿、磷灰石组合,铁矿储量达7亿吨,为上地幔暗色霞石岩质岩浆液态不混溶性和极端分异的产物,磁铁矿是以“浮石”形式运移生成的。

近年来对底辟构造的研究,特别表现在底辟构造与矿产资源(油、气和有色金属)关系;地幔底辟与造山带及盆地成因;地幔、盐、岩浆底辟与诱发地震;盐底辟与水、工、环、灾害等关系以及底辟与基础地质理论等方面的研究等,中国还存在一定差距,许多有关的科研领域有待深入探讨与开发。

参考文献

- 1 Coward M P. Journal of structural geology, 1981, 3(1)
- 2 Proceeding of symposium on diapirism with special reference to Iran, 1990, 1~2
- 3 Jackwon P A et al. Salt diapirs of the great kavir Central Iran, 1991, 1~2
- 4 曲国胜. 国外地质科技, 1992, 4: 1~17
(安徽省地质矿产局刘湘培教授撰)

海沟 trench 主要位于环太平洋周围,沿着大陆地壳与大洋地壳毗邻地带发育,而偏典型洋壳一侧,并微呈弧形、断续延伸的狭长深水槽。一般轴部水深超过6000m以上称之为海沟,如西太平洋的马里亚纳海沟,最深达11034m(11°19'N142°15'E)。小于6000m者称为海槽,如西南日本海槽。海沟横剖面几乎成宽大的“V”形,底部稍微变平,其沉积物甚薄。靠陆侧平行发育着火山岛弧或弧形山链,而统称为沟—弧系,若弧后还发育有边缘海盆者称为沟—弧—盆系,均代表活动的大陆边缘。地球极大部分的大地震多发生于沟—弧系或沟—弧—盆系。大洋地壳由洋脊运移到海沟带,“老化”的洋壳沿着向大陆倾斜的震源面(贝尼奥夫带)俯冲、下沉、消亡于深部地幔之中。所以,海沟带也就是大洋地壳开始向深部俯冲的构造部位又称为俯冲带(Subduction Zone)

19世纪中叶以来,有些国家由于铺设海底电缆而进行海底地形与地质的调查。1874年“塔斯卡洛勒”号探险船首先发现千岛群岛东南侧深达8574m的海渊,称之为“塔斯卡洛勒海渊”。1899年“乃罗”号发现世界最深的马里亚纳海沟,深达9636m。随着深海调查的进展,先后测量了几乎全部的海沟。特别是第二次世界大战以后,随着回声测深仪器更加精密,1951年10月“探险者八世”号测得马里亚纳海沟最深深处为10863m。1952年10月“地平线”号探险船于汤加海沟测得深度为10635m(23°15'S, 174°46'W)。1959年8月,前苏联“勇士号”在“探险者八世”号测深处测得为11034m,就称之为“勇士海渊”,乃当前世界最深

的海沟记录。

20世纪50年代,艾因(J. Ewing)等根据人工地震资料而先后分析中美海沟、秘鲁—智利海沟和马利亚纳海沟等地壳构造,并获得阿留申海沟、汤加海沟、千岛—堪察加海沟等的地磁资料,以及中美海沟、秘鲁—智利海沟与日本海沟等的热流值资料。

60年代,由于活动论的板块构造理论的兴起,海底扩张、地幔对流等概念都认为海沟是“老化”洋壳开始向大陆边缘陆壳下面俯冲的地带。由于洋壳俯冲,部分洋壳重熔,导致大陆边缘形成了钙—碱质火山—深成弧(或陆缘弧形山链),后者便是大洋地壳沿俯冲带俯冲作用的有力证据。海沟与火山—深成弧两者有成因的内在联系,故称之为沟—弧系,它们呈平行延伸发育。在宏观上,沟—弧系是处于两板块相对运动的挤压构造环境,故将环太平洋的海沟,现今板块构造的聚敛型边界,并以含有蛇绿岩—构造混杂岩楔的加积体为特征。但在70年代后期先后于日本海沟、马利亚纳海沟、中美海沟的危地马拉段等,通过深海钻探与地震剖面信息均未发现蛇绿岩—构造混杂岩楔加积体,反之,发现较薄的没有变形沉积盖层,有的岩芯还含有张性裂隙,在海沟陆侧发育拉张型断陷盆地,具有拉张背景的构造特征及发育重力控制的滑塌堆积,此乃受俯冲构造侵蚀作用的结果,岛弧或大陆边缘外侧非但没有向大洋方向扩展,反而向大陆方向呈现沉降作用与后退,海沟向大陆方向推进。所以,若发育蛇绿岩—构造混杂岩楔加积体的海沟称为挤压—聚敛型边界,否则,称为拉张—聚敛型边界,现阶段环太平洋海沟主要属于后一类型,但它们之间在不同的时—空可以相互转化。

现代海沟主要沿太平洋边缘的陆壳与洋壳过渡带上分布,呈断续延伸的狭长深水槽。横剖面的陆侧先为宽浅的大陆架,后向大洋方向,坡度急剧变陡到3000m, K深为大陆斜坡,它可被次一级的深海平台与陡坡所交替。在3000m以下的沟壁变为陡立而延伸到海沟轴部,水深超过6000m以上。海沟轴部较为平坦接受较薄的沉积物。海沟向大洋侧以洋壳为基底,水深稍变浅到5500~6000m,然后过渡为平坦的洋盆,海沟外坡形成小型的边缘隆起,此由于洋壳进入海沟开始俯冲形成弯曲,其表面发育小型的拉伸断裂。总的来说,海沟为两侧不对称的陡壁,宽阔的V形轴部相对平坦。但海沟经常发生浅源地震与有关的断裂活动。

全球共有30条海沟,主要沿太平洋边缘分布,其中著名的有秘鲁—智利海沟、中美海沟、赛德罗斯海沟(加里福尼亚半岛西侧)、阿留申海沟、千岛—堪察加海沟、日本海沟、伊豆—小笠原海沟、马利亚纳海沟、雅浦海沟、帛琉海沟、西南日本—琉球海沟、菲律宾海沟、西南太平洋海沟(新几内亚海沟、西美拉尼西海沟、新不列颠海沟、东美拉尼西亚海沟、新赫布里特海沟、新喀里多尼亚海沟等)、汤加海沟和克马德克海沟等。此外,在大西洋水域有中美洲东侧的波多黎各海沟、凯曼海沟及南极洲附近的南桑德韦奇海沟。印度洋东北边缘的爪哇海沟及东地中海的爱奥尼亚—波利尼海沟等。

海沟的地球物理特征 (1)地震。据1961~1967年29000次地震的分布表明,主要地震活动特别是中、深源均和海沟有关,震中均集中于环太平洋边缘的狭窄带内。主要向大陆倾斜不同深度的震源面,习惯称和达—贝尼奥夫带(Wadati—Benioff Zone)。该带厚约数千米,震源集中可分上、下两密集带。俯冲带延伸最大深度可达600~700km,这也表明形成海沟的力量是在地表以下很深的地方。贝尼奥夫将其作为大陆地块与大洋地块间巨型挤压俯冲带。60年代,板块构造学者将它作为大洋板块的俯冲带(或称消亡带、消减带),海沟带就作为地球表面活动大陆边缘陆壳与洋壳的边界。(2)重力。1930年,迈奈兹(F. A. Vening Meinesz)首先于爪哇海沟发现一条—150~—400mGal的巨大重力异常带,称为“魏宁—迈奈兹带”。他认为这是由于海沟下面存在较轻的物质面出现质量亏损。也有人认为海沟被比重小的海水充填,重力也变小。但海沟附近的重力异常表明这里不存在

均衡平衡,形成海沟的力量必须与重力作用相反,拉着海沟下面地壳向下运动。因此,海沟带是地幔对流向下俯冲的地带。(3)热流值。洋中脊是新生洋壳,以高热流值为特征,随着新洋壳远离洋中脊而变得越远、越冷、越致密,比重变大而相应下沉,相应还接受一部深海沉积物。所以,到达海沟附近的“老化”洋壳具有较均匀的低热流值,约为 $46\text{mW}/\text{m}^2$ 。而进入海沟地带降为最低值,约为 $29.3\sim 33.5\text{mW}/\text{m}^2$,向火山弧地带重熔上升,超过 $83.7\text{mW}/\text{m}^2$ 。横穿沟—弧系,其热流曲线呈台阶状变化,海沟附近的等温线显著下降,反映大洋地壳俯冲的“冷却”效应。地幔对流理论认为洋中脊是热地幔上涌地带,海沟则是冷而重的洋壳下沉、俯冲,并重新返回到地幔深部中去。

海沟的地质作用 外来洋壳移置到海沟—俯冲带下沉、俯冲挤压,并和上覆板块前锋相互挤压为“铲刮作用”被强烈剪切成大小不一的碎块,又被海沟陆侧的原地复理石沉积物所胶结,形成蛇绿岩—构造混杂岩楔(Mélange)。在长期持续的俯冲作用下,由俯冲大洋地壳刮下的洋壳碎块组成向大洋方向呈一系列迭瓦状逆冲的构造混杂岩楔形体。新的楔形体插入老的之下,而老的楔形体被顶举升高、变陡,逐步拼贴于上盘外侧,于弧—沟间隙外侧形成构造高地(亦称非火山弧),构成弧前盆地的外缘。构造混杂岩楔在证明板块构造几何格局方面起了巨大的作用。弧前盆地沉积了半深海或浅海沉积物,使岛弧不断地向大洋方向扩展,新海沟相应也向大洋方向迁移。哈密尔顿(W. Hamilton, 1979)认为爪哇海沟较为典型。板块构造理论早期认为这是板块聚敛型边界的普遍现象,80年代以来则认为这种是挤压—聚敛型的海沟才发育典型的构造混杂岩增生楔。现阶段的环太平洋海沟大多不属此类。

70年代后期以来,对日本海沟、中美海沟南段等地的陆侧通过深海钻探与多道地震反射测量,并未发现蛇绿岩—构造混杂岩增生楔的加积体,或者规模非常小型。代之的是大陆边缘组分为重力滑塌沉积,钻探采集的岩芯也具有拉张构造特征,据地震剖面表明海沟极薄的沉积物静卧海底没有变形,日本岛弧陆坡的上白垩统不整合面之上为未变形的第三纪砂砾岩,向外发现由岛弧型钙—碱性和拉斑玄武岩序列组成而下沉的“黑潮古陆”。上述现象表明,那里的大陆边缘不仅没有被顶举起来,反而被俯冲的洋壳拽到深部去了。它的形成机制,首先决定沿海沟边缘碎屑物质的多少,后者控制构造混杂岩增生楔的发育与演化,其次是俯冲板块的地形,平坦地形有利于沉积物的增生,而崎岖不平地形导致幕式沉积俯冲和洋底隆起物体的幕式增生作用。特别是碎屑物质不很发育时俯冲板块缺乏一个沉积物的缓冲层。崎岖不平的地形对仰冲盘底部起到刨蚀作用,刨蚀的物质随着洋壳俯冲消亡,使上盘因重力而塌陷,后退,堆积了以大陆边缘或火山弧组分的重力滑塌杂岩体为特征。在横剖面被移走的大量物质,不能被岩浆作用所补偿,最终导致大陆或岛弧边缘后退,海沟相应向大陆方向推进。这以构造侵蚀作用为特征的边界称拉张—聚敛型边界,在环太平洋海沟多处出现。奥布埃(J. Aubouin)等强调俯冲构造侵蚀的普遍性与重要性。实际上,构造混杂岩增生楔加积与构造侵蚀两者在不同的时空上可以相互转化。如日本海沟于23Ma前,石英安山岩喷出后,便转入急剧下沉以俯冲构造侵蚀为主,岛弧边缘下沉达2000m。但到最近数百万年便开始发育小型的构造混合岩增生楔。

大洋内部有各种不同成因、规模的洋底高原。它高出海底数千米,而低于海面2000~3000m。它的组分有大洋亲缘的非正常洋壳组分,但厚度超过正常洋壳,也有属大陆亲缘的残块,它们随着大洋板块运移到达海沟附近,因具浮力不能下沉而与大陆边缘碰撞,上田诚也称为增生型碰撞。碰撞拼贴于大陆边缘的洋底高原则称为移置地体或外来地体等,简称为地体。有些小型大洋新缘的洋底高原,仅仅减缓俯冲的速度,但最终仍俯冲消亡。由于洋底高原的杂乱分布、不连续性,洋底高原的碰撞因时空不同而有差别,具有地区性。海沟俯冲带于碰撞前表现为一般的俯冲作用,然后因洋底高原的碰撞,整个大洋渐次缩小并未封闭,局

部的新海沟跳跃到已拼贴到大陆边缘的地体后侧开始新的俯冲。沿地体走向的两端点出现横向或斜向的转换断层(或走滑断层)。由于地体碰撞与俯冲的多次交替,但往往碰撞作用改造了俯冲作用的形迹。而大的造山带内也还因走滑断层作用将大量较小的“碎块”聚集起来,或者将“陆块”与碰撞的地体错成若干新的小块体。

极大部分的洋壳沿俯冲带俯冲到不同的深度而局部熔融上升,由海沟向岛弧方向分别形成岛弧型拉斑质玄武岩、钙—碱质火成岩与碱质玄武岩序列的岩石组合。其中以钙—碱质火成岩组合构成火山—深成弧为其特征,并伴生有以红柱石等为标志的高温型变质作用。而毗邻海沟—俯冲带的构造混杂岩楔内部伴有以闪石为代表的高压型变质作用。两类变质带的成对出现,有助于分析俯冲带的倾向,一般由海沟—俯冲带的高压型指向火山岛弧的高温型。这是沿大陆边缘洋壳俯冲形成大陆边缘火山—岩浆弧造山带(安第斯山)的模式。古老的海沟—俯冲带于大陆内部可见,它是反映古大洋当时的俯冲带的部位,称为古俯冲带,若大洋完全封闭,两侧大陆或大陆—岛弧、岛弧—岛弧直接碰撞则称碰撞带或焊接带,多见于两大陆之间(喜马拉雅山)。反映古洋壳残余的蛇绿岩—构造混杂岩带经强烈剪切,变形与变质出露的洋壳剖面也极不完整,便需要根据残留的蛛丝马迹及毗邻有成因联系的伴生构造、岩石组合等,重建该时沟—弧系或沟—弧—盆系被动大陆边缘等的构造轮廓。

海沟的成因 海沟成因的研究也是一项长期艰巨的任务。魏宁·迈奈兹强调重力异常将沟—弧作为“共轭”体系考虑,而认为来自大洋侧向压力作用于海沟迫使轻的上地壳向下形成褶皱,以负重力异常为特征,使较重的地幔物质于毗邻的岛弧下面向上挤以正重力异常为特征,但当时未涉及洋壳向陆壳下面俯冲概念。奎年(1936)认为深海沟的地壳向下弯曲,后被巨厚沉积物充填,再受到进一步压缩就形成大陆边缘的山脉。

20世纪50年代,以人工地震探测与重力测量为主要手段强调海沟属拉张背景的产物。60年代后期,板块构造理论崛起,按地幔对流假说解释,冷而重的较老洋壳前缘移向海沟时,因重力等拖曳洋壳沿着俯冲带下沉、俯冲。海沟附近明显的重力异常也表明附近没有均衡的平衡。频繁、密集的中深震源沿海沟分布,特别是与深而陡的海沟密切相关,这也表明海沟形成于地表以下很深处,它拉着海沟下面的洋壳向下俯冲,所以沿太平洋边缘便出现太平洋型的板块聚敛。然而,板块构造理论对于西太平洋的洋壳向大陆边缘俯冲,没有形成统一的一条深海沟。火山弧的凸面朝向大洋。最近发现海沟出现拉张构造背景的现象。构造侵蚀作用如何使密度小的陆壳型滑塌堆积物,下潜到密度大的地幔中去,而不致严重破坏地球上层质量均衡等现象。当前以板块构造理论探索海沟的成因是较合理的,但尚有很多现象有待于进一步深化与解决。总之,海沟的成因似乎不是简单的。

(南京大学叶尚夫副教授撰;卢华复审)

洋中脊 mid-oceanic-ridge 亦称中央海岭,它是大洋内部呈纵向延伸的巨型海底山脉。一般脊顶水深为2000~3000m,脊宽宽达1000~2000km,较窄者也有几十千米。其中以大西洋中脊最为典型,宽达3000km以上,占大西洋宽度的一半。洋中脊沿走向也有较大起伏,少数呈岛屿状稍露出水面,如大西洋的冰岛、亚速尔群岛和阿森松群岛等洋中脊除纵向呈波状起伏外,在横向上呈现出由许多平行的岭脊和谷地相间,其轴部为裂谷型谷地,如大西洋于37°N处的中脊裂谷宽可达30km,水深1500m,裂谷两侧为坡度从20°~30°到几乎直立的众多小阶梯。裂谷内几乎没有沉积物。随着远离洋中脊,其沉积物相应增加,导致洋中脊地形渐趋平缓而延伸到洋盆底部。沿走向又被许多近于垂直的转换断层所错断成几十到几十千米的小段。

洋中脊是现代板块构造的拉张(离散)型边界,它以众多、频繁的水平拉张型浅源地震与高热流值为主要特征,伴有频繁的海底火山活动,这些均标志着深部热地幔物质上涌形成新生的洋壳

的证据。洋中脊也是地球表面的巨型拉张构造,为板块的离散型边界。

19世纪70年代,英国“挑战者”号调查船作环球考察后,认为北大西洋中部有一条宏伟的海底山脉,1925~1927年,德国“流星”号用回声测深而得到证实,并认为在整个大西洋海域呈南北向延伸,长达17000km。1956年,尤因(Maurice Ewing)等发现北冰洋中脊,并认为它是大西洋中脊的延续,而进一步指出世界各大洋都有洋中脊存在,如太平洋中隆、印度洋中脊,彼此相接呈绵延不断的环球构造。

20世纪60年代,发现东太平洋隆不具有中央裂谷特征,与其它洋中脊有明显差异。1968年,瓦因(F. J. Vine)提出海底扩张理论,认为大洋中脊是否发育中央裂谷乃取决于海底扩张速度,大西洋等扩张速度为1~2cm/a(即一侧扩张速率),则发育典型中央裂谷。太平洋洋隆超过3cm/a,由于大量的上涌地幔物质充填而不发育中央裂谷。虽则两者在地貌上有所差异,但是在板块构造意义上,洋中脊与洋隆同属扩张中心与拉张边界。

1973年,法美大洋中部海底研究计划(FAMOUS)对北大西洋亚速尔群岛西南640km处的洋中脊两侧典型的对称磁异常条带研究表明,洋中脊的扩张速率大约为1.5cm/a,洋中脊裂谷宽约30km,谷底平坦,并测制了裂谷的详细地形。直接观测到火山与断层地形,测得微小地震与热量等,从而认为裂谷目前正在活动之中。

冰岛是大西洋中脊出露于水面的岛屿,有大规模玄武岩岩浆作用,对于研究洋中脊的构造与岩浆活动具有重要的意义。1964年,冰岛西南的大西洋中脊发生惊人的火山喷发,火山物质堆积形成的苏尔策依火山岛,并连续喷溢出基性熔岩与碎屑物质,时达数月之久。据观察,苏尔策依火山仅15天就升高达100多米。按冰岛构造研究表明它以2cm/a速率裂开。

根据50年代地震测深波速剖面表明大洋型地壳仅为陆壳厚度的1/3,厚度8km左右。整个洋壳剖面自上而下分为3个主要层序:(1)沉积层,主要由深海相钙质、硅质生物软泥组成,或参与部分的火成碎屑组分。背离洋脊而增厚,于深海盆地可达1~2km。通常于洋中脊附近缺失或极薄。该层波速以1.5~3.0km/s为特征。(2)火山岩层,主要为低钾拉斑玄武岩(即大洋拉斑玄武岩),间可夹有深海喷溢的枕状玄武质熔岩与玻璃碎屑岩。火山岩层表面极不平整,中下部有席状辉绿—辉长岩墙群为特征。地震波速为4.5~6.0km/s。1978年法国Cyana潜艇于加利福尼亚湾出口的东太平洋隆对枕状熔岩进行直接观察,于水下2300m深的火山带上发现了12个“黑烟囱”,其水温高达350°C,喷出含有重金属的硫化物热液。沿玄武岩枕边有蛤类及巨大管栖蠕虫生物等繁殖。1980年又在13~15°S的东太平洋隆上发现许多热液喷口,其沉积物中含有大量有经济价值的硫化物,类似塞浦路斯的铜矿床。(3)变玄武岩、辉长岩层亦称大洋型,主要由辉长岩、角闪岩及蛇纹石化橄榄岩等为特征,它是洋壳的主体。辉长岩可具有堆晶构造及微密块状。地震波速为6.5~7.7km/s。

洋中脊的主要地球物理特征有以下几方面:(1)地震。据1961~1967年全球29000次地震(≥4~5级)震中分布表明,95%的地震均集中于一些狭长带内,而大部分集中于环太平洋边缘和沿阿尔卑斯—喜马拉雅地震带。而沿各洋中脊的地震仅占释放总能量的5%,它表现为频繁的浅源地震,构造上以拉张正断层为特征。它又与前者以挤压背景的中、深源地震带相接。勒比雄(X. Le Pichon, 1968)以地震带为依据,将全球岩石圈划分为6大板块,其中,沿大西洋与印度洋中脊为界将两侧洋壳和有关大陆分属为美洲板块、非洲板块、印度—澳大利亚板块与南极洲板块等。70年代,将太平洋水域内以东太平洋隆与加拿大西侧海域的戈尔达—胡安·德富卡洋脊东西两侧相应,再分出太平洋板块主体及小型的纳兹卡、可可斯及胡安德富卡等板块,全部以洋壳为特征。以洋中脊为板块的边界称离散型边界,它是新洋壳的产生和增长的构造部位,并导致两侧洋壳以传送带的运动模式远离洋中脊,而使海底扩张。波速资料又表明洋中脊下部

有7.3~7.8km/s的波速层而高出正常洋壳,但又低于正常地幔称其为异常地幔,它是洋中脊所特有,也是使洋中脊隆起的主要原因,洋中脊岩浆作用的基础。洋中脊两侧的低速上地幔,其单侧宽度达10~400km。(2)热流值。洋中脊热流值从小于209mW/m²到大于209mW/m²,东太平洋隆有几处高达335~419mW/m²,高值主要出现在两侧约50~150km区间,远离洋中脊而减小,但是洋中脊上同时也出现低值,所以洋中脊以高热流值和多变为特征。(3)磁异常与磁异常条带。洋中脊下伏的异常地幔上涌,冷却到居里点以下形成新洋壳,其磁性矿物按当时磁场方向磁化,测得磁场强度与海底正常磁场之差,分别称为正或负异常,它们相互呈带状,与洋中脊平行呈对称排列,洋中脊附近磁场强度较大,向两边变小。每一条带宽达数千米到数千米,纵向延伸达数十千米常被转换断层错断。瓦因与马修斯(D. H. Matthews, 1963)认为海底磁异常条带并非海底岩石磁性强弱的反映,它是因地幔磁场每隔数万到数十万年发生周期性的倒转,即地磁南、北极周期性的颠倒背景下,而海底不断新生与扩大,在洋壳上记录了地磁场转向的历史。就现今北半球而言,地理北极与磁场北极基本一致,仅有11.5°的磁偏角,而称为正磁场。正向磁化的海底强化了地磁场的强度而出现正磁异常。若地磁场北极倒转与地理南极一致称为负向磁场,因而减弱了地磁场强度而出现负磁异常。正、负磁异常条带的宽度与正、负地磁场所经历的时间长短成正比。若海底扩张速率不变,其比例系数为海底扩张速率。地磁场的倒转是全球同时发生,奠定各大洋磁异常图案的可对比性。考克斯(A. Cox, 1969)根据钾氩法测定洋底熔岩的年代而得到距今大致450万年来地磁场倒转年代表。海尔兹勒等(J. R. Heirtzier)以南大西洋为根据,运用外推法使地磁年代表大大地向前延伸到8000万年以前。自那时以来,曾发生171次的地磁场倒转,并将其关键性磁异常条带统一编成1~32号。洋中脊顶为1号(即现今),编号数越大代表年代越老。海底磁异常条带起到等时线的作用,可以勾划出各大洋洋壳的年龄。同时,反映最年青的洋壳形成于洋脊及以后海底扩张的图案。

海底扩张理论认为洋中脊为异常地幔上涌,冷却成新洋壳,被增生到正向两侧扩张板块的底部,并随其作背向运动,所留下的空间又为后继的上涌岩浆作类似的作用。远离洋中脊的洋壳继续变冷、致密,于其上部接受深海相沉积,整个洋壳组分加厚。当其运移到海沟处俯冲,下沉回到地幔内部。

洋中脊附近热而轻的异常地幔使洋中脊形成高位环境的地貌,为板块的背向运动提供一种重力体力的分力以及新生洋壳的侧压力,驱使板块向两侧运动。这便是60年代解释板块构造运动的传送带模式的重要依据。70年代,上田诚也分析作用于板块上有8种力,认为上述的脊推力仅是3类驱动之一,而不是主要的。

大西洋中脊的演化史,表明东西两侧大陆自中生代晚期与新生代早期由统一的泛大陆先后分裂,作相对的背向运动,大陆之间便扩张成现今的大西洋,其洋中脊基本上保持着中线位置,距两侧大陆大致相等,扩张速率也近似。而东太平洋隆的位置偏离中线,靠近南美大陆侧。太平洋西侧最古老的洋壳为侏罗纪,位于马里亚纳海沟东侧,而东侧为渐新世(位于秘鲁—智利海沟附近)。这种洋中脊两侧洋壳时代不对称现象或许因美洲板块向西仰冲,纳兹卡大洋板块向东俯冲速率较快所致。

其次,中生代太平洋水域内大洋板块可划分为库拉板块、法拉莱板块、菲尼斯克板块与“太平洋板块”。彼此均以洋中脊为界,随着上述三者大洋板块向北、东北与东向大陆方向移动,相应的洋中脊也相应随着移动,而向大陆下面俯冲。中生代晚期,库拉板块全部俯冲到亚洲与部分美洲大陆之下,法拉莱板块与菲尼斯克板块分别俯冲到北美与南美大陆之下,各自残留成现今的戈尔达—胡安·德富卡板块、可可斯板块和纳尔卡板块。“太平洋板块”便相应扩展为现今大型的大洋板块,构成现代太平洋水域内板块构造的格局。

洋中脊是板块构造的离散型边界,也是生长新洋壳的地带,

它提供了新生洋壳、海底扩张、地幔对流等理论的极为重要的信息。洋中脊对于板块构造理论的发展具有重要的意义。

参考文献

- 1 Vacquier V. *Geomagnetism in Marine Geology*, 1972
- 2 Coulomb 著, 海底扩张与大陆漂移. 刘光鼎译. 北京: 海洋出版社, 1980. 13~80
- 3 怀利 P J 著, 地球是怎样活动的. 张崇寿, 等译. 北京: 地质出版社, 1980. 13~14, 34~50
- 4 小林和男著, 海洋底地球科学. 袁家义, 吕先进, 译. 北京: 海洋出版社, 1980. 13~173
- 5 上田诚也著, 海洋底板块构造. 于纯仁, 等译. 北京: 地质出版社, 1986. 86~102

(南京大学叶尚夫副教授撰; 卢华复审)

波浪状镶嵌构造说 hypothesis of the crustal-wave mosaic structure 是一种阐明地壳的统一构造格局及地壳运动规律的理论假说。该学说认为, 整个地壳的构造是由大小不同的地壳块体和大小不同的活动带镶嵌而成的复杂构造图案, 这就是地壳的镶嵌构造; 同一级别的活动带与地块带相间分布, 在构造地貌上显示峰—谷起伏及疏—密相间, 并具有近等间距性, 这样的构造就是波浪状构造; 全球地壳表现为几个系统的一级套一级的活动带与地块带的定向排列, 因而在几个方向上表现出一级套一级的波浪状构造; 地壳几个系统的、从宏观到微观级相套的地壳波浪状构造的交织与叠加, 形成十分复杂, 但却有一定规律的镶嵌构造图案, 这就是地壳的波浪状镶嵌构造。

1959年, 张伯声通过对华北和华南地质发展异同的分析, 提出了“天平式运动”原理, 认为相邻二地壳块体在各地史时期内都以它们之间的活动带为支点带作天平式的摆动, 同时支点带本身也做激烈的波状运动, 并认为这种“天平式运动”(1974年后改称“天平式摆动”)具有普遍性。1962年, 张伯声根据2次大战后国际地学界在研究全球构造(尤其大洋区构造)方面的最新进展, 提出了“镶嵌的地壳”的观点, 认为整个地壳是由大小不同级别的活动带将其分割为大小不同级别的地壳块体, 然后再把它们焊接(或镶嵌)起来的构造, 并称之为地壳的镶嵌构造。

1964~1965年, 张伯声把地壳的镶嵌构造同相邻地块的天平式摆动统一起来考虑, 引申出地块波浪, 进而建立了地壳波浪运动的概念, 并指出全球地壳有四大波浪系统(即北冰洋—南极洲波系, 太平洋—东非波系, 印度洋—北美波系和南大西洋—西伯利亚波系)。这一观念是将地球四面体理论(地球四面体理论是建立在收缩说基础上的一种地球构造动力学假说, 认为地球的演化由于体积的不断收缩而呈向四面体过渡的趋势, 从而地球表面大陆与大洋的分布呈四面体4个顶角和4个面心的两两对称关系, 该理论19世纪中后期曾在西欧流行一时, 到20世纪初, 随着收缩说的逐渐衰落而被科学界多数人所冷落)从收缩说的营垒解脱出来, 纳入到以收缩为主要趋势的脉动说范畴之后的更新与发展, 因而张伯声的这一观念及其后的研究进展, 均被称为“新四面体理论”。

张伯声和王战(1974, 1978, 1980, 1985)注意到了由于地球脉动所派生的地球自转速率变更而形成的构造, 尤其是斜向的X型共轭断裂网络对地壳波浪状镶嵌格局的重要影响, 并强调地质构造的近等间距性及其级相套性, 以及在找矿和地震研究方面的意义。1983年, 张伯声和王战指出了地球演化所表现出的10亿年的阶段性及20亿年的大周期, 以及次级的2亿年的周期性和更小的周期。由此而形成了地壳的波浪式演化与地壳的波浪状构造相统一的时空观。

郝家璋等(1984, 1986)在“新四面体理论”的基础上提出了地壳的驻波运动, 即地球在脉动过程中表现为正四面体和负四面体(设北极处于顶角部位为正四面体, 处于面心部位为负四面体)的反复转换。王战(1988, 1990)进一步指出这种驻波运动是多级的, 并建立起“地球多级驻波式脉动”的理论模型。

该学说发展到90年代初其主要观点可作如下概括: 地球在演化过程中进行着周期性的收缩与膨胀相结合而以收缩为其主要趋势的脉动, 这种脉动是大周期中套有次级、更次级小周期的驻波运动, 因而地球的演化呈现出“准球体→负准四面体→准球体→正准四面体→…”的反复变换, 从而周期性地激发全球四大地壳波浪系统的活动, 使全球造山带的分布具有规律性, 造山运动具有旋回性; 脉动又导致自转速率的周期性变更, 从而产生全球X型共轭构造网络, 这种斜向构造网叠加于四大地壳波系之上, 使全球地壳形成以斜向为主的波浪状镶嵌构造格局; 由于地壳波浪的级相套, 从而导致它们相互交织、叠加后形成的镶嵌构造也级相套, 即高一级的地壳块体可分为次一级的活动带和次一级的块体, 高一级的活动带内也包含着许多次一级的活动带及许多小型地壳块体。全球第一级的镶嵌构造是环太平洋、特提斯两个环球性活动带与劳亚、冈瓦纳、太平洋3个壳块的镶嵌。最低级别的镶嵌构造见于显微镜下。活动带、岩浆带、沉积带、变质带以及成矿带等空间分布的近等间距性及其交织、叠加和干涉的特征, 都是石化了的地壳波浪遗迹。该学说还认为, 地球的多级驻波式脉动, 是大陆起源和演化的根本驱动机制, 因而也是多数全球性重大地质事件的共同起因。如早期陆核的分布特征, 恰恰反映了第1代和第2代准四面体(分别为负、正准四面体)的顶点所在位置; 北大陆地壳成熟度普遍高于南大陆, 恰是它们属于不同世代的证明; 南极洲和北冰洋的对蹠性, 表明地壳演化中先在性对后期地表形态的影响; 全球性海侵事件多与冷事件近乎同时, 是准球体阶段的产物, 此时洋—陆地貌差异减小, 地球因膨胀而吸热; 全球性海退事件、热事件以及造山运动、推覆构造等近于同时, 是准四面体(无论正、负)阶段的产物, 此时洋—陆地貌差异增大, 水平挤压力增大, 地球因收缩而放热; 正、负准四面体的变换又导致了全球裂谷作半球规模的周期性转换以及次一级的海水进退的半球性变更; 地磁极性呈“多变—不变(正向)—多变—不变(反向)”的阶段性反复, 恰是地球演化的驻波运动模式“准球体—负准四面体—准球体—正准四面体”形态转换对外核液态电离层形态的制约而导致的磁效应; 磁极在准球体阶段的多变, 是次级驻波运动所造成的次级正、负准四面体的反复变更的结果, 因为磁极反复多变阶段的磁场强度一般均小于磁极持续长期不变阶段的磁场强度。

该学说强调中国地壳的活动性(非地台性), 认为中国恰恰处在环球2大构造活动带(环太平洋与特提斯)在东亚的T字型接头地区, 北东向的环太平洋构造活动带各分带同北西向的特提斯构造活动带各分带的交织, 其结果是编织而成斜方格网状的中国构造网。构造网上任何部位, 均兼具环太平洋和特提斯构造的双重特征。构造活动带的分带根据其构造的相对活动程度分成构造带和地块带, 二者相间排列, 近等间距分布, 可以认为是一种沿水平方向传播的地壳纵波(疏密波)。构造带与构造带的交织形成构造结, 是构造活动强烈部位; 地块带与地块带的交织形成构造网眼, 称为地块, 是构造活动性相对和缓的部位, 具有山间地块性质; 构造带与地块带的交织, 则显示出构造带的单一优势构造方向, 形成构造网线, 称为构造段, 其构造活动性一般介于地块和构造结之间。中国构造网上不同部位的上述构造特征, 也就决定了不同部位的成矿特征: 内生矿产多分布于构造结, 外生矿产多分布于地块和构造段, 其中油气资源又多分布于地块之中, 煤炭及沉积成因的铁铝锰磷等多分布于构造段以及地块边缘; 同内生、外生作用均有成因联系的夕卡岩矿床, 则多分布于构造段。并受其内潜着的同构造段优势构造呈互补构造关系的构造的叠加作用的控制。按照波浪状镶嵌构造学说的划分(1986, 1989), 中国地壳在中国构造网中共占有159个基本镶嵌构造单元, 其中构造结43个, 地块38个, 环太平洋构造段40个, 特提斯构造段38个。该学说还认为, 由于从东南向西北传播的环太平洋构造波浪(详见“环太平洋构造波系”条)和从西南向东北传播的特提斯构造波浪(详见“特提斯构造波系”条)相遇之后相互间所产生的干涉作用, 形成了一条北起西伯利亚中部、南至印支半岛

蜿蜒曲折纵贯亚洲大陆中东部地区的构造活动性相当强烈的地带,称为东亚镜像反映中轴带(详见“东亚镜像反映中轴带”条)。该带同地震活动及矿产分布均有较密切的关系,是中国大陆地壳中不容忽视的一条活动带。

波浪状镶嵌构造说在其建立后的30年间,对中国大陆内部地壳构造的波浪状演化特征研究较多,而对洋—陆边缘附近构造特征的研究比较薄弱,模拟实验及定量化研究也较少,对地壳以下的深部构造特征的研究和认识正有待深入。但由于该学说在建立之初就放眼全球,牢牢地立足于对全球构造的系统论分析,并在80年代中后期建立了地球的正、负准四面体多级驻波脉动理论模型,全面地涉及到了地球演化的一系列重大问题。今后,该学说很可能在下方取得重要进展:上地幔的波动;地球的多级驻波式脉动演化同各圈层的形成与演化的关系;拉张构造与压缩构造(即裂谷与推覆构造)在时间上和空间上的波动式互换;地球多级驻波脉动与地磁极性倒转现象的必然联系的细节;全球气候变迁或波动的细节及其同全球性海侵—海退、造山和岩浆事件相耦合的程度;地球化学旋回同成矿作用的时空波动规律;地球演化过程中的灾变事件的周期性及其同更大天体的波动式演化的关系。

参考文献

- 1 张伯声.地质学报,1962,42(3):275~288
- 2 陈国达,等.中国大地构造问题.北京:科学出版社,1965.66~95
- 3 地质部书刊编辑室.国际交流地质学术论文集——为26届国际地质大会撰写.北京:地质出版社,1980.55~60
- 4 张伯声.中国地壳的波浪状镶嵌构造.北京:科学出版社,1980.1~90
- 5 张伯声,等.西安地质学院学报,1983,1:1~7
- 6 张伯声,等.西安矿业学院学报,1983,2:1~13
- 7 马宗晋,等.国际交流地质学术论文集——为27届国际地质大会撰写.地质出版社,1985.165~173
- 8 张伯声主编.地壳波浪与镶嵌构造研究(2).西安:陕西科学技术出版社,1986.272~280
- 9 王战.西安地质学院学报,1990,12(2):38~45
- 10 王战.地质构造学刊,1991,1(1):1~11

(西安地质学院 张伯声 院士、
西北大学博士生导师王战教授撰)

环太平洋构造波系 circum-pacific tectonic wave system 由位于中国及邻近地区地壳的一系列类平行的北北东~北东~北东东向构造带与地块带组成,二者间互排列,呈近等间距分布,在区域上形成一疏一密相间排列的构造格局,张伯声和王战(1986)主编四百万分之一《中国波浪状镶嵌构造图》时,将这些大体呈北东向疏密相间排列的构造归之于环太平洋构造波系,并将其中的构造带和地块带分别用 Ct (C=Circum-Pacific, 环太平洋; t=tectonic zone, 构造带) 和 Cb (b=block zone, 地块带) 表示。由东南向西北方向排列,环太平洋构造波系的分带依次为: Ct₁—钓鱼岛—台湾山构造带; Cb₁—东海—南海地块带; Ct₂—东南沿海构造带; Cb₂—黄海—湘桂地块带; Ct₃—长白—雪峰构造带; Cb₃—渤海—川滇地块带; Ct₄—燕辽—太行—龙门山构造带; Cb₄—松嫩—陕甘宁地块带; Ct₅—大兴安—贺兰山构造带; Cb₅—阿拉善—藏东地块带; Ct₆—沙拉扎山—珠穆朗玛构造带; Cb₆—柴达木—羌塘地块带; Ct₇—额尔古纳—阿尔金构造带; Cb₇—哈密—塔里木地块带; Ct₈—博格达—哈尔克构造带; Cb₈—准噶尔—伊犁河地块带; Ct₉—西北准噶尔构造带。构造带又称波密带,地块带又称波疏带,它们至少在中生代前已经形成,并在其形成之后的历次构造运动中都有活动。

环太平洋构造波系同特提斯构造波系相交织,形成中国波浪状镶嵌构造网(见“特提斯构造波系”条及“波浪状镶嵌构造

说”条)。

中国的环太平洋构造波系只是广义的环太平洋构造活动带的一部分。环太平洋构造活动带围绕太平洋壳块分布。狭义的环太带指太平洋四周的岛弧—海沟系,又称环太带的内带;而广义的环太带则由岛弧—海沟系向四周加宽到大陆内部一定的范围(环太外带),这里均有同环太内带类平行的造山带及活动型沉积注陷,它们基本上同步活动或作规律性迁移。这些地带都是当今地壳运动剧烈地区。对于环太平洋构造活动带出现的最早时期的认识,地质界多有分歧,传统的看法是始于中、新生代,主要是以环太内带发生造山作用的时间为依据;二次世界大战后,随着海洋地质研究的进展,多数学者又以在太平洋内部发现的最老沉积地层是侏罗系或略老为依据,认为环太带出现的时间只能略晚于太平洋,故倾向了侏罗—白垩纪;但20世纪70年代中后期以来的研究表明,无论在西太平洋岛弧带(如日本)或东太平洋岛弧带(科迪勒拉山系)内,中、新生代褶皱层之下都至少有古生代的活动型沉积地层存在。由此看来,太平洋及环太带出现的时间至少应比侏罗纪早得多。

对于华东南区地壳演化,张文佑(1984)、郭令智(1980,1986)等的研究表明,从雪峰山构造带向东,依次发育着同西太平洋现代岛弧—海沟系类平行的从晋宁期至喜马拉雅期各个不同构造时期的造山带。

张伯声(1965,1980)认为全球地壳的一级构造图案表现为三大壳块(劳亚、冈瓦纳和太平洋)同两大构造活动带(环太平洋和特提斯)的镶嵌;环太带和特提斯带在东亚地区相交接,并在这里加宽成一个三角形的活动地区,将中国地壳全部囊括其中。这里的北东向构造(东部呈北北东,西部呈北东东)均被视为环太平洋构造波系的一部分,因为它们都受环太内带活动的影响而同步(或依次)活动。

张伯声(1965,1966)还认为环太平洋构造活动带是环球四大地壳波浪系统之一的太平洋—欧非波系一系列同心环带中的大圆构造带。中国东部地区的环太平洋构造波系所属各构造带都是这个大圆构造带上的组成部分;而在西部地区,环太平洋构造波系的构造带多呈北东东向,它们虽然仍受环太带影响而同步(或依次)活动,但也在一定程度上受到特提斯构造活动带活动的制约,主要是北冰洋—南极洲波系和印度洋—北美波系对其有一定的牵就作用。

钓鱼岛—台湾山构造带(Ct₁)是西太平洋岛弧—海沟带上的一个段落,它构成中国构造网的东南边框。原来人们把它作为一个喜马拉雅期的构造带,随着地质构造学研究的进展,表明它初始形成的时期可能是海西—印支期,在其后的燕山期和喜马拉雅期则表现出了更强烈的活动,当今的构造形态大体上在第三纪末至第四纪初已基本形成。钓鱼岛—台湾山构造带同西太平洋岛弧—海沟带的其它多数段落相比较,有着很大的特殊性,尤其是岛弧凸进的方向是朝向大陆一侧,同其它段落一般均朝太平洋方向凸进恰恰相反。张伯声和王战(1986)认为,台湾山地段的向西凸进,同华南广大地区古生代(甚至可追溯到元古宙)以来各个时期的构造带的凸进方向是完全一致的。从西向东排,龙门山、雪峰山、武夷山、台湾山,四者在其构造线的展布方向上表现出惊人的类平行性。这表明整个华南地壳比华北地壳柔弱,因而在地史时期太平洋壳块向西偏北方向的多次波浪式(间歇性或脉冲性)挤压过程中,华南地壳便出现向西偏北方向推进的趋势,并形成从老到新不同时期向西凸出的类平行的反岛弧形构造带。

王战(1991)通过对中国东部大陆地壳演化史的分析指出,分布在华北新太古克拉通东侧的鞍山群(Ar₃),代表地壳沿北北东向张裂的产物,在其以东的地壳,无论在成熟度或演化史方面,均同以西有较大的差异,从辽中到华南的雪峰山,即大体沿现今的郯庐断裂带和武陵山断裂带,应是太平洋壳块同外太平洋壳块(劳亚+冈瓦纳)的初始分界,在其后的地史时期中,该分界逐步东移,其发展顺序及特征是:新太古(Ar₃)鞍山绿岩带,古元古(Pt₁)胶辽拗陷槽,中元古(Pt₂)江南(东安)裂谷,新元古至加里

东(Pt_3-P_2)浙赣拗陷槽, … 这种裂谷与拗陷的交替出现, 代表了环太平洋构造波系张—压交替的波浪式演化过程。饶有趣味的现象是, 在将环太构造波系的这些拉张型与挤压型带状沉积出现的时间同特提斯构造波系(见“特提斯构造波系”条)加以比较之后可以发现, 二者在相同的地质时期其性质恰恰是相反的; 前者处于拉张状态时, 后者则为挤压状态, 反之亦然。二者在构造方向上的大体正交和在构造性质上的这种相反表现, 可以称做二构造波系的构造互补作用(tectonic cooperation, 或称构造协作)。

在环太平洋构造活动带的研究方面, 各分带(构造带及地块带)形成的时期、性质及其同成矿作用的关系将继续作为研究的热点, 这中间还涉及到太平洋壳块最初形成的可靠时间、它同外太平洋壳块间有说服力的分界线以及这个界线是基本固定的还是在逐步移动着, 即大陆地壳是以何种方式增生的。

参考文献

- 1 张伯声, 等. 西北大学学报(自然科学版), 1974, 1: 7~17
- 2 张伯声. 中国地壳的波浪状镶嵌构造. 北京: 科学出版社, 1980. 8~36
- 3 中国地质学会构造地质专业委员会. 构造地质学进展. 北京: 科学出版社, 1982. 26~33
- 4 张伯声. 张伯声地质文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1984. 86~180
- 5 张文佑. 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社, 1984. 197~201
- 6 中国地质学会等. 国际前寒武纪地壳演化讨论会论文集(1). 北京: 地质出版社, 1986. 30~33
- 7 Wang Zhan. Proceedings, IGCP Project 321, 1991, 239~244
(西北大学博士生导师王战教授撰)

东亚镜像反映中轴带 east asian reflectional axis

是一条纵贯亚洲大陆地壳中东部近南北向的构造活动地带, 它将中国及其邻区大陆地壳明显地分隔为东西二部, 二者的构造线展布方向大体上以其为对称轴形成镜像反映。张伯声和王战(1974)首先明确指出该带的存在并使用了“东亚镜像反映中轴带”这个名称, 他们在随后(1977)编制的千万分之一《中国大地构造图(根据“镶嵌构造波浪运动”学说编制)》中, 清晰地标出了该带的分布范围。其实, 中国地质学界早在20世纪30年代初即已意识到这条构造带的存在。李四光(1931, 1933)提出东亚中部地区存在着一些山字型构造, 其中3个最大的山字型构造(自北而南为: 伊犁库次克山字型, 中国北部山字型[后改称祁吕贺山字型], 金沙江山字型)的脊柱分别为: 普里莫尔斯克山脉, 贺兰山脉和陇山山脉, 龙巢山脉。这3个山字型的脊柱实际上都断续处于东亚镜像反映中轴带上。黄汲清(1945)建立“糜棱地轴”时, 认为糜棱地区以磨盘山片麻岩带及金沙江和滇中的震旦带构成一个南北向的巨大前寒武纪地块, 它形成两个不同地质区域的分界线, 所以称为轴。中国地震学界也在40年代即认识到从宁夏到云南有一条大致呈南北向分布的地震震中密集带, 并从50年代起通称之为“南北地震带”。张文佑等(1959)进一步明确指出, 以贺兰山—六盘山—龙门山—横断山为界, 东西地质构造有显著不同, 以东的构造走向大致呈东北方向, 属华夏构造系, 以西大致呈北西方向, 称“西域构造系”, 并认为它们全部形成颠倒的“个”字型构造, 其尖端大致与西伯利亚地台的尖端在一条南北线上。张文佑认为这条南北构造带是牵就北北东和北北西向的X型交插断裂带而形成的, 所以有些地方呈锯齿状。张伯声(1965)在全面分析了中国地壳的镶嵌构造特征之后明确指出, 在东亚, 从西伯利亚地台到越南地块, 存在着一个套一个的巨大山字型构造, 合起来可以叫做“东亚套山字型构造”, 并指出不但其东的华夏构造线与其西的西域构造线呈镜像反映, 而且其东的构造带和地块多作正S形状, 其西的构造带和地块多作反S形状, 它们也恰成镜像反映。张伯声和王战(1974)正是在“东亚套山字型构

造”脊柱的基础上正式建立“东亚镜像反映中轴带”的, 对于其形成机理的解释, 当时主要是求助于地球自转速率的变更以及由此而导致在东亚地区作“品”字形排列的西伯利亚地台、印度地台和太平洋壳块这三者之间的相对挤压和剪切效应。从1977年起, 张伯声和王战在其论述中国地壳波浪运动与镶嵌构造的一系列论著中, 从地壳波浪的基本原理出发, 愈来愈深入地探讨了“东亚镜像反映中轴带”的基本特征和成因机理, 其中尤以对中轴带在不同段落的不同特征性表现和对两大地壳构造波浪系统相遇之后的干涉现象的论述最为重要。

王战(1987)经过对东亚镜像反映中轴带进行全面剖析之后认为, 该带在地质构造上鲜明地显示出北东向和北西向构造的交互组合特征。它的不同段落, 在构造形态上表现为4种类型: (1)一系列向南凸出的“弧形”构造的“弧顶”部位; (2)北东向构造与北西向构造相交叉而形成的棋盘格式构造; (3)以北北西方向或以北北东方向为主的构造; (4)基本呈南北方向展布的强烈挤压构造。其中(1)类型以甘南—川西北段落为代表, 即中轴带在通过甘南到川西北地段时, 北起西和、经武都、南到松潘—平武一带, 地层的展布表现出一系列的向南凸出的貌似弧形构造的特征, 前人曾命名这里为“武都弧”。但在“武都弧”建立之后地质界一直对其是否真正的弧形构造争论不休, 恰恰反映出这里同典型的弧形构造尚有一定差异, 其成因机理、运动特征也均不相同。通过大比例尺地质调查, 发现这些向南凸出的“弧形构造”实为一系列北东走向和北西走向的地层所作的麦穗状交叉, 同一“弧形”的“东北翼”与“西北翼”的发育情况都不对称, 两“翼”岩相较难对比, 一般均以“弧顶”附近为岩相发生变化的过渡地带。这些现象表明, 在不同地史时期中形成的这些“弧形”都不是在具有真正的弧形构造应具备的地应力场中所产生出来的构造形迹, 而是一系列北东向构造和北西向构造在其基底地壳较弱的情况下的巧妙联合。类似的构造类型还见于中轴带的蒙古段, 所谓的“蒙古弧”实际上也是一系列的麦穗状交叉。(2)类型见于贺兰山西北侧的内蒙阿拉善左旗境内, 在这里的戈壁滩上有大量斜方形构造交织的棋盘格式断裂构造发育, 它代表着北东与北西构造在较坚硬地壳基底的情况下所发生的脆性形变的联合。(3)类型见于六盘山及龙门山地段, 六盘山脉的北北西方向和龙门山脉的北北东方向都是再明显不过的, 对于它们构造的斜向性没有争议, 这些地段都是中轴带在靠近以北西向构造或北东向构造为主的构造段时所表现出来的以构造段的优势方向为其主要构造方向。(4)类型见于川西南及滇中地段, 这里在宏观上表现为近南北向的断条及南北向展布的挤压褶皱, 但在大比例尺地质图上仍然表现为次一级或更次一级构造的斜向网状交叉, 此外还可发现在中轴带这些段落的内部或外侧, 常含有或相伴有一些长轴呈南北方向的菱形小地块, 这种小地块可以视为在斜向应力作用下形成的挤压凸镜体, 其斜方形状可以作为中轴带是由北东和北西方向的斜向构造所组成的一种佐证。

中轴带除了上述的分段性和蜿蜒性(时而北东、时而北西)特征之外, 还具有边界的不确定性。它不具有用传统的岩相古地理分析法划分构造单元的确定性指标, 它同其东西两侧的构造单元常呈过渡状态, 因而“波浪镶嵌学说”把它视为中国构造网上的附加构造, 然而中轴带仍有其明显的统一性。各种地球物理特征和新构造运动的强烈活动性, 都有力地支持该带的存在。

关于中轴带的成因, 按照“波浪状镶嵌构造说”的最新解释, 归结于两大斜向构造波系相遇后所产生的构造波的干涉现象。自东南向西北传播的环太平洋构造波系同自西南向东北传播的特提斯构造波系在传播过程中相遇, 两大波系前锋在相遇后的叠加, 必然掀起近南北向的地壳轩然大波, 由于中轴带所经地区基底性质的不同, 因而具有不同的分段性特征, 两大构造波系相对强弱的变化, 导致中轴带在不同段落分别显示出北东或北西向的优势构造。波浪干涉原理还决定了在同一地史时期中轴带上从南到北构造强度和构造高度的波浪式规律变化, 以及地震震中在中轴带上作由北向南和由南向北的波浪式迁移。

王战(1986)还将两大构造波系相互干涉形成东亚镜像反映中轴带的原理拓宽,应用于地质构造同气象灾害关系研究,提出在亚洲大陆中东部与东亚镜像反映中轴带相呼应,还存在着一个“气象中轴带”,其每年的左右摆动状况决定着旱涝灾害的分布状况。

由于东亚镜像反映中轴带在中国区域构造研究中的不容忽视性,以及它同地震灾害和一些内生矿产关系的密切性,构造学界、地震学界和矿床学界都把该带作为一个重要的研究对象。

参考文献

- 1 张伯声,等.西北大学学报(自然科学版),1974,1:7~17
- 2 张伯声,等.西北地震学报,1980,2(2):3~15
- 3 张伯声主编.地壳波浪与镶嵌构造研究.西安,陕西科学技术出版社,1982.12~13:25~72,76
- 4 王战.灾害学,创刊号 1986,38~41
- 5 Wang Zhan. International Symposium on Tectonic Evolution and Dynamics of Continental Lithosphere, Abstracts, 1, Beijing, 1987.153~154

(西北大学博士生导师王战教授撰)

特提斯构造波系 tethyan tectonic wave system 由位于中国及邻近地区地壳的一系列类平行的北西西—北西向构造带与地块带组成,二者间互排列,呈近等间距分布,在区域上形成一疏一密相间排列的构造格局,张伯声和王战(1986)主编四百万分之一《中国波浪状镶嵌构造图》时,将这些呈北西向疏密相间排列的构造带归之于特提斯构造波系,并将其中的构造带和地块带分别用 T_t ($T = Tethys$, 特提斯, $t = tectonic\ zone$, 构造带) 和 T_b ($b = block\ zone$, 地块带) 表示。由西南向东北方向排列,特提斯构造波系的分带依次为: T_{t1} —喜马拉雅构造带, T_{b1} —滇南地块带, T_{t2} —西昆仑—哀牢山构造带, T_{b2} —叶尔羌—滇东地块带, T_{t3} —东昆仑—珠江构造带, T_{b3} —柴达木—四川地块带, T_{t4} —祁连—秦岭—大别构造带, T_{b4} —准噶尔—河淮地块带, T_{t5} —阿尔泰—沂蒙构造带, T_{b5} —查干诺尔—渤海地块带, T_{t6} —辽河—辽东构造带, T_{b6} —呼伦贝尔—嫩江地块带, T_{t7} —额木尔—小兴安岭构造带, T_{b7} —黑龙江地块带。这些构造带最早出现的时期尽管并不完全一致,但它们至少都是在中生代之前已经形成,并在其形成之后的历次构造运动中都有活动。

特提斯构造波系同太平洋构造波系相交织,形成中国波浪状镶嵌构造网(见“环太平洋构造波系”条及“波浪状镶嵌构造说”条)。

奥地利修斯(E. Suess)于1904年首先使用特提斯来命名中生代时存在于欧亚大陆中南部、直至东南亚和大洋洲北部岛区的古海域。由于现今的地中海正是这一大片东西向延展甚远的古海域在经历多次造山运动之后的残余,所以地质界便将特提斯作为各地质历史时期“古地中海”的同义语,但对特提斯海最早出现的时期颇具争议,传统看法认为始于二叠纪到三叠纪早期,以浅海生物群的对比为准,一些学者则认为始于早古生代,以特提斯海(或洋)南北两侧的生物群各自能够对比为原则;另有认为始于元古宙甚至太古宙者,以北大块(劳亚)和南大陆(冈瓦纳)之间出现明确的活动性海槽时期计。张伯声(1962, 1964, 1965)以特提斯命名出现于南北大陆之间的构造活动带,这样就无须考虑一定存在海或洋,而把特提斯从一个单纯的古地理学名词转化为一个构造学名词了。他(1965)把全球地壳看作是劳亚、冈瓦纳和太平洋这3个巨大地块(后称壳块)同环太平洋和特提斯这两大断裂褶皱带(后称构造活动带)的镶嵌,呈近东西向展布的特提斯带同环太平洋带在东亚和中美地区各有一个丁字接头,中国及其邻区地壳恰恰处于二者在东亚的接头部位。如作仔细的分析,特提斯带并不是真正的东西向展布,而是呈一段北东、一段北西的舒缓波状形态,在东亚地段主要表现为北西向,所以张伯声和王战(1974, 1978, 1980, 1986)便将这一地区发育的一系列类平行的北西向构造带归入特提斯构造波系,因为它们的活动基本上同

步或依次(从西南向东北或从东北向西南)传播。

张伯声(1965, 1966)把特提斯带看作环球四大地壳波系之一的北冰洋—南极洲波系一系列同心环带中的大圆构造带,但这只是在总体上的一种粗略归属。具体到东亚地区,前述中国及其邻区的特提斯构造波系所属各分带与真正的北冰洋—南极洲波系所形成的构造形象(东西向构造带)则有一定的角度。它们大多对应于印度洋—北美波系,西部地区一些特提斯构造带对应于南大西洋—西伯利亚波系,但它们都受到了东西向构造的影响并对其作一定的迁就。因此,中国的特提斯构造波系在一定程度上可以视为太平洋—欧非波系之外的其它三大地壳波系在东亚地区的有机结合。

喜马拉雅构造带(T_{t1})构成中国构造网的西南边陲,它同其南邻的印度河—恒河平原之下基底岩系间的差异升降超过了洋—陆之间的岛弧—海沟系的最大高差,加之恒河平原之下发现有新生代的火山岩,说明喜马拉雅及其南邻的冲积平原地带是一个当今仍剧烈活动着的“陆间地槽系”,多数人习惯性地将其作为阿尔卑斯—喜马拉雅地槽带(或地中海构造带)的一部分。70年代以来的研究表明,喜马拉雅构造带不仅是一个第三纪的造山带,在新生界活动型沉积之下,尚有中生界、古生界以至前寒武系的存在,且有经受过多次造山运动的痕迹,其沉积岩相和古生物大多可与冈瓦纳及扬子区对比。

祁连—秦岭—大别构造带(T_{t4})是中国大陆内部最醒目的一条特提斯构造带。以它为界,华北与扬子地壳的性质有较明显差异,二者的地史发展也不相同。王战(1991)通过对东秦岭和中国西南部地壳演化特征的分析之后认为,在该带北部边缘断续呈北西西—北西走向展布的以太华群为代表的太古宙晚期地层(A_{r3}),是劳亚与冈瓦纳在东亚地区最初始的构造分界(活动性海槽)的产物,太华拗陷槽北深南浅,说明早期地壳在由挠曲发展成挠折之后华北地壳南缘的翘起和扬子地壳北缘的俯倾以及扬子壳的强度不及华北壳;到了古元古代(P_{t1}),在太华褶皱带之南出现了北秦岭宽坪裂谷,中元古代(P_{t2})又向宽坪褶皱带之南跨过秦岭群(A_{r3} — P_{t1})断条,在中秦岭北部形成流岭拗陷槽,新元古代(P_{t3})至加里东早期在秦岭构造带出现了一系列类平行的裂谷和裂隙,其中以位于北秦岭和中秦岭之间的丹凤裂谷带最具分界性质。太华拗陷带、宽坪裂谷带、流岭拗陷带、丹凤裂谷带的依次出现,代表了特提斯构造波系挤压与拉张相交替的波浪式演化过程。这些槽谷地带应依次是南北二大壳块在不同地史时期的构造分界。到海西—印支期,由于秦岭地区地壳的强度已增加到足以使华北壳与扬子壳基本上焊接为一体,从而海西—印支期二大壳块的分界便向南跨越扬子地块跳迁到西昆仑—哀牢山构造带(T_{t2}),中、新生代又进一步依次向西南迁移。

在有关特提斯构造活动带的诸多研究中,劳亚壳块和冈瓦纳壳块的构造分界问题作为当今地质学(尤其构造学)的研究热点仍将持续下去。

参考文献

- 1 张伯声.地质学报,1962,42(3):275~288
- 2 陈国达,等.中国大地构造问题.北京:科学出版社,1965.66~93
- 3 张伯声,等.西北大学学报(自然科学版),1974,1:7~17
- 4 中国地质学会构造地质专业委员会.构造地质学进展.北京:科学出版社,1982.26~33
- 5 Wang Zhan. Proceedings, IGCP Project 321, publ by China Univ Geosc Beijing, 1991, 239~244

(西北大学博士生导师王战教授撰)

四大地壳波浪系统 four essential crustal—Wave systems 即太平洋—欧非波系、北冰洋—南极洲波系、印度洋—北美波系及南大西洋—西伯利亚波系。每一波系都包含一对基本上呈对称分布的洼陷构造区与隆起极构造区,在二者之间则呈环状分布着一系列类平行的隆起带与洼陷带,它们既可以是

构造活动性很强的构造活动带,也可以是活动性较弱的地块带。在一个系列的构造活动带中,最大的一个称大圆构造带。其余称小圆构造带。每一波系的大圆构造带,是该波系构造活动性最强的地带,围绕着每一个隆起构造区,又都有一个较明显的小圆构造带。由于四大波系的隆起极在球面上基本呈均匀的辐射对称分布,洼陷极构造区又与其对蹠,地球因而略具四面体形态。

四大地壳波浪系统,是张伯声(1964,1965,1966)为解决全球地壳镶嵌构造以及镶嵌地块在空间上的波浪状展布和在时间上的波浪式发展等构造特征的形成机理时提出的。他认为,地球在不断地进行着收缩与膨胀相结合的脉动式演化,但以收缩为主要趋势。收缩时地球向四面体过渡,膨胀时向球体回返,但由于收缩的总趋势而使地球在膨胀阶段也略具四面体形势。地球的脉动不断激发四面体4个面心地区的下凹与上隆,4个顶点部位也相应地上凸与下降,于是导致其间的构造波浪在地球表层呈环状往返传播。

上述思想是在19世纪中后期出现的“地球四面体”理论的基础上发展而来的。1857年,英国欧文(Richard Owen)曾指出地球具四面体形态,并找出了4个顶点及与之相对应的4个面心部位。19世纪80年代初,英国格林(William Lowthian Green)进一步通过数学方法论证了地球形成四面体形状的必然性。他指出,表面积相同的正球体,以球体之体积为最大,四面体之体积为最小,地球在其外壳凝固之后,内部物质还在进一步冷缩,因而必然导致四面体形状——只有这样,地球表面以最小程度的变化即可满足地内物质最大程度的体积收缩。此外,格林也注意到了地球的自转效应,认为地球的形态是由收缩所导致的四面体趋势加上旋转所导致的椭球趋势的综合。接着,法国拉尔曼(Lallemand)做了橡皮球抽气实验,获得了类似的四面体形态,并解释了地球上主要山系由于位于四面体棱边部位而所受的横向挤压力最大。1888年,戴维森(C. Davison)又按照四面体理论得出了大陆地壳下面的拉张量比大洋地壳下面要小得多的推论,较好地解释了大洋盆地的下沉和大陆边缘造山带的形成。

张伯声(1964)提出的由地球收缩脉动而引起地壳四大波系的发动、传播及相互交织,是对格林四面体模型的重大发展。他将四面体理论所认为的地球不断向着四面体目标做单向收缩(包含由自转所导致的趋椭球效应)的看法修正为,地球在其演化过程中不断作收缩与膨胀相交替的脉动,而以收缩为其总趋势,于是地球的形态也就不断地作四面体趋势与球体趋势的交互转换,以此启动全球四大地壳波浪系统的传播。其中关于隆起极与洼陷极、大圆构造带与小圆构造带等概念,则是在布鲁克(B. B. Brock, 1956)等人为地球四面体效应而提出的一些构造概念(地质极、构造大圆、构造小圆等)的基础上发展而来的。

1978年张伯声和王战进一步阐发了上述思想,并将其概括为一个简单的公式:

$$\text{准球体} \rightleftharpoons \begin{matrix} \text{(收缩为主)} \\ \text{(适度膨胀)} \end{matrix} \text{准四面体}$$

并明确指出,球体和四面体都只是一种趋势。在收缩阶段,地球从来没有十分接近过四面体,在膨胀阶段,也从来没有成为真正的球体或椭球体,因为尽管由地球收缩的变更使地球形态随之在球体与四面体之间反复变更,从而大洋深度也反复变化,由此而引起的海进、海退事件屡屡发生,然而位于地球四面体四个顶角部位的前寒武纪地盾区,地史上历次大规模的海侵都并未将其淹没,加之地球的总体收缩趋向,所以四面体效应应是不断演化着的地球形态的总趋向,即使在准球体阶段,地球的准四面体迹象也并未被磨灭。这些思想虽仍沿用了格林四面体理论最基本的原理(球体收缩取四面体趋势),但毕竟同其原来的理论已相去甚远(原属于冷缩说的范畴,现已引入到脉动说的领域),因而被称之为“新四面体理论”。

四大地壳波浪系统的提出,不但成了从“地球四面体理论”发展到“新四面体理论”的转折点和里程碑,而且更促进了“新四面体理论”的重要进展。王战(1987,1990,1991)提出的“地球多

级驻波脉动”模型(参见“波浪状镶嵌构造说”),正是通过对四大地壳波系在传播过程中由于波的干涉所引起的地球驻波运动效应的分析而建立起来的。因为每一地壳波系的波浪在由凹陷极传播到隆起极之后形成反射波,反射波与原波同频而反向,因此相互干涉而形成驻波,即每一波系都必然导致凹陷极所在半球的地块带与隆起极所在半球的地块带隆起状况相反,它们所处部位都是驻波的波腹,而其间的部位则是驻波的波节,即应力最易集中的地带,于是就在这种地带形成了大圆构造带。由于地壳的波浪运动是由大到小一级套一级的,所以四大地壳波系驻波运动的总合成,便是地球的多级驻波脉动,这就是地球形态在地史时期常是此半球略大、彼半球略小并定期变换的原因,也是海水进退、裂谷发展等重要地质现象常具有半球性转化特征以及地磁极性倒转的原因。今后的发展方向将是对四大地壳波系传播状况及其干涉效应细节的研究。

参考文献

- 1 张伯声. 张伯声地质文集. 西安, 陕西科学技术出版社, 1984. 103~118
- 2 国家地质总局书刊编辑室. 国际交流地质学术论文集(1). 北京, 地质出版社, 1978. 100~118
- 3 王战. 西安地质学院学报, 1990, 12(2): 38~45
- 4 王战. 西北大学学报(自然科学版), 1992, 22(2): 237~248
- 5 Brock B. B. Trans. & Proc. Geol. Soc. S. Af., 1956, 59: 149~197.

(西北大学博士生导师王战教授撰)

吊筛式摆动 hung-sifter swing 是一个地块在地史演化中由沉陷中心的规律性迁移而表现出来的一种地块运动形式, 可以认为是一种特殊的地块波浪运动。

一个镶嵌地块在地史演化中的状态往往不是呈水平状态平衡发展的, 面是一侧翘起向另一侧俯倾。这种状态随着时间的推移不断改变其方位, 即翘起和俯倾的方位呈顺时针或逆时针方向的变化, 因而地块盆地各地史时期的沉陷中心常常不在地块中部, 而多在接近其边缘的一些地方。

张伯声在1956~1964年的多篇学术讲演和著作中都论及过鄂尔多斯地块的翘倾运动以及转动问题。“吊筛式摆动”名词的提出和对地块运动性状较系统的论述以及对其成因机理的探讨, 则始于张伯声和王战(1982, 1983)合作完成的两篇论文。他们(1982)在分析了鄂尔多斯地块在更新世的运动状态之后指出: 地块按一定方向倾斜转换的翘倾运动, 是一种“吊筛式运动”, 并认为类似的运动在中国构造网中的大小地块都有不同程度的表现, 同时还提及地块这种倾斜变换同环太及特提斯这二大构造波系的传播和叠加有关。他们(1983)紧接着又对四川地块从震旦纪到第四纪的古地理状况进行了系统研究, 发现四川地块在各个地史时期的沉陷中心所在的部位和抬升方位总是基本处于盆地边缘两相对立的部位, 而地块中部几乎从来都未曾作过盆地沉陷的中心, 两相对立的翘起部位与沉陷部位, 在地史发展中又大体上表现出有时沿盆地周边作逆时针、有时作顺时针方向迁移的情况, 并指出“吊筛式摆动”是一个镶嵌地块以其四周的构造带为支点带同四个相邻镶嵌地块作“天平式摆动”在该地块本身所表现出来的综合效应, 其动力来源仍应归结于两个系统的地壳波浪, 其迁移方向(即逆时针或顺时针)的变更, 可能是由于两个系统的地壳波浪在该地块上优势地位的变化而引起的。他们此时已正确地认识到翘倾运动方向的变化同地块的转动方向并不是一回事, 但对二者之间是否存在必然联系, 尚未作进一步研讨。

王战(1987)通过陀螺歪斜实验和简易数学分析, 证明了地块翘倾运动方向的变化与地块转动方向之间存在着必然联系; 在地块进行吊筛式摆动过程中, 摆动轴的摆动方向同地块转动的方向这二者之间存在着恰恰反方向的规律性, 即当地块的翘倾方向作顺时针变化时, 则地块的转动方向必定是反时针的, 反之亦然。发育在盆地边缘及其邻近的造山带内的断裂构造, 往往由于有着

超长的发展演化历史而经历过不同方向的多期构造运动,于是常常导致保留至今的构造形迹模糊不清或亦此亦彼,使学者们为断裂构造的左行与右行、张扭与压扭等问题争论不休。在此情况下,设法正确辨明长期发育的断裂在不同时期的性状已成为构造地质学的迫切任务之一。而地块盆地在吊筛式摆动过程中的翘倾方向变化则有着毋庸置疑的公认准则,即在系统地研究了盆地各地史时期的沉积相和进行古地理分析之后便可确定。于是也就可以应用前述吊筛式摆动规律(地块翘倾运动与扭动关系定理)去轻而易举地判定地块在各个地史时期的扭动方向,这样便可以准确地重建盆地边缘断裂性质变迁史,从而推论出哪一期的构造活动对形成哪一类矿床更为有利,边界断裂在晚近地质时期性状的变化同工程、水文以及地震活动关系密切。

在通过解析四川地块发现了上述定理的同时,王战还发现该地块在扭动过程中所表现出来的往返波动性质:在从震旦纪到第四纪这一漫长的地史时期内,四川地块经历了顺时针扭动(晚震旦世到中奥陶世)→逆时针扭动(晚奥陶世到早二叠世)→顺时针扭动(晚二叠世到晚白垩世)→逆时针扭动(新生代以来)的循环往复地变换扭动方向的情况,而且其时间间隔大体上是相等的(约2亿年),这显然是地块波浪的一种新类型。更仔细的分析还发现,地块扭动的波浪式往复也具有其它地块波浪所具有的级相套性,即在上述以约2亿年为阶段的往复中,还包含有一些较短时期的次一级往复。王战发现鄂尔多斯往复扭动也具有大约2亿年的阶段性和级相套性,但其各个时期扭动的方向则同四川是恰恰相反的。这一发现为研究上述两地块之间所夹的秦岭构造带的发展演化揭示了边界构造条件,同时也为研究相邻地块间的扭动关系提供了重要依据。

对地块吊筛式摆动性状及其内在规律性的揭露,由于其显而易见性和确定性等优点,因而在构造地质学中有广阔的应用前景和进一步深入研究的必要,特别是由于块体扭动的方向、距离和断裂面的属性等同找矿关系密切,这方面的研究必将走向量化,即通过地块在各地质时期的翘倾幅度、翘倾变化速度等确定地块扭动幅度,从而进一步揭示地块的边界断裂及邻近的造山带内与周边断裂类平行的那些断裂左行或右行扭动(以及斜冲或斜向下滑)的距离。

参考文献

- 1 张伯声主编,地壳波浪与镶嵌构造研究,西安:陕西科学技术出版社,1982,147~148
- 2 张伯声,等,西安矿业学院学报,1983,2:6~9
- 3 王战,西安地质学院学报,1987,9(1):59~68
- 4 Wang Zhan, International Symposium on Tectonic Evolution and Dynamics of Continental Lithosphere, Abstracts, I, Beijing, 1987, 119

(西北大学博士生导师王战教授撰)

板块构造理论 theory of plate tectonics 是定量描述地球表层运动的新兴大地构造理论。它使地球科学家第一次比较成功地回答了地球是怎样活动的问题,为解释全球地质作用提供了颇有成效的框架。1912年,德国魏格纳首先提出了大陆漂移说。1961~1962年,美国赫斯(H. H. Hess)和迪茨(R. S. Dietz)在大陆漂移和地幔对流说的基础上创立海底扩张说,认为洋底处于生长、扩张和俯冲的过程中。1963年,瓦因(F. J. Vine)和马修斯(D. H. Matthews)运用海底扩张说提出解释海底条带状磁异常的模式。1965~1968年,瓦因、威尔逊(J. T. Wilson)、海茨勒(J. R. Heirtzler)等通过海底磁异常的研究为海底扩张提供了重要证据。1965年威尔逊建立转换断层概念。他首先提出,转换断层把扩张中心及俯冲汇聚边界相互连接起来,构成环绕全球的连绵不绝的网络,将地球表层划分为若干刚性板块。1967~1968年,摩根(W. J. Morgan)、麦肯齐(D. P. McKenzie)和帕克(R. L. Parker)将转换断层概念外延到球面上,定量地论述了全球板块的运动。1968年,勒皮雄(X. LePichon)在摩根等人工作的基础

上进一步论证了板块运动的几何学及板块运动造成的后果。同年,艾萨克斯(B. Isacks)等阐明了地震与板块活动之间的联系。1969年,麦肯齐和摩根讨论了板块三联点的演化问题。1968年开始实施的深海钻探计划,从深洋底采集岩样,测定年龄,为海底扩张和板块构造说提供了强有力的证据。

20世纪60年代晚期至70年代前半期,板块构造理论迅速渗透进地质学的许多领域,使地质学的面貌焕然一新。1966~1968年威尔逊提出洋盆开合的发展旋回,为板块构造角度研究造山运动和大陆地质历史问题,提供了一个有用的框架。1969~1970年,汉密尔顿(W. Hamilton)指出南、北美洲西缘造山带的发育与板块俯冲有关,乌拉尔山脉则是西伯利亚和俄罗斯陆块间的碰撞带。1969~1972年,杜威(J. F. Dewey)、伯德(J. M. Bird)、迪金森(W. R. Dickinson)等进一步阐明了地槽演化、造山运动与板块构造的关系。1970~1973年,迪金森、康迪(K. C. Condie)等将岛弧火山岩中碱含量向大陆方向递增的现象纳入板块俯冲构造的框架中。1971~1973年,都城秋德、厄恩斯特(W. G. Ernst)将双变质带的发育与板块构造联系起来。1971年,许靖华(K. J. Hsü)将加利福尼亚的弗兰西斯科统解释为产于上覆板块前缘的混杂岩体。1974年,迪金森讨论了板块构造与沉积作用的联系。60年代晚期至70年代早期,科尔曼(R. G. Coleman)及其他许多学者已认识到山脉中的蛇绿岩套是残存的大洋岩石圈碎片。1973~1975年,都城秋德进一步指出蛇绿岩套可起源于不同的环境。迪金森在1971~1972年还强调运用岩石学资料可以识别古大地构造环境。上述成果促进了岩石学、构造学、地史学等学科的革新,也推动了陆上古板块构造的研究。1971年,斯克莱特(J. G. Sclater)等论证了洋底水深是洋底年龄的函数。1973年,皮特曼(W. C. Pitman II)等提出扩张速率变化导致扩张脊体积增减,进而可引起海侵和海退。1971年,卡里格(D. E. Karig)论述了边缘盆地的弧后扩张成因。1963年威尔逊就曾提出,夏威夷—天旱海岭及其他一些无震海岭是岩石圈越过固定火山源(即热点)的产物。1971年摩根进一步指出,这种固定火山源乃是来自地幔深部的热柱(称为地幔柱)。热点—地幔柱的概念被用来研究板内岩浆活动、板块的绝对运动及驱动机制。

70年代后半期以来,板块构造理论进一步发展。在板块扩张的研究方面,1980年,海伊(R. Hey)通过对洋底磁异常的详细分析,发现一些以转换断层为界的扩张脊分段,其端部可以伸长或退缩。他将向前伸展的裂谷称为前展性裂谷。1982年,通过精密的海底测深发现东太平洋海隆有儿处扩张脊端部相互错开,其间并没有转换断层相连接,两脊轴自由端彼此相向弯曲,并列在一起。1983年麦克唐纳(K. C. MacDonald)等将这种形态特征命名为重叠扩张中心。1988年麦克唐纳进一步指出,重叠扩张中心、前展性裂谷及转换断层等不连续构造,使扩张脊呈现出明显的分段性。不连续构造附近(即扩张脊分段的端部)与分段中部相比,脊轴水深较大,地壳较薄。地震和岩石化学资料表明各分段可能下伏着分隔的岩浆房。1974年,皮特曼等根据洋底磁异常编制了第一幅世界大洋洋底年龄图。1985年,拉森(R. L. Larson)等对此图作了修订,将澳大利亚与南极洲之间海域的最老洋底年龄从5300万年前移至约9500万年,从而使澳大利亚裂离南极洲的年代大大提前。还发现印度洋的年龄并不比大西洋年青。

在汇聚边界的研究方面,70年代晚期和80年代的深海钻探发现,一些俯冲带缺失增生楔,可见西利(D. R. Seely)等1974年提出的俯冲增生模式并不适用于所有俯冲带。1988~1989年,通过对岛弧火山岩中¹⁰Be含量的测定,进一步证明高¹⁰Be含量的大洋沉积物已潜入俯冲带,致使¹⁰Be进入火山弧的岩浆源中。地震和磁测资料提示一些海山已俯冲至增生楔之下。秘鲁海沟等地的深海钻探成果,支持上覆板块前缘遭受俯冲侵蚀,致使原火山弧岩石见于今日的弧前区。俯冲增生与俯冲侵蚀、弧后挤压与弧后扩张等对立现象并存,显示了俯冲带的多样性和复杂性。1979~1983年,上田诚也等论述了智利型(高应力型)和马里亚纳型(低压力型)两种俯冲带极端类型。杜威在1980年则划分了压性

弧、中性弧和张性弧。对大陆碰撞带的研究,1975~1986年莫尔纳(P. Molnar)和塔庞尼(P. Tapponnier)提出平面应变的滑移线场模式,认为印度作为刚性体挤入导致西藏地区形成南北走向的拉伸构造及更广大地区沿走滑断层的侧向挤出现象。1982年,常承法指出,青藏高原地区地壳加厚与大规模抬升,与地壳楔片的相互冲掩叠覆有关。

在板块划分和板块运动的研究方面,除早已认识到大陆碰撞带镶嵌着微板块,还发现大洋中脊顶部以扩张中心为界的微板块(如复活节岛微板块),弧后扩张中心与海沟之间的岛弧微板块(如马里亚纳微板块),以及斜向俯冲引起的平行于海沟的走滑断层与海沟之间的弧前微板块。1985年威恩斯(D. A. Wiens)等指出,原先所划出的印度板块可划分为独立的印度板块和澳大利亚板块,两者之间的边界沿赤道附近近东西向展布。1990年,戈登(R. G. Gordon)等进一步论证了澳大利亚板块相对于印度板块作逆时针旋转,其边界东段伴有沿走滑断层的构造挤出现象,从而认为在大洋岩石圈内也存在着宽阔的散漫型边界。第一代现代板块相对运动模型是勒皮雄于1968年建立的。1978年明斯特(J. B. Minster)和乔丹(H. Jordan)建立的RM2模型及同年蔡斯(C. Chase)建立的P071模型曾被广泛引用。1990年,德梅茨(C. DeMets)等采用22个板块边界上的1122个数据建立了新的现代板块运动模型(NUVEL-1模型),其精度大大超过以往的模型。80年代中期,空间大地测量的首批成果为大陆漂移和板块运动提供了直接的证据。1978~1988年卫星激光测距测得5个板块12个测站间的运动速率,与按NUVEL-1模型计算得出的速率十分接近。1989年,佐巴克(M. L. Zoback)等基于大量应力测量成果编制了世界应力图,显示最大水平压应力方向常与板块绝对运动方向一致,表明板块边界力可能是控制板内应力场的重要因素。

80年代初期以来,地体分析法被广泛用于造山研究中,豪厄尔(D. G. Howell)等认为,造山带是由经历过长距离移动的各种地体拼贴而成(见“构造地层地体分析”)。各方面资料表明,中国大陆乃是众多地体的拼合镶嵌体。1984~1987年,森格(A. M. C. Sengör)指出,包括土耳其、伊朗、西藏等在内的基里里大陆,在古生代末期至中生代早期从冈瓦纳北缘裂出,向北漂移然后拼合于北方大陆,伴随着北侧古特提斯洋的关闭和南侧新特提斯洋的张开。1990年森格论述了造山运动与板块构造学的关系,从板块角度对造山带作了系统的分类。

尽管80年代以来地震层析术、卫星重力测量等新技术的发展推进了板块驱动机制的研究,但驱动机制依然是板块理论中悬而未决的难题。板块动力学问题将继续是板块理论研究的前沿。以板块理论为基础,建立能用于找矿预测的区域性地球动力学模型,显然具有重大的实际意义。运用新技术手段深入研究各类板块边缘的现代作用过程,可望解决涉及板缘活动的各种遗留问题。

参考文献

- 1 Wilson J T. Nature, 1965, 207: 343~347
- 2 Morgan W J. Jour Geophys, Res, 1968, 73: 1959~1982
- 3 Dewey J F Bird J M. J Geophys Res, 1970, 75
- 4 Uyeda S Kanamori H. J Geophys Res, 1979, 84: 1049~1061
- 5 Howell D G, et al. (Editors), Proceedings of the Circum-Pacific Terrane Conference, Stanford California, Stanford University, 1983, 1~9
- 6 MacDonald K C, et al. Nature, 1988, 335: 217~225
- 7 DeMets C, et al. Geophys, J Int, 1990, 101(3): 425~4798
- 8 Hilde T W C, Carlson R L. (Editors), Tectonophysics, 1991, 187(1~3): 1~344
- 9 Hilde T W C, Carlson R L. (Editors), Tectonophysics, 1991, 187(1~3): 1~344

(同济大学金性春副教授撰, 劳秋元教授审)

构造地层地体分析 tectonostratigraphic terrane analysis 简称地体分析,又称岩石构造地体分析,是1980年初出现的一种新的区域大地构造分析方法。

美国地质学家在对北美西部科迪勒拉造山带进行深入研究后,发现原先由迪金森(W. R. Dickinson)按照活动大陆边缘的板块构造模式提出的弗兰西斯科杂岩(Francisco Complex)代表海沟杂岩,大谷系(Great Valley System)代表弧—沟间沉积物、克拉斯—内华达山—萨林尼亚区(Klamath—Sierra Nevada—Salinia)代表岩浆变质杂岩体的简单模式,并不能解释那里复杂的地质演化史,因此提出了造山带是由一些移置的地体拼合组成的认识,而如何确定这些地体和它们位移演化历史的方法就是地体分析方法。

1977年琼斯(D. L. Jones)等首先应用地体分析方法分析阿拉斯加,以解决那里古生代和早中生代岩石的复杂分布关系,而这种关系是传统的地槽模式和板块构造模式所不能解释的。从此这个方法就被逐步地推广了。

1981年在日本北海道的苫小牧召开了第1届环太平洋地体讨论会。在这次会上,琼斯等人提出了辨识地体的标志和进行地体分析的方法,并举出了他们研究科迪勒拉造山带的结果。会后由桥本和上田主编出版了论文集。

1983年在美国加利福尼亚斯坦福大学召开的第2届环太平洋地体会议,标志的地体分析方法已被广泛接受并推广应用到了除北美西部外的环太平洋其它地区,包括前苏联远东、日本、中国、东南亚、澳大利亚东部、南极洲和中南美洲。在这个会上,豪厄尔(D. C. Howell)等正式提出了地体的定义和地体分析的内容,即:构造地层地体为一具有区域规模的、以断层为边界的地质体,它以与相邻地体具不同的地质发展历史相区别。会后,豪厄尔主编出版了会议论文集。自此以后,环太平洋地区各国,特别是中国的地质学者开始广泛地引入和采用了这个新的大地构造分析方法,来进行大陆板内区域大地构造研究,并被认为是板块构造理论应用于大陆板内地质的一一个新研究方向。

1985年在澳大利亚悉尼召开了第3届环太平洋地体会议。这次会上发表的论文较多地涉及澳大利亚、新西兰、南极洲和东南亚等地。会后由莱契(E. C. Leitch)和希勃纳(E. Scheibner)主编出版了会议论文集。

1988年在中国南京大学召开了第4届环太平洋地体会议。这次会议的特点是首先有约3/4的论文是由我国地质学者提供的,这些论文涉及到从前寒武纪到新生代整个中国大陆地体分析研究的新成果,表明了它在应用于大陆板内构造研究中的适用性和有效性。因为在目前尚难以用板块构造的理论对大陆内部古老造山带进行详细研究的情况下,采用在一定程度上不完全联系成因环境的地体分析法不失为一条现实可行的途径,而这样的研究成果是可以提供有用的基础资料作进一步的深入研究的;其次,在会上土耳其森格(A. M. C. Sengör)对地体分析法提出了严厉的批评意见,这些意见实际上也代表了大多数西欧的特别是研究阿尔卑斯造山带的地质学者的意见。他指出,按定义,地体的规模和大小(三度空间的)以及运移距离并没有确切的规定,更主要的是地体分析法没有考虑大多数地体的成因环境。他认为当前的研究情况就象1955年以前用推覆体理论研究阿尔卑斯造山带地质一样,其后果将会是越来越多的、规模越来越小的地体被划分出来,直到使一张地质构造图成为大量毫无个性特征的碎块的高度集中而变得漆黑一团为止。因此,他断言由于地体分析法缺乏固有的理论基础,又采取了回避问题的作法,因而它的出现并不意味着科学研究的进步,而是一种倒退!

1991年在智利圣地亚哥又召开了第5届环太平洋地体会议。会议发表的论文更多的涉及到安第斯造山带。

总之,从1980年出现地体分析法到1990年,研究工作主要集中在环太平洋的中、新生代造山带中。1990年以来,地体分析工作的重点开始逐渐转向更老的古生代造山带和迄未触及的特提斯—喜马拉雅造山带,即研究冈瓦纳古陆的裂离、分解和裂解

形成的地体的运移、演化历史。研究的另一个重点方向就是要按板块构造理论对地体的成因环境进行深入研究,力求确定每一地体所在的板块构造位置。

参考文献

- 1 Hashimoto M, et al eds, Accretion tectonics in the circum-Pacific region. Terra Publishing Company, Tokyo, 1983, 358
- 2 Howell D G. Tectonostratigraphic terranes of the circum-Pacific region. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, 1985, 1: 585
- 3 Howell D G, et al. Preliminary tectonostratigraphic terrane map of circum-Pacific region; American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Okla, scale 1: 17,000,000, 1985
- 4 Leitch E C, et al. Terra accretion and orogenic belts. American, 1987; 19, 343
- 5 Wiley T J, et al. Terrane analysis of China and the Pacific rim; Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, 1990; V. 13, 368P
- 6 森格 A M C 著. 板块构造学和造山运动—特提斯例析. 丁晓等译. 上海: 上海复旦大学出版社, 1992. 182

(上海同济大学劳秋元教授撰)

断块构造学说 theory of fault-block tectonics 又称断块学说或断裂体系与断块大地构造学说, 是研究地球岩石圈断块结构及其运动的假说, 由张文佑先生创立。他运用地质力学与地质历史分析相结合方法, 将地质构造的建造与改造、形成与形变有机地结合起来, 成功地阐明了中国及世界大地构造的生成演化规律, 同时在指导找矿和改善人类生活环境中有重大作用。断块构造学说的产生, 在一定程度上代表了现代地质学发展的新趋势。

1904年美国霍布斯(W. H. Hobbs)创立了线形构造一词, 他指出地球表面的断裂带与线形构造有统一型式和大致相近的方向, 并揭示了隐伏的深部构造受一系列结晶基底块断所控制, 这些块断表明地球整体外壳具统一的应力、应变条件。1910年德国克罗斯(H. Cloos)在研究了瑞士巴塞利地区侏罗山时发现老第三纪断裂对新第三纪褶皱的控制, 并提出地槽是在不均一块体的基底上发展起来的, 由于克罗斯多年对世界地质构造的全面研究, 于1939年又将地球表面大型构造带分为两大类, 即地缝合线和地破裂带, 最后于1948年首先提出地壳块体(Crustal blocks)和基底断块(Basement blocks)的概念。

20世纪40年代初, 张文佑在跟随李四光研究中国华南大地构造时, 注意到线形构造的重要性, 并把岩石中的破裂——节理分为X型和T型二大组合, 前者具剪切性质后者则具拉张性质, 这便成为其后创立地球表面4种断裂体系的雏形。与此同时对线形构造作出重要贡献的还有前苏联斐伟(A. B. Жеңе), 他于1945年把断裂构造与地槽演化联系起来, 提出深断裂一词。1947年凡宁、迈内兹(F. A. Vening Meinesz)分析了全球线形构造的力学成因, 提出全球剪切断裂体系的概念。另外, 澳大利亚希尔斯(H. S. Hills)1956年相继提出地块构造(Block tectonics)的概念。他认为大大小小的地块是由断裂和褶皱带分割而成, 并具长期独立性, 对火山活动、矿产和沉积以及地槽的生成演化均有控制作用。

50年代后, 在张文佑主持下以断裂体系为主导思想编绘了第1张“中国大地构造图”及其说明书“中国大地构造纲要”, 并首先创用了断块、断块、断褶带、块断带、台块等术语, 为后来成为一种新的大地构造学派建立了坚实的理论基础。70年代开始他运用地质构造力学分析与历史分析相结合的原则, 把野外观察与室内模拟实验及理论分析三者结合起来, 初步完善了断裂体系与断块大地构造学说思想。

80年代初, 断块构造学说得以迅速发展, 完成了“中国及邻

区海陆大地构造图”及说明书“中国及邻区海陆大地构造”, 在中国首次打破了海陆间的界限, 包括大陆与大洋统一的大地构造图。同时运用断块构造学说初步解释了其它大地构造学派尤其是板块构造学说所不能解释的众多地质现象。建立了一系列学术观点, 除宏观上的理论基础研究外, 还着重研究地球上部岩石圈的断块结构, 他认为岩石圈是被断裂分割成大小不等、深浅不一、厚薄不同和发展历史不同的断块。由此构成岩石圈的多层、多级和多期发展的断块构造。断块的规模可分为4个等级: (1)岩石圈断块(Lithospheric fault block), 是地球表层即地壳和上地幔顶部、软流圈以上被岩石圈断裂所切割和围限的最大一级断块, 它可以沿软流圈滑动, 相当于板块学说的岩石圈板块。如现代的太平洋、非洲、欧亚、印度、南极洲六大板块即与岩石圈断块相当。现代大陆区和大洋区可划分出许多地质历史时期的岩石圈断块, 大陆上的古槽块相当于现代大洋断块, 台块相当于现代的大陆断块。(2)地壳断块(Crustal fault block), 是地球表层中的第2级断块, 也是岩石圈断块内部的次一级断块, 比岩石圈断块薄, 它被地壳断裂切割和围限, 可沿莫霍面滑动。现代大陆被地壳断裂所切割的台隆和台陷, 槽块内的槽隆和槽陷以及现代大洋被火山岩带或断裂带所分割的断块, 均属地壳断块。现代槽块、台块内, 中、新生代含玄武岩及其它基性岩的沉积盆地, 也多属地壳断块。(3)基底断块(Fundamental fault block), 是地壳断块内部次一级的, 被基底断裂切割和围限的断块称为基底断块, 它可沿康腊面滑动, 基底断块多分布在现代大陆区, 现代大洋不存在基底断块。大陆台地内的台凸和台凹, 槽块内的槽凸和槽凹多为基底断块。大陆及大陆边缘的中、新生代不含基性火山岩的红层盆地也属基底断块。如华北台块上规模较小的中、新生代盆地, 槽块上的红层盆地等。(4)盖层断块(Superficial fault block), 它是被盖层断裂切割的断块。存在于现代大陆及大陆边缘, 是沉积盖层发育的构造单位。断块边界断裂按其深度、规模和地球物理特征, 又可分为5个等级: 岩石圈断裂(Lithospheric fault)、地壳断裂(Crustal fault)、基底断裂(Fundamental fault basement fault)、盖层断裂(Superficial fault sedimentary cover fault)、层间滑动断裂(Interlayer-gliding fault)。断裂的形成和发展过程是由剪切开始, 拉张完成。在构造应力作用下, 岩石产生X型共轭剪切断裂, 在拉张作用下牵就原始X型共轭剪切断裂形成锯齿状断裂。这些断裂按其力学性质可分为7种活动方式, 而同一条断裂的活动类型在不同地质时代中是可以相互转化的, 断块不但沿断裂面滑动, 而且也沿各圈层的界面产生层间滑动。断块边缘和内部不仅有水平运动, 也有垂直运动, 不仅有俯冲, 而且也有俯冲断裂。构造应力场产生的基本原因是地球内部的热力和重力所引起的膨胀(拉张)和收缩(挤压)。地球在长期胀缩交替作用下, 加上外部天体的影响, 地球自转角速度变化和地球自转轴摆动的不均一性对地球的影响, 是大地构造形变的主导原因, 并由此而引起岩石圈的多层、多级、多期的断块构造运动。沿着断块边缘断面的相互错动和沿着断块顶底产生层间滑动, 是岩石圈层状块体相对运动的两种基本方式。浅层构造是受深部断块运动所控制, 相反, 深层构造又可受浅层构造的影响。基底断裂常控制盖层褶皱, 盖层褶皱也可影响基底断裂。如大陆型地壳在拉张作用下, 可形成地堑, 产生小洋到大洋。而大洋型地壳在挤压作用下, 也可形成岛弧或陆缘山脉, 过度成为大陆, 即大陆和大洋是相互转化的。这种演化规律可概括为“剪切—拉张造洋、剪切·挤压造陆”。以上这些是断块构造学说现阶段研究的精华。

当前随着科学技术水平的不断提高, 人类探测地球内部结构变化的能力越来越增强, 对大陆与大洋都进行了大规模的地质、地球物理观测, 特别对深海大洋盆地的研究, 开阔了人类认识地球的眼界, 同时关于地球表面存在着巨型断裂网络的思想, 也得到了发展, 这更加稳固了断块大地构造学说的理论观点。它与国外流行的板块大地构造学说的思想有联系, 但也有差别, 板块构造学说侧重于研究海洋与海陆边缘, 而断块学说除研究全球性构造形变场的演化规律外, 更注意对大陆内部与陆缘进行研究,

如岩石圈断块内部,还有多次一级的断裂,还可划分出许多次一级的新断块。而板块学说对板块内部构造缺乏研究,虽然近几年考虑到板内应力问题,但与断块构造学说相比还相差甚远。板块学说热衷于运用地球物理方法对板块的运动方向速率等运动学标志进行研究,在地质方面,主要集中在对岩石学的研究上。而断块学说除了上述方法外,特别强调对地质构造的力学分析与历史分析上,以及对断块边界断块内部的运动与形变场进行力学机制与历史演化过程分析,对于岩石圈断块的运动方式,除拉张、碰撞、水平位移外,还要三维多层次地考虑它们的运动学规律。

现代高速电子计算机的普及和其他新技术的发展,地质学也面临着一场全面的技术革新,如航判及卫星遥测、遥感技术以及红外、微波、激光等新的探测手段的使用,提高对地球大地构造形变场即断块构造的运动速度、广度、深度与精度的研究。并利用各种地球物理场对地球内部结构、物性进行探测,而且开始对古地球物理场的研究,加强室内实验模拟,如高温高压以及物理模拟与数学模拟方法,即由定性向半定量到定量阶段过渡。断块构造学说还有大量的研究课题有待开发,在理论上也还应有更大突破。

参考文献

- 1 Suess E. The Face of the Earth, 1904, 1
- 2 Hobbs W H. Geol Soc Amer Bull, 1904, 15: 483~506
- 3 Lee J S. Geol Mag, 1929, 66: 782~785
- 4 Vening Meinesz F A. Trans, Amer Geophys, 1947, 28, 1~61
- 5 张文佑. 科学通报, 1961, 12(1)
- 6 张文佑, 钟嘉猷. 地质构造问题, 1962
- 7 张文佑, 钟嘉猷. 地质科学, 1977, 3
- 8 张文佑, 钟嘉猷. 构造地质学进展, 1982, 12~25
- 9 张文佑. 中国及邻区海陆大地构造特征与发展. 北京: 科学出版社, 1983
- 10 张文佑. 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社, 1984

(中国科学院地质研究所钟嘉猷教授撰)

活动构造 active tectonics 是当前地球科学中的一个重要分支学科。对人类生活关系极为密切,可以直接影响人类的生存和生活。任何形式的活动构造都关系到地壳的稳定性,直接影响到人类生存的环境,如由于活动构造而引起的河道的破坏、海岸和海港的淤积,以致于对各种工程和城市建设的直接破坏,并可能在一定条件下引发其它各种类型的次生灾害。其中,活动断裂与各种地质灾害,尤其是地震灾害有着更加密切的关系。由于活动构造是地质历史中的最新活动过程及其产物,故对地球动力学的研究也具有重要理论意义。

活动构造一般可定义为:在第四纪期间,尤其是晚更新世晚期以来至现今活动的并在今后仍可能活动的构造。活动构造着重强调现今仍在活动的构造,但确定构造现今的活动性,仅根据最近短时间的资料是困难的,必须了解它一个时期的活动过程。对这样一个活动过程的时期长短,认识是不同的,有的定义为1万年或3.5万年,也有的定义为15万年,以至上百万年,这主要由于不同部门的实际需要对所容许的活动程度和危险水平不同有关。现在定义为第四纪期间,而重点在晚更新世晚期以来,看来是比较全面的。

活动构造大体可分为两种基本构造类型:活动褶皱和活动断裂。由于它们的规模、组合结构不同,因此可以包括小至几千米、大至上百万米的不同组合形态的活动构造或活动构造区、带。

活动构造尤其是活动断裂被人们所特别关注。活动断裂的研究,自20世纪70年代开始,由于在地震和工程建设中的特殊地位,获得了飞跃发展。70年代初,美国 R. E. Wallace 倡导利用断裂滑动速率进行大震重复时间间隔的研究,继而又提出利用断崖形态剖面的变化研究大地震。70年代中期,美国 K. E. Sieh 首先利用系统槽探技术研究断裂全新世时期活动及古地震,推进了活动断裂的深入研究。与此同时,活动断裂的综合分析和对比的

工作也相继开展,许多国家出版了活动断裂研究的综合性成果。如美国在1979年出版了加利福尼亚的活动断裂图;1980年日本出版了《日本活断层图集》(1991年再版);1986年美国出版了《活动构造学》(Active Tectonics)一书,对活动构造,主要是活动断裂的研究理论和方法进行了总结。1983年,在中国学者的建议下,国际地质对比计划(IGCP)正式将“全球活断层及其地震活动性比较研究”这一项目列入计划,先后有十几个国家参加了这一项目的活动。

然而,活动褶皱的研究进展较缓慢,其原因可能与活动褶皱对人类活动的影响不象活动断裂那么直接、普遍有关。不过,近10~20年来,通过对含油盆地及一些典型地区的活动褶皱研究,对活动褶皱的类型、力学机制及其与活动断裂的关系都取得了不少新的认识和成果,如美国学者 R. S. Yeats 等人对美国西部和喜马拉雅山麓地区的活动褶皱研究。

中国在地质学研究初期,就开始注意活动构造的研究,但到新中国成立以后,于50~60年代才有了较大的发展。1966年以来,由于一系列强烈地震的发生,使活动断裂的研究提到更加重要的位置,开展了对中国主要活动断裂的存在、展布及其活动特征的调查,而活动褶皱的研究主要是结合石油和天然气的勘探和开发,在第四纪仍有明显活动的新生代盆地内进行。1982年出版的《中国活动断裂》一书,基本反映了70年代这一时期活动断裂研究的成果。

80年代初期,以1981年富蕴地震断裂带研究为标志,开始了活动断裂的综合专题研究工作,对这一条活动断裂的几何学、位移速率和古地震学问题开展了一系列定量研究工作。此后,在鲜水河断裂带、鄂尔多斯周缘断裂系、祁连山—河西走廊断裂带和阿尔金断裂带等均相继开展了各种专题研究工作,先后出版了《富蕴地震断裂带》(1985)、《鄂尔多斯周缘活动断裂系》(1988)、《鲜水河活动断裂带》和《阿尔金活动断裂带》(1992)等一系列专著。在此基础上,在国际地质对比计划(IGCP)中的《全球断层及其地震活动性比较研究》项目工作中,中国学者对中国6条活动断裂的活动特性进行了总结,并出版了《中国活断层图集》(1989)。80年代中晚期,中国开始组织对大陆地区主要活动断裂带进行大比例尺(以1:5万为主)地质填图和综合研究。这一工作是1983年从海原活动断裂带上开始的,于1989年出版了中国第1份活动断裂带1:5万地质图,随后又出版了《海原活动断裂带》专著。在此基础上,国家地震局制定了活动断裂大比例尺填图工作大纲和图例(1989,1991),并开始在全国10多条重要活动断裂上开展以1:5万比例尺为主的地质填图和综合研究工作,并作为重点研究项目列入国家地震局“八五”计划。其主要研究内容为断裂几何学、运动学、古地震和大震重复间隔、断裂分段性及其与地震的关系等。

中国和世界活动构造研究主要反映在活动断裂研究上取得了重要进展,表现在以下方面:(1)活动断裂研究的时间尺度已重点放在晚更新世晚期以来,尤其是全新世1万年左右的时间;(2)活动断裂的研究已由定性研究阶段发展到定量研究阶段,尤其是对其不同方式的位移和位移速率的详细研究;(3)对不同类型活动断裂几何学和细结构进行了具体研究;(4)对古地震和大地震重复时间间隔的研究,使我们可以更长的时间尺度内分析强震活动特点和趋势;(5)断裂分段性研究使我们对断裂活动不均匀性和重复破裂过程有了更深入的认识;(6)在隐伏活动断裂探测方面已逐渐形成了以遥感地质、构造地质、地球化学、地球物理方法为手段的有效综合探测方法;(7)在活动断裂研究的基础上,已对大陆内部构造变形和块体运动特征及其与地震的关系,取得了进一步认识。

当前活动断裂研究的热点主要集中在以下方面:(1)活动断裂的几何学、细结构和构造组合及其不同类型断裂的力学机制;(2)活动断裂的运动方式,尤其是断裂粘滑与蠕滑的区分及其关系;(3)断裂运动的位移和速率在空间和时间上分布规律及不均匀性;(4)断裂的活动习性和分段性;(5)活动断裂上的古地震;

(6) 定量评估活动断裂的地震危险性和对工程安全性进行评价。

值得提出的是,活动褶皱的研究目前尚未引起人们的足够重视,尤其它与石油、天然气的勘探和开采有密切的关系,今后应加强这一方面的研究工作。

参考文献

- Wallace R E. *Geol Soc Am Bull*, 1977, 88(9): 1267~1281
- Tapponnier P, Molnar P. *J G R*, 1977, 82(20): 2905~1930
- 中国地震学会地震地质专业委员会. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社, 1982
- 新疆维吾尔自治区地震局. 富蕴地震断裂带. 北京: 地震出版社, 1985
- 艾伦 C R 等著. 活动构造学. 四川省地震局译. 成都: 四川科学技术出版社, 1989
- IGCP 第 296 项中国工作组. 中国活断层图集. 北京: 地震出版社, 1989
- 国家地震局地质研究所, 宁夏地震局. 海原活动断裂带. 北京: 地震出版社, 1990
- 活动断裂研究编委会. 活动断裂研究. 北京: 地震出版社, 1991
- 国家地震局阿尔金活动断裂带课题组. 阿尔金活动断裂带. 地震出版社, 1992

(国家地震局地壳应力研究所刘光勋研究员撰)

重力构造 gravity tectonics 是指在重力影响下的岩石圈及岩石变形过程和结果。从物理学原理来看,因重力势的降低所产生的构造变形总体特征,统称为重力构造。重力构造可在不同尺度和不同层次上发育,且具有不同的表现形式,如岩体在重力作用下顺坡向下滑动或崩塌、重力横向扩展以及密度倒置形成的底辟构造等。地球是一个动力体,物体所受重力大小主要取决于其质量,因之,不论重力均衡状态如何,只要出现密度不均和重力不稳定性,就会驱动组成地球物质的运动及变形。构造力源是多种的,重力则是其中最重要的因素。地球上的一切物体,都永远处于重力的作用之下,在理解和解释岩石圈板块构造、地幔对流、热地幔柱、地震活动及不同尺度的变形过程中,都需要充分运用重力及重力构造的概念和思维方法。

重力构造是一个古老概念。18世纪末开始注意重力在构造变形中的作用,主要是现象的描述和局部构造的认识,例如,将褶皱作用视为岩体在重力作用下沿倾斜面向下滑动的结果。瑞尔(Reyer 1888, 1892, 1894)进行了许多模拟实验,证明地壳上部的挤压和拉伸现象,主要是由重力作用造成的,开始把重力作为一种重要的造山机制。

19世纪末至第二次世界大战期间,通过欧洲亚平宁山、阿尔卑斯山等地区巨大的推覆构造研究,用重力作用解释区域尺度的构造现象取得了很大进展。阿尔卑斯构造地质学者,在大面积填图和剖面图测绘基础上,提出重力流动的概念,认为形成大型伏卧褶皱的岩层相当软,难以传递搬运整个联结在一起的粘滞体所需应力,因此,不得不求助于作为体力的重力,去解释那些复杂的现象。哈尔曼(Haarman, 1930)的颤动说及范本梅伦(van Bemmelen, 1931)的波动说问世,代表了重力构造学说的一个重要发展阶段,他们认为,地壳垂向上的运动是初始的,而岩体沿斜坡在本身重力作用下的滑动现象,则是次生的重力构造。简言之,垂向运动破坏了平衡,产生了新的势能,水平运动丧失了势能,创造了新的平衡。

二次世界大战后至60年代中期,以典型的重力滑动构造实例研究和模拟实验为主,深入探讨重力构造形成机制,并进行必要的理论概括,提出各种重力构造的分类方案,更加强调重力在造山和塑造最终造山带构造型式上的作用,重力不稳和密度不均、重力势和空间势、孔隙流体压力、水力破裂及有效应力等一系列物理学上的概念,大量引入到重力构造理论里来,因之,进一步充实和加强了重力构造的理论和力学基础。

自从20世纪60年代板块构造学说问世以来,地质学者和地球物理学者相继将重力构造引入全球构造、岩石圈动力学范畴加以应用。例如,当软流圈的顶部相对于平衡状态略微隆起时,岩石圈必然滑离软流圈的隆起区,从而在岩石圈内产生附加应力。同时,软流圈的上升会增大岩石圈的压力,并在软流圈中造成粘滞性流动,从而挤压或拉伸岩石圈。在研究大洋中隆及岩石圈板块运动学时,许多学者都运用了重力及重力不稳定性的概念。除此之外,不同尺度的重力滑动构造的识别和分析,推覆构造、底辟构造、伸展构造等的解析,也都考虑到重力作用的积极因素,丰富了重力构造的内容,拓宽了其研究领域。

近年来,地质和地球物理学者密切配合,充分利用各种地球物理资料尤其是COCORP深震反射资料及衍射波信息,分析和模拟岩石圈结构及地球动力学过程,用均衡调整理论解释水平运动及垂直运动的相互关系,在认识核幔边界构造(Yessession等, 1992)、大洋旋回式的打开与关闭、伸展塌陷(Dewey, 1988)及造山带物质的侧向挤出、重力扩展(Ratschbacher等, 1991)等领域方面,有了新的进展。许多学者已趋于一致的认识,造山带岩石圈由四层物质组成,即在地质时间尺度上的固态上地壳,流体地壳层、固态铁镁质下地壳及上地幔。上地幔及固态下地壳内的局部应变是由流体地壳层的区域性破裂相伴的,而不均匀的变形上地壳块体则浮在流体层之上,流体层内部的流变场则主要是受上地壳块体漂浮平衡性控制的。壳内的均衡调整作用无论在伸展或是在挤压造山过程中,主要产生在厚的地壳或高热流区。这是因为厚的地壳区域具有巨大的剩余能量,处于重力不稳定性状态,组成地壳的物质有向四周较稳定地区流动和扩展的趋势。Dewey(1988)指出,一个造山带形成过程中,由板块汇聚对接造成的地壳缩短作用是与由体力控制的抬升伸展作用同时进行的,而变形的总体矢量则受板块相对运动及体力共同制约。换言之,在造山带内部的应变和位移矢量,是由体力及板块驱动的运动联合作用的结果。从这里可以看出,地壳水平缩短增厚、垂向伸展和重力塌陷(gravitational collapse)、重力扩展是一个统一的复杂过程。经济地质学者,如石油地质学者、煤田地质学者等,也借用同样和类似的概念解释沉积盆地的形成、发育和改造,指导石油、天然气及煤田的勘探与开发,分析逆冲推覆构造、伸展和拉分构造。

岩石圈运动和变形是多种原因的。深入探索和研究重力与其它力源特别是热力的相互关系,结合深震反射资料进行三维重力模拟、解释地壳或岩石圈深部构造,识别岩石圈不同层次和不同尺度的重力构造样式并从物理学上进行解释,建立数学与物理模型,结合石油、煤田的寻找和开发工作,研究重力滑动及重力扩展构造的控制作用,继续研究重力均衡调整、重力与地幔对流和板块构造的关系,寻找地震活动的能量库及动力源,建立地球动力学演化模式,乃是近期该领域的研究热点。

参考文献

- 马杏垣, 索书田, 闻立峰. 构造地质论丛, 1981, 1(1): 1~9
- 马杏垣, 索书田, 游振东. 嵩山构造变形——重力构造(构造解析). 北京: 地质出版社, 1981. 1~256
- 索书田. 地球科学, 1983, 22(3): 11~22
- Dewey J F. *Tectonics*, 1988, 7(6): 1123~1139
- Ratschbacher L, Merle O, Davy P. *Tectonics*, 1991, 10(2): 245~256

(中国地质大学索书田教授撰)

地槽—地台学说 geosyncline—platform theory 简称“地槽学说”。地质学的发展到19世纪中期,人们在总结当时认识的基础上,开始判别出地壳构造可分为两种活动性大小不同的单元,分别称地槽区和地台区,而地槽和地台是地槽区和地台区的简称,由于它们的发现和阐明,便逐渐形成一种关于大陆地壳演化一般性规律的原始理论——地槽—地台学说。

1859年,美国J. 赫尔根据研究北美东部阿拉帕契安山脉

(Alachian Mts)的古生界地层的岩性、岩相和厚度的特点,及其所受褶皱的强烈情况,并与邻侧的北美中部大平原者对比的结果,提出了一种解释,认为该处山脉生成之前,原是分布着一些海槽的地区。后来海槽中的沉积物遭受两侧地块的挤压,发生褶皱,因而升起成为山脉。至1873年, J. D. 德那总结了当时的有关地质资料,讨论地球冷缩与山脉成因时,发展了赫尔的思想,并把上述的海槽定名为“地槽”。介于海槽之间的隆起地带(露出海面的部分就成为链状群岛,也称岛弧),则叫“地背斜”。

18~19世纪,关于地层的褶皱以及山脉形成的力源,存在着两种对立的看法。一种是由18世纪时由俄国罗蒙诺索夫(M. B. V. Lomonosov)倡导,后经苏格兰J. 胡顿等发展而成的隆起说,即主张由于垂直运动。胡顿于1788年发表的《地球学说》中提出:在地壳运动中,起主要作用的是垂直运动,就是由地球内热的上升力所引起的隆起作用。在隆起过程中,自下而上的原始方向的力,便导致了岩层因重力与阻力相配合所造成的侧向压力及倾斜力,并使岩层发生褶皱。继胡顿之后,在19世纪前半期,经瑞士斯图德尔的充实,这一学说便具体形成。

另一种看法则是19世纪中期由法国学者鲍蒙特(E. de Beaumont)为代表的收缩说,即主张由于水平运动。鲍蒙特于1852年认为:岩层的波状拗曲,用地球水平压缩来解释最为自然。他还认为:地球系处于冷却和压缩的状态,它的外壳已冷却到可能的限度。因此,它的体积固定不变,但地球内部还未冷,还在继续缩小体积。结果,对于正在缩小的核心来说,地壳是太宽了,便被褶皱起来。这一学说由于19世纪末在阿尔卑斯山脉等处褶皱带中发现了大的逆掩断层,遂得到有力的支持,终于代替了隆起说及垂直运动说而取得优势。例如,奥国学者修斯(E. Suess)于1875年在其《阿尔卑斯山脉的成因》一书中,就是从收缩说观点来阐述褶皱山脉的形成机理。按照修斯的见解,地槽是地壳中拗陷很深的海槽,其中沉积了很厚的沉积物。后来在水平压力的挤压下,这些沉积物便被褶皱、逆掩、垒叠起来,升露海面,成为高峻的山脉。至于象北美中部大平原那样的构造—地槽区(简称“地台”)。

随着地质学的发展,人们逐步发现,地槽区与地台区之间具有历史生因和演化顺序上的密切关系。因为在许多地台区内,可以见到其处的地壳结构是双层的,即由上下两个“构造层”组成。上面为时代较新的由未受过褶皱的地层组成的“沉积盖层”,下面是由时代较老的,由已受过强烈褶皱及区域性变质的,如同构成褶皱带山脉那样的地层所组成的“褶皱基底”。上下两构造层之间为一明显的不整合面所分隔。据此人们便得出结论:地台区是在地槽区的褶皱带山脉经过剥蚀削低,达到准平原化的基础上发育而成的,也就是由地槽区转化而成的。正如前苏联学者别洛乌索夫(V. V. Belousov)所说的:“地壳的地台状况是跟着地槽状况之后的”,“这样便形成了一个比较有系统的大地构造理论——地槽—地台学说”。

根据地槽区与地台区的转化关系,人们将地壳的发展过程分为二个阶段:起先是活动性强,叫做活动区阶段,出现了地槽区;在地槽中所沉积的巨厚地层,后来遭受水平运动,被挤压褶皱形成山脉。再后,该处地壳演化便转入地壳活动性减弱阶段至褶皱带山脉经受过准平原化后,便转化为稳定区即地台区。

到了20世纪初,地槽学说这个理论在法国奥格(Haug)和瑞士阿尔(A. Argand, 1916)的著作中继续发展。另一方面,经俄国学者的研究,对地槽的概念及其鉴别依据又有所创新。至十月革命后,在前苏联经济建设需要的推动下,发展迅速,并形成了新的学派。这时,世界上关于地槽的理解及其研究方法便分为两个大学派。一个是以德国的史蒂勒(H. Stille)、瑞士的阿尔冈、美国的凯伊(Kay)为首的一派。史蒂勒在研究方法上仅强调地层厚度和表面形态的对比,作为判别地槽的根据。并据此把地壳中所有的区域性地表拗陷都称为地槽,然后又仅仅根据它们的形态及所在的位置来进行分类,认为长带状(线状或弯曲状)并位于地台周围

边缘的拗陷为正地槽,短带状而位于地台之上的拗陷则为准地槽。凯伊在其《北美地槽》(1951)一书中,完全采纳了史蒂勒的划分构造区的方法及识别标志,仅据地层厚度及地表形态把北美洲的所有拗陷都划为地槽。因此,他们所理解的地槽,不仅有地槽褶皱带特征,而且具有地台区的特征。

另一个则是由俄国 A. Yu. 卡尔宾斯(Karpinsky)所奠基,后经阿尔汉格尔斯基(A. Arhangelsky)加以发展的“历史分析学派”。这派强调从历史分析对比的角度来划分构造区的方法和鉴别标志。它认为不是地壳中所有的拗陷都是地槽。地槽的认识标志主要是这种拗陷中的地层以具有自己特色的沉积—岩浆—变质建造为特征,并受过具有自己特色的构造型相的改造。例如在沉积建造方面,主要是以由格拉瓦岩(graywacke),构成的复理石建造为代表,具有海相复理式的韵律。岩浆建造方面早期主要为细碧角斑岩建造,由海底喷发的基性至中性层状熔岩所构成,中期有以花岗岩等酸性岩为主的侵入岩浆建造。变质建造以区域变质为广见。在构造型相方面则以长线状褶皱逆掩,及推复构造发育为特色。关于地槽的分类,这学派认为,有早期海底火山喷发者为正地槽,而火山活动缺乏或微弱者为潜(冒)地槽。此外,这学派还强调地槽区与地台区之间具有历史生因关系,地台区是由地槽区衰亡之后转化而成的,并据此进一步阐明了关于地壳演化一般性规律是先有地槽区,随后出现地台区的观点,同时丰富了“地槽—地台学说”。

参考文献

- 1 别洛乌索夫. 大地构造的基本问题. 北京:地质出版社, 1954
- 2 凯伊. 北美地槽. 北京:科学出版社, 1959
- 3 陈国达, 陈思民. 大地构造学(上下册). 中南矿冶学院、中山大学及兰州大学出版, 1962, 1964

(中南工业大学陈国达院士撰)

地台活化、活化区及地洼区 platform activation,

activated region and diwa (geodepression) region 地质学发展到了20世纪中期,一些学者在批判地继承地槽—地台学说的基础上,加以创新,相继提出并逐步发展了一些关于大陆地壳构造演化的新概念。地台活化、活化区及地洼区是其中的较著者。

自1859年地槽—地台学说由美、奥两国学者提出并经前苏联等国学者发展以后,关于大陆地壳构造的类型一直被认为只能划分为地槽区和地台区2种,前者活动性强,属活动区;后者活动性微弱,属“稳定”区。在判别一个地区的大地构造性质时,人们总是离不开这样的两种选择:即认为“非槽即台”或“非台即槽”,别无其他可能性。在论述一个地区的地壳发展史时,则描绘为仅仅是从地槽(区)阶段进到地台(区)阶段,即由强烈活动阶段转变为稳定阶段。

自20世纪初以来,不少地质工作者已经陆续发现:各个大陆上有许多地区,其地壳演化史实际上比地槽—地台学说所总结出来的结论远较复杂,以致当该说被运用于研究这些地区的地壳演化全过程及现阶段大地构造性质时,便遇到了困难。例如,中国东部自早元古代(华北地区)或中晚元古代(华南地区)至三叠纪中期(华南)或三叠纪晚期(华北)这段地质时间,确曾经历过地槽阶段—地台阶段。这一段地壳演化史与地槽—地台学说是一致的。在论述这一地区的现阶段大地构造性质时,一般地也就据此称它为地台区。所谓“中国地台”之名,由来已久,习惯使用,深信不疑。英国B. 维理士等甚至曾依此认为,在东亚地区中生代是一个地壳运动平静时期。但事实上这一地区的地壳演化到了三叠纪末(华南)或侏罗纪(华北)之后,却出现了与地台区特征相反的情况,地壳运动转变为十分强烈,属造山型,水平运动显著,分异明显,发生了连续型的褶皱及密集断裂,多推覆构造,并有各具特色的“拱曲构造”,形成了高岭深盆相间的构造—地貌格局,广布全区。其中的山岭名叫地穹,盆地叫地洼。同时有大量的花岗岩浆侵入,并多火山喷发。岩浆侵入及变质作用,常造成强烈的接触变质及动力变质,后者主要为“断裂变质”。地穹山

脉隆起急剧,其风化产物便在邻侧的地洼盆地中快速堆积,形成了具有特征性的“假(类)磨拉式建造”。在目前仍处于这一演化阶段的地区,其新构造运动强烈,地震带多见,地震频度与强度均高($M \geq 8$)。凡此种现象,均与地台区的特征完全相异反,以致地槽—地台学说对之无法解释。

早在1927年,中国翁文灏总结了当时许多中国学者野外观察结果,指出这一事实,并称这期造山运动为“燕山运动”。燕山运动的提出,其学术意义不止在于阐明了一期新被认识的造山运动,而更重要的是在于动摇了地槽—地台学说对于地壳演化规律问题的认识。它证明了大陆地壳演化在经历了地台阶段之后,还可以继续向前发展,有较新的阶段出现。这个新阶段是一个活动区阶段,说明作为稳定区的地台区可以转化为活动区。1954年前苏联学者V. V. 别洛乌索夫(Belousov)把地台区转变为强烈活动地区的现象,起名为“地台活化”(activization of platform)。

然而,对于地台活化这一现象的本质,当时还存在着3种不同的理解:(1)把它看做“地台活化部分”,如别洛乌索夫本人1954年的看法属之(至1960年已修改)。(2)把它理解为地台阶段之后的地槽历史重演,如1937年前苏联谢音曼把燕山运动看成“地台区变成地槽区的极好范例”。(3)认为这是地台阶段之后出现了一种新型活动区的标志。例如,中国陈国达指出,这是地台区向活动区转化,地台活化应理解为地台的活动区化。但这个新活动区虽然与地槽区同属活动区,性质相似,具有活动区的各种共同特征,诸如强烈的造山作用、大的构造—地貌反差强度、高的大地热流、强烈的构造—岩浆—变质作用和沉积作用等,但其各方面具体特征却与地槽区不同。此外还有更易区别的特征,就是它具有更为复杂的地壳结构(一般地具有前地槽、地槽、地台及地洼诸构造层),代表更为高级发展阶段的构造单元。因此,它的出现显然不是该处以前有过的地槽历史的重演,而是地壳演化到达更高阶段的产物。陈国达从1956年开始,对这些事实陆续作过阐明,并于1960年出版了《地台活化说及其找矿意义》一书,进一步作了详细的论证。

陈国达(1956)在其《中国地台“活化区”的实例并着重讨论“华夏古陆”问题》一文中,根据地台活化的本质,把由地台活化所造成的构造区视为既非地台区,也有别于地槽区的一种后地台活动区,起名为(地台)“活化区”(activated region),用以反映它的形成过程。1959年,陈国达又根据这个新型活动区在构造地貌上的最主要特征和认识标志是在于它的地穹与地洼相间的盆岭格局,地洼盆地又是其标志构造层即地洼构造层的分布所在,故又叫它“地洼区”。(geodepression region或汉语拼音 diwa)。

1959年,前苏联学者杨申(A. Yanshin)把“地洼”术语译成俄文 дива。随后在西方国家的著作中转译为英文 tiwe, tiva, deva 等。

在1959年的文章中,陈国达把地洼区列为大陆地壳除槽台以外的第3构造单元,并指出其主要特征。至1965年,他又以《地洼区后地台阶段的一种新型活动区》为题,着重对它的鉴别依据作了系统的、全面的论证。陈国达认为:(1)在地壳结构上,地洼区由于一般是继在地槽区→地台区这两阶段之后才出现的,它既可继承地槽(及前地槽)、地台几个构造层,然后又在此基础上发育自己的构造层(地洼构造层),从而形成了更复杂的结构。(2)在构造—地貌上,由于它是具有造山运动为重要特色的,故反差强烈,起伏急剧。这与地台区之起伏和缓,反差微弱,平宽开阔,以准平原为特征者相反。另一方面,地洼型山脉以短带状、块断成因为主,与地槽型山脉之多作长带状、褶皱成因为主者有别。区内高原发育,山脉也多属高原型(反映以前地台区的地貌特征残留部分)。(3)在构造型相方面,由于地洼型造山作用发生于地台阶段之后,这时该处硅铝构造层较多,硅铝壳厚度也较大,刚性较强,故所成褶皱以宽展型为主,断层密集而多块断型,并有属于半刚性变形的“拱曲构造”。推复构造可发生于或影响及各个构造层。(4)沉积建造方面,由于地洼型沉积盆地通常发生在地壳膨胀、地面上隆的背景上,故主为陆相,并多陆相复理式韵律。山麓相、山间河流相十分发育;并多内陆湖相。(5)岩浆建造方面,

其岩石一般以高硅高碱而低铁镁为特色;重熔花岗岩多见。岩浆活动顺序通常由酸中性发展到基性。(6)变质建造方面,以断裂变质沿深大断裂带广泛发育为特色,有时具高压特征,并可出现混合岩化及花岗岩化。

由于上述各方面的特征,使得地洼区可以同地槽区相区别,并且具有重要的成矿作用。自60年代以来,地洼区(活化区)已在各大洲陆续发现。目前这方面的研究正在国际上逐渐开展,研究前景宽广。

参考文献

- 1 Wong W H. Crustal movement and Igneous activities in Eastern China since Mesozoic time. Bull Geol Soc China, 1927, 6(1): 9~36
- 2 谢音曼. 中国台盾的发展史. 苏联地质出版社, 1937
- 3 别洛乌索夫. 大地构造学的基本问题. 北京: 地质出版社, 1954
- 4 陈国达. 地质学报, 1956, 36(3): 239~272
- 5 陈国达. 科学通报, 1959, 3: 94-95
- 6 陈国达. 地台活化说及其找矿意义. 北京: 地质出版社, 1960
- 7 陈国达. 中国大地构造问题. 北京: 科学出版社, 1965. 1~52
- 8 陈国达. 中南矿冶学报, 1991, 22(6): 473~486

(中南工业大学陈国达院士撰)

地洼学说 theory of geodepression (diwa) or activated tectonics 详称地洼构造学说,也称活化构造学说,是在批判地继承地槽—地台学说的基础上,按照对地台活化的深入理解而提出并逐步引伸发展而成的一种新学说。它最初只是以阐明大陆地壳演化过程中继地槽区→地台区之后形成的第3构造单元这样的简单理论出现。随后在此基础上逐渐充实和扩大,终于成为涉及从洋壳到陆壳,包括岩石圈的演化和运动及其规律和力源机制在内的、具有全球性的一个新型综合大地构造及成矿学理论体系。

1956年,中国陈国达发表《中国地台“活化区”的实例并着重讨论“华夏古陆”问题》一文,第1次提出第三构造单元“活化区”概念的雏形,标志着地洼学说的诞生;在1983年日本弘文堂出版的《科学史技术事大事典》的《简明科学史技术史年表》(伊东俊太郎编)中,已正式把它作为大事之一列入。随后陈国达相继发表的《地壳的第3构造单元——地洼区》(1959)及《地洼区——后地台阶段的一种新型活动区》(1965)等著作,均系对这个新构造单元的特征、鉴别标志、类型划分、在地壳演化史上的出现时间和在地理上的分布规律等,作出的详细论证。

起初,人们认为活化区(地洼区)的出现,不过是中国及其他有关地区的特殊的、局部性的情况。后来经过中国及外国学者的研究,证明了这个后地台阶段的新型活动区在亚洲其他地区(西伯利亚南部及东部、蒙古、日本、朝鲜、越南、高加索、中亚、印度北部、阿拉伯半岛等)、北美(西部的盆—岭地区、维儿大、加拿大大熊湖等)、南美(巴西)、欧洲(莱茵地堑、南斯拉夫、北欧波罗的海区、西欧等)、非洲(东非裂谷区、红海、南非等)、澳洲(东部、中部、塔斯曼尼亚),以至南极洲(中央山脉以西)均有分布。这些发现说明这个新构造单元虽然首先在中国发现并阐明,但具有世界意义。另一方面,进一步研究又已证明,在大陆地壳长达40亿年以上的漫长演化史中,无论活动区还是稳定区,都已出现过不止一种,因此,它们在出现时间顺序上构成了一连串的动定旋回。这说明,无论活动区的“稳化”还是稳定区的“活化”都不止一次。1959年陈国达发表的《地壳动定转化递进说》就是对大陆地壳演化的这样的一般性规律的阐述。

根据成矿作用及其所成矿产乃是地壳演化历程的产物这一观点,一种新的、与地壳动定转化递进说相对应的成矿理论——“递进成矿理论”逐步建立起来。前苏联外贝加尔地区,按照传统成矿理论曾一直被认为是无矿或远景甚小的地带。前苏联学者后来发现该处实际上为活化区,于是根据大地构造单元成矿专属性

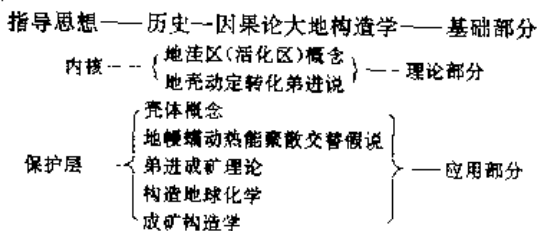
的原理,并与中国的活化区对比,改变勘探战略,将该处列为重点勘探区,结果便找到了当时该国短缺的钨、锡、稀有元素及萤石等矿床。“多因复成矿床”理论在不少地区(例如中国湖南花垣铅锌矿)寻找富矿,收效显著。

为了便于把岩石圈的演化与运动结合起来,以求更好地全面解决矿产的时空分布规律问题,使大地构造及成矿学能够更有成效地适应为找矿服务的需要,陈国达于1977年初步提出壳体构造概念;随后逐步充实和深化,于1992年作出系统的论述。他把壳体看作组成地球硬壳(岩石圈)的如同细胞那样作用的块体。它们是在不断演化又在不断运动的时空综合超级构造单元。它们的形成过程是在岩石圈孕育和形成过程中,就已开始于不同地域先后分别诞生、增长而成。它们组成岩石圈后仍继续运动、变化和发展。它们与岩石圈的关系是先有壳体,才由它们组合成为岩石圈。这些都是壳体与板块的主要区别。

鉴于地壳演化过程中出现的热事件盛衰变化与大地构造体制更替的密切关系,陈国达于1977年提出“地幔蠕动能聚散交替”假说即设想地球硬壳之所以分异发展,壳体的演化—运动过程之所以通过动定转化、交替更迭、递进发展的根本原因,以及壳体内部及整体运动和有关构造形成的主要力源机制,均是在于地幔物质和温度的不均一性所引起的地幔蠕变及流动。前者是由于地幔蠕动的速度以及给位于其上相应部位的壳体或其中有关地段提供热能多少的变化,即地幔蠕动活跃期与相对宁静期的交替,从而引起在有关壳体或地段热能积聚的增减交替所致。后者则是由于地幔平向蠕动流所产生动力场的变化,并因此牵引壳体或其中有关地段发生相应的应力场和运动方向变化的结果。此外,这假说还探索了由地幔蠕动直接间接导致的成矿作用,以及地幔蠕动同深部构造反差强度、深部构造控矿的关系。

随着地洼学说本身内容发展的同时,还衍生了一些新兴科学,目前已成熟的有构造地球化学和成矿构造学两门。(1)构造地球化学为一门由构造地质学同地球化学互相渗透而成的、着重研究构造作用同物质运动之间的密切关系的交叉科学。陈国达、黄瑞华认为,地质构造作用不仅是机械过程,而且还有化学过程。建立这门学科就是为了研究各种地质构造作用过程与地壳中化学元素的分配和迁移、分散和富集等关系,即把形成与变形、建造与改造之间的辩证统一关系加以阐明。(2)成矿构造学是专门研究与矿床形成及改造有关的地质构造的一门学科,是陈国达于1965年开始提出,逐步形成的。它主要根据构造地球化学的原理,阐明构造对于矿床的关系,不只有控矿的一面,而且有促致或参与造矿的一面。其研究任务和范围包括直接间接控制、影响或参与内生及外生矿床形成和改造的大中小各级构造。此外,还有与地洼学说并行创建及发展的综合性新型全球大地构造学,即历史—因果论大地构造学。这门把地质学发展史上一直分歧的历史论和因果论二门大地构造学有机地结合起来,既兼顾两方的研究目的和任务,又把两者研究方法的长处融为一体的学科,既可以列入地洼学说的衍生学科,同时又是地洼学说的基础理论,指导着该学说的向前发展。

地洼学说已发展成为具有5个组成部分和3个衍生学科的,比较完整的大地构造及成矿学的理论体系。其理论结构有如下表所列:



地洼学说今后的发展,陈国达认为:在研究方法上,强调把历史分析同动力分析相结合的“历史—动力综合分析法”;在发展方式上,在于充实和加固内核,以及调整某些或各个保护层以适应世界科学前沿的进展和

变化。研究领域包括学说本身的进一步研究,以及运用它解决实际问题。

参考文献

- 1 Chen Guoda Tectonics of China. Intern. Acad Oxford, U K, Publishers-Pergamon Press, 1988
- 2 Chen Guoda. Developments in Geosciences of China. Beijing: Science Press, 1989, 1~8
- 3 Chen Guoda. On the theory of activated or geodepression (diwa) tectonics, 1990, 14(2), 95~107

(中南工业大学陈国达院士撰)

地壳动定转化递进说 theory of progression, with

transformation between mobile and stable regions 20世纪50年代中后期,由于地台活化现象的本质问题的提示,以及由此发现了大陆地壳第3构造单元即活化区(地洼区),便引起了人们注意到地壳构造演化规律问题的重新研究,并开辟了一条新思路,把大地构造学研究推进到更高的阶段。

1959年,中国陈国达发表《地壳动定转化递进说——论地壳发展的一般规律》一文,阐明了地壳的构造实际上是多单元的,其演化历程实际上是多阶段的。陈氏指出,以往的地壳演化理论(地槽—地台说)对于地台区的发展只知其始(自地槽区转化而成)而不知其终;对于地槽区的发展则只知其终(转化为地台区)而不知其始。地台活化的研究固然已经说明,地台区不是地壳构造演化的终点,它可以转化为新的活动区(活化区或地洼区)。但实际资料又已经指出,地洼区也不是地壳构造演化的最终形式,它还可以转化为更新的构造区。因为有些发生时代较早的地洼区目前已经发展到余动期,其活动性已经转弱,表现出有向稳定区转化的趋势。这个新的构造区可用Y1来表示。依照同样的道理,地槽区也不是大陆地壳构造演化的起点,在它诞生之前已经有过若干个阶段。关于这一点,早在1950年,前苏联A. B. 裴伟(Пейве)及B. M. 西尼村(Синицын)就曾经揭示过,他们认为地槽区是以一个古老的稳定区为基础发育而成的,并称这个稳定区为“统一的地台”或“泛地台”。陈国达根据这个古老稳定区的特征与真正地台区的区别,则认为它实系一个与地台区不同的、前地槽阶段的另一种类型的稳定区,并用X来表示,它以位于地槽构造层之下的结晶基底为代表构造层。

1962年,陈国达对前地槽阶段构造单元作了进一步研究,认为古老结晶基底实际上包含有不止一个构造层,它们是在地槽区出现之前的多个地壳演化阶段的产物。它们的产生时代自前太宙(40亿年前)延至早中元古代(13亿年前),为长达20多亿年,其中至少可以再细分出两个活动区和稳定区阶段。陈氏建议自新而老用X-1(原陆壳稳定区,各地原区),X-2(原陆壳活动区,各地盆区),X-3(萌陆壳稳定区),X-4(萌陆壳活动区)。这些古老构造单元的发育基础为原始地壳(硅镁层),以X-n表示之。在X-4与X-n之间有无经历过其它未知阶段,尚待今后研究。

在《活化、稳化、动定递进转化》(1963)一文中,陈国达进一步指出:在大陆地壳演化的历程中,地槽区衰亡转化为地台区,是通过活动区的稳定区化(简称“稳化”)来实现的;反之,地台区衰亡,转化为地洼区,则是通过稳定区的活动区化(简称“活化”)来实现的。综观现知的大陆地壳演化史,曾经出现过的构造单元中,无论是活化区还是稳化区都不止一种。因此,在构造单元的相继衰亡与转化过程中,无论是活化还是稳化也都不止一次。人们曾经详细研究的“地台活化”实系多次活化的序列中的较新一次而已。由此可见,大陆地壳的演化过程,实质上是一系列的活区—稳区—活区……相继转化的过程,大陆地壳构造演化史乃是一连串的活化—稳化—活化……的历史,构成了一个接一个的动定旋回。

陈国达(1959)在分析不同构造单元的地壳结构差别的时候,发现了这种差别是有序的,并且与相应构造单元在大陆地壳演化史中的出现顺序呈正相关。也就是说,出现顺序愈晚的构造

单元其地壳结构愈复杂,即所包含的构造层数目愈多。其原因是在于任何一个演化阶段所成的构造单元,它既继承了先一代构造单元的所有构造层,又在此基础上发育了自身的标志构造层。因此,累积的构造层多少,必与它的出现序数成正比。例如,地槽区在前地槽构造层(结晶基底)之上发育了自身的标志构造层,即地槽构造层。地台区则在继承了地槽区的所有构造层之上,多发育了地台构造层。地洼区除了继承地台区的各个构造层之外,又增添了地洼构造层。所以地洼区的地壳结构无论比地槽区还是比地台区都更为复杂。

根据上述的研究结果,陈国达得出结论,认为大陆地壳构造的演化,总的来说是通过各种不同的活动区同各种不同的稳定区,互相转化,交替更迭,从一个动定旋回到另一个动定旋回,由简单结构到复杂结构,由低级阶段到高级阶段,循着螺旋式上升的路线,之字形曲折,波浪式起伏,递进前进的。这个一般性规律,叫做“地壳动定转化递进律”(简称“递进律”)。

参考文献

- 1 陈国达. 地质学报, 1962, 3(3): 279~292
- 2 陈国达. 中国科学院中南大地构造研究室参加湖南省 1963 年学术年会论文集
- 3 陈国达. 科学通报, 1963, 1: 17
- 4 陈国达. 大地构造与成矿学(第 4 卷增刊), 1980
(中南工业大学陈国达院士撰)

递进成矿理论 theory of progressive ore-formation

从 20 世纪 50 年代中期起,由于地台活化及其形成的新构造单元的成矿重要性的初步阐明,建立在地槽—地台学说之上的传统成矿理论已开始受到挑战。特别是在像中国东部那样地壳演化史复杂,现阶段的大地构造性质属于地洼区(活化区)的地域找矿,旧的成矿理论尤易显出不足。

1958 年,中国陈国达在《活化区矿产分析》一文中,对于这个新型活动区的矿产特点,包括它从历代前身的构造单元继承下来的矿产,以及它自身各种成矿作用所成的矿产,作了初步的研究,阐述了它们在时间和空间上的分布规律。1960 年,陈国达又出版了《地台活化说及其找矿意义》一书,对于地洼区矿产的时间规律及其与地槽区、地台区的比较,进一步提出较为详细的分析。在此基础上形成了一种新的成矿理论。这个成矿理论是建立在地壳演化理论“递进说”之上的,所以称为“递进成矿理论”。又由于它是通过地洼区的发现及其成矿作用的重要性而产生雏形,以及随后逐步引申形成的,故又称地洼成矿理论。依陈国达在他主著的《中国大地构造概要》和《地槽学说概论》,以及专著《成矿构造研究法》中的论述,递进成矿理论可以概括为下列几点内容。

成矿作用演化的规律性 蕴藏在地壳中的矿床,乃是地壳演化的产物,它们是随着地壳演化的进程通过先后各种不同的大地构造成矿作用而形成的。研究结果表明,成矿作用是与地壳演化同步的,是同受动定转化递进律制约的。所以,各种不同体制的大地构造单元的成矿作用及其所成矿产也各有特色,并且循着递进规律而叠加积累,致使在数量上由少向多发展、质量上由贫向富发展,矿床结构上也从简单向复杂发展。这是递进成矿理论的立论基础。

大地构造单元成矿的专属性 在地壳演化过程中,于不同大地构造体制下形成的构造单元,由于该处的地质—地球物理—地球化学历史背景的不同,以及当时的地质—地貌—动力环境的差异,便形成了不同的历史—动力成矿条件,从而产生了相应的重点矿种组合和(或)重点矿床类型系列。

矿产继承性、成矿递进性及矿床叠加现象 较早世代的大地构造单元所成矿产,可由较后世代的大地构造单元继承下来,作为自己矿床形成的基础,或者作为自己蕴藏矿产的一部分。这就形成了矿产继承性,而这些矿产也就叫做继承矿产。因此,任何一种构造单元,它里面赋存的矿产其大地构造类型都比它的前一代构造单元者多,因为它既有前世代的矿产,又增添了自身的

矿产,并且,凡在地壳演化史中出现顺序愈后的构造单元,它所继承的先成矿产愈多,这就形成了成矿递进性。因此,在出现顺序较后的构造单元,往往可以见到“多代同堂”的“矿床叠加”现象。并且,出现顺序愈后的构造单元,这种现象愈为明显。地洼区是现知各种构造单元中出现顺序最晚的一种,所以它的继承矿产最多,矿床叠加现象最为发育,里面蕴藏的矿床最为综合、最为多样,特别丰富多彩。中国境内地洼区分布广泛,占总面积 80% 以上,提供了丰富的地下资源,矿种齐全,有可能加快发展国民经济,成为富强国家的天赋良好条件。

成矿作用的叠加、改造与多因复成矿床 1975 年,陈国达在中国南方富铁矿会议上论述《大地构造与富铁成矿规律》时,曾经初步分析了多种大地构造成矿作用的叠加与(或)改造,导致多种物质来源复合,及其对于富矿形成的关系。1978 年,在《成矿构造研究法》专著中,对于多因复成矿床作了进一步阐述。1979 年,在其《从地壳演化规律看多因复成矿床》一文中,又把多因复成矿床的形成作出理论分析。自 1982 年陈国达在前苏联第六届国际矿床成因协会上正式向国际学术界宣读《多因复成矿床并在地壳发展规律看其形成机理》一文后,这一概念已引起广泛的注意和应用,收到明显的找矿效果。

综合陈国达以上各篇著作,多因复成矿床概念的主要论点是:先成构造单元的各种成矿作用,包括岩浆、沉积、变质、构造诸方面或它们综合的成矿作用,可以为后成构造单元提供成矿物质基础(其中包括尚较简单的矿床或矿源层/矿源岩);又或为后成构造单元提供有利的成矿围岩或成矿构造。另一方面,后成构造单元的各种成矿作用(特别是构造、岩浆、热水、变质诸方面或它们的综合结果)又可把先成构造单元遗留下来的矿床给予叠加、改造,使之富化或(及)增大,形成更富、更大的矿床。此外,这些成矿作用还可把先成构造单元遗留下来的矿源层(岩)中原来还属尚在分散状态的成矿元素驱动或带动,使之活化、迁移,汇集于适宜的岩性层位或构造部位,即把矿源层(岩)再造,形成达到工业品位、可供开采的矿床。

其次,从成因类型的角度看,通过如同上述的 2 种或多种成矿作用的叠加、改造(又或再造),互相交织所形成的矿床,往往不止一种成因特征,其中既有内生也有外生特征,亦此亦彼,以致关于这类矿床的成因问题往往长期争论,无法解决,并因此使找矿方向问题也受到影响,无从确定。依现实实例所见,这类矿床的最突出特征是具有“五多”,即多成矿大地构造阶段、多物质来源、多成矿作用、多矿床成因类型、多控矿因素。

就已研究的矿床而论,多因复成矿床可有 3 种成矿模式,即:叠加富化、改造富化和再造富集。它们有时单独进行,但在不少情况下,2 种或多种模式结合在一起,形成更为复杂的矿床。论其成矿大地构造条件,多因复成矿床可以至少分出如下几类:地槽(及前地槽)沉积(或火山沉积)变质矿床+地洼岩浆矿床的叠加富化;地台沉积矿床+地洼岩浆矿床的叠加富化;地槽(及前地槽)型矿床+地洼型成矿作用(岩浆、构造、变质、热水等)的改造富化;地台型矿床+地洼型诸种成矿作用的改造富化;前地洼阶段各矿源层(岩)+地洼阶段各种成矿作用的再造富集。

多因复成矿床的重要性,主要在于这类矿床往往由于积累了多次成矿作用及多来源物质而成为既大且富的矿床。世界上许多著名的大型富矿,例如中国的白云鄂博钕—稀土—铁矿床,就是属于这型矿床。因此它的提出和阐明,对于许多重要矿床的成因及其找矿方向问题的解决,具有特别重大的理论意义和实用意义。多因复成矿的研究,目前在国内外(特别是前苏联)均有较快的开展。随着寻找大型富矿的生产需要,今后研究当日益深入和提高。

参考文献

- 1 陈国达. 湖南地质学报, 1958, 2: 3~10
- 2 陈国达. 地台活化说及其找矿意义. 北京:地质出版社, 1960
- 3 陈国达. 我国南方富铁矿资料汇编(1), 1977, 113~136
- 4 Chen Guoda. Research methods on metallogenic tectonics

Geol. Press, 1978, 2nd ed, 1986

(中南工业大学陈国达院士撰)

历史—因果论大地构造学 *historistic-causationist geotectonics* 是中国陈国达于 1992 年正式提出建立的一种新全球大地构造学。

在地质学发展史上,关于地质学的研究目的,意见不一。美国劳丹(R. Laudan)把它们归纳为 2 类:一类认为其目的主要在于对地球历史的重建,即把地质学看作自然史的一部分,要求写出详尽的地球史,并把研究重点放在追求地质事件的时间序列上,尤其重视遥远过去的事件,特别重视由“岩石建造”代表的地质体。这可称为历史主义或历史论地质学。另一类则认为,它的主要目的在于对地球变革的理解,即把地质学看作是自然哲学的一部分,并把研究重点放在探究支配地球变化的一般性规律;而对于地质学记录的细节则注意较少,大都是附带性的,主要是为了满足检验所提地质定律的需要,并且大多倾向于选择最近的过去,因其对于研究对象来说最为完整。这可称为因果论地质学。作为地质学中常常涉及地球科学中许多根本性问题的**大地构造学**,这种分歧自然更为明显,并形成了**历史论大地构造学**和**因果论大地构造学**。这不独表现在研究目的上,尤其表现在研究对象的选择,以及所采用研究方法等方面的分歧。例如,在**历史论大地构造学**理论中,有些主要探究地壳演化的阶段划分、构造单元的出现顺序和**历史生因关系**(如地槽—地台理论),而在**因果论大地构造学**中,则有些主要探索地壳中诸种构造的力学成因和体系划分(如地质力学);另一些主要探索岩石圈块体的移动情况,互相间的力学关系,以及移动的力源机制(如板块理论)。因为主要研究对象不同,导致主要研究途径和方法各有侧重。从研究全球构造看来,二者都有其重大作用和意义,轻一不可,但由于它们都有各自的局限性,只有双方互相结合,融为一体,建立双方同等兼顾、目的、对象及研究方法比较全面的新型**大地构造学**,才能较完整地认识地球的形成、运动、变化、发展过程和规律,以及它们发生的根本原因和力源机制,从而较易了解矿产的时空规律性,更有效地指导生产。这样同时吸收**历史论**同**因果论大地构造学**两方的长处,把两者的适用部分有机地结合起来,相得益彰的一门综合性新型**全球大地构造学**,陈国达建议叫它做“**历史—因果论大地构造学**”。

历史—因果论大地构造学的研究任务是全面地既研究地球(现阶段主要为地球硬壳,相当于岩石圈)的孕育、诞生、成长、运动、变化和发展的全过程,同时又探索这个过程的发生和演变的根本原因和力源机制。为了这一需要,陈国达倡议建立了把演化与运动结合起来、融为一体、统一研究的构造概念,叫做**壳体**。它指的是组成地球硬壳的胞体,是在岩石圈孕育、形成和发展过程中,可能先后不一地出现于不同地域,在诞生、成长、运动、变化和**发展**等方面分异进行,既在演化又在运动(包括移动)的时空综合的全球性巨型超级构造单元(详见“**壳体构造**”条)。岩石圈就是由这些在形式上表现为块体,具有不同的演化—运动历程的**壳体**逐步增生、移动,通过互相联结、拼接组合而成的。**历史—因果论大地构造学**的任务核心,就是研究各个不同壳体的诞生、成长、运动、变化的发展的全部历程的细节,它们的形成和演化方式,整体运动和体内运动,水平运动和垂直运动,物质组成、地壳性质、成熟度、演化阶段,垂向及平向结构、构造单元组成,厚度和面积及形态的变化、类型划分,运动与相对运动的方式、进退弯旋等运动的变化、分裂离散与汇聚接合的变迁,演化与运动,诞生与消亡的方式,以及上列各种史实发生,变化的根本原因和力源机制等。在此基础上,进而总结整个地球硬壳及其中各个壳体的形成、运动、变化和发展的规律及其因果关系,据以预测未来。此外,在掌握这些规律的同时,还需总结由这些规律所制约的**成矿规律**,以及和自然环境、自然灾害等的关系,据以认识各种矿床在时间上的出现规律和空间上的分布规律,指导找矿以及解决其他生产问题和消减灾害等问题。

陈国达指出:历史因果论的研究方法宜吸收历史论同因果论两方面研究方法的长处,结合起来,综合运用,形成历史—动力综合分析法。具体要求包括下列几点:(1)发展观点与联系观点结合。由于**历史—因果论大地构造学**既要研究全球范围内每个壳体在不同地质时代的运动和变化,及其在时间发展上的和在历史生因上的联系,又需研究每个地质时代中全球各个不同壳体的运动和变化,以及它们互相之间的空间上的变迁和在力学上的联系。(2)时间观念与三维空间观念结合。**历史—动力**分析法既要求着眼于时间又要求着眼于空间;并且在空间方面既着眼于平面(二维空间)又着眼于立面(垂直的一维),即要求四维思维,并且运用地球物理方法同地质方法相结合以加大垂直一维的认识,即注意大三维空间。(3)水平运动与垂直运动并重。要求注意壳体运动既有水平运动又有垂直运动,虽然水平运动的尺度通常可以较大,在平面图上的变化又较易察觉,因而更较受到人们的注意和发生兴趣,但垂直运动仍需同样重视研究。(4)壳体的整体运动与体内运动并重。壳体运动的研究既包括它们的整体运动,也包括它们的体内各个次级壳体或地段的运动,因为这两方面都是壳体运动的表现,同等重要。(5)构造层划分与构造系划分结合。陈国达认为,构造层是在壳体或其中某个地段演化和运动过程中,于一定**大地构造体制**的发展阶段所成的地层组合。就大陆型壳体组成**硅铝**的构造层而论,它们是由具有属于相应**大地构造体制**的共同特征和认识标志的建造,包括岩浆建造、沉积建造及(或)变质建造所组成,并受过同期伴生构造作用改造过(即具有属于相应**大地构造特征**的构造型相)。构造系则是在一定应力场范围内,例如一个壳体的某些边缘部分,或相邻 2 个壳体的某些边缘部分,于某一时期内同时形成的构造组合,它们由具有一定的分布配合方式、具有力学成因联系的由各种构造成分(褶皱、断裂等)所组成。由于构造层是壳体演化—运动各个不同发展阶段**大地构造体制**的物质记录,构造系则是相应发展阶段地壳运动所留下的构造形迹,是重建当时古平面应力场的实际依据。因此,必须二者结合。(6)远古与近代并重。(7)全球与地区兼顾。(8)岩石圈演化与运动并重。研究各种地球构造问题时,均宜对演化与运动同样重视。例如研究活动带、造山带及裂谷带等,既要阐明其动力成因,又要分辨其**大地构造属性**,据以划分出不同**大地构造体制**(地槽型、地洼型等)的活动带、造山带、裂谷带等。

参考文献

- 1 陈国达. 大地构造与成矿(英文版), 1992, 16(1-2): 1~98
- 2 陈国达. 地球科学进展, 1993, 8(3): 30~35
- 3 Chen Guo-Da, Integrative classification of basinogenesis and ore-forming basins, China: Geosciences - Journ Univ Ged, 1993, 3

(中南工业大学陈国达院士撰)

壳体构造 *crustobody tectonics* 这是为了把岩石圈的演化与运动结合起来统一研究,以求全面认识地球的一个综合性的新**大地构造单元**概念。

1977 年,陈国达等在《中国大地构造图》(1:400 万)及《中国大地构造概要》专著中,提出了**壳体**这个术语的雏形,用以描述并阐明岩石圈中一些演化运动分异明显的块体。当时划分出中国东部、中国西部及西太平洋 3 个壳体。东亚与中亚两壳体为大陆壳型,以纵贯中国中部的南北地洼区(相当于著名的昆明—银川南北深大断裂带及地震带)为分界线。在这两个壳体里面,还各划分出 3 个次级壳体(也叫壳块)。

从 1989 年开始,陈国达等在编制《亚洲陆海大地构造图》(1:800 万)及撰写《亚洲陆海大地构造生演机理》专著过程中,进一步深化和提高**壳体**概念,赋予明确的定义,并据以提出建立“**历史—因果论大地构造学**”的倡议,把壳体的研究作为该学科的核心任务。

依陈国达所下的定义,“**壳体**是组成地壳硬壳(相当于岩石圈,简称广义的“地壳”)的胞体,具有各自的演化—运动史及明

确的边界”。详言之,就是在岩石圈的孕育、形成和发展过程中,可能先后不一地出现于不同地域,在诞生、成长、运动、变化和演化等方面分异进行,既在演化又在运动(包括移动)的时空综合的全球巨型超级构造单元。它们在形式上表现为组成岩石圈的具有类似细胞那样的作用,既在不断发展又可变化位置的不同块体,具有各自的诞生时代、成长方式和发展历程,演化阶段和成熟度,物质组成及地壳性质,垂向及平向结构,构造单元的组成,面积、厚度、形状及其变化,边界类型,整体及体内运动,垂向及水平运动,地球化学,生物演化,成矿演化及其时空规律等方面的特点。

不同壳体可由不同数目和(或)不同性质类别的大地构造区组成,它在区域划分上是比基本构造区(如地槽区、地台区、地洼区等)的范围更大,层次更高。岩石圈就是由具有不同演化—运动历程的许多壳体,逐步增长、移动,通过互相结合拼接、组合而成的。

壳体是属丁历史—因果论大地构造学范畴的构造单元概念。根据它的上述定义和主要特征,其与板块构造的主要区别如下:

	壳体	板块
涵义	组成地壳(岩石圈)的胞体;演化—运动综合超级构造单元	岩石圈的裂块
形成过程	在岩石圈孕育形成过程中开始先后于不同地域分别诞生、增长而成,组成岩石圈后它们仍继续运动、变化和发展	在岩石圈形成之后,被一系列不同的活动带割切,分裂解体成为大小不同的块体
与岩石圈关系	先有壳体,才由它们组合成为岩石圈	先有岩石圈,才由它分裂成为板块

此外,壳体概念还在其他许多方面区别于板块概念,如演化成长历程、垂向结构、边界、构造单元组成、大地构造体制,其中的造山带及活动带的类型划分和分布,演化—运动的力源机制等。

壳体可以依不同角度划分为多种类型。例如:依发生程序可分为原生壳体和次生壳体(由前者破裂面成或分裂出来);依目前演化阶段可分为大洋型壳体、维陆壳型壳体及大陆型壳体(又可细分为正常陆壳型及薄化陆壳型);依复杂性可分为单一壳体和混杂壳体;依地理位置可分为大洋区型壳体、陆缘区型壳体、陆间区型壳体及大陆区型壳体。

不同壳体的演化虽然各有特色,但具有一定的共同规律性,即一般是循着从未成熟逐步经过半成熟向成熟演变,从低级阶段向高级阶段推进的。

壳体可按里面各个部分的分异演化—运动情况,以及平向结构的复杂情况,划分为大中小3级。中级壳体为基本壳体(通常简称壳体)。由多个基本壳体组成的为复式壳体。在基本壳体内则可以细分为较小的壳体,即次级壳体或亚壳体。基本壳体通常为具有一些共同特征的岩石圈块体。就大陆型壳体而论,它通常具有从最先出现的陆核开始,逐步开展的壳体演化系统,即由前地槽阶段、地槽阶段及地台阶段,以至地洼阶段及可能还有其它更后的阶段。但由原生壳体破裂而成或分裂出来的次生壳体,则这个演化系统不一定完整。复式壳体大多数是由多个基本壳体联结而成的,但也有由一个较大的壳体破裂后尚未离散而成的。复式壳体的面积通常比其中的基本壳体大。次级壳体是从一个面积较大的基本壳体因各个部分的分异演化—运动十分显著,并有明显的分界线,以致有必要再细划分为面积较小的壳体。它们之间的分界线通常为规模不及基本壳体分界线的深大断裂带。一般地说,每个次级壳体的范围不小于一个基本构造单元。在更多的情况下,它们是由不止一个基本构造区所组成。如东亚壳体内,可以分为东蒙—锡霍特、华北、华中、华南、滇带—昆嵩5个次级壳体。在这些次级壳体中,各包含有若干个基本构造区。

壳体在成长过程中,其面积、厚度及形状都在不断地变化,可以增大,也可以减小。在岩石圈的不断运动、变化和发展的进

程中,既时有新壳体的发生,也时有旧壳体的消亡。壳体的运动既有整体运动也有体内运动;既有水平运动也有垂直运动。水平运动通常表现为整体或体内各个壳块或壳段的移动。其方式可为进、退、弯、旋;在相邻壳体或壳块、壳段之间的相对移动可为汇聚碰撞、拉裂离散或(及)剪切错移,从而形成了压、张、剪或它们复合的应力场,并产生了相应的构造系。

由于壳体演化运动所形成的裂谷带、造山带、成矿盆地等,既可发生于壳体之间的过缘地带,也可发生于壳体内部;它们形成于有关壳体的各个演化阶段的各种应力场。因此从找矿及其他生产的需要看,它们均宜作历史—动力综合分类。

参考文献

- 1 陈国达. 在地构造与成矿学(英文版), 1992, 16(1-2): 1~98
- 2 陈国达. 地球科学进展, 1993, 8(3): 30~35
- 3 Crien Guo—Da. Integrative classification of basinogenesis and ore—forming basins, China: Geosciences—Journ Univ Ged, 1993, 3

(中南工业大学陈国达院士、陈世益教授撰)

构造地球化学 tectono geochemistry

这是一门由构造地质学同地球化学互相渗透而形成的交叉科学。该学科的建立,其中心思想是认为在构造的形成过程中,不仅有机作用,并且有化学作用的伴随或参与。因此有必要把两方面的研究互相结合,以求对地质构造及其与成矿关系作出深入的、全面的了解,即把化学元素的迁移与构造运动的关系及其规律性开展系统的探索和认识,更有成效地从这一角度指导找矿。

1961年,中国科学院成立了中南大地构造及地球化学研究室。在陈国达主持下,试图从事把地质构造与地球化学结合起来统一研究,开始了“构造地球化学”这样一个新学科的初步设想。1963年,黄瑞华发表了第一篇研究论文《论华夏型地洼区发展过程中的火成岩岩石化学特征》。同年,袁奎荣在其《华南某地地洼型花岗岩的特征》一文中,也作了类似的探索。这些早期发表的研究成果,为本学科的发展作了实践上的铺垫。1976年,陈国达在《构造地球化学若干问题》一文中初次发表“构造地球化学”这个术语,并明确了构造地球化学的定义是:“从事研究各种地质构造作用与地壳中化学元素的分配与迁移、分散和富集等关系的一门科学”。文中并对大、中、小各级构造与化学元素分配集关系的具体表现,及其研究的理论和实用意义作了初步阐述。继黄瑞华于1978~1982年陆续发表了关于地洼区、地台区及地槽区的构造地球化学特征的研究结果之后,在1983年召开的第1届全国构造地球化学讨论会上这门学科正式宣告成立。在这次讨论会上,陈国达、黄瑞华在他们的《关于构造地球化学的几个问题》一文中,进一步定出这个术语的英译文为 Tectono—geochemistry,明确了其任务是“研究地质构造作用与地球化学过程之间,也就是运动与物质之间在时间、空间及因果诸方面的关系,即把形成与形变、建造与改造统一起来,加以研究。其研究范围包括不同地壳运动类型、构造单元、构造区、构造系、壳体、褶皱、断裂、裂隙(节理、劈理、片理等)、微构造(显微裂隙等),以及火成岩体构造等,即大、中、小各级构造作用所引起的地球浅部和深部的物质反应(化学反应、核过程等),以及元素的活化和迁移、分散和富集的重分配过程。它一方面从构造的角度研究地球化学,即在构造作用下的地球化学过程;另一方面又从地球化学角度来研究构造作用,即研究由地球化学过程所引起或反映的构造作用。其最终目的是在于揭示出有用物质组分在各种构造环境下的赋存规律,作为指导找矿勘探和预测,服务生产的依据。

陈国达、黄瑞华系统地吧构造地球化学的研究内容划分为下列12个分科:(1)微构造地球化学。研究显微构造(如显微裂隙)的发育过程中的化学现象及与成矿元素富集的关系。(2)裂隙构造地球化学。主要研究节理、片理、劈理等构造的形成与伴生化学现象关系。(3)断裂构造地球化学。由于断裂构造发生过程中,化学作用比较复杂,有塑性流动、压力溶解、重结晶、元素的动力

分异作用、断裂变质作用、水解作用和脱水作用、氧化和还原作用等,因此断裂构造地球化学的研究工作也相应地比较复杂。同时,它对找矿勘探及盲矿体的预测研究具有直接的指导作用。(4)褶皱构造地球化学。研究褶皱作用进行过程中岩层里面的元素随着应力在褶皱不同部位的变化而沿岩层或穿过层理迁移,发生重分配的情况。(5)火成岩构造地球化学。专门研究火成岩中的构造形成过程中的地球化学作用。与构造作用有关的火成岩的岩石学、矿物学及地球化学研究也属此范畴。(6)成矿构造地球化学。着重专门研究各种类型构造的成矿作用进行过程中的地球化学过程,包括成矿前、成矿期及成矿后的构造地球化学。(7)深部构造地球化学。研究地壳深部主要是与深大断裂有关的、规模巨大、成份复杂的地球化学异常。这些“穿透构造”通过上地幔,往往为同幔源岩浆有直接关系的大型至超大型矿床的所在。(8)地震构造地球化学。研究地震发震之前有关构造及其邻侧的地球化学前兆异常,包括水气、CO₂、稳定同位素和放射性同位素等方面的观测,对于预推地震有颇大作用。(9)大地构造地球化学。着重研究不同大地构造体制的构造区,如地槽区、地台区及地洼区等,或者研究某一地区壳体演化史中不同体制的大地构造发展阶段,如地槽、地台及地洼阶段等,其元素富集的特征,包括各种元素的丰度、共生组合等。这方面的研究(包括体制构造单元地球化学及壳体构造地球化学)对于阐明有关矿产的时空分布规律、成矿带的划分、以及找矿勘探具有重大的实用意义。(10)宇宙构造地球化学。例如陨石坑构造、冲击变质岩(碰撞岩)的研究。这类构造与一部分金刚石的形成、以至某些铁矿的形成具有一定的关系。(11)实验构造地球化学。通过模拟实验详细了解并实证构造作用进行中化学元素在应力差、温差、地球化学位能差、浓度差等环境条件及其变化下的分散迁移与重分配及富集情况,以求对自然界的构造地球化学过程的加深认识或探索。杨开庆、侯威(1983)、吴学益所作的构造地球化学高温高压拟模试验研究,即为其例。(12)应用构造地球化学。着重运用构造地球化学原理以研究和解决一些与构造有关的地球化学问题,或者由地球化学过程反映和确定的构造问题。

1990年,杨国清所著的《构造地球化学》在阐述构造地球化学原理的基础上,划分出微构造地球化学、矿田和矿床构造地球化学、区域构造地球化学、大地构造地球化学。此外还论述了构造地球化学研究法。

关于构造地球化学今后的发展方向,陈国达、黄瑞华指出:宜注意加强地壳深部的研究、应用研究、多学科相结合、模拟实验、现代物理化学知识的运用、构造地球化学绘图方法研究、野外工作等,其中以应用于矿田及矿床的找矿勘探研究为当前发展动向的重点。此外,关于本学科的研究领域、内容、途径、方法等方面,也是尚待探讨、充实和完善的课题。

参考文献

- 1 黄瑞华. 湖南地质学会 1963 年学术年会论文摘要汇编, 1963, 56~57
- 2 袁奎荣. 中国地质学会 1963 年岩矿地球化学会议论文集
- 3 陈国达. 构造地球化学若干问题, 1976
- 4 陈国达, 黄瑞华. 大地构造与成矿学, 1983, 8(1): 7~18
- 5 陈国达. 成矿构造研究法. 北京: 地质出版社, 1978, 1985(再版)

(中南工业大学陈国达院士、黄瑞华教授撰)

成矿构造学 构造成矿作用(Tectonic Metallogensis)及构造矿床 Metallogenic Tectonics and Tectonotenerated Ore Deposits。成矿构造学为着重从事研究与矿床形成及改造有关的地质构造、介于构造地质学和成矿学之间的一门边缘学科。它是1965年陈国达在总结研究一些危机矿山边部及深部寻找隐伏矿体经验的基础上进一步充实和系统化而形成的。其建立的中心思想是根据构造地球化学的原理,认为构造对于矿床的关系,不止限于为成矿物质提供运移通道及容矿空间,并且还可促使或参与

矿床形成的动力—热力因素以至提供成矿物质。

成矿构造学的研究任务和范围,包括直接或间接控制、影响或者参与一个含矿区内的内生或外生矿床形成的先天、临产及或后天条件的大中小各级构造。所谓先天条件指的是矿床的发生原因、物质来源、历史背景、发育基础(例如大地构造中的先成构造层);临产条件指的是矿床的形成环境(例如大地构造中的所属体制),包括当时的古构造—地貌、古地理、古气候、古生物区等方面,以及当时的物理化学条件;矿床的发生和发展过程,在时间上的出现顺序和在空间上的赋存部位、形态和产状等。后天条件则是指矿床形成以后的构造变形及由此所引起的保存情况;还有后期构造成矿作用通过叠加、改造或再造等方式使先成矿床富化成为新的、更富、更大的矿床,或者把先成矿源层(岩)中的成矿物质富集,使之形成具有工业价值的矿床。

成矿构造包括各种性质不同、类型有别的地质构造。这些构造依其影响范围广狭及成矿作用的复杂情况划分为大、中、小3级。大型构造是构造区和构造系;中型构造是褶皱和断裂(包括深大断裂);小型构造是节理和劈理。此外还有火成岩体中的构造。其中,构造区(及其组成的壳体)的范围通常最大或较大,其成矿作用最为复杂,包括着由它们控制的沉积建造、岩浆建造、变质建造及构造型相等多个方面的成矿作用,因而它们可决定矿床的物质来源、历史背景和发育基础,又可为矿床形成时期的区域环境、产出条件和发育过程、矿床产状、赋存部位等方面的控制因素。此外还可对矿床或矿原层(岩)形成以后施加叠加、改造富化或再造富集的作用。构造系以及中小型构造,则可对矿床形成起着赋存部位、产状、形态,以及在一定范围内的分布规律等施加直接作用。此外还有更重要的是对矿床形成所起的促致或参与作用,即某些构造(例如断裂、褶皱,特别是前者),在其发生过程中,可通过驱动成矿元素活化、迁移,在适当的构造部位或岩性层位富集形成矿床的加工作用。

成矿构造与含矿区之间,在一定程度上存在着对应关系。依陈国达的分析,任何一级含矿区里面都包含有各种性质和类型的中小型成矿构造,同时它又必然具有自己的壳体构造演化运动史,属于一定性质和类型的构造区,占有一定的大地构造部位。因此它必然具有相应性质和类型的成矿大地构造历史背景和发育基础,成矿时期的区域环境和物理化学条件,以及矿床产出和分布的时空规律。因此,无论研究哪一级的含矿区构造,都要同时对区内各级成矿构造进行全面的综合的研究。大致上说,对于大范围的含矿区(成矿省、成矿带)构造来说,以研究大地构造为重点,但要在中小型构造的研究基础上来进行。对于中等范围的含矿区(成矿区)的构造而论,以大中型构造为主,但也要注意小型构造。对于小范围的含矿区(矿田、矿区、矿床、矿体、矿柱)的构造来说,则以中小构造为主,但也要兼及大地构造的研究,在了解该处的地壳演化运动史及现阶段的大地构造体制的思路引导下来进行。

关于成矿构造的研究方法,依照陈国达的总结,宜遵循下列6条原则:各种成矿控制因素相结合;大、中、小各型成矿构造相结合;时间空间同时兼顾;点面兼顾;地质历史分析法与构造应力分析法综合;成矿构造研究与其他有关学科的研究及新技术运用相配合。

除了大型构造中构造区的成矿作用表现为多方面的综合因素外,按照构造地球化学原理以及模拟实验结果证明,某些构造形成过程所促致的成矿作用,主要表现在通过应力场的变化以使某些元素被驱动,发生活化迁移,重新分配,并在适当的构造部位或岩性层位富集,从而使该处已有矿床加富或增大,或在该处形成新的矿床。以褶皱及断裂为例:当地层褶皱进行时,随着应力场的变化,一些离子半径大的元素,以及那些离子半径虽小但难于稳定的元素,便从压力增强的部位(例如背斜的鞍部,以及中和面以下的核部)迁移至压力减小或张力部位(例如背斜的鞍部,中和面的上方)。同样道理,当断裂运动进行时,这些元素便从断层面的压力增强部位朝压力减小或张力部位(例如曲折断层的隐蔽

面,比方正断层的倾角变陡段,左剪平移断层的左折段)迁移富集。此外,在构造作用进行中所产生的磨擦热,对成矿元素的活化、迁移、富集、重分配也有明显的作用)。这样,在有利于元素富集构造部位的原有矿床,便可因此增大或加富,改造变成“动力富化型多因复成矿床”,或者使受影响的矿源层(岩)中原属分散的元素迁移集中该处,形成“动力再造富集型多因复成矿床”。

由于“成矿构造”概念的提出,结合上述的构造地球化学原理的运用,合理地建立了“构造成矿作用”及“构造矿床”这两个新概念。它们以用于那些由于构造作用(特别是以断裂作用为多见)驱动成矿元素活化富集产生的成矿作用,以及由此所成的矿床,最为合适,并可在成矿学及矿床成因类型划分方面开辟了新的思路。

陈国达认为:成矿构造学今后发展的方向,除在理论及研究方法上有必要进一步充实、加深和提高外,还需要在总结找矿实践经验的基础上,吸收有关科学的新成就,采用新的技术和手段。关于成矿时代与构造作用发生时代关系的准确测定,构造成矿过程的模拟实验,以及构造矿床的特征、鉴别标志和式类划分等,都是今后有必要开展研究或加深研究的课题。

参考文献

- 1 陈国达. 成矿构造研究法. 北京:地质出版社,1978;(1986再版)
 - 2 陈国达. 大地构造与成矿学,1985,15(4):273
 - 3 边干韬. 90年代的地质科学,北京:海洋出版社,1992
- (中南工业大学陈国达院士、陈世益教授撰)

双隆起—凹陷模型 double uplift—depression structural landform 双隆起—凹陷是新构造运动所产生的一种较为普遍的地貌形态,它反映了断层水平运动及垂直运动的作用所产生的一种特殊构造地貌组合,为动态构造地貌的一种表现。研究双隆起—凹陷这种构造地貌的发生、发展,对于认识自然界中的新构造运动现象,解释及预测地震的发生,充实本学科的理论等,都有十分重要的意义。

早在20世纪50年代,人们已不限于静态构造地貌的研究,而开始注意到对动态构造地貌的研究。

50年代中期,在前苏联果尔什柯夫建议下,中国召开了第1次新构造运动座谈会,它标志着中国新构造运动学研究的开始。不过当时研究的侧重点是构造的垂直运动。60年代末期以后,由于板块构造理论的问世,新构造运动的研究在为生产实践服务的同时,及时地吸收了包括板块运动、地质力学在内的地球动力学理论和方法,从而使新构造运动学的研究无论在理论上还是方法上都得到了很大发展。人们开始从三维空间的角度来探讨动态构造地貌问题,也就是从过去偏重于构造垂直运动的研究,转为既注意水平运动又考虑垂直运动,并特别重视从构造应力场的角度来研究构造地貌,分析其成因及所处的应力状态。

1972~1973年,中国国家地震局组织了大批地质工作者对山西临汾盆地进行了大规模的地震地质调查。后来,杨景春等又对中国华北、西北、西南等地壳活动强烈地区进行了深入细致的构造地质研究;邓起东等对中国大地构造应力场的分布特征进行了全面研究。双隆起—凹陷构造地貌模型就是在上述工作成果的基础上分析研究得来的。

20世纪70年代末的研究表明,中国华北地区自晚第三纪以来,处于一个以北东东—南西西方向的水平压应力和北北西—南南东方向的水平张应力构造应力场中。

20世纪80年代初,杨景春等研究北京南口山前构造地貌时,曾发现了北东向的南口山前断裂在与之相交的北北向左旋活动的南口—孙河断裂影响下,在山前平原区产生了小的构造地貌分异。以北北向断层为界,西南侧为一新生代局部凹陷;东北侧为一抬升台地,台地上还出现了一近南北向的新生代隆起。尔后杨景春深入地研究了南口孙河地区的地质构造、新生代沉积物厚度分布规律,发现南口—孙河断裂的东南端点附近也出现了与山

前平原区相似的构造地貌分异现象,只不过隆起、凹陷的位置变了方位,断层西南侧出现一地下隆起,东北侧出现一构造凹陷。进一步的研究显示,断层东北盘的西北端台地上,几十米厚的新生代沉积物中发育了一组北北西和北西向的压性结构面,表明了主压应力方向为 $38^{\circ}\sim 48^{\circ}$,而有别于整个华北区的构造应力场方向,反应了南口—孙河断裂左旋运动时所产生的低序次压应力方向,东南端点附近为张性应力。断层的西南盘两端点的应力状态与之相反。

根据断层的活动与其所产生的构造地貌特征,杨景春提出了双隆起—凹陷构造地貌模型。1979年,韩慕康在调查云南通海震区的构造地貌特征时,就曾发现这种情况;北西向的曲江断裂为一右旋剪切兼做枢纽运动的断裂。枢纽点的西北段,断层面倾向西南,西南盘向东北盘逆冲,西南盘上的新第三纪夷平面和早更新世曲江阶地分别比东北盘上的高90m和80m。在枢纽点的东南段,断面向北东倾,东北盘上的新第三纪夷平面比西南盘上的高200~300m。研究的结果不仅表明了断层的水平运动可以产生双隆起—凹陷,而且还反映了产生双隆起—凹陷的活动断层同时具有枢纽断层的活动特点。

20世纪80年代末,研究临汾盆地北界什林断层,盆地东界霍山断层时也发现了同样的构造地貌现象。什林断层为一近东西向的左旋断层,70年代初杨景春就发现断层南北盘的同级汾河阶地有着水平错动现象。根据实测,南盘早更新世的阶地(T6)相对于北盘的同级阶地向东水平错距达1000m之多。从断层的垂直活动来看,西段断层面的倾向为南,北盘上升,南盘下降。同级的第6阶地、第5级阶地南盘比北盘分别降低了80m和70m。断层东段,断层面倾向北,这里由于缺乏应有的构造活动资料,还无法判断断层的垂向运动情况,但估计其活动为南盘上升而北盘下降。

霍山断层为一北北东向右旋断层,其东侧为高大的霍山山地,西侧为临汾盆地。根据物探资料及实地调查,发现断层的盆地侧,断层南段广胜寺、洪洞一带为一深度很大的新生代凹陷区,基岩基底之上堆积了厚达1600m的新生代沉积;断层北段观堆、李曹一带,上新世砾岩大面积出露,甚至某些地段基岩在沟谷二壁都有出露,相对于广胜寺、洪洞一带为盆地内的一构造隆起区。而断层自上新世以来右旋水平活动量达12.5km。

从近几年中国对西北地区一些活动断层的重复水准测量结果,以及国外的一些活动断裂测量结果来看,一些断层的现代活动也有着双隆起—凹陷的构造运动特征。

双隆起—凹陷模型现在仍有许多需要进一步探讨的地方,如产生双隆起—凹陷地貌特征的做水平运动的断层,二端点边界条件如何?从实际来看,有的断层两端被其它走向的断层横截,而有的断层却没有发现被其它断层横截。对于后一种情况,在断层的不断活动中,往往导致在两端点附近的岩层不断破裂,断层不断向两侧扩张。据此,杨景春提出了双隆起—凹陷的动态模型,就是双隆起区或双凹陷区随着断层的扩张而不断向两侧迁移。

在一些大规模的断层水平活动地区,往往出现地壳的波浪式运动,沿着块体水平运动的方向,依次形成多个波状隆起。如台湾省东侧的台东走滑大断裂,断裂两侧各有多个横推挠曲产生。北美圣安德烈斯断裂也出现了这种情况。它们的成因是不是双隆起—凹陷构造运动形式在较大活动断层上的表现,还有待于人们的进一步研究。

参考文献

- 1 张裕明,等. 地震地质,1979,1(1):23~28
- 2 韩慕康. 地理学报,1983,38(1):41~54
- 3 杨景春. 地理学报,1983,38(3):324~227
- 4 中国国家地震局鄂尔多斯周缘活动断裂系课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系,北京:地震出版社,1988.94~97

(安徽师范大学胡晓猛撰)

祁连运动 qilian orogeny Цилиньский орогенез 李康等(1962)创名,指早古生代末期的一次褶皱运动。这是根据祁连山区晚泥盆世老君山砾岩(黄汲清,1954年将这套山前堆积的磨拉石建造定为早石炭世杜内期)和早古生代浅变质岩系早峡群之间的角度不整合确定的。并认为这个运动波及到整个祁连山地槽系,表现为玉门的老君山砾岩与上志留统不整合、在民乐二道口又与奥陶—志留系不整合、在水昌至武威间与志留系不整合、天祝—中宁等地又与下古生界不整合。

1963年,李悦民在老君山群之中又发现不整合。不整合面之上的陆相红色碎屑岩建造被甘肃省地质局603队命名为沙流水群,1978年徐福祥等建议采用老君山群,据地层中含植物化石 *Leptophloeum rhombicum* 及 *Sublepidodendron wushense*,与江浙的五通砂岩相当,时代确定为晚泥盆世;1980年潘江在宁夏的同一地层中采到 *Remigolis zhongningensis*,命名为中宁组,依据地层命名优先原则,建议废弃使用中宁组,仍沿用沙流水群。不整合面下部为一套紫红色巨厚的山前堆积磨拉石建造,局部夹有陆相中基性火山岩,在景泰雪山该地层不整合在下志留统马营沟组之上,周文昭将此地层命名为雪山群,采到植物化石 *Tacnocrado* sp.?, *Drepanophychus* sp.。1972年甘肃省区测一队 在阳凹山又发现 *Protolpidodendron of scharanum*, *Zosterophyllum* sp.,唯 *Zosterophyllum* 主要繁殖于早泥盆世,其余化石多系中泥盆世常见分子;1980年潘江在宁夏的同一地层中发现了 *Bothriolepis niushoushanensis*, *Antiarchi*, *Dipnoi* 鱼化石,命名为石峡沟组,与湖南跳马涧组的 *B. sinensis*,云南海口组的 *B. tungseni* 对比,时代确定为中泥盆世,同样道理建议废弃使用石峡沟组一名,仍沿用雪山群。雪山群的时代仍有分歧意见,即有早中泥盆世与中泥盆世两种观点,至此雪山群底界不整合所代表的祁连运动时限未能最终确定。但是,如果要从更广阔的地域考察祁连运动,这个难题会迎刃而解。

西秦岭南带相当艾菲尔阶的含铁沉积的当多组和石堡子组(与湖南宁乡式铁矿层位相当),分别平行不整合覆盖在相当埃姆斯阶的杂拉组和石坊组之上。从时代而论,艾菲尔阶与中国南方的四排阶和应堂阶相当,它包含了早泥盆世晚期和中泥盆世中早期的沉积,而埃姆斯阶与郁江阶相当,为早泥盆世中早期的沉积。这些平行不整合面与雪山群底界面应该大致同时,据此确定祁连运动是发生在志留纪末期,而至早泥盆世早期。这就是雪山群中既含 *Zosterophyllum* 早泥盆世分子,但数量少,而以含中泥盆世 *Protolpidodendron of scharyanum*, *Bothriolepis niushoushanensis* 为主的原因。代表祁连运动的岩浆活动是金佛寺—柴达诺尔期花岗岩,同位素地质年龄 362~417Ma,时代是泥盆纪早期,很少为志留纪末期。

柴北缘的阿木尼克组与沙流水群相似,为晚泥盆世沉积。牦牛山组上被阿木尼克组不整合覆盖,其下不整合盖在志留—奥陶系之上,岩性变化大,以中酸性火山岩、火山碎屑岩和碎屑岩为主,也是一套巨厚磨拉石建造与陆相火山岩建造,也因含 *Leptophloeum rhombicum* 而确定为晚泥盆世沉积。这种划分与区域对比矛盾很大,牦牛山组与雪山群为同期异地的产物,由于化石鉴定有误,还是层序尚待进一步查清,是今后应该注意解决的问题。如果牦牛山组也为中泥盆世,祁连运动向南已波及到柴达木盆地。

现在许多文献中将雪山群、当多组和石堡子组都定中泥盆统,这是岩石单元的概念,如果是生物地层单元概念,它是跨越早泥盆世晚期的,这在许多文献中没有说明,我们在讨论祁连运动的时限中引入这个概念。如果以岩石单元概念来衡量,祁连运动就是发生在早泥盆世末期。1977年甘肃省地矿局地质力学区域测量队认为,祁连山区早古生代的褶皱主要表现在晚志留世至晚泥盆世地层之间的角度不整合面上,这种观点不可取,祁连运动是加里东构造旋回的最后也是最强烈的一幕;而宁夏运动(雪山群与沙流水群的不整合面)是海西构造旋回的早期一幕,两者应该区别开来。

1929年丁文江创名的广西运动,代表了中国西南地区志留纪末期和泥盆纪初期的地壳运动。发生在英国苏格兰的加里东山,志留系及其更老的地层褶皱,被上覆泥盆系老红砂岩不整合覆盖的加里东运动。二者均属同期异地的构造运动,由此看来这场构造运动具有洲际性。构造运动所波及的范围远不止祁连山和阿尔金山,北山也受影响,天山区中泥盆统3个井群超覆不整合盖在奥陶系或寒武系之上也是一个例证。

王鸿祯(1985)、周良仁(1988)将祁连运动的时限放在360~450Ma,它不但包括祁连运动,还包括了古浪运动或更多。这会造成祁连运动的定义不准确。古浪运动不但造成了祁连山中、上奥陶统平行不整合,还使得华北板块普遍抬升,北美板块受此构造运动(塔康运动)影响也抬升。虽然祁连运动与古浪运动都属于加里东构造旋回,但是它们属于不同的构造幕,故不能归入一场运动。

槽台说认为:祁连运动造成了祁连山加里东地槽全部褶皱,隆起成山形成褶皱带。板块说认为:元古代末分裂成的北祁连微洋盆地型地槽,祁连运动使两侧断块俯冲成陆。地质力学的观点认为:祁连运动造成古河西系成熟,在此基础上又产生了祁吕贺兰山字型构造体系等。

参考文献

- 1 沈纪祥.地质论评,1959,19(5)
 - 2 周文昭.陕西省煤炭学会论文选集,1964
 - 3 徐福祥,等.地层学杂志,1978,2(1)
 - 4 潘江.地质学报,1980,54(3)
 - 5 翟玉沛.地层学杂志,1981,5(2)
 - 6 金松桥.长春地质学院学报,1983,2
 - 7 金松桥.中国地质科学院562综合大队集刊(4号),1983
 - 8 左国朝,等.地质科学,1987,1
 - 9 周良仁,等.西北地质,1988
- (甘肃省地矿局地质科学研究所金松桥高级工程师撰)

海西运动 hercynian orogeny 又称华力西运动(Variscan Orogeny)。海西及华力西以德国南部山系而得名。德国地质学者把“海西褶皱带”看作北西向褶皱而无时间概念,而法国和瑞士地质学者赞同 M. Bertrand 意见,将海西用于时间意义造山运动,并把北阿尔卑斯的结晶岩体看做海西运动的产物。与它相当的运动还有阿尔泰运动。该词徐士(Suess)曾称为阿莫利亚加运动。海西运动时代从石炭纪至二叠纪。在全球范围内它比早古生代加里东运动有更为广泛的影响。

王鸿祯(1956)最早介绍了史蒂勒(Stille,1924)根据中欧各山系褶皱强度将海西运动划为5幕:

- 早三叠世
~~~~~ 法尔琴(Pfalzian)幕=阿帕拉契亚幕
- 晚二叠世  
~~~~~ 萨尔(Saalian)幕=东吴运动
- 早二叠世
~~~~~ 阿斯突里(Asturian)幕
- 中晚石炭世  
~~~~~ 苏台德(Sudetic)幕
- 早石炭世
~~~~~ 布列东(Bretonian)幕=南山运动
- 晚泥盆世

70年代对这一运动的解释不尽一致,大致有3种:指德国南部哈尔茨山区的晚古生代晚石炭世末发生的一次造山运动;晚古生代发生的造山运动;晚古生代发生的地壳运动(包括造山运动和造陆运动等)。

中国张文佑等(1983)将泥盆纪至二叠纪整个晚古生代作为海西构造旋回或海西阶段。因此,海西运动也就是晚古生代地壳运动。

海西运动所形成的世界著名山系有:(1)乌拉尔海西褶皱带。位于东欧与西伯利亚之间的一个古生代活动地槽带。早古生

代具有沟弧体系特征。晚古生代该带西南仍具优地槽特征,其余地区为褶皱沉积环境。石炭纪晚期发生强烈的地壳运动,优地槽整体褶皱上升,冒地槽形成山前凹陷。二叠纪中期强烈的造山运动致使冒地槽全部褶皱上升。(2)西欧海西褶皱带。位于欧洲中西部的英格兰东南部、比利时、法国、德国和捷克等地区。该活动带其北为东欧地台和英国加里东褶皱带的巨大地块,其南为波希米亚地块和法国中部地块组成的莫尔丹努布隆隆起区。由于古欧洲板块(或称欧美板块)和冈瓦纳地块之间的相对加速移动并相互碰撞,引起晚古生代西欧海西地槽褶皱、上升。其中泥盆纪末发生的“布列东运动”所引起的褶皱变形主要限于地槽南部,可能是由古欧洲与冈瓦纳大陆之间的初始接触所引起。早石炭世末发生的苏台德运动,表示了冈瓦纳大陆与古欧洲板块间的碰撞、拼接,导致整个地槽发生强烈的褶皱、断裂和变质作用,在南部有广泛的中酸性岩浆活动,晚石炭世末的阿斯突里运动使该区褶皱成山,最终形成西欧海西褶皱带。(3)阿巴拉契亚海西褶皱带。晚古生代时,阿巴拉契亚地槽位于北美东部,属于欧美地块南缘的一个活动带。中泥盆世阿卡德运动使其北部优地槽发生褶皱、变质作用形成褶皱山系。晚石炭世末的地壳运动,使阿巴拉契亚地槽进一步褶皱。二叠纪中期阿勒格尼(Alleghenian)运动,该地槽受到强烈的变形形成巨大的褶皱山系。

海西运动在中国西北、内蒙和东北北部地区表现极为强烈,地处天山、准噶尔山、阿尔泰山、北山、大小兴安岭、长白山等晚古生代沉积,在石炭、二叠纪先后褶皱形成山系。这一时期运动在中国称为天山运动,对于晚二叠世末期的运动,甘肃北山地区又称北山运动。在中国华北和南方地区,海西运动表现为升降运动,如华北中奥陶统与中石炭统之间的平行不整合。中、上石炭统的海陆交互沉积与二叠系的陆相沉积,华南石炭系与二叠系及上、下二叠统之间的平行不整合接触,藏南早二叠世早期为陆相沉积,晚期又为浅海相沉积,皆显示升降运动特征。与海西运动相伴生的侵入岩主要分布于天山、北山和阴山地区,其次是昆仑山、阿尔金山和滇西。在秦岭、西藏、川滇、中南地区以及台湾等地区也有少量出露。海西期侵入岩可分为早(泥盆纪)、中(中、晚石炭世)、晚(二叠纪)三期。以中、晚期花岗岩类分布最广,多呈较大的岩基出露,如北山地区海西期花岗岩占露头区的三分之一强,其中中期花岗岩类活动达到了高潮,晚期其次,早期据为第3,为挤压构造体制为主的产物。东北地区的吉林花岗岩体,规模巨大,几乎占据了整个吉林和黑龙江东部广大地区。

海西早期侵入岩以基性、超基性岩为主,形成于张性地壳动力环境,见于天山、北山、滇西、川滇等地。在天山、北山、祁连山等地有花岗岩分布。海西中期花岗岩类广泛分布于大小兴安岭、内蒙、北山、阿尔泰山等地,同位素年龄在2.25~2.90亿年。基性、超基性岩分布更为广泛,其中有天山东段、阿尔泰山、北山及内蒙北部等地。新疆黄山地区超基性岩中赋存大型铜镍矿床。晚期以花岗岩、白岗质花岗岩为主,广泛分布于东北东部、内蒙北部、天山、昆仑山、滇西等地,同位素年龄界于2.3~2.6亿年。

晚古生代不同阶段的早、中、晚海西运动,导致全球地壳构造演化的总趋势是,全球早古生代末的欧美板块、西伯利亚板块、中国的华南板块、塔里木板块及中朝板块,以及包括由非洲地块、南美地块、印度地台、澳大利亚地块、南极洲地块所联合在一起的冈瓦纳地块逐步靠拢,随着板块间的“碰撞”,板块边缘的一些海西地槽带相继上升褶皱为造山带。这些晚古生代褶皱带主要有:欧美板块与西伯利亚板块交界处的乌拉尔海西褶皱带、欧美板块南部的阿巴拉契亚海西褶皱带、西伯利亚板块与中国板块、印度板块之间的亚洲中部和北部的哈萨克斯坦、阿尔泰、天山、昆仑、蒙古国、内蒙、大小兴安岭等地区的海西褶皱带。南半球围绕冈瓦纳大陆的边缘的澳大利亚东部、非洲西北部和南缘等地也存在海西褶皱带。二叠纪末,晚期海西运动将原来彼此分离的各板块通过海西褶皱带的形成而相互连结,从而出现一个新的统一联合古陆(泛大陆)。

#### 参考文献

- 1 王鸿祯,地史学教程,1956,241~243
- 2 张文佑,等.中国及邻区海陆大地构造图,1983
- 3 冯益民.中国北方板块构造文集(第1集),1983,17~34
- 4 中国地质科学院地质研究所武汉地质学院.中国古地理图集,1985,3~4
- 5 李亚美,夏德馨.地史学,1985,303~305
- 6 甘肃省地质矿产局.甘肃省区域地质志,1989,617~620
- 7 左国朝,何国琦,等.北山板块构造及成矿规律,1990,40~80  
(甘肃省地矿局地质科学研究所左国朝高级工程师撰)

## 地质力学

**地质力学** geomechanics 是运用力学原理研究地质构造和地壳运动规律的一门边缘学科。它是由中国李四光开始倡导研究而逐步总结创立起来的。

地质力学产生与大陆漂移学说的兴起有着密切的联系。1926年李四光发表了《地球表面形象变迁之主因》的论文。他认为魏格纳的大陆漂移学说遇到的基本困难并不是有关大陆运动的方向,而是它的动力基础。于是他在总结地质构造和海水进退规律等项资料的基础上,提出了一个新的论点:地球自转速度的变化是引起地壳运动的主因。当地球自转速度变快时,离心力增大,其增量的水平分力从两极指向赤道。同时还会产生和地球自转方向相反,即自东向西的惯性力。在这两种力的作用下,大陆必然产生两个方向的运动,其一是由两极向赤道的整体移动或大陆不同部位的差异运动;其二是大陆西移。当地球的转速增加超过一定限度时,所有的大陆块起到巨大的“煞车”作用而自动地加以制动,从而减慢了地球转速。然而由于某种原因,如可能起因于地球的收缩、地壳重物向地球内部集中等原因,又使地球转速再次加快,一次新的地壳运动随之发生,从而提出了“大陆车闸说”。这是地质力学的启蒙阶段。

李四光对“大陆车闸说”理论并不满意,于是,他又转入扎扎实实的地质构造现象的研究,从地质构造现象来追索力的作用,从力的作用方式追索地壳运动的方式和方向,进而揭示出地壳运动的规律,探索地壳运动的起源问题。终于发现了一个极为重要的普遍规律,就是一切构造形迹都是成群发生的,每一群构造形迹和其它有成生联系的构造形迹群,往往形成构造带,构造带与构造带之间,有时存在着构造形迹不甚显著的地块,它们和围绕它们的或半围绕它们的构造带,形成一个整体,构成一个统一的构造体系。构造体系是地质力学研究工作中建立起来的一个极为重要的概念。

新中国成立后,地质力学的主要建树是总结出了一套系统的地质力学方法:(1)鉴定每一种构造形迹或构造单元(结构要素)的力学性质,将结构面按其力学性质分为压性、张性、扭性和张扭性、压扭性5大类。(2)辨别构造形迹的序次,按照序次查明同一断裂面力学性质可能转变的过程。(3)确定构造体系的存在和它们的范围。(4)划分巨型构造带,鉴定构造型式。(5)分析联合和复合的构造体系。(6)探讨岩石力学性质和各种类型的构造体系中应力活动方式。(7)模拟实验。

20世纪60年代以后,地质力学在完善其基础理论的同时,特别重视了实践应用。在指导找矿方面,运用地质力学方法,已经在寻找石油、铀、钨、煤、铁、多金属等矿产方面取得了显著的成果,并初步总结出了构造体系多级控矿的规律、构造体系复合控矿的规律、构造体系不同部位控矿的规律、扭动构造影响流体矿产迁移集中的规律和同沉积的构造影响外生矿产富集的规律等认识;在工程地质水文地质方面,运用地质力学方法找水,已经在山区基岩裸露地区广泛应用。20世纪70年代初期李四光提出开辟新能源,为寻找利用地下热水开展了地热的研究工作。另一项重要的工作是李四光运用地质力学方法进行地震的预测预报。1966年河北邢台地震发生后,李四光就预见河间一带有发生

地震的可能,并对1975年海城地震预报成功起了重要作用。

1982年,孙殿卿和高庆华撰写的《地质力学与地壳运动》,对1962年《地质力学概论》出版之后的地质力学工作进行了总结,在李四光的理论基础上加强了对建造及水圈、气圈运动与变化的研究。这一时期地质学专家还先后出版了《隐伏矿产预测》、《地质力学及其在水文地质、工程地质方面的应用》、《岩体工程地质学基础》、《应力矿物概论》等60部专著和1500篇学术论文,展示了地质力学在理论研究和实际应用方面的成就。

地质力学发展所面对的主要问题和努力方向是:(1)继续加强构造体系的研究。这一项工作的基础是结构面力学性质的鉴定。结构面的性质不是一成不变的,它在发展过程中性质的改变是普遍的现象。构造形迹的演化是构造体系演化的反映,研究同一构造体系成生过程、构造体系之间的复合关系和成生过程中早成构造体系对晚成构造体系的控制作用,是十分重要的。另外,根据深部构造活动在地壳表层留下的痕迹和深部地球物理资料,结合深井钻探资料,研究深部构造体系的工作,需要探索。(2)加强岩石力学性质与构造应力场的研究。构造形迹是构造应力活动的表现,构造体系的产生,一方面取决于动力作用的方式和方向,另一方面也与岩石的力学性质有关。因此要研究岩石处在各种温度、压力、时间条件下受到应力作用而发生的形变与相变特征,研究测定岩石形变和破裂的基本参数,以及构造型式形成的机理。(3)加强建造的研究。建造的研究曾被许多人认为是地质历史分析的基础,它对地质力学的建立也起了很大的作用。从地质力学观点来看,建造是在地壳运动推动下,物质迁移到适当的环境下形成的自然共生组合,是地质力学的一项重要研究内容。(4)研究地应力场与地球化学场的关系。地球化学是研究原子与离子在地壳中运动的科学。原子与离子的运动取决于两个因素,其一是本身的性质;其二是外界条件。地壳运动破坏了元素的平衡,使元素沿着构造带发生迁移,并在构造带中活动程度与元素的结晶能力相适应的部位重新稳定下来。由于不同的构造带或同一构造带不同的部位活动的强度不同,因此便在不同的构造带和同一构造带不同的部位聚集了不同的元素,这可能是地球化学分带现象产生的一个重要原因。(5)地壳运动与气候变迁。对于气候变迁的原因目前尚无统一的意见,但地轴倾斜度、太阳、地形、地貌、生物和大气成分的变化等都是影响气候变迁的因素。从气候冷暖变化的步调和构造及海水进退的规律相耦合的事实来看,在考虑气候变迁的原因时也不能忽略地球自转的作用,由此引起的海水进退和海陆分布与大气厚度的变化都可能影响到气候的变化。(6)开展古生物分区与迁移规律的研究。作为传统地质学重要基础的古生物学,在地质力学奠基中起了重要的作用,根据古生物的分带可以为确定古构造提供证据;根据古生物的演化和迁移是研究地壳运动的重要途径。此外,地球应力场的变化,还可能影响到地球热场、磁场、电场的变化。研究这些物理场的特点、产生的机制和相互转换的条件,也是地质力学今后拟开展的工作。(7)进一步总结地质力学实践应用的经验。运用地质力学方法在解决生产实践中已取得显著的成效,存在的问题是缺乏规律性的经验总结。

#### 参考文献

- 1 李四光.地质力学概论.北京:科学出版社,1972
- 2 李四光.天文、地质、古生物(资料摘要).北京:科学出版社,1972
- 3 孙殿卿,高庆华.地质力学与地壳运动.北京:地质出版社,1982
- 4 中国地质学会地质力学专业委员会.地质力学发展的回顾与展望.1982地质论评,1982;28(2):170~175

(地质力学研究所孙殿卿院士、国家地震局地质研究所高庆华研究员撰)

**构造体系** tectonic systems 其涵义是地壳上任何一部分出现的每一项构造形迹,如褶皱、断裂,都不是孤立的,往往成

群发生。每一群构造形迹和其它有成生联系的构造形迹群,往往各自形成构造带。构造带与构造带之间,有时存在着构造形迹不甚显著的地块,它们和围绕它们或半围绕它们的构造带,形成一个整体,构成统一的构造体系。简言之,构造体系是许多不同形态、不同性质、不同等级和不同序次,但具有成生联系的各项结构要素所组成的构造带以及它们之间所夹的岩块或地块组合而成的总体。构造体系是一定方式的全球性或区域性构造运动的产物。

构造体系是地质力学的一个重要概念。在地质力学创始之前,就已孕育着构造体系的胚胎,如把相互交叉的两组节理叫做“X节理”,把主干断裂和它的分支裂统称为“羽状断裂”等等。但是当时还只是停留在感性认识阶段,李四光首次将这些现象提高为理性的概念。

构造体系概念的建立始于20世纪20年代。1927年李四光对乌拉尔山的形成引起注意,他发现一条高耸的南北向山脉,突兀在东西两大平原之间,是一个奇异的现象,并且注意到在两大平原的南缘还有一条与乌拉尔山大体同期形成的弧形褶皱山脉,既然是同期又遥相对应,在生成上是否可能有某种联系呢,这便成为他认识山字型构造体系的开始。1928年又在南京、镇江间及柳州一带,发现多个弧形构造的内侧垂直出现一条挤压构造带——状如一个“山”字的构造型式,对这种组合图象他用弯褶理论进行了解析,又用泥土实验进行了模拟,于是山字型这个构造型式便被确认下来。

1929年李四光认识并提出了 $\delta$ 型(即多字型)、 $\gamma$ 型(即帚状)、 $\eta$ 型(即 $\lambda$ 字型)、 $\lambda$ 型(即入字形)及山字型构造等,他将具有一定的共同总体组合形态特征的构造体系称为构造型式,他要求每一种标准的构造型式的建立要根据:(1)同一类型构造体系,在地壳各部份迭次出现;(2)从力学方面,能够证明它是起源于一场一定方式和一定规模的构造运动所引起的应力场;(3)用实验方法,能够得出类似的构造型式。

1945年李四光《地质力学之基础与方法》中,详细论述了构造形迹和构造型式的力学涵义,还提出同一地区出现不同型式的力学涵义,并提出同一地区出现不同型式的构造体系时,可出现重接、斜接、反接、截接等复合现象和联合现象。

新中国成立以后,通过广大地质工作者广泛而深入的实践,获得了大量的资料。1962年出版了《地质力学概论》,将构造体系划分为3大类型。

纬向构造体系(横亘东西的复杂构造带)属于这一类型的构造带,走向东西或近东西,往往经过了长期的、复杂的历史演变,多次运动。在没有严重干扰的情况下,它们可延长几千百万米,具有一定规模的东西复杂构造带,往往出现在一定的纬度上,在中国发育良好的有3带,北面的一条称阴山——天山纬向构造带,其主体大致在北纬 $40^{\circ}\sim 43^{\circ}$ 之间;中间的一条称秦岭——昆仑纬向构造带,其主体位于北纬 $33^{\circ}\sim 36^{\circ}$ 之间;南面的一条称南岭纬向构造带,其主体大约在北纬 $23^{\circ}30'\sim 25^{\circ}30'$ 之间。上述3条纬向构造带具有环球性。除此以外,地球上在赤道附近、北纬 $10^{\circ}$ 、北纬 $18^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、北纬 $49^{\circ}\sim 51^{\circ}$ 、北纬 $57^{\circ}\sim 58^{\circ}$ 、南纬 $25^{\circ}\sim 26^{\circ}$ 、南纬 $34^{\circ}$ 也有纬向构造带出现。在这些带之间,还有一些区域性的东西向构造存在。

经向构造体系(走向南北的构造带)属于这一类型的构造带,最强大的一条出现于四川西部和云南西部,其前身可以是一个古生代地向斜,后经多次活动,形成了强烈的南北向褶皱与断裂。另外在中国其它地区,如云南东部、贵州东部、湖南东南部、江西西南部及贺兰山、太行山等地区,都有南北向构造带出现,其性质多为挤压性。走向南北的构造带,在地球其它地区也往往出现,规模不等,性质不尽相同,发生和发育的时期,也不尽相同。其中规模最宏大的出现于南北美洲的西部边缘,由巨大而强烈的褶皱带组成。介于欧洲与亚洲之间的乌拉尔山也为挤压性经向构造带。在非洲的东部发育了一条巨大的南北向断裂带,称东非大断裂或东非裂谷带,这一断裂以及大西洋中间海岭等,都属于张性

的经向构造带。

**扭动构造(各种扭动构造型式)** 上述两类构造带的走向与纬度或经度方向的一致性,反映了经向或纬向的水平挤压或引张作用,这是地壳构造运动的两个基本方向。然而,由于地壳组成的不均一性,使沿着经向或纬向的作用力发生变化,当作用力不通过地块质量中心时,地块就发生旋扭运动,形成各种扭动构造型式,主要有:(1)多字型构造。是由走向大致互相平行的挤压带,包括褶皱、压性兼扭性的断裂等等和那些挤压带大致成直角的互相平行的张性或兼扭性的断裂组成。其规模小到一块手标本,大到如中国东部的华夏系、新华夏系及中国西部的西域系、河西系,纵横几百千米。(2)山字型构造。由前弧、反射弧、脊柱以及介于脊柱与弧形构造之间构造形迹不甚明显的马蹄形地质组成。中国目前已肯定的山字型有20多个,最显著的一个为以祁连山为西翼、吕梁山为东翼、贺兰山为脊柱的祁吕贺兰山字型。(3)旋扭构造体系。这一类型的构造大致由两部分组成,一是旋扭的核心,二是围绕或半围绕核心的旋回面,根据旋扭核心与旋回面的组合形态,可以进一步划分为帚状构造、莲花状构造、S型与反S型构造、幅射状与同心弧构造、歹字型构造等。东亚最大的一个是青藏高原印度歹字型构造。(4)入字型构造。它由一条扭性的主干断裂和在它一旁或两旁发育的若干分支断裂或其它分支构造组成,世界上最著名的入字型构造是北美以圣安德利亚斯断层为主和中国以郯城—庐江断裂为主干的入字型构造。(5)棋盘格式构造。这一类型的构造都是由两组互相交叉的扭性断裂面组成。状如网,故又称网状构造。

70年代以来,构造体系的工作,除了对其类型划分、发生、发展、演化、复合等基础问题进行了深入研究外,重点是加强了构造体系的应用研究,尤其是根据构造体系的规律指导找矿、找水、工程选址、地震预报等主要方面都取得了显著的成就。

#### 参考文献

- 1 李四光.地质力学概念.北京:科学出版社,1972
- 2 李四光.天文、地质、古生物(资料摘要).北京:科学出版社,1972
- 3 孙殿卿,高庆华.地质力学与地壳运动.北京:地质出版社,1982
- 4 高庆华.中国地质科学院院报,1985,11:1~5

(国家地震局地质研究所高庆华研究员、  
地质力学研究所孙殿卿院士撰)

**构造序次** structural generation, tectonic generation 指在一场构造运动中,在同一方式和方向的构造力作用下,随着主干构造变形的发生和发展过程中,由于局部地块或岩块的边界条件发生改变,换次派生出一系列不同性质、不同方向的构造形迹,或是将已形成的构造形迹发生力学性质的转化,这类现象称为构造形迹的序次。

构造形迹序次的发生与地块或岩块所受外力、应力分布和几何边界的变化情况有着密切的关系,在岩块、地块总体受力状态和总体区域构造应力场不变的情况下,其局部的受力情况和局部应力场可以因边界条件的变化而发生改变。在地质上,边界条件主要是指地块或岩块的受力边界或传力边界的几何特征。在初始应力场的各种应力作用下,地块或岩块因变形或变位而导致边界条件发生整体或局部的变化,从而导致应力分布的改变,派生出新的构造形迹或转化原有构造形迹的力学性质。新的构造的出现,又使局部边界条件发生改变,应力分布也相应改变,产生更新的派生构造。这种过程可以递次出现,直到构造应力逐步释放、衰减到不能引起岩石变形为止。

构造序次理论的提出,是对岩石变形研究的深化,也是分辨区域构造体系与局部构造体系及其关系的一个重要观念。通过构造序次分析不仅可以分辨构造形迹之间主次关系,还可以帮助推断构造运动的方式与方向。在成矿规律研究中也有应用价值,通常初次的主干断裂是导矿构造,而再次的派生构造是储矿构造,

甚至运用这种规律,进行矿床预测。

序次概念是随着构造地质学和地质力学的发展而逐渐形成的。1947年李四光在《地质力学之基础与方法》一书中讨论了序次问题,至50年代,他将序次概念提得更加明确,当时称为“世序”(1953);在“地壳运动问题”(讨论提纲)(1956)对序次理论阐述得更加具体,列举了伴随纵弯褶皱形成过程,初期形成X共轭节理;当岩层发生屈曲,伴随弯曲旋量的增大,背斜转折端部位变为引张状态,从而出现纵张断裂,甚至进一步发展为地堑或裂谷,所有这些变形序幕的变化都是在统一构造力或构造应力场作用下,外力作用方式不变化,而是随着初次构造变形导致局部应力场改变方式的结果。

与此同时,国外主要是侧重于主干断层与分支构造关系的研究(H. E. McKinsty, 1953; J. D. Moody 和 M. J. Hill, 1956)提出共轭平移断层3个序次的理想模式,它们的主要理论依据是,一条断裂,不论是在怎样的应力状态下形成的,只要断裂两盘发生相对的变形或变位,两侧岩石就会受到对盘施加的力,派生出局部构造变形,按照力学性质,派生的分支构造分为压性、张性、剪(扭)性3类,它们均以不等的锐角与主干断裂相交。李四光(1956)还提出主干断裂派生构造中还有旋卷构造,特别是帚状节理更为常见。

Chinnery(1966)从应力集中的角度出发,提出另一种剪切断裂序次模式。他认为在一定的初始应力条件下,当主干剪切断裂出现并发生走向滑移后,原来的均匀应力场发生扰动;沿主干断裂大部分地段,剪应力减小,唯有端点附近,剪应力集中并重新分布,从而派生出二次剪切断裂,这种在主干平移断层端点附近派生的二次剪切断裂可分为六种类型,每种类型都可以是平行主干断裂的剪切作用形成的;也可以是平行主干平移断层斜交的轴向挤压作用形成的。E. Z. Lagtai(1969)认为Chinnery的序次模式要求断裂位移恒定,只在末端才急剧减小,与地质事实不符;再则按Chinnery序次模式也难以解释野外常见远离主干断层端点的分支构造。

1962年李四光在《地质力学概念》一书中还提出:“按照序次查明同一断裂面力学性质可能转变的过程”。主要列举了由于区域性扭动作用发生2组共轭剪切面,属初次构造形迹;当扭动按原来的方向继续进行,由于塑性变形,原来棋盘格式的岩块或地块逐渐变为菱形;原来的2组剪切面,其中和扭动方向角距较小的一组转变为张裂面;而和扭动方向角距较大的一组转变挤压面性质。也就是说,对于这种断裂的鉴定,如果仅仅是按照自身的变位效果,可能认为是2期运动的结果,若认真考虑序次概念,将可能就是一期运动的产物。

1986年出版的《地质力学导论》中对于构造形迹的序次进行了较全面的论述,但主要停留在纵弯褶皱和走滑断裂的序次划分上。实际上,构造序次的概念的内涵与外延是极其丰富的,几乎所有规模较大的变形系统内部都有序次问题。例如,许多大型推覆构造或剥离断层系统主滑面上上下盘构造形迹多为低序次构造;许多顺层滑动构造面也大都更高一序次构造的派生物,但是目前文献中,大多停留在现象的描述阶段,尚未上升到力学原理的分析,这也说明李四光学术思想的超前性。

构造序次概念也不仅是构造形迹的序次关系,构造体系也有序次关系,李四光一系列著作中都强调“在大的‘一盘棋’的局面下,还存在着小的‘一盘棋’的局面。就是说在高一级的构造体系中,还存在着比较低一级的构造体系”。这些低一级的构造体系中,有些是同一序次不同规模(等级)的构造体系;也有一些是低一序次的派生构造体系。这个思路对于研究岩石圈构造及地球动力学都具有重要科学价值。总之,尽管现阶段有关构造序次理论问题研究文献很少,但今后必然是一个重要研究方向。

#### 参考文献

- 1 李四光.地质知识,1953,1:1~6
- 2 Moody J D, Hill M J. Bull Geol Soc Am, 1956, 67(9)
- 3 李四光.地质力学概论.北京:科学出版社,1962. 20~21

- 4 Chinnery M A. Science, 1966, 3(2)  
 5 李东旭, 周济元. 地质力学导论. 北京: 地质出版社, 1986. 97  
 ~109

(中国地质大学李东旭教授撰)

**构造复合与联合** compounding of structures and conjunction of structures 严格说, 构造复合与联合, 同构造体系复合与联合是两个相关而不相同的概念。前者含义更加广泛, 除包含构造体系复合或联合外, 可泛指不同规模各类构造要素(形迹、单元)的相互交织、叠置、干扰的各种现象; 而且相互复合或联合构造形迹, 可以分属两个以上不同的构造体系; 但也可以是同一构造体系内部不同序次的构造成分。

构造体系复合现象的研究具有重要的实际意义和理论意义。据统计, 绝大多数内生金属矿都受到构造复合控制, 沉积矿床、油气田、煤田的分布也与构造体系复合有关。此外, 地质灾害, 如地震、岩爆的出现部位, 有时也与构造复合有关。另一方面, 构造体系复合关系的研究也是查明地壳构造格局与构造演化的重要依据。

最早将构造复合及联合作为一个专门课题, 并上升到构造体系之问和复合及联合应归功于中国李四光。关于构造复合概念早在 20 世纪 20 年代末《东亚一些构造形式及其对大陆运动问题的意义》(1929)一文中即已萌生。当时他将东亚的构造型式分为 2 种类型, 一种是单一体系; 另一种是共生体系。他认为后者是由两个或更多方式共同作用而生成的, 其中已含有复合联合概念。1954 年在《地质力学基础与方法》一书中, 李四光仅采用“联合”一词, 泛指构造体系之间复合干扰关系。1956 年又改用“复合”一词代替联合, 直到 1961 年才将复合与联合明确区分为 2 个既相关又不同的独立概念。

**构造复合现象** 李四光将构造复合现象归纳为归并、交接、包容和重叠 4 种基本方式。归并: 是指一个构造体系的某些成分, 或者一部分的所有成分, 有时经过轻微的改变, 卷入另一个构造体系; 或者成为同一体系的不同序幕的成份, 这种现象, 都可称为“归并”, 在大多数的场合被归并的成分(或部分)属于较老的体系, 或者是同一体系中较早出现的成分。所谓改变, 是指被归并的构造成分的正常形态、方位和力学性质发生了变化。追踪断裂是归并复合方式的常见现象, 典型实例就是较早形成的一对共轭剪切节理, 随着变形的加强, 垂直 BC 变形面张应力加大, 并出现横张断裂, 这组横张断裂往往是追踪共轭剪切节理的局部面发展起来的, 这种复合力学机制表现为日常所见的张节理或充填张性裂隙岩或矿脉, 仔细分析世界上许多大型裂谷, 如东非裂谷系, 莱茵裂谷系, 甚至大洋中脊裂谷, 很可能是纵张追踪断裂力学成因。

**交接:** 是一种最常见的复合方式, 其含义是指两个构造体系的构造成分出现在同一地区, 有时二者互相穿插, 但又保持其原来的面貌, 很少发生变化。它们彼此既不加强, 也不削弱, 这种复合现象称为交接。根据两个构造体系的主干成分以及它们所组成的构造带之间几何关系, 李四光又将其划分为 4 个亚类型: (1) 重叠: 这种复合现象的特征表现在复合的褶皱或冲断面走向完全一致即一个构造体系的成分对于另一个构造体系的成分不发生任何改变走向影响。(2) 斜接: 这种复合现象的特征, 表现在复合的褶皱或逆冲断层的走向彼此稍微不同。只有实地通过长距离追索和准确测量, 才能发现它们之间的分歧。这种复合现象在有些地方显示出较晚构造体系的逆冲断层交切早期形成的构造体系的褶皱和逆冲断层, 有时则两者交而不切; 或者后期的逆冲断面在很短的距离内就利用了早期的逆冲断面后, 再按照正常方向延伸。(3) 反接: 这种复合关系表现在复合的褶皱或逆冲断层彼此显著地交叉, 一组隔断另外一组或形成横跨褶皱, 这种复合现象有时是由较新的构造体系成分, 特别是断裂及其组成的构造带切割或隔断了较老的构造体系的构造形迹(或构造带)。(4) 截接: 这种复合现象的特征, 表现在复合的褶皱或逆冲互相切断并在一定程度上互相干扰, 以致每一被截断段落, 或多或少改变它正常

的形态及排列方向。这种复合现象的出现, 很可能是大致同时形成的构造体系, 在其成生过程中构造应力场交替变化结果。

**包容:** 是指在一定类型的构造体系中, 有时包括着由其它构造体系组成的地块。这个被吞并的或被“俘虏”的地块中, 可能出现一个或几个不完整或完整的独特的构造体系, 其变形样式构造层次(变形相)与并吞它们的构造体系迥然不同, 它们之间往往有明显的界线。这种分割开来被吞并的部分, 在结构上与并吞它们的构造体系, 一般是格格不入的。

**重叠:** 系指在已经一个一定构造体系所贯穿的地块中, 在那个体系发展到了成熟阶段以后, 有时受到另一个体系组成部分的影响。以致前者有一部分发生隆起或挠起, 而另一部分发生沉降或陷落, 在隆升地块中, 原来的构造体系成分或其一部分显得加强, 但实际上并未加强; 而相对沉降作用被较新的沉积物所覆盖, 显得相对微弱, 或不见踪迹, 但实际上并没有减弱。究其原因大多是中生代构造重叠复合的结果。

乐光等(1981, 1986, 1989)在构造体系联合方面进行了较深入的研究, 提出直线性联合、弧形联合及行列式联合 3 种基本类型, 并进行了应力场叠加分析。

构造复合与联合研究内容的实质是构造变形关系学问题, 但在构造地质、大地构造研究中一直未能引起足够的重视, 相信随着地质调查研究的深入, 这项理论将成为今后地质构造研究的重点。

#### 参考文献

- 1 李四光. 地质杂志, 1929, 66(784): 457~473
- 2 李四光. 地质力学之基础与方法. 北京: 中华书局, 1947, 90~93
- 3 李四光. 地质力学概论. 北京: 科学出版社, 1962(1976). 86~92
- 4 乐光禹. 构造地质论丛(1). 北京: 地质出版社, 1981, 127~139
- 5 孙殿卿, 高庆华. 地质力学与地壳运动. 北京: 地质出版社, 1982, 60~83
- 6 李东旭. 地球科学. 北京: 中国地质大学出版社, 1983, 3(22): 33~42
- 7 李东旭, 周济元. 地质力学导论. 北京: 地质出版社, 1986, 246~280
- 8 李东旭, 温长顺. 中国地质科学院 56 大队综合大队集刊, 1987, 7~8: 201~212

(中国地质大学李东旭教授撰)

**构造应力场** tectonostress field 地壳构造是地壳在力的作用下所形成的产物。地壳受力作用, 在内部产生应力, 根据应力分布状态, 即应力场情况的不同, 地壳岩石种类、性质的不同, 物理、化学环境的不同, 所形成的构造单元、构造型式也不尽相同。这种存在于地壳岩石内的应力场即为构造应力场。研究构造孕育、形成、演化, 构造单元类型、形态, 构造形迹的成生联系, 探寻地壳运动动力来源等问题, 都从构造应力场进行需要研究的基本问题。地质力学着重研究各种构造型式、某一地区或全球的构造应力场。

构造应力场研究方法分为: (1) 野外考察和观测, 包括地史、地质和构造解析, 地应力测量, 地形变测量和地球物理方法等; (2) 模拟实验; (3) 数学力学解析理论的建立和计算机数值方法等。

1929 年, 李四光通过对东亚地区构造研究, 首次提出构造型式概念, 总结出山字型、多字型等多种构造型式, 并用模拟实验方法说明各种构造型式形成条件、受力方式和运动程式。1945 年, 李四光首次运用力学原理对山字型构造进行解析理论研究; 1947 年发表了对一个地区复原构造应力场的途径和方法, 指出按不同时期、不同地点发生的构造单元构造面, 结合当地岩石力学性质, 分析形成各种构造单元的应力状态, 建立应力迹线网络,



表达该期、该区应力场。

50年代,李四光倡导并亲自致力于野外地应力测量,用于地震预报和地质构造研究。同期,国外M. B. Гзовский也提出在野外和用模型研究构造应力场方法,采用构造运动速度梯度进行地震区划和地壳应力状态估计;N. Hast在北欧进行了大量的地应力测量,积累了丰富的测量数据,汇同其他人在世界各地大量测量数据,表明在大多数地区地壳水平应力大于垂直应力。60年代,李四光总结提出典型构造型式:棋盘格式构造(共轭断裂构造,X型构造,网状构造),雁行状构造,入字型构造,同心圆—辐射状构造,以及涡轮状、莲花状、帚状等构造型式,并进行了模拟实验,阐明构造成因和可能的外力作用方式。潘立宙等开始进行地应力测量原理和方法的合理化、科学化和计算程序化等研究,取得重要成果。在此期间,关于探测、复原构造应力场,在国内个有很大发展,先后提出:小构造法,断层擦痕法,缝合线法,凯塞效应法,岩墙法,双晶法,位错密度法,重结晶粒度法,亚颗粒法,剪切热法,地震波速法,震源机制解法,天文重力空间技术,计算机数值模拟法等等。这些方法中,有的适用于一定尺度范围,有的适用于古构造或现今构造活动。有些方法,从原理上或方法本身,还需要进行改进和完善。

以J. G. Ramsay为代表将力学大变形(有限应变)理论和方法引入构造变形解析,创立了岩石有限应变测量原理和方法。有限应变测量的任务之一是复原构造应变场(地质学也称应变图象)。韩玉英建立任意(非均匀)有限应变场解析理论和解法,可利用露头变形标志物的有限应变测量,通过有限应变场的场方程推算出构造应变场,再通过地质体的本构关系,复原构造应力场。

70~80年代,在构造型式解析理论的建立、利用计算机进行数值计算和构造应力场相关研究等方面都有很大的进展。王仁从全球考虑,提出两种分层地球模型,计算、论证由于自转速率变化引起全球应力场产生构造运动的可能性。黄庆华运用弹性力学原理建立雁行状褶皱和旋卷褶皱的数学力学解析理论,论证两种构造型式形成的受力方式和褶皱排列规律。王连捷利用有限元法对旋卷构造应力场进行数值计算,得出应力迹线与解析解进行比较,十分符合;通过对雁行构造应力场计算,阐明以雁行褶皱为背景的雁行断裂等间距性形成机理。王维襄建立非线性断裂准则,统一反映张断裂和剪断裂形成条件,为棋盘格式构造、雁行状断裂、入字型构造、涡轮状构造、同心圆—辐射状等各种典型构造型式建立数学力学解析理论,并导出棋盘格式和雁行状构造根据构造排列推算应力状态的理论公式,可根据构造定量地复原构造应力场。廖椿庭等利用地应力测量和有限元计算,结合地质条件,对金川矿区构造应力场进行研究,根据应力场状况,提出合理的巷道走向、孔形和支护,有效地解决长期由于巷道变形严重影响生产的难题。在矿田构造研究方面,万天丰对一些地区不同地质时期的构造应力场进行了系统的复原和研究,对认识矿体赋存规律取得良好效果。对中国和邻区现代构造应力场进行不同研究的有,郇家全、时振梁和李方全等。S. Gregersen和B. Muller等对欧洲,B. C. Haimson对美国,J. S. Bell等对加拿大,T. N. Gowd对印度等地区,以及A. E. Scheidegger, M. L. Zoback等对全球的构造应力场都进行不同程度的研究。

构造应力场研究展望:(1)在构造应力场研究中,考虑地质体的非均匀性、各向异性、节理化不连续性和相关物性参数的测定;(2)在构造力学解析中考虑大变形(大位移、大转动、有限应变)、非线性,引进断裂力学和损伤力学;(3)在褶皱研究方面主要是大幅幅、对称非对称、盘桓倒转等大变形有限元和边界元数值计算等;(4)不同地质时期,不同尺度范围,包括世界范围的地应力场复原与图件编制;(5)构造应力场研究在矿田构造预测、区域稳定性评价、地震预报、地质灾害防治和地壳运动动力起源等研究中的应用。

#### 参考文献

- 1 李四光.地质力学之基础与方法,北京:中华书局,1947.1~7
- 2 Ramsay J G. Folding and Fracturing of Rocks. New York;

- McGranw—Hill,1967,50~254
  - 3 Hast N. Tectonophysics,1969,8;169~211
  - 4 黄庆华.中国科学(B辑),1974,5;492~500
  - 5 潘立宙,等.地应力测量的原理和应用.北京:地质出版社,1981.1~238
  - 6 王仁,等.地质力学论丛(第6号),1982.193~197
  - 7 Scheidegger A E. Principles of Geodynamics, Springer—verlag,1982.86~103
  - 8 万天丰.古构造应力场,北京:地质出版社,1988.76~95,124~144
  - 9 Wang Weixiang. Physics and Chemistry of the Earth,1989,17;149~158
  - 10 韩玉英.中国科学(B辑),1990,3;319~328
- (中国地质大学王维襄教授撰)

**构造体系控矿** control of ore deposits by tectonic systems 地壳上矿产分布是受着双重控制的,其一,是成矿的物质条件;其二是成矿的构造条件。由于成矿物质的迁移、聚集和分布受后者的制约,所以事实上矿产的分布规律主要是受构造体系控制的。根据地质力学长期工作实践中总结出的构造体系控矿的规律,已经在寻找石油、铀、镭、煤、铁、多金属等矿产方面取得了显著的成果。

李四光在新中国成立前,根据地质力学的研究已暗示了华北石油的远景,1954年他在题为《从人地构造看我国石油勘探远景》的报告中,明确提出了在新华夏系凹陷带找油的意见,1959年首先在松辽平原找油获得重大突破。1959年底李四光根据构造体系控矿的理论,又提出下辽河、华北、渤海、江汉、北部湾、鄂尔多斯、塔里木盆地、西藏若干山间盆地和海拉尔—巴音和硕等地区作为石油普查的对象,其中绝大多数地区现在都已找到工业油田。

60年代初期,由于国内外形势发展的需要,寻找铬铁矿的工作已摆到一个重要的位置。李四光根据我国的实际情况,指出应该着重研究铬铁矿分布与构造体系的关系。在这个思想指导下,首先在新疆进行了大量的调查研究工作,总结出大型构造体系控制矿带;不同级、序的构造成分控制矿体;张性或性质多次转化的断裂、断裂交叉处、入字型构造主干与分支断裂相汇处易于矿体集中等规律性认识,并据此指出了盲矿存在的有利部位,其中许多已为钻探所证实。这些规律在西藏、甘肃寻找铬铁矿工作中也起到了重要作用。

根据构造体系控矿的规律,在预测河南西部钨钼矿、赣南木梓园钨矿、大别山与广西多金属矿、山东及东北的金矿等工作中,都获得了成功。

运用地质力学方法找煤,曾在煤炭系统中普遍开展,编制了全国、大区和各省区的构造体系图与煤田预测图,对煤炭基地的开发与建设的战略布署提供了基础资料。所预测的新煤区,部分已被生产所证实。

此外,运用地质力学寻找金钢石、铀矿、铁矿等也取得了令人瞩目的成绩。

在大量的找矿实践中,根据地质力学的基础理论,已经总结出若干构造体系控矿的规律性认识。

**构造体系多级控矿规律** 在一个地区,如果说初次的1级构造控制了成矿带的分布;那么2级构造则控制着其中个别矿区或矿田;第3级构造控制着矿床;第4级构造控制着矿体。所谓1级、2级、3级、4级构造成分,未必平行,而是按构造体系的组合规律,依一定的形式排列。只有掌握构造体系的组合规律,根据控制矿体、矿床、矿田、矿区和矿带的各级构造之序次关系,才能有效地指导找矿。大量的地质实践证实,在同一构造体系中,在岩性相似的情况下,级别、序次、性质、方位相同的构造,彼此之间常有大体相等的间距,使所控制的矿产具有等间距排列的规律。

科学院苗培实研究员撰)

**构造体系多期控矿规律** 构造体系以成矿的时期为标志可分为前成矿构造体系、同成矿构造体系和晚成矿期构造体系,它们对矿产的分布起着不同的控制作用。前成矿期构造作为基础条件控制了提供成矿物质的岩体和岩层的分布,也作为一种边界条件制约了同成矿构造体系的形成;晚成矿期构造体系则对矿体或矿层起着改造、保护和再聚集的作用。同成矿构造体系形成的同时,影响了地壳的地球化学场,构造运动破坏了地球化学的平衡状态,使有用元素发生迁移,然后在新的适宜的环境条件下,重新聚集,形成有用矿产,因此在很大程度上矿产的聚集主要是受着同成矿构造的控制。

**构造体系复合控矿规律** 构造体系复合控矿是最普遍的规律,按着复合现象的种类可分为四种类型:(1)归并控矿。断裂面的归并,必然因其多次活动和力学性质的转变,导致在断裂所影响的范围内,使岩石破碎程度和孔隙度增大,加之裂隙的反复启闭,这种条件极利于导入矿液,形成有工业价值的矿床。(2)交接控矿。由于两种以上构造成份交接复合,在其交接复合部位构造变的复杂;裂隙因不同方式和方向的动力交替活动易于启开;岩浆或热液活动较强,因此易于矿液流通和聚集,故是内生矿产富集的地方。在构造交接复合部位,可以因负向构造叠加形成特殊的盆地或凹陷,利于石油及盐类矿产形成;也可能因正负构造相叠加而保持了相对稳定的环境,利于煤层的堆积,故是外生矿产富集的地方。在构造交接复合处,由于应力集中,也常是变质矿产形成的有利场所。应力的作用,也可能使具塑性的矿层加厚。(3)包容控矿。其含意是指被某一构造体系包含的地块中的另一个构造体系控矿的现象。(4)重叠控矿。某一构造体系的一部份所控制的矿产,与另一个构造体系规模较大的拗陷构造重叠复合时,可因下降而保存了矿产,这一规律对寻找盖层之下的隐伏矿产很有意义。

**构造体系不同部位控矿的规律** 构造体系的不同部位,因其结构面的性质与活动性不同,所以显示了不同的控矿作用。以山字型为例,前弧与背弧及反射弧因构造强烈常是内生矿产聚集处;马蹄形盾地则因常下降为盆地是石油、煤聚集之处。结构面的力学性质不同,规模不同,也显示不同的控矿特点,如巨大的压性结构面往往控制了矿带的展布;张性结构面常为内生矿产的容矿构造等。

**扭动构造影响流体矿产迁移集中的规律** 扭动构造因其特殊的构造应力场,最容易使流体矿产发生迁移集中。一般的规律都是从压力高的地方向压力低的地方迁移并集中成矿。如旋扭构造的隆起砥柱部位、帚状构造旋回带靠近撒开的地段,都是石油聚集处。80年代的一些工作发现,内生矿产也有按构造应力场中应变、应力能量极值区集中的现象。

如上所述,矿产的分布是受着双重控制的,但是迄今为止,对矿产分布规律的研究,基本上还局限于构造条件的研究范畴,而对成矿物质条件研究很少,更很少研究两者的内在联系。因此深入进行构造体系控矿理论的研究,已经选择了如下的内容:(1)开展成矿物质运动与构造活动之内在关系研究,包括研究成矿——岩浆带的分布与构造体系的关系;研究内生矿产的构造——成矿模式;探索矿床垂直分带的力学问题;研究沉积矿产与构造岩相的分布规律。(2)深入研究成矿构造体系不同阶段的活动对矿产分布的控制作用。成矿是多期的,并具有多阶段性,构造体系的活动也是多阶段的,也具有多期性,根据彼此的发展演化规律,重塑矿产形成的历史,将更有助于总结规律,指导找矿。(3)开展运用应力场的规律进行矿床预测的研究工作。这是因为无论构造体系,还是成矿物质的运动和聚集,都是受统一的地应力场支配的,动态的系统研究,将更深入地认识矿产分布规律。

#### 参考文献

- 1 孙殿卿,高庆华.地质力学与地壳运动.北京:地质出版社,1982
- 2 孙殿卿,高庆华.隐伏矿床预测.北京:地质出版社,1987  
(国家地震局地质研究所高庆华研究员、中国地质

**海水进退规程与古生物迁移** the canon of marine transgression and the migration of paleobiotas canon of transgressions and regressions paleobiotamigration “海水进退规程”一词,首先由李四光(1928)提出,系指地质时代海水浸入大陆和从大陆退出的程序。他认为,当地球自转速率增加时,海洋表面的形状就会比陆地变得更扁,两极方面的陆地就会从海中露出,赤道方面的陆地就要被淹没。当地球自转速率变慢时,就会出现相反的情况——两极方面的陆地被淹没,赤道方面的陆地从水中露出。

1928年,李四光更系统地引用了北半球自中生代以来地层的许多事实,具体地论证了海水高低纬度间运动的程序。他认为,地球上每次大的变革之前,北半球的海水都有向赤道移动的趋势,而变革进行时期或变革之后,海水又有向北极流注的趋势。自三迭纪赛特期 Scythian 以来,北半球高低纬度间的海水运动,共经历了10个左右的旋回,每个旋回约23Ma 历程。他认为,除了造山(变革)运动前后,地球自转速率的变更,似乎没有其他原因能酿成此种结果。

当现代海平面研究进入广泛的仪器精密观测和监测的时代,又给李四光的理论带来了福音。其中,最值得庆幸的是 Maksimov(1971)的观测工作,他记录了1900~1950年世界广大地域不同地点海平面的数据,发现赤道海面下降了8cm,两极海面上升了15cm,高低纬度间海面存在此起彼伏的对应关系,赤道海面上升时两极海面下降,反之亦然。他认为,地球海面形状的变化和随纬度重新分布的规律,与地心引力与离心力的平衡有关。这一从实际测量中得出的结果再现了李四光理论的生命力。最近,人们发现,自20世纪20年代以来,地球自转变慢38.87s (Smolac, 1985),海面有两极高、赤道低的现象 (Горшковое, 1949),两极地区的陆缘海面面积要比赤道大得多,海水正经历向两极的运动。如此种种现象反复证明了,随地球自转速率的变化,海水高低纬度间的运动是海面升降的一个重要方式。50年代以来,这一方式的研究之所以未能广泛流传,主要是由海面升降变化现象及原因的复杂性决定的。正象李四光(1956)评论这一段历史时所估计的那样,海面对于地心的绝对升降变化,几乎是难以估价的。仅就海面对于陆地的相对升降而论,可以归结为8种情况:2种效应:陆地不动,海面上升;海面不动,海底沉降;海面与海底同时上升,但海面上升的程度大于海底;海面上升,海底下降。这4种情况,都可能存在,但所产生的效应却只有1个,都表现为海面对于陆地的上升运动;而所产生的沉积物,只能反映海底对于陆地的下降运动。陆地不动,海面下降;海面不动,海底上升;海面与海底同时下降,但海面下降的程度大于海底;海面下降,海底上升。这4种情况,都可能存在,但所产生的效应,也只有1个,都表现为海面对于陆地的下降运动;而所产生的沉积物,只能反映海底对于大陆的上升运动。所以,即使海面对于陆地的相对升降,也是极其复杂的。上述任何一种情况或其他数种情况连续起来,相互迭加,加上气候变化所引起的海面升降,使问题变得更加复杂。但李四光的理论使这一问题变得简单了,概括起来,海面升降大致有3种方式:高低纬度间的海水运动;全球性海面的同时上升或同时下降;局部地区的海面升降。

最近的研究还表明,第1种方式的海水运动与后两种方式有一定联系,这种联系在地质历史中曾不止一次地重复出现,即海水向高纬度区的运动往往伴随全球海面上升;向赤道的运动伴随全球海面下降。甚至第1种方式的海水运动与气候变化也有联系,当海水向两极运动时,全球气候有变暖的趋势,影响到气候带向两极的迁移,进而影响到生物向两极的迁移。反之,当海水向赤道运动时,全球气候变冷,气候带和生物向赤道迁移。自寒武纪以来的显生宙,这一过程重复进行过多次。

生物作为能动的有机体,其迁移与海水运动的一致性,决不是一种机械的动力学混合,而是具有更深刻的原因和中间链条。

生物迁移的思想,是与地质力学的创立和发展共存的。李四光在20世纪20年代,曾不止一次地谈到生物随海水作南北迁移的事实,如 *Holmia*, *Ceratopea*, *Icaospir*, *Calceola*, *Nummulites* 的迁移;关于迁移的路径和屏障,他曾指出北方动物群珠角石 *Actinoceras* 在四川的出现,认为秦岭有一个沟通南北的缺口。地质力学对于生物随海水运动作南北迁移的研究,把地质力学的研究领域从岩石圈拓宽到水圈,又从水圈延伸到生物圈。

生物迁移的思想,首先是由达尔文(1859)提出来的,是通过物种单一起源中心的观点表达的。他认为每个物种都有自己的一个也是唯一的一个起源中心。在条件允许的情况下,它会从这个中心迁移到力所能及的地区。迁移和演化,是达尔文物种起源理论的两个基本命题,也是生命进化的两个基本趋势——“达尔文力”,在自然选择的条件下,构成了生命进化的两个基本方向——演化与迁移。然而自达尔文时代以来,几乎所有关于生命进化的科学,包括 Eldredge 和 Gould 的间断平衡论、McClintock 的遗传学原理、Haeckel 的谱系理论、Goldschmidt 的大进化与小进化、Umbgrove 的周期理论、Newell 的新灾变、Pearson 的宇宙魔爪等等,都倾泻在演化上,把达尔文的另一个基本命题——迁移丢在一边。

直到 Adams(1902)的散布中心理论、Matthew(1915)的“新存旧离”学说、Willis(1922)的时域说,标志着达尔文迁移理论的石蒙时代。但后来,由于人们慑于 Buckman(1922)“迁移炮弹”的威力,使人们联想到蝗虫大规模的移动,兽群在大陆上的漫游,候鸟的迁徙,肺鱼在南美、澳洲、非洲之间的分布,在地质历史是不可识别的,使迁移研究徘徊不前近50年。但李四光(1926,1928)大胆地将生物迁移的思想引入到他的海水进退规程理论中去。生物迁移的思想,自达尔文的启蒙时代之后,李四光是依然坚持这一思想的少数科学家之一,尽管他并没有论证具体的迁移过程。

李四光所开创的海水进退规程的思想体系,为迁移研究建立了稳固的科学基础。现代的研究者已经发现了生物随海水高低纬度间的运动而迁移的证据,论证过具体的迁移过程,使这一理论引起了国内外许多学者的关注。可以认为,没有高低纬度间的海水运动和伴随气候冷暖变化的古气候带迁移的思想,生物迁移的研究几乎是无从着手的。而生物迁移的研究,也将为海水进退规程理论提供新的依据。可以认为,生物迁移的思想,是地质力学关于生物科学和生物圈运动的一个独到的研究途径和思想内容。

#### 参考文献

- 1 李四光,地球表面形象变迁之主因,中国地质学会电,1926,5:3~4
- 2 李四光,占生代以后大陆上海水进退的规程,中国地质学会电,1928,7(1)
- 3 李四光,地壳运动问题,地质力学方法,北京:科学出版社,1956,237~245
- 4 徐大刚,中国晚中生代古生物迁移研究,地质科学院院刊,562,1983,562(4)
- 5 W. Valentine, Evolutionary Paleocology of the Marine Biosphere, Prentice - Hall, Inc Englewood Cliffs, New Jersey
- 6 孙殿卿、高庆华,地球自转与全球构造,地质科学院院刊,1980,562(1)
- 7 Xu Bing chuan, Dissussion on paleobiomig ration and associated problems, Scientia Sinica (B) 1985, 28; 772~784
- 8 —, Biogeographical Provincialism and Biomig ratory Barriers daring the Permo - Carbon terons in China, Geosournal, 1987, 14(4), 429~434
- 9 Mekerrow. W. S & Scotese C. R. Palaeosic, 1990 Palaeogeography and Biogeography, London  
(地矿部地质力学研究所徐炳川高级工程师撰)

**大陆车闸说** the continetnal brake hypothesis 是20世纪20年代李四光基于地球表面形象特征和海水进退规程,所提出的一个地壳运动假说。以后随着资料的积累和深化研究,成为地质学地壳运动问题的基本观点。在大量的调查研究工作基础上发现以下规律。

在空间上,地壳的主要构造形迹——诸如褶皱、断裂、地槽、裂谷、洋中脊、造山带、挤压带等,凡具有一定规模者,其伸展方位大都为经向、纬向、北东向、北西向,即与地球自转轴平行、垂直或斜交,反映推动地壳运动的动力作用方向与地球的旋转运动有关。每一个构造体系都是一幅应变图象,反映了一定方向和方式的地壳运动。归纳地壳上规模巨大的构造体系所反映的动力作用方向,不难看出纬向构造带反映了南北向力的作用;经向构造带反映了东西向力的作用;扭动构造规模巨大者如山字型、新华夏系、歹字型、澳大利亚旋卷构造等,则不是反映南北向的相对扭动,就是反映东西向的相对扭动。总之,纬向力与经向力是形成地壳构造的最基本的作用方向。

地质历史时期曾发生过多次海水进退、气候带迁移和生物迁移,它们的迁移方向以及现今地球上的洋流、气流所反映的运动方向,也主要有二:一是从赤道到两极或从两极向赤道;二是以赤道为最大值向两极逐渐减小的自东而西或自西而东的作用力,也就是说与岩石圈的动力作用方向类同。

在时间上,地球的岩石圈、水圈、气圈的物质运动和发展变化,往往具有多尺度周期的同步变化性。地球多圈层运动变化的相关性无疑反映了作用于各个圈层的动力系统的统一性,因此有关地壳运动问题的研究,必需考虑到地球的整体运动。

地球的诸多运动中最频繁的是地球的自转运动。然而地质力学认为发动地壳运动的主要因素不是地球等速自转,而是地球自转速率的变更。因为,如果地壳构造运动简单地起源于地球等速自转的话,那么地球已经自转了几十亿年了,在这样长的过程中,地球为了适应万有引力场和离心惯性力场两者联合力场的要求,它的外形和它的表层内部构造早已达到平衡,大规模的地壳运动便不会周而复始的发生。

地球自转角速率的变化是问题的关键。根据近代天文观测资料,地球自转的角速率确是时快时慢地变化着,它的变化包含了月变化、季节性变化、长期变化和趋势性的减慢。从古代对日蚀、月蚀和月掩星等观测记录的分析,也可看出地球自转是不均衡的。人们从珊瑚化石上生长线的数目差异,也找到了古生代地球自转速率变化的证据。

影响地球自转速率的外界因素很多,如空间宇宙物质的陨落,其它星球对地球引力的变化等等,然而更重要的是地球的内部变化因素。在忽略不计外力的条件下,地球的自转角动量( $\omega I = C$ )是个常数。其中 $\omega$ 是地球的自转角速率, $I$ 是地球的转动惯量。地球内部任何物质的运动和变化,如球体涨缩、火山喷发、重力均衡、海水运动等,都可能导致转动惯量 $I$ 发生变化,从而使地球自转角速率 $\omega$ 发生变化。设想当 $\omega$ 增大,即地球自转速率变快时,便产生了自东而西的纬向惯性力和自两极向赤道的离心惯性力增量的水平分力。由于地壳各部分与基底固着的牢固程度不同,在纬向惯性力的作用下便形成了压性的或张性的经向构造带,及相关的扭动构造;在离心惯性力增量的水平分力作用下,便形成了纬向构造带及相关的扭动构造。这时海水从两极向赤道集中,高纬度区发生海退;低纬度区发生海侵,岩浆上侵,褶皱成山,其结果使转动惯量 $I$ 增大。 $I$ 的增大,潮汐力的增强,以及地壳运动与深层所发生的摩擦力所起的“大陆刹车闸”作用,便使地球的自转速率逐渐慢下来。

地球自转速率变慢,所产生的纬向惯性力自西指向东;离心惯性力增量的水平分力自赤道指向两极。这时除了将出现与地球自转变快时性质相反的构造形迹外,海水自赤道流向两极,低纬度地区发生海退;高纬度地区出现海侵,这时地球物质在万有引力控制下从表层向深处运移,地表的夷平与重力均衡作用增强,

其结果使转动惯量  $I$  减少。 $I$  的减少,潮汐力的减小,以及成为“大陆车闸”的地壳表层相对向东的运动,又使地球的自转速率逐渐加快,于是一场新的地壳运动又将开始。因此,地质力学认为,地壳的构造运动是控制地球自转速率的自动机制,就是说,地球自转加快,就包含着使它变慢的作用;地球自转变慢,又孕育着使它变快的因素。地球时快时慢的运动,便推动了一次又一次地壳运动的发生,形成了各种构造体系,引起了海水运动,影响了气候的变迁和生物界的变化。

高庆华曾大胆设想,地球是宇宙体系的一颗小星,地球体系的运动和变化,一方面必然受着宇宙体系的控制和影响;另一方面也必然决定于地球体系内部物质的运动和变化,从而构成一个相互联系的开放的自组织系统,这个系统中任何一个部份的变化达到一定程度时,都会影响到地球各个圈层的变化和地球的整体运动,包括自转速率的变化。也就是说,地球上一些运动和变化现象,即使可能不是由地球自转速率变化所产生的力直接引起的,但也必然会显示一定的联系。看来地球运动的统一观或许将成为解决地壳运动问题的最佳方向,从而也扩大了“大陆车闸说”研究的领域。

#### 参考文献

- 1 李四光,地质力学概论.北京:科学出版社,1972
- 2 孙殿卿,高庆华.地质力学与地壳运动.北京:地质出版社,1982
- 3 杜品仁,徐道一.天文地震学引论.北京:地震出版社,1989  
(国家地震局地质研究所高庆华研究员撰)

**地质系统论** theory of geological system 是将系统科学思想引入地质科学研究而提出的一种理论。系统论是20世纪40年代由贝塔朗菲提出的,以后经过许多科学家逐步完善、提高,现在已被普遍用于社会科学与自然领域中,并取得了显著的成效。系统论的特点是强调事物的整体性、联系性、层次性和最优化。

地质科学领域中,很早已孕育着系统科学的胚胎,如提出的结晶序列、沉积序列等。然而对地质系统科学最有贡献的应首推李四光,他在20世纪20年代已将系统论的观念引入地质科学,用于地质构造的综合研究。至60年代反映构造系统规律的“构造体系”的研究已臻完善,他在《地质力学概论》一书中对构造体系做了如下的定义:“简单扼要的说,构造体系是许多不同形态,不同性质、不同等级和不同序次,但具有成生联系的各项要素所组成的构造带以及它们之间所夹的岩块或地块组合而成的总体。”

构造体系是地质力学研究工作中建立起来的一个重要概念。一个构造体系就是一幅应变变象,反映了一定方式的构造运动。他把那些看来似乎是孤立、静止而凌乱的构造形迹,用地应力场作为纽带联系起来,将力学与地质学结合起来,这在地质科学发展史上不能不说是一次重大的飞跃。李四光所倡导的用联系的观点、发展的观点、层次的观点研究构造现象的思想方法,与系统论的观点是完全一致的。

李四光早在1926年发表的《地球表面形象变迁之主因》一文中,曾深刻地认为,在岩石圈之下一定深度可能有一最小强度带,这一最小强度带称壳下层(可能相当现今所指的软流层),壳下层之下则为重圈。当地球转速变化时,岩石圈各部分跟不上变化的速率,便沿着这一最小强度带,发生或东或西的漂移,在漂移速度不同的地块之间便出现了挤压褶皱带或张裂带。他还认为,岩石圈之上是水圈,特别活动的海洋体对地球转速的变化最为敏感,当地球转速增加,在造山运动到来之前海水从两极流向赤道,当地球转速减慢,海水由赤道流向两极。他甚至还认为:“还可以作另一些有深远意义的理论推导,诸如古山脉的走向,气候旋回的时间分布,火山活动时期,生物群的迁移等等,但它们将极大地扩展我们讨论的范围。”显然李四光早期已注意到气圈、水圈、生物圈运动与岩石圈运动的关系了。李四光将地球分成若干层次并探讨各个层次物质运动相互联系的思想,无疑是符合系统要旨

的。在他晚期的论著中,更进一步把地球运动与天体运动联系起来,他晚期(1969)的代表作《天文、地质、古生物资料摘要》,就是一部天、地、生系统研究的重要著作。世界上80年代开始的“天、地、生”综合研究的系统科学思想,是与李四光的基本学术指导思想相当近似的。80年代的天、地、生综合研究,积累了大量资料,为地质系统论的提出打下了坚实的基础。1985年高庆华写出了《地球自转与地质体系》的论文及《地质系统论与矿产预测》的专著,在对比分析了各大地构造学说的特点之后,认为地球的各种运动形式中,最重要的是地球的自转。地球在其运动中由于向心力和离心力联合力场作用的结果而形成各个圈层。地球表面形态和各圈层的物质在其旋转过程中发生不同形式的运动,从而出现了各种地质构造现象及相关的自然现象,诸如大气的流动、海水的进退、岩石的形变、地幔物质的运动、各圈层物质交换与变化等等。在地球发展演化过程中,地壳的结构和构造也发生了一系列的变化,板块、构造体系、地槽、地洼、断块、大地波浪等大地构造形迹的形成都与地球自转运动有关。他将各种地质现象相互联系的总体,称为地质体系。接着,他研究了地球诸圈层的变异与气象灾害、洪水灾害、海洋灾害、地质灾害、地震灾害、生物灾害等在空间上的联系性,探讨了地球运动场、构造场与生态环境及自然灾害的空间关系;研究了自然灾害发生的准周期性性与地球整体运动的及各个圈层运动变化韵律的同步联系;研究了地壳运动、自然变异与自然灾害的链发关系,揭示了它们的内在联系,提出了“自然灾害系统”的概念,并从系统论的高度探讨了其整体性、联系性、层次性和最优化等问题,又于1988年发表了《自然灾害系统概论》。由此将地质系统的变化与自然界的联系联系起来,对地球系统的规律进行了更为广泛的探索,并将其应用范围从揭示地质构造现象的规律用于矿产预测,向揭示自然现象相互联系的规律和预测自然变异的更广阔的领域发展。

地质系统论虽然现在还只具雏形,但可以看出它有可能成为地质学各分支相互联系的桥梁,为最终解决地壳运动问题和认识地质及相关自然现象的规律开辟一条宽阔的途径。相信只要按着这一思路不懈努力,一门更加综合更加高层次的新科学——地球系统科学可望形成。

#### 参考文献

- 1 孙殿卿,高庆华.地质力学与地壳运动.北京:地质出版社,1982
- 2 高庆华.中国地质科学院院报,1985,11,1~12  
(国家地震局地质研究所高庆华研究员撰)

**实验构造地质学** experimental structural geology 运用模拟实验方法,再现自然界中各种地质构造现象的形成过程,并用来解释构造地质学中不同规模构造形式的生成机制,对认识地球岩石圈构造的形成与形变有重要意义。我们所研究的地质构造现象,只是几亿、几十亿年以来地球形变的最终结果,而模拟实验是为了反演这种过程,全面系统地形成演化规律深入研究。

1832年美国霍尔(J. Hall)用模拟实验或模型实验方法再现了褶皱等构造形态的形成过程,从而使模拟实验方法应用于地质构造研究。他首先用叠层布模拟了褶皱的形成过程,其后又用叠层湿粘土做了褶皱的模拟。1877年法国道勃埃(G. A. Daubree)用实验方法着重研究了节理的剪切面和张力破裂面的力学性质。1893年维里士(B. Willis)用湿粘土和松散介质作材料,对阿帕拉契亚山脉的褶皱机制研究,通过模拟实验结果提出能干岩层(competent)和不能干岩层(incompetent)在褶皱过程中的形变特征,建立了岩石的力学性质是决定褶皱类型的概念。然而自18世纪以来,实验构造研究并没引起地质学家的足够重视。自1893年美国维里士成功地进行了褶皱机制实验研究后,1912年阿坦姆斯(F. D. Adams)用大理岩材料在挤压作用下进行了流动实验,1914年霍布斯(W. H. Hobbs)对弧形构造形成与发展的实验研究,1920年米德(W. J. Mead)用石膏在常温下进行了褶皱成因机制的实验,1926年德田贞一(S. Tokuda)关于日本海附近弧

形构造的模拟实验,1929年李四光对东亚一些典型构造的实验研究,并倡导建立地质力学这一新学科。1930年德国克洛斯(H. Cloos)用湿粘土成功的模拟莱茵地堑的成因过程。直至50年代末期模拟实验研究才逐渐形成一门独立的学科,但模拟各种构造形态成因机制的实验分析方法,以及各种相似条件的选择等,还没形成一套完整的研究手段。

1968年瑞典兰培克(H. Ramberg)把物理模拟实验与数学模拟结合起来,进行了大量综合实验研究,对地球表层大地构造的生成演化规律从理论上作了细致推导,并着重对褶皱机制以及在地球重力场影响下地幔体的对流形式,建立了理想的形变模式。1972年美国A和M大学构造物理中心哈丁(J. Handin)、劳根(J. M. Logan)用野外采回未经变形的岩石,放入高温、高压容器中进行褶皱与断裂及其它构造形式的实验研究,并从岩石形变后微观构造上研究它们的形变机制。从模拟实验的相似性考虑又向前迈进一步。

80年代后,构造物理模拟实验研究方法进入了崭新的阶段,以兰培克为代表的实验构造地质学家,曾一度把重力作用看作是地壳形变的主要动力源,并用离心机进行了造山作用的模拟实验研究,成功解释了阿尔卑斯山的生成与演化。同时板块构造学说得以大规模发展,法国达波尼尔(P. Tapponnire)用楔状体(相当于板块)挤压模式进行了韧性材料(橡皮泥)物理模拟实验,对欧洲和亚洲大地构造发展演化提出滑移线场理论。同时有大量学者应用数学模拟有限元方法模拟如板块、推覆体等的运动学规律。又如德国施瓦茨(H. U. Schwarz)用物理模拟实验方法,模拟水动力沉积作用后在重力作用下的变形特征以及与地震作用的关系。英国科博尔德(P. Cobbold)1990年以来进行了大量砂盒模拟实验,除模拟局部构造的成因机制,多数实验模型结合石油构造的生成演化,即着重于生产实践。中国科学院地质研究所,自1955年初成立构造物理模拟实验室以来,完成了多种实验条件下的形变模拟,在中国是最早的,实验手段即方法也最全面,而且更着重于实际应用和理论分析。如在大地构造理论上对断块大地构造学说的理论推导,以及实际应用的验证,包括地质构造中若干构造式样的成因机制、演化过程,又如地壳中断裂系统的生成发展与三维空间中的几何形态、断裂性质、运动方式等,它们除在地表与纬度有一定关系外,垂向上即各层圈内的断裂分布形式、性质、运动方式也有明显差异。因而形成现今地表各种形式的构造格局,尤其结合中国地质构造特征通过模拟实验提出中国构造形变场现代运动形式的新格局,即由于北部安格拉古陆与南部冈瓦纳古陆(板块或断块)的相向挤压下整个中国大陆向东南蠕滑的运动学规律。另外,对各种类型褶皱内部断裂的分布形式,基底几何形态样式对上覆褶皱形式的控制作用,地幔上涌与上涌幅度变化对上覆岩层构造形式变化的控制作用,成功地模拟了裂谷各种类型的生成机制,同时结合弹性材料构造形式的力学分析以及数学模拟。用了多种力学性质不同形式和不同性质的实验材料,进行各种构造形式模拟,如各种层组合的模型受力后的形变特征等,并于1992年底完成具综合性的实验构造地质学研究专著。

1990年以来,国际地科联(IUGS)下属的现代地壳运动委员会(CRCM)、大地构造委员会(CT)、地球动力学委员会(ICG),以及上地幔委员会(UMC),都先后将模拟实验列入重要研究分析手段,虽然多数研究者倾向于从岩石力学与数理统计着手模拟大地构造或各种构造形式的形变规律研究,但物理模拟仍处于领导地位。美国、法国、德国、瑞典等构造物理中心,目前投入主要力量进行构造物理模拟实验的研究工作,并把它全面应用于地球科学的各个领域,所要模拟的构造也是多尺度的,如工程地质中地质构造的工程稳定性模拟实验研究、地震地质中对断裂再活动时的应力场模拟、矿田构造中各种矿脉生成与分布规律的模拟、沉积构造特征与构造形变关系的实验模拟等。因此,实验构造地质学是一门综合性很强的学科,它具有深远的研究意义,它使传统的以描述和推理为主的研究手段,逐步过渡为半定量、定量,使

数理化逐步渗透于地质学,而且带动和发展与地学有关的很多边缘性学科。

#### 参考文献

- 1 张文佑,中央研究院地质研究所丛刊(第8号)南京,1948
- 2 Ramberg H, Strömberg K E. *Tectonophysics*, 1971, 11, 461~472
- 3 Mattauer M. *Les déformations des matériaux de L'ecorce Terrestre*, Paris, 1973
- 4 李四光. 地质力学概论. 北京: 科学出版社, 1973
- 5 钟嘉猷. 地质科学, 1974, 2, 161~170
- 6 Johnson A M. *Styles of Foloding*, Amsterdam, 1977
- 7 Rodgers D A. *Bull Calif Div Mines Geol*, 1979, 203, 74
- 8 Ellis P G. *Basin Research*, 1988, 1, 55~70
- 9 钟嘉猷. 地震地质, 1988, 3, 67~87
- 10 钟嘉猷. 大陆岩石圈构造与资源. 北京: 海洋出版社, 1992. 250~265

(中国科学院地质研究所钟嘉猷教授撰)

## 矿物学

**矿物学** *mineralogy* 是地质学的基础学科。研究矿物的化学组成、晶体结构、物理性质和成因产状,不仅有利于对地壳岩石圈中国态晶体物质的宏观及微观层次上的认识,而且为晶体学(又称结晶学)、材料科学及与其密切相关的矿冶、建材、陶瓷、环保等工业部门提供基础资料和理论知识,它是一门既古老又生机勃勃的重要学科。

矿物学作为一门独立学科是以1956年德国医生Georgius Agricola的著作为标志的。他首先对几种矿物的颜色、透明度、光泽、硬度、挠性和解理进行了描述。1857年索尔比(H. C. Sorby)把偏光棱镜与显微镜组装起来,发明了观察岩矿薄片的偏光显微镜。矿物的化学成分研究始于克隆史杰特(A. F. Kronstedt),他首先采用吹管方法测得矿物中的10余种化学元素。关于矿物形成,1920年艾斯科拉(Eskola)首先引进矿物相概念,1928年鲍温(N. L. Bowen)等人通过实验提出了造岩矿物及金属矿物析出顺序。

由于矿物是人类首先接触到的天然晶体,因此矿物学在发展过程中孕育着另一重要学科——晶体学(结晶学)的诞生和生长。1669年斯丹诺(Nielssten)提出了一个关于矿物晶体形态的重要关系的定律,即不管晶面的大小和形状怎样,晶体的两个相同的晶面间的夹角总是恒等的。这一著名的斯丹诺定律宣告了晶体学的诞生。1784年阿羽依(Rune Just Hauy)提出晶体结构是由相同的组成分子所构成,实际上引进了晶胞的概念。进入19世纪,魏斯(Samuel weiss)提出结晶轴和晶系的概念,1848年布位维(August Bravais)提出了14种空间点阵,这是当代空间群理论的先导。

矿物学及结晶学的近代研究是19世纪俄国弗德洛夫(E. S. Federov)推导出230个空间群而引发的。由于伦琴(Rontgen)在1895年发现了X射线,1913年布拉格父子(W. H. Beagg & W. L. Bragg)用X射线测定了第1个晶体结构,尔后完成大部分硅酸盐晶体结构测定;进入70至80年代以来,由于探测器、X射线源及计算机技术的发展,测定的速度、精度及数量方面有了极大的提高,目前成为世界各国晶体学实验室的常规手段。除X射线衍射外,中子及电子衍射也广泛地用于测定矿物晶体结构测定,其中中子衍射对于确定原子核的及轻原子位置是特别有效的。电子衍射主要用于微区(1~100nm)的矿物晶体结构研究(详见矿物晶体结构条目)。

关于实验矿物学方面,50年来大量的研究表明某些矿物仅在一个狭窄的温度和压力范围内稳定。采用实验方法确定这一范围,有利于阐明矿物形成与地质体成岩成矿之间的关系。在地壳

不同深度的温压条件下矿物的共生可用自由能及成分空间的原理来加以解释。如石英( $\text{SiO}_2$ )和刚玉( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),在正常的地壳环境中极少一起出现,因为它们之间总会形成一种中间化学成分的矿物,如低压时是红柱石( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ );在高压时是蓝晶石。只有在接近地幔条件的极高压下,蓝晶石才分解成刚玉和斯石英。现代科学已为模拟地壳及地幔的各种特殊环境提供了技术条件,例如  $304 \times 10^9 \sim 405 \times 10^9 \text{ Pa}$  及数千至 10 000 摄氏度的高温,从而可将矿物形成实验推向地幔和地核。并且得到许多不同温压条件、化学成分及自由能关系的相图。根据这些相图我们可以解释岩石及矿床中矿物共生组合的规律。

当前矿物学的发展趋势主要表现在两个方面:(1)矿物学本身的实际材料的丰富和理论体系的完善。(2)与矿物有关的交叉学科的产生和发展。由于矿物学研究的深入,新的矿物种属不断地发现,目前被国际矿物命名委员会确认的矿物种属已达 4 000 余种。目前矿物晶结构已从统计、平均结构研究走向实际、局产和表面的结构研究,如透射电子显微镜有可能观察到晶畴以至晶胞级的微区(1~100nm)。扫描隧道显微镜(STM)及原子力显微镜的应用导致了矿物表面结构的直接观察。各种矿物谱学(如穆斯堡尔谱、红外吸收谱、拉曼谱等)与 X 射线、中子及电子衍射相配合揭示了矿物的电子云分布及量子力学特征。在宏观方面由于空间技术的发展,导致了月球矿物及其他天体矿物的研究成为可能。矿物的合成实验方面不仅使模拟地球深处温压条件得以实现,而且也为高新技术材料、无机晶体生长提供了诱人前景。在成因矿物学方面,矿物的标型特征研究得到了巨大进展,利用标型特征及其他成因信息来判断地质体的成矿专属性、确定矿体远近及富矿体埋藏深度已取得了一定成就。更值得注意的是随着人类对矿物认识的深化,矿物资源已不再作为单纯的冶炼金属的原料,而是利用它的物理化学性质(如吸收性能、保温性能、净化性能)加工成不同用途的材料。因而作为一门新兴的学科——矿物材料学正在蓬勃发展之中。

#### 参考文献

- 1 Fedorov E S. Theorie der kristallstruktur Einleitung. Regelmässige Runkssysteme (mit übersichtlicher graphischer Darstellung). I kristallogr, 1895, 24: 209~252
- 2 Bragg W L. Proc Camb Phil Soc, 1913, 17: 43
- 3 佐尔泰 T, 斯托泰著 J H. 矿物学原理. 施倪承, 马哲生, 等译. 215, 239
- 4 Liao Libing, Shi Nicheng, Ma Zhesheng, Bai Chunli Chinese Sciences Bulletin, 23, 1989, 36: 23, 1992

(中国地质大学施倪承教授撰)

### 白云鄂博矿物学 bayan—obo minerlaogy

1927 年丁道衡在白云鄂博发现铁矿, 30 年代初何作霖发现矿石中的稀土矿物, 从而开创了铁和稀土资源的开发前景。新中国建立后不久, 中国科学院地质研究所等科研单位对白云鄂博矿床开展了系统的地质学、矿物学、岩石学和地球化学研究。结果表明白云鄂博矿床蕴藏着大量的稀土和稀土矿物。在白云鄂博发现易解石和包头矿等铈钍矿物之后, 经过仔细分析又发现铈铁矿和烧绿石等一大批独立的铈钍矿物, 奠定了大型铈钍矿的基础。此后, 为解决选矿和矿产资源综合利用问题, 进一步对白云鄂博矿床进行详细的矿物学研究, 查明铈、钍和稀土矿物的化学组成及晶体结构, 为选矿提供了先决条件, 也建立了中国的稀土矿物学理论。在矿床中, 前后发现 18 种新矿物, 其中有的在化学组成和晶体结构方面都是全新的矿物新种。白云鄂博的新矿物可分为下列 6 类:(1)氟碳酸盐类稀土新矿物。黄河矿:  $\text{Ba}(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})(\text{CO}_3)_2\text{F}$ ; 氟碳酸铈矿:  $\text{Ba}_3\text{Ce}_2(\text{CO}_3)_5\text{F}_2$ ; 氟碳酸铈钍矿:  $\text{Ba}_3(\text{Nd}, \text{Ce})_2(\text{CO}_3)_5\text{F}_2$ ; 钍氟碳酸铈钍矿:  $(\text{Nd}, \text{Ce})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$  中华铈矿:  $\text{Ba}_2(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd})(\text{CO}_3)_3\text{F}$ ; 白云鄂博矿:  $\text{NaBaCe}_2(\text{CO}_3)_4\text{F}$ ; 未名新矿物:  $(\text{Ca}_{0.5}\square_{0.5})\text{BaCe}_2(\text{CO}_3)_4\text{F}$ 。(2)钽铈酸盐类稀土新矿物。铈褐钇铈矿:  $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{RE}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Fe})\text{O}_4$ ; 钍褐钇铈矿:  $(\text{Nd}, \text{Ce},$

$\text{RE}, \text{Fe})(\text{Nb}, \text{Ti})(\text{QOH})_4$ ; 单斜斜褐钇铈矿:  $(\text{Ce}, \text{RE})(\text{Nb}, \text{Al})(\text{O}, \text{OH})_4$ ; 单斜斜钍铈铈矿:  $(\text{Nd}, \text{Ce})\text{NbO}_4$ 。(3)偏钽铈钨酸盐类稀土新矿物。钍易解石:  $(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{Ca}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe}^{3+})_2(\text{O}, \text{OH})_6$ ; 铈易解石:  $(\text{Ce}, \text{Nd}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Fe}^{3+})_2(\text{O}, \text{OH})_6$ ; 钍铈易解石:  $(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{Ca})(\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2(\text{O}, \text{OH})_6$ 。(4)硅酸盐类新矿物。硅铈矿:  $\text{KB}_3(\text{Al}, \text{Sc})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_6\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{F}_2$ 。(5)钽铈酸盐类新矿物。包头矿:  $\text{Ba}_4(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe})_8\text{O}_{16}(\text{Si}_4\text{O}_{12})\text{Cl}$ ; 钽铁铈矿:  $\text{Ba}(\text{Fe}, \text{Mn}_2\text{Ti})(\text{O}, \text{OH}, \text{Cl})_2(\text{Si}_2\text{O}_7)$ 。(6)磷酸碳酸盐类稀土新矿物。大青山矿:  $\text{Sr}_3\text{RE}(\text{PO}_4)(\text{CO}_3)_{3-x}(\text{OH}, \text{F})_{2x}$ 。

张培善等发现在白云鄂博的稀土矿物中, 分布最广、含量最多的是氟碳酸铈和独居石, 两者都是富含铈族稀土的矿物。但是, 对原子序数为奇数的轻稀土, 其富集程度不同。相对于一般氟碳酸铈和独居石而言, 氟碳酸铈是奇数轻稀土的富集矿物; 独居石则是奇数轻稀土的富集者, 有的则不是, 故奇数轻稀土的富集法则在氟碳酸铈矿中表现最为明显。

白云鄂博稀土新矿物的共同特点是都含大阳离子钡。众所周知, 钡和硅、铝、钙、镁、钾、钠一样, 同属于造岩元素。在岩浆期, 钡赋存于正长石中; 在接触交代期, 钡大量富集时, 便形成钡长石; 在热液交代期, 也可能形成钡冰长石。在热液矿床中, 钡形成稳定的硫酸钡——重晶石; 在近地表条件下, 形成低温热液的重晶石矿床。钡与铈和铁结合, 生长结构复杂的硅酸盐新矿物。稀土元素在热液作用过程中, 与钡、碳酸和氟结合, 形成多种钡稀土氟碳酸盐新矿物, 故白云鄂博是钡稀土氟碳酸盐系列矿物研究的理想地区。自 20 世纪初在南格罗兰发现氟碳酸铈矿以后, 未在其它地方找到过这类矿物。但在白云鄂博, 自发现黄河矿之后, 相继发现氟碳酸铈矿和中华铈矿。随着研究深入, 还将出现该系列矿物的新成员。有序化方解石结构理论和矿物晶体化学理论, 将会在这里有所突破。

稀土新矿物的正钽铈酸盐类中的褐钇铈矿族矿物的结晶状态有四方晶系和单斜晶系之分。由于矿物处于变生状态, 在加热过程中尚会出现斜方相。本族矿物的化学通式为  $\text{ABX}_4$ , A 在褐钇铈矿中, 除选择铈外, 尚选择钍、铈和铈等重稀土元素。自发现铈褐钇铈矿和钍褐钇铈矿之后, A 的位置便扩大到全部稀土元素。B 的位置为铈、钍、钽, X 为氧、羟基和氟。恰恰是白云鄂博成矿溶液中含巨量铈族稀土元素。这在适宜的地质条件下, 褐钇铈族中铈族矿物新种的出现而得到了解释。偏钽铈钨酸盐稀土新矿物中的易解石族矿物, 化学通式属  $\text{AB}_2\text{X}_6$  型; 几何结晶学属斜方双锥晶类, 由于其矿物化学组成复杂, 非晶变态变化多端, 而被认为是矿物学研究中的“头疼症”。A 组中为多次配位的大型阳离子:  $\text{RE}, \text{Th}, \text{U}, \text{Ca}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Pb}$ ; B 组为六次配位的中等大小的阳离子, 即所谓假想虚根阳离子, 如  $\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta}, \text{Fe}^{3+}, \text{Zr}, \text{Sn}$ ; X 为 O 或 OH, F。大量易解石族矿物的出现, 显示出白云鄂博矿床的新特征。

磷铈钙铈矿(铈磷灰石)是磷灰石结构的硅酸盐矿物, 是磷酸盐矿物过渡到硅酸盐矿物的典型代表。大青山矿是磷酸根和碳酸结合的属于跨类的新矿物。白云鄂博的地质背景提供了这种新矿物的形成条件。

硅铈铈矿和钽铈铈矿的化学组成几乎相同, 仅矿物晶体结构有别,  $\beta$ 角大小不同而已。其矿物化学式皆为  $\text{A}_2\text{B}_2\text{C}_3\text{Si}_4\text{O}_{22}$ , A 为 10 次或 9 次配位的  $\text{RE}, \text{Th}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Na}, \text{K}$ ; B 为 6 次配位的  $\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Mn}$ ; C 为 6 次配位的  $\text{Ti}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Al}$ 。该两种矿物均产于白云鄂博, 但产出部位不同, 其地质产状和形成条件尚需进一步探索。

铈、铁、钙、铈、钽等二价阳离子的碳酸盐及其复盐的矿物, 在白云鄂博都有出现。如菱铈矿、菱铁矿、菱锰矿、方解石、文石、菱铈矿、毒重石以及多种元素互代的铈铈矿。众所周知, 以其离子半径的大小, 钙离子居于上述几种离子的中间位置, 故钙出现于两种不同对称结构的方解石和文石之中。在简单碳酸盐中, 钙铈之间可以互相无限取代。如钙菱铈矿和铈文石就是这样。至于离子半径比钙铈大的钽离子, 则只能有限取代, 否则对

称结构便发生变化,如出现于单斜晶系的钡方解石(斜钙钡石)或假斜方晶系而实为三斜晶系的碳酸钡钡矿,后两者与三方晶系的副碳酸钡钡矿组成矿物的同质3型。白云鄂博产出的碳酸复盐有白云石、铁白云石、菱钡镁石(Norsethite)、本斯顿石(Benstonite)等,含钡的碳酸复盐的出现,具有重要的地质意义。

对白云鄂博矿物学的系统研究,确定白云鄂博矿区约存在170种矿物,包括种、新种(新矿物)、亚种和变种,是中国矿物种类最多的一个矿床。对许多矿物的晶体结构、晶体化学研究,对各种矿物的物理性质、化学组成和矿物化学性质等进行深入的研究,建立了稀土氟碳酸盐类矿物系列的晶体化学体系;提出了钨钨酸盐类矿物中的双类质同型理论;发现了复杂的非晶变生现象,从而提出了非晶变生程度的新分类;发现稀土氟碳酸盐矿物中的复杂体衍变生现象。这些在矿物学研究中都具有重大意义。对白云鄂博稀土新矿物和白云鄂博全部矿物的研究,大大增添了我国矿物研究的数目,丰富了矿物学研究内容。无论从扩大元素类质同象置换系列方面,还是从矿物成因产状方面,都为矿物学宝库增添了新内容。如金红石的有限含铌量,烧绿石的有限含铈量;钨铁矿中铁钨的完全类质同象,碳酸盐矿物中钙钨类质同象的扩大;氟碳铈钨矿的新产状等都为矿物学研究提供了宝贵信息。

白云鄂博矿物学在何作霖、郭承基、谢苗诺夫、彭志忠、沈今川、张培善等的精心研究下,取得了令人满意的成果,但尚有许多矿物学问题有待于后来人的深入工作。

#### 参考文献

- 1 丁道衡,中央地质调查所地质汇报(第23号),1933
- 2 何作霖,中国地质学会会志,1935,14(2):129
- 3 张培善,地质论评,1958,18(5)
- 4 李毓英,白云鄂博铁矿地质与勘探,北京:地质出版社,1959
- 5 张培善,洪文兴,白云鄂博矿物志,北京:科学出版社,1963
- 6 任英忱,等,矿物学报,1982,3:161
- 7 张培善,陶克捷,白云鄂博矿物学,北京:科学出版社,1986
- 8 付秋平,苏贤泽,矿物学报,1987,4:290
- 9 中国科学院地球化学研究所,白云鄂博矿床地球化学,北京:科学出版社,1988
- 10 沈今川,宓锦校,第15届IMA大会论文摘要,1990:339  
(中国科学院地质研究所博士生导师张培善研究员撰)

**矿物晶体结构分析** 是用X射线衍射、中子衍射及电子衍射等方法揭示矿物这种自然界存在的固体晶态物质在微观层次上的原子排列及其晶体化学特点,它可以完整地提供矿物晶体的晶胞尺寸、点群及空间群类型、原子坐标、原子间的键长和键角、化学键性质等晶体化学资料。这对于矿物及无机晶体中与晶体结构有关的物理化学性质的阐明、晶体的合成与生长、矿物成因等方面都具有重要意义。

矿物晶体结构分析的理论基础,是孕育于矿物学中的经典晶体学(结晶学)长期发展中奠定的。1784年阿羽依(R. J. Haüy)在他的著作中提出晶体结构是由相同的分子所组成,他认为菱面体是构成晶体的几种基本构造单元中的一种特殊形状。他的理论含蓄地提出每一组成分子都有一特定的化学内容,组成分子本身就是基本物质,任何进一步的分割都会破坏它本身的特性。1815年魏斯(S. Weiss)提出了结晶轴概念和结晶轴三维空间中的对称轴关系,并确定了等轴、四方和正交晶系。1830年赫塞尔(T. Hessel)得出了32个晶类以及只有1,2,3,4,6次旋转轴才与平移对称相容的见解。1848年布拉维(A. Bravais)提出了14种空间点阵,并指出这14种空间点阵可划分成7种点阵对称,对应于以前所认识的7个晶系。这就为宏观外部对称研究的结晶学进入微观层次的空间点阵研究提供了理论武器。1879年Leonard Sohncke发现了螺旋轴和滑移面这两种对称要素。在掌握这些概念的基础上,俄国晶体学家弗德洛夫(E. S. Federov)提出了230个空间群,这一重要理论不仅是现代矿物晶体结构分析

的基础,而且也是一个理论发展走在实验前头的有趣的例子。因后来通过现代实验技术得出的晶胞内原子排列情况毫无例外证实了该对称理论的正确性。

矿物晶体结构的近代研究是由1895年伦琴发现X射线而引发的。1911年劳埃(von Laue)将一束X射线通过硫酸铜晶体,得到了第1张X射线衍射照片,从而导致了两个有意义的结果:(1)X射线具有电磁性质并具有短的波长;(2)该波长与规则排列的原子间距相近,从而导致X射线衍射效应。1913年布拉格父子(W. H. Bragg & W. L. Bragg)用X射线测定了第1个晶体结构并在30年代完成了大部分硅酸盐矿物的晶体结构测定工作。到60年代,中国完成葡萄石晶体结构分析止,占地壳主要成分的硅酸盐矿物的晶体结构的测定工作差不多全部完成了。在这个测定基础上,完整的硅酸盐的晶体化学体系也建立起来了。

进入70~80年代,X射线晶体学由于X射线源、探测器及计算机技术的发展使得测定速度、精度及数量方面有了极大的提高。例如X射线源的功率,在50年代只是在1kW以下,进入70年代由于旋转阳极靶的使用而提高到60~100kW,而现代同步辐射源的应用,功率又可以比旋转阳极靶提高1~2个数量级,在结构解析的理论方面,研究的焦点集中在如何在相当数量的强度衍射数据中推引出结构因子的位相值。这个问题由于卡尔(karle)等人的不懈努力,在直接法方面研究取得突破性进展。由于上述的实验技术及理论体系的发展和完善,矿物晶体结构分析目前已成近于常规的测试手段并越来越普及。除X射线衍射外,中子衍射也已成为矿物晶体结构测试的有效手段。它的优点是可以获得原子核的准确位置,并且对于轻原子位置的测定特别有效。由于X射线测定精度的提高及中子衍射法的应用,目前矿物晶体结构的任务已不局限于点原子位置的确定,而是可以获得晶体结构中价电子云的密度,从而对原子的化学键性进行定量的解释。

自70年代起矿物物理学及矿物谱学的兴起,为探索矿物晶体结构的量子化学特征提供了有力武器。对于矿物晶体结构的研究,目前的发展趋势是从统计、平均结构的测定,走向实时、局部及表面结构的方向,透射电子显微镜的应用不仅可以提供矿物微区(1~100nm)的晶体学对称信息,而且可以实时地观察到晶畴及晶胞级区域的局部结构图象。自1987年以来,扫描隧道显微镜及原子力显微镜的发明并被引入矿物学领域,从而导致矿物的表面结构的直接观察,由于它能提供0.1nm水平分辨率及0.01nm左右的垂直分辨率,成为当今世界上观察矿物晶体表面分辨率最高的仪器,随着这一研究方法的成熟和完善,人类一睹微观原子世界真面目的理想将变成现实。

#### 参考文献

- 1 Voe Fedorv E S. Theorie der kristallstruktur, Einleitung Reglmassige punktsysteme [mit udersichtlicher graphischer Darstellung]. Z kristallogr, 1985, 24, 209~252
- 2 W. L. (1913) Peoc Camb, Phil Soc, 1913, 17, 43
- 3 M. M. woolfson Direct Method in crystallography. Oxford University press, 1961
- 4 Binning G, Rohrer H. Surface Sci., 1983, 126: 236
- 5 Friedrich Liebau. Structural Chemistry of Silicates, Springer - Verlag, Berlin Heidelberg, New York, Tokyo, 1985  
(中国地质大学施倪承教授撰)

**晶系** crystal system 根据晶体的点群对称性将晶体划分为不同的晶系,是晶体学研究的重要内容,它对于探索晶体中原子排列和对称性及空间群的确定是至关重要的。

根据晶体内部结构的周期性,晶体点阵可划分为许多大小和形状完全等同的平行六面体。此种平行六面体称为晶胞,用来代表晶体点阵的基本重复单位。晶胞可用晶体点阵中3个不共面的平移矢量 $a, b, c$ 及其夹角 $\alpha, \beta, \gamma$ 表示。

根据晶体点阵中点群对称的特点,晶体学家将不同点群对

称的点阵归入7种(六方晶系包括六方和菱面体两种)晶体学中特有的坐标系之中,这7种坐标中点阵参数之间的关系是一定的,称为晶系。三维晶体空间各晶系的名称、符号及其点群见表。

各晶系的名称、符号及其点群对称

| 点阵的<br>点群 | $C_i = \bar{1}$     | $C_2 = 2/m$         | $D_{2h} =$<br>mmm<br>mmm    | $D_{4h}$            | $D_{3d}$            | $D_{6h}$                    | $O_h$        |
|-----------|---------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------|
|           | $\bar{1}$           | 2/m                 |                             | 4/mmm               | $\bar{3}m$          | 6/mmm                       | m $\bar{3}m$ |
| 晶系        | $\frac{a}{c}$<br>三斜 | $\frac{m}{c}$<br>单斜 | $\frac{c}{a}$<br>正交<br>(斜方) | $\frac{t}{a}$<br>四方 | $\frac{h}{a}$<br>六方 | $\frac{c}{a}$<br>等轴<br>(立方) |              |

不同晶系根据其点群对称特点,晶胞选取及基本轴矢量的定向有一系列常规方法(Theo Hahn, 1983),可归纳如下:(1)每个基本矢量是从原点出发到达其行列中最近的网格结点的点阵矢量,基本矢量的定义要符合右手系原则。(2)对于等轴(立方)晶系点阵来说,矢量应与四次轴平行。(3)对六方点阵来说,一个矢量与六次轴平行,并记作 $\bar{c}$ 。其余两个基矢量是两个二次轴方向,这两个方向必须成 $120^\circ$ 夹角,而且矢量长度尽可能地短。(4)对菱面体点阵来说,有两种定向方法,第一种方法是按“六方”定向,即将三次轴当作 $c$ ,其余两个基矢为两个二次轴。它们之间的夹角为 $120^\circ$ ;第2种定向是选择一个菱面体晶胞,选 $a, b, c$ 为3个与三次轴成等角的晶棱,并且是不共面的3个最短的点阵矢量。(5)在正交点阵中 $a, b, c$ 为3个相互垂直的二次轴。(6)对单斜点阵,有两种定向方式,在第1种定向中, $b$ 的方向是唯一的,即使它平行二次轴, $a, c$ 是垂直 $b$ 的面网中两最短矢量,它们之间的夹角应选为非锐角(即 $\geq 90^\circ$ );第2种定向是 $c$ 作唯一方向,也就是让 $c$ 平行于二次轴,在这种情况下, $a$ 和 $b$ 是垂直于 $c$ 的面网中的两个最短矢量,并使 $a$ 与 $b$ 之间的夹角 $\gamma \geq 90^\circ$ 。一般将 $b$ 为唯一方向的定向方式称为标准定向。(7)对于三斜点阵,由于 $\alpha, \beta, \gamma$  3个夹角均不等于 $90^\circ$ ,因而建立定向标准比较困难。一般来讲,首先要将其划分为 $\alpha, \beta, \gamma$  3个夹角均大于 $90^\circ$ 或均小于 $90^\circ$ 的两种点阵类型。1980年, Mighell等指出进一步的定向则需按照还原晶胞的方法来加以确定。

由上表可知,由于1946年国际晶体学会一致商定所有单独3次或6次轴的点群均作为六方晶系来考虑,因此目前晶体学中的晶系只有6种。

20世纪60年代以后,晶体学在无公度相及准晶体研究方面取得了重大进展。传统晶体学中点对称操作与平移对称操作相容性的定理受到了挑战。在准晶体研究中,无公度平移对称操作的概念被提出来了(施悦承, 1991)。由此可推导出五方、八方、十方、十二方晶系的点群及空间群。这些晶态物质已在理论及实验中得到证实。

#### 参考文献

- Martin J. Bueger, Contemporary crystallography, Mcgraw-Hill Book Company, 1970; 29~37
- Theo Hahn, International Tables for crystallography. Volume A, D. Reidel publishing Company, 734~735
- Mighell A D, Rodgers T R Acta Cryst, 1980, A36; 321~326
- 施悦承, 闵乐泉, 沈步明. 中国科学, B辑, 1991, 11; 1216~1223

(中国地质大学马哲生教授撰)

**铀矿物** uranium minerals 是提取核燃料和原子弹核心材料的主要原料。它作为一种金属元素(铀)在自然界产出的独立矿物,其种类之多,为绝大多数金属元素所不及。截至1990年止,在自然界已发现156种铀矿物和15种含铀矿物,而且新发现的铀矿物和含铀矿物,每年正以1~2种递增。

铀矿物的研究主要是对铀矿物化学成份、晶体结构、种属分类(描述铀矿物学),以及对铀矿物的形成条件、形成机制(成因铀矿物学)两方面的研究。铀矿物是铀矿床形成过程的物质记录,研究铀矿物之目的,主要在于揭示其生成物理化学条件,进而推断赋存铀矿床之形成条件,为有效地寻找铀矿床、扩大核能资源提供理论指导。铀矿物可生成于岩浆铀矿床、伟晶岩型铀矿床、热液型铀矿床、氧化带铀矿床、机械沉积型铀矿床、成岩型铀矿床、变质岩型铀矿床等不同成因类型的铀矿床中;其次,研究铀矿物之目的还在于,查明铀矿物的发生、生长、演化历史和晶体化学特征,丰富矿物学理论。

有关描述铀矿物学的研究,最早可追溯至18世纪初期,布鲁克曼(F. E. Bruckmann, 1727)首次发现黑色放射性矿物,并将它命名为Schwarz beck erz,后经深入研究,命名为现在的晶质铀矿(Uraninite)。20世纪40~60年代初,美国和原苏联等最早发展核武器的国家,掀起开发铀矿资源热潮,铀矿物研究也随之进展迅速,现有的绝大部分铀矿物和含铀矿物便是在该时期被发现的,而且在该时期涌现出了一批铀矿物成因研究开拓者,例如,弗隆德尔(C. Frondel, 1951)曾用人工方法制得晶质铀矿、沥青铀矿、铀石、铀酰磷酸盐、铀酰硅酸盐等铀矿物;在这之前,费尔柴尔德(J. G. Fairchild, 1929)曾首先采用阳离子交换法人工制得钙铀云母。世界上最早较系统地、深入地研究铀矿物人工合成条件的学者是原苏联的拉法尔斯基(Р. П. Рафальский, 1963),他开创了系统研究铀矿物形成物理化学条件(成因铀矿物学)的历史。在同一时期从事这方面研究的还有:罗斯(V. Ross, 1955)、富克斯(L. H. Fuchs, 1959)、霍尼(R. M. Honea, 1954, 1958)、谢尔普林尼柯夫(В. С. Серебрянников, 1966)、霍斯特特勒(P. B. Hostetler, 1962)等。中国第一批铀矿物是由南延宗和吴嘉伯(1943)在广西钟山县调查铀矿时于一个花岗岩晶岩铀矿点上发现的,这些铀矿物在当时被分别命名为磷酸铀矿、脂肪铅铀矿和沥青铀矿。

随着铀矿物和含铀矿物种类的增多,乔治(D. R. George, 1949)和麦尔科夫(В. Г. Мелков, 1957)曾先后对其按成因和化学成份分类,但该分类体系都存在一定局限性。此后,西多连科(Г. А. Сидоренко, 1978)提出的铀矿物晶体化学分类,即把铀矿物分为四价铀矿物和六价铀矿物两大类,每一大类按其晶体化学特征又被分为若干亚类,它体现了铀矿物研究的最新成果,已被广泛采用。

运用现代科学技术,较详细研究铀矿物发生、生长、演化机制的,首推迪姆科夫(Ю. М. Дымков, 1973),他采用电镜分析术较深刻地揭示了晶质铀矿分裂、生长成为沥青铀矿皮壳的过程和机制,这一研究成果不仅对铀矿物界,而且对整个矿物界产生了深远的影响。同时进行铀矿物晶体结构电镜研究的还有别洛娃(А. Н. Белова, 1975)、杜宾丘克(В. Т. Дубинчук, 1978, 1979, 1981)和西多连科(1975, 1978)等。在同一时期,纳乌莫夫(Г. Ы. Наумов, 1978)、兰米尔(D. Langmuir, 1978)、布鲁金斯(D. G. Brookins, 1976, 1981, 1984)和帕克斯(G. A. Parks, 1988)等采用化学溶解和热力学计算方法,建立了许多铀矿物形成的物理化学相图,他们在理论上发展了成因铀矿物学。

中国学者的一系列研究成果丰富和推动了铀矿物学的发展。例如,王志雄(1980)采用X射线粉晶技术首次在湖南某两铀矿床中发现两种新铀矿物,它们分别被命名为芙蓉铀矿(含铝铀酰磷酸盐类)和湘江铀矿(含铁、铝铀酰磷酸-硫酸复盐类),该两矿物已获得国际矿物协会认可。在铀矿物形成条件研究方面,赵凤民(1983)曾总结了不同铀矿物共生组合的成因意义;沈才卿等(1979, 1980, 1985, 1988)、程汝南等(1981)和南京大学地质系(1986)曾通过人工合成某些铀矿物,研究铀矿物形成的物理化学条件;魏思华(1979)、徐国庆(1982)、闵茂中(1985, 1991)、蔡根庆等(1988)研究了不同类型晶质铀矿、沥青铀矿的标型特征等;闵茂中等(1992)较系统地总结了直至20世纪80年代末各国对铀矿物成因的研究成果;赵凤民等(1988)对描述铀矿物学



作了全面深入的研究和总结等。

研究轴矿物种属、化学成分、晶体结构等的技术较成熟,主要采用常规光学显微镜鉴定、化学成分分析、微区微量成分分析、(电子探针、扫描电镜、透射电镜、激光显微光谱、离子探针等)、物相和结构分析(X射线粉晶分析、X射线结构分析、电子衍射、红外吸收光谱分析、电子顺磁共振分析、核磁共振分析、激光拉曼光谱分析)等;研究轴矿物形成物理化学条件的主要方法有轴矿物人工合成、热力学计算、轴矿物溶解试验、轴矿物包裹体测温测压和成分分析等;研究轴矿物发生、生长、演化特征的主要手段为电子显微术、化学侵蚀、普通光学显微镜鉴定等。研究轴矿物形成物理化学条件的主要困难在于,原生轴矿物大多为不透明矿物,就现代已有的测试技术,难以直接观察和直接测得不透明矿物中的包裹体及其形成温度、压力、化学成分、 $H^+$ 浓度、 $E_h$ 等参数,而采用其它方法测得的参数,其误差较大。已有的轴矿物人工合成研究,因实验条件过于简单,使由此得出的认识有一定局限性和片面性。

今后世界各国对轴矿物的研究重点主要为:(1)在接近天然成矿条件下于更复杂的实验系统中人工合成轴矿物,以便深刻揭示天然轴矿物的形成条件,为扩大寻找轴矿资源提供理论指导。随着实验地球化学理论和技术的迅速发展,可望对晶质轴矿、沥青轴矿、钛轴矿、铀石等主要工业轴矿物的形成条件,获得较新的认识。(2)采用溶液生长体系和高倍透射电子显微术,研究晶质轴矿、沥青轴矿、铀石的发生、生长、演化过程。(3)利用轴矿物包裹体水溶液的化学成分及有关参数,采用电子计算机程序,对轴矿物的形成物理化学条件作准确的理论计算。

#### 参考文献

- 1 Рафаэльский Р. П. Физико-химическое Исследование условий образования Урановых кристаллов, Москва: Атомиздат, 1963, 50~63
- 2 Garrels R M, Christ C L. Solutions, Minerals and Equilibria, New York: McGraw Hill, 1965, 48~76
- 3 Дымков Ю. М. Процедур Урановой Смошной Руды, вопросы Генетической Минералогии, Москва: Атомиздат, 1973, 35~78
- 4 Brookins D C. Econ Geol, 1976, 71(5): 944~948
- 5 Сидоренко Г. А. Кристаллохимия Минералов Урана, Москва: Атомиздат, 1978, 10~100
- 6 Langmuir D. Geochem. et Cosmochem. Acta, 1978, 42: 547~569
- 7 闵茂中. 地质论评, 1991, 37(1): 64~69
- 8 Min Maozhong. The Textural Patterns of Radioactive Mineral Paragenetic Associations, Athens: theophrastus Publications S A, 1991, 75~104
- 9 闵茂中, 张富生. 成因轴矿物概论. 北京: 原子能出版社, 1992, 8~9

(南京大学闵茂中教授撰)

**二八面体绿泥石亚族矿物** 绿泥石矿物为2:1型层状硅酸盐,其结构中有两个八面体片。一片在2:1层中,另一片在2:1层之间,称层间八面体片或层间片,故早期的文献多将绿泥石称为2:1:1或2:2型,也称TOTO型。绿泥石结构中,各层、片之间产生位移的方式很多,造成多种规则和无序的排列型式。Bailey和Brown(1962)曾导出12种规则的多型,分为Ia、Ib、Ia、Ib 4种基本类型。I型指两种八面体片的倾斜方向一致,II型指不一致。a指层间八面体片的阳离子与下面2:1层中四面体阳离子在投影图上重叠,b指不重叠。这些多型还可以互相组合形成多种无序和部分无序的堆垛。在自然界,大多数绿泥石为Ib型,其次为Ia,并广泛出现无序堆垛的矿物。从化学成分上看,绿泥石的四面体中存在 $Al^{3+}$ 代 $Si^{4+}$ ,八面体阳离子更有着广泛的类质同象代替,因此,形成了众多的矿物种和变种。按照晶体化学特征,考虑到不同位置的八面体性质,国际粘土研究协会(AIPEA)命名委员会的意见(1966),将三八一三八(前一个

“三八”代表2:1层中八面体性质,后一个代表层间八面体片性质)到三八一二八(或二八一二八)面体的绿泥石总称为三八面体绿泥石亚族,而将二八一二八到二八一三八(三八一二八)面体的绿泥石总称为二八面体绿泥石亚族。二八面体绿泥石亚族的矿物,八面体离子主要是 $Mg^{2+}$ 和 $Fe^{2+}$ ,是自然界中最常见的,也是目前研究得比较详细的镁质、铁质和铁镁质绿泥石。二八面体亚族的绿泥石、八面体离子主要是 $Al^{3+}$ ,常以隐晶质粘粒级矿物出现。1967年,Eggleston和Bailey对二八面体绿泥石的结构特征进行了初步概括。Bailey和Lister(1989)对已知的该种矿物结构、成分和X射线鉴定做了较全面的总结。他们指出,到目前为止,已确定了三种结晶好的二八面体绿泥石—锂绿泥石、须藤绿泥石和顿绿泥石。其中锂绿泥石和须藤绿泥石是二八一三八面体的,顿绿泥石是二八一二八面体的。尚未发现具三八面体2:1层和二八面体层间片的绿泥石。这些矿物种与三八面体绿泥石的区别是:成分上富铝, $d_{(060)}$ 值小( $1.49\sim 1.51\times 10^{-10}m$ ), $d_{(001)}$ 值稍小( $14.2\leq 14.2\times 10^{-10}m$ )以及较强的 $4.70\times 10^{-10}m$ 的(003)反射。这3种矿物之间,单用XRD数据区分是困难的。

锂绿泥石的报道较多,1961年Norrish用一维电子密度图确定它是一种二八一三八面体的绿泥石。已知产状多为伟晶岩的热液脉中含锂矿物的蚀变产物,亦有产于蚀变的铝土矿中。其理想组成为 $Al_2(Si_3Al)O_{16}(OH)_2\cdot (Al_2Li)(OH)_6$ 。结构式的前半部分表示2:1层的构成,其八面体阳离子为Al,是二八面体型,四面体中Al代替Si引起阳离子不足,产生负电荷;结构式的后半部分分为层间八面体片的构成,阳离子为Al和Li,为三八面体型,由于阳离子过剩产生正电荷,与2:1层的负电荷平衡。锂绿泥石与须藤绿泥石和顿绿泥石的区别是含数量较多的锂。自然界产出的锂绿泥石一般含3%~4%的 $Li_2O$ ,每个结构式的Li为0.8~1.4原子,主要集中于层间片。四面体Si的数目是4.0个位置中约有3.0个;少数样品的四面体Al被少量B或Be取代,F有时取代少量的OH。Cerny(1970)修正过的13个锂绿泥石的结构式中,每6个八面体离子的占位总数在4.8~5.3之间。但如果把化学分析中的少量Ca+Na+K做为杂质处理(据Peacor等,1988),则占位总数需有小的修正。已知的锂绿泥石样品多数结晶不太好,为单斜的二斜结构,绝大多数为Ia多型,其层间片位置受长氢键的控制。已知有数种多型变体。Vrublevskaja等(1975)报道了产于中亚变质铝土矿中的锂绿泥石,其结构为Ia-6型规则的一层三斜结构。Lister(1966)发现,一种产于含锂伟晶岩中的锂绿泥石中显示出两层单斜的“S”结构,而英属哥伦比亚、美国的阿肯色等地一些结晶好的矿物具有两层单斜的“γ”和“q”的结构。Bailey(1975)指出,一种产于“North Little Rock”的晶体,层间八面体片的锂有序,它位于上下两个2:1层的四面体阳离子之间的直线上,达到了最佳的局部电荷平衡。Cerny等(1971)和Bailey等(1989)先后确定了产于捷克和美国缅因州伟晶岩中具Ib多型的锂绿泥石。

须藤绿泥石的命名有一些变化,1954年须藤俊男等在日本发现了一种绿泥石/蒙皂石的规则混层矿物,其中的绿泥石层为二八面体的Al-Mg绿泥石。后来,Engelhardt等(1962)就把二八面体的绿泥石命名为须藤石。60年代,随着对二八面体绿泥石及其混层矿物的进一步研究与发现,Bailey等(1967)建议,把须藤绿泥石做为具有二八面体的2:1层和三八面体层间片的绿泥石之专有名称,并为国际粘土研究会所认可。须藤绿泥石的产状比较多样,在热液蚀变带、沉积岩、土壤、裂隙脉和低级变质岩中均有发现。其理想成分为 $Al_2(Si_3Al)O_{16}(OH)_2\cdot (Mg_2Al)(OH)_6$ 。与锂绿泥石和顿绿泥石不同的是,它含有相当数量的Mg,主要分布在层间八面体片中。自然界产出的样品,一般含10~15%左右的 $MgO$ 。每个结构式中约有0.4~1.1个原子的Al取代四面体的Si;八面体中,Al由2.5~3.4,Mg由1.2~2.5,还有少量的Fe、Mn、Li等。八面体阳离子占位总数是,每6个位点中有4.5~5.1个。Eggleston和Bailey(1967)、Shirozu和Higashi(1976)对须藤绿泥石进行了详细的结构测定,证实它们

均为 1b 结构, 2:1 层是二八面体, 层间片是三八面体。用粉末法确定密执安州 Tracy 矿山的绿泥石矿物为 1b-2 或 1b-4 的一层结构, 据弱的  $k \neq 3n$  的一系列反射确定它是规则堆垛。其晶胞参数:  $a = 5.237, b = 9.070, c = 14.285, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta = 97^\circ 02'$ 。Drits 和 Lazarenko(1967)以及 Lin 和 Bailay(1985)曾分别用乌拉尔和比利时的须藤石样品进行研究, 指出它们具有“S”型 2 层结构。后者还用一维电子密度图计算出, 须藤石具较小的  $d_{(001)}$  值, 是由于每个 2:1 层中的二八面体较薄造成的。

顿绿泥石最早由 Лазаренко 在原苏联的顿巴斯地区发现(1940), 故定名为 Dobassite, 其定义是具有两个二八面体片的绿泥石。理想组成为  $Al_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2Al_{0.33}(OH)_6$ , 是一种铝的绿泥石。已知顿绿泥石产于土壤、沉积岩、热液蚀变带及裂隙脉中。在结晶好的晶体中, 四面体 Al 对 Si 的取代数是每 4 个位置 0.6~1.3 原子, 八面体阳离子总数大于 4, 约 4.2~4.5 原子。通常存在少量的 Li。

顿绿泥石鉴定为 1a 结构多型。Lazarenko(1967)确定顿巴斯地区的顿绿泥石为具有“γ”及“q”结构的 2 层构造。Aleksandrova 等(1972)精确测定另一个苏联的低锂顿绿泥石为 1a-2 的多型变体, 一层结构。至今还没有可与须藤石和锂绿泥石相比较的精确 X 射线衍射数据。观测到的  $d_{(060)}$  值在  $1.49 \sim 1.50 \times 10^{-10}m$  之间, 而前两者一般在  $1.5 \sim 1.51 \times 10^{-10}m$ 。其中  $k = 3n$  的反射较强, 与 1a 锂绿泥石的位置和强度相似, 强的  $4.269 \times 10^{-10}m$  的(021)反射是 1a-2 多型的特征。

有关二八面体绿泥石的红外光谱和差热特征方面的资料不多, 特别是红外数据也不很一致。总的看来, 二八面体绿泥石的红外光谱在高频区与三八面体种属有较明显的区别。二八面体的主要有 3 个吸收带,  $3620 \sim 3640cm^{-1}, 3520 \sim 3540cm^{-1}, 3350 \sim 3400cm^{-1}$ , 有时出现约  $3660cm^{-1}$  的弱带。而三八面体的绿泥石主要有两个吸收带,  $3550 \sim 3600cm^{-1}, 3400 \sim 3450cm^{-1}$ 。在  $950 \sim 1050cm^{-1}$  范围的 Si-O 吸收带, 富 Al 绿泥石的振动波数较高, 约  $1000 \sim 1020cm^{-1}$ , 而 Fe、Mg 质绿泥石约  $950 \sim 990cm^{-1}$ 。大量热分析资料表明, 顿绿泥石和锂绿泥石的 DTA 曲线上有约  $550 \sim 650^\circ C$  的大脱羟吸热谷,  $900^\circ C$  左右有一明显的相变放热峰; 须藤绿泥石的 DTA 曲线介于铝质的和镁质的绿泥石之间, 约  $650^\circ C$  有一大吸热谷,  $>800^\circ C$  有一小吸热谷, 近  $900^\circ C$  有一放热相变峰。

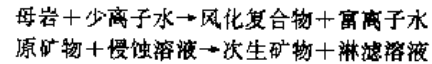
(国家建筑材料工业局地质研究所杨雅秀撰)

**粘土矿物与风化作用** 粘土矿物是地球表面和近地表分布最广的矿物, 大量纯的粘土矿物聚集形成有工业价值的矿床。粘土矿物的成因有多种多样, 但风化作用是大多数粘土矿物, 特别是沉积粘土矿物形成的主要地质营力。

物理风化作用造成地表各种母岩的破碎和分解, 而对矿物的结构没有影响, 因而母岩中各种矿物成分仍保持在风化产物之中, 一般称这些矿物为继承矿物。其中粘土矿物组合为碎屑云母、伊利石和绿泥石。这些物理风化的产物可以在未受结构变化的情况下被风和水来自母岩的破碎崩解, 最常见的粘土矿物组合为碎屑云母、伊利石和绿泥石。这些物理风化的产物可以在未受结构变化的情况下被风和水流等介质搬运到数百至数千 Km 以外, 中国黄土高原厚层的黄土物质一般认为是山风从沙漠地带搬运而来, 它们基本上保持了源区风化产物的特点。从对陕西的黄土和新疆沙漠中粘土样品的分析可知, 均以碎屑云母、伊利石和绿泥石为主。只是某些占土壤层中, 粘土矿物发生不同程度的结构变化, 有过渡性粘土矿物和少量自生粘土矿物出现, 这种变化是风化产物沉积下来之后在新的环境下发生的。河水亦可以搬运大量未受化学风化的物质。如北阿帕拉契山的一些山区河流携带的伊利石和绿泥石等粘土矿物组分, 主要是河水从基底页岩中冲蚀的物质。根据统计学分析和伊利石结晶指数, Potter(1975)认为, 被密西西比河搬运的大量粘土物质多来自基岩而不是土壤。Gibbs(1967)提出, 到达 Amazon 河口的大多数粘土矿物组分是

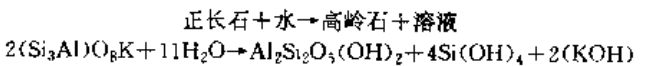
安第斯山中物理风化的产物。中国黄河搬运的大量泥沙物质主要来自对黄土高原上黄土层的侵蚀, 其中粘土矿物组分也主要是物理风化的产物。所以, 海洋中的沉积物也含有相当多量的物理风化产物。

化学风化作用是更为广泛的现象, 主要受自然界水活动的控制, 特别是水中溶有  $CO_2$  和来自有机质分解的有机酸时, 可大大加速化学风化作用的进行。自然界雨水的  $H^+$  浓度大约为  $1.59 \times 10^{-7} \sim 1mmol/L$ , 一般稍具酸性, 与大气  $CO_2$  平衡的水,  $H^+$  浓度为  $2\mu mol/L$ , 而水的化学风化作用主要是其中含有  $H^+$  离子。一般每升雨水中含有  $10^{-4} \sim 10^{-3}ml$  的  $H^+$  离子。雨水进入土壤后, 其酸性应加大, 因土壤上层有很大的细菌家族, 细菌活动导致有机质被氧化, 释放出  $CO_2$ , 故水饱和带以上土壤气体中含有  $CO_2$  是大气中  $CO_2$  含量的  $10 \sim 40$  倍,  $CO_2$  和水反应形成碳酸和  $H^+$  离子,  $H^+$  离子的其它来源是有机酸。碳酸的形成和  $H^+$  离子浓度的增大, 促进化学风化作用的进化。高的气温是促进化学风化作用的另一个重要因素。化学风化作用有如下的基本反应:

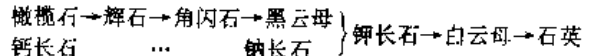


按照侵蚀溶液的组成, 化学风化作用包括 4 种不同的类型: (1)酸解作用。发育于有机的和酸性环境, 易形成有机—矿物复合物; (2)盐化作用。以蒸发的含盐(Na, K)环境为特征; (3)碱化作用。具相应的碱性条件和水中含有 Ca 和 Mg; (4)水解作用。是最发育和常见的作用, 岩石遭受少离子水的侵蚀, 具有中等  $H^+$  浓度的条件。

水解作用基本上代表盐和水之间的化学反应, 形成一种酸和碱。广泛分布的铝硅酸盐(例如长石、辉石、角闪石、云母)构成弱酸盐, 它们与水反应形成溶解的硅酸和各种碱以及次生矿物如粘土矿物, 例如:



水解作用实质上是从母岩的不同矿物中进一步去除离子, 首先是最活跃的如 Na, K, Ca, Mg 和 Sr, 开始是在矿物对淋滤最暴露的部位如外表面、解理面和裂隙, 而最不活跃的 Al 离子残留下来, 形成 Al 的氢氧化物。在温湿条件下, 云母水解显示如下离子去除的步骤: 层间阳离子(K, Na)的淋滤; 某些四面体阳离子(Mg, Fe)向层间迁移, 以便平衡电价; 某些四面体阳离子(Si, Al)向八面体层迁移和最后向层间迁移。利于水解作用发生的条件有: (1)可溶性矿物丰富, 例如盐类矿物明显地比碳酸盐更脆弱, 而硅酸盐抗水解的能力又大大超过碳酸盐。常见的硅酸盐遭受水解作用也存在着如下由易到难的顺序:



(2)矿物的细小颗粒, 因有高的比表面积和大量的离子排出位置, 比大颗粒的同样矿物更易于被水解; (3)由细菌活动提供有机碳的存在并参与矿物分解; (4)好的排水条件, 使淋滤作用连续进行和便于离子排出; (5)高的湿度和温度促使水解活动加速, 其中湿度的影响超过温度, 风化复合物中水解作用的加强和离子顺利排出, 相应地淋滤溶液中含有越来越多的溶解元素, 同时形成次生矿物。

经风化作用形成的次生矿物通常包括各种粘土矿物和与之共生的氧化物, 它们是由原生矿物退化转变形成的, 或在淋滤溶液中释放的离子新形成的(Miilot, 1964, 1970)。根据水解的强度和离子去除的情况, 硅在土壤中可以形成具有 2 个、1 个或不具有四面体层的新矿物。具有 2 个四面体层(主要是 2 个 Si 层)和 1 个八面体层(主要为 Al 层)的次生矿物被称为双硅铝土化, 它符合于 2:1 层的粘土矿物; 只具有 1 个四面体层的称单硅铝土化, 符合 1:1 层的粘土矿物; 而不具有四面体层的称缺硅铝土化, 为铝的氧化物。

水解作用有时伴随有其它风化作用或受到其它风化作用的调剂, 可使总的风化作用的效应加强。如果在强而短的潮湿季节

且地面又缺乏植被(如南非一些地区)时,风化淋滤层位遭受强烈剥蚀,粘土矿物和细颗粒物被搬运走,只留下粗的物质,使风化淋滤进一步向深部发展,在地势高处便于水的活动和离子去除,这种发展就较快,相反地形低平则较慢。所以,风化和淋滤作用总的结果是使大陆地形均夷化。

各气候带内风化作用的类型和程度很不相同,相应地产生出不同的风化产物和土壤类型,所含有的粘土矿物组合及特征粘土矿物的结构特点也有明显的差异。因而,粘土矿物的形成、转化及其组合特征与它们所处的气候带有十分密切的关系。

**严寒的气候** 非常冷的冰川和永久冻土带的气候是以不存在活动水为特征,缺乏降雨(即使降雪多)使气候干燥,植被不发育造成有机质缺乏,这些都不利于化学风化作用的进行,风化产物主要靠物理风化作用形成。在剥蚀表面的砂丘、冲积层或高山硅质及钙质岩上发育了很薄的苔原土壤,其中粘土矿物主要由母岩中含有的矿物碎屑组成。这是南、北极和高海拔山区的典型特征。Kelly和Zumberge(1961)指出,南极的冈长岩没有受到明显的化学风化作用。已知挪威中部的风化复合体和年轻土壤中的粘土矿物主要是来自母岩中的碎屑云母和绿泥石。阿根廷南Pampa平原上薄的土壤含有来自母岩的伊利石等矿物,伴生有少量的高岭石和蒙脱石,它们来自下伏的岩系。覆盖于阿尔卑斯山和比利牛斯山最高部分结晶岩之上的风化产物,主要由云母类和绿泥石类粘土矿物组成,最高海拔的土壤是以伊利石和绿泥石为特征的,因为岩浆的和变质的基岩丰富,物理风化导致云母的页片状剥落,长石的绢云母化和硅酸盐的绿泥石化。高纬度区非结晶岩的风化作用产生各种粘土矿物,如蒙脱石来自各种蚀变的火山岩,高岭石、伊利石和混合层粘土矿物产生于近北极的中生代沉积物。少数化学风化的例子报道于南极的McMurdo Sound地区,在岩浆岩和冰碛层之上的土壤中,发现有不规则混合层粘土矿物、蛭石和蒙脱石,这些土壤层是全新世以前形成的,是连续的间冰期风化导致的。现代的水解作用只是限于某些金属(Fe、Mn)的解压和氧化物沉淀。

**温-湿气候** 中纬度地区,大多以温和的气候和平均降雨量500~1000mm/a为特征,这种条件导致有意义的化学风化作用,硅酸盐的淋滤,造成某些碱(Ca、Mg等)元素的迁移,也有少量Fe和Si的迁移,形成的土壤主要呈褐色和栗色。在较温暖的地中海地区,土壤呈淡红色,它们含有由物理风化和化学风化形成的粘土矿物。温和的气候只造成原物质部分地脱盐和去硅,土壤中粘土矿物有限的去除离子和退化,原来的层状硅酸盐(云母、绿泥石)首先被水解剥离,形成开放伊利石和绿泥石,如水解更为活跃时,这些矿物继续演变形成不规则的蛭石混合层、粘土状蛭石、蒙脱石混合层、退化蒙脱石,最后出现非晶质物水铝英石(Millot,1970)。已知有3种演变相:

绿泥石→开放绿泥石→绿泥石→蛭石 } →蛭石 (1)

云母→开放伊利石→伊利石→蛭石 } →蛭石 (1)

蛭石→蛭石-蒙脱石→退化蒙脱石→水铝英石 (2)

绿泥石-蛭石→绿泥石-蒙脱石 } →退化蒙脱石→水铝英石 (3)

伊利石-蛭石→伊利石-蒙脱石 } →退化蒙脱石→水铝英石 (3)

Millot(1970)描述了法国东北部黑色石灰土和褐色土壤中的绿泥石-蛭石、伊利石-蛭石和伊利石-蒙脱石的发展。Lamoureux等(1967)提出,在地中海型土壤中,母岩对沉积岩成壤作用的控制,影响不规则混合层及退化蒙脱石的形成。Tardy和Gac(1968),Meilhac和Tardy(1970)描述了覆盖于法国东北部结晶岩上大多数砂和土壤的中等演变情况,来自碎屑云母的伊利石和长石的退成岩作用,伴有次生的Al-蛭石,组合有绿泥石-蛭石,有时还有退化的蒙脱石,斜长石是花岗岩风化形成粘土矿物的主要来源。Reynolds(1971)提出,美国华盛顿北面阿尔卑斯带中,由花岗岩及变质岩风化形成蛭石-金云母混合层、蛭石和蒙脱石,强调了化学风化作用的重要性。Kha Ngyen和H. Paquet(1975)观察到富含粘土矿物的褐色土壤中,风化作用停留在混合层阶段。Churchman(1980)描述了在正常H<sup>+</sup>浓度

条件下,某些新西兰土壤中粘土矿物有如下的转变:

绿泥石→膨胀绿泥石→绿泥石→蛭石

伊利石→伊利石→蛭石→伊利石→蒙皂石→蒙皂石

伊利石→蛭石→退化蒙皂石

总之,温和气候下发育的风化作用,基本上与变化的2:1层粘土矿物的形成一致,主要形成不规则混合层和小的结晶中等的蒙皂石。总的来看,蛭石混合层在冷-温地区(如中高纬度和中纬度山区)占主导,而退化蒙皂石在暖-温及潮湿地区更丰富。2:1层矿物多是由原矿物退化产生而不是新形成的。

**热-湿气候** 热带和亚热带大部分地区是典型的热-湿气候,此类气候环境是以高降雨量(1300~8000mm/a),活跃的排水和氧化条件为特征,导致白-淡黄到红色土壤的形成,一般用红土一词加以概括,红土一般可厚10~30m以上,此种气候下最典型的风化产物除红土外,尚有高岭石和三水型铝土矿。

在热-湿的环境中,强烈的淋滤妨碍有机质的积累,且母岩中大部分活动组分被排走,在风化复合体中残留的铝和铁与不同数量的硅和铁结合形成新矿物。强烈的水解作用导致高岭石的形成,其硅-铝1:1层结构同单硅铝化了的化学作用一致。针铁矿常与高岭石伴生。非常强的水解作用导致三水铝石及少量勃姆石形成,代表土壤以铝土矿化为特征。红土中高岭石和三水铝石的相对丰度主要取决于固定地下水面的存在,暂时的或波动的潜水面有利于二氧化硅的排出和三水铝石的形成。然而,甚至在富三水铝石层位,也伴生有显著数量的高岭石。这种组合出现于热-湿气候下的所有岩浆岩、变质岩和沉积岩之上。某些剖面中可保存有某些残余的或被改造的矿物,如由花岗岩碎屑中云母或长石绢云母化形成的伊利石等(Lelong和Millot,1956)。

中国南方各省广泛分布有大片的红色土壤,其中普遍含有丰富的高岭石矿物,广东和广西境内已先后发现了多个大型的高岭石矿床,海南、福建和广西等地区有三水型铝土矿形成,正是热-湿气候下强烈化学风化作用的结果。富高岭石和富三水铝石的红土铁含量都很高,它们多发育于干季时间很长的热-湿气候下。Nahon(1986)提出发育的几个阶段:通过母岩水解,阳离子被淋滤,形成氢氧化物的沉淀和结晶;连续增长的离子氧化物形成结核;假砷岩和豆状铁质壳形成。

某些其它粘土矿物可暂时性的发育于红土剖面下部最初的风化阶段,例如非洲和南美的土壤中,特别是在以稳定地下水为特征的土壤基底带(Volhoff和Melfi,1978),形成不规则混合层矿物、蛭石和蒙皂石。在地形起伏不大和排水有限的基性、超基性岩石中,在剖面的下部经蚀变可形成大量的蒙皂石,如在苏丹、埃塞俄比亚和肯尼亚的平坦盆地中。富蒙皂石的变性土常见于北-中非的玄武岩和角闪片麻岩之上,其中含有形成的Fe-贝得石(Paquet,1970)。发育在印度德干高原玄武岩上的蒙皂石也有高含量的四面体Al和八面体Fe,更象是贝得石(Singh和Murti,1975)。发育在西象牙海岸超基性岩上的粘土矿物主要为绿脱石(Paquet等,1982)。

**冷-湿气候** 在中高纬度和中高海拔地区的冷-湿气候条件下,腐殖质倾向于在排水良好的森林地区风化剖面中积累,决定了其酸性环境(H<sup>+</sup>浓度大于100mmol/L)和形成有机-矿物复合体,主导的风化作用符合于酸解作用,形成黑褐色土壤层,通常厚度小于1m,在不同层位中含有不同类型的有机质,在表面带(O带)中含有腐败的植物碎片,在淋滤层位(A带)中为黑色原腐殖质,而在其下的堆积层位(B带)的上部为暗褐色有机质,其余部分为砂质和持久性物质。在酸解环境中,所有阳离子倾向于从矿物中排出和形成可溶盐(Pedro等,1977),导致在黑褐色土壤化期间母岩矿物被强烈破坏,与其它风化作用不同的是,Al和其它阳离子一起被排出,而硅的可溶性离子少,倾向于在土壤中集聚。结果,许多黑褐色土壤中含有丰富的蛋白石或方英石等次生二氧化硅(Swindale和Jackson,1960)。黑褐色土壤中粘土矿物主要是母岩矿物退化形成的,常见有强烈蚀变的伊利石、蛭石及蛭石和蒙皂石的混合层矿物(Bryant和Dixon,1964;

Miliot, 1970)。如果母岩中含有蒙皂石, 它可保存在剖面底部和伊利石发育的层位。高岭石、三水铝石和石英更能抵抗酸解作用, 经常出现于土壤的上部层位。非常成熟的黑褐色土壤可含特有的次生二氧化硅、非晶质有机-矿物复合体和强烈退化的云母残余。

**热-干气候** 在炎热的沙漠地带, 微小的降雨和强烈的蒸发妨碍化学风化作用的进行, 因而水解作用非常弱, 只限于铁、锰氧化物的迁移和沉淀。由于淋滤作用很弱, 碱很少被排出, 使岩盐、石膏等地地结晶。大多数粘土矿物形成于物理风化作用并反映母岩的组合。最典型的例子是撒哈拉大沙漠, 它发育在老的稳定的由结晶岩组成的克拉通地区。其风化剥蚀的沉积物中, 有丰富的伊利石和绿泥石。

**温暖-半干气候** 具有强烈干-湿季节变化的温和到暖的地区以风化作用不连续为特征。在湿季(年降雨 500~1300 mm), 水解作用明显, 矿物中释放的离子并未被排走, 各种碱、硅、铁甚至铝元素在 A 层位与有机质伴生, 在干季它们结合并形成新的矿物, 过剩的 Ca 形成次生方解石, 无论什么岩性的母岩均是如此。形成的土壤主要由黑色颗粒状的 A 层和淡褐色富钙质的 B 层组成。土壤结构皆为棱柱状和不稳定的, H<sup>+</sup> 浓度由上到下减小, 由稍酸性变为碱性。它们一般出现中低纬度地区, 如乌克兰、中东、印度南部、澳大利亚东部、北-西非洲、美国达科他到得克萨斯等地区, 粘土矿物通常是以新形成的结晶良好的蒙脱石为特征, 这与真正的双链铝土化是一致的。从温暖的气候下, 水解的强度不同, 蒙皂石含量为丰富到很丰富。在土壤的上部层位, 蒙皂石可占粘土矿物总量的 60%~90%, 而不管其母岩性质如何(Redmont and Whittside, 1967)。

在干-湿季节悬殊的地区, 有硅结砾岩和钙结砾岩形成, 前者是土壤表层由玉髓和蛋白石等形成的壳, 后者是次生方解石形成的壳, 它们在北半球半干旱地带特别发育。同时与之伴生的粘土矿物有 Mg-蒙皂石、坡缕石和海泡石。纤维状粘土矿物和纤维状次生方解石的发育是由于水解和蒸发足够强的情况下形成的。例如摩洛哥钙质中存在有坡缕石(Paquet 等, 1969), 美国内华达南部钙结砾岩含有以坡缕石和海泡石为主导的粘土组合(Hay 和 Wiggins, 1980)。中国陕西周原黄土及古土壤层中, 也发现有海泡石等纤维状粘土矿物及丰富的纤维状次生方解石, 反映出在半干旱气候下水解和干季蒸发下毛细作用发育的特点。

粘土矿物是在一定的地质环境和气候条件下形成的, 产生并广泛分布于地表带的沉积粘土矿物, 其形成和转化与气候, 特别是温度和湿度有十分密切的关系。不同的气候条件, 发育了不同类型和强度的风化作用, 导致不同的风化复合体和土壤类型, 相应地形成了特征不同的粘土矿物和组合。通过深入地研究粘土矿物和结构特征和粘土矿物的组合特点, 不同粘土矿物的含量比和粒度分布特征等, 可以了解和推测形成区和来源区的风化作用类型和气候环境特点, 为解决地质理论和有关科学问题提供有用的资料和信息。

(中国科学院地质研究所张乃嫻撰)

**石灰石化工制品碳酸钙** 在地质学上称为石灰岩(工业原料称为石灰石)的钙碳酸盐岩, 是自然界中分布广泛且储量丰富的一种沉积岩。石灰岩的主要矿物组成是方解石, 化学组成为碳酸钙(CaCO<sub>3</sub>)。工业上所用的碳酸钙包括天然的和合成的两类制品, 它们在橡胶、塑料、造纸和涂料等工业上作填充料, 同时也广泛用于皮革、染料、油墨、饲料和日用化工等工业中。

以碳酸钙为主要化学成分的矿物, 按结晶构造分为 3 种类型: 方解石型、文石型和球霏石型。方解石是方解石型结构中的主要代表性矿物, 也是自然界中最常见的矿物之一。工业上所用的合成碳酸钙大部分是属于方解石型结构的晶体。文石(亦称霏石)是文石型结构中的主要矿物, 是方解石的一种结构多型。它比方解石有较高的密度和更紧密的堆积, 属于低温矿物。在自然界中文石不稳定, 易转变为方解石。在合成的碳酸钙中, 该种结

构较少见。球霏石是准稳定态, 低密度, 六方对称, 常为高温碳酸钙沉淀中的产物。此外, 在人工合成的碳酸钙中, 还有一种属于无定形的非晶质结构, 这种非晶质碳酸钙自然界尚未发现。同结晶质产品相比, 非晶质碳酸钙的比表面积高达 600m<sup>2</sup>/g, 是结晶碳酸钙的约 20 倍, 密度 1.6~2.5g/cm<sup>3</sup>。水溶性极好, 该产品有极大的开发利用价值。

碳酸钙制品按其制造方法可以分为重质碳酸钙、轻质碳酸钙、特种碳酸钙和活性碳酸钙等: (1)重质碳酸钙 利用干法和湿法, 通过机械直接粉碎、研磨天然石灰石、白垩、贝壳等, 再经干燥、筛分等制得。重质碳酸钙产品是今后发展的重要方向。(2)轻质碳酸钙(沉积碳酸钙) 这是基于化学方法, 将石灰石煅烧成生石灰, 加水消化生成石灰乳 Ca(OH)<sub>2</sub>, 再与石灰石煅烧过程中放出的二氧化碳气体进行碳化反应, 最后经脱水干燥、过筛制得。(3)特种碳酸钙 在轻质碳酸钙工艺基础上, 改变碳化阶段的合成工艺和条件, 如 Ca(OH)<sub>2</sub> 的浓度、温度、流速和 CO<sub>2</sub> 气体的温度、浓度、流速、流量, 以及加上某些添加剂等制得具有不同晶形、粒径的各种碳酸钙产品, 如链状、纺锤状、立方形、球形、六角板状等碳酸钙。(4)活性碳酸钙 在上述的碳酸钙产品表面通过一定的技术, 以各种表面活性剂进行活化处理, 制得具有各种特殊性质适于不同用途的碳酸钙产品。这种活性碳酸钙产品具有广泛的利用与开发前景。

中国石灰石资源丰富, 分布广泛, 质地优良, 是发展碳酸钙工业的一大优势。不同类型的碳酸钙制品在橡胶、造纸、塑料、涂料、新材料及其它日用化工工业等开发应用上有广阔的前途。因此, 研制碳酸钙新产品, 开拓碳酸钙产品的应用范围和发展碳酸钙工业是中国目前工业中的重要方面。

世界上在纸张中超细碳酸钙的填充量约为纸张重量的 20%~40%。但中国造纸工业碳酸钙用量尚少, 且不够普遍。碳酸钙加入纸张涂覆料中可提高涂覆层的光泽、白度、不透明度、油吸水性、平滑度等等。尤其是由于纸张充填碳酸钙采用中性施胶法, 纸张不会有变黄现象发生, 易于长久保存。中国造纸工业中, 由于仍使用较多的高岭土等, 并采用酸性施胶法, 致使纸张质量不好, 尤其是因酸性纸张极易变黄发霉, 不易长期保存。因此, 采用碳酸钙代替高岭土作为纸张材料是中国造纸工业今后发展的方向。

塑料工业中碳酸钙主要作为填充剂, 填充量一般在 5%~30%。在聚丙烯、聚丙烯和酚醛塑料等聚合物中均可用多量的碳酸钙填充。钙塑料是中国塑料工业近些年来发展起来的一种新型复合材料, 它是在合成树脂中加入无机钙系矿物(如碳酸钙、石膏或亚硫酸钙等)经混炼塑化后成型的产品, 兼有塑料、木材、纸张等多种性能, 可以制成各种具有耐热、耐寒、隔音、防震特性的产品, 广泛用于产品包装、隔音隔热材料、门窗框和室内装修材料、天花板、墙壁板、地板以及家具等。为了改善碳酸钙在塑料中的分散性、补强性以及其它性能, 近年来正在开发新型的偶联剂等高分子聚合物用于碳酸钙的表面处理, 为活性碳酸钙应用于塑料工业开辟了广阔前景。

微细碳酸钙在橡胶制品中有明显的补强性, 即更高的抗扯断强度、耐磨性、抗拉伸强度, 可以降低生胶含量以达到降低成本的目的。而且在浅色补强剂中, 微细碳酸钙的耐压挠性特别好, 对发展橡胶制品中的透明制品和浅色制品有很大的价值。此外, 还特别适用于合成橡胶制品, 微细碳酸钙填入橡胶后, 制品的抗撕裂强度可提高 1 倍以上, 屈挠次数将可提高 5~6 倍。活性碳酸钙填入橡胶后, 更能显示其优越性, 不仅增加了在橡胶中的相容性, 而且大大改善其流变性。在中国应努力研制微细化相表面活性的碳酸钙系列产品, 以适应橡胶工业发展的需要。

涂料中碳酸钙的最大用量乳胶漆, 可部分取代钛白粉。在防腐涂料、溶剂涂料中作为防沉剂。碳酸钙普遍用于建筑物的钢材防锈、木材防腐和水泥结构部件的涂料。碳酸钙还广泛用于建筑内墙涂料。此外, 碳酸钙在公路涂料、海洋涂料中也是重要组分。值得注意的是重质碳酸钙在涂料中的应用有广阔前途。它

不仅可大大降低涂料成本,而且可改善材料的不透明度。因此,重质碳酸钙的开发应用有巨大潜力。

此外,碳酸钙在医药、油墨、食品、饲料、陶瓷、染料以及民用化工产品如化妆品、牙膏等方面还有广泛的用途。

国内外在工业用碳酸钙的研制方面已有一些新的进展,特别在应用研究方面发展较快。碳酸钙制品最重要的发展方向有如下的4个方面:(1)继续加强造纸颜料碳酸钙的研制和开发 重质碳酸钙和沉淀碳酸钙今后仍是造纸中的重要涂覆料。重质碳酸钙在造纸中的用量越来越大,中国粒径为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的产品用于一般造纸的颜料,平均粒径为 $1\mu\text{m}$ 的产品用于铜版纸的颜料,平均在造纸工业中,快速推行中性施胶法,改变中国纸张的质量,开发多品种纸张产品是有行业的重要任务。(2)继续致力于多种晶形、粒径的超细碳酸钙系列产品的研制与开发 国际上,特别是日本在多种晶形、粒径的超细碳酸钙系列产品的研究与开发方面已走在各国的前面,今后仍然是一个发展方向,非晶质碳酸钙的开发将有重要意义。(3)重质碳酸钙的进一步开发 国外极重视重质碳酸钙的开发,其用量已远远超过轻质碳酸钙。欧洲塑料用重质碳酸钙是轻质碳酸钙用量的16倍。二者的比例,造纸为3倍,橡胶为11倍。在美国,塑料为18倍,橡胶为10倍。有人认为,轻质碳酸钙有逐渐被重质碳酸钙所代替的趋势。(4)碳酸钙—有机复合体的研究与开发。国外已研制出多种表面改性碳酸钙产品,且仍在不断深入开发研究。碳酸钙—高聚物复合体的研究将会更加扩大碳酸钙的应用范围。特别是重质活性碳酸钙的研究与开发将是一个重要的发展方向。

(中国科学院地质研究所张乃颀、马玉光撰)

## 岩石学

**火成岩** 同义词为岩浆岩,是指地表以下或在地表由熔融状态的岩浆固结生成的岩石。19世纪后半期偏光显微镜用于岩石薄片研究,这是岩石学发展中的一大变革事件,从此出现了岩石描述的热潮,鉴定出一大批岩石类型,第一批岩石分类表也应运而生(Zirker, 1866; Rosenbusch, 1877; Michel-Levy, 1889)。这些分类中突出了矿物成分的作用,都是些定性的分类,此外也重视了岩石结构。19世纪末对火成岩的化学成分做了广泛的研究,从而出现了岩石的化学分类(Певископцесены, 1890, 1896, 1898),也正是由于这一研究的进展,促进岩石定量矿物分类的发展(Cross等, 1900, 1902, 1903),此后出现的Johannsen的定量矿物分类(1931)是这一时期的代表。

自1760年至今共提出大成岩的名称(和相关的术语)1584个,由于全球岩石对比、综合研究以及建立地学信息系统的需要,统一岩石分类命名的需求日益迫切。1970年国际地质科学联合会火成岩分类分委会建立,经过了以Streckeisen为首的一批岩石学家20年的努力工作,由Le Maître主编推出了《火成岩分类及术语辞典》—国际地科联(IUGS)火成岩分类分委会推荐(1989),这是岩石学发展史上第1个统一完整的岩石分类,从已有的术语中选择推荐了297个火成岩的岩石名称和相关术语。火成岩的这一分类是以实际矿物及其含量为分类依据。通常的深成岩和火山岩,若可测定实际矿物,  $M$ (镁铁矿物及有关矿物) $< 90\%$ 的岩石以QAPF双三角形—图解分类(Q石英, A碱性长石, P斜长石和方柱石, F副长石类),  $M > 90\%$ 的超镁铁质岩按镁铁质矿物分类。对于含玻璃质及粒度细无法测定实际矿物含量的火山岩,采用全碱—氧化硅图解分类。一些特殊类型的岩石如火山碎屑岩类碳酸岩类、煌斑岩类、黄长岩类、紫苏花岗岩类各有各自的分类框架。这一岩石分类方案的发表已经和必将有助于火成岩学的新发展。当前正对常见类型岩石按新的分类方案做出新的归纳,动用新的测试技术采集新数据,也还有新的岩石类型不断的被发现,对以往研究不足的岩石如高钾质岩石特别是钾碱煌斑岩及与之有关的煌岩、金伯利岩、洋底分布玄武质岩石等

正在作进一步的研究。

近代火成岩研究已不再停留在对单独类型岩石的描述,正在从岩石共生的角度与板块构造相联系研究各种共生体的成因。Harker(1909)按地理环境分出了太平洋岩套和大西洋岩套,随后一些学者又分出了地中海岩套(Niggl, 1923)、北极岩套(Wolff, 1914)等。后来的研究证实岩石共生并无地理限制(Tyrell, 1926)。至今已提出了多种岩石共生体,而且已经确认各种岩石共生体都有其特有的构造环境。

洋脊拉斑玄武岩的母岩浆生成于地幔,溢流于洋底(Engel等, 1965),这类岩浆具有原生性质(Carmichael等, 1974),洋脊拉斑玄武岩的成分有一定变化范围,因而又有进一步分类的意见,例如分为高铝亚类和低铝亚类(Miyashiro, 1969),或N型、E型(Wood, 1979)及T型(LeRoex等, 1983)。稳定陆区广泛分布着拉斑玄武岩组合,这种玄武岩浆曾遭受过陆壳的混染(Champbell, 1985)。碱性橄辉玄武岩分布于陆区及大洋岛,大洋脊也可出现少量碱性玄武岩,常含地幔来源的尖晶石石榴石二辉橄辉岩包体,说明岩浆来源深达 $60\sim 100\text{km}$ (Jackson等, 1970),岩浆的产生与热柱的活动有关,母岩浆在不同压力下发生分异出现不同的演化趋势(Miyashiro, 1978)。辉绿岩床及岩墙、层状镁铁质侵入体是玄武质岩浆侵入于陆壳中,在低压下发生分异作用生成的,对层状侵入体的韵律性层状构造的成因曾提出过多种解释(Wage等, 1968; Irvine, 1979),但都不令人满意。太古代斜长岩是地幔成因的,元古代斜长岩巨大岩基产于裂谷环境,富铝下地壳残余的熔融产生斜长岩浆(Taylor等, 1984)。月球高地也分布了斜长岩,说明月球演化早期与地球早期演化有相似性(Windley, 1970)。

阿尔卑斯型超镁铁岩是蛇绿岩套的一个组成部分,分布于造山带环境,是地幔岩发生部分熔融熔出的玄武质岩浆分凝的残余,以构造侵位的方式进入大陆边缘(Coleman, 1977)。具有高温热变质晕的高温橄辉岩体产生造山带,是未遭亏损的低程度熔融的地幔岩侵位生成的,可以做为地幔成分的代表(Green, 1964; Snoki等, 1981)。科马提岩发现于太古宙绿岩带剖面的下部,是火山活动产物,是原始上地幔物质高程度部分熔融生成的(Viljoen等, 1969; Arndt等, 1982; Beswick, 1983)。

安山岩组合主要分布于活动陆缘带和造山带。环太平洋有一个中生代至新生代的安山质岩石分布带。它的生成与板块消减有关。随地壳增厚以及随着逐渐远离海沟进入陆区,这一组合岩石的硬度增高,富硅碱岩石所占比例增大(Gill, 1981; Thorpe等, 1982)。安山岩浆不是从地幔产生的原始岩浆(tless, 1989)。火山灰流的生成与环状构造或破火山口的活动有关,是近地表岩浆房活动的产物(Smity, 1979)。岩浆房的不均一性及其形成演化机理正成为当前的一个研究热点。玻镁安山岩最早发现于日本的无人岛(Kikuchi, 1890),其生成与岛弧环境有关(Cameron等, 1983),是亏损地幔橄辉岩又发生富集作用,在含水条件下部分熔融生成的,它具有原始岩浆的特点(Tatsumi等, 1982)。Crawford等(1989)以岩石成因为基础将玻镁安山岩分为四类,不同类型的成分差别是源区亏损程度、含水量、部分熔融程度的函数。它产于大洋岛弧的前缘,与活动的扩张中心向大洋岛弧之下消减有关(Crawford等, 1989)。钾玄岩是岛弧或活动陆缘转至稳定阶段,在陆壳增厚条件下生成的(Norrison, 1980)。细碧岩、角斑岩组合主要发现于造山带,是海底火山喷发产物,大洋脊的洋壳剖面中也发现了类似岩石。在这一类岩石的成因中,有无原生细碧质岩浆及这一类岩冰岛的生成条件、岩石中钠的来源、钠交代作用的机理是争论的焦点(Lehmann, 1974)。

花岗质岩石分布于造山带中,有同造山花岗岩、晚造山花岗岩、造山后花岗岩之分(Eskola, 1932; Marmo, 1969)。Buddington(1959)研究北美西部花岗岩时按形成深度分出了浅带、中带及深带的花岗岩。70年代以来按产生岩浆的源岩的不同区分出了I型及S型花岗岩(Chappell等, 1974)。后来又从I型中分出A型(Loiselle等, 1979)和M型花岗岩(Pitcher, 1983)。

英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩(TTG)岩套产于太古宙地体中,广泛而多期的变形变质产生了片麻理。花岗岩的成因类型与地质环境有关(Pitcher, 1979, 1983),将花岗岩的研究推进到一个新阶段。与此同时Ishihara(1977)将花岗岩分为磁铁矿型和钛铁矿型,二者之差异在于岩浆的氧逸度的不同。当前花岗岩研究除了与地壳的活动性及其演化相联系之外,正通过花岗岩的研究探讨早期地壳的生成及地壳生成之后产生岩浆时的地球动力学过程。

碱性火成岩分布于大陆裂谷区、大洋板内的大洋岛以及大陆边缘和岛弧转为稳定的阶段。70年代以后将地幔交代作用作为碱性岩浆作用的先导,80年代后期也出现了另一种倾向,认为地幔交代作用是碱性岩浆作用的结果(Fitton等, 1987)。在大陆稳定区有霓霞岩—碳酸岩杂岩体。1960年及1962年先后在坦桑尼亚和乌干达发现的碳酸岩熔岩证明了它的岩浆成因。目前正致力于岩浆产生机理的研究。地壳稳定区也出现了富钾的岩石组合,含白榴石镁铁质超镁铁质岩石呈火山相或次火山相产于稳定陆块。煌斑岩是成分差别很大的一组岩石,是一些富含碱、富含挥发分的脉状岩石。金伯利岩是地幔深部来源的,有地壳物质的参与,有的岩体中含金刚石,现已归属于煌斑岩类(Le Meitre等, 1989)。

国际岩石学界对各种岩石组合做了广泛的研究。70~80年代以来,尤其深入研究了地幔岩及其有成因联系的玄武岩、蛇纹岩,对安山岩、花岗岩也有广泛研究。今后将探讨火成岩形成演化的整个历史过程,并以火成岩共生体做为岩石圈的构成、热状态、岩浆产生的地球动力学过程的探测器,探讨岩石圈的现在、过去和未来。

#### 参考文献

- 1 Coleman R G. Ophiolites, Springer-Verlag, 1977
- 2 Barker F. Trondhjemite, dacite, and related rocks. Elsevier Scientific Publishing Co, 1979
- 3 Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 1981
- 4 Arndt N T, Nisbet E G. Komatiites. George Allen & Unwin, 1982
- 5 Pitcher W S, Atherton M P, Cobbing E J, Beckinsale R D. Magmatism at a plate edge, The Peruvian Andes. Blackie Halsted Press, 1985
- 6 Fitton J G, Upton B G J. Alkaline igneous rocks, Blackwell Scientific Publications, 1987
- 7 Hess P C. Origin of igneous rocks. Harvard University Press, 1989
- 8 Wilson M. Igneous petrogenesis, A global tectonic approach. Unwin Hyman, 1989
- 9 Crawford A J. Classification, Petrogenesis and tectonic setting of boninites, in Boninites and related rocks, 1-49, Crawford, A. J. Ed., Unwin Hyman, 1989
- 10 Le Meitre R W. 火成岩分类及术语辞典. 国际地科联(IUGS)火成岩分类学分会推荐, 1989, 北京, 地质出版社, 1991

(长春地质学院林景任研究员撰)

**岩浆作用** 岩浆从地壳或上地幔中产生,之后从源区分凝聚集侵入到地壳上部或喷出到地表,演化生成了多种岩石,在此过程中发生过多种作用。20世纪30年代以来,许多学者对此作出了卓越的贡献。50年代后期特别是60年代以来,岩浆起源过程和动力学研究是一个热点,其中包括岩浆源区的结构、热状态、岩浆产生的物理化学过程等。Presnall(1969)提出由源岩部分熔融产生岩浆的概念,分出平衡熔融和分离熔融两种类型,得到了广泛的支持。一般认为岩浆来源于上地幔或地壳,上地幔是橄辉岩质的,大洋地壳是玄武质的,大陆下地壳是玄武质的,上地壳是

花岗质的。地幔是不均一的,地壳就更加不均一,无论是地幔或是地壳都有许多个成分和状态不同的层,而且在长期的地质演化中不断发生着某些元素的亏损和富集(Wilshire, 1984; Grant, 1985; Schilling, 1985)。

岩浆源区物理状态的研究引起了广大学者的关注,计算了现代地球内部的地温曲线(Clark等, 1977; Lubimova, 1976)。在正常情况下,上地幔及地壳并未处于熔融状态,是在地幔低速层达到始熔温度。在地幔的60~200km深度范围内,地温线与地幔固相线相距最近,是有利于岩浆产生的深度(Wyllie, 1979)。岩浆的产生需要有另外的热能供应,如放射性同位素衰变、地球早期陨石的冲击、岩石圈板块消减至深处增温、重力压实、断裂剪切摩擦生热等都可使温度增高,近年来探讨花岗质岩浆产生时常常解释为玄武质岩浆贯入带来了热量使地壳岩石熔融(Cobbing等, 1972; Hildreth, 1979)。Wilson(1963)提出了“热柱”假说,解释了夏威夷海山链火山岩浆的成因。Smith(1980), Condie(1982), Gupta等(1984)认为热柱在大陆上也有显示。Anderson(1981)认为地幔内有热柱储集层。热柱提供的热能能使地幔或地壳熔融。断裂发生时因降低了物质的熔点,也诱发了部分熔融。岩石圈中热的塑性岩块的底辟上升也是发生熔融的一种机制。

熔体从源区分凝聚集是当前人们关心的课题,提出了多种机制,如浮力、负荷压力、侧压力、蒸气驱动、底辟过程中熔体分凝等。多数人不怀疑玄武质熔体可以从地幔中萃取,硅质熔体从部分熔融层中发生厘米级至米级的分凝是人们公认的,但它们能否聚集成公里级的熔体,能否穿过地壳上升到高层位,对此存在着争议(Wickham, 1989)。现在认为生成的岩浆类型或与源岩类型有关(Bailey等, 1980),或者岩浆类型是源岩部分熔融程度、岩浆分凝深度的函数,例如由地幔产生玄武岩及碱质岩浆的类型与部分熔融程度及岩浆分凝深度有关(Green, 1973; Clague等, 1982; Elthon等, 1984)。Wyllie(1981)证实挥发分主要是CO<sub>2</sub>对碱性超基岩和金伯利岩岩浆的产生有重要作用。

岩浆上升及侵位机制是岩浆作用研究领域中的又一热点。岩浆沿岩石圈中的张性断裂上升,或喷出到地表形成火山岩,或侵入地壳中形成各种侵入岩。长期以来对巨大体积的岩体,尤其是花岗质侵入体占有的空间如何获得这一问题一直困惑着地学界。近期的研究为空间问题最终解决奠定了基础。片麻岩穹隆是太古宙地层出露区最普遍的花岗岩构造,底辟是穹隆的进一步发展,气球膨胀作用是靠接触带围岩的压扁变形给深成岩体提供了空间,火口沉陷作用导致了环状杂岩体的侵位(Castro, 1987; Bateman, 1985; Bussell, 1985)。

岩浆房这个老概念80年代以来的研究又有新的发展,重力及其他地球物理测量证明在火山之下及详岩轴部等地存在着岩浆房,对岩浆房的形态、结构、埋深、岩浆房内的分带性和化学梯度、岩浆房的演化机理如分异作用、混合作用、同化作用以及熔融作用等,提出了新颖的但却颇有分歧的看法(Dowty等, 1982; Hildreth, 1981; Trial等, 1988, 1990; Grove等, 1988; Leshner, 1990; Duffield等, 1992)。

岩浆结晶过程中发生分异作用的理论至今仍统治着火成岩石学的理论领域。Bowen(1928)的早期工作奠定了这一理论的基础。近代的研究证实Bowen提出的反应原理及分异作用的规律对低压高氧逸度条件下玄武岩岩浆的演化是有效的,低压低氧逸度条件下岩浆具有富铁演化的趋势(Osborn, 1962, 1980)。高压下的分异复杂的多,富碱岩石也有其独特的分异趋势。近年提出的边界层分离结晶理论得到了广泛的支持,它和传统的均一结晶作用不同,岩浆成分演变有不同的成分变异趋势(Nielsen等, 1992)。

Fenner(1926)是同化作用早期观念最强有力的倡导者之一。50年代以来对大陆拉斑玄武岩、造山带安山岩、花岗岩等的研究中,许多学者强调了大陆地壳物质的参与,并且做了定量估计。Bunsen(1851)在研究冰岛及其它地区火山岩时,提出了玄武岩和流纹岩混合生成玄武岩—安山岩—流纹岩系列火山岩

的概念,但多年来未得到重视。自从微量元素应用于岩石成因研究,区分出了岩浆混合作用的化学模型,岩浆混合作用的观念又重新兴起(Canlagrel等,1984)。Didier(1987)认为花岗岩中基性微粒包体的存在表示了基性岩浆与酸性岩浆的不完全混合。目前岩浆混合作用的地质学、岩相学判别标志尚缺乏明确的概念。早年硅酸盐实验研究时曾提出过岩浆中发生过熔离作用。由于熔离相的成分与天然岩石相差太远,熔离作用在成岩中的地位一直未得到确认。近年的实验研究(Roedder,1978,1983;Naslund,1983)和天然岩石的研究都证实了自然界发生过熔离作用,但是问题的关键在于分熔产生的两种液相如何分别聚集成为独立的岩浆体,这是一个未能解答的难题。现在普遍认为,岩浆生成之前的源区可能发生交代作用或亏损事件。尤其是在富碱岩浆的产生中,碱性交代作用是岩浆产生的先导(Fitton等,1987)。现在较普遍地认为岩石圈的不同部位对岩浆的生成及演化都做出过贡献(Flower,1991)。岩浆生成前源区发生过亏损或富集,在岩浆变成岩石的过程中曾经发生过多种作用,目前正对各种作用及岩石圈不同层位对演化着的岩浆的贡献作出定量估计,在这方面微量元素及同位素资料起着关键作用。

60年代以来,利用微量元素定量模拟火成岩的成因获得了巨大发展。首先是矿物/熔体分配系数概念的提出和将这一概念应用于岩石学研究(McIntire,1963;Gast,1968),测定了不同岩石中一些矿物的分配系数(Schnetzel等,1970;Arth等,1976;Gast,1968),从而使模拟计算成为可能。在这一进展中建立了平衡结晶、雷利分离结晶、平衡熔融、分离熔融、收集熔融、岩浆混合等模型。然而目前在分配系数的选择上存在着诸多疑难。80年代以来认识到利用各种协变图可以消除总分配系数和液相分数不确定性的影响。同位素测定结果也广泛用于岩石的成因研究,70年代以来测定了典型构造环境生成的岩石Sr、Pb、Nd等同素比值,借以判断岩浆源区,计算岩浆熔体中地壳、地幔的参与程度。最近的模拟计算使许多人认为岩浆产生及演化中发生了多种作用,计算了各种作用的比重,更加支持成岩的综合模式。

实验岩石学的成果始终是火成岩成因理论的强大支柱。自19世纪前半叶就开始了实验岩石学研究,1907年华盛顿Carnegie研究所地球物理实验室提出了著名的Bowen反应原理和结晶分异作用的学说,奠定了火成岩的理论基础。他先是做了干体系的实验研究,之后开始了含水体系的研究。60年代以后合成体系的高压试验证明增高压力地幔岩石初始熔体硅酸饱和度和度降低,含碱度增高(Kushiro,1968),随着含水量的增高熔体的硅酸饱和度增大(Kushiro,1972)。CO<sub>2</sub>的存在,可以形成硅酸不饱和的熔体,在压力很高时甚至生成碳酸岩熔浆(Wyllie等,1981)。橄榄石(Fo=91)于8.5GPa条件下可在玄武岩熔体中漂浮(Fujii等,1987)。目前已能使硅酸盐实验达到25GPa,可以模拟下地幔顶部的压力(Ohtani,1987;Takahashi等,1986,1987)。对硅酸盐熔浆的性质有了进一步的了解,有些强解聚岩浆的粘度是随压力增高而增高,多数岩浆的粘度是随压力增高而降低(Brearely等,1987)。岩石学的实验研究是向着更接近于成岩的实际条件的方向发展,给火成岩成因理论的完善提供着更多的支持。

#### 参考文献

- 1 Yoder H S. Generation of basaltic magma, National Academy of Sciences, Washington, D C, 1976
- 2 Pitcher W S. The nature, ascent, and emplacement of granite magma, Geol Soc London J, 1979, 136: 627~662
- 3 Yoder H S. The evolution of the igneous rocks, Fiftieth anniversary perspectives, Princeton University Press, 1979
- 4 McBirney A R. Igneous petrology, Freeman, Cooper and Company, 1984
- 5 Huang W L. Wyllie P J. Phase relationship of Gabbro-tonalite-granite-water at 15Kbar with application to differentiation and anatexis, American Mineralogist, 1986,

71: 301~316

- 6 Castro A. On granitoid emplacement and related structure, A review, Geol Rundsch, 1987, 76: 101~124
- 7 Pitcher W S. Granites and yet more granites forty years on, Geologische Rundschau, 1987, 76(1): 51~79
- 8 Flower M. Magmatic processes in oceanic ridge and intraplate settings, in Oceanic basalts, Ed Floyd, P A, 116~148, Blackie-Van Nostrand Reinhold, 1991
- 9 Duffield W A. Ruiz J. Compositional gradients in large reservoirs of silicic magma as evidenced by ignimbrites versus Taylor Creek rhyolite lava domes, Contrib Mineral Petrol, 1992, 110: 192~210
- 10 Nielsen R L. Delong S E. An numerical approach to boundary layer fractionation: application to differentiation in natural magma systems, Contrib Mineral Petrol, 1992, 110: 355~369

(长春地质学院林景任研究员撰)

#### 沉积岩 sedimentary rock

是由各种介质中沉积或沉淀出的松散沉积物固结而成的岩石。它是在地表及地表下不太深的地方形成的一种地质体;是在常温常压下由风化作用、生物作用和某种火山作用形成的物质,经搬运、沉积(或沉淀)、石化作用所形成的岩石。例如砾岩、砂岩、粉砂岩、风成岩、冰碛岩等碎屑岩,是由物源区机械破碎的较老岩石的碎屑经过水,或大气,或冰的搬运、沉积、石化而形成的;岩盐、石膏等化学岩,是从溶液中沉淀形成的;某些石灰岩、煤等生物岩,是由动、植物遗体或其分泌物形成的。

沉积岩构成了地壳的沉积岩石圈。就其分布面积而言,地球大陆的70%以上的面积为巨厚的沉积盖层,海底几乎全为沉积岩与沉积物所覆盖;就其年龄而言,沉积圈岩石最老的达36亿年,其中有生命记载的岩石年龄为32亿年,因此,它们是地球发展和演变的重要记录。

沉积岩类中蕴藏有丰富的矿产资源,其中能源类矿产(包括石油、天然气、煤和油页岩)和盐类几乎全为沉积类型;放射性原料、黑色金属(包括铁、锰)、有色金属(包括铜、铅、锌)、稀有和分散元素、矿物肥料(如磷、钾)、非金属矿产(如重晶石、萤石)等资源中,沉积类型占很大比例。据估计,沉积和沉积变质型矿产要占世界资源总储量的80%。

20世纪50年代以前,对沉积岩的研究主要着重于岩石外部特征的描述及其相互的区别。第二次世界大战以后,由于对矿产资源,特别是能源资源的急需,对沉积岩的认识和研究得以重大进展。主要表现在:(1)沉积岩理论的重大变革,其中最突出的是沉积碳酸盐岩的研究,最初认为石灰岩是单纯的化学沉积;50年代以后改为主要是机械沉积;70年代,当用电子显微镜研究石灰岩的基质时,发现它们是由超微化石组成的,这一沉积理论的改变,使得相模式完全改变。此外,对浊积岩、火山碎屑沉积岩的研究和新认识,在沉积理论上也有重大突破。(2)沉积岩的研究,从单一的古代岩石的描述进展为古代沉积岩、现代沉积物和实验室研究等三方面的结合。(3)新型沉积矿床的发现和成矿理论研究的深入。(4)沉积岩研究中广泛应用数理统计和计算机技术。

当前,对沉积岩的研究主要集中在两个方面,一是把沉积岩作为地球发展史的重要记录之一,因此从全球角度来考察和研究它;二是研究沉积成岩作用,从而提出或发展新的成岩、成矿模式。

80年代初,刘宝琛提出沉积岩研究的主要方面为:(1)全面地研究沉积岩的物质组分、结构、构造、岩石产状和岩层之间的接触关系,为阐明其成因及分布规律提供依据;(2)总结沉积岩形成的理论,包括风化作用、搬运作用、沉积作用以及沉积期后(沉积物埋藏以后)的变化的理论,搞清楚沉积岩的成因和某些矿床的成岩成矿机理;(3)进行沉积环境分析,恢复沉积时的古地理

环境以及大地构造环境。

#### 参考文献

- 1 地质辞典(矿物岩石、地球化学分册). 北京:地质出版社, 1981. 153
- 2 刘宝珺主编. 沉积岩石学. 北京:地质出版社, 1980. 1~7  
(地质矿产部成都地质矿产研究所  
李文汉研究员、刘宝珺院士撰)

**沉积相** sedimentary facies 是沉积物或岩石沉积时自然地理环境的物质表现。它是通过沉积物或沉积岩石的沉积特征、生物特征等标志来综合判别和划分的。按沉积时的自然地理环境,沉积相可分为陆相、海相、海陆过渡相三大类,然后再分相、亚相、微相等。

1838年,瑞士格列斯利(A. Gressly)就用“相”这个术语表示岩石单位,并认为具有相同的岩石特点和古生物学特点的岩石单位才能作为一个“相”。1879年,俄国莫西索维克(S. Mojsisovics)用相这个术语表示在同环境下所形成的沉积。1949年,穆尔(Moore)把“相”看作是一个指定的岩石单位中任一区域上隔开的部分,其中的自然生物特点截然不同于其它的分隔的一个或多个部分。后来佩蒂庄(Pettijohn, 1981)发展为:“沉积相是在一个同时代地层内的沉积物的面貌或特点”,并认为相是面貌特征上有区域性变化的一种表示。1953年,鲁欣(Л. Б. Рухин)的定义是,相就是能表现沉积条件的岩性特征和古生物特征的有规律的综合,因此,相是沉积物形成的物质表现。但是,在他的相的分类表中,却把相与环境等同起来。

1970年,塞利(Selley)用以下5个方面来限定相:沉积岩体的几何形态、岩石学特点、沉积构造特点、古生物特点和古流向特点。1976年他更把相理解为“沉积环境的古代产物”,因之有红层相、蒸发岩相、复理石相、黑页岩相等名称,而不使用“地槽相”、“陆棚相”等术语。70年代末,里丁(H. G. Reading)认为:相是一种具有特定特征的岩石体。就沉积岩来说,它是根据颜色、层理、成分、结构、化石和沉积构造加以定义的。“岩相”应该就是指这样一种客观地描述的岩石单位。同时,里丁也指出“相”这个术语可以有不同的含意,例如:仅仅指岩石产物的外观,例如“砂岩相”;指岩石产物的成因,即指形成该岩石的作用过程,例如作为浊流产物的“浊积岩相”;指形成一种岩石或一套混合岩石的环境,例如“河流相”或“浅海相”;作为“构造相”,例如“造山期后相”或“磨拉石相”。最后,里丁提出:在理想情况下,相应该是在一定的沉积条件下形成的一种有特色的岩石,这种沉积条件反映一种特定的过程或环境。

在中国,对于相的概念的理解和分类,以及术语的使用也不统一。有的按格列斯利的原始定义,有的则受前苏联鲁欣等人的影响。1985年,刘宝珺等认为:相的概念不应与环境等同,它是环境的物质表现,因之它主要用于古代沉积。一定的环境有其特定的物质表现,即沉积相,其在生物学的综合表现即“生物相”,在岩性方面的综合表现即“岩相”。这是目前国内许多人采用的概念。长期以来,国内常用海相、深海相、浅海相、湖泊相……之类的术语,即在“相”之前冠以环境的名称,以此表示古环境的特征。这里可以看出“相”和“环境”的意义是不相同的,如“湖泊”是表示现代的地理景观单位,而湖泊相是指古代湖泊环境中形成的一套沉积组合。

当前,对沉积相的研究已从局部的、区域性的分析,发展为进行全球性的分析,包括作为一定的板块构造和古气候条件反映的沉积相、时间-空间上的沉积相模式、沉积相研究的扩展、沉积相的序列和演化。

#### 参考文献

- 1 刘宝珺主编. 沉积岩石学. 北京:地质出版社, 1980. 281~283
- 2 佩蒂庄 F J, 沉积岩. 第3版李汉瑜, 等译. 北京:石油工业出版社, 1981. 560~561
- 3 刘宝珺, 曾允孚主编. 岩相古地理基础和工作方法. 北京:地

质出版社, 1985. 1~6

- 4 里丁 H G 主编. 沉积环境和相. 周明鉴, 等译. 北京:科学出版社, 1985. 1~19

(地质矿产部成都地质矿产研究所  
刘宝珺院士、李文汉研究员撰)

**孔兹岩系** 孔兹岩一词最初于1902年由 T. L. Walker 用来描述印度 kala-handi 东南部大量出现的一种石榴石砂线石片岩。组成孔兹岩的主要矿物是石英、石榴石和砂线石。一般都含少量鳞片状石墨。

1972年,美国地质学会出版的地质辞典把孔兹岩定义为“一套变质的铝质沉积岩组合,由石榴石-石英-砂线石岩以及含石榴石的石英岩、石墨片岩和大理岩组成。”由于在印度地质区地质找矿工作的实际需要, Narayanaswamy (1975) 对孔兹岩系正式提出了新的见解,其岩石组合是:含和不含石榴石的花岗片麻岩/注入片麻岩/混合岩;含和不含石榴石的石英-长石变粒岩和片麻岩;含石榴石的黑云母片麻岩;石榴石-砂线石-石墨片岩和片麻岩;结晶灰岩、钙酸盐岩和钙质麻粒岩;石英岩、石榴石石英岩、石榴石片麻岩、磁铁石英岩。

综合各地的资料,孔兹岩地区内的主要岩石类型大致可以包括:(1)石榴石-砂线石片岩、片麻岩(即狭义的孔兹岩)类。是组成孔兹岩系的最主要的岩石类型,以富铝为特征,有时  $Al_2O_3$  可达30%以上,形成高铝矿床。主要矿物组合为砂线石-石榴石+石英+钾长石+石墨,有些地区可含少量斜长石和石墨,在露头上常与石榴石石英岩、石英石榴石岩以及一些仅含少量或不含砂线石、石榴石的长英片麻岩共生。(2)石墨片岩、片麻岩类也是构成孔兹岩系的重要岩石,常包括富钙和贫钙两种类型,露头上与大理岩关系密切,一般不与砂线片岩类岩石直接接触。(3)钙硅酸盐岩 常见矿物组合为透辉石-方柱石-硅灰石-碳酸盐矿物,并常见以微斜长石为主的钾长石。钙质片麻岩中常含较多的石英或斜长石。该类岩石中常赋有同生沉积的锰矿床。自70年代以来,在世界各地的孔兹岩系中,陆续发现了一些含蓝青石的片麻岩。这些岩石包括两种类型:蓝青紫苏麻粒岩,主要矿物组合为蓝青石+紫苏辉石+石榴石+石英+斜长石+石墨+砂线石+石榴石+石英+斜长石+石墨+斜长石(Harris 等, 1982; Santosh, 1987; 姜继圣, 1988), 在露头上与不含蓝青石的泥质片岩片麻岩互相整合,关系渐变。

此外,还有一些较为少见,但对孔兹岩系的研究有特殊意义的岩石类型,如含假蓝宝石的石英岩和变质泥质岩(Rerchuk 等, 1985; Naqvi 等, 1987; Kamineni 等, 1988)以及含假蓝宝石、柱晶石的蓝青片麻岩(Balasubrahmanyam, 1965, 1976; Grew, 1982; 姜继圣, 1988)。

世界各地孔兹岩的分析资料表明,它们在化学成分上的共同特点是硅铝含量高,碱质含量低,  $MgO > CaO$ ,  $K_2O > Na_2O$ , 一般 Cr, Ni 含量低。

姜继圣的研究结果表明,麻山群孔兹岩系在成分上表现为富钾贫钠,整个岩系钠质含量极低,平均值  $< 1\%$ 。泥质和长英质岩石,多数样品  $Na_2O < 0.5\%$ ,  $K_2O/Na_2O$  值均在5以上,  $CaO$  含量低,多数  $< 1\%$ ,  $Al_2O_3/Na_2O$  值高,变化范围为30~60。它们的一些主要造岩元素之间存在良好的相关关系,如  $Al_2O_3$ 、 $TiO_2$ 、铁镁元素( $Fe_2O_3 + FeO + MgO$ )以及过渡组微量元素(Cr + Ni + Co + V)的含量与  $SiO_2$  之间表现为反相关,而  $Al_2O_3$ — $TiO_2$  间呈正相关,反映出典型的变质沉积岩的特征。

目前已有文献中尚未见到对孔兹岩系稀土及微量元素特征的系统研究资料,一些零星的分析数据反映出,孔兹岩的稀土分布具有明显的变异性。对麻山群典型岩石类型样品的研究表明,除少数中基性麻粒岩样品外,麻山群孔兹岩系具有与典型的太古后碎屑沉积岩相同的稀土分布型式。大多数样品稀土总含量高,具明显的负铕异常,轻稀土富集,重稀土亏损,反映它们主要是一套



以花岗质岩石为源岩的碎屑沉积物。它们的微量元素分布,为大量离子造岩元素富集,过渡组微量元素亏损,表现出太古代沉积物的典型特征。但在另外一些地区的孔兹岩系中,也有的样品亏损不明显,表现出与太古代沉积物相同的稀土特征,与前一类型相比,岩石中钠质含量稍高, $\text{Na}_2\text{O}$ 一般 $>1\%$ ,反映它们的原岩可能是一些黄云闪长质的岩石。

根据孔兹岩系中由泥质岩石、石墨片岩及大理岩所反映出来的组合关系,目前多数人认为孔兹岩系的原岩是一套较稳定构造条件下的陆棚浅海沉积物(刘铁军,1982;姜继圣,1985;沈其韩等,1986)。根据部分地区的蒸发岩类沉积物,有人认为这种环境反映盐度较高,可能属半封闭的海盆和港湾性质。通过原岩恢复及原始沉积物理想组分计算,认为孔兹岩系内高铝岩石的原岩主要为高岭石粘土沉积物。对麻山群古沉积环境的研究,认为该区的低铝泥质岩石系湖坪及滨岸泻湖低能环境下的沉积物;砂线片岩层位之上的石英片岩和长英质麻岩是障蔽岛外浅水高能带的沉积产物;石墨片岩的原岩,形成于高能带外侧浪基面以下的还原环境;含磷钙硅质沉积,则是在更深一些的海盆中以碎屑为主的沉积物。整个孔兹岩系的沉积序列,反映一个海进型的浅海陆棚沉积环境(姜继圣,1988)。

孔兹岩系一般都遭受了强烈的区域变质作用,多数变质程度达到麻粒岩相。富铝组合中, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ 多形变体以矽线石为主。少数地区见有红柱石和蓝晶石,局部出现堇青石,压力范围属中一低压。

利用孔兹岩系内不同阶段所形成的共生矿物对以及麻粒岩相变质期后与堇青石共生的石英内的气液包体所确定的温度、压力,Chacko等(1987)、Santosh(1987)成功地确定了印度南 Kerala 孔兹岩系主期变质作用的 P-T-t 轨迹。

几乎所有的孔兹岩地区都经历了复杂的变质和变形作用。Sandiford等(1988)把印度半岛孔兹岩系所经历的主要热事件,划分为中和晚太古(3.1-2.5Ga),中一晚元古(1.3~1.0Ga)和晚元古末—早古生代初(0.6~0.5Ga)3个阶段。最近,印度、斯里兰卡的孔兹岩系中,都有晚元古期(1.1Ga)所迭加的麻粒岩相变质作用的报道(Grew等,1986;Kroner等,1987;Naqvi等,1987)。Berger等(1976)把高原群的变形作用划分为3期,第1期为NW向中型同斜及横卧褶皱,第2期为不对称的平卧紧闭褶皱,第3期为直立开阔褶皱。他认为前两期变形发生在2.2Ga之前,而第3期发生在1.2Ga之前。

孔兹岩系以非金属矿产为主,差不多所有已知孔兹岩地区都产有富铝矿物及晶质石墨矿,主要为同生沉积的变成矿床。富铝矿物主要包括矽线石、石榴石,有时为蓝晶石、红柱石。这些岩石风化,常形成高质量的铝土矿(Krishnan,1935;Бушник-ин,1975)。由多数层状石墨矿中所获得的石墨碳稳定同位素资料,目前一般认为同生沉积的石墨碳属有机成因。而在某些地区,如产在斯里兰卡孔兹岩系内后生的脉状石墨矿,经过工作,认为是深部地壳源的(Katz,1987)。

中国孔兹岩系内的石墨矿床,主要分布在湖北的三岔垭、二郎庙,黑龙江的柳毛、云山以及内蒙的黄土窑等地。中国对矽线石资源的开发起步较晚,目前仅三道沟一处投产,但根据在野外的观察,有些地区很可能成为具可观开发前景的矽线石矿床。在麻山地区,矽线石矿床分布于孔兹岩系的下部,赋矿岩石为高铝的矽线片岩和片麻岩互层,偶有少量麻粒岩和钙硅酸盐岩的夹层,反映其原岩主要是经受了强烈化学风化的硅铝壳陆源碎屑沉积物。而在黄陵变质地区高铝的石榴石英矽线石岩(榴线英岩)与黑云斜长片麻岩、变粒岩类密切伴生,在层位和区域分布上都无明显差异;榴线英岩的近矿围岩中一般不出现大理岩,而常与副变质的斜长角闪岩关系密切;矿体规模也远较麻山群小,故认为它们的原岩是以高岭石为主的硅铝质胶体沉积。上述石墨矿床均呈层状,并且都具有一定规模,矿体与孔兹岩系区域岩石展布一致,与大理岩关系密切,反映它们的同生沉积成因。无论矽线石还是石墨矿床,成矿有用元素的富集,主要受原始沉积环境的

控制。区域变质作用对矿床的形成及其工业价值往往起着决定性作用。

在前苏联、印度、斯里兰卡、中国的崆岭群(姜继圣,1985)孔兹岩系以及南非、加拿大、澳大利亚等地的类似岩石中,都含有变质成因的刚玉。

在前苏联,斯堪的纳维亚以及中国的麻山群、集宁群中都含有同生沉积的磷矿床,如黑龙江的石场、内蒙的浑源窑磷矿,均属此种类型。麻山群中,磷矿床赋存在孔兹岩系的中上部,与石墨层位关系渐变,反映连续的沉积环境。

在印度还见有同生沉积的锰矿床。中国及世界各地的孔兹岩系中都见有一定数量的条带状磁铁矿。此外,在斯里兰卡的孔兹岩系及南非一些类似的变质沉积岩系中还见有金矿化的报道,但其成因尚不明了。

孔兹岩是地壳演化早期阶段的产物,过去一般将其划为太古代,但近年来的研究结果表明,至少部分地区孔兹岩系的形成时代可能属早元古。例如,Lapland 孔兹岩系内紫苏花岗岩的 Rb-Sr 全岩年龄为  $1918 \pm 107\text{Ma}$ ;孔兹岩 Rb-Sr 年龄为  $2063 \pm 202\text{Ma}$ ;Sn-Nd 年龄值  $1.9 \sim 2.0\text{Ga}$ ;Pb-Pb 全岩年龄为  $1909 \pm 118\text{Ma}$ ,故认为属元古界。

前苏联阿尔丹地质英格群的 BIF 中,U-Pb 年龄大于 3.5Ga (Pelymskiy 和 Shishova,1985);南阿尔丹麻粒岩中的锆石(206Pb/207Pb 法)年龄为 3.4Ga;西阿尔丹斜长片麻岩中的锆石(208Pb/207Pb 法)年龄为 3.3Ga。

乌克兰地盾亚速地区的同位素年龄为 1.9~2.86Ga(天津地矿所,1981),含石墨孔兹岩系一般认为属早元古(И.Л.Р.ябенко,1982)。

印度的孔兹岩系,过去比较占多数的观点认为属于太古代(Narayanawamy,1975;Mukherjee等1986),将其作为印度地质最古老的上壳岩。

但另一些人认为孔兹岩系的形成时代稍晚(Naqvi等,1978;Chadwick等,1981;Naqvi等,1987),认为半岛片麻岩的形成年龄为 3300~2900Ma,最老的变质沉积岩为早太古 Sargur 上壳岩系(3000Ma),然后为中晚太古( $>2600\text{Ma}$ )的 Dharwar 上壳岩系。孔兹岩系的原岩则是在这些老于 2.6Ga 的前寒武陆壳基础上所形成的早(2600~2000Ma)、中(2000~1500Ma)元古活动带内的沉积物。

在斯里兰卡,过去一般认为高原群麻粒岩相变质作用的时间为  $2170 \pm 18\text{Ma}$ (Wickremasinghe,1970)。近来 Kroner 等利用离子探针获得高原群变质石英岩中碎屑锆石变质前 U-Pb 年龄为 3.17~2.4Ga,泥质片麻岩中碎屑锆石年龄为 2.04Ga,这些碎屑锆石及其它锆石样品都具有 1100Ma 的铅丢失记录,因此他们认为,高原群的原始沉积物可能在 2~2.5Ga 前形成,但麻粒岩相变质发生在晚元古。

中国崆岭群孔兹岩系的锆石 U-Pb 一致线年龄为 2332Ma,Rb-Sr 全岩等时线和 K-Ar 稀释法年龄值分别为 2010 和 1891Ma,故其时代属元古。内蒙的孔兹岩系,利用锆石 U-Pb 法和全岩 Rb-Sr 等时线法获得集宁群最大年龄值为 2467Ma,结合地质及地球化学方面的依据,认为集宁群的时代属晚太古,其经历了晚太古和早元古两期变质作用(沈其韩等,1987;梅保丰,1988)。使用  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  法已获得麻山群二辉麻粒岩中的紫苏辉石近 2.5Ga 的变质年龄(黑龙江省第一区调队,1988),结合近年来在本区所获得的一些年龄资料(董保保等,1986),认为麻山群麻粒岩相变质作用发生在晚太古末—早元古初期,其成岩时代显然属于晚太古。

因此,从目前的同位素年龄资料看,世界上的孔兹岩建造大致可以包括太古和元古两个类型,但这两个不同时代的孔兹岩系的区分,一方面还有待于同位素年龄资料的进一步积累,另一方面也还需要不同地区孔兹岩系之间在岩石学、地球化学、构造地质学及其它方面的详细对比研究,但无论形成于太古代还是早元古代,都反映它们是地壳早期演化阶段的产物。

(长春地质学院姜继圣撰)

**蛇绿岩** ophiolite 在大陆边缘与大陆内部的造山带中出现一套由超基性岩、辉长岩、辉绿岩和玄武质熔岩及上覆深海相的硅质岩(特别是含放射虫硅质岩)组成的杂岩系,显示原产于大洋环境,称为蛇绿岩或蛇绿岩套。根据板块构造理论,蛇绿岩套与现代的大洋地壳上地幔顶部的主要成分、稀有元素、稀土元素含量、结构和岩石序列极为相似,故认为蛇绿岩套是古洋壳的残余。它原来形成于洋中脊,由于异常地幔橄榄岩质软流圈的上涌,经岩浆分异形成玄武岩质熔岩、辉长岩类与超基性的斜辉辉橄岩和纯橄岩,海洋学家称为洋中脊扩散中心模式。新生的洋壳经海底扩张离开洋中脊而相应变为老洋壳,也相应变冷增厚,除大部分沿海沟一俯冲带俯冲回到地幔中去外,小部分的洋壳于俯冲带被刮脱下来,便以大规模逆冲断层作用拼贴到当时的大陆或岛弧的外侧,称构造侵位或冷侵位,所以蛇绿岩套一般多产于构造变形的板块聚敛边界。蛇绿岩套被强烈剪切切成大小、形态不一的块体,杂乱地散布于碎屑岩和蛇纹岩基质之中,以构造混杂岩(Mélange)形式产出。这样产出的岩石组分既有外来的大洋地壳碎块,又有原地或准原地的碎屑岩基质而呈杂乱无序的分布。蛇绿岩套所产出的空间便标志着曾是大洋地壳的俯冲带或两大洲的碰撞带,同时,蛇绿岩套中也蕴藏有如Cr、Ni、CO、Pt族与Cu、Pb—Zn、Au、Fe、石棉等重要矿产资源。

早在19世纪初叶,Brongniart(1827)称蛇纹岩为蛇绿岩。蛇绿岩(Ophi)来自希腊语,其词义是蛇(Snake),因蛇纹岩外貌相似蛇的颜色,所以用蛇绿岩代替了蛇纹岩。1879年,Michel Levy用蛇绿状(Ophitic)描述辉绿岩的结构。因此,蛇绿岩缺乏严格的定义而被广泛滥用于描述各种蛇纹石化的超基性岩。

20世纪初叶,斯坦曼(R. G. Steinmann, 1927)把橄辉岩、辉长岩、辉绿岩、细碧岩等同源组合和有关的岩石均归属有成因联系的一套岩石组合。蛇绿岩套的岩浆演化顺序,首先是橄辉岩固结,其次是辉长岩和伴生的辉石岩岩墙,最后为具球状玄武岩边缘的辉绿岩—细碧岩。斯坦曼又强调蛇绿岩侵位到放射虫硅质岩或深海粘土等深水沉积层中,因而提出蛇纹岩、辉绿岩—细碧岩和硅质岩的“斯坦曼”三位一体。并认为蛇绿岩是岩石的成因组合,它代表优地槽早期沿断裂由海底侵入,属原生侵位(或称热侵位)。当时,欧洲学者用此概念满意地解释了阿尔卑斯造山带内基性—超基性岩石组合的产出。本生(Benson, 1926)称为阿尔卑斯型基性—超基性岩石组合,奥布埃(J. Aubouin, 1965)也认为蛇绿岩为优地槽早期分异的玄武质溢流物。

赫斯(H. H. Hess' 1938, 1955)曾注意到橄辉岩周围没有高温接触晕这一极为重要现象而提出低温原生橄辉岩浆观点,即超基性岩石能在低温条件保持含有5%~10%的水分。这种超基性岩石含水与蛇纹石化事实一致。同时,美国学者倾向将橄辉岩与伴生的辉长岩、辉绿岩和枕状熔岩等而认为橄辉岩是深成的结晶堆积物,并不强调斯坦曼的三位一体概念。而塞耶(S. R. Thayer, 1967)认为橄辉岩与伴生的镁铁组合之间的同源关系是重要的,并提出“阿尔卑斯镁铁质岩浆系”,强调辉长岩、辉绿岩和伴生的浅色岩石是来源于一个单一的原始橄辉岩浆,从而激励美国学者重新考虑欧洲蛇绿岩的概念。

20世纪50年代,贝利(E. B. Bailey)于中东发现广泛分布的中生代构造混杂堆积,他认为其中的外来岩块与基性—超基性岩有关,并称为“安卡拉混杂岩”,而超越了格林(E. Greenly, 1919)所提的“混杂岩”原始概念。由于枕状熔岩的发现而承认斯坦曼的三位一体,然而没有将混杂岩纳入蛇绿岩套范畴。

随着板块构造理论的兴起,美国许靖华(K. J. Hsu, 1968)认为美国西海岸白垩纪弗朗斯科混杂岩是一套大小不一,从数厘米到几千米不等的碎块,其物性、形态各异,而与不同的岩屑、细粒岩粉、粘土杂乱相混,互相挤压,显然是经过强烈的剪切、挤压、破碎和变形,难于辨认的混杂物而称为混杂岩(Mélange),但仍沿用E. 格林(1919)年于英国威尔士安格尔夫西岛的前寒武纪

诺杂岩中一套复杂的构造混合物所取的名称。格林所指的构造混合物未涉及到蛇绿岩套,而许氏(1968)认为加利福尼亚沿海山脉的诺布(Nob)峰的绿色岩石按序恢复为蛇绿岩,吐云(Twin)峰的红色岩为深海放射虫硅质岩,两者均原位于深海底,由于某种自然力而被搬到了陆地上。许氏于1960年受到F. J. 凡因海底扩张理论的启示,才认识到弗兰斯科混杂岩是由于太平洋洋壳的俯冲,少部分被挤到北美大陆西缘,形成宽达200km的混杂岩带,它反映自晚侏罗世到第三纪以来145Ma年期间,有宽约1万km的洋壳俯冲于北美大陆边缘之下,并在沿上驮板块前端形成了混杂岩楔而强调其构造含义。混杂岩楔在证明板块的几何格局发挥了巨大作用,它补充了海底扩张的另一侧面——洋壳的俯冲作用。许靖华并将混杂岩作为填图单位有助澄清许多混乱情况,使板块构造理论向前跨了一大步。杜威(J. F. Dewey)和柏德(J. M. Bird)认为部分俯冲洋壳被刮下而挤入于仰冲大陆边缘(或岛弧)外缘所形成的增生棱柱体中。科尔曼(R. G. Coleman, 1971)认为部分洋壳“仰冲”到大陆边缘之上等的类似见解。由于混杂岩不论在俯冲型或碰撞型造山带均广泛出露,有关混杂岩的概念在造山带与造山运动研究中占据了重要位置。考虑到现今环太平洋边缘俯冲增生与构造侵蚀作用均普遍出现,并可相互转化,但两者构造背景与地质特征不同,以含有蛇绿岩块为特征的混杂岩,突出其挤压构造背景称之为构造混杂岩与以构造侵蚀为背景所形成的重力滑塌堆积(Olistostrome)区别。

1972年,美国地质学会的彭罗斯会议对蛇绿岩的概念、成因和应用方面取得较一致的意见,强调蛇绿岩是特殊的基性—超基性岩石组合,并非单一具体的岩石名称或岩石单元。60年代,根据大量深海钻探与人工地震测量所建立的标准洋壳剖面作对比而重建蛇绿岩套的理想剖面,由上而下呈层状构造如下:(1)深海相放射虫硅质岩、薄层泥岩及少量灰岩等;(2)基性枕状熔岩,深部为块状玄武岩、粗玄武岩等,基性席状岩墙杂岩(辉绿岩墙);(3)辉长岩,具堆晶构造,纯橄岩和辉石岩,通常呈蛇纹石化与剪切变形;(4)超基性杂岩,为不同比例的斜辉橄辉岩和二辉橄辉岩、纯橄岩,不同程度的蛇纹石化,它已属地幔上部范畴。甘塞尔(Gansser, 1974)将蛇绿岩与混杂岩两个概念结合起来称为蛇绿岩混杂岩,突出混杂岩中的外来洋壳残块成分。蛇绿岩混杂岩具有构造和沉积混杂的双重成因。甘塞尔认为蛇绿岩在侵位过程中发生重力崩塌物混杂到蛇绿岩混杂岩楔之中,强调洋壳板状俯冲的复杂性,但甘塞尔所述的重力崩塌混杂沉积尚未涉及构造侵蚀引起的机制。

70年代有关国际学术组织先后组织数次野外考察和讨论,其主题围绕两个方面:(1)蛇绿岩的原生侵位和成因;(2)造山带的次生构造侵位。列举了全球不同时一空蛇绿岩带的产状,均由洋壳俯冲或陆壳碰撞作用而沿俯冲带或碰撞带分布,以大型逆冲断层作用而移位到现今位置,构造混杂岩内部以一系列剪切滑动为特征组成的增生加积体,但由于后期构造的改造,而显得更为复杂。

根据海底扩张理论的分析与得到深海钻探、海底磁异常条带等研究表明:洋中脊所形成的新洋壳,随着海底扩张,冷而老的洋壳运移到海沟俯冲带附近,大部分洋壳沿俯冲带下沉,俯冲回到地幔内部外,而少部分沿海沟被刮脱下来,以构造混杂岩增生楔加积于大陆或岛弧的外侧。由于构造混杂岩含有特征性的外来洋壳碎块,标志着原来位于大陆外侧或两大洲之间的一个汪洋大海,通过沿大陆边缘的俯冲而逐步缩小而至完全封闭,导致两侧大陆的直接碰撞,焊接成一个巨型泛大陆。所以,将构造混杂岩带直观地认为是洋壳的残余体,其产出空间是俯冲带或碰撞带。其次,在构造混杂岩内部因受到强烈的挤压,往往出现以兰闪石为代表的高压型变质带,也反映了俯冲—碰撞带的高压—低温的构造环境。

科尔曼(R. G. Coleman, 1985)指出,蛇绿岩组分的构造环境除洋中脊以外,还有岛弧前缘、岛弧深部、弧后边缘海及狭窄洋等环境均可形成蛇绿岩套的岩石组分。现今大陆内部所发现的蛇绿

岩带,特别是中国西部地区,根据岩石化学特征表明大多属边缘海或狭窄洋环境。

有关蛇绿岩套岩石的年龄,要区别蛇绿岩套的原生年龄与构造侵位的年龄,后者可以根据构造混杂岩内混杂岩最新的年龄确定,为分析构造运动及动向、大陆碰撞时间尤为重要。特别是在造山带内出现多条蛇绿岩带时,相应与大洋的不同空间长期俯冲或局部碰撞有关,但其中侵位年龄最年青者应是反映海洋的最后封闭,大陆碰撞的蛇绿岩带,它的构造意义更为重要。为大地构造相分析作为主要对象而重建俯冲带—碰撞带的构造轮廓。如西藏始新世的雅鲁藏布江—印度恒河蛇绿岩带是标志印度板块与亚洲板块最后碰撞带,也就是特提斯海的完全封闭消失。

蛇绿岩套蕴藏着许多与基性—超基性岩有关的重要矿产。在橄榄岩中含有铂,橄榄岩类中含有铬铁矿,基性岩含钛磁铁矿,辉长岩类有硫化铜—镍矿,与玄武岩、细碧岩有关的黄铁矿型铜矿或铜镍矿,矽卡岩型硫铁矿、金矿、斑岩型铜—钼矿等。此外,还有石棉、滑石、菱镁矿等矿产。

另外,中国大陆内部有许多不同时期的蛇绿岩带,具有较重要构造意义的有:台湾纵谷新生代蛇绿岩带,雅鲁藏布江新生代蛇绿岩带,澜沧江中生代蛇绿岩带。

#### 参考文献

- 1 Gansser A. 国外地质科技动态, 1976, 6: 10~26
- 2 Coleman R G 著. 蛇绿岩. 鲍佩声译. 北京: 地质出版社, 1982. 1~12
- 3 上田诚也著. 海洋底板块构造. 于纯仁, 等译. 北京: 地质出版社, 1986. 18~24
- 4 HSu K J 著. 地学革命风云录. 何起洋, 译. 1985, 70~82
- 5 Nright J. Appalachians, 1988
- 6 Allegre C J 著. 活动的大陆. 孙坦, 张道安译. 北京: 科学出版社, 1987. 79~81
- 7 Howell D C 著. 地体构造学. 王成善, 译. 成都: 四川科技出版社, 1991. 15~35

(南京大学叶尚夫副教授撰, 卢华复审)

## 矿床学

### 流体包裹体同位素年代学与放射成因同位素

**研究** 在矿床地球化学研究中,成矿流体的研究是一个十分重要的部分。对成矿流体的研究,有助于清楚了解成矿物质的来源、成分,运移的动力和过程,沉淀的物理化学条件和机理以及矿床形成的年代。矿石矿物或脉石矿物中的流体包裹体含有保存下来的成矿流体,因此,对这些流体包裹体的研究可以得出成矿流体的来源、组成、矿床形成时的物理化学条件以及形成年代。成矿年代问题的解决不仅有助于了解矿床成因,同时对找矿勘探也有很重要的指导意义。稀有气体同位素研究是流体包裹体中同位素年代学与放射性同位素研究的最早尝试,近年来,流体包裹体中稀有气体同位素研究得到了迅猛发展。除此之外,流体包裹体中流体的 Rb—Sr、Sm—Nd、Pb—Pb 以及  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的同位素年代测定和同位素示踪,取得了明显的效果。

Shepherd 和 Darbyshire (1981)、Shepherd (1986)、Norman (1987)、Changkakoti 等 (1988) 率先进行过流体包裹体中 Rb—Sr 等时线年龄研究。Shepherd 和 Darbyshire (1981) 首先研究了英格兰坎布里亚的卡洛奇费尔钨矿中流体包裹体的 Rb—Sr 同位素时线年龄,得出成矿流体成矿年龄为  $392 \pm 6\text{Ma}$ , 与通过石英脉中云母测得的 K—Ar 年龄 ( $387 \pm 6\text{Ma}$ ) 基本一致。这种对比有效地验证了流体包裹体 Rb—Sr 等时线的可靠性。因而流体包裹体中的流体代表了其主矿物结晶时的流体。其次选择了各种地质作用中十分常见的,同时又是含流体包裹体最好的主矿物—石英,通过 Rossman 等 (1987) 的系统研究发现,石英相对于其它矿

物含杂质少,而且 Rb、Sr 主要赋存于流体包裹体中而不在晶格之中。再者采用阶段加热爆裂包裹体的方法,有效地排除了次生包裹体对数据的影响,因而流体包裹体中流体的 Rb—Sr 等时线年龄是完全可以接受的。

Changkakoti 等 (1988) 测定了加拿大不列颠哥伦比亚省布卢贝尔铅锌矿石英中流体包裹体的 Rb—Sr、Sm—Nd 和 Pb—Pb 同位素。他们分析了 6 个流体包裹体、3 个全溶石英样品和 4 个大理岩样品的 Rb—Sr 同位素。其中流体包裹体的数据是通过加热到  $900^\circ\text{C}$  左右爆裂包裹体后分析得出的。通过分析在  $900^\circ\text{C}$  左右爆裂的流体包裹体后的抽提物、全溶石英样品和两个矿化的大理岩样品得出的 Rb—Sr 同位素值在  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  图上构成一条斜率为  $2.73 \times 10^{-4} \pm 0.42 \times 10^{-4}$  (MSWD=1.2) 的等时线,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始值为 0.7143, 等时线年龄为  $19.2 \pm 5.9\text{Ma}$  (误差  $2\sigma$ ), 与其它分析方法得到的矿化年龄基本一致。但另外两个未矿化的大理岩样品落在等时线之外,可能是因为未受矿化作用而未达到同位素完全均一,或是因为具有完全不同的初始值。

有关流体包裹体中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  示踪的文献比任何其它流体包裹体中放射成因同位素的文献都要多,其应用范围也相对比较广泛。流体包裹体的主矿物也不局限于石英,其它类型的主矿物如白云石、方解石等,其中的流体包裹体也被用作测定对象。

最先测定流体包裹体中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素的是 Norman 和 Landis (1983)、Medford 等 (1983), 他们均将  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值用于成矿流体的示踪,以探索成矿物质的来源。Norman 和 Landis (1983) 研究了秘鲁帕斯托布埃诺矿床中几种矿物的流体包裹体溶液、高铈矿物和全岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值。该矿床是一个产在石英二长岩岩株中的、含黑钨矿、黝铜矿以及贱金属矿物的矿床,该岩株位于侏罗系页岩和白垩系石英岩中,岩株的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化于 0.7056~0.7074 之间。侏罗系页岩和白垩系石英岩的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值分别为 0.7169 和 0.7158。大量测定了主矿物中流体包裹体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值及菱锰矿和萤石的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值, 其值在 0.7058 到 0.7239 的大范围内变化,并且它们的 Rb/Sr 比均小于或等于 0.027。  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值低的流体来源于第二纪侵入的石英二长岩岩株,而  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值高的流体意味其来源于中生界的侏罗系或白垩系地层,也可能来源于古生界或下寒武统的基底层。结合  $\delta\text{D}$  和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  两个同位素值在包裹体流体中以及矿物和岩石中的系统变化,得出以下结论:有 3 种流体,即大气降水、岩浆水以及二者混合水在成矿过程中起作用;黑钨矿来源于含钨的岩浆水,当这种岩浆水与大量的大气降水相遇时,由于含钨岩浆水中的盐度、温度骤然降低, pH 值和  $f_{\text{O}_2}$  值增高而使钨从岩浆水中沉淀出来;硫化物的矿化取决于这种混合流体的演化,尽管其中有些贱金属可能来源于岩浆;萤石是一个例外,其中的流体和溶质均来源于石英二长岩岩株。Medford 等 (1983) 研究了加拿大西北区派恩潘特铅锌矿中硫化物、碳酸盐及硫酸盐中流体包裹体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  的系统变化,分析测试了赋矿地层普雷斯奎尔 (Presqu'île) 组的和成矿作用形成的白云石、方解石以及其中包裹体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值的变化。赋矿地层普雷斯奎尔组的细粒白云岩中  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.7084, 它们中的流体包裹体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.7081。这两个数据均与泥盆纪海水的平均  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.7082 相接近,可见赋矿地层中的白云石与泥盆纪海水达到了锶同位素平衡。第二组样品取自赋存于成岩早期白云岩中的矿体,但其平均值为 0.7086, 可见早期成矿流体没有带来可探测出的放射性铈;第三组样品来自成矿晚期但仍与成矿有关的脉状白云石,通过分析这些样品及流体包裹体的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值,发现按锶同位素可将它们分两类,第 1 类 5 个样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值与泥盆纪海水接近,第 2 类 5 个锶同位素平均值达 0.7110, 这可能反映了富  $^{87}\text{Sr}$  流体的加入。最后一组样品是方解石,代表最晚期的成矿热液活动,其  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值高达 0.7137, 可见随矿化作用的进行,流体中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值越来越高。这种现象在密西西比河谷型矿床中也曾发现过。对于这个现象目前最能令人接受的解释是,成矿卤水不断地从金属来源的沉积物中(矿源层)提取硅酸盐中的  $^{87}\text{Sr}$ , 与金属

一起运移到成矿场所沉淀成矿。

Norman 和 Mearns (1986) 及 Changkoti 等 (1988) 对流体包裹体中 Sm-Nd 等时线法进行过初步研究。Norman 和 Mearns (1986) 研究了挪威德拉门花岗岩中晶洞石英的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素。该花岗岩伴随有 Mo 矿化。运用分阶段加热爆裂包裹体的方法分析结果表明, 石英流体包裹体中含有  $0.3 \sim 2.1 \mu\text{g/g}$  的 Sm 和  $0.8 \sim 5 \mu\text{g/g}$  的 Nd。两次分析得知流体包裹体中流体的  $^{87}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值分别为 0.0735 和 0.0749,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值均为 0.51253。在  $400 \sim 600^\circ\text{C}$  捕获的富  $\text{CO}_2$  的流体包裹体的  $\epsilon\text{Nd}$  值为  $-1.0$ , 在  $650 \sim 800^\circ\text{C}$  之间爆裂流体包裹体的  $\epsilon\text{Nd}$  ( $\sim 274\text{Ma}$ ) 值是  $+1.8$  到  $2.7$ , 而整个岩石的  $\epsilon\text{Nd} = -0.4 \sim +1.3$ 。这些分析数据表明, 包裹体中的流体既有岩浆水又有地层水。Changkoti 等 (1988) 研究了加拿大不列颠哥伦比亚省布卢贝尔铅锌矿床中石英中的流体包裹体的 Rb-Sr、Sm-Nd 以及 Pb-Pb 同位素。分析结果表明, 流体包裹体中  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值的变化范围从 0.07 到 3.95,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值在 0.5099  $\sim$  0.5277 范围内变化, 可见流体包裹体中的 Sm-Nd 同位素数据变化范围不大, 没有一个明显趋势。但结合全溶石英样品的 Sm-Nd 同位素值, 就会得到一个年龄为 600Ma 的等时线年龄, 它代表了岩石形成的年龄。

流体包裹体中 Pb-Pb 等时线研究只有 Changkoti 等 (1988) 进行了初步尝试, 其结果与 Sm-Nd、Rb-Sr 等方法结合起来解释地质地球化学过程基本令人满意。研究对象仍是布卢贝尔铅锌矿中的石英。在整个石英样品中 Pb 的含量在  $100 \sim 300 \mu\text{g/g}$  范围内, 而 U 的含量仅为  $0.4 \sim 1.1 \mu\text{g/g}$ , 由此可见, 相对 Pb 而言, U 可忽略不计, 因此没有必要进一步测定流体包裹体中的 U。共分析了 12 个石英中流体包裹体样品、3 个全溶石英、6 个方铅矿以及大理岩样品中的铅同位素。用分阶段加热爆裂法在  $500^\circ\text{C}$  左右和  $900^\circ\text{C}$  左右分别提取了流体包裹体中的流体用于铅同位素分析。从分析结果看, 从全溶石英样品到流体包裹体的高温爆裂提取物, 再到低温爆裂提取物, 其放射性铅是逐步增高的, 这些数据在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图上构成一条斜率为  $0.1316 \pm 0.0038$  的等时线 ( $\text{MSWD} = 0.79$ ), 而大理岩的样品在该图上则构成另一条斜率为  $0.0429 \pm 0.0020$  的等时线 ( $\text{MSWD} = 0.71$ )。从流体包裹体中高温提取物到低温提取物中放射性铅逐步增高这个事实表明, 成矿流体中铅同位素存在渐进变化。这与在该区工作过的地质学家提出的热水循环模式或两大成矿流体逐渐混合的模式是一致的。即表明至少有两个不同的铅同位素来源: 一个是富含放射性铅的流体, 可能来源于附近年轻的沉积地层, 而另一个是贫放射性铅的流体, 可能来源于布卢贝尔大理岩中聚积的硫化物或来源于深部下地壳。这种混合流体成矿模式也得到了前面描述的 Sm-Nd 同位素的支持。

在稀有气体族中, He、Ne、Ar、Kr、Xe 同位素被用来探讨流体包裹体中流体的来源均有尝试 (Roedder, 1990), 但其中研究历史最长, 效果最好的是 Ar 同位素。

Wahler 在 1965 年就注意到了石英流体包裹体中过剩氩的存在。Damon 和 Kulp (1958) 发现了绿柱石、萤石和电气石中流体包裹体里的过剩氩和过剩氦。Rama 等 (1965) 指出, 除了云母可能例外, 绝大部分矿物普遍含有流体包裹体, 这些流体包裹体中所含的过剩氩是年轻或含钾低的矿物在用 K-Ar 法测定年代时产生错误的来源。因此当时研究流体包裹体中的 Ar 的目的是如何排除它, 以尽量减少它对 K-Ar 年龄测定所带来的误差。Kelly 等 (1986)、Bannon 等 (1987)、Turner 和 Bannon (1988)、Turner 等 (1988) 近年的工作使流体包裹体中氩同位素研究面目一新。Kelley 等 (1986) 率先对英格兰西南和北部花岗岩中钨矿化石英或脉中流体包裹体的氩同位素进行了详细而系统的研究。他们通过阶段加热法分析了英格兰西南部海西期默尔顿顿花岗岩中有钨锡矿化石英脉中的 3 个石英样品和英格兰北部加里东期斯基多花岗岩卡洛克费尔钨矿中的一个石英样品的氩同位素。另外用真空破碎的释放液体和气体的办法分析了一个来自卡洛克费尔的石英样品, 用来进行对比研究。通过分析发现, 石英

中的氩以几种分散组分存在, 这些组分可以通过 K、Cl、Ca 的中子轰击诱导产生的  $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{38}\text{Ar}$  和  $^{37}\text{Ar}$  之间的相互关系而鉴别出来。具有这种氩组分的流体包裹体被认为是捕获了与地壳岩石相对长期作用的流体而形成的。Kelley 等 (1986) 的工作是卓有成效的, 区分了几种不同同位素组成, 可能是不同来源的氩共存在石英中的固体包裹物、流体包裹体中的流体和流体包裹体中的子矿物。但他们的 Ar-Ar 等时线研究却不大成功, 尽管大致给出了最大的成矿年龄有 280Ma。但在中国, 邱华宁、戴潼谔 (1989) 关于石英流体包裹体中 Ar-Ar 等时线的研究却取得了成功, 他们用阶段加热法分析测定了云南某钨矿石英脉中石英流体包裹体的坪年龄, 这个年龄为  $31.4 \pm 14.6\text{Ma}$ 。同时用真空破碎法测出了相同来源的石英的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  等时线年龄, 为  $38.6 \pm 1.9\text{Ma}$ 。这个等时线年龄与跟石英有关的 K-Ar 年龄惊人地一致。在 Ar-Ar 等时线图上, 其截距为 337.7, 代表初始  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比值, 表明成矿流体中有过剩氩存在。

流体包裹体中流体的同位素年代学和放射成因同位素的研究仍处于起步阶段, 它的研究与一般全岩或单矿物同位素与放射成因同位素研究相比较, 大的说来都是两个方面, 同位素计时与同位素示踪。流体包裹体中流体的同位素年代学、放射成因同位素研究有如下优点: (1) 近几十年来的流体包裹体研究已经表明, 除个别极特殊情况外, 流体包裹体不存在渗漏现象 (Roedder, 1984), 即流体包裹体自形成之后一直构成封闭地球化学体系。而一般全岩或单矿物形成之后可能受后期热液活动或其它地质作用的影响, 因此它们所构成的封闭地球化学体系不如流体包裹体的封闭体系严密。(2) 矿物晶体在结晶之后受到后期热液活动或其它地质作用的影响, 在流体包裹体方面也有记录, 表现为在晶体中形成次生包裹体。目前流体包裹体研究已能正确地辨认出这类次生包裹体。通过阶段加热爆裂法能将后期地质作用的流体与早期地质作用中晶体结晶时的流体区分开来。而用全岩或单矿物样品进行这类研究要作如此详细的区分是不可能的。(3) 不少同位素计时方法要求特殊的单矿物作为它的研究对象, 而这些矿物在地质作用中并不是普遍存在的, 特别是在成矿流体年龄的研究方面, 矿床地球化学家常常因找不到适合于测年的矿物而苦恼, 而流体包裹体中流体的同位素年代学和放射同位素加以研究, 从理论上来说, 任何矿物, 只要含有包裹体, 就都可作为它的研究对象, 目前使用最为广泛的是石英。石英无疑是各种地质作用中最为普遍存在的矿物。

(中国科学院地球化学研究所鲁清博士、卢焕章博士生导师撰)

**热液矿床中金的地球化学** 热液作用是金矿矿化中极其重要的机制。由于热液活动中含金溶液-矿物平衡的复杂性, 金的地球化学性质必须考虑四个因素: 矿化溶液来源、金源、金的运移机制和沉淀机制。显然, 这四个因素是相互制约的。

对不同矿床类型而言, 有五种溶液来源, 即地下水、海水、同生水 (或建造水)、岩浆水和变质水。Taylor (1979) 总结了大量贵金属矿床的氧和氢同位素数据, 认为热液主要来自地下水。Rakike (1985) 总结卡林金矿研究得出, 矿液主要为大气水成因, 碳来自围岩, 硫源于下伏古生代沉积岩; 金的主成矿环境为  $175 \sim 200^\circ\text{C}$ , 溶液为弱酸性到中性, 盐度低, 氧逸度也低。在主成矿期, 热液发生沸腾, 造成上部的酸滤氧化。Buchanan (1981) 和 Berger (1982) 认为低温热液贵金属矿床是古地热带, 这些贵金属矿床的形成机制类似于现代的热泉活动。Fripp (1970) 提出, 罗得西亚太古宙含金的铁建造为水下热泉喷口的化学沉淀。层状矿体为含燧石、毒砂、磁黄铁矿和铁白云石交代层的硫化物及硫化物-碳酸岩相的带状铁建造。金赋存在毒砂中。矿石结构研究表明, 金和硫化物是在变形和变质前沉积的。Bavington 和 Keays (1978) 发现, 西澳大利亚科马提岩序内沉积岩中金有明显富集, 达几千万分之一, 认为属于海底周围热泉的沉积。

Hallager (1984) 推断贾了山合金富铁沉积岩是太古宙海相

沉积。金与硫化物相富铁岩共生,而富铁岩产于石英云母片岩和石英岩中。赫姆斯塔克矿床中金与碳酸岩铁建造的紧密联系暗示其共生沉积关系。这类矿床与同生成因块状硫化物矿床有许多相似之处,据认为,块状硫化物矿床的成矿溶液是经过深部循环加热和化学演化后的海水形成的(Hutchinson和Burlington, 1984)。Fehlberg和Giles(1984)提出西澳大利亚太古宙斯帕艾维尔矿床为火山喷气成因,在杂砂岩层序中的含毒砂的阳起石-石英-碳酸岩的整合夹层中含有细粒金。这些沉积岩处于绿岩带内靠近长英质的火山岩中心。陈丰认为,沉积-火山岩层序中的同生水是矿化溶液的可能来源。近年来,变质作用释出水在金矿形成时所起的作用受到很大的注意。Boyle(1959)首先提出了吉布提西北部太古宙绿岩中矿脉的变质成因。Grove等(1984)将西澳大利亚太古宙脉状矿床解释为变质作用释出的热液产物。FrieT Kerrich(1984)根据脉内外的元素分布的大量数据,建立了太古宙绿岩中脉金矿床的普遍模式,指出其运移介质是变质溶液。矿物中气液包裹体的研究可以提供成矿溶液的有价值的信息。虽然包裹体体积太小,往往达不到化学分析所需的数量,同时包裹体组成不仅反映成矿溶液成分,还反映成矿后的叠加事件。

热液金矿活动的温度范围为 $100\sim 400\text{C}$ ,多数在 $200\sim 300\text{C}$ 之间(Buchanan, 1981)。由于热液体系多处于或近于溶液的沸腾状态,沉淀温度可以近似为均一化温度,热液盐度在质量分数为 $0\sim 1\%$  NaCl范围内变化。金矿床包裹体中测出的高温和高盐度往往与岩浆活动有关。据Noore和Nash(1974)报道,宾厄姆坎宁岩矿床成矿温度为 $400\sim 600\text{C}$ ,盐度质量分数为 $36\%$  NaCl。Huang等(1978)测定内华达州伊利接触型矿床成矿温度为 $450\sim 600\text{C}$ ,盐度质量分数为 $42\%$  NaCl。Theodore等(1985)测定内华达州通博伊-明尼砂卡岩矿床的温度和盐度分别为 $350\sim 550\text{C}$ ,质量分数为 $25\%$   $\text{CaCl}_2$ 。包裹体溶液测定表明,NaCl是最重要的组分,也存在少量Ca和K。

地球化学研究表明,围岩可以是金的源岩,至少在局部范围是这样。据Vincent和Gocket(1960)报道,在岩浆过程中,金与铜呈正相关。在谢尔德侵入体中,金主要进入铜的硫化物,而铁的硫化物、氧化物和硅酸盐含金低。Rowe(1969)、Keays和Kirkland(1972)对拉班玄武岩及Cu矿岩墙的研究也证实了这一看法。Keep和Scoff(1976)发现大西洋中脊玄武岩中金与铜相关,并认为金与铜尖晶石有关。他们认为金与硫没有强烈相关,虽然数据表明高金样品含铜也高。Dupuy等(1981)发现新喀里多尼亚蛇绿岩的非和堆积超镁铁岩中金与铜行为相近,在部分熔融的残留相对富集;而在镁铁质岩堆积相中金与铜不相关,却富集于铜尖晶石。

超镁铁岩和镁铁岩相对于平均地壳丰度( $5\text{ng/g}$ )富金,但有例外。Rozhkov等(1973)测定某些金伯利岩和超镁铁质包体中平均含金分别为 $3.9\text{ng/g}$ 和 $4.8\text{ng/g}$ 。他们提出典型上地幔物质含金 $3\sim 7\text{ng/g}$ 。Mitchell和Keays(1981)认为,上地幔金大部分存在于不混熔硫化物熔体的粒间相。他们测得实晶石二辉橄辉岩平均含金 $0.6\text{ng/g}$ 。Oshin和Crocket(1982)研究得知,加拿大塞特福德蛇绿岩杂岩体中橄辉岩含金 $1.5\text{ng/g}$ ,纯橄岩含金 $0.27\text{ng/g}$ ,辉长岩则含金达 $1.7\text{ng/g}$ 。

太古宙金-石英脉的超镁铁质和镁铁质围岩中含金异常高,这些围岩被认为是金的源岩(Groves等, 1984)。但矿化和未矿化岩石之间金含量没有可测出的差异(Anbaeusset等, 1974)。Tilling等(1973)也提出绿岩带内花岗岩质石和变火山岩之间金含量没有明显的差异。Saager等(1982)对比南非太古宙绿岩带岩石与欧洲古生代超镁铁岩中金含量后得出,前者含金 $0.1\sim 372\text{ng/g}$ ,平均 $10.8\text{ng/g}$ ;后者含金 $0.1\sim 25\text{ng/g}$ ,平均 $2.0\text{ng/g}$ 。这个引人注目的事实可能与上地幔金的随时间演化或地幔的不均一性有关。Keay和Scoff(1976)测定了大西洋中脊枕状玄武岩的金含量。内部样品含金 $0.2\sim 0.7\text{ng/g}$ ,玻璃质顶部含金 $0.3\sim 2.7\text{ng/g}$ 。陈丰认为玻璃质更好地保存了岩浆特征组分,而内

部样品受海水交代。Crocket和Teruta(1977)测出了从太平洋中脊钻出的镁铁岩中类似的含金量,并提出金随深度稍有增大。Anoshin和Kepezhinskas(1972)研究了库里尔-勒察加省的近代玄武岩、安山岩和流纹岩,提出全部岩石平均含金 $1.8\text{ng/g}$ ,金含量与分异数据不相关。他们认为金以原子形式均匀分布于硅酸盐岩中,此外,镁铁质岩中硫化物,特别是黄铁矿富金。

镁铁质到中性的侵入岩含金稍高于喷出岩。当岩浆在封闭系统中分异,金将随挥发份进入残留液相;如果岩浆全部晶出,则金将混入岩石中;如果岩浆喷出地表,则金、挥发份和其他不相容元素将消失。在超镁铁质岩中,金可进入早期晶出的尖晶石。Korobeynikov(1981)测出岩浆岩和变质岩中长石含金量处于本底水平,金含量从镁铁质岩石向长英质岩石降低。最高值为侵入玄武岩的长石( $7\text{ng/g}$ )。斜长石斑晶比共生基质(近 $6\text{ng/g}$ )含金低(近 $1\text{ng/g}$ )。Korobeynikov(1981)测出岩浆岩中黑云母含金高于其他造岩矿物。发现辉长岩中黑云母含金 $15\sim 90\text{ng/g}$ 。

以上表明,没有哪一个岩类富集金。换言之,大多数岩石可以作为金的源岩,只要该岩石具有良好的渗透率,运移溶液可以达到金所处的位置,并与其起反应。金的溶液化学尚未充分了解,许多具地质学意义的溶液中金溶解度很低。热液体系的金的运移研究主要集中在酸性氧化溶液中金氯化物和还原条件下硫化物的溶解度测定。Becker(1987)提出,金可溶于含硫化物溶液。Stokes(1905)和Lenher(1918)对氯化物中金溶解度进行了实验测定。Ogryzlo(1935)首次比较系统地测定了金在盐酸和二硫化物溶液中的溶解度。他认为,酸性体系中金以氯化物运移,在还原或中性条件下沉淀;还原性溶液中金以二硫化物运移,氧化时沉淀。Smith(1943)考虑天然体系常有亚铁和 $\text{H}_2\text{S}$ 作为还原剂,这将使金氯化物发生沉淀,故提出金主要以硫化物溶液中金溶解度,推断高温时以氯化物形式运移。Helgeson和Garrels(1968)评价了金氯化物的溶解度,推断出它在热液成矿中是重要的。Henley(1973)实验测定了 $300\sim 500\text{C}$ 下氯化物形式运移。在低温下金以离子或硫化物形式运移。Seward(1973)对金的二硫化物配合物的溶解度进行了大量研究,观测到的溶解度远高于地质上成矿所要求的浓度,并假定有 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 和 $\text{Au}_2\text{S}(\text{HS})_2^2-$ 配合物。Buzop和Jlaukeny(1987)在 $100\text{MPa}$ 、 $100\sim 350\text{C}$ 条件下测定了硫化物溶液中金溶解度。Renders和Seward(1989)测定了在 $25\text{C}$ 和不同压力条件下, $\text{H}^+$ 浓度 $10^{-12}\sim 10^{-2}\text{mol/L}$ 时金在硫化物溶液中的溶解度,提出金以 $\text{AuHS}^-$ 、 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 、 $\text{Au}_2\text{S}_2^{2-}$ 和 $\text{Au}_2(\text{HS})\text{S}^-$ 形式出现。Shen-berger、Barnes(1989)测定和讨论了 $150\sim 350\text{C}$ 下 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 溶解度及其中的某些问题。

热液体系中金大多以 $\text{Au}^+$ 及其配合物出现。金的氯化物和二硫化物配合物,在酸性、氧化条件下,金以氯化物配合物形式出现;在还原条件下则以二硫化物形式出现,这时硫为 $\text{H}_2\text{S}$ 或 $\text{HS}^-$ 。氯化物可因 $\text{H}^+$ 浓度下降或还原而使金沉淀;而二硫化物的最大溶解度位于稍碱性稍低于硫酸盐与硫化物的边界线处。这样, $\text{H}^+$ 浓度的变化导致金沉淀,这依赖于溶液的变化前的 $\text{H}^+$ 浓度。

在金以二硫化物运移时,最有效的沉淀机制是氧化和硫活度减小, $\text{H}^+$ 浓度改变可能是次要的,虽然它决定了交代组合的分带性。热液的氧化可能是由于沸腾、与气饱和地下水的混合,或与氧饱和围岩反应所造成的。沸腾作用是低温热液矿化的相当普遍的有效机制。沸腾现象的标志是在矿物包裹体中气相大于 $50\%$ 。Drummond和Ohmoto(1985)比较系统地讨论了沸腾作用,计算了 $150\text{C}$ 、 $250\text{C}$ 和 $350\text{C}$ 时 $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{H}_2$ 的变化,以及对氧逸度、氢浓度、pH值和贵金属、贱金属沉淀的影响。Spycher和Reed(1989)用计算机模拟了Broadland型水的沸腾、气相金属运移和酸化反应。近年矿床研究表明,沸腾和贵金属沉淀有着空间和时间上的相关,金多半处于沸腾部位及其稍上方,而贱金属在其下方,富金矿体标高与古地表有空间相关,地表常有热泉痕迹。矿化带两侧的蚀变带可以用沸腾后pH值的变

化来解释,而矿化带上方的明矾石—高岭石酸化淋滤带,是沸腾时 $H_2S$ 进入上方氧化溶液所形成硫酸溶液的产物。当然,金也可能以气相运移,据推测,金以 $AuAsS_2$ 形式存在,在近地表处再冷却进入液相,再氧化析出。这可以考虑为热泉中析金的机制。

环太平洋带金矿床常可分为沉积岩地体中的金矿床和火山岩地体中的金—银矿床。前者金以自然金产出,含银10%~20%;后者以银金矿(含银30%~70%)产出,并伴生各种含银矿床。Shikazono和Shimizu(1987)总结了日本这两类矿床的地质特征。热力学计算表明,Ag/Au比值随氯化物和温度增加而减小。金矿床的 $Au(Cl_2)^- / Au(HS_2)^-$ 比值较大,而硫活度低于银—金矿床。上升的热液与冷却的氧饱和地下水的混合也是金沉淀的重要机制。

在研究贵金属的沉淀时,吸附作用具有重要意义。在低温条件下,非晶质的砷化物、锑化物、非晶质二氧化硅、赤铁矿、硫化物和高岭石等矿物均可吸附金。如果考虑到含金热液主要来自地下水,可以认为形成金矿的地球化学过程是一个地下水在地壳上特定的构造部位向深部渗透和对流的过程。并可认为对流涉及的深度至少在4km,最深可达9~12km。允许自由对流的岩石可以用Rayleigh—Darcy方程的Ra参数表示,要求Ra值大于40(或4)。这样,实际上除页岩外,包括破裂的、结晶的岩石可满足要求。通过淋滤,运移溶液中含金量可达1~100ng/g。Shenberger(1985)的计算表明,含1~10ng/g的金溶液可以形成有经济价值的金矿床。这估计与Brown(1986)对新西兰金矿测行的成矿溶液含金1.5~10.5ng/g相符。结合包裹体测压结果,Nesbitt(1988)将地下水对流型热液金矿分为低温热液型、卡林型、深成中温热液型3个不同深度的成矿模式。

地球化学模式是以容纳似是而非的天然过程为先决条件,并要求与溶液—矿物平衡原理相符。但是,应用这些模式时必须小心,为了平衡原理与矿物共生组合相吻合,应当注意沉淀往往是多期性的。每期均有其本身的物理化学参数,具不同参数的沉淀事件的叠加,使矿物共生组合复杂化。

(中国科学院地球化学研究所陈丰撰)

**矿床成矿模式** 成矿模式即矿床形成过程的模式。它是从四维空间概括矿床赋存的地质环境、演化过程和成因机理,并以不同的形式及认识深度给予表达。成矿模式一词首先是由捷克人于1962年提出的。1970年提出了“洛厄尔—吉伯特模式”,即后来的斑岩铜矿床的成矿模式。1982年,美国R. L. Erickson发表了48个成矿模式的系统材料后,使人们对成矿模式有了全面的理解。矿床学理论和大量地质资料获得的基本事实是:(1)矿床赋存在一定的地质环境中;(2)类似矿床的地质环境也相似;(3)矿床成矿地质特征的一致性反映了成矿环境、演化过程和成因机理的一致性;(4)矿床可以根据内、外部特征进行归类,划分出层次不同的类、类型组合、亚类等;(5)对每类矿床的特征进行有机综合,可建立成矿模式。它是对矿床认识的最佳方式和描述的最好方法。矿床学家共同认为,成矿模式揭示了矿床成矿规律,发展矿床成矿理论及矿床地质学,促进地质学的发展,同时亦为矿产勘查成员提供有关成矿作用的完整概念,指导矿产预测和勘查工作。成矿模式在20世纪70年代和80年代形成高潮,至今还在延续之中。

矿床成矿模式充分反映成矿作用的过程和矿床形成复杂的地质条件,它表明同一地质条件下不同矿种、不同类型矿床的共生和制约关系,用不同的形式及认识深度综合解释成矿学的理论和地质现象,成矿模式还能把握住同类矿床的一组找矿标志,其中的直接找矿标志可以提高预测区内的找矿效益,识别和提取成矿信息,对同类潜在矿床作出预测,采用最经济、最有效的技术方法发现矿床。据此,对矿床成矿模式分为以下3类。

**区域成矿模式** 反映一定级别成矿单元内各种固体矿产的分布特征、成矿作用的时空演化、成因联系和成矿机制,从而提高区域成矿学的理论研究水平,指导区域矿产的预测和勘查工作。

根据中国区域矿产的时空分布规律和各类矿产的成因特征,区域成矿单元分为全球性的(I级)、区域性的(II, III, IV级)、矿田、矿床、矿体V级。但从区域成矿模式的角度出发,主要是建立全球性的、区域性的和矿田的V级模式。不同级别的成矿单元内,由于赋存的矿种不同、矿床成因类型的多样性和多变的成矿地质条件,建立成矿模式需要用矿床成矿系列理论作指导,反映成矿单元内多阶段、多成因的区域性的成矿特征。虽然区域成矿模式涉及的范围、成矿作用性质上有较大的差异,但从建立区域成矿模式的共性出发,建立成矿模式内容可统一考虑以下几方面:(1)必要条件:区域地质矿产图;各类矿床综合剖面图(并用附表说明各类矿床的基本特征);区域成矿模式图。(2)区域成矿模式的描述内容:区域地质环境(构造单元、成矿区带、区域地质概况);成矿期次(时代)和成矿作用及其有关的矿产种类、矿床类型(概括用成矿模式或用代表性的矿床说明,常用综合剖面图和附表说明);构造对成矿的控制(包括构造层、构造分区和构造类别对区域的和局部的矿化类型的控制作用);沉积岩相对矿化类型的控制(层位、岩性、古地理);岩浆岩对矿化类型的控制(时代、产状(喷发、侵入)、岩性及地球化学特征);变质作用对矿床形成的控制(原岩、温度、压力);各类矿床随时间的演化关系(矿种、类型);各类矿床的区域特征、成因及其各自的矿化分带性;各类矿床的识别标志及后期变化特征(包括地质、物探、化探、遥感等信息);成矿系列组合、类型及其呈现的序次(找矿依据、矿床类型及其成因联系,用模式图说明);区域的和局部的控矿因素及找矿标志;参考文献。

总之,建立区域成矿模式是以区内所出现的矿床类型或有代表性的矿床为描述对象,用其综合特征来解释区域成矿作用的整体性,它将促进区域成矿规律研究的深化,是提高中国区域成矿学理论水平的途径。

**矿床成矿模式** 描述矿床的形成过程,它要对矿床赋存的地质环境、矿化作用及其随时间和空间变化显示的各类特征(包括地质、地球物理、地球化学和遥感地质)、成因机制等矿床要素进行概括总结 and 解释。虽然各类矿床成因的差异极大,变化万千,但建立一个矿床的成矿模式的总体内容是相似的。(1)必要图件:区域的或矿床地质平面图;矿床典型剖面;矿床成矿模式图。(2)矿床成矿模式:区域地质背景(大地构造单元、成矿区带级别及所在区域成矿特征);成矿环境(赋矿地层时代和岩性特征);成矿岩体(岩石组合、岩性特征及年代);控矿构造(用地质图说明);矿体(或矿床)组合分布及产状;矿石类型及矿物组合;矿石结构构造;矿化阶段及分带性(用矿床典型剖面图或其它图件说明);蚀变类型及分带性(用矿床典型剖面及其有关图件说明);成矿物理化学条件(温度、压力及 $Eh$ 、 $H^+$ 浓度, $f_{O_2}$ 、 $f_{S_2}$ 等);矿床成因机理(成矿物质、成矿溶液、成矿作用能量来源、成矿物质的空间变化特征,配合成矿模式图作合理描述);矿床类型;控矿因素和找矿标志(即综合技术方法找矿);参考文献。

上述内容是对矿床内、外部特征的基本要素作概括性描述,但作为建立一个完整的、实用的矿床模式应给出的是矿床原型的“同构象”,它具有严格的等价性,属矿床的实体。但从当前的地质理论和具备的已知矿床的实际资料现状看,它并非现实的要求。而矿床成矿模式的“同构象”仅描述矿床形成过程与周围地质环境的关系,矿床内、外部特征等基本要素及其科学地推断解释。这些要求是可以实现的,但要满足以下3个必要条件,才能建立一个与地质实际吻合程度较高的矿床成矿模式:(1)成矿模式与矿床“原型”之间呈相似关系,在研究和矿产勘查工作中可以类比,简称类比性;(2)在成矿学理论研究中,它能代表矿床的“原型”,用作成矿学理论的典型实例,通称成矿模式的代表性;(3)在地质—找矿实践中,运用矿床成矿模式能获得矿床“原型”的“信息”,据此可以对潜在矿床进行预测评价和指导矿产勘查,即矿床成矿模式的外推性。

综上所述,成矿模式是对矿床赋存的地质环境、内外部特征、控矿因素、矿化的时空演化规律、矿化标志、成矿物质来源、

成因机理和找矿标志的高度综合、描述和解释,将复杂多变的成矿作用和地质现象上升为成矿学的地质理论,并用图表、文字予以表达,使人们对同类或一组相似矿床的成矿特征有一个完整的概念,从整体上深化对矿床的认识。加之当前的地质—找矿工作由地表矿的寻找转向对隐伏矿床的勘查,相应的找矿难度越来越大,矿床成矿模式是适应当前找矿难度增大的需要,是实现科学找矿、解决隐伏矿床找矿工作中出现的一系列勘查技术问题的有效方法和途径,也为地质—找矿提供了地质理论依据,勘查对象为人们提供了接近客观实际的模拟对象,提高了地质—找矿的科学性。

**找矿模型** 建立有效的找矿模型既不同于论证和推理式的学术论文探讨,又不属于全面地质工作总结的“地质报告”(普查评价或矿床勘探),而是对找矿实践中工作经验的有科学依据的理论和方法的综合,并要求用直观的方法表达出来。找矿模型要求回答“矿床为什么赋存在现在众所周知的特定的地质位置上”。这是当代成矿学和综合技术方法找矿中需要回答的根本问题。在当前技术条件下,只能应用成矿学理论的推断解释和综合找矿方法两个侧面来解决。前者只能用成矿模式;后者需有找矿模型作回答。在地质—找矿的实践中,两者均是找矿的途径,而找矿模型显得更为重要。人们认为:成矿模式是建立找矿模型的地质基础,所以找矿模型是以地质为基础的地质及物化探、航卫技术方法的最佳组合。

找矿模型是为适应寻找隐伏矿床的需要而创立的找矿新途径。“就矿找矿”是在实践中证实它是否为有效的找矿方法,它是建立在“矿床成群分布、在相似地质条件下可找到类似矿床”的成矿规律出发的找矿思路前提下,属地质概念式的找矿模型。但是当前和未来的找矿重点是隐伏矿床和覆盖层下的盲矿床,单用地质标志进行直接勘查的作用逐步缩小,使之地质找矿的难度加大,而相应的风险就增加。为适应这一找矿新形势,需要借助地球物理、地球化学和航卫资料等间接找矿标志识别成矿信息,推断和预测隐、盲矿床的四维空间位置。在找矿实践中,不同地区、不同构造单元内,对不同矿床应用地质理论找矿、地球物理勘探方法找矿、地球化学勘探方法找矿和航卫信息找矿所起的作用是不同的;在同一地区的同一类型矿床上,各类方法所提供的找矿信息各不相同。应用单一方法提供的信息对找矿来说是不够充分的。但是,综合方法的组合,特别当地质、物探、化探、航卫信息最佳组合建立的找矿模型,不仅具有扎实的地质基础,而且建立了完整的方法前提,将能获得较好的找矿效益。由于地质体,特别是矿床(体)的千变万化,赋存四维空间的差异,即使是同一类型的矿床,其显示的找矿信息将会有相当大的差别,因而它不能提供一个现成的找矿模型或建立一个统一的组合模式供矿产勘查使用;但在研究了矿床(体)的地质、物探、化探、航卫的性质和成矿的地质规律前提下,优化找矿标志,确定找矿信息和找矿方法的最佳组合,据此建立找矿模型,导致发现矿床(体),是当今找矿的应时之途。据此可知,找矿模型同平时所提的综合方法概念有一定的差异。建立一个与找矿实践吻合程度较高的找矿模型涉及到构成成矿模式;控矿因素和找矿标志的标定;地质数据的处理;成矿信息的提取;矿与非矿信息的区分、浓缩、优化和组合;干扰的剔除;同一矿床(体)在不同埋深条件下成矿信息的显示和识别等系统的工作方法。据此,建立一个完整的找矿模型大致包括的内容是:(1)必要图件有与找矿模型相匹配的矿床成矿模式图;代表矿床(矿体)赋存部位不同埋深的综合剖面图;典型剖面的物性分层图或综合平面图;找矿模型图。(2)矿床地球物理场特征,包括勘查目标和目的物特性、异常特征、干扰因素及影响和矿床在覆盖条件下显现的地球物理场的推断解释。(3)矿床地球化学场特征(成矿元素和指示元素种类、元素组合、元素分带、矿床或矿体晕和尾晕、化探数据中包含的干扰因素、覆盖条件下的化探晕的特征等)。(4)地球物理、地球化学模型。(5)在干扰场压制或消除情况下的物化探场的特征。(6)找矿需要的物化探和遥感信息。(7)找矿适用的方法类别、使用的次序及配制。

(8)参考文献。

从上述内容可知,建立找矿模型需要具备扎实的地质基础资料,它包括地质、物探、化探资料;超深探测的物探资料;推断解释的地质理论。据此建立的找矿模型具有较大的实用性。找矿模型在勘查工作中具有预测、发现矿床和提高找矿效益的三大作用,应用地质、物探、化探、航卫资料中包含的成矿信息编制找矿模型是当前地质找矿工作的需要,也是当代科学找矿的发展趋势。但是在找矿模型的表达式中,不能过分强调一种方法的有效性而否定或排斥另一些方法的效果,而应从找矿实践出发,在找矿方法最佳组合前提下,标定找矿模型的各项参数,直观而又逻辑地表达各类成矿信息和使用方法的最佳组合,提出科学找矿的地质前提和方法配置。建立找矿模型不仅标志着综合技术找矿方法的发展和理论上的提高,而且标明理论找矿步入新阶段,即矿产勘查理论的整体提高。

找矿模型的内容展示了地质—找矿对象的具体轮廓,通过直接找矿信息的标定、综合和推断解释,阐明间接找矿信息与勘查对象间的空间联系。但由于勘查对象的物理、化学性质差异甚大,通常将找矿模型按方法、手段的组合划分为:(1)地质经验找矿模型;(2)地质—地球物理找矿模型;(3)地质—地球化学找矿模型;(4)地质—地球物理—地球化学综合方法找矿模型。

由建立成矿模式和找矿模型的内容可知,两者都概括了矿床形成的重要特征和成因机理,是寻找同类矿床理论的依据,它在矿产勘查中的作用是:(1)为地质类比和矿床地质研究提供直观对象,帮助勘查人员把注意力集中到与潜在矿床有关的关键性的地质特征上;(2)掌握导致矿床发现的直接和间接找矿标志,在勘查过程中,使找矿人员知道是在探寻矿床的哪个部位而预测未知地段;(3)制定合理的勘查战略和最佳勘查技术方法组合,是提高勘查效益的决策依据。

建立成矿模式已被公认为是矿床学研究的重要课题之一,是矿床学理论的组成部分。建立成矿模式对矿产勘查、研究和发展矿床学理论有深远的影响和重要的实际意义。但需要强调,目前已建立的模式还多属经验性的描述模式,对许多重要地质事件尚达不到知其所以然的程度,对已建模式的修改完善、新模式的不断建立是目前发展的必然趋势,在“修改”和“建立”过程中日臻完善。

#### 参考文献

- 林强,现代和古代成矿水动力学系统——含油气盆地非岩架成矿模型,园外地质科技,1995,(3):12~18  
(中国地质科学院成矿远景区划室朱裕生撰)

**海底喷流成矿作用** submarine exhalation 泛指含矿水热流体从海底下喷溢而出,并将所携带的成矿组分,在喷口上下或侧沉沉淀下来成矿的过程。由此作用形成的矿床称为海底喷流型矿床。此类矿床主要包括:贱金属硫化物矿床、重晶石矿床、金银矿床、锡矿床等。与矿体共生的、由喷溢形成的一类岩石,一般称之为喷流岩。喷流岩的存在对判定喷流矿床具有重要的意义。

喷流型矿床中以块状硫化物矿床最为重要,由于其品位高、规模大、矿化延展稳定,伴生有用组分多,具有很高的经济价值。据估计,世界上大约80%的锌、40%的铅、20%的铜、40%的镉和50%的银采自此类矿床(Hutchinson,1988)。喷流型矿床特别是块状硫化物矿床,既显示出典型的同生沉积特征(层状、层纹状矿石),又具有后生成矿特征(网状脉、角砾状、交代溶蚀等结构以及热液蚀变)。早年,Lindgren(1919)认为此类矿床是由岩浆析出的热液上升,通过选择性交代有利的岩性地层而成矿的。

对Lindgren观点的反叛最早出现于欧洲。一些学者(如Berggt等)在研究了德国的Rammeloberg块状硫化物矿床后,首次提出了海底同生沉积的观点,他们认为矿床所具有的后生成因特征乃成矿后遭受变质作用改造的结果。20世纪30年代初,Bernauer研究了海岛火山附近正在进行的海底热水成矿活动,

支持了上述观点。与此同时,德国 Schneiderhöhu 首次把“喷流(exhalatio)”一词引入矿床学。他认为,对应于侵入岩浆的气成热液矿化期,火山熔岩也有一个“射气阶段”,在大陆的火山喷气孔和热泉中常生成硫磺等射气矿床;在海底则由火山射气和正常沉积联合作用而生成喷气—沉积矿床。

20世纪40~50年代,德国毛赫(Maucher)及其学生系统地研究了中欧地区的块状Pb—Zn矿床,认为这类矿床系海底热液同生沉积的产物,成矿物质可能与地层中的火山岩夹层有关。50年代晚期,Oftedahl(1959)结合对现代火山活动区火山射气成矿现象的观察资料,对已有的火山射气成矿概念提出修正,强调挪威、瑞典、西班牙、德国等地的块状硫化物矿床以及铁矿床,是由火山喷气与海水相互作用而成的。

50~60年代期间,澳洲的Stanton等人对Brocken Hill和Mount Isa等著名超大型矿床的成功研究,使人们对此类矿床的同生沉积特征又有了进一步的认识。1963年,Nobel提出沉积物成岩压实过程排出的水,可能是一种富含金属的成矿热液。60年代中期在红海裂谷的卤水池中发现富含金属的热卤水及其沉积物;在美国西部撒尔顿发现高热富金属地下卤水,这些是人类第1批获得的含金属热液的直接证据。

70年代初,一些学者(主要是日本学者)对“黑矿”的研究成果,无可辩驳使人们相信此类矿床乃从到达海底的火山喷气作用同生形成的,在成矿流体上升通道内常见脉状矿化、浸染状矿化和热液蚀变现象。氢氧同位素研究表明成矿流体是一种循环加热的海水。硫同位素还证明矿石中的硫并非来自岩浆,而是与海水或有机物质有关(Sangster,1970)。这一见解到70年代中期被普遍接受。人们的注意力开始转向这一成矿作用发生的全球构造和局部的地质背景、成矿物质来源和成矿流体的演化、组分沉淀的条件和机制等方面。

地球物理学家根据洋壳热流观测资料曾指出:下渗冷海水的对流循环,是一种在地质历史上普遍存在的,造成地球冷却的重要机制,其海底露头处就将构成一个热水喷流区。果然,1976年由大洋深潜调查在东太平洋Galapagos Rift首次发现了洋底正在活动的热液喷口。后来又相继发现了百多个类似的海底喷流区,遍及四大洋的洋中脊、裂谷海和弧后扩张中心。水热流体的温度为150~635℃,盐度2.1~62.5,当这些热水注入冷水(-2℃)后即构成一个个的喷口。刚出喷口的流体清澈透明,往上由于各种细粒沉淀物的出现而成为冒烟的“烟囱”。沉淀物多以黑色金属硫化物为主(黑烟囱),局部以重晶石和二氧化硅为主(白烟囱)。喷出海底的热液主要是被加热的下渗海水,通过与新鲜的海底玄武岩的反应而获得金属组分的。这已为海底钻探和玄武岩/海水反应实验结果所证实。近来,人们对海底喷流及其成矿体系取得了以下重要的共识。

(1)喷流作用一般包含两套成矿系统。喷口以下的流体补给系统(热液通道)和其上的海底热液化学沉积系统,两者在空间上既可相互叠置,也可相互分离,这取决于成矿流体的密度、海底地形及海流情况。喷口以下形成网状脉、浸染状矿体;喷口上形成层状、似层状矿体。

(2)根据赋矿岩系的不同,可以分出火山—喷流型矿床和沉积—喷流型矿床两大类。火山—喷流型矿床多产在板块增生带(裂谷或洋中脊)或俯冲消减带的火山建造或火山沉积建造中。洋壳的这些区段其岩石破碎程度高,强烈的火山岩浆活动造成高热流区,海水渗入后被加热环流并与流经的岩石反应后演变为含矿热液。环流热液既可以在洋壳岩石孔隙和裂隙中通过减压沸腾、与下渗冷海水以及围岩相互作用等方式,生成具后生热液矿化特征的脉状矿体;也可能上升直达海底或在喷口处遇循环烟囱—烟丘模式堆积成近源透镜状矿体,或在海底低地以热卤水池的形式生成更具同生沉积特征的远源层状矿体。矿床之下的火山岩中,常有一个大范围的区域性原岩蚀变带。蚀变过程中释放出的元素正是矿床中富集的元素。沉积—喷流型矿床多产在火山活动微弱的大西洋型被动大陆边缘或大陆内部裂谷盆地中,矿床是

沉积盆地正常演化过程中可能出现的多种产物之一。沉积物成岩压实和矿物相变,都能释放出大量的水并随成岩压实作用的进行被不断排出。由于离子过滤效应、残留孔隙水的盐度以及酸度、温度等均将升高。尤其是在欠压实的高压含水层中,孔隙水含量及其压力、温度和盐度都异常地高。在此条件下铝硅酸盐矿物将发生相转变,促使沉积物质点所携带的成矿组分以络合物的形式释放出来,最终演化成为热液。当同沉积期断裂—地震活动或欠压实异常高压系统自身的水热压裂穿透上覆的隔水屏蔽层时,储水层中的热卤水将迅速上升涌向海底并形成卤水池,各种矿物随之沉淀,在喷口附近较还原环境中多出现黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等;远离喷口较氧化环境中形成重晶石及其他硫酸盐矿物。

(3)当矿化发育完整时,常出现分带现象。就单个矿床而言,由底部至顶部出现Cu(Au)—Zn、Pb、(Ag)—Fe、Mn、Ba和磁黄铁矿—磁铁矿→铁的氧化物的更迭;在矿田范围内几个矿床之间,出现近中心的Cu(Au)矿床至边部的铜锌(银)矿床、重晶石矿床、铁锰氧化物矿床。

(4)喷流岩常与非喷流岩相互迭置,或在水平方向和垂直方向上相互过渡。

当前,对喷流成矿作用和喷流矿床的研究,在宏观上力图弄清喷流矿床产出的大地构造背景和局部地质环境及其对矿床特征的影响,了解此类矿床与其他类型矿床之间的联系。在微观上,探讨下渗循环加热海水及沉积物成岩压实水与流经的岩石矿物之间的水岩反应机理,研究成矿组分的迁移形式和喷流热液与冷海水之间相互作用的细微机制,以阐明控制此类矿床的元素—矿物—矿(岩)石共生组合和分布特征的基本因素。此外,海底喷流形成大面积的初步富集矿质的沉积层和对海洋化学循环的影响等方面也日益引起人们的重视。

#### 参考文献

- 1 Frantalín J M, Sanster D M, Lydon J W, Volcanic associated maeveite sulfide deposits Econ Geol, 1981, 75(0.3): 485~627
- 2 Large D E, Sediment-hosted massive sulphide lead-zinc deposits: An empirical model. In: Sangster D E. Short course in sediment-hosted stratiform lead-zinc deposits Mineral Assoc Canada Victoria, 1983, 1~29
- 3 Rocenbauer R J, Bischoff J L, UpTake and transport of heavy metals by heated seawater, A summary of the experimental results. Hydrothermal processes at seafloor Spreading center
- 4 Talyar B F, Slack J F, Tourmalines from Appalachian—Caledonian massive sulfide deposits; textural, and isotopic relationships Econ Geol, 1984, 49: 1703~1726
- 5 Pollock S G, 1987, chert formation in a ordovician volcanic arc, Journal of sedimentary petrology, 1983, 57(1): 75~84
- 6 Barrett T J, Jambor, J L. Seafloor hydro Thermal mineralization, Canada Mineral, sepc. 1988, 26: 429~888
- 7 Lydon J W, Volcanogenic massive sulphide deposits. Part 2: Genetic models Geosci Canada, 1988, 15: 15~30
- 8 Oberkansli R, Stoffers P, Hydrothermal activity and metalliferous sediments on the oceanfloor Marine Geol, Spec. Issue, 1988, 84: 145~282
- 9 韩发, 哈钦森. R W. 大厂锡—多金属矿床热液喷气沉积的证据——含矿建造及热液沉积岩, 矿床地质, 1989, 8(2): 25~27
- 10 郑明华, 等. 一个海底喷流—后期地下水热液改造成因的 Au—Cu—U—Pt 族矿床的新矿例, 科学通报, 1991, 36(5)

(成都理工大学博士生导师郑明华教授、刘建明教授撰)

**萨布哈成矿作用** sabkha 在地质历史时期和现代,均存在一种特殊的地质—地貌景观;萨布哈环境。在地形起伏极



为平缓的海岸上,由风的作用或潮汐所产生的水流,可以周期性地漫过广阔的海岸区,甚至可以比正常的日潮水位高出数米。此种广阔的潮坪称为潮上坪。倘若当地气候支配了潮上带的地表,例如极端炎热和干旱,纯蒸发率很高,往往会在潮上带的地表形成盐类的堆积。这种被盐类物质所覆盖的地表景观,在中东地区的阿拉伯国家称之为萨布哈(Sabkha)。实际上它指的是中东地区荒无人烟的蒸发岩平原。

20世纪60年代,D. J. Kinsman(1969)曾描述过波斯湾Trucial海岸的萨布哈环境。该萨布哈组成一个线形的海岸带,坡度十分平缓(1/1000),平均厚度约0.6m,宽9.0km。在萨布哈内或其上形成一层“盐壳”,组成矿物有石膏、硬石膏、岩盐、天青石和白云石等。大体同时,G. P. Butler和G. Evans等人对萨布哈的形成和发育,以及萨布哈内的矿物组成作了许多研究。他们认为,贫瘠的萨布哈通过孔隙水中蒸发盐类的沉淀作用和风力的垂向加积作用,以及潮汐流搬运的砂和钙质泥的加积作用,可穿越潮间带的藻类沉积物的边界范围向海洋方向推进,从而在向海一侧和向陆一侧可出现不同特征的矿物堆积。此类矿物是成岩作用的产物,而不是原生的沉积作用的产物。于是人们认识到,成盐作用除一般的蒸发岩盆地在地下水沉积各类盐物质之外,还存在一种很特殊的成盐环境,即萨布哈环境,其成盐作用的沉积界面处于空气中。

进入70年代,对萨布哈环境和在此环境中的成矿作用的认识,有了长足的进步。在波斯湾地区,由于蒸发率高达128cm/a之多,而降雨量平均仅为3.8cm/a(Butler 1969)。因而Hsu和Schneider(1973)提出,这样高的蒸发率必然会导致在萨布哈中形成一种垂向的水动力梯度。由于孔隙水的丧失造成水动力势能向上减小,因而发生了蒸发泵流的作用或泄流作用。先是向侧方然后在垂向上进行“泵流”的泻湖盐水和大陆水,在萨布哈的表面进行泄流。被蒸发的大陆地下水和泻湖盐水的相对数量,取决于二者之间的动力平衡。

1974年,A. R. Renfro对萨布哈的环境做了最为清晰的论述。他指出萨布哈可分为两种,一种称为海岸萨布哈,它与部分封闭的海相邻接;另一种称为大陆萨布哈,它分布于大陆的洼地中。最有利于萨布哈发育的是能引起大量蒸发的极端炎热和干燥的气候条件。就成矿作用而言,海岸萨布哈起主要作用。海岸萨布哈一般是沿着堆积的、后退的海的超潮边缘形成的,向海一侧与半封闭的泻湖交界,向陆地一侧与沙漠交界。由于地下水(海水补给和陆源水补给两种)经过萨布哈蒸发排出,这就形成一个对萨布哈的水力梯度,从而导致来自海水的地下水由海向岸流向萨布哈,陆源地下水则由陆地朝海方向流向萨布哈。在萨布哈外(向海一侧)为潮间泥滩,此种泥滩一般被捕集沉积物的兰绿藻丛所覆盖。在由藻类覆盖的沉积界面之下,由于厌氧细菌的作用,常使被埋藏的藻类腐烂而形成黑色软泥。如果萨布哈朝海的方向推进,潮间藻丛必为蒸发盐类物质所覆盖,而萨布哈的尾端会被退覆的陆相沉积物所掩埋。

A. R. Renfro根据对现代萨布哈的观测和对与蒸发岩有关的金属矿床的野外观测,如德国的含铜页岩,非洲的含铜带,美国密执安的非诺苏安矿床等的观测,认为自然界中有许多重要的金属矿床的形成是与萨布哈的发育与演化有着密切的关系。

由萨布哈作用形成矿床的过程是:(1)开始时需要有一个海侵的过程,在此期间充满 $H_2S$ 的藻丛相必定会向陆地移动超覆于其邻近沙漠的含氧沉积物之上。与此同时,海源地下水把陆源地下水挤向内陆,当沉积物供给和沉降达到平衡时,海侵即行停止,造成了一个初期的萨布哈,直接覆盖在沙漠的陆源碎屑上。(2)当沉积物供给超过沉降速度时,发生海退。随着海退过程使得有“盐壳”的萨布哈越过具强烈还原性的潮间一泻湖有机沉积层的近陆尖灭边缘向盆地推进。与此相应,大陆水补给的地下水同时向海一侧挤退海源地下水。这种含金属和氧的地下水通过地表的强烈蒸发由下而上,通过藻丛淤泥层到达蒸发排泄区,即萨布哈表层。在这一过程中,充满 $H_2S$ 的藻丛层起一种“还原膜”的

作用。那些可穿透此“膜”的成分,如盐类成分穿膜到达地表后即沉积下来形成“盐壳”。而大多数游离的金属,则与 $H_2S$ 相结合形成金属硫化物沉淀下来。显然,此黑色淤泥层中的藻类和细菌起了一种潜在的捕集金属的作用。沉淀的顺序主要依照金属硫化物溶解度的大小,大体沿地下水蒸发流动方向的垂直方向沉淀下来,从而造成一种特殊的矿物斜切分带现象。

由上可见,这是一种在特殊地质环境中发生的一种特殊成矿作用,它依靠的是蒸发泵流作用(Evaporative pumping)。水的流动不是以重力而是以太阳能的作用效应发生高蒸发作用而产生的一种垂向(山下而上)的水动力梯度,这种水动力作用是萨布哈形成金属矿床的核心。

80年代以来,人们对在萨布哈环境中得以形成矿床或工业矿体,提出了需要具备的基本条件:很高的蒸发率,蒸发量远大于降雨量;地下水含有丰富的金属组分;在藻丛沉积层中有足够数量的还原剂;持续不断的萨布哈和潮间带的沉积作用。

此外,人们还总结出由萨布哈成矿模式形成的矿床所具有的基本特点:矿床赋存于较浅的半封闭的泻湖或内陆海岸边的沉积地层中;含矿层岩石为还原性的,一般为层状状的灰色至黑色的页岩、砂岩和白云岩;含矿层之上即上覆岩层为白云岩、石膏和石盐等含盐层,下伏岩层为红色层或其他被氧化的陆相碎屑沉积层。

根据观测表明,萨布哈环境所能存在的时间的长短,取决于是否存在稳定的沉积条件。在Trucial海岸潮间带上部(藻带)和萨布哈的平均为0.7m的沉积物,堆积了大约3500a左右。根据这一观测数据,人们成功地对一些古萨布哈环境和成矿可能性进行了论证。例如意大利、加拿大、美国和德国等地均有巨厚的古老萨布哈沉积,而且其中均有金属矿床的形成。特别是中欧的Zechstein的Mansfeld“含铜页岩”,对其成因曾是长期争论不休的难题。“含铜页岩”指的是产于欧洲许多国家(英国、荷兰、德国、波兰)的晚二迭世的一层薄的海相炭(沥青)质泥灰岩,其覆盖面积达60万 $km^2$ (其中含矿面积约1200 $km^2$ )。在Zechstein盆地的东南部(接近陆地部分),含矿性(Cu、Pb、Zn)为主,其余有Ag、V、Cr、Ni、Mo、Co等)最好;向盆地远端的西北地区,含矿性明显变差。“含铜页岩”中Cu、Pb、Zn的堆积量与海岸的距离有关;Cu主要富集于近岸带,Zn的富集部位距海岸最近;Pb富集部位处于Cu与Zn之间。就沉积层的剖面来看;在“含铜页岩”之上则被白云岩和石膏所覆盖。从而构成了一个典型的萨布哈剖面。这样的地层剖面,显然表明当时所处的环境具有极为炎热、干旱的气候条件。萨布哈成矿作用已成为当前层控矿床理论中的最重要的成矿机制之一。

#### 参考文献

- 1 Butler G P. Modern evaporite deposition and geochemistry of coexisting brines, the Sabkha, Trucial coast, Arabian Gulf. *J Sediment Petrol*, 1969, 39: 70~89.
- 2 Evans G. et al. Stratigraphy and geologic history of the Sabkha, Abu Dhabi, Persian Gulf. *Sedimentology*, 1969, 12 (1/2): 145~159.
- 3 Hsu K J, Schneider J. Progress report on dolomitization - hydrology of Abu Dhabi Sabkha, Arabian Gulf. In: B H Ruscov (ed), *The Persian Gulf*. Springer, New York, 1973, 409~422.
- 4 Renfro A R. Genesis of evaporite-associated metalliferous deposits; a Sabkha process. *Econ Geol*, 1974, 69(1): 33~45.
- 5 Gavish, E. Recent Sabkha margin to the Southern coasts of Sinai, Red sea. In: A Nissenbaum (Ed), *Hypersaline Brines and Evaporitic Environments*. Elsevier, Amsterdam, 1980, 233~251.
- 6 Ali Y A, West I. Relationship of modern gypsum nodules in Sabkha of loess to companions of brines and sediments in northern Egypt. *J Sediment Petrol*, 1983, 53: 1151~1168.

- 7 Reda A. Sedimentological studies of a siliciclastic coastal Sabkha, Bahrah area, north Kuwait. M Sc Thests, Kuwait University, 1986, 256
- 8 Gunatilake A, Shearnan D J. Gypsum—Carbonate laminites in a recent Sabkha, Kuwait (Carbonates Evaporites, 1988, 3: 67~73)
- 9 Gunatilake A. Anhydrite diagenesis in a vegetated Sabkha, Al—khiran, Kuwait. Arakian Gulf Sediment. Geol, 1990, 69:95~116
- 10 郑明华, 萨布哈成矿作用, 层控矿床学, 北京:地质出版社, 1991, 77~82

(成都理工学院博士生导师郑明华教授撰)

### 生物礁环境与成矿 microgenetic bioherm environ-

ment 生物礁至今似乎尚没有一个公认的概念。一般指由具有能造成坚固的抗浪构造本能的生物所形成的一种骨骼碳酸岩。近来,文献中出现的生物丘(Bioherm)、生物层(Biostrome)、碳酸盐岩隆(Carbonate buildup)等,是生物礁的同义词或近义词。此外,在中国震旦纪地层中广泛出现一种形态特殊的沉积碳酸岩,被中国学者称为“藻碳酸盐岩”,它是藻类生长和新陈代谢过程,捕集、沉淀和粘合碳酸盐而成的一种生物沉积构造—叠层石(Stromatolite)。叠层石在现代环境中的生成已被认识,倘若人们对现代叠层石形成环境的认识也适用于古代,那么藻碳酸盐岩无疑可以当作一种生物礁看待。又由于叠层石代替生物硬体起抗浪的骨骼的作用,故通常又称为“叠层石礁”。

生物礁不仅具有重要的指相意义,更为重要的是生物礁及其所在环境的控矿意义。

首先确认与生物礁环境有关的矿床当推石油和天然气。早在20世纪50年代,由于预见到沉积碳酸盐岩对油气可能具有的重要意义,美国石油地质学家协会设置了专门的机构,把对古代沉积层的研究与对现代海洋沉积作用的研究结合起来。到目前为止,全球已发现生物礁型大油田数十个。

进入60年代,人们对生物礁的控矿研究,由石油、天然气逐渐扩展到金属矿床特别是贱金属矿床方面,如Garlick(1964)指出,生物礁特别是聚环藻式叠层石组成的生物岩礁,不仅可作为石油的圈闭,而且能特别有利于后生矿化的就位,他以赞比亚铜带、扎伊尔加丹加、澳大利亚 Katherine—Darwin, Mount Isa 等地铜、铅、锌矿床作为实例进行了广泛的论证。

70~80年代,生物礁控矿现象更引起矿床学家们的广泛兴趣和注意。许多产在礁体内的矿床被发现,如著名的密西西比铅锌矿床、加拿大派因·波因特铅锌矿床、欧洲阿尔卑斯铅锌矿床等。在中国,一些重要的铅锌矿也证明与生物礁有关,如广东凡口铅锌矿、广西北山铅锌矿等。由于认识到生物礁对Pb—Zn矿床的成因意义,世界各地相继发现了一大批层控型铅锌矿床,对铅锌储量的急剧增长起了重要的作用。

进入80年代以后,人们对一些似乎已有定论的矿床(指成因),经研究后证明与生物礁有关或与生物作用有关。中国著名的庞家堡铁矿,一直被认为是胶体化学沉积成因,现证明组成庞家堡矿床主要矿石(肾状构造)乃是一种铁叠层石,因而铁矿层可视为生物层或生物丘。中国云南东川铜矿中的“马尾丝状构造”矿石,传统认为是热液充填交代微构造裂隙而成,现已证明乃是一种铜叠层石。许多现代礁岛中发育有铝土矿,如所罗门群岛的伦纳尔环礁和贝洛纳环礁,洛亚尔提群岛的乌韦阿、利富等环礁以及一些古代铝土矿都是以生物礁灰岩为基底发育起来的。中国西南地区的沉积磷矿床,有些(如开阳磷矿)本身具有清楚的藻礁结构,成为板状、柱状、锥状等多种形态的磷质叠层石。在黔中陡山沱组磷块岩中还发现富磷的磷质叠层石。

当前,尽管生物礁的自身概念存在狭义的理解和广义的理解,但生物礁及其周围环境控制沉积层控矿床的形成却是公认的。生物礁及其周围环境控制成矿,至少表现在以下3个方面:

(1)吸收和聚集矿质,形成矿源岩(层) 据近代海洋碳酸盐沉积和环境保护的研究表明,某些造礁生物尤其一些低等生物(如藻类)可以从海水中“捕捉”各种金属,从而使礁灰岩初步富集某些金属成矿物质。N. L. Gale等进行的一项研究证明,丝状蓝绿藻可在含Pb<0.2mg/L的水里,把Pb富集到超过1000ppm左右。J. D. Milliman对若干海生动物的碳酸盐硬体的测定表明,它们对许多元素的浓集系数极大,如软体动物文石质碳酸盐中的Pb达4200~6700;方解石质碳酸盐中,Fe可达450(苔藓虫)、Pb可达600(瓣鳃类)和300(腔肠动物)Zn可达2100(节肢动物)和800(棘皮动物)。上述海生动物均是造礁或喜礁的。

由礁灰岩中初步富集的金属和成矿组分,随着沉积盆地的沉降,经过成岩、后生和变质作用,在各演化阶段都有溶化和迁移的可能,并可在特定的条件下成矿。

(2)生物礁起隔挡作用,造成礁后的成矿环境(停滞还原环境) 生物礁一般生长在浅海处,是在一种浅水环境并有充足氧气的条件下形成的。礁体向海一侧为礁前,因经常受到强烈的波浪冲刷,堆积的多是礁体破碎的产物,一般不易发生有用物质的堆积。礁体向陆一侧或向泻湖一侧为礁后,礁后环境因受生物礁体的隔挡,特别是堤礁的隔挡,常造成闭塞的泻湖盆地及礁后沉积物。在一些礁后环境中,由于强烈的蒸发作用可沉淀出蒸发岩和形成盐类矿床,如炎热和干旱的气候条件下多有石膏、石盐和钾盐矿床的形成。在另一些礁后环境中,除了海洋生物和藻类以及海水碳酸盐沉积外,还接受来自大陆的碎屑物质和金属离子。这些成矿金属进入礁后环境后,在相对闭塞的、富含有机质和相对还原的条件下,往往与沉积层(淤泥层)中的H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>等发生化学反应,导致金属硫化物的沉淀,形成同生矿床。Garlick曾对著名的赞比亚铜带做过详尽的论述,赞比亚铜带中生物礁十分发育,可是这些生物礁本身并不含铜,铜矿化仅赋存于生物礁体的礁后沉积层和礁体之间的泥灰岩层中。这些含矿层均富含H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>等成分,当溶解的Cu、Fe等金属被河水带入沉积盆地后,在较浅的近岸部位,受到骚扰的氧化带中,一般难以形成铜的硫化物矿物。只有当金属进入稍深的、有足够的由厌氧细菌产生的H<sub>2</sub>S的还原带时,才有可能发生金属硫化物的沉淀。因此,当生物岩礁自身不含矿,而其邻近的显然不大有利于后生矿化作用的岩层却有广泛的层状矿化,无疑这类矿石是同生的。这种同生矿床与生物礁控制的环境关系当然十分密切。

(3)生物礁起圈闭构造的作用,成为储矿岩,对后生矿化特别有利 在这方面最先被重视的是生物岩礁对石油和天然气的贮存。由于生物礁往往是同时代沉积物的“构造高点”(生物礁由于不断向上生长可抵偿地壳下沉陷下;其生长较同期地壳的沉积速度快;后期固结压缩过程由于造礁生物硬体的支撑,其压缩程度要比周围沉积物小等原因,常造成以礁为核心的隆起或背斜构造),生物礁内的生物骨骼具有极多的孔隙,粒间孔隙也很发育,此外,在成岩中常发生白云石化,又可使礁体的孔隙大大增多,加之长期的溶解又可形成许多新的孔隙,所有这些都对油气的流通和储集极为有利,尤其是生物岩礁向周围即相变为渗透性的非礁沉积岩,当油气沿盆地斜坡侧向往上运移时,必选择礁体就位,从而受到圈闭进而聚集起来,生物礁就成为一种非常有效的“油捕”(Oil trap)。加拿大阿尔伯达上泥盆统比弗西尔胡组天鹅丘段生物礁储油,是最著名和最典型的事例之一。

生物礁的“油捕”原理,已成功地应用到金属层控矿床的成因解释中,并引伸为一种有效的“矿捕”(Ore trap)。斯坦屯(Stanton, 1972)、戴维斯(Davis, 1977)等人均指出,密西西比式铅锌矿床,大多产生在碳酸盐岩层中,这些岩层中均有生物礁存在,金属矿化均赋存于礁组合的一定地段,一般多在礁核或礁前中。现已查明,这是由于含Pb、Zn等金属的地下卤水,经过运移进入生物礁体内通过充填和交代而成矿的,其原理与油气的运移和油田的形成原理是类似的。这是一种后生矿化的就位。“矿捕”作用已成为当前层控矿床形成的主要机制之一。

综上所述,礁体及礁环境不仅对控制油气田的形成具有重要意义,而且对层控金属矿床的形成也具有极为重要的意义。礁体与层控矿化的关系还常表现出在不同的亚相中选择性地富集一定的矿物组合。如在礁核和礁体附近的生物碎屑碳酸盐岩中主要含Pb;礁后碳酸盐岩中含Fe、Mn、Pb、Zn。从陆架到礁体,矿化顺序为:Fe、Mn、Pb→Fe、Mn→Pb、Zn→Zn、Pb,其变化趋势十分显然。就时代而言,与礁环境有关的矿床从前寒武纪到白垩纪均有发现。岩礁性质表现为:前寒武纪和寒武纪为白云质岩石;泥盆系、三叠系和下侏罗统中为白云质和钙质岩石;时代更新的为钙质岩石。常见的矿种中,铜矿常见于寒武纪和前寒武纪的礁体中,而Zn和Pb矿则多见于时代较新的生物礁体内。

#### 参考文献

- 1 Anderson G M. Precipitation of Mississippi Vally Type ores. *Econ Geol*, 1975, 70: 937~942
- 2 Beales F W. Precipitation mechanism for Mississippit Vally type ore deposits. *Econ Geol*, 1975, 70: 943~948
- 3 Babe L, Zuponic J. Various Pore Type in a Paleocene reef, Banga Yugoslavia. In Toomey, D F (ed.), *European fossil reef models*. Soc Econ palcontal. Mineral. spec publ, 1981, 30: 473~483
- 4 James N P. Reef environment. In Scholle, P A et al. (eds), *Carbonate depositional environments*. Am Assoc pet Geol, Mem, 1983, 33: 346~440
- 5 Chappell J. Sealevel changes and reef growth. In Barnes, D J (ed), *perspective on coral reefs*. Australian Institute of Marine science, Townsville, and Brian cloustor, Canberra, Australia, 1983, 46~53
- 6 Sheehan P H. Reefs are not so different—They follow the evolutionary paffern of level — boffom communitues. *Geology*, 1985, 13: 46~49
- 7 Fagerstrom J A. The Evolution of Reef communitues. A wiley — Interscience publication. New York — Toronto — singapore, 1987
- 8 Hayes T S, palmer J R. et al. ,Correlation of hydrothermal dolomite generations across the Mississippi Vally — type mineralizing system of the Oyarck region; U S Geol, Survey open — File Dept, 1989, 89~169; 12~13
- 9 Tucker M E, et al. Carbonate platforms; Facies, Evaluation and sequences. *Int Ass Sedim Spec publ*, 1990, 328
- 10 John G V, et al. Variation in Minor and trace metals in sphalerite from Mississippe valley — type deposits of the Oyarle Region; Genetic Implicatiuous. *Econ Geol*, 1992, 87, 1897~1905

(成都理工学院博士生导师郑明华教授撰)

**交代成矿作用** 交代作用在自然界十分普遍,无论在岩浆作用、变质作用或沉积作用过程中,均伴有不同程度和不同形式的交代作用,形成各类交代—蚀变岩。交代作用和内生成矿作用关系尤为密切,不但许多内生矿床主要是以交代的方式形成的,而且经常伴生有广泛的围岩蚀变现象。这些交代—蚀变岩石,与矿体关系十分密切,且其分布大多远远超出矿化的范围,因此,往往可作为重要的找矿标志。随着地质工作的深入,地表露头矿大多已被发现,不少矿点也进行过多次反复的评价,今后找矿工作的主要方向将是不同深度的隐伏矿体,找矿难度愈来愈大。因而在地表以下内生矿的预测工作中,作为找矿标志的近矿交代岩的研究,具有重要意义。深入研究交代岩,还可直接揭示热液系统的物理化学特征和成矿机理。

交代成矿作用的研究主要始于20世纪初期。林格伦(1922、1933)认为,“交代作用实际上是一种同时发生的毛细管的溶解和沉淀作用。其结果,化学成分部分或完全不同的新矿物可以在

老矿物或矿物群的位置上生长”。戈尔德施特(1922)则认为“交代作用是一种从外界带入新物质的岩石改造作用”。根据岩石中加入物质(元素)的不同,他把交代作用分为:碱质、硅质、钙质、镁质、铁质、氟—氟—硼质、硫酸质以及水和二氧化碳的交代作用……等。

交代建造及含矿性的研究是交代成矿作用的核心。60年代初前苏联学者就很重视对交代建造的研究。交代建造是交代相的总和,形成于相似的地质条件和同一个成矿作用。同一个交代建造在矿物组成、分带性、形成温度、深度、溶液性质和原岩成分方面具有共性,但也有某些差别,一定的交代建造伴有一定的矿化,这就是交代岩的含矿性。以往文献中常见的交代建造及其可能伴生的矿化有:镁砂卡岩(Fe、Cu、Zn、Sn、Mo、B、Be),钙砂卡岩(Fe、Cu、Zn、Pb、W、Sn、Mo、Bi、Ag),云英岩(W、Sn、Be、Mo、Li),电英岩(W、Sn、Cu),条纹岩(Be、Sn、Fe),次生石英岩(刚玉; Au、Ag; Cu、Pb、Zn; Mo),绢英岩或黄铁矿绢英岩(Cu、Mo; Au、As; Pb、Zn),青盘岩(Ag、Au; Hg、Sb、As; Cu、Pb、Zn),泥化岩(Au、Ag; U; Cu; Pb、Zn)……等。

胡受翼(1980)曾对各种蚀变岩石的特征,作了较系统的显微镜下岩石薄片研究。陈毓川等(1982)对玢岩铁矿的矿化蚀变作用作了较深入的研究。扎里科夫等(1978)和赵一鸣(1986)对交代岩进行了较全面的分类,并对其含矿性作了探讨。赵一鸣等(1986、1990、1991)通过对中国福建、辽宁、内蒙等地砂卡岩铅锌矿床的系统研究,还提出了一个新的交代建造,即锰质砂卡岩。它主要由锰钙辉石、锰钙铁辉石、钙蔷薇辉石、蔷薇辉石、锰铝榴石和锰硅石榴石等锰(钙)质硅酸盐矿物所组成,常伴生Pb、Zn(Ag)矿化。其形成条件也和钙砂卡岩、镁砂卡岩等有明显的差别。

交代系列是赵一鸣等(1986、1990)提出的一个新的概念。这是考虑到在一个矿床或成矿区内,由于成岩成矿地质背景的差异和热流体演化的不同,常形成两个或更多的含矿交代建造,它们在时空成因上相互之间有密切的内在联系,因而,可以组成一个交代系列。交代系列的提出,把不同含矿交代建造,有机地结合起来进行综合分析,作为一个统一的成岩成矿过程中的不同交代产物来研究,将有助于全面地进行交代矿床的评价。

交代岩和矿石矿物共生组合分析,是研究交代成矿作用的重要方法之一,主要用相图的形式阐明岩石和矿石的矿物成分与其形成的不同物理化学条件之间的关系。以往岩石学家们仅把相图应用于变质岩。前苏联柯尔斯基(1936、1957)提出了具有完全活动组分系统的理论,将吉布斯相律和施林纳玛克斯法则成功地引入开放系统交代岩的研究,并在多体系相图的构筑方法上有所创新,使从温度和压力为座标的相图扩大到以完全活动组分学位作为座标的图解。

目前,愈来愈多的岩石学家和矿床学家正在用这种方法来研究开放体系的岩石和矿床的形成物理化学条件。在美国,以赫尔杰森为代表的一部分学者,用不可逆过程热力学建立各种交代作用过程的定量模型,把相图的构筑从定性转向定量。

交代岩矿物共生组合研究的另一进展,是通过交代岩共生矿物对之间类质同像组分的分配关系的研究,建立了一些交代矿物的地质温度计、压力计和酸度计等。根据扎里柯夫(1968)的研究,认为“共生的辉石—石榴石含铁率比值的高低,主要决定于溶液的酸度和氧化还原条件”。在此基础上,林文蔚(1990)通过热力学计算,进一步提出了辉石—石榴石矿物对的酸度计和氧逸度计。扎里柯夫(1968)还提出,共生方柱石与斜长石的成分和形成的地质深度差有明显的依从关系,从而有可能建立地质压力计。阿拉诺维奇(1975)通过实验研究,提出了石榴石—绿帘石地质温度计。

有关交代岩和交代成矿作用的实验研究,多年来进展较大。早在60年代,奥夫契尼柯夫等(1962、1964)对接触交代成矿作用中金属物质的活化、迁移和富集进行了实验研究。他们模拟岩浆岩(辉绿岩、花岗岩等)和灰岩之间的接触反应作用,采用开放

体系的流动实验装置,获得了较好的结果,发现铁、铜、硅、铝等元素在高温水蒸汽作用下从岩浆岩中活化向灰岩方向迁移,并在灰岩接触处有较大富集现象。加里宁(1969)曾对一些重要的砂卡岩矿物如辉石、石榴石等的生成环境进行了广泛的实验。查拉依茨基等(1984,1989)对交代岩的分带进行了系统的实验模拟,包括石英—长石交代岩、云英岩、次生石英岩、黄铁绢英岩、青盘岩、泥化岩、电英岩和双交代砂卡岩,特别是对双交代砂卡岩的实验,在各种  $T$ 、 $X_{CO_2}$ 、 $H^+$  浓度和溶液成分以及 550~800°C 的温度条件下,在花岗岩长岩类与灰岩、白云岩接触带获得了 520 个双交代砂卡岩分带。他指出,  $Al_2O_3$  的迁移只是在温度高于 800°C 时才发生。

70 年代以来,交代岩和成矿关系的研究已成为地质学的一个独立分支学科。特别是在前苏联,从 1963 年开始,曾在列宁格勒先后召开过 6 次全苏“交代作用和成矿作用”的学术讨论会。研究内容包括各类交代建造及其含矿性、交代岩矿物共生组合分析、交代分带、成岩成矿实验等。近几年来,国外对交代作用的研究进一步扩展到地幔交代作用(索洛夫也娃等,1984;柯加利科等,1989)和前寒武纪的交代岩及其含矿性。为了使理论研究和找矿实践相结合,还开展了大中比例尺的交代岩地质填图和成矿预测等方面的工作。

当前交代岩研究的热点主要表现在:(1)对一些特殊含矿交代建造(如前寒武纪交代建造,地幔岩的交代作用等)进行深入研究,填补某些空白;(2)用交代系列的理论,从交代成矿用演化整体来研究各类交代建造;(3)除了常规的矿物、岩石、地球化学方法外,加强对交代岩的稳定同位素、同位素测年和流体包裹体地球化学的研究,来探讨成岩成矿的时代和交代作用过程中矿质的活化、迁移和富集规律,揭示交代矿床的形成机理;(4)加强在大一中比例尺地质填图时交代—蚀变岩的研究,为寻找隐伏矿床(体)提供重要信息;(5)进行在流动开放体系中的水—岩反应实验研究。

#### 参考文献

- 1 Жариков В А, Омел'яненко Т П, Классификация метасоматитов В кн. Метасоматизм и рудообразование М. Наука, 1978, 9~28
- 2 赵一鸣,等. 国际交流地质学术论文集(4). 北京:地质出版社, 1985, 229~239
- 3 赵一鸣. 矿床地质, 1986, 5(4), 1~13
- 4 林文蔚,等. 矿床地质, 1990, 9(3), 195~207
- 5 胡受奚. 交代蚀变岩岩相学. 北京:地质出版社, 1990
- 6 赵一鸣,等. 中国砂卡岩矿床. 北京:地质出版社, 1990, 354
- 7 Zhao Yiming. Skarns — their genesis and metallogeny Theoprastus Publications S A. Athens, Greece, 1991, 165~180

(中国地质科学院矿床地质研究所博士生导师赵一鸣撰)

### 热液对流循环系统 hydrothermal system of convective

circulation 指渗流的热液当运动到一定的深度,由于受热并在以下地质因素影响下会返回地表,遇到较深部的排放系统,如断裂和破火山机构等;遇到热交换体;遇到地震泵;到达一定的地质界面等。

岩浆铜矿床的对流循环系统 20 世纪 60 年代,随着稳定同位素和流体包裹体测定技术的发展,岩浆水和天水的对流循环模式相继提出(Lowell & Guilbert, 1970; Sillitoe, 1973; Fournier, 1967; Norton, 1977, 1978) 1982; 任启江, 1977, 1989; 芮宗瑶, 1984)。高侵位的花岗质斑岩体,一方面接受深部岩浆房分馏出来的高温(600~900°C)蒸汽(Steam plume),同时作为一部热机,将斑岩体周围淋滤天水不断加热,加热的天水与岩浆水通过对流循环形成混合热液,由此形成斑岩矿床成矿系统。

层状矿床的对流循环系统 1974 年任弗罗提出了著名的萨布哈成矿理论,他认为与蒸发岩有关的层状金属矿床形成于海岸萨布哈带。这里气候干燥炎热,蒸发量极大。在海滩生长着大量

的蓝绿藻并有细菌滋生繁殖,在藻席之下为黑色软泥,并散发  $H_2S$  ( $H_2S$  为极好的贱金属还原剂)。蒸发泵流(evaporative pumping)引起海水和天水的强烈补给,将大量贱金属和贵金属源源不断地带到黑色软泥地带堆积,由此形成层状金属矿床。

Sedex 和 Volex 矿床的对流循环系统 1980 年哈钦森等为沉积岩矿床中的喷气矿床(Sedex)和火山岩矿床中的喷气矿床(Volex)制定了对流循环模式。哈钦森等认为在海水向下流入的过程,会发生  $SO_4^{2-}$  被二价铁硅酸盐还原,贱金属从二价铁硅酸盐和其他硅酸盐结构中淋滤出来,形成金属络合物形式迁移。在较深部由  $H_2O$  和  $CO_2$  与二价铁硅酸盐作用分别形成  $H_2$  和  $C$ , 使流体变得更加还原了。由于岩浆房的加热,海水密度变小,海水由向下循环转为向上循环。由于  $C$  和  $H_2$  结合形成一系列碳氢化合物如  $CH_4$ 、 $C_2H_6$  等,流体变成强烈还原的高盐度流体,在排放系统中可造成蚀变和沉淀出细脉—浸染状金属硫化物。还由于排放口系统中压力突然释放,热流体发生沸腾,蒸气爆发可形成角砾岩,由此最终形成 Sedex 型和 Volex 型块状硫化物矿床。

大多数地质学家都意识到,热液对流循环系统是大型和超大型热液矿床生成的必要条件,而且对流循环体制要保持长期(10~50Ma 以上)稳定。目前该问题的研究热点主要为:(1)HHP (high-heat producing)花岗岩是否是 Sedex 矿床生成的必要条件;(2)岩浆水、天水和海水在对流循环中的功能;(3)该系统的分类、作用过程和贡献。

#### 参考文献

- 1 Lowell J D, Guilbert J M. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. Econ Geol, 1970, 65: 373~408
  - 2 Renfro A R. Genesis of evaporite — associated stratiform metalliferous deposits — a sabkha process. Econ Geol, 1974, 69: 33~45
  - 3 Hutchinson P W, Fyff W S, Kerrich R. Deep fluid penetration and ore deposition. Minerals Science and Engineering, 1980, 12(3): 107~120
  - 4 Solomon M, Meinrich C A. Are high — heat producing granites essential to the origin of giant lead — zinc deposits at Mount Isa and McArthur River, Australia. Explor Mining Geology, 1992, (1): 85~91
- (地矿部矿床地质研究所芮宗瑶研究员、张洪涛副研究员撰)

热液蚀变分带 zoning of hydrothermal alteration 指当蚀变岩石与热液溶液发生反应时,其化学成分和矿物成分常常发生带状变化。这种变化反映出热流体的成分和物理—化学状态(温度、 $H^+$  浓度、Eh、压力等)随着时间或与岩石反应的程度而变化。在某些情况下可以产生单矿物带,但在另一些情况下新生矿物相只是选择性交代被蚀变岩石中的某些矿物,而对其他矿物则相对不发生交代。

热液蚀变分带是热液矿床和受热水溶液作用地区的普遍现象,研究这种现象对于认识许多金属矿床和非金属矿床的地质特征,制定找矿评价准则具有十分重要的意义;同时对于认识岩浆侵入区、火山喷发区、海底以及大陆天水活动区的热液活动规律也具有十分重要的意义。

砂卡岩矿床的蚀变分带 该蚀变分带是热液蚀变分带中认识最早和研究最详细的对象之一。早在 1864 年柯塔(Kotta)就研究了匈牙利巴纳特铁多金属矿床的砂卡岩;1875 年焦瑟邦(Tornebohm)将瑞典 Norborg 铁矿床的辉石—石榴石称之为砂卡岩;1938 年皮利宾科较详细地研究了砂卡岩的分带性与矿化的关系;柯尔仁斯基(1945, 1947, 1948, 1955)提出了砂卡岩分带的交代理论,他认为砂卡岩的生成是由两种化学性质不平衡的介质——碳酸盐岩石和铝硅酸盐岩石在高温岩浆期后溶液作用下,通过双交代作用和淋滤交代作用形成的;扎里柯夫(1968)研究了钙砂卡岩和镁砂卡岩组成的地质环境和物理化学条件;沙贝

宁(1981)针对前苏联许多砂卡岩矿床的地质特征,认为相当一部分钙砂卡岩是由镁砂卡岩改造而成;赵一鸣等(1964, 1981, 1982, 1990)研究了中国砂卡岩矿床分类、交代系列和交代分带,以云南个旧锡多金属矿床为例划分了镁砂卡岩分带(由花岗岩到白云质岩);钾长石交代岩→方柱石砂卡岩→透闪石化透辉石砂卡岩→粒硅镁石砂卡岩,以大冶铁山铁(铜)矿为例划分了钙砂卡岩分带(由闪长岩到大理岩);透辉石化钠长石闪长岩→强透辉石化方柱石化和钠长石闪长岩→石榴石透辉石方柱石砂卡岩→次透辉石金云母砂卡岩。

**斑岩矿床的蚀变分带** 1970年洛维尔(Lowell)和吉尔伯特(Guilbert)提出了斑岩铜矿床的侧向和垂直的蚀变分带,以斑岩体为中心向外扩展,中心带为钾硅酸岩带(黑云母和钾长石化),向外钾质带逐渐被绢英岩化带(绢云母和石英化)代替,再向外青盘岩化带(绿帘石、绿泥石和碳酸盐化),在钾质带和绢英岩化带还可以叠加中-深度泥英岩化带。芮宗瑶等(1980, 1982, 1984)研究了中国斑岩铜(钼)矿床的蚀变分带,认为由于斑岩体多次侵入,斑岩体周围的裂隙发育程度和岩石渗透率不同,岩浆水和天水对循环的差异等,使斑岩矿床的蚀变分带形式呈现多样性。

**矽岩铁矿床的蚀变分带** 1977年陈毓川等总结了宁芜矽岩铁矿床的蚀变分带(由上而下):上部浅色蚀变带(高岭石-明矾石-水云母-石英化)、中部深色蚀变带(纤磷钠长石-纤闪石-绿泥石-钠长石-更长石-绿帘石化和辉石-石榴石-方柱石-钠长石化)、下部浅色蚀变带(钠长石-更长石化和局部钾长石-钠长石化)。

**云英岩型矿床的蚀变分带** 袁忠信(1958)、胡受翼(1962)和季寿元总结了这类矿床的蚀变分带(由下而上)为:钾长石和钠长石交代带→云英岩化带→似伟晶岩化带→石英壳。

**浅成热液矿床的蚀变分带** 拉马哈夏(Raymahashay, 1968)、怀特(White, 1971)等将浅成热液矿床的蚀变作用与温泉作用联系起来,认为靠近地表的水流体是酸性的,含有较高的 $SO_4^{2-}/Cl^-$ 、 $Fe^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 和较低的 $Na^+$ 和 $K^+$ ;在潜水面以下的水流体接近中性或弱碱性,含有较高的 $Cl^-$ 。1989年芮宗瑶等研究吉林五凤金矿床划分了以下蚀变带(由下而上):地表硅帽→浊沸石-青盘岩化带→碳酸盐-冰长石化带→绢英岩带。1991年张德全等研究福建紫金山铜矿床划分了4个蚀变带(由上而下):硅化带→石英-迪开石化带→石英-明矾石化带→绢英岩化带。

20世纪70年代,热液蚀变分带研究由野外定性描述转入室内定量实验和计算机模拟研究(Montoya and Hemley, 1975; Fletcher and Hofman, 1974; Frantz and Weisbrod, 1974; Helgeson, 1968; Brady, 1975)。例如,通过一个500°C的KCl浓度增加的多孔叶腊石-石英岩石的流体体系,反应会自发地朝白云母+石英共生相和钾长母+石英共生相发展。

目前,热液蚀变分带研究的热点为:(1)流动体系的化学动力学研究;(2)地热泉的蚀变分带与贵金属富集关系;(3)岩浆水、海水和天水不同比例混合作用及对流循环;(4)地幔射气作用。

#### 参考文献

- 1 Einaudi M T, Meinert L D, Newberry R J. Skarn deposits. *Econ. Geol.*, 1981, 317~381
- 2 芮宗瑶, 黄崇珂, 等. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京:地质出版社, 1984. 1~350.
- 3 赵一鸣, 林文蔚, 等. 中国砂卡岩矿床. 北京:地质出版社, 1990. 1~354
- 4 张德全, 李大新, 等. 地质论评, 1991, 37(6): 481~491

(地矿部矿床地质研究所芮宗瑶研究员、张洪涛副研究员撰)

**中国非金属矿床成矿系列** minerogenetic series of nonmetallic mineral deposit in China 成矿系列是指受成矿地

质背景的控制,在特定的构造环境中成因上相关或有联系的几种矿床的有规律的伴生共生组合。成矿系列又称矿床系列。中国非金属矿产丰富,已开发的非金属矿床按矿物学和岩石学分类原则统计有109种,它们常构成各种非金属矿床成矿系列,且其形成规律与金属矿床成矿系列相比有较大差别。对中国非金属矿床成矿系列的研究,实质上是在非金属矿床学领域中将对单个矿床或矿种的研究提高到去研究它们在各种非金属矿床群体中的形成和分布规律。这方面的研究必然会推动矿床成因类型和含矿建造的研究,完善各种非金属矿床的成矿模式,丰富非金属矿床学理论,并为有目标、有规划地在各地区寻找所需的非金属矿床资源,为综合勘查、综合开发共生伴生的非金属矿产资源指出方向。

程裕祺、陈毓川等于1979年提出了成矿系列的定义,阐述了研究结果。其研究基本上侧重于金属矿床,对非金属矿床的共生伴生规律未能全面概括,但论文对中国非金属矿床成矿系列的研究是有启迪作用的。刘志贤等(1984)对吉林九台早白垩世昔营组火山岩系中的非金属矿床成矿系列的研究,陈鹤年等(1986, 1988)对中国东部中生代火山岩区非金属矿床成矿系列的研究,是对中国某一地区的非金属矿床成矿系列的最早的研究。陶维屏(1987, 1988)从成矿构造环境的角度研究了控制非金属矿化的中国古板块演化背景,研究了不同地质时期各种构造环境中各种岩系里的非金属矿床形成和分布规律,为中国非金属矿床成矿系列的全面研究进行了基础准备。

1989年,陶维屏在第28届国际地质大会和《地质学报》上发表了论文“中国非金属矿床的成矿系列”,提出了以下研究结果:(1)对非金属矿床而言,一个成矿系列中形成各种矿床的成矿物质有同源的,也有不同源的,成矿作用可能是一种,也可能是2种以上迭加或规律地顺序发生,但是这种不同成矿物质和成矿作用的出现,必须有一定规律。特定的成矿系列发生于一定的地质背景中,而各种地质背景总是受构造环境控制的。构造环境不仅是指一个地区某一时期的大地构造属性,而是指这一地区地壳演化的全过程,这就包含了时间的概念。非金属矿实质是一些工业能利用的矿物和岩石,有的以后又经变质、蚀变、风化、破碎后再沉积、成岩等等作用,其中一部分形成新的或另一种非金属矿。由于不同成矿作用的先后发生,受地质背景控制常是有规律的,因而才能形成具有一定程度的普遍意义的几种非金属矿床的规律共生和伴生。因为形成一个成矿系列的成矿物质来源、矿化过程、成矿后的保存和改造都是有一定规律的,这种矿床的共生伴生组合就必然在四维空间显示出其相应的赋存规律。(2)根据非金属矿床的成矿特点,非金属矿床成矿系列可以定义为:由于成矿物或矿化途径的相关和联系(可以是同源的,也可以是不同源的),在一定的构造环境中,受一定的成矿作用的组合控制,因成矿微环境的差异(如温度、压力、介质等等的细微变化)或控矿因素发生变化,在某一成矿带(成矿区)中同时生成或不同时但先后顺序生成而规律地相伴分布的几种非金属矿床的特定组合。(3)控制成矿系列形成的地质环境,真实地被记录于含矿建造中,而有规律地先后发生的成矿作用又是形成一个成矿系列中各种非金属矿床的必要条件,它们可以揭示矿床共生伴生组合的内在联系,所以非金属矿床成矿系列应以含矿建造与成矿作用来分类和命名,并据当时的资料划分出13个中国非金属矿床成矿系列。(4)中国非金属矿床成矿系列的形成模式有元素组合的顺次富集、成矿微环境改变、不同成矿物质与成矿条件的有序提供、成矿作用的规律伴生、母岩的规律伴生等5种。

在上述基础上,中国非金属矿床勘查部门从1989年开始进一步组织了对中国非金属矿床成矿系列的专题研究,从地壳演化、成矿构造环境、含矿建造、矿床成因类型入手,研究各种非金属矿床在四维空间上的共生伴生及分布规律,并于1991年根据研究结果划分出31个中国非金属矿床成矿系列:霞石+霞石正长岩建造岩浆蚀变风化成矿系列(霞石+霞石正长岩+钾长石+刚玉+高岭土);碱性超基性岩碳酸岩建造岩浆蚀变风化成矿系列(透辉石+磷灰石+金云母+蛭石);花岗岩建造岩浆蚀变风

化成矿系列(花岗岩+石墨+长石+高岭土+石英+萤石+重晶石+锆石砂矿);花岗伟晶岩建造伟晶岩风化化成矿系列(水晶+长石+绿柱石+电气石+天河石+高岭土);酸性脉岩建造岩浆风化化成矿系列(瓷石+高岭土);酸性熔岩建造喷溢水解成矿系列(珍珠岩+沸石+膨润土);酸性凝灰岩建造蚀变成矿系列(硫+刚玉+萤石+红柱石+玛瑙+黄铁矿+明矾石+叶蜡石+高岭土+金红石+伊利石);中性火山岩建造蚀变风化沉积成矿系列(硫+黄铁矿+硬石膏+玛瑙+叶蜡石+高岭土+明矾石+天青石+膨润土);金伯利岩建造岩浆成矿系列(金刚石+石榴子石);超基性岩建造岩浆蚀变成矿系列(石棉+蛇纹石+石榴子石+橄榄石+滑石+菱镁矿+水镁矿+皂石+金红石);基性岩建造岩浆成矿系列(辉长岩+辉绿岩);细碧角斑岩建造蚀变成矿系列(黄铁矿+蓝石棉);玄武岩建造喷发风化沉积成矿系列(玄武岩+浮石和火山灰+石榴子石+尖晶石+贵橄榄石+蛋白石+刚玉+膨润土+凹凸棒石+铝土矿+硅藻土);海相硅质岩碳质岩建造沉积成矿系列(重晶石+毒重石+绿松石+磷);海相硅质岩硅质页岩碳酸盐岩建造沉积风化成矿系列(硫+黄铁矿+海泡石+滑石粘土+高硅土+磷);海相碳酸盐岩硫酸盐岩建造沉积成矿系列(灰岩+白云岩+石膏+杂卤石+天青石);海相碎屑岩碳酸盐岩建造沉积成矿系列(石膏+磷+雄黄雌黄+皂石);滨海相含煤碎屑岩建造沉积成矿系列(黄铁矿+铝土矿+高岭土+累托石);陆相含煤碎屑岩建造沉积成矿系列(黄铁矿+高岭土+膨润土);湖相含盐碎屑岩建造沉积成矿系列(硫+石膏+芒硝+岩盐+天然碱);第四纪盐湖盐类建造蒸发成矿系列(石膏+芒硝+岩盐+钾盐+天然碱+硼+卤水);夕卡岩大理岩建造沉积接触变质成矿系列(石榴子石+透闪石+透辉石+硅灰石+金云母+蛭石+大理石+硬石膏+硼+水晶+黄铁矿+蓝石棉+水镁石);角岩建造接触变质成矿系列(红柱石+石墨半石墨);脉石英建造接触变质或区域变质热液充填成矿系列(脉石英+萤石+重晶石+毒重石);葡萄石相绿纤石相板岩片岩建造区域变质成矿系列(矽石+板岩);绿片岩相千枚岩片岩石英岩建造区域变质成矿系列(石墨+蓝晶石+磷+石英岩);绿片岩相角闪岩相片岩变粒岩镁质碳酸盐岩建造区域变质成矿系列(滑石+菱镁矿+透闪石+透辉石+水镁石+蛇纹石+硼+纤维状海泡石+绿泥石+石棉);角闪岩相麻粒岩相片岩变粒岩片麻岩建造区域变质成矿系列(石墨+石榴子石+刚玉+蓝晶石+红柱石+夕线石+黄玉+石英岩+金红石+浅粒岩);混合岩建造混合岩化成矿系列(石墨+碎云母+花岗岩);混合岩化伟晶岩建造混合岩化伟晶岩化成矿系列(白云母+长石+石英+绿柱石+电气石+石榴子石+刚玉+蛭石);榴辉岩建造区域变质成矿系列(金红石+石榴子石+金刚石)。

中国非金属矿床成矿系列研究工作的主要问题在于:(1)到1991年止,研究工作尚属于开创阶段,31种成矿系列仅研究了其中的主要部分;(2)研究需要全面详尽的非金属矿床资料,这种资料是随矿床勘查与开发的进展而丰富的,所以对成矿系列的种类和其规律的认识程度将随时间而深化;(3)非金属矿床成因类型及它们的形成和分布规律,特别是其中成矿物质、成矿地球化学和物理条件、成矿同位素地质学的研究深度不够,影响成矿系列研究的深入。

非金属矿床成矿系列的研究是从系统论角度观察非金属矿床形成规律,在研究矿床群集机制的过程中对成矿规律进行新的认识。今后,研究工作将侧重在4个方面:(1)继续综合分析和高度概括各时期的非金属矿床学、非金属矿床勘查和中国大陆板块构造学成果,使中国非金属矿床成矿系列的研究更深入、全面和完善;(2)开展各成矿系列在矿床学、成矿大地构造学、地球化学和同位素地质学方面的深入研究;(3)开展区域性非金属矿床成矿系列的研究;(4)利用中国非金属矿床成矿系列的理论编制中国非金属矿床成矿地质图。前两方面的工作将使非金属矿床学理论不断深化,后两方面的工作将使这一领域的研究成果可以直接

指导非金属矿产勘查,使研究成果转化为社会效益。

#### 参考文献

- 1 程裕琪,等.中国地质科学院院报,1979,1(1):32~58
- 2 刘志贤,等.建材地质,1984,3,6~20
- 3 陈鹤年,等.建材地质,1986,3,21~27
- 4 陶维屏主编.中国工业矿物和岩石.北京:地质出版社,1987,1~6
- 5 陈鹤年.浙闽赣地区中生代火山成因非金属矿产基本特征.北京:地质出版社,1988
- 6 陶维屏.地质学报,1988,62(2):144~154
- 7 陶维屏.地质学报,1989,63(4):324~337

(中国建筑材料工业地质勘查中心陶维屏教授撰)

### 中国非金属矿床 nonmetallic mineral deposits in China

非金属矿床是指除矿物燃料及水资源以外的,其化学成分或技术物理性能可资人类社会开采利用而具经济价值的、包括宝石、玉石和彩石在内的所有天然非金属矿物或岩石,以及与之共同产出的夹石、围岩、共生和伴生矿所构成的地质体。

到1992年止,按矿物学和岩石学原则分类,中国已开发利用的非金属矿床有:自然硫、金刚石(钻石)、石墨、碘、溴、雌黄和雄黄、黄铁矿、萤石、食盐、钾盐、刚玉(红宝石、蓝宝石)、金红石、水晶(芙蓉石)、玉髓、玛瑙、蛋白石、水镁石和纤维状水镁石、铝土矿和高铝粘土、橄榄石(贵橄榄石)、石榴子石(紫牙乌、翠榴石)、锆石(风信子)、蓝晶石、红柱石、夕线石、黄玉(黄晶)、绿柱石(海蓝宝石、金绿宝石、祖母绿)、电气石(碧玺)、透辉石、透闪石、蓝闪石、蓝石棉(虎睛石)、硅灰石(长白玉)、蔷薇辉石(桃花石)、海泡石和纤维状海泡石、滑石、镁质粘土、温石棉、叶蜡石(寿山石、青田石、田黄)、高岭土(青田石、鸡血石)、膨润土、皂石、凹凸棒石、累托石、白云母、碎云母、金云母、锂云母、水云母、蛭石、长石、天河石、沸石、硼砂和硼镁石及硬硼钙石、磷灰石及蒙脱帕莱石(紫磷灰石)、绿松石、重晶石、天青石、石膏和硬石膏、芒硝、杂卤石、明矾石、白垩、冰洲石、菱镁矿、毒重石、孔雀石、天然碱、钠硝石、辉石岩(紫达木玉)、辉绿岩、玄武岩、安山岩、麦饭石、花岗岩、细晶岩和石英斑岩、珍珠岩、浮石和火山灰、霞石正长岩、凝灰岩、砂和卵石、砂岩、石英砂和石英砂岩及石英岩、脉石英、粉石英(高硅土)、粘土、页岩、红土、赭石、泥炭、沥青、磷块岩、硅藻土、石灰岩、泥灰岩、白云岩、大理岩、板岩、千枚岩、绢英岩、绿泥石岩(祁连玉、仁布玉)、浅粒岩、阳起钠长片岩、透闪石阳起石岩(和田玉、昆仑墨玉、龙溪玉、玛纳斯碧玉)、蛇纹岩(岫岩玉、蓝田玉、蛇绿玉、安绿玉、乐都玉、南方玉、鸳鸯玉)、次生石英岩(密玉、东陵玉、琅琊玉、京白玉)、硅化木、琥珀、煤精、砚石等109种。这些非金属矿主要用作化工原料、建筑材料、光学工业原料、电气和电子工业原料、工业填料、过滤剂及吸收剂和载体材料、绝热、隔音、绝缘和轻质材料、玻璃原料、陶瓷原料、耐火材料、铸造材料、冶炼熔剂原料、钻探工业材料、研磨原料、染料、宝玉石材料、医药原料和农药、农肥原料、饲料添加剂原料。

中国对非金属矿产资源的利用,最早可追溯至170万年前,当时云南元谋人已用石英岩打制石器;1万年前山西怀仁鹅毛口石器制作场遗址说明当时已开采当地的煌斑岩来制作石器。中国最早利用高岭土制成的瓷器是浙江上虞出土的东汉(公元1世纪)瓷器。中国对宝玉石和非金属矿的文字记载最早见于春秋战国时(公元前770~公元前211年)著的《山海经》。

中国对非金属矿床的现代研究最早成果当推章鸿钊1921年所著的《石雅》。1930~1950年谢家荣等对硫、石膏、磷、盐、高岭土、铝土矿和粘土矿床做过不少工作。1950~1992年中国组织专门地质机构对非金属矿床进行勘查,建设了许多著名的非金属矿山,石膏、石墨、菱镁矿、萤石、重晶石、石棉、滑石、硼、磷、天然碱、铝土矿的储量和产量均位于世界各国前列。特别是1980~1989年间新发现和开发的非金属矿种17种,占109种的

15.6%。在此期间,袁见齐等对盐类矿床,叶连俊等对磷块岩矿床,沈水和、陶维屏分别对高岭土矿床,陶维屏对石膏矿床,莫如爵、刘绍斌对石墨矿床,秦元熙、莫如爵对玻璃原料矿床,许仲华、江绍英对石棉矿床,阎俊峰、王鸿博对硫矿床,王鸿博对膨润土矿床,卢炳对黄铁矿矿床,刘长龄对耐火粘土和铝土矿矿床,李取亚对滑石矿床,关铁麟对浮石和火山灰矿床,吴自强等对萤石矿床,江海等对累托石矿床,章少华对纤维状海泡石矿床,黄强等对霞石正长岩和水镁石矿床,闻广等对玉石矿床等,均做了系统的研究并出版了专著或发表了重要论文。1890~1992年间陶维屏等对中国非金属矿床分布规律及其与板块构造的关系、中国非金属矿床含矿建造、成矿系列及其形成模式作了研究。1987年出版了由陶维屏、张培元主编的第1本中国非金属矿床学专著《中国工业矿物和岩石》(上下册)。1993年出版由陶维屏、高锡芬、孙祁等撰写的有关中国非金属矿床共生伴生和形成、分布规律的专著《中国非金属矿床成矿系列》。

非金属矿床与金属矿床、燃料矿床及水资源相比有其明显的特点与差异,表现在:种类多,随社会发展一方面种类不断增加,另一方面一些不合用的种类被淘汰;与金属及燃料矿产冶炼金属元素和燃烧提取能量不同,非金属矿床少数提取元素外大部分是利用其物理和化学特性;一种非金属矿有多种用途,同一用途又可由不同矿种的非金属矿互相代用;矿石需求随市场波动大,对采选加工运输条件要求严;成矿活动与条件远较金属及燃料矿床复杂。今后,中国非金属矿床学和非金属矿床勘查发展和研究的主要方向有3个方面:(1)从四维空间来研究非金属矿床的形成模式、矿床共生伴生关系及赋存规律以指导找矿;(2)从矿石工艺学的角度进行非金属矿用途开发的研究;(3)从技术经济、自然辩证的角度和社会经济学的角度,研究非金属矿床勘查方法、评价方法及有关的制度,以提高非金属矿床勘查的经济效益和社会效果。

#### 参考文献

- 1 陶维屏主编.中国工业矿物和岩石.北京:地质出版社,1987
- 2 陶维屏.矿床地质,1991,10(1):35~39

(中国建筑材料工业地质勘查中心陶维屏教授撰)

### 中国高岭土矿床 kaolin deposits in China

高岭土矿床是由达到有用含量的高岭土族矿物所组成的地质集合体。矿层有土状(粘土)和石状两种。高岭土(Kaolin)以发现于中国江西省景德镇市的高岭村而得名。在高岭土作为专门术语出现之前,中国历史上对高岭土还曾有“麻仓土”、“东土”、“稷米土”、“御土”、“明砂土”等称呼。1867年约翰逊和布莱克(S. W. Johnson, J. M. Blake)首次把组成高岭土的粘土矿物称为高岭石。1969年德国李希霍芬(Richtofen)访问景德镇并著文将高岭土音译成“Kaolin”介绍传播于欧美地质学界。

高岭土最早用以制陶瓷。河南新郑裴李岗和河北武安磁山出土的陶器制于公元前5000~6000年的新石器时代,浙江上虞出土的瓷器制于公元1世纪的东汉,是中国已知的最古陶器和瓷器。中国古籍对高岭土矿床也早有记载。宋代蒋祁著《陶记》对景德镇早期使用的高岭土曾指出:“进坑石泥,制之精巧,湖坑、岭背、界田之所产已为次矣。”明代王士性著《广志绎》卷四:“浮梁景德镇,雄村十里,皆火山发焰,故其下当有陶埴应之。”可说是对高岭土矿床的最早记述。

高岭土具有可分散性、可塑性、烧结性、耐火性、离子交换性及物理化学稳定性而广泛应用于许多领域。高岭土是陶瓷工业主要原料,大量用于制日用陶瓷、建筑卫生陶瓷、化工陶瓷、工艺美术陶瓷、电瓷、无线电瓷和艺术陶瓷。高岭土还用来制作搪瓷、坩埚、耐火材料,纸张填料和涂料,橡胶和塑料的填充剂,医药、纺织、日用化工、油漆、颜料、制皂的填料,白水泥的原料,化肥、农药、杀虫剂的载体,工业陶瓷质切削刀具和钻头,化工和石油炼制业用的人工合成分子筛,原子反应堆、喷气飞机和火箭燃烧室喷嘴用的陶瓷涂料,以及作为无机高分子净化剂的聚合铝。

中国最早对高岭土矿床的地质研究,始于郁国城(1940)、李悦言(1941)对四川叙永埃洛石矿床的工作。50年代,章人俊对景德镇高岭土矿床,沈水和对含煤建造中的高岭土矿床做过系统研究。1965年唐炎森对中国第1次发现与勘探了凝灰岩蚀变型高岭土矿床作了报导。1963年彭琪瑞等的《中国粘土矿物研究》、1978年张乐天等的《中国粘土矿物的电子显微镜研究》是两本对中国的粘土矿物包括高岭土族矿物进行论述的矿物学专著。1984年陶维屏等的《中国高岭土矿床地质学》出版,是中国的第1部高岭土矿床学专著。1987年郑直等的《中国主要高岭土矿床》出版。在1960~1992期间刘长龄对含煤建造中的高岭土矿床,夏璋、陈开惠对形成高岭土上的风化作用和风化淋滤作用,任磊夫、杨雅秀等对高岭土矿物学,陶维屏对岩溶充填物蚀变型高岭土、酸性凝灰岩蚀变型高岭土和高岭土矿床学,郑直、方邦森等对高岭土矿床学,都做过不少工作。

根据高岭土矿床的主要成矿作用及成矿地质背景,中国高岭土矿床可以分为风化残积的、风化淋积的、热液蚀变的、沉积的和沉积成岩的5大类共10种矿床成因类型:(1)酸性脉岩风化残积型高岭土矿床,如福建晋江白安,矿床分布于弧后岩浆带,矿体由穿插在长石较多片岩、片麻岩、花岗岩、酸性火山岩中的石英斑岩、花岗斑岩、细晶岩、霏细岩脉风化残积而成;一般由地表往下5~15m为全风化的土状矿石带,再往下5~15m为半风化的石状矿石带,再往下为原岩;矿石由无序的自形程度差的片状或蠕虫状高岭石,部分 $7 \times 10^{-10}$ m埃洛石、水云母及石英斑晶组成,用作日用陶瓷及白水泥原料。(2)花岗岩—花岗伟晶岩风化残积型高岭土矿床,如江西景德镇高岭村,矿床分布于弧后岩浆带雨量充沛地势低平地区;矿体由花岗岩和花岗伟晶岩风化残积而成,呈面状,矿化深度20~40m,以下为原岩;矿层中高岭土矿物在垂直方向上规律分带,潜水面以上为无序的晶形不完整的板状高岭石,潜水面以下为 $10 \times 10^{-10}$ m埃洛石,再向下为 $7 \times 10^{-10}$ m埃洛石,近原岩处为无序的结晶差的细小书册状高岭石与水铝英石、矿石中含石英斑晶,选矿后可作陶瓷及造纸原料。(3)边缘混合岩风化残积型高岭土矿床,如湖南衡阳界牌;矿床分布于弧后岩浆带中花岗岩体的边缘混合岩化带上;矿体透镜状,长上千米,厚几十米,斜深上百米,为花岗岩体边缘的钠长石化带风化而成,上部有石英岩顶盖;矿石以具较多且较粗大的晶形完整的管状埃洛石为特征,用作陶瓷原料及工业填料。(4)凝灰岩风化残积型高岭土矿床,如江西乐平南港,矿床分布于火山弧的雨量充沛地区;矿体呈面状,矿化深度5~20m;矿石由大量水云母和有序的假六方片状高岭石以及石英组成,用作日用陶瓷原料。(5)长石石英砂岩风化残积型高岭土矿床,如广东茂名山阁,矿床产于雨量充沛地区的新生代盆地中;矿层系与油页岩共生的胶结疏松的第三纪长石石英砂岩在酸性环境下长石受风化而成,长几千米,宽数百至千余米,厚几米至十几米;矿石由六方片状高岭石及石英粒组成,用作造纸、陶瓷、搪瓷、橡胶工业原料。(6)古岩溶剥蚀面洞穴充填风化淋积型高岭土矿床,如四川叙永六拐河;矿床产于碳酸盐岩古岩溶剥蚀面洞穴中,上部为含有有机质或黄铁矿的岩系覆盖;单个矿体直径仅几米至几十米,厚几十厘米至七八米;这种小矿体沿剥蚀面断续分布,由此构成的含矿带延长可达200km;矿石由大量的 $10 \times 10^{-10}$ m埃洛石及 $7 \times 10^{-10}$ m埃洛石组成,用作陶瓷工业原料。(7)古岩溶剥蚀面洞穴充填物热液蚀变型高岭土矿床,如江苏苏州阳东及陕西略阳白水江,矿床产于碳酸盐岩古岩溶剥蚀面的洞穴中,区内后期火山活动强烈或受轻微的区域变质作用;矿体形态受溶洞控制,直径一二百米,厚几十米;矿石由有序的晶形完好的高岭石及 $7 \times 10^{-10}$ m埃洛石组成,用作技术陶瓷、建筑卫生陶瓷、日用陶瓷、搪瓷、橡胶、造纸原料,受轻微变质的可作工艺雕刻材料。(8)凝灰岩热液蚀变型高岭土矿床,如江西上饶下高洲,矿床产于火山弧中的酸性火山岩系中部靠上层位,具层控性质,附近火山活动强烈,母岩为晶屑凝灰岩,与叶蜡石矿体共生;矿体透镜状,长二三百米,倾向延伸几十米到近百米,厚几米到二十几米;矿床具不对称的蚀变分带,

顶部硅化带形成石英岩顶盖,中间高岭石化带,下部为绿泥石化带,有时这种分带多次重复或各蚀变带互相掺杂致使分带复杂化,矿石石状,由有序的晶形不完整的高岭石、少量无序高岭石、迪开石和部分叶蜡石组成,为建筑卫生陶瓷、造纸原料和工艺雕刻材料。(9)碎屑建造沉积型高岭土矿床,如福建南安康龙,矿床产于河漫滩、湖泊和海湾中;矿层为附近花岗岩、凝灰岩受风化形成的高岭土族矿物搬运分选富集及硅铝胶体淀积而成,长几千米,宽上百米,厚1~3m左右;矿石由无序的细小浑圆或假六方片状高岭石和部分水云母组成,用作造纸、陶瓷、搪瓷、橡胶原料。含煤建造沉积型高岭土矿床,如山东淄博贾黄,矿床产于煤系中;矿层有软质和硬质两种,长上千米,倾向沿伸几百米,厚几米至十几米;矿石由有序到无序的不规则小片或呈蠕虫状集合体的高岭石组成,用作陶瓷原料和耐火材料。

中国已勘查的高岭土矿床中,小型的较多,大型的较少;质量高的造纸用、特别是作铜版纸涂料用的高岭土较少;高岭土的选矿和剥分技术尚需提高,这是高岭土资源勘查与开发工作应注意解决的问题。

#### 参考文献

- 1 Johnson, S W, et al. American Journal of Science, 1867, 43, 531~561
- 2 沈永和. 论高岭岩. 北京:地质出版社, 1959
- 3 彭琪瑞,等. 中国粘土矿物研究. 北京:科学出版社, 1963
- 4 唐炎森. 地质论评, 1965, 23(2)
- 5 陶维屏. 地质论评, 1966, 24(3)
- 6 张天乐,等. 北京:地质出版社, 1978
- 7 夏琄,等. 地质科学, 1979, 4
- 8 陶维屏. 硅酸盐学报, 1983, 11(2)
- 9 陶维屏,等. 中国高岭土矿床地质学. 上海:上海科学技术文献出版社, 1984
- 10 郑直,等. 中国主要高岭土矿床. 北京:北京科学技术出版社, 1987

(中国建筑材料工业地质勘查中心陶维屏教授撰)

**长江中下游矿床系列** minerogenetic series of mineral deposits in the middle-lower reaches of the Yangtze River 矿床系列和成矿模式关系紧密,模式源于“model”,美地质词典定义“用描述、统计数据或类比方法对直接观察的现象(或过程)所作的一种假说或模拟”。成矿模式则为对某些矿床类型地质特征及其成因机理运用上述原则表达的形式。矿床的成矿系列(下称矿床系列)也称区域成矿模式,高度概括一定成矿区内不同矿种、不同类型之间的内在联系及其时空演化规律。开展成矿模式研究可促进矿床系列研究的深化,进行矿床系列的研究则有助于建立客观实际的成矿模式。二者相辅相成,均为矿床学研究的延伸,是成矿理论与找矿实践相结合的产物。

长江中下游铜铁(硫金)成矿带,是一条少见的巨型聚矿带。据统计(1985),其面积不足全国的0.38%,却拥有全国铜的保有储量16.8%(1990年为33%)、铁6.1%、硫15.8%和金15%,且多为富矿。

矿床系列的基础在于矿床类型的正确划分。公元前500年管仲《地数篇》已提出“上有丹砂者下有黄金;上有磁石者下有铜金”,是关于元素共生和矿床分带最早的阐述;1927年艾孟斯(W. H. Emmons)指出了深源的斑岩体顶部矿化和分带特点,是为矿床模式和系列的雏形;1933年林格伦(W. Lindgren)据成矿深度和温度,首次将与花岗岩类有关矿床分为深成、中深和浅成热液3类。1941年尼格里(Niggli)提出了火山-侵入的矿床分类观点,1958年史耐德洪(G. Schneiderhohn)按矿石组合将矿床分为七类型、八建造,并指出成矿作用围绕侵入体形成具同心带状分布。1970年洛厄尔(Lowell)、1984年尼尔森(R. L. Nicholson)先后作出和发展了斑岩模式矿床的定义及其成矿理论。1984年巴布科克(J. W. Babcock)通过日本黑矿、热泉型金矿、金伯利岩

等模式研究,从复杂的成矿作用中揭示了成矿模式的本质,发表了《成矿模式导论》。1986年美国以全球3900个矿床的资料为基础,阐明了87个矿床描述模型和建立60个品位-矿量模型。80年代加拿大在《地球化学》杂志连续发表成矿模式讲座,前苏联学者则喜欢按矿床类型建模,或成矿模式与矿石-地质建造联系讨论,并于1987年出版了《成矿系列模型的建立》。国际地科联(IGC)更制订了1985~1994年为期10年的矿床模式研究计划。

70年代中国开始了成矿模式深入研究,1978年陈毓川等《宁芜玢岩铁矿》,对我国成矿理论研究的起了积极作用。1979年程裕祺、陈毓川等《初论矿床的成矿系列问题》,按三大类和不同区域构造背景,在矿床类型合理划分基础上将全国分为19个矿床系列,1983年接着发表了《再论》,成为国际矿床学研究领域中划时代的大事,仅《初论》后就有徐克勤等10多位学者发表了关于矿床系列的论述,涉及了华南花岗岩、太平洋成矿带、火山岩型铁矿等课题。

长江中下游地区矿床系列的研究,1982年包家宝等《九江地区铜矿床区域成矿模式》,亦即有名的“三位一体”模式,阐述了不同矿床类型围绕斑岩体复合地层屏蔽所形成矿化蚀变现象的内在联系机理,是区内研究矿床系列较早的代表作。翟裕生等1980~1990年从成矿理论出发,进行了该地区矿床系列研究,他对铁矿矿床系列的主要观点是大冶、宁芜两类矿床在成因上近似,均有接触交代、矿浆贯入、碱质交代、沉积-接触变质作用,可以划分出相应的矿床成因亚类,并分别对大冶和宁芜式铁矿形成的区域构造背景和与岩浆岩系列的关系作了较为深入的探讨。常印佛等则从找矿实践出发,不断总结了该地区的矿床分类和成矿规律,划分矿床系列和找矿模式,从1981~1991年多次强调了岩浆初始物质成份不同,成岩演化特征不同,岩浆活动方式和持续时间的差别,以及构造-围岩环境对岩浆分异影响的不同,使岩浆中成矿物质的挥发组份(含从围岩中淬取)也不尽相同,因而划分了扬子式同熔型(壳<幔源)、江南式同熔型(壳>幔源)、重熔型以及叠改作用等相应的5个成矿系列。同熔型低硅富碱, MgO 偏低,不相容元素丰度较高,轻稀土富集,  $\Delta Eu_0.9 \sim 1.2$ , 球粒陨石标准化曲线为平滑右斜型,  $\delta^{18}O_0.5 \sim 1\%$ ,  $\delta^{34}S$  近于陨石值, 锶同位素初始值  $(Sr^{87}/Sr^{86})_i 0.7050 \sim 0.7100$ , 壳幔过渡性质。重熔(陆壳改造)型高硅富碱, 亲石元素丰度高, 重稀土富集,  $\Delta Eu$  亏损强烈, 球粒陨石标准化曲线“V”形,  $(Sr^{87}/Sr^{86})_i > 0.7100$ , 为混合岩化及重熔再生岩浆而成。

综合上述研究成果,长江中下游地区主要内生矿床系列一扬子式同熔型系列归纳为下列3个成矿亚系列:(1)与高碱富钾闪长岩-花岗闪长岩有关的铜金(铂)矿床亚系列。产于块断褶皱隆起区,控矿构造近E-W或NWW,围岩 $E-T_1$ ,为深源浅位(1~3km)小岩体,同位素年龄170~130Ma,  $SiO_2$  62.9%,  $K_2O+Na_2O$  7.7%,  $K_2O/Na_2O$  0.9,成矿元素Cu、Au、Mo、S、Fe、Pb、Zn、Ag,为砂卡岩型、斑岩型、热液型,产地为铜陵、九铜、阳新、宁镇,相应为铜陵模式,典型特征为“一圆多层”及“三位一体”。(2)与高碱富钠辉石闪长岩-石英二长岩有关的铁(铜铂)矿床亚系列。产于隆起与坳陷过渡区,控矿构造为NNE,围岩 $T_1-T_2$ ,岩体规模较大,侵位深度1.5~3km,同位素年龄150~125Ma,  $SiO_2$  59.7%,  $K_2O+Na_2O$  8.2%,  $K_2O/Na_2O$  0.6,成矿元素Fe、Cu、Co、Au,为矿浆型、砂卡岩型、矿浆-砂卡岩、热液型等。产地为大冶、当涂、繁昌,相应为大冶模式,典型特征为“上下同体”。(3)富钠偏基(辉石)闪长(玢岩)-粗安岩有关的铁硫矿床亚系列。又称“玢岩铁矿”系列,产于断陷火山岩盆地,围岩为 $J_3-K_1$ ,岩体为潜火山岩,侵位<1.5km,同位素年龄130~90Ma,  $SO_2$  52.5%,  $K_2O+Na_2O$  6.6%,  $K_2O/Na_2O$  0.37,成矿元素Fe、S、V、Ti、P,有时见后期AuCu叠加。为矿浆型、潜火山气液型、矿浆-气液过渡型、热液型、伟晶型等。产地为宁芜、庐枞、繁昌,相应为宁芜模式,典型特征为“三带一隆”。

3个矿床亚系列(模式)之间存在明显差异,但时空关系却揭



示了清楚的演化规律:成矿地质环境从块断褶皱隆起区经隆拗过渡区向火山岩盆地迁移;岩浆活动机制上从侵入作用向潜火山活动和火山喷溢转化,成岩演化从中酸性转化为中性;主要成矿期  $J_3$  成 Cu,  $J_3-K_1$  成 Fe, Cu,  $K_1$  成 Fe, 单个矿床则 Fe 又早于 Cu;控矿构造从燕山早期近 E-W (压扭性) 控 Cu, 演化为较晚期的 NNE (张扭性) 向控 Fe;主要围岩 Cu 为 C-T<sub>1</sub> 演化为 Cu, Fe 的 T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub> 及 Fe 的 J<sub>3</sub>-K<sub>1</sub>。

矿床系列深化了成矿模式的研究内容,将预测区域内可能发现的矿床,无论在理论研究或经济价值上意义均很重大。如板块边界和地壳深部构造对矿床系列的控制;矿床系列组合表借助于元素周期表,以不同成因、岩石类别为经,成矿作用为纬,交织组成矿床系列,将预测新系列的发现;同时地质-地球物理-地球化学-遥感-找矿矿物等综合分析将大大提高预测精度,又将带动矿床系列研究的深化。

#### 参考文献

- 1 程裕淇,等.中国地质科学院报,1979,1:32~57
- 2 Einandi M T. classification and composition of skarn deposits E G, 1982, 77: 745~754
- 3 刘湘培.地质论评,1989,5:388~408
- 4 常印佛,刘湘培,吴言昌.长江中下游铜铁成矿带.北京:地质出版社,1991,287~359
- 5 Newberry R J, et al. A reinterpretation based on new data, E G, 1991, 86: 960~982

(安徽省地质矿产局刘湘培教授撰)

### 微细浸染型金矿床 fine-Grained Disseminated Gold Deposits

又称“卡林型(Carlin-type)金矿床”,指由热水溶液(主要为非岩浆热水溶液)作用形成的、在不同成分的容矿地层中的金呈细分散状态,并具有经济价值;矿化很少受结构控制或不受结构控制,金一般以超显微状和显微状产出,少量或极少量以“可见金”形式产出者。

金是人类最早发现和利用的金属之一,据考证,人类利用黄金已有近 6 000 年的历史。早在公元前 14 世纪就在非洲、欧洲和亚洲等地广泛地开采。到了中世纪,美洲和大洋洲也相继对金矿进行开采。至 1990 年底,世界累计产金量超过  $12 \times 10^4$  t。

早期,人们开采的多是块金。澳大利亚是世界上发现天然金块最多的地方,1872 年在此曾发现一块含纯金达 214.32kg 的特大金块,这是迄今为止世界上发现的最大的天然金块。块金一般均产于砂金矿床中。砂金矿床易于开采但规模较小。自 19 世纪以后,人们逐渐转向“岩金矿床”的寻找与开发。岩金矿床类型众多,最早被人们注意的是那些品位高、颗粒大、肉眼易于辨认的矿床,如石英脉型金矿床、古砾岩型金矿床、霍姆斯托克型金矿床等。岩金的成功开发,使人类对黄金的利用进入一个新的时期,更加刺激人们对黄金占有的愿望。由于黄金的利用范围日益扩大,由装饰、贮藏、货币直至工业利用,人类对金的需求量不断增加,因而迫切需要寻找出更多的金矿床来。此外,随着经济技术的不断发展,采选冶技术的不断进步,不同类型金矿床的经济意义及其相对重要性也发生显著的变化。到 20 世纪 80 年代时,微细浸染型金矿床已成为具有重要意义的新的金矿类型。

微细浸染型金矿床发现于 20 世纪 60 年代,起初一直未被人们所认识,只是由于美国内华达州卡林金矿床的发现而被广为重视。内华达卡林地区属科迪勒拉地槽的一部分,在古生代中晚期由于安特勒运动造成了大规模的逆掩断层(罗伯茨山断层),该大断层把西部优地槽沉积推覆到东部冒地槽之上,以后又经多次构造运动,其中隆起部分经长期风化剥蚀而露出下部地层,形成许多构造窗,在这些构造窗中产有多金属矿床。1907 年,在卡林镇以北约 2km 处发现砂金,翌年在其附近奥陶纪灰岩中发现含金石英脉,但规模小。1939 年,美国地质调查所制定了在该区系统开展大面积的中小比例尺地质填图和物化探扫面的计划,直至 1960 年完成全部既定任务时找矿局面仍无新突破。随后,美国罗

伯茨(R. I. Roberts)在分析大量的资料后发现:凡是有金显示的地方,均有砷、锑、汞的异常和铊的出现,后 4 种元素对金具有指示意义,建议在构造窗中进一步开展勘查工作。纽蒙特(Newmont)矿业公司采纳了他的意见,首先选择 Lyna 构造窗进行解剖,在化探异常区试行钻探,在第 2 年的第 3 个钻孔中成功地打到了 24m 厚的微细浸染金矿体,到 1963 年初完成了卡林矿床的评价,金平均品位为 9.95g/t,贮量近百吨。至 70 年代,在对卡林金矿矿化、热液蚀变和控矿构造特征等详加研究的基础上,在卡林金矿的附近区域上相继找到了数十个大小不等的微细浸染型金矿床,矿带长达 960 余 km。过去,内华达州的黄金产量不足全美的 10%,而自微细浸染型金矿床大批发现后,今天其产量已占美国总产量的 70% 左右。纽蒙特矿业公司在数百平方公里范围内,即获得金贮量达 2 000t 以上。

80 年代,除美国外,在世界其他地区也陆续发现了为数众多的微细浸染型金矿床,如加拿大、西班牙、前苏联、新西兰、中国等国均有重要发现。加拿大艾略特省赫姆洛矿床、美国加利福尼亚州的麦克劳林矿床和内华达州的金坑矿床,金贮量均超过百吨,属超大型矿床之列。尤其赫姆洛矿床规模最大,影响最广。该矿床矿化长达 40km,矿体宽数米至 30m,延深超过 1 000m,品位 4~16g/t,贮量高达 600t。

70~80 年代,在中国也发现了众多的微细浸染型金矿床,如在黔桂三角地带发现了板其、丫他、戈坊、紫木齿、烂泥沟、三岔河、高龙、金牙等金矿床;在川陕甘三角地带发现了东北寨、桥桥上、丘洛、拉尔玛、二台子、马脑壳等金矿床。这些金矿床的发现是中国金矿地质工作的重大突破,对改变中国金矿资源的落后面貌起了巨大的作用。

自 80 年代以来,微细浸染型金矿床在世界各地有了更多的发现,尽管对其研究难度很大,但人们毕竟对其有了更多的和更新的认识。实际情况表明,此类矿床的容矿岩石是多种多样的,虽然大多数矿床是产于硅化的碳酸盐岩地层中,但也可产于砂岩、粉砂岩、片岩、燧石岩和沉积火山岩层中,从而扩大了微细浸染型金矿床的勘查范围。

此类矿床的产出与地层时代无关,从前寒武纪地层至第三纪地层中均已发现。但是地层赋矿部位往往含碳质较高。金矿化一般与较年轻的地质事件有关。金多呈不可见金出现,与黄铁矿、雄黄、辉锑矿、粘土物质以及碳质物密切共生,或赋存于矿物中或呈吸附状态。早期认为此类矿床的成矿作用与岩浆活动有直接关系,现已查明,绝大多数微细浸染型金矿床的形成是与以大气降水补给的地下热水的活动关系密切。成矿物质主要来自矿源层(岩)。岩浆可以提供部分矿质,但其主要作用是提供热源。

此类矿床的物质组成极具特色。矿石的矿物成分较简单,主要是黄铁矿、雄黄、辉锑矿、辰砂、石英和方解石。少数矿床可出现毒砂、白钨矿和自然砷等。一般缺少金属矿床中较普遍出现的黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等。在化学成分上出现的标型元素为 Au、Ag、Hg、Sb、As、Tl 等,往往构成稳定的化学组合,成为地球化学标志。

对于微细浸染型金矿床的成矿机制,鉴于此类金矿床在岩石建造特征、容矿主岩类型、矿化与蚀变的分带、构造控制的性质与程度,以及成矿流体的化学性质与化学成分的演化等差异,当前出现 3 种成矿模式可以选择,即流体混合-冷却模式、流体沸腾-酸化模式和海底喷流模式。

微细浸染型金矿床虽然品位较低,但一般储量大,具有重要的经济意义。可以说,此类金矿床是最具远景的金矿类型之一。

#### 参考文献

- 1 Toohar E W. Discussion of The disseminated-gold ore occurrence model, U S Geol survey Bull, 1985, 1646: 107~150
- 2 Hannington M D. et al. Gold in sea-floor polymetallic sulfide deposits. Econ. Geol., 1986, 81: 1867~1883

- 3 Morthrop H R. et al. Sediment - host disseminated gold mineralization at Yerric Canyon, Nevada. V - stable isotope geochemistry and a model of ore deposition [abs]; Geol Soc America Abstracts with programs, 1987, 19: 1791
- 4 Harris D C. Mineralogy and geochemistry of the Hemlo gold deposit, Ontario, Canada; Canadian Geol. Survey Econ Geol Dept, 38: 88
- 5 郑明华, 等. 四川东北寨微细浸染型金矿床成矿物理化学条件和成矿过程分析, 矿床地质, 1990, 2
- 6 Kuchn A, Rose A W. Geology and Geochemistry of wall - Rock Alteration at the Carin Gold deposit, Nevada, Econ Geol, 1992, 87: 1697 ~ 1721
- 7 Pan Y, Fleet M E. Calc - silicate Alteration in the Homlo gold deposits, and significance. Econ Geol, 1992, 87: 1104 ~ 1120
- 8 Pan Y, Fleet M E. Mineral chemistry and geochemistry of vanadium silicate in the Hemlo gold deposit, Ontario, Canada; Contr. Mineralogy Petrology, 1991, 109: 551 ~ 525
- 9 郑明华, 等. 论微细浸染型金矿床的形成条件和成矿机制. 金银矿选集, 15 集, 1991, 1 ~ 30
- 10 Greg B A, et al. Evidence for the supergene origin of alunite in sediment - hosted Micron gold deposits, Nevada. Econ Geol, 1992, 87: 263 ~ 270

(成都理工学院博士生导师郑明华教授撰)

**中国铁矿资源** 铁矿资源是钢铁工业的粮食和发展钢铁工业的物质基础。对铁矿资源现状进行科学分析, 加强铁矿地质勘查和有关研究工作, 是确保中国钢铁工业持续发展的重要前提。

新中国成立前, 只有鞍山、大冶等少数几个铁矿产地。通过建国以来的大量地质勘探工作和研究工作, 特别是通过 70 年代的铁矿科研会战, 使中国铁矿的类型、特点和分布规律得到基本查明。中国幅员辽阔, 地质条件复杂, 铁矿类型很多, 铁矿资源也较丰富。现已探明的铁矿储量, 占世界第 3 位。

**铁矿床类型** 受变质沉积铁矿床, 这是中国最重要的铁矿类型, 主要产于前寒武纪变质地层中, 呈层状、似层状产出, 较集中地分布于辽宁鞍山、冀东、山西五台、岚县、河南舞阳和安徽霍邱等地区, 矿床规模一般较大, 矿石以条纹条带状石英—磁铁矿(假像赤铁矿)为其特征, 含铁品位一般为 25% ~ 35%。

**岩浆型铁矿床**, 又称钒钛磁铁矿床, 也是中国重要的铁矿类型。矿体呈多层状产于高铁质的超基性和基性岩类岩体的下部和底部。这类矿床在四川西南部攀枝花—西昌地区分布最集中, 规模较大, 约占全国铁矿总储量的 15%。矿石品位虽不高(20% ~ 34%), 但钒和钛的含量却较高, 还伴生其他有益组分。

**接触交代—热液型(广义的砂卡岩型)铁矿床**, 矿体多呈透镜状, 似层状或不规则状, 产于中性、中酸性和酸性, 侵入岩和碳酸盐围岩的接触带或其附近。矿石含铁量相对较高, 多数为 40% ~ 55%, 常伴有铜、锡、钼、钴、金等组分。矿床较集中地分布于长江中下游、华北地台的邯邢、鲁中、晋东南和闽南、粤东等地区, 占全国铁矿总储量的 9% 左右。

**沉积铁矿床**, 矿体呈层状、似层状、透镜状产于碎屑岩为主的地层中。矿层分布范围大, 但厚度较小(多数为 1 ~ 3m)。矿石以赤铁矿为主, 次为菱铁矿和绿帘泥等。其形成时代主要为震旦纪、泥盆纪和侏罗纪。该类铁矿约占全国铁矿总储量的 8%。

**火山—潜火山岩型铁矿床**分布不普遍, 但不少为大型富铁矿, 其中较重要的有海南石碌、云南大红山和宁芜地区的一些与玢岩有关的铁矿床, 约占全国铁矿总储量的 6.5%。

从已知铁矿的分布情况看, 虽然在各省市自治区均有铁矿产出, 但主要集中在东北、华北和西南 3 个地区, 其中东北和华北两大区的探明储量占全国的 47%, 西南区占 20%。西北和西藏地

区地质工作程度较低, 探明的铁矿储量也较少。中国的铁矿大多属贫矿, 全国铁矿石的平均品位仅 33%, 富矿数量很少, 含铁量大于 50% 的富铁矿仅占总储量的 6% 左右, 可以直接入炉的富矿只占总储量的 2%, 而平炉富矿就更少。在已探明的铁矿中, 有相当数量采选技术尚未解决, 如储量巨大的宁乡式沉积型高磷鲕状赤铁矿, 山西袁家村等地氧化的假像赤铁矿, 内蒙黄岗、广东大顶等矿区的含锡磁铁矿和辽宁翁泉沟的含硼磁铁矿磁铁矿等。有些大型矿床由于水文地质条件复杂还暂不能开采利用。也有一些铁矿因交通不便, 近期难以利用。

**中国铁矿地质工作对策** 受变质沉积铁矿应作为最主要的找矿对象。因为这类铁矿无论在国外或国内均是最重要的铁矿类型, 不仅储量大, 而且分布相对集中, 虽然矿石品位不高, 以贫矿为主, 但大多易选, 铁精矿的成本不高。中国一些重要钢铁基地, 如鞍山、本钢、首钢等, 由于铁矿石原料主要是鞍山式贫矿, 因此保证程度好, 生产长期稳定上升。但目前中国不少钢铁厂每年要从国外进口铁矿石, 如上海宝钢的铁矿石几乎全部从澳大利亚等进口, 消耗大量国家外汇。因此, 从长远的观点看, 中国发展钢铁工业所需的矿石资源必须立足于国内。为此, 对华北地台北缘前寒武纪老地层分布区, 特别是在覆盖区和半覆盖区有航磁异常出现的地段, 应注意寻找这类铁矿, 山西五台、冀东、鞍本等地已知铁矿山外围及深部也应进一步加强找矿勘查工作。

**接触交代—热液型铁矿床**是中国富铁矿的主要来源, 应进一步注意寻找。在这类矿床中还有一些优质平炉富矿, 如山东莱芜张家庄、江苏利国、湖北大冶灵乡、福建潘田和四川泸沽等矿床。

要加强中国西部等边远地区铁矿资源的勘查工作。中国铁矿资源分布不均, 东部、中部多, 西部少。西北地区现已探明的铁矿储量仅占全国铁矿总量的 4.2%, 但西部各省的地质研究程度较差, 有些地区的成矿地质条件还是较好的, 只要深入工作肯定会有较大的突破。

**加强区域成矿规律、成矿系列和成矿模式的研究**, 用成矿理论来指导铁矿找矿工作。成矿系列的概念是程裕淇等(1978)在研究中国几组主要铁矿类型时提出来的, 由于成矿系列是在对区域成矿规律和典型矿床成矿模式进行深入研究的基础上提出来的, 因而符合客观成矿地质规律。它揭示了自然界不同矿床类型和矿种之间的成因联系、生成演化序列和空间分布规律。正确运用成矿系列的理论, 使有可能根据一定的矿床类型或类型组来科学地预测与之有关的其他矿床类型或类型组的存在, 有助于提高铁矿找矿工作的科学性和进行正确的综合评价。

**加强对铁矿伴生元素的综合利用研究**。中国许多铁矿常是共生矿, 一个矿床中往往伴有多种有用组分, 如岩浆型攀枝花式钒钛磁铁矿床不仅是铁、钛、钒的共生矿, 而且是 Cr、Ca、Cu、Co、Ni、Se、Te、S、P 和 Pt 族元素等十几种有用组分的综合性矿床; 华北地台上接触交代铁矿普遍伴生 Co, 部分矿床还有 Cu、Au 等元素; 鄂东南地区的大冶式铁矿常伴生 Cu、Co、Au 等; 玢岩铁矿伴生 V、Ti、S、P 等; 宁乡式沉积铁矿伴生 P; 黄岗、大顶等砂卡岩铁矿伴生 Sn; 白云鄂博铁矿所含稀土元素和铈的价值比铁要高 20 多倍等。正确认识中国许多铁矿的上述特点十分重要, 能使我们更好地重视对铁矿资源的综合利用, 保护矿山资源, 提高矿石利用的经济效益。目前尤其迫切的是应积极组织力量进一步加紧对储量较大的宁乡式高磷赤铁矿和黄岗式含锡磁铁矿的工业性选冶研究, 以便使这些铁矿早日得到利用。这不但将扩大中国铁矿的可采储量, 而且还能从中国回收大量磷肥资源和金属锡。

今后, 铁矿资源的研究一方面应加强成矿有利地区的铁矿地质勘查和研究工作, 增加铁矿的储量; 另一方面, 针对中国伴生矿多、赤铁矿比例大的特点, 组织科研攻关, 使数十亿吨铁矿潜在资源得到开发利用。

#### 参考文献

- 1 程裕淇, 等. 地质矿产研究, 1976, 3: 1 ~ 23
- 2 程裕淇, 等. 地质学报, 1978, 4: 253 ~ 268

- 3 程裕淇,等.中国地质科学院院报,1979,1(1):32~58
- 4 张淑伟,等.中国地质,1986,7:23~25
- 5 地质矿产部.中国矿产资源年报,1989,82~94
- 6 赵一鸣,等.中国砂卡岩矿床.北京:地质出版社,1990.354  
(中国地质科学院矿床地质研究所博士生导师赵一鸣研究员撰)

**中国稀土矿床成因** the genesis of rare-earth ore deposit in China 稀土矿床成因具有自己的地质特征,其形成决定于地质条件、稀土元素的地球化学性质和稀土矿物的晶体化学性质。研究稀土矿床成因对于开发利用稀土资源、了解稀土地球化学行为和稀土成矿物质条件均具有重要意义。

中国稀土矿床和稀土矿化地区在大地构造上的空间分布规律是:既分布于稳定的地质构造单元之中(地台或准地台),又分布于活动的地质构造单元之内(褶皱系)。地台是地壳的稳定地区,但有地台活化的发生,故有岩浆和成矿溶液的活动,为稀土的转移富集提供了条件。褶皱系是地壳的活动地区,岩浆和矿液的活动,适宜的地质环境,促成了稀土的富集成矿。

中国稀土成矿作用与中国大陆地壳运动的关系非常密切。太古代和元古代,中国大陆地壳发生了多次剧烈构造运动和岩浆活动,使地壳物质产生强烈分异,也为稀土分异富集和矿化作用提供了重要的依据和条件,如辽西—桑干运动、阜平—鞍山运动、泰山运动、五台运动、吕梁运动、晋宁运动、澄江运动、蓟县运动等等。

就外生作用下稀土地质情况来看,元古代是稀土富集期,如东北的辽河群、北方的浑群(即白云鄂博群)、东南沿海的建群、华中的板溪群、川北的火地垭群,以及西南的昆阳群等层中都富有稀土矿床。古生代和中生代的造山运动和岩浆活动多次频繁发生,波及全国的巨大构造运动有上古生代的加里东期,下古生代的海西期,早中生代的印支期,中晚中生代的燕山期,以及新生代的喜马拉雅期。每期构造运动中又有多次造山运动和多次岩浆活动,如加里东期岩浆活动,形成了中国南方和北方的某些稀土矿床和稀土矿化地区,和海西期岩浆活动一起形成了巨大的白云鄂博稀土稀有金属矿床,海西期也形成了攀西裂谷中的碱性岩体及大量稀土矿化。

岩浆活动形成了辽宁赛马碱性岩体,位于辽东台背斜中,岩浆活动侵于元古界和下古生界的白云质大理、干枚岩、石英岩和灰岩中,绝对年龄为220~240Ma。西南地区,绝对年龄为180~230Ma期间的印支运动,具备有稀土矿化的条件。燕山期的岩浆活动波及全国,产生了许多稀土矿床和稀土矿化,华北、华南均有许多矿床实例,特别是燕山期花岗岩岩浆活动与南方许多金属矿床关系密切,例如江西西华山复式花岗岩岩体,形成了锡、铜、铋、铍、钨、钼、稀土的矿化,绝对年龄184~140Ma,均有与岩浆活动有关的稀土矿化。

根据稀土矿床的成因特征,我们将中国稀土矿床和稀土矿化地区分为10大成因类型,每一类型中都具有工业意义的典型矿床代表。

(1)花岗岩型稀土矿床。矿床中稀土的来源与酸性、中酸性或偏碱性花岗岩岩浆活动有关,岩浆源多为浅源,也可能为深源,稀土以副矿物形式存在。复式岩体、大岩体边缘和小型岩株,对稀土矿化有利,岩浆后期或岩浆期后的热液活动,对稀土富集成矿起着促进作用。这类矿床多分布于华南褶皱系之中。

(2)碱性岩型稀土矿床。正长岩、霞石正长岩、霓霞岩等碱性岩中富含稀土,且稀土矿物种类繁多。碱性岩是产生稀土矿物和稀土矿化的良好场所,有许多很稀有的稀土矿物,只在碱性岩中产生。碱性岩中除蕴藏稀土矿床外,尚有铀、钍、铷、铯、钾、磷等矿床孕育其中。

(3)火成碳酸岩型稀土矿床。火成碳酸岩的生成与碱性岩密切相关,关于它们之间的成因关系,也有理解为前者是后者分异的产物。火成碳酸岩体往往就是稀土矿体,因为其中的稀土矿物富集,如美国加州芒顿斯稀土矿体就是这样。中国的火成碳酸

岩体分布于稳定的地台区,有稀土矿床多处。

(4)砂卡岩型稀土矿床。砂卡岩稀土矿床规模一般不大,矿床附近有火成岩体的侵入,并有砂卡岩矿物生成,透辉石、石榴石、硅镁石等是砂卡岩的典型矿物,有镁质砂卡岩和钙质砂卡岩之分,并有内外接触带之别。

(5)伟晶岩型稀土矿床。伟晶岩型稀土矿床稀土储量不大,但矿床中往往含多种稀有矿物和稀有金属矿物,有利于进行综合开发利用。伟晶岩是宝石矿物和某些稀有矿物的重要产地,其分布与地质条件特别是地质构造关系密切。

(6)变质岩型稀土矿床。该类型矿床为变质作用下稀土的富集,其中分布广泛的矿物为独居石,在我国的太古代特别是元古代岩石发育的地区,都有这种稀土矿床的出现,产地甚多。

(7)热液交代和热液脉型稀土矿床。此类矿床往往能形成大的稀土富集,矿石中的稀土种类较多,尤以碳酸盐类和氧化物类稀土矿物种类最丰富。

(8)沉积岩型稀土矿床。沉积岩型稀土矿床赋存于沉积磷矿之中,目前已作为开采磷矿综合利用的目标。一般磷灰石矿物中,含稀土可达千分之几。磷灰石结晶格架中,钙原子有两种位置,钙氧原子间距离较大,有利于稀土较大离子的进入,故磷灰石中富集轻稀土较多。

(9)稀土砂矿。稀土砂矿是砂矿利用的一部分目的,其中,稀土矿物往往与钛、锆等砂矿矿物共存,故稀土砂矿亦可看作钛、锆等稀有金属的砂矿。在稀土砂矿中,耐风化的重砂矿物是独居石  $CePO_4$  和磷钨矿  $YPO_4$ ; 半耐风化的矿物有:褐帘石  $(Ca, Ce, La)_2(Al, Fe, Mg)_3(SiO_4)_3(OH)$ , 褐钨钨矿  $YNbO_4$ , 易解石  $(Ce, Y, Ca, Fe, Th)(Ti, Nb)_2(O, Oh)$ , 氟碳铈矿  $Ce(CO_3F)$ , 铀铈矿  $(U, Ca, Ce)(Ti, Fe)_2O_8$ , 黑稀金矿  $Y(Nb, Ti)_2O_6$ , 硅铈矿  $Be_2FeY_2Si_2O_{10}$ , 钨钽矿  $(RE, U, Ca, Pb)(Nb, Ta, Ti, Sn)_2O_6$  (?), 钨钽矿  $(Ca, Th, Ce)Zr(Ti, Nb)_2O_7$ , 等矿物。

(10)花岗岩风化壳型稀土矿床。该类型稀土矿床广泛分布于华南,以南岭地区前景最大,那里的花岗岩类岩石中普遍含上较高,风化后形成稀土矿床。数十万平方公里的范围内,随处可能有稀土的富集。大地构造单元的位置主要是在华南褶皱系中和东南沿海褶皱系中,火成岩的侵入时代主要为燕山期,其次属印支期,部分为海西期或加里东期。

总之,中国稀土矿床成因类型丰富多采,在各种地质作用下,不同的地质环境中,以及复合的叠加的地质作用过程中,都形成有代表性的稀土矿床和稀土矿化。

#### 参考文献

- 1 郭承基.稀土地球化学演化.贵阳:贵州人民出版社,1985,545
- 2 Semenov E. Rareearth Mineralogy, 1963, 412
- 3 Henderson P., Rare Earth Element Geochemistry, 1982, Elsevier Amsterdam, 1982, 510
- 4 白鹤,袁忠信.中国地质科学院矿床地质研究所刊(总第13号),1985,195
- 5 Lipin B R, Mckay G A. Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements, Published by the M S A, 1989, 348
- 6 杨主明,潘兆禧,张建洪.中国稀土学报,1992,10(3):194~198
- 7 杨主明,珀特里克.地质科学,1993,28(3):221~227
- 8 伊丽莹.中国科学(B辑),1984,2:175
- 9 王中刚,于学元,赵振华.北京:科学出版社,1989,535

(中国科学院地质研究所博士生导师张培善研究员撰)

**斑岩矿床系列** porphyry deposit series 属于矿床系列的一个分支,系指在一定地质环境中形成的在时间上、空间上和成因上有密切联系的一组矿床类型。当着重强调它们的时间联系时则可称为矿床氏族;当着重强调它们的空间联系时则可称为矿床组合。研究斑岩矿床系列,对于揭示与浅成—超浅成花岗岩

浆有关矿床的时空和成因联系、区域成矿规律、成矿机制,制定找矿评价准则和预测隐伏矿床等具有重要意义。

早在斑岩矿床系列提出之前,许多学者已对矿床系列作过较深入的探讨。1926年翁文灏根据华南区域矿产的时空分布特点首次提出成矿系列(metallogenic series)的概念。20世纪30~40年代,艾孟斯和贝特曼强调以侵入体为中心,由内而外形成Sn、W、Bi、Mo、Cu、Pb、Zn、Sb、Hg等矿床组合。1979年和1982年程裕淇等先后初论和再论矿床的成矿系列,他们将矿床(矿石)与岩石作类比,根据3大成岩作用对应划分3大矿床的成矿系列组合,进一步详细建立了27个矿床成矿系列和有关亚系列。

1986年芮宗瑶等首次建立中国斑岩矿床系列。他们将斑岩矿床作为与浅成—超浅成花岗岩质浆有关的矿床组合,其中包括斑岩铜矿、斑岩钼矿、斑岩钨矿、斑岩铋矿、斑岩金矿、斑岩铅锌矿和斑岩铀矿等。由此可见,斑岩矿床系列的提出,使斑岩矿床类型不再局限于铜钼两个矿种,大大拓宽了斑岩矿床的研究领域。

1991年张洪涛等进一步讨论了斑岩矿床系列的地质背景,首先将斑岩矿床划分为离散型板块边界矿床系列和聚敛型板块边界矿床系列。前者产出的地质背景有:大陆克拉通、地槽隆起带、大陆活化伸展带和裂谷带等;后者产出的地质背景有:岛弧带、安第斯型岩浆带、弧后扩张带、弧后陆缘带和聚敛后陆相火山活动带等。

现今,斑岩矿床系列研究的热点为:(1)源岩(镁铁质的、长英质的和过渡性的)对于形成斑岩矿床的预富集作用及对于矿床系列的影响;(2)斑岩矿床系列产出的地质背景对比性研究;(3)超大型斑岩矿床形成机制;(4)浅成—超浅成侵位体制对于斑岩矿床的形成意义。

#### 参考文献

- 1 Wong W H. Position of arsenic minerals in the metallogenic series. Bulletin of the Geological Society of China, 1926, 5 (1): 61~63
- 2 Emmons W H. Gold deposits of the world, New York, 1938
- 3 Bateman A M. Economic mineral deposits, 1943
- 4 程裕淇. 中国地质科学院院报, 1979, 1(1): 32~57
- 5 程裕淇, 等. 中国地质科学院院报, 1983, (6): 1~64
- 6 芮宗瑶, 等. 中国地质科学院院报, 1986, 89~100
- 7 Rui yongyao, et al. A discussion on the series of the porphyry deposits of China. Bulletin of CAGS, 1988, 109~121
- 8 张洪涛, 等. 地质学报, 1991, 3: 250~262  
(地质部矿床地质研究所芮宗瑶研究员、张洪涛副研究员撰)

### 铜矿地质

geology of copper deposits 5 000年来,人类开采的铜矿床品位越来越低,规模越来越大,这是一个历史趋势,各种铜矿类型的发现及其重要性也依此为转移。这些类型大体依次是脉状铜矿、矽卡岩铜矿、块状硫化物铜矿、铜镍硫化物铜矿、砂页岩铜矿和斑岩铜矿。60年代以来,以品位低规模大为特点的斑岩铜矿的大量发现与开发正好说明了这个趋势。多年来,国内外地质工作者对铜矿类型划分,各种类型铜矿成矿背景、成矿地质特征、分布规律及其成因,都做过不同程度的探讨。特别是60年代以来各种学科的渗透和新技术的引进,使铜矿地质由描述性认识向理性高度发展。因此一批成矿区带专著问世。如《非洲铜矿》(1964)、《西半球斑岩铜矿》(1978)、《欧洲铜矿》(1980)、《乌拉尔含铜黄铁矿》(1989)等,和一批典型铜矿床总结以及《铜的地质与经济》(1977)一书的出版等,为今后铜矿地质研究奠定了基础。谢家荣、孟宪民、郭文魁、宋叔和等对中国铜矿的勘查研究和总结做过开创性贡献。

历史表明成因分类只是一个暂时可以接受的概念。经过长期的探讨,国内外趋于以容矿岩石分类。这是因为一定的铜矿类型总是和一定的岩石类型相关联,而岩石组合最能反映矿石产出

地质环境和经济意义。它们按重要性依次是:斑岩型(约占世界探明铜储量的51.7%);海相沉积(变质)岩型(约占25%);海相火山岩块状硫化物型(约占10.3%);镁铁质—超镁铁质岩铜镍型(约占6%);脉型(约占3.2%);矽卡岩型(约占2.2%);海相沉积岩块状硫化物型(比例甚小);陆相砂页岩型(仅有个别大型矿例)。前4种类型占世界铜总储量约93%。

其成矿环境、时空分布和成矿模式如下。

**斑岩型** 斑岩铜矿产出在会聚板块边界,包括大陆边缘和岛弧环境。近年进一步认为多半形成在挤压弧系里。大型斑岩铜矿床不论与板块俯冲消减带关系密切与否,都与区域性深大断裂有关,常见于陆相火山断陷盆地边缘。

成矿时代集中在新生代(约占42.5%)和中生代(5.4%),其次是古生代(3.8%)。主要分布在环太平洋构造域、特提斯—喜马拉雅构造域和古亚洲构造域。而又主要集中在环太平洋成矿域的东部带。

以美国西南部斑岩铜矿为基础于1970年提出并于1974年进一步论述的Lowell—Gulbert蚀变分带模式,以西南太平洋岛弧带斑岩铜矿为基础于1978年由V. F. Hollister提出的“闪长岩模式”,R. H. Sillitoe于1972年提出的“斑岩铜矿系统模式”和在1979年提出的“斑岩铜矿巴尔下模式”等,导致了世界范围内斑岩铜矿勘查的许多重大突破。近年王之田等研究发现,斑岩热液蚀变过程中主岩和围岩的稀土元素具互补性,证实了热液对流的存在;锆亏损对斑岩铜矿化具指示意义。近年来强调了众人皆知但长期被人忽视的破裂裂隙事件,而印度马兰杰坎德斑岩铜矿的确认,可能为世界前寒武纪地域斑岩铜矿找矿开辟了途径。

**海相沉积(变质)岩型** 海相沉积(变质)岩铜矿多发育在稳定大陆内部裂谷或类似张裂构造环境的早期阶段。裂谷环境所以适合形成大型海相沉积(变质)岩型铜矿,在于以下4个相辅相成的有利条件:裂谷玄武岩富铜;裂谷盆地中氧化、还原环境的界限十分明显;裂谷盆地沉积同时有张性断裂活动;裂谷中存在高热流。

成矿时代集中在两个高峰期:中元古代和泥盆纪至二叠纪。主要发育在中非、美国北部、巴西萨洛博、俄罗斯乌道坎、阿富汗喀布尔和中国的中元古代海相沉积(变质)岩中,及中欧、哈萨克斯坦的石炭纪—二叠纪地层层序中。

成矿受同生—成岩—后生作用控制。近年经进一步研究,认为层状矿化是通过盆地卤水对流循环而就位,而卤水对流循环是由横穿盆地的地热梯度驱动的,受改造矿床矿化的富集与贫化程度主要取决于矿石改造区的古温度梯度。

**海相火山岩块状硫化物型** 该类矿床对于大地构造环境不具特别的选择性。离散板块边缘和会聚板块边缘均可产生,属地槽环境。

成矿时代从太古宙直到第三纪均有大型矿床。重要成矿期是太古宙—古元古代和晚古生代,主要分布在加拿大地盾、阿巴拉契亚、斯堪的纳维亚、乌拉尔、伊比利亚、科迪勒拉、土耳其—塞浦路斯、日本北鹿及中国祁连山、阿尔泰、阿尼玛卿山等地。

近年很多学者认为“火山成因块状硫化物矿床”一词不准确。目前主要有洋底热液对流圈模式(最流行的水动力模式)、地层含水模式、岩浆热液模式和热水沉积成岩成矿模式。因此,该类矿床矿液成因的争论远未形成一致意见。

**镁铁质—超镁铁质岩铜镍型** 该型矿床主要产出在克拉通地区陆内裂谷、陆内热点、陆边大断裂、绿岩带和增生褶皱带地区褶皱带边大断裂环境。

该类矿床在太古宙、元古宙、晚古生代和早中生代均有产出,以中元古代为主要成矿期。主要分布在加拿大的肖德贝里、美国的德卢斯、俄国的诺里尔斯克和中国的金川、喀拉通克等地。

该类矿床形成,包括多数来自地幔的镁铁质岩浆在克拉通内部侵位就地熔离成矿模式,以及镁铁质—超镁铁质岩浆深部熔离沿克拉通边缘或增生褶皱带边缘深大断裂及其浅部次级断裂上侵成矿模式。近年研究表明,地壳中如含大量的碱则为镁铁质

一超镁铁质岩浆所同化摄取而有利于铜镍矿床的形成。

研究热点是：(1)在类型上将主要集中在4大类型，同时注意发现和研制新类型。斑岩铜矿的发现和开发将持续稳步增长。(2)深入全球对比，加强铜矿成矿环境和时空分布演化研究，从宏观上指出找矿方向，而铜矿床与板块构造关系研究将是一个热门。(3)着重超大型铜矿的找矿研究和开发。(4)成矿模式研究向具有更高预测能力方向发展，着重成矿系统研究。(5)以地质理论为指导，因地制宜合理综合运用有关先进勘查技术，勘查模式研究将取得较大进展。(6)努力研制应用先进提取技术，充分利用铜资源，原地浸析采矿法将得到大发展。

#### 参考文献

- 1 Economic Geology, Seventy-Fifth Anniversary Volume, 1905~1980
  - 2 27th I G C. Abstracts, Moscow, USSR, 1984, 8(6)
  - 3 Economic Geology, 1985~1990, 80~85
  - 4 28th I G C. Abstracts, Washington, D C USA, 1989, 7(1~3)
  - 5 王之田, 秦克章. 地球化学, 1989, 4: 304~314
  - 6 Sawkins F J. Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics, 2nd revised and enlarged - Berlin: Springer-Verlag, 1990
  - 7 王之田, 秦克章. 矿床地质, 1991, 10(2): 119~130
  - 8 王之田. 当代地质科学技术进展. 北京: 中国地质大学出版社, 1992. 9~16
  - 9 29th I G C. Abstracts, Kyoto, Japan, 1992, 8~9(1~3)
- (中国有色金属工业总公司北京矿产地质研究所王之田教授撰)

## 地质、矿产普查与勘探

### 综合信息矿产资源评价和预测

the mineral

resource assessment and prognosis of synthetic information 是以找矿模型为基础，以地质体为单元，以计算机为手段，采用有效的数学方法，综合应用矿产的地质、地球物理、地球化学和遥感地质等多种信息，进行综合性矿产资源定量评价和预测的理论、方法和实践活动。它有别于以成矿模式为基础的常规矿产预测，受矿床成因争论的影响较小，侧重于成矿地质环境的分析、区域成矿规律的总结和找矿标志模式化研究，具有更大的客观性和实用性。随着各国地质普查工作的广泛开展，表露和易找矿床大部分已被发现，找矿难度日益增大，而矿产资源需求量却与日俱增。综合信息矿产资源评价和预测的提出及其应用，为矿产资源定量评价和成矿预测开辟了科学可靠的新途径。

利用数学方法进行地学研究，可以追溯到19世纪初。1833年，英国 Layer 首次运用统计分析方法对第三纪地层进行划分。但系统提出矿产资源定量评价思想始于20世纪中叶。20世纪50年代，M. Allais 提出矿产资源评价概念，认为在足够大的区域内单元中的矿床数服从泊松分布，并对阿尔及利亚的撒哈拉沙漠区的矿产资源进行了预测工作(1957)，奠定了矿产资源定量评价的基础。荷兰 Dewigs 提出元素含量的分异模型，并先后发展了矿产资源量估算的二项分布和对数二项分布模型。英国 Brinck 借用 Dewigs 思想，以对数正态分布模型作为矿产资源评价的基本概率统计模式，正式运用于较大区域内资源总量估算。这一阶段，研究的重点在资源分布方面，使用的数学方法主要是单变量的统计方法，还没有把成矿控制条件、成矿规律等同资源量有效联系起来。

60~70年代初，矿产资源评价受到高度重视，多元统计方法被大量地应用于矿产资源评价工作，矿产资源评价在这一时期得到迅速发展。1962年，J. C. Griffiths 利用判别函数建立了矿产资源评价模型。1965年，D. P. Harris 建立起地质条件同矿床价值关系的统计模型。1966年，Griffiths 完成了单位区域评价方法的研究，并于1977年与 Labouitz 等人建立了该方法的计算机程序

系统(COMOD)。英国 Brinck 的丰度估计法也于60年代末期形成。1969年和1971年，加拿大 Agterberg 把多元统计方法应用于地质变量的研究。1971年国际地质科学联合会拟定了国际地质对比计划第98项“资源研究中计算机应用标准”，对矿产资源评价工作的发展起到了推动作用。

70年代中期，矿产资源评价工作进入实用阶段。矿产资源评价理论基本形成，评价方法有效化和系统化，大规模的矿产资源评价计划在许多发达国家开始实施。在理论和方法上，Harris 的决策网络更加系统化，并已建立起完整的处理系统；与此同时，美国地质调查所建立了“勘探者”程序包，斯坦福大学和加利福尼亚大学人工智能中心建立了铅锌预测系统。Agterberg 发展了一套适用于岩性分析、矿产储量计算、地球化学勘探以及区域矿产资源评价的图像分析方法。Botbol 等人提出特征分析，并被 Mecammon 等人所发展，建立起逐渐外推广义特征分析模型(1981)。Harris 进一步发展了丰度估计法，同时考虑吨位、品位、成本及利润4项指标，将一维丰度估计变为四维丰度估计。前苏联学者提出了较有代表性的逻辑信息法。在实践上，一些发达国家开始实施大规模的矿产资源评价计划，如“美国尚未发现的石油和天然气可回收资源的地质估计”、“阿拉斯加矿产资源评价计划”、“美国国家铀矿产资源评价规划”、“美国本土矿产资源评价计划”、“阿巴拉契亚资源评价计划”、“芬兰的矿床模拟和矿产潜力评价”等等。

70年代中后期，矿产资源评价方法被介绍到中国，并应用于中国的矿产预测工作。1975年，赵鹏大完成了宁芜盆地中、北段的矿床统计预测工作。1978年，王世称开展了冀东水厂地区的变质铁矿预测工作。1981年在原地地质部规划院的组织下，对国际地科联第98项计划所推荐的6种方法进行了详细研究，经过3年的方法性试验，完成了多种方法的电子计算机程序设计。1984年在全国开展了铁、铜、金、石灰石4个矿种的资源总量预测工作。这标志着中国的矿产资源评价工作正走向实用阶段。80年代以来，赵鹏大等在矿产资源评价的自动化处理方面作了开拓性工作。王世称等将数量化理论和马尔柯夫链等数学模型运用到矿产资源评价中，先后同辽宁、浙江、吉林、山东、河北、内蒙、福建、安徽、江苏等省地质矿产局(队)合作，开展综合信息矿产资源定量评价工作。并在这一过程中提出了独具特色的综合信息矿产资源预测的理论和方法，弥补和克服了国外矿产资源评价工作的不足，建立了基本完整的理论体系和工作方法，使控矿信息进一步综合化，提高了矿产资源评价成果的实用价值，不仅能够进行矿产资源总量和资源潜力的预测，为国家或地区中、长期矿产资源政策的制定提供科学依据，而且能够具体地对资源的分布作出估计，圈定成矿远景区或靶区，为缓解中国地质普查勘探基地紧张的局面做出贡献，使普查找矿工作取得突破性进展，使中国的矿产资源评价工作步入世界先进行列。

综合信息矿产资源预测理论体系的核心由3部分组成，即综合信息找矿模型的建立；矿产预测模型及简化预测模型的建立；矿产资源预测的成果表达形式。其工作方法贯穿于整个预测工作的各个阶段，汇于一个统一的系统工程和工作流程之中(参见王世称等《综合信息矿产预测理论体系》)。其基本出发点在于力图从成矿预测宏观结构和每个研究环节上，优化预测系统，提高矿产预测的成功概率。

王世称的综合信息矿产预测法，找矿效果明显。地矿部已在“七·五”期间，通过多种方式在全国地矿系统推广使用。与此同时，综合信息矿产预测的理论和方法也在实践中得到进一步发展。主要表现在：(1)由单矿种单矿床类型到多矿种多矿床类型的多目标预测；(2)由在资料水平较高地区的模型定量类比预测到资料水平不高地区的无模型预测；(3)多种方法迭加、方法的有序渐进深入、多层次方法组合研究等；(4)采用人工智能技术，应用“专家系统”替代专家本人进行矿产预测。1991年9月，一个新的计算机软件系统——“王世称金矿预测专家系统”已经研制成功。它的推广使用，将在新一轮普查找矿和解决现有矿山后续

问题中发挥重要作用。

综合信息矿产资源定量评价和预测是数学地质领域中实用性很强的分支,具有广阔的发展前景。在矿产资源预测这项复杂的大系统工程中,每个阶段、每个研究环节都有值得进一步探索的课题。遥感数据处理、人工智能和专家系统、地质评价与经济评价、动态预测等则是应加强的环节。整个研究工作有待于进一步系统化和深化。其理论还需要从更多的矿产预测实际工作中不断总结和完善的,其工作方法也需要进一步优化和创新。

#### 参考文献

- 1 Boyle R W. Geological Survey of Canada, 1981, 75:844
- 2 Cox D P. et al. Mineral deposits models, Washington, U S A Government Printing Office, 1986
- 3 Thomas Lugaski. et al. The use of remote sensing to delineate gold and other precious metal deposits in Nevada. Proceedings of ISGGE, 1989
- 4 王世称,等. 综合信息解译原理与矿产预测图编制方法. 长春, 吉林大学出版社, 1989
- 5 刘承祥,等. 矿产预测的数学方法. 北京:地质出版社, 1989
- 6 赵鹏大,等. 地质勘探中的统计分析. 北京:中国地质大学出版社, 1990

(安徽省地质矿产局刘玲高级工程师撰)

**矿产勘查的植物学方法** botanical methods of prospecting for mineral deposits 金属矿区土壤中一些元素含量过高,常使一些植物中毒死亡,或发生某些变异,有些植物能够忍耐下来成为忍耐种,有些植物能适应这种环境,并生长得很好,有些植物能聚积某些元素。利用这些变化了的特征指导找矿,常把前几种特征称为地植物学方法,把利用植物中元素含量异常的称为生物地球化学法(因主要是以植物为对象,所以也可以称为植物地球化学法)。植物的这些变化特征虽各有独特的一面,但从植物本身来讲,几个特征是相互联系、不可分割的,因此可统称为矿产勘查的植物学方法。它是矿产普查与勘探的方法之一,在勘探隐伏矿方面更具有优越性。

早在公元 800 年,中国古籍中就记载有“山上有葱下有银,山上有薤下有金,……。”此外还记载有“草茎黄秀,下有铜器”、“草青茎赤,其下多铅”等等。表明中国古代已经注意到植物与矿的关系。在国外,1979 年 Cannon 和 Brooks,分别概括了这个领域的发展简史。1556 年 Agricola 进行了金属元素对植物生理影响的观察;1588 年 Thalius 记录了伴随含金属土壤上的春米努草(*Minuartia verna*);1640 年 Barba 记述了“一定的树木、沼泽植物和草本植物是矿脉的指示者,从表面上再现了地下矿脉的过程,生长在矿脉顶部的植物较小、细弱。”1841 年 Karpinsky 描述了出现在不同地质基岩上的不同的植物群落,较早发现并已被进一步证实的指示植物有:铜矿指示植物旋柱白鼓丁(*polycarpea spirostylis*)(澳大利亚,1889),锌矿指示植物欧洲黄堇菜(*Viola lutea*)(德国,1887),银矿指示植物卵叶绒毛蓼(*Eriogonum ovalifolium*)(美国,1897)。植物地球化学找矿的研究,最早的工作是俄罗斯的 Thalich(1938),瑞典的 Brundin(1939),他们取得了这个方法的专利。

60 年代已形成了较系统的方法,进入了应用阶段。主要工作集中在美国、前苏联、加拿大、英国等国家。其成果可概括为:在植物群体水上的为指示植物群落,在种群水平上的为指示植物种,在个体水平上的是植物变异、变态特征的指示作用和以植物成分分析为特征的植物地球化学法。这几个方面密切相关。

指示植物群落。Malyuga(1964),Brooks(1979,1983),Cannon(1979)进行了详细综述。概括起来,主要是利用植物群落学原理,通过由于矿化作用引起的植物群落种类组成、覆盖度、群聚度、生活力、周期性等特征的变化,以及地植物学作图,指导找矿。Cole(1978)报道,在南非利用 *Helichrysum leptolepis* 占优势的植物群落,发现了铜矿,在博茨瓦纳利用 *Echolum lugardae* 占

优势的植物群落预测了钙质砾岩以下 300m 深的铜矿;Ernst 研究了各地区指示植物群落,发现有几种植物是共同的,如芦叶堇菜(*V. calaminaria*)、高山蕨菜(*Thla spi alpestre*)、春米努草、蝇子草(*Silene vulgaris*)、海石竹属植物(*Armeria spp.*)和羊茅(*Festuca ovina*)。因气候的差异,有时偶然缺乏一两个种。他编制了芦叶堇菜群系纲的植物群落系列,然后分为 3 个“系”,并指出典型的植物群落出现在各自独立的矿化区域。在长江中、下游发现,由海州香薷(*Elcholtzia haichowensis*)、蝇子草(*S. fortunei*)、石竹(*Dianthus chinensis*)等植物组成的群落指示铜矿(李明喜,1974)。通过地植物学作图,利用指示植物群落的介线,在南非、澳大利亚等地发现了铜矿,以及铅、锌矿、铁矿。许多结果表明,在金属矿体的上方,植物群落种类组成比非矿化区少,植物生长不好,在林区常形成林窗。近些年来,植被遥感技术在矿产勘查上的应用,发现了一些矿体。

指示植物,是植物种或变种在矿化土壤上的出现或缺乏,指示出基岩的化学组成状况。常分为通用指示植物和局部指示植物。据不完全统计,已报道的指示植物近 200 种,但不少指示植物的发现,缺乏准确性的考证。确切知道现在或过去在找矿中应用过的指示植物是少数。Cannon(1960)列出了 32 种,Malyuga(1964)列出 25 种,Brooks(1983)列出 80 种。这些种多属于豆科、石竹科等的草本植物,且大多数是铜、铅、锌、镍、钴、铀矿指示植物。中国报道过 16 种,除海州香薷(谢学锦,1953)曾被推广应用并被许多文献引用外,其它尚未被验证和推广。

植物体变异变态的指示作用被广泛研究。结果表明,在过高的金属元素影响下,植株颜色变化、器官发育异常、物候期提前或延后、株体肥大或矮小。如在铜矿上植物叶片出现褪绿病,茎的颜色常变为紫红色;在钼矿上,蔷薇科植物 *peraphyllum rammosina* 的花由粉红色变为白色;在锌矿区的罂粟属植物 *papover macrostomum* 花瓣具有缺刻(Cannon,1979)。铜矿上的鸭跖草(*Commelina communis*)花序上的第一朵花常能形成,在非矿化区,第一朵花常常连花蕾也不能形成(李明喜,1974)。再如长柄灰叶(*Tephrosia longipes*)的矮化、多枝的形态和蔡氏风车藤(*Combretumzeyheri*)果实的变大是典型的铜的生态型;新西兰的海桐花(*pittosporum rigidium*),在正常条件下几米高,在含镍、铬高的蛇纹岩地区变为几十厘米高的垫状植物(Cannon,1979)。

植物地球化学法(是生物地球化学的主要部分)。Brooks(1979,1983),Kovalevskii(1987,1991)等人作了详尽的综述。重点集中在植物对金属元素吸收积累特点(积累金属元素植物条)和植物地球化学法找矿。在美国,50~60 年代 Cannon 起了极大的推动作用。另一些活跃的工作者如 Chaffee 分析了 *microphyllum* 和 *Larrea tridentata* 3 种植物中的铜、锌、钼和锌的含量,在隐伏矿体上方出现异常,而土壤未出现异常,在特殊景观区是一种有用的勘查工具;在干旱环境中,利用深根植物 *prosopis juliflora* 勘查铜矿,亦是有效的工具。1985 年 Erdman 论述了植物在勘查金矿上的作用,列举了 133 篇文献。前苏联植物地球化学找矿的工作大大超过其它国家,最活跃的科学家是 Malyuga, Kovalevskii, Talipov 等人。Kovalevskii 主要在西伯利亚森林覆盖区工作,利用他提出的生物障原理,1978~1982 年发现了 4 个矿床,1988 年他提出了进行矿产普查的岩石—生物地球化学、水—生物地球化学和气体—生物地球化学模型。Talipov 的工作大多是植物地球化学勘查金矿的研究。H. V. Warren 及其同事们在加拿大做了开创性的工作,近期的许多工作涉及到植物地球化学法勘查金矿的研究。此外,澳大利亚、英国、新西兰等国家都进行了大量的植物地球化学勘查工作,利用植物元素含量异常分别圈出了铜、锌、铅、钼、金等矿体的轮廓。中国近些年来进行了一些植物地球化学找矿的试验研究,在铀矿(戴兴根,1981)和在干旱半干旱区的试验研究(孔令韶等,1988),都取得了满意的结果。此外还有一些报道是利用树液、植物挥发性物质的航空低空大气取样和利用极少量的标本室的标本进行生物地

球化学的研究,以及苔藓、地衣、泥炭、腐殖质等的生物地球化学研究。

当前矿产勘查的植物学研究和应用的热点是:(1)寻找隐伏矿。由于一些植物具有发达的根系,深入到土壤深层、岩石裂隙等部位,像采集器一样,吸收积累某些元素,它的异常能够显示出较深部位矿床的存在。在森林、沼泽区,地表有风沙干扰和厚层运积物覆盖区,以及在寻找盲矿等方面,植物作为采样介质,进行植物地球化学勘查具有优势。(2)勘查金矿。近年来找金矿热和中子活化高技术来分析植物中微量金含量的利用,已成为金矿勘查的热点之一。出版了许多有份量的专论和研究报告(Erdman, 1985; Siegel, 1991; Brooks, 1982),发现了许多聚积金的植物种类,作为采样介质勘查金矿。研究结果还表明,植物中的铜、砷、镉等元素异常,对勘查金矿也具有意义。(3)植被航空遥感找矿,近年来受到重视。1991年在第8届国际遥感地质专题讨论会上,对这一新技术进行了交流和肯定。受金属元素毒害的植物褪绿、变异变态、矿体上方植物群落种类组成变化等,光谱特征会发生很大变化,这种变化反应出矿致异常。植被遥感应用在勘探者难以涉足的森林、沼泽区或植被覆盖度大的地区,会取得很好的勘查效果。

植物法找矿,有些研究者也评论了它的不利方面,如采样种类、植株部位的选择较难确定,样品分析的前处理复杂等。但近期的研究表明,快速、简便、准确分析技术的发展,有些不利因素正逐步克服。总之,植物学找矿已形成了一整套的理论和办法,展望未来会有新的发展,与其它勘查方法联合应用,将会充分发挥它的优势。

#### 参考文献

- 1 Malyuga D P. Biogeochemical methods of prospecting, New York: Consultants Bureau, 1964, 205
- 2 Brooks R R. Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration. New York: John Wiley & Sons, 1993, 9~84, 162~265
- 3 Erdman L A, Olson J C. J Geochem Explor, 1985, 24: 281~304
- 4 彼得·胡德编,地球物理和地球化学找金属矿(地球化学部分)谢学锦,等译.北京:地质出版社,1986, 112~136
- 5 Kovalevskii A L. Biogeochemical exploration for mineral deposits, 2nd ed. Utrecht, Netherlands: VNU Science press, 1987, 8~209
- 6 Busche F D. J Geochem. Explor, 1989, 32: 199~209
- 7 孔令韶,高平,任天祥,等.植物学报,1991, 33(7): 529~541
- 8 Siegel F R, Barrows J A N, Barrows E M. J Geochem. Explor, 1991, 41: 257~289
- 9 Ковалевский А. Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, сб. отл.-нисю, 1991, 122~200
- 10 孔令韶,高平,任天祥,等.植物学报,1992, 34(10): 781~789  
(中国科学院植物研究所孔令韶研究员撰;姚士硕审)

**点断平衡说** punctuated equilibria model 1972年, Eldredge 和 Gould 根据泥盆纪三叶虫和更新世陆生腹足动物的研究资料提出“点断平衡”学说,来说明生物演化事件在地史中的分布规律。他们认为地质历史中生物演化事件的发生、新分类单元(新属、新种等)的出现,绝大多数是在很短的地质时间内完成的。和达尔文的理论不同,点断平衡学说强调新种和地史中重大的演化事件主要是通过成种作用完成的。成种作用通常是发生在小居群内,并且持续时间很短,因此,地史中新种形成过程一般是很难有机会保留在化石记录中的。该学说认为,地层中缺失的是发生在局部地区,持续时间很短(几千年到几万年)的物种分化过程,而不是持续数百万年的物种逐渐演化的步骤。这就是未能在地层中发现大量中间类型或过渡类型的原因。

Mayr(1970)认为,由少数先驱个体所构成的新居群往往只

包含了物种内整个基因变异的一小部分,虽然这种小居群很有可能包含了该物种内最常见的变异,但其内部的等位基因频率将不可避免地不同于主体居群。因此,由少数先驱个体构成的小居群实际上是形成了一个独特的基因群,在和物种的主体居群隔离开来的情况下,这种小居群往往会发生迅速的分化。这种现象,也被称之为“定殖原理”。Mayr(1970)还指出,在其它条件相等的情况下,居群越小,居群内基因发生迅速变化的可能性越大。如果这些先驱个体是进入了一个新的生态环境的话,它们所面临的选择压力也将会改变。Carson(1968)的研究表明,当一个小居群迁入到一个没有天敌、没有竞争者的新环境后,原先被竞争、捕食所压抑的变异将会迅速地表现出来。他将这样一种机制称为“居群膨胀”。利用计算不同地史时期动物群的“莱伊尔百分比”的方法,Stanley(1979)对不同门类物种在地史中延续的时间进行了估算。他认为,地史中已形成的物种一般都要延续100万年到1000万年左右。由于物种延续的时间是如此之长,这就表明世系演化(一个物种向另一处物种的转化)的速率很低,由此可以推测,地史中新的分类单元的出现必然主要是通过“成种作用”(分枝)完成的。

点断平衡和传统的世系渐变学说之间的最大分歧在于如何认识世系演化在生物演化的整个历程中的重要性。

Schopf(1982)认为,化石物种是一个模糊的、广义的和多源的物种概念。古生物学家不会把仅仅出现在一个局部地区或一块露头上的标本称为一个独特的种。相反,古生物学家往往总是选择那些可以适用于一大批标本的形态特征作为分类依据,这样做的结果必然是掩盖了物种之间的微小差异。他认为,如果把一个在地史中延续了100万年的简单“形态体”当作生物种,这显然就会出现点断平衡学说所描述的物种“停滞”现象。但如果这一形态体实际上包含了100个生物种的话,每个物种延续的时间则不超过10万年,这样,就不存所谓的“停滞”。对这一问题,Stanley(1985)认为,尽管化石物种中有可能包含有“亲缘种”,但这正说明世系演化造成的形态差异很小;如果一个化石物种中包括了一些同时存在的亲缘种在内的话,实际上是为物种形态的“停滞”提供了更广泛的证据。Schopf(1982)指出,保留为化石的只是生物的部分硬体;而在自然界大约只有1/10左右的基因突变可以表现在生物的骨骼上。根据化石来研究物种延续的时间,必将大大地低估了生物的演化速率。

Stebbins 和 Ayala(1981)认为,点断平衡学说是在重复前入早已提出的一些论点,它的基本内容实际上是包括在新系统学所研究的内容中的。Boucot(1978)提出,Simpson(1944)关于“数量演化”的学说就可以合理地解释生物地层学中的一些问题。而Gould(1982)则认为,点断平衡学说研究的是地史中一物演化的速率和模式,它和前人关于物种突变的学说不同。前人的这些学说研究的是物种突变的机制;而点断平衡学说研究的是物种分化事件在地质历史中的分布规律。

虽然对待点断平衡学说学者们意见不一致,但是它对地史中生物演化的研究有推动作用。

1. 宏观演化和物种选择。Stanley(1975, 1979)提出,除了“谱系漂移”和“定向分化”外,生物演化的宏观趋势主要是由物种选择所决定的。物种选择的过程可以和自然选择的过程相类比。某一门类的演化趋势主要是由该门类中分化速度较快、生存时间较长的物种的演化所决定的。

2. 对地史中动物群演化规律的研究。1984年, Malmgren 等采用“特征形态分析”对新生代浮游有孔虫 *Globorotalia tumida* 物种谱系进行研究,发现在其延续的整个地质时期中, *G. tumida* 物种谱系在很长的一段时间内保持着形态的稳定,但物种谱系内新种的形成则是通过世系演变在一个不太长的地质时期中完成的。Lazarus(1986)对放射虫 *Pterocanium prismatium*-*P. charybdium* 物种谱系的研究显示, *P. prismatium* 向 *P. charybdium* 的演化过程可以分为两个不同的阶段。第1阶段以物种的分化(分枝)为特征,这一阶段只持续了大约5万年左右。第2阶段以迅速

的形态分异为特征,分化后的两个后裔分枝迅速地向不同方向发展,这一阶段持续了约50万年左右,在这一阶段中世系演化的速率很快。而在随后的200多万年中世系演化的速率则较低。他认为,该物种谱系演化所表现出来的特征既不完全点是点断平衡,也不是绝对的世界系渐变,而是两者兼而有之。Cronin(1985)运用多变量的分析方法对海洋介形类的研究表明,长期的形态稳定和迅速的物种分化,是西大西洋浅海介形类的演化规律,这又和点断平衡学说所预见的规律相吻合。

3. 对生物形成演化速率的研究。1985年,Charlesworth提出了一个数学模式来检验世系演化速率是否可以造成种间的形态差异。根据这一模式,Cheetham(1986)对新生代苔藓动物的形态演化速率研究表明,苔藓动物物种内的形态演化速率不足以造成其种间的形态差异。他的研究成果和点断平衡模式相一致。Hallam(1975,1978)对欧洲侏罗纪瓣鳃类的研究表明,瓣鳃类的演化具有物种个体逐渐增大的趋势。但是,他还注意到除了个体大小的变化以外,这些瓣鳃类的其它形态特征在同一时期中始终是处于一种“停滞”状态。Stanley和Yang(1987)认为,由于这些形态特征的演化速率很低,世系演化造成的不同时代居群之间形态上的差异极小,因此,这种物种内部形态的微小变化不足以造成瓣鳃类不同物种之间的形态差别。

#### 参考文献

- 1 Gould S J, Eldredge N. *Paleobiology*, 1977, 3: 115~51
- 2 Schopf T J M. *Evolution*, 1982, 36: 1147~1157
- 3 Cronin T M. *Sciences*, 1985, 227, 60~63
- 4 Lazarus D. *Paleobiology*, 1986, 12(2): 175~189
- 5 Stanley S M, Yang X N. *Paleobiology*, 1987, 13(2)
- 6 杨湘宁. *古生物学报*, 1988, 27(4): 514~520

(安徽省农业科学院罗守进撰)

### 油气勘探

prospecting of oil and gas 石油和天然气资源

是不能再生的天然能源,是千百年来人类社会赖以生存和发展的重要物质财富。在当今世界工业技术蓬勃发展的今天,人们把石油喻为“工业的血液”。因此世界各国对石油和天然气资源的勘探开发前景,是反映一个国家工业经济的发展速度和社会发展的历史进程。

油、气勘探,是石油和天然气矿产普查工作(包括油气概查、普查和详查)的继续。它是在大区域内的油、气普查工作基础上,即在已经查明是具有良好油气生聚条件的区带或盆地内进行的一项综合性很强的工作。其目的和任务在于探明含油气区内油气藏的工业价值,探明油气藏的规模和类型,确定含油气面积的大小和展布特点,计算石油和天然气的资源量,分析和研究油气田的时空分布规律和进一步发现新的工业油、气田,为该区域内油、气田的开发提供可靠的资料依据,为国民经济建设持续稳定的发展奠定物质基础。

中国的油、气田勘探历史悠久,远在3000多年以前,中国的史书《易经》上就有关于石油资源的文字记述,秦汉时代的历史史册上,已有许多有关油、气资源开发和利用方面的珍贵文字记载。我们的祖先不仅最早发现和利用了石油,而且远在2000多年以前(公元前115年),就开始用钻井技术开采地下的石油和天然气。据1521年在《蜀中广记》一书中就记载有四川嘉州一带从地下1000多米深处开采石油的历史事实,这说明中国的油、气勘探历史比美国的第一口石油探井(1859)和前苏联的第一口石油探井(1848)都要早320多年以上。从19世纪中叶到1949年,是中国近代石油、天然气工业的发展阶段,在这长达70多年的历史进程中,经过普查和勘探,只发现了5个油田和7个天然气田,当时中国的油、气勘探历程,可以说步履艰难、发展缓慢,尽管在中国辽阔的大地上蕴藏着丰富的石油和天然气资源,但还是外国“洋油”倾销中国市场,使中国的石油工业长期以来处于岌岌可危的境地。

中国大规模的油气勘探开始于1949年。从1949年到1990

年的41年间,在全国范围内广泛进行的油气勘探工作中,不仅发现了数以百计的重要油气田和工业油气流,而且在中国的近邻海域内,诸如渤海、黄海、东海及南海所属的珠江口、莺歌海和北部湾等盆地内经勘探,找到了不少油、气田和工业油气流。这样我国近代石油工业发生了重大的飞跃,石油和天然气不但自给有余,而且还大量出口。经过大规模的油气勘探,中国的油气产量和储量比1949年前增长了几百倍甚至上千倍。中国从一个贫油国,跻身于世界石油强国之林。

随着油气勘探工作的深入发展,中国的成油地质基础理论,尤其是生油、储油和油气藏的形成理论,取得了新的重大的突破,在油气勘探工作中对新的勘探方法和勘探技术方面的应用,也取得了很大发展,特别是对高精度、高效能的各种新的勘探技术应用方面,得到了很大发展。

目前,就油气勘探方法而论,世界各国主要采用的是地质勘探法、地球物理勘探法、地球化学勘探法和钻井法等。

**地质勘探法** 油气田调查和勘探工作中的最直接、最重要和最基本的油气勘探方法,它是油气资源勘探工作的先行。地质勘探法包括的内容十分广泛,主要是阐明和正确地处理好油气田调查与勘探工作中的一系列地质技术问题。诸如对含油气盆地的基本地质构造特征、油气生聚条件、生储油性能、油气资源评价及进一步开展工作的资料依据等。

**地球物理勘探法** 地球物理勘探技术的广泛应用,在中国油气勘探事业的蓬勃发展发挥了极其重要的作用。它是根据地下岩层的密度、磁性、电性以及弹性等物理性质的不同,在地面上应用灵敏度高的精密仪器进行测定地下深处的各种物理参数和信息,从而了解和研究地下的油气生聚条件和控制油气的地质构造背景,以便达到寻找油气藏的目的。因此,地球物理勘探法,是一种间接的寻找油气的方法,它包括重力勘探、磁力勘探、电法勘探和地震勘探等4种方法。在各种地球物理勘探方法和参数研究中,由于地震勘探法精度高、效能好,故在油气勘探工作中发挥了很好的作用,尤其是三维地震勘探技术的推广和应用,为在复杂的地质构造区域进行油气勘探创造了优越的条件。另外,非地震油气勘探技术方法已由50年代的重磁力勘探,发展到80年代以来的大地电磁测深和激发极化法检测油气藏的新技术、新方法的应用。此外,还有一种是矿场地球物理勘探法,它是通过定量地测定井下地层的电、声、光、核、热、力等物理量,根据不同地层和油、气、水层所具有的不同物理性质,确定井下油、气、水层的位置,从而达到定量解释油、气层的厚度、油水饱和度及储量、储气层的物理性质。

**地球化学勘探法** 是利用化学分析的方法,对含油气远景区内的地层、残坡积土壤、气体和水化学分析样,测定由于地下油气的运移和扩散后形成的化学和生物化学异常的变化,分析和研究地下油气资源的分布情况。目前,为了减轻中国油气勘探的难度,中国不少研究部门提出了物化探多参数直接找油气的方法。这一方法是采用氧化还原电位法、放射法、地温法、 $\Delta C$  芳烃分析法和瞬变电磁测深等物化探相结合的多参数直接找油气法。这一方法通过实践验证,获得了成功。

**钻井勘探法** 钻井技术是油气勘探和油气田开发阶段工作中,勘探石油和天然气最直接的方法,也是发现油气藏和把油气资源开采出来的不可缺少的重要技术手段。在油气勘探过程中,根据钻井任务的不同,可细分为制图井、构造井、基准井、参数井和探井等。

当前,中国的油气勘探形势处在一个重要时期,那就是石油和天然气的产量逐年上升缓慢,后备勘探基地日趋紧张,主要老的油气田已进入高产晚期,油气勘探成本和勘探技术难度逐年增大,今后数十年内油气勘探总的任务,必须是加紧勘探,积极寻找后备基地,探明更多的油气资源,以满足国民经济飞速发展的需要。基于此,中国今后的油气勘探方针,只能是“稳定东部,发展西部”,立足于老油气区,着眼新含油气区的勘探,积极发展陆、海油气勘探并举的战略决策。



## 参考文献

- 1 Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence Springer verlag, Berlin Heidelberg, New York, Tokyo, 1984
- 2 朱世新,等. 油气田调查勘探与资源评价. 北京:地质出版社, 1988
- 3 当代中国丛书编辑部. 当代中国的石油工业. 社会科学出版社, 1988
- 4 吴传壁等译. 油气化探的理论与方法. 北京:地质出版社, 1989

(中国地质科学院 562 综合大队高级工程师张长华撰)

## 石油地质学

石油地质学的诞生和发展,与油气勘探开发活动密切相关。同时世界油气勘探开发的发展,促进了石油地质学的新进展。

世界石油工业从发展起,大约经历了煤油时代、汽油时代燃料及化工原料时代。寻找油气资源的总趋势是由易到难:从陆地向海洋、从地理条件较好地区向极地、从地质结构简单的背斜油气藏向复杂隐蔽的非构造油气藏及逆冲推覆带,从中深井向超深井发展。

**世界油气勘探特点** 寻找大型油、气田仍然是首要目标。据美国 Halbouty 估计,全球约有 600 个沉积盆地,其中已有 400 个投入了勘探大约有 160 个盆地产出了工业石油,估计尚有 100 多个盆地会产石油。在全球 160 个产工业石油的盆地中,发现储量超过  $70 \times 10^8 \text{t}$  石油或等量天然气(通常按  $1000 \text{m}^3$  天然气折算为  $1 \text{t}$  石油)的大型盆地只有 6 个,即波斯湾、西西伯利亚、伏尔加—乌拉尔、马拉开波、墨西哥湾及锡尔特等盆地,它们拥有的油气储量占世界发现储量的 65%。全球正在生产的油、气田已逾 3 万个,所发现的特大型油、气田尽管为数不多,但在世界储量上却占有重要地位。据不完全统计,最终可采储量超过  $15 \times 10^8 \text{t}$  的世界特大油田 10 个,其储量占世界石油总储量的 50% 左右;最终可采储量超过  $9800 \times 10^6 \text{m}^3$  的世界特大气田 10 个,其储量占世界天然气总储量的 30% 左右。由上可知,寻找大型油、气田,寻找油气资源特别丰富的大型盆地,具有重要的意义。

**加速海上油、气田勘探**。海上油气勘探至今已逾 40 年,油气产量占世界油气总产量的 30% 左右。海上勘探的领域从大陆架扩展到大陆坡,今天已向深海和极地发展。目前所钻的探井水深可达 2100m,开发井水深达 400m。北极圈是当今世界海上勘探最困难的区域,但是加、挪、美、前苏联等国都在大力加强极地油气勘探。据不完全统计,加拿大发现了希伯尼亚和阿毛里加两个大油田,前者可采储量油  $3 \times 10^8 \text{t}$ 、气逾  $500 \times 10^8 \text{m}^3$ ,日产油 1300~2300t,气  $64 \times 10^4 \sim 120 \times 10^4 \text{m}^3$ ;后者距岸 60km,水深 32m,1984 年第 1 口井日产油 833m<sup>3</sup>,第 3 口井 23 天产油  $5 \times 10^4 \text{m}^3$ ,可采储量达  $1 \times 10^8 \text{t}$ 。挪威在巴伦支海 6 年勘探发现 4 个主要油气田,可采储量气  $3500 \times 10^8 \text{m}^3$ 、油  $8500 \times 10^4 \text{t}$ 。美国继发现普鲁德霍湾大油田后,在北极又发现一个近海油田恩地科特,水深 1.2~3.7m,1978~1988 年建成投入开发,产能  $1.39 \times 10^4 \text{t/d}$ ,可采储量  $4800 \times 10^4 \text{t}$ 。前苏联在开发西西伯利亚的大型油、气区后,现也向北极圈开展海上勘探。

**加强天然气勘探**。天然气是热值高、用途广、价廉物美的洁净资源,世界各国纷纷重视加强天然气勘探,以弥补石油资源的不足。1950~1985 年世界油气储、产量的增长速度,天然气比石油增长更快。

**大力寻找非构造油气藏**。背斜理论指导油气勘探的黄金时代,从世界范围而言多已过去,寻找受地层、岩性因素控制的非构造油气藏,早已引起许多产油气大国的重视。1917 年首先在委内瑞拉发现了玻利瓦尔湖岸油区,可采储量  $47.7 \times 10^8 \text{t}$ ;美国继 1930 年发现东得克萨斯大油田(可采储量  $7.3 \times 10^8 \text{t}$ ,累计产量已逾  $5 \times 10^8 \text{t}$ )后,相继发现了潘汉得尔油气田(累计产气  $7000 \times 10^8 \text{m}^3$ ,油逾  $1.25 \times 10^8 \text{t}$ )和普鲁德霍湾大油田(可采储量油

$13.12 \times 10^8 \text{t}$ ,气  $26 \times 10^{12} \text{m}^3$ );其他如墨西哥的波扎—里卡(可采储量  $3.8 \times 10^8 \text{t}$ )。阿尔及利亚的哈西·迈萨乌德(地质储量  $34.7 \times 10^8 \text{t}$ )等,都属于由地层或岩性因素控制的世界大型非构造油气田。

随着现代数字地震技术的蓬勃发展,促进了现代沉积学的宏观研究。实践证明,现代数字地震勘探技术与沉积体系、沉积相研究相结合,已经成为寻找非构造油气藏的有效勘探方法。墨西哥在波扎—里卡油田中生界生物礁油气藏开发后期,采用上述先进技术在其上覆下第三系中,又发现了始新统下部奇孔特佩克组深海浊流水道砂岩透镜体油藏,沿古浊流水道分布延伸,石油聚集受砂岩厚度及岩性控制,与构造关系不大。奇孔特佩克组由暗色页岩、粉砂岩、砂岩组成,页岩生油,砂岩透镜体普遍含油,估计可采储量高达  $20 \times 10^8 \sim 25 \times 10^8 \text{t}$ ,属特大油田。

上述世界油气勘探的动向及特点,决定了石油地质学必须向若干边缘学科方向发展,才能满足勘探的需要,促进生产的发展。近 20 年来,石油地质学获得了显著进展。

## 石油地质学进展

1. 板块构造学说的应用。表现在:(1)含油气盆地分类方案繁多;过去的含油气盆地分类多限于陆地和大陆边缘,板块构造学说诞生后,含油气盆地分类方案如雨后春笋,异常活跃,不再限于陆壳型和过渡壳型的盆地,而是眼光更为开阔,注意到洋壳型盆地,对盆地类型及其形成机制的认识也更为深刻,油气勘探的预见性增强,领域更广。(2)油气无机成因说重新活跃;板块构造学说的出现,以及在巨大转换断层带和环太平洋俯冲带发现了大量烃类显示,说明与上地幔的物质活动有关。因此,国内外不少学者重新提倡油气生成的无机来源,在地盾、俯冲带及转换断层带的油气勘探与科学研究显著加强。(3)逆掩推覆带找油引起重视;以往地质学家们认为逆掩断层带构造复杂,保存条件差,很少列为油气勘探对象。由于板块构造学说将烃类生成及显示与上地幔活动联系起来,大型逆掩断层带正可成为深部油气向上运移的通道,只要遇见良好圈闭便可聚集成油气藏。美国落基山东麓逆掩推覆带若干重要油气田的发现证实了上述观点,开拓了油气勘探领域。

2. 有机地球化学的应用。它使石油地质学的基本原理发生了天翻地覆的变化,油气成因的研究始从定性向定量发展,提高了油气勘探成功率。有机地球化学的现代技术和先进设备,使有机质类型、丰度及成熟度研究愈益深入,地球化学指标大量涌现,烃源岩及生气区、生油区的评价均可达到定量水平,生物标志化合物及同位素地球化学自 80 年代以来发展尤快,甾、萜、异戊间二烯型烷烃等类生物标志物的研究,有助于探讨油源对比、母质类型及成熟度;同位素地球化学研究对解释气源对比、油源对比、有机质成熟度、天然气成因类型及地层绝对年龄等,均具有重要意义。现在有机地球化学技术正被推广用来探讨油气运移、聚集和保存问题,用来发展地面地球化学勘探技术,探索直接找油气的途径和方法。

3. 地震地层学的应用。地震地层学是现代数字地震勘探技术与地层学、沉积学、石油地质学相结合衍生的一门新兴边缘学科,对油气勘探与开发均具有重要意义。目前可将地震地层学明确地划分为区域地震地层学(含层序地层学)与储层地震地层学(含开发地震学)两个范畴。前者主要是利用地震反射剖面结合少量岩芯及测井资料,研究盆地内各层序的沉积环境,分析体系域的类型、特点及分布,重塑沉积史及构造史,对生、储、盖、圈等条件作出评价,寻找非构造圈闭,为预探并提供钻探对象。后者是近几年萌芽的一个新研究动向,在一个局部构造或沉积单元内对地震资料进行特殊处理,综合测井及岩芯资料,定量研究薄砂层或薄石灰岩,确定薄砂层厚度或薄石灰岩溶蚀带厚度,计算孔隙度、渗透率、泥质含量等物性参数与含气饱和度、含油饱和度、气水界面、油水界面、剩余孔隙流体压力等含烃性参数,甚至探索直接寻找气藏或油藏的方法,为详探井、生产井、调整井等提供钻探对象。

4. 储层评价技术。随着油气勘探的深入发展,尤其是在深部油气勘探和天然气勘探中,对储集层的研究和评价技术愈显重要,在盆地、区带及油田的勘探、开发全过程中,如何对储集体、储集层、储集性质及储集效率逐级进行定性和定量评价,日益成为勘探或开发成败的关键。所以国内外学者正在加强储层评价技术的系统研究,包括区域储层评价技术、单井储层评价技术、开发储层评价技术、动态储层评价技术和敏感储层评价技术等5套。这些成套储层评价技术的研究,必将显著提高油气勘探与开发的成功率。

5. 数学地质和计算机的应用。数学和计算机技术的引入,正在促使石油地质学及油气勘探技术发生更加深刻的革命。各种数理统计方法在沉积学、古生物学、构造地质学、石油地质学中早已得到广泛的应用。特别是近几年来,应用计算机技术,编制各种地质图件,建立各种数据库、开展盆地分析与模拟,进行不同勘探阶段的油气资源评价和储量计算,并进一步探索建立各地质学科的综合专家系统。

综合石油地质学的上述新进展,可以为油气勘探工作中的盆地描述、区带描述、圈闭(油藏)描述提供新技术,显著提高油气勘探成功率,促进油气地质勘探及开发事业的蓬勃发展。

(石油大学张厚福教授撰)

**塔里木地台** *tarim platform* 位于中国新疆维吾尔自治区南部,其主体为塔里木盆地,现已被塔克拉玛干沙漠所覆盖,南北两侧分别被昆仑山和天山山脉所限,由于盆地内发现了丰富的油气及其他矿产资源,引起了国内外对它的极大重视。

20世纪初,地质学家已认识到塔里木盆地的沙漠覆盖之下,有一个在古生代以前就已固结的刚性古老地块,其上有未变质的震旦系冰碛岩及古生界,和其周缘的古生代褶皱山系有明显不同,将其称之为“塔里木地块”,这一名称被一些学者应用至今。70年代以后,黄汲清(1974)、王鸿祯(1981)等先后将它改称为“塔里木地台”。李春昱(1980)提出了“塔里木板块”一名,最初是作为“中朝—塔里木板块”的一部分,其主体分别为中朝地台及塔里木地台,同时包括了地台两侧的部分褶皱山系。所以,现在所说的塔里木地台是指以塔克拉玛干为主的塔里木盆地部分,并包括了其周缘的库鲁克塔格、柯坪塔格和铁克里克等基底出露区。

作为一个地台,其基本特征是具有元古宙或更老的结晶基底以及古生代以来未变质的沉积盖层。对塔里木地台的基底,过去的争论在于是否有太古代的古老岩块抑或仅由元古代的变质岩系所组成。这些基底在塔里木盆地南北两侧均有出露。目前的研究已知,最老的基底出露于北侧的库鲁克塔格地区,称为达格拉格布拉克群。这是一套深变质的片麻岩、片岩和角闪岩类岩石,具有强烈的混合岩化。同位素年龄有1757.16Ma(Rb—Sr,全岩)、2487.70Ma(U—Pb,锆石)和3263Ma(Sm—Nb,全岩)等,表明其时代属晚太古代甚至可能更老。

下元古界在地台南北两侧均有出露。北侧称兴地塔格群,是一套以片岩为主夹石英岩、大理岩的副变质岩系,侵入其中的片麻状花岗岩同位素年龄为1976Ma。在南侧的铁克里克地区称埃连卡特群,岩性组合及时代均与北侧相似,同属地台早期基底的一部分。

中元古代开始,地台在老陆核两侧开始出现分异。在地台北侧,长城系杨吉布拉克群主要是浅变质的砂岩、千枚岩和片岩;蓟县系爱尔基干群由大套变质碳酸盐岩所组成,下部镁质较高并含丰富叠层石,上部夹有片岩和变质火山岩,后者年龄为1005Ma(Rb—Sr,全岩);青白口系帕尔岗格塔群下部为变质的浅海碎屑岩,上部为富含叠层石的变质碳酸盐岩。故而在地台北侧中—上元古界总体都属于台内陆表海—台缘边缘的沉积。在地台南侧,据最近的研究,长城系至青白口系也是一套类似的地台盖层型沉积,但夹有一定的深水沉积并含火山岩。这些都表明在中、晚元古代时地台核心虽已固结,但边缘仍具明显的活动性,尤其南侧

更强烈。青白口纪的塔里木运动(800~850Ma)代表了地台基底最后形成的时期,其上的震旦系是地台上的第1个真正的盖层。

现在的地球物理资料已证实,塔里木盆地内大体以北纬40°为界南北两侧的基底在构造性质和方向上均有所不同,并认为南部的基底比北部更老一些。另外,近年的研究还认为,塔里木的基底也是由不同的古老岩块在晚元古代末以前拼合而成的,阿克苏地区年龄为720Ma的片麻岩就是这些拼合活动的证据。

从震旦纪到奥陶纪地台内部主要是一套稳定型的海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积。震旦纪时地台南北两侧均见有冰碛岩及少量基性火山岩。寒武系下部有含磷硅质岩沉积。与此同时,在塔里木地台外围,亦即板块边缘的部位,分布有一些较深水的沉积,甚至有火山岩。志留纪时地台北部海水有所变深,形成一些与海底扇有关的沉积。志留纪后期海水又逐渐变浅。志留纪末,塔里木板块和北侧的哈萨克斯坦板块碰撞,拼合成一个统一的陆块。塔里木地台也一度升起成陆地,其上的泥盆系发育不全。

石炭纪开始,塔里木地台重新受到来自两侧的海侵,并逐步扩大。直至早二叠世后期,地台普遍上隆,海水退出。北侧柯坪一带并有玄武岩喷发,代表了古生代末期的一次地壳开裂活动。其后,塔里木北面的天山洋盆闭合,并导致塔里木地台西侧地壳大规模由西北向东南方向推覆以及地台边缘大量中性岩浆侵入。

中生代早期,塔里木地台上只有零星山间盆地沉积,地台南侧有无三叠系尚有争论。早白垩世晚期开始,特提斯海水大规模由西向东推进,在塔里木地台西部形成晚白垩世至早第三纪的厚层碳酸盐岩及膏盐岩沉积,早第三纪末期海水退出。其后,受印度板块不断向北推挤的影响,地台两侧的昆仑山和天山急剧上升,致使在海拔近2000m的高处可见到晚第三纪和第四纪早期的沉积。

由于塔里木地台目前研究程度尚较低,其内部大片地区为沙漠所覆盖,因而一些重大地质问题也还有许多争论。例如塔里木地台或塔里木板块和周围板块之间的关系,王鸿祯(1980,1985)、李春昱(1981,1982)认为塔里木地台和中朝地台属于一体,将它们称为“中朝—塔里木中轴大陆”;有的学者认为震旦纪时塔里木地台和中国南方的扬子地台属于同一板块,等等。关于塔里木和柴达木的关系也有不同认识。塔里木地台发展过程中盆地的性质,国内有许多学者将它看作是一个板内盆地,另外也有人认为是一个长期发展的弧后盆地,还有人认为主要属于一个前陆盆地,等等。这些不同认识需要通过对该地台及周缘山系的关系进行详细研究来解决,同时还应注意到不同地质时期盆地的性质会有所变化。

古地磁的研究认为,古生代以来塔里木地台有过长距离的位移和旋转。早古生代时它位于南半球,志留纪开始向北移动。有人认为石炭纪时塔里木已和现今位置相近,也有人认为白垩纪以后塔里木相对于西伯利亚还有上千公里的位移。这些都需要进一步证实,尤其是地质资料的证实。

目前塔里木的研究正日趋深入,特别是在盆地的腹地,正在取得越来越多的资料,对该地台也有了许多的新认识。相信随着调查工作的不断推进,人类对这一浩瀚沙漠之下的古地台也一定会有更深入的了解。

#### 参考文献

- 1 李四光原著,中国地质学,张文佑编译,正风出版社印行,1952
- 2 黄汲清,中国主要地质构造单位,北京:地质出版社,1954
- 3 王鸿祯,武汉地质学院学报,1981,14
- 4 李春昱,等,亚洲大地构造图及说明书,北京:地质出版社,1982
- 5 高振家,等,新疆前寒武地质,乌鲁木齐:新疆人民出版社,1984
- 6 Graham S A, et al. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1988, 72, 191

- 7 Hsu K J. New perspective in Basin Analysis. Springer-Verlag, 1988  
 8 范璞,等. 塔里木油气地质. 北京: 科学出版社, 1990  
 9 陈哲夫,等. 新疆地质, 1991, 9(2)

(中国地质科学院地质研究所刘训研究员撰)

**孔隙水压力圆锥静力触探** 约在 20 世纪 70 年代末 80 年代初,国际上出现了孔隙水压力圆锥静力触探。这种触探所使用的探头不是以往那种只能测量孔压的单一型传感器,而是把它和静力触探探头结合设计成一个整体的多功能探头(也常简称为测压锥)。

孔隙压力触探头有 3 个传感器,分别测定端阻  $q_e$  侧阻  $f_s$  和孔压  $u$ 。它们都是电阻应变式的,其中  $q_e$  和  $f_s$  传感器与常规电测圆锥静力触探的传感器没有什么不同,电阻应变式压力盒感应由锥类处多孔透水元件通过内通水间隙和水压室传递过来的锥尖处孔隙压力。

多孔元件是孔隙压力触探头的最重要部件,采用特殊的烧结不锈钢、聚丙烯、烧结青铜、铝合金等材料制作。要求这种元件的孔隙极微,土粒不易进去,且在圆锥短时暴露在空气中(或非饱和和土中)时,有足够高的入口压力维持其内部饱和,同时又能充分透水,使孔压盒对圆锥周围孔隙水压力变化作出快速的反应。

多孔元件的位置不同构成了孔压触探头的主要差别。多孔元件在圆锥上的位置不同,贯入时所测的孔隙压力及其以后的消散速率是不会一样的。众多研究表明,贯入时的孔隙水压力在锥尖处最大,因此为测量孔压峰值,透水元件应置于圆锥尖部,但由于锥尖处易于损坏,且排气困难,多孔元件常置于锥面范围内,一般认为这样安装多孔元件的探头,将对土层和土质变化具有最大的灵敏度。

由于贯入期间孔隙压力变化非常大,因此要求整个测压系统的设计必须能对孔压变化作出准确快速反应。为了将时间延滞减至最小,要求孔压传感器的体积变化特征必须极小,内部孔隙体积(主要为内部通水间隙和水压室的体积)也要减至最低限度,除此以外,透水元件的厚度对探头检测极薄层时的敏感性也有影响。Torstensson(1982)提供了透水石位于圆锥基部的面积为  $100\text{cm}^2$  的厚度分别为 4mm 和 2.5mm 的两个测压锥记录。使用 2.5mm 厚透水元件的孔压记录比 4mm 厚的更详细。该资料说明,如果要识别局部土层,非常薄的透水石厚度的重要性和必要性。

多孔元件和内部间隙的充分饱和是至关重要的,Rad 和 Tumay(1985)通过大量的室内试验后提出,完全饱和和测压锥能对贯入时产生的孔压作出快速准确反应,而部分饱和的测压锥达到瞬态均衡的时间滞后可高达 10%~20%,其大小随着测压锥饱和度降低或渗透系数的降低而增大,为使测压系统充分饱和,对透水元件装在锥尖处的探头,需要在真空室内抽吸探头,使其彻底排气,然后用去气水饱和;对透水环式的探头,可在水中煮沸透水石,然后在水下装配到圆锥上;最后都封在装水的薄塑料袋或玻璃罩内备用。

孔压静力触探成果日前主要应用于如下 3 方面。

**划分地层和鉴别土类** 根据触探过程中孔隙压力和端阻随深度的变化情况,可计算出地层不同深度的归一化超孔隙压力指标  $\Delta u/q_c$ 。 $\Delta u = u - u_0$ ,  $u$  是测量的贯入孔压,  $u_0$  是静孔压(或原位孔压),  $q_c$  是测量的圆锥阻力,许多测量结果表明了砂上  $\Delta u/q_c$  很低,密砂和高度超固结粘土甚至可为负值,而一般粘性土中  $\Delta u/q_c$  值要高得多,据此可对土进行分类并划分地层。使用  $\Delta u/q_c$  分类和划分地层比过去用  $q_c$  和摩阻比  $R_f$  分类更精确(Baligh 等, 1980)。

**估计粘性土的超固结比** 自从能测定贯入过程中产生的孔隙压力的测压锥出现以来,许多人致力于根据在粘土中的测压锥资料估计土的应力历史即超固结比的研究工作。直至目前已提出

各种各样的归一化孔压指标,以及这些指标同土的超固结比 OCR 之间的统计相关关系。按所采用的归一化孔压指标的不同,目前在用测压锥资料估计超固结比方面大致有如下几种作法。(1) Tumay 等(1981)、Baligh 等(1981)研究了归一化孔压指标  $u/q_c$  与粘土超固结比 OCR 的相关性, Campanella 和 Robertson 曾研究了  $\Delta u/q_c$  与粘土超固结比的相关性。认为  $u/q_c$  或  $\Delta u/q_c$  随 OCR 的增加而降低。(2) Wroth(1984)根据临界状态土力学理论提出,归一化孔压指标  $Bq$  和粘土中的 OCR 应该具有比  $\Delta u/q_c$  与 OCR 之间更好的相关性,  $Bq$  为:

$$Bq = \frac{u - u_0}{q_t - \sigma'} = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma'} \quad (1)$$

式中,  $u$  为在圆锥面上测得的孔压;  $u_0$  为静水压力,  $\Delta u = u - u_0$ ;  $q_t$  为对圆锥不等端面面积效应修正过的圆锥阻力,  $q_t$  的表达式为:

$$q_t = q_c + (1 - a)u_b \quad (2)$$

式中,  $q_c$  为圆锥阻力;  $a = A_1/A_2$ ,  $A_1$  和  $A_2$  为不等端面面积;  $u_b$  为圆锥基部的测量孔压。

Almeida 和 Parry(1985)根据在重粘土中进行的室内小型测压锥试验成果,认为  $Bq$ -OCR 之间具有较好的依赖关系,而  $\Delta u/q_c$  随 OCR 的增加仅略微减少。(3) Sully、Campanella 和 Robertson(1988)根据 Robertson 等(1986)的有关圆锥周围孔压分布的研究成果提出,在锥面上测得的总孔隙压力对静水压力  $u_0$  归一化的孔压指标  $(u/u_0)_p$  与在圆锥基部测得的孔压指标  $(u/u_0)_b$  之差,随着超固结比的增加而增加,即:

$$PPD = (u/u_0)_p - (u/u_0)_b = f(OCR) \quad (3)$$

为了确定上式中的关系,必须使用同时在两个位置上装有过滤元件的测压锥,即一个装在锥尖或锥面上,另一个装在圆锥后部的测压锥进行试验。由于还没有这种装有两个孔压测试元件的测压锥(1988),他们将在北美、南美和欧洲各种粘土中获得的过滤元件位置对孔压测量的影响已经得到评价的测压锥资料与 OCR 的关系绘制成图,并得到如下线性方程:

$$OCR = 0.66 + 1.43(PPD) \quad (4)$$

该式的相关系数为 0.98。(4) Mayne(1987)根据 Mayne 与 Holtz 研究的 30 个场地上百个测压锥数据与 OCR 之间的对比分析,得到超孔隙压力  $\Delta u$  对有效竖向应力  $O_{v0}$  归一化的孔压指标与固结比测得 OCR 之间的关系为:

$$OCR = 0.45(\Delta u/O_{v0})^{1.45} \quad (5)$$

**估计粘性土的固结系数** 许多学者提出了不同的利用孔压消散资料估计粘性土水平固结系数(和水平渗透系数)的解答和方法,迄今主要有 Torstensson(1977)提出的基于球形和圆柱形孔穴扩张理论的解析解答及 Battaglio 等(1981)对其所作的修正; Randolph 和 Wroth(1979)提出的基于圆柱形孔穴扩张的解析解答; Roy 等(1982)提出的经验方法; Baligh 和 Levadoux(1980、1986)提出的基于球形和圆柱形孔穴扩张的解析解答和适合于  $60^\circ$  圆锥角的数值解答。中国朱小琳等(1986)开展了这方面的研究工作,提出了经验方法。其中尤以 Baligh 和 Levadoux 提出的适合于  $60^\circ$  圆锥角的数值解答及其使用方法最引人注目。

(长春地质学院张喜发撰)

**海相硅岩沉积环境的有效指标** 硅岩是一种内源沉积岩。它可以出现在深海、浅海陆棚甚至潮汐带的各种海洋沉积环境中,也可以形成于陆地湖泊沉积物中。硅岩沉积环境的稀土元素(REE)研究,最早由 Shimizu 等开始,后来 Steinberg 等以及 Murray 等也研究过。近年来中国也有些学者做了硅岩的 REE 分析。

对 REE 在海水中的分布特征和规律的研究表明,在海洋的不同环境和不同深度,REE 的含量和分布模式都有一定的差别。Martin 等认为海洋中的 REE 主要来源于河水的补给。按照 Piper 的研究,大洋海水相对于河水和陆棚海水有 3 个方面的差异: REE 总量降低; Ce 的亏损; HREE 相对于 LREE 富集。在这 3 个方面的变化中, Ce 的亏损或富集最为明显。在河水中,无论

是悬浮质还是溶解质,REE 都不显示 Ce 的负异常,而海水 Ce 则可表现出明显的亏损,然而并非所有地区海水都如此。Fleet 认为只有开阔大洋海水才能出现明显的 Ce 负异常。另外,在洋中脊附近,海水的 Ce 负异常最为显著。

关于 Ce 从海水中迁出的机理已有许多讨论。Coldberg 等认为在海水中  $\text{Ca}^{3+}$  易被氧化成  $\text{Ce}^{4+}$ ,以  $\text{CeO}_2$  的形式从溶液中沉淀出来,从而产生海水中的 REE 分馏。Fleet 比较了海水中 REE 的停留时间,发现 Ce 的停留时间最短,只有 80a,而与之相邻的元素 La 和 Pr 分别为 440a 和 320a,因此 Ce 易于优先与其他 REE 分离,造成海水的 Ce 亏损。对于洋中脊附近海水的强烈 Ce 负异常,Kinkhammer 等的解释是:热液中 Fe、Mn 质微粒提取了较多的 Ce,从而产生洋中脊附近海水的 Ce 明显亏损。总之,Ce 的含量和分布模式的不同,是由于 REE 分馏作用的差异,使得不同环境海水的 Ce 相对浓度产生变化所致。通常,河水和陆棚水不显示 Ce 的负异常,大洋海水则具有明显的 Ce 负异常,而洋中脊附近海水的 Ce 负异常最为显著。

REE 从海水中迁移进入沉积物的过程很复杂,但其主要途径是通过海水中 REE 结合进入生物相和自生矿物相。如果从海水向沉积物的元素迁移过程中,REE 没有发生明显的分馏,沉积物的 REE 则可以继承海水的 REE 特征。根据 Shimizu, Steinberg 和 Murray 等对海相硅质沉积的 REE 研究,可以发现硅岩的 REE 与其相当环境海水的 REE 有着良好的对应关系。这里硅岩的 Ce 异常仍然是最为显著的标志。

Shimizu 等对深海钻探计划(DSDP)钻孔中的硅质沉积物进行 REE 分析。在太平洋中部的 5 个样品中,有 3 个白垩纪—渐新世硅岩样品, $\delta\text{Ce}$  分别为 0.21、0.29 和 0.32。两个从放射虫软泥中分离出来的硅质微化石样品(分别是渐新世和始新世), $\delta\text{Ce}$  为 0.22 和 0.24。因此太平洋样品均显示明显的 Ce 负异常。取自加勒比海的一个 DSDP 硅岩样品(始新世)的  $\delta\text{Ce}$  值为 0.47,显示较弱的负异常。Shimizu 等将上述硅岩和硅质化石的 REE 值与陆地硅岩的 REE 进行了比较,陆地样品中有两个是日本岐阜三叠—侏罗纪硅岩,一个是加拿大安大略二叠—三叠纪硅岩。结果这些陆地硅岩  $\delta\text{Ce}$  分别是 1.0、1.2 和 1.4。无负异常或显示正异常,与深海硅岩截然不同。Shimizu 等因此提出 Ce 的负异常是指示硅岩是否形成于海洋环境的良好指标。他们认为加勒比深硅岩的 Ce 弱负异常是因为此海区与大洋之间被岛链隔离所致。根据 REE 的分布模式,Shimizu 等推测那些陆地硅岩形成于海岸、边缘海或内海环境。

Murray 等对美国西海岸加利福尼亚侏罗—白垩纪硅岩进行了 REE 研究。他们根据已有的生物地层学、沉积学、矿物学和地球化学的研究资料,将此区硅岩分为 3 个沉积环境组合,分别是:覆盖在玄武岩之上,洋中脊环境的红色富锰硅岩;形成于大洋底环境,与页岩互层的薄层硅岩;形成于大洋边缘环境,被杂岩所覆盖的绿色硅岩。REE 分析结果表明,9 个洋中脊环境硅岩样品的  $\delta\text{Ce}$  平均值为 0.30,为明显的 Ce 负异常;3 个代表大洋底环境的硅岩为 Ce 中等负异常, $\delta\text{Ce}$  平均 0.55;形成于大陆边缘环境的 15 个硅岩 Ce 负异常不明显或甚至为正异常, $\delta\text{Ce}$  值为 0.79~1.54。此外 Murray 等还注意到与硅岩共生的页岩也具有与硅岩类似的 Ce 异常特征,另外硅岩或页岩 EREE 含量与其沉积环境也有一定的关系。

Murray 等对上述现象的解释是:由于铁锰质对 Ce 的优先提取,扩张洋中脊附近的海水 Ce 强烈亏损,而非铁锰质沉积物吸附了这种 Ce 亏损的 REE,因而使硅质沉积显示出强烈的 Ce 负异常。Ce 中等异常的硅岩形成于大洋盆地,既远离洋中脊又不受大陆物源的影响,并且长期与大洋海水接触,因而吸附了海水中具 Ce 负异常的 REE。Ce 微弱异常或正异常的硅岩反映了大陆边缘沉积物的 REE 特征。

综合 Shimizu 和 Murray 等的研究可以看出,海相硅岩 REE 特征,尤其是 Ce 特征,能够反映硅岩的沉积环境。在进行沉积相、沉积盆地和板块构造重建的研究中,可以将不同环境硅岩的

REE 值,特别是 Murray 等的不同类型硅岩的  $\delta\text{Ce}$  值作为硅岩沉积环境的判别标准。当然,由于目前这方面的分析资料还不多, $\delta\text{Ce}$  值随环境变化的判别值还不够完善、具体,所以还有待于更多的分析材料来补充、修订和总结以往的标准,以建立更为全面的硅岩沉积环境 REE 判别指标。

吉磊在对江西南部寒武—奥陶系沉积相进行研究的过程中,在对盆地的沉积学、地球化学和大地构造学研究基础之上,对寒武纪—奥陶纪层状硅岩进行了 REE 分析。研究区位于江西南部的永新、泰和、井冈山以及崇义、大余一带,其大地构造位置至今尚有不同认识,但基本上位于扬子陆块基底出露区和华夏陆块基底出露区之间。此区寒武系和奥陶系主要是砂泥质复理石,夹有厚层或薄层的硅岩层。硅岩层中含有丰富的海绵骨针、放射虫和笔石等门类化石。硅岩的主要矿物成分是石英(微晶状)、伊利石和绿帘石,常含少量黄铁矿和陆源粉砂质碎屑,有些硅岩具有较高的有机碳含量(约 1%)。

吉磊对赣南寒武—奥陶系的 4 个硅岩和 1 个硅质板岩进行了 REE 分析,分析采用等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法。经计算 5 个样品的  $\delta\text{Ce}$  值分别是 0.76、0.81、0.86、0.88 和 0.94,平均值为 0.85。如将上述硅岩的  $\delta\text{Ce}$  值与 Murray 等的硅岩  $\delta\text{Ce}$  值相比,可见江西硅岩的  $\delta\text{Ce}$  值介于大陆边缘环境—大洋盆地环境之间。据此推测此盆地处于大陆边缘—大洋盆地的过渡地区,即可能在大陆坡—深海盆地边缘的范围内,属半深海沉积。这个推论与吉磊所进行的江西南部早古生代沉积相和盆地性质的研究结论基本一致。

综上所述,海洋各种不同环境海水中的 REE 特征可以反映在硅质沉积中。根据硅岩的 Ce 异常状况可以判别海相硅岩的沉积环境类型,但不能将 REE 作为判别沉积环境的唯一标志。在沉积相研究中,还必须结合沉积学、古生物学、地球化学与大地构造学的研究进行综合判断,这样才能得到可靠的结论。

(中国科学院南京地理与湖泊研究所吉磊撰)

## 水文地质学与工程地质学

**水文地质学** hydrogeology 研究地下水的科学。它研究在岩石圈、水圈、大气圈、生物圈及人类活动相互作用下地下水水量和水质的时空变化规律,并研究如何利用这些规律去避害趋利。

人类首先利用泉作为供水水源,随后又凿井取水。中国浙江余姚河姆渡井凿成于 5700 年前。至少在公元前 7 世纪,亚美尼亚就有了坎儿井(Qanats),以后传入波斯等地。最大的坎儿井深达 150m,长达 26km。公元前 250 年左右,在中国四川的三叠纪坚硬基岩中开凿了深百米以上的自流井。水文地质学是作为一门实用技术学科而萌芽的。

1856 年,法国达西(H. Darcy)为设计第一流的供水系统,进行了水透过砂的室内试验,得出水在砂中的渗透速度与砂的渗透系数及水力梯度成正比。这就是著名的达西定律(Darcy's law),它提供了地下水定量计算的依据,奠定了作为学科分支的水文地质学的基础。

后来,法国裘布依(A. Dupuit)在达西定律基础上提出了地下水流向井的稳定流公式。奥地利福希海默(P. Forchheimer)在 1886 年绘制了流网并开始应用映射法。格本(B. Ghyben)在 1888 年建立了海水与淡地下水保持平衡的法则。1935 年,泰斯(C. V. Theis)利用地下水流动与热传导的相似性,得出了地下水流向井的非稳定流描述——泰斯公式,使地下水定量计算更为接近实际。直到此时,地下水计算用的是只能求解比较简单条件的解析法。

从 20 世纪 30 代起,还发展了一些物理模拟方法。怀科夫(R. D. Wyckoff)等用砂槽模拟地下水流,以后又出现了窄缝槽模拟。马斯卡特(M. Muskat)等则根据水流与电流的相似性,用

电流模拟连续介质中地下水的运动。50~60年代,离散介质电网模拟成为地下水计算的重要手段。

与地下水水量研究的同时,也注意到了地下水的水质。早在公元前1世纪,在利用矿水医疗时便开始研究地下水化学成分。19世纪对油田地下水的研究积累了大量水化学资料。1933~1936年,前苏联维尔纳茨基(В. И. Вернадский)在《天然水的历史》中,探讨了地下水的地球化学特征。20世纪中叶,前苏联奥弗琴尼科夫(А. М. Овчинников)在研究矿水的基础上建立了水文地质学的一个分支——水文地球化学。在这方面,美国怀特(D. E. White)也作出了贡献。

人们在利用地下水时也在探究它的来源。法国帕利士(B. Palissy, 1509~1589)、珀若(P. Perraut, 1608~1680)、马里奥特(E. Mariott, 1602~1684)和中国的徐光启(1562~1633)先后提出了井水的水来源于降水或河水的入渗。20世纪初,奥地利徐士(E. Suess)提出了初生说,认为地下水来源于岩浆冷凝时析出的水。由于缺乏事实支持,初生说逐渐被人淡忘了。大致与此同时,美国兰(A. C. Lane)、戈登(W. C. Gordon)和俄国的安德鲁索夫(N. I. Andrusov)分别提出了埋藏水的存在。这些水是在沉积物堆积时储存在粒间孔隙中,固结时受挤压进入含水层的。1907~1919年间,俄国列别捷夫(А. Ф. Лебедев)提出了凝结说,认为水汽冷凝为液态水是地下水的一种来源。

1912年,德国凯尔哈克(K. Keilhack)进行了地下水分类和泉的分类,总结了地下水的埋藏条件和排泄条件。20世纪20~30年代,美国迈因泽尔(O. E. Meinzer)对一系列水文地质概念和术语进行了探讨。

大致在20世纪中期,有关地下水的赋存、运动、补给、排泄、起源以及水化学、水量评价等方面,均已有了比较完整的理论和研究方法。水文地质学已经发展成为一门成熟的学科。第二次世界大战以后,随着科技及生产力的迅猛发展以及人口的快速增长,世界各地普遍出现地下水资源枯竭、地下水位深降、地面沉降、海水入侵乃至地下水污染等问题。因此,正确地预测在人类活动干预下地下水的变化,以合理评价、开发、管理与保护地下水资源成为当务之急。

由于水文地质学最初是从寻找地下水以满足供水开始的,所以人们一直关注的是含水层。裘布依的稳定井流公式只涉及含水层中井附近的很小一个范围。泰斯公式则将整个含水层作为考察对象。至此,人们仍然认为“隔水层”是不起作用的。1946年雅可布(C. E. Jacob)提出,原先认为绝对不透水的“隔水层”,大多数仍然是透水的。于是,人们认识到地下水是在既包括含水层,也包括相对隔水层(弱透水层)在内的整体——含水系统中发育的。20世纪60年代初期,加拿大托特(J. Tóth)提出了区域地下水流动(地下水流动系统)理论。他认为,只要时间尺度足够大,任何一个构造稳定、压实作用已结束的大型盆地,均具有水力连续性,在受地形控制的重力势作用下,发生复杂的穿层流动,形成局部的、中间的及区域的地下水流动系统。托特的理论,打破了水文地质学中长期以来介质场起主要控制作用的观点,认为地形控制的势场是决定地下水渗流场的根本因素。荷兰英格伦(G. B. Engelen)发展了托特的理论,主要用于分析与溶质迁移有关的各种水文地质问题。地下水流动系统理论出色地运用了地下水流网分析这一传统工具,将渗流场、化学场、温度场统一于地下水流网系统这一理论框架之中,将地下水各方面的表现,纳入一个易于为人们所理解的时空有序结构之中,有助于整体上把握地下水与环境联系的图景。

战后水文地质学的迅猛发展,也是某些学科与技术向水文地质学渗透的结果。1956年,斯图尔曼(R. W. Stallman)将数值法用于水文地质计算。60年代,华尔顿(W. C. Walton)首次利用电子计算机对地下水进行数值模拟。从此,大范围的复杂条件下的水文地质问题也可以进行计算了。

1954年,博尔顿(N. S. Boulton)发现潜水位下降过程中非饱和带滞后释水现象,使人们进一步认识到饱和带水的研究在许

多情况下是不能与非饱和带水割裂的,从而促进了非饱和带水的研究。

20世纪60年代,同位素技术开始用于解决某些水文地质问题(例如,确定地下水年龄、追踪地下水的流动等)。同时,遥感技术、数学地质方法等也被引入水文地质学。

目前,有两个方面的趋势正在促使水文地质学演变。首先,人类活动对地下水形成过程的干预日益强烈,由此引起的生态环境效应十分严重,水文地质课题愈来愈复杂,愈具综合性与前瞻性。水文地质学长期关注的焦点是地下水水量转移。由于地下水污染、海水入侵等一系列问题的出现,与溶质迁移有关的问题开始受到重视,出现了求解溶质转移的数学模型。但是,室内试验与野外试验获得的有关参数往往与实际差别较大。同时,水文地质学与其它学科之间相互渗透非常迅速。

水文地质学在对比过去更为复杂与综合的问题时必须更多地引入系统论的思想与方法。地下水流动系统分析是这方面的一个开端,预计今后还将引入包括决策支持系统在内的系统工程方法。最近开始引入的地理信息系统与地下水模拟相结合,将成为建立决策支持系统的良好基础。

为了更好地预测人类活动影响下地下水的演变并及时施加影响,要求对水文地质过程的机制有更好的了解。因此,下列问题将加强研究:不同条件下的降水入渗机制;地下水位下降时介质的变化,尤其是粘性土释水压密所引起的水文地质参数的变化及地下水水质的变化;溶质转移的弥散机制;含水层与包气带中污染质的自净作用;含水层储能及其应用;裂隙与岩溶地下水的赋存与运移特征。

水文地质学还面临学科内容与性质的演变。传统的水文地质学研究狭义地下水,即饱气带岩石空隙中的水;现在的研究对象则是广义地下水,即包括饱和带和非饱和带水在内的地面以下岩石空隙中的水。1947年,前苏联萨瓦连斯基(Ф. П. Саваренский)提出地下水圈的概念。近年来,前苏联加弗里连科等提出,水文地质学是研究地下水圈(Subsurface hydrosphere)的科学,研究对象包括地面以下地球各层圈以各种形态存在的水。他们认为,通过地幔的流动,地壳浅层圈的水与深部的水是相互转化的一个整体。因此,水文地质学还应研究地球深层圈对岩浆活动、变质过程的作用,对成矿作用、地震过程及地壳构造变形中的作用。沿此方向发展,水文地质学将发展形成理论学科的分支。

#### 参考文献

- 1 Freeze R A, Cherry J A. Ground Water, Prentice-Hall, Inc., 1979
- 2 Tóth J. Problems of Petroleum Migration, 1980, 121~167
- 3 Pinneker E V. General Hydrogeology. Cambridge University press, 1983
- 4 王大纯, 张人权, 等. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 1986
- 5 Engelen G B, Jones G P. Developments in the Analysis of Groundwater Flow Systems. IAHS Press, 1986
- 6 张人权. 水文地质工程地质, 1987, 2: 1~2
- 7 张人权. 当代地质科学技术进展, 1989, 37~40

(中国地质大学张人权教授撰)

**地下水动力学** dynamics of groundwater 是研究地下水在多孔介质和裂隙介质中运动的学科,它是水文地质学的一个分支。无论是地下水供水、矿山排水、农田或建筑工地降低地下水位或者地下水污染预测都需要研究地下水的运动,因此地下水动力学这一学科,不仅有科学理论上的意义,还有重大的实用价值。

1856年,法国达西(H. P. G. Darcy)通过试验建立地下水运动的基本定律。1863年,法国裘布衣(J. J. Dupuit)根据实际的地下水而坡度很小的事实,提出了裘布衣假设,并导出地下水流向

水井和渠道的计算公式。两人的工作奠定了地下水动力学的基礎。1870年,德国希姆(A. Thiem)改进了裘布衣公式,并将它应用于抽水试验求渗透系数。1928年,美国迈因策尔(O. E. Meinzer)研究了承压含水层的可压缩性和弹性,为地下水非稳定流理论的建立准备了实践基础。1935年,美国泰斯(C. V. Theis)利用地下水非稳定流动和热传导之间的相似性,导出了计算承压地下水非稳定流的公式,即著名的泰斯公式。1940年,美国雅可布(C. E. Jacob)用严格的数学方法推导了泰斯公式,并导出了越流含水层的非稳定流计算公式。英国布尔顿(N. S. Boulton, 1954, 1963)和美国纽曼(S. P. Neuman, 1972, 1975)分别导出了潜水非稳定流的计算公式,并利用这些公式确定含水层的参数。

1937年,美国马斯斯特(M. Musket)出版了《均匀流体通过多孔介质的流动》一书,用数学方法系统地论述了地下水的运动。1935年,前苏联卡明斯基(Г. Н. Каменский)出版了《地下水动力学原理》。这些著作的出版,确立了地下水动力学作为一门独立学科的地位。此后,系统论述地下水动力学的著作有:前苏联波卢巴里诺娃—柯琴娜(Л. Я. Полубарнинова-Кочина)著的《地下水运动原理》(1952),以色列贝尔(J. Bear)的《多孔介质流体动力学》(1972)和《地下水水力学》(1979)等。

20世纪60年代以来,地下水动力学无论从研究内容和研究方法上都有较大的进展。不仅研究多孔介质中地下水的运动,也研究裂隙介质中地下水的运动。从60年代中期以后,美国斯诺(D. T. Snow)、前苏联罗姆(E. C. Pomm)和法国路易斯(C. Louis)先后应用张量方法提出了描述各向异性裂隙介质渗透性的数学模型。1976年,日本K. Iwai用实验的方法研究了水通过单个裂隙运动的立方定律。1985年在美国的亚利桑那州的吐逊(Tucson, Arizona)召开了国际水文地质学家协会第17届大会,中心议题是低渗透性岩石的水文地质学。对于裂隙岩石中地下水的运动进行了系统的探讨。以前的研究多局限于饱和带的地下水的运动,近来也扩展到非饱和带地下水运动的研究。澳大利亚菲利浦(J. R. Philip)和美国雷姆森(I. Remson)等都做了不少研究工作。

当前,地下水动力学的研究已从研究地下水水头和水量扩展到研究地下水的水质。由于目前全世界对于环境问题的重视,地下水中污染物运移的研究已成为当前地下水动力学研究的热点。1989年在德国的斯图加特(Stuttgart)召开了“地下水中污染物运移”的国际会议,对这方面的研究作了广泛的交流。以色列贝尔(J. Bear)1984年和其合作者出版了《多孔介质中运移现象基础》,1990年出版了《多孔介质运移现象模拟导论》二本专著,对这一领域的研究作出了贡献。在研究方法方面,20世纪60年代以前广泛地应用解析解法。随着电子计算机技术的长足进步,当前广泛地应用数值模拟方法(Numerical modeling)。

#### 参考文献

- 1 Darcy H. Determination of the Laws of Water Through Sand. Paris, Victor Dalmont, 1856, 590~594
- 2 Meinzer O. E. U. S. Geol. Survey Water—Supply Paper 489, 1923, 1~8
- 3 Theis C. V. Am. Geophys. Union Trans, 1935, 16: 519~524
- 4 Jacob C. E. Am. Geophys. Union Trans, 1940, 21: 574~586
- 5 波卢巴里诺娃—柯琴娜 Л. Я. 著. 地下水运动原理. 萧森森, 等. 北京:地质出版社, 1952, 1~94
- 6 Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier, 1972, 1~728
- 7 薛禹群, 朱学愚. 地下水动力学. 北京:地质出版社, 1979, 1~370

(南京大学博士生导师朱学愚教授撰)

#### 地下水水质模型

ground water quality modeling 对于地下水中溶质(或污染物)的运移和变化,用数学模型来表达,称为地下水水质模型。这是地下水污染预测和定量评价的一种重要

的方法。可为环境的保护和治理以及核废料的贮存等问题,提供决策的依据。

地下水水质模型是20世纪70年代以来发展起来的学科领域,也是当前地下水研究的热点之一。1972年,以色列的贝尔(J. Bear)在《多孔介质流体动力学》一书中,对多孔介质中物质和能量的运移现象作了深入的分析,对于地下水中溶质运移的基本微分方程,即对流—弥散方程作了严格的推导,并且详细研究了有关的参数。1975年,弗林特(J. J. Fried)出版了《地下水污染》一书,在介绍水质模型的实际应用方面很有特色。这两本书对于地下水水质模型的发展起了重要的作用。

20世纪80年代以后,关于地下水中运移现象机制和模型的重要论著有:贝尔(J. Bear)和柯拉修普(M. Y. Corapcioglu)的《多孔介质中运移理解基础》(1984),以及贝尔(J. Bear)和巴干满(Y. Bachmat)的《多孔介质中运移现象模拟导论》(1990)。在数值计算方法方面,美国休延康(P. S. Huyakorn)和品特(G. F. Pinder)著作《地下水流的计算方法》(1983)和美国纽曼(S. P. Neuman, 1981, 1982和1984)关于解对流—弥散方程的欧拉—拉格朗日方法的研究等,对于水质模型的计算都有重要的作用。1989年德国斯图加特召开的“地下水中污染物运移”的国际会议,其中一部分重要的交流内容就是用水质模型求解地下水的污染问题。1990年在荷兰的海牙召开了“地下水模拟的校正和可靠性”国际会议,其中也有相当大部分内容讨论水质模型问题。

地下水水质模型的求解,必须同时求解水头模型。用数值方法求解水质模型时,存在数值弥散和数值振荡。如何消除数值弥散和数值振荡以提高精确度,如何增加水质模型的可靠性,是当前该领域研究的热点之一。最近,有些研究者把非线性理论和随机方法引入水质模型研究当中。预计不久的将来,地下水水质模型的理论和方法还有新的进展。

#### 参考文献

- 1 Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. New York: American Elsevier, 1972, 579~664
- 2 Fried J. J. Groundwater Pollution. Amsterdam: Elsevier, 1975, 1~274
- 3 Neuman S. P. J. of Computational Physics, 1981, 41(2)
- 4 Huyakorn P. S., Pinder G. F. Computational Methods in Subsurface Flow. New York: Academic Press, 1983, 181, 228
- 5 Neuman S. P. J. for Num. Methods in Eng., 1984, 20: 321~337
- 6 Bear J., Corapcioglu M. Y. Fundamentals of Transport phenomena in Porous Media. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1984, 1~346, 771~952
- 7 朱学愚, 谢春红. 地下水运移模型. 北京:中国建筑工业出版社, 1990, 129~183
- 8 孙炳正. 地下水污染. 北京:地质出版社, 1989, 10~49, 208~298

(南京大学博士生导师朱学愚教授撰)

#### 地下水资源评价 groundwater resources evaluation

可供人类利用的地下水称为地下水资源。对地下水资源的数量、质量、时空分布特征和开发利用条件的分析和评定,称为地下水资源评价。它是地下水资源合理开发利用、管理和保护的基础,可为国家、地区或城市有关水资源问题的决策提供依据。

在20世纪70年代以前,中国习惯上把地下水资源评价称为地下水储量评价或地下水储量计算。20世纪的40年代,前苏联普洛特尼柯夫(Н. А. Плотноков)把地下水的储量分为动储量、静储量、调节储量和开采储量四类,并提出相应的计算方法。中国在50年代和60年代,广泛采用普洛特尼柯夫的储量分类和计算方法,70年代以后,中国广大的水文地质工作者认为地下水是总水资源的一部分,它是不断地运动、变化着,所以把地下水 and 矿产

类比,采用地下水储量这一名称不大确切,应改为地下水资源。地下水资源评价应当包括水质评价和水量评价两部份内容。一个地区地下水资源的丰富程度和可利用量的大小,主要取决于地下水的补给、储存和开采条件。因此在地下水资源评价时,要计算地下水的补给量、储存量和允许开采量。这种方法一直沿用到现在。1970年,美国沃尔顿(W. C. Walton)的《地下水资源评价》一书系统论述了地下水资源评价的理论和方法,对于地下水资源评价的发展起了重要的作用。

地下水资源评价的方法也经历了一个发展的过程。20世纪40~60年代采用解析法进行地下水资源评价,但是只有极其简单的情况下才能求出解析解。而实际的水文地质条件往往是相当复杂的,为了使求出的结果接近于实际,在50年代晚期至70年代初期,物理模拟(Analog)方法在地下水资源评价中得到广泛的应用,主要应用的方法有电解液模拟、电网络模拟等。这在沃尔顿的著作中有所反映。从70年代中期以后,数学模拟(Modeling)方法逐步取代了物理模拟,成为目前国际上地下水资源评价的通用方法。如朱学愚、钱孝星、刘新仁的著作《地下水资源评价》,就是以数学模拟为中心的。所谓数学模拟,就是将实际的水文地质条件进行简化和概化,建立数学模型,并利用电子计算机求解。数学模型可分为随机模型和确定性模型。在地下水资源评价中常用的随机模型有时间序列分析、多元回归分析等。确定性模型常为偏微分方程加上一组定解条件,地下水资源评价时常用数值方法求解。广泛应用的数值方法有:有限单元法、有限差分法、边界单元法等。

当前该领域的发展趋向是把地下水资源评价和管理结合起来,将数值方法和系统分析耦合,求出一个地区地下水的最优开采量。

#### 参考文献

- 1 Walton W C. Ground Water Resource Evaluation. New York: McGraw-Hill, 1970, 1~200
- 2 Fetter C W. Applied Hydrogeology. Columbus: Charles E Merrill Publishing Company and A Bell, Howell Company, 1980, 258~305, 378~405
- 3 Huyakorn P S, Pinder G F. Computational Methods in Subsurface Flow. New York: Academic Press, 1983, 1~179
- 4 朱学愚, 钱孝星, 刘新仁. 地下水资源评价. 南京: 南京大学出版社, 1987, 1~316
- 5 厚佩贤, 卫中鼎, 廖资生, 等. 专门水文地质学. 北京: 地质出版社, 1987, 89~93
- 6 Willis R, Yeh W W-G. Groundwater Systems Planning & Management, New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1987, 81~252

(南京大学博士生导师朱学愚教授撰)

**地下水污染及水文地质地球化学** 地下水的污染源多种多样,如工业、农业生产中和人们日常生活中产生的废物和垃圾、采矿废渣、核能研究和利用时产生的放射性废料等等。这些废物中的有害物质一旦渗入地下,就会使地下水受到污染。

地下水污染可能是局部的,也可能是区域性的,这取决于污染源和地下水系统。一般说来,地下水运移和自然净化的过程较缓慢。一个地区一旦受污染,污染物可在地下水中停留几十年甚至更长的时间。

水文地质学是一门研究地下水及其与岩石、土壤和人类关系的交叉性学科,其本身是一门定量的科学,正在有目的地从理论向实际发展,其核心是研究水流体通过各种地质构架的机理,并据此解释控制水质量和水资源储量的因素。在过去,由于人类对水污染认识的不断提高,促进了水文地质学的迅速发展。

美国对水污染问题的认识觉醒较早,近来主要执行两个水质大工程计划。一个由美国地质调查局负责,名叫“全美水质

量评估工程”。该项目立项于1985年,旨在:为美国大部分地区水资源的地质条件提供一个权威性的评价;预测水质量的长周期性变化趋势;尽可能详细地鉴别出影响水质量变化的自然因素和人为因素,并对此作出恰当的解释采用局部和大区域两个层次相结合的办法来评估水资源质量。局部地区这一层次的重点是调研具体的水文体系,为明尼苏达州北部和北达科他州的雷德河水系、特拉华州的德尔马瓦半岛和得克萨斯州的巴尔康斯断裂带等,计划用4~5年时间对局部体系进行监控,然后再用5年或更长的时间进行间歇监控。在这期间,每个被研究地区均有几名有关专家研究其地下水和地表水的水文、水质量、地球化学和生态,并进行统计。第一阶段调研工作可望在2002年前结束,届时要提交详细的系列调研报告。

据设计,该项目的调研重点在于各种水体中残余农药的浓度和分布,人对水的卫生要求标准、农药的施用量与农作物的收成、气候、地质和土壤之间的相互关系,点源和非点源形成污染的比较,微量元素和工业污染有机化保物在区域水体中的分布状况,城市污水处理对水质、生态系统的影响等。

与上述工程平行的另一工程是“2000年后的水质量政策”,旨在使与水供应和水质量有关的各个利益实体达成共识,并据此制定有关政策、法律,以便强制实施。这将有利于保护人类赖以生存的自然水资源的质量。“2000年的水质量政策”工程开始于1988年,主要由全美水污染监测网联合会负责协调,参加者包括美国联邦政府、地方政府、技术职业学会、科研单位、工业界和环境工作者。有人认为,尽管现行的法律对点源污染(主要是工业排放的污水)有效,但对非点源污染却无能为力。他们相信,通过政治、法律和技术手段,将最终能使美国水资源质量得到控制。

所谓水污染,实际上指的是有毒化学物质、放射性物质和盐度在水中超过了一定的标准。所以,准确地分析地下水溶解物质的化学成分,了解其化学行为和化学反应是污染水的水文地质学的主要课题。

水化学和地球化学家的参与是现代水文地质学的重要特征之一。尽管水文化学在20世纪50年代已得到倡导,但目前对污染物质在地下水中的化学状态和迁移的认识,还不足以可靠地预测污染物质的宿源。

人类仍需要加强对地下水中污染物质的化学反应及其对污染物质迁移、扩散的影响的研究。在饱和及不饱和的各种地下环境中,污染物质的地球化学问题还远未得到解决。一些有机化合物在地下水中具有特别的顽性,并且浓度不高也可能对人体造成危害。就目前所知,许多有机反应是受生物控制的,但人类对微生物在这方面所起的作用仍知之甚少。对污染物的生物化学反应的了解,将有助于利用这些反应来净化受污染的地下水。

水文地质工作者向地球化学家靠拢是一种必然趋势,因为只有这样才能深入认识水文地质系统(包括地球的可溶物质、污染物的迁移机理和化学问题)。水文地球化学家发展和利用地下水指纹技术,将有助于推定地下水年龄和污染物来源,改进水文地质工作中的不确定性。通过对地下水体中各种金属含量的测定和对水在地下被加热活化、运移行为的研究,亦可为研究古成矿流体提供可直接借鉴的信息。

对污染物质运移的可靠的定量预测,只有在了解控制这些物质在地下水中的运移、水动力扩散机制以后才能变成现实。综观水文地质史,不难发现水文地质学与数学有不解之缘。

长期以来,人们已认识到水文的特征主要受气候、地质和地形的控制。19世纪达西定律、达布依平衡方程等数学定律的引用,为定量描述流体的流动规律奠定了坚实的基础。

在20世纪,水文地质以定量描述地下水流、化学成分和热量的迁移为特征,C. V. Theis(1935)发展了非平衡流动方程,描述了水井周围地下水的瞬态条件。M. K. Lubbett(1940)等讨论了大盆地中地下水的流动规律,同时提出关于贮藏机制和地下水流体系的分析。60年代以后,人们研究分析了地下各种地质条件对地下水流体系的控制作用,以及深盆地和其周围的流体。当

前,水文地质学正热衷于定量表征水流体在有孔隙地质介质中的行为和质量的迁移过程,以建立复杂的水流体流动和迁移的数学模型。

20世纪80年代,计算机模拟地下水体系飞速发展。但由于受到硬件的制约,所获得的模型也受到特定的限制。可以预料,随着计算机硬件的发展,这些模拟的前景肯定会改观,并且在计算机软件帮助下,流体、迁移和化学反应之间的关系将会统一起来。现在有许多研究地下水系统的水文地质学家已感到:计算机模拟的复杂程度在一定条件下已超过了野外技术收集可靠数据的能力。计算机模拟要求的常常是空间分布型数据,而不是简单的点数据。所以,遥感技术对未来水文地质的发展会产生强大的冲击效应。

今后,水文地质学的发展方向是:(1)与数学、统计学、地球化学和土壤等学科的结合将进一步得到加强。传统地质领域(如石油、矿床、岩石、构造地质、沉积学等)与水文地质学的相互关系和交叉地带也将受到进一步重视。(2)对区域范围研究的兴趣将会受到重新评价。现在水文地质学家已能定量描述区域的地下水体系,但必须依靠地质和数学、物理、化学原理去揭示水系统中的各种因果关系。(3)流体在多孔介质和碎裂岩石中的迁移和扩散问题,仍然是水文地质学的主要研究方向之一。数学模型和计算机模拟仍将是定量描述、模拟地下水及其中迁移物质的产状、数量、质量和运移的有效手段。通过这些研究,将会减少预测地下污染物活动规律的不确定性。(4)进一步加强水化学和地球化学研究,其中包括对地下水中污染物的化学反应及其对污染物迁移、扩散的影响的研究。(5)基础研究与应用研究的密切结合。(6)公众和政府的参与和支持。

(中国科学院地球化学研究所卢焕章、周永章撰)

**沙地水分的研究进展** 土地沙漠化是当前世界极为严重的生态问题和社会经济问题。主要发生在干旱、半干旱地区和半湿润地区。土地沙漠化造成生物生产量下降和可利用土地资源的丧失相当严重,全世界受沙漠化危害和影响的土地约有 $3.6 \times 10^{12} \text{m}^2$ ,涉及全球1/4土地面积和1/6的人口。为了改造和利用土地,防治土地沙化,许多国家都注重沙地水分的观测和研究,并取得一些进展。

沙地水分的研究,前苏联起步较早。1912~1913年,托马斯开始对俄罗斯东南沙地进行水分状况的定位研究,首次收集沙地水分状况和有关大气凝结水的资料。1930~1936年前苏联的观测扩大到捷别克沙地、那伦沙地。杜卡斯基在顿河、索别列夫在第聂伯河下游分别对沙地湿度状况进行分析和观察。彼得罗夫和里昂捷夫等则积累了中亚沙区水分状况的大量资料。50年代法国,Stoue, Stuger, Milthorpe详细地观察与研究干旱沙地露水凝结的重要性,收集了大量资料。法国Monteith和Hofmann对有关露的形成条件进行了论述。1948年日本不少大学和科研单位进行了沙地含水量与砂粒大小关系研究,随之有人进行了水源、水位、水量和水动态的研究工作。1958年库利克提出根据水分资料来确定沙地旱情的论述。沃朗科夫和斯维特利谢夫阐述了前苏联部分沙质土,特别是顿河沙地的水分状况,并建立起顿河水分平衡的简单方程。随后米霍维奇和维诺格拉夫对乌克兰沙地做了详细的研究,并出版《荒漠过境水及其利用问题》。奥吉尔维和丘巴罗夫研究了雅斯汉淡水透镜地区各沙地热量平衡和水分平衡之间的关系,并且开始对地下储水与沙地水分变化关系的重要性进行研究。

沙地水分运动的基础是沙土的土质和粒径组成,不同粒径组成具有不同的沙土水分状况和运动状态。Thompson应用土壤物理学理论分析指出:沙土田间持水量受有机质含量影响大,凋萎点随植物生长情况和大气状况而发生轻微变化。而孔隙体积与细砂、粉砂、粘粒、有机质和可溶性盐含量成正相关,与粗砂、碳酸钙和代换性钠含量成负相关。沙粒较细时,孔隙率小,沙中的水蒸气扩散系数较小,沙丘蒸发速度慢。70年代以来,许多国

家在沙地上建立了气象观测系统,从而把气象学和气候学理论应用到沙地水分研究中。

土壤温度对沙地水分影响明显,当土壤在夜间冷却时,水汽压下降,水汽从温度高的地下向温度低的地表运动,并进行蒸发。土层中水蒸气的迁移受热力学规律所支配。这是因土壤中空气含有的水汽所受局部压力与液态水状况相关,特别是液态水随温度呈现函数关系。沙层中液态水主要决定于大气降水,当降水在沙丘上下渗时,受沙丘的形态、结构影响和超过休止角的沙层跌落的覆盖,使水分深入沙层。

沙地表面的干沙层直接影响降水补给沙丘的水量,干沙层对沙丘微气候影响很大,干沙层与地温(0~20cm)的日变化相关,两者周期极相似,干沙层随地温下降水分略有增加趋势。进入沙丘中的水分的运动可以分汽态和液态水运动,它们的影响因素有土体孔隙和各种“势”以及土壤的温度梯度(库利克,1979)。库利克应用热力学与土壤水文学指出,水分迁移强度取决于化学势和温度梯度、液流断面和液体的粘滞性,并总结为:气压势在沙地水分不超过最小持水量时,对水分迁移意义较小;当超过时则为主要因素,并对地表蒸发产生影响。

应用生物学与生态学来分析植物体与沙地储水之间关系。在湿润地区Smith认为良好的土壤条件下,牧草生长时土壤水分亏缺的界限为50mm(1m土层内),在浅薄的土壤中,该界限降到5mm。为了保证牧草生长,牧草实际蒸散量和土壤含水量之差值,不应超过5mm这个限度。植被蒸腾作用消耗降水量的72%。裸沙地土壤表层水势波动与降水有关,降水时植被覆盖地的土壤层水势增加,尽管沙地持水量低于粉砂与粘土持水量,但沙粒持水的负基质电位比颗粒低的多,即使沙的含水量较低,植物也易吸收。

应用风沙流动力学研究沙地土壤水分含量与风蚀关系引起许多人的兴趣。W. P. Chepil发现土壤可蚀性随土壤水分增量的平方而减少,土壤水汽压达到15%大气压时则不发生风蚀。经过不断的研究,其结论为土壤水分对起动风速的增大程度与土壤质地有密切联系。一般地,其调萎系数大,在一定范围内则土壤水分增大条件下起动风速呈缓慢趋势。

经过研究,完整的模拟系统已经建立,70年代以来,模拟水文层流系统发展很快。在沙地中,不饱水分迁移模型已发展到二维系统即垂直与水平方向上(N. Hanks, 1973),模拟不同相液态水与气态水过程就需要设计空间方向上的三维模型。

降水可以看作是随机模型,虽然降水在空间上分配不均衡,但采用随机模型来模拟降水过程证明是可行的,降水过程的随机模型结合土壤水和表层水运动的确定性模型,可以研究蒸发输出与土壤水特性、土壤水数量。

地下水经常当作单独系统来考虑,实际上沙漠地区地下水与地表水是相互转化的,地下水除部分来源于降水外,地表水系中河水下渗或山区地质结构裂隙的入渗,往往成为地下水的重要组成部分。沙漠地区地下水是生物生长的重要因素。草原地区和沿沙漠边缘潜水溢出带和蓄井带,在模拟沙地水分时不能忽略地下水的作用。国际生态中的沙漠生态项目已经开始从事这个沙漠带的任务。

沙地水分研究进展的另一种表现,是世界各地沙地水分研究机构和人员的不断增加。50年代之前,前苏联和美国、日本等国家都有从事有关沙地水分研究的机构,如前苏联的土库曼沙漠所列别捷夫试验站、日本的鸟取大学沙地水分研究室等。进入60~70年代,主要研究沙地水分的国家开始建立起专门机构,如日本、前苏联、美国、埃及等国家建立起了水分平衡研究试验场。70~80年代,随着沙漠化的研究,开始从事沙地水分研究的国家和地区逐渐增多,世界上有沙漠的沙地分布的国家都开始直接或间接对沙地水分进行观察和研究。

沙地水分研究的深入,促进了沙地利用和保水技术的改善。节水保水技术有:采用地膜覆盖和下层防渗材料,干旱条件下盐水和咸水灌溉,光电流电渗析法。自从美国Sterling Davis首先研



制滴灌系统以来,给沙漠地区经济、有效地用水提供了良好的方法。随后以色列迅速发展滴灌技术,已建立起自控模拟滴灌系统。美国、澳大利亚也都积极采用,使沙地农业和经济种植得以发展。

中国沙地水分研究从20世纪60年代开始。60~70年代主要采用定点人工测定沙土水常数,确定了沙地水分运动的简单过程。70~90年代沙地水分研究与农业生产和防风固沙林相联系,继续进行部分定点(位)沙地水分观测,并在90年代建立起一些水分平衡场,使水资源综合评价得以发展,并在沙坡头站加强了沙地水分的研究,不同地区的站、点也相应进行了沙地水分的动态观测。同时逐步建立优化组合模型,但沙地水分的平衡综合研究和动态模拟还很薄弱。

(中国科学院兰州沙漠研究所冯起、高前兆研究员撰)

**工程地质学** engineering geology 是随着研究工程建设中的地质问题而逐渐兴起的一门学科,是地质学的一个分支。工程地质学的任务是研究人类工程活动与地质环境的相互联系、相互作用及相互制约关系,解决工程建设规划、设计、施工以及运行过程中的地质问题,为合理开发利用地质环境,选择有利建筑场址,优化工程建筑设计,制订合理施工方案和整治不良地质条件及害地质作用措施提供地质依据,达到保护地质环境、保证工程建筑物安全稳定和建设资金经济合理的目的。

工程地质学的研究内容,最基本的是研究作为工程建筑物地基、介质及材料的岩土的工程性质,以及影响工程建筑物安全稳定的地质作用和地质环境。工程地质学实际上是由工程科学和地质科学共同发展起来的。19世纪,在土木工程师和采矿工程师研究岩石的性质时,地质学家也参与解决大型建设工程项目的地质问题。如英国的W. Smith、美国的C. Berkeley、俄国的N. В. Мужиков等,都曾参加解决运河、铁路建设中的地质问题。1864年捷克的布拉格工业大学地质学教授J. Krajič首次开设工程地质学课程,给土木系学生结合工程建设的需要讲授地质学的基本内容。

现今公认近代工程地质学形成于20世纪20年代,奠基人为美国的K. Terzaghi教授和前苏联的Ф. П. Саваринский教授等。K. Terzaghi继1925年出版《建筑土力学》提出著名的有效应力原理和渗透固结理论,奠定了近代土力学的基础之后于1929年出版了第1本工程地质学教科书。Ф. П. Саваринский等最早在大学地质系创设水文地质与工程地质专业,于1937年出版了更成型的工程地质教科书。明确界定工程地质学为地质学的一个分支学科,发展了俄国著名学者B. В. Докучаев教授等关于岩土是自然的多组分的动态体系的理论,并提出了工程地质作用等新概念。

40和50年代以来,工程地质学得到迅速发展,成为包括下列分支的一门综合性学科。

**工程岩土学(土质学)** 主要研究土体和岩体的组成成分、结构构造、状态和物理力学性质,也包括岩土性质改良措施的研究。代表性著作有前苏联B. A. Приклонский的《土质学》(1949、1952、1955)、E. M. Сергеев的《土质学》(1952、1959、1975)和中国唐大雄、孔德坊分别主编的《工程岩土学》(1980、1987、1992)等。

**工程地质动力学(工程动力地质学)** 主要研究与工程建设有关的各种自然地质作用与因人类工程经济活动而产生的工程地质作用的发生原因、条件和发育分布及发展演变的规律,同时也研究其防御和整治措施。代表性著作有前苏联И. В. Попов的《工程地质学》(1951、1959)、英国P. B. Attewell和I. W. Farmer的《工程地质学原理》(1974)、前苏联B. Л. Ломтадзе的《工程地质动力学》(1977)、英国F. G. Bell的《工程地质学基础》(1983)、前苏联Л. А. Молоков的《工程地质作用》(1985)和中国张坤元、王士天、王兰生的《工程地质分析原理》(1981)等。

**专门工程地质学(工程地质勘察)** 是总结各类工程建筑地质勘察经验,研究勘察原理原则、勘察工作内容和技術方法要求

的一分支学科。代表著作有:捷克Q. Zaruba和V. Mencl的《工程地质学》(1976)、B. Д. Ломтадзе的《专门工程地质学》(1978)和中国张咸恭主编的《专门工程地质学》等。

**区域工程地质学** 是综合各地区工程地质勘察研究成果,分析工程地质条件区域性变化规律、论述各区域工程地质特征的分支学科。代表性著作有И. В. Попов的《苏联工程地质学》(1959)、刘明昌的《中国区域工程地质学》(1965)、德国W. R. Dearman和俄国E. M. Сергеев、B. С. Шибаконя主编的《全球地质学》(1989)等。

20世纪70年代以来,人类工程活动范围和建设规模越来越大,工程地质学的研究领域也进一步扩大,工程地质学在理论和研究方法上都取得了新的进展。一些新的分支学科正在突起和形成。首先是研究因人类工程经济活动而产生的不良地质环境效应,特别是加剧或诱发的地质灾害,而正在形成一门新的分支学科——环境工程地质学。作为工程地质学和环境科学结合的这一边缘学科,强调必须以地质环境作为研究对象,必须在勘查研究工程场地的地质条件,解决与工程设计施工有关地质问题的同时,调查研究建设地区地质环境特征及其在工程建设影响下可能发生的变化。80年代中期以来长春地质学院等已开设这门课程,编纂有关教材。这方面的研究成果,除结合一些大型建设工程项目完成的专题研究报告外,英国Perry H. Rahn的教科书《工程地质学——环境的研究》(1985)也是朝这方向努力的一本代表性著作。第二,是由于系统论、信息论、控制论以及突变论、协同论等最新理论,向工程地质研究的渗透和计算机技术的应用,使现代工程地质学呈现出新的面貌。不仅工程地质学工作全面计算机化,而且为工程地质体、工程地质环境和各类工程动力地质作用及地质灾害的复杂性理论研究注入了新的生机,使工程地质问题评价、预测进一步向系统化、信息化、定量化标准化方向发展。这方面的代表性著作如最近出版的中国崔政权的《系统工程地质学》(1989)等。该书将系统工程原理及概率分析原理与工程地质研究有机地结合起来,将工程地质研究进一步推向动态分析、目标分析和预测分析的新阶段。第三,在50和60年代出现的水利水电工程地质、工业及民用建筑工程地质、铁路工程地质这3类工程建筑的工程地质学分支学科基础上,由于经济发展的需要,城市工程地质学、矿山工程地质学、近海及海岸工程地质学等新的分支学科也正在兴起和形成。代表性著作有:英国R. F. Legget的《城市与地质》、俄国И. П. Иванов的《矿床工程地质学》(1991)以及有关的工作手册等等。第四,工程地质学在理论和研究方法方面较有代表性的有:美国J. K. Mitchell的著作《土的特性原理》(1976)和前苏联E. M. Сергеев、B. И. Осипов等的《粘性土强度和变形性质的本质》(1979),对土的物理力学性质与其成分结构,特别是与其微观结构的关系进行了深入研究和总结。美国R. E. Goodman的《不连续岩石的工程地质方法》(1976)研究了岩体力学性质的基本规律。中国谷德振的《岩体工程地质力学基础》(1979),将地质力学、岩石力学和工程地质学有机结合起来,对工程岩体稳定性问题进行了深入探讨和全面总结。刘国昌及谭周地等的《区域稳定工程地质》(1992)将地震地质学、地质力学和工程地质学有机结合起来,为以地震作用为中心的区域稳定性工程地质研究奠定了基础。岩体工程地质力学、区域稳定工程地质学都已成为中国工程地质学的特色。分别强调岩体结构对岩体稳定性、地壳结构对区域稳定性的控制意义。前苏联E. M. Сергеев主编的《岩土工程地质研究方法手册》(1984)全面论述了岩土成分、结构和工程特性的室内、野外研究方法,都具有代表性意义。

当前的研究热点是:(1)工程建设地质环境效应的研究,亦即工程设施——地质环境系统协调稳定性的研究;(2)工程岩土体、工程动力地质作用和工程地质环境等复杂系统的非线性动力学研究;(3)岩土工程地质性质及其研究方法、工程地质体和工程动力地质作用的监测及其方法的研究;(4)不良工程地质体和灾害性地质作用预防及整治方法的研究等。

参考文献

- 1 Сергеев В. М. Инженерная Геология. Москва, 1978
- 2 ЛПомтадзе В. Л. Инженерная Геология. Москва, 1977, 1978
- 3 Zaruba Q, Mencl V. Engineering Geology. Prague, 1976
- 4 Attewell P B, Farmer I W. Principles of Engineering Geology. London, 1976
- 5 Bell F G. Fundamentals of Engineering Geology. London, 1983
- 6 Perry H. Rahn Engineering Geology - An Environmental Approach. New York, 1985
- 7 Dearman W R, Sergeev Y M, Shikobova V S Engineering Geology of the Earth. Moscow, 1989
- 8 谷德振. 岩体工程地质力学基础. 北京, 科学出版社, 1979
- 9 崔政权. 系统工程地质导论. 北京, 水利电力出版社, 1989
- 10 刘国昌. 区域稳定工程地质. 长春, 吉林大学出版社, 1993  
(长春地质学院谭周地教授撰)

**环境工程地质学** environmental geology 是环境科学“部门环境学”或“基础环境学”的组成部分,是工程地质学的一个新的发展。20世纪60年代(1968年国际地质大会布拉格会议)便提出了环境地质学与环境工程地质学问题。环境工程地质学问题在中国引起普遍关注是在中国第1次全国工程地质大会上(苏州,1979),而中国环境工程地质学诞生的标志,应推中国第1次全国环境工程地质学术讨论会(孝感,1982)。此后,中国地矿部系统和其他部门、研究机构,开始设置某些环境工程地质队组,提出研究环境工程地质课题,出现了许多这方面的成果;同时,地质院校开始培养环境工程地质研究生,开设“环境工程地质学”课程,1984年西安地质学院胡广韬首次编著了“环境地质学基础”讲义,环境工程地质问题的研究已成为热点。然而,环境工程地质学仍然处于发展中的萌芽阶段。根据若干年环境工程地质的探索实践,对环境工程地质学的基本属性,目前已经具有大体一致的认识。早在1944年,由维尔纳德斯基提出类似地质环境的概念“灵生圈”;谢尔盖耶夫进一步阐明了“地质环境”。他认为,地壳上部,包括岩石、水、气和生物在内,相互联系的系统,就是地质环境。人类改变着这个范围内的地质作用和现象,或形成新的工程地质作用和现象。大量事实充分反映出地质环境的3项根本性的关键:(1)地质环境是人类周围的地质实体,客观存在;(2)地质环境是对人而言,不是其他;(3)地质环境与人类是一个相互联系制约、矛盾而又统一的总系统,主要是一种物理环境工程地质环境,在普遍意义上,也就是地质环境;它在空间和时间上,与地质环境完全一致。但是,工程地质环境具有特殊的涵义,它不是天然地质环境。人类从事经济工程活动,利用、改造、破坏了天然地质环境,并使它产生一系列有规律的新变化,形成了新的地质环境。环境科学是综合性科学,是自然科学与社会科学的新兴边缘科学,环境工程地质学也必然是工程地质学与其有关的社会科学(环境经济与环境法)的新兴边缘学科。环境工程地质学的研究对象,就是工程地质环境,就是人类从事生产、生活、生存发展活动为中心的周围一定范围内的,并由其活动影响变异的客观地质实体。它可分为聚落工程地质环境、区域工程地质环境、星际工程地质环境(表1)。

环境工程地质学研究的内容,就是环境工程地质问题。它是在一定地质本构条件下,由于经济工程活动引起的、超出环境自控能力的地质环境之变异,并影响人类生产活动、生活健康、生存安全的环境恶化问题。它主要是地震灾害的诱发变异、地面沉降塌陷变异、斜坡变动的变异、流域冲淤的变异、滨岸浸淹的变异及表水枯竭的变异(表2)。但是,环境工程地质学又是自然科学与社会科学的新兴边缘学科,其内容还要广泛些。工程地质环境有性质之差,大小之别。大多情况下,对区间广阔、恶化严重的工程地质环境之开发、利用、调控、改造、管理等,常常不是一个单位或一个部门所能独自承担的,需要协议合作,统筹规划,甚或由政

府责成推行。这就需要研究、制订、完善工程地质环境法。同时,为合理地开发、利用、调控、改造和管理环境,还需要研究工程地质环境经济学。

表1 工程地质环境空间划分

|          | 类        | 亚类       |
|----------|----------|----------|
| 工程地质环境   | 聚落工程地质环境 | 庭院工程地质环境 |
|          |          | 村落工程地质环境 |
|          |          | 工矿工程地质环境 |
|          | 区域工程地质环境 | 城镇工程地质环境 |
|          |          | 乡际工程地质环境 |
|          |          | 县际工程地质环境 |
| 星际工程地质环境 | 省际工程地质环境 |          |
|          |          | 国际工程地质环境 |

表2 工程地质环境要素

| 要素 | 地质本构 | 经济-工程     | 环境工程地质作用(问题) |
|----|------|-----------|--------------|
| 构  | 地质组成 | 工业民用建筑工程  | 地震灾害的诱发变异    |
|    | 地质结构 | 水利水电建筑工程  | 地面沉降塌陷的变异    |
|    | 地质动力 | 道路交通建筑工程  | 斜坡变动的变异      |
| 成  |      | 气、油、水开发工程 | 流域冲淤的变异      |
|    |      | 农林牧开发工程   | 滨岸浸淹的变异      |
|    |      |           | 表水枯竭的变异      |

环境工程地质学这个新发展的学科,仍然处在萌芽阶段。这个领域里许多问题,特别关于工程地质环境质量评价的量化问题、环境工程地质经济学问题和环境工程地质法学问题的研究,尚需进行大量工作;后二者,在中国尚属空白区。

参考文献

- 1 胡广韬. 陕西水利发电(3), 1989
- 2 胡广韬. 水文地质工程地质(6). 北京:地质出版社, 1992
- 3 胡广韬. 西安地质学院学报, 西安地质学院, 1993  
(西安地质学院博士生导师胡广韬教授撰)

工程地质勘察 engineering geological survey or engineering kgeological prospectyng

也称工程地质勘测,指为工程建设进行的地质勘察工作。通常将工程地质勘察、水文地质勘察和工程测量等工作合称为工程勘测。工程地质勘察是工程勘测的中心内容。工程地质勘察的目的是为工程建设项目规划、选址、设计及施工取得所需工程地质资料。

工程地质勘察是配合工程规划、设计分阶段进行的。在规划或可行性论证阶段,基本任务是勘查研究建设地区地质环境特征,为综合利用资源、合理利用与保护生态环境进行工程建设规划和可行性论证。在工程选址和设计阶段,则逐步查明建设地段以至建筑场址工程地质条件,取得工程设计所需地质资料,解决与工程建筑稳定性正常运行有关的工程地质问题。

工程地质勘察的工作种类主要有:工程地质测绘及制图,地球物理探测、钻探、坑探及洞探,野外试验,长期观测,室内实验室研究和资料分析等。

总结各类建设工程地质勘察经验形成的工程地质学的分支学科,常被称为专门工程地质学,也有的直接称为工程地质勘察或工程地质勘测。各不同工程建设部门于40~50年代以来相继制订了各类工程建筑的工程地质勘察规范和工作手册。水利水电工程、工业及民用建筑、铁道工程等部门在60、70和80年代都数次进行修订,对提高工程地质勘察工作水平起了重大作用。工程地质勘察研究探讨的主要问题是:(1)勘察工作的设计。即根据不同勘察设计阶段对勘察精度和可靠性有不同要求,如何合理地选择工作种类、工作范围及工作精度;如何合理地布署各项勘察工作;如何合理地安排各项勘察工作的工作量、工作方法和规定其技术要求等等。这也是各工程建设部门制订和修订工程地质勘察规范的中心内容。(2)勘察技术的提高和改进。主要是在

工程地质勘察工作中,及时地采用新技术、新方法,也包括地学、力学、数学中新理论和新知识的应用。70~80年代以来,这方面的进展是很大的。如遥感技术的应用,不仅因利用卫片、航片大大提高了地质测绘工作的速度和精度,而且现今已用以定期观测,监视滑坡、泥石流等地质灾害。浅层地震勘探、微重力仪等先进物探方法和综合测井、钻孔摄影、地质雷达、无线电波透视等高新技术现已推广应用,取得越来越好的效果。

**参考文献**

- 1 Attewell P B, Farmer I W. Principles of Engineering Geology, London, 1976
- 2 Zaruba Q, Mend V. Engineering Geology, Prague, 1976
- 3 Ломгадзе В. Д. Спелляшная инженерная Геология Москва, 1978
- 4 Bell F G. Fundamentals of Engineering Geology, London, 1983
- 5 张倬元主编. 工程地质勘察. 北京:地质出版社, 1981
- 6 张成基主编. 专门工程地质学. 北京:地质出版社, 1988

(长春地质学院谭周地教授撰)

**岩土结构** structure of soils and rocks 指岩石和土的结构单元的特征及其组合关系。不同结构单元和各种不同形式的组合排列,形成不同的结构类型,具有不同的性质。研究岩土结构的意义在于揭示其工程地质性质的本质,特别是岩土结构对岩土变形和强度性质的控制性意义,为评价、预测岩土工程地质性质的变化和工程岩土体的稳定性问题提供理论依据。

**土的结构** 土的结构单元包括单个颗粒和由细小颗粒组成的集合体。各结构单元的大小、形状、表面特征、数量比例关系、在空间排列状况和相互接触连结关系以及其间孔隙的特征等决定着土的结构,形成不同结构类型。

工程地质研究中主要研究土的微结构,即借助光学显微镜和电子显微镜来揭示的结构特征。而肉眼所能观察的结构特征,如层状、块状、板状、棱柱状以及片状、核桃状等结构特征,常称为土的构造或土体结构。无疑,土的原生构造是研究土结构特征的基础。

最早提出土的结构并进行研究的是美国 K. Teyaghi, 1925年即指出在评价土的工程性质时必须注意研究其微观结构,并提出了土的蜂窝结构、絮状结构和单粒结构的概念。1926年 Goldschmidt 接着提出了片架排列结构的概念。1932年 A. Casagrande 提出了海相粘土的结构模式,发展了 K. Terzaghi 蜂窝结构的概念。1936年前苏联 M. M. Финаров 也提出在研究粘性土的工程地质性质时必须研究其微结构特征。1944年 И. В. Порон 也曾指出粘土存在定向性的特征。

进入50年代,透射电镜开始应用并实际观察到粘土颗粒为片状体,带电的片状体由于电性不同而形成“面一面”、“面一边”、“边一边”等不同接触形式。中国陈宗基提出了粘土颗粒空间网络结构模式(1957), Lambe 提出了不同电解质中的不同结构模式(1958), Pusch 提出了理想的三维边一边结构模式(1962), Van Olphen 总结了粘土悬液中颗粒的连结模式及提出了命名原则。美国 J. K. Mitchell、前苏联 E. M. Сепреес 等这期间也进行了很有意义的研究。

60年代后期以来,扫描电镜、电子探针、X射线衍射等新技术的引用,土结构的研究有了新的突破,可以直接观察土颗粒的排列关系、孔隙特征及结构连结情况,从而形象地划分土的结构类型,并开始从定性向定量方向研究。加拿大 R. N. Yong 对众多结构类型进行了系统分类(1973)。英国 K. Collins and A. McCow 根据各种因土微结构的研究,进一步提出土结构分类的方案。美国 J. K. Mitchell 综合当时欧美研究成果,写入专著《土的特性原理》(1976)。前苏联 E. И. Сепреес, В. И. Осипов 和 В. И. Соколов 等在系统研究境内各种粘土结构特征基础上,提出了骨架状、蜂窝状、基质状、紊流状、层流状、磁畴状、假球状及海绵状8种结构类型(1978, 1979)。同时根据结构连结力的深入研究,指

出对结构连结起作用的有磁性力、偶极(库伦)力、毛细管力、分子力、离子静电力和化学(价键)力等(Осипов, 1975)。而粘土类土和岩石中结构单元的接触类型主要有凝聚接触、过渡接触和同相接触三类,并据此对粘土类土和岩石按结构连结类型进行了分类。具体划分为远凝聚、近凝聚、过渡的、相位的、凝聚的及相位的、相位的及过渡的6类(Осипов, 1978)。这些研究,不仅使土的结构研究与力学性质联系起来,而且进入定量评价阶段。

中国土的结构的研究是由陈宗基、张宗祜倡导的。张宗祜深入研究了西北黄上类土的显微结构特征,揭示了黄土湿陷性与内部结构的关系。其后高国瑞等对膨胀土,唐大雄等对红土的结构特征研究都具有代表性意义。同时相应提出了中国土结构的分类方案。当前,研究的热点是:(1)结构连结的研究 这是土结构研究的关键。土结构单元接触连结关系是决定土性质的基本因素,土粒接触类型划分中将粒间作用力与粒间距离两者结合起来考虑是正确的研究方向。(2)结构研究的系统化、标准化、定量化和应用化研究,也是土结构研究的必然发展趋势。

**岩体结构** 岩体结构指的是岩体内结构面和结构体的性质、形状、规模大小及其组合关系所反映出的结构特征。岩体结构特征在很大程度上决定着岩体在外力作用下的变形机制和破坏方式,决定着岩体的工程地质性质,同时也对岩体内地下水的运动起着控制作用,因而岩体结构研究是工程岩土学和岩体力学的主要问题之一。研究岩体结构特征,就是从结构上研究岩体的不均一性和不连续性。

岩体结构这一术语是1972年谷德振教授正式提出的,并提出了岩体结构分类的初步方案,划分出:块状、镶嵌、碎裂、层状、层状碎裂及散体6类岩体结构类型。以后在1978年又补充为如下4类及8个亚类:

- I 整体块状结构 { I<sub>1</sub> 整体结构  
I<sub>2</sub> 块状结构
- II 层状结构 { II<sub>1</sub> 层状结构  
II<sub>2</sub> 薄层(板)状结构
- III 碎裂结构 { III<sub>1</sub> 镶嵌结构  
III<sub>2</sub> 层状碎裂结构  
III<sub>3</sub> 碎裂结构
- IV 散体结构

并对各类和亚类结构岩体的力学介质特性变形破坏特征分别作了论述,同时为各亚类划分提出了结构面间距、特性和结构体形态、力学强度的大致界限值,成为以后岩体结构研究的基础。

大致在同一时期,欧美岩石力学学者也注意了这一问题。较有代表性的有:1974年奥地利 L. M. Ullmer 根据岩体内软弱面网络的发育特征,将岩体划分为未破裂岩体、少裂隙岩体、裂隙岩体及强烈破碎岩体4类,也分别描述了其力学属性和变形、强度的有关特征值。1976年美国 R. E. Gookman 提出按连续性对岩体进行分类,具体划分方法是根据野外裂隙空隙度和岩块变形模量  $E_b$  与岩体变形模量  $E_M$  的比值来进行划分。所划分的连续岩体、过渡性岩体、不连续岩体和松散岩体4类岩体都相应规定了划分界限值。

80年代以来,国内外工程地质学家、岩石力学家对岩体结构研究有进一步发展。如王思敬补充提出断续结构、孙广忠补充提出板裂结构等新概念等。孙广忠并综合80年代研究成果,进一步划分岩体结构为如下6类12亚类:

- 块裂结构 { 块状块裂结构  
层状块裂结构
- 板裂结构 { 块状板裂结构  
层状板裂结构
- 完整结构 { 块状完整结构  
层状完整结构
- 断续结构 { 块状断续结构  
层状断续结构
- 碎裂结构 { 块状碎裂结构  
层状碎裂结构

### 散体结构

碎屑状散体结构  
糜棱状散体结构

并据此按连续介质、碎裂介质、块裂介质及板裂介质进行岩体力学分析。从而使岩体结构研究与岩体力学分析直接联系起来。当前研究热点是：(1)岩体结构类型划分因素指标的定量化、标准化；(2)岩体结构研究的实际应用，如何使其与岩体力学分析、稳定性分析密切联系起来。

#### 参考文献

- 1 Mitchell J K. Fundamentals of Soil Behavior. 1976
- 2 Sergeev Y M, et al. Types of the Microstructures of Clayey Solids. 1978《International Congress IAEG》section I Vol. 1
- 3 Осипов В П. Природа Прочностных и Деформационных Свойств Глинистых Порог Москва, 1979
- 4 唐大雄, 等. 工程岩土学. 北京, 地质出版社, 1987
- 5 高国瑞. 近代土质学. 东吴大学出版社, 1990
- 6 Müller L. Rock Mechanics Udine 1974
- 7 Good man R E. Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks. New York, 1976
- 8 中国科学院地质研究所工程地质研究室. 岩体工程地质学的基础和方法. 中国科学, 1972
- 9 谷德振. 岩体工程地质学基础. 北京, 科学出版社, 1979
- 10 孙广忠. 岩体结构力学. 北京, 科学出版社, 1988

(长春地质学院谭周地教授撰)

### 动力滑坡学 dynamic landslideology

滑坡又称地滑或地垮。20世纪60年代就提出了滑坡的“剧烈启动(剧动)”问题, 80年代又发现并提出了高速滑坡的“多级冲程”, 从而有“动力滑坡学”的研究。对此, 中国西安地质学院胡广韬出版了第1本“动力滑坡学”专著(1988)。这不仅丰富发展了滑坡理论, 而且合理可靠地对灾害性滑坡的调查研究、预防、调控、治理提供了更切实际的科学依据, 取得更加显著的效果和价值。

20世纪60年代, 人们开始重视高速滑坡与动力滑坡学的研究。此前萨瓦林斯基、尼范托夫等, 尽管在研究中涉及到不少高速滑坡实例, 但没有重视滑坡的高速滑动。甚至在有些极为详细的滑坡分类中, 虽考虑到滑坡滑动的动力特征, 但仅提到“一次滑动”、“周期地或不定期地大约在同一表面上的重复滑动”、“连续地滑动”。谢苗诺夫提出过“崩塌式滑坡”, 罗高全提出过“崩塌滑坡”。1974年, 席埃德格(A. E. Schiedegger)首次提出“关于灾难性滑坡滑程与速度的预测”理论。中国对这种滑坡研究反应强烈的, 应属水电工程界。1980年, 水电部总工程师、中国科学院学部委员在《建筑物的抗滑稳定和滑坡分析》中, 提出滑坡速度的计算公式。1963年胡广韬在《关中西部黄土原边滑坡的基本规律》中, 提到“剧动式滑坡”问题; 继而在1980年又专门对“剧动式坡基滑坡的超稳性”进行了研讨, 并提出其功能转化的关系式。近年来, 中国发生许多规模巨大、危害惨重的高速滑坡, 已经广泛引起地质、地理、地震以及其他各个经济建设部门, 特别是水电、建筑、铁道、航运、城乡建设和环境保护部门的极大重视。

滑坡学或动力滑坡学, 做为独立的学科或课题而被提出, 仅仅是80年代近期的动议。尽管此前所有对滑坡的有关调查、勘探、研究的成果, 都应归属于滑坡学的范畴之内, 其中也有一些属于动力滑坡学的研究内容, 但大都是零星的、局部的, 或者仅仅是涉及而尚未形成独立学科。滑坡的全部研究史, 除在特殊情况下, 一般主要集中对滑坡的形态、组成和结构、滑坡形成、演化和滑体稳定性的条件、因素和原因, 以及对滑坡进行调查、勘探、预报预测和监测防治的探讨和研究。因此可以认为, 国内外开始重视高速滑坡的同时, 便明显地展开了动力滑坡学有关方面的研究并逐步丰富了动力滑坡学研究的内容。1981年, 张俤元在《工程地质分析原理》中与刘汉超以及其他合作者, 协同水电部西北勘测设计院一起, 通过对中国龙羊峡水库库首斜坡和滑坡的研究,

首次提出了滑坡床面的累进性破坏与贯通的机理; 并在这里的斜坡坡脚处向坡体内延申的平洞内, 发现斜坡破坏前期的可见长度大于60m的剪切滑移面, 以及斜坡破坏过程中滑坡床面累进破坏与贯通中斜坡变动体的现场原型; 这些都是动力滑坡学研究方面的重大发现。胡广韬在60年代初期便对陕西著名的引渭工程所遇到的滑坡场地, 进行了“剧动式坡基滑坡”滑动过程中的“功能转化”及其滑体“超稳性”的研究, 并于1986~1987年相继提出“滑坡原因与因素的历史转化性”、“古老滑坡复活条件的特殊性”、“斜坡破坏的变异”、“多级冲程剧动式高速滑坡”以及“斜坡环境中滑坡之剧动与高速之机理”等理论, 专门研讨了斜坡或滑坡的有关动力学问题, 从而积累了动力滑坡学研究资料。与此同时, 近年来还有不少滑坡研究者提出了动力滑坡学研究的新课题。1986年6月在湖北宜昌召开的“我国典型滑坡实例学术讨论会”的总结中, 也建议在中国开展“滑坡动力学或滑坡运动学的研究”。

动力滑坡学这项新课题, 是对具有一定本构(本质与构造)斜坡坡体, 与其所处的特定应力场或力系之中而表现出内在和外在的机械力相互有机地联系并制约的滑体, 着重研究它在形成演化的全过程中的发展、变化、滑移、运行、停滞与消亡, 以至更新斜坡出现之动的规律。该著在这种观点上, 在坡体应力与变形和破坏、滑坡营力因素的历史转化、滑坡动态的阶段差异, 滑坡形成位置的选择、滑坡的功能均衡与滑体超稳功能、滑体超稳性与滑体复活条件的特殊性、高速滑坡的多冲程与多序次、高速滑坡的启程剧动与行程高速机理, 多冲程滑坡的功能转化与滑体稳定性向量问题、多冲程滑坡的超前减泥气浪与边缘旋流, 以及地质环境中斜坡破坏的变异等方面, 探讨并论证“动力滑坡学”的若干问题。

“动力滑坡学”的研究仅是开端, 尚有许多方面将进行全面而深入的研究。诸如对缓动低速滑坡、常动中速滑坡、滑坡启程加速、滑坡行程加速与持速、滑坡全程减速(特别是终程消能减速)等研究, 以及这些方面的量化与微观探索, 均有待于广泛展开; 在此基础上, 将必然会发展提出滑坡研究的新学科——滑坡动力学。

#### 参考文献

- 1 胡广韬. 西安地质学院学报, 1986, 4
- 2 胡广韬. 西安地质学院学报, 1980, 1
- 3 胡广韬. 灾害学, 1987, 1
- 4 胡广韬. 动力滑坡学. 西安, 陕西科学技术出版社, 1988
- 5 Hu Guang-tao. Stability evolution tendency of the slope failure with multiple stage. in *TRAC TOPOGRAPHY*, The Japan, China symposium on landslides and debris flow, The Japan Landslide Society, 1989
- 6 Hu Guang tao. A new kind of landslide, The China Japan workshop on landslide

(西安地质学院胡广韬教授撰)

### 水利水电岩溶工程地质 water resources and hydropower karst engineering geology

系以研究水利水电工程建设中所遇到的各种岩溶水文工程地质现象和问题为主要对象的一门边缘地质科学。研究的主要内容包括: 岩溶作用理论和岩溶发育规律; 水库岩溶渗漏及防渗处理; 水库岩溶地质环境; 大坝、厂房、隧洞等土建筑物地基, 岩层稳定及工程处理技术等。

1844年前, 法国勘察和兴建的阿朗坝, 是世界上最早的一个工程。据不完全统计, 国外已兴建的大型水利水电工程, 在130座以上。其中最大坝高271.5m, 是前苏联的英古里坝, 最大的水库地质库容340亿 $m^3$ 是土耳其的凯班水库。

中国岩溶主要分布在西南及中南各省区, 河流纵横, 蕴藏着丰富的水能资源。水利水电岩溶工程地质勘察与建设, 主要是从1950年前后开始的。至今, 已建成大中型电站在50座以上, 总装

装机容量达 585 万 kW, 总库容达 358 亿  $m^3$  以上。在岩溶地区兴建的小型电站和水库达数千座, 遍布中国的南方和北方。勘察研究工作与工程建设, 可划分 3 个阶段: (1) 1950~1960 年, 在全国范围内只在几个局部地区开展了选坝、初步设计阶段的勘察工作。在中国的南方和北方, 建成水槽子、六郎洞、红枫和官厅等几个中型电站。同时在长江三峡南津关比较坝址, 进行了详细的勘察研究和论证工作。(2) 1961~1982 年, (从上一阶段末期起始) 在广西的龙江和贵州的猫跳河等河流, 都进行了系统的流域规划和梯级开发研究, 先后建成了拉浪、拔贡、六甲及百花、修文、窄巷子、红林和红岩等一批中型和小型电站。中国岩溶地区最大的电站——乌江渡电站, 在此期开展了全面的勘察研究工作。1980 年, 电站建设已初具规模。在完成高压灌浆防渗帷幕以后, 于 1982 年最后建成发电。该电站为 165m 高的重力拱坝, 库容 21 亿  $m^3$ , 装机容量 63 万 kW。(3) 1983~1993 年, 在前一阶段和本阶段勘察工作的基础上, 又有一批大型水利水电工程先后建成, 主要有黄泥河上的鲁布革, 红水河上的天生桥二级、岩滩、大化、清江上的隔河岩等电站。此期, 是中国岩溶区大型水利水电工程勘察和建设的兴盛时期。除此, 还有一批工程进入可行性研究和初步设计和施工准备, 主要有清江上的高坝洲, 溇水上的江垭, 乌江上的洪家渡、构皮滩、思林, 北盘江上的光照和黄河上的万家寨等电站, 预计在 2000 年前后, 可望大部分建成发电。

正在兴建的长江三峡工程, 大坝虽在非岩溶地区, 但水库中分布大片岩溶化地层, 为论证水库渗漏问题, 做了大量研究工作, 已获得可靠的结论。

由于各阶段勘察研究工作做得认真、细致, 上述已建的大中型电站基本上都是成功的和比较成功的, 产生岩溶渗漏的水库是极少数。

在岩溶工程地质勘察技术和分析研究方法方面, 经过多年来的生产和科研实践, 积累了丰富的经验, 取得了很大的进展, 在理论研究水平上也有明显的提高。除了常规的勘察方法外, 大力发展了遥感技术和地球物理勘探技术, 后者主要有钻孔电磁波透视、浅层地震反射、微重力及地质雷达, 还引进了国外岩性探测仪技术。

在分析研究工作方面, 建立和发展了 15 种以上的分析研究方法, 其中带有普遍意义的主要有: 岩溶地貌水文网分析法, 岩溶地下水渗流场、温度场、水化学场、同位素场分析法, 岩溶地下水衰减、地下水动态及水均衡分析法, 岩溶管道堵塞抬水试验及岩溶洞穴堆积物特征分析法等, 电网络模拟分析法, 也取得了新的进展。

带有一定独创性的分析研究方法主要有: 岩溶地下水压渗系数 ( $Pk$ ) 分析法, 水库岩溶渗漏地质模型和数学模型以及岩溶趋势面分析法等。

压渗系数的表达式为:  $Pk = L/t \cdot (h/n)^m$ , 式中,  $L$  为地下水运动距离,  $t$  为时间,  $H$  为水库或河流上游水头,  $h$  为下游钻孔或溶洞水头,  $m$  为回归系数, 一般在 0.5~1.0 之间。

岩溶渗漏数学模型是建立在众多库水头与渗漏量相关曲线基础上的, 共有 6 种线型, 即直线、抛物线、指数、对数、双曲线及 S 形曲线类型。各种线型, 均代表一定的岩溶渗漏特性。

在岩溶渗漏计算方面, 除了常规的按达西理论计算的方法以外, 应用和发展了逻辑信息法、模糊数学评判法和数量化理论计算方法, 其实质在于将很多非定量的地质因素通过数学处理转化为定量因素, 从而建立数种渗漏计算的多元回归数学模型。

为了研究岩溶管道的运动规律, 正在研究和建立一种岩溶管道水汇流理论, 以大量的地下水示踪试验资料为依据, 建立了比流速(单位水头流速  $ui$ ) 与水力比降 ( $I$ ) 的非线性回归数学模型, 其带有普遍意义的数学表达式为  $ui = 1/(a + b/I)$ , 式中  $a$ 、 $b$  均为汇流系数,  $a$  在 0.01~0.03 之间;  $b$  在 0.03~0.4 之间, 利用此理论亦可进行岩溶渗漏计算。对于河谷岩溶地下水动力条件的研究较为深入, 划分为 4 种类型: 补给型、排泄型、补排型、悬托型。各种类型均具有自己的岩溶地下水动力特征。

统一岩溶地下水流和孤立岩溶管道水流并存的理论, 已为大量的实践和研究证实。在岩溶地区特有的水文地质现象, 如多潮泉和岩溶管道水穿跨流等现象, 其成因已通过模型试验和现场示踪试验等方法所证实。在深岩溶研究方面, 划分出河谷深岩溶和区域深岩溶两种类型。其区别在于, 前者处于地下水浅部循环带(受当地或邻近河流排水基准面控制)内; 后者, 处于地下水深部循环带(受远离江河湖海排水基准面控制)内。河谷深岩溶, 对水库渗漏影响很大。

按岩溶渗漏的性质, 可划分为 8 类 28 种类型。其中根据岩溶管道水比流速  $w$  的大小, 划分为快速流、中速流和慢速流。

在防渗处理方面, 创立和发展了防渗帷幕灌浆、堵截、铺盖、围片、围坝、喷涂、导引和排气等 10 多种行之有效的办法。以防渗帷幕在河床深部接地的型式划分为 5 种类型: 全帷幕(底部接隔水层)、相对全帷幕(接相对隔水层)、悬帷幕(不接隔水层或相对隔水层)、相对悬帷幕(接相对弱透水层)和水槽式帷幕(帷幕端点接上游或下游隔水层, 两岸近于平行河流的帷幕在河谷底部交叉相接)。当岩溶地质条件复杂时, 可使用由上述多种帷幕组合而成的组合型帷幕。

灌浆材料, 通常使用纯水泥, 近年来发展为混合浆液灌注。主要材料有: 水泥、粘土、粉煤灰等。化学灌浆, 也在小范围内予以应用。灌浆压力, 分为低压 ( $P < 1MPa$ )、中压 ( $P = 1 \sim 2MPa$ ) 高压 ( $P > 2MPa$ ) 3 种压力。在乌江渡和正在兴建的东风电站, 均使用了高压灌浆, 获得和初步获得了良好的效果。

对于岩溶管道的防渗堵漏, 发展了预充填级配粒(砂砾石、碎石等)再进行灌浆的方法, 在乌江渡及岸堤等工程应用成功。

岩溶坝基工程处理, 在结构改善方面, 主要方法是扩大坝基、调整坝体应力、增设混凝土垫层, 以适应不同的地基条件; 在地基岩体加固方面, 主要方法是溶洞开挖、回填混凝土和固结灌浆。对于坝基或坝肩的溶洞, 应用有限元等方法予以计算。猫跳河某电站右拱端外 7m 处发育一溶洞, 经计算对受力有一定影响, 通过回填混凝土和灌浆处理, 效果良好。窄巷子双拱坝右岸, 遇一溶洞, 进行了开挖、冲洗、回填混凝土和固结灌浆, 并在洞口使用了型钢砼作盖板, 使地基均匀受力, 取得了良好效果。东风左拱端地基遇一溶洞, 经开挖回填混凝土、固结灌浆和设置传力墩, 处理效果良好。

对于地下洞室(隧洞、地下厂房等)勘察研究的主要内容有: 岩溶洞穴及充填物的稳定、岩溶涌水外水压力及岩爆等问题。天生桥二级引水发电隧洞, 单条洞长 9.56km, 直径 9~10.8m, 沿洞线岩溶强烈发育, 开挖中岩溶充填物大量塌方, 处理方法主要有挑梁法、顶篷法、套管法和钢支撑及砼衬护等方法。在隧洞中岩溶涌水以雨季最为严重, 最大涌水量 10  $m^3/s$  以上, 处理方法, 以排为主, 结合封堵。在开挖过程中, 岩爆现象甚为频繁, 有 40% 左右的洞段出现低及中等岩爆, 局部洞段出现强烈岩爆。处理方法分为两种, 一是应力控制法(用人工方法, 使部分地应力释放); 二是应变控制法(通过各种支护手段, 减少洞室围岩变形)。

从岩溶工程地质勘察到科学试验, 再到工程建设的实践, 建立一套理论研究系统, 再用这些理论来指导生产实践, 从而达到逐步提高勘察研究水平, 是我们的主要技术路线。

目前, 在岩溶工程地质勘察及理论研究方面, 存在以下几个尚待深入研究的问题: 岩溶洞穴有效的探测方法; 岩溶渗漏的定量计算和预测问题; 岩溶管道渗漏计算及防渗处理技术; 大坝等水工建筑物地基岩溶洞穴的稳定分析方法及更有效的工程处理方法等。

今后, 本条目的研究热点预测有以下几个方面: 岩溶洞穴分布具体位置、规模的精确探测方法; 岩溶管道水运动规律及汇流理论的研究; 水库岩溶渗漏及预测的计算机应用技术; 水库岩溶管道渗漏快速而经济的防渗处理方法及灌浆新材料新工艺的研究等。

#### 参考文献

- 1 Milanovic P T Proceedings book W. R. P, KClolrado, USA,

1976

- 2 袁道先. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 1980
- 3 Milanovic P T. Karst Hydrogeology, water resources Publication, 1981
- 4 卢耀如. 水文地质工程地质, 1982, 4: 15~21
- 5 任美镔, 刘振中. 岩溶学概论. 北京: 商务印书馆, 1983
- 6 刘邦良, 李森. 水力发电, 1903, 3
- 7 张汝清. 中国岩溶, 1989, 183~189
- 8 邹成杰. 中国岩溶, 1990, 3
- 9 邹成杰. 中国岩溶, 1992, 2: 119~129

(电力工业部贵阳勘测设计院邹成杰高级工程师撰)

## 岩体工程地质力学 *mechanics of rock masses*

*engineering geology* 是随着中国山区工程建设而在 20 世纪 70 年代由中国科学院地质所谷德振为首的工程地质研究室倡导和创建的。

岩体工程地质力学从工程地质观点出发, 应用地质力学、岩石力学的原理和方法, 研究岩体结构特征及其工程地质特性的本质, 分析岩体在受力条件下的变形破坏机制, 将工程地质学、地质力学和岩石力学有机结合起来, 强调力学分析、计算必须以地质学研究为基础, 为工程岩体稳定性评价、预测指出了正确的方向。

20 世纪 60 年代谷德振发表的“地质构造与工程建设”、“水利水电建设中的地质构造问题”等论文, 可认为是岩体工程地质力学的酝酿时期, 而 1972 年发表的“岩体工程地质力学的原理和方法”的论文和 1976、1979 年相继出版的《岩体工程地质力学问题》文集(1)以及《岩体工程地质力学基础》专著, 代表了岩体工程地质力学的兴起, 成为工程地质学的一门新的分支学科。

80 年代以来, 中国科学院地质研究所工程地质研究室进一步汇总各阶段研究成果, 相继出版了《岩体工程地质力学问题》文集(2)至(6)以及如下一些专著:《赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用》、《岩体力学基础》、《地下工程岩体稳定分析》、《边坡岩体稳定性分析》、《岩体结构力学》、《坝基岩体工程地质力学分析》等。这些都进一步研究了各类工程岩体变形破坏的地质模式和稳定性计算分析方法。

当前研究的热点是: (1) 岩体结构对力学强度的影响, 如结构面的力学效应的研究等; (2) 工程岩体稳定性计算分析中地质模型与力学数学模型之间的正确衔接或接轨问题。

### 参考文献

- 1 谷德振. 岩体工程地质力学基础. 北京: 科学出版社, 1979
- 2 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定分析. 北京: 科学出版社, 1984
- 3 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988
- 4 孙玉科, 牟会宠, 姚宝魁. 边坡岩体稳定性分析. 北京: 科学出版社, 1988
- 5 王思敬. 坝基岩体工程地质力学分析. 北京: 科学出版社, 1990

(长春地质学院谭周地教授撰)

## 黄土的显微结构 *microtexture of loess*

指必须借助于显微镜才能辨认的黄土结构, 例如, 构成土体的碎屑颗粒形状、大小和特征, 碎屑颗粒在空间的排列形式、孔隙状况以及粒间接触和连接特征等。它的首要任务是观察分析组成黄土的骨架颗粒、粘土物质和空隙的结构特征以及它们的组构形式所反映的物质在成土过程中的运动变化规律。这不仅对恢复和重建黄土发生过程以及当时的生物气候环境具有重要的理论意义, 并对评价黄土工程地质性质及水文地质性质有着重要的实际意义。

早在 1925 年, 太沙基(K. Terzaghi)就指出: 在评价土体的工程性质时, 必须注意考虑其微观结构。但第 1 位真正使用透镜对土的微观结构进行系统研究的是库比纳(W. L. Kubiena), 他在 1938 年出版的《微土壤学》中使用了微结构(*microfabric*)一

词。这样, 土壤微形态作为土壤学的独立分支学科便获得承认, 它亦应用于松散沉积物的研究。

黄土的显微结构研究是从 20 世纪 50 年代末开始的。自从艾尔特姆勒(H. J. Altermuller)用湿胶法成功地解决了松散土体的薄片制作以来, 越来越多的地学工作者开始对黄土的显微结构研究感兴趣。1959 年拉里昂诺夫(A. K. Ларионов)首先把前苏联黄土的显微结构分为 3 类: 粒状结构、团粒结构和粒状-团粒结构, 他发现具有粒状结构的黄土是湿陷的, 团粒结构是不湿陷的。同年, 张宗桔等对中国黄土高原西部黄土类土的显微结构作了初步研究, 并注意到黄土显微结构特征与工程地质性质的密切关系。

60 年代到 70 年代初期, 是黄土显微结构研究深入发展阶段, 这一时期, 不仅对黄土的粒度组成特征从满足工程建设的需要和探讨黄土成因的角度出发进行了大量系统研究, 更重要的是在显微镜下开始深入研究黄土的显微结构。1963 年朱海之在研究了中国晚更新世黄土后; 把黄土显微结构分为 3 类: 接触式、基底式基底和接触-基底式, 其含义和拉里昂诺夫的划分基本相类似, 但他并未明确提出这种结构类型和湿陷性的关系, 1964 年张宗桔对中国黄土高原及其邻区的晚更新世黄土类土的显微结构进行了深入系统研究, 他根据颗粒接触关系、孔隙及胶结特征将中国黄土类土的显微结构进行 7 级分类。嗣后, 朱海之等(1964)及刘东生等(1966)在偏光镜下从不同的侧面观察分析了黄土显微结构特征。在欧美, 1966 年奈脱(K. Knight)在研究了湿陷性黄土的微结构后认为开放亚稳结构是湿陷的基本条件。1970 年特脱莱(J. H. Dudley)对奈脱的观点进行了补充, 认为这种开放亚稳结构有 3 种胶结形式, 即粉砂胶结、絮状支托式胶结和葱皮胶结。1973 年巴顿(L. Barden)利用扫描电子显微镜(SEM)观察湿陷性黄土, 证实上述葱皮胶结是存在的, 絮状支托式胶结还不能完全肯定, 而粉砂胶结没有发现。

70 年代末到 80 年代初, 扫描电镜、透射电镜等先进手段相继广泛用来分析研究黄土的微形态, 弥补了一般显微镜下进行黄土显微结构观察的不足, 使黄土结构研究进入了超微观阶段, 并从微结构角度探讨黄土的成因、黄土的工程地质性质及其形成环境等诸方面的问题。1978 年刘东生等首先在扫描电镜下观察了黄土中石英颗粒的形态和表面结构, 发现黄土中的石英颗粒大多数为次棱角状及棱角状, 边缘不规则, 并见有次圆状颗粒, 有的具显著的贝壳状断口, 这些特征非常类似于阿拉善沙漠中现代风砂中的石英颗粒形态。1982 年王永森等在扫描电镜下把黄土中的石英颗粒表面结构与现代沙漠中的石英颗粒表面结构作了对比观察, 发现黄土中的石英颗粒表面结构如解理面、凹坑、槽沟、贝壳状断口等和沙漠中的基本相似。上述研究结果表明, 黄土和沙漠中的石英颗粒的生成环境及搬运过程是基本一致的。另外, 卢演侑等(1976)用透射电镜观察了黄土与古土壤中石英颗粒表面结构特征, 黄土中石英颗粒表面仍保持着比较新鲜的贝壳状破裂结构, 而古土壤中的石英颗粒表面的氧化硅沉淀和溶蚀等化学结构明显, 反映了石英颗粒经受成壤作用后, 表面结构受到一定的改造。1979 年萨盖里科(J. Saigalik)结合工程地质从成因角度出发利用扫描电镜对捷克不同时期的黄土的微结构进行了研究。

1980 年高国瑞注意到黄土超微结构与湿陷性的关系。他从黄土这一空间结构体系的力学分析出发, 将骨架颗粒形态划分为粒状、粒状-凝块和凝块 3 类, 将颗粒连接形式分为接触、接触-胶结和胶结 3 类; 颗粒排列方式分为架空、架空-镶嵌和镶嵌 3 类。上述 3 类分别具有从易湿陷到湿陷性较小的顺序, 并根据物理学性质和扫描电镜微形态观察结果, 提出了黄土微结构与湿陷性关系的 12 级分类。1985 年刘东生等将黄土微形态“成因”分类与物理学性质研究结合起来, 试图从这个角度探索黄土湿陷性的形成机理。此外, 张宗桔等(1985 年)研究了黄土的湿陷变形及其结构变化特征, 结果表明, 自重湿陷型黄土由于大于 0.01mm 的集粒均被破坏, 致使土体整个结构破坏, 产生强烈湿陷; 加压湿陷型黄土在水和压力作用下, 大于 0.05mm 的集粒遭到破坏而导致黄土发生湿陷现象; 非湿陷型黄土在浸水加压时只有

大于 0.1mm 的集粒发生破坏,变形很小。从而揭示了黄土湿陷发生的内在本质规律。

到了 80 年代中期,有人对黄土微结构开始尝试做定量研究工作,使该学科开始了突破性的发展。1985 年雷祥义采用染色铸体薄片、扫描电镜和压汞法等手段对中国黄土高原黄土的孔隙结构进行了深入研究,对黄土孔隙按成因和大小进行了双向分类。他首先用压汞法定量揭示了黄土中不同大小孔隙的分布规律。1987 年他又深入研究了黄土孔隙结构与湿陷性的关系,发现中孔隙(孔隙半径为 0.016~0.004mm)是引起黄土产生湿陷变形的的主导因素,从工程地质方面阐述了黄土湿陷的内在因素。1989 年雷祥义对中国黄土高原黄土的显微结构进行了系统研究,他综合大量研究资料,根据颗粒接触关系、空隙和胶结程度,将黄土显微胶结结构划分为 3 个结构组合 6 种结构类型,即微胶结结构组合(包括支架大孔微胶结结构和镶嵌微孔微胶结结构)、半胶结结构组合(包括支架大孔半胶结结构和镶嵌微孔半胶结结构)和胶结结构组合(包括絮凝胶结结构和凝块胶结结构)。他发现黄土的稳定性由 I 类的支架大孔微胶结结构到 VI 类的凝块胶结结构依次增大,其湿陷性与此序列成负相关关系,而湿陷起始压力与此序列成正相关关系,规律性十分明显,不仅在空间上得到了证明,而且在时间上也得到了证明。他根据大量统计资料,确定了黄土显微结构类型与其物理力学性质指标之间的定量关系。1991 年雷祥义根据微结构研究结果揭示了晚更新世时期中国黄土高原自然环境的空间格局。上述成果将黄土显微结构特征与工程性质及古气候关系的研究向前推进了一大步。

黄土显微结构的研究正在向纵深发展,其趋势是:(1)为保证黄土结构的原状性,必须改进制样方法;(2)利用现代仪器设备对结构作定量分析;(3)从微结构角度进一步探讨黄土湿陷变形机制;(4)探讨如何利用结构作出黄土工程性质的定量评价,以取代繁重的物理力学性质的试验过程。

#### 参考文献

- 1 高国瑞,中国科学(B辑),1980,12:1203~1208
- 2 雷祥义,中国科学(B辑),1987,12:1309~1318
- 3 雷祥义,地质学报,1989,63(2):182~191
- 4 雷祥义,地质论评,1989,35(4):333~341
- 5 王永焱,林在贯,等,中国黄土的结构特征及物理力学性质,北京:科学出版社,1990,105~172;223~244
- 6 吴义祥,等,地质论评,1992,38(3):250~259

(西北大学雷祥义教授撰)

### 土体微观结构

早在 1925 年,K. Terzaghi 就指出:在评价土体的工程性质时,必须注意考虑其微观结构。但第一位真正使用透镜对土的微观问题进行系统研究的是 W. L. Kubiena。1938 年,Kubiena 在《微细土壤学》一书中提出了一套土体微观形态的描述体系和大量有关微观形态描述的概念和术语。

1958 年由 H. Freset, H. J. Altermuller 倡导举行了第 1 届国际土的微观形态学工作会议。以后每隔 4~5 年举行一次,直到 1978 年该协会并入国际土体科学协会(ISSS)为止。60 年代以来,越来越多的学者开始对这一领域感兴趣,随着研究的开展,人们感到以前一直引用的 Kubiena 描述体系具有很大的局限性,因此,1964 年 R. Brews 在《土体结构与矿物分析》中提出了一个新的土体微观形态分析体系。该体系以辨认土要素的定向性和分布特征为基础。在他的著作中提出了土结构概念,其定义是指:形成复合颗粒的基本颗粒本身以及相应孔隙的大小、形状和排列所表示土的物理构成。

60 年代末期,由于电子技术革命,扫描电镜(SEM)、探针(MICROPROBE)、透射电镜(TEM)等陆续地被引进土的结构研究领域,使该学科开始了突破性的发展。

中国工程地质界从 20 世纪 60 年代就开始进行土的微观结构的研究工作(张宗桔等)。70 年代末,该领域才正式兴盛起来。1982、1985 年国内曾召开过两次土的结构会议,这些会议的论文

基本上反映了中国的微结构研究水平。

用于土体微结构研究的方法从研究手段上可分为两大类:即直接法和间接法。各种技术手段各有千秋。大多数研究者使用这些技术来研究颗粒或孔隙的大小、形状、分布、定向性,或者通过这些技术获得图象或数据供定性定量分析。在中国,目前使用较多的是:光学显微镜,电子显微镜 X 衍射(求定向性)以及压汞法(求孔隙体积)和气体吸附。

国际上现行的资料处理方法有两类:结构图片的解释法;微观信息的定量表示方法。目前使用的所有间接结构分析技术都能定量、半定量提取土的某些方面的微观信息。如何用这些信息定量表示土的微观结构是目前的一个研究重点。目前已有的方法主要是反映结构某一方面特征的参数,例如:通过气体吸附、压汞试验所获得的数据,可以整理成孔隙度、孔径分布、平均孔径等定量参数。

70 年代后期,随着计算机技术发展起来的图象测量法,通过使用计算机图象分析系统来提取孔隙、颗粒的大小、形态和定向特征,是一种能同时获得最多结构定量信息的方法,该方法将是一种最有发展前途的方法。

有关土结构的总体定量特征参数的研究,1988 年,地矿部水文所提出大量的观测表明,粘土的结构单元之间存在的是一种混杂的联系,几乎无法找到排列完全一样的两个样品,或者是同一样品不同部位排列完全相同,即使是同一样品的同一部位其结构随着环境也在不断变化。粘土结构的这种混乱性正是它不同于其它材料的结构特征。他们把某一确定时刻粘土系统中各个要素的这种混杂联系叫做结构状态,并且认为只要确定了此时这种结构联系的混杂程度,就把握了这一状态的特征。由此他们引入了结构熵的概念,即用熵来反映结构在排列、粒级和能级上的混乱程度。其表达式为:

$$E = E_0 \& E_g \& E_e$$

式中, $E$  为粘土的结构熵; $E_0$  为排列熵; $E_g$  为粒级熵; $E_e$  为能级熵。

$$E_i = - \sum_{k=1}^n P(k) \log_n P(k)$$

1988 年,他们同合肥工业大学一道研制了微观结构图片计算机定量分析系统。该系统能提取颗粒、孔隙的大小、定向、形状系数、粒级分布以及测定上的排列熵和粒级熵,并能按给定的标准进行颗粒或孔隙的分类。土的结构熵概念提供了一个土体总体结构特征的定量量度指标。

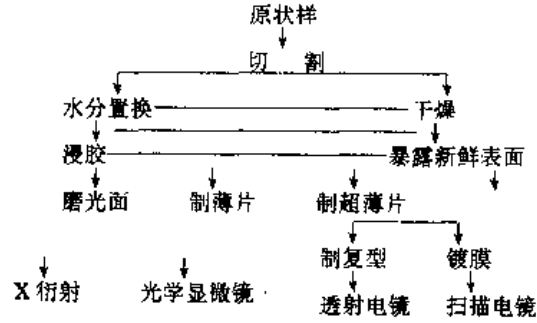
土的微观结构的研究重点是研究原状的土体,由于多数研究者使用光学、电子技术等手段进行微结构的直接观测,因此,如何制备非扰动的试样是一个关系到观测结构正确性的重大前提。目前,国际上流行的制样过程可归结如下页表:

在这些步骤中,干燥问题是比较难办的一步。表面暴露也是一个维持原状性的难题,目前使用胶带揭皮的办法比较普遍。也有人报道过使用离子轰击方法,1953 年 Call 第 1 次使用该方法成功地暴露了蒙托石样品的新鲜表面。

由于结构连接在日前进行直接测量还很困难,因此这一方面还基本上限于利用胶体化学、物理化学理论对几个片状颗粒之间的连接作一些理论上的探讨。这方面的研究有 2 个方向。

(1) 土颗粒之间的主要作用力理论。分子力;F. London (1937)首次提出分子相互作用的一般理论。Hamaker (1937)在其著作中第 1 次计算了分散颗粒之间的分子力。1948 年 Verwey 和 Overbeek 提出了计算 2 个厚度为  $\delta$  的彼此平行的 2:1 型层状粘土间的分子相互作用能计算公式。对于单个粘土颗粒分子之间相互作用,目前正处于研究之中。1973 年 Соколов 曾对高岭土和蒙托石粉末结构进行了测定,试验结果是:高岭土的平均连接强度为  $3.25 \times 10^2 \text{Pa}$ ,蒙托石为  $3.35 \times 10^2 \text{Pa}$ 。而用理论计算的高岭土和蒙托石 2 的单个分子连接强度为  $1.2 \times 10^{-8} \text{N}$  和  $1.5$

$\times 10^{-6}N$ 。离子静电力,离子静电力的研究主要为古依双电层理论和施恩特双电层理论的应用。Jording, Bodman 和 Gold(1962)曾提出了对一个离子和两个带电介电板的相互作用能的表达式。后来 Jordinf, Steel, Wolfe 继续了这方面的工作,计算了两个蒙托石层间每一结构晶包面上的离子静电引力能并得出如下结论,即离子静电引力能曲线具有明显的势能最低点,小距离内粘粒间的离子静电作用能远大于分子引力能。粘粒间的其他连接力:三相界面的毛细力以及胶结粘土中的化学连接力有许多学者进行了研究并提出了计算公式。1979年 Osipov 还提出了磁性力、库伦偶极力的存在。



(2)粘土接触类型。前苏联学者认为粘土颗粒的结构连结不是沿颗粒所有相界面进行的,而是在其最靠近的接触点上进行,这些单个接触点的量和性质是结构的重要特征,并且认为接触是指各种连结力的综合表现。1966年 Ребиндер 曾将土体的接触划分为3种类型,即,凝聚型、过渡型和同相型。迄今为止,许多学者还沿用这种分类。

(地质矿产部水文地质研究所吴义祥,张宗祐、凌泽民撰)

**核分析技术在地质学中的最新应用** application of nuclear analysis techniques in geology 当代地质科学发展趋势之一,是地质学正由以找矿为主拓宽到为解决人类社会发所面临的环境问题。

已经发现,在核辐射的轰击下,原子或离子能从晶格格点上位移出来。负离子位移形成的空位带正电,并且可以捕获自由电子。石英中的氧空位在捕获一个自由电子时可形成一个顺磁中心。当顺磁中心密度很大时,物质就具有顺磁性,其磁矩来源于电子自旋。根据塞曼效应,当顺磁中心的磁矩仅取决于电子自旋时,那么在外磁场中电子将分成两组,一组位于较高能级  $(1/2)g\beta H$ ,另一组位于较低能级  $-(1/2)g\beta H$ 。其中  $\beta$  是玻尔磁子,  $g$  是自由电子谱分裂因子,  $H$  是磁场强度,处于上下两能级的电子数目之比为:

$$N_1/N_2 = e^{-h\nu/KT}$$

式中  $k$  为玻耳兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $h$  为普朗克常数。如果在这个系统上加一个频率为  $\nu$  的高频电磁场,那么电子就会从一个能级向另一个能级跃迁。从低能级向高能级跃迁时,需吸收能量;从高能级向低能级跃迁时,要释放能量;两个跃迁过程的概率相同。但由上式看出,位于低能级上的电子数目  $N_2$  多于高能级上的  $N_1$ ,所以最终发生吸收能量的过程。此时发生电子自旋共振,共振条件为  $h\nu = g\beta H$ 。

待测样品在共振腔内吸收高频电磁场能量的多少正比于样品中的顺磁中心浓度。例如石英的谱分裂因子  $g$  值与自由电子相近,约在  $2.0005 \pm 0.0003$  之间,  $g$  值与样品晶格结构有关,不同的矿物,其  $g$  值也不同,振幅  $J$  越大,石英中所含的顺磁中心浓度越高,表明试样所吸收的核辐射累积剂(TD)值也越大。由于在试样埋藏过程中,周围岩石给予它的年剂量(AD)值,一般认为是一个取决于岩石中铀、钍、钾含量的定值,因此采用“附加剂量法”即给一组等量的试样施加不同的人工  $\gamma(^{60}Co)$  或  $\beta(^{90}Sr-^{90}Y)$  剂量,然后分别测定每一个 ESR 试样的振幅  $J$  之值,经过适当的拟合,可以得到振幅与剂量的相互关系,根据此关系很容易

得到此石英样品在天然埋藏状态下共吸收的累积剂量值(TD)。利用堆中子活化分析法可以测定原岩样品中铀、钍、钾的绝对含量,结合采样点的地质情况,采用合理的年剂量模式可获得岩石给予石英的年剂量值(AD),于是年龄值可由比值  $TD/AD$  确定。

石英顺磁中心的寿命与环境温度有关。在表生条件下,  $t \leq 50^\circ C$ ,实际上顺磁中心浓度并不衰减;当  $t \geq 100^\circ C$  时,顺磁中心寿命变短,在  $300 \sim 400^\circ C$  持续加热条件下,石英中先前形成顺磁中心会迅速消亡,当这种强烈的热事件结束之后,石英又开始重新吸收辐射剂量形成的顺磁中心。由此可见,石英作为“计时剂量器”,其 ESR 年龄对不同的地质作用具有不同的意义,断层强烈活动产生的热退火和粉碎作用可使断层岩中石英颗粒早先形成的顺磁中心消失,此时 ESR 年龄表示断层最后一次强烈活动的年龄,对于断层岩中重结晶形成的石英颗粒,显然其 ESR 年龄表示发生重结晶作用的年龄。

断层的 ESR 测年技术还处于完善阶段,虽然有些理论问题和 技术方法问题有待于系统研究,但已取得了一些可对比的结果。例如,长江巫峡区湖北巴东县附近长江岸边黄腊石滑坡的研究表明,该滑坡深部变形体是在岩坡形成之后,由于经受长江水的软化作用,岸坡体中砂泥岩层的力学性质变差,在重力作用下导致产生滑坡,上述结论与长江河谷发育史一致,并且为研究滑坡机理和滑坡治理方案提供了依据。据行家预测,在中国核物理地质学家的共同努力下,几年之后,将能在 ESR 年代学研究方面赶上世界先进水平。

在环境地质学中研究活断层的另外一个目的就是预报强烈地震。按照地质学的一种观点,地壳表面可以分解成若干个几何和物理片块,它们彼此之间由相对可塑的构造破碎带联系着。当这些片块进行相对运动而受到挤压时,岩石释放氡射气( $^{222}Rn$ )的能力增强,即松散构造带土壤的氡场中含有岩石应力变形状态的信息。这种信息可利用氡的核探测技术在现场进行动态提取。

从1981年1月到1989年6月底 В. П. Рудakov 等连续8年对亚美尼亚的一条近南北向的构造破碎带中的氡场时变特点进行了动态观测,同时,他们还观测了大气压和地球自转速度,记录了以观测台站为中心方圆400km半径范围内地震释放能量的月平均值。据此 В. П. Рудakov 认为,太阳辐射引起大气循环并改变着地球的热状态,使地球自转速度发生变化并发生区域性形变,岩石的区域性形变引起氡场特点的变化,因此若氡的月平均释放量连续在数月之内保持强烈摆动趋势,则很可能将会发生强烈地震。

利用 $^{238}U$ 的气态子体核素氡预报地震的研究工作在外国已进行了多年。В. П. Рудakov 的研究之所以有说服力,主要是他不是孤立的进行氡测量,而是把一切与释放氡射气的因素有联系的物理现象加以综合研究而且坚持不懈地连续观测了8年时间。这表明,综合地质学、核物理学以及物理学的多种观测结果,才能揭示自然现象的规律。预报灾害性地震在国民经济中具有非常重要的意义,氡的核探测技术在预测地震活断层方面将不断完善而且将会有较好的应用前景。

随着地质研究的不断深入,在每一个阶段都会出现一些新的找矿思想和新观念,若无先进的核探测技术,这种新思想和新观念很难得到验证。近年来,轰动矿业界的用来寻找隐伏矿体的地气法的提出和发展就是一个生动的实例。

在前苏联科拉半岛的一口深12km的钻井中,地质学家发现了一些奥秘。在井深5km以下,每增加100m,地温上升2.5°C,而过去传统认为该处每增加1000m才增加1°C。不仅如此,在距地面11km深处,发现弥漫流动的天然气体和含有矿物质的高热水。这类现象使地质学家们想到,地下这种热流体会缓慢地向地球表面迁移,当这种上升地下水流经矿体时,水中所含的微小气泡由于水与矿体之间发生的反应能摄取矿体中极其微量的金属元素,并随气泡一起向地面继续迁移。最后,在地表疏松层中有可能形成含有多种金属元素的地气异常。如果采用一种高灵敏度低检出限的核分析方法探测地气中含有哪些金属元素以及含



量有多少,那么,就可以根据地气异常来寻找隐伏矿体。这就是瑞典 Boliden Mineal AB 公司和伦德科学技术学院核物理系的研究者们共同提出的地气法的基本思想。

传统的气体地球化学勘查法认为,某些隐伏矿体能够不断散发  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{Rn}$  等气体,这些气体组分也向地面迁移,因此测量这类气体浓度可以寻找隐伏矿体。然而地气法测量的却是上升到地面土壤中的一批金属元素,而且地气来自较深部位,其找矿深度比较大。

从地气法的构思可以推知,上升地气流带到地表的金属元素的含量甚微,实现地气法的关键在于采用一种特制的且本底极低的超净捕集器来提取地气中的金属元素,同时采用微量或痕量元素分析法来检测这些金属元素,在解决上述技术关键方面,质子荧光分析法(PIXE)和中子活化分析法起到了极其重要的作用。

瑞典采用一直径为 25mm 的圆形玻璃片,一面蒙上一片聚苯乙烯薄膜作为野外地气捕集器,地气中金属元素的测量采用了 PIXE 法。此法是用质子束轰击样品,激发聚苯乙烯薄膜上捕集到的金属物质的内电子层,使之发射出 X 射线,利用安装在脉冲高度分析系统中的锗探测器,记录各种能量的特征 X 射线,根据特征 X 射线的能量区分元素种类,根据特征 X 射线的强度确定元素的含量。在地气样品分析中,由于聚苯乙烯膜很薄(面密度为  $20\sim 30\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ),选用了能量为 2.55MeV 的强质子流,质子束直径 8mm,束流 250nA,可使样品被充分激发,在 2min 辐照后便可进行 X 射线谱的测量。这种方法的效率高,每天可快速分析薄膜 300~400 片。

#### 参考文献

- 1 梁中兴,等.核技术,1991,14(2):79
- 2 童纯函,等.科学通报,1990,16:1280

(中国科学院高能物理研究所李士研究员,  
成都理工学院梁中兴教授撰)

## 宇宙矿物学

**宇宙矿物学** cosmic mineralogy 是研究地球外固态物质发展变化规律的科学。它研究地球外的固态物质组成、含量变化和分布特征,并与地球相比较,探索它们之间的成因联系。如 I 型碳质球粒陨石代表着原始太阳系的成分。人们获得对地球外物质认识的主要途径有:对地球外发光物质的光谱分析,包括对星光、太阳光、宇宙射线和射电辐射的综合分析;太阳飞行和行星探测;月球取样,研究月岩、月壤和月岩矿物;研究宇宙回来的物质(陨石和宇宙尘)。物质(元素)的集聚决定于物质本身的性质和当时的环境条件,而物质的性质又取决于原子(离子)的构造。矿物形成是地质时期的过程,形成矿物之后,开始了地质的演化,故宇宙矿物中就记录着宇宙发生、发展和演化的历史,是人类认识宇宙的一个重要途径。

宇宙矿物学研究属天体演化的课题范畴。众所周知,天体演化、生命起源和基本粒子是当代 3 大基础理论研究课题。宇宙矿物学的内容包括:陨石矿物学、月球矿物学和宇宙尘等问题的研究。

**陨石矿物学研究** 陨石分为 3 类:石陨石,石铁陨石,铁陨石(陨铁)。在石陨石中,又有球粒陨石和无球粒陨石之分。世界上已收集到的陨石标本,依是否知道陨落时间而分两类进行统计,知道陨落时间者为 Falls,不知道陨落时间者为 Finds。知道陨落时间者以石陨石为最多,在现有的石陨石中,以 H 型和 L 型球粒陨石为最多;在现有的铁陨石中,以八面体式陨铁为最多。

现有的陨石标本数日中,以球粒陨石为最多,约占 84.6%,无球粒陨石约占 8.3%,铁陨石约占 5.7%,石铁陨石约占 1.4%。以化学组成而论,铁陨石全部为铁镍,石铁陨石中铁镍和硅酸盐各占一半,球粒陨石中大部分为硅酸盐,少部分为铁镍,而无球粒

陨石中则全部为硅酸盐。

陨石中的主要矿物为:锥纹石  $\alpha-(\text{Fe},\text{Ni})$ ,镍纹石  $\gamma-(\text{Fe},\text{Ni})$ ,陨硫铁  $\text{FeS}$ ,橄榄石  $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$ ,斜方辉石  $(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$  和单斜辉石等。次要矿物为铬铁矿,白磷钙矿,自然铜等约百余种矿物(梅森,1962)。

人们对陨石矿物研究甚早,经过多年来的研究后表明,陨石矿物特征是:(1)特殊的矿物存在形式和众多的宇宙矿物。在一百多种陨石矿物中,约占四分之一(即 30 余种)为陨石中所独有,说明陨石形成的特殊条件和环境。如六方晶系的六方金刚石(Lonsdalite),碳原子虽仍是六次配位(如金刚石者),但结构已非金刚石者,关于它的形成条件,目前还正在研究。自从应用电子探针显微分析以来,大批陨石新矿物被发现,这是 20 世纪 60 年代后期发生的矿物学研究中的重大事件。(2)许多矿物反映其形成时的强还原环境。(3)高压矿物及特殊高压矿物的出现。(4) $\text{SiO}_2$  矿物广泛出现于各类陨石中。

**月球矿物学研究** 自从 1969 年 7 月 25 日人类第 1 次登上月球以来,采来的月岩标本共有 386kg。由于对月球矿物的研究,促进了对矿物学研究理论和手段的深入。

月球上不存在水,故没有含水矿物。月球表面没有大气,故月球表面没有矿物的氧化作用。月球上没有造山运动时期的高温高压下的褶皱岩石,也就没有原始矿物的相变、再结晶。月球的早期虽有构造活动,但缺少挥发元素,故组成岩石的矿物种类有限。

有结晶岩石说明月球上火成作用的存在。月球高地是富斜长石的岩石,月海是斜长石辉石玄武岩。月球上仅是个别现象有花岗岩、伟晶岩,以及辉石和铁镍矿的大晶体(数毫米)。月岩矿物种类不多,仅 50~60 种,目前没有经济价值,但是,月岩和月壤中含有太阳风带来的  $^3\text{He}$ ,或可作为将来的核聚变的燃料。月球矿物的可贵之处在于说明了月球的起源和形成过程。月球矿物反映了月球史。月球固结至少在 30 亿年前,它的长石质壳的形成超过四亿年,这可以与地球进行许多有意义的比较。

月岩矿物主要为单斜辉石、斜长石、铁镍矿和橄榄石,四者占有月岩的绝大部分。月岩中的次要矿物为磷石英、方石英和三斜铁辉石,这些含量在百分之几以下。月岩中只有很少的含(OH)的矿物,即角闪石类和云母类矿物。冲击角砾岩中有少见的针铁矿(锥纹石颗粒边缘有针铁矿)。

硅酸盐矿物是月岩的主要成分,但种类也很有限。辉石和长石是岩石的主要成分。长石主要是富钙的斜长石(An 往往大于 90)。辉石仅限于铁、镁、钙的变种,变化于透辉石—钙铁辉石—顽火辉石—铁辉石四角图解中。还有准稳定相的三斜铁辉石,是火成岩结晶作用后期的产物。氧化硅也是准稳定相方石英或磷石英。橄榄石仅作为晚期副矿物而出现。矿物中很少有二价铁,镍铁和陨硫铁的存在,都说明了最低的氧化状态,低价态的阳离子进入矿物晶格。在 Basaltic Mesostasis 区,有静海石新矿物,还有铁钛钽矿和磷钙石,都含稀土元素。静海石作为铁钛钙的复杂硅酸盐而出现,结晶于月球玄武岩的晚期阶段,有铈和稀土的进入。

在月岩矿物的研究工作中,发现了 3 个月球新矿物:三斜铁辉石  $(\text{Fe},\text{Ca})\text{SiO}_3$ ; 低铁假板钛矿  $(\text{Fe},\text{Mg})\text{Ti}_2\text{O}_5$ ; 静海石  $\text{Fe}_8^{2+}(\text{Zr}+\text{Y})_2\text{Ti}_3\text{Si}_3\text{O}_{21}$ 。

地球、月球、陨石矿物数目和种类的比较 铁、氧、硅、镁、镍、硫、钙、铝等元素,构成了地球、月球、陨石物质组成的主体,并以矿物的形式表现出来,故地球、月球、陨石共有的矿物是:硅酸盐类矿物(石英、长石、辉石、橄榄石),氧化物类矿物和硫化物类矿物。

月球矿物有五六十种,陨石矿物有百余种,地球矿物则有 3000 余种,丰富多彩的地球矿物是各种地质作用的结果(岩浆作用、热液作用、变质作用、风化作用等)。只存在于地球的矿物有:大量的含水矿物;大量的氢氧化物矿物;多种其他化合物矿物,如:氟化物、溴化物、碘化物、硒化物、碲化物、砷化物、铋化物、铊

化物等矿物;多种含氧酸盐:硝酸盐、硼酸盐、磷酸盐、钒酸盐、钨酸盐、钼酸盐、铬酸盐、碘酸盐等矿物;有机酸盐矿物和碳氢化合物矿物等。

关于宇宙尘的研究 除陨石块体外,微细的地球外物质,即宇宙尘,是宇宙间较重化合物的质点,主要是铁、钴、镍、锰、硅等及其氧化物。此外,宇宙空间里较轻质点称行星际分子,现已发现40余种行星际分子,大多数是有机分子,无机分子不多。宇宙尘体积大小不一,大者直径可达100 $\mu\text{m}$ ,小者直径小于0.1 $\mu\text{m}$ 。

广义的宇宙尘分为3类:真正宇宙尘(cosmic dust)微米级或微米级以下未遭受熔融的,进入大气层中的小质点;陨星尘(meteoritic dust)陨星崩解后的小质点;陨石尘(meteoritic dust),陨石进入大气层燃烧或崩解后的微米级小质点。

这类地球外物质每年进入地球的数量难以估计,有人估计每年30t(根据深海沉积物中的微米级球体统计),有人估计每年10<sup>6</sup>t(根据卫星测量测标),还有人估计地球每天接受40t宇宙间的微尘。随着矿物学研究手段的不断改进,这些都列入研究日程。

推测真正宇宙尘的来源之一,是来自早期的陨星,因为根据球粒陨石的宇宙暴露年龄,一般都小于65Ma,大部分是在2~10Ma。这就表明,早期的陨星很可能都崩解为宇宙尘。也有人认为,宇宙微尘是由彗星不断提供,这些宇宙微尘遍及太阳系,密集于太阳周围。

关于玻璃陨石和陨石冲击坑的研究 玻璃陨石就是通常说的“雷公墨”,因其中不含宇宙射线作用下的<sup>21</sup>Ne、<sup>26</sup>Al或<sup>10</sup>Be,故往往被认为是非宇宙成因,而其中的矿物仍有详细研究的必要。玻璃陨石中有意义的矿物如:柯石英、锆石等固态包裹体。玻璃陨石中含SiO<sub>2</sub>在70%~80%以上,最新的是75 $\times 10^{-2}$ Ma,最老的是35Ma,中国海南岛和广东、广西的雷公墨分布很广。

对于陨石冲击坑的研究出现了冲击变质矿物学的分支,地球上陨石冲击坑的数目逐日增多,冲击变质矿物学的研究越来越引起人们的关注。冲击坑的研究与宇宙矿物学关系密切。德国有人统计,全球陆地上约有230个陨石坑,其中78个已经得到确实证据,其余尚需要进一步研究证实。

总之,宇宙矿物学是人们了解宇宙、认识自然的强有力工具之一。国外学者研究较早,做了许多开创性工作。国内学者有欧阳自远(1965)、谢先德(1976)、王道德(1976)、张培善(1976)、陶克捷(1976)做出了贡献,王东坡(1976)等对吉林陨石雨的研究,彭汉昌(1989)对深海宇宙尘的研究,王人镜(1990)等对随州陨石雨的研究,王奎仁(1990)对陨石新矿物的发现与研究,郭宗山(1977)和陈正(1977)还有许多学者对宇宙矿物学的研究做出贡献。

#### 参考文献

- 1 Mason B. Meteorites. Inc New York, John Wiley, Sons, 1962
- 2 Wasson J T. Meteorites. Berlin, Heiderberg: Spring - Verlag, 1974
- 3 Frondel J W. Lunar Mineralogy. New York, John Wiley, Sons, Inc, 1975
- 4 Guest J, et al. Planetary Geology. Inc John Wiley, Sons, 1979
- 5 吉林陨石雨论文集. 北京: 科学出版社, 1979
- 6 金E A 著. 宇宙地质学概论. 王道德, 等译. 北京: 科学出版社, 1979
- 7 王奎仁. 地球与宇宙成因矿物学. 合肥: 安徽教育出版社, 1979
- 8 阿莱格尔C J 著. 陨石地球太阳系. 鲍道崇译. 北京: 地质出版社, 1989
- 9 王人镜, 李肇辉主编. 随州陨石综合研究. 北京: 中国地质大学出版社, 1990

(中国科学院地质研究所博士生导师张培善研究员撰)

## 古地磁学 paleomagnetism

是介于物理学、地球物理学与地质学之间的一门新兴的边缘学科。它是借助于测定岩石和古代文物的剩余磁性研究,来追溯地质时期和人类历史时期地球磁场特征及其演化的科学。尽管人们对地磁场的认识可以追溯到几千年以前,但对地磁场系统的测量却历史不长,因此利用直接观测的资料不可能了解更远古时期的地磁场,这就必须依靠古地磁的研究来解决。

古地磁学研究内容十分广泛,主要包括3个方面:(1)研究岩石的磁性;(2)通过岩石的剩余磁性来解决地质学上的重大问题;(3)研究过去地磁场的缓慢变化。古地磁学近代所取得的成果,不仅在基本磁场研究中使人们认识到地球磁场的倒转和演化,在考古地磁学、磁性地层学、古纬度研究以及找矿、地质填图等生产实践活动方面均发挥了重要作用。而且在探讨地壳运动规律、研究海底扩张、大陆漂移和板块运动理论等方面更具有重大的意义,推动了地球科学的革命。

中国对磁学知识的了解和应用历史最早。公元前239年《吕氏春秋·精通》中记有“磁石召铁,或引之也。”是世界上最早记载磁石吸铁的现象。公元25~220年,王充《论衡·是应》中记载了“司南之杓,投之于地,其柢指南。”司南勺就是指南针的前身。1044年北宋曾公亮《武经总要》中,记载了指南鱼能识别方向及制作方法。这也是关于利用热剩磁原理在地磁场中进行人工磁化的最早记载。沈括《梦溪笔谈》中明确记载了地磁偏角及岩石反向磁化的现象,不过当时并不知道岩石反向磁化的原因。1119年北宋朱或在《萍州可谈》中记有当时已把指南针用于航海事业上。这一时期的国外关于地磁现象的发现、指南针的应用、对地球磁性知识的认识和利用,均比中国晚得多。至1205年法国才制造出指南针,1269年E. Perigrinus才发现磁铁两端有指北和指南的性质。1544年G. Hartmann发现了地磁倾角的存在。1546年G. Mercator注意到磁偏角的存在。1576年R. Horman第1次记录了欧洲一些地方磁倾角和磁偏角数值的变化。1600年W. Gilbert发表了《磁学》论文,用均匀磁化球体的概念来描述地球磁场的特性,第1次指出地磁场具有偶极子磁场的特征,至今该论点仍具有重要意义。1848年A. Delesse第1次研究了岩石天然剩余磁性,指出一些熔岩的剩磁是平行于地磁场而均匀地磁化的。1853年M. Mellonio也发现了意大利维苏威火山熔岩的剩磁是平行于当地磁场方向。1904年P. David研究了受熔岩流烘烤的物质,发现它们同时磁化时所获得的磁化方向是相同的。1906年B. Brunhes首次在法国发现了熔岩的天然剩余磁化方向与现今地磁场方向相反,认为这种反向磁化现象并非是自然雷电影响造成的。随后,1926年P. L. Mercanton通过研究北欧、澳大利亚的岩石磁性,证实了B. Brunhes的岩石反向磁化现象,认为这种现象具有世界性。1929年日本松山基范指出,第四纪早期的熔岩的磁化方向才与今天的地磁方向一致。1925年,被称作近代古地磁学研究的先驱R. Cheralier发表了对意大利埃特纳火山熔岩的剩磁测定数据,与同时期的历史记录相比,大致相间,提出了12世纪以来地磁场方向变化的踪迹。这些研究记录了岩石生成时期或粘上熔岩时期地磁场的信息,这种天然剩余磁性可以保存相当长的时期。因此通过测定岩石或古代熔岩粘土的天然剩余磁化强度的大小和方向,为研究古地磁场的特征和演变奠定了基础。20世纪30年代以后,古地磁研究进一步对测量技术和分析方法进行了改进。如L. Neel的反磁化现象物理机制的解释;R. Fisher关于剩磁方向的球函数分布的研究;P. M. S. Blackett对无定向磁力仪的制作与使用等,使古地磁研究取得了较快的发展。

20世纪50年代,古地磁学开始真正成为一门学科,最初的研究工作主要在英国、法国、日本、前苏联和中国进行。这个时期S. K. Runcorn等大力推进了古地磁极位置变化的研究,研究发现了地质时期古地磁极的位置并不是固定不变的,而是随着时间的推移在不断变动,这实际上就证实了1912年A. Wegener首先

提出的大陆漂移的存在。后来通过地壳和上地幔计划的实施,对大陆的火山熔岩以及海底地磁条带异常的测量,并结合同位素年代测定,发现了地质时期地球磁场发生过多次频繁的倒转。这个时期的古地磁学研究,还揭示了海洋中由洋中脊向其两侧的地磁极性呈现正反交替的磁化方向,并且基本上对称。根据同位素年代的测定,靠近洋脊的海底岩石地质年龄较新,愈远则愈老。于是1960年由H. H. Hess和R. S. Dietz提出了海底扩张的概念。1969年A. Cox和1974年W. C. Pitman等在此基础上,制定出磁极年表,后来又根据磁极年表,编制了三大洋(太平洋、大西洋、印度洋)洋底年龄图。古地磁的大量研究成果都支持了大陆漂移的论点,导致了在1967年D. P. McKenzie、1968年W. J. Morgan和X. Lepichon先后提出了全球构造——岩石圈板块构造学说,促进了地球科学的发展。

近年来,古地磁学取得了以下重大成就:(1)地质历史时期的地磁极并非固定地停留在一点上,而一直是在不断地移动。例如,中国古地磁极位置座标以其纬度而言,更新统大约处在北纬 $80^{\circ}$ ,第三纪是在北纬 $70^{\circ}$ 左右。(2)研究表明,不同地质时期有不同的地磁极位置,来自同一个大陆的岩石所测定出的古地磁极位置的移动有一定的规律,形成一条视磁极迁移轨迹。但是相同地质时期,来自不同大陆上岩石所得到的古地磁极位置却彼此分离,随时代变老,偏离越远。如英国和北美所测得的视磁极迁移轨迹是两条相隔一定距离而又相似的曲线。S. K. Runcorn首先指出这种位置差异原因,是地质时期北美相对欧洲曾发生向西漂移而又顺时针运动的结果。(3)研究发现在地史上,地球磁场曾发生过多次 $180^{\circ}$ 的反向,即整个地球的地磁极曾经完全倒转。若把地磁场极性变化按照地层年代排成序列,并在极性变化界线处配以同位素年代数据,则编制成地磁极性年表。现在已知每个地质时期均有地磁场倒转,自晚白垩世以来倒转可能达170余次。地磁场倒转的发现,为磁性地层学研究奠定了基础,也为海底扩张、岩石圈板块运动理论提供了最为有力的依据。

总之,古地磁学研究对象可以是陆地上的沉积岩、岩浆岩和变质岩,也可以是采自海洋底的各种岩石,还可以测定来自月岩等地球之外物质及陨石。在近代的国际地球科学合作计划中,古地磁一直是重要的研究课题,如国际地球动力学计划中的区域古动力史研究,岩石圈研究计划中的岩石圈起源与演化,前中生代构造和大陆极移轨迹,以及板块运动的再造等方面,古地磁学都将越来越发挥其重要的作用。

#### 参考文献

- 1 Vine F J, K Wilson J T. Science, 1965, 150: 485~489
- 2 傅承义. 大陆漂移海底扩张和板块构造. 北京: 科学出版社, 1972
- 3 Kennett J P. Magnetic stratigraphy of sediments, 1980
- 4 徐世浙. 古地磁学概论. 北京: 地震出版社, 1982
- 5 朱志文. 地球物理学报, 1985, 28(1): 219~225
- 6 马醒华, 张正坤. 板块构造基本问题. 北京: 地震出版社, 1986. 119~142
- 7 林金系. 地质论评, 1989, 35(4): 349~354
- 8 吴汉宇, 常承法, 刘春, 等. 地质科学, 1990, 3: 207~214
- 9 董学斌, 王忠民, 谭承泽, 等. 地质论评, 1991, 37(2): 160~164

(安徽师范大学王浩清副教授撰)

#### 天文地质学

astrogeology 地球作为一颗普通行星存在于宇宙天体之中, 地球的形成和演变同其它天体具有共性, 同时又是在其它天体相互影响、制约的宇宙环境中进行的。随着现代科学技术的发展, 地质研究涉及的空间范围从大陆扩大到海洋, 从局部扩展到全球, 从表层扩展到深部, 不断发现了许多新的地质现象和规律。究其成因, 发现与宇宙中各种天体和物质的影响和作用有关。大量的研究资料表明, 在地球岩层中, 记录了丰富的反映地质历史时期天文过程的信息。现代地质学的发展, 已经

突破了“就地球论地质”的经典研究阶段。天文地质学就是从天文学角度来研究地质学许多重大问题的一门边缘学科。地质学与天文学的紧密结合, 可以相互补充, 取长补短, 体现了地球和宇宙的统一, 地球内部发展和外部环境变化的统一。

天文地质学一词最初是1877年Лисевич提出, 1949年又见于前苏联B. Г. Фесенков《宇宙现代概念》一书中。在中国3000多年前已有人根据星体运行来进行预测地震的发生。欧洲在19世纪已有人把冰期发生与天文因素联系起来。1920年M. Milankovitch提出地球公转轨道要素变化可能是冰期和间冰期变化的原因假说。1930年E. Haarmann认为地球主要构造是由于宇宙能产生的观点。1934年B. H. Бepнaкyкuи等将地球和宇宙的关系类比为动态物理化学方程式, 两者不断进行着化学元素的交换。这些研究都是零星的, 比较综合地研究是1947年J. H. F. Umbgrove在他的著作中提出了地质学要探索很遥远的时代和宇宙深处的变化, 把地球和宇宙应紧密地联系起来, 把地球的脉动与宇宙的压缩和膨胀联系起来。通过对地球脉动的研究认为, 造山运动、海侵、海退、地壳应力场、岩浆活动等变化是密切相关的, 都是由于地壳周期性过程活动的结果。但是他对周期性的原因没有明确的解释。1945年黄汲清提出了大地构造多旋回的观点, 以后逐渐形成多旋回构造学说。1950年开始, E. J. Opik研究了恒星(太阳)内部结构的变化对冰期的影响可能性, 发表了约40篇论文探讨太阳光度长期变化与地质上冰期的分布联系。1954年O. H. Schindewolf首先注意到超新星爆发对生物灭绝可能产生的影响。1956年, M. W. Delaunfels提出恐龙灭绝原因是由于陨石对地球撞击的假说。1957年B. H. Красoнeкuи等提出白垩纪末恐龙灭绝是由于超新星爆发使宇宙线温度增加而引起。但是这些假说当时并没有引起人们的重视。从20年代, 李四光已开始研究地球上地质构造与地球自转速度变化的相关性, 提出了地球自转速度变化说, 后来发展成为地质力学。1957年M. B. Cтoякoв指出在构造形成过程中, 行星的旋转起主导作用, 认为地球上山脉分布与地球的不规则旋转变化有很大关系。1961年A. B. Итeнeв认为地球自转速度变化是地壳块体相互运动的原因。60年代初期, 日地关系研究取得显著进展, 一些学者注意到太阳活动对地质现象的深远影响, 1961年R. Y. Anderson研究海相泥盆纪页岩的层理发现有22a峰值, 认为与太阳黑子活动的22年磁性周期有关。在前苏联这一时期先后召开了数次天文地质学学术讨论会, 1962年出版论文集《天文地质学》, 1963年出版论文集《行星地质学问题》, 多数学者认为影响地球构造图案变化的基本原因是地球旋转速度的变化。1963年J. W. Wells论证了珊瑚的生长纹层可以反映每天的变化, 由此认为可以推算地球自转速度变化。1963年王嘉荫已注意到太阳活动与地震的关系, 认为单纯地从地质构造上来考虑地震成因有片面性, 应综合考虑天体引力、潮汐作用等因素与地震关系。1964年叶连俊等发现了中国震旦系中的宇宙尘。1967年J. Steiner较系统地总结出各种地质现象(造山运动、古生物、古地磁、冰期、岩浆活动、成矿期)与太阳系在银河系轨道的关系, 并用引力常数G值随时间和空间变化的角度来解释这些宏观地质变动。同年, 又提出古地磁极性侧转的原因与太阳系在银河系中运动有关的观点。1973年H. C. Urey提出彗星与地球冲撞的可能灾变假说。

70年代以来, 由于航天科技的进步, 促进了天文地质学发展到一个新阶段, 开始深入探讨银河系各种结构和物质分布对地球的影响, 小行星对地球演化的重要作用, 新灾变假说为较多人接受。1975年W. H. McCrea提出了大冰期可能与太阳系经过银河系中稠密的星际云有关。1975年G. E. Williams提出冰期与银河系中性氢云物质分布不均匀有关, 认为大、小麦哲伦星云对银河系的潮汐引力, 可能是造成氢云物质分布不均匀的原因。1976年H. B. Лoлyиeнкo系统论述了地质学中的周期性现象, 把不同的地质周期与不同的宇宙因素相联系。1976年尹赞勳等综合了天文周期在古生物骨骼中的反映, 论证了古生物钟的地质研究意

义。1977年С. Максимов等详细地论述了地质旋回性,对构造活动、岩浆活动、古气候、古地磁、沉积作用和矿产分布等的旋回性进行了半定量分析,认为有可能与宇宙因素有关。1976年J. D. Hays应用了绝对年龄测定方法和频谱分析方法,对深海钻孔资料进行了深入分析,证明近几十万年以来第四纪古气候变化与地球轨道要素变化有关,使米兰柯维奇(M. Milankovitch)假说得到广泛承认。自1979年以来卢滨涛、徐道一等,对陕西洛川剖面的CaCO<sub>3</sub>含量进行频谱分析,找到了与地球轨道要素周期相近的周期,证实了黄土剖面是陆地上反映轨道要素变化比较完整的剖面,能较好记录下古气候变化的完整信息。1976年J. A. Eddy提出太阳黑子活动在几百年中有明显的波动,打破了传统的观念,对古气候研究产生影响。1977年由于对白垩纪和第三纪交界处生物灭绝现象的深入研究,不少学者探讨了太阳超耀斑、磁场、超新星等天文因素与生物灭绝的关系,P. Beland还提出了地内成因和地外成因两种可能作用的关系图。1978年英国F. Hoyle探讨了宇宙星云与地球上生命起源问题,并提出彗星、天王星、海王星在生命物质形成和发展过程中可能起的“温床”和联系纽带作用。1979年W. Alvarez等发现意大利白垩纪与第三纪交界处粘土层中铱含量异常高值,推断是因小行星与地球冲撞的结果,并认为是导致生物大量灭绝的原因,这种看法得到其他学者的支持,铱含量异常先后在新西兰、北美都有发现,因此引起了地质学界的重视,成为当前天文地质学研究的重点之一。1979年R. T. Rood等对南极冰岩芯进行硝酸根离子分析,认为在1000年的历史中,超新星爆发的X与Y射线可能影响到地球。1981年G. R. Brakenridge认为约1万年前的船帆座超新星的爆发,可能影响到地球,表明了探讨超新星的地面效应,及其在地球上留存的地质信息,已是摆在天文地质学者面前的一项新任务。1980年徐道一、郑文振等在“天体运动与地震预报”一书中,较系统地探讨了太阳系各天文因素与地震的相关性。在1981年10月美国召开了“大物体冲击和地球进化”讨论会,强调应加强研究地球受到陨石冲击作用后的地质效应,及各种地外事件影响到地球上古气候、古生物等方面演化的具体表现和地质依据,反映了地外事件

对地球作用问题成了当今研究的中心课题之一。1983年徐道一等编著《天文地质学概论》一书出版,较全面和系统地论述了天文地质学的基本问题,通过大量资料探讨了众多天文因素的变化与各种地质过程的相关性,是天文地质学的新进展。在1989年徐道一等著《中国的天文地质事件》(英文版)一书,于英国爱丁堡和美国纽约出版,对中国的天文地质事件作了比较全面的阐述和分析研究,是当今国内外第一部天文事件研究著作。

进入80年代以来,国内外的天文地质学研究进展较快,在围绕地质旋回、古气候变化和大冰期、古生物演化等基本地质问题与宇宙因素的相关性研究,以及宇地关系的成因和机制方面的探讨,都是近期的热点和中心课题,并取得了一定的进展。天文地质学是一门边缘性学科,目前仍处于开始发展的时期,随着人类宇宙探测研究的蓬勃发展,仍可预料天文地质学的发展将会更快。

#### 参考文献

- 1 尹赞勋,等.地质科学,1976,1:1~22
- 2 卢滨涛.地质地球化学,1979,5:8~15
- 3 徐道一,郑文振,等.天体运动与地震预报.北京:地震出版社,1980
- 4 Enilini C. A new global geology, 1981, 7: 1687~1728
- 5 Brakenridge G R. Terrestrial paleoenvironmental effects of a the Quaternary—age supernova, Lcarue, 1981, 46: 81~93
- 6 徐道一,张勤文,等.地质论评,1982,5:421~427
- 7 徐道一,杨正宗,等.天文地质学概论.北京:地质出版社,1983
- 8 Earth System Science Committee, Earth System Science, A program for global Chang, 1988
- 9 徐道一,张勤文,孙亦因,等.中国天文地质事件(英文版), 1989
- 10 赵靖舟.地质论评,1990,36(6):518~527

(安徽师范大学王浩清副教授撰)

# 海洋学

## 海洋基础科学

**古海洋学** paleoceanography 研究大洋体系发展的学科,是地球科学最新的一个分支。它通过海洋沉积物再造古洋流格局(表层流、底层流及上升流)、海水古温度(表层与底层水温)、古海洋化学(缺氧环境与碳酸盐化学等)、古海洋肥力、古生产力、古生物群及生物古地理的分布等,即研究地质时期大洋水圈与生物圈的演化历史。这既与古气候有关,又与海洋盆地的大小及海陆分布的轮廓密切相关,涉及到板块学说、物理海洋学、化学海洋学、海洋生物学(以微体与超微化石为主)、古气候学、古气象学及天文地质学等学科,因此,它是地球科学各个分支在研究古海洋演变过程中相互结合的产物,是一门高度综合性的边缘科学。

随着古海洋学日趋成熟与迅速发展,不仅促进了各个相关学科的巨大发展,而且已给岩石圈、水圈、大气圈与生物圈作为一个整体的地圈(geosphere)的研究带来新的认识,产生新的突破,导致地球科学上一系列的变革。古海洋学还为查明深海矿产资源,如锰结核、多金属软泥以及深海黑色页岩中蕴藏着的油气资源提供形成机理、形成环境与分布规律的认识。

古海洋学这一名称在20世纪初就已提出,50年代根据美国尤里(H. C. Urey)关于钙质化石中氧同位素比值可作为地质时期古温度计的想法,埃米利安尼(C. Emiliani, 1955)首次利用大洋浮游有孔虫测得了更新世表层海水的古温度,并细分出若干气候阶段,建立了古温度期的编号系统,而其他学者(如A. W. H. B'e.等)则利用有孔虫的某些属种作为古水团与古水温的标志研究古洋流的活动,因而开始了古海洋学研究的新时期。1969年,美国肖霍夫(T. J. M. Schopf)首次开设“古海洋学”课程,出版相应教材,介绍了古海洋学早期研究成果,并相继被译成俄文与中文。

现代意义上的古海洋学是随着深海钻探计划(DSDP)的实施逐渐成长起来的。自1968年8月至1983年11月,深海钻探船“格罗玛·挑战者”号在各大洋先后航行96次,航程60万km,钻井千余口,回收岩芯总长达95km。由于深海钻探可提供洋底连续的岩芯,特别是1978年底开始采用的液压活芯取样器(HPC)可以在5000m水深取得长达200~300m不受任何干扰的连续岩芯,为高分辨率地研究大洋系统的发展提供最理想的材料,因而带来许多古海洋学的新发现,使海洋地质学家们的注意力转向古海洋学的领域。与此同时,室内仪器分析手段的巨大进步也极大地推动了古海洋学的发展。例如,70年代初,英国沙克尔顿(N. J. Shackleton)改进了同位素分析样品的制备方法,使得样品需求量由几十毫克减少到十几微克,从而大大提高海水古温度的测量精度。据此,沙克尔顿与微体古生物学家肯内特(J. P. Kennett, 1975)合作利用浮游有孔虫与氧同位素资料确定了全球新生代古气候具有阶梯状逐渐变冷的趋势,而且发现南北两半球冰期开始的时间并不相同,从而揭开了古海洋学研究现代阶段的序幕。又如,70年代中期发展起来的超导磁力仪可以对任何岩性的深海沉积物进行古地磁测年,而且精度较前提高成百倍,80年代,据此编制出新生代完整的古地磁年表,伯格伦(W. A. Berggren, 1985)等人又将生物地层与磁性地层序列及放射性测年相结合,建立了磁性生物年代学(magnetobiostratigraphy),大大推动了全球高分辨率的对比工作。

除了深海钻探外,1971~1980年美国“气候长期调查制图与

预报”组织(CLIMAP, 1976, 1984)分析了大量较短的洋底沉积柱状样,用转换函数的方法再造18000年前与122000年前世界气候分布图,这是第四纪研究中划时代的壮举。此外,大洋深潜技术的进步是古海洋学迅速发展又一重要条件,自1976年东太平洋加拉帕戈斯裂谷发现热液喷口及周缘奇特的热水生物群落以来,人们已认识到大洋裂谷热液活动对于古海水成分及生命起源等问题的研究都具有关键意义。

1983年7月在瑞士苏黎世召开了第1届国际古海洋学会议,标志着古海洋学的日趋成熟。1986年9月在美国佐兹霍尔举行的第2届古海洋学会议上,组织了11个专题报告会系统地检阅了古海洋学研究的重大进展,同年3月美国地球物理联合会又创办了“古海洋学”双月刊杂志。这样,古海洋学作为一门独立的学科已经完全成熟。

近年来,古海洋学研究的内容已深入到更新的层次,探索的古环境参数已涉及到古云量、古风速、古风向、古生产率、古大气成份、古潮差、海水更新的速率以及各种参数对古气候变化响应的的时间等更精细的内容,研究的方法也已进入应用严格的数据采集及处理技术进行模型建立与检验的定量阶段。

目前,古海洋学的研究内容与成果已渗透到地球科学的各个领域,许多重大的国际科学研究计划与国际学术会议都安排有古海洋学内容,近来已在极地冰盖与全球气候演化的关系、热带大气环流、古季风及上升流等项研究上取得了重大成果,并计划将完成大洋与气候变化原因与后果的研究,其中包括古气候的长短期全球变化、海平面波动、碳循环与古生产力及演化生物学等热点课题,这必将进一步推动地球科学的发展。

自80年代初,古海洋学已开始引起中国学术界的普遍关注,从1985年开始,有关古海洋学的译著、编著、论文及综述文章显著增加,1989年,同济大学海洋地质系编著出版了《古海洋学概论》一书,比较系统全面地介绍了古海洋学的研究方法、现状和最新成果。1989年11月中国岩石圈计划全国委员会等6大学术团体联合发起在上海召开了第1届全国古海洋学学术讨论会,会议决定在同济大学设立“中国古海洋学联系网络”,并发行“中国古海洋学通讯”。1991年9月中国海洋研究委员会决定将联系网络改为“中国古海洋学工作组”以对外对应于国际学术活动、对内促进科研合作与交流。目前,中国的古海洋学进展十分迅速,各边缘海区及太平洋新生代的古海洋学正结合全球变化的研究及海底石油与多金属结核的勘探向纵深发展,而从古海洋学角度对前新生代地层的探索,包括海陆古气候旋回对比、古上升流、古等深线流、缺氧事件、生物绝灭事件等课题也正在中国大陆迅速展开,并已取得一批具有重要意义的成果。所有这些都标志着中国古海洋学的研究已进入成熟的阶段。

### 参考文献:

- Emiliani C. Journal of Geology, 1955, 63: 538~578
- Shackleton N J, Kennett J P. Initial Reports of The DSDP, 1975, 29: 743~755
- CLIMAP Project Members, Science, 1976, 191: 1131~1137
- Schopf T J M. Paleooceanography. Harvard University Press, 1980, 1~341
- Kennett J P. Marine Geology. Prentice-Hall, 1982, 1~813
- 同济大学海洋地质系. 古海洋学概论. 上海, 同济大学出版社, 1989. 1~315

(同济大学王震中教授撰, 劳秋元审)

**海洋地质学** marine geology 地质学是研究地球生成和演化的科学,海洋地质调查开展后,创立了板块构造说。在地质学研究逐渐重视深部地质的今天,海洋地质研究就更加重要。海洋科学钻探(深海钻探和大洋钻探计划)也促进了陆地科学钻探的进展。

1872~1876年,英国“挑战者”号进行了全球大洋综合调查,对海底进行了测深和取样,发现了深海软泥和锰结核,标志着海洋地质研究的开始。此后其他一些临海国家也投入了大洋调查,但由于技术条件,当时都属以海洋生物为主的综合性调查。直到1925年,德国“流星”号调查船采用回声测深技术,并用柱状取样管取样,除发现纵贯整个大西洋的中央海岭外,还对深海沉积速率进行了估算,从此真正进入了以海洋地质地貌调查为主的时代。

从20世纪20年代起,几种用于陆地的地球物理测量方法,包括重、磁和地震测量,开始向海上移植。随着战争和海上石油勘探的需要,技术设备不断更新,第二次世界大战后,海洋地质调查进入了以地球物理测量为主的时期,所获成果为60年代的地质革命打下了基础。

为了开展海底深部取样,1968年开始了宏伟的深海钻探计划,加上各种潜水器直接在海底观察和取样,使海洋地质进入了综合调研阶段。综合调研的主要内容有以下几方面:(1)海底地形。回声测深是海底调查进行最多的一个项目,但对 $3.6 \times 10^{11}$  km<sup>2</sup>的海洋来说,所进行的工作只能说对基本地形得到了控制,对次级和更次级的地形或精度差或遗漏,故不断有新的发现。基本地形单元可分为大陆边缘、中央海岭和二者之间的大洋盆地。以横穿大西洋的剖面最为标准,印度洋和太平洋的地形就更为复杂。(2)海洋沉积。因受距陆地远近、气候、深度和洋流的影响,有明显的分带现象。近海沉积多含陆源碎屑,在湿润的赤道带和温带,生物沉积作用显著;在干燥的亚热带,红色粘土发育;两极高纬度地区的沉积物富含长石及其他易风化物。洋流似陆地河流,可延伸很远,其沉积亦呈带状,如暖流可将热带生物带至较高纬度处。深海钻探对大洋沉积环境取得了纵向认识,未见有侏罗纪以前沉积物,并产生了古海洋学。(3)海底火山。大洋是火山特别发育的地方。在大陆和岛屿的活火山总数约600个,还有几千个死火山,但只太平洋的火山总数至少在50000个以上(萨莫费尔,1991),至今洋底火山远未全部查明。(4)海底矿产。洋底赋存的巨量锰结核和中央海脊热水多金属矿的生成,与地球内部金属离子析出有关,石油和砂矿分布于大陆边缘。(5)地球物理成果。随着技术设备的不断改进,成果不断深入,除查明浅层外,对深部地质的了解做出了特有的贡献。板块构造说的提出和发展即为一例。(6)海底构造。主要根据海底地形划分。结合地球物理成果,如条带状磁异常及软流层的存在,在老的大陆漂移说的影响下,创出了板块构造说。

板块构造说和以往诸地质假说划分大地构造单元的依据完全不同,它以背离边界、转换边界和会聚边界把全球划分为若干板块,并认为构造运动都集中在各类板块边界处。这一思路使海洋地质调查进一步集中于板块边界,导致精度本来就很差的海洋地质调查更趋不均。现将板块边界处的调研成果分述如下。

**背离边界** 指新生成的洋壳向两侧即向相背方向扩张的中央海岭脊部。虽然很多人认为自瓦因和马修斯(1963)设想洋壳扩张是海底线形磁异常的一种解释后,海底扩张这一概念就变成了学说,但磁条带的成因至今说法不一。瓦因和马修斯(1963)认为源于20km厚的洋壳,塔尔瓦尼(1971)认为磁源层为层2最顶部厚0.5km的枕状熔岩,考克斯等(1972)认为磁源分两层共厚2.5km,以后还出现各种不同的说法。深海钻探更显示磁结构的复杂性。霍尔和罗宾逊(1979)根据北大西洋15个孔中基岩上部600m岩性变化大、火山活动成幕,普遍存在低温蚀变和大规模构造扰动,以及很多古地磁倾角与所期望者相差太大诸事实,认为磁条带由海底扩张形成有问题。肯尼特(1982)列举诸实证后,

更明确指出磁性洋壳均匀转变磁极的简单模式是不对的。如果中央海脊真是扩张中心的话,凡是由海底扩张生成的洋壳都应和中央海脊处具有相似的岩性,但事实并非如此。中央海脊轴部出露的岩石分异强烈,除玄武岩外,有时还伴有粗面岩甚至流纹岩,但翼部出露的岩石分异现象就不多(马克斯威尔,1974)。

1991年9月在胡安德富卡海岭中央谷区进行了大洋钻探,4个孔位就钻遇3种不同情况。855孔内的沉积物及孔隙水未受液任何影响,856孔所遇全为热水形成的矿床,857和858孔钻遇的是沉积物和玄武岩岩床互层(第139航次钻探团,1992)。同一扩张中心内,岩性差异如此大,怎能证明扩张?又怎能得出相同的磁性?中央海脊很少见到正在溢出的活火山,常见的是喷出的或溢出的热水。在加拉帕戈斯扩张中心一裂谷内见到有二氧化硅烟囱(黑齐格,1988)。根据实际调查材料,中央海脊处现象复杂,看不出什么海底扩张迹象,陆地和洋陆地壳交界的大陆隆处,常发育有跨纪、甚至跨代的巨厚沉积,证明板块长期并未移动。

**转换边界** 中央海脊并非连续不断,而是由很多与之近于垂直的断层断开。威尔逊(1965)认为这些断层与平移断层不同,创名为转换断层,被断开的两海脊段之间的部分即为转换边界。科尔曼(1975)认为转换边界为无得失的板块边界。但查明的转换边界多有超基性岩出露,甚至有晚近火山活动。朗斯代尔(1978)认为转换断层带比原来经常设想者要复杂的多,值得更详细地研究。最近对太平洋内盖莱特转换断层的调查,发现其中发育有与东太平洋隆(扩张中心)近于平行的 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 火山脊,在分隔这些脊的盆地和东谷地中还发育有小的火山丘,证明有晚近火山活动,并见有方辉橄辉岩、异剥橄辉岩和橄长岩的残留(海金尼安,1992)。丘克鲁尼(1978)指出:“虽然由威尔逊于1965年引入的转换断层概念至今已广泛应用,但他们所提出的相应的地质模式,仍属高度图解的和假说的,立足于纯粹运动学基础之上”。东太平洋海隆多处发现了安德逊(1986)所称的69型构造,即前入所称的超覆扩张中心或偏移扩张中心,更是图解式的板块构造模式所难想像的。

**会聚边界** 主要指环太平洋海沟和向陆方倾斜的地震带,板块构造说认为是洋壳遇到较轻的陆壳时俯冲消亡的地方。洋壳在扩张中心生成,经扩张变老变重,最终于海沟处消亡,这是一条板块构造说的中心思想。根据这一设想,洋壳沿俯冲带消亡时,尚未固结的远洋沉积物甚至一部分洋壳定会被刮下来,集中于海沟陡坡一侧形成增生楔,不仅使陆壳增加,且成为以后形成山脉的场所。1977年日本海沟陡坡深海钻探成果,得出了与原来设想完全相反的结果,因此又产生了消亡侵蚀和未固结沉积物也可消亡的说法(方休尼等,1982)。这样千变万化的事实和板块构造模式的框框使上田诚也(1982)创出了比较消亡学。

现在地质学中的主要争论问题之一即是否承认质变。在地质现象中,各种“化”,如花岗岩化、蛇纹岩化等早已为人们所熟知,但以纯粹运动学为基础的板块构造说是不承认“化”的。事实上,越来越多的人不得不承认下部地壳由于岩浆或离子交代使其比重增大,震速加快,甚至变为异常地慢。1978年谢继哲在《论板块构造假说及其他》一书中曾用大量事实证明地壳的厚度和性质可以改变,也曾把上述现象称为地幔上蚀,是一种量变到质变的过程。把山脉下的山根视为地壳下侵的结果,随着造山带的老化,山根也会经质变而消失,造山带也就改变了性质。即使在浅处,也存在有“化”的现象。如美国加利福尼亚州长谷地热区一处土壤中的汞异常,1982年值就比1975年值有所增加(威莱坎波和巴塞克,1984)。“当移动的卤水进入浅埋的沉积物,它们沉积金属矿物形成世界一级的矿区。石油可从油源岩在卤水中做很远的运移”(白斯基和马尔沙克,1990)。

运动着的地球,不同的地区存在着不同的应力场,且随时间可以改变。很多老的逆断层可以转变为正断层,日本海沟陆侧老第三纪时上抬,新第三纪时下沉,都是应力场改变的表现。因板块构造说认为扩张处总是扩张,消亡处总是消亡,方休尼等(1982)宁可得出新第三纪洋壳俯冲时海沟陆侧不是上抬而是下

沉的结论。上田诚也(1982)虽已注意到不同消亡带具不同性质(实即不同应力场),但仍认为不论什么性质,消亡作用不变。

综观海洋地质结合陆地地质诸现象,说明地球的发展是一种量变质变趋均衡的过程,这种过程速度很慢,且常出现滞后现象,如斯堪的纳维亚冰盖消失后,至今仍在进行均衡上升。但由于各种内外营力的不断作用,均衡是相对的,不均衡是绝对的,这就是地质现象不断变化、构造活动不断进行的原因。

#### 参考文献

- 1 Uyeda S. Tectonophysics, 1982, 81:133~159
- 2 Von Huene R, et al. Japan Trench transect; Geol. Soc. Am. Bull., 1982, 93:829~840
- 3 Herzig P M, et al. Sci Letts, 1988, 89:261~272
- 4 Bethke C M, Marshak, S. Rev Earth Planet Sci, 1990, 18: 287~315
- 5 Summerfield M A. Longman scientific and Technical, 1991
- 6 Hekinian R, et al. Earth Planet, Sci Letts, 1992, 108:259~275
- 7 Leg 139 scientific Drilling party, Researchers drill new sea floor; Geotimes, 1992, 37(4):23~25

(青岛地矿部海洋地质研究所谢继哲研究员撰)

### 南极和北极的海冰 sea ice in antartic and arctic

南极和北极海冰占海洋总面积的7%。海冰和南极大陆、格陵兰岛上的冰盖不同。海冰是在海洋表面大气和海洋热交换敏感反应而形成的一层薄膜;既是热的不良导体,也是反照率极高的物体。因此海冰是海洋和大气之间热交换的屏障。海冰的成长和融化使海洋混合层上部的盐分发生变化。冰厚和范围的变化直接影响到太阳辐射能向海水中的传输,再加上海冰的季节变化和年际变化都非常大,所以海冰是制约极地冷源的重要因素。海冰的异常与否与全球气候关系极为密切,所以海冰在全球气候变化的研究中已越来越引起世界气象学家和海洋学家的关注。两极海冰的总质量和总面积的值,不同专家计算的数字有一定差异。Kotlyakov(1984)报导,总质量是 $3.48 \times 10^{13}t$ ,年生成量为 $3.33 \times 10^{13}t$ ,平均寿命是1.05年(北极冰是1.3年,南极冰为0.8年)。平均面积为 $(26 \pm 3) \times 10^6 km^2$ 。平均冰厚为1.5m,北极平均海冰厚为3~5m,南极平均冰厚为1~2m。由于南极和北极陆地分布的差异,两极海冰的分布特征有明显的差异。南极海冰呈带状绕南极大陆,北侧是宽阔的环球大洋,海冰范围大约从70°S南极大陆的沿岸至55°S或者更北。南极海冰的主要源地是罗斯海、别林斯高晋海、威德尔海以及南极沿岸带。

南极海域从3月中下旬开始结冰,先结成薄冰后形成浮冰群,冰受波浪和潮汐的影响有时破碎,致使冰片互相堆积,形成2~3m厚的多层冰,大量的积雪使冰下沉常常使冰面低于水面。10月下旬~11月冰开始融化。2月份海冰最少,这时绝大部分沿岸地段冰带不超过50英里,个别地区冰一直破碎至岸边。南极海冰冰量变化非常大,夏季(2月) $\geq 50\%$ ,冬季(9月) $\geq 80\%$ 。冰密集度的冰范围分别是 $400 \times 10^7 m^2$ 和 $2000 \times 10^7 m^2$ ,冬季约是夏季的5倍。解思梅、郝春江(1993)计算了净冰面积(不包括冰间水域)2月是 $319 \times 10^7 m^2$ ,9月是 $1684 \times 10^7 m^2$ ,冬季是夏季的5.2倍。

北极海冰被大陆包围在70°N以北的北极海盆里,所以即使夏季也仍然有多年性冰存在,不能自由的向南面大洋里漂移,冬季也不能自由向南扩展。因此北极海冰范围的季节变化不大,冰厚比南极海冰厚。Zakharov(1981)计算了北极海冰范围的面积,夏季(9月)是 $792 \times 10^7 m^2$ ,冬季(2月)是 $1231 \times 10^7 m^2$ ,冬季仅是夏季的1.6倍。北极海冰的净冰面积,冬季(3月) $1507 \times 10^7 m^2$ ,夏季(9月) $682 \times 10^7 m^2$ ,冬季是夏季的2.2倍。北极海冰受到大陆的制约,易形成冰丘和冰脊,夏季气温升高,日照时间长,表面融化,使冰丘平坦化。

冰山是南北两极海冰中的重要成员。南极的冰山是由南极

冰原周围的冰舌(ice stream)、冰架崩解(calving ice)产生的。冰山的北限大致与海洋锋一致,冰山的平均寿命为13年,为北极冰山寿命的4倍。南极海冰的冰山和大小可分为巨台型、台型、圆顶型、倾斜型和破碎型。最常见的平顶台型。冰山一般长数千米到数十千米。高出海面几十米。高出海面的高度与长度之比在1/5~1/20的范围。一般说来,由于重量的原因,冰山越大,高出海面的高度越小。1956年美国曾观测到长333Km,宽96km罕见的大冰山。1956年英联邦的空中侦察小组发现了在南极半岛以东的非尔希纳陆缘冰上有几处相当大的裂缝,到1986年9月崩解成了3座大冰山,被科学家命名为A<sub>23</sub>, A<sub>24</sub>, A<sub>25</sub>。这3座大冰山的总面积为13000km<sup>2</sup>。这些冰山漂移到了威德尔海后,底部陷入浅海停止了漂移。1991年初A<sub>24</sub>又重新自由地漂移,进入了大西洋。冰川学家通过卫星和船只一直对A<sub>24</sub>进行跟踪(美国对A<sub>24</sub>跟踪观测达4000km),他们预计,另外两座冰山A<sub>23</sub>和A<sub>25</sub>总有一天也将步其后尘。

A<sub>24</sub>冰山的冰含量超过了整个南极区常年一年的积冰量。A<sub>23</sub>和A<sub>25</sub>的冰含量与A<sub>24</sub>大致相当。为什么会一下子分裂出这么多的冰?据专家分析,这可能是全球气候变化的一个迹象,也可能是南极洲陆缘冰演化的一个正常部份。

历史上有几个时期经常见到冰山。例如,1885年在霍恩角附近,1984年在26°S接近南回归线的低纬度海域发现了冰山。20世纪20年代和30年代在南大洋里也能频繁地看到冰山。这些冰山的生成可能也是象A<sub>24</sub>那样巨大的碎冰块。1967年,埃默里陆缘冰与芬尔陆缘冰相撞,撞下了一座8000km<sup>2</sup>的巨大冰山,被命名为特罗尔通加冰山,直到1979年才破碎消失在南非沿海,持续了长达13年之久。

北极的冰山主要是在格陵兰岛西岸冰河口外诞生的,之后流入大西洋。北极海盆常常有表面平坦类似于南极的台状小冰山,厚度10~50m大小从数千米到几千米。

南北两极海冰的观测。1772~1774年,库克船长率领的船队环绕南极,对海冰进行了观测。之后有别林斯高晋、威德尔等著名航海家也多次对南极海冰进行了观测。对北极海冰的观测从公元860年就开始了。以冰图的形式记录始于1900年,由丹麦气象局制作。从1937年起前苏联发布北极部分业务化的冰图。由于两极环境恶劣,再加上冬季的极夜期,连续观测获取全面的海冰资料极度困难。20世纪60年代进入了卫星时代,特别是自1973年以来,美国NOAA系列卫星和 Nimbus 系列卫星上装载了甚高分辨率辐射仪(AVHRR)和微波辐射仪,解决了大范围两极海冰密集度观测和利用微波亮度温度确定海冰外缘线,解决了极夜期的海冰监测问题,再加上船舶、航空和岸边岛屿测站观测资料,经过综合处理后便可获取可信度较高的连续性的极冰资料。世界资料中心(WDC-A)、美国联合中心将卫星资料和实地观测资料同化后提供了统一格式的极冰资料SIGRID格式磁带。这些资料为极冰的研究,以及极冰对全球气候变化的研究创造了必要的基础条件。90年代世界气候研究计划(WCRP)提出开展南极冰厚监测计划(AnITMP),解决卫星遥感所不能解决的问题,冰厚监测的主要仪器是仰视声纳(ULS)。中国自1985年以来先后在南极建立了长城站和中山站,逐渐开始了对南极海冰的观测工作,从1992年开始正式按照世界气象组织规定的国际标准化海冰观测规范进行了船舶、飞机和地面站的海冰观测工作。1992~1993年第9次南极考察队又在南极建立了两个高分辨卫星遥感监测站。

根据世界资料中心、美国冰联合中心提供近期资料,计算了两极海冰的净冰面积指数并分析其距平变化趋势,发现南极海冰20世纪70年代前期为多冰期(1973~1975),70年代后期为少冰期(1976~1980),80年代前期为正常(1981~1984),80年代中期为少冰期(1985~1987),后期又转向正常趋势(1988~1989)。总趋势虽体现出周期性的变化,但70年代(1973~1975年)出现多冰期是非常显著的,后期属周期性振荡的衰减趋势。另外由于南极冰区域的差异其变动规律不同。威德尔海冰的变化

差异最大,出现过2次明显的多冰期(1973~1974, 1979~1980)。而罗斯海域和东南极海域恰恰相反1980年,是明显的少冰年。北极海冰变化的总趋势与南极冰的共同之处是80年代中后期为少冰期,均为负距平期。70年代(1972~1980)为多冰期,均为正距平期,其中中期少,初期(1972~1973)、后期(1978~1980)多。80年代中后期两极海冰均属少冰期,并且其变动趋势均是衰减性的低频振荡周期,南北两极海冰的长期变动趋势及其异常对于全球气候的影响正在成为当今的热门研究课题。

#### 参考文献

- 1 WMO ICSU, et al. Report of the WMO/CAS - JSC - CCCO, Meeting of Experts of the role of sea ice in climatic variations (with special reference to Antarctica). WCP - 26, Geneva, P63. , 1982
- 2 SCAR (Scientific on Antarctic Research) : Antarctic Climate Research. Cambridge, 1983, 65
- 3 WMO/ICSU, et al. General corculaton of the Southern Ocean, Status and recommendations for research (A Report by SCAR Working Group 74). WCP - 108, Geneva, 1985, 50
- 4 WMO/ICSU. Reports of the Second Session of the Working Group on Sea Ice and Clima (seattle, ct 1986). WCP - 128, Geneva, 1987, 97
- 5 Kotlyakov V M. Morskoy led (sea ice). Glyatsiologicheskiiy. slovar' (Glossary of Glaciology), ed by Kotlyakov V M. , leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 285~287

(国家海洋环境预报研究中心解思梅研究员撰;包澄澜审)

**规则波在淤泥质海床上的沿程衰减** 淤泥质海岸在世界各地分布很广,多位于河口附近。中国的淤泥质海岸占全国海岸线的很大一部分,自北纬28°至40°均有分布,如渤海湾、辽东湾、莱州湾,以及江苏省北部、浙江省和福建省的部分海岸普遍为淤泥质海岸。淤泥质海岸主要是由极细的泥沙颗粒物质组成的,其中粘性矿物占主要成份。淤泥质海岸的岸滩坡度极为平坦,如渤海湾地区滩地平均坡度为1/1000至1/2000,在天津港附近,低潮时可看到数千米宽的淤泥滩面。

波浪在沙质海床上传播时,主要由于床面的摩阻作用引起波浪能量的沿着波浪传播方向的逐渐衰减(即所谓的波浪能量的沿程衰减),从波面看,表现为波高的沿程衰减。淤泥质海床则不同,原因为泥面以下相当厚的泥层,都处于非饱和状态,含水量甚高。如果这种高含沙量的泥样的容重不致太大,则在表面波的作用下,在水、泥交界面上出现明显的界面波,在泥层内也有波动现象(对于新港泥样而言,当容重在1.20g/cm<sup>3</sup>及以下时,其现象甚为明显,随着容重的增加,这种现象渐趋消失,大概在1.25g/cm<sup>3</sup>及以上时,凭肉眼就看不到这些现象),当泥样的容重较大时(例如,对于新港泥样,其容重约在1.25g/cm<sup>3</sup>或以上时),海床物质呈现一定的柔顺性。赵子丹等所做的大量实验证明,表面波在淤泥质海床上传播时,其波高的沿程衰减,要比表面波在沙质海床上传播时的沿程衰减快得多,有时可快一个数量级。其表面波的沿程衰减的快慢,还与泥的容重有关,即先是随着泥的容重的增大而增快,大致在容重在1.22g/cm<sup>3</sup>左右时,表面波的沿程衰减最快,尔后逐渐变慢。关于波浪在淤泥质海床上传播时其沿程衰减普遍要比在沙质海床上传播时快得多的现象,在自然界也屡屡发现。例如,在中国黄河口的外海区,有南、北2个“烂泥湾”,湾外海面波浪汹涌,湾内却风平浪静,说明波浪进入湾内后由于“烂泥”的存在而迅速衰减掉了。在印度西南海岸和南美的东北海岸地区,由于底泥的存在,波浪常常达不到岸边。印度的Kerala,在西南季风季节里,入射到淤泥质岸滩上的台风波,往往只需要经过4~8个波长的距离就几乎完全被衰减掉了。淤泥质海床的床面,比沙质床面要光滑得多,所以在淤泥质海床上传播的

波浪,其沿程衰减得那么快,主要不是由于床面的摩阻作用引起的,而是由于泥面以下的泥层的运动,损耗了表面波提供的部分能量而引起的,因此,从问题的本质来说,正确地理解泥的物理力学特性是至关重要的。淤泥的动力特性非常复杂,根据研究,它具有粘性、塑性和弹性。根据流动性和动力特性,可把淤泥分为浮泥及软泥2类;浮泥的特点是具有明显的流动性,弹性效应不显著,这相应于泥的容重较小的情况,在试验水槽中可以看到,在表面波作用下,在泥和水的交界面处有界面波;软泥的特点是没有明显的流动性,弹性效应比浮泥显著,这相应于泥的容重较大的情况,在试验水槽中可以看到,在表面波作用下,在泥和水的交界面没有明显的界面波。因此,对这课题的理论分析的可用性,关键在于理论模式中能否比较近似地反映出淤泥的流变特性。

Gade(1958)首次研究了这一课题,他假定上层水体为理想流体,表面波为浅水长波,淤泥层为粘性流体,从而导出了波高的沿程衰减规律的解答,他还用实验与理论作了对比(在他的实验中,上层流体用的是煤油,下层流体用的是糖溶液,即上层流体的容重和粘性都比下层流体小得多,二者都属于牛顿流体)。结果表明,理论值和实验值之间的一致性较好,这似乎表明,对于波高的沿程衰减而言,在上述实验条件下,可以忽略上层流体的粘性。Dalrymple和Liu(1978)把上层水体和下层淤泥都作为粘性流体,对表面波改用微幅波,得出了他们的理论解答,结果表明,在长波理论可用的范围内,他们的解答、Gade的解答和Gade的实验之间都相当接近。可惜,上述2项研究成果,都没有触及到淤泥能否作为粘性流体处理,以及在什么条件下可近似作为粘性流体处理。Hsiao,Shemdn(1980)和Macpherson(1980)几乎在同时建立了粘弹性模型,即都把淤泥作为粘弹性体处理,并以个别现场数据作了对比。

大量的试验表明,淤泥与宾汉体比较接近,特别是当淤泥为浮泥的容重范围内时,其流变特性与宾汉体极为接近;另一方面,若把水槽试验结果与Gade及Daitymple和Liu的理论值相比,实验结果的沿程衰减要比理论计算结果的快得多。据此,赵子丹和姜林(1988)提出了下层淤泥为宾汉体、上层水体为粘性流体,表面波为微幅波情况下的解答,并和相应的实验作了对比,证明在浮泥范围内,理论值和实验值之间的一致性较好。尔后,赵子丹和李贺青(1993)又以大量实验检验,再次证明了这一结论。赵子丹和练继建的研究还表明,对于新港淤泥而言,当泥的容重低于浮泥的极限容重时,宾汉体模型(即假设淤泥为宾汉体)能很好与实验结果一致,在泥的容重略小于或略大于浮泥的极限容重的情况,宾汉体模型和粘弹性体模型(即假设淤泥为粘弹性体)都能满意地与实验值一致,当泥的容重更大些时(例如,对于新港泥,其容重为1.27g/cm<sup>3</sup>或更大时)粘弹性体模型比宾汉体模型与实验结果更为接近。

#### 参考文献

- 1 Zhao Zidan, Jiang Lin. Interaction between Waves and Mud Bottom , Coastal and Maritime Hydraulics (6th CoNgress APD-IAHR Proceedings Vol. N), 1988, 105~111
- 2 Zhao Zidan. A Rievew of studies on the Interaction between Waves and Muddy Bottom , China Ocean Engineering , 1992, 6(2): 187~200
- 3 赵子丹,李贺青.波浪在浮泥床而上的传播,海洋通报,1993, (1)
- 4 李贺青.规则波和不规则波在浮泥海床上的传播、变形.天津大学博士论文,1993,105
- 5 练继建.波浪、水流与淤泥质底床的相互作用.天津大学博士论文,1993,141

(天津大学博士生导师赵子丹教授撰)

**不规则波在淤泥质海床上的沿程衰减** 从自然界的客观情况来说,在淤泥质海床上传播的波浪为不规则波。不规则波是一种随机运动特点是海面的波动振幅时大时小,波动周期



时长时短,因而波长也是时长时短。为研究不规则波的随机波动,通常假定它为平稳随机过程。按照 Longuet-Higgins 的模型,假定在固定空间点处的水面波动是由一系列的具有不同的圆频率和初始相位、且振幅微小的余弦波的线性叠加的结果(上述的每一个余弦波都被称为不规则波的组成波)。表达不规则波的方法是波浪谱,它实际上是波浪的能量与不同圆频率的关系曲线。实验观察是要在波浪槽的起始断面和各个指定断面测定波浪谱。根据观测,由波浪谱所包括的总面积,及波浪谱的峰值,都是由起始断面向波浪传播方向的各个断面逐渐减小的。在理论分析中,我们假定各组成波为线性波,各组成波之间的相互作用可以略去不计,因而对每一个组成波的分析,可采用规则波情况下波浪与淤泥质海床相互作用的分析方法。这样,以初始断面的波浪谱(实验谱)为依据,算出各组成波的波高,经过统计计算,就得出该初始断面处的各种特征波高,如平均波高、均方根波高和三分之一波高。此外,以在初始断面处的各组成波波高,用上述在规则波情况下的解答,求出指定断面处的各组成波波高。经过快速傅里叶变换,得出该断面处的计算波谱。对上述在指定断面处的计算得到的组成波波高,进行统计分析,即得出在该断面处的各种特征波波高(即平均波高、均方根波高和三分之一波高)。

在上述实验研究中所用的泥样取自天津新港,在水槽实验中所用的泥的容重为  $1.0290 \sim 1.3160 \text{g/cm}^3$ ,理论分析时所“借用”的用于规则波情况下的解答是宾汉体模型,即假定泥层为宾汉体而得出的(Zhao Zidan & Jiang Lin, 1988)。理论计算和实验检验表明,由赵子丹和他的博士生李贺青(1993年)共同提出的关于不规则波在淤泥质海床上的沿程衰减的解答,在浮泥范围内,能与实验值取得很好的一致性。

#### 参考文献

- 1 Zhao Zidan, Jiang Lin, Interaction between Waves and Mud Bottom, Coastal and Maritime Hydraulics (6th Congress APD-IAHR Proceedings), 1988, 4: 105~111
- 2 赵子丹,李贺青. 波浪在浮泥床面上的传播, 海洋通报, 1993, 1: 1~9
- 3 李贺青. 规则波和不规则波在浮泥海床上的传播、变形. 天津大学博士论文, 1993, 105
- 4 赵子丹,李贺青. 规则波和不规则波在浮泥海床上传播的沿程衰减, 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室研究报告, 1993, 61

(天津大学博士生导师赵子丹教授撰)

**波浪与海工建筑物的相互作用** interaction of wave and maritime structures 随着世界海洋运输事业的发展,港口、海岸及海洋工程的发展就显得越来越重要。波浪是海上建筑物所经受的最主要的动力荷载,是设计海上工程时所需考虑的关键因素,它对海工建筑物的作用直接影响着建造在海岸和海洋中的用于各种用途的海工建筑物的设计、施工和安全等问题。因此波浪对海工建筑物的作用的研究是十分重要的问题。

波浪对建筑物的作用有许多种类,由于结构型式不同,建筑物前的波浪形态和波浪对建筑物的作用也各异。防波堤、开敞式码头、护岸及海上平台是目前国内最常见的海上建筑物,它们分别属于直墙式、斜坡式、混合式,以及各种尺度和布置型式的桩或柱结构。波浪又分为深水波、浅水波或不规则波、正在破碎波、已破碎波或未破碎波等。由于工程实际的需求,波浪与各种型式的海工建筑物的相互作用一直是海洋工程界学者主要关注的研究内容。就采用的波浪理论而言,总的趋势是由线性理论向非线性理论发展,提出了微幅波、Stokes波、孤立波、桶余波和流函数波浪理论等等。20世纪50年代初,Pierson 最先把 Rice 关于无线电噪声的理论应用于海浪,与 Newman 等提出了能量谱的概念,并用于海浪预报。从此这一理论开辟了海浪研究的另一个重要途径,并成为90年代的主要研究方向。随着海工建筑物的发展,有关波浪作用的理论和试验方法、计算方法也随之有了广泛

而深入的发展。

海岸工程及海洋工程的结构物中,各种型式的杆件或柱状结构得到了广泛的应用,这些杆件或柱体可以是垂直的,水平的或斜向布置的,其截面尺度相对于波要素可以是小尺度的或是大尺度的。对于小直径垂直构件,至今仍主要采用1950年 Morison 等人提出的方法计算波浪对其的作用力,它认为当构件尺度与波长相比较小时,桩柱的存在并不影响波浪场,故作用在其上的波浪力除与桩柱尺度有关外,还取决于未被桩柱扰动的波动场内的水质点运动速度和加速度。对于倾斜杆件, Borgman(1958)建议采用推广的向量 Morison 方程进行计算,李玉成等分别对倾斜杆件上的波浪力做了实验研究,很好地验证了 Borgman 所提出的计算方法。由于 Morison 公式的经验性质,所以被广泛地应用于海上小尺度杆件的设计中。当柱体尺度很大时,波浪场将受柱体的干扰,此时 Morison 方程不再适用,通常采用1954年由 MacCamy 和 Fuchs 所提出的基于波浪绕射理论的计算方法。他们假定流体无粘性作势流运动,采用线性波理论,柱体只产生波浪的散射而无水流的分离。因此,当平面波推进与柱体相遇时,此入射波将与沿柱面向外散射的波系相叠加形成一新波系,柱体所受的波浪力将决定于新波浪场。随着研究的发展,人们发现墩柱上作用有定常或缓变的波浪力,这个现象是线性理论所不能解释的,于是许多研究者就开始了非线性波浪力的研究。由于阶数的增加,计算量迅速增加,且更高阶的势所占的比重不会很大,所以一般的非线性研究只考虑二阶问题。Chakrabarti 在1972年研究了垂直圆柱体受到非线性波浪力,把 Stokes 五阶展开理论应用到绕射问题。接着 Hunt 与 Baddour 等对 Chakrabarti 的工作做了改进,由于二阶绕射势的辐射条件不甚清楚,在求解中,有多种辐射条件被采用。随着对任意形状的柱体的研究的开展,从80年代开始,有人用数值解法研究了非线性波浪力,有限元法、无限元法、源汇分布法等都被用来解决这样一个问题,也得到了比较满意的结果。邱大洪(1985)将此绕射理论应用到浅水区域椭圆余弦波对单个墩柱和多个墩柱的作用情况,又将此绕射理论向前发展了一步。

在港口及海岸工程中,斜坡堤是一种传统的、广为采用的结构型式,这种结构可以采用大量的当地材料,且在超设计标准的外荷载的作用下一般不易发生灾害性破坏,因而采用较多。它通常可以用做防波堤、码头、护岸等。由于波浪容易在斜坡堤面上发生剧烈破碎,人们就发展了几十种稳定性较高的混凝土人工块体。最早计算斜坡堤石块稳定重量的方法是在1938年由西班牙 Iribarren 所提出的,他假设波浪在斜坡堤上完全破碎,石块有可能沿斜坡下滑一滑动失稳。1959年美国 Hudson 提出了另一种方法,即沿用至今的 Hudson 公式,其假定波浪在斜坡面上发生破碎,块体由于浮起失重而失去稳定。Hudson 公式至今仍广为应用。波浪爬高亦是斜坡堤设计中的一个很关键的参数。由于斜坡堤有着各种不同的断面形式,从而得到适用条件各不相同的研究结果,有侧重理论的,也有侧重于试验的,由于斜坡面上波浪水流现象的复杂性,迄今在工程上主要采用试验研究成果。斜坡堤越波量的估算,目前的一些成果也是基于模型试验得到的。

直墙建筑物也是工程中经常被采用的一种结构型式,如防波堤、护岸、码头等,波浪力通常是它们最主要的外荷载。直墙前的波浪形态与墙体结构和墙前的地形和水深有很大关系,可以形成全反射的立波、部分反射的立波、远破波、近破波等。关于立波理论,1928年法国 Sainflou 应用拉格朗日坐标系提出了一个直墙前立波的理论解,由于其计算简便,且在一定范围内具有足够的精度,所以至今一直为工程师们所采用。70年代以来各国学者分别在寻求更高阶的近似解,中国的洪广文及邱大洪对高阶近似解都做过大量的工作,邱大洪还把桶余波理论应用到直墙建筑物的情形,给出了许多有意义的理论和试验结果, Penny 和 Price 对深水有限振幅的立波进行了详尽的研究,得到了五阶近似的理论解,对浅水立波也作了二阶近似解,传统的直墙结构主要起挡浪作用,它或是将波浪全部反射,或是部分反射及部分破碎,因而

需要很大的自重才能保持建筑物的安全与稳定,为了降低工程造价,减轻结构物重量,并很好地消浪,人们提出了许多新型结构,如削角堤、圆形结构、透空式结构和曲面壁消浪结构沉箱等。目前对于直墙前的波浪破碎的机理尚无满意的解释,因此大部分研究工作均靠实验研究。随着计算技术的高速发展,也给海岸工程的研究注入了新鲜血液,已有入在用数值方法模拟波浪对直墙建筑物作用的全过程,这无疑使得人们对波浪的作用现象认识更为清楚。

波浪是海上建筑物的主要荷载,波浪对建筑物的作用主要有二方面,一是直接作用在建筑物上的波浪力,一是波浪在海床内引起的渗流对建筑物与海床接触的边界上作用的波浪渗流。前面涉及的都是指前者的作用,后者的研究在学术界是80年代才开始的,而在工程界则多采用根据判断而提出的经验计算方法,缺乏理论依据。波浪在多孔介质内的渗流作用包括两方面,一是作为多孔介质的海床或人工抛石基础,在与之相接触的海工建筑物上作用有波浪渗流力,一是以多孔介质为材料所建造的海工建筑物中的波浪渗流作用,上述渗流作用比较复杂,它涉及波浪在可渗结构和内部传播引起的孔隙水压、渗流、孔隙水压积累等现象,以及可渗结构对波浪的影响。基于海床为刚性多孔介质的假定,Durand和Monkmeyer(1980)对波浪场下渗流对大尺度圆柱的作用进行了理论分析和计算,并相应地做了一些验证性模型试验。邱大洪领导的课题小组自1986年开始,基于海床可渗可压缩的假定,用Biot固结理论对重力式结构底面上由于波浪引起的渗流力进行了系统的研究,其中包括解析的、数值的和实验研究,相继给出了立于有限深或无限深海床上或抛石基床上的二维或三维的圆形截面,以及任意形状建筑物在线性波、椭圆波、不规则波作用下的渗流力的解析解、数值解和模型试验结果,经比较表明,理论结果与试验结果吻合很好。在波浪作用下,斜坡式抛石防波堤和护岸等抛石结构,其堤身和护面都可能发生破坏,在设计此类结构时,所需考虑的几个因素大多与堤身内引起的渗流运动有关,在目前的工程设计中,均采用经验的设计方法或物理模型试验来确定设计断面,虽然也有一些数值结果,但距实际工程尚有差距。由于这些因素,许多研究者相继开展了这方面的研究。1978年Madsen在长波、小振幅的假定下,研究了波浪的爬高、反射、波浪在堤身内的运动以及波浪的透射等问题。邱大洪等用边界元与有限元相结合的方法,采用同时求解波浪场和渗流场的数学模型,提出了波浪在抛石防波堤内引起的渗流运动模型。

除了以上所述的几种建筑物外,波浪与海工建筑物相互作用研究还包括波浪对浮体、海底管线的作用,对这方面的问题也已有不少的研究成果。

波浪对海工建筑物的作用分为确定性的和不确定性的问题。在确定性分析中,波浪被看做是单方向的、连续稳定的、等振幅的过程,然后确定其波浪力的大小,规则波的作用情形就属于这类问题。在不确定性分析中,波浪被看做是随机的过程,通过统计分析和谱方法分析波浪力的大小,不规则波的作用情形则属于这类问题。不规则波的作用力将以建筑物所受的规则波浪力的分析计算方法做为其研究的基础,目前主要采用以下几种方法进行分析:特征波法;谱分析法;概率分析法;不规则波试验法。目前许多研究者对此进行了大量而深入的研究,并已将其研究成果应用到实际工程之中。

由于计算机的引入,波浪对海工建筑物的作用研究大大拓宽了其研究范围。目前许多计算方法,诸如有限差分法、有限单元法、边界元法、流体体积函数法、有限分析法等,都曾被用来解决这一领域的许多问题,将此数值解与理论解及实验结果结合起来,构成了对问题的一个完整解答。研究表明,数值方法已越来越显示其巨大的优越性和蓬勃的生命力。

#### 参考文献

1 Morison J R, Johnson J W, Schaaf, S A, *Petroleum Transaction*, 1950, 189:149~157

- 2 Pierson W J. *Journal of Geophysics Research*, 1964, 69 (24): 5181~5190
- 3 Isaacson M. *Journal of Fluid Mechanics*, 1982, 120:267~281
- 4 邱大洪. 波浪理论及其在工程上的应用. 北京:高等教育出版社,1985.5~384
- 5 邱大洪. 水利学报,1989,4:22~32
- 6 李玉成. *Wave Action on Maritime Structures*. 大连:大连理工大学出版社,1990.1~273
- 7 俞聿珍. *随机波浪及其工程应用*. 大连:大连理工大学出版社,1992.211~258

(大连理工大学邱大洪教授撰)

## 不规则波及其与海工建筑物的相互作用

irregular wave and its interaction with maritime structures 海浪是不规则的,是一种复杂的随机过程,它的作用常构成海洋工程和海岸工程等的控制荷载,同时建筑物的建造又常对海浪产生反作用。因此海浪及其与建筑物的相互作用早就引起人们的重视,开展了大量的研究。但由于海浪运动的随机性、复杂性,早年限于科技水平,长期把海浪简化成波高和周期都固定不变的规则波,先后建立了线性波浪理论、非线性波浪理论,并由低阶向高阶理论发展。还研究了规则波与建筑物的相互作用。这些在认识波浪和进行工程实践中起到了重大的作用,至今仍扮演着重要的角色。但它们毕竟与实际的海浪情况是不相符的,必然要随着科技的发展逐步向不规则波理论方向发展。1979年日本“港口设施技术标准及编制说明”比较全面系统地引进了不规则波的概念和大幅度地采用不规则波设计方法。其他西方国家也多逐步采用不规则波设计法。

不规则波及其与海工建筑物的相互作用,主要研究作为随机过程的海浪(不规则波)在时间域、频率域和概率域的特性;不规则波浪对各种(直墙式、斜坡式、混合式、浮式和桩柱结构等)建筑物以及岸坡的作用,包括对建筑物基础的冲刷作用;以及建筑物和岸坡对波浪的反作用;波浪的折射、绕射、反射和破碎等等。

斯维尔德鲁普(Sverdrup)和孟克(Munk)在二次世界大战期间首先考虑到海浪的不规则性,提出了有效波的概念,用于预报风浪,开创了不规则波研究的先河。1952年,皮尔森(Pierson)最先把瑞斯(Rice)关于无线电噪声的理论应用于海浪,对不规则波进行了大量的开创性研究,建立了在时域描述不规则波的第1个数学模型。同年劳曼(Nenmann)提出了能量谱(海浪谱)的概念,用于海浪预报,逐步形成了预报风浪的PNJ法。从此利用谱以随机过程描述海浪逐步成为海浪研究的一个主要途径,劳曼提出的波谱表达式成为不少研究工作的基础。1968~1969年间,英、荷、美、德等国进行了“联合北海波浪计划”,系统地观测了海浪,提出了JONSWAP谱,得到广泛的应用,中国文圣常于1988年从理论上导出风浪频谱,可考虑到风浪发展阶段和水深的影响。1953~1959年期间,美国首次尝试由航空摄影测量波浪的方向分布(方向谱),Cote等于1960年指出波能的方向分布也与波浪频率有关。光易恒于1975年建议了比较完备的方向谱。1985年Donelan采用14个测波仪组成的阵列,系统地观测了方向谱,提出了新的公式。

50年代中,朗盖脱-赫金斯(Longuet-Higgins)把瑞斯提出的高斯随机过程中振幅的概率函数和能谱的解析关系引入到随机海浪中,首先提出了包括极值在内的各种波高的概率预报方法,表明波高服从瑞利分布。后又提出了非窄带波分布、波高和周期的联合分布等的预报方法。1959年,Tick提出了第1个二维深水波随机波动二阶非线性模型,随后进一步推广于有限水深情况。1973年,Hasselmann等最先把二阶谱应用于海浪的研究。

1970年合田良实首先提出了波群现象的重要性,并通过数值模拟进行了研究,以后不少学者研究了波群特性及其对建筑物的影

响,表明它对斜坡堤和系泊浮体等有较大的破坏作用。

关于不规则波浪对建筑物的作用,最早工程师们采用有效波作为不规则波的代表波,沿用规则波的方法设计斜坡式建筑物。对于直墙式和桩柱建筑物,不规则波列中少数大波的作用就可能引起建筑物的破坏,因此采用最高波或百分之一大波等大特征波作为设计波浪。这类方法都是把不规则波用单一的规则波来代表,只是根据不同的作用情况采用不同的特征波要素,统称为特征波(代表波)法。此法易于考虑波浪的非线性影响,广泛应用于静力计算。

60年代末,合田良实在研究海堤越浪量时,指出要考虑不规则波列中各单个波浪越浪量的累积效果。伊藤喜行(1966)研究直墙防波堤的稳定性时,也采用了累积滑移量的概念。对于桩柱结构,可由波高分布推算波力分布以确定设计波力,或用于由实测资料确定水动力系数。此类方法称为概率分布法。

1967年,Borgman在研究波浪对于桩柱的作用时,把不规则波浪及其对桩柱的作用都看作是平稳随机过程,它们之间的变换可简化为一个非随机函数一方差谱的变换。这种方法称为谱分析法,它易于考虑结构物对波浪作用的动力反响,但仅限于线性化系统。

1958年,R. O. Reid首先提出用线性过滤法数值模拟不规则波浪对桩柱的作用力。1969年,Borgman系统论述了波浪迭加法和线性过滤法模拟波浪和波浪力的方法,确立了数模方法的地位,它既适用于线性系统,也适用于非线性系统,而且为在实验水槽中复演不规则波进行物理模型试验打下基础。Hudspeth和Chen于1979年开始研究非线性不规则波的模拟。

物模试验是研究不规则波浪及其与建筑物相互作用的主要方法之一。从60年代起,以船模水池为中心,不规则造波机逐渐得到普及。70年代后,在港口和海岸工程研究机构也广为应用。中国在70年代末80年代初开始研制,80年代中期从美、日和丹麦等国引进了现代化的造波系统。对不规则波浪的特性及其对群桩、海底管线、斜坡堤和系泊船舶的作用以及港内泊稳条件等进行了大量的研究。

为了在实验室模拟多向不规则波,70年代中期英国水利试验站首先把10台不规则造波机排列在圆心角为100°的圆弧上,按要求的波能方向分布造波,在圆心区产生多向不规则波。1977年英国爱丁堡大学把蛇形造波机用于产生多向不规则波,逐步得到推广应用。中国海岸与近海工程国家重点实验室(设在大连理工大学)于1990年建成了我国第1座多向不规则波浪水池。

1973年合田良实提出了考虑不规则波浪特性计算直墙波浪力的方法,对立波和破波采用统一的计算公式。80年代洪广文从理论上研究了非线性不规则波及其与直墙相互作用的随机模型。

1984年,van der Meer基于一系列的模型试验结果,建议了随机波作用下斜坡堤的设计公式。

50年代以来,本领域的研究已取得了长足的进步,在水动力研究领域受到广泛的重视。但还很不成熟,远远不能满足工程实践的需要。目前研究的热点为:(1)非线性随机波浪(包括浅水破波带随机波)及其与岸坡和建筑物的相互作用;(2)三维随机波浪及其与建筑物相互作用的研究;(3)波浪—建筑物—地基的相互作用;(4)把数值模拟和物理模拟结合起来的联合模拟研究。

#### 参考文献

- 1 Neumann G. On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea, Beach Erosion Board, U S Army Corps of Engineers, Tech Mem, 1953, 43: 42
- 2 Pierson W J. Wind-generated gravity waves, In - Advances in Geophysics. New York: Academic Press Inc, 1954, 2: 93~178
- 3 Longuet-Higgins M S. The statistical analysis of a random moving surface, Phil Trans Roy Soc, A, 1957, 249(966): 321~387

- 4 Reid R O. Correlation of water level variations with wave forces on a vertical pile for nonperiodic waves, Proc of 6th Conf. on Coastal Engineering, 1958, 749~786
- 5 Borgman L E. Spectral analysis of ocean wave forces on Piling, Proc. of ASCE, 1967, 93(WW2): 129~156
- 6 Borgman L E. Ocean wave simulation for engineering design. Proc. of ASCE, 1969, 95(WW4): 557~583
- 7 Goda Y. Random Seas and design of maritime structures. University of Tokyo Press, 1985, 323
- 8 Wen S C, et al. Theoretical wind wave frequency spectra in shallow water. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 7(3): 325~343
- 9 洪广文. 不规则波随机数值模拟及其工程应用. 河海大学科技情报, 1989, 9(3): 74~107
- 10 俞聿修. 随机波浪及其工程应用. 大连: 大连理工大学出版社, 1992, 266

(大连理工大学博士生导师俞聿修教授撰)

#### 海岸建筑物前的局部冲刷

在海滩上布置建筑物后,通常会导致海岸区的地形变化,这是因为这种建筑物破坏了海岸物质的供给和损失之间的天然平衡。由于建筑物的存在而引起的地形变化,包括2方面的问题:(1)在海岸建筑物前的局部冲刷,指的是以横向输沙为主的情况;(2)与沿岸输沙特性有关的地形变化。第1个问题是二元问题,可以用波浪槽进行试验研究。

海岸建筑物包括海塘、突堤和防波堤、高岸堤及护岸等,它们所处位置处的水深是不同的,而建筑物的局部冲刷特性上的差别,是和建筑物所在处的水深密切相关的。

很多人研究过海岸建筑物前的局部冲刷问题,把建筑物所在处的水深作为影响冲刷的一个函数。Sato等(1966, 1968)曾对直立堤放在各类岸滩上的不同位置处的冲刷特性进行过试验研究,结果表明:如果直立堤所放的位置处,正好使破碎波直接作用在堤面上,则堤前很快出现冲刷;如果把建筑物布置在岸线附近,则冲刷坑很快会被重新填满;如果把建筑物布置在岸线的陆侧,就不出现重新填满的过程;如果把建筑物布置在介于波浪的破碎点与岸线之间处,则在波浪作用下的初始阶段冲刷很快,以后逐渐变慢;如果堤前水深较大而足以形成立波,则冲刷坑逐渐发展而不出现重新被回填的情况。

当把堤放在击浪带内时,由来自建筑物那里反射过来的波浪所引起的回流把床面物质向海侧输送,从而在堤前出现显著的冲刷。Sawaragi和Takabata(1977)及Saeki等(1985)都曾研究过反射波对冲刷过程的效果,Hattori和Kwamata(1977)、Hashimoto等(1983)曾研究过由于改变入射波的特性而引起的冲刷坑的重新被填满问题。

若建筑物布置在水较深处,则在建筑物的向海一侧的海床会受到立波的冲刷。Bijier和Wichers(1971)、谢世楞(1981)和Irie(1984)指出在立波作用下有2种不同的床沙质运动模式:第1种模式是悬沙显著地由波节向波腹方向输送(即L型),在波节处出现冲刷坑,第2种模式是床沙显著地由波腹向波节方向输送(即N型),在波腹处出现冲刷坑。

近年来,赵子丹对与此有关的课题,进行了比较全面的研究。对于直立堤在立波作用下的底流速问题,采用了3种方法:(1)用保角变换的方法,研究了有突基床的直立堤、堤前海底面为水平情况下的底流速分布(霍继申,1987);(2)采用波浪槽试验与电模拟相结合的办法,研究了有突基床的直立堤、堤前海底面任意起伏情况下的底流速分布(霍继申,1987);(3)用MAC法研究了有突基床的直立堤、堤前海底面任意起伏情况下的底流速分布(高学平,1992);(4)研究了立波作用下、没有突基床时,直立堤前的局部冲刷,包括冲刷形态、冲刷机理、冲刷形态的判别标准、冲刷历时、及堤前冲刷坑的位置、尺度,以及有突基床时,突基床的尺度对它们的影响(高学平,1992),此外,还扼要研究了

远破波或近破波作用下,直立堤前的局部冲刷(高学平,1992)。目前,赵子丹正致力于在不规则波作用下堤前的局部冲刷的研究。

#### 参考文献

- 1 Kiyoshi Horikawa. Nearshore Dynamics and Coastal Processes. 1988, 158~163
- 2 赵子丹. 港口工程, 1990, 3: 22~28
- 3 赵子丹. 港口工程, 1990, 2: 4~7
- 4 高学平. 天津大学博士论文, 1992, 122

(天津大学赵子丹教授撰)

**海岸砂坝** coastal barrier 又称堡岛、堰岛、滨外砂岛,系指离岸一定距离,形成于浅水域,大致平行于岸线的沙体,一般由砂或砂砾构成。砂坝与岸线之间被拦截的水域称为潟湖(Lagoon),因而砂坝与潟湖相伴而生,发育砂坝的海岸通常被称为砂坝—潟湖海岸,关于潟湖的分类往往直接或间接地反映砂坝的特征。砂坝,潟湖一般发育在海底坡度1/100~1/500的地区,分布甚广,约占世界海岸线总长度的10%~13%,海岸砂坝和潟湖是沿海地带重要的生境,世界各国政府相继制订法律,加以保护。

法国博蒙(Elie de Beaumont)于1845年以《海岸潟湖》为题发表了第1篇关于海岸砂坝成因的科学论文,至今已有近150年的历史。他对欧洲和南北美洲的海岸砂坝潟湖作了描述,提出海岸砂坝是在波浪作用下砂砾向岸运移而产生的。1885年吉尔伯特(G. K. Gilbert)以美国Bonneville湖砂坝的研究为依据,认为砂坝是砂砾在波浪的作用下沿岸运动生成。1890年麦杰(W. McGee)在研究大西洋沿岸和墨西哥湾海岸砂坝的基础上,得出第3种海岸砂坝形成的方式,即最初形成于海岸上的海滩(Coastal beach),因海平面上升而与岸线分离,二者之间出现潟湖,从而产生海岸砂坝。这3种关于海岸砂坝成因的意见曾是19世纪末至20世纪初争论的焦点。

约翰逊(D. Johnson)在1919年发表的《海岸过程和海岸线发育演化》(shore processes and shore line development)的经典著作中,以美国沿岸大量海岸剖面的测量结果为依据,试图分清上述3种意见的孰是孰非。他认为,若博蒙的意见正确,砂坝以外的剖面将是凹形的,因为海底受到侵蚀,侵蚀物向岸搬运,而形成海岸砂坝;若吉尔伯特意见正确,则砂坝之外的海底剖面应保持原来的状态,近于直线向海倾斜。实测资料表明,所有海岸砂坝的剖面均为凹形。1957年前苏联曾科维奇(В. П. Зенкович)根据海岸均衡剖面塑造的理论指出,自然界砂砾的沿岸和垂直海岸的运动同时存在,美国沿岸以后由矿物学方法证实确系泥砂沿岸运动形成的海岸砂坝,其横剖面仍然是凹形的,因此,约翰逊的验证不可能得到预期的结果,他的验证方法是无意义的。麦杰关于海岸砂坝形成的方式虽然未被约翰逊的海岸剖面观测资料所证实,然而,1957年曾科维奇以前苏联海岸的事实,1967年霍依特(J. H. Hoyt)以美国沿岸的材料证明,麦杰的意见是正确的。这种海岸砂坝形成的方法对认识和理解海岸砂坝的沉积模式和地层关系十分重要。事实上,上述3种海岸砂坝的成因在自然界各自适用一定的情况,各自适用不同的海岸地段,它们互不排斥,一种不能代替另一种。

1960年,列昂捷夫(O. K. Леонтев)依海岸砂坝的发育状况和潟湖的封闭程度,将潟湖分为封闭型潟湖,半封闭型潟湖和海湾—潟湖。现今,世界各地的潟湖大多由海湾—潟湖变为半封闭型,再转化为封闭型,最后消亡,成为海岸沼泽和陆地。在一些侵蚀岸段出现海侵之处,潟湖的发展方向相反,即由封闭型变为海湾—潟湖。1973年谢帕德(F. P. Shepard)由海岸砂坝和潟湖所在的气候带,把潟湖划分为湿润地区的潟湖,其中以陆源碎屑沉积物为主;干旱地区的潟湖,其沉积物为蒸发盐类陆源碎屑;热带湿润地区的潟湖,其中主要为钙质沉积物。

20世纪70~80年代以来,随着海平面变化和海侵海退研究

的进展,海岸砂坝研究的重点转向沉积模式和地层类型。1983年汤姆(B. Thomp)由澳大利亚沿岸的实例,依海岸砂坝的地貌特征,发育过程和动态,区分出海侵型、海退型和稳定型。海侵型砂坝下伏潟湖沉积,沉积等时线向岸倾斜,记录了砂坝向岸的移动;海退型下伏海相,等时线向海倾斜,反映了砂坝的进积;稳定型砂坝下伏陆相层,海岸线相对稳定。中国研究者陆相根据中国沿岸的钻探资料,参考世界各地的实例,采用汤姆类型的名称,但剔除了地层中难以保存或辨认的地貌标志,强调砂坝的地层关系,从而分出海侵型、海退型、稳定型和局部海侵型4类。海侵型砂坝形成于海侵过程,上覆浅海相层,下伏层,具有海侵层序的特征;海退型形成于海退过程,下伏海相层,上覆陆相层,或暴露于地表,具有海退层序;稳定型的上覆和下伏层皆为陆相或砂坝顶部暴露于地表,是海侵转化为海退、岸线相对稳定的产物,在古代常常出现砂坝和潟湖沉积互相叠置,厚达数百米;局部海侵型砂坝下伏潟湖沉积,上覆层或为海相,或为陆相,相当于汤姆分类的海侵型。它是由于局部水动力的增强或来沙量相对减少而造成,可由海侵型、海退型或稳定型转化而来。这种分类适用于海岸砂坝的辨认和海岸砂坝和潟湖沉积矿产的勘探。

海岸砂坝和潟湖是多种海洋生物生长繁殖的良好环境,稀有珍贵动物的栖息之处,沿海船只的避风港,减少砂坝的侵蚀,防止潟湖水域的污染,维持潟湖的纳潮量,延缓砂坝和潟湖的衰老过程,是当前海岸砂坝和潟湖立法管理的重要任务,是各国海岸管理的重要目标。1986年联合国曾就海岸砂坝和潟湖提出了专门的报告和管理建议。

#### 参考文献

- 1 Schwartz M L. Baerrier Islands Dowdea, Hutchinson & Ross, Inc, 1973, P451
- 2 Зенкович В П. Тр. исан. СССР, 21. 1957, 3~39
- 3 Hoyt J H. Geol Soc Am. Bull, 1967, 78, 1125~1135
- 4 Леонтев О К. типы и образование лагун на современных морских берегах моряка, геоло-гия. Изд. АН СССР, 1960, 188~196
- 5 Shepard F P. Submarine Geology, 3-ed, Harper and Row Publishers, 1973, 174~187
- 6 Johnson D W. Shore processes and shoreline development, John Wiley and sons, Inc, New York, 1919
- 7 Thom B G. Marine Geology 1983, 56, 137~157
- 8 Li Congxian, Wang Ping. Sedimentary Geology, 1991, 72: 189~200

(同济大学李从先教授撰)

**热带海洋与全球大气计划** the plan of tropical ocean and global atmosphere 又称TOGA计划。TOGA是海洋学家和气象学家作为一支共同的队伍,在国际上第1次大规模合作的研究计划。共有18个国家参加,主要有美国、日本、中国、法国、澳大利亚、英国及新西兰等,还有秘鲁、厄瓜多尔、智利、巴西、印度和印度尼西亚等。TOGA计划的领导机构是国际TOGA办公室,其总部设在瑞士日内瓦。18个成员国的政府间TOGA组织,每年举行一次工作会议。TOGA受到世界气象组织(WMO)、国际科学联盟理事会(ICSU)、联合国教科文组织(UNESCO)政府间海洋委员会以及ICSU的海洋研究科学委员会等机构联合资助,仅美国联邦政府的3个机构每年约资助1800万美元(1989年数字)。这些经费的75%左右花费在为了获得确定热带太平洋海气状态所要求的观测上,或者说约3/4的经费花在建设一个较完整的观测系统上。因为在TOGA以前,由于热带海洋和大气的观测资料的缺乏,严重阻碍了耦合海洋大气系统的研究进展。

TOGA计划要处理两个问题,大气风应力变化和其他强迫作用对赤道海流和热力结构的影响;热带海洋动力学对全球大气环流的反馈,也就是耦合海洋大气相互作用问题。海洋主要通过

海表温度(SST)的热强迫改变大气环境,变化了的大气环境主要通过风应力强迫影响海洋环境发生变化,从而再改变原先的海表温度,反过来又再一次改变大气环流,如此循环不已。

具体说来 TOGA 计划有如下 3 个科学目标,为了描述热带海洋和全球大气作为一个时变系统,以及弄清该时变系统的可预报性机制;为了研究海气系统模拟的适用性;为了发展业务预报系统提供科学背景。

在耦合海洋大气相互作用过程中,最突出的是以 3 年为变化时间尺度的 ENSO 现象(参见该条目),所以 ENSO 就成为 TOGA 计划的中心研究内容。并且由 ENSO 条目可知 TOGA 计划对人类生存环境和经济影响的重要意义,TOGA 是为期 10 年的计划,自 1985 年起 1994 年止。这是依据 ENSO 的历史资料,任意一个 10 年时段内均可出现数次 ENSO 现象的事实,来论证确定该计划的时间长度为 10 年。这样在 TOGA 计划执行的 10 年时间内至少可包含一个和最好是几个 ENSO 事件。

1979 年由世界气象组织(WMO)开始规划和执行的世界气候研究计划(WCRP)的 3 项科学目标中,其中第 2 项就是要研究全球大气年际变率以及为期数年的热带海洋年际变率。而 TOGA 计划就是为 WCRP 第 2 项科学目标而制定的。这也是经过努力研究积累之后,证实了热带海洋与全球大气间存在着相互作用,人们才开始为期 10 年的 TOGA 计划。

从定性分析方面而言,来自太阳的能源驱动着大尺度大气环流,而后者确定了全球和区域性气候。由于太阳辐射在近赤道处几乎直射地球,所以占地球面积一半的热海洋就吸收了这种能量的绝大部分。海洋主要从热带暖水区以热量和水汽的形式,驱动着大气环流变化,由此同时大气通过风应力拖带海流改变着海洋动力和热力结构的特征。另一方面,大气运动的热力调整时间和对流层特征时间估计是以月为量级的。而海洋运动的特征时间是随纬度增加的,在热带地区基本亦是以月为量级的。所以,只有在热带地区海洋可以与特征时间以月为量级的大气运动发生强耦合相互作用。

TOGA 的目的是建立业务气候预报和与之相应的观测网。它要寻求预报未来一年以后或更长时间以后的热带海洋状况(海面高度、斜温层深度及海表面温度场分布),以及给出热带降水、急流位置和风暴路径等。TOGA 目的还包括耦合海气系统的基础研究,观测网的设计和建立,资料同化和数值模式的发展应用研究。

整个 TOGA 计划分两个阶段执行,自 1985~1989 年为前半部,1990~1994 年为后半部。1990 年 7 月 16~20 日在美国夏威夷召开了国际 TOGA 科学会议,阶段性地小结了 TOGA 前半部所取得的研究成果。主要有:大气和海洋的模拟,耦合模式的发展及其试验结果,ENSO 动力预报;ENSO 的诊断和统计预报,与历史记载相符的 ENSO 事件的经验研究;物理和动力过程研究,生物过程研究;大气、海洋及其间的界面的长期观测;资料处理。在 TOGA 头 5 年期间较创新的结果,是建立了一个较适宜的海洋观测系统用于观测热带太平洋大量热力结构和海流变化,采用了新一代、有威力的和经得起检验的海洋预报模式。此外,美国 TOGA 计划所支持的地面和高空观测站,正好填补了覆盖热带太平洋的世界天气监测网(WWW)的空缺。较显著的成功,就是 ENSO 循环中主要振荡的经验预报,用统计预报技术和耦合海气系统的简单动力模式作了季节的或更长的预报。用简单动力模式的基础研究结果亦得出一些新的看法。

TOGA 的后半部,还在执行中。所预想的海洋观测系统,在热带太平洋已有系统地重要扩充,以便取得更高质量的资料组,支持海洋模式的能力有明显的改进。同时要不断扩充资料同化研究。相类似的,大气观测系统也在不断扩充加密。所有这些观测系统不仅是 TOGA 研究的资料来源,亦是 TOGA 结束以后世界气候研究计划(WCRP)及其他重要组成部分的研究资料来源,以及未来业务数值天气预报的资料来源,就此而言 TOGA 计划的意义是深远的。

TOGA 后半部要计划研究各种过程,其中最重要的是要弄清楚局地机制。因为该机制使得大气和海洋在西太平洋的“暖池”区相互作用,亦就是在那里具有深积云对流的多种天气系统在时间尺度很宽的范围影响着海洋。为此,在 TOGA 计划后半部又提出了一个子计划,即耦合海洋大气响应试验(COARE)。COARE 主要是外场观测试验,它将提供一份西太平洋暖水区广泛而精密的科学资料组,以允许气候模拟者对耦合海气过程诸方面进行更真实的定量分析。试验重点将集中在 750 万平方公里上的海洋和大气间的能量交换。从纬度 10°N 伸展 10°S 以及 140°E 到 180°经度范围内,COARE 区域覆盖了暖水区的暖最部分。利用陆地基地天气站、锚泊浮标、天气气球和气象卫星,西太平洋暖水区海洋和大气的持续监测将始于 1992 年中到 1993 年中结束。其中 1992 年 11 月到 1993 年 2 月为 4 个月的加强观测期。除掉装备有雷达、其他大气探空和廓线装置的海岛基地地面观测站以外,还将利用海洋和大气的观测系统:船(12 条)、浮标、飞机(7 架)、气球和卫星。为了更精确地测量能量交换,这些装备系统都是先进的,具有精密刻度的遥测感受器。COARE 至少有 15 个国家 700 多位人员参加外场试验,中国也是其中的参加国。对于 COARE,如同海洋和大气研究中的任何大规模外场试验一样,科学工作的主要部分开始于资料收集阶段以后。尽管 COARE 的资料分析将要持续数年,但是对于了解气候研究能力和预报当前的气候变化,以及未来的气候变迁,应该会迅速得到改进。

TOGA 领导组确信到 1994 年该计划结束时,其主要科学目标将会被完成。对热带海洋和全球大气组成的耦合系统可预报性将会得到充分地了解,并由此可对预报技术水平进行正确评价,这种预报技术原则上可达到月到年的气候预报。耦合系统的可预报性的主要指标,正在鼓舞和保证观测和资料处理的设计和试验,以支持经验气候预报的继续努力。因此,在 TOGA 结束后,开始设计一个业务系统并继续维持存在,已是日程上的事了。为了解决气候变化的复杂情况,TOGA 亦可作为未来规划其他计划的典范。

#### 参考文献

- 1 National Research Council, TOGA (a Review of progress and Future Opportunities), National Academy Press, VSA, 1990
- 2 John Houghton. 全球气候. 金莹译. 北京:气象出版社, 1986  
(南京大学博士生导师余志豪教授撰)

**厄尔尼诺与南方涛动** El Niño and southern oscillation, ENSO. 地球上的大气和海洋是相互耦合的地球流体。地球流体在不时地运动变化着,在热带地区它存在着时间尺度为 3 年量级的振荡变率。由于振荡的非常不规则,热带地区地球流体中的有关变率谱可具有从 2a 到 10a 那么宽的谱峰。有时亦称此种热带地球流体的变率为低频振荡,它基本构成了地球上气候的季节和年际变化,与人类的生存环境密切相关。

热带地球流体的这种低频振荡,反映在海洋中就是厄尔尼诺现象。在南美洲的秘鲁和厄瓜多尔沿海(或赤道东太平洋),有的年份在圣诞节前后会出现表层海水增暖现象,或者表层海水温度(SST)出现持续异常正距平,当地人称此种现象为厄尔尼诺,这是西班牙语“圣婴”的意思。厄尔尼诺这种海洋异常现象每隔 3~5a 出现 1 次,可持续 1a 左右时间。厄尔尼诺最早见于科学文字记载的是秘鲁格郎查(Luis Garranya, 1891)从海流角度指出了这个现象。直到 20 世纪 60 年代,海洋学家才认识到在厄尔尼诺期间秘鲁沿海的异常暖表层水可离岸伸展数千公里,并且它仅仅是整个热带太平洋表层异常状况的一个方面。

跟海洋学家发现厄尔尼诺现象相独立的,气象学家在大气中也发现了热带地球流体低频振荡的反映,这就是所谓的南方涛动。接近 19 世纪末,黑特勃郎松(Hidebrandsson, 1897)注意到澳大利亚悉尼的大气压力起伏是与阿根廷布宜诺斯艾利斯反位相

的。数年后罗克尔(Lockyer, 1902)父子确认了此现象,并估计大概有 3.8a 的振荡周期,是全球范围的现象。这表明横越太平洋大气中的海平面气压具有此起彼伏的跷跷板现象。沃克(Gilbert Walker, 1923, 1924, 1928)称这种起伏为南方涛动。亦是在 20 世纪 60 年代以前,人们并未发现南方涛动与热带太平洋海温变化(即厄尔尼诺现象)之间的关系。

海洋学家和气象学家按照他们各自的研究,发现热带地球流体低频振荡在海洋中的反映(即厄尔尼诺现象)和在大气中的反映(即南方涛动)之后,直到 60 年代中皮雅克尼斯(J. Bjerknes, 1966, 1969)创新地揭示出厄尔尼诺与南方涛动之间存在的内在关系。于是人们愈益认识到,这两类分别发生在大气和海洋中的异常现象,实际上是热带大尺度海洋和大气相互作用的结果,费兰德尔(S. Philander, 1983)统称这两类现象为 ENSO (El Niño and Southern Oscillation)。

地球上海洋和大气中这两类异常现象,即 ENSO 的出现,将会严重地影响地球气候和生态环境。通常状况下,ENSO 事件常伴随发生澳洲、印度和非洲的干旱,南美的洪水,美国冬季的强风暴和东亚的一系列气候异常。从历史发展来说,正是 1877 年印度大灾害的干旱和严重饥荒以及 1899 年季风中断现象,促使沃克去研究大气中的南方涛动问题,仅仅是他没意识到 1877 和 1899 年亦是海洋中出现厄尔尼诺的年份。ENSO 对人类构成一系列的影响,其中包括生命的丧失,谷物的欠收,渔业资料的枯竭等。从 20 世纪 70 年代以来,ENSO 对人类生存环境的影响更为严重,所以引起了联合国有关组织及有关国家的农业、能源、水利、渔业、海洋和气象等部门的关切。以 1982~1983 年的 ENSO 为例而言,它是 20 世纪最严重的一次 ENSO 事件。1983 年 8 月 2 日纽约时报和 1983 年 8 月 17 日洛杉矶时报刊登了 1982~1983 年 ENSO 对世界范围经济影响的详细估计。1982~1983 年 ENSO 期间,全球估计丧生 2 000 人,财产损失 8 万亿美元。受 ENSO 灾害最重的国家可能是秘鲁。在 1972 年的 ENSO 爆发前,秘鲁供应鱼肉占世界的 38%,这是家畜的动物饲料。仅仅在两年中它的捕获量从  $10.3 \times 10^6$  吨锐减到  $1.8 \times 10^6$  吨。没有鱼作为食物造成大量海鸟死亡。在美国作为鱼肉代用品的黄豆价格超过了 1972 年的 3 倍。饲料价格的高涨,反过来又促使鸡的零售价格增加。所以,ENSO 对人类经济生活的影响由此可见一斑。

ENSO 现象可用众多的科学指标来定量确定它。例如,常采用纬度  $0^\circ \sim 10^\circ S$ , 经度  $180^\circ \sim 90^\circ W$  区域的平均海水水温的持续异常来表征厄尔尼诺现象,采用塔希提(Tahiti,  $17^\circ 53' S, 145^\circ 5' W$ )和达尔文(Darwin,  $12^\circ 20' S, 130^\circ 59' E$ )之间的海平面气压差来定义南方涛动,并记作 SOI 所以,ENSO 现象可用正的海温距平加上负的 SOI 来显示。从早先的海洋学观点来看,厄尔尼诺是由热带太平洋上海面风变化所引起的。但是,又是什么原因导致海面风场的年际振荡呢?依先前气象学家的研究来看,与南方涛动相联系的海面风场的年际变化又是跟热带海面温度变化相关。其实,热带太平洋的海温年际变化引起了南方涛动,海面温度变化又是由与南方涛动相联系的海面风振荡所引起的,这是一种互为因果的海洋和大气相互作用过程。所以说 ENSO 是海洋大气相互作用后的一种不规则低频振荡现象。

有关 ENSO 形成的原因,迄今尚无一致的结论。联合国气象组织(WMO)正在大量集中人力物力执行 TOGA 热带海洋和全球大气计划,即从 1985~1994 年间重点研究 ENSO 的形成原因。

以热带太平洋海温变化方式的不同,特塞尔和华莱士(Deser and Wallace, 1987, 1990)将 ENSO 现象分成两大类。一类是海温正距平最先从东太平洋南美沿岸出现,然后向西延伸扩展到中、西太平洋整个海盆区域。历史上大多数 ENSO 属于这一类。雷松孟松(Rasmusson, 1982)等将这一类 ENSO 特征进行了合成分析。另一类,以 1982~1983 年的强 ENSO 为例,1986~1987 年和 1991~1992 年等等,海温正距平首先出现在中、西太平洋,然后向东传播扩展到整个太平洋区。

20 世纪 80 年代初期以前,人们试图探索和解释 ENSO 现象的成因。1969 年皮雅克尼斯(J. Bjerknes)认为由于东太平洋赤道信风减弱,引起厄尔尼诺现象。1975 年怀特基(K. Wyrtki)指出,前期西太平洋赤道东风带的持续增加,造成太平洋洋面西高东低倾斜而产生向东的返流,遂形成东太平洋的厄尔尼诺。1976 年,赫尔伯特(H. Hurlburt)提出开尔文(Kelvin)波和罗斯贝(Rossby)波对典型的厄尔尼诺期间东部和热带太平洋区域的海水交换具有重要意义。1981 年陈烈庭认为东南和东北太平洋两个副热带高压的减弱可分别引起东南和东北信风的减弱,导致赤道洋流和赤道东部冷水上翻减弱,从而使赤道东太平洋海温升高。

80 年代初期以后,对 ENSO 成因的研究逐渐构成了 ENSO 动力学。它主要探讨 ENSO 这种准周现象的物理机制,以及 ENSO 时空尺度选择和扰动的传播及发展等问题。(1)对 ENSO 循环准周期问题的研究,多数研究工作均认为 ENSO 循环是海-气耦合系统中的一种振荡。麦克夸瑞尔(McCreary, 1984)利用非线性的海气耦合简单模式做模拟实验,指出海洋中存在两种平衡态,一种是冷平衡态,一种是暖平衡态,海气系统的年循环阻碍其达到这两个平衡而形成年际振荡,安德生(D. Anderson, 1985)利用简单模式模拟得到一种常规振荡,斯柯夫(P. Schopf, 1988)等将非线性海气耦合模式进行积分得到了 3~5 年时间尺度的 ENSO 振荡,并认为这是非线性系统中的自维持振荡。寿拜克(S. Zebiak, 1987)等强调耦合系统动力学上是线性的,热力学是非线性的,成功地模拟出 3~5a 的准周期振荡,而且可提前 1~2a 将 ENSO 报出来。由于所用耦合模式无外强迫作用,ENSO 循环是海气耦合系统的本征模。(2)对于 ENSO 时空尺度选择问题。斯柯夫(1988)认为 ENSO 的长时间尺度发展演变的原因是海气耦合不稳定作用。寿拜克(1987)提出年循环对 ENSO 循环的重要性,而巴底斯蒂(D. Battisti, 1988)认为热带太平洋东西边界的反射作用,对 ENSO 循环的影响较大。(3)海气耦合系统线性波动特征研究。赫尔斯德(A. Hirst, 1986),余志豪和杨(J. Young, 1989, 1990)等研究指出,在 ENSO 循环中开尔文波模和罗斯贝波模起了重要作用。

TOGA 计划展示了 ENSO 研究未来的热点问题。首先进行大规模外场试验,取得大量前所未有的海气耦合系统的资料后进行观测分析研究,最终期望建立季节和年际气候变化的业务预报模式,以及与之相应的观测系统和资料处理系统。

#### 参考文献

- 1 Wyrki K. Abstract of International TOGA Scientific Conference, Hawaii USA, 1990, 7, 16~20
- 2 张向东. ENSO 动力学中若干问题研究. 南京大学大气科学系博士论文, 1990, 7, 16~20

(南京大学博士生导师余志豪教授撰)

**化学海洋学的新领域** new areas of chemical oceanography 全球变化的研究促进了化学海洋学的发展,使化学海洋学与其他学科的联系更加密切,由此产生了化学海洋学一系列新理论、新概念、新方法和新领域。

**初级生产力与新生产** 初级生产力是单位时间内浮游生物生产的有机碳的量,其大小决定海洋生物贮量、分布。初级生产力原是化学海洋学一普通概念,IGBP 将其列为最重要的化学海洋学参数之一加以研究,其测定采用  $^{14}C$  法。中国用  $^{14}C$  测得的初级生产力的资料还很少,在大型的海洋普查中均未列入,仅有个别海区的零散资料。

**NP** 是与初级生产力相关联的一化学海洋学新概念,它是由 Dugdale 和 Goering (1967)首次提出用于定量表达初级生产力与有机物沉降的关系,最初 NP 被表达为自养生产来自于外源  $NO_3^-$  转化的部分,后来研究包括各种形式的氮。在长期连续的稳态条件下, NP 就成为初级生产力的有效输出量(以 C 或 N 表示),即等于真光层中有机碳向深水海底输出的那部分,其输出量

被外源的氮所平衡,  $NP$  正比于自养碳的生产。定义  $f = NP/\text{总初级生产}$  ( $f$  为百分数),  $NP$  和  $f$  比值是研究海洋碳循环尤其是研究海洋—大气界面  $\text{CO}_2$  的净通量非常重要的工具, 可提供重要信息。 $NP$  通常用  $^{15}\text{N}$  标记质谱法测定。

80年代沉积物捕捉器的发展, 直接测得  $C, N$  通量, 继而可直接计算出  $NP$ , 所以沉积物捕捉器成为测定  $NP$  更为时新的工具, 可以长时间、大范围取得系列资料, 这就能与卫星资料相对比, 从而可以在全球范围内了解  $NP$  与总初级生产的关系。

**溶解有机碳(DOC)** 溶解有机碳在海洋碳循环中起着关键性的作用。海洋真光层内无机碳向生物有机碳的转移过程, 首先是浮游植物利用海水中无机碳和生源要素, 浮游动物摄食浮游植物, 破碎的浮游植物一些细胞, 加上浮游动物的排泄, 又将碳释放到水中。如磷虾在摄食中将 16%~21% 的 DOC 排放到水中, 浮游植物在 2h 内可立即利用水中 DOC 的 10%~30%, 死的生物颗粒在上层水中释放出的 DOC 占总 DOC 的 40%~60%。当然 DOC 的释放还取决于生产者即生物种群的生长情况, 涉及初级生产中的再生产和新生产。在真光层内, 光合作用产生的 DOC 和一小部分其他来源的 DOC 又可被水中自由生活的异养微生物利用转化为 DOC (微生物细胞), 构成二次生产者。由此可见, DOC 的动力学在上层水(真光层)中食物链及碳循环中占据重要地位。

海水中溶解有机碳组成十分复杂, 包括溶解的糖类(200~600 $\mu\text{g/L}$ ), 含氮的有机物(50~420 $\mu\text{g/L}$ ), 类脂化合物(5 $\mu\text{g/L}$ 左右), 维生素类及海水中腐植质。DOC 的测定方法各异, 有干法氧化和湿法氧化, 检测有电导、库仑、火焰离子化、光度法多种。在海水中 DOC 浓度一般为 0.5~2.5 $\text{mg/L}$ , 大多数为 1 $\text{mg/L}$  左右。在 JGOFS 计划中, DOC 是一关键参数, 其测定准确度要求 1~2 $\mu\text{g/L}$ , 所以建立标准的、不同实验室可互校的海水 DOC 分析方法成为迫切的研究课题。

对 DOC 的研究重点是建立 DOC 取样与分析测定方法, 以达到不同实验室同程序互校; 研究 DOC 不同粒度化学同位素组成、生物活性和各粒度的年代; 在河—海、气—海、海水—海底、海水—生物体界面各种生态环境中测定溶解、胶体 DOC 的分子量等。海水中溶解有机碳和海洋生物地球化学循环过程息息相关, 对研究初级生产和新生产有重要作用。中国海水中 DOC 的资料还很少, 仅在某个别海区和长江口、大亚湾等进行过调查, 应全面开展中国海溶解有机碳的研究。

**化学示踪物质(CT)** 化学示踪技术尤其是同位素示踪技术在化学、生物、地质科学上早有应用, 应用于研究物理海洋大洋环流、水团运动是从 80 年代初才开始。研究海洋环流结构的化学示踪剂有两类, 一类是自然界不存在, 只是人为合成才进入全球循环的, 其典型代表是氟利昂, 如  $F-11(\text{CCl}_3\text{F})$ ,  $F-12(\text{CCl}_2\text{F}_2)$ , 这一类物质是 20 世纪 50 年代以后作为推动剂使用进入全球循环, 一直到 70 年代中期氟利昂呈指数形式增加, 70 年代中期后海水中浓度呈直线增加, 为 0~10 $\text{pmol/L}$ 。另一类示踪物质则是某些核素的放射性同位素, 应用较多的有  $\text{H}$ ,  $\text{He}$ , 另外还有  $^{14}\text{C}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  等。一般  $^3\text{H}$  浓度以 TR 形式报告,  $\text{TR} = [^3\text{H}]/[\text{H}]$ ,  $\text{TR} = 10^{-18}$  其测定准确度为 2.5% 或 0.05 $\text{TR}$ 。 $^3\text{He}$  是  $^3\text{H}$  的衰变产物, 以  $^3\text{He}/^4\text{He}$  形式检测(R); 在测定中有一大气标准, 则

$$\delta_3\text{He} = \left( \frac{R_{\text{样}} - R_{\text{大气}}}{R_{\text{大气}}} \right) \times 100$$

氚( $^3\text{H}$ )被水汽交换、河流输入及沉降以 HTO 形式进入海洋表层, 由于 60 年代中期世界各国核武器试验, 大气中  $^3\text{H}$  呈最大值。

$\text{He}$  同位素质谱灵敏度为  $\pm 0.2\%$ , 在表层海水中  $\delta_3\text{He}$  通常与大气溶解很接近平衡, 约为  $-2\%$ , 其在水中范围为  $-10 \sim 100$ 。 $^3\text{H}$  在海水中范围为  $-1 \sim 100\text{TR}$ 。

在 WOCE 计划中, 氟利昂、 $^3\text{H}$ 、 $^3\text{He}$  等是用来研究海洋环流最有力的工具, 近几年在物理海洋学中得到了广泛的应用, 其最

大特点是可直接反映温盐水文参数不能得到的海水运动混合速度的信息, 为研究水团结构、大洋环流提供了新的研究手段。最近 Heinze 等(1990)对欧洲极地海区海水交换用示踪剂进行了研究, 建立了模式。

用化学示踪剂不仅可以比较精确地估算海水交换时间, 而且还可得出水体运动方向, 而这些海区海水温盐在年代上几乎看不出差别, 显然从温盐得不出海水交换的结论, 可以看出化学示踪研究物理海洋学的巨大优越性。化学示踪研究在中国物理海洋学中还是空白, 应大力开创这方面研究, 使化学海洋学这一新技术大大促进物理海洋学的发展。

化学海洋学今后的发展趋势是: (1) 和生物、物理、地质、大气科学相互渗透, 如全球变化研究中新生产、溶解有机碳等一系列新问题是和生物科学息息相关的重大问题, 而化学示踪成为物理海洋学重要手段, 海洋中碳及生源要素的循环是影响大气气候、大气化学的重要因子, 海洋生物地球化学是其综合产物。(2) 化学海洋学显著地分化, 表现在化学海洋学的基础理论研究跟踪国际前沿—全球变化研究和某些专题的系统综合研究, 其应用表现在传统的化学海洋学转入了海洋环境的调查评价, 直接为石油、矿产、生物资源、海洋工程等开发服务, 以及海水及海水养殖产品的综合利用和开发。(3) 随着研究的深入, 化学海洋学新分支逐渐形成, 如全球变化化学海洋学、海洋气候化学、海洋化学资源学、海洋生物地球化学、海洋养殖化学、海洋药物化学、海洋界面化学等。一方面化学海洋学的分支逐渐形成, 极大丰富了化学海洋学的研究内容, 另一方面, 对一具体对象又需要化学海洋学各个分支与其他学科的联合研究, 形成化学海洋学全新的研究局面。

#### 参考文献

- 1 Knauer G A, et al. Deep-Sea Res, 1990, 37(7): 1121~1134
- 2 Romankerich E A, Ljutsarev S V. Mar Chem, 1990, 30: 161~173
- 3 Kumar M D, et al. Mar Chem, 1990, 31: 199~316
- 4 Gauwet G. Mar Chem, 1991, 32: 269~283
- 5 Heize Ch, et al. Deep-Sea Res, 1990, 37(9): 1425~1453
- 6 Hedges J I. Mar Chem, 1992, 39: 67~93
- 7 IGBP Report Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone. Scienc Plan, IGBP-ICSU, stockholm, 1993, 25
- 8 Kiene R P. Mar Chem, 1992, 37: 29~52
- 9 Wangersky P J. Mar Chem, 1993, 41: 61~74
- 10 Sanniento J L, Sundquist E. Nature, 1992, 356: 589~593  
(中国科学院海洋研究所宋金明副研究员撰)

#### 海洋天然有机化学 marine natural organic chemistry

海洋天然产物主要指从海洋生物中分离得到的有机物质。其中包括萜类、甾醇、大环内酯、生物碱、环肽、聚醚类、聚丙酸酯类和含氮、含硫等各种类型的化合物。这些化合物的分离、提纯、化学与药理性质、应用光谱技术和化学转变确定其化学结构的现代方法以及化学合成和生物合成的研究, 构成了有机化学一个新的分支—海洋天然有机化学的主要内容。

海洋天然产物是目前天然有机化学中最活跃的研究领域之一。由于海洋中的生物资源非常丰富, 海洋中的生态环境与陆地显著不同, 因此海洋天然产物具有独特的化学结构和多种多样的生理活性。对这些物质的深入研究, 必将丰富天然产物化学的内容, 促进有机化学基础理论和合成方法的发展。同时, 对于寻找新型药物、防治重大疾病也具有重要意义。

海洋天然有机化学的发展大致可分为 3 个时期: 1960 年以前时期称为孕育期; 1960~1970 年为形成期; 1970 年至今为高速发展期。

与陆地天然产物化学一样, 海洋天然有机化学的发展也是从人们对海洋生物的认识和利用开始的。人们使用海洋生物作为

食物和药物有悠久的历史。如世界上最早的医药文献之一《神农本草经》就描述了海藻、文蛤和牡蛎等的医药用途。唐朝颁布的《唐本草》是世界上最早的一部国家药典,其中有不少海洋药物的内容。明朝李时珍的巨著《本草纲目》已记载了近百种海洋生物的药性功能和医药价值。本世纪30年代,国外出现了以海洋生物为基础的制剂,如从鱼肝油制维生素A、D,海藻胶和藻酸等。对海洋生物化学成分的研究可以追溯到19世纪末20世纪初,例如1909年日本的田原良纯首次分离到河豚毒素(Tetrodotoxin,简称TTX)的粗毒。海洋毒素是海洋天然产物中最早的研究对象之一。但是这一时期研究的重大成果并不多,因而称之为海洋天然有机化学的孕育时期。

60年代,海洋有机化学进入了发展阶段。1960年由美国纽约科学院主持的首次海洋生物的生物化学和药理学专题讨论会标志着这个发展的开端。这个时期,化学家越来越多地使用现代手段来研究海洋生物的化学成分,据美国的迈阿密大学海洋研究所统计,仅1967~1970年4年间就发表了论文和报告643篇。这个时期的主要研究对象是海洋毒素,TTX和石房蛤毒素(Saxitoxin,简称STX)是最早被人注意的海洋毒素。但直到1964年TTX结构测定成功之前,毒素研究进展不大。TTX结构的测定是海洋天然产物研究进展的里程碑。此后,一系列STX类、沙海葵毒素(Palytoxin,简称PTX)及短裸甲藻毒素(Brevetoxin,简称BTX)等相继发现并测定了结构。通过这些研究,逐步形成一门新兴的海洋天然有机化学。

1968~1970年间,韦恩海默(Weinheimer)等从加勒比海柳珊瑚(*Plexaura homomella*)中发现了前列腺素(Prostaglandin,简称PG)<sub>15R</sub>·PGA<sub>2</sub>及其衍生物,含量高达1.3%。这是一项具有重大意义的发现。PG具有强烈的生理活性和广谱的药理效应。但在自然界中存在极微,全合成也甚为困难,限制了对其深入研究。从柳珊瑚中发现PG,改变了这种被动局面,这一成果促进了PG的研究,也掀起了海洋有机化学发展的新高潮。海洋毒素在这个时期继续得到深入研究。凯西(Kishi)等于1972年完成了消旋TTX的合成。莫尔(Moore)和优姆拉(Uemura)各自用了10多年的时间,于1981年分别宣布PTX结构测定成功。PTX是除多肽和多糖外分子量最大、结构最复杂的天然有机物之一,毒性极为强烈,是非蛋白毒素中最毒的物质。它是一个复杂的聚醚化合物。这一工作是80年代海洋天然有机化学研究的重大成就。对PTX的研究非常活跃,包括它的性质、活性、用微生物生产和人工合成。日本化学家平田义正认为,PTX作为天然物的合成是一个顶峰,第一流的化学家正在进行其全合成方面的研究。萜类、甾体和其它类型的化合物的研究全面展开。1973年出版《海洋天然产物化学》专著的时候,所发现的倍半萜不超过40个,二萜只有4个,到1978年,从海藻中就发现了60多个倍半萜,而新的二萜有90多个。1988年苏镜媛等从软珊瑚(*Sarcophyton tortuosum* Tixier-Durivault)中分离并测定了1个结构非常独特的四萜化合物—扭曲肉苧甲酯(Methyl Sartortuolate)和异扭曲肉苧甲酯(Methyl Isosartortuolate)。动物试验表明,前者具有明显的子宫收缩作用及抑瘤活性。100多年来,萜类化学发展很快,在萜类大家族中,倍半萜的碳架有100多种类型;单萜、二萜和三萜也各有几十种类型的碳架,唯独四萜却只有一种象胡萝卜素那样的链型碳架。上述四萜是由两个十四员环二萜构成的罕见双大环四萜,这一发现结束了四萜只有一种类型碳架的历史,对萜类化学的发展是一大贡献。海洋异常甾醇的研究进展更快。1972~1976年所发现的新甾醇是以前发现的总和的两倍以上,1983年从一种海绵中一次就分离到24种新甾醇。海洋环肽是海洋药物研究中一个值得重视的最新进展。1980~1983年发现了10多个这类化合物,主要来源于海绵和海兔,尤其是含噻唑环、吡嗪环的海洋环肽,结构特殊,与氨基酸、蛋白质和杂环化合物都有关系,与迄今使用的抗癌药物结构类型都不相同,而抗癌活性更为强烈,已构成一类完全新型的有前途的抗癌物质。对环肽进行系统研究,阐明其抗癌机制和构效关系,可望取得突破性成果。

此外,许多具有明显生理活性的海洋天然产物如大环内酯、生物碱、含氮化合物和聚丙烯酸酯类化合物等也不断被发现,它们对海洋天然有机化学的发展都有重要意义。海洋天然产物不但能提供新的特效药物,更重要的是为化学家提供结构模式,从而进行合成和结构改造,得到高效低毒的新药。由于从海洋生物中分离得到的天然产物的量很少,且不易做成单晶,无法用X-射线单晶衍射法准确测定结构。因此,全合成研究随着分离、结构测定和生理活性研究工作的完成而展开。例如从海绵分离到的抗癌成分改造造成阿糖胞苷成了治疗白血病的主要药物,后来又改造成环胞苷,疗效高且不受酶的脱氨基作用,是海洋天然产物合成研究中一个成功而有启发意义的例子。通过合成研究,也可以发现结构测定中的错误,进而加以修正。

海洋是天然有机化学的广阔天地,它占有地球上所有生物的四分之三,至今被研究的只是其中一小部分。可以预料,研究海洋生物中的次级代谢产物必将有更多重大发现和进展。今后20年内本领域的研究热点仍然是:(1)从海洋生物中分离有特异生理活性的物质,用现代物理、化学方法确定其结构,提供新的特效药物,特别是抗癌和心血管药物;(2)海洋毒素的研究;(3)以海洋活性物质为结构模式,进行构效关系、结构改造、生物合成和化学合成等方面的研究,以获得高效低毒的新药;(4)海洋天然有机物的生源合成;(5)海洋有机物和海洋生态的关系。

#### 参考文献

- 1 龙康候,巫忠德,海洋天然产物化学(第1卷),第1版,北京:海洋出版社,1984,1~298
- 2 苏镜媛,龙康候,彭唐生,等,中国科学,1988,(1):8~19
- 3 曾晓梅,有机化学,1989,9(5):402~413
- 4 郑其焯,曾晓梅,等,化学通报,1990,(9):9~18

(中山大学郑其焯博士撰)

**海底热液活动和热液硫化物** submarine hydrothermal activity and hydrothermal sulfide 人类认识自然是无穷的。就海底资源而言,大洋锰结核的研究不过百余年,海底热液矿产资源的探索虽然尚可追溯到几十年前,但真正的海底热液矿产资源的调查也不过是最近10余年的事情。

1944年瑞典科学考察船“信天翁”号首先在红海发现了盐度和温度都偏高的海水。1965年美国“发现者”号在红海发现了高热卤水,次年又在红海的Atlantic I海渊发现了热液金属软泥(Miller等,1968),从此揭开了人类研究现代海底热液矿产资源的新篇章。

1972年美国学者Rona确认大西洋中脊26°N处有热液活动,1976年伍兹霍尔和斯克里普斯海洋研究所在东太平洋和加拉帕戈斯断裂带发现海底热液溢口,1978年美法联合用法国Cyana号深潜器,在东太平洋海隆21°N首次发现海底热液硫化物,1979年美国“阿尔文”号再度下潜,发现了“黑烟囱”。自此之后,美、法、前联邦德国、日、加、澳大利亚和前苏联等国科学家相继加入了地学界这场最新发现的大角逐。至此,调查研究的范围已扩大至全球大洋构造活动带,并陆续在大西洋中脊、汤加—斐济海盆中的Lau海盆、印度洋中脊、加利福尼亚湾扩张中心、胡安—德富卡断裂带,以及夏威夷构造带、马里亚纳海槽和冲绳海槽等百余处发现了海底热液活动和热液硫化物。可以说,海底热液硫化物的发现是集地球物理、海底构造、岩石学、海洋沉积学、地球化学及矿床学诸学科的世人最瞩目的成果之一。

随着板块学说的日臻完善和古海洋学资料的积累,各国科学家经过十余载的不懈努力,到80年代初,已对海底热液活动发生的构造部位有了比较清晰的认识。可以说,迄今为止人们所发现的百余处海底热液硫化物,皆是由海底热液溶解的高温热水溶液所形成的矿物学堆积。海底热液溶解作用则是火山热源驱使热水在海底扩张中心对流循环而产生。海底扩张中心由大洋海脊—断裂带系统组成,它们环绕地球5万多公里,并通过所有主要的海盆。



在板块构造体系中,扩张中心是一种离散板块边界。它们以每年数厘米的半扩张速率连续形成新的海底,这片新海底成了深层热液通道和产生硫化物的温床。在红海,扩张中心呈一条断裂带出现;在大西洋和印度洋呈洋中脊形式;在太平洋,以环太平洋地震带,间有火山、岛弧或转换断层构成;在东太平洋呈东太平洋海隆、加拉帕戈斯断裂带等构造出现。不难设想,随着调查研究的日益深入和新技术的应用,新的海底溢口和海底热液硫化物将会有更多的发现,老溢口将随着地球热点在板块俯冲消亡带中的相对位移而逐渐消亡,新的溢口也将新的热点和扩张脊或断裂带中出现,带来了新的热液硫化物。这种情况将鼓励着人们不断地进行探索和不断地收到效益。

从观测到的众多的海底热液溢口的温度变化可以将其分为3种类型。第1种为高温型,即黑烟囱类型溢口,是迄今所观测到的海底热液温度最高、活度最大的溢口。由于喷出口水中含有硫化物沉淀而变为黑色烟雾状而得名于“黑烟囱”,其溢口温度至少350℃以上,但流出速度较小,一般为1~5cm/s。如东太平洋海隆20°50'~20°57'N,109°01'~109°07'W范围内,水深2620~2700m处,喷口水温度可达380℃±30℃;加拉帕戈斯断裂带0°45'N,85°50'W处,水深在2600m的热液喷口温度可达350~400℃。第2种为中温类型,即白烟囱类溢口。流体中因含白色沉淀物而变得浑浊,其流速为每秒十几厘米,自各种形态的海底烟囱流出的温度低者100℃,最高者不超过300℃。伊豆一小笠原断裂带,26°42'N,141°05'E 900m水深处,热液溢口温度293℃;下加利福尼亚北部 Agua Blanca 断裂,水深25~30m处,热液水温102℃。在白烟囱溢口附近的水层中,可形成CH<sub>4</sub>或<sup>3</sup>He的羽状流。第3种类型为低温型溢口,温度一般为10~20℃,具有清澈透明到稍有混浊的热液流体,它们以每秒数厘米的慢速度从溢口缓缓流出。如东太平洋海隆21°47'N 东北部热泉,温度5~20℃,加拉帕戈斯断裂带0°47'N,86°05'~15'W,水深200~250m的轴部溢口,水温7~12℃。

关于热液烟囱物的形成机制,因涉及内外营力和多种作用因素,目前尚处于不成熟的模式阶段。但是,近10年来各国学者在对红海热液多金属软泥的产状研究、对塞浦路斯块状硫化物矿床成因机制与东太平洋海隆热液硫化物的对比研究,以及对加拉帕戈斯断裂带硫化物的研究后,至今已提出了多种模式。

一般认为,海底热液硫化物是热液水溶离海底玄武岩、在热液溢口附近产生的矿物学沉淀。这期间,重要的是海水沿扩张裂隙下渗,并受到深部热力加热,形成了酸性的、具有强溶蚀能力的高温热水,在对流循环的上涌过程中溶离出玄武岩中大量的金属元素,并以热液或蒸汽状态喷入海水中。在高温体系内,岩石中的硫酸盐被还原成H<sub>2</sub>S或HS<sup>-</sup>,促使Cu、Zn等硫化物在热液通道及喷口内迅速沉淀堆积,形成了块状热液多金属硫化物。

如此说来,块状硫化物是在高温、酸性的原始热液溶液直接从玄武岩裂隙溢口喷入正常海水沉淀堆积形成的。此类热液硫化物是已发现的最多的类型,它以快速扩张的东太平洋海隆轴部热液区最为典型。另外在胡安一德富卡(Juan de Fuca)海脊、加利福尼亚湾的多金属硫化物及土丘沉淀物、巴布亚新几内亚热液烟囱物(Both,1986),以及东印度洋海脊喷出物,都是此类块状热液硫化物堆积的实例。这类烟囱也是含Cu、Zn、Fe、Ag等金属和贵金属最富的热液产物,有的已大大超过工业品位而构成可能的多金属块状硫化物矿床,因此是最具矿产意义和工业价值的海底热液烟囱种类。

热液烟囱物的矿物成分随海区的构造部位和烟囱物的具体部位的不同而有明显的差别。黑烟囱的温度高(350℃以上),沉淀物大都为结晶的Cu-Fe硫化物,主要矿物有黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、白铁矿、磁黄铁矿、纤锌矿和斑铜矿等;白烟囱发生的温度稍低,沉淀物大都以蛋白石、石膏和重晶石为主;与低温热液溢口有关的沉淀物,一般可见热液成因的粘土矿物绿脱石和蒙脱石等。

另外,在黑烟囱的不同部位,沉淀的矿物也有差异。热液溢

口周围先析出的矿物是硬石膏,它们皆沉淀于烟囱通道的外壁,在海水的降温作用影响下,同时也沉淀了磁黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿微粒。烟囱通道的内壁,由于热液温度高、呈酸性环境,不断沉淀Cu-Fe硫化物。

当今世界关于海底热液硫化物的研究,已向人们展示了它在大洋底矿产资源家族中的潜在地位,它是人类对于现代海洋演化和成岩成矿作用的最新认识。

大洋盆地已不再是单纯的被动接受陆上侵蚀作用的盆地,它包含着许多活跃的作用过程和平衡体系。海底扩张中心所发生的热液喷出作用,因其有可能形成具有重要经济价值的新型海底矿产资源,将成为今后海洋科学中人们关注的焦点。1988年美国国家海洋和大气局特此制定了研究全球性海底热液变化的战略规划,其主要理论依据是海底热液喷出物在控制全球大洋中化学元素的收支平衡起着的主导作用。由此可见,人们所面临的既是一个涉及全球观的成岩成矿作用的重大理论问题,又是人类将由此获得新型矿产资源的现实问题。

#### 参考文献

- 1 Miller A R, et al. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 1966, 30: 341~359
- 2 CYAMEX Scientific Team. *Nature*, 1979, 277: 523~528
- 3 Lonsdale P. *EOS Trans Amer Geophys Union*, 1980, 61: 995
- 4 Rise Project Group. *Science*, 1980, 207: 1421~1433
- 5 Malahoff A. *Marine Technology Society Journal*, 1982, 16: 39~45
- 6 Scott S D. *Proceedings OCEANS*, 83, San Francisco. 1983. 818~824
- 7 Both R, et al. *EOS*, 1986, 27: 489
- 8 Urabe T, et al. *Marine Geology*, 1987, 74: 295~299
- 9 吴世迎, 陈穗田, 张德玉, 等. *中国科学 B 辑*. 1991, (2): 198~204
- 10 吴世迎主编. *马里亚纳海槽海底热液烟囱和菲律宾海沉积物*. 北京: 海洋出版社, 1991. 30~66

(国家海洋局第一海洋研究所吴世迎研究员撰;李从先审)

#### 中国南海珊瑚化学 south China sea corals chemistry

中国南海地处热带,海域辽阔,海洋资源极其丰富,是世界上珊瑚集中分布的海域之一。1978年以来,中山大学化学系天然有机化学研究室对南海软珊瑚和柳珊瑚的化学成分进行了比较系统的研究,发现其代谢产物中存在许多结构新颖并具有强烈生理活性的天然产物,研究这些化合物对于海洋天然有机化学的发展和海洋药物的开发利用都具有重要的现实意义。南海珊瑚代谢产物中的化学成分主要包括萜类、甾醇类、含氮化合物、长链脂肪酸及其酯类和长链脂肪醇及其醚类等。这些化合物的分离、提纯、性质、结构测定和全合成研究构成了中国南海珊瑚化学的主要内容。

中国历史悠久,祖国医学关于海洋药物的记载和经验十分丰富。李时珍的《本草纲目》有以珊瑚炼制“金浆”、“玉髓”,久服长生不老的记载,这说明古代医学家已对珊瑚的药用价值作过尝试。直到20世纪60年代,人们才从柳珊瑚的代谢产物中发现结构独特而具有明显生理活性的天然产物;70年代各国先后开展了软珊瑚化学成分的研究,发现了许多有意义的物质,这些天然产物多数具有抗菌、抗癌和心血管病等生理活性。因此,珊瑚化学的研究一直是海洋天然有机化学中活跃的领域。

珊瑚代谢产物中含量较多的化学成分是萜类化合物。苏镜娉等从软珊瑚(*Sarcophyton tortuosum* Tixier-Durivault)中分离到的扭曲肉芝甲酯和异扭曲肉芝甲酯是最有意义的成果。这两个化合物具有新颖独特的四萜碳架,文献报道的所有四萜类都离不开胡萝卜素类型的线型链状碳架,这一发现结束了四萜只有一种碳架的历史。这种四萜碳架显然与软珊瑚中普遍存在的西松烷

类碳架有关,推测它们是由二个西松烷类二萜在生物体内经类似狄尔斯-阿尔德(Diels-Alder)反应而形成的。药理试验表明,扭曲肉苕甲酯具有强烈地使子宫收缩的作用,其效价相当于目前临床应用的缩宫素的一半;同时也显示出显著的抗癌活性。在同一种珊瑚中,常常可分离到与生源密切相关的对萜类化合物。龙康侯、苏镜媛等从豆荚软珊瑚(*Lobophytum sp.*)分出中国豆荚软珊瑚内酯A和B。B具有一个不常见的十三员环二萜内酯碳架,是一个变形的二萜,是由A在珊瑚生物体中环丙烷环转变为酮基得来的。从第氏肉苕软珊瑚(*Sarcophyton decaryi*)亦分离出具有生源关系的肉苕软珊瑚素和肉苕软珊瑚素酮。这些都是典型的西松烷型二萜内酯,具有明显的细胞毒性和抗肿瘤活性,存在于珊瑚中的抗肿瘤活性物质主要为该类化合物。郑其煌等已完成肉苕软珊瑚素的全合成,并正在进行这类化合物的化学合成和生源合成。从柳珊瑚(*Gorgonian suberogorgia sp.*)中分离到柳珊瑚酸,是一种新型的倍半萜碳架。在很低的浓度下便有抑制神经与肌肉的传导作用。龙康侯等还合成了一系列柳珊瑚酸的衍生物并研究其构效关系。从珊瑚中先后发现和测定了10多个甾醇类化合物的结构,它们是具有不同支链的甾醇和多羟基甾醇,均有不同程度的细胞毒性和抗菌活性。这些发现丰富了甾醇类化合物的内容。含氮化合物是珊瑚代谢产物中的重要化学成分。龙康侯等从短指多型软珊瑚(*Sinularia polydactyla*)中分离到一种新的喹啉酮衍生物,结构虽然简单,但有显著的生理活性。药理试验表明,它能明显提高老鼠脑和心血管系统的血液循环,是一种有开发前景的心血管药物。目前正在研究其合成方法和构效关系。苏镜媛等从柳珊瑚(*Echinogorgia pseudosappo*)中分离到咖啡因,这是首次在海洋动物中发现咖啡因;从多种软珊瑚中首次发现了神经酰胺。酪甙和鲨肝醇甙是珊瑚化学成分中另一类型的化合物。从软珊瑚(*Sinularia lachmodes Kolonko*)分离出6-脱氧- $\beta$ -D-六碳吡喃糖鲨肝醇甙;从软珊瑚(*Lemnalia bournei*)中发现波伦磷花甙,一种二萜甙类化合物。南海珊瑚中普遍存在着长链脂肪酸,长链脂肪酸及其所形成的酯类、醚类。已从多种软珊瑚中分离到鲨肝醇,十六酸- $\alpha$ 鲨肝醇酯,十六酸十八醇酯,十八酸- $\alpha$ 鲨肝醇酯,十八酸十八醇酯,十六酸十六醇酯,直链脂肪酸和醇类如十八酸和内消旋赤藓醇等。另外,从柳珊瑚(*Echinogorgia flora Nutting*)也分离到了鲨肝醇。值得注意的是鲨肝醇具有升高白血球的药理作用,临床上普遍使用。纵观珊瑚化学成分的研究,采取的主要技术路线是,从南海采集不同种属的软珊瑚和柳珊瑚,晒干后切碎并用有机溶剂浸取,浓缩,经硅胶柱层析分离,提纯得结晶化合物;再用化学转变和现代波谱分析技术测定结构,进一步培养成单晶,用X-射线单晶衍射法确定结构;研究化合物的化学和药理性质,以之作为结构模式进行化学合成、生物合成和结构改造;研究构效关系,寻找高效低毒的新药应用于临床。存在的主要难题是,从珊瑚中分离得到的天然产物往往量很少,且不易做成单晶,有时难以准确确定出结构;另外,全合成研究的难度也较大。

从南海珊瑚的代谢产物中已发现许多结构奇特生理活性显著天然产物,充分展示了中国南海珊瑚化学广阔的研究和应用前景。今后10~20年,中国南海珊瑚化学仍然是非常活跃的研究领域。研究热点仍然是:(1)从珊瑚生物中寻找有特异生理活性的物质,提取新的特效药物,特别是抗癌和心血管药物;(2)以珊瑚活性物质为结构模式,进行构效关系、结构改造、生物合成和化学合成的研究,以获得高效低毒的新药;(3)珊瑚中具有生源关系化合物的生源合成。

#### 参考文献

- 1 苏镜媛,龙康侯,彭益生,等.中国科学,1988,(1):8~19
- 2 傅建龙,龙康侯.中国海洋药物,1991,(2):33~39
- 3 郑其煌,等.肉苕软珊瑚素的全合成,科学通报,1991,36(11):878
- 4 郑其煌,等.肉苕软珊瑚素全合成的研究(I-V),中山大学学报(自然科学版),1990~1992

5 龙康侯.龙康侯选集,1992

(中山大学郑其煌博士撰)

### 海洋环境中Pu的地球化学 geochemistry of plutonium in marine environment

1941年Seaborg及其同事就分离出 $^{238}\text{Pu}$ 和 $^{239}\text{Pu}$ 。由于Pu能在热中子作用下进行核裂变反应,所以很快在军事上得到了广泛应用。与此同时,也给海洋环境造成了一定程度的污染。近年来对Pu的研究已经得到了世界各国科学家的重视。对海洋环境中Pu的来源、含量、分布、存在状态、生物化学、地球化学过程、同位素和沉积物中Pu的分布变化特性等问题进行了大量工作。

核能事业的发展对Pu的需求量逐年增加。Seaborg曾估计,以美国为例,1980年前使用 $2 \times 10^4 \text{kg}^{239}\text{Pu}$ ,而1980~1990年增为 $6 \times 10^4 \text{kg}$ ,1990~2000年增为 $8 \times 10^4 \text{kg}$ ,20多年增加了4倍,其增长速度是可观的。世界上其它核能发达的国家也大体以相似的速度迅速增长着,16.28g的 $^{239}\text{Pu}$ 产生 $3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ 的放射性, $8 \times 10^4 \text{kg}$ 将产生 $18.13 \times 10^{16} \text{Bq}$ 的放射性。在Pu的生产和应用过程中必有大量的Pu进入海洋环境中,并在那里逐步积累起来,如英国温茨基核燃料再处理厂每年都将大量的Pu废液直接排入爱尔兰海中,因此,引起了公众的关注和科学家的重视。

Pu有很长的半衰期, $^{239}\text{Pu}$ 为24400a, $^{238}\text{Pu}$ 为88a, $^{240}\text{Pu}$ 为6537a, $^{241}\text{Pu}$ 为14.8a。除 $^{241}\text{Pu}$ 为 $\beta$ 衰变外,其余为 $\alpha$ 衰变。这种物理特性增加了它在人类环境中的潜在危害。Pu也是高毒性放射性物质,体内蓄积量为 $3.7 \times 10^4 \text{Bq}$ 以上时就会产生急性毒性效应,它有明显的亲骨性和致癌性。这就使人们更加注意了对于Pu的研究。

随着社会对能源的需求,利用增殖型核反应堆作为能源是一重要趋势。因此,在大量使用Pu源时,海洋作为排放废液的场所也是必然现象。Pu可以作为指示剂研究海洋生物地球化学过程、质点运动规律和污染历史等,因此,海洋Pu化学的研究是十分重要的课题。

Pu是超铀元素,只能人工合成。最常测定的Pu同位素有4种,它们是 $^{238},^{239},^{240},^{241}\text{Pu}$ 。地球上Pu的主要来源是大气核试验,据Bowen估计,由此而沉积在地球上的 $^{239},^{240}\text{Pu}$ 为 $14.8 \times 10^{15} \text{Bq}$ 。其中 $25.9 \times 10^{14} \text{Bq}$ 沉积在核试验区附近,而 $12.2 \times 10^{15} \text{Bq}$ 作为全球下落物而分布于世界各地。由于核碎片污染的纬度特点和多数实验在北半球进行,因此,北半球和南半球的中纬度地带Pu的沉积最多(尤其是在北半球中纬带),赤道和极地最少。根据同温层和对流层中新鲜核碎片的 $^{90}\text{Sr}/^{238},^{240}\text{Pu}$ 活比之比(为56),可以从 $^{90}\text{Sr}$ 的量推算出沉入地球上的Pu含量。

太空航天器事故是地球上 $^{238}\text{Pu}$ 的来源,如1964年4月SNAP-9A在印度洋上空燃烧,释放出大约 $6.29 \times 10^{14} \text{Bq}$ 的 $^{238}\text{Pu}$ ,约为 $1 \text{kg}^{238}\text{Pu}$ 因 $3.7 \times 10^{13} \text{Bq}^{238}\text{Pu}$ 的质量为57.5mg。3/4的放射性分布在南半球。1970年从土壤中测量得知, $^{238}\text{Pu}/^{239},^{240}\text{Pu}$ 之比,在南半球、北半球和全世界分别为0.178、0.036和0.066。

放射性废液的排放是海洋中Pu的重要来源。从1957~1978年温茨基核燃料厂共放出 $5.18 \times 10^{14} \text{Bq}$ 的 $^{239},^{240}\text{Pu}$ ,此值为北大西洋从全球下落物中接收的 $2.33 \times 10^{15} \text{Bq}^{239},^{240}\text{Pu}$ 的22%。

核反应堆的破漏和B-52事故也是Pu的来源之一。例如,在格陵兰Thule空军基地发生的B-52事故,将大量的Pu释放到冰雪地区。另外,应用Pu同位素的一些单位也有少量Pu废物排入海中,但量很少,影响也只是局部的。由此看出:海洋中Pu的主要来源是核试验。

在天然水中,Pu可同时以4种价态存在,三价四价是还原态,五价六价是氧化态。其氧化态与还原态之比是变化的,例如,在爱尔兰海以溶解形式存在的氧化Pu与还原Pu之比可从2.4变化到12.0。很明显,氧化形式是溶解Pu的最重要形式,这一点与湖水中两者之比是不同的(湖水多为0.1~0.3,个别高达5)。还原形式最大为总溶解Pu的30%左右。六价Pu相似于六价U,

可以形成稳定的碳酸盐络合物,因此,六价 Pu 可能是最重要的溶解形式。然而,在爱尔兰海和密执根湖中,许多研究结果表明:五价 Pu 可能是溶解 Pu 的主要形式。Cleveland 指出:五价 Pu 是最少水解的。D. Rai (1980) 等通过 Eh-pH 平衡模式和实验指出:五价 Pu 是淡水中最重要的形式。可以看出:进一步弄清水中氧化态的分布是很重要的研究任务。

总的溶解 Pu 与 pH、碱度均无明显的关系。实际发现:Pu(V, VI)/Pu(III, IV)之比与水体的营养水平之间有一定关系,即从低营养向富营养水平过渡, Pu(V, VI)/Pu(III, IV)比值减小。这是因为有机质与溶解的四价 Pu 形成了稳定络合物,事实证明,有机质可以控制或影响水体中 Pu 的浓度和溶解性。甚至可以使六价 Pu 还原为五价或四价。Pu 除同时以 4 种价态存在之外,还可在水体中进行不同类型的化学反应,如水解、与有机和无机配位体形成络合物、聚合形成胶体等,这些反应都可以改变 Pu 的地球化学行为。

大洋水中的 Pu 主要以溶解状态存在,而不是颗粒状态。比较典型的垂直分布资料来自 GEOSECS 计划。在这些分布图中一个最明显的特点是在 250~750m 深处有一个 Pu 浓度的最大值。在西、东太平洋从 50°N 到 20°S 都有这种现象,但最大值仍是在北半球中纬度地区(15~30°N),最大值达到 0.9dpm/100kg,高于表层海水 10 倍左右。产生这种现象的原因是落入海洋表面的<sup>239,240</sup>Pu 可在几年内被生物质点所除去,而这些生物质点(死亡生物)下沉之后,通过分解矿化又将其中的 Pu 转移到水体中,观察得知,最大 Pu 浓度附近处溶解氧含量很低,磷酸盐含量很高。由此看来, Pu 在浅水层的释放过程与磷酸盐、硝酸盐以及某些痕量金属(Cd, Ni 等)的再循环相类似,但并不完全相同。

另外,1974 年(GEOSECS)曾在北太平洋中部底层水(55~25°N, 160°E~150°W)发现有一个高 Pu 浓度区,其中颗粒形式的 Pu 只占 5%~10%,其余的为溶解形式。这种现象的解释有两方面:(1)Pu 的来源丰富,此区属北纬 30~40°N 高沉降区,水柱中 Pu 的储量较高,同时,太平洋核试区附近下落的 Pu(10°N, 165°E)也可输送到这里;(2)该区具有垂直输送和分解 Pu 的有利条件。对沉积物捕集器所得物质的研究得知,草食性浮游动物的粪便、有机质、颗粒物质和微量矿物质就是迅速输送 Pu 的载体。在这个区域,上层生物生产力很高,底栖生物也较多,有利于捕获和分解 Pu。当然这个过程是复杂的,它可能包括细菌分解、生物搅动、氧化还原过程、三价、四价 Pu 氧化到五、六价或五、六价 Pu 还原成三、四价,并随着 Mn、Fe 氧化物的还原溶解而释放 Pu。

在北太平洋中部,通过 1973~1974 年和 1978 年两次水柱 Pu 含量的分析得知:在 5a 中, Pu 的最大浓度从 465m 深处下降到 515m 处,共下降 50m。由此得知, Pu 的下沉速度约为 10m/a。同时发现<sup>137</sup>Cs 在 4a 中从 69m 深处下降到 162m,平均下降速度为 23m/a。后者比前者要快 1 倍多。颗粒 Pu 的下沉速度可达 100m/d,它是靠重力而不是靠扩散进行的。

溶解 Pu 在海水中滞留时间很长,从 1981 年 Anderson 的资料(夏威夷附近 P 站)看出,在 378 和 978m 之间, Pu 的净通量约为 4min<sup>-1</sup>/m<sup>2</sup>·a,在 1m<sup>2</sup> 面积 600m 高的水柱中,总活性约为 1800min<sup>-1</sup>(假定平均浓度为 0.3min<sup>-1</sup>/100L)。由此算出 Pu 的除掉时间为 450a(1800min<sup>-1</sup>/4min<sup>-1</sup>/m<sup>2</sup>·a)。同样利用 378m 至 2778m 的资料求得 Pu 的滞留时间为 600a。因此,可以大体认为海水中 Pu 的滞留时间约在 400~600a 之间。当然由于外界条件不同(水文、生物密度、颗粒流量等因素),其滞留时间并非一致。

总之,海水中的 Pu 主要以溶解形式存在,包括三、四、五、六 4 个价态,颗粒态是很少的,因此滞留时间较长,约为 400~600a。

太平洋广阔海区的水体中存在一个亚表层高 Pu 值。同时,在北太平洋底部也有一个高 Pu 值,这与 Pu 的性质和生物地球化学过程有关。近岸沉积物中,同时存在 Pu 的沉积和溶解过程,但前者是主要的,沉积物存有 Pu 的震动现象,主要是通过间隙

水来实现的。某些海区(圣巴巴拉)沉积物中的高 Pu 值来自海洋上升流的携带和搬运,而不是人们通常认为的河流搬运、大气沉降、风成搬运和陆原物质。

间隙水和底层水的 Pu 浓度分布以及氧化还原形式的研究,对阐明 Pu 的运动特性、震动现象和机制以及成岩作用都是很重要的。

根据过去经验,今后研究 Pu 时,最好与多元素和多同位素相结合进行,这样可以从多方面深化 Pu 的特性研究。同时,也必须辅以水文、生物、沉积和地球化学等方面的调查资料,这样才能正确解释 Pu 的各种分布曲线和影响分布的真实机制。

河口以及 Pu 废物排放区,包括核试区是今后深化 Pu 化学研究的良好场所。一方面,在这些区域 Pu 浓度高,易于测定;另一方面,这些区域的物理、化学、生物和沉积过程更为复杂和更具有典型性,有利于对 Pu 的深入了解。尤其是研究间隙水中 Pu 的化学时,这些区域是最好的天然实验室。

#### 参考文献

- 1 Koide M, Goldberg E D, Hodge V F. Earth planet. Sci Lett. 1980, 48: 250~256
- 2 Bowen V T, et al. Sci Lett. 1980, 49: 411~434
- 3 Sholkovitz E R. Earth-Science Reviews, 1983, 19: 95~160
- 4 李培泉,于银亭,颜启民.海洋科学,1984, 6: 19~22
- 5 Bertine K K. J Environ. Radioactivity, 1986, 3: 189~201
- 6 Holm E, Aarkrog A, et al. Earth and Planetary Science Letter, 1986, 79: 27~32
- 7 Aarkrog A, et al. Articles, 1987, 115(1): 39~50
- 8 李培泉,颜启民,于银亭.海洋科学,1988, 3: 43~46

(中国科学院海洋研究所李培泉研究员撰)

**旁侧声纳图像镶嵌** 自从第 1 台实用的旁侧声纳在 20 世纪 60 年代初期投入使用以来,声纳技术日臻完善。当代旁侧声纳系统应用了微计算机技术,由配有微计算机的主机、声纳换能器(也称“拖鱼”)、数字磁带机和电缆组成。主机为换能器提供讯号源,处理回波信号和显示声纳图像。数字磁带机记录经过处理的声纳资料,供进一步处理和重新回放。在回放过程中,可以选择不同的显示参数,获得最佳的图像面貌。应用微计算机,可以对声纳图像进行一系列校正。

声纳镶嵌图是海洋地球物理调查的一项重要成果,在海底调查中广泛应用。通过声纳技术所获得的地质资料既可用于区域性的海洋地质研究,也能直接应用于局部场地的工程调查项目,还可以作为考古评价的重要依据和搜索沉没体残骸的有效手段。对于不同目的、不同范围的工作,选择不同类型的旁侧声纳系统会收到高效率、低成本的良好效果。

进行海底声纳图像镶嵌工作的必要前提是布置合适的测网,保证声纳资料 100% 覆盖整个预定的调查区。在海上调查时,声纳的侧扫扫描量必须大于 1/2 测线间距。譬如,测线间距为 400m,声纳的侧扫扫描量选择为 250m(或更宽)档,则相邻测线之间存在一个 100m 宽的资料重叠带。此外,要保证理想地完成海上作业,还有赖于先进、可靠的导航技术辅助。

制作镶嵌图的过程中,首先把每一条测线的记录按照航迹图所标的测线位置和方向顺次序展开排列。考虑到拖鱼至调查船定位天线之间存在着一定的水平距离,所以,把各张声纳图像沿各自的航迹方向向后偏移相应比例的距离,使声纳图像中反映的各种海底特征体基本回归到其实际位置上。拖鱼距离的变化也是图像偏移所要考虑的因素。解释人员要根据声纳记录中显示的特征把相邻测线图像的相同部分叠置对接,大致确定各张图像的偏移位置。

由于各种原因影响,调查船在海上不可能完全沿着设计测线直线行驶,而每张声纳图像均代表一条测线的情况,它们似乎总是“笔直”的。当实际航迹与设计测线在方向和位移方面误差

不大近似一直线时,往往忽略其误差。而在实际航迹以较大的角度和位移偏离原设计测线,明显呈折线状时,镶嵌时在转折处把图像记录切割开,将转折段的记录以相应的夹角与前面的记录段相连接,消除显著的方向性误差,使周围的海底特征较好地吻合。

把调查区内所有的声纳图像依序相拼接,可以制成大面积的声纳镶嵌图。在调查区覆盖面积广大、声纳镶嵌图不易制作的情况下,可以首先在若干个小面积范围内各自进行镶嵌,分别摄影拍照。然后将各分幅的镶嵌图进一步拼接起来,构成一幅完整的镶嵌图。另外,通过选择不同的缩放参数进行摄影复制,可以获得不同比例的镶嵌图,满足各种填图的要求。

声纳镶嵌图代表连续的两维空间图像,以直观的形式展示各种海底地貌形态和地质体特征。通过解释声纳图像中色阶变化的意义,结合测深和浅地层剖面等其它地球物理资料,可以得出海底特征的三维空间解释。

声纳镶嵌图中存在包括方向上和距离上的累积误差,特别是远距离的标志物之间的方位和距离均不是十分准确。所以,声纳镶嵌图不适宜作为精确的等比例图使用。

声纳镶嵌图目前仍然主要由人工制作。随着数据存贮能力的增大和处理能力的进一步提高,可以期待将来能够在解释工作站的大型高分辨率显示屏幕中实现自动化图像镶嵌。

(地质矿产部广州海洋地质调查局李廷恒撰)

**海洋学中新生产力的研究** 新生产力(量)一词,最初由 Dugale 等(1967)提出,这个概念是建立在 N 源划分基础上的。他们认为,进入初级生产者细胞内的任何一种元素都可划分为新结合的和再循环的两类,但并非每一种元素的这种划分都能够用实测来实现,而 N 是一种可供这种区分的较为理想的元素。N 是构成细胞的主要元素,又相对稳定,且 N/C 比、N/P 比也相当恒定,用 N 描述初级生产者的生长比其它元素(如 C、P)更精确些。此外,N 常常是海洋环境中的限制性营养元素,因而建立在 N 源基础上的生产力更具有实际意义。他们定义,在真光层中再循环的 N 为再生 N,由真光层之外提供的 N 为新生 N。由再生 N 源支持的那部分初级生产力叫再生生产力(Regenerated production),由新生 N 源支持的那部分初级生产力称之为新生产力。

1979 年,Eppeley 等将新生产力与真光层底部的碳输出(即输出生产力(Export production))联系起来,赋予新生产力以新的含义,Platt 等(1985)在更广泛的意义上定义新生产力为真光层群落净生产力,即真光层有机物的积累率和输出率之和。这实际上阐明了新生产力与输出生产力的量值关系,通常二者并不相等。在季节尺度上,当真光层生物量变化为零时,这个季节的平均输出生产力等于平均新生产力。在一年或更长的时间尺度上,可认为二者是相等的。

新生产力的表达方式与初级生产力相同。常见的观测和估算方法有以下几种。

**<sup>15</sup>N 法** <sup>15</sup>N 法是经典的方法,也是唯一可进行现场直接观测的方法。目前已有的新生产力的资料绝大部分是用此法测得的。这一方法是由 Dugdale 等(1967)建立的。该法首先用 <sup>15</sup>N 示踪技术测定初级生产者对新生 N 源和再生 N 源的吸收率,以新生 N 吸收率与总可利用 N 吸收率之比求得 f 比,再由 f 比与初级生产力相乘即为新生产力。此外,还可以只测新生 N 之吸收率,然后按照 Redfield 比值求得以碳表示的新生产力。

**沉积物捕集器法** 在真光层底部设置沉积物捕集器,收集沉降下来的颗粒有机物,实际上是测定输出生产力。在时间跨度足够大和平流较小的情况下,其结果可基本反映新生产力。但该方法易受上升流、环流、涡流等干扰,不宜用于近海。该法测不到 DOC,DOC 的数量也直接与水深有关,所得结果通常是新生产力的偏低估计值。另外,游泳生物的干扰、收集物的保存等都是容易产生误差的环节。设备造价昂贵、操作困难且容易丢失,也限

制了它的广泛使用。

**f 比推算法** 这是一种通过代表性海区 f 比与初级生产力的函数关系(实测求得),借助已有的 <sup>14</sup>C 初级生产力资料外延推算其他海区新生产力的间接方法。Eppeley 等(1979)给出了这种方法的示范。在新生产力实测数据尚嫌太少的目前情况下,这是大致估计大尺度范围上新生产力水平的可行方法,但不同海区、不同时间 f 比变化很大。如 Platt 等(1985)研究百慕大东南海区所得的 f 值为 0.03~0.84;Knauer 等人(1990)对东北太平洋 VERTEX 时间序列站连续 18 个月的观测发现,f 比的季节变化达 4 倍,平均为 0.11~0.16。Eppeley 等(1979)指出,f 比随初级生产力按渐近线变化,从贫营养大洋海区的 0.05 到沿岸上升流区的 0.50;而在地区范围内,f 比随时间、深度、环境条件(如 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量比例)的变化都会发生变化。

**物理模型推算法** 即利用海流模型和水团中营养物质含量,推出真光层中限制性营养元素的补足速度,从而推算出新生产力的上限。如 Chavez 等人(1987)运用上升流模型和上升流中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的浓度推算了赤道太平洋海域的新生产力;Hamilton 等人(1989)讨论了盐舌对流模型和热能通量模型用于推算世界大洋 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 垂直通量的可能性;Dugdale 等人(1988)运用地中海环流模型推出了该海区初级生产力和新生产力的规模;Minas 等(1986)结合 Broenkow 的营养盐、氧模型和 Bowden 的上升流滞留时间,计算了西非、秘鲁沿岸等上升流区的群落净生产力。物理推算法的优点是,可利用已建立起来的海流模型在中尺度范围上推算新生产力。但该方法没有考虑生物学因素和其它环境因素(如还原态氮对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 吸收的抑制的作用、El Niño 现象的影响等(Wilkson et al., 1987)),所得结果实际是新生产力的一个最大潜在值,与实际水平可能有较大差距。

**真光层净产氧量法** 真光层中溶解氧的净积累量是估计季节性新生产力的一个综合指数,但此法受到气体交换的限制,在低纬地区效果较好,而高纬地区误差很大。同时,它只适合于混合层浅和稳定度高的情况,像秋、冬季节则不宜。

**<sup>234</sup>Th 滞留时间法** 由于 Th 是具有颗粒吸附活性的,因而海水中的实际溶解度比由 <sup>238</sup>U 衰变推算出的结果要小。当颗粒越多时,它在真光层滞留时间越短。如果 Th 所吸附的所有颗粒都是本海区所产生的有机颗粒,则可用 Th 的滞留时间和颗粒有机物的含量来推算该海区的新生产力(Eppeley, 1989)。水柱中总的物质通量与 <sup>234</sup>Th 的滞留时间有着良好的相关关系,在有机颗粒中途分解时,Th 的滞留时间增长,这影响到新生产力估计的准确性。同时,该法也不适用于颗粒来源复杂的海区。但 <sup>234</sup>Th 法不仅测出了物质通量,还可测出过程速率,是一个很有希望的方法。

**物质通量模型法** Toggweiler (1988) 和 Sarmiento 等(1988)提出了以 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 表一次表层通量为基础的,包括颗粒有机碳(POC)、溶解有机碳(DOC)在内的新生产力通量模型。Bacastow 等(1991)提出了包括 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、POC、DOC、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、碱度等指标在内的模型,并计算了东、西太平洋 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、CO<sub>2</sub> 以及新生产力和输出生产力的一些估计值。这种方法代表了综合模拟的趋势,尽管目前尚难精确化。随着指标测定(如 DOC)的改进和通量模型的优化,这类方法对于新生产力的宏观预测具有潜在价值。

**遥感法** 对于某些特定海区,如果通过现场实验(如用 <sup>15</sup>N 法)求得有代表性的 f 比,即可通过卫星遥感叶绿素资料与初级生产力的关系实现对新生产力的估计。此外,利用已建立的水团温度与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量的关系(Kamykowski et al., 1986),可以从遥感水温图象估计 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 供给量,进而推算新生产力。这一方法适用于 40~60°S 的大洋区,其优越性在于可以利用卫星遥感资料实现大洋乃至全球尺度上的大致估计。

除上述几种方法外,海洋新生产力还被用<sup>3</sup>He/<sup>3</sup>H 分布模型法、<sup>3</sup>H/<sup>222</sup>Rn 分布模型法、DO 分布模型法,以及深水呼吸电子转运系统等方法估计或测定过。

自 20 世纪 60 年代以来,海洋<sup>15</sup>N 技术得到了广泛的应用,但这些研究主要是针对真光层中 N 代谢、N 循环以及与此有关的生态学问题而进行的,而真正新生产力的专门研究几乎没有。直到 1979 年,Eppey 等利用以往<sup>15</sup>N 的实验数据(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,尿素 N,氨基酸 N 等)和<sup>14</sup>C 测得的初级生产力数据建立起新生产力和初级生产力的定量关系(f 比),并依据后者对全球性新生产力和初级生产力的估计。同时,将初级生产力与输出生产力联系起来,赋予了新生产力以生物地球化学方面的含义。从此,新生产力的研究进入了一个新的阶段。1984 年,美国的海洋学家首先把大尺度物理海洋学与生物地球化学过程相联系,在此基础上提出了全球海洋通量研究(GOFS)的设想。随后,更多的国家相继提出了各自的研究计划,并在一些重点海区(如北大西洋、东北太平洋等)设立标准站位,开始了有计划的现场研究,新生产即是其中的重点观测项目之一。这些研究为后来的全球海洋通量联合研究(JGOFS)计划的制订奠定了基础。1987 年,海洋研究科学委员会(SCOR)召开了一系列关于 JGOFS 的会议,并于 1988 年成立了国际 JGOFS 委员会。1989 年,由美、加、英、德、日、荷等 6 国联合进行了第 1 个过程研究(North Atlantic Bloom Experiment),所有这些研究中,新生产力都被列为重点内容之一。

新生产力研究在中国尚属空白,但这项研究的重要性已引起有关组织和学者的高度重视。1992 年 1 月在青岛召开的 JGOFS 委员会第 4 次会议再次确认其为今后工作的重点内容之一。JGOFS 在中国的一项计划——东海陆架边缘海洋通量研究,即将新生产力列为重点观测项目之一。

不久的将来,将对全球海洋新生产力有一个比较精确和全面的了解,这种了解不是基于理论演绎,而是基于各种途径的观测结果。从而新生产力的研究也将为海洋生态学、生物海洋学乃至全球变化预测作出贡献。

(中国科学院海洋研究所熊念志、王荣撰)

**蒸馏法脱盐技术** 蒸馏法(或蒸发法)脱盐过程实际上包括了海水淡化、苦咸水淡化、高纯水制造以及其它稀溶液的蒸发过程,通常以获取淡水(溶剂)为主要目标。

蒸馏法脱盐是一种古老的方法,它的发展大致可分为 3 个阶段。第 1 阶段为 20 世纪 50 年代以前,海水淡化以单效和多效浸管式(ST)蒸发为主,没有其它方法与其竞争,但是它能耗高、易结垢。1957 年英国 R. S. Silver 发明了多级闪蒸(MSF),这是蒸馏法的一个里程碑。MSF 有优越的防垢性能,加上预处理和防垢药剂的进展,基本解决了结垢的问题,能耗也大幅度降低,成为当时最主要的脱盐设备。蒸馏法的第 3 个阶段是从 70 年代初期开始,随着世界性的能源危机,反渗透法(RO)已逐步达到实用化的水平,电渗析法(ED)的应用也逐步扩大,迫使蒸馏技术的研究者改进技术,创造出更有效的工艺和设备。例如热电联合造水、高效换热设备的出现,节能的多效蒸发和压汽蒸馏的开发,给古老的蒸馏法带来新的活力。

多效蒸发由于结构上的限制,单机容量比 MSF 小,一般为每天数十吨至数千吨。最近以色列 IDE 公司的 HTE 可以做到单机  $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4$ t。过去由于结垢和热效率低的问题使 ME 一度处于停滞,但是由于防垢技术的发展、新型高效蒸发设备的出现、低温蒸发技术的进展,使 ME 迅速发展起来。如 HTE 和板式蒸发器(VPE)由于传热的加强、传热温差的减少,装置效率可以显著增加,能耗大幅度下降,显示出优越的性能。例如前西德开发的一种塔式 ME 样机,用 55 效板式蒸发器,最高操作温度 115℃,产水 500m<sup>3</sup>/d,造水比可达 40,即 25kg 蒸汽可生产 1m<sup>3</sup> 淡水,这是一个非常低的数值。水平管降膜蒸发器是 70 年代发展起来的新型蒸发器,它比 VTE 传热系数高,同时显著地降低了空间高度,使其便于组成塔式 ME,可以节省液体循环的输送功,同时增加了传热的有效温差,为进一步节省能源带来许多好处。例如以色列 IDE 公司开发的一种 HTE 在低温下操作,各效集中

在一个水平的圆筒中,节省了流体输送功。装置的造水能力  $1.7 \times 10^4$ t,发电 5MW,最高操作温度 62.9℃,共 7 效,造水比可达 5.8~6.2,折合电耗 9.4~8.2kW·h/m<sup>3</sup>。它的加热蒸汽是从透平中抽出来的,压力很低,所以蒸汽的价格也低。由于温度低还带散热少,阻垢剂用量少,设备材料的腐蚀减轻,全装置都用铝材,节省投资等优点。由此装置可放大设计成发电 550MW,造水  $2.1 \times 10^6$ m<sup>3</sup> 的大型双目的工厂,能耗可下降到 7kW·h/m<sup>3</sup>,水价降到 0.5\$/m<sup>3</sup>。

压汽蒸馏(VC)早已被人们发明,70 年代初期迅速发展,其原因有:(1)压汽技术的提高,特别是高效离心式压缩机的出现,克服了罗茨式压缩机重量大,速度不能提高,大型化困难等问题。(2)密封技术的进展保证了压缩机的可靠运行和水的质量。(3)传热技术的提高为 VC 创造了必要条件。新型蒸发器的传热温差不断减小,压缩机可在低压比下工作,不仅节省了电能,而且结构上也可简化,使人们看到 VC 在节能方面的潜力。(4)能源危机使人们不得不更珍惜能源。VC 在各种脱盐方法中占的比例并不大,但它增长速度很快。VC 又可分为热压缩(TVC)和机械压缩(MVC)两类,热压缩是用高压蒸汽在喷射器中吸引二次蒸汽,达到低压蒸汽反复利用的目的,由于它结构简单易行,近几年发展迅速;另一类是用压缩机吸引二次蒸汽。VC 在各种蒸馏法中可以贯穿于整体,也可以做为其中的一部分。例如前西德和美国开发的一种安在驳船上的造水装置,把 VC 放在 VTE 的前面,其主要性能:容量 5052m<sup>3</sup>/d,效数 24+2,总电耗 550kW,造水比 22.3,折合油耗 3.9kg/m<sup>3</sup>,最高操作温度 135℃,浓缩比 5。此处 VC 的作用是把原料做最后的预热,比一般的预热方法节省蒸汽。压缩机由蒸汽透平做为动力,背压式透平一方面发电,一方面把低压蒸汽送给 24 效蒸发器的第 1 效做为热源。最后的 MSF 进一步回收 VTE 来的淡化水和浓水中的热量,并且再获得一部分淡水。目前蒸馏工艺过程设计几乎都以不同的形式利用 VC,以提高系统的经济性能。

太阳能是未来可提供的地球稳定能源之一,所以太阳能蒸馏具有长远的意义。1872 年智利建立了世界第 1 个顶棚式太阳能蒸馏器,但从蒸发原理来看还没有脱离单效蒸发过程,因此产水量不会有大幅度提高,成本也不会有大幅度下降。近年来由于其它脱盐方法的影响,使太阳能蒸馏产生了重大变化。太阳能蒸馏可分为直接法和间接法。直接法是太阳热直接作用于海水而立即蒸发的过程。1982 年在日本冲绳建立了多效热扩散蒸馏装置。该装置用塑料板上下分割成多效,在板的下侧海水蒸发(汽化的方式是自然扩散,而不是沸腾),在下一块板的上侧冷凝,而其下侧又是海水蒸发,这样逐效把冷凝潜热传过去,用类似于热管的吸液芯完成海水、淡水和浓水的输入和输出因为靠毛细管输送液体,所消耗的动力极小。间接法是把太阳能先收集起来,然后再为其它淡化法提供能源。间接法可分为太阳热收集贮存和太阳光发电。太阳能转换的关键在于提高效率和提高能位。由于太阳光的强度多变,而 ME、MSF 连续操作要求稳定的热源,就要把太阳热蓄集起来,连续稳定输出。以日本高见岛和阿联西的阿布扎比的两套 HTE 为例,前者为 15 效,后者为 18 效。太阳光发电又可分为光电池和抛物面聚焦产生高压蒸汽发电。用此电力可以为海水淡化 VC、RO、ED 的电源。

抛物面聚焦产生的蒸汽温度可达 700℃以上,发电后的低压蒸汽用于蒸馏法海水淡化。因固定投资大,太阳能蒸馏造水成本比一般蒸馏法高,要使它降下来难度很大,但它对于既缺能源又缺水资源的地区是有吸引力的。太阳能蒸馏的另外一条出路是合理地与常规能源组合创造出一些新的工艺流程。

(国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所张洪撰)

**太阳能海水淡化技术** 应用集热技术或将太阳能转换成电能,供给海水淡化中所需的全部或部分能量制取淡水的方法。如蒸馏法中海水加热需要的热能,电渗析法中渗析及泵的电力所需的电能,反渗透法中加压和运输泵所需的电能等都可以利

用太阳能供给。

太阳能海水淡化方法可分直接法和间接法两大类。直接法是将集能部(主要是集热器)和除盐部(蒸馏器)集于一体的方法;而间接法是将集能部(集热器、太阳能电池等)和除盐部(各种淡化装置)分开,即通过集热器收集能量,用以驱动除盐装置的方法。

**直接法** 应用集热器将太阳光照变成热能直接加热海水,蒸馏制得淡水的方法,它分浅盘型(也称顶棚型、水平型)、倾斜型和多效型3种蒸馏装置。

(1)浅盘型:它由盛水的浅盘(20~40mm)和透明罩组成。太阳光透过透明罩照到盘内的黑色物质上,使其产热,使盘内的海水升温,产生蒸气,蒸气碰到透明罩被外界的空气冷却,凝结成水滴,流到淡水收集槽中,浓缩的海水在析出水垢之前排出。这种方法产水量比较低,通常日照量 $145.4\sim 290.8\text{W}/\text{m}^2$ 时,产水量约为 $2\sim 4\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。日本在屏风岛实验工厂试用此法后发现,采取保温措施可以提高产水量20%~30%,浅盘内海水浅时产水量高,但过浅易生成水垢,通过过滤、沉淀、酸洗及氯杀菌等方法可以预防或除去浅盘内的水垢。此法已在科威特、希腊、印度和日本等国推广应用。

(2)倾斜型:倾斜型分倾斜浅盘型和倾斜吸水毛型两种。倾斜浅盘型是将水盘由水平改成倾斜形,使海水沿着斜面流动,以提高集光效率和促进蒸发。其工作原理和浅盘型一样,但水层更浅。采用此法产水量可提高30%~60%,但技术难点比较多。它要根据蒸发量调节海水的流量,而且由于水层浅很容易析出水垢。倾斜毛型是通过在倾斜型的水盘面上设置吸水毛储存海水,使海水层更浅,以减少热容量提高造水量。

(3)多效型:浅盘型和倾斜型都将蒸气凝结成水滴时的热量白白浪费掉了,为了提高热能的利用效率,利用这部分热量反复加热海水提高产水量,研制了多效型蒸馏器。其工作原理:集热板被太阳光加热,在集热板的反面有吸水毛,浸存有海水,海水遇热蒸发,水蒸气遇到了下面冷的隔板凝结成水滴,凝结时产生的热量加热隔板反面吸水毛上的海水,使之蒸发。这样反复蒸发—浓缩—蒸发,最后通过最下层的散热板将余热排出。还可装上反光镜增加集热量以提高海水的产量。采用这种方法,在日照量 $257.0\text{W}/\text{m}^2$ 时淡水产量为 $30\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,大约是浅盘型的7.5~10倍。

**间接法** 用集热器将光能变成热能,或用太阳能电池将光能变成电能,并以此作为海水淡化装置的能源制取淡水的方法。此法又分以下几种:

(1)蒸馏法:在常压下,海水的沸点约 $100.5^\circ\text{C}$ 。海水蒸发约需 $2261\text{kJ}/\text{kg}$ 的热量,蒸气在凝结成水时可放出同样的热量。根据这一原理,人们设法反复利用水凝时的热量以节省能源。根据不同的利用方法,蒸馏法又分多级闪蒸法,多效蒸馏法和蒸汽压缩蒸馏法。

(2)反渗透法:此法是利用压力差分离淡水,通过太阳能发电供给驱动高压泵所需的电能。沙特阿拉伯在吉沙建造的一个海水淡化工厂就是用此法进行海水淡化,1981年投入运转,产水量为 $0.2\text{m}^3/\text{d}$ (1d运转12h),太阳能电池的电力容量为 $8\text{kW}$ (高峰时),反渗透装置采用2级除盐方式。后又在阿拉伯湾卡塔尔建造了一个产水量为 $0.4\text{m}^3/\text{d}$ 的海水淡化工厂,太阳能电池的电力容量为 $11.2\text{kW}$ ,1983年投入运转。意大利在亚得里亚海的尼科拉岛建造了一个太阳能电池的电力容量为 $65\text{kW}$ ,产水量为 $30\text{m}^3/\text{d}$ 的海水淡化工厂,从1984年投入运行。1982年日本在冲绳泡濑地区建造了一个产水能力为 $15\text{m}^3/\text{d}$ 的太阳能反渗透海水淡化工厂,白天1/2电力使用太阳能电池。1987年在广岛因岛市的细岛建造的海水淡化工厂,太阳能电池容量为 $30.4\text{kW}$ ,产水能力为 $13.2\text{m}^3/\text{d}$ 。

(3)电渗析法:海水温度升高时,海水的粘度减少,因此在该系统中既可利用太阳能电池供给电渗析法所需的能量,又可利用太阳能提高海水的温度,从而降低耗电量。此法目前还未推广应

用。日本在香川县高见岛建造了一个产水能力为 $10\text{m}^3/\text{d}$ 的平板型集热器和高温电渗析槽相组合的实验工厂,主要是利用太阳能提高海水温度,降低耗电量。后在长崎福江市的黄岛建了一个太阳能电池容量为 $25\text{kW}$ 、电渗析槽容量为 $10\text{m}^3/\text{d}$ 的实验工厂,1986年投产,到1987年2月平均产水量为 $3.4\text{m}^3/\text{d}$ 。

中国应用太阳能淡化技术始于20世纪70年代中期。最初用于甘肃的苦咸水地区,以后中科院能源研究所分别在南海岐州岛和西沙建立了两台顶棚式直接蒸馏装置,产水能力分别为 $1\text{t}/\text{d}$ 和 $0.2\text{t}/\text{d}$ 。1982年,该所又在浙江嵊泗建成1台设备完善、性能良好的装置,产水能力为 $2.3\text{t}/\text{d}$ 。

中国南海诸岛地处热带,日照长,有充足的太阳能可以利用,开发太阳能海水淡化装置对这些地区有着重要的意义。由于这些岛屿远离大陆,要求设备简单,易操作、管理和保养。从目前国内外研究情况看,采用直接蒸馏法最为有利。目前,浅盘型蒸馏器已推广应用,倾斜型蒸馏器正在研究,而多效型还未见研究的报道。该法虽然难度比较大,但有发展前途,值得研究和探索。  
(海军医学研究所朱世华、秦思昌撰)

## 海洋环境保护

**海洋生态学** 在现代海洋生态学研究,生态系的结构与功能研究受到很大重视,一般着眼于营养结构、空间结构和物种结构。自养生物(生产者)、异养生物(消费者)和分解者表现为3种不同营养代谢的生物要素,由初级消费者到次级消费者构成了不同营养层次的食物链和复杂的网络结构,物质和能量通过生态系的生物结构进行转换和流动。不同层次的消费者(个体、群体或种群直到群落),在其不同的生态位发挥着作用。能量沿着食物链传递时有大量的消耗,随着营养级逐级向上,其净生产量呈阶梯式递减,形成生产力底宽上窄的塔形锥体。从能量观点看,限定动物种群数量的最主要因素是其所处的营养级次,营养级的层次愈多,其次级生产量就愈少。一般来说,海洋在食物链愈长,生态效率就愈低,食物链愈短,生态效率就愈高。而食物链(网)愈复杂,生态系统愈成熟,其自我调节的能力就愈强,这是生态系统的主要功能,人们所直接利用的是次级生产量,因此,探讨能流的最佳模式是研究生态结构与功能的主要任务。

在生态系结构与功能研究中,近年来海洋微生物生态研究日益受到重视,科学家们发现微生物在海洋生态系能流中起重要作用,其中最大的进展就是微生物食物环的发现。浮游植物一部分被草食性动物利用,而大部分死后由微生物分解再被其他动物利用。现已证实海洋微生物(主要是蓝细菌)不仅是还原者,而且也是生产者,它们以溶解有机碳(DOC)的形式迅速被浮游细菌吸收,共同形成微生物循环。因此,海洋食物链除捕食食物链、碎屑食物链外,还存在着可溶性物质(DOM)→细菌和真菌→原生动物食物链等。微生物食物链不仅是海洋生态系的主要研究内容,而且也是生物海洋学的重要研究课题。

生命活动是海洋中最活跃的因素,几乎所有生物地球化学过程都与生命活动有关。生命活动所需要的物质元素,通过食物链在各营养级中传递、转化,最后被生物分解回到环境中。当前人们所关心的温室效应,一般认为主要由于人类活动造成 $\text{CO}_2$ 进入大气的结果。海洋既可吸收大气的 $\text{CO}_2$ ,又向大气释放 $\text{CO}_2$ ,因此,有关海洋碳的循环就成为世界性所关注的问题。海洋在调节气候系统方面起着关键作用。国际地圈生物圈计划中一个优先研究领域就是海洋生物地球化学过程对气候变化的影响和响应。人类活动将影响生物地球化学循环,从而导致海平面上升。我们需要了解海洋在形成地球生命环境中的特殊作用,特别是需要加深对气候系统和海洋过程间相互作用的定量认识。例如开展海洋生态系统与大气圈的相互关系研究,其目的就是查明限制生物生产能力和影响气候的大洋碳循环及其与其他元素循环的关系,以评价人类活动对气候变化的影响以及对近岸和海湾生态系统的

影响。

随着海洋资源开发事业的发展,许多国家围绕渔业资源的合理开发和海洋环境的保护,对不同类型的海洋生态系统开展了大量的研究工作,研究领域涉及到各种不同类型的海洋生态系统。

**河口、海湾生态系** 河口受到人类和自然的双重影响,与人类的社会活动密切相关。由于河口的生产力较高以及河口在经济中的重要作用,河口生态系的研究越来越受到人们的重视。近年来人们更加注意控制河口产量和动力功能机制的研究,对河口水域能流、营养循环、食物网、微生物的分解作用、碎屑组成和溶解有机物的作用等均是研究的重点。G. A. Knox 近年出版的《河口生态系》一书,全面系统地对口河口生态系研究进行了论述和总结,并提出现代河口生态系研究的方向是:河口高产量的机制;初级生产力的组成;能流的途径与流速;化学物质流动与流速;微生物的作用;河口与陆架水体间有机碳和营养物流通的速率和通量问题。

**上升流生态系** 已经查明海洋上升流区是初级生产力最高、生物量最多的区域。据估计上升流区仅占世界海洋面积的1%,而渔获量高达世界海洋渔获量的50%。在上升流区域,由于物理海洋学作用,把底层丰富的营养盐类带上水层,促进浮游生物繁殖,为鱼类提供丰富饵料,从而形成鱼群密集的渔场。因此,海洋上升流现象日益引起海洋学和海洋生态学家的关注。了解上升流现象及其生物学过程的研究对开发海洋生物资源具有重要意义。70年代以来,上升流已成为国际上重点研究课题,如“中大西洋东北部合作调查”(CINECA),美国“沿岸上升流生态系研究”(CUEA)以及德国的“海洋上升流现象”计划等。通过上述计划的实施,基本摸清了上升流的动力学过程和营养物的迁移规律以及生物学过程的规律,并建立了上升流的理论模式。近年来对上升流区的种群动态、分布模式、丰盛度、群落多样性以及上升流区的物理化学特性等方面都做了深入研究。这些现象的揭示将对海洋生态系研究和生物资源开发利用带来深远的影响。据近年研究,在海洋发现了非常小的原核细菌和真核细菌(0.2~2.0 $\mu\text{m}$ ),这些超微型浮游植物在海洋初级生产中占有极重要的地位,它的贡献高达60%。目前,对蓝细菌(Cyano bacteria)的研究很重视,在热带海洋的初级生产中具有特别的重要性,它们在光补偿层占总叶绿素的25%~90%。这是在初级生产力研究中的一个重要进展。直到最近还把热带反气旋区看作“沙漠”不毛之地,认为那里浮游植物生产量每昼夜不超过0.1g/m<sup>2</sup>。但目前这种观点有了改变,注意到这里数量众多的金枪鱼、箭鱼、鲈、竹刀鱼、竹荚鱼及大量食微生物的种类,此现象只有在浮游植物产量很高的情况才能出现。经研究,该水域在某些时期的浮游植物产量每天可达0.5~0.9g/m<sup>2</sup>,大大地超过了用<sup>14</sup>C法获得的数据。表明在对初级生产者新的认识情况下必须改进传统的研究方法。

在研究上升流生态系的营养来源问题上,科学家把营养物的来源分为两个,一个是上升流物理过程带来的营养盐,称“新生产”来源;另一是通过生物本身再循环而来的营养盐,叫“再生产”来源。两个来源的营养盐共同满足浮游植物的需要。如果把生产—消费过程的初级阶段作为海洋中生物生存的基础,那么有学者指出,一部分以新的营养元素生产的浮游植物产量就形成不平衡的生物群落;当浮游植物主要以再循环为生物营养元素的再生产产量(即再循环产量)就形成平衡的生物群落。对再循环产量来说,必须保持生产—消费的平衡,从生产—消费循环中捕出新产量才不会破坏平衡。否则,即使在其产量很高的情况下也将受到影响。

**大海洋生态系** 自60年代以来,由于对近海渔业资源利用过度,一些经济种类资源衰退,导致一些小型低值种类增加,渔业资源结构发生了很大变化。人们逐渐认识到单种类的研究对渔业的管理已达不到预期效果。单种类研究只考虑某个单一种类在一段时间内的生活周期和各种生物过程,而不考虑同一海域的其他各类及其之间的相互关系和影响。70年代渔业学家对

多种类资源的评估与管理曾做过许多探讨,用于多种类渔业管理模型相继出现。例如多种类生态系统模型等,这一模型特点是把鱼作为一个海洋生态系的一个组成部分,研究在复杂的生态环境中多鱼种的数量变动,采取适宜管理措施以增加产量和经济效益,所以也称为整体系统模型。

1984年K. Sherman和L. Alexander提出了大海洋生态系统的概念,这个概念的条件是:世界海洋中一个较大的海域(一般在200 000km<sup>2</sup>以上);具有独特的海底深度、海洋学特征和生产力特征;生物种群具有适宜的繁殖、生长和营养的依赖关系;对污染、人类捕食和环境条件等因素具有相同的影响和作用。大生态系统作为一个新的海洋资源保护、管理的概念和策略已引起国际社会的广泛注意。

世界渔业的管理方向将由过去的开发型向管理型转变。从单种到多种资源管理并向着整体、系统水平发展。大海洋生态系统作为一个具有整体系统水平的研究和管理单元,能够从全球出发逐步走向以生态系和地理学边界为依据的生态系统管理。

海洋生态学作为一门系统科学的历史尚不长,60年代以来海洋生态学有了较快的发展,自70年代以来,随着海洋探测手段的提高,一个全面开发利用海洋的热潮在全世界兴起,成为推动海洋生态学发展的动力。另一方面,国际上相继实施的若干重大研究计划,使海洋生态学的研究内容和范围不断深入和扩大,较快地促进了海洋生态学的发展。例如早在60年代提出的国际生物学研究计划(IBP),就是以研究全球主要生态系统结构、功能和生产力为目标的。70年代初开始执行的人与生物圈计划(MAB)是一项长期性的国际计划,其目的是研究人类活动与环境的相互关系,为生物圈资源的合理利用和保护提供科学依据。由于人类正面临着一系列重大而紧迫的全球环境问题,人们如何对迅速变化着的全球环境作出较好的预测和研究,取决于人们对这些变化中的地球系统过程的监测和认识水平。为了迎接这个挑战,国际科联理事会(ICSU)于1986年组织了全球变化研究计划,即国际地圈生物计划(IGBP)。其目的是了解全球的变化、变化过程和造成这种变化的原因以及对人类未来的影响,同时研究人类如何制约自己的行动,以防止生态灾难的出现。这是一项以地球科学和生态科学为主的跨学科的计划,是全球科学家最大的协作,中国也参加了这一计划,并成立了国家委员会。1991年由政府间海洋学委员会(IOC)和海洋研究科学委员会(SCOR)共同发起的全球大洋生态系统动态研究(GLOBEC),其核心内容也是了解全球气候系统和人类活动所产生的变化及其对大洋生态系统的影响。除了国际性的大型生态学网络研究计划外,还有跨国区域性的或一个国家的生态学研究网络。1987年中国科学院提出建立“中国生态研究网络”,由分布在全国不同自然区域的52个生态观测试验站组成,其中有关海洋的有5个,即胶州湾黄岛生态研究站、汕头海洋植物试验站、大亚湾海湾生产力试验站、湛江海洋经济动物试验站、海南热带海洋生物研究站。中科院海洋所黄岛站是全国29个网络站之一。网络生态站的目的是围绕全球生态环境变化、可再生资源的合理利用、农林牧渔业生产力的发展、环境保护和不同生态系统的演化等重大问题的研究,预测生态环境演变趋势,提出合理利用资源、保护环境的对策。

根据国内外海洋生态学研究现状和发展趋势,中国海洋生态学研究应紧密结合国家经济建设亟待解决的资源和环境重大问题开展研究工作。如对主要河口、海湾和近海生态系的研究,逐步开展大洋与南极生态系的研究,为海洋生物资源的开发利用、增殖与管理以及全球面临的环境问题作出贡献。

(中国科学院海洋研究所罗秉征、胡晓燕撰)

**海洋环境预报和海洋灾害警报** *marine environment forecasting and oceanic disasters warning* 海洋是一个巨大的(矿物、生物、水、能源、空间、交通等)资源宝库,又是孕育多种自然灾害的温床。台风、风暴潮、海上狂风巨浪、海冰、海温异常、海啸等都能造成重大灾害。大范围海温异常(如著名的厄尔尼诺现

象)更能引起全球性的气候异常与各种气象—海洋灾害。因此,对上述各种海洋环境要素和海洋灾害进行深入研究并作出正确的预报—警报,是开发海洋、利用海洋、防灾减灾的必要前提。中国国家海洋局经过近30年的努力,已经建成由国家海洋预报台和青岛、上海、广州、海口预报区台组成的海洋环境预报—海洋灾害警报体系,为国民经济作出了重大贡献。

**风暴潮** 指由强烈的大气扰动(台风、温带气旋)所引起的海面异常升高(增水)现象。由于受地球自转和太阳、月亮的引力影响,海水潮位会出现每日一高一低或二高二低的潮汐波动,称为天文潮。每月有2次月天文大潮,每年7~9月都会出现年天文大潮。台风和温带气旋引起的风暴潮如果和天文大潮相叠加,就会产生大海潮,而造成严重灾害。

孟加拉、美国和中国是受风暴潮灾最严重的3个区域。例如孟加拉国1970年11月一次死亡30万人;1991年4月29日死亡14万人,损失30亿美元。美国1989年9月一次损失90亿美元;1992年8月24日损失200多亿美元。中国历史上也有过一次风暴潮灾死亡10万余人的记载;1992年8月29日~9月1日,南起福建—台湾,北至辽宁—河北9个省市全线遭受特大风暴潮袭击,直接经济损失90多亿元。风暴潮是最严重的一种海洋灾害。

风暴潮预报方法主要有经验、数理统计和数值预报3类,有两种行之有效的方法。第1种为诺模图方法,以中国渤海海域为例,根据历史资料归纳出5套27条台风路径,计算出中等强度以3种不同速度袭击渤海湾的81种情况下的8个站的风暴潮位场的逐时值。在实际预报时,根据此诺模图和表查算并订正出最大风暴潮位值。第2种是数值模式预报方法,即采用有限振幅的浅水型二维运动方程,着重考虑海表面风应力和底摩擦应力,优化选定台风的气压和风速分布公式,将中国海划分为5个区块(将重灾岸段放在计算区块的中间),计算时按6h间隔输入各种和最优台风参数(台风中心位置、中心气压、最大风速及其半径),就能计算出风暴潮位空间场和各站时间变化曲线。国家海洋预报台对历史上31次台风风暴潮过程进行了模拟计算,最大潮位值及其发生时刻的预测和实测值很相吻合,相关系数分别高达0.947和0.902,方差分别只有27.8cm和3.16h,并在1988~1991年对39次台风过程作了实时跟踪业务化预报,效果很好,平均潮位误差24.9cm,潮时误差21.1min,预报时效12.25h。1992年8月29日~9月1日的特大风暴潮,从福建到河北,共有15个站破历史最高潮位记录,8个站出现历史上第2大值高潮位,直接经济损失高达90多亿元。国家海洋预报台对南方4个省市提前24~48h,对北方4个省市提前6~8h作出了特大海潮警报。潮位预报误差(以30cm以内为正确)在10cm以内的站占总数的34%,30cm以内占76%,为抗灾减灾作出了重要贡献。

**海浪** 海洋表面的一种波动现象,包括风浪、涌浪和近岸浪3种。风浪是风直接作用下产生的浪。涌浪是风向、风速突变后尚存的波浪。近岸浪是由外海的风浪或涌浪传到海岸附近,受到地形作用而改变波动性质的海浪。在温带气旋和台风影响下,海面常出现4~6m以上的灾害性巨浪,甚至十几米高的狂涛恶浪。海浪可使船舶横摇、纵摇和垂直运动。当船舶自由摇摆周期与海浪周期相近时,共振可使船舶倾覆;当海浪波长与船长相近时,船舶的自重可使之拦腰折断。由于海水密度大,巨浪的压力可达30~50t/m<sup>2</sup>,这股巨大力量足以掀翻或摧毁各种船舶。巨浪拍岸时,也足以摧毁或破坏各种建筑物。估计80%的海难事件是由灾害性海浪引起的。

海浪的预报除了用天气学方法根据天气系统演变分析预报浪区的移动变化外,还可根据风速、风时(风向风速不变条件下,风作用的持续时间)和风区(风掠过的海面距离)用各种公式和图表计算浪高。近代则采用各种数值模式作海浪的数值预报。国际上目前已发展到第3代WAM模式,从波谱能量平衡方程出发,除风能量输入项、能量消衰项、底摩擦项以外,还着重考虑了波一波间相互作用项。从而能更合理地描述出波浪成长、传播和消

衰的物理过程。中国青岛海洋大学与预报中心合作提出用于业务化预报的混合型海浪数值预报模式,风浪部分采用参量化方法,涌浪部分采用谱分量方法,从而使整个模式的精度得到保证,而且计算手续简便,使用高级微机在40min内就可作出西北太平洋和海浪数值预报。

**海冰** 北极和南极地区全年都有不同程度的海冰,并随季节变化而往中纬度扩张、增长和伸缩。中国北部海域是北半球海冰的最南边界,渤海和黄海最北部每年冬季也都有不同程度的结冰。海冰最容易出现的辽东湾,在正常年份的冬季海冰范围65~90n mile,重冰年可达125n mile以上。1969年竟出现渤海全部封冻现象。海冰不仅使海上交通和渔业生产中断,还能摧毁船舶和石油平台,造成严重损失。海冰预报方法主要是根据物理要素的各种海冰计算公式、数理统计方法和背景分析预报方法。现在已发展为数值预报方法。预报中心根据海冰热力学—动力学方程,进行渤海海冰的本构关系和冰脊的参数化、外强迫力作用下海冰漂移规律,以及气—冰—水间热量收支和热传导的研究,并与大气模式和大气边界层模式相联系,提出了渤海海冰数值预报模式。经3年准业务化预报,72h冰外缘线预报误差在5km以下,冰厚预报误差在5cm左右。

中国积极参加南极考察,在南极大陆建立了2个南极考察站,每年都派科学考察船去南极,因此南极海冰预报就成为南极考察安全保障的主要问题。目前已对南极海冰的演变规律有了很好的研究成果,并用数理统计方法作出南极海冰的长期预报。正在对南极海冰的数值预报作进一步的研究。

**海温** 这里主要指海表面温度。海温对渔业有重大影响,海温突变带往往是鱼群密集区;海温分布轴线也常常能反映洋流的走向。卫星遥感能相当精确地测定表面海温。预报方法主要是数理统计方法。中国也发展了几种海温数值预报模式,正在为海温的业务化数值预报运行作准备。大范围海温异常,特别是赤道东太平洋海温异常,即所谓厄尔尼诺现象,可引起全球性气候异常。现在对厄尔尼诺已有了许多统计学和动力学的研究成果,但精确的数值预报还有待于进一步的研究。

另外,潮汐主要是天文潮汐,已能作出很精确的预报。海啸是由海底地震、海底火山爆发引起的海面异常起伏。海啸波高最高可达50多米,目前还无法预报海啸的发生,只能在其发生后在大洋上移动时作出海啸波的移行警报。

#### 参考文献

- 1 包澄澜,王喜年,解思梅,等.海洋灾害及预报.北京,海洋出版社,1991.1~205

(国家海洋环境预报中心包澄澜教授撰;解思梅审)

**河口浑浊带成因** 河口浑浊带又称最大浑浊带、最大浊度带,是广泛存在于河口的一种动力沉积表征现象。它的主要特征是含沙量明显高于上游和下游地区,而且在不同的水文条件下持续出现,河口浑浊带对河流泥沙向海的输移、对河口泥沙的淤积产生巨大影响,对各种化学元素(包括有害元素)具有过滤器作用;在浑浊带内透光性弱,生物活动受到影响,为此国内外学者对它进行了许多实地观察和理论研究,使它成为60年代以后河口泥沙运动研究的一个热门课题,进入20世纪80年代,有关浑浊带形成的机制已有了多种学说,对有些机制已建立了一定的理论模式,但仍是河口泥沙运动的一个重要的理论和实际问题。

自1938年法国Glangeaud在吉伦特河口首先发现并定义河口浑浊带后,世界各国学者都对这一现象作了大量的描述,对其成因作了深入的研究。中国自70年代陈吉余提出长江口“高含沙量区”,继而最大浑浊带的问题后,也开始了对现象的研究。如在椒江和珠江等河口,他们分别从动力、泥沙、沉积、化学和生物等角度进行了探讨,迄今已提出一系列影响浑浊带形成和发育的过程,归纳起来有以下6个。

**沉降和起动滞后效应** 首先由荷兰学者根据潮滩泥沙运动轨迹提出其主要含义是泥沙在往复水流的作用下经历的悬浮和



沉降的循环过程中,开始沉降时的位置和它到达床面的位置不一样,此为沉降滞后(SettingLag)效应;这两种效应使泥沙在往复流作用下,有向某一部位富集的趋势。Postma指出在潮汐不对称的河口,上、下游河段泥沙的净输移方向有区别,其结果将导致泥沙在河口某一部位的富集。

**絮凝作用** 理论根据是细颗粒泥沙在河口的盐度絮凝作用。试验表明,其絮凝率在某个盐度范围内有最大值。这可能导致泥沙在河口的某个部位(通常在盐水入侵的顶端)沉积作用加剧,为浑浊带的形成提供了物质基础。不过有学者提出在含沙量较高的环境下泥沙由于紊动碰撞而产生絮凝的概率比由盐度引起的絮凝作用更为重要。悬沙的大规模絮凝沉降有利于形成河口高浓度悬浮体,其含沙量的变化范围很宽,常具有非牛顿体流变性质。

**河口环流模式** 河口环流模式与浑浊带的关系在1962年由Rattray和Hansen提出,他们认为在部分混合型河口内存在底层流向陆、表层流向海的余环流模式,在其作用下泥沙在底层被带向上游,在表层又被带往下游,而在余流为零的地方泥沙作垂向运动,成为泥沙富集地区,也是浑浊带发育的中心。1978年由Festa和Hansen用数学模型所证实。在他们的模型中假定上、下游边界没有泥沙输入、输出,变化的主要因素是由于絮凝引起的悬沙沉速,结果形成了浑浊带,其中心位置位于余流零点的稍下游。这一成因说是目前被广泛接受的一种,被认为是形成浑浊带的主要过程。这种环流是伴随盐水入侵出现的,也被称为河口重力环流、异重流。上述环流模式在许多部分混合和缓混合型河口都曾得到观测,在美国切萨比克湾支流托马克河口利用自动记录仪连续1a的观测显示在43%的时间内存在上述有利于浑浊带形成的环流。在中国长江口,多年观测资料显示浑浊带中心位置与盐水入侵上限有一定的关系。

虽然河口环流和浑浊带生成之间的密切关系已从理论和实际两方面得到证实,但仅有河口环流的输沙作用并不能形成实测中浑浊带的高含沙量,因而单纯河口环流说还不能充分解释浑浊带的形成。另外河口环流和形成有赖于径流和水深对潮汐混合作用的抑制,所以主要在分层型(A、B型)河口内存在。对于其他类型河口,尤其是充分混合型河口内的浑浊带,就难以给出充分合理的解释。

**潮流变形引起的输沙作用** 对于潮汐作用强烈、河口环流弱或消失的河口,有学者提出单纯潮汐作用也可形成浑浊带。Allen指出在强潮河口的下段和中段,由于潮流变形引起涨潮流占优势,尤其在底层,由于涨潮流大于落潮流,侵蚀作用加强,泥沙净向上游输移;而在河口的上段则由于涨潮流减弱和上游来水的原因,泥沙净向下游输移,结果在河口的中、上段形成富集,导致浑浊带的形成。作为实例,他列举了吉伦特和奥尔尼(Aulne)河口的情形。

**侵蚀浑浊带** DeGrandpre利用数学模型证明在强潮河口存在一个潮流作用最强烈的地区,底沙被强烈悬浮而形成侵蚀浑浊带。他指出河口潮差的沿程变化受到断面束窄和底边界摩擦两个因素的作用,根据其强弱平衡可将河口分成3类:次同步、同步和超同步河口。在超同步河口内存在一个潮差和流速最大的区域,在该地区浑浊带由于底沙的强烈悬浮而得以形成,吉伦特河口就是一个突出的例子。中国椒江口大含沙量区也是由于潮流对床面细颗粒泥沙冲刷引起的(毕敦洪、孙志林,1980)。

**高浓度悬浮体的悬浮作用** 高浓度悬浮体(包括浮泥)是常见于河口的一种沉积体,尤其在疏浚频繁和过度的河段,常形成浮泥层,这些沉积物在风浪和潮流作用下的大规模悬浮可以成为河口浑浊带的主要成因。在法国卢瓦尔和吉伦特河口,枯季小潮期水流速度小,航道内形成浮泥;大潮期被急流悬浮,成为浑浊带的主要物质来源。浮泥的悬浮既有以一个潮周期为周期,也有以大、小潮和洪、枯季周期为周期的。在塞文(Severn)和莱茵河口也有类似的现象,由洪水所引起的富含沙量带区与河床上高浓度悬浮体的分布位置十分吻合。

对河口浑浊带成因的综合性研究在20世纪70年代便已开始,如Allen, Dyer, Meade等注意到浑浊带可能是多因素作用的结果,而Fisher, Dyer等人则着手将不同的过程加以定量化。

根据统计学原理,河口输沙率公式 $F=V \cdot S \cdot A$ 中的各要素(流速 $V$ 、浓度 $S$ 、断面 $A$ )可以同时时间和空间(垂向、横向、断面)被分解为均值和偏量的和,分解后相乘便得到一系列的项,分别反映了不同的输沙机制,如王康善和苏纪兰提出的输沙率公式就包含了13项,分别代表余流效应、斯托克斯输移、起停滞后效应、含沙量垂直及横向分布、垂向和横向环流对断面输沙影响等。这一计算方法已被应用在许多河口,证明它对理解浑浊带各种成分机制的相对重要性很有帮助。

但是,这样分解所得各项仍不能包含某些重要的成因过程,如底层高浓度悬浮体的输移;或者意义比较含糊,如剪切项既反映了絮凝沉降,又代表了底沙悬浮对含沙量剖面的影响。此外,在断面上实施不同的数据选点可能完全改变计算的结果,这是需要进一步改进的。

目前对河口浑浊带某些成因机制的认识并不深入,如近底层浮泥或高浓度悬浮体输沙问题、浮泥的悬浮速率问题等。对这些问题的深入理解将有助于精确描述河口浑浊带的形成过程,并建立可靠的理论模型,对含沙量的变化作出较准确的预报。同时这些问题既是河口所特有的过程,又涉及到一些泥沙运动的基本理论问题,因而对它们的深入研究不仅有助于理解各种河口过程,而且也可使河口起到泥沙运动的试验场的作用。

(华东师范大学河口海岸研究所时伟荣、沈焕庭、李九发撰)

## 海洋环境中海—气与海—泥交换界面区腐蚀与防护

海水是一种强电解质溶液,金属材料在海洋中遭受着严重的腐蚀。由于金属的腐蚀可以使海上观测仪器失灵,会大大缩短各种设施的使用寿命,或者由于腐蚀不得不中断作业进行维修保养,这既影响了生产又造成人力和物力的浪费。

由于钢铁材料具有价格便宜、强度大、韧性好等特点,所以钢铁材料在海洋开发中被大量使用着。从腐蚀的角度来看,一般把钢结构构筑物在海洋环境中的腐蚀分为5个区带。

(1)海洋大气区。这部分的钢桩不接触海水,始终处于海洋大气腐蚀环境中。与内陆大气相比,由于海洋大气中含有较多的海盐粒子,湿度大,紫外线强,其腐蚀速度为一般内陆大气腐蚀的2~5倍。(2)浪花飞溅区。这一部分属于海洋大气与海水交换的界面区,海水飞溅,钢桩忽干忽湿,风吹雨淋加之日光照射,温度较高,氧的供给充分,因此腐蚀最为严重,普通碳钢在没有采取防腐措施的情况下其腐蚀速度每年可达0.5~1.0mm之多,该部位的腐蚀速度一般为海水全浸区的5~10倍。(3)潮差区。实际上钢铁在这部分的腐蚀比全浸于海水的部分还要轻得多,研究表明,这是由于钢桩同时处于潮差区和全浸区形成了宏观电池,潮差区部分为宏观电池的阴极,因而腐蚀较轻。(4)海水全浸区。海水中钢铁的腐蚀速度一般为0.1~0.2mm/a。但在平均低潮位下部由于含氧量较多、海水流动等原因,使腐蚀速度偏高。(5)海底泥土区。由于溶解氧极少,在一般的海洋构筑物中是腐蚀最轻的部位,特别是在海底1m以下的深处,其腐蚀更为轻微。在海底土壤的腐蚀中,土层越深腐蚀越轻。而事实告诉我们,在海水与海泥交换的界面区有一个严重的腐蚀峰。在这部分氧的浓差电池,硫酸盐还原菌、电阻率、盐度等都是影响腐蚀的重要因素。

在海—气交换与海—泥交换的界面区,由于环境不同,例如溶解氧、海水温度、盐度、 $H^+$ 浓度、电阻率、 $Es$ 、 $Fe^{2+}/Fe^{+3}$ 、氧化还原电位、硫酸盐还原菌等因子的影响,便会产生不同的腐蚀形态。因此进行海上调查,研究各种环境因子与腐蚀的相关性,绘制腐蚀图谱是一项重要研究内容。

海洋大气与海水交换的界面,即浪花飞溅区有一个严重的腐蚀峰,各国腐蚀工作者对此都进行了不少研究工作。另外仅次于海—气交换界面区的另一个严重腐蚀峰值出现在海—泥交换

界面区,在该部位的腐蚀速度远大于单纯的海底土壤中的部位,而有关这部分的研究报道则比较少。研究该部位钢桩的腐蚀规律及其防腐措施是很有意义的。

针对海—气交换界面区与海—泥交换界面区腐蚀最为严重的现象,首先需要利用现场的条件进行模拟钢桩的电连接腐蚀挂片,并与分别挂片的结果进行对照,同时进行不同钢材材料、不同环境、不同水深、不同浸水时间的各种外海试验,并同时要在室内利用模拟的方法进行电化学试验研究。

移植埋片法是指在不破坏原结构的情况下将外海沉积物取出,并将它放在已经设计好的试验容器中,将各种试片埋设在各种不同的沉积物中,然后将容器一起移植埋设在适当的海域,使整个试验装置在试验期间仍旧参与原来海洋体系的循环,使得到的试验结果更接近实际。

电偶腐蚀是钢铁在海洋腐蚀中的一个重要腐蚀行为,从纵的方向来看,海—气交换与海—泥交换界面区及其他不同环境中存在着电偶腐蚀行为;从横的方向来看,在海底铺设的长距离管线要通过不同水质的海水、沉积层及陆海交界处等各种环境,也会产生电偶腐蚀。

当前,钢铁在海水全浸区的防腐蚀措施中铝基牺牲阳极保护法被广泛采用着,在防腐蚀设计中,一般在海底土壤部位中的防蚀电流值为海水全浸区的1/5以下,所以研究的重点应当放在海—泥交换界面区具有严重腐蚀峰的部位。研究铝基牺牲阳极的不同腐蚀环境中的各种电化性能,进而提供特定海区所需要的新型阳极材料是当前需要解决的课题之一。

海底大部分为缺氧环境,而硫酸盐菌则是钢材在缺氧的海底中遭受腐蚀的主要因素之一,硫酸盐还原菌硫酸盐转化为硫化氢,强烈地加速了金属的腐蚀过程。通过现场采样及室内各种模型模拟试验来研究硫酸盐还原菌对钢铁材料腐蚀的影响规律。

钢铁材料在海洋环境中除均匀腐蚀外,小孔腐蚀是影响钢铁材料强度及使用寿命的一个重要因素。利用室内电化学方法可研究钢铁材料在海洋环境中小孔腐蚀的发生、发展及防止小孔腐蚀的方法。

对钢铁材料在海—气交换界面区的防腐蚀措施已进行了许多试验研究,如包敷牺牲钢、不锈钢板、蒙乃尔合金及其他有机复合层是经常采用的方法。根据室内试验结果,在潮差区平均中潮位以上部位,喷铝或铝—锌合金复合层可以有效地防止钢铁在浪花飞溅区及潮差区上部的腐蚀,并且可以配合阴极保护使用。在现场复杂的条件下进一步判定喷铝盖层的保护作用,及研制耐浪花飞溅区腐蚀性能较好的涂料及水下防腐防污涂料是一项重要研究内容。

现场挂片试验及有关电化学测试试验工作量大、周期长,有时还会因自然条件的恶劣而丢失。为此,中科院海洋研究所在国内首创了“电连接模拟海洋腐蚀试验装置与方法”,受到了有关单位的欢迎,并利用它已经进行了许多有关腐蚀试验。为了进一步开展海洋环境中金属腐蚀与防护试验研究,需进一步研制室内用模拟海洋环境腐蚀试验机,以适应室内腐蚀试验研究的需要。

波浪载荷下的腐蚀疲劳破坏是海上钢桩式结构的主要强度破坏形式之一,另外,海水腐蚀与疲劳载荷共同的作用。疲劳载荷可以加速腐蚀的过程,而海水腐蚀也可以加速钢结构的疲劳破坏,从而使寿命缩短。因此进行平台构件的腐蚀疲劳性能研究是完全有必要的。

在对海中钢铁设施进行阴极保护时,选取最佳保护电位对节省电力能源,防止钢桩涂膜的劣化都有重要意义,而最佳保护电位与海水的水质、温度、流速、 $H^+$ 浓度等有着密切的关系,在现场以及室内进行各种保护电位下所需的最低保护电流以及保护电位与钢铁保护效果的关系的研究,建立一套阴极保护优化设计管理系统,对海上钢铁设施的保护,具有重要的指导作用。

在科学发展的今天,计算机已广泛应用在各个领域,腐蚀数据的积累、腐蚀图谱的绘制、腐蚀数据库的建立,进而提出海洋腐蚀综合评价报告,努力做到海洋环境腐蚀灾害预报数值化、程序化等,使海洋腐蚀研究方法规范化,并逐步形成新学科——海洋

工程腐蚀学。

(中国科学院海洋研究所侯保荣、郭公玉、马士德撰)

**海洋沉积环境的基本参数和研究流程** 按照海洋沉积环境研究的基本思想分析沉积环境时,首先要确定一些基本参数。这些参数能反映海洋沉积环境的基本特征,由主要基本参数组合能界定沉积环境,而且这些基本参数应具有成因意义,在最终建立沉积模式时可作成因素使用。海洋沉积环境的基本参数有以下几种。

**沉积物组分及矿物组分** 沉积物组分能说明物质来源和搬运机制,对沉积物组分的研究,首先是区分碎屑组分和自生组分,前者是进行动力分析(沉积作用过程分析)的依据,后者是推断物理化学条件的依据。

矿物是沉积物组成的基本单位,沉积物组分的研究可归结为矿物组分的研究,因而碎屑矿物与自生矿物的区分非常重要,重矿物组合、轻矿物组合、粘土矿物组合以及某些重矿物含量比值、轻矿物的比值(主要是石英/方解石,碎屑方解石/自生方解石)、轻重矿物的比值、某些粘土矿物的比值等,都是指示沉积环境的重要参数。

**元素的丰度、比值和相关性** 元素的丰度和特征的比值及相关性是环境的良好指示。不同的环境(如陆架、陆坡、大洋盆地等),其沉积物有不同的元素组成,微量元素和稀土元素尤为特征。特征的元素丰度和比值,可用于划分海陆相、区分物源、指示沉积作用和进行演化分析。例如,著名的白垩纪末事件就是主要借助于元素的丰度和比值识别出来,取之于深海中的白垩纪—第三纪界线粘土中In的高含量异常, $^{13}C$ 比值的减小, $CaCO_3$ 含量的降低等指示了白垩纪末海洋沉积环境发生了重大变化,有宇宙源物质加入,导致了陨星撞击学说的产生。

在各项环境参数中,元素的丰度和比值是最易于量化和进行数学处理的。对于建立环境数学模型是最有用处的。

**沉积物的结构和构造** 沉积物的结构和构造总称沉积构造,是进行沉积作用过程分析的基础。沉积物的结构包括碎屑颗粒的特点及颗粒之间的关系。颗粒本身的特点主要用粒度、球度、圆度、形态和颗粒表面特征来描述。对于已固结成岩的沉积岩,要注意颗粒之间的关系,区分杂基和胶结物,鉴别颗粒的支撑性和胶结类型。对于沉积环境研究来说,粒度分析资料最有用处,通过数学处理得到的粒度参数和通过作图得到的曲线是环境的良好指标。石英砂粒表面特征与海洋沉积环境的关系也是热点的研究题目,已取得了一些重要结果,近来又有人试图将此项研究扩大到重矿物。

至于沉积构造,对沉积环境的研究来说,最有意义的是原生沉积构造,它可指示沉积物的搬运、沉积方式,沉积介质的性质及流体的动力状态。一般,不应把单个沉积构造的存在与否作为环境解释的确实标志,而利用保存于沉积层序中的沉积构造垂向序列或组合来判别沉积作用,鲍马序列就是浊流作用形成的一套沉积构造的组合。

**生物组合和生态特征** 生物与其生存的环境是统一的,不同类别的生物对环境因素的要求是不同的,因而不同的沉积环境中都有与环境物理化学因素相适应的生物组合、生态特征,它们随着环境条件的演变而不断变化和更替,所以生物类别、数量和形态构造,生物群落或化石组合面貌可以指示海洋沉积环境。滨海、浅海和深海环境中都有其特征的化石组合及生态特征。另一方面,若在沉积物中发现了与其环境不相适应的生物组合,则表明了特殊搬运、沉积作用的存在。例如在深海沉积物中发现有滨海生物组合,则可能为浊流搬运的结果;而南极底层流可将南极特有的生物分子搬到中太平洋沉积下来。

**沉积序列与旋回性** 在陆相盆地分析和沉积环境研究中,特别重视充填序列和旋回性的研究。沉积序列由若干套沉积组合构成并按一定顺序出现,每套沉积组合皆由共生关系密切的沉积岩相组成。旋回性指相似沉积组合在空间(垂向上)重复出现。沉

程序列和旋回性是建立沉积模式的基础。我们认为,将沉积序列与旋回性参数引入到海洋沉积环境是可行的,尤其是对较深孔岩芯的分析更是如此。欲建立此项参数,难点在于划分岩相和组合。在划分出岩相之后,采用马尔科夫概型方法处理。

**沉积体的形态和厚度** 海洋沉积体(OcuoyRoe Teno ok esRQ)是前苏联学者提出的概念,沉积物在海盆中所构成的沉积体的形态和厚度反映海洋沉积环境的宏观特征,是各种因素综合作用的结果。当没有侵蚀间断或不整合存在时,依据瓦尔特(Waither)相律,从单个岩芯所反映的沉积体纵向序列可以推知横向上的环境变化,在大陆边缘研究中这种方法尤其有用。沉积体的形态和厚度反映沉积区整体的占地理概貌,直接决定着沉积矿产富集的有利部位。沉积体的形态和厚度随时间不断地发生变化,如果条件允许,应该分期编制一套环境古地理图来反映不断变化的沉积体概貌。

**地层层序和年代** 海洋沉积环境的研究,特别是演化分析是建立在地层层序基础之上的。海洋地层学与陆地地层学相似,广泛运用岩性地层学、生物地层学与时间地层学3种方法建立地层层序。另外,海洋地层学还广泛采用事件地层学、磁性地层学、气候地层学和元素地层学方法。沉积物的年代参数主要是通过放射性同位素测量获得,通过地层学方法对比也可获得年代数值。有了年代数据以后,将柱状沉积物岩芯中的元素变化剖面转移到时间座标上,通过数学方法(如功率谱分析)处理后,可以得到很好的环境演化模型。

**沉积期的火山活动和沉积** 火山活动主要受地质背景控制。沉积期火山活动有可能造成沉积间断,火山喷发物也可以加入到沉积物中沉积下来。这项参数包括火山岩成分、沉积厚度及与上下层位的关系。

**含矿性** 含矿性参数包括矿产(层)的形态、厚度、赋存层位及分布特征。海洋沉积矿产是海洋沉积环境发展演化的结果,除了实用意义外,它又能敏锐地反映沉积条件。例如,铀钍核的存在表明沉积区沉积速率低、底流活动强、具氧化条件,一般在深海区;而磷酸盐矿床多在陆源浅海区,微生物活动强烈,有较强上升流的环境。

可以看出,上述参数是非常粗略的,有些不能用数据表示,而且分类也不统一。基本参数的选择和提炼尚需做大量的工作。海洋沉积环境研究的最终成果是沉积模式的建立。模式法和参数法是人们研究沉积环境的两条途径。

因为沉积环境是由许多边界条件限定的,所以人们一直试图通过确定边界条件或参数来恢复环境,这一设想在逻辑上是合理的,但在实际工作中是困难的,这在海洋沉积环境中表现尤为突出。其一,很难确定代表环境充分必要条件的参数,有些参数反映的是环境的充分条件而非必要条件,有些则反映的是必要条件而非充分条件;其二,有些关键性参数难于求解和确定,有时根本求解不了;其三,若确定足以标志环境的参数要做大量的工作,在经济上和效率上都非最佳选择(何起祥,1988)。因而单纯依据参数法来恢复环境是不可取的。将参数法与模式对比法结合起来比较方便与实用,对已成为陆地的古海洋,沉积环境的恢复更离不开模式对比。

沉积模式是对一个特定沉积环境的全面概括。理想的模式除了概括环境外,还应起到4个方面的作用:环境判别比较的标准,观察的提纲和指南,水力学解释的基础和新区预测的工具(沃克,1982)。海洋沉积环境模式建立的过程实质上就是对古今许多地方性海洋环境实测进行提炼和概括的过程,用提炼出的模式指导观察并进行预测,然后把实践结果反馈出模式。经不断的反馈、修正、充实、完善,使模式趋于符合实际。在对新海区进行环境研究时,可以先求解几个主要的易求的参数,与已知的类似的模式对比得出一个粗略模式并进行预测,随着工作的深入而不断完善,最终建立起一个地方性模式。

应该指出的是,海洋沉积学研究必须与大陆沉积学结合起来。海洋沉积学现在主要是研究为海水所淹没的沉积环境,所得到的模式更具有直观性和现实意义,应将这种模式与陆地古海洋

环境模式相比较,进而推广应用到陆地古海洋环境研究中。

(中国科学院海洋研究所石学法撰)

**沉积物捕捉器** 自20世纪70年代以来,沉积物捕捉器的应用对于化学海洋学和生物海洋学的发展起着一定的推进作用。海水中沉降的颗粒物质不仅受到重力作用,同时也受到流作用。当将捕捉器放置在海水中时,它周围的流场将受到阻碍和扰动。多数情况下,由于捕捉器的阻挡,周围的流将加速,并受到分散,此时,在捕捉器开口处,流速加大,压力减小。当捕捉器上方的压力梯度和分散作用足够大时,海水在捕捉器周围将产生涡动,涡流沿着捕捉器的外壁旋转进入捕捉器底部,从而引起捕捉器内的静水产生运动。涡动的大小和频率取决于捕捉器的几何形状和流场的特性,由涡动引起流场变化,严重地影响了海洋中沉降的悬浮颗粒,控制着水体的交换和停留时间。因此,Butman等人提出了捕捉器设计中的6个参数:流速( $\mu$ );捕捉器开口外径( $D$ );流体运动学粘度系数( $\nu$ );捕捉器高度( $H$ );颗粒重力沉降速度( $w$ );捕捉器开口内径( $d$ )。对于典型的圆柱形捕捉器,可用3个综合参数表示:

$$Re = \mu D / \nu$$

$$A = H / D$$

$$\text{流速与沉降速度比: } \mu / w$$

式中, $Re$ 为雷诺数; $A$ 为外形比。公式中最主要的几何参数是 $Re$ 和 $A$ , $D$ 同时影响 $Re$ 和 $A$ 。

沉积物捕捉器设计的基本要求 为保证收集各种颗粒度的沉降物质,必须要最大限度地减少捕捉器内外的涡动和防止沉积物的再悬浮。由于捕捉效率取决于悬浮体的浓度、颗粒的大小和密度,捕捉器的几何形状以及流速,因而必须进行实验室和现场研究,马萨得斯技术学院和伍兹霍尔海洋研究所曾共同进行了如下研究:捕捉器的几何形状与捕捉效率的关系;捕捉时间、流速与捕捉效率的关系;不同流速下的各种漏斗形捕捉器的捕捉效率等动力学实验。要求足够大的开口面积,使得捕捉器能在预定的投放时间内收集足够量的样品。列举一些海域的颗粒物质通量(单位为 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )的大约范围:北太平洋,大西洋为500~100, Sarga-sso海为40,巴拿马海盆地为500~1000, Funka湾(日本)为2900~24000,萨尼奇湾(加拿大)为700~6000 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。要求时间系列控制系统可靠和具有较大范围的可调性。这是因为通量研究要求获得月、季度以至年度变化资料,所以要求捕捉器必须具备定时分步收集的功能。时间控制系统是准确无误地工作的重要部分,目前主要由石英定时控制器和微型计算机控制系统组成时间控制系统。要求分步收集样品,分别贮存,并与周围的海水隔离,能安全回收。捕捉器的材料和结构应适应于在海洋任何正常深度下投放。要求能运用普通的海洋调查船进行投放和回收。

**常用捕捉器** (1)圆柱形捕捉器。适用于物质通量较大的近海和海湾,中国科学院海洋研究所、加拿大海洋科学研究所和哥伦比亚大学以及日本的S. Tsunogai等人都长期使用过。其特点是开口面积小、结构紧凑、成对悬挂、投放和回收简便。直径一般为20cm左右, $H/D$ 为3~3.5。不能分步捕捉样品。(2)梅花形捕捉器。其外形与圆柱形捕捉器相似,但直径小, $H/D$ 大。具备圆柱形捕捉器的特点,配置蜂窝巢。(3)圆柱形与漏斗形组合捕捉器。由日本的K. Iseki博士设计,曾用于白令海有机碳海洋通量研究。体形为圆柱形与漏斗形的组合,开口面积较前两种大,不配备蜂窝巢,但是配有密封盖,投放时打开密封盖,回收前,借用使锤启动,将捕捉器的开口覆盖。(4)漏斗形捕捉器。美国伍兹霍尔海洋研究所S. Honjo设计的3种尺度的漏斗形捕捉器(Mark2, Mark5和Mark6)是该类型的代表。具有分步捕捉的功能,可以投放1a,以至更长,设有12个搜集杯。时间系列控制系统准确、可靠,又称时间系列捕捉器。它们已先后应用于北太平洋、大西洋、北冰洋、Sargasso海和巴拿马海盆地等海域的海洋物质通量研究。Mark2, Mark5和Mark6的结构和性能基本一

样,不同之处在于所用材料不同,分步捕捉控制系统不同,方法和开口面积不同。

海洋通量研究已成为世界海洋研究的3大主要课题之一。沉积物捕捉器是研究海洋能量(垂直通量)的基本可靠手段,中国的少数单位已开始设计和使用这种设备,但是还不成熟,特别是今后将从事海洋通量的年季变化研究,需要采用微程序动力控制的时间系列捕捉器,因而本文论述了沉积物捕捉器设计的基本原理和目前国内外运用捕捉器的研究动向,以有利于国内有关单位参考和运用,促进这个研究领域的发展。

(中国科学院海洋研究所詹滨秋、李鹏程、任建伟撰)

**治理赤潮的化学方法** 关于赤潮治理方法的研究起步较晚,迄今已报道有许多种。鉴于赤潮现象本身的复杂性和对治理方法的环保要求,真正能推广应用的寥寥无几。目前采用最多、发展最快的,大都是化学方法。

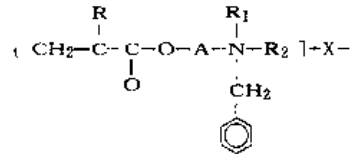
**直接杀灭法** 该法旨在利用化学药品直接杀死赤潮生物。目前已发现能杀死赤潮生物的化学药品有多种。国际上对该类药品的一般要求是:低浓度下能迅速破坏、杀死赤潮生物;在海水中易分解、消失;对非赤潮生物不产生影响;成本低。目前尚未发现某种药品完全符合上述要求。但实验表明,在不同的要求和条件下仍有些化合物可供选择。如硫酸铜、高锰酸钾、次氯酸钠、氯气、过氧化氢、臭氧、过碳酸钠等。

硫酸铜是最早应用于海洋湖沼中的杀菌药品,所以也在治理赤潮的研究中最早选用。尾田(1935)曾在实验室中分别考察了硫酸铜、氯气等对裸甲藻(*Gymnodinium mikimotoi*)的灭杀效果。其中硫酸铜最有效,当浓度达1mg/L即可抑制其生长。但使用硫酸铜有以下缺点:具有毒性,能破坏近岸生态系统;控制赤潮是暂时的,成本高。鉴于铜类试剂的缺点,人们着眼于一些在水中易分解、残留量少的化合物。富田(1982)曾设计一装置,将含有赤潮生物的海水引入后电解产生次氯酸杀死赤潮生物。该方法优于外加次氯酸钠的方法,但其装置复杂,难以用于大面积赤潮的治理。村田(1989)、神田(1989)等提出用过氧化氢消除海洋福胞藻(*Chattonella marina*),实验得出不伤害鱼类的有效过氧化氢浓度为15~50mg/L。这些方法的优点是药品能在水中马上分解,无污染。

相对无机除藻剂而言,目前研究较多的是有机除藻剂。这些有机试剂可分为人工化学物质和生物分泌物两类。由于前者往往能破坏生态环境,故后者是目前研究的主要对象。其种类主要是有机羧酸和有机胺,前者以一些不饱和脂肪酸为主,如花生四烯酸、亚油酸等。相对无机化合物,有机除藻剂具有药力持续时间长、对非赤潮生物影响小等优点。

**凝聚剂沉淀法** 利用物质的胶体化学性质,使赤潮生物凝聚、沉淀而后回收是该方法的主要目的。现在国际上使用的凝聚剂有三大类:无机凝聚剂、表面活性剂和高分子凝聚剂。无机凝聚剂又称为电解质凝聚剂,普遍使用的是铝和铁的化合物。主要利用铝盐和铁盐在海水中形成胶体粒子,对赤潮生物产生凝聚作用,该作用与溶液H<sup>+</sup>浓度有关。通常胶体粒子表面电荷越少,凝聚作用越强。所以疏水性胶体粒子最有效。例如用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O制成不同晶形的氧化铝溶胶聚合体,对赤潮生物有极强的凝聚作用。加入1min后,立刻无游动型赤潮生物;30min后,90%的细胞被凝聚沉淀(奥田庚二,1989)。铁盐也有类似性质,如用铁矿酸化制得的一些铁盐,在海水中浓度达10~100mg/L即可形成氢氧化铁溶胶,对赤潮生物产生较强的凝聚沉淀作用(奥田庚二,1990)。

由于赤潮生物具有昼浮夜沉的趋光性质(Eppley et al, 1968),治理时的凝聚过程主要在表层进行,所以表面活性剂和表面活性剂成为发展较快的赤潮凝聚剂。实验表明,带正电的表面活性剂和表面活性剂对赤潮生物最有效,但通常海水的高盐度大大降低了其凝聚作用。对此山本保夫(1981)提出一种新型凝聚剂,其结构为:



其中,R为H或甲基,R<sub>1</sub>,R<sub>2</sub>为1~4个碳的烷基,A为2~4个碳的直链或接枝烷基;X<sup>-</sup>为平衡阴离子。该凝聚剂的凝聚作用不受海水高盐度的影响,其凝聚能力与氮上4个官能团有关。当其中之一是苄基时,对赤潮生物凝聚作用最强。根据不同赤潮生物,当浓度为5~1000mg/L时,细胞去除率达90%以上。

此外,PAC、聚丙烯酰胺等高分子凝聚剂也在市场上占有重要地位。鉴于高分子单体的毒性和成本问题,在使用上受到一定程度的限制。由此可见,凝聚剂沉淀法是利用化学手段消除赤潮的又一重要途径。

**天然矿物絮凝法** 日本是研究应用天然矿物治理赤潮的主要国家,其天然矿物以粘土矿物为主,其他矿物质为辅。粘土矿物是大地土壤的基本单元,在大自然中具有参与物质循环,使之自然净化的作用。早在70年代就有人开发利用粘土,使之成为鱼类的饵料(代田昭彦,1975)。在其他领域,粘土矿物又作为一种天然吸附剂被广为研究(Swartzen-Allen et al, 1974)。所以粘土矿物被认为是一种治理赤潮的天然凝聚剂,具有来源丰富、成本低、无污染等优点,在国际上受到高度重视,因而从实验室到养殖场,乃至天然海域均做了大量的实验研究。

最早开展粘土矿物对藻类凝聚作用研究的是日本小岛贞男(1961),其目的是消除贮水池中产生的大量浮游植物。在实验中,他将粘土矿物作为“增重剂”与硫酸铝土混合,使藻类去除率由单纯硫酸铝土时的82%上升至97%。此后该结果被应用于海水条件下的藻类凝聚试验,结果表明,粘土矿物对赤潮生物的凝聚作用与其种类、结构和表面性质等因素有关,其中蒙脱土的凝聚作用最强。其去除率高低与粘土溶液能否和赤潮生物形成“絮状物”以及形成大小有关,通常悬浮粒子表面电荷愈多,形成“絮状物”愈大,去除率愈高。针对这些实验室结果,80年代初日本在鹿儿岛实验场进行了大规模的现场实验,取得了满意的结果。

用粘土矿物治理赤潮在成本、对环境和非赤潮生物影响等方面远远优于前述几种方法。但其溶胶性质差,迅速凝聚、沉淀赤潮生物能力低,量少时难以完全消除赤潮生物。所以在实际应用时必须大量散播粘土,由此给大面积治理赤潮带来了原料量和淤渣量过大的问题。针对该不足,大须贺龟丸(1983)提出,用适量盐酸处理后的粘土可显著提高其去除效率。认为其原因用盐酸处理后的粘土粒子有较高的铝离子置换容量和较大的比表面积,从而提高了对赤潮生物的灭杀能力和凝聚作用。丸山俊朗也提出了类似的观点,认为所有无机酸均有上述作用,其中以硫酸最经济,并指出处理后的粘土物质不仅提高了灭杀和凝聚赤潮生物的能力,减少了散播后的淤渣,而且能抑制磷从底泥中溶出,降低了水域营养盐的浓度,净化了水体。所以,不仅能治理赤潮,而且还有助于防止赤潮的发生(丸山俊朗等,1984,1987)。

总之,用粘土物质治理赤潮是一种很有发展潜力的方法。目前研究的对象大都是植物性赤潮生物,主要集中于该技术的开发应用上,有关治理方面的基础性研究较少。目前对其去除机理主要有两种观点:一种立足于粘土粒子和生物的表面性质,认为以吸附作用为主(代田昭彦,1980);另一种则认为这是由于粘土中溶出的铝离子杀死生物细胞所致(九万田一巳,1982;丸山俊朗等,1984)。所以,欲提高粘土物质的去除效率,进一步开发和应用这种方法,开展有关的基础性研究将是今后一项重要内容。另外,还有人提出以沸石和多氯化铝或硫酸铝组成的赤潮去除剂(池添有朋等,1986)和以水铝英石、腐植酸为主要成分的赤潮生物强力凝聚剂(包国祐雄,1984)等等。这些方法的推广应用价值远远不如粘土物质治理法,但作为一种补充,这些方法的提出为人们治理赤潮开阔了思路和途径。

(中国科学院海洋研究所俞志明、邹景忠、马锡年撰)

# 自然地理学

## 数理地理学

**地理信息** geographical information 又称资源与环境信息(Resources and Environment Information),地理信息是地理圈或地理环境中的要素或物质的数量、质量、分布特征及相互联系等的数字、文字、图形和图象的总称。人类认识地球并获取其信息经历了漫长的历史时期,积累了丰富的资料,特别是遥感遥测技术的应用,采集到的地理空间信息量激增。由于人口膨胀、资源短缺和环境恶化,社会对地理信息的要求日益提高,需要适时和动态地识别、转换、存储、传输、再生、显示、控制和应用这些信息。地理信息系统作为综合处理和分析空间信息的技术系统,将传统的定性分析发展为定性、定量和定位相结合的分析,从单一要素的分析过渡到多要素多时相的综合时空分析,在自然资源清查与评价、土地潜力与适宜性分析、环境动态监测与预报,以及市场、交通和城乡的规划、灾害的预测预报、资源开发和环境保护等方面,得到了广泛的应用,成为现代地理分析的重要技术手段。

地理信息系统是20世纪60年代中期发展起来的一门新技术。20世纪40年代和50年代,由于计算机科学、地图学和航空摄影测量技术的发展,产生了最早的地理信息系统的基本框架。到60年代初,计算机被用于空间数据的存储与处理,计算机成为地图信息存储和计算处理的装置,将很多地图转换成能为计算机利用的数据形式。计算机分析地图内容并提供决策信息,是从自然资源管理和土地利用规划开始的,在这个基础上诞生了世界上第1个地理信息系统——加拿大地理信息系统。它是在加拿大政府环境部的主持下,从1963年开始设计,1966~1967年间由加拿大IBM公司具体研制的,到1968年取得较大的进度,1971年系统全面投入使用。

70年代出现的第3代计算机,不仅内存容量大增,运算速度达到 $10^{-6}$ 级,而且输入输出设备齐全,推出了大容量直接存取设备——磁盘,为地理数据的录入、贮存、检索、输出提供了强有力的手段,特别是人机对话和随机操作的实现,可以通过屏幕直接监视数字化操作,还可进行实时编辑。80年代诞生的第四代计算机,特别是微型计算机、工作站和远程通讯传输设备的出现,为计算机普及应用创造了条件,加上计算机网络的建立,使地理信息的传输时效得到了极大的提高。

数据的标准化与规范化是信息资源共享的基础。日本、法国和加拿大都十分重视全国性信息的统一规划与标准。中国吸取国际上的经验与教训,着重开展关于资源与环境信息系统的国家规范研究,以便准确地规定系统中普遍涉及的内容分类、数据格式、控制体系、精度要求和技术名词等,以保证不同系统数据之间的交换。

数据结构是地理信息系统中最活跃的研究领域。目前地理信息系统的数据结构主要有两种,一是空间数据文件结构,它包括点记录文件结构、多边形结构、栅格结构及其组成的系统,这类系统有双重独立地图编码系统(DIME)、多边形转换系统(POLYVERT)、地理属性和空间坐标的拓扑联接编码系统(TIGER);二是关系数据库管理结构,它将几何数据与属性数据分开存储,关系数据库系统管理非图形数据,通过公共的数据项,

实现两种数据的自动联接。

现代地理信息系统的设计表现出明显的综合性特色。其综合性首先包括信息系统输入数据的完整性、系统的遥感影像数据与地图矢量数据的结合、系统使用的矢量数据与栅格数据的相互兼容,以及与机助制图系统的结合。遥感数据在环境动态监测、自然灾害防治以及土地利用分类等方面,具有其它类型数据无法代替的优越性。因此综合性地理信息系统以功能较强的图象处理系统为基础,通过对遥感影像进行专题分类,然后对分类后的栅格影像(象元)进行矢量化,最后以弧段格式存入数据库,以便与其它来源的数据进行匹配,提供分析应用模型,输出优质的图形图象。80年代以来的以知识为对象的信息处理,利用人工智能方法,通过多种语言,如LISP、C及专家知识的规则,建立知识库,发展专家系统。

随着地理信息系统应用领域的不断拓宽,地理信息系统的发展和已不再受国界、区域界的限制,工业化国家和第三世界国家均在开发自己的系统软件或购买商业软件建立自己的系统。这有利于解决全球性问题,例如全球的沙漠化、全球可居住区的评价、El-Niño现象及酸雨、核扩散等对世界环境潜在的影响等。建立国际间或全球地理信息系统已引起了国际组织的重视。1985年欧洲经济共同体宣布联合设计提供全欧环境信息的地理信息系统(CORINE),联合国环境规划署(UNEP)已在肯尼亚首都内罗毕建立了全球环境监测系统(GEMS)和全球资源信息数据库(GRID)。国际科学联合会(ICSU)提出建立监测生物圈和地球空间变化的地理信息系统,于1984年在加拿大渥太华举行的首届全球变化专题讨论会,主要致力于建立全球地理信息系统,用以监测全球变化和全球范围内的问题。

根据1990年8月“北京国际地理信息系统研讨会”、1991年5月“ARC/INFO用户会议”及与美国国家地理信息与分析中心有关专家的讨论,地理信息系统发展的方向是:(1)与遥感遥测技术、全球定位系统和机助制图技术有机结合;(2)系统硬件小型化,采用光盘存取、网络传输数据;(3)加强空间分析的功能,充分注意系统分析模型的研建;(4)数据结构和算法仍是主要研究课题;(5)提高数据的标准化与规范化水平及系统的智能化水平;(6)全球数据库的研制及对全球变化的监测;(7)提供良好的用户界面和优质服务。预计地理信息系统在数据结构、不同系统之间的兼容、地学模型分析和专家系统等方面取得突破性进展,在生产、生活、军事、地学分析、工程环境评价、全球变化监测等方面广泛应用。

### 参考文献

- 1 Tomlinson R F, et al. Computer hHandling of geographical data. the UNESCO Press, 1976
- 2 Calkins H, et al. Computer software for Spatial Data Handling, full geographic at information system, USGS, 1980
- 3 Clark K C. Recent trends in geographic information system research, Geo-Processing, 1986, 1(3), 1~15
- 4 Smith T R. International Journal of Geographical Information Systems. 1987, 1(1), 13~31
- 5 吴健康. 黄土高原(重点产沙区)信息系统研究, 1988, 25~32  
(南京大学阎国年博士撰)

**地理信息系统** geographical information system (GIS) 是60年代发展起来的新兴科学技术领域,它随着计算机、通讯

网络、遥感技术、人工智能的进步以及系统工程、区位理论、模式分析等理论的深化发展,正向着系统化、模式化和智能化方向发展。

地理信息系统是对地理环境信息进行采集、储存、检索、分析和显示的综合性技术系统。它一般由信息源选取、整理编辑预处理、数据信息输入、数据管理、分析应用和数据图件输出几个部分组成,具有系统综合分析和预测预报的能力。有机地将自然、人文科学综合成为一体化,这对于自然资源与环境的管理、规划和决策等方面有着深远的科学实践意义和积极的重要作用。

地理信息系统具有空间与时间的分布特征,它通常以资源与环境为主要研究和服务对象。因此,在我国亦称作“资源与环境信息系统”(REIS),“地理”在此指“空间”含义,故其属于空间信息系统。1985年2月开始筹建的中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室,就是基于这一目的,开展这一领域的研究和应用。地理信息系统能实现对各种调查实测、遥感、地图和社会统计等资料数据建成地理数据库,进而开展多要素、多时序、多层次的综合分析处理,通过多途径向用户提供信息服务,为国民经济建设提供现代化的技术手段,使资源开发和环境整治从定性到定量分析,从静态达到动态监测等的新技术管理水平得以提高。所以,地理信息系统也是对地理空间信息进行综合分析处理的技术系统。

地理信息系统的类型众多,它们可按性质、用途、功能等予以分类,按性质分为静态、动态的非空间模式地理信息系统,静态、动态的空间模式地理信息系统,这4种模式以动态空间数据模式为核心,按用途分为资源与环境监测信息系统、城市规划与管理信息系统、规划与评价信息系统、空间信息分析系统等;按应用功能分为专题地理信息系统、区域地理信息系统和综合性地理信息系统。

20世纪60年代初,世界上主要是关于城市和土地利用方面的信息系统的研制,如加拿大地理信息系统(CGIS)。此后GIS经历着快速的发展,1966年美国成立了城市和区域信息系统协会(URISA)等,1968年国际地理联合会(IGU)设立了地理数据收集和委员会,它们为地理信息系统的发展,起到了积极地促进作用。70年代,继加拿大、美国后,德国、瑞典、日本、法国等先后都发展了各自的地理信息系统。1978年国际测量工作者联合会(FIG)规定了第3委员会的主要任务是研究地理信息系统。同年在德国达姆斯塔特(原联邦德国)工业大学召开了第1次地理信息系统会。70年代后期,地理信息系统与图像处理系统功能结合的软件系统日渐增多,并相继出现“遥感与地理信息系统”。早在1965年,Garrison等人就提出把遥感数据纳入地理信息系统的观点,Nichols和Brooner(1972)及Steiner(1973),分别介绍了遥感与地理信息系统的接口问题的研究。可见,遥感是GIS的重要信息源,GIS是处理和应用空间数据的一种强有力的工具。所以,在GIS支持下改善遥感数据分类精度是一个有效的技术途径。80年代,人工智能开始引进地理信息系统,在GIS支持下的专家系统的智能分析和决策应用等深入发展,从而促使地理信息系统达到新的研究水平。美国(Abler,1987;NCGIA,1989)和英国(Maher,1990)均建立起国家地理信息中心。

回顾GIS的发展,自60年代以来,在向纵深方向发展,现已逐步向实用化阶段过渡。目前已推出不少的商用地理信息系统,如美国环境系统研究所(ESRI)的ARC/INFO系统,它主要是用于地理数据的管理,具有输入、分析、管理、显示和转换等功能。它是模块化设计,故拥有通用地理信息处理的组件箱,实现更复杂的地理信息系统功能。

90年代地理信息系统的理论与技术有新的进展。陈述彭提出,要把科学注入到数据中去,把数据奉献给社会,提高地理信息系统的科学水平和社会效益。地理信息系统的发展,为遥感数据综合利用奠定了重要的基础。因此,到90年代人们越来越深刻地认识到开发遥感数据的必要性和GIS用于管理遥感数据的潜力,所以实现遥感与GIS一体化,建立实用性的一体化GIS,成为

科学工作者深入关注的一个课题,即解决不同系统之间一体化和标准接口问题。对此,Ehlers等讨论了遥感与GIS一体化的3个阶段:第1阶段是借助于GIS与影像分析系统之间的某种数据交换格式来实现的;第2阶段是将串联或组合栅格/矢量处理方法予以实施;第3阶段是把遥感与GIS看成是一个系统。这种先进的一体化技术能极大地发挥多传感器遥感对GIS的作用,使其一体化系统具有更优越的功能。

目前GIS已成长为一较完整的产业,它较多地向GIS技术的进步、GIS的理论基础和专门领域的应用方面发展。GIS的硬件处理机速度和内存容量,每年成倍数的增加,计算机从同一网络内或网络群中访问正成为大型GIS应用的需求,并形成大范围的网路,在软件设计中更注重于复杂的空间数据类型、关系和一体化数据压缩问题的研究。对于数据,今后应集中提高数据收集和维护的功能,使数据共享技术迅速发展起来,另外,用户界面的发展,其设计思想尽量与人们所用的方式紧密结合,使用户界面变得简单易学,以适应于不同水平的用户群及其它的文化和语言。可见,GIS是一个多因素影响的复杂系统,其中所用技术的快速进步和适应用户及机构需要是影响的重要因素。不言而喻,90年代,微机地理信息系统是一重要的发展方向。GIS的技术、空间信息正迅速地成为各种决策任务中的重要因素,并进入研究或实验应用阶段。

#### 参考文献

- 1 Proceedings of International Workshop on Geographical Information System. Beijing, 1987,5:25~28
- 2 Proceedings of the second International Workshop on Geographical Information System. Beijing, 1990,8:8~11
- 3 Manfred Ehlers. 遥感与GIS,1990,4
- 4 Andrew U Frank, Max J Egenhofer. 90年代GIS技术展望. 1991,57(11)

(中国科学院地理研究所傅贵青研究员撰)

#### 地理系统评价 evolution of geographical systems

地理系统是地理环境系统和社会经济系统相互作用形成的复合系统,是人与自然相互密切关联的系统。地理环境是人类社会、国家赖以生存和发展的环境,有自然的、有人为的、也有人所改造的自然环境。因此,一方面地理环境系统为人类活动提供资源和生存空间,另一方面又受到人类社会经济活动的显著影响。随着科学技术和经济的发展,人类活动对地理环境的影响越来越大,科学地认识地理系统的动态规律,揭示地理环境的现状,预测人类活动对地理环境系统的影响,无疑是地理学的一项艰巨任务。地理系统评价就是利用各种定性和定量方法,根据确定的评价目标,对地理系统作出客观评价,在保护人类生存的地理环境和协调人地关系方面具有重要意义。

地理系统评价根据所选定的评价指标数目可分为单项指标评价和多项指标综合评价两大类。单项指标评价就是根据某项关键指标对地理系统的某一方面作出评价。例如一个地区的农业人口容量主要取决于该地区的农业生产潜力,可以根据农业生产潜力对人口压力作出客观评价。多项指标综合评价就是用多个指标表示地理系统的综合状况,在此基础上作出综合评价。例如城市中的工业企业排放各种污染物污染城市环境,为科学地调整工业布局、改善城市环境,需要根据经济效益、环境效益和社会效益等各种指标对工业企业、工业小区进行综合评价。

地理系统评价方法可以用定性的定量的方法,也可以用定性和定量相结合的方法。60年代以来,随着电子计算机技术的发展,各种定量方法得到了应用。主要的有:最优分割法,系统聚类法,逐步聚类法,模糊聚类法,因子分析加权法等。最优分割法是根据方差分析原理对事物进行分类、评价的方法。1939年沈建法和黄叶芳曾用最优分割法对中国各省市的经济水平进行过分类和评价研究,且在此基础上对方法进行了进一步的改进,提出了一套更适合于不同地理系统评价的新方法,并应用新提出的最

优分割法研究了上海市“72”工业小区大气环境质量分类与综合评价,有效地区分了不同类别工业小区的环境经济效果,系统全面地对“72”工业小区的环境污染与经济状况作了客观的评价。系统聚类法是一种把事物按相似性逐步归类的方法,目前已被广泛地应用于气候、土壤、地貌、经济区划和国土区划等不同层次的地理系统评价。逐步聚类法也称动态聚类法,是在某分类基础上,按照某种最优原则,进行反复迭代,直至分类比较合理为止。1989年封志明在土地资源定量化评价中应用此方法来进行评价研究,以85个农用土地资源单元为评价对象,构成评价样品集,选择与农业生产密切相关的对生产潜力有较大影响的土地特性,构成样品评价因子集,建立原始数据库,用经验方法和Fuzzy数学方法相结合,借助计算机建立一种土地资源定量化评价的新模式,利用新模式对甘肃定西县农用土地资源生产潜力作了评价。模糊聚类法是通过标定相似关系 $R$ ,经过模糊矩阵的自乘复合运算,最后根据一模糊等价关系的固有性质进行动态聚类归并,此方法可以有效地进行区域环境质量评价的研究。因子分析加权法是采用因子分析方法确定各项指标的权重,由此得到综合指标,对地理系统作出评价。

地理系统评价的趋势是同地理信息系统相结合,地理信息系统为聚集、存储、处理、综合分析、输出大容量的地理系统信息提供了技术支持。地理系统是一种空间系统,宜于用二维或三维的地图或图形直观表述,地理信息系统具有多层次数据结构、多功能综合分析能力的空间型信息系统,集自动制图、数据处理、地理系统评价方法于一体,从而可以快速、灵活地进行地理系统评价。目前,地理信息系统已在地理系统评价研究中得到了一些应用。例如,1990年贾冰媛等进行了区域城镇发展用地评价的研究,是以海南省为例,选定9个与城镇发展用地有关的要素,利用地理信息系统的技术,建立了地形评价模型、基础设施辐射范围扩散模型、分区多幅图覆盖分析模型等一整套模型,使评价工作更科学、系统,且省时省力,根据综合评价结果,将全岛按用地结构划分为五个地带,为规划海南省城镇发展、资源保护以及旅游开发等提供了理论依据。

地理系统评价的研究重点是进一步发展各种定量评价方法,并探索同地理信息系统相结合的途径。区域性、全球性的地理系统评价将会越来越得到重视与发展。

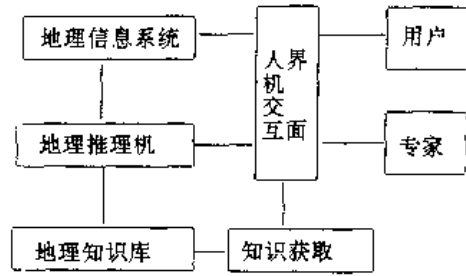
#### 参考文献

- 1 沈建法,黄叶芳. 数学的实践与认识, 1989, 2
- 2 封志明. 地理新论, 1989, 2(4)
- 3 贾冰媛, 毛学军. 地理研究, 1990, 4(9)
- 4 张超, 余国培, 沈建法. 华东师大学报(自然科学版·地理科学专刊), 1990, 37~42
- 5 Maguire D J, Goodnild M F & Rhind DW. Geographical Information Systems, Principles and Applications, 1991
- 6 张超, 沈建法. 区域科学论. 武汉:华中理工大学出版社, 1991  
(上海师大地理系黄叶芳硕士撰;沈建法审)

#### 地理专家系统

geographical expert system 一种拥有大量地理专业领域知识(包括理论知识和地理专家经验)和地理数据并能在一定的推理策略控制下进行以地理知识为核心,以地理数据为对象的推理,以产生一定的地理决策方案为目的的计算机软件系统。用该系统求得的地理决策方案和人类地理专家在相同推理条件下得出的方案具有相同的水平。

由于地理学中大量存在难以用数学方法精确描述的不确定性问题,不能或很难用常规的方法解决,而地理专家系统通过运用知识和经验进行推理,特别适合于解决或者辅助人类专家解决各类不确定性地理决策问题。因此,地理专家系统具有很大的实用价值。一般地,地理专家系统可以分为4个功能模块,即地理知识库(Geographical Knowledge Base)、地理推理机(Geographical Inference Engine)、地理信息系统(Geographical Information System)及人机交互界面,如图示。



地理知识库是地理专家系统的核心,存储着解决专业地理决策问题所需的地理知识和地理专家经验,能方便地管理地理知识,即进行增补、删除、查询、更新地理知识。地理知识通过知识获取模块进入地理知识库。地理知识的获取是地理专家系统研究的重要课题,地理推理机是地理专家系统的逻辑纽带,用以模拟地理专家运用地理知识对地理数据进行推理的方法,如对比、联想等。在地理专家系统运行时,地理推理机连接地理信息系统和地理知识库,不断地从知识库中找出合适的地理知识来对地理信息系统中的数据推理,以获取结论,并把推理过程记录下来,用以解释推理过程和结论。

地理信息系统是一种利用数据库技术来管理地理空间特征数据和地理属性数据(如地理量数值),并能对地理数据进行一定的综合分析和处理的计算机系统。地理专家系统把地理信息系统作为自己的子系统,并认为地理信息系统应具有两个主要功能:数据管理,包括数据输入、预处理、组织管理、输出等;解决能用数学模型表示的地理问题,即所谓确定性地理问题。人机交互界面包括两部分:地理专家界面和用户界面。地理专家界面用于知识获取,应使地理专家能方便自然地输入地理知识,一般地应使专家能用近于自然语言的形式输出知识。通过用户界面,用户能方便地与系统对话,如干涉推理过程,并实时地获取对推理过程和推理结论的解释。

20世纪50~60年代,地理学引进统计学方法,构造了一系列统计量来描述地理要素的空间分布特征,如各种概率分布函数、均值、方差以及两个地理要素间的线性回归关系等,并建立了大量的定量关系和定量概念,如地理要素分布的集中和分散度、分布中心、区域形状等,标志着数量地理学的产生。60~70年代中期,地理学引进多元统计方法,并用计算机算法语言编制了许多用以解决地理因素、复杂结构和动态特征的复杂地理问题的程序,在自然地理学、农业地理学、社会地理学等领域发挥了重大作用,地理学已能精确定量解决许多复杂地理问题,这标志着数量地理学的成熟。此后,地理学的研究引进了系统论方法,认识到地理学研究的对象实际上是一个复杂的地理系统,由大气、水、岩石、土壤、生物和人类社会等复杂的子系统组成。这一时期遥感技术也有了很大发展,并为地理学的研究提供了大量数据。地理学的研究已转化为通过地理数据的分析和规划来实现对地理系统特征的认识和对地理系统的管理规划。运用数据库技术管理分析数据的管理信息系统方法,已成为重要的计算机应用方法,地理学引入管理信息系统方法用于管理庞大的地理数据,建立了地理信息系统的概念。

自60年代中后期加拿大建立世界上第1个地理信息系统——加拿大地理信息系统(用于土地资源管理)以来,地理信息系统在技术和应用方面都已有了很大的发展,它综合数量地理学方法,形成了一种崭新的地理研究学方法,能很好解决能用数学方法解决各类地理问题,如地理要素的时空变体特征分析、地理要素的预测与分析、多要素情况下主导因素的提取、地理要素空间分布规律的分析、地理区域界限的确定及等级结构分析、地理系统最优化设计等,已被广泛地应用于地理学的各应用领域。

然而在地理学的实际应用中,经常遇到的却是大量的不确定问题,如城市发展规划土地应用评价、水土保持规划等。地理

学家在解决这类问题时总是应用相应领域的知识和实际经验对实际情况进行分析推理。80年代, L. M. Pereira, P. Sabatier, E. Barath, T. R. Smith, N. C. Brandra, M. N. Demers 等人研究了基于知识的地理学分析方法, 并提出了用专家系统解决地理学问题的方法, 80年代中后期, V. B. Robinson, A. U. Frank 等人进一步研究了基于知识的地理学研究方法, 提出了为地理信息系统服务的专家系统的设计思想。他们提出的这类系统实际上是两个紧密联系在一起的独立系统, 即一个完整的专家系统和一个地理信息系统。专家系统主要用于解决地理研究中涉及知识推理的问题, 如地形分析、地理规划决策、地图设计等。同一时期, T. R. Smith, D. Peuquet, S. Menon 等人提出了基于知识的地理信息系统的概念, 即在普通地理信息系统的基础上增加一个地理知识库(或规则库)和一个智能界面, 使系统具有一定的知识推理能力, 能解决一定的不确定性地理问题。这一时期的地理知识表示及地理推理研究取得了一定的成果, 并已具有了地理专家系统的基本思想。

北京大学马藻乃等人自80年代后期开始研究地理专家系统, 并首先提出了地理专家系统的整体化结构定义, 认为地理专家系统方法是一种全新的地理学研究工具, 它结合现代遥感技术从根本上改变了延续了几个世纪的地理学研究方法。运用地理专家系统的现代地理学不仅能快速、方便地组织管理遥感及野外观测获得的庞大地理数据, 而且能动态地组织管理最新地理知识(理论、经验、最新成果), 更重要的是能自动地或辅助地理学进行地理规划决策。

地理知识分析和地理知识表示(形式化)是地理专家系统研究的重点和难点, 地理知识获取的水平主要地决定了核心的地理专家系统的水平。目前地理知识表示主要以把地理知识进行分层分类表示的方法为主, 即把地理知识按其应用侧面不同进行分类, 对各类知识按其逻辑关系进行从基本到复杂的分层。马藻乃等人提出了以地学编码模型为基础的地理知识表示方法, 即把地理学中的独立基本要素, 如高程、降水量、岩石类型等的分级作为最基本的地理知识构成因素, 而基本因素的逻辑组合构成较复杂的地理知识因素, 如土壤类型、植被类型等的分类规则, 以这些规则为基础又可构成更复杂的地理知识, ……最高层的地理知识是地理区划决策规则和地理专家决策经验。这种表示方法逻辑层次清晰, 便于推理和管理。

地理推理机的策略控制方式, 应能最大限度地模拟地理学家解决地理学问题时的思维方式。因此, 地理推理机应以不精确推理, 模糊逻辑推理为基础, 以达到进行联想、对比等推理的目的。北京大学研制的地理专家系统目前采用模糊数学及灰色系统等理论作为地理推理机的逻辑框架, 较成功地解决了地理学家解决水土保持规划决策的模拟问题, 在应用上取得了预期的效果。然而人类即使是在解决专题问题时的逻辑推理过程也是非常复杂的, 要用计算机准确地模拟这样的过程还需要长久的努力。

#### 参考文献

- 1 Pereira L M, et al. Departamento de Informatica, Universidade Nova de Lisboa, 1982
- 2 Barath E, et al. Papers of the Regional Science Association, 1984, 55: 135~154
- 3 Smith T R. The Professional Geographer, 1984, 36(2): 147~158
- 4 Chandra N, et al. Geographic Information Systems in Government (B Opitz, ed), 1986, 749~763
- 5 Robinson V B. Journal of Surveying Engineering, 1986, 112: 119~130
- 6 Robinson V B. Introduction, Review and Prospect, Computer, Environment, and Urban Systems, 1986, 4: 161~173
- 7 Robison V B, et al. Artificial Intelligence Application in Natural Resource Management, 1987, 1(1): 47~57
- 8 Smith T, et al. Journal of Geographical Information

Systems, 1987, (2): 149~172

- 9 Ma Ainai. The 16th International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, Japan, 1988
- 10 周长发. 中国科协首届青年学术年会论文集(交叉学科分集). 北京: 中国科学技术出版社, 1992, 192~196  
(北京大学马藻乃教授、周长发博士撰)

### 计量地理学

quantitative geography 又称数量地理学、理论地理学(Theoretical Geography), 是将数学和电子计算机技术应用于地理学的一门新兴学科。主要研究地理现象的共同空间秩序、空间的规律性和空间结构的一般法则、原理和理论, 具有重要的理论和应用意义。

自然地理学应用计量方法较早, 人文地理学也早在20世纪30年代出现定量研究。二次世界大战后, 在电子计算机的推动下, 出现了地理学的“计量革命”。主要有欧洲地理学家引入几何学方法和美国学者引入的代数方法。从1980年开始, 中国地理学界对于发展这一学科给予普遍重视, 科研机构配备了定量方面的研究人员并确定了研究课题, 高校地理系开设计量地理学课程。很多学者加入了国际地理联合会地理数学模型专业委员会。计量地理学的研究过程和对象大致为下列3个方面。

**空间与过程的研究** 1912年戴维斯(K. Davis)的德文著作《地形的解释性描述》(“Die erklärende Beschreibung der Landformen”)提出的模型是, 在构造营力作用下, 一个平坦的地面被迅速抬升, 然后遭到外营力的侵蚀破坏, 依次经历幼年、壮年、老年的各发育阶段, 最后演化为准平原, 亦即从地势起伏迅速增长、持续时间短促的幼年期, 演化到地势起伏最大、地貌类型最复杂的壮年期, 最后演化到地势起伏不大, 变化特别缓慢的漫长老年期。即是说地貌是过程 and 时间的函数。20世纪50年代斯特拉勒(A. N. Strahler)在一个侵蚀流域, 用面积高程曲线给以量化, 更扩大了 this 学说的影响。20世纪70年代乔利(R. J. Chorley)强调自然地理学研究空间过程—反应系统的重要性。中国李春芬、吴传钧等, 也在有关论文中提出它的重要性。西方国家地理学界开展的所谓感应地理(Perception Geography)和行为地理(Behaviour Geography)研究, 则属于人文过程的研究, 以此探索人文地理现象分布的形成过程。这些问题的提出, 用原先的简单统计学等模式是无能为力的, 因此把系统论理论和数据库系统技术结合起来, 建立起地理系统数学模型。模型结构也发生根本性的变化, 地理系统模型中的各种要素具有不同的作用方式、作用方向和作用强度, 与要素间的相互作用相伴随, 系统中还存在有复杂多样的反馈关系, 这些相互作用和反馈关系把系统中的各种要素紧密地联系在一起, 从而形成一个具有自组织功能的复杂系统。为探索这种复杂系统, 不少的中外地理学家将普里戈津(I. Prigogine)的耗散结构理论引入地理学, 把地理事物的空间和过程结合起来, 通过过程来研究分布位置与模式, 并从过程的演化来预测变化的趋势。一些非线性地理系统数学模型在逐步形成与完善。

**生态研究** 主要指人地关系的研究。由于科学技术的进步以及世界人口的日益增长, 人类利用自然环境的范围扩大了, 强度也不断提高, 甚至使环境质量恶化。如森林被破坏, 造成生态不平衡; 中国西北干旱与半干旱地区, 由于土地利用不合理, 沙漠化面积在扩大, 而沙漠化面积的扩大又使自然环境质量更进一步遭到破坏, 产生一种恶性循环。因此人地关系的研究, 决不是地理学一门学科或它的某一门分支学科所能承担得了的, 它涉及到多学科的综合问题。为了合理利用地理环境, 20世纪50~60年代空间分析应运而生, 70年代生态分析又被提到日程上来。一般都通过数学的方法, 把自然和人文要素综合起来考虑。为人类活动的地面设施、新建城市或港口选出最适当的位置; 在生产布局中使地区得到最合理的利用。为此, 还要求对环境可能产生的影响加以监测, 并对其将来的变化趋势进行预告。在方法论上, 计量地理学比传统地理学在理论与实践的结合有明显的进步性。



区域研究 地理区域的相似性和差异性区域研究的根据,开始只满足于描述和解释区域的特点和差异(区内和区际的),强调区域个性,把注意力局限于形态一致的区域(Formal or Homogeneous Regions),现在则日益趋向功能区域(Functional Regions)。在实践中为了解决一个特定的地理学问题,常涉及几个区域,如对流域之间的调水问题,首先要查明有关流域内水资源的分布和需水情况,把水资源盈余和匮乏的地区结合起来进行通盘考虑。这类区域就是所谓功能区,区内各部分存在着功能上的联系,也称之为空间组织区域(Spatially organized regions)。以城市为中心的结节区(Nodal Regions),也属于这类区域。这方面的中外学者代表作很多,但大部分属数理统计模型、模糊数学模型、线性规划模型等。人们在实际工作中认识到在一功能区域中,系统与系统之间,要素与要素之间多数不是线性关系的相互作用问题。实际上地理系统在不同层次的外界因子以及内部自然力和生产力的综合作用下,形成多种多样的不同层次物质循环和能量循环,这种循环过程把系统内不同层次的组成要素紧密地联系在一起,从而使要素之间存在有复杂多样的相互作用,构成不同形式的反馈关系,这些相互作用和反馈关系基本上都是多体间的不对称相互作用,其中既有强作用,也有弱作用;既有正反馈,也有负反馈,作用的双方既可以是同一层次的要素,也可以是不同层次的要素,不同强度和方向的相互作用与反馈关系交织在一起,从而使各种要素、过程和作用都具有非独立性,而且各种相互作用因时因地而异,即具有空间和时间上的非均匀性,所以这些相互作用属于非线性相互作用的范畴。正是由于这种非线性相互作用,使所有的要素相互制约,整合成一个有机的整体。因此有人用统计动力学方法模拟区域系统的随机性和确定性的客观要求,甚至于实行多层次,多方位的模拟。

20 世纪末的计量地理学开辟了地理学科的一个广阔天地,如用耗散结构理论研究曲流发现河道曲流的发育是一个不断趋向能量耗散极大一极小的循环过程;用突变理论研究滑坡,找到快速和慢速滑坡的判别式;用分形和渗流理论研究自然地理现象和地貌演化;用湍流和孤波理论研究荒漠;用物理系统湍流运动的无序理论研究区域经济、生态系统中若干与无序现象有关的形态机制;用混沌理论研究人口系统等。中国钱学森对地理学在科学系统中的地位的研究中明确指出,地理科学是一个学科体系,它既不同于地理学,也不同于地学,它是自然科学与社会科学的汇合。地理科学的发展要从整体上考虑并解决问题,要应用“从定性到定量的综合集成”的最新方法开展深入研究。这种从定性到定量的综合集成的研究工作,很大程度上是计量地理学从 20 世纪走向 21 世纪的发展方向。

#### 参考文献

- 1 Cole, King. Quantitative Geography. London: John Wiley & Sons Ltd, 1970. 1~24
- 2 John A. Matthews Quantitative and Statistical Approaches to Geography. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1981. 1~12
- 3 张超, 杨秉庚. 计量地理学基础. 北京: 高等教育出版社, 1989. 1~12
- 4 刘妙龙. 系统工程, 1991, 9(6): 1~7
- 5 艾南山. 大自然探索, 1992, 11(39): 15~19

(安徽师范大学地理系查良松副教授撰)

## 古地理学

**古地理学** palaeogeography 是一门重建过去地理环境发展历史的科学(周廷儒, 1982)。依据不同的研究方向可分为: 以地质学为研究方向的古地理学; 以古气候为研究方向的古地理学; 以自然地理学为研究方向的古地理学。现代地面自然界的每一个特征, 都有一定发展的历史。研究古地理不仅是为了了解现代, 更重要的是为了预报将来。研究古地理有助于解决自然进化

问题, 探明矿床带的形成与分布规律, 具有重要的理论和实践意义。

**古地理学发展过程** 古地理学是在地质发展的最初阶段就开始形成, 其发展过程可分为 4 个阶段。

**建立阶段。**18 世纪中叶古地理学取得了合法地位, 这与德国康德(I. Kant)的星云学宇宙起源理论(1755)和俄国 M. B. 罗蒙诺索夫的地质学思想(《论地层》, 1763)有关。M. B. 罗蒙诺索夫在《论地层》中就已经采用了“古代地理”(即古地理学)这一术语。

**发展阶段。**19 世纪古地理学的观念由自然科学各部门的学者共同加以发展。其中德国洪堡(Alexander von Humboldt)的《宇宙》(1843~1844)和达尔文(Charles Robert Darwin)的《物种起源》(1859)影响巨大。当时的自然史(或称为自然历史学), 乃是生物学、地质学和自然地理学的综合。19 世纪时, 普通地质学和地史学是 2 门独立的科学。在没有具备一套特有的一般原理和研究方法以前, 古地理学一直是地史学的一部分。这一时期曾提出了古地理学的基本问题, 其中包括大陆的起源和世界海水的成因等。例如奥地利修斯(Eduard Suess)在《地球的面貌》(1883~1888)巨著中, 依据岩层、构造、矿物、古生物以及冰川擦痕等证据, 提出冈瓦纳古陆存在的设想, 但在最后解释中仍陷入了海陆固定论的陆桥说, 未能达到大陆漂移的思想。

**成熟阶段。**20 世纪初到 60 年代, 最具影响的是德国魏格纳(Alfred Lothar Wegener), 他综合当时的气候学、地质学、地球物理学、古生物学、古气候学等已有的证据, 创立了大陆漂移说。魏氏于 1912 年发表《大陆漂移说》, 1915 年发表《海陆的起源》。但受当时地质学界的大陆固定论和陆桥说的束缚, 致使大陆漂移说被搁置达 20 年之久。在此期间, 古地理学仍然吸收了地球化学(和生物地球化学)、地球物理学、太阳地球物理学和天文学的新事实和新见解面变得丰富起来。其中前苏联的古地理学发展比较迅速, 例如马尔科夫(K. K. Марков)《古地理学》(1956), Л. Б. Рухин(鲁欣)的《普通古地理学原理》(1959)等。这些著作明确地提出了地球上的地形、风化壳、水圈、大气圈、生物圈和成层岩石圈在地史过程中的发展规律, 系统地介绍了古地理学的基本原理; 研究大地构造对研究古地理的作用; 古地理的研究方法; 古代景观的基本类型及主要组成部分; 古地理图的编制及其对找矿的意义等。

**迅速发展阶段。**20 世纪 60 年代以后, 由于古地磁学的兴起, 对洋底的认识更加清楚。1961 年确立了洋底扩张说, 1968 年建立起板块构造学说(即“新全球构造论”), 从而引起一场规模巨大的“地学革命”。在“地学革命”的冲击下, 古地理学有了迅速的发展, 许多重要的著作和论述相继问世。1962 年 Lester C. King 的《地球形态学》, 1965 年 A. E. M. Nairn 的《古气候学问题》, 1973 年 A. Hallam 的《地球科学的革命——从大陆漂移到板块构造》, 1976 年 Brian F. Windley 的《地球早期历史》, 1979 年 M. W. Mc Elhinny 的《地球: 其起源、结构和演化》等。许多新科学、新技术的发明, 如回声测深仪、深海洋底钻探技术、放射性同位素测年法、人造地球卫星的发射、遥感遥测技术、电子计算机技术、古温度、微古生物学和精密地震测量等技术的广泛应用, 对古地理学的发展有重要的推动作用。

在 1949 年以前, 中国古地理学的研究是比较薄弱的领域。1949 以后, 随着地理学的发展, 古地理学的研究也取得了巨大的成就。其中周廷儒作出了卓越的贡献。1981 年胡焕庸等编著《世界海陆演化》, 1982 年周廷儒编著《古地理学》, 1984 年中国科学院《中国自然地理》编辑委员会编辑出版《中国自然地理—古地理》。

**古地理学的研究** 其很重要方面, 是探讨地理圈的形成和演化。

**地球的起源和地球年龄。**关于地球起源的认识至今仍有分歧, 把众多假说归纳起来, 可分为两类: 认为地球前身是一团炽热的气体, 是太阳系渐变的统一过程形成的, 称为星云假说(康德

—拉普拉斯(Pierre Simon Laplace)]认为地球是由太阳捕获的低温埃尘和气体所组成。地球的热量是地球内部物质能量释放的结果[费森科夫(В. Г. Хесенков)—施密特(С. Ю. Шмидт)]。过去30年来,大多数学者倾向于地球是由固体物质积累而成的理论(周廷儒,1982)。随着地球内部热量的积累,地球物质发生了热力和重力分化,形成了地核、地幔和地壳。关于地球的年龄,沃伊特凯维奇(И. В. Войткевич)分出以下地球年龄概念的序列:地球物质(重化学元素)的年龄为 $55 \pm 5$  亿年,地球形成行星以后的年龄为 $55 \pm 5$  亿年至 $45 \pm 5$  亿年;地壳形成年龄为 $45 \pm 2$  亿年;已知最古老的地壳区年龄为30 亿年;最古老的生物化石年龄为20 亿年。目前已知经同位素测定的地球年龄为46 亿年,大陆上已知最古老的岩石年龄为38 亿年。

大洋、大陆的起源与发展。现在已知洋底的岩石最老不超过2~3 亿年,与大陆地壳相比具有新生的性质。洋壳一面生长,一面消亡,大约2~3 亿年洋底便要更新一次。洋底的演化主要通过海底的扩张,并经历以下几个阶段:胚胎期(如东非裂谷)、幼年期(红海与亚丁湾)、成年期(大西洋)、老年期(太平洋)、结束期(地中海)和残迹期(喜马拉雅—印度河)。

大陆地壳主要由密度较小的硅铝层和洋壳地壳主要由密度较大的硅镁层组成。“花岗岩浆和玄武岩浆的起源问题……正就是……大陆的起源问题”(П. Н. 克鲁泡特金,1956)。有人推测距今46 亿年前是花岗岩壳的发展时期。现在各大洲都有太古代形成的古陆块,环绕着这些古陆块的四周有元古代所形成的岩层,在它们的外围边缘则是显生宙活动带所构成的边缘,从太古代到现代大陆是逐渐发展扩大的。板块构造的雏形大约形成于50 亿年前地壳开始固结的时候。岩石圈板块以洋脊(海岭)、海沟和转换断层为边界,环绕着它自己的旋转极作移动,但各个板块的移动方向和速度是不同的。地幔对流、热点和地幔柱理论,是70 年代关于板块驱动理论中的又一个新进展。现在有足够的证据可以证明,在漫长的地质历史时期中,各大陆是有分有合的。

大气圈和水圈的形成。原始地球体积较小,不可能吸引住大气圈。大气圈主要是由原始岩石圈中外逸和累积的产物(周廷儒,1982)。原始大气圈含有丰富的碳酸气、氮、氨、水蒸气、氢、二氧化碳、硫化氢、氰化氢等,并可能有非生物成因的氧,其中碳酸气最多。现代大气的主要成分是氮和氧,氮本来和氢结合成氨。氧的来源是某些次生作用的结果,包括水分子的裂解,重力场逸出的氢,岩石风化而来少量的氧以及二氧化碳和水的合作用产生的氧。原始的海盆并未贮有海水,水的来源主要靠地壳内部的水蒸气。包括地幔对流外壳物质熔融结晶中排出的水蒸气。花岗岩和其它岩石中包含的水分(花岗岩含水量占总体积的6%~10%)、火山喷出的水蒸气、断裂洋壳里分化出来的矿物水等。地球体积膨胀增大到有足够引力时,地球上的水圈才进一步建立。因而大气圈和水圈是在不断增长发展,当时的大气圈和水圈中水的体积可能只达到现代的10%~30%。

生命圈的形成和演化现已知在地球发生生命之前,曾进行着有机化合物的逐渐复合过程,并可能在原始宇宙本身已包含着有机化合物的基础。生命圈的形成在很大程度上决定于水圈、大气圈和地面风化壳的形成。原始大气在对流层中缺乏游离氧,这对有机高分子化学合成提供了理想条件,导致了生命的起源(周廷儒,1982)。生命的形成与演化可分为4 个阶段:由无机物质生成简单的有机物质,原始大气在自然界产生的宇宙射线、紫外线、闪电、局部高压、火山爆发等外界高能作用下,自然组合成如氨基酸、核苷酸、单糖、ATP(三磷酸腺苷)等简单的有机物;简单的有机物形成如蛋白质、核酸、多糖、类脂等高分子有机物,它们是组成生命的必要的物质基础;复杂的有机物在原始海洋中凝结成许多类似“团聚体”的多分子体系,构成原始生命的萌芽;多分子体系通过互相吸附形成原始界膜,构成独立体系。通过不断进化和自然选择,产生生命的基本特征—新陈代谢和繁殖,诞生了原始生命。从此,生命的演化就由化学进化阶段进入生物进化阶段。以上各个圈层共同构成地理圈,地理圈的形成标志着原始地球演

化的结束和重要地质时期的开始。

古地理学除研究地理圈的形成和演化以外,还研究各地质时代的古地理环境。主要通过地质方法(构造岩相法、沉积岩相法、重力计算和重力测量、古地磁等);古代陆地、海盆、盆地的古地理描述法;古地理制图法等,力图用综合观点和专门方法来重建地球历史时期的地理环境,运用景观分带学说研究过去地质历史时期和人类历史时期地理圈的变化规律。随着科学技术的发展,古地理学将有许多新的发现和认识,将更趋于:(1)应用研究(寻找能源和矿产等);(2)新生代古地理研究(因古地理遗迹保存较为完整易于观察和对比,同时与人类环境密切);(3)模拟研究等。

#### 参考文献

- 1 K. K. 马尔科夫. 古地理学. 梁元博,等译. 北京:地质出版社,1959
- 2 Л. Б. 鲁欣. 普通古地理学原理. 张智仁,等译. 北京:中国工业出版社,1963
- 3 Brian F. Windley. The Early History of the Earth. A Wiley—Interscience publication,1976
- 4 McElhinny M W. The Earth its Origin, Structure and Evolution. Academic press INC(London)LTD 1979
- 5 胡焕庸,等. 世界海陆演化. 北京:北京商务印书馆,1981
- 6 周廷儒. 古地理学. 北京:北京师范大学出版社,1982
- 7 Marsaglia K M, Carzoi A V. Journae of South American Earth Sciences,1990,3(4):253~267
- 8 Faure H, Lang J. Journal of African Earth Sciences,1991,12(1—2):1~7

(安徽师范大学周秉根副教授撰)

**古风化壳** old weathered layer 因为古风化壳处在地球岩石圈陆地的最表层,比较疏松,其最上层为具有肥力的土壤层,是人类生产与生活的活动基地。若对它的生成过程及发展变化客观规律认识不深,研究不够,了解不透,在利用改造它的过程中采取不妥当的措施,就必然破坏它的结构,给人们造成重大的损失。所以,必须彻底认识古风化壳生成及其发展变化的客观过程与规律,依照它的客观规律行事,既利用其对人类有利的一面,又克服其对人类不利的一面,在利用中保护,在保护中利用,造成一个生态环境的良性循环。而且古风化壳代表着形成时期古气候状况与古地质、地理环境的变化,对深入认识自然有着巨大的作用。综上所述研究古风化壳不仅具有巨大的理论上的认识自然意义,而且也具有重大的实践上的利用价值。

本来地球岩石圈的上部,地壳比较深部的新鲜的、坚硬的岩石,虽具有一定的可塑性,但未出露在地球表面以前,是比较稳定的,保持着新鲜坚硬的状态。然而一旦出露在地表,遇见空气、接触到阳光、雨、露、风、霜、冻、雪,就要起风化作用,逐渐转变为比较疏松的碎屑状态,这一部分很像包裹在新鲜、坚硬岩层表面上的一层比较松软的壳似的物质,人们就称它为风化壳。它们有的一直裸露在地球表面上,有的已被后来新形成的地层所埋藏于地球表面之下。但这些不管是一直裸露在地球表面之上的风化壳,还是已经被后来新形成的地层所埋藏于地球表面之下的风化壳,它们都决不是今天一朝一夕所能够形成的,而是在过去漫长的地质历史时期中,使裸露在地球表面的新鲜的、坚硬的或较为疏松的(如黄土等)岩层,经过长期的物理风化的机械碎化过程和变质变性的化学风化过程,以及生物风化过程,从古代即开始逐渐地形成的,所以又被人们称为古风化壳。

1934 年,波雷诺夫(В. В. Дольнов)提出并创立了风化壳学说。他给风化壳的定义赋予十分广泛的内容,指出:“风化壳是岩石圈的上部,地壳较深部的坚实块状物质露出在风化壳中以后,就转变为疏松的碎屑状态”。根据波雷诺夫的意见,厚度约0.5km 的岩石圈上层可以划入风化壳带。前苏联维尔纳茨基(В. И. Вернадский)和费尔斯曼(А. Е. Ферсман)则更把厚约8km 的岩石

圈表层都划入风化壳之内。但是大多数的研究者认为风化壳是遭受过物理化学作用和生物作用的改变的基岩表层,厚度比较小,一般只有几十米,最厚也有一二百米。世界上研究得比较透彻的乌拉尔风化壳,其厚度也局限在25~80m到200m以内。

风化壳学说的创立者波雷诺夫曾于1948年编制了风化壳中“元素迁移序列”表:

| 元素迁移序列        | 迁移序列的组成              | 迁移值的数量级                 |
|---------------|----------------------|-------------------------|
| I. 剧烈运出的      | Cl, (Br, I), S       | $2n \times 10^1$        |
| Ia. 易于运出的     | Ca, Na, Mg, K        | $n \times 10^0$         |
| Ib. 可迁移的(活泼的) | $SiO_2$ (硅酸盐), P, Mn | $n \times 10^{-1}$      |
| II. 惰性的(不活泼的) | Fe, Al, Ti           | $n \times 10^{-2}$      |
| IV. 实际上不动的    | $SiO_2$ (石英)         | $n \times 10^{-\infty}$ |

波雷诺夫发现,三价氧化物的迁移性能只及氯化物和硫酸盐迁移性能的数百分之一和数千分之一。氯化物和硫酸盐在水分极不充分的条件下,能保存和积累在沙漠土内。碳酸盐则积存在黄土和草原及森林草原的土壤内,或黑钙土内。比较不活动的硅、铝、铁等三价氧化物,在潮湿的热带和赤道的土壤上其相对含量有所增加。若其含量很多,即成为水硅酸矾土岩。再若其中只能积存活动性最小的铝,就成为铝土岩。残余的产物,即风化作用的典型残积物,其形成经历4个阶段:氯化物和硫酸盐的淋溶阶段;碱金属和碱土金属盐基以及碳酸盐的淋溶阶段;残余粘土失掉部分二氧化硅的硅铝岩阶段;硅酸盐的二氧化硅受到淋溶和聚积起三价氧化物及石英的阶段,即铝土岩阶段。铝土岩风化产物是一种残积层,它只是风化残积物的堆积体,而没有从外面运来的化合物加入;这是化学风化的最后阶段,为最古老的风化产物和最剧烈的风化作用所特有。典型的铝土岩风化壳出现在最古老的陆地上印度斯坦、刚果盆地、亚马逊盆地。在马达加斯加只有结晶地层的古代岩层受到砖红壤化。因为砖红壤风化壳经常是残留,而不是堆积的,所以它经常见于分水岭的残积层内,而不是见于坡面的坡积层、山前平原的洪积层,以及更不能见于阶地或河漫滩的冲积层内。而堆积的风化壳则位置在坡积层、洪积层、冲积层和湖积层中。氯化物—硫酸盐的风化壳,可以作为戈壁闭流盆地的特征;在那里它形成于永久湖泊或暂时性湖泊之内,因为这种湖泊不仅是集水区,而且是集盐区;这是由于分水岭地带的残积层在风化的过程中失掉了易于溶铝的氯化物和硫酸盐,本身变为残留的碳酸盐残积层,而从它那里搬运出来的氯化物和硫酸盐则堆积在此凹地内。因此碳酸盐的堆积风化壳所占的地貌位置,比氯化物—硫酸盐的堆积风化壳高,但比硅铝的堆积风化壳低。所以风化壳的类型首先取决于地貌部位和时间,当然气候也有影响。既然风化壳同地貌的关系是如此的密切,以致可以把风化壳作为探溯过去地貌条件和地壳运动方向的钥匙。

1958年朱显谟、石元春研究中国黄土地层及其形成过程时,开始讨论黄土层中红层问题,认为这是埋藏的褐色土型的古土壤,是在比堆积黄土阶段较为湿润的森林草原气候条件下形成的。当时地表生长森林草原,后经过物理风化、化学风化与生物风化一系列成土过程而在黄土表面形成,再后来气候又趋于干冷,在草原气候条件下,又被风从北方或西北方(外地)吹来的粉土质黄土物质所埋藏,成为埋藏的褐色土型古土壤。

60年代,刘东生等研究中国的黄土堆积,曾经指出,埋藏土壤之所以特别为第四纪地质工作者所注意,是因为其多数情况下在冰期堆积(冰碛物)上的发育良好的古土壤(埋藏的和未埋藏的)代表着一次间冰期的存在。在一个地区,当间冰期时期在没有新的沉积物的情况下,可以在前一个冰期沉积上形成土壤。因而,古土壤层作为广泛被利用划分冰期、间冰期、或雨期、间雨期的界限标志。同时,根据埋藏土壤的发育情况,不仅可以确定冰期、间冰期等气候的变化,甚至也可以确定较轻微的气候变化、沉积的间断或速度的变缓等。所以,近年来各国第四纪工作者都特别注意埋藏土壤的研究。因为黄土本身是一个很好的气候指标,而且由于黄土分布面积较广,产状不受地貌限制,又具有均匀一

致的岩性,所以在黄土上发育起来的埋藏土壤更能够在地层对比中说明区域内的气候的不同,对研究很有利。

80年代,景才瑞在研究中国黄土形成气候条件,时代与成因中指出,在黄土堆积中发现的多层埋藏土壤褐色土型的古土壤,是在森林草原气候条件下形成的,代表气候变化中比较温湿的阶段。黄土本身属于母质,埋藏的古土壤即属于古风化壳的最上层,古土壤下破碎黄土带即包括在古风化壳之内。

当前,对于古风化壳的研究日益引起人们的关注。1991年孙建中、赵景波首次确定了黄土中的几个时期的风化壳;杨怀仁、徐馨根据中国红色风化壳的广为分布,推断亚热带和热带气候曾经扩展到现代亚热带气候区边界以外,或被新构造运动抬高。尤其是随着大规模工程建设,古风化壳更成为研究热点:(1)确定古风化壳形成时代;(2)确定古风化壳类型;(3)确定古风化壳形成的古地质环境;(4)确定古风化壳形成理论;(5)确定古风化壳与生产建设的关系。

#### 参考文献

- 1 K. K. 马尔科夫. 古地理学. 北京:地质出版社,1959. 80~98
- 2 朱显谟. 中国第四纪研究,1958,1(1):1~98
- 3 石元春. 中国第四纪研究,1958,1(1):1~98
- 4 刘东生,等. 中国的黄土堆积. 北京:科学出版社,1965. 72~73
- 5 景才瑞. 地理学报,1980,35(1):83~86
- 6 王永焱,等. 中国黄土研究的新进展. 西安:陕西人民出版社,1985. 49~53
- 7 杨怀仁,等. 第四纪冰川与第四纪地质论文集(第2集). 北京:地质出版社,1985. 89~103
- 8 Wang Yongyan. Teng Zhigong Microtexture of loess in China and its variation in geological time and district. KEXUE TONGBAO, special issue, 1988, 214~219
- 9 孙建中,等. 黄土高原第四纪. 北京:科学出版社,1991. 110~112

(华中师范大学景才瑞教授撰)

**古喀斯特** palaeokarst 是非现代环境下形成的喀斯特,包括被各地质时期的岩层埋藏的埋藏喀斯特;地下喀斯特空间全部被充填已无喀斯特作用的化石喀斯特;被松散堆积物所掩覆的覆盖喀斯特;由于地壳上升和气候带的变动,使一些地质时期发育的喀斯特被剥露而被现代喀斯特作用改造的残留喀斯特。古喀斯特的研究具有恢复构造和古环境的意义。

1909年德国L. 萨维茨基(Sawicki)称,覆盖型喀斯特是一种被第四纪松散堆积物所覆盖的古喀斯特。自此以后,古喀斯特的含义长期来是泛指而比较含糊的,如前苏联B. A. 阿普罗道夫(Апропов, 1960)把第四纪前发育的喀斯特称古喀斯特,张英骏等(1985)则把新生代以前地史时期形成的喀斯特称为古喀斯特,任美镛等(1979)、D. C. 福特(Ford)和P. W. 威廉姆斯(Williams)(1989)指出,一些喀斯特现象是过去地质时期的营力作用所形成,对现代环境来说,它们是古喀斯特或是残留喀斯特,这种提法是比较合理和全面的。

20世纪70年代由于板块运动、古海洋学以及石油天然气储存空间等研究,使古喀斯特研究广泛开展起来。M. 赫拉克(Herak)等(1972)指出一些残留的锥状喀斯特(古峰林)的分布,从中国云贵高原和青藏高原向西经帕米尔、高加索、波兰克拉科高原、南斯拉夫南部至德国的斯旺和阿尔卑斯高原,均位于喜马拉雅—阿尔卑斯山系的北侧,适在印度板块和非洲板块与欧亚板块碰撞而大面积抬升地带,任美镛等(1979)亦这样认为,并指出那儿正是始新世古特提斯海沿岸,处于古热带和热带洋流所流经地区,发育了锥状喀斯特(峰林)。同时他们研究了中国的古喀斯特和深部古溶洞后指出,不同时期的喀斯特过程是迭加的,喀斯特形态也是迭加和积累的。中国热带喀斯特分布范围远远超过现在的热带,青藏高原和云贵高原上的古峰林、云南路南石林都是

在第三纪热带气候条件下形成的,是为残留喀斯特。残留喀斯特在古巴、波多黎各沿海为孤峰,兀立在喀斯特平原上,中欧为残留的锥状喀斯特,分布在南斯拉夫和爱奥尼亚岛上,英国有一种溶沟间的平板状喀斯特面(Clint),是经过第四纪冰川作用的石芽,亦是一种残留喀斯特。

埋藏在地下深处的喀斯特,则有古喀斯特面和古溶洞,它们往往被矿床所充填,或是油气的储存场所。如中国二叠系茅口灰岩与乐平煤系之间的古喀斯特面上有高岭土和粘土岩矿,灰岩喀斯特面上若被二叠系玄武岩所覆盖则有冰洲石矿;世界上50%的油田分布在碳酸盐岩地层中,以层间喀斯特面和古溶洞作为油储,中国华北平原丘油田的古潜山,就是一个震旦亚界灰岩的喀斯特面,它已被数百米厚的第三系和第四系地层所埋藏。\*新几内亚一些喀斯特为火山熔岩所埋藏,火山熔岩的年龄为85万年。加拿大、挪威的一些古喀斯特地貌如坡立谷为第四纪冰碛物所覆盖,有的在冰川覆盖下发育了喀斯特洞穴,称为冰川喀斯特。世界上一些铝土矿沉积在古喀斯特面上和喀斯特盆地,前者为埋藏喀斯特,后者称覆盖型喀斯特,其规模很大,如中国广西平果铝土矿。

80年代中,由捷克鲍萨克(P. Bosak)和加拿大D. C. 福特主编的“世界古喀斯特”论文集,综述了各地质时期世界古喀斯特特点和分布,指出古喀斯特发育分布于N30°~S30°间,那儿是碳酸盐沉积带,而三叠系、侏罗系和白垩系的喀斯特可扩大至N60°和S80°。

参考文献

- 1 Апродов А В. Об основных принципах классификации карстовых процессов, в кн.: Мат-лы Комиссии по изуч. геол. и геогр. карста. Издательство АН СССР 1960. 127~139
- 2 Herak M, et al. Karst—Important karst Regional of the Northern Hemisphere. Amsterdam; ELsevier, 1972
- 3 James N P, et al. Paleokarst. New York; springer, 1972
- 4 任美镛,等. 南京大学学报(自然科学版), 1979, 4: 95~108
- 5 张英骏,等. 应用岩溶学及洞穴学. 贵阳: 贵州人民出版社, 1985. 71~72
- 6 Ford D C, et al. Karst Geomorphology and Hydrology. London; Unwin Hyman, 1989, 1: 507~512

(南京大学王飞燕副教授撰)

中国东部第四纪地理环境 quaternary geographic environments in East China.

中国东部第四纪地理环境的演变直接与此地区人类的生存、发展息息相关。与以前第三纪地质时期相比,距今240万年来的气候不仅变冷而且变干,大陆性季风盛行。地形自西向东减低,三级梯状地形已经形成。西部隆起,青藏高原迅速抬升;东部的西部处于第2阶梯——中山山地和高原;东半部为第3阶梯——丘陵和平原。青藏高原隆起使冬季的北方冷气流受堵而沿其边缘延伸至东部地区,导致这些地区气温下降而明显地低于欧洲同纬度地区;夏季,东部地区气温高,北方和南方温差小,都明显地高于欧洲同纬度地区。冬季干冷气流将西北地区沙土撒落在陕甘宁晋地区形成黄土高原;向东南可抵达长江中下游。

据对黄土剖面研究,第四纪时期内至少经历了11次以黄土堆积的干冷期和次以形成古土壤为主的温湿期相互交替,它们与世界的冰期和间冰期同步。气候的波动引起了海面的升降变化和海进海退。温湿期海进时,海面上升,海水淹没东部的沿海平原,干冷期海退时,海面曾下降到现在东海海面以下155m处,渤海和黄海成为陆地,在动植物群方面,表现为东北地区的喜冷动物群南迁和亚热带的湿热带植物的逐渐消失。

1963年黄培华等指出,第四纪温湿期时,中国东部地理环境与今相似。以第四纪中期距今46~55万年的温湿期最为温暖湿润,年平均气温比今高2.5℃~5.0℃,降水量多100~200mm。那时,东北北部兴安岭为温带湿润森林,中部平原为暖温带半湿

润森林草原,东南部和和华北为北亚热带湿润森林,黄土高原为半湿润的森林草原,淮河以南分别为中亚热带、南亚热带、热带湿润森林环境。

第四纪干冷期时,东部地理环境与今相比有明显的差别。那时的地理环境怎样?有2种不同的观点。一是李四光的观点,认为那时东部山地普遍有山地冰川分布,论述详细的主要有北京西山、江西庐山和安徽黄山。他以庐山为典范,划分3次冰期。从老到新有:鄱阳冰期、大姑冰期和庐山冰期。它们分别与欧洲阿尔卑斯山的贡兹冰期、民德冰期和里斯冰期相对应,分别属于第四纪早期和中期。在冰期时,他认为“山谷冰川在整个华北山地曾经发展到相当普遍的程度”,“长江流域超过200m的山地可以发生4次冰期,而在高度不及200m的山地,至多只能发生3次冰期”;“桂北及五岭山脉”“虽其高度不超过200m,仍可发生冰流也”。他认为中国东部广西北部(北纬25°20′)以北的山地都有冰川分布。1963年黄培华依据第四纪动植物群的变化结合冰川学与土壤学等方面研究成果,首次重建了中国第四纪各个时期的气候环境演变,发现中国东部第四纪干冷期时没有出现过象李四光所描述的上述景象,并依据有关证据从以下几个方面提出了质疑。(1)所述的“冰川堆积物”不具冰碛物的主要特征。(2)论述的“冰蚀地形”也都与经历过冰川作用形成的冰斗、冰川谷和冰川擦痕等形态特征不一致;而且在所认为的“冰川谷”之上缺乏必具有的、不断提供冰雪物质的粒雪盆地。(3)世界中纬度山谷冰川其雪线以上的积累高度都在1000m以上。李四光所提及的山地,依其所确认的“雪线”高程至该山的最高峰高程之间的高差均不足1000m。即使有积雪条件,因其积雪高度不足也难形成山谷冰川。(4)中国东部第四纪时期,特别是长江以南地区,动植物群的组成基本上没有重大变化,故在自然环境方面也是缺乏依据的。他认为李四光提出的中国东部冰川遗迹的依据都是不足信的。于是,关于中国东部冰川遗迹问题两种观点的争论成为中国地学界最重要的、争论时间最长的问题之一。

80年代中期,施雅风、崔之久和李吉均等对李四光所论述的山谷冰川地区都一一进行考察。他们认为李四光所指的冰川(堆积物)泥砾实是泥石流堆积;所认为的冰斗,缺乏真正冰斗具有深度、陡峭后壁和出口处冰坎;所确认的冰川谷没有真正冰川谷特有的平缓谷肩。重建的第四纪晚期(末次冰期)的雪线高度:北京西山2670m(最高东灵山海拔2303m),江西庐山3080m(大汉阳峰海拔1474m),安徽黄山2826m(莲花峰海拔1864m),广西桂林北部为3250m(架桥岭最高峰海拔1171m)。可见上述古雪线的高度都超过该地区最高峰高度,因而这些山上在第四纪时期都不具备终年积雪的条件,不可能有山地冰川发育。此外,黄培华等在李四光确认的冰川泥砾中发现了温暖的孢粉组合,有力地证明了当时堆积泥砾的环境不是寒冷的冰川环境,而是温暖湿润的环境。

依据黄土、孢粉、哺乳动物群、冰川、冻土、海面变化和古土壤变化等方面研究,中国东部干冷气候第四纪晚期距今12.8万年的末次冰期最冷,特别是距今2万年前为末次冰期最盛阶段,也是中国东部最干冷的阶段。在中朝边境的长白山(在我国境内最高峰白云峰海拔2691m)在2200~2300m附近发育了冰斗冰川。陕西太白山(海拔3767m)发育了冰帽、冰斗和山谷冰川。冰川末端曾到达海拔2800m。台湾玉山(海拔3997m)的山顶上有冰斗冰川分布。当时的海水全部退出渤海和黄海,海岸线下降到东海大陆架边缘,距现在海岸线以东600km。东北地区当时属寒温带,年平均气温比今降低10~12℃,多年冻土南界向南推移到北纬40°附近。华北地区年平均气温比今降低10℃左右,主要属温带气候。黄土高原为温带半干旱草原,是风成黄土堆积最盛期。东半部为温带半湿润森林草原。江淮地带年平均温度比今低8℃左右,为暖温带森林草原,有下蜀黄土堆积。长江以南(北纬30°以南)地区,在南岭以北,气温比今低6℃~7℃,在南岭以南,气温比今降5℃左右,仍为亚热带、热带湿润森林环境。

距今1.2万年前末次冰期结束,气温逐渐回升。至5000年

前气候已转变为较今更温暖些。在200年前气温又略有降低,称为小冰期。近200年来,气温虽仍有小的波动,总趋势是处于温湿期阶段。

从中国东部第四纪地理环境研究结果可以看出,它与世界地理环境的变化在时间上是同步的,它是世界地理环境变化最敏感的地区之一。因此,深入研究中国东部第四纪地理环境变化,重点是研究距今12.8万年(第四纪晚期)以来,特别是近1.2万年以来的地理环境变化,不仅对于现在国民经济发展有现实意义,而且对于现在和未来全球地理环境的变化、预测未来东部地理环境变化趋势,都有着十分重要的意义。

#### 参考文献

- 1 黄培华,科学通报,1963,1:34~39
- 2 黄培华,科学通报,1963,10:29~33
- 3 李四光,中国第四纪冰川,北京:科学出版社,1975
- 4 计宏祥,古脊推动物与古人类,1982,20(2):148~154
- 5 施雅风,王靖泰,第3届全国第四纪学术会议论文集,北京:科学出版社,1982,111~121
- 6 刘东生,等,黄土与环境,北京:科学出版社,1985
- 7 黄培华,等,地理学报,1987,42(4):289~298
- 8 李文漪,地理学报,1937,42(4):299~307
- 9 施雅风,崔之久,李吉均,中国东部第四纪冰川与环境问题,北京:科学出版社,1989

(中国科学技术大学黄培华教授撰)

### 中国东部山地古冰川研究

study on the mountain

palaeoglaciation in east China 自地球上出现古人类以来的200~300万年(第四纪)中,地球气候曾发生过几十次冰期与间冰期相交替的剧烈变化。冰期的全球年平均气温要比现在低6~7℃多,中高纬地带要低10~14℃多,不仅南极冰盖曾大规模扩张,北半球高纬地带也曾发育过一系列厚逾3000m的大冰盖,如北美的Laurentide(劳伦)冰盖,北欧的Fennoscandian(芬诺斯堪的纳维亚)冰盖等,全球生态环境也曾发生过重大的改变。1972年,有的学者曾据高纬地区的降温与中纬地带的少雨等现象提出新冰期即将来临的预言,它意味着世界大部分产粮区的土地将丧失生产力。在第四纪冰期中,中国东部山地曾否出现过山地冰川活动的研究,关系到论证冰期成因、冰川发育机理、冰期来临标志、冰期环境特征以及古冰川堆积物的科学鉴别等一系列基本问题的探索。

欧洲的古冰川研究至今已有近200年的历史。中国东部山地古冰川研究的奠基人是李四光,他于1922年、1933年、1934年、1936年分别报道了在华北山地、长江中下游山地,如江西庐山和安徽黄山等地发现的多类古冰川活动的遗迹,包括冰斗、冰窖、冰盆、冰溜面、U型谷等古冰川侵蚀地貌,具条痕的漂砾和谷壁上的刻痕,U形谷中的羊背石以及多种类型不同时代形成的冰碛物等。1937年李四光又完成了专著《冰期之庐山》,详细阐述了庐山的古冰川侵蚀与堆积的自然体系(由于抗战,该专著1947年才出刊)。

李四光报道的中国东部山地残存的古冰川活动遗迹,曾被当时由国际联盟教科文组织派来实地考察的威斯曼(H. V. Wissmann, 1937)教授所承认,但也为国内外部分学者强烈反对,其中包括早年的巴尔博(G. B. Barbour, 1934, 1936)、哈尔迪和扬(Teilhard de Chardin P. and C. C. Young, 1935)等。60多年中,又有部分学者声称在中国东部的其他山地区也发现了古冰川活动遗迹,如山东泰山、安徽大别山和九华山、浙江天目山、江西幕阜山以及湖南和湖北西部的山地等,从而支持了李四光提出的古冰川学说,但是,对李四光提出的古冰川学说持怀疑甚至否定态度的似乎也越来越多。不同观点的争论曾在20世纪60年代和80年代两度达到高潮,争论的焦点是:(1)所认为的古冰川遗迹是否真的是由古冰川作用所形成的?(2)中国东部的这些山地,所处地理纬度比较低、山体规模和海拔高度也比较小,在这种条

件下是否有可能发育古冰川?争论的场所已扩及几次在国外召开的国际学术讨论会和多种国际学术刊物,不同观点的争论也带来了科学研究的深化。

要把有关中国东部山地古冰川问题的争论条理清晰地表达出来是相当困难的。应该说,在近几十年的调查研究中,确乎存在中国东部山地古冰川遗迹分布的“扩大化”现象。如把一些地方由洪流(包括泥石流、碎石流)或坡地动力作用形成的泥、沙、碎石和岩砾组成的混杂堆积,视作冰碛泥砾了,把另一些地方的古冲积砾石层底部的蚀余堆积中的巨砾权定为冰(融)水堆积等。事实上,就目前的科学技术水平而论,对一些自然现象的认识不可避免会出现“多解性”,或从不同角度对它进行研究往往会得出不同的结论。对一些古冰川侵蚀地貌的不同认识,就是由其“多解性”而产生的。

对那些与古冰川活动有关的堆积体,也有不同的认识。反对者提出这些堆积体颜色较深,反映其形成时气候比较温暖,其中有部分巨砾的排布有一定的定向性,恰与泥石流堆积相近;堆积体中粗颗粒与细颗粒的配比关系,与国内外其他地方典型的冰碛物不完全相符;堆积体的空间规模偏大,它与物质供源区空间规模的比例关系,也与中国西北高山现代冰川活动区的情况有较大的差别。实际上,世界各地的现代山地冰川,由于冰体规模、冰川类型、冰面坡度及冰流运动速度的不同,受冰川侵蚀的基岩岩性及其矿物成分的不同,以及冰碛物堆积部位的差别等原因,所形成的冰碛物,无论在其粒度结构方面,还是在巨砾的排布构造方面,本来就有相当宽的变化幅度(D. E. Sugden, 等, 1976)。另外,在江西庐山还发现,所谓冰川堆积物的颜色偏深,仅仅是其表层颜色偏深,其内部没有经历长期风化染色的部分颜色仍然很浅。中国东部山地古冰川是指第四纪更新世冰期中曾发育的冰川,而现代山地冰川全是经历了全新世1万多年气候温暖时期大量融化之后的残余部分,在物质供源区与堆积体规模的比例关系方面,把两者等同起来作比较,显然是不可取的。

如何把冰川作用形成的混杂堆积与非冰川作用形成的混杂堆积,用具体标志检测加以区别,这仍然是个比较困难的问题。有的学者倾向于注重对混杂堆积体的“生成构造”进行深入细致的观测分析,原理是冰川流本属流动缓慢的固态流,它与自然状态下的气态流(风)、液态流(水)以及具临空面的碎屑流或块体流等在物理参数方面因而在堆积体生成机制与生成构造方面会有比较大的差别。经过连续几年的观测,已发现江西庐山的部分混杂堆积体中存在强烈推挤压轧所产生的压裂、挤褶、扭曲、研磨、逆覆、压陷等构造现象,从而认为它们是与古冰川活动有直接关系的混杂堆积体。

杨怀仁教授长期研究中国东部第四纪自然环境变迁,1958年提出长江下游地带存在第四纪冰缘现象,1980年创立了东亚“冰期冷槽”理论。东亚冰期冷槽起因于西部高山高原自第四纪初期以来的继续强烈隆起、冰期中东亚夏季风的萎缩、北方冷气流的南侵和气候活动的加强,它导致中国东部冰期气温比世界同纬度其他地区低得多,雪线高度也大幅度下降。之后,对南海北部深海沉积的研究等有力地证实了东亚“冰期冷槽”的影响。它为中国东部山地在第四纪冰期中出现冰川活动的可能性提供了理论依据。

中国东部山地古冰川研究,早已为国际地学界所关注,预计在今后10~20年中有可能在混杂堆积的生成机制、生成时代测定及生成环境的研究方面取得重大进展,并在预测未来东亚环境特征方面作出重要贡献。

#### 参考文献

- 1 Lee J S. Geol Mag, 1922, 59, 14~21
- 2 Lee J S. Bull Geol Soc, China, 1933, 13, 15~44
- 3 Barbour G B. Analysis of Lushan glaciation problem. *ibid*, 1934, 13, 647
- 4 Teilhard de Chardin P, et al. The Cenozoic sequence in the Yangtze valley. *ibid*, 1935, 14, 165

- 5 Lee J.S. Nature, 1938, 141, 3569  
 6 李四光. 中央研究院地质研究所乙种专刊, 1947, 第2号  
 7 Sugden D.E. et al. Glaciers and landscape. London, Edward Arnold, 1976  
 8 杨怀仁, 等. 南京大学学报(自然科学版), 1980, 1, 121~144  
 9 施雅风, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题. 北京: 科学出版社, 1989  
 10 杨达源. 地质论评, 1990, 36(2): 125~129  
 (南京大学地理系杨达源教授撰)

**青藏高原第四纪大陆冰盖遗迹** 大约形成于早更新世中期, 是第四纪研究中的重大发现。对开展涉及人类环境、第四纪冰期和间冰期的划分、对比、古气候、古环境变迁和现代气候变化趋势的分析、研究及预测等重大地质学问题, 有重大的科学价值和实际意义。

关于青藏高原在整个第四纪地质发展过程中是否曾形成连绵一片的大陆冰盖(简称“青藏大冰盖”或“大冰盖”, 下同), 60年代以前, 一些国外研究者根据零星的资料曾推测过大冰盖的存在, 或完全否定大冰盖的形成。1906年, 亨丁顿(E. Huntington)等研究了喜马拉雅山、喀喇昆仑山及西藏其它一些地区后, 认为西藏广阔的湖盆多半是由于冰川作用形成的。1907年斯文赫定(Sven Hedin)则持完全相反意见, 认为喜马拉雅山、喀喇昆仑山那时已有相当高度, 已能阻挡潮湿的印度洋季风的入侵, 西藏冰川活动的规模极为有限。1958年, 西尼村(B. M. Саничн)根据西藏古冰川和现代冰川的终点盆地分布的海拔高度, 推测高原曾被连绵一片的冰雪所覆盖。上述所指的大冰盖主要是末次冰期。但由于均未能取得确切的大冰盖遗迹证据, 他们的“假说”或推测均无法令人信服。此后, 中国科学工作者在高原进行过多次广泛和详细的考察工作。由于国内外研究者在研究高原古冰川遗迹时, 研究范围基本上局限在高原各大山脉附近, 即喜马拉雅山、昆仑山、唐古拉山、念青唐古拉山、喀喇昆仑山等, 对高原各大山脉之间的广阔平原、低山丘陵及湖盆区涉及不多, 因此对高原大冰盖存在与否, 都未能拿出确切的证据, 并且在我国基本上持完全否定的看法。1982年中国地质学会第四纪冰川与第四纪地质专业委员会, 在总结中国第四纪冰川及第四纪地质学成就与展望时明确指出: “青藏高原古今冰川研究的成果, 使我们高原第四纪冰川的性质有了较明确的认识: 第四纪任何时期都不存在统一的大冰盖”。

1989年, 韩同林在高原进行十多年的广泛地质调查, 在研究前人有关高原大冰盖的各种假说或推测的证据基础上, 结合该区大量的航卫片的解释, 重点区域放在高原各大山脉之间的广阔平原、低山丘陵及湖盆区, 发现大量确切的大冰盖遗迹证据, 并首次以大量确切的大冰盖遗迹为依据, 来论证青藏大冰盖确实存在及特征。依据大冰盖遗迹形成的方式及特征, 大致可划分出3种最基本类型, 即冰蚀遗迹、冰碛遗迹及挤压构造遗迹等。

青藏大冰盖遗迹与高原目前研究最详细和取得的资料最丰富的中晚更新世山谷、山麓冰川遗迹的特征有很大不同, 主要有如下几方面: (1)空间分布。大冰盖冰川遗迹主要分布于高原各大山脉之间的广阔平原、低山丘陵及湖盆区, 分布不受地形因素限制, 即在平原、丘陵的山脊、山坡及U形谷中, 洼地等均有分布, 且多较连续和呈面状分布。分布的海拔高度较低, 均可到达区域最低位置。中晚更新世山谷、山麓冰川遗迹, 主要围绕高原各大山脉主脊线附近分布。分布的海拔高度较大, 且多不连续发育。冰碛物较集中分布于高原各大山脉主脊线附近的U形谷中及山前或山肩地带, 受U形谷严格控制。(2)遗迹类型。大冰盖冰川遗迹类型主要有冰蚀平原、冰蚀丘陵、冰碛丘陵、冰碛、U形谷、冰蚀洼地、冰盆、冰阶和巨型冰川漂砾等, 其中冰蚀平原、冰蚀丘陵、冰碛丘陵、冰碛和巨型冰川漂砾是大冰盖所独具的冰川遗迹类型。中晚更新世山谷、山麓冰川遗迹的类型主要有U形谷、冰斗、冰窖、角峰、刃脊、冰盆、冰阶等, 其中冰斗、冰窖、刃脊、

角峰等, 一般为山谷、山麓冰川所具有的冰川遗迹。(3)规模。大冰盖冰川遗迹规模巨大, 冰蚀平原面积在数百、数千至上万平方千米, 冰蚀丘陵及冰蚀洼地面积可达数百至上千平方千米。U形谷宽在0.5~20km以上等。中晚更新世山谷、山麓冰川遗迹的规模小, U形谷一般在0.5~2km左右, 冰蚀洼地一般局限于宽0.5~2km U形谷中发育。(4)遗迹特征。大冰盖形成的U形谷大小悬殊, 且常相互联结并向同一方向呈网状分布, 冰川漂砾搬运距离有的可达100~300km以上。中晚更新世山谷、山麓冰川形成的U形谷, 常围绕高原各大山脉的一些高海拔山峰呈放射状分布。冰川漂砾搬运距离不大, 且受U形谷严格控制。

表1 青藏大冰盖冰川遗迹类型划分简表

|         |        |                   |                  |                 |  |
|---------|--------|-------------------|------------------|-----------------|--|
| 大冰盖冰川遗迹 | 冰蚀遗迹   | 冰蚀地貌              | 正地貌              | 冰蚀平原、冰蚀丘陵、基岩鼓丘等 |  |
|         |        |                   | 负地貌              | U形谷、冰蚀洼地、冰盆、冰宽等 |  |
|         | 冰碛遗迹   | 冰碛物               | 直接堆积             | 冰川泥砾、侧碛、冰碛、终碛等  |  |
|         |        |                   | 间接堆积             | 冰水砂砾堆积、冰川泥石流堆积等 |  |
|         | 挤压构造遗迹 | 冰碛地貌              | 冰碛丘陵、侧碛堤、冰碛垄、冰台等 |                 |  |
|         |        | 表皮构造              | 褶皱构造<br>断裂构造等    |                 |  |
|         | 变形砾石   | 压坑、马鞍石、压裂砾石、压断砾石等 |                  |                 |  |

初步查明, 青藏大冰盖遗迹以高原内流区及河源区保存最多、最好、最完整和最连续; 在外流河的强烈切割区、高原各大山脉中晚更新世山谷、山麓冰川发育区, 以及由砂岩、粉砂岩、泥岩等为主的第三纪红层分布区, 大冰盖遗迹一般保存不多, 有的甚至踪迹全无。

依据现有资料, 并结合高原航卫片较详细判读, 以及大冰盖遗迹的类型、特征、规模及空间分布等, 重建大冰盖冰川发育的特征。青藏大冰盖大约形成于早更新世中期。大冰盖应属于亚热带、内陆型、海洋性统一大冰盖。大冰盖主要冰流中心大约位于西藏中部, 北纬32°~35°, 东经81°~89°, 冰流除中心部分大致呈放射状流动外, 其余冰流基本上呈自西向东或自西北向东南方向流动为主。冰流厚度最少在3000~1700m以上。大冰盖形成时的古雪线海拔高度可能不超过1000m。

早更新世青藏大冰盖遗迹, 目前所知是我国也是世界上保存最多、最好、最完整、最连续、遗迹类型最发育和不可多得的地区, 但是因受高原自然条件恶劣、交通困难等因素的限制, 目前实际调查范围还有限。在高原内部, 尤其是羌塘区, 基本上处于空白区状态, 因此继续开展广泛和深入的实际考察, 将会取得更多、更好和更丰富的大冰盖遗迹的珍贵资料, 这必将突破中国和世界第四纪研究的旧格局, 并在今后较短时期内取得突破性进展, 完全有可能成为第四纪研究中一些重大理论问题的诞生地。

#### 参考文献

- Huntington E. Journal of Geology, Chicago, 1906, 14: 599~618
- 西尼村 B.M. 地理译报, 1958, 1: 22~30
- 崔之久. 地质学报, 1964, 4(2): 229~245
- 李吉均, 等. 西藏冰川, 1986, 258~260
- Kuhle M. Subtropical mountain and highland glaciation as ice age triggers and the waning of the glacial periods in the Pleistocene. Geojournal, 1987, 14(4): 393~421
- 郑本兴. 地质论评, 1989, 35(6): 543~551
- 韩同林. 地质论评, 1989, 35(5): 468~478
- 韩同林. 青藏大冰盖, 1991

(地质矿产部地质研究所韩同林研究员撰)

**黄土地层** loess strata 一般由黄土或黄土与古土壤构成, 主要分布在30°~55°之间的干旱和半干旱区。世界上黄土分布最广、厚度最大的国家是中国。中国黄土地层象一部内容丰富的典籍, 记录了约250万年来黄土高原乃至欧亚大陆所发生的重大地质事件。黄土地层的研究对查明250万年来陆地环境的变化和第四纪发展历史等有十分重要的意义。

对黄土地层的研究有约 150 年的历史。早期的研究主要涉及到黄土地层的成因,后来逐渐扩展到地层划分和物质成分等方面。随着黄土地层研究的深入,关于黄土的成因也由最初的水成说转向现在绝大多数学者赞同的风成说。1847 年布朗(Braun)观察欧洲莱茵黄土和多瑙黄土后,认为这些黄土是深水湖积物。1866 年庞培利(P. Pumpelly)观察黄土后认为中国和北美黄土是湖成的。1877 年李希霍芬(F. Richthofen)据中国黄土无层理、含旱生蜗牛化石等认为黄土是草原风积物。这时庞培利也转而认为黄土风成说是可接受的。1933 年奥勃鲁契夫(B. A. Oбpычeв)发展了黄土风成说,指出黄土应分为原生黄土和次生黄土,他认为中国黄土的物质是从沙漠区搬运来的,欧洲黄土物质是从冰川作用区搬运来的。1958 年刘东生等在山西午城镇黄土中发现了长鼻三趾马与中国貉等化石,确定了中国黄土开始发育在早更新世,并在新老黄土划分的基础上,进一步将中国黄土地层划分为午城黄土、离石黄土和乌兰黄土。1966 年刘东生等对中国黄土地层的物质成分与结构进行了研究,查明了黄土地层粒度成分以粉砂为主,发现了乌兰黄土粒度成分由西北向东南变细的现象,进一步充实了黄土的风成理论。同时确定了黄土和古土壤在矿物、化学和粒度成分方面的差异,得出了黄土发育在较为干旱条件下、古土壤发育在相对温湿条件下的认识。1965 年朱显谟研究中国黄土中的古土壤后认为黄土地层中存在多层褐土型古土壤。1966 年贾兰坡等在陕西蓝田午城黄土中发现了蓝田猿人和动物群,为古人类研究和地层划分提供了重要依据。

近期黄土地层研究取得了重大进展,突出表现在黄土的年代地层学和气候地层学两方面。通过古地磁和热释光等年代测定,为黄土地层的划分和对比提供了定量依据。1978 年库克拉(G. J. Kukla)通过对欧洲奥地利克雷姆斯黄土层古地磁测定,确定该地黄土开始发育在距今约 180 万年前。1982 年海尔(F. Heller)、刘东生得出中国洛川黄土开始沉积的古地磁年代为距今约 240 万年。1987 年孙建中等对西安东郊黄土层古地磁进行了研究,获得了该地黄土层开始发育在高斯正向期末期、距今 250 余万年的资料。1989 年郑洪波、丁仲礼对关中平原黄土层古地磁测定,也得出了黄土开始发育在高斯正向期末期的认识。目前资料表明,中国黄土地层开始发育在距今 250 万年前的结论是可靠的。年代学的研究还表明,布容正向期与松山反向期的分界多在第七层古土壤底部,午城黄土与离石黄土的分界年代为距今 120 万年左右,离石黄土与乌兰黄土分界年代为 10 万年左右,乌兰黄土与全新世黑垆土的分界年代为 0.8 万年左右。年代学的研究也使人们认识到黄土地层与河湖相沉积为同期异相关系。目前黄土地层年代学研究的不足是 70 万年以前层位的年代研究不够,无地磁极性变化层位的年代研究不够准确。

黄土地层是在基本连续沉积的条件下发育的,这种细而均一的沉积物易受气候影响,对气候变化反映敏感,所以黄土地层对研究陆地第四纪气候变化是很理想的。黄土地层的气候变化具有非常明显的规律性,主振荡周期为 10 万年左右。目前已将黄土地层的气候变化划分为 30 多个旋回,每一旋回由黄土代表的冷干或温干阶段和古土壤所代表的温湿阶段构成。黄土地层古气候的资料表明,早更新世和中更新世早期的气候振荡幅度小,中更新世晚期气候振荡幅度大。1978 年库克拉对奥地利和捷克黄土层中蜗牛化石与土壤结构等进行研究,确定了黄土中以代表冷干气候的蛹形螺、牙螺以及指示温干气候的蜗牛占优势,古土壤中则以代表温湿气候的成分为主,并将 170 万年来的气候划分为 17 个旋回。1988 年赵景波将西安东郊 250 万年来的气候划分为 25 个旋回。1991 年孙建中据氧化铁含量将 90 万年来西安东郊黄土地层气候变化分为 10 个旋回。1988 年克拉根据磁化率测定,将洛川等地黄土地层 70 万年来的气候划分为 8 个旋回。1989 年丁仲礼据古土壤与黄土交替将 250 万年来的气候分为 37 个旋回,并认为 250~180 万年间的和 70~1 万年间的的主振荡周期约为 10 万年,180~70 万年间的的主振荡周期为 4 万年左右。资料表明,氧化铁含量与磁化率变化能获得高分辨率的气候曲线,对次

级气候变化研究有重要意义。上述气候划分与深海沉积氧同位素气候曲线很吻合,反映出海陆气候变化是一致的,也证明黄土地层代表的气候变化是完整的。黄土地层和深海沉积气候划分突破了传统的 4~6 次冰期划分方案,这将对第四纪气候研究产生深远的影响。关于黄土地层气候变化的主周期目前尚未完全查明,次级周期更缺乏研究,这是有待进一步深入研究的内容。

黄土层古土壤的研究也取得了显著进展,发现了许多层古土壤和风化壳,认识到了冷干和温干条件下发育的古土壤。1985 年安芷生据粘土、CaCO<sub>3</sub> 含量、土壤结构和矿物风化度等将陕西洛川黄土地层中的古土壤分为棕褐土、淋溶褐土、褐土、碳酸盐褐土和黑垆土五种,并将黄土进一步分为弱风化、中等风化和强风化 3 种。1991 年赵景波在西安东郊辨认出 40 层红褐色古土壤,并通过孢粉、化学分析、土壤结构和 CaCO<sub>3</sub> 淀积深度研究,确定了该地黄土地层中第 1、5 层古土壤分别为棕壤和黄棕壤。1991 年赵景波首次确定西安东郊第 1~5 层古土壤已成为风化壳,并系统论证了黄土是干旱气候下发育的古土壤,提出了黄土地层中存在栗钙土、棕钙土和灰钙土等古土壤。1991 年福尔默(R. Follmer)的研究支持了黄土是古土壤的认识。黄土地层古土壤的研究仍很不够,许多层古土壤的类型有待确定。

黄土地层环境演变是未来研究的一个活跃方面,特别是 15 万年来短周期气候变化将成为研究的重点。黄土地层中的古土壤是今后研究的又一重要方面。除研究红褐色古土壤外,亦将开展温干和冷干气候下发育的古土壤的研究。

#### 参考文献

- 1 Kukla G J. the classical European glacial stages, correlation with deep-sea sediments, Nebraska Academy of Science Transaction, 1978, 6: 57~93
- 2 Zhang Zhong hu. loess in China Geojournal, 1980, 4: 253~540
- 3 Heller F. et al. magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. Nature, 1982, 300, 431~433
- 4 安芷生,等. 洛川黄土剖石土壤层学初步研究. 中国第四纪研究, 1985, 6: 166~173
- 5 孙建中,等. 黄土还要更老些. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7: 105~112
- 6 Kukla G J. et al. Pleistocene climate in China dated by magnetic susceptibility Geology, 1988, 16: 811~814
- 7 丁仲礼,等. 250 万年来的 37 个旋回. 科学通报, 1989, 34: 1494~1496
- 8 刘东生. 中国黄土研究新进展. 第四纪研究, 1990, 1: 1~9
- 9 赵景波. 黄土中风化壳的确定与研究. 地质论评, 1991, 37: 117~124
- 10 赵景波. 西安刘家坡剖石第 1 第 5 层古土壤研究. 地理研究, 1991, 10: 51~58
- 11 赵景波. 第四纪冷干气候条件下发育的土壤. 土壤通报, 1991, 22: 245~248

(西安地质学院赵景波教授撰)

#### 泥炭植物残体

the plant residue in peat 指泥炭中成碳植物遗体未完全分解而残存的部分。因此,植物残体是泥炭有机质中的主要组分,也是最有价值的部分,包括植物的根、茎、叶、果实、种子、孢子和花粉等。泥炭植物残体的类型对于沼泽的形成、演替规律、古植被生态,古气候以及泥炭的应用均有重要意义。

泥炭是在一定气候、水文条件下,于沼泽环境里形成。由于沼泽地表过度湿润或经常处于水分饱和状态,致使土壤层通气不良,死亡的沼泽植物在嫌气微生物的作用下,不能完全被分解,其残体就堆积于沼泽地表,经过几百至几千年不断积累而成为泥炭。

泥炭在自然状态下,是由液相、气相和固相 3 部分组成。固

相物质是由有机质和矿物质两部分组成的。泥炭的有机质一般占固相物质的50%以上,有机质的组成复杂,决定各种类型以及利用方向。在季节性积水条件下,干季时温度较高,水分少,通气较好,好气性微生物活动频繁,植物残体分解较好,其残体呈半纤维状态,用肉眼能辨认,但茎和叶的形态分辨不清。湿季时,温度较低,水分多,在嫌气性微生物作用下,植物遗体分解缓慢,其残体多呈纤维状或海绵状,能较好的保存于泥炭中。

在常年积水条件下,温度低、水分多,以嫌气性微生物活动为主,植物残体分解缓慢,其残体多呈纤维状,富有弹性,用肉眼能清楚地辨认出根、茎、叶等各部分残体,有时还可见到果实和种子。只有花粉和孢子在显微镜下识别。

关于泥炭植物残体的识别,早在1842年丹麦的斯蒂斯特鲁普(J. S. Steenstrup)曾根据泥炭土剖面及各层中含有的植物残体,详细地论述了植物的演替过程,证实了泥炭沼泽是森林数次演替期间形成的,这一研究推动了古植被学和古地理学的发展。1871年,挪威布莱特(A. Blytt)观察了挪威最古老泥炭层(平均厚4.9m),它分4层,各层植物残体之产夹有树根层。他认为从树根层的形成到泥炭藓泥炭堆积开始,在几千年间曾经过3次气候转变,树根层表明该泥炭地处于较干燥时期,树根之间的泥炭层是在湿润期堆积的,如今的泥炭地又被森林所覆盖,表明已进入第4次干燥时期。1961年德国韦伯(C. A. Weber)等人确立了近代孢粉分析法应用于泥炭研究,对植物残体的研究起着重大的作用。1977年前苏联莫斯科出版社出版了由卡茨(H. Я. Кач)编著的《泥炭植物残体图册》,描述了主要泥炭植物残体的特征。1981年,日本梅田安治、辻井达一、清水雅男等的《泥炭植物组成鉴别手册》介绍了日本北海道主要的泥炭植物残体的特征。

1984年,中国的郎惠卿、金树仁发表了“中国泥炭主要植物残体类型的初步研究”。1988年郎惠卿、金树仁等编写的《泥炭的鉴别与利用》,均论述了中国主要泥炭植物残体类型、特征及泥炭的利用,建立了泥炭植物残体分类,提出了泥炭植物残体的个体分类与组合分类的理论,同时对中国泥炭植物残体进行了分类。系统地阐述了泥炭植物残体与沼泽的形成和演替;植物残体和泥炭矿体的分类以及泥炭植物残体鉴定方法。尤其分类系统曾引起国内外学者的关注,促进泥炭植物残体理论的研究。

关于泥炭植物残体分类,郎惠卿指出应当包括两个体系,即植物残体的个体分类与组合分类。前者以成炭植物残体的个体角度出发,以泥炭中成炭植物残体的个体形态特征为依据,来确定植物残体的分类体系和名称。后者是从成炭植物残体的群体角度出发,以泥炭的植物残体组合的类型特征为依据进行的分类。这两种分类同植物分类与植物群落分类,是两种不同分类单位与系统,但植物残体的个体分类是组合分类的基础。

植物残体个体分类,以形态上“质”的差异作为原则。以成炭植物的生活和植物分类系统中的科、属、种等为依据,将植物残体分为3级。植物残体种为基本单位,命名采用成炭植物的种名。如芦苇残体,乌拉苔残体。又将同一属的植物残体种,归纳为中级分类单位,即植物残体属,命名采用成炭植物的属名。如芦苇和卡开芦苇皆为芦苇属植物残体。再根据植物生活型,属于草本、木本还是藓类等特征,作为高级分类单位“植物残体型”。根据上述原则与依据,初步将中国泥炭植物残体分为3个植物残体型,24个植物残体属,56个植物残体种。

泥炭中的植物残体来源于沼泽植物群落中成炭植物的种群,它们决定了泥炭植物残体的组合类型。因此,在进行植物残体组合分类时,应以能够反映植物残体组合间,在发生上的联系和形态上的“质”的差异作为分类原则。例如芦苇残体组合和苔草残体组合,在形态上是完全不同的。又以成炭植物的生活型和各种成炭植物残体的数量关系作为分类依据,将植物残体组合分为“群”和“型”两级。

“群”是植物残体组合的基本单位,是以成炭植物残体组合中占优势的成炭植物为依据。例如泥炭藓残体是泥炭藓植物残体组合中的优势种,它反应沼泽和泥炭的营养状况贫瘠、强酸性,水

分来源于以大气降水为主。

“型”是植物残体组的高级分类单位,以植物残体组合中的优势成炭植物的生活型为依据。可以分为木本;草本;藓类;木本;草本;木本、草本、藓;草本、藓植物残体型。命名时,以生活型为依据,将相同植物生活型的不同植物残体组合属归纳而成。如木本、草本残体组合型,是由森林沼泽形成;草本残体组合型是草本沼泽形成的;藓类残体组合是藓类沼泽形成的。因此,“型”又是“群”的归纳。根据泥炭植物残体组成中成炭植物的优势度和生活型,初步将中国主要泥炭植物残体组合划分为6个型、17个群。

对于泥炭植物残体的研究刚刚开始,国际上也尚未成熟,各种植物残体的解剖学特征和先进的鉴定方法,都有待于深入研究。

#### 参考文献

- 1 Кач Н Я, кач С В. Атлас растительных остатков остатков в торфах. непра. москва 1977, 1~27
- 2 梅田安治,辻井达一,清水雅男. 泥炭の构成植物の识别の手引. 北海道泥炭地研究会, 1980, 1~10
- 3 郎惠卿,金树仁. 植物生态与地植物学丛刊, 1984, 8(3): 182~188
- 4 郎惠卿,金树仁. 泥炭的鉴别与利用. 北京: 科学出版社, 1988. 73~80

(东北师范大学郎惠卿教授撰)

**森林沼泽植物与泥炭间的营养物质交换** the exchange of nutritive materials between plant and peat in the forest swamp 森林沼泽是沼泽的一种类型,指在地表有季节性积水或常年积水的森林,林下的土壤有泥炭积累或潜育过程。它广泛分布于北半球的温带和寒温带,在热带、森林沼泽面积小。

森林沼泽是个复杂体系。在其形成与发展过程中,所处的不同的发育阶段,植物群落结构、种属成分、种群动态、植物与泥炭的营养以及沼泽所处地段自然条件的差异,形成了不同的森林沼泽。一般可分为两大类,一是地表过湿或有季节性积水,土壤有薄层泥炭或无泥炭,其上生长有树木的沼泽地。这类森林沼泽是处于沼泽形成发育的初级阶段,故称为低位沼泽(Lower mires),由于沼泽土中营养物质丰富,又称为富营养沼泽(eutrophic swamp)。国际上通常称为Swamp,即树沼泽。另一类森林沼泽,其地表处于常年积水的嫌气环境,死亡的沼泽植物,其残体积聚形成泥炭层,并不断增厚,造成沼泽地表高出周围地面,因而得不到地下水补给,以大气降水补给为主,泥炭层中的营养物质贫乏、酸化,满足不了维持树木正常生长发育的需要,因而树木逐渐生长发育不良,矮生、枯梢、林木稀疏成为疏林,乃至无林。但喜湿耐酸的贫营养植物大量侵入,尤其泥炭藓十分发达,在地面形成密致的地被物和高大的藓丘。此类沼泽是发育的高级阶段,故称为高位沼泽(High bog),由于泥炭层中的营养物质十分贫乏,呈强酸性,又称为贫营养沼泽(Oligotrophic bog)或酸沼(Bog)。还由于沼泽地表泥炭藓占优势,故还称为泥炭藓沼泽(Sphagnum Bog)。

森林沼泽中蕴藏着丰富的泥炭资源,但它又影响着树木的生长,因此,很早引起人们的重视,把它作为改造利用的对象,研究它的形成、发展、演替以及在其演化过程中沼泽植物与泥炭间营养物质的交换等理论。

在17世纪末以前,人们在开发利用泥炭过程中,开始认识泥炭。1535~1543年,在莱兰德(J. Leland)的旅行日记中,记载了泥炭中有树木残体,认为泥炭地是由森林沼泽形成的。

18世纪初至19世纪末,欧洲一些国家利用泥炭和疏干泥炭地,并对森林沼泽进行了研究。1779~1981年丁·沃尔克(Wulker)著的《地质学讲义》一书中叙述泥炭沼泽有4种:一是由半腐烂的树木残体形成的;二是由草本植物残体形成的;三是由欧石楠植物残体形成的;四是由泥炭藓残体形成的。



19世纪,对泥炭沼泽及其应用的研究,得到了迅速发展。1842年J.S. 斯蒂特普对丹麦泥炭地的形成进行了研究,认为该地是森林数次演替而成的。1888~1889年,B.B. 道库恰夫研究了俄国的森林沼泽,详细描述了森林沼泽化的特点,提出了陆地沼泽化的形成与发展,在很大程度上与砍伐森林和森林火灾有关。

1902年,德国韦伯(C. A. Weber)根据泥炭沼泽的水分补给的地表形态及营养状况,论述了沼泽发育的3个阶段,以此作为分类依据,将沼泽分为低位、中位和高位3种类型,至今仍被广泛使用。1905~1915年,前苏联的B.H. 苏卡契夫,对森林和沼泽的相互关系进行了研究,提出了与韦伯类似的沼泽分类。芬兰、瑞典、英国等国学者也相继对森林沼泽进行了研究。

50年代后,关于沼泽的论著越来越多。1963年,前苏联皮雅钦科(H. N. Пиваченко)编著了《森林沼泽学》一书,论述森林沼泽地的营养生态和沼泽生态系统的研究。前苏联M.C. 博奇,和B.B. 马津格曾写了苏联沼泽生态系统一书。1983年美国的戴维、勾得尔写了全球生态系统一书,其中第4卷论述沼泽。中国沼泽学的研究较晚,在本世纪60年代初,在东北师范大学地理系和中国科学院长春地理研究所,先后建立了沼泽研究室。70年代起,煤炭、地质等一些科研单位和高等院校也先后成立了研究机构,开展了中国泥炭沼泽与沼泽学的研究工作,形成一支专业科研队伍。1983年郎惠卿等编写了中国沼泽一书。

森林沼泽的形成与发育过程,是泥炭层中营养物质逐渐贫化的过程,也是沼泽植物与泥炭之间营养物质交换量的变化过程。由于沼泽地势低洼,地表过湿或有积水,土壤通气不良,死亡的森林植物残体在土壤嫌气条件下,微生物活动能力弱,难以分解,呈半分解状态保存于土中形成泥炭,逐年积累形成炭层。因此泥炭层中的营养元素来源于泥炭植物残体、地表径流和地下水中溶解的无机盐类,而主要靠泥炭植物残体分解释放的各种营养物质。森林植物在这样一个物质循环过程中,即死亡的植物残体形成泥炭,泥炭分解释放的营养物质又被吸收,不断地进行营养物质交换、赖以生存与发展。

沼泽地水分过多,直接影响树木的生长发育,因此,本世纪50年代以来欧洲一些国家特别是芬兰和前苏联重视沼泽地排水工程的研究。因为沼泽排水后改善了土壤的通气状况,加强了土壤微生物的活动与繁殖能力,促进了泥炭的分解与营养元素的释放,有利于植物对营养元素的吸收。中国小兴安岭伊春红星林业局70年代进行了小面积贫营养森林沼泽的排水试验。沼泽排水后,收到一定效益,树木恢复了生长。但是树木生长速度较慢,径生长量很低。树木生长发育不良,不仅是沼泽地水分过多影响,还与泥炭中的营养元素贫乏有关。近年来许多国家学者又重视沼泽的营养生态。80年代美国学者曾研究贫营养沼泽中泥炭藓的生长发育与酸度、营养元素的关系。但是群落中各种植物的生长发育状况并不完全相同,泥炭藓、狭叶杜香和甸杜在群落中生长繁茂,成为优势种和特征种,而树木则生长发育不良,说明贫营养森林沼泽中的营养物质适合某些植物生活的需要,而满足不了树木生长发育的要求。因此,80年代后期中国开展了对森林沼泽植物与泥炭间营养物质交换的研究。定位和半定位研究森林沼泽的小气候、泥炭的水化学、泥炭的营养成分及其季节性变化对植物生长发育的影响;研究土壤微生物和土壤动物区系成分的特点及其季节性变化,以及各种沼泽植物对泥炭中营养元素的吸收力(迁移力)、生物吸收系数及植物凋落物返回泥炭土中的营养元素等,即森林生态系统中的物质流、能量流的物质循环。根据实验研究,初步证明不同泥炭层位中的理化性质及营养元素含量有差别,并有季节性变化规律。各种沼泽植物体内的营养元素含量不同,也有季节性变化规律,而且对泥炭中各营养元素的迁移力有差别。

沼泽植物对泥炭的营养元素的吸收量与泥炭的分解强度和营养元素的释放量密切相关。今后有待深入研究泥炭的分解强度与营养元素释放时所需要的适宜温度、湿度以及土壤微生物区系

成分及其活动能力的机理,全面揭示森林沼泽生物系统中物质循环特征,加强沼泽植被的生理生态学的研究方向,并为合理利用、改造与保护沼泽提供理论基础。

#### 参考文献

- 1 Кач. И Я. Москва. Государственное Издательство Географическое Литературы 1949, 153~245
- 2 Пиваченко Н. Н. лесное водопользование. Москва. издательство Академии наук СССР, 1963. 1~99, 145~151
- 3 David W Goodall. Ecosys TEMS OF THE WORLD, 4A New York: Amsterdam—Oxford, 1983, 35~255
- 4 郎惠卿. 小兴安岭森林沼泽植物与泥炭间营养物质交换过程. 国家自然科学基金委员会, 东北师范大学, 1993. 60~73  
(东北师范大学郎惠卿教授撰)

## 部门自然地理学

**地貌学** geomorphology 又称地形学,是研究地球表面形态及其发生、发展与分布的科学。它是地理学的重要分支,也是地质学的一员,总属地球科学。研究的对象是地球表面形态(地形圈),研究内容为地表形态空间变化、组合与结构的特征,塑造动力与组成物质所决定的形态成因、形态发育过程,以及形态时、空分布规律。该词于1858年诺曼(K. F. Nauman)首先提出,由希腊语3个词根“ge(地球)”、“morphe(形态)”和“logos(学科)”导出,概括了这门科学的性质。

地貌学孕育时间很早,在国外可追溯到公元前赫罗多德士(Herodotas),从埃及丘陵上发现贝壳,从而得出海面升降概念和尼罗河沉积物增长的意义;亚里士多德(Aristotle)叙述了河流侵蚀与沉积的意义;以及11世纪阿拉伯人阿费森纳(Avicenna)的地面升降和流水冲刷两类成山的概念。当然这些均为简单的现象描述,作为一门系统的独立的地貌学,直到18世纪中叶以后才逐渐从地文学中脱胎。从此,现代地貌学的发展大致经历了3个阶段:(1)萌芽阶段(18世纪后期~19世纪末) 受欧洲文艺复兴浪潮波及,“地貌学”一词及其内涵酝酿成熟,脱颖而出。地形塑造概念的奠基人苏格兰的赫顿(J. Hutton),1785~1795年发表了《地球的学说》,阐述“现在是过去的钥匙”。英国莱伊尔(C. Lyell)是均变论的倡导者,代表作《地质学原理》(1830)认为谷地的形成不单是降水和流水作用。法国苏里尔(A. Surell)1841年提出河流均衡剖面,即纵剖面下流变缓的缓曲线概念。美国鲍威尔(J. W. Powell)在英国格林伍德(C. G. Greenwood, 1857)河流侵蚀以硬岩为下限(今日称临时基面)的基础上,首先提出了侵蚀基面的概念。美国吉尔伯特(G. K. Gilbert)研究河流搬运与流量、流速、坡降的定量关系,提出河流动力调整保持“均衡”的概念,以及河流侧向夷平的作用。后两位及道顿(C. E. Dutton)的科罗拉多高原“大剥蚀”侵蚀期分析,为后期戴维斯的地貌循环和准平原理打下基础。(2)经典地貌学理论形成阶段(19世纪末~20世纪中叶) 把前期分散的概念联结起来,加以发展,形成系统的现代地貌学理论,通过地形成因解释法,给地貌学以新活力。主要代表为美国戴维斯(W. M. Davis),在1899~1932年间提出地貌循环学说,以及“地貌是构造、过程、阶段的函数”理论,认为地壳运动抬升形成高地,在侵蚀基面控制下,外力侵蚀下切,而后山坡自上而下剥蚀削低与河谷展宽的夷平作用,经历幼年、壮年和老年阶段,最终形成准平原,长期稳定后,再次突发上升,进入新的旋回,德国彭克(A. Penck & W. Penck)1924年发表《地貌分析》,提出山坡平行后退理论,建立山麓梯地学说。前苏联马尔科夫(K. K. Марков)1948年提出地貌水准面学说等。(3)新地貌学和部门地貌纵深发展阶段(20世纪中叶以后) 60年代掀起地貌学革命以来,以均衡概念研究地貌演化模式;地貌过程频率与机制;地貌突变与临界;地形与时间关系及地貌年代;气候成因地貌;板块构造地貌过程;地貌的数学形态与小尺度形态;应用地

貌与环境地貌等有长足的进展。

中国对地貌研究很早,公元前3世纪战国“禹贡”将东部山川大势分9州并分类;公元5世纪北魏郦道元“水经注”记载黄河、长江与两江等沿岸地形;11世纪北宋沈括《梦溪笔谈》论述河流侵蚀、搬运与堆积作用,明朝《徐霞客游记》记载了华东与西南地区的地貌,特别对喀斯特地貌、洞穴及其沉积物的成因、类型与分布进行了科学的研究,走在当时世界的前列。20世纪初西方地貌学思想传入中国后尤其建国后地貌学迅速发展,现已成门类齐全的学科。除理论研究外,大量参与国民经济建设的地貌调查,还参加中国第一批(1980年)和以后的南极考察,以及某些援外工作。1961年中国地理学会地貌专业委员会成立后,至今已召开了6次全国地貌(与第四纪)学术大会;中国还派出33人代表团参加1985年在英国曼彻斯特召开的第1届国际地貌学大会(共54国,650人,700篇论文);参加1989年在德国法兰克福以地生态为中心的第2届大会;参加1993年在加拿大哈密尔顿召开的第3届大会。

现代地貌学的发展向四方面分支:地貌发生系统,包括构造地貌学、气候地貌学、动力地貌学、人为地貌(学);地貌营力(过程)系统,包括流水地貌学、河口与海岸地貌学、海底地貌学、湖泊地貌学、冰川与冰缘地貌学、泥石流与重力地貌学、风沙地貌学、喀斯特地貌学、岩石地貌学、火山地貌(学)、历史地貌(学);地貌应用(综合)系统,包括区域地貌学、应用地貌学、环境地貌学、城市地貌学;地貌技术系统,包括数量地貌学、实验地貌学、地貌年代学、地貌制图学、地貌遥感与探测技术。其中主要的分支学科有:(1)构造地貌学,研究内营力过程形成的地貌,分两方面:历史地壳运动遗留的地质构造形迹对地貌的影响称静态构造地貌;新构造运动对地貌发育与形态的控制,称动态构造地貌。全球大构造地貌,是近代研究的热点。原因不仅地块构造力是一种进入地貌系统的能量,提供地壳均衡态信息,且有助于预测与控制某些公害,又是研究全球巨地貌的基础。(2)气候地貌学研究以气候为主要表现形式的太阳能外力控制下地貌过程与形态产物。即研究不同气候区、不同外力过程下的地表形态及其发育特征。研究方法上主要是划分全球气候地貌成因区,借助现代气候和地貌过程参数进行数理统计分析,结合古气候的重建,揭示历史过程及其特征地形产物。鉴于气候环境多变,作用时段划分和历史过程强度的数值化均较难,目前主要采取综合分析法。(3)动力地貌学,研究地貌营力在地形形成中的作用,即研究营力过程的动力学系统在地貌系统演化中的作用。它往往从现代地貌过程入手,研究地形与各作用变量关系、动力机制,强调营力强度、频度及其相互匹配。动力作用均衡是其理论基础,即地形的演化处在营力对地表作用过程中,遵循最小能耗定律,自动向相对均衡态调整,使地貌演变率最小,地形形差变化小,地貌趋于相对稳定。近代还注意到动力地貌的人为环境效应及其临界。(4)应用地貌学,研究运用地貌学原理与方法解决生产实际,如农业、水利、国土与流域规划、自然资源调查与开发评价、港口建设、铁路建设、河道整治、泥石流等灾害防治、水土保持、防风固沙、找矿、城市建设与环境评价等。(5)区域(综合)地貌学,研究地貌的区域分异、分类和特定区域内各种地貌现象的综合。

当地貌学正进入一个发现与深入的新时代,在时空上不断扩大尺度,向宏观与微观两端伸展,从解释性描述向机制研究发展,向量化与实验化发展,从简单的物理模型向数学模型发展。近年应用与环境地貌成为热门。预计今后将在以下领域有较大的发展:大区域综合研究,建立全球巨地貌体系,环境地貌,建立地貌与人的关系;新突变论,深入认识大幅度、低频率地貌事件;地貌过程,深入探讨地貌集合体随时间发展细节和动力学机制;地表形态数量分析;地表组成物质与环境信息。当前虽各分支发展很快,但总理论尚无新的重大突破。

#### 参考文献

- 1 Thornbury W D. Principles of geomorphology, John Wiley, Sons Inc, 1969

- 2 任美得. 自然杂志, 1978, 1(1): 19~24
- 3 沈玉昌. 地理学报, 1980, 35(1)
- 4 Ollier C D. Tectonics and landforms. Longman Group Ltd., 1981
- 5 Budcl I. Climatic geomorphology. Princeton University Press, 1982
- 6 Chorley R J, et al. Geomorphology. Methren, Co Ltd, 1985
- 7 Andrew Goudle. The encyclopedic dictionary of physical geography. Basil Blackwell Ltd., 1985
- 8 Hart M G. Geomorphology—pure and applied. Allen & Unwin Ltd, 1985
- 9 中国科学院, 国家计委地理研究所. 现代地理学辞典. 北京: 商务印书馆, 1990
- 10 王乃樵. 中国大百科全书(地理学). 北京: 中国大百科全书出版社, 1990, 88~89

(中国科学院地理研究所林钧枢研究员撰; 尤联元审)

### 构造地貌

structural geomorphy 主要指由地壳运动和地质构造作用所形成的地表形态。由于它是地球内部物质运动的产物, 所以又称“地质内营力地貌”。

构造地貌主要是研究地壳运动、大地构造单元、地质构造类型与现代地貌之间的关系。它一方面是从构造这个因素出发来解释现代的地貌, 另一方面是根据目前的地貌表象来分析地壳的构造。不论是从构造来解释地貌, 或是从地貌来分析构造, 都不能忽略外力因素的影响。不过, 从研究构造地貌的角度, 则侧重于探索地貌发育对构造的依赖关系, 因此对认识地质构造有重要意义。

构造地貌的概念在19世纪初已经初步形成, 当时有些地质学家根据地貌特征和水文网性质, 借以阐明基本地质构造特征和线形构造。1945年以来, 由于应用了航空地质和卫星地质判读及解释方法、地球物理数据等使构造地貌的研究获得迅速发展, 逐步形成了新的科学体系。它不仅正确地阐明地貌形成过程中内力因素(主导因素)和外力因素相互制约的规律性, 而且将大地构造学和新构造学的概念联系在一起, 又发展了它本身的特色。目前构造地貌的专著有法国 Jean Chardonnet 的《地势与构造》(1955)和 Pierre Birot 的《构造地貌学》两卷(1958), 其讨论内容包括沉积岩地貌、结晶岩地貌、火山地貌、缓斜构造地貌、褶皱地貌、断裂地貌、接触带地貌以及地势发展形式等。前苏联邦达楚克(B. П. Бондарчук)则运用了大地构造学观点探讨山脉的形成及地壳表面的主要地貌单元, 将造山作用作为大地构造表现形式, 著有《构造造山作用的基本问题》一书。60年代初, 郭令智曾用构造地貌学的观点探讨了中国苏南、皖南和浙西地貌的形成和发展。

按构造地貌的规模, 可分为3个等级。第1级为大陆和海洋, 它是在地球内部和宇宙性动力作用下形成的地球表面最大的构造地貌单元, 称为全球构造地貌或星球构造地貌。大陆与海洋在地球表面的分布不均匀, 海洋面积占地球总面积的71%, 南半球海洋面积大; 大陆面积占地球总面积的29%, 大部分在北半球。从地球高程面积分布曲线看, 大陆和海洋的地形起伏呈两个明显的台阶。第1个台阶分布在-6 000~-3 000m之间, 平均深度为3 729m, 大部分是大洋底; 第2个台阶分布在1 000~-200m之间, 平均高程为875m, 大部分是陆地。

第2级为陆地上的山系、平原、高原和盆地, 海洋中的大洋盆地、洋脊、海沟和岛弧等。这些地貌单元的形成、发展和大地构造作用有关, 所以称为大地构造地貌。当今通用的两种学说((地)槽(地)台说和板块构造说)都认为地壳上有强烈活动地带和相对稳定地区。在活动地带和稳定地区有着不同的地貌反映。高大的山系多位于活动构造带, 如分布于环太平洋构造带上的有南、北美洲的安第斯山、科迪勒拉山及亚洲东部太平洋沿岸的山

脉和岛弧;分布于地中海—喜马拉雅构造带上的有喜马拉雅山系上的山脉、喜马拉雅山脉、阿尔卑斯山脉和非洲西北部的阿特拉斯山脉。这两个山系带,构造运动活跃,火山地震频繁。世界上的大平原都位于稳定的地区,如中国东部的华北平原位于中国地台上,美国东部的大平原位于北美地台上,而俄罗斯大平原则位于东欧地台上。大陆裂谷的形成与深大断裂活动有密切关系,象世界上最长的裂谷带(总长约7500km)东非大裂谷和世界上最深的裂谷湖泊(水深达1600m以上)贝加尔湖以及中国的汾、渭地堑等,均因地壳区域性隆起产生巨大张力以至断裂下陷所致。据张文佑教授等(1959)的研究,中国西北部的准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地和东部的四川盆地等也都是在地壳运动的过程中,产生斜大深大断裂使地壳下陷、周边褶皱上升所形成。海底构造地貌分为大洋底和大陆边缘两部分。大洋底中的主要地貌单元是大洋中脊和大洋盆地。大洋中脊是一条纵贯世界各大洋洋底的巨大山系,其两坡陡峻,中峰尖峭且被断裂切割的两条平行的峰顶,相对高度在3000m以上,洋脊顶部的平均水深在2000~3000m之间,个别高点纵立于海平面之上(如大西洋北部的冰岛等),它的宽度为1000~1500km,全长约达8000km。两坡较缓,顶部裂缝不显著,无明显中央裂谷的洋底山脉;称为洋隆,为东太平洋洋隆。洋脊和洋隆是洋底地壳运动、海底扩张在地貌上的反映。大洋盆地是位于大洋中脊两侧,界于中脊和海沟之间浩瀚而又较平坦的大洋洋底部分,平均深度在海面以下4~5km,约占海洋面积的44%。盆地内由多种成因的海岭和深海平原组成。大陆边缘的大陆架,是大陆周边的浅水平台,在地形和构造上均属大陆的延伸部分。它向大洋底微倾,平均坡度为1.7%。大陆架的水深一般在200m以内,个别的外缘水深可达500m。平均宽度约70km,约占海底面积的7.5%。中国沿海的大陆架是世界上最新的大陆架之一,整个黄海均在大陆架上,宽750km,东海大陆架宽130~560km,南海南部的巽他陆架宽达1000km。大陆坡是大陆架前缘的巨大斜坡,是大陆的边缘,在构造上处于大陆性地壳向大洋性地壳过渡的位置。其坡度从4°~14°不等,斯里兰卡的大陆坡坡度达35°~45°之多,是世界上大陆坡最陡的海域。深度一般从200~2400m。平均宽度为40~50km,约占海底总面积的12%。在大陆坡外侧有延长1000多km,略向海洋方向突出呈弧形的列岛,称为岛弧,如太平洋西岸由阿留申、千岛、日本、琉球、吕宋等岛屿组成的“东亚岛弧”。岛弧的外侧常伴生有深达5000~6000m的海沟,其横剖面呈不对称状,靠大陆一侧坡度较陡(10°~15°),另一侧坡度较缓(2°~3°)。标准宽度为100~150km。按板块构造理论,地幔对流在大陆附近,使大洋壳向大陆壳下俯冲,俯冲带的后端形成深陷海沟,前端在地幔中熔融上升形成侵入体或火山,构成岛弧。

第3级是由褶皱、断层和火山等作用造成的地貌,称为地质构造地貌。褶皱地貌是由于岩层受力弯曲发生褶皱所表现出的地貌形态。有因近代构造运动造成、未遭外力破坏、地貌形态与构造一致的原生褶皱地貌,如背斜山、向斜谷、单面山和穹窿等;也有因早期构造运动造成,经长时间剥蚀和侵蚀,使地貌形态与构造相反的次生褶皱地貌,如背斜山、向斜谷等。与断层有成因关系的地貌有断层崖,断层三角面,断层线崖,断块山和断陷盆地等。火山地貌形态常与火山喷发方式和岩浆性质有直接关系。中、酸性熔岩,粘性较大,往往猛烈喷发,形成坡度较大(30°~35°)的锥形火山,著名的意大利维苏威火山,为一大型的锥形火山;基性熔岩,流动性较大,常宁静地溢出地表,形成坡度较小(10°左右)的盾形火山,夏威夷的基拉韦厄火山是世界上少有的巨型盾形火山之一。中心式喷发火山一般都有完整的火山口。常积水成湖,如中国东北长白山主峰的天池。此外,还有熔岩流沿地面坡度流动冷凝而成的许多地貌形态。

构造地貌的研究,是介于地理和地质之间的边缘科学研究,它研究的历史还不长,有着广阔的发展前景。当前和今后一个时期,将采用更为先进的科学手段,从构造应力场的角度,从水平运动和垂直运动所构成的三维空间,从地壳运动的强度和外力作用

消长等方面,对静态和动态构造地貌进行综合研究,更深入地探讨构造运动和地貌形态之间的关系和发展规律。在地壳稳定区,着重研究大型线形构造所切成的断块及其与地貌发育和分区的关系;在褶皱断裂带,则研究地势的发展史,地壳构造形态与水系的一致性及其对河流发育的控制作用;在平原地区着重研究地下隐伏构造的特征。尤其重要的是把构造地貌的研究广泛应用于实践,为找矿、工程建设及地震预报等服务。

#### 参考文献

- 1 Hills E S. Jour Geol Soc, Australia, 1956, 3: 1~15
- 2 Meiton F A. Jour Geol, 1959, 67: 351~370
- 3 郭令智. 南京大学学报, 1962, 2: 15~29
- 4 Einarson T. et al. Societas Scientiarum Islandica, 1977, 6
- 5 北京大学, 南京大学, 等. 地貌学. 北京: 人民教育出版社, 1979. 228~251
- 6 严钦尚, 等. 地貌学(第1版). 北京: 人民教育出版社, 1985. 5~21
- 7 上田诚也, 佐藤任弘, 等编, 海洋底板块构造. 于纯仁, 等译. 北京: 地质出版社, 1986. 71~189

(安徽师范大学傅毅副教授撰)

#### 大地构造地貌 tectonic landforms

大地构造地貌属于构造地貌之一,它以地球内力为主导力并在外力长期的共同作用下,由地壳运动(大地构造运动)而产生的地球表面大型的形态。它包括陆地上的褶皱山系,大型的平原、高原和盆地;海洋中的洋中脊、海岭、深海平原、岛弧以及属于大陆边缘大陆架、大陆坡等。大地构造地貌反映了地貌过程与大地构造控制之间的调节关系。它是构造地貌研究的中心课题。通过对大地构造地貌的研究,不仅可以从大地构造这个因素出发来解释大型地貌,更重要的是根据大型地貌来分析推断地壳的构造与运动特征,追溯地球特别是岩石圈及其表层的演化、发展规律,为预报地震、找矿及工程建设服务。通过对大地构造地貌的地貌过程研究,还可以对外星体的地质进行解释与推测。

由于用途的不同,对构造地貌的划分方法也不相同。李契科夫(Б. Л. Шичков, 1948)结合 von Engle(1942), R. D. Salisbury, (1919)的划分方法,把构造地貌分为巨地形(第1级地形,包括大陆、海洋)和大地形(第2级地形),即今天所称的大地构造地貌。而微地形属第3级地形。

大地构造地貌是大地构造学与地貌学交叉的领域,它的研究成果是地质、地貌等学者共同努力的结果。以20世纪60年代板块学说兴起为界,可以把大地构造地貌的研究划为前后两个阶段。17世纪末,莱布尼兹(G. W. von Leibnitz, 1680)第1次提出地球由于冷却产生山脉和沟谷的见解。俄国洛蒙索夫(M. B. Ломоносов, 1763)提出了改变地貌的力量有内、外两种的观点。1777年,帕拉斯(P. S. Pallas)以乌拉尔山为例,提出山脉因火山作用的“隆起说”。1859年,美国霍尔(J. Hall)首次把山系与沉降带联系起来。1885年,休斯(E. Suess)提出地台区地貌十分平坦的观点。戴维斯(W. M. Davis, 1899)系统地阐述了地貌学理论框架和“侵蚀循环学说”,提出了陆地地形的演化是抬升—侵蚀—夷平周而复始的运动。彭克(W. Penck, 1924)把地貌发育看作内、外动力相互作用的结果,同时,根据山坡的发展过程研究地壳运动的方向与速度。法国马东(E. de Martonne, 1909)曾专门阐述了地质构造对地形的影响以及不同大地构造单元的地貌发育问题。毕罗(P. Birot, 1958)也就不同大地构造单元论述了地貌的演化,并评述了新造山机理。前苏联捷贾耶夫(М. М. Шукевич, 1933)认为对于陆地地形的分析可以向我们揭示地壳升降运动的一切主要特点,同时,这些运动都是具体表现于大陆上过去的主要地形起伏的形态上。1948年,李契科夫提出了地貌学要研究整个地表形态的观点,并提出地球表层结构中,地质构造只是作为骨架,它为各种雕塑地形所丰富和复杂化的认识,并把构造地貌进行分类和尝试性地拟定了地球上大地形(第2级地形)发生

发展的“6条规律”。与此同时, K. K. 马尔科夫(1948)完善地论证了不仅要研究小地形, 而且要研究较高一级的其它所有地表形态, 并把地形学分成3个部门, 其中普通地形学, 主要研究的是大地构造地貌问题。

在海洋地貌学领域中, 美国谢帕德(F. P. Shepard)从20世纪30年代开始从事海底调查, 1948年出版《海底地质学》, 为洋底地质地貌的研究作了开创性的工作。

总之, 在20世纪50年代之前, 大地构造地貌的研究比较薄弱。一方面由于大地构造学在此之前一直立足于大陆, 而对海洋所知甚少, 因此, 不可能对全球进行更为完整的大地构造研究; 另一方面, 地貌学本身由于占统治地位的地貌理论来源于欧洲、北美, 这些地方第四纪冰川广泛盛行, 形成了许多年青的地貌形态, 因而使这些地方的学者认为地球的面貌很少比第三纪老, 大多年轻于更新世(W. D. Thornbury, 1969), 甚至说全球大多地表形态是中新世之后(G. H. Ashby, 1931)形成的错误思想, 使得地貌与大地构造之关系的研究一度被忽视(Ollier, 1981)。

20世纪60年代发展起来的板块构造学说使大地构造地貌研究得到迅速发展, 给予了比较令人满意的解释。该学说认为, 造山作用发生于板块敛合边界, 造山带就是板块的俯冲带、碰撞带。

从二次世界大战到20世纪60年代, 地貌学发生了一系列重大的变化。地貌学时空尺度大为扩展, 这为大地构造地貌的蕴藏与发展作了准备, 地貌学研究的重点也从戴维斯所开创的构造一作用一时间的封闭式地貌循环, 转为形态一作用一时间的开放式地貌系统演化。地貌不再看成构造被动受外力雕塑的产物, 形态反过来也影响作用。1961年, 霍斯(E. S. Hills)给予了构造地貌学的解释, 构造地貌学已包含了大尺度构造地貌, 把一直集中于小尺度地质构造地貌研究的构造地貌学引向深入。但是, 20世纪50~60年代, 当大多数地学分支因海底扩张和板块构造而变得令人鼓舞的时候, 大地构造地貌却没有及时与板块学说相结合。1962年, 肯纳基(W. Q. Kennedy)以“重力均衡”为假设前提, 建立了一个以构造运动(主要指上升)、侵蚀(指河流的下蚀)和剥蚀(河流之间地表的下降)三要素的理论体系, 组合成反映地表演化的九种情况, 并得出值得注意的结论: 准平原可以发生在活动构造上升期间, 而不是非要在静态的构造条件下; 准平原过程可以与区域基准面无关, 并且可以在高、中、低海拔发生; 上升的准平原面不必含有之后的构造上升的涵义。把地貌与板块构造相结合进行研究, 主要是在20世纪70年代之后, 如杰迪逊(S. Judson, 1975)、奥力尔(C. D. Ollier, 1979, 1981)、泰勒(R. L. S. Taylor, 1985)等。奥力尔(1981)明确指出理解新地质学和大地构造对于理解地貌(不仅第一级地形)是非常必要的, 地貌与大陆漂移、板块构造、生物演化可以有同样时间尺度。托戴(C. R. Twipale, 1991)通过对澳大利亚不同大地构造背景下地貌演化分析, 得出其地貌年龄在60~100百万年。

在中国, 李四光早在20世纪30年代就对东亚特别是中国的地貌与地质构造作了深刻的研究。20世纪70年代, 黄汲清分别以秦岭、祁连山、天山等一些地槽为实例, 进一步阐述了地槽多旋回造山观点。郭令智等(1975, 1977, 1978, 1979)用板块学说解释了中国南部大地构造旋回的海沟—火山岛弧—弧间盆地(边缘海)和前陆盆地复合体的形成及大陆地壳的演化。由于新构造运动研究的深入和板块构造学说的影响, 中国地貌学者开始深入进行大地构造地貌的研究。1981年8月, 中国地理学会召开第1次构造地貌学术讨论会, 有不少人对大型构造地貌的成因、区域断裂构造地貌、板块与地貌、构造地貌的应用等作了研究。还有人进行了地壳运动对河型转化影响的实验研究和计算机模拟(1982, 1985)等。

今后的大地构造地貌研究, 将是多学科的综合性、定量化和计算机模拟为其主要特点, 运用板块构造模式, 对全球大陆与海洋地貌重新进行认识。这对于大地构造地貌理论系统化并与生产实践的结合, 具有重要意义。

## 参考文献

- 1 李契科夫 B. П. 地理译报, 1955, 2, 83~88
- 2 Kennedy W. Q. Geo Mag, 1962, 99, 304~312
- 3 Ollier C. D. Tectonics and landforms, 1981, 299~310
- 4 中国地理学会地貌专业委员会编. 中国地理学会第1次构造地貌学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1984. 1~207
- 5 Белоусов В. В. 国外地质, 1986, 1, 1~10
- 6 高抒. 地理研究, 1989, 8(1), 50~55
- 7 Ritter D. F. 未来地理译报, 1991, 2, 35~42
- 8 TwilDale C. R. Z. Geomorph N. F., 1991, 35(1), 85~109

(安徽师范大学王心源撰)

## 不同大地构造单元的地貌表现 landforms in

different tectonic units 大地构造单元又称地壳基本构造单元, 它是地壳大型构造的基本单位。以内力作用为主导的大型地貌, 其形成与分布都与一定的大地构造单元相联系。从不同的大型地貌表现来揭示大地构造单元结构与构造及其运动之间的差异, 为地震预报、找矿、工程建设服务, 以及对岩石圈演化和外圈地质体的认识, 均具有重要意义。直至今日, 有关大型地貌与大地构造单元相互关系的研究, 仍显得比较薄弱。当前, 人们主要使用的是槽台学说和板块学说的大地构造单元划分方法。

槽台学说对于陆地上以及大陆边缘部位的大型地貌的形成与演化提出了理论假说。地槽主要特征之一, 是地槽褶皱之后表现为一系列大致平行的延续达数十万米至数百万米线状山脉。1857年赫尔(J. Hall)观测到阿巴拉契亚山脉是由于长条状海沟内积聚了比其它各处都厚得多的浅水沉积受到褶皱作用与断层作用而形成的, 1873年丹纳(J. D. Dana)接受此意见, 并把它创名为“地槽”(geosyncline)。他俩理解的地槽是形成于大陆边缘。叔舍特(C. Schuchert, 1923)将此研究扩展到北美及其以外, 包括大陆上的盆地。地台构造单元中地貌以相对和缓为其特征。休斯(C. E. Suess)于1885年把地壳上稳定的、自形成以来不再褶皱变动的平坦地形命名为“地台”(Platform)。1900年, 奥格(E. Haug)将全球划为地槽和地台2种大地构造单元。地台区地貌有大型的高原、平原、盆地, 宽缓褶皱的山地。由于地台的发展与演化, 地台会由相对稳定向相对活动转化, 使得地台内部地形变得复杂化。哈因(B. E. Xahh, 1960)把这种活动性大的地台称活动地台, 黄汲清(1960)称此为准地台, 陈国达(1959)把这种活动区作为大陆地壳的第3种构造单元地洼。20世纪60年代之后, 给予了槽台说新的概念, 认识到现代大陆边缘的大陆架、大陆坡、边缘海、岛弧、深海沟甚至洋盆和洋中脊都是正在发展中的地槽。地槽并非简单地先被填满然后褶皱成山, 褶皱也并非仅是地槽生命结束的唯一特征, 地槽生命结束时的挤压是不足以造成所见到的褶皱内容(C. D. Ollier, 1981)。米切尔和雷丁(A. H. Mitchell 和 H. C. Reading, 1969)根据大陆边缘3种类型, 把地槽划分为相应的4种类型: 大西洋型地槽, 在大陆边缘外缘无海沟, 大陆架上三角洲发育; 安第斯型地槽, 地貌上表现为沿海发育了一个巨大的山系, 外侧有一深海沟; 岛弧型地槽, 地貌上表现为岛岸斜坡陡峻, 没有广阔的大陆架(如马里亚纳岛弧); 日本海型地槽, 位于大陆和岛弧之间的边缘海盆地, 在近陆一侧发育了大陆架和三角洲。1977年鲍洛特(G. Boillot)对地槽的不同构造单元与大陆边缘的不同部位进行了有益的对比工作, 如把大陆架与冒地向斜进行对比, 把陆坡与冒地背斜对比, 把陆隆、洋盆与优地向斜进行对比。

许多褶皱山脉都形成于被称作地槽的巨厚沉积的海沟或盆地中, 但很少有人阐述过没有这种海沟出现的众多山脉, 如喜马拉雅山脉、落基山脉和日本内带(T. Matsuda & S. Uyeda, 1971), 板块学说对此给予了较好的解释。

板块学说认为, 造山作用发生于板块的敛合边界。杜威和伯德(J. F. Dewey & M. Bird, 1970)把造山运动机制分为2种基本模式: 一种为热力驱动的造山模式, 即大洋岩石墨板块在另一板

块之下俯冲,导致仰冲板块前缘形成岛弧或山脉,又进一步分为岛弧型造山带和科迪勒拉型造山带。T. 松田和 S. 上田等(1971)把这两种造山称太平洋型造山。另一种是机械驱动的造山模式,又可分为2个大陆之间、大陆与岛弧之间或2岛弧之间碰撞形成褶皱山系。

板块构造学说认为,大陆既可裂开、漂移,又可碰撞、缝合到一块。因此造成了大洋也有开启和闭合的发展过程。威尔逊(J. T. Willson, 1973)根据现今世界上大洋盆地的特点,提出了大洋发展的6个阶段,即胚胎期(东非裂谷)—幼年期(红海、亚丁湾)—成年期(大西洋)—老年期(太平洋)—结束期(地中海)—残迹(雅鲁藏布江)。于是,板块学说把造山带的发育阶段与构造旋回同地球上的大洋的发生与发展统一了起来。米切尔(1981)给出模式,依次为大陆裂谷阶段,海底扩张阶段,洋壳俯冲阶段和最终的大陆碰撞阶段,一个完整的威尔逊旋回。如果从广义的造山作用来看,依次经历了断块造山,洋中脊隆起和岩石圈绕曲导致的大陆边缘隆起造山(哈因,1982),俯冲造山以及最终的大陆碰撞造山。板块运动学说对施蒂勒(1940)建立的关于地槽从发生到造山转化为褶皱带的全过程这个构造旋回的思想赋予了全新的理解。

板块学说在海洋和板块边缘的研究取得了较大的成果。自该学说建立起,就面临着从海洋向大陆,从板块边缘向板块内部研究转移的挑战。尽管板块内部构造相对稳定,总体为平坦广阔的地貌特征,但是自中、新生代以来,由于构造运动强度明显的加大(V. Belousov 等,1974),造成板块内部活动也十分强烈,尤其垂直运动比较显著(杨怀仁,1982,1987),表现为许多褶皱断块山脉。板块内部大型地貌,特别是对众多山脉的研究,无疑是认识板内构造的关键之一。对此中外一批学者(J. F. Dewey, 1969, 1973; W. Hamilton, 1969, 1970; S. Yeats, 1968; A. Gansser, 1974; 常承法, 1973; 肖常序, 1978, 1980; 李春昱, 1978 等)先后对欧、美、亚洲一些有代表性的山脉作了研究。青藏高原这一大型地貌作为现代板块碰撞产物,引起了中外大地构造学者的兴趣。中国学者们对青藏高原东西向诸山系形成的探讨(常承法等1973),对喜马拉雅山脉近期上升的探讨(赵希涛1975),对青藏高原隆起的研究(李吉均等1979)等,为大地构造地貌研究作出了贡献。

大地构造地貌分析与地球物理和地质资料相结合,确定板块边界条件和认识边界上如何进行的作用力,以及板块内部大型地貌研究和对古板块边缘确定的意义,都是有待进一步深入探讨的领域。

#### 参考文献

- Jacobs J A, et al. Physics and geology. New York; McGraw Hill, 1974, 2: 471~476
- 沈玉昌. 地理学报, 1980, 15(1): 3~4
- Ollier C D. Tectonics and Landforms. New York; Longman Lnc., 1981, 1~73, 181~191
- Scheidtger A E. Principles of geodynamics, 1982, 3: 2~21, 238~282
- 杨森楠, 等. 中国区域大地构造. 北京: 地质出版社, 1985. 11~18
- 刘肇昌. 板块构造学. 成都: 四川科学技术出版社, 1985. 76~202
- 李春昱, 等. 板块构造基本问题. 北京: 地震出版社, 1986. 1~33
- Dale FRitter. 地理译报, 1991, 2: 35~42

(安徽师范大学王心源撰)

**地貌系统** geomorphic systems 传统地貌学注重从地质基础出发,进行综合性、区域性研究。而动力地貌学则侧重于地貌过程的动力、形态分析与实验研究。学科愈分愈细,研究方向愈来愈窄。这种趋势对某些问题的认识固然可以大大深化,但在

另一方面,却又人为分割了自然界这个有机联系的整体。因此,要求运用系统论的基本原则,从总体出发,把分析与综合结合起来,对自然界形成整体化、系统化的认识方法。

20世纪60年代以来,系统论的思潮及其基本原则迅速地向着地貌学领域渗透和扩展,改变着地貌学家的知识结构和思维方式,愈来愈显示出地貌学的一个新的生长点——系统地貌学,它与传统地貌学结合成一个整体,将以其强大的生命力成长起来。

地貌系统既是一个有结构的整体,又是一个具有特殊功能的整体。系统的结构是使系统保持整体性,使系统具有一定整体功能的内在依据。系统之所以具有稳定有序的结构,是由于系统通过自组织过程使其各子系统协同的结果。在地貌系统中,其自组织现象与协同现象是通过自我调整作用的三重趋向性(目的性)体现出来的。

**平衡的趋向性** 地貌系统自我调整的最终目的在于力求使进入系统各个部分(包括溶质在内)的泥沙量等子出沙量,系统能够维持动态平衡。在这里,所谓平衡有二层含意:①输沙平衡,即系统与环境之间输入与输出相互协调;②系统内各个层次、各个部分、各个要素之间和谐一致。例如冲积性河流通过自我调整建立起来的有序结构——河槽水力几何形态,明显具有动力与形态之间相互协调、和谐一致的特点,只要来自环境的输入不发生超出一定限度的突变,则系统对来水来沙的变化,有能力通过调整其自身的结构和功能,以保持系统的适应性,使动力与形态趋于在新的条件下的和谐有序。从研究地貌系统发展的 W. M. Davis 侵蚀旋回模式来看,系统为了适应环境,长期地处于变化之中。地势不断剥蚀降低,起伏逐渐夷平。鉴于系统具有这样一个宏观变化过程,故可将地貌系统视之为不断变化着的进步系统。

**能量呈空间均匀分配的趋向性** 系统自动调整的最终结果不仅满足平衡的要求,而且还要使系统内部的能量各部分呈均匀分配。在热力学系统中,为了衡量其不能利用的热能,引出了熵的概念。所谓熵  $\Phi$ ,是指系统中不能用作机械功的那一部分能量的量度

$$\Phi = \frac{E_i}{T} \quad (1)$$

其中  $E_i$  为状态  $i$  所具有的单位质量的能量,  $T$  为绝对温度。

在任何不可逆的自然过程中,熵总是不断增加的。熵的增加意味着系统中可能转化为机械功的能量减少,而熵的大小则可提供作机械功的能量在系统中如何分配的函数。在考虑一些具体问题时,常把熵作为系统出现某种状态概率的尺度来处理。所谓玻耳兹曼关系,就是理想气体中联系熵与概率的一个关系

$$\Phi = k \ln p + c \quad (2)$$

其中  $k, c$  分别为常数,  $p$  为概率。鉴于  $p$  为小于1的数,并考虑到(1)、(2)式,则可写为

$$p \sim \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \quad (3)$$

其中  $kT$  代表所有可能状态的总能量。

利奥波德(L. B. Leopold)等曾应用熵的概念,研究河流中能量空间分配问题。设河流的总能量为  $E$ ,沿河各段的能量分别为  $E_1, E_2, \dots, E_n$ 。类比理想气体的情况,则  $i$  河段能量  $E_i$  的概率为

$$P_i \sim \exp\left(\frac{-E_i}{E}\right) \quad (4)$$

而整个河流的熵为

$$\Phi \sim \sum \ln p_i \quad (5)$$

鉴于河流在调整过程中力求使熵达到最大,因此河流内能量按  $\sum \ln p_i = \text{最大}$  要求进行沿程分配,才能达到最大的可能,此时要求

$$P_1 = P_2 = \dots = P_n \quad (6)$$

于是

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n \quad (7)$$

也就是说,河流自动调整的结果,将使能量沿程分配达到均匀一

致有序状态。

利奥波德等在讨论弯曲型河流能量损耗沿程分配时指出,由于弯曲型河流弯顶上下附近为深槽段、而相邻两弯道之间的过渡段为浅滩段。其中浅滩段的床面物质组成较粗,水深较小,在这里能量有较集中的损耗,表现为枯水期浅滩段的水面线比较陡峻。相反地,深槽段水深较大,物质组成较细,能量损耗较小,故水面线比较平缓。可是,在另一方面,弯道的平面外形所引起的形态阻力却又额外追加了水流的能量损耗,这部分损耗主要集中在曲率最大的弯顶一带。由于两种因素的结合,使得弯曲型河流的能量损耗沿程分布较之其他河型更趋均匀化,由此认为,弯曲河型是一种更稳定、更常见的河型。

能量均匀分配的学说还有一层派生的涵意,即所谓集合效应。当流域来水来沙条件发生变化时,与河道水流能耗有关的各个要素,如流速、糙率、水深、河宽和坡降等都要作出反应,并发生相应的调整。也就是说,在不受外界限制的情况下,系统的调整不会集中由某一个或某几个要素来独立承担,而是均匀分散在各个要素之间,使每个要素的变化都尽可能小。在河流系统中,所谓最小方差理论就是认为,河流最大可能发生的状态是各水力要素变化的方差达到最小的一种状态。兰宾(W. B. Langbein)等人曾根据这个理论对河曲的形成与发展进行了研究,认为正弦曲线形的河曲是最符合最小方差的一种形态,因此是自然界最常见、最稳定的一种河曲形态。

低能耗的趋向性 河流系统通过自动调整,逐渐达到最大,而熵的产生率却达到最小,处于这样一种状态的系统结构代表低能耗的稳定结构。由式(5)~(7),则有

$$\frac{d\Phi}{dt} \sim \sum \frac{dE_i}{dt} \quad (8)$$

若能量取水流的势能,以高程  $H$  表示,则

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dH}{dt} = \frac{dH}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = Ju \quad (9)$$

其中  $t, x, J, u$  分别为时间,沿河距离,河流坡降,断面平均流速。鉴于熵的变率最小,则

$$Ju = \text{最小} \quad (10)$$

其中河流坡降  $J$  除了标志河流的纵向形态特征以外,它还代表单位重量的水经过单位距离所损失的势能;断面平均流速  $u$  表示单位时间内水流行进的距离。若以符号  $\gamma$  为水的容重,则  $\gamma u J$  表示单位重量水的能量损耗率(或所作的功率)。由(10)式则有  $\gamma u J$  等于最小,这就是所谓“最小功原理”,它已被用来揭示不同河型和河流均夷剖面形成的机制。按照这个原理,认为河流调整,当以调低比降为主时,则河流趋向弯曲型;若以增加河宽为主时,则河流趋向宽浅分汉型,而这两种情形,都是为了减小  $uJ$  值而自动增大阻力的一种手段。实测和试验资料都表明,曲率半径相当于3倍河宽值的弯道形态是最符合最小功原理的一种形态,因此是弯曲河型中最稳定的一种形态。

通过对流域地貌系统在物质与能量交换过程中建立起来的稳定有序形态结构的认识,就可根据再现自然的原则,为优化流域人地系统、治理河流、建立人工河系等提供科学依据。当前,地貌系统研究已逐渐成为地貌学的热点,并分别从形态要素之间的关系——形态学系统、物质与能量的流通系统、过程—反应系统和控制系统诸方面入手,深入研究地貌系统空间结构、时序结构、功能特点和演化规律。随着对地貌系统认识的加深,可望在不久的将来,在优化原理的研究方面一定会有突破性的进展。

#### 参考文献

- 1 Leopold L B, Langbein W B. U S Geol. Survey, Prof. Paper, 1962, 500~A, 20
- 2 Langbein W B J, Hyd Div. Proc Amer Soc, Civil Engrs. 1964, 90(HY2); 301~312
- 3 Chorley R J, Schumm S A, Sugden D E. Geomorphology. London: Methuen, Co. Ltd, 1984, 607
- 4 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学. 北京: 科学出版社, 1987.

313~317

- 5 尹国康. 流域地貌系统. 南京: 南京大学出版社, 1991. 3~19  
(南京大学尹国康教授撰; 陈钦峦教授审)

### 分形地貌学 fractal geomorphology

是一门用现代非线性科学中的分形方法及原理研究地球表面起伏形态及其发生、发展和分布规律的新兴科学。分形地貌又称为“曼德尔布罗特景观(Mandelbrot landscape)”。“景观”作为一个地理科学术语,由于不同学派或学者在认识和理解角度上的差异,后来出现了同词多义的现象。数学家所用的曼德尔布罗特景观是狭义的景观。主要指地貌,这说明大自然的地貌现象是分形理论最好的研究对象。

分形是一个新的科学名词,指具有标度不变性的集合或体系、现象。地理学家们长期以来凭直觉已认识到标度不变性在地貌中的客观存在。例如,在野外拍摄的地貌照片中通常附上已知尺寸的某件普通物品(如地质锤、人体等),否则就无法断定原形体的大小,这就是标度不变性的一种反映。分形理论是由法国曼德尔布罗特(B. B. Mandelbrot)创立的。分形的外在表现是极其破碎或非常无规或十分复杂,具有无穷的细节,在不同标度(放大率)下呈现同等程度的复杂性。而其内在本质是有自仿射性(或自相似性)。以直线为基础的传统欧几里德几何无力描述大自然的真实面貌,而让位于以描述客观自然(如处处连续处处不可微的曲线)为己任的分形理论,分形地貌学即随之而诞生。分形有简单分形和多分形(multifractals)两类,后者指的是不均衡的须用多个标度指数来刻画的复杂分形。定量描述分形外貌特征、构造演化规律的参数叫分维(fractal dimension),有多种形式和计算方法。分形地貌学的主要任务是以分维为工具来刻画地貌形态,并以分维为中介参数建立地貌与内部机制之间的联系。

在现阶段,分形地貌学作为理论地貌学的一个新分支,已在两方面展开工作。一是凭借地质学家和数学家的丰富想象,用计算机创造出各种标准的理想“地貌”,在通过研究这些地貌,找到塑造某些特殊地貌的内在动力学机制。目前至少已有这样的共识:地貌尽管千姿百态,但产生的机制可能很简单,即内外力相互作用的结果。在理论上,可用维尔斯特拉斯—曼德尔布罗特(Weierstrass—Mandelbrot)随机函数、分式布朗运动(FBM)和复函数迭代法来产生,这是曼德尔布罗特景观的主要来源,已达以假乱真的程度。如海岸线,就可用科赫(von Koch)曲线来构造。这种地貌的分维可能严格准确地计算。另一方面,分形地貌学必须直面现实,对大自然中客观存在的各类地貌进行卓有成效的研究,求出有关分维,作出区域划分,进行理论地貌学阐述。计算分维的方法一般是R/S分析,谱密度分析或时间序列分析(如GP算法)。

分形地貌学目前已建立如下基本原理。(1)仿射变换原理。地貌是一类满足自仿射变换的分形曲面,内外力的作用是发生变换的根本原因。(2)开放性原理。地貌是地理系统长期演化和局部耗散失稳的结果,在此过程中地貌系统与外界进行的物质、能量、信息交换具有分形输运的性质。(3)层次性原理。地貌系统中的各个要素的地位和作用不同,系统和要素是相对的。一个系统可称为上个系统的要素,同样,一个要素对下个系统来说又可称为系统。(4)分解协调原理。在认识和研究地貌时,可将其活动过程或组成结构分解为若干相互衔接和关联的部分,通过协调关系或调整结构,可使系统的功能达到预定的效果。其数学形式为多分形(multifractals),其意义是奠定了区域开发、利用的理论基础。(5)稳定性原理。地貌在外界作用下保持和恢复其原有状态及内部结构功能的性质。一种地貌要存在,必须有相对稳定性,即它的状态参量在短时间内是不随时间变化的。(6)突变性原理。在一定时空区域内的地貌系统,由于内部非线性机制作用,会自发地向临界状态进化。处于临界状态的地貌系统,在空间上具有分形结构,在时间上具有负幂律( $f^{-\beta}$ )行为。若有某一微扰触动就会发生从一种稳态向另一种稳态的跃迁。(7)级差原理。

若地貌是分形集  $M$ ,  $M$  是由分属于不同层次的子集  $G_k (k=0, 1, 2, \dots, k$  称为初次) 构成,  $G_k$  可以某种方式 (结构、组成或运动性) 与  $M$  相似, 则  $K$  越小, 结构越简单;  $K$  越大, 结构越复杂。级次  $k$  越接近的子集越相似, 反之,  $k$  相差越大则越不相似。(8) 分形相关性原理。地貌系统中各局域分维之间, 局域分维与整体分维之间具有相关性, 满足一定的运算规则。这一原理共包括 7 条定理: 定理 1 (积和原理): 若集合  $S$  是两个分维为  $D_1$  和  $D_2$  的分形子集  $S_1$  和  $S_2$  的乘积, 则  $S$  的分维  $D = (D_1 + D_2)$ ; 定理 2 (和并原理): 若集合  $S$  是两个分维为  $D_1$  和  $D_2$  的分形子集  $S_1$  和  $S_2$  的和, 且  $D_1 > D_2$ , 则  $S$  的分维  $D$  介于  $D_1$  和  $D_2$  之间, 最大值为  $D_1$ ; 定理 3 (匹配原理): 若分形子集  $S_2$  和  $S_1$  要有效地组成分形集  $S$ , 则要求  $S_2$  和  $S_1$  的分维 (或局域分维) 相等或接近; 定理 4 (包容原理): 若分形集  $M$  欲包含子集  $S$ , 则要求  $S$  的分维不大于  $M$  的分维; 定理 5 (相交原理): 在  $d$  维欧氏空间中, 两个分维分别为  $D_A$  和  $D_B$  的分形子集的交集的维数  $D = (D_A + D_B - d)$ ; 定理 6 (赫斯特原理): 若曼德尔布罗特景观的赫斯特 (Hurst) 指数为  $H$ , 则在  $d$  维欧氏空间中的分维  $D = (d + 1 - H) = d + \frac{(3 - \beta)}{2}$ , 其中  $\beta$  是谱指数  $1 < \beta < 3$ , 而  $0 < H < 1$ ; 定理 7 (相关原理): 若分式布朗运动 (fBM) 地貌的赫斯特指数为  $H$ , 相关函数为  $C(t)$ , 则  $C(t) = 2^{2H-1} - 1$ 。当  $H > 1/2$  时呈正相关;  $H < 1/2$  时呈负相关;  $H = 1/2$  时即随机运动 (不相关)。由此可进行预报。

分形地貌学的诞生和发展有一个历史过程。1961 年理查逊 (L. F. Richardson) 发现海岸线的长度  $L$  依赖于测量的尺度  $r$ ,  $L(r) = Kr^{1-D}$  ( $K$  为常数), 即随着尺度的缩小, 长度增长。1967 年, 曼德尔布罗特发表了《英国海岸线有多长?》的划时代论文, 他把  $D$  解释成分维, 从而标志着分形地貌学的诞生。1975 年, 曼德尔布罗特称为“宣言加手册”的专著《分形: 形态、机遇和维数》法文版正式出版, 1982 年英文版《大自然的几何学》与读者见面。此书有近 1/3 的篇幅是讨论曼德尔布罗特景观的, 并附有許多精美的插图。在水系方面, 1945 年河顿 (R. E. Horton) 提出的水系结构定律, 实际就是一个分形模型。1988 年以来, 罗索 (R. Rosso)、巴伯拉 (L. Barbera) 和耶尔姆费特 (A. T. Hjelmfelt) 等人在这方面进行了许多研究, 如发现分维  $D_f = 2 \ln R_L / \ln R_b$ , 或分维统计值  $(D_f) = \frac{\ln R_b}{\ln R_L}$ , 其中  $R_b$ ,  $R_L$  分别为分枝比和长度比。1987 年 12 月, 美国地理物理联合会在旧金山举行的秋季学术会议上召开了“地球物理学中的分形”专题讨论会, 内容涉及地貌、地表水系、地下渗流和海岸等领域的分形问题。斯诺 (R. S. Snow) 对西俄亥俄河流域的 12 条形态各异的河道进行了详细研究, 他认为把流径作为分形曲线来描述是恰如其分的。马林维诺 (A. Malinverno) 和马雷斯切 (J. C. Mareschal) 讨论了海底地形的分形性质, 吉尔伯特 (L. E. Gilbert) 则研究了大陆地形。福克斯 (G. Fox) 和吉尔伯特两人指出了在对地形剖面这样的自仿射分形进行直接分析时所遇到的困难。1991 年, 李后强、艾南山在渗流 (Percolation) 模型基础上, 发现流域的侵蚀积分值  $P$  与河网密度  $d_s$  有关系  $P = Ed_s^D$ , 其中  $E$  是侵蚀模数,  $D$  为分维。并且,  $P$  可从斯特拉勒 (Strahler) 曲线上直接求出,  $P = 1 - \int x dy$ 。其中,  $x = a/A$ ,  $y = h/H$ ,  $a$  是流域等高线图上量出的每一条等高线以上的面积,  $h$  是每条等高线与流域最低点的高差,  $H$  为流域最高点与最低点的高差,  $A$  为流域面积,  $x, y$  均在  $[0, 1]$  内取值。得到侵蚀早期分维  $D = 0 \sim 0.75$ , 中期  $D = 0.75 \sim 1.89$ , 晚期  $D = 1.89 \sim 2.0$ 。奥地利沙伊德格 (A. E. Scheidegger) 1991 年出版的《理论地貌学》第 3 版, 已专门介绍了分形的应用。1992 年李后强、艾南山等用稳定分布研究了风沙流的结构, 发现了风沙流分布的负幂律  $M(h > h_0) = ch^{-D}$  ( $M$  为沙子含量,  $h$  为高程,  $D$  为分维,  $c$  为常数) 和运动的标度律,  $\frac{v}{\beta} \varepsilon - D \ln h = A$  ( $v$  为地表耗散系数,  $\beta$  为空气弥散系数,  $A$  为常数,  $D$  为分维,  $h$  为高程,  $\varepsilon$  为风速), 特别是用湍流的多分形特征研究了风沙地貌的形成机制。

分形地貌学的问世虽有 30 余年的历史, 但真正作为一门科

学受到重视仅是近年的事。预计今后的趋势是: 大范围 (甚至全球性) 地观测地貌分维, 并将其规范为一种应用性参数, 将是地貌学家的一项重要工作。使用的数学工具将是非线性时间序列、功率谱分析和子波变换。其中, 根据自组织临界状态研究地貌突变机制, 会激发一些学者的兴趣, 并可能有实质性突破。利用间歇湍流的多分形理论成果讨论流域地貌的发育和风沙地貌的机制 (或土地沙化) 是一个富有活力的研究领域。把多分形同信息熵联系, 深化地貌熵的内涵和拓展信息熵的应用, 也是大有可为的。把从时间序列观测的分维作为独立变量的个数, 进行非线性动力学反演, 求出地貌演化的动力学方程, 将是引人入胜的新方向, 并有可能是理论地貌学家今后几十年的奋斗目标。

#### 参考文献

- 1 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature W H Freeman, 1982
- 2 Peitgen H O, Sauer D. The science of Fractal Images. Springer-Verlag, 1988
- 3 Feder J Fractals. Plenum Press, 1988
- 4 Scholz C H, et al. Fractals in Geophysics. Pure and Applied Geophysics. 1989, 131: 1~2
- 5 李后强, 等. 分形与分维. 四川教育出版社, 1990
- 6 Li H Q, Chen S H, et al. Chinese Science Bulletin, 1991, 36 (15): 1319
- 7 Scheidegger A E. Theoretical Geomorphology, Third completely Revised Edition, Springer-Verlag, 1991
- 8 李后强, 等. 自然杂志, 1991, 4: 245

(四川大学物理系李后强教授撰; 艾南山教授审)

#### 气候地貌的多代性 climatic geomorphic multiplicity

气候地貌是一定的气候条件控制下的地貌外营力组合所产生的特有地貌景观, 它界于大气圈和岩石圈之间, 布德尔 (J. Budei 1977) 称之为地貌圈 (relief sphere), 它和生物圈、水圈、土壤圈、风化圈有密切的关系, 而且它们的结构组成都随着气候带的水平变化和垂直变化而变化。如寒区的冰川、冰缘地貌, 干旱半干旱区的风沙地貌和黄土地貌, 温带、副热带、热带多雨气候下的各种流水地貌等, 组成了目前地球表面复杂的地貌成因类型。1905 年, 戴维斯 (W. M. Davis) 认为冷、湿与温暖气候中, 有两个气候事件 (climatic accidents)——冰川作用与干燥作用最能影响地貌景观。1927 年托尔贝克 (F. Thorbeke) 对地貌气候分类进行了研究, 1945~1927 年特卡尔特等 (J. Tricart and A. Caillex) 编著了气候地貌学概论, 1977 年布德尔在“气候地貌学”中把全球现代地貌气候带划分为 10 大类, 进一步阐述了现代地貌形成与气候带的密切关系。

然而一个地区的气候条件是随时间和空间的变化而变化的, 因此, 同一地区留下了不同气候条件下产生的多种成因的地貌类型和形态, 这就是气候地貌的多代性。以今论古、古为今用的原则, 来研究气候地貌的形成过程、演变历史和发展趋势, 有助于恢复该地区的古地理环境, 探索过去气候变化的机制和规律, 预测将来气候变化趋势, 研究矿产资源和古水系变迁, 海陆变化等。为地区经济开发提供科学依据。

在第四纪以前的地质历史时期, 地球表面的多次气候变化受着星体运动、板块构造运动、地壳变动等的影响, 地球形成的地质时期约 10~5 亿年前, 大约每隔 3 亿年左右发生一次大的冰期, 即 5.7 亿年前的震旦纪大冰期、3 亿年前后的晚古生代大冰期和 270 万年前开始的晚新生代大冰期。这些冰期都留下了许多冰川侵蚀和堆积地貌的证据, 成为寒冷气候的标志。弗雷克斯的“地质时期的气候” (L. A. Frakes, 1979), 周廷儒的“古地理学” (周廷儒 1982), 托日康 (K. K. Turekan, 1971) 主编的“晚新生代冰期”, 弗林特 (F. Flint, 1971) 编著的“冰川与第四纪地质”, 杨怀仁主编的第四纪地质都全面地讨论了世界和东亚地区地质历史时期的古地理环境变迁, 布鲁蒙所著《“地貌学”晚新生代地貌

系体的分析》一书中,专章讨论了第四纪地貌成因系列的交替(A. L. Bloom, 1978)。

例如,晚古生代的石炭—二叠纪时,南非、印度、澳大利亚和南美连接在一起,称冈瓦纳古陆,位于南半球高纬度地区,并发生了大陆冰川,现在的南半球古生代冰碛岩散布于上述地区,甚至到非洲南纬 $2^{\circ}$ 左右,在印度达北纬 $34^{\circ}$ 左右。到三叠纪时,南极又移至广大海洋中,南大陆的冰川便告消失。中生代为一温暖而干燥的时期,气温远比现在高,侏罗纪时,苏格兰海水温度为 $17^{\circ}\text{C}\sim 23^{\circ}\text{C}$ ,比现在海水的温度高 $10^{\circ}\text{C}$ 。第三纪的 $20\sim 30$ 百万年前,澳大利亚与南极洲分离,移向赤道,造成今日南极冰盖与澳洲大陆占优势的干燥地貌的强烈对照。第三纪初期,地壳处于相对稳定时期。各处进行准平原化作用,大气环流以行星风系为主,气候温热,形成了红土风化壳。当时中国东北、华北、内蒙、北疆都属于亚热带范围,在北美西岸和欧洲,亚热带北界达北纬 $50^{\circ}$ 。尼巴棕榈树向北分布到阿拉斯加( $60^{\circ}\text{N}$ )。第三纪中晚期的喜马拉雅运动和青藏高原的逐步隆起,形成了现在东亚高山、高原和盆地的格局,大气环流发生了变化,如上新世早期,青藏高原处于副热带森林草原环境,黑河西藏三趾马动物群尚可自由来往于南亚大陆,但晚期由于喜马拉雅山的抬升,吉隆三趾马已不能越过喜马拉雅山进入印度,但还可以自由往来于中国北方,表明当时青藏高原大部分地区还仅海拔 $500\sim 1\,000\text{m}$ (许宏祥、黄万波、陈万勇等, 1981)。

第四纪以来的240万年期间,地球经历了一系列气候冷暖变化,出现了多次冰期与间冰期的交替变化,1909年彭克和布鲁克涅尔(A. Penck, and E. Bruckner,)根据欧洲阿尔卑斯山外围新老冰碛的形态,风化程度以及冰碛和冰水阶地划分出4次冰期,即恭兹(Gunz)、明德(Mindel)、里士(Riss)和玉木(Wurm)四次冰期,后来又增加了一次更老的多脑冰期(Donau)。

北美大陆有4次冰期,即内布拉斯加(Nebraskan),堪山(kansan),伊利诺安(Illinoian)和威斯康辛(Wisconsin)。中国青藏高原发生过 $3\sim 4$ 次冰期,即希夏邦马、聂聂雄拉、古乡、白玉冰期(郑本兴、牟昫智、李吉均等 1981)。但世界各山地冰川的次数和形成年代并不完全一致。根据北美大平原从南达科他至得克萨斯广泛分布有与冰碛相间的3层火山灰层,最老的火山灰层形成于1.9百万年前,比内布拉斯加冰碛年轻,其次的火山灰形成于1.2百万年前和0.6百万年前,都老于伊利诺安冰期(Flint, 1971, C. W. Naesser, et al. 1973)。目前关于北美冰期的年代的认识尚不一致,毕而德(Beard, 1978)认为内布拉斯加冰期发生于 $2.8\sim 2.2$ 百万年前,第2次冰期发生于 $1.9\sim 1.5$ 百万年前,第3次冰期发生于 $1.0\sim 0.4$ 百万年前,第4次冰期于10万年前开始,而贝格林等(Berggren et al. 1974)提出威斯康辛冰期=(里士+玉木)于0.35百万年开始,伊利诺安冰期=明德冰期于0.6百万年前开始,堪山冰期=恭兹冰期,于0.9百万年前开始,内布拉斯加冰期=多脑冰期,于1.6百万年前开始。青藏高原的冰期次数各地不一,从1次到4次,最老的希夏邦马冰期形成于早更新世,中更新世以来的聂聂雄拉冰期和古乡冰期在希夏邦马峰南坡都可分出2个阶段,末次冰期(白玉)也有早期和主期之分。在西昆仑山,中更新世以来的3次冰期分别形成于大约33万年前、20万年前,和7万年前 $\sim 1$ 万年前(郑本兴等, 1991)。

虽然世界各地倒数第2次冰期以前的冰期次数,形成年代不尽相同,有待深入研究,但末次冰期最盛期以来的冰川变化和气候变化基本上是一致的。在 $20\,000\sim 18\,000$ 年前,北欧斯坎的那维亚冰盖流到 $51^{\circ}\text{N}$ 左右,其南界从英国的都柏林,经德国柏林、波兰华沙向东到俄罗斯莫斯科北面,约 $4.09\times 10^6\text{km}^2$ 。北美的劳伦冰盖在 $17\,000\sim 21\,000$ 年前到达五大湖以南,最南达到 $37^{\circ}\text{N}$ ,面积约 $1.274\times 10^7\text{km}^2$ 。在非洲乞力马扎罗山( $5\,895\text{m}$ )末次冰期时的冰川面积为 $150\text{km}^2$ (H. A. Osmaston, 1965),而今仅 $4.0\text{km}^2$ 。在新几内亚, $22\,000$ 年前至少有20个高山被冰帽或山谷冰川所覆盖。其中最高峰(查亚峰M4 884 m)地区古冰川面积约 $1\,400\sim 1\,600\text{km}^2$ 。巴布亚新几内亚约 $600\text{km}^2$ 雪线比今日低

$1\,000\text{m}$ (E. Lomer, 1972, G. S. Hope et al. 1976)目前 $3\,200\sim 3\,400\text{m}$ 之间的山地为热带雨林,但在 $10\,000$ 年前都是高山草原,据同位素测年和孢粉资料分析,在 $17\,000$ 年前温度下降 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。

新几内亚的胡昂半岛珊瑚抬升阶地的高度和时代,反映了大陆冰流消长所控制的海面变化,据研究在 $120\,000$ 年前海面比今日高 $2\sim 10\text{m}$ ,相当于末次间冰期; $80\,000$ 年前海面为 $-13\text{m}$ ; $65\,000$ 年前为 $-7.5\text{m}$ (Chappell, 1974, A. L. Bloom, 1974)。

在中国北方的延庆盆地和华北平原钻孔岩芯分析表明,第四纪时有约10次大的海漫,出现含有孔虫等微体化石的海相地层。弗林特(Flint, 1971)据冰川与更新世冰流体积的变化,经过详细的计算,末次冰期最盛期海面下降 $132\text{m}$ 。在中国东海 $15\,000$ 年前的最低海面为 $-150\sim -160\text{m}$ ,海岸线比今日向东退缩约 $500\sim 600\text{km}$ 。

在内陆,根据世界141个干旱半干旱湖泊及年龄测定,末次冰期以来,热带地区高湖面与间冰期、亚间冰期一致,低湖面与冰期和冰进期一致。按什崔特等(F. A. Street and A. T. Grove 1976, 1979)的低湖面期高湖面数目不超过总数的 $15\%$ ;高湖面期高湖面数目超过总数的 $70\%$ ,统计出世界干旱半干旱区大多数湖泊在 $24\,000\sim 23\,000$ , $21\,000\sim 20\,000$ , $18\,000\sim 17\,000$ , $15\,000\sim 14\,000$ , $12\,000\sim 11\,000$ , $9\,000\sim 8\,000$ , $6\,000\sim 5\,000$ 和 $1000\sim 0$ 年前,为低湖面。在热带以外地区情况较为复杂,如美国西部,冰期中为高湖面;中国东部季风区,末次冰期时干旱,降水量减少,为低湖面;而在西部高山冰川融水补给为主的湖泊,冰期时为高湖面(1988)。在早更新世、中更新世时,由于青藏高原比今日低 $2\,000\sim 3\,000\text{m}$ ,印度洋、太平洋的水气可以深入高原内部和中国西北地区,因而气候湿润。在高原上,柴达木和塔里木盆地,都存在着大面积的湖相沉积。晚更新世初,由于青藏高原和邻近高山的隆起,高原内部和西北地区气候变得愈加干冷,湖面愈来愈小。

虽然山区、湖、海滨地貌区留下了气候交替变化的遗迹,但由于地面的长期剥蚀破坏,除了末次冰期以来的气候变化信息保存较好外,较老的气候变化遗迹在山地、丘陵区已成断片残简。近20年来,地学界已把研究重点转移到海洋沉积、湖泊沉积、黄土沉积、连续剖面沉积和冰岩芯等研究方面。丹什尔等(W. Dansgaard等, 1971, G. Robin, 1977),据格陵兰世纪营地 $1\,250\text{m}$ 冰岩芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 含量的变化建立了15万年以来的气候变化曲线,沙克勒顿和奥尔杜克(N. J. Shackleton and N. D. Opdyke, 1973, 1976),据太平洋的钻孔V<sub>28-239</sub>岩芯的氧同位素和古地磁记录把1.6百万年以来的气候变化曲线分为23个氧同位素阶段,奇数代表 $\delta^{18}\text{O}$ 含量增多,与间冰期(间冰阶)相当,偶数与冰期(冰进阶段)相当。其中第1阶段相当于全新世冰后期(现代间冰期),2、4阶段代表末次冰期的两个阶段,5阶段峰值为 $120\,000$ 年前左右,相当于末次间冰期,第6阶段相当于倒数第2次冰期,更老的气候变化氧同位素阶段如何与大陆冰期相比,至今尚无统一的看法。最近,对一个冰期旋回的时间尺度已有较多的研究,一般冰川旋回平均尺度为 $10.4$ 万年,短的旋回约 $9$ 万年,长的旋回为 $11.5$ 万年(G. Kukla, 1981),这个周期变化与米兰科维奇研究的地球运动中的地轴倾斜、轨道偏心率及岁差变化所造成的地面气候冷暖变化周期相一致。

中国黄土堆积厚度为世界之最,黄土—古土壤序列最多,成为大陆上研究气候变化最理想的场所,如洛川黄土剖面( $130\text{m}$ 厚)有18个古土壤组合。宝鸡黄土剖面( $160\text{m}$ 厚)有37个旋回(Din Zhongli, 1991)。兰州九州台黄土剖面( $300\text{m}$ 厚)有21个古土壤组合(陈发虎等, 1991)。黄土—古土壤序列反应干旱少雨和温暖湿润的多次气候变化。都可以和深海沉积岩芯V<sub>28-238</sub>, V<sub>28-239</sub>的氧同位素变化曲线相对应。

目前对气候地貌多代性的研究,着重于晚更新世以来的地貌演化、地层对比与环境变迁的研究上。如八五期间中国自然科学基金重点项目中就包括,青藏高原北部15万年以来的自然环



境变迁,15 万年以来中国东海与干旱半干旱地区地层对比与环境变迁及晚更新世以来南极环境变化的研究。

#### 参考文献

- 1 中科院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式问题. 北京: 科学出版社, 1981. 19~63
- 2 Flakes I. A. Climates throughout geological time, 1979, 319
- 3 周廷儒. 古地理学. 北京: 北京师范大学出版社, 1982. 342
- 4 杨怀仁主编. 第四纪地质. 北京: 高等教育出版社, 1987. 428
- 5 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991, 15: 130

(中国科学院兰州冰川冻土所郑本兴研究员撰; 任炳辉审)

**地貌界限** geomorphic thresholds 事物发展总是由量变的逐渐积累, 达到某一界限以后, 发生质的飞跃。地貌系统的发展也不例外。在马金(J. H. Mackin, 1948)所定义的均夷河流中, 当流域输入任何控制性变量的改变, 都会使平衡发生变位, 最终又都可以完全吸收这种改变所带来的影响, 从而使整个系统又逐步回到平衡。但是还必须看到, 系统在吸收这种改变所带来的影响的过程中, 孕育着新的变化, 这种新的变化有时还会发生累积作用, 整个系统在若干年以内便会发生充分的变化, 以至达到某一界限以后, 发生突变, 系统就会分解, 河型发生质变, 河流将会根据外界环境的约束重新进行自组织过程。如黄河下游, 为了适应流域过量来沙输移的要求, 河床长期处于加积状态, 河床愈积愈高, 潜伏的突变危机愈来愈大, 这是不言而喻的。

因此, 地貌界限(临界点)的概念是极其重要的。例如, 在河曲发育的长途途中, 曾经历过顺直微弯的时期。虽然河道纵向输沙常常是平衡的, 但由于弯道洪冲枯淤, 凹岸冲、凸岸淤, 两相邻弯道间的过渡段(直道)洪淤枯冲, 致使河床向两侧、向下游蠕移。随着弯道曲率渐次增大, 河床不稳定性逐渐加大, 最后达到某一界限, 弯道将由渐变转化为突变, 发生自然裁直。河曲蠕移与裁直这种旋回发展表明, 弯道平面位置的渐变因裁直而告终。凹岸冲刷、凸岸淤积这种输沙平衡因裁直而破坏, 这都完全是由河曲演变本身所固有的属性决定的, 而与河曲系统以外的流域因素是否变化无关。又如, 黄河河口三角洲迅速淤长, 河道不断向海域延伸, 与之相应, 河床坡度不断递减, 河道水流阻力日趋增大, 因而河道不稳定性随着这种渐变的积累而不断增加, 达到某界限以后, 出现突然分流改道, 新河道又开始它的渐变过程。地貌景观某一部分的发展总是经历渐变与突变的过程, 其间有一个数量界限被突破, 这个界限常被称为地貌系统内部界限(intrinsic geomorphic thresholds)。

另一方面, 外界因素往往是促成事物转化的条件。地貌系统的突变或质变往往是来自外界控制因素的突变(干扰)引起的。如出现特大洪水, 超出了河槽形态结构的承受能力, 便会使系统分解, 河型发生质变。又如, 营造地貌的内动力—地壳运动对地貌系统的作用, 从各国水库库区地震资料看, 当大水库蓄水水深超过 100m 时, 就有可能诱发 4~6 级地震, 震源深度一般在 20km 以内, 多半在 5km 左右。似乎地壳受到 10kg/cm<sup>2</sup> 以上的区域压力就有可能达到地层弹性屈服强度。近代均衡论认为, 在更高的区域压力下, 有可能突破岩石圈深处物质的塑性强度, 使物质外流。大约 50kg/cm<sup>2</sup> 区域压力的变化就会引起均衡调整。地表剥蚀使地势降低, 地下压力随之递减, 当剥蚀岩体的厚度所引起的减荷超过地壳以下物质弹性强度时, 就会出现地壳均衡上升运动。由于地壳上升的速率远过于剥蚀速率, 地势逐渐增高, 直到新的重力均衡, 上升作用才会逐渐停顿下来。而剥蚀作用仍以一定的速率进行着, 直到超过地壳深处物质的强度, 均衡上升又一次突然发生。可见, 地震因水库蓄水这个外界条件达到一个界限而诱发, 地壳因地表剥蚀这个外界条件达到一定数量界限而均衡上升。另一方面, 剥蚀作用使地势降低, 起伏夷平, 其强度随之逐渐减弱, 而后又因地壳均衡上升, 流域回春, 剥蚀作用随地面升高、起伏加大面渐次加强, 最后达到最大值。这类对地貌系统

突变起控制作用的外界条件数量界限, 谓之地貌系统外部界限(extrinsic geomorphic thresholds)。

地貌界限的存在反映了地貌系统的突变性, 地貌系统在外界环境的作用(输入)下所作出的反应(输出), 总是从突变开始到渐变告终, 不断地从一个旋回到另一个旋回步步向前发展的。

因此, 在研究地貌发育过程中, 分析和掌握从量变到质变的转化界限, 就能抓住有利时机, 加以因势利导, 使之适应人们的需要。另一方面, 从量变到质变的飞跃是有条件的, 地表侵蚀作用的性质和强度是由区域多种自然条件决定的。识别引起地貌过程强度最大、地貌变形最快的条件界限, 如坡面、沟谷和河流的坡度界限、植物覆盖度界限、气候水文界限、泥沙粒度界限、沟谷深切界限等, 就能对不利的条件加以控制, 达到因势利导的目的。此外, 界限理论有可能用来预测地貌对自然和人为变化所作出的反应。

过去地理学家在考察冰川遗迹、河流阶地的分布和各种沉积物的特征中, 发现在地质时期可能出现某种巨大的变化时, 总是以为在当时不是地壳构造运动十分活跃, 便是气候有急剧的波动; 自舒姆(S. A. Schumm, 1973)提出地貌临界点理论以后, 人们对这样的变化, 就有可能归结为体系内部的产物, 不一定必然伴随着外界条件的明显改变。所以, 舒姆的学说一提出来, 就受到地貌研究者的普遍重视。1980 年还专门召开了地貌界限方面的国际性学术讨论会, 出版了论文集。80 年代以来, 这方面的研究一直是地貌学领域的研究热点之一。

#### 参考文献

- 1 Coates D R, et al. Thresholds in Geomorphology. London: George Allen, Unwin, 1980
- 2 尹国康. 泥沙研究, 1984, 4: 25~36

(南京大学尹国康副教授撰; 陈钦宙审)

**中国地貌** geomorphology of China 中国位于欧亚大陆的东南部, 东南濒临太平洋, 西北深入亚洲腹地, 西南与南亚次大陆接壤, 幅员辽阔, 山河壮丽。境内有气势磅礴的高原, 巍峨的从山峻岭, 群山环抱的大型盆地, 广袤的沙漠, 宽阔的平原, 奔流不息的江河, 星罗棋布的湖泊, 绵延万里的海岸及浩瀚的海洋。地貌作为自然地理环境中一项最基本的要素, 各类地貌地域上的组合和垂向上的分异, 不仅对气候、水文的变化和土壤、动植物的分布有着密切的关系, 而且对工农业生产和水利、交通建设亦有重大影响。长期以来, 中国的广大科学工作者在野外实地调查和室内实验分析方面作了大量工作, 积累了多方面的科学资料, 并在构造地貌、河流地貌、冰川与冰缘地貌、沙漠地貌、海岸和海底地貌、沼泽与湖泊、滑坡与泥石流、区域地貌与地貌制图、应用地貌和旅游地貌等各分支学科的研究中取得重大进展。

中国地貌的总轮廓是西高东低, 自西向东逐渐下降, 构成 3 个巨大的阶梯; 高级阶梯是青藏高原, 由极高山、高山和大高原组成, 海拔平均达 4 000~5 000m, 其中, 珠穆朗玛峰高达 8 848 m。青藏高原号称“世界屋脊”, 对气候起着屏障作用。青藏高原的外缘至大兴安岭、太行山、巫山和雪峰山之间, 为第 2 级巨大的阶梯, 主要由广阔的高原和大盆地组成。中国东部宽广的平原和丘陵是最低的一级阶梯, 自北向南有东北平原、华北平原、淮河平原、长江中下游平原, 它们构成中国最重要的农业区。

中国现代地貌所反映的基本结构和形态, 是长期以来内外营力综合作用的结果。内营力奠定了中国地貌的基本结构, 外营力则在此基础上不断进行雕塑、再造。中国地貌的宏观格局, 即大高原、大山脉、大平原等在平面上的排列、组合与大地构造的关系十分密切。早在 20 世纪 30 年代, 李四光对中国大地貌单元及其成因已有精辟的论述。以后, 李四光从动力地质学的观点对亚洲构造体系进行了分析, 他所提出的弧形构造在地貌上有非常明显的反映。中国现代地貌的骨架形成于中生代末期燕山运动, 而现在的地势差别主要是喜马拉雅运动的结果。如以贺兰山—六盘山—龙门山—哀牢山的南北走向山脉为界, 此线以东和以西

在地貌上有十分明显的差异。东部山文方向以北东到北北东占优势,新构造绝对和相对升降运动一般比较微弱,地势的绝对和相对高度都不大,地貌组合以平原、海拔不高的高原、丘陵和中、低山为主。西部山文方向以北西到北西占优势,新构造绝对和相对升降运动很强烈,故地势的绝对和相对高度都很大,地貌组合以大型盆地、海拔很高的大高原和极高山为主。

在上述地貌基本结构的基础上,外营力不断进行雕凿和修饰。然而,在中国地貌形成过程中,各种外营力在地域上的分异有差别。中国东部地区以秦岭—淮河为界,南北气候有较大差异,秦岭—淮河一线以北,蒸发量超过降水量,地表径流不足,河网密度较小,但暴雨洪水的冲刷及河流泥沙的堆积作用仍然十分强烈,风的蚀积作用也有一定影响。秦岭—淮河以南,降水增多,水文网发育良好,流水的侵蚀、搬运和堆积作用更为活跃。中国东部平原中,位于秦岭—淮河以北的华北平原是中华民族摇篮,从新石器遗址及西周城镇的分布可见当时华北平原河网纵横、湖泊密布。嗣后,随着人类活动的增加,黄土高原土壤侵蚀强烈进行,特别是唐、宋以后不断加剧。据统计,1919~1960年黄河多年平均输沙16亿吨,导致黄河下游泥沙强烈堆积,决溢改道频繁,形成了北至海河、南抵淮河面积 $2.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的华北大平原。总的来说,属于湿润和半湿润的中国东部地区,流水的侵蚀地貌和堆积地貌占据绝对优势,俗称为常态地貌。

河流地貌学的研究在中国开展得比较早,70年代以前主要偏重于河谷发育史、河流与地质构造关系方面的研究。沈玉昌的《长江上游河谷地貌》对长江的发育过程作了系统而全面的研究,明确指出,长江三峡远在第三纪初就已经形成,是在夷平面上上下切而成的。三峡两岸多级阶地的发现,证明从第四纪以来,三峡地区一直处于间歇上升过程中。近年来,对青藏高原河谷地貌进行了大量研究,获得了系统的资料,填补了空白。从70年代开始,河流地貌研究重点逐渐由河谷地貌过渡到河床地貌,并着重于研究现代河床过程和河型,研究方法上则由原来单纯的地质地貌学方法转变为地理学方法与水力学方法、数理方法、系统论方法相结合,取得了进展。尤其对长江中、下游,黄河和渭河下游的河床形态及演变规律进行了系统的分析研究,总结出不同河型的基本特征、形成机理及相互转化的条件,建立了某些定量指标。对河口、三角洲的研究也是河流地貌研究中的一个重要内容,尤其对黄河、长江、珠江等大河的研究比较系统、深入,并建立了有关的各种河口发育模式。

在河流地貌的研究中,河流地貌的实验研究及新技术的应用越来越得到人们的重视,尤其是大型水利工程对河道上下游演变的影响,模型试验研究更是必不可少的手段。遥感方法及计算机模拟等技术手段的应用,不仅可以节省大量人力、物力,而且也使研究工作更为深入。

中国西北、华北的北部及东北的西部,地处内陆温暖干燥区,降水少,风力大,蒸发强烈,植被稀疏,在广大的内陆盆地和内陆高原上,拥有大面积的风成地貌。解放后,随着国家治理沙漠工作的开展,风成地貌的研究工作也得到迅速发展,尤其是配合铁路沿线的防风固沙工作,进行了大量的科学研究。1954年,铁道部铁道科学研究院在腾格里沙漠南缘的中卫沙坡头设立了中卫铁路防沙工作站,进行了气象要素和沙丘移动的观测,并进行了固沙造林和沙障固沙的实验研究。中国科学院沙漠研究所对沙漠地貌进行了大量野外考察,区分出中国12种主要的沙丘形态类型,还采用定位或半定位方法研究风蚀与风积地貌,特别是关于沙丘的移动方向、移动方式及移动速度方面的研究,获得成果。此外,沙漠研究所还利用风洞进行风沙移动的模拟试验,并应用高速动态摄影,研究沙粒运动规律,取得效果。

中国西部的高山、高原地区,外营力作用以冰川和冰缘作用占优势。中国现代冰川主要分布于喜马拉雅山、昆仑山、横断山、祁连山和阿尔泰山等高山地区,冰川规模巨大、类型众多。从50年代起,结合西部地区的综合考察和登山运动,对小唐古拉山、玉龙山和贡嘎山等山地的冰川进行了调查研究。从1958年开始,中

国科学院等单位系统考察了祁连山现代冰川的分布、类型与储量,搜集了大量关于冰川运动、构造与历史发展的资料,为中国现代冰川学的发展开辟了道路。60年代以来,冰川的研究有很大发展,陆续查明了中国西部现代冰川的分布大势,尤其对珠穆朗玛峰和希夏邦玛峰等高山冰川和冰川地貌的考察取得了突出的成就,对这些地区冰川的发育、条件、数量、分布、冰的运动、冰层温度、热量平衡等都有详细研究。对冰塔林及其他冰面地貌,以及对某些冰川及其槽谷的演变过程进行的深入探讨,不但在地区上填补了冰川地貌研究的空白,在理论上也提出了新的见解。冰缘地貌为寒冷气候环境的产物,它与多年冻土的分布有密切的关系。除了青藏高原以外,中国东北地区也有大量冰缘地貌现象。随着冻土研究的迅速发展,对冰缘地貌的研究也不断深入,已经根据这方面大量资料,划分了中国冰缘地貌的类型和区域。

在中国地貌的形成过程中,内外营力起了决定性作用。然而,无论哪一种地貌都必须通过一定的物质来表现,一些岩性特殊的地面物质,在不同方式的外力作用下,也会产生特殊的地貌现象。中国碳酸盐类岩石面积有 $1.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,占全国总面积的14%,所以岩溶十分发育,不仅形成了独特的岩溶地貌,而且还发育有特殊的土壤和植被,对中国区域自然景观的分异有重要影响。南方许多构造盆地里堆积的白垩系和第三系红层,经过构造抬升及以后的流水侵蚀,产生了独具特色的红层地貌。广泛分布于北方的第四纪黄土,不仅造成了广阔的黄土高原,而且许多沟谷、坡地上的现代侵蚀过程相当活跃,发育了非常典型的黄土侵蚀地貌。黄土高原地区严重的水土流失,对周围生态环境产生极为不利的影响。此外,中国海域辽阔,海岸线长达16000km,沿海海底有广阔的大陆架、狭窄的大陆坡及广袤的深海平原。随着沿海地区的开发及大陆架石油资源的开采,海岸和海底地貌的研究也取得可喜的成就。

总之,中国地貌气势恢宏、类型多样、成因复杂,它既为我们提供了丰富的矿产资源及发展多种经济的有利条件,又给农业生产及水利、交通等经济建设提出诸多问题,需要在今后的研究工作中加以重视解决。

#### 参考文献

- 1 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会,中国自然地理貌.北京:科学出版社,1980.1~13
- 2 沈玉昌,地理学报,1980,35(1),1~18
- 3 任美铎,中国自然地理纲要.北京:商务印书馆,1982.5~18
- 4 左大康,地理学研究进展.北京:科学出版社,1990.92~98
- 5 中国地理学会地貌与第四纪专业委员会,地貌及第四纪研究进展.北京:测绘出版社,1991.8~20

(中国科学院、国家计划委员会地理研究所  
陈志清副研究员撰;叶青超审)

**喀斯特地貌** karst landform 又称岩溶地貌,是水对可溶性岩石进行喀斯特作用所形成的地表和地下形态的总称。喀斯特作用是以溶蚀作用为主,并包括流水的冲蚀、潜蚀,以及坍陷等机械侵蚀过程,这种作用及其产生的现象统称为喀斯特。喀斯特是南斯拉夫西北部伊斯的里亚半岛碳酸盐岩高原上的地名,当地称 kras,意大利语为 carso,德语为 karst,它来自印欧语“kar”,意为岩石裸露的地方。近代喀斯特研究在19世纪中叶发轫于此而得名,成为世界地理学上通用的术语。1966年中国第二次喀斯特学术会议上建议将喀斯特一词改为岩溶,1981年在山西召开的“北方岩溶学术讨论会”上,议定“岩溶”和“喀斯特”二者皆可使用。

喀斯特地貌在碳酸盐岩地层中发育分布最广,地面上往往崎岖不平,岩石嶙峋、奇峰林立,地表常见有石芽、溶沟、石林、峰林、喀斯特丘陵等喀斯特正地形和溶沟、落水洞、盲谷、干谷、喀斯特洼地、漏斗、喀斯特盆地等喀斯特负地形;地下喀斯特地貌有溶洞、地下河、地下湖等;以及与地表和地下密切相关联的喀斯特地貌有竖井、穿洞、天生桥等。喀斯特地貌就是研究这些形态特征及其发生、发展和分布的规律,以及对它的改造、利用和预测。

中国对喀斯特地貌的研究,远在晋代已有记载,宋代以后,并对其成因进行探讨,如宋代沈括在《梦溪笔谈》中指出了石钟乳的成因,而周去非在《岭外代答》中提到地下河袭夺地表河的现象。明代徐霞客考察了湖南、广西、贵州、云南等地的喀斯特地貌,探查了270多个洞穴,详细记载了喀斯特区景观特征,成为世界上考察喀斯特地貌的先驱,其著作《徐霞客游记》比欧洲最早的喀斯特著作早200年。近代的喀斯特地貌的研究始于欧洲,19世纪的代表作是南斯拉夫J. 茨维伊奇(Cvijic)的《喀斯特现象》(1893),提出了喀斯特侵蚀基准面,喀斯特水动力分带的概念,创立了石芽、斗淋(喀斯特圆洼地)、坡立谷等国际通用术语,与此同时欧美、前苏联等国相继开展了洞穴的探测工作。1903年德国格伦特(A. Grund)论述了喀斯特地貌演化与地下水的关系;1930年美国戴维斯(W. M. Davis)《石灰岩洞穴的成因》专论,是在侵蚀循环影响下提出了喀斯特地貌演化模式;1936年德国莱曼(H. Lehmann)对热带喀斯特的研究,指出热带喀斯特地貌发育以正地形为主,如峰林、石林。

20世纪40年代各国研究进展缓慢,仅做一些区域性的研究,对戴维斯关于洞穴发展的双循环理论得到广泛的赞同,中国任美镛、杨怀仁、沈玉昌、陈述彭等对贵州喀斯特高原的论著,吴尚时、曾昭璇对云南、广东喀斯特地貌的论述,其中杨怀仁著《贵州中部之地形发育》(1944年)一文对贵州喀斯特地貌与地文期的划分影响深远,如大娄山期、山盆期、乌江期等喀斯特地貌发育阶段至今仍被广为引用。

50~60年代,喀斯特地带性的研究,继莱曼对热带喀斯特研究后,有亚热带、温带、寒带等喀斯特论述,其中法国科贝尔(J. Corbel)对寒带喀斯特研究(1959)较为详尽。瑞士包格里(A. Bögli)研究了喀斯特溶蚀机制,用实验分析提出了混合溶蚀的概念(1964)。洞穴探测和探险蓬勃发展,1965年成立了国际洞穴学联合会(ISU),法、奥、苏等国建立了洞穴定位站和实验室,美国赛拉基尔(J. Thraikill)(1968)总结概括了有关洞穴的成因,论证了大的洞穴系统和水平廊道发育在潜水面附近,这个带称为浅饱水带。喀斯特基本理论的研究有初步总结,以前苏联索科洛夫(D. C. Корсаков)为代表。该时期中国喀斯特地貌以区域研究为主,如陈述彭《西南地区的喀斯特地貌》(1954),曾昭璇《华南喀斯特峰林地区地形类型初步划分》(1960),卢耀如《中国南方喀斯特发育规律的初步研究》(1965),并密切结合三峡、红水河、乌江等区域喀斯特,西南铁路建设中的喀斯特隐患问题;以及喀斯特区地下水的开发利用。1961、1966年召开了两次全国性的学术会议,结合生产建设讨论喀斯特地貌基本问题和研究方向,出版了这两次会议的论文集。

70年代喀斯特地貌研究在基本理论和研究方法上大大地提高了一步,福特(D. C. Ford)研究了欧洲和北美中部500多个洞穴,提出了溶洞发育于充气带、深饱水带、潜水面带和承压水带(1971),匈牙利雅库斯(L. Jakucs)《喀斯特区地貌成因》(1977)中有关喀斯特地貌演化的研究,发展了侵蚀循环学说,把喀斯特水分分为外源水和内源水,两者的喀斯特地貌发育各异。任美镛等《中国岩溶发育规律的若干问题》(1979)论证了中国喀斯特地貌发育演变具有地带性规律、西藏和云贵高原的古喀斯特地貌和深部喀斯特等问题,英国史密斯(D. I. Smith, 1972)等提出了喀斯特地貌演化的数学模式,自此用数学方法建立了喀斯特地貌发育的动力、形态因素的数学模式。喀斯特的溶蚀试验已从室内走向野外定位观测,卢耀如等(1973)计算出中国华南的溶蚀量比华北大3~5倍。该时期出版的一些教科书和专著有:美国斯维汀(M. M. Sweeting)《喀斯特地貌》(1972),南斯拉夫赫拉克(M. Herak)与美国斯特林弗尔德(V. T. Stringfield)合著《北半球喀斯特》(1972),中国水文地质工程地质研究所《中国岩溶》(画册, 1976),中国科学院地质研究所岩溶研究组《中国岩溶研究》(1979)。1975年中国召开了全国喀斯特10年规划会议,在山西、湖南、贵州、广西选定了5个重点研究区,并在桂林建立了岩溶研究所。1978年中国地质学会喀斯特专业委员会成立。

80年代至今,喀斯特地貌以综合研究与定位观测、模拟试验相结合,喀斯特水资源的开发利用,洞穴与喀斯特旅游资源考察普遍深入开展,中国喀斯特研究广泛地与国际交流,1983年中国召开了第3次全国喀斯特学术会议。任美镛等(1983)从生物、气候观点阐明了中国喀斯特地貌地带性差异的原因,探讨了第三纪峰林分布与板块及古海洋的关系,张世从等(1986)据戴维斯观点提出黔南喀斯特地貌发育的6个阶段,卢耀如(1986)据新构造运动与第四纪气候变化等探讨了喀斯特地貌演化的8个模式;许多学者认为峰林与峰丛可相互转化,而朱德浩(1984)则与此观点相反,论证了峰丛洼地发展到一定时期逐步趋向稳定,不存在相互转化过程,威廉姆斯(P. W. Williams)自70年代就提出了喀斯特发育与喀斯特水动力关系,把热带喀斯特中的麻窝状喀斯特(cockpit karst)称为多边形喀斯特,并将它分为3~4个发育阶段(1989),而A. 包格里论述了各喀斯特水动力带的形态特征。喀斯特地貌研究已从定性走向定量,用传统的地质地貌方法(1981)与新技术相结合,开展定位研究,如用萤光素、孢粉作地下河流通试,综合地球物理法、微波红外探测地下喀斯特,用模拟方法对石芽进行溶蚀试验(1988),1986年贵州省建立了普定喀斯特综合试验站,推动了中国喀斯特定位实验的研究工作。喀斯特的应用研究以水资源的开发利用为主,如中国对洛塔、普定等地区的专题论著(1984, 1990),而在石油勘探中对喀斯特各种孔隙、裂隙和地下形态的研究更为深入。洞穴研究深入广泛,有各种洞穴研究机构和组织,有专门著作和杂志,国际洞穴学联合会(UIS)有3个定期出版物,即国际洞穴联合会通报、洞穴学文摘、国际洞穴学杂志,在国际地理联合会喀斯特制图委员会组织下,1986年出版了4幅大比例尺喀斯特图集。中国洞穴研究机构的成立虽然较迟(1990,中国地质学会洞穴研究会),但洞穴的勘测和研究却很早,尤以洞穴生物和考古最为突出。自1927年以来对北京周口店喀斯特洞穴作了系统的研究,1979~1982年又对该地区洞穴作多学科的综合研究,出版了专著(1985),居国际领先地位。喀斯特地区旅游资源丰富,如美国猛犸洞辟为旅游点,中国桂林—阳朔的山水、路南石林早已闻名中外。《黄果树区域旅游资源研究》(1990),则是中国第1本有关喀斯特地区旅游资源研究的科学论著。

#### 参考文献

- 1 A Bögli. Karst hydrology and physical speleology Berlin Springer, 1980
- 2 Sweeting M M. Karst geomorphology; benchmark papers in geology, 1981, 59, Stroudsburg, Penn; Hutchinson—Ross
- 3 任美镛, 等编著. 岩溶学概论. 商务印书馆, 1983
- 4 Jennings J N. Karst Geomorphology. Oxford; Basil Blackwell, 1985
- 5 卢耀如. 地理研究, 1986, 5(4): 25~34
- 6 陈治平. 地理研究, 1986, 5(40): 93~101

(南京大学大地海洋科学系王飞燕副教授撰)

#### 喀斯特地貌类型

Karst landscape type 指可溶性岩石(主要是分布最广的碳酸盐岩)经以溶蚀为先导的喀斯特作用,形成地面坎坷崎岖、地下洞穴发育的各种特殊地貌类型。喀斯特地区蕴藏有丰富的矿产资源,又是很好的旅游资源,同时所埋藏的古生物和古人类化石具有重大的科学价值。但是喀斯特地区经常发生地基破裂、水库漏水和地表缺水等现象,对工农业生产和生活带来诸多不便,因此对喀斯特地貌的研究有着十分重要的意义。

中国喀斯特现象的记载,可追溯到2400年前。明代徐霞客的《徐霞客游记》中,详细地叙述了中国西南地区的喀斯特现象,创立了许多专有名词如“坞”(岩溶洼地或坡立谷)、“环洼”(圆洼地)、“盆洼”(漏斗)、“石山”(峰林地形)等等。1893年斯威奇(J. Cvijic)发表《喀斯特现象》一文,阐明喀斯特形态主要由侵蚀—溶蚀作用形成,提出石灰岩地区的夷平面可位于不同高度,喀斯特

地区的地下水可分为3带:上部的干燥带(即充气带)、中间的季节饱和带和最下面的全饱和带,他用喀斯特(karst)一词来称呼这些特殊的地貌和水文现象,现已成为国际通用术语。1930年戴维斯(W. M. Davis)发表《石灰岩洞穴的成因》长篇专文,这是有关洞穴研究较早的理论著作。

喀斯特地貌的发育特别受岩性为主的地质背景及气候为主导的地理环境所控制。其基本类型,按岩性分为碳酸盐岩喀斯特、石膏喀斯特和盐喀斯特;按存在形式分裸露型、覆盖型和埋藏型喀斯特;按发育程度分为全喀斯特、半喀斯特或流水喀斯特;按气候地貌带分为热带、亚热带、温带和寒带喀斯特;按垂直动力带分为渗流带、浅潜水带和深部喀斯特。喀斯特地貌特殊性又在于它不仅在地表的,且有与其成因联系的地下喀斯特形态——洞穴。喀斯特地表形态类型属正地形的主要有峰丛、峰林、孤峰、残丘、喀斯特丘陵和石芽。负地形主要类型有漏斗、落水洞、竖井、盲谷、干谷、溶蚀洼地、坡立谷、喀斯特平原、喀斯特峡谷(峡谷)、溶沟与溶隙等。地表正、负地形间及地表与地下喀斯特地貌类型间常有成因上的联系,构成一定的地貌组合。

喀斯特地貌的演化模式在侵蚀循环学说的影响下,从早期格朗德(A. Grund),至近期雅库斯(L. Jakucs)和威廉姆斯(P. W. Williams)的模式,基本为定性3~4阶段模式。在喀斯特地貌发育的幼年期,喀斯特现象主要在地表发育,地面上出现许多石芽和溶沟以及少数漏斗。青年期,喀斯特主要向地下发展,漏斗、落水洞、干谷、盲谷、溶蚀洼地等广泛发育,并发育复杂的地下水系和地下洞穴系统。中年期,喀斯特发育主要由地下形态向地表形态转化,由于洞穴顶板坍塌,许多地下河又转为地上河,有大量深陷洼地、大型溶蚀谷地、峰丛和峰林等形成。而到老年期,则发育广阔的喀斯特平原以及喀斯特平原上的孤峰与残丘。1972年史密斯(D. I. Smith)等提出外成喀斯特地貌演化数学模型后,用数学方法建立喀斯特地貌发育与动力、形态因素的数学模型正在发展。1988年怀特(W. B. White)又提出喀斯特地形发育速率过程模型。

喀斯特作用营力、过程和形态产物受地球表面的太阳能分配所引起自然地带变化的制约,而具有水平的和垂直的地带分异。气候为其主导因素。其中温度、降水及受其影响的水文和生物等自然因素,构成溶蚀作用的环境营力和外动力条件。喀斯特地带分为热带、亚热带、温带、寒带或冰缘及干旱区(沙漠)等类型。垂直喀斯特分带随所处基带而异。总体而言,森林线以上为高山喀斯特。据雅库斯1977年计算的全球溶蚀强度比例,热带占72%,亚热带(地中海型)12%,温带9%,冰缘区6%,干旱区(沙漠)1%。热带喀斯特以峰林和石林为代表,地表和地下喀斯特均发育。按降水量和生物地球化学,又分热带雨林—季雨林喀斯特和热带干草原喀斯特。亚热带喀斯特以洼地、漏斗、矮锥状喀斯特丘陵为代表,地下喀斯特亦发育。温带喀斯特以干谷和岩溶泉为代表,地下喀斯特较发育,冻裂作用已较明显。寒带喀斯特因冻土会阻滞地表水下渗,喀斯特水中CO<sub>2</sub>含量较大,使地面发育有小溶沟和浅洼地,水冻层以下可出现洞穴。中国喀斯特地带,大体以南岭北麓、秦岭—淮河二线为界,分热带、亚热带和温带喀斯特。此外,还有高山及冰缘喀斯特与西北干旱喀斯特等。

通过对喀斯特地貌正、负地形的量计和数理统计研究,得出两种截然相反的喀斯特地貌演化系列和模式:一种认为峰丛洼地和峰林平原是在不同的初始条件和环境中产生并以各自的方向发展;另一种则认为喀斯特地貌必须遵循其演化规律,即从与非碳酸盐岩地层相似的常态石灰岩地貌向喀斯特峰丛地貌、丘陵峰林地貌和孤峰残丘平原地貌演化,亦即峰丛向峰林洼地、峰林台地发育。通过对中国峰林地区的数量研究,发现峰林锥丘有较稳定的对称两坡,锥峰的长短轴之比因受岩层产状、岩性、地形和构造的控制,其变化较大;锥峰直径与相对高度之比与地貌演化阶段相吻合;在峰丛洼地向峰林洼地和峰林台地演化的系列中,锥峰个数是一个增大的过程,锥峰的分布由均匀到成簇,洼地面积由小到大,以及边数由少到多的发育过程。

对西藏高原的喀斯特地貌,过去一直认为是从热带喀斯特演化而来的,1982年杨逸畴在柳州召开的“喀斯特地貌与洞穴学术讨论会”上对此提出质疑,他根据多年在青藏考察研究结果认为西藏喀斯特是在半干旱的亚热带条件下发展起来的,现在的喀斯特形态主要是冻融作用的结果。

中国喀斯特地貌的系统化、理论化研究起步较晚,迄今许多有关喀斯特地貌的形态命名法还缺少规范化和数量化,给喀斯特地貌的深入研究带来一定的困难。因此,在区域综合性喀斯特研究进一步发展的基础上,应加强研究适用于全球性的、统一的喀斯特学术语和喀斯特类型划分,以取得对喀斯特发育基本特征的统一认识。在此过程中,还应加强喀斯特地貌规范化和系统化的数量研究,为准确命名喀斯特形态提供科学依据。同时,要结合国民经济建设,进行大量的环境喀斯特地貌的研究工作,这将是一个很有发展前途并具有现实意义的研究领域。洞穴研究在中国还很薄弱,有些方面几乎是空白,近期是要有效地解决生产实际问题,尽快建立区域洞穴年谱,加强洞穴物理和水流特性的观测研究,形成和发展中国的洞穴理论体系。

#### 参考文献

- Williams P W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea, *Geol Soc Am Bull*, 1972, 83: 761~796
- 袁道先. 中国岩溶, 1982, 1(1): 4~9
- 陈治平. 喀斯特地貌与洞穴. 1985. 1~8

(安徽师范大学程久苗撰)

#### 洞穴化学沉积物 speleothems 洞穴化学沉积物

1952年由G. W. Moore提出,系指渗流水进入洞穴中,由于物理化学条件的改变,使得溶于水中的碳酸钙等物质达到饱和而析出,形成各种沉积物并沉积在洞穴的不同部位。洞穴化学沉积物的研究对洞穴环境、洞穴沉积和洞穴年代有重要的理论意义。张英骏等(1985)认为,洞穴碳酸钙是由过饱和水流的沉淀产生的,也可以由蒸发引起。沉淀的速度在化学条件和物理条件相同的情况下,取决于水—空界面面积的大小,界面越大,沉淀的速度越快;温度增高也能加快离子扩散并使CO<sub>2</sub>溶度降低,使沉淀速度增大。俞锦标在调查上百个洞穴化学沉积物时发现,凡洞穴内相对湿度在95%以上的洞穴,化学沉积物十分丰富,石膏只沉积在相对湿度低于90%的洞穴内,因此,俞锦标(1985)提出:洞穴化学沉积物的沉积原因中,蒸发作用不占主导地位。主要原因是大气降水降落地面后,溶解地面附近空气中的CO<sub>2</sub>,继续渗入土壤时,不断溶解土壤空气中的高浓度的CO<sub>2</sub>(比空气中正常CO<sub>2</sub>含量高10~100倍)。这种渗流水具有较高的PCO<sub>2</sub>,在下渗经过碳酸盐岩石时,溶蚀碳酸盐岩石,当成饱和水时才停止溶蚀作用,一旦进入洞穴,渗流水中的PCO<sub>2</sub>要高于洞穴空气中的PCO<sub>2</sub>,渗流水就释放CO<sub>2</sub>,使得渗流水呈过饱和状态而沉淀出各种各样的洞穴化学沉积物。因此,在大量化学沉积物的洞穴中,水量较大,空气中相对湿度较大,蒸发作用就相对较弱。

根据洞穴化学沉积物的成因,可将其分为重力水沉积、非重力水沉积以及两者混合沉积等3种类型。

1. 重力水沉积。主要包括:(1)滴水类(dripstone)(见滴水沉积条)。(2)流石类(flow stone),由连续运动的水流形成的洞穴碳酸钙沉积物,其形态具有条带状、流层状、环纹状。朱学稳(1988)将流石类沉积分为洞顶流石为石带(stone girdle)、肉条石(cave bacon)、水母石(cave medusa)、石旗(stone flag);将洞壁流石分为石幔(draperies)、石幕(curtain)、石瀑布(stone fall)、穴盾(cave shield)、盾帐(round mosquito net)、穴板(cave board)和石柱盘(column tray)等;将洞底流石分为流石坝(flowstone dam)、石梯田(terraced fields)流石板或岩席(flowstone sheets)。钙板往往覆盖在其他沉积物之上起保护作用,所以洞穴内沉积物不易受到破坏。有时当钙板下的碎屑物被后期水流冲刷掉后,钙板可以形成无支撑的悬空物,称天蓬(canopy),天蓬下又可以被后期的物质充填。穴盾和盾帐的形成,是由裂隙中涌出的

渗流水具有一定承压性质,流出洞壁后形成两片圆形的盾板,上下吻合而对应,有环形纹理,小的为10cm,一般为60cm,大的可达3m左右,两板之间为缝隙,承压水通过该缝隙向四周流出,在盾板的周缘向下滴落,从而形成碳酸钙下坠,称为盾顶,呈圆形状挂的帐子,又称盾帐。盾帐的长度最大可达5m,一般为1~2m。盾帐因重力作用而崩塌。(3)溅水沉积类,洞穴水流常因滴落而形成飞溅的水珠和水雾依附于其他沉积体上,形成多种类型,有菜叶片、棕榈树叶(palm leaf)、石葡萄(botryoid)、石蘑菇(stone mushroom)、石花瓣(stone petal)和石珊瑚(stone coral)等。(4)水池沉积类,洞底有流石坝内池水中当贮水不溢而又不滴的情况下,其表面因蒸发呈饱和状态生成水钙膜或石荷叶或穴筏浮冰(cave raft or floating film)、穴泡(cave bubble)和边石(rimstone),在池水下还可形成石花(stone flowers)、晶花(crystal flowers)、晶刷(crystal brush)、石葡萄(stone grape)、月奶石(moonmilk)等。

2. 非重力水沉积。系在微细的裂隙和多孔隙的洞顶,在具薄膜水毛细管水和弥漫于空气中含有碳酸钙微粒的气溶胶体时,可以形成非重力沉积物。如毛细管水和气溶胶微粒生成的石枝或卷曲石(helictite and heligmite),附生在管状钟乳石上,如树枝分岔,有的如发髻形成 $\infty$ 形。此外还有洞穴毛发(cave hair)。非重力沉积的生成的必要环境是:(1)无流动空气的平静空间;(2)高湿度(相对湿度大于98%);(3)有相关的依附体。

上述化学沉积物的形成与形态类型,1965年Г. А. МАСКУМОРНИУ 研究认为与渗流水的来水量有关,他提出:钙板形成的水量为1L/s,流石为 $10^{-1}$ L/s,石幔为 $10^{-2}$ L/s,石笋为 $10^{-3}$ L/s,棕榈树石笋为 $10^{-4}$ L/s,钟乳石为 $10^{-5}$ L/s,鞭状钟乳石为 $10^{-6}$ L/s,符状钟乳石(鹅管)为 $10^{-7}$ L/s,卷曲石为 $10^{-9}$ L/s,石花为 $10^{-10}$ L/s。

3. 混合沉积类。由两种或两种以上运动方式的水流协同作用形成的化学沉积物,又称协同沉积(synergetic deposits),如锥状石笋、片状钟乳石和大型石柱等为滴水一流水沉积;棕榈树石笋、飞溅石花为滴水一流水沉积;钙膜晶锥(rat-crystal cone)和穴珠(见洞穴珍珠类)为滴水一流水沉积;云盘(cave lotus)、石灵芝为滴水一流水沉积。

目前洞穴学家致力于洞穴化学沉积物的研究的目的,在于解决洞穴化学沉积的环境和成因。例如河南巩县的雪花洞中的洞穴毛发;广西恭城县的钙膜晶锥、南宁附近龙虎山洞穴内的石灵芝以及阳朔附近兴坪莲花洞内的云盘等的研究,在恢复洞穴古环境以及喀斯特成矿作用中气、液、固三相作用、平衡、转化的复杂过程,洞穴矿床在常温成矿作用中成矿物质来源特征、迁移、聚集和结晶成矿过程等成矿模式及喀斯特矿床的标志,促进喀斯特矿床研究向高层次发展均具有实际意义。

#### 参考文献

- 1 Moore G W. Spelcothem—a new cave term. NNS, new, 1952, 10(6):2
- 2 Moore G W & Nicholas G. Speleology the study on caves. Boston: Heath and Co, 1964
- 3 张英骏,等. 应用岩溶学及洞穴学. 贵州: 贵州人民出版社, 1985. 208~211
- 4 俞锦标,等. 南京大学学报(地理学), 1985, (1): 49~58
- 5 朱学稳,等. 桂林岩溶地貌与洞穴研究. 北京: 地质出版社, 1988. 102~109

(南京大学俞锦标教授撰)

**滴石沉积** dripstone 喀斯特洞穴化学沉积物中以滴石类沉积较为常见,其中主要形态类型以常见的悬挂滴石中的鹅管(straw stalactite)、钟乳石(stalactite)和站立滴石中的石笋(stalagmite)。而滴杯(dripping cup)较少见。经过土壤层和碳酸盐岩体裂隙水,从洞顶裂隙中渗出,并成悬挂的水珠时,因 $\text{CO}_2$ 逸出,从水中就有碳酸钙析出并发生沉积作用,随着下渗水流的不

断补给,循着已沉积的碳酸钙小突起往下加长加粗,呈管状下坠。其中心可以有小管与端点相连,水可以从小管流出加长,其表面可因薄层水的流动、蒸发沉积加粗。可由来水量的大小、洞顶斜度、裂隙密度不同,形成各式各样钟乳石体。滴石沉积的研究对恢复古地理环境有重要意义。

瑞士 A. Bögli(1978)认为,滴石类沉积物的形态成因是与水滴中的 $\text{CO}_2$ 逸出有关,因为经过土壤层的渗流水的 $\text{PCO}_2$ 较高,进入洞穴后,因洞穴空气中的 $\text{PCO}_2$ 较低,水滴中的碳酸钙就发生沉积。H. W. Franke(1965)经过实验,采用物理化学方法的计算,提出渗流水与石笋间的关系,并得出石笋的断面与来水量、石笋高度与来水中 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度呈线性关系。他于1975年提出滴水滴落高度以毫米计时,石笋的直径可以到1.5cm,而Curl(1974)则认为,石笋最小的直径为3cm。R. Wells(1971)认为滴石沉积与来水量有关,如果来水量较大,水滴下落的滴率太大,不利于碳酸钙在洞顶沉积,却有利于洞底石笋的生长。他同时又对鹅管进行仔细观察,提出鹅管是一种快速生长的沉积物,要求碳酸钙的纯度较高,下滴率则需很慢,慢到不能使鹅管顶端生长的水珠干涸或水珠倒缩入管孔中的滴率。程星(1990)认为,水滴从洞顶板滴落到洞底,需要经3个阶段:(1)附着阶段;(2)滴落阶段;(3)地面飞溅的扩散阶段。在附着阶段中可观察水滴中 $\text{CO}_2$ 的逸出量随着滴率的减慢而增加,如果滴率较快时,水滴中 $\text{CO}_2$ 逸出量不大,与渗出水初始状态较为接近;当滴率很慢时,滴率的改变对水滴的 $\text{CO}_2$ 影响较大。他认为滴率快与慢直接控制着洞顶 $\text{CO}_2$ 逸出量,也就影响到洞穴顶部下垂的钟乳石和洞底站立的石笋数量关系。在第2滴落阶段内表现为水滴下落过程中 $\text{CO}_2$ 的逸出量是随着滴落路程的增加而加大,同时滴率越快, $\text{CO}_2$ 的逸出量越大,反之 $\text{CO}_2$ 的损失量亦小,这是因为滴落时间比随着时间长;滴率很慢时,滴落时间比附着时间短。地面飞溅的扩散阶段则表现为 $\text{CO}_2$ 的逸出量随水一气界面面积增大而增大。当溶液(水滴)中 $\text{CO}_2$ 与外界达成平衡后,水气界面的增多复又不再影响 $\text{CO}_2$ 的逸出。他在总结时指出:滴率很慢时, $\text{CO}_2$ 的逸出主要集中在洞顶附着阶段,这时有利于在洞顶生成钟乳石;当滴率很快时,则在滴落和在洞底扩散阶段有利于 $\text{CO}_2$ 逸出,因此也就在洞底生成众多的碳酸钙沉积。由此可见,从洞穴中钟乳石和石笋等形态组合特征,亦可推断来水量与滴率的关系。俞锦标(1990)指出,滴石类沉积的形成是与滴水中 $\text{CO}_2$ 逸出有关,但其形成的形态类型特征与来水量、滴率、水质和洞穴环境有关。鹅管状钟乳石是在水质洁净、每分钟一滴或3~5min一滴时形成,且数量众多。锥状钟乳石的形成是在水量增大和有杂质时,长度可达3m,基部直径可达2~3m不等。当渗出水循洞顶斜面流动时则形成旗状和帷幕状钟乳石;在非常宁静的洞穴中,没有任何干扰时,细小裂隙中下渗的水流可生成厚度一致、却又菲薄的薄板状钟乳石,厚度为0.2~0.3cm,有层理。当洞穴为多洞口,洞穴空气十分畅通,钟乳石向下生长重心受到不同风向偏移,产生螺旋形旋转的扭曲钟乳石。在洞口部位的钟乳石在生长过程中因受藻类尸体的叠加呈圆球形钟乳石。在洞口部位可形成向洞外翘起的钟乳石。石笋的形成是因滴水冲击地面, $\text{PCO}_2$ 密度减小,加速石笋的生成,其形态特征也与上述原因有关。当碳酸钙沉积正好满足石笋保持一定直径向上生长,这种石笋粗细一致,呈柱状;在通风条件较好的洞穴内,时常改变空气流通方向,就可以形成不对称的轮状石笋;其生长过程中有飞溅水加入时,可以形成棕榈树形或称叶片状石笋。袁道先、翁金桃等(1989)认为,石笋外形和规模取决于洞顶滴水的水量、数量变化、速度和高度等状况。当均速而缓慢下滴时,形成基部与顶部直径大致相同的竹笋状石笋,如果水滴的速度较快,形成丘状石笋,高位滴水因地面飞溅形成棕榈状石笋,早期的滴水地段,后期又多处下滴,则形成烛台石笋丛。

石柱的形成,各学者的意见较一致,认为:(1)钟乳石与石笋相对生长而成;(2)由钟乳石生长触及洞底联结而成;(3)由石笋向上单向生长到达洞顶生成。

洞穴化学沉积物中滴石类目前作为研究洞穴环境变迁和洞穴年代的主要对象,其中含泥量的变化,可分析不同时期补给水源的多寡;沉积和再溶蚀,表明洞穴内积水与来水的变化,可重建洞穴环境;化学沉积物沉积时同时裹挟了渗流水,对此液包体的水中的稳定氧、碳同位素( $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ )的分析,广泛地作为沉积时期当地的古温度和自然地理环境标志;不同沉积的部位的 $^{14}\text{C}$ 、轴系法测年的方法,早已作为测定洞穴形成上限时沉积物生成的绝对年代。因此,目前对于洞穴化学沉积物的成因研究,环境条件分析、旅游美学价值等评价外,已作为第四纪地质学家们研究第四纪年代、环境变化的最好实体,预计将有愈来愈多的地面野田的年代、古环境研究转向洞穴,因为洞穴内沉积物生成以后,很少受到后来各种不利因素的改造。

#### 参考文献

- 1 Franke H W. Stud Speleol, 1965, 89~95
- 2 Curl R L. Deducing flow velocity in cave conduits from scallops. NSS Bull, 1974, 35(2): 1~5
- 3 Bögli A. Karsthydrographie und physische speleologie. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1978
- 4 朱学稳,等. 桂林岩溶地貌与洞穴研究. 北京:地质出版社, 1988. 105
- 5 俞锦标,等. 中国喀斯特发育规律典型研究. 北京:科学出版社, 1990. 67~68
- 6 俞锦标,等. 黄果树区域旅游资源研究. 上海:上海科技教育出版社, 1990. 243~250

(南京大学俞锦标教授撰)

**溶洞珍珠** cave pearls 是一种洞穴化学沉淀作用和机械作用形成的包壳体,形状如珍珠,又名“洞穴珍珠”,简称“穴珠”。其实穴珠大小十分悬殊,大者直径十几厘米,似石球、石饼状,小者仅 1.5mm,称蛹形石,两者间呈豆状、弹丸状大小不等。

徐霞客(1586~1641)对穴珠的形态有过精辟的描述:“四面纹痕蜃起”者称“杨梅”,“多磊落痕”者为“荔枝”,“圆洁胜珠”者为“丸石”。从外形上看,多数穴珠呈球形或椭圆形,少数呈扁平形、多角浑圆形或短柱形。表面多不光滑,一般为灰色或灰黄色、灰黑色和灰白色。绝大多数穴珠彼此孤立产出,少数经粘结成团块呈葡萄状。穴珠的横切面很少呈正圆形,往往为椭圆形,没有棱角的多边形或不规则形,不少呈梅花瓣状。这种具有裂口的花瓣状穴珠,是由于包缠后经过干裂作用或干裂后又发生包缠作用的结果。

穴珠内部可以由珠核和包壳两组分组成。珠核常为岩屑、粘土块、植物碎片、碳酸盐类(微晶方解石)和其他物质的集合体构成。珠核的形状多种多样,穴珠内层圈与珠核相似,但外层圈往往与珠核形状不一致,珠核的大小与包壳层的比例并无一定规律,一般珠核的直径 1~2mm。若以较大的粘土块体为珠核的穴珠,在干裂后珠核受流水的冲刷,可以将粘土冲去形成空心穴珠,形如海胆躯壳,一端开口,内部空心。核外包壳层多数呈同心纹层结构,少数具放射状。同心纹层数多少不一,一般为 10 圈左右,有时可达 50 圈。包壳可由较为明亮的层圈和比较暗蚀的层圈交替组成。亮层为方解石晶体,称生长层,每一层圈厚约 0.1~1mm,晶形较好,在偏光镜下呈粒状,柱粒状或长柱状、纤维状,且垂直于珠核或层圈生长,未见方解石晶体沿切线方向生长。暗层由灰泥质和粘土层组成。前者沉淀层一般较薄,有的在 0.3mm 厚度中层圈可达 20 层之多,即每一暗色层仅有 0.015mm 厚。粘土层中泥质成分可达 90% 以上,方解石小于 10%,表面呈波状起伏,波面不规则。多层泥质圈可以辐合在一起形成集合泥质层圈,在底部有辐合缺层现象。穴珠如在静水条件下发育起来,方解石晶体垂直珠核,层圈数少;如来水中带有粘土的,含粘土质的暗层层圈较多,在动荡的水动力条件下,它与现代海洋中的鲕粒、豆粒一样生成正常核穴珠,包壳层圈在悬浮或滚动的碳酸钙颗粒均匀加积生长,包壳的厚度反映穴珠在水介质中呈悬浮或滚动状

态的持续时间。穴珠长到一定大小后,由悬浮转变到滚动,甚至到静止状态,穴珠的形状也由球形到饼状。在水动力暂时处于静止条件下,穴珠形成后由于包壳层尚未固结,加之珠核比重大于包壳层,在重力作用下,珠核可以逐渐下降,形成底平上圆的馒头状扁心核穴珠。静水环境保持时间越长久,偏心核穴珠的表面包壳也逐层加大。其偏堕程度与静水环境初始包壳固结、硬化速度有关。当偏核心的扁平穴珠生成后,它们就难以再滚动或很少滚动。扁平度就更大,最后形成饼状。

1965 年 J. D. Donahue 认为穴珠的成因是无机化学沉淀作用而成,且需要 4 个必要条件:过饱和的碳酸钙溶液;可被利用的碎屑核心;受到扰动的水;巢状的浅水盆。1982 年翁金桃和茹锦文提出:很浅的积水是形成穴珠的必要条件之一;间歇性流水和由这种流水带来的机械沉积物又一必要条件,洞顶滴水不一定是形成穴珠的必备条件;穴珠生长过程不一定总是处于滚动状态,在相对静止状态,因方解石晶体的生长力,可使穴珠抬升。1985 年俞锦标和王英华指出 3 种成因:(1)衰亡地下河床生成的穴珠,在分布上具有良好的分选性,含粘土质可达 80% 以上,方解石呈针状结晶或隐晶状,壳圈层少而薄。在主流线附近的河床内粒径小,浑圆球形,表面光滑。向河床两侧粒径增大,呈长柱形或扁平形,表面有荔枝状凸起。(2)浅水盆内穴珠形成初始阶段多位于边缘部位,随着穴珠的不断增大和增多,逐渐向中心扩展,最后滴水盆,穴珠也由开始时自由旋转变为只沿残留的自由空间生长,故水盆中心部位多见长柱体、截头圆锥体、多面体和蚕茧体穴珠,并出现压实变形现象;边缘部位的穴珠为球体,粒径均一,表面光滑。这类穴珠多具同心结构,方解石晶体组成的包壳占 80%,粘土包壳仅占 20%。(3)泛滥水道内生成的穴珠在供水区粒径粗大,数量较少,渗透排泄区粒径较小。这一类型穴珠的方解石和粘土介于上述两类型之间。

穴珠作为洞穴堆积物研究古气候、古水文和年代,在科学界已引起广为注意。1985 年俞锦标研究指出,在浅水盆和泛滥水道中的原始穴珠的亮层的化学沉淀物是夏季渗流水的产物,其沉淀介质  $\delta^{18}\text{O}$  的微小变化与当地地面平均温度变化有关;暗层较多则表示环境多变;穴珠内,外层包壳松紧不一,成分和颜色各异,沿沉积界面富含粘土则表示是在间歇性水流作用下生成的;同样包壳层的圈数不足以证明穴珠的绝对年龄,因为内圈沉积以后可因气候变化而中断沉积。同时还指出有的洞穴的穴珠的包壳是藻类,无疑这一工作给洞穴生物,特别对洞穴内少光和元光条件下的低等植物研究开辟新径。

#### 参考文献

- 1 Donahue J D. Laboratory Growth of Pisolite I Sedim Petrol, 1965, 35: 251~256
- 2 翁金桃,茹锦文. 中国岩溶, 1982, 1(1): 58~65
- 3 俞锦标,王英华. 南京大学学报(地理学), 1985, (1): 36~48

(南京大学俞锦标教授撰)

**干旱气候地貌学** arid climatic geomorphology 又称干旱区地貌学或荒漠地貌学,是气候地貌学的重要分支学科。它研究干旱区特定条件下地貌营力的性质、强度、组合特征及其所造成的风化剥蚀、搬运与堆积过程,以及由此导致的地表形态的发生、发展演变和分布规律及其改造利用途径,其次级学科包括干旱区地表形态与分区、分类学,干旱区动力地貌学,干旱区地貌演化,干旱区地貌制图,干旱区实验地貌学与数量分析和应用,干旱区人为地貌学以及干旱区地貌学的研究方法论等方面。

全球干旱区地貌的分布占陆地面积的 32.8%,其中半干旱地区(年平均降水量 500~200mm)占 13.7%,干旱地区(年平均降水量 200~25mm)占 13.7%,极端干旱地区(年平均降水量 < 25mm)占 5.8%。世界各大陆干旱区的分布:非洲 37%,亚洲 34%,澳大利亚 13%,北美 8%,南美 6%,欧洲 2%。在世界干旱区中心发育五大荒漠带:亚非荒漠带,北美荒漠带,阿塔卡玛和巴塔哥尼亚荒漠带,澳大利亚荒漠带以及南非荒漠带。干旱区地貌

过程总的特点表现为强烈的物理风化、风力作用占优势以及间歇性洪流作用等,主要分布在亚热带和温带降水稀少、无水流外泄的内流区,分别称之为热干气候和暖(温)干气候地貌。

干旱区地貌学研究始于19世纪末期。C. K. Gilbert(1872)对美国西部干旱区风蚀地貌、斜坡过程和山足夷平面的研究,可以看作是干旱区地貌研究的先驱。事实上,气候控制地貌景观演化的观点到法国的Martonne、德国的Passarge、Thorbeche和Sapper等人发端,又经Peltier、Tricart、Caillux、Büdel、Louis及Wihelmy等的深入研究与不断发展之后才被广泛接受的。

C. K. Gilbert在干旱区地貌学的许多方面都有建树。例如他关于地貌发育动态平衡的观点,就是现代动态平衡地貌学说的雏形,但他始终没有提出一套地貌演化的整体理论框架。到本世纪前期,W. M. Davis以演化的观点,把地形看作是随时间、构造和过程而变化的衰减函数。他认为地壳快速隆起后有一个长期相对平静期,从而在时间坐标上,在不同过程的作用下处于青年期、壮年期或老年期的不同发育阶段,表现出不同的地形特征。这样,地形就成为可以预期的随时间发展的必然结果。与此同时,德国青年地貌学家彭克(W. Penck)运用数学地质学方法,把地形发育同构造运动联系起来,从外营力过程及地形特征来推论地壳运动过程。Penck的主要观点在于把地形看作内营力与外营力强度之比率函数的函数,地形只是变化着的地壳抬升同侵蚀强度之间相互作用所控制的多种可能结果之一。随后,南非地貌学家L. C. King(1948)根据他在非洲干旱及半干旱热带草原气候下一些地区的研究,提出了一个与Davis不同的侵蚀循环理论,以说明具有高山散布的侵蚀平原的成因。King关于干旱区大地貌发育的重要概念有“麓原作用”、“陡崖后退”等,归结为“山麓夷平循环”。King认为山麓夷平循环的初始条件为海面降低。他后来(1982)把麓原夷平循环同板块构造学说联系起来解释大地貌的成因。总的说来,20世纪50年代以前的大地貌演化理论都属于“时间衰减”模型。

60年代以后,相继提出了更多的地貌发育理论模型,但所考虑的地貌发育的时空尺度都不及以前那么深远广大。1960年,Hack用动态平衡原理来说明地形的变化,认为只要影响地形发育的控制因素不变,地形就不会随时间变化。Chorley和Kennedy(1971)提出系统地貌学模型, Frank Ahnert(1967)和Michael J. Kirkby(1976)分别提出数学地貌学模型,标志着60~70年代地貌营力过程研究的定量化。Schumm(1965)提出的循环期、均衡期和稳定期3个时间尺度以及相应的3个空间尺度概念,补充了时间衰减模型和独立时间模型的不足。之后,他(1973)提出了地貌临界和复杂反应理论,认为干旱、半干旱区地貌发育不一定是渐进的、持续而有规律地发育的,变化可以在渐变中出现,也可能以突变方式出现,很可能在没有外部环境变化的情况下,地形长期侵蚀也会被快速调整所中断。如果对地貌临界值进行系统监测,就可能发现地貌系统潜在的不稳定点,从而预测地形对自然和人为作用的反应。

对干旱区各种营力过程的研究,近数十年来的特点主要表现为方法上的更新,如遥感技术、室内和野外实验技术以及计算技术的应用,使对各种营力过程及其强度、频度及其地貌作用的认识更加深入,但是从总的情况来看,还处于资料积累阶段,要把这些成果综合起来产生新的理论突破,尚待更深入的研究和理论思考。这种对大尺度理论地貌研究的复兴趋势已初见端倪(V. R. Baker and C. R. Twidale, 1991)。

对于干旱地区风化作用的认识,都强调水分在物理和化学风化中的作用。盐类的风化作用及其地貌效应也越来越受到关注。对荒漠结壳(Desert Crust)的分类研究表明,硅壳和钙壳主要发育于半干旱到干旱地区,石膏壳则见于干旱地区,盐壳只发育在极端干旱的地区。对荒漠岩漆的分析表明,微有机质和低等植物在生物风化、元素迁移和岩漆发育中也起着重要作用。Dorn等人(1990)用加速器质谱仪对岩漆有机质作<sup>14</sup>C测定,并进行微观分析,把荒漠岩漆的成因、物质组成与环境变迁联系起来,成为

重建古环境方面一项很有前途的研究领域。

过去研究干旱区中等地貌的发育,较多地注意机械风化和风营力的作用,近年来对地表和地下水的的作用也越来越重视。Howard等(1989)认为地下水渗流在干旱区非固结沉积物的侵蚀中具有特殊作用,即使在固结岩石区,表层地下水渗出界面上的风化作用也大为加强。

风沙地貌的研究是干旱区地貌研究的一个主要方面。上世纪末,奥勃鲁契夫研究了中亚沙漠,与之同时的索科洛夫提出沙粒运动的蠕移、跃移和悬移3种方式。本世纪初,前苏联学者在风沙地貌成因、分类和流沙动态与固沙措施方面积累了大量资料。兹纳敏斯基(1936)运用流体动力学理论与方法提出“风沙非堆积搬运”理论。英国Bagnold于1935~1938年通过风洞实验以及在北非野外实地观测验证,从沙物质、风沙流到风积地貌等方面系统地论述了风沙过程,奠定了风沙地貌学的理论基础。近数十年来相继提出的风沙地貌发育假说已达十数种。例如60年代S. R. Hanna创立了“卷轴涡流说”(1969), D. King提出了“风蚀说”(1960), Fryberger和Dean(1979)提出了“合成风作用说”等以解释纵向沙丘的成因。Tsao则认为纵向沙丘的发育是其本身形态引起的次级气流场结构所导致的,并非大气条件改变了风向。由此可见,关于沙丘的成因仍然处于探索阶段,还没有形成一个比较成熟的理论。

风沙形态学及区域风沙地貌的研究,自70年代以来有了长足的发展。McKee(1979)等通过卫星影像,判读、制图和统计分析,提出了一个全新的全球风沙地貌分类系统,根据形态学指标及其与风况的关系把沙丘分为简单的(基本的)、复合的和复杂的沙丘,每类又包括若干亚类,已成为目前通用的分类系统。

中国干旱区地貌的研究以区域性研究为主要特色。近数十年来对西北和内蒙干旱、半干旱地区各种荒漠地貌的分类、分区研究与制图,基本摸清了各类地貌的分布并初步分析了其成因(中国科学院自然区划委员会,1959;朱震达等,1974;赵松乔,1985)。半干旱黄土区地貌分类、动力过程、侵蚀机制与泥沙输移等方面的研究成果(陈永宗,景可等,1988;齐嘉华,甘枝茂等,1991;唐克丽等,1990)以及干旱区环境演变(董光荣等,1988)、风沙地貌的研究(吴正,1988;夏训诚等,1990)成果代表了我国干旱区地貌研究的主要方面。

近年来,干旱区土地沙漠化的研究取得了一系列进展(Alan Grainger, 1990;朱震达等,1986)。今后10年内,干旱区地貌研究仍将在全球干旱气候地貌统一分类与分区、全球气候变化和海面变化与干旱区地貌响应及其速率、干旱区地貌参数、临界值、新技术新方法的应用及干旱区工程地貌学等方面开展工作。研究热点可能主要表现在:(1)全球变化与干旱区地貌,尤其是灾害性地貌过程、土地退化等响应的关系,制定防止干旱、半干旱地区沙漠化和水土流失的措施。(2)干旱区第四纪以来,特别是全新世以来地貌环境的变化过程。随着资料的积累和资料精度、分辨率的提高,可望取得突破性进展,制定全球统一的对比规范并开展全球对比。(3)应用遥感与地面监测相结合的方法,摸清中国干旱区现代风蚀、水蚀的侵蚀强度与侵蚀量,编制全国干旱区现代侵蚀现状图。(4)沙丘成因与风沙物理、风沙工程学的研究仍将受到普遍关注。通过野外实地观测和连续遥感分析,结合风洞实验模拟和数理方程可望取得突破性进展。(5)发展干旱区人类地貌学,研究干旱区人类活动对地球表面能量平衡、大气和生态环境的影响,以便趋利避害。与此相应,干旱区应用地貌学和工程地貌学将有较大发展。(6)干旱气候地貌学与构造地貌学的结合,吸收现代构造地质、地球物理的新理论,提出新的地貌发育理论模型的条件渐趋成熟。

#### 参考文献

- 1 Bagnold R A, 钱宁, 等译. 风沙与荒漠沙丘物理学. 北京: 科学出版社, 1954
- 2 中国科学院自然区划委员会. 中国地貌区划. 北京: 科学出版社, 1959

- 3 Chorley R J, A J Dunn & Beckinsale (eds) R. P. The history of the study of landforms or the development of geomorphology. London, Methuen, 1964. 1
- 4 Schumm S A & Lichty R W. Am J Sci, 1965, 263: 110~119
- 5 朱震达, 吴正, 等. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社, 1974
- 6 McKee E D. (ed). A study of global sand sea, U. S. Geol. Survey Prof. Paper, 1052. Washington, U S Government Printing Office, 1979. 3~19
- 7 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987
- 8 董光荣, 等. 中国科学(B辑), 1988, 18(6): 633~642
- 9 Thomas D S G. (ed.). Arid Zone Geomorphology. London, Belhaven Press, 1989
- 10 Thorn C E, 陈渭南译. 理论地貌学导论. 西安: 陕西人民教育出版社, 1992

(中国科学院兰州沙漠研究所陈渭南研究员、董光荣研究员、王贵勇博士撰)

**风沙物理学** physics of blown sand 是一门以风和沙(尘)的相互作用为对象, 研究有关地表风蚀、沙(尘)物质的风力搬运、堆积和因之形成的各种地貌形态的过程和物理机制, 以及风沙危害防治工程的物理学原理的新兴学科。它是介于风沙地貌学与物理学之间的边缘科学, 在解决风沙地貌学和风沙危害防治工程的重大理论和实践中起着关键性作用。

1941年拜格诺(R. A. Bagnold)通过大量的风洞实验, 首次运用实验物理学方法来解释流沙的自然运动。他在单个沙粒的运动物理学; 小尺度的作用, 粒径分布, 地面沙纹及沙脊; 大尺度的作用, 泥沙的聚集, 沙丘内部结构等方面都作了系统而全面的分析, 并得出重要的结论, 为风沙物理学奠定了理论基础。此后, 各国学者根据实际需要, 将土壤风蚀、沙(尘)物质的风力搬运和堆积、风成地貌以及风沙危害防治工程4个研究内容逐渐分开, 至今仍在相对独立地发展。

1930~1936年美国由于大肆开垦, “黑风暴”(Dust-storm)席卷中部大平原, 大片土地发生风蚀和荒漠化, 从而导致土壤风蚀研究的大规模展开(W. S. Chepil, 1945; 1946; 1950)。Chepil成为土壤风蚀研究的开创者。1947年前, 美国土壤风蚀的基础研究主要集中于风速梯度、土壤表面结构稳定性和风蚀量的关系方面。1947年后, 美国开始系统地对土壤水分、土壤结构、有机物质、耕作制度、地表粗糙度和表土密度等风蚀影响因子进行研究, 在此基础上推导出包括气候因子和保护带等因素在内的通用风蚀方程, 并成为美国预报土壤风蚀的正式方法。与此同时, 沃卓夫(N. P. Woodruff, 1965)等人利用大量的实测数据, 建立了各种经验或半经验的风蚀方程, 取得了良好的预测效果。美国的风蚀预测方法已推广到其他地区, 如西非各国。同样, 在前苏联50年代由于过度垦荒, 也导致中亚地区的严重荒漠化和“黑风暴”现象。兹纳门斯基(A. N. Знаменский, 1955)和雅可波夫(Т. Ф. Якубов, 1962)率先在前苏联展开土壤风蚀研究, 对土壤风蚀与微地形、土壤理化性质、植被等环境条件的关系, 以及防止土壤风蚀的农业综合技术措施等方面做了系统的工作。为了进一步研究和控制土壤风蚀及“黑风暴”, 在中亚广大地区建立了尘暴观测网。中国土壤风蚀研究起步很晚, 最初对新疆沙漠地区新垦荒地的土壤风蚀问题作过一些野外观测研究(吴正, 1962)。自1986年开始, 中国科学院兰州沙漠研究所利用室内环境风洞对影响土壤风蚀诸自然因素(风况、植被、地表物质组成)和人为因素(开垦和放牧等)进行了初步的模拟实验(董光荣等, 1987; 贺大良等, 1986)。为了进一步开展土壤风蚀和土地沙漠化物理过程的研究, 于1988年建立了中国第一座中型野外土壤风蚀风洞。沙(尘)物质风力搬运、堆积和风成地貌研究, 自1941年以来有很大发展。1951年日本河村龙马对沙(尘)物质风力搬运的运动力学诸宏观量进行了较全面的风洞实验和野外验证, 还用统计分析方法研究了沙粒密度分布、风沙流结构、沙粒跃距及其分布等。

随后, 卡迪布(A. L. A. Kadib, 1965)也研究了风沙运动的机制, 认为引起沙粒运动的基本力量是升力, 并结合室内风洞实验, 提出一种计算输沙率的方法。前苏联伊万诺夫(А. П. Иванов, 1972)比较全面地研究了沙粒的运动及其转输过程。他通过对沙粒滚动、碰撞和旋转运动的模拟实验, 测量了小球的整球与半球的面压力分布, 还模拟了沙粒的跃移轨迹。仙科维奇(Б. Н. Сенкевич, 1976)系统地讨论了风力对单个沙粒起动的的作用, 并从宏观上探讨了风速与沙物质搬运的关系。福特(E. F. Ford, 1957)在考虑沙粒的儒可夫斯基升力、斯托克斯阻力和重力的情况下计算了沙粒的跃移轨迹。斯特劳姆(G. H. Strom et al, 1962)等在考虑了重力和阻力, 并进行了粒子与地表的相互作用和颗粒间碰撞等因素的修正, 最后采用数值计算方法, 计算一条玻璃小球的跃移轨迹。1977年开始, 中国科学院兰州沙漠研究所环境风洞实验室多次在室内风洞中进行不同条件下流沙地表的沙粒运动动态摄影研究(凌裕泉等, 1980; 贺大良等, 1988), 并自行设计了半隐蔽式活动铁筒, 在野外天然风沙条件下进行高速频闪摄影和高速电影摄影机摄影(刘贤万等 1989)。对不同下垫面(包括流沙、戈壁和特殊下垫面)在原始条件和遭受人为破坏情况下的风蚀风积过程、风沙流总体特征和风沙流结构等方面进行了深入研究并用统计和概率的方法推导了风沙流结构对数关系(邹学勇, 1992)。通过高速频闪摄影对不同下垫面情况下原样沙粒的跃移轨迹、沿程速度、起跃角与降落角呈线性关系等一系列问题作了论证(邹学勇, 1991)。大规模的研究风成地貌, 是第二次世界大战后才正式开始的, 现已基本摸清了全球范围内风成地貌的类型和空间分布(吴正, 1987; 朱震达等, 1980; C. S. Breed, 等, 1979; J. A. Maddutt, 1977; Б. А. Федорович, 1956), 但对其物理机制的研究进展甚微。到1880年修建里海东岸铁路时, 防治风沙的问题才被提到正式议程。当时的方案是紧靠路基的地方采用芦苇和旧枕木阻挡沙子侵袭和防止路基吹蚀; 在沙丘表面用碎石和粘土覆盖, 或喷洒石油、海水进行固结; 并在沙地上栽种植物。它揭开了现代风沙工程的序幕。随后, 中亚地区、澳大利亚、印度、美国和中国等许多国家修建穿越荒漠地带的铁路和公路, 都根据具体情况采取了多种防治风沙的工程措施, 而且在实践中不断完善。众所周知, 栽种植物既阻止了风沙运移, 又可抑制地表起沙。但在实际中, 非植物(生物)的应急风沙工程则更为常见和重要。

风沙物理学作为一门新兴的边缘学科, 正在迅速地完善自身的理论体系。以美国为代表的土壤风蚀研究, 自1983年以来采用数学和过程模拟的方法(G. W. Cole, 1983; 1984; 1985; L. J. Hagen, 1988)把土壤风蚀研究推向一个新高潮。各国学者都致力于多学科、多领域的联合, 吸取数学、物理学和土壤学等学科的营养, 试图建立风蚀的基本理论和可靠的预测模式。所以研究的区域性在逐渐淡化, 加强了数学模拟。美国农业部的风蚀预报系统(WEPS, 1986)中的风蚀模型(WEM)就是一种高度简化的风蚀模拟系统, 它运用物理学基本原理和动量守恒定律与各种输沙率方程结合, 从时间和空间上计算通过地块边界的土壤输移量。由于各地的土壤物理、化学性质和植被状况不尽相同, 目前, 无论何种风蚀模型, 在推广应用方面都还存在一定的困难, 必须根据具体情况选定各种参数, 修改原有的风蚀模式才能较有效地进行度算, 更重要的是将影响土壤风蚀的诸多因子分别摆在何种重要性的位置上, 诸如此类的因素是制约土壤风蚀研究的根本原因。沙(尘)物质的风力搬运和重新堆积是土壤风蚀的直接结果。在这个问题上各国学者致力于过程研究, 即力学机制的研究。有关风沙流总体特征的研究, 自拜格诺以来进展不大。风沙流结构研究取得一定的进展(吴正等, 1981)野外观测和室内风洞实验表明: 在各种风速和沙量条件下, 含沙量随高度分布呈指数规律递减; 随风速的增加, 下层气流中沙量(%)相对减少, 相应地增加了上层气流中搬运的沙量; 在同一风速条件下, 随着总输沙量增大, 面增加了下层气流中搬运的沙量, 上层沙量相对减少。在高速摄影技术进入风沙物理学领域的同时, 对风沙流主体成份——跃移沙粒的研究也就发生了深刻的变革, 通过高速摄影获得跃移沙粒的运



动方程、轨迹方程、起跃角与降落角关系方程等(邹学勇等, 1991; 刘绍中, 1985; A. П. Иванов, 1980)并对跃移沙粒跃移过程中的加速度、加速度分量、速度分量等进行了详细的统计分析(苏维等, 1988; 贺人良, 1988; 凌裕泉等, 1980)。现在看来根据本学科的特殊要求, 要获得沙粒起跃期间的力学机制的结论, 仍有相当的困难。主要原因是沙粒起跃的时间为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ s 量级, 测量和摄影系统不能满足要求, 这是一个亟待解决的问题。风成地貌物理机制研究存在的困难较多。由于其尺度相对较大, 在风洞模拟满足不了相似条件, 造成结果不可靠。从理论上讲, 野外观测效果最好, 但又限于时间跨度太长和仪器精度不高、功能不够。在这种情况下, 只能用常规方法和在一定的时间内进行观测, 并由此推断风成地貌的发育机制(Б. А. Федорович, 1977; 朱震达, 1963)。在实际需要的推动下风沙工程理论研究进展较快(刘贤万, 1982; 邹本功等, 1981), 但研究手段单一, 主要依靠沙风洞和烟风洞测量纯净气流情况下, 研究各种风沙工程设置的气流场变化, 据此分析在真实情况下挟沙气流被所设置的防沙工程作用后发生的风蚀、堆积或风沙流变化特点。这种做法的缺陷是用实验来指导实际工作, 更重要的是实验条件与实际并不完全相似。中国在风沙工程的实践方面属世界先进水平(沙坡头沙漠科学研究所, 1991), 包兰铁路中卫段的铁路防沙工程就是全世界的典范。

由于风沙物理学是一门新兴的边缘学科, 各个研究领域都具有很大的发展前景。根据科学发展的一般规律, 可以预见完善土壤风蚀预报方程将是一个最艰难和最引人注目的问题。对风沙流的研究会更加深入细致, 把从单个沙粒的运动和力学机制到风沙流的气固两相流总体特征理论化已势在必行, 特别是风沙流动力学模型和本构方程的建立整个风沙物理学具有重大意义, 但要达到这个目标必须从单个沙粒研究开始, 然后应用统计、随机概率的方法和理论才有可能。风沙工程的实验研究焦点在解决实验相似条件下, 其理论研究和风成地貌理论研究一样, 应致力于运用风沙气固两相流的基本理论和基础知识, 建立风沙工程和风成地貌的数理理论模式。这样, 一方面可以解决实际中遇到的问题, 另一方面加强风沙物理学的自身理论建设。

#### 参考文献

- 1 Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. Methuen & Co, Ltd. London, 1941
  - 2 Chepil W S, et al. J Soil and Water Conserv, 1962, 17(4): 162~165
  - 3 兹纳门斯基 A M 著, 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题. 杨郁华译. 北京: 科学出版社, 1958
  - 4 Cole G W, et al. Tran. of the ASAE, 1985, 28(4): 1106~1124
  - 5 董光荣, 等. 科学通报, 1987, 4: 297~301
  - 6 河村龙马. 东北理工研究所报告, 1951, 5: 3~112
  - 7 朱震达. 地理集刊, 北京: 科学出版社, 1963, 5
  - 8 Иванов А. Л. Физические Основы Дефляции Песков Лустыни И ЗД, ЫЛЫМ Алшхабад, 1972
  - 9 凌裕泉, 吴正. 地理学报, 1980, 35(2): 174~181
  - 10 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987, 61
- (中国科学院兰州沙漠研究所邹学勇博士撰; 董光荣审)

**地貌灾害** geomorphy calamity 山区的陡坡和沟谷在重力作用下, 由于其它触发因素的影响而发生的滑坡、崩塌和泥石流等地貌自然现象, 具有强大的破坏力, 往往淹埋村镇、摧毁厂矿、切断交通、堵塞江河、破坏农田和森林等, 造成严重的地貌灾害。因此地貌灾害的研究具有重要的实际意义。

滑坡、崩塌、泥石流等分布广泛。凡是构造运动频繁, 风化强烈, 雨量充沛的山丘地带, 几乎均有发生。就全球而论, 主要分布在南、北美洲的安第斯山地和科迪勒拉山系以及两者的山前区; 亚洲的喜马拉雅山区, 小亚细亚半岛上的山地以及日本的北海道

岛屿; 欧洲的阿尔卑斯山区, 巴尔干半岛地区, 比利牛斯山地和喀尔汗山以及非洲、澳大利亚的某些山地。分布最多的国家有前苏联、美国、日本、奥地利、瑞士、印尼、意大利、南斯拉夫、新西兰、印度、尼泊尔、巴基斯坦、法国、英国、秘鲁、智利和罗马尼亚等。中国幅员广阔, 山丘区占全国总面积的 2/3, 地质构造复杂, 岩性多变, 地震强烈, 加上季风气候, 以及几千年来人为活动的影响, 成为世界上这项自然现象最发育的国家之一, 特别是在西南、西北山区和青藏高原的边缘地带。

正因为处于活动状态的滑坡、崩塌、泥石流等破坏力强, 分布广泛, 对国家和人民的生命财产构成了极大的威胁。所以, 逐渐被许多国家所重视并积极开展科学研究, 采取防治措施。据现有资料, 目前对这项自然现象的研究, 正处于发展阶段。在国外, 前苏联的研究最早(始于 19 世纪中叶), 内容较广, 规模较大, 体系较完善, 成果较丰富, 暂时处于领先地位。日本 1966 年开始进行观测和定点研究, 起步晚, 但发展快, 在世界上占显著地位。阿尔卑斯山区国家奥地利、法国、意大利和瑞士等, 研究得比较早, 获得不少成果, 特别在工程建筑物物质结构和森林坡积物改良措施等方面比较突出。美国 1897 年就有报导, 但较多研究是从 20 世纪 60 年代开始, 现在正处于蓬勃发展时期。中国在 1949 年前, 山区人民虽有同这项自然灾害作斗争的经验, 但系统的研究长期处于空白状态。50 年代初, 随着山区经济建设的迅速发展, 研究工作才逐渐开展。中国科学院、交通、水利、矿山、城镇、农业、地质和高等院校等 10 余个部门及地方单位, 相继开展了调查研究、定点观测、模拟试验和防治实践, 在短短的 1/4 世纪内, 积累了丰富而珍贵的资料, 初步掌握了滑坡、崩塌、泥石流等的分布、形成、运动和发展的规律, 探索了一些行之有效的预测和防治措施。

滑坡是斜坡上的部分土岩体或其它碎屑堆积物沿斜坡内部一个或几个滑动面整体向下滑动的现象。美国每年因滑坡造成的损失达数亿美元。意大利北部 1963 年发生一水库滑坡,  $3 \times 10^6 \text{m}^3$  的滑坡体, 几乎填满了由 265m 高的拱形坝形成的水库, 掀起的巨浪高出坝顶达 100m 左右, 洪水倾泻而下冲毁了很多村庄, 造成近 2 000 人死亡。中国 1955 年 8 月 18 日晨宝鸡附近大雨滂沱, 陇海铁路发生大滑坡, 半小时内把铁路推移了 110m; 1967 年四川雅砻江某地发生崩塌性滑坡,  $6.8 \times 10^7 \text{m}^3$  的土石间刻间滑入河谷, 形成高达 300m 以上的天然堆石坝, 雅砻江被堵断 9 天 9 夜, 溢流溃坝后, 形成 40m 高的洪水, 冲毁了下游的一些农田和房屋。一个发育完全比较典型的滑坡, 常有滑坡体、滑动面、滑坡壁、滑坡阶和滑坡丘等形体结构。沿斜坡边缘向下滑动的土石体叫滑坡体, 它的体积小的仅十几到几十立方米, 大型滑坡可达几百至几千甚至数亿立方米。滑坡体沿其滑动的面叫滑坡面, 滑动面大多由粘土夹层或其它软弱岩层所构成。滑坡体滑落后, 滑坡体后部与斜坡未动部分之间半圆形的陡崖面(呈  $60^\circ \sim 80^\circ$  倾斜)称滑坡壁。滑坡体下滑时, 因滑体各段移动速度的差异, 形成阶梯状的地面, 称滑坡阶地。滑坡体向前滑动时, 如前端受阻而隆起的小丘, 称为滑坡丘。一般认为在下列情况下容易发生滑坡, 即(1)古老的岩系, 经过多次构造运动的作用, 严重破碎;(2)坡地由页岩、泥岩、千枚岩等抗剪强度低、容易变形的岩石构成;(3)构造面(岩层面、断层面、节理面)的倾斜方向与山坡方向一致且斜坡角度大于构造面倾角时;(4)地下水和地表水浸湿坡面物质, 降低了粘聚力;(5)斜坡度介于  $20^\circ \sim 40^\circ$  之间以及地震诱发和人为破坏自然斜坡的稳定状态等。滑坡的发生与发展一般要经过蠕动变形阶段, 剧烈滑动阶段和暂时稳定阶段。当斜坡内某一部分因抗剪强度小于剪切力而首先变形, 产生微小缓慢的蠕动。以后变形逐渐发展, 形成滑动面, 滑体与滑床完全脱离而急剧滑动。经急剧滑动后, 重心降低, 能量消耗, 移速渐慢, 滑坡体趋于稳定。

崩塌是陡坡上的巨大岩土块或碎屑层, 突然破裂、急剧坠落并在坡脚形成倒石堆的现象。崩塌的运动速度一般为  $5 \sim 200 \text{m/s}$ , 体积由小于 1 立方米到若干亿立方米。山岳区域地上发生的巨大崩塌称为山崩, 它能产生巨大的气浪和气垫, 崩塌体甚至

可在气垫面上滑翔,跨越山谷,堆积在山谷的另一坡,故其破坏力很大,特别是峡谷区的山崩,常可毁坏森林,堵塞河道,破坏建筑物和村镇。如中国川藏公路1968年发生的拉日大塌方,由600m厚的岩体崩塌造成,对该公路破坏严重。崩塌一般发育在地势高差较大、坡度陡峻( $>45^\circ$ )、岩石裂隙(尤其是具有垂直节理的脆性块状结构的岩石)多、风化强烈或地表水对山麓冲刷、地下水的潜蚀、人工挖掘、地震等情况下。崩塌如果发生在河岸、湖岸、海岸则称为坍塌,发生在悬崖陡坡上的巨大石块,叫做坠石,若由地下溶洞、潜蚀穴或采空区所引起的崩塌,则称为坍塌。

泥石流是有大量泥沙、石块或巨砾等固体物质,突然暴发,历时短暂、来势凶猛、具有强大破坏力的特殊洪流。泥石流中泥沙石块的体积含量一般都超过15%,最高可达80%,其容重比 $1.3\text{tm}^{-3}$ 以上,最高可达 $2.3\text{tm}^{-3}$ 。由于泥石流粘度高、容重高,具有巨大的冲击力,往往在几小时甚至几分钟内将数十万、数百万乃至千万 $\text{m}^3$ 的固体物质,从山沟内搬到山外,以惊人的破坏力埋没农田森林,堵塞江河溪流,毁坏村庄城镇,冲毁路基桥涵和灌溉渠道。如1964年云南东川市石羊沟泥石流,就冲毁了汽车停车场和十几辆汽车。该省蒋家沟1968年8月10日的一次泥石流,堵江长达6个月,水位升高10m,中断交通达3个月之久。泥石流形成的条件集中表现在地形、固体物质供应和水源补给3个方面。陡峻的地形使位能变成动能,是泥石流运动的动力条件之一;地质构造复杂、断层交错、岩体破碎、新构造运动强烈、地震烈度大,成为提供泥石流松散固体物质的最基本因素;猛降暴雨、冰雪融化以及湖泊、水库溃决常为泥、石成流补给了水源。人类活动对某些泥石流的发生也有一定影响。由于暴雨降落的位置和沟谷内固体物质补给量变化等原因,泥石流的暴发往往有一定的间歇性。从总体来讲,在一定范围内,泥石流的活动规律受水文年度和周期、地震年度和周期等因素所制约,因此具有一定周期性的特点。泥石流堆积物,通常分布成连续的、在平面上与山谷底部地貌相适应的弯曲条带,其内部结构杂乱无章,颗粒分布无分选与定向。堆积物变干后不会解体,仍保持泥石流停止时的状态。根据这些特点可以研究泥石流扩展的界限、确定其最高流位等。

由中国科学院成都山地所编制完成的1:600万中国泥石流、滑坡分布图(中、英文版)于1992年正式出版发行。这是中国第1幅形象、直观的地图形式反映了全国性泥石流、滑坡分布状况的实用图。地貌灾害今后研究重点:(1)理论上运用相似的原理结合模拟试验进一步探索滑坡、崩塌和泥石流等现象的形成机理,进行运动力学(固体和流体)的有关参数计算,从而在更深的层次上揭示和把握其发生、发展的规律;(2)实践上在山区的有关地段,通过遥感技术、航空测量和定位观测等手段进行详尽的环境地质地貌调查,并拟定切实可行的评价方案和整治规范,为城镇建设、居民布点、工程设计提供可靠的第一手资料和科学依据,从“防”、“治”两个方面来避免危害。

#### 参考文献

- 1 中国科学院中国自然地理编委会,中国自然地理(地貌),北京:科学出版社,1980,301~312
- 2 陈光曦,等.泥石流防治.北京:中国铁道出版社,1983
- 3 杨景春.地貌学教程.北京:高等教育出版社,1985,9~25
- 4 叶米里诺诺娃 E. П. 著,滑坡作用的基本规律.铁道部科学研究西北所滑坡译译.重庆:重庆出版社,1986,1~158
- 5 延军平.灾害地理学.西安:陕西师范大学出版社,1990:142~168
- 6 Anderson M. G., Kemp. M. J progress in physical geography, 1991, 15: 29~52

(安徽师范大学博导副教授撰)

**雪线** snowline 是年固体降水的积累量等于消融量的平衡线,故也称平衡线,是地球上永久积雪的下限。雪线反映气候现象的空间概念,实际上是一个带。由于雪线能反映冰川地区

的气候变化,研究雪线的多年变化也可预测冰川未来的趋势。雪线的升降将改变高纬度洋面冰山和浮冰的分布界线,对航海有直接影响。雪线的变化会影响极地或高山、高原草场和森林的兴衰,冰雪融水径流量的变化,还会影响山岳冰川区的水力发电等。

1736年P. 布格(Buger)首先提出永久雪线的概念,而洪堡德(A. von Humboldt)强调指出这条界线的气候学意义。通常所说的雪线,是指平坦无遮盖地面上大气固体降水量与消融量相当的多年零平衡线,称为理论雪线(又称气候雪线)。实际上可见的雪线不同于气候雪线,它的位置取决于当年的气候状况,不同的年份其高度不同,这种雪线被称为地方雪线(即区域雪线)。1957年查理士威尔斯(Charlesworth)建议把气候雪线和地方雪线看作是同样的东西。另一些冰川学家(E. Matthes)认为气候雪线抽象,倾向于不用这个概念。由于冰川学的实践,还发现其它种类的雪线。在中纬度地区,山上积雪的下限会随夏季温度增高而逐渐上移,往往在山坡上看到一条黑白分明的界线,称为季节雪线。当季节雪线上移到一定高度时,便与地方雪线相重合。所以严格的说,季节雪线不是雪线,只是随季节变化而发生的积雪下限上下摆动的现象。在背阳峡谷、山间凹地等处,积雪或从高处崩落的雪崩堆积,在消融季节也不能全部融化,这种特殊地形造成的多年积雪下限称为地形雪线。在冰川学中还常用“粒雪线”一词,它是指冰川表面粒雪分布的下限,粒雪线以下冰川冰裸露。但是,粒雪线不是冰川上的零平衡线,冰川上物质纯积累与纯消融等于零的界线才是冰川上的雪线位置。

**雪线高度的确定** 一种是直接测定获得,而另一种是间接在室内推算求得。直接测定的雪线高度的资料准确可靠,但由于条件所限一般具有多年观测资料能用以确定稳定平衡线高度的冰川为数较少。研究者经常采用间接的方法,利用航空像片或大比例尺地形图来判断雪线高度,在像片上读出航摄时冰川上粒雪和裸露冰的分界线,实际是暂时粒雪线。从地图上判读平衡线,有:赫斯法(Hess, 1904),假定平衡线位于等高线由冰川消融区的上凸转为积累区的下凹处;霍费尔法(Hofer, 1897),假定平衡线位于冰川末端高度和山脊平均高度或边缘裂隙高度的算术平均值处;库罗夫斯基法(Kurowski, 1891),假定平衡线将冰川按面积平均分为积累区和消融区;列希顿克法(Lichtencker, 1938),假定平衡线在冰川表面或边缘首先出现冰碛的高度上。其中赫斯法最简便易行,但此法不适用源头有大量雪崩、表面不规则的冰川,地形图不够精确的也不宜应用。

**影响雪线高度的因素** 1956年特罗诺夫(M. B. Трoнов)的意见,将形成雪线的基本因素归纳为4类:气候因素或总的气候条件;山地气候因素,包括山脉和谷地分布、山坡高度和坡向以及相应的变化或变异;地形因素,它通过地形形态的微气候产生小的冰川作用形态(例如,冰斗冰川);冰川本身的影响。这些因素在每个地点的组合是极复杂的,实际上每个地点的雪线高度是这些因素综合影响的结果。一般说,气温低、降水量大,雪线位置就低,反之则高。远离海洋的高山区,降水稀少,其雪线分布较高,而靠近海洋的高山区,即使气温较高,由于降水较丰富,冰川上物质补给较充足,雪线分布也较低。在局部地方,一年中最热月份的气温和暖季持续时间长短等都会影响雪线的高度,水汽来源方向、湿度、云量、日照和风等间接影响雪线的高度。地形对雪线的影响表现在坡向、坡度和山地位置的关系上。阴坡接受太阳辐射比阳坡少,雪线相应比阳坡低,陡峻山坡不利于雪的聚集,雪线比平缓山坡的要高些。1888年里赫特(E. Richter)和耶格尔列涅尔(И. Егeрленер)注意到山岭边缘部分的雪线高度比其内部的低(山体效应),主要是越往山区内部,气流中的水分渐渐减少,降水也减少,而日照越增加。

**地球上雪线高度的分布** 1963年卡列斯尼克(C. B. Калесник)收集的由北而南纬度带上的雪线高度分布资料绘制的图与帕申格(Paщнгeр)计算出来的在不同纬度线上雪线平均高度绘制的图进行对比,两条曲线几乎完全吻合。从而看出,地球上雪线高度是从两极向赤道逐渐升高,但最高处不在赤道和热

带地区,而在副热带高压区。雪线最大平均高度是在南半球的亚热带,但最大绝对高度却是在北半球,如西藏内部,有在6 200 m 以上的雪线高度。南半球海洋面积大,雪线高度多比北半球低,南半球在南纬62°处的雪线已降至海平面的高度,而北半球只有个别地方(格陵兰岛东北部的克里斯琴太子地)的雪线触及海平面,而且这种现象还是发生在很高的纬度(81°N—82°N)带内,这个位置比南半球雪线降到洋面的相应位置更靠近极地(近20°)。

中国雪线高度的分布 1988年施雅风等研究结果认为,具有如下区域特征:(1)雪线高度具有明显的纬度地带性,雪线分布随纬度的降低而升高。若沿87°E作一断面,最低雪线出现在49°06'N的阿尔泰山仅2 800m,至44°N的北天山雪线升至4 000m左右,37°N的昆仑山北麓升至5 400m,34°N的青藏高原内部升至5 800m,至喜马拉雅山珠穆朗玛北坡的东绒布冰川,雪线高达6 200m;(2)青藏高原雪线分布以高原为中心,由边缘向内部呈环形的等值线图式分布,越向内部雪线高度越大,环形的中心在西藏的阿里地区,那里的雪线高达6 200m;(3)和同纬度外国山区雪线高度比较,中国雪线明显要高。中国雪线之所以特别高,主要是因为中国西部山地深居欧亚大陆腹部,远离海洋,降水较少;其次是由于青藏高原的热效应,相对东西两侧同高度自由大气气温比高原上高出很多,必然导致雪线抬高。

由于还不很清楚的某种原因,冰川对气候变化有较高的灵敏度。如亚洲中部冰川雪线普遍升高和物质平衡明显负值增长的趋势,指示气候暖干化,而阿拉斯加太平洋岸冰川伴随温度升高物质平衡正值增加雪线下降则指示了气候的暖湿化。青藏高原的气候变化比东部地区早若干年出现,则已为冰岩芯、树木年轮和气象站的观测资料所证实。所以在全球变化研究中,各国都加强了对雪线及冰川变化的监测,注意各地雪线波动对全球气候的响应和反馈,建立相应的冰—气关系模式,预报下世纪气候变暖条件下冰川、海冰的退化情况及其对水资源和人类生活的影响。

表1 不同纬度线上的雪线高度(m)(根据帕申格尔)

| 地理纬度(度) | 雪线高度(m) |      | 差值   |
|---------|---------|------|------|
|         | 北半球     | 南半球  |      |
| 70      | 600     | 0    | 600  |
| 60      | 1600    | 600  | 1000 |
| 50      | 2600    | 1100 | 1500 |
| 45      | 3000    | 1300 | 1700 |
| 40      | 3900    | 2200 | 1700 |
| 30      | 4900    | 4100 | 800  |
| 20      | 5200    | 5600 | -400 |

#### 参考文献

- 1 Flint R F. Glacial and Quaternary geology. New York: John Wiley, 1971, 892
- 2 卡列期尼克 C B. 著:冰川学概论. 丁亚梅, 等译. 兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1982. 28~41
- 3 施雅风, 黄茂祖, 任炳辉. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 1988. 11~18  
(中国科学院兰州冰川冻土研究所苏珍副研究员撰, 任炳辉审)

#### 冰川形成条件 formation conditions of glaciers

冰川是寒冷地区多年降雪积聚、经过变质作用形成一定规模和运动着的冰体。它的形成是在一系列外部因素和内部因素作用下,经过相当长的一段时间过程形成的。从外部条件看,寒冷的气温和丰富的固体降水,在一定的海拔高度和地形条件下才得以实现。从内部因素看,由雪的变质,经过粒雪化和成冰过程才形成冰川冰。冰川的存在与人类活动有着密切的关系,它既是全球环境的组成要素,又是重要的淡水资源,而且还是若干地区形成严重灾害的发源地。研究冰川形成条件,掌握它的规律,可以进一步利用它

和改造它,使其为人类服务。

对现代冰川的系统观测,始于1830年阿迦西(L. Agassiz)建立的世界上第1个冰川研究站。该站系统地观测了阿尔卑斯山的冰川,发现冰川中部流速最快,而向两侧以及源头和末端减缓。直到1849年汤姆逊(Thomson)在实验室中才证实冰川的流动。经过大量的观测研究,对冰川的认识开始成熟起来。1884年成立了国际冰川委员会。其他国家如意大利也相应成立了冰川小组。一些有影响的著作开始出现,1884年海姆(A. Heim)出版了《冰川学指南》。1976年克鲁泡特金(П. А. Кропоткин)著有《关于冰期研究》。1913年库克(J. P. Koch)韦格纳(A. L. Wegener)开创了大陆冰盖的研究,观测了成冰过程等。1920~1940年阿尔曼(H. Ahlmann)对北极群岛和斯塔地那维亚冰川变化与气候的关系作了经典研究等。上述研究和工作的奠定了对冰川形成条件的认识。

1939年卡列斯尼克(C. В. Калесник)提出,根据冰川是稳定的自然冰体的概念,可得出冰川首先是一定气候状况下的产物的结论。可以产生冰川的地区,以雪线为界。要了解冰川产生所需的条件,首先应该研究现代冰川存在的条件。1963年他又指出,从普通气候学的观点来看,冰川产生所需要的条件是:冬季或全年均有固态降水和低温,特别是夏季的低温,这样才能使每年都留下不融雪层。近年来各国冰川学家以雪线所在的温度和降水,代表冰川形成的气候条件。雪线是冰川上年积累量与消融量相等的零平衡线。积累主要取决于降雪,在夏季也降雪的前提下,可大体以年降水量为代表。消融主要在夏季进行,取决于辐射平衡和暖空气湍流热,其综合指标为温度,这里所说的温度不是年平均温度,而是暖季消融期温度,通常以夏季6~8月平均气温代表。1975年克林克(A. N. Krenke)和霍达科夫(Khodakov)分析中亚冰川消融与夏季气温的关系后发现,气温和消融期的持续时间以及辐射平衡之间存在着一定的内在联系。根据冰川区观测资料,获得任意冰川表面有如下经验关系: $a_1 = (T_0 + 9.5)^3$ 。1982年科特里亚科夫等(V. M. Kotlyakov 和 Krenke),根据国际水文10年中获得的大量资料,对上式进行了修正,得出如下平衡线处的经验公式: $a_m = 1.33(T_m + 9.66)^{2.85}$ ,式中, $a_1, T_1$ 分别为暖季消融(mm)和6~8月2m高处的平均气温(°C); $a_m, T_m$ 分别为平衡线处的 $a_1$ 和 $T_1$ 。修正后的公式在帕米尔和兴都库什计算冰川年消融量获得了较好的结果。几乎所有平衡线上夏季温度都是根据附近气象站地面或探空温度资料推算所得,困难在于正确地确定垂直温度梯度值,而在不同时间不同地区与从非冰川区过渡到冰川表面均有相当变化,从而增加了计算的复杂性。平衡线上的降水量主要根据考察者在冰川上实地观测结果,一般多采用测量雪坑中年层厚度估算面得。由于缺乏直接观测数据,不论平衡线上的降水值还是夏季温度值,多系间接推算所得的近似值。1989年施雅风等,根据中国西部与欧洲阿尔卑斯山区冰川平衡线的年降水与夏季消融温度资料,平衡线上年降水量出入于200~2000mm,夏季6~8月平均温度出入于-2°C~4.4°C,平衡线上年降水大体在500mm左右时,夏季平均气温在0°C左右,年降水增至1000mm时,夏季平均气温增至2°C左右,年降水量增大至2000mm时,夏季平均温度升至4°C左右。

具备了冰川形成的气候条件以后,地形对冰川的形成以至冰川的形态和规模等有很大影响。1963年C. B. 卡列斯尼克建议把雪线和雪线以上的山顶之间的高程差称为冰川作用正差,雪线与雪线以下的地形点之间的高程差称为冰川作用负差。冰川作用正差越大,对冰川形成越有利。1988年施雅风等总结中国山地冰川形成条件时认为,接近或低于雪线水准面的山地,一般不发育冰川。高出雪线400~500m的山地,只能形成小型的悬冰川或冰斗冰川,如祁连山冷龙岭的现代冰川。由于不同坡向水分和热量条件的差别,可能出现山地的一侧存在冰川,而另一侧则有缺失冰川的现象。高出雪线近1000m的山地,冰川的补给比较充足,使冰川向山谷低处长较距离伸展,就形成山谷冰川。高出雪线若接近2000m或更多时,将会形成支流众多、冰舌下伸更低的树

枝状大型山谷冰川。另外,山体的形态、位置对局部气候有相当大的作用。例如阴坡和阳坡、迎风坡和背风坡、和缓开展的谷地和陡峻狭窄的谷地等,都不同程度对雪的积累消融产生重大影响。在不利部位,如突出陡崖,尽管高出于气候雪线,雪仍无法积累,不能形成冰川。在有利的部位,如荫蔽的有利于吹雪或雪崩雪积聚的洼谷,虽然低于气候雪线数十米以至数百米,但仍然可能形成冰川,这里的地形雪线就远低于气候雪线。冰川向低处伸展的程度取决于平衡线以上流来的冰量,流来的冰量越充沛,冰川向低处伸展的能力就越强,冰川作用负差就越大。在正常状态下,积累区面积都大于消融区面积,积累区面积与冰川总面积之比,简称 AAR 值。在瑞士阿尔卑斯山,冰川处于稳定状态时的 AAR 值平均为 0.67。

积累在平衡线以上的雪如果不变成冰川冰,则山顶上只能有永久积雪,而不会有冰川。只有当年复一年地积累起来的雪经过变质作用形成冰川冰之后,在重力作用下沿斜坡流动,形成真正的冰川。1955 年舒姆斯基(П. А. Шумский)、1963 年卡列斯尼克等对冰川冰的形成进行了详尽的论述,认为积雪经过变质形成冰川冰的过程可以分为:雪的沉积过程;粒雪化;成冰过程。新降的雪花形态万千,但基本上是六角状雪片和柱状雪晶,其直径一般为 0.5~2.0mm,大的可达 5mm,新雪密度一般仅 0.01~0.1 g/cm<sup>3</sup>,最大可达 0.3g/cm<sup>3</sup>,孔隙度则达 67%~99%。新雪降落到地面后,经过一个消融季节未融化的雪叫粒雪。新雪的水分子从雪片的尖端和边缘向凹处迁移,使晶体变圆的过程叫粒雪化。在这个过程中,雪逐渐密实,经融化、再冻结、碰撞、压实,使雪晶体合并,数量减少而体积增大,雪晶间的孔隙减少,发展成颈状连接,称为密实化。粒雪化和密实化过程在接近融点的温度下,进行很快;在负温下,进行缓慢。当粒雪密度达到 0.5~0.6g/cm<sup>3</sup> 时,粒雪化过程变得缓慢。在自重作用下,粒雪进一步密实或由融水渗透再冻结,晶粒改变其大小和形态,出现定向增长。当密度达到 0.84g/cm<sup>3</sup> 时,晶粒间失去透气性和透水性,便成冰川冰。粒雪转化成冰川冰的时间从数年至数千年。冰川冰是大而形态不规则的多晶集合体。其密度,山岳冰川很少超过 0.9g/cm<sup>3</sup>,极地冰盖深处接近纯冰(0.917g/cm<sup>3</sup>)。上述过程在有些雪堆下部也形成冰,但不能运动的,则不能被称为冰川,而被称为雪溪。

冰川的大规模扩张和收缩将会影响到全球环境的变化,另外,冰川冰层中储存有许多连续记录下来的气候与环境变化的信息,这些都是人类需要了解 and 认识的,特别是过去冰川的发育环境和现代冰川形成条件以及演化过程等,均未被人类完全掌握。联合国教科文组织长期执行的国际水文计划(IHP)中,冰川是重要的研究内容。其主要目标是监测全球性的气候环境变化,冰、雪在其中的作用与其它圈层之间的相互作用及机制,特别是对水资源的影响。另外,各国也有相应的组织和研究计划,特别是随着高寒地区的开发以及对全球变化的研究,使冰川研究将有广阔的前途。

#### 参考文献

- 1 Шумский П. А. Основы структурного ледоведения, Москва: изд. Аносер, 1955, 239~395
- 2 Krenk A. N. Snow and Ice (Proceedings of the Moscow symposium, Aug, 1971). IAHS Publ. (104), 1975, 30~34
- 3 Kotlyakov V. M., Krenk A. N. Investigation of the hydrological condition of alpine regions by glaciological methods. IAHS Publ. (188), 1982, 31~41
- 4 卡列斯尼克 С. В. 著. 冰川学概论. 丁亚梅, 等译. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1982, 40~51
- 5 施雅风, 黄茂根, 任炳辉. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 1988, 20~25

(中国科学院兰州冰川冻土研究所苏珍副研究员撰, 任炳辉审)

### 中国冰雪水资源 ice melt water resources in China

是研究地球表面冰川、冰内、冰下、河冰、地下冰和积雪的水文现

象,内容包括冰雪的形成、积累和消融、产流机制、水文过程、径流时空分布规律、计算及其在河川径流中的作用。冰雪融水径流是高寒山区、中国西北干旱与半干旱区发展工农业和农牧业重要的水源之一。冰雪融水径流随着气候而变化,是可更新的水力资源。由于水是人类赖以生存和工农业发展的最基本要素之一,近期随着工农业的迅速发展和人口的不断增长,水资源研究引起世界各国的高度重视。冰雪水资源研究是冰川学和水文学的边缘科学。

1958 年,中国科学院首次提出“开发高山冰雪、改变西北干旱”的状况,在祁连山进行冰川考察和融冰化雪试验,增加河西灌溉水源。随后,在中国西部山区多处进行冰川考察和建立定位与半定位观测站,观测冰川、气象、水文等要素。国际水文 10 年期间,已在全球建立 60 多个冰川水文野外观测站,从建站时间上看,大体与中国相同。目前乌鲁木齐河上游的天山冰川站已成为中国唯一具有长系列、多学科、高山冰川综合性实验研究基地,为深入开展冰雪水文和冰雪水资源研究提供了有利条件,从冰雪水文研究有可能从定性描述冰川的分布、形态、类型特征发展到冰川作为水资源开辟了广阔的前景。侧重研究冰川储量、冰川融水径流、年内、年际变化及其水文基本特征的分布规律,同时合理利用水资源以生态和环境平衡为基础,以系统工程理论和综合方法进行宏观综合评价。对于寒区环境可能形成的冰川泥石流、冰川溃决洪水、雪崩等相应得到重视。80 年代初开始加强国际间交流与合作研究。根据国际冰川编目的要求,在中国系统进行了冰川编目工作。为适应中国国民经济建设的需要和针对全球气候变暖可能带来的后果,在全国范围内进行水资源现状(包括冰川水资源)的全面综合分析和评价,并列为国家重点研究项目之一。1985 年首次提出了中国冰川水资源的估算和评价(杨针娘, 1991)。近几年与瑞士苏黎世高级理工学院地理所在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川开展冰川、水文、气象合作研究;在祁连山黑河上游冰沟和天山站空冰斗与加拿大麦克斯特大学地理系开展了寒区水文研究,这标志着中国冰川水文学研究范围从冰川区扩大到整个高寒山区,应用遥感技术研究大尺度雪盖和融雪径流预报在黄河上游和祁连山中段取得可喜进展。

近期研究主要进展:(1)冰雪融水径流是中国西部山区河流水资源的重要组成部分。随着观测资料的积累,有可能以数理统计为基础建立以物理基础的冰雪融水径流模式。例如能量与水量平衡原理模拟乌鲁木齐河 1 号冰川冰雪融水径流模式(康尔泗等, 1992),提高到新水平。应用区域性地理的综合模式是解决现阶段估算高寒缺乏观测资料地区冰雪融水径流的重要途径之一。80 年代初,提出了利用冰雪融水径流模数具有随大陆度的增强而减小的区域分布特点,首次估算了中国冰雪融水径流量(杨针娘, 1988),及按山脉、水系的冰雪融水量,此外,国外还常以气温作为热量的指标和以度日因子法等估算冰雪融水径流。冰川是全球淡水资源的宝库。全球冰川面积为  $1.62275 \times 10^{10} \text{m}^2$ ,冰川储量为  $2.6041 \times 10^{10} \text{m}^3$ (K. P. Voskresensky, 1978),约占全球淡水总储量的 69%。中国冰川面积为  $5.8651 \times 10^7 \text{m}^2$ ,约相当于亚洲中部山岳冰川的一半。冰川年融水量为  $564 \times 10^9 \text{m}^3$ ,约占全国地表水资源的 2%,为中国西部包括新疆、甘肃、青海和西藏四省区地表水资源的 10%。冰雪融水在西部山区河流的补给比重是随着干旱度的增加而增大,从青藏高原外围的 10% 向高原腹地递增到 30%~40%。有些河流冰雪融水比重可达 50% 以上。冰雪融水比重达 25% 以上的西部山区河流约有 30 余条(杨针娘, 1991)。冰雪融水受制于气候变化,干而暖气候的,冰雪融水量大,低温湿润气候则相反。因此起到多年调节河川径流量的作用,使干旱年份河流不缺水,湿润年缓和了河川径流量偏丰程度。从面具有冰雪融水补给的河流,径流年际变化小,一般径流变差系数为  $C_v = 0.10 \sim 0.20$ 。

(2)中国西部地区河流不同程度承受冰雪融水补给。据河流不同水源的补给比重及其水文特征,西部山区河流可分为:冰雪融水型;冰雪融水与雨水混合补给型;融雪水型;雨水型和地下水

型。上述类型河流的径流年内、年际变化及其水文特征做了详细的分析和论述。气候变化对水资源的响应近几年引起学术界高度关注。“六五”期间,中国科学院兰州冰川冻土研究所开展了祁连山气候、冰川与径流变化及寒区水文研究,通过树木年轮、冰岩芯、水文气象资料的周期性、趋势性应用数理统计等方法探讨祁连山区气候、冰川与径流趋势变化预测,取得了一定进展(中国科学院兰州冰川冻土研究所,1992)。水量平衡是水资源研究的基础。从开展冰川区水量平衡研究(杨针娘,1991),逐步扩大到高寒山区水量平衡研究。开展了高山区降水不同降水观测仪器的对比试验,求得降水修正系数(杨大庆,1988),高山冰雪蒸发,陆面蒸发观测实验也取得了一定进展。在中国开辟了新的寒区水文学。这对于占中国领土四分之一的冻土覆盖区将具有深远意义,对寒区水资源的开发及其对水文环境的评价显示出积极的作用。

(3)冰川资源作为水资源对中国西部经济建设有积极的一面,但也应重视消极的一面,即寒区冰湖溃决洪水形成的冰川泥石流灾害。中国川藏公路多次受冰川泥石流袭击,1964年首次进行冰川泥石流考察(施雅风等,1964),随后于中巴公路喀喇昆仑山南坡(李斌,1980),中尼公路和叶尔羌河支流克勒青河等进行冰川溃决洪水考察与研究(张祥松等,1990),对公路交通发挥了积极的作用。

《中国冰川水资源》不仅是中国第1部科学专著,也是目前国际上第1本综合一个国家冰川水资源状况的科学论述。理论上重要发展,得到国内外专家的高度评价和肯定,冰雪水文研究从总体上已基本接近和达到国际先进水平。然而中国西部山区的面积大部是冻土覆盖区,目前冻土水文过程的研究处于起步阶段,需要进一步重视和积累野外观测资料,加强物理过程、能量与水量平衡研究及气候变化对寒区径流的响应,到2000年可望中国寒区水文研究接近或达到国际先进水平,填补本学科领域空白。

#### 参考文献

- 1 施雅风,等.科学通报,1964.542~544
- 2 李斌,等.喀喇昆仑山巴托拉冰川考察与研究.北京:科学出版社,1980.146~152
- 3 杨针娘.中国冰川概论.北京:科学出版社,1988.187~204
- 4 张祥松,等.喀喇昆仑山叶尔羌河冰川湖突发洪水研究.1990.38~47
- 5 杨针娘.中国冰川水资源.兰州:甘肃科学技术出版社,1991.1~152
- 6 康尔泗,等.乌鲁木齐河山区水资源形成与估算.北京:科学出版社,1992.148~165
- 7 祁连山冰川气候及径流变化监测与寒区水文研究专辑.北京:科学出版社,1992.1~47

(中国科学院兰州冰川冻土研究所杨针娘研究员撰)

### 地球上水分循环 earth hydro logic cycle

水是万物之源,也是自然界的经纬,循环是天地间的命脉。水分循环是自然界的物质交替、能量转换或再生,并使地球生机盎然、朝气蓬勃的生命线。水分循环的过程对自然环境的形成有重要的影响,并与人类生产活动及生活都有密切关系。其规模之大,遍及全球。因此,对水分循环的研究,既是水文科学的基本理论问题,又是解决全球水资源分布的实践问题。

人类对水分循环的认识有个过程,古希腊柏拉图臆测地下有一个大水库,是一切水的来源,大水库的水来回摆动,形成河流,汇入大海,通过地下通道海水又返回水库。古罗马建筑师M. V. P. 维特鲁维吸收了前人关于水文循环的概念,提出了一个包括雨水入渗形成地下水等比较完整的水分循环概念。

中国早在公元前400余年的《黄帝内经·素问》中就提出:“地气上为云,天气下为雨,雨出地气。”比较科学地描述成云致雨的水文现象。在战国时期《吕氏春秋·圜道》篇中指出:“云气西行云云然,冬夏不辍,水泉东流,日夜不休,上不竭,下不满,小

为大,重为轻,圜道也。”比较完整地记述了水分循环现象。唐朝柳宗元在注释屈原的《天问》时,撰写了《天对》,其中有一段关于水循环的问答。屈原在《天问》中指出:“九州安错?川谷何夸?东流不溢,敦知何故?”,柳宗元在《天对》指出:“东穷归墟,又环西盈。脉区土区,而浊浊清清,坟垆燥疏,渗漏而升。充融有余,泄漏复行。”这样精辟的水分循环的理论,属世界上较早提出的。法国P. 佩罗在1674年的《泉水之源》一书中,把观测的年降水量与塞纳河的估计流量作了比较,得出塞纳河年径流量是降水量的1/6的结论,这个科学的定量概念的提出,被公认为现代科学水文学的开始。

20世纪以来,世界上许多科学家,都注意水分循环的理论和实践中各个循环因子数量计算方面的研究。例如李沃维奇(M. I. Lvovich)、布得科(M. I. Budyko)、加里宁(G. P. Kallnin)等,对水分循环的研究作出重要的贡献。他们发现大洋和大陆水汽在陆地降水形成中所起的作用。同时,利用世界各地水文、气象站网和边缘台、站的观测资料,用科学的方法进行水量的运算,以及参与水分循环的蒸发、降水和径流量的运算,成果是巨大的。

地球上的水在太阳辐射和重力作用下,以蒸发、降水和径流等方式,进行周而复始的运动过程,称为水分循环,又叫水循环或叫水文循环。太阳辐射和重力作用是这一过程的动力。在常温条件下,水的3态转化特性是产生水分循环的内因。水分循环的空间范围,上至地面以上平均约17km的对流层顶部,下至地面以下平均约1km深处。水以各种形态往返于大气、陆地和海洋之间,形成巨大的不停地、连续地运动,不断改变其地理位置和物理状态的动态系统。水分循环发生区域不同,分3种形式:(1)海陆间的水分循环 又叫大循环,或外循环。这一过程是由海洋表面蒸发的水汽,有一部分通过气流被输送到陆地上空;由陆地表面各种水体通过蒸发、植物蒸腾进入大气,在适当的条件下,大陆上空大气中的水汽产生凝结,以降水的方式降落陆地表面,这些水量部分被蒸发;部分渗入土壤,岩层裂缝中形成地下水;部分暂时停蓄在低洼处;较大部分形成地表径流,汇集河水与地下水后,又回到海洋。(2)海上(或陆地)内循环 是从海洋(或陆地)表面蒸发的水分,进入大气后凝结,以降水的方式返回海洋(或陆地),其过程只在海洋与海洋上空(或陆地与陆地上空)范围内进行,称为海上(或陆地)内循环。(3)内陆水分循环 这一过程是降落到大陆的水,一部分返回海洋外,另一部分降水被蒸发,这蒸发的水汽被输送到距海较远的陆地上空,以降水的方式降落,部分形成径流回海洋,部分从陆面再蒸发,继续向内陆进行循环,降落、蒸发、再降落、再蒸发,辗转深入内陆,愈向内陆,水汽含量愈少。在大陆内部,地表所含的水分均可被蒸发,少量的大气降水消耗于荒漠中。很少能形成地表径流,也就是地表水分不再回海洋,而由海洋输向大陆内部上空的水汽,却参与内陆水分循环。

水分循环过程中使水分得以交换,各种水体的水也不断得到更新。其更新的速度用更新周期表示,也就是水体的静态储量与年动态水量之比。各种水体更新周期不同,如下表:

| 水体名称      | 更新周期    | 水体名称 | 更新周期 |
|-----------|---------|------|------|
| 两极冰盖永冻土底冰 | 10 000a | 沼泽水  | 5a   |
| 世界大洋      | 2 500a  | 土壤水  | 1a   |
| 山地冰川      | 1 600a  | 河水   | 16d  |
| 深层地下水     | 1 400a  | 大气水  | 8d   |
| 湖泊水       | 17a     | 生物水  | 几小时  |

(据 M. I. Lvovich 1970 年)

关于全球的水分循环研究,从20世纪50年代就绘制出“全球水分循环和物理图像”。中国郭敬辉等计算了中国的地表径流及其要素的数值。60年代,一些国家计算了本国局部地区某一时段的水分循环各要素数值。中国科学院地理所等单位,对中国的水汽输送及大陆上空的水汽含量进行了分析和计算。

进入70年代,随着天气监测网的建立,建有大约6万个测站,还有大量的水文站等,新的观测手段的运用,资料精度明显提

高,电子计算机的利用,对7大洲、4大洋的水储量及水汽含量的分布数值,以及南、北半球沿纬度、垂直高度0~7km范围内水汽输送量等数值,各种水体覆盖面积、水的储量等数值进行大量的计算、研究和分析,并进行水分循环更新周期的研究。因此,全球水资源总量才得出准确的数据。70年代末期中国进行全国各流域水资源调查与评价,并对水分循环各要素如降水、蒸发和径流等进行研究和计算。80年代初,国际水文、气象组织都确定水分循环为重要的研究课题,开展了科学研究方面的国际协作。中国科学家计算了中国大陆上空的水汽含量,平均年水汽输入量、输出量以及水汽输送相关的降雨量。1984年还编制了《中国气候图集》。

近10多年来,水分循环的研究经历了2个阶段:第1个阶段的研究与水资源的评价工作紧密相连。随着现代工、农业生产的发展与人口激增,不少地区出现了水资源紧缺的局面,这促使人们对世界以及本国水资源的储量,水的再生能力有个量的认识。如前苏联的《世界水平衡和地球水资源》一书使人们了解了世界水资源的储量,海陆间水分交换量,以及不同形式水分循环更替的时间,对研究世界气候变化也有很大意义。第2阶段将水分循环的研究与气候变迁相连。人们对大气化学成分的变化,尤其是二氧化碳增加产生“温室效应”日益关注。如加拿大和美国先后用水文随机模型、概念性模型研究了水资源系统对气候变化的敏感性。这项工作有较大的实践意义,世界气象组织已列为特殊课题进行研究。

现阶段,对水分循环的研究,已超出了对它的平均状态研究,而与旱涝等极端情况下水分循环的变化相连接。但目前限于对某些物理过程理解得不够,对这种模拟的水平较低。当前国内、外对水分循环研究的热点为:(1)对水分循环要素及其计算的研究。对一个所研究的大陆单元来说,从海上和邻近大陆上蒸发的水汽输入后,进行再分配的方式,可以求出水分循环的各要素,从而得到一系列反映水分循环特性的系数。还可利用已有资料进行大陆单元水汽输入量和输出量及其大陆降水量的计算。(2)对水分循环与气候变化的研究。大气中的二氧化碳含量的增长,对全球气候和水分循环变化有影响。科学家们开始考虑是否能定量地估算未来气候变化对水资源系统的影响。水资源系统对气候的敏感性是指水资源量的变化对气候变化反映的大小。1983年J. Schaake及J. Nemece用确定性模型研究气候变化对径流的影响。

#### 参考文献

- 1 UNESCO, World water balance and water resources of the earth, 1977, 50~77
- 2 Schaake J, Nemece J. Hydrological sciences Journal, 1982, 9: 27~30
- 3 全国水文情报网. 水文水资源译文集(第3册). 武汉, 长江水利委员会水文局, 1985. 26~44
- 4 中国大百科全书(大气科学、海洋科学水文科学卷). 1987, 724~725
- 5 孙德佩. 地球. 北京:地质出版社, 1988. 1~32
- 6 刘春霖. 水文. 北京:水力电力出版社, 1989. 250~531  
(河北师范大学李慧珍副教授撰;李增广审)

**水量平衡** water balance 是质量守恒定律在水文学上的应用,即在给定任意尺度的时域空间中,水的运动(包括相变)是连续的,遵从物质守恒,保持数量上的平衡。

水量平衡是水文学的一个主要课题,是解决水文学中重大理论和实践问题的手段之一,根据水量平衡研究,有可能对水资源及其在人类活动影响下的变化进行定量评述,对湖泊、河流和地下水的水量平衡研究,将为水资源合理利用、调控和时间、空间上再分配(如跨流域调水、大型水利工程、河流流量控制等)的水利工程提供水文基础,同时对区域经济发展、工农业发展、城市规划等提供理论依据。

水量平衡对水文循环的研究亦极为重要,利用水量平衡资料对一个水文系统中不同时期的各个水源进行比较,可确定它们对水情变化的影响程度;再者,对各个水量平衡进行的计算和这些要素在水量平衡方程中之相互关系的初步分析,有可能判别水文测站分布上的不足,发现测量中的系统误差,同时,研究水量平衡有助于从已知要素之间的差值中间接求得未知的水量平衡要素,如通过降雨和径流差值可计算流域的长期蒸发。

通常水量平衡方程的入流部分包括降水量( $P$ ),即实际降到地面的雨量或雪量、从区域外进入本流域或水体的地表水和地下水入流量( $Q_{in}$ 和 $Q_{in}$ ),方程式的出流部分包括流域陆面及水体表面蒸发( $E$ )和从本区域或水体流向外区的地表水和地下水出流量( $Q_{out}$ 和 $Q_{out}$ ),所有水量平衡要素都易于发生测验误差和估算误差,即误差项( $\eta$ ),因此,任何水体、任何时段的水量平衡一般形式为:

$$P + Q_{in} + Q_{in} - E - Q_{out} \pm \Delta S \pm \eta = 0$$

按系统的空间尺度,大至全球,小至一块陆地、水域或从大气层到地下水的任一层,均可根据上式写出不同的水量平衡方程,根据具体流域的水文地理特征,有的项要删除,有的相则需详细分解,全球水量平衡方程,对全大陆和全海洋分别为:

$$\pm S_C = P_C - E_C - R \quad \pm S_M = P_M - E_M + R$$

其中 $P$ 、 $E$ 、 $R$ 分别为大陆(脚标为 $C$ )和海洋(脚标为 $M$ )降水量、蒸发量与径流量。 $P/E$ 和 $R$ 为水量平衡的主要要素。

前苏联李沃维奇(M. I. Lvovitch)在一般水量平衡方程基础上,提出了六要素水量平衡方程组,即:

$$P = S + G + E \quad R = S + G \quad W = P - S = G + E$$

其中 $P$ 、 $R$ 、 $E$ 同前, $W$ 为地区湿度, $G$ 为地下径流, $S$ 为地表径流,根据上述水量平衡方程组可求得地下水补给系数 $K_g = G/W$ 和蒸发系数 $K_e = E/W = 1 - K_g$ 。李沃维奇认为水量平衡一般式的最大缺陷是没有反映出土壤水在水量平衡中的巨大作用。六要素水量平衡将径流量分为地表径流和地下径流,引出地区湿度 $W$ ,进一步揭示水循环的本质,在水文学、土壤学、农学、地理学上都有重要意义。

在1965年国际水文10年(IHD)协调委员会第1次会议上,组建了世界水量平衡工作组(后来改为水量平衡工作组),其职权包括对水量平衡计算方法提出指南,水量平衡工作的第一步是提出一个计算平衡各要素的方案,这项工作首先设立在前苏联国立水文研究所和国际水文10年前苏联国家委员会,由阿柳维巴夫(V. A. Ouryvaev)指导的“水量平衡要素计算方法概要”的论文(1967)经工作组通过,并于1967年提交协调委员会第3次会议。从1965年到1967年起,世界各国对水量平衡的研究都重视起来,到1970年起,在联合国教科文组织(UNESCO)的130个成员中,已有104个成立了国际水文10年国家委员会,1970年7月在英国召开世界水量平衡大会,来自40多个国家的250余名代表参加了此次大会,相互交流了各自的研究成果,会议出版了论文集3册,不仅涉及到各水量平衡要素的计算,各大洲、各个国家、区域的水量平衡,而且涉及海洋、冰川、湖泊、地下水、土壤水等的水量平衡,同时还涉及到一些特殊地域的水量平衡,如喀斯特地区、森林、灌溉农田、岛屿等的水量平衡。1974年前苏联国际水文10个国家委员会出版了World Water Balance and Water Resources of the world一书(俄文版,英文版,1978),这是一部对第1个国际水文10年(1965~1974)研究成果的总结,书中不仅对水量平衡计算方法提出许多建议,而且对全球、大陆、各大洲水量平衡进行了估算,书中的定量数据至今仍是国际上的权威性数据。

中国水量平衡研究紧跟国际动态,在全国水量平衡基础上,各大自然区、各省、市、自治区,乃至各县都进行水量平衡研究,为工农业生产提供了基本依据。

近年来,水量平衡问题在学术上和实践上显得愈来愈重要。例如,随着人类社会工业化,大量使用化石燃料,空气中 $CO_2$ 等温室气体浓度增高,造成全球性气候明显变暖,其对全球水文循

环、区域水文情势都将产生明显影响。而水资源又与人类生活息息相关,为此国际水文科协(IAHS)、世界气象组织(WMO)、联合国粮农组织(FAO)等许多国际组织都重视这一领域的研究,IAHS阶段四(1995~2004)的研究主题便是“环境变迁中的水文学研究”。

人类的各项活动不仅影响水量平衡结构,区域水文情势,对工农业生产产生影响,而且水量平衡又是水文科学的基本依据。现今在人类活动对水文情势影响研究的主要模型乃是水量平衡模型或源于水量平衡模型。水量平衡与能量平衡方程联立,即水热平衡是现代自然地理学的主要研究方向之一,此外,水量平衡也是盐量平衡、沙量平衡等的基础。

#### 参考文献

- 1 Sokolov A A, Chapman T G. An International Guide for Research and Practice. The Unesco Press, 1974
- 2 Symposium on World Water Balance (1~3). IAHS Publication 92~94
- 3 World Water Balance and Water Resources of the Earth. Unesco, 1978
- 4 左大康主编. 现代地理学辞典. 商务印书馆, 1990

(中国科学院、国家计划委员会地理研究所  
傅国斌助理研究员撰)

**应用水文学** applied hydrology 是水文科学的一门分支学科。运用水文学和有关学科的理论和方法,研究人类活动所引起的各种实际水文问题的解决途径和方法,为水利、电力、交通、城市发展和环境保护等工程建设提供水文数据和水文预报服务;为农业、林业和国土整治规划提供水文依据,具有重要的理论和实践意义。

应用水文学起源于20世纪初,1914年A. 黑格第1次用正态机率选配频率曲线,1924年福斯特(H. A. Forster)完整地提出借用英国皮尔逊(Pearson)Ⅲ型(P-Ⅲ)频率曲线的分析方法把机率论和数理统计的理论和方法引入水文学,把水情要素与它们的机遇联系起来,为预估水利工程未来运行期间可能出现的水文情势开辟了道路。1932年谢尔曼(L. R. K. Sherman)提出单位线,1933年霍顿(R. E. Horton)建立蓄满产流和超渗产流理论,1935年麦卡锡(G. T. McCarthy)等提出的流量演算技术等,在根据降水过程来计算流量过程和洪水演进计算方面取得了开拓性进展。1938年奈斯德(F. F. Lesder)提出了综合单位线,为无水文资料地区进行水文计算开辟了途径,随后克拉克(E. O. Clark)、纳什(J. E. Nash)柯勒(M. A. Curer)等在单位线、各种水文要素的综合分析和径流调节的理论方法方面的研究进一步发展并丰富了上述内容。在此期间,柯勒等合著《应用水文学》,D. 姜斯(Jones)著《应用水文学原理》;美国土木工程师学会编著《水文学手册》等陆续相继出版,阐明了应用水文学的理论和方法,系统总结了这一时期的成就,标志着应用水文学已成为一独立的学科,其研究现状包括工程水文学、都市水文学、农业水文学、森林水文学等分支学科。

**工程水文学** 主要包括水文计算、水文预报、水利计算3个组成部分。水文计算是以概率论和数理统计的原理和方法,寻找出自然界各种水体水文现象发展变化的规律,正确估计各水文特征值的数量大小、时间上的分配过程和地区上的分配形式,从而为水利工程规划设计和其它部门提供设计暴雨,设计洪水,设计年径流、排涝和泥沙等有关水文数据。水文预报是以分析和利用各种水文现象的变化规律为依据,对未来长期水文现象的变化作出正确预报,被称为防洪抗旱的耳目和参谋。1954年中国国防洪抗旱指挥部成功地为长江流域、淮河流域作出特大洪水的预报,保证了武汉市、荆江大堤和里下河地区数百万农田和数千万人民生命财产的安全。水利计算是根据国民经济各部门的要求来运用各种水文现象的变化规律,研究水利资源综合利用中的规划设计和经济效益论证,管理运用中的优化调度和对环境影响评价

的理论和计算方法,特别是水资源开发利用中系统分析的理论和方法,以达到改造自然、合理开发利用水利资源的目的。

**都市水文学** 又称城市水文学,主要研究城市中人与水的相应关系。城市供水是经济发展的基本因素,中国北方,包括北京、西安、天津、青岛等都曾出现缺水紧张的局面,北京为此曾有迁都的动议,天津市从1980年9月至1981年5月的9个月中,因缺水而造成经济损失将近1000亿元。工矿企业各种废水大量排入河道或渗入地下造成水体严重污染,全世界每年有6亿多人由此生病,近千万人死亡,可见城市环境保护与城市生态的研究,水是中心问题之一。城市水文学的研究内容是多方面的,其热点主要有:(1)可供城市利用的地表和地下水资源的数量与质量评价,尤其是各种不同保证率可利用水资源的数量和质量的评价;同时要科学地预测社会经济不同发展阶段的用水需要量和供需矛盾,为水资源的合理开发利用和科学管理指出方向,使城市供水规划更加科学化。(2)提供城市地下水资源的合理开采方案,以防止发生不均匀沉降。(3)查明都市化对暴雨洪水径流形成的加剧和由污染引起水质剧烈变化的原因,为城市的防洪、排水系统和环境保护的规划设计提供科学依据等。

**农业水文学** 主要研究水分、土壤、作物、大气之间的联系,具体研究内容是:降水、地表水、土壤水、地下水动态过程对农作物生态的影响,旱涝时土壤盐动态,尤其是地下水埋藏深度与作物根系的发育、土壤次生盐碱化的关系;各种农业措施所产生的水文效应等,以便更有效的协调水分、土壤、作物、气象的综合作用,为合理灌溉、保墒抗旱、防治涝渍和减少水土流失提供依据。

**森林水文学** 主要研究森林生态系统中水文过程和森林水分循环相互影响。中外学者就此内容进行深入研究,但所取得结论各不相同,有过激烈的争议,目前无法定论。一部分学者认为森林会减少河川径流量,其根据是森林具有比无森林地区高出10倍以上的蓄水功能,简称“水库效应”或“绿色水库”,这就是森林涵养水源作用。如果森林过度砍伐破坏,就会使其失去涵养水源的作用。另一部分学者则认为森林会增加河川径流量,其根据是在太阳辐射、大气环流、地形条件相同情况下,森林地区比无森林地区可以增加降水量,尽管森林可以储蓄一部分降水,但最终仍补给河流,也就增加了河川径流量;森林一旦遭到破坏,就会减少降水,引起干旱。中国许多学者70~80年代在长江流域和黄河流域曾就这一课题进行过研究,结果在长江流域有林的地区河川径流量大于无林地区河川径流量,但在黄河流域却相反,有林地区河川径流量小于无林地区河川径流量。所以说,森林对河川径流影响的实质都具有除害兴利的特殊作用,其表现在森林可以改变天然降水的分配比例和调整天然降水流出森林地区的时间两个方面,从而起到蓄水、保水、保土的作用,削减洪峰流量,增加枯水流量,使河川径流的年内分配更加均匀。森林水文学的研究方法多以野外试验为主,包括标准流域法、单独流域法、并引流域法和多数并行流域法,无论那种方法均可同时进行水量平衡各分量(降水、蒸发、截留、径流等)的单项观测和综合分析。

由于应用水文学是紧密与人类活动相联系的,直接为生产提供多方服务,其研究领域和技术不是单一学科所能解决的,需要多学科的合作与配合,因此应用水文学的发展趋势,必然是以研究水为核心,在不同的科学技术领域内发展成相应独立的分支学科,例如环境水文学、土壤改良水文学、供水水文学、风景水文学等会相继兴起,并在生产实践活动中表现出很强的生命力。目前应用水文学的研究手段正在不断改善,室内物理模拟和计算机数学模拟正在兴起,大流域的统计分析正在进行,新兴的现代技术如遥感、核技术和电子计算机采集数据等手段被采用,无疑将使应用水文学的研究工作提高到一个新水平。

#### 参考文献

- 1 林期雷 R K. 等. 工程水文学. 刘光文译. 北京:水利出版社, 1981, 204~226

- 2 中野秀章, 森林水文学, 李云森译, 北京: 中国林业出版社, 1983, 108~175
- 3 Novatry V, et al. Jour of NPCF, 1985, 57(4)
- 4 金光炎, 城市水文学, 北京: 水利出版社, 1989, 28~112
- 5 陈祖明, 地理学报, 1992, 47(1)

(安徽师范大学周世术副教授撰; 孙毓飞审)

**河流水文学** river hydrology 亦称河川水文学, 是陆地水文学的分支学科之一。研究河流的水文现象、过程以及基本规律, 为防治洪涝灾害和河流开发利用, 提供河流水情及河水资源等基本资料, 在国民经济建设和日常生活中具有重要意义。

世界上研究河流的科学起始很早, 中国和埃及是进行水位观测最早的国家。公元前约 22 世纪, 中国传说中的大禹治水, 已“随山形木”(立木于河中), 观测河水的涨落, 此后战国的李冰设立都江堰中的“石人”, 隋代的石刻, 宋代的水则碑等都标志着对河水的观测是不断进步的。公元前 4 世纪, 印度首先开始雨量观测, 中国于秦代就有了呈报雨量的制度, 至 1247 年就有较科学的雨量器和雨深、雪深计算方法, 明代的刘天采用“乘沙量水器”测量黄河水中泥沙的数量, 成书于公元 6 世纪初的“水经注”中记述了当时中国境内 1 252 条河流的概况, 为当时的生产发展提供了重要的河流水文资料。1610 年意大利圣托里奥(Sttolio)首先发明了流速仪, 使河道的水流测量有了科学基础。1663 年雷恩(C. Nen)和胡克(R. Hooker)创制了翻斗式自计雨量器, 1687 年哈雷(E. Harne)创制测量水面蒸发量的蒸发皿, 使河流水文的测验技术得到迅速发展。1746 年中国在黄河老坝口设立了全国第 1 个正规水文站, 开始系统观测水位, 并进行汛期预报。1870 年埃处斯(T. G. Elise)发明了旋浆式流速仪, 1876 年意大利弗里西(P. Folins)著《河流水文测验技术》一书, 进一步总结了河流水文测验技术的经验。1874 年佩罗(P. Paie)率先提出水量平衡的概念, 这是迄今为止研究河流水文学的最基本理论。自 1738 年瑞典伯努里(Burnely)发表了著名的水流能量基本方程之后, 1778 年法国谢才(Sherce)提出了关于明渠中水流断面平均流速与断面形状、水流比降之间的定量关系, 即  $V = c \sqrt{Ri}$ , 式中  $V$  为断面平均流速,  $R$  为水力半径,  $i$  为比降,  $c$  为谢才系数, 其值的大小与河道糙率有关。1802 年道耳顿(J. Eolton)建立了研究水面蒸发的道耳顿公式; 1851 年 T. J 莫万尼(Morwanly)提出汇流和径流系数的概念, 并率先发表了推算最大流量的公式, 为河川径流形成的研究开辟了道路; 1879 年法国人迪布(Depew)首次提出河流中泥沙推移质运动的拖曳理论; 1931 年前苏联 B. M. 马卡韦耶夫(Макавпелъ)把流体扩散理论应用到含沙水流中悬移质分布规律的研究中去, 为研究河流的泥沙运动奠定了基础。至此, 河流水文学在学科内容、测量技术和基本理论等方面都已形成独立的科学体系, 成为陆地水文学的一门重要的分支学科。

从 20 世纪 30 年代以来, 谢尔曼(L. R. Sherman)的单位线方法、韦利卡诺夫(M. A. ВЕЛИКАНОВ)的等流时线的概念、马斯京根(Mars Jean)河道洪水演算方法、霍顿(R. E. Halton)降水向土中渗入的理论相继问世, 都进一步丰富了河流水文学的研究内容。在这期间, 经 A. 黑曾、H. A 福斯特等人的研究, 把概率论、数理统计的理论和系统引入河流水文学中来, 使水文变量(如洪峰流量、最高水位等)和它出现的机率联系起来, 为预估水利工程可能出现的水文情势开辟了道路。第一次世界大战后, 大量兴起的防洪、灌溉、交通工程和农业、林业乃至城市建设等, 使河流水文学在河水热动态、河流冰情、河水水化学和河口水文等方面的研究不断引向深入, 并开拓出新的研究领域。

中国郭敬辉一生致力于中国大江大河水文的研究, 50 年代就编制出中国主要河流的年径流图以及其它水情要素图件, 是中国河流水文学的先驱学者之一。中国刘克文于 1952 年在华东水利学院(河海大学)首创水文学系, 为培养中国高级水文工作者作出了杰出的贡献。他擅长水文分析与计算, 首先系统地把握数理

计理论与方法用于中国的水文分析与计算, 1961 年他所提出在中国进行水文分析与计算的基本原则与方法, 至今仍不失其指导意义。1958 年他主持长江三峡大坝的洪水计算研究, 首创用暴雨组合法推求三峡的可能最大洪水, 这一成果居世界前列。中国钱宁一直致力于黄河泥沙问题的研究。他对冲积河流的河型分类、稳定性和游荡性河床的演变特性提出了新的见解, 认为在含沙量大的河流中发育有分汉性河床, 床沙质的相对来量和河岸的相对可冲刷性是河型形成中起决定作用的、掣领全局的因素。他还提出“节点”新概念, 并以此论证了藕节状的平面外形在黄河下游河床演变的重要作用, 造成黄河下游河床淤高的原因主要是来自中游高含沙量水流源地的粗颗粒泥沙, 为根治黄河水患指明了方向。在高含沙量水流研究中, 他首创中性悬浮质和层移质等泥沙运动的新概念, 使中国的这一研究居世界领先地位。

河流水文学的研究内容主要有: 水系的流域特征; 河川径流的补给源; 河川径流的形成和运动; 河川径流水文情势的年内分配和年际变化; 河流泥沙的形成和运动; 河水热动态和冰情以及影响因素; 河水水化学成分的形成过程及地理分布规律; 人类活动对河流水情的影响和河流与环境的相互作用等。50 年代以来, 随着社会生产规模空前扩大, 人们逐渐认识到, 水已成为影响社会发展的重要因素, 水与人的关系已经由古代的趋利避害发展到现代较高水平的兴利除害的新阶段。河流作为自然界中与人类关系最为密切的水体之一, 被人们视为水资源的主体, 因此河流水文学的研究领域正在向着水资源最优开发利用的方向发展。由人类活动所产生的水文效应和这种效应的环境意义, 进而探讨水文分析的新方法和新途径, 以防止人类活动对水资源的开发利用朝着不利于人类生存环境的方向发展, 将成为河流水文学所面临的新课题, 越来越多地成为国际会议和国际合作的水恒主题, 为此河流水文学与环境学科的交叉学科正在孕育形成。

河流水文学获取水文信息主要通过: (1) 根据有关规范, 沿河布设一定数量的水文站网, 长期定期观测其水文要素, 并逐年编制水文年鉴; (2) 水文调查, 了解流域自然地理条件、历史洪水、枯水情况和人类活动; (3) 对有代表性的流域进行室内模型和野外试验, 进行水文要素的观测, 然后运用成因分析法、数理统计法和地理综合法来研究河流水文现象的基本规律。近数十年来, 科学技术使获得水文信息的手段和分析水文信息的方法有了长足的进步。遥感技术的应用可同时观测到大范围内、特别是人烟稀少地区的河流宏观水文现象; 核技术的应用使人们能够获得用常规方法无法取得的微观河流水文要素信息; 用现代先进设备的水文实验使人们有可能对河流水文现象的物理过程有更深入的了解; 水文模拟、水文随机分析、水文系统分析, 使人们研究河流水文现象的能力发展到新的水平; 电子计算机的应用, 使正在由人力和简单的机械操作, 发展到以电子计算机为核心的自动化系统。中国的南水北调东线工程、举世无双的长江三峡水利枢纽, 将标志中国能够成功地运用上述科学技术手段, 推动河流水文学的研究达到一个新的高度。

#### 参考文献

- 1 南京大学地理系, 中山大学地理系, 普通水文学, 北京: 人民教育出版社, 1978, 97~137
- 2 钱宁, 万兆惠, 泥沙运动力学, 北京: 科学出版社, 1983, 78~186
- 3 Yen Te Chow, Handbook of Applied Hydrology, New York: Mc Graw-Hill, 1984, 123~146
- 4 施成熙, 陆地水文学原理, 北京: 高等教育出版社, 1986, 46~157
- 5 Moussa O M, Smith S E & shrestha LR L. Science 1991, 17(3): 177~183

(安徽师范大学周世术副教授撰; 孙毓飞审)

**地下水文学** subsurface hydrology 是水文学中一门分支学科。根据能量守恒定律, 研究地下水的补给、径流、排泄、



贮存之间的数量关系;地下水与降水、地表水之间的联系和转化,建立地下水水量、盐量平衡方程式。地下径流是海陆间水分循环中一个环节,它是在重力和压力作用下所产生的渗流运动。研究地下水运动的基本方法,是根据达西定律推导出不同条件下地下水运动的数学物理方程,然后加以求解,就可预测由于自然和人为因素引起某地某时地下水位、水量、水质等水文要素的变化,建立各要素在时间和空间上的定量关系;建立观测站和均衡试验场,计算有关水文和水文地质参数,评价地下水的补给量、贮存量和允许开采量,监测地下水的水质变化,以防止地下水污染等。地下水是水资源不可缺少的组成部分,它的合理开发应在查明地下水资源数量和质量的基础上,进行统筹安排、合理规划;它的管理除制定规划外,还要健全管理机构,进行水资源的合理调配,规定开采地下水的技术要求,保护好水源,防止因抽水过多而产生的区域漏斗和地面不均匀沉降,或海水入侵,以保证长期安全供水等。因此地下水文学的研究,不仅有重要的理论意义,而且对解决好干旱半干旱地区的供水、排水和防治土壤次生盐碱化等方面都具有重要的现实意义。

16世纪以前,人们只局限于从井水或泉水的直接观察或推断来了解地下水。梅拉图(Maillart)曾认为地下有一个很大的洞穴,水可以从其中流出。中国的柳宗元在《天对》中曾记述降水渗入地下,蓄存于岩土空隙中,伴随蒸发、运动等现象。从17世纪到20世纪初,不少学者,总结出一系列关于地下水形成和运动的重要理论和方法。法国佩罗(P. Pale)研究了地下水毛细管上升现象,认为砂中毛细管水的上升高度小于粘上性;法国马洛特(E. Malot)测量了由雨水渗入补给的地下水水量,认为泉水是由降水补给的。1856年法国达西(H. P. Darse)通过大量实验,认为地下水在岩土空隙中流动,所受阻力比地表水流动时受到的阻力要大得多,其流动速度是非常缓慢的,属于层流,它的渗透速度与水头梯度成正比,这就是著名的达西定律,奠定了研究地下水运动的理论基础,1863年法国裘布依(Jubay)依据达西定律推算单井抽水时涌水量公式,又称裘布依公式。

$$\text{潜水时为: } Q = \frac{\pi K (2\delta\rho \cdot \Delta h) \cdot \Delta h}{\ln R/r}$$

$$\text{承压水时为: } Q = \frac{2\pi K \cdot \Delta h \cdot \delta}{\ln R/r}$$

式中 $Q$ 为单井开采出水量( $\text{m}^3/\text{d}$ ); $K$ 为含水层渗透系数( $\text{m}/\text{d}$ ); $\delta\rho$ 为抽水前潜水含水层厚度( $\text{m}$ ); $\delta$ 为承压水层厚度( $\text{m}$ ); $\Delta h$ 为抽水井的水位降深,即抽水前的水位与抽水时水位的差值( $\text{m}$ ); $R$ 为抽水井的影响半径( $\text{m}$ ); $r$ 为抽水井的半径( $\text{m}$ )。裘布依公式至今仍为地下水计算中最常用公式之一。从20世纪初至80年代,地下水文学逐渐从水文地质学发展形成一门独立的学科。1928年美国迈因策尔(O. E. Minchael)在研究承压水层的压缩性和弹性之后,首先提出地下水非稳定理论。1930年荷兰德赫莱(G. J. Derheland)用数学成功分析地下水渗过弱透水层的越流现象。1935年美国学者泰斯(C. V. Tyles)在此基础上,建立著名泰斯公式:

$$Q = \frac{4\pi T \cdot \Delta h}{W(U)}$$

式中 $T$ 为含水层导水系数( $\text{m}^2/\text{d}$ ); $W(U)$ 为泰斯井函数,其余符号与裘布依方程相同。

这一成就奠定了计算非稳定流单井出水量的理论基础。1937年美国马克斯特(M. axter)的《均匀流体通过多孔介质的流动》一书问世,用数学方法较系统地论述了地下水运动规律。1954年英国博尔顿(N. S. Bolton)完善了潜水完整非稳定流的方程式,从此随着电子计算机在地下水计算中的广泛应用,解析法、有限单元法、边界积分法等越来越多地纳入地下水的计算领域,解决许多复杂条件下的地下水计算问题,成为行之有效的计算方法。从1949年以后,中国地下水文学的研究,在地下水水位及开采预报、水文及水文地质参数的确定、地下水调蓄计算、地下资源评价等方面取得不少成果,尤其从60年代起在山东禹城建立地

下均衡试验场,对中国北方平原地区水量平衡的研究取得显著成果,利用井灌井排方法为改变黄淮海平原农业低产的贫穷面貌开拓了有效途径;在上海等大中城市采用井水回灌技术,有效地控制地面不均匀沉降。

地下水文学研究途径主要有两个方面:数学物理途径,根据地下水的水情和影响因素之间的物理联系,建立它们之间的定量关系;统计途径,根据大量的实测资料,用概率统计理论研究地下水各水情要素的统计规律。主要的研究手段有:钻探、地球物理勘探和遥感技术,可以查明含水层埋藏条件、空间分布规律;试验和观测,包括抽水试验、井泉水的长期动态观测和土壤水的观测等;地下水数学模型和地下水模拟技术,前者用来计算地下水的水位、水量、溶解质浓度和水温在时间、空间上的变化;后者用来研究地下水的实际运动;同位素技术,研究土壤水含量、地下水的起源、年龄和示踪运动途径等。

地下水文学发展历史只有几十年,还是一门年轻的学科,有些问题如降水、地表水和地下水在不同地区、不同条件下的转化关系还缺乏定量的评价方法;在区域范围内复杂的水文地质条件下正确划定含水层的参数尚无完整的办法;地下水污染物质的弥散、含水层温度场,地下水动态规律与预测等领域还有待进一步深入研究;地下水数学模型、电子计算机和电模拟技术用于地下水资源评价还处于起步阶段;地下水资源最优开发及管理等方面的研究尚未成熟,这些问题,是今后研究工作的方向。

#### 参考文献

- 王大纯,等. 水文地质学基础. 北京:地质出版社,1986. 176~236
- Mohan \* Munasinghe, Graundwater resource management and environmental Protection, 1991, 15(4): 302~312  
(安徽师范大学周世术副教授撰;孙毓飞审)

**沼泽水文** swamp hydrology 是陆地水文学中一个研究领域。通过沼泽水文的研究,对沼泽的形成、演变趋势和开发利用,查明区域水文特征以及沼泽对河川径流、湖泊的影响等方面都具有重要的意义。

目前国内外对沼泽的概念尚未统一,各国根据本国的自然地理条件,对沼泽的认识各有不同。美国威廉斯(Williams)从土壤角度出发,认为完全由有机质、即泥炭所组成的土壤就是沼泽。1934年前苏联召开的沼泽会议,决定符合以下条件方称为沼泽:地表长期过于潮湿,上覆有不小于30cm厚的泥炭,其上还有60cm厚以苔藓为主的植被层,如果没有30cm厚的泥炭,只称为沼泽化地带。中国科学院长春地理研究所长期致力于中国沼泽的研究工作,并于1983年出版专著《三江平原沼泽》,他们从中国形成沼泽的自然地理条件出发,认为沼泽应具有以下相互联系、相互制约的3个条件:地表多年积水,土壤处于过湿或饱和状态;其上生长有沼生植物、湿生植物,有泥炭的形成或积累,或者土壤具有明显的潜育层。他们提出水是沼泽形成的主导因素,也是沼泽中最活跃的组成部分,沼泽实际上是在多水条件下,各种因素相互作用的结果而形成的自然综合体,这一崭新观点,把中国沼泽的研究提高到一个新的高度。

湖泊、河流演变的过程中,在岸坡平缓的部位,湖水运动减弱,河水流速小,水生植物呈带状依次向湖心、河心推进,死亡残体在缺氧环境中形成泥炭。有些深水湖泊,陡岸附近因风浪影响小,湖水停滞,湖面的浮水植物根茎交织在一起形成浮毯,并逐年加厚沉入湖底,当堆积厚度达到与浮毯相接时,湖泊灭亡形成沼泽。在海滨潮间带,潮水作用把潮滩泥沙由低滩运至高滩,同时入海河水所带来泥沙亦不断沉积,使滩面逐渐淤高,一些耐盐的喜水植物侵入,死亡后的残体经久累积成泥炭,促使海滨沼泽形成。在坡降较小,区域范围较大草甸的洼地中,地面以下有稳定的淤泥层分布,造成地表水下渗受阻,通气条件恶化,喜湿植物侵入,形成很厚的草根层,土壤长期为水所浸渍,出现潜育层,在当地水热条件下,如果植物残体分解速度大于或等于泥炭累积速

度,则形成无泥炭沼泽;如果分解小于累积速度,则形成泥炭沼泽。在寒冷地区的针叶林和阔叶林混交林地带,因淀积层和水冻层阻碍地表水入渗而使地表过湿,喜水植物侵入,有利发育成沼泽。人为活动引起的沼泽,多为雍水建筑物使地下水位升高而使地表过湿,或耕地过量灌溉,排水不畅而使地下水位升高;或草甸过度放牧,破坏草场,蒸发量减少,表层土壤结实,渗透能力降低而造成长期过湿,这些因素都极有利于沼泽形成。沼泽水是地表水和地下水的过渡类型,具有一系列特殊的水文过程,其特征主要取决于沼泽的发育阶段、所含泥炭的物理性质和厚度等。

沼泽的补给源,一般包括地表水、地下水和降水混合补给。但在不同地区,这种补给有主次之分。如果在湿润地区,沼泽形成之初,混合补给可能性较大,泥炭积累很快,中部隆起,地表水和地下水难以到达,只接受大气降水补给,沼泽发育就进入高位沼泽;如果在干旱地区,地下水是沼泽的主要补给源,由于蒸发强烈,沼泽的发育受到限制,很少有泥炭的形成和累积,很难发育成高位沼泽,一般以低位沼泽为主。无论哪种沼泽,水都含在植物根层或泥炭中,一般为70%~90%,随泥炭分解度的升高而减少,当沼泽表层过于饱和就会出现水面积水,有时形成固定水体。

沼泽的持水能力很高,其大小取决于沼泽体的组成,泥炭的分解度和灰分含量,一般为300%~1000%(重量)。低炭分、弱分解的藓类泥炭具有很高的持水能力,它能保持大于本身绝对干重15~20倍的水量。沼泽水在个别时段可能会出现表面外流,大都是孔隙介质中侧向渗透的表层流,呈层流状况,从表层以下,泥炭逐渐密实,孔隙小,透水性能就要减弱,称为沼泽惰性层。

沼泽的水量平衡以蒸发量大、径流量小为特点,在多年的变化中,前者变化小,后者变化大。沼泽土的毛细管可以把大量水分输送到地面蒸发,沼泽生湿植物的蒸腾作用亦十分强烈,泥炭本身热容量小,导热性能差,表层热辐射所产生的热量不易向下层传导而使沼泽表层温度升高,有利于蒸发。所以高位沼泽的蒸发量与所在地区陆地正常蒸发量大体相当,而潜育沼泽和低位沼泽的蒸发量要大于所在地区陆地的蒸发量。

沼泽土的热容量比一般土层低,其表层温度容易增高或降低,加之沼泽土的导热性能差,因此表层在白天所取得的热量很难向下传导到深层,这就使得沼泽地区的冻结或解冻要比一般土层迟缓。如中国北方盛夏的7月,沼泽表层温度达20℃,而在50~60cm深处仍有冻结存在。

沼泽水的运动非常迟缓,水交替不迅速,使沼泽水富含有机质和悬浮物,生物化学作用强烈,水体浑浊,黄褐色,鱼腥味,硬度低, $H^+$ 浓度为 $3.162 \times 10^{-4} \sim 3.162 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$ ,腐植酸的含量从每升几毫克至百毫克变化。

沼泽对河川径流的影响尚无定论,但沼泽中经常可储存大量的水分,类似一个无形的蓄水库。当降水或地表水补给沼泽时,水分首先由草根层和泥炭层所吸收,一直达到饱和,沼泽的表面才有水从中流出,形成地表径流。因此沼泽中这种积水状况,对河川径流的影响,一方面可使产流减少,减少一次降水对河川径流的补给量,使其汇流历时延长;另一方面可削减河流的洪峰流量,甚至可以使当年的降水不从沼泽中流出,通过蒸腾作用耗于大气中。

沼泽一般都占据着低平丰水的地段,在自然状态下,它们不仅不能耕种,反而影响农、牧业的发展,在山区还要严重影响林木的更新,甚至成为交通的障碍。但沼泽并不是无用之地,合理开发和改造之后,可以变成良田、牧场和宜林地,因此世界各国对它的考察和开发都十分重视,在沼泽的形成、类型、分布规律和工农业上开发利用等方面,做了大量工作。目前研究热点包括:(1)沼泽荒地的合理开发与利用 提出改造沼泽地为耕地、牧场、林地是开发利用沼泽的基本方向,但必须注意解决好以下3方面的问题,一是确定排水定额,根据沼泽土的水分和通气状况,对不同地区、不同沼泽类型及泥炭层的厚度以及作物发育时期,采用正确的排水定额;二是提高灌溉温度,改善沼泽土的热力状况,保证

作物生长;三是采取混土压沙,大坑熟化泥炭等农业技术措施改善沼泽土的理化状况和养分不均衡的现象,以防止作物贪青不结实,确保高产稳产。(2)沼泽资源的综合利用 沼泽中生长的芦苇和蕴藏的泥炭都是宝贵的自然资源,泥炭不仅是很有潜在肥力的土地资源,而且也是制作土壤改良剂、作物激素,尤其是有机无机复合肥料的最有效、最经济的原料,泥炭及其化工产品在保证人类健康、消除环境污染方面具有特殊的功效;泥炭也是解决目前能源危机不可缺少的燃料资源。因此更进一步深入对泥炭综合利用的研究是今后的发展趋势,也是国际合作的重要主题。

#### 参考文献

- 1 中国科学院中国自然地理编委会,中国自然地理(地表水).北京:科学出版社,1981.89~216
- 2 中国科学院长春地理所,三江平原沼泽.北京:科学出版社,1983.97~234
- 3 邓授林,等.普通水文学.北京:高等教育出版社,1988.148~152
- 4 Цванов К. Е. Тигроулетозам, Тигроулетозам, Денитраг. 1990.123~146

(安徽师范大学周世术副教授撰;孙毓飞审)

**中国历史时期的水系变迁** 即历史时期内中国境内水系的演变及其规律。在自然地理诸要素中,水系和人类社会的发展有着最为密切的关系,中国的众多水系在历史时期内频繁和复杂的变迁,对中国的自然地理环境和人文地理环境都产生了深刻的影响。中国历史时期水系变迁的研究,是中国历史自然地理研究的重要内容,其研究性质属于自然科学。

中国历代注重水系分布及其变迁的记载和研究,并逐渐形成撰写、笺注和研究水经的传统。据现有文献,成书于战国和战国秦代之际的《尚书·禹贡》和《山海经·五藏山经》已记载了中国的主要水系。至公元3世纪前后出现了《水经》、《汉书·地理志》水道部分和《说文·水部》等叙述全国水系的专著和专篇,6世纪又有一部详述1000多条河流的不朽名著《水经注》问世,其后重要的著作有清代的《水道提纲》和《行水金鉴》等。此外,《史记·河渠书》、《汉书·沟洫志》、宋、金、元、明史和《清史》稿中的《河渠志》以及历代方志中的河川、水利志等都或多或少、或详或略地记载了全国或区域水系,世界上没有一个国家能有中国这样宏富的有关水系变迁的历史文献。而北魏酈道元的《水经注》无疑是最杰出的著作,不仅代表了中国古代水系研究的辉煌成就,而且是那个时期世界最优秀的地理著作,在中国近、现代水系变迁的研究中,也仍然产生着巨大的影响。

中国有众多的河流湖泊,其中最为重要、被历代学者研究较深入的河流是黄河、长江、海河、珠江、辽河、塔里木河、钱塘江等,湖泊有云梦泽、洞庭湖、鄱阳湖、太湖、滇池、罗布泊等,组成了遍布全国的大小水系。《中国历史地理·历史自然地理》的第四章《历史时期的水系变迁》(1982),对中国历史时期的水系变迁及其以往的研究作了高度的概括和总结。

在中国历史时期水系变迁的研究中,黄河水系变迁的研究占有首席地位。黄河是中华民族的象征,并以其善淤、善决、善徙的特性闻名于世。黄河下游决溢改道的记载,史不绝书,在有史以来的历史时期内,共经历了1500余次决溢改道,较大的有26次,其中包括最大的6次,是世界上历史变迁最大的河流。围绕河源考察、历代改道、历代治理等问题的研究著述延续不断。1949年前,林修竹的《历代治黄史》(1921)、沈怡和赵世暹的《黄河年表》(1936)、张含英的《历代治河方略述要》(1946),等论著对黄河变迁及其治理的历史文献作了初步总结。1949年后,黄河水利委员会、《黄河志》编委会作了大量的基础研究工作。学术界则以岑仲勉的《黄河变迁史》(1957)、钱宁和周文浩的《黄河下游河床演变》(1965)等著,以及近10余年来谭其骧的《西汉以前的黄河下游河道》(1981)、史念海的《由历史时期黄河的变迁探讨今后治理黄河的方略》(1981)、钮仲勋的《黄河河源考察和认识的历

史研究》(1988)、王质彬的《黄河史研究的回顾与展望》(1988)和郭豫庆的《黄河流域的地理变迁的历史考察》(1989)等文为重要研究成果。

长江是中国的第一大河,但其流域的开拓晚于黄河流域,其河性以及水系变迁也没有黄河突出和频繁,因此,有关长江水系变迁的历史记载和著述远少于黄河。但近代考古学和地貌学等学科的研究成果,以及现代遥感技术的应用,在相当程度上弥补了历史文献的不足,江源的考察活动自汉就已开始,明代徐霞客的《江源考》以金沙江为正源的观点纠正了以往岷山导江的错误,今人于希贤的《谈金沙江是长江上源的历史记载》(1979)叙述了这一问题。长江河床的演变是长江水系变迁研究的重点,1949年以来,长江流域规划办公室作了大量的基础研究,林承坤的《长江中下游河谷、河床形成的演变》(1960)、杨达源《近五年来长江中下游干流的演变》(1989)、张修桂《长江城陵矶—湖口河段历史演变》(1980)、《长江宜昌至城陵矶段河床历史演变及其影响——三峡工程背景研究之一》(1990)等研究成果引人注目。隶属长江水系的云梦泽、洞庭湖、鄱阳湖、太湖等湖泊与长江中下游河床的历史演变休戚相关,历来受到关注,近十几年主要研究成果有谭其骧的《云梦与云梦泽》(1980)、张修桂的《云梦泽的演变与下荆江河曲的形成》(1980)、《洞庭湖演变的历史过程》(1981)、卞鸿翔的《洞庭湖区地貌与环境变迁》(1988)、杨巧言等的《略论鄱阳湖地貌与环境变迁》(1988)、汪胡桢的《太湖之构成与退化》(1969)、魏嵩山的《太湖水系的历史变迁》(1979)、褚绍唐的《历史时期太湖流域主要水系的变迁》(1980)等。

海河是华北平原最大的河流,其河性及其水系变迁都与黄河密切相关。谭其骧的《海河水系的形成与发展》(1986)以及《海河巨变》(1973)、《海河》(1974)、《海河史简编》(1977)等著作是这一水系的重要研究成果。

珠江是南方大河,其水系变迁主要发生在下游,与历史时期人类对这一地区的开发有直接的关系。徐俊鸣的《珠江流域古代历史地理初探》(1959)、曹昭璇、黄少敏的《珠江水系下游河道变迁》(1977)和周源和的《珠江三角洲水系的历史演变》(1980)等文作了深入的探讨。

由于历史文献的缺乏,东北水系变迁的研究相对较弱,仅以辽河为主。罗玉堂、章文溶的《辽河三角洲平原地貌的特征和发育过程及其对农业的意义》(1963)和林汀水、陈连开的《辽河平原水系的变迁》(1982)等文作了探索研究。

塔里木河是中国最大的内陆河流,也是西北地区的主要河流,该水系变迁的特性受西北内陆自然地理环境变迁的影响,并与古丝绸之路有着密切的关系。由于历史文献的许多讹误,人们对该水系的认识,长期处于模糊的状态。1949年以后经过大量的勘察研究,才逐渐认清了一些问题。近期主要的研究成果有樊自立的《历史时期内塔里木河流域水系的变迁》和李江凤等的《塔里木河中游近200年的河床序列和变化》(1988)等文。隶属塔里木河水系的罗布泊,水域面积不断缩小是其历史变迁的总趋势和主要特点,30年代以来,中国大陆黄文弼(1936,1948,1981)、陈宗器(1936)、李长傅(1943,1957)、莫国金(1987)等以及港台学者陈正祥(1943)、王恢(1971)等做了一系列的重要研究,外国学者斯文赫定、项勒、斯坦因、艾汉丁顿、保柳睦美、长泽和俊等也对罗布泊作了许多研究。

钱塘江是中国东南的一条重要河流,以钱塘潮著称于世,此河春秋时期就已见于史籍,其水系变迁主要发生在下游。重要的研究有王国维的《浙江考》(1934)、陈吉余的《钱塘江河口沙坎的形成及其历史演变》(1964)、钱宁的《钱塘江河口沙坎的近代过程》(1964)和陈桥驿的《论历史时期浦阳江下游的河道变迁》(1981)等文。其河源的考定以吕以春的《钱塘江河源考证与源头的勘定》(1988)为最新成果。

在水系变迁研究中,湖泊变迁的研究占有重要的席位。李长傅的《中国湖泊之研究》(1934)、陈桥驿的《我国古代湖泊的湮没及其经验教训》(1982)、邹逸麟的《历史时期华北平原湖沼变

迁述略》(1987)、王树基的《近四十年来人类活动对我国干旱区湖泊的影响》(1989)等文,均为湖泊变迁研究的重要成果。许多湖泊都隶属于各大河流水系,但也有相对独立的湖泊如青海湖、滇池等。

青海湖是中国最大的咸水湖,过去的研究不多,有马子奇的《青海湖纪略》(1940)等文。1949年后,中科院所属单位作了大量研究,《青海湖综合考察报告》(1979)一书即为其研究成果。近年来有胡东生的《青海湖的地质演变》(1989)、单纬东的《浅谈青海湖水位下降的原因及对策》(1988)等新成果。滇池的研究有方国瑜的《滇池水域的变迁》(1979)和于希贤的《滇池历史地理初探》(1975)等文。

中国自古就利用河流水系进行交通运输,并疏凿自然水道或开凿人工河流,形成运河水系。历史时期中国的运河水系,从沟通江、淮、河、济,到以洛阳、开封为中心,再到京杭大运河的变迁,在很大程度上受制于人类社会政治、经济活动。重要的研究成果有史念海的《中国的运河》(1944,1988)、绍华的《大运河的变迁》(1961)、朱契的《中国运河史料选辑》(1962)等著,以及高殿钧的《中国运河沿革》(1933)、汪胡桢的《运河之沿革》(1935)、马正林的《中国运河的变迁》(1978)、《中国运河变迁的基本特点》(1978)和魏嵩山、王文楚的《河南运河的形成及其演变过程》(1979)等文。

近年来,水系变迁的研究在原有的基础上,从内容到地区方面都有了新的突破。综合水系研究的趋势明显,不仅强调了自然环境各要素之间的相互联系,而且突出了水系与人类社会活动相互制约的关系。许多历史地理学者在不同的场合和各种有关论著中都提出,在水系变迁的研究中,要视流域为整体,从而萌发了历史流域系统学。在近期内,水系变迁的研究将与自然环境变迁和自然灾害研究紧密结合。

#### 参考文献

- 1 岑仲勉. 黄河变迁史. 北京: 人民出版社, 1957
- 2 中科院中国自然地理编委会. 中国自然地理(历史自然地理). 北京: 科学出版社, 1982. 1
- 3 中国自然科学史研究所地学史组. 中国古代地理学史(陆地水文地理). 1984, 6: 123~167
- 4 陈桥驿. 历史地理(第2辑). 上海: 上海人民出版社, 1988, 11
- 5 王守春. 中国历史地理译丛(第3辑). 1988

(杭州大学历史地理研究中心陈桥驿教授、阙维民撰)

**土地科学** land science 是从整体上全面研究土地的自然属性、土地利用、土地关系、土地规划与管理的一门综合性科学,属于自然科学与社会科学的交叉科学,可分为土地类型学、土地资源学、土地利用学、土地经济学、土地规划学、地籍管理学、土地生态学、土地法学和土地信息学等若干分支学科。土地科学研究对于合理利用和科学管理土地、建立协调的人地关系等具有重要意义。

20世纪40年代以后,土地科学作为一门新兴的独立学科开始产生和发展。土地科学的形成与发展主要取决于社会生产力的发展,取决于人类对土地概念内涵的不断丰富和对土地问题研究的日益深化。在人类发展的初期,人们以采集、渔猎为生,随着种植业的产生,土地成为最基本的生产资料。人类为了发展生产,在力求扩大和改善土地利用的同时,开始重视对土地问题的研究。

在国外,对土地进行综合研究的思想和关于土地综合特征的系统理论总结,最早是从景观学开始的。德国是景观学的故乡,帕沙格(S. Passarge)1919年就出版了《景观学》,以后又陆续出版了不少景观学的理论著作,现在世界上所有土地研究的思想根源,都直接或间接地受他的思想影响。

20世纪30年代,英国动员上万人开展了全国土地利用调查,完成了全国1:62500土地利用图和调查报告,在世界上引起很大反响。德国、美国开始了以赋税为目的的土地评价研究。

贝尔格(П. С. Бєр)在道库恰耶夫(В. В. Докучаев)的自然综合体思想基础上,发展了前苏联的景观学说。同期,欧美各国也有类似于前苏联景观学的思想。30年代以后,欧美各国的土地类型学理论有了新的发展,德国特罗尔(C. Troll)开始把生态学的观点引进土地类型学,后来发展成为景观生态学

20世纪40和50年代,是土地类型学发展的重要阶段,开始从理论发展到广泛的应用。一些国家设立专门机构进行有计划的土地调查,并在土地调查中应用土地类型学的思想与方法。1946年澳大利亚联邦科学和工业研究组织(CSIRO)开始设立土地资源研究部,在全国近1/3国土及国外进行大、中比例尺的土地类型划分与制图,并首次采用土地系统、土地单元、土地3级土地分级系统。目前该分类系统已被除前苏联以外的世界各国所采用。1949年,国际地理联合会第16届大会根据英国的建议成立了世界土地利用调查委员会,号召在全世界开展土地利用调查,按统一规范编制1:100万土地利用图。

60年代初,英国成立了海外发展部,在亚非拉各国取得了许多重要的土地研究成果。英国牛津军事工程实验处(MEXE)也进行土地类型研究,开始主要为军事服务,侧重研究现代战争中交通与土地的关系,后来扩大到民用方面,他们于1966年提出了一个7级制的土地分级系统。世界第一个较为全面的土地评价系统—美国农业部土壤保持局的土地潜力分类系统也于60年代初提出,对各国土地评价影响很大。

70年代,美国开始广泛应用遥感技术,进行1:25万土地利用和土地覆盖调查与制图。1978年,国际统一规范的土地评价系统—联合国粮农组织的《土地评价纲要》问世。同年,加拿大成立了生态土地分类委员会(CCELC),协调各方面的理论与方法,并在全美开展土地生态调查工作,建立了一个6级的生态土地系统。

80年代以来,美国、墨西哥等众多国家普遍利用航片与卫片判读来获得地理信息和制图。英国、澳大利亚、加拿大等已为土地类型建立了资料存储库,利用电子计算机存储和回收土地类型的信息。联合国粮农组织、教科文组织、国际航测与地学研究所等,近年来都在世界范围内进行土地类型、土地资源调查与制图、土地人口承载力等研究工作。

世界各国除重视上述土地类型、土地评价和土地调查的研究外,随着人口的不断增长和工业化、城市化的发展,还发展了对土地利用的合理性和地力保护、土地制度及其管理措施、土地规划等研究,这些都为土地科学理论体系的不断完善和丰富奠定了社会基础。

中国的土地研究有悠久的历史,早在2000多年前的春秋战国时期,《周礼》一书便将全国土地分为5类。但对土地科学进行科学研究则始于1949年以后。50年代至1980年,中国土地科学的发展非常缓慢,主要是学国外,并开始结合国情创建自己的学科,但由于历史的原因,学科仅限于农村土地规划和土地利用的范畴。1980年,中国土地学会成立,国家提出“十分珍惜和合理利用每寸土地,切实保护耕地”这一基本国策,土地科学才在中国为一门独立的学科,研究土地科学的学科体系、学科发展仍很缓慢,重点研究土地资源、土地规划和土地管理方面。1986年中国《土地管理法》正式公布,各级土地管理机构相继建立,1987年《中国土地科学》创刊,这些大大促进了中国土地科学的发展,并初步形成了具有自己研究对象、理论体系和研究方法的独立科学。

到20世纪末,世界各国,特别是中国,除了进一步完善和丰富土地科学的理论体系外,将在下列几方面广泛开展研究:(1)以土地资源调查、土地综合评价、地籍管理系统的建立为核心的土地资源学、地籍管理学的研究;(2)以土地使用制度改革、地租、地价、地权为核心的土地经济学的研究;(3)以土地利用区域优化结构模式的建立、土地利用动态规律研究为重点的土地利用及省、市、县、乡土地利用总体规划及其土地规划理论、方法的研究;(4)以防止土地退化、保护土地资源为核心的土地生态经济

学的研究;(5)以系统工程、遥感和微机应用为核心的土地信息系统的研究。

#### 参考文献

- 1 林超. 中国土地类型研究. 北京: 科学出版社, 1986
- 2 邓静中. 地球科学信息, 1988, 6
- 3 何永祺. 中国土地问题研究. 北京: 经济出版社, 1991
- 4 林增杰, 等. 北京: 经济出版社, 1991
- 5 中国土地学会学术工作委员会. 中国土地科学, 1991, 4

(安徽师范大学地理系张光生撰)

**土地类型** land type 对土地类型的研究是综合自然地理学的一门分支学科,以往曾有学者称为景观形态学、地方类型学等。中国习惯称之为土地类型学。研究对象是地表环境某一段由地质、地貌、气候、水文、土壤、动植物等各自然地理成分长期相互作用,亦包括人类活动对自然环境影响在内形成的相对一致的局部自然综合体。这种局部地段具有综合特征和相应地段类型在地表重复出现的特点。该学科重点研究土地自然综合体形成、分级与分类、结构与功能以及制图等内容。

土地类型学根源于地表局地具有综合特征的思想。1913年德国帕萨格(S. Passarge)发表《景观学的基础》一文首先指出地表可划为一些局地地段,1931年俄罗斯地理学家Л. С. 贝尔格发表《苏联景观地理带》一文,进一步讨论了景观是自然综合体概念,并认为景观典型地重复分布于相应自然地带内。1930年,美国微奇(J. O. Veatch)发表《土地的自然地理划分》一文,首次对土地进行类型划分。1931年英国波纳(R. Bourne)发表《区域调查和大英帝国农业资源估计的关系》一文,将土地划分为3级,土地类型学成为初具独立体系的学科。以后前苏联H. A. 宋采夫着重研究景观形态学,把土地即景观形态部分分为相和限区两个分级。以后前苏联地理学家又进一步划分为相、限区、地方3个分级。这方面理论随着伊萨钦科1959年到中国讲学,系统地介绍到中国。陈传康在此基础上根据Ф. Н. 米尔科夫的论点研究土地的分级的连续性和基本等级的固定性问题,并确定这些等级的地貌划分标准。1953年,澳大利亚克里斯琴(C. S. Christian)和斯图特(C. A. Stewart)共同发表《Katherine Darwin地区的调查报告》,首次采用土地系统(land system)、土地单位(land unite)、土地点(land site、land facet)的术语,并进行实际制图。目前除俄罗斯和中国外,世界其余国家都几乎采用这一分级术语。但西方国家的土地分级规范化还不严格,因而实际制图同一分级土地大小差别很大。土地类型研究广泛应用于生产实践始于20世纪40年代。1946年澳大利亚设立土地研究处,对澳大利亚北部和中部,以及巴布亚新几内亚进行大面积调查与制图。英国20世纪60年代设立土地资源处,后改称为土地资源研究中心,对博茨瓦纳、尼日利亚、赞比亚等国家进行土地类型制图,合计面积100多万平方公里。加拿大、前苏联、墨西哥、日本、美国、东欧各国等国家都从50年代起设有国家级研究和教学单位专门从事土地类型研究。联合国粮农组织下设“土地资源开发和保护局”,教科文组织与荷兰政府合作建立“国际航空调查与地学研究所”(ITC),均专门对土地进行系统研究。在全球面临资源、环境、人口和发展的挑战面前,土地类型的研究正日益起着重要作用而被广泛重视。

中国对土地调查研究拥有悠久历史。早在2500年前,《周礼》一书就把中国土地分为5大类(山林、川泽、丘陵、坟衍、原隰),战国时期的《管子·地员篇》进一步把全国土地划分为3大类25种。之后,历代均按耕地质量和产量划分类型,作为税收的依据,其中明代的《鱼鳞册》最为著名。但作为现代科学概念的土地类型,却迟至20世纪50年代末才确立。1958年和1959年,俄罗斯景观学家A. T. 伊萨钦科在北京大学和中山大学讲授景观学原理,介绍了俄罗斯的景观研究方法。其时中国正值完成综合自然区划工作,迫切需要从类型角度深化自然地理学研究,国民经济建设中的大量课题亦对土地类型研究提出新的要求。从50

年代末至80年代,中国地理学家结合全国性综合考察、区域开发整治和全国农业区划,进行了各种比例尺制图,召开全国性学术讨论会7次,取得了重大进展。50年代至60年代,主要在典型区域进行大比例尺调查与制图,包括赵松乔在河西走廊和乌兰布和沙漠、林超在北京怀柔山区、陈传康在毛乌素、缪鸿基、潘树荣在珠江三角洲、景贵和在吉林西部、刘胤汉在关中盆地、吴伯甫在黄土高原。70年代至80年代,进一步深入开展中小比例尺土地调查和制图,赵松乔等在黑龙江省,陈传康在鄂尔多斯、申元村在青海省、樊自立在新疆、汪久文在内蒙古中部高原、黄荣金在黄淮海、程伟民在洞庭湖平原等等,其研究广度遍及全国。1978年国家确定全国1:1 000 000万土地类型图为重点科研项目之一,并委托中国科学院地理研究所主持该项研究,1980年成立有42个科研、教学和生产部门参加的编委会(主编赵松乔),1989年完成并出版中国1:1 000 000万土地类型图制图规范和分类系统,以及7幅按国际分幅的1:1 000 000万土地类型图,还出版专著与文集4部,文章计约300余篇。这些研究成果表明中国土地类型研究在理论体系、研究方法、制图与应用于生产实际方面,已成为具有独立体系的成熟的学科。

中国土地分级和分类研究在80年代取得突破性进展。土地分级受不同尺度土地分异规律制约,依地段间的相似性和差异性程度划分不同级别。从低级至高级,其内部相似性逐渐减少,而相互间的差异性逐渐增大。目前国际上通用的多为3级划分制。俄罗斯(前苏联)自下而上为相—限区—地方3级。澳大利亚等国为土地点—土地单元—土地系统。中国1:1 000 000万土地类型图编委会制定的制图规范,以自然区划基本单位(自然地区)作为土地类型划分的0级(土地纲),其下按从上而下划分为土地类—土地型—土地相3级。土地综合体除了有等级高低之分外,在同一等级内,依其属性的相似性和差异性还可进一步划分若干类型,便叫土地分类。土地的分级和分类是2个不同的概念,但它们彼此间又相互联系。在如何处理分级和分类关系上,中国主要存在2种不同的观点。中国科学院地理研究所(赵松乔、申元村)采用单系列划分法,即每一级单位都可以划分类型,而每一类型都可以进行等级归并,两者可以编织在同一网络之中。北京大学(林超、陈传康)采用多系列划分方法,即在严格区分个体单位与类型单位基础上,强调每一级个体单位都可以进行分类。

分级指标的选取基本稳定。中国1:1 000 000万土地类型图规范标准为:0级—大气候水分温度相似的区域,将全国划分为12个0级类型。其下按3级划分:土地类—同一0级单位内具有大(中)地貌、土壤类、植被型及土地利用方向相似地段(在山地相当于一个垂直带);土地型—指同一土地类内,具有相似小地貌、植被亚型或群系组、土壤亚类,因而土地利用方向和改造措施也相类似的地段(在山地相当于一个垂直亚地带);土地点—是最低级分类单位,具有相同的地貌部位、岩性、土种和植被群系(或群丛组)。

土地类型制图是确定各级各类土地空间位置和进行面积量算统计的必要途径。目前主要有2种方法:(1)综合制图法 以土地类型综合理论为依据,将土地类型的界线直接绘制在地形图上。此种方法由于80年代航空像片和卫星像片的广泛应用而得到了很大普及。中国“三北”防护林遥感综合土地资源类型调查(申元村,1990),黄土高原综合治理土地类型制图(袁勤省,1990),黄淮海平原土地类型制图(黄荣金,1991),吉林西部土地演变研究(王化群,1989)等均采用这种方法。(2)叠置制图法 把与土地类型相关的各种要素图叠加分析,确立土地类型界线。此种方法60年代较多采用,如江苏太湖东西洞庭山土地类型图(陈述彭,1964)。

土地类型系列制图在80年代发展迅速,并在理论体系上促进了分级分类指标体系的建立。其学科意义是编制一整套不同比例尺土地类型图,反映了不同利用目的和不同的精度要求。中国倡导土地类型系列制图的首推林超和赵松乔。1975~1980年,赵

松乔等在黑龙江省大面积编制1:50 000万、1:500 000万、1:1 000 000万比例尺土地类型图,林超等1980年发表“北京山区土地类型研究初步总结”,亦进行了3级分类和2级系列制图,刘胤汉1983年在黄土高原编制1:10 000万、1:50 000万、1:100 000万、1:200 000万、1:500 000万、1:1 000 000万比例尺典型区域土地类型图。至1988年,中国大部分区域拥有各种比例尺土地类型图件。根据土地类型制图与土地分级的实践总结,中国土地类型学家已初步统一了认识,即制图单元小于1:1 000 000万比例尺的制图对象是第1级(土地类),1:200 000万至1:1 000 000万比例尺适用于第2级(土地型),1:50 000万至1:100 000万比例尺适用于第3级(土地相)。

20世纪80年代开始,土地类型应用于生产实际的“结构与功能”研究逐渐成为该学科研究的热点。陈传康1979年发表“区域农业与农业经济”一文,阐明土地结构分析的应用功能。申元村、李昌文1983年发表“土地类型结构与农业综合自然区划”一文,以北京为例进行了土地类型结构转变成自然区划的理论与实践。蔡运龙的《贵州省地域与资源开发》(1990),傅伯杰的《土地结构与演替》(1985),都是以土地类型结构为理论去开拓应用研究的尝试。90年代初期,土地类型结构及其功能的研究初步涉及到土地类型结构的定义,指各级各类土地在要素、空间、时间、数量上的组合建造关系和组合形式。组合建造形式(结构类型)的不同,则功能亦不同。目前进行的土地类型结构研究主要在下列几方面:(1)土地类型空间组合结构,是从地表空间上研究土地类型分布规律和类型的组合形式,是进行自下而上综合自然区划的主要依据;(2)区域组合结构,以区域为单位去研究一定区域内的土地类型及其面积数量构成,这是确定区域农业发展方向和农林牧业合理用地构成的主要依据;(3)动态演替结构,内容是从时间尺度上研究土地类型的时段变化。从地质时段研究,可回答地质环境变化;从历史时段研究,可回答现代时期以来的环境变迁;从季相时段研究,可鉴别土地生产潜力的波动。时间演替结构研究,是进行土地动态监测和定向改造土地的基础。以土地结构理论去开发土地的应用研究,无论在研究深度和广度上,均还在深入和完善之中。20世纪80年代末开始的以土地类型为土地资源评价——土地利用现状与土地结构调整规划——土地生产潜力——土地人口承载能力的土地系统研究,是正在兴起的另一个热点,正在探索研究之中。

#### 参考文献

- 1 赵松乔,等.地理学报,1979,(34)(3):187~199
- 2 陈传康.自然资源,1979,2:9~16
- 3 林超,等.地理学报,1980,(35)(3):187~199
- 4 申元村,等.地理研究,1983,2(4)
- 5 林超.中国土地类型研究.北京:科学出版社,1986.29~42
- 6 刘胤汉.陕北黄土高原土地类型系列制图研究.西安:陕西师范大学出版社,1986
- 7 中国1:1 000 000万土地类型图编委会.中国1:1 000 000万土地类型图制图规范.北京:测绘出版社,1989
- 8 赵松乔,等.地理学研究进展.北京:科学出版社,1991.46~44
- 9 申元村.“三北”防护林甘青宁类型区再生资源遥感应用研究.北京:科学出版社,1991.99~128

(中国科学院国家计划委员会地理研究所  
申元村研究员撰;陈传康审)

**土地评价** land evaluation 是指根据具体的生产目的对土地的适用性和生产潜力进行评价分级。它是一门涉及自然、社会、经济和技术等多种学科的综合性的边缘学科,以土地质量作为自己的研究对象。土地评价是土地科学研究的主要内容之一。通过土地评价研究可以完善和丰富土地科学的理论,可以揭示区域土地的生产潜力、土地的适宜性和限制因素,为充分而合理地利用土地资源,为土地利用规划和国土开发整治,为科学管理土

地和实行土地有偿使用提供基础资料和科学依据。

土地评价研究已有 2 000 多年的历史,中国早在战国时代,就出现了依据土地肥力制定贡赋等级的土地评价,但作为一门独立的学科则产生于 20 世纪 60 年代。目前,世界土地评价研究则分为 3 大学派:(1)以美国为首的土地潜力分类系统;(2)以荷兰的毕克(K. L. Beek)为代表的土地适宜性分类;(3)前苏联的土地生产—发生分类方案。

土地评价研究初期,其目的是作为赋税的依据。20 世纪 50~60 年代,土地评价已开始为土地利用服务,这以美国农业部土壤保持局 1961 年正式颁布的土地潜力分类系统为代表。该分类系统是世界上第一个较为全面的土地评价系统,以土壤保持为目的,自上而下分为潜力级、潜力亚级和潜力单元 3 级。该评价系统问世后,世界上许多国家纷纷采用,但因评价目的和国情不同,许多国家都作了修改,英国和加拿大还在理论上给予补充,并各自建立了自己的评价系统。

70 年代,土地评价的目的已转到为土地利用服务,研究进一步深化,已从一般目的土地评价转向特定目的的土地评价。许多国家制定了自己的土地评价系统,这种情况使情报交流难以进行,因此,很有必要通过国际讨论来达成某种规范形式,同时针对美国土地潜力分类系统的不足,联合国粮农组织经过几年的讨论和实践,于 1976 年颁布了“土地评价纲要”(FAO,1976)。该纲要基本采用了毕克的观点,从土地的适宜性角度出发,分为土地适宜性纲、土地适宜性级、土地适宜性亚级和土地适宜性单元 4 级。这一系统的发布,大大促进了国际土地评价的研究,在世界各地广泛采用。此后,联合国粮农组织又组织了农业生态区计划的研究,从气候和土壤的生产潜力分析入手进行土地适宜性评价。前苏联也在 1955 年以后大规模的土地资源研究的基础上,于 1976 年拟定了一个适用于国家地籍的苏联土地生产—发生分类方案,包括土地评价区划、土壤质量鉴定和土地经济评价 3 个主要部分。

1949 年以后中国的土地评价,最早应算财政部 1951 年组织的查田定产工作。系统的土地评价则始于 50 年代的荒地调查,有 2 个评价系统:一是农垦部荒地勘测设计院提出的,按水热条件把全国划分为区和副区,在副区以下又按开垦的难易程度划分为 4 等。另一个是中国科学院综合考察委员会提出的,主要根据水热条件将全国分为 8 个土地类,类以下分等,等以下再分组。此外全国还进行了宜林地评价、橡胶宜林地评价、天然草场评价等。这一时期的土地评价大多是单项目的土地评价。70 年代末至 80 年代中期,是中国土地评价的成熟阶段,产生了 2 套全国性的土地评价体系:一是《全国第 2 次土壤普查暂行技术规程》,将全国土地统一分为 8 级;另一个是中国科学院综合考察委员会拟定的“中国 1:100 万土地资源图分类系统”,该系统分为土地潜力区、土地适宜类、土地质量等、土地限制型和土地资源单位 5 个等级。这一系统的提出,推动了中国土地评价研究的迅速发展,使中国的土地评价研究从地区性走向全国性,从单向评价走向综合评价,从经验性上升到理论和系统的研究。

80 年代以来,随着计算机在资源调查与评价中的广泛应用,土地评价的理论与方法不断改进和完善,土地评价向着综合化、精确化的方向发展,一系列新的评价系统相继问世。1981 年,美国农业部土壤保持局在土地潜力分类的基础上,提出了“土地评价与立地评价”系统。该系统是为规划工作者和资源管理人员作出合理的土地利用决策而制定的,它除考虑了土壤的物理和化学特性,还考虑了经济因素,既考虑了土地管理措施,又考虑了土地税收和法规;同时结合了地方政府的农业政策,具有很强的综合性、精确性和法律性。与此同时,联合国粮农组织在土地评价纲要的基础上,针对不同的土地利用类型,详细分析了各种土地利用对土地的要求和土地的质量特性,建立了系统的全面的土地评价体系(FAO,1983,1984,1985),在世界各地广泛实施。此外,加拿大的杜曼斯基(J. Dumanski)和斯图尔特(R. B. Stewart)发展了联合国粮农组织的农业生态区计划方法,用来预测加拿大作物

生产潜力并估价土地对各种作物的适宜性,这一研究的主要的优点是可以对加拿大各地土地适宜性进行直接比较。

在此基础上,土地评价向着更综合的方向发展。特纳(R. K. Turner)从土地的生态条件评价、财政与经济分析、社会条件评价等方面,论述了土地评价这一综合分析过程(Turner,1985)。加拿大圭尔夫大学土地评价组致力于建立新的土地评价程序(Smit,1981),它可以把各种特定用途所要求的土地条件、土地现状属性、土地利用目的、对特定地区土地利用效益的估价等内容有机地贯穿起来。斯密特(B. Smit)等人发展了毕克提出的综合土地评价的概念,他们通过分析自然、社会和经济条件,建立综合土地评价模型,并应用于安大略省的农业土地评价(Smit 等,1984,1986)。综合土地评价能把不同土地利用方式及其产量的分析、对某些特殊作物品种需求的分析以及具有特定属性土地的适宜性的分析有机地结合起来。

近年来,景观生态学的迅速发展,使土地生态评价成为土地评价研究的新方向之一。土地生态评价是以土地生态类型为基础,着重生态价值和功能的评价,它直接服务于景观生态设计和景观生态规划。

面对全球性的人口、资源、环境等问题,土地评价已深入到土地的人口承载力研究。联合国粮农组织已设计出不同农业投入下所养活人口的估算方法,并用它评价 117 个发展中国家 2000 年的人口承载力(FAO,1982)。英国 Strathelyde 大学和苏格兰资源利用研究所的斯莱瑟(M. Slesser)等提出了“提高承载力各样方案的 ECCO 模型”,这是为长远规划服务的承载力研究,是一种反映人口、资源、环境和发展之间相互关系的综合方法,其手段是通过建立系统动力学模型,模拟不同各样方案下人口变化与承载力之间的动态变化。中国科学院综合考察委员会主持的“中国土地资源生产能力及人口承载力研究”也于 1991 年 10 月通过鉴定。

纵观土地评价研究的历史与现状,20 世纪末土地评价的范围将更加广泛,土地评价的内容也更加综合。在土地自然评价的基础上,更加强调土地经济评价和综合土地评价。模拟方法、土地资源信息系统等将使土地评价向定量化方向发展,土地评价工作更加细致,更加深入,土地评价系统和理论体系更趋完善,同时也更加注重学科的科学性和应用价值。

#### 参考文献

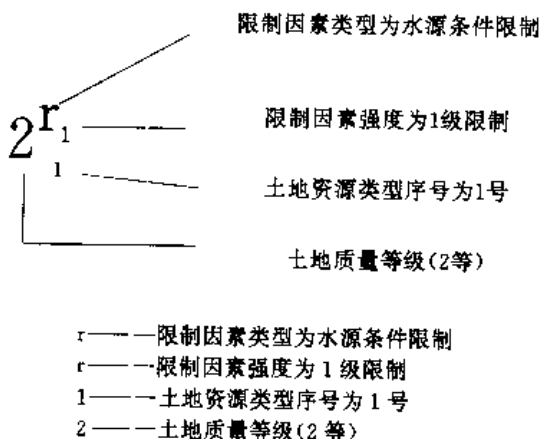
- 1 Young A, Goldsmith PF. Geographical Journal, 1977, 143
- 2 FAO, FAO Soil Bulletin 55, Rome, 1985
- 3 Turner R K. Soil Survcy and Land Evaluation, 1985, 5
- 4 李孝芳. 土地资源评价的基本原理和方法. 长沙:湖南科学技术出版社, 1989
- 5 倪绍群. 资源与环境, 1990, 2(4)
- 6 傅伯杰. 自然资源, 1990, 3

(安徽师范大学地理系张光生撰)

**中国土地资源** land resource of China 土地资源通常指目前或可预见的将来可供农、林、牧业或其他各业利用的土地。因此,土地资源是与利用目的紧密相关的一种术语,其内容包括土地质量和数量 2 个方面。土地质量是指对于一定利用目的而言的质量高低优劣,土地数量通常指土地面积。土地质量的确定是通过土地评价来实现的。

土地评价亦称土地资源评价、土地质量评价。土地资源评价等级系统,在中国主要有 2 个不同学派。中国 1:1 000 000 万土地资源图编委会(主编石玉林)采用土地潜力区—土地适宜类—土地质量等—土地限制型—土地资源单位等 5 级分类制,各级均给出一定指标。“土地潜力区”等级单位,以气候水分温度条件为依据,反映区域间的生产力的差异,将全国划分为 9 个土地潜力区,即华南区,四川盆地—长江中下游区,云贵高原区,华北—辽南区,黄土高原区,东北区,内蒙古半干旱区,西北干旱区,青藏高原区,土地适宜类,是在土地潜力区范围内,依据土地对农、

林、牧业生产的适宜性划分,在划分时尽可能按主宜方面划分,但对那些主要利用方向尚难确定的多宜性土地,应用多宜性评价,共划分出8个土地适宜类,即宜农耕地类、宜农宜林宜牧土地类、宜农宜林土地类、宜农宜牧土地类、宜林宜牧土地类、宜林土地类、宜牧土地类和不宜农、林、牧土地类;土地质量等,是在土地适宜性范围内反映土地适宜程度和生产潜力的高低,是土地资源评价的核心。各土地适宜类下,按对农林牧的适宜程度和质量高低各划分3个质量等,共划分出9个质量等;土地限制型,是土地等范围内,按其限制因素及其强度划分,共可划分出10个限制型,即:无限制,水分和排水条件限制,土壤盐碱化限制,有效土层厚度限制,土壤质地限制,基岩裸露限制,地形坡度限制,土壤侵蚀限制,水分限制,温度限制;土地资源单位,亦称土地资源类型,是土地资源评价对象和制图单位。表示方法采用农林牧土地质量等和限制因素类型与强度的组合表示方法,如华北—辽南土地潜力区的322<sub>1</sub>m<sub>2</sub>河滩地砂土质潮土旱耕地,其含义表示3等宜农2等宜林2等宜牧,限制因素为土质限制(m),其限制强度为2级(m<sub>2</sub>),土地资源类型滩地砂土质潮土旱耕地的排列序号为1号。中国“三北”防护林遥感综合调查的土地资源评价体系(申元村)亦采用土地适宜类—土地质量等—土地限制型—土地资源评价单元为评价序列的分类体系,但在类和等的划分上有较大差别。土地适宜类采用多宜类(宜农、林、牧土地类)、双宜类(宜林牧类)、单宜类(宜牧类)和不宜农林牧土地类划分,其主导指标采用温度、水分类型作为划分指标。土地质量等作9等划分,是土地适宜类下的评价单位,以反映土地质量差异的限制性因素强度等级作为主要依据,从1等至9等,土地质量依次降低,其中1~4等属宜农林牧土地类,5~7等属宜林牧土地类(其中7等地仅宜灌木林),8等地属宜牧土地类,9等地为不宜农林牧土地类。土地质量等和限制性因素强度有相关关系,1等地为无限制,2等地的限制因素强度≤1级,3等地限制因素强度>1级、<2级,4等地限制因素>2级、<3级,5等地的限制强度级为3级,6等地为>3级、<4级,7等地为≤4级限制,8等地限制强度为4级,9等地达5级强度限制。土地限制型划分为11个,即坡度,水源保证程度,积水程度,沼泽化程度,细土层厚度,土壤质地,障碍土层分布深度,盐渍化程度,侵蚀程度,风蚀风积程度,温度限制等,每个限制因素类型的限制程度从弱面强划分为0级(无限制)至5级。评价对象为土地类型(亦可称土地资源类型)。表示方法采用等、型、评价单元序号的组合方式,如:



50年代至70年代中期,中国土地资源制图主要是局部区域编制大比例尺土地资源图。70年代中期至80年代中期,围绕全国和各省区的农业区划,编制了从1:1 000 000、1:500 000至1:100 000和1:50 000的图件,因而中国除少数区域外,已经拥有各种比例尺的土地资源系列图件,制图技术方法上,亦逐步并正广泛利用遥感和计算机。

中国1:1 000 000土地资源图编委会依据1:1 000 000土地资源图的量算与统计,可以得到中国26项土地资源的有关资

料,能较全面地反映中国土地资源的概况。8个土地适宜类面积及其占全国陆地总面积的%为:宜农耕地面积1.62亿公顷,占全国土地总面积17.2%;宜农宜林宜牧土地类面积0.467亿公顷,占5.0%;宜农宜林土地类面积0.0952亿公顷,占1.0%;宜农宜牧土地类面积0.047亿公顷,占0.5%;宜林宜牧土地类1.16亿公顷,占12.3%;宜林土地面积1.602亿公顷,占17.0%;宜牧土地类面积2.351亿公顷,占25.0%;不宜农林牧土地类2.074亿公顷,占22.0%;现有耕地净面积1.387亿公顷,其中一等耕地0.575亿,占耕地面积的41.33%;二等耕地面积0.48亿公顷,占耕地面积34.53%;三等耕地面积0.285亿公顷,占耕地面积20.48%;不宜农耕地0.0507亿公顷,占耕地面积3.66%;现有林地中,一等林地面积1.103亿公顷,占林地面积64.87%;二等林地面积0.465亿公顷,占林地面积的26.93%;三等林地面积0.138亿公顷,占林地面积8.20%。草地资源中,一等草地面积0.489亿公顷,占草地面积的12.85%;二等草地面积1.48亿公顷,占草地面积的38.93%;三等草地面积1.82亿公顷,占草地面积的47.86%;不宜牧草地面积0.014亿公顷,占0.36%。10个限制性因素类型面积及占全国农林牧土地总面积的%为:无限制面积0.731亿公顷,占9.82%;水文与排水条件限制面积0.406亿公顷,占5.46%;土壤盐碱化限制面积0.363亿公顷,占4.89%;有效土层厚度限制面积0.927亿公顷,占12.46%;土壤质地限制面积0.789亿公顷,占10.61%;基岩裸露限制面积0.0813亿公顷,占1.09%;地形坡度限制面积2.795亿公顷,占37.59%;土壤侵蚀限制面积0.368亿公顷,占4.94%;水分限制面积0.619亿公顷,占8.32%;温度限制面积0.359亿公顷,占4.38%。

中国土地资源研究,随着资源、环境、人口、发展关系的日趋尖锐和协调发展任务的日趋繁重而越来越显得突出。当前,研究的热点主要有:(1)土地资源评价指标体系的研究;(2)土地资源生产潜力及土地人口承载能力的研究;(3)城市土地合理利用结构,工矿土地合理开发结构,旅游土地资源评价等非农业目的评价研究,亦越来越受到重视。

参考文献

- 1 石玉林.自然资源,1986,3:54~57
- 2 李孝芳.自然资源,1986,3:16~20
- 3 戴旭.土地评价.北京:科学出版社,1986.182~199
- 4 申元村.土地资源调查规程.北京:林业出版社,1987.25~47
- 5 中国1:1 000 000土地资源图编委会.中国1:1 000 000土地资源图编图制图规范.北京:科学出版社,1990
- 6 中国1:1 000 000土地资源图编委会.中国1:1 000 000土地资源图集.西安:西安地图出版社,1990
- 7 中国1:1 000 000土地资源图编委会.中国1:1 000 000土地资源图土地资源数据集.北京:中国人民大学出版社,1991

(中国科学院、国家计划委员会地理研究所  
申元村研究员撰;赵松乔审)

土壤形成因素

soil-forming factor 包括气候、生物、母质、地形和时间等自然成土因素,以及人类的耕垦、施肥和灌溉等人为成土因素。土壤形成因素的研究对了解土壤类型和特征及其相互关系,深入而确切的阐明土壤的起源及其发展方向,土壤的改良及土壤资源的合理开发利用途径和措施等,均具有重要的意义。

19世纪60年代,随着自然科学,特别是物理、化学和生物学的迅速发展,土壤科学的基础理论发生了新的突破。1860年美国赫尔格德(E. W. Hilgard)提出了土壤受地质、气候、植被等因素影响的正确概念。1865年菲罗(Fallou)指出土壤与母质、地面高度和地形条件的关系,成为建立土壤发生学的先驱之一。19世纪70~80年代俄国道库恰耶夫(В. В. Докучаев)进一步完整地提出成土因素学说,他认为土壤的发生发展同自然界各成土因素均有关,在其著作中多次提出土壤是各土壤形成因素的函数,而且在

1898年所发表的论文中第一次明确地提出了下列公式:

$$H = f(K, O, G, P, T)$$

式中,  $H$  代表土壤,  $K$  代表气候,  $O$  代表生物,  $G$  代表岩石,  $P$  代表地形和  $T$  代表时间。

这样,了解土壤和成土因素之间相互关系的本质和历史后,对于虽然是未经研究过的地区,但只要已知该地区的年龄、地形、岩石、气候和植被的情况,便基本上可预测该地区土壤的类型。几乎在同一时期,美国赫尔德在1892年发表的《土壤与气候的关系》及1906年发表的专著《湿润和干旱地区的土壤,其形成、性质和组成与气候及植物生长的关系》中,认识到土壤的形成及其属性均受母质、植物与动物有机体、气候、地形与时间等因素的深刻影响。匈牙利齐格莫德(A. A. de Sigmond)于19世纪初对土壤形成因素作了深入研究后认为土壤是母质、气候、地形、动植物活动和年龄综合作用的结果,并始终强调土壤与生物,特别是植被的紧密联系,他指出人们的经济活动是现代土壤形成的一个最重要的因素,同时强调了不同地区条件下某一土壤形成的主要因素。

20世纪以来,俄国卡巴宁(A. A. Сабанин)认为,只有生物,特别是植被和母质才是土壤形成因素,他认为土壤学应该研究生物界和非生物界的相互联系,了解它们的规律,预测在时间和空间上土壤发育、生命及其变异的途径。道库恰耶夫(1909)的继承者西比尔泽夫(H. M. Сибирцев)和威廉斯(B. P. Вильямс)等发展了他的学说,提出生物是土壤形成的主导因素。格林卡(K. Л. Глинна)和波雷诺夫(B. B. Полянов)指出,作为土壤形成基质的岩石和矿物的特征及地形具有重大的意义。威廉斯还认为人类的生产活动,特别是耕作和土壤改良在当代是最重要的,并可能是决定性的成土因素。

美国詹尼(H. Jenny)进一步发展了土壤形成因素学说,1941年他在《土壤形成因素》中提出了同样的数学表达式来表达土壤和最重要成因素之间的函数关系:

$$S = f(cl, O, r, P, t, \dots)$$

式中,  $S$  代表土壤的性质,  $cl$  代表气候,  $O$  代表生物,  $r$  代表地形,  $P$  代表母质,  $t$  代表时间,省略号代表其它尚未确定的因素。这样,可以根据已知的成土条件来预测土壤性质及其可能变化的速度和趋势。同时,他认为生物起主导作用不是千篇一律的现象,不同地区和不同类型的土壤往往有某一因素占优势。他将土壤看作是几组特征组成的连续体(Continuum),其中带有若干不连续的因素,后者标明了不同种类土壤界限,并从土壤调查入手,从确定比较均一的土壤客体开始,用大比例尺制图表示出来,并通过土壤特性和成土因素间进行地理对比,说明土壤形成发生,这种研究方式在美国占优势,由定性转向定量方向发展,而且函数关系已作为一种重要的工具。地形因素在土壤形成的作用也引起美国学者的充分重视,从他们的研究中认识到,与现代环境呈绝对平衡的土壤几乎是罕见的,多数土壤的一系列性状曾受到更新世以来自然因素变化的影响,环境的演化和地貌特征的稳定在他们的发生模式中更突出地体现出来。俄国沃洛布耶夫(B. P. Волобуев)对气候在土壤形成中的作用作了深入的研究。同时,许多研究者认为就广义和全面的概念而言,土壤形成的主导作用属于气候因素。但是,它们的作用迄今尚未完全研究清楚,并且没有得到足够的评价。1950年以来,马留卡(Д. П. Малюга)、格拉佐夫斯卡娅(M. A. Глазовская)和柯夫达(B. A. Ковда)等的研究表明,在成土过程中还存在着来自地球上地幔的深层因素,如火山作用、上升的热水流、新构造运动、矿体及石油矿床等,它们与其它形成因素的结合中有时起着显著的作用。60年代以来逐步了解到,地球与宇宙紧密联系着,不仅太阳能以光和热的形式到达地球表面而且宇宙射线、宇宙尘埃、陨石雨等也到达地球表面,这些因素在成土过程中有何意义,有待于今后的研究加以确定。关于土壤形成的时间因素,近几十年来也有很大的发展,威廉斯提出了土壤“绝对年龄”和“相对年龄”这2个现代概念的术语,威列斯基(Л. К. Виленикий)和科夫达及其他研究者的著作中对这些

观念得到了进一步发展。1970年联合国教科文组织和国际土壤学会专门召开了土壤和母质年龄的国际会议,出版了“古土壤”论文集。利用  $C^{14}$  等法测定土壤的绝对年龄已获得成果。

随着土壤信息的不断积累和电子计算机技术的发展,确切地估算土壤形成发育和各成土因素之间的定量函数关系将逐步得到运用和发展,并可能创造出一些新的概念和揭露目前某些概念中的不足之处;研究人为因素对土壤形成发育的影响,以及不同土壤退化类型的形成机制及防治途径等,是近来研究的重点和面临的重要任务。1990年阿洛尔德(R. W. Arnold)在《全球土壤变化》中全面深刻地阐述了人类活动间接和直接地对土壤的影响,并认为这是当前引起土壤退化的主要因素。

#### 参考文献

- 1 Cline M G. Soil Soil. Soc. Am. J., 1977, 41(2): 250~253
- 2 柯夫达 B. A. 著. 土壤学原理. 陆宝树, 等译. 北京: 科学出版社, 1981. 113~198
- 3 Schliching E. Transactions of the 12th International CongRess of soilscience, New Decln, India, 1982, (5): 269~276
- 4 Arnold R W, et al. Global soil change, IISA Laxenburg, Austria, 1990
- 5 Varallyay G Y. the 14th international congress of soil Science, Kyoto, Japan, 1990

(南京大学大地海洋科学系彭补拙教授撰; 龚子同审)

**土壤形成过程** soil forming proces 是在各种成土因素及其多样化的配合下进行的,从而产生各种各样的成土作用类型。从发生学的角度看,土壤形成过程也就是土壤肥力发生与发展的过程,它们是物质的地质循环过程与生物小循环过程矛盾统一的结果。其研究对于深入和正确地解释各种土壤的起源及其发展方向,科学地进行土壤分类,以及土壤资源的合理开发利用等方面均具有重要的意义。

1840年德国李比西(J. F. Liebig)发表了《化学在农业和植物生理学上的应用》一书,提出了土壤是养分的贮存库,无机物可以转化为有机物,只需要施用矿质肥料,把植物吸收的矿质养分归还土壤,就能使土壤的耗损与营养物质之间保持平衡,物质的生物循环过程可以免于土壤肥力下降。19世纪的后半叶,法鲁(F. A. Fellow)、李希霍芬(F. V. Richthofen)、拉曼(Ramann)等将土壤的形成过程看作岩石矿物的风化过程和物质的地质循环过程。他们认为岩石风化的碎屑物是植物生长所需矿质养分的来源,土壤是植物养分的贮存库,同时土壤中的矿质养分遭到淋溶,肥力下降,最后变成岩石。1860年美国赫格德(E. V. Hilgard)提出了有关土壤及其形成的重要概念,认为土壤的形成是从低等植物在岩石表面着生的时候开始的,植物的作用常伴随着无数细菌和霉菌的作用,并将腐殖质看作是微生物的作用下分解植物残体的产物。俄国萨巴林(A. H. Сабанин)继承了道库恰耶夫的观点,将土壤看成是特殊的自然历史形成体,认为土壤形成的实质是在生物活动和环境条件的影下,“物质的破坏和新形成”的连续过程,卡萨维奇(П. Е. Коссович)对土壤形成过程的理论起过很大的作用,认为风化和土壤形成都是分阶段的过程。

20世纪20年代,土壤形成过程获得了较大的发展。马伯特(C. F. Marbut)在赫格德研究的基础上于1921年提出了钙成土和淋溶土的形成过程。1924年克拉克(F. W. Clarke)认为造岩矿物的化学风化,主要是从矿物的晶体结构与电性说明硅酸盐矿物的风化机理,从地球化学的角度阐明溶性风化产物的淋失速度。30~40年代,前苏联维尔拉德斯基(B. И. Вирнадский)和维诺格拉多夫(А. П. Виноградов)证实了土壤形成过程并不是风化过程和矿物质形成过程完全等同的一种过程,而是一种综合的生物地球化学过程。与此同时,威廉斯(B. P. Вильямс)首次提出了土壤统一形成过程的学说,特别强调生物在土壤形成过程中的作用,建立了土壤结构性和土壤肥性的新观点,他们系统地研究了植



物—土壤系统中所形成的植物有机体和无机灰分的化学组成,它们在植物营养过程中参与有机物的合成,阐明了植物在矿物质营养元素生物循环方面进行着大规模的生物地球化学作用和土壤形成作用。以后的研究已证明,由于有机质的分解和矿化后的硅、铝、铁化合物进入生物循环,形成次生粘土矿物,如氧化硅、碳酸钙、水铝英石和蒙脱石类粘土矿物。

在土壤形成过程学说发展的同时,风化学说也进一步充实和完善。1952年波雷诺夫(Б. В. Полянов)在对风化壳的形成、类型和地球化学过程进行了深刻的论述。1954年费尔曼(А. Е. Ферман)将风化和土壤形成产物的移动、分异和聚集过程的整个土圈及风化壳称为表生作用带。土壤水分状况对土壤中物质的运动和土壤形成过程具有重要的影响。60年代,罗杰(А. А. Родс)和柯夫达(В. В. Ковда)等的研究表明,灌区和非灌区盐渍土壤形成过程是经由植物或从地表蒸发的毛管上升液流为上的条件下进行的,草原和荒漠区的盐渍土和碱化土的形成,则是由于土壤地下水的平衡过程中蒸发过程为主的缘故;森林植被下冲洗型土壤水分状况能使一些物质从土壤剖面中淋溶,从土层和风化壳深层完全淋失;在森林草原条件下,土壤水分状况呈一个过渡类型。同时,风化和土壤形成物的侧向和横向的再分配、分异作用及次生积累过程在土壤形成过程中也具有很重要的作用。

1970年来,研究有了进一步的发展,开始以热力学的理论来阐述土壤中能量的输入和转化,从热力学的观点来看,土壤是一个开放的、非均质的、多相的、以不可逆热力学过程为其特征的系统。60年代以来,前苏联佛罗布耶夫(В. П. Волобуев)对此进行了详尽的研究,提出了土壤形成的热力学平衡式:

$$Q = w_1 + w_2 + b_1 + b_2 + i_1 + i_2 + g + v$$

式中,  $Q$  为参与土壤形成的能量;  $w_1$  为参与物理风化的能量;  $w_2$  为风化过程中矿物分解的能量;  $b_1$  为聚集在腐殖质中的能量;  $b_2$  为有机质和矿物质改造过程中消耗的能量;  $i_1$  为消耗于土壤及植物表面蒸发的能量;  $i_2$  为消耗于蒸腾的能量;  $g$  为土壤中盐分和细土颗粒迁移过程中消耗的能量;  $v$  为在土壤—大气系统热量交换过程中消耗的能量。1976年 M. J. Mcfarlane 等对热带、亚热带土壤的发生研究较多,重视游离高铁铝移动和累积,它们象温带土壤中的石灰质的移动与累积,都对土壤的形成过程和性状产生巨大的影响。洛森(E. W. Russell)于1973年对灰化过程中铁铝从 A 层溶解而在 B 层淀积的问题作了较深入的阐述,原认为“生腐殖质中”的腐殖质酸在随水下移时能溶解 A<sub>2</sub> 层中的二氧化物、三氧化物,现已证实,有机化合物被雨水从活的或刚凋落的植物叶面冲洗下来,能溶解土中铁铝而使之移动,这些有机化合物包括多元酚类等,在酸性土壤条件下能还原氧化物或砂粒表面的氢氧化三铁,并与亚铁与铝离子形成水溶性复合物, B 层中铁铝沉淀的原因尚不能肯定,但最主要的原因可能是亚铁—多元酚常被土壤粘粒就地吸附,只有在砂性母质中才能向下层淋洗一定距离而使 A 层出现漂白现象。与此同时,波马等(T. Bouma, et al.) 对低纬土壤“灰化”现象的研究中,划分出隐灰化和假灰化土等概念。70年代以来卡瓦古齐(K. Kawaguchi, et al.) 等重点研究了土壤处于氧化还原交替下所引起土壤中物质移动和累积的情况,特别是水稻土的发生与演变,1978年在菲律宾还专门召开国际水稻土学术会议。

1983年罗孔洛夫(Б. Г. Розанов)认为土壤形成过程是诸成土因素及其多样化的配合下进行的,由此产生各种成土作用类型,不同的土壤中常重复着同样的过程,这些过程的本质是相同的,但其表现的细节却又有不同,这种对各类成土作用共有的过程,称为基本成土过程。他将土壤中的成土作用划分为生物累积、淀积、累积、水成累积、淋溶等基本过程,以下再分为40个亚过程,并对4种基本成土过程的形态特征进行了详细探讨。1990年阿洛尔德等人(R. W. Arnold, et al.) 在《全球土壤变化》中将土壤形成过程分为转化过程和迁移过程两大类,其下再划分为若干次一级的过程。

根据近几年国内外土壤科学学术会议的资料,21世纪前夕

土壤形成过程研究的热点为:(1)土壤形成过程程度的定量研究;(2)研究自然和人类活动影响下不同土壤类型的历史和现代成土过程,特别是土壤退化过程的形成机理及防治途径;(3)各种不同类型土壤形成过程中,物质迁移转化的动力学研究;(4)研究土壤形成过程的土壤生态站网的建立,以及形成过程的模拟研究等。

#### 参考文献

- 1 Mofarland J E. Proc. of the National Soil Survey Conf V S A, 1976, 111~120
- 2 Cline M G. Soil Sci Soc Am J, 1976, 41(2): 250~253
- 3 柯夫达 B A 著. 土壤学原理. 陆宝树译. 北京: 科学出版社, 1981, 25~195
- 4 Унел. Bulltion of LSSS, 1990, (1): 21~31
- 5 Sparks D. L. the 14th International congress of soil science, 1990, (2): 4~9
- 6 赵其国. 中国土壤科学的现状与展望. 南京: 江苏科学技术出版社, 1991, 1~7

(南京大学大地海洋科学系彭补拙教授撰; 龚子河审)

#### 植物区系地理 floristic plant geography

是生物地理学的一个分支,植物学和地理学的交叉学科,也是广义植物地理学的重要组成部分,其研究内容包括植物种属地理、植物分布学和植物历史地理学3部分。即以植物区系为对象,与植被地理组成植物地理学的两大部分。

所谓植物区系(flora),是指某一地区,或者某一时期,某一分类群、某类植被所有植物种类的总称。植物区系是自然形成物,它是植物界在一定自然地理环境,特别是自然历史条件综合作用下长期发展演化的结果,是生物圈的主要组成,生态系统中能量交换和物质循环的第一性生产者和最活跃积极的因素。因此,它对人类的生存、生活及环境具有决定性的作用。各种作物、蔬菜、瓜果等就是人类长期引种栽培并驯化的栽培植物区系,它们是直接供给人们的食物。植物区系又是组成各类及各地植被的实体,是自然地理环境的反映和环境变迁的鉴证或依据。

植物区系地理学,就是研究世界或某一地区所有植物种类的组成、现代和过去的分布以及它们的起源和演化历史的科学,其目的是探究植物生命的起源、演化、时空分布规律及与地球历史变迁的关系。它与植物分类学、系统学、生态学、古植物学,以及自然地理学和古地理学等有密切联系且是相辅相成的。因此,研究植物区系地理在理论和实践中都具有重要意义。

植物区系地理学的发展与植物地理学的发展历史是分不开的,可以分为3个时期和几个阶段,即前达尔文时期、达尔文时期、现代植物区系地理学的兴起和发展时期。

从远古延续至18世纪,是植物地理学发展前达尔文时期的萌芽阶段。由于人类的生活需要和生产活动,很早就接触到植物的种类和分布问题。在公元前几百年,古希腊已产生这方面的初步认识,到亚历山大·马其顿东征印度时(公元前334~前327年),特亚福拉斯特(Theophrastus)随军记述了沿途观察到的不同植被和植物,整理出《植物历史》和《关于植被的论文》,被认为是西方最早的植物地理著作。中国于公元前11世纪至几世纪的古代著作中就有关于植物种类和分布的记述。如《诗经》中记载古代汾河下游,山有柞、栲、漆等树,隰(低地)有榆、柰栗等树木。秦岭山地多松树、竹类,还有桑、杞、栲、枸等。《水经》中记载今日罗布泊一带“多葭苇、柽柳、胡桐、白草”等。在《禹贡》、《管子·地员篇》及后来的《南方草木状》(晋代)和《本草纲目》(明代)等著作中也有所记述,可称为植物地理学的萌芽。

18世纪西方资本主义发展初期,生产和交通有很大发展,积累了更多的植物地理资料知识,促进了植物地理学的迅速发展而建立了这门新学科。1792年德国维尔登诺(C. Willdenow)首先发表了《草本植物学基础》,书中讨论了很多有关植物分布的问题,并指出植物地理学的3个主要研究方向,即植物种类地理学、

植物历史地理学和植物生态地理学。然而植物地理学的真正创始人是地理学的创始人洪堡德(A. von Humbolt),他在1807年发表的《植物地理学概念》一书中论到植物地理学的3个主要方向及植物区系的起源问题。其后,主要代表作有丹麦斯考(J. F. Schouw)的《普通植物地理学原理》(1822),总结了各国学者所搜集的资料,继续阐明植物地理学原理,第1次明确叙述了它的3个基本方向。与此同时,瑞士德康多(Aug. P. de Candolle)的《植物地理学初论》(1820)中更详细指出植物地理学的研究任务,他认为历史植物地理学不只限于确定植物分布的生态,而且要确定分布的原因。德康多研究总结了以前的知识理论,于1855年出版《植物地理学》著作,进一步阐明植物分布的规律,并指出植物地理学的主要目标应解释植物现代分布的原因哪些是由于现代气候条件,哪些是过去气候条件影响的结果。他们为创建近代植物地理学做出贡献,但是在此以前都是神造万物和物种永恒不变的观点占统治地位,许多问题未能正确认识。

达尔文时期是植物地理深入大发展的时期。1859年达尔文(C. R. Darwin)发表了《物种起源》一书,他的生物进化论使生物学及植物地理学发生根本性的变化。这时期,很多植物地理学大师用进化的理论研究世界植物区系的分布、历史和起源等问题。如虎克(J. D. Hooker)研究世界及许多国家的植物区系,提出许多新问题,尤其是根据植物区系成分分布区的分析而确定各植物区系的起源。在其主要著作《南极航行植物学》(1844, 1853, 1860, 3卷)中讨论南极、新西兰和塔斯马尼亚的植物区系并得出极重要的结论。在《印度植物志》第1卷(1855)中研究了热带植物区系的代表印度植物区系的发展史。在《北极植物分布纲要》(1862)和《岛屿植物的演讲》(1866)中讨论了北极和岛屿植物区系的起源及其相互关系等。其后,恩格勒(A. Engler)在1879~1882年发表的《植物界发展史,特别是第3纪以来植物区系的研究》中提出的原理和资料,适于解释植物各分类单位的分布及世界各植物区系的发展和相互关系,特别是发展了北极—第三纪植物区系起源的假说。俄国鲁普列赫特(X. Рупрехт)1866年发表《黑土地植物学研究》,详细研究了俄国各不同地带的植物区系和植被的区系组成,查明这些地带的不同年龄,并且把植物区系和植被的发生发展同地质历史和土壤的发生发展联系起来,为历史植物地理学的研究开辟了新途径。美国阿萨·格雷伊(Asa Gray)于1846年首先提出著名的东亚和北美的洲际间断分布及这两个植物区系的关系,后来进行更详细的研究。此外还有岛屿区系的研究等。

然而现代植物区系地理的兴起是从20世纪20年代开始,主要由于相关学科新理论的产生,促进植物区系地理的变革与发展,影响最大的是魏格纳(A. L. Wegener)的大陆漂移说和孟德尔、摩尔根学派的新达尔文主义。

奥地利A. L. 魏格纳于1912年提出的大陆漂移说冲击了地质学中长久盛行的海陆固定论,植物地理学中的陆桥说和植物区系北极第三纪起源说。伊尔姆谢尔(E. Irmischer)首先应用大陆漂移说研究植物的分布,1922、1929年出版《大陆植物分布和发育》。吴鲁夫(E. B. Byush)非常推崇A. L. 魏格纳的学说,在其《历史植物地理学引论》(1943)和《历史植物地理学》(1944)中全面总结了植物区系地理学的理论,详尽论述了世界14个区域的历史植物地理,并驳斥了植物区系的北极起源说和迁移论,认为泛古大陆的存在、分裂和漂移是世界植物区系热带一起源的地质基础。塔赫他同(A. Takhtajan, 俄国人)的著作《有花植物的起源和散布》(1969)从植物的系统发育和地理分布论述世界有花植物的热带起源和起源中心,这是植物地理学和进化生物学相结合的代表著作。同时期,古德(R. Good)系统研究总结植物区系地理,并发展了关于植物分布忍耐力的理论,先后出版4版《有花植物地理学》(1947, 1953, 1964, 1974),是现代植物区系地理学的权威著作。

50年代以来,分子生物学、进化生物学、系统植物学 and 现代生态学的产生和研究,使人们更深刻地洞察植物种形成和变异的

内在本质和机理,尤其关于被子植物的起源和演化的问题。基因和染色体的研究与植物分类、分布及与生态环境的关系结合起来,从而产生细胞地理学或基因和染色体地理学(E. C. Pielou, 1979)。这些有关学科融合形成生物地理学。70年代以来出版不少生物地理著作。

另一方面,60年代提出的海底扩张—板块构造理论,大大推动了植物区系地理学的发展,对于植物分布区的形成、历史及植物区系的起源、演化等中心问题又得到新的认识和证明。如在《海底扩张和生态系统的关系》(D. L. Axelrod, 1972)、《板块构造和被子植物的分布》(R. F. Thorne, 1977)、《板块构造及其对被子植物的地理起源和传播的关系》(R. M. Schuster, 1976)等著作中都有详细论述。

中国近代和现代植物区系地理学的发展比较迟缓。中国胡先 肃、刘慎谔和李惠林3人,于20世纪20~30年代曾研究中国植物区系的性质、成分、分区及与东亚、北美区系的关系。吴征镒、张宏达和王荷生等对于中国现代植物区系地理的建立和发展做出重要贡献。他们主要从全球和系统演化、生态学的观点研究中国种子植物的分布区类型、分区和区系起源等,自60年代发表一些论著,并获得若干重要结论。如吴征镒的《中国植物区系的热带亲缘》(1965)首次从全球观点划分所有中国种子植物属的分布区类型和提出中国植物区系热带起源的观点。于《论中国植物区系的分区问题》(1979)中提出具有中国特色的中国植物区系分区。他与王荷生合作的《中国自然地理:植物地理(上册)》(1983)是以往有关中国区系地理研究的总结和发展。同时期,张宏达《华夏植物区系的起源和发展》(1980)提出了关于被子植物起源问题的新见解。最近出版的《植物区系地理》(王荷生, 1992)是中国一部关于植物区系地理学比较系统全面的著作。以上工作对于现代区系地理学在中国的普及和发展起着重要的作用。

当前,生物学和地学的一些有关学科已融合形成生物地理学(Biogeography),中心研究生物种的形成、演化、发展历史和时空分布的格局与规律。不同版本的生物地理著作虽然各有侧重,但是一般都是从进化生物学、生态系统或全球构造的角度,或者说以动态和综合的观点研究生物地理学,包括植物区系学的各种问题。众所关注和有兴趣的问题是植物区系的起源和演化,植物分布区的形成、变化及它们和环境变迁的关系。对于各地特有的及珍稀濒危植物特别注意。在研究方法上,应用电子计算机进行数理统计分析制图,栽培试验和实验室观测研究等。

#### 参考文献

- 1 吴鲁夫 E B 著. 历史植物地理学引论. 仲崇信, 张梦译. 北京: 科学出版社, 1960
- 2 Good R. The geography of these flowering plants, London, Longman Group Ltd, 1974, 4th
- 3 Pielou E C. Biogeography. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, John Wiley, Sons, Inc., 1979, 294~314
- 4 Kellman, M. C. Plant geography, 2nd ed. New York; St. Martin's Press, 1980
- 5 张宏达. 中山大学学报(自然科学), 1980, 1, 1~12
- 6 Tivy J. Biogeography—a study of plants in the ecosphere, 2nd ed., London, New York: Longman Group Ltd., 1982
- 7 吴征镒, 王荷生. 中国自然地理—植物地理. 北京: 科学出版社, 1983
- 8 Brown J H, Gibson A C. Biogeography. London: The C. V. Mosby Company, 1983
- 9 王荷生. 植物区系地理. 北京: 科学出版社, 1992  
(中国科学院、国家计划委员会地理研究所王荷生研究员撰)

#### 动物生态地理群

ecogeographical communities of animals 简称动物群(Zoogroup),它是地球表层自然综合体的组成部分,是现代生态动物地理学的主要研究对象。研究动物群可以了解世界动物群的组成、结构、生态地理规律及其在自然综

合体中的地位与作用。对于各地区的景观生态建设和有计划、有目的地开发、利用有益动物或防治、减少有害动物均有重要的理论意义和实践意义。

1924年黑瑟(R. Hesse)指出生态动物地理学研究的对象是“动物的生态群”(ecological communities of animals),并把世界动物划分为两大生态群:陆生动物群和水生动物群。1955年苏卡切夫(В. Н. Сукачев)提出“生物地理群落”(Биогеоценоз)概念,其中考虑了动物这一要素。1958年库加金(А. П. Кузьякин)指出“景观动物群”(Ландшафтный Зооты)是景观动物地理学的研究对象。他认为景观动物群是占据地理区大面积土地景观中的动物综合体,可以理解为群落的综合或“群落的群落”。1964年张荣祖提出“动物生态地理群”概念,并指出划分的具体指标是生态条件和最适合该条件的种,主要是优势种所形成的特殊群落。1990年陈鹏明确了“动物生态地理群”的涵义,并对它的组成结构、功能、地域分异和分级、分类等进行了阐述。他认为动物生态地理群(ecogeographical communities of animals)简称“动物群”(Zoogroup)是占有一定的地区,与现代自然地理条件及人类活动紧密相联,能够充分反映地理特征,在生态地理系统中起主要作用的动物综合体。

动物生态地理群研究的主要倾向,一方面侧重于某个地区、某个流域或某个自然综合体中动物群的组成结构、功能作用、地域分异以及与其他地理要素之间的关系,阐明动物生态地理群在景观生态建设中的作用,解决动物群与人类之间的共生关系问题,有计划地开发、利用有益动物群,防治、减少有害动物群。另一方面,侧重于动物生态地理群的分级、分类系统。关于动物群的划分,就世界范围基本上形成一个比较一致的分类方案,大体上与自然地理单元或植被类型相适应。1937年黑瑟(R. Hesse)将陆地动物划分为森林动物群、草原和荒漠动物群、高山动物群、极地动物群、岛屿动物群、地下动物群。1951年阿里(W. C. Allee)和施密特(K. P. Schmidt)进一步将森林动物分为热带雨林动物群、温带落叶林动物群、针叶林动物群;分草原动物群为稀树草原动物群和草原动物群。将水域动物划分为海洋动物群、淡水动物群、淡水海浸动物群。波布林斯基(П. А. Бобринский, 1951)在全北区范围内划分出苔原动物群、泰加林动物群、欧洲阔叶林动物群、远东阔叶林动物群、撒哈拉荒漠动物群、地中海荒漠动物群、蒙古草原动物群、北美草原和荒漠动物群、西藏高山草原动物群等。1965年张奎光在《动物学基础与动物地理学》中,将世界陆地动物划分为热带森林动物、温带夏绿阔叶林动物、泰加林动物、热带稀树草原动物、草原动物、荒漠动物、苔原动物和高山动物。将世界海洋动物划分为沿岸带动物、大洋带动物、深海带动物。将内陆水域动物划分为河流动物、湖泊动物和水库动物。1986年陈鹏等将世界陆地动物划分为8个生态地理群:热带森林动物群、热带草原动物群、亚热带常绿林动物群、亚热带和温带荒漠动物群、温带落叶阔叶林动物群、温带草原动物群、寒温带针叶林动物群、寒带苔原动物群。将世界水域动物分为海洋动物群和内陆水域动物群。1990年张荣祖将世界陆地动物分为森林动物群、草原动物群、荒漠动物群、高山动物群和极地动物群。将世界水域动物分为陆上水域动物群和海洋动物群。以下的再分以及各个国家内的具体分类,是现阶段研究的主要目标。1962年库加金(А. П. Кузьякин)以前苏联境内的8个自然地带和58个景观区为基础,对前苏联的景观动物群进行研究和阐述。1978年张荣祖将中国陆栖动物划分为3大生态地理动物群:东部季风耐湿动物群、蒙新高原耐旱动物群、青藏高原耐寒动物群。同时又划分出7个基本生态地理动物群:寒温带针叶林动物群,温带森林—森林草原、农田动物群,温带草原动物群,温带荒漠、半荒漠动物群,高地森林草原—草甸草原、寒漠动物群,亚热带林灌、草地、农田动物群,热带森林—林灌、草地、农田动物群。

上述动物群的划分,大都属于一般性的划分方案,作为系统的严密的动物群分区、分类,目前尚没有形成一个完整的体系。黑瑟(R. Hesse)所提出的生境、水平带、垂直带、生物域、生物环、

生物圈等,并非动物群本身的分类。库加金(А. П. Кузьякин)认为动物群的分类应与相应的景观分类相一致。1951年他提出一个与景观分类相一致的动物群低级单位分类系统,即景观动物群(Ландшафта)、景区动物群(урочище)和景观动物群(фашия)3个等级。张荣祖(1963)基本上同意库加金的观点和分类系统,并在景观动物群之上增加一级“地带动物群”张荣祖认为动物群的划分不能简单地跟随景观或生物地理群落的划分,而应在景观划分的基础上再考虑动物群本身的特点,所以动物群的划分系统不一定恰好相当于相应的景观分类系统。1990年陈鹏指出动物群的分类指标,是根据动物群某些特征的相似性,将不相邻的同一类型的动物群单位逐级概括。他认为动物群分类系统的基本单位是动物群相,并提出4个分类等级单位:动物群相、动物群集、动物群系、动物群型。

动物群的分区系统,迄今为止尚无一个完整的区划方案。现行高级单位动物区划几乎都是动物区系区的划分。1978年张荣祖对中国陆地动物生态地理群的划分,可视作动物群的分区系统。他首先依据动物群的非地带性规律,把中国陆地动物划分为3大生态地理动物群(区)。同时又依据动物群的地带性规律,划分出7个基本生态地理动物群(区)。这两类系统互不隶属,各自独立。他划分的每个动物群(区),在地域上是连成一片的,在全国范围内是不重复的,所以是区域划分而不是类型划分。7个基本动物群(区)以下的再分,是从属的、连续的,构成两个相衔接的区域单位(农田动物群例外)。1990年陈鹏指出动物群的分区指标,是按着动物群组成的特殊性及各成分间的生态地理联系,并考虑区域上的共轭关系,由低级向高级逐级合并形成一个由简单到复杂的动物群区域单位。他认为动物群区划的基本单位是动物区,并提出4个区划等级单位:动物区、动物省区、动物地区(地带)、动物区域。迄今为止,除了张荣祖关于中国动物群区划之外,尚未见有一个完整的世界性动物群区划方案和区划图。制定动物群的区划等级单位系统并完成世界动物群区划,是关于动物生态地理群研究的一项艰巨任务。

#### 参考文献

- 1 库加金 А. П. 著,刘鸿麟译. 动物学杂志, 1958, 2(4): 245~251
- 2 张荣祖, 等. 地理, 1963, 3: 122~127
- 3 张荣祖, 等. 青海甘肃兽类调查报告. 北京: 科学出版社, 1964. 12~16
- 4 张荣祖. 地理学报, 1978, 32(2): 85~101
- 5 陈鹏, 等. 动物地理学. 北京: 高等教育出版社, 1986. 53~109; 121~133
- 6 陈鹏, 等. 生物地理和土壤地理研究. 北京: 科学出版社, 1990. 89~94
- 7 张荣祖. 生物地理学: 现代地理学辞典. 北京: 商务印书馆, 1990. 342~343

(东北师范大学陈鹏教授撰; 王宗英审)

#### 动物区系区

fauna region 动物区系是指在一定的历史条件下,由于地理隔离和分布区的共同所形成的动物综合体。找出反映区系特征的特有种及其联系,查明现代动物区系的分布范围,按着动物区系的形成过程和分化,发展的共同性,分析各级动物区系间的主从关系,把地球上的动物区系进行划分或合并而得出一定的动物区系区。它反映动物区系的地域分异规律及组合特征,也反映各地动物资源的主要特点及其开发利用前景。研究动物区系分区对追溯动物区系发生、发展过程具有理论意义,对自然资源的综合开发利用具有实践意义。此外,还可证明动物界的进化,并根据动物区系区的特性来阐明地史的各个时期,为板块学说提供重要生物学论据。

世界陆地动物区系区的划分,是从19世纪后半叶开始的。1857年斯克莱特(P. L. Sclater)根据鸟类分布,将世界陆地动物区系划分为6界:旧北界、埃塞俄比亚界、印度界、澳大利亚界、新

北界和新热带界。1866年麦利(A. Murray)将世界陆地动物区系划分为4界:旧北界、印度—非洲界、阿美利加界、澳大利亚界。1871年阿伦(J. A. Allen)分北半球为南北两界:北极界与北温带界。1876年华莱斯(A. R. Wallace)综合了斯克莱特与阿伦的观点并作了修订,分为旧北界、新北界、新热带界、埃塞俄比亚界、东洋界和澳大利亚界。这6界为各国学者普遍采用。1887年海尔普林(A. Heilprin)和牛顿(Newton)分别根据哺乳类和鸟类将旧北界与新北界合并为全北界,也为多数学者所承认。

1951年阿里(W. C. Allee)和斯密特(K. P. Schmidt)分世界陆地动物区系为3界6区:北界——古北区、新北界、东洋区、埃塞俄比亚区、新界——新热带区;南界——澳大利亚区。分世界海洋动物区系为极地海洋动物区和热带海洋动物区。1951年波布林斯基(Н. А. Бобринский)将世界陆地动物区系划分为4个大陆8个区:南大陆——新西兰区、澳大利亚区、波里尼西亚区;新大陆——新热带区;旧大陆——马达加斯加区、埃塞俄比亚区、印度——马来西亚区;北大——全北区。将世界海洋动物区系划分为6区:北极区、北太平洋区、北大西洋区、热带印度太平洋区、热带大西洋区、南极区。1952年盖普特涅尔(В. П. Гелтнер)、捷连齐耶夫(П. В. Терентьев)将世界陆地动物区系划分为7区:旧北区、新北界、新热带区、埃塞俄比亚区、澳大利亚区、印度马来区和南极区。将世界海洋动物区系分为沿岸带:印度—波里尼西亚区、热带—大西洋区、北极带区、北区、南区、南极带区;远洋带:北极带区、印度—太平洋区、大西洋区、南极带区;深海带:印度—太平洋区、大西洋区、北极带区。1980年罗帕金(И. К. Лопатин)将世界陆地动物区系划分为:旧大陆界(4区)、北大——全北界(5区)、新大陆界(2区)、南大陆界(4区)。

世界陆地动物区系的划分,各家观点虽有不同,但皆以最早的6区(界)为基础。现在将趋向于7区,即古北区、新北界(合为全北区)、东洋区、热带区、新热带区、澳大利亚区、南极区(张荣祖,1990)。因为南极大陆经现代科学考察,发现许多真正的陆栖动物类群,无疑应单独划一陆地动物区系。在世界七大陆地动物区系的基础上如何进一步划分并建立适宜的区划等级单位系统,要看各个国家的区划工作。不同国家动物区划工作进展的很不平衡,中国1949年以来,开展了全国性动物资源普查和动物区系专题研究。竺可桢领导的中国自然区划工作,推动了中国动物区系的研究。1956年郑作新、张荣祖根据哺乳类和鸟类最早将中国陆地动物区系划分为7个亚区。1959年又以哺乳类、鸟类、爬行类、两栖类等陆栖脊椎动物为准,将中国陆栖动物区系划分为7个区、16个亚区。1978年对上述区划进行修订,确定为2个界7个区19个亚区,即古北界:东北区、华北区、蒙新区、青藏区;东洋界:西南区、华中区、华南区,为我国生物、地理学界普遍采用。此外,也进行一些个别动物类群的全国性或地区性的区系区划。1959年马世骏将中国昆虫区系划分为2个界9个区。李思忠(1981)分中国淡水鱼类区系为5区。张荣祖(1964)将青甘地区哺乳动物区系划分为3个区、5个亚区、10个省。马勇(1981)将新疆北部地区啮齿动物区系划分为2个亚界、3个区、5个亚区。陈鹏(1964)将东北与内蒙东部地区鸟类区系划分为2个区域、5个地区。与此同时,对动物区划的理论问题也作了探讨。1961年张荣祖、郑作新发表《论动物地理区划的原则和方法》,提出一般动物区划应遵循“历史发展”、“生态适应”和“生产实践”3项原则,并建立界、亚界、区、亚区、省、州等级单位系统。1964年陈鹏发表《试论鸟类区划的原则和方法》,指出鸟类分布的基本区域分异规律,区系性、地带性、非地带性是鸟类区划的基本依据,提出鸟类区划三项原则(生态地理学、发生学、主导因素原则)和双列等级单位系统,在全国动物区划工作的带动下各省相继开展了省级动物区划。如《河南省动物区划》(周家兴,1962)、《山西省动物区划》(周宝华,1962)、《河北省动物区划》(顾昌栋等,1963)、《吉林省动物区划》(傅桐生等,1981)。象中国这样全国范围全面地进行各级动物区划,在世界上是少有的。

世界动物区系的划分,高级区域单位基本趋于一致(7

区),亚区或更低级单位的划分,全世界很难取得统一的方案,特别是一些跨国家的高级区域单位和界线,在一个国家内不容易得到完整的系统资料,只能对存在于本国范围内的各个区系区进行研究,从而对世界动物区系的界线进行局部修订。比较一致的倾向是高级区域单位,侧重区系历史观点,强调地域自然历史的统一性,以种的地域分布特征和区系中的特殊成分为重要指标;低级区域单位,侧重生态地理观点,强调生态因素对动物区系的影响,以种的生态分布和优势种及有重大经济意义的种为重要指标。因而“动物省”以下常采用“动物群”(生态地理)的划分。例如,中国青甘地区兽类区系区划(张荣祖,1964)、吉林省动物区划(傅桐生等,1981)。H. A. 波布林斯基(1951)对高级区域单位全北区的再分,也没按传统的“亚区”来进行,而从生态地理学角度,划分出若干个动物群,如苔原动物群、泰加林动物群、欧洲阔叶林动物群、北美草原荒漠动物群等等。动物区系研究的另一个倾向是探索动物区系的发生、发展历史。中国裴文中(1957)、周明镇(1964)等曾研究过中国第四纪动物区系的演变问题。张荣祖在《试论中国陆栖脊椎动物地理特征》(1978)、《中国自然地理—动物地理》(1979)、《青藏高原哺乳动物地理分布特征及区系演变》(1985)等论著中,对中国动物区系的起源和区域分化与地理环境的变迁问题作了较深入地探讨。在陈鹏等《动物地理学》(1986)中也涉及到有关地理环境变迁与动物区系分化的问题。随着世界各国关于动物区系历史与生态的综合研究,动物区系区的划分将会更深化,更合理。

#### 参考文献

- 1 郑作新,等. 中国动物地理区划. 北京:科学出版社,1959. 1~66
- 2 张荣祖,等. 地理,1961,6:268~271
- 3 陈鹏. 动物学杂志,1964,6(2):66~68
- 4 中国科学院中国自然地理编委会. 中国自然地理——动物地理. 北京:科学出版社,1979. 1~81
- 5 陈鹏,等. 动物地理学. 北京:高等教育出版社,1986. 1~3; 146~148
- 6 张荣祖. 生物地理学——动物地理. 现代地理学辞典. 北京:商务印书馆,1990. 344~346

(东北师范大学陈鹏教授撰;王宗英审)

### 企业地理研究

企业地理又称公司地理,是经济地理学的一个重要分支,也是经济地理学一种相对较新的微观分析方法。将企业作为工业与区域经济分析的一种尺度,已成为当代工业区位实证研究的一个有机组成部分。企业地理研究主要典型对象是多厂企业,其显著特点是研究个别企业及其活动的空间组织方式,而不是研究总体性工业。但它对揭示宏观总体性区域工业变化过程仍具有重要意义。在对个别企业研究,又不注重研究企业内部的生产过程,而是研究某一企业的前向、后向联系,从而便可了解企业为何配置在某一地点及其对所在地区产生的影响。就企业地理研究方法,已形成了多种与工业地理学研究相似的分析框架。归纳起来,代表性的主要有5种(D. E. Keeble,1977):企业方法;系统方法;行为方法;组织方法;结构方法;

企业地理研究发展阶段 企业地理研究的产生与发展有着深刻的社会经济背景,并与管理科学、组织理论、工业经济学和经济地理学的发展紧密相关,其理论基础与分析方法大都是地理学与组织理论的一种融合。自20世纪60年代以来,企业地理便成为一门独立的研究领域而逐渐活跃起来,大致说来,可划分以下几个阶段。

初创时期(1950~1960)。企业地理研究起源于20世纪初法国“人文地理学派”对经济地理学者的影响,面对工业地理学较少地考虑“企业”现象,试图超出经济地理学仅就事物的分析,而开始转向考虑人类本身、人类社会组织与机构。20世纪后半期,世界经济结构发生了根本性变化,出现了新型国际劳动分工,跨国公司和多厂企业的生产规模和经营范围扩大,越来越多的经济活

动日益由少数大型企业组织所占有,对区域发展的作用日趋增加。单个工厂、企业个别“运营单元”的行为相对重要性增加,区位因素更加复杂,大型企业组织外部环境的变化以及各企业组织之间的各种联系错综复杂的性质,已使传统区位理论和分析方法不能解释这种复杂现象,这从根本上改变了传统单一的单厂企业的区位趋势,这在很大程度上歪曲了新古典区位论的观点,也不能满意地说明工业区位的动态变化,使新古典区位论日益受到冲击,而工业地理学只注重研究某一特定工业部门或某特定的区域工业,而很少研究某一特定“运营单元”本身。面对这种状况,Robert Platt首次提出企业“运营单元”的重要性,一种共同趋势是调查对象不再是宏观的工业部门或由许多不同公司构成的某一区域,而是注意研究在经济活动中居主导地位少数大型企业或某一较小的公司区域,这是企业地理产生重要一步。后来,McNee(1985)首次对石油工业公司的地理决策问题进行了开拓性研究,在此基础上,于1960年首次提出“企业地理”概念,这标志着“企业地理研究”的开端。

发展阶段(1960~1975),20世纪60年代至70年代初期,企业进一步通过对外直接投资和技术转让等形式建立了众多分支机构,形成了全球性经营体系,工业组织的跨国发展与全球化十分迅速,企业内部及其之间的联系跨国网络迅速扩展到全球,加上管理科学、组织理论的发展,量化和模型化的飞跃发展,尤其在60年末期,企业区位决策的“行为方法”首次在美国出现,行为主义占据了重要地位,系统分析方法开始出现,工业地理学对组织行为研究也日益关注,使企业地理的理论、方法和实践有了很大发展,研究领域有了进一步拓广和深化。诸如利用管理科学和组织理论所发展的概念来解释工业区位模式、工业联系和制造业公司的区域效应研究。70年代初又着重研究多厂制造公司,主要侧重于探讨其区位决策与联系模式,将组织理论与地理学融为一体,跨区位企业和跨国企业仍是研究的重点。但由于缺乏理论统一性、统一的方法论和严密的实例研究,加上政策导向研究需要日益增加,使企业地理实证研究已受到个人思想和多种方法实践的重要影响,此阶段大都致力于“过程”的研究,而不是“模式”的研究,仍缺乏任何先进的成熟理论和定量化方法。

理论化和系统化阶段(1976年以后)。20世纪70年代后期至80年代是世界经济结构发生主要转换,生产国际化的一个新时期。一个显著的变化就是跨国多厂企业以前所未有的生产规模和范围扩大,经济活动很大份额由少数大型企业组织所占有。地理学者、经济学家和区域科学家便逐渐认识到,“一国经济不再是只能在区位分析中所假设的‘孤立国’,而是相互依赖、相互关联,并以多产品、多区位和多分工的大型多厂性企业的经济居优势”,一方面开始注重工业区位决策的过程;另一方面强调企业在区位决策中的作用,这些巨大变化给企业地理研究提出了较过去更为复杂化的急需解决的问题,导致了企业地理研究远比过去更为迅速而深刻的变化,使企业地理研究领域有了新的变化,并展现出巨大的多样性。一方面从环境变化含义上研究企业组织、发展与空间行为之间的相互关系,公司组织与外部所有制之间的关系,并着重研究企业发展、组织结构和组织过程的空间含义,另一方面又试图衡量和解决企业组织之间高度复杂的相互关系、运行和增长,以及企业地方或区域环境的性质、机会与限制。诸如:跨区和跨国多厂企业的空间行为和组织、探讨大型企业的区位决策和物质、信息联系的空间模式,从区域经济发展角度来研究多厂企业组织增长的空间后果,外国跨国公司对该区域经济发展的影响,多厂企业的空间演化模式、企业联系与地方聚集等。70年代末期又迅速对小企业总体趋势的关注。从总体来看,该阶段在研究实践上仍是大型多厂企业作为调查研究的关键单元,尤其跨国公司的地理研究已成为一个焦点。80年代以后,最主要的是从区域经济发展角度分析多厂企业增长的空间后果,分析不同类型企业与区域经济发展之间的关系。在理论和概念上广泛借用了相邻学科的理论,并通过实例研究归纳与提出多厂企业空间演化模式、多厂企业地理组织模式;在研究方法上也引入了相关的

系统分析法和数学方法等,从而使企业地理研究的理论、方法有了很大发展和提高。

企业地理研究领域大的拓展 企业与环境相互作用关系研究。自20世纪60年代以来,企业—环境相互作用关系一直成为企业地理研究的焦点,并从行为观点(尤其从新区位决策含义上)将企业—环境的关系加以概念化。Taylor提出企业“运营”、“作用”和“信息”空间的概念,强调了个别企业如何对环境作出反应。许多地理学者对企业环境的特点、组成及其动态变化进行了研究,将环境解释为一系列机构(包括用户、供给者、竞争者和协调组织等),并直接调查了企业—环境相互依存性、企业与空间环境的适应性、企业的经济环境与空间背景、企业组织之间的相互作用,并提出了企业—环境相互作用模型,其核心为试图展示企业组织内部结构是企业与其环境相互作用的结果。在某种程度上,企业—环境相互作用关系研究日益成为试图建立企业地理理论框架的焦点。

企业联系研究。大致有以下几个方面:(1)利用典型数据对企业联系的微观分析。这类研究大都注重建立一个企业及其环境之间的物质和信息联系分析,而不注重工厂与其母公司(即组织内部各功能单元之间)的联系,所总结出的结论是较少的,而且大都局限于一个区域或一、二个部门内部的企业调查分析。(2)企业信息联系研究。这些研究均表明,企业组织的信息流动具有高度地方化,其空间模式与企业的物质联系的空间模式十分相似。(3)企业服务联系研究。主要探讨制造企业与服务业之间的关系、研究服务供给的空间差异性对制造企业需求模式的影响和大型多厂企业组织结构与服务需求联系的调查。探讨企业服务联系的地方依赖性,确认远离城市中心的企业或公司通常将许多服务联系内部化,分支工厂更日趋用企业内部的服务联系来代替地方性服务联系。

企业的增长与空间演化研究。这些研究大致有企业增长战略方式、企业组织结构与战略的关系、企业组织内部的相互依存关系、企业组织结构演替模式、企业空间演化模式等几个方面。其中企业组织空间演化模型的研究最为广泛,众多学者提出了企业增长要经过的一系列结构阶段及其特点。最具有代表性的是Chandler和Redlich(1962)提出的四阶段演化模式:具有非正式控制结构的简单小型企业组织;以单一产品生产为基础的功能结构;多产品、多样化的分工结构;较复杂的跨国企业的全球结构特征。

多厂企业地理组织研究。20世纪70年代以后,许多学者对此进行了研究,其中迪肯(Peter Dicken)等提出的多厂企业地理组织模式具有一定意义,认为多厂企业内部各功能单元(总部、管理单元、研究与发展单元、生产单元)对区位因素的需求不同而分别加以配置,并通过总部或组织联系而使各功能单元相互联结。技术和组织上的发展相结合不仅导致了多厂企业的多层次组织结构,而且使这类企业形成了一个明显的地理结构。

企业联系与工业集聚。多年来许多地理学者从企业联系角度来解释工业集聚的行为,通过研究表明:尽管企业在空间上紧密邻近,但彼此相关程度却很低。因此,有的学者反对“联系引起集聚”的观点。在这类研究中,许多学者利用投入—产出矩阵对大城市若干个企业进行调查,分析城市企业总体的投入来源和销售方向及数量,以鉴别企业联系与城市工业集聚的关系;另一方面有的学者注重从大型企业组织结构及其空间行为上探讨企业空间行为与工业集聚之间的关系。

企业与区域经济发展研究。70年代末期以来,跨区和跨国企业的增长日趋广泛,研究最普遍的论题是从区域经济发展的观点来分析多厂企业尤其跨区企业增长的空间效果,在研究企业对区域经济发展过程的影响中已取得很大进步:(1)注重从企业属性(外部控制、组织结构、所有制)上探讨企业与区域经济发展过程之间的关系;(2)注重研究分支工厂的地方经济效果;(3)从企业联系(前、后向、旁侧联系)的空间特点上分析企业与区域经济发展的关系;(4)注重从公司内部的服务联系上分析企业对区域第

三产业发展的影响,研究公司对区域政策的反应。

为进一步促进企业地理研究的深入发展,今后研究工作方向性问题如下:(1)应加强企业地理的理论与方法的研究;(2)要继续重视多区位、多厂企业空间行为的研究;(3)企业微观调查分析应与宏观区域经济研究相结合;(4)企业联系研究应得到深化;(5)要加强小企业和非工业企业地理研究;(6)开展具有中国特色的企业地理研究。

以上概括分析了国际上企业地理研究状况,虽然其中有些仍待深入研究,但迄今为止,中国企业地理研究尚属空白。改革开放以来,中国企业行为发生了根本性变化。一方面,企业已成为具有相对独立性的商品生产者和经营者,由单纯生产型转变为生产经营型,企业区位决策主体日益从一元化向多元化方向发展;另一方面,随着企业横向经济联合的迅速发展,先后成立了作为经济实体的管理同类企业或不同类企业的公司、中外合营公司,企业跨部门、跨区位、承包、投资、兼并、控股等活动日益活跃,越来越多的企业相应组成了各种形式、各种规模的企业集团和企业群体,这些变化肯定都会对地区工业系统的形成与演变产生不同程度的影响,并日益在区域经济发展和工业布局过程中显示出其重要地位和作用,中国企业地理研究也将相伴而生。

#### 参考文献

- 1 Young A., Goldsmith P F. Soil Survey and Land Evaluation in Developing Countries: A Case Study in Malami. *Geographical Journal*, 1977, 147
- 2 FAO, Guidelines, Land Evaluation For Irrigated Agriculture, FAO Soil Bulletin 55, Rome, 1985
- 3 Turner R K. Land Evaluation, Financial, Economic and Ecological Approaches, Soil Survey and Land Evaluation, 1985, 5
- 4 李孝芳. 土地资源评价的基本原理和方法. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1989
- 5 倪绍祥. 中外土地评价研究的最新进展. 资源与环境, 1990, 2 (4)
- 6 傅伯杰. 土地评价研究的回顾与展望. 自然资源, 1990, 3 (南京大学贵洪平撰)

**旅游资源评价** 在西方也称为“旅游吸引力评价”或“旅游潜力评价”,是旅游开发的基础性工作,可为确定旅游地的性质、开发规模和经营战略提供必要的依据,亦是进行旅游区划、制定旅游规划的前提。

旅游资源评价工作兴起于20世纪50年代。到目前为止,在世界上较具影响力或已投入实用的旅游资源评价系统大致有如下几个:1962~1963年由派柏罗格(J. Piperoglou)等在希腊西海岸区域旅游规划中提出的旅游资源评价系统,该系统曾于1966年进行过修改、补充;1969年加拿大区域经济发展部在加拿大土地调查中提出的休闲资源评价系统;1969年铃木忠义研究提出的观光地区评价方法;1974年英国科波克(J. T. Coppock)在《休闲地理学》一书中提出的休闲资源评价系统;1975年美国土地管理局提出的土地供游憩活动适宜性评估系统;1979年南非费拉里昂(Franco F. Ferrario)提出的南非旅游资源评价系统;1985年中国台湾观光部门拟就的“风景特定区评鉴方法”;1991年楚义芳提出的“中国旅游地开发评价基础模型”。

旅游资源评价建立在旅游需求构成相对稳定性规律和价值判断的统计性规律的基础之上。前者是指在一定时间内,旅游者对于各种旅游活动的需求和参与在总体上呈现出相对稳定状态;后者包括两个方面,一是指各个旅游者对于旅游对象质量的感知趋向于一个相同的结论,二是指参与旅游资源评价工作的专业人员在具体评判过程中价值取向相对一致。在对旅游资源的评价中,评价所依存的价值尺度至为重要。以不同的价值标准来衡量同一旅游资源,其评价结果可能会有天壤之别。

旅游资源评价可分为体验性评价、技术性评价和综合性评价3种。体验性评价着眼于旅游者或旅游专家对于旅游资源的质量体验的评价。根据评价深入程度及评价结果的形式,体验性评价又可分为一般体验性评价和美感评价。其中,对于自然风景质量的视觉美感评估技术已经比较成熟。自然风景的视觉质量评估研究起始于60年代,已形成4个学派。(1)专家学派:它认为凡是符合形式美原则的风景就具有较高的风景质量,在评价方法上突出地表现为一系列的分类分级过程。主要代表人物是林顿(R. B. Jr. Linton)。主要成果有美国林业局风景管理系统、美国土地管理局的风景资源管理系统、苏格兰乡村委员会的苏格兰风景评估系统。(2)心理物理学派:它把风景审美理解为一种刺激反应的关系,把心理物理学中的信号检测方法引入到风景质量评价中来,具体做法是通过测量公众对风景的审美态度,获得一个反映风景质量的量表,然后将该量表与风景的各组成成分之间建立起确定的数量关系。主要代表人物是丹尼尔(T. C. Daniel)和布雅夫(G. J. Buhyoff)。主要成果有:施罗德(H. W. Schroeder)和丹尼尔的西黄松林风景质量评估模型、布雅夫等的森林风景评估模型。(3)心理学派(认知学派):它把(自然)风景作为人的生存空间、认识空间来研究,强调风景对人的认识作用的情感影响,试图用人的进化过程及功能需要来解释对风景的审美过程。主要代表人物是阿普尔顿(A. Appleton)、乌尔里希(R. S. Ulrich)。主要成果有:阿普尔顿的“了望—庇护”理论、卡普兰(S. Kaplan)夫妇的风景审美理论模型、布朗(T. Brown)模型等。(4)现象学派(经验学派):它把人在风景审美评判中的主观作用提高到了绝对高度,把风景审美评判看作是人的个性和其文化历史背景、志向与情趣的表现。代表人物是洛温撒尔(D. Lowenthal)。

技术性评价着眼于旅游资源各要素对于旅游者从事特定旅游活动的适宜程度的评价,大量技术性指标的运用是这类评价的基本特征。它一般限于自然旅游资源评价:(1)气候适宜性评价,气候既对旅游者参与某一旅游活动时的环境和活动质量产生影响,气候状况也直接影响人的生理过程,影响人的体感舒适度。目前,对气候适宜性的评价方法主要有奥利弗(J. E. Oliver, 1987)的温度—湿度指数和风寒指数评价模型、特吉班(W. H. Terjung, 1966)的舒适指数和风速指数评价模型。(2)地形的适宜性评价。地形因素对于运动类型的旅游活动至为重要,是关键的旅游因子。地形对于风景观光也有影响,但地形崎岖、陡峭给旅游者移动带来的困难常能借助人工设施(如缆车)来解决,而地形的这种特征本身却能提高风景的美感。(3)资源要素组合的技术性评价。它是对资源要素组合的适宜性状况和等级进行评价。对于不同资源要素组合状况的适宜性等级,不同的国家有不同的划分方法。

综合性评价着眼于旅游地的旅游资源整体价值评估,或旅游地的开发价值评估。它包含有如下几个方面的含义和特点:评估范围包括已开发的旅游资源和未开发的旅游资源;评价目的着眼于对不同地域的旅游资源进行开发价值比较,或规划与管理意义上的重要度排序;对于某一类型(以所适宜的旅游活动类型分)的旅游资源,评估工作遵循一个统一的评估系统,有着确定的通用的评估标准;评价系统中的各被评估因子大都带有合适的权重值;评估的结果多是数量化的指数值。旅游资源综合性评估模型采用如下的形式:

$$E = \sum_{i=1}^n Q_i P_i$$

其中,  $E$  为评估结果值,  $Q_i$  为第  $i$  个评估因子的权重值,  $P_i$  为第  $i$  个评价因子的评价价值,  $n$  为评价因子数。即把综合性评估工作分为3部分:选取适当的评价因子;确定因子权重值;确定各因子的评价价值。因子权重值的获得一般来源于专家征询,而因子的评价价值则一般通过分级标定评分法获得。

总之,关于自然旅游资源评价的理论和技术的理论和技术已趋成熟,但对于人文旅游资源的评价仍争议较多。如能进一步完善自然旅游资源评价的量化技术,并在此基础上研制出评价用电脑软件,旅游

资源评价就能从研究阶段走向实用,极大地促进旅游开发工作的科学化。

参考文献

- 1 Piperogiou J. Identification and definition of regions in Greek tourist planning 1966,168~176
- 2 Terjung W H. Annual of A A G, 1966,56(1)
- 3 Ferrario F F. Journal of Travel Research, 1979,3~4
- 4 Ferrario F F. Tourism planning and Development, 1980,311~320
- 5 李贻鸿. 观光行政, 1986
- 6 楚义芳. 地理学报, 1991,46(4):396  
(南开大学楚义芳副研究员撰, 鲍觉民教授审)

**旅游容量** 又称“旅游环境容量”或“旅游承载力”,是迄今为止世界上在旅游研究中争议最多、尚无定论的重要问题之一。旅游容量的实用价值主要体现在两个方面:其一,在旅游地的规划与管理中作为一种强有力的工具来保护旅游地的环境免遭退化或破坏;其二,旅游容量作为一种管理工具而使用,在客观上保证了旅游者在旅游地的体验质量。

第二次世界大战后,旅游活动大众化,越来越多的人涌向各种各样的旅游胜地。在旅游高峰季节,部分旅游地渐渐地显得拥挤起来,旅游容量的研究工作也就随之而出现。1963年,拉佩瓦(LaPage)首次提出了旅游环境容量的概念。1971年,利姆和斯坦奇(Lime and stankey)在60年代初步工作的基础上,对旅游容量问题作了进一步的讨论,从此以后关心旅游容量问题的人逐渐增多。劳森(F. Lawson,)1977等在《旅游和休闲的发展:旅游资源评价手册》中论及旅游容量问题;皮尔斯(D. Pearce,1986)等在联合国环境规划署的出版物《产业与环境》中专文论述“旅游海岸的承载能力”;林赛(I. J. Lindsay,1986)也在同一专刊上专文介绍和研究了“美国国家公园的旅游承载能力”;谢尔比(B. Sheby,1987)等出版有《游憩背景中的承载容量》一书,对旅游容量作了较多的论述。中国对旅游容量的研究起步于80年代初。主要的工作有:赵红红(1983)、刘振礼和金健(1985)先后就旅游容量的概念和计算进行探讨;保继刚对北京颐和园旅游容量的个案研究;楚义芳(1989)对旅游容量的概念体系、旅游容量的量测其实用研究方向的研究。

旅游容量是一个概念体系。根据各种容量的属性,可以将旅游容量分为基本容量和非基本容量两大类。基本容量有5种:(1)旅游心理容量,又称旅游感知容量,是旅游者于某一地域从事旅游活动时,在不降低活动质量的前提下,地域所能容纳的旅游活动最大量;(2)旅游资源容量,是在保持旅游资源质量的条件下,一定时间的旅游资源所能容纳的旅游活动量;(3)旅游生态容量,在一定时间内旅游地域的自然生态环境不致恶化的前提下,旅游场所所能容纳的旅游活动量;(4)旅游的经济发展容量,指一定时间一定区域范围内经济发展程度所决定的能够接纳的旅游活动量;(5)旅游的地域社会容量,指旅游接待地区的人口构成、宗教信仰、民情风俗、生活方式和社会开化程度所决定的当地居民可以容忍的旅游者数量。非基本容量是基本容量在时空上的具体化和外延。主要的非基本容量有:旅游合理容量和旅游极限容量;既有旅游容量和期望旅游容量;景点容量、景区旅游容量、旅游地容量、区域旅游容量。这些概念是旅游规划和管理中直接可用的工具。

量测旅游环境容量的基点在于确定一个适当的基本空间标准,即确定单位利用者(通常是人或人群,也可以是旅游者使用的载体,如船、车等)所需占用的空间或设施。一个旅游场所的性质和类型是决定基本空间标准的关键因素。在不同的国家和地区,由于旅游资源条件、旅游环境、旅游客源结构以及历史上形成的生活方式的差异,同一细类的旅游地在规划和管理中使用的基本空间标准也未必相同。基本空间标准的获得,大都是长期经验积累或专项研究的结果。基本空间标准的具体表示指标,常用的有

$m^2/人$ 、设施量/人和污染物量/环境规模等。

迄今为止,关于旅游容量的研究仍处于分散、小区域和尝试性实用的阶段。一个完整的、世所公认的旅游容量理论体系尚未形成;有关旅游容量量测的经验参数值还很缺乏,这种状况不利于将旅游容量用于旅游规划和管理实际操作;旅游容量的问题在旅游开发中远未获得普遍的重视。

参考文献

- 1 Lawson F. et al. A Handbook of Evaluating Tourism Resources, 1977
- 2 Pearce D. et al. Carrying capacities for coastal tourism. UNEP Industry and Environment, 1986,9(1)
- 3 Lindsay J. Carrying capacity for tourism development in national parks of the United States. UNEP Industry and Environment, 1986,9(1)
- 4 Shelby B. et al. Carrying Capacity in Recreation Settings. Oregon State University Press, 1987
- 5 Cooper C P. et al. Progress in Tourism, Recreation and Hospitality Management. Belhaven Press, 1989
- 6 李贻鸿. 观光事业;发展·容量·饱和. 淑馨出版社, 1986
- 7 保继刚. 中国环境科学, 1987,7:2
- 8 楚义芳. 旅游的空间经济分析. 西安:陕西人民出版社, 1992  
(南开大学楚义芳副研究员撰, 鲍觉民教授审)

**旅游线路设计** 又称“旅游行程设计”。旅游线路设计的好坏直接影响着旅游线路的销售,而旅游线路销售的成功与否,则最终决定一个国家或国家中区域旅游开发的成败。因此,旅游线路设计在旅游规划和经营中具有重要的意义。

旅游线路设计随着人类旅游活动的发展而发展。20世纪60年代,旅游线路设计只是基于设计者的旅行和工作经验。70年代以来,全世界旅游业务迅猛增长和电脑迅速普及,使旅游线路设计成为一个专门化的研究和领域。1980年,南非费拉里昂(Franco F. Ferrario)从旅游资源评价入手探索旅游线路的设计,对旅游线路设计的科学化产生了重要影响。1988年,荷兰伯格司马(Jan R. Bergsma)在荷兰北部绿色海岸旅游线路设计中,对旅游线路设计的一般原则、定量方法和技术操作等进行了系统的探索。1992年,中国楚义芳提出了旅游线路的基本类型和设计的操作性曲线。

根据旅游者的行为和意愿特性,旅游线路可分为周游型(touring tourism)和逗留型(destination tourism)两类。周游型旅游的目的是观赏,旅游线路中包括有多个旅游目的地,同一位旅游者重复利用同一条线路的可能性小;逗留型旅游的目的多是度假性质的,线路中包括的旅游目的地数量相对较少,同一旅游者重复利用同一线路的可能性大。无论是周游型和逗留型旅游者,其具体的行为属性都属于成本(费用、时间、距离)最小化行为,或非成本最小化行为(即单纯的满足最大化行为)。因此,旅游线路就有如下表所示4大基本类型。在具体设计旅游线路时,除必须注重线路本身的类型差异,还必须遵循下列技术性原则:在设计成本最小化的周游型与逗留型线路时,要注重可能条件下的旅游者满足最大化;而在设计满足最大化的周游型和逗留型线路时,又必须注重成本的最小化。这是因为,现实中的旅游线路竞争能力不仅决定于旅游者意愿的显露面,同时也决定于旅游者意愿的隐藏面。

表1 旅游线路的基本类型

| 行 为               | 周游型 | 逗留型 |
|-------------------|-----|-----|
| 成本最小化             | 1   | 2   |
| 满足最大化<br>(非成本最小化) | 3   | 4   |

旅游线路设计所必须考虑的基本技术因子有:旅游吸引物(旅游价值);与旅游通达性能密切相关的基本设施;旅游专用设

施;旅游成本因子(费用、时间、距离)。旅游业发展到今天,已使旅游线路设计及其结果显示离不开电脑,原因在于旅游线路本身包含的信息量大,组合形式复杂多样,而且对所设计线路的查询必须快捷方便。好的线路设计系统必须同时具备5方面的功能:线路图显示;详细的项目安排清单;关于线路沿途详细的、可随意选择的描述资料;一般情况下仅供旅行社职员掌握的沿线各项花费情况;突发事件处理提示系统。好的线路设计系统(同时也是线路显示和应用系统)应该是定性和定量相结合,而量化又是设计阶段必不可少的一个环节。

1992年,楚义芳提出旅游线路设计的操作性曲线,旅游线路的可行与否通过确定的量化标准来判断。旅游者出解决策的实施同旅游对象的吸引力(旅游价值)达到的某一最低值相对应,即当旅游成本已经确定(设定为 $b$ )的情况下,整个旅程带给旅游者的体验水准只有等于或大于某一确定水平(设为 $K$ )时,旅游者才会成行(旅游者行为法则1)。随着旅游成本的增加,旅游体验水平只有以等于或高于与旅游成本增加速度成比例(设定此比例值为 $\alpha$ )的某一速度增长时,旅游者对于旅游线路才会有满意的评价(旅游者行为法则2)。以旅游成本为横坐标( $X$ )、旅游体验水平为纵坐标( $Y$ ),根据旅游者行为法则1和法则2,则可建立一条 $Y=K+\alpha(X-b)$ 的旅游体验——成本基准线。从设计的线路与基准线间的关系,即可判断所设计的线路是否可行。具体判断方法为:设旅游体验水平对于旅游成本的变化速度为 $\alpha'$ ,即 $\alpha'=dy/dx$ ,在坐标图中,所设计的旅游线路有5类,各类线路的可行性如下表所示。

旅游线路的设计基本分为4个阶段:首先,确定目标市场(游客群)的成本因子,它在总体上决定了旅游线路的性质和类型;根据游客的类型和期望,确定组成为线路内容的吸引物之基本空间格局,旅游吸引物的对应旅游价值须用量化的指标表示出来;结合前两个阶段的背景材料,对相关的旅游基础设施和专用设施进行分析,设计出若干可供选择之线路;选择最优的旅游线路。

表2 旅游线路可行性的判断

| 类 | 曲线(线路)斜率变化                                | 线路的可行性                                      |
|---|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| A | $\alpha' < \alpha$                        | 完全不可行                                       |
| B | 由 $\alpha' < \alpha$ 到 $\alpha' > \alpha$ | 有条件的可行( $\alpha' < \alpha$ 段尽量短,且曲线终点高于基准线) |
| C | $\alpha' = \alpha$                        | 可行                                          |
| D | 由 $\alpha' > \alpha$ 到 $\alpha' < \alpha$ | 不可行(当曲线终点高于基准线而 $\alpha' < \alpha$ 段极短时可行)  |
| E | $\alpha' > \alpha$                        | 完全可行                                        |

旅游线路设计的理论至目前已基本解决,但大量的技术操作问题还有待作进一步的工作;不同的目标市场(游客群)有不同的旅游体验——成本基准线,这些基准线的建立必须依靠大量的旅游者行为和意愿调查;要达到旅游线路设计的电脑化,必须建立大容量的旅游信息系统;现有市售电脑软件尚不能完全满足线路设计和结果应用的需要,必须研制适用的软件系统。

#### 参考文献

- 1 Ferrario, Franco F. Tourism Planning and Development, 1980, 311~320
- 2 Bergsma Jan R. The Promotion of Destination Regions, 1988, 89~110
- 3 楚义芳. 旅游学刊, 1992, 7(2): 9

(南开大学楚义芳副研究员撰;鲍觉民教授审)

## 区域自然地理学

地域自然综合体 又称“地理综合体”或“区域自然综合

体”,是自然地理各种组成要素相互联系、相互制约、有规律地结合而成的具有内部相对一致性的整体,而且具有特殊的整体水平的新的功能和属性。它可分为不同的等级,组成综合体的要素彼此联系,当其中一个要素发生变化时,必然引起其它要素的变化,并不断的发展和演变。

地域自然综合体是客观存在的,也是地理学中综合的整体的思想之反映,从近代地理学的奠基人 A. 洪堡(Humbolt,)开始就致力于阐明地理现象的因果关系,他在论及普通自然地理学的任务时指出:这门科学应该“从互相依存关系方面对地理的诸现象作一般描述”,“研究地理上各种现象的一般规律的内在联系”。从19世纪末到第二次世界大战结束,这一综合思想得到了充分发展,德国地理学家李希霍芬(F. V. Richthofen,)坚持了 A. von. 洪堡关于自然界统一的整体观点,认为地理学必须限于研究地球表层。他更认识到除了把世界看成是一个整体外,还必须考察地理表面的更细小的片断。他对大小不同的地区用不同的方法来研究,当时就已经确定了不同等级的自然单元,而且这些自然单元按大小顺序分别称为地球的主要部分、大区、景观区和地方。

对发展自然综合体理论贡献最大的则首推俄国道库恰耶夫(B. B. Докучаев,)他在研究俄罗斯黑钙土时,于1889年发表了关于土壤形成过程和按气候来划分自然土壤地带的概念,并在此基础上进行了综合的地理概括,把土壤看作地表自然因素综合作用的产物,发现了相互制约的本质特征。从而创立了自然综合体的概念,阐明了自然综合体思想的基本原理,具体表现在自然地带学说上。他在晚年时指出“最近在现代自然科学领域中,正逐渐形成和分出一门极有意义的科学,这门科学是关于那些各种错综复杂的相互联系和相互作用的学说,也就是关于那些支配着存在于所谓生物界和非生物界之间的长期变化的规律的学说……。它是处于现代自然科学所有最重要部门的最中心,也是处于地质学、山川学、气候学、植物学和动物学以及广义的人类学这样一些部门的最中心。因此,它必然会使这些科学部门彼此接近,甚至将它们联结起来。现在这门科学正在年复一年地取得新的成就和胜利……。而且在不久的将来,按其权力和人类命运的伟大意义来说,它一定会占有完全独立和光荣的地位,它将有自己的十分确定的任务和方法,而不会与现存的自然科学各部门相混淆,尤其不会与研究范围正日益向各方面渗透的地理学相混淆。”

B. B. 道库恰耶夫的自然综合体思想,在前苏联主要从3方面得到了继承和发展:以卡列斯尼克(С. В. Калесник)、伊萨钦科(А. Г. Исаченко)等人为代表的综合自然地理学,实质上主要是继承和发展了起源于德国后经道库恰耶夫和贝尔格(Л. С. Берг)等人充实提出的景观形态学,在景观分类、自然区域和制图方面前进了一步;以莫罗佐夫(Г. Ф. Морозов)、苏卡乔夫(В. И. Сукачев)为代表的林型学,创立了生物地理群落学的概念,指出物质和能量的积累与转化是生物地理群落学研究的核心,充实和提高了自然综合体的“中心”思想;以维尔纳茨基(В. И. Вернадский)、威廉斯(В. Р. Вильямс)、波雷诺(В. Б. Польнов)等人为代表的风化壳地球化学,建立了生物地球化学省的概念,丰富和发展了道库恰耶夫关于生物在自然综合体中起积极导向作用的思想。半个多世纪以来,这3个方向都在理论准备、定位实验、研究或解决生产实践等方面丰富和发展了道库恰耶夫的自然综合体思想。

中国黄秉维于20世纪50年代末提出了自然地理学发展的3个方向,即分别研究在现代地理环境中进行的物理过程、化学过程和生物过程,先分别形成水热平衡、化学地理与生物地理群落3个研究方向,再将3个方向联结起来,便成全景。从更深的角度概括了道库恰耶夫以后自然地理学发展的新趋势。

德国关于自然综合体的研究则从景观学出发,并成为自然综合体的代名词,帕萨格(S. Passarge,)把景观类型看作是一种空间体系,即一种相关要素的集合体。S. 帕萨格不仅对小区做了考察,也对全球范围内的景观进行了研究。以植被为指标,划分



了地球上的景观带。其后在 1939 年,特罗尔(C. Troll)引用了景观生态学这个术语,指出:我创造了“景观生态学”这个词“表示支配一个地区不同地域单位的自然—生物综合体的相互关系分析”,“景观生态学的概念的直接目的是自然条件的综合研究”。1968 年又进一步定义为“对景观某一地段上生物群落与环境间的主要的、综合的、因果关系的研究,这种相互关系可以从明确分布组合(景观镶嵌、景观组合)和各种大小不同等级的自然区别表现出来”。这以后,各国从不同侧面对景观生态学的研究,使自然综合体理论得到了进一步的发展。

20 世纪 60 年代以后,贝塔朗非的一般系统论、维纳的控制论、申农的信息论、哈肯的协同理论及普利高津的耗散结构理论都不同程度地为自然综合体研究所应用。以“地理系统”作为书名的第一批专著之一是美国拉姆尼(G. R. Rumney)的著作《地理系统,陆地、海洋和大气的动态演化》(1970),但该书没有全面而详尽的地理系统理论概念。自然综合体研究的系统观点在英国乔利(R. Chorley)和肯尼迪(B. A. Kennedy)所著的《自然地理中的系统方法》(1971)中得到了表述,作者把自然地理系统分成形态系统、级联系统、过程—响应系统和受控系统。1983 年,联邦德国克卢格(H. Klug)和朗格(R. Lang)在《地理系统学说导论》中提出了同样的系列,只是名称略有不同(相关地理系统,过程地理系统,过程—反应地理系统和受控地理系统)。前苏联学者索恰瓦(В. В. Соцва)所著的《地理系统学说导论》(1978)更具现代综合自然地理学特征。他在景观学基础上对地理系统进行了深入研究,把地理系统看作以系统概念表示的景观统一体。同时特别重视自然过程及其与地表景观划分单位的结构和多样性的地理相关。他认为结构和动态的统一性是地理系统的主要特性,地理系统学说首先是结构—动态景观学,它具有更大程度上的生态学方向。自然综合体的模型研究在此间也得到高度重视,如里希德(H. Richter, 1968)根据物理过程中的太阳循环、生化过程中的热能循环以及水分循环、有机物质循环、无机物质循环设计的大气圈、近地面大气层、地形、土壤、岩石、植被、动物群、土壤微生物之间组织的地理综合体模型,克劳克利斯(A. A. Краклиц, 1975)等设计的生物地理群落中生产过程最佳状况模型等。

自然综合体研究的另一重要方面,是将其融入人地关系巨系统中加以认识。R. 乔利和 B. B. 索恰瓦就提出了人与自然“共生”、共同创造的思想,中国马世骏提出了“社会—经济—自然复合生态系统”的概念。钱学森提出了“地球表层学”、“地理巨系统”概念以及相应的“从定性到定量的综合集成方法”等(1983~现在)。

总之,关于地域自然综合体的研究,尤其是由物理过程、化学过程、生物过程综合而成的地理过程,以及由气态、固态、液态、生物有机态和人类社会优化组合态构成的地球表层巨系统研究正逐渐渗透到地理基础理论和社会实践领域中,它将在解决资源合理利用与保护、人类对地理环境的作用、地理环境预测及定向协调开发和区域发展诸领域作出重要贡献。

#### 参考文献

- 1 索恰瓦 В. В. Вучение (Г) Геосистемах, 1978
- 2 Bennett R J, Chorley R J. Environmental Systems, 1981
- 3 景贵和. 综合自然地理学. 长春: 东北师范大学出版社, 1986
- 4 赵松乔, 等. 现代自然地理. 北京: 科学出版社, 1988
- 5 黄秉维. 中德地理学发展与地理教育. 广州: 中山大学出版社, 1991
- 6 杨青山. 地理学报, 1991, 46(3)

(东北师范大学杨青山博士撰)

#### 南极研究

antarctic research 处于特殊地理位置的南极洲,自 20 世纪 50 年代以后,已成为全世界科学家向往的科研宝地。1959 年 12 月 1 日,由 12 个国家发起签署了《南极条约》,其宗旨是“合作、和平与友谊”,它明确规定南极洲只供科学研究之用,是全人类的共同财富。自《南极条约》签署后,世界主要国家

在南极研究中已取得重要成就。

大地测量和制图学是 SCAR(国际南极研究科学委员会)制定南极国际研究的主要学科之一,其研究包括两个方面:一是支撑其他学科考察的课题研究;二是现代空间大地测量理论和卫星遥感技术应用于南极地学中动态问题的研究。因此,它是南极考察中所必要的一项超前期的工作。1989 年 9 月,SCAR 大地测量和制图学工作组向各考察国发出要求:采用 GPS 系统统一南极座标系统和广泛推广卫星影像成图方法。目前中国已拥有 GPS 定位系统和卫星遥感成图的全套完整技术。中国长城站和中山站地区的大比例尺地形图采用纸测图和航空摄影测量成图,其坐标系统采用卫星多普勒定位系统确定。因此,在南极成图研究方面,此项技术的应用属世界先进水平。

南极区具有极其广阔的大陆架,发育有巨厚沉积物和沉积盆地,随着与南极洲有着相似地质历史的南美、澳大利亚南部海域进行钻探并在中新世地层中见到工业油流,世界各具雄厚经济实力的国家对南极大陆边缘的油气资源进行了频繁的调查。美国、前苏联、英国、法国、前西德、日本、澳大利亚、挪威在 80 年代都在南极陆架进行了大量重力、磁力、多道地震等地球物理调查。中国自 1984 年首次南极、南大洋考察以来已开展两个航次地质、地球物理调查工作,调查区局限于西南极地区,“八五”期间,将利用“极地”号及地矿部“海洋四号”船开展 2~3 个航次的地质地球物理调查,从而为中国在南极海域的油气资源调查打下初步基础,并为国家制订南极油气资源政策提供科学依据。

南极磷虾资源非常庞大,据 1990 年“南极海洋系统和储量的生物考察”(BIOMASS)的声学探测,现存量为 4~6 亿吨。虽比以往的估计(10~20 亿吨)低,但仍然是目前世界上最大的单种动物蛋白资源。估计每年捕捞 3000 万吨将不会影响南大洋的生态平衡。这个数字接近目前全世界年渔获量的一半。自 70 年代以来各国竞相试捕,至 80 年代,最高年产量已达 52.9 万吨。中国近海渔业资源已严重衰退,发展远洋渔业势在必行。作为远洋渔业的一个组成部分,开发南极磷虾具有广阔的前景。

南极是与北极和青藏高原齐名的地球上三大气候敏感地区之一。对南极气候环境的研究是世界气候计划和全球变化计划研究中的一个重要组成部分。从 1957 年国际地球物理年起,南极古气候和古环境的研究,获得了较大的发展,其中最突出的是 60 年代开始的冰芯的研究。美国在伯德站、前苏联在东方站,都钻获 2 000m 的冰芯;英、法联合在洛多姆冰帽打了深 905m 的冰钻。1991 年 9 月 22~27 日,SCAR 在德国布莱梅市举行了规模空前的首届国际南极科学大会,展示根据对冰内同位素含量比( $^2\text{H}/^1\text{H}$  和  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ )、冰内气泡和有 15 万年记录的南极冰芯分析结果,表明在过去 200 年中,温室效应的气体明显增加。自人类工业化以来,大气圈中的  $\text{CO}_2$  增加了 25%,甲烷和  $\text{N}_2\text{O}$  分别增长近 100% 和 10%。冰芯分析还揭示,冰期—间冰期气候变化基本上和大气圈内温室效应气体的富集有关。冰期最冷阶段时,大气圈  $\text{CO}_2$  的浓度比现代低 30%,甲烷低 50%。利用上述结果建立的模式预测,在其它条件不变时,大气圈内  $\text{CO}_2$  含量增加 1 倍,气温将升高 3~4℃。

70 年代以来,在南大洋实施了国际深海钻探计划。通过海底软泥芯的研究,获得了沉积物组成、类型、生物、浊流、等密度流、浮冰以及沉积环境的沉积作用的认识;获得了南极地区更新世冰期与间冰期沉积旋回的表征和南极底流的历史,以及 2 500 年以来南大洋同位素组成及环流变化和晚更新世硅藻地层学方面的资料。

1985 年法曼(J. G. Farman)等注意到南极哈利湾站(Hally Bay, 76°S, 64°W)春季的臭氧( $\text{O}_3$ )总量比其它季节和地区减少很多,比 10 年前该地区  $\text{O}_3$  总量减少 30%~40%。随后,美国宇航局(NASA)利用极轨卫星雨云七号上安装的  $\text{O}_3$  总量绘图光谱仪(TOMS)和太阳后向散射紫外光谱仪(SBUV)对全球  $\text{O}_3$  总量观测的资料,也证实了这一结果,并发现春季  $\text{O}_3$  总量在整个南极地区都下降,同周围地区的  $\text{O}_3$  总量相比,就显得在南极洲出现

了一个O<sub>3</sub>空洞,这就形成了南极臭氧洞。现在对南极O<sub>3</sub>洞的形成机制主要有大气动力学、太阳活动和大气化学过程等诸种解释。1986年汤(K. K. Tung)、肯尼斯(P. B. Kenneth)和卡德拉(S. Chandra)等提出了O<sub>3</sub>洞形成的大气动力解释。他们认为,冬季大气波动几乎不向环极涡旋中输送O<sub>3</sub>,而大气动力过程往南极环极涡旋中输送的非绝热通量(H)也不强,基本上与长波辐射冷却率C(T)近似平衡,并达到最低温度T<sub>e</sub>。初春极夜结束,太阳重新出现时,这种平衡被破坏。太阳辐射使H增大,产生净加热率Q。被加热的空气产生上升运动,垂直将对流层O<sub>3</sub>丰度较低的空气输入到平流层,造成O<sub>3</sub>的流失,从而出现了南极O<sub>3</sub>洞。S. Yoshiro 1986年发现,太阳黑子数与O<sub>3</sub>总量的相关系数为R = -0.70;并且O<sub>3</sub>总量的3年滑动平均值:Ω<sub>t</sub> = (Ω<sub>t+1</sub> + Ω<sub>t</sub> + Ω<sub>t-1</sub>)/3同太阳活动一样也有11年的周期。魏鼎文1990年指出,南极地区是O<sub>3</sub>对太阳活动响应最敏感的地区,并指出除了太阳紫外线辐射大大增强对O<sub>3</sub>的影响外,逐渐增多的大量带电粒子也是形成南极O<sub>3</sub>洞的原因。太阳活动形成O<sub>3</sub>洞的机制是:随着太阳活动峰年的临近,宇宙射线明显增强,使大气中的NO<sub>2</sub>和其它奇电子氮化合物的含量增加,通过下列化学过程破坏南极的O<sub>3</sub>层: NO<sub>2</sub> + O<sub>3</sub> → NO<sub>3</sub> + O<sub>2</sub>。法曼1985年首先提出氯催化化学反应能破坏南极的O<sub>3</sub>。所罗门(S. Solomon)等1986年证实了这一点。麦克罗里(M. B. McElroy)1986年则强调Br和Cl之间存在的最佳浓度混合比在破坏南极O<sub>3</sub>中的重要性。考克斯(R. A. Cox)等1988年证实了两个氯催化反应环的存在,从而将氯破坏O<sub>3</sub>的过程同化学理论联系起来。

进入90年代以来,一个又一个大规模国际合作计划应运而生。例如南极岩石圈大断面计划,运用地质、地球物理、遥感等手段完成从阿蒙森海经极点至埃默里冰架的南极大陆基准岩石圈剖面研究。至少20个国家的科学家投入到这个为期5年的科研项目中。类似的合作计划还有南极陆地系统生物调查(BIOTAS),国际全球大气化学计划(IGAC),国际卫星云层气候学计划(ISCCP),国际卫星陆地表面气候学计划(ISLSCP),全球洋流联合调查计划(JGOFS),中层大气计划(MAP),日一地环境监测(MONSEE),世界大洋环流实验(WOCE),世界气候研究计划(KCRP)等。中国的南极研究,根据国家南极考察委员会的部署,在“八五”计划期间,主要侧重于:南大洋磷虾资源考察与开发利用研究,南极重点地区生态系统研究,南极大陆和陆架盆地岩石圈结构、形成、演化和地球动力学及重要矿产资源潜力的研究,晚更新世晚期以来气候与环境演变及现代环境背景的研究,南极与全球气候环境相互作用和影响的研究,南极日地系统整体行为研究,南极环境对人体生理心理等方面影响及医学保障的研究。

#### 参考文献

- 1 Farman JG, Gardiner B G, Shanklin J D. *Natures*, 1985, 315: 207~210
- 2 刘小汉,位梦华. 南极研究, 1991, 3(4): 60~66  
(南京大学朱诚副教授撰,刘淑军审)

### 南极自然地理 *antarctic physical Geography*

南极洲位于地球的最南端,四周濒太平洋、印度洋和大西洋,面积约1.4 × 10<sup>7</sup> km<sup>2</sup>,其中大陆面积约1.239 × 10<sup>7</sup> km<sup>2</sup>,岛屿面积约7.6 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,陆缘冰面积约1.58 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>。南极洲面积在世界七大洲中居第5位,南极大陆是水圈、大气圈的冷源,对地球的气候调控起重要作用;它又是地球上资源和能源极为丰富且有待开发的最后一块大陆。

1965年,安德森(J. J. Anderson)、哈宁顿(H. J. Harrington)和瓦伦(G. Warren)全面总结了南极大陆地质的特征,即南极大陆是冈瓦纳古陆的一部分。在侏罗纪末期,大约1亿4千万至1亿6千万年前的第1次分裂后,出现了由南美洲和非洲组成的西冈瓦纳大陆和包括南极洲、印度、新西兰和澳大利亚的东冈瓦纳大陆。东南极的主体是古老的前寒武纪地盾,由太古代和元古代

多次变质的沉积岩、火山岩和侵入岩组成。东南极和西南极之间的缝合线是以南极横断山脉为标志的,它主要由前寒武纪至中寒武世褶皱和轻变质沉积岩、火山岩以及著名的罗斯超群组成。西南极形成时期的主要造山作用是安第斯造山作用,它以晚白垩世——早第三纪广泛的花岗岩侵入为标志,这种花岗岩大约占了南极半岛的80%。

1979年,洛夫林(J. F. Lovering)和普雷斯科特(J. R. V. Prescott)概述了南极洲的地貌特征,即南极洲主要由大陆冰盖和四周的南大洋及其岛屿组成,南极大陆冰盖面积约1200 km<sup>2</sup>,平均厚度2000~2500m。南大洋是世界上唯一完全环绕地球,而没有被任何大陆地块分割的大洋,它的南界是南极大陆边缘,它的北界一般认为应定在50°~60°S之间的南极辐合带上,向北流动的南极水与向南流动的温暖大洋水在这里相遇。

南极大陆是地球上最冷的大陆,现今世界最低气温记录为-88.3℃,这是1960年8月24日前苏联东方站(Vostok)在南极大陆测定的。鲁宾(M. J. Rubin)1965年根据研究结果指出,南极大陆沿海地区年平均气温约为-17℃,沿大陆冰盖斜坡向内陆地区,年平均气温随高度和纬度的增加而逐渐降低,海拔升高100m,年平均气温下降1℃以上。南极大陆是地球上风最多的地区,大陆沿岸盛行东风,其它地区盛行从大陆高原沿大陆冰面陡坡急剧下滑的下降风。1912~1913年,莫森(Douglas Mawson)曾在阿德利地丹尼森角观测到下降风平均风速大于17.9m/s的日数一年占64%。南极洲也是地球上最干燥的地区,鲁宾和韦扬特(W. S. Weyant)1965年统计出,除沿海200~300km<sup>2</sup>宽的狭窄地带内年平均降水量为200~600mm外,南极大陆内部几乎所有降水都是固体形式的,且年降雪量很少。在东南极高原年降水量仅50mm。

严酷的环境使得南极大陆动植物种类稀少。拉诺(G. A. Llano)1962年揭示了南半球的树线大约在54°S,南极大陆现在没有树木生长。1965年拉诺又指出,以总生物量而论,藻类是南极洲最丰富的植物,鲜绿色的单细胞藻类生长在岩石上,蓝绿藻生长在冰上,而地衣则是分布最广、种类最多的南极大陆植物,因为它最能适应干燥和严寒的环境。

格雷西特(J. L. Gressitt)1965年根据长期研究结果指出,南极大陆最高等的土著动物是昆虫和蜘蛛类,特别是蜂、虱、螨、尖尾虫和螺,陆生脊椎动物则根本没有。陆地动物虽达150种左右,但其中许多种是海鸟和海兽身上的寄生虫,并非真正的陆地动物。

与南极大陆上贫乏的动植物区系相反,环绕南极大陆的南大洋却充满了生机。墨菲(R. C. Murphy, 1962)分析认为,在南大洋中,从微小的单细胞植物和动物到成群栖息在海岸附近的海豹、企鹅、海鸟以及大量的鲸,应有尽有。南大洋高等生物之所以丰富,是因为那里有繁茂的浮游植物,其中大多数是硅藻,这些硅藻是南极磷虾的食物。磷虾是南大洋食物链中的关键环节,它直接维持着南大洋中其它所有较高生命形式的动物——枪乌贼、鱼类、企鹅、海鸟、海豹和鲸的生存。埃文森(I. Everson)1977年调查后认为,南大洋主要鱼类是Nototheniiformes,该门所包含的5个科约占全部近海鱼种的75%,其中南极鳕科、鳕科、鳕科和无须鳕亚科具有潜在的经济价值。

约翰斯顿(G. W. Jognstone)1978年据研究结果指出,南极大陆上没有陆地鸟类,在南极区繁殖的仅有41种海鸟。沃特森(G. E. Watson)1975年研究后指出,以捕食磷虾为生的企鹅是最能体现南极特征的海鸟,它们不会飞翔,一生中约有一半时间生活在海里。在南极辐合带以南繁殖后代的企鹅有7种,其中有4种是在南极大陆和邻近岛屿区生育的,即平均体重41kg、直立身高约1.22m的帝企鹅(*Aptenodytes forsteri*)、以及体形稍小的阿德利企鹅(*Pygoscelis adeliae*)、金图企鹅(*Pygoscelis papua*)和帽带企鹅(*Pygoscelis antarctica*),其它3种只在亚南极岛屿上繁殖后代。在南极地区繁殖的海燕有24种,它们包括了按自然顺序划分的各种鸟类的代表,即从巨大的漫游信天翁到个体极小的

风暴海燕,而只有雪海燕(*Pagodroma vivea*)终身生活在南极辐合带以南地区。在南极地区繁殖后代的其它鸟群还有贼鸥、燕鸥、海鸥和鞘嘴鸥等共约7种,褐色贼鸥(*Catharac taskua*)是南极地区最常见的掠食鸟类之一。

墨菲1962年揭示威德尔海豹(*Leptonychtes weddelli*)、罗斯海豹(*Ommatophoca rossi*)、锯齿海豹(*Lobodon carcinophagus*)和豹海豹(*Hydrurga Leptonyx*)在浮冰区北界以南的南极水域中繁殖后代。另一种数量较多的象海豹(*Miroung leonina*)在南极区的外缘生育。豹海豹是企鹅的最大捕食者,锯齿海豹专以捕食磷虾为生,罗斯海豹主要捕食乌贼,最常见的是威德尔海豹,它主要捕食鱼、乌贼和底栖无脊椎动物。

洛夫林和普雷斯斯科特1979年总结出,在南极水域已发现的鲸有12种以上,其中最大的是蓝鲸(*Balaenoptera musculus*),体长可达30m以上,重约150t,其它主要有须鲸(*Balaenoptera physalus*)、抹香鲸(*Physeter catodon*)和虎鲸(*Orcinus orca*),它们主要以捕食磷虾、鱼、乌贼、企鹅和海豹为生。

南极洲拥有某些重要的自然资源、能源和科学研究价值。休特(J. L. Hult)和奥斯特兰德(N. C. Ostrander)1973年统计后指出,南极冰盖是世界最大的淡水库,它的体积约为2450万km<sup>3</sup>,其淡水储量约占世界总淡水量的90%。武衡1988年指出,据初步估计仅南极大陆的铁矿按目前世界每年平均开采量可以开采200年。国际南极研究科学委员会(SCAR)1977年估计,南极磷虾储藏量至少在10亿吨以上,每年生产出来的磷虾至少在1.1亿吨以上。迄今为止,已有20多个国家在南极洲建立了近50个常年考察站和100多个夏季考察站,对南极的资源、能源和环境进行全面深入的调查和研究。

#### 参考文献

- 1 Everson I. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1977. 155~157
- 2 Lovering JF, Prescott JRV. Last of Lands-Antarctica. Melbourne University Press, 1979. 1~229
- 3 武衡. 中国科学院地学部第2次学部委员大会文集. 北京: 科学出版社, 1988. 101~103
- 4 朱诚, 陈传康. 地理学报, 1991, 46(3): 300~309

(南京大学朱诚副教授撰, 刘淑军审)

### 北冰洋自然地理 physical geography of Arctic ocean

北冰洋地处北极圈以北的北极地区,为亚洲、欧洲和北美洲所环抱。面积1310km<sup>2</sup>,为世界最小的大洋。北冰洋平均深度为1130m,最深的利特克海沟5449m。北冰洋是一个近于封闭的极地海洋,因而气候极度严寒,造成洋面广布常年不化的冰盖、浮冰和冰山。北冰洋底大陆架宽阔,其面积竟占整个大洋总面积的1/3强,几个不深的海盆(一般3000~4000m)被几条海岭分隔开,其中最突出的海岭是纵贯北冰洋中部的罗蒙诺索夫海岭,而属于大洋中脊性质的加克利亚海岭 хр. Гаккеля 与大西洋中脊海岭在冰岛连接,向北穿过南森海盆直到勒拿河口附近,但其宽度、高度、裂谷发育等都表现为不健全而幼稚的特点。

英文 Arctic ocean(北冰洋)一词源于希腊语,意思是正对大熊星座的海洋,而俄文 Северный Ледовитый Океан,意译即北冰洋。世界上最先将北冰洋划作独立大洋的是德国(后移居荷兰)地理学家瓦伦纽斯(B. Varenius),他在《通论地理》中明确将北冰洋与其它大洋同等并列。1845年,在伦敦地理学会上被正式承认北冰洋的名称。后来,许多学者将世界洋只划作3个,把北冰洋只作为大西洋的属海。从20世纪30年代起,又重新将北冰洋独立划分出来。目前,一般国家都将世界大洋划分为太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋。

北冰洋的形成,在地质史上是比较晚近的事。大致在中生代(2.25亿~0.65亿年前)时期,它还只是泛大洋(古太平洋)的1个海湾,称为博雷利斯湾。可能直到距今0.25亿年前(更新世),现今北冰洋的海盆才逐渐连接起来,北大西洋的海水才大规模地

与极地区的海水互相交流。直到第四纪大陆冰川消融,才形成北冰洋今日的轮廓。

开始认识北冰洋的人,应是因纽特人(爱斯基摩人),因为他们早在5000~6000年前已在北冰洋沿岸生活,他们在北冰洋边划着独木舟捕猎海豹、海象、北极熊,赶着狗拉雪橇远距离捕猎北极狐、驯鹿等兽类,因此,他们很早就对北冰洋的海水、海冰、气候、生物等基本情况有一些了解。在公元18世纪以前,当时住在斯堪的纳维亚半岛和日德兰半岛的诺曼人,他们为寻觅捕获鱼类和海兽、从事商业贸易,甚至进行冒险和海盗活动,在北方绕过了斯堪的纳维亚半岛进入白海,在10世纪以前,他们已横渡大西洋北部并到了冰岛和格陵兰。这说明诺曼人对大西洋与北冰洋之间的海域状况早已有相当的了解。到15世纪后期,英国、荷兰的工商业有了较大的发展,需要扩大对外贸易,特别是对东方的印度和中国的商业贸易,但是当时从大西洋经印度洋或太平洋通往印度和中国的航路已控制在西班牙和葡萄牙人手中。因此,迫使英、荷向北冰洋寻找通往东方的航路。由于北冰洋海域地处高纬,有漫长的寒冬和永夜,常有非常恶劣的暴风雪天气,海上冰丛拥挤、浮冰漂移,在这种条件下,要想顺利地找到通往中国、印度的航路,是十分困难的。据一些材料了解,16世纪以来,英国、荷兰、俄国等,先后有不少探险家、航海家、科学家甚至海军军官率领探险队对北冰洋进行探险和调查。如1576~1578年英国M. 弗罗比瑟率领的两首船曾到达格陵兰岛以西的巴芬岛附近。1585~1587年J. 戴维斯曾到达格陵兰岛西侧海峡的72°12'N的纬度,因受浮冰和浓雾的影响才不能继续前航。现已将该海峡命名为戴维斯海峡。1610年以英国探险家哈德孙(H. Hudson)为首的探险队曾航行探险到北美大陆北面的哈德孙海峡和哈德孙湾的北冰洋海域。1615年巴芬(W. Baffin)等组成的探险队曾先后探测了掃桑普敦岛(南安普顿岛)以北的水道。探险队认为,由于冰块、浅滩甚多而又缺少洋流的情况下,是没有通路的征兆。第2年,该探险队再次通过格陵兰岛西侧探寻,虽到了史密斯海峡、忠斯海峡和兰开斯特海峡,但终因遭到重重浮冰的困阻,根本无法通行,只好返航。现在的巴芬岛和巴芬湾的名称即来源于W. 巴芬的名字。1631年,英国福克斯对哈得湾西部和南部作了进一步考察,并发现了该湾以北的福克斯海峡、福克斯湾和巴芬湾西南的福克斯半岛。以后200余年的时间,虽也有一些探险队企图通过“西北航路”(北冰洋靠北美大陆一侧)的探险航行,但均未获得成功。一直到1903~1905年的挪威阿蒙森(R. Amundsen)率领的探险队驾驶着“伊瓦”号汽艇,通过巴芬湾,曲曲折折穿过很多冰海和海峡,最后穿越白令海峡抵达了北美西海岸的旧金山。成为世界上第一支乘船通过“西北航路”的探险队。

在探寻“西北航路”的同时,英、荷、俄等国也先后派遣和支持一些探险队去寻找“东北航路”(北冰洋邻近欧亚大陆的海域)。16世纪中叶,英国先后派出威劳比(1553)、勃罗(1558)和庇特(1580)率领的3支探险队探寻前往中国的“东北航路”,但因遭暴风雪和严冬的侵袭,最远只到达新地岛。16世纪末,荷兰人巴伦支(W. Barents)曾多次率领探险队在欧洲以北的北冰洋海域,向东向北探寻,他们曾到达了熊岛、斯匹次卑尔根群岛和新地岛,并对这些岛屿间的海域进行了探测和调查,他们虽经艰苦努力仍无法穿过环境极端严酷的喀拉海,而巴伦支于1597年却在探险途中病逝。为纪念巴伦支的功绩,后人将他探险调查过的这一海域,命名为巴伦支海。1648年由迭日涅夫(С. Дежнев)率领的探险队驾驶几条独桅小船从北冰洋岸的科累马河口出发,在浮冰间隙之间艰难的东航,经过东西伯利亚海、楚科奇海,绕过亚洲东端的“东角”而到达白令海西北的阿纳德尔河口。现已将“东角”改称“迭日涅夫角”。1728年白令(von. Bering)从堪察加半岛乘船穿过亚洲和北美洲之间的海峡进入北冰洋,从此,探明了北冰洋与太平洋间的通道。1733~1743年的10年间,由俄国海军总部组织了“大北方探险队”,由许多单独的海上和陆上分队组成。在俄罗斯北部诸大河河口均建有基地,对北冰洋的俄罗斯各边缘海进行探险和考察,较为详细地记述了各考察海区的海况、冰

情、水文和天气气候状况,还收集了部分沿岸的动、植物资料。然而,最终仍未真正探明从大西洋向东经北冰洋进入太平洋的“东北航线”。

第1支征服“东北航线”的探险队是“瑞典北极探险队”。该探险队由芬兰人A. S. 诺登舍德率领。1878年,乘300t的“维佳”号海船由挪威北部特罗姆瑟港出发,进行“东北航线”探险。他们克服了一个又一个的困难奋力东进,当严冬初夜来临时,已到楚科奇半岛北边的科姆铁湾,只得在此熬过漫长和严寒的冬夜。第2年夏天才穿过白令海峡抵达太平洋岸的彼得罗巴甫洛夫斯克的海参崴。

1932年,由前苏联O. Ю. 施米特和B. Ю. 维泽率领的“西伯利亚科夫”号破冰船,用2个月时间完成了从阿尔汉格尔斯克直达海参崴的航行,实现了不需在中途过冬而在一个航期中完成“东北航线”的驶航任务。

对北冰洋中部海区调查研究做出重大贡献的首推挪威的南森(F. Nansen)。1882年南森即开始研究高纬度海洋动物的生活特性,1888年首次以雪橇横穿北冰洋中最大岛屿—格陵兰,并研究了格陵兰岛爱斯基摩人的生活。1893年“弗拉马”号小海船从挪威出发,沿北冰洋岸向东进发,经过巴伦支海、喀拉海并绕过切柳斯金角,进入了向极地漂移的浮冰中,在缓慢的漂流过程中,特制的“弗拉马”号海船经受了浮冰的碰撞和挤压,直到1895年3月,才漂流到 $84^{\circ}04'N, 102^{\circ}E$ 。此时,南森认为海船已漂到离北极相当远的地方,决定离船步行去北极,然而因海流将脚下的冰原带向西南方,在冰上的艰难跋涉,难于到达北极,只好放弃而返回。南森所率领的“弗拉马”号探险队在3年的北极海域的探险中,进行了11次水深测量,测得水深变动于 $3400\sim 4000m$ 之间,并收集了有关北冰洋的洋流、浮冰、气象等许多很有价值的资料。南森著有《北极盆地海洋志》、《北极海深特征》、《远北区》、《格陵兰横越记》及《爱斯基摩人的生活》等书,对北极和北冰洋的研究,做出了巨大的贡献。现在已将南森探险队探测过的北冰洋海盆命名为南森海盆。从20世纪30年代起,前苏联在北冰洋海域扩大了探测考察范围。1937年建立了“北极漂流站”,其中最著名的是“Г. 谢多夫”号破冰船的漂流考察探测。该船在北冰洋中漂流考察了812天(从1937年10月至1940年1月)。曾漂达 $N86^{\circ}39'5''$ 的高纬冰海,这里距北极只有320km。“Г. 谢多夫”号对北冰洋辽阔的海域进行了水深、海底地貌、海流、地磁、气象、冰情等多方面考察。根据此次考察所获资料与南森“弗拉马”号考察资料对比分析,发现了从本世纪起北极气候开始转暖。据K. C 巴季庚的分析,在“Г. 谢多夫”号和“弗拉马”号漂流最相符合的地区中,“Г. 谢多夫”号所记录的平均气温要比“弗拉马”号所记录的平均气温高 $4.1^{\circ}C$ 。在冬季,从9月到2月,这种气温差达 $7.5^{\circ}C$ 。“弗拉马”号的漂流期中,水面冰冻的最大厚度为3.7m,而我们漂流期中,大约在同一区域水面冰冻的最大厚度为2.5m。前苏联为了在北冰洋中部北极附近进行科学观测,曾于1937年5月在 $85^{\circ}29'N, 78^{\circ}W$ 点建立了第1个北极科学观测站。原计划该站观测一年时间,但建站的冰原却不断移动,到1938年2月19日(计274d)“北极”科学站已漂移到远离北极的 $70^{\circ}45'N, 19^{\circ}48'W$ 的地方。科学观测站只好由“太梅尔”号破冰船和“摩尔曼人”小艇接回前苏联。1937年6月,前苏联“安特—25”飞机从莫斯科经北极上空、加拿大北极群岛西部飞抵美国波特兰。此后,苏、美等国都相继派飞机飞越北极上空。1953年5月,斯塔的纳维亚航空公司“DC—6B”型飞机由挪威奥斯陆起飞,越过北极到达日本东京,这是穿越北极的大型民用航空客机首航成功。由于飞越北极的航空线是联结欧、亚、北美三大洲的捷径,所以从1959年起,已先后开辟了联结西欧、北欧与远东间的多条航空线穿越北冰洋上空。

60年代以来,美、苏、加等濒临北冰洋国家,对北冰洋的调查、研究和监测更加重视。1958年,美国潜艇首次从北极冰原下面穿过北冰洋。1970~1976年,美国加拿大利用人造卫星和浮标等技术,在北冰洋进行了“北极动力学联合实验”。前苏联先后建

立了数个浮冰漂流站,用几十艘破冰船对北冰洋进行了广泛而多学科的调查监测,且在1977年8月用“北极”号破冰船到达了北极点,开辟了穿过北冰洋的新航线。另外,英、法、日、德、比、丹、挪、瑞(典)、芬等国,也多次到北冰洋考察。据统计,世界各国已有200余艘破冰船,在北冰洋进行了300多航次的考察和探测,获得了多方面的观测资料和研究成果。现在对北冰洋的海水深度、海底构造、海底地貌、海底沉积、海水温度、盐度、密度、海流、海洋气象、海洋生物、海底矿藏以及航运条件等基本特征,都有了一定了解。但直至今日,对整个北冰洋的调查、研究和认识,都远不如人们对大西洋、太平洋和印度洋那样全面和深入。

鉴于北冰洋恶劣的自然环境,今后除了对一些边沿海域进行人员直接调查研究外,应充分利用飞机、卫星从高空进行遥感遥测,利用浮冰漂流站建立有人与无人多学科多功能仪器监测;还可利用潜水器、潜水机器人进行冰原下调查研究,探明其自然资源,掌握其海上气象变化、浮冰消长和运移的规律,为开发利用其资源、发展航运和航空事业作努力,以便更好造福人类。

#### 参考文献

- 1 Heezen BC, et al. national Geog Magazine, 1971
- 2 Пуцаровский Ю М. геотектоника, 1976. 2
- 3 Богданов Д В. География мирового океана, м, 1978
- 4 毛汉英. 北冰洋. 天津: 天津人民出版社, 1980
- 5 Логвиненко Н В. Физическая География Мирового океана, 1980
- 6 玛丽. A. 麦克惠民著. 南北极研究的现状和未来. 高玉香, 等译. 北京: 海洋出版社, 1981
- 7 Капша А. П. Северный Ледовитый И южный океан, П. 1985
- 8 于效群, 等. 海洋科技发展概况. 北京: 海洋出版社, 1986
- 9 Леонтьев О К 著. 世界大洋自然地理. 李志国, 等译. 北京: 高等教育出版社, 1990

(福建师范大学吴廷辉副教授撰; 林庸甫)

### 印度洋自然地理

physical geography of Indian Ocean

印度洋位于亚洲、非洲、南极洲和澳大利亚之间,面积7492万 $km^2$ ,为世界第3大洋。印度洋平均深度3897m,最深的阿米兰特海沟(Amirante Trench)9074m。印度洋有北部封闭、南部开敞的水平轮廓,北部因受较多的半岛、岛屿穿插分隔,形成许多边缘海、内海与海峡,因而岸线曲折,而南部岸线比较平直简单。印度洋底展布着“入”字形的大洋中脊海岭、广泛分布的大陆隆起、特有的 $90^{\circ}E$ 海岭、巨大的恒河与印度河水下冲积锥以及几个大的海盆相嵌其间,构成印度洋海底地貌的基本格局。印度洋的主体部分位于赤道带、热带和副热带范围内,因此,被称为热带性的海洋。由于印度洋与亚洲大陆的交互作用,随着季节的交替,使印度洋北部形成热带季风气候和特有的季风洋流。印度洋海洋资源以石油最突出,波斯湾是世界海底石油储量产量最丰富的地区。

印度洋的产生和形成,与冈瓦纳古陆的分离和特提斯海的缩小衰减过程紧密相关。根据“海底扩张说”与“板块构造”理论,结合大量的海洋地质调查和有说服力的动植物化石,都充分证明了以上说法的正确性。大致在三叠纪以前,冈瓦纳古陆还是一个整体,特提斯海呈一巨大的三角形楔在北方劳亚古陆和南方冈瓦纳古陆之间。到侏罗纪时冈瓦纳古陆开始分裂,至晚侏罗世,即距今约1.6~1.4亿年前,非洲大陆与南极—澳大利亚大陆之间出现大洋中脊,古特提斯海向西南侵入,构成了印度洋的雏型。到了晚白垩世,即距今1~0.8亿年前,印度、马达加斯加与非洲大陆脱离,相继在非洲与马达加斯加、马达加斯加与印度、印度与澳大利亚—南极大陆之间,发展了大洋中脊。其后,印度洋板块随着洋底的快速扩张,每年向北漂移10cm左右,直到早第三纪末即距今约0.6亿年前,与亚欧板块发生碰撞,形成喜马拉雅山。印度洋今天的轮廓和规模,直到第四纪即约0.03亿年以后才形成。

印度洋北部的阿拉伯海、波斯湾、亚丁湾、红海一带的海上航行,大约早在7000~8000年前就开始了。考古学家们从巴林

群岛、阿拉伯半岛南部、马达加斯加岛,以至古埃及首都菲瓦等地发掘出远古印度的大量文物古迹,就证明了印度远在石器和铜器时代,就已是一个航海国家了。印度洋北部成为世界最早的航运中心,一方面在其沿海一带孕育了世界上灿烂的古代文明(印度、巴比伦、埃及),另一方面北部印度洋有规律地变换方向的热带季风和季风洋流,给这里发展海上航行、贸易往来赋予了特殊有利的条件。在孟买附近的“洛塔尔”,就发掘出7000年前的港口码头、货站和船坞。船坞规模长达280m、宽37m,这在当时是相当惊人的。有由当时印度、波斯、阿拉伯等国的海员、商人利用北印度洋的“贸易风”往返航行于印度半岛、阿拉伯和东非沿海的史料记载,他们当时对北印度洋的气候、水文等情况已有初步的了解。

对印度洋最早记述的著作叫《厄立特里亚海环行记》,此书写成于公元1世纪。本书总结了当时各国海员在印度洋的航海经验,详细介绍了沿海各国的物产、港口情况和航运距离,记载了横越印度洋的贸易状况。书中谈到海员们依据季风的规律性,限期在一定时期内,快速横渡印度洋辽阔的洋面,改变了传统的靠岸边慢速航行的走法。

写于公元1世纪的中国《汉书·地理志》,记载了中国商船从广东徐闻、广西合浦出发,满载丝绸、琉璃以及黄金、珠宝等,经过南海、安达曼海、孟加拉湾而抵达印度,并从印度运回珍珠、宝石及土特产品,这说明汉代或更早的时间,中国海员已来到印度洋。根据《宋书》记载,在南朝的刘宋时代(420~479)中国远洋帆船已到达波斯湾湾头。阿拉伯马苏第在其《黄金草原》一书中说,6世纪时,中国商船经常来到波斯湾阿曼、巴林和巴士拉港进行货物交换与贸易。英国李约瑟主编的《中国科技史》一书明确指出:公元350年,中国船只航行到马六甲海峡北口檳榔屿,公元4世纪末横越东印度洋到锡兰(斯里兰卡),5世纪时来到波斯湾尽头的幼发拉底斯河口,并访问了天然良港亚丁。另据阿拉伯史料也证明了李约瑟的论断是正确的,而且还证明苏哈尔港(阿曼港口)曾被阿拉伯商人称为“通向中国的门户”。自从宋代航海用指南针于航船以后,中国广州、泉州与阿拉伯、印度、东非各国通过印度洋进行贸易交往已非常频繁,这条航线即是著名的“海上丝绸之路”。15世纪上半叶,中国郑和率领庞大的船队7次下“西洋”,前后达28年(1405~1433),航行于印度洋和南中国海广阔海面对一些重要海域、海峡,如安达曼海、孟加拉湾、阿拉伯海、红海、马六甲海峡、尼可巴海峡、曼德海峡与霍尔木兹海峡等,都进行了考察,他们途经40多国,穿过印度洋北部各海,直到东非沿岸,并发现了马达加斯加岛。这一发现比欧洲人发现该岛还早60年。郑和率领的船队用指南针定向,对途经的海岸、岛屿、水深、海水运动和风向等都作了记载。

在郑和7次下“西洋”半个世纪之后,欧洲人为了通过海路寻觅印度和中国,受葡萄牙国王派遣的瓦斯科·达·伽马(Vasco da Gama),率领船队于1498年初绕过“风暴之角”(后取名好望角)进入印度洋,后沿东非海岸北上,到马林迪(Malindi)港,在阿拉伯航海家艾·伊·马吉德的导航帮助下,成功地横渡北印度洋抵达印度西海岸的卡利卡特(Calicut)港。在这次有名的从欧洲穿过印度洋到达印度航行之后,便开始了绕过非洲南端与印度的定期航行,一直到苏伊士运河开通通航为止。此后,受西班牙国王命费尔南多·麦哲伦(Fernao de Magalhaes)率队由圣罗卡(Sanlucar)启航,越过大西洋,绕过南美洲,穿过太平洋到亚洲的菲律宾和摩奴佳群岛,并第1次横越印度洋中部,绕过非洲南端最后返回西班牙。1642年阿·塔斯曼以爪哇为基地在印度洋发现了马斯克林群岛,而后向东南航行,在南纬49°处折而向东,绕过了澳大利亚南部,并发现了塔斯马尼亚岛和新西兰岛。其后,著名的库克(Captain James Cook)于1766~1779年进行了3次航行,特别是前2次为了寻觅“南大陆”而远达印度洋、大西洋、太平洋的南部海域,包括南极附近的浮冰区(71°10'S)。所以,库克是第1位到达并探测南印度洋的航海家。

到18世纪后期,人们对世界陆地与海洋已经积累了相当丰富的实际探险和考察材料。对印度洋的轮廓、主要岛屿、主要航

线、气象和海流特点等,都有了较为清楚的了解。在此基础上,已绘制出印度洋沿岸及主要岛屿的地图。

19世纪开始了世界洋的科学考察。俄国Ф.Ф.别林斯高晋和M.M.拉扎列夫乘坐“东方”号与“和平”号在南半球高纬区海域探测航行,于1820年首次发现了南极洲,同时对南极水域进行了系统的水文、气象观测。

1853年在比利时首都召开了第1次国际海洋会议,通过了世界统一的航海观测制度,这对观测标准化、综合系统整理各国观测和收集的世界海洋资料、系统进行海洋科学研究工作,起了重大的作用。

从19世纪后半期起,一些国家开始使用专门的船只对海洋进行考察。第1个考察队是英国的“挑战者”号(Challenger)。考察时间从1872年12月到1876年5月。此次历时3年多的包括印度洋在内的环球考察,包括海水深度和密度、表层和深层水温、海水透明度、海洋环流,还测量了各海域的地磁值。本次系统综合的调查材料和标本,由70位科学家从事整理分析研究,用了20年时间,写成了报告50卷,计29500页,还有3000多幅插图,成为近代海洋学“奠基性调查”总结报告。

为了填补“挑战者”号未曾进行的赤道无风带海域的调查,瑞典“信天翁”号(Albatross)于1947~1948年对印度洋和太平洋、大西洋的这一海域进行了补充观测和调查。

从本世纪50年代后期兴起,60年代得到蓬勃发展的国际联合海洋调查,标志着海洋考察与科学研究发展到一个新的阶段,如1957~1958年的“国际地球物理年”(IGY)组织了40多个国家80艘船只,对世界大洋进行全面系统调查,其中前苏联“勇士”号等对印度洋和南极海区作了大量的调查。1960~1964年的“国际印度洋调查”(IIDE),由联合国教科文组织发起,有10多个国家的36艘调查船参加。此次调查发现了新的海山和苏达群岛南岸的涌升流鱼场,发现了索马里海流、红海热流及丰富的重金属矿泥、印度洋的赤道潜流等。

1968年以美国为首的“深海钻探计划”(DSDP)由“格洛玛·挑战者”号(Glamor Challenger)实施,历时15年(1968~1983年),共完成96个航次,航程60万km,在大西洋、印度洋和太平洋624个站位上钻井1092口,取得岩芯95000余m。从1985年起,“大洋钻探计划”(ODP)由“乔迪斯·决心”号(TOIDES Resolution)钻探船施行。该船在1987年第115航次中,在印度洋底第一次取得未被扰动的岩芯,这为研究和重建印度洋古海洋环境史提供了重要的依据。此后几个航次对孟加拉湾与阿拉伯海底进行了多次钻孔,从而取得了不同部位与不同厚度的岩芯。从这些钻孔取样分析研究,对印度洋板块与亚洲板块的碰撞和喜马拉雅山青藏高原的隆升过程,获得了更具体的了解。随着喜马拉雅山、脉的隆起,直接影响到印度洋北部热带季风的形成和演变。当西南季风盛行时,阿拉伯海西侧出现上升流,富含营养盐的上升流导致海洋生物的繁殖,这在阿拉伯海海底沉积层的微体古生物化石中得到了反映。强盛的季风还导致海水中缺氧,从而形成纹层状缺氧沉积物。通过对孟加拉湾、阿拉伯海及印度洋其它海域的钻探和取样分析,对印度洋洋盆的演化、古海洋环境的变迁、热带季风和季风洋流发展的复杂历史以及海底矿产资源的分布和生成等方面的认识,均较以前有很大的进步。

1971~1980年的“国际海洋考察10年”,是迄今国际上规模最大、内容最广、时间最长的一次国际联合调查研究。调查研究涉及环境质量、环境预报、海底资源和海洋生物资源4大领域,分5类40多项具体内容。共有80多个国家和地区参加,使用了从调查船、飞机、潜水器、浮标到人造卫星等多种新技术和仪器,取得了丰硕的成果。其中对北印度洋季风环流多要素、多因子的综合调查(1973)和专门观测(1976),对南印度洋绕极流的观测和野外实验(1975~1977),发现绕极流并不是象过去认为那样是1支单独环流,而是由3支性质不同的射流组成。在印度洋东南部海域,绕极流的经向热力结构也包含了1个温度为13℃的较为均匀的水“透镜”,与湾流的热力结构相类似。同时,还发现绕极

流也有象湾流那样的流环和中尺度涡旋,并证明它们在经向热量输送过程中起着重要的作用。在利用  $C^{14}$ 放射性元素作为示踪物进行印度洋水团追踪,发现深层水的更新速率比早先估算的快得多。过去认为大洋深层水几乎是停滞的,起码要几千年才能更新一次,而此次测量结果,得知从  $60^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ ,大约只需要600年时间,印度洋底层水更新时间,最多不会超过1200年,而边缘海的海水更新一次不到100年。另外,通过印度洋岩芯同位素  $C^{14}$ 的测定,确定印度洋的沉积速率为  $1\sim 100\text{cm}/10\,000\text{a}$ 。

近期已实施或正在实施的“第1次全球大气试验”(FGGE)、“全球大气研究计划”(GARP)、“世界气候计划”(WCP)、“热带海洋全球大气试验”(TOGA)、“季风实验”(MONEX)等试验研究的完成,对印度洋的气象气候特点及其活动变化规律以及形成机制的认识,必然会产生新的突破性进展。

为了对印度洋自然地理更深入的认识,特别为了更充分地利用开发印度洋的自然资源,在今后应进一步对印度洋包括各个海域的水文、气象,尤其对印度洋北部的孟加拉湾、阿拉伯海区进行全面系统地观测调查研究,对于这里的海洋、大气相互作用的过程和机制的研究,对于经常给孟加拉湾北部沿岸造成巨大危害的热带飓风和风暴潮的研究,对印度洋及其属海的海底矿产资源、生物资源的分布、数量及其开发利用的调查研究,尤其对波斯湾及其附近地区的石油、天然气资源的研究等,应是今后研究的重点课题。与之同时,对这里的海洋石油污染和防治途径的研究,对保护印度洋环境也至关重要。

#### 参考文献

- 1 胡欣,等. 印度洋纵横谈. 福州:福建人民出版社,1982
- 2 Маркoв К. К. География Мирового океана, Нhаунckну океана Hayka, мeһhzрdа, 1982
- 3 Harl W B, et al. A Geologic time scale. New York, 1982
- 4 于效群,等. 海洋科技发展概况. 北京:海洋出版社,1986
- 5 唐连江. 地质科技情报. 北京:中国地质大学出版社,1988
- 6 陈国新主编. 海洋开发的今天和明天. 上海:复旦大学出版社,1990
- 7 ПeoHTbeB 著. 世界大洋自然地理. 李志国等译. 北京:高等教育出版社,1990

(福建师范大学吴廷辉副教授撰,林庸审)

### 世界海洋动物区系区 world ocean animal fauna area

研究海洋动物的全球分布规律,是海洋动物地理学的工作。其主要目的,是描述海洋动物的特征,研究形成现今动物区系及分布类型的原因。

在早期研究中,曾提出沿纬度线等作为划分动物地理学界线,但是,由于它们没有生态学上的意义,因而不能成为动物区系区的合理界线;后来根据某些等温线进行划分界线时,才比较清楚地将动物区系进行分区。例如 Murray and Hjort (1912) 在研究了 Wyrille Thomson 海脊两侧的动物区系以后指出,温度的差异,是大洋深海区域底栖动物分布的一个有效障碍;其它如 Farran (1911), With (1915) 等的研究。至 20 年代到 30 年代,如 Bigelin (1926) 指出,在北美缅因湾中,箭虫 (*Sagitta serratodentata*) 由于温度影响,它们的正常分布是在温度高于  $15^{\circ}\text{C}$  的海水中。Runnstrom (1927) 的研究结果,提出在不同海区中温度和三类浅海生物—北极—寒带系、寒带系、地中海寒带系的生殖和幼体发育的关系。Elegvad (1929) 根据丹麦潮间带动物死亡率与温度关系,指出在气候比较温和的海区内,在突然的严寒袭击下,可以发生巨大的破坏作用。根据 Orton (1920)、Prytherch (1929) Galstoff (1930, 1933)、Elsey (1934)、Hopkins (1937)、Loosanoff (1939) 等研究海洋动物临界产卵温度的变化,从观测及实验获得的大量证据,证明了很多海洋动物的分布,取决于是否能将其临界生殖期内的温度,调整到比较狭窄的范围内。但即使如此,还不一定就得到动物地理学合理的界线。因为,动物地理学的分区,必须是以动物本身的实际分布作为依据。

Ekman 根据他对动物区系研究的结果,并收集很多专家们的著作,写出海洋动物地理学一书 (Tiergeographie des Meeres, 1935)。Ekman 指出:早先的动物区系,其边界是根据气候和水文条件而推定的。这是由于当时对很多种,以及很多动物群实际分布的界限,所知甚少,而气候的边界,则已知道,因此,根据气候条件来划分动物区系,而不是实验研究所得。但必须指出:根据气候条件推定的边界,事实证明,基本上是正确的;这说明了在海洋动物区系的发育过程中,温度显然是最重要的因素之一。Ekman (1935),将海洋划分为若干动物区系带 (faunal zones),这些动物区系带,则以浅海底带内所见到的动物的种、属和科为其特征。所采用的动物,不仅包括浅海底栖动物,也包括了必须沿岸带内完成其生活史的一些浮游种类。在分类中,以生活在某一区域内为限的,或作为某一区域特征的各动物类群 (种和属集合),作为确定动物区系区域的依据。当然,动物区系区域,也并不是明确地划分,在几个区域交界的地方,被认为是过渡地带;过渡地带的宽度,决定于水文学上的特征,而水温是最主要的一项决定性因素。然而,其他因子,也可决定一个动物区系区域的地理范围。特别是大陆障碍 (land barrier) 和广阔的深水区域。一般说来,浅海底地带的动物区系,可以清楚地分为北极、热带和南极 3 个区系。在区系之间,又可产生北寒带、温带和凯尔盖朗 (Kerguelen) 动物分区等。有一些动物区系,还可以分为东、西两部。例如,热带动物区系,可以认为由如下 4 个部分所组成:即印度洋—西太平洋部分、太平洋热带美洲部分、大西洋热带美洲部分和热带西非洲部分。70 年代 Fenhe (1975) 对螺类 (*Hydrobiid*) 腹足动物的 *Hydrobia ulvae* 和 *H. Ventrosa* 两类的调查,在两者同时存在的地区 (同域的 sympatric) 和它们各自分别生活的地区 (异域的 allopatric) 中, Fenche 发现它们同时在形态和生态上彼此分异,即表现出性状替换。在异域分布时,两个种在大多数方面彼此相似;当同域分布时, *H. ulvae* 的个体比正常情况下稍大,而 *H. ventrosa* 的个体则比正常小得多。80 年代 Barnes 研究,在它们分布范围的大部分地区, *H. Ulvae* 似乎是占优势的竞争者,而 *H. Ventrosa* 则只存在少数地区,如低盐度地区及某些沿岸泻湖。据 Stehli 和 Wells 1977 年研究,印度—太平洋的热带海域是世界上浅海底栖物种分异度最高的地区,其次是美洲的热带太平洋海岸。而在大西洋两岸,热带底栖物种的分异度最低。在印度—太平洋中,以印度—马来西亚地区为中心分异度最高。

近来,Valentina (1973)、Cray and Boucot (1979) 等,论述了关于板块构造及生物地理学意义。由于大陆解体,使各个陆地单位面积内海岸线增加,从而改变了世界气候;同时促进了生物群的隔离,增加了异域演化的机会,结果产生了分区性的差异。根据 H. A. 波布林斯基 (1951) 的论述,以海洋哺乳类和鸟类为依据,可将世界大洋划分为 6 个海洋动物区系,即北极区、北太平洋区、北大西洋区、热带印度—太平洋区、热带大西洋区及南极区。卓·埃里斯 (Joachim Illies) 提出 (1973), 详细的海洋动物区系结构,反映在基于种、属划分的一系列小动物地理区域上,而这些区域基本上依随大陆的划分。冷水类型几乎经常以环极方式分布,温水动物区系则表现出某些明显的区域性差异,特别是巨大的陆块和洋盆形成南北走向的屏障,因而出现了 4 个远洋动物区:西大西洋亚区、东大西洋亚区、印度—太平洋亚区和东太平洋亚区。深海动物区系是指海面下 200~600m 无光的深处的动物区系,对它们来说,上述屏障没有什么效力,因此,深海动物地理学分区的可能性是很小的。

由于海洋考察的新技术使用,如水下电视可以提供深海动物的新资料。采用板块构造及演化生态学理论,从而预测人类对当代生物地理所产生的重大影响。随着人类技术的发展,已导致了生物在全球范围内的被动迁移,甚至在以前隔离的海洋之间开辟了新的扩散途径。R. S. K. 巴恩斯和 R. N. 休斯 (1982) 提出,与地质历史时期所发生的生物地理事件相比,人类目前对海洋生物群的影响是微不足道的。如果人类确实对海洋生物的生物地理有重大影响的话,那么这种影响也只能将由污染和核战争所引

起。

### 参考文献

- 1 H U 斯费德鲁普,等著. 海洋(第3卷). 毛汉礼译. 北京: 科学出版社, 1959
- 2 H. A. 波布林斯基著. 动物地理学. 北京: 高等教育出版社, 1959
- 3 山本太郎著. 海洋生态系—构造与机能. 北京: 海洋出版社, 1981
- 4 W. B. 温伯格, 等著. 海洋动物环境生理学. 北京: 农业出版社, 1982
- 5 卓其姆·埃累斯著. 动物. 环境. 历史. 许维枢, 等译. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1983
- 6 R S K. 巴恩斯, R. N 休斯著. 海洋生态学导论. 王珍如, 等译. 北京: 地质出版社, 1990

(河北师范大学李恩庆教授撰)

**欧洲自然地理** physical geography of Europe 欧洲位于欧亚大陆西部,三面环海,北临北冰洋、西滨大西洋、南濒大西洋的内海—地中海和黑海,东与亚洲大陆相连,犹如亚欧大陆向西伸入海洋中一个巨型半岛。欧洲大陆地处 $N36^{\circ}\sim 71^{\circ}$ 之间的中高纬区,大部分位于北温带内,又正当西风之冲,沿岸又有北大西洋暖流经过,加之海湾、海峡、内海众多,地势低矮而且平原山地多呈东西延伸,致使欧洲典型温带海洋性气候最为突出;同时随着风带因冬夏南北移动,在南欧形成典型的地中海式气候。

荷马(Homer)所著的《奥德赛》是对欧洲爱琴海周围及其它一些地方的地理状况的记述。赫卡泰(O. Hecataos)著有《旅行记》一书,对地中海沿岸及其纵深地域地理状况,如地形、矿产、植被、风俗民情等广泛内容都作了记述,被誉为古时的地理百科全书。赫卡泰也为后人称作“地理学之父”。希罗多德(Herodotus)所著《希腊波斯战争史》中提出“全部历史都必须用地理观点来研究”。他曾游历过南欧许多地方并做了真实的记述。埃拉托色尼(Eratosthenes of cyrene)为古希腊最伟大的地理学家之一。在西方第一个以《地理学》(Geographica)命名他所著的书。这部书叙述了通过他自己测量计算出的地球的形状、大小、经纬度、黄道和赤道。还把世界分为欧洲、亚洲和利比亚(即非洲)。他根据经纬网绘制了当时已知海陆分布的地图。斯特拉波(Strabo)根据自己的游历和前人的资料,写成了一部达17卷的《地理学》巨著,其中有8卷专门写欧洲。书中对各国各地区的自然特征、地形、气候、物产、居民习俗等地理内容均作了相当详细的描述。在书中,他还试图以自然因素的影响解释人文现象。斯特拉波还注意到欧洲具有强烈切割的水平脉节,研究了陆地的降水情况、水体对陆地破坏和建设作用以及三角洲的形成等等。总之,斯氏致力于区域地理研究,特别是对欧洲研究得较为详细。他所主张的注意地区差异、地理现象的相关关系及其描述方法,对以后区域地理学的研究具有较大的影响。

到了中世纪,欧洲各国多是自给自足的小农经济和分散而呈封闭状态的国家,彼此贸易交往很少,再加上基督教及神学在欧洲占居统治地位,使整个欧洲的科学包括地理学在内,几乎未得到什么发展。

15世纪开始,随着工业的发展,资本主义在欧洲从萌芽而发展,地理科学与其它科学一样,也得到很快的发展。特别是“新大陆(美洲)”的发现和环球航行的成功,欧洲一些国家的探险家、旅行家、传教士,通过探险、旅游和传教活动积累了极其丰富的游记和调查报告,这就为近代科学的地理学的产生创造了条件。德国洪堡(A. von Humboldt),不仅是杰出的综合自然地理学家,还是植物地理学、气候学、地球物理学创始人之一。他不仅思路开阔、知识渊博,而且足迹遍历西欧、北亚和南北美洲。他总结出了自然地理学和方志学研究的一般原理,正确地指出自然界各种事物之间相互联系,并依其内部力量不断运动和发展。总之,洪堡的实践和论著,对以后欧美各国地理学家的思想产生了深刻的影

响,对地理学诸多领域都做出了开创性的贡献。李特尔(C. Ritter)1804及1807年出版两卷《欧洲地理》教科书。该书在1806年增补进一套6幅全欧洲地图,在图上绘出山脉、植被(树和灌丛)、农作物与气候、野生和驯养动物的分布以及民族之间的关系。李特尔主张地理学应以经验为依据,去找出一般法则、规律。他强调地表各事物的相互联系和因果关系。法国韦达·白兰士(Paul Vidal de la Blache)著有《法国地理概论》、《法国东部》、《人文地理学原理》等书。由他生前所倡导的《世界地理大全》,由其学生陆续出版,多年来该书一直被认为区域地理著作的典范。德国彭克(A. Penck)曾对挪威、英国、比利牛斯山、阿尔卑斯山和巴尔干地区作过实地考察和研究,尤其对冰期和冰川形成问题进行了深入的研究,他将阿尔卑斯山区的第四纪冰期分为群智(Günz)、明德(Mindel)、利斯(Riss)、玉木(Wörm)4个冰期,给世界各国冰期研究以深远的影响。德国赫特纳(A. Hettner)是德国《地理杂志》的创办人,并主编该杂志达40年之久,他对区域地理和地理学方法论有颇深的研究。他认为地理学是研究地域分异的科学,主张区域研究应是自然与人文的统一或结合。赫特纳曾到欧、亚、非以及南、北美洲不少地区进行过考察旅行,著有《区域地理》(包括《欧洲》和《欧洲以外国家》两卷)、《地理学基础》、《地理学的性质和方法》等。法国马东(E. de Martonne)提出自然地理是一个地区地理研究的基础部分。他对气候和地貌特别重视,主要著作有《自然地理专论》、《中部欧洲》和《法国自然地理》等。马东的一些著作被认为是自然地理方面最好的综合性著作,被翻译成多种外文出版,影响颇广。德国帕萨格(S. Passarge)主张景观即地理综合体。他把景观类型看作是一种空间体系,即一种相关要素的综合体。帕萨格对德国的许多景观小区进行了实际考察研究,对欧洲乃至世界的各种景观也进行了比较深入的分析研究。他以植被为指标,划分了包括欧洲在内的全球景观带。前苏联贝尔格(И. С. Берг)提出:景观就是地理学研究的对象,地理学就是景观学。他指出:地理景观是自然对象和自然现象的结合或组合,也即是地形、气候、水、土壤、植被和动物界乃至人类的活动等特性在其中结合为一个和谐的整体,并在地球一定地带内典型地重复出现。著有《苏联景观地理地带》、《苏联自然界》、《气候学原理》等,对欧洲前苏联地区进行了较深入的分析研究。贝尔格的地理景观学说对前苏联自然地理研究有较大的影响。

20世纪以来,西欧各国先后出版了不少“欧洲地理”方面的著作,如马克孟(N. E. Macmunn)等编著的《欧洲区域地理》(牛津,1926);赖德(L. W. Lyde)的《欧洲大陆》(伦敦,1930);胡尔巴德(G. D. Hubbard)的《欧洲地理》(伦敦,1937);恩斯台德(J. F. Unstead)的《欧洲》(伦敦,1939);萨克里东(M. R. Shackleton)的《欧洲》(伦敦,1944);乔治(P. Geoge)等编著的《中部欧洲》(巴黎,1954);孟克豪斯(F. J. Monkhouse)的《西欧区域地理》(伦敦,1964);蓬兹(N. J. G. Pounds)的《东部欧洲》(伦敦,1969);比克京萨尔(M. Beckinsale)等著的《南部欧洲》(伦敦,1979)等。以上著作不仅只有自然地理内容,还包含有相当丰富的人文地理知识,而且大多按区域或分国叙述。

前苏联道布雷宁(Б. Ф. Добрынин)于1941年出版,1948年再版的《苏联自然地理:欧洲部分和高加索》一书对欧洲东部地区的自然地理作了相当全面的分析和阐述。

1973年叶拉莫夫(Р. А. Ерамов)出版了《外国欧洲自然地理》(即前苏联除外的欧洲部分的自然地理),对北欧、西欧、中欧和南欧各自然地理区各组成要素及它们之间的相互联系和相互影响,作了较深入的分析 and 阐述。1976年前苏联还出版了符拉索瓦(Т. В. Власова)的《大陆自然地理》。这是一本全面论述全世界各大陆的区域自然地理大陆的著作,欧洲作为其组成部分,对它所包括的各自然地理区的基本特征、形成原因等,都进行了简明扼要地综述。

在中国公开出版发行的欧洲地理著作,在解放前有邹豹君的《欧洲地理》(1948),此书与欧美等国的欧洲区域地理基本相似,主要是对欧洲各国自然和人文地理各方面进行综合阐述,且

人文地理内容所占比重更大。该书“东欧欧洲”还将前苏联亚洲区域一并包括在内。

1949后,中国先后出版了3本欧洲自然地理著作:(1)是1957年宋德明的《欧洲自然地理》;(2)是胡焕庸的《各洲自然地理》讲义的“欧洲分册”(1959年交流教材);(3)1981年在中国台北出版了有自然和人文的《欧洲地理》;(4)是胡焕庸等著的《欧洲自然地理》(1982)。

欧洲是世界调查研究最细致深入的一个洲。为了更合理更充分地利用其自然环境和自然资源潜力、防治污染,保持和维护好生态平衡,地理学者应运用遥感遥测、计算机等现代科技手段,对欧洲的不同区域用定性定量相结合的方法进行更深入的研究,而且需要加强多国协作与合作共同研究,逐步达到能认识并掌握自然环境演变、发展的方向和规模,进而提出合理利用改造的方法和途径,以期造福于欧洲各国人民。

#### 参考文献

- 1 迪金森,近代地理学创建人。葛以德等译。北京:商务印书馆,1988
- 2 哈特向,地理学性质的透视,黎德译。北京:商务印书馆,1981
- 3 李春芬,地理学的传统与近今发展。地理学报,1982,37(1)
- 4 詹姆斯,地理学思想史。李旭旦译。北京:商务印书馆,1982
- 5 胡焕庸,等。欧洲自然地理。北京:商务印书馆,1982

(福建师范大学吴廷辉教授撰;林庸审)

**中国自然地理** physical geography of China 中国地域辽阔,自然环境复杂,人口众多,人地关系密切。研究中国自然环境及其组成要素的形成、发展、结构和区域分异,特别是对农业自然资源和农业自然条件的探讨,具有重要的意义。

中国自然地理环境的研究,历史悠久。远在公元前5世纪,就出现《尚书·禹贡》一书,划分全国为“九州”并阐述其山川、湖泽、土壤、特产等。大约在同时代的还有《周礼》。战国时编有《管子地员篇》。其后陆续出版了《汉书地理志》、《大唐西域记》、《徐霞客游记》、《大清一统志》等。19世纪中叶以后,由 von. 洪堡德(A. Humbolt)奠定的现代自然地理学逐步发展起来,并传入中国。至1949年,中国自然地理研究发展缓慢。1949以后,开展了大规模的自然资源综合考察、自然区划、流域规划等研究,使中国自然地理研究有了很大的发展,出版了具有代表性的中国自然地理专著。例如,1959年刘象天编有《中国自然地理讲义》;1973年中国科学院成立了以竺可桢为主任的《中国自然地理》编辑委员会,组织了有关地理研究所、大专院校及生产部门共30个单位,200多名科学工作者,编写了《中国自然地理》(全书分12分册);1979年任美铎等编著《中国自然地理纲要》,1982年出修订版,并于1985年出版了英文版;1979年《中国自然地理》编写组编写了高等学校教材《中国自然地理》;1979年郭正权等编《中国自然地理常识问答》;1983年雍万里编《中国自然地理入门》;1985年雍万里编《中国自然地理》;1987年袁树人等编《中国自然地理教学参考书》;1984年西北师范学院地理系、地图出版社主编出版《中国自然地理图集》。1991年李涛主编的《中国地理》包括有中国自然地理部分。此外商务印书馆先后还出版了一套地理知识读物,包括《我国的平原》(张光业等,1978)、《我国的沙漠》(吴正,1982)、《我国的河流》(黄锡荃等,1982)、《我国的土壤》(张俊民,1984)、《我国的湖泊》(王洪道等,1984)、《我国的沼泽》(牛焕光等,1985)、《我国的森林》(丁建民等,1985)、《我国的海洋》(孙湘平,1985)等。1984年《中国地理丛书》编辑委员会组织编写了普及地理知识的中级读物——《中国地理丛书》,自然地理类包括中国自然地理、中国的地形、中国的山地、中国的名山、中国的地震、中国的火山、温泉和地热资源、中国的黄土高原、中国的青藏高原、中国的奇峰异洞、中国的气候、中国的热带、中国的亚热带、中国的干旱区、中国的沙漠和绿洲、中国的河流、长江、黄河、中国的大运河、中国的湖泊和水库、中国的海岸和河口、中国的内海和邻海、中国的沼泽、中国的冰川、中国的冻土、中国土壤地

理、中国的草原、中国的森林、中国的自然保护区等。至此,目前已具有一套高中低不同档次的教学、科研和普及的中国自然地理学术专著。

中国自然地理研究最有参考价值和权威性的,首推中国科学院《中国自然地理》编辑委员会编写的《中国自然地理》。全书分总论、地貌、气候、地表水、地下水、土壤地理、植物地理、动物地理、古地理、历史自然地理、自然条件与农业生产、海洋地理12分册。总论荟萃了其它分册的精华,分1、2两篇。第1篇,综合分析中国自然地理环境的主要形成因素。分章阐述气候、地貌、海域、地表水、地下水、土壤地理、植物地理、动物地理等自然地理要素的特点和分布规律,着重阐明各要素之间的相互联系和相互作用,并评价其在农业生产中的作用。第2篇,为自然地理区域综述。首先进行了全国综合自然区域的划分,然后分章论述中国各自然地区和自然区的自然特征、地域分异及土地资源的合理利用和自然改造等问题。其它分册各有侧重,在其相应领域,理论联系实际,与生产实际更加紧密结合。

具有一定影响的《中国自然地理纲要》(任美铎、杨纫章、包浩生),突出分区自然地理内容,在自然地理区划和区域分异理论上有所独到之处,1992年出版第3版,内容更加翔实,1985年英文版的出版,扩大了《中国自然地理》的影响,深受国外学者高度评价。

《中国地理丛书》编委会编写的《中国地理丛书》自然地理类著作,不同于一般性的地理知识读物,也不同于学术性研究著作和教材,注重科学性和知识性,内容丰富,形式新颖,具时代特色。其中雍万里编著的《中国自然地理》,内容丰富,语言简洁通俗,图文并茂,可读性强。

围绕国民经济建设中的一些重大课题,开展了区域自然地理综合研究。例如,黄淮海平原的旱涝洪盐碱的成因及综合治理、黄土高原的水土流失与综合治理、南方山地的综合开发、南水北调水利工程、干旱区合理开发等专题,取得了有价值的研究成果。1982年贾大林等“黄淮海平原旱涝盐碱的发生和综合治理”,1983年姜德华的“黄淮海平原的利用和改造”,1987年西北大学地理系黄土高原地理研究室编《黄土高原地理研究》,1988年陈永宗等著《黄土高原现代侵蚀与治理》,1988年郭书田等主编《黄土高原综合治理与开发》。1984~1988年中国科学院、国家计划委员会组织南方山地综合科学考察队对南方山地进行了综合考察,编有《安徽省南部丘陵区国土开发与整治研究》等专著。1958年提出南水北调工程以后,在全国范围内开展了大规模的学术讨论,目前南水北调东线第1期工程已经实施。1982年杨利普著《新疆水资源及其利用》,对新疆水资源利用与保护有重要参考价值。同时中国自然地理在揭示自然综合体的内在规律,为区域规划和农业区划服务开展了不同区域、不同等级、不同方案的综合自然区划。中国自然地理具有区域性和综合性特点,既包括部门区域自然地理,又包括综合区域自然地理,开展了基本理论研究。其基本理论相应地包括自然地理的基本理论,主要是区域分异的理论,同时应包括自然地理环境的改造与利用方面的人地关系论等。目前在全国高等师范院校地理系都开设有中国自然地理课程。加上地理科学研究机构,在全国范围内有一支较强的中国自然地理专业研究队伍。

1949年以后,中国自然地理是一个比较活跃的研究领域,随着国民经济的发展,今后将有着更广阔的前景。从未来发展趋势看,发展动向具有理论与实际,部门与综合,自然与经济,利用与环境保护,历史、现状与未来发展,定量分析与定性分析相结合的特点。定量分析和开发模型是发展方向,基础理论研究需要加强。

#### 参考文献

- 1 Troll C. Geoecology of highmountain regions of Eurasia, 1972
- 2 任美铎,等编著。中国自然地理纲要。北京:商务印书馆,1979
- 3 中国自然地理编写组,中国自然地理(第2版)。北京:高等教



育出版社, 1984

- 4 中国科学院中国自然地理编辑委员会, 中国自然地理(总论). 北京: 科学出版社, 1985
- 5 雍万里, 编著. 中国自然地理. 上海教育出版社, 1985
- 6 袁树人, 等主编. 中国自然地理数学参考书(上、下册). 济南: 山东教育出版社, 1988
- 7 李涛主编. 中国地理. 长春: 东北师范大学出版社, 1991  
(安徽师范大学周秉根副教授撰)

### 中国华南自然地理 physical geography of south China

华南, 泛指中国南部地域, 其范围有多种说法。作为自然区域, 或称自然区、自然地区、自然地域、自然地带, 最大包括滇南、粤、桂中南部, 闽东南, 台湾岛, 海南岛和南海诸岛; 最小仅限于粤、桂中南部, 闽东南, 台湾和海南岛。而作为特定区域, 一般指南岭以南、武夷山以东的台湾、福建、广东、广西、海南五省区及香港、澳门地区。

华南地处低纬, 濒临太平洋, 位于东亚与东南亚大陆的转折处, 地理位置颇具特色。区域环境的热带性特征突出。自然资源尤其水热及生物资源丰富且开发潜力大, 又是中国改革开放的先行区。开展华南自然地理研究对认识华南区自然环境特性、结构、功能, 高效益地开发和保护热带、亚热带自然资源与生态环境, 防治自然灾害等具有极重要的意义。

1911年前, 华南自然地理研究多以笔记, 方志式记述地理事物和考证地理沿革, 如广东地理记述之杰作“广东新语”(屈大均, 1700)。1911~1949年, 地理科学新兴, 华南自然地理开始步入地理考察阶段。如沈鹏飞等赴西沙群岛进行多学科考察后编写的《调查西沙群岛报告书》(1928), 邓植仪《广东土壤提要》(1934), 吴尚时、何大章《广东省之气候》(1943), 吴尚时、曾昭璇《广东南路》、《珠江三角洲》(1947)等, 都属这类研究成果。因受时代限制, 研究范围、内容局限性大, 较偏重地形、气候等方面, 以景观描述为主, 但却为现代区域自然地理研究奠定了良好的基础。

50年代至60年代初, 为自然地理研究的大发展时期。如1952年, 华南垦殖局组织的海南、粤西、广西南部进行橡胶树宜林地的调查和勘察。1955年, 广东省亚热带资源考察委员会组织的海南、湛江、合浦地区自然资源调查和开发利用规划。1957~1960年由中国科学院华南热带生物资源综合考察队组织的在粤、桂、闽3省进行选择以橡胶为主的热带作物宜林地与开发并结合综合自然区划的综合考察。通过考察研究, 选出了可种橡胶及其它热带作物宜林地并分别撰写了广东、广西、福建各省综合自然区划, 华南3省地貌、植被、气候、土壤各专题区划及综合考察报告, 《华南地域分异规律和综合自然区划》(余显芳等, 1964)等著述。

随着全国自然区划和华南综合考察工作的深入, 热带区域间问题成为华南甚至全国各有关学科讨论的热点之一。唐永奎(1959, 1964)、曾昭璇(1960, 1963)、李国珍(1960)、李宗干(1961)、汪晋三(1962)、余显芳(1962)、徐祥浩(1964)、张宏达(1964)、陈彦章(1964)等先后发表文章, 从地学、植物学等不同角度, 探讨了对热带这自然综合体的认识、其划带的原则、依据、植物标志及准热带等问题。不少人提出向北扩大热带区域范围的主张。70年代后期至80年代初, 讨论又重新掀起高潮, 并已逐步深入。主要问题为划带指标的检验与修订, 准热带归并热带, 热带区域特性等。虽然未取得一致的见解, 但认识已趋接近。

1960~1965年, 在华南自然区划研究中, 曾昭璇、余显芳、徐君亮、易绍贞、汪晋三、唐永奎、缪鸿基等进行自然区划有关理论问题研究, 相继发表论著, 就区划对象、目的、任务、原则、方法和等级单位等理论问题, 在1962年全国地理学会上展开了广泛的讨论。一些学者结合当时农业区划开展珠江三角洲等地的土地类型研究, 还按当时提出的新方向对化学地理、水热平衡、生态系统方面作了探索性研究。1966~1978年, 自然地理研究处于低谷,

仅有少数人进行华南紫胶奇主树定植地, 珠江流域自然地理、河网特征、河道变迁等研究。

中国华南自然地理研究又一大发展时期是从1980年开始的。为配合国民经济建设发展, 重点进行了珠江三角洲、海南岛、深圳、珠海、汕头特区、华南沿海、山地等区环境、资源开发利用与保护的调查研究。

对珠江三角洲研究, 黄镇国等(1982)、赵焕庭(1984)、徐君亮等(1985)、钟功甫等(1987)、许学强等(1988)、李春初(1988)、曾昭璇等(1990)、李平日等(1991), 分别对其形成、发育、演变, 河口海岸, 基塘系统, 环境与空间发展, 水土资源、土地类型及土地利用, 以及一万年来环境演变等问题进行了深入的探讨, 对珠江三角洲形成、发育、演变, 环境变迁, 基塘系统等提出了许多见解, 取得了重大的进展。

海南岛的水热平衡、化学地理、生态环境、土地利用、自然灾害、资源开发利用与保护等研究, 是广州地理所、中山大学地理系、华南师范大学地理系等1980年以来的重点研究领域。主要成果包括了广州地理所《海南热带农业自然资源与区划论文集》及图集(1985), 《海南热带大农业与生态平衡》(1983), 《海南岛资源环境与空间发展研究》(温长恩等, 1989), 唐永奎《海南岛自然生态系统分析》(1982), 韩渊丰《海南岛灾害区划研究》(1991)等。

深圳、珠海、汕头特区1980年建立后, 为制订特区发展战略及规划, 围绕发展外向型农业, 广州地理所等开展环境、资源调查, 评价以及生态农业等方面研究。主要成果为: 《深圳市自然资源与经济开发研究》专著及图集(1989), 《珠海市自然资源与经济开发研究》专著及图集(1989), 《珠海市金鼎农业示范区生态农业研究》(1992)等。

广州地理所等单位承担华南海岸带和滩涂资源调查, 1980~1989年通过综合调查研究发表了《广东省海岸带海涂资源调查报告》(1989)等专著、论文。

对华南沿海环境及南海海域, 黄玉昆等(1982)、谢在团等(1983)、李平日等(1987, 1991)、张勇男等(1990), 分别就海平面变化、海岸线变迁、地质环境、未来海面上升对环境的可能影响等问题进行了研究。此外, 中国科学院南海海洋研究所进行了南海海区综合调查研究于1982、1985年发表了调查研究报告(1)、(2)。

1983~1989年由中国科学院南方山区综合考察队和广州地理所等6个单位承担华南山区综合考察研究, 其成果主要反映在《中国南方山区国土资源开发与整治研究》(1989)、《南方山区自然资源综合利用分区研究》(1989)、《广东山区研究》(1990)等专著上。

对华南红土区水土流失, 1983年姚清尹等在中国科学院森林生态系统电白县小良定位站进行“花岗岩台地水土流失特征与整治改造研究”。1987~1990年, 广州地理所、华南师范大学地理系等与加拿大合作, 在德庆县马圩深涌建站, 采用多种手段开展测试等研究, 完成“华南花岗岩地区土壤侵蚀与整治研究”项目, 成果刊登在《广东省水土保持研究文集》(1990)上。

与此同时, 华南区自然地理特征研究也有所发展。主要论著有: 曾昭璇等《南海诸岛》(1986), 《台湾岛自然地理》(1989), 《海南岛自然地理》(1989), 福建自然地理编写组《福建自然地理》(1987), 余显芳《中国热带范围自然地热带亚地带的划分》(1990), 韩渊丰《华南地区自然环境及其开发利用》(1991)。

近10多年来, 改革开放与经济建设新形势, 极大地促进华南自然地理研究向深度与广度发展。应用遥感、计算机、地理信息系统等新技术新方法, 建立自然地理定位站, 进行多学科多手段的综合研究, 提高了华南自然环境特性、结构、功能, 自然资源、环境的开发利用与保护, 自然灾害防治、预测预报等方面研究的水平, 扩大了华南海区、岛屿区、边远山区的研究范围和规模, 发展了水热平衡、化学地理、生态系统等新领域。

该领域近期的研究热点是: 华南地区尤其沿海经济开发区

的综合开发,资源系统的结构与功能研究,环境演变和预测及人类活动相互关系,自然灾害防治,海洋国土资源开发研究。今后,区域自然地理的理论、方法和应用研究均有长足的发展与提高,各学科各部门之间的交叉渗透会增强,其成果在华南经济建设中将作出更大的贡献。

#### 参考文献

- 1 中国地理学会,1962年自然区划讨论会论文集.北京:科学出版社,1964.96~111,144~164
- 2 NStrahler A, Strahler A H. Elements of Physical Geography. John Wiley & Sons Inc, New York, 1976
- 3 Nstrahler A, strahler A H. Modern Physical Geography. John Wiley & Sons. New York, 1978
- 4 华南师范学院地理系.地理理论丛.1981.161~237
- 5 广东地理学会.华南地理文献选集.广州:科学普及出版社广州分社,1985.1~117
- 6 温长恩,等.海南资源环境与空间发展研究.海口:海南人民出版社,1989.205~211
- 7 广州地理研究所.华南热带亚热带地理研究.北京:科学出版社,1990.1~7
- 8 华南师范大学地理系热带地貌编辑委员会.曾昭兼与华南地理学论文集,1991.4~154
- 9 韩渊丰.华南地区自然环境及其开发利用.北京:高等教育出版社,1991.1~43

(广州师范学院郑正青撰,韩渊丰审)

**中国综合自然地理区划** China complex physical geographic regionalization 是研究中国这一特定区域内容存在的自然地理综合体,其主要任务在于揭示不同等级的自然地理综合体的地域分异规律性。区划成果在本学科的发展和指导、服务于生产实践上均有重要意义。无论古今中外,综合自然地理区划研究都是地理学中心课题之一。

公元前5世纪,《禹贡》一书中将全国划分为“九州”,分别阐述其山川、湖泽、土壤、物产等,是全世界最早的自然地理区划之一。其后,《汉书地理志》、《元和郡县志》、《大唐西域记》、《徐霞客游记》、《大清一统志》、《天下郡国利病书》、《读史方舆记要》等著作陆续出版。历代正史之中的地理志,以及各省、府、县编的地方志,均含有综合自然地理区划的研究内容,合计达9000种之多。

1949年后,全国性和地方性的综合自然地理区划工作得到迅速发展,区划理论研究十分活跃。尤其是50年代中期到60年代初期,中国地理学会单就全国性的综合自然地理区划,先后3次(1954、1960、1962)组织了学术研讨会,共收到论文110篇以上,同时发表学术论文也达100篇以上。这些论文,提出了许多很有价值的区划原则、等级系统、区划方案等基本理论。在此基础上提出几十个区划方案。1954年,林超等为了综合性大学地理教学需要,第1次进行较全面的综合自然地理区划。首先根据大地构造将全国划分为4大部分,按气候状况划分10个“大地区”,再按地貌划分为31个“地区”和105个“亚地区”。由罗开富主编的全国自然地理区划(中华地理志编辑部主办)也于1954年完成。首先将全国分为东、西两大半壁,按东西半壁依据湿润程度、地势及温差等划分7个“基本区”,再按地形划分为23个“副区”。从1954年开始,中国科学院自然区划工作委员会开展了较大规模的综合自然地理区划。由黄秉维主编,在各个部门自然区划工作的基础上,比较全面地总结了以往的经验,于1959年编写了中国综合自然区划。按照大自然区、热量带、自然地区、自然地带、自然省、自然州、自然县等7级单位系统,将全国分成3大自然区(东部季风区、蒙新高原区、青藏高原区),6个热量带,18个自然地区和亚地区,28个自然地带及90个自然省。其中自然地带和亚地带是整个区划方案的主要分类单位。此次区划,着重考虑了直接参与自然界物质和能量交换的基本过程,明确自然地理区划的主要服务对象是农业。1963年,侯学煜等综合研究了以发

展农、林、牧、副、渔为目的的全国自然区划。首先按照温度指标把我国从北而南划分为6个带和1个区(温带、暖温带、半亚热带、亚热带、半热带、热带及青藏高原区),再按水分和温度状况将全国划分为29个自然区,并就各个自然区的农业配置、安排次序、改造利用方面提出了轮廓性意见。1980年,全国农业自然资源调查和农业区划委员会为了向中国农业区划和农业自然资源评价提供基础资料,再一次编写全国综合自然区划方案。先把全国划分3大区域,再按温度状况把东部季风区域划分为9个带(寒温带、中温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带、边缘热带、中热带和赤道带),把西北干旱区域分为2个带(干旱中温带、干旱暖温带),青藏高原区域也分为2个带(高原寒带、高原温带),然后根据地貌条件划分全国为37个区(东部21,西北12,青藏4)。1978~1984年,在全国农业区划委员会组织下,由黄秉维、侯学煜、席承藩、丘宝剑等参与编写的《中国自然区划概要》,是在吸收了有关最新资料,对全国自然条件、自然特征及以往自然区划方案,进行探讨、比较以后完成的。考虑到1954~1959年区划级别过多,这次进行了简化。在分区系统中,分出“自然区域”(3个)、“自然带”(14个)、“自然区”(44个)。这一方案已被全国农业区划工作采用。

全国性综合自然地理区划,除以上方案外,还有任美镛、周廷儒、施雅风、李连捷、曾昭兼、陈昌笃、唐永奎、赵松乔等均提出了很有价值的方案。与此同时,区域性的综合自然区划研究也取得了较大进展。不少省(区),如吉林省、陕西省、广东省、河北省、内蒙古自治区及青藏高原、“三北防护林”地区等,也都完成了自然区划。

中国综合自然地理区划是地理科学中的重要内容,其在自然条件改造、自然资源保护、区域开发与整治等领域具有重要意义。随着科技进步和社会经济发展的需要,中国综合自然地理区划将愈来愈引起重视:(1)区划原则、区划方法和区划等级系统将进一步完善,使区划方案可比度增大;(2)专业性和专题区划将是主体发展方向,使区划任务更加明确;(3)区域性区划由省、县、镇进一步深入到乡(镇)一级,使区划成果更具应用价值。

#### 参考文献

- 1 林超.地理学报,1960,1:52~60
- 2 周廷儒.地理学报,1960,2:87~103
- 3 任美镛,等.中国自然区划问题,1961,1:66~72
- 4 邱振民,等.地理学报,1963,1:90~92
- 5 赵松乔.地理学报,1983,1:1~10
- 6 尹泽生.农牧资源与区划研究,1988,1:8~13

(江西师范大学梅梅鑫撰;刘会庆审)

#### 城镇体系规划 town territorial planning

其内容是,在一定地域范围内,根据某个时期国民经济长远计划所制定的战略目标与总体部署,充分考虑地区自然条件和资源、经济基础及历史背景,针对区域城镇布局的现状与问题,分析城镇化的机制和过程,预测规划期内本区域城镇化的水平,拟定城镇体系的规模等级;确定各级城镇的性质、主要职能及在劳动地域分工中的地位和相互关系;使每个城镇具有合理的发展方向;明确本区域重点发展的城市;协调区域性城市基础设施的建设;形成合理的城镇网络系统,使之在空间上合理地布局,从而为每个城镇的总体规划提供科学依据。在编制城镇体系规划的基础上,使区域生产力布局有着更为明确的方向。

城镇体系作为一个科学新概念,在国外出现于60年代初期。1960年,美国霍普金斯大学邓肯(O. D. Duncan)等的著作《大城市与区域》,第1次比较充分地明确了城镇体系概念含义。

世界上区域城市规划从何时开始?西方和国内某些学者认为区域城市规划是随贸易发展产生的,最早出现于14世纪的欧洲。另一种意见认为区域城市规划不是贸易发展产生的,而是生产力发展的产物,最早产生于中国。例如周初为了选城址,进行大量的规划,曾绘制洛阳一带的地图,这是最早的城市规划。随

着现代化大生产的发展,区域城镇体系的研究也随之开展。30年代德国克里斯塔勒(W. Christaller),在对德国南部的城市及乡村聚落进行了大量的有关市场中心和服务范围的实验分析研究的基础上,完成了《德国南部的中心地》一书。书中论述了一定区域(国家)内城市和中心居民点发展的区域基础及等级—规模的空间关系,以抽象演绎的方法得出六边形市场模型。克里斯塔勒的中心地理论深刻地揭示了城市、中心居民点发展的区域基础及等级规模的空间关系,为城市规模和区域规划提供了重要的方法论依据。1966年,邦吉(W. Bunge)发表《理论地理学》,从实例证明了如果经济地域不是单纯的面积,而是以人口密度分析为基础,则能使中心地理论更为完善。其他如廖什(August Losch)的不同等级市场区中心地数目研究,齐夫(G. K. Zips)的等级—规模法则,贝里(B. J. L. Berry)的对数正态分布研究等,都是具有代表性及一定经典意义的研究。经济地理学家和研究区位的学者们,试图在克里斯塔勒和廖什的研究基础上,将中心地理论运用于区域发展规划的研究中。他们的做法不是细分区域,而是把区域视为村与村之间、镇与镇之间、城市与城市之间互相联系着的一个网络、一个有机的体系。在克里斯塔勒和廖什之后,美国柏克曼(Beckmann)创立了城市和市场区等级序列模式,用以解释城市体系内各级城市的规模。近年来,随着自然科学、社会科学、计算机应用的发展,城镇体系等级规模分布数学模型也取得了一定进展,如熵最大化模型(Entropy Maximization model)、规模—交通价格模型(The Scaletransport Costs model)、马尔柯夫链模型(Markov Chain model)、工业体系模型、行政等级体系模型、城乡人口匹配模型、动态模型、水资源系统分布模型等等。由哈肯创立的协同学(Synergetics)主要从事研究系统从无序到有序转变的规律和特征。既适应于非平衡态中发生的有序结构或功能形成,同时又包括平衡态中发生的相变过程,对形成地域城镇体系的等级规模分布控制论模型无疑是一门很有用的学科。

区域城镇体系规划是城市总体规划的发展和延伸,但从规划的范围、对象、完成的任务来看,已超越了城市总体规划。城市总体规划一般是以单个城市为对象,以城市经济发展为目标,从城市的自身发展条件出发来进行的,是封闭式规划。近几年,中国各地在总体规划中增加了经济分析的内容,将规划考虑的范围扩大了一些,规划的构思和具体内容也有所深化,一些大、中城市还考虑到了近、远郊卫星城市自身为中心,一切都围绕这个中心而展开的。区域城镇体系规划,则是以经济区域为范围,以区域内城镇群体为规划对象,对区域内城镇基础设施统一安排。对区域内影响城镇体系的各种因素不但进行具体的调查分析,而且要作协调平衡的工作,对城镇职能进行合理分工。在研究区域城镇总体发展战略的基础上,确定各级各类城市的性质与发展方向。这里所指的“区域”也不局限于“市区”、“市郊”、“市域”,往往要从经济联系密切、城市直接吸引的经济范围来确定,如跨省的经济区、省城经济区、省下一级经济区、市域经济区等。在城市人口规模预测方面,总体规划中常采用“劳动比例法”、“带眷系数法”、“产值增长法”以及这几年常用的“综合分析法”、“分项叠加法”等等,一般能获得较为正确或接近的结果,具有一定的价值。但是,中国有许多特性,现阶段城镇化速度较快,各地城镇化动力不相同,人口流动规律十分复杂,很难用以上方法预测人口规模。城市人口的增长不光是受控制的自然增长与有计划的机械增长,还有相当大的比例来自其他诸多方面。另外国家城市发展方针是控制大城市规模,合理发展中等城市,积极发展小城市,这就更难以单个城市的规划来贯彻这一方针了。这几年城市人口普遍突破规划这一事实,证明了原有计算方法已很不适应。为改变这种状况,当前研究应以区域经济发展战略和合理增长速度为依据,以国际经济发展普遍规律为借鉴,根据经济区及各省的实情,预测区域城镇化水平;对规划期内增长的城镇人口,结合生产力布局规划、城市发展条件和现状,进行合理配置;从而确定区域内各级各类城镇的数量、人口规模。这样也能从宏观上控制城市规模和各级城市人口增长速度。

城镇体系规划高于城市总体规划,还表现在它统筹考虑区域范围、城市基础设施方面。在城市总体规划中,实际上有一些问题是没有真正解决的,如没有经过论证,更没有可靠的协议,就把其他行政范围的上游水源作为城市水源,而上游地区又将此水源规划为他用;一些行政范围较小的城市,无处选择垃圾与粪便储放地;大江两岸的城市对航道未作统一规划,双方预留的桥位对不上茬;上游城市污染下游水源等。这种问题只有在区域规划、区域城镇体系规划中才能得以解决。另外,区域城镇体系规划,能更好地计划利用土地,开发利用资源,协调多种矛盾。

城镇体系规划是人们城市观念、城市规划方法的一大突破,它从传统的方法发展而来,但已高于单个城市的总体规划,不能看作城市规划的一个部分内容,而应把它看作城市总体规划的编制依据。区域城镇体系规划具有一定的综合性,但也不是区域综合规划,它是区域规划的一个组成部分,或者是区域内一个专项规划。区域经济是城市的摇篮,城镇化机制取决于区域经济发展模式,直接受商品经济的影响,城镇体系的建设必须结合生产力布局规划进行。但因城镇体系规划比起其他的行业规划,更具有综合性、系统性、协调性,城镇体系的规划能较好地体现区域整体发展战略,对实现总体目标负有比其他行业规划更大的任务,因此,它是区域规划的核心内容之一。

#### 参考文献

- 1 霍尔 P 著. 城市 and 区域规划. 邹德慈, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985
- 2 严重敏. 地理学与国土研究. 1985, 1(2)
- 3 林德金. 实用省市地县现代规划. 北京: 光明日报出版社, 1988
- 4 未家泰, 等. 地理学报, 1988, 43(1)
- 5 陆大道. 区位论及区域研究方法. 北京: 科学出版社, 1988  
(河北省地理研究所于凤兰研究员撰; 李恩庆教授审)

#### 中国部门自然地理区划 China branch physical geo-

graphic regionalization 分别以中国自然地理环境某一要素为研究对象,按各要素自然特征的相似性和差异性逐级进行区域划分,并根据各分区单位自然地理综合特征的相似程度和差异程度排列成一定的区域等级系统。区划成果对于各要素理论研究和指导、服务于生产部门具有重要意义。同时,部门区划成果又是综合区划的必要基础。

中国公元前 5 世纪的《禹贡》一书中山川、湖泽、土壤等的分别阐述均属部门区划的范畴。此外各个时期的地理志、地方志中都富含部门区划的内容。

1949 年后,部门区划研究工作十分活跃,自 50 年代中期到 60 年代初期,全国性的部门区划有中国地貌、气候、水文、潜水、土壤、植物、动物和昆虫、冰缘、黄土等区划。各专业部门,还进行了区域性区划,如中国地貌区划。1956 年周廷儒、施雅风、陈述彭完成了中国地形区划草案;1959 年沈玉昌主持完成了中国地貌区划。同时,各省(区)和地区还完成了一大批区域性地貌区划,如吉林省、黑龙江流域(丁锡社, 1959)、安徽省(杨怀仁, 1958)、华南六省(1962)、内蒙古自治区(孙金铸, 1963)地貌区划等。气候区划、水文区划、植被区划、土壤区划的情况大致如此。

中国地貌区划(1959),由中国科学院地理研究所主持,沈玉昌主编。遵循形态成因、区域性、大地构造标志和综合标志等原则,划分全国地貌为第 1 级地貌区 18 个,第 2 级地貌区 44 个,第 3 级地貌区 144 个,成为我国的重要学术著作。区划中,编著者提出的划分我国地貌的形态指标,丘陵、低山、中山、高山、极高山,及其自然地理标志,对我国有很深刻的影响。另外,为本项区划所编制的区划图,是在编制大量分析图件如中国地貌类型图、地貌形成构造条件图、岩性分布图等基础上完成的。

中国暴雨区划具有如下意义:根据暴雨的区域特性和成因,从宏观上确定气候的一致性,为暴雨洪水计算服务;暴雨与粮食生产、交通运输、水资源的开发与利用等有密切关系,暴雨区划可

以为工农业生产布局,各种规划决策提供气候依托;长历时暴雨分布具有明显的地域性,分区研究暴雨,不仅可以预告提供气候性指标,并且可以详细揭露暴雨与地理环境诸因子之间的内在物质联系,从而进一步认识中国气候特点。

中国暴雨区划由邹进上等在“中国暴雨区划初步研究”中提出,将全国划分为10个暴雨气候区和4个副区,即东南沿海区、湖赣区、江淮区、华北区、东北区、云贵高原区、四川盆地、黄土高原区、蒙新区和青藏高原区。

中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划研究(1981),由中国科学院兰州沙漠研究所承担。根据沙漠化发生和分布的特征,可以将其分为3个大区:半湿润地带沙漠化零星分布区、半干旱草原地带及荒漠草原地带沙漠化发展区、半干旱荒漠地带流沙入侵及固定半固定沙丘活化区。3个大区可再根据沙漠化的发展程度,又划分为26个区域。针对不同区域沙漠化土地特征,提出不同的治理措施。

中国气候区划的研究,1929年竺可桢的“中国气候区域论”将全国气候区分为南部、中部、北部、满洲、云南高原、草原、西藏、蒙古8类。1959年中国科学院自然区划工作委员会“中国气候区划(初稿)”,将全国划分为寒温带、温带、暖温带、亚热带、热带、赤道带和青藏高原区。丘宝剑在“中国农业气候区划再论”中把中国气候区划分为3个等级系统:1级划分为季风、干旱、高寒3大区域;2级划分14个带:季风区域9个带,干旱区域2个带,高寒区域3个带;3级以降水量和温度以及地形、水文、土壤、植被等为指标,将全国划分为46个地区。

对于部门自然地理区划来说,地带性原则是区划的总则,还必须根据各部门自然地理区划对象的属性,拟定其它的具体原则,如气候区划不仅要考虑地带性规律,还要考虑各个地域的环流特征以及地形的影响等;土壤区划还要考虑岩性、人类活动等对土壤的影响;地表水区划还要补充流域完整性、岩性等对水质的影响等。

中国部门自然地理区划类型很多,不同学科由于侧重点不同,在区划原则、指标确定、系统选择等方面,还存在一些分歧,将逐步完善自身的体系,其中包括:区划原则和区划指标的统一;区划对象更加深细,类型更加繁多;区划的目的性更加明确。

#### 参考文献

- 1 丘宝剑,等.地理学报,1980,2:116~125
- 2 丘宝剑.地理学报,1983,1:154~162
- 3 邹进上.地理学报,1987,2:151~164
- 4 李万.地理学报,1987,4:376~381
- 5 尹泽生.农牧资源与区划研究,1988,1:8~13

(江西师范大学蒋梅鑫撰;刘会庆审)

## 中国热带的问题 the tropical problem of China

中国热带在华南的偏南部地域,其范围界线的确定至今仍有分歧。中国热带区域与温带之间出现宽广的过渡带(亚热带),热带区域内陆地面积小而分散,海域广阔,又处于世界著名的季风区内,具边缘性、季风性特点。开展中国热带区域性质及其范围界线的研究,属以综合性、区域性为特点的区域自然地理范畴;对认识热带自然环境特点及其分异规律,合理开发和保护热带自然资源、生态环境,发展热带大农业生产和热带作物垦殖业,自然灾害防治、国土整治,经济开发等,具有极重要的意义。

1950年前,对华南的热带问题研究较简略,资料较分散。1952年为大力发展橡胶,华南垦植局组织在海南、粤西和广西南部以选择橡胶宜林地为主的多学科综合调查,同年开始在海南、雷州半岛垦植橡胶。1954年为充分认识中国自然特点,因地制宜发展农业,自然区划研究迅速开展,全国自然区划方案相继发表,开始大量涉及对中国热带划分及区域特征的研究。70年前较有影响的全国自然区划有罗开富(1954)黄秉维(1959)任美镛和杨纫章(1961)侯学煜(1963)等方案。这些区划对热带区域特征论述大体相同,但热带界线、范围划分却不大相同,多数位置偏北在

23°N附近。1958~1961年,华南生物资源综合考察队在对两广、闽东南等地进行多学科综合考察基础上,分别编写了华南三省省级、地区、县级自然区划。主要作者为徐君亮(1959),唐永奎(1960),杨宗干(1962)陈史坚、余显芳、徐国璇(1963),包浩生(1965)等。这类地方性自然区划大多数将前全国自然区划方案的热带界线作了调整,南移至21°~21°50'N以南的地带,其研究成果为解决界线争论提供理论和资料依据。

随着自然区划、华南综合考察工作的深入和热带大农业生产的需要,热带区域性质及其北界成为地理乃至各有关学科争论的热点之一,争论的关键是对热带亚热带过渡带的处理问题。地学、植物学者多次撰文,从不同角度进行讨论。50年代后期至60年代初,讨论的主要问题:(1)热带作为自然综合体来划分还是作为区划的一个步骤。多数人同意前者。(2)划带的原则。多数人倾向综合划带原则。(3)热带划分依据。多数人以活动积温总和(日均温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的持续期温度总和)等值线与土壤、植被及农业分布的大体关系拟定的大体指标来进行。具体指标各学者有差别,具体界线也不尽相同。在多组界线中,最北在25°N附近,最南约在19°N附近,两者相差6个纬度之多。(4)划热带的植物标志。鉴定热带的主要标志是木瓜、香蕉、荔枝、龙眼等“热带作物”,还是椰子、三叶橡胶胡椒等“赤道作物”;现状植被特征及区系组成反映了热带性或是亚热带性景观,植物学者及部分地学者赞成后者。(5)准热带问题。任美镛等把热带性稍有不及、比亚热带有余之地称为“准热带”,江爱良、侯学煜称“半热带”,曾昭璇称“过渡带”,对其归属看法不一,而更多人没有接受“准热带”或“过渡带”,讨论文章分别发表在《地理学报》等书刊上。由于热带概念性质和划分标准各家认识不一,当时尚难取得较近的见解。

70年代中至80年代,全国农业区划及农作物光合潜力研究的进展,热带北缘橡胶栽培、热带资源、环境、经济开发、规划及海南岛等重点开发区研究的深入,全国自然区划新方案相继出现。在热带问题上对原方案作了修订并提出新的见解。1980年全国农业自然资源调查和农业区划委员会由席承潘等人执笔编写《中国自然区划概要》,根据温度指标、农业植被、土壤特征,在东部季风区南部划出边缘热带、中热带和赤道热带。1982年李万根据气候定性指标,在《中国景观区划初步研究》提出准热带、季热带、恒热带。1983年赵松乔吸取以往区划方案的优点,提出《中国自然区划新方案》,根据气候指标,在东部季风区南部划出华南湿润热带区。1985年任美镛《中国自然地理纲要》,坚持原界线的划分方案。1986年黄秉维《中国综合自然区划纲要》发表,对原方案的热带范围作了修改,提出边缘热带、中热带、赤道热带。这些方案的热带位置多数倾向南移而且多划出一个边缘热带。

热带地方性自然区划也先后出现。1982年余显芳发表《海南岛综合自然区划与大农业布局》,1987年发表《中国热带范围自然地带亚热带划分》以景观综合观点,采取多指标划分方法,提出北缘热带、中热带、赤道热带。其界线较前无重大调整,与席承潘(1980)、徐祥浩(1982)、黄秉维(1986)何大章(1988)的划法相似。1984年赵维成发表《西双版纳综合自然区划》,其热带界线与上述学者观点相似。全国性、地方性的自然区划,农业、气候、植被等部门的专题区划新方案,对热带北界看法渐趋接近。

热带区域特性研究不断深入。1979~1982年,厉鼎勋、韩渊丰先后发表《华南区域分析初步》、《也谈我国的热带区域》、《对云南热带亚热带区域的再认识》,运用传统和定量相结合方法对区域性质、范围、区内结构进行分析并提出新的见解。1982年,陈广叙等论述了《雷州半岛热带区域的边缘性质》;1990年钟功甫等赞同余显芳等的热带界线并论述了《中国热带特征及其区域分异》。

70年代至80年代初,热带界线问题讨论又重新活跃,并且逐步深入。主要问题:(1)划带指标的检验与修订。黄秉维(1979)、余显芳(1981)提出热带修订指标;韩渊丰(1978)、厉鼎勋等(1980)经实地调查检验,结合数理方法提出热带划分标准;丘宝剑、卢其尧(1980)重申其60年代初的见解。各学者热带热

量指标的认识趋于接近,指标项目的选择也相似。(2)准热带归并于热带的问题。任美镛(1980)改变60年代“准热带与热带并列”的划法,将准热带归并热带作为热带内一个亚带,其北界即是热带北界。(3)热带区域特性问题。1980年曾昭璇等提出《我国热带界线问题商榷》,重申其原见解,坚持热带北界不南移的观点。余显芳(1981)、韩渊丰(1981)、徐祥浩(1982)分别撰文论理,提出不同看法。着重从热带区域特性出发提出划区依据。

中国热带问题讨论60年代初为高峰期,当时提出问题较多,反映出热带研究的初始阶段。那时国家迫切需要橡胶等重要物质,加上热带区域性质、热带作物特性认识刚开始,故出现强调夏季高温低估冬季低温倾向且不少人提出向北扩大热带范围的主张。关于热带问题的各种见解经过20多年生产和科学实践、考察检验,到70年代后期出现重新认识的局面。对冬季低温限制因素给予充分重视,热量指标生物学意义有较具体认识,修订指标趋于一致。但过去的论证多以气候指标与热带作物、农业、林业、植被、土壤等关系展开,这种讨论内容、方法,在过去热带问题研究上作过贡献,而现在又暴露出短期难以解决、今后有待解决的问题。近年来,中国地理学和热带区域问题研究中出现系统论思想和数量分析方法,这对进一步揭露热带区域本质、建立各环境因素相互关系模式,找出主导因素有好处,不过仍是个新问题,还需在实践中慎重摸索。自然区划的理论和方法,热带概念、性质及划分标准还有待进一步探讨。作为中国重点经济开发区的热带资源系统,环境开发与保护研究已逐步深入,区域生态环境结构、综合开发研究正在起步。当前迫切需要更广泛采用遥感、计算机等现代科技手段,并建立地理信息系统,使区域研究基础更深入扎实。

热带自然环境各要素特征,过去描述性解释现象较多,成因研究较少。今后有必要将其作为环境、资源的整体来认识,综合研究各要素之间的相互关系及与人的相互作用;开展野外定位实验,深入研究区域自然环境的形成发展、演变过程,以利加强环境变迁、自然灾害等监测及预测预报。

#### 参考文献

- 1 中国地理学会. 1962年自然区划讨论文集. 北京: 科学出版社, 1964. 1~5, 245~247
- 2 余显芳. 热带地理, 1981, (4): 25~36
- 3 韩渊丰. 热带地理文集, 1982, 25~36
- 4 徐祥浩. 植物生态学与地植物丛刊, 1982, 6(1)
- 5 周正主编. 综合自然地理学文献选编. 重庆, 西南师范大学出版社, 1988. 97~111
- 6 中国科学院地理研究所编辑. 地理集刊. 北京: 科学出版社, 1990. 1~20
- 7 韩渊丰. 华南地区自然环境及其开发利用. 北京: 高等教育出版社 1991. 25~36
- 8 黄秉维. 地理学报, 1992, 12(2)

(广州师范学院郑芷青撰, 韩渊丰审)

**中国山地** mountain land of China 山地是一个地貌学的概念。广义的山地还包括丘陵、高原、山原、台原(波状起伏、分割轻微的高原)、台地和黄土塬等类型,习惯上又称之为山区(mountain region)。中国山地面积广阔,类型多,这对于研究山地的形成和演化,合理开发利用和保护山区资源,具有重要的意义。

对中国山地的认识、研究和记述已有4000多年的历史。先秦时期,比较系统记载中国山地的著作有《禹贡》、《五藏山经》、《管子》、《尔雅》等。其中,《禹贡》一书提出的“山列”概念和“九州”境内“西部集中,东部分散”的山岳大势,对研究中国山脉的分布具有奠基作用;《五藏山经》是《山海经》一书中最早的部分,也是中国最早的一部山岳地理专著,书中将中国山脉的排列和分布记述为“五藏(或五大片)”,总共26行列,并说明山脉的走向、延伸里程和山脉间的距离,对山地各部分的差别能区分出上下、阴阳,详加记述,对后来的研究具有重要的参考价值;《管

子·地数篇》记载:“出铜之山四百六十七山,出铁之山三千六百九十山”;“上有铅者其下有注银,上有丹沙者其下有注金,上有葱石者其下有铜金”,这可以说是中国早期关于山地矿产资源勘探开发的论述。

明代后期,王士性的《五岳游草》一书中有《地脉》、《形胜》、《风土》3节,填补了中国当时自然地理方面的空白。所谓“地脉”,代表后来的山脉,“形胜”是说明行政区划和自然形势的。明末徐弘祖对中国山地进行了大规模考察研究,所著《徐霞客游记》精确记载了中国西南的喀斯特地貌,并初步论述其形成原因,是世界上最早的关于喀斯特地貌的科学文献。

20世纪初,中国地理研究逐步科学化、系统化。张相文、丁文江、翁文灏、李四光等,发起成立“中国地学会”、“中国地质学会”等科研组织;建立“地质研究所”、“地质调查所”等研究机构;培养了中国第一批地理专业研究人材;组织各种考察队,先后对全国各山地进行考察,主办《地学杂志》,先后出版了多种地理科学论著。其中,《中国山脉考》(翁文灏)、《地文学》(张相文)、《地球表面形象变迁的主因》和《地质力学概论》(李四光)、《中国之造山运动》(丁文江)等著作,记载了应用现代科学方法研究中国山地获得的重大成果。

李四光教授从研究地壳运动现象入手,应用现代数学、物理学、地质学方法,对构造地貌成因进行模拟实验,建立了“构造体系”这一基本概念,其主要观点是:(1)中国山脉的形成和排列受构造体系控制。东西走向的山脉受巨型纬向构造体系控制;南北走向的山脉受经向构造体系控制;东北—西南走向的山脉(分布于南北向构造带东地区)主要受华夏构造体系控制;北西走向的山脉(分布于中国西部)主要受西域式构造体系的控制;各种弧形山脉(如大陆边缘的喜马拉雅山)受扭动构造体系控制。(2)从发展历史来看,中国的山脉大都经过多次造山运动而形成,但中生代以前的地壳运动与现代地貌一般已很少直接联系。中生代燕山运动使中国大地构造轮廓基本定型,纬向、经向、北西和北东向的山脉都在燕山运动中奠定基础。新生代的喜马拉雅运动对中国现代巨地貌结构的形成有特别重大意义,喜马拉雅山脉、台湾山地在此时形成,昆仑山、天山及青藏高原上的许多山脉都在原来的基础上发生大幅度隆起。

70~80年代,竺可桢、赵松乔等组织《中国自然地理》编辑委员会,编辑出版了《中国自然地理·总论》和《中国自然地理·地貌》。总结了山地考察研究的成果,主要有:(1)根据山地的海拔高度和主要地貌过程,结合中国山地众多、高差巨大、西耸高山高原为世界所罕见等实际情况,将中国山地分为极高山(海拔>5000m)、高山(3500~5000m)、中山(1000~3500m)、低山(500~1000m)等类型。丘陵虽也是以基岩为主的高起地形,但常以更低的相对高度和更大的破碎性分布于其它地貌类型之中。(2)中国地形大势是西高东低,自西向东逐级下降。山脉将中国地势划分为3级阶梯,并控制其它地貌类型的分布。第1级阶梯是青藏高原,边缘有昆仑山、祁连山和横断山脉等。第2级与第3级阶梯的分界是大兴安岭、太行山、巫山、雪峰山一线。各级阶梯面上,山脉与高原、盆地或平原相间排列。山脉对中国地理环境及其演变具有深刻影响。山地随着海拔高度的变化,日照、气温和降水以及植被、土壤类型等也随之改变,形成了自然景观的垂直带谱。由于各山地所处的纬度位置和海拔位置不同,山地垂直带谱类型也复杂多样,并与水平自然带相互交错。山地对地表能量和物质的流动具有屏障、分支及阻滞等作用。高大的山脉多是河流的源地或流域的分界,对地表径流的控制作用十分明显。中国地理区划中的许多界线都以山脉为基础。

80年代以来,山区的合理开发利用和治理成为中国山地研究的重点课题。1980年,中国科学院地理研究所编著的《中国农业地理总论》一书提出的山区开发的基本思想是:通过了解山地自然综合体的结构、类型、特点和变化规律,有意识地对其自然发生过程施加人为影响,使整个山区向有利于国民经济的方向发展。为此,将中国山区划分为8种类型:(1)西北温带干旱地区的

高山;(2)黄土高原温带半干旱区的山地、丘陵和黄土塬;(3)东北温带半湿润区的中山和低山;(4)华北暖温带半湿润区的中山和低山;(5)华中(江淮之间)北亚热带湿润区的中山和低山;(6)江南与西南中亚热带湿润区的中山、低山和丘陵;(7)华南与滇南热带与南亚热带湿润区的低山丘陵;(8)青藏高原区的高山。各类山区目前利用程度不一,今后进一步开发利用必然存在方向上的差别。其利用价值决定于资源(矿藏、森林、宜农或宜牧草地、水源、野生动植物等)、地貌(险阻或平易)、所在地区的人口密度(劳动力)以及邻近居民点或城市之间的交通条件等。

在现阶段,中国山区生产存在的主要问题是,缺乏全面规划、统一经营;很多山区交通运输不便;山区水土流失严重,影响山区及山下生产;资源利用不当,生产力水平较低。山区开发利用的方向和途径主要是:有计划地对山、水、田、林、路进行综合治理,增加植被覆盖,保持水土,改善山区生态环境;因地制宜,多种经营,发展山区农业和各种土特产品的生产,一般山区要把林业作为重点来经营;开发山区水力和矿产资源,建立多种能源、冶金工业基地;开发山区旅游资源,以旅游业带动山区经济的发展。

目前,山地研究的部分成果已投入实际应用。如黄土高原水土流失的治理,是从合理利用土地着手,因地制宜确定生产方向,实行农林牧综合发展;以水土保持为中心,改土与治水结合,治坡与治沟结合,工程措施与生物措施结合,积极建设基本农田,大力造林种草,以中小流域为单位,实行山水田林路综合治理、集中治理和连续治理。南方丘陵山地的开发利用,是以林为主,林农牧结合,力求做到以林保土,以林蓄水,以林护农,以农养林,使农林牧副渔得到全面发展。

中国山地开发利用与生态环境保护研究已在全国范围内展开。此项工作蕴藏着巨大的经济效益、生态效益和社会效益。根据1992年中国地理学会山地分会召开的“中国山地环境与灾害学术讨论会”和中国科学院学会召开的“全国喀斯特地区农业发展学术研讨会”提出的议题,现阶段中国山地研究的热点是:(1)山区的人地关系;(2)山地综合开发与环境保护;(3)山区开发和建设的各项政策与措施;(4)山区农业的发展方向 and 途径;(5)山地灾害的防治对策。由于此项工作的迫切性,已得到国家和各级地方政府的大力支持,参与的学科和部门也逐步增加。

#### 参考文献

- 1 李四光.地质学概论.地质部地质力学研究所,1960
- 2 中国科学院中国自然地理编辑委员会.中国自然地理(地貌).北京:科学出版社,1980
- 3 任美镛,杨纫章,包浩生.中国自然地理纲要.北京:商务印书馆,1980,10~12
- 4 中国科学院地理研究所经济地理研究室.中国农业地理总论.北京:科学出版社,1980,104~112
- 5 王成祖.中国地理学史.北京:商务印书馆,1982,4~25
- 6 中国自然地理编写组.中国自然地理.北京:高等教育出版社,1984,5~20

(安徽宿州师范专科学校张理华副教授撰)

### 中国名山 famous mountains of China

中国是多山的国家,山地丘陵面积占国土面积的三分之二,在众多的山地中有许多名山,相传中国名山有5770座,其中比较著名的有779座。各山地地质构造复杂,地理环境多样,风景秀丽,自然资源丰富,旅游价值大,对名山的研究具有重要的经济、生态、社会和学术意义。

早在6000~7000年前,中国人就把山作为崇拜的对象,尊山为神。中国名山的发展历史,若从“禹封九山”算起已有4000多年历史。春秋战国时代,对“山神”的崇拜已遍及神州诸国。《诗经·大雅》谓“崑崙崑岳,峻极于天”。成书于2700多年前的《山经》,又名《五藏山经》,是一部内容丰富的名山录。它首次以山为纲,记述了全国名山451座,每座山都记有方向、道里、特点、河流、动植物、特产以及神话传说、祭祀活动内容。当时另一部名

著《禹贡·导山》是专论山岳的著述。秦始皇于公元前219年亲登岳顶封泰山。《尔雅·释山》有五岳的最早记载,称泰山为东岳,华山为西岳,霍山(今安徽天柱山)为南岳,衡山为北岳,嵩山为中岳。代表了5座峻极于天的山,被看作是天的5个方位。隋文帝时改称湖南衡山为南岳。西汉张骞出使西域,记述了西域山川大势。司马迁撰写的《史记》赋予应时的名山大川以新的内容和历史价值。在中国漫长的封建社会时期,人们寄情山水欣赏自然之美,吟咏创作了一大批名传千古的山水诗、山水画和山水游记。佛教和道教在名山的发展中起了重要作用。唐宋时代,在一些名山上组建了书馆书院。唐宋至明清时代,中国在研究名山成因、探索名山的科学价值和地理学理论方面,开创了新局面。出版了许多名著,例如沈括(宋代)的《梦溪笔谈》,明末徐霞客的《徐霞客游记》,清代魏源的《衡岳吟》和《潜山吟》等。鸦片战争以后,有些名山被外国人侵占建造了疗养院和别墅。1949年以来,国家公布了文物保护单位,发布了保护风景名胜区,成立了自然保护区,正在有计划有步骤地建设全国性大中小结合的名山体系,对名山的研究取得了较大的进展。中国名山,例如黄山1990年被联合国教科文组织确定为文化和自然遗产,列入“世界遗产名录”。中国名山研究现状可包括以下方面。

**名山的特点、功能和作用** 名山的特点是亿万年前形成的自然山岳景观为基础,与中国悠久历史相结合而形成的。名山的自然景观一般都具有“雄、奇、险、秀、奥、旷”等特征。历史文化一般与封禅祭祀、名人游踪和多种历史文物、革命遗址、民间传说和故事相联系,加上各种文化建筑,使名山显得更加秀丽。名山的功能包括自然景观美功能(名山的峰、林、水、石、花、草、兽、禽的美学价值)、人文景观美功能(如摩崖石刻、古建筑、古文物和古遗址的人文景观价值)、科学研究功能(揭示地质地貌形态和成因,动植物演化的研究价值)和经济功能(发展旅游,提高经济效益)。名山作用主要表现在:民族史、国情教育的课堂;诗人、画家、文学家、摄影师、园艺家的理想天地,灵感的源泉;人们陶冶情操,锻炼身体和磨练意志的场所;天然博物馆、地质博物馆和天然动植物园,是一部完美的自然之谜教科书。

**名山的类型** 名山类型具有不同的划分原则和规定,依据名山的演化可以划分为以下类型:封禅名山,如“五岳”和“五镇”等;佛教、道教名山,四川峨眉山、山西五台山、安徽九华山和浙江普陀山是中国四大佛教名山;云南鸡足山、湖北玉泉山、湖南衡山、江西庐山、福建鼓山、江苏宝华山、浙江天台山和山东泰山是佛教“八小山”。湖北武当山、四川鹤鸣山、江西龙虎山和安徽齐云山为中国道教四大名山,还有衡山、华山、崂山和青城山等也是道教名山;风景名胜,如庐山、黄山、雁荡山、长白山、武夷山、武陵山(张家界)等;高峰名山,如中国西部的珠穆朗玛峰、乔戈里峰、托木尔峰、贡嘎山以及东部的台湾玉山等都是著名的高峰名山;革命胜迹名山,如江西的井冈山,湖北、河南两省间的大别山,以及山东的沂蒙山区等是中国革命的革命遗址。根据构成名山主体的岩类为依据,可分为:岩浆岩类名山,主要包括花岗岩、火山岩、玄武岩和安山岩等,其中以花岗岩构成的名山为多,如西岳华山、南岳衡山、浙江的天台山和普陀山、安徽的黄山和九华山、江苏吴县的灵岩山、山东崂山、辽宁千山等;沉积岩类名山,如珠穆朗玛峰、北岳恒山(主要为古生代前期的石灰岩、砂砾岩、页岩组成)、南京钟山、湖口石钟山(石灰岩)、江西井冈山、甘肃麦积山、四川青城山(古名丈人山,红色砾岩和砂、页岩构成)、台湾阿里山(第三纪红砂岩和页岩)、新疆火焰山(以侏罗纪、白垩纪和第三纪砂砾岩和红色砂页岩为主)、甘肃鸣沙山(砂砾岩)等;变质岩类名山,岩性以片麻岩、混合岩、石英岩、大理岩、板岩和片岩为主,如东岳泰山、东镇沂山、连云港云台山、山西五台山、中岳嵩山、陕西骊山、江西庐山、湖北武当山、台湾玉山、云南苍山和玉龙雪山等。

奇峰是名山的组成部分,包括孤峰、峰丛和峰林,在喀斯特地貌分布区最为发育,以云南路南石林最为著名。近来有些把由石英砂岩、花岗岩、火山岩等岩石在构造、流水和重力等作用下所

形成的类似峰林的地貌分别称为砂岩峰林地貌(如张家界)、花岗岩峰林地貌(如黄山、天柱山等)和火山岩峰林地貌(如雁荡山火山岩峰林)。一些由钙质胶结、产状近似水平的红色砂砾岩、砂页岩所组成的峰林地貌称为丹霞地貌,例如广东的丹霞山、福建武夷山、安徽齐云山等。

汪谦益曾报道中国名山形成的地质年代,约在 20 亿年开始,中国名山被陆续随古陆台的抬升而奠基。太行山、五台山、嵩山、泰山等北方名山是在华北陆台的基础上上升出海平面的,距今已有 25 亿年历史,这些名山历经漫长的地质岁月,显示出“皱纹满布”和“面貌全非”的“老年”特征。燕山、南岭及西部一些高峰,是在距今 2 亿年左右的燕山运动时形成的,山峰林立,充满“青春”活力。台湾玉山和喜马拉雅山的珠穆朗玛峰等,形成于距今 300~7 000 万年前,具有山峰高大和不断增高的幼年特征。

中国名山的研究历来以描述性、文学性和美术性研究为主。随着经济和旅游事业的发展,中国名山研究的热点包括:(1)名山的形成与构造;(2)名山的价值、功能和作用;(3)名山的景观和经济的定性定量评价;(4)名山的开发利用与保护等。

#### 参考文献

- 1 Ferrario F F. Journal of Travel Research, 1979, 17: 3~4
- 2 中央人民广播电台祖国各地节目组编. 祖国各地(名山篇). 北京: 广播出版社, 1982
- 3 谢凝高编著. 中国的名山. 上海: 上海教育出版社, 1987
- 4 潘凤英等编著. 祖国的山水峰洞. 北京: 测绘出版社, 1991. 54~243

(安徽师范大学潘玲玲、周秉根副教授)

### 中国湖泊信息系统 the lake information system of China

是将历年以来在全国实地考察和调查研究,以及近年来遥感信息图像处理分析解译所得到的各种湖泊的基本数据,经过审定和标准化,依照一定的记录格式,输入计算机形成湖泊基本数据文件,在计算机内按选择的数据结构把这些文件组织成湖泊编目数据库,通过软件对数据加以管理和应用,以实现湖泊数据的查询、检索、更新、修改和分析应用,这样一个完整的技术系统。

中国湖泊信息系统具有强有力的信息分析功能。它可将相互有关的资料进行重叠和对比,并在计算机屏幕上显示出复合的结果,十分便利于人们对湖泊和湖区问题的研究。因此,它是湖泊资源开发利用、湖区经济发展、湖泊科学管理和正确决策的重要的工具。

中国湖泊信息系统是中国自然地理信息系统的组成部分。它同土壤、植被、冰川、沼泽、沙漠等要素平行地组成中国自然地理信息系统。从宏观上为国家的国土整治和区域开发提供服务。

中国湖泊信息系统的研究历史很短。始于 1983 年,在陈述彭院士的倡导下,中科院地学部组织了“中国自然资源与环境信息系统”的设计。到 1987 年“七五”国家重点科技攻关落实,在张晋、赵锐主持的“全国自然地理环境综合信息系统”的课题中,赵宏、许丽焱、奚和平、严晓蓉等人进行了湖泊子系统的建立。1987 年赵锐申请国家自然科学基金“中国主要湖泊信息系统辅助决策试验研究”获准,赵锐、王洪道、赵宏、严晓蓉等至 1990 年完成了中国湖泊信息系统试验。

全国性湖泊信息系统在国外尚未展开,然而对一些湖泊的研究亦已经运用到计算机和数据库技术。中日太湖—琵琶湖合作研究,日方建立了琵琶湖微机数据库,并输出彩色图集。在国际贝加尔生态研究中心,前苏联、美国、中国等湖泊专家都对贝加尔湖进行了数据采集、计算机计算与制图。世界各主要国家正朝着建立湖泊信息系统方向前进。

中国湖泊信息系统主要由 4 大部分组成,即数据采集子系统、湖泊编目数据库、数据管理与更新子系统和数据应用子系统。数据采集子系统设有栅格数据微机键盘输入软件、数字化器矢量和多边形输入软件,以及键盘数字输入软件。能将现有地图、遥

感信息和观测数据进行采集,接着完成数据预处理(包括查错、审定、评定数据精度)和数据标准化与规范化(包括数据分类、编码、统一记录格式和地理座标),输入计算机。湖泊编目数据库由 4 个层次组成。第 2 层是全中国主要湖泊分布。它是空间数据,反映每一湖面积大于 1km<sup>2</sup>湖泊在全国的分布情况。第 2 层是每一个湖泊的形态和基本数据。实际上是图形库和属性库,图形库是从 1:5 万或 1:10 万地形图上标描出各个湖泊形态(包括湖岸线、入湖河道、沿湖公路和主要居民点),经数字化得来;属性库则由属性数据表格构成,属性表里记载着湖泊代码、名称、形态要素(如位置、面积、长度、宽度、行政所属、流域所属、湖区地形等),水文要素(如贮水量、水深、水温、水质、湖水变化、水文台站分布等)、生物要素(如水生动物种类数量和分布、水生植物种类、数量、和分布等)化学要素(如矿化度、富营养程度、八大离子、总氮、总磷、COD、BOD 等)和旅游要素(风景名胜、旅游交通、湖泊历史等)。它表明湖泊与属性是一种关系数据结构。而湖泊与湖泊之间,通过湖区与流域形成一种层次数据结构。至于图形与属性则由湖泊代码作为关键字而联接起来。第 3 层是某些个湖泊的专题数据。这些专题数据是指基本数据尚未包含的内容。如 20 多个湖泊的等深度线库是根据这些湖泊测量得到的地形数据而建立的。又如主要湖泊富营养化数据库是按“七五”重点科技攻关课题的数据库建立的。第 4 层湖泊应用模型库。它是为了特定的研究目的或应用目的而建立的,如太湖围垦动态变迁模型、鄱阳湖地形与面积容积关系模型。数据库管理更新子系统着重软件设计。一方面借用现成的数据管理软件,如 ARC/info, dBASE;另一方面可以自编一些管理软件,以实现管理数据与更新数据的要求,同时加强数据编辑、作图等功能。数据应用子系统的设计经历了由浅入深不断发展阶段。最先满足用户查询检索的要求,继而分析、对比、评价,再则实现预测、预报和辅助决策功能,并逐渐在知识库支持下向专家系统发展。应用子系统还要充分利用计算机外围设备,精心设计数据产品输出的各种软件。从仪器讲应考虑屏幕显示、宽行打印、绘图仪和彩色硬拷贝的输出。从产品形式讲应考虑文字、表格、图表、地图和图像。

中国湖泊信息系统还考虑信息畅通、信息共享和保密措施,以及编写湖泊数据字典等具体技术要求。

湖泊信息系统的建立与应用是长期的基础性研究任务。它吸收系统工程、信息科学的新成就,采用电子计算机与遥感技术,依赖湖泊综合性多学科研究的成果。因此,湖泊信息系统的发展亦必然是随着计算机科学和湖泊科学的发展而发展。同时,它又是直接为国民经济建设服务的,必然会随着应用的深入提出种种科技问题来研究。其研究热点大致在于 3 个方面:(1)湖泊信息系统基础理论的研究 对湖泊数据采集、标准化、数据结构、存贮、管理与更新的探讨。(2)湖泊动态监测与信息系统不断更新、扩展的研究 湖泊是有其发生、发展、消亡的规律,加之人类活动的干预,湖泊的变化十分复杂。而恰恰又是这种变化能反映自然演变的进程,能够反映人类活动的轨迹。因此湖泊动态监测与信息系统更新,必然是研究的热点。(3)湖泊信息系统应用模型 应用是系统的生命,随着应用的深化,应用模型层出不穷,且日益提高。而近几年来混沌学(Chaos)与分形学(Fractal)的诞生,对湖泊信息的应用又注入了新的方法。总之,可以预见,其发展可能遵循:湖泊数据库—湖泊信息系统—湖泊信息学而发展。

中国湖泊信息系统研究的难点在于原始数据不全与数据量庞大。按数据库所列数据项中有许多湖泊数据不齐全,有些数据项的数据重复,如湖泊面积有好几个数字。针对它必须加强湖泊的基础研究,开展学术讨论,得出规范的数据。克服数据量庞大必须尽量减少信息的冗余度,同时采用信息压缩技术,如最简单的游程编码,较新的分维压缩等方法加以解决。

#### 参考文献

- 1 陈述彭. 地理科学, 1983, 3(4)
- 2 O'Donnall H. 14th world Conference ICA, 1989
- 3 Zhao Rui. 14th world conference ICA, 1989

4 赵锐,赵宏,严晓蓉. 湖泊科学,1991,13(1):67~73

(中国科学院南京地理与湖泊研究所  
博士生导师赵锐研究员撰,黄杏元审)

### 历史自然地理学

是历史地理学的主要分支学科,其研究对象是历史时期的自然地理环境。研究范畴,在时间上介于古地理学与现代地理学之间;在空间上主要指历史时期人类活动影响所及地域。研究内容涉及历史时期自然地理环境各要素的演变及其规律,如历史气候、历史植被地理、历史水文地理(河流、湖泊)、历史地貌(海岸、沙漠)、历史动物地理、历史土壤地理等,研究性质属于自然科学。

历史自然地理环境的演变及其对人类的影响很早就得到各类学者的注意。如中国北宋的沈括、明代的杨慎和清代的刘献庭都曾认识到历史气候的变化,但真正的深入研究始于本世纪上半叶。前苏联的 M. A. 博戈列波夫和中国的竺可桢在历史气候(1907、1925)方面、美国的 C. 苏尔在历史地貌(1925)方面、前苏联的 E. B. 吴鲁夫在历史植物地理学(1932)方面、英国的 H. C. 达比在历史植被(森林)(1934)、历史水文(沼泽)(1936)方面作了奠基性的开创研究。至 50 年代,美国 A. 克拉克和 C. 苏尔等人特别强调了历史地理学与自然地理学的联系,从而大大增加了历史自然地理研究在历史地理学总体研究中的比例,彻底改变了以往历史地理学多侧重于历史人文地理研究的状况。自 50 年代以来,中国进行了系列的历史自然地理研究,《中国自然地理、历史自然地理》(1982)总结和反映了这一时期的研究成果。

60 年代以来,现代自然地理学的研究取得了很大的进展。尤其在历史气候、历史地貌、历史植物地理、历史水文地理以及历史动物地理方面,获得了较多的研究成果。

**历史气候** 中国成为这一研究领域内的主要国家,取得了许多重要研究成果。竺可桢的《中国近五千年来气候变迁的初步研究》(1972),不仅标志着中国历史气候学的形成,也堪称为现代历史气候学最显著的研究成果。徐宗之的《各地气候历史记载初步整理》(1977)、张家诚等的《气候变迁及其原因》(1976)等著作,以及王开发、张玉兰的《根据孢粉分析推论沪杭地区 1 万多年来气候变迁》(1981)、葛全胜的《历史文献中气候信息的评价》(1990)等论文为重要成果。

**历史地貌** 是近年来历史自然地理学研究中比较活跃的领域,英美两国有较多的研究成果。如 D. Hooke 的《盎格鲁撒克逊地貌》(1985)、M. Aston 的《地貌的辨识:地区研究中的地貌考古学》(1985)等著作和 A. King 的《地貌与英帝国》(1988)、M. Williams 的《历史地理学与地貌概念》(1989)、P. G. Goheen 的《地貌与历史考察中的观念形态》(1990)等论文。中国曾昭璇等的《历史地貌浅论》(1985)也作了较系统的探讨。在沙漠历史地理、黄土高原历史地理、河口、海岸历史地理等方面,中国学者如侯仁之、史念海、陈吉余等做出了一系列的研究成果。

**历史植物地理** 是较为成熟的历史自然地理学分支,欧美国家有很好的研究基础,尤其是英国, H. C. 达比从 30 年代至 60 年代均有这方面的研究成果。M. Williams 的《英国森林》(1988)一文即是在达比等人的基础上作出的重要研究成果。在中国,陈桥驿的《古代绍兴地区天然森林的破坏及其对农业的影响》(1965)是一篇影响巨大的研究论文,其影响远远超出历史植物地理学本身,日本学者称其为代表现代中国历史地理学研究方向的重要文献。关于历史时期中国森林分布及其变迁的研究,以文焕然等人的研究成果为代表。

**历史水文地理** 中国的研究成果是显著的,由于中国是个多河流、多湖泊的国家,因而历史水文研究在历史自然地理研究中占有较大的比例。谭其骧、史念海、邹逸麟等对黄河水系的历史变迁,谭其骧、张修桂等对长江水系的历史变迁,曾昭璇等对珠江水系的历史变迁,陈桥驿、邹逸麟等对中国湖泊历史变迁以及史念海、邹逸麟、马正林等对运河的历史变迁,都有深入的研究成果。西方在历史水文地理研究大都作为区域历史地理研究的一个

方面,象美国 R. Rubin 近年来对赫格夫沙漠的水资源所作的深入单一研究较少。

**历史动物地理** 世界动物保护组织所做的基础研究工作是值得推崇的;中国文焕然、何业恒等人在这领域内的研究也相当出色,发表了一系列的重要研究成果。

80 年代以来,历史自然地理研究在原有的基础上,取得新的进展。主要反映在历史自然地理环境变迁综合研究和历史自然灾害研究两个方面。围绕环境保护和防灾减灾两大全球性问题,历史地理工作者的基础研究发挥了积极作用。捷克斯洛伐克 V. Vanekov 和 L. Jelecek 主编的《环境变迁研究中的历史地理学》(1988)以及中国侯仁之主编的《环境变迁研究》杂志,刊载了一系列历史自然地理环境变迁综合研究的重要研究成果。历史自然灾害的研究,中国一系列研究成果引人注目,在用历史地图再现历史自然灾害地理分布及其规律方面,尤为突出如《全国近五百年旱涝分布图集》(1981)、《明时期中国历史地震图集》(1986)、《清时期中国历史地震图集》(1990),均为大型研究成果。

目前,世界各国学者已经把历史自然地理研究的重点转移到自然地理环境各要素的变迁对人类自身的影响方面。环境变迁和历史自然灾害研究热的兴起正是这一转变的结果。随着研究的进一步深入,在区域历史自然地理研究和综合历史自然地理研究两个方面,将得到更多的研究成果。用历史地图再现历史自然环境将成为重要的研究手段和研究方向。

### 参考文献

- 1 吴鲁夫 E. B. 著. 历史植物地理学引论(第 1 版). 仲崇信、张梦庄译. 北京:科学出版社,1960,4
- 2 中国科学院中国自然地理编辑委员会. 中国自然地理(历史自然地理). 北京:科学出版社,1982,1
- 3 寇·哈瑞斯. 历史地理(第 4 辑). 上海:上海人民出版社,1986,2
- 4 Williams M. Journal of Historical Geography 1989,15(1), 92~104
- 5 Journal of Historical Geography 1989,15(1):5~13  
(杭州大学历史地理研究中心陈桥驿教授、阙维民讲师撰)

### 中国海洋动物区系区: China ocean animal fauna area

中国幅员广大、海域辽阔,邻近中国大陆的海洋有渤海、黄海、东海、南海,它们都是北太平洋西部的陆缘海,简称中国近海。

中国近海自然条件优越,生物资源十分丰富。海洋动物的主要特点是种类繁多,区系组成复杂,含热带、亚热带和温带各种成分,对国民经济发展有着十分重要的意义。

中国海洋生物学研究始于 20 世纪 20 年代,但由于当时历史条件,只限于海洋鱼类及某些海洋生物研究。50 年代前期,海洋调查处于起步阶段,主要进行了以生物调查为主的渔场调查;50 年代后期至 60 年代以来,组织了全国海洋综合调查;70 年代至 80 年代以来,开展了南海海域综合考察,取得了丰硕成果。根据不同海区鱼类的区系、组成及其温度性质,全国海洋鱼类可分为 3 种类型:渤海与黄海区系为暖温带性,属北太平洋温带动物区系东亚区;东海西部与南海北部区系,属亚热带性质,为印度—西太平洋暖水区系的印度—日本亚区;东海东部与南海南部区系,属热带性质,为印度—西太平洋暖水区的印度—马来西亚区。有关海洋鱼类学方面专著有《中国软骨鱼类志》(朱元鼎),《黄渤海鱼类调查报告》(张春霖等),《东海鱼类志》(朱元鼎等),《中国南海经济鱼类区系》(成庆泰),《南海诸岛海域鱼类志》等。在海洋无脊椎动物方面,以经济价值较大的软体动物、甲壳动物和棘皮动物为重点,对种类形态特征、地理分布取得重要成果,如张玺等编著的《中国经济动物志 海产软体动物》、《中国海软体动物区系区划的初步研究》、《中国海无脊椎动物区系及其经济意义》、刘瑞玉《黄、东海虾类动物地理学研究》、《黄、东海底栖动物区系特点》,沈嘉瑞等《中国海蟹类区系特点》,以及古丽雅诺娃



论述中国海沿岸动物区系在世界大洋动物地理区中的地位等。

中国近海位于亚洲大陆东侧中纬度和低纬度带,除台湾东岸濒临西太平洋外,其他各海都被大陆边缘的半岛和岛群与大洋隔开,使动植物分布受到一定程度的影响。中国与邻近海区的海洋动物区系分别属于北太平洋温带区系区和印度—西太平洋暖水区区系,两区的分界大体在长江口北岸至朝鲜济州岛之间。

**黄、渤海区** 该海区夏季水温高,一部分暖水种得以生长繁殖;冬季受大陆气候影响,近岸区水温很低,北部有结冰现象,温度年变幅达 29℃,因而限制了许多喜温动物的生存。区系组成较其他海区贫乏,主要是温水性种类。(1)鱼类区系:本区鱼类共约 300 种,暖温性种占主要地位,其次为暖水性种,而冷温性种最少。暖温性种约占本区鱼类种数一半以上。如长蛇鲻、赤眼鲷、黄姑鱼、真鲷、鲷鱼、鲈鱼、大黄鱼、半滑舌鳎、小黄鱼、黑梅鲷、光魮等。(2)底栖动物区系:沿岸浅水区因水温季节变化显著且盐度较低,在数量上占优势的主要是广温低盐性种,基本属于印度—太平洋区系暖水性成分,如毛蚶、泥蚶、菲律宾蛤仔、文蛤、缢蛭、近江牡蛎、褶牡蛎、中国对虾、鹰爪虾、脊尾白虾、三疣梭子蟹、口虾蛄、棘刺锚参等。黄海南部冬季水温较高,因此种类比渤海和黄海北部浅水区丰富,出现一些不能生活于黄海北部的暖水种,如伶仃糠螺、黄新对虾等。黄海中部深水区由于夏季有冷水团存在,底层水温较低,有利于适应冷水环境的北温带种的生存与发展,形成以北方真蛇尾为代表的冷水性区系。

**东海区** 东海区为一较开阔的浅海,西部和东部动物区系有明显差别。(1)鱼类区系:东海西部包括长江口至台湾海峡之间的大陆架浅海水域,有长江、钱塘江等江河贯注,带来大量营养物质,为海洋生物繁殖与生长提供极为有利条件,著名的舟山渔场和闽东渔场就在这—海区。共有鱼类 450 多种,其中暖水性鱼种居首位,约占半数以上,暖温性鱼种次之,冷温性成分很少,仅在冬季出现于北部,如带鱼、大黄鱼、高眼鲷、长棘等。东海东部包括自日本九州以南,沿琉球群岛向南至中国台湾省北端之间大陆架以东的海域,处于暖流高温水控制范围。鱼类区系以暖水性种占绝对优势,如隆头鱼科、雀鲷科、蝴蝶鱼科、海鲷科、蓝子鱼科等科鱼类,多数为暖水性珊瑚礁种。(2)底栖动物区系:由于受黑潮暖流的影响较大,底栖动物中以暖水种占压倒优势,北方起源的冷水种极少。东海西部沿岸浅水区热带性成分增加,如扁足异对虾、几种管鞭虾、几种小型梭子蟹、棒锥螺等。在深度超过 50~60m 的深水区,为黑潮及台湾暖流所控制的区域,冬季底层水温高于 12~15℃,故狭温狭盐的热带种显著增多,如海羽鳃科、珍珠贝科、衣笠螺科、蚌科等。深度在 50~60m 的砂泥底质区,栗色管螺和凹裂海胆等种占极大优势。东海东部由于受强大的黑潮主流的影响,区系组成和西部有明显不同,热带性成分显著增多,有很多典型的热带种,造礁珊瑚区系相当发达,栖于珊瑚礁环境的热带虾、蟹和贝类种类十分丰富,如几种梯形蟹、珊瑚虾、珊瑚蟹、长砗磲、大砗磲等。

**南海区** 南海为一较大的深海盆,北部和南部的动物区系有明显区别。(1)鱼类区系:南海北部包括广东近海和北部湾较广阔的浅海水域。鱼类共有 750 多种,以暖水性种为主,暖温性种较少,无冷温性种。如蛇鲻、鲱鲤、红笛鲷、短尾大眼鲷、金钱鱼、蓝圆鲹等。南海南部包括海南岛和台湾岛南端水域及南海诸岛附近海域。处于暖水范围中,温度变化甚小,约有鱼类 800 种以上,皆为暖水性种,以广泛分布于印度—西太平洋区的种类所占比例最大。除同时出现于南海北部的种类外,还有不少典型暖水性种,如蜂巢石斑鱼、甲尻鱼、驼背大嘴鱼等。(2)底栖动物区系:基本上都是热带、亚热带成分,动物种类显著丰富,但主要种的个体数量除某些虾、蟹较多外,一般不如北方海区那样集中,季节变化也不明显。南海北部除东海常见的暖水种外,又拥有更多的热带成分,如蚌科约有 30 多种,织纹螺科约有 40 种,对虾科约有 60 种,在数量上占优势的主要有锈蚶、中华乌蛤、日本日月贝、栉江瑶、锡岛织纹螺、墨吉对虾、变态蚌、珠脊梭子蟹等。南海南部海水温度常年都在 20℃ 以上,区系成分基本上都是典型的热

带种,特别是珊瑚礁区系极其发达,动物种类越向南越多。西沙群岛和南沙群岛无论是造礁珊瑚或其他无脊椎动物类群,都比海南岛和大陆沿岸显著丰富。如笙珊瑚、苍珊瑚、梅花参、二斑白尼参等,在海南岛及其以北的大陆沿岸水域都不出现。西沙群岛已发现有 260 多种前鳃类软体动物。

海洋蕴藏着极为丰富的自然资源,而中国近海,特别是东海,是生产力较高的海域。随着海洋调查开发新技术突破,今后着重海洋生物生产力和资源调查研究,海岸带资源调查研究等工作,将为海洋动物地理学提供更多的科学依据。

#### 参考文献

- 1 张春霖,等. 黄渤海鱼类调查报告. 北京:科学出版社,1955
- 2 朱元鼎,等. 东海鱼类志. 北京:科学出版社,1962
- 3 张玺,齐钟彦,等. 海洋与湖沼,1963,5(2):124~138
- 4 刘瑞玉. 海洋与湖沼,1963,5(3):230~224
- 5 中国科学院动物研究所等. 动物学报,1974,20(2):113~130
- 6 中国自然地理编委会. 中国自然地理海洋地理. 北京:科学出版社,1979
- 7 当代中国丛书编委会. 当代中国的海洋事业. 北京:中国社会科学出版社,1985

(河北师范大学李恩庆教授撰)

**黄土高原** the loess plateau 是中华民族摇篮和古文化的发祥地。早在石器时代,中国劳动人民就生息繁衍在这块土地上。黄土高原由于深厚的黄土和强烈的侵蚀作用而闻名于世。由于独特的自然地理环境结构和不合理的开发利用,目前黄土高原是中国生态平衡严重失调的地区之一,对其综合研究具有重要的环境、经济和社会意义。

黄土高原的研究大致可以 1949 年为界,分为前后两个阶段。早在 2500 多年前,《尚书·禹贡》篇中,有关雍州地理概况的记载,最早提出“黄土高原”这一区域的基本内容。“厥土惟黄壤”、“洹河”(先秦时期称黄河为“洹河”)、“石水而六斗泥”等都形容了黄河多沙和黄土高原强烈侵蚀的特点。800 多年前(北宋)的沈括在《梦溪笔谈》中写道:“千观雁荡诸峰,皆峭拔险怪,上耸千尺,穹崖巨谷,不类它山。……今成,泉(陕)西大洞中,立土动及百尺,然管立,亦雁荡具体而微者,然此土彼石耳。”这是中国较早生动描述黄土地貌的论述。

19 世纪后期到 20 世纪 40 年代末,黄土高原研究有了新的进展,许多中外学者来此调查研究。如外国有李希霍芬(Ferdinand von Richthofen, 1868~1872)、奥勃鲁契夫(B. A. Обручев, 1892~1894)、安特生(F. G. Andersson, 1922)、德日进(P. Teilhard de Chardin, 1930)、巴尔博(G. B. Barbour, 1935)和美国 W. C. 罗德名(1922~1927, 1942~1943)等;中国有杨钟健、李庆远、马溶之等。这些研究中如奥勃鲁契夫的黄土风成观点,德日进和杨钟健的黄土分层和黄河河道发育等研究,对认识黄土现代侵蚀的历史演变有重要意义。1942 年在甘肃天水(由傅焕光等筹建)和陕西西安荆峪沟建立了水土保持试验站,为研究黄土区侵蚀规律积累了资料。

1949 年以后,开创了黄土高原研究的新纪元。曾于 1951~1954 年,1955~1958 年等多次组织中外学者对黄土高原进行大规模的综合性和考察,开展了一系列定位观测试验,成立了黄河中游水土保持委员会,颁布了《关于黄河中游地区水土保持工作的决定》,并于 1979~1980 年对黄土高原的生产建设方针问题组织了一系列的讨论,制定了有关的方针、政策和法令。1987 年 9 月,农牧渔业部、林业部、水利电力部、中国农业环境保护协会、中国水土保持学会等 5 个单位,在山西河曲县联合召开了“黄土高原地区综合治理和开发问题讨论会”。综合治理问题列入了中国“七五”计划的重点科技攻关项目,黄土高原研究取得了丰硕的成果。例如,刘东生等著《中国的黄土堆积》(1965),《黄土与环境》(1985),西北大学地理系黄土高原地理研究室编《黄土高原地理研究》(1987),陈永宗等著《黄土高原现代侵蚀与治

理》(1988),郭书田等《黄土高原综合治理与开发》(1988),张宗祜等著《中国黄土》(1989),钱林清《黄土高原气候》(1991)。

1. 黄土高原的界线问题。《尚书·禹贡》中提出的“黄土高原”(雍州)主要包括陕、甘、宁黄土高原的部分地区。1955年中国地形区划草案中划出黄土高原的范围是:秦岭以北,太行山以西,长城以南,祁连山以东,其面积约60多万 $\text{km}^2$ ,现有人口约6000多万。作为地貌单元的黄土高原其范围是:西起日月山、鸟鞘岭,东至太行山东麓深断裂带,南以秦岭、伏牛山北麓为界,北至长城(马乃喜,1987)。作为自然地理单元的黄土高原研究的侧重点不同,因此与自然区划中的黄土高原,其范围不完全相同。马乃喜建议用地貌单元的黄土高原的范围作为一般所说的黄土高原的范围。

2. 黄土高原的形成与演化。根据黄土的分布、厚度、黄土层等特性分析,一般认为黄土是风成所致。刘东生等(1965)认为黄土是在与“间冰期”相应的间冰期的堆积物。自250万年以来,黄土高原堆积了厚约100~200m的黄土-古土壤系列,成为全球最厚最完整的黄土层。黄土高原的形成实质上就是厚层黄土的堆积过程。1985年刘东生等用 $^{14}\text{C}$ 、热释光、古地磁、氨基酸、微量和稀土元素测试、X射线粉晶衍射、微形态学以及生物化石生态分析等方法,在多年实地调查的基础上建立了黄土-古土壤时间序列,研究了黄土的组织及生物遗存等地质事件。从黄土环境系统出发,重建了距今240万年以来不同尺度的气候变迁序列,讨论了风成黄土堆积的全过程及其与现代粉尘、水土保持、工程地质、农业土壤及地方性疾病等的关系。陈发虎等(1991)研究兰州九州台剖面认为,150万年以来兰州黄土磁化率曲线和古土壤层序与公认的标准气候变化曲线和分段相吻合,反映了全球气候变化的共同点。孙建中等(1991)根据孢粉资料分析,论证了近1万年以来黄土高原植被、气候和环境的时空变化规律。

黄土高原内部有山脉、丘陵和断陷盆地,除了一些比较高耸的石质山岭以外,基本上由深厚分布连续的黄土所覆盖。主要地貌类型有黄土塬、黄土梁、黄土阶、黄土沟壑、黄土喀斯特(黄土桥、黄土柱、黄土陷穴、黄土碟)等。黄土具有孔隙大、垂直节理发育、下渗性强、旁渗性弱、抗冲性低、湿陷性明显、腐殖质含量低(一般在1%以下)、团粒结构少、质地粉砂、结构疏松、吸水性高(44%~48%)、持水性低(20%左右)、富含Ca质等特点。

黄土高原属于暖温带半干旱地区,降水具有春旱严重,夏雨集中,暴雨猛烈,秋雨分布不均,冬雪稀少,年季变率大等特点。多年平均降水量650(东南部)~350mm(西北部),7~9月降水量占全年的50%~70%。

黄土高原在公元前7000~1000年时自然环境优越,植被茂密。但近千年来,由于掠夺性和破坏性开发,致使原始植被破坏殆尽,目前除少数地方尚残存有少量森林或梢林外,广大地区均很少有植被。水土流失极为严重,年侵蚀模数高达3720 $\text{t}/\text{km}^2$ ,黄河多年平均输沙量16亿 $\text{t}$ 。严重的水土流失,高原面上沟壑纵横,犹如一把利刃肢解和分割着黄土高原。引起水土流失的原因是受多种因素的影响。其中地面坡度、降雨强度和雨型是造成土壤侵蚀的主要自然因素,而人为因素加强了自然因素的影响程度,使水土流失更为加剧。

防止黄土高原的水土流失必须因地制宜,合理利用土地。区分黄土高原沟壑区(黄土源区)、黄土丘陵沟壑区(黄土丘陵区)和土石山区等不同类型,实行小流域综合治理。结合农业技术、工程和生物等措施,调整用地结构,强化林草体系的功能,改善生态环境,改革治理开发工程的运行机制,正确评价治理开发的综合效益。使黄土高原地区的生态环境、经济水平和社会环境有较快的发展。

黄土高原的自然环境和综合治理是一个重大课题,今后研究的热点包括:黄土高原自然环境的演化,黄土高原水土流失的原因与防治;治理效益分析;模拟研究和定点观测;小流域治理;应用系统理论;综合治理。

#### 参考文献

- 1 Smith D D, et al. *Advances in Agronomy*, 1958, 14
- 2 刘东生,等著.黄土与环境.北京:科学出版社,1985.303~400
- 3 西北大学地理系黄土高原地理研究室编.黄土高原地理研究.西安:陕西人民出版社,1987.1~108
- 4 陈永宗,等著.黄土高原现代侵蚀与治理.北京:科学出版社,1988.1~183
- 5 郭书田,等主编.黄土高原综合治理与开发.北京:中国展望出版社,1988.1~247
- 6 张宗祜,等著.中国黄土.北京:科学出版社,1989
- 7 钱林清主编.黄土高原气候.北京:气象出版社,1991
- 8 朱显虞,等.中国水土保持,1992.2:4~10

(宁波万里国际学校吴利淳、周秉根副教授撰)

**中国黄土高原地区兽类生态地理** the ecology geography of beasts in the loss plateau China 黄土高原位于黄河中上游,东起太行山,西至日月山,北抵沙漠南缘沿长城一带,南达秦岭北坡,横跨陕、甘、宁、青、晋、内蒙及豫西7省区,面积为52万 $\text{km}^2$ 。这里沟壑纵横,地表支离破碎,在黄土覆盖的地方,几乎被垦为耕地,其余土地为荒山草坡,仅局部的地区保存森林,而大部分地区植被严重破坏,自然灾害频繁,水土流失相当严重,每年向黄河倾注的泥沙达16亿 $\text{t}$ 。

“七五”期间,国家把黄土高原综合治理列为重点科研攻关项目,1986年开始,组织科技人员400多人,进行科学综合考察。在攻关项目中陈钧承担了黄土高原地区的鼠害与防治及兽类生态地理。经过多年大面积的调查研究,初步摸清了黄土高原地区的鼠类种类、分布、危害与防治以及兽类与环境问题,具有生产实践意义。

1957年张荣祖和陈钧提出黄土高原地区的啮齿动物对农林牧业危害外,有些鼠种挖掘洞穴破坏了黄土层,引起水土流失,这种现象较为显著,在黄土高原上是一个特殊的问题,应积极开展防治。1958年陈钧和伊佩衡在兰州市的桃树坪对子午沙鼠调查研究,尔后写了《兰州盆地子午沙鼠对水土保持影响的初步观察》(1959)。

生态动物地理学,在中国的历史是很短的,溯自1924年Hessed在他的著作中提出现在已被公认的生态动物地理学。1979年张荣祖在《中国自然地理—动物地理》著作中将中国分为7个基本的生态地理动物群:寒温带针叶林动物群;温带森林—森林草原、农田动物群;温带草原动物群;温带荒漠、半荒漠动物群;高地森林草原—草甸草原、寒漠动物群;亚热带林灌、草地—农田动物群;热带森林、林灌、草地—农田动物群。到目前为止,均采用这种研究方法,生态动物地理学的观点和方法,也逐渐得到广泛的应用。1986~1988年,在黄土高原地区进行鼠类和兽类生态地理的调查研究,根据自然环境、鼠类的分布及栖息环境,大致分为以下4个生态地理兽类群。

**森林—森林草原兽类群** 分布在太行山、中条山、吕梁山、黄龙山、崆山、子午岭、陇山和兴隆山等山地。在这类生态环境中栖息的兽类有豹、麝、青羊、野猪,食肉目金钱豹、豹猫、黑熊、黄鼬等。森林中的啮齿动物有岩松鼠、花鼠、大林姬鼠等也是森林系统中的组成部分。

**草原兽类群** 草原植被分布在黄土高原上的梁峁、山地及沟坡,多呈零星的分布,局部的山地也有连片的草原,如宁夏自治区的南华山、月亮山、云雾山及内蒙的伊金霍洛旗,准格尔等地。草原兽类以草本植物绿色部分和种子为食的啮齿动物特别繁盛,大多数为群聚性,以达乌尔鼠兔、达乌尔黄鼠、中华鼯鼠及蒙古兔等为主要成分。但啮齿动物的种类组成及优势种的区域变化比较明显。例如,在宁夏南华山山地草原上,最突出的有2个鼠种—中华鼯鼠和达乌尔鼠兔,其中中华鼯鼠危害草场十分严重,“鼯鼠丘”呈连续分布,在海拔2350m的草场上做了样方测定,样方面积为2500 $\text{m}^2$ ,在样方面积内有鼯鼠丘260个,土丘平均面积为

7.64m<sup>2</sup>, 土丘总面积为 1 992m<sup>2</sup>, 而上丘面积占样方面积的 76.68%, 土丘的分布极为均匀, 因而引起草场退化。

草原上有蹄类以黄羊为代表动物, 过去, 在伊金霍洛旗和准格尔草原上黄羊三五成群的活动觅食, 如今难以遇见。草原上的食肉兽以黄鼬、赤狐、艾鼬、虎鼬、香鼬等广泛分布, 但数量不多, 它们消灭草原上害鼠有一定的作用。

**农田兽类群** 农田中分布的兽类, 以啮齿动物占优势, 如仓鼠科的大仓鼠、灰仓鼠、长尾仓鼠、黑线仓鼠及中华鼯鼠。其次还有花鼠、达乌尔黄鼠和蒙古兔等。食肉目有黄鼬、赤狐、猪獾、狗獾等为农田生态系统中的组成部分。

**荒漠草原兽类群** 分布于沙漠南缘沿长城一带, 从山西北部的右玉、偏关至陕西的神木、榆林, 并包括伊克昭盟的东部地区, 向西伸展至陕西的靖边、定边; 宁夏的盐池、同心及甘肃的景泰一带。荒漠草原生态环境里栖息兽类以啮齿动物为主, 无论种数和数量均为跳鼠科和沙鼠科为主。跳鼠科中常见的有五趾跳鼠、三趾跳鼠等, 沙鼠科有子午沙鼠、大沙鼠、长爪沙鼠等, 它们栖息于固定沙丘和半固定沙丘上。其中大沙鼠对固沙植物砾砾危害较为严重。

1959年马世骏著《中国昆虫生态地理概述》, 是现今国内唯一的生态地理学专著。今后随着中国经济建设的发展, 生物资源的保护与利用及生态环境的保护, 将进一步促使生态地理学的日益发展。

#### 参考文献

- 1 郑作新, 张荣祖. 动物学杂志, 1964, 6: 262~263
- 2 张荣祖. 中国自然地理—动物地理. 北京: 科学出版社, 1979. 82~86
- 3 刘东生, 等著. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 16~24
- 4 陈钧. 黄土高原啮齿动物与环境. 黄土高原地区综合治理开发研究论文集, 1993, 410~419

(兰州大学陈钧撰; 张荣祖审)

**青藏高原** the plateau of Qinghai—Xizang 位于中国西南部, 北起昆仑山、阿尔金山及祁连山, 南抵喜马拉雅山, 东自横断山, 西至国界线。面积约 250 万 km<sup>2</sup>, 平均海拔 4 000m 以上, 号称“世界屋脊”。境内地域辽阔, 新构造运动强烈, 地貌类型多样, 自然环境复杂, 是一个独特的自然地理单元。因此, 长期以来青藏高原为众多的中外地学专家所关注。其研究对揭示地壳运动的奥秘, 自然环境的演变, 高寒气候区的开发利用等方面具有重要的意义。

16~19 世纪以后, 意大利、英、法、美、德、俄、日、印度、梵蒂冈、匈牙利、挪威等曾派人来西藏进行所谓的探险和游历。1909~1913 年瑞典人斯文赫定 (Sven Anders Hedin) 撰写的《穿过喜马拉雅》, 1918~1922 年的《南部西藏》, 是西藏地区地理方面的较早著作。20 世纪 30 年代中国徐近之曾考察过纳木错等地, 编撰出版了《西藏自然地理资料》植物部分及地文部分。新中国建立以后, 开展了对西藏地区的考察, 取得了丰硕的成果。1951~1953 年, 中国科学院组织西藏工作队入藏进行科学考察。1956~1967 年和 1963~1972 年国家科学发展规划两次把青藏高原科学考察列为重点科研项目。1958~1961 年、1966~1968 年、1973~1977 年, 中国科学院 3 次组织大规模的综合考察。例如第 3 次综合考察包括地球物理、地质、地理、生物、农业、牧业等 50 多个专业。考察范围从藏东三江平行岭谷区到西部阿里高原, 从藏南喜马拉雅山到藏北高原湖盆地区。考察成果汇编成青藏高原科学考察丛书, 内容包括西藏的地球物理场与地壳深部构造、地层、古生物、沉积岩、地热、地质构造、自然地理、气候、地貌、冰川、泥石流、河流与湖泊、盐湖、土壤、植被、森林、草原、农作物、野生大麦、家畜、农业地理、植物志、昆虫、鱼类、水生无脊椎动物、两栖类和爬行动物, 以及《青藏高原隆起时代、幅度和形式问题》等。1959~1960 年国家组织了珠穆朗玛峰登山科学考察。1964 年组织了希夏邦马峰登山科学考察。1981 年以来中国科学院综

合考察队重点考察了横断山区。

近年来中国科学院地质研究所的科学工作者通过考察对青藏高原的形成, 中生代的岩浆活动和变质作用, 构造演化历史等方面取得了宝贵的科学资料。研究成果主要刊登在《中国科学院地质研究所集刊》、《青藏高原地质论文》专辑中。地质部所属各有关省(区)地质局、各科研单位和地质学院对青藏地区进行了大规模的区域地质调查、矿产普查勘探和地质科学的研究工作, 编辑出版了《青藏高原地质文集》。1985 年中国科学院和英国皇家学会合作沿拉萨—格尔木路线进行综合地质考察, 研究成果出版了《青藏高原地质演化》一书。

中国科学院大气物理研究所、高原大气物理研究所、当地气象台站的气象工作者, 对青藏高原的环流、天气、气候以及高原对东亚大气环流和天气的影响进行了长期研究, 主要研究成果包括《西藏高原气象学》(1960)、《青藏高原气象学》(1979)。中国科学院冰川冻土研究所同铁道部等有关部门从 1960 年开始对青藏高原公路沿线进行了冻土考察与定点观测, 1974~1978 年间又进行了综合性调查与模型、模拟实验研究, 主要成果包括《青藏冻土研究论文集》(1983)。中国科学院自然资源综合考察委员会对西藏自然资源进行综合考察, 1983 年编辑出版了《西藏自然资源》论文集。重点论述了西藏的气候、土地、水利、森林、家畜等资源的形成、演变、资源的特点和分布规律, 在对资源评价的基础上提出了资源合理开发利用的途径。

青藏高原地区在始新世晚期全部脱离海浸成陆以后, 曾于早第三纪和上新世晚期两度被夷平或接近夷平。上新世末至第四纪初的新构造运动表现为大幅度整体断块上升。在空间上有差异性, 高原面由西北向东南倾斜。在时间上有 3 个剧烈上升阶段。上新世末高原面海拔约 1 000m; 早更新世时高原面上升到海拔 2 000m, 山地高度可能超过 3 000m; 中更新世时高原面一般在 3 000m 左右; 到晚更新世时高原面已达 4 000m 以上, 目前高原面已达 4 500~5 000m 的高度。从上新世晚期到现在, 累计上升量已达 3 500~4 000m, 平均每年的上升速率为 2mm, 后期(晚更新世以来)上升速率每年可达 10mm, 具有后期加速的特点。青藏高原隆起的原因据李吉均等报道, 是由于印度板块沿主边界断层向北俯冲, 喜马拉雅山被托起, 南来的巨大压力通过具有相当刚度的青藏断块北传, 使更老更硬的塔里木、柴达木台块向南作被动式的俯冲, 青藏高原因被夹持而抬升。1992 年刘代志在前人研究的基础上, 利用卫星重力资料求得的地幔蠕流分布格局和岩石圈底部切向应力场值, 建立高原隆起的动力学模型。获得高原下地幔流的有效粘滞系数 ( $\eta = 10^{18} - 10^{20}$  Pa·s), 并求得地幔流南北向蠕动的平均速率 ( $\bar{v} \approx 5.26$  cm/a) 和高原距今隆升的速率(预测)值为 7mm/a, 认为高原隆升的原因是高原周边地区地幔流向高原下蠕流合聚、挤压而成。

青藏高原大面积大幅度的抬升, 不仅对中国 3 级阶梯式大地形结构的形成和分异有很大的作用, 而且由于它对大气层的热力作用和动力作用, 成为东亚季风环流形成的决定因素。同时对中国自然环境的区域分异和形成青藏高原独特的自然特征产生了深刻的影响。

高原地貌类型除山地、高原、盆地、谷地外, 还有古夷平面、古冰川地形和古喀斯特地形, 以及现代冰川和冻土地貌。地貌单元有喜马拉雅山和藏南谷地、藏北高原、柴达木盆地和横断山脉等。

高原上空气稀薄(空气密度大多在 0.71~0.80kg/m<sup>3</sup>), 气压低(年平均气压大部在 625mPa 以下), 含氧量少(大部在 0.166~0.186kg/m<sup>3</sup>); 光照充足, 太阳辐射量高(586~795J/cm<sup>2</sup>·a); 气温低(年均温大多低于 5℃), 1 月平均气温大多为 0℃~13℃, 7 月平均气温大部为 8℃~18℃, 气温年变化小, 日变化大; 干湿季明显, 干季多大风。高原年降水量从东南部 900mm 左右向北逐渐减少到 50mm 以下。高原对气流能够产生分支、绕流、爬坡、屏障等动力作用以及冷热源作用。冬半年高原使西风流经高原产生分支, 形成“南槽北脊”的环流形势, 其形成原因与

高原地形等高线曲率和侧边界摩擦层的摩擦系数有关。夏半年高原的热源作用加强了印度热低压,冬季的冷源作用加强了蒙古高压的势力,增强了东亚季风环流。夏半年高原高空青藏高压的形成,与高原感热和长江中下游地区降水潜热的释放有关。青藏高压热力的强弱和高压脊线的位置移动对中国东部降水产生影响。高原与四周自由大气的热力差异形成了高原季风。

青藏高原是世界上最大的高原湖泊群分布区,湖泊面积约3 0974km<sup>2</sup>,约占中国湖泊面积的38.4%。强烈的构造活动和冰川作用是本区湖泊形成的主要原因。湖水补给以高山冰雪融水为主,多咸水湖和盐湖。第四纪以来,高原湖泊面积日趋缩小,表明高原气候向干旱方向发展。

青藏高原现代冰川面积约47 000km<sup>2</sup>,占中国冰川面积的82%。高原冰川主要分布在高原外围的山地,其中西部的喀喇昆仑山、西昆仑山和南部的喜马拉雅山冰川分布最多,规模最大。高原第四纪冰川规模超过现代冰川许多倍,有学者认为第四纪时青藏高原存在着大陆冰盖。

青藏高原以高山草甸、草原和高寒荒漠景观为主。植被矮小稀疏,具有抗干旱、抗风、耐盐等生态特征。高原土壤因化学风化微弱,机械组成粗,成土作用缓慢,一般具有土层浅薄、发育较差的特点。

青藏高原由于地域辽阔,环境恶劣,给科学考察和研究带来了困难,目前科研数据并不详尽。高原形成机制、高原自然环境演变及其影响,高原自然资源的开发利用,仍将是今后研究的重点。模拟试验、定点观测等动态研究将可能成为研究的热点。

#### 参考文献

- 1 Hahn D G, Manabe S. *J Afm, Sci*, 1875, 32: 1520~1541
- 2 Gapsner A. *Himalaya*, 1977, 181~191
- 3 李吉均,等. *中国科学*, 1979, 6: 608~616
- 4 Mitchell A H G. *the value of regional stratigraphic correlation and tectonic analogies*, 1979
- 5 叶笃正,等著. *青藏高原气象学*. 北京: 科学出版社, 1979. 127~275
- 6 中国科学院青藏高原综合科学考察队. *青藏高原地质构造*. 北京: 科学出版社, 1982. 82~84
- 7 袁树人,等主编. *中国自然地理学参考书(下册)*. 济南: 山东教育出版社, 1988. 739~829
- 8 刘代志. *地质论评*, 1992, 38(1): 60~67

(安徽师范大学周秉根副教授撰)

### 青藏高原的自然地域分异 physico-geographical

differentiation of Qinghai-Xizang plateau 青藏高原是全球海拔最高的一个巨型构造地貌单元,具有独特的自然环境和空间分异规律。探讨高海拔区域的地带性和非地带性规律,研究综合自然区划,是发展自然地理学的重要基础。在应用实践上,其目的在于了解高原地表自然界的基本情况,生产和建设的有利与不利方面,以及充分利用和改造自然的可能性。可为合理利用高原农业自然资源、农业生产潜力的持续发展、自然环境的整治与保护、科研试验站网的布署以及拟订改造自然的规划提供必要的科学依据。

青藏高原的自然地域分异有不同的观点。有人主张高原上存在着水平地带性,但被垂直地带性所掩盖;有的认为高原上的地带仅能由垂直带来辨认,也有人强调高原非地带性明显,不应划分为自然地带等。意见分歧固然与对地带性的理解不同有关,但主要是科学资料较少,人们对其缺乏全面了解所致。

位于青藏高原边缘及其内部的一系列山脉是山地垂直自然带对比研究的理想区域。在探讨珠穆朗玛峰地区气候、植被与土壤分带相互关系的基础上,1975年郑度等对复杂的分带现象进行概括,提出自然分带主要类型的分布图式。1964年姜恕、1985年郑度等对川西滇北山地垂直自然带的考察研究,依带谱和基带性质划分出不同的类型。1981年郑度等、1986年彭补拙对东喜

马拉雅山及南迦巴瓦峰地区垂直自然带的研究,揭示了它是整个山系最湿润的部分,具有热带北缘山地带谱的性质。1989年郑度等对喀喇昆仑山—昆仑山垂直自然带的研究,在大陆性带谱系统中特别划出超旱生型及高寒超旱生型带谱结构类型。按照垂直自然带谱的基带、带谱结构、优势垂直带以及温度水分条件等特点,可将青藏高原的垂直自然带划归为季风性和大陆性两大带谱系统。季风性带谱系统以山地森林各分带为主体,有湿润、半湿润和高寒半湿润3种结构类型组;大陆性带谱系统以草原和荒漠各分带占优势,可分出高寒半干旱、高寒干旱、高寒极干旱、极干旱、干旱和半干旱6种结构类型组。青藏高原垂直自然带结构类型模式揭示其分布规律,从边缘到高原内部带谱性质不同,基带有别,结构由繁及简,分带数目也随之递减。垂直带界线向高原内部递升,形成全球最高的森林上限和北半球最高的雪线,显示出高原巨大的山体效应(郑度等,1990)。

从三维地带性观点出发,高原边缘的垂直带与毗邻的水平地带有关联,在内部其基带或优势垂直带在高原面上联结、展布,反映出自然地带的水平分异,反过来又制约着垂直自然带的特点。因此,高原上自然地带的水平分异和垂直自然带的变化互相结合、犬牙交错,显示出自然地域分异的独特性,是范围狭小的一般高原山地所不能比拟的。

青藏高原的隆起破坏了亚欧大陆纬向地带分布的一般规律,使其变形、扭曲甚至中断。但在南北跨越纬距约12°的高原范围内,作为纬向地带性主要因素的太阳辐射仍然显示出其重要影响,表现为温度(年均温、最暖月均温等)自南而北递减,垂直自然分带界线的海拔高程也沿同一方向降低,高原上辐射平衡和温度等项要素呈以高原西北部为中心的弧状分布态势,在更大程度上反映出海拔高度和地势结构等因素的作用。所以青藏高原的自然地域分异与一般的纬向地带分异明显有别(郑度等,1979)。受大气环流和高原地势格局的制约,形成了高原温度、水分条件地域组合的不同,呈现从东南温暖湿润向西北寒冷干旱的变化,在自然景观上表现为山地森林—高山草甸—高山/山地草原—高山/山地荒漠的带状更迭,与我国温带自东而西由湿润至干旱的水平地带分异相似。

对比研究表明,青藏高原上各具特色的自然地带和我国温带低地相应自然地带之间有着质的区别。由地势和海拔引起的辐射温度和水分条件的不同是地域变异的主导因素(郑度等,1975)。因此,可以认为青藏高原上自然地带的分异和更迭是亚欧大陆东部温带低海拔地域相应水平地带在巨大高程上的变异,张新时(1978)称之为“高原地带性”。

张荣祖等(1982)对西藏、伍光等(1989)对青海及杨勤业等(1989)对横断山区均分别进行过综合自然区划研究。和低海拔地域一样,大体上可依次按温度、干湿情况和地形将青藏高原加以划分。高原上地势起伏、海拔参差,不同地貌类型交错排列,需按照不同区域确定其代表基面的海拔高度范围,比较其温度水分条件组合以及地带性植被和土壤,以使水平地带性先得到充分的反映,然后再体现垂直地带性的差异,为进一步划分温度带和自然地带提供基础。

以日均温稳定 $\geq 10^{\circ}$ 的天数作为主要指标,最暖月平均气温为辅助指标,可将青藏高原划分为高原温带和高原亚寒带两个温度带。以年干燥度为主要指标、年降水量为辅助指标,可分为湿润、半湿润、半干旱和干旱等不同水分状况的地域类型。高原温度带和水分状况地域类型的不同组合,形成自然地带这一基本地域单元(林振耀等,1981)。

根据高原地表自然界地域分异特点,依照大地貌的区域差异,温度水分条件的不同组合,地带性植被、土壤和垂直自然带结构类型的异同,可将青藏高原划分为10个各具特色的自然地带或自然地理区。其中有5个自然地带属于高原温带,其余5个则划归高原亚寒带。

80年代在高原大尺度地域分异的背景下,揭示了若干生态现象和区域:(1)水汽通道 雅鲁藏布江下游河谷作为印度洋湿

润气流的主要通道促进了东喜马拉雅山脉两翼生物界的融合交流,对垂直自然带及冰川发育有明显影响(杨逸畴等,1987)。(2)干旱河谷 在高原东、南、西缘的横断山区、喜马拉雅山以及喀喇昆仑山普遍发育着干旱河谷,横断山区中北段典型干旱河谷出现具刺小叶灌丛的特定景观,土壤具旱成土特征。(3)寒旱核心 中昆仑山腹地及南翼高原处于东西两条水汽输送路径之间,气候寒冷干旱、干燥剥蚀及寒冻冰缘作用普遍,植被极为稀疏,是寒旱干旱的核心区域(郑度等,1990)。

高原自然地域分异和生态系统类型关系密切。在有关三维地带规律和分布模式基础上,将选择若干关键区域深入研究,把自上而下和自下而上的区划途径结合起来,加强定量分析研究,重视人口、资源、环境的协调发展,提出高原生态区划,为主要生态系统类型的稳定发展和持续利用提供必要的科学依据。

#### 参考文献

- 1 郑度,等.珠穆朗玛峰地区科学考察报告.自然地理.北京:科学出版社,1975.147~202
- 2 张新时.植物学报,1978,20(2):140~149
- 3 郑度,等.地理学报,1979,34(1):1~11
- 4 林振耀,等.地理学报,1981,36(1):22~32
- 5 张荣祖,等.西藏自然地理.北京:科学出版社,1982
- 6 杨逸畴,等.中国科学(B辑),1987,(8):893~902
- 7 伍光,等.青海省综合自然区划.兰州:兰州大学出版社,1989
- 8 杨勤业,等.山地研究,1989,7(1):56~64
- 9 郑度,等.地理研究,1990,9(2):1~10
- 10 郑度,等.地理学报,1990,45(2):235~244

(中国科学院地理研究所郑度研究员撰;林振耀审)

**东北平原** northeast plain 又称松辽平原,位于中国东北部,面积约35万km<sup>2</sup>,是中国最大的冲积平原。平原周围:西有大兴安岭,北有小兴安岭,东有长白山环绕,南临渤海。东北平原,在地形上又可分成3个区,即,松嫩平原、下辽河平原和三江平原。平原气候,属温带湿润、半湿润和半干旱季风气候。平原水系,有黑龙江、辽河两大水系。平原土壤,以黑土、黑钙土、草甸土、盐碱土、风沙土、滨海盐土和沼泽土等为主。平原植被,大部垦为农田,平原西部尚存一些羊草草原、碱蓬、碱蒿、榆树疏林、蒿类灌丛,三江平原尚有大片禾草、苔草沼泽等。平原地下,蕴藏着丰富的地下水资源和石油。东北平原是中国重要的农牧业基地和石油产地。因此,对东北平原的研究,就具有重大的科学意义和国民经济意义。

50年代,韩景行等,对松辽盆地进行了石油普查工作。这一阶段,采用了航空磁测、重力、磁力、电法、地震、地质调查、浅钻、深探井等综合勘探方法,掌握了盆地概况,建立了地层层序,明确了白垩系是松辽盆地主要生储油岩系,相继发现了大庆油田和扶余油田。50年代中期开始,对辽河断陷盆地的油气资源也进行了勘探,70年代后进行了大规模钻探,证实它是一个含油气很丰富的盆地。此外,水电部对辽河流域进行了规划,还探讨了松辽运河开发的可能性,并完成了《辽河流域规划要点》。长春地质学院,完成了一套1/20万综合性水文地质报告。1959年,程伯容对松嫩平原盐渍土及其改良途径进行了研究。1959年,祝廷成撰写了《黑龙江省萨尔图附近植被的分析》一文,并被国外引用。

60年代,黑龙江省地质局对松嫩平原(北部)水文地质进行了勘测并计算了地下水储量;吉林地下水储量联合研究组,于1960年,对吉林省中西部地区地下水的可开采储量进行了研究。内蒙古水利设计院对西辽河及松辽运河内蒙灌区的土壤和水文地质进行了勘测与研究;1963年,程伯容等对松嫩平原盐渍土的盐分累积进行了研究;李昌华等对松嫩平原盐渍土的主要类型、性质和形成过程进行了探讨;王汝塘、刘期松、陈恩凤等对吉林省郭前旗灌区苏打盐土的盐分动态和生物特性等进行了研究;祝廷成等对东北草原上的植被复合体进行了综合研究;1964年,

李慎研究了西辽河平原沙地特征及其改造利用途径。

70年代,裘善文对三江平原中部的第四纪地质、古河道与沼泽形成以及松花江古水文遗迹等进行了研究,夏玉梅探讨了三江平原第三纪至第四纪孢粉组合特征与古气候关系。中国科学院长春地理研究所沼泽研究室对三江平原沼泽进行了较系统研究。1976年,黑龙江省三江平原治理小组对三江平原做出了综合治理规划。

80年代,杨万里主编《松辽陆相盆地石油地质》一书,从不同学科角度总结了松辽盆地石油地质规律,并对若干石油地质理论问题进行了探讨,反映了近30年来陆相石油地质的进展。杨万里、高瑞琪、郭庆福、刘耀光等著《松辽盆地陆相油气生成运移和聚集》一书,从生油岩形成的地质环境、油气生成演化、油气运移和聚集特征,以及大油田形成的地质地球化学条件等方面,较全面地论述了陆相大型湖盆油气生、排、运、聚的基本规律,建立了陆相大型湖盆的生烃模式,提出了陆相大油田形成的最佳匹配条件;葛泰生、陈义贤、熊崇钰对辽河盆地构造特征与油气藏分布进行了分析与总结。1982年,孙建中对松辽平原第四纪地层的划分进行了研究;1983年,杨秉康、孙肇春、吕金福研究了自新第三纪以来的松辽水系的重大变迁和平原的形成;1984年,裘善文对松辽平原第四纪中期的古地理进行了研究;1986年,杨国荣应用数值分类法对松嫩平原苏打盐渍土进行了分类;1987年,林汀水等对辽河及辽河平原水系的变迁进行了研究;1985年,东北平原第四纪自然环境形成与演化课题组对《中国东北平原第四纪自然环境形成与演化》进行了较为详细的研究,并获得了重要成果;1981年,祝廷成发表的《中国东北羊草草原的生态研究》,被第14届国际草地会议列为草地生态组论文。他以草地优势植物对水、热因子反映的生态特性为依据,对中国草地类型进行了划分,现已被国内外同行广泛采用;1990年,景贵和等对《吉林省中西部沙化土地景观生态建设》进行系统的研究和总结,并对吉林省中西部沙地和景观生态建设进行了规划。当前,对东北平原的研究包括:(1)是对平原西部土地沙化和“三北防护林”正进行着深入的研究;(2)是对“北水南调”进一步进行着广泛的研究;(3)是对平原区的综合利用与整治进行着广泛、综合的研究;(4)是对草甸草原生态系统的结构、功能和生物生产力的研究。

#### 参考文献

- 1 石油勘探开发科学院地质研究所.中国陆相油气生成.北京:石油工业出版社,1982,232~241,282~295
- 2 杨秉康,等.地理研究,1983,2(1):48~56
- 3 杨万里主编.松辽陆相盆地石油地质.北京:石油工业出版社,1985,1~14,26~34
- 4 杨万里,等.松辽盆地陆相油气生成运移和聚集.哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1985,1~17
- 5 中国地质科学院地质研究所武汉地质学院.中国古地理图集.北京:地图出版社,1985.77~81
- 6 朱夏,徐旺.中国中生代沉积盆地.北京:石油工业出版社,1990.7~23,60~74
- 7 东北平原第四纪自然环境形成与演化课题组.中国东北平原第四纪自然环境形成与演化.哈尔滨:哈尔滨地图出版社,1990.1~50

(东北师范大学杨秉康教授撰)

**四川盆地** Sichuan basin 区域自然地理学中,盆地是指盆底部分。1939年李四光划分的中国自然区,其中四川红色盆地,即指盆底。四川盆地位于四川省东部,北纬28°10'~32°30',东经103°00'~109°20',约在广元~雅安~叙永~毕节四地连线范围内。面积16.5万km<sup>2</sup>,约占中国总面积1.8%。

四川盆地是驰名中外的典型大盆地,属亚热带湿润地区,自然资源丰富,素称“天府之国”。但随着社会发展,对自然的开发利用,生态平衡受到破坏。对盆地自然环境、自然资源及其开发利用的研究,对提高区域自然地理学研究并在合理利用自然、维

护环境生态等方面,都是很有意义的。

1872年德国人李希霍芬(Ferdinand von Richthofen)到盆地进行地质地理调查,首先指出盆地内广泛分布有中生代红层,称它为“红色盆地”,从此“红色盆地”蜚声世界。中国在20年代末30年代初到盆地进行地质地貌研究的有赵曾亚、黄汲清、谭锡畴和李春昱,开始对盆地地层系统、地质构造、地文发育进行较详细研究。稍后李四光也对盆地进行广泛观察,指出它在天然富源方面,华南无一省能和盆地抗衡;并首先提出川东存在第四纪冰川遗迹。1939年侯德封、杨敬之对盆地中部丘陵进行了分类,并划出6个地文期。1940年前中国地理研究所成立于重庆北碚,曾组织嘉陵江流域考察,对盆地流水地貌做了不少研究。

1931年,竺可桢“中国气候区域论”把盆地列为中国中部或长江流域类,但指出和长江中下游有区别。30年代中期至40年代中期,涂长望、朱炳海、吕炯、郑子政、么枕生等,分别对峨眉山多雨、重庆气候、巴山夜雨、重庆雾和川黔间静止锋等作过初步探讨。1941年张宝堃把四川(不含原西康)气候划分为4大类8区,盆地和三峡东南边为一区。

早期对盆地水体水文的研究,1914年陈懋立写过盆地内长江干支流概况。1931年顾世椿曾记述盆地洪水详情。1940年邢维堂发表了盆地江河水文测验成果及特征资料。

30年代初,朱莲青、陆发熹、余皓等曾在盆地进行土壤调查,其成果收入美国梭颇(J. Thorp)的《中国之土壤》。1940~1945年马溶之、侯光炯、席承潜、侯学煜等对盆地土壤进行过研究。1945年余皓、李庆远撰写了《四川之土壤》,侯光炯发表《北碚土壤志》。当时研究内容多偏重于酸性土、紫色土和水稻土。

20年代末~30年代初,在盆地进行植物调查研究的有陈畴、方文培、俞德浚、曲仲湘、郑万钧、樊庆生、柯病凡等。调查过峨眉山的植物和四川的森林。30~40年代,动物方面,有张明俊、刘承钊对盆西鱼类、两栖类、爬行类的调查;王家楫、倪达书对原生动物的调查;陈世骥对金花虫的调查;陈义对蚯蚓的调查等。当时对动植物的调查,偏重于分类。

最早的综合自然区划研究,为1936年任乃强的“四川之自然区划与天产配布”。全川划分为盆内(盆底)、盆缘和盆外3部分。盆内分为4区,每区又次分为2个2级区。

建国后,特别是70年代末和80年代以来,对盆地的研究进入新的发展阶段。对各自然地理要素都有较广泛深入的研究,以地质构造和地貌研究最为突出。1979年罗自立的《扬子古板块的形成及其对中国南方地壳发展的影响》,1982年谢琪等的《川中微型古陆与四川盆地的形成》,1983年郭正吾的《四川盆地地质构造特征及其含油气性》,任纪舜等的《中国大地构造及其演化》,分别从槽台说或板块学说深入论证盆地范围和“四川台拗”构造相吻合,基底稳定,为一古陆核,盖层为厚达3000米红层。经印支、燕山和四川运动后,四周褶皱隆起,成为中、高山。进一步阐明盆地的典型性及其形成过程和发展方向。

地貌研究也取得大量成果,最主要的有1965年沈玉昌的《长江上游河谷地貌》,分析川江的河谷地貌、形成过程,指出三峡是随川东、鄂西褶皱山脉形成过程而逐渐形成。1977年穆桂春的《四川东部地区地貌特征、地貌分类与地貌区划》,具有代表性,除概括地貌特征、结构和分布外,按形态成因分9个形态类型,再按主导因素归纳为3组,各组又划分若干种,使形态和成因相结合,构成完整的地貌类型。在地貌区划中划出3个1级区、5个2级区和19个3级区。1983年刘兴诗总结前人成果和自己的观察,编著了《四川盆地第四系》,把盆地夷平面分为3期,阶地分为5期,使对盆地的地文期基本上取得共识。地貌研究成果尚多,如王明业、柴宗新的地貌类型和区划,秦万成、杨世荣等对盆地喀斯特地貌的研究。

盆地气候研究成果也多。1961年成都中心气象台编写出《四川气候》,并首次把盆地划分为3个降雨气候区,据以提出生产布局建议。1979年省气象局出版《四川气候图集》和《四川农业气候资源图集》。1984年西南师范学院地理系编有《四川光能资源图

集》等。70年代以来,借助于对青藏高原气象气候研究所取得的成果,对盆地气象气候变化机理有更深入研究,对对准静止锋、秋霖雨、暴雨洪涝、夏伏旱等,都有新的认识。

综合研究获得重视,首推1964年四川省科委领导、西南师范学院负责业务,多单位协作进行的川东地区自然区划研究。至1966年先后完成各自然地理要素区划和综合自然区划。为首次运用现代地理学区划理论、原则、方法进行的自然区划工作。综合自然区划方案,把盆地划分为5个区和12个小区,成为日后盆地综合自然区划的蓝本。1982年西南师范学院四川地理研究室编著的《四川地理》,是建国后第1本全面研究四川地理的专著。上篇按自然要素分6章,都以盆地作为重点研究对象。1982年杨宗干的《四川盆地的自然地理特征及其演变》,指出最晚在第四纪初或第三纪末,盆地的自然地理特征便已形成,发育为亚热带丘陵性盆地型的湿性常绿阔叶林紫色土景观。作者在另一文中还指出盆地的中亚热带范围,比长江中下游至少向北多扩展两个纬度,对自然和生产都有重要意义。1986年四川省农业资源与区划编委会编的《四川省农业资源与区划》(上),是研究盆地自然地理另一重要文献。含有综合自然、地貌、农业气候、农业土壤、水文、农业水文地质和植被8项区划,都把盆地作为一级单元进行研究。

80年代研究重点是国土资源、整治和开发规划。首先为1981年西南师范学院地理系等在自贡市开展的土地利用、土地类型和国土资源的调查研究和制图。据1986~1988年不完全统计,全盆地已有13个市、地区编印出国土资源或综合农业区划。集大成的是1985年省国土处的《四川省国土资源》,1990年中国科学院成都山地灾害与环境研究所编的《四川省国土资源图集》。后者较全、新,图文并茂,都以盆地部分最为详尽。

近年的热门研究课题是灾害地理和环境保护。上述《四川省国土资源图集》中有“自然灾害与环境保护图组”,是研究的最新成果。含地震、泥石流、滑坡、水土流失、盆地干旱、洪涝灾害、大气及水环境评价、自然保护区8种图幅。盆地最严重的是旱涝灾害,研究较早也较多。早期的偏重于对统计资料的分析、整理,初步划出分布范围和发生频率,理论和方法尚有不足。如1973年成都中心气象台的《四川盆地主要灾害性天气气候分析》,1979年四川省气象科学研究所的《四川盆地近五百年旱涝规律及未来趋势展望》,1981~1982年四川省气象局《四川盆地灾害性天气气候图集》(上、下)、省自然资源研究所的《1981年四川暴雨洪灾》等。近年的研究趋向是运用系统理论,采取数学模式进行综合研究。如上述“盆地干旱图”,用农田水分平衡理论和数学模式:定义距需百分率= $\frac{\text{降雨量}-\text{农田蒸发力}}{\text{农田蒸发力}} \times 100$ ,求出水程度,再以连旱天数和受害面积三者的综合气候指标,划分春、夏、伏旱为5级,使指标更明确实用,也容易确定分布范围,并统计出1951~1985年有旱年和无旱年分别占80%和20%,说明盆地干旱的严重性。“洪涝灾害图”表明洪涝出现频率,盆西盆北>10%,最大在盆西>60%,北川达110%。这些研究成果都比过去有较大提高。赵晨曦(1988,1989)用耗散结构理论,分析盆地自然地理系统抗御旱、洪灾的能力,提出增强系统抗性对策。1990年张剑光以旱灾时间频率(T)、空间频率(S)、干旱强度(D)、受灾经济水平(L)的乘积,求四川盆地旱灾的危险度(Dr),分为6级:极端危险≥50、高度危险35~50、显著危险20~35、一般危险10~20、稍有危险1~10、无危险<1。全盆地平均为23.9,属显著危险,重庆48.2,属高度危险。

水土流失是盆地另一严重自然灾害,“水土流失图”以年均侵蚀模数和年均土壤流失厚度,划分水土流失强度为6级,即微度、轻度、中等、强度、极强度、剧烈。盆中丘陵区几乎全为5~6级,遂宁是全盆地之冠,遂宁、南充、广安、安岳之间,为剧烈侵蚀区。1986年顾恒岳根据多年平均输沙量数值的侵蚀力图对比分析,绘出长江三峡水库流域侵蚀力分区图。盆地大部属强侵蚀力区和中等侵蚀力区。年侵蚀模数500~1000t/km<sup>2</sup>和200~500t/

km<sup>2</sup>;嘉陵江中下游 1 000~1 500 t/km<sup>2</sup>。重庆港水域,年最大淤沙量 126×10<sup>4</sup>t,年平均淤沙量 4.6×10<sup>4</sup>t。

盆地还有滑坡、泥石流和地震等自然灾害。

1991年,张剑光根据系统论理论,考虑各类自然灾害的共同作用和受灾区域的社会经济水平,提出自然灾害综合评价模型,求算自然灾害的综合指数及其等级,用以评定区域自然灾害的危险程度,作出综合分区。1992年,詹兆渝建立模糊数学公式,对盆地各类气象气候灾害进行综合评定。这些研究都达到新的水平。

自然灾害成因虽多,无疑和生态环境受到人类破坏有密切关系。近期对环境保护研究也增多,但多局限于城市附近。对自然灾害和环境保护进行系统、定量的研究,使占全国 1.8%土地、能养活占全国 10%的人口,能维护良好的生态环境,是当前和未来的研究重点。

#### 参考文献

- 1 穆桂春. 四川省东部地区地貌特征、地貌分类与地貌区划. 中国地理学会 1977 年地貌学术讨论会文集. 北京: 科学出版社, 1981. 256~263
- 2 西南师范学院四川地理研究室. 四川地理. 重庆: 西南师范学院出版社, 1982. 16~273
- 3 杨宗干. 四川盆地的自然地理特征及其演变. 大自然探索, 1982, 1: 104~107
- 4 四川省农业资源与区划编委会. 四川农业资源与区划. 上册. 成都: 四川省社会科学院出版社, 1986. 1~475
- 5 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 四川省国土资源地图集. 自然灾害与环境保护图组. 成都: 成都地图出版社, 1990. 109~124
- 6 张剑光. 自然灾害综合评价与分区~以川南地区为例. 灾害学, 1991, 2: 1~5

(西南师范大学杨宗干教授撰)

**台湾岛** Taiwan island 位于中国东南大陆架上浩瀚的海洋之中, 酷似纺锤形, 东濒太平洋, 南隔巴士海峡与菲律宾相望, 东北与琉球群岛相邻, 西隔台湾海峡与福建省遥遥相望。全岛陆地总面积 35 798 km<sup>2</sup>, 成为中国东南大陆的海上屏障和通往太平洋的重要门户。全岛人口 20 155 830 人(1990 年 3 月), 其中汉族占 98%、高山族占 2%。千百年来, 经过海峡两岸人民披荆斩棘、含辛茹苦地奋力开发, 已使台湾成为一座美丽富饶的宝岛。

台湾岛在地质史上与大陆曾连在一起, 后来由于强烈的喜马拉雅地壳运动, 相连接的部分陆地下沉为海峡, 上升部分遂成为台湾岛。由于特殊的地貌成因和地理位置, 而形成了十分复杂的地形。全岛多高山和丘陵, 平原和盆地小而少, 海域广阔。岛上东西狭窄而南北长, 纵贯南北的中央山脉, 把全岛分成了东西两部。东部山地统称台湾山脉, 由一系列平行山脉所组成, 高峰连绵, 构成台湾岛的“屋脊”。西部为河流冲积而成的平原, 为全岛农业最盛、人口最密的地区。

台湾岛地跨北回归线南北, 由于所处的地理位置受到纬度、季风、地形和北赤道洋流等因素的影响, 使其属于热带—亚热带海洋性季风气候, 具有高温、强风、多雨的特点。全岛年平均气温 22℃左右, 最高月份平均气温达 27~28℃, 最低月份平均气温 15~16℃, 南部较高, 北部偏低。台湾是中国多雨地区之一, 全年平均降雨量平地多在 2 000 mm 左右, 山地一般在 3 000 mm 以上, 南北两端的多雨中心可达 5 000 mm 以上。岛上的河流多发源于中央山脉, 向四方分流入海。因受地形影响, 大都流程短, 落差大, 水流急, 多险滩瀑布, 一般不具备通航条件, 惟灌溉和水能资源蕴藏量较大。同时, 岛上生物资源丰富, 分布极广。陆上生物资源最丰富的是森林资源, 森林资源覆盖率达 52% 以上, 经济价值较高的树种有 200 种以上, 著名的有红桧、扁柏、铁杉、台湾杉、樟榕、相思等。繁茂的森林为动物提供了良好的栖息地, 哺乳动物有 80 种。目前, 尚有台湾熊、云豹、台湾猕猴等。由于海域广阔, 海洋生物资源也很丰富, 周围海域有鱼类不下 200 种, 以鲷、

鲷、鲳、鲱、旗鱼等较著名。台湾的矿产资源, 已发现的矿藏有 110 种, 但有开采价值的只有 10 多种, 主要有煤、石油天然气及金、银、铜矿等。此外, 非金属矿产以大理石、石灰石、白云石储量较干, 地位也重要。

台湾自古以来就是中国的领土。根据台湾发现的新石器时代遗址和大量的遗物, 证明远在新石器时代, 台湾就和大陆有文化上的联系。台湾古称“夷洲”, 秦汉以来与大陆间交往频繁。1624 年荷兰侵占台湾。1661 年郑成功率众驱逐侵略者, 收复台湾。1683 年清置台湾府, 属福建省。1885 年改置台湾省。1895 年被日本侵占, 直到 1945 年抗日战争胜利后归还中国。1949 年, 中国大陆解放后, 国民党当局退据台湾。

第二次世界大战后, 台湾经济发展很快。其经济发展过程大致经历了以下几个时期: (1) 战后至 50 年代初的经济恢复时期。这一时期着重抓了农业。在工业方面, 则重点恢复和发展城镇加工工业和修复基础设施。到 1952 年, 工农业生产已基本恢复到战前水平。(2) 50 年代初至 60 年代初为经济初步发展时期。在经济得到恢复以后, 重点发展农产品加工、食品、纺织、合板、塑胶、水泥和玻璃等劳动密集、技术层次低的替代工业。(3) 60 年代初至 70 年代初为经济高速增长时期。重点是发展加工出口工业, 促进对外贸易发展, 以适应国际市场需求的机遇, 带动台湾经济成长。在此期间, 工业生产总产值年平均增长 18.5%, 工业产品出口值年平均增长 26.7%; 国民生产总值年平均增长 10.1%, 被称为台湾经济高速增长的“黄金时代”, 轻纺工业“鼎盛时期”。(4) 70 年代初至 80 年代初为经济增长受挫与调整时期。正当台湾经济经过 10 年高速增长, 欲进一步扩张时, 受到了资本主义世界两次“石油危机”的严重冲击, 暴露了其经济发展的种种弱点, 使台湾当局不得不进行经济调整。着重发展钢铁、电力、交通运输、造船、石油炼制和石化为主的重化工业。到 1982 年, 重工业所占比重已超过轻工业 1.2 个百分点。(5) 80 年代以来为新的经济增长时期。随着台湾经济的调整, 重化工业比重的提高, 以及世界高技术发展的影响, 台湾当局提出“自由化、国际化、制度化”作为稳定经济发展的指导方针。在产业发展上, 优先发展电子、资讯、材料、能源、机械及技术密集产业, 以带动经济的进一步发展, 使台湾经济进入一个新的增长时期。所以近几年来, 台湾经济增长出现了回升的势头。

虽然如此, 当前台湾经济仍面临着许多问题。诸如经济发展受国际市场影响的情况越来越严重; 劳动密集产品的竞争力受到严重削弱; 外汇存底过多, 投资不振; 工农业发展不平衡的状况越来越严重; 污染公害、劳资纠纷、交通拥挤等情况日趋严重; 投资环境恶化等等, 使台湾经济的进一步发展受到严重影响。

从经济结构来看, 战后台湾经济结构的变化, 也是明显的。主要表现在: (1) 从传统经济结构转到现代经济结构。战后初期至 60 年代中期, 台湾农业经济居主导地位。到 60 年代中期以后, 则已形成了以工业为主导部门的现代经济结构。(2) 经济结构的变化反映了部门投资结构的变化。50 年代初, 台湾经济以传统农业为主, 当时的固定投资分配也较多, 以后农业投资逐步减少, 工业投资逐步增加, 服务业投资相对稳定。这表明台湾经济结构的转化, 是由不断提高对工业的投资促成的。(3) 经济结构的变化也反映了生产形态的变化。主要表现在由劳动密集型到资本密集和技术密集型的变化。上述经济结构的变化, 虽说明了经济发展的一面, 也增强了它弱点的一面, 这就是轻型为主, 导致基础脆弱, 面向海外, 依附性强, 多受国际经济变化的影响。

从生产布局来看, 台湾的生产布局, 经过长期的整治、配置和调整, 经济地理面貌有很大改观。主要表现在: 以工业经济作为台湾经济核心的布局占主要地位, 改变了历史形成的传统农业经济布局的面貌; 以重化工业作为台湾工业主导的布局已基本形成, 轻纺工业占绝对优势的布局有所下降; 以出口贸易作为台湾经济导向的布局正在大力发展, 落后单一的交通运输布局已得到明显改善; 台湾西部弧形经济地带的布局已明显形成, 东部地区也有所发展。

上述经济的发展,结构的调整,布局的变化,都以其利用原有的技术经济基础和积极引进海外先进技术,不断更新技术经济条件有着密切的关系。首先,从技术经济基础来看,战后,台湾经济发展的技术经济条件是比较好的。在清末,台湾资本主义经济已经萌芽;日本占据台湾50年间,又把近代资本主义的生产方式带进了台湾;战后,国民党占据台湾时又挟带了一批大陆的工厂设备、资金和技术、管理人才,为台湾经济发展输送了技术经济的“新血液”;同时,尤为重要的是台湾当局受到美国的蓄意扶植,这对于增强台湾技术经济条件的作用更是难以估量。其次,从发展科学技术与技术人才培养来看,台湾当局承受世界第3次科技革命发展的机遇,自1954年起即开始为现代科学技术教育与科技研究创造条件,设置一系列的科研领导机构,加强科技研究。第三,从引进技术来看,台湾当局根据不同时期发展经济的需要,引进了一些适用技术和设备,以增强生产技术,提高生产水平。第四,从技术经济现状看,目前,台湾技术经济已拥有一定实力,技术经济条件大为增强。这对于今后生产布局进一步合理发展提供了良好条件。总之,目前台湾的技术经济条件大体尚好。但由于台湾当局政治趋向“未稳定”,社会人心不稳,影响了台湾技术经济条件进一步的增强。

从两岸经济关系来看,台湾与大陆的经济往来,自古以来即为一体,互补互利。只是战后不久,两岸被人为的隔离,但始终阻隔不了两岸间的经济联系。近10多年来,随着两岸政治关系和气氛的改善,两岸经济关系也有明显发展。但从现状看,其进展还是不能令人满意的。当前,两岸人民强烈要求尽早恢复相互间的正常关系。如若实现,海峡两岸的经济关系将有巨大发展。

海峡两岸虽然政治制度不同,但都在为发展现代化的商品大生产,彼此都有增强经贸往来的愿望与要求。双方经济各有所长,也各有所短,若能结合起来,取长补短,对大家都有好处。海外一些华入学者说,两岸经济“相融,则荣;相离,则弱;相背,则衰。”目前两岸虽暂时还未统一,但仍可先从经济着手改善关系和加强往来。两岸经济的发展,一方面可促进台湾—香港—大陆的中国经济圈的形成;另一方面又可加深亚太地区经贸关系的发展和加重中华民族经济在国际经济布局中的地位,这对于整个中华民族的振兴是大有好处的。

#### 参考文献

- 1 刘大年,丁名楠,余绳武,等.台湾历史概述,1978,10:2~4
- 2 毛一波.中外地理,1986,10(1):1~2
- 3 李非.台湾研究集刊,1988,1:13~14
- 4 程璐,李振泉,等.中国经济地理(修订本),1988,357~358
- 5 Jack FWilliams. 热带地理,1991,11(4):346~356
- 6 李家泉,石裕汉,等.台湾省经济地理,1991,3~65
- 7 李宏硕,牛芳.港澳经济,1992,1:17~19

(华南师范大学谢福林撰;吴郁文审)

**海南岛** Hainan island 是中国第二大岛,也是中国唯一的典型热带岛。海南岛资源丰富,得天独厚,生产潜力大,又是中国最大的经济特区,是一个大有希望的地方,把海南岛开发建设好,对国民经济发展具有重大的战略意义。

海南岛位于南海北部,地处北纬 $18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10'$ ,东经 $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}03'$ ,岛的轮廓颇似雪梨的平面投影,长轴作东北—西南向,长约300余km,西北—东南宽约180km,面积33920km<sup>2</sup>,仅次于台湾岛。人口661.5万人(1991),中部五指山区为最高地,向外由山地、丘陵、台地(阶地)、平原顺次组成环绕中央山地的圈层地貌。“海南”一词早见于唐代,魏征《隋书》卷80《淮国夫人洗氏》中说“海南儋耳归附千金洞”。宋代“海南”更是通用,如苏东坡《书柳子厚中赋后》中云:“岭外俗皆恬条牛,而海南为甚”。《诸蕃志》且列出“海南条”。元更设海北、海南道、宣慰使都元帅等官职,海南一词更成俗语。

海南岛作为一个多民族的地区,其开端应该以中央政权的直接统治开始为标志。西汉以前,史书上没有关于中央政权对海

南岛进行直接统治的记载。据《汉书·地理志》载,“自合浦徐闻入海,得大州,东西南北方千里,武帝元封元年(公元前110年)略为儋耳、珠崖郡”。儋耳、珠崖两郡的设置使海南岛开始划入中国的版图,标志着封建中央政权对海南岛正式统治的开始,从而也开始了它的开发历史。此后虽然遇到不少困难,但确是给海南岛带来了进步,促进了海南岛的社会文明和开化。

从西汉到唐代这一历史时期,除了行政区划的不断变更外,海南岛没有进行实质性的和有成效的开发。宋元两代(特别是宋代)是海南岛开发的兴盛时期,贸易的发达超过历代。宋代海南岛物产丰富,珍奇物品众多,交通工具发达,海上交通北可达广州、泉州、福州,南可下马来半岛,另外汉人继续迁入,文化进一步开化,加之名人的流放,都成为宋代海南岛开发的重要因素。汉人移民大多居住在北部沿海一带,他们带来了文化和先进的生产技术。元代海南岛外来人口不断增加,贸易继续发展,设立了专门管理对外贸易的机构,称博易提举司。但当时海南岛并没有与国外进行大规模的贸易,只是与大陆西南部的占城和安南有小规模物资交流。

明清时期是沿海向腹地纵深拓展时期,而且农业开发已具规模,土地开发不断扩大,工矿业和对外贸易都得到一定的发展,海南岛作为一个正规的完整的地方行政区和较为典型的“农业社会”也就形成。明代人口不断增加,到清代出现了向岛内迁移及流向海外的趋势,随着本岛东北部迁居到南部和西部的人口不断增多,海南岛的开发也逐渐向全岛扩展。土地开发已达到一定规模,开始形成农业社会。清代不但继续明代开始的“农业社会”的开发,而且突出工矿业的发展。主要是以加工农产品为主,矿业的开发主要有儋州的锡矿、石碌铜矿和昌江铜矿。对外贸易不仅商品输出增多,贸易量扩大,而且输入的商品结构也趋于正常化。

1840年鸦片战争后,中国社会逐步沦为半殖民地半封建社会。1939年日本侵略占领海南岛,使海南岛的经济和资源受到严重破坏。与此同时,国内有识之士和爱国华侨也进行了探索性的开发,认识到海南岛地位的重要性和开发海南岛的迫切性。如民主革命先驱孙中山,早在辛亥革命后多次提出海南设省,并陈述其理由在于巩固国防、启发天然资源、振兴实业、方便行政等。另外,民主革命时期,革命根据地和解放区的局部开发,也促进了海南岛经济的发展。

海南岛于1950年4月30日解放,设立海南行政区公署。1988年4月13日设立海南省,同时海南岛被划为经济特区。解放后的海南岛经济有较大的发展,在农业方面,进行了大规模的水利建设,有效灌溉面积从1.2万公顷扩大到1991年20.17万公顷。1991年农业机械已有总动力 $1.368 \times 10^9 \text{W}$ 。粮食产量达658.3万t,糖蔗产量达387.48万t,农业总产值69.3亿元。热带作物种植面积已达43.89万公顷,其中橡胶面积37.42万公顷,干胶产量17.26万吨,占全国的60%,成为全国最大的橡胶生产基地。工业方面,逐步建立了制糖、制胶、制盐、化工、化肥、罐头食品、农机、水泥、冶金、电力、机械、森工、矿山开采、电力、纺织等部门,1991年工业总产值53.7亿元,(按1990年不变价格计算)比1952年增长115倍,海南设省,并被划为经济特区,制订了20年发展目标,即:坚持开放改革,促进开发的方针,建设实行社会主义市场经济的特区。最终建成以工业为主导,农贸旅并举的,三大产业协调发展的外向型的综合性经济特区,力争以20年左右的时间,达到人均国民生产总值2000美元以上,赶上国内最发达地区的水平。

要实现以上目标,近20年内,海南岛经济建设的主要任务是:发展交通、能源、通讯等基础设施,创造一个具有吸引力的投资环境;发展海南岛四大经济支柱:工业、农业、商业和旅游业;大力引进外资,引进先进技术,发展“三来一补”和出口加工业,办好创汇农业基地;大力发展科技和教育,提高人口素质,大量引进技术管理人才;注意保护生态环境,保持热带景观原貌;进行经济体制改革,实现整体转轨,逐步建立市场经济新模式,建立完善



各种市场体系;进行政治体制改革,加强法制建设,建立适应经济运行的政治体制,使政府机构完成职能转变。

#### 参考文献

- 1 海南国上局、广州地理研究所.海南岛.北京:高等教育出版社,1988.1~5
- 2 黄家驹.海南经济发展战略研究.北京:科学出版社,1989.43:1~27
- 3 曾昭璇,曾宪中.海南自然地理.北京:科学出版社,1989.63:1~6
- 4 吴郁文.中国海南经济研究.香港:香港新闻出版社,1989.15
- 5 许士杰,吴郁文.海南省——自然、历史、现状与未来.北京:商务印书馆,1989.110~120
- 6 Jack FWilliams.热带地理,1991,11(4):354
- 7 海南省统计局.海南日报,1992.3

(华南师范大学郑达生撰;吴郁文审)

## 地图

**普通地图** general map 地图按内容可分为普通地图和专题地图两大类。普通地图是以同等的相对精度和详细程度,综合地反映地球表面地理景观的外貌。它比较全面地反映地表自然条件、社会经济要素和人类改造自然的状况。因此,在地图上主要表示水系、地形、土质植被、居民地、交通网和境界线等6大基本要素。

普通地图由于任务和成图方式、方法的不同,又区分为地形图和普通地理图两种。地形图和普通地理图的内容和要素大体相似,它们的对象都是地球表面自然和人类活动现象的各基本要素。但由于目的、任务、比例尺范围、对几何精度的要求、表示方法、地图分幅与地图投影以及成图方法的不同,它们有明显的区别。

现代的国家基本地图,必须要能够同时满足国防建设与经济建设双重的需要。在全国范围内,有着完全统一的海拔高度的标准,采用统一的经纬度坐标,每幅图的大小范围基本一致,可以互相衔接,还要采用统一的比例尺系统,根据统一的符号格式来绘制。

从现代地图制图的发展历史来看,普通地图历史最悠久。1973年湖南长沙马王堆三号汉墓出土的绘于帛上的3幅地图,其中的“地形图”经过修复以后,为96cm×96cm的正方形图幅,比例尺约1:170 000~1:190 000之间,大体为“图上1寸折合实地10里”。这幅汉初地图虽然距今相去2 000余年,但该图的内容除了境界线、土质植被外,现代地形图上的地貌、水系、居民地和交通线等基本要素,都作了比较详细的表示,因此可以说是古代的一幅内容相当丰富的地形图,且在图形定位、内容的分类分级、取舍化简、符号设计和描绘技术等方面都具有相当高的水平。

第二次世界大战以后,世界各国竞相测绘地形图。许多国家在50年代或60年代已完成了全国的1:50 000或1:25 000万航测地形图。世界各国各种比例尺地形图的成图面积与二次世界大战前相比,增长了8%~25%,到80年代,除南极洲之外,不同比例尺的地形图已覆盖各大洲,地形图的质量也发生了显著变化。地形图的应用由服务于战争,逐渐转向利用于和平为主。其特点:(1)1:25 000万地形图逐渐失去了军事意义和经济意义。由于远程国防新的发展,部队认为这种比例尺太大了,并规定1:50 000万比例尺地形图为基础战术图;但对经济建设规划设计又嫌太小了,不如1:10 000比例尺地形图适用。(2)地形图的世界性统一趋势已经表示出来。主要表现在地形图的数学基础的统一,即地图投影和比例尺系列的统一。至于地形图的内容、图式符号和整饰等方面,主要在各国内进行,形成本国的地形图体系。(3)地形图正朝两个方面迅速发展。一方面更加军事化,发

展成为现代多兵种立体作战服务的各种专用军事地形图;另一方面更加民用化,广泛开发成为国土管理、资源调查、环境保护、建设设施、科学研究、城市管理、交通游览、人民生活等各方面服务的民用地形图。(4)影像地图是地图发展中最明显的趋势。由于现代影像地图可以满足地形图的几何精度要求,又同样有数学基础、图廓整饰和必要的线划要素,而图面内容由正射影像组成,信息量比线划图丰富得多,再加上成图周期短,得到广泛的重视。(5)地学、生物学等区域科学的进一步发展,普通地图作为调查研究成果最好的表达形式和研究手段的地图,获得了越来越广泛的应用。各种比例尺的地形图成为必备的基本图件资料。

中国基本比例尺地形图的比例尺系列,同国际上大体一致,有1:10 000,1:25 000,1:50 000,1:100 000,1:250 000,1:500 000,1:1 000 000七种,但图型和品种过于单一。虽然图式几经修改,基本图型几乎没有多少变化,仍保持军事地形图的老模式,因而难以满足国民经济建设和国土整治管理等各方面的需求。在开放地区和较发达地区反映尤为突出。因此,进一步研究、开发中国基本比例尺地形图的工作已提到议事日程。

由于50年代空间科学技术的兴起,60年代遥感技术科学基础的形成,70年代以美国发射的陆地卫星为主的遥感技术的广泛应用,地图制图已经把遥感技术看成为地图编制资料来源的重要渠道。目前,陆地卫星图象或视频数据,由于分辨率偏低,且旁向重叠和航向重叠较少,只能制作1:1 000 000及1:500 000影像地图,或修编同比例尺普通地图。Spot卫星图象或视频数据,地面分辨率为20m,且有60%~80%的影像重叠,可满足1:100 000比例尺测图,当摄影轨道为300km时,可以测制1:50 000比例尺地图。这样就有可能用航天遥感技术代替航空摄影测量测制大面积地区的地形图了。

90年代高新技术在科研、生产领域大量应用,对普通地理图提出了新的课题,其发展方向表现在以下方面:(1)普通地理图必须全面改革,以与现代科学技术水平和现代社会发展的要求相适应。要将现代科学的新理论、新技术、新方法融合到自己的理论体系和研究方法中,逐步由定性描述转向定量描述。(2)普通地理图历来对陆地表示详细,而对海洋表示概略。在世界各国向海洋进军、人类重返海洋的热潮正在兴起的今天,必须提高普通地理图综合性的研究。尤其是大陆与海洋过渡带、近海区域及海底地形必然予以充实。(3)在世界各国日益把海洋开发视为一项正在兴起的关键产业进行投资的今天,普通地理图要面向海洋,面向未来,最大限度地反映沿海、近海自然环境与人类活动的相互影响和相互作用等,并为之服务。

21世纪的普通地图,将随着电子计算机技术的进一步发展,更加充分地显示出目前处于萌芽状态的两个最明显的特征。其一是普通地图以数据的形式存储在数据库中;其二是“联机地图”将获得巨大的发展。

地图的数据库化,是采用数字化器或扫描仪,将地图上的各种地物和地形要素,变成点的(X、Y、Z)坐标数据的集合形式,存储在电子计算机之中。需要时,可根据需要调用。这种地图数据库,可以提供各种不同内容、不同比例尺、全要素或分要素、广大地区或局部地区放大的地图信息,以满足各种不同用图要求。美国、英国、加拿大、德国、荷兰等国家,由地图数字化而确立的地理信息系统,已获得实用性进展。这些包括国家基本地图的地图数据库,是一个国家性的基础资料。

“联机地图”就是由电子计算机存储、管理、调用,由屏幕显示的地图。各种图象显示系统,是联机地图得以发展的可靠保证,通讯技术的发达和通讯网络的完备,则可以将地图数据库中的地图输送至远方的用户面前。这种地图也可称之为“屏幕地图”、“无纸地图”等。用户的终端设备与地图数据库相联,就可以获取国家基本地图和各种专题地图的有关地图信息,还可以进行图象处理,打印记录。

通过计算机,地图数据库的建立及“联机地图”的发展,在未来21世纪广泛应用以后,将大大缩短编制地图资料的搜集和处

理时间,而且提高资料的准确程度和统一性,这对普通地图的发展将起重大作用。但目前正在研究以下几个技术难题:(1)手持跟踪数字化和特征码的应用,使数字化后的信息处理和图形输出简便,但属人工操作,速度不快;各种扫描数字化速度虽快,但自动识别尚未解决,数字化后仍需作大量技术处理,才能输入计算机,故速度也不快。因此,解决数字化速度问题是一项迫切任务。(2)建立什么样的数据库,面临存储的手段、库的性质和结构特点,以及它的服务对象等问题,需要进一步研究。(3)必须解决制作地图过程制图综合自动化的难题。(4)目前使用的地图符号有些不利于制图自动化,作为地图本身图形的改造问题需要深入研究。上述这些难题,也是21世纪普通地图深入研究的热点问题。

#### 参考文献

- 1 苏霍夫 B U. 普通地理图的编制. 北京:中国工业出版社, 1965
- 2 Arthur Robinson. Elements of cartography, 1978
- 3 吴忠性. 1980年第10届国际制图协会会议论文. 日本:东京, 1980
- 4 廖克. 第3届全国地图学学术会议论文  
(安徽师范大学张文彩副教授撰)

**专题地图** thematic map 又称“专门地图”、“主题地图”、“特种地图”,是地图的一大类。它在地理底图上,突出而完整地显示自然现象或社会现象中的某一种或几种要素。

专题地图的研究,在国民经济、国防建设和科学文化教育各领域有十分重要的意义。专题地图把要素最小单元以图式符号传输给用图者,给地学和有关学科总结规律、综合评价、趋势预测、规划设计、制定措施提供重要参考资料,又是科研成果的表达形式。在地下资源、水、土壤、气候、生物圈等的分析研究中,编制各种专题地图,以保证在国民经济中有效而正确地利用这些自然资源和条件。在工业、农业、交通运输和建筑业中,都需要制作专题地图提供基础资料。专题地图是反映历史、阐明政治立场的重要形式,是用于学校教学与作为对广大群众宣传教育的重要手段。随着专题地图日益广泛的应用,已成为用文字或其他表达方式不可代替、有特殊效用的工具和手段。

专题地图渊源于农业生产。古代巴比伦和埃及在尼罗河季节泛滥平原上建立灌溉系统时,就测制了农田水利图。中国周厉王时期的疆域田界图,“家人”官员绘制并掌握的兆域图都是表示某一主题内容的专题地图。公元前1400年,埃及人绘制在纸草上的埃及金矿山的专题地图。中国于1973年12月在湖南长沙马王堆三号汉墓中发现了地貌图、驻军图与城邑图,据考证,这几张图距今有2100年,可能就是中国专题地图的“始祖”。

原始专题地图在内容和形式上明了朴素,几乎都是用简单的象形符号表示山川、森林、农田、动物、军事等要素,以满足当时生产、交通和军事上的需要。

19世纪末到20世纪初,各种自然地图与社会经济地图,如地质图、地貌图、海洋图、气象图、土地利用图、工业图、农业图、人口图等大量涌现。如德国的别格哈兹“自然地图集”(1836~1841),包括了气象和气候图、水文和水文地理图、磁物图、植物地理图、动物地理图及民族地图等。这一时期的专题地图内容已由简单的要素逐步过渡到多要素的分布和质量特征,图型也由简单的示意性象形符号过渡到定位定性的符号。

20世纪50年代,计算机开始应用于专题制图。60年代,专题地图制图发展较快。美国和欧洲技术先进国家广泛利用航空像片和卫星像片遥感资料编制各种专题地图。在历次国际地理学会议和地图学会议上都把专题制图作为中心议题之一。这一时期的专题制图主要同地质、水文、土壤调查、气候、林业和地籍工作紧密联系,并以专题地图集形式为多。如美国气候地图集,墨西哥气候地图集(1967~1968),匈牙利水文地质图集(1961),奥地利农业地图集(1963),英格兰和威尔士农业地图集(1964)等。中国

从60年代以来,编制了自然地图集、历史地图集,反映了中国专题制图的发展水平。各省(区)地图集中专题地图,其图面配置、表示方法,均有创新。

70年代,由于运用了数学、电子学、光学和化学等方面的知识,并应用了遥感和制图自动化新技术,因而使专题地图获得大发展。专题地图内容由定性发展到定量、动态变化及预测预报,从无机发展到有机,从地表发展到地下和宇宙空间,改变了专题内容的古典面貌。1972年,美国发射了第1颗地球资源卫星(Landsat 1),1975年、1978年、1982年相继发射了3颗陆地卫星,主要用于探测地质、矿产、森林、土地资源、农作物产量估算、环境污染及动态分析等,并利用陆地卫星系列所获取的信息资料(磁带),编各种专题地图。美国乔治大学地理系利用卫星象片编制中国东北地区1:600 000土地利用图和1:100 000沈阳—鞍山城市图。前苏联利用卫星片修测编制了1:300 000和1:500 000景观图。加拿大利用自动系统编制海洋水文图集。中国从70年代初到80年代初,地图出版社与有关部门编制了《中华人民共和国水文地质图集》、《恶性肿瘤地图集》、《中国地质图》、《亚洲地质图》、《中国近五百年旱涝分布图集》等一系列高质量的专题地图及专题地图集。

近10多年来,新技术、新工艺的广泛应用,加速了专题地图的发展。专题地图的研究主要反映在下面几方面:(1)专题地图的类型日益增多,专题内容愈来愈广泛,新型专题地图迅速兴起。尤其是反映人类居住条件的环境地图、城市地图;为摸清海洋自然资源和自然规律的海洋地图;为探索宇宙空间科学的星球地图;为保证各国家内部统一的经济政治和共同计划的生产力图、自然经济和劳力资源图、经济潜力图;为适应旅游业发展、满足旅游者及管理部的旅游地图。目前,世界上编制出版的专题地图已有1 000多种。(2)广泛应用遥感和制图自动化技术。遥感技术及时提供地球上的大量信息,成为专题地图制图的重要资料来源,并提高了资料的准确性、可靠性。通过多光谱摄影、红外摄影及微波测定获取地面要素资料,直接编制各种中、小比例尺专题地图。制图自动化技术为专题地图制图提供了先进的技术手段,使专题地图具有周期短、成本低、精度高的优点。(3)向综合、成套和图集的方向发展。专题地图的图型和制图方法由简单显示一种要素或现象,发展到在一幅图上用不同的表示方法分别反映多种现象质量和数量特征的综合图、多种现象多项指标合成的合成图。由单幅地图发展为成套地图和综合地图集。在内容上增加了实用性地图、综合评价图、环境保护图、预测预报图等。如墨西哥利用航片编制了一套全国1:50 000的专题地图,包括地形、地质、土壤、土地利用、土地利用潜力等5种地图。中国著名史地学家谭其骧教授主编的8卷本《中国历史地图集》是内容详尽的大型历史疆域政区地图集,共收图300多幅,历史地名7万多条。《中华人民共和国人口地图集》(1985)是一部全面反映中国人口特征的大型专题地图集,内容丰富,资料翔实。从图集的设计、编制、工艺、整饰、印刷上均具中国特色。(4)加强了数量指标和动态变化信息的表示。现代专题地图内容强调定量分析和反映动态特征,阐明各种现象的发展与变化。如火山活动、河床演变、沙漠移动、森林火警、地震烈度划分、地貌形态示量、土壤侵蚀强度、农作物病虫害等的专题地图上加强了定量和动态变化的内容。随着现代科学技术的进步以及对专题地图需要迅速地增长,专题制图的发展前景非常广阔。展望未来,专题地图制图自动化是地图制图学发展的必然趋势。像片资料专题自动制图技术的研究将取得成功。复合型地图内容的制图综合,可以用“人机对话”方式,使地图学家进入自动编图过程,借助显象屏上的自动综合图象,以光笔同时在显象屏上绘画新图形,用手工完成复杂的编图任务。可以预料,全面实现专题地图自动化制图已为期不远。本世纪内,专题地图的内容愈加广泛深入到资源、环境、城市、交通、旅游等各个方面,更紧密地为国民经济服务。此外,按国际合作方式编绘世界或各大洲专题地图成为可能。这样的专题地图集将已经积累的知识按现代水平加以概括,并合成统一系

统。在未来的几十年中,海洋专题地图将蓬勃发展。21 世纪的海图,将实现计算机辅助判断各种航海信息,计算机组合各种信息而显示于屏幕上,从而加速实现由“纸质海图”向功能齐全、自动显示的“无纸海图”过渡。

近 20 年内,专题地图的研究热点:(1)专题制图学系统理论的研究 引用信息论、模式论、感受论、传输论和电子计算机、自动绘图机等理论和方法,研究专题制图的系统化程序,把复杂的制图工艺转化为科学的系统工程。(2)全球性专题地图制图标准化和规范化研究 全面实现专题制图自动化。(3)关于专题地图内容与地理基础紧密联系的研究。(4)探索新型专题地图的新体裁与新品种,开拓专题地图的应用领域。

#### 参考文献

- 1 Lloyd A Brown The story of maps, New York, Dover pub, 1979
- 2 李道义译. 地图制图学概论. 北京: 测绘出版社, 1982. 166~258
- 3 李海展. 专题地图与地图集编制. 北京: 高等教育出版社, 1984. 5~9
- 4 卢志良. 中国地图学史. 北京: 测绘出版社, 1984. 1~35
- 5 温长春. 专题地图制图. 北京: 地震出版社, 1984. 1~152
- 6 Leo Bagrow. History Cartography. Chicago: Precedent Pub, 1985
- 7 陈显. 地图, 1988, 2: 8~10
- 8 范正一. 地图, 1990, 2: 45~48
- 9 Taylor D R F. 地图, 1991, 3: 36~38

(安徽师范大学钱复生副教授撰)

**遥感地图** *remot sensing cartography* 是指利用遥感图象制图。它是 20 世纪 60 年代以来,在遥感技术迅速发展的前提下,而形成的地图制图学的一种新方法,是遥感技术与测绘科学技术相结合的产物。它以遥感提供的图象数据为依据,利用遥感数据分析处理技术和现代地图制图学方法,按照地图的规定和用图的需要,来完成遥感数据的制图表示和制作地图。遥感图象有航空遥感图象和卫星遥感图象,制图方式有计算机制图和常规制图。

19 世纪末和 20 世纪初,平板仪测量成为测制地图的主要方法,以此为基础而形成相应的各种地图;到了 20 世纪 20 年代之后,航空摄影测量逐步建立起来,随之世界各国主要是用这种方法测制国家基本地图。由此而派生出各种类型的地图;到了 60 年代,遥感技术的迅速发展,已使它成为资源调查、环境监测,以及区域开发、评价和决策的重要手段。遥感技术新提供的遥感信息,已成为许多地图基本资料来源,这就是遥感制图的出现,它将使地图成图过程的作业方法,发生比前两次变革更加深刻的变化。并且,已有许多新的图种出现,它们是过去所没有的,或者说是办不到的。实践告诉我们,遥感制图已成为专题地图编制的主要方法之一,广泛应用于影像地图制作、普通地图更新和各种专题地图的编制。测绘科学长期不能解决的地图资料陈旧、成图速度慢、生产周期长、地图更新慢等问题将逐步加以解决。同时,由于人类生活的环境越来越趋于动态化,例如监测农作物的长势、了解每年的土地利用状况、了解城市化的发展状况、了解水域面积变化状况、跟踪洪水进退、了解环境污染状况、了解和预报天气变化等。所以那种老式的、静止的、百科全书式的地图保障方法,已越来越不能适应业已提出的动态制图保障的需要,只有遥感技术的发展,才能从根本上改变这种状况。

航空遥感信息制图,已经建立了可行的作业方法,并有系统的理论作为基础,不论中国和外国都是如此。而卫星遥感信息制图则是 60 年代以来发展起来的事。虽然美国、前苏联、日本、加拿大等国都发表过大量的文章和专题影像地图,但还没有成套的大面积专题制图的生产实践,而且大面积的卫片几何纠正和投影转换问题,也只是在小范围内试验性的研究中,地图符号系统的

规范化和标准化,也只是在地质图方面有新统一,其他内容的专题地图符号问题,虽然在历次国际性地图学术讨论会上进行了专题研究,但仍属研究中没有解决的课题;专题影像地图的图型研究还是处于起步阶段;遥感影像地图的面积量算方法研究也只是进行了试验;遥感图象的计算机模式识别与分类技术,无论是理论还是技术本身,目前仍处于研究和试验阶段。

遥感图象在制图方面的应用,主要取决于遥感图象的质量,而遥感图象的质量在很大程度上由遥感传感器技术水平所决定。随着人们对环境电磁波辐射特性的掌握和电磁波接收、探测、信号处理等技术水平的提高,以及所获得遥感图象上几何精度和地面分辨率的提高,遥感制图技术得到了长足的发展。航天、航空遥感传感器技术两者相互渗透、相互发展,目前已从第 1 代、第 2 代发展到第 3 代至第 4 代,型号种类繁多,工作方式不同,覆盖的波谱区域由可见光扩展到紫外、红外、热红外和微波范围。遥感图象数据的精度、地面分辨率都有不同程度的提高,在制图方面的应用越来越广。

60 年代阿波罗(Apollo)系统以卫星摄影测量方法完成了登月前的月形图测绘以后,相继出现了大量的对地观测系统,用于世界制图的摄影测量成为国际测绘界瞩目的课题。

70 年代以来国际上兴起卫星摄影解决世界制图与世界资源开发。1972 年在加拿大渥太华举行的第 12 届国际摄影测量与遥感(简称 ISPRS)大会期间,美国发射了 Landsat-1 号(当时称 ERTS),MSS(多光谱扫描仪)及 RBV(返束光导摄像机)图象第一次被送到会场上时,轰动了整个会议。地球资源遥感技术获得了突飞猛进的发展,航天传感器技术已从实验阶段走向实用阶段,成象方式从单一的机载扫描和摄影转变为光机扫描(电子学扫描)和高分辨率摄影。其特点:(1)增加了应用的波谱区,如 TM7.2.08~2.35 $\mu\text{m}$ ;(2)提高了地面分辨率,如 TM 的地面分辨率由过去 MSS 的 79m 提高到 30m;(3)具有立体像对的能力,如已从 Landsat 为代表的平面像片时代转向 Spot 式的立体三维像片时代,即从平面主题图的制图技术发展到三维地形图技术,打破了只有航空象片才有立体像对的能力;(4)改进了探测器性能,采用了线、面 CCD 器件的推帚式扫描成象技术。把传感器的能力提高到新的水平。

80 年代遥感制图又取得了明显的进展。1982 年美国发射的陆地卫星——4 号上除 MSS 外,还安置了新的光机扫描仪主题测图仪(TM);1986 年法国发射了地球观测实验系统(spot 卫星),装有两台全色和多光谱高分辨率扫描仪(HKV)。

中国于 70 年代中期已引进卫星遥感新技术和相关理论,80 年代初期就已得到普遍发展。在对 MSS 及 TM 图象进行深入研究的基础上,在遥感制图方面取得了卓有成效的应用。例如,腾冲遥感制图、太原农业遥感制图、长春净月潭遥感制图,以及大量影像地图的编制出版,就是遥感制图发展的实例。其中东北三江平原卫星象片影像图,为该地区经济开发、环境保护及农林牧副渔发展等方面的合理布局,提供了重要的科学依据。利用 TM-7.4.3 波段分别赋予红、绿、蓝色合成的彩色合成图象,对大兴安岭森林火灾进行了实时监测与灾情分析。用 TM 图象分析黄河下游河道变迁的规律,正确指导了黄河入海的改造工程路线,节约投资数亿元。

目前,很多国家把研究的重点放在航天 CCD 扫描图象测制和修测地形图的问题上。中国也进行了这方面的研究和试验。试验结果表明,利用 spot 卫星的 HRV 全色波段图象测绘等高线可以满足丘陵地、山地 1:100 000 地形图的精度要求( $\pm 9\text{m}$ );基本可以满足 1:50 000 地形图地物修测的判读要求;但不能满足 1:50 000 地形图测制的要求。1983 年,美国利用 spot 模拟数据、陆地卫星的 TM 和 MSS 数据,分别编制了土地利用和土地覆盖图。对这些图进行分析比较后,认为 spot 数据成果在二级、三级分类精度上比陆地卫星提高了 15%~20%。目前,中国获得的 spot 卫星影像资料还很有限,对其在制图和测图方面应用的研究只是初步的,有些问题还有待进一步探讨。此外,美国 80 年

代连续发射的航天飞机,装有10个波段的光谱仪和测视雷达,可以获得连续大幅摄影底片(20m),图象非常清晰。原苏联的“联盟号”宇宙飞船的“礼炮号”轨道站,也同样能获得高质量的遥感图象信息。如“礼炮-6”获得的图象具有6个波段,地面分辨率达20m。总之,目前国际上航天遥感技术正向高分辨率、多波段和全天候方向发展,并使遥感信息商品化。

近年来,遥感图象已由光学处理向数字分析处理的方向发展,建立遥感图象数字分析与自动化分类制图系统。这种系统包括大容量计算机、彩色图象显示和人机交互装置、图象输入输出装置及整套图象分析处理软件。除操作系统软件外,主要包括图象的几何纠正、投影变换、影像增强、密度分割、专题信息提取、自动识别分类与制图等分析处理和应用软件。

遥感制图是遥感技术应用的一个主要方面,而且其他许多方面的应用的最终成果也往往是以地图形式来表现的。目前,国外在地表覆盖与土地利用、地质、地貌、森林、植被、土壤、水资源、环境污染等专题制图中,已由局部实验转入广泛应用阶段。而且已出版了不少利用遥感图象分析解译编制的自然条件与土地资源系列地图,如墨西哥、加拿大、美国、法国、英国等国家,都利用遥感图象MSS进行了各自然地理基本要素的系列制图工作。近年来运用TM图象编制各种专题地图也相应得到发展。再如澳大利亚1:500 000自然条件系列图、蒙古人民共和国1:1 000 000自然条件系列图,内容丰富、图斑细致,具有较高的质量。

中国的遥感系列成图,在陈述彭教授倡导下,开展了腾冲航空遥感系列成图(彩红外像片)、山西遥感农业自然条件系列成图(MSS)、内蒙古草原遥感系列成图等试验工作。实验中对系列图内容类型界线的统一协调方法,提出了很有意义的经验。如腾冲的系列成图,是以自然景观结构图作为各专业要素类型界线统一协调的基础;山西农业自然条件系列图,主要是在解译过程中各专题要素同步进行,把矛盾解决在解译制图过程中,而不是在成图后再解决类型界线的协调问题;云南丽江的遥感系列成图,则是在成图之前,首先解译出自然地理单元轮廓界线图,以此为基础进行其他各要素图的解译工作。

遥感系列成图,是根据相同的信息源,同步进行专题解译的系列图,既要保证差别性和对比性,又要保证各专题要素的统一协调,因而可大大提高各专题图的质量。同时,通过编制系列图,为研究各专业如何充分运用遥感资料,特别是为研究利用遥感资料解译专题图的理论和方法打下基础。

今后,遥感制图将集中在卫星遥感图象的模式识别、影像处理过程的自动化,以及自动编制专题地图的试验,这一方法的成功是指日可待的,这将使遥感资料应用于编制中、小比例尺专题地图具有极为广阔的前途。

#### 参考文献

- 1 国家测绘总局测绘研究所情报室.《地球卫星与遥感技术在测绘中的应用》,1975,9
- 2 The use of satellite imagery for very small scale mapping—hotog. record, 1975, 8(6)
- 3 Колвокоресес А. П. Применение Спутника Лансат В картограф-ши. 1976
- 4 Remote sensing techniques in vegetation mapping—Norsk geogr. tidsskr, 1976
- 5 Lillesand T M, Kiefer K W. Remote Sensing and Image Interpretation, 1979
- 6 温长慈编著. 专题地图制图. 北京,地震出版社,1984
- 7 中国人民解放军测绘学院. 卫星遥感与制图, 1984, 1

(安徽师范大学张丽娟副教授撰)

**光盘地图的研究与应用** 计算机地图制图和地理信息系统的不断发展与应用,必须要有制图和空间信息数据库的支持。建立这样一种数据库不仅是一个繁重而复杂的工作,而且需要大容

量的存储器。而光盘存储技术的发展,则为地图学者提供了一种完全新颖的技术方法。

相对磁盘而言,人们把利用激光进行信息存储的介质圆盘称之为激光光盘。它的形状象唱片,功能似录象介质,故有时又称为激光视盘。它的特点是记录密度高,存储容量大,存取时间短,检索快,信息保存时间长,易与计算机联机使用。光盘是利用聚焦极为细微的激光光点来记录信息的。记录密度可高达 $10^7 \sim 10^8$ 位/cm<sup>2</sup>,是目前磁盘的几十倍至100多倍。光盘存储器是采用非接触方式来读、写信息的,这种方式不会使盘面磨损、划伤,不受光盘表面的灰尘、指纹和划痕的影响,输出图象清晰。光盘与计算机联结,可进行图形处理,例如影像的叠加和组合。它与印刷装置联结,可将光盘上的信息打印或复制为纸质拷贝。光盘可以用母盘大量复制,因此,其价格低廉,在常温、常压和常湿下,可长期保存。光盘按其性能分为3种类型:只读式、只写一次式和可擦式。只读式光盘只能读出光盘上已记录的各种信息,但不能修改或写入新的信息。只写一次式又叫写入后立即读出式,它是记录后不能在原址重新写入信息的不可逆记录系统。可擦式光盘是可以写入、擦除、重写的可逆型记录系统。按数据记录形式,光盘又可分为两类,即模拟型和数字型。模拟型的存储方式与电视记录过程相似,以视频信号调制激光存入光盘;数字型是将图象以数字信息存入,类似磁盘。前者存储容量大,后者可直接与计算机联用。光盘的性能与记录形式的不同,其用途也不同。光盘存储技术因具有其它存储技术无可比拟的优越性而受到重视。近年来在数据处理、图象存储和地图制作等领域也开始采用激光存储技术。

光盘存储的主要原理是激光与物质的相互作用。它是利用激光的单色性和相干性,把光束聚焦成为 $1\mu\text{m}$ 的微小光点,其能量高度集中,在存储介质上产生物理化学变化,进行记录;用微小的光点在介质上扫描,根据反射光的变化读出记录的信息。光盘存储系统分为两大功能部件,即控制处理机部件与读、写部件。前者控制从用户到光盘和从光盘返回用户的数据流。写、读部件又可分为光盘机和光盘机电路两部分。光盘的盘体结构由光盘基片,存储介质和密封层3个部分组成。基片是最为关键的光学部件,通常采用的材料有丙烯酸类树脂,聚碳酸酯类树脂,环氧类树脂以及铝合金类等。只读型光盘的读写原理:记录输入的数据、信号首先通过检校电路和编码电路,去调制激光器的输出,经调制过的记录光束聚焦成直径约 $1\mu\text{m}$ 的光点,并落在数据存储介质上,当高强度的写入光通过时,记录光脉冲就在介质上形成一连串的物理标志。记录后的光盘上形成了极细密的螺旋式信息道。在电子显微镜下观看,这些信道上的纹迹是一个个相隔间距不同的,大小不一的凹坑。对于数字光盘,激光在信道上直接烧出坑来,有坑无坑分别代表二进制代码的1或0。读出过程是记录的逆过程。读取光学头是一个激光器,聚焦成微米级光点照在光盘面上,并跟踪光盘上的信息纹迹,则被调制的光信号还原成调制的电讯号,经解调后还原成视频和音频信号。光盘存储数据的格式与磁盘相似。沿光盘半径方向有若干条信息道,每条信息道在圆周方向分成若干扇区,每个扇区又可分标题区和数据区,其中附有误差检验和校正码。一条信息道划分多少个扇区,一个扇区内有几个数据区,或数据区内有多少字节,均随光盘系统不同而异。

光盘在存储和显示文字与图像信息方面的优越性,早已引起国外地图制作和应用部门的重视。正如奥尔森(J. M. Olson, 1984)指出,“光盘具有高密度存储能力,可以随机存取图象,图形显示能与计算机联结,并可用软件控制,激光读图不损坏光盘,可长期保存,它为地图生产提供了一种完全革新方法”。因此,国外地图制作机构,以光盘作为制图传递媒介出版发行光盘地图。

由于光盘存储容量大,人们可以充分利用它的存储功能建立模拟测绘资料库,或数字数据库。可以配套地存储地图、航片和大地控制网图,以及各种测量控制数据等。存储的地图可以是

各种比例尺的地形图,专题地图;并以不同规格的幅面存入,单色地图或多色地图均可存入。航片可以是按航线排列的单幅像片,也可以是某一地区的像片镶嵌图。一张或多张光盘就可以组成一个区域完整的测绘资料库。据估计,一张光盘就足以存贮中国陆上和海上全部的1:50 000基本比例尺地形图。1982年美国在一张光盘上存贮了108 000幅单色地图,在1985年美国国家海洋局和大地测量局开始应用双面光盘存贮了他们的全部地图、航图和有关文字说明资料。这种视频光盘测绘资料存贮系统,带有随机存取功能的处理机,用户不仅可以在很短的时间内,从屏幕上查询和阅读所需的地图资料,光盘本身也可作为母盘大量复制出版。日本准备把测地卫星的遥测资料制成光盘,代替磁盘向外发行。日本国土地理院也计划把公开的地图制成光盘向外发行。这种光盘测绘资料库,占有空间小,便于保存,机动性强,利于管理和检索;比纸质地图和资料有更大的优越性,它可以减少地图的贮印数量,有助于解决一些地图存贮和供应的困难。从目前来看这种超大容量的地图资料数据库,采用光盘存贮是一可行的办法。视频光盘地图资料存贮系统,给地图资料的管理和应用开辟了新的途径。

将光盘存贮系统与计算机联结,可以建立视频处理系统,进行各种地图的图形处理与制图。用模拟光盘存贮的地图图像,能自动完成地图数字化过程,并用微机以交互式修改和变更数字化数据,进行图形处理,修改或编绘新的地图,输入激光绘图机,制作出合适的晒印底片,然后制版印刷,即可得到新地图。光盘上存贮的地图,也可根据用户的要求制作地理底图,把已存贮在光盘上的数据,或实时输入的专题数据,分类分级制成统计图表,叠加在底图上,可快速显示事物变化的新信息,或实时制作有关的统计地图,并可对图像套色增强某些要素,以提高图形的显示和判读能力。对存贮的航空像片,可以进行影像的合并、叠加和镶嵌,甚至可以利用航空像片的像对,以视差较法建立地形的立体模型,进行立体显示或测图。在该系统内的图形或图像,可以平面显示,也可立体显示,分色或单要素显示;能扫视全图,也能从整体移向局部的地区详图。

近年来国外利用光盘存贮技术,开发了一些专用的信息系统光盘:(1)人口统计地理信息系统光盘的研制。澳大利亚时空研究所发行的高级制图光盘就是这种性质的光盘。在该光盘上存贮了澳大利亚1981年至1986年的人口和住房建筑调查统计资料及有关的数据;澳大利亚各州和州以下地区边界的数据库,高级地图制图软件包,并留有一定的空间供用户实时使用。该盘可在索尼、飞利浦和日立等光盘放象机上使用,只要与IBM·AT或XT的微机联接,即可运行该信息系统。它可以显示各种统计数据,制作统计图表,选择或组合不同地区的数据,用户可根据需要设计专题地图并在屏幕上显示或修改,然后用单色或多色喷笔输出地图,也可实时输入数据进行制图。该系统还存贮了美国(1980)、新西兰(1986)、香港地区(1981)和瑞典(1970~1987)的人口调查资料 and 这些国家的省、县地区的行政界线。该系统使用方便,无需专门训练,用户只要阅读手册即可上机操作。(2)城市街道信息系统光盘的研制。在该系统中存贮了这些城镇的全部大街小巷的平面图,并区分出主干道,高速公路和一般街道,或按照车速分级的道路;有的还能显示特殊的交通规定,如单行,禁止转弯的路口,限速和超车区等。同时存贮了所有的街名,干线两侧住宅的门牌号码;并具有计算两点之间距离和选择最快,最短行车距离的功能,有的甚至还可计算到达目的地所消耗汽油的用量。有的系统光盘上还可进行准确的行车定位,若驾驶员没有按预先确定的路线行车,它会在你迷路或错过的路口处,

停止播放音乐,并问你是否要重新计算或选择到达目的地的路线。这种道路网系统光盘目前有两类:一是在室内使用的,供快餐食品公司,给送货的驾驶员选择和确定最佳分送路线用,或给私人选择或确定假期的最佳旅游路线,这种系统既可屏幕显示也可打印出所需区域的道路图;二是放在汽车内使用的小型光盘系统,它具有汽车运行实时定位和重新选择路线的功能。(3)军用光盘制图系统的研制。该系统将地图与战场信息、通讯指挥联合起来,采用了新颖的光盘存贮与显示手段进行作战指挥。该系统存贮了许多不同比例尺和不同用途的地图。其功能有:快速查阅地图;分色显示制图区域内的军事设施和物体结构,以及不同比例尺的地图;进行地图图形的处理(如叠加图形、符号和注记);立体观察高度、地形和视线范围、设计航线;还有公用的数据库、地名索引库和通讯软件等,系统内有2048×2048像元的高分辨率工作站。其软件均按标准化形式设计的。该系统主要用于战斗演习模拟,空军的战场指挥、控制和通讯,战区的情报准备、收集、管理和综合分析等。国外地图学者利用光盘存贮的特性开始研制光盘地图集,也称之为“录像地图集”。英国电视广播事业公司出版的视频光盘图像系统被认为是第1部光盘录像地图集。它存贮了50 000张照片,250 000页的文字内容,24 000幅地图,以及航空照片和卫星影像。存贮的地图是英国陆军测量局测制的标准化地图,比例尺从1:1250至1:625 000的系列地图。全系统分国家盘和公共盘。公共盘具有下列功能:沿地图移动,观看照片,阅读文字内容和地图索引。可在地图上计算距离、测量面积、换算比例尺、拼接地图、选择最佳路线、分要素提取信息、实时输入数据进行制图等。该系统存贮有专题地图和普通地图,比例尺有大、中、小;有文字和图片,能多方面地介绍一个区域的状况,起到了一部地图集的作用。澳大利亚皇家理工学院的一位地图学者,在前几年研制录像磁带地图集的基础上,近年来开始研制光盘专题地图集,并提出研制用于城市规划决策的专用光盘地图集。他对光盘存贮专题地图集的内容、图幅大小和文字照片的编排,资料搜集的广度和深度,内容显示的逻辑层次,用于规划设计的专门功能等,按地图集的特点作了进一步的研究,该光盘地图集将为城市规划决策者提供一个有力的工具。

光盘存贮技术在地图领域中的应用,解决了计算机地图制图和地理信息系统中的数据采和存贮容量的问题,加速这些系统中的超容量的大型数据库的建立及其应用,随着超大容量数据库管理系统的解决,完全可以用光盘存贮进行全数字制图,这为计算机地图制图和地理信息系统的发展开创了新的前景。存贮在光盘上的图像资料可用视频信号或数字信号远距离传送到显示终端上,屏幕上的观察代替了实地考察,并能快速给军事、科研、生产和政府机构等部门提供地理环境信息,及时为军事指挥,规划决策服务,提高了地图信息传递的效率。光盘地图集的研制,使光盘存贮技术不仅在计算机地图制图中所发挥的作用,而在地图应用中还存在着很大的潜力。地图、照片、文字说明、统计图表、地名索引、声音解释等汇编在一起,有图有声,检索方便,有平面和立体显示、定位和量算的功能,这种地图以完全新颖的形式提供给用户,给地图应用开拓出更加广阔的领域,光盘地图的发展也必将会对传统的地图设计和编制产生一定的影响。中国从20世纪70年代开始研究光盘技术,1984年引进激光视盘系统生产线;近年来已推出一种光盘文件管理系统,在可擦重写磁光盘的研制方面取得很大的进展。随着光盘技术的大力发展,将会很快引用到测绘领域中来。

(南京大学田德森、冯璧华撰)

# 生物学

## 普通生物学

### 生命的起源 the origin of life

生命起源问题是人类认识自然界的重大课题之一。在古代,有唯物主义的(原子论者)、唯心主义的(柏拉图)等形形色色的自然发生论。雷地(F. Redi, 1608)、斯帕兰扎尼(L. Spallanzani, 1765)、巴斯德(L. Pasteur, 1862)等先后用实验证明,现存的生物不能自生。德蒙利佛(De Montivault)、开尔文(L. Kelvin, 1871)等则提出宇宙胚种学说。海克尔(E. Haeckel, 1868)、耐格里(C. Naegeli, 1884)等认为巴斯德所否定的只是自然发生说的一种具体观点。他们认为生命不是从来就有的,认为生命在原始地球条件下,最初来自非生命物质。自19世纪30年代,人们开始提出蛋白质的概念,并认为它是生命活动中最重要的物质(J. J. Berzelius, 1836)。1868年,海克尔根据对生物体中各种物质的化学分析指出:它们也是化学物质,同无机物没有不可逾越的鸿沟,蛋白质早晚会被人工合成,从而合成生命。奥巴林(A. E. Oparin)率先采用化学途径进行实验和研究生命起源。1924年和1936年,他提出了“团聚体假说”,认为生命起源时原始地球的环境是还原性的,不是氧化性的。他以蛋白质为中心组分同其他有机高分子,如多核苷酸、组蛋白等其他蛋白质或阿拉伯树胶等碳水化合物,分别混合,这些混合物的水溶液,在一般温度、酸碱度等条件下,会自然凝聚成一个个的小滴(团聚体)。这种团聚体具有选择性吸收的功能,它们在适宜的条件下可以呈现某种新陈代谢、生长、繁殖等类似生命活动的现象。因此,奥巴林认为,团聚体可能是从原始蛋白质进化为原始生命的过渡性结构形式和演化场所。1953年,尤里(H. C. Urey)、米勒(S. L. Miller)推测原始大气的主要组分是 $CH_4$ 、 $NH_3$ 、 $H_2O$ 和 $H_2$ 等,但后来不断有人提出异议。如1990年小林健正提出原始大气的主要成分是 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $H_2O$ 和少量的 $N_2$ 、 $H_2$ 等。

奥巴林所使用的实验材料是生源性的,而生命原始发生时的原材料显然是自然界的,非生源性的。米勒(S. L. Miller, 1953)和福克斯(S. W. Fox, 1955)等部分地填补了这个空白(核酸除外),他们在模拟推测的原始地球的环境条件下,分别实现了氨基酸和类蛋白的自然合成。星际有机物质的发现(B. E. Turner, 1968等),陨石中氨基酸等有机物的发现(1962年以来)和月球土中氨基酸的发现(1970),说明合成生物大分子的原料广泛存在于宇宙空间,证明米勒等人的实验的自然性。

1959年,福克斯发现,他所合成的类蛋白在水溶液中加热到 $130\sim 180^\circ C$ 后冷却,可以自然聚合为大小一致的( $0.5\sim 3\mu m$ )微球体,其外围有一层自然形成的双层界膜,并具有如团聚体一样的类生命现象。多肽形成的可能方式,除了福克斯的干热聚合外,还有1967年贝尔纳(L. D. Bernal)提出的矿物表面吸附理论,1972年可恰斯基(A. Katchalsky)的蒙脱土吸附理论和1955年赤堀四郎的聚甘氨酸理论等。

奥巴林和福克斯都侧重于蛋白质及代谢的起源研究,而不大注重核酸及遗传复制的起源的研究。1953年分子生物学诞生后,如艾根(M. Eigen)、奥格尔(L. E. Orgel)、奥罗(J. Oro)等在这方面展开了研究。他们强调核酸及其复制机制在生命起源中的首要作用,他们的主要成果有4个方面:(1)在模拟原始地球环境条件下,研究了5种碱基和核糖、嘧啶、脂肪酸等的非生源性合成,并取得了成功。但对核苷,进而对核苷酸的形成机制还不清楚。(2)在有酶没有模板或有模板没有酶的条件下,合成了短链

RNA。(3)设计和描述了遗传密码起源的可能途径。(4)研究了核酸和蛋白质在结构上的共同进化和在功能上协同耦合的可能途径,提出了“超循环论”(艾根,1970)。

生物大分子光活性的起源问题通过科学实验已知有许多可能的途径,主要有:(1)不对称因子的选择结晶(赤堀四郎,1955;福克斯,1962等);(2)圆偏振光(T. L. Davis等,1945);(3)宇称不守恒的决定(A. S. Garay, 1968; S. Mason, 1985);(4)随机起源论(R. E. Dickerson, 1979)

生命起源研究中还有两种生物大分子即蛋白质和核酸哪一个首先起源问题。奥巴林主张蛋白质首先起源,里奇(A. Rich, 1962)、克里克(F. H. C. Crick, 1968)等则主张核酸首先起源认为RNA自复制体系的出现即诞生了生命。1981年T. R. Cech, S. Actman发现了RNA具有酶活性(RNA后加工方面)支持了后一种观点,1972年F. Lipmann发现的短杆菌肽S和1982年S. Prusiner发现的Prion因子的自复制现象则有利于前者。艾根(1979)等主张平行协同进化,认为两者产生后的存活是互为因果的,没有先后可言。1985年戴森(F. Dyson)提出了生命两次起源的假说,他指出:(1)核酸及核苷酸难于非生源性合成,就核苷酸来说,非生源性合成过程中形成具有现在的核苷酸结构的几率,只有1%。而蛋白质易于非生源性合成已成定论,并且,如此合成的蛋白质中的肽链结构大多数是正确的。另外,艾根和奥格尔的RNA合成实验,都不是纯非生源性合成。艾根使用了生源性的RNA聚合酶,奥格尔则加入了现代的RNA模板。这说明,只要有蛋白质及合成RNA的原料就可以产生RNA,只有合成了RNA才能再复制新的RNA分子。(2)RNA在复制过程中易于出现多种突变,产生误差,但RNA自身不具有校正功能,结果,已有遗传信息将逐渐消失,走向无序。戴森通过计算机计算,发现蛋白质体系可允许高达20%~30%的误差率。因此,奥巴林的团聚体中总有一部分蛋白质具有完整的正确结构,保持有正常的催化功能,从而使团聚体得以正常生存和发展。没有核酸的指令作用,核酸中积累的误差也就不会损害蛋白质的结构和功能。(3)团聚体的分子群体从无序达到有序,实现自稳定,要求能自保持的分子群体必须具有足够的大小(约 $10^4\sim 2\times 10^4$ 个),这样大的自保持群体,核酸达不到,差两个数量级,只有能容忍高突变率的原始蛋白质,才有可能。

基于上述种种情况,戴森在冯·诺依曼(J. von Neumann)和马古里斯(L. Margulis)等关于自动机结构和内共生理论的启示下,提出了生命起源过程分两步走:第一步是蛋白质及其代谢机制的起源和发展,第二步是核苷酸及核酸(RNA)在团聚体中的蛋白质催化下起源产生。最初,它只是作为寄生物存在于原始蛋白质构成的细胞中,结果,有的原始细胞因此面死亡,有的则逐渐变得能够容忍RNA及其复制活动,从而使得它们间的关系由寄生变为共生。后来又经过数百万年,才一步步建立起协调的耦合关系,形成了互相依赖的有机整体。从此,地球上才出现了原始的生物体,生命才真正形成。

生命起源的理论已有了基本框架,但许多具体问题都还在广泛探索中,需研究的主要问题有:(1)蛋白质同核酸的协同匹配问题,包括核酸和遗传密码的起源问题。(2)有关生物大分子构型的破缺问题,即光活性的形成问题。(3)实验证明,许多生命组分和属性的起源机制具有多样性,如光活性的起源、各种碱基和蛋白质的合成等,都有了多种方法,说明它们的起源并不难,困难在于这些组分的耦合及其整体性的展现。这中间既需要新的科学实验,更需要进行新的理论探索和新的系统综合。

## 参考文献

- 1 奥巴林 A I 著. 地球上生命的起源. 北京: 科学出版社, 1960
- 2 Fox S W. The origin of prebiological system, New York: Academic Press, 1965
- 3 原田馨著. 生命起源的化学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1978
- 4 米勒 S L, 奥吉尔 L E. 地球上生命的起源. 北京: 科学出版社, 1981
- 5 Dyson F. Origins of life, Cambridge University press, 1985
- 6 Thomas R C. The generality of self-splicing RNA: relationship to nuclear mRNA splicing, Cell, 1986, 44: 207
- 7 艾根 M. 超循环论. 上海: 上海译文出版社, 1990
- 8 Nena Hall. Chemical clues to the origin of life, New Scientists, 1990, 21(4): 29
- 9 Waldrop M M Science, 1990, 3

(北京师范大学郭华庆副教授撰; 彭奕欣审)

**生物多样性** biological diversity 指在一定时间内, 一定地区(或空间)所有生物物种及其变异和其生态系统组成的复杂性。它可以分成许多层次, 从完整的生态系统到组成遗传分子的化学结构。生物多样性包括生态系统多样性、物种多样性和遗传多样性 3 个层次。生物多样性是地球上 40 亿年来生物进化的结果。生物多样性的保护和持续开发利用, 已受到当今国际社会普遍关注。

1968 年 P. R. Bell 和 C. L. F. Woodcock 合著《绿色植物的多样性》, 对绿色植物(光合自养植物)的各大类群中物种的丰富度、形态结构特征、繁殖习性、生活史和进化格局等方面的多样性进行了较全面的阐述。1970 年 P. Hanaadler 出版《生物学与人类未来》, 从生命起源、发展和演化、生物多样性研究现状及应用前景等多方面论述了生物多样性与人类生存发展的关系。1978 年(世界自然和自然资源保护联盟)IUCN 出版《植物红皮书》。1980 年《世界自然保护策略》中提出要维护基本生态学过程和生命维持系统; 保持基因(遗传)多样性及物种和生态系统的持续利用。世界自然保护运动的发展遵循着: 对个别的濒危物种的保护→濒危物种栖息地保护→在特殊景观下有代表性生境类型保护→生态学过程保护。为保护生态系统的多样性, 截止 1989 年底在世界 71 个国家的 103 个生物地理区内, 建立了 276 个生物圈保护区, 中国参加生物圈保护区的有长白山、鼎湖山、卧龙、梵净山、武夷山和内蒙古锡林郭勒草原自然保护区, 主要保护世界各生物地理区中有代表性的生态系统。就其研究资料来看, 早期的生物多样性研究, 主要是对珍稀濒危物种及其保护的研究。

生态系统多样性系指构成生态系统的生物群落与其生存环境组合的复杂性。其结构愈复杂, 生态系统多样性愈丰富。其研究进展如下: (1) 不同生物气候带生态系统多样性的调查。包括热带、亚热带、温带和极瑞环境中, 森林、草原、荒漠等生态系统中生物种类、多度、结构及其与环境的关系。各类生态系统中关键种的确定, 关键种群的特征、动态及进化, 种间关系(授粉、传播种子、食物链、附生、寄生、共生、凋落物分解过程中分解者的动态变化规律等)探讨, 以及生态系统演变规律、趋势及其与人类经济活动的关系。(2) 特殊景观地理区域的生态系统多样性, 生态地理分面规律及其保护研究。(3) 湿地、海岸和岛屿生态系统多样性及其演变趋势, 以及人类经济活动对其影响的研究;(4) 生态系统多样性保护及永续利用途径研究, 即研究生态系统多样性保持稳定的基本条件, 各种生态系统变化与物种多样性及物种绝灭速度的关系, 探索提高和永续利用生态系统中物种多样性的合理经营管理措施。

物种多样性是指生物群落中物种的丰富性和异质性。物种多样性是生物多样性研究中非常重要的环节。目前已完成或正在进行的研究课题:(1)建立物种多样性档案。即通过对一定区域的所有物种进行区系分析、数量统计, 地理分布规律研究后, 编写

不同区域各类生物基本图志, 并建立物种多样性标本馆或陈列馆。(2)珍稀濒危物种保护的系統研究, 即珍稀濒危物种的现存数量、环境现状、分布区域、种群动态、繁殖生态及涉危原因的研究, 以及编写不同区域的濒危物种《红色名录》和《红皮书》, 同时探索其保护途径。(3)对野生经济物种资源的蕴藏量、再生潜务、潜在价值(经济价值和学术价值), 对人类生活的重要性程度评价, 探索合理开发利用途径等方面的研究有较大进展, 并获得较显著成果, 例如在野生药用物种的保护和利用, 野生食用物种的保护和利用(尤其是饮料植物的开发利用和引种驯化等)引起全社会的普遍关注。(4)物种多样性的就地保护。此项工作正在全世界广泛开展 并已初具规模。(5)物种多样性的异地保护。主要是利用植物园、动物园、森林公园、繁殖场等网络对濒危物种进行异地保护, 例如大熊猫、金丝猴、丹顶鹤、水杉、银杏、银杉、人参等的保护和繁殖方面已取得较大进展。(6)极端环境中物种多样性的研究, 例如对高原、盐碱地、沼泽、荒漠地区其特定物种对特殊环境的耐受性特性及遗传特性的研究, 尤其对高温、高盐、高碱、高压、低温、高 H<sup>+</sup> 浓度值、低营养等极端环境中微生物物种多样性的研究, 有一定进展。

遗传多样性系指种内或种间表现在分子、细胞和个体三个水平上的遗传变异, 即遗传多样性又可分为个体外部表现型性状的多变性, 细胞染色体(染色体数目的多态性, 染色体结构的多态性和染色体分带特征的多态性等)的多样性和分子水平的多样性。遗传多样性的研究进展主要体现在以下几个方面:(1)自然种群遗传结构的研究, 主要是对种内和种间的遗传变异因素(如基因频率、每个基因的位点数, 每个位点的等位基因数等)进行了探讨。(2)家养动物和栽培植物的野生祖型及亲缘种的遗传学研究, 是遗传多样性研究中应用前景最广泛的一个领域, 目前正在探讨以下几个问题, 即栽培植物和其野生种间遗传多样性的研究, 试图培养出稳定、高产、优质和抗逆性强的新品种, 达到增产增收的目的; 家养动物品种和种内遗传多样性研究。(3)建立物种种质资源基因库, 是保护珍稀濒危物种的又一可行途径。中国科学院在上海细胞生物学研究所和昆明动物研究所均建立了细胞库, 中国科学院在上海细胞生物学研究所和昆明动物研究所均建立了细胞库, 其中昆明动物研究所截止 1990 年已收入 170 余种动物细胞保存于细胞库中。胚胎移植(包括同种和近缘种间的胚胎移植)已在狒狒、绵羊和猕猴等 11 种兽类获得成功。另外在低温生物学、低温或超低温(-196℃)长期保存种质技术的研究也取得一定进展。(4)极端环境下特殊生物的特征与其遗传特性的研究, 从而建立特殊生物性状的外源基因库, 以利于对特殊生境的充分利用并培育耐性强的新品种方面进展较慢。

世界自然和自然资源保护联盟专门成立了物种生存委员会(SSC), 正在缔结《全球生物多样性保护公约》, 组建各国生物多样性研究机构和协调生物多样性研究工作。在 SSC 的支持和推动下, 不少国家建立了专门研究机构, 如哥斯达利加的“生物多样性研究所”, 中国的“四川师范学院生物多样性研究中心”。生物多样性保护研究系当今国际社会新潮流, 也是生物学领域中的研究热点, 从研究进展和今后发展趋势来看, 可望从以下几个方面取得新进展: 生物多样性的就地保护; 生物多样性的迁地保护; 珍稀濒危物种的研究; 栽培植物和饲养动物品种与其野生亲缘种间遗传特性的研究, 尤其对主要农作物、果树、经济林木和畜禽等经济效益和社会效益显著的物种, 通过利用地方种及野生种培育出稳产、高产、优质和抗性强的优良物种(或品种)。生态系统中关键种(或关键种组)的研究; 农业区域生态系统多样性研究; 野生经济物种的研究与保护。

## 参考文献

- 1 Arms K. Environmental science, 1990, 74~103
- 2 Handler P. Biology and the future of man, 1970, 290~308
- 3 Hoyt E. Conservin the wild relatives of crops IPBGR-IUCN-WWF
- 4 Peter R B, Christopher L F W. The diversity of green pla-

- nts, 1968, 1~330
- 5 Rabb G B. Species, 1991, 17~76
- 6 Wilson E C. The current state of biological diversity. Biodiversity, 1988, 3~18
- 7 苏智先. 生物多样性的概念及其研究内容. 四川师范学院学报(自然科学版), 1991(增刊), 40~45  
(四川师范学院生物多样性研究中心苏智先撰)

**生态位** niche 曾称作生态龛或生态灶, 是一个既抽象又含义丰富的生态学专有名词, 在现代生态学中, 其研究已经渗透到许多研究领域, 而且应用范围越来越广。

生态位概念是美国格林内尔(J. Grinnell)首先使用的(1917, 1924), 他把生态位定义为“恰好被一个种或一个亚种占据的最后分布单位”, 并且“没有两个种能够长久占有同一个生态位”。格林内尔的生态位实际上指的是空间生态位。1927年英国埃尔顿(C. Elton)认为生态位是物种在生物群落中的功能作用和地位, 特别强调与其他种的营养关系, 他对这个概念的解释可以看作是营养生态位。1957年哈钦森(G. E. Hutchinson)对生态位概念给以数学的抽象, 提出生态位是位于几维资源空间中的超体积, 进而他又划分了基础生态位和现实生态位, 认为在没有任何竞争者或其它干扰作用存在时, 某一物种所占据的最大的“理论上的栖息超体积”, 即为该物种的基础生态位。但由于其他物种的竞争或捕食等的干扰, 一物种只能占据其基础生态位的某些区域, 这种缩小的超体积哈钦森称之为现实生态位。1959年奥德姆(E. P. Odum)把生态位定义为“一个生物在群落和生态系统中的位置和状况, 而这种位置和状况取决于该生物的形态适应、生理反应和特有的行为”。帕茵克(E. R. Pianka, 1973)认为, 一个生物单位(包括个体、种群或物种)的生态位, 就是该生物单位适应性的总和。生态位的概念实际已同种间竞争现象密不可分, 而且也越来越同资源利用相关联, 这样把重点放在资源利用上有利于生态位的定量分析。

生态位宽度和生态位重迭是最常见的生态位测度, 在一维或多维基础上对群落内的生态位宽度和生态位重迭的分析工作越来越多, 生态学家已经提出了许多数学方法来定量地测定生态位的宽度和重迭。

生态位宽度, 有时也称作生态位“广度”或“大小”, 是指被一个有机体单位所利用的各种各样不同资源的总和。曾有很多生态学家致力于寻找测定生态位宽度的方法, 但莱文斯(R. Levins)最先提出利用比较简单的测定群落多样性指数 Simpson 公式(E. H. Simpson, 1949)及信息论中的 Shannon—Weiner 公式(C. E. Shannon & W. Weaver, 1949), 来表示任何生物所利用的资源的多样性。因此, 生态位宽度的计算公式是:

$$B = 1 / \sum_j P_{ij}^2 \quad (\text{R. Levins } 1968)$$

或 
$$B' = - \sum_j P_{ij} \log P_{ij} \quad (\text{R. Levins } 1968)$$

以上两式分别以 Simpson 公式和 Shannon—Wiener 公式为基础建立, 式中  $B$  和  $B'$  为物种  $i$  的生态位宽度,  $P_{ij}$  是与资源位  $j$  相联系的物种  $i$  个体的比例。上面计算方法很大程度上取决于所考虑资源种类的多少, 而忽视了物种对资源的利用效率, 因而人们曾提出一些较前述两种测定方法有了改进和使测定程序标准化的方法, 但它们对一般应用来说又过于繁重。

生态位理论的另一个中心问题涉及资源分享和数量或生态位重迭。人们对生态位重迭概念的理解也各不相同。考韦尔(R. K. Colwell, 1971)把被两个或更多相邻物种共同分享的几维生态因子空间的某个区域称作生态位重迭。皮洛(E. C. Pielou, 1972)提出了资源位上平均生态位重迭的概念, 并视之为资源位上种的多样性。梅依(R. M. May, 1974)认为生态位重迭是种间生态学相似性的标度。赫伯特(S. H. Hurlbert, 1978)则把生态位重迭定义为种间相遇频率高于或低于每一种所利用的每个资源

位与资源位丰富度之比值的程度。

计算生态位重迭的方法与计算生态位宽度的方法一样, 主要是来自对各种多样性指数的分析, 特别是根据对资源分割的分析。常用的生态位重迭计算公式有以下几个:

$$C_{MM} = 1 - 1/2 \sum_i |P_{Mi} - P_{Mi}|, \quad (\text{T. W. Schoener, } 1968)$$

$$O_{MM} = \sum_i (P_{Mi} P_{Mi}) / (\sum_i P_{Mi}^2 \cdot \sum_i P_{Mi}^2)^{1/2}, \quad (\text{E. R. Pianka, } 1973)$$

$$a_{M(m)} = \sum_i (P_{Mi} P_{Mi}) / \sum_i P_{Mi}^2, \quad (\text{R. Levins, } 1968)$$

$$L = (A/XY) \sum_i (x_i y_i / a_i), \quad (\text{S. H. Hurlbert, } 1978)$$

式中  $C_{MM}$ 、 $O_{MM}$ 、 $a_{M(m)}$  和  $L$  为不同的生态位重迭计测指数,  $P_{Mi}$  和  $P_{Mi}$  是与资源位  $i$  相联系的种  $X$  和种  $Y$  个体的比例,  $P_{Xi} = X_i/X$ ,  $P_{Yi} = y_i/Y$ ,  $x_i$  和  $y_i$  分别为与资源位  $i$  相联系的种  $X$  和种  $Y$  的个体数,  $X$  和  $Y$  是种  $X$  和种  $Y$  的个体总数,  $a_i$  是资源位  $i$  的丰富度。

虽然上述各公式都反映了物种在资源利用上的重迭, 但它们各有特点。其中莱文斯(R. Levins, 1968)公式所使用的重迭矩阵是不对称的, 即种  $X$  对种  $Y$  的侵占或影响与种  $Y$  对种  $X$  的侵占或影响不相等, 而赫伯特(S. H. Hurlbert, 1978)的公式则注重了资源位  $i$  之间在丰富度或可获得性( $a_i$ )上可能存在的差异。此外, 人们还曾提出其他计算生态位重迭的公式(如 M. Morisita, 1959; H. S. Horn, 1966; M. Lloyd, 1967; B. J. Rathke, 1976; 王刚等, 1984)。

在种群和群落生态学中, 现实生态位的计测与研究竞争对群落组成的作用和环境梯度分析关系密切, 因而是生态位理论的重要研究内容; 基础生态位与现实生态位之间关系的研究以及生态位形状的确定也受到生态学家的广泛重视; 此外, 利用生态位理论解释共存现象也已经十分普遍。总之, 生态位理论和实验研究正处于蓬勃发展时期, 还存在着许多的问题和争论, 例如, 竞争和生态位分离是否是引起种群进化和决定群落动态的重要因素; 生态位多样化假说是否适用于解释植物群落中的多种共存现象; 以及种间的生态位重迭是否必然伴随着竞争排斥现象等, 这些都有待于生态位理论的进一步发展来阐明。

#### 参考文献

- 1 Colwell R K, Futuyma D J. On the measurement of niche breadth and overlap. Ecology, 1971, 52: 567~576
- 2 Pianka E R, Competition and niche theory. In: R M May (ed), Theoretical ecology, 1976. (孙儒泳, 等译, 理论生态学, 1982, 116~143)
- 3 Hurlbert S H. The measurement of niche overlap and some derivatives. Ecology, 1978, 59: 67~77
- 4 Abrams P. Some comments on measuring niche overlap. Ecology, 1980, 61: 44~49
- 5 Slobodkitchoff C N, Schulz W C. Measures of niche overlap. Ecology, 1980, 61: 1051~1055
- 6 Odum E P. Fundamental of ecology (Third edition). (孙儒泳, 等译, 生态学基础, 1982, 228~233)
- 7 尚玉昌. 现代生态学中的生态位理论. 生态学进展, 1988, 5(2): 77~84

(东北师范大学草地所博士生导师祝廷成教授、张玉勋博士撰)

**生态位重叠** niche overlap 生态位理论研究中的一个中心问题, 涉及种群对资源的分享数量, 是研究群落结构和功能、资源利用对策、竞争和种间聚集、物种特化和泛化等生态学问题的基础。研究种群间生态位重叠, 可预测野生生物群落结构动态。同时, 可对野生动物管理及生物防治提供重要的理论依据。

自 1917 年 Grinnell 首先提出“生态位”一词后, “生态位重



叠”这一概念也随之产生,70年代初开始明确定义,但众多学者持有不同意见。Colwell(1970)等认为生态位重叠即两个种对一定资源状态的共同利用程度;Pielou(1972)的定义为某一资源状态上种的多样性;Hurlbert(1978)则把它看作是两物种在同一资源状态上的相遇频率。1984年王刚等将生态位重叠定义为两个种在其生态因子联系上的相似性,即两个种在生态学上的相似性。

生态位重叠指数是衡量生态位重叠大小的尺度。该指数的计算是通过建立一定数学模型来实现的,其中最简单的一个计测公式是 Renkonen(1938),Schoener(1968)等提出的:

$$O_{xy} = 1 - \frac{1}{2} \left( \sum_i |P_{xi} - P_{yi}| \right)$$

这里:  $P_{xi} = \frac{x_i}{X}$ ,  $x_i, y_i$  为利用资源  $i$  的物种  $x, y$  的数量。

$$O_{xy} = \frac{\sum_i \{[(x_i + y_i)/n] \log[(x_i + y_i)/n]\} - \sum_i [(x_i/N) \log(x_i/N) + (y_i/N) \log(y_i/N)]}{(x/N) \sum_i (P_{xi} \log P_{xi}) + (Y/N) \sum_i (P_{yi} \log P_{yi}) - \sum_i [(x/N) \log(x_i/N) + (Y/N) \log(Y_i/N)]}$$

这里:  $N = X + Y$ 。

Levins(1968)又提出一种生态位重叠的计测方法,也是经常被使用的一种:

$$O_{xy} = \sum_i (P_{xi} \cdot P_{yi}) / \sum_i P_{ni}^2$$

Hurlbert(1978)在对以上关于生态位重叠计测公式评价的基础上,提出一个新的计测方法:

$$O_{xy} = (A/XY) \sum_i (x_i y_i / a_i)$$

其中:  $a_i$  是可利用的资源状态;  $A$  是所有可利用资源之和。

$$O_{ab} = \frac{\int_D \min[f_a(x_1, x_2, \dots, x_n), f_b(x_1, x_2, \dots, x_n)] dx_1 dx_2 \dots dx_n}{\max \left[ \int_D f_a(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n, \int_D f_b(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \right]}$$

其中:  $a, b$  分别为种  $a, b$ 。

$f_a(x_1, x_2, \dots, x_n)$  和  $f_b(x_1, x_2, \dots, x_n)$  分别为种  $a$  和种  $b$  的生态位连续函数,  $D$  为  $f$  的定义域,  $D = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n, I_i$  为  $f$  在  $x_i$  轴上的定义区间。

$$I_i = \begin{cases} [0, \infty] \text{ 或} \\ (-\infty, \infty) \end{cases}$$

关于能否用生态位重叠来估计竞争是有争议的。Hurlbert(1978)等认为生态位重叠不能用来估计竞争。其主要原因:(1)当所考虑的资源没有稀少到限制消费者时,即使完全重叠也不会导致竞争。(2)竞争强度取决于消费者密度与资源密度之间的比例。如所有的资源在数量平分,竞争一般会更强烈,但重叠并不改变。(3)重叠是否引起竞争,要比较实际生态位重叠和基础生态位重叠值,如果无差异或为零,说明均无竞争(杨效文等,1992)。而 Pianka(1975)等认为竞争和生态位重叠是密切相关的。竞争的大小可用竞争系数来表示,竞争系数的估计,主要有三个公式:

$$S_{x(y)} = \left[ \sum_i x_i y_i / a_i \right] \left[ \sum_i x_i^2 / a_i \right] \quad (\text{Hurlbert, 1978}) \quad (1)$$

$$S_{x(y)} = \frac{\left[ \sum_j (K_j / r_j) W_{jx} a_{xy} \right]}{\left[ \sum_j (K_j / r_j) W_{jx} a_{xy}^2 \right]} \quad (\text{Lawlor, 1980}) \quad (2)$$

其中:  $K_j$  和  $r_j$  分别为资源  $j$  的容量及内禀增长率,  $a_{xi}, a_{yj}$  分别为种  $x, y$  对资源  $j$  的选择性,  $W_j$  是资源的相对值。

$$S_x(y) = \left[ \sum_i (P_{xi} P_{yi} / a_i^2) \right] / \left[ \sum_i (P_{xi} / a_i^2) \right] \quad (\text{Schoener, 1968, 1974}) \quad (3)$$

关于两个种的生态学可以相似到多大程度而仍然允许共同生存,也即它们的最大允许生态位重叠是多少,是使生态学家长期感到困惑的问题,建立在竞争群落中的生态位重叠模型,虽然

$P_{xi} = \frac{y_i}{Y}$ ,  $x, Y$  为物种  $x, y$  的总数。以下类同。

而被广泛使用的生态位重叠指数则来源于 Lotka-volterra 方程的“竞争系数”,包括:Morisita(1959),Horn(1966)提出的:

$$O_{xy} = 2 \sum_i (P_{xi} P_{yi}) / (\sum_i P_{xi}^2 + \sum_i P_{yi}^2)$$

和 Pianka(1973)提出的:

$$O_{xy} = \sum_i (P_{xi} P_{yi}) / (\sum_i P_{xi}^2 \cdot \sum_i P_{yi}^2)^{1/2}$$

Lloyd(1967)基于他的“平均拥挤度”的概念而提出:

$$O_{xy} = n \sum_i (P_{xi} \cdot P_{yi})$$

Horn(1966)基于 Shannon-Wiener 指数提出了:

上述关于生态位重叠的计测多是沿某一资源轴而进行的。对于运用 Hutchinson 关于生态位  $n$ -维超体积定义,有一定的难度(杨效文等,1992)。Green(1971,1974)运用多元判别分析,首次使 Hutchinson 超体积概念得到了应用。这在方法上是对生态位理论的研究是一个很大的推动。他在生态位重叠的计测方法是:生态位椭圆相交面积占用 2 个种累计面积的百分比。王刚等(1984)基于他们提出生态位重叠的定义,指出生态位重叠的计测应是种间生态学相似性的计测;

已经产生若干可检验的预测,但现有大多理论是按单个生态位维度制订的,而实际的植物和动物,常常沿两个或多个生态位维度显示出中等的生态位重叠,理想的情况是沿一个以上生态位维度的资源利用和生态位分割的多维分析,必然通过每一个分离的生态位维度估算所有资源的成比例同时利用来进行。可是实践上,取得多维利用数据极其困难。因而,如何建立一个更合理的生态位重叠模型,及其理论参数如何保变成可以应用于野外群落形式,也是生态学家们所关注并亟待解决的课题。

参考文献

- 1 Levins R. Evolution in changing Environments. Princeton Univ. Press, Puinceton, W J. 1986. 120
- 2 Pianka E R. The structure of Lizard communities. Ann Rev Ecol syst, 1973, 4: 53~74
- 3 Green R H. Multivariate niche analysis with temporally Varing environmental factors. Ecology, 1974, 55(1): 73~83
- 4 Hurlbert S H. The measurement of niche overlap some relatives. Ecology, 1978, 59(1): 67~77
- 5 Lawlor L R. Overlap, Similarity, and competition coefficients. Ecology, 1980, 61(2): 245~251
- 6 王刚,等. 关于生态位定义的探讨及生态位重叠计测公式改进的研究. 生态学报, 1984, 4(2): 119~127
- 7 杨效文,等. 生态有关术语的定义及计算公式评述. 生态学杂志, 1992, 11(2): 44~49

(安徽师范大学郑艳硕士撰,陈壁辉教授审)

食物网的结构与功能

生物群落中的一切生物都是通过取食关系(包括捕食和寄生)相互联系在一起,各生物物种彼此间形成的这种复杂的取食(营养)关系称为食物网。在不同的自然生态系统中,由于物种组成不同,食物网的结构也不相同。一定的食物网结构表现出一定的功能。研究食物网的结构与功能对有

害生物治理及人类的健康具有重要意义。

食物网的概念最早由达尔文(Darwin, 1859)描述。他在物种起源中指出,植物和动物,以及微弱的自然等级制通过复合关系的网状形式紧密地联接在一起。1880年卡梅兰诺(Camerano)完整地描述了食物网。卡梅兰诺描述的食物网树状图在功能上类似于今天生态学教科书中的食物网。1923年萨默海斯和埃尔顿(Summerhayes and Elton)报道了贝尔岛(Bera Island)的一个详细的食物网,接着1926年理查兹(Richards)研究了生活在松树上的动物食物网。尔后,群落食物网研究的主要方面有物种丰富度;利用多元统计方法对物种进行排序;对抽样物种进行群落多样性和稳定性理论研究。这些基本上是食物网结构研究。有必要从功能上对食物网加以深入研究。

1982年萨吉哈拉(G. Sugihara)把具有相同捕食者和相同猎物的物种看作一个单位,即具有相同食物和捕食者的两类物种营养上是等价的。1982年约德齐斯(P. Yodzis)提出把具有相似食物和捕食者的物种类群作为一个营养物种。1989年布赖恩和科恩(F. Briand and J. E. Cohen)在萨吉哈拉物种营养等价概念基础上,进行了物种的归类,并开始用营养物种研究食物网。一个营养物种可以就是一个生物物种,也可以是由若干种生物物种组成。一种生物物种的不同阶段(如稻纵卷叶螟的幼虫和成虫)可以属于不同的营养物种。营养物种的计数单位可用物种、生物量等。

食物网的结构可粗略地分为顶位、中位和基位物种。与此相对应的有4种营养链索,即基位—中位物种链索、基位—顶位物种链索、中位—中位物种链索和中位—顶位物种链索。1989年科恩(J. E. Cohen)根据113个食物网的研究成果,归纳出5个定律或规律性:(1)若排除自相残杀,环是很少的;(2)食物链通常是不长的,40个2维环境(平原)食物网平均链长为2.6,28个3维环境(如林冠)食物网平均链长2.7;(3)顶位、中位、底位物种的比例不变,该比例不随物种数的增加而增加或减少;(4)不同种类的链索比例不变;(5)链索与物种数的比例不变,如以物种数为横坐标,链索数为纵坐标,113个食物网曲线的斜率近似2。比例不变定律被更多的研究工作者所证实(A. Trombla, 1989; G. Sugihara et al, 1989; S. J. Hall and D. Raffaelli, 1991)。研究的栖境包括以无脊椎动物占优势的食物网、河口湾食物网等,假设S是群落食物网的总物种数,T、I和B分别是期望的顶位、中位、底位物种数;R和Y分别是期望的捕食者和猎物数,则:

$$S = T + I + B \quad (1)$$

$$R = T + I \quad (2)$$

$$Y = I + B \quad (3)$$

$$T/S = P \quad T = PS \quad \hat{P} = 0.2853 \quad (4)$$

$$I/S = q \quad I = qS \quad \hat{q} = 0.5251 \quad (5)$$

$$B/S = B = rS \quad \hat{r} = 0.1896 \quad (6)$$

把(5)–(6)两式相加除以(4)–(5)两式之和,则为:

$$Y/R = a \quad Y = aR \quad a = (q+r)/(q+p)$$

1989年科恩(J. E. Cohen)用图论的方法研究食物网物种间取食和被取食关系并导出一个食物网的营养链索总数。设 $C_n$ 为一个非环食物网中的n链索数, $n=1,2,\dots,S-1$ 。链长的频率分布是向量 $(C_1, \dots, C_{S-1}) \equiv C$ ,一个食物网的总链索数为:

$$C \equiv \sum_{n=1}^{S-1} C_n$$

还提出了用串联模型(Gascade model)研究食物网的结构。根据串联模型,具有S物种的食物网的n-链的期望数为:

$$E(C_n) = P^n q^{n-1} \sum_{k=n}^{S-1} (s-k) \binom{k-1}{n-1} q^{-k} \quad n=1,2,\dots,s-1$$

式中P为一条随机链索的概率。

除了食物的结构及模型研究外,对食物网中的物种组团和基石种的研究也非常活跃。例如1990年道比(B. M. Doube)对食粪甲虫功能团的研究;1991年福斯(J. E. Fauth)等对煤蛾 *Siren*

*intermedia* 与其基石种捕食者 *Notophthalmus viridescens* 间相互作用的研究。群落中基石种的功能对整个群落起着重要的作用,如果排除基石种,群落的结构和功能就会产生较大的变化。但上述研究,尤其是食物网的3个比例不变定律基本上是依据海洋、河口湾等栖境资料得出的规律,几乎还没有农田生态系统群落食物网的材料。在食物网的串联模型中仅考虑抽样物种数,而抽样物种数与抽样单位大小有关,以及该模型如何结合每一物种的数量还须深入研究。农田生态系统有害生物综合治理基本研究的突破点主要应放在食物网的结构与功能上。食物网的捕食者与猎物、链索一物种数比例不变定律可能对有害生物的生物控制理论和实践有着重要的指导作用,此外,食物网的组织化及其功能与环境保护、人类健康研究甚少,有待进一步深入探讨。

(江苏农学院吴进才撰)

## 竞争

重要的生物相互作用之一。生物群落的成员之间的竞争塑造着群落的结构,并且常常能影响群落中物种的多样性。介于与许多生态学过程(如动物迁徙、群落演替和资源利用)和人类经济活动(如作物栽培)等的密切关系,竞争的研究愈来愈受到人们的重视。

1929年,美国克利门茨(F. E. Clements)等在《植物竞争》中最早提出竞争的定义,认为竞争是生长在一起的植物之间为分享基本环境资源(光、土壤养分和水)而发生的争夺现象。后人们又提出了许多关于竞争的定义。但一个被广泛接受的具有生物学意义的定义是由唐纳德(C. M. Donald, 1963)提出的,即“当两个或多个生物寻求它们所需求的任何特定要素或东西,并且当这些特定的要素或东西的直接提供量低于这些生物的需求量之和时所发生的现象”。

习惯上,竞争的类型可以按照以下两方面内容划分:(1)相互作用实体的种类;(2)竞争者之间相互作用的机制。由前者可把竞争简单地划分为种内竞争和种间竞争,种内竞争是发生在同一物种内个体之间的竞争,而种间竞争是不同种间个体之间的负作用。由后者可把竞争划分为干涉性竞争和利用性竞争两个基本类型,干涉性竞争是一个个体直接影响另一个个体,如身体的攻击行为和领域的侵占;利用性竞争是间接的影响,只是通过减少资源的可利用量而实现的一个个体对另一个个体的影响。斯考纳(T. W. Schoener, 1983)按照竞争机制更精细地划分了6种竞争的类型,包括消费性竞争、优先占取竞争、优势生长竞争、化学竞争、领域竞争和遭遇竞争。

1859年,达尔文(C. Darwin)在专著《论通过自然选择的物种起源》中就论述了物种之间的竞争现象,但真正对生物之间竞争的研究是从英国坦斯雷(A. G. Tansley, 1917)开始的,他对生长在不同土壤类型上的两种猪殃殃属植物在竞争能力上的差异进行了比较研究。以后不但生态学家,而且遗传学家和进化论工作者也参与了竞争的研究。特别是1934年高斯(G. F. Gause)把生态位概念引入竞争的理论和分析中以来,有关竞争的理论工作和定量研究得到迅速发展。

1934年高斯在对两种草履虫进行实验室研究基础上,提出由于竞争的结果,两个相似的物种不能占有相同的生态位。同年,英国生态学会举行的近缘种生态学讨论会上,高斯的这种观点被称作高斯假说,即竞争排斥原理。对于高斯假说或竞争排斥原理,生态学家一直持有肯定、怀疑或否定等不同的看法(如G. E. Hutchinson and E. S. Deevey, 1949; J. H. Vandermeer, 1972; T. W. Schoener, 1974, 1982; J. L. Harper, 1977; L. W. Aarssen, 1987)。但高斯的竞争排斥原理在现代生态学中仍十分盛行,人们常把它同资源生态位分离和有限相似性一道看作是解释竞争和共存现象的理论基础,有人甚至把这些科学假说当作解释现象的公理。

种间竞争过程易于用数学模型表述。生态学研究中的著名的模型是洛特卡—沃尔泰拉方程,它们也是竞争理论中争论最多的问题之一,甚至对这些方程本身的研究被认为也是生态学研究

(D. Simberloff, 1982; T. Fagerstrom, 1987)。洛特卡-沃尔泰勒方程的基础是逻辑斯谛增长模型。(P. F. Verhulst, 1838; Pearl 等, 1920), 它们是由洛特卡(A. J. Lotka, 1925)在美国和沃尔泰勒(1926)在意大利分别独立提出的, 因而通常称为洛特卡-沃尔泰勒方程。

洛特卡-沃尔泰勒方程存在着一些缺陷, 如它们的假设前提缺乏生物学的真实性, 竞争系数不能独立于种内的竞争影响, 并常常混淆竞争相互作用的真实机制等。尽管如此, 这些模型确实对现代生态学理论的发展做出了贡献, 它们不仅提供了一种概念框架, 而且除了竞争系数外, 还帮助产生了许多非常有用的生态学概念, 包括平衡种群密度, 群落矩阵, 弥散竞争, 非线性等斜线等。

除了洛特卡-沃尔泰勒方程这类探索性数学模型, 关于竞争的研究还产生了一些描述性模型。它们常被用来概括现有的生态过程的知识, 对实际模式作出定性的预示。

用于探索自然中竞争的重要性的基本途径有 3 个, 即描述、比较和实验的方法。描述的方法是对从一群落中收集的数据进行统计处理, 寻求那些被研究者认为是由竞争造成的格局。简单的例子如 2×2 联列表的关联分析, 寻求任意种对之间正或负的关联格局。比较的和实验的方法是通过比较不同的系统, 以解决一个或更多的具体问题。比较的研究直接由描述的研究推导出, 首先用观测的数据描述格局, 然后比较得出的不同空间或时间位置的格局, 推论出过程的差异(包括物种丰富度, 生态位宽度和生态位重叠程度等), 进而反映出种间竞争的特点。这种方法首先是在植物群落生态学研究中得到充分发展, 以后被动物生态学家广泛接受和应用。在描述的和比较的研究中, 研究者不能控制独立的变量, 在实验的研究中, 研究者将对某些系统的一个或更多独立变量进行谨慎的控制, 并设置对相应变量不进行控制的对照系统。竞争的实验研究包括实验室研究和野外实验, 虽然这两类实验研究所回答的问题不同, 但它们都是以竞争可能以某种方式构造了一个群落这个假设为开端的。

在竞争的实验研究中经常采用的方法主要有以下 6 种, 即替换系列实验(F. J. Ayala, 1971), 附加实验, (J. L. Harper, 1977; E. I. Newman, 1983), 成对实验(E. J. Williams, 1962; C. A. McGilchrist, 1971), 去除实验(N. Fowler, 1981; E. T. Bauder, 1989), 加入实验(G. A. J. Platenkamp 等, 1990), 邻体实验(如 T. Kira 等 1953, S. C. Thomas 等, 1989), 同时陆续提出了一些与这些实验方法相联系的检测种间相互作用的指数、公式或模型。由于植物的固着特点, 所以易于采用以上方法进行实验研究。其中前 3 种方法多用于实验室研究, 后 3 种主要用于野外实验。实验室研究的缺陷主要是极端的、不真实和极有限的影响范围, 可以相信实验室研究所表明的竞争结果, 但用这种结果外推自然生态系统实际存在的竞争还存在疑问, 而野外实验已经揭示了许多关于种间竞争的自然范围, 在建立自然生态系统与竞争理论之间的纽带上前进了一大步。

尽管竞争处于众多生态学过程的核心部分, 但对它的研究仍不充分, 还存在着许多的问题和争论。因此, 科学地设计和进行实验研究, 探索竞争与共存、物种进化、物种多样性、生态位重叠或环境胁迫等生态学过程和现象之间的相互关系, 深入研究竞争相互作用的精密机制和其结果, 无疑对生态学的未来有重要意义。

参考文献

- 1 Diamond J M. Laboratory, field and natural experiments. Nature, 1983, 304: 586~587
- 2 Schoener T W. Field experiments on interspecific competition. Am Nat, 1983, 122: 240~285
- 3 Harper J L. Population biology of plants, 1977
- 4 Keddy P A. Competition, 1989

(东北师范大学草地所张玉勳、祝廷成撰)

**生物全息律** the bio-holographic law 1973 年山东大学张颖清发现了一个新的微针系统, 即人体第 2 掌骨侧穴位群。这一微针系统应用于临床, 取得了良好的医疗效果。他对 1560 个病例及羊的穴位分布及化学物质的分布情况作了分析后发现, 生物体上穴位的分布规律与生物体上独立部位上的穴位分布规律十分相似。相对独立部位上的穴位分布规律是整体上穴位分布图的成比例缩影。这种现象张颖清称之为“穴位分布全息律”。在穴位全息律的基础上, 他又发现任何生物体上相对独立部分上的物质分布规律也是整体上物质分布规律的成比例的缩影, 他把整体与部分上物质分布规律的相似性称为“生物全息律”。

1980 年的《潜科学》和 1981 年的《自然杂志》分别发表了《生物全息律》的论文, 1981 年在《自然辩证法通讯》上发表了《生物全息现象》。1983 年、1984 年、1985 年和 1987 年分别在内蒙古、山东、福建召开了全国性的生物全息律学术讨论会, 标志着生物学中的一个新分支学科在中国诞生。中国汪德耀教授认为, 经典生物学是从生物的宏观层次研究生物的生长、发育规律的; 分子生物学是从生物的微观层次研究生物的生长、发育规律的, 全息生物学则从生物的中间层次研究生物的生长、发育规律, 研究生物个体的整体与部分之间的全息相关规律, 填补了生物学层次研究的空白。是理论生物学和应用生物学一个重要研究成果。打破了生物个体的整体与部分、部分与部分之间的绝对界限, 是生物个体的进化论。在第 4 次全国性的生物全息律讨论会上, 张颖清又率先提出了“全息胚”的新概念, 认为无论是动物的体细胞, 还是植物的体细胞, 都具有潜在的发育成新个体的能力, 或者叫做体细胞的全能性。这种全能性不一定要在离体培养的条件下, 即在人工配制的培养基上才能够得到体现, 或者在核移植时才能得到体现。体细胞的全能性在动植物的个体本体上, 在自然生长条件下也有所表现。动植物个体本体是最好的天然培养基, 动植物体细胞的全能性也并不是被闲置而不用, 而是每时每刻都在表现着。虽然这种自主发育通常在亲体的个体本体上不能进行到发育的最后阶段, 成为一个完整的新个体, 但却毕竟在向着新个体发育着。通常动植物个体发育过程中器官和部分的发育, 其实不仅仅是整体的分化, 即各个相对独立部分的特化过程, 而且还有各个相对独立的部分的自主发育过程。并且, 自主发育过程是基本的过程, 而特化却是建立在这种自主发育过程的基础之上的。特化是在自主发育过程中才发生的, 没有相对独立的部分自单个体细胞开始向新个体的自主发育, 也就没有这一相对独立的部分的特化。在动物学中, 所谓胚胎就是从卵裂起到出卵壳或脱离母体前的正在发育的动物。在通常情况下, 一提到胚胎, 就会使人想到母腹中的胎儿, 在植物学中, 胚胎是指种子或颈卵器内由受精卵发育形成的幼体。在某些被子植物, 可由胚囊中未受精的卵、反足细胞和助细胞。甚至蕨类植物原叶体的营养细胞发育成胚。在这些情况下, 胚胎通常是能够发育成熟个体的发育单位。为了概括能够发育成新个体的发育单位和那些通常不能发育成新个体而只处于向着新个体发育的某个阶段上的发育单位, 张颖清提出了“全息胚”这个新名词。全息胚中的“胚”这个词体现了全息胚是一个发育单位, 体现着全息胚与原来意义上的胚胎有着本质上相同的性质; “全息”一词又使全息胚与原来意义上的胚胎有所区别。全息胚是生物体上处于某个发育阶段的特化的胚胎。全息胚的标志是, 在结构和功能上, 全息胚与其周围的部分有着相对明确的边界, 而又有着内部的相对完整性。自从“全息胚”这个新名词提出以后, 生物全息律就完整地表达为: 生物体上一个全息胚的各个部位都分别在整体或其他全息胚上有各自的对应部位; 全息胚的一个部位, 相对于该全息胚的其它部位, 与整体或其他全息胚上其所对应的部位生物学性质相似程度较大; 各部位在全息胚的分布规律与各对应部位在整体或其他全息胚的分布规律相同; 在生长轴线连续的两个全息胚, 生物学性质相似程度最大的两端总是处于相隔最远的位置, 从而总是对立的两极联系在一起。

张颖清认为, 全息胚是生物体上处于向着新个体发育的某

个阶段的特化的胚胎。全息胚具有15种性质：发育性；滞育性；生长性；发育的重演性；发育的镶嵌性；调整性；加成性；发育程度低于整体性；结构的可简化性；自律性；极性；遗传性；变异性；多型性；全息胚间联系的多样性。研究全息胚这些生命现象的科学就称为全息生物学。

1990年在新加坡召开了第1届国际全息生物学学术讨论会，1992年在挪威首都奥斯陆召开了第2届国际全息生物学学术讨论会。

全息生物学的研究，不断深化了人们对生物体的认识，有重要的理论意义，而且它还有着广泛的实用价值。人参自古以来都是以根入药，茎叶花果都不被重视，人们误认为只有人参的根才会含有较多的药用成分——人参皂甙。根据全息生物学原理，人参的茎叶花果和根一样，都是全息胚，人参根里的人参皂甙，茎叶花果里也会有这种成分。分析研究证明，人参皂甙在茎叶花果内的含量，有的比根还高，应很好地开发利用。生活在亿万年前前的古生物，很多早已灭绝，人们常常只能在地层中找到它们一些残缺不全的化石。全息生物学指出，高发育程度的全息胚，都是整体的缩影，这样，古生物学家也就可以依据化石所提供的部分全息胚来研究整体的形态，再现古生物整体的面目。在农业生产上，应用全息生物学的原理进行定域选种，是一项重要的增产措施。玉米果穗结在植株的中间，作为整体的缩影，玉米穗这个全息胚，就会是中部的籽粒长得最好，所以用中部籽粒作种用玉米，就能增产。全息生物学不仅使中国历史悠久的针灸疗法有了现代科学的理论基础，同时也给医学增添了一种新的诊疗法——生物全息诊疗法。全息生物学认为，癌是滞育在卵裂期或桑椹期发育阶段的全息胚，从而提出了新的抗癌战略：促进癌细胞的分化和发育以突破滞点，使癌细胞的发育穿出发育时间轴上的癌区而正常化。安全有效的全息胚分化促进剂这样的抗癌药物系列将为征服癌症开创新局面。山东医科大学李莱田根据全息生物学原理研究成功的“全息诊疗仪”，在南斯拉夫举行的第15届新发明展览会上获得了金牌奖，张颖清制成的“全息诊断仪”获得1988年北京国际发明展览银牌奖和第80届巴黎国际发明展览会的最高奖——巴黎市政府大奖。

全息生物学是一项很重要的基础性发现，然而，这一学科的出现较晚还应该组织力量在诸多领域进行广泛、深入的研究。

(上海农学院潘重光撰)

**海洋微型浮游生物** 1887年著名的生物学家V. Hensen 创用 Plankton 一词，将所有在水域中被动地漂浮着的生物名以浮游生物。人们曾按其个体大小分为6类：(1)巨型浮游生物 (Megaplankton)，个体大于1cm；(2)大型浮游生物 (Macroplankton)，个体大小5~10mm；(3)中型浮游生物 (Mesoplankton)，个体大小1~5mm；(4)小型浮游生物 (Microplankton)，个体大小50 $\mu$ m~1mm；(5)微型浮游生物 (Nanoplankton)，个体大小5~50 $\mu$ m；(6)超微型浮游生物 (Ultraplankton)，个体小于5 $\mu$ m。

在海洋浮游生物生态系统中，经典的食物链，集中地研究较大的浮游植物，如硅藻、甲藻，被捕食浮游动物如桡足类所消耗的问题。本世纪80年代以来，业已发现海洋浮游生物微型食物网在生态系统中占有相当重要的位置，起着本质的作用。这一食物网的主要特点是营养盐的快速更新、能量的高效转换，与碎屑紧密联系，以及具有复杂的摄食类型，包括吞噬营养。微型食物网中的初级生产者是一群个体很微小的浮游单细胞藻类和细菌，有时还包括较大种类生活周期中的一个阶段。它们是初级生产力的重要贡献者(可占初级生产力的50%~100%)。

微型浮游生物研究最早始于英国，Cole (1937)、Park (1949)、Knight—Jones (1950)等结合有商品价值的双壳类幼体的营养研究作过英国沿岸水域的一些微鞭毛藻的零星报导，但没有对微型浮游生物作专题研究。我国金德祥教授(1965)最早对厦门及附近水域的海产微型生物作了初步调查。直到近十几年才

得到重视并有较快进展，这主要与一些新技术的应用有关，使人们认识到了微型浮游生物在海洋生产力中的重要地位和作用。因此，近年来的工作主要集中在生物量 and 生产力研究方面，采用的测定技术有光学显微镜的细胞计数，荧光显微镜细胞计数，叶绿素的分光、荧光、色潜测定，<sup>14</sup>C测定生产力。

目前对微型浮游生物大小的划分还不很一致，因为研究者常根据自己的需要进行人为划分。1978年 Sieburth et al. 建立了一个较实用的大小划分系统，其划分等级相当于3个数量级，它们是：(1)小型浮游生物 (Microplankton)，大小20~200 $\mu$ m；(2)微型浮游生物 (Nanoplankton)，个体大小2.0~20 $\mu$ m；(3)极微型浮游生物 (Picoplankton)，个体大小0.2~2.0 $\mu$ m。后来的一些研究又发现很多浮游生物样品中以小于5~10 $\mu$ m的种类占数量优势，为了研究方便，有些人就用 Ultraplankton 一词来描述那些小于5~10 $\mu$ m的浮游生物。(Sitver et al. 1986; Shapiro & Guillard, 1986)。

微型浮游生物生产力：这是目前微型浮游生物研究中最引人注目且热门的课题，其中叶绿素和<sup>14</sup>C测定应用最广，生产力研究的最大成就是发现微型浮游生物在初级生产力中占了很重要的比例，尤其是在热带寡营养水域，它们可占初级生产力的80%或更多，它们比细胞较大的种类有明显的优势 (Malone, 1980; Li et al. 1983; Beinfang & Takahashi, 1983; Glover et al. 1985; Weber & El-Sayed, 1987)。

微型浮游生物的地理分布和垂直分布：微型浮游生物的分布极其广泛，在大洋或沿岸、热带至寒带、贫营养水域和富营养水域，事实上，微型浮游生物存在于几乎所有水域中。Joint (1986)总结了世界各海区超微型浮游生物对初级生产力的贡献，提出了它们的地理分布微型浮游生物在垂直分布上也存在差异。原核微型浮游生物适于在低光照下生长，因此，它们的最大分布区一般在亚表层，不仅叶绿素含量最大，细胞数也最多。Murphy & Haugen (1985)和 Glover et al (1985)的研究发现，微型浮游生物最大数量层位于营养跃层中，其上则主要是较大型的浮游植物及一些真核微型生物。对微型生物种类组成的垂直分布还知道的很少。据 Shapiro & Guillard (1986)报导，微型硅藻(还可能包括球石藻)是混合层微型浮游生物的重要组成部分，而在叶绿素最大值的亚表层则较少。在厦门港的表层水中微型硅藻在种类和数量上都丰富。

微型浮游生物的分类研究：电子显微镜的应用促进了这项工作的进展，然而，大多数微型浮游生物都很细弱，不易制成可供电镜观察的干燥样品，制样技术的困难阻碍了这项工作的进展。目前，除了具有较硬外壳的硅藻、金藻和少数硅鞭藻外，其它种类还不能作满意的观察。因此，未见有关微型浮游生物分类的专题报导。多数研究只集中于某个门类。Tomsen (1986)曾对微型浮游生物的分类研究作了综述。Seigel & Stein (1961), Leakbeater (1972), Metting (1980), Throndsen & Kristiansen (1988)对微鞭毛藻(也包括一些金藻)作了些研究; Durrschmidt (1980), Momeu (1983), Booth & Marchant (1987) Nicholls (1988)对金藻作了些研究; 在硅藻方面的研究相对较多，但尚未成为一个专题。大多数分类研究结合于生态研究中 (Belcher & Swale 1986; Takano 1980, 1981, 1982, 1983, 1985; Hasle 1978, 1980, 1983; Johansen & Fryxell 1985)。我们在微型浮游生物研究中，以小于20 $\mu$ m的硅藻为研究对象，称为微型硅藻 (Nanodiatom)。

生理生化方面研究：Glover (1985), Wood (1985), Lewis et al (1986), Joint (1986)等研究了光合作用机理，Brand (1986)详细介绍了微型浮游生物的营养机理和培养方法，O'Connors et al (1978), Throndsen & Kristiansen (1988)对微型浮游生物与污染的关系作了研究。

微型浮游生物作为经济动物幼体的饵料：作为幼体饵料小型细胞比大型的更好，在自然水体中小于10 $\mu$ m的浮游植物是组成具光合活性的浮游植物的大部分 (Manawar et al, 1978;

Malone et al. 1979 等),而这些微型的种类常常是海洋动物幼体的饵料(聂宗庆, 1964; 金德祥, 1965; Jorgensen, 1966; de Pauw, 1981; Enright et al. 1986)。当然,海水中的某些有机碎屑、细菌等也可能成为它们的饵料,但作用远不如微型生物的大。目前,幼体培养中的饵料几乎都是人工培养的单细胞微型藻类或商品性饵料,它们并不能真正代表幼体在自然海区中摄食情况。最可靠作法是了解幼体在自然海水中摄食情况,进行饵料组成的分析。但由于进行幼体消化道解剖分析难度大和微型浮游生物一般较细弱,绝大多数在被摄入后很快被消化或磨碎成难以鉴定的碎屑颗粒。因此,这一问题至今还未被解决。

总之,对微型浮游生物的生物量、生产力及其在食物网中的作用是世界微型浮游生物研究中做的最多的课题。滤膜过滤法(滤膜孔径一般为 0.2~0.5μm)被广泛用于测定微型生物的生物量和生产力,但需考虑那些群体生活的和具胶质丝、毛等附属物的种类利用膜过滤出现的误差。对于微型浮游生物的分类研究,在微鞭毛藻和具有硬外壳的硅藻、金藻方面做得较多,其它藻类相对较少,主要进行种类描述,至于某一水域的群落,季节演替,地理分布等尚未见系统的专题报导。培养微型浮游生物大多采用的稀释培养法在种类方面不一定齐全,但它可以得到数量较多,种类较纯的结果,有利于进一步深入研究,微型浮游生物对不同培养基的反应很不一致,某一培养条件不一定适合所有种类,成功的培养基要尽可能地适合于尽可能多类别的种类。值得提出有些种类不能培养或在培养中失去某些特征而难于鉴定,如何观察贝类等幼体的食料组成?为什么微型的种类在不良环境中比细胞较大的种类可更好地生活?等等,还有许多研究方法尚待完善,许多领域有待开发。

参考文献

- 1 高亚辉,金德祥. 海洋微型浮游生物研究进展. 福建水产, 1989, (3), 33~37
- 2 Glover H E. Photosynthetic characteristics of picoplankton compared with those of larger phytoplankton populations in various water of the Gulf of Maine. Biol. Oceanogr. 1985, 3: 223~248
- 3 Joint I R. Physiological ecology of picoplankton in various oceanographic provinces. In: Platt T, Li W K W. (eds), Photosynthetic Picoplankton. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci. 214, 287~309
- 4 Li W K W, et al. Autotrophic picoplankton in the tropical ocean. Science. 1983, 329: 292~295
- 5 Platt T, Li W K W. Photosynthetic Picoplankton. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci. 1986, 214, 583
- 6 Weber I. H., El-Sayed S Z. Contributions of the net, nano and pico-plankton to the phytoplankton standing crop and primary productivity in the Southern Ocean. J. Plankton Res. 1987, 9: 973~994

(程兆第撰)

细胞学

细胞分类学

cytotaxonomy 又称核型系统学。细胞水平分类性状识别、描述分类阶元,并探讨其亲缘关系的学科。主要研究对象是细胞核染色体,即有丝分裂和减数分裂染色体的数目、形态、结构及行为等,研究的是核型,它可分为常规核型和分化核型两个类型,后者又称带型。细胞分类学的基础是在特定的阶元中的整个生命周期,各个组织器官显示出相对稳定的核型,和染色体上基因的位置效应。细胞分类学是细胞遗传学与分类学相互渗透形成的交叉学科,为分类学走向自然分类增加一个重要层次。50年代后,由于低渗、秋水仙碱(素)(纺锤体抑制剂)、PHA(植物血球凝集素)、空气干燥和细胞培养技术的应用,特别

是70年代后,带型技术的发展和原位分子杂交技术的应用,使得染色体研究有了很大的发展,各类生物的核带型报道大量涌现,还有专门期刊出版。

体细胞二倍体(2n)染色体是由2个亲本的同源染色体组成的,生殖细胞为单倍体(n),比正常二倍体染色体数目多余染色体,称为超数染色体,或称B染色体。核型中与性别分化相关的称为性染色体,其余的通称常染色体。染色体是由染色质组成的,间期呈现密状者叫异染色质,其余的为常染色质。根据染色体大小和有无明显的着丝点,可以分为大染色体和微小染色体2种类型。大染色体根据着丝点的位(弥漫性着丝点无固定位置)分为(1)中部着丝点(M)、(2)亚中部着丝点(SM)、(3)端部着丝点(T)、(4)亚端部着丝点(ST)等4种类型,在哺乳动物中还用近端着丝点(A)染色体的名称。其类型通常用臂比值(长臂/短臂)来划分(Levan等, 1964);臂比值1.0~1.69为M, 1.70~2.99为SM, 3.0~6.99为ST, ≥7.0为T, A介于ST和T之间。着丝点把染色体分为2个臂,通常有长臂(q)和短臂(p)之分。一般M和SM计2个臂, T计1个臂, ST和A计臂尚不统一,或1个或2个臂,臂数(NF或AN)是重要的核型参数。另外,次缢痕(h)的数目和位置、随体(Sat.)、相对长度 =  $\frac{\text{每一染色体长度}}{\text{单套基因组(包括X或Y)总长度}} \times 100$ 亦是核型参数。如猕猴 2n = 42(16 + 24SM) + X(M) + Y(ST), NF = 84, 20Ph., 峨眉髭麝 2n = 26(24m + 2sm), NF = 52, 6qh, 昆明龙蜥 2n = 34(12V + 22m), NF = 46(爬行动物有鳞目有微小染色体,以m表示,双臂染色体V表示,单臂染色体以I表示)。

对于减数分裂染色体,通常以其二价体的数目、形状、交叉数目和位置,是否出现多价体等为研究内容。近来,不少学者把前期偶线期——粗线期存在的非永久性核内细胞器——联合复合体(简称SC)作为重要的研究内容,即SC核型分析。由于染色体较长,便于测量,可得到比有丝分裂更精确的核型数据。重要的是它可用于观察和研究同源染色体的联合、交换、分离、倒位和易位等结构变化和性染色体的来源等。

受某些昆虫的多线染色体带纹的启示,以染色体DNA碱基对非随机排列为假设,1969年Caspersson,首先用合成荧光染料成功地显示了染色体的Q一带后,发展了一系列显示染色体结构的显带技术。常用的有以下几种:G一带是用碱、酶、尿素等处理染色体,使其呈现深浅相间的带纹;以80℃左右的磷酸缓冲液处理可得与G一带相反的带纹,称R一带;通过同步处理获得较长的前中期或后前期染色体,可显示比G一带更清晰更多的带纹,即高分辨G一带。C一带可显示着丝点和其他异染色质区域;银染技术与NOR(核仁组织者区域)、具有活性的28S + 18S rRNA基因、次缢痕相关。BrdU渗入使染色体出现DNA复制类型的分化染色,形成复制带。还有碱基特异性荧光带, Hoechst 33258, 阿的平、吖啶黄、Distamycin A等为AT-特异性染料;色霉素、光神霉素、放线霉素D等为GC-特异性染料。近年来,有了可对C一带及异染色质区域异质性作差异研究的内切酶带。一般认为带型的产生是染色体经过预处理后,由于核蛋白的选择性提取的产物,是染色体的DNA、蛋白质和染料三者相互作用的结果。

对于各类生物大量的核带型研究,表明细胞分类有以下几个意义。

核带型的趋异以识别类群;研究阶元分化和物种形成。相同等级内分类阶元间,例如门内纲间、纲内目间、目内科间……以至种内亚种间,亚种内居群间表现出不同的核带型,借此,以检索和鉴别各别分类阶元。以脊椎动物为例,哺乳纲除原兽亚纲有少量微小染色体外,均为大染色体,而鸟纲及爬行纲的核型则有大量的微小染色体;七鳃鳗目有较多(2n > 100)染色体,且多为T染色体,而盲鳗目则有数目较少的双臂染色体。在有尾目中,小鲵科含有 2n > 46,且有许多微小染色体,而蝶螈科和无肺螈科则为 20 和 26~28;人科与猩猩科之间 Ag-NORs 的分布和数目也有很大的差异。眼镜鳄属与鳄鱼属相比,前者 2n = 42, 后者 2n

= 30-34。棘蛙属内不同种间呈现差异,双团棘胸蛙,棘肛蛙和棘脚蛙的  $2n$  分别为 64, 40 和 26; 麂属内赤麂  $2n=6$ (♀), 7(♂), 而小麂  $2n=46$ 。最近,在云南高黎贡山发现一新种——贡山麂,  $2n=8$ (♀), 9(♀)。而原误定为费氏麂其  $2n=14$ (♀), 15(♂), 二者间的核型差异纠正了原来的误定。腹斑掌突蟾与高山掌突蟾的  $2n$  分别是 22 和 24, Ag-NOR 的位置也不同。黑鹿不同亚种间核型有差异,印度黑鹿  $2n=58(12M+44A+XY)$ , 而云南黑鹿  $2n=62(8M+52A+XY)$ 。在一些广布种较多存在着不同居群,生态宗间的核型差异,如蛙鱼类中就种内核型多态现象。阶元间的核型分化,查明其间的染色演化机制和方向,以建立系统发育图。若阶元间的分异时间是已知的,那么就可以定量研究每一个重组的时间。染色体演化与同域物种形成有密切关系。

阶元间的核型相似用以探讨共同起源和祖先型,追溯同源性,爬行纲与鸟纲有数目不等的微小染色体,大染色体的 G-带相似,人类与猩猩之间 G-带相似,硬骨鱼类许多目核型都由 48 个 T 组成,晰蜴类各科都不  $2n=36(12V+24m)$  蛇类都有  $2n=36(16V+20m)$  等,表明它们的共同起源和同源性。灵长类中从倭狐猴出发,用 G-带可以追溯人类各个染色体的来源。核带型研究表明家鼠属中黑家鼠具有原始核型。

核型的分化是通过染色体重组实现的,常见的是:(1)罗伯逊易位,即着丝点分离和融合,  $M \leftrightarrow 2T$ , 引起染色体数目的改变;(2)易位和倒位,导致数目、臂数和内部结构排列变化;(3)常染色质转变为异染色质和异染色质的生长;(4)多倍体化,即基因组重复,等等。

已有资料表明类群间的染色体演化速度是很不相同的,如哺乳动物较快,无尾两栖类较慢。核型的保守和分化,取决于诸多因素,特别与物种形成的方式和隔离机制相关。核型演化理论已知的有:(1)循环理论(  $\square \rightarrow T \rightarrow A \rightarrow M \rightarrow \square$  ) (IMAI, 1978); (2)隧道模式理论(BicKham & Baker, 1979)。

核型作为一类性状,也有演化方向和极性(Polarity)问题,在多数情况下,微小染色体逐渐消失,单臂染色体融合为双臂染色体,染色体数目由多变少。但是也有不少类群中有相反的过程。因此,核型极性的确定要综合形态学,地理分布,古生物学资料及其他进行分析。同样,核型也有平行演化和趋同演化现象。核型作为一种分类性状,同样应遵循后验加权的原则。

细胞分类学将随着细胞遗传学和生物分类学的发展和进步,为提高生物分类的预见性作出更大的贡献。但它不可能也不应该回答生物演化和物种形成中的全部问题,但却是一个十分重要的组成成分。

#### 参考文献

- 1 Imai H T. J Theor Biol. 1978, 71: 619~637
- 2 Atchley W R. Woodruff D. Evolution and Speciation, Cambridge Univ Press London. 1981
- 3 施立明. 动物学研究, 1984, 5(1)(增刊): 1~12
- 4 King M. Syst Zool. 1985, 34(1): 69~75
- 5 李树深. 生物学通报, 1986, 8: 1~4
- 6 Schmid M. et al. Chromosoma (Berl.) 1988, 96(4): 283~290  
(云南大学李树深教授撰)

**胞间连丝** plasmodesma 胞间连丝是植物细胞的重要结构特征之一,是共质体运输的有效途径。它联结两个相邻细胞的原生质体,致使两细胞的细胞质可以互相流通,相关的刺激得到传导,某些代谢物质得到运转,构成原生质的连续性,使多细胞植物体形成完整统一的整体。

1879年,坦格(E. Tangl)在马钱子胚乳细胞中发现胞间连丝。1882年由德国斯特拉斯布格命名。随后,许多学者致力于这一结构的研究,但早期受技术条件的限制,胞间连丝的精细结构与生理功能均未得到充分揭示。直到20世纪50年代,对于胞

间连丝能否转运有机溶质仍意见分歧。随着电子显微镜、标记物的体内示踪等新技术的广泛应用,胞间连丝的内部结构与功能才逐渐被揭示出来。

胞间连丝结构非常复杂。据1971年罗巴兹(A. W. Robards)的研究资料证实,它是一个贯穿细胞壁的管状结构物,相邻两原生质体借质膜通过连丝孔道而连接;质膜进入孔道后构成胞间连丝的外围,直径约40~60nm;内质网通过孔道时受约束而紧束成连丝小管,直径约20nm,由蛋白质亚单位构成;中央与细胞壁垂直方向有一条电子密度深的线,称为中央棒;质膜与连丝小管间充满细胞质,横断面呈环状,称为孔环;在胞间连丝两端,由于连丝小管与质膜间的间距缩小,孔环随之收缩形成颈区。但不同学者根据自己的实验资料,对结果有不同程度的修正。事实上,胞间连丝结构随植物或组织、发育时期和生理状态的不同而有所变化。

胞间连丝的形成主要有两种方式:(1)初生形成。细胞分裂末期,纺锤丝在靠近两极处消失,中间的纺锤丝保留下来;微管的数量增加并向四周扩展,形成一个筒状结构,称为成膜体。同时,内质网由两极通过纺锤体的细丝向赤道区移动,并在赤道区形成直径20nm的小泡和200~500nm的“成膜颗粒”;高尔基器也分出小泡,三者沿赤道面排列,并融合成细胞板。内质网在细胞板孔道中的存在,可阻止囊泡内成壁物在此沉积,从而始终保持这两团被分割的胞质之间的联系;在细胞板或膜的约束下,这段内质网进一步转变为连丝小管,随着质膜的相接,组成外周界限,胞间连丝即告形成。(2)次生形成。即在已经长成的非分裂细胞间形成胞间连丝的过程。1983年,西古尔(Seagull)对玉米、萝卜、高粱和白轴草等四种植物的根尖分生组织等直径细胞和延长区细胞径向壁上胞间连丝的频率与分布进行了比较研究,发现延长区细胞的壁较等直径细胞的壁扩展了4倍,胞间连丝的频率并不减低,特别是玉米,由等直径细胞壁上平均每平方微米3.1条,明显增加到12.9条。这说明在细胞延长过程中发生着胞间连丝的次生形成。1985年,杨世杰利用瓦里安娜凤仙花/奥利佛凤仙花和蚕豆/向日葵两个嫁接组合中获得大量次生胞间连丝的电镜照片,证实接穗与砧木细胞间有胞间连丝的次生形成。1987年,宾丁(Binding)用龙葵和马铃薯的原生质体混合培养得到细胞嫁接嵌合体,在种间细胞壁上观察到次生胞间连丝。1987年,郑国钊证实百合花粉母细胞染色质穿壁运动前(细线期到偶线期)有次生胞间连丝的形成。

次生胞间连丝形成机理。1972年,琼斯(M. G. K. Jones)基于酶作用的观点提出一个假说,他认为胞间连丝的次生形成可能按两种方式进行,一种是内质网释放水解酶,使细胞壁两侧内陷,半连丝相对发展,而后相互融合。另一种是从细胞壁的单侧开始内陷,直到细胞壁的另一侧,最后完成连丝的贯穿。1987年,郑国钊等研究百合花粉母细胞染色质穿壁运动前胞间连丝次生形成时,发现大量水解酶由内质网通过类溶酶体小泡或直接分泌到膜附近。1985年,杨世杰用连续超薄切片证明嫁接组合中半连丝的真实存在。

胞间连丝在胞壁的分布密度。不同组织、不同生理与发育状态及胞壁的不同部位,有明显变化,一般在  $1 \sim 10/\mu m^2$ ; 在次生加厚的胞壁中,初生纹孔场分布密集,局部密度可达  $30 \sim 40/\mu m^2$ 。值得注意的是,凡细胞间物质交流频繁、强烈的,其连丝分布密度高;细胞的纵向端壁比横向侧壁高。

胞间连丝的结构形式。罗巴兹把胞间连丝的结构分为5种类型:(1)无连丝小管的简单形式,主要出现在低等藻类中;(2)具松散内质网的连丝,常出现在细胞分裂时细胞板形成后期;(3)具紧缩内质网的连丝小管;(4)连丝在壁的中部形成瘤状体,中部出现空腔,系由正常的内质网膨大而成;(5)分叉连丝,常出现在筛管和伴胞之间。

胞间连丝的生理功能,主要是在植物细胞间运输物质与传递信息。目前研究资料证实的功能有:

运输电解质 1950年,伦德高(Lundegardn)提出胞间连丝

可作为盐类传导的途径。1950年初, 姜成后在测量生活组织的电流与分布中发现植物薄壁组织中细胞间通过胞间连丝有“电偶连”现象, 证实离子在组织内转移的最有效通道。范斯特文尼克 (Van Steveninck) 用离子定位术和 X 射线能谱分析法研究, 证明 [Cl<sup>-</sup>] 经胞间连丝运转。

**运转光合作用的中间产物** 1971年, 利特斯 (W. M. Laetsch) 发现在 C<sub>4</sub> 植物的 CO<sub>2</sub> 泵运转过程中, 叶肉细胞和维管束鞘细胞之间存在着辅酶 I (NADPH) 和磷酸谷氨酸 (PGA) 等物质的频繁交换, 明确显示出光合作用中间产物在细胞间的运转, 而这些物质的运转都是通过胞间连丝进行的。王美琪也在水牛草和玉米的叶切片电镜图中发现这种胞间连丝通道。

**多肽类物质的迁移** 1985年, 欧威 (M. G. Erwee), 古德温 (P. B. Goodwin) 等利用微电极注射荧光标记多肽的技术, 追踪引入原生质体内标记物的动向, 发现一般胞间连丝可允许通过分子量为 700~900 的多肽物质, 而重建的胞间连丝可允许通过分子量为 1700 的多肽物质通过。

**细胞器的穿壁运动** 自 1908 年盖茨 (Gates) 在月见草的花粉母细胞中发现通过细胞融合道有核物质的穿壁运动后, 国内外学者先后证明, 在生长旺盛的组织和衰老的器官中, 原生质和其包含的各种细胞器和团粒都可穿过连丝进行细胞间的运动。目前已在 42 科, 102 属以上的植物中观察到这种现象。据生化分析和显微定位显示, 这种运动是由具有 ATP 酶活性的和类似动物肌肉的收缩性蛋白来推动的。1973 年, 姜成后在衰老的大蒜叶片及鳞片组织中观察到局部解体的原生质有穿过薄壁组织最后向维管束集中的趋势; 在蒜鞘细胞加厚过程中, 细胞核呈多种不规则形态, 有些核解体, 核物质扩散, 原生质从越变越窄的细胞腔向邻近细胞转移; 当细胞分化完成后, 原生质则穿越连丝撤离。1975 年, 郑国绍在百合花粉母细胞减数分裂前期特别是在凝线期, 发现花粉母细胞由细胞融合道互相贯通连成一片, 花粉囊内的所有花粉母细胞集合在一起好像一个多核细胞, 其间出现川流运动; 由于细胞融合道的协助, 细胞内的细胞质、细胞器以及遗传物质, 都可以从一个细胞经通道转移到另一个相邻细胞, 一个接一个地向同一方向或相反方向转移; 到晚粗线期, 毡绒层细胞为二核期, 这时细胞质内组分的穿壁运动才停止。

**传递信息, 控制细胞的分化与发育** 19 世纪末, 有人将细胞置于高渗蔗糖液中使其质壁分离, 然后将细胞质的原生质团取出并分成两团, 在适宜的条件下培养, 有细胞核的一团 2~3 天内可形成新的细胞壁, 而无核的一团则不能; 但是, 如果将无核原生质团通过连丝与邻近的细胞原生质相连, 就可形成新的细胞壁。这说明形成细胞壁的信息或电波是由细胞核发出并通过胞间连丝传递出去。1976 年, 克里克 (Crick) 证实, 发育信号——造型素也是通过胞间连丝传递到各组织器官的, 传递的方式主要以激素或电波的形式来完成。

**传播病毒** 1969 年, 基泰吉迈 (E. W. Kitajima) 观察到大丽花花叶病毒感染百日草的细胞中有病毒通过的胞间连丝约占总数的 1%, 其孔径也明显增大一倍多。1983 年, 吴小洁等证明小麦黄化卷叶病类立克次氏体 (RLO) 胞间转移的位置在纹孔区或胞间连丝密度较高的区域, 通过的颗粒直径一般在 200~600nm。现在已知有 20 种病毒可以通过胞间连丝在细胞间转移。

胞间连丝转运的动力主要有 3 种: (1) 细胞质的环流; (2) 共质体系统内溶质的不平衡状态, 即浓度梯度; (3) ATP 酶的活性和收缩性蛋白的运动。

从分子水平研究胞间连丝的超微结构, 将有很大的发展前景。由于胞间连丝的生理功能是一个活跃领域, 进一步的工作将是向生化机理和分子水平发展。

**参考文献**

- 1 Robards A W. The Ultrastructure of plasmodesmata protoplasmata, 1971, 72: 315~323
- 2 A. JI. 库尔萨诺夫. 植物体内同化物的运输. 北京: 科学出版社, 1986. 57~69

- 3 张伟成, 等. 高等植物的有机物运输. 北京: 科学出版社, 1987. 8~18
- 4 姜成后. 植物生理学专题讲座. 北京: 北京科学出版社, 1987. 109~112
- 5 杨世杰, 等. 植物学通报, 1989, 6(3): 129~135

(山东济宁师范专科学校王玮副教授撰)

**核仁的类型 morphology of nucleoli** 细胞核的核仁是一个重要的动态细胞结构, 在细胞分裂周期中发生一系列的变化, 分裂早期开始分解, 中期和后期消失, 分裂末期染色体上的特殊部位的核仁组织者 (NOR)-rRNA 基因存在的地方, 再次开始形成核仁结构, 并逐渐增大, 融合成一个或几个核仁, 在间期细胞中核仁持续存在, 核仁中含有 200 多种蛋白质, 细胞所有的生命活动都和核仁的结构和功能相关, 不同的核仁形态很不相同, 在电子显微镜下依其不同组分和不同分布可把细胞的核仁分为 3 种类型。不同的类型反映细胞不同的生理和病理状态, 和细胞的增殖、代谢活动紧密相关。研究核仁, 对研究细胞的生长发育、癌变和逆转及临床诊断上都有重要意义。

1951 年 Estable 首先用银染技术在光学显微镜下观察到核仁的丝状结构, 1952 年 Benhard 最先用超薄切片电子显微镜技术观察了核仁的丝状结构, 随着新的包埋剂和新的固定液醇类和锇酸的应用, 核仁的结构得以很好的保存, 使能够较好的观察核仁的结构。1968 年 Benhard 首先报道核仁至少有 4 种重要成分, 其中的纤维成分和颗粒成分交织成网, 1969 年 Recher 最先把网眼内低电子密度的物质叫纤维中心, 1983 年, 1984 和 1986 年 Schwarzacher Goessens, Fakan 都分别确认核仁的 4 种重要成分为纤维中心, 致密纤维成分, 颗粒成分和核仁的染色质。依其主要成分的不同分布把核仁分为 3 种型。环状的类型; 1970 年 Busch 认为这是一种无活性的核仁。主要在正常的细胞中发现, 如无活性的外周血的小淋巴细胞, 核仁内有一个大的电子密度低的纤维中心, 外周有大量的致密纤维成分相围绕, 并附有少量的颗粒成分。网状型的核仁; 致密纤维成分和颗粒成分交织成网, 网眼内有电子密度低的纤维中心, 这样的核仁多在代谢活跃的细胞中发现, 如 PHA conA 刺激的淋巴细胞, 以及培养的瘤细胞等。致密型的核仁; 有大量的颗粒成分, 纤维中心由埋在颗粒成分的纤维成分围绕, 常常在恶性细胞中发现。

1. 纤维中心。是核仁的最内层结构, 1969 年是 Recher 首先提出的, 但不是所有的动植物细胞都能见到, 在核仁的中央区呈现出小的、圆的区域, 占核仁总体积的 5%, 含有直径为 5nm 的纤维, 在电子显微镜下呈现出低的电子密度, 有强的嗜银性, 1974 年 Goessens 证实了纤维中心相当于核仁组织者, 1979 年 Busch 证实了纤维中心含有的银染蛋白是 C23 和 B23 蛋白, 1982 年 Arrouq 证实了纤维中心含有 rRNA 基因, Busch 1979 年报道纤维中心的数目、大小和形状和癌变有关。

2. 致密纤维成分。由直径为 4~10nm 的细丝构成, 大约占核仁总体积的 15%, 是核仁发生时首先形成的, 1975 年 Royal 发现纤维成分相当于转录的 rRNA 基因或核糖体的前身 (45sPre-rRNA), 纤维成分内存在 rRNA 染色质并与 Ag-NOR 蛋白相联接, 1996 年 Wachtler 用原位杂交荧光显示法证实致密纤维成分也含 rDNA, 是 rRNA 合成和 rDNA 转录的地方。

3. 颗粒成份。由直径 20nm 左右的核糖蛋白组成, 致密型的核仁颗粒成份占核仁总体积的 70%~80%, 含 28s rRNA, 32s RNA。

纤维中心的数目银染蛋白的量最能反映出 rRNA 转录活性的情况, 并能代表核仁的功能水平, 1979 年 Busch 用计数的方法统计了大鼠正常肝细胞中银染颗粒为 4.4/核仁, 再生肝为 15.3/核仁, 肝癌为 21/核仁, 1991 年吕桂芝等用图相分析仪定量分析法测得丁酸钠处理的人胃癌细胞核仁银染颗粒所占面积与核总面积的比值明显和分化低于未处理的人胃癌细胞的此比值, 说明了银染蛋白与细胞增殖紧密相关, 1980 年 Wachtler 报

道了活化的淋巴细胞与非活化的淋巴细胞纤维中心的体积不同,1984年Mirre等报道了小鼠卵细胞纤维中心的数目和体积与核仁的活性相关,1988年Zatspina等报道了rRNA基因活性影响红细胞生长过程中成幼红细胞核仁纤维中心的数目和大小。这些事实证明了纤维中心与细胞增殖和代谢活动的相关性。

1970年Busch报道核仁的类型与细胞的生长速度紧密相关,癌细胞的生长速度快代谢旺盛,一般呈现致密型的核仁,而正常的细胞生长缓慢,核仁多为无活性的环状类型。细胞的不同发育阶段核仁的类型也是不相同的,1972年Smetana等观察到蛙红细胞的成熟过程中核仁的类型不同,从前成红细胞到红细胞核仁从大的致密型核仁到网状型的核仁,最后变为环状的核仁,1986年Wachtler发现PHA激活的人外周血的淋巴细胞经过从环状到网状的及致密型的改变,并用原位杂交荧光显示法证实PHA激活的人外周血淋巴细胞rDNA荧光点数目增多,表明rRNA和rDNA转录活性的增强,代谢活动和增殖的旺盛,1991年吕桂芝等用平行超薄切片技术证实丁酸钠处理的人胃癌细胞核仁的类型由网状型向环状型的改变,说明丁酸钠抑制增殖诱导分化与核仁类型的改变相关,这些事实提示,核仁类型与细胞增殖分化和代谢活动的相关性,可望用于临床癌症诊断。

#### 参考文献

- 1 Bernhard W, et al. *Ultrastructure in Biological Systems*, vol 3; *The Nucleus*, Academic Press, New York, 1968, 81~149
- 2 Recher L, et al. *Ultrastructure Research*, 1969, 29: 1~14
- 3 Busch H, et al. *The Nucleolus*, Academic Press, New York, 1970
- 4 Wachtler F, et al. *Cell and Tissue Research*, 1980, 213: 310~360
- 5 Mirre C, et al. *Protoplasma*, 1984, 121: 120~128
- 6 Zatspina O V *J cell Sci*, 1988, 91: 439~488
- 7 吕桂芝,等. *实验生物学报*, 1991, 24: 317~323

(北京市肿瘤防治研究所细胞生物学室吕桂芝研究员撰)

## 细胞膜结构

structure of cell membranes 细胞膜又称质膜,它是包裹在细胞质外的一薄层结构,为细胞的重要组成部分。

细胞与环境之间进行物质交换,识别环境变化以及许多其他的特殊作用,都是通过细胞膜进行的。细胞膜的研究涉及细胞起源、细胞病变、细胞衰老以及物质转运、神经传导、细胞识别、免疫、激素和药物作用等一系列生命基本功能。正确认识细胞膜的结构与功能的关系不仅有重要的理论意义,而且对解决工、农、医等方面的实际问题也有重要作用。因此,细胞膜结构与功能的研究是当前分子生物学和细胞生物学的重大课题之一。

细胞膜主要由脂质和蛋白质构成,此外还含有少量糖,以糖蛋白或糖脂存在于膜上。其中,脂质以磷脂为主,是构成细胞膜的基本物质。在细胞膜中脂质排列成双分子层,厚度约 $50 \times 10^{-10}m$ 。因此,细胞膜的基本结构是脂质分子双层结构(脂双层)。这一概念首先是荷兰柯特(E. Gorter)和格林德尔(C. Grendel)在1925年提出的。他们通过红细胞表面积和脂质单层面积的测定,认为细胞膜不可能是一种简单的单层脂质分子而应由双层脂质分子构成。

关于细胞膜结构,数十年来出现几十种假设和模型。比较影响的膜结构模型是1935年坦尼厄利(J. F. Danielli)和达费逊(H. Davson)提出的夹板模型(又称D-D模型)。他们认为,连续的脂双层是构成膜结构的主体,而膜蛋白呈球状,对称地分布在脂双层两侧。1958年,罗伯逊(J. D. Robertson)在此基础上又提出单位膜概念,认为单位膜是细胞膜以及其他一切生物膜(如线粒体膜、细胞核膜、溶酶体膜等细胞器膜)的基本结构。单位膜由连续的脂双分子层构成,其中磷脂的非极性端面向膜内侧,极性端面向膜外侧;蛋白质为伸展的纤维状蛋白,以 $\beta$ 折叠形式通过静电作用与磷脂极性端相结合,从而组成“蛋白质-脂质-蛋白质”三夹板式结构模式。单位膜厚度约 $75 \times 10^{-10}m$ ,中间为脂双

层,电子密度较低而两侧电子密度较高,因此在电子显微镜视野中单位膜呈双轨结构。

20世纪60年代以后,由于应用一系列新技术,证明膜中蛋白质和脂质的结合主要是疏水键性质。电镜冰冻蚀刻技术证明膜蛋白在膜上的分布是两侧不对称的,而且在膜脂双分子层中心部分也有蛋白质颗粒存在。红外光谱、旋光色散和圆二色相分析等证明膜蛋白是 $\alpha$ -螺旋的球形结构。这些事实与单位膜的许多基本概念不相符合,因而又出现许多新的细胞膜模型。其中比较重要的有亚基膜(1967年, D. E. Green)、蛋白晶态膜(1968年, F. S. Sjostrand)和镶嵌晶态膜(1970年, G. Vanderkooi 和 D. E. Green)。与单位膜的理论不同的是,新模型都强调蛋白质或蛋白质与脂质形成的复合体(亚基)构成膜结构的重复单位。蛋白质在膜中可形成有序的晶格排列(蛋白晶态膜)或者由蛋白-脂复合体形成有序的晶态结构(镶嵌晶态膜)。但后来的实验资料表明,在生物膜中蛋白晶格排列不是普遍存在的,更主要的问题是和以前的细胞膜模型一样都是把膜看成是一种静态结构。20世纪60年代后期和70年代初期,由于热差分析,电子自旋共振技术应用于膜脂性质的研究,以及荧光标记融合细胞都证明细胞膜结构的最大特点是具有流动性。在此基础上,1972年辛格(S. T. Singer)和尼柯松(G. Nicolson)提出流动镶嵌膜模型。该模型主要强调细胞膜不是僵硬的静态结构。其要点:(1)脂质双分子层组成生物膜的连续主体;(2)由于脂质的疏水部分含有一定量的饱和或不饱和的脂肪酸,而这些脂肪酸在细胞正常温度下呈液晶状态,因此脂质双分子层具有流动性;(3)膜的外周蛋白表面含有亲水基团,可通过静电引力与脂质双分子层的极性部分连接;(4)膜的内嵌蛋白表面具有疏水氨基酸侧链基团,故能“溶解”于脂质双分子层的中心疏水部分,外周蛋白漂浮在脂质双分子层“海洋”的表面,而内嵌蛋白犹如“冰山”浸沉于脂质双分子层中间;(5)膜蛋白可作横向移动(侧向扩散)。20世纪70年代以来,又有不少物理学技术,如核磁共振、荧光偏振、激光喇曼光谱和生物学技术,如电镜冰冻蚀刻技术、激光漂白荧光恢复(FRAP)技术等等,都证实膜脂流动性是细胞膜和其他细胞器膜在结构上的基本特征之一。因此,流动镶嵌膜模型是目前为人们广泛接受的生物膜结构模型。流动镶嵌模型虽然用来解释许多物理学的、化学的和生物学的性质,但一种模型也难以概括不同来源、不同功能的生物膜。因此,流动镶嵌模型的修改模型仍不断出现。1975年沃利奇(D. F. H. Wallach)指出,在大多数动物细胞膜系统中,嵌入蛋白可能影响它周围的脂质分子,使之不能移动,这些脂质分子称为界面脂。膜上脂质分子的流动性不同,会导致膜结构出现分相现象。金(Jan)和华特(White)从膜上脂与脂的相互作用考虑,于1977年提出脂质板块模型,认为脂质分子之间相互作用会导致分子间的聚集而形成不同大小的板块结构(有序结构区)。这些板块在脂质双分子层中能彼此独立移动。板块之间由无序的流动脂区所分割,两者处于一种连续动态平衡之中。分布于膜内两半层的板块彼此相对独立,呈不对称性,但可能有某些板块延伸到全部双分子层。板块内的各种组分之间以疏水力相互作用。因此,膜平面实际上是同时存在不同结构和性质的许多“板块”,它们的变化主要由板块内组分的构象和相互作用的特异性所决定,而膜功能的多样性也可能与板块的性质和变化有关。

1988年,马寿特(C. E. Monmzord)等提出细胞膜结构中脂质排列的新模型,指出癌细胞、胚胎细胞及受刺激细胞等的细胞膜不同于一般的细胞膜,它含有大量中性脂(三酰甘油和胆固醇)。这些中性脂堆积在一起构成核心,外面覆盖一单层的磷脂和自由胆固醇构成中性脂质大颗粒镶嵌在脂质双分子层中,这些颗粒的表面均有糖链伸出。进入20世纪90年代后,对细胞膜非脂双分子层结构的研究日益受到重视。在人工脂质体膜上,脂质非双分子层结构或脂质交叉双分子层结构已被证实,但在生物膜中的存在尚未确定。脂质非双分子层结构对解释细胞融合、离子通透等问题将有重大意义,因此脂质非双分子层结构在细胞膜中



的存在和作用在未来膜结构研究的一个重要课题。

#### 参考文献

- 1 Singer S, Tet al. Science, 1972, 175: 720
  - 2 刘树森. 基础分子生物学. 刘培楠, 吴国利主编. 膜分子生物学. 北京: 高等教育出版社, 1983. 144
  - 3 Hwang F, et al. B B A, 1986, 860: 713
  - 4 宋立新, 等. 生命的化学, 1988, 8(6): 6
  - 5 Seddon J, et al. New Scientist, 1991, 1769: 45
- (华东师范大学秦德安教授撰; 柯家康审)

**核孔复合体** pore complex, PC 核孔复合体由核孔和环绕核孔的环体组成, 系中等电子密度复杂的蛋白质结构, 分子量 $10^8$ 以上, 是细胞核质间通讯和物质交换的控制点. PC 直径约为 $1200 \times 10^{-10}$ m, 在 $90 \times 10^{-10}$ m 分辨率电镜下两端各有一外环, 每环 8 个亚基均与内环相连, 中央为半径约 4.5nm 的含液中央通道. 偶见两端有丝伸出, 似是核运输的轨道. 在对亲核分子应答中, 中央通道可扩展到 26nm, 让大分子通过. 中央通道壁含 8~11 种核孔蛋白 (nucleoporin), 它们均含  $\phi$ -连接的 N-乙酰葡萄糖胺. 1990 年戴维斯 (Davis) 等提出 NUP1 和 NSP 1 中部所含同以高电荷短区的筒并性串联重复是核孔蛋白的共同特征. 该重复形成  $\beta$ -折迭, 而间区形成  $\alpha$ -螺旋. PC 由 gp120 和 gp190 等糖蛋白固着于核被膜. 1984 年霍尔 (Hall) 等报道酵母核信号 (NLS) 与高等生物相似. 1989 年艾伦 (Allen) 等报道二者 PC 结构相似, 卡林里奇 (Kalinich) 等报道酵母核能摄入 SV40 大 T 抗原和核质素. 故 PC 是保守的.

细胞核运输与其他运输系统区别是: (1) 它是选择性双向过程; (2) 对小分子和离子提供扩散通道而对大分子提供选择性转运. 1965 年费尔德赫 (Feldherr) 首先用胶体金实验证明 PC 介导核运输. 核孔扩散极限为直径 9nm, 50nm 的核糖核蛋白转运时变长变细. 1976 年埃沃斯 (Avers) 发现 PC 含有  $Mg^{2+}$ -激活的 ATP 酶. 1986 年哥德法布 (Goldfarb) 发现蛋白质核输入有饱和现象. 故蛋白质转运入核是主动过程.

蛋白质入核首先必须具有核信号, 又称靶核信号或亲核信号. 1982 年丁沃 (Dingwall) 发现核质素断裂后仅一半能入核, 原无法通过的大金粒用其包裹也能入核. 1984 年凯尔德朗 (Kalderon) 等发现 SV40 病毒 T 抗原含有核信号, 迄今已在核质素等几十种蛋白发现了类似顺序. 核信号由几个碱性残基 (Lys 和 Arg) 组成, 两侧常有 Pro 或 Gly 以防  $\alpha$ -螺旋形成. 亲核性由电荷的空间分布状态决定. 核层蛋白 A 的核信号在翻译后 5min 便使总量 1/2 的肽完成核输入的结合阶段. 酵母蛋白激酶亚基 cdc 13 以其 N-端 3 个核信号区将无信号的调节亚基 cdc 2 带过核孔.

核信号介导的输入反应分两个步骤: (1) 结合, 信号结合于 PC; (2) 转移, 蛋白依赖 ATP 穿过中央通道. 1989 年埃杰 (Akey) 等证实核质素先结合于 PC “转运器” 的外层, 再经中央部分移入.

1991 年米考德 (Mickaud) 等证明多聚 (Lys)-BSA 与核质素竞争 PC 中同一限制性成分, 多聚 (Lys)-BSA 抑制 [ $^{125}$ I] 小牛胸腺组蛋白 H1 输入, H1 又抑制 [ $^{125}$ I] 核质素输入. 1991 年李 (Lee) 等用配位体印迹法证实部分纯化的 PC 蛋白 p67 特异性识别组蛋白 H2B 核信号和 SV40 T 抗原核信号. 故 PC 含信号受体成分. 抗 Asp-Asp-Asp-Glu-Asp 人工肽抗体能结合于 PC, 并阻止亲核蛋白输入 HeLa 细胞核, 说明受体含类似顺序. 用此抗体分离到 69kd 受体蛋白. 1989 年斯尔伍尔 (Silver) 报道了另两种受体蛋白 (270kd, 59kd). 信号与受体结合不需要 ATP.

核输入的另一决定因素是 ATP. 1990 年纽美叶 (Newmeyer) 等发现缺少 ATP 信号肽一金不能通过核孔. 停留在结合阶段. 1991 年贝里奥 (Berrios) 等证明雄果蝇 PC 含 ATP 酶的多肽是肌球蛋白重链样分子, 其特异性抗体与肌肉肌球蛋白起交叉反应, 但编码基因不同. 故认为肌球蛋白分子的头

部组成了 PC 的 8 个亚基, 尾部聚成中央通道壁. 输入时 ATP 由头部 ATP 酶水解.

大量证据证明核孔蛋白介导了转移步骤, 特异性抗体或麦胚凝集素与其糖基结合, 蛋白便不能通过核孔, 停留于结合阶段. 1989 年本纳温特 (Benavente) 等报道单克隆抗体 P11 几乎完全抑制昆虫、爪蟾、哺乳类的核输入. 1988 年纽美叶等证明去除核孔蛋白, 核孔形态正常但转移功能受损, 1990 年芬莱 (Finlay) 等提出结合阶段也受损.

蛋白质核输入的调控因素有: (1) 细胞周期依赖性磷酸化作用, 1991 年莫尔 (Moll) 等报道酵母 HO 核酸内切酶转录因子 SW15 的核信号被信号区内及附近 3 个磷酸化 Ser 抑制, 仅在 G1 期 Ser 脱磷酸化才能入核, 此外还有 2 个 Lys, 其突变减缓核输入; (2) 翻译后修饰、亚基反应或与其他蛋白结合, 抑制了信号受体识别或掩蔽了信号, 果蝇胚细胞核内 d1 蛋白浓度决定背腹分化, 其与 ct 蛋白结合留于胞质, toll 蛋白则促其入核, 平截人生长素分子很小但不入核, 与原胸腺素或拟胸腺素结合便大量入核, 转录因子 NF- $\kappa$ B 入核须先脱离胞质固着物; (3) 配位体的结合, 表皮生长因子或胰岛素的受体复合物使 PC 蛋白变构, 引起 3T3 成纤维细胞核输入呈剂量依赖性增加 (江 (Jiang) 等, 1990), 1985 年纳格 (Nigg) 等报道 cAMP 使蛋白激酶催化亚基从调节亚基脱落而入核, 固醇类激素亦使其受体与固着蛋白 HSP 90 脱离而入核; (4) 其他因素, 如爪蟾卵母细胞 c-myc 蛋白须受精后才能通过核孔, 家兔黄体酮受体除核信号外还须激活 DNA 结合区才能入核, 1990 年纽美叶等还报道信号与受体的结合必须有细胞溶质中的核输入因子 1 参加, 因子 2 增强因子 1 的作用.

RNA 通过核孔入核机制有所不同. 1990 年汉姆 (Hamm) 等证明爪蟾卵母细胞 mRNA 前体拼接辅因子 U snRNP 入核信号来自本身的 U snRNA. 该信号包括一个三甲基鸟苷帽和至少结合于一种 U snRNP 蛋白两种因素. 双成分信号的意义可能是确保装配完整并经过加工的 U snRNP 才能入核, 可能一成分与 PC 识别, 另一成分参与转移步骤.

核输出的信号尚不了解, 但输出速度很快, 新合成病毒 RNA 在感染后几小时就运到胞质, 核仁素及六聚体 p38 虽体积很大, 但出核速度亦很快, 抗核孔蛋白抗体也阻止 5s RNA 输出, 故 1989 年波勒 (Borer) 等提出核输出也是主动过程. 另一方面有证据表明某些蛋白参与核输出. 爱滋病毒衣壳特异性 RNA 需 Rev 蛋白才能进入胞质, 新装配的流感病毒 RNP 与病毒基质蛋白 M1 结合才能入质, 感染别的细胞后又脱离 M1 而穿过核孔, 5s RNA 出核前也需与 TF II A 或 La 蛋白结合, 包裹多聚 (dA) 或 (dI) 的大分子能立即被运出细胞核.

对 PC 研究的另一热点是其在有丝分裂过程中的解聚和装配. 一般认为前期核被膜崩解时 PC 解聚成较大的复合物分散到胞质, PC 丢失可能发生在核膜解体之前, 关于 PC 重建有两种观点: (1) 1984 年洛卡 (Lohka) 等提出的小泡前体模型认为膜泡先结合于染色质并侧向融合成扁囊后, 由 gp210 等 PC 成分参与形成核孔; (2) 1988 年席汉 (Sheehan) 等提出的前孔模型认为 PC 先在解聚染色质表面 (成核位点) 装配, 然后起膜泡受体的作用. 维格斯 (Vigers) 等 1991 年发现细胞溶质中含两种小泡状被膜前体成分, 其中 B 成分把膜块引向染色质, 并参与 PC 装配, A 成分仅提供膜块. B 成分相对比例高时新建被膜中核孔密度增高. 1991 年戴保莱 (Dobauvalle) 等在缺少 DNA 条件下培养爪蟾卵 “建核提取物” 形成了遍布 PC 的环片, PC 出现很早, 含有 p68. 去除 p68 所建人工被膜无 PC, 不能输入核质素和核层蛋白 L $\alpha$ . 加入麦胚凝集素得类似结果, 故核被膜重建和 PC 的装配是两个独立但又内在联系的过程. 人工装配的不含核孔蛋白的 PC 不能结合或转运信号蛋白, 但形成了有扩散功能的中央通道. 加入爪蟾或大鼠核孔蛋白后可完全修复.

#### 参考文献

- 1 Berrios M, et al. Localization of a myosin heavy chain-like

- polypeptide to *Drosophila* nuclear pore complexes, Proc Natl Acad Sci. USA, 1991, 88: 219~223
- 2 Clever J, et al. Import of Simian Virus 40 virions through nuclear pore complexes, Proc Natl Acad Sci. USA, 1991, 88: 7333~7337
  - 3 Moll T, et al. The role of phosphorylation and the CDC28 protein kinase in cell cycle-regulated nuclear import of the *S. cerevisiae* transcription factor SW15, Cell, 1991, 66: 743~758
  - 4 Martin K, et al. Nuclear transport of influenza virus ribonucleoproteins; the viral matrix protein (M1) promotes export and inhibits import, Cell, 1991, 67: 117~130
  - 5 Clinton M, et al. Evidence for nuclear targeting of prothymosin and parathymosin synthesized in situ, Proc Natl Acad Sci. USA, 1991, 88: 6608~6612
  - 6 Lee W C, et al. The NSR 1 gene encodes a protein that specifically binds nuclear localization sequences and has two RNA recognition motifs, J Cell Biol, 1991, 113: 1~12
  - 7 Vigers G P A, et al. A distinct vesicle population targets membranes and pore complexes to the nuclear envelope in *Xenopus* eggs, J Cell Biol, 1991, 112: 545~556
  - 8 Dabauvalle M C, et al. Spontaneous assembly of pore complex-containing membranes "annulate lamellae" in *Xenopus* egg extract in the absence of chromatin, J Cell Biol, 1991, 112: 1073~1082
  - 9 Dingwall C, et al. Protein import into the cell nucleus, Annu Rev Cell Biol, 1986, 2: 367~390
  - 10 Dabauvalle M C, et al. Identification of a soluble precursor complex essential for nuclear pore assembly in vitro, Chromosoma (Berl), 1990, 100: 56~66

(江苏教育学院胡明副教授撰)

**空泡膜类型  $H^+$ -ATPase** 已知的膜质子泵 ATPase 有 3 种: 质膜  $E_1E_2$  类型的  $P$ -ATPase; 线粒体(或称真细菌) $F_1F_0$  类型的  $F$ -ATPase, 即 ATP 合成酶; 空泡膜类型的  $V$ -ATPase, 核类型 ATPase 广泛地存在于真核细胞的高尔基体、内质网、溶酶体、嗜铬颗粒、笼蛋白衣被小泡以及植物和酵母的液泡膜上, 是研究较多的一类新型质子泵 ATPase (N. J. Nelson 等, 1989),  $F$ -和  $V$ -ATPase 在结构和生化性质方面有许多相似之处, 但这是两种不同类型的质子泵 ATPase (Y. Wang 等, 1985), 在真核细胞中, 酵最根本的区别在于酶复合物中各种亚基的基因分布,  $V$ -ATPase 所有亚基的基因都分布在核 DNA,  $F$ -ATase 亚基的基因, 有些在核 DNA 而另一些在细胞器 DNA 中。植物液泡膜  $H^+$ -ATPase 与所有的  $V$ -ATPase 有类似的结构, J. M. Ward 和 H. Sze (1992 年) 的工作证明了这一点。他们采用 Sepharv 1 S-400 凝胶过滤和 Q-Sepharose 离子交换的方法纯化燕麦根液泡膜  $H^+$ -ATPase, 经 SDS-PAGE 9%~15% 的梯度分离, 结果表明这个分子量为 650kD 的 ATPase, 由 10 种多肽组成, 用 KI 和  $Mg^{2+}$ -ATP 溶液处理液泡膜微囊, 释放出 70, 60, 44, 42, 36 和 29kD 的多肽, 留在膜上的多肽并无水解 ATP 和泵质子的活性, 这说明释放出的多肽为膜的外周蛋白。J. M. Ward 和 H. Sze 提出的燕麦根液泡膜的结构模式图中, 70kD 的多肽为酶的催化部位, 60kD 的多肽为底物结合部位, 16 和 13kD 的两条多肽与膜脂结合形成脂蛋白, 16kD 的多肽可与 DCCD (二环乙基碳二亚胺) 结合, 可能参与质子通道的形式。在嗜铬颗粒膜  $H^+$ -ATPase 的结构模式图中, 它与溶酶体膜  $H^+$ -ATPase 有类似的亚基结构, 水溶性部分有 5 种多肽, 脂溶性部分有 16 和 20kD 两条多肽与膜结合形成脂蛋白, 39 和 115kD 的两条多肽为附属亚基, 溶酶体丰富的细胞含有大量可翻译为 39kD 多肽的 mRNA, 对编码这条多肽的基因已进行了克隆和序列分析 (Y. Moriyama 等

1987)。目前在溶酶体膜  $H^+$ -ATPase 中尚未找到 115kD 的多肽, 是否所有的  $V$ -ATPase 分子中都含有这种高分子量的附属亚基, 尚未定论。1992 年 M. S. Perin 等人提出, 高分子量的附属多肽应是各种来源的  $V$ -ATPase 的共同成分, 他们从笼蛋白衣被小泡  $H^+$ -ATPase 中分离出包括 116 和 38kD 在内的 9 条多肽, 确定 116kD 的多肽由 838 个氨基酸残基组成, 全肽分为两部分, 氨基端一半含茶氨酸残基多, 这段疏水肽段多次跨膜折叠, 根据疏水度推断跨膜片段的氨基酸序列和残基数 (S. M. Perin 等, 1991)。

液泡膜  $H^+$ -ATPase 最明显的特征是被硝酸盐抑制和阴离子激活, 对于燕麦根液泡膜  $H^+$ -ATPase 来说, 各种单价阴离子激活的顺序为:  $Cl^-$ ,  $Br^- > I^- > HCO_3^-$ , 对叠氮盐和钒酸盐不敏感 (Y. Wang 等, 1985)。

液泡膜  $H^+$ -ATPase 的催化机理 E. Uchida 等用酵母在稳态和非稳态两种条件下作了研究。稳态条件下, 反应混合液中有过量的 ATP 存在, 酶催化 ATP 的水解采取多向循环路线非稳态条件下, 反应液中仅有少量的 ATP<sup>32</sup>, ATP 的水解路线为单向循环。

ATP 首先与对 NBD-Cl 敏感的催化部位结合形成酶-ATP 复合物, 水解 ATP 生成的 ADP 和  $P_i$  先后从酶分子上释放出来, 如果有过量的 ATP 存在, ATP 作为正效应物激活催化部位, 进行多向循环路线形成 nATP. EA 复合物, 既可以先释放出 nATP, 也可以先释放出 ADP 和  $P_i^{32}$ 。在两种情况下, NBD-Cl 都有抑制作用, 它的作用是使催化部位失活, 阻止酶-ATP 复合物的形成, 只有在 ATP 过量时, DCCD 才有抑制作用, DCCD 不影响酶与 ATP 的结合, 这种催化机理模式与线粒体  $H^+$ -ATPase 的催化机理类似 (C. Grubmeyer 等, 1983; M. Futai 等, 1988)。

为了说明液泡膜  $H^+$ -ATPase 分子中与膜脂结合的小分子多肽在水解 ATP 中的作用, R. Hirara 等 (1989 年) 采用放射性失活分析法 (radiation inactivation analysis), 把液泡膜微囊置于  $Co^{60}$   $\gamma$  射线照射, 两种 ATP 水解路线都受到抑制。对射线照射的敏感性, 单向循环比多向循环多 4 倍, 采取靶理论的方法, 测定参与单、多向循环的多肽, 其分子量分别为  $0.9 \sim 1.1 \times 10^5$  和  $4.1 \sim 5.3 \times 10^5$  D 这说明在单向循环中只需要  $V$ -ATPase 的 A 和 B 两个亚基参加, 在多向循环中,  $V$ -ATPase 必需有适当的寡聚结构, 即 (A, B)<sub>m</sub>C<sub>n</sub>, C 代表与膜结合的多肽组分, 其中 m 不小于 3, 在这种情况下, ATP 水解与泵质子过程偶联, 受 DCCD 的抑制。

$V$ -ATPase 的各亚基基因克隆和序列分析工作进行得较晚。萝卜、脉孢杆菌和酵母液泡膜 ATPase 的 A、B、亚基基因的序列分析已经完成, 各种  $V$ -ATPase A、亚基的氨基酸序列测定有许多报道, 结果表明, 不同来源的  $V$ -ATPase 亚基之间表现出极大范围的同源性 (B. J. Boowmam 等, 1988; N. Nelson 等, 1989)。表 1 列出了  $F$ -ATPase 的  $\alpha$ 、 $\beta$  亚基与各种  $V$ -ATPase 的 A、B 亚基之间, 相同氨基酸序列所占的百分比, 可以清楚地看出, 高等植物与真菌  $V$ -ATPase 的亚基之间, 相同的氨基酸序列占整个亚基总氨基酸的 60% 左右, B 亚基更保守的约占 70%。古细菌和真菌、高等植物的  $V$ -ATPase A、B 亚基之间的相同氨基酸序列约占 50%,  $F$ -与  $V$ -ATPase 之间的同源性表明, A 与  $\beta$ 、B 与  $\alpha$  之间的较密切的关系 (N. Nelson 等, 1989)。

根据分子遗传学的研究, 普遍认为  $F$ -和  $V$ -ATPase 在进化上有密切的亲缘关系, 在  $F$ -和  $V$ -ATPase 中两个大亚基的进化过程中, 70kD 的祖先  $H^+$ -ATPase 基因中含有编码 ATP 结合位点的 GXXGXGKT 氨基酸序列, 这段序列在  $V$  和  $F$ -ATPase 的 A 亚基和 B 型亚中都可找到。  $V$ -ATPase 的催化组分中, 仅对 E 亚基进行了序列测定, 它与  $F$ -ATPase 的  $\gamma$ 、 $\delta$  和  $\epsilon$  亚基均无相同的氨基酸序列, 即无同源性。这说明  $\gamma$ 、 $\delta$  和  $\epsilon$  是 ATP 合成酶所必需的功能肽,  $V$ -ATPase 的 D 和 E 亚基是细胞器内酸化所必需的功能肽, 这些亚基部是进化过程中后来加上去的 (S. Hirsch 等, 1988)。编码牛嗜铬颗粒膜和酵母液泡膜  $V$ -ATPase 的脂蛋白基因已经克隆, 并进行了序列测定 (V. P. Richard, 1988)。在具

有 ATP 合成酶功能的 F-ATPase 和古细菌的 V-ATPase 分子中,都有 8kD 的祖先脂蛋白基因产物。真核细胞中,V-ATPase 的 16kD 的脂蛋白是 ATP 合成酶演变为具有质子泵功能,不再具有 ATP 合成酶功能的重要标志(M. Mandel 等,1988)。

K. Puopolo 等 (1990) 使用各种技术对笼蛋白衣被小泡  $H^+$ -ATPase 进行结构分析,结果发现 V-和 F-ATPase 的拓扑结构非常类似,在 ATP 或  $Mg^{2+}$ -ATP 存在的情况下,用促溶剂(如 KI, KNO<sub>3</sub> 等)处理这两种酶,可溶性多肽从膜上溶解下来,从 V-ATPase 上下来的多肽有 73, 58, 40, 34 和 33kD,被称之为  $V_1$ ,留在膜上的 100, 38, 19 和 17kD 的多肽,被称之为  $V_2$ 。两者的差别是: $V_1$  具有水解 ATP 的活性, $V_2$  则丧失了这种活性。

深入的分子遗传学研究仍在进行。对于在植物细胞内离子平衡起中心调节作用的液泡来说,液泡膜  $H^+$ -ATPase 起着关键作用,日本学者 Y. Ohya 等人研究醇的  $Ca^{2+}$  敏感 cis 系列突变体时发现,不能利用甘油、乳酸、琥珀酸等作碳源的 pet<sup>-</sup> 表现型,细胞内维持  $Ca^{2+}$  的研究证明,pet<sup>-</sup> 表现型是由于液泡膜  $H^+$ -ATPase 的各亚基有不同程度的损伤,丧失了酸化液泡内环境的能力,导致  $Ca^{2+}$  转运受阻(Y. Ohya 等,1991)。V-ATPase 在酸化细胞内各种细胞器内环境的过程中起重要作用,这种酸化作用为细胞内各种生理系列化反应提供了必要的条件,因此 V-ATPase 的深入研究对于医学和农业生产具有重要的理论和实际意义。

(武汉大学王延枝教授、许献忠撰)

## 溶酶体的细胞生物学 cell biology of lysosomes

溶酶体是细胞内的一种膜性细胞器。溶酶体功能异常将引起溶酶体病使溶酶体成为细胞生物学中研究最活跃的领域之一。

1949 年英国德杜弗(C. De Duve)等在研究经差速离心分离出来的大鼠肝匀浆各亚细胞组分中酶的水平时发现溶酶体。匀浆静置数日后,发觉线粒体级分中酸性磷酸酶(ACP 酶)的活性有了显著增加。这表明酶是在放置过程中从某种来源释放出来了。后研究表明,只要不损伤这一级分子中的颗粒酶对颗粒外加入的底物便没有多大活性。德杜弗由此推测,这些处于“潜伏”状态的 ACP 酶是被封闭在某种有膜包裹的可沉淀颗粒内,只有当膜破裂或使其通透性改变,酶才有机会与底物接触并表现出活性。静置、冰冻、融化和添加去垢剂等均能导致膜的破裂。1955 年,德杜弗根据这些颗粒富含 ACP 酶并且具有与其他细胞器不同沉降系数的特点,断定是一种新的细胞器,并命名为溶酶体。同年,美国诺维科夫(A. B. Novikoff)用电镜细胞化学方法清晰地显示和鉴定了大鼠肝细胞的溶酶体。其他如科恩(Z. A. Cohn)、戈登(G. B. Gordon)、埃里克森(J. L. E. Ericsson)等后来也都证实了溶酶体的存在。1974 年德杜弗发现溶酶体。

1955 年后,科学家们对溶酶体进行了广泛的研究。发现从原生动物到人的各种细胞中都有溶酶体。细胞类型不同,溶酶体形态、大小内部结构不同;同种细胞,也可因机能状态不同而有差异。因此,要鉴定一种胞质颗粒是不是溶酶体,一要看它有无界膜包裹,二要看它是否具备含有酸性磷酸酶或芳香硫酸酯酶等溶酶体标志酶的细胞化学证据。植物细胞中的液泡,也含有酸性水解酶,被认为是一种变态的溶酶体。但这个问题尚未取得一致意见。

1. 溶酶体的来源。60 年代就有许多实验证明溶酶体是由高尔基体成熟面扁平膜囊出芽、脱落而成。例如,酶细胞化学方法显示这些脱落的小泡具有 ACP 酶的活性;放射自显影术证明溶酶体的蛋白质部分是先在内质网池、后在高尔基体加上多糖成分的;还有实验证明,糖蛋白所需糖基转移酶除内质网外,几乎仅限于高尔基体。这也表明高尔基体是溶酶体最后生成的部位。然而,1964 年诺维科夫等在神经细胞高尔基体成熟面附近发现有一种与粗面内质网相连续的具有较大腔隙的滑面内质网,其一侧与高尔基体扁平膜囊贴近,一侧有芽状突起及膨大,认为这种结构与溶酶体形成有关,并称之为 GERL,即“与高尔基体关联的可

产生溶酶体的内质网”。此即 GERL 假说。后来,他们用细胞化学方法显示 ACP 酶位于 GERL 和溶酶体,而不位于高尔基体,因而认为 GERL 是一种能产生溶酶体的独立结构。GERL 的存在已陆续得到证实,1983 年汤雪明在早期精细胞高尔基体成熟面观察到 GERL,并注意到在精细胞发育过程中 GERL 有一个生长、发育和退化、消失的过程。1986 年克斯迪克(R. Krstic)在沙土鼠松果体细胞中也找到了 GERL 存在的细胞化学证据,并于 1988 年观察到松果体细胞中的管状溶酶体也由 GERL 出芽产生。1989 年周勉等在豚鼠和蟾蜍肝细胞中观察到 GERL 和溶酶体均显 ACP 阴性反应,蟾蜍的 GERL 较发达,多呈弯曲的长管或池囊。豚鼠的 GERL 多呈扁囊状;它们的初级溶酶体常位于高尔基体附近,有的也位于 GERL 近旁;家鸽的肝细胞中则未见到 GERL 结构。但至 90 年代初止,GERL 与高尔基体之间的确切关系仍未肯定。

2. 溶酶体酶。60 年代只鉴定出 12 种,且均为酸性水解酶;1975 年前后猛增至 30 多种,并查明了各种酶的最适  $H^+$  浓度,发现少数水解酶偏碱性,如精子的顶体素最适  $H^+$  浓度为  $10^{-8}$  mol/L;到 80 年代初,已确定的水解酶有 60 多种,其中蛋白酶 18 种,核酸酶 4 种,多糖水解酶 28 种,磷酸酶 5 种,酯酶 7 种,此外,还有少数非水解酶,例如氧化物酶和 NADPH2 氧化酶,不过这些酶并非同时存在于某种溶酶体;细胞类型不同,溶酶体的酶谱也不同。这些酶主要以溶解状态存在于溶酶体内的液相中。但也可以存在于膜的内表面甚至外表面(所以膜完好时也可测得少许酶活性),与膜的内表面结合的酶,有的彼此形成酶复合物,有的则以膜上有受体作媒介,某些 ATP 酶离子转移酶和载体蛋白就属于这种膜结合酶。膜结合酶的产生可能与水解过程要求酶与物或酶与酶之间保持一定的相对位置有关。

3. 溶酶体的功能。60 年代已基本阐明异噬和自噬作用机制。异噬是指溶酶体对细胞通过内吞作用摄入胞内的各种外源性物质的分解、消化。无论吞入的是固态的细菌、异物,还是含蛋白质的液态小滴,由质膜包裹后,均由溶酶体与之融合,以水解酶消化之。异噬在白细胞和巨噬细胞中最明显,是机体进行细胞免疫、抵抗病原微生物入侵的重要保证。1976 年安德森(R. G. Anderson)还首次描述了一种称为受体介导的内吞作用。这是一种很重要的细胞过程,是细胞摄取大分子营养物质,如低密度脂蛋白(LDL)、转铁蛋白、转钴硫胺蛋白等的主要机制,而且要比液相吞饮快得多,因此成为 80 年代以来细胞生物学研究的一大热点。但是,LDL 等大分子营养物质与聚集在细胞表面被膜穴上的相应受体结合而被膜小泡带入胞内并在内吞体中与受体分离后,也必须由溶酶体与它们所在的配体泡融合,才能降解为细胞所必需的胆固醇及氨基酸。溶酶体这种参与和调节胞内大分子物质代谢的作用,进一步丰富了异噬的理论。

4. 自噬理论。70 年代以来,也有新发展。1972~1981 年马谷原(H. Mayahara)和小川根据在大鼠皮下组织细胞自噬溶酶体形成过程中观察到的胞内待清除物可由溶酶体直接凹陷、包裹的现象,提出了溶酶体包裹机制 LWM 的概念,使原有的自噬理论更趋完善。因为在此之前只知待清除物,如衰老死亡的细胞器及过剩的分泌颗粒等,是由滑面内质网包裹,再由溶酶体消化的。LWM 后为许多实验所证实。1985 年克斯迪克在大鼠和沙土鼠的松果体细胞中也观察到类似现象。1990 年张树欣等注意到肉芽组织破纤维细胞溶酶体的包裹相有突起包裹、内陷包裹和混合包裹 3 种形式,其中突起包裹呈 C 形结构,推测其动力来源可能与肌动蛋白微丝有关。

溶酶体的功能是多方面的。在受精、胚泡植入、指趾形成、骨组织更新、心肌细胞改建、甲状腺素的释放、断奶后乳腺的退化以及肝细胞中胆红素和铁的贮存和运输等方面都起着重要作用。然而越来越多的研究表明,不少药物和疾病均能引起溶酶体膜破裂、水解酶外溢,造成细胞死亡和组织损伤;而溶酶体本身功能异常,也会引起各种疾病,如溶酶体底物贮积病就是患者缺乏某种溶酶体而导致底物在细胞内的堆积。这类疾病现已发现 30 多种。

不过近些年的研究表明,也有不少药物如胆固醇、氯化可的松、地塞米松、氟唑、胰岛素及山莨菪碱等均有稳定溶酶体的作用。因此溶酶体与疾病的研究将是今后的一个重要课题。同时,一些理论问题,如控制溶酶体定向移动的机理是什么,为什么溶酶体能与吞噬体或自噬体融合而不与完好的细胞器融合,溶酶体膜为什么不会被它所包含的酶水解,膜上到底有没有控制氢离子进出的离子泵等,也将是人们继续研究的热点。

#### 参考文献

- 1 林邦和. 溶酶体. 生物学通报, 1989, 8, 3~6
- 2 细胞和细胞器. 李肇特译. 北京: 科学出版社, 1985, 83~95
- 3 De Duve C. Lysosomes revisited. Eur J Biochem, 1983, 137, 391
- 4 Novikoff AB. GERL: Its form and function in neurones of rat spinal ganglia. Biol Bull, 1964, 127, 358
- 5 Cohn ZA, et al. Lysosomes in Biology and Pathology, Vol 1 ed 3 Amsterdam: North-Holland, 1969, 43~61
- 6 Gordon GB, et al. Studies on the intracellular digestive process in mammalia tissue. J cell Biol, 1965, 25, 41
- 7 Novikoff PW, et al. Golgi apparatus, GERL, and lysosomes of neurons in rat dorsal ganglia, studied by thick section and thin section cytochemistry. J cell Biol, 1971, 50, 859
- 8 Dean RT. Lysosomes Edward, London, 1977, 1
- 9 Carpenter JL, et al. Coated pits coated vesicles, and receptor mediated endocytosis. Nature, 1979, 279, 679
- 10 Furlanetto RW. Receptor-mediated endocytosis and lysosomal processing of insulin-like growth factor 1 by mitogenically responsive cell. Endocrinol, 1988, 122, 2044
- 11 Sakai M, et al. Relationship between lysosomal wrapping mechanism (LWM) and cytoskeletal elements during autophagolysosome formation Acta Histochem cytochem. 1984, 17, 1
- 12 林邦和, 朱舜丽. 溶酶体病的基础和临床研究进展. 安徽中医学院学报, 1993, 12(2): 61

(安徽中医学院林邦和副教授撰)

**贮脂细胞** fat-storing cells, FSCs 又称肝脂细胞, 伊东细胞或星状细胞。为肝脏非实质细胞中的一种, 是肝脏胶原和细胞外基质的主要来源。在肝纤维化的形成中起重要作用。1876年枯否氏(Kupffer's)利用氯化金浸渗法在肝小叶内首次发现FSCs, 当时称星状细胞。此后对FSCs的研究分为3个阶段。

**第1阶段(FSCs的认识阶段)** 1876年枯否氏发现FSCs位于肝窦周围, 附着在肝窦毛细血管和肝实质细胞上, 细胞突起伸入狄氏间隙, 将肝细胞与内皮细胞分离开, 这些发现得到其他学者的证实。1878年Platan发现该细胞浆内含有脂滴。1890年狄斯又对位于肝窦周围的星状细胞做了相同的描述。这一阶段人们已认识到这种形态细胞的存在。

**第2阶段(澄清对FSCs认识的混乱)** 1898年在第12届国际解剖学会议上, 枯否氏否定了他早期的观点, 认为星状细胞是一种具有吞噬功能的内皮细胞, 参与肝窦壁的构成。这一观点导致了近1个世纪对FSCs的认识的混乱。许多学者对该细胞也进行了研究。Aschott提出了网状内皮细胞的特性。即特征性形态、贮存脂肪和维生素A及吞噬功能。Ito Menoto等认为它与肝脏巨噬细胞、内皮细胞不同。此外, 这一阶段先后还发现其它肝窦周围细胞。分别命名为颗粒细胞、周皮细胞、贮脂细胞(或伊东细胞)和间质细胞, 这些细胞在分布、形态和功能方面有其相同点和一定的联系。但它们之间, 尤其FSCs与间质细胞是否为同一类细胞, 一直未得到证实。直到1972年Wake氏用经典的金银浸渗法, 荧光显微镜及电子显微镜揭示了由枯否氏所发现的星状细胞是与吞噬细胞、内皮细胞完全不同的细胞。认为星状细胞实际上就是FSCs, 澄清了对FSCs认识的混乱。

**第3阶段(FSCs的深入研究阶段)** 20世纪70年代以来, 人们利用各种先进方法和技术对FSCs做了深入研究, 丰富了对FSCs的认识。通过免疫荧光显微镜和电子显微镜等技术认识了FSCs具有独特的形态结构—胞浆内有大量脂滴, 丰富的粗面内质网及多囊小体, 微管和微丝, 缺乏基底膜; 通过细胞生物化学和细胞免疫化学及分子生物学等方法认识了FSCs具有独特的基因表达—透明质酸、中间丝结蛋白、2 $\alpha$ -巨球蛋白, 类胰岛素生长因子-I(IGF-I)和肝生长因子(HGFs)等, 认识了FSCs功能受细胞和分子双向调节。

通过深入的研究, 在贮脂细胞的形态学与功能方面取得重大进展。

**贮脂细胞的形态学** FSCs位于肝窦周围, 狄氏间隙内层, 较长的细胞突起包绕肝窦, 呈星状, 大小介于肝细胞与枯否氏细胞之间, 胞浆内含有折光性强的脂滴, 脂滴内含有维生素A, 在荧光显微镜下受328nm落射紫外光照射, 自发绿色荧光; 核较圆形成卵圆形, 有一个或多个核仁电子显微镜下见核内有球状体, 胞浆内有丰富的粗面内质网, 其网池中度肥大, 是胞浆中最大的细胞器, 提示FSCs有蛋白质合成能力; 有少量糖原和不发达的网状颗粒, 故可能不参与糖代谢; 有显著的高尔基复合体, 由许多管与完好的片层相连接构成, 大的高尔基泡少见, 溶酶体较少, 线粒体在大小和数目上均比肝细胞少; 常可见多囊小体, 微管及微丝。该细胞无基底膜。

**免疫细胞化学染色**—Desmin和Vimentin染色均阳性, 提示FSCs既具有成纤维细胞特性, 又具有肌原纤维细胞特性。最近报道来源于肝硬化的FSCs是异源性混杂克隆, 具有表达I型胶原及纤维连接蛋白能力, 该异源性混杂克隆衍生地FSCs, 对单克隆抗体和枯否氏细胞产生的分裂子及生长因子产生克隆重反应。

#### 贮脂细胞的功能

目前认为FSCs至少有两种功能, 即贮存参与维生素A代谢和在肝纤维化形成中发挥作用, 后者颇受重视, 自Knook、Friedman等建立起一种简便、重复性好的分离、纯化方法后, 人们能够建立较高纯度的FSCs原代和传代培养, 使FSCs在生理和病理状态下的特点重现于体外, 为研究FSCs在慢性肝病中的作用创造了一种实用的工具。在原代FSCs培养中证实其合成、分泌I、II、III及IV型胶原, 对四氯化碳诱导大鼠肝纤维化, 分离肝细胞和FSCs, 对I型胶原mRNA进行比较, 发现随四氯化碳的诱导FSCs中I型胶原mRNA增加30倍, 而肝细胞仅增加两倍, 纠正了以往学者认为肝细胞是产生胶原的主要细胞之观点, 究其原因是在肝细胞培养时没有纯化分离, 而混杂了10%的FSCs, 后者增殖力强、合成胶原多, 则误认为肝细胞是合成胶原的主要细胞, 人们还证实FSCs是合成细胞外基质的主要部位, 即合成、分泌层粘连蛋白, 纤维连结蛋白, 蛋白聚糖, 葡糖胺, 透明质酸, 在肝脏相关细胞中唯有FSCs合成, 分泌透明质酸, 且80%分泌到细胞外。

FSCs具有表达 $\alpha_2$ -巨球蛋白的能力。 $\alpha_2$ -巨球蛋白是蛋白激酶的抑制子, 对蛋白激酶有广谱抑制, 直到目前人们还认为唯有肝细胞表达 $\alpha_2$ -巨球蛋白。对于FSCs表达 $\alpha_2$ -巨球蛋白的意义及在何种条件下表达还不清楚, 推测在肝损伤时可促进FSCs表达 $\alpha_2$ -巨球蛋白, 抑制胶原蛋白降解, 促进病理性改变, 形成肝纤维化。

类胰岛素生长因子-I(IGF-I)的表达是人们新认识。该因子可促进FSCs DNA分子的复制, 促进类胰岛素生长因子粘蛋白的合成, 在肝损伤时通过自动分泌或旁分泌机制促进FSCs增殖、活化、转化, 增加纤维化区域类肌原纤维细胞数量, 促进肝纤维化的形成。

Peter等利用原位杂交和Northern blotting技术证实静息状态下的FSCs表达HGFs, 转化的FSCs和肝纤维化时的FSCs, 失去表达HGFs能力, 在保持肝细胞死亡和再生的生理平衡中以旁分泌方式发挥作用, 说明在慢性肝病中FSCs失去了表达HGFs能力, 不促进肝实质细胞的再生。

FSCs 合成、分泌、蛋白激酶,受到特别重视。这些酶几乎均以酶原形式存在,以中性金属蛋白酶为典型,受联苯乙酰氨基盐激活,不受胰蛋白酶激活。具有破坏狄氏间隙内膜下基质,扩大胶原酶活性的作用,人们设想如果能够改变 FSCs 生物活性状态,使 FSCs 大量分泌蛋白激酶,促进胶原降解,减少胶原沉积可能有积极作用。

在维生素 A 代谢中,FSCs 不仅贮存维生素 A,还分泌载脂蛋白 E,表达  $\beta$  视黄醇受体,对视黄醇的调节作用产生应答,而参与维生素 A 代谢。肝纤维化时 FSCs 的视黄醇受体 mRNA 明显降低,虽细胞视黄醇结合蛋白(CRBP)mRNA 水平不变,但  $\beta$ -视黄醇受体表达减少或丧失。而反应性引起 FSCs 对视黄醇的应答,表明肝纤维化时 FSCs 对视黄醇无反应是可逆的。

上述资料构成了在肝纤维化形成中,FSCs 一方面是胶原和细胞外基质的主要来源,通过表达  $\alpha_2$ -巨球蛋白阻止胶原蛋白降解,促进胶原在肝脏沉积,形成肝纤维化,使 FSCs 丧失表达  $\beta$ -视黄醇受体和 HGFs 能力,反馈引起 FSCs 合成胶原增多,肝实质细胞再生减少,形成病理性改变,加重肝纤维化的形成。另一方面 FSCs 合成蛋白激酶,扩大胶原酶活力降解胶原,使 FSCs 在肝纤维化的形成、发展中起核心作用。其两方面作用之强弱对肝纤维化的形成或逆转起重要作用。研究热点是:(1)利用原代 FSCs 培养筛选抗肝纤维化药物,研究抗肝纤维化药物的药代动力学。(2)利用原代和传代 FSCs 培养,探索肝纤维化形成的分子机制。(3)研究对 FSCs 合成、分泌蛋白激酶的调节。(4)研究 FSCs 增殖、活化和转化的机制。(5)针对胶原蛋白基因表达,探讨基因工程治疗肝纤维化。

(中国人民解放军 302 医院杨永平撰;宋喜秀审)

**肺巨噬细胞** pulmonary macrophages 是常驻在肺内的一类组织巨噬细胞,具有粘附、变形、游走、趋化、吞噬、分泌等生理特性。经常性地与外来异物接触,处于机体防卫的第一线,并参与肺内细胞之间的功能调控和适应性保护。在肺部疾病的发生及病理过程中也起重要作用。

1961 年迈维(Q. N. Myrvik)等首次采用洗肺法收集兔肺泡巨噬细胞进行实验研究。1967 年芬雷(T. N. Finley)等人从人的支气管肺泡灌洗液中获得人肺泡巨噬细胞,由于肺泡巨噬细胞标本收集简便,是组织巨噬细胞中研究得较多的一种。肺巨噬细胞起源于骨髓生成的单核细胞(D. H. B owden 等,1969)。单核细胞向肺内管迁移时首先停留附着于肺血管内壁,再逐步迁移进入肺间质、肺泡腔及小气道。肺巨噬细胞也可在肺内增殖。1980 年亚当森(I. Y. R. Adamson)等提出:急性炎症时的巨噬细胞浸润是由于单核细胞向肺内迁移增多,而慢性炎症时主要由肺巨噬细胞在局部增殖加强。肺巨噬细胞实际包括肺血管内、肺间质、肺泡、气道以及胸膜腔内巨噬细胞等多种群,它们在代谢和功能方面均有不同。其中肺泡巨噬细胞所占比例最大,研究得也最多,文献报道中有时对肺巨噬细胞和肺泡巨噬细胞两个名称未严格区分。早在 1964 年,格林(M. Green)等就观察到肺泡巨噬细胞可吞噬和清除入侵的细菌;迈维等又于 1972 年证实肺泡巨噬细胞参与特异性免疫反应。这些工作确立了肺巨噬细胞在肺内防卫和免疫反应中的重要地位。

1977 年卡茨米洛夫斯基(J. A. Kazimierowski)等报道了肺泡巨噬细胞在肺部炎症反应中释放中性粒细胞趋化因子,此后发现由其分泌的介质种类愈来愈多。1986 年费尔斯(A. O. S. Fels)等归纳了肺巨噬细胞分泌的介质多达 14 类约 80 种,主要有:补体成分;凝血因子;蛋白水解酶类;促生长因子;白细胞介素等蛋白类调节因子;前列腺素;白三烯;血小板活化因子等生物活性脂类;胸腺素 B<sub>4</sub>、1,25-二羟维生素 D<sub>3</sub> 等激素样物质等。借助分泌介质,肺巨噬细胞与肺内其他细胞之间相互影响,参与多种调节过程。现认识到,肺巨噬细胞不仅是吞噬细胞和炎症反应细胞,也是分泌细胞和调节细胞(J. D. Brain,1988 年)。

肺巨噬细胞可调节肺成纤维细胞的活动。肺损伤或疾病时,

肺巨噬细胞释放纤维连接蛋白(S. I. Rennard,1981)及成纤维细胞生长因子(Bittermant 等,1986),促进成纤维细胞的趋化、增殖及胶原合成,有利于组织修复;而在损伤修复后期,肺巨噬细胞可释放 PGE<sub>2</sub>、IL-1(M. Jordana,1987)及成纤维细胞生长抑制因子(J. A. Elias 等,1985),抑制成纤维细胞的增殖及胶原的合成,防止纤维化过度。正常人肺泡巨噬细胞经常释放 PGE<sub>2</sub>,从而提供一个背景性抑制。1987 年克拉克(J. G. Clark)等报道肺泡巨噬细胞培养液低浓度时抑制胶原合成,高浓度则促进胶原合成,肺纤维化的发生机制尚未阐明,可能是肺成纤维细胞对肺巨噬细胞分泌活动负反馈调节机制的破坏,或由于损伤刺激持续存在,大量单核细胞迁移入肺,以致肺巨噬细胞不够成熟,PGE<sub>2</sub> 分泌不足所致(J. A. Elias 等,1987)。

肺内急性炎症时,肺泡巨噬细胞可吞噬入侵的细菌或坏死细胞,释放溶菌酶在细胞外杀菌,释放白三烯类等炎性介质,促进渗出及激活补体;释放趋化因子募集中性粒细胞,总的作用有利于局限和清除感染病灶。肺泡巨噬细胞处在高氧分压的微环境中,其氧代谢速率比血液中单核细胞和粒细胞高(R. Orens 等,1963),故有作者认为其杀菌机制与氧自由基产生有关,但格雷林(A. P. Greening,1983)及其他研究者观察到人和动物肺泡巨噬细胞在吞噬活动中几乎不释放氧自由基。炎症时新迁移入肺的单核细胞尚保留有产生氧自由基的能力,但随着细胞的成熟此能力降低(A. Nakagawara 等,1981)。诺加莱(A. R. D. Nogare,1990)等观察到,炎症时肺泡巨噬细胞氧自由基释放增多与其吞噬了中性粒细胞而获得大量髓过氧化物酶有关。炎症后期,肺泡巨噬细胞通过吞噬作用及释放蛋白水解酶清除沉积在肺泡腔内的蛋白质,吞噬聚集局部的中性粒细胞(S. L. Newman 等,1982),起到终止炎症反应、促进炎性物吸收、减轻炎症对组织损伤的细胞保护作用。诺加莱认为,肺巨噬细胞中存在的限制和及时终止炎症反应的机制若受到削弱或破坏,急性炎症便可能发展为慢性炎症和纤维化病变。

肺巨噬细胞与淋巴细胞间的相互作用在细菌、寄生虫及肿瘤免疫中起重要作用。肺泡巨噬细胞膜上有 Fc 受体,其吞噬、杀菌能力可在 B 淋巴细胞产生的抗体调理下增强。T 淋巴细胞分泌的某些淋巴因子可激活巨噬细胞,而淋巴细胞的激活又需要巨噬细胞释放的介质。人肺泡巨噬细胞可表达 HLA-DR(G. B. Toews 等,1984)及 HLA-DS 抗原(K. C. Garrett 等,1984),参与免疫反应的抗原呈递。肺巨噬细胞呈递抗原时释放 IL-1(S. K. Dower 等,1985),IL-1 可刺激辅助 T 细胞产生 IL-2 而促进活化淋巴细胞的功能表达,IL-1 还可直接刺激 B 细胞增殖(A. Rao 等,1983)及 NK 细胞增殖(R. A. Dempse 等,1982)。成熟肺巨噬细胞产生 IL-1 的能力低于单核细胞。正常人肺泡巨噬细胞可抑制淋巴细胞对有丝分裂原的增殖反应(C. C. McCombs 等,1982),此抑制作用是单核细胞或腹腔巨噬细胞所不具备的特征(P. G. Holt,1979)。另外,亚当斯(J. S. Adams)等 1983 年报道肺泡巨噬细胞可分泌 1,25-二羟维生素 D<sub>3</sub>,调节淋巴、单核巨噬细胞的活动。肺巨噬细胞的抗肿瘤作用有:经细胞接触将氧自由基、C<sub>3a</sub> 及蛋白酶等导入肿瘤细胞使其溶解(G. N. Olsen 等,1985);成熟肺泡巨噬细胞所释放的肿瘤坏死因子比单核细胞多 10 倍,可溶解或抑制肿瘤细胞生长(E. A. Rich 等,1989)。

肺部炎症时,肺泡巨噬细胞可与中性粒细胞、肥大细胞等相互作用诱导局部气道痉挛(J. D. Brain,1988)。中国孙秀泓等 1991 年以来报道,激活肺泡巨噬细胞所释放的介质可降低气道阻力、促进离体灌流肺释放肺表面活性物质,用消炎痛阻断 PG 合成后,上述效应以及肺泡巨噬细胞分泌的粒细胞趋化因子均显著减弱,故认为肺巨噬细胞的前列腺素代谢在其分泌功能中起重要作用。

对肺巨噬细胞的认识目前主要是基于对肺泡巨噬细胞的研究,而对肺巨噬细胞其它种类及其亚群的生理特性及功能研究,是有待深入的领域。肺巨噬细胞分泌的介质种类繁多,有些介质之间存在相拮抗的生物效应,对某一生理或病理过程可有促进

或抑制的多重作用。在不同的发育阶段或不同的微环境中,肺巨噬细胞的分泌和调节功能存在一定的倾向性,这必然与细胞的酶系统或受体表达的改变及其基因调控有关,探讨这种倾向性变化的规律有助于更全面地认识肺巨噬细胞的防御、免疫、分泌、调节和细胞保护等功能,也将是未来研究的主要趋势。

#### 参考文献

- 1 Adamson IYR, Bowden DH. Role of monocytes and interstitial cells in the generation of alveolar macrophages: kinetic studies after carbon loading. *Lab Invest*, 1980, 42: 528~523
- 2 Bitterman PB, et al. Modulation of alveolar macrophage-derived fibroblast proliferation by alternative macrophage mediators. *J Clin Invest*, 1986, 77: 700~708
- 3 Brain JD. Lung macrophages. How many kinds are there? what do they do? *Am Rev Respir Dis*, 1988, 137: 507~509
- 4 Elias JA, et al. Differential prostaglandin production by unfractionated and density-fractionated human monocytes and alveolar macrophages. *J Leuk Biol*, 1987, 42: 114~121
- 5 Fels AOS, Zanvil AC. The alveolar macrophage. *J Appl Physiol*, 1986, 60: 353~369
- 6 Myrvik QN. Function of the alveolar macrophage in immunity. *J Reticuloendothel soc*, 1972, 11: 459~468
- 7 Nogare ARD, et al. Characteristics of alveolar macrophages in an animal model of resolving pulmonary inflammation. *Am Rev Respir Dis*, 1990, 142: 660~667

(湖南医科大学秦晓群副教授、孙秀泓教授撰)

**胸腺 B 细胞** 鸟类法氏囊,哺乳动物的肝胚、骨髓是人们公认的 B 淋巴细胞中央淋巴器官。而胸腺是 T 淋巴细胞分化的中央淋巴器官,由胚肝、骨髓来源的前体 T 细胞在此分化成熟为 T 细胞。在胸腺内也存在少量 Ig<sup>+</sup>B 细胞(M. Inaba 等,1987),特别是患有自身免疫疾病如重症肌无力(MC)、系统红斑狼疮(SLE)病人的胸腺内存在 B 淋巴滤泡和大量的浆细胞(C. L. Williams 和 V. A. Lenmon, 1986; Y. Ichikawa, 1992)。在一系列自身免疫小鼠如(NZB×NZH)<sub>F<sub>1</sub></sub>、MRL/MP-lpr(MPL/lpr)和 BXSB 等也观察到类似现象。结合现代细胞分离技术和免疫酶检测手段,学术界对胸腺 B 细胞的表型、发生、功能等进行了深入研究。

Miyama-Inaba 等采用 65% Percoll 密度梯度离心,收集介质与 Percoll 溶液界面之间低浮力密度胸腺细胞,再经抗-Thy-1.2, CD4, CD8 加补体杀死 T 细胞,即可获得富含胸腺 B 细胞的类群(也叫低浮力密度胸腺细胞),约占全部胸腺细胞总数的 1% 左右。从正常小鼠胸腺分离纯化的 B 细胞,其中膜表面 Ig 阳性(sIg<sup>+</sup>)细胞占低浮力密度胸腺细胞总数的 3%~90%。免疫酶标检测表明,大多数胸腺 B 细胞表达 CD5<sup>+</sup>表面抗原,而脾脏 B 细胞为 CD5<sup>+</sup>用抗-CD5 单抗加补体能够杀死胸腺 B 细胞,抗-Thy01.2, CD4, CD8 等抗 T 细胞抗体加补体则对胸腺 B 细胞不产生毒害作用。尽管胸腺 B 细胞和脾脏 B 细胞都有 sIg,但多数胸腺 B 细胞较弱地表达 B220, Ia 表面抗原,相对较多表达 Mac-1(CD11b)和 CD5(M. Inaba 等, 1988),与腹腔 CD5<sup>+</sup>B 细胞特性相似(从英姿, 1993),而脾脏 B 细胞的表型为 CD5<sup>-</sup>, CD11b<sup>-</sup>,对 C57BL/6 小鼠、年幼的 NZB 小鼠胸腺 B 细胞的研究也得到相似的结果。

对人类 MG 患者胸腺 B 细胞的研究报道较多。MG 患者低浮力密度胸腺 B 细胞占全部胸腺细胞总数的 0.83±0.15%(C. Leprince, 等 1990), Leprince 等对 MG 患者胸腺进行免疫荧光分析,发现胸腺内具有生发中心, IgM<sup>+</sup>IgD<sup>+</sup>双阳性细胞位于生发中心边缘,处于分化过程中的 IgM<sup>+</sup>IgD<sup>-</sup>细胞则位于生发中心中央。CD21 单抗(抗 CR2)能使大多数生发中心着色,中央部位染色最深,这表明 B 细胞活化过程,促进了 CD21 的表达。进一步分析低浮力密度胸腺 B 细胞的表型,结果有 63±4% CD19<sup>+</sup>

细胞, 8±2% CD35<sup>+</sup>细胞,并有一部分胸腺 B 细胞表达 CD71 和 4F2 表面抗原。用 B8.7、CD23 单抗染色, B8.7 是 B 细胞活化特异抗原, (C. Y. Leprince, 1988), 虽然 CD23 在 T 细胞、网状细胞表面也有表达,但这两种细胞在胸腺 B 细胞分离过程中被除去,结果 B8.7<sup>+</sup>细胞占全部胸腺 B 细胞总数的 22±4%, CD23<sup>+</sup>细胞则占 14±5%。表明 MG 患者胸腺生发中心 B 细胞表达 CD19, CD21, IgM, IgD 等 B 细胞标志,低浮力密度胸腺 B 细胞则不同程度地表达 B 细胞活化标志,如 CD71, 4F2, CD23 和 B8.7, 即 MG 患者胸腺 B 细胞有一部分为活化的 B 细胞。

K. Nango 等(1991)收集 14d 小鼠胚胎低浮力密度胸腺细胞,经抗 B220(6B2)、抗 CD5 单抗双染色分析,结果约 3.5% 为 B220<sup>+</sup>细胞, B220<sup>+</sup>/CD5<sup>+</sup>细胞占 0.5%, 此时 sIg 细胞尚未观察到。16d 胚胎小鼠低浮力密度胸腺细胞含 3%~10% 的 CD5<sup>+</sup>细胞,在 18d 胚胎也观察到类似的数量。14d、16d 胚胎, B220<sup>+</sup>/CD5<sup>+</sup>细胞分别占低浮力密度胸腺细胞总数 0.98% 和 0.64%。A. Strasser 等(1988)证明, B 细胞表面抗原 B220(14.8)的表达比 sIgM 的表达要早,在 14d 胚胎胸腺就存在 B220<sup>+</sup>/Thy-1<sup>-</sup>细胞,而肝胚在 13d 胚胎才有前体 B 细胞出现,说明胸腺 B 细胞是在胸腺内分化,而不同于外周淋巴器官 B 细胞的发育。18d 胚胎中低浮力密度胸腺细胞含有大量的 B220<sup>+</sup>细胞,且 70% 的 B220<sup>+</sup>细胞表达 CD5<sup>+</sup>。值得注意的是, 18d 胚胎胸腺 B 细胞类群中 70% 为 sIgM<sup>+</sup>, 约 95% sIgM<sup>+</sup>细胞为 CD5<sup>+</sup>(占全部胸腺 B 细胞类群的 65%)。新生小鼠, 90% 的胸腺 B 细胞为 sIgM<sup>+</sup>, 且 70%~80% 的胸腺 B 细胞为 CD5<sup>+</sup>。与新生小鼠相比, 18d 胚胎的胸腺不存在 CD5<sup>-</sup>/IgM<sup>+</sup>细胞。CD5<sup>-</sup>B 细胞是出生后由外周淋巴器官迁移而来,还是由胸腺内的 CD5<sup>+</sup>细胞转化形成而来不清楚。很明显, 18d 以后的胚胎, CD5<sup>+</sup>B 细胞是胸腺 B 细胞的主要类群。胚胎胸腺 CD5<sup>+</sup>B 细胞的增殖情况与成体胸腺 B 细胞增殖情况相似。14d、18d 小鼠胚胎胸腺中仅有少量的 CD5<sup>+</sup>B 细胞,随后胸腺 CD5<sup>+</sup>B 细胞继续增殖到成体水平。从小鼠出生后 3d 到 6~8 周,胸腺 CD5<sup>+</sup>B 细胞的百分比保持不变,说明第 18d 胚胎对于胸腺 B 细胞和胸腺 CD5<sup>+</sup>B 细胞的分化和成熟是个重要时期。

正常小鼠胸腺 B 细胞特别是 CD5<sup>+</sup>B 细胞对常规 B 细胞有丝分裂原如 LPS、或抗-IgM 加 IL-4 不产生免疫应答。即使有 LPS 存在,胸腺 B 细胞也不分化为抗体产生细胞。然而带有 Ia 抗原的 T 辅助细胞能够促使 CD5<sup>-</sup>B 细胞增殖、分化为抗体产生细胞(M. Inaba 等, 1990)。MG 患者胸腺 B 细胞具有活化 B 细胞的表型。Leprince 等检测 MG 患者胸腺 B 细胞对 BCGF12kDa、rIL-2 加抗-IgM 的免疫反应,发现单独用 BCGF12kDa 就能诱导所有胸腺 B 细胞大量增殖。抗 B8.7 抗体能够完全拮抗 BCGF12kDa 所诱导的正常人 B 细胞增殖,而对 BCGF12kDa 所诱导的 MG 患者胸腺 B 细胞的增殖只起部分抑制作用。由 rIL-2 所诱导的 MG 患者胸腺 B 细胞的增殖,结果差异很大,但都低于 BCGF12kDa 的诱导增殖数量,表明 rIL-2 还需要其它刺激因子协同诱导胸腺 B 细胞的增殖。不论 BCGF12kDa 还是 rIL-2,在有抗-IgM 单抗存在时,都能显著促进 MG 患者胸腺 B 细胞的增殖,表明 MG 患者胸腺 B 细胞有一部分为休止 B 细胞,在有生长因子存在时,可以被抗-IgM 进一步激活,诱导增殖。其它一些因子如 rIL-1, rIL-4, rIFN- $\alpha$ , rIFN- $\gamma$  则不能诱导 MG 患者胸腺 B 细胞的增殖,即使与抗-IgM 一起刺激,也仅起微弱诱导增殖作用。

胸腺对于 T 细胞发育的正向、负向选择起着重要的作用。在 T 细胞分化过程中获得了对自身 MHC 限制和自身抗原的耐受性。最近研究表明,对自身抗原的耐受性是由于胸腺内带有 TcrV $\beta$  的 T 细胞缺失所致,而表达 MIL-1, Mts-9 的小鼠则不含有 V $\beta$ -3, V $\beta$ -6, V $\beta$ -1T 细胞。Molina 等发现,只有 B 细胞表达 MLs(I. J. Molina 等, 1988),表明胸腺 B 细胞对于 T 细胞发育的负向选择起着重要作用。

小鼠胸腺 B 细胞主要是 CD5<sup>+</sup>B 细胞, Y. Hitoshi 等(1990

年)发现,小鼠 CD5<sup>+</sup>B 细胞能够产生 IL T,从而增强胸腺细胞对 IL-2、IL-4 和 IL-10 的增殖反应,影响胸腺中 T 细胞发育。自身免疫小鼠的腹腔 CD5<sup>+</sup>B 细胞能够分泌自身抗体(从英姿,1993)。对 MG 患者胸腺 B 细胞表型、功能的研究表明,胸腺 B 细胞的活化状态与自身免疫反应有关。抗-乙酰胆碱受体(AChR)抗体阻断了神经与肌肉之间的信号传递是 MG 疾病机理(Y. Fujii 等,1984)。MG 患者胸腺 B 细胞在体外能够自发分泌 Ig,特别是抗-AChR 抗体,与常规 B 细胞相比,所分泌的抗-AChR 抗体具有高度特异性。如将 rIL-2 加入培养的 MG 患者胸腺 B 细胞,则提高 Ig 的分泌量,其中包括抗-AChR 抗体。用 StaphA 和 RIL-2 共同刺激 MG 患者胸腺 B 细胞,只能进一步促进 Ig 分泌量,而对抗-AChR 抗体的产量影响不大。用 IL-2 或 IL-2 加 StaphA 作为刺激因子,研究与上述相同条件下培养的人正常 B 细胞的影响,结果是单独用 IL-2 或 IL-2 加 StaphA 都能够促进正常人 B 细胞 Ig 分泌量,但不能促进抗-AChR 抗体。分泌培养上清液中地检测不到抗-AchR 抗体。StaphA 和 IL-2 能够提高 Ig 分泌量,但不能促进 MG 患者胸腺 B 细胞抗-AChR 抗体产生,说明这些抗 AChR 抗体产生细胞在体内早已被激活。MG 患者胸腺 B 细胞的表型、功能与临床症状也有相关性,具有高滴度(>100nm)血清抗自身抗体的病人其胸腺内 B 细胞、B8.7<sup>+</sup>细胞和 CD23<sup>+</sup>细胞等的百分比比较高,受 BCGF12kDa 刺激,胸腺 B 细胞具有更高的增殖反应(C. Leprince 等,1990)。R. R. Hardg 等(1987 年)研究表明,人类 CD5<sup>+</sup>B 细胞与类风湿关节炎自身抗体分泌有关,MG 患者胸腺内是否有 CD5<sup>+</sup>B 细胞尚需作进一步研究。

(山东大学于士广、丛英姿撰)

**小鼠胚胎性干细胞 mouse embryoid stem cell**

20 世纪 60~70 年代,人们一直在致力于寻找一个具有类似胚胎细胞分化性质,又能源源不断取材的实验模型。胚胎性瘤细胞(EC 细胞)是畸胎瘤干细胞,既有恶性生长,又显示类似早期正常胚胎细胞发育多能性的双重性质(L. C. Stevcn,1964)。随后 70~80 年代间,EC 细胞就一直成为研究哺乳类胚胎发育和遗传的模式系统。由于 EC 细胞具有肿瘤的某些特性,包括核型的不正常,作为研究正常发育的体外模型仍不够理想,直至 1981 年直接从小鼠早期胚胎内细胞团建立了胚胎干细胞(ES 细胞)系,才有助于进一步解决研究哺乳动物胚胎发育和遗传的模式问题。

EC 细胞是胚胎性恶性畸胎瘤组织的干细胞,起源于生殖细胞和早期胚胎细胞。异位移植 12.5~13.5d 的小鼠生殖嵴或 8d 前的小鼠胚胎,都能诱发出恶性畸胎瘤。要成功地分离获得 EC 细胞,首先要进行动物肿瘤的体外培养并传代和筛选,然后才能达到建系或克隆目的。丛笑倩等(1984 年)曾从小鼠自发畸胎瘤细胞培养,建立了多能 B7EC 细胞系,也从 F9EC 细胞系克隆到 F9-1 和 F9-3 两个克隆亚株。这些细胞株在生长行为,分化发育潜能以及对维生素 A 酸(RA)反应的敏感性等方面均有所不同。根据胚胎移植实验,证明不同品系小鼠形成畸胎瘤频率是受遗传因素影响的,例如 C<sub>3</sub>H 和 BALB 纯系小鼠产生含有 EC 细胞畸胎瘤约为 50%~70%;相反,其他品系如 AKR 和 C<sub>57</sub>BL 小鼠却很少产生这类肿瘤(I. Danjnov 和 D. Solter,1982)。胚胎异位移植实验进一步表明,影响肿瘤生成的主要因素是宿主本身的遗传背景,而不是被移植胚胎的遗传因素。

在常规培养条件下,小鼠胚泡极易分化为各种细胞。曾有人提示,有可能把胚泡的 ICM 细胞经体外培养建立分化型的永久细胞株。但人们更多的注意力是在于如何阻止 ICM 细胞体外分化,使之继续增殖。循着这个方向, M. J. Eeans 和 M. H. Kaufman(1981 年)通过延迟胚胎着床,分离晚期胚泡,并直接培养在用丝裂霉素处理过的小鼠成纤维细胞饲养层上,再经胰酶消化使 ICM 细胞团增殖从而得到多个原始的 ICM 细胞克隆,最终建立了未分化的 ES 细胞系。同年,有人用免疫手术法(Immunosurgery)分离 ICM 细胞,在上述的饲养层上用 EC

细胞的培养液培养,也得到未分化的 ES 细胞系,后来进一步简化了延缓胚胎着床或免疫手术等复杂步骤,直接把晚期囊胚接种在饲养层上,也成功地建立了 EC 细胞株(H. R. Axelord 和 E. Lader,1983 年)。丛笑倩和 C. Mummery 以及 H. R. Eistetter,(1989)先后报道,用小鼠的 16~20 个细胞的桑椹胚分离得到了 EC 细胞系,它的成功率比胚泡期 ICM 的要高得多,46 个桑椹胚得到 17 个细胞系,占 37%;而 108 个胚泡只能得到 9 个细胞系,仅占 9%。这可能由于所培养的桑椹期细胞是单个的,因而减少了促使细胞分化的相互接触和影响,使得这些单个细胞容易增殖,从而使 EC 细胞的建系成功率远高于发育阶段较晚的胚泡。不论是从胚泡的 ICM 细胞,还是从桑椹胚细胞都能分离得到 EC 细胞系。用这种方法建立 EC 细胞系不受鼠不同品系和遗传背景的限制,即使是单性生殖的胚胎和致死突变的同源胚胎,也能得到 ES 细胞系。

EC 细胞性质。核型异常:畸胎瘤初期的 EC 细胞,具有与正常胚胎细胞相同的染色体数,但随着肿瘤细胞增殖和体外长期传代培养,产生选择作用,染色体数目往往发生异常,细胞的分化潜能也相应地受到限制(丛笑倩、姚钰,1987),虽然有些在饲养层上生长的 EC 细胞系也可维持其多能的稳定性。另一方面,得到的 EC 细胞在建系初期就可能是异质性的,包括生长特性,染色体结构以及分化能力等。发育潜能:把 EC 细胞注射到胚胎环境中,虽然能够形成嵌合体小鼠,但形成的比例一般较低。有的也易产生带瘤嵌合体,很少形成生殖细胞嵌合体。即使像具有正常核型的 METF-1 和 P<sub>10</sub>EC 细胞,形成嵌合体的能力也很低,前者仅 13%,后者虽然形成嵌合体比例高达 53%,但也未见有生殖细胞嵌合体。

ES 细胞性质。核型正常:ES 细胞是直接从桑椹胚和晚期胚泡的 ICM 细胞直接培养获得的,这种经短期培养而得到的 ES 细胞,无论在体内或体外都具有高度的分化潜能,同时绝大多数 ES 细胞系都具有正常的整倍体核型。发育潜能性和正常整倍体核型这两个特点,可能有着内在联系。ES 细胞在体外极易分化,因此必须生长在小鼠胚胎成纤维细胞饲养层上或培养在大鼠肝细胞(BRL)的条件培养液中,否则将不能维持它的未分化状态。发育潜能:ES 细胞形成嵌合体的能力较高,平均达 35%,可能与嵌合体各个器官包括生殖腺的发育。但是在后一类嵌合体,不一定都具有生殖能力,常发现有外表似雌性的畸变现象,可能的原因为 XY 型的干细胞被注射到宿主 XX 型的胚泡中,产生了含有两性性的胚胎,在发育过程中干扰了宿主的 XX 型胚胎正常发育,从而转变为外表似雄性的嵌合体。这种嵌合体不能生殖,经解剖观察证明是雌雄生殖器官同体(E. J. Robertson 和 R. Bradley,1986)。

培养的 EC 和 ES 细胞一般都来源于发育中的早期胚胎,12.5d 原始生殖嵴也能产生 EC 细胞。胚胎细胞的移植实验指出,7d 龄的胚胎所含有的原始内胚层,胚胎外胚层和胚外外胚层分别作异位移植时,30d 后只有胚胎外胚层形成多种分化组织和大量的未分化的 EC 细胞(S. Diwin 和 L. G. Stevens,1976)。ES 细胞一般都是从 4.5~6d 的胚胎直接分离培养得到的,这表明 7d 龄的胚胎外胚层细胞仍具有全能性质。就 EC 和 ES 细胞本身的各种特性而言,它们极接近于 5.5d 龄胚胎原始外胚层细胞。从细胞形态分析,细胞直径一般为 12~14μm,超微结构显示未分化的外胚层细胞特性:核大,多为常染色质,核仁也大,细胞质结构简单,散布着大量的游离核糖体和为数甚少的线粒体。EC 和 ES 细胞均表达 5.5d 龄原始外胚层细胞的表面抗原,如 Forssman 抗原存在于培养的 EC 和 ES 细胞,晚期桑椹胚和 ICM 细胞,但不存在于 6.5d 龄的胚胎外胚层细胞(M. J. Evans 等,1976)。培养的 EC 和 ES 细胞并不等于胚胎的 ICM 细胞,如果将培养的 EC 或 ES 细胞团注射到去除 ICM 细胞的滋养层囊泡中,并不发育成胚胎(J. Rossant 和 V. E. Papaioannol,1985)。可能除了 EC 和 ES 细胞在发育时间上比 ICM 细胞约晚 1d 外,缺乏 ICM 细胞所具有的与其他整体胚胎细胞相互依赖的有序的

完整性,可能是培养的 EC 和 ES 细胞不能发育成胚胎的原因。无论 EC 或 ES 多能细胞,当接种到同系宿主的体内,都能像肿瘤细胞那样不断增殖并分化为多种类型的分化细胞,形成畸胎瘤样结构。然而 EC 和 ES 细胞系细胞的这种瘤性生长行为可以通过接种到胚胎环境(胚泡)中而改变或失去。这里,EC 和 ES 细胞往往有着程度的,有时甚至是本质的区别。ES 细胞的增殖和分化易受胚胎环境的调节信号影响,参与宿主胚胎各种胚胎组织和器官的形成,而 EC 细胞系的细胞则不然,有的 EC 细胞可以为胚胎环境所“正常”化,参与宿主胚胎的组成,而大多数 EC 细胞保持继续增殖,形成肿瘤或引起胚胎死亡。EC 细胞的这种不易“正常化”的性质可能要归因于这些细胞的核型异常。

通过干扰并分析发育过程中出现的突变,是研究哺乳类胚胎发育机理的途径之一。已发现了一些发育上的致死突变,并确定了它们相应的遗传位点。发育突变体胚胎的不能发育可能是细胞致死效应引起的结果,也可能是特殊的细胞谱系缺失所致。(E. J. Robertson 等,1986)。然而,仅用生化和分子生物学方法还难以研究胚胎在发育过程中的突变和证明其有关基因产物,研究发育突变体需要纯合子型的实验材料。因此就有必要从同源型胚胎建立多能突变干细胞系。这样,一方面通过比较突变型与野生型干细胞之间的分化潜能,不仅能了解基因异常表达的结果,而且也可以知道突变干细胞对发育刺激信号的反应能力;另一方面也可将这种突变干细胞接种到胚胎中产生嵌合体,分析这些细胞的发育和分化潜能,从而有可能较全面地探讨发育突变体问题。值得指出的是,从 t-复合位点致死突变的纯合子型胚胎成功地建立的 ES 突变细胞系不仅能在体外培养,而且也可以被诱导分化成各类细胞,表明这个突变似乎不是通过一些细胞致死效应而起作用的,也不是由于分化受阻遏的结果。但是胚胎的聚集实验表明,这些嵌合胚仍不能存活。纯合子型 ES 突变细胞株的建立,不仅解决了实验材料来源不足困难,而且也可从这些细胞中抽提出 DNA, mRNA 和蛋白质等物质,这些生物大分子物质对研究突变基因的功能,改造和克隆由 t-复合位点基因转化的纯合子型细胞株以及恢复其野生型功能都是十分重要和必需的。

EC 和 ES 细胞都是多能干细胞,在体内或体外能分化为属于 3 个胚层来源的各种组织,许多实验室常用为研究早期胚胎发育的模型。不同的诱导剂和不同的生长条件可以控制 EC 或 ES 细胞的生长分化,并由此可获得不同分化类型的细胞。同时因后者表达和合成不同的蛋白质,从而可对比较验证正常胚胎发育中的一些重要标志。如 F9EC 细胞在正常培养液中失去分化能力,但在低浓度的 RA 中 F9 单层细胞可以分化为原始内胚层样细胞,若这种细胞成聚集状态时,在同样 RA 诱导条件下又形成脏壁内胚层或体壁内胚层(除 RA 外,另加诱导因子 cAMP)。前者的标志物是甲胎蛋白,后者是基膜蛋白。这些衍生于 EC 细胞的内胚层细胞就其表达的蛋白标志而言,很类似于胚外组织细胞的谱系(S. Strickland,1981)。P19EC 细胞系能被控制诱导产生心肌细胞或神经细胞(M. Mcburney 等,1981),根据这些诱导结果,可利用体外培养系统探讨正常胚胎中某些细胞的分化机制。RA 也能诱导体外 ES 细胞的分化,分化细胞的类型一则依赖于 ES 细胞本身的生长方式和环境,二则是不同的 ES 细胞系可产生出不同的细胞类型(C. L. Mummery 等,1990)。维生素 A 酸(RA)和双丁酰基环核苷单磷酸(dAMP)能诱导单层培养的 ES 细胞产生神经胶质样细胞;若 ES 细胞聚集后贴壁培养再经 RA 处理则产生有搏动功能的心肌细胞(徐洁等,1991)。从胚胎性干细胞制备和筛选 C-DNA 库,进一步证明不同类型的细胞所表达的基因不同,并试图了解这类基因的表达与胚胎发育关系。已分离到许多特异性分化细胞的 c-DNA 克隆。例如,1984 年 A. J. Stacey 和 M. J. Evans 从 PSMB EC 细胞中分离到 EC<sub>1</sub> 基因,证明这种基因只存在于 EC 和 ES 细胞以及睾丸组织,而在其他分化组织中不表达。鉴于 EC 和 ES 细胞实际上是胚胎的原始外胚层细胞,揭示 EC<sub>1</sub> 基因可能在早期胚胎发育中起着调节的作用。

由于细胞转染技术改进,特别是发展了显性选择系统和构

建了高感染病毒载体。使有可能把外源 DNA 有效地导入体外培养细胞。利用 ES 细胞的发育多能性特点,在不改变干细胞多能性质的前提下,这些技术同样也可用来将外源 DNA 导入 ES 细胞,进一步制备嵌合体,从而研究某些外源基因在胚胎发育中的作用,例如探讨这些外源基因在发育中是组织特异性表达,还是发育阶段性表达等问题。如果能建立人类遗传性疾病有关基因的嵌合体模型,研究这些基因在个体发育中的表达规律和探索基因治疗,使之用于造福人类,则意义就更大了。1986 年,Robertson 等人用磷酸钙沉淀法将 neo 基因导入 ES 细胞获得了成功,产生生殖细胞嵌合体,提示 neo 基因能稳定地世代传递。男性缺少次黄嘌呤-磷酸核糖转移酶(HPR1)会导致许尼汉氏病,临床表现为智力迟缓和肢体残缺等症状。1987 年 M. Hooper 等人建立了 HPR1 自发突变的 ES 细胞系,用逆转录病毒 DNA 随机插入(M. R. Kuehn 等 1987),或用同源重组方法(K. B. Thomas 和 M. R. Capecchi 1987)也得到了 HPIT 缺失 ES 细胞系,最终成功地获得了 HPR1 缺失的嵌合体小鼠。这种模型的建立为探索基因治疗提供了有利的条件。近有人报道胶原蛋白 II 型基因和 r-晶体蛋白基因在嵌合体小鼠组织中的特异表达,前者位于嵌合体的身躯,后者分布在晶体(R. H. Lovell-Badye 等,1987; Y. Takahashi 等,1988)。1989 年 D. Shinn 等人将大鼠肌动蛋白和珠蛋白的嵌合基因转入 ES 细胞,并把这种细胞接种在裸鼠皮下,在所生的瘤状物中分离出来的肌原细胞含有这种嵌合基因 mRNA 的表达。这种肌原细胞经马血清和胰岛素诱导形成肌管后,该 mRNA 表达可增至 5~10 倍。以上实验结果表明,利用 ES 细胞系可探讨外源基因在胚胎发育中的作用。

通过基因嵌合体的分析,也可探讨癌基因的功能,例如癌基因 mT 的功能。用 N-TKmT 载体转染 ES 细胞,再将转染细胞注射到小鼠的胚泡中,发现其中 40% 以上嵌合胚的血管形成不正常。近 40% 嵌合胚产生血管瘤,阻断了进一步正常发育。在这种情况下,即使能得到活的携带血管瘤的嵌合小鼠时,也只能存活 14~42d。进一步研究证明癌基因 mT 的表达主要是破坏了内皮细胞和肾上腺皮质细胞的生长(E. F. Wagner, 等,1990)。综上所述,小鼠 EC 和 ES 细胞都是多能胚胎性干细胞,相当于在体胚胎 5.5d 龄的原始外胚层细胞。在体内外一定的条件下,能被诱导分化成为各种类型的细胞或组织,如果将它们,特别是 ES 细胞,接种到胚胎环境胚泡中能参与正常的胚胎发育。但是大多 EC 细胞核型异常,常保持其恶性生长特性,而 ES 细胞则由于核型正常,细胞增殖和分化易受胚胎环境的调节。因此,就作为研究哺乳类发育和遗传问题的模型而言,ES 细胞比 EC 细胞更优越。ES 细胞也是探讨基因,包括外源基因,在胚胎发育中表达和功能的途径之一,更有望在建立人类遗传疾病模型,探讨其发病机理和临床基因治疗等问题上提供有效的手段。

(中国科学院上海细胞生物学研究所从笑倩研究员撰)

### 辐射对天然杀伤细胞及其活性的影响

20 世纪 70 年代初,人们在研究细胞诱导的细胞毒作用时,发现来自正常人的或动物的淋巴细胞可杀伤肿瘤细胞,并把这种不需抗原刺激、不依赖于抗体和补体存在、不受主要组织相容性抗原限制的细胞毒的作用称为天然杀伤(NK)活性,介导 NK 活性的细胞称为 NK 细胞。这是一组在来源、形态、功能、调节等方面有很强异质性的细胞群。现在普遍认为,NK 细胞来源于骨髓干细胞,为非 T、非 B 性,属大颗粒淋巴细胞(LGL),具有抗肿瘤、抗病毒、介导骨髓移植排斥等作用,参与多种生理过程的调节,同时也受多种因子的调控。NK 细胞杀伤溶解靶细胞要经过效靶细胞结合、NK 细胞活化、毒素因子(如 NK 细胞毒因子 NKCF,胞溶素 CL 等)释放及与靶细胞结合、靶细胞裂解等过程。

NK 细胞的辐射敏感性 细胞受射线作用后发生形态、结构、功能的变化,表现为破坏、死伤、功能抑制或丧失。淋巴细胞是对辐射敏感的细胞之一,而 NK 细胞较 T 细胞、B 细胞则不敏感。据报道,人外周血淋巴细胞(PBLC)受 γ 射线照射后,T、B 各



亚群存活曲线的  $D_{50}$  值为  $4.5 \sim 5.5$  Gy, 而其对肿瘤细胞的 NK 活性的效应——剂量曲线的  $D_{50}$  值为  $7.5 \sim 8.5$  Gy (D. M. Dean, 1978)。刘树坤(1989)报道,小鼠受 X 射线全身照射(TBI)24 小时后,胸腺和脾脏各种指标的  $D_{37}$  中,脾脏 NK 活性的  $D_{37}$  值(16.4Gy)大于 T、B 各亚群数量或功能的  $D_{37}$  值(0.65~11.15Gy)。NK 细胞对辐射的反应各家报道很不一致,反映 NK 细胞辐射反应性的强异质性。有报道说 10Gy  $\gamma$  射线照射对人 PBLC 的 NK 活性和克隆形成抑制活性(CIA)影响不大(C. A. Kcever, 1988),甚至有些人的 NK 活性对 30Gy 仍抗拒,但大多数报道认为 4~5Gy 的 X 射线或  $\gamma$  射线即可引起人 PBLC 或动物脾脏 NK 活性下降,30Gy 足可以使大多数动物的 NK 活性严重受损或完全丧失。

自 70 年代末期提出低剂量电离辐射可增强机体免疫系统或免疫细胞体外功能以来,大量研究资料已使“辐射刺激作用”这一概念为人们所接受。有证据表明 NK 活性同样存在这一现象,且产生刺激作用的剂量范围变化很大。范晓慧(1989)报道,0.025~0.5Gy X 射线照射使小鼠脾脏细胞的 NK 活性增强。Rena (1990)报道,人 PBLC 受 2~6Gy  $\gamma$  射线照射后 3h 总的细胞毒性增强,48h 后 NK 细胞的作用较对照高出 70%。而 Dean (1978),Browall(1981)报道, $\gamma$  射线对人 PBLC 的 NK 活性有刺激作用的剂量范围分别是 <10Gy 和 5~20Gy。日本原子弹爆炸幸存者中,Bloom(1983)报道估计当初受照剂量在 0.50Gy 以下者,35 年后其自然细胞介导的细胞毒作用明显高于受照剂量为 0.00Gy 者,受照时年龄(ATB)对此影响不大;而周藕良(1989)报道两种剂量 0.01Gy~1Gy 和 >1Gy 对 NK 活性的增强作用仅发生在 ATB>25 岁者,而对 ATB<14 岁者主要表现为抑制作用。

受照动物 NK 活性的动力学变化 射线作用于机体或体外系统后,NK 作用的变化大都表现出时相性,随动物品种不同,照射剂量与方式的不同,其变化无一定规律。

NK 活性受照后的变化还与所用的靶细胞有关,如乳腺癌患者 45Gy 局部照射后,其 PBLC 对 K562 细胞的 NK 活性于放疗结束后明显下降,3~4 个月后恢复正常,而对 Chang 细胞的 NK 活性起初仅轻微下降,3~4 个月时尚有“超常”,之后再回到正常。

NK 活性的辐射效应机理 NK 活性的辐射效应指 NK 细胞本身质和量的变化及机体或测定系统 NK 活性的变化。20Gy  $\gamma$  射线照射人外周血单个核细胞(PBMC)后电镜观察,NK 细胞形态的变化主要发生在胞核、胞浆,包括核疏松、核缢缩、核碎裂及胞浆颗粒变化,而胞膜变化很小。

在生化方面,射线引起的 DNA 断裂激活在其修复中起关键作用的 ADPRP(二磷酸核苷酸并多聚酶),而 ADPRP 的抑制剂 3AB(3-氨基苯甲酰胺)可完全消除 30Gy  $\gamma$  射线对 NK 活性的抑制;同时,比较  $\gamma$  射线和烷化剂链脲佐菌素(SZ)对不同的人群的 NK 细胞的抑制作用,发现 NK 细胞对  $\gamma$  射线和 SZ 的敏感性有关,即 DNA 链易被化学物质破坏(因而激活 ADPRP)的 NK 细胞也对  $\gamma$  射线敏感。Schacter 认为 ADPRP 的激活和其水平在 UV、X 射线、 $\gamma$  射线照射对人 NK 活性的抑制中起重要作用,并可能决定着 NK 活性对  $\gamma$  射线辐射敏感性的多样性;相反,DNA 断裂本身对 NK 活性并无损害,因为 3AB 的另一作用便是使照射引起的 DNA 损伤加重并抑制其修复。

已知射线产生损伤的方式之一是通过产生活性氧基团(ROS)作用于生物大分子。有人证实,照射时超氧化物歧化酶(SOD)的存在可减轻 UVB/PUVA 对 PBLC 的 NK 活性的抑制,但在照射前洗去 SOD,则不改变 NK 活性受抑程度,说明在 NK 细胞辐射损伤机理中氧自由基占重要地位,且主要在 NK 细胞的外环境中起作用。

至于辐射对 NK 活性刺激作用的机理主要有 3 种解释:(1)在 PBLC 及脾细胞中存在对辐射很敏感而对 NK 活性有抑制作用的细胞( $T_8$  细胞?),在较低剂量照射下即先受到损伤,从而

解除对 NK 活性的抑制;(2)神经—内分泌网络调节下的 Th 细胞的活化及 IL-2(白细胞介素 2)分泌增加,可能在整个增强效应中起关键作用;(3)辐射敏感细胞的死亡导致 NK 细胞所占比例增大。如范晓慧(1989)证明,0.5Gy TBI 后,脾细胞数量变化远比 NK 活性变化明显,但 75mGy TBI 后,NK 活性增强 19%,脾细胞计数仍为对照的 93%,故 NK 活性增强是否由于 NK 细胞在总的细胞中所占比例增大,也有待研究。Onsurd(1981)证明,骨盆局部照射 40Gy 的病人 3~5 年后,单个 NK 细胞活性增强,但全血 NK 活性并无差异,由此可见是 NK 细胞的数量和杀伤效率共同决定 NK 活性的水平。

影响 NK 细胞辐射反应性的因素 (1)遗传:正常人 PBMC 受 30Gy  $\gamma$  射线照射后,有的 NK 活性完全丧失,有的降低 50%,有的完全保留。1987 年,Browall 得出 NK 活性的辐射敏感性受伴性遗传的共显性基因控制,且遵循孟德尔遗传规律,约 97% 的 X 染色体带有辐射抗性基因,所以几乎没有女性的 NK 活性可以耐受 30Gy  $\gamma$  射线,而对辐射仅部分敏感的人中没有男性。(2)射线种类及照射方式:不同射线对 NK 细胞有不同程度的生物学效应,紫外线(UV)照射可使人 PBMC 的 NK 活性呈剂量依赖性下降,有人认为是其中波长较长的波段 UVA 起主要作用,但也有人认为波长较短的 UVB 起作用,而 UVA 单独并不能引起 NK 活性抑制。Herberman(1978)曾报道,大鼠脾细胞体外照射 10Gy 后 2 天,仍保留着 50% 的活性,而全身照射 9Gy 后 NK 活性即完全消除,验证了 NK 活性整体照射比离体照射时更敏感。放射性核素内照射时,受其体内分布及代谢影响。<sup>90</sup>Sr 等亲骨性核素可引起动物 NK 活性的完全缺乏,<sup>90</sup>HOH 照射与体外同等剂量的  $\gamma$  射线照射相比,对 NK 活性的危害更大。(3)IL-2 等其他因素,与 IL-2 共育后可明显提高人 PBLC、LGL 的抗辐射能力。如使人 PBLC 受 30Gy 照射后,对 K-562 细胞的杀伤活性由对照的 24.8% 提高至 83.1%,UVB/PUVA 照后,PBMC 的 NK 活性可被 IL-2 明显增强。LGL 受照后,立即与 IFN 共育可保持 NK 活性不降低,甚至高于非照射细胞。可能存在一些对辐射更不敏感的有潜在 NK 活性的细胞,与刺激剂共育表现出 NK 作用,病毒感染后 3 天,肝脏、腹腔处聚集的 LGL 辐射敏感性增强,可能与效应细胞分化、增殖加快有关。

NK 细胞及辐射致癌 辐射致癌机理包括射线所致染色体畸变、细胞癌变和癌细胞逃避免疫监视在体内的生长等。Warner (1982)报道,1.6~2.0Gy 多次照射,可强烈抑制动物的 NK 活性,使 C57BL/6 小鼠照后 3~5 个月白血病发生率高达 80% 甚至更多,而末次照后输入克隆化的 NK 细胞的小鼠,患病率小于 10%。Gorelik(1982)等报道,1.79Gy/次、周×4 周 TBI 照射 C57BL/6 小鼠可使 93% 的动物发生 T 淋巴瘤,这些小鼠脾细胞的体外 NK 活性,体内脾脏对接种肿瘤细胞的清除率均有较持久的降低(至少照射结束后 7 周仍可检出)。Lotzova 报道,骨髓移植可以重建这类小鼠的 NK 活性,并因此阻止白血病的发生。

但 1986 年 H. J. Seidel 等认为,很难把辐射致白血病的发病归结于 NK 活性的下降,因为  $1 \times 1.5Gy$ ,  $1 \times 4.5Gy$  与  $4 \times 1.75Gy$  3 种照射方式引起的 NK 活性抑制并无明显差别,前二者却不诱发白血病。NK 细胞对辐射较不敏感,其辐射反应受动物种类、照射方式、剂量、剂量率等众多因素影响,研究 NK 细胞及 NK 活性在受照动物体内的变化,既可帮助人们揭示免疫系统的奥秘和放射生物学规律,也有较高的临床价值。

(军事医学科学院放射医学研究所王宜强、王瑛琪、刘树坤审)

AT 细胞对电离辐射敏感的原因 毛细血管扩张性共济失调(Ataxia-telangiectasia,简称 AT)是一种人类常染色体隐性遗传病,发病率约为 1/40 000(M. Swift, 1986),其主要临床症状为进行性小脑性运动失调,静脉毛细血管扩张, $\alpha_2$ -胎球蛋白增高,糖耐量降低,内分泌异常,早衰,多种免疫功能缺陷,累发淋巴瘤网状细胞瘤及其它实体瘤,如乳腺癌、胃癌、胰腺癌、膀胱癌等。肿瘤的发病率约比正常人高 84~167 倍(N.

Lenon, 1989)。其典型的细胞学特征是对电离辐射和似辐射药物高度敏感。虽然 AT 发病率很低,但携带 AT 基因杂合子的人却较为多见,约占人群的 1.4%。这些人的细胞对电离辐射敏感程度介于 AT 细胞和正常细胞之间,不表现 AT 的临床症状,但易发癌症,特别是乳腺癌。据 Wwitt 报道,约有 15% 乳腺癌患者携带 AT 基因。由于这部分人对电离辐射敏感,给肿瘤放疗造成困难。

鉴于 AT 以上的特点,对 AT 的细胞分子生物学的深入研究对阐明细胞电离辐射敏感性的分子基础,探讨 DNA 修复的基因调控和修复忠实性,进一步探讨免疫缺陷的原因和致突变的原因,都具有重要的理论意义和实际意义。

**AT 细胞遗传学互补分析** 根据属于不同互补组的 AT 细胞融合后能够表现出不同辐射敏感性的现象,可以证明 AT 的基因异质性。如果进一步利用微细胞介导的染色体转移技术,还可以对 AT 基因进行定位和克隆。

在 AT 互补分析研究中,由于其复杂多样的细胞学特性,人们采用的互补分析标志不同。1977 年,Paterson 等首次对 AT 互补组的分析是依据某些 AT 成纤维细胞系,在缺氧条件下受  $\gamma$  射线照射后, DNA 修复能力下降的特性进行的,他将 AT 细胞系分为“外切缺陷”和“能够外切”两组; Jaspers 等以 AT 细胞对电离辐射所致 DNA 合成抑制的抗性作为互补分组标志,将 5 株 AT 细胞分为 3 个互补组,而 Murnace 以同样的标志将 7 株 AT 细胞分为 4 个互补组。Thacker 等发现利用细胞辐射敏感性作互补分组标志和以辐射所致 DNA 合成抑制的抗性作标志的互补分析,会得出不相关联的结果。目前对 AT 互补组分析较为一致的看法是,以 AT 细胞对电离辐射的敏感性作标志,将 AT 划分为 A、C、D、E 四个互补组,而 B 是 A 的一个变异组(N. G. Jaspers et al, 1988)。

诸多 AT 细胞互补组的存在表明 AT 基因的复杂性,在互补组分析中,辐射敏感性与 DNA 合成抑制抗性缺乏一致的变化,说明显性特性的 DNA 合成抑制抗性与隐性特性的 AT 细胞辐射敏感性不是由一种基因所控制的。Lambert 等(1990)在 AT-D 组研究中发现一条重组染色体可以互补 AT-D 组细胞 5 种性质:(1)电离辐射敏感性;(2)DNA 合成抑制抗性;(3)电离辐射后细胞异常动力学;(4)AT 细胞 S 期延长;(5)博莱素诱导的染色体断裂加快。将此重组染色体转入 AT-A 组和 AT-C 组,未发现任何互补作用,这说明不同互补组的 AT 基因存在差异。

目前对 AT-A 组 AT 基因的定位有了一些明确的看法,认为 AT-A 组的 AT 基因位于染色体 11q22-33 位点(1988)。由于在这一区域不仅含有与免疫功能、神经功能相关的蛋白编码基因,如胸腺细胞膜标记基因(Thy-1)、神经细胞粘连分子(N-CAM)基因、CD3-T 细胞受体基因(CD3 $\epsilon$ 、CD3 $\gamma$  和 D8 $\epsilon$ ),而且还存在两个染色体脆点以及一些与非淋巴性细胞中染色体转位相关的断裂位点。对于染色体 11q22-33 位点的进一步研究对阐明 AT 患者易发神经功能缺陷、免疫缺陷和肿瘤有重要意义。

由于利用基因连锁方法研究 AT 基因定位既费时又需要大量 AT 患者家族,而微细胞介导的染色体转移技术为 AT 基因定位开辟了新途径。Komatsu 等将正常人 11 号染色体通过微细胞介导的染色体转移技术转入 AT-D 组细胞中,发现细胞恢复正常的辐射敏感性,因此认为 AT-D 组的 AT 基因也位于 11 号染色体上。然而目前对 AT-D 组 AT 基因的定位仍有不同看法。1990 年, Lambert 等将多条人 11 号染色体重组体转入 AT-D 组中,未见对其有任何互补作用。但是他们发现一条可以互补 AT-D 组细胞 5 种性质的染色体重组体。对此染色体,目前仅了解到其含有人 18 号染色体片段,对其他成分的鉴定还有待于进一步研究。

总之,对 AT 基因的定位将有助于对 AT 复杂表型原因的理解,有助于 AT 基因的定位和克隆,以及对电离辐射敏感性基础的认识。目前已经发现 1 株 V79 仓鼠细胞突变株 irsl,表现出与 AT 株相似的 X 射线敏感性和 DNA 合成抑制抗性及高染色体

畸变,而且具有与 AT 相似的表现。

**AT 细胞的 DNA 修复缺陷** 染色体 DNA 是电离辐射的靶分子。目前研究发现,一些对电离辐射敏感的突变细胞株存在着对辐射诱导的 DNA 断裂修复能力的缺陷,主要表现为两种形式:(1)DNA 断裂修复能力降低,如仓鼠突变株 xrs、大肠杆菌突变株 rorA 和 recN、酵母突变株 rad52 等;(2)DNA 断裂修复忠实性下降,如 V79 突变株 irsl、大肠杆菌突变株 rorB 等。这些突变细胞对断裂链修复能力的缺陷程度与他们对 X 射线的敏感性密切相关(P. J. Smith, 1990)。

在对 AT 细胞 DNA 断裂链修复能力的研究中发现,虽然 AT 细胞能重接辐射诱导的 DNA 双链断,但染色体畸变率增高。因此,人们的兴趣集中到 AT 细胞 DNA 双链断裂重接修复的忠实性上。

Cox 等首次利用基因转移技术将带有限制性内切酶切口的质粒转入 AT 细胞,发现 AT 细胞对转化质粒上双链断裂的重接修复正确率下降,AT 的正确重接率为 4%,而辐射敏感性正常的细胞 MRC8C 的正确率为 75%(R. Cox et al, 1984)。其后, Cox 等又构建了第 2 代载体 pPM17,采用相互联结的反筛选标记。实验结果支持最初的结论,而且通过 DNA 杂交实验发现,大多数转化的质粒载体得到重接,但在 DNA 链断裂点周围丢失部分 DNA 序列(R. Cox et al, 1986)。Debenham 等构建的第 3 代载体 pPMH16(又称 pPMHSV16),上面的两个标记基因 gpt 和 neo 可以独立地表达。用限制性内切酶 KpnI 在 gpt 基因中导入双链切口,再分别转入经 SV40 转化的 AT 细胞 AT5BIVA 和经 SV40 转化的辐射敏感性正常的细胞 MRC5CV 中,用 G418 筛选 neo 基因转化子,发现至少有 55 $\pm$ 6% MRC5CV 细胞转化子能正确重接质粒中的双链断裂,而 AT5BIVA 细胞转化子的正确重接率只有 9 $\pm$ 0.3%(P. J. Debenham et al, 1987)。

AT 细胞对外源性质粒上双链断裂修复忠实性下降,意味着 AT 细胞对自身 DNA 损伤的修复可能也存在着同样的缺陷,这种缺陷导致了 AT 细胞对电离辐射的高度敏感和染色体畸变率的升高。

在 AT 病人的 T 细胞中,可以观察到由于基因错误重排引起的染色体易位:t(x;14),t(7p;14q),t(7q;14q),7(14q;14q),inv(7),inv(7),inv(14)和 t(7p;14q)以及端粒二中心体的出现。在 B 细胞中存在 t(2;14)(p11;q32)染色体转位。在 AT 成纤维母细胞中出现端粒二中心体(A. M. R. Taylor et al, 1989)。Smith 等(1989)认为,这些染色体畸变体的产生是由于 DNA 双链断裂的末端重接过程和核酸外切酶降解过程的失调造成的。这一失调过程不仅在辐射引起的 DNA 损伤修复中造成修复忠实性下降,导致细胞对电离辐射的高敏感性,而且在组织分化中引起基因重排错误,导致染色体转位,从而引起 AT 的一些临床症状,如神经功能衰退、免疫功能失调及易发肿瘤等。当然,对这一假说的证实还需要对 AT 细胞的 DNA 损伤修复机制的进一步研究。

**拓扑酶的研究** 目前在鼠淋巴瘤细胞 L5178Y 中发现,细胞对电离辐射的敏感性与细胞对拓扑酶 I (Topoisomerase I, Topo I)抑制剂的敏感性相关。在对 X 射线敏感的仓鼠细胞突变系中,(如 xrs)可以观察到由拓扑酶 I (Topoisomerase I, Topo I)抑制剂喜树碱(camptothecin, CPT)诱导的染色体畸变率增高,并且这些细胞中广泛存在着 DNA 链断裂修复缺陷(I. D. Hickson, 1990)。因此,研究 AT 细胞中拓扑酶(Topo)的变化及对 Topo 抑制剂的敏感性,对研究 Topo 在 DNA 损伤修复中的作用有重要意义。

在 AT 细胞中,Topo 活性及由 Topo 抑制链断裂与正常细胞相比,并无显著变化,但 AT 细胞对 CPT 却异常敏感,其敏感性约为正常细胞的 3~5 倍(S. M. Davies et al, 1989)。而 Topo I 的活性在不同组织和不同互补组中的变化大不相同:在 AT 病人淋巴细胞中,Topo I 活性比正常细胞约低 10 倍,但 Topo I 的 mRNA 和酶蛋白含量不同;在 AT 成纤维细胞中,Topo I 含量

和活性在整个细胞周期中比正常细胞有显著提高,并且性的增高与含量的增加一致;但所有 AT 细胞都对 TOPOV I 抑制剂 VP16(鬼臼乙叉苷)异常敏感(I. D. Hickson, 1990)。

在拓扑酶作用过程中会产生一类称为“可断裂复合物”的 DNA 拓扑酶的中间产物拓扑酶抑制剂,如 CPT, VP16, mAMSA(1'- $\beta$ -吡啶氨基甲磺酸-间-茴香胺)等,通过与这些拓扑酶复合物作用产生双链断裂而发挥细胞毒作用。如在噬菌体系统中,Topo I 抑制剂 mAMSA 引起的移码突变就涉及可断裂复合物。可见,如果在细胞中存在依赖于“可断裂复合物”产生 DNA 双链断裂重接的异常中间体,也就必然与对 Topo 抑制剂的敏感性有关(I. D. Hickson, 1990)。Smith 等认为,电离辐射引起 DNA 损伤和拓扑酶抑制剂对细胞 DNA 的损伤在本质上可能有共同点,某些诱发染色体辐射损伤的途径也导致细胞对拓扑酶抑制剂的敏感性(P. J. Smith et al, 1989)。因此,对 AT 细胞 DNA 拓扑酶学的研究将有助于对 AT 辐射敏感性原因的理解。

AT 细胞对电离辐射高敏度性是目下 AT 细胞研究的热点之一。AT 细胞对电离辐射的高敏度性及 AT 多种临床症状可能与和 Topo I 相关的 DNA 链断裂修复缺陷相关,但有关这方面的证据还不充足,需对 AT 基因及 DNA 修复机制等作进一步的研究。

(北京放射医学研究所郭学青、夏寿萱撰、郑秀龙审)

**流式细胞仪** flow cytometer, FCM 又称荧光激活细胞分类仪(FACS)或流式细胞术(FCM)。它是当代激光、电子学、流体力学、光学精密机械、计算机、荧光染料、细胞生物学、分子免疫学等学科技术高度发展的产物,具有很强的数据采集及分析、分选功能。特别是在细胞分类、分析细胞表面标志、核酸含量等方面,有其独特作用,是近代生物学、医学领域中最先进的仪器之一。

1964 年,库尔特(W. Coulter)等介绍了 FCM 的应用技术。但此后的 10 多年间没有受到应有的重视。80 年代以后,FCM 得到快速发展和广泛应用。尤其是近年来激光、光学精密仪器、计算机等学科技术的高度发展,使 FCM 的性能不断完善,从而可以快速进行细胞分类,定量地测定核酸含量、酶活性、细胞体积、细胞膜表面受体和抗原等成分,在细胞生物学、细胞生理病理学、细胞遗传学、免疫学、血液学、药理学、海洋生物学、植物学等方面有着广泛应用。

FCM 由样品处理和输出系统、检测系统、电子计算机和数据分析系统 3 个集成部分组成。其工作原理并不复杂,通过流体力学的作用,让样品中的细胞排成单行,以稳定的速度同方向通过检测区。在检测区内,预先经过特定荧光素染色或细胞化学处理的细胞,在聚焦激光束照射下,产生荧光和散射光信号。信号的强弱与细胞内各种组分如核酸和蛋白质等的含量成正比,通过测定荧光信号的强度,即可知道细胞内各组分的含量。不同物质具有不同荧光光谱,如经吖啶橙染色的细胞,其 RNA 发红色荧光, DNA 发绿色荧光,这样仪器就可以同时测定 RNA 和 DNA。细胞的散射光信号是由细胞的衍射、折射光和反射光组成的,它取决于细胞的大小、形状、密度和染料的吸收等。用光电倍增管测定细胞的 90° 散射光,以获得细胞表面结构等方面的信息;用光电探测器检测细胞的小角(如 0.5°~2°)散射光,用于测定细胞的大小等。把各光电探测器检测到的荧光信号和散射光信号转换成电脉冲,送到信号处理单元,脉冲高压取决于接受光的大小。综合电脉冲的高低、宽度、面积,用计算机综合分析出细胞的大小、表面标记、内部结构,从而对每次测到的细胞作出准确评价,并以单参数直方图、双参数直方图或三维图的方式表示,实时显示出来。也可以把结果存盘或打印出来。FCM 的精确度可通过荧光微球的变异系数(HFCV)来反映。通常,分析免疫荧光时,要求对数绿色荧光(LGFL)的 HFCV < 5%,前向散射光(FLS)的 HFCV < 3%;分析核酸(DNA 或 RNA)含量时,要求红色荧光(RFL)的 HFCV 至少 < 1.5%。因此,每天开机时,应根据分析内

容核查荧光微球的 HFCV 是否在允许值之下,若高出允许值,应校正仪器的精确度。

FCM 分选细胞的速度及纯度是目前任何其他医学仪器无法比拟的。其分选速度可高达 3 000~5 000 个细胞/s,纯度可高达 99% 以上。在流动室上安装一个超声振荡器,从喷嘴往下喷射的液流在该振荡器的作用下被打断成一个接一个的液滴,细胞也被分散在这些小液滴中。通过光电探测器测定细胞的各种信号,如果信号满足预定的条件,即对应于所要收集的细胞,电子线路就产生一个电脉冲。该电脉冲在液流快要形成液滴时,通过电极对细胞充电,此时含有细胞的液滴就带有电荷。根据不同的要求,可对液滴分别充以正电和负电,使其通过一对偏转板时产生偏转。于是,带不同电荷的细胞在静电场的作用下,落在两个不同的试管里。

1983 年,巴洛吉尔(B. Barlogie)等研究和总结了 FCM 临床诊断肿瘤病的资料,发现细胞 DNA 含量异常增加,对恶性肿瘤的诊断具有结论性意义。巴洛吉尔认为,利用 FCM 测定肿瘤细胞 DNA 含量的动态变化,可作为指导肿瘤治疗、了解病情发展过程、预后等的考虑参数。FCM 还可用于宫颈癌细胞的自动甄别,用于分析痰样品以诊断肺癌,用于分析尿样品以检查膀胱表皮细胞癌等。1979 年,克里桑(A. Krishan)等报告,FCM 可用于研究抗癌药物的疗效和最佳的给药时间,是研究癌细胞被杀伤与恢复情况的有效工具。1983 年,海德利(D. W. Hedley)建立了石蜡包埋组织 FCMDNA 含量分析法,进一步开拓了 FCM 在临床应用的新领域,适用于通过短期的回顾性分析以明确肿瘤的发生发展及临床转归之间的联系。

利用免疫荧光方法结合使用 FCM,能辨认和计数带有不同表面特异性抗原的细胞。比如利用荧光素标记的免疫球蛋白,可以鉴别免疫活性或非活性的淋巴细胞,并且进一步可以把两者分开,以供免疫学研究。借助某些试剂,利用 FCM 可分析单克隆抗体,可测定和鉴别 T 淋巴细胞和 B 淋巴细胞及其亚群,用于研究免疫系统的功能,研究白血病、淋巴瘤、艾滋病及其他免疫缺陷疾病。

用 FCM 测定细胞染色体的形状和其中 DNA 的含量,可得到染色体的频率分布信息,发现某些遗传病综合征患者白细胞染色体(XXY)与正常男性的白细胞的染色体(XY)中 DNA 含量的不同。FCM 也可通过妊娠妇女血液检测胎儿的细胞,并有足够的灵敏度早期测定胎儿的性别。该技术还可扩展到动物的人工授精方面。

T 淋巴细胞亚群在机体细胞免疫的调控和效应中起主导作用。检测 T 淋巴细胞亚群,已成为基础医学和临床研究观察免疫状态的主要指标。1980 年,霍夫曼(R. A. Hoffman)等建立了 T 淋巴细胞亚群的全血溶解染色及使用 FCM 分析结果的方法。实践证明,FCM 分析全血染色的 T 淋巴细胞亚群具有快速、客观、不失真等优点。1986 年,桑斯韦特(J. T. Thornthwaite)等总结 31 例艾滋病的 T 亚类细胞及  $T_H/T_S$  的比值情况,结果发现,31 例中 OKT4 细胞的百分数全部低于正常,  $T_S$  的百分比全部高于正常,  $T_H/T_S$  的比值全部下降。如今,FCM 已成为诊断和研究艾滋病的要工具。1984 年,卡普(J. E. Cupp)等应用 FCM 检查母体血液中存在 Rh(+)或抗 D 抗原阳性的细胞,证实其有很高的敏感性,每 1 000~100 000 个红细胞中含 1 个阳性细胞即可检测出来。在母体妊娠过程中,检测是否存在 Rh(-)或抗 D 阳性的细胞,以了解胎儿可能遭到因 Rh 血型不合而发生严重溶血的结果,对指导治疗有重要意义。FCM 可用于对 B 淋巴细胞增殖性疾病的诊断,此类疾病包括各种多发性骨髓瘤、巨球蛋白血症、重链症、轻链症等,诊断的精确率较高。

用于其他方面的研究尚有:(1)用于检测血液中的大肠杆菌;(2)研究 EB 病毒受体在细胞上的分布、存留和再生情况;(3)研究郎罕氏细胞的不同亚群;(4)研究哺乳动物精子的发生和形态的测量等。

FCM 的某些性能目前尚不完善,主要难点在于:(1)要设计

加工一个更精密的流动室和流动系统,使细胞高速地排成一行,逐个按顺序通过激光照射区;(2)由于细胞很小,其荧光信号与散射光信号较弱,所以要设计大数值孔径的显微镜并使用合适的挡光杆、光阑、双色分光片、干涉滤光片等光学器件,以便收集尽量多的光信号;(3)要用高灵敏度低噪声的光电探测器和放大器以及各种高性能的电子线路;(4)设计微机多道脉冲分析器和编写相应的软件,对大量的数据进行采集和处理,仪器可进行单参数的、双参数的定时或定量采集。更主要的是,FCM 价格昂贵、操作复杂,因而限制了它的推广应用。如能针对上述不足加以改进,将会使其在更广泛的范围内发挥作用。

#### 参考文献

- 1 Titus J A, et al. Proc Natl Acad Sci. USA, 1981, 78: 519
- 2 Jerry A, et al. Expl Cell Biol, 1981, 49: 1
- 3 Kenneth A A. Diagnostic Immunology, 1983, 1: 2
- 4 Bohler D W, et al. Cancet Res, 1984, 44: 3317
- 5 Renzi P, et al. J Immunol Methods, 1987, 98: 53
- 6 奇云. 量子电子学, 1989, 6(2): 192
- 7 奇云. 科技通报, 1989, 5(6): 56~59

(安徽省淮南职业医专奇云副教授撰)

### 电离辐射对淋巴细胞的效应

the effects of

radiation on lymphocytes 机体遭受电离辐射作用后引起免疫功能降低,严重时可并发感染导致死亡。淋巴细胞是免疫系统最重要的也是对电离辐射高度敏感性的细胞,它可以反映辐射损伤时机体免疫和造血功能的异常,而且容易采自活体。因此,淋巴细胞的变化可作为早期判断受照剂量的客观而灵敏的指标,并可据此随时观察病情。早期的临床和实验研究工作是关于电离辐射对整群淋巴细胞的数量和形态的影响。急性放射病时,外周血中淋巴细胞数辐照后迅速下降,并持续减少,可以根据其数量变化判断病情。例如根据外周血淋巴细胞绝对值估算受照剂量:当 600 个/mm<sup>3</sup> 时推算剂量为 4~6Gy; 300 个/mm<sup>3</sup> 则剂量超过 6Gy。淋巴细胞存活率以及集落形成均随辐射剂量增加而减少,并显示含有两个辐射敏感性不同的亚群。花环试验观察淋巴细胞表面膜受体的辐射效应,还有研究浆膜表面电荷和细胞膜的通透性,认为淋巴细胞膜是辐射的敏感靶子。电子显微镜观察淋巴细胞核的分叶和空泡,胞浆自溶。辐射对淋巴细胞增生动力学的的影响;淋巴细胞的染色体畸变作为粗略受照剂量的“生物剂量计”,后来还应用分带技术、姐妹染色单体互换和早期染色体凝聚等指标研究辐射效应。1983 年,阿克亚马(M. Akiyama)对原子弹爆炸后的幸存者外周血淋巴细胞的变化做了大量观察,在接受 2Gy 照射后植物血凝素(PHA)诱导的外周血淋巴细胞转化的百分数降低随年龄增加而更加明显,因为部分淋巴细胞是长寿的,因而其辐射效应是持续的,癌的发生率高,而且易于感染。关于 B 淋巴细胞的辐射效应,对抗体的生成研究较多,有实验资料提示,照后 12~72h 给予抗原时,严重地抑制抗体生成,如在照前给予抗原,则免疫活性细胞已受到激活,辐射的影响就小,从而得出免疫活性细胞的敏感性顺序是:潜在性免疫活性细胞>激活免疫活性细胞>成熟效应细胞。

淋巴细胞也是一个很好的模型,可提供研究各种射线的效应及其相对生物效应。苏燎原曾用<sup>3</sup>H-胸腺嘧啶核苷掺入 PHA 激活的 T 淋巴细胞的指标测定快中子和<sup>60</sup>Co $\gamma$  线的相对生物效应为 1.98,与其他作者研究结果近似。1986 年,爱德华(A. A. Edwards)比较了质子和氦-3 离子对人淋巴细胞染色体畸变的相对生物效应。亦有用淋巴母细胞株的遗传性作为研究辐射敏感性的模型的。

许多人是应用各种丝裂原激活不同的淋巴细胞群体,进而研究其辐射效应的。PHA 激活 T 淋巴细胞,必须指出 PHA 能提高淋巴细胞辐射抗性。1984 年卧德斯(G. M. Woods)认为,可能与其激活后 DNA 聚合酶和连接酶活性增加,修复断裂的 DNA 及染色体功能增强等有关。其他丝裂原亦有类似作用。刀豆球蛋白

(ConA)激活 CD<sub>3</sub> 细胞,亦有认为它可激活 CD<sub>4</sub> 细胞。美洲商陆(PWM)激活 CD<sub>4</sub> 细胞和 B 淋巴细胞,使之产生免疫球蛋白。脂多糖(LPS)激活 B 淋巴细胞,许多作者认为它只激活脾脏 B 淋巴细胞。苏燎原成功地用 LPS 激活人血 B 淋巴细胞,察觉<sup>60</sup>Co $\gamma$  线 1~40Gy 作用后, PWM 激活的人血淋巴细胞转化受到显著抑制,并失去辅助 B 淋巴细胞转化的作用, LPS 激活的 B 淋巴细胞受相同剂量照射则变化不明显。肿瘤病人接受一个疗程的<sup>60</sup>Co $\gamma$  线治疗后亦有类似变化。ConA 激活的淋巴细胞受照后的变化和 PWM 激活的细胞类似。<sup>60</sup>Co $\gamma$  治疗后的肿瘤病人被 PHA 激活的 T 淋巴细胞转化明显受抑制,而 B 淋巴细胞转化却显著增强,后者可能由于 T 抑制细胞受抑。实验结果反映了人血 T 淋巴细胞比 B 淋巴细胞的辐射敏感性高。在细胞集落生成的实验中,表明 ConA 细胞比 LPS 细胞的辐射敏感性高。但有些学者认为 B 淋巴细胞比 T 淋巴细胞敏感。

淋巴细胞中含有各种不同的亚群,互相调节和制约。苏燎原应用淋巴细胞单克隆抗体的盘尼法或亲和层析法分离 CD<sub>4</sub>、CD<sub>8</sub> B 淋巴细胞和非 CD<sub>4</sub> 细胞等,并结合应用各种丝裂原激活,然后用<sup>3</sup>H-TdR 掺入探讨其相互调节及辐射效应,进一步察觉 PWM 除了激活 CD<sub>4</sub> 和 B 细胞外,还能激活非 CD<sub>4</sub> 细胞与 T 细胞。CD<sub>4</sub> 与 B 细胞在 PWM 作用下其 DNA 合成均有协同作用,其中一种细胞受 10Gy<sup>60</sup>Co $\gamma$  线照射后,协同作用即消失, ConA CD<sub>8</sub> 细胞比 ConA CD<sub>4</sub> 细胞敏感性高,但 PHA CD<sub>4</sub> 细胞和 PHA CD<sub>8</sub> 细胞敏感性无明显差别。CD<sub>4</sub>、CD<sub>8</sub> 和 B 淋巴细胞受 0.1Gy 照后,结合各自单抗的能力均非常显著地降低, CD<sub>8</sub>、B 细胞变化比 CD<sub>4</sub> 细胞更敏感,有学者认为淋巴细胞结合单抗能力下降与细胞接受器的基因缺失有关。

1991 年,模勒(W. U. Muller)认为淋巴细胞染色体的辐射效应仍然是估算接受辐射剂量的生物指示剂的重要指征。非对称性染色体畸变是敏感的生物效应指标。早期染色体凝聚的变化可以快速反映辐射效应,不需要等待淋巴细胞分裂。利用松胞素 B 技术产生双核细胞,用细胞萤光镜检查,辐射导致微核发生率比未经处理的淋巴细胞高几倍。1988 年,普洛色(J. S. Prosser)认为如果已知个体在照前的微核率,则 0.05Gy 照射引起的变化可以察觉,否则只能判定 0.1Gy 的辐射损伤。有些作者认为淋巴细胞微核是由发生畸变的染色体部分于胞质中在不同状态、不同条件下融合的结果,还认为与染色体畸变有高度密切相关性。另外还认为不是全部染色体断裂都能形成微核,有些断片经几次分裂仍保留在胞核内,有些微核在几次分裂后仍不丢失。部分微核可能是由整条染色体而不是断片形成的,然而,如果全部染色体断裂都能形成微核,染色体畸变率有可能接近微核率的上限值。

从分子水平研究淋巴细胞的辐射效应有很大进展。苏燎原的实验提示资料提示, PHA、ConA 和 PWM 激活的 3 种淋巴细胞受 1~30Gy 照后, DNA 单链断裂与辐射剂量呈线性关系,三者无显著差异。但受 15Gy 照后,以 PWM 细胞 30 分钟的重接修复率最高。此外,用流量细胞计分析,辐射损伤后淋巴细胞基因突变的发生率提高。1990 年,塔其巴拿(A. Tachibana)用 Southern 印迹方法发现 HPRT 的基因缺失,电离辐射引起大量突变,紫外线导致特征性点突变,点突变可以表现在碱基对的错误转换。1991 年,质夫托夫斯基(B. D. Zhivotovsky)发现辐射损伤淋巴细胞的过程中出现某些基因组激活的产物才能导致细胞死亡。辐射引起不规则 DNA 降解,核内出现 DNA 碎片,增加外膜的通透性,亦有用凝胶电泳检测 DNA 双链断裂的。低剂量电离辐射导致的适应性效应引起人们的重视,如 1991 年沃尔夫(S. Wolff)发现淋巴细胞受 0.02Gy X 线照射后再受氧作用,其染色体缺失相当于单独受氧作用的一半。

淋巴细胞各个亚群的辐射敏感性不同,了解哪一亚群细胞对辐射最敏感,从而影响其他亚群或对免疫系统产生效应,这是深入研究淋巴细胞辐射效应的一个重要方面。单克隆抗体问世,为医学研究揭开了新的一页,为深入研究淋巴细胞亚群提供了条件。各淋巴细胞亚群的功能及其相互调节是值得探讨的问题。

低剂量电离辐射的刺激效应,表现在延长寿命、刺激生长、促进 DNA 修复、减少染色体损伤、降低癌的发病率等,这些已逐渐被人们所证实,一个可能的重要机制是通过免疫系统介导了这些效应,而淋巴细胞是免疫系统最重要的细胞,因此研究低剂量电离辐射对淋巴细胞的效应对阐明辐射刺激效应的机制是非常重要的。有些学者研究了各种病人的淋巴细胞的辐射敏感性与正常人相比可帮助了解疾病时免疫方面存在的缺陷,有助于阐明发病机制,辐射敏感性高则肿瘤的发病率高。研究辐射对淋巴细胞的效应还可帮助制定辐射治疗某些白血病的方案。

参考文献

- 1 Akiyama M. et al. *Radiat Res.* 1983, 93: 572~580
- 2 刘树铮,主编. *医学放射生物学*. 北京:原子能出版社,1986. 165
- 3 苏燎原,等. *苏州医学院学报*, 1987, 7(1): 17~20
- 4 苏燎原,等. *辐射研究与辐射工艺学报*, 1988, 6(3): 29~33
- 5 苏燎原. *辐射研究与辐射工艺学报*, 1988, 6(3): 1~5
- 6 Prosser J S, et al. *Mutat Res.* 1988, 199: 37~45
- 7 耿勇志,等. *辐射研究与辐射工艺学报*, 1989, 7(4): 30~35
- 8 Tachibana A. et al. *Mutat Res.* 1990, 230: 159~160
- 9 Muller W U. et al. *Int J Radiat Biol.* 1991, 59(4): 863~873
- 10 Zhivotovsky B D, et al. *Radiat Res.* Toronto: Academic Press, 1991, 1: 216

(苏州医学院博士生导师苏燎原教授撰)

氟化物的亚细胞效应

氟对生物有机体存在危害性影响。在进入体内后,自身经历复杂的代谢过程,同时对体内不同的生命物质产生各种影响。氟化物(F<sup>-</sup>)的亚细胞效应研究是从亚细胞水平探讨 F<sup>-</sup> 对不同物质的影响,这项研究已达到一定的广度和深度。

氟化物的任何生物效应与氟的化学特征密切相关 氟原子(F)的电离能很高,因在小原子中电子被牢牢吸住,激活能也就很高。强氧化剂、低序的 F 可取代高序的卤原子。因 F-F 键能较低,反应活性高。由此决定氟具有以下与生物效应有关的化学特征。(1)根据共价键半径的大小, F 是第 2 最小的取代基, C-F 键强度与 C-H 键极为相近。在生物活性化合物中, F 与 H 在酶受体位点的空间效应上相似。(2)因 C-F 键强度大于 C-H 键,故氟引入有机物中时,热和氧化作用的稳定度增高,导致 C-F 键的生物稳定。(3)电负性高。氟改变电性,影响邻近功能团或分子构成(通过氢键形式或是极间作用)。(4)氟的存在增加分子的亲水性,提高具有生物活性的 F<sup>-</sup> 在体内的吸收率和迁移率,致使此类化合物在靶组织中含量增高。

抑制酶活性的机理 氟在生物系统中几乎能与所有金属离子构成复合物,因它是有力的配位体,掺入生物复合物,取代其它离子配位体,例如 OH<sup>-</sup> 离子,致使酶与底物错位,最终使酶失去活性。说明此类机理的示例是:(1)F<sup>-</sup> 过氧化物酶的过程。氟代过氧化物酶是在 F<sup>-</sup> 作用下形成的氟化酶或称氟抑制细胞色素 C 过氧化物酶,两者的分子结构基本上没有变化。(2)过氧化物酶含有 Fe<sup>2+</sup>, 在 pH 中性时,与 OH<sup>-</sup> 离子结合。当酶接触 F<sup>-</sup> 时, F<sup>-</sup> 便占有结合位置,挤掉水分子,即在该酶的活性中心—Fe<sup>2+</sup> 上, F<sup>-</sup> 取代原来的 O—Fe<sup>2+</sup> 形成 F—Fe<sup>2+</sup>, 此时—Fe<sup>2+</sup> 附近的质子数增多或铁与原子的距离缩短。(3)在过氧化物酶的周围原先存在的氢键网络被 F<sup>-</sup> 破坏,使—Fe<sup>2+</sup> 不再能与其形成强有力的氢键的基团发生联络,而形成 O—H...F 或 N—H...F(虚线表示氢键)新的氢键联系。(4)酶中精氨酸残基(Arg—48)向氟原子移位约 2×10<sup>-4</sup>μm, 以优化形成氨基与氟原子的氢键,而组氨酸残基(His—52)则移位约 5×10<sup>-5</sup>μm, 使咪唑基与氟原子搭成氢键。因此, F<sup>-</sup> 抑制酶活性不是通过改变酶的基本分子结构,而是通过改变酶分子形状或构型而发生的。其原因是氢键尽管比 C—H 化学键脆弱,但是一旦形成网络体系,如 DNA 那样能起不小的保护活性的作用。与痕量的铅或铍在机体内形成新型的磷酸类似物

[AlF<sub>x</sub>(x<sup>-3</sup>)(x=1-6)]或[BeF<sub>x</sub>(x<sup>-2</sup>)(x=1-4)]。它们对磷酸核苷酸与蛋白质结合部位具有高度亲和力,还能生成焦磷酸酯类似物。由此 F<sup>-</sup> 对所有的 ATP 酶和磷酸酯酶以及 G 蛋白质产生影响,干扰在许多酶中负责能量和信号传递的磷转移过程。

胶原——氟作用的靶位 胶原是由 3 条多肽链拧成的三螺旋,分子间以共价键交联,定向排列的原胶原构成。甘氨酸、脯氨酸和羟脯氨酸及赖氨酸、羟赖氨酸是胶原蛋白中的重要氨基酸组分,占氨基酸残基总量的 2/3,按照化学结构,胶原可分为 I、II、III 和 IV 等 4 型,各型均有一定的分布,在 F<sup>-</sup> 的作用下,胶原纤维的规则性下降,不同片段增厚不一,取向紊乱,骨骼培养物吸收减弱。尤以新生胶原受害最重。F<sup>-</sup> 致使胶原形态学变化外,还阻抑胶原蛋白合成,胶原数量普遍减少,羟脯氨酸和赖氨酸也随之减少,相反,脯氨酸却增多。上述的阻抑作用对不同型胶原具有选择性。胶原纤维不仅是软硬组织的重要结构成分,而且也是器官细胞间质中的共同物质,因此 F<sup>-</sup> 累及胶原的后果是危害各种器官组织的结构和功能。目前,有些学者主张胶原是有机体内氟作用的靶位,其理由是(1)F<sup>-</sup> 降低胶原纤维中氢键的形成,胶原中形成氢键的关键基团是羟基,它是脯氨酸在脯氨酸羟化酶催化下生成。羟化酶的主要辅助因子是维生素 C, F<sup>-</sup> 导致维生素 C 代谢异常,由此降低羟化酶活性,促使胶原中无足量的羟基去形成氢键。另因维生素 C 是甾类脱氢酶的重要辅酶之一,因此 F<sup>-</sup> 还危及甾类物质的合成。(2)F<sup>-</sup> 降低胶原的交联程度。饱和的多肽—醛基是胶原分子两端的赖氨酸或羟氨酸残基经氧化生成的交联前体。它与分子内另一条肽链相近的醛基发生醇醛缩合反应,使这两条肽链共价交联,增强胶原纤维的坚韧性。F<sup>-</sup> 降低铜和铜依赖的赖氨酸氧化酶活性,致使胶原中饱和醛基减少造成胶原纤维交联不足。由于以上两方面的 F<sup>-</sup> 作用,导致胶原分子结构稳定性的下降,原胶原易被降解,出现尿中排泄原胶原。(3)F<sup>-</sup> 能使有机体内钙含量减少,而钙是水解原胶原的胶原酶的激活剂,因此 F<sup>-</sup> 能抑制胶原的分解代谢。

对染色体的损伤 氟化物的生物效应研究中存在实验结果互相矛盾的现象,除酶、生物膜等外,细胞遗传效应、染色体损伤中尤其突出。在整体实验中, F<sup>-</sup> 不诱发动植物细胞的染色体畸变(主要是单体型断裂和裂隙)、姐妹染色单体互换(SCE)、微核和程序外 DNA 合成(UDS)以及不延迟细胞周期动力学过程,也不诱发小鼠卵细胞染色体损伤。在离体实验中, F<sup>-</sup> 诱发动植物细胞染色体损伤,如染色体畸变、SCE、微核和 UDS、以及延迟细胞周期动力学过程。用 L5178Y 小鼠淋巴瘤细胞前向突变检测确定在胸腺嘧啶酶位点上,突变体集落经 F<sup>-</sup> 处理后增多,表明在该系统中已发生染色体畸变。F<sup>-</sup> 除诱发人外周血白细胞的染色体断裂和裂隙外,还诱发着丝点碎片、非整倍体和多倍体的结构畸变,洋葱根尖细胞发生染色体畸变外,发生后期延迟和桥。F<sup>-</sup> 诱发小鼠、绵羊和牛的卵母细胞后期延迟发生率偏低,出现极体 I (PBI)抑制和重排碎片,诱发小鼠睾丸细胞染色体损伤。以上事实反映同类指标在整体与离体的实验中结果会异同并存。在离体实验中,人外周淋巴细胞在 0.25~8.0mmol F<sup>-</sup> 浓度范围内染色体畸变,而在 1.0~4.0mmol F<sup>-</sup> 浓度范围内 SCE<sub>0</sub> 和 UDS 率不增加;叙利亚仓鼠胚细胞的 UDS 在 10~40μg/ml F<sup>-</sup> 处理 4~8h 时不增加,在 12h 后随剂量增加而增加,反映在相同的染毒途径下,染色体效应也不尽相同。当 F<sup>-</sup> 与辐射联合处理小鼠成熟精子时隐性致死率明显地上升, F<sup>-</sup> 单独处理时无影响,表明两种不同因素起了协同作用。当 F<sup>-</sup> 与乙基亚胺类物质联合处理时,后者使培养的人体细胞染色体单体断裂,等位断裂和易位的效应大大地减弱。F<sup>-</sup>、重铬酸钾、丝裂霉素 C 和秋水仙素等各自单独处理时,诱发蚕豆根尖细胞产生微核,但是当 F<sup>-</sup> 分别地与后三者之一联合处理微效应被减弱,由此表明发生了拮抗作用。F<sup>-</sup> 对染色体损伤出现如此矛盾现象,可能与 F<sup>-</sup> 对蛋白质/DNA 合成等产生的影响有关。目前,最新的实验结果表明与 F<sup>-</sup> 作用于细胞周期不同阶段有关,即大多数细胞在 G<sub>2</sub> 期对 F<sup>-</sup> 敏感,畸变细胞增多,而在 G<sub>2</sub>/S 期则不发生畸变细胞增多现象。F<sup>-</sup> 对多

氟联苯诱导大鼠肝微粒体组分( $S_9$ )混合功能氧化酶活性,进而活化外源性物质损伤染色体上没有影响。

**对线粒体的影响**  $F^-$ 诱导线粒体和完整细胞能量活动发生组织学和功能性的变化。 $F^-$ 可破坏线粒体膜的完整性,结果使与膜结合的琥珀酸脱氢酶受抑制,细胞色素的活性也遭强烈抑制。在有氧或无氧糖酵解过程中,尤其存在磷酸时, $F^-$ 以氟磷酸离子形式强烈地抑制烯醇化酶,损害Kerb's环和电子传递系统,导致2,3-磷酸甘油的堆积、柠檬酸盐产量的大减、ATP生成的下降。ATP是在 $Na^+$ 、 $K^+$ -ATP酶、 $Mg^{2+}$ -ATP酶和 $H_2CO_3$ -ATP酶催化下由ADP和AMP合成。 $F^-$ 减弱 $Na^+$ 、 $K^+$ 经线粒体膜的运动降低 $Na^+$ 、 $K^+$ -ATP酶含量,以及提高或降低 $Mg^{2+}$ -ATP酶,致使ATP酶活性遭到抑制,并且该抑制作用随着ATP在膜上位置不同而敏感度不一。当 $F^-$ 直接损伤肌肉的线粒体时,会促使其释放磷酸肌酸激酶,也使由ADP和磷酸肌酸转变为ATP的过程受阻。 $F^-$ 抑制线粒体间质的焦磷酸酶,阻碍从无机焦磷酸的水解,造成焦磷酸盐的累积,使间质中的酰基——乙基辅酶A合成酶遭抑制,结果降低ADP和ATP的水平。存在 $F^-$ 时,组织氧消耗似呈双相曲线:在组织匀浆或线粒体制品中活性先明显地上升而后缓慢地下降;氧耗则呈直接下降的单相曲线。添加 $Mg^{2+}$ 后可使被 $F^-$ 降低的氧耗,依赖 $Mg^{2+}$ -ATP酶和线粒体膜运动恢复到正常状态, $F^-$ 强烈地抑制游离脂肪酸不需酰基肉碱的氧化。 $Ca^{2+}$ 是cAMP的激活剂,在线粒体内累积, $F^-$ 降低 $Ca^{2+}$ 含量,影响与氧化磷酸化有关的许多过程。 $F^-$ 诱发多形核中性白细胞呼吸爆发时产生超氧阴离子 $O_2^-$ 和羟自由基 $-OH$ ,这些活性氧自由基都来自 $O_2$ ,消耗的 $O_2$ 来自细胞外,同时经磷酸己糖支路利用葡萄糖。以上是需 $Ca^{2+}$ 的过程, $F^-$ 能单独地使肝发生病理变化,但是不使因四氯化碳中毒的大鼠肝损伤加重。

**生物膜的效应** 在 $F^-$ 过量时, $F^-$ 在人血红细胞膜内发生累积,消耗钙,出现膜棘。 $F^-$ 增强通透性,使磷酸肌酸激酶大量穿过细胞膜进入血液,影响磷酸肌酸代谢。 $F^-$ 抑制细胞膜上的钠泵活。抗 $F^-$ 细胞产生对 $F^-$ 的遗传适应性:膜通透性对 $F^-$ 发生适应性变化,或称膜形成“泵”,机械地抽出 $F^-$ 。促发膜透性和膜结合酶变化的主要原因是 $F^-$ 引发生物膜不饱和脂肪酸氧化和脂质过氧化,并且以上作用随着器官种类和染毒途径不同存在差别, $F^-$ 促使人血红细胞膜流动性轻度增加,并具有时间动力学和温度效应。 $F^-$ 影响膜的NADA—细胞色素P450—还原酶外,还引起游离巯基变化,并对人血红细胞膜蛋白的巯基结合位置、性质产生显著的影响,其剂量效应关系。在与重铬酸钾、丝裂霉素C和秋水仙素联合处理时, $F^-$ 对膜蛋白巯基结合位置性质的影响呈现协同效应,也具有剂量效应关系。在与重铬酸钾、丝裂霉素C和秋水仙素联合处理时, $F^-$ 对膜蛋白巯基结合位置性质的影响呈现协同效应,也具有剂量效应关系。 $F^-$ 在细胞膜上没有象激素那样固定的结合部位,它是通过膜内侧的腺苷酸环化酶(Ac)影响第二信号系统——环-3',5'-磷酸腺苷,例如 $F^-$ 使整体动物的心、肝、肺、颌下腺和骨骼中Ac和cAMP含量同步增高或减少,随之尿中cAMP也增加或减少,但是骨骼中仅有cAMP含量变化,而Ac含量则不变。 $F^-$ 对Ac的影响是通过以下3种方式中的一种产生:(1)直接激活或抑制;(2)作用于Ac分子的催化区;(3)抑制磷酸二酯酶,结果造成cAMP降解为磷酸腺苷的过程发生变化, $F^-$ 的作用一般比激素强数倍。因在任意的ATP浓度下,Ac均被激活,使反应速度增加达20倍左右,而在正常状态下ATP转变为cAMP是缓慢的。其中Ac活性增减决定于非活化(二磷)存在的形式。以上种种效应在离体实验中不明显。 $F^-$ 刺激坐骨神经—缝匠肌发生非低钙性骨骼肌兴奋,此因末梢神经的质膜内层Ac被激活,胆碱酯酶受到抑制和运动终板对乙酰胆碱敏感性增强所致。 $F^-$ 增强完整细胞Ac活性指示细胞的完整性,使血清球蛋白降低白蛋白升高;ATP酶和碱性磷酸酶大大地减少,cAMP浓度变化,膜蛋白磷酸化等活动减弱,以及葡萄糖经膜转运受阻等一系列变化均指示膜通透性在 $F^-$ 影响下发生了变异。因此,Ac—cAMP系统对 $F^-$ 是敏感的。在个体发育中上述的敏

感性还与靶组织功能状态有关,即 $F^-$ 能作用于较早形成的Ac活化部位,而激素受体却较迟地形成。至于膜的鸟苷环化酶(Gc)、环-3',5'-磷酸鸟苷系统,迄今尚无充分的证据确定 $F^-$ 的影响,不过已知 $F^-$ 对与 $Ca^{2+}$ 进出和与cAMP有关的细胞膜,及从膜输入胞内介质中糖蛋白“内化”(Internalization)产生影响。

**对蛋白质合成的影响**  $F^-$ 引起有机体血清总蛋白,白蛋白,唾液酸含量降低,氨基多糖升高,在骨中, $F^-$ 使蛋白聚糖(基础物质)增加。在亚细胞水平, $F^-$ 使核内mRNA减少。通过阻滞蛋白质合成启动降低蛋白质合成,而此过程与RNA转录活动有关。另外 $F^-$ 虽使80s核糖体与40s和60s核糖体亚基脱离,但不影响已启动的蛋白质肽链延长过程,蛋白质合成受阻导致蛋致白含量减少,随之影响 $F^-$ 一周期DNA合成的启动,使核内DNA减少,细胞分裂减慢,生长停滞,多核糖体部分地遭到裂解,rRNA减少,RNA酶则增加,DNA吸收胸腺嘧啶和RNA吸收尿嘧啶的能力下降,刺激多肽合成的核蛋白体转译发生变化。线粒体ATP因 $F^-$ 减少而将降低透明聚氨基酸活化和氨酰tRNA的功能值。由此可知,蛋白质合成抑制发生于不同的水平:核、核蛋白、线粒体和透明聚。另外蛋白质在骨中发生分解代谢,同时矿物质过多地排除(尽管发生相关的矿化作用)。 $F^-$ 对骨、齿、肝、肾、胰和胶原产生影响体现代谢过程的紊乱,由此造成亚细胞水平的功能障碍, $F^-$ 在有机体内发生的影响可能是直接的、通过在不同水平上毒性复合物F-H发生的、或者通过氨基-F-H发生的,特别是通过降低蛋白质合成发生的。

(北京市环境保护科学研究所王英彦撰)

## 遗传学

### 染色体进化与生物进化的关系

relation between chromosomal evolution and organismic evolution 生物是进化的产物。进化是对遗传的适应性变异的选择。而遗传的变异又主要是由于染色体上的基因突变和染色体结构、数目的改变。染色体是基因或遗传信息的特定线性序列的连锁结构,也是生物进化的档案库。研究染色体进化与生物进化的关系,主要是研究染色体的化学成分,DNA含量,碱基组成和以染色体数目、形态、结构,大小为特征的核型进化与物种形成和演化的关系,为生物进化趋势的揭示提供可靠的科学依据。

19世纪,染色体开始被发现和命名,但染色体进化与生物进化关系的研究还是Sutton和Boveri发现染色体行为与遗传因子行为的平行性,并于1903年提出遗传的染色体学说之后的事,1931年G. Levitzky提出核型不对称理论以来,关于染色体进化与生物进化关系的研究论文和专著很多,其中具有代表性的专著是Stebbins的《高等植物染色体进化》,White的《动物细胞学与进化》,Chiarelli等的《细胞分类学和脊椎动物进化学》及小川和朗等的《植物细胞学》等。

**染色体的化学成分** 电镜观察和细胞化学研究表明,原核生物染色体的化学成分比较单一,只具DNA或RNA,而真核生物染色体的化学成分比较复杂,除了DNA和RNA,还有蛋白质,磷脂和无机物质。生物从简单的原核生物进化到复杂的真核生物的同时,染色体也从化学成分单一的原核生物染色体进化到化学成分复杂的真核生物染色体。

**染色体的结构** 原核生物染色体是一条裸露的RNA或DNA分子,可以说是染色体结构的低级水平,而真核生物染色体则是由一条很长的DNA分子和许多蛋白质组成的DNA—蛋白质纤维同少量的RNA等组成,有一级结构,二级结构和多级结构之分,是染色体结构的高级水平。

**染色体DNA的含量和碱基组成** DNA含量是细胞核型的一个重要参数。自1951年Mirsky首先在动物中报道DNA含量的进化趋势以来,到1989年,已测定了1000多种植物,300种鱼类,以及其它许多动物和微生物的DNA含量。结果表明,DNA

含量的进化总趋势是,愈是高等的生物,DNA含量愈高。例如,真菌、藻类,苔藓、蕨类,裸子植物和被子植物的DNA含量依次为 $4.6 \times 10^7 \sim 7.0 \times 10^8 \text{bp}$ , $1.2 \times 10^7 \sim 4.0 \times 10^{11} \text{bp}$ , $9.0 \times 10^8 \sim 6.3 \times 10^{14} \text{bp}$ , $1.2 \times 10^{10} \sim 2.8 \times 10^{11} \text{bp}$ , $8.4 \times 10^9 \sim 1.4 \times 10^{11} \text{bp}$ 和 $2.0 \times 10^9 \sim 3.5 \times 10^{11} \text{bp}$ 。高等植物和脊椎动物的染色体DNA量是细菌的1000倍。但是,DNA含量也不一定跟生物的复杂程度成正比。例如,肺鱼每个基因组的DNA量几乎是哺乳动物的40倍。松的单倍染色体组DNA量是人的10倍。在生物进化过程中,除了DNA含量的变化外,还发生了DNA的核苷酸对替换。碱基组成(G+C mol%)的变化是反映这种替换的重要参数。根据Storek等1980年的总结,G+C含量在生物不同类群中的分布是:细菌25~75,兰绿藻35~71,藻类37~68,原生动物22~68,真菌27~70,苔藓43.9~49.3,蕨类43.2~48.3,裸子植物42.2~44.0,双子叶植物31.0~42.4,单子叶植物36.0~49.0。碱基组成的变化在微生物和藻类中有系统分类意义,但在高等植物中因碱基组成比较一致,而几乎没有系统分类学意义。后者与1972年Sylusorenko的观点相反。

**染色体数目** 截止1991年的不完全统计,已进行过染色体计数和核型分析的植物有25245种,动物有9735种。染色体数目变化的总趋势是由少到多,特别是在生物由单倍体向二倍体和多倍体进化的过程中,染色体数目是以染色体基数为单位,从低往高倍增的,物种的倍数性愈高,染色体数目愈多。但染色体数目也不一定跟生物的进化等级相一致。在进化等级不同的动物,或植物,甚至动物和植物之间都有很多种的染色体数目是相同的。但在生物进化过程中,染色体数目的偶数性变化可能比奇数性变化更有意义。

**染色体的形态** 原核生物染色体多为环状。真核生物染色体一般为线状,而且根据着丝粒位置可以分成m,sm,st和t4种类型。前3种都有2个臂,称双臂染色体。双臂染色体的演化方向是由少到多,由小到大,t只有一个臂,称单臂染色体,其演化方向是由多到少,由有到无。t染色体可由m染色体通过着丝粒横裂而来,m染色体可由2个t染色体通过着丝粒融合产生。在进化过程中,着丝粒融合频率大于横裂频率。因此,一般认为t染色体较为原始,m染色体较为进化。物种进化程度的高低可用m染色体的多寡来衡量。

**染色体的大小** 原核生物染色体很小,约相当于真核生物染色体的0.1%。高等植物的染色体比低等植物的大,单子叶植物的比双子叶植物的大。具有相同或相似染色体基数的同一科的属间,染色体大小可能相差20倍。在龙舌兰属、丝兰属、飞燕草属等植物和鱼类、两栖类、爬行类、鸟类、大部分哺乳类等动物中,除了大染色体外,还有一定数目的微小染色体。大染色体的演化方向是由少到多。微小染色体的演化方向是由多到少。

**核型** 对有丝分裂中期染色体数目和形态、结构的描述。从染色体角度讨论生物进化趋势主要是强调核型的变化。

1933年,Tatuno在1917年由Alleu开始的苔类染色体研究的基础上,对苔类总体进行染色体分析,并于1959年绘制了苔类分化与核型进化的关系图。

1971年,Stebbins在其《高等植物染色体进化》中将核型分成12种类型,并指出“1A”型最对称,“4C”型最不对称,核型进化的主要趋势是由对称到不对称,进一步丰富和发展了1931年G. Levitzky提出的核型不对称理论。但当时已知高等植物核型没有“1B”型和“1C”型。

1985~1989年,刘玉红等,先后在披碱草属(4种)、野豌豆属(1种)、水车前属(1种)、苦草属(1种)和杉属(6种)等4科5属13个种中发现了“1B”核型,将高等植物已知核型由Stebbins时的10种增到11种。但1989年和1990年,杨淡清和梁国鲁先后发现兰科和柑桔属的核型是由不对称到对称,与1978年Jones在其他一些科属中的发现相同。

1990年,李庆伟等将鸟类核型分为“表型核型”和“内部结构核型”两种。前者是指通过常规染色体制片所观察到的有丝分裂

中期核型。后者是指通过特殊处理和分染表现出的各种带型、原位杂交、放射自显影、联会复合体等结构。

1981年,Maruyma和Imai在分析大量哺乳动物核型资料的基础上,又从理论上推算出染色体数目和臂数的变化是每300万年左右发生一次,与一个新种演化所需的时间基本一致。

1985年和1991年,姚世鸿先后两次通过染色体的化学成分,DNA的量与质,以及染色体数目、形态、结构、大小和核型的综述,讨论了染色体进化与生物进化的平行关系。

综上所述,染色体进化与生物进化的平行关系至少表现在:

- (1)染色体进化和生物进化都是从无到有,从简单到复杂,从低级到高级。染色体进化的总趋势和生物进化的总趋势是平行的。
- (2)物种是多种多样的,而且每个物种都有自己的核型。物种的多样性和核型的多样性是平行的。
- (3)物种和染色体都具有连续性和相对稳定性,物种的连续性和相对稳定性同染色体的连续性和相对稳定性是平行的。
- (4)物种和染色体都既是相对稳定的又是可变的。物种的可变性同染色体的可变性是平行的。
- (5)染色体进化速率同物种演化速率基本一致,二者是平行的。
- (6)染色体数目、形态、大小和结构的变化为核型的进化提供了最原始的材料。如果新改变的核型对生物是有利的,那么经过连续累代的选择作用,就会在群体中固定下来,形成新的核型,出现新的物种。物种演化与核型演化是同步的。

鉴于生物的多样性和已知染色体数目及核型的生物种数还不到生物总种数的2%,上述平行关系将会随着染色体研究的发展而不断被证实,补充。今后的染色体研究,特别是核型研究,要在统一的标准下,全面系统地开展各分类阶元总体的染色体分析,逐步建立染色体进化树,并用它同生物进化树比较,正确反映物种的亲缘关系和演化地位。

参考文献

- 1 Stebbins G L. Chromosomal evolution in higher plant. Edward Arnold London, 1971
- 2 H Ress and Jones, Chromosome genetics. Edwad Araold (publishers) limited 1977
- 3 小川和朗,等编辑. 薛德裕译. 植物细胞学. 北京: 科学出版社, 1983. 249~257
- 4 陈宜峰,等. 哺乳动物染色体研究. 动物学研究, 1984, 5(1增刊): 52~53
- 5 时英,等. 披碱草属6种植物的核型研究. 植物分类学报, 1987, 27(3): 215~221
- 6 李万良. 核酸资料在植物系统与进化研究中的意义. 植物学通报, 1989, 6(1): 10~15
- 7 李林初. 杉科的两条演化路线. 植物分类学报, 1990, 28(1): 1~9
- 8 李庆伟,等. 鸟类核型及其进化规律的探讨. 辽东大学学报(自然科学版), 1990, 3: 50~54
- 9 姚世鸿. 论染色体进化与生物进化的关系. 生物学通报, 1991, 1: 7~9
- 10 姚世鸿. 染色体数目变化与物种的分歧和进化. 贵州师大学报(自然科学版), 1991, 3: 44~47

(贵州师范大学姚世鸿教授撰; 王景佐审)

染色体超微结构

染色体在电子显微镜下所显示的接近分子水平的结构。在50年代,人们就应用电镜观察染色体的内部结构,提高了对染色体超微结构的认识。1963~1966年J. G. Gall确立了染色体的电镜标本制备技术。后E. J. Dupraw(1965~1970)进行有丝分裂染色体的电镜分析,发表了染色体超微结构的原始论文。他们认为染色体是由很长的染色质纤维通过复杂的折迭而构成的。J. C. Hozer等(1981)和C. J. Harrison(1983)提出电镜可能应用于临床细胞遗传学。超微结构细胞遗传学可能发展成细胞遗传学的分支,并应用于临床。

染色质纤维 由DNA、组蛋白和非组蛋白组成。即由DNA

(一级螺旋)和 H<sub>2</sub>A、H<sub>2</sub>B、H<sub>3</sub>、H<sub>4</sub> 组蛋白形成直径  $100 \times 10^{-10} \text{m}$  的核小体串珠链(二级螺旋)在 H<sub>1</sub> 组蛋白的诱导下形成超螺旋(三级螺旋),并与非组蛋白装配成丝状的染色质纤维。染色质纤维的长度约 7.6cm。其直径有各种报道,如  $500 \times 10^{-10} \text{m}$  (Stevens, 1967)、 $250 \times 10^{-10} \text{m}$  (Schwarzacher 等, 1969)、 $191 \times 10^{-10} \text{m}$  (Zirki 等, 1972)。Watanabe 和 Fanaka (1972) 发现人的淋巴细胞染色质纤维的直径范围是  $200 \sim 300 \times 10^{-10} \text{m}$ , 但也意外地发现最细的纤维是  $30 \times 10^{-10} \text{m}$ 。Bahr (1977) 认为  $200 \times 10^{-10} \text{m}$  直径是人的细胞间期和中期染色质纤维的正常直径。根据广州中医药大学电镜室扫描电镜染色体图象计算,最小直径是  $150 \times 10^{-10} \text{m}$ , 较大的是  $300 \times 10^{-10} \text{m}$ , 最大的约  $900 \times 10^{-10} \text{m}$ , 一般是  $200 \sim 300 \times 10^{-10} \text{m}$ 。现在已知,  $100 \sim 150 \times 10^{-10} \text{m}$  的纤维是 DNA 核小体串珠链,称为染色质源纤维。染色质纤维的直径因物种而异,并受制样时试剂的影响而有不同程度的变化。目前,在染色单体内部的染色质纤维的始端和末端是在哪个部位,它是否有游离端,是不是环形(即封闭式的纤维),还不了解。

**染色质粒** 根据 Bahr (1975) 染色质纤维折迭模型,认为染色质纤维可以通过折迭成多回路环并与蛋白质结合形成颗粒状结构,称为染色质粒。由于染色质纤维折迭的方式和数量不同以及纤维外部蛋白质质量的多少,因而在染色体上染色质粒的大小不同。染色质粒大多数聚集在染色体的隆起带区(即光镜下 G 带染色体的深带)。某些隆起带区较多且很明显,某些隆起带区较少且不明显,因此,不同隆起带区的宽窄和突起的程度不同,出现各号染色体的带型不同。有些凹陷带区(即光镜下 G 带染色体的浅带)也有少量的染色质粒。姐妹染色单体相应的隆起带区上染色质粒的大小、分布和数量都是相似的,表明了染色质纤维的折迭回路是遵循自身固有(即种的遗传性)的严格规律进行的。

**染色体的 G 显带** 经胰蛋白酶消化后用 Giemsa 染色的 G 显带人体中期染色体,在光镜显示带型,其中分深带和浅带。G. F. Bahr (1973~1975) 用电镜分析染色体的带结构时提出 G 显带染色体在电镜下的带型与光镜相符合。在透射电镜下, G 带以电子密度区出现(G. D. Burkholder 1974)。在扫描电镜下,染色体保持三维结构(C. J. Harrison 等 1981~1983)。隆起带区相当于光镜的深带,凹陷带区相当于光镜的浅带。在隆起带区除了有染色质纤维之外,还聚集许多染色质粒,故成隆起形状形状。

**着丝粒** 着丝粒在电镜下是由平行于染色体纵轴的紧紧地捆扎在一起的染色质纤维结构(M. L. Mace 等, 1977)。着丝粒成狭窄状,这是由于在这个区域中外部的特殊蛋白的影响,这种特殊蛋白经过胰蛋白酶处理后消失,便出现边界凹陷的着丝粒。姐妹染色单体各有单独的姐妹着丝粒,它通过银不同染色的超薄切片在电镜下可明确地辨认出来(V. J. Goyanes 等, 1984)。E. Stubblefield (1971) 认为姐妹着丝粒内部染色质纤维是对称的一对密集体,中央着丝粒有 4 个密集体,它们之间保留一个中心孔,而末端着丝粒染色体只有两个密集体。D. E. Comings 和 T. A. Okada (1970) 曾建议一个着丝粒模型,在这个模型中染色质纤维从密集体出来后成回路环,接触它的姐妹染色单体之后再回来,使姐妹两个着丝粒彼此对应地连系在一起。V. J. Goyanes 等 (1982) 发现染色体彼此通过直径  $240 \times 10^{-10} \text{m}$  的染色质纤维相互连接。

**着丝点** 着丝粒和着丝点在结构上和功能上是不同的。着丝点是两对圆盘状结构,附着在着丝粒的两侧各一对,是纺锤丝直接连系的部位。圆盘状的着丝点宽大约 40nm 可分 3 层,冠状纤维的外层、光亮的中层和稠密的内层(D. E. Comings 等在哺乳动物发现, 1971)。H. Ris 等 (1981) 研究表明外部的圆盘是由内部的圆盘出来的染色质纤维回路环组成的,纺锤微管由此贴附染色质,圆盘外层是微管发生的部位。

**随体** 在电镜下,人体染色体的随体呈无规则的球状,直径变化很大,但经常比染色单体的宽度要小。它是由直径  $240 \times 10^{-10} \text{m}$  染色质纤维组成的(V. J. Goyanes 1984)。广州中医药大学电镜室实验发现随体染色质纤维的排列是无规律,纤维直径

的变化也大,而且此处的染色质纤维常与邻近的染色体相连接。在随体中也有稀少的染色质粒。

染色体超微结构的研究,已有各个方面的技术和相当丰富的理论。但它仍在朝着超微结构细胞遗传学继续发展。主要依赖于技术的简化、可重复性和临床应用的价值。深入研究的问题有高分辨型染色体带数的电镜分析,纤维结构的进一步深入认识、单个和多个复制基因位点的辨认等。

#### 参考文献

- Gall J G. Chromosome fibers studied by a spreading technique chromosoma, 1966, 20: 221~233
- Dupraw E J. Evidence for a folded-fiber organization in human chromosomes. Nature, 1966, 5023: 577~581
- Dupraw E J, et al. The arrangement of DNA in human chromosomes, as investigated by quantitative electron microscopy. Acta Cytol, 1969, 13: 188~205
- Bahr G F, et al. Correlates of chromosomal banding at the level of ultrastructure. In: chromosome identification. T Caspersson, Lzech, eds. Nobel symposia No. 23, Academic, New York, 1973. 280~289
- Bahr G F. The fibrous structure of human chromosomes in relation to rearrangements and aberration; a theoretical consideration. Fed Proc Fed Am Soc Exp Biol., 1975, 34: 2209~2217
- Mace M L, et al. Isolated metaphase chromosomes scanning electron microscopy appearance of salt-extracted chromosomes. Cytobios, 1977, 19: 27~40
- Harrison C J, et al. Scanning electron microscopy of variation in human metaphase chromosome structure revealed by Giemsa banding. Cytogenet cell Genet, 1983, 35: 21~27
- Goyanes V J, et al. Electron microscopy of sister chromatid exchanges. Cytogenet cell Genet (in press), 1984
- Derobertis, Cell and Molecular Biology, 1987, 424~429
- 郑高飞, 等. G 显带人体中期染色体亚显微结构的扫描电镜观察. 细胞生物学杂志, 1991, 13(1): 34~37

(广州中医药大学郑高飞副教授、邹良秀副教授撰; 廖玉兰副教授审)

**染色体端粒** 端粒构成直接生物染色体的天然末端。20 世纪 40 年代,人们发现其对于染色体的稳定有着十分重要的作用; X 射线辐射能引起染色体突变。但有染色体末端区域却很少有缺失与倒位等现象发生; 当染色体发生断裂时,其断端不同于天然末端,具有粘性,能在断端处发生融合,形成多着丝点的环状或串状等畸形染色体(M. J. Muller, 1938)。端粒被看成是染色体的重要结构之一,然而人们对它的结构却一无所知,随着分子生物学的发展和 DNA 复制机制研究的深入,端粒问题又再一次从分子水平上提出来。DNA 复制的起始是由 RNA 聚合酶在起始因子的作用下与 DNA 母链结合,合成一段 RNA 引物,提供一个 3' 端羟基,这样 DNA 聚合酶才能够接着这条引物对链进行延伸复制。当链复制延伸反应启动后,5' 端的 RNA 引物便被降解掉,在新链的 5' 端就留下了一段空缺而无法填补,因为任何 DNA 聚合酶都不能从线性 DNA 的 5 端端起始合成一段 DNA 链,而只能从已有链的 3'-OH 端使链延伸。这样随着细胞的分裂, DNA 每复制一次,母链 5' 端与 RNA 引物结合的那一段 DNA 无法拷贝到子链中去,势必造成 DNA 链愈来愈短,遗传信息不断丢失。这就是 Watson (1972) 首先提出的 DNA 末端复制难题。

原核生物如细菌将自己的 DNA 永久性环化,这种首尾相连的形式使新链的 3'-OH 端继续向前延伸,而补上 RNA 引物被消除后所留下的空缺。λ 噬菌体 DNA 虽是一个线性分子,它的两个 5' 端都有一个 12b. p. 长的单股互补突出,一旦它感染细胞



后,就能借助互补突出暂时环化,达到完全复制的目的。许多动物病毒 DNA 也为线线,它们以核酸多联体方式复制或末端过刺等机制克服了 DNA 复制的 5' 端缺失(潘惟钧,1986)。真核生物的染色体 DNA 都是线性分子,其完全复制方法直到 70 年代末发现端粒的分子结构,才被真正搞清楚。

尽管端粒的概念是在研究高等生物时提出的,但真正弄清它的分子结构却是在单细胞的原生生物中完成的。1978 年 E. H. Blackburn 等发现凹膜虫 rDNA 分子末端是一连串的六核苷酸重复。一般可达几十次,总长度为 370~520b. p. 并发现四膜虫不同株之间以及不同种之间的 rDNA 末端结构完全一样,而且这种重复序列总有着某些特性。

四膜虫端粒 DNA 结构的发现导致了許多其他物种染色体端粒结构的相继发现。由表 1 中可以看出,端粒 DNA 序列广泛存在于真核生物的染色体末端,而且它们基本上都有着与四膜虫端粒序列相同的特点,例如总有一条链富含 G,其 5'→3' 方向总是指向染色体末端,且比反向连长出若干个核苷酸而造成一种末端突出等。

E. Henderson 等(1987)用非变性聚丙烯酰胺凝胶电泳,吸热变性分析,以及 <sup>1</sup>H 和 <sup>31</sup>P 的核磁共振光谱分析了端粒的顶端结构,证实其顶端由于 DNA 链的回折而形成了一个发夹形结构,且这一特殊的结构是由于 G—G 配对所造成的,为氢键所稳定, G—G 配对是不遵循 Watson—Crick 的 G—G 配对规律的,富含 G 链的这些特性对于端粒 DNA 的复制有着重要的意义。

在细胞中,端粒 DNA 总是和非组蛋白成分的蛋白质结合,形成一个复合体,构成染色体或染色质的天然末端。这种 DNA 和蛋白质的复合体常常表现为典型的异染色质或构成染色体的末端结节(E. H. Blackburn, 1984)。1986 年 E. D. Gottschling 等在尖毛虫 *Oxytricha* 中发现了与端粒 DNA 结合的特异性蛋白质,其分子量为 55kD, 26kD, 它们与端粒 DNA 结合,这种结合能抗高盐抽提和核酸酶的处理,但对蛋白质变性剂敏感,因此推测这种结合是紧密的非共价结合。

M. K. Raghuraman(1989)发现尖毛虫 *Oxytricha* 的端粒蛋白能与端粒 DNA 在体外组装成复合体,并推测出了端粒 DNA 与端粒蛋白的结合模式。

原生动物学的研究表明:纤毛原虫(如四膜虫、游仆虫)都有两个细胞核,大核为营养核,基因活跃地转录,负责着体的表型特征;小核是生殖核,其基因不表达,负担着种质遗传,在有性生殖(接合)的过程中,大核是由小核发育而成。发育时,小核的单拷贝 rRNA 基因被剪切下来成为染色体的游离基因,经过扩增和多倍化,最后的 rDNA 分子多达 1 万个。分析这些 rDNA 分子,其末端都具有端粒序列即为 (GGGGTT)<sub>n</sub> 的六核苷酸重复片段,而从小核 rRNA 基因两侧则找不到相应的重复片段的模板,很显然,这些末端重复并非小核遗传的,而是在大核发育过程中添加到染色体两端的(B. O. King 等, 1982)。

1984 年 J. Shampay 等为了研究酵母染色体的端粒结构,构建了一个线性 DNA 质粒,这个线性质粒的一端带有四膜虫的端粒重复(G<sub>1</sub>-<sub>3</sub>T),另一端带有四膜虫的端粒重复(G<sub>4</sub>T<sub>2</sub>)。当这个质粒转化酵母后,发现经过扩增,原有的四膜虫端粒序列仍都保留着,但在其后面(最末端)又加上了酵母的端粒重复。因而推测端粒的复制是一种无模板复制,并猜想有一种具有末端转移的活性的物质负责着将端粒 DNA 片段加到染色体上。以此为契机,Blackburn 实验室利用四膜虫的无细胞抽提物在体外进行了端粒“加尾”实验。用合成的四膜虫末端重复(G<sub>4</sub>T<sub>2</sub>)<sub>4</sub> 做为引物,并加入同位素标记的 dGTP 和 dTTP,发现四膜虫的抽提物能使引物向前延伸上百个核苷酸,而且是以每 6 个核苷酸为单位延长。如果加入的是酵母端粒序列,则“尾巴”上加上的仍是四膜虫的端粒重复。若用 PBR 片段做引物,不能使链延长。用四膜虫端粒 DNA 的另一条链(CCCCA—A)<sub>4</sub> 做引物,也不能加尾。当把反应基质加热至 90°C 或白酶处理,即失去活性,因而得出了许多重要的结论:端粒的加尾方向是按富含 G 链的 5' 端到 3'

端,每次是以 TT—GGGG 为一个单位重复加上的;它是无模板重新合成 de novo synthesis;能特异性识别拟被加尾的末端序列;是一种蛋白质的酶所催化的反应。并把这种酶称为端粒转移酶,现简称端粒酶。

表 1 不同物种的端粒重复

| 端粒重复单位*                         | 生物体  |                            |
|---------------------------------|------|----------------------------|
| AGGGTT                          | 人    | Homo sapiens               |
|                                 | 绒泡菌  | Physorom                   |
|                                 | 双泡菌  | Didymium                   |
|                                 | 脉泡菌  | Neurospora                 |
|                                 | 锥虫   | Trypanosoma                |
| GGGGTT                          | 短膜虫  | Crithidia                  |
|                                 | 四膜虫  | Tetrahymena                |
| GGGGTTTT                        | 瞬膜虫  | Gtaucoma                   |
|                                 | 尖毛虫  | Oxytricha                  |
|                                 | 棘尾虫  | Stylonychia                |
| GGG(G/T)TT                      | 游仆虫  | Euplotes                   |
|                                 | 草履虫  | Paramecium                 |
| AGGGTT(T/G)                     | 疟原虫  | Plasmodium                 |
| AGGGTTT                         | 拟蓝芥菜 | Arabidosis                 |
| AGGGTTTT                        | 衣藻   | Chlamydomonas              |
| G <sub>1</sub> - <sub>3</sub> T | 裂生酵母 | Schizosacch-arymyces pombe |
|                                 | 酿酒酵母 | Saccharomy-ces cerevisia   |
| G <sub>1</sub> - <sub>3</sub> A | 网柱毒菌 | Dictyoste—lium             |

C. W. Greider 等(1987)对四膜虫的端粒的蛋白进行了分离纯化。该酶的分子量在 200~500kD 之间,如此大的分子量,以及对 RNA 酶的极为敏感性,说明了端粒酶是一种 RNP 结构。

1989 年 C. W. Greider 等又对端粒酶中的 RNA 成分进行了克隆和序列分析,发现端粒酶 RNA 是一个 159 碱基的小 RNA,其中 46, 47 和 48 位的核苷酸被修饰过,而这一位置恰恰有 CAACCCAA 的序列结构。用反义 RNA 封闭该区域,能抑制端粒酶的活性,从而提出了端粒酶 RNA 的 CAACCCAA 序列是该酶的一个活性位点,并为合成 TTGGGG 的端粒重复提供模板。

1990 年余国良等对四膜虫端粒酶 RNA 的基因的核心序列<sup>5'</sup>CAACCCAA<sup>3'</sup>进行了点突变,后将其插入质粒转化四膜虫,果然发现受体细胞后代的染色体两末端出现相应突变的端粒序列,从而以实验遗传学方法在基因水平上证实了端粒酶 RNA 的核心序列是拷贝端粒 DNA 的模板。

从游仆虫的端粒酶中发现了相似的核心 RNA 片段 CAAAACCCCAAAA 以做为游仆虫的端粒重复 GGGGTTTT 的合成模板(E. H. Blackburn, 1984)。端粒酶合成端粒 DNA 端粒必须有 3 个步骤:(1)端粒酶对已有的末端的识别和结合。(2)根据内设的 RNA 模板添加互补的核苷酸并聚合。(3)移位使端粒重复得以连续拷贝。端粒酶能移“自主”地对端粒 DNA 的 G—富含链进行加尾延长,而 G—富含链又能通过 G—G 配对使其终端形成回折,这样 DNA 复制时,新链 5' 端缺失就可以得到补齐。这就是其该生物解决 DNA 末端复制难题的方法。

端粒 DNA 总是和非组蛋白紧密结合,四膜虫大核 DNA 的(G<sub>4</sub>T<sub>2</sub>)<sub>n</sub> 重复片段不能被小球菌核酸酶所消化。这种受保护的片段长度可达 300~400b. p., 并且是作为一个整体受到保护的。所以端粒 DNA 并不形成核小体结构(E. H. Blackburn 等, 1981; M. L. Budarf 等, 1986)。游仆虫和尖毛虫的端粒结合蛋白已经被找到(D. E. Gottschling 等, 1986; M. K. Ragh Raghuraman 等, 1989)。这种核酸与蛋白质的结合关系可以从许多种生物的染色体制片中看到,用蛋白质银染的方法对粗线期的人卵细胞染色体进行染色,发现端粒部位出现浓染,而其它部位出现不完全染色

或不染色(N. O. Haslit 和 R. C. All Shire; 1989)。瓜瓣灯刷染色体中也能见到顶端有球形结节的结构(H. G. Collan 等, 1987)。这些端粒蛋白质就象两顶帽子盖在线性 DNA 两端,使其末端具有惰性,保持着遗传系统的稳定,并有可能参与染色体的空间组织。无论是同源染色体还是异源染色体,它们的端粒常常会发生暂时的并合。第 1 次减数分裂前期,端粒聚集在一起,并处于核膜周围,这样染色体就呈现出“花束”状排列(A. Lima-de-Faria, 1983)。双翅目染色体的双联期,异源染色体相互配对(异位配对)时,端粒的并合参与了这一过程的发生(T. Hinton, 1945; G. M. Rubin, 1978)。人卵细胞的粗线期染色体(联合复合体形成的早期),染色体的配对首先发生于染色体末端的端位置(N. D. Hastic 和 R. C. Allshire, 1989)。爪瓣的灯刷染色体末端也出现相互融合现象。(H. G. Callan 等, 1987)。洋葱根尖细胞间期染色体的端粒似乎是以成对的方式相联合(C. A. Fussell, 1975)。

体外的端粒 DNA 也有相互粘附的现象。Lipps 发现提纯的尖毛虫大核 DNA 相互并合成大的多寡体。并认为是由于端粒 DNA 间相互并合所造成的(H. J. Lipps, 1980)。Y. oka 又对这一现象进行了研究,他们发现这种粘附现象明显不同于互补单链间的配对。这种端粒与端粒间的相互作用意义还不十分清楚。人们认为它一定影响着染色体的行为,如基因重组以及基因表达。这一方面还需要进一步的研究。

端粒的长度与序列变化常常伴随着一些有趣的生物现象发生。余国良等(1990 年)用显微注射的方法将天然的以及人工突变的端粒酶 RNA 基因导入四膜虫。结果发现,注射天然野生型基因的四膜虫与未注射的对照组没有差异,而注入突变基因的四膜虫变得形态异常巨大、形状不规则并且老化。大多数后代都死掉。检查其端粒 DNA,发现已掺入突变序列,且长度要么比平均长得多,要么短得多,表现为端粒长度调节机制紊乱或端粒延长缺陷。

酵母 est1 株是一种不能有效进行线性染色体复制的突变株,它的端粒长度随着细胞分裂而缩短。同时它的活力、集落形成能力也不断下降而最终出现老化(V. Lundblad 和 J. W. Szostak, 1989)

C. B. Harley 等 1989 年用人的端粒重复片段(TTAGG—G)<sub>2</sub> 为探针针对胎儿的细胞株,新生儿细胞株以及青年和老年的细胞株的端粒长度进行了研究,发现随着年龄的增长,人的成纤维细胞的端粒序列长度不断下降。

端粒 DNA 和着丝粒 DNA 一样是一种结构 DNA。端粒结构不仅仅是为染色体的完全复制所必需,而且端粒的变化可以引起细胞形态乃至生命状态的变花。端粒在参与细胞功能的同时,还参与着细胞结构的构建。

20 世纪初,许多细胞学家就发现动、植物细胞中期,间期染色体有不随机分布性。他们常常看到端粒位于核膜附近,总是位于与着丝粒相对的位置,并把这一现象称为“Rabl 定向”(E. B. Wison, 1924)Fussell 用 H—T 对洋葱根尖细胞进行脉冲标记,发现无论是 G<sub>1</sub> 期、S 期、G<sub>2</sub> 期还是早前期,其染色体的走向都和分裂末期的染色体一样,着丝粒异染质聚集于核的一边。而端粒则位于着丝粒的对侧。成散在状分布,端粒和着丝粒均与核膜靠近,并认为可能正是这种与核膜的紧密结合关系。维持着细胞染色体的空间定向,使得染色体所携带的信息能有秩序而又有效地复制表达。1984 年 D. Shoeman 用光镜摄像系统对果蝇唾腺的多线染色体进行断层分析,计算机重建了唾腺染色体的三维空间模型,也发现染色体的顶端常位于核膜下。R. T. Shoeman 等 1988 年在体外进行了中间纤维蛋白 Vimentin 和 Lanins 与不同寡核苷酸序列之间的吸附实验。发现端粒序列与中间纤维单克隆抗体进行免疫印迹,发现 55kD 和 68kD 条带处有阳性反应。因而他推断端粒蛋白与中间纤维以及 Lamin 有关。可能它们共同组成大核的核骨架系统。汪国顺等 1992 年用 HeLa 细胞为材料,用选择性抽提方法,分离出核骨架,并从而得到与核骨架紧密结合的 DNA。然后用人的端粒序列为探针与之杂交,结果表明端粒富积

在核骨架上,因而从一方面证明了染色体端粒与核骨架的结合关系。

端粒的研究已经从研究其 DNA 序列及其与染色体复制关系发展到对其多方面生物学功能的研究。目前人们尤为感兴趣的是它与核内骨架(包括核纤层)以及染色体空间定位的关系,端粒酶做为反转录酶的一种特殊类型(酶自身含有其作用底物模板)所具有的生物学特性等。

(北京大学生物系汪国顺、潘惟钧、翟中和院士撰)

### 染色体显带机制 mechanism of chromosome banding

自 1968 年卡斯帕森(T. Caspersson)提出荧光分带以来,染色体分带技术及其应用研究的发展十分迅速。自 20 世纪 70 年代初以来,对显带机制的认识越来越深入,已从染色体形态特征的改变转移到染色体的化学组成及其超微结构的变化上。它不仅能促进分带技术的发展,而且对阐明染色体的结构、组织、成分、功能、进化、复制特性等基本理论也有重要意义。

1970 年帕杜(M. L. Pardue)等用 DNA 变性和异染色质的优先复性理论作为染色体显带的基础。但后来许多实验结构与这种解释相矛盾。1972 年以来,米勒(O. J. Miller)等的核酸免疫分析,康明斯(D. E. Comings)等的放射性同位素标记和细胞化学分析,伯克霍尔德(G. D. Burkholder)等的生物化学分析和电镜观察,以及近年来米杰克(E. M. Jack)等的光镜结合扫描电镜观察,弗雷黛尼(M. Frediani)和洛撒诺(R. Lozano)等对植物、德罗伊(R. Drouin)和戈撒维治(J. Gosalvez)等对人类和动物染色体用限制性核酸内切酶的原位消化分析等,均证明染色体中 DNA 和蛋白质的不均匀丢失,或 DNA 与蛋白质的相互作用是染色体显带的主要机制。

染色体标本经各种分带处理后,导致 DNA 和蛋白质不均匀丢失,其中蛋白质丢失于 DNA 之前,而非组蛋白(NHP)又是被首先提取的蛋白质组分。1968 年迪克(C. Dick)等,1973 年萨姆纳(A. T. Sumner)等都发现固定后染色体中的许多蛋白质(8%~100%),特别是组蛋白被抽提了。德琼贾罗(L. Djondjurov)则强调 NHP 对染色体显带的作用,1972 年他利用<sup>3</sup>H—色氨酸同位素标记,发现 G 带处理后染色体臂上的 NHP 呈不均一分布。1976 年马特凯姆(S. Matsukuma)用荧光染料丹磺酰氨基酸特异染色中国田鼠染色体中的蛋白质,发现处理后的荧光带纹与 G 带一致。因而认为 G 带处理使带间区蛋白质丢失,带区蛋白质仍保留着,NHP 的不均匀丢失是 G 带的基础。1982 年伯克霍尔德等利用 SDS—PAGE 分析了 G 带、C 带和 R 带处理后的染色体,发现各种处理均匀不同程度地抽提蛋白质,被抽提蛋白质的种类随方法不同而异;G 带和 C 带处理后的残留蛋白质类型与 R 带处理后的显著不同。1987 年迪尔(J. E. Dille)利用抽提电镜观察了 C 带处理后的黑麦染色体,发现每步处理均导致染色体表面局部结构的显著变化,碱处理过程非选择性地除去染色质。

染色体中蛋白质的丢失,破坏了 DNA 赖以存在的结构完整性,使核酸容易断裂和丢失。1973 年康明斯等用放射性同位素标记研究表明,G 带处理后约 60% 的 DNA 被提取。1978 年康明斯等用放射性同位素标记研究表明,G 带处理后约 60% 的 DNA 被提取。1978 年布鲁斯(R. K. Brure)等的扫描电镜观察表明,在螺旋化程度较差的疏散区域,染色质纤维呈环状伸出染色质表面,从而使其表面积扩大,增加了与化学试剂接触的机会,加强了 DNA 对化学处理的敏感性。1985 年杰克等利用光镜结合扫描电镜观察了人类染色体,发现光镜下的 C 带在电镜下紧密集缩的染色质纤维组成,带间区的染色质则呈疏散状态。他们还发现 C 带和 G 带处理造成的染色质结构变化是近似的。1989 年德罗伊等用抗 BrdU 抗体和透射电镜研究了 FPG 法显带的机制,认为染色体经荧光染料 Hoechst 33258 和 UV 处理后,使 BrdU 替换的染色质发生“崩解”而被提取,未被替换的 DNA 保留下来与 Giemsa 反应而显带。1990 年戈撒维治的洛撒诺等利用光镜、电镜和琼脂糖凝胶电泳分析了限制性核酸内切酶(REs)对鼠中期染色体的强胞学效应,发现染色体经各种 REs 原位消化后都能

产生类似C带(有时为G带)的带型,这些进一步证明了DNA的不均一抽提对染色体显带的作用。

带区核蛋白比带间区更能抵御提取,其原因除与结构异染色质的高度重复序列及其化学组成有关外,还与DNA的碱基组成及其与蛋白质的相互作用密切相关。1972年米勒和迪维(V. G. Dev)、1974年施莱茨(R. Rreck)等用发荧光的抗腺苷抗体和抗胸苷抗体与变性DNA作用,获得Q带或类似G带的带型。1978年德莱茨(M. E. D. rets)发现,亚甲兰引起的光氧化反应使G带区DNA变性残留的DNA与发荧光的抗胞苷抗体结合产生了R带。这些证明了Q带富AT碱基对,R带富GC碱基对。1973年丘普威彻(T. W. Chupervich)等认为,胰酶-Giemsa显带与染色体上不同的DNA片段覆盖不同的蛋白质类型有关,经酶短时间处理后仍能保持正常的核蛋白结构,与染料结合而显带与富AT区域结合的组蛋白对胰酶有抗性,与富GC区域结合的蛋白质对胰酶的作用比较敏感,染色较浅。1972~1978年康明斯等的一系列实验工作,以及1988~1989年德罗伊等的免疫化学分析,进一步证明Q带和G带的基础是AT碱基对,R带的基础是GC碱基对。1977年康明斯、伯克霍尔德和马特凯姆等人的工作都表明组蛋白和NHP与结构异染色质的集缩程度有关。1984年恩登(T. R. Endo)发现多聚嘧啶-多聚嘌呤(GAA)n(GAG)n顺序(SAT-DNA)的分布与N带一致,无此SAT-DNA序列的DNA显示G带;DNA碱基顺序的异质性及其与蛋白质及其与蛋白质的特异结合是形成N带和G带的原因。1978年施瓦兹彻(T. Schwarzacher)等、1985年哈伯尔德和马凯姆等人的工作都表明组蛋白和NHP与结构异染色质的集缩程度有关。1984年恩登(T. R. Endo)发现多聚嘧啶-多聚嘌呤(GAA)n(GAG)n顺序(SAT-DNA)的分布与N带一致,无此SAT-DNA序列的DNAs显示G带;DNA碱基顺序的异质性及其与蛋白质的特异结合是形成N带和G带的原因。1978年施瓦兹彻(T. Schwarzacher)等、1985年哈伯尔(H. R. Hubbell)等发现某些NHP与NOR异染色质特异结合,从而改变了NOR的结构和组织,使NOR及其邻近的异染色质对处理因素更加敏感。1990~1991年罗撒诺等利用C带、Ag带、荧光分带和REs原位消化技术,对某些植物和动物染色体的结构与组织进行了研究,发现NOR异染色质富GC碱基对。对荧光染料色藜素A3有高度亲和性;NOP异染色具有与着丝粒和端粒明显不同的结构组织特征,其原因是某些NHP与NOR异染色质呈现特异结合;抵御REs消化的能力取决于染色质的结构组织特征。

每种染料都以特定的方式与核蛋白相互作用。如噻嗪类染料Giemsa为正电荷平面分子,以离子形式与DNA磷酸基团作用,堆积于DNA侧面。Hoechst 33258是特异作用于AT碱基对的荧光染料,它通过氢键结合在DNA双螺旋的小沟中。许多学者强调染料与核蛋白互作对染色体显带的作用。1975年康明斯等发现热或盐处理破坏了NHP的三级结构,G带和R带正是由于变性NHP更牢固地覆盖在DNA磷酸基团上,影响了染料与DNA的相互作用所致。1980年~1984年布斯(C. H. C. M. Buys)根据生物化学和细胞化学分析,发现giemsa和AgNO<sub>3</sub>对NORs的选择性染色是NHP与染料相互作用的结果。其中Giemsa对NORs的染色能力决定于核仁磷蛋白的磷酸化状态。选择性银染则与磷蛋白中高含量的羧基有关。1985年达金(P. Duijn)和1987年迪尔则强调核小体中组蛋白八聚体的变性和异染色质对染料的差别亲和力是形成C带的原因。但是1985年杰克等根据扫描电镜观察,认为Giemsa染色只是光镜观察所必需的,它并不影响染色体的结构。

染色体显带机制是细胞化学家正在积极探索的问题之一。在光镜结合染色体超微结构研究的基础上,综合应用生物化学,细胞化学和免疫化学等技术,研究染色体蛋白质与DNA互作及各种分带处理的细胞学效应,仍是探查染色体显带机制的主要途径。各种分带和限制性核酸内切酶原位消化技术的结合是近来分带研究中的一个活跃领域,进一步深化这方面的研究,对于阐明

染色质的结构、组成和异质性分布,以及各种带型与碱基组成间的相互关系均有重要意义。在光镜、电镜和分子水平上深入研究各种带型间以及DNA、蛋白质(包括组蛋白和非组蛋白)和染料三者之间的相互关系,也能为阐明染色体显带机制提供重要证据。

参考文献

- 1 Comings D E, et al. The mechanism of C- and G-banding of chromosomes, *Exp Cell Res*, 1973, 77: 496~498
- 2 Burkholder G D, et al. The effect of chromosome banding techniques on the proteins of isolated chromosomes, *Chromosoma*, 1982, 87: 425~435
- 3 Duijn P, et al. The involvement of nucleosomes in Giemsa staining of chromosomes A new hypothesis on the banding mechanism, *Histochemistry*, 1985, 62: 363~376
- 4 Dille J E, et al. Topographical changes in rye chromosome ultrastructure caused by the C-banding procedure *Genome*, 1987, 29: 817~822
- 5 Drouin R, et al. DNA denaturation for ultrastructural banding and the mechanism, underlying the fluorochrome-photolysis-Giemsa technique mechanism, underlying the fluorochrome-photolysis-Giemsa technique studied with anti-5-bromodeoxyuridine antibodies *Chromosoma*, 1989, 98: 174~180
- 6 高明君, 等. 染色体显带机制研究若干进展. *生物学通报*, 1990, 11: 1~3
- 7 Lozang. AG- and fluorochrome staining, and in situ digestion with restriction endonucleases, *Heredity*, 1991, 66: 403~409

(青岛海洋大学高明君教授撰)

多线染色体

polytene chromosome 在双翅目昆虫的某些细胞中存在的一种巨型染色体,由于它的巨大形态结构的可见性,已被广泛地用于生物的细胞遗传、系统分类、基因的定位和克隆及基因结构的研究。

通常用光镜或电镜在间期细胞核中是看不清染色体的。1881年意大利巴尔比安尼(Balbiani)偶然在孑孓(*Chironomus*)幼虫的唾腺间期细胞中发现了一种巨大的染色体,这些染色体比起同体中正常分裂相体细胞染色体要长100~200倍,当时巴尔比安尼称之为巨型染色体。之后,1882年Flemming又在西立蠅(*Siredon*)的卵母细胞中发现了另一种巨型染色体,它是由两条单体组成的,形态像毛刷,所以被称作牙刷染色体,而前者由于每条染色体看来都是由许多染色线组成的,因此又被柯勒尔(Koller)称之为多线染色体。以后,美国贝恩妥(Painter)又在果蝇幼虫的唾腺细胞中观察到这种多线染色体。由于多线染色体能在间期细胞中显示出来,并且体积长大,显示了更多的结构细节,所以引起了科学家们极大的兴趣。随后又在果蝇的马尔丕基氏管的细胞中和某些按蚊(热带按蚊)的卵巢营养细胞中发现了多线染色体。1938年Geitler的研究证明,这些细胞的特点是:它们不是生长到一定程度就进入有丝分裂,而是不断生长,继续复制,而且新的复制体总是沿其全长整齐地跟原来的染色体并列着的,因而染色体长得极大。在果蝇唾腺细胞中每一个多线染色体都是经过大约9个循环的复制产生的,所以每条多线染色体至少包含了500~1000条的染色单体(DNA纤丝),某些昆虫的多线染色体甚至包含了多达16000条。经过磷酸洋红或地衣红染色后,在高倍光镜下就可以看到每条多线染色体都是由暗带和明间带直线交替组成的。同时也已证明大部分DNA存在于暗区带之内,每条区带都相应于染色体上染色粒的聚合区域,它被碱性染料染得很深,孚尔根染色呈现阳性,而明间带则几乎不着色。以后又证明了每条区带都包括着几个或几十个基因位点。

早在1881年巴尔比安尼就第一次在孑孓幼虫唾腺染色体

上发现了许多膨大的区段,这种结构被称为疏松区或巴氏环。疏松区被认为是由于在暗带区域中通常紧密折叠或弯曲着的染色体纤丝发生了解旋,然后以环的形式向外凸出形成的。1964年 Pelling 的研究证明,DNA 一般不在疏松区内复制,但 RND 的合成和酸性蛋白质的积累却在疏松区内活跃地进行,因此推测疏松区与控制基因的表达有关。特别是在1964年 Beerman 等发现动物发育的不同时期有特异疏松区的出现和消失之后,激发人们利用多线染色体进行了很多昆虫发育过程中基因表达的研究。实验证明,如果把蜕皮激素注射到早龄幼虫,可以使它们的唾腺染色体的某些部位提早出现疏松区。目前已从蜕皮激素处理的细胞内成功地提取出一种作为合成一种酶的模板的信使 RNA(mRNA),这种酶是未经蜕皮激素处理的幼虫中所没有的,这证明疏松区中具有某种遗传信使 mRNA 的合成基因。

由于两条同源染色体总是并行地紧密结合在一起,两条同源染色体间有差别时就很容易被观察出来,而且这种长大的多线染色体又易于制备和观察,所以多线染色体已成为研究细胞遗传学和昆虫系统分类的极为方便的材料。每一个生物的种、亚种和株的染色体不但数目是恒定的,而且染色体的结构、区带的数目和相对大小及空间排列等等都是特异的,生物染色体的任何差别(如染色体的着丝点位置、带型、包括倒位、互换、易位和缺失等等)都往往会引起生物特性的差别。早在1936年 Dobzhansky 就发现加里福尼亚的果蝇群体中存在着有3种多线染色体倒位顺序,称为 AR、CH 和 ST3 种不同的类型,并且发现在温暖的春天选择有利于 AR 和 CH 的基因顺序,而在一年的较热的月份则选择有利于 ST 类型。1979年 Coluzzi 等根据卵巢营养细胞多线染色体上的臂内倒位类型已在冈比亚按蚊(*Anopheles gambiae*)类群内区分出6个形态上不易鉴别的姊妹种,它们在温湿度不同的地区有着不同的分布界限,而且发现冈比亚按蚊中 2Rb 倒位对化蛹和羽化时间、卵的大小、吸血习性等都有明显的影响,不同的倒位类型对疟原虫的敏感性也有显著差异。其它病媒按蚊,如五斑按蚊(*A. maculipennis*)类群的10个种,微小按蚊(*A. minimus*)类群的2个种,大劣按蚊(*A. duri*)类群7个种,金蚋(*Simulium metallicum*)复合体的11个姊妹种等等也都是根据极易观察到的多线染色体的倒位、带型、特别是性染色体区带的差别,结合生态、电泳、杂交等等方法鉴别出来的。此外,染色体各种交叠的倒位重排,还可以在一些昆虫种间阐明其系统发生的关系,如中国嗜人按蚊与中华按蚊仅相差 2L 臂上的1个倒位,而嗜人按蚊与赫坎按蚊(*A. hyrcanus*)相差 2L 臂上的2个倒位,说明了嗜人按蚊与中华按蚊的亲缘关系较嗜人按蚊与赫坎按蚊更为密切。

1910年左右摩尔根(Morgan)等研究了果蝇性状的遗传方式,确定基因位点是以线性顺序从染色体的一端排列到另一端的,因此一对性状所形成的重组体配子的百分数越高,这两个基因位点相隔的距离就会越大,反之亦然。利用这一认识就可以绘制出一定染色体上所能发现的全部基因位点的连锁图。到1915年摩尔根等利用果蝇成对突变型的杂交实验就已画出了大约50个果蝇基因的位置,它们分属于相应于4个染色体的4个连锁群。1933年 Paiter 直接观察比较了果蝇的形态变异和染色体变异的对应关系,从而设计了表示基因的更确切的实际位置的基因图,并证明上述用统计学方法画出的基因次序是正确的。至今,单单在一个较长的染色体上已画出了500个以上,仅在X染色体上已鉴定出100个以上基因的顺序,这样就筑建了比较详细的果蝇基因图。生物基因图的筑建对生物遗传学的研究和生物新类型的培育是极有参考价值的。目前人们不仅在研究昆虫中自然发生的多线染色体变异,而且也在广泛而有成效地利用射线、化学诱变剂、杂交等方法来诱发昆虫染色体的突变。

现代分子生物学的进展为多线染色体的研究和利用开辟了更为广阔的前景。1967年 French 等第1次创立了果蝇唾腺染色体的原位杂交技术,1990年这个技术又被 Graziosi 等引入按蚊多线染色体上基因定位的研究,他首次利用生物素标记的

Puchsneo 作探针在冈比亚按蚊卵巢营养细胞多线染色体玻片标本上进行了杂交,通过放射自显影从而直接地观察到这些特异核酸序列在染色体上的位置,成功地确定了含有对新霉素抗性基因的 Puchsneo 是位于在 2L 的端部。以后又有人测定了联苯酚氧化酶基因是位于在 3R 中部的 33c 段。白腹按蚊(*An. albimanus*)组蛋白的基因是位于在唾腺多线染色体 3R 的 34A 段。1980年 Barnett 等用克隆法分离的果蝇卵黄蛋白的3个基因的克隆片段与多线染色体进行原位杂交证明了3个基因都位于在 X 染色体上,并且测定了他们的顺序;1982年 Kubli 利用标记的 tRNA 和果蝇唾腺多线染色体的压片进行原位杂交,定位了15%以上的 tRNA 基因,其中好多 tRNA 基因也已被克隆出来。此外也有人应用某些特异抗体与多线染色体上的抗原蛋白质进行反应,根据交叉点的多少来判断生物种间的亲缘关系;如1982年 Kabisch 等就应用间接荧光抗体技术建立了黑腹果蝇(*Melanogaster*)亚群的系统树。80年代初 Edstrom 等就建立了微切染色体技术,由于多线染色体长大,具有宽达 0.1~0.2 $\mu$ m 的区带,所以利用玻璃受热拉制的直径小于 1 $\mu$ m 的纤维细尖,在浸油的染色体标本上划动就很容易地能刮下目的片段,然后转到收集液滴中进行克隆。1981年 Scalenghe 等对果蝇未染色的唾腺 X 染色体第3节区进行了成功的克隆,切割6个片段,得到80个克隆。1989年 Donelies 等又发展了一种激光切割技术,借助激光光束将染色体片段从制片上切割并分离出来。这样用显微切割技术所得到 DNA 片段就可以用微克隆的方法建立起染色体区域特异的 DNA 文库,使越来越多的遗传性状正在定位于特定的染色体上。目前在昆虫学中对识别和分离基因或 DNA 片段的工作还刚刚开始,这些新技术在多线染色体方面的应用必将大大地促进对染色体细微结构及其功能的研究,特别是对基因分析和病媒昆虫遗传工程的研究。

#### 参考文献

- 1 Coluzzi M, et al. Chromosomal differentiation and adaptation to human environments in the *Anopheles gambiae* complex. *Trans R. Soc Trop Med Hyg*, 1979, 73: 483
- 2 Kubli E. The genetics of transfer RNA in *Drosophila*. *Advances in Genetic*, 1982, 21: 123
- 3 N. 麦克莱恩, 等主编, 真核基因. 朱作言等译. 北京: 科学出版社, 1987, 70
- 4 Graziosi C, et al. Method for In Situ hybridization to polytene chromosomes from ovarian nurse cells of *Anopheles gambiae*. *Journal of Medical Entomology*, 1990, 27(5): 905
- 5 许激壁, 等. 赫坎按蚊与中华按蚊染色体的比较研究. *昆虫学报*, 1991, 34(3): 380
- 6 Wesly C S, et al. Cloning regions of the *Drosophila* genome by microdissection of polytene chromosome DNA and PCR with non-species primer. *Nucleic Acids Res*, 1991, 18: 599
- 7 孙正昌等. 染色体技术在畜主份类和防治中的应用. *中间血吸虫病防治杂志*, 1993, 5(2): 127

(山东省寄生虫病防治研究所孙延昌研究员、邓守俭讲师撰)

#### 补体

complement 补体是在1889年由 Buchner 发现的。但最初一直被认为是血浆中的单一成份。随着科学的进展,补体成份一分再分,至今已知哺乳动物补体是由近40种蛋白质组成的一个庞大的限制性蛋白解系统。

在免疫学的传统观念中,一向把补体当作免疫应答中的配角,只是“补充”抗体的作用,将微生物等靶细胞溶破而已。此外还历来把补体看作免疫应答中的非特异性成份,并不参与特异性免疫反应。但随着时间的推移,特别是在近年科学技术的大发展进程中,发现补体是组成成份众多,功能复杂多样,不仅参与免疫应答的非特异功能,且与特异性免疫反应息息相关。生物医学中一门新的独立领域——补体学乃应运而生;不仅如此,至今补体学已有了其分支学科,如补体生理学、补体生化学、补体病理学、

补体遗传学等。特别是近年在分子遗传学的带动下,补体遗传学 的发展相当迅速,大大丰富与补充了免疫遗传学的内容。

表 1 人补体固有成份的一些理化参数及结构功能特点

| 名称        | 分子量 (kD) | S 值  | 电泳位置           | 血清浓度 (μg/ml) | 肽链数目 | 氨基酸数 <sup>①</sup> | 基因定位 | 含糖 (%) | 结构功能特点                             |
|-----------|----------|------|----------------|--------------|------|-------------------|------|--------|------------------------------------|
| 第一前端反应成份  |          |      |                |              |      |                   |      |        |                                    |
| C1q       | 400      | 11.1 | γ <sub>2</sub> | 80           | 18   | 226               | 1    | 15     | 胶原蛋白样                              |
| C1r       | 90       | 7.5  | β              | 50           | 1    |                   | 12   |        | SCR <sup>②</sup> , SP <sup>③</sup> |
| C1s       | 90       | 4.5  | α <sub>2</sub> | 50           | 1    | 673               | 12   |        | SCR, SP                            |
| C4        | 200      | 10.0 | β <sub>1</sub> | 480          | 3    | (1722)            | 6    | 7      | -S-C(=O) <sup>④</sup>              |
| C2        | 100      | 4.5  | β <sub>1</sub> | 20           | 1    | 732               | 6    | 16     | SCR, SP                            |
| 共同的固有成份   |          |      |                |              |      |                   |      |        |                                    |
| C3        | 180      | 9.5  | β <sub>2</sub> | 1600         | 2    | (1663)            | 19   | 2.7    | -S-C(=O)                           |
| 第二前端反应成份  |          |      |                |              |      |                   |      |        |                                    |
| C3b       | 171      | 9.0  | α <sub>2</sub> |              | 2    | (1586)            | 19   |        | -S-C(=O)                           |
| B         | 90       | 5.9  | β              | 300          | 1    | 739               | 6    | 7      | SCR, SP                            |
| D         | 25       | 4.0  | α              | 2            | 1    | 222               | ?? X |        | SP                                 |
| 共同的末端反应成份 |          |      |                |              |      |                   |      |        |                                    |
| C5        | 185      | 8.5  | β <sub>1</sub> | 75           | 2    |                   | 9    | 15     |                                    |
| C6        | 128      | 5.5  | β <sub>2</sub> | 60           | 1    | 913               | 5    | 4-11   | SCR, PFP <sup>⑤</sup>              |
| C7        | 121      | 5.3  | β <sub>2</sub> | 60           | 1    | 821               | 5    | 6.4    | SCR, PFP                           |
| C8        | 153      | 8.0  | β <sub>2</sub> | 80           | 3    | 1325              | 1.9  |        | PFP                                |
| C9        | 71       | 4.7  | β <sub>2</sub> | 50           | 1    | 587               | 5    | 15     | PFP                                |

①指单链氨基酸数,括弧内为总氨基酸数;②SCR 短同源重复;③SP 丝氨酸蛋白酶;④Thioester bond 硫酯键;⑤PFP(pore-forming protein)孔道形成蛋白

在补体的众多成份中,有 13 个是补体的固有成份,它们是 C1(C1q C1r C1s)、C4、C2、C3、B 因子、D 因子、C5、C6、C7、C8 及 C9,它们的理化参数及结构功能特点见表 1。这 13 个补体成份构成了以限制性蛋白解为基础的补体级联反应,从而导出补体各种生物学功能。补体的级联反应由 3 个反应序列组成:(1)第 1 前端反应序列由 C1、C4 及 C2 组成,形成第 1 途径 C3 转化酶 C3b2a,裂出活性分段 C4a 和 C2b;(2)第 2 前端反应由 C3、B 及 D 因子组成,形成第 2 途径 C3 转化酶 C3bBb,裂出活性分段

C3a、Ba、C3bi、C3f、C3dg、C3c、C3e、C3c'等;(3)末端补体复合体 (terminal complement complex, TCC)由 C5、C6、C7、C8 及 C9 组成,最后可形成攻膜复合体(MAC)将致病微生物加以溶破清除。在 C3b 存在的情况下,C3 转化酶就成为 C5 转化酶 C4b2a3b 或 C3bBb3b,可将 C5 裂解成 C5a 与 C5b,前者为过敏毒素,后者参与 MAC 的形成。今将补体各分段的理化性质、产生及功能报如表 2。

表 2 补体各分段理化参数、产生及功能

| 补体分段 | 亚单位数 | 氨基酸数目 | 分子量 (kD) | 产生                                        | 功能                                  |
|------|------|-------|----------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| C4a  | 1    | 77    | 9        | C1 裂解 C4α 链 N 端精 77-? 78 键产生              | 过敏毒素                                |
| C4b  | 3    | 1645  | 190      | 裂出 C4a 后余下的部分(βγ)                         | 形成 C4b2a, C4b2a3b                   |
| C2a  | 1    | 509   | 70       | C1 裂解 C2 产生的大分段                           | 形成 C4b2a, C4b2a3b                   |
| C2b  | 1    | 223   | 30       | C1 裂解 C2 产生的小分段                           | C2 激肽(?)                            |
| Ba   | 1    | 234   | 30       | D 裂解 B 因子产生的小分段                           | 抑制 B 淋巴细胞增殖                         |
| Bb   | 1    | 505   | 60       | D 裂解 B 因子产生的大分段                           | 形成 C3bBb, C3bBb3b<br>刺激 B 淋巴细胞生长与分化 |
| C3a  | 1    | 77    | 7        | 由 C4b2a 或 C3bBb 裂解 C3α 链 N 端精 77-丝 78 键产生 | 过敏毒素                                |
| C3b  | 2    | 1586  | 170      | 由 C4b2a 或 C3bBb 裂解 C3α 链 N 端精 77-丝 78 键产生 | 补体级联反应的中心分子                         |
| C3bi | 3    |       | 167      | I+H 作用于 C3b 产生                            | CR3 配体                              |
| C3f  | 1    | 17    | 2        | I+H 作用于 C3b 产生                            |                                     |
| C3dg | 1    |       | 43       | I 裂解 C3bi 产生                              | CR2、CR5 配体                          |
| C3c  | 2    |       | 140      | I 裂解 C3bi 产生                              |                                     |
| C3d  | 1    |       | 35       | 蛋白酶裂解 C3dg 产生                             | C3 的硫酯键部位                           |
| C3g  | 1    |       | 8        | 蛋白酶裂解 C3dg 产生                             |                                     |
| C3e  | 1    | 101   | 10       | 胰蛋白酶裂解 C3 产生                              | 增加白细胞及血管通透性                         |

(续表)

| 补体分段 | 亚单位数 | 氨基酸数目 | 分子量(kD) | 产生                        | 功能         |
|------|------|-------|---------|---------------------------|------------|
| 3c'  | 3    |       |         | C3c裂出, C3d, C3g及C3e后剩余的分段 |            |
| C5a  | 1    | 74    | 11      | 由C5转化酶作用子C5a链N端精74—亮75键产生 | 过敏毒素       |
| C5b  | 2    |       |         | 同上产生的大分段                  | TCC组装的起始分段 |

补体的级联反应,受控于一系列调节蛋白的严密调节,这些调节蛋白自目前为止已发现17种,它们是:C1q抑制剂(C1q-In),C1抑制剂(C1-In),I因子(I),C4结合蛋白(C4bp)、蛋白S(PS)、补体1型受体(CR1,CD35)、补体2型受体(CR2,CD21)、衰变加速因子(DAF,CD55)、膜辅蛋白(MCP,CD46)、H因子

(H)、备解素(P)、C3肾炎因子(C3NeF)、血清羧肽酶B(SCPB)、S蛋白(SP,也称玻璃连接蛋白、C8结合蛋白(C8bp)、膜反应性溶破抑制因子(MIRL,CD59)、SP40/40等等。表3是这些调节蛋白的理化参数及结构功能特点。

表3

补体的调节蛋白及其理化参数

| 调节蛋白        | 分子量(kD) | S值   | 电泳位置           | 血清浓度( $\mu\text{g/ml}$ ) | 肽链数目 | 单链氨基酸数目 | 基因定位    | 含糖(%) | 结构功能特点        |
|-------------|---------|------|----------------|--------------------------|------|---------|---------|-------|---------------|
| (1)C1q-In   |         |      |                |                          |      |         |         |       |               |
| (2)C1-In    | 100     | 4.5  | $\alpha 2$     | 180                      | 1    | 478     | 11p11.2 | 35    | SP抑制剂(serpin) |
| (3)I        | 90      | 6.0  | $\beta$        | 50                       | 2    |         | 49.25   |       | SP            |
| (4)C4bp     | 540     | 10.7 | $\beta-\gamma$ | 270                      | 8或10 | 549     | 1q32    |       | SCR           |
| (5)PS       | 84      |      |                | 25                       | 1    | 634     |         | 7     |               |
| (6)CR1      | 160~250 |      |                |                          | 1    |         | 1q32    |       | SCR           |
| (7)CR2      | 140     |      |                |                          | 1    |         | 1q32    |       | SCR           |
| (8)DAF      | 75      |      |                |                          | 1    | 347     | 1q32    |       | SCR,PI锚       |
| (9)MCP      | 50~68   |      |                |                          | 1    | 357     | 1q32    |       | SCR,氨基酸锚      |
| (10)H       | 150     | 5-6  | $\beta$        | 350-550                  | 1    | 1216    | 1q32    | 4-18  | SCR           |
| (11)P       | 220     | 5.4  | $\gamma 2$     | 4.2                      | 4    | 441     | X       | 9.8   |               |
| (12)C3NeF   | 170     | 7.0  | $\gamma 1$     | 100-300                  | 2    |         |         |       |               |
| (13)SCPB    | 310     | 9.5  | $\gamma$       |                          | 8    |         |         |       |               |
| (14)SP/Vn   | 80      | 4.0  | $\alpha$       | 200-400                  | 1    | 459     |         |       |               |
| (15)C8bp    | 65      |      |                |                          |      |         |         |       | PI锚           |
| (16)CD59    | 20      |      |                |                          |      | 103     | 11      |       | PI锚           |
| (17)SP40/40 | 80      |      | $\alpha$       | 35~105                   | 2    |         |         |       | 异质二聚体         |

在补体的激活过程中形成的活性分段,许多是配体分子,须与相应的补体受体作用,才能完成其功能。关于补体受体已发现多种,计有补体第1、2、3、4、5型受体(CR1,CR2,CR3,CR4,及CR5),C3a/C4a受体,C5a受体,C1q受体,C3e受体,H因子受体(HR)等。

补体学的研究热点有:(1)攻膜机制;(2)补体溶破的同种限制作用;(3)补体的分子结构及其同源重复;(4)补体的基因结构及遗传多态现象;(5)补体受体;(6)补体功能等。

(同济医科大学赵修竹教授、汪策撰)

### 补体的遗传多态现象 genetic polymorphism of complement

1968年,Alper在C3上发现补体的遗传多态性,他们在较长时间的琼脂糖高压电泳上,发现C3有快带(F)与慢带(S)之分。在1969年,Rosenfeld在C4上也发现了类似情况。在此后的20余年里,不仅检出了C3、C4更多的带型,且逐渐及于其他补体成分。90年代初已知,13个补体固有成份中的12个、大部分补体调节蛋白及一些补体受体都具有遗传多态现象,成为免疫遗传学中一个热点研究领域。

对具有多态性蛋白的基因进行分析发现,除了散在的以外,还有3个补体多基因族。

1. C4-Bf-C2多基因族:补体C4、B因子(Bf)及C2基因

在人共同位于第6染色体短臂(6P21.3),由于它们嵌在人组织相容性复合体HLA-I与HLA-II类基因之间,所以也称HLA-III类基因。这组基因均表现明显的多态性,已知Bf的别型在20种以上,且Bf与BfS还有亚型;C2型别较少,过去只检出C、B、A3型,近年又发现4个罕见A型与3个罕见B型。至于C4基因,很有一些特点,一是C4有两个基因座位,分别称为C4\*A与C4\*B;二是别型最多,至今已检出40种以上;三是具有相当频率的是表达(C4QO)与基因重复;四是基因长短不一,因情况而不同。同济医科大学中澳友谊补体实验室已对中国10余种民族及10余种疾病的C4、Bf及C2的别型进行了检测,获得了第一批中国人的资料。

C4两个基因间仅相距10kb,所以连锁紧密,构成单体型(C4单体型)。C2、Bf、C4A与C4B也紧密连锁,构成单体型(补体型)。由于这此HLA-III类处于HLA-I与HLA-II基因之间,所以它们的关系受到人们的关注,近年研究表明,它们之间也组成更长的单体型,Alper称之为HLA扩展单体型(HLA-EH),Dawkins则用祖传单体型(AH)一词,例如[HLA-A2-Cw11-B46-C2C-BfS-C4A4-C4B2-DR9-DQW9]这样的AH就以中国人多见。关于C4单体型、补体型及AH赵修竹等在中国进行了一些检测。

C4、Bf及C2的DNA水平的多态性,即限制性片段长度多

态现象(RFLP)近年受到极大关注,其中C4 RFLP尤受重视。新近第6届国际补体遗传会议报道,从C4 RFLP的检测发现,C4基因数目变异较大,1~3个结构基因不等。赵修竹等也用TaqI、Hind III及BamHI等内切酶消化,以识别C4 5'端的DNA探针对中国及某疾病时C4 RFLP进行了一些研究。

2. RCA多基因组: RCA组所包含的都是补体调节蛋白的基因。现知这组成员共有6个,它们是补体第一型受体(CR1)、补体第二型受体(CR2)、衰变加速因子(DAF)、膜辅蛋白(MCP)、H因子及C4结合蛋白(C4bp)。它们的基因共同位于第一号染色体C1q32部位,其顺序为MCP—CR1—CR2—DAF—C4bp。这6个调节蛋白结构上相关,均含有由约60个氨基酸组成的衔接重复单位。这些补体调节蛋白重复合(CCP)亦称短同源重复(SCR),从每个蛋白的N端向C端延伸。短的SCR只有4个(DAF、MCP),长的可达30以上(CR1)。这个调节因子均通过C3及C4及其裂解产物的产生共同抑制补体激活程度。

在上述6个RCA中,大部分检出了其遗传多态现象。如CR1(CD35)为单链糖蛋白,是C3b/C4b的受体,它的功能是介导单核吞噬细胞的内吞作用、通过红细胞介导免疫复合物的清除及加速C3转化酶的解离。CR1的多态性表现在分子量的差异上,从小到大依次为160(C型)、190(A型)、220(B型)及250(D型)Kd,分别受相应的等位基因控制。不同分子量的CR1并无抗原性的差异,也不因分子量不同而影响其功能。1985年CR1cDNA克隆成功,大大深化了CR1结构的了解。现知,A型CR1是一条长约114nm的单链。其C端嵌于细胞膜内,N端伸出并游离于细胞外。全长由30个SCR组成,其中N端28个SCR又各以7个为一组分别为4个长同源重复(LHR)。

3. C6与C7多基因族:补体C6与C7均为末端补体复合体(TCC)成份,两者的化学性质十分相似,均为单链糖蛋白,在电泳上均泳于β2区,血中浓度均为70mg/L,此外沉淀系数、分子量等亦均相当。C6与C7分子均不对称,均含一定程度的α螺旋结构。这两个补体成份的基因在人均位于第5染色体,均呈现明显的多态性。C6有两个主型C6A与C6B,至今已在其两侧检出19个少见型或罕见型。陆保等曾报道过中国人C6的别型分布。C7至今检出6型,此外还有欧洲人的C7—3与日本人的C7—6不易分,有人提出C7在东方人变异较大。

4. 散在的基因编码的补体蛋白的多态现象,除了上述多基因族编码的补体蛋白外,还有更多的补体基因散在于其它染色体上,如第1染色体上的C1q、C8α链及C8β链基因,第4染色体上的I因子基因,第5染色体上的C9基因,第9染色体上的C5基因及C8γ链基因,第11染色体的C1—1n及CD59基因,第12染色体上的C1r及C1s基因,第19染色体上的C3基因,X染色体上的备解素P及D因子(?)基因等等。这些基因及其编码的补体成份不少也有遗传多态性,于此不能一一叙述,这里仅举补体的中心分子C3及参与补体两条途径调节的I因子作为代表加以介绍。

C3是补体固有成分中的中心分子,是补体两条激活途径所形成的C3转化酶C4b2a及C3bBb的共同作用对象,也是Alper与Propp于1968年最早发现具有遗传多态性的补体成份。当时在较长时间的琼脂糖高压电泳上仅发现了C3S与C3F两型。到80年代末,除了S、F外,还检出了29个罕见型,它们是SO15、SO25、SO35、SO4、SO5、SO6、SO65、S1、S11、S13、S155、S16、FO15、FO25、FO35、FO45、FO5、FO56、FO6、FO65、FO7、FO75、FO8、FO85、FO9、F1、F11、F115、及F12。人C3基因位于19染色体(19p13.3—p13.2),它与胰岛素受体基因(INSR)、低密度脂蛋白受体基因(LDLR)、肌强直性营养不良基因(DM)、脱脂脂蛋白C2基因(APOC2)等呈如下排列:pter—(C3, INSR)—LDLR—cen—(DM, APOC2)。

I因子是双链式丝氨酸蛋白酶,在C4bp、H、MCP及CR1等辅因子作用下,I因子既可将C4b灭活为C4bi,又可将C3b灭活为C3bi,并参与C3bi的进一步裂解。I因子的遗传多态现象

是1985年在日本人首先检出的,现知它的常见型有3个,IFA、IFB及IFAB,罕见型有2个,IFBB1及IFA1B。有人提出,I因子的多态性在黄种人具有较大的变异。

5. 在补体的级联反应过程中,C3转化酶C4b2a与C3bBb起着重要的作用。一般讲来,酶的主体是酶蛋白,有相应的基因为之编码。但这两个C3转化酶则是在后天形成的,没有基因为之编码,如前者C4b2a是C4bC2在C1作用下裂出C2b,使C4bC2变为C4b2a后,C2a暴露出一个催化部位形成的;同理,后者(C3bBb)是C3bB在D因子作用下裂出Ba,使C3bB变为C3bBb后,B因子暴露出一个催化部位而形成的。这是酶学中一项很具特征性的情况。

补体遗传多态现象的研究热点有:(1)C4—Bf—C2多基因族的各基因座位的别型以及C4单体型、补体型及扩展单型型的连锁关系,(2)RCA多基因族,(3)各补体基因座位与邻近基因的关联情况等。

参考文献

- 1 陆保,杜传书.人血清补体C6遗传多态现象及其与疾病的关系.遗传与疾病,1986,3(4):206~208
- 2 赵修竹.补体的多基因族及其遗传多态现象.自然杂志,1987,10(3):171~175,216
- 3 赵修竹.补体遗传学研究进展.国内外医学科学进展.1988,61~66
- 4 赵修竹.HLA-III基因与补体型.国外医学分子生物学分册,1989,11(6):251~258
- 5 赵修竹,等.中国人HLA-III的遗传多态性.自然杂志,1990,13(9):555~562
- 6 赵修竹,等.中国人HLA-III(C4A、C4B、Bf、C2)遗传多态性及其与疾病的关系.中国病理生理杂志,1990,6(5):359~363
- 7 汪策,赵修竹.HLA-III类基因组成的两个单体型:C4单体型与补体型.国外医学遗传学分册,1991,14(4):174~180
- 8 陈芳琦,赵修竹.HLA扩展单体型及其生物学意义.上海免疫学杂志,1992,12(2):126~129
- 9 Wu Xiongwen, et al. Haplospecific polymorphism between HLA-B and tumor necrosis factor. Hum Immunol. 1992, 33: 89~97

(同济医科大学赵修竹教授撰)

基因资源的保存

基因资源又称遗传资源或种质资源,是指决定生物性状的核内核外的基因总和。在育种中,由于基因资源来自特定的品种,因此一般采用“品种资源”这一术语。还有些基因资源来自未经人工选择的原始群体或亲缘物种。基因资源是动植物育种的物质基础,而育种工作也永远就是基因资源各种形式的重建和改造。育种工作近代的显著成就无一不与关键性基因资源的发掘和利用有关。但是,现代工业、交通的发展,住宅区的延伸,大片土地的开垦,森林和草原植被被破坏……在加速野生资源的消失。农业生产不断现代化也在促使基因资源的日益贫乏。这首先是育种本身就是这一进程的参与者。对品种高产和特定品质及农艺性状的要求不断把种植品种推向单一化,其遗传基础变得愈来愈脆弱。大批农家珍贵品种被淘汰。人类面临种质资源如此丧失的威胁,不得不引起各国农学家和生物学家的深切忧虑。1974年,国际植物遗传资源委员会(IBPGR)成立,在协调和促进世界遗传资源搜集和保存活动方面发挥重要作用。到1990年,全世界种质基因库(0℃以下)已从1974年的8个发展到106个,建立了世界种质库网络,分别承担各种作物的全球长期保存任务。中国农科院国家种质库承担了全球油菜、大白菜、萝卜和亚洲地区小麦的长期保存任务。

中国已建立起的种质资源数据库系统是目前世界上最大的遗传资源数据库系统之一,包括3个子系统,即国家种质库管理数据库子系统,农作物种质特异性评价数据库子系统和国内外农

作物种质交换子系统, 分别有 22, 1627、27, 2710 和 9, 7452 万份种质以及 332, 4405、813, 9214 和 113, 3969 万个数据项。全部系统数据项符合国际规范, 计算机网络管理。

动植物基因资源保存途径有 3 个方面: ①就地保存, 即通过保护动植物原来所处的生态系统来保存; ②异地保存, 即把植物迁出他们原来的生长地, 保存在动植物园里; ③离体保存, 即保存植物种子、根、茎、花粉和组织培养物; 分生组织, 胚, 花药, 花粉, 单细胞、原生质等以及动物的精液、卵细胞、受精卵、精卵母细胞、原细胞和体细胞等。

自然保护区是指具有代表性的自然景观, 珍稀动植物天然分布以及其它许多为科研、教育目的而划分的需要加以特殊保护的地区。自然保护区是动植物、微生物的天然贮存库, 为人类生活提供丰富的资源, 也为植物育种提供珍贵的野生资源, 对维持生物圈的生态平衡、改善环境、保持水土和涵养水源起着积极作用。在自然保护区, 由于其中动植物群体处于自然的生态平衡状态, 又加以人工保护和科学管理, 选择因素和遗传漂移可减少到最低限度。国际上, 1972 年开始了“人与生物圈”计划, 有 46 个国家提出了 177 个生物圈自然保护区。中国批准将长白山、鼎湖山和卧龙自然保护区加入这一计划。中国自然保护区数量和面积(仅占国土面积 0.17%) 远不及发达国家和某些发展中国家(如日本占 15%, 联邦德国和美国占 10%, 英国和瑞典占 8%, 墨西哥占 2% 等)。随着中国国力增强, 相信, 这方面工作定有较大改善。

动植物园。建立各类综合的、特种的动植物园, 使一些珍稀动植物完全置于人工保护和管理之下。但保护在这里的动植物由于失掉原产地生态系统, 加之数量极其有限, 因而基因组受选择、突变和遗传漂移等因素影响很大, 尤其需要经常以种子繁殖的一、二年生植物为最。因此动植物园只能起临时“救生艇”的作用。

种子库。由于能容纳大批样本, 是目前保存基因资源最实际有效的方法。但是群体遗传学的理论和实践证明, 种子在长期库中一般是不能保护原来采集时的遗传结构的。这是因为(1)种子生活力的差别存在, 就有可能破坏材料的原有基因组; (2)材料更新时的自然条件对材料的选择作用; (3)材料间的异交; (4)由于每份材料有限而发生遗传漂移; (5)贮藏过程中的遗传性变异。常规栽培植物种子贮藏技术已基本解决, 但对于许多野生植物, 特别是其中一些“顽拗型”植物种子保持生活力的贮藏条件还知之甚少或无全无知。

花粉贮藏。此项技术已研究和实践 1 个世纪, 但仅能满足育种上人工授粉要求。花粉寿命远较种子为短, 有的仅存活几天(如禾本科、莎草科等)、有的在接近 0℃ 条件下最多也只能保持 1~2a 的活力(苹果、梨、银杏等), 尽管已有在超低温(-196℃)下长期贮存成功的一些例子。另外, 花粉在遗传组成上有分离, 用来恢复二倍体遗传组成很困难。所以, 花粉作为种质贮存还有许多问题。

营养体贮藏。营养器官如茎段、芽、块根、块茎、鳞茎、球茎之类在生产上的贮藏是用来繁殖或食用的, 通常贮藏一年左右, 作为种质贮存还远不符合要求。营养器官含水量大不易长期贮存。这方面研究还很少。

组织培养。利用特定培养基在试管中培养植物器官、组织、花药、花粉、单细胞或原生质体的研究工作已取得重大进展, 而且已用于育种、繁殖珍贵苗木和保存种质的实践。我国已建成薯类作物试管苗种质库, 保存甘薯种质 410 份, 马铃薯实生块茎 50 份。这项技术占空间小, 便于管理, 又能长期保存, 一旦需要能在较多时间里繁殖大量个体, 是极有前途的种质保存方法。待研究解决的是培养过程中往往发生体细胞遗传性变异问题。

细胞银行。就是将生物的遗传信息以细胞群的形式在极度冰冻条件下(-196℃)贮存起来, 一旦需要就将冰冻对象解冻并恢复培养再生出新的个体。这方面工作在动物上最为成功。

冷冻精液已广泛用于繁殖家畜。用冷冻的牛羊猪兔卵细胞

和受精卵繁殖成功的事例也不少。在利用人工胎座培养解冻胚胎的研究上已有了突破。在我国昆明已建立了滇金丝猴、懒猴等 12 种猴子及其它珍稀野生动物的体细胞和精子超低温冷冻库。植物细胞由于有牢固的纤维素壁和具有巨大液泡, 冰冻贮存研究面临着比动物方面多得多的问题。植物几乎所有细胞皆具有全能性, 解冻后容易再生。这是动物所不及的。目前只在分生组织和花粉(含水量较少)冰冻贮存研究上有较大进展。

在基因资源保存技术和理论上还存在许多有待解决和深入研究的课题, 诸如许多野生种和“顽拗型”种质的贮藏条件, 无性繁殖植物常规长期贮藏方法, 动物和植物体细胞冰冻贮存和解冻后的再生技术, 贮藏种质遗传完整性的保持等。利用基因文库技术直接保存基因克隆是未来研究最活跃的领域, 如何采用基因工程和细胞工程技术恢复已灭绝的种群也将是生物学家追求的目标。

#### 参考文献

- 1 Вепринцев В Н, Ротт Н Н. Консервация генетических ресурсов. Природа, 1978, 11: 15~20
- 2 Бутенко Р Г, Лопов А С Банк клеток растений — возможность и проблемы. Природа, 1979: 4
- 3 张宇和, 等. 植物的种质保存. 上海: 上海科学技术出版社, 1983
- 4 安彩泰. 基因资源的保存. 生物学通报, 1987, 2: 13~15
- 5 Sloten D H Van. The role of curators, breeder and other users of gemplasm in characterization. Newsletter, IBPGR Regional Committee for Southeast Asia, 1978, 3~8

(甘肃农业大学安彩泰教授撰)

**基因文库** 是指将某种生物的总 DNA 或单个染色体、细胞器(叶绿体、线粒体)DNA 的所有片段, 以与载体 DNA 重组的形式引入受体细胞中, 然后通过细胞增殖形成一系列克隆的总体。

基因文库是分离基因特别是分离真核生物有价值的基因用于改造动植物以及生产珍贵医药等基因工程的有效手段。基因文库还可以用于研究基因表达和调控、基因定位、核酸序列分析、物种亲缘关系以及医学诊断治疗等。

基因文库的建立和使用是 70 年代早期重组 DNA 技术的一个发展。从 1974 年起已相继建立了大肠杆菌、酵母菌、果蝇、海胆、蚕、鼠、兔、人、玉米、大豆和水稻等生物的基因文库。近年国内外基因文库技术的研究更接近于实用水平。例如, 构建了 24 个人类单染色体文库进行基因定位和 DNA 序列分析(M. A. van Dilla 等, 1990), 建立了虹鳟鱼和大麻哈鱼(杨学成, 1991)、猪(寇寇, 1991)和羊(任兆钧, 1990)的基因文库并从中筛选出生长激素基因克隆, 构建了慢生型大豆根瘤菌(彭文涛, 1990)和 Frankia 菌(崔玉梅等, 1990)的基因文库, 并从中钩出了结瘤基因克隆, 以及利用弓形虫基因文库(夏爱娣等, 1990)进行了弓形虫 DNA 诊断技术研究等。

基因文库有染色体基因文库和 cDNA 基因文库两种。前者由细胞核总 DNA 构建。由于真核细胞大而复杂, 从其染色体基因文库分离基因特别是单拷贝基因比较困难。但从这里分离的基因含有内含子以及结构基因两侧的调控序列, 对于研究基因表达调控和转录加工非常重要。cDNA 文库一般由丰度较高的 mRNA 逆转录合成的 cDNA 构建, 可分离的目的基因在文库中比例较高。cDNA 不含内含子和调控序列, 从中分离出的基因只要与载体合适的启动子连接就能在任何生物体内表达。所以要依据研究目的来选择建立染色体基因文库或 cDNA 文库, 或同时具有 2 种文库。

基因文库构建一般有下列程序。

设计一个基因文库应包含的克隆数的多少( $N$ )决定于生物基因组的大小( $G$ )、载体所能容纳外源 DNA 片段的长短( $f$ )和所需基因从文库中检出的机率( $p$ )。基因组的大小和 DNA 片



段的长短用碱基对或道尔顿表示。这个关系如下式:

$$N = \frac{\ln(1-p)}{\ln(1-f/G)}$$

**目的 DNA 片段的制备** 从供体生物中提取出纯净 DNA, 然后用限制性内切酶把 DNA 切成所需大小片段。原核生物一个基因的长度大约是一个 kb。真核生物由于有内含序列基因长度约 10 倍于原核生物, 即 10 个 kb 左右。DNA 片段的大小, 还要依据载体能整合外源 DNA 的长度而定。所需一定长度的 DNA 片段可通过选择不同内切酶和控制其作用时间、用量获得。

**载体 DNA 的制备** 在开始研究基因重组技术时, 作为载体的是一些天然的细菌质粒和 λ 噬菌体。后来, 利用重组 DNA 技术, 采用点突变、置换和缺失等方法对这两类载体进行了改造, 构建了多种系列容量幅度宽、与外源 DNA 重组效率高、筛选特性强的各自衍生载体及其杂种载体。例如, 已将几种大肠杆菌质粒重组成了 pBR 系列载体, pMB9, pBR322, pBR325 等。在 λ 噬菌体类载体中, 适合作构建真核生物基因文库的是其衍生物 Charon 系列载体, 已发展到 30 余种, 可携带外源 DNA 片段达 22kb, 而且重组体很便于筛选。容纳外源 DNA 片段更长的是早由 λDNA 和质粒 DNA 重组构成的杂种质粒—粘粒 (cosmid) 载体, 其本身 DNA 仅有 6kb, 却能携带 45kb 的外源 DNA。更令人注目的是已重组成了能容纳 100~200kb 或更长的外源 DNA 的粘粒载体和噬菌体 M13 系列载体, 利用外源 DNA 片段遗传信息的相互覆盖进行基因定位和 DNA 序列分析。

**重组 DNA** 用噬菌体连接酶或大肠杆菌连接酶把目的 DNA 片段与切开的载体 DNA 缝合在一起, 形成重组 DNA。

**重组 DNA 包装** 用质粒作为载体的重组 DNA 可通过转化引进受体细胞。用 λ 噬菌体的 DNA 作载体的重组分子直接经转染引入细胞的效率较低; 如果先用外壳蛋白质包装后再引入 (转导) 受体细胞, 其效率要比直接转染高几十到几百倍。包装蛋白一般取自 2 个溶源性噬菌体菌株。这两个菌株分别带有使外壳蛋白发生缺陷的 2 个琥珀突变, 使它们分别都不能包装, 在一起时才能包装。这样就比较安全。谢雍 (1987) 和杨学成 (1991) 在构建水稻和虹鳟鱼基因文库时, 重组 DNA 就是用来自 E. coli 的 BHB2688 和 BHB2690 的 2 种 λ 噬菌体菌株的外壳蛋白抽提物包装的。

**重组 DNA 的增殖和保存** 将重组 DNA 引进大肠杆菌细胞后随各自的载体增殖而增殖, 在每个细菌细胞中仅繁殖 1 种重组 DNA 分子, 1 个细菌的后代 (即克隆, 每个菌落中约含 10<sup>7</sup> 个细菌) 也就包含着同样 1 个目的基因。结果, 繁殖包括各种各样重组分子的所有细菌细胞, 就形成了某个有机体的一大批基因, 而且每个基因又有无数个拷贝。这就是基因文库。

文库中的基因可以质粒重组 DNA 形式保存起来 (沉淀在乙醇中)。如果是重组噬菌体 DNA, 最好是保存在固定培养基上 (室温下)。在固体培养基上每个细菌单独形成菌落, 互不干扰竞争, 因而有利于全部克隆的保存。这样的克隆必须定期地转移到新的培养基上。

如何从基因文库钩取所需的基因呢? 常用的方法是分子杂交。首先把属于一个文库中的细菌以较低的密度接种在固定培养基上。然后将硝酸纤维素膜置于培养基上, 吸印下细胞克隆, 其位置与培养基上完全对应。在这同时要制备供分子杂交用的探针。常用的探针是用放射性元素标志的与待钩取的 DNA 互补的 DNA, 即 cDNA。cDNA 可通过反转录 mRNA 和依据多肽链结构化学合成 (可以是与待钩取 DNA 互补的一小断片)。探针与滤膜上 DNA 经变性杂交后, 覆盖于 X 光底片上进行放射自显影。在培养皿中找到与底片上黑点相对应的菌落或噬菌斑。后者便包含着要找的基因。再经扩增以获得大量基因副本。

如果既不知道基因结构, 也不知道由它编码的蛋白质结构, 但知道是一种什么蛋白质, 于是就设法获得该蛋白质抗体。该抗体只同产生它的抗原相互作用, 形成抗体—抗原复合物。这样就可找到待分离的基因克隆。值得注意的是, 近年发展起来的多聚

酶链式反应 (PCR) 技术也有研究者 (E. D. Green, 1990; J. S. Tung et al., 1989) 用来从基因文库分离基因, 表现了很高的特异性和灵敏度。

基因文库构建的技术关键已经解决并日臻完善。未来研究的重点是如何使文库构建和基因筛选过程自动化。研究分离单个染色体和建立单染色体基因文库以及构建和利用特大容量载体用于染色体重建、基因定位、DNA 序分析和研究基因表达调控等问题仍将为研究者所注目。当代面临人类最大的问题是大量动植物珍稀资源的迅速丧失。研究如何利用基因文库技术保存濒危珍稀基因资源和恢复已灭绝的动植物也将是未来科学的热点。

**参考文献**

- 1 安彩泰. 基因文库. 生物学通报, 1991, 3: 6~8
- 2 柴建华. 基因文库. 中国大百科全书生物分册: 遗传学. 北京: 中国大百科全书出版社, 1983. 98~101
- 3 Tung J S, et al. PCR amplification of specific sequences from a cDNA library. In PCR technology, 1989. 99~104
- 4 van Dilla M A, et al. Construction of gene libraries for each human chromosome. Cytometry, 1990, 11(1): 208~218
- 5 Киселев Л. Л. Библиотека генов. Природа, 1987. 12: 72~76
- 6 Янковски Н. К. Дериват фага λ как вектор для конструкции и анализа библиотек генов. Молекулярная биология, 1988, 21(5): 968~973

(甘肃农业大学安彩泰教授撰)

**遗传密码**

遗传信息的表达是信息分子核酸指导生成功能分子蛋白质的过程: RNA(DNA)由 4 种单核苷酸 A、C、G、U (A、C、G、T) 组成, 蛋白质由 20 种氨基酸组成, 信息从前者传递到后者要求核苷酸和氨基酸间存在一定对应关系, 由核苷酸编码氨基酸。

1953 年沃森 (Watson) 和克里克 (Crick) 提出 DNA 的双螺旋结构模型后, 伽莫夫 (Gamow) (1954) 首先提出由 DNA 的 4 种碱基来编码 20 种氨基酸的遗传密码思想。认为蛋白质在 DNA 表面上合成, 氨基酸直接位于双螺旋的沟中, 在 4 个碱基构成的菱形小孔中置放一个氨基酸。证明 4<sup>4</sup>=256 种菱形中, 在一定约束下正好填充 20 种氨基酸 (金刚石密码)。伽莫夫认为 DNA 是蛋白质合成模板的观点与实验不符, 并且这种密码是交迭 4 联体, 也与后来证明的实际密码是非交迭 3 联体相矛盾。

从基本的信息论考虑便可导出编码一个氨基酸的核苷酸 (碱基) 数不能小于 3。因为一个氨基酸的信息量是 4. 32 比特, 而一个核苷酸的信息量只有 2 比特。碱基点突变的实验证明, 一个碱基的变化只会引起一个氨基酸的变化, 碱基缺失可为碱基插入的移码突变所补偿。这些实验证明了密码是非交迭的三联体。

历史上密码的破译是通过蛋白质的生物合成获得解决的。1961 年尼伦伯格 (Nirenberg) 和马太埃 (Matthaei) 及乔乔阿 (Ochoa) 等两个组开始用人工合成的 RNA 进行无细胞蛋白质合成。这个无细胞系统的制备通过破坏大肠杆菌细胞得到, 它包含核糖体, tRNA, ATP 和 GTP; 以及必需的酶, 但不含 DNA 和 mRNA。然后引入人工合成的 poly-U, 便可观察到苯丙氨酸的合成。如果换成 Poly-C, 便可观察到脯氨酸。后尼伦伯格将上述实验中的多核苷换成各种已知结构的 3-核苷酸 (密码子), 研究 3-核苷-tRNA-氨基酸复合物, 检验了约 50 多种密码子。从而建立了密码子氨基酸的对应关系。1966 年柯拉纳 (Khorana) 进一步将有机化学合成和酶合成方法结合起来, 用人工合成约 12 个单位的寡脱氧核糖核苷酸为模板, 在 DNA 聚合酶作用下, 通过重复复制, 生成类 DNA 双螺旋, 其两股各包含互补的重复若干次的核苷三联体。再藉助于 RNA 聚合酶, 由类-DNA 产生已知顺序的 RNA, 把它们引入无细胞系统, 便得到各种对应的氨基酸。柯拉纳通过人工模拟氨基酸的生物合成, 证实了尼伦伯格的实验, 从而完全破译了遗传密码。尼伦伯格和柯拉纳的工作获得 1968 年诺贝尔生理医学奖。

遗传密码的重要特点是它的普适性(通用性)。但1979年后发现了一些密码反常,总结如下(wong,1988):

| 基因组(有机体)               | 密码子   | 反常指派 |
|------------------------|-------|------|
| 线粒体(脊椎类、果蝇、酵母、丝状菌、锥形虫) | UGA   | Trp  |
|                        | (ter) |      |
| 线粒体(糖霉菌)               | CUN   | Thr  |
|                        | (Leu) |      |
| 线粒体(植物)                | CGG   | Trp  |
|                        | (Arg) |      |
| 线粒体(脊椎类、果蝇、糖霉菌)        | AUA   | Met  |
|                        | (Ile) |      |
| 线粒体(海盘车)               | AAA   | Asn  |
|                        | (Lys) |      |
| 线粒体(脊椎类)               | AGA/G | Ter  |
|                        | (Arg) |      |
| 线粒体(海盘车、果蝇)            | AGA/G | Ser  |
|                        | (Arg) |      |
| 线粒体(霉菌)                | UGA   | Trp  |
|                        | (ter) |      |
| 细胞(纤毛虫)                | UAA/G | Gln  |
|                        | (ter) |      |

密码子编码氨基酸还和环境有关,例如在改变  $Mg^{++}$  浓度,改变温度、存在酒精、存在抗体等条件下,还有其他反常(Findley等,1982)。另外转译也可能出差,差错率约  $\frac{1}{3000}$ ,这个精确度已大大超过非生物学反应。

密码字典的一个重要特点是它的简并性——几个密码子(称为同义密码子)编码同一个氨基酸。普通密码中61个有意义的密码子编码了20个氨基酸。其中AUG除编码甲硫氨酸外,还可与fMet-tRNA结合,作为起始密码。GUG也可作起读之用。UAG,UAA,UGA不能与tRNA结合,它们是无义密码子,作为终止符号。在反常密码中,起始和终止密码常有变化。哺乳类线粒体使用AUU,AUC,AUA为起始密码,终止密码的反常见表。

核酸编码氨基酸是通过mRNA上的密码子与tRNA上的反密码子结合而实现的。对应于一种氨基酸,存在一种或几种tRNA,它们一般以第34~36位携带的不同反密码子相区别。理论上tRNA的种类数应在20和61之间。克里克提出摆动说(1966),认为tRNA5'端空间位置不甚固定,能和密码子3'端两种或3种碱基配对。后来证明这种摆动还和反密码子5'端的核苷转变为某些修饰成分(如次黄苷I,I能与C,U,A配对)有关。克里克摆动是密码简并的重要原因。

在一个简并多重态中,诸密码子使用频率不同,它受着基因组碱基频率的约束(Bernardi,1985)。人们推测它与基因组中相应tRNA的拷贝数有关(Ikemura,1985)。统计分析也表明它可能与基因表达水平有关,产生高丰度蛋白的高表达基因使用高偏置的密码子(Gouy等,1982;Sharp等,1986)。

从已测定一级结构的tRNA的统计分析表明,在其60几个至90几个核苷中,除恒定和半恒定核苷约占  $\frac{1}{3}$  外,某些位点具有特异性,它们有决定该分子选择性地携带某种氨基酸的作用(例如Ala-tRNA的第3位G和第70位U),称为第2遗传密码(de Duve,1988;Hou等,1988)。这方面的工作正在进展。

关于遗传密码的物理意义,早期工作已知密码子第2碱基对氨基酸理化性质有决定作用。如把碱基突变分成保守和改变氨基酸疏水性的两类,那么后一类突变是危险的,并已被自然选择所消除。因此密码表的结构有利于前一类突变(Volkenstein,1977)。80年代以后开展的遗传密码逻辑的研究,包括密码的简并规则,简并多重态的分布,密码表的疏水-亲水轴,以及密码

的对偶性等。通过引入密码字典突变危险性的概念,从它的极小化可导出普通密码表中各种简并多重态的排列规则及出现频率,并解释亲水和疏水氨基酸在密码表中的瞬状结构。从而由稳定性原理导出了普通密码表的各种特征(Luo,1988;1989)。密码的阴阳对偶性的研究揭示了密码逻辑的另一重要方面,由此也可较好解释氨基酸的疏水-亲水分布(Luo,1992)。

遗传密码理论研究的另一个焦点是密码的起源和进化,从氨基酸的合成实验和陨石资料都说明Gly,Ala,Ser,Asp,Glu和Val等是最早出现的氨基酸,可能它们首先被编码。有人从线粒体密码推测原始密码,认为原始的tRNA结构简并,没有专一性,密码三联体实际只是“三中读二”,进化朝着减少密码模糊性的方向发展(Jukes,1983)。

遗传密码的研究在人类对生命奥秘的探索中占据重要地位,它不仅具有理论意义,而且在蛋白质工程中有重要实践价值。期望通过密码突变来改造氨基酸(包括产生非标准氨基酸)从而改造蛋白质——这可能是蛋白质工程和设计的一个新方向。

(内蒙古大学博士生导师罗辽复教授撰)

**结瘤基因** nodulation genes 由根瘤菌编码,是控制其宿主植物根部根瘤形成的基因。根瘤菌与豆科植物共生固氮体系有较高的固氮效率,在农业上最有经济价值。根瘤菌与豆科植物是专一的共生体系,且根瘤菌只能在其宿主植物根瘤内进行有效的固氮反应。所以,根瘤菌的遗传学研究,包括根瘤菌结瘤基因的研究,一直是被集中研究的课题,借此以揭示共生现象的内在奥妙,为人类扩大根瘤菌的宿主植物范围及更有效地利用共生固氮资源提供理论依据。

1977年,纳蒂(Nuti)等研究发现根瘤菌中存在分子量超过200Md( $1d=1.65 \times 10^{-24}g$ )的巨型质粒,而控制结瘤和固氮的遗传信息就编码在这些巨型质粒上;同时,利用某些耐药因子与共生固氮基因共传递的特性,可不依赖宿主植物便可进行共生固氮的许多遗传学研究;加上分子遗传学研究技术的广泛应用,大大促进了这个领域的研究进展。现已发现许多根瘤菌含有数目不等,大小范围在90~300Md或更大的质粒,它们编码根瘤菌全部遗传信息的20%,但是慢生型根瘤菌中却不存在这类共生质粒,其有关固氮结瘤的遗传信息由染色体编码。

利用转座子(Tn5等)突变等遗传研究技术,已分离、鉴定了一系列结瘤基因,研究最为详细的是豌豆根瘤菌和苜蓿根瘤菌的结瘤基因。1989年,在豌豆根瘤菌的巨型质粒上已发现、鉴定了13个结瘤基因(NodABCII,NodD,NodFEL,NodMNT,NodO),分属5个操纵子;在苜蓿根瘤菌中也已发现鉴定了13个结瘤基因(到1991年止,为NodD,NodABCII,NodFEGPQ,NodH,NodL),分属5个操纵子;在其它根瘤菌中,如菜豆根瘤菌、三叶草根瘤菌中也先后发现鉴定了一系列的结瘤基因;即使是慢生型根瘤菌,借助于快生型根瘤菌中的研究成就,通过分子杂交等研究技术,也已在慢生型大豆根瘤菌染色体DNA上发现并鉴定出6个结瘤基因,分属2个操纵子。各结瘤基因通常在其巨型质粒相当小的区域内( $\leq 20kb$ )连续分布,组成一个基因簇。有些根瘤菌,如苜蓿根瘤菌、快生型大豆根瘤菌、三叶草根瘤菌及菜豆根瘤菌含有多拷贝的NodD基因,而且研究资料表明它们都是有功能的。根据不同结瘤基因的突变体对结瘤的不同影响,结瘤基因被分为共同结瘤基因(如NodABC)和宿主专一性结瘤基因(如NodEF)。共同结瘤基因的Tn5插入突变体将使根瘤菌丧失结瘤的功能,而这种功能的缺失在根瘤菌种间可被互补。而宿主专一性基因的Tn5突变体仅导致延迟结瘤或结瘤数量的减少,这些基因的突变体不能被种间互补,这说明NodABC在结构及功能上是保守的,但它们的详细生化功能尚不清楚,根据遗传学研究结果推测NodABC为植物根毛变形、细胞分化所必需,NodI,NodJ,NodM则据其氨基酸序列分析推测它们与分子跨膜传递有关。

1990年,法国莱伍格(Lerouge)等首次从苜蓿根瘤菌培养液

中分离纯化得到宿主专一性信号分子(NodRm-1)、NodABC及NodH、NodQ等基因因为这个信号分子的产生所必需。用质谱、核磁共振、 $^{35}\text{S}$ 标记及化学修饰研究推定NodRm-1为 $\beta$ -1,4-四聚葡萄糖胺-6-硫酸酯,其中4个葡萄糖胺中有3个氨基被乙酰化,另一个被含16碳的不饱和脂肪酸酰化。这个纯化的NodRm-1因子在 $10^{-8}\sim 10^{-11}\text{mol/L}$ 浓度水平时即可专一激发其宿主根毛的形变等。1991年,罗奇(P. Roche)分离出NodH、NodPQ突变体的信号分子,进而阐明苜蓿根瘤菌中NodH、NodPQ基因与信号分子还原端葡萄糖的6-O-硫酸酯化作用密切相关,而信号分子的这种硫酸酯化作用则决定由NodH和NodPQ介导的植物宿主专一性。在豌豆根瘤菌中,起码有5种泌入培养基的宿主专一性信号分子代谢物被分离纯化(1991年);豌豆根瘤菌的宿主专一性信号分子(NodRiv)的产生与NodABC、NodFEL操纵子密切相关;与苜蓿根瘤菌NodRm-1比较,还可发现:(1)豌豆根瘤菌NodRiv中缺乏硫酸基而含有另一O-酰基链分支;(2)它们的不饱和脂肪酰链(NodE基因与其形成密切相关)及O-酰基链(NodL基因与其形成密切相关)是NodRiv作为信号分子诱导根部组织分化所必需。宿主专一性信号分子的发现,是近年来共生固氮研究的重大突破,它将大大促进结瘤基因的结构与功能的研究进程,也将有助于宿主植物在结瘤过程中的生理生化的研究,已为各国科学家所瞩目。

上述NodABC、NodFEL、及NodH等结瘤基因的表达是受到严格调控的。研究资料表明,根瘤菌在正常的培养条件下,通常只有NodD基因是转录的,而其他结瘤基因包括NodABC、NodFE等均不转录;但当细胞在含其宿主植物抽提物的培养液中生长时,NodABC、NodFE也在高水平上转录,这种转录诱导作用同时需要NodD基因产物的存在。这说明NodD是正作用的调节基因。1985年,罗森(L. Rossen)等研究发现NodD又自身负反馈调节。利用色谱法及荧光研究技术,对植物抽提液进行深入的研究,于1986年发现这类结瘤基因转录的激活因子是一种类黄酮物质。不同的植物宿主分泌不同化学结构的类黄酮,以激活与其共生的根瘤菌结瘤基因的表达。弗尔明(J. L. Firmin)等还发现某些类黄酮(如异黄酮、黄酮醇)拮抗豌豆抽提液对豌豆根瘤菌NodABC、NodFE基因转录的激活作用。

比较不同根瘤菌结瘤基因操纵子上游DNA序列,发现它们之间存在着保守区域,称为结瘤基因调控区域保守序列(Nod box,顺序为ATCCAAACAATCAATTTTACCAATC)。Nod box在所有NodD介导转录的操纵子上游皆存在,是依赖NodD的转录激活作用所必需。利用凝胶迁移研究技术,洪国藩等在1987年首次发现NodD蛋白与Nod box DNA可形成专一的核蛋白复合物。1988年,美国朗(S. R. Long)等研究苜蓿根瘤菌结瘤基因时也证实了这一发现,这说明NodD蛋白是一个能结合DNA的转录激活因子,通过这种核酸与蛋白质直接作用的方式来实现结瘤基因的表达调控。

结瘤基因自发发现以来,在基因分离、鉴定、顺序测定、功能及调控研究诸方面,吸引着一大批科学家。随着当代分子生物学研究技术的广泛应用,结瘤基因的研究范围不断开拓,不断深入。特别是各结瘤基因的结构与功能研究的全面展开,参与调控各元素相互关系研究的深入,有希望在近期内搞清各结瘤基因的结构、功能,并在分子水平上阐明结瘤基因各调控元素间的作用关系、位点、方式等,从而提出结瘤基群调控的分子模型,为人类改变根瘤菌的宿主选择性,使不结瘤的禾本科等重要经济作物也能自行结瘤固氮提供理论依据。

(中国科学院上海生化所洪国藩研究员、倪福弟助理研究员撰)

**抑癌基因** tumor suppressor gene 抑癌基因是一种抑制细胞生长和肿瘤形成的基因,在生物体内起着与癌基因相互对抗的功能,以共同保持生物体内正负信号互相作用的相对稳定。目前抑癌基因的研究已经成为当今肿瘤分子生物学研究的一个热点,并已取得许多进展。

20世纪70年代初,期英国的Harris通过细胞杂交的方法,将肿瘤细胞与正常细胞进行融合以后,杂种后代失去癌变能力。这种细胞杂交中的抑制作用,可能是由于肿瘤亲本隐性变性互补造成的。由此确认在正常细胞中存在着能抑制肿瘤的基因,可抑制住肿瘤细胞的恶性表型。

典型的抑癌基因模型来自视网膜母细胞瘤(Retnobloma, Rb)基因的研究。这是一种儿童期发病的恶性家族性肿瘤。1978年Francke研究发现,在视网膜母细胞瘤患者体细胞中的13号染色体上,如一段序列的两个等位基因都丢失,会导致细胞的癌变。这一研究资料支持在细胞水平上关于隐性功能丧失性突变以常染色体显性遗传形成家族癌的观点。研究结果提示人们在Rb座位的等位基因对肿瘤发生有抑制作用。直到1987年Lee等完全确认Rb基因是能够抑制视网膜母细胞癌发生的,将它称之为肿瘤抑制基因、隐性癌基因或抑癌基因。

Rb基因定位于13p14,由27个外显子组成,编码产物是一种由928个氨基酸组成的蛋白质,即P<sup>105</sup>-Rb。在细胞周期的各个不同阶段,该蛋白的磷酸化程度有明显的差别。因此,分子量在110~114kd之间。在细胞分裂的S期和G<sub>1</sub>期,Rb蛋白是磷酸化的;在细胞的静止期(G<sub>0</sub>)和分裂G<sub>1</sub>期,Rb蛋白则脱磷酸化。P<sup>105</sup>-Rb磷酸化程度的高低影响到它的抑制细胞增殖活性。

Rb蛋白还能够与病毒癌基因的转化蛋白形成稳定的复合物,这种结合与细胞转化密切相关。Whyte等将Rb基因产物P<sup>105</sup>-Rb(105kd)与腺病毒癌基因产物E1A结合后,前者的正常功能完全破坏,产生与Rb基因丢失后相似的效应,这也表明DNA病毒癌基因是使抑癌基因失活而致癌的。由此可见,Rb基因在正常细胞中表达抑制细胞周期进程的作用,还受到正常细胞的磷酸化过程以及病毒感染等方面的影响。

最近的研究资料表明,在成骨肉瘤、小细胞肺癌、膀胱癌和乳腺癌等不同肿瘤的细胞株中都发现有Rb基因的丢失和突变,并且已于1989年将Rb基因分离出来。

P<sup>53</sup>基因是继Rb基因及隐性致癌机理的研究之后新确认的一种抑癌基因,也是目前肿瘤分子生物学研究中最热门的课题之一。1987年以前,一直认为P<sup>53</sup>是细胞中的一种原癌基因,能促进细胞分裂增殖,并能与其他癌基因协同致癌。1989年,Finlay等发现正常的P<sup>53</sup>基因能够抑制细胞的恶性转化。

P<sup>53</sup>基因是以它的蛋白质产物的代号命名的。它的产物是53kd核蛋白,定位于17p<sup>13</sup>,由11个外显子组成,为393个氨基酸。P<sup>53</sup>基因是细胞生长的重要负调节基因,在正常细胞中起着维持细胞正常分化和增殖、阻抑癌变的作用。Mowat等发现,P<sup>53</sup>基因的失活和突变后可改变原有的功能,引起细胞生长失控,是转化成为癌变的主要原因。近年来,相继在成骨肉瘤、肺癌、肠癌、神经胶质瘤、卵巢癌、脑瘤、乳腺癌等肿瘤细胞中发现P<sup>53</sup>基因的缺失和突变。许多研究资料表明,17p等位基因的缺失伴随P<sup>53</sup>基因的突变,是最常见的致癌方式,突变包括基因结构的点突变以及转录和翻译过程中的突变。另外,还发现突变型P<sup>53</sup>对野生型P<sup>53</sup>的“显性负效应”,即认为突变型的P<sup>53</sup>蛋白能抑制和阻碍野生型P<sup>53</sup>的功能,其作用是显性的。这种负效应能产生与P<sup>53</sup>纯合缺失同样的致癌效应。

P<sup>53</sup>基因的转录产物也是一种核磷蛋白。P<sup>53</sup>的活性亦是受P<sup>53</sup>的水平和磷酸化调控的影响。P<sup>53</sup>含量在细胞有丝分裂后期最低,G<sub>1</sub>期开始升高,并在S期磷酸化。这也表明P<sup>53</sup>的磷酸化程度与抑制细胞分裂活性有关。

P<sup>53</sup>基因产物与Rb基因产物同样能与DNA病毒癌基因转化蛋白(如SV<sub>40</sub>T抗原、腺病毒E1A或E1B蛋白、人乳头瘤(HPV)E<sub>6</sub>或E<sub>7</sub>蛋白)结合而失活,继而引起细胞发生癌变。

1989年以来抑癌基因的鉴定和分离已取得一定进展。除已经分离克隆Rb基因、P<sup>53</sup>基因以外,还分离到与Wilms瘤(一种肾脏的胚胎性肿瘤)有关的WT1基因,与神经胶质瘤有关的NF1和DCC等抑癌基因cDNA。在FAP(家族性息肉)已找到染色体缺失部位(5p15-22)以及在结肠癌细胞中发生点突变、缺

失的 18p 上的等位基因 DCC。此外,日本野田亮分离到一种能抑制 Kras 转化的 NIH<sub>3</sub>T<sub>3</sub> 细胞(来源于鼠的成纤维细胞)的恶性表型的 cDNA,定名为 Krev1。中国冯路等分离到一种 3.2kb 的 cDNA,当转移到食管癌细胞系中可抑制其增殖,并引起细胞脱落、死亡,定名为 RA1。

迄今,世界上已经发现大约 100 种癌基因,大体上分为生长因子、生长因子受体、信号转导子、蛋白激酶和转录激活子等几大类。如果从理论上推测,有多少癌基因就可能有多少抑癌基因。然而已经分离到的抑癌基因数目屈指可数。分析其原因,一是癌基因的作用方式是显性的,一个等位基因发生点突变、重排或扩增时,立即能显示癌变作用。目前已经具备若干种检测系统来检测其作用,使用常规的克隆手段即可分离到核酸序列。然而抑癌基因的作用方式是隐性的。一般认为,必须有两个等位基因都丢失或失活才能显示其促癌作用。再者,检测和分离到这种丢失或失活的基因难度也比前者大。另外,癌基因、原癌基因、抑癌基因的概念比较含糊,它们的数目很可能受人为因素的影响。

在细胞的基因组中存在着原癌基因、抑癌基因,是调控细胞发育、分化的必需基因,具有调节控制细胞分化的功能,并能促进或抑制细胞的转化。当它们受到某些致癌因素的作用后,使之激活或失活时,才能促使细胞发生癌变。就细胞生长增殖和分化调控的机制来看,原癌基因和抑癌基因起着相反的作用,互相对抗,分别从正调控和负调控两个方面影响细胞生长增殖和分化。

Rb 和 P<sup>53</sup> 等抑癌基因的抑癌机理如同癌基因的致癌机理一样,涉及到许多不同调控分裂和分化途径。在对人类肿瘤的研究中发现,肺癌和骨肉瘤的细胞中有失活的 Rb 和 P<sup>53</sup> 基因;结肠癌的细胞中有失活的 P<sup>53</sup> 和 DCC。这可能由于这些基因的产物调节着不同的过程,或是几个抑癌基因共同调节同一个过程。弄清癌基因在不同肿瘤中的改变和不同肿瘤又涉及到哪些基因等都需要进行研究。为此,可望继续通过细胞杂交、家族性癌、肿瘤杂合性丢失等研究方法和其它途径,按特定表型有目的地寻找更多的抑癌基因,识别这些基因在染色体上的位置,还必须弄清它们的作用机制,例如 P<sup>53</sup> 基因可在多种不同类型肿瘤细胞中作用于共同限定的作用位点,这些作用位点可能与原癌基因产物密切相关。

在抑癌基因的应用方面,已经利用 Rb、P<sup>53</sup>、DCC 探针,将 Rb 基因或含有特定抑癌基因的整条染色体导入肿瘤细胞,可使其失去恶性表型。例如将正常的 Rb 基因导入视网膜的细胞瘤系,可明显减低细胞的增加率,抑制肿瘤的形成;在骨肉瘤中,正常的 Rb 基因的表达可抑制培养细胞的分裂能力。另外,将正常的 P<sup>53</sup> 基因和 Rb 基因导入 P<sup>53</sup> 和 Rb 基因均已失活的肿瘤系中,结果每一个正常的等位基因均能抑制细胞的增殖。这些研究结果为细胞的功能调控和用基因治疗癌症开辟了新的领域。

#### 参考文献

- 1 Knudson AG FR. *Cancer Res*, 1985,45:1437
- 2 Huang HJS, et al. *Science*, 1988,242:1563
- 3 Hoffman M. *Science*, 1989,246:1387
- 4 Sager R. *Science*, 1989,246:1406
- 5 Weinberg RA. *Cancer Res*, 1989,49:3713
- 6 Koi M, et al. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1989,86:8773
- 7 Studzinski G P, et al. *Lab Invest*, 1990,63:279
- 8 Werness B A, et al. *Science*, 1990,248:76
- 9 Moroco J R, et al. *Lab Invest*, 1990,63:298
- 10 Levine A J, et al. *Biochem Biophys Acta*, 1990,1032:119
- 11 Marshall C J. *Cell*, 1991,64:313

(安徽大学生物系陈钦耀副教授撰)

**动植物 DNA 指纹图** 从血液或其他组织中提取基因组 DNA,用限制性内切酶将 DNA 切割成很多长短不等的片段,通过琼脂糖凝胶电泳将这些片段按长短分开,然后转移和固定到

能吸附 DNA 的硝酸纤维膜或尼龙膜上,以同位素(如 <sup>32</sup>P)或生物素标记的多核探针或微卫星探针与膜上的互补性 DNA 片段杂交,就可以通过放射自显影或染色处理将杂交片段显示出来,肉眼可辨。用这种方法得到的图谱一般包含 15~30 条带(即杂交片段),每和带均遵循简单的孟德尔式遗传,不同个体的图谱是不一样的,就象人的指纹一样,因此叫 DNA 指纹图。以同一个体的不同生长发育阶段以及不同组织中的 DNA 为材料,得到的 DNA 指纹图是相同的。

1980~1984 年间,人类遗传学家相继发现在人体基因组中存在着一些高度可变的条带(即杂交片段),每条带均遵循简单的孟德尔式遗传,不同个体的图谱是不一样的,就象人的指纹一样,因此叫 DNA 指纹图。以同一个体的不同生长发育阶段以及不同组织中的 DNA 为材料,得到 DNA 指纹图是相同的。

1980~1984 年间,人类遗传学家相继发现在人体基因组中存在着一些高度可变的位点(后来称小卫星区域),基 DNA 序列为一个基本序列单位(11~70 个核苷酸)重复排列而成。每个位点上有多个等位基因,其差异为基本序列单位的重复数目不同。1985 年英国的杰弗里斯(A. J. Jeffreys)等首次发现,人的不同小卫星位点的基本序列都含有 11~16 个核苷酸,序列相同的核心序列。因此,他们用一主要为核心序列的串连重复的小卫星(如 33.6 和 33.15)作探针(后来称之为多核探针),能够同时检测到数十个高变异小卫星位点,得到的图谱在个体间是不一样的,此即 DNA 指纹图。由于 DNA 指纹图的个体特异性和图谱的简单遗传性,它已成功地应用于法医学上刑事罪犯的确认和亲子鉴定。

杰弗里斯还推测人体核心序列是一种重组信号,在进化过程中被保留下来,因而人源多核探针可能检测到其它生物的小卫星 DNA。他和他的同事证明,探针 33.6 和 33.15 确实能检测到从哺乳动物到鸟类、爬行动物、两栖动物、鱼等的变异小卫星,产生出 DNA 指纹图。后来其他研究还证明人源多核探针也能用于植物和昆虫,产生品种或生物型特异的 DNA 指纹图。1987 年,瓦萨尔(G. Vassart)等发现野生型噬菌体 M13 可以用作多种生物的 DNA 指纹探针。同年,阿里(S. Ali)等证明(TG)n、(CAC)n 等人工合成的微卫星也适合于产生 DNA 指纹图。

动植物 DNA 指纹图也具有体或品种特异性,但特异性的高低主要因种属和探针而异。1988 年乔治(M. Georges)等用四种探针研究了猪、牛、马、狗的 DNA 指纹图,两个无直接血缘关系的个体有完全相同的 DNA 指纹图的可能性分别为  $4.1 \times 10^{-7}$ 、 $1.4 \times 10^{-11}$ 、 $3.2 \times 10^{-12}$ 、 $3.4 \times 10^{-12}$ 。1988 年达拉斯(J. F. Dallas)用探针 33.6 研究了水稻的 6 个籼稻品种,同品种内不同植株的 DNA 指纹图是相同的,而不同品种之间有相同 DNA 指纹图的可能性仅为  $1.3 \times 10^{-17}$ 。因此, DNA 指纹图可应用于良种登记事业、解决专利权争端问题等方面。

DNA 指纹技术是研究群体遗传学的有力工具。利用 DNA 指纹图准确地鉴定个体或品种之间的亲缘关系,可以研究动植物的交配繁殖行为。个体间 DNA 指纹图的相似程度可用相似系数 D 来衡量,  $D = 2N_{RB} / (N_A + N_B)$  式中  $N_{RB}$  为个体 A 和 B 共有的带数,  $N_A$  和  $N_B$  为其各自的带数。也可用变异系数(COD)替代相似系数,  $COD = 1 - D$ 。1987 年韦顿(J. H. Wetton)等证明麻雀的母子或同胞之间的 D 值为 0.5 左右,而无血缘关系的麻雀之间的 D 值小于 0.25。一个群体内个体之间的相似系数的平均值可反映该群体内的遗传变异程度,而两个群体之间的平均相似系数则可反映它们间的遗传相关程度。这种群体遗传结构的分析对于弄清育种群体的选择潜力和预测优良杂交组合都是很有价值的,1990 年库恩伦(U. Kuhnlein)等用已知近交系数(0.026~>0.98)的 7 个白来航鸡品种(系)建立了 DNA 指纹图相似系数与近交系数间的相关曲线,相似系数明显地随近交系数的增加而提高。

当两个样品在不同凝胶中电泳时,很难确定一个样品的某一条 DNA 指纹图带是否与另一样品的某条带处于相同的位置。

而作群体分析时往往需要分析较多的样品,因而不可能在同一凝胶上分析。1990年邓宁顿(E. A. Dunnington)等采用了混合样品法分析两个洛克鸡品系之间的差异,即将每个品系的5~25只鸡的混合DNA产生完全一样的DNA指纹图,都能代表该品系的DNA指纹图群体特征。因此采用混合样品法既可克服电泳时胶的样品容量不足造成的问题,又可节省分析时间和成本。

一个多核探针同时探测几十个高度可变的小卫星位点,其中某些位点可能与控制经济性状的位点在同一条染色体的邻近区域,因此利用DNA指纹图寻找某些重要经济性状的遗传标记是可能的。但只有当经济性状表现分离的家系有足够多的成员时,才能够找到与该经济性状位点真正连锁的遗传标记。1990年乔治等报道找到一条很可能与牛的肥胖基因连锁的DNA指纹图带;同年普洛特斯基(Y. Plotzky)等找到一条小型肉鸡的腹脂率有关的DNA指纹图带。当然,这些与经济性状有关的DNA指纹图带尚待分离和克隆,然后用做探针以进一步检验其特异性。

DNA指纹图的某些区域图带特别密集,分辨困难。另一方面,由于不清楚哪些带来自同一位点或相邻位点,因而在统计分析上有较多的技术难题。如果用只与单个位点上的等位基因杂交的小卫星或微卫星做探针(即单位点探针),则每个个体的杂交图谱中只出现一条带(纯合体)或两条带(杂合体),分析起来就很方便。据估计,哺乳动物的基因组中分布着上下个高变异的小卫星和微卫星区域,为分离高变异单位点探针提供了丰富的资源。1990年乔治等报道他们用人体多核探针和合成的微卫星探针筛选牛的基因文库,分离到100多个高变异单位点探针。在拥有较大数量的单位点探针的情况下,就可绘制基因连锁图,为寻找经济性状基因打下基础。

DNA指纹探针的数量正在逐渐增加,DNA指纹图技术将扩展到更多的物种,研究的领域包括群体遗传学、生态遗传学、进化遗传学、动植物育种学等。从不同驯化的物种分离的高变异单位点探针将大量出现,相应的基因连锁图的绘制会取得重大进展。特别是利用DNA指纹图技术寻找与生产性状如产奶量、产蛋性能、抗病性等连锁的遗传标记方面可能在5~10年内取得突破性进展,甚至找到一些真正直接控制生产性状的基因。

(北京农业大学生物学院孟安明博士撰)

## 人工细胞融合 artificial cytomixis (artificial intercel-

lular migration of chromatin and cytoplasm) 1900年和1901年植物体细胞间核穿壁和生殖细胞间染色质穿壁先后被发现,1911年盖茨(Gates)把染色质从一个细胞的核中穿壁转移到相邻细胞的细胞质中的现象叫做细胞融合。1975年郑国鎔等用电镜观察到花粉母细胞间不仅有染色质而且还有细胞质的穿壁转移,并观察到穿壁的胞间通道,赋予了“细胞融合”的完整意义。1986年吴伯骥等受前人工作的启迪,提出了“人工细胞融合”的概念,并建立了“人工细胞融合杂交技术”。这是一个涉及生物变异和进化,遗传和发育,以及染色体的结构和功能等重大问题的研究项目,因而引起国内外广泛的关注。

盖茨首次提出的“细胞融合”的涵义仅限于染色质的细胞间穿壁转移,并不包括细胞质在内。由于这一现象触及有机体的生活史、遗传和染色体的个体性和连续性,并与传统的遗传、时化和染色体理论相悖,因此几十年来在国外并未引起足够的重视尚缺乏专门、系统和深入的研究。

在中国,从50年代初期开始到现在,吴素萱等以植物体细胞为材料,郑国鎔等以生殖细胞为材料,对体细胞间的核穿壁和生殖细胞间的染色质穿壁进行了专门的、系统的和细致的研究,先后发表了40余篇研究论文,论述了细胞融合现象在不同植物和同一植物不同组织和器官细胞中发生的普遍性;论述了这一现象在植物发育中的发生时期、发生部位、出现的形态和顺序以及穿壁的方向和位置的一致性;研究了机械损伤或外界压力、不同固定液、不良环境条件、病害或退化以及杂交诸因素对细胞融合的影响和作用;研究了植物细胞的生理状态、胞间通道和共质性。

他们的研究结果指出,细胞融合在细胞的形态结构和生理功能上是有物质基础的,是一种固有的正常生理现象,其主要动力是原生质中耗能的收缩蛋白的主动伸缩运动,并探讨了这一现象在物质运输、生物变异和进化、发育上的生物学意义。持相反观点的代表是王宗清和吴小航,60年代初,他们曾提出植物细胞间核穿壁是退化现象和机械损伤所致,并一度引起争论。细胞融合作为一种正常生理现象,已被广泛接受。在细胞融合的研究中,郑国鎔和姜成后等的工作是独树一帜的,现已从光学显微镜进入到电子显微镜,从单纯形态学描述进入到生理生化研究,从静态观察进入到动态分析。但是,由于缺乏严格的跟踪实验体系,对细胞融合的本质、机理和生物学意义和研究大多还属于推测,缺少直接证据,因而有待于进一步深入探讨。

1985年初,基于对细胞生物学和细胞工程学的基本理论和实践的认识和思考,受郑国鎔的指导,吴伯骥等发展了一项新的细胞工程技术—人工细胞融合杂交技术,简称 ACHT (Artificial Cytomixis Hybridization Technique) 曾用名 LB 技术,1986 年正式提出“人工细胞融合”的概念。

“人工细胞融合”或“人工促使植物细胞间细胞质和染色质穿壁转移”的全部涵义是,采用细胞工程的实验体系,人工模拟正常生理条件下花粉母细胞间染色质和细胞质穿壁转移时的细胞生理和结构状态,经共培养使相同或不同植物细胞间形成次生胞间连丝、次生胞间连丝通道,扩大的胞间通道和细胞融合道,进而人工促使相同或不同植物细胞间细胞质和染色质的穿壁转移,实现“细胞融合”,从而达到或直接改变细胞的遗传结构,或通过引入外源遗传物质来改变细胞的遗传结构,获得广泛变异类型的再生植株,进一步选择、培育,最终实现非载体遗传操作培育新材料、新品系、新品种或新的物种类型的目的。

1986~1992年,吴伯骥等先后在国内外发表有关“人工细胞融合”的论文16篇,分别报导了 ACHT 技术的建立,采用 ACHT 技术获得烟草+菠菜、水稻+稗稻、半夏+紫鸭跖草等组合的杂种再生植株和籼稻变异再生植株。以及对 ACHT 技术和杂交后代进行的细胞学、遗传学、生理生化、植物化学、免疫化学和分子生物学多方面的研究结果。

ACHT 的技术程序:(1)亲本的选择及其胚性细胞和拟分生细胞的诱导、分离和纯化;(2)亲本胚性细胞和拟分生细胞的离散、混合、收集和共培养;(3)对已形成次生胞间通道和共质联结的细胞团进行细胞间细胞质和染色质穿壁转移的人工操作;(4)再生完整变异植株和选择;(5)大田目的性选择,结合常规选育种选育新材料、新品系、新品种和新的物种类型。

1985~1988年,采用 ACHT 技术先后获得烟草+菠菜、水稻+稗稻、半夏+紫鸭跖草等再生杂种植株和籼稻变异再生植株。

1988~1992年,完成 ACHT 技术的细胞学基础研究,结果表明,采用 ACHT 技术对不同植物细胞共培养期间,不同植物和相同植物细胞间渐次形成次生胞间连丝、次生胞间连丝通道,扩大的胞间通道和细胞融合道,它们的直径从100~290nm扩展到500~1500nm左右;在未经穿壁转移的人工操作前,细胞间已发生物质、能量和信息的交流;经穿壁转移的人工操作处理后,不同植物和相同植物细胞间广泛发生细胞质的染色质以不同的质和量的穿壁转移,实现对不同植物细胞和相同植物细胞的人工细胞融合,从而以直接和引入外源遗传物质的两种方式改变植物细胞的遗传结构。

1987~1992年,对 ACHT 获得的烟草+菠菜杂种真实性进行了多方面论证,形态学分析表明杂种及后代具双亲性状特征;植化分析表明杂种后代中具双亲特有化学组分;RuBP 羧化酶等电聚焦表明杂种后代中具有双亲各自大小亚基;蛋白质免疫试验表明杂种后代中具双亲特有的抗原决定簇;蛋白质免疫吸附双扩散及蛋白质 EP 电泳法,试验表明杂种后代中具双亲特有蛋白质;杂种后代总 DNA 与双亲标记 DNA 的杂交度都低于标记 DNA 与双亲自身总 DNA 的杂交度,但都高于标记 DNA 与另一亲本

总DNA的杂交度,但都高于标记DNA与另一亲本总DNA的杂交度;杂种及后代的染色体组中含与双亲同类型的,但又显著不同的染色体;与烟草回交第一代减数分裂中期出现高频率的单价体、三价体、多价体和网状排列染色体,结实率大幅度下降。对ACHT得到籼粳稻杂种及后代性状分析表明它们具双亲显著的标记性状;在与双亲正反回交第1代减数分裂中期,出现比对照的两亲本、杂种本身以及有性杂种及其回交第一代频率高得多的单价体,且结实率下降到15%~5%以下,都远低于对照。ACHT获得的籼稻变异材料除性状发生较大变异外,与亲本回交第1代减数分裂中期,也出现比对照的亲本和变异材料本身频率高得多的单价体,结实率也显著低于对照。染色体组型分析表明,ACHT获得的籼稻杂种和籼稻变异材料的染色体类型和结构较之亲本已显著发生变异。此外,不同的杂种株系又有较大差异。

1989年在操作半夏和紫鸭跖草人工细胞融合中,获得了带有紫鸭跖草紫红色标记性状的半夏再生植株,半夏叶片均呈紫红色。

由于人工细胞融合是随机的,不同质和不同量的细胞质和染色质的穿壁转移,给杂种选择系统的建立带来巨大困难;此外,人工细胞融合的发生贯穿共培养、穿壁人工操作和继续分化培养整个过程,因而要在细胞水平上跟踪已发生细胞融合的细胞的发育分化全过程,在现有条件下是极为艰难和难以实现的。“人工细胞融合”的提出和ACHT技术和建立才6年时间,在理论和实践上还有很多工作要做,诸如(1)ACHT的实验体系和由此建成的不同植物细胞组成的共质细胞社会;(2)由人工细胞融合引起的细胞组装、细胞核和染色体重建;(3)人工模拟物种形成和进化、演变;(4)由于烟草+菠菜杂种后代在烟草杂种优势育种上成功的应用和籼粳稻杂种及籼稻变异系在应用上的巨大潜力,ACHT技术在遗传育种上的应用研究等理论和实践问题将成为该研究项目20世纪初的重要研究内容和课题。这些研究的进展,将对现代生物科学的发展产生重大影响。

(中国科学院成都生物研究所吴伯骥研究员撰)

**辐射细胞遗传学** radiocytogenetics 对电离辐射所致生物体遗传行为改变的研究称为辐射遗传学;而对电离辐射诱发细胞内遗传物质改变的研究称为辐射细胞遗传学。1888年瓦德(Waldevyer)和1901年邸里斯(Devries)分别提出了染色体和突变的概念。1926年,米莱(Muller)和斯坦德尔(Stadler)分别证明X射线或紫外线都可参引起动、植物可传递的损伤效应,并在显微镜下证明是染色体损伤所致。辐射细胞遗传学作为真正的实验科学建立于30年代,沙克斯(Sax)等用紫鸭跖草的孢子为材料,系统地观察了电离辐射(X射线,中子)诱发染色体畸变的规律。1952年,徐道觉意外地发现低渗透溶液处理后,细胞核中的染色体分散良好,利于分析。1960年,墨哈德(Moorhead)等建立了人外周血淋巴细胞体外培养制备染色体方法,使辐射细胞遗传学从动、植物的研究转入了人类细胞的研究。1964年,依文恩(Evan)和1975年,培依恩(Payne)等分别建立了成熟地制备雄性和雌性哺乳动物生殖细胞染色体的方法。1978年,鲁德克(Rudak)又成功地把人精子与去透明带仓鼠卵进行体外受精,使分析人类精子染色体成为可能。

多年来,对电离辐射诱发哺乳动物体细胞和生殖细胞染色体损伤已作了深入、细致的研究,其中以体细胞的研究较多,主要是对其效应规律,机制的研究,多是探讨其作为生物剂量计的可行性和应用范围,而对生殖细胞的研究主要是探讨辐射所致的遗传效应。

大剂量或中等剂量辐射诱发染色体损伤的研究证明,低LET辐射(指 $\gamma$ 射线, $\gamma$ 射线)诱发一次击中染色体畸变(末端缺失)量是剂量的直线函数,即畸变量随辐射剂量增加而呈直线增加( $Y=a+bD$ ),不受剂量率和分割照射的影响;诱发的二次击中畸变量(双着丝粒体,易位等)与剂量呈二次多项式性相关( $Y=a+bD+cD^2$ ),与剂量率和分割照射有关。而高LET辐射( $\alpha$ 粒子,

裂变中子和低能质子)诱发的染色体损伤,无论是一次击中还是二次击中畸变均与剂量呈直线相关( $Y=a+bD$ ),与剂量率,分割照射无关。

低剂量辐射细胞遗传学的效应与大、中等剂量的效应有些不同,这已成为人们非常关注的问题。1976年,鲁肯尼克(N. V. Luchnik)证明50~400毫戈瑞(mGy) $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 射线照射人离体细胞发现100~200mGy之间双着丝粒体畸变率出现坪值,与从大剂量效应外推至小剂所得的效应不一致。库瑟姆瓦(Kucervova)也证明似乎150mGy处有一剂量阈值,即在150mGy以内染色体畸变发生率很低。并且,国际原子能机构(IAEA)组织十几个实验室,对低剂量辐射诱发染色体畸变规律进行了研究,其结果:4mGy剂量点的各种类型染色体畸变率均低于对照组,50~100mGy之间为坪值段。总之,在很低剂量辐射照射时,染色体畸变发生的速率很低,可能有些修复系统被激活,这已被以后发现的低剂量辐射可诱导细胞遗传学适应的现象给予证实(详见细胞遗传学适应性反应条目)。

由于雄性生殖细胞取材较方便,故电离辐射诱发生殖细胞染色体损伤的研究以雄性生殖细胞为多,其中又以精原干细胞染色体易位研究的居多,这主要是因为染色体易位为稳定性畸变,可随生殖细胞减数分裂的过程传递给子代产生遗传效应。典型的辐射诱发哺乳动物精原干细胞染色体易位的剂量效应曲线为峰形,即在一段剂量范围内染色体易位随剂量增加而增加,超过一定剂量后易位率随剂量增加而下降。曲线高峰处的剂量称为峰值剂量,小鼠约为6~7Gy,金黄地鼠为2~3Gy;灵长类动物,如罗猴、猕猴、食蟹猴为1~2Gy,人类的约为2Gy。

从理论上讲,一个带有染色体易位的精原干细胞在形成配子时,有4种可能,一个为正常配子,与正常卵子受精形成正常子代个体;一个为携带染色体易位的配子与正常卵子受精后形成的子代个体中所有的细胞均含有染色体易位,该个体可表现为神经系统发育障碍、生育力低下,易患肿瘤倾向增加等;两个遗传物质不平衡的配子,该精子与正常卵受精不能形成正常胚胎,常在受孕早期死亡而淘汰,故评价辐射诱发生殖细胞中染色体易位传递给子代形成可遗传易位个体的危险度有极重要的意义。按上面的推算,其易位率应属1/4传递。1990年,王献理等用0~4GyX射线照射小鼠后观察其精原干细胞染色体易位发生率,然后利用上述原理推算其子代中易位携带者的发生率效应曲线为: $Y=0.19+0.35D$ 与詹诺若色(Generoso)利用0~6GyX线照射雄鼠后直接观察 $F_1$ 代获得易位携带者的效应曲线 $Y=0.16+0.31D$ 是一致的。由此可见,从亲代生殖细胞的损伤直接评价子代中遗传危险度是可行的。但是,由于人类生殖细胞来源受限,故直接对人类的这种评价似乎有些困难。所以,加拿大巴丁(Martin),美国布郎德里夫(Brandriff)及日本凯米库其等广泛开展了辐射诱发人类精子染色体畸变的研究,并与其他哺乳动物的结果相比,证明人类精子的辐射敏感性最高,分别是豚鼠、家兔、中国仓鼠、小鼠和金黄地鼠的6倍、5.5倍、3倍、3倍和1.5倍,这对于评价男性受照射后对子代影响的研究具有重要意义。

辐射细胞遗传学的研究,还有许多工作要做,有着很大的发展前景。随着分子生物学手段向辐射细胞遗传学的引入,人们已证明电离辐射可诱导细胞产生某些新蛋白质,称为辐射诱导蛋白(IIP或CIP),并且证明大剂量辐射与低剂量辐射诱导的蛋白质各自不同,进一步工作将阐明这些蛋白质生物活性以及他们的基因表达如何,尤其是在生殖细胞中的表达及向子代中的传递如何。

(白求恩医科大学预防医学院 杨宝晨 副主任技师、蔡露博士撰)

**自然转化** natural transformation 1928年F. Griffith发现的肺炎双球菌的转化现象。1944年O. T. Avery等人从元素分析、酶学分析、血清学分析以及生物活性鉴定等方面证实了无细胞抽提物中引起肺炎双球菌荚膜转化的转化因子是DNA,第1

次为遗传物质是 DNA 而不是蛋白质提供了直接证据。随着质粒的发现和 DNA 重组技术的建立,细菌的转化系统由自然转化进入到人工转化,并由细菌细胞扩展到高等动植物细胞,这一阶段可以从 70 年代初 Mandel 和 Higa(1970)发现用  $\text{CaCl}_2$  处理大肠杆菌可提高其摄取  $\lambda$  噬菌体 DNA 的能力和 Cohen(1972)首次成功地将重组质粒转化进大肠杆菌为起点。今天人工转化已成为现代遗传学研究及基因工程不可缺少的重要技术。80 年代以来,随着遗传工程微生物在农业和环境技术中的应用,带有重组 DNA 的细菌人为地释放到环境中,出于对生态学和安全性的考虑,人们的注意力转向环境中的自然转化的研究。

**受体功能** 过去对受体的功能(包括感受态出现、DNA 结合和摄取、重组)作了详细研究,提出了阐明受体细胞对线型染色体 DNA 分子的摄取机制的模型。后来又提出了质粒 DNA 转化和噬菌体 DNA 转染的模型,并指出虽然染色体 DNA 片段与质粒 DNA 以十分类似的方式进入细胞,但后者被转化的频率极低。质粒 DNA 的低频率转化并非是受体具有不同的摄取功能,而是由于作为独立复制子的环状双链 DNA 分子在转化过程中与染色体片段一样,首先被核酸内切酶切断,形成单链,这些单链片段不能复制,而且因与受体染色体无同源性,所以也不能整合。质粒 DNA 必须以其多个拷贝数的协同作用产生具有复制能力的质粒才能在细胞内存留和表达。但是,如果受体细胞内染色体或质粒上含有与进入的质粒的 DNA 同源序列,那么可通过同源序列之间的重组(依赖于 *recA* 功能)使转化获得成功。虽然受体细胞摄取 DNA(包括质粒 DNA、噬菌体 DNA)的机制比较清楚,但仍有许多尚待解决的问题。例如在有些细菌中,感受态细胞对 DNA 的摄取有序列特异性,也就是在摄取 DNA 时具有识别内源 DNA 的能力。虽然已有许多细菌被鉴定为具有自然转化能力,但只对少数细菌的受体功能进行了研究,而且关于受体功能的信息主要来自医学上具有重要意义的 3 个属的细菌:链球菌属、芽孢杆菌属和嗜血杆菌属。在环境和农业上具有重要意义的细菌,如假单胞菌属、不动杆菌属、固氮菌属、弧菌属中的许多种的转化机制却研究得很少。

**给体功能** 自然界中 DNA 的来源过去一直认为是来源于某些细胞偶然随机地裂解释放出来的 DNA,但随着转化机制的了解,逐步认识到仅仅靠这种来源似乎难以解释受体所具备的复杂功能。受体细胞为了摄取介质中的 DNA 发展成了一套高度完整的过程,并且涉及到至少 10 个基因的产物,有些细菌还具有摄取特殊序列的功能。受体细胞似乎不可能用如此复杂的过程仅仅为了吸收由细胞随机裂解释放出来的 DNA。而且细胞的裂解和受体感受态的出现是不同步的,前者是在细胞生长的稳定期以后,后者通常是在对数生长期,加之环境中的 DNA 遭到 DNA 酶的降解,其寿命很短。因此,环境中的自然转化应该还有其它非偶然的 DNA 来源。近年来的研究表明,这种来源是给体的功能所致,完整的给体细胞可向环境中分泌大量的 DNA,不仅为受体细胞提供具生物活性的 DNA 来源,而且在转化中起主动作用。

1. 给体 DNA 的分泌。近年来的研究表明许多细菌可向培养基中分泌 DNA 和 RNA 分子,而且这种分泌是完整细胞的功能,不是细胞裂解所致。另外,通过杆菌肽的试验表明,杆菌肽能增加胞外蛋白质的分泌,但不引起胞外 DNA 的增加,说明 DNA 的分泌机制不同于蛋白质的分泌,细胞具有对二者的选择渗透性机制。随着环境中自然转化重要性的提出,有关 DNA 释放机制的研究必然具有与摄取机制同等的重要性,如同肺炎双球菌、流感嗜血杆菌、枯草杆菌作为 DNA 摄取机制的研究模型一样,很可能有另外一些细胞将为成为 DNA 释放机制的模型。

2. 细胞接触转化。传统的转化概念是不涉及细胞间的接触,但近年来不仅观察到细胞接触的转化,而且实验表明细胞间的接触大大促进转化活性,从而进一步证明完整给体细胞在转化中的作用。Stewart 等人在研究施氏假单胞菌(*P. stutzeri*)的接合系统时发现,当给体和受体菌株被混合固定在滤膜上培养时,接合质粒 RK<sub>2</sub> 和染色体标记的转移频率总是不同,染色体基因转移频

率很低并且对 DNaseI 敏感;质粒基因的转移频率高而且对 DNaseI 不敏感,所以按照传统的区分标准,染色体基因的转移是通过转化进行的;而质粒则是通过接合转移的。虽然有报道表明施氏假单胞菌具有自然转化能力,但在不加外源 DNA 的条件下,只有给体和受体混合固定在滤膜上而发生的转化出乎意料,而且没有检测到细胞的裂解,在这种情况下发生的转化必然是细胞释放的 DNA 所致,这种释放是双向的,混合的二菌株既是给体也是受体,都以同样的频率接受和提供基因,转移频率完全不受细胞内是否存在 RK<sub>2</sub> 质粒的影响。所以,这种细胞接触的染色体基因转移不是接合而是转化,同时也不是转导,因为没有检测到噬菌体。分别以等量的完整细胞形成的 DNA 和溶液形式的 DNA 进行转化比较实验时发现,前者的转化频率是后者的 10<sup>3</sup> 倍,这种高频率的转化并不是由于细胞连接转化时 DNA 得到保护所致,可能是细胞间的接触促进给体细胞在转化过程中释放更容易为受体接受的 DNA 分子所致,也说明给体在转化中起着主动作用。

**环境中转化 DNA 存在的方式** 用 PCR 技术可以检测到环境中(如土壤、水下沉积物等)所存在的微量的 DNA 和 RNA。有许多实验表明,在水体、土壤、废水中都有自然转化发生。那么,自然环境中的 DNA 是如何保持其活性和稳定性的呢?曾经观察到来自水环境中的 DNA 比水底沉积物的 DNA 稳定性差,易遭到降解。通过吸附试验表明,DNA 不仅能很好地吸附到沙子等矿物质表面上,而且吸附的 DNA 对 DNaseI 的降解有较强的抗性,其转化活性也比游离 DNA 高得多。Romanowski 等用质粒 DNA 的吸附研究也得到类似的结果。可见,存在于自然界中的 DNA 具有自身保护能力,自然界中发生的转化是普遍的。如重组质粒 DNA 也得到这种保护而不被迅速降解。那么,它们将成为土壤中胞外遗传物质库的一部分。这种质粒编码的遗传信息便可通过转化进入自然感受态的 G<sup>+</sup>和 G<sup>-</sup>细菌中。

参考文献

- 1 Hara T, et al. Agric. Biol. Chem., 1981. 45:2457~2461
- 2 Hara T, et al. J. Gen. Appl. Microbiol., 1981. 27:109~114
- 3 Khanna M. Appl. Environ. Microbiol. 1992. ,58:1930~1939
- 4 Lorenz M G, et al. Appl. Environ. Microbiol., 1987. 53:2948~2952
- 5 Orgam A V, et al. Appl. Environ. Microbiol. 1994. 60:393~396
- 6 Romanowski G, et al. Appl. Environ. Microbiol., 1991. 57:1057~1061
- 7 Saunders C W, et al. 1981. J. Bacteriology, 146:517~5262
- 8 Selenska S, et al. Microb Releases, 1992. 1:41~46
- 9 Smith H O, et al. Annu. Rev. Biochem., 1981. 50:41~68
- 10 Smith H O, et al. Annu. Rev. Biochem., 1981. 50:41~68
- 11 Stewart G J, et al. J. Bacteriol., 1983. 156:30~35

(武汉大学生命科学学院沈萍、彭珍荣撰)

衰老分子生物学

molecular biology of aging

衰老是一古老的生物学现象与命题。在 60 年代以前,人们的主要注意力集中于器官、组织的功能减退和衰竭上。60 年代初期, Hayflick 的实验表明正常人的成纤维细胞具有有限分裂的能力,从胎儿身上取得的细胞群最多可连续分裂 50 次,被取得细胞的人越老,细胞分裂次数越少,细胞生存的时间也越短,只有癌细胞才能永久分裂,这一发现使人们对细胞生物学产生了浓厚兴趣,因而细胞生物学成为研究衰老的出发点,但是,对于影响衰老和长寿的细胞变化情况,最基本的生物过程如何影响细胞的衰老、衰老的细胞如何影响组织、器官和整个机体的功能等方面的了解,这仅仅是一个开端。70 年代以来,人们才逐渐从遗传学、基因结构、基因调控、细胞寿命、衰老相关疾病的分子发病机制、分子生理学等方面获得对衰老的分子机制认识。衰老的免疫理论指出,调节许多免疫系统的 MHC 系统影响最长寿命。70 年代,利用 H-2 同系小

鼠从存活曲线和年龄相关的肿瘤发生率两方面获取了直接证据。80年代 Walford 表明 MHC 可影响大量非免疫系统,如某些自由清除酶、混合的功能氧化酶、DNA 修复和生殖衰老。而这些均与衰老相关。M. R. Rose 发现果蝇的许多突变体其寿命大大缩短。然而,是衰老的加速还是表型变异的病理效应导致死亡,尚有争议。实际上,得到一种真正的衰老加速或衰老延迟的突变体极为困难。D. Subobscura 有一种突变的等位基因可同时导致雌性卵巢缺乏、寿命延长。它类似于 *C. elegans* 的 *age-1*。但由于位点连锁所致的近交退化,不大可能从果蝇中筛选出短命的突变体。寿命增加的突变体则通过远交的实验室繁殖得到。研究表明这些品系在许多位点上与野生型不同,而这些位点一般说来存在能产生附加效应的等位基因。1990年 Hutchinson 等得到一种寿命增加 70% 的单一基因 (*age-1*) 突变体。*age-1* 已在线虫 *C. elegans* 的第 2 连锁群上定位,是一种隐性基因。它既可影响雄性,也可影响两性体(使其自育力下降 4/5)。作者正采用多因子杂交和缺陷分析对此基因进行精密定位,并正克隆。此外,他们在果蝇中也筛选到衰老延迟突变体,并证明它们以孟德尔方式遗传,不近交退化,非性连锁,非全直接显性。数量遗传分析表明,1 个以上的位点参与寿命延长。1990年 W. J. Mackay 等则对果蝇的过氧化氢酶缺陷突变体进行了遗传学及分子生物学分析,以检验衰老的氧自由基理论。结果表明,这些突变体在标准实验室条件下可以存活,但寿命大大缩短。为检验抗氧化剂酶的过量表达能否延长果蝇的寿命,他们正将多拷贝过氧化氢酶基因通过 P-因子介导的转化导入果蝇的基因组内以进行观察。

小鼠肝中 DNA 甲基化随年龄增加而减少,附加序列(如卫星 DNA、a1 球蛋白)在衰老过程中逐渐失去甲基化。Spuck 等正努力确定哪些限制因素参与衰老相关的去甲基化。他们认为甲基化位点的专一性、DNA 甲基转移酶作用的调节、5-甲基巯基氨基酸糖基酶的参与和衰老相关。Randerath 等在衰老哺乳动物组织中发现加合物样 DNA 修饰在体内的含量随衰老增加。此化合物有组织种属特异性,在胆汁中含量可为非致突变性致癌剂减低。它是一种 DNA 结构的永久性变化,影响 DNA 的复制并由此引起细胞恶变或衰老。

1990年 Richardson 等探讨了饮食限制延长寿命的分子机制,发现它阻止了 a<sub>2</sub>I-球蛋白表达因衰老而出现的下降,提高了此蛋白基因的转录和翻译。同时,超氧化物歧化酶(SOD)基因、过氧化氢酶基因的转录和翻译也提高了 50%,但脱脂蛋白 B 和 c-myc 因衰老而出现的表达增加则不受其影响。此外,还发现肝脏中热激蛋白 70 的产率随年龄增加而大幅度下降。作者认为,这种变化中至少 SOD 和过氧化氢酶表达的增加会有利于寿命的延长。

雏鸡、小鼠、大鼠、人等的皮肤、肺中的成纤维干细胞系统可演变为 9 种细胞,这些细胞分别分布于 4 个不同“库”(干细胞库、增殖与分化库、后分裂与成熟库、退化库)。前 3 种能增殖的库的数量无论在体内还是在体外均随衰老而急剧减少。Smith 等观察到,无论将正常人成纤维细胞与多少数量的永生(imortal)人细胞形成融合体,其分裂潜能总是有限的。从而表明细胞衰老的表型为显性,细胞永生是源于隐性变异。通过互补实验,证明有 4 个互补群与细胞永生相关。同一互补群内的细胞融合,细胞获得永生。群间融合的细胞其寿命不是无限期的。因此,作者认为有 4 条途径通向细胞永生。在一系列实验中,均发现衰老细胞产生抑制 DNA 合成起始的蛋白因子,含有丰富的能抑制 DNA 合成的 mRNA。这些 mRNA 通过抑制 DNA 合成的起始而起作用。1992 年,他们将此定位于人 4 号染色体上。

Alzheimer 氏病(AD)的特征是 42 到 43 残基的淀粉粒 A<sub>4</sub> 蛋白(又称 β 蛋白)在大脑中的大量沉积。此蛋白源于前体的裂解。相似的过程在所有 Down 氏综合征病人的早期也出现。淀粉粒 A<sub>4</sub> 蛋白在神经原内或突触间的沉积是导致 AD、DS 病人痴呆的最重要原因。H. Vlassara 报道了一种能解释衰老与糖尿病多种并发症的机制—非酶催化的蛋白高度糖基化。他发现,蛋白的

高度糖基化会形成不可逆的高度糖基化终产物(Advanced Glycosylation Endproduct,简称 AGE)。这种产物会在长期存在的蛋白(如胶原蛋白、基质膜蛋白、眼晶体蛋白、髓磷脂蛋白)中不断积累,导致众多系统的衰老变化(如血管小球、毛细血管基质膜加厚、动脉粥样硬化;关节周僵硬与外周神经病)。这种修饰还能改变遗传物质的结构与功能。

大部分癌症的发生率都与年龄呈正相关。为了肯定这种增加的危险是否源于衰老细胞对恶性转化的敏感性增加,1989年 T. Kunisada 等用起始点缺陷的 SV40DNA 转染衰老的大鼠成纤维细胞并计数转化灶。结果表明,衰老细胞的转化灶数大大高于胚胎细胞或断奶鼠细胞。这种增加不是因为细胞对 DNA 摄取量的增加、DNA 整合或外源 DNA 表达的增加。已知出芽酵母的分裂次数有限,当细胞衰老时其传代时间延长。他们证明酵母中衰老表型为显性,且由衰老细胞产生的一种胞质因子控制,控制点在 G1 与 S 期交界处。为了找到此因子的基因,作者观察并克隆了细胞在衰老过程中表达不同的基因,其中有两个基因被证明不仅为静止期特有,而且为衰老期特异。

1989年 Hornsby 等发现,在细胞衰老过程中存在随机丧失分化功能基因表达的过程。他们观察到,牛肾上腺皮质细胞经长期培养,其中分化功能基因—甾体 17α-羟基酶基因的表达在子代细胞中随机丧失证明复制对于开启基因表达是必需的。1989年 Spiering 等证明 DNA 复制与衰老直接相关。他们在衰老和静止的人二倍体成纤维细胞中发现了 DNA 合成抑制因子。虽然功能相同的因子在水生的人细胞系 SUSM-1 中组成性地表达,但这两类来源不同的因子对温度酶解、环己亚胺、嘌呤霉素敏感度不同。作者认为这是一类新型的生长负调控因子,执行控制寿命的遗传程序。1991年 Grotendons 等则通过 TGF-β 对同种属来源内皮细胞生长的影响探讨了衰老的机制,认为衰老表型是某些生长调控基因产物产率降低的结果。HC. Yand 等细胞衰老是由于细胞周期停滞在早 G<sub>0</sub>/s 期,而且证明蛋白激酶 C 和 87KD 蛋白的磷酸化在其中起调节作用。

1991 Kay 等以 RBC 为模型,进行了衰老指标及衰老机制的研究。其方法是分别采用年轻和衰老细胞特异的 cDNA 探针对衰老细胞 cDNA 文库进行差别筛选。少于 0.05% 的重组子表达衰老特有的活性。这种衰老特有的 cDNA 克隆能与 7.8kb 大小的 mRNA 杂交,或 cDNA 序列与人纤维结合素的 3' 末端部分有同源性。这种糖蛋白 mRNA 的水平反映细胞的生长状态(年轻的、增殖的细胞中这 mRNA 水平低,增殖停止的、衰老的细胞则相反)。实验还肯定,这种增加并不是由于此基因的扩增或重排,而是由于衰老过程中其序列有所改变。采用同样方法,1992年 C. Winstrom 等获得了 6 个衰老相关的 cDNA 克隆。片段最长的为 1.8kb,被命名为 SAG1(Senescence-Associated Gene)。基因总长为 2.8kb,其表达在老细胞中高 5 倍,而在细胞周期中表达无变化。由此得知,衰老细胞中 SAG1 表达的不同并不是由于衰老细胞只能处于 G<sub>0</sub> 期,而只能直接与衰老相关。序列测定后经比较表明,在所有已知序列中没有相同顺序。在 SV40 转化的 W138 细胞中可见到其表达,Hel<sub>2</sub> 中则没有。此外,SAG<sub>1</sub> 不能与大鼠或小鸡 DNA 杂交,表明它为人类所特有。作者还指出,虽然 SAG<sub>1</sub> 是迄今为止在衰老细胞中发现的唯一高调节(Upregulated)基因,但也存在几种衰老相关的低调节(Down-regulated)基因(如精氨酸琥珀酸合成酶基因和胶原蛋白基因)。

根据上述进展,不难预期,未来衰老分子生物学的研究将主要侧重于如下方面:(1)发现并克隆新型衰老相关基因;(2)详尽研究已克隆的衰老相关基因的功能及其作用机制;(3)阐明衰老相关酶、蛋白与衰老的因果关系;(4)综合,统一分子、细胞、组织、器官水平上对衰老的已有认识。

#### 参考文献

- 1 Phillips P D, et al. J Gerontol, 1984, 39: 11
- 2 Cohn J P. Bio Science, 1987, 37: 99
- 3 Johnson T E. Proc Natl Acad Sci., USA 1987, 84, 3777



- 4 Finch C E. et al. J Cell Biochem, 1989, 13D
- 5 贺福初, 国外医学分子生物学分册, 1990, 12: 44
- 6 Finch C E. Longevity, senescence, and the genome. The University of Chicago Press, 1990
- 7 Goldstein S. Science, 1990, 249, 1129
- 8 Yi Ning, et al. Proc Natl Acad Sci., USA 1991, 88: 5635
- 9 Tomei L D, Cope F D. Apoptosis: The molecular basis of cell death. Current Communications 3 in Cell and Molecular Biology. Cold Spring Harbor Lab Press, 1991
- 10 Schwartz L M. Bio Essays, 1991, 13: 389

(北京放射医学研究所贺福初副研究员撰; 夏寿萱审)

## 生理学

**时间生理学** chronophysiology 利用时间生物学方法, 研究生物行为和生理功能的时间性特征。早在 19 世纪中叶已经发现植物花能按昼夜时辰有规律地开放。而后发现动物睡眠等行为也有昼夜节律, 甚至将动物置 24h 完全黑暗环境中, 这种节律仍能自激进行。生物的这种节律性逐渐被人们所承认, 因此于 1937 年成立了国际生物节律学会, 并在瑞典召开了首届生物节律会议。1950 年哈尔伯格(F. Halberg) 倡导, 建立了时间生物学。

生理学中许多正常值随昼夜、月、季节而变化, 呈现有规律地周期性变化, 峰值与低谷植相差几倍甚至几十倍。科学地阐明生理功能变化规律, 对统计生物学实验数据, 农牧业生产, 临床医学, 跨时区飞行及倒班工作都有相当重要的意义。因此研究节律的发生, 调控及生物钟机制不单是生理学的理论问题, 也是社会科学的课题之一。

时间生理学以昼夜节律研究最为普遍。草履虫细胞核白天 12:00 时最小, 下午逐渐增大, 0:00 时最大。夜行动物大鼠呼吸频率傍晚至早晨较高。相反日本鹌鹑和鸡肺有效通气量 6:00~18:00 时最高, 体温也有昼夜波动。体温高时, 精力旺盛、活动效率高。人体清晨最低傍晚高早为人们所熟知。大鼠 12:00 时较低为  $36.9 \pm 0.2^\circ\text{C}$ , 2:00 时最高为  $38.8 \pm 0.7^\circ\text{C}$ ; 猫头鹰午夜时分最高。1991 年周天禄从中国云南特产动物树鼯测得体温及其它生理节律与人类相似, 其很有可能成为研究时间生理学的理想材料。

1977 年哈尔伯格较为全面地研究了人血液成分, 尿中排泄物, 血压和心率等节律。1989 年马孔琛等报道小白鼠血液及肝脏核酸等十几个指标都有昼夜节律。

内分泌系统的节律性尤为突出。1974 年高桥(Y. Takahashi) 证明人生长激素在 23:00 时有分泌高峰。1978 年克赖杰(D. L. Krieger) 报道入血中 11-羟可的松高值在 8:00 时为  $150\mu\text{g/L}$ , 而 23:00 时只有  $40\text{ g/L}$ , 其峰值与 ACTH 的昼夜波动同步。1987 年李经才等用荧光法测出大鼠血清皮质酮 20:00 为  $26.8 \pm 1.98\mu\text{g/dl}$ , 早 8:00 为  $10.20 \pm 0.41\mu\text{g/dl}$ , 1977 年贾雷特(R. T. Jarett) 证明人胰岛素血中早 8:00 时高于午后。

各种生理节律均受神经系统控制, 脑内神经递质是不可忽视的生理因素。1979 年萨莎(S. Sasa) 用高效液相法证明小鼠全脑 5-HT, 多巴胺和去甲肾上腺素昼夜节律。放射免疫法的应用对神经递质和受体研究有长足进展。1990 年克瑞斯库罗(M. Criscuolo) 测出雌性大鼠脑内  $\beta$ -内啡肽午夜高峰和中午低谷与光暗同步。1983 年克赖恩(D. C. Klein) 发现大鼠松果腺细胞有  $\alpha$ 、 $\beta$  受体,  $\beta$  受体白天与配体结合率高, 18h 时后减少。1985 年苏格登(D. Sugden) 指出 cAMP 夜间激活 NAT, 使褪黑激素合成增加。翌年苏格登(A. J. Sugden) 又证明细胞外  $\text{Ca}^{2+}$  内流引起 cAMP 增加。1986 年徐仁宝等在大鼠肝脏发现糖皮质激素的受体夜间 23:00~2:00 最高, 白天 9:00~13:00 最低。

时间生理学实验数据除了常用的量变—时间曲线之外, 哈尔伯格创造了余弦矢量法使数据处理别具一格。

其他节律有如鸟的迁徙及动物繁殖的季节节律; 海洋动物活动的潮汐节律及人类体温、血糖随月相盈亏而改变的月节律也均有报道。

生理节律是怎样产生的一直受到学者们极大关注, 因此, 节律起搏点的研究成为近年的热点。1972 年特鲁曼(J. W. Trumam) 研究了蚕蛾羽化的起搏点在脑。1975 年索科洛维(P. G. Sokolove) 等指出蟑螂的运动行为由眼接受光线, 影响视叶起搏点, 将电冲动经脑传至胸部, 调节运动。1969~1977 年杰克利特(J. W. Jacklet) 和埃斯金(A. Eskin) 等发现海兔双眼是生物种的起搏点, 并系统地研究了视神经电冲动传导及光暗对起搏点的影响。他们为此做出突出贡献。鸟类的松果腺是昼夜节律的起搏点。哺乳动物及人昼夜节律机构可能包括下丘脑视交叉上核、松果体、脑垂体和肾上腺等, 因此使哺乳类起搏点研究变得更加复杂更多样化。

1958 年勒纳(A. B. Lerner) 首次从两万头牛松果腺提取物中分离出能使蛙皮颜色变浅的褪黑激素(MT)。1961 年艾克斯尔罗德(J. A. Axelrod) 从大鼠松果腺分离出羟基咪唑单位甲基转移酶和 NAT 两种 MT 合成酶, 明确了由 5-HT 合成 MT 的路线。各种动物松果腺内 MT 含量均在暗期有含量高峰, 光期降低, 5-HT 含量则恰好相反。1974 年艾克斯尔罗德等发现 MT 合成酶夜间竟比白天高 123 倍之多。MT 受体有两个亚型, 主要分布于下丘脑、视上核、正中隆起和垂体及中脑网状结构。

关于 MT 昼夜节律的作用, 有多种实验证据。1990 年李经才等发现切除小鼠松果腺增加皮质酮分泌。1990 年应永旺等报道 MT 对小白鼠有镇痛作用。同年马孔琛等发现松果腺参与痛觉过程。白天痛觉敏感性高, 夜间低。切除小鼠松果腺后, 夜间痛觉敏感性增加, 与白天相似。注射 MT 又使痛觉敏感性下降。1991 年戈洛姆贝克(D. A. Golombek) 的工作进一步支持了这一观点。

对于高位起搏点, 1987 年施瓦茨(W. J. Schwartz) 认为啮齿类动物视交叉上核(SCN) 是昼夜节律起搏点。大鼠的 SCN 为  $0.32 \times 0.60\text{mm}$  两个卵圆形神经核, 约有 2 万个细胞。视网膜电冲动由视神经中少数纤维传到 SCN, 改变 SCN 中 5-HT 含量。1979 年留塞克(B. Rusak) 认为 SCN 与睡眠和觉醒、摄食和饮水、体温调节及多种神经递质分泌有关。切除 SCN 上述节律消失。1989 年梅杰(J. H. Meijer) 等总结 SCN 有 3 条传出通路。但 SCN 如何起搏并调制各种生理功能仍未得到圆满解决。欲揭此迷, 还要从细胞和分子及亚分子水平来研究。哈尔伯格认为生物节律性是以 DNA 作为遗传基因的。关于 DNA 复制和功能蛋白合成, 只有通过生物化学、分子生物学技术手段才能解决。至于其他附属起搏点如何调制生理功能的节律性, 都将是有待探索的新课题。

### 参考文献

- 1 Lerner A B, et al. Isolation of melatonin the pineal factor that lightens melanocytes. J Am Chem Soc, 1958, 80: 2587
- 2 Jacklet J W. Circadian rhythm of optic nerve impulses recorded in darkness from isolated eye of Aplysia. Science, 1969, 164: 562~3
- 3 Halberg F. Implication of biologic rhythms for clinical practice. Hosp practice, 1977, 12: 139~49
- 4 马孔琛, 等. 小白鼠血液成份的昼夜节律. 沈阳药学院学报, 1989, 6(1): 69
- 5 Meyer J H, et al. physiological reviews. Am physiol Soc, 1989, 69(8): 697
- 6 李经才, 等. 人参皂甙对中枢儿茶酚胺昼夜节律影响的余弦法分析. 中国药理学通报, 1990, 6(2): 91~6
- 7 Golombek D A, et al. Time-dependent melatonin analgesia in mice inhibition by opiate or benzodiazepine antagonism. Eur J pharmacol, 1991, 194: 25~30

(沈阳药科大学生理教研室马孔琛副教授撰)

**神经生理学** neurophysiology 神经科学是研究神经系统内分子水平的、细胞水平的和细胞与细胞之间的变化过程,以及这些过程在中枢控制系统内的整合作用。神经生理学是研究神经系统的结构和生理功能的学科。它包括外周神经生理学、中枢神经生理学 and 感觉器官神经生理学。它主要研究神经信号如何产生、如何传递,信息在中枢神经系统内如何加工、如何整合,以达到对机体行为的精确调节和控制。

1791年,意大利戈维尼(A. Galvani),在《肌肉运动中的电效应》著作中提出了蛙的神经肌肉标本在受到刺激时产生收缩。在他的启发下,伏特(A. Volta)发明了“伏特电池”。1848年,德国杜波伊斯-雷蒙德(Du Bois-Reymond)发现神经动作电流,并提出了沿神经或肌肉表面,有秩序地排列着一层“电动粒子”。以后,伯恩斯坦(J. Bernstein)在此基础上提出膜学说。他认为,膜仅对钾离子有选择通透性,兴奋过程的电位变化是由于兴奋部位膜对离子选择性通透性的消失,因此动作电位的大小应等于静息电位的绝对值。这显然不能解释动作电位的“超射”,所以被以后的“离子学说”所代替。谢灵顿(C. S. Sherrington)研究了不同神经元之间的相互作用,提出“突触”概念。1906年,又提出“整合”概念,通过“反射”、“反射弧”的分析,阐明神经系统的工作原理。

外周神经生理学的主要内容是研究神经信号的产生和突触传递机制。40年代以后,随着微电极的发明和应用,大量开展了单个神经元细胞内电活动的研究。1949~1952年,霍奇金(Hodgkin)、卡兹(Katz)和哈克斯莱(Huxley)提出了膜的“离子学说”,建立了可兴奋膜双通道模型的一整套理论。他们认为,动作电位的产生机制是由于电刺激使神经膜发生去极化,使得 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 通透性发生了变化。首先 $\text{Na}^+$ 电控门通道开启,再生式的正反馈去极化很快产生“超射”,形成动作电位上升相。紧接 $\text{Na}^+$ 通道失活化, $\text{K}^+$ 通道活化,钾电导增加,大量钾离子外流,形成动作电位的下降相。最后由钠泵( $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ )来完成驱 $\text{Na}^+$ 吸 $\text{K}^+$ 的任务,恢复到静息水平。所以,膜的兴奋过程是 $\text{Na}^+$ 和 $\text{K}^+$ 的离子通道、离子电导和离子电流变化的结果。1968年塔萨克(Tasaki)根据神经生物学原理,认为膜分子在分子水平上的运动,即膜蛋白分子构象的变化才是膜兴奋性的基本因素,还有 $\text{Ca}^{2+}$ 通道的作用,提出了双稳态模型,更加完善了可兴奋膜的兴奋性理论。近年来,由于片膜钳(Patchclamp)技术的应用,人们能够对单个离子通道功能作直接的观察。目前发现至少有5种电控 $\text{K}^+$ 通道,7种 $\text{Ca}^{2+}$ 通道和3种 $\text{Na}^+$ 通道。应用重组DNA技术等分子生物学方法来测定离子通道结构,目前已弄清了 $\text{Na}^+$ 通道、 $\text{K}^+$ 通道和 $\text{Ca}^{2+}$ 通道的一级结构,如 $\text{Na}^+$ 通道是由1820个氨基酸残基组成的单肽链,包括4个相似的同类序列单元,组成对称的跨膜实体,中央形成 $\text{Na}^+$ 通道。

空触传递机制的研究是神经生理学的主要内容之一。1950年卡兹(Katz)根据神经肌肉接头处记录到的终板电位与自发微终板电位的关系提出了Ach量子释放理论。1955年用电子显微镜观察到轴突末梢含有突触小泡,1957年卡兹(Katz)等提出递质释放的小泡假说。同时耳克尔斯(Eccles)用微电极对中枢神经元及其突触传递机制进行了研究,为阐明中枢神经系统的功能作出了贡献。小泡假说认为,当神经冲动到达末梢时,触发了 $\text{Ca}^{2+}$ 内流,在 $\text{Ca}^{2+}$ 参与下,突触小泡与突触前膜碰撞而直接融合,通过胞吐作用将递质释放出来。1968年,萨舍兰德(Sutherland)发现了第2信使物质环腺苷-磷酸(cAMP),提出了受体结合的第2信使作用机制:在递质与受体结合时,首先经鸟苷酸结合蛋白(G蛋白)介导激活腺苷酸环化酶,它再去催化ATP变成cAMP。在cAMP作用下,蛋白激酶被活化,活化的蛋白激酶一方面可作用于细胞膜,使膜蛋白磷酸化,从而改变膜对离子的通透性;另一方面可作用于细胞核,核蛋白磷酸化可形成长期记忆。

中枢神经信息的加工机制主要通过兴奋和抑制的相互作用。由多突触联系的复杂的兴奋和抑制网络,经过空间和时间的综合进行复杂的信息加工。现已发现中枢神经系统内存在5种抑

制作用,即前馈抑制、返回抑制、突触前抑制、交互抑制和侧抑制。在脊髓内发现的润绍(Renshaw)细胞对 $\alpha$ 运动神经元的抑制和海马的兰状细胞对锥体细胞的抑制回路就是典型的返回抑制网络。

蒙特卡斯特(Mountcastle)对躯体感觉皮层,休伯尔(Hubel)和维塞尔(Wiesel)对视觉皮层,以及阿萨尼玛(Asanuma)等对运动皮层的研究表明,具有相同功能特性的皮层细胞按照有规则的空间结构排列起来,构成纵向的柱状结构,称皮层功能柱(Functional-column)。如感觉皮层压力刺激、关节移位刺激和毛感受器输入的3类感觉功能柱,视觉皮层的方位功能柱、眼优势动能柱和空间频率功能柱运动皮层功能柱与某一特定的运动功能柱有关,等等。因此,推测功能柱构成了大脑皮层的结构和功能单位,它象标准组件一样组成初级皮层有序的镶嵌结构。每一个柱内通过它内在的神经元连接使传入信号放大、调制和整合,每一个柱又接受数百个柱的输入,也对数百个柱发生作用,时刻处于兴奋和抑制的相互制约之下,功能柱的活动构成了整个大脑皮层活动的基础。

在中枢神经系统信息加工中以视觉信息的加工机制研究得最清楚。现已证明,中枢视觉信息处理既是一种平行处理的过程,又是一种由低级往高级逐步升级的处理过程。在皮层下,X/Y/W通道、ON-中心和OFF-中心通道、空间频率通道、方位敏感性通道和颜色信息处理通道是不同程度上分离和平行处理的。在猴视觉皮层17区和18区,形状、颜色、运动和深度视觉形成了分离的通路,在猴更高级视觉皮层区域,一部分与运动分析有关,另一部分与形状、颜色分析有关。

学习和记忆的神经机制的研究取得了重大进展。神经生理学家认为,大脑的存储信息是存在于脑神经元之间的突触连接的精确型式之中。海马是大脑学习记忆环路中的关键部位,海马神经元突触的长时程增强效应(LTP)是学习记忆的重要方式。LTP的生物学基础是N-甲基-D-天门冬氨酸(NMDA)受体,它分布于突触后膜上,是一种特殊的离子通道蛋白,通过电刺激后产生一系列生化变化来增强突触的连系强度。现已证明,短期记忆和长期记忆的细胞机制是相似的,都是由于神经递质5-HT释放的增加,感觉神经元的兴奋性的增高。但两者的分子机制是不同的,短期记忆中所需的基因产物是预先存在的,更新慢,长期记忆所需的基因产物必须是预先合成的,需合成新的蛋白来存储记忆。记忆信息刻在DNA模板上,形成一种DNA、mRNA和蛋白质的空间有序分布。回忆过程则是将记忆的化学痕迹转化为物理过程,表现为神经元的电活动。

正电子发射断层扫描术(PET)和磁共振成像术的应用,使得神经科学家和医生能无损地仔细观察活动状态的脑,可以确定脑局部的血流、氧耗、酸碱度、离子通透性的情况,研究受体结合、递质代谢,研究复杂的行为和记忆,确定病患的脑区。

中枢神经系统损伤后的功能恢复是困扰人们已久的问题。人们一直认为大脑和脊髓受损以后不能再生,但现在研究认为可部分再生,恢复后能够传递神经冲动。这将对治疗脊髓损伤、震颤麻痹症、中风、脑损伤有重大意义。利用重组DNA等分子遗传学方法,对老年痴呆症的基因定位获得成功,基因定位和氨基酸顺序测定技术可分离和分析特异的遗传缺陷,基因疗法可使某些神经疾患得到治愈。

在科学家的倡议下,美国国会一致通过了“命名1990年1月1日开始的10年为脑的10年”。国际脑研究组织力促“脑的10年”成为全球性的行动。90年代将是神经科学发展的辉煌时期,其主要研究方向有以下方面:(1)神经活动基本过程的研究,包括用片膜钳技术对离子通道的研究,用物理和计算机技术对神经回路和神经网络的研究,神经递质、神经调质和受体的研究;(2)神经系统发生和发育的研究,包括中枢神经系统损伤后的恢复和再生,以及神经生长因子的研究;(3)感觉和知觉的研究,包括视觉、听觉和体感系统信息加工机制的研究;(4)神经疾患,包括基因定位,氨基酸顺序测定和新药物的研究;(5)脑的高级功能,包

括语言、学习、记忆、感知和行为的研究等。

(中国科学技术大学阮迪云教授撰)

**神经生长因子** 在神经发育生物学中,存在的问题之一就是突触后细胞发出什么样的信号帮助新分化的神经元存活和发挥功能。神经生长因子(NGF)被认为是由外周组织提供的一种引导和维持胚胎期交感和感觉神经元生长的神经营养物质,同时它在中枢神经系统中亦发挥重要的生理功能。

1948年,E. Bucker发现,将小鼠肉瘤180植入3d的鸡胚体壁内,3~5d后,附近的背根神经节发出的感觉纤维即长入肿瘤组织内,同时神经节的体积增大。Levi-Montalcini等后来证实了这一发现,并观察到交感神经节及其纤维亦发生类似的变化。通过一系列的体内植入及体外培养试验,他们证实了这种肉瘤能产生一种可扩散的因子,促进神经生长,因此称为神经生长因子(NGF)。1959年和1960年,Cohen分别从小鼠颌下腺分离纯化出NGF蛋白,并证明它有NGF的生物活性。由于他们的工作,两人获得了1986年诺贝尔医学奖。

NGF是一种蛋白质,它广泛存在于各种生物的组织器官中,其中含量最丰富的为雌性成年小鼠颌下腺及几种毒蛇的蛇毒中。小鼠颌下腺NGF是一种大分子复合体,由 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 3种亚基组成,分子组成形式为 $\alpha_2\beta\gamma$ 。 $\alpha$ 和 $\gamma$ 分子量均为26000,由两条肽链组成 $\beta$ 亚基分子量亚基的分子量为26518,因此,整个NGF的分子量为130000,沉降系数为7,称为7S NGF。组成NGF的3个亚基由非共价键结合在一起,在 $H^+$ 浓度在 $10^{-5}$ ~ $10^{-8}$ mol/L范围之外或稀释的情况下即可解离。在3种亚基中,只有 $\beta$ 亚基具有生物活性, $\alpha$ 和 $\gamma$ 亚基的功能还不太清楚。由完全纯化的7S NGF解离而得到的活性亚基称为 $\beta$ NGF,它由118个氨基酸残基组成,其氨基酸序列及基因编码已经确定。而由部分纯化的NGF分离出来的活性亚基称为2.5S NGF,2.5S NGF由于在分离纯化过程中的酶促降解,在氨基末端丢失8个氨基酸残基及丢失羧基端的精氨酸残基,一般为109个氨基酸残基,但其生物活性保持不变。从蛇毒提纯的NGF与小鼠颌下腺的 $\beta$ NGF相类似,分子量约为28000,两者之间存在着很大的同源性,大约有64%的氨基酸残基相同。但在等电点、形成7S复合体能力及生物活性上却不相同;蛇毒NGF不能形成7S复合体,生物活性仅为小鼠颌下腺 $\beta$ NGF的50%,等电点为6.75,而小鼠 $\beta$ NGF的等电点为9.1。

除上述两种丰富来源的NGF外,NGF还广泛存在于其它组织器官中,包括心脏、肾脏、胸腺、隔、子宫、输精管、脾、肝、肉牙组织、肾上腺髓质和中枢神经系统。有很多细胞系在培养中产生NGF,如L细胞,3T3细胞,SV403T3细胞,原发成纤维细胞,成神经细胞瘤细胞,黑色素瘤细胞,成肌细胞,神经胶质瘤细胞和原发滑液性成纤维细胞等。

小鼠颌下腺NGF基因序列分析于1971年完成。现在已完成人类、小鼠、牛、鸡的NGF cDNA的克隆,并发现这些动物种类NGF的cDNA具有高度的同源性。人类NGF基因位于1号染色体的短臂上,它编码一个由307个氨基酸组成的大分子肽链,裂解后形成由118个氨基酸组成的成熟的NGF亚基蛋白。

NGF不仅有广泛的分布,亦具有广泛的生理功能,其反应细胞包括神经性和非神经性细胞,可分为以下3类:(1)神经嵴起源的细胞,包括交感肾上腺系统和感觉神经元。(2)中枢神经系统神经元包括胆碱能、吡啶胺能及肽能神经元。(3)非神经起源的细胞:肥大细胞。

早期的体外培养和免疫交感切除试验均证实,NGF对胚胎期交感神经元的发育和存活是至关重要的。取自8~11d的鸡胚交感神经节在体外培养时,每天在培养基中加入ng级的NGF神经细胞才能存活;每天给新生动物注射少量的NGF抗血清,1个月后,动物的交感、副交感及椎前链神经节均消失,但不影响动物的正常发育和存活。

中枢神经系统内有些神经细胞,特别是海马和皮层的神经

细胞能产生大量的NGF mRNA和NGF蛋白;另外,应用点杂交技术证实,在桥脑、延髓脊髓、纹状体及间脑均含有一定量的NGF mRNA。NGF在中枢神经系统内的广泛分布提示它可能具有广泛的生理功能。它可能调节的中枢神经元群包括基底前脑胆碱能神经元,纹状体胆碱能神经元,脊髓和脑神经的感觉神经元。但NGF在中枢神经系统中的作用范围还远没有搞清楚。

NGF对上述神经性靶细胞的作用有几点:(1)在早期发育过程中发挥至关重要的营养性作用;(2)促进细胞的分化过程,如促进神经纤维向外生长;(3)引导神经纤维沿其浓度梯度生长或再生。(4)在中枢内的神经元和交感及感觉神经元对NGF表现出相同的反应和特性,即(1)细胞上存在有特异性的NGF受体,(2)有将NGF逆行运输至胞体的能力,(3)增加神经递质,特别是胆碱能神经元内乙酰胆碱的合成及调节成熟的感觉神经元内P物质的水平,(4)营养性反应,表现为给予外源性NGF可以保护选择性的毒性处理或外科横切时神经细胞免于死亡。

NGF在体内和体外均使肥大细胞的数量增加,并能刺激肥大细胞释放组织胺。最近发现NGF对脾脏内的其它细胞如单核细胞亦有效应,在胸腺细胞上亦存在有NGF的受体,这表明NGF可能对免疫系统发挥作用。

目前,NGF研究的热点主要在以下几个方面。(1)应用更为复杂的体内及体外技术寻找新的NGF靶细胞。例如,在神经内分泌系统及造血系统中寻找NGF的靶细胞有可能发现这种生长因子的新作用。(2)NGF与中枢神经系统及免疫系统的关系。NGF通过直接作用于胆碱能、肾上腺素能和肽能神经元发挥多少间接作用?它激活肥大细胞释放组织胺,作用于单核细胞和胸腺细胞后又能发挥多少免疫调节和免疫抑制效应?这些问题的解决将有助于利用NGF来治疗大脑和免疫系统疾病。例如,当局部神经营养因子(如NGF)减少而引起细胞死亡时,给予外源性的因子或用药物刺激产生内源性因子则可提供一种对目前不治之症很有前途的治疗方法。目前NGF主要用于治疗Alzheimer氏病,这被认为是一类不治之症,如各种进行性的神经元退化症,血管性痴呆及Huntington氏病等。另外,NGF还广泛存在于雌性生殖器官中,因此它可能参与生殖过程。有人推测它可能通过防止局部的免疫反应抑制排斥而有利于受精卵的着床,这为生殖免疫的研究提供了又一新的线索。(3)寻找和鉴定对其它神经细胞群有活性的NGF样的其它的因子。这些因子可分为两类:一类是NGF基因自身所编码的,但通过不同的转录或翻译途径而产生的一些结构和功能上不同的多肽生长因子。另一类是其它基因所编码的具有NGF样营养、趋化及分化的蛋白质和肽类。前一类研究将利用分子生物学及免疫学技术,其中最重要的是发现NGF与受体结合并可能激发一定的细胞反应的活性部分。目前,根据反应动力学,已知与NGF结合的细胞受体可分为两型,即I型(高亲和力型)和II型(低亲和力型)。但NGF与受体结合的活性部位及受体结合后信号的转换机制仍不清楚。一旦发现了NGF与受体结合的活性部位及其氨基酸序列组成,就有可能进行氨基酸替换分析和化学修饰,并分析新产生的肽的生物活性。这不仅将有利于了解NGF活性中心的特征和性质,而且还有可能使人们合成比NGF活性更高的肽。有关后一类研究的工作虽然很多,但进展不大,原因在于:(1)缺乏象检测NGF一样快速可靠的生物活性检测方法(目前NGF主要用鸡胚神经节或PC12细胞系来进行鉴定);(2)没有找到象NGF那样丰富的来源。

NGF以极高的浓度存在于小鼠颌下腺这样一个外分泌腺中,而且在雄性小鼠比雌性小鼠含量要高10倍左右,其合成过程受睾丸酮和甲状腺素的控制。这一现象是否具有某种生理意义一直困扰着人们。最近发现NGF在应激过程中大量释放入血,NGF在防御机制中是否具有重要的作用,有待进一步研究。

#### 参考文献

- Bradshaw R A. Nerve Growth Factor, Ann Rev Bio Chem, 1978, 47:191~216

- 2 Shelton D L, et al. Studies on the Expression of the B Nerve Growth Factor (b NGF) Gene in the Central Nervous System; level and Regional Distribution of NGF Functions as a Trophic Factor for Several Distinct Populations of Neurons. *Proc Natl Acad Sci. USA*, 1986, 88: 2714~2718
- 3 Levi-Montalcini R. The Nerve Growth Factor. Thirtyfive Years Later. *The EMBO Journal*, 1987, 6(5): 1145~1154
- 4 Franz Hefti, et al. Role of Nerve Growth Factor in the Central Nervous System. in: *Neurobiology of Amino Acids, Peptides and Trophic Factors*. eds: Ferrendelli, J A et al. Kluwer Academic Publisher, 1988, 127~138
- 5 Johnson E M, et al. The Biology of Nerve Growth Factor in vivo. in: *neurobiology of Amino Acids, Peptides and Trophic Factors*. EDS: Ferrendelli, J A Collins R C and Johnson E > M, Kluwer Academic Publishers, 1988, 101~114
- 6 Lindsay R M, et al. Neuropeptide Expression in Cultures of Adult Sensory Neurons; Modulation of Substance P and Calcitonin Gene-Related Peptide Levels by Nerve Growth Factor. *Neuroscience*, 1990, 33(1): 53~56
- 7 Jackson G R, et al. Role of Nerve Growth Factor in Oxidant-Antioxidant Balance and Neuronal Injury. I Stimulation of Hydrogen Peroxide Resistance. *Journal of Neuroscience Research*, 1990, 25: 360~368

(中国人民解放军 514 医院李广木撰)

**内源性睡眠物质** the sleep substance 长时期以来,睡眠一直被误认为是平静的、纯一和被动的状态,是大脑在休息。自从一些内源性促眠物质被人们分离提纯后,人们对睡眠这种生理现象的认识进入了一个崭新阶段。

1909 年日本石森将剥夺睡眠的犬脑中存在的睡眠物质用热的乙醇提取,并认为这种睡眠物质的本质是一种蛋白碱。将它注入血管内或皮下均可引起显著的睡眠状态。通常在注入 30min 后逐渐生效,并可持续 1~5h,而且无副作用。

1910 年, Pieron 和 Legendre 将剥夺睡眠 6~15d 后陷于深度睡眠的犬脑脊液灌流到正常觉醒犬的脑室中,发现能使后者睡眠几小时。这使 他们想到在剥夺睡眠后的犬脑脊液中可能存在有诱发睡眠的特殊物质。当时以为睡眠就是由于这些特殊物质的中毒作用所致,故称它们为“睡眠毒素”。1933 年, Kroll 亦从睡眠中的猫、兔及冬眠中的刺猬、蝙蝠脑中提取了具有诱发睡眠作用的物质。1939 年 Schnedorf 和 Ivy 再次证实了 Pieron 和 Legendre 的工作。1952 年, Kornmuller 等首次借用动物血液交叉循环方法证明了体液性睡眠物质的存在。他们将两只猫的主动脉交叉吻合,相互沟通体循环。这时,电刺激一只猫下丘的睡眠中枢(如视前区等)使其入睡,则另一只未受刺激的猫很快被诱发入睡。由此可推论在受电刺激的猫血液中可能存在着睡眠物质;在本研究工作中,他们首次使用了脑电图,以判断猫是否处于睡眠状态,这对以后的研究有重要意义。因为当时尚不清楚睡眠与脑电波的关系,通常仅靠观察动物行为或问诊来判断是否入睡,缺乏客观性;但遗憾的是他们并未对所发现的睡眠物质进行鉴定。1963 年, Monnier 等对兔重复了 Kornmuller 的实验,并进一步研究从家兔脑脊液中分离得到促眠的活性物质,并于 1977 年确定其化学结构为: Trp-Ala-Gly-Gly-Asp-Ala-Ser-Gly-Glu 的 9 肽,分子量为 849 由于它的生理作用主要是促进慢波睡眠,故命名为“ $\delta$ -睡眠肽”(DSIP)。在此期间, Pappenheimer 和 Nagasaki 等分别报道从剥夺睡眠山羊的脑脊液和大鼠脑中分离得到具有不同促眠作用的物质,但其化学结构至今尚未确定。

DSIP 是第 1 个明确的化学结构,并能人工合成的睡眠物质。Monnier 及 Schoenenberger 等在 1977~1978 年首先用液相法合成了 DSIP 及其 8 种同系物。合成的 DSIP 分为 a 型和 b 型

两类,比例为 1:4, b 型无活性, a 型显示 DSIP 的活性。中国学者刘世熠等且固相法合成 a 型 DSIP 及其五种同系物,并发现后者中的 [Phe<sup>5</sup>]-DSIP 也具有使脑电波  $\delta$  和  $\delta$  (spindle) 活动增强作用。1984 年徐杰诚等用固相法合成了促  $\delta$ -睡眠肽及其 14 种类似物和 3 个短肽,研究了结构与功能的关系,1990 年又用液相法合成促  $\delta$ -波睡眠肽(DSIP)的 5 位取代衍生物, Qus<sup>5</sup>-DSIP。由于使君子氨酸(简称 Qus), 一种与兴奋性氨基酸受体有关的化合物的引入,使促眠活性明显降低,表现其一定的促醒活性。

关于 DSIP 对睡眠的影响,最初观察到它仅对慢波睡眠有促进作用,而对异相睡眠无明显影响,但后来有不少证据表明 DSIP 对异相睡眠也有促进作用,甚至对这两种时相睡眠有相似程度的促进作用。DSIP 不仅能增加动物的睡眠量,亦可能改变动物的行为模式。如每天夜里给大白鼠注射 DSIP,可使脑中 5-羟色胺、多巴胺、去甲肾上腺素(NA)及血浆蛋白、皮质酮水平的昼夜节律发生显著变化,表现为峰值时间推迟或提前,而且早晨或夜间注射 DSIP 显著差异,表明 DSIP 对昼夜节律具有较高水平的“修饰作用”, Schoenenberger 等称其为 DSIP 的“程序效应”。目前利用 DSIP 的程序效应,临床上试治各种失眠症。据 Schneider-Helmert 报道,静脉注射 DSIP 可使慢性失眠患者增加实际睡眠的时间和效率,同时增高白天的觉醒水平。DSIP 亦能改变因吗啡引起的失眠。

DSIP 的“剂量-反应曲线”呈钟型,而不呈 S 状,浓度过低或过高,效果都不好,兔或猫等哺乳动物脑室内给药,产生效果的最小有效浓度是 1nmol/kg; 6~8nmol/kg 时效果最大;静脉内给药, 30~40nmol/kg 效果最好,但剂量再大则效果减小,至 10 倍剂量时,效果则消失。

Pappenheimer 等用类似 Monnier 的方法,发现剥夺睡眠后的山羊脑脊液中也存在一种可使大白鼠活动减少,即睡眠增多的物质。后来进一步用脑电图证实它能促进慢波睡眠,并命名为“S 因子”。因山羊脑脊液的促睡眠活性随剥夺睡眠的时间而逐渐增加,约 48h 后达到最大值,这很可能反映脑脊液中 S 因子浓度与剥夺睡眠时间的关系。S 因子还可从剥夺睡眠的绵羊、山羊及兔等的脑干及大脑皮层中提取。S 因子与 Monnier 等发现的 DSIP 不是一种物质,它们有不同的化学性质及生理作用。例如 S 因子尽管也引起以  $\delta$  波幅度增加为特征的慢波睡眠,而且这种睡眠类似于相同动物剥夺睡眠后引起的睡眠增加,但 S 因子在体内显效较 DSIP 缓慢,脑室内给药时其效果需要 1h 才出现;引起慢波睡眠增加的有效持续时间为数小时;(兔 5~10h, 大鼠 24h),每只兔有效剂量少于 150pmol,相反, DSIP 则作用快,持续时间长,有效剂量较大。

Pappenheimer 等从刚起床人的尿液中提纯出与 S 因子类似的睡眠物质, Krueger 等命名为“尿性睡眠促进因子”(SPU)。SPU 的化学性质及对睡眠的作用都与 S 因子相似。脑室内注入少于 10pmol 的 SPU 已足以使兔、猫或大白鼠的慢波睡眠增加几个小时,而对异相睡眠影响很小,唯一不同的是 SPU 不象 S 因子那样恒定地增加大脑皮层慢波的幅度。推测其原因, SPU 可能是 S 因子的一个代谢产物;或者由于人类的 S 因子可能稍微不同于动物的 S 因子。因此,人类的 SPU 亦不同于来自动物的 S 因子。显然, SPU 亦与 S 因子一样不同于 DSIP。SPU 是一种小分子糖肽,由谷氨酸、丙氨酸、 $\beta$ -氨基庚二酸和胞壁酸以 2:2:1:1 的克分子比例组成。Krueger 等认为 SPU 或从尿中分离出的 MDP 是哺乳类的内源性睡眠调节物质。微注射研究表明 SPU 的作用位点的基底前脑与中脑-间脑交界之间的区域。在脑中可能有与 MDP 高亲和力的受体存在, SPU 或内源性 MDP 与其相结合便导致睡眠。

自 1974 年起日本内圆耕二等在大白鼠脑组织中发现一种与 S 因子作用类似、分子量约 350~750 的睡眠物质,称其为 SPS。它们设计了一套装置,可对 40~50 只大白鼠同时电刺激剥夺睡眠,然后直接从脑组织中提取。他们还利用促眠物质对藪是神经的抑制作用对所提取的物质进行粗选,最后用脑电图

(EEG)、颈肌电图(EMG)、眼球运动图(EOG)等鉴定其对不同睡眠的影响,从而大大影响了对睡眠物质进行生物鉴定的效率.SPS至少分为SPS-A、SPS-B两种.SPS A注入脑室,可促进慢波睡眠与异相睡眠,前者量增加21%,后者量增加50%.SPS-B可使慢波睡眠增加53%、异相睡眠增加31%.因此,SPS-A对异相睡眠的促进作用较强,SPS-B对慢波睡眠有较强作用.

前列腺素D<sub>2</sub>(D<sub>2</sub>PGD<sub>2</sub>)分布在许多哺乳类的脑中,尤以下丘脑和丘脑含量最多,而且其合成与代谢活跃,它是最新引起的、引人注目的一种促眠物质.在清醒大白鼠第三脑室注入60fmol/min剂量的PGD<sub>2</sub>,即可引起慢波睡眠增多.若剂量达600fmol/min,则增加慢波睡眠33%,同时还可增加异相睡眠56%.PGD<sub>2</sub>引起睡眠的一个作用位点在下丘脑视前区,而在大白鼠脑的这个区域,每克组织含PGD<sub>2</sub>的量为4~6pmol(湿重)就足以引起睡眠.因此,Ueno等提出脑中的PGD<sub>2</sub>可能是生理性睡眠的内源性调节者.PGD<sub>2</sub>比MDP及DSIP有强得多的促睡眠作用,而且,PGD<sub>2</sub>无MDP那样的致热副作用,PGD<sub>2</sub>亦不同于SPS,脑室内注射(PFD)后立即出现效应,而且不扰乱动物的昼夜节律.

褪黑素是松果体产生的主要吲哚胺激素,它的分泌具有明显的昼夜节律.在人类,褪黑素的主要作用是轻度的催眠或镇静.Holmes等报道,大白鼠腹腔内注射褪黑素可缩短入睡及醒来的时间;并增加慢波睡眠与异相睡眠的时间.

其他一些促睡眠物质还包括r-Br、哌啶血管活性肠肽(VIP)、精氨酸催产素(AVT).它们都有一定程度的促睡眠作用.而AVT可能是至今所知最活泼的促睡眠物质.

目前,睡眠发生的机制尚未彻底搞清,机体所形成的促眠物质及促醒物质到底有多少种,其分子结构如何,作用“剂量—曲线”关系如何等问题尚有待进一步研究.随着生理促眠物质及促醒物质的分离、纯化,完全可以通过人工合成的方法合成促眠物质用于临床,治疗因促眠物质分泌紊乱的失眠患者.

参考文献

- 1 内藤耕二.日本临床,1971,42:221
- 2 Monnier M, Gaillard J M. *Experientia*, 1980, 36: 21
- 3 Maugh R H. *Science*, 1982, 216: 1400
- 4 Ueno R, et al. *Proc Natl Acad Sci. USA*, 1982, 79: 6093
- 5 Holmes S W, Sugden D Br. *J Pharmacol*, 1982, 76: 95
- 6 Ueno R, et al. *Proc Natl Acad Sci. USA*, 1983, 80: 1735
- 7 井上昌次郎.生化学,1983,55:445
- 8 徐杰诚,等.促 $\delta$ 波睡眠肽的结构与功能的研究.化学学报,1983,43:1160~1166
- 9 徐杰诚,等.促眠肽类似物Qus5-DSIP的合成与活性测定.生物化学与生物物理学报,1992,24:108~115

(江苏盐城师范专科学校毛海兵撰)

松果腺的某些分泌功能

随着实验生物学、特别是神经内分泌学的发展,对松果腺的结构、功能及其内分泌物质的生物化学等都较前有了深入的认识.脊椎动物的松果腺是由胚胎时期的间脑衍生出的,鸟类和哺乳类虽然只有一个松果腺,但是低等运动则由两个独特部分构成,除颅内的松果腺器官外,另有一个在表层的副松果腺器官(在爬行类被称谓顶眼).科学证实上述两个腺体均有光感受性能,而光线对松果腺机能具有强有力的调节作用.视交叉上核是哺乳动物脑中周期性活动的起点,由此发出节律性信号调节着松果腺及其它器官的周期性活动.实验揭示松果腺分泌的激素有两类:(1)吲哚类.早在1941年Fiske即曾报告过,将大鼠置于恒光照下,能使其发情增长.后来Lerner等从小鼠松果腺中分离出一种物质,能使蛙的皮肤变浅,以鉴定为5-甲氧基色胺,称为褪黑素.它是由松果腺细胞从血液中摄取的色氨酸及其羟化酶逐步合成的.合成过程中被称谓羟基吲哚羧基甲基转移酶(简称HIOMT),对它的活性测定,可用做判定褪黑素分布及其合成与分泌的动向.过去曾认为去甲肾上腺素是蛙类最强的天然皮肤变白剂,但是与褪黑素相比,后者的活性

比前者还要强10倍;虽然剂量小至 $10^{-12}$ g/ml,仍可使两栖类动物的皮肤发生可见性变化.松果腺中褪黑素的含量变化,每天受光照的影响经受着高低起伏的波动,参予对其它激素的作用.此外,视网膜、哈德氏腺以及胃肠道的嗜铬细胞,均有合成褪黑素的能力.(2)肽类激素8-精加压催产素(AVT).1963年首次在牛的松果腺中发现的肽类结构.如将AVT注射给处于性分化阶段的新生小鼠,则可增强其生殖器官的生长,并能达到成体状态;如果在脑的性分化之后注射,则性腺、副性腺器官的生长会受到抑制.不同种类的动物,其松果腺中的AVT的含量不同.成体动物的单侧卵巢被切除,另一侧卵巢则出现代偿性肥大;如合这类运动第Ⅲ脑室或腹腔直接注入AVT,则这种现象即受到抑制.这类活性物质具有一个共有的环状结构及8位上的羧性氨基酸.如以巯基乙醇处理这些化合物,则二硫键即告解体,活性随即消失.此外,松果腺的分泌功能变化,既影响生殖系统的结构与功能,而且又与光周期密切相关.早期的动物实验证明,切除幼年雌鼠的松果腺,可使卵巢增重、阴道提早开口.青春期提前到来.切除成年雌鼠的松果腺,则动物出现发情.切除幼年雄鼠的松果腺,则使其睾丸、前列腺和精囊的重量增加,而在注射松果腺提取液后,则受试雄鼠的前列腺和精囊出现萎缩.松果腺浸液尚抑制PMSG/HCG引起的排卵,使垂体重减轻及其分泌的FSH、LH减少.相反,行松果腺切除术的动物,常出现垂体—性腺轴活动过度兴奋的现象.对光周期试验常用叙利亚地鼠进行,雄性地鼠只有在较长的光周期( $\geq 12.5$ h光照/d)才能较长期地保持其生殖能力.但是,如果将运动转移到短光照环境中,则在10周之内将引起睾丸的萎缩;如再要恢复性腺功能,需重新经历25周的长光照处理.利用人工光照可促使珍稀毛皮动物的繁殖季节提前,即对乏情动物在秋冬季节补充光照,或模拟夏季的光周期,可促进繁殖季节提前几个月到来.雪貂的生殖系统对光线尤为敏感,仅13.04cm $\cdot$ cd $\cdot$ 烛光(光暗之比为14:10)即足以促使提前发情.如果以光暗为8:16h处理雪貂,经4~6周可提早抑制发情.在两极生活的动物的松果腺,跟温带或热带动物的同类腺体相比,其大小差别极为显著.海象、企鹅和海豹的身体大小虽然跟狗一样,但它们的松果腺却比狗的大5~10倍.两极运动的松果腺的季节变化特别显著,在夏季,松果腺的活动完全停止;到冬季松果腺的分泌活动极度增强,合成与分泌大量褪黑素,生殖活动也受到抑制,从而避免在猎食困难的隆冬受孕怀胎,这是在进化过程中,生理机能适应自然环境变化的明证.如果将鸟(如鹌鹑)置于长光照的环境中,可使血浆LH及FSH水平升达7倍.切除性腺的鹌鹑,在短光照状态下,LH为0.5ng/ml,如将其迁移到长光照条件下,血浆LH则上升达100ng/ml以上;在短光照条件下,血浆FSH为20ng/ml,而在长光照的环境中则上升至5000ng/ml;如将手术动物再转移到短日照条件下,则需经过两周才能恢复到基础水平.在自然环境中褪黑素的生物合成有很严密的昼夜节律性,同时也受人工光照与黑暗的影响.通常从午夜12h到凌晨2h,生物合成达到高峰.此时松果腺中褪黑素的含量最高.然后合成逐渐减少,至中午12h降至最低值.在血浆中褪黑素的含量变化也有昼夜节律性,如大鼠血浆中,在午夜为15pg/ml,而到日间仅为10pg/ml.放免测定技术证实,家兔脑脊液中褪黑素的含量,夜间较日间高17倍;绵羊和人类也有类似的节律,人类血浆褪黑素的含量,夜间较白天高4倍;尿中排出量夜间较白天高5~7倍.此外,褪黑素与毛皮的生长、成熟关系密切.如将水貂置于短光照(光暗之比为6:18h)或给予补注褪黑素,则导致夏毛提早脱落及冬毛的提前生长.法国D. Alhan.(1981)及美国Rose(1984)曾利用外源褪黑素对水貂睾丸的大小及功能影响以及在不同生理状况下,探讨褪黑素的消长与皮肤毛囊的生长发育和促性腺素(FSH、LH、PRL)、类固醇激素(孕酮、雌二醇)等的相关性进行过基础研究.后来又报道通过饲喂、长期注射的方法,研究褪黑素调节家畜(牛、羊等)的光照周期.新西兰的学者则更着眼于生产性观点,探讨褪黑素作用于山羊,研究其促进羊毛及羊绒生长的可能性.80~90年代,美国Sigma制药公司及

有些实验室,也根据不同受试动物的需要,将褪黑素制备成系列产品。供应畜牧业及毛皮动物养殖业的试用。但由于应试对象、剂量及用药的方法不同,因而效果各异。90年代初期,前苏联学者已将褪黑素类性质的药物(被称之为 MePNA)规模性应用于毛皮动物养殖业,取得了较好的效果。在中国,80年代末曾有学者利用恒定短日照和逐渐缩短日照的物理方法,导致水貂的冬毛成熟期提前的报道。但是该方法如用于较大群体的动物,则将出现不易控制的情况,如需要建造控光房舍及一些附属设备,耗资较大,使该方法的推广难免受到一定的限制。几乎在同一时期,柳建昌(1988~1992)选择了适当的载体,将有效剂量的褪黑素利用特制的工具分别埋入了貂、狐、貉雪兔及绒山羊身上,均取得了显著的效果。由于松果腺及其合成与分泌的激素对一定的光周期存在严格依赖性特点,因此无论对实验动物(包括鱼类、两栖、爬行、鸟类及哺乳类)、某些野生珍禽及毛皮兽类等良种培育、繁殖种群,甚至宇宙航行时差对人们造成不适的综合症等,必须改虑光照因素对于调节松果腺功能的意义。因为有机体对光线的生物学反应及松果腺功能失调,会导致动物及人类有机体产生包括生殖功能障碍的许多疾病,褪黑素对中枢系统的抑制作用已得到证实,如给小鸡注射,它将引起镇静与睡眠现象。这已受到生物—医学领域的注意。另外,对环境中光照强度及光谱能量比例的检测也相当重要,因为这些因素对动物和人类神经内分泌功能调节影响颇大,大鼠在全光谱白光(0.5 $\mu$ W/cm<sup>2</sup>)或相当于月光强度10倍的环境中,其褪黑素合成受抑制程度约达50%;当有机体处在绿光环境中,其褪黑素合成酶将受到最大程度的抑制;而红光环境中则几乎没有影响。这是由于这种作用与眼睛的视紫质对光谱的吸收效应一致之故。此外,松果腺功能作用的发挥又与其他内分泌腺及有关激素相互联系、制约,共同参与维护生命的活动。所以根据不同种属动物对光周期节律季节性生理性需要的特点,建立相应合理的光暗周期比例,不仅对生殖生物学、宇宙生物学具有广阔前景,而且对珍贵禽兽和其他经济动物的生产也具有实践意义。

(中国科学院动物研究所柳建昌教授撰)

**前列腺素对生育的调控** 早在中国唐代王焘所著《外台秘要》中,就有羊水治疗胎衣不下的记载。据近代科学研究证明,羊水中含有丰富的前列腺素。1930年 Kurzrok、Leib 等观察到,将人子宫肌条滴上新鲜人精液后,能引起强烈收缩或舒张的现象。1933年英国 Goldblatt 和瑞典 Von Evler 分别发现此种物质对平滑肌刺激的作用,后者将此物质命名谓前列腺素(PG)。二战后由于 Bergstrom 等搞清了它的化学结构,才逐渐引起各国的重视。中国从70年代起即开展了对PGS的研制工作,不仅在综合利用生物资源、生物合成了PGE类化合物,而且又成功地先后化学合成了PGF、PGE类化合物。PGS是脂溶性的不饱和脂肪酸,有一个5碳环。它的前身物为前列腺酸。天然的PGS有14种,由有机体所必须的脂肪酸如花生四烯酸等衍生而来。发展到目前阶段,PGS已由原来所谓的经典PGS(PGA、B、E、F)发展到第二、三代产物了。它们都是从基本物质花生四烯酸出发,经过一系列的酶促反应,被制备成各种重要的生化产品。它们呈现的生理作用也是不同的。由于它们具有不同的生理学及药理学特性,因而在医学上具有重要的医用价值。如有的种类(PGF)具有收缩,而另一类(PGE)则有舒张平滑肌的特性;有的(如TXA<sub>2</sub>)促进,而有的(如PGI<sub>2</sub>)则抑制血小板的聚集;有些(如PGE、F类及其衍生物)已用于临床控制生育、诱发分娩及早期流产;有的则能调节胃液分泌(如PGE、A),对于防治胃溃疡具有一定的潜力。作用相当复杂。PGS的分布极为广泛,不仅雄性生殖系统的精液、前列腺、储精囊中均有,而且在雌性生殖系统的子宫内膜、月经液、蜕膜、羊水及其他器官如脑、神经组织、虹膜、肾上腺、甲状腺、唾液腺、胸腺、胰、肾、胃粘膜、骨骼肌及心肌等处,都发现PGS的存在。PGS在组织中产生,同时在体内由于15-羟-脱氢酶的作用,又被迅速降解,变为无活性的15-酮-PGS。现在它们的应

用主要是在生殖领域,特别引人注意的是PGS对黄体的退化,对子宫平滑肌的收缩作用、诱发排卵、发动分娩等。

PGS对雄性生殖调控的研究,尚处初期阶段。从目前的报道表明,雄性生殖系统是PGS的丰富来源,在哺乳动物中,人和羊的精液内PGS含量最丰富,而产生的主要部位是精囊腺。它们在人精液中的浓度是: PGE<sub>535</sub>  $\mu$ g/ml; PGF<sub>2</sub> 为  $8\mu$ g/ml; 19-羟-PGS为  $150\mu$ g/ml; PGA与PGB为  $200\mu$ g/ml。跟血浆中含量相比,精液中的PGE与PGF,较血液中的同类物质的浓度分别高5万倍及2万倍。对PGS的生理作用研究表明,它们与男性生育密切相关,功能性不育症男子精液中PGS的总含量和PGE的含量都较正常者低,男性不育者中有40%的精液标本每毫升内PGE有浓度低于  $15\mu$ g,而正常者平均每毫升达  $50\mu$ g以上。同时,长期服用阿斯匹林(PGS合成酶抑制剂)也能使19-羟-PGA、19-羟-PGB与PGF降低,并能使PGE的含量降低至不育者的水平。此外,PGS与阴茎勃起与射精、精子在副性腺中的运行,精子穿越宫颈液及促进精子在雌性生殖道内的运动等问题密切相关,而且又与性成熟、附睾以及睾丸中精子的发生、睾酮的生物合成等生理作用的维持,均有重要的意义。

PGS对雌性生殖的调控方面,无论在研究对象和生理作用的环节诸方面,研究得比较广泛和深入。在雌性性周期中,排卵是个很重要而且相当复杂的生理活动,它主要受到下丘脑—垂体—性腺轴合成与分泌的促性腺激素、类固醇激素和光周期的调节控制,排卵活动是上述诸因素相互调节与制约的集中表现。在实验动物如大鼠、兔、猴等已经证明,在卵泡成熟前如给注射消炎痛(PGS合成酶抑制剂)或PGS抗血清,则排卵作用将受到抑制,但这种抑制又可通过注射PGS而得以逆转。一系列的实验研究证明,在幼龄大鼠及幼龄母猪诱发排卵过程中,当接近排卵时,无论是卵巢组织、卵巢静脉血或卵泡液中, PEG<sub>2</sub>、PGF<sub>2</sub>及6-酮-PGF<sub>1</sub>的含量,均有高低不同水平的高峰出现,表明在哺乳动物排卵过程中,PGS的参与是重要机制之一。在鸟类、两栖类和鱼类的排卵和产卵活动中,PGS的参与亦得到了证实,PGS在动物个体发生中,是出现较早的信息之一,如兔、牛的胚泡时期已能合成与分泌PGS。PGS在个体生长发育的不同阶段,随性别、年龄的变化,也发生相应地改变。同时由于PGF类具有溶血体的特性,故自70年代中~80年代末和90年代初,主要靠国内自己合成的15-甲基-PGF<sub>2</sub>及氟前列烯醇(中国科学院有机化学所、动物所、上海市计划生育科学技术研究所等)在畜牧业上用于家畜同期发情,促进冷冻授精技术的推广;同时对治疗奶牛持久黄体性不育症,疗效也极显著,在实践中有利于肉、乳的工业化生产,产生了显著的社会经济效益。在许多工业发达国家已将PGF类制备成专供家畜及经济动物繁殖用的商品。如日本的产品为Panacelin,英国则有ICI系列79939、80996、81008,原苏联的产品  $\alpha$ CTY ФАЛАН 等,德、瑞典、美、原苏联及东欧诸国亦将PGF及其衍生物引入家畜繁殖领域。关于PGF类溶黄体的原因,经组织化学研究证明,它抑制了3 $\beta$ -羟-脱氢酶,使孕酮的生物合成严重受阻所致,而主要媒介已是通过黄体细胞膜上存在的PGF特异受体完成的。这已在羊、牛、马、大鼠及人的黄体细胞膜研究得到证实。为了控制人口数量,探索催经止孕效应,国内外志研学者瞄准PGS的处类、剂型、用药方式及时间等方面进行了艰苦卓绝的工作取得飞跃的进展。中国学者在70年代初曾用生物合成的PGE<sub>2</sub>成功地应用于临床抗早孕;继而利用15-甲基-PGF<sub>2</sub> $\alpha$ 与丙酸睾酮全并应用终止早孕获得98.56%的成功率(周毓芬等,1981)。80年代以来,许多临床及实验医学家将PGE类衍生物与RU-486合并应用,抗早孕效果显著。国内的科研与生产单位(中国医科院药研所等)对用于催经孕为目的PGE类衍生物的研制与应用效果,也达到了国际水平。德国先灵药厂的Sulprostone(16,16-二酮-PGE<sub>2</sub>)经临床证明,无胃肠道副作用,而对增强宫颈扩张和刺激子宫平滑肌收缩抗早孕效果显著。上述PGE类衍生物与海带糖合并使用又可提高终止中期妊娠的效果与安全性。荷兰ORGANON药厂产生的一种Ceriprost,美国Upjohn药厂

生产的(Prepidil)以及一种称谓 misoprostone 的产品。具有同样的作用。值得指出的是,在 80 年代初由 Samuelsson、Bergstrom 及 Vane 等弄清了前列腺素(PGI<sub>2</sub>)及凝血素 A<sub>2</sub>(TXA<sub>2</sub>)的结构与功能,因而荣获诺贝尔生物-医学奖之后,受到广泛注意。科学证实,血管内皮细胞具有不断合成与分泌 PGI<sub>2</sub> 的能力,它具有很强的抗凝特性;而血小板内则有合成与释放使血小板凝集物质 TXA<sub>2</sub> 的能力;PGI<sub>2</sub> 与 TXA<sub>2</sub> 的合理比例对维持循环系统的生理功能,至关重要。这两种物质的生物活性虽然很强,但半衰期却很短,可分别在 2min~30s 之内被降解为无活性的 6-酮-PGF<sub>1α</sub>(简称 6-KF)及凝血素 B<sub>2</sub>(简称 TXB<sub>2</sub>)。这两种降解物虽无活性,但性能稳定,国际上通常通过检测这两类 PGS 的含量变化做为 PGI<sub>2</sub> 及 TXA<sub>2</sub> 动态变化的依据。在国家“七五”科技攻关规划中曾被列为重点课题,因为这种微量检测技术对探讨避孕药的出血机理、对妊娠综合症病因的探讨与疗效检验,特别对心、脑微循环病因导致的 PGI<sub>2</sub> 及 TXA<sub>2</sub> 合理比例失调与疗效检测等,均有极其密切的关系。该项技术国内(中科院动物所、中国人民解放军总医院、中国医科院基础医学研究所等)已经建成与应用。当前除了化学合成 PGS 及其有关类似物用于控制人类生育及促进经济动物繁育外,天然资源的综合利用则值得探索。

(中国科学院动物研究所柳建昌教授撰)

### 细胞因子对下丘脑-垂体-肾上腺皮质轴的调节

**作用** 神经内分泌系统和免疫系统之间有密切的联系。神经内分泌激素对免疫器官的发育、免疫细胞的成熟和免疫应答的调节具有广泛的作用;免疫系统对神经内分泌系统也有重要影响(Ader, 1981)。两者之间相互联系和相互作用的研究开创了神经免疫调节(NIM 新领域。单核因子、淋巴因子和胸腺激素对神经内分泌系统,特别是下丘脑垂垂体肾上腺皮质轴(HPAaxis)的研究有重大进展,G. F. Solomon 等(1987)提出了“免疫细胞下丘脑垂垂体肾上腺皮质轴(IHPA)”的新概念。

H. O. Besedovsky 等(1979)用绵羊红细胞免疫小鼠,在检测到抗体形成细胞的同时,发现血中皮质激素水平上升、甲状腺素水平下降。注入可溶性抗原如三硝基苯血蓝蛋白偶合物和新城鸡瘟病毒均见到类似的激素水平变化。进一步研究发现,植物血凝素激活的人外周血白细胞或大鼠脾细胞培养上清液中含有一种促进肾上腺皮质激素分泌的因子(GIF)。研究表明:许多细胞因子具有激活 HPA 轴的作用,细胞因子可能在免疫系统和 HPA 轴之间起某种“信使”作用(见表 1)。

白细胞介素(IL-1)是主要由单核巨噬细胞分泌一组 15-19kD 糖蛋白,具有广泛的生物学活性。除免疫效应外,还具有引起机体发热、促进肝细胞合成急性反应蛋白,促进软骨重吸收及促睡眠等作用。Besedovsky 等(1986 年)给大鼠腹腔注射重组或天然纯化的 IL-1。可见血浆 ACTH 水平快速、显著的上升。同时 B. Woloski 等发现,体外培养的小鼠垂体肿瘤细胞株 AtT-20 受 IL-1β 刺激后,ACTH 分泌增加,从而认为 IL-1 具有激活 HPA 轴作用。IL-1 的作用位点可能在下丘脑 CRF 神经元。静注 IL-1 后,下丘脑-垂体门脉内 CRF 水平升高,血浆 ACTH 随之上升(R. Sapolsky 等,1985)。预先注入抗 CRF 抗体可完全取消血浆 ACTH 水平的升高(A. Uehara 等,1987),表明 IL-1 能刺激下丘脑 CRF 神经元,合成和释放促肾上腺皮质激素释放激素(CRF),从而激活 HPA 轴。脑内注射支持这一观点,第 4 脑室或正中隆起部位只需注射外周剂量 1/10 的 IL-1,就见到 HPA 轴的激活效应(G. Katrillura, 1988)。这些资料均支持下丘脑 CRF 神经元肾 IL-1 作用位点的观点。rIL-1 在去垂体大鼠未能促进糖皮质激素的分泌,体外培养的肾上腺皮质细胞及其肿瘤细胞株 Y 对 IL-1 无反应性,排除了 IL-1 作用位点在肾上腺皮质的可能。IL-1 的刺激垂体激素分泌作用有较好的特异性,在促进 ACTH 分泌的同时,并不影响 PRL、GH、Vasopressin MSH 等垂体激素的分泌。体外培养垂体细胞对 IL-1 无反应性。故可认为 IL-1 不作用

表 1 激活 HPA 轴的细胞因子研究概况

| 细胞因子                                      | 来源      | 作用位点                 | 作用效应                    |
|-------------------------------------------|---------|----------------------|-------------------------|
| 白细胞介素 1 (IL-1)                            | 单核巨噬细胞  | 下丘脑                  | CRF ↑                   |
| 肿瘤坏死因子 (TNF-α)                            | 单核巨噬细胞  | 下丘脑?<br>垂体?<br>肾上腺皮质 | CRF ↑<br>ACTH ↑<br>GC ↓ |
| 白细胞介素 6 (IL-6)                            | 单核巨噬细胞  | 下丘脑<br>垂体?           | CRF ↑<br>ACTH ↑         |
| 白细胞介素 2 (IL-2)                            | T 细胞    | 间接作用                 | GC ↑                    |
| 干扰素 α (INF-α)                             | 白细胞     | 肾上腺皮质                | GC ↑                    |
| corticosterone re-icasing activity (CRA)  | 脾细胞     | 肾上腺皮质                | GC ↑                    |
| glucocorticoid incetmg faotor (GIF)       | 白细胞,脾细胞 | 下丘脑                  | GC ↑                    |
| 胸腺素 α <sub>1</sub> (Ta <sub>1</sub> )     | 胸腺上皮细胞  | 垂体                   |                         |
| irACTH                                    | 粘附细胞    | 肾上腺皮质                | GC ↑?                   |
| 转化生长因子 β (TGF-β)                          | 单核细胞    | 肾上腺皮质                | GC ↓                    |
| adrenocortical suppressive activity (ASA) | 巨噬细胞    | 肾上腺皮质                | CG ↓                    |
| corticostatins                            | 嗜中性白细胞  | 肾上腺皮质                | GC ↓                    |

↑:该激素合成,分泌增加;

↓:合成分泌减少;?:尚未明确;GC:糖皮质激素

于垂体(Uehara 等,1987);但垂体肿瘤细胞株 AtT-20 对 IL-1 有明显的反应性。这种矛盾的结构被认为是肿瘤细胞和正常细胞的差异所致(B. Woloski, 1985)。IL-1 的作用部位在下丘脑,而免疫应答过程中产生的 IL-1 主要在外周血,这就有必要了解 IL-1 对血脑屏障的通透性。IL-1 是分子量 15~19kD 的单链多肽,这样大的结构很难透过血脑屏障;但血脑屏障在下丘脑终板血管器(OVLT)等部位结构并不完整(Partridge 等,1983),在 IL-1 致热效应研究中发现,IL-1 可从 OVLT 部位进入中枢(Morimoto 等,1988)。损毁 OVLT 使外周注射 IL-1 的促 ACTH 分泌效应提高近 1 倍(Katsurs 等,1988)由此推测,IL-1 可从 OVLT 等处入下丘脑起作用。另一方面,在枢某些细胞,如星状细胞、神经胶质细胞,经细菌类脂多糖(LPS)刺激,能合成和分泌 IL-1(A. Fontano 等,1988)。并已从纯化的变形小神经胶质细胞中分离到 IL-1 样肽(Giulan 等,1986)。免疫组化法研究证明,具有 IL-1 免疫反应性的纤维位于下丘脑的室中核、终纹、穹窿下器、下丘脑前部和正中隆起的垂体血管区(Breder 等,1988),而这些部位均有纤维延伸到 CRF 神经元胞体,但 IL-1 并不装入神经末梢的囊泡(March 等,1985)。也不受神经冲动的刺激而释放。故尚难判断中枢合成的 IL-1 在激活 HPA 轴方面起何种作用。IL-1α 与 IL-1β 有 30% 的同源氨基酸,它们作用于同一受体。但亲和力不同。在多数免疫指标中,IL-1α 比 IL-1β 活性高,但激活 HPA 轴作用方面,IL-1β 比 IL-1α 更强。Uehara 等(1987)比较了 IL-1α 和 IL-1β 的激活 HPA 轴作用,认为 IL-1β 是体内激活 HPA 轴的主要成份。IL-1α 只能在较大的剂量时才能使 ACTH 水平升高。第 3 脑室注射 IL-1α 与 IL-1β 也证明,IL-1β 激活 HPA 轴作用比 IL-1α 强得多(Katsuura 等,1988;Catherine 等,1988)。

肿瘤坏死因子(TNF-α)的生物学活性与 IL-1 相近,有致热作用,还引起血管收缩、肿瘤坏死和消瘦等效应。B. M. Sharp 等(1989)和 R. Bernardini 等(1990)分别比较了 TNF-α 和 IL-1β

对HPA轴的激活作用,均认为TNF- $\alpha$ 与IL- $\beta$ 有相似的作用强度。但Bernardini认为,TNF- $\alpha$ 作用于下丘脑,通过释放CRF而激活HPA轴,因为抗CRF抗体阻断了TNF- $\alpha$ 的激活作用。而Sharp等认为,作用部位不在下丘脑,因为第3脑室注射TNF- $\alpha$ 无效。在垂体水平,Milenkovic等(1987)用垂体细胞体外培养体系证实,垂体中部细胞对TNF- $\alpha$ 有较强的反应。但Kehrer等(1988)报道,TNF- $\alpha$ 不影响体外培养的垂体细胞合成ACTH。而在肾上腺水平,TNF- $\alpha$ 被证明有抑制体外培养肾上腺皮质细胞释放糖皮质激素的作用。这些资料还不足以明确TNF- $\alpha$ 的作用位点,但可能是多位点的。

主要由单核巨噬细胞分泌的白细胞介素-6(IL-6)不仅诱导增殖的B细胞合成和释放免疫球蛋白,还刺激肝细胞合成和分泌急性期蛋白。外周注射IL-6有激活HPA轴作用,但作用强度不如IL- $\beta$ 。用抗CRF抗体能阻断IL-6的促进ACTH分泌作用,揭示IL-6作用部位在下丘脑水平。体外实验可见,IL-6刺激垂体肿瘤细胞株AtT-20合成和分泌ACTH,对肾上腺肿瘤细胞株T无作用(Woloski,1985)。IL-6对体外培养的正常垂体细胞和肾上腺皮质细胞有作用尚不明确。IL-6能在下丘脑水平激活HPA轴,但尚难肯定是否作用于垂体和肾上腺皮质。

在临床使用大剂量基因工程制备的白细胞介素-2(IL-2)治疗免疫缺陷病患者时,血清皮质醇水平明显升高,并伴有发热。因IL-2本身并不致热,故认为是IL-2激活一群免疫细胞产生内源性热,引起发热,继而影响皮质醇的合成和分泌(M. B. Atkins等,1986)。在动物实验中,亚临床剂量的IL-2不能直接激活HPA轴,体外培养肾上腺皮质细胞或垂体细胞对IL-2也无反应性(Fukara等,1988)。这些资料说明,IL-2本身并无激活(HPA)轴的功能,但可通过间接途径激活HPA轴。 $\alpha$ -干扰素(IFN- $\alpha$ )是人或动物白细胞经诱导后分泌的一种23kD糖蛋白,和ACTH同源于POMC(前阿黑皮素原)前体,其分子结构中包含有ACTH和endorphins(内啡肽)的氨基酸序列。IFN- $\alpha$ 裂解后形成18.5kD和4.5kD两个片段,后一段的氨基酸序列与ACTH一致。在功能上,IFN- $\alpha$ 和ACTH也有某种程度的交叉。T. E. Blalock等(1981)发现,ACTH有类似IFN- $\alpha$ 的抗病毒作用,而IFN- $\alpha$ 有类似ACTH的促进肾上腺肿瘤细胞株Y合成和释放糖皮质激素效应。在经ConA刺激的大鼠脾细胞培养上清液中,Torres等(1987)和Besedovsky等(1985)分别发现了皮质醇释放因子(CRF)和糖皮质激素促进因子(GIF)。前者直接作用于肾上腺皮质,而后者作用于下丘脑水平。(CRF和GIF)尚未纯化,结构不甚了解,故还有待进一步确定。

胸腺是T细胞分化成熟的场所,其分泌的激素主要促进T细胞分化和成熟。现已发现胸腺素、胸腺体液因子、血清胸腺因子、thymopotentin和thymostimulin等因子。胸腺素组分5(TF5)是Goldstein从小牛胸腺中纯化的一组多肽。TF5能升高大鼠血浆皮质酮水平(McGillis等,1985),并能升高猴血浆ACTH水平(Healy等,1983),从TF5中进一步纯化得到的胸腺素 $\alpha_1$ (Ta $_1$ )有类似TF5的促进肾上腺皮质激素分泌作用(J. P. McGillis等,1983)。Ta $_1$ 作用于体外培养的大鼠垂体前叶细胞,引起ACTH的释放(McGillis等,1985),但对培养的肾上腺束状带细胞的分泌皮质酮功能无影响(Vahouny等,1983)。由于胸腺因子成分复杂,有关胸腺因子与HPA轴联系了解不多,但早期资料表明,胸腺与HPA轴有密切联系。在无菌环境饲养的动物,由于缺乏抗原攻击,胸腺和淋巴组织发育不全,免疫球蛋白水平低下,同时可见肾上腺功能不全(Miyakawa等,1970)。裸鼠和新生时切除胸腺的小鼠也表明肾上腺网状皮质区发育不良,早期移植胸腺可使肾上腺皮质正常发育,而被动输入淋巴细胞虽能使动物获得免疫功能,但并不能改善肾上腺皮质功能(Pierpaoli等,1972)。这些资料有力地证明,胸腺与HPA轴之间有密切关系。

J. B. Blalock等(1985)发现,人白细胞经NDV或LPS激活后,能分泌一类与垂体分泌的ACTH氨基酸序列和生物学活性一致的多肽,称之为irACTH(immune reactive ACTH)。免疫组

化可见,分泌irACTH的细胞为粘附细胞(Lolait等,1984)。经Northern Blot分析证实,NDV刺激的鼠脾细胞多聚mRN中有POMCmRNA(Lolait等,1986)。采用反相HPLC技术已从激活的脾细胞上清液中纯化出 $\beta$ -End 1-31, N-acetyl-,  $\gamma$ -End,  $\alpha$ -End等多肽分子。这些资料充分肯定某些活化免疫细胞能分泌irACTH;但活化免疫细胞产生的微量irACTH能否激活肾上腺皮质仍有争议。Smith等(1982)给去垂体大鼠注射NDV,重复出在完整大鼠注射NDV的升高血浆皮质酮水平的效应,从而认为NDV诱导白细胞释放irACTH,刺激肾上腺皮质分泌皮质酮。但Dunn等(1987)未能重复此结果,并认为Smith的阳性结果是NDV诱生的IL-1激活下丘脑,通过残留或再生的垂体促进皮质酮的分泌所致。irACTH在结构和功能上与垂体分泌ACTH一致,而且也受糖皮质激素的负反馈调节。因此,irACTH可能在免疫系统 and 神经内分泌系统的联络中有一定意义。

转化生长因子 $\beta$ (TGF- $\beta$ )是巨噬细胞分泌的一种活性多肽,分布广、生物活性复杂。TGF- $\beta$ 在体外培养体系中明显抑制肾上腺皮质的基础分泌和ACTH刺激分泌(J. J. Feige等,1986)。有关TGF- $\beta$ 的抑制作用机理有两种解释。Hotta和Baird(1986)发现,TGF- $\beta$ 的抑制作用可被25-羟胆固醇、孕烯醇酮、孕酮等阻断,故认为TGF- $\beta$ 是通过限制游离胆固醇的量来限制皮质酮的合成。而Feige等(1986)认为,TGF- $\beta$ 限制17 $\alpha$ -羟化酶活性来限制皮质酮的合成,在小牛肾上腺皮质细胞膜有高亲和力的TGF- $\beta$ 受体(Cocher等,1988)。此类受体的数目受ACTH的调控。这就是说,ACTH刺激肾上腺皮质细胞分泌皮质激素的同时,增加TGF- $\beta$ 受体数,使TGF- $\beta$ 有效地抑制皮质激素的合成,构成了一条调节回路。Mathison等(1983)发现,巨噬细胞经LPS刺激后,产生一种强烈抑制肾上腺皮质细胞合成和分泌皮质酮的因子(ASA),几乎完全抑制ACTH对肾上腺皮质的刺激作用,初步确定该因子是分子量10kD以上的蛋白质,作用部位可能在肾上腺皮质细胞膜ACTH受体。体外传代的单核细胞株,如P388D1、RAW2647、WEHL-3和L929等,经LPS刺激也能产生此因子。ASA尚未纯化,结构不明,但该因子的一些理化特性和生物学活性与TNF- $\alpha$ 、糖皮质激素拮抗因子、脂蛋白脂酶,及前述的TGF- $\beta$ 有相似之处(J. C. Mathison等,1984)。中性粒细胞能产生一组低分子量的多肽,约含34个氨基酸残基,具有拮抗ACTH作用。作用快速、高效、完全。抑制位点在肾上腺皮质细胞膜ACTH受体(Q. Zhu, J. Hu和S. Mulag等,1988)。从中分离出的HP4成份有显著的拮抗ACTH效应。

胸腺产生的胸腺因子和免疫细胞产生的细胞因子在不同水平对HPA轴起到复杂的调节作用。总体上看,在免疫应答的早期,激活HPA轴的因子起主导作用,作用快速,作用位点也较高(多在垂体、下丘脑水平)。这就意味着,在免疫应答过程中,激活的免疫细胞分泌细胞因子,促进免疫细胞进一步活化,产生免疫应答,同时,有些细胞因子快速激活HPA轴,使其终产物糖皮质激素水平升高,反馈抑制细胞因子的产生和免疫细胞的活化,使免疫应答受到限制。另一组细胞因子使已被激活的HPA轴缓慢转入抑制,减少终产物糖皮质激素的过度分泌,终止对免疫应答的限制。这种精细复杂的神经内分泌调节在维持免疫稳态和自身免疫性疾病发病研究中可能有重要意义。

(上海中医学院实验核医学研究室陈坤华撰)

### 大脑动脉环 cerebral arterial circle 又称 Willis 氏环。

即颈内动脉与椎基底动脉入颅后,在大脑底部借前交通动脉和后交通动脉相互连接,所形成的一个多角形或葫芦状的动脉吻合环,这是1664年Thomas Willis最先描述的。大脑动脉环的存在,对脑血液供应的调节与代偿起着重要作用,因而给与脑血液供应有较大的代偿潜能。

自从Thomas Willis描述人脑动脉环之后,许多学者也随着进行这方面的研究,如国外有Fawcett-Blackford(1905), Stopford(1916), Hasebe(1928) Голдинов(1929) Гиндле(1947)



Круначев-Мета, Пинкова (1970), Киселевский (1951) 等多人; 在中国有邱治民、冯元富 (1955); 蔡振邦 (1955), 毛增荣 (1956), 叶铮 (1986) 以及李维宙等。其研究的范围也很广泛, 从种系发生和个体发生直到变异和功能都有报道。为了配合脑血液循环的生理学研究, 制作脑缺血模型, 曾利用蒙古种沙土鼠和小型香猪进行研究并有大脑动脉环的论文发表。

按照 Таглицева 的研究, 哺乳动物的大脑动脉环的结构型式有两种: (1) 仅由椎动脉构成, 颈内动脉发育不明显。(2) 仅由颈内动脉或代替颈内动脉的“怪”网所构成。在上述的两种型式之间, 还有很多移行型。鲸鱼大脑动脉环的型式主要是由颈内动脉所构成, 没有组成怪网。在哺乳类则相反, 全部动脉环系由椎动脉所组成, 在某些动物 (如熊、猴), 其大脑动脉很平均地由颈内动脉和椎动脉组成。人类大脑动脉环属于移行型, 颈内动脉和椎动脉均参与大脑动脉环的组成。

大脑动脉环的类型、变异甚多, 有人按动脉环完整与否分为闭锁型和开放型, 以闭锁型居多; 有人按形成动脉环的左右动脉粗细不同, 分为对称型和不对称型, 以不对称型多见; 有人按种系发生史把大脑动脉环分为近代型、原始型、过渡型、混合型和发育不全型等五型。后者的分类法简单易行。且具有进化上的意义, 根据 503 例的调查, 中国人的大脑动脉环, 以近代型的为最多, 占 64.61%; 其次是混合型, 占 19.7%; 过渡型占 7.16%; 原始型占 4.37%; 发育不全型占 3.98%; 其他 0.20%。小型香猪的大脑动脉环与人的大脑动脉环相比, 在 14 例中相当于原始型者 11 例 (占 78.6%); 相当于过渡型者 3 例 (占 21.4%), 因此, 可以说原始型是小型香猪大脑动脉环的基本类型。沙土鼠大脑动脉环与大白鼠的不同, 大白鼠大脑动脉环具有粗大的前交通动脉和后交通动脉, 因此, 大白鼠大脑动脉环是完整的 (闭锁型); 而沙土鼠的前交通动脉, 根据 80 只的调查, 完全的前交通动脉占 66.25%, 细弱的占 13.75%; 缺乏的占 20.00%。后两型称为易卒中型沙土鼠, 这两型动物在中断其一侧颈动脉血流后, 可出现神经损伤症状。研究结果还表明, 大多数双峰驼的大脑动脉环, 从结构上不同于其他哺乳动物 (除单峰驼外), 双峰驼大脑动脉环各段血管的血流方向与牛、羊的相似。

脑血管的形态学研究应该面向实际, 而向日趋发展的现代医学。近年来对脑内浅动脉的研究包括 Willis 动脉环的研究, 其题材较以往广泛, 研究的内容较以往深入、细致, 有不少论文紧密结合临床实际, 并且有的提出了一些新见解。但对脑动脉壁的显微结构及超微结构的形态特点如何, 其特点与脑出血及动脉瘤形成和发展的关系如何, 尚待进一步观察、研究。

#### 参考文献

1. Киселевский В. П. циркуляция крови в мозгу. Менинг. Москва, 1951; 11~34
2. 曾司鲁, 等. 脑血管解剖学. 北京: 科学出版社, 1983. 66~70
3. 李维宙, 等. 北京畜牧兽医学年会论文集, 1985. 87~89
4. 李维宙, 等. 中国畜牧兽医学动物解剖学第七次学术讨论会论文集, 1992. 1~3
5. 李维宙, 等. 上海实验动物科学, 1993, 13(4)
6. 陈耀星, 李维宙. 中国农业科学, 1994, 27(1)

(北京农业大学李维宙副教授撰)

**循环系统内分泌功能** 长期以来, 人们对循环系统的传统认识仅是一个血液动力学系统。随着生化分离技术、微量测定技术和分子生物学的研究发展, 从原来不认为有内分泌功能的循环系统组织和细胞, 如心脏、血管和血细胞等, 发现了一些激素样活性物质。这些活性物质具有广泛的生物效应, 并相互协调, 参与心血管和其它系统的功能调节, 与心血管疾病的发生发展有密切关系。逐渐认识到循环系统不仅是一个血液动力学的系统, 亦是体内的一个重要内分泌系统。

从 1956 年基斯克 (B. Kisch) 首次发现豚鼠心房肌细胞含有特殊颗粒, 到 1984 年加拿大鲍尔德 (A. J. de Bold)、美国尼德尔

曼 (P. Needleman) 分离纯化了大鼠和人的心钠素, 人们对心脏内分泌功能概念的认识经历了漫长的阶段。1984~1988 年相继发现, 心脏还可以产生和分泌血管紧张素、肾素、前列腺素、内源性洋地黄素、心肌生长因子、抗心律失常肽、脑钠素和异心钠素等心脏源性激素样活性物质, 其中以心钠素最为重要。心钠素具有强大的利钠、利尿作用, 可以调节水盐代谢和体液容量的平衡量, 亦舒张血管, 改善心律失常和调节心功能, 在高血压等疾病的发病和防治上具有重要意义。人心房约含 150μg 的心钠素, 远超过垂体、甲状腺、胰岛和肾上腺等分泌腺所含相应激素的量。

人体血管的内皮细胞约  $10^{11}$  个, 覆盖整个血管床表面。从 1863 年黑斯 (His) 提出内皮的概念以来, 对内皮细胞功能的了解仅仅在于作为半透膜调节物质通过血管壁, 维持血液的流动状态。1976 年文 (J. R. Vanca) 发现内皮细胞生成和分泌前列腺素, 成为内皮细胞内分泌研究的先驱, 并荣获 1981 年度诺贝尔奖。前列腺素可以舒张血管和调节血小板粘集的功能。1980 年弗查格特 (R. F. Furchgott) 发现内皮细胞合成和分泌的舒张因子 (EDRF) 可舒张血管, 调节和控制血小板聚集和血栓形成。1987 年蒙卡德 (S. Moncada) 证明它是一氧化氮 (NO) 样物质, 具有广泛的生物效应。

1988 年 3 月日本柳沢从培养的猪主动脉内皮细胞分离纯化出内皮素 (ET), 它是迄今所知, 作用最强、持续最久的缩血管活性多肽, 以旁分泌、自分泌方式调节局部血管紧张度, 参与血压基础长期调节; 亦可促进心肌和血管平滑肌的增殖, 调节心脏的代谢和内分泌。ET 在循环系统和中枢神经、呼吸、生殖、泌尿等系统生理功能调节, 以及心血管疾病的发病过程具有重要生理和病理生理意义, 受到各国学者广泛的关注。内皮细胞是特殊分化的调节组织, 亦可合成和释放白细胞介素 I、II、III、IV、V, 内皮细胞生长因子、纤维蛋白酶原激活剂、血管紧张素转换酶、脂蛋白脂酶和血小板活化因子等多种活性物质, 因此, 认为内皮是重要的代谢和内分泌器官。1991 年安格尔德 (E. E. Anggard) 认为血管内皮是人体最大最长的内分泌腺, 几乎所有的器官组织都受其调节和影响。

应用免疫组织化学、放射免疫和分子杂交方法证明, 全身血管的平滑肌细胞都具有合成和释放肾素、血管紧张素的能力。1987 年德奥 (V. J. Dzau) 证明血管平滑肌细胞有其特异性 mRNA 存在, 因此, 血管局部亦存在完整的肾素-血管紧张素系统。它们收缩血管, 正反馈调节儿茶酚胺、内皮素的分泌, 促进血管平滑肌和心肌的增殖; 血管的肾素-血管紧张素系统在高血压、心肌肥大等的发病中占有十分重要的地位。此外, 血管平滑肌亦可分泌心钠素、内皮素、前列腺素、血小板生长因子等。

血细胞包括红细胞和粒细胞两大类。红细胞内无细胞器, 仅含大量血红蛋白。1984 年莱特 (G. L. Wright) 从红细胞溶血产物分离了一种高血压因子, 可使动物血压持续升高。此外红细胞亦可产生利钠因子、血啡肽排钠素等单细胞、淋巴细胞、白细胞等都可以产生多种细胞因子, 如白细胞介素、慢反应物质、趋化因子、吞噬素、5-羟色胺、组织胺、血小板活化因子、干扰素、内皮素等, 它们不仅可以调节免疫和机体防御机能, 亦调节和影响心血管的运动、凝血功能。因此, 这些物质都具有激素样性质。

心血管系统的肽类神经纤维不仅直接支配心血管的运动, 亦调节心血管的内分泌, 发挥局部的神经内分泌作用。已发现的神经递质包括降钙素基因相关肽、神经肽酪氨酸、速激肽、阿片肽、神经降压素、血管活性肠肽、心脏兴奋肽和乙酰胆碱等。其中以降钙素基因相关肽较为重要, 它是体内作用最强的扩血管物质, 可以拮抗内皮素、血管紧张素的作用, 对心、脑、肾等器官的再灌注损伤具有强大的细胞保护作用。

综上所述, 可以看出整个循环系统都具有内分泌功能。自 1902 年斯塔林 (Starling) 发现促胰液素, 并提出激素的概念以来, 经典内分泌学相继扩展出神经内分泌学和弥散性内分泌系统两个不同的领域。随着近代科学的发展还派生出旁分泌、自分泌、胞内分泌和循环分泌等不同的概念。

内分泌功能是一切生命细胞最基本的特征之一。心脏、血管、内皮细胞、血细胞和支配心血管的神经纤维都可合成、分泌许多生物活性物质。其含量之高,种类之多,作用之广泛,在体内各内分泌器官中是罕见的。循环系统的内分泌功能有重要生理意义和病理生理意义,它们既有循环激素样作用,又有局部激素的功能,彼此相互促进,又相互制约,构成一个复杂的自身调节网络。在生理条件下,调节循环系统和其它系统的生理功能,维持机体内环境恒定,发挥抗病和防病作用。在高血压、动脉粥样硬化、心肌缺血缺氧、再灌注损伤、休克、肿瘤等调节紊乱性疾病的发病过程,循环内分泌功能的失调对于机体循环稳态和内环境平衡的破坏,具有重要发病学和病理学意义。此外,循环系统内分泌物质强大的生物学效应,作为外源药物应用,可能具有临床治疗学意义。循环系统内分泌学作为一个年轻和新兴的学科领域,具有十分广阔的前途和深远的意义。

#### 参考文献

- 1 Furchgott R F, Zawadzki J F. The obligatory role of endothelial cells in the relaxation of arterial smooth muscle by acetylcholine. *Nature*, 1980, 288: 27, 373~376
- 2 Vane J R, et al. The endothelial cells as a metabolic and endocrine organ. *Trends In Pharmacol Sci*, 1987, 8(12): 491~493
- 3 Palmer K M J, et al. Nitric oxide release accounts for the biological activity of endothelium-derived relaxing factor. *Nature*, 1987, 327(11): 524~526
- 4 Dzau V J. Circulating versus local renin-angiotensin system in cardiovascular homeostasis. *Circulation*, 1988, 77: Suppl I, 1~4: 1~17
- 5 Yanagisawa M, et al. A novel potent vasoconstrictor peptide produced by vascular endothelial cells. *Nature*, 1988, 332: 411~415
- 6 汤健, 等编著. 心钠素. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1989. 1~116
- 7 汤健, 等编著. 循环系统的内分泌功. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1989. 1~11
- 8 汤健等编著. 心血管疾病——基础、临床. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1990. 69~82
- 9 Anggard E E. The endothelium—the body's largest endocrine gland. *J Endocrinol*, 1990, (127, 3): 371~375  
(北京医科大学心肺内分泌研究室杨军、凌世长撰)

### 肺循环的自身调节

近年来,由于血管内皮细胞(EC)功能的不断被揭示,静脉血在肺循环内进行动脉化不止是起气体交换作用,而且血液经肺循环以后,既有某些物质丢失或减少,也有若干新的成分出现。特别是那些由肺血管内皮细胞所释放的物质如前列环素等对肺血管紧张度的调节起了重要作用。

#### 内皮细胞释放的生物活性物质

1. 内皮细胞舒张因子(EDRF)。1980年费尔告特(R. F. Furchgott)等发现,乙酰胆碱(ACh)使主动脉或其他哺乳类动物动脉发生的舒张反应,依赖于内皮细胞的存在,并且进一步发现, ACh所产生的舒张是由于ACh作用于内皮细胞的M-受体,使其释放一种非前列腺素样物质所致。此物质称为EDRF。现已知体内其它一些舒血管物质如腺嘌呤核苷酸、凝血酶、P物质、加压素和促胰酶素等所致的血管舒张也是EDRF介导的。但硝酸甘油、硝普盐、心钠素和前列环素引起的血管舒张则是通过非内皮(非EDRF)依赖机制。EDRF舒张血管平滑肌的作用是由于其能激活鸟苷酸环化酶引起cGMP增加有关。近期鉴定表明EDRF是氧化一氮(NO)。半衰期为6~50s,其本身很不稳定,在超氧阴离子环境中更不稳定。一些有氧化还原作用的化合物,可通过超氧阴离子的生成而抑制EDRF的活性。血红蛋白抑制EDRF的活性,它的抑制作用不是通过超氧阴离子的生成,而是

通过与EDRF分子的结合。

2. 多种缩血管因子。其中一种与环氧化酶产物有关,可能是超氧阴离子,其作用主要参与脑血流的自身调节;另一种为内皮素(ET),是近年来研究的重点;又一种是在缺氧时释出,其结构尚未明确,似乎与ET无关,可能在缺氧性肺血管收缩中起重要作用。

ET是从猪主动脉内皮细胞所提纯的一种强大缩血管物质,系21个氨基酸残基的多肽。1990年高托(Goto)等提出,多种哺乳动物具有3种与ET有关的基因,由此推定出三种结构相近的多肽,分别命名为ET-1、ET-2和ET-3。目前这三种多肽均已人工合成,其缩血管效能以ET-2作用最强,ET-1其次,ET-3作用最弱。

某些病理条件下,内皮细胞释放舒张因子的能力减退而释放收缩因子的能力不变或加强,从而可引发血管痉挛。

#### 花生四烯酸(AA)代谢产物对肺血管的调节作用

1. 花生四烯酸及前列腺素在肺的形成。肺内的AA主要以酯化形式存在于膜磷脂上。在多种刺激(包括机械、化学和免疫学等)的作用下,磷脂酶A<sub>2</sub>被激活,使膜磷脂释放AA。游离的AA迅即经环加氧酶和脂加氧酶两途径代谢。环加氧酶途径的活性产物总称为PG类物质或前列腺素类化合物,包括初级PG(即PGE<sub>2</sub>、F<sub>2α</sub>及D<sub>2</sub>)、前列环素(PGI<sub>2</sub>)及血栓素(TXA<sub>2</sub>)。脂加氧酶途径首先生成氢过氧基四烯酸(HPEETE),后者还原为羟基四烯酸(HETE)和,或分子重排形成具有3个共轭双键的不稳定产物白三烯(Leukotriene,LT)A<sub>4</sub>。其中PG类物质对肺血管紧张度的调节起重要作用。

2. 花生四烯酸代谢产物对肺血管的作用。在初级PG中,(1)PGE<sub>2α</sub>可使大多数种属的肺血管强力收缩。但反应大小及作用的血管部位因种属而异。例如,在体内,对猫的肺血管床的作用比猴的作用较大;在狗,主要作用于肺静脉及其属支,在猪、羊则作用于肺动脉。PGE<sub>2α</sub>的肺血管收缩作用与它对全身动脉阻力及动脉压不具明显作用形成鲜明对照。(2)PGE<sub>2</sub>。在狗,PGE<sub>2</sub>可使肺血管轻度收缩,其效力约为PGE<sub>2α</sub>的1/3;但在离体灌流的小牛及胎羊肺,PGE<sub>2</sub>使肺血管舒张。PGE<sub>2</sub>可降低新生儿肺血管张力。因此,孕妇摄入非类固醇抗炎药(NSAID,环加氧酶抑制剂)可能导致新生儿原发性肺动脉高压;对于动脉导管关闭的早产婴儿,则可用NSAID关闭动脉导管。(3)PGD<sub>2</sub>。其缩血管作用近似PGE<sub>2α</sub>。虽然PGD<sub>2</sub>是PGE<sub>2</sub>的异构体,但它对成年肺血管和支气管的收缩作用比PGE<sub>2</sub>强,而对全身血管的舒张作用则比PGE<sub>2</sub>小。

在PGI<sub>2</sub>中,血管组织AA代谢的主要产物。肺的血管内皮总面积很大,因而,PGI<sub>2</sub>不但在肺产生局部作用,还可进入体循环导致全身作用。例如,肺PGI<sub>2</sub>合成和释放增加,可能补充血管PGI<sub>2</sub>的局部抗血小板聚集和血管舒张作用,增强机体对血栓和动脉粥样硬化的天然抵抗力。PGI<sub>2</sub>对肺血管及全身血管都具有强舒张作用,也可能是正常情况肺血管张力较小的原因,也是使成年肺血管床舒张的AA的唯一代谢物。PGI<sub>2</sub>明显降低ADP和血管收缩剂引起的肺高压,阻止ADP引起的肺内血小板聚集。缓激肽及肝素吐喘的肺血管舒张作用也是通过PGI<sub>2</sub>介导的。给狗静脉注入或气雾吸入PGI<sub>2</sub>可显著逆转PGE<sub>2α</sub>引起的肺阻力增加及肺顺应性减小。

在TXA<sub>2</sub>中, TXA<sub>2</sub>是豚鼠及仓鼠肺环加氧酶途径的主要产物,它能使离体灌流的家兔肺内动脉螺旋条和豚鼠肺实质条收缩。TXA<sub>2</sub>也是在过敏性刺激、机械刺激以及各种化学刺激时从豚鼠肺释放的所谓“家兔主动脉收缩物质”(RCS)的主要成分。

PGI<sub>2</sub>与TXA<sub>2</sub>对肺的效应相反。在实验模型上, TPA<sub>2</sub>可引起呼吸功能显著变化,而PGI<sub>2</sub>则对抗TPA<sub>2</sub>引起的肺血管和支气管产生的效应。这两种环加氧酶途径产物由肺的不同部位合成和释放,肺实质组织为TPA<sub>2</sub>的丰富来源,肺血管和气管组织则是PG的来源。正常情况下,人肺组织环加氧酶途径占优势的产物是PGI<sub>2</sub>(及E<sub>2</sub>),这有助于维持气道的开放和血管的舒张。

1983年怀特(B. J. R. Whittle)提出,病理情况下,PGI<sub>2</sub>-TXA<sub>2</sub>失去平衡,PGI<sub>2</sub>减少,THA<sub>2</sub>增加,引起支气管收缩及肺血管收缩。

1990年布恩(Busse)等提出,内皮细胞通过释放两种重要的自体有效物质调控着血管紧张度和血细胞的激活。它们就是EDRF和PGI<sub>2</sub>,它们在多种化学和物理因素作用下,从内皮细胞中平行地释出。这种存在于血管壁本身的主动的自身调节系统在维持肺血管的正常舒缩活动和病理机制中具有重要作用。

参考文献

- 1 Moncada S, et al. Arachidonic acid metabolites and the interactions between platelets and blood-vessel walls. *N Engl J Med.* 1979, 300(20): 1112~1147
- 2 Furchgott R F, et al. The obligatory role of endothelial cells in the relaxation of arterial smooth muscle by acetylcholine. *Nature.* 1980, 288: 373~376
- 3 Phillips J B. Prostaglandin D<sub>2</sub> inhibits hypoxic pulmonary vasoconstriction in neonatal lambs. *J Appl Physiol.* 1983, 54(6): 1583~1589
- 4 Whittle BJR. Pharmacological interactions between prostacyclin and thromboxane. *Br Med Bull.* 1983, 39(3): 232~238
- 5 陈子彬, 刘磊. 呼吸调节生理进展. 上海: 上海医科大学出版社, 1989. 115~125
- 6 何瑞荣. 心血管生理的某些进展. *生理科学进展.* 1990, 21(1): 80~82

(南京医学院生理教研室倪慧教授撰)

**呼吸节律的形成** 1812年勒加劳(LeGallios)第1个比较准确地指出呼吸节律起源部位在延髓。此后对此问题已做了大量而精确的研究,并提出各种学说和假设,但迄今未完全解决。

早期的研究方法主要是切除法、刺激法、解剖制图法等。1847年郎格斯特(Longest)把呼吸中枢定位于脑室底的网状结构。1887年马克沃德(Marckwald)首先提出假说认为吸气神经元只有紧张性活动的能力,这种紧张性活动受到某些周期性抑制机制的调制,变成节律性的活动。1923年拉姆斯登(Lumsden)用分段切除髓干法,成功的观察了呼吸节律的变化,提出了3级中枢理论,即认为脑桥有“呼吸调整中枢”和“长吸中枢”,延髓存在产生基本节律的“喘息中枢”和“呼气中枢”从而支持了呼吸节律形成假说。1936年格塞尔(Gesell)用粗电极在狗的延髓下部附近网状结构中记录到呼吸性电位。1939年皮茨(pitts)等用电刺激的方法对猫的脑干逐点探查后,提出延髓网状结构的腹内侧面有一个“吸气中枢”,其背侧是“呼气中枢”,并对假说作了进一步说明,他认为延髓吸气中枢的紧张性活动被呼吸调整中枢和肺牵张传入活动周期性地打断,变成节律性活动。但是,Pitts也提出了另一种可能的机制,即认为延髓呼吸中枢具有内在的节律性,由于技术上的困难,迄今都还不能把单个细胞从哺乳动物的神经中枢孤立起来,消除一切体液和突触传入对其的影响,观察和分析具有呼吸节律自律活动的起步细胞,故大部分研究者是从神经网络方面去研究呼吸节律的形成。1957年王世藩做了著名的孤立延髓的实验,证明延髓本身有产生呼吸节律的能力,但在正常情况下延髓的呼吸节律为长吸中枢的活动所掩盖,长吸中枢的紧张性活动被迷走神经和呼吸调整中枢的活动周期性地抑制,产生正常的呼吸节律。

随着电刺激和单位电活动引导等电生理学方法的创立和应用,对呼吸中枢的定位比较精确。一般认为,延髓中呼吸性神经元的分布可分两组:一部分神经元集中在孤束核(NTS)的腹外侧部,称为背侧组,大多数是吸气神经元(I神经元),可分为Ia和I<sub>1</sub>两类,仅在吸气相放电;另一部分神经元在疑核(NA)和后疑核(NRA),有I神经元和呼气神经元(E神经元),称腹侧组,新近发现NRA头端相当于面神经核后核的部位有比较集中的E

神经元,此区被称为包氏复合体。1972年前后梅里尔(Merrill)用记录细胞体逆向动作电位和碰撞测验等方法对腹侧组进行了许多观察,将I神经元分为两类:一类吸气相中放电频率愈来愈高,后来贝格尔(Berger)称之为IY神经元,其轴突下行于脊髓;另一类仅在吸气相早期放电,称为I<sub>2</sub>神经元,其轴突不下行于脊髓,而是分布于NRA的呼吸性神经元。贝特纳德(Bertrand)等对脑桥呼吸调整中枢中的神经元进行了详细的研究,将该区的呼吸性神经元分为3类:E神经元,I神经元和“跨相的”吸气-呼气性神经元(简称I-E神经元),这些跨时相的呼吸神经元可能在呼吸时相的转换中起作用。呼吸性神经元在脑桥的分布主要在前端的背外侧的结合臂旁内侧核和Kolliker-Fuse核(KF核),这个区域就是过去所谓的“呼吸调整中枢”,现在研究者们称为“PBKF区”。

根据神经元的解剖定位,放电特征及反应特性,可以想象不同类型的呼吸性神经元可以在脑内构成神经网络,产生呼吸的自动节律。萨莫诺凯(Salmonragh)和伯恩斯(Burns)提出的“双稳态振荡器”假说一度为许多人所接受,并总结成为交互抑制学说,他们设想在延髓的I神经元和E神经元分别形成一个网络,只要少数神经元兴奋通过正反馈联系就可使整个网络进入活动状态;当神经元重复放电达到一定程度就会发生疲劳,兴奋性很低而中断活动,于是吸气中止,转为呼气,或者由呼气转为吸气;而且,I神经元群与E神经元群之间存在着交互抑制关系,然而,1971年梅里尔(Merrill)和米切尔(Mitchell)都证明延髓中并不存在E神经元和I神经元的联系,1957年里克特(Richter)在记录细胞内电位时也认为呼吸性神经元的放电活动并无适应现象,长吸时,I神经元可连续放电达数分钟之久而无“疲劳”。因此,延髓中呼吸性神经元群之间并不存在对称的交互抑制,而是一种非对称性的作用环路。后来的一些研究也不支持交互抑制学说,同时也否定了“长吸中枢”的存在,认为长吸只是控制呼吸运动神经机制处于某种特殊机能状态时的外部表现。

在呼吸神经元及核团的定位方面,采用包括同位素与放免、组化、局解显微损毁、电子计算机的使用等新技术,对脑的延髓和脑桥做了大量的研究工作。1977年柯亨(Cohen)和卢勒尔(Euler)分别从不同的角度,同时提出了呼吸节律的吸气切断机制。认为安静时中枢的呼吸节律发生主要是吸气性活动的节律,中枢吸气性活动被外来影响而“切断”,他们认为Ia神经元可能是中枢吸气性活动的来源,而晚吸气I<sub>2</sub>神经元起了“切断”作用,1979年Cohen在吸气切断机制模式中指出通过3个方面激活吸气切断机制,即延髓内部I<sub>2</sub>神经元兴奋,肺牵张感受器的传入活动和呼吸调整中枢的活动可激活切断神经元。在此基础上,1981年费德曼(Feldman)1981年提出呼吸节律产生的回返性抑制学说模式,认为中枢吸气性活动,呼吸调整中枢的传出活动和肺牵张感受器的传入活动三者都作用于同一吸气切断机制,并推测由呼气相向吸气相的转换也存在一组切断呼气的神经元,即呼气切断机制。中枢吸气性活动除导致吸气运动外,还直接或间接地通过肺牵张感受和呼吸调整中枢而刺激延髓中的吸气切断机制,使它进入活动状态,就反馈地切断中枢吸气活动,吸气相就转为呼气相,同时吸气切断机制还激活呼气切断机制,后者对中枢吸气性活动的抑制逐渐减弱,终于使中枢吸气性活动脱抑制而激发下一次吸气过程。如此反复,形成基本呼吸节律。但也有一些研究不支持这一假说,1982年贝格尔(Berger)等破坏猫的两侧背侧组和腹侧组的很大部分,并不明显改变平均呼吸节律,故中枢吸气性活动的确切定位仍待阐明。

近年有人报告在脊髓颈段的最头端的外侧中央灰质中亦含有呼吸相关神经元,绝大多数属I神经元,并认为是高位颈髓离断的动物呼吸节律的可能来源。1987年王玉田等观察到电刺激兔中缝背核引起吸气易化效应,而电刺中缝大核则具有呼吸位相转换效应。1989年刘磊等报道了面神经核背内侧面在中枢呼吸节律发生中可能具有吸气发生器的作用。1990年高建新等进一步观察了面神经核背内侧面区的吸气启动效应,结果提示该区在呼

吸节律产生中具有吸气易化效应。

用电生理学技术与其他新技术的结合研究呼吸节律的形成,不仅发现了脑中与呼吸节律有关的神经核团,还发现了许多散在的呼吸神经元,呼吸的基本节律可能是发生在延髓的NTS、NA、NRA、包氏复合体及周围散在的呼吸神经原之间,脑桥的“PBKF区”对呼吸时间的转换和节律的调制可能起着重要作用。然而,呼吸节律形成的回返性抑制学说有待于通过更广泛深入的研究来补充和完善。

#### 参考文献

- 1 Cohen M I. How is respiratory rhythm generated. *Fed Proc*, 1981, 40(9): 2372~2377
- 2 Feldman J L. Interaction between brainstem respiratory neurons. *Fed Proc*, 1981, 40(9): 2384~2388
- 3 Cohen M I. Central determinations of respiratory rhythm. *Ann Rev. Physiol*, 1981, 43: 91~104
- 4 Richter D W. Generation and maintenance of the respiratory rhythm. *J Exp Biol*, 1982, 100: 93~104
- 5 Von Euler C. On the central pattern generator for the basic breathing rhythmicity. *J Appl Physiol Respirat Environ Exercise Physiol*, 1983, 55(6): 147~1659
- 6 张衡. 关于哺乳动物呼吸中枢的现代观点. *生理科学进展*, 1986, 17(3): 210~215
- 7 Lir Lei, et al. The study on respiratory generating effects of dorsomedial area of nucleus facialis in rabbits. *Respiration Physiology*, 1989, 75(1): 65
- 8 高建新, 等. 面神经核背内侧区的吸气启动效应. *山东医科大学学报*, 1990, 28(3): 22~25

(广州体育学院刘建中, 江西宜春地区卫校刘蓉蓉撰)

**气道内含肽神经** 1970年首次在肺内分离到支气管活性肽。此后又在气管支气管树中发现20多种肽类物质,其中大多数起神经递质或神经调质的作用。释放神经肽类的神经被称为非肾上腺素能非胆碱能(NANC)神经。神经肽类常和胆碱能和肾上腺素的神经递质如乙酰胆碱、去甲肾上腺素共存于同一神经元。在肺气道平滑肌运动、腺体的分泌和血管张力的调节方面,肽类递质或调质发挥着十分重要的生理功能,并直接参与了肺和呼吸道许多疾病的病理生理过程。

NANC神经最早发现于肠道,后来发现肺、气道中也有丰富的NANC神经。现在已经明确,气道中的NANC神经和传统的自主神经、感觉神经一样能够释放神经递质或调质,和传统的递质一样发挥神经信使的作用(Lundberg)。因为人类气道平滑肌上缺乏功能性的交感神经分布(Barnes),所以含肽神经对气道的平滑肌和功能具有明显的影响,已基本清楚,气道的NANC抑制性神经是气管至小支气管平滑肌的松弛的唯一的神经通道。放射免疫测定法或免疫组织化学法可以证明一些神经肽存在于气道神经中,但尚无法区分一些结构相近的神经肽。目前已较明确的肺、气道含肽神经情况是:(1)血管活性肠肽(VIP),以及VIP相关的组氨酸酰亮氨酸肽/组氨酸甲硫氨酸肽(PHI/PHM)和乙酰胆碱共存于副交感神经中。Galamine可能作为一种神经调节肽也同存于气道的副交感神经中(Cheung)。(2)神经肽酪氨酸或称神经肽Y(NPY)与去甲肾上腺素共存于肺内交感神经节后纤维中(Said)。(3)在肺气道的感觉神经C纤维中共存着多种神经肽,有降钙素基因相关肽(CGRP)和神经激肽如神经激肽A和B(NKA, NKB)、P物质(SP)等,此外还可能还有蛙皮素、胃泌素释放肽(GRP)、胆囊收缩素(CCK)等发挥着神经内分泌作用(Said)。在不同种属动物或同种动物的不同年龄阶段的气道中,这些神经肽类的含量差别可能很大。

在肺、气道中这些肽类的特异性受体有:VIP受体、NPY受体以及CGRP、NK-1、NK-2、NK-3受体。

作为神经递质的神经肽,须完全符合下列的基本标准

(Said):(1)在神经元中生物合成和存在;(2)浓集在神经末梢及其突触部位;(3)在兴奋、去极化时,以钙依赖方式释放这种神经肽;(4)外源性应用这种肽类时具有相应的有效应的一致性;(5)能和靶细胞上特异性受体相结合;(6)在特异性受体区域被降解、失活或重摄取。前述的气道中的多数神经肽尚只部分地符合这些标准,VIP等个别几个神经肽已被证明完全符合上述标准。

可导致支气管平滑肌收缩的主要有CGRP和神经激肽类。它们共存于肺气道的迷走神经感觉纤维中,这是一种无髓鞘的C纤维,对辣椒素很敏感。很低浓度的辣椒素既可引起C纤维末梢轴突反射释放肽类递质,也能使C纤维末梢受刺激部位直接释放上述肽类,作用于效应器,造成气道平滑肌收缩,小血管扩张、渗出,气道腺体分泌增加,从而使肺通气阻力升高,肺动态顺应性下降,高浓度的辣椒素对C神经纤维产生毒性作用,例如新生动物皮下注射高剂量的辣椒素后,可导致动物体内的辣椒素敏感的C神经纤维功能终生丧失。所以,辣椒素已成为一种研究C神经功能的重要工具药(Maggi)。除辣椒素外,香烟、尼古丁、组胺、机械刺激等许多理化因素可以兴奋肺气道内的C神经末梢,不仅引起向中枢的感觉冲动,还在局部释放神经肽类,产生效应(Fang)。在呼吸道神经中存在的蛙皮素、胃泌素相关肽等可引起大气道平滑肌的收缩(Said)。

能够松弛气道平滑肌的神经肽有:VIP和PHI/PHM、心钠肽等。VIP类递质贮存于副交感节后神经纤维的大而致密的囊泡中,高频电刺激交感节后纤维时,可释放VIP类神经递质。VIP是最强的内源性气道松弛剂,其强度是异丙肾上腺素的50倍(Lundberg)。在人类的VIP能神经中存在PNM,其他哺乳动物的相应神经是PHI。VIP类递质尚有明显的扩张气道血管作用和促进乙酰胆碱引起的腺体分泌作用(Lundberg)。

主要影响血管张力的神经肽有NPY和Galanin。NPY存在于肺和气道的肾上腺能神经纤维中,利血平处理后不仅干扰去甲肾上腺素神经在神经末梢囊泡中的贮存,也可使外周血管的交感神经纤维中的NPY耗竭(Lundberg)。NPY是一种强的血管收缩剂,在肾上腺素能受体拮抗剂存在情况下,对交感神经的高频电刺激,就可显示出NPY释放引起的长时间的缩血管作用。NPY也能作用于突触前膜,调节共存去甲肾上腺素的释放,促进去甲肾上腺素的缩血管作用。

日前,对肺气道中含肽神经及其功能的研究集中在下列方面,在今后一二年中中期得到较大的进展。(1)运用各种技术证实肺气道中各种含肽神经的存在,搞清各种神经肽的化学结构和它们的共存的情况。(2)研究含肽的生理功能和病理生理作用。例如将会证实支气管的高反应性和肺、气道的炎症反应和VIP能神经功能和感觉神经C纤维的外周功能的各种关系。(3)研究共存的神经肽和经典递质的相互调控关系,研究神经肽递质的受体及其激动剂和拮抗剂,有可能发展一些新颖的药物,以调控肽类神经的作用。例如最近发现速尿(Furosemide)能够抑制豚鼠气道中的非肾上腺素能非胆碱能的兴奋性肽类递质的释放(Elwood)。(4)研究神经肽类的降解过程和影响降解过程的因素,也有利于发现和阐明某些肺气道疾病的病理生理。例如已发现炎症细胞能释放降解VIP的肽酶,气道炎症时可能导致气道内的VIP类递质降解的加速,削弱了对胆碱神经收缩气道的“刹车”作用,造成支气管的高敏性。所以对神经肽类降解酶的研究可能有助于肺气道疾病的防治。

(浙江医科大学方理本,杨秋火撰)

**胃肠道神经递质与调节肽** neurotransmitters and regulatory peptides in gastrointestinal tract 研究胃肠道神经分布,神经递质及调节肽的种类、作用,以及递质作用时的相互关系,既对消化道机能的研究,消化道稳态的维持及其对体内外环境变化的适应有一定的理论与应用价值,也对神经网络系统的组成,神经网络中信息的处理及人工神经网络和生物神经网络的研究奠定理论基础,从而为脑科学的研究提供新思路。

1921年,奥地利洛伊(O. Loewi)发现植物神经对心脏的调节是通过末梢释放化学物质而实现的。英国戴尔(H. H. Dale)、卡兹(B. Katz)、瑞典欧拉(U. von Euler)等通过对神经末梢化学递质的发现及递质的储存、释放、失活等机制的研究,建立起了神经递质的概念。

1898年,兰利(Langley)注意到刺激迷走神经,可引起胃舒张。这种效应不能被阿托品阻断,而且表现的更为明显。用烟碱兴奋植物神经节,仍可引起猫胃和小鼠肠的舒张反应。从而表明胃和肠壁内存在有抑制性节后神经元。当时认为这些神经元是肾上腺素能的,以后,有人用胍乙啶和阿托品共同处理后,刺激迷走神经引起胃舒张反应依然存在,表明这种反应既非肾上腺素能,也非胆碱能。以后发现这种抑制性神经广泛地分布于不同动物的不同器官。哺乳动物、爬行动物和两栖动物消化道都有分布。除此而外,在哺乳类、鸟类和两栖类动物消化道还发现有非肾上腺素能、非胆碱能兴奋性神经。这种植物神经第3类型的发现,引起许多学者浓厚的兴趣。形态学研究证明,这类纤维末梢以包含大的颗粒囊泡( $1\ 000\sim 2\ 000\times 10^{-19}\text{m}$ )占优势为特征,而且在囊膜和颗粒轴心之间没有明显的电子透明晕。这第三类纤维末梢的大颗粒囊泡非常类似于脑垂体后叶的肽能神经分泌末梢,1970年,鲍姆加滕根据他的发现,称这类纤维为P型纤维。1978年,布卢姆(S. R. Bloom)等用各种肽的抗血清对消化道肽类进行了研究,发现了一些分泌肽既存在于胃肠道内分泌细胞,也存在于神经组织,他们根据大量的研究,也提出了植物神经中第三类成分为肽类,而对伯恩斯托克(G. Burnstock)等认为是ATP的观点表示否定。

胃肠道神经按其来源和分布,至少分为经典的植物神经和内在神经,前者又包括了交感神经和副交感神经两大类。按其神经纤维末梢释放的递质,可分为肾上腺素能、胆碱能、肽能和各种氨基酸及其衍生物类。由于胃肠道神经种类复杂,递质多样,因此,是生理学研究十分活跃的领域。以往的研究主要集中在发现新的调节肽。调节肽对胃肠道的作用;调节肽作用的形式;调节肽与植物神经经典递质的共存、共释及相互关系这几个方面。

从众多的调节肽作用机理来看,其中有些是以递质的形式发挥调节作用,有的以调质或激素的形式存在。现在被大多数学者认为在胃肠道具有递质功能的肽有P物质(SP)、脑啡肽(ENK)、生长抑素(SOM)血管活性肠肽(VIP)、胃泌素(GAS)、胆囊收缩素(CCK)神经降素素(NT)、神经肽Y(NPY)等,氨基酸及其衍生物有 $\gamma$ -氨基丁酸(GABA)、5-羟色胺(5-HT)等。有人认为,经典递质只能解释30%的突触传递,70%的突触活动可能与肽递质有关。吉尔曼(R. Guillemin)在评价神经肽的意义时指出:当人们认识到,神经生理学等学科的现有概念是建立在缺乏神经肽的知识上的时候,未来的发展必将是革命性的。但是,如此众多的肽递质、调质,它们的生理功能是什么,它们之间有何关系,它们与经典递质之间的关系又是什么,这都是生理学中的重要问题。霍克费尔特(T. Hokfelt)证明,下列肽递质与经典递质共存,5-HT-SP;NE-SOM;NE-ENK;NE-NT;DA-ENK;ACh-VIP以后,又有大量的研究证明递质的共存是一个普遍的现象,消化道也不例外。主辅递质是可以转变的,从而维持动物体机能稳态。

胃肠道神经递质相互作用的研究,较多采用回肠肌间神经丛纵肌(MPLM)。1977年,普伊赫(M. M. Puig)建立了电场刺激诱发ENK释放的模型,范蓬之等用MPLM的进一步研究证明了ENK能抑制回肠纵肌收缩,而且NE对ENK有加强作用,ENK可抑制NE的释放。安书成等人对兔十二指肠的研究,提出NE的抑制作用部分通过调动内源性ENK释放而产生间接抑制作用。ENK作为胃肠道抑制性递质优势于NE。ENK能加强环肌收缩,Acl<sub>2</sub>能加强L-Enk对豚鼠、兔回肠环肌的收缩反应。诺思(RA. North)等人提出ENK通过胆碱能轴突的超极而达到抑制作用。M-Enk使小肠肌电复合波(IMC)发生延迟,频率减少的原因也是它能阻止肠壁内植物神经中胆碱能递质释放。福克斯

(J. E. T. Fox)1987年报道了在狗小肠尤其是空肠M-Enk是电场诱发肌间神经丛产生的非胆碱能兴奋性递质,胃动素(motilin)能引起兴奋性递质M-Enk的释放。安书成等人对两栖动物胃窦和小肠的研究表明,Enk可能作为主要兴奋性递质而代替ACh,而ACh则为调质。由此可见,ENK对胃肠系统的作用,具有兴奋和抑制的双向调节作用,就抑制而言,又可以突触前、突触后或对同一神经末梢内兴奋性递质的调制而发挥作用。

SP是胃肠道肽能神经元释放的一种主要递质,SP能神经元存在于胃肠道管壁各层,属内在神经元。森德勒(F. Sundler)等在豚鼠回肠纵肌的研究表明,SP的作用一是直接作用于平滑肌,促进胃肠运动,二是经壁内神经元间接作用。肖强等人的研究提出了SP与5-HT对回肠有协同作用,SP能神经元可以被5-HT所兴奋,而SP又能促进胆碱能神经末梢释放ACh,从而加强5-HT的作用。

VIP能神经元分布于胃肠道管壁各层,主要作用是舒张胃肠平滑肌,抑制胃酸分泌,并能抑制5-肽GAS、组胺或进食后引起的胃酸分泌,抑制胃蛋白酶和GAS的分泌。促进肠分泌,也有报道在离体状态下,有引起十二指肠和回肠肌的收缩。法伦克鲁格(J. Fahrenkrug)等人通过刺激迷走神经引起血浆中VIP增加的效应不被阿托品阻断,而能被神经节阻断剂消除,证明了VIP能神经元是胃肠壁内的节后神经元。在颌下腺副交感神经支配中,ACh与VIP共存,相互调节。ACh经突触前M受体抑制VIP释放,而VIP与其受体结合后,改变突触后膜ACh受体的构型,提高了ACh与受体的亲和力。1989年马拉卡(H. Y. Manaka)等人在狗的回肠证明ACH能神经元经VIP能神经元对消化道产生抑制,VIP神经元既能反馈了ACh能神经元,又能经SOM产生抑制。在盆神经节中,胆碱能神经元中含有VIP样肽,说明ACh与VIP共存。

SOM能神经元占粘膜下神经丛的17%、在肌间神经丛占3%,沿整个消化道分布。科斯塔(M. Cosat)认为,SOM可能是消化道下行神经元所释放的递质,能抑制ACh释放。激活神经丛中抑制性神经元,并对胃肠平滑肌直接起抑制作用。在肠系膜下神经节中,有SOM与NE共存,向肠道分布。周昌等人通过实验提出,SOM可以介导促胰液素对胃运动的抑制效应。

从食道到大肠都有NT样分泌细胞存在。在回肠粘膜中含量最高。抑制在体胃肠运动和胃酸分泌,但可使豚鼠离体回肠平滑肌收缩。

CCK除引起胆囊收缩和胰酶分泌外,对胃腺有较强的营养作用,并与胰腺的正常生长有关。1989年梅诺兹(D. Menozzi)证明CCK相关肽受体是胃泌素受体。1991年克劳斯(N. Claus)证明CCK与小肠蠕动有关。应用免疫组化方法观察到GAS/CCK纤维可能起源于肠壁,到达肠系膜下神经节。约翰逊(L. P. Johnson)的研究结果为GAS/CCK对狗胃窦部环肌收缩运动具有兴奋作用,这一作用可被促胰液素抑制。

有资料报道,在胃肠道植物神经中,还显示有蛙皮素(BBS)样肽。BBS可使胃酸分泌增加。自1972年以来,有关BBS的报道就更多。恩迪安(R. Endean)和厄斯帕默(V. Erspamer)提出BBS可直接刺激大鼠、豚鼠和猫离体平滑肌收缩。卡普利利(R. Caprilli)的在体实验则表明不同部位反应不同。科瓦列夫斯基(K. Kowalewski)1976年提出了BBS也涉及到胃肠道ACH的释放。也有实验证明小肠粘膜下神经丛有NPY能神经元,这些神经纤维在小肠各层神经丛形成网络。等格纳特(LR. Agnati)的研究证明了NPY通过激活突触前 $\alpha_2$ 受体,对NE能神经元进行突触前抑制。

一些氨基酸及其衍生物在消化道越来越受到重视。研究较多的有5-HT和GABA。5-HT既存在于肠壁内在神经丛、肠神经节,对胃肠道平滑肌有兴奋作用,并呈量效关系。对胆碱能神经元有调制作用。5-HT对平滑肌作用的受体和神经元上的受体不同。在低等脊椎动物,肠内就有5-HT,在哺乳动物肠肌神经丛中发现有由色氨酸合成5-HT的神经元,对吗啡耐受的动物,肠

肌丛神经元对 5-HT 更敏感。如前所述,5-HT 与 SP 在胃肠道相互作用的研究较多。

塞维戴范格(Severdavyanger)等用免疫组化技术证明 GABA 是哺乳动物消化道神经丛中的一种递质。加布里埃尔(R. Gabriel)1990 年报道,认为鸡、蛙、鲤鱼消化道神经丛中均有 GABA 能纤维,并进入环肌层,通过调制附近神经递质的释放来影响平滑肌活动。1985 年,巴托(L. Bartha)和坦卡(L. Tanka)的工作证明 SP 可调制 GABA 对慢兴奋性突触后电位的抑制,SP 也能引起 GABA 的释放。

塔尼亚玛(K. Taniyama)1983 年的研究结果是 GABA 可引起豚鼠回肠释放 Ach。1990 年,希拉卡瓦(J. Shurakawa)发现豚鼠回肠纵肌肌间神经丛标本中,GABA 释放受 5-HT 双重影响,5-HT 促进 GABA 自发释放,抑制电诱发释放。经 5-HT-3 型受体对 GABA 神经元起兴奋作用,经 5-HT-1 型受体抑制 GABA 神经元。玛奇(Maggi)证明,大鼠、豚鼠回肠上有不同 GABA 受体。

植物神经释放的经典递质的作用,从利维(M. N. Levy)1971 年对心脏的研究提出了副交感胆碱能神经与交感肾上腺素能神经相互影响以来,在胃肠道的研究也存在着相互影响的现象。安书成等人对蟾蜍胃窦部的研究,发现了 Ach 对 NE 的抑制有加强作用,Ach 抑制作用是由于 NE 参与的结果。经典递质的双向作用,除递质的相互作用外,不同种属动物及不同消化道受体类型也是关键因素。贝利(D. M. Bailey)及奥克瓦(H. Okawa)奇哈拉(S. Chihara)等人的工作表明,胃壁上有 3 类肾上腺素能受体: $\alpha$  兴奋型、 $\alpha$  抑制型和  $\beta$  抑制型。马峰等人 1990 年报道,大鼠胃平滑肌上的  $\alpha$  受体是兴奋性的,依赖于迷走神经的  $\alpha$  受体是抑制性的,可能位于肌丛中。 $\beta$  受体介导抑制作用,位于胃壁平滑肌上。

综上所述,可以看出,胃肠道神经递质和调节肽对胃肠机能稳态的维持,已引起许多学者的关注,并且取得了显著的成绩。但是,这些研究只是部分递质在部分器官的作用,还没有进行系统的研究。递质和调节肽的双向调节作用的机制以及双向调节与递质之间相互调制的关系,经典递质与调节肽的相互调制,调节肽之间的相互调制,经典递质的相互调制,递质共存共释的生物学意义将是近年研究的热点。从方法上将生理机能、免疫组化和放免测定相结合,用于胃肠道神经递质与调节肽的研究。由于消化道神经元种类多,调节肽分布广将会吸引更多的研究者对消化道调节进行深入研究。除此之外,中枢对消化道的调控,将集中在中枢定位,递质作用及其途径分析方面,也就是脑与胃肠的关系。

#### 参考文献

- 1 Hokfelt T, et al. Peptidergic neurones. *Nature*. 1980, 284: 515~520
- 2 Sundler F, et al. Peptidergic nervous system in the gut. *Clin in Gastroenterol*. 1980, 9: 517
- 3 Baartha L, et al. Search for a physiological role of substance P in gastrointestinal motility. *Neurosci*. 1985, 16: 11~32
- 4 王志均,主编. 胃肠激素. 北京: 科学出版社, 1985. 76~92
- 5 Fox J E T, et al. Activation of endogenous excitatory opiate pathways in canine small intestine by field stimulation and motilin. *Am J Physiol*. 1987, 253(2): G189~194
- 6 韩济生. 神经肽研究中的若干问题. *生理科学进展*. 1988, 19(2): 173~181
- 7 范德之,等. 脑啡肽在豚鼠、兔回肠环肌收缩中的作用. *生理学报*. 1988, 40(1): 91~97
- 8 Manaka H Y, et al. Release of VIP and substance P from isolated perfused canine ileum. *Am J Physiol*. 1989, 257: G182~190
- 9 Gabriel R, et al. Distribution of GABA-like immunoreactivity in myenteric plexus of carp, frog and chicken.

*Histochemistry*. 1990, 94: 323~328

- 10 Claus N, et al. Effects of CCKreceptor blockade on intestinal motor activity in conscious dogs. *Am J Physiol*. 1991, 260: 315~324

(陕西师范大学安书成副教授撰; 苏生珍审)

## 生物化学

**生物化学** 从分子(包括离子)水平研究生命的化学过程的一门科学,是医学、生物工程学、农学的基础,在相当程度上改变了医学、工业与农业的面貌,创造了新兴的生物工程产业,改变了农作物育种的方向。从古生物学到分类学,从免疫学到药理学,从细胞的相互作用到大脑的信息处理,都需要运用生物化学的知识、技术与手段。

在生物化学领域,生物大分子如蛋白质(包括酶)、核酸(RNA、DNA)与复合多糖的结构与功能的关系以及它们的相互作用仍然是研究的中心课题。生命过程中的关键分子是 DNA、RNA 与蛋白质。不论在细菌还是动植物中,生命过程的基本轮廓与原则都是大同小异的,大肠杆菌与人都用同样的构件来构造生物大分子,从 DNA 的基因信息到蛋白质的合成都遵循着中心法则,都以同样的方式合成 ATP。因此,研究模型生物的生物化学可以更容易得到所需要的信息。

生物机体的遗传信息全部“写”在 DNA 中。人体基因组含有 30 亿个碱基对,基因组的 DNA 顺序是一个人从单细胞发育成含有 10 万亿个以上细胞的复杂整体的基础,决定对人类文化至关重要的学习、语言、记忆等智能的因子也编码在 DNA 的顺序中。阐明人类基因组 DNA 的全部顺序将使人们从根本上认识人体所有的生命活动成为可能。当然,单纯地解决基因组的全部顺序还只不过是硬件配置的了解,它的本身并不足解释人类生物学,但是,通过与其它模型生物基因组的比较,将会逐步分析出重要的信息。

重组 DNA 技术将成为生物化学研究中的一项有力的常规技术。随着 DNA 顺序测定技术、DNA 合成技术以及聚合酶链反应技术的成熟,将大大地推动基因表达与基因调控的研究、蛋白质的研究以及生物工程的发展。基因的表达与调控是各种基本生命现象的关键。受精卵如何形成不同的细胞、组织与器官,生长如何受到控制,癌肿、记忆、精神病的分子机制究竟是什么等等问题的最终答案,都有赖于基因的表达与调控的研究。关于分化过程中的基因表达与调控的研究,得到许多可喜的成果。从线虫、果蝇的研究结果表明,由基因编码的一些蛋白质在分化过程中起着控制的作用。20 世纪 90 年代的研究资料,一方面要阐明原核细胞新的表达调控机制和转录终止的调节机制,同时要阐明真核细胞参与遗传信息表达的各个因子,另一方面要进一步研究发育与分化有关的表达调节因子。

重组 DNA 技术使分子遗传学与蛋白质化学紧密地结合起来。蛋白质是生命活动的主要承担者,所有生命活动都与蛋白质有关。同时,蛋白质通过与核酸的相互作用,使得细胞能够充分运用基因组的硬件,创造出各种各样的生物分子,表达各种各样生命现象。人体大约有 10 万种不同类型的蛋白质。由于蛋白质分析技术与 cDNA 克隆技术的发展,蛋白质氨基酸测序分析得到不少进展。然而蛋白质的不同功能起源于它的空间结构。X 光衍射是当今研究蛋白质空间结构最有效的工具。数千种蛋白质的空间结构已经得到阐明。核磁共振研究蛋白质的空间结构近年来有了很大的进展,一批分子量较小的蛋白质的结构已经通过二维核磁共振而得到阐明。随着核磁共振技术的进一步发展,将能积累更多的关于蛋白质在溶液中的空间结构和运动的知识。这方面如果能与蛋白质空间结构预测方法的发展相结合,将成为蛋白质结构研究的另一个里程碑。

微量蛋白质分离分析技术,高分辨双向蛋白质电泳,为比较

原代细胞与转化细胞的蛋白质提供了手段。现有的高分辨双向蛋白质电泳可以比较与分析 2 000~3 000 蛋白质条带,为研究基因表达与调控创造了条件。重组 DNA 技术的发展使蛋白质工程成为现实,一方面可以对蛋白质分子进行改造,另一方面可以开展分子的定向设计,包括合理的新药设计。

膜结构是生物体的基本结构之一。它大约占细胞干重的 70%。细胞间的物质交换和信息传递都要通过质膜来进行。膜上具有多种受体,它们与相应的配基结合后产生一系列的信息传递过程。不论是环化腺苷酸-蛋白激酶系统和蛋白激酶 C-甘油二酯系统还是酪氨酸激酶系统,都与生物膜密切相关。这些调节系统对机体的应激、生长与内环境的稳定都有着重要的作用。癌的形成也与它们有关。细胞内还有各种膜系统,叶绿体起光磷酸化的作用,线粒体起氧化磷酸化的作用,内质网系膜与大多数的蛋白质生物合成有关,核膜则保证染色体的相对独立性和稳定性。由于各种膜系统的存在,细胞实际上被分成许多互相独立而又关连的空间,生物活性分子跨膜的传递在代谢的调节控制上就起着关键的作用,而膜两侧的 H<sup>+</sup> 浓度梯度与膜电位又是 ATP 合成和神经、肌肉兴奋的基础。一些生命现象如受精、免疫、感觉等都与生物膜有关。最简单的离子、H<sup>+</sup> 跨膜传递的机制通过点突变的研究与博里叶转换红外分光光度法的研究已经在细菌视紫红蛋白上得到阐明。这个结果会有助于了解 H<sup>+</sup>-ATP 合成酶的机制以及解偶联蛋白的机制。

生物化学不仅研究生物活性分子的结构与功能,还要研究它们的相互作用。核酸与蛋白质的相互作用更加引人注目。蛋白质是由核酸编码合成的,而蛋白质又调节着基因的表达,在基因表达过程中又需要各种酶蛋白的作用。膜蛋白与磷脂的相互作用是一个重要的方向。一些膜蛋白在装配前是水溶性的蛋白质,但在与磷脂相互作用后形成膜的固有蛋白,催化膜上的向量化学反应。复合糖类在细胞识别上有着特殊的作用,而有的糖脂本身就是膜上受体。

1973 年,重组 DNA 技术的成功开辟了基因工程这个崭新的领域。基因工程的每一步进展都源于生物化学的基础研究,高表达就需要基因表达和调控的知识,分泌型就需要分泌蛋白质生物合成的知识。为了获得有生物活性的表达产物,还需要有深入的蛋白质合成后折叠与二硫键配对的知识。反过来,基因工程与蛋白质工程的广阔前景也促进人们对生物化学基础研究的重视与支持。人类基因组 DNA 顺序测定计划还促进大型计算机在生物化学领域中的应用,基础研究与应用研究是相辅相成的,片面强调一个方面将不利于科学的发展。

生物化学作为生物科学的基础,应该得到更多的重视,才能真正带动其它生物科学,包括细胞生物学与神经生物学以及生物工程的发展。为了使中国生物化学研究在今后能够赶上发展的潮流,应着重考虑的方面是基因表达与基因调控,包括基因的启动、剪切、蛋白质与核酸的相互作用;信息传递过程的分子机制;包括生长因子、基因产物的作用机制;生物能量的转换与物质的跨膜传递;生物模拟,包括蛋白质工程。

(上海生物化学所林其谁研究员撰)

**Baker 酵母与合成手性氟化物** 微生物转化,特别是酵母的中间转化作用,很早就在生产面包、和醇类饮料中得到应用,但这些都是采用混合微生物培养。纯净菌种的培养是 Pasteur 在 1862 年奠定的基础,随后生物化学家进行广泛的研究,并用于有机合成。

生物转化的主要作用是外消旋体拆分,当有几个类似基团时,对其中一个功能团进行选择性的转化,引入手性中心,不活泼碳的功能化。生物转化方法之所以引起人们兴趣的另一个原因,是考虑到能量及对环境污染。

有机化学家在选择一种微生物时,首先必须是易得且价廉的,而 BY *Saccharomyces cerevisiae* 即是易得的微生物。如果想用其他微生物则需要生物学家的帮助。同时,BY 不像整体细胞

那样需费时培养和复杂的分离过程,而且对选择性反应更为专一、使用时只需小规模装置,操作也较简便。

BY 是酶的一类,作为一种蛋白质,它具有蛋白质的物理化学性质,特别是具有 2 级结构(主链原子的局部的空间排列)和 3 级结构(整个分子或亚基的空间排列),这两个高级结构构成 BY 有效的活性部位,它处于分子表面的一个裂隙内,那里具有可以和底物结合并促使底物起生化反应的基因。当 BY 和底物结合后,一部分结合能被用来使底物的某些键发生变化(例如还原或水解等),底物比较接近它的过渡态,因而降低反应的活化自由能,这一点已为 X-射线衍射结果所证实(许根俊,1984)。

BY 和底物的作用是通过生成络合物而进行的,两者的结合主要靠离子间的吸引力、氢键、范德华力和疏水键来维系;同时,BY 具有高度的专一性和立体选择性,因而在不对称合成中表现出令人惊叹的能力。近几年来,BY 不仅仅是用于催化反应,而且已广泛应用于不对称还原、氧化及水解反应。

含羰基的化合物用 BY 进行不对称还原是应用得最广泛的反应之一。1898 年, Wundisch 已将酵母用于将吡喃醇还原成吡喃醇,并由 Macleod 和 Cervinka 进一步完善推广应用。

含氟化合物在自然界存在极少,但它们对药物合成具有潜在用途以及在研究新陈代谢极有价值。例如,当分子中引进一个或数个氟原子后,常常能得到活性更强、选择性更高的药物,农药及其他生理活性物质。药学家在前列腺素中引入含氟基团,可以期望增强生理活性,抑制副作用,并使得化学稳定性和代谢稳定性有所增强(徐泽奇等,1990)。另外,含氟氨基酸具有抗菌活性和潜在的抗癌活性,对肉瘤的生长亦有很强的抑制作用。

酮的还原 氟代酮类化合物被 BY 还原成相应羟基衍生物,1988 年以来研究甚为活跃, Maria 等人采用 BY 制备了一系列手性多氟烷基化合物,其中光学活性的 2,2,2-三氟乙醇具有实用价值,被用作 NMR 的溶剂,测定多种手性物质的对映异构体的纯度和绝对构型,而且还可用于诱导光学活性化合物的不对称合成。为了研究氟代烷基化合物在生命循环中的生物转化作用的需要, Tomoya 借助 BY,以多氟烷基酮、酮酯和乙烯化合物为原料,合成具有光学活性的多氟烷基醇和酯,而乙烯基则被还原成多氟烷基醇。在发酵反应过程中,始终采用 <sup>19</sup>F NMR 进行追踪,检查反应终点,同时还观察到双(多氟烷基酮)对 BY 有较强的抵抗作用,而未能得到还原的醇。这种生物方法已被公认为是合成光学活性多氟烷基化合物的最简便的方法,它提供了将多氟代有机化合物转化成多种光学活性物质的可能性。

1983 年 T. Kutazume 报道,(-)-15-经 BY 作用,可转化成非对映异构体的混合物 16(98.4:1.6),产率 50%;而三氟甲基取代酮 17a-b,在 BY 条件下,7d 内未发现反应发生。

1983 年, Maria 等改进 BY 的发酵条件,即在无糖条件下将底物酮用大量过量的酵母悬浮于少量水中,发现发酵过程不是十分剧烈,反应混合物的总量也没有加糖时(方法 A)那巨大的体积,而且在短时间内(4~24h)就可以得到预期的醇类化合物,产率有明显提高。

反应的立体化学和光学产率,主要受空间影响,而未观察到电子效应,基团的排列次序是, R<sup>1</sup>: CH<sub>3</sub> < CF<sub>3</sub> < CH<sub>2</sub>Br。除了两个苯基衍生物 19d 和 19e 及 19h 外,其他产物的对映体过量都相当高(大于 80%)。

BY 对氟羰基化合物的还原已扩展到不饱和类似物(K. Tomoya, 1984),但当氟原子直接连在碳碳双键上,如酮 23a-d,则主要生成非对映异构体醇 25a-d;而发酵 10d 后,有光学活性烯醇 24a-d 生成。这些结果表明,多氟烷基酮的碳碳双键比碳更易于还原。这是对氟化合物中双键进行不对称诱导反应的新路线。

某些含氟 1,25-二酮 31a g,经 BY 5d 还原后,主要产物为二醇 33a-g,仅有少量的光学活性醇 32a-g;如果反应只进行一天即使之中止,则主要产物为单醇 32a-g。这一引入手性单氟代合成子的微生物方法,为具有较高对映和/或非对映选择性的不对称

诱导作用提供了一条方便实用的途径。

氟代烯酯化合物经 BY 7d 发酵作用,双键还原得十分彻底,分别得到不同的化合物(T. Kitazume, 1983)。1989年, P. Bravo 揭示氟代磺酰酮及羧基化合物是十分有用的含氟手性合成子。同年, Bucciarelli 用 BY 在 25°C 将  $\alpha$ -氟代- $\alpha'$ -一次磺酰、亚磺酰和磺酰酮还原成羧基化合物,所得产物顺式和反式之比以及光学产率列于下表:

| 产物 | 反应时间 / d | 反/顺   | $[\alpha]_D$ | ee/%      | 绝对构型     |
|----|----------|-------|--------------|-----------|----------|
| 4a | 1        | -     | +30.8        | >85       | (S)      |
| 6a | 1        | -     | -9.7         | >80       | (S)      |
| 1b | 12       | 10/60 | -14.4 反      | 20        | (2S, 3S) |
|    |          |       | -22.6 顺      | 50        | (2S, 3R) |
| 6b | 12       | 45/55 | -8.9 反       | 32        | (2S, 3S) |
|    |          |       | -2.6 顺       | 21        | (2S, 3R) |
| 4c | 12       | 10/60 | -19.2 反      | 46        | (2R, 3R) |
|    |          |       | 6.0 顺        | 30        | (2R, 3R) |
| 6c | 6        | 40/60 | -4.1 反       | 18        | (2R, 3R) |
|    |          |       | -1.3 顺       | 8         | (2R, 3S) |
| 4d | (6)      | 65/35 | -52.5 反      | 74        | (2R, 3R) |
|    |          |       | -2.6 顺       | 76        | (2R, 3S) |
| 6d | (6)      | 40/60 | 反            | $\geq 80$ | (2R, 3R) |
|    |          |       | 顺            | $\geq 80$ | (2R, 3S) |

**酮酯的还原** 多氟 $\beta$ -酮酯也同样可经 BY 还原,得到预期产物(D. Seebach, 1984)。同时,单氟化合物被还原成非对映异构体的混合物,产率不高,但非对映异构体的比率合理。其中外消旋-氟乙酰乙酯,还原后可得到 4 种产物。

如果用活性发酵 BY 将  $\alpha$ -氟代- $\alpha$ -甲基- $\beta$ -酮酯还原,制得一些赤式构型的或苏式构型的光学纯  $\alpha$ -氟代- $\alpha$ -甲基- $\beta$ -羟基酯,其中(S)- $\beta$ -酮酯转化成赤型(反式),选择性>99%,而(R)- $\beta$ -酮酯转化成苏型(顺式),选择性>98%。这表明,含氟原子的分子的绝对立体化学控制对生物活性物质的结构有重要影响。反应在 35~36°C 下经 3d 完成,赤型和苏型产物的  $^1\text{H}^1\text{F}$ NMR 谱数据完整。

丙二酸二酯经微生物水解制得具有实用价值的手性合成子(+)和(-)-2-氟-2-取代丙二酸单酯。在生化反应过程中,氟原子表现出无外消旋作用的优点。而以-ce和-Br取代F时,反应未能发生。

总之, BY 在不对称合成中显示出极强的能力。对于一些采用常规化学方法很难合成的高光学活性物质(如上述含氟手性化合物),借助 BY 就很容易完成。因为它在十分温和(通常为室温、中性及常压下)的条件下表现出高度的反应性、特异性和专一性。随着酶的纯化技术、固定化技术向实用方向快速发展,同时,涉及 BY 的实验技术也已相当成熟。

(湖北大学黄锦霞、潘瀚军撰)

**高灵敏度非放射免疫分析** high sensitive nonisotopic immunoassay 免疫分析是一种以被分析物与特异抗体之间反应为基础的分析方法,是生物分析化学中最常用的技术之一。研究抗体-抗原反应的初期,常常使用放射标记蛋白质。1958年, Berson 和 Yallow 发展出一种新的生物医学和临床分析技术—放射免疫分析,开创了超灵敏度免疫分析新领域。用放射免疫分析可以测定  $10^{-9} \sim 10^{-12}\text{g/ml}$  水平的蛋白质和多肽,而且选择性极佳,为多肽、蛋白质超微量分析开辟了新的道路,是生物化学和生物分析化学发展史上一个重要的里程碑。但是 RIA 有一固有缺陷就是放射同位素对环境的潜在影响,使用设备费用以及管理上的问题,促使人们发展新的高灵敏度非放射免疫分析。

酶免疫分析(Enzyme Immunoassay EIA)是 70 年代最先发

展起来的一种非放射免疫分析。它是建立在抗体或抗原可与酶连接,生成了既保持免疫活性又保留酶活力的结合物的基础上的。一般说来, EIA 选择性好,但灵敏度比 RIA 低。酶免疫发展的重要阶段是将可溶性的抗体或抗原连接到不溶性的固相物上,发展成酶联免疫分析(ELISA)。用该法测定某些生物样品其灵敏度已接近 RIA。例如用 ELISA 测定甲胎蛋白和乙肝表面抗原结果相当满意,已成为临床分析常规方法。但在癌胚抗原等分析上则不如 RIA。酶免疫分析的另一个重要进展是 Rubenstein 提出的酶倍增免疫分析技术(EMIT)。众所周知 EIA 中酶标抗原与抗体形成的复合物,酶的活力未变,所以测酶活力前要把未结合的酶标抗原与结合在免疫复合物上的酶标抗原分离才能以分析酶的活力来测定抗体。这种方法通常又称为非均相酶免疫分析。在 EMIT 中,酶的活性是改变的。当特异抗体与酶标抗原(半抗原)结合形成复合物后,复合物中的大分子抗体对酶分子产生有力影响,酶的活性或提高或降低。通常酶标半抗原和它的特异抗体结合以后,复合物中的大分子抗体掩蔽酶的活性,使底物不能接近酶的活性中心,酶的活性被抑制。若在此体系中加入待测样品,它所含的游离半抗原就会与特异抗体竞争结合,把酶标半抗原从复合物中排除出去,酶的活力再现。半抗原的浓度与酶的活性变化成函数关系,即通过测定溶液中酶的活性变化可以定量测定被分析物中半抗原的含量。EMIT 已成功地用于小分子化合物的测定尤其是血药含量的测定,对于大分子抗原的分析研究在进行中。EMIT 中酶活性改变,不需分离只要检测加入抗体及样品前后酶活性的差别,就可以分析出样品中游离半抗原的含量。所以 EMIT 是一种不需分离游离型与结合型酶标化合物的均相免疫分析。方法快速简便、准确,通常几分钟可以完成。但灵敏度低于放射免疫分析。

为了提高非放射免疫分析的灵敏度,人们研究了高灵敏度的发光免疫分析(LIA)。LIA 通常包括荧光免疫分析(FIA),化学发光免疫分析(CLIA)和生物发光免疫分析(BLIA)。发光免疫分析灵敏度高,特异性强,分析速度快,试剂稳定,检测线性范围宽,实用面广。发光免疫分析的确是放射免疫分析以及酶免疫分析的强有力的竞争者。近年来人们研究出有效的增强剂和稳定剂,新的发光体系不断出现,促进了发光免疫分析的研究和应用。其中荧光偏振免疫分析(FPIA)已广泛用于临床分析。

时间分辨荧光免疫分析(TRFIA),由于它既具有 RIA 的灵敏度和选择性又克服了 RIA 放射性的问题,同时线性范围宽,样品用量少,分析准确快速方便。因此被认为是当代最灵敏、最完善,最有发展前途的高灵敏度非放射免疫分析。当含有荧光化合物的混合物被一种发自激光或闪光灯脉冲所激发,则被激发的荧光分子可发出寿命长短不一的荧光。尽管两种类型的荧光都以指数形式衰减,荧光寿命短的可在  $100\mu\text{s}$  内衰减为零。若在激发后  $100 \sim 200\mu\text{s}$  内不测量,所有寿命短的荧光背景信号散射的激发辐射就会消失,那么所有长寿命的荧光信号就能够高灵敏度检测。

具有荧光的络合物产生很大的斯托克斯位移,没有吸收光谱与发射光谱重叠,且在  $615\text{nm}$  仅有很窄的发射光谱,远离了血清的本底荧光。同时,络合物有很长的荧光寿命(约  $600 \sim 100\text{ns}$ ),可用微秒时间分辨荧光法测量,使得背景信号明显减小。

目前以络合物作标记的 TRFIA 分为 Delfia 免疫体系和 Diamandis 免疫体系。Delfia 体系中抗体和抗原直接用  $\text{Eu}^{3+}$  标记,当发生反应后键合的非荧光  $\text{Eu}^{3+}$  被释放,与增强溶液混合,产生一种强的荧光信号。这种体系可用于非竞争和竞争分析法。

Diamandis 体系与 Delfia 体系不同在于(a)标记物以络的螯合剂如 BCPDA 代替了  $\text{Eu}^{3+}$ (b)标记的链抗生素蛋白被用作探针试剂,与生物素化的抗体作为互补试剂代替用  $\text{Eu}^{3+}$  标记抗体(c)荧光复合物直接在干燥的固相上测定,代替了  $\text{Eu}^{3+}$  解离到游离溶液中,在溶液中形成新的复合物再进行测量。

用  $\text{Eu}^{3+}$  标记的时间分辨荧光免疫分析具有很高的灵敏度。



目前可达到  $10^{-13}$  mol/L。由于体系消除了  $\text{Eu}^{3+}$  的外部干扰,因此定量  $\text{Eu}^{3+}$  就不难了。多重荧光标记常被用来提高该法的灵敏度,BCPI/A 的载运蛋白数目可高达 450。

镧系元素中,除铽(Tb)也用作检测部分。现在用到的主要标记物是酶-碱性磷酸酶(ALP),ALP 可以使磷酸从荧光底物 5-氟水杨酸中裂解出来,形成 5-氟水杨酸(5-FSA)。FSA 形成一种具有强荧光的三元复合物  $\text{FSA}-\text{Tb}^{3+}-\text{EDTA}$ 。由于 Tb(比 Eu)具有更长的荧光寿命以及酶放大效应,方法灵敏度高。目前以  $\text{Tb}^{3+}$  标记的时间分辨荧光免疫分析正在发展之中。

非放射免疫分析由于选择性好,无放射性物质影响,而且经济,因此正在经历由高灵敏度非放射免疫分析向超灵敏度非放射免疫分析发展,且以极快的速度应用于临床分析,农业、食品、环境分析及法医等分析领域中。

#### 参考文献

- 1 Yalow R S, Berson S A. *Nature*(London), 1959, 184: 1648
- 2 Engvall E, et al. *Immunochemistry*, 1971, 8: 871
- 3 Rubenstein K E, et al. *Biochem Biophys Res Commun*, 1972, 47: 846
- 4 胡天喜, 陈杞, 陈克明, 等. 发光分析与医学. 上海: 华东师范大学出版社
- 5 Soini E, Kojala H. *Clin Chem*, 1983, 29: 65
- 6 McGuwn L B, et al. *Anal Chem*, 1984, 56: 1400
- 7 Diamandis E P, et al. *Clin Biochem*, 1988, 21: 139
- 8 Reichstein E, et al. *Anal Chem*, 1988, 60: 1069
- 9 Mortor R C, et al. *Anal Chem*, 1990, 62: 1841
- 10 Diamandis E P, et al. *Anal Chem*, 1992, 64: 342

(武汉大学陈震华副教授撰)

**酶联免疫吸附法** 酶联免疫吸附法(ELISA)是一项基本的免疫测定方法。以 ELISA 为代表的固-液抗原-抗体反应体系,大有取代经典的以同位素标记为基础的液-液抗原-抗体反应体系。

抗原包被的质量是影响固-液抗原-抗体反应的重要因素。ELISA 使用的微孔板通常为聚苯乙烯板,它和蛋白质类抗原有较强的相互作用。目前蛋白质类抗原的包被技术已经相当成熟。包被技术的改进主要集中在对聚苯乙烯亲和力和较弱的抗原、短肽、完整细胞及多糖类抗原等的包被上。

半抗原通常以半抗原-载体结合物的形式包被,既能克服半抗原在微孔板上不易吸附的弱点,又为抗原-抗体反应提供合适的空间环境。胡昌勤等在对头孢菌素半抗原的分析时发现,半抗原通常也存在多个抗体结合位点,且各位点在与抗体的结合过程中所起的作用不同,因此和载体结合后,主要抗体结合位点的结构及空间构象不能有太大的改变,否则和抗体的结合作用将减弱。Tiefenauer 等对类固醇类半抗原的研究得出相同的结论,蛋白质是最常见的半抗原载体,但用半抗原-蛋白质做包被抗原存在两个主要问题:包被抗原制备的重现性不好,且贮存中不稳定;易和抗血清(体)发生交叉反应。T. A. Verschoor 等(1990)报道,尼龙(如尼龙 6)可作为半抗原的载体。由 DCC 为交联剂制备的半抗原-尼龙结合物不仅在室温放置稳定,用苯酚-乙醇溶解后即可在微孔板上包被。P. Ordroneau 等(1991)利用戊二醛(GA)将含有氨基的半抗原直接与微孔板连接,并以此为基础建立了可行的 ELISA 操作程序;虽然上述两项研究均克服了用半抗原-蛋白质包被的弱点,但使用下半抗原-尼龙可能更方便。

短肽类抗原在微孔板上的吸附情况差异很大,某些短肽极难包被。M. Zouali 等(1991)报道,利用 UV 辐射处理微孔板可增强短肽在微孔板上的亲和力,包被的情况可用生物素-抗生物素-过氧化物酶技术(G. E. Griesmann 等, 1991)来检测,对某些来源困难的短肽,可将其羧基直接与经修饰的微孔板共价连接(J. S. Ardersen 等, 1990),该方法不仅能减少抗原在包被过程中的丢

失,且使 ELISA 的灵敏度及重现性都有所提高。

对小分子抗原包被的另一新进展反映在对金属元素的包被上。抗金属元素抗体是近年来的新发现, S. M. Clark(1991)采用电子束喷镀法实现了对金属膜的包被,并对抗-被抗体进行了 ELISA 分析。

ELISA 还可用于分析细胞膜表面抗原,虽然某些细胞经空气干燥即可吸附到微孔板表面,但通常需用戊二醛固定细胞。K. Carroll 等(1990)报道,戊二醛的最适浓度(可有效固定细胞,但不引起抗体非特异吸附)和微孔板的材质及检测细胞的特性有关;其最适浓度范围(0.05%~0.025%)非常窄,这些结果有助于对实验条件的选择。

多糖类抗原通常需经化学修饰以增强和微孔板的亲和力,但利用真空过滤技术(S. H. Feng 等, 1991)可使之直接吸附到硝酸纤维素膜(NC)上,包被在 NC 上的抗原可由酶免疫法检测,从而避免化学修饰过程中抗原性的改变。K. O. Smith 等(1991)尝试在经聚四氟乙烯处理的盖玻片上包被抗原,并取得对 HIV 抗体的检测成功,该方法耗用的试剂量仅为 5~10  $\mu\text{l}$ , 费用比所有其它 ELISA 都低。

ELISA 的检出线虽然已经达到  $10^{-8}$ ~ $10^{-12}$ g,但对某些测定仍需有更高的灵敏度。传统 ELISA 中显色剂发色团的吸光度是限制 ELISA 灵敏度提高的主要因素,虽然改用荧光标记或其它化学发光物标记抗体替代酶标记抗体可以提高灵敏度,但它们的应用受到设备条件的限制。提高 ELISA 灵敏度的主要途径是采用酶放大系统,已经有多种酶放大系统,如 M. N. Bobrow 等(1989)的 CARID 法,利用与抗体偶联酶的一级反应,去引发已经包被到微孔板上的二级反应系统,以实现放大作用。R. Leseune 等(1990)利用亲和色谱技术发展了一个新的酶放大系统。用 2 种免疫亲和树脂,在色谱过程中形成酶-抗体-抗原-酶复合物,两种酶的联级放大作用使检测灵敏度大大提高,该方法测定人生长激素的检出限低于  $10^{-15}$ mol。另外,在以  $\text{NAD}^+/\text{NADH}$  循环为基础的酶放大系统中,加入氨基脲试剂可以增加  $\text{NAD}^+/\text{NADH}$  的循环,使该放大系统的灵敏度进一步提高(J. L. Brooks, 1991)。

在不增加设备条件的情况下,改变传统 ELISA 的操作程序也可以提高灵敏度。W. L. Naser 等(1990)介绍的 SIMIT 技术,利用抗体和抗-抗体能形成多层复合物的特性,将预先混合好的抗体、抗抗体-酶一步加入到包被好的微孔板中,经保温洗涤后即可测定结果。该方法可以使 ELISA 的检测水平提高 10~20 倍。如果和振荡-保温系统(R. E. Mushens 等, 1990)结合,还可以大大简化 ELISA 的操作步骤,缩短检测时间,因此很有实用价值。

ELISA 中可发生多种非特异吸附作用,但主要的非特异反应是由于抗体反应体系选择不当所致,不合适的抗体反应体系(如大鼠抗体和小鼠抗体反应系统)引起的非特异反应可导致 ELISA 出现假阳性结果,选择适当的抗体组合(如羊 IgG 和兔 IgG 反应系统)可明显地减少这种非特异反应的发生。实际工作中通常采用一些简单的预处理方法,如用固定化的抗生物素蛋白预先处理抗血清,去除抗体和抗生物素蛋白间的非特异作用;用小鼠的非特异免疫球蛋白预处理血清,减弱其它抗体和小鼠抗体(单克隆抗体)的非特异结合,避免这种非特异反应的发生,在设计一个具体的 ELISA 检测系统时,还应考虑不同封闭蛋白的封闭效果、实验用水的纯度(F. H. Pruslin 等, 1991)、缓冲液的种类及实验中的某些处理步骤等一些细节的影响。总之,设计特殊的实验方法检测特定物质是 ELISA 试验的发展方向。

开发新的免疫试剂,提高免疫试剂的质量,是提高 ELISA 特异性的另一途径。高选择性的单克隆抗体的应用明显地改善了抗体和异质抗原间的交叉反应,筛选高选择性的单克隆抗体技术已经很成熟。目前已能筛选构象特异性单克隆抗体(W. Pfund 等, 1990),单克隆抗体将逐步取代多克隆抗体(血清)在 ELISA 中的应用。新开发的细胞 IgG 结合蛋白 H 已在 E. coli 中克隆并表现。蛋白 H 可选择性地和人 IgG 结合,但没有发现能与 IgM,

IgA 和 IgE 结合。它的另一突出的特点是和牛 IgG 没有交叉反应,从而避免在细胞培养物检测时由牛血清带来的干扰,因而是一个非常有价值的免疫试剂。

ELISA 和其它分析技术的结合,不仅可区分异质抗原间的交叉反应,而且已发展成专门的分析方法,如和电泳技术的融合——免疫印迹技术;和层析技术的融合-层析-ELISA 技术。前者利用电泳技术分离混合抗原,后者通常应用层析技术分离混合半抗原。免疫印迹技术已相当成熟,Harper 等对此已有详细的综述。K. g. Mann 等(1990)报道了一个称之为特异活性部位免疫测定法,该方法利用酶(抗原)对底物的特异性、抗体对抗原(酶)的特异性为双重识别,大大提高检测的专属性,对酶(受体)类抗原的测定提供了新的方法。

ELISA 可用于含量分析,测定时微孔板上同时设有标准样品和待测样品,测试结果的准确性与待测样品的重复数有关。增大待测样品和标准样品的重复数,可提高测定结果的准确率。但同时也减少一块微孔板上能测定的样品数目。D. S. Bunch 等(1990)利用统计学原理,对测试中待测样品和标准样品在 96 孔微孔板上的配置引起的误差情况进行分析,实验中可以根据各自的实验误差要求选择最佳配置。根据 F. H. Pruslin 等(1991)的建议,在含量分析中还应特别留意实验空白值的合理性及作为二抗的抗体-酶用量是否合适,以提高测定结果的精确性。

ELISA 实验设计的另一研究焦点集中在对抗体亲和力的测定上。ELISA 可以方便地测定抗原-抗体复合物的解离常数( $K_d$ ),尤其当抗体的亲和力较低,其它方法不易测定时,ELISA 更显示出其优越性。亲和力测定的 ELISA 方法以 Friguer 法较为成熟。最近的研究资料表明,如抗原中抗原决定簇的密度对亲和力测定的影响(G. P. Holland 等,1991);包被抗原对液相中抗原-抗体反应的影响(S. Hetherington,1990)等,已促使 Friguer 法更加完善,ELISA 测定的亲和力结果已经接近真值。M. F. Hoylaerts 等(1990)利用类似于在二底物酶动力学研究中应用的数学处理方法,在液相中有抗体存在的情况下分析溶液中抗原和包被抗体的结合作用,反应强度和液相中抗体浓度的双倒数曲线呈直线,由不同包被量抗体得出的一组直线的交点即为  $K_d$ 。该方法的主要问题是低浓度情况下常带来试验误差,这种偏差在双倒数做图时又被放大,因此影响对  $K_d$  值的精确测定。V. Chapman 等(1990)对液相中抗体和固相抗原的结合作用进行了分析,结果表明这种结合服从 Langmurian 等温方程,因此被称为 Langmurian 吸附。用 Langmurian 吸附理论可以很好地解释竞争 ELISA 的试验结果。

几项 ELISA 应用研究很值得一提,W. Pfund 等(1990)建立的构象敏感性免疫测定法可用于鉴定构象特异性单克隆抗体,其基本原理为利用变性技术使包被蛋白(抗原)变性,然后利用传统的 ELISA 比较单克隆抗体和变性蛋白及正常蛋白的作用情况,当单克隆抗体仅能与正常蛋白作用而不能与变性蛋白作用,或仅能与变性蛋白作用而不能与正常蛋白作用时,该单克隆抗体为构象特异性抗体。H. Inagaki 等(1990)利用该原理发展了一个对转移生长因子  $\alpha$ (TGF $\alpha$ )的非常特异的分析方法,在三明治 ELISA 中,利用包被的抗 TGF $\alpha$  抗体吸附样品中的 TGF $\alpha$ ,并使吸附后的 TGF $\alpha$  构象改变,此时原先不外露在 TGF $\alpha$  表面的 10~33 位氨基酸序列外露,利用筛选到的位于该位点结合的单克隆抗体与之作用,从而解决了 TGF $\alpha$  的表皮生长因子(EGF)间的交叉反应问题。另一项用于改进淋巴细胞转化试验的 ELISA 方法(P. L. T. Huong 等,1991)是利用制备的 5-溴脱氧尿苷(BrdUrd)抗体,检测细胞复制过程中 BrdUrd 的渗入量,进而测定经抗原处理的淋巴细胞的增殖情况,检测结果与传统的利用  $H^3$ -Tdr 的测定结果相同,但由于所用的设备条件简单,因此使用起来更为方便。

ELISA 技术的发展主要表现为完善和改进已有的测定方法,发展新的测定方法,使测定结果更灵敏、准确,使用范围更广

泛。对新型免疫试剂的开发研究,尤其是利用基因工程、蛋白质工程开发出的超高效免疫试剂,如已开发的既有酶活性又能和抗体结合的变苯儿酚酶/蛋白 A 融合蛋白,将使 ELISA 应用起来更加方便、可靠,这将是发展的主要方向。

(中国药品生物制品检定所胡昌勤副研究员撰)

### 新化学发光免疫分析试剂 new chemiluminescence

immunoassay reagents 1977 年赫尔门(M. Halmann)等将高特异性的抗体-抗原反应与高灵敏的化学发光反应相结合,建立了化学发光免疫分析(简称 CLIA),它是用化学发光物质或酶标记抗体(或抗原),以化学发光反应作最后检测手段,因此,化学发光试剂的性能决定了化学发光免疫分析的灵敏度、选择性、精密性及被标记物的稳定性。

化学发光试剂种类繁多,但是,目前用于化学发光免疫分析的发光剂主要有环酰肼类、吡啶酯类、菲啶酯类、1,2-二氧四环金刚烷类、芳基草酸酯类。

环酰肼类试剂在化学发光免疫分析中最常用的是鲁米诺(Luminol)和异鲁米诺(Isoluminol)衍生物。1928 年阿贝切特(H. O. Alberch)首先合成了鲁米诺,它是最早用于化学发光免疫分析的发光剂之一。用酶或金属络合物标记抗体或抗原后使其催化鲁米诺-过氧化氢的化学发光体系,已广泛应用于化学发光免疫分析。自从卡托(T. J. N. Carter)和怀特赫得(T. P. Whitehead)等人于 1982 年和 1984 年先后发现虫荧光素和合成的荧光素对辣根过氧化物酶-鲁米诺-过氧化氢化学发光体系有明显增强发光作用以来,国外学者又相继研究了噻唑、咪唑、咪唑、苯酚类衍生物作为酶催化鲁米诺化学发光体系的增强剂,其中,6-羟基苯并噻唑和对磺苯酚增强效果最好。增强剂的研究给鲁米诺这一最经典的发光剂用于化学发光免疫分析注入新的生命力,大大提高了灵敏度。

鲁米诺很少用作发光标记试剂,因为它标记抗体或抗原后,对发光体产生空间位阻效应,发光效率降低 10 倍甚至淬灭。1978 年斯可洛得(H. R. Schroeder)等合成了一系列不同碳链的氨基烷基取代的异鲁米诺衍生物,其中 ABEI[N-(4-Aminobutyl)-N-ethylisoluminol],已被广泛应用于化学发光免疫分析,测定对象达几十种。ABEI 分子中的标记功能团氨基与环酰肼母体相隔 4 个碳原子,使得 ABEI 标记抗体(或抗原)后,对发光体的空间位阻效应大大减小,保持了一定的发光强度,同时被标记的抗体(或抗原)基本保持固有的生物活性。1982 年巴特罗(A. Patel)等将 ABEI 与硫光气反应制得 ABEI 的异硫氨基衍生物,用于标记抗体、抗原,被标记的 RIGG 十分稳定,在一 20℃ 贮存数月后,其免疫活性和发光强度几乎不变,(而用  $I^{125}$  标记的 RIGG 只稳定 5~6 周)最低检测浓度为  $10^{-17}$ ~ $10^{-16}$  mol。1984 年格都(A. Gadow)将 ABEI 与 N-羟基琥珀酰亚胺反应制得 ABEI-H,使 ABEI 中的氨基活化,易于标记抗体抗原。1986 年和 1989 年文献相继报导了苯并芘-1,2-二羧酸酰肼-4-丁酸-N-羟基琥珀酰亚胺酯和非环酰肼类化学发光标记试剂。这两种试剂具有较大的共轭体系,大大提高了发光强度,已用于标记抗原和蛋白质等免疫分析。各种环酰肼类试剂在化学发光反应中,都需要加入催化剂,这样背景高、干扰大,使得该类试剂应用于化学发光免疫分析的灵敏度受到限制,用环酰肼类试剂标记的抗体、抗原,其生物活性和发光量子产率都有所降低。

然而,各种吡啶酯类衍生物不需加入任何催化剂,只要加入适当的碱和氧化剂就可激发化学发光反应。1935 年伽略(K. Gleu)合成了光泽精(10,10'-二甲基-9,9'-双吡啶硝酸盐)并发现了其化学发光性质,为研究吡啶类化合物的化学发光性质、应用及机理做出了开创性的贡献。1983 年威克斯(L. Weeks)等合成了用于标记蛋白质的第 1 个吡啶酯。1985 年雷查德逊(A. P. Richardson)等合成了具有氨基标记功能团的吡啶酯,用于测定孕甾酮,方法的灵敏度和精密性与放射免疫分析相近。1987 年哈特(R. C. Hart)等发现先前报导的简单的苯基吡啶酯在  $H^+$  浓

度小于  $10^{-4}$  条件下缺乏较长期贮存的稳定性。1989 年拉乌(S. J. Law)等合成了多取代苯基吡啶酯,利用空间位阻效应改进了简单苯基吡啶酯在较高温度和中性条件下易水解的缺点。同年马克普拉(F. McCapra)等合成了一系列吡啶酯、吡啶硫酯、吡啶羰基磺酰胺,研究结果表明吡啶羰基磺酰胺是一种特别稳定的化学发光标记试剂。1991 年赫曼德(P. W. Hammond)等研究了 9-苯基羧酸酯 10-甲基吡啶酯的 9-位亲核加成反应防止吡啶酯水解的机理,提出用一个不参与环化反应的“保护加合物”与吡啶环的 9-位进行亲核加成反应,形成一种“被保护”的吡啶酯,改变了吡啶环的电子结构,并增加了吡啶酯周围的空间位阻,使羰基更不易受到亲核进攻,由此便得到更加稳定不易水解的吡啶酯。这一研究为合成性能更加优良的吡啶酯发光标记试剂提供了宝贵的经验和理论。1989 年威勒井(M. V. Welzajn)等设计并合成了一类新型的吡啶酯试剂,它与大多数文献报导的通常的吡啶酯试剂不同之处是将其具有标记功能的基团键合在吡啶环的 10-位氮原子上。吡啶酯类发光剂发光效率高、体系简单、背景小,易于标记蛋白质、激素、抗体、抗原,被标记物的发光量子产率和生物活性几乎不损失,检测限可达  $10^{-20}$  mol,是很有发展前途的化学发光免疫分析试剂。

1986 年林·威恩(H. T. Lin Wayne)首先合成了一系列非吡啶酯类化学发光标记试剂,成功地用于标记兔抗 IgG,检测线性范围宽(0.8ng~100ng/ml)其性能与吡啶酯类试剂相似,但近年来非吡啶酯类试剂在化学发光免疫分析中的应用还未得到进一步发展。

1972 年韦琳嘎(I. H. Wieringa)等最早合成了 1,2-二氧四环金刚烷。1985 年傅默仁(J. C. Humenlen)等在这个基础上,改造了金刚烷的结构,在金刚烷环上引进了易与蛋白质偶联的 N-羟基琥珀酰亚胺活化酯功能团,为化学发光免疫分析提供了又一类新发光剂。1987 年斯却帕(A. P. Schaap)等合成了一种萘乙酸酯取代的 1,2-二氧四环衍生物,在室温下与蛋白质共存时能被酶催化引发化学发光,从此,1,2-二氧四环金刚烷衍生物成为化学发光酶联免疫分析的重要发光底物。1989 年勃朗斯登(I. Bronstein)等合成了新的 1,2-二氧四环金刚烷衍生物 AMPPD,用 AMPPD 能够检测溶液中固定在膜支持物上  $10^{-23}$  mol 的碱性磷酸酶。1990 年艾德沃亦(B. Edwards)等又合成了一系列新的萘基 1,2-二氧四环金刚烷磷酸酯发光剂;最近,文献报导了第二代的 1,2-二氧四环金刚烷类发光底物,它是金刚烷环上 5-位取代的衍生物,能防止这些分子的聚集作用,降低了由热裂解引起的试剂背景,改善了碱性磷酸酶测定的信噪比。

由芳基草酸酯、过氧化氢、荧光体构成的过氧草酸酯化学发光体系的量子产率高达 22%~76%。1980 年柯拜西(S. Kobayashi)等首先将 TCPO 的化学发光反应与 HPLC 技术相结合,测定了丹酰氯标记的氨基酸。1985 年宏达(K. Honda)等系统研究了 9 种不同取代基的苯基草酸酯和 19 种荧光化合物的化学发光反应性能和应用。1986 年和 1989 年,艾麦(K. Imai)和耐克西马(K. Nakashima)先后合成了一系列烷氧基取代的苯基草酸酯,这些草酸酯更适合与 HPLC 技术相结合用于化学发光免疫分析。引进表面活性剂能改善芳基草酸酯在化学发光反应的水溶性。目前用于化学发光免疫分析的芳基草酸酯主要有 TCPO、DNPO、TDPO、DOPO;与芳基草酸酯相配合用作标记试剂的荧光体主要有荧光素、荧光素胺、丹酰氯等。芳基草酸酯的化学发光反应也可与酶免疫分析相结合,用于这一技术中的荧光体主要有 DPA 和 ANS 等。

纵观国内外文献,近 10 年来已研制了许多新的化学发光免疫分析试剂,但有待于进一步广泛应用,使其转化为商品用于临床免疫分析。广大医学、生物、化学工作者期待着有化学发光标记的抗体、抗原出售。目前,国外已有几种化学发光免疫分析试剂盒出售,但远远满足不了化学发光免疫分析的研究和临床应用,合成发光寿命长、量子效率高、选择性好、易于标记各种生物活性物质的新化学发光试剂和研制新的化学发光免疫分析试剂

盒是化学发光免疫分析发展的一个主要方向。化学发光试剂结构与性能之间的内在关系也有待于进一步深入研究。

参考文献

- Schroeder H R, et al. Methods in Enzymol, 1978, 58: 427~433
- Gysbert Z, et al. Proc Int Biolumin Chemilumin. Symp. 4th, 1986, 143~146
- Clifford man C. Eur Pat Appl, 1989, 313, 919
- Law S J, et al. J Biolumin Chemilumin, 1989, 4(1): 88~98
- Hammond P W, et al. J Biolumin Chemilumin, 1991, 6(1): 35~13
- Maeda M, et al. Biolumin Chemilumin, 1991: 119~122

(福州大学张帆教授、庄惠生讲师撰)

胆碱酯酶催化反应 cholinesterase catalyzing reaction

胆碱酯酶是一类专性的水解酶,催化胆碱酯类(如乙酰胆碱)及其它一些酯类的水解反应。胆碱酯酶在胆碱能传递和运动神经末梢水解乙酰胆碱(Ach),维持正常的神经活动的机体运动功能中起重要作用。从分子水平上研究胆碱酯酶催化乙酰胆碱或拟胆碱药物的反应动力学和机理,对深入探讨酶的作用功能、酶与底物的作用机制、增强药物临床的实用性等方面均有重要意义。

胆碱酯酶可分为真性胆碱酯酶和假性胆碱酯酶。前者也称乙酰胆碱酯酶(AchE),主要存在于神经之中(特别是胆碱能神经之内)、神经肌肉接头处以及红细胞和肌组织内,对于低浓度(接近生理浓度)的乙酰胆碱和髓甲胆碱的作用最强。假性胆碱酯酶主要指丁酰胆碱酯酶(BuChE),存在神经胶质细胞、血浆和肝脏中,其生理功能尚不十分清楚。

1967 年,略伊肯格(W. Leuzinger)指出 AchE 是一种糖蛋白,含少量的氨基酸和半乳糖胺。1973 年,洛伊肯格获得 AchE 结晶,为研究 AchE 的结构提供了必要的实验材料。AchE 分子量约 8 万,它的一级结构是线性多肽链,其氨基酸组成及酯解部位活性氨基酸附近的氨基酸顺序均已发表。1967 年,洛伊肯格对电鳗电器官的氨基酸组成进行了测定,1972 年罗森伯里(T. L. Rosenberry)等对之进一步修正。1973 年,库曼(V. Kumari)等也先后对金环蛇毒、牛红细胞、电鳗电器官等 AchE 进行了氨基酸组成测定,发现氨基酸含量酸性的为 19%~23%,碱性的为 12%~13%,其余的为中性,因而均为酸性蛋白质。不同来源的 AchE 氨基酸组成相似,亲缘关系越近,相似性越大。

采用  $^{32}$ P 标记的有机磷化合物,使酯解部位酰化基团附近的氨基酸排列顺序得以确定。1959 年詹兹(H. S. Jansz)研究马血清的 BuChE,指出氨基酸顺序为甘-谷-丝\*一丙-甘。而 AchE 活性区域肽片的氨基酸顺序是 1973 年谢弗(W. K. Schaffer)在对电鳗电器官的研究中弄清的:甘-谷-丝\*一谷。

酶分子表面能够识别底物并催化其转变的局部结构即活性区域是在蛋白质的 3 级结构中形成。威尔逊(Wilson)首先提出胆碱酯酶活性区域的模式图,又经后人修正补充。一般认为由酯解部位、阴离子部位及周围部位等组成。酯解部位,即 AchE 使底物水解的催化部位至少由 3 个活性基团构成:碱性亲核基团由组氨酸咪唑基构成,酸性基团由酪氨酸酚羟基构成,酰化基团由丝氨酸羟基构成,酯解部位存在一个埋藏在酶分子内部的解离的门冬氨酸,它吸引组氨酸咪唑氮原子上的一个质子,产生共振效应,使咪唑基上另一个氮原子与丝氨酸羟基上的质子形成氢键,从而增强活性丝氨酸上氧原子的亲核活性,后者与乙酰胆碱中的羰基碳原子结合。1953 年,芒特(L. A. Mounter)观察了巯基试剂对胆碱酯酶的影响,指出胆碱酯酶活性中心不包括巯基。1963 年,尚延冲等通过交叉抑制实验证实:至少对于电鳗的 AchE,巯基是该酶活性区域内的一个活性基团。阴离子部位可能是门冬氨酸或谷氨酸的羧基构成的, AchE 阴离子部位的羧基呈解离状态,而 BuChE 的羧基不解离或解离度很小。1965 年,凯勒(J. C. Keller)

等研究一系列具有不同离子半径的季胺离子与酶的阴离子部位的作用规律,发现当季胺离子具有高度对称性时,特别是具有致密形式时,静电亲和力最强,取代基以丙基最好。因而推论阴离子部位是一个能容纳大约  $0.110 \sim 0.150 \text{nm}^2$  的小腔,腔内有一个点电荷,可与底物的阳离子基团相结合。疏水区由胆碱酯酶活性区域氨基酸的碳氢键所构成,具有明显的亲脂性质,在与底物或抑制剂作用时,可以与其分子中的疏水基团结合,同时排斥亲水性基团,把亲水性基团推向酯解部位,促进反应的发生。1970年,卡兹尼克(M. I. Kachnik)提出 AchE 和 BuchE 活性区域疏水区的模式图,指出阴离子部位各有两个疏水区,酯解部位 AchE 有一个疏水区, BuchE 有两个疏水区。

1980年,维拉泰勒(O. M. Vitatelle)等通过对电辅等动物的胆碱酯酶动力学研究表明,不同种类的胆碱酯酶的一些物理性质明显不同,但它们却具有本质上同一的催化性质。这可能是“内部”多肽皱褶,内部残基顺序相近或相同的缘故。1978年,卡托德(J. Cartaud)指出 AchE 的最小活性单位亚基呈球状结构,直径约  $5 \text{nm}$ ,它具有完全的胆碱酯酶活性。现已确认,每个种属只有一个亚基,每个亚基只有一个活性部位。各个活性区域独立起催化作用,亚基间相互作用不敏感,催化活性都是相等的。

1975年西尔曼(L. Silman)指出,由于在天然状态下与膜结合的 AchE 活性区域反折进去形成一个半封闭的囊腔,因此构成一个微环境。微环境中  $\text{H}^+$  浓度及底物梯度的形成,对膜结合的 AchE 的活性影响很大。

真性胆碱酯酶和假性胆碱酯酶催化胆碱酯类底物的水解反应速率是不同的。一般来说, AchE 催化胆碱酯水解速度顺序是:乙酰胆碱 > 丙酰胆碱 > 丁酰胆碱,并能专一地催化水解  $\beta$  甲基乙酰胆碱。而 BuchE 催化胆碱酯的速度顺序则与 AchE 相反,它却能专一地催化水解苯酰胆碱。不同种属动物的非特异性胆碱酯酶在底物专一性方面有一定的差别。

人们一直试图从微观上揭示胆碱酯酶与底物相互作用的本质,但由于酶催化反应受到诸多因素的影响,从分子及电子水平上对于其本质探讨并不乐观。

1938年,泰勒(Taylor)已经尝试用电子极化效应来说明酯酶的反应机制。1962年,科什兰(D. E. Koshland)指出酶反应中邻近效应和定向效应的重要性。1970年,他进一步提出轨道取向,认为酶活性中心和底物的电子轨道进行高效的轨道取向,造成反应以  $10^4$  数量级的加速。1971年,布鲁斯(T. C. Bruce)等对轨道取向的设想提出疑问。1973年,梅山以具体酶为例,认为轨道取向在酶催化反应中是很重要的,由于丝氨酸残基-OH 离解成  $\text{O}^-$ ,“攻击”底物的羰基碳,亲核攻击阶段是反应速度的限制步骤,因而取决于  $\text{O}^-$  的  $p$  轨道和羰基碳的  $p$  轨道电子轨道重叠的稳定性,随着轨道取向变坏,能量急剧变化,对应于  $10^2$  约达  $0.75 \text{eV}$  之多。

1973年,费雷拉(R. Ferreira)应用轨道对称性的设想来解释酶反应机理,认为底物与酶的活性中心之间的电子移动使反应物到产物的过程对称性禁止变为对称性允许。

关于 AchE 催化反应动力学的研究,近年来认为酶与底物首先形成米氏络合物  $\text{R}-\text{C}(=\text{O})\text{X}\cdots\text{E}\cdots\text{OH}$ ,进一步形成诱导契合复合物(四面体中间体),其随底物酯键的断裂,胆碱离去,生成酰化酶,酰化酶最后水解,酶活性得到恢复。1975年,罗森伯里提出一个 AchE 诱导契合模式图,在低浓度 Ach 为底物时,米氏络合物的生成是限速步骤,在高浓度 Ach 为底物时,去酰化反应是限速步骤。限速步骤因底物及反应条件的变化而不同。AchE 亚基间没有协同反应,但配体结合在周围部位可导致亚基内活性区域的别构效应。

1963年,米泽贞次郎等首次从量子化学分子水平上研究了胆碱酯酶催化水解反应,他们以二甲胺基乙酸乙酯与胆碱酯酶的反应体系作了简单的 HMO 法讨论,粗略计算在过渡状态附近产生酶与底物间电子移动模式的非定域能,并与实测的活化焓比较,较好地吻合。但他将此体系作为完全的共轭体系来处理,并

忽略  $\sigma$  电子的作用。

1987年赵成大等认为,从电子水平看,胆碱酯酶催化作用的实质乃是诱使参与反应的前线轨道处在空间定向化和使 MO 的对称性适应化的协同效应的结果,降低了活化能,底物水解速度加快。

1991年,苏忠民等通过量子化学半经验 CNDO/2 方法,采用模型分子计算胆碱酯酶与乙酰胆碱及同系物的相互作用能,探讨了胆碱酯酶催化水解乙酰胆碱同系物的规律,进一步证实轨道取向在酶化反应中的适用性,把轨道取向、非定域能与水解速度、药效等有机联系起来,指出在催化反应中活性中心的组氨酸残基侧链咪唑与丝氨酸的羟基原已形成的较牢固的氢键,在羟基进攻底物羰基过程中逐渐减弱,羟基氢逐渐迁移至咪唑端,而底物的胆碱部分随羟基-O 的进攻而协同地离去。

尽管像溶菌酶等酶的结构已通过 X 射线衍射方法得以确定,但胆碱酯酶的微观结构尚未全部弄清。从分子水平探索催化反应机制和模拟应用仍有待发展。随着人们对胆碱酯酶分子结构和生理生化功能研究的深入,高分子模拟功能酶应用于催化将是一个意义十分巨大的课题。有效控制生物体内乙酰胆碱含量,抗胆碱酯酶药物、拟(或抗)胆碱药物的设计与研制也将更活跃。测定分析酶结构和热力学实验手段如 X 射线衍射、核磁共振等也将取得进展。有机磷等对人体、动物甚至植物体中的胆碱酯酶有很强的抑制作用,随着酶活性被抑制的毒理的揭示,高效有机农药的合成与筛选工作也将得到推动。采用量子化学方法,从底物与胆碱酯酶间的电子移动、分子轨道间相互作用等角度研究酶的催化作用,可能是今后研究酶反应的一种饶有兴趣的工作,并随着计算机的发展而逐渐深入展开。

#### 参考文献

- 1 Leuzinger W. Proc Natl Acad Sci. U S A, 1967, 57: 46~451
- 2 Rosenberry T L. Proc Intl Meeting Split Croatica Chemica Acta, 1975, 235~240
- 3 米泽贞次郎. 量子化学入门. 东京: 化学同人, 1963. 275~280
- 4 孙曼琴, 周廷冲. 生物化学与生物物理进展, 1981, (3): 1~14
- 5 苏忠民, 崔瑞海, 王荣顺. 催化学报, 1992, (2): 138~141

(东北师范大学苏忠民博士撰; 王荣顺审)

### 蛋白质的三维结构与功能

三维结构亦称空间结构或立体结构,蛋白质的三维结构是指构成蛋白质分子的原子或基团在三维空间中的相对位置和排布,也就是蛋白质分子在三维空间中的立体形象。随着生命科学研究的进展,人们对构成生命的两大类基本物质——蛋白质和核酸的研究和认识已进入分子水平。生物大分子的结构与功能关系也只有分子水平上才能得到揭示和阐明,这就需要首先获得生物物质在分子水平上的结构信息。蛋白质的结构通常被分为 4 个层次,即一级结构(氨基酸顺序和二硫桥的位置),2 级结构( $\alpha$ -螺旋、 $\beta$  折叠等基本结构肽段),3 级结构(2 级结构在三维空间中的相关排布,包括构成分子的基团和原子在三维空间的相互关系),和 4 级结构(构成分子的亚基或结构域的组装方式);其中 2、3、4 级结构反映不同层次的三维结构信息。

任何蛋白质,无论它具有何种生物学功能(简单或复杂),其生物学功能的发挥无不取决于分子特定三维结构和运动行为,分子生物学的许多研究结果都表明,在一级结构不变的情况下,即构成蛋白质的氨基酸的组成顺序不变的情况下,仅仅因为三维结构的变化,即组成分子的原子或基团在三维空间排布的相对关系的变化即可导致蛋白质生物功能的改变甚至完全丧失(如蛋白质的变性等);这就是说,蛋白质分子特定三维结构是决定其特定生物学功能的必不可少的重要条件;正因如此,蛋白质的三维结构与功能研究已成为当代分子生物学的核心问题之一。

20 世纪 50 年代末,肯德罗(John Kendrew)和佩鲁茨(Max Perutz)分别测定了肌红蛋白的和血红蛋白的三维结构,这一点

越工作成为分子生物学发展史上的一个里程碑,其意义在于:(1)证明了X-射线单晶衍射方法可以测定蛋白质这类生物大分子的三维结构,标志蛋白质晶体学的正式诞生。(2)在已测定的血红蛋白分子的三维结构的基础上,阐明了血红蛋白分子结合氧的协同性和变构作用的分子机制,把蛋白质的结构与功能关系研究推向一个崭新的阶段。这一成就极大地刺激并推动了蛋白质晶体学的全面发展。在此后的30年中,与生物大分子三维结构测定和结构与功能关系研究有关的方法和技术均有长足进步,如生物大分子的单晶培养已摆脱盲目探索的阶段,开始总结出一些可循的规律和有效的方法,有的实验室已开始采用计算机控制的自动的或半自动的机器人代替重复的人工操作;在X-射线衍射光源方面,由大功率的转靶X-光机代替了普通的X-光机,单色性好,功率更大的同步辐射光源也开始被普遍利用;收集衍射数据的方法由传统的回摆照相法发展到普遍使用的四圆衍射仪;到80年代,包括image plate在内的各种面探测仪已先后被各有关实验室所采用;在蛋白质单晶结构分析方法方面,经典的多对同晶置换法仍不失为解决相角问题的最有效的手段,然而,一些新的方法,如分子置换法、单对同晶加反常散射法、分解反常定相法(RAP)也已成熟并在结构测定中发挥特殊的作用;计算机的发展(包括软件和硬件),如大型计算机(super computer)和图象系统(graphic)的使用和普及,不但极大地提高了分析和计算的速度,也使原来无法实现的超大分子的复杂运算和分析成为可能。方法和技术的进步,给蛋白质晶体学带来的直接影响是使结构测定和分析的速度大大的加快。截止1990年底,存入美国Brookhayen蛋白质数据库(protein data bank)的蛋白质结构数据已达597套,到1991年6月为686套,而到1991年底,该数据库收集的生物大分子结构数据已达790套,存入数据总数所表征的上升趋势更是令人振奋的,这表明人们在认识和揭示生物大分子结构与功能关系奥秘的征途上所付出的劳动、艰辛、追求和收获。在1990年召开的第15届国际晶体学大会上,有关生物大分子三维结构的论文达400多篇,提交大会的全新结构达20个。此次会议集中体现了进入80年代末90年代初,在生物大分子三维结构与功能研究领域的进展和趋势。一批具有重大意义、高难度的、有广泛应用前景的结构研究课题相继被突破,如与爱滋病有关的HIV-1(人免疫缺乏性病毒-1)、CD4(一种与HIV有很强结合能力的糖蛋白)和口蹄疫病毒(foot and mouth disease virus)等。作为80年代蛋白质三维结构与功能研究的突出代表,特别值得提到的是由Micher, Deisenhofer 和 Huber 等人成功地解决了一种膜蛋白质——紫色甲单胞菌属光合细菌反应中心蛋白的结晶问题,测定了该光合细菌的色素分子与蛋白质复合物的三维结构,并进而揭示出其光合作用的反应机制,无论是对光合作用研究,还是对膜蛋白质研究和蛋白质晶体学研究,这一成就都具有重大意义。

在认识和揭示生物大分子的三维结构与功能关系的努力中,中国科学工作者也作出了自己的贡献。1970年、1973年北京胰岛素晶体结构研究组分别完成了 $2.5 \times 10^{-10}m$ 和 $1.8 \times 10^{-10}m$ 分辨率的三方二角猪胰岛素的结构测定,到1990年已完成12个胰岛素类似物的结构测定,并在此基础上对胰岛素分子与受体的相互作用的可能机制提出新的观点,天花粉蛋白和某些酶及其抑制剂的三维结构相继测定,标志着中国的蛋白质晶体学研究基础已经建立。

为确定蛋白质的三维结构,除了已经成熟的并被广泛应用的X-射线单晶结构分析手段之外,人们也在一直探索和研究其它的有效手段,其中二维核磁共振技术(NMR)和扫描电镜的三维重组技术,均在探测生物大分子三维结构信息方面显示了其特有的优点和广泛的应用前景。80年代出现的蛋白质工程为利用和改造蛋白质开创了新路,各相关学科包括分子设计、分子动力学和蛋白质肽段折叠理论研究等的发展和现代科学技术手段的更新和完善,必将更加推进蛋白质三维结构与功能关系研究的深入发展,为探索和认识生命现象的奥秘提供更多更有价值的信

息。

参考文献

- 1 Seong - Eon Ryn, et al. IUCr XVth Congress, Bordeaux, 1990; C-180 MS-03 08 07
- 2 Jiahua! Wang, et al. Nature, 1990, (348): 411~418
- 3 D Stuart, et al. IUCr XVth Congress, Bordeaux, 1990, C3 M1 03 6
- 4 J Deisenhofer, O Epp, K Mikl, R Huber, H Michel. Nature, 1985, (318): 618~624
- 5 J Deisenhofer, H Michel, R hube. TIBS - June, 1985; 243~248
- 6 梁栋材,等. 中国科学(B), 1991; 715~723

(中国科学院生物生理研究所常文瑞研究员撰; 梁栋材审)

蛋白质晶体学

用晶体衍射方法(主要是X射线衍射)测定蛋白质的三维结构并研究蛋白质三维结构与功能关系,称之为蛋白质晶体学。蛋白质晶体学所采用的方法与技术同样适用于研究其它生物大分子,故又有生物大分子晶体学之称。X射线衍射方法测定的生物大分子晶体结构数据是迄今为止生物大分子三维结构信息的主要来源。生物大分子三维结构与功能关系的知识对于理解生命的本质有极其重要的意义。

蛋白质晶体学经历了很长的发展过程。根据蛋白质和核酸纤维的衍射数据,结合结构化学与生物学知识,人们对这两类生物大分子的立体结构进行了推测。1951年, L. Pauling 提出蛋白质 $\alpha$ 螺旋结构模型; 1953年, J. D. Watson 与 F. H. C. Crick 提出脱氧核糖核酸(DNA)双螺旋结构模型; 这两项里程碑式的工作成果,是人类认识生物大分子三维结构的重大突破。但是,生物大分子三维结构的直接测定有赖于单晶体X射线衍射方法的发展。虽然早在1934年人们就知道蛋白质晶体能产生X射线衍射(J. Bernal),但经过20年的努力之后,才找到解决蛋白质晶体X射线衍射相位的方法——同晶置换法。M. F. Perutz 与 J. C. Kendrew 于20世纪60年代末分别测定出血红蛋白的与肌红蛋白的晶体结构,使人们第一次“看”到了蛋白质分子中成千上万个原子在空间配置的真实图象,开创了用实验方法直接测定生物大分子三维结构的新时期。X射线衍射法测定蛋白质晶体结构包括培养高质量单晶体,收集数以万计的衍射数据,求解X射线衍射位相,计算电子密度图并从中识别结构以及结构的精化等一系列复杂而又费时环节。自第一个蛋白质结构问世以来,X射线衍射技术的这许多环节都得到革新和完善。目前,同步辐射强X射线源和二维型衍射数据记录装置的出现,使收集一套蛋白质数据的时间从几个月缩短到几个小时;在相位求解方面,同晶置换法作为求解未知结构的基本方法日臻完善,同时还发展了一种新的有力的分子置换法,可以借助某个已知的类似结构求解未知结构,也可以通过亚基电子密度平均使多亚基蛋白质结构的解析得以简化;在结构精化方面,立体化学制约最小二乘程序、分子动力学模拟“退火”技术的XPLOR程序以及计算机控制图象系统上的人工调整结构模型技术都很有威力,目前结构测定的精度可达 $0.1 \times 10^{-10}m$ 以上,最高分辨率可达 $1.5 \times 10^{-10}m$ 以上;由于这些方法与技术的进步,蛋白质晶体的X射线衍射已成为一个比较常规的结构分析手段。

随着X射线结构分析方法与技术的长足进步,越来越多的新蛋白质结构相继被测定,发表的新结构数量逐年增多,截至1990年7月,存入蛋白质数据库中的原子坐标达503套,其中独立的结构约300个,有代表性的例子列举如下:1965年, D. C. Philips 测定了第1个酶——溶菌酶结构,开创了蛋白质晶体学中最大一类蛋白质的晶体结构分析; D. C. Hodgkin 小组与北京胰岛素晶体结构研究组于20世纪60年代末至70年代初分别独立完成第1个蛋白质激素——胰岛素的结构分析;蛋白质晶体学已扩展到抗体抗原、电子转移蛋白、毒蛋白等其它许多重要研究领域。核酸是另一类最重要的生物大分子。70年代初测定了第1

个核酸——转移核糖核酸(r-RNA)结构;70年代末陆续报道了若干合成的寡聚脱氧核糖核苷酸的单晶结构分析,揭示出脱氧核糖核酸双螺旋结构的许多细节和结构的多变性。病毒是由核酸与蛋白质组成的复合大分子,分子量以百万计。70年代末报道了3个小植物病毒蛋白外壳的结构。80年代中叶, M. G. Rossmann又成功地测定了分子量850万的感冒病毒蛋白外壳结构。同一时期, H. Michel等克服结晶的困难,解出第一个膜蛋白——光合成反应中心蛋白(Rhodospseudomonas viridis)的结构。这两项研究代表了蛋白质结构分析的最高水平,为世人所瞩目。

大量的蛋白质结构数据和生物化学、物理化学资料相结合给出了丰富的蛋白质三维结构与功能关系的知识,揭示出多种生物大分子发挥作用的结构基础,如蛋白质晶体学家对比氧合的与无氧合的血红蛋白晶体结构分析结果,阐述了血红蛋白与氧结合的别构作用的分了机制;根据酶及其与底物类似物或抑制剂复合物的结构分析,提出许多酶催化机制的学说;从抗体及其与抗原复合物的结构分析中开始了解到有关免疫系统是如何识别及抵抗外来分子的;从转录调控蛋白及其与操纵基因(DNA片段)复合物的结构中,了解到这类蛋白质是如何识别操纵基因并调控基因转录的;病毒的结构则直接显示病毒这一类大分子聚集体的自我装配方式。蛋白质晶体学大大深化了人们对蛋白质进化与折叠等基本原理解。比较来自不同种属的同一蛋白质的晶体结构发现,在蛋白质进化过程中三级结构比一级结构更加保守,以三维结构信息为基础进行分类会更好地反映分子进化的过程。已有结构信息提示,蛋白质三维结构虽然相当复杂,但存在一些共同的肽链折叠模式,较大的蛋白质分子常折叠成两个或更多一些接近球状的结构单位——结构域(domain)。按照主链二级结构类型及其相互排列方式,可将结构域分成全 $\alpha$ 型的、全 $\beta$ 型的、 $\alpha+\beta$ 型的、 $\alpha/\beta$ 型的、和卷曲型的等5种基本类型。

虽然蛋白质晶体学已有几十年的历史,但仍处于鼎盛时期。在生物大分子结构分析方法方面,今后相当长时间内晶体衍射法仍将占主导地位并得到进一步发展。可以预料,X射线结构分析的薄弱环节——结晶问题将得到更大重视;多波长反常散射法有望成为长期以来所寻求的新相位测定技术;时间分辨的晶体学研究将走向成熟,它利用同步辐射强X射线光源和劳厄法快速记录衍射数据,可以测定生化反应过程中瞬时存在的中间体结构和快速构象变化。此外,还可以预见与其它结构测定方法紧密结合相互补充的前景。如二维核磁共振测得的溶液构象、电镜三维重组得到的低分辨率结构以及理论计算的结构模型等可作为X射线衍射分析的初始结构模型,然后通过一些运算获得精确的三维结构。在结构研究方面,预计今后10年将快速发展并可能获得许多重要结构信息的前沿领域有:(1)膜蛋白结构,旨在阐明物质、信息、能量传输过程中的分子机制;(2)大分子聚集体结构,即病毒、核糖体、核小体等结构,以了解具有高度完善、复杂功能的生物组织的结构特点;(3)生物分子折叠、识别等基本理论问题的结构研究。当前,蛋白质晶体学已走出纯基础理论研究的范畴,它与理论化学、药物化学或基因工程等科学或技术互相结合产生两个新的有重要应用前景的研究领域,一个是蛋白质工程,一个是以生物大分子结构知识为指导的药物分子设计。这两个领域在今后10~20年无疑将得到充分发展,将出现一批有实际经济效益的研究成果。可以期望蛋白质晶体学将对生物技术的许多方面发挥越来越重要的作用。

#### 参考文献

- 1 Pauling L, et al. Proc Nat Acad Sci, Wash, 1951, 37: 205
- 2 Watson J D, Crick F H C. Nature, 1953, 171: 737
- 3 Perutz M F, et al. Nature, 1960, 185: 416
- 4 Kendrew J C, et al. Nature, 1960, 185: 422
- 5 北京胰岛素结构研究组. 中国科学, 1974, 6: 591
- 6 Blundell T L, Johnson L N. Protein Crystallography. Academic Press, 1976

- 7 Schulz G E, Schurmer R H. Principles of Protein Structure. Springer Verlag New York Inc, 1979
- 8 Blake C C F, Johnson L N. TIBS, 1984, 9: 147
- 9 Eisenberg D, Hill C P. TIBS, 1989, 14: 260

(中国科学院生物物理研究所博士生导师  
林政炯研究员撰;毕汝昌审)

**CD4 抗原** 1983年第5次国际免疫学代表大会采用CD (cluster of differentiation)代表人白细胞表面抗原分化群, CD4即是其中一种极为重要的见于胸腺细胞和成人T细胞表面的分化抗原。CD4是一种非多态性的55kd糖蛋白,在人和小鼠中又分别称之为T4/Leu3和L3T4抗原。其主要功能为:(1)与抗原递呈细胞(APC)上的Ⅱ类主要组织相容性复合物分子(MHC)的单态决定簇相结合,从而增强细胞—细胞相互作用的亲和力;(2)CD4糖蛋白是一种可能介导细胞外源信号的动态实体,在穿膜信号传导中起作用;(3)携带CD4的T细胞称之为CD4<sup>+</sup>细胞或T<sub>H</sub>淋巴细胞,能向B细胞提供激活信号,或诱导带(CD8标志)的T细胞转变为细胞毒/抑制细胞,因此在免疫系统中起重要作用;(4)人CD4是获得性免疫缺陷综合征(艾滋病)病原体人免疫缺陷病毒(HIV)的受体,是HIV侵入细胞的门户。CD4分子在T细胞功能中的作用及其与HIV感染的关系,使其成为当今分子生物学研究的热点之一。

近年来,CD4研究中的突破性进展首推CD4基因结构的阐明,随后证明CD4抗原是免疫球蛋白(Ig)超族的成员。1985年,麦顿(Maddon)等首次分离出长约3kb的CD4cDNA,测定了核苷酸序列。证明其最长开放阅读框延伸1374个核苷酸,成熟CD4由435个氨基酸组成。1986年,亚索伯(Issobc)等确定CD4基因组长约33kb,由9个外显子和7个内含子组成,定位于12号染色体短臂,同任何已知Ig基因家族的座位不相连锁。1987年,利特曼(Littman)等证明CD4多肽由5个胞外功能域(E1, E2, E3和E4)、一段疏水穿膜残基(TM, 31个氨基酸)和一段40个残基的细胞浆内尾部(C)组成。成熟CD4mRNA编码一个带氨基端疏水信号肽序列的蛋白;信号肽之后是一同Ig轻链可变区(V)具有广泛同源性的功能域(E1, 99个氨基酸残基),在氨基酸序列和预测的2级结构两方面的同源性表明,此区在其折叠模式上同Ig可变区十分相似。CD4其余270个胞外氨基酸与数据库中的其它蛋白质无很强的同源性。1987年,克拉克(Clark)等将这段长序列分成3个功能域,也同Ig家族功能域特别是多聚Ig受体区域具有某些结构同源性。在E1和E3区各有两个在人和大鼠中均很保守的半胱氨酸残基,可能与域内二硫键形成有关。此区每域皆由分开的外显子编码,表明它们在糖蛋白中的确形成不同的功能域(E2—E4)。CD4与其它Ig家族成员的突出区别是其与IgV区相似的E1功能域由两个分开的外显子编码。

早期,人们对CD4糖蛋白的兴趣集中在其作为T细胞分化标志方面。T细胞的异源二聚体受体(TcR)在双负(CD4<sup>-</sup>, CD8<sup>-</sup>)细胞上不存在,但见于50%的双正(CD4<sup>+</sup>, CD8<sup>+</sup>)细胞和所有成熟的单正胸腺细胞。现仍不清楚成熟的胸腺细胞是来源于TcR+双正细胞还是来源于未成熟的双负前体;前一种可能性提示先表达的基因或其产物在发育期间可能被关闭。1986年,兰尼尔(Lanir)等揭示外周T细胞中有小部分双负细胞,以其CD3<sup>+</sup>表型无表面 $\alpha\beta$ 受体二聚体存在而与胸腺中大多数双负细胞相区别。这些细胞似乎表达TcR的TY链且与CD3复合物相缔合。阐明这些细胞在缺乏CD4和CD8表达时的功能与特异性,可能有助于确定CD4和CD8在胸腺内发育期间的作用。

20世纪80年代中期,本杰明(Benjamin)等指出CD4和CD8在胸腺细胞发育中的潜在作用。1985年,克鲁斯贝克(Kruisbeek)给新生鼠注射抗Ⅱ类MHC分子抗体阻断Ⅱ类限制性CD4<sup>+</sup>细胞的发育,表明在胸腺成熟期间变成CD4<sup>+</sup>的细胞和

II类MHC分子之间存在相互作用。其他学者在体内研究中证明:同时给动物注射免疫抗原和CD4抗体将导致动物对抗原的持久耐受性。同年,沃尔德尔(Waldor)等指出这一途径可用于免疫应答的抗原特异性阻断(Antigen-Specific abrogation of immune responses),并已成功地用于逆转小鼠自身免疫性实验性变态反应脑脊髓炎。某些研究者认为,在TcR-抗原相互作用的亲和力不足以引起T细胞激活时可能需要CD4和CD8作为辅助分子,分别同II类和I类MHC分子的不变区结合,以增进细胞-细胞亲和力,促进T细胞的激活。

CD4不仅与MHC识别有关,还可能在穿膜信号传递中起重要作用。1986年,埃姆瑞奇(Emmrich)等证明CD4在佛波醇酯处理之后发生内化(internalization),而内化则伴有一个胞浆内丝氨酸残基的磷酸化;并证明CD4的磷酸化与表皮生长因子受体及其它受体的磷酸化相似,即其内化遵循蛋白激酶C介导的胞浆内丝氨酸或苏氨酸残基的磷酸化方式。1991年,亚伯拉罕(Abraham)等指出,CD4胞浆内功能域同一种淋巴专一性56kd蛋白酪氨酸激酶(P56<sup>lck</sup>)相互作用,可能参与CD4激活T细胞的功能。

80年代中期,许多研究者指出HIV的组织趋向性依赖于靶细胞上CD4抗原的表达,CD4糖蛋白至少构成T细胞与单核细胞/巨噬细胞上HIV受体的一部分,可能也是中枢神经系统细胞的HIV受体。HIV入侵非淋巴类细胞还可能受CD4以外的受体,如Fc受体的介导,但是感染效率只有CD4<sup>+</sup>细胞的万分之一。艾滋病免疫功能障碍主要是由于CD4<sup>+</sup>T细胞因HIV感染破坏而从循环中消失所致,体外实验资料已证明,只有CD4<sup>+</sup>T细胞才容易被HIV感染。1986年,麦顿(Maddon)等证明人细胞系由于能表达转染的人CD4抗原而获得结合并内化HIV的能力,从而直接证明CD4结合在HIV感染中的重要作用。1987年,科瓦尔斯基(Kowalski)等利用突变分析证明CD4结合于HIV膜糖蛋白gp120羧基侧。同年,拉斯基(Lasky)等发现gp120的412~421氨基酸残基区域直接同CD4结合相关,缺失则导致结合力完全丧失。科学家们根据CD4同HIV结合的特性,研究下述治疗艾滋病的途径:(1)80年代末期,美国一些学者利用遗传工程大量生产的可溶性CD4(sCD4)同CD4<sup>+</sup>T细胞竞争结合HIVgp120,干扰HIV同CD4<sup>+</sup>T细胞的结合,从而阻断HIV感染;与此同时却并不干扰膜上CD4<sup>+</sup>同其天然配基II类MHC的结合;(2)1989年,卡彭(Capon)等设计出CD4与IgG的Fc段结合而成的CD4免疫粘附剂,可以阻断HIV对淋巴及非淋巴细胞的感染,后又有人提出IgM-CD4可能比CD4-IgG更有效;(3)利用基因工程技术将绿脓杆菌外毒素的细胞毒部分(PE-40)与CD4连接,构建一种嵌合毒素CD4-PE-40,能定向结合并杀死HIV感染的细胞及其中的HIV病毒。

20世纪90年代CD4的研究热点:(1)CD4与I类MHC分子的精确结合位点、相互作用机理及其在免疫系统中的作用;(2)CD4在穿膜信号转导中的作用机理;(3)CD4与免疫耐受及自身免疫的关系及其临床应用;(4)进一步探讨CD4与HIV相互作用的机理;(5)以CD4为基础的抗艾滋病毒药物的研制。

参考文献

- Maddon P J, et al. The Isolation and nucleotide sequence of a cDNA encoding the T cell surface protein T4: a New member of the immunoglobulin gene family. *Cell*, 1985, 42: 93~104
- Littman D R, Gettner S N. Unusual intron in the Ig-like domain of the newly isolated murine CD4 (L3T4) gene. *Nature*, 1987, 325: 453~55
- Kruusbeek A M, et al. Absence of the L<sub>yt</sub>-2<sup>-</sup>, L3T4<sup>+</sup> lineage of T cells in mice treated neonatally with anti-I-A correlates with absence of intrathymic I-A bearing antigen-presenting cell function. *J Exp Med*, 1985, 161: 1029~1047
- Benjamin R J, Waldmann H. Induction of tolerance by

monoclonal antibody (therapy), *Nature*, 1986, 320: 449~451

- Lasky L A, et al. Delineation of a region of the human immunodeficiency virus type I gp 120 glycoprotein critical for interaction with the CD4 receptor. *Cell*, 1987, 50: 975~985.
- Capon D J, et al. Designing CD4 immunoadhesin for AIDS therapy. *Nature*, 1989, 337: 525~527.
- Abraham N, Vielle A. The lymphocyte-specific tyrosine protein Kinase P56<sup>lck</sup>. *Cancer Investigation*, 1991, 9(4): 455~463

(军事医学科学院基础医学研究所王嘉玺研究员撰)

糖蛋白的结构与功能 structure and function of glycoproteins

糖蛋白是与生命有机体的组成密切相关的一类化合物。它分布广泛,结构复杂。从广义上说,蛋白聚糖或粘蛋白也属这类物质。糖蛋白一般包含蛋白质和糖链两部分,这两部分之间是通过共价键相互结合起来的。从某种意义上说,研究糖蛋白的结构与功能主要是侧重于研究糖链的结构与功能。糖链的结构、大小很不均一,其中寡糖链在整个糖蛋白分子中所占的比例变化幅度也大(1%~85%),它们通常以N-糖苷键或O-糖苷键与蛋白质中的N-天门冬酰胺、丝氨酸或苏氨酸等氨基酸相结合。20世纪70年代以来,学者们对糖蛋白的研究颇感兴趣,其原因是,糖蛋白在调节机体代谢、增强免疫功能、检测某些疾病(如癌症)等方面显得越来越重要。

20世纪60年代以前,研究糖蛋白的目的主要是从糖类可作为生物的能量和骨架出发的。多年来,Wolfson (1980~1969)、一直致力于糖类的分类研究,并对糖类的命名和资料的收集编纂做了大量工作。Pigman (1910~1977)在60年代,以唾液中的糖蛋白为材料,开展了研究其结构与功能的试验,所得的结果加深了对粘蛋白的认识,并曾先后于50年代和70年代出版了《碳水化合物》和《糖缀合体》(Glycoconjugates)专著。

糖化合物研究虽然起步较早,但在结构与功能方面的进展却很缓慢。比如,Morner在1889年就已从软骨中分离出硫酸软骨素,但直到1951年才确认软骨素分为两类,而搞清硫酸软骨素中糖肽连接点属于O-型糖肽键,则是酶解法建立之后的事。又如,Mclean于1916年第1个从心脏组织中提取出肝素,但是直到1978年Robinson等才证明肝素是一种典型的糖蛋白,对其结构的研究也才有了较大的进展。关于肝素的结构,现在仍有学者在潜心研究。

研究糖蛋白糖链结构的方法通常有酶解法、化学法和物理法。

酶解法 即用糖苷酶催化糖苷键水解的一种方法。糖苷酶具有专一性,除可水解糖苷键外,还可转移糖基。因此,采用酶解法辅之以化学法,确定糖类化合物中糖苷键、α-或β-异头构型、糖链的组成与序列是一种好方法。糖苷酶有外切酶和内切酶之分,外切糖苷酶对作用的糖苷键的α、β异头构型有极严格的专一性,对糖基一侧的要求也较严格,而内切糖苷酶则对糖基一侧整个寡糖结构有专一要求。糖苷酶发现于19世纪30年代,20世纪初已认识到糖苷酶的专一性是由糖基部分决定的。60年代采用盐析沉淀和各种柱状色谱(如离子交换、凝胶过滤等)法才真正得到专一性强的糖苷酶纯品。后来亲和层析的应用,使纯化该酶的程序得到简化,目前已纯化出数十种糖苷酶。经纯化的糖蛋白,用同位素或其它特异的小分子标记后,再用酶解法分析,其灵敏度可提高几个数量级。

化学法 即多糖链经酸水解或者氧化裂解、甲基化反应、β-消除反应等降解步骤后,辅之以同位素或者荧光素的标记,最后用亲和层析或离子交换法、高效液相分离法、气相色谱法、电泳法等手段进行分析的方法。选择性酸水解法是Hough等在70年代报道的,即用硫酸、盐酸和三氟乙酸处理糖蛋白,如果条件(中性

糖水解:  $1\text{mol/L H}_2\text{SO}_4$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $6\text{h}$ ,  $2\text{mol/L}$  三氯乙酸,  $100^\circ\text{C}$ ,  $6\text{h}$ , 糖醛酸含量在  $16\%\sim 30\%$ ,  $1\text{mol/L N}_2\text{SO}_4$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $18\text{h}$ , 三氯乙酸浓度  $2\text{mol/L}$  控制得好, 可以做到部分水解或彻底水解。将水解产物进行化学反应即可得到三氯乙酰、三甲基硅烷基、糖酯等衍生物。沸点低的物质经气相色谱分析, 即可了解糖链中单糖的组分。进入 20 世纪 80 年代, 现代毛细管气相色谱的发展与应用, 大大提高了对糖链分析的灵敏度与分辨率。

在温和的碱性条件下, O-糖苷键的糖蛋白很容易被  $\beta$ -消去反应将丝氨酸和苏氨酸分别转化为 2-氨基丙烯酸和  $\alpha$ -氨基-2-丁烯酸, 释放出糖链, 尔后通过酸水解; 硼氢化钠还原, 经氨基酸自动分析仪检测, 即可得知被测糖蛋白样品中含多少 O-糖苷键。N-糖苷键连接的寡糖是经酶彻底水解, 过离子交换柱或 HPLC, 随后用  $\text{NaBH}_4$  还原就可知待测糖蛋白样品中含有多少 N-糖苷键。

糖苷键位置的确定可用甲基化分析、氧化裂解法来完成。Chambers 和 Clamp 于 70 年代指出, 甲醇-HCl 裂解糖蛋白中的糖类生成甲基糖苷或甲基酯, 经气相色谱分析, 回收率较高的是中性糖。随后, 他们还还对水解条件及甲基糖苷等物质的稳定性作了进一步的研究。

乙酰解作用是酸水解多糖后测定多糖结构的又一种方法。20 世纪 60~70 年代系统作过二糖乙酰解作用的研究, 即在醋酸、醋酸酐和硫酸混合作用下, 糖链中 1-6 糖苷键会优先发生, 而在酸水解时则是稳定的。

氧化裂解法有过碘酸氧化、Smith 氧化等, 前者能有选择地氧化糖环羟基, 根据过碘酸的消耗量与产物(如甲酸)的形成量即可确定糖苷键的位置及支链的多少; 后者则是在过碘酸氧化的基础上用硼氢化钠还原, 糖环上的醛基生成多羟基化合物, 此物经酸水解产生乙醇醛和甘油等产物, 由此结构可推断糖链中端基异构的构型。此外, Barry 降解法、三氟氧化铬氧化降解法等也可确定糖苷键的位置。

目前, 凝集素(lectin)也成为分析糖结构的一种工具。凝集素对糖的束缚有很强的专一性, 这是用其研究糖结构的主要依据。Sumner 等从 20 世纪 30 年代就对分离自刀豆种子凝集素(Con. A)的特性以及用其作为纯化糖蛋白的配体进行了深入的研究, 现已有一些与 Con. A 凝集素偶联的亲吸附剂制品面市, 这对分离、纯化以及研究糖蛋白是极有意义的。

近来 boehringer 公司制造的 digoxigenin-lectins 等试剂盒检测糖链中糖的组分, 既简单又灵敏。其原理是, 利用凝集素对糖束缚的专一性, 与固定在硝酸纤维素膜(NC)上的糖蛋白反应, 漂洗后, 用抗 digoxigenin 抗体和辣根过氧化物的标记物与 digoxigenin-lectins 反应, 漂洗后呈阳性者表明该糖蛋白可能存在与所用 lectin 结合的糖类物质。实际上这也是一种酶联免疫吸附测定法, 采用该方法, 再辅之以过碘酸氧化法等可测定糖链中 N-或 O-糖链数。

物理法 用子分析糖链结构的物理方法, 主要有质谱分析、核磁共振谱、红外光谱等, 这些方法分辨率高(如一个单糖在红外光谱中呈现数十个峰), 但对样品纯度要求高, 结果分析较困难。

以上研究糖蛋白中糖链的方法, 从一个侧面反映出研究糖蛋白结构的难度。经过多年的研究分析, 一般认为糖蛋白有运输物质、凝固血液、催化反应、粘着细胞、支持结构、降低冰点、润滑保护、识别细胞、提高免疫力、增强激素活性等生物学功能。另外, 糖蛋白的糖链可作为识别标记物和(或)多肽链构象的决定子, 该糖链还可影响糖蛋白与某些分子的结合, 改变糖蛋白的溶解度, 增高溶液的粘度以及抵抗蛋白酶水解等特性。

一般探讨糖蛋白之功能的方法有去糖基化法, 用糖苷酶去除糖链, 用抑制剂阻断糖链的合成; 用基因工程手段使原核细胞产生无糖基化的重组产物, 尔后观察糖蛋白的功能变化。此外, 用标记的凝集素作探针, 也可以研究糖蛋白的结构与功能。Burger 等于 1960 年末发现 Con. A 可以专一地凝集癌细胞, 其理由是癌变细胞表面产生能被凝集的、具有特异糖链的糖蛋白。

Yamashita 于 1989 年在检测肝癌患者的肝  $\gamma$ -谷氨酰转肽酶时发现, 该酶中含有正常细胞不存在的甘露糖型糖链。

开展糖蛋白的研究工作, 不仅要掌握蛋白质方面的知识, 而且要了解糖化学方面的学问。蛋白质本身就复杂, 如其分子上与有关的糖链连接构成糖蛋白, 其复杂程度就更可以想象了。再者, 蛋白质与糖链合成的机理是不同的。前者是由基因控制的, 合成的肽链是规则的; 而后者则是由基因控制的有关酶(如糖基转移酶等)催化完成的, 合成的糖链变化大, 因为它要受体内形成的酶和核苷酸糖的有无、多少制约, 要受机体代谢程度的影响。加之糖链的存在与否, 并非都能决定糖蛋白的生物活性有无。尽管研究糖蛋白的困难远不止这些, 但是, 随着时间的推移, 糖蛋白的结构与功能方面的一些不解之迷定会搞清楚的。

当前研究的主要热点: (1) 探讨糖基化与去糖基化的机理及有关规律; (2) 糖苷酶的制备及专一性的研究; (3) 完善已有检测糖蛋白的结构与功能方面的方法, 建立灵敏、快速、精确的新方法; (4) 中草药和藻类等生物中糖蛋白的应用研究。

#### 参考文献

- 1 Beeley J G. Glycoprotein and proteoglycan techniques Printed in Belgium, 1985
- 2 Armstrong E G, et al. Immunochimistry of Human chorionic gonadotropin In. Biochemica actions of hormones X II, 1986, 91~124
- 3 吴东儒, 主编. 糖类的生物化学. 北京: 高等教育出版社, 1987
- 4 Daniel J, et al. Anal. Biochem, 1987, 163, 204~209
- 5 Sharon N, et al. Lectins. New Dethi Printed, 1989
- 6 Yamashita K, et al. J Biochem, 1989, 105, 728~735
- 7 赵永芳, 等. 生物化学与生物物理进展, 1992, 20(2)

(武汉大学生命科学院赵永芳教授撰)

#### 糖化蛋白质

glycosylated protein 糖化蛋白是蛋白质与还原吡喃糖经非酶促缩合而形成的一类糖基化蛋白。临床常见的有糖化血红蛋白(glycosylated hemoglobin)、糖化血清蛋白(glycosylated serum protein)、糖化血浆蛋白(glycosylated plasma protein)、糖化脂蛋白(glycosylated lipoprotein)及糖化胶原蛋白(glycosylated collagen)等。蛋白质分子的糖基化反应可以发生在 N-末端, 也可发生在赖氨酸的侧链氨基。糖化后的蛋白质分子在结构与功能上发生一定的改变。因此, 它们在人体内含量过高对健康具有一定的影响。正常人体内含有一定量的糖化蛋白, 只是在血糖长期升高的病人, 特别是糖尿病人体内明显增高。因此, 糖化蛋白在人体内的含量又是诊断糖尿病和监测其并发症的重要指标。在长期高血糖的状态下, 发生在长半衰期蛋白如胶原、血管壁、基底膜、晶状体等所含蛋白上的早期糖基化产物不断堆积, 缓慢而不可逆地进行分子重排(rearrangement), 形成稳定的高级糖化终末产物(advanced glycosylation end products AGE)。AGE 可与体内的蛋白质发生不可逆的结合, 当血糖纠正后, AGE 为棕色, 具有荧光并引起蛋白与蛋白之间发生交联。

Holmquist 等(1966)报道了血红蛋白(HbA<sub>1c</sub>)的  $\beta$  链 N-末端并非以游离的状态存在, 而是被小分子六碳糖以 Schiff 碱的形式所连接。20 世纪 70 年代中期, 证实参与糖基化反应的糖是葡萄糖及其衍生物, 它们以非酶促的方式与蛋白质分子的 N-末端氨基发生反应, 形成不稳定的 Schiff 碱结构, 继而通过分子重排(Amadori rearrangement)形成稳定的酮胺(Ketoamine)结构。通过葡萄糖标记的体内实验发现, 糖化血红蛋白的含量随体内血糖浓度的增加而增高, 从而阐明了糖尿病患者体内糖化蛋白增高的原因。Robins 等(1972)报道了糖尿病人的胶原蛋白的非酶催化的糖化现象。后来糖化红细胞膜蛋白(Bailey 等 1974)和糖化眼晶状体蛋白也在糖尿病人体内发现(Stevens 等, 1979)。Day 等(1979)报道糖尿病人的糖化血清及糖化血浆蛋白的升高现象, 并在体内(in vivo)和体外(in vitro)的葡萄糖结合实验中得到证实。80 年代初, Schleicher 等(1981)报道糖化低密度脂蛋白



(gIcLDL-glycosylation of low density lipoprotein)在糖尿病人体内的增高,并证实糖基的结合部位是赖氨酸残基的 $\epsilon$ -氨基,有的糖尿病患者的低密度脂蛋白的赖氨酸有5%发生糖基化,并且催化活性降低5%~25%。Witztum等(1982)报道高密度脂蛋白的赖氨酸被糖基化后可以增快其代谢速度,使高密度脂蛋白在血中的含量下降。由于糖尿病患者的糖化高密度脂蛋白(gIcHDL-glycosylation of high density lipoprotein)在血中的含量增加,使得脂代谢发生一系列的改变而并发心血管疾病。目前,国内外对糖化蛋白的研究已较多地转向临床,弄清糖化蛋白与糖尿病及其并发症之间的关系,无疑具有重大的意义。

**糖基化原理** 早在20世纪40年代,在食品研究领域中就有人发现蛋白质与还原糖共热或长时间的共同存放会使其颜色变褐,这是还原糖与蛋白质中的赖氨酸残基发生了反应,并使蛋白质的营养价值降低(Patton等,1948),这一结果后来在血清球蛋白与还原糖的反应中得到进一步的证实。Dixon(1972)报道在乙酰胺吡啶(pyridine acetate)的水溶液中还原糖与缬氨酰组氨酸(Valyl-His)反应的机理与血红蛋白链的N-末端的糖基化相同,还原糖与蛋白质非酶催化的反应可能性取决于蛋白质分子和糖的结构。对于还原糖来说,在水溶液中以自由醛基的存在形式存在,将决定它与蛋白质反应的可能性。6-磷酸葡萄糖(glucose-6-phosphate)与糖化血红蛋白的反应能力比葡萄糖强,这可能是6-磷酸葡萄糖的结构比较适合于血红蛋白与二磷酸甘油(diphosphoglycerate)结合,6-磷酸果糖(fructose-6-phosphate)的反应性更强。酸碱度对糖化蛋白形成的影响主要在Amadori分子重排的阶段。醛基与蛋白质分子的氨基反应首先形成Schiff碱结构,在酸性条件下,还原糖可从蛋白分子上脱落下来;在碱性或中性环境中,Amadori分子重排为主,反应不可逆,终产物稳定。Means等(1982)证实蛋白质分子与还原糖反应的可能性及速率不但取决于还原糖的分子状态和pH值,还取决于氨基在蛋白质分子上的空间位置,并认为这是决定糖基化反应程度的最重要的因素(He, et al., 1995)。

**临床意义** 糖尿病的慢性并发症是威胁病人健康和生命的重要原因,也是糖尿病研究的重要课题。糖基化蛋白的系列测定将为并发症的监测提供可靠的指标。糖尿病人的血糖控制与并发症的发生,发展密切相关。现已证明,糖化反应不但发生在血红蛋白、白蛋白、球蛋白、血浆总蛋白,人体的各个组织中的蛋白甚至角质蛋白也可发生糖基化,如毛发及指甲发生糖基化,产生糖化角质蛋白。糖化蛋白可作为临床检验血糖的方法,只是不同的糖基化蛋白所反映的血糖增高的时间长短有所不同。血清蛋白在人体内的寿命为30d,测定糖化血清蛋白在血液中的含量可以监测30d血糖的平均水平。糖化血红蛋白(HbA<sub>1c</sub>)在血红蛋白总量中所占比例能反映红细胞生命周期120d的平均血糖水平。糖化总蛋白在血液总蛋白中所占比例能反映患者的血糖在2~3周的平均水平。进一步的研究资料表明,蛋白质的糖基化是引起糖尿病并发症的重要原因之一。血红蛋白的N末端被糖基化后,与2,3-二磷酸甘油酸的反应下降,使血红蛋白所携带的氧不易释放而造成局部缺氧。血浆蛋白糖基化后引起毛细血管内皮细胞吞噬能力增强,脂蛋白糖基化后引起脂代谢异常,眼晶体蛋白糖基化后引起白内障,髓鞘蛋白糖基化后引起神经纤维功能异常造成神经系统并发症。由此可见,蛋白质的糖基化反应为对糖尿病病的病理研究提供了新的线索(赫荣乔,1995)。

目前临床上测定糖化蛋白的方法基本可分为四类,即层析法、比色法、电泳法及放射免疫法。在少数几个发达国家已将糖化蛋白的测定列为糖尿病监测诊断的常规项目。值得一提的是,层析法中的高压液相色谱法(HPLC)和亲和层析法(affinity chromatography)。HPLC是定量分析糖化蛋白的准确而灵敏的方法,但由于仪器昂贵,目前还不适合于我国大多数的中小医院应用。亲和层析技术是用氨基苯硼酸琼脂糖凝胶对糖化蛋白进行特异的分离纯化(Mallia, 1981),亲和树脂由琼脂糖凝胶与氨基苯硼酸通过空间臂连接而成,其结构为:

$C_6H_2N-NH-NH$ -苯基-B(OH)<sub>2</sub>-B(OH)<sub>2</sub>。该方法具有对糖化蛋白检测的定量准确,灵敏度高,并可反复使用,是目前国内检测糖化蛋白的最理想方法(邱文升等,1989)。它的优点是:一次即可把糖化的和非糖化的蛋白分开,再用比色的方法测定它们的百分率。它不仅可作为糖尿病的监测指标,而且可用于常见的II型糖尿病的早期诊断指标。由于操作简便,快速,价格较国外低廉,用量少,用一普通可见分光光度计即可测定。因此,一般基层医院都可将其作为糖尿病检测的常规手段。

#### 参考文献

- Holmquist W R, et al. *Biochemistry*, 1966, 5: 2489~2503
- Robins S P, et al. *Biochem Biophys Res Commun*, 1972, 48: 76~84
- Bailey A J, et al. *Biochim. Biophys Acta*, 1976, 431: 51~57
- Stevens V S, et al. *Proc Natl Acad Sci. USA*, 1979, 75: 2918~2922
- Day J F, et al. *J Biol Chem*, 1979, 254: 595~597
- Schlescher E, et al. *FEBS Letters*, 1981, 129: 1~4
- Witztum J L, et al. *Diabetes*, 1982, 31: 1029~1032
- Patton A R, et al. *Science*, 1948, 107: 68~69
- Dixon H B F J. *Biochem*, 1972, 129: 203~208
- Means G E, et al. *Diabetes*, 1982, 31: 1~4
- Mallia A K, et al. *Anal Letters*, 1982, 14: 619~661
- 邱文升,等. *中华内科杂志*, 1989, 28: 407~413
- He Rong-Qiao, et al. *The Biochem. J. (BJ)*, 1995, (309): 133~9
- He Rong-Qiao, et al. *Biochim, Biophys. Acta (BBA)*, 1995: 1253, 47~56
- 赫荣乔. *生物物理学报*, 1994, 10: 542~551
- 赫荣乔. *生物物理学报*, 1994, 10: 361~366

(中国科学院生物物理研究所博士生导师赫荣乔撰)

### 红细胞膜血型糖蛋白 the glycoprotein of erythrocytes membrane

血型糖蛋白(GP)是一组位于红细胞膜的特殊跨膜糖蛋白,主要包括GPA、B、C、D和E,前四者又分别称为 $\alpha$ 、 $\delta$ 、 $\beta$ 和YGP。它们常表现结构多态性,并显示MNSs血型系统和Gerbich抗原性。GP与血影蛋白、锚蛋白、蛋白3、蛋白4.1以及肌动蛋白(actin)等一道组成红细胞膜骨架,以维持红细胞的正常双凹形态和变形性(deformability)。GPA和B还可作为恶性疟原虫和弓形虫入侵的受体部位。GPC和D的缺失与变异,将引起某些遗传性椭圆形红细胞性贫血或产生棘红细胞。一些白血病患者的红细胞膜缺乏GPC的表达。

1978年福斯梅尔(Furthmayr)采用溴化氰裂解及胰蛋白酶酶解,结合Edman降解法,最先报告了 $\alpha$ 和 $\delta$ GP的N末端31肽和35肽的氨基酸顺序,随后测出前者的全部131位氨基酸顺序。1986年西伯特(Siebert)与佛库达(Fukuda)分离了几种对人 $\alpha$ GP特异的cDNA克隆,并测定其核苷酸序列,完全印证了其多肽链组成。1987年帕兰卡尔德(Blanchard)和达尔(Dahr)等用高效离子交换层析进行蛋白质分析,与西伯特等以分子克隆和核苷酸测序,先后确证了 $\delta$ GP的多肽链为72位氨基酸组成,只在3处顺序稍有差异。1988年卡尔特隆(Cartron)等从人网织红细胞的cDNA文库调出两种 $\beta$ GP的cDNA克隆,与达尔终于阐明了 $\beta$ GP的全部128位氨基酸顺序。1990年美国库朵(Kudo)和法国菲格纳尔(Vignal)等的两研究室先后报告了一种新型GP,建议定名为GPE。其编码基因属 $\alpha$ GP和 $\delta$ GP基因家族,不仅见于正常人基因组,且亦在 $\alpha$ GP和/或 $\delta$ GP表达异常的人体中发现。GPE基因携有4个外显子,沿着其DNA和30kb长度分布,它的头26个氨基酸同M表型的 $\alpha$ GP一致,但缺乏N糖基化。至此,除YGP外,其他4种GP分子的一级结构均已清楚。若用SDS-聚丙烯酰胺凝胶进行垂直板电泳(pH8.8),通过放射免疫印迹或山羊抗家兔IgG-辣根过氧化物酶(GAR-HRP)法检测,可将正

常人红细胞膜 GP 分为 7 条区带。按安斯梯 (Anstee) 1979 年提出的命名原则, 从原点 (-) 极朝 (+) 极方向它们分别为:  $\alpha_2$  ( $\alpha$ GP 二聚体),  $\alpha\delta$  (杂化体), ( $3\alpha$  区带),  $\delta_2$  ( $\delta$ GP 二聚体),  $\alpha$  ( $\alpha$ GP 单体),  $\beta$ ,  $\gamma$  和  $\delta$  (各为  $\beta$ ,  $\gamma$  和  $\delta$ GP 的单体)。3 $\alpha$  区带常见于 10%~15% 梯度胶电泳。

80 年代以来有关 GP 的研究进展很快, 取得了不少重要成果, 简要概括如下:

GP 的可能空间构象和生理功能  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\delta$ GP 分子均有颇长的糖基化肽段伸出红细胞膜外, 糖基上所携唾液酸残基成为带负电荷的受体部位。组成人红细胞膜骨架的蛋白质之间存在有极复杂的相互作用与缔合。按照它们与红细胞平面的相对关系而言, 可将此相互作用分为两大类: (1) 平行的相互作用—维持膜下骨架网结构的双向连续性, 有血影蛋白异型二聚体、蛋白 4·1 和肌动蛋白等参加; (2) 垂直的相互作用—组成骨架网结构与整体膜成分的附连, 有血影蛋白、锚蛋白、蛋白 3、蛋白 4·1 和  $\alpha$ GP 参加。其中“血影蛋白—蛋白 4·1— $\alpha$ GP 的接触”对红细胞骨架网结构的稳定十分重要, 而膜磷酸肌醇的磷酸化状态可调节蛋白 4·1 与  $\alpha$ GP 的接触。1987 年瑞德 (Reid) 等报告,  $\alpha$ GP 或  $\delta$ GP 缺失的红细胞仍保持着正常的膜特性, 只有  $\beta$  和 YGP 缺失的红细胞显示了膜机械稳定性和变形性的降低, 仅各达正常值的 50% 和 40%。因此认为,  $\beta$  和/或 YGP 同膜骨架间的相互作用在调控正常红细胞的膜特性中占有重要地位。1990 年纳席 (Nash) 等指出, 在缺失  $\beta$  和 YGP 的椭圆形红细胞, 其刚性、粘度和通过 5 微米孔隙的转变时间皆同正常细胞无异, 但它们的体积和表面积减少, 提示它们的变形指数降低实与其形状改变有关, 而不应归咎于膜的改变。瑞德 (1990) 进一步证明, 蛋白 4·1 可通过同  $\beta$ GP 的相互作用来调节人成熟红细胞的  $\beta$ GP 含量。

椭圆形红细胞性贫血 (EC) 根据临床观察并印证于电镜和生化检测, 1985 年泊里克 (Palek) 等提出一种假说, 认为红细胞膜骨架蛋白的平行相互作用如发生缺陷, 将引起 EC 或异型红细胞症; 而垂直相互作用异常将主要引起球形红细胞症。他们推测, 由于椭圆形红细胞的骨架发生削弱, 不能像正常红细胞那样及时从血流切应力诱导的变形中复原。早在 1984 年, 安斯梯等就描述了两例缺乏  $\beta$ ,  $\beta_1$  和 YGP 的椭圆形红细胞症。纳席等 (1990) 则主张, 椭圆形红细胞属于较老化的红细胞, 它们被释入血流时仍保持正常形态。血流切应力对其不稳定膜的持久扭曲, 将使它们拉长变成椭圆形。卢义钦等 (1992) 报道了一例伴发异常  $\alpha$ GP 的 EC, 文献未曾记载。患者红细胞膜的蛋白 4·1 对蛋白水解的易感性增强, 可能属于杂合子基因的短缺失。血影蛋白和/或蛋白 4·1 的基因变异或缺失, 也会导致遗传性 EC。

GP 变种 文献共报道过 10 多种 GP 变种, 其蛋白质或基因结构变异已加确证者计有: ①氨基酸取代; ②基因缺失; ③基因体杂化。

1985 年以来, 卢义钦等采用免疫印迹技术筛查了 167 名正常黄种人、黑人和白人的红细胞膜 GP 变异。中国青年的检出率为 8%, 高于白人和黑人, 24 名蒙古族青年的检出率高达 25%, 明显高于汉族。在中国健康青年 114 人中共检出 3 个类型的 10 例 GP 变种, 其中 1 例的基因结构已被鉴定, 确证名为 St<sup>+</sup>GP。55 例各类血液病患者的筛查, 发现 1 例重症镰刀形红细胞贫血的黑人患者携有一条异常  $\alpha$  区带, 此外, 还检测了 31 只类人猿 (黑猩猩 19 只, 大猩猩 3 只, 猩猩 6 只及长臂猿 3 只) 与 14 只旧世界猴类 (猕猴 3 只, 恒河猴 5 只及短尾猴 6 只) 的红细胞膜 GP, 发现类人猿组的 GP 图谱同人类近似, 并显示高度多态性。

病原体对红细胞的侵袭 1993 年刘俊凡等观察到, 恶性疟原虫入侵人红细胞时, 红细胞的皂角苷沉淀物的 GP 图谱出现一条分子量为 77.5kD 的异常区带 1', 并伴有  $\alpha$ ,  $\delta$ GP 及一些红细胞膜蛋白分子的裂解。在培养恶性疟原虫的上清液和被感染红细胞中, 含有分子量 107~143kD 的 4 种红细胞结合抗原 (EBA)。当 Chabaudi 疟原虫侵袭小鼠红细胞时, 其膜 GP 亦有类似变化。

关于红细胞膜 GP 的研究方兴未艾。展望未来, 国外将集中研究和继续深化 GP 基因结构变异与某些遗传病和血液病发病机制的探索, 从分子水平上阐明 GP 结构与功能的相关, 以及从疟原虫侵袭人红细胞的寄生虫生理和生化学角度寻找防治疟疾的潜在敏感点, 作为设计和筛选新抗疟药物的有效途径。国内有关 GP 的研究刚起步, 许多新的课题和发现有待生物医学工作者去开拓。

#### 参考文献

- 1 Anstee D J. The blood group MNSs—active sialoglycoproteins. *Semin Hematol*, 1981, 18: 13~31
- 2 卢义钦, 等. Erythrocyte membrane glycoproteins of Central Africans and some hematological patients. *Chinesc Med J*, 1987, 100: 787~794
- 3 卢义钦, Blumenfeld O O, 等. Polymorphism of glycoproteins in nonhuman primate erythrocytes. *Biochem Genet*, 1987, 25: 477~491
- 4 卢义钦, Nagel RL, 等. Elliptocytosis associated with an abnormal  $\alpha$  glycoprotein. *Ann Hematol*, 1992, 65: 106~109
- 5 刘俊凡, 等. Involvement of membrane glycoproteins in human erythrocytes invaded by plasmodium falciparum. *Chinesemed J*, 1993, 106
- 6 王力飞, 等. 我国青年人红细胞膜血型糖蛋白变异的筛查. *遗传学报*, 1991, 18: 1~5
- 7 Kudo S, et al. Identification of a novel glycoprotein, glycoprotein E, by isolation of genomic clones and complementary DNA clones, utilizing polymerase chain reaction. *J Biol Chem*, 1990, 265: 1102~1110
- 8 Huang C H, et al. Biochemistry and molecular biology of MNSs blood group antigens. in *Bailliere's Clinical Haematology*, 1991, 4: (4)

(湖南医科大学生化教研室卢义钦教授撰)

**红细胞膜区带 3 蛋白** band 3 protein on erythrocyte membrane 区带 3 蛋白简称区带 3, 是红细胞膜上的主要蛋白质, 根据 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳时它出现在第三条区带的位置, 定名为区带 3。区带 3 占红细胞膜蛋白总量的 25%~30%, 分子量 95 000~100 000, 呈扩散宽带状。每个红细胞含 106 个拷贝的区带 3 原体, 它们以同型二聚体或四聚体存在于膜上。区带 3 属嵌膜蛋白, 其分子在膜上可分为 3 个辖区: 亲水的胞浆辖区、疏水的膜辖区和酸性 C 末端外侧辖区。区带 3 的 N 端深埋于胞浆中, 在含糖的 C 端最后延伸出红细胞表面, 其分子已在膜内横跨曲折 2~3 次。区带 3 的功能包括阴离子转运、连接细胞膜骨架蛋白, 同调节糖酵解酶、血红蛋白和高铁血色原结合, 携带血型抗原等。

区带 3 的生理功能 (1) 膜转运功能: 区带 3 是红细胞主要阴离子的转运蛋白, 能催化无机阴离子, 主要是  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$  通过细胞脂质双层膜进行交换, 也能协助  $\text{SO}_4^{2-}$ 、水、葡萄糖等通过细胞膜。区带 3 的转运功能主要位于膜辖区, 用酶切除其胞浆辖区, 并不改变阴离子转运活性。区带 3 的膜辖区为一种  $\alpha$  螺旋结构。动力学研究资料表明, 阴离子交换的机理可能为乒乓机制, 即转运位点可能由两个可变的盐键构成, 阴离子借助促进两个盐键构型互变而进出细胞。在深埋于脂质双层的  $\alpha$  螺旋结构中, 天冬氨酸、谷氨酸、精氨酸和赖氨酸残基对阴离子转运机理起到重要作用。(2) 结合功能: 区带 3 是结合胞质成分和膜骨架蛋白的“中心”。在此功能中, 区带 3 的胞浆辖区是关键部位。红细胞膜骨架蛋白主要包括血影蛋白、锚蛋白、区带 4.1 蛋白 (band 4.1) 和肌动蛋白。它们通过彼此间的相互作用与缔合, 形成一个稳定的弹性骨架, 从而使红细胞呈双凹圆盘状, 血流循环时能抵抗血管和脏器壁的切应力, 保证红细胞不致破裂。研究资料表明, 膜辖区

带 3 和血型糖蛋白 A (glycophorn A) 分别通过与锚蛋白、区带 1:1 结合,使膜骨架附着于脂质双层膜上。区带 3 由于含量高,其潜在的结合位点也多,是膜骨架的主要附着点。区带 3 分子的锚蛋白结合位点定位于 N 端胞浆区靠近膜的段节,每个红细胞含有  $10^6$  个区带 3 原体和  $10^5$  个锚蛋白原体,显然并非所有的区带 3 都能与锚蛋白结合。有关两者结合的调控机理至今尚不清楚。

区带 3 胞浆区存有 3 磷酸甘油醛脱氢酶、醛缩酶、磷酸果糖激酶等多种与糖酵解有关酶类的特异性结合位点。区带 3 与醛缩酶形成 1:1 的复合物,致使该酶活性被抑制 90%;与 3-磷酸甘油醛脱氢酶结合,则导致整个酶活性受抑制;与磷酸果糖激酶结合,可先产生短暂的活性,最终酶活性被完全抑制。以上资料表明,区带 3 胞浆区可能对糖酵解具有调节作用。

区带 3 的胞浆区还存有血红蛋白的高亲和力结合位点,其酸性 N 末端可伸入血红蛋白分子中央腔约  $1.8 \times 10^{-8}$ 。一般认为,脱氧血红蛋白与区带 3 的亲合力比氧合血红蛋白强。血红蛋白与糖酵解酶可竞争区带 3 上的结合位点;因此血红蛋白与区带 3 的结合,可能影响糖酵解酶活性和红细胞的糖代谢。

区带 3 胞浆区可与高铁血色原结合。血红蛋白变性后形成高铁血色原,它保持有血红蛋白的大部分结构特征,但在血红素的周播构型改变,高铁血色原对区带 3 的胞浆区显示高度亲和力,其结合位点与血红蛋白相同,结合后可导致区带 3 的侧向聚集,使其活动受限,从而增强膜脆性,导致红细胞极易破裂,这可能是某些不稳定血红蛋白溶血性疾病的病因及衰老红细胞清除的机理。

区带 3 与血型抗原 区带 3 载有 ABC 血型物质,可能还携有 Rh、Kell 和 B 血型物质。同时,区带 3 被认为是衰老红细胞和异常红细胞的自身抗体识别抗原。衰老红细胞表面一种糖肽的生成与区带 3 有关,这种糖肽的分子量为 62 000,它参与免疫作用,可与 IgG 结合变成巨噬细胞破坏的靶目标。另外,该“衰老抗原”的过早表达可能与恶性疟原虫侵袭红细胞有关,推测区带 3 的快速老化涉及一些病因不明的溶血性贫血的发病机制。

区带 3 与红细胞疾病 近年来,人们对区带 3 的结构及其与临床上一些溶血性疾病的关系非常感兴趣。区带 3 因其疏水的膜辖区深埋于脂质双层膜中,用传统的氨基酸顺序测定方法难于阐明其一级结构。重组 DNA 技术与 DNA 序列分析,加速对区带 3 一级结构的测定。1988~1989 年,泰勒(Tanner)等及鲁克斯(Lux)等分别独立地通过 cDNA 克隆重测定了人区带 3 蛋白的氨基酸顺序,得知人红细胞的区带 3 蛋白含有 911 个氨基酸残基。鲁克斯等进一步证实人区带 3 的基因位于第 17 号染色体上,其胞浆区的氨基酸残基为 1~403 位,其膜辖区为 404~882 位,前酸性 C 端为 883~911 位。区带 3 缺陷引起的红细胞异常也不少见。有人报道,在异形红细胞症溶血性贫血患者,其锚蛋白虽属正常,但它与内内外翻膜小泡的结合力减弱,分离纯化的区带 3 胞浆区与锚蛋白的结合并无异常,这提示锚蛋白结合异常与区带 3 在膜上的定向发生改变有关。家族遗传性棘红细胞症患者的区带 3 分子量增大,其锚蛋白的高亲和力结合位点减少,利用双向肽段图谱进行结构分析,发现在区带 3 的 17kd 区域有额外的酪氨酸肽斑。在另外一些棘红细胞症患者中,其锚蛋白与区带 3 的结合正常,但其 C 端结构有改变。在球形红细胞症,其区带 3 的分子量增加约 3kd,并伴有磷酸化作用下降。东南亚卵形红细胞症患者的红细胞呈刚性,此不正常现象是由于使膜骨架附着于脂质双层膜的蛋白出现缺陷所致,其区带 3 可被胰蛋白酶或其他试剂异常裂解,这是因为它含有较正常数目为多的高亲和性锚蛋白结合位点。

研究存在于非红系细胞膜上的区带 3 样蛋白,也是目前此领域的热点之一。禽类及哺乳动物的许多非红系细胞,均发现含有区带 3 样蛋白或多肽,例如抗区带 3 的抗体与许多其他细胞有交叉反应,用区带 3 cDNA 探针可在贫血小鼠的脾细胞和不同分化的红白血病细胞检测到与区带 3 相关的 mRNA,鸡胚肾细胞内

也存在这种 mRNA。因此,对区带 3 的深入研究,有助于了解其他组织的细胞膜结构和功能,这无论对生物学还是医学,都具有十分重要的意义。

参考文献

- 1 Macara I G, et al. The structure and function of band 3. In Elson, E. et al. ed. ; Cell Membranes, Methods and Reviews, New York: Plenum Press, 1983, 41~88
- 2 Low P S. Biochim Biophys Acta, 1986, 864: 145~167
- 3 卢义钦,刘俊凡. 人红细胞膜骨架蛋白的相互作用. 江苏省生物化学会通讯“生命微观”, 1987, 7: 453, 1990, 9: 698
- 4 Alpe S L, et al. J Biol Chem, 1988, 263: 17092~17099
- 5 Tanner M J A, et al. J Biochem, 1988, 256: 703~712
- 6 Kay M M B, et al. Clin Res, 1989, 37: 547A
- 7 Lux S E, et al. Proc Natl Acad Sci. USA, 1989, 86: 9089~9093
- 8 Palek J, et al. Semin Hematol, 1990, 27(4): 290~332

(遵义医学院王力飞讲师撰;卢义钦审)

蛋白质卷曲

蛋白质卷曲又称蛋白质折叠(Protein Folding),蛋白质的生物功能是由其复杂的空间结构决定的,而蛋白质合成却只能给出线性的氨基酸序列。实验中发现,对于大多数简单的球状蛋白质来说,多肽链在体外完全伸展后,能够自发地卷曲回到天然状态。因此,蛋白质空间结构是由一级结构决定的。这个用一维信息编码三维结构的过程就称为蛋白质卷曲,它是当今生命科学亟待解决的重大基础课题(有人称之为破译生命的另一半密码)。

蛋白质卷曲规律的阐明对相关学科的发展有深刻影响。例如,蛋白质空间结构预测问题;全新蛋白质分子设计问题;以及基因工程产物的复性、复活问题等等,都与蛋白质卷曲密切相关。

早在 20 世纪 30 年代,包括我国学者吴宪在内的一些科学家就注意到蛋白质的变性问题。50 年代末,安菲森(C. B. Anfinsen)基于对核糖核酸酶 A 的研究,提出了“一级结构决定空间结构”这一命题之后,一批从事生物、物理、化学的工作者加入到蛋白质卷曲研究队伍中来。

蛋白质卷曲的密码 也称立体化学码。有许多实验结果支持卷曲密码的存在。例如:枯草杆菌蛋白酶在酶原阶段可以正确卷曲,但成熟的酶由于 N 端剪切掉一段,体外伸展后,就不能再正确卷曲。理论计算的结果也支持卷曲密码的存在。卡普拉斯(M. Karplus)等人指出,对于一个长度为 100 个残基的蛋白质,若从可能的构象中随机筛选出一个特定的构象,需要时间为  $10^{20}$  年。这说明蛋白质卷曲不可能是随机的。尽管多数作者都承认存在卷曲密码,但针对对这密码的构成形式一无所知。有一点可以肯定,就是这密码形式极为复杂,蛋白质空间结构(比较一级结构而言)的保守性以及  $\alpha/\beta$  两可肽的普遍存在说明了这一点。金(J. King)曾在 1989 年提出“分散—相关”模型,注意到先形成的构象对后生成的构象的影响,在思考问题的方式上有一定进步。

蛋白质的体外卷曲与体内卷曲 现在进行的蛋白质卷曲研究工作都是在生物体外进行的,体外卷曲只能是肽链合成后的卷曲。目前尚不能准确指出体外卷曲能在多大程度上代表体内卷曲。但二者之间存在的不同点已为多数作者承认,即体内卷曲中可能存在与肽链合成同步进行的过程。边合成边卷曲的一个实验证据来自肽链合成尚未结束的  $\beta$ -半乳糖苷酶(未脱离核糖体)已具有酶的活性,并且可与抗体起反应。也有实验资料表明卷曲可能发生在肽链合成完成之后,例如,细胞色素 C 的 C 端螺旋与 N 端螺旋是最早形成的结构,这可能暗示着,卷曲一开始就要求远程作用。邹承鲁(C-L. Tsou)于 1988 年综合上述两种情况,认为卷曲在转译过程中即已开始,随着肽链的延伸,其空间结构不断调整,调整过程在合成终结之后才完成并达到天然态构象。

80 年代末,许多在体内卷曲中发挥作用的“助卷曲因子”被发现,如蛋白质二硫键异构酶、分子伴侣等,提示体内卷曲比以前

想象的要复杂得多。

蛋白质卷曲的起始点。80年代后期,由于高分辨率的核磁共振仪的出现以及二维核磁共振技术的完善,使解析蛋白质溶液构象的能力大大加强,寻找卷曲起始点成为可能。目前,起始点研究集中在以下几方面:(1)卷曲由非特异的疏水塌缩开始。已经发现用点突变法引入疏水性残基不影响葡萄球菌核酸酶天然态的稳定性,但会大大降低其伸展态的稳定性。另外,小肽也可以通过相邻残基的疏水作用而呈现有序结构。(2)二级结构生成作为卷曲起始点。近来关于小肽在水溶液中能生成稳定二级结构的报告越来越多。如已发现核糖核酸酶A的N端13肽在水中形成稳定的 $\alpha$ 螺旋。除 $\alpha$ 螺旋外, $\beta$ 转角的研究也很活跃。狄林(H. J. Dyson)等人发现YP>DV能够形成 $\beta$ 转角结构,当用不同的残基置换X时, $\beta$ 转角的含量与用Chou&Fasman的方法得到的转角形成几率存在相关性,这可能意味着天然态的 $\beta$ 转角只是由近程作用决定的。形成转角的肽段有可能作为卷曲起始点。(3)特殊成键作用启动卷曲。奥斯(T. G. Oas)等人分别合成了牛胰蛋白酶抑制剂(BPTI)的43~58肽段和20~33肽段,当两个肽段由(30~51)二硫键连接起来时,各自都表现出在天然态分子中所取的构象。(4)伸展态中的有序结构启动卷曲。近来,对伸展态的研究不断加深,现在看来,用各种方法变性的蛋白质多肽链并不像以前想象的那样松散,而是不同程度地存在一些有序结构,这些结构可能作为构象胚胎而启动蛋白质卷曲。

卷曲中间态 (1)熔球态。经典的蛋白质二态理论(二态为天然态和伸展态)曾经束缚了卷曲中间态的研究。在70年代中期,桑岛邦博等人以及普蒂林(O. Ptitsyn)小组在罗曼(K. Kronman)等人工作的基础上,在 $\alpha$ 乳清蛋白和碳酸酐酶中发现存在稳定的卷曲中间态。后来陆续在一些小蛋白中发现类似的中间态,并在80年代中期命名为熔球态。现已证明熔球态广泛存在,并且证明通过卷曲动力学研究得到的熔球态与平衡态熔球态的结构相似。熔球态的特点是,它具有天然态的二级结构,但三级结构不完整,它比天然态有较多的疏水暴露。(2)与二硫键相关的中间态。克萊頓(T. E. Creighton)从70年代开始对BPTI进行了系统的、深入的研究,通过控制氧化还原条件,捕捉到一系列与二硫键相关的卷曲中间态,阐明了(30~51)单S-S键中间态的重要性,并发现BPTI的卷曲存在重排途径。

蛋白质卷曲途径 对于蛋白质是循单一途径卷曲还是多途径卷曲曾经有过激烈的争论,现在尚不能说已有定论。在比较了众多的模型之后,克萊頓认为BPTI的卷曲途径有一定代表性。卷曲开始时,伸展态与少数几个有序结构可逆地快速互变,启动有序结构生成的力是疏水作用。在不断的构象互变中,有些结构具有天然态的构象从而接近卷曲过渡态,如果过渡态有较高能障,则构象重组和变异可能发生,这类似于BPTI中的二硫键重排反应。一旦通过过渡态,天然态构象大部分都已生成,剩下的是构象微调,这一步类似于BPTI中的14-38二硫键的生成,速度很快。可见,这个模型在卷曲起始时是主张多途径的,但经历共同的过渡态,因此,整个卷曲途径是由多途径逐步过渡到单一途径的。

目前,蛋白质卷曲研究进入飞速发展时期,正如《生物学中的机会》一文指出的:卷曲问题取得重大进展的时机已经成熟。近期的研究热点在于:(1)方法学上将分子生物学方法与多维、杂核磁共振方法引入卷曲研究中来,这是使卷曲研究获得重大进展的根本保证。(2)卷曲起始点与中间态的进一步探索。(3)加强多肽片段卷曲研究以强调结构域的独立性和重要性。(4)用含N端在内的不同长度的肽段模拟新生肽链的卷曲。(5)分子伴侣介入卷曲和多亚基蛋白的装配问题。(6)各种类型的理论研究,如能量优化、分子动力学方法等。值得一提的是我国已批准蛋白质卷曲问题为八五期间重大基础研究课题的立项申请。

(中国科学院上海有机化学研究所石颖博士撰;许根俊审)

## 螺旋—环区—螺旋蛋白质—DNA结合蛋白的

**新类型** 关于DNA结合蛋白的研究已成为分子生物学的热点, DBP可结合在DNA的某一特定部位,它不仅可调节DNA的复制、重组和转录,还在染色质的解旋、盘绕和折叠过程中起重要作用。基因的活化蛋白和阻遏蛋白分子有以下几种特殊结构:螺旋—转折—螺旋(HTH)结构,它最初是在细菌的蛋白质中发现(W. H. Landschütz等1988);锌指结构,含有此结构的蛋白质是一类真核结构基因的调节因子(J. M. Bery, 1986),TFIIIA中有9个锌指结构;亮氨酸拉链(LZ)结构;存在于fos, Jun, mys基因编码的蛋白质中(W. H. Landschütz等, 1988);螺旋—环区—螺旋结构(J. Visvader等, 1991)。本文主要介绍HLH结构。

HLH结构由3部分组成,两端为 $\alpha$ 螺旋,中间是由一个或几个 $\beta$ -转角组成的环区,大约有60个氨基酸残基(P. Henlhion等, 1990)。两个 $\alpha$ 螺旋含有许多高度保守的疏水氨基酸, $\alpha$ -helix中有12个疏水氨基酸残基,在 $\alpha$ -螺旋的疏水侧,Leu和Phe具有高度的保守性,与它们相连的氨基酸残基也是疏水氨基酸。 $\alpha$ -helix II中有13个疏水氨基酸,其中有5个具有高度保守性(C. Murre等, 1989)。中间的环区一般含有多个阻碍 $\alpha$ -螺旋形成的氨基酸残基,多和Gly、Pro、Asp、Asn和Ser连接而成,如c-myc癌基因编码的蛋白质,其环区的氨基酸序列为Pro-Glu-Leu-Glu-Asn-Glu,这种序列同样也存在于E12以及MyoD基因编码的蛋白质中(C. Murre等, 1989)。同族的HLH结构蛋白的环区大小和组成在不同种属是相同的,但不同族的就有很大的差异(J. Visvader等, 1991)。一般在HLH结构的上游有富含碱性氨基酸的区域(BR),大约有10~20个氨基酸组成,它可分为3个碱性氨基酸聚集片段:B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>,这种结构特点在MyoD、Myogenin和Myf-5基因编码的蛋白质中都是高度保守的(R. Davis等, 1990)。近又发现BR缺乏或中断的一些HLH结构蛋白,它们是基因转录的负调节因子(R. Beueira等, N. J. ones等1990; C. Murre等, 1989)。HLH的存在是从氨基酸序列特征推断的,仍没有真正的结构数据发表。

HLH结构蛋白质能与同家族的其它蛋白质分子结合形成同源或异源的二聚体,同源二聚体与相应基因结合的能力比异源二聚体弱(C. Murre等, 1989)。HLH蛋白质可分为3类:A类为分布广泛的HLH蛋白,如E12、E47;B类是具有组织特异性的蛋白质,如MyoD的蛋白质产物;C类主要指myc编码的蛋白质。A类的与B类的可形成异源二聚体,而C类的则不能与A、B类的HLH蛋白结合成异源二聚体。1991年Wood和Eisenman利用含有c-myc编码蛋白的C末端的标记融合蛋白分离出一种蛋白质,被命名为Max(M. D. Cok, 1991)。Max也含有BR区、HLH和LZ结构,它可与3类myc基因编码的蛋白质结合,但不能与其它HLH结构蛋白结合,在不表达c-myc的细胞中也有Max的存在,可见Max还可能行使不依赖于c-myc的功能,或许Max可与其它未知蛋白质相结合,来拮抗myc-Max异源二聚体的基因激活作用(M. D. Cok, 1991)。1989年C. Murre等通过对E12与MyoD编码蛋白质结合的研究发现, $\alpha$ -螺旋直接参与HLH蛋白二聚体的形成,他们的实验资料证明,E12的编码基因发生Bal 31区带缺失时,E12的 $\alpha$ -helix I I的C末端就不能形成,MyoD-E12异源二聚体也就不能形成;同样, $\alpha$ -helix I I的编码基因的Bal 14区带缺失后,也会影响二聚体的形式。两个HLH蛋白质分子的 $\alpha$ -螺旋上的疏水氨基酸残基相互靠近,形成疏水键,从而形成二聚体。

Lesczynski和Rose认为HLH蛋白的 $\alpha$ -螺旋参与二聚体的形成,而环区保守性差,他们认为环区是HLH蛋白的DNA结合部位。Murre认为 $\alpha$ -螺旋在HLH蛋白的DNA结合部位,而Murre认为 $\alpha$ -螺旋在HLH蛋白与DNA结合的过程中起重要的作用。1990年Davis等通过基因定位突变的研究,表明BR才是HLH结构蛋白的DNA结合区,与DNA的结合之所以需要HLH结构,是因为HLH蛋白质只有形成二聚体之后才能与DNA结合,HLH结构区与BR的关系十分密切,只要在两者的交接处插入几个氨基酸残基,就会影响二聚体的形成以及

DNA的结合,如果环区的长度和氨基酸序列发生变化,也会影响与DNA的结合能力。HLH结构蛋白质的碱性区带有大量的正电荷,在溶液中不能形成稳定的 $\alpha$ 螺旋结构。当与DNA相靠近时,其正电荷被DNA的磷酸根离子所中和,从而形成稳定的 $\alpha$ 螺旋结构,然后与DNA双螺旋的大沟相结合,许多HLH蛋白的异源二聚体可与DNA上的E"Box"(CACGTG序列)相结合,在免疫球蛋白的重链基因、轻链基因和胰岛素基因的增强子上都含有E"Box",它还存在于肌肉肌酸激酶基因的启动子上。HLH结构蛋白作为一类转录调节因子,它不仅含有与DNA相结合的区域,还应含有转录激活区。myc基因的编码蛋白质是通过HLH结构区与Max形成异源二聚体的,二聚体又通过BR与DNA的特定区域相结合,而其转录激活作用完全取决于myc编码的蛋白质的N末端序列(M. D. Cole等,1991)。N末端序列只有与其它部分相连时才有细胞转化和转录激活作用,可见HLH结构蛋白的DNA结合区和激活区是密切相关的。

在原核生物中,有4种具有HLH结构的蛋白质对基因转录起调控作用。 $\lambda$ 阻遏蛋白和 $C_{80}$ 蛋白可调节噬菌体的 $\lambda$ 基因的表达;CAP在缺乏葡萄糖的情况下可激活大肠杆菌的乳糖操纵子的结构基因;还有色氨酸操纵子阻遏蛋白也含有HLH结构。在真核细胞中,myc基因编码的蛋白质以及Id蛋白(R. Beuerra等,1990;BR缺失的一种HLH结构蛋白质)对基因表达的调控作用研究较深入。Id蛋白是由一类cDNA编码的具有HLH结构的DNA结合蛋白质,它不具有碱性区,Robert和Davis证明,在体外Id至少可与3种HLH蛋白结合(E12 E47和MyoD的编码蛋白质),从而影响它们与DNA结合的能力。Id是肌肉肌酸激酶基因表达的负调节因子(R. Beuerra等,1990)。此外,Id在红细胞系、肌细胞以及网织红细胞系的分化过程中都处于低表达状态。Id可能对各类细胞系的其它HLH蛋白的基因激活作用起拮抗效应。在果蝇emc编码的HLH蛋白没有BR,hairy编码的蛋白质由于Pro的存在,BR出现中断,它们都对achaete-scute基因有负调节作用(J. Visader等,1991)。可见BR缺失或中断的HLH蛋白可形成无功能的异源二聚体,从而对其它的HLH蛋白激活的基因起抑制作用。

人的c-myc基因的编码产物是一种分子量为65kD的DNA结合蛋白(P65<sup>c-myc</sup>)(H. Persson等,1984)。在转录水平和转录过程之后,它都对基因的表达起调控作用,并且对不同的基因作用不同(F. Grignani等,1990)。P65<sup>c-myc</sup>对成纤维细胞的血纤溶酶原激活因子I(PA1-1)编码基因起激活作用(G. C. Prendergast等,1990),而对神经母细胞瘤和黑色素瘤细胞的HLA基因起阻遏作用(R. Versteeg等,1988),P65<sup>c-myc</sup>对PA1-1编码基因的调节主要发生在转录之后(F. Grignani等,1990)。此外,在一些非肿瘤细胞,如正常的淋巴细胞和成纤维细胞,c-myc的编码产物对于c-myc基因可产生自身反馈抑制,这种自身调节发生在转录起始水平,并且至少需要一种中介物或辅助因子来介导,但在肿瘤细胞中不存在这种自身负反馈。1989年H. Ariga等研究资料表明,c-myc基因的编码蛋白可促进肿瘤细胞c-myc基因的复制和转录的起始,可见c-myc编码蛋白对不同基因的作用方式和作用时间有所不同,这可能由于c-myc编码蛋白具有多种功能,也可能由于所参与的中介物和辅助因子不同。

HLH结构蛋白既能形成两种二聚体,又可在不同的时间对不同的基因表达产生正负调节作用,从而形成真核细胞基因表达的调控系统。

在Burkitt's淋巴瘤和其它B淋巴细胞肿瘤中,c-myc原癌基因可易位到免疫球蛋白的重链或轻链的调控区附近(J. Visader等,1991),这种易位并不改变c-myc的编码潜能。由于c-myc的编码蛋白可结合于Ig的重链基因的及轻链基因的增强子上的E"Box"上,同时由于c-myc的直接损伤,其自身反馈调节作用丧失,最终导致c-myc的高表达。在Burkitt's淋巴瘤细胞中还发现,c-myc基因的第1个内含子的点突变,在肿瘤细胞,c-myc的编码产物可以促进c-myc基因的复制,因而在小细胞肺

癌和前列腺细胞白血病可见到c-myc基因的扩增和高表达,其他HLH结构蛋白的编码基因(SCL,LYL1,E2A)的易位也与肿瘤的发生有关。

正常的HLH结构蛋白参与多种基因的调节作用,从而维持细胞正常的增殖、分化。当HLH基因发生突变、易位和扩增时,就可能引起肿瘤的发生。在myc编码的蛋白质中既有HLH结构,又有LZ结构,二者的关系还不清楚,HLH结构蛋白对正常细胞的基因表达的调控还应更深入地研究。

(北京医科大学李建业、意坦君撰)

### 膜锚蛋白

细胞膜是细胞内对外环境的屏障,它能进行物质交换、信息传递及细胞间相互作用等。细胞表面糖基的改变,影响细胞间的交联及信息传递(朱大刚,1988)。膜外表面的一些蛋白,如膜的表面抗原、各种受体、某些酶等通常多是糖蛋白;它们接受来自环境的各种刺激因素,通过膜系统影响或调节整个细胞的活动。膜表面结构直接参与细胞的代谢、识别、运动以及细胞的分裂、分化等活动的调节。不少膜蛋白是通过与糖链共价结合直接连到糖基磷脂酰肌醇(GPI)上,形成一种完全新型的"蛋白-糖-脂脂肪酸复合物",也是一种完全新型的蛋白质在膜上锚着的方式。

膜锚蛋白包括细胞粘附分子、免疫球蛋白超家族成员(如CD2,LEA-3,CD3,CD4,CD8等)、受体(如CR1)、酶(如AChE,ODC)等,它们仅存在于胞外,胞内部分,锚着于膜成分之一的磷脂肌醇,因而可使它们在膜上的运动性增强,从而使膜上有限的蛋白分子可接触大量的配体,以发挥生物效应。

细胞粘附分子中第1个分离得到的是神经节粘附分子(NCAM),对NCAM单一基因的分子的遗传学研究资料显示,NCAM的3种主要多肽形式的差异在羧基末端区,这种特异性是由NCAM的mRNA以不同形式剪接使不同的外显了特异结合造成的(B. A. Murray,1986)。3种多肽链从氨基末端到它们与细胞膜连接的区域之间的序列完全相同;其中两个较大的多肽是细胞膜整合蛋白,含细胞质结构域;最小的多肽是小表面结构多肽,缺乏跨膜结构域,靠磷脂酰肌醇与细胞膜相连,类似于其他细胞表面分子,推测NCAM的ssd链很可能在特异的磷脂酶C作用下从细胞膜释放(J. J. Hemperly等,1986)。所有这3种NCMA,氨基端完全相同,包括结合部位和多聚唾液酸附着位点,还含5个各自100个氨基酸组成的同源环状结构,与Ig超家族成员相应区域同源(G. C. Owens等,1987)。NCMA和Thy-1都在神经系统表达(A. F. Williams等,1988),基因部位位于11号染色体q23带上,且NCAM和Thy-1都是通过糖基磷脂酰肌醇(GPI)锚着在细胞膜上的膜锚蛋白。

膜锚蛋白的共同结构特点是:C端氨基酸残基的游离羧基与乙醇胺(Etn)的氨基缩合,乙醇胺的羟基通过磷酸二酯键与糖链的非还原端相接,而糖链的还原端和磷酸肌醇的肌醇6位羟基生成糖苷键。不同来源的GPI蛋白糖链的组成和结构均有差别,多数的结构是2~3个甘露糖(Man)和一个N-氨基葡萄糖(GlcN);有的则还有多个半乳糖(Gal);而Thy-1则还存在另一个乙醇胺,磷脂酰部分的脂肪酸结构也因膜锚蛋白的来源不同而有所差别。补体的衰变加速因子(DAF)能促进C3、C5转化酶的衰变,该蛋白的羧基端氨基酸具有磷脂锚结合蛋白信号,并发现这种信号存在于羧基端的最后8个氨基酸中(D. M. Lubin,1989)。DAF的膜锚结构中含乙醇胺、葡萄糖醇、肌醇、饱和的及非饱和的脂肪酸等,与其他膜锚蛋白如CRI,AChE等结构相似。

膜锚蛋白除与GPI连接成为膜结合型外,还存在可溶性型的,蛋白溶解于体液中,例如DAF通常存在于补体接触的细胞膜外表面,调节所在细胞膜上C3、C5转化酶活性。此外,还可溶性形式存在于尿液、唾液等体液中。用PI-PLC与红细胞温育,检测到膜上能释放20%的DAF。从红细胞中游离出来的DAF,能重新嵌入红细胞膜,并能保留其功能活性(A. S. Asch等,1986)。DAF是共价结合在磷脂酰肌醇上,其他膜锚蛋白亦相似,

故膜锚蛋白本身也可作为细胞膜释放活性蛋白因子的媒介,并与胞内信息传递也有一定关系(M. G. Low 等, 1986)。细胞表面蛋白(CSP)是存在于细胞表面、胞外基质和细胞外液的一种糖蛋白,又名纤粘素(Fn),它在细胞的粘附、分化、增殖和形态等方面起重要作用。粘着分子如LFA-3、硫酸类肝素蛋白聚糖等都是带有GPI的蛋白,分子由亚单位在肽链C端形成二硫交联键;各亚单位由相似的数个结构域构成;1~2个细胞结合部位;两个与肝素结合的部位;3个与纤维蛋白及1个与胶原结合的部位;共约2500个氨基酸组成的Fn分子中,结合细胞的只有4个氨基酸(Arg Gly Asp Ser, RGD)序列,后来又发现,仅RGD三肽序列,与细胞发生作用,Fn通过分子中特定功能域与细胞表面专一受体识别并相互作用,调节细胞的生长和分化,其中三肽序列RDG为必需。不同类型细胞产生的Fn,其糖基化程度及糖链类型不尽相同,用不同方法从不同细胞分离结合RDG三肽序列的受体不但分子量不同,且选择性的宽窄也不一样,Fn可与之结合的物质不下25种,包括各种细胞外基质大分子,如IV型胶原、透明质酸、乙酰乙酰肝素等蛋白多糖、玻璃粘连蛋白、细胞表面受体、肌动蛋白、肌球蛋白、纽带蛋白、C反应蛋白、凝血因子XIII<sub>a</sub>、补体C19、IgG转化因子、不对称乙酰胆碱酯酶等。转化细胞可利用Fn作粘着因子而锚着。由于各种粘着蛋白共有的氨基酸识别序列RDG三肽序列的发现,以及识别这个序列的各种受体分离,发现整合蛋白家族(R. O. Hynes, 1987)。有人认为,Fn可能就是很晚期抗原-5(very late antigen, VLA 5),Fn受体在细胞粘着和移动中起枢纽作用(S. K. Akiyama 等, 1989),因此,可利用RDG多肽抑制粘附,抑制癌细胞的粘附和转移等,具有重要的实用价值。

膜锚蛋白的蛋白部分在一定条件下很容易被内吞,进入细胞后蛋白部分被降解。膜锚蛋白(受体、酶、表面抗原等)内吞的结果是减少膜表面的相关蛋白,这本身可认为是调节细胞膜表面有生物活性的蛋白分子数量的一种方式。进入细胞后,蛋白分子被降解的同时,磷脂酰肌醇(PI)被特异的磷酸酶C(PLC)降解,生成第2信使物质(DG, IP<sub>3</sub>, Ca<sup>2+</sup>),进而使细胞产生生物效应。

膜蛋白由于用疏水肽段锚在膜上,且有膜内侧肽段,并与细胞骨架蛋白相互作用,因而限制了膜蛋白的运动性。膜锚蛋白与膜蛋白不同,通过与GPI直接连接而锚着在膜上,没有胞内肽段,因而其活动度大、流动性强,易于在膜上成簇,可继而引起不同的生物效应。例如采用折痕-标记免疫电镜观察红细胞膜上的CRI和中性粒细胞(PMN)膜上的CRI,每个细胞约含200~1000个CRI,而每个PMN含2500~6000个CRI但CRI在红细胞膜上呈簇集分布,几乎50%CRI呈≥3单位簇形式,而在PMN上则不到15%呈簇集分布。尽管PMN上有较多的CRI,但由于CRI处于非聚集状态,对C<sub>3b</sub>结合免疫复合物(IC)的亲合力低,在清除循环免疫复合物中作用不大;而细胞膜上的CRI呈簇集分布,这样数个C<sub>3b</sub>分子与之相互连接,使结合免疫复合物能力增强,免疫粘附后把IC带给肝脾巨噬细胞加以清除,为机体清除抗原异物(L. P. Pacaud 等, 1990)发挥特异的“红细胞免疫”功能(朱大栩, 1991)。

膜锚蛋白由于有膜结合型的和可溶性型的,因此膜锚的本身GPI也可作为细胞膜释放或结合蛋白活性因子的媒介,并与胞内信息传递也有一定关系。例如淋巴细胞功能相关抗原3(LFA-3)为CD2配体,属细胞表面糖蛋白,广泛分布于造血细胞、内皮细胞和上皮细胞上;LFA-3有两种形式:一种含有一个跨膜区域和一个较短的由12个氨基酸组成的细胞质结构域;另一种则没有跨膜区和胞内部分,通过磷脂酰肌醇直接与细胞膜连接(W. A. Sewell 等 1989),CD2在T细胞粘附和活化中起功能性作用。红细胞膜上的膜锚蛋白LFA-3通过与CD2结合,激活B细胞、T细胞、自然杀伤细胞等,进而促进它们分泌免疫活性因子(抗体、淋巴因子等),进一步调控机体的免疫应答反应(朱大栩, 1991)。LFA-3通过膜上GPI的结合解离,使之保持稳定的水平;如果游离的LFA-3过多进入体液,红细胞膜上的GPI与之

结合,降低血清中LFA-3水平,进而调控机体的免疫应答水平。LFA-3与CD2均含有免疫球蛋白(Ig)样结构域,长度为185个氨基酸,具明显的序列相似性;除CD2、LFA-3外,最近发现越来越多的Ig同源结构分子,组成一个免疫球蛋白的超家族(朱大栩, 1991)。这些分子在结构上具有极大的相似性,均含有Ig的V区、C区的同源结构域;功能上都通过Ig相关分子间的同种亲和或异种亲和相互作用而介导细胞间识别及相互作用。CD2和LFA-3基因位于相同的染色体带上,这两个相关基因可能由编码胞外结构域一个共同前体衍生而来。CD2较长的胞内结构域可能不存在于共同前体中,基因复制后CD2获得该区域,而LFA-3则没有。白细胞分化抗原CD44是血型抗原(ih<sup>a</sup>和In<sup>b</sup>)的骨架分子,在红细胞膜上CD44与LFA-3分子在空间上极为接近,可能调节CD2-LFA-3的相互作用,是体内“LFA-3-CD2粘附通路导致细胞粘附”的调节系统(B. F. Haynes 等, 1989)。

在受体的信号传导机制研究中,过去一向认为主要有两个第2信使系统:环式核苷酸系统(cAMP, cGMP, cCMP);磷酸肌醇系统(DG, IP<sub>3</sub>, Ca<sup>2+</sup>)。GPI作第2信使也具有可能性,在研究胰岛素与受体结合导致膜外侧蛋白水解时,发现产生的两个寡糖肽具有细胞内效应;实验证明这些寡糖肽均能模拟胰岛素生理功能,提示它们为胰岛素第2信使(L. Lerner 等, 1981)。后来发现,胰岛素能诱导糖基化磷脂酰肌醇(GPI)合成增加;磷脂酰肌醇(PI)被特异的PI-PLC分解为甘油二酯(DG)和磷酸肌醇寡糖(IP-gly),IP-gly能抑制A-激酶活性模拟胰岛素功能,应认为PI-gly就是胰岛素的第2信使(G. N. Gaulton 等, 1988);而先前提到的寡糖肽实际上是第2信使IP-gly的前体。实验发现,抗原或分裂因子激活T淋巴细胞后,胰岛素诱导GPI合成增加,且GPI与胰岛素受体的出现相平行,进一步分析发现,T细胞活化蛋白Thy-1含有标记的GPI,证明抗原活化的T细胞有GPI合成。GPI不仅参与胰岛素的信息传递,而且是几种T细胞生长调控中起重要作用的膜锚蛋白(如Thy-1,鸟氨酸脱羧酶等)的锚链。Thy-1为表面抗原,分子量为18000~25000。T细胞的膜表面糖蛋白,易从脾及胸腺中分离得到;这是一种受体蛋白,可通过GPI结构锚着于膜上。鸟氨酸脱羧酶(ODC)作用于鸟氨酸后形成腐胺,腐胺转丙胺后生成精胺,继而生成精胺、腐胺、精胺、精胺这3种成分统称多胺,多胺能通过离子键、氢键与核酸(DNA, RNA)、蛋白及含负电基团的磷脂等物质结合,调节它们的生物活性和功能,控制细胞的生长、增殖、分裂、分化(F. Flamigni 等, 1986)。胰岛素受体产生的GPI增加,通过结合Thy-1, ODC等可引起后继的生物效应。

总之, GPI在跨膜信息传递中有重要作用,其前体含GPI的膜锚蛋白参与早期的信息传递;而GPI本身则参与后期的信息传递。

(浙江省海宁市市肿瘤防治研究所朱大栩撰)

**肝脏脂蛋白受体** 血浆脂蛋白是运输血脂的形式,由脂质和蛋白质组成,可分为高密度脂蛋白(HDL)、低密度脂蛋白(LDL)、极低密度脂蛋白(VLDL)及乳糜微粒(CM)四类。流行病学调查表明,血浆脂蛋白的异常改变与动脉粥样硬化性疾病有关,如血浆HDL降低及LDL升高可导致冠心病。大量研究资料表明,血浆脂蛋白含量由其代谢决定。1988年J. Breslow将血浆脂蛋白代谢归纳为3条代谢途径。第一,外源性甘油三酯(TG)及胆固醇(Ch)转运途径:食入的脂肪及Ch在小肠中被消化吸收,并在小肠粘膜细胞中重新组装成富含TG及Ch的颗粒,即CM。CM进入血液循环,在脂蛋白脂酶(LPL)作用下,其TG被逐步水解,CM转变为富含Ch的CM残粒后被肝脏摄取清除。第二,内源性TG及Ch转运途径:即由肝脏制造分泌入血浆的LDL代谢途径。VLDL富含TG,也含有Ch,进入血浆后,其TG被LPL水解转变为中密度脂蛋白(IDL),IDL部分被肝脏清除,部分IDL的TG被肝脏甘油三酯酶(HLP)进一步水解形成LDL。

LDL 为富含 Ch 的脂蛋白,约 70% 被肝脏清除,其余被肝外组织清除。第三,胆固醇逆向转运(RCR)途径,肝外组织 Ch 必须运至肝脏,大部分转变为胆汁酸从胆道排出,这一过程主要由 HDL 参与完成。新生的圆盘状 HDL 由小肠及肝脏分泌入血,在肝外组织摄取 Ch 后,经卵磷脂胆固醇酰基转移酶(LCAT)的作用,将摄取的 Ch 酯化,再加入 CM 及 VLDL 脂解时所转移的 apoC<sup>II</sup>、磷脂等转变为成熟的球状 HDL。HDL 通过胆固醇转移蛋白(CETP)将其内核的胆固醇酯(CE)转移到 VLDL、IDL 或 LDL,最后被肝脏清除。肝脏 HDL 受体选择性地摄取 HDL 中的 CE。

肝脏在血浆脂蛋白代谢中起重要作用,它不仅合成和分泌 VLDL 及 HDL,还是摄取和降解血浆脂蛋白的主要器官,CM 残粒、VLDL、HDL<sub>2</sub> 及 70% 左右的 LDL 均在肝脏被摄取和降解。大量研究资料表明,肝脏摄取血浆脂蛋白主要通过肝细胞表面脂蛋白受体完成。LDL 的摄取由 LDL 受体介导实现,CM 残粒的摄取由 apoE 受体介导完成。还有 HDL 受体等多种脂蛋白受体参与肝脏的脂蛋白的分解代谢及其调节,迄今已发现肝实质细胞及非实质细胞表面至少存在 LDL 受体、HDL 受体及 apoA<sup>IV</sup> 受体、apoE 受体、VLDL 结合位点和 apoC<sup>III</sup> 受体等脂蛋白受体或结合位点。由于肝非实质细胞位于肝实质细胞与血液之间,浸浴在血液中,直接与血浆中各种脂蛋白接触,肝非实质细胞在脂蛋白降解中比肝实质细胞具有更重要的作用。

自 1974 年 Brown Goldstein 发现 LDL 受体以来,LDL 受体的研究已取得重大进展。LDL 受体分布于细胞膜,LDL 通过 apoB<sup>100</sup> 的精氨酸和赖氨酸残基所带的正电荷与 LDL 受体结合,结合需要 Ca<sup>2+</sup>,最适 pH 为 7.5;受体被链霉菌蛋白酶融合后被水解,完成 LDL 的降解。LDL 受体蛋白的一级结构已经阐明(J. Goldstein 和 M. Brown, 1984),它是由 839 个氨基酸组成的单链多肽,糖分子连接在丝氨酸及苏氨酸残基上。受体蛋白有五个结构域:结构域 I,由 N 端的 322 个氨基酸构成,含成簇带负电荷的氨基酸,可与 apoB<sup>100</sup> 分子中带正电荷的精氨酸及赖氨酸残基特异结合,是 LDL 受体的结合部位;结构域 II,由 350 个氨基酸构成,其部分组成与表皮生长因子的组成有同源性;结构域 III,由 48 个氨基酸组成,其中 18 个是苏氨酸及丝氨酸残基,与糖分子形成 O 糖苷键,此区紧靠膜外,使 LDL 受体结合部位固定伸出膜外,以完成结合配体的功能;结构域 IV,由 22 个氨基酸构成,是跨细胞膜的区域;结构域 V,由 C 端 50 个氨基酸构成,可能与胞浆内的内包含素蛋白结合。1977 年 R. Mahley 的实验资料表明,LDL 受体除了可以与含 apoB<sup>100</sup> 的脂蛋白(VLDL、IDL 及 LCL)特异结合外,还可与含 apoE 的脂蛋白(HDL<sub>2</sub>)结合。因此,LDL 受体又被称为 apoBE 受体。

LDL 受体数目受 Ch 浓度向下调节及 Ch 需要量的影响,当胆固醇浓度升高或需要量减少时,LDL 受体数目减少,反之,当胆固醇浓度降低或需要量增加时,LDL 受体数目增加。Kovanen 等发现,牛有许多组织都有高亲和的 LDL 受体,每克组织的结合活性以肾上腺和卵巢黄体最高,但就整个器官而言,肝脏的 LDL 受体数目远多于其它器官。他们用人胚胎进行实验也发现相同的结果。Spady 等发现,静脉注射后,70% 左右的标记 LDL 通过肝脏 LDL 受体途径摄取。LDL 受体主要参与内源性 Ch 代谢。VLDL 转变成 HDL,小部分 IDL 通过 apoB<sup>100</sup> 及 apoE 与 LDL 受体结合,在肝脏被清除;大部分 IDL 转变成 LDL,被各组织细胞(主要是肝脏)的 LDL 受体摄取降解,其中的 apoB<sup>100</sup> 被溶酶体中的蛋白酶水解成氨基酸,CE 被酯酶水解或游离胆固醇(FC)。FC 在一般细胞用于合成细胞膜;在肾上腺、卵巢及睾丸用于合成类固醇激素,在肝脏被转变为胆汁酸,是机体排出胆固醇的主要途径。同时,FC 对细胞 Ch 代谢有重要的调节作用,它可以在多个水平抑制 HMGCoA 还原酶的活性,从而抑制的合成(M. Brown 和 J. Goldstein 1986),称之为抑制 HMGCoA 还原酶活性的第二信使,它抑制该酶的转录,并促进酶蛋白的分解;它可以通过降低 LDL 受体 mRNA 浓度,抑制 LDL 受体的合成,

从而减少细胞对 LDL 的进一步摄取;它还可以激活 ACA1,使过多的 Ch 酯化,并以 CE 的形式储存于胞浆。通过这些调节作用,维持细胞内 FC 的平衡。

Sherrill 等首先发现,用狗 HDL<sub>2</sub> 灌注鼠肝脏时,肝脏对 HDL 的摄取呈可饱和及高亲和特征,用 HDL<sub>2</sub> 和 CM 残粒进行竞争实验表明,肝脏对这两种大分子的摄取机制相同。1981 年 R. Mahley 等用肝细胞膜进行的受体结合实验表明,HDL<sub>2</sub> 与 apoE 受体的结合力比与 apoBE 受体的结合力强;apoE 受体与 HDL<sub>2</sub> 的结合不被 LDL 抑制,而 apoBE 受体与 HDL<sub>2</sub> 的结合能被 LDL 抑制,说明肝脏 apoE 受体是有别于 apoBE 的另一种独立受体。Windler 等也证实,apoE 受体只与 apoE 或 apoE 的脂蛋白结合,不能与 apoB 结合,且只存在于肝脏。利用 apoE 受体的单克隆抗体研究资料显示,经 HDL<sub>2</sub> 亲和层析纯化的 apoE 受体含 3 种蛋白质,其中两种分子量为 56kd,另一种分子量为 59kd。1986 年 Hui 等证实,分子量为 56kd 的蛋白质是肝细胞线粒体 F<sub>1</sub> ATP 酶的  $\alpha$  亚基和  $\beta$  亚基,纯化的 F<sub>1</sub> ATP 酶与含 apoE 的脂蛋白也有高亲和力结合,而分子量为 59kd 的蛋白质可能是一种独立的蛋白质,位于细胞内质网膜。尽管肝细胞这 3 种蛋白质与 apoE 均有高亲和结合能力,Hui 等推测,它们可能在细胞内不同细胞器之间或细胞器内的 apoE 或含 apoE 的脂蛋白运转中发挥作用。肝脏 apoE 受体主要在外源性 Ch 及 TG 的代谢中发挥作用。CM 降解成富含 Ch 的残粒,被肝脏 apoE 受体识别摄取而从血浆中清除。虽然 CM 残粒中含有多种载脂蛋白,但 apoE 是 CM 残粒被肝脏识别清除的决定因素。apoE 也确能与肝外组织 LDL 受体结合,所以含外源性脂质的 CM 残粒也有部分经 LDL 受体途径清除。

1976 年, Gwynne 等首先在大鼠肾上腺皮质细胞膜上发现特有的、高亲和可饱和的 HDL 结合部位,提示细胞膜上可能存在 HDL 受体。1990 年 M. Fernandez 等用豚鼠肝细胞膜进行的实验表明,肝细胞膜上存在着特有的 HDL 受体,并发现 HDL 与受体的结合有温度依赖性。他们分别用同种的和异种的 HDL 进行受体结合实验,发现同种 HDL 和异种 HDL 结合的动力学性质明显不同。1989 年张林华等用大鼠肝细胞膜进行的实验也证实,肝细胞膜上存在着特有的 HDL 受体,并可特异结合人及大鼠 HDL,不依赖 Ca<sup>2+</sup> 激活,对胰蛋白酶不敏感,apoC<sup>III</sup> 对 HDL 与 HDL 受体结合有重要的调节作用。他们还发现,新分离的大鼠肝实质细胞与肝非实质细胞均存在高亲和的和及可饱和的 HDL 受体,且非实质细胞 HDL 受体活性比实质细胞受体活性高 4~10 倍,可能肝非实质细胞在肝脏清除 HDL 过程中起着比肝实质细胞更重要的作用。1991 年 J. Oram 等纯化出一种分子量为 110kd 的膜蛋白,它具有很多完整细胞膜上高亲和 HDL 结合位点的特性,能与含 apoA<sup>I</sup> 或 apoA<sup>II</sup> 的脂蛋白结合,不能与 LDL、修饰 LDL 或含 apoE 的脂蛋白结合。

HDL 参与 RCT 各个环节,Ch 从肝外细胞的清除及进入肝细胞是 RCT 的关键环节,均与 HDL 受体介导有关(J. Oram 等, 1991)。在外周细胞,HDL 受体介导细胞内 Ch 的清除。将 HDL 与负荷标记 Ch 的成纤维细胞一起孵育,能促使标记 Ch 从细胞浆转移到细胞膜,进而外流至培养基中。HDL<sub>3</sub> 的这种作用受 TNM(四硝基甲烷)的抑制,TNM 不仅能使 HDL<sub>3</sub> 与细胞的结合消失,也能使细胞内 Ch 的转移及外流减少。将 TNM 处理的 HDL<sub>3</sub> 进行氨基酸分析发现,特异的修饰部位是酪氨酸残基,表明 HDL<sub>3</sub> 中的酪氨酸残基参与受体识别。将 HDL<sub>3</sub> 用蛋白酶处理后,与 110kd 膜蛋白的结合消失,但不能使其与完整细胞的结合减少,说明 HDL 与细胞表面的结合由脂质而不是由蛋白质介导,但与细胞膜蛋白受体分子的结合是由蛋白质介导。蛋白酶处理后的 HDL<sub>3</sub> 虽能增加细胞质膜上 Ch 的外流,但选择性地使胞浆移出 Ch 的能力显著降低,表明细胞质膜 Ch 的外流由 HDL 脂质介导,而细胞内多余 Ch 的移出则由 HDL 的载脂蛋白介导。HDL 载脂蛋白与受体的结合,使细胞内 Ch 转移到细胞表面,再由 HDL 或其它富含脂质的接受体从细胞表面移走,是较为流行

的一种关于 Ch 从外周细胞清除的假说。在肝脏, HDL 受体介导 Ch 的摄取降解和 LDL 受体介导的 LDL 胆固醇摄取降解不同。肝脏摄取 HDL 后, HDL 并不迅速转移至溶酶体降解, 经选择性摄取的 HDL 胆固醇酯可被质膜的酯酶水解, 产生的 FC 用于合成胆汁酸, 而其蛋白质则直接分泌入胆汁。肝细胞膜 HDL 受体介导的 HDL 在肝细胞内的降解可能不通过溶酶体系统完成, 其详细机制尚待阐明。

1986 年 S. Gustafson 发现, 肝内皮细胞与标记 VLDL 的结合为可饱和性的及高亲和性的, 这种结合能被非标记的 VLDL 抑制。1989 年张林华等也证实, 大鼠肝实质细胞及非实质细胞均存在高亲和的和可饱和的 VLDL 结合位点, 且非实质细胞 VLDL 结合活性比实质细胞 VLDL 结合活性高 10~30 倍。Gustafson 用标记 VLDL 静脉注射给大鼠, 发现 5min 时 51% 在肝非实质细胞, 30min 时 87% 在肝实质细胞。VLDL 中含有 apoB 及 apoE, 已观察到的 VLDL 结合位点是否就是 LDL 受体或 apoE 受体, 目前尚无充分的证据加以否定。肝脏 VLDL 结合位点的配体特异性实验资料表明 (S. Gustafson, 1986; 张林华, 1989), 非标记的 HDL 及非标记的 LDL 均能抑制标记 VLDL 的特异结合, 这一结果不支持肝脏存在独立的 VLDL 受体; 但 apoC III 能抑制标记 VLDL 与肝细胞 VLDL 受体结合, 表明肝 VLDL 结合位点又不同于已知的 LDL 受体。Bradley 等发现, 小鼠 P338D1 巨噬细胞存在不同于 LDL 受体的 VLDL 受体。1983 年 Z. C. Feng 发现, 巨噬细胞 VLDL 受体有一定的配体特异性, VLDL 和  $\beta$ -VLDL 可有效地与标记 VLDL 竞争并与巨噬细胞结合, 而 LDL、HDL 的竞争作用很弱, 甚至没有竞争作用。他们还发现, 巨噬细胞内负荷 TG 或 Ch 后, 对 VLDL 受体仅有轻微的向下调节作用, 巨噬细胞可以不断地摄取 VLDL, 使细胞内堆积 TG 或 Ch 而转化为泡沫细胞, 表明至少在巨噬细胞表面可能存在独立的 VLDL 受体, 至于肝脏是否存在独立的 VLDL 受体则尚待进一步研究。

许多迹象表明, 肝脏可能存在 apoA IV 受体。1990 年 R. Winberg 等证实, 人肝细胞膜上存在着可饱和的、可逆的、高亲和和特异结合 apoA IV 的位点, 即 apoA IV 受体。apoA IV 与人肝细胞膜的这种特异结合对温度敏感, 部分依赖  $Ca^{2+}$ 。当 apoA IV 用盐酸胍处理或肝细胞膜蛋白用链霉蛋白酶处理后, apoA IV 与肝细胞膜的结合消失; 当 apoA IV 渗入磷脂/胆固醇蛋白脂质体后, 与肝细胞膜结合增加。抑制实验资料表明, apoA IV、apoA I 及 HDL 均能有效地抑制标记 apoA IV 脂蛋白入细胞。由于 apoA IV 主要存在于 CM 及 HDL 中, 因此, apoA IV 受体可能与肝脏清除这两种含 apoA IV 的脂蛋白有关。1990 年 G. Hiselli 等从大鼠肝细胞膜上增溶出分子量为 95kd 的 apoA IV 特异结合蛋白, 它不仅与含 apoA IV 脂质体特异结合, 也能与含 apo I 及不含 apoE HDL 脂质体的结合, 不能与 LDL 及 apoC III 结合。将这种膜蛋白用链霉蛋白酶处理后, 与 apoA IV 的识别结合作用消失。游离 apoA IV 及不含 apoE HDL 与 95kd 膜蛋白的结合提示, 该膜蛋白在含 apoA IV HDL 的摄取中发挥作用。根据上述特性, 考虑到 SDS-PAGE 测定蛋白质表观分子量的某些不确定性, Hiselli 等认为, 这种 95kd 的膜蛋白就是 J. Oram 等所纯化的 110kd HDL 受体蛋白, 并把它们统称为 apoA IV/apoA I 结合位点。虽然 apoA IV 与 apoA I 在结构上有相当大的同源性, 但它们与肝细胞的结合特性不相同, 尤其是在与磷脂的竞争性作用, 对链霉蛋白酶的敏感性以及与肝细胞结合后的内在化等方面。这可能是由于这两种载脂蛋白存在于脂蛋白表面所形成的特定构象对结合特性的影响, 也可能是由于 apoA IV 和 apoA I 与肝细胞表面的结合位点的亲和力不同。对肝细胞的 95kd apoA IV/apoA I 结合位点的配体特性、理化性质尚有待进一步研究。

apoC III 是 VLDL 中含量最多的一种载脂蛋白。有实验资料证明, apoC III 除可以抑制 LPL 活性外, 还可以抑制肝细胞 apoE 受体的识别功能, 在 VLDL 及 HDL 等脂蛋白的分解代谢中起重要调节作用。1979 年 Y. Chao 等发现, apoCS 能抑制肝细胞识别

结合 VLDL。1983 年 T. Van Berkel 等的实验资料表明, apoC III 可抑制 CM 与大鼠肝实质细胞及非实质细胞的结合。S. Gustafson 1986 年的研究资料显示, 标记 apoC III 与肝内皮细胞的结合是可饱和的, Scatchard 作图分析发现, 这种结合具有受体结合的特征; 抑制实验资料表明, 标记 apoC III 与肝内皮细胞的结合能被非标记 apoC III 抑制。1989 年张林华等的研究也证实, 大鼠肝非实质细胞膜上存在特异的 apoC III 受体; 同时, 他们还发现, apoC III 不仅可抑制标记 VLDL 与肝实质细胞的结合, 还可以抑制不含 apoE 的标记 HDL 与纯化肝细胞膜的结合; 人血浆 VLDL 中 apoC III 含量升高可抑制 VLDL 清除, 而 HDL 中 apoC III 含量减少则使 HDL 清除加快。他们进行的动物实验表明, VLDL 及 HDL 受体活性降低的同时, 伴有 apoC III 受体活性增高。1991 年冯定志在人及小鼠肝细胞膜上亦证实存在 apoC III 受体, 它不同于已发现的 LDL 受体及 apoE 受体, 也不同于 HDL 受体, apoC III 与受体的结合不依赖于  $Ca^{2+}$ , 不受 EDTA 抑制, 对胰蛋白酶敏感。

许多实验者发现, apoC III 抑制肝脏对富含 TG 脂蛋白的摄取 (Y. Chao 等, 1979), apoC III 抑制肝脏对 HDL 的摄取。apoC III 受体活性增高的同时, 伴有 HDL 及 VLDL 受体活性的降低 (张林华, 1989)。体内实验资料也表明, apoC III 直接影响血浆 HDL 及 VLDL 的清除, 当血浆中 VLDL-apoB 及 TG 升高时, VLDL 中 apoC III 含量大幅度升高。1991 年方定志等的组织细胞定位研究资料表明, apoC III 受体仅分布在肝细胞膜上, 推测上述抑制作用可能是由于 VLDL 中 apoC III 与肝细胞膜上 apoC III 受体结合后, 导致肝细胞膜上清除 VLDL 的受体功能发生改变, 识别结合 VLA 的作用下降或/和在内在化减少, 引起血浆 VLDL 的清除减少, 促成血浆 VLDL 增加。当 HDL 中 apoC III 减少时, 这种抑制作用减弱, HDL 与肝细胞膜上 HDL 受体的识别结合或/和在内在化加快, HDL 清除加快, 血浆 HDL 降低。对 apoC III 受体的研究获得一些初步的结果, 但是否存在独立的 apoC III 受体, 其结构、性质、功能等如何, 均有待进一步阐明。

(华西医科大学生物化学与分子生物学研究所方定志、刘秉文撰)

**核糖核酸 RNA** 核糖核酸是核酸的一种, 因含糖核而得名。它又可分为多种, 细胞内含量较多的有信使 RNA (mRNA)、核糖体 RNA (rRNA) 和转移 RNA (tRNA)。它们的主要功能是参与蛋白质的生物合成。在 RNA 病毒和噬菌体内, RNA 是遗传信息的载体。此外, 还有核小分子 RNA (snRNA) 参与 RNA 前体加工; 反义 RNA 是主要的调控物质。酶活性 RNA (Ribozyme) 的发现打破了“酶就是蛋白质”的经典概念。酶活性 RNA 以及根据反义 RNA 原理而设计的反义核酸在阻断有害基因表达方面的应用前景正日益宽广。

1957~1961 年间, 先后发现 tRNA、rRNA 和 mRNA。1965 年, 霍利 (R. W. Holley) 等测出第 1 个核酸 (酵母丙氨酸 tRNA) 的 1 级结构。60 年代中期, 尼伦伯格 (M. W. Nirenberg) 等发现遗传密码。以后的 10 多年中, 基本搞清楚 RNA 的转录过程、转录后加工过程、蛋白质生物合成过程、RNA 的结构等。80 年代后, RNA 的研究更趋活跃, 新的发现层出不穷。真核生物的转录调控、转录后加工、蛋白质生物合成的研究正在不断深入。

tRNA 在蛋白质生物合成中起着把 mRNA 的遗传信息翻译成氨基酸顺序的关键性作用 (参见“转移核糖核酸”条)。核糖体是细胞合成蛋白质的唯一场所。早先的模型表明核糖体只有两个 tRNA 结合位点: A 位即氨酰基 tRNA 结合位点, P 位即肽酰 tRNA 位点。80 年代末, 尼尔豪斯 (H. Nierhaus) 等提出核糖体的 3 点模式, 认为核糖体上有 3 个 tRNA 结合位点。除 A、P 两个位点外, 还有一个 E 位, 即 tRNA 出口位。按新的模型, 肽键形成时, 原来在 P 位的空载 tRNA 并不立即从核糖体上解离下来, 而是移位到 E 位。当新的氨酰 tRNA 结合 A 位时, 核糖体构象发生改变, E 位的空载 tRNA 才解离下来。构象的改变提高了对氨酰



tRNA 的识别作用,从而提高了蛋白质合成的正确性。蛋白质合成的整个过程涉及到 200 多个生物大分子的协同作用,各个蛋白质与 RNA 的具体作用目前尚不甚了解。大肠杆菌核糖体含有 3 种 RNA (5S、16S、23S) 和 30 多种蛋白质,它们的序列已全部被测定。诺勒(H. F. Noller)等提出一个被广泛接受的 16S rRNA 2 级结构模型。嗜热杆菌核糖体结晶实验已获得成功,为核糖体高级结构的研究创造了条件。赫尔(W. Herr)等认为大肠杆菌核糖体的两个亚基之间的结合主要靠 16S 和 23S RNA 之间的碱基配来实现。实验资料表明,16S RNA 的一个含 790 个核苷酸的环位于两个亚基相接触的平面上。在 16S RNA 中有 3 个区域可与 tRNA 的结合而被保护。它们是核糖体上 mRNA 和 tRNA 的结合部位,亦即核糖体解码部位。23S RNA 的区域 V 与肽基转移酶有关。区 V 的中心环上,许多保守的核苷酸序列代表 A 位、P 位和 E 位。

真核基因转录调控的研究正集中在顺式作用元件和反式作用因子以及它们的相互作用等方面。顺式作用元件包括转录起始位点及其上游约 30bp 处的 TATA 盒,上游几百 bp 处的 CCAAT 序列或 GC 盒,或其它特异基因的调控序列。有的基因中有增强子(enhancer)和抑制子(silencer)。反式作用因子分两类,结合 TATA 盒附近的称转录因子,有 TFIIA、IIB、IID、IIE 等;结合上游调控序列的称转录调控因子,如 SPI、CTF、AP1、AP2、Oct-1、Oct-2、CRER 等。已被分离纯化或鉴定的蛋白质因子有几百种,新的因子还在不断被发现。反式作用因子通过与顺式元件结合起调控作用。激素的调控也是通过引发核酸与蛋白质、蛋白质与蛋白质间的相互作用完成。

许多真核生物核内 mRNA 前体的编码区是不连续的,它们被一个或数个间隔序列(IVS)所分开,IVS 通过剪接被除去。IVS 来自基因中的内含子(intron)。80 年代中期夏普(P. A. Sharp)提出细胞核 mRNA 前体在剪接体上经过套环结构中间产物而进行剪接的机制。剪接体至少有 U1、U2、U5、U4/6 四种细胞核小分子 RNA 与蛋白质的复合物(snRNP)以及 C1 和 C2 两种细胞核不均一核蛋白体蛋白参与组装而成。而线粒体 RNA 前体的剪接分属于 I 型和 II 型内含子的自我剪接。某些单基因的初始转录物可含有多个剪接位点,因而通过不同的剪接可以得到多种不同的蛋白。

mRNA 的编辑是由伯恩(R. Benne)1986 年发现的一种新的加工方式。锥体虫线粒体细胞色素 C 氧化酶亚基 II 的 mRNA 中存在着不同于其 DNA 序列的阅读框架。差异是由于初始转录物的某些位点被加入若干个尿嘧啶核苷酸引起的。实验结果表明,mRNA 的编辑是 3' 向 5' 方向进行的,可以通过加尿苷酸、删尿苷酸将胞苷酸转换成尿苷酸或将尿苷酸转换成胞苷酸以及加鸟苷酸、或腺苷酸等多种方式来进行。tRNA 编辑也可能存在。mRNA 的编辑可以发生在编码区、3' 不翻译区、5' 不翻译区和 Poly A 区,但没有发现所有上述区域均被编辑的。编码区的编辑可以引起阅读框架的开放或关闭、移码、增加信息、改善 mRNA 与核糖体的结合状态、改变密码子的种类等功能。在锥体虫线粒体细胞色素氧化酶亚基 II 的 mRNA 中,因编辑增加了 376 个核苷酸,占该 mRNA 总编码区长度的 55%。因此该基因被称为隐匿基因。近来在锥体虫中找到一些小子 80 核苷酸的指导 RNA (gRNA),它们是有其它基因编码的。gRNA 有 5' 锚式结构和 3' 寡聚尿苷酸结构。它被作为编辑的模板,反应的历程类似于四膜虫酶活性 RNA 的方式。因此切赫(T. Cech)称 RNA 编辑可能是最小的插入顺序。其它几种编辑的机制还不清楚。3' 端的成熟有两种方式:组蛋白 mRNA 前体只需要切去 3' 端多余序列,其它 mRNA 前体则还需加上 Poly A 末端。

核糖体对起始密码的识别一般认为是核糖体亚基在 mRNA 上扫描完成的。1988 年索南伯格(N. Sonenberg)认为 mRNA 首先与 eIF-4B 结合,eIF-4B 在 mRNA 5' 端扫描发现起始密码子,然后 43S 起始复合物与 mRNA 结合。另有一些核糖体并不扫描 mRNA 的 5' 端区而直接与 mRNA 内部的起始密码子结合并开

始翻译。

以往认为 mRNA 编码区内每 3 个核苷酸编码一个氨基酸,密码子间没有停顿间隔。80 年代发现一些翻译过程中有跳跃现象。最典型的是黄(W. M. Huang)等 1988 年发现 T4 噬菌体基因拓扑异构酶 60 中 50 个核苷酸在翻译过程中被跳过。

1969 年,博勒(K. Bovre)等观察到入噬菌体 DNA 同一区段的双链都被转录。与正链 RNA 互补的 RNA 即反义 RNA。它是生物体内一种重要调控物质,可在转录、翻译等多层次上调控。有迹象表明真核生物内亦有反义 RNA,且主要在翻译水平上进行调控。根据反义 RNA 作用原理,可把反义基因导入细胞,在细胞内转录出反义 RNA。赞姆尼克(P. C. Zamecnik)等 1978 年用人工寡聚核酸(主要是 DNA)直接导入生物体。这两种途径都可用于抑制有害基因的表达。

酶活性 RNA 也是反义 RNA 的一种。1982 年初赫发现四膜虫 rRNA 前体的自我剪接(属剪接型 ribozyme),奥尔特曼(S. Altman)等发现核糖核酸酶 P 的核酸部分(属剪切型 ribozyme)即可催化 tRNA 前体 5' 端的成熟。西蒙斯(R. H. Symons)发现自我剪切的锤头结构并用人工合成的锤头 ribozyme 剪切其它 RNA,促进了 ribozyme 用于抑制有害基因表达的研究。酶活性 RNA 的发现,表明 RNA 是一种既能携带遗传信息又有生物催化功能的生物大分子。1989 年,多尔特纳(J. A. Doudna)和索尔斯得克(J. W. Szostak)用四膜虫 ribozyme 把几个寡聚 RNA 连接成与 RNA 模板互补的 42 聚 RNA。这个实验资料证明 RNA 具有自我复制的功能。

今后 RNA 研究的热点将有:(1)RNA 的结构研究。RNA 结构比 DNA 复杂,所以 RNA 测序方法还不完善。1991 年鲁特(M. R. Rould)测出谷氨酰胺 tRNA 与合成酶、ATP 的分辨率为 2.8 Å 的 X-衍射图,人们将会了解更多有关蛋白质与核酸的相互作用的细节。(2)RNA 转录的调控研究会推出各种调控模式,发现新的顺式元件和反式因子。(3)RNA 转录后加工及转运的细节及其生理意义,特别是 rRNA 前体的成熟,因为它在核仁中进行,所以研究有相当的难度。(4)蛋白质生物合成的细节。(5)核酸与蛋白质的相互作用,如 snRNP、hnRNP、mRNP、剪接体、编辑体,真核生物核糖体的结构与功能等;(6)发现新的 RNA 品种及 RNA 的新功能。(7)RNA 的应用研究。乌伦贝格(O. C. Uhlenbeck)1990 年提出 20 世纪的 90 年代是 RNA 的 10 年。

#### 参考文献

- 1 Cech T R, et al. Cell, 1981, 27: 487~496
- 2 Guerrier-takada C, Altman S. Science, 1984, 223: 285~286
- 3 Sharp P A. Science, 1987, 235: 766~771
- 4 Shaw J M, et al. Cell, 1988, 53: 401~411
- 5 Sonenberg N. Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology, 1988, 35: 173~207
- 6 Huang W M, et al. Science, 1988, 239: 1005~1012
- 7 Gnirke A, et al. J B C. 1989, 264: 7291~7301

(中国科学院上海生物化学研究所博士生导师金由辛撰)

**转移核糖核酸 tRNA** tRNA 是一类小分子 RNA。分子量为 25 000~30 000,沉降系数为 4S。它在蛋白质生物合成过程中起着关键性的作用,是将核酸的遗传信息翻译成蛋白质一级结构的生物大分子化合物。它还参与很多重要的生命活动。

tRNA 发现于 1957 年。tRNA 与核糖体结合的试验导致遗传密码的发现。霍利(Holley)解决了第 1 个 tRNA(酵母丙氨酸 tRNA)的分离纯化问题,于 1965 年测出它的全序列并提出 tRNA 的三叶草型二级结构。到 1990 年底已测出一级结构的 tRNA 及 tRNA 基因达 1 710 种。一级结构测定、X-衍射分析、自由能计算等各种物理化学分析结果表明,tRNA 三叶草型二级结构是正确的。整个分子由四茎(氨基酸接受茎、D 茎、反密码茎和 TψC 茎)、四环(D 环、反密码环、可变环和 TψC 环)组成。80 年代初发现哺乳动物线粒体丝氨酸 tRNA 只有 63 个核苷酸(沉

降系数为 3S), 呈三叶草型结构, 缺 D 茎和 D 环。1990 年, Okimoto 等提出在 nematode worms 线粒体中存在缺 T 茎和可变环的 tRNA。

1973 ~ 1975 年间, 金 (Kim), 里奇 (Rich) 和 罗伯茨 (Roberts) 等分别用斜方晶和六方晶测定了酵母苯丙氨酸 tRNA 晶体的三维结构, 得到几乎完全一致的倒 L 型三级结构模型。分子全貌像字母 L, 呈扁平状, 长  $60 \times 10^{-10} \text{m}$ , 厚  $20 \times 10^{-10} \text{m}$ 。其它 tRNA 晶体的三维结构与酵母苯丙氨酸 tRNA 的相似, 但某些参数不同。据此 tRNA 可以分为两类。一类以酵母苯丙氨酸 tRNA 为代表。倒 L 型两臂夹角较小, 反密码子与接受茎末端间距离较短。另一类以酵母天门冬氨酸 tRNA 为代表。它的两臂夹角比前者的要大  $10^\circ$ , 两臂端点的距离比前者的长约  $5 \times 10^{-10} \text{m}$ 。它们分别类似于 tRNA 在核糖体 P 位和 A 位时的构象。tRNA 的溶液构象与其晶体结构一致。1989 年, 鲁特 (Rould) 等获得了谷氨酰胺 tRNA 与其合成酶、ATP 的共结晶, 并取得  $2.8 \times 10^{-10} \text{m}$  分辨率电子云图。

tRNA 是各种核酸中含修饰核苷酸最多的一种。1989 年又发现一种新的修饰核苷酸 L。这一核苷酸被普通核苷酸置换, 即可引起接受氨基酸种类的改变。这是修饰核苷酸与氨酰化活力有关的最明显的一个实验。但是, 桑普森 (Sampson) 和 乌伦贝克 (Uhlenbeck) 报道体外转录所得的不含任何修饰核苷酸的苯丙氨酸 tRNA 具有与天然对照基本相同的接受活力。对修饰核苷酸生物功能了解得还不很清楚。

以前认为校正 tRNA 是对 mRNA 突变的校正。80 年代发现很多种天然的校正 tRNA。如硒代半胱氨酸 tRNA, 它参与硒代半胱氨酸及硒蛋白的合成。它识别的密码子是 mRNA 编码区内的 UGA (通常为终止密码子)。所以正常 tRNA 与校正 tRNA 的概念正逐渐模糊。校正 tRNA 的研究加深了人们对蛋白质生物合成过程中各种分子间的相互作用以及如肽链合成终止机制的理解。

因为所有的 tRNA 均具有相似的倒 L 型结构, 所以各种氨酰 tRNA 合成酶 (简称合成酶) 必须在相似的 tRNA 中识别各自相对应的 tRNA。这种识别对于蛋白质合成的精确性极其重要而一直受到广泛的重视。1988 年, 何 (Hou) 和 希梅尔 (Schimmel) 证明大肠杆菌 tRNA 中的 G3 : U70 碱基对决定了该 tRNA 与其相应合成酶的识别。为此他们提出 tRNA 的个性理论, 即 tRNA 分子内由一个或几个核苷酸组成的元件, 决定着该 tRNA 与相应合成酶的识别。这一理论的提出促进了 tRNA 与合成酶识别机制的研究。到 1991 年底已知的 tRNA 个性有 9 种。但是希梅尔等、王德宝等近几年中都证明, 对于丙氨酸 tRNA 来说, 除了 G3 : U70 碱基对外, tRNA 中其它一些核苷酸也决定着氨酰化程度的高低。此外, 酵母和大肠杆菌苯丙氨酸 tRNA 的个性不同。大肠杆菌酪氨酸 tRNA 在酵母中接受亮氨酸。所有这些事实说明, tRNA 与合成酶的识别机制十分复杂。

肽链延伸过程中, 延伸 tRNA 至少参与五个反应: (1) 氨酰 tRNA 与延伸因子 (原核生物的 EF-Tu, 真核生物的 EF-2), GTP 形成三元复合物。(2) 三元复合物结合到核糖体的 A 位 (氨酰位)。(3) 肽基转移反应。(4) 移位。(5) 肽酰 tRNA 结合到核糖体的 P 位 (即肽酰基位)。所有这些过程都决定着蛋白质生物合成的精确性。蛋白质生物合成过程中, tRNA 与许多生物大分子起作用, 如 mRNA, rRNA, 起始因子, 延伸因子, 释放因子, 核糖体蛋白等。体外试验资料表明, 核糖体和某些氨酰 tRNA 就可以合成蛋白质而无须 mRNA 模板。这表明推动蛋白质合成的是 tRNA 而不是 mRNA。mRNA 是通过与 tRNA 相互作用推动合成一定顺序的蛋白质。蛋白质合成的精确性在于相配的和不相配的密码子-反密码子对间的差异, 这种差异影响着核糖体对氨酰 tRNA 的选择。这种选择又受到一系列基因的和环境变量的调节, 其中有核糖体蛋白和延伸因子的变种、密码子的上下文、ppGpp 的水平、温度以及阳离子的浓度。

tRNA 还具有很多其它重要功能: (1) 与硒代谢有关。如一些

生物来源的赖氨酸 tRNA 和谷氨酸 tRNA 含硒, 可提高反密码子对密码子的识别能力。硒代半胱氨酸 tRNA 在丝氨酰 tRNA 合成酶催化下接受丝氨酸, 丝氨酸在 tRNA 上被转化成硒代半胱氨酸并由该 tRNA 参入蛋白。(2) 谷氨酰 tRNA 参与叶绿素的生物合成, 结合在谷氨酰 tRNA 上的谷氨酸被还原成谷氨酰半醛, 再经专一性转氨酶的作用转变成一氨基乙酰丙酸。后者是叶绿素合成的原料。(3) 一些氨酰 tRNA 在氨酰 tRNA 转移酶催化下进行不需核糖体和模板的氨基酸转移反应。受体分子可以是蛋白质的 N 末端 (调节蛋白质的功能)、磷酸甘油 (细胞膜的合成) 和 N-乙酰 2-氨基-3-0-(1-乙基)-2-脱氧-D-葡萄糖 (细胞壁的合成)。(4) 参与 DNA 的合成, 反转录病毒以一些特定的 tRNA 为 DNA 合成引物。大肠杆菌中一种精氨酸 tRNA 参与 DNA 的复制。(5) 对代谢的调控作用。空载 tRNA 进入核糖体引发 ppGpp 的合成造成严格控制反应。在大肠杆菌组氨酸操纵子、赖氨酸操纵子和色氨酸操纵子中的衰减子分别受这几种氨基酸的调控。(6) tRNA 作为一些酶的抑制剂, 如大肠杆菌内切核酸酶 I 因 tRNA 而改变作用模式。果蝇中酪氨酸 tRNA 抑制色氨酸吡哆醇活力。一些植物病毒 RNA 末端有类似 tRNA 的结构可接受氨基酸等。一些与 tRNA 结合的蛋白质 (如合成酶、EF-Tu 等) 在生物体内还有很多其它的生物功能, tRNA 可通过对它们浓度的调节而间接调节生物的其他活动。

tRNA 基因有的来自细胞核, 有的来自线粒体、叶绿体等细胞器, 它们之间的异同及与进化的关系引起人们的注意。DNA 分子上的 tRNA 基因经转录生成 tRNA 前体, 然后加工为成熟的 tRNA。加工过程包括切除前体分子中两端或内部的多余核苷酸, 修饰酶, 加上 CCA 末端等。硒代半胱氨酸 tRNA 可能还经过 RNA 的编辑。这些过程在生物体内部都是由酶催化进行的。如切除 tRNA 前体 5' 端一段核苷酸的 RNaseP 含有蛋白质和 RNA 两部分。RNA 组分单独即有催化活力, 这是酶活性 RNA 的最有说服力的证据。阿尔特曼 (S. Altman) 因此而获 1989 年诺贝尔化学奖。

1981 年, 王德宝等用化学和酶促合成相结合的方法首次合成酵母丙氨酸 tRNA, 它由 76 个核苷酸组成, 包括天然分子中的全部修饰成分, 并具有完全的生物活性。

近期内 tRNA 研究的热点有: 修饰核苷酸的生物合成, 修饰核苷酸的生物功能, tRNA 与其它生物大分子 (mRNA, rRNA, 起始因子, 延伸因子, 释放因子) 的相互作用, tRNA 与合成酶识别的分子基础, tRNA 的转录及加工, tRNA 生物功能多样性等。进一步的工作将是研究这些过程的分子基础, 并从较高的层次, 亦即复杂的高分子化合物的复合物水平, 如核糖体水平研究 tRNA 的各种生物功能。

#### 参考文献

- 1 王德宝, 等. 酵母丙氨酸转移核糖核酸的人工全合成. 中国科学 B 辑, 1983, (5): 385
- 2 Muramatsu T, et al. Nature, 1988, 336: 179~181
- 3 Rould M A, et al. Science, 1989, 246: 1135~1142
- 4 Okimoto R, Wolstenholme D R. EMBO J. 1990, 9: 3405~3411
- 5 Diamond A M, et al. Nucleic Acids Res. 1911, 18: 6727

(中国科学院上海生物化学研究所博士生导师余辛撰)

**三链 DNA** 1957 年, Davis, Felsenfield 和 Rich 等就提出三链核酸结构的观念, 他们以两条 poly(U) 和一条 poly(A) 链合成出一种三链物质。1966 年, Miller 和 Sobell 提出第三股 RNA 可连接到操纵基因上作为阻遏物的设想, 但由于同年证实了乳糖阻遏物是一种蛋白质, 此设想破灭了。1975 年, 加州大学 L. E. Perlgr 等人研究体外三链 DNA 的形成过程, 按标准 DNA 制备步骤, 从牛脾脏中以  $\text{MgCl}_2$  代替氯化钠-柠檬酸钠缓冲液 (SSC) 制备出牛脾 DNA 的镁盐 ( $\text{MgDNA}$ ); 天然牛脾 NaDNA 经热变性可制得相应的单链的 NaDNA, 根据 260nm 处双链  $\text{MgDNA}$

与变性单链 NaDNA 结合时的减色效应,可推知三链 DNA 的形成,其浮力密度为 1.726g/cm<sup>3</sup>。A. J. Raae 等(1978 年)研究在 T4 聚合酶连接酶催化作用下三链核酸的连接形成过程。这些核酸确实能够形成三链结构,在紫外吸收曲线上可以看到有三链核酸的转折点,低温下混合物吸收曲线的形状表明存在三链化合物和双链化合物,主要产物还是 1:2 的三链结构,实验还发现在三链 DNA 中 T<sub>1</sub> 连接酶仍可催化 dI<sub>10</sub> 的连接,并且反应速率同形成双链的、二链的 DNA 的速率大致相同。研究者们还观察了多胺对反应的影响,发现低浓度的多胺、腐胺、尸胺及亚精胺(< 10<sup>-3</sup>mol/L)对 T4 酶在双链载体上的催化连接反应有激活作用,而当浓度较高时,则又呈明显的抑制作用。因此,低浓度的多胺能提高三链结构的连接反应速率。J. S. Lee 等(1979 年)研究 (Py)<sub>n</sub> · (Pu)<sub>n</sub> DNA (Py 为嘧啶, Pu 为嘌呤)在 H<sup>+</sup> 浓度大于 10<sup>-2</sup>mol/L 情况下的结构形式与变化,有 1 条证据表明这种化合物是由一个二链化合物及一个具有二级结构的多聚 d(Pu) 组成。

过去有人认为:Py · Pu DNA 结构作用的特殊性在于 Py · Pu DNA 能与 RNA 形成三链化合物的专一性。例如, d(TC)<sub>n</sub> · d(GA)<sub>n</sub> 只与 r(UC) 相互作用形成三链化合物 d(TC)<sub>n</sub> · d(GA)<sub>n</sub> · r(UC)<sub>n</sub>, 两条嘧啶链是反平行的, RNA 链沿着 DNA 的大沟缠绕,以 Hoogsteen 碱基对方式配对,这就需要质子化的胸腺嘧啶,因此,这类结构在 pH 值较低时有利。A. G. Letai 等(1988 年)以琼脂连接的均聚核苷酸和柱为手段,研究了形成三链核酸化合物的特异性,即均聚 DNA、共聚 DNA 和 RNA 碱基互补配对的专一性。

1987 年, S. M. Mirkin 等从准天然途径中发现 DNA 的三螺旋结构,以此为转机,对三链 DNA 研究的势头在国外兴盛起来。Mirkin 等在酸性溶液的质粒中发现 DNA 的一种三链结构,称为 H-DNA(绞链 DNA),规则的均聚嘌呤核苷酸-均聚嘧啶核苷酸片段(dC-dA)<sub>n</sub> · (dT-dC)<sub>n</sub> 和(dG)<sub>n</sub> · (dC)<sub>n</sub> 在低 pH(1.3)条件下,经过超螺旋诱导,发生结构转变,生成新的 DNA 构型,即 H 构型。研究者指出, H 构型可以在任何重复的均聚嘌呤核苷酸-均聚嘧啶核苷酸中产生(核苷酸序列具有 H 回文形式),为了验证此假设,采用一系列裁剪过的质粒片段,均含有 AAGGGAGAAXGGGGTATAGGGGYAAGAGG-GAA 这样的内插序列,其中 X、Y 为 A 或 G,通过二维凝胶电泳进行分析,结果表明,当 X=Y=G, 或 X=Y=A 时(具有 H 回文形式),插入序列很容易转变为 H 构型;而在 X=A、Y=G 或 X=G、Y=A 两种情况下(非回文形式),构型转变要困难得多,几乎不可能。研究者认为, H 构型是 S1 核酸酶超敏感性的结构基础。

1990 年底,白春礼等在用扫描隧道显微镜 (STM) 研究噬菌体 λ DNA-Hind III 的变异结构时,发现一种新的三链 DNA 结构,称为三链辫状 DNA。实验方法为:将这种 DNA 的水溶液加热到其 T<sub>m</sub> 点之上的 100°C,保持约 15min 左右,然后快速降温到 0°C,将此经过处理的稀溶液滴到新鲜剥离的裂解石墨表面,待溶剂蒸发后,在室温条件下用 STM 直接进行观察,从获得的图象上看到由 3 条 DNA 链形成的辫状三链结构,并且还观察到由双螺旋与结构片段与三链辫状结构片段的衔接结构,以及右手双螺旋与左手双螺旋结构片段的衔接结构。

三链也同样是过氢键作用形成,也有它的专一性。二链的基本结构有两种,一种是嘧啶-嘌呤-嘧啶,如 TAT、CGC 等;第 2 种是由嘌呤-嘌呤-嘧啶组成,如 AAT、GCC 等。三螺旋的形成,所受的限制要比双螺旋多。首先,中间的碱基一定得是嘌呤;其次,双螺旋的形成只需 4 个核苷酸以上即可,但三螺旋据推测至少要 8 个以上,所以,三链结构需要特殊条件才可产生。对于三链结构的初步研究资料表明,第 3 条链一般是沿着双螺旋的大沟缠绕上去,由于 A 型核酸的大沟较 B 型的大,所以三螺旋结构应当是 A 构型,但对三链辫状结构则不然,由于 3 条 DNA 单链在空间构型上都处于“均等”的位置,每条链的作用基本相同。

D. S. Pilth 等(1990 年)对 (dA)<sub>10</sub> · 2(dt) 三螺旋进行结构分

析,在中性 pH 的 MgCl<sub>2</sub> 溶液中诱发出三螺旋 (dA)<sub>10</sub> · 2(dt)<sub>10</sub> 并使之稳定,进行圆二色谱 (CD) 及核磁共振谱 (NMR) 研究,核 Overhauser 效应 (NOE) 对未氘代和 C<sub>5</sub>-H-氘代的 (dA)<sub>10</sub> · 2(dt)<sub>10</sub> 三链的测量结果表明,在溶液中亚胺上的质子(腺嘌呤 C<sub>5</sub>-H 质子及芳香质子 C<sub>2</sub>-H 之间)有偶极接触,因此,在 MgCl<sub>2</sub> 溶液稳定的三链结构中,胸腺嘧啶亚胺上的质子 N<sub>2</sub>-H 既包含 W-C 又含 Hoogsteen 碱基对。对 NMR 研究也证实三链形式中存在 W-C 及 Hoogsteen 碱基对,对八聚体的及十一聚体的三链的研究资料表明,包含有 TAT 及 CGC<sup>+</sup> 三链碱基,在低 pH 及 MgCl<sub>2</sub> 中较稳定;UV 及 CD 实验资料研究均证实 1:2 的摩尔比形成三链的 (dA)<sub>10</sub> · 2(dt)<sub>10</sub>。

P. Rajagopal 等研究溶液中 DNA 三螺旋的形成及结构,主要运用一维质子及二维质子 NMR 谱及 NOE 测量方法,虽然嘧啶-嘌呤-嘧啶三螺旋的基本结构曾根据纤维衍射研究资料作出过推测,然而目前的 NMR 研究资料提供了关于溶液中存在此类结构的第 1 个直接证据。

第 1 组使用两种八聚体, d(G-A)<sub>8</sub> 及 d(T-C)<sub>8</sub> 为材料表明,在 H<sup>+</sup> 浓度 10<sup>-2</sup>mol/L 下,等量的寡聚物形成 B 型双螺旋结构,而在高 H<sup>+</sup> 浓度下,样品包括双链的和三链的混合物,形成的主要三链有 4 个 T-A-T 及 3 个 C-G-G 三链碱基对,但第 2 条寡聚嘧啶与其有最后未配对胞苷的寡聚嘌呤平行键合。关于三链的螺旋构型, NMR 数据表明嘧啶链具有 A 构型。第 2 组使用七聚链及十一聚链,由相当随机的嘌呤及嘧啶系列组成,每一组的序列都作了设计,以使寡聚嘌呤能够以一种反平行方式补偿一条寡聚嘧啶链;另一条则为平行方式, NMR 谱证明在酸性 pH (5.0) 条件下, TAT 及 CGC<sup>+</sup> 三链碱基能够形成。当 pH 值提高至中性,三螺旋又解离为双链组分和单链组分,三链的总体构型是 A 构型,与纤维衍射研究结果相似。

高分辨 NMR 方法在监测不同的三链碱基异常氢键键合作用,被认为是最有用的方法,甚至可扩展至四链结构或六链结构,然而由于这种方法限制在相对小分子量化合物(< 50 核苷酸),其它类似方法如 X 射线晶体学、凝胶电泳及酶探针等,可用于研究极大分子量化合物体系如 H-DNA 等。

白礼春、叶圣和龚立三等可分辨率极高的扫描隧道显微镜测定这种结构,成功地观察到三链 DNA 的存在。

S. Arnott 等用 X 射线法测定三链 poly(dT) · poly(dA) · poly(dT) 的结构,与前人描述过的 RNA 三链化合物作了比较,发现 poly(dT) · poly(dA) · poly(dT) 在构型上类似, poly(V) · poly(A) · poly(U) 及 poly(I) · poly(A) · poly(I), 三链化合物的精细结构远比双链复杂,因为三条多聚核苷酸链彼此各不相同。J. Griffith 等人(1990 年)研究了蛋白质 Res A 催化形成的三链结合体的结构,在一个微型 dsDNA 和环形 DNA 配对过程中观察到无蛋白的较长三链区域,所有 3 条链有十分规则的结构,好像典型的正常双螺旋 DNA,然而在上千个碱基长度上却包含着 3 条紧密相连的 DNA 链。H. Hun 等(1989 年)研究了 H-DNA 的形成和拓扑学结构重复的共聚物 (dT-dC)<sub>n</sub> · (dA-dG)<sub>n</sub> 序列 (TC · AG)<sub>n</sub> 可假定为一种 H-DNA 结构,由三链区域和单链区域组成,是形成 H-DNA 的一种模型; H-DNA 的形成始于共聚物内部的一个小的变性包,其中的双链 DNA 在一边轻微旋转、折叠回去,以生成第 1 个三链碱基对,这种成核过程建立了一种非平衡的 H-DNA 构型,假定为任一 DNA 分子捕捉到一条处于不能进行自由内部转变的亚稳态构型的 DNA 分子,结果,当单链多聚嘧啶在给体区域由于逐步的变性而松弛时,受体区域缠绕单链分子,缠绕与变性导致其余 DNA 分子负超螺旋的松弛,可以预测, DNA 超螺旋的水平决定着 (dT-dC)<sub>n</sub> 的那一半将要变式给体第 3 链。3' 及 5' 一半的多聚嘧啶链都可以用作 H-DNA 的给体链(分别称为 H-y3DNA 及 H-y5DNA), H-y3 及 H-y5 构型是等价的,而形成 H-y3 比 H-y5 更有利于松弛负超螺旋,说明在拓扑学上和能量上是不等价的,两类构型可以在非内部转变、亚稳态形式中共存。

关于三链核酸结构的量子生物学计算, F. Gago 等(1989年)使用计算机图形学及分子力学计算方法研究三链化合物的构型, 提出在一个超螺旋的 DNA 分子中寡聚核苷酸(链 3)与两个配对的(链 1, 2)链合作用中, 链 2 会采取一种左旋构型, 而链 1 和链 3 以正常的 W-CB 构型配对, 分子模型是在 SGIRIS 3120 工作站中利用互相作用的分子图形程序 HYD-RA 来构筑的。S. Arnott 等人通过计算机化的原子关联步骤提出若干种三链化合物的细节性模型, 并且保留标准键长、键角及糖环构型, 研究者使用计算机程序通过这种信息来预测可能的分子结构, 基本方法是采用原子关联最小二乘法(LALS)。分析结果表明, 第 3 条链占据着 A 构型多聚核苷酸双链的大沟, 并且与两条 W-C 链之一通过 Hoogs-teen 碱基对相互作用。

三链结构的生物学作用目前仍知之甚少。有人曾提出, 双链 DNA 与单链 RNA 的相互作用对基因表达可能有调控的功能。Anott 等指出, A 型螺旋可能是转录过程中所需要的, 这种机理假定, DNA 中或发生 B 构型向 A 构型的转变, 在富含 dA, dT 的 DNA 结构中尤为可能。三链核酸对不同的 DNA、RNA 聚合酶可能起抑制作用。S. A. Strobel 等人研究酵母染色体上通过寡聚核苷酸定位形成三螺旋 DNA 实现特殊位置上裂解的过程, 结合有 EDTA·Fe 的寡聚核苷酸可以通过与双链 DNA 特异结合形成三螺旋, 并且在长度大于 12 个 bp 的裂解位上产生双链的裂解, 为了证实寡聚核苷酸定位的三螺旋形成是大的 DNA 基因组特异性裂解的可靠化学途径, 一条带有 EDTA·Fe(在 5' 及 3' 端)的寡聚核苷酸被定位连接在 SE-CE 染色体 (340kb) 的一个 20bp 序列上, 观察到有确切尺寸和位置的双链裂解产物, 显示出在  $14 \times 10^6$ bp DNA 中寡聚核苷酸的连接和裂解靶位, 三链的碱基结合形式有 TAT, C+GC, GAT 等。长度为 15~20bp 的 EDTA·Fe 寡聚核苷酸在长如  $\lambda$  噬菌体 (48.5kb) 的基因组内的靶位上产生特殊序列双链破裂的效率从 5%~25%。嘧啶寡聚核苷酸在双链 DNA 上形成区域三链的序列特异性依赖于 pH、温度及有机共溶剂等条件, 如在低 pH、低温或加入乙醇的情况下, 观察到寡聚核苷酸结合在有意义的靶位序列上, 但并非完美匹配, 因为酵母基因组的完全序列还不清楚, 在 SE-CE 染色体上的次级结合位的位置和数目还不能事先作出预测, 由于寡聚核苷酸定位的三链核酸的形成有可能成为 DNA 识别的一个一般性方法, 故该结果对于染色体的遗传图的测定、基因的分离及 DNA 序列的确定具有重要的意义。

对三链 DNA 的生物学意义只能进行一些预测, 但作为转录过程中 DNA-RNA 三链形成的一个可能模型还是有价值的。有人认为这样的三链形成要求 DNA 的大沟加宽。也有人提出, 一个短三链 DNA 片段是 DNA 复制过程中的中间体。M. Cooney 等(1988年)根据在人体 c-myc 基因特殊位置上 DNA 与寡聚核苷酸的键合作用(在双链结合位上寡聚核苷酸形成共线型三链物), 提出三链态的形成(特殊位 RNA 与 DNA 双链的结合)可能是体内基因控制交替程序的基础。据 S. Hayes 等发现, 在  $\lambda$  噬菌体中, DNA 复制的初始过程包含着小的 RNA 寡聚物分子, 可以假定这个过程存在三链结构, RNA 在通常是 B 构型 2 级结构的 DNA 中会充当诱导因子。三链 DNA 研究的热点将主要集中在两个方面: 具有特异性裂解正常 DNA 分子的功能; 在基因转录过程中起诱导、阻断等作用。人们一旦在细胞水平上掌握这种功能后, 就能够通过三链阻断转录机制治疗一些遗传性疾病和病毒性疾病, 如爱滋病、乙型肝炎等, 这是值得生物学和医学工作者去努力探索的课题。

(中国科学院化学研究所郭军、张平城、  
博士生导师白春礼研究员撰)

## DNA 的化学合成 the chemical synthesis of DNA

化学合成 DNA 是用已经保护好的单核苷酸或二核苷酸、三核苷酸为基本原料, 用化学的方法将它们连接起来, 形成一定大小的单链寡核苷酸片段, 单链寡核苷酸片段通过酶法或化学法可以进

一步形成 DNA。

1955 年, 托德(A. R. Todd)等首次合成具有 3'-5' 磷酸二酯键结构的 TpT。1956 年, 霍拉纳(H. G. Khorana)等用对苯磺酰氯(Trt)为试剂, 将(Trt)T 和 pT 缩合形成(Trt)TpT, 脱去 Trt 后得到 TpT。霍拉纳等发展了一系列有关核苷酸的糖上羟基、碱基的氨基和磷酸基的保护基以及一些缩合剂, 从而建立了寡核苷酸合成的磷酸二酯法, 用此方法合成了大量由一种、两种或三种脱氧核苷酸组成的重复顺序的脱氧寡核苷酸片段。霍氏的磷酸二酯法是用保护的核苷磷酸单酯同另一保护核苷的羟基缩合形成磷酸二酯的方法, 由于核苷间的磷酸没有保护, 该未被保护好的磷酸羟基可以与磷酸单酯反应形成多种焦磷酸衍生物, 导致磷酸组分的消耗和寡核苷酸链断裂; 同时, 由于合成时副产物较多, 不易进行产物纯化。另外, 磷酸二酯法只适于液相合成而不适于固相合成, 无法实现合成自动化。1966 年, 莱德辛格(R. L. Letsinger)等在托德(1955)的工作基础上建立和发展了磷酸三酯法。磷酸三酯法采用磷酸二酯法中的羟基和氨基保护基, 同时寻找一些磷酸保护基并研究它们的导入和脱除条件, 发现了一系列能使磷酸二酯活化的高效缩合剂。磷酸三酯法副反应少, 产物易于纯化, 并能用于固相合成, 但每次偶联反应达 15 分钟至 2 小时, 连接产率只能达到 95%, 合成的片段只有 20 个左右核苷酸大小。1976 年, 莱德辛格首次提出亚磷酸三酯法。1981 年, 马泰乌奇(M. D. Matteucci)等对该法作了改进并发展成为固相的亚磷酸三酯法。该法的基本偶联单位为 3' 端的亚磷酸核苷酸, 偶联后用碘( $I_2$ )将偶联产物亚磷酸三酯氧化成磷酸三酯, 该法反应时间比磷酸三酯法至少短 8/10, 连接产率达 98%, 可以合成 50 个核苷酸大小的片段; 但由于核苷间的磷酸保护基为三氯乙基, 带氯原子的亚磷酸反应物具有很高的活性, 给制备和处理带来困难, 也易产生副反应。1981 年, 博康基(S. L. Beaucage)等采用二烷基胺替代亚磷酸中间体上的氯原子形成亚磷酸胺化合物, 解决了以上矛盾, 该亚磷酸胺化合物十分稳定, 当用四唑活化时, 几乎不产生副反应, 偶联时间不超过 2min, 偶联产率达 95%, 合成片段可达 100 个核苷酸以上。

DNA 的固相合成技术是 1973 年伊塔库尔(K. Itakura)借鉴多肽的固相合成技术发展起来的。在磷酸三酯法特别是亚磷酸三酯法和亚磷酸胺法取得成功后, DNA 的固相合成技术取得巨大的进展。固相合成是将待合成 DNA 链的 3' 端第一个核苷酸固定于一个不溶性的高分子面上, 然后根据不同载体选用不同化学试剂洗脱除去核苷酸 5' 端的保护基, 将第 2 个待连接的核苷酸用四唑活化, 活化后的 3' 端磷酸基与第 1 个核苷酸的 5' 端羟基偶联, 每接长一个核苷酸经历一轮循环, 接长的链一直连接在不溶的固相载体上, 除去未反应物或分解产物, 当整个链长增加到所需的长度后, 再将寡核苷酸链从固相上切下来, 脱去保护基即可分离纯化得到所需的最后产物。

在固相合成中, 每一轮偶联反应除了所用的单核苷酸不同外, 其它操作过程和试剂均相同, 可采用机械的仪器来完成。将 4 种(dA, dC, dT, dG)保护的单核苷酸或其它试剂密封于试剂瓶中, 将各个试剂瓶用连接管与装有第 1 个核苷酸的固相载体反应柱相连接, 然后按一定顺序即可完成合成循环。很多高度自动化的合成仪采用微电脑控制, 只需事先将合成片段的碱基顺序输入电脑, 电脑就会按固定顺序依次控制合成。美国应用生物系统公司生产的 393A 型的和 394A 型的合成仪可以同时合成 3 个和 4 个 DNA 片段, 大大提高了合成效率。世界上其他公司贝克曼(Beckman)、法默西亚(Pharmacia)等生产的 DNA 合成仪也各具特点。随着生物技术和电脑技术的发展, 预计自动化程度更高的合成仪将会被研制出来, 合成时各个指标将会得到进一步的提高。

DNA 的化学合成已在分子生物学、医学、农业和发酵工业等方面得到广泛应用。自 1977 年伊塔库尔首次合成 14 肽的生长激素释放抑制素基因并在大肠杆菌中表达以来, 一些有生物活性的多肽和蛋白质基因如胰岛素、生长激素、干扰素、生长激素释放

因子、胰腺素、舒缓激肽、脑啡肽、抗菌肽等基因相继被合成并获得表达。由于合成试剂和材料的商品化,合成仪的自动化,原则上任何已知结构的基因都可以合成。DNA的化学合成除为人工合成基因提供一条途径外,还用于基因突变和蛋白质的结构功能研究以及基因的改造和核酸结构研究;在基因工程中用作接头、探针和引物等,并已用于植物病害的普查以及医学上传染病和遗传病的诊断。总之,化学合成的DNA目前已发展成为现代生物学研究的有用工具,将为进一步解决生物学及医学中的重大理论问题作出贡献。

#### 参考文献

- 1 Letsinger R L. J. Am Chem Soc, 1976, 98: 3655
- 2 Itakura K. et al. Science, 1977, 198: 1056-1063
- 3 Matteucci M D. et al. J Am Chem Soc, 1981, 103: 3185
- 4 Beaucage S L. et al. Tetrahedron Letters, 1981, 22: 1859
- 5 熊克勇,等. 武汉大学学报(生物工程专刊), 1990, 12: 1~6
- 6 王美岭,等. 基因合成及其应用. 济南: 山东大学出版社, 1991 (中国科学院武汉病毒所胡勳学撰; 胡康洪审)

**三链 DNA 的制备与生物学应用** DNA 是生命活动的主要遗传物质,研究其结构与功能的关系,将有助于人们从分子水平了解生命现象的化学本质。

1953年, J. D. Watson 和 H. C. Crick 提出的 DNA 分子双螺旋结构模型,使生物学各个学科进入分子水平,成为现代分子生物学的里程碑之一。科学工作者发现在生命体中存在一些非标准的 B-DNA 结构,如 Z-, P-, A-型双螺旋 DNA,甚至在某些生命体中还存在单链形式的 DNA 分子。另外,在负超螺旋的超螺旋应力作用下,某些 DNA 序列经历了一个从 B-DNA 到非 B-DNA 的结构转变,这包括重复序列的翻转形成的十字型结构、交替嘌呤-嘧啶链形成的左手 Z-DNA 结构、具有镜面对称性的同型嘌呤-同型嘧啶序列形成的 H-DNA (亦即绞链三螺旋 DNA) 等 (R. D. Wells 等, 1988)。1957年, G. Felsenfeld 等人首先提出三链核酸的概念,合成了一种三链 RNA (poly A. 2U)。当时被认为仅仅是一种有趣的反常现象。1973~1974年, S. Arnott 等在 X-射线纤维衍射的基础上建立了简单的三链核酸分子模型,并提出三链核酸的结合方式,但缺乏足够的证据。直到 1987 年前后,几个小组在权威的《Science》和《Nature》杂志上几乎同时发表几篇关键性的论文,如前苏联 S. M. Mirkin 等从准天然途径(质粒 DNA 的酸性溶液)中发现一种 DNA 的三螺旋结构,为预测三链 DNA 在生物体内的存在提供了强有力的探索性证据。1987年, P. B. Dervan 等证实可能通过将第 3 股 DNA 粘接到天然 DNA 上形成三链 DNA,为三链 DNA 作为一种潜在的基因调控和精确切割 DNA 的“分子剪刀”等技术手段提供了可能。自此以后,三链 DNA 才逐渐为人们所重视,近年来,已经成为分子生物学和基因工程的一个前沿研究领域。

三链核酸是由 4 个碱基组成的,只不过其基本结构单元为三碱基体,三碱基体是通过氢键作用形成的,有专一性。目前一般认为三碱基体有两种,其一为嘌呤-嘌呤-嘧啶,如 TAT 和 CGC<sup>+</sup>等,其专一性体现在 C 不能接在 AT 上,而 T 也不能和 GC 形成氢键;另一种则是嘌呤-嘧啶-嘧啶,如 CGC 和 AAT 等,其专一性体现在 A 和 G 分别专一性地接在 AT 和 GC 上,当然理论上只要在适当条件下形成足够的氢键,就可以形成三碱基体。寻找能在更广泛的 H<sup>+</sup> 浓度范围内形成三链 DNA 的寡聚核酸有较为重要的意义。通过研究已经知道,嘧啶的 5 位取代衍生物能通过改变其疏水力、碱基堆积、三链 DNA 的 Hoogsteen 嘌呤-嘧啶对的电子互补,来改变它的 H<sup>+</sup> 浓度,从而能在中性条件下形成三碱基体 (T. J. Povise 等, 1989)。

1957年, G. Felsenfeld 等首先提出的三链物是一种人工合成的三链 RNA。60年代,人们主要研究了那些含有同型碱基或重复序列形成的三链 RNA 或 DNA。如 1964 年 M. N. Lipsett 等第一次报道了 GGC 和 C<sup>+</sup>GC 三螺旋的形成,发现 poly(C) 和

同量的 poly(G) 反应可形成双链的和三链的化合物,而 poly(C) 和等摩尔量的双链化合物缓慢反应则形成三链物,并提出 G<sup>+</sup>G<sup>+</sup>C 和 C<sup>+</sup>G<sup>+</sup>C 的可能构象。但由于这些体系是由 RNA 组成的,被认为是一种有趣的反常现象而未引起人们的重视。70年代合成了许多三链 DNA,主要研究它们的形成条件、热稳定性、结构特征。在这期间, S. Arnott 等基于 X 射线纤维衍射,对三链 RNA 或 DNA 的结构进行描述,建立了三链核酸的分子模型,这些模型后来成为人们理解三链核酸的性质和功能的结构基础。80年代中期,三链 DNA 的研究才获得突破性进展, S. M. Mirkin 等、P. B. Dervan 等的研究为三螺旋 DNA 是否在体内存在,第三股寡聚核酸是否可作为序列专一性的探针用于染色体基因图谱研究和抗癌新药开发等方面,提供强有力的探索证据。自此以后,三链 DNA 才逐渐为人们所重视。白春礼等采用溴乙烷作为荧光探针,研究 (dA)<sub>10</sub> 和 (dT)<sub>10</sub> 间的相互作用。荧光滴定的实验结果表明,在中性 (pH 7.1) 含镁离子的溶液中,确实观察到 (dT)<sub>10</sub> · 2(dT)<sub>10</sub> 三链 DNA 形成;变温实验证实,溴乙烷的存在增强了三链 DNA 的稳定性。这个实验结果表明,溴乙烷荧光探针法不失为有效而灵敏的检测三链 DNA 形成的手段之一。

在三链 DNA 研究的早期,主要集中在那些较短的同型嘌呤和同型嘧啶形成的简单三链 DNA 体系,后来才逐渐发展到对线性单链 DNA 和天然双螺旋 DNA 形成的分子间三链 DNA 体系进行研究。1978年, A. J. Rase 等研究在 T4 连接酶催化作用下三链核酸的连接形成过程。他们在紫外吸收曲线上观察到三链核酸形成的理论拐点,低温下的吸收曲线表明同时存在三链物和双链物,证实了三链 DNA 形成过程中 T4 连接酶可催化 T<sub>4</sub> 与双链 DNA 的连接。研究者认为三链 DNA 的结构为 A 构型。1989年, P. Rajagopal 等对两种八聚体, d(G-A)<sub>8</sub> 及 d(T-C)<sub>8</sub> 进行一维的和二维的 NMR 谱与 NOE 谱研究,表明在中性 pH 下等量的寡聚物间形成 B-型双螺旋结构;而在低 pH 下,混合溶液中同时存在双链和三链物;三链物的构型为 A-构型;在酸性 (pH 5.0) 条件下,能形成 TAT 及 GCG<sup>+</sup> 三碱基体,当 pH 提高到中性时,三螺旋又解离为双链组分和单链组分。这个研究资料表明, NMR 可以作为检测三链 DNA 形成并获得其结构信息的一种强有力的手段。最近,人们为了增加通过形成三螺旋目标靶物进行专一性识别的分子长度和种类,探讨了采用环状寡聚核酸 (G. Prakash 等, 1992)、含 3'-3' 链节、5'-5' 链节、3'-5' 链节以及含“之”字形结构的寡聚核酸 (B. C. Froenler 等, 1992) 等对目标 DNA 分子进行专一性识别的可能性。

1990年, R. Haner 通过形成纯粹的 Py · PuPy 三碱基体证实在线型单链 DNA 分子内能形成分子内三螺旋 DNA。1991年, F. M. Chen 使用光谱技术证实通过形成 Pu · PuPy 三碱基体,线性单链 DNA 分子内也能形成分子三链 DNA。除有数的研究者外,通过形成三链结构对 DNA 分子内进行识别的研究,仅局限于使用含有寡聚嘌呤-寡聚嘧啶束道 (tract) 的单链核酸,而对任何碱基序列都能进行识别,必将有利于人们最大限度地利用那些基于通过形成三链 DNA 而实现的技术。针对这种要求, 1990年 D. A. Horne 提出一些有意义的建议和设想,包括设计能结合具有交替寡聚嘌呤-嘧啶束道的双螺旋的单链 DNA 分子,但这要求在两个寡聚嘧啶链间有一个适当长度的非天然 3'-3' 或 5'-5' 或 3'-5' 链节。1992年, S. D. Jayasena 和 B. H. Johnston 基于两类三碱基体在适当条件下都能形成的实验事实,设想到含有寡聚嘧啶和寡聚嘌呤束道的单链可能同时通过形成这两种三碱基体,结合到含有邻近寡聚嘌呤-寡聚嘧啶束道的双螺旋 DNA 上,形成三链 DNA。

1992年, T. Kohwi Shigematsu 等研究了 Escherichia Coli Cells 的分子内 dG · dG · dC 三链 DNA 的形成。他们采用与未偶合 DNA 碱基专一性反应的氯乙醛作为化学探针,现场研究了含有质粒 DNA 和 E. Coli 细胞与不同长度 poly(dG) · poly(dC) 发生相互作用形成分子内三链 DNA 的可能性。结果表明,与长 35bp、44bp 和寡聚核酸反应能形成三链 DNA, 而与

25bp poly(dG)·poly(dC) 则不发生相互作用,而且在氯乙醛处理后的不到两小时,抽提的质粒 DNA 才显示出最大的超螺旋密度。

规则的同型嘌呤-同型嘧啶束道(dG-dA)<sub>n</sub>、(dT-dC)<sub>n</sub>和(dG)<sub>n</sub>、(dC)<sub>n</sub> 经历一个负超螺旋诱导的强烈依赖于 H<sup>+</sup> 浓度的结构转变过程,形成一种新的分子内三螺旋(H型)DNA。1987年,S. M. Mirkin 等认为这种 H-DNA 能在任何含镜面对称(H回文结构)的同型嘌呤-嘧啶序列中出现。他们通过使用一含 AAGGGAGAAXGGGGTATGGGGYAAAGAGGGAA (X 或 Y 可以是 A 或 G) 特定序列的质粒作为模板,进行二维凝胶电泳实验。结果表明,当 X-Y-G 或 X-Y=A (如质粒 pAA32, pGG32) 时,这个插入序列显示出易发生向 H 型 DNA 的转变;反之,对于两个非同型结构(即 X-A, Y-G 或 X-G, Y=A, 如质粒 pAG32, pGA32),这个转变相当困难或不可能。据此,他们测定了 pAA32, pGG32, pAG32, pGA32 四种质粒的超螺旋在诱导下向 H 型的结构转变,结果与预期的相同,前两者(含回文结构)发生预期的像其回文结构的同型嘌呤-同型嘧啶束道一样的依赖于 pH 值的结构转变,而后两者则更困难或不可能,结果说明 H 回文结构是那些能形成 H-DNA 的序列必须具备的条件。

基于对 H-DNA 的深入研究和仔细分析有关 H-DNA 的形成,以及化学的、物理的、生物的实验结果(1989年),H. Htin 等提出一种 H-DNA 形成的可能机理:H-DNA 的形成始于其聚合物内部的一个小的变性包,即双链 DNA 在一边轻微旋转、回折,由此生成第 1 个三链碱基体,这种成核过程建立一种非平衡的 H-DNA 构型。假定,任一 DNA 分子捕捉到一条处于亚稳态构型的 DNA 分子,结果当多聚嘧啶链在给体区域由于逐步的变性而松弛时,受体区域缠绕起多聚嘌呤链,缠绕与变性导致 DNA 分子负超螺旋的松弛,从模型中可以预测 DNA 超螺旋的大小决定(dT-dC)<sub>n</sub> 的那一半将要变成给体第 3 条链。在这个机理中,H-DNA 形成过程中的关键被认为是那些重复内部的第 1 个三碱基体的形成(即成核作用)。

对三链 DNA 而言,尽管缺少详细的 X-射线晶体结构数据,但是从上面所讨论的有关作为辅助手段的化学的、物理的和生物的证据表明:三链 DNA 的结构单元是三碱基体,它也有专一性;三螺旋 DNA 的形成是通过第三股螺旋缠绕到双螺旋的大约上形成的,第 3 股 DNA 与双螺旋 DNA 中的一条链是通过形成 Hoogsteen 氢键而发生相互作用的;同时,三螺旋的形成还要考虑链的相对极性;有证据表明螺旋有可能是采用 A-构型的。

近年来,三链 DNA 已引起人们的广泛关注,但早期对三链 DNA 的生物学功能有着不同的猜测,比较有代表性的是双链 DNA 和单链 RNA 的相互作用对基因表达的控制可能有调控的功能,A-型三螺旋可能是转录过程中所需要的,这在富含 dT 和 dA 的 DNA 中尤为可能;同时,三链核酸对不同的 DNA、RNA 聚合酶可能还会起抑制作用(A. J. Raue 等,1978)。现在三螺旋 DNA 在提供控制基因表达的手段和发展序列专一性 DNA 切割试剂等方面,显示出应用的可能性。

三链 DNA 能否在体内存在,一直是人们所关心的一个重要问题。通过研究发现,有几个支持三链 DNA 在体内能存在的证据。首先,嘌呤-嘧啶束道(其中有些甚至长度达到 100bp 或更长)在真核基因中的含量高达 1% 左右,由此可能形成三链 DNA 的序列的浓度是相当大的。其次,发现在基因的 5'-端区域存在许多嘌呤-嘧啶束道,而这些区域无论在体内或体外对单链核酸专一性酶敏感。众所周知,双螺旋 DNA 形成三链 DNA 要求存在第 3 条单链核酸,再次,存在一个结合老鼠、人和多线染色体基因的三螺旋专一性抗体,这个结合作用能通过竞争性三螺旋的加入而被阻止,但加入那些不能检测到三螺旋形成的 DNA 则没有这种现象发生(C. Helace 等,1982)。S. M. Mirkin 等在酸性质粒溶液中发现的一种 H-DNA,为探索三链 DNA 在体内的存在提供了一个最有力的推动力。后来,T. Kohwi-shigematsu 等揭示了在体内和体外三链 DNA 的形成对长度的依赖性,在此细胞内

H-DNA 的形成,表明利用三链 DNA 的形成,可能对细胞内那些涉及 DNA 的过程产生影响。1991年,K. J. Hampel 等通过包括热变性、歧化动力学及其他实验证实,在 H<sup>+</sup> 浓度为 10<sup>-7</sup> mol/L 下,少量多胺(生理浓度)的存在对三链 DNA 的形成有促进作用。研究者据此推测,在真核细胞核小体中也许确实存在三链 DNA。

基因表达调节,涉及通过控制蛋白和调节核酸对特定碱基序列或碱基结构进行识别(T. C. Boles 等,1987),这是在基因表达水平上控制细胞内过程的关键,这些识别可以出现在每个双螺旋 DNA 的水平上:合成的寡聚核酸和反义 RNA 都能用作人工控制基因表达的手段,在那些实验中的大多数情况下,在使 RNA 和寡聚核酸或反义 RNA 间形成一种负责捕获转译的复合物,短的寡聚核酸能介入 DNA 的转录过程,由此可以假定,它们可作为那些未配对 DNA 的目标靶物,因为 DNA 和 mRNA 之间的那些未配对区域的大小通常都有一定的限制。因此,必须增加那些寡聚核酸对目标靶物体进行识别的精确性(R. D. Wells 等,1988)。

研究者们发现,同型嘌呤-同型嘧啶束道常出现在基因的调控区域(T. L. Davies 等,1989),也常作为专一性序列结合因子的目标(R. D. Wells 等,1988)。在超螺旋应力下,同型嘌呤-同型嘧啶束道高度倾向于形成一个非 B 构型的 DNA,这导致在基因表达控制方向 DNA 的结构变化有可能起重要作用。

1987年,M. E. Hogan 等根据体外,在人体 c-myc 基因特殊位置上的 DNA 与寡聚核苷酸的结合作用,提出三链态的形成可能是体内基因控制的基础。1991年,Y. Kohwi 等发现在老鼠 L 细胞中引入的 poly(dG)·poly(dC) 序列,能增强其转录基因的转录活性,并发现这种效应依赖于所引入序列的长度,25~30bp 和 dG 束道强烈地增强转录的活性,而长度为 30bp 或 30bp 以上的 dG 束道则不影响其活性。考虑到由 poly(dG)·poly(dC) 序列形成的 H-DNA 也存在这种长度的依赖性(在对质粒 DNA 形成三螺旋的研究中发现的),可以合理地推断出 H-DNA 也许能在体内形成,且能影响基因转录和表达。在应用方面,此技术的主要限制是在体内寡聚核酸对限制性内切酶的存在很敏感,为此,1987年 C. Helene 等发展了一种能被光化学激活而在寡聚核酸的目标序列上产生交联或光敏性破坏的试剂。由此可能开辟一条在活体内能进行专一性控制基因变异或失活的新途径。这些研究表明,作为基因表达的反义抑制物和基因活动的调节信号,人工合成的寡聚核酸可在基因的特异位点上通过形成三链 DNA 阻止基因转录。

专一性精确切割双链 DNA 是染色体图谱、基因分离和 DNA 测序的关键,能识别长 8~10bp 的限制性内切酶已被广泛用于基因图谱的研究中,但它们数量较少,且仅限于对富含 CpG 序列的识别,而且它对大分子基因的切割常导致高聚合。最近发现,限制性内切酶 I 也许有比 12bp 大一些的特异性。遗憾的是,没有一种方法可作为一种普遍适用的方法,对那些出现在人体 DNA 中的大量特异性序列进行识别,并对其进行专一性切割。由于生物体的基因组相当大,必然存在许多可以被酶切的小 DNA 片段,假如那些酶识别的序列远大于 4~8bp,就可极大地减少基因组上的切点数目。寡聚脱氧核苷酸与双螺旋形成三链 DNA,是序列专一性键合双螺旋的化学新进展。研究资料表明,它们比限制性内切酶的特异性要高 10<sup>6</sup> 倍(M. N. Linscott 等,1964;A. D. Horne 等,1990;T. L. Doan 等,1987)。因为通过寡聚嘧啶形成的三链 DNA,仅仅局限于嘌呤束道,因此人们渴望寻找到一个在天然条件下(37°C, pH 7.0)能键合所有的 4 种碱基的普遍方法;通过系列研究,1989年 D. B. Dervan 及其合作者发展了一系列达到这一目的的方法:(1)寻找天然以外的专一性三链碱基组,如 G-TA;(2)设计形成三链密码的非天然碱基;(3)设计能结合双螺旋 DNA 的不同链的寡聚核酸以及其他方法,如 1989年他们证实寡聚核酸能协同结合双链 DNA 模板。1991年,在酵母染色体上通过寡聚核苷酸形成三链 DNA,实现了特异性切割。1989年,Dervan 和 Luebke 研究通过在双链 DNA 与寡聚脱氧核

酸之间形成非酶络合物的过程。这些研究资料表明,三链 DNA 能作为一种有效的精确切割 DNA 分子的剪刀。除了以上的应用外,三螺旋 DNA 的形成可能有其他方面的应用,首先它可能与染色体的凝聚有关。1988 年, G. D. Burkholder 等利用三链 DNA 的单克隆抗体,发现细胞核染色体上有三链 DNA 存在,细胞周期中结构型染色质都含有数量较少但稳定的三链 DNA。这表明在细胞周期中三链 DNA 的存在,可能与染色体凝聚有关,并可作为真核 DNA 结构的一种固有特征。其次,三链 DNA 可用于发展一种序列专一的纯化分离 DNA 的新方法。1992 年, T. Ito 等利用三链 DNA 的形式,成功地从异源 DNA 混合物中专一性地分离和富集出目标 DNA 分子。

(中国科学院化学研究所方晔博士、张平城博士、博士生导师白春礼研究员撰)

### 核苷酸以及金属配合物 nucleotides and it's metal complexes

核苷酸是由碱基、核糖和磷酸根(一个或多个)组成的。核苷酸有的作为能量载体(如 ATP),有的作为氧化还原酶或脱氢酶的辅酶(NAD, FMN 或 FAN 等),有的直接参与生物遗传的主要物质基础 DNA 和 RNA 的生理作用。核苷酸有两个配位基团——碱基和磷酸根。核苷酸中较为重要的是 AMP、ADP 和 ATP。

20 世纪 60 年代起,核苷酸与金属离子的配位化学研究始有报道。生物无机科学工作者对此作了大量的工作,主要研究核苷酸的配位部位和在生物体中的作用。1966 年, R. Phillips 证实  $Mg(II)$ 、 $Ca(II)$  与 ATP 配位时,常与磷酸根中氧配位。而  $Cu(II)$ 、 $Ni(II)$ 、 $Mn(II)$  可以与磷酸根中氧配位,也可以与碱基氮配位。

1971 年, M. E. Heyde 发现  $Mg(II)$ 、 $Ca(II)$  与 ATP 配位时不仅是 1:1 配合物,而且有 ATP-M-ATP 和  $M_2$ -ATP 存在。(其中 M 为  $Mg(II)$  或  $Ca(II)$ )。ATP-Ca-ATP 对肌球蛋白三磷酸腺苷酶在人体中的作用具有十分重要的意义,而且与许多激酶、磷酸酶的反应有关。如许多激酶反应中,  $Mg(II)$  与 ATP 配位最佳比为 1:1,  $Mg(II)$  的浓度如果超过该比值,酶催化作用会降低。

ATP 是生物体贮存能量的载体,为生物的一些活动提供能量,如生物合成、肌肉收缩、膜内外的离子传递等。ATP 水解能释放出能量而自身变成 ADP 和正磷酸  $P_i$ 。Tetas 等人报道,不同  $H^+$  浓度下,二价金属离子促进 ATP 水解的活性顺序。Schneider 报道金属离子促进 ATP 水解的反应速度顺序,并推断水解过程中有  $CuATP^2-$  形式存在。铃木等人报道用  $[Cu(den(HO))_2]^{2+}$  有促进 ATP 水解的作用。在研究  $Mn(II)$ 、 $Zn(II)$ 、 $Cu(II)$ 、 $Ni(II)$  等离子配位情况时, D. N. Hague (1972) 发现  $Ox-Mn-ATP$  的作用与  $Ox-Mg-ATP$  的作用相类似,这与许多酶体系中可用  $Mn(II)$  代替  $Mg(II)$  的情况相一致。 $Cu(II)$  与 AMP 中的磷酸根氧和腺嘌呤中 N7 同时配位形成分子内配合物,使其稳定性有所增强。1966 年, M. M. TaguiKhan 等曾报道二价金属离子与 ATP、ADP、AMP 形成配合物稳定常数的大小顺序为  $Cu(II) > Ni(II) > Co(II) > Mn(II) > Mg(II) > Ca(II) > Sr(II) > Ba(II)$ 。1971 年, N. A. Berger 等报道 AMP 形成二聚体,而且两个腺嘌呤环叠加起来使结构稳定性增强。1974 年, H. Sigel 在研究  $[Cu(bpy)(ATP)]^{2-}$  时发现, bpy 和 ATP 的芳环有重叠堆积现象(又可称为疏水基的结合作用)使三元配合物稳定性大大增强。这种堆积作用是配位化合物分子内配位体的疏水基之间的缔合作用,是一种电子效应。1985 年, S. Yorshikaw 等的研究资料证明这种配位体芳环的重叠堆积是有条件的,在溶液中存在堆积型和开放型两种异构体的互变平衡,这种堆积作用引起生物无机化学家们的浓厚兴趣。H. Sigel 提出计算其稳定常数的公式,进而研究了  $Cu(II)$ 、 $Zn(II)$ 、 $Co(II)$ 、 $Ni(II)$ 、 $Mn(II)$ 、 $Pd(II)$ 、 $Pt(II)$ 、 $Mg(II)$  和  $Ca(II)$  等元素类似化合物中的堆积作用。影响这种堆积作用的因素很多:(1)1973 年, C. H. Barlow 等人研究

芳环相对大小不同时对堆积程度的影响。当两个芳环大小较为接近时,匹配性较好,则易发生堆积作用。如  $Cu(phen)(ATP)^-$  和  $Cu(bpy)(UTP)^-$  中各自两个配位体的芳环较为匹配,则堆积效果好。(2)1970 年, J. C. Maxwell 发现堆积程度大小顺序与参与堆积的芳环大小顺序相一致,有  $ATP > UTP > CTP$  的规律。1974 年又证实芳环相互位置的远近也影响到堆积效果。(3)1987 年, W. T. Potter 等人研究表明  $Cu(phen)(ATP)^-$  和  $Mg(phen)(ATP)^2-$  的堆积程度大小不同,这与不同金属离子与 phen、ATP<sup>-</sup> 键合情况有关。(4)1974 年, J. C. Maxwell 还研究了金属离子在配位体间的桥联作用对堆积有影响。另一些科学家还证实配位体的几何构型、溶剂效应、温度变化等因素都影响堆积作用,进而影响到配合物稳定性和反应的选择性。研究堆积作用对于了解金属离子对酶的专属作用有一定的意义。

由于蛋白质和 DNA 等这些大分子中疏水基较多,在生物体内局部微环境中溶剂的极性将有所改变。近几年来,研究溶剂极性的变化对核苷酸——金属配合物的配位性质影响较为活跃。1985 年, R. Tribolet 等人研究了溶剂极性的改变对  $Cu-ATP^+$  和  $Cu(phen)(ATP)^2-$ 、 $Cu(bipy)(ATP)^-$  的结构和稳定性的影响。

同样的情况也出现在发生芳环堆积的  $Cu(Phen)(ATP)^2-$  和  $Cu(bipy)(ATP)^-$  混配配合物中,溶剂极性减小,使堆积作用减弱,堆积型异构体减少。

1990 年, G. Liang 等证实  $Cu-AMP^2-$  受溶剂极性的影响与  $Cu-ATP^+$  不同。在二氧六环-水混合体系中,随着二氧六环百分比的增大(从 0%~30%), 闭式异构体减少,随着二氧六环百分比的继续增大(从 30%~50%), 闭式异构体增多,约在二氧六环百分比为 30% 左右,闭式异构体最少,1988 年, S. S. Massoud 等总结了二价金属离子与  $UMP^2-$ 、 $TMP^2-$ 、 $CMP^2-$  的配位规律,证实二价金属离子仅与  $UMP^2-$ 、 $TMP^2-$ 、 $CMP^2-$  的磷酸根配位,而不与其碱基氮配位,建立了二价金属离子  $M^{2+}$  与  $NMP(NMP-UMP, TMP, CMP)$  的配合常数与其磷酸根的碱性的线性关系。

核苷酸-金属配合物的理论研究的目的之一,是希望据此提供金属离子存在与否时生物体中各种蛋白、酶作用的信息。对于研究金属蛋白、金属酶的结构和性质,设计金属离子催化反应模型,查明金属离子对生命体系和正常生命活动的作用;寻找新型药物,研究药理,解析 DNA 基团密码将有所帮助,能提供一定的理论证据。这方面的工作才刚刚开始,有待于进一步研究。

### 参考文献

1. H. Sigel, Metal Ions in Biological systems, Marcel Dekker A G, Basel, 1979
2. Roger Tribolet, et al, Influence of Decreasing Solvent Polarity (Dioxane - water Mixtures) on the Stability and structure of Binary and Ternary Complexes of Adenosine 5' - Triphosphated and Uridine
3. H. Sigel, et al, Comparison of the Stabilities of Monomeric Metal Ion Complexes Formed with Adenosine 5' - Triphosphate (ATP) and Pyrimidine - Nucleoside 5' - Triphosphates (CTP, UTP, TTP) and Evaluation of the Isomeric Equilibria in the Complexes of ATP and CTP, Inorg. Chem., 1987, 6: 2149~2157
4. Salah S. Massoud, et al, Metal Ion Coordinating Properties of Pyrimidine - Nucleoside 5' - Monophosphates (CMP, UMP, TMP) and of Simple Phosphate Monoesters, Including D-Ribose 5' - Monophosphate Establishment of Relations Between Complex Stability, and Phosphate Basicity, Inorg. Chem., 1988, 27: 1447~1453
5. Guogang Liang, et al, Solvent - Dependent Metal Ion - Nucleic Base Recognition Inorganic Chemistry 1990, (19): 3631~32

(山东大学杜鸣撰)

**核酸** nucleic acid 核酸是指由数十至数十亿个核苷酸通过磷酸二酯键形成的一类生物大分子化合物。动植物、微生物都含有核酸。根据组成成分不同,核酸可分为核糖核酸(RNA)和脱氧核糖核酸(DNA)两大类, DNA 是绝大多数生物的遗传物质。某些病毒和噬菌体则以 RNA 为遗传物质。遗传信息的传递和表达是通过核酸分子的复制、转录和转译等一系列复杂过程实现的。

1869年,瑞士米歇尔(F. Miescher)从外科手术绷带上脓细胞的细胞核中提取出一种新的含磷化合物,称之为“核质”,实即由核酸和蛋白质组成的核蛋白。当时已知的含磷有机化合物只有卵磷脂一种,因此引起了重视。1889年,阿尔特曼(R. Altmann)制得不含蛋白质的核酸,并提出“核酸”这一名称。

核酸在生物体内通常和碱性蛋白质、多胺以及金属离子结合。可从已破碎的细胞中用一定浓度的盐溶液抽提核蛋白,然后加盐至饱和,使核酸和蛋白质解离,并使蛋白质沉淀。也可用苯酚、氯仿或去垢剂如硫酸十二酯钠或蛋白水解酶去除蛋白质,除去蛋白质的溶液可用乙醇将核酸析出。生物组织中含有核酸酶,因此提取核酸时要尽可能减少或抑制核酸酶的活力,才能获得不降解的核酸制品。

DNA 为染色体的主要成分,存在于真核生物的细胞核、线粒体和叶绿体等细胞器中以及原核生物类核及质粒中。RNA 则在细胞核和细胞质中都有。病毒和噬菌体的蛋白质外壳内只有一种核酸,或为 DNA,或为 RNA。类病毒则全由 RNA 构成,没有外壳。

核苷酸是核酸的组成单位,它由碱基、戊糖和磷酸构成。碱基又可分为嘌呤碱和嘧啶碱两类。核酸中常见的嘌呤碱为腺嘌呤(A)和鸟(便)嘌呤(G),RNA 和 DNA 都含有这两类嘌呤碱。嘧啶碱在 RNA 中为胞嘧啶(C)和尿嘧啶(U),在 DNA 中则为胞嘧啶和胸腺嘧啶(T)。此外, RNA 和 DNA 中还含有少量带有一种或多种基团的修饰碱基。戊糖在 RNA 中为 D-核糖,在 DNA 中为 D-2-脱氧核糖。嘌呤或嘧啶和核糖结合生成的化合物叫核苷,和脱氧核糖结合则成脱氧核苷。核苷和磷酸结合成为核苷酸,脱氧核苷和磷酸结合成脱氧核苷酸。核苷内 2'-羟基可以甲基化,这样形成的核苷或核苷酸就叫作修饰核苷或修饰核苷酸。根据磷酸和核糖上的羟基结合位置不同,又可分为 2'-核苷酸、3'-核苷酸和 5'-核苷酸。由于脱氧核糖的 2'-位碳原子上没有羟基,脱氧核苷酸只有 3'-脱氧核苷酸和 5'-脱氧核苷酸两种。无论 RNA 或 DNA,核苷酸之间都是由 3',5'-磷酸二酯键连接起来的,就是磷酸基团和左边戊糖的 3'-羟基形成酯键,同时又和右边戊糖的 5'-羟基形成酯键。

**核酸的碱基组成** 一般用化学方法(酸或碱)或酶解的方法处理核酸,使核酸降解成核苷酸或碱基,然后用纸层析、纸电泳、薄层层析、柱层析或高效液相色谱等方法将生成的核苷酸或碱基分离成单一组分,再分别测定其含量。

核酸中核苷酸的排列顺序,称为核酸的一级结构。第 1 个核酸的一级结构是 1965 年霍利(R. W. Holley)实验室提出的,它就是酵母丙氨酸转移核糖核酸。由桑格(F. Sanger)以及吉尔伯特(W. Gilbert)分别建立的双脱氧法和化学法,对 DNA 中核苷酸排列顺序测定的贡献很大,使 DNA 的一级结构测定最为成熟。

除 1 级结构外,核酸还具有 2 级结构和 3 级结构。霍利对转移核糖核酸提出的三叶草结构,沃森(J. D. Watson)和克里克(F. H. C. Crick)提出的 DNA 双螺旋结构都是 2 级结构。DNA 的超螺旋结构和酵母丙氨酸转移核糖核酸的倒 L 型立体结构则是 3 级结构。

由于核酸带有大量磷酸基团,呈强酸性,在生物体内一般以盐的形式存在。嘌呤碱和嘧啶碱具有强烈吸收紫外光的共轭双键结构,使核酸显示特定的紫外光吸收光谱,高峰为 260nm,低峰

为 230nm。核酸分子的消光系数,比其组成成分核苷酸的消光系数之和要低,因此核酸水解成核苷酸后,其紫外光消光系数有所增加,这叫“增色效应”。

由于核酸含有戊糖和磷酸,测定磷含量和戊糖的颜色反应,常用为检测核酸的方法。RNA 中含核糖,和浓盐酸共热后生成糠醛或其衍生物,后者与地衣酚反应呈绿色。DNA 中脱氧核糖与二苯胺在酸中共热呈蓝色。

**核酸的生物合成** 核酸的嘌呤碱和嘧啶碱是从氨基酸、二氧化碳以及“-C 化合物”合成的,因此在正常情况下生物体能合成自身所需的嘌呤和嘧啶。合成 RNA 时,各种核糖核苷酸逐步磷酸化成核苷三磷酸如腺苷三磷酸(ATP)、鸟苷三磷酸(GTP)、胞苷三磷酸(CTP)和尿苷三磷酸(UTP),然后在 RNA 聚合酶催化下,以 DNA 的一条链为模板转录成 RNA。

合成 DNA 的脱氧核苷三磷酸,其中脱氧腺苷三磷酸(dATP)、脱氧鸟苷三磷酸(dGTP)和脱氧胞苷三磷酸(dCTP)是从下述途径来的。5'-核苷酸磷酸化先生成核苷二磷酸,一部分继续磷酸化生成核苷三磷酸,一部分则还原成脱氧核苷二磷酸,后者再磷酸化成脱氧核苷三磷酸。脱氧胸苷三磷酸(dTTP)和上面三种脱氧核苷三磷酸不一样,它是从 5'-尿苷酸来的。5'-尿苷酸磷酸化成 5'-尿苷二磷酸,还原成 5'-脱氧尿苷二磷酸,再磷酸化成 5'-脱氧尿苷三磷酸,后者去焦磷酸成 5'-脱氧尿苷酸,接受“-C 化合物”成 5'-脱氧胸苷酸,再逐步磷酸化成脱氧胸苷三磷酸。四种脱氧核苷三磷酸在 DNA 聚合酶催化下,以 DNA 的一条链为模板复制成新的 DNA 链。

**核酸的降解代谢** 在生物体内核酸降解时生成核苷酸或寡聚核苷酸,寡聚核苷酸进一步水解成核苷酸。核苷酸脱去磷酸则成核苷,后者经核苷磷酸化酶或核苷水解酶的作用放出碱基。在不同动物中再降解成尿酸、尿囊素、尿素或 β-丙氨酸等物质。

核酸自人工合成以来,用化学和酶促相结合的方法,已合成许多核酸。脱氧核糖没有 2-羟基,不需特殊保护,所以 DNA 的合成比 RNA 要方便,进展也快。许多多肽和蛋白质基因,如生长激素释放抑制因子、胰岛素、生长激素、促性腺激素、干扰素、白细胞介素、凝血因子 VIII、促红细胞形成素、血纤维蛋白溶酶原激活剂等的基因,以及一些转移核糖核酸的基因都已经人工合成了。

RNA 的合成比 DNA 为困难,迄至 1991 年底止,只有酵母丙氨酸转移核糖核酸一种,是中国科学家于 1981 年完成的。核酸的人工合成不仅有其理论意义,对开展基因工程生产各种生物药物也有重要的作用。

核酸研究今后的热点:1988 年美国决定对人体基因组全结构进行研究,拟用 15 年时间、30 亿美元,测定人 DNA 分子的全部核苷酸(共 30 亿对)的排列顺序,企图通过这项工作对人类生长、发育、衰老、死亡等生命现象有进一步的了解,为防治疾病、增进健康服务。

#### 参考文献

- 1 王德宝,等. 酵母丙氨酸转移核糖核酸的人工全合成. 中国科学 B 辑, 1983, (5): 385~398
- 2 王德宝,等主编. 核酸—结构与功能与合成. 北京: 科学出版社, 上册 1986, 下册 1987
- 3 王德宝. 核酸. 大百科全书生物学, 生物化学. 北京: 中国大百科全书出版社, 1990. 5~8
- 4 王德宝. 核酸. 大百科全书生物学. 北京: 中国大百科全书出版社, 1991. 533~535

(中国科学院上海生物化学研究所王德宝院士撰)

**RNA 自拼接** 自 1926 年萨默(J. B. Sumner)结晶出脲酶并发现它是一类蛋白质以来,酶是蛋白质的概念便深深植入生物学家的脑海。1968 年克里克(F. H. C. Crick)开始思索关于蛋白质合成复杂性生化机制起源的问题。他设想,原始核糖体很可能完全由 RNA 组成,最初的酶也可能是一种肯复制酶活性的



RNA 分子。1974 年首次测定出 tRNA 结构,发现它本身能折叠成三维结构。然而,四种碱基组成的 RNA 似乎无法与 20 种氨基酸构成的蛋白质的巨大灵活性比拟。所以,克里克的远见卓识很难为科学共同体接受。

1981 年切赫等在纤毛原生动细胞四膜虫细胞中发现,前体 rRNA 内含子(又叫插入序列,IVS)的离体自拼接现象。IVS 由 414 个核苷酸组成,其一级结构有 4 个保守的碱基配对区(P1~9),Q,R,S],P3~1 和 P6~7 区形成一个高度保守的核心结构,其中 U310 是鸟苷的结合位置。IVS 自催化过程包括两个顺序的转酯酰反应:溶液中的一个 GTP 或鸟苷首先攻击 5' 拼接位点;与内含子的第 1 个核苷酸形成一个磷酸二酯键,释放出 5' 末端的外显子;5' 外显子的 3' OH 末端继而攻击 IVS3' 端拼接位点,释放出这个内含子后将两个相邻的外显子连接在一起。经过自拼接的内含子就获得一个 3' 末端非基因编码的 G 残基。为此,切赫把自拼接的 IVS 定名为“核酶”。

70 年代奥尔特曼把一个 pre-tRNATyr 的突变分子与 E. coli 提取液混和时发现,后者存在明显的酶活性,它可以从 pre-tRNA 分子 5' 和 3' 端切除“多余”的核苷酸。奥尔特曼把这种具 5' 端内切和 3' 端外切活性的酶命名为核糖核酸酶 P(RNaseP)。经过 10 年的研究,终于在 1983 年揭示了此酶的本面目。RNaseP 由两个亚单位组成,一个是 377 个核苷酸组成的 RNA 分子(M. RNA),另一个是分子量为 14,000 的蛋白质(C5pr)。离体条件下参与 pre-tRNA 催化作用的是 M1RNA,在活体内则需 C5pr 的辅助。M1RNA 的二级结构上有两个互补的寡核苷酸序列 5'-357GGCC<sup>3'</sup>,推测它在三级结构上有助于 M1RNA C92 残基与底物 pre-tRNA 之间形成交联而完成离体条件下 MRNA 的催化反应。RNaseP 的催化机理不详,已提出两种假设:(1)S<sub>N</sub>2 线性取代机理的变形;(2)RNaseP 分子上的一些官能团衍生出亲核物质,然后与 Mg<sup>2+</sup> 联合完成催化过程。

继切尔奥尔特曼之后,在脉孢菌酵母的线粒, T4 噬菌体、类病毒、玉米及衣藻的叶绿体中又陆续发现许多具有自拼接功能的内含子。已经发现的各种内含子分两种:一类内含子和二类内含子。在二级结构上,前者的显著特征是有两个高度保守的寡核苷酸序列,5'-PYUCA, GACUA-3' 和 5'-U. A. GA. AUAGUC-3'。这两个互补序列借助二级结构在空间上相距很近。一类内含子 3' 端始终为 G, 5' 端则终止于 U 之后。后者 3' 端均有一个高度保守的序列(约 100 个核苷酸)5'-PUAGCPYGUAUPu...PU. GAA. U. PYACGUACPUGUOPY-3'。该序列大都能折叠成一个 14BP 组成的发夹结构,其上有一个 GAAA 末端环,位于环的 3' 侧有一个 CG 形成的凸臂。在催化机理方面,四膜虫 Pre-rRNAIVS 的自拼接过程即是一类内含子的催化机制。二类内含子通过“套索(lasser)”结构进行自身剪接,它不需鸟苷或其他任何核苷酸的辅助。位于内含子 3' 端高度保守的 A7 或 A8 的 2'-OH 对 5' 拼接位点亲核攻击,通过转酯酰基使内含子先从 5' 端拼接位置上剪切下来,形成具 2', 3', 3' 磷酸二酯键的套索状;然后游离的外显子 3' OH 再次对内含子 3' 端拼接位点亲核攻击,一个完整的分支套索状内含子被切除,两个外显子连接在一起完成自拼接过程和程。

1983 年布朗(R. S. Brown)等阐明 Pb<sup>2+</sup> 催化酵母 tRNA<sup>phe</sup> 糖一磷酸骨架链的断裂机制。Pb<sup>2+</sup> 在 tRNA<sup>phe</sup> 上有 3 个吸附位点(Pb(1), Pb(2), Pb(3)), Pb(1) 位于 TYC 环区, Pb<sup>2+</sup> 吸附于 U5g 的 O<sub>4</sub> 原子上; Pb(2) 位于额外环区, Pb<sup>2+</sup> 吸附于 G45 原子上; Pb(3) 位于反密码子区, Pb<sup>2+</sup> 吸附于 Y37 的 N-7 原子上。在 Pb(1) 位点上,结合在 Pb<sup>2+</sup> 上的 -OH 先攻击二氧嘧啶(D17)核糖 2'-OH 的质子,产生的 2-O 再对 G18 的磷原子发动亲核进攻。结果 D17~G18 之间的磷酸二酯键断裂, D17 核糖形成 2', 3'-环化磷酸酯, G18 末端形成 5'-OH。此外,位于 Pb(2) 处的 G22~A23 之间也发生缓慢断裂,但机理不详。Pb(3) 处未发生断裂。

1984~1985 年,一些实验表明核 pre-mRNA 的拼接是通过

称为拼接体(spliceosome)的过程完成的,拼接体是由核内小分子核糖核蛋白(snRNP),一些必需的蛋白因子和 pre-mRNA 3 部分组成复合体,其中 snRNP 又是 snRNA 和一些核蛋白的复合物。已知 snRNA 有 10 种(U1-10),而参与 pre-mRNA 拼接的 snRNA 至少有 U1 和 U2。U1 snRNA 在其 5' 端有一段高度保守序列,它与 pre-mRNA 5' 端拼接位点上有 9 个核苷酸一致序列精确配对,并与拼接体其它组分联手完成 PRE-mRNA 的加工。拼接机理依第 2 类内含子的套索结构进行,只是 3' 端高度保守的 A 碱基在其上游较远的 20~50 位置处。

1986~1987 年陆续证实植物病原 RNA 自断裂现象。这些病原 RNA 有拟病毒、病毒正链卫星 RNA(+)sTRSV 和类病毒(ASBV)它们的二级结构都有一个“榔头(hammerhead)”结构即碱基配对形成的 3 个臂组成, I 和 II 臂上各有 8~10 个高度保守的寡核苷酸序列, 5'-CUGA, GA, G, C-3' 和 5'-G, CGAAAC 3', I 和 II 臂间的 C 残基 3' 侧是自断裂位点, 5'-GUC ↓...-3'。目前,自断裂机制不详,推测是转酯酰作用,断裂处形成 5'-OH 和 2', 3'-环化磷酸酯。

如果说 RNA 在自拼接过程中因本身发生变化不能说是真酶的话, I 类内含子所具备的 polyC 聚合酶活性则于 1987 年被实验证实, IVS 近 5' 端有一段 6 个碱基组成的富 G 内部指导序列(IGS), 5'-GGAGGG-3', 可与 5' 端外显子序列配对后构成底物结合部位, IGS 可选择寡聚 C 前体做底物,由内含子核心结构通过自拼接相同的转酯酰机制完成 polyC 的聚合反应。

1989 年汉普尔(A. Hampel)等在病毒负链卫星 RNA(-)sTRSV 中发现了催化 RNA/底物 RNA 自催化复合体。在 (+)sTRSV 经液相复制产生的 (-)sTRSV RNA 分子,催化区与 (-)sTRSV 的自断裂区结构不同。它有两个最短序列, 11 个碱基(53-40)的底物序列(5'UGACA ↓ GUCCUUUU 3')和 50 个碱基(224-175)的催化序列。(5'-AAACAGAGAAGUCAACCAGA AACACACGUUGUGGUAUAUUACCGUA-3')。后者催化前者在 ApG(48~47)处断裂,形成 5'-OH 和 2', 3'-环化磷酸酯。同年在棘螈细胞卫星 DNA 转录本中也发现了这种榔头结构的自断裂催化机制。

RNA 自拼接现象为科学家重新认识 RNA 在生命活动中的作用奠定了基础,首先,近来有实验表明,用富 A 序列取代内含子 IGS, polyC 聚合功能则转变为 polyU 聚合功能,这是否意味 IGS 相当于原初 RNA 复制酶的模板?换言之,若借遗传工程技术切除内含子的 IGS, 用一个不同的能起外部引导序列功能的单链 RNA 模板取而代之,这样获得的依赖模板的 RNA 聚合酶也许能复制其他 RNA 分子。其次,在 RNA 复制过程中保证复制错误的校对机制是什么?近来在低等填核生物线粒体 mRNA 中发现了类似校正的机制——RNA 编辑(RNA editing)。然而,在 RNA 聚合酶起源以前,该过程最初是否代表了 RNA 顺序变化和修复的一般机制?此外,在能虫线粒体中还发现, RNA 编辑能将潜在的起始密码子从阅读框架中打断,这是否暗示 RNA 编辑是一种基因表达的正负调节系统?或代表着一种信息?第三,与 DNA 和蛋白质分子比较起来,因为自拼接和自复制特性, RNA 似乎无疑会成为生命大分子起源的第一个产物。那么,最初无蛋白质的“RNA 世界”的图象是什么?自复制的 RNA 究竟是怎样产生的?第四, RNA 自拼接功能预示一个基于 RNA 新基因工程时代的到来,用 RNA 工具酶剪切引起人类和动植物病源的 RNA 分子就有可能达到治愈顽症的目的,但这需要克服技术上的挑战,即如何使 RNA 工具酶进入细胞并能长期保持其稳定性;它是否剪切错误的部位以及是否能在活细胞内发挥正常剪切功能等问题。

(河南大学生物系张大卫教授、李荣撰)

**反意 RNA** antisense RNA 是反意基因(antisense gene)和或基因的反意链(antisense strand)的转录产物,能与特异 mRNA 形成互补双链,高度特异地抑制 mRNA 的翻译,从而调

节基因的表达,天然存在于原核和真核生物细胞中的反意RNA,其分子组成一般小于200个核苷酸,也可通过人工合成,导入细胞内。其潜在的应用前景十分诱人。这项技术可能成为一项基本的分子生物学方法而被普遍采用。

1969年波夫瑞(K. Bevre.)等首先观察到在λ噬菌体b2中心区段两条互补的反向单链能同时被转录,但当时对其转录产物(互补的RNA链)有何可能的调节作用,仅仅是在推测。1980年伊托赫(K. Itoh.)等发现一种RNA分子,它能与DNA复制时的引物RNA互补,这种RNA能调节DNA复制原点的频率。1983年西蒙斯(R. W. Simons.)等和米兹诺(T. Mizuno.)等报告,天然存在的能与mRNA的核糖体结合位点互补和能与特异基因的启动密码互补的RNA能抑制该基因的表达。嗣后,相继在原核生物中发现天然存在的反意RNA。直到1988年帕戈(B. Popko.)等和奥卜诺(H. Okano.)等在多发硬化症病鼠中发现有天然存在的抑制髓鞘碱性蛋白基因表达的反意RNA,这是首次报告在脊椎动物中有天然存在的反意RNA。

根据其抑制基因表达的机制,可将已发现的反意RNA分为3大类:Ⅰ类反意RNA互补于靶基因mRNA的核糖体结合位点相/或编码区序列,直接抑制mRNA的翻译(ⅠA类),或使mRNA对核酸酶敏感而不稳定(ⅠB类);Ⅱ类反意RNA是与mRNA功能区上游转区的非编码区结合,可能导致mRNA二级结构的改变,使其不能与核糖体结合;Ⅲ类反意RNA在转录水平起负效应的作用,是转录抑制的互补RNA(ticRNA),与crp mRNA的5'-最末端结合,阻断crp操纵子的顺式转录,使crp的转录减弱。

天然反意RNA基因的来源,可能是在DNA水平由于基因转移,或通过靶mRNA逆向转录形成cDNA,这类cDNA在某种植物下整合到特异的加顺子方向,使之生成反意RNA。

反意RNA也可人工合成并导入细胞而起调节作用,合成方式可有体内和体外两种,体内合成法是先将要靶基因片段以与正常基因相反的方向插入适当的载体,导入细胞后即在活细胞内转录出反意RNA,也可用体外转录或化学合成反意RNA,通过显微注射导入细胞内。

在设计人工合成反意RNA时,必须考虑其结构与功能的关系,原核生物RNA分子3'端的茎环结构及CUUCGG发夹结构对RNA的稳定有重要作用,靶序列的选择,在原核系统针对其SD序列最有效,对真核生物mRNA5'端非编码区杂交比与编码区杂交更有效。由于技术的发展,有可能设计反意RNA的3'-端或5'端具有ribozyme功能,特异地降解靶mRNA并使其失活。应避免设计出的结构对反意RNA本身有负效应,如互补区的结构妨碍与靶mRNA形成杂交,在此情况下可在茎区结构插入1个或多个核苷酸使其二级结构不稳定。

反意RNA技术已被应用于生物学科的许多领域。(1)研究基因的基本功能。新基因的发现及其功能研究,对低等生物及植物,一般是通过突变体认识的,在高等动物及人类,突变体常常是隐性的或致死的,而且多拷贝基因中的单个基因突变,常可没有表型变化或很难观察到表型变化,因而研究突变体表型的方法不适用于高等动物及人类,反意RNA技术是一条简便的途径。基因工程技术已能获得特定时期特定细胞内表达的单个基因,人工构建此基因的反意RNA进行检测即可准确地了解其产物在活体中的功能。拉赤曼(M. R. Lachman.)等应用反意RNA技术发现myc癌基因在小鼠红白血病细胞的诱导分化中具有双重作用,霍特(J. T. Holt.)等用此技术研究*fos*癌基因的功能时发现,*c-fos*的表达是Swiss 3T3细胞受血清刺激进行分裂所必需的。(2)恶性生长的抑制。已知癌基因的异常表达或其突变体的表达是致癌的关键之一,应用针对癌蛋白的抗体特异性地使癌蛋白失活而逆转癌细胞的方法,由于抗体的不稳定性及数量有限,以及导入方法繁琐等不能用于恶性肿瘤的治疗,利用反意RNA技术将癌基因的反意RNA引入癌细胞,阻断癌基因的表达,控制恶性生长,可望达到基因治疗恶性肿瘤的目的。史蒂芬逊

(M. L. Stephenson.)等应用劳斯肉瘤病毒(RSV)相关的反意寡聚物在麦胚系统中能有效地抑制翻蛋白,加入培养液(10μg/ml),能抑制RSV在鸡胚成纤维细胞内的再生和细胞转化,成功地将反意RNA用于抗癌研究。(3)人工免疫。柯立曼(J. Coleman.)等报道,人工制造的针对大肠杆菌噬菌体SP外壳蛋白及复制酶的反意基因,导入大肠杆菌后,有效地抑制了SP的复制,形成了一个新的人工免疫系统,即通过核酸的相互作用,使细胞获得了防御噬菌体感染的能力,为应用反意RNA抗病毒感染或抑制其在体内的复制展现出诱人的前景。(4)研究病因、病理机制。米戈施巴(K. Mikoshiba.)等用核糖核酸酶保护法检测缺乏髓鞘碱性蛋白的突变小鼠中,有与基因外显子3-7互补的反意RNA,推测与MBP表达下降有关。基立特茨尔(R. Gilitzer.)等用NAP-1 IL-8特异的反意RNA为探针作原位杂交,牛皮癣病人NAP-1 IL-8表达局限在受损皮肤的表层,提示局部用药治疗的可能。塔卡达(H. Takada.)等用针对前列腺分泌的类固醇结合蛋白基因的反意RNA为探针,发现此基因只在前列腺腺叶上皮层有表达,而在腺叶间质层,前列腺背叶,侧叶以及膀胱和肾等均未见有表达。克瑞斯廷森(P. Kristensen.)等用小鼠尿激酶型组织浆原激活剂(U-PA)基因cDNA转录的反意RNA为探针作原位杂交,观察到某些组织的成纤维母细胞样细胞中有表达,而另一些组织则无表达。(5)反意RNA技术在植物细胞中的应用也获得成功。埃卡尔(J. R. Ecker.)等用反意RNA有效地抑制了植物细胞靶基因的表达。

反意RNA不仅能起负效应因子(抑制剂)的作用,也能起正效应因子(激活剂)的作用。例如mRNA本身二级结构的形成对其翻译有时是起抑制作用的,设计一种能阻断mRNA二级结构形成的反意RNA,即能激活基因的表达。另一方面可构建一种基因,产生的反意RNA是针对天然(或人工)反意RNA的抑制剂,这类RNA可对靶基因的表达起激活作用。

也可能应用人造反意RNA调节其他RNA相关的细胞功能,如核糖体的功能,真核生物RNA的剪接反应,真核mRNA5'端帽子形成反应,真核mRNA从细胞核到胞浆的运输作用,以及核蛋白体复合物的形成等方面。总之,反意RNA技术为基因基本功能的研究开辟了一条新的途径,为癌症治疗,人工免疫、植物遗传工程提供了广阔的研究与应用前景。

#### 参考文献

- 1 Simons RW, Klekner N. Translational control of IS 10 transposition. *Cell*, 1983, 34(2): 683~691
- 2 Inouye M. Antisense RNA: its functions and applications in gene regulation - a review. *Gene*, 1988, 72(1): 25~34
- 3 李伟, 袁昱. 反义RNA: 原理与应用. *生物化学与生物物理进展*, 1998, 15(6): 402~405
- 4 Lachman HM, Cheng G, Skoultschik AI. Transfection of mouse erythroleukemia cells with myc sequences changes the rate of induced commitment of differentiate. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1986, 83(17): 6480~6484
- 5 Holt JT, Gopal AV, Moulton AD, et al. Inducible production of *cfos* antisense RNA inhibits 3T3 cell proliferation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1986, 83(13): 4794~4798
- 6 Stephenson ML, Zamecnik PC. Inhibition of Rous Sarcoma viral RNA translation by a specific oligodeoxyribonucleotide. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1978, 75(1): 285~288
- 7 Ceman J, Hirashima A, Inokuchi Y, et al. A novel immune system against bacteriophage infection using complementary RNA (mcRNA). *Nature*, 1985, 315: 6020, 601~603
- 8 Mikoshiba K, Aruga J, Okano H. Molecular biology of myelin basic protein: gene rearrangement and expression of antisense RNA in myelin-deficient mutants. *Comp Biochem Physiol [c]*, 1991, 98(1): 51~61
- 9 Takada H, Suematsu N, Mizuno T. Transcription of prost-

atic steroid binding protein (PSBP) gene is induced by epithelial - mesenchymal interaction. *Development*, 1990, 110(1): 273~281

10 Kristensen P, Eriksen J, Dano K. Localization of urokinase - type plasminogen activator messenger RNA in the normal mouse by in situ hybridization. *J Histochem Cytochem*, 1991, 39(3): 341~349

11 Ecker JR, Davis RW. Inhibition of gene expression in plant cell by expression of antisense RNA. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1991, 88(15): 5372~5376

(中山医科大学罗超权撰)

**(1→3)、(1→4)-β-D-葡聚糖**

(1→3)、(1→4) β-D-葡聚糖(简称β-葡聚糖)由β-D-吡喃葡萄糖通过(1→3)和(1→4)糖苷键连接成的一类多糖。分子量为 $2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^6$ 。不具分枝。(1→3):(1→4)键的比例为1:3~3:2。它区别于纤维素的主要特点是分子内具有(1→3)和(1→4)两种键。β-葡聚糖为地衣和某些禾本科植物的细胞壁组成成分,能不同程度地溶于水产生粘性的水溶液。其水溶程度受分子量大小、(1→3)键的数目和位置以及温度等因素的影响。水溶的β-葡聚糖在80%乙醇中形成白色沉淀。β-葡聚糖对麦芽和啤酒品质以及大麦和燕麦的食用、药用和饲用价值有决定性的影响。

1931年,施密特(Schmidt)等最早在地衣中发现β-葡聚糖。在禾本科谷物中,大麦种子的β-葡聚糖含量最高,为3.8%~10.7%;小麦种子的β-葡聚糖含量偏低,为0.5%~0.7%。20世纪50年代,人们发现β-葡聚糖是啤酒酿造中的不利因素,这个发现使关于β-葡聚糖的研究从此之后主要集中于大麦作物。β-葡聚糖能被(1→3)、(1→4)-β-D-葡聚糖酶降解成寡聚糖。β-葡聚糖在制作麦芽中妨碍胚乳降解。在啤酒酿造中,由于来自麦芽的β-葡聚糖增高麦芽汁的粘度,从而降低麦芽汁的过滤速度。β-葡聚糖还可能在啤酒冷藏时聚集和沉淀。80年代初,艾斯翠鲁帕(Aastrup)筛选出低β-葡聚糖的大麦突变体。该突变体具有粘性低、胚乳降解快的优点,但是籽粒干粒重仅为对照亲本的74%,因此没能推广应用。1966年,伯内特(Burnett)发现β-葡聚糖在鸡的肠道中产生高粘度的消化物并假设这种粘度是导致鸡生长迟缓的原因,该假设后来获得实验证据的支持。以大麦饲养的小鸡生长缓慢。1992年,上林济报道这些小鸡的小肠粘度脂肪或蛋白质的消化率成负相关,与粪便中的脂肪含量成正比相关。20世纪80年代末期,β-葡聚糖被证明具有降血脂的功能。大麦和燕麦食品由于富含β-葡聚糖而被誉为“保健食品”。因为β-葡聚糖吸水性很强,它使面粉的发酵和保气效果变得很差。所以,β-葡聚糖含量高的面粉不适合制作由酵母发酵的食品,但适合于制作不经发酵或用酸碱反应产气的食品。

80年代以来,关于β-葡聚糖研究的重大进展主要有:(1)低β-葡聚糖大麦的育种;(2)β-葡聚糖酶的基因工程和分子生物学研究;(3)β-葡聚糖的营养功能和β-葡聚糖酶添加饲料在畜牧业上的应用。1989年,莫利诺-开诺(Molino-Cano)采用叠氮化物( $\text{NaN}_3$ )诱变,成功地筛选出高产的低β-葡聚糖春大麦突变体。培育β-葡聚糖酶活力很高的大麦品种是另一种克服β-葡聚糖不良影响的途径。两种(1→3)、(1→4)-β-D-葡聚糖同工酶和三种(1→3)-β-D-葡聚糖同工酶已在萌发的燕麦中得到鉴定。1991年,斯莱斯基(Slakeski)等已分离获得编码这些酶的大多数基因,并作过核苷酸序列分析。1990年,颜秋生等建成大麦原生质体再生成苗的技术。基因转移技术在大麦细胞上的应用不断改进。采用基因工程培育高β-葡聚糖酶活力的大麦品种将来有可能成功。还有一种克服β-葡聚糖对麦芽和啤酒质量影响的途径是培育分泌β-葡聚糖酶的啤酒酵母。大麦的β-葡聚糖酶基因已被转入酵母并得到表达。1985年,欣克利菲(Hinchliffe)已将分泌β-葡聚糖酶的酵母应用于制造啤酒。关于β-葡聚糖的药用价值的研究,目前着重开发高β-葡聚糖的产品。通过粉碎加工和合理筛选分离可得

到β-葡聚糖含量成数倍提高的大麦和燕麦材料,这些材料可以作为廉价的β-葡聚糖来源用于食品生产,也可用于降血脂食疗。另外,β-葡聚糖对人体吸收脂肪、蛋白质、矿物质和维生素的影响正在进一步研究,以便制定合适的β-葡聚糖摄入量。β-葡聚糖是饲料中妨碍单胃动物生长的因素。把β-葡聚糖酶掺入饲料中,可显著地减轻β-葡聚糖的不良作用。不过,如果不能获得廉价的β-葡聚糖酶,这项技术不能得到推广。1990年,汤姆森(Thomsen)等报道枯草杆菌的β-葡聚糖酶基因被转化入大肠杆菌并由其获得一种能合成热稳定的β-葡聚糖酶的大肠杆菌。从该菌提取的β-葡聚糖酶已经商品化可用于啤酒酿造、饲料生产。

近10年来,关于β-葡聚糖研究主要围绕克服β-葡聚糖对麦芽和啤酒品质的影响进行。采用 $\text{N}_2/\text{N}_3$ 诱变育种看来可以培育出低β-葡聚糖的大麦品种。基因工程在培育分泌β-葡聚糖酶的酵母,提供廉价的β-葡聚糖酶方面发挥了重要作用。在发达国家,由于饮食富含脂肪,高血脂症已成为流行病。因其具有降血脂功能,β-葡聚糖在这些国家得到食品工业界的重视。关于β-葡聚糖的研究涉及麦芽、啤酒、食品、医药和畜牧业。不仅如此,由于β-葡聚糖是细胞壁的基本组成成分,对它的分子生物学研究将可能为细胞壁在植物抗病、抗旱和细胞通讯上的作用提供新的资料。

**参考文献**

- 1 Barnett G S Br. *Poultry Sci*, 1966, 7: 55~75
- 2 Aastrup S Carlsberg. *Res Commun*, 1983, 18: 307~316
- 3 Hinchliffe E J. *Inst Brew*, 1985, 91: 384~389
- 4 Appl Genet. 1989, 78: 748~754
- 5 颜秋生,等. *科学通报*, 1990, 20: 1518~1583
- 6 Slakeski N, et al. *Barley Genetics VI*, 1991, 1: 181
- 7 Thomsen K K, et al. *Chemical Abstracts*, 1991, 114: 21
- 8 Wang L. (王林济). Influences of oil and soluble fiber of barley grain on plasma cholesterol concentrations in chicks and hamsters. Ph D Thesis. Montana State University, Bozeman, MT 59717, U S A; 1992. 16~77

(杭州大学王林济博士撰)

**寡糖素 oligosacchavins**

寡糖素是一大类有生物活性可溶性的寡聚糖。最初研究的寡糖素是植物和病原体真菌菌胞壁中多糖的部分降解产物,它产生生物效应所需的浓度很低,有时可低至 $10^{-7} \text{mol/L}$ ,所能产生的作用是多方面的,寡糖素可认为是一类新的调节分子。

植物的抗病害研究是植物学中的一个重要课题。1976年,阿尔勃斯海姆(Albersheim)等在研究植物和病原体的相互作用过程中,发现植物和病原体真菌菌胞壁多糖接触时产生一些植物抗菌素,借此保护自身。经鉴定产生这种效应的物质是真菌菌胞壁中的β-葡聚糖的降解物。这是关于寡糖素的首次报道。1972年,瑞恩(Ryan)实验室指出番茄受到创伤时会合成蛋白水解酶抑制剂,对抗昆虫和微生物的进一步的侵袭,而抑制剂的合成又是一种所谓的创伤激素所诱导。1981年,鉴定了诱导蛋白水解酶合成的因子是植物细胞壁中多聚半乳糖醛酸的部分水解产物。1983年,阿尔勃斯海姆等将这些有活性的寡糖素称为寡糖素。

从大豆的病原体真菌大雄孢菌细胞壁中β-葡聚糖降解到寡糖素的功能是诱导植物合成植物抗菌素。这一寡糖素的结构已被阐明,经部分水解所得的产物是多种大小不一、结构相异的寡糖的混合物。用凝胶渗透层析法可分得不同结构的一组7个葡萄糖构成的葡七糖,经过多次层次分离,在这些异构体中只得到一种葡七糖是有活性的,它的结构有高度特异性,是一个有分支的寡糖,主链由有5个糖残基以β-1,6方式相连,另外两个葡萄糖基以β-1,3方式接在2位和5位两个糖基上,即使同样是葡七糖,只是分支的两个糖基连接的位置稍有改变,也就失去活性,这种高度专一的结构与功能的关系也用化学合成的方法加以研究。首先是合成了上述活性结构的寡糖,而后又合成了一系列类似物。结果表明,主链上非还原端的两个葡萄糖和靠近非还原端的分支上的葡萄糖

基是活性必需的,而还原端的糖基是可以修饰的,例如还原开环或接上更多的葡萄糖基等。结构特异的葡七糖可以作为一个诱导植物抗菌素产生的信息分子。有关信息的传递是通过植物细胞(例如大豆根部细胞)的质膜上的相应受体,这一受体活性葡七糖的结合是高度专一的,同时呈现饱和与可逆等特性。寡糖素和其受体的结合有非常高的亲和常数,为 $7.5 \times 10^{10}$  L/mol,结构稍有差异的葡七糖,亲和常数可相差几千至上万倍,而其他一些以1~4方式连接的葡萄糖的寡聚糖,则亲和性小几个数量级。有些实验资料还表明,信息进入细胞内是在转录水平上调控的。

某些真菌的细胞壁含有甲壳质,它们的脱乙酰化产物是一种多聚阴离子,也有激素的功能,诱导蛋白水解酶抑制剂的产生;还能诱导植物抗菌素的合成。寡聚氨基葡萄糖还能诱导愈伤组织的合成,其活性和聚合度、乙酰化程度有关。

木葡聚糖是植物细胞壁内半纤维素的一个组分,它们的主链和纤维素相同,为 $\beta$ -1,4连接的葡萄糖;约有3/4的葡萄糖基带有分支结构,支链上可以是单个木糖,也可以在木糖上再接有半乳糖成为二糖,甚至接有第3个糖基,L-岩藻糖。木葡聚糖经纤维素酶的作用可降解,但得到的碎片种类不多。经高效液相层析分离可得到6种寡糖,它们具有不同的生物活性,其中尤以一个结构特异的九糖 XG9(其主链为纤维四糖,有两个葡萄糖接有单个木糖,另一个接有木糖、半乳糖和 L-岩藻糖构成的三糖)的活性最为明显,它单独时具有促生长的活性,同时又能拮抗2,4-D和氢离子引起的促生长活性。如果除去九糖中的 L-岩藻糖,所得的八糖就失去拮抗活性。

在已知的寡糖素中,表现活性最强的是寡聚半乳糖醛酸。多聚半乳糖醛酸属植物细胞中果胶类。有多种果胶酶可以降解多聚半乳糖醛酸,得到寡糖素;温和酸水解也是制备这类寡糖素的又一种常用的方法。除了按分子量大小可以分得各种寡糖素外,也可用阴离子交换树脂分离这类寡糖素,因为它们是一系列带有不同电荷多聚阴离子。不同聚合度的寡聚半乳糖醛酸有不同的生物功能。聚合度介于5~8的寡聚半乳糖醛酸有拮抗植物生长素的能力。 $10 < \text{聚合度} < 15$ 的寡聚半乳糖醛酸则有诱导植物抗菌素的活性,这一活性和羧基的解离有关,一旦酯化或还原,寡糖素就失活;可是其他一些多聚阴离子(例如硫酸软骨素、透明质酸和多聚谷氨酸)都不是诱导物。因此,寡聚半乳糖醛酸的这一生物活性是和一定大小以及特定的化学结构相关。长期以来,通过改变 pH 值和几种植物激素的比例可以影响烟草外植体的形态发生。寡聚半乳糖醛酸也可产生同样的生物效应。1985年,脱明塔凡(Tran Thanh Van)等用的细胞壁的碎片混合物;1989年艾勃哈特(Eberhard)等指出在这混合物中高活性的部分是 $0.5 \mu\text{mol/L}$ 的聚合度为12~14的寡聚半乳糖醛酸;如果聚合度为6~11,在高浓度下才起作用;寡聚半乳糖醛酸聚合度小到2也能诱导马铃薯或番茄的编码蛋白水解酶抑制剂的基因表达。这类活性的寡糖素中有一部分可以是非还原端的糖残基在4,5位上出现双键。除此以外,寡聚半乳糖醛酸还有其他的生物效应,如诱导高等植物合成乙烯,使黄瓜和蓖麻木质化,以及引起植物组织的超敏反应,细胞壁中的其它果胶物质,例如鼠李半乳糖醛酸聚糖 I,降解产物也能诱导蛋白水解酶的合成。这类酸性寡糖素的作用机制还不太清楚,尚未发现它们的受体,有的实验室认为可能是通过极化作用改变膜电位,进而将信息传入细胞内;有的指出是通过质膜上的某些蛋白质的磷酸化,但是并不能排斥它们受体存在的可能性,因为已有关于植物生长激素受体的报道。

因为上述这些寡糖素都是一些植物结构多糖的降解产物,因此植物细胞和病原体真菌表面的有关糖苷酶,例如病原体中的内切多聚半乳糖醛酸苷酶和木聚糖酶,植物细胞壁中的 $\beta$ -1-3葡萄糖苷酶等,也是寡糖素研究的一个重要方面。在一些文献上也称这些酶为诱导物。在一段时期内,制备寡糖素的方法是用温和的酸或稀碱水解不同的植物细胞壁中的多糖,甚至直接水解细胞壁。但这样所得的产物是复杂的混合物,且水解反应不易控制。文献上已有使用酶乃至固定化酶制备寡糖素的报道,这将为寡糖素

的开发和应用提供方便。

除了植物多糖的降解碎片有生物活性外,还有一些寡糖的衍生物也表现出明显的生物活性。从一种固氮菌大量的培养液中分得一种专一的共生结瘤因子(对苜蓿专一),其生理作用是专一地诱发根毛弯曲变形,可产生效应的浓度是 $n \text{ mol/L}$ ,经鉴定此因子是 $\beta$ 1,4连接的氨基葡萄糖的衍生物,其非还原端的糖残基上的氨基被一个具有两个双键的不饱和软脂酸酯化,另外3个氨基被乙酰化,而且还原端糖基的6-羟基形成硫酸酯。再有动物细胞间质中的肝素,经降解可得到具有完全抗凝活性的八糖。

作为一类有特定生物活性的寡糖的存在已是毋庸置疑的,但是对其作用原理还知之甚少,很可能是不同结构的寡糖素的作用方式有所不同,这是有待深入研究的。更为重要的是如何根据寡糖素的各种生物效应将它们使用到农业、园艺等方面。再者,寡糖素的研究也不应局限于植物和有关病原体的细胞壁中的结构多糖。

#### 参考文献

- 1 Alberheim P, Valem B S J. Cell Biol, 1978, 78: 627
- 2 Alberheim P, et al. Oligosaccharins: naturally occurring carbohydrates with biological regulatory functions. In Structure and Function of Plant Genomes (eds O. Ciferri, Dure L. II), P293 plenum Press, New York
- 3 Alberheim P, Darvill A G. Scient Americ, 1986: 253, 48
- 4 Eberhard S, et al. Plant Cell, 1989, 1: 747
- 5 Cheong J J, et al. Plant Cell, 1991, 3: 127
- 6 Cheong J J, Hahn M. Plant Cell, 1991, 3: 137
- 7 Ryan C A, Farmer E E. Annu Rve Plant Physiol Mol Bio, 1991, 42: 651
- 8 Aldington S, et al. Plant, Cell and Environment, 1991, 14: 625

(中国科学院上海生物化学研究所王克夷研究员撰)

**甲壳质** chitin 甲壳质是一种天然多糖,广泛存在于甲壳类动物和昆虫的外壳以及菌类和藻类的细胞壁中,是地球上最丰富的有机物之一。据估算,仅海洋中的甲壳质年产量就达10亿吨,相当于陆地上纤维素的总和,而且是一种不断增殖的再生资源。由于甲壳质及其衍生物具有广泛而奇特的用途,因而越来越受到人们关注。

1811年始发现甲壳质。曾有甲壳素、甲壳胺、壳蛋白、几丁质、明角质等名称。其化学名称为聚 N-乙酰-D-葡萄糖胺,是2-乙酰氨基葡萄糖多聚体,呈白色或微黄色固体,其化学结构与天然纤维素相似。20世纪80年代以来,甲壳质的研究空前活跃,内容涉及甲壳质及其衍生物的结构、性质、性能以及制造和应用。1977、1981、1985、1988年曾先后在美国、日本、英国和挪威召开4次国际甲壳质会议。

甲壳质不溶于水、乙醇、乙醚、盐和稀酸、稀碱,只能溶于碘盐、三氯乙酸/二氯乙烷等极少数的溶剂,而且往往伴有大量的水解反应。这样,其研究和应用便受到限制。如果将甲壳质大分子侧基上的乙酰基( $\text{CH}_3\text{CO}$ )脱去,就使它变得可溶于许多稀酸溶液,称为脱乙酰甲壳质或壳聚糖。壳聚糖可制成多种形式,如颗粒、膏状、溶液、薄膜、纤维或喷射剂。利用酰化、氧化、羟化、硫酸酯化等多种化学反应,可以从甲壳质和壳聚糖制备各种衍生物。如果利用交联等方法,还可制备出具有生物相容性好的复合材料。制造甲壳质的主要工业原料是水产加工厂废弃的虾、蟹壳。在干燥的虾、蟹壳中甲壳质含量为20%~50%,产率一般在20%左右。

甲壳质可被体内溶菌酶溶解并被组织吸收,是制作手术线的理想材料。甲壳质手术线伸长率小,抗张强度大,在胆汁、尿、胰液中可很好地保持抗张强度。1984年,纳卡吉马(M. Naksjima)等对甲壳质手术线进行的毒性试验表明,它在所有诱变、急性中毒、发热、溶血、皮肤反应方面均显示阴性。用甲壳质制作的人造皮肤柔软度适当,与人体亲和性好,没有副作用,再

生的表皮光滑。它还具有吸收从伤口渗出的体液、减缓伤口疼痛的效果。当伤口愈合后,这种人造皮肤会自行脱落。日本等国正准备将其投放市场,甲壳质和壳聚糖无论是溶液还是固体粉末,都是很好的止血剂。在止血的同时,还能阻止血纤维蛋白束的形成、结缔组织细胞的增殖以及胶原蛋白的合成,而且伤口愈合结痂最小。也可以把它们制成绷带,用于止血和加速伤口的愈合。把壳聚糖乙酸水溶液直接涂于烧伤和烫伤的伤口,能在伤口表面形成一层坚韧、吸水、透气、生物相容性好的薄膜。该薄膜可以起到防止感染、减轻痛苦等作用。特别是从真菌发酵提取出甲壳质,由于其精细的粉末状态,使用更为方便。经硫酸酯化的甲壳质或壳聚糖在结构上与抗凝血药物人造肝素相似,所以利用甲壳质或壳聚糖制作人造肝素的研究已做了许多工作。1985年,希拉诺(S. Hirano)等将某些壳聚糖的硫酸衍生物对一些动物的凝血因子的作用进行研究,并与肝素进行比较。在活化某些凝血因子时间方面的活性次序(units/mg)是O-硫酸化N-乙酰基壳聚糖(371~379)>N,O-硫酸化壳聚糖(190~287)>肝素(174)>硫酸化O-羧甲基壳聚糖(27~31)。1984年艾伦(G. G. Allan)等研究报道,甲壳质及其衍生物所具有的一些生物学特性,能很好地满足接触眼镜材料的要求。特别是壳聚糖具有优异的透氧性和促进伤口愈合的特殊性。把N-乙酰基甲壳质粉末注模后制成的接触镜,它的透氧率可达 $14 \times 10^{-11} (\text{cm}^2/\text{s})(\text{mlO}_2/\text{ml} \times \text{mmHg})$ ,且可被水很好地湿润。1989年希拉诺和罗兰德(B. Roland)等研究报道,将药物分子填入甲壳质细小的孔穴内,可制成含药物的微孔小球或微胶囊。例如,将含有磺胺嘧啶的壳聚糖溶液滴入三聚磷酸中,通过离子交换,形成三维网络结构的微球,一次用药可达到长期发挥药效的作用。长效的阿斯匹林剂可由浓缩的阿斯匹林和乙酸壳聚糖水溶液块化凝聚后制得。通过控制壳聚糖在剂片中的含量、物理状态以及药物溶解介质的pH,可以控制药物的释放速度。通过对灰黄霉素、氯化泼尼松、苯巴比妥、消炎痛等药物的增溶研究发现,甲壳质和壳聚糖对药物溶解性和生物利用率的改善,要比微晶纤维素好。适合填入甲壳质中空纤维中的药物包括蛋白质、抗生素、抗癌药、眼用药、甾类避孕药等,药物分子的释放速率为零级动力学控制,释放时间可以控制在24小时至3个月不等。

甲壳质及其衍生物也有许多药理功能。例如,甲壳质和壳聚糖可抑制某些癌细胞的增殖,具有杀菌、杀霉、杀虫和免疫功能。1989年杜宾斯基耶(A. M. Dubinskaya)等报告,壳聚糖具有降低胃酸、抑制溃疡、抗凝血、降低胆固醇和三甘油酯等作用。现已有用于治疗癌症的含有壳聚糖的注射液的专利问世,不久可望投入临床应用。将副作用大的抗癌药接到壳聚糖的侧链上,可以保持药物的抗癌性,使副作用减少或消除,同时还可以起到使药物缓释的作用。癌细胞表面往往具有较高的负电荷,如用带正电荷的聚电解质壳聚糖治疗,则可有效地阻止癌细胞的增殖和扩散。

在工业方面,利用溶液浇注法很容易使甲壳质及壳聚糖成膜,可用于制造食品包装袋、磁带、超滤膜、药物外包装和胶囊等。在纺织染整上,它是上浆剂、固色剂及处理剂,可赋予织物更好的染色性、耐洗性和抗皱性。由于甲壳质不怕水,制成的纸可用来绘制海图及航海记事本。纸表面用壳聚糖处理,可提高纸的强度,使油墨印刷鲜明,且不会因紫外线照射而褪色。壳聚糖有很强的增粘、保湿和抗静电作用,形成被膜的性能及保护胶体的能力优异,可用于制作润肤剂、洗发剂、固发剂等。甲壳质及其衍生物无毒无味,是理想的絮凝剂。它们可降低食用色素的毒性,可用于处理食品厂的废水,絮凝效果优于合成的高分子絮凝剂。美国环保局已把壳聚糖列为可用于饮水净化。日本每年用于水的净化的甲壳质达500 000kg。甲壳质及其衍生物还被用作酒类、饮料的除浊剂,食醋的防沉淀剂,原料糖汁的纯化剂。虽然甲壳质及其衍生物在各国均可用于动物饲料的添加剂,但对其用作食品工业原料,各国有不同的规定。在日本,将其视为天然物质,可用作食品原料,几种添加壳聚糖的食品已供应市场。

在农业方面,甲壳质或壳聚糖还可诱生植物的甲壳酶和壳

糖酶,使酶的活性增强几倍,进而活化植物细胞,刺激植物生长和发育。用甲壳质拌种,出芽率高、苗壮。1989年,美国马里兰IGENE公司利用甲壳质生产一种不污染环境的新型杀虫剂。该杀虫剂不是直接杀死害虫,而是利用刺激土壤微生物产生一种杀死线虫和虫卵的酶,间接地把害虫消灭。将甲壳质溶液喷在采摘下的水果上,可形成一层允许适量氧气通过的膜,从而延长水果的保鲜期。也可通过改变甲壳质溶液的浓度,使甲壳质形成的膜具有不同的通透性,以适应不同的水果保鲜需要。

在生物学领域,甲壳质及其衍生物可用于固定酶载体。1975年,斯坦利(Stanley)最早用壳聚糖为载体,采用戊二醛交联法研究乳糖酶的固定化。1983年,穆扎里利(R. A. A. Muzzarelli)等报告,通过物理吸附作用,甲壳质可以不用交联剂将溶菌酶、淀粉酶等直接固定,可保持高达90%游离酶的活性。除此之外,甲壳质和壳聚糖还可用于固定脲酶、胃蛋白酶、木瓜酶、氧化酶等多种酶,与其它固定酶载体比较,具有价格低廉、原料易得、固定酶效率高、反应活性高、不易受溶液中金属离子干扰和抑制等特点。它们还可以用作微生物细胞的固定以及制造各种生物反应器等。

甲壳质及其衍生物在日本、美国和一些西欧国家颇受重视,新的用途不断开发,实际应用也越来越广泛。未来的发展方向,将仍然是开发新的甲壳质衍生物及其应用。中国甲壳质资源十分丰富,仅每年废弃的虾、蟹壳就有数百万吨,如果利用这些废弃的污染源制取甲壳质及其衍生物,就会变废为宝。

参考文献

- 1 Tokura S, et al. Polym J, 1982,14:527
- 2 Aiba S, et al. Carbohydr Polym, 1985,5:285
- 3 Kawashima Y, et al. Chem Pharm Bull, 1985,33:2107
- 4 奇云. 广东生化通讯,1989,6:146~147
- 5 Ouchi T, et al. Macromol Chem, 1989,190:1817
- 6 奇云. 天然产物研究与开发,1991,3(2):100~106

(安徽省淮南职业医学专科学校奇云副教授撰)

多胺

polyamine 多胺常指生物体中自然存在的多阳离子脂肪胺类物质,主要包括腐胺(Putrescine, 1,4-丁二胺)、精胺(Spermidine, 1,4,7 庚三胺)和精胺(Spermine, 1,4,7,10 癸四胺)。精胺是第一个被发现的多胺。1674年,显微镜发明者利温霍克(Leeuwenhoek)应用他早期的显微镜观察精液时,发现一种结晶性沉淀物质,被称之为 Semenstut,约一个世纪后,法国化学家范奎宁(Vanquelin)在研究精液凝固特性时再次报告了这种结晶性物质;直到1900年才证实是磷酸精胺,后来由罗森赫姆(Rosenheim)首次成功地合成了精胺和精胺。多胺在精液中的含量比其他任何体液或组织都高许多,但遍存于所有的生物体系。至今还未发现不含多胺或其中一种多胺成分的有生命的物质,包括动植物,单细胞生物等。1965年,戴科斯塔(Dykstra)首次证明多胺可能累及到肝细胞再生过程,然而直到1970年,人们仍然认为伴随细胞增殖所出现的多胺合成增加和细胞内多胺水平增高是细胞增殖的非必需伴随反应,甚至认为多胺是无任何生理意义的代谢废物或排泄形式。1970年,莫里斯(Morris)等的发现改变了人们的看法。他们证实了一种多胺合成缺陷型大肠杆菌突变体的生长需要外源性多胺的维持,由此揭开了多胺在生物调控中的效应和机制研究的帷幕。

多胺代谢与调节 多胺合成是从鸟氨酸开始的。鸟氨酸通过鸟氨酸脱羧酶(ODC)脱去羧基后形成腐胺,然后经过一次丙胺基转移效应生成精胺,后者再经一次丙胺基转移反应生成精胺。丙胺基来自S-腺苷蛋氨酸脱羧后的S-腺苷甲硫丙胺。多胺合成酶系包括两个脱羧酶即鸟氨酸脱羧酶和S-腺苷蛋氨酸脱羧酶(SAMDC),及两个丙胺基转移酶即精胺合成酶和精胺合成酶。在哺乳动物细胞中,ODC为分子量50 000~55 000的二聚体结构,其活性依赖于磷酸吡哆醛,含量很低且极易被诱导,半衰期短,多在10~30min之间,因而是多胺合成的限速酶。许多刺激细胞生长的物质如激素、环核苷酸等均可诱导该酶活性的增强。其

调节机制主要包括:(1)转录和翻译水平的调节,(2)鸟氨酸脱羧酶抗酶和抗酶抑制剂的调节。1976年,卡奈拉克斯(Canellakis)等人证实一种非竞争性蛋白抑制剂——抗抗酶,抗抗酶可被多胺诱导产生,并特异性地与ODC结合生成无活性的ODC-抗抗酶复合物,使之失活。哺乳动物细胞还含有一种蛋白因子——抗抗酶,能特异性地与ODC-抗抗酶复合物结合,释放被抗抗酶结合的ODC,使其恢复活性。(3)酶蛋白降解的调节(4)酶活性形式与无/低活性形式的调节。ODC可通过翻译后磷酸化或酰胺基化进行酶动力学活性形式与无/低活性形式的相互转换。SAMDC以丙酮酸为辅酶,通过丙酮酸与底物形成Schiff碱参与催化作用;该酶半衰期也很短,在35~60min之间;许多诱导ODC活性增强的物质亦可诱导增强SAMDC的活性,其调节方式包括酶蛋白合成率、酶蛋白稳定性的调节以及底物诱导和产物反馈抑制的调节。丙胺基转移酶在细胞内的含量比上述两种脱羧酶要高得多,故调节效应也小。

上述是经典的多胺合成途径。1982年,人们还发现一条多胺相互转化的途径。精胺、精胺可经精胺-精胺乙酰转移酶(SAT)催化,将乙酰CoA的乙酰基转移至精胺或精胺的N1原子上形成乙酰化物,然后再在多胺氧化酶作用下脱去乙酰氨基内酯,生成腐胺或精胺。细胞内多胺氧化酶含量远高于精胺-精胺乙酰转移酶,因而认为多胺的乙酰化过程是多胺相互转化过程中的限速步骤。精胺或精胺-经乙酰化便可快速被多胺氧化酶降解。精胺-精胺乙酰转移酶有核型的和胞浆型的两种,核型除催化多胺N1位乙酰化外,尚可催化精胺N9位乙酰化、腐胺乙酰化以及组蛋白的乙酰化。

有关多胺的分解代谢与排泄的研究目前还进行得不多,但对多胺分解产物的定量发现,尿中可含有多种与多胺降解相关的物质,包括N8-羧乙基精胺、精胺、 $\gamma$ -氨基丁酸、 $\alpha$ -酮吡咯烷、 $\beta$ -丙氨酸、多胺乙酰化物、Putrescine和Isoputrescine等。一般认为Putrescine和Isoputrescine是多胺分解代谢的终末产物,是由血浆精胺氧化酶和肾脱氨酶催化所生成。虽然也发现有Putrescine和Isoputrescine转变为腐胺的反应,但仍认为是多胺代谢的清除形式。

生物学功能。由于多胺遍存于所有生物体,推测多胺可能是维持生命所必需的物质。多胺可能像参与血管调节、免疫反应和作为神经递质的生物活性胺如组织胺、羟胺、儿茶酚胺等一样,控制生物体和细胞生物学行为的某一特殊方面。多胺在生理pH时带有正电荷,可以通过离子键和氢键的形式与核酸、蛋白质及含有负电荷基团的磷脂物质结合,调节它们的生物学活性及功能;又由于多胺化学结构中的碳链部分具有脂肪族的特性,因而又可以出现在某些疏水环境中如细胞膜上,这与体内常见的多价阳离子如 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 等不同,多胺是由细胞本身合成,而且又受控于细胞内外的许多调节因素,由此决定了多胺的特殊的生物学作用。

人们较早注意到的是多胺与细胞增殖周期的相互关系,当细胞从静止期或G<sub>0</sub>期刺激增殖时,多胺合成酶活性及多胺水平在细胞周期中可以出现二个高峰,分别位于G<sub>1</sub>早期、G<sub>1</sub>后期/S期和G<sub>2</sub>/M期,若细胞持续增殖时只出现后两个高峰。一般认为第一高峰与细胞进入增殖周期有关,而后两个高峰则分别与S期DNA合成和细胞分裂有关。应用多胺合成抑制剂(如DFMO)处理细胞时,细胞内多胺水平降低,结果细胞虽可以从G<sub>0</sub>期通过G<sub>1</sub>期进入S期,然而S期明显延长,甚至细胞在G<sub>1</sub>期积聚。一般情况下,细胞内有足够的多胺能使细胞在无多胺合成的情况下完成一个细胞周期的循环。当多胺水平低于某一参照限制点时,细胞便滞留在S期。同时,由于多胺的耗竭,可使细胞分裂所需要的肌动蛋白束、微管蛋白束消失或发生装备障碍,以及组蛋白和非组蛋白蛋白质的合成与修饰发生变化,染色体提前凝缩异常,细胞不能正常分裂,双核细胞增加,并可出现染色体畸变。

在多胺营养缺陷型突变体细胞中,或在多胺合成抑制剂处理的细胞内,DNA合成起始与DNA链的延长均受到显著抑制。

同时,DNA构型和稳定性亦发生明显改变。多胺除可以直接与DNA相互作用外,尚可间接影响染色体蛋白质的合成与化学修饰,改变这些蛋白质与DNA的作用方式,调节DNA构型、功能状态及其稳定性。更主要的是多胺可调节DNA合成体系的酶活性,如DNA聚合酶、DNA旋转酶、拓扑异构酶Ⅱ以及DNA连接酶和胸腺嘧啶核苷激酶等。其次,由于DNA的稳定效应,可减少各种变性因素如热、X线、酶及药物所诱发的DNA损伤。

多胺亦调节RNA合成与降解过程。多胺可刺激RNA转录,影响RNA合成的起始和链的延长,其调节效应是多重性的,表现在多胺与核糖体蛋白质的结合、多聚核糖体的形成、核糖体亚单位的重组以及多胺与mRNA和tRNA的相互作用。多胺还可以激活RNA聚合酶与核蛋白激酶N1,抑制RNA水解酶,调节细胞内RNA含量。蛋白质的合成亦需有最佳浓度的多胺存在,当多胺耗竭后蛋白质多肽链延长减慢,起始频度减低。多胺尚可保护未成熟的多肽末端,增加翻译的稳定性和准确性,减低误读的机率。

此外,多胺还有许多其他生物学功能,如稳定细胞膜、调节细胞内外及线粒体内外的 $Ca^{2+}$ 流量,调节环磷酸核苷的生物学活性,参与细胞抑制素的组成以及细胞受体的构型调节和细胞免疫的调节等等。多胺的调控研究是一片尚待开发的领域,随着研究的不断深入,多胺在生物学领域中的重要性将会引起人们的广泛关注。

#### 参考文献

1. Bachrach U. Polyamines in Biomedical Research (ed. Gaugas JM). New York: John Wiley, Sons Ltd, 1980; 81~198
2. Hely O. Differentiation, 1981, 19: 1~20
3. Pegg A E. Biochem J, 1986, 234: 249~262
4. 缪金时, 潘瑞彭. 生物化学与生物物理进展, 1989, 16: 12~15 (上海第二医科大学仁济医院缪金时博士撰)

#### 新辅基—吡咯喹啉酮

A novel cofactor -

Pyroquinoline quinone 一切生命活动都是靠酶参加完成的,而酶可分为单成分酶和双成分酶两类,前者仅蛋白质存在就具有催化活性;后者则除蛋白质外还要有非蛋白质基团即辅基配合才能显出催化活性。吡咯喹啉酮(Pyroloquinoline quinone,简称PQQ)就是一种有别于已知脱氢酶类辅基烟酰胺核苷酸(NAD和NADP)和黄素核苷酸(FMN和FAD)的新辅基。它在酶反应过程中担负着传递电子、质子和化学基团的功能。此外,还能刺激某些生物在发育前期快速生长。所以,深入研究PQQ的分布状况、产生机理、结构功能以及生物学性质,对促进酶学学科的发展,搞清酶蛋白酶类的代谢过程,推动PQQ在实践中尽早应用等都是很有意义的。

20世纪60年代,Hauge首先描述了A. Galoaceteticus(当时称B. antitratum)葡萄糖脱氢酶的特征。虽然他未充分阐明其辅基的结构,但已排除该辅基是FAD的说法。70年代初,有很多研究革兰氏阴性细菌生长在甲醇上可产生甲醇脱氢酶的报道。开始,Urushibara等视该脱氢酶的辅基为嘧啶化合物,后来Sperl等推测是2,1-二氧四氢嘧啶。然而,ESR分光技术的应用否定了上述看法,Westerling等提出甲醇脱氢酶的辅基是一种可抽提的分子量为小的含N酰类化合物。1979年Salisbury等搞清了该辅基的结构,并将其取名为“methoxatin”;翌年,Duine等在总结前人研究成果的基础上,结合自己的工作,将这一辅基正式定名为PQQ,该辅基PQQ(醌式)在还原状态和与水化合状态时,其结构有PQQH(半醌式)、PQQH<sub>2</sub>(醌醇式)以及PQQ-H<sub>2</sub>O。还原状态的PQQ,在生理条件下可与有关物质相互束缚,且较稳定;而呈游离状态时,则不甚稳定。

PQQ的C(5)羰基氧、N(6)和C(7)羰基基团是较活跃的,且具有束缚某些物质的能力,已发现它们可以与水、亲核试剂(如联胺、叠氮化物)、蛋白质(如白蛋白)和金属离子(如 $Co^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $Li^+$ )等发生结合作用。PQQ-H<sub>2</sub>O的pK值为10.7,PQQH<sub>2</sub>的pK

值为8.5, PQQ 为8.7 (Mewhürter 等则认为4.6和6.8)。

PQQ 在水中显示两套光谱即吸收光谱和 NMR 光谱, 一套属 PQQ 的性质, 一套属 PQQ H<sub>2</sub> 的性质, PQQ 在低温下水化程度增强, 另外, 一价阳离子复合物对 PQQH<sup>•</sup> 的吸收光谱也有一定的影响。

检测和定量 PQQ 的方法很多, 反相柱的 HPLC 分离物, 用紫外光、荧光或电化学方法进行检测已成为有些实验室中的常规分析手段, PQQ 的挥发性衍生物能用 GLC 检测, 其灵敏度较高。另外, 根据 PQQ 能作为某些氨基酸氧化脱羧的催化剂的原理, 在所试的氨基酸, 如甘氨酸氧化脱羧时, 与染料四唑盐 (tetrazolium) 偶联形成甲胍 (formezne) 可通过比色法测定加入的 PQQ 量, 除上述方法外, 生物测定法则是公认的既专一又灵敏的方法, 该法是依照 PQQ 与脱辅基脱氢酶可以重组的道理进行的。

关于 PQQ 生物合成的途径试验所用的材料是两种甲基营养细菌 (methylophilic bacteria), 研究中发现, 酪氨酸和谷氨酸是生物合成 PQQ 的前体, *Cragam* 等已用发酵法得到了可观的 PQQ 产品, 至于生物合成 PQQ 的调控与诱导研究也已起步。

PQQ 的生物学特性以及药理功能研究颇多, 通常认为, PQQ 对细菌不起致命性的作用, 例如, 很多细菌不能产生该物质, 有些可产生该物质的突变株 (即 PQQ-变种) 仍能正常存活便是极好的证据, 但是, PQQ 的存在能赋予某些微生物具有特殊的功能, 可明显地刺激某些微生物和植物种子前期生长速度加快, 比如, 将 PQQ 加到培养假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.) 基质中, 就可使其产生全醇脱氢酶, 并获得降解聚乙烯醇 (PVA) 的能力; 又如, 将 PQQ 加到培养大肠杆菌 (*E. coli*) 基质中, 就可使其产生全葡萄糖脱氢酶, 从而使该菌生长有了能量供应基础; 再者, *psl*-变种要生长在葡萄糖基上, 必须有 PQQ 存在, 另外, PQQ 与动物营养的关系, PQQ 对哺乳动物感染的某些疾病的防治也有了报道。

PQQ 研究工作始于 20 世纪 60~70 年代, 迅速发展于 80 年代, 这期间荷兰及日本等国的学者研究成绩较突出, 进入 90 年代研究 PQQ 的旺盛势头仍有增无减, 到 20 世纪末, PQQ 的研究内容会越来越深入, 对它的生产规模和应用范围也一定会有新的进展, 目前研究 PQQ 的热点为: (1) PQQ 的分布, 该物究竟只存在于革兰氏阴性细菌中, 还是也存在于其它生物 (包括革兰氏阳性细菌、真核生物、哺乳动物等) 中; (2) 有些细菌的一种脱氢酶有时依赖于 NAD 作辅基, 有时则依赖于 PQQ, 如甲醛脱氢酶就是如此, 这是为什么? (3) PQQ 与相应的酶蛋白结合是以共价键方式, 还是其它方式完成的? (4) PQQ 除可充当辅基, 并可刺激某些生物生长外, 还有没有其它生物学功能? 其机理是什么?

参考文献

- 1 Urushibara T, et al. *Biochem J*, 1971, 125: 147~147
- 2 Sahabury S A, et al. *Nature*, 1979, 280: 843~844
- 3 de Beer R, et al. *Biochem Biophys Acta*, 1980, 622: 370~374
- 4 Ameyama M, et al. *Agric Biol Chem*, 1984, 48(2): 561~565
- 5 Adachi O, et al. *Agric Biol Chem*, 1990, 54(9): 2481~2483
- 6 Matsushita K, et al. *Biosci Biotech Biochem*, 1992, 56(2): 304~310
- 7 赵永芳, 等. 生物化学杂志, 第7次全国生物化学学术会议专题报告(摘要)及论文(摘要)汇编, 1993, (8): 135

(中科院武汉病毒研究所王银善副研究员、武汉大学生命科学学院赵永芳教授撰)

**抗体酶** abzyme 抗体酶是抗体的高度选择性和酶的高效催化性巧妙结合的产物, 它实质上是一种具有催化活力的免疫球蛋白, 在可变区赋予酶的属性, 所以也叫催化性抗体, 抗体的多样性及精细识别性使其能束缚几乎任何有意义的分子, 因此, 抗体酶制备技术的开发预示着可以人为生产适应各种用途的特别是自然界不存在的高效催化剂, 对生物学、化学和医学等多种学

科有重要的理论意义和实用价值。

1952年, 比利(D. W. Woolley)推测, 如果连续刺激抗体是长时间, 抗体则可能进化成为酶, 1969年, 詹克斯(W. P. Jencks)根据波林(L. P. Pauling)的化学反应过渡态理论预言, 如果找到针对某个反应过渡态的抗体, 将其加入到该反应体系中, 就可观察到其对应化学反应的催化效应, 这是因为抗体可束缚反应的过渡态络合物, 使其能级降低, 从而帮助大量反应物分子跨越能垒, 达到加速反应的目的, 由于实践中很难俘获过渡态, 所以设计和制备稳定的过渡态类似物, 代替过渡态作为抗原(半抗原), 就成为能否成功制备抗体酶的关键, 由于对酶作用机理理解的差别以及实验技术的限制, 长期以来, 制出的抗体酶效率不高, 甚至观察不到催化能力, 虽然1975年单克隆抗体技术的出现为抗体酶技术的开发铺平了道路, 但直到1986年抗体酶的研究才取得突破性进展。

1986年, 舒尔兹(P. G. Schultz)小组认定对硝基苯磺酰阻碱是丙氨酸二酯水解反应的过渡态类似物, 用这类物质作半抗原诱导产生单克隆抗体, 经过筛选, 找到一株 MOPCD 7, 使该水解反应速度加快12 000倍, 勒纳(R. A. Lerner, 1986)小组利用金属肽酶的研究成果合成一个含有吡啶甲酸的磷酸酯化合物作为半抗原, 得到一株克隆抗体6D1, 用来催化不含吡啶甲酸的甲磺酰酐酯的水解反应, 使反应加速近1 000倍。

上述两个小组成功的关键在于巧妙运用过渡态类似物, 此后选择合适的过渡态类似物来诱导抗体酶得到了迅速发展, 反应类型也不再局限于水解反应。

目前, 制备抗体酶的基本方法有3类: (1)用抗体来稳定特定过渡态; (2)用抗体作为模板; (3)在抗体的抗原结合部位引入催化基团和辅基, 这些方法综合运用现代化学、免疫学和现代分子生物学等成就, 使抗体酶催化反应的类型越来越多, 除水解反应外, 还有酰胺形成、光诱导裂解和聚合、转酯化、丙酯化、消除反应、克莱森重排、金属整合、脱羧反应、异构化和氧化还原反应等, 这些抗体催化反应的专一性相当于或超过酶反应的专一性, 催化速度有的可达到酶催化的水平, 但一般地说, 抗体催化反应速度比未催化反应速度快10<sup>3</sup>~10<sup>6</sup>倍。

迄今, 大多数抗体酶是通过理论设计和合成合适的与反应过渡态类似的小分子(半抗原), 然后让免疫系统产生针对半抗原的抗体来获得的, 由于针对半抗原的抗体在几何形状和化学性质上与反应过渡态互补, 因而可以稳定过渡态, 从而加速反应。

1987年, 内耶(A. D. Napper)等用一个环化的磷酸酯作为过渡态类似物免疫动物, 得到单克隆抗体24B11, 发现这种抗体可催化外消旋的羧基酸酯分子内环化形成内酯反应, 加速反应167倍, 而且首次观察到抗体酶催化反应的立体专一性, 反应产物中一种对映体的含量高出91%, 波赖克(S. J. Pollack, 1989年)等人也证明抗体酶可以立体专一地催化非活化酯的水解, 产物中一种对映体的含量比另一种高出100多倍, 这个结果的重要意义在于, 目前还没有一种化学方法可以产生立体专一性酯解催化剂, 这类抗体可用于含有酸或醇功能基的合成中间物的手性拆分。

1990年, 舒尔茨小组利用与底物扭曲构象相似的抗曲咪唑作半抗原, 制备的抗体可催化咪唑金属整合反应, 亚铁整合酶是血红素生物合成途径中的末端酶, 可催化亚铁离子插入原咪唑的生物合成, N-甲基原咪唑由于内部甲基取代而呈扭曲结构, 它是此酶的有力抑制剂, 也与酶催化的咪唑金属整合反应的过渡态类似, 针对甲基咪唑的抗体可催化平面结构原咪唑的金属整合, 这就为该反应过渡态扭曲结构的作用提供了证据, 此项工作不仅证明抗体结合能可扭曲底物结构, 而且表明可用抗体检验酶催化作用的机理。

设计的其他半抗原是利用抗体结合能克服反应能垒, 巴特利特(P. A. Bartlett, 1988)等合成一个有椅式构象的氧杂双环的化合物来模拟由分枝酸生成于苯酸这样一个克莱森重排反应的过渡态结构, 用此双环半抗原诱导的抗体可使重排反应加速10<sup>6</sup>

倍。由于反应中不形成离子或游离基中间体,反应不需要酸、碱等催化基团催化,所以这项工作对采用非化学基团催化的抗体酶的发展有重要意义,它加深了人们对于酶作用机理中酶模型的理解。

用抗体作为酶模型的另一个例子是抗体催化的狄尔斯-阿尔德耳反应。此反应是由二烯和烯烃产生环己烯,这在有机合成中很重要,但却没有相应的酶催化此反应。这种反应的过渡态是具有高能构象的环状物,反应中化学键的断裂和生成同时进行,因此常可观察到不利的活化熵。设计半抗原时不仅要利用邻近效应,还要消除产物抑制,才能诱导出催化这一双分子反应的抗体。希尔沃特(D. H. Hilvert, 1989)等成功地解决了这一问题。他们用稳定的三环状半抗原诱导的抗体可催化起始加合物的生成,然后立即排出  $\text{SO}_2$  产生次级二氢苯邻二甲酰亚胺,抗体对该产物的束缚力很弱,因而显著加速反应。这个例子说明,抗体酶不仅可以催化天然酶不能催化的反应,而且通过半抗原设计还能解决产物抑制问题。

有一种产生抗体的方法不是利用过渡态类似物,而是利用抗体一半抗原的互补性。抗体与其配体的相互作用是相当精确的,抗体常含有与配体功能互补的特殊功能基。已经发现带正电的配体常能诱导出结合部位带负电残基的抗体,反之亦然。肖凯特(K. M. Shokat, 1989)等利用这种互补性,制备了针对带正电半抗原的抗体,在抗体结合部位上产生带负电的羧基,可作为 $\beta$ -消除催化作用中的碱功能基。他们获得的6个抗体中4个具有催化活性,其中一个抗体可加速反应 $10^5$ 倍。后来证明,利用抗体一半抗原互补性是产生抗体的一般方法,可适合各类不同的反应,如缩合、异构化、水解反应等。抗体催化的下一个重要目标应是在其结合部位诱导出两个催化基团(两个酸、一酸一碱或两个碱),进一步加快反应速度。

很多酶的催化作用要有辅因子参与,这些辅因子包括金属离子、血红素、硫胺素、黄素和吡哆醛等。因此,开发将辅因子引入抗体结合部位的方法无疑会扩大抗体催化作用的范围。要做到这一点,基本上有3种方法:(1)用多底物类似物一次免疫动物,可产生既有辅因子结合部位又有底物结合部位的抗体。小心设计半抗原可确保辅因子和底物的功能部分正确配置。此法已用于获得  $\text{Zn}(\text{I})$  为辅因子的序列专一性裂解肽键的抗体酶。将  $\text{Co}(\text{III})$  三亚乙基四胺连到肽底物上作为半抗原,免疫动物后产生抗体,其结合部位能适应肽底物、三亚乙基四胺和  $\text{Zn}(\text{I})$  离子。 $\text{Zn}(\text{I})$  上的开放配位部位可将羟离子传递到束缚底物的待断裂肽键的羧基碳上。此法还用于许多具有氧化还原活性的辅因子,如黄素、刃天青和依赖吡哆醛的反应。(2)用选择性化学修饰法即半合成法将辅因子或催化基团引入抗体结合部位。一般是先用可裂解亲和和标记物将反应基团(辅功能基)选择性引入抗体的结合部位,再用这个反应基团作为锚,引入各种催化基团和辅因子。已用此法制备出含有活性部位巯基和咪唑基的具有水解活力的抗体。特别重要的是,此法并不需要了解目的抗体的三维结构,而且可以引入天然的和非天然的辅因子。(3)蛋白质工程即定点突变是产生抗体酶的另一个重要方法。1989年,舒尔茨小组用此法将催化基团组氨酸插入到对二硝基苯专一的抗体(MOPC315)的结合部位。这个组氨酸在酯底物水解中起亲和催化剂的作用。他们合成了  $V_L$  片断的基因,其中抗体结合部位的 Tyr34被组氨酸残基取代,然后用大肠杆菌表达重组的  $V_L$ ,再将此  $V_L$  链与天然的  $V_H$  链组合在一起,则得到具有显著酯解活力的抗体酶,反应加速 $10^6$ 倍。

1990年勒纳小组用定点突变技术将金属离子引入抗荧光素抗体的结合部位。半抗原-抗体的晶体结构显示,轻链互补性决定区中的3个残基在相对几何学上类似于碳酸酐酶锌结合部位中的3个组氨酸残基,因此,用 His 取代抗体残基 Arg34L、Ser89L 和 Ser91L。为避免对金属结合部位可能产生的空间障碍,用 Leu 取代 Tyr36L,经过这样改造后的抗体不仅仍能束缚荧光素,而且还能结合  $\text{Cu}(\text{I})$ 、 $\text{Zn}(\text{I})$  和  $\text{Cd}(\text{I})$ 。对  $\text{Cu}(\text{I})$  的束缚常数为  $2$

$\times 10^5 \text{mol}^{-1}$ 。这种将金属离子结合部位引入抗体的能力十分重要,因为金属离子可催化各种类型的反应。

勒纳小组用 $\lambda$ 噬菌体在大肠杆菌中构建一个庞大的单克隆抗体基因文库。他们用聚合酶链反应放大抗体的重链、轻链基因。放大的基因先插入不同载体,再随机重组得到表达文库,其中含有数百万个可分泌 Fab 的不同斑点。由于 Fab 可在大肠杆菌中表达,因此可用定点突变法修饰目的克隆。然而用此法表达的抗体还没有催化能力。温特(G. Winter)等采用另一种途径,即只表达  $V_H$  文库,因为有时抗体结合部位主要在重链。文库里的重链可与具有功能基的轻链重组而产生新的抗体酶。

抗体酶的研究还处于幼年时期,存在许多问题有待解决。然而抗体酶的研究实践清楚表明,它是研究酶作用机理的有力工具。尽管目前抗体酶距离实用阶段还很遥远,但已显出诱人的应用前景。具有酯解活力的抗体酶已用于生物传感器的制造。已经证明,抗体酶可以反相胶团和固定化的形式在有机溶剂中起作用,这为抗体酶的商业应用开辟了前景。具有立体专一性的抗体酶有助于解决化学合成中的对映体拆分问题,用于制药工业也很有发展前途。随着抗体酶催化反应类型的不断增加,抗体酶在生物学、化学和医学上的应用会展现更加诱人的前景。

今后,抗体酶的研究重点是如何提高抗体酶的有效性。这要综合运用上述抗体酶制备方法,产生催化基团、辅因子和焓效应协同作用的活性部位。抗体的细菌表达系统的出现对此则会有极大的促进作用。

#### 参考文献

- 1 Pollack S J, Jacobs J W, Schultz. Science, 1986, 234: 1570~1573
- 2 Tramontano A, Janda K D, Lerner R A. Science, 1986, 234: 1566~1569
- 3 Napper A D, Benkovic S J, Tramontano A, et al. Science, 1987, 237: 1041~1043
- 4 Bartlett P A, Nakagana Y, Jonsson C R, et al. J Org Chem, 1988, 53: 3195
- 5 Pollack S J, Hsiun P, Schultz P G. J Am Chem Soc, 1989, 111: 5961~5962
- 6 Hilvert D H, Hill KW, Nared KD, et al. J Am Chem, Soc, 1989, 111: 9261~9262
- 7 Shokat K M, Leumann C J, Sugawara R, et al. Nature, 1989, 338: 269
- 8 Baldwin E, Schultz P G. Science, 1989, 245: 1104
- 9 Cochran A G, Schultz P G. Science, 1990, 249: 781
- 10 Iverson B L, Iverson S A, Roberts V A, et al. Science, 1990, 249: 659

(吉林大学酶工程实验室罗贵民教授撰)

#### 漆酶

laccase 漆酶(EC 1.10.3.2)是含铜氧化还原酶,主要有漆树漆酶和真菌漆酶两类,分别来源于漆树液(生漆)和真菌。研究漆酶的结构与功能、金属铜离子的作用与配位环境、催化反应、氧化还原和电子传递过程等,不仅为人们了解天然体系、探索生命现象提供信息,而且对天然资源的开发、应用都具有重要意义。

1883年,日本吉田首次从日本生漆(即中国生漆)中发现漆酶,但他没有深入研究。后来,伯查德(Bertrand)和凯林(Keilin)分别从越南生漆和中国生漆中分离出漆酶,发现它能催化氧化漆酚、邻苯二酚、对苯二酚、连苯三酚等多元酚。1897年,拉波德(Laborde)发现真菌类植物中有一种酶具有漆树酶一样的催化活性,因而称真菌漆酶。此外,还在紫花苜蓿、毒蕈莖、马铃薯、毛地黄、香蕉、咖啡豆、苹果等植物中发现漆酶。不同来源的漆酶化学组成也有差别(表1)。



表1 漆酶的分子量、含糖量和含铜量

| 来源      | 分子量             | 含糖量%  | Cu/mol |
|---------|-----------------|-------|--------|
| 中国漆酶    | 110 000~141 000 | 45    | 4~6    |
| 越南漆酶    | 130 000         |       | 5~6    |
| 变色多孔菌漆酶 | A               | 10~14 | 4      |
|         | B               | 10    | 4      |
| 柄孢菌漆酶   | I               | 24    | 16     |
|         | II              | 25    | 4      |
|         | III             | 23    | 4      |
| 脉孢菌漆酶   | 64 800          | 11    | 3.4    |
| 双孢担子菌漆酶 | 100 000         | 15    | 2      |

按光谱和磁学性质可以将漆酶中的铜离子(Cu<sup>2+</sup>)分为3类: I型铜离子和II型铜离子各1个, III型铜离子两个。I型铜离子呈蓝色,在λ<sub>614</sub>nm处有特征吸收; II型铜离子非蓝色,没有特征吸收光谱。III型铜离子是偶合的离子对(Cu<sup>2+</sup>-Cu<sup>2+</sup>),在λ<sub>330</sub>nm处有宽的吸收峰。I型铜离子和II型铜离子呈顺磁性,可用ESR检测, III型铜离子反磁性,一般条件下ESR检测不出。I型铜离子可选择性地除去,得部分脱辅基漆酶,即T<sub>2</sub>D(Type I Cu-depleted)漆酶。T<sub>2</sub>D漆酶无催化活性,用Cu<sup>+</sup>离子重建可使其恢复天然酶活性。I型铜离子可用Hg<sup>2+</sup>或Co<sup>2+</sup>离子取代,得部分取代的漆酶,它的催化活性比天然漆酶低。由于漆酶的含糖量较高,难以得到X-射线分析用的漆酶单晶,它的三维空间结构还不清楚。根据光谱、磁学性质和实验事实推测,漆酶中铜的配位结构为I型铜离子分别与Cys、Met中的两个硫、两个His中的氮原子配位,形成变形的四面体。II型铜离子是四方配位,分别与2个或3个His中的氮和两个或一个氧原子配位,氧化型的III型铜离子含氧配体可能是水或羟基。III型铜离子中的2个铜分别与3个His中的氮配位,又同时与Tyr的氧配位形成氧桥。

漆酶的底物专一性不强,据1989年初步统计漆酶的底物已超过200个。按底物结构可分为5类:(1)酚类及其衍生物,它们约占漆酶底物总数一半以上,包括邻苯二酚、对苯二酚、间苯二酚、α及β萘酚、硫酚、甲基酚及其衍生物等,真菌漆酶还可催化一元卤代酚的氧化。一元酚衍生物取代基一般在酚羟基的邻、对位。随取代基数目、种类和位置不同,反应活性也有差异。如漆酶催化下列一元取代酚氧化的活性次序分别为:P-甲酚>O-甲酚>m-甲酚>>苯酚,2,6-二甲氧基酚>2,6-二甲基酚>邻甲氧基酚>邻甲基酚。(2)芳胺及其衍生物,它们的结构除氨基外与酚类相似,还有N,N-二甲基对苯二胺,1,5-萘二胺,联苯胺等。(3)羧酸及其衍生物,局限于芳环连有羟基或氨基的芳香酸、碳链连有酚或芳胺基团的羧酸及其酯,如原儿茶酸、原儿茶酸甲、丁、戊酯,3,4-二羟基苯乙酸等。(4)甾体激素和生物色素,在有机溶剂中真菌漆酶可催化氧化雌甾二醇、α-卵胞激素等激素,漆酶可催化氧化胆红素、苏木色精、茜素红等色素。(5)其他非酚类底物:包括维生素C,亚铁氰化钾、二茂铁、二茂铁衍生物(Fe-R, R=CH<sub>2</sub>OH, CH<sub>2</sub>NEt<sub>2</sub>, COO<sup>-</sup>, COOCH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub>Fc等),以及1,2,4,5-四甲氧基苯和1-苯基-2-(3,4-二甲氧基)乙二醇等。

漆酶催化氧化反应专一性较差,它催化酚(或芳胺)氧化时,酚羟基或氨基(胺)基上先失去一个电子生成自由基,后者再发生一系列非酶反应,氧化成醌,发生键的断裂,导致聚合或偶联反应。1960年,中村隆雄用ESR监测对苯二酚的酶促氧化,发现反应分为两步:(1)底物酚向漆酶转移一个电子生成半醌-氧自由基中间体,在ESR谱上出现明显的吸收信号。(2)不平衡的非酶反应,二分子半醌生成一分子对苯醌和一分子氢醌。半醌氧自由基可以转变为碳自由基,继而发生碳碳或碳氧偶联生成较复杂的产物。在漆酶催化氧化过程中铜起决定性作用。但伯查德却认为是锰起决定作用。1986年,莱恩(Lehn)等用X-射线荧光光谱分析技术对伯查德使用过的漆酶样品和他们制备的纯漆酶样品进行金属含量分析比较,发现伯查德的漆酶样品中杂质锰含量较高,因

而导致错误的结论。

漆酶是含铜单电子氧化还原酶,其中I型铜和II型铜是单电子受体, III型铜是双电子受体,催化底物氧化时底物首先将电子传递给I型铜和II型铜,然后通过分子内的电子转移给III型铜,在III型铜上氧被还原为水。这样通过3种类型4个铜离子的协同作用,传递电子,同时发生铜离子的价态变化,实现漆酶对底物的催化氧化。对漆酶中哪一类铜首先从底物接受电子存在分歧,美国哈尔德(Holwerda)和格雷(Gray)认为是II型铜首先从底物接受电子,而瑞典恩决森(Andresson)和瑞哈姆(Reinhammar)则认为是I型铜,产生分歧的原因是对实验现象解释不同。他们对真菌漆酶催化氧化反应中的电子转移认识一致,都认为是I型铜从底物中首先接受电子。真菌漆酶的活性比漆酶大,因为后者的I型铜被深埋在酶蛋白的多肽链内而显示出较小的反应活性。

漆酶的用途除催化漆酚氧化使生漆干燥成膜外,还可作毛发染色的催化剂、助染剂、果实催熟剂、啤酒和果汁的澄清剂、分析和有机合成试剂等,都是基于漆酶的催化氧化反应。例如染色剂中的酚或芳胺经漆酶催化在头发上氧化成醌类物质,使头发呈橙黄色,染色程度可以通过加入的酶和染色剂量来控制。70年代以后固定化漆酶的制备为漆酶的实际应用开拓了广阔的前景。1986年,鲍拉格(Bollag J. M.)等用固定化漆酶处理纸厂废水,可以有效地除去甲基酚等毒物,用琼脂等固定的漆酶电极测定多酚、多芳胺浓度达2×10<sup>-5</sup>~7×10<sup>-4</sup>mol/L;用戊二醛交联的固定化漆酶制成膜型或网状电极测定脑神经组织儿茶胺,能消除维生素C的干扰,具有较高的灵敏度、重复性和稳定性。

100多年来,漆酶的研究久盛不衰,涉及化学、生物学、物理学、医学、环境等多种学科。尤其是20世纪70年代以后,ESR、NMR、IR、UV、MS、HPLC等现代科学技术的普遍应用,使漆酶的研究取得很大进展,改进了纯化方法得到高纯度的漆酶;漆酶的活性由定性检测发展到定量快速测定;初步弄清漆酶的化学组成和铜的作用;制备了脱辅基(T<sub>2</sub>D)漆酶,探索了漆酶的部分取代、再生和重建。尤其是制备了固定化漆酶,初步开拓了它的实际应用途径。但至今没有得到漆酶的单晶,它的三维空间催化活性中心的立体结构还不清楚;漆酶催化反应机理和它在木质素生物合成或降解中的作用还缺乏直接、充分有力的证据;漆酶作为一个氧化还原酶还没有为人类充分地利用,有待于人们做深入细致的艰苦研究,才能取得更大的进展。

参考文献

- 1 Reinhammar B, Laccase, in Copper Proteins and Copper Enzymes. (Lontie R, Ed) Vol III, CRC Press Boca Raton, 1984; 1~35
- 2 Felici M, et al. J Chromatogr, 1985, 320; 435
- 3 Mayer A M. Pychemistry, 1987, 26(1); 11
- 4 季立才. 中国生漆, 1990, 4; 22
- 5 Meadows K A, et al. J Inorg Biochem, 1991, 41(4); 253~60
- 6 Galliano H, et al. Enzyme Microb Technol, 1991, 13(6); 478

(武汉大学季立才副教授撰)

ATP酶的结构与功能

structure and function of ATPase ATP是生物体内各种生命活动的直接能源和间接的能源,一个成年人在静息状态时,每天消耗约70kg ATP,在进行重体力劳动时,每天消耗约800kg以上。但是,ATP不能透过细胞质膜,在细胞内通过ATPase催化ATP分解与合成的偶联、循环,使ATP保持恒量。生物体需要的能量愈多,循环的速度就愈快,ATPase活性直接影响循环的速度。多年研究资料证明,ATPase的种类很多,而且所有的ATPase都是与生物膜(细胞质膜和细胞器膜)相结合,与离子的跨膜转运有关。现在知道的至少有三类离子转运ATPase。

P-ATPase:这类ATPase的特点是酶在反应过程中形成共价磷酸化的中间物,由于钒酸盐可以代替磷酸与酶共价结合,所

以钒酸盐是这类酶的专一性抑制剂。P-ATPase 分布在真核细胞的质膜、少数细胞器膜和大肠杆菌、链球菌的内膜。大多数 P-ATPase 只有一条具有催化活性约 70 000~100 000, 另一条催化活性为 55 000。真核生物(酵母、真菌如脉胞杆菌和动植物)的质膜 ATPase 催化 ATP 水解的同时, 泵质子(H<sup>+</sup>)到细胞外形成质子电化学梯度(Δμ<sub>H<sup>+</sup></sub><sup>+</sup>), 产生质子驱动力(Proton Motive Force), 简称 PMF(Δμ<sub>H<sup>+</sup></sub><sup>+</sup> = PMF · F, F: 法拉第常数, PMF = Δψ - 59ΔpH, ψ: 膜电位), 为糖、氨基酸和阴离子、阳离子的主动跨膜转运提供动力, 称为质子泵 ATPase(H<sup>+</sup>-ATPase)。阳离子激活该类酶活性。对多种 P-ATPase 考察证明, 在具有催化活性的多肽中, 有 8 个疏水段横跨质膜磷脂双分子层, 各段之间有亲水肽段连接, 多肽的 N、C 末端和大部分的亲水肽段位于质膜的内侧, 每两个疏水肽段组成一个区, 分别称为 I、II、III、IV 区, 第 I 和第 III 区相距较远, 两者之间的亲水肽段最长, 含有可发生磷酸化的部位和几种抑制剂如 NEM(N-乙基琥珀酰亚胺, 专一性修饰巯基的试剂)等的结合位点, 过量的 ATP 可保护这些位点不与抑制剂结合。质子通道的抑制剂 DCCD(二环己基碳二亚胺)结合位点是第 I 区 Glu<sub>129</sub>。P-ATPase 在反应过程中, 经过 E<sub>1</sub> 和 E<sub>2</sub> 两种构象变化, 发生磷酸化作用水解 ATP, 为此, 常把 P-ATPase 称为 E<sub>1</sub>E<sub>2</sub> 类型 ATPase。一级结构、基因克隆和序列测定工作进一步证明, 各种 P-ATPase 有着类似的结构和作用机制, 它们之间的差异在于转运不同的离子, Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATPase 使 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 逆向跨膜交换, 其它的酶则分别转运 Ca<sup>2+</sup>、H<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup>, 这是因为在这些酶分子中, 与离子结合或形成离子通道部位的氨基酸种类不同, 因而它们对于抑制剂的敏感性也不同, 抑制 Na<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATPase 的鸟本苷不抑制 H<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>-ATPase。

F-ATPase: 这是一类结构最复杂、研究最深入的质子泵 ATPase, 存在于细菌内膜、叶绿体的类囊体和线粒体内膜的内侧, 分子量 450kda 以上, 由水溶性的 F<sub>1</sub>、脂溶性 F<sub>0</sub> 和连接 F<sub>1</sub> 与 F<sub>0</sub> 的柄状寡霉素敏感蛋白(OSCP; Oligomycin Sensitivity Conferring Protein)3 部分组成。不同来源的 F-ATPase 含有数量不等的亚基: 细菌 8 个, 叶绿体 8~9 个, 酵母和鼠肝 10 个, 牛心 13 个。早在 1960 年, 美国康奈尔大学的 Racker E., 教授及其同事用机械搅拌的方法使牛心线粒体 ATPase 的可溶性部分脱落下来, 进行纯化和重组研究, 定名为 F<sub>1</sub>, 电镜观察到 F<sub>1</sub> 组分为直径 9nm 的椭圆形球体, 分子量 360 000~380 000, F<sub>1</sub> 组分由 α、β、γ、δ 和 ε 5 种亚基组成(α<sub>3</sub>β<sub>3</sub>γδε), 不同来源的 F-ATPase 复合物中, F<sub>1</sub> 组分差别很小, α 亚基含有合成 ATP 的活性部位, γ 亚基含有分解 ATP 的活性部位, β 亚基含有 ATP 的结合位点, 此外还有一条称之为 ATPase 抑制因子的多肽, 与 F<sub>1</sub> 可逆性的结合。F<sub>0</sub> 组分是与膜结合的脂蛋白, 不同来源的 F-ATPase 复合物中, F<sub>0</sub> 组分的亚基数差别较大, E. Coli 的 F<sub>0</sub> 有 a、b、c 三种亚基, c 为 DCCD 结合亚基, 每个 F<sub>0</sub> 中至少有 10 个 c 亚基, 和 a、b 亚基结合形成质子通道。真核生物的 F<sub>0</sub> 通常含有 5~8 个亚基。全酶具有催化 ATP 合成与分解双重活性, 受寡霉素、叠氮化钠和 DCCD 的抑制。当 ATPase 抑制因子与 F<sub>1</sub> 结合时, 该酶催化 ATP 合成, 反之, 催化 ATP 水解。除机械搅拌外, 用 EDTA、氯仿处理, 也可使 F<sub>1</sub> 组分脱落下来, 可溶性 F<sub>1</sub> 保留催化 ATP 水解的活性, 被称为溶性 F<sub>1</sub>-ATPase, 对寡霉素和 DCCD 不敏感, 低温下迅速失活(Cold labile), 其它性质与全酶相似。各种 F-ATPase 的差异在对抑制剂的敏感性不同, 细菌的 H<sup>+</sup>-ATPase 对寡霉素不敏感, 连接 F<sub>1</sub> 和 F<sub>0</sub> 的不是 OSCP, 而是被称之为连接素或结合素(nectin)的蛋白质。叶绿体 H<sup>+</sup>-ATPase 对寡霉素的敏感性不如线粒体 H<sup>+</sup> 对 ATPase 强, 有些甚至完全不敏感。

V-ATPase: 这类 ATPase 因存在于真核细胞内的空泡型(Vacuolar)细胞器上而得名, 如酵母、真菌的空泡, 植物的液泡, 动物的溶酶体、笼蛋白衣被小泡(Clatrin Coated Vesicles)、嗜铬颗粒(贮存肾上腺素等激素)、突触小泡(贮存乙酰胆碱)和分泌小泡等。V-ATPase 是 3 类离子转运 ATPase 中数量最多的一类, 它们虽有许多共性, 但在它们之间也存在着某些细微而重要

的差别, 似乎有进一步划分成亚类的必要。V-ATPase 的研究从 20 世纪 70 年代后期开始, 进展很快。基因克隆和序列分析的结果证明, 在进化上, V-和 F-ATPase 有比较近的亲缘关系, 其结构、生化性质和作用机制类似, 它们与 P-ATPase 有几点主要的差异: (1) 在反应过程中不形成共价磷酸化中间物, 不受钒酸盐的抑制; (2) 都是质子泵 ATPase, 受阴离子激活; (3) 由多个亚基组成的寡聚蛋白。V-ATPase 由水溶性的和脂溶性的两部分组成, 分子量约 400 000。水溶性部分由 5 个亚基组成突向细胞质中, 含有催化 ATP 分解的活性部位。嗜铬颗粒 H<sup>+</sup>-ATPase 的可溶性组分中, 5 个亚基 A、B、C、D、E 的分子量分别为 73 000, 58 000, 40 000, 34 000 和 33 000。脂溶性组分的 20 000 和 16 000 的两个亚基中, 含有 DCCD 的结合位点, 此外, 还有 115 000 和 39 000 两个辅助亚基, 前者可与 DCCD 结合, 推测至少这个大的辅助亚基参与质子通道的形成, 在笼蛋白衣被小泡的 H<sup>+</sup>-ATPase 中也发现辅助亚基, 但由于在酶纯化过程中辅助亚基极易脱落, 所以目前尚不能确定是否在所有的 V-ATPase 中都含有辅助亚基。V-ATPase 不受寡霉素、叠氮化钠的抑制, 不能催化 ATP 的合成。V-ATPase 泵质子进入空泡内, 酸化泡液, 为泡内的水解酶提供最适条件, 直接或间接影响细胞内的物质分解代谢, 在在受体介导的内吞过程中促进受体-配体的解离, 对受体的再利用起重要作用。跨膜质子电化学梯度直接影响泡内物质的吸收与贮存。

英国 Metcchell, P. 在 1961 年提出化学渗透假说, 解释氧化磷酸化和光合磷酸化的机制, 他认为电子传递过程中, 由质子泵作用形成的质子电化学梯度(Δμ<sub>H<sup>+</sup></sub><sup>+</sup>), μ<sub>H<sup>+</sup></sub><sup>+</sup> 中, 所含的渗透能可通过 ATPase 合成 ATP。已有许多的事实支持这一假说, 并且证明, Δμ<sub>H<sup>+</sup></sub><sup>+</sup> 可直接与耗能过程如溶质跨膜转运偶联。但对泵质子的机理还有待进一步研究。ATPase 是生物体内的重要酶之一, 研究非常广泛而深入, 目前主要对其作机理特别是转运离子的分子机理进行研究。另外, 正在研究的古细菌 H<sup>+</sup>-ATPase 究竟属于哪一类, 是否需要另列新类, 还有待进一步研究。

参考文献

- 1 Pullman M E, Penefsky H S, Racker E J. Biol Chem, 1960, 232:3322~3329
- 2 Mitchell P. Nature, 1961, 191:144~148
- 3 Josephson L, Cantley L C. Biochem, 1977, 166:4572~2082
- 4 Ohkumy, Anraku Y. Biol Chem, 1981, 256:2079~2082
- 5 Wang Yanzhi, Sze H. J Biol Chem, 1985, 260:10434~10443
- 6 Hager K M, Mandala S M, Davenport J W, et al. Proc Natl Acad Sci. USA, 1986, 83:7693~7697
- 7 Nakamoto R K, Slayman C W. J Bioenerg Biomemb, 1989, 21:621~632
- 8 Adachi I, Puopolo K, et al. J Biol Chem, 1990, 265:967~973
- 9 王延枝, 冷楠. 武汉大学学报(自然科学版), 1991, 1:72~76  
(武汉大学王延枝教授撰; 马晓军审)

磷脂酰肌醇特异的磷脂酶 C phospholipase C

(Pi-PLC, EC3. 1. 4. 10) 广泛分布于动物、植物体内和细菌中, 作用于肌醇磷脂的一类磷酸二酯酶。其分解产物是甘油二酯(DG)和肌醇磷酸盐(如三磷酸肌醇 IP<sub>3</sub>)。DG 和 IP<sub>3</sub> 是双信息途径中的第 2 信使。PI-PLC 是该信息途径的开关酶, 直接控制 C 激酶(PKC)活化, 促进胞内 Ca<sup>2+</sup> 库释放 Ca<sup>2+</sup>, 最终导致细胞的各种效应。故对 PI-PLC 的研究已成为生物学等领域的重大课题。

1953 年, 斯隆-斯坦利(G. H. Sloane-Stanley)第 1 个报道了从脑组织神经细胞液中提取的 PI-PLC, 其活化需 Ca<sup>2+</sup>。最适 H<sup>+</sup> 浓度, 为弱酸性。此后相继发现几种细菌分泌 PI-PLC 以及膜结合的 PI-PLC, 1981 年由鼠肝液液纯化出 PI-PLC(70kda), 从羊精囊中获得免疫学性质不同的两种 PI-PLC, 还发现牛血小板、

牛胸腺细胞等均具有性质各异的 PI-PLC。由此推断, PI-PLC 可能是结构不同的一组同功酶。

由于对 PI-PLC 的基质及纯化方法的不断改进, 格里芬(O. H. Griffith, 1991)cDNA 克隆、单克隆抗体等方法的应用, 对 PI-PLC 结构、性质等进行了大量研究。已证实 PI-PLC 为一个人家族, 包括结构、性质不同的四组( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ )同功酶(S. G. Rhee 1989)。 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  组 PI-PLC 同功酶的氨基酸序列中有两个区域(I、II)为催化功能区, 如其中之一被破坏将导致 PI-PLC 完全失活(A. Bristol 1988)。PI-PLC $\alpha$  一级结构与前3种有明显差

异, 其 N-末端24个氨基酸残基可能与膜连接有关(C. F. Bennett 1988)。如破坏此区段, 则可导致 PI-PLC $\alpha$  由膜转运至胞液。PI-PLC $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  氨基末端缺乏以上区域, 但仍有大量 PI-PLC $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  与膜相接, 这可能是通过 G 蛋白(Gp)固定于膜上。1990年, 梅尔德姆(E. Meldrum)从牛脑纯化的一种 PI-PLC(85kd), 其氨基酸顺序与 PI-PLC $\beta$  相似, 故命名为 PI-PLC $\beta_2$ 。果蝇 norpA 基因编码的一种 PI-PLC 是  $\beta$  组成员, 命名为 PI-PLC norpA(B. T. Bloomquist, 1988)。现将目前发现的 PI-PLC 同功酶总结如下表。

表1 同功酶的分类表(E. Meldrum 1991)

| 名称          | 分子量            | 分类依据              | 组织来源           | 学者姓名             | 年份        |      |
|-------------|----------------|-------------------|----------------|------------------|-----------|------|
| $\alpha$ 组  | 70kd           | 分子量               | 鼠肝             | T. Takenawa      | 1981      |      |
|             | 65             | 分子量               | 羊精囊腺           | S. L. Hofmann    | 1982      |      |
|             | 70             | 分子量               | 鼠胸腺细胞          | P. wang          | 1986      |      |
|             | 62             | 分子量               | 豚鼠子宫           | C. F. Bennet     | 1987      |      |
|             | 61             | 分子量               | 人血小板           | Y. Banno         | 1988      |      |
|             | 63             | 分子量               | 人血小板           | J. J. Baldassare | 1989      |      |
|             | 67             | 分子量               | 人血小板           | J. J. Baldassare | 1989      |      |
|             | 57             | 分子量               | 人血小板           | J. J. Baldassare | 1989      |      |
|             | $\beta$ 组      | $\beta_1$ 150 154 | 纯化、克隆          | 牛脑与鼠脑            | S. H. Ryu | 1986 |
|             |                | $\beta_2$ 134     | 克隆             | 人早幼粒细胞 cDNA      | J. Knopf  |      |
| $\beta_3$ — |                | 克隆                | 人成纤维细胞 cDNA    | J. Knopf         |           |      |
| $\gamma$ 组  | norpA125       | 克隆                | 果蝇基因组          | B. T. Bloomquist | 1988      |      |
|             | $\gamma_1$ 115 | 纯化、克隆             | 牛脑、鼠脑          | S. H. Rys        | 1986      |      |
|             | $\gamma_2$ 146 | 克隆                | 转化的人淋巴细胞       | S. Ohta          | 1988      |      |
|             | $\gamma_3$ 145 | 纯化、免疫反应性          | 牛脑             | Y. Homma         | 1988      |      |
|             | 143            | 分子量               | 牛血小板           | H. Hakata        | 1982      |      |
| $\delta$ 组  | 140            | 分子量               | 人血小板           | M. G. Low,       | 1988      |      |
|             | $\delta_1$ 85  | 纯化、克隆             | 鼠脑、牛脑          | S. H. Ryu        | 1987      |      |
|             | $\delta_1$ 88  | 纯化、免疫反应性          | 牛脑             | M. J. Rebecchi   | 1987      |      |
|             | $\delta_2$ 85  | 纯化、克隆             | 牛脑             | E. Meldrum       | 1990      |      |
|             | $\delta_3$ 84  | 克隆                | 人成纤维细胞 (cDNA)  | J. Knopf         |           |      |
|             | 85             | 分子量               | 鼠脑             | Y. Homma         | 1988      |      |
|             | 85             | 分子量               | 羊精囊腺           | S. L. Hofmann    | 1982      |      |
|             | 85             | 分子量               | 鼠肝             | T. Fukui         | 1988      |      |
| 85          | 分子量            | 牛心                | L. J. McDonald | 1989             |           |      |

1991年, 亚马夫对鼠神经系统 PI-PLC $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  进行了研究。除 PI-PLC 同功酶外, 还有糖基 PI-PLC, 它可促进许多膜蛋白质及酶的释放(G. A. M. Cross 1987)。

PI-PLC 的基质特异性是研究此酶的重点之一。多数学者已证实, PI-PLC 既可作用于磷脂酰肌醇(PI), 又可作用于磷脂酰肌醇4-磷酸(PIP)和磷脂酰肌醇4,5-二磷酸(PIP $_2$ )。当三者共存于生理 Ca $^{2+}$  浓度下, PIP $_2$  为此酶的首选基质。对 PIP $_2$  特异的 PI-PLC 相继由曼恩(V. Manne, 1987), 托马斯(G. M. II. Thomas, 1991)证实。研究资料还证明 PI-PLC $\beta_1$  作用于 PIP $_2$  和 PI, 两者 Km 相同, 最大反应速度比为30:1。说明 PI-PLC $\beta_1$  对 PIP $_2$  具有较高的催化活性(M. Katan 1987)。PI-PLC $\beta_3$  于低 Ca $^{2+}$  浓度体系中倾向于多磷酸肌醇脂, PI-PLC $\alpha$  (低 Ca $^{2+}$  浓度) 优先选择多磷酸肌醇脂进行催化。1989年 L. A. Seruman 报道 PI-PLC 对 PI(3)P, PI(3,4)P $_2$ , PI(3,4,5)P $_3$  的作用, 以上资料说明 PI-PLC 的特异性由于同功酶的种类及测活体系不同其表现有明显差异。

1982年, 舒克拉(S. D. Shukla)指出 PI-PLC 的分解产物为无环形及1:2环形肌醇磷酸盐。PI-PLC $\beta_1$  催化反应生成的环形肌醇磷酸盐最多, PI-PLC $\gamma_1$  最少。此产物的生成量不仅和 PI-PLC 同功酶的种类有关, 还可随肌醇环上磷酸基的增加而减少。

对双信息途径中 PI-PLC 活性调节的研究是探讨此途径作用机理的中心环节, 也是难度较大的研究领域。现已证实 PI-PLC 活性与受体种类, G 蛋白(Gp)、酪氨酸蛋白激酶, PKC, cAMP 蛋白质磷酸化等均有关。1983年, 戈姆佩尔茨(B. D. Gomperts)首次用化合物48:80诱导组胺释放, 证实 PI-PLC 和 Gp 偶联。现已查明许多细胞如星形细胞瘤(J. R. Hepler, 1986)、中性白细胞(C. D. Smith 1986)等的 PI-PLC 与 Gp 偶联。实验资料证实 HL60Gp 的两个  $\alpha$  亚基 G $\alpha_2$ 、G $\alpha_3$  如被百日咳毒素核糖基化, 则可阻断 PI-PLC 的活化(P. Gierschik, 1989)。说明

对百日咳毒素敏感的 Gp 与 PI-PLC 的活化密切相关。但也有许多 PI-PLC 受体系统是通过百日咳毒素不敏感的 Gp 产生效应的(L. F. Brass 1987)。为了鉴定哪种 PI-PLC 与何种 Gp 偶联, 进行了 PI-PLC/Gp 复合物的合并纯化实验(T. Wang, 1988)。纯化实验所得27kd 的蛋白质复合物, 不仅具有 GTP- $\gamma$ S 活性, 还能促进 PIP $_2$  分解, 说明此蛋白质还具有 PI-PLC 的活性。1989年, 林登(J. Linden)报道一种 G $\beta_1$  与 PI-PLC 有关, 但两者的偶联尚未完全证实。还有人证实 PI-PLC $\beta_1$  由 Gq 组的  $\alpha$  亚基活化(S. J. Taylor, 1991)。由于 Gp 是膜结合蛋白质, 因此 PI-PLC 也应在膜上。但使人费解的是许多 PI-PLC 是从胞液纯化出的(S. L. Hofmann, 1982; C. F. Bennett, 1987)。1987年, K. Y. Lee 第1个证实牛脑的膜结合 PI-PLC 与胞液 PI-PLC $\beta$  是同一种酶。因此推断胞液和膜之间可能有一种机制转运 PI-PLC(S. G. Rhee 1989), 使 PI-PLC 及时由胞液移至细胞膜, 从而行使其在信号传递中的重要作用。

磷酸化与 PI-PLC $\gamma$  的活性有关。此组 PI-PLC 通过几种酪氨酸激酶受体系统进行磷酸化。PDGF、EGF 与相应受体结合不仅活化其固有的酪氨酸激酶, 还可导致肌醇磷酸盐产量增高的事实(L. J. Pike, 1987)以及酪氨酸激酶可直接作用于 PI-PLC 的实验(M. I. Wahl)均证明 PI-PLC 活化及酪氨酸激酶密切相关。

cAMP 对 IP $_3$  的生成具有多重效应(P. McAtee, 1989; N. E. Oleshaw, 1988)可能和细胞内存在各种信息途径有关。PKC 活化对 PI-PLC 活性具有负反馈的调节作用, 因此 PKC 激动剂可抑制 IP $_3$  的生成及 Ca $^{2+}$  的动员(S. Krishnamurthi, 1989)。

尽管 PI-PLC 已成为世界范围内生物学及医学界的热门话题, 但仍有许多问题没有弄清。如在多个信息分子、多种信息途径介导的各种细胞效应中, PI-PLC 是如何对不同偶联系统进行选择的, 不同 PI-PLC 同功酶在不同细胞或同一细胞不同部位, 以

哪些不同方式进行表达,其他第2信使以及  $Ca^{2+}$  等如何对 PI-PLC 活性进行正向、逆向调节等。这些都是急待解决的问题。可望能用抗体 cDNA 等方法对 PI-PLC 及其相应膜受体、Gp 的共同表达进行研究,对有关 PI-PLC 活性的蛋白质有更多的了解,从而能更深入地理解信息传递的分子机理。

#### 参考文献

- 1 Shukla S D. Life Sciences, 1982, 30: 1323~1335
- 2 Cross G A M. Cell, 1987, 48: 179~181
- 3 Rhee S G, et al. Science, 1989, 244: 546~550
- 4 Meldrum E, et al. Bolchim Biophys Acta, 1991, 1092: (1): 49~71
- 5 Griffith O H, et al. Methods in Enzymology, 1991, 197: 493~503

(哈尔滨医科大学肿瘤研究所彭愈生、马红撰;张乃忠审)

### 蛋白激酶 C protein kinase C

蛋白激酶 C 是广泛分布于真核细胞特别是哺乳类动物细胞中的一种蛋白激酶,以无活性形式存在于胞液中,当被  $Ca^{2+}$  等激活后,转移到膜上。用抗 PKC 单克隆抗体进行免疫细胞化学分析表明,PKC 几乎不存于细胞核内,但有证据表明,在某些细胞核中也有一定分布,并与一种染色质片断紧密结合在一起。PKC 的研究已取得惊人的进展,研究结果表明,PKC 对调节细胞代谢、分化、生长、增殖以及癌变、细胞内生物信息的传递等均起着重要作用。

通过分子克隆方法证明,PKC 不是单一分子的酶,而是一组密切相关的有多种亚型的蛋白质家族(Y. Ono 等,1988;K. P. Huang 等,1989)。它由两组 PKC 基因编码,即 A 组:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ; B 组:  $\delta$ 、 $\epsilon$ 、 $\zeta$ 。现只有 A 组的  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  编码的 PKC  $\beta$ 、PKC  $\beta$ 、PKC  $\beta$  被纯化鉴定;其中 PKC  $\beta$  含有  $\beta$  I、 $\beta$  II 两种,它们具有高度的顺序同源性,仅在羧基端氨基酸顺序上有所不同。PKC 分子中氨基酸残基的数目按  $\alpha$ 、 $\beta$  I、 $\beta$  II、 $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\epsilon$ 、 $\zeta$  分别为 672、671、673、697、673、737、592。研究人员发现,不同 PKC 的编码基因定位于不同染色体,它们之间存在相似的同源性。PKC 为一条多肽链,其结构可分为 4 个保守区 ( $C_1 \sim C_4$ )、5 个可变区 ( $V_1 \sim V_5$ )。羧基端 1/2 侧的两个保守区 ( $C_3$ 、 $C_4$ ) 为激酶活性区,该区域与其它蛋白激酶的相应区域有很高的同源性。 $C_3$  区含有结合 ATP 的特定结构,该区有酶的催化部位,  $C_4$  有一酸性区,起识别底物的作用。氨基端 1/2 侧的保守区 ( $C_1$ 、 $C_2$ ) 有  $Ca^{2+}$ 、二酰基甘油 (DG)、佛波酯等的结合位点,是酶的调节区。 $C_2$  区可能是酶对  $Ca^{2+}$  的敏感性所必需的。另一组 PKC 结构中不存在  $C_2$  区,所以,  $\delta$ 、 $\epsilon$ 、 $\zeta$  cDNA 在 COS-1 细胞中表达的产物不需要  $Ca^{2+}$  激活 (D. Schaap 等, 1989)。各种 PKC 的  $C_1$  区包含一个“假底物序列”,它使 PKC 在没有激活剂存在的条件下保持无活性状态。此外,  $C_1$  区内有富含半胱氨酸的随机重复序列,可能在控制 PKC 家族的基因表达中起重要作用 (K. P. Huang, 1990)。在催化区与调节区联结部分为蛋白水解酶的敏感位点,PKC 可被钙依蛋白酶的限制性蛋白水解而激活,这种水解发生在  $V_3$  区的一个或两个位点上,该蛋白水解可能与 PKC 分子本身的衰减调节有关。

各种 PKC 同工酶在各种组织中的分布是不同的。PKC  $\beta$  ( $\gamma$  型)仅存于脑、脊髓组织中。据研究,它在后突触活动中起重要作用。 $\beta$  I 和  $\beta$  II 以不同比例分布在许多不同的组织、细胞中,通常  $\beta$  II 表达量远远大于  $\beta$  I 的数量,在神经细胞中,有时  $\beta$  I 与质膜相联,而  $\beta$  II 则常位于高尔基体膜上。PKC  $\beta$  ( $\alpha$  型)的分布非常广泛,低等生物中也发现有 PKC 存在。从酵母菌中提纯的 PKC,则表现出与哺乳动物中的 PKC 完全不同的底物特异性,并发现它不能被佛波酯所激活。

Nishizuka 等对 PKC 的研究做了许多开创性的工作,他们使用羧基磷灰石吸附色谱等方法分离纯化 PKC,而 1990 年 D. J. Burns 等使用不同的 baculovirus 表达系统,即从 baculovirus 感染的昆虫细胞中得到纯化的 PKC,并对  $\alpha$ 、 $\beta$  I 和  $\gamma$  同工酶进行一系列生化特性研究。实验结果表明,各种同工酶对  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、

ATP、组蛋白 H-S 都有相同的动力学常数,且对大多数的磷脂类物质有相同的反应和作用,关于花生四烯酸 (AA) 对不同酶激活作用方面有不同结果。Nishizuka 等的实验资料表明,PKC 在低浓度的 AA (没有 PS 和 DG),有或无  $Ca^{2+}$  都会被激活,高浓度的 AA (高于  $120 \mu\text{mol/L}$ ) 则变为酶的抑制剂。PKC  $\beta$  和 PKC  $\beta$  在没有  $Ca^{2+}$  下均无活性,加入  $Ca^{2+}$  后即被激活,PKC  $\beta$  被激活的程度就更高一些。但 Burns 等的研究资料结果却大相径庭, $\beta$  I 与 PKC  $\beta$  在低浓度 AA ( $25 \mu\text{mol/L}$ ) 没有  $Ca^{2+}$ 、PS、DG 下时被最大限度激活, $\beta$  I、PKC  $\beta$  都没有被高于  $125 \mu\text{mol/L}$  的 AA 明显抑制,在有 AA 及  $300 \mu\text{mol/L}$   $Ca^{2+}$  前提下,只有 PKC  $\beta$  的活性显著升高,而  $\beta$  II 和 PKC  $\beta$  基本维持原有的活性。可见 Nishizuka 与 Burns 的研究资料在  $\beta$  I 活性方面有显著差异。

PS 是 3 种同工酶的最有效激活剂,在 PS 存在下,佛波酯与 PKC  $\beta$ 、 $\beta$  结合激活的酶活性小于对 PKC  $\beta$  的影响,这些发现说明,佛波酯与不同 PKC 同工酶结合会使它们产生不同程度的活性 (Y. Ono 等, 1988)。1990 年 K. P. Huang 等的研究资料表明,PKC  $\beta$  对心磷脂 (CL) 激活的敏感性高于 PKC  $\beta$  和  $\beta$ ,但 Burns 等的实验结果却表明 CL 可使 PKC  $\beta$  和  $\beta$  激活到相似程度。其它磷脂一般都不能引起相当的活性,惟有磷脂酰 D-丝氨酸 (DPS) 能显著激活 PKC  $\beta$ ,对 PKC  $\beta$  影响甚微,磷脂酰同型丝氨酸 (HMS) 只激活 PKC  $\beta$ 。

PKC 对几种特定底物如多聚赖氨酸、多聚丝氨酸较为敏感,对其余底物则各种同工酶的  $K_m$  值很相近。研究结果表明,各种 PKC 同工酶对激活剂、对底物的反应和影响都有各种不同特点,很可能这些酶在不同的细胞位置里被一系列激活剂有区别地激活,兴奋剂诱导的 PKC 的激活与移位经常导致它的加速降解。PKC  $\beta$  比  $\beta$  和  $\beta$  对蛋白酶的降解更敏感,而且 PKC  $\beta$  对蛋白酶的水解具有抗性。在 DG 或佛波酯存在下,一般能够促进 PKC 活性的物质也可促进其降解;反之,一些中性磷脂如 PE、PC 既不能激活 PKC,也不能促使它们降解。PKC 与酸性磷脂如 PS、PG 和 CL 在没有二价金属离子的环境下一起混合保温,可引起 PKC 同工酶的不同失活效应,PKC  $\beta$  最易失活,PKC  $\beta$  具有抗性 (K. P. Huang 等, 1990)。比起  $\alpha$ 、 $\gamma$  亚型的, $\beta$  II 活性的产生对 DG 或佛波酯的依赖性更大,在有 AA 存在下, $\alpha$  亚型的不同于  $\beta$  I 和  $\gamma$ ,它完全依靠  $Ca^{2+}$  激活 (D. J. Burns 等, 1990)。

佛波酯可在没有磷脂的情况下激活 PKC (C. D. Silva 等, 1990)。PKC 的活化又与一系列原癌基因和其它一些细胞基因的诱导关系密切。这些基因都有一个独特的 5'-逆向 DNA 序列片段,能对 PKC 的活化产生反应。有些能对佛波酯产生反应的因子如 AP-1、AP-2、AP-3 和 NF-kB 已在一些细胞中被鉴定,AP-1 是一族蛋白质复合体,由 Fos、Jun 原癌基因产物组成 (Gentz 等, 1989);但 PKC 激活 Fos 的具体机制,即如何影响 Fos 与 Jun 的复杂关系,如何使其移位进入细胞核内等尚不清楚。NF-kB 是一种可被佛波酯激活的转录增强子。NF-kB 的无活性前体与一种叫作 I $\kappa$ B 的抑制子结合在一起。据推测,I $\kappa$ B 被 PKC 磷酸化并与 NF-kB 解离,因而 NF-kB 被激活,以后移位进入核内 (F. Shirakawa 等, 1989)。PKC 的活化也可抑制某些基因的表达。如一种干扰素基因的表达就被 PKC 的活化所抑制。佛波酯对 PKC 也有双重作用,起初激活 PKC,然后促使其加速降解表现出负反馈调节作用。如细胞中的 PKC 被降解,就会导致丝裂原刺激的细胞发生失控的增生。同样有证据表明,佛波酯诱导的是 PKC 的降解,而不是 PKC 的活化,引起表皮细胞 JB6 的停泊不依赖性生长 (Thomas 等, 1989)。

不仅是佛波酯,在 T 细胞中多次加入具有膜渗透性的 DG 也可引起 PKC 的持续激活,进而可促进白介素-2 受体的表达 (N. Berry 等, 1990)。基因的表达、细胞的活化、分化,是一系列信号系统相互作用的结果。1990 年 Anderson 等的表工作表明,两种涉及酪氨酸、丝氨酸/苏氨酸激酶的信号系统的整合作用,需要激活一种叫做管结合蛋白的激酶 (MAP),说明 PKC 与其它第 2 信使系统在基因表达中的协同作用。

许多激素、生长因子、神经递质的受体,例如 $\alpha_1$ -和 $\beta$ -肾上腺素受体、胰岛素受体、白介素2受体、IGF-1受体、表皮生长因子(EGF)受体、尼克酸胆碱能和铁传递蛋白受体皆受PKC调控。它们被PKC磷酸化后,导致去敏感效应,酪氨酸激酶活性降低以及重新分布效应。许多与G蛋白偶联以产生第2信使的受体受到PKC的直接磷酸化。PKC在体内外都可以磷酸化 $\beta$ -肾上腺素能受体,引起不同信号通路的交叉调节或称为一种“异种的” $\Delta$ 敏化方式。PKC可使EGF受体的Thr<sup>654</sup>磷酸化,导致其酪氨酸激酶活性降低。EGF受体与EGF的结合会激活磷脂酶C,促使磷脂酰肌醇-4,5-二磷酸分解,DG增加, $Ca^{2+}$ 内流,从而激活PKC,而活化的PKC抑制酪氨酸激酶(EGF受体)活性,反馈地抑制EGF受体促进细胞增殖的能力。正是PKC的这种负反馈调节作用保证正常细胞中EGF受体不会导致细胞异常增生。在肝癌细胞中观察到,胰岛素受体也受到相似的PKC的这种负反馈调节,佛波酯诱导的受体磷酸化抑制受体的酪氨酸激酶活性,但并不影响胰岛素与受体的结合(Takayama等,1988)。PKC这种负反馈调节可能是正常细胞调节的一种重要机制。(1991年A. W. Earbara等报道,细胞内 $Ca^{2+}$ 和PKC相互作用可调节 $\alpha_1$ -肾上腺素能和舒张激肽受体,而激活磷脂酶 $A_2$ 的活性。在其它一些受体中,Huckle等(1989年)发现PKC的正反馈调节作用。例如,在佛波酯或DG存在的条件下,可增强促性腺激素释放激素与垂体结合,PKC的这种增强作用只与兴奋剂结合的受体形式有效。

生物体内多种PKC同工酶共存具有重要意义,各种同工酶性质只存在细微的差别。当一种同工酶的基因遭到破坏时,其它同工酶仍可使机体生存下去,而这些同工酶对激活剂有不尽相同的敏感性,使得机体可以对第二信使产生精细的反应。在对PKC生理功能的研究中不难发现,PKC具有双重调节作用,一方面PKC被激活后可增强一些基因的表达,增进激素与受体的结合,表现出正向调节作用,另一方面它又可抑制一些基因的表达,抑制如EGF受体等的酪氨酸激酶活性,又表现出负反馈调节作用。PKC这种双重生理效应对维持机体的正常平衡起着重要的作用。PKC的研究必将受到越来越多的重视,深入了解PKC在细胞调节中各种生理功能的作用和意义以及与肿瘤的发生、发展的关系更将是研究的热点。

(北京大学张庭芳教授、中国医学科学院药物研究所秦岭撰)

**P34<sup>cdc2</sup>激酶** 细胞周期调节是一复杂过程。在酵母条件突变株中,已发现一类基因与细胞周期调节密切相关,称为细胞分裂周期基因(*cdc*基因)(L. H. Hartwell, 1971),它们控制着细胞周期的启动及有时相的转换,其中以*cdc2*基因最重要。该基因是唯一在两个控制点 $G_1 \rightarrow S$ 、 $G_2 \rightarrow M$ 均起作用的*cdc*基因,它编码分子量为34kD的丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶,P34<sup>cdc2</sup>激酶的活化是细胞分裂的增殖信号,它具有启动DNA复制和诱发有丝分裂的双重作用,在细胞周期调节中起重要作用。

20世纪70年代初,Masui等从蛙卵中发现一种能促进细胞成熟和分裂的因子,称为成熟促进因子(MPF)。1976年Nurse等发现和建立了*cdc2*酵母突变株,*cdc2*基因的编码产物即P34<sup>cdc2</sup>激酶,后确定两者为同一成分。P34<sup>cdc2</sup>激酶广泛存在于从酵母到人等多种生物中,形成一个庞大的家族。不同生物种族,其结构虽有差异,但具有很高的同源性。如酵母与人的有63%同源性(G. Draetta等,1987)。该酵母由催化亚基和调节亚基组成。催化亚基分子量为34kD,调节亚基又叫周期素。催化亚基由约300个氨基酸残基组成,含一般蛋白激酶的基本序列,同时又含该家族的特征序列,即:EGVPSTAFREISLLKE。催化亚基有3个重要的功能区(G. Draetta, 1990):第1功能区在9~38位残基之间,是ATP的结合部位和该酶的活性部位;第2功能区在42~51位残基之间,是调节亚基的结合部位;第3+功能区在177~208位残基之间,是P13<sup>suc1</sup>的结合部位。P13<sup>suc1</sup>可与该酶高亲和力特异结合而使之广泛应用于实验研究,含P13<sup>suc1</sup>的层析柱可抽提掉提取物中99%的P34<sup>cdc2</sup>激酶,且不影响其活性。此外,催化亚基的上

14-苏氨酸、15-酪氨酸、33-赖氨酸、227-丝氨酸也具有非常重要的作用。调节亚基cyclin具有周期性积累和降解的特性,在细胞周期的特定时相与催化亚基结合,主要发现有3种cyclin:G1期cyclin,cyclin A,cyclin B,它们结构差异较大,但都含有一个相同的序列区域,即“cyclin box”。它们在细胞周期的不同时期发挥作用,G1期cyclin在G1末期与催化亚基结合,在G $\rightarrow$ S控制点起作用;cyclin A在S期和G $_2$ 期与催化亚基结合,与DNA合成及S期向G $_2$ 期的过渡有关;cyclin B在G $_2$ 期末与催化亚基结合,可诱发有丝分裂。

P34<sup>cdc2</sup>激酶对DNA复制和有丝分裂的诱发是必需的,在G $_1 \rightarrow$ S和G $_2 \rightarrow$ M两个控制点起中心调节作用。

非洲爪哇卵的提取物在体外能诱发DNA复制,但若将提取物中的P34<sup>cdc2</sup>激酶移走,则丧失诱发DNA复制的能力,说明P34<sup>cdc2</sup>激酶具有启动DNA复制的作用(J. J. Blow, 1990)。但DNA复制的引发是一复杂过程,可能通过以下环节起作用:(1)对RNA聚合酶II的调节作用:细胞由G $_1 \rightarrow$ S的移行需要RNA聚合酶II指导下的基因转录,P34<sup>cdc2</sup>激酶可作用于RNA聚合酶II,对其进行磷酸化修饰调节,P34<sup>cdc2</sup>激酶可通过促进RNA聚合酶II指导下的基因转录,从而启动DNA复制(Pines等,1990)。(2)对SV40T抗原样蛋白的调节作用:把纯化的T抗原注入静止期细胞核中,可诱导DNA复制,T抗原带有使静止期细胞进入细胞周期的必要信息,R. Baserga认为,细胞内存在SV40T抗原样蛋白,并认为它是控制细胞增殖的主要成分。1989年Mevcy研究资料表明,T抗原如果不被磷酸化则无诱发DNA复制的作用,而体内外实验资料均证明T抗原是P34<sup>cdc2</sup>激酶的底物,P34<sup>cdc2</sup>激酶可能以细胞内T抗原样蛋白作为中间调节,以启动DNA复制。(3)对P<sup>53</sup>蛋白调节作用:P<sup>53</sup>是一个抗癌蛋白,有抑制细胞生长的作用,但突变的P<sup>53</sup>则具有促转化作用,P34<sup>cdc2</sup>激酶可磷酸化野生型P<sup>53</sup>(C. J. Marshall, 1991),磷酸化的P<sup>53</sup>与SV40T抗原蛋白的结合能力降低,使之抑制复制的能力减弱。此外,还可使突变型的P<sup>53</sup>磷酸化,使之稳定性增加,有利于其发挥促增殖转化作用。(4)对高迁移率非组蛋白的DNA结合功能的影响:高迁移率非组蛋白(HMG)是一类丰富的核蛋白,可影响染色体功能和DNA复制。HMG-1是其中的一个亚类,为DNA结合蛋白,结合到DNA的A-T丰富区,在增殖细胞中HMG-1的表达增加,它与细胞分裂和保持细胞的未分化状态密切相关。体内外实验资料均证明,HMG-1是P34<sup>cdc2</sup>激酶的有效底物,磷酸化部位是53位苏氨酸残基,该部位正是DNA结合的部位,它被磷酸化后则与DNA的结合能力下降。虽然HMG-1与DNA结合后所发挥的作用不清楚,但P34<sup>cdc2</sup>激酶对DNA结合蛋白的亲合力的影响可能是其启动DNA复制的机制之一(R. Reeves, 1991)。如*c-myc*、*c-myb*的编码产物是DNA结合蛋白,它们同样受到P34<sup>cdc2</sup>激酶的磷酸化修饰调节。(5)对核蛋白的调节作用:核仁蛋白是一种分子量为92kD的核蛋白,在核蛋白体RNA的合成和成熟过程起作用,它可直接作用于染色体,也可通过RNA聚合酶I调节rRNA基因的转录。实验资料证明,核蛋白亦是P34<sup>cdc2</sup>激酶的底物,它的磷酸化可促进其功能作用,使rRNA的转录增加。此外,另一种核蛋白NO<sub>38</sub>也受到P34<sup>cdc2</sup>激酶的调节,NO<sub>38</sub>在核蛋白体的聚合和转运中起作用,它的磷酸化可影响它与核蛋白体RNA及蛋白质之间的相互作用。DNA的复制需一系列蛋白质因子的作用,P34<sup>cdc2</sup>激酶还可通过促进蛋白质的合成而促进DNA的合成(L. M. Boy等,1990)。

有丝分裂是细胞一分为二的过程,其中包括一系列重要过程如染色质凝集,纺锤体形成,核膜破裂等。利用无细胞体系可直接观察到P34<sup>cdc2</sup>激酶对上述过程的促进,说明其具有诱发有丝分裂的作用。

很早就观察到组蛋白H<sub>1</sub>以细胞周期依赖方式进行磷酸化,在G $_1$ 晚期,G-端的一个丝氨酸残基被磷酸化;在S期,相邻的另外两个丝氨酸被磷酸化;进入M期后,C-端的一个丝氨酸残基又被磷酸化,组蛋白H<sub>1</sub>的磷酸化与染色质凝集密切相关。组蛋白

H<sub>1</sub>是P34<sup>cdc2</sup>激酶最早确定的底物。目前体外测定P34<sup>cdc2</sup>激酶活性实际上就是测定其组蛋白H<sub>1</sub>激酶活性(E. M. Bradbury等, 1974)。在有丝分裂初期纺锤体形成,它的形成对于核膜的破裂和染色体向两极的移动必不可少。纺锤体由中心粒和微管组成,微管在中心粒周围呈放射状排列。P34<sup>cdc2</sup>激酶在G<sub>2</sub>期与中心粒结合,并催化中心粒蛋白磷酸化(E. Bailly等, 1989),中心粒蛋白的磷酸化使微管的成核作用增强,而放射状排列在中心粒周围。P34<sup>cdc2</sup>激酶还可直接作用于微管(F. Verde等, 1990),促进其在间隙的解聚及在分裂期的重组,还可维持其长度的稳定性,这可促进微管参与形成纺锤体,以及帮助染色体向两极的移动。

核膜由内外两层组成,由3种蛋白质组成的核板与核内膜、染色质和核孔相连。核板在维持核的稳定性中起重要作用,此外还与染色质重组、DNA复制有关。板蛋白是丝状蛋白质,结构与中丝蛋白相似。在分裂开始时,核蛋白发生磷酸化,其溶解性增强促进核板解聚乃至核膜破裂(B. Luscher, 1991)。P34<sup>cdc2</sup>激酶可催化板蛋白的磷酸化,促进核膜破裂。而在分裂中晚期,在特异磷酸酶的作用下,板蛋白脱磷酸,核板重新合成。波形纤维蛋白和索蛋白是细胞骨架的组成成分,前者存在于胞质中,形成从质膜到核膜的网架结构;后者在核内聚积于核膜下面。它们的解聚与核膜破裂密切相关,同样,它们的解聚也需磷酸化修饰调节。免疫沉淀法显示,从细胞中提取的波形纤维蛋白激酶就是P34<sup>cdc2</sup>激酶(T. C. Ned, 1990)。索蛋白也是该酶的底物。在细胞增殖分裂过程中,有一种蛋白发生高度磷酸化,即核蛋白体S<sub>6</sub>蛋白。胰岛素刺激细胞后使它的磷酸化程度急剧增强,S<sub>6</sub>蛋白的磷酸化可促进蛋白质合成。催化S<sub>6</sub>蛋白磷酸化的酶是S<sub>6</sub>激酶,该酶还可作用于核板蛋白,使之磷酸化而促进核膜破裂。它受PP60<sup>c-src</sup>磷酸修饰调节,而后者又是P34<sup>cdc2</sup>激酶的底物(D. Morgan等, 1989),即P34<sup>cdc2</sup>激酶可间接促进S<sub>6</sub>激酶活性。

P34<sup>cdc2</sup>-cyclin复合物有3种形式,它们的活性调节方式有差异,但基本方式相同,以P34<sup>cdc2</sup>-cyclin B为例介绍其活性调节。

磷酸化/脱磷酸化修饰调节:与许多蛋白激酶相反,P34<sup>cdc2</sup>激酶磷酸化后失活,脱磷酸则活化。在间隙期,P34<sup>cdc2</sup>激酶14-苏氨酸和15-酪氨酸残基磷酸化,该酶处于失活状态。在进入M期前的一瞬间,两部位脱磷酸,激酶迅速被活化且活性达峰值。在M中后期,调节亚基的解聚引起激酶失活(J. Gautier, 1990)。目前还未分离出特异的P34<sup>cdc2</sup>激酶磷酸酶和磷酸酶。据1991年K. Lundgren等研究资料表明,Wee和MIK<sub>1</sub>两基因的编码产物可能是P34<sup>cdc2</sup>激酶酪氨酸蛋白激酶,cdc<sub>25</sub>基因产物可激活P34<sup>cdc2</sup>激酶,它可能是磷酸酶的活化剂。

调节亚基的调节作用:调节亚基的作用是多方面的。第一,它是该酶活化所必需的,在间隙期cyclin B不断合成积聚,并与磷酸化的催化亚基结合(R. Booher, 1989),它的结合虽不直接使激酶活化,但是活化的必需前提,未与cyclin B结合的催化亚基即使脱磷酸也不能被活化,cyclin B可能调节活性中心形成。第二,它调节激酶的底物特异性,Cyclin可能改变催化亚基的构象,使之与不同的底物相结合;也可能在底物与酶之间起桥梁作用,但只是推测,尚无实据。第三,cyclin的降解与激酶M期失活有关。进入M期后,由于特异的cyclin B磷酸酶和水解酶的出现,使cyclin B降解,调节亚基的解聚和降解使激酶失活,如果它的降解受阻,则可使激酶持续cdc<sub>2</sub>维持高活性。原癌基因c-mos<sup>src</sup>的编码产物使cyclin B磷酸化,磷酸化后其稳定性增强使之不易被降解,因而c-mos<sup>src</sup>过度表达则可引起P34<sup>cdc2</sup>激酶持续活化(H. Onkura等, 1990),有丝分裂不能顺利完成,细胞停滞于M期。

生长因子是细胞增殖所必需的,某些癌基因的活化可使细胞获得无限增殖的能力,它们与P34<sup>cdc2</sup>激酶的关系尚不很明了。

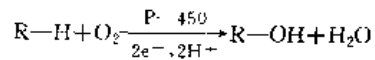
生长因子与受体作用后,经信息传导,增殖信息转变为细胞内的化学信号,其作用的最后靶点是否就是P34<sup>cdc2</sup>激酶,通过它而诱发细胞增殖呢?1990年Barrett等报道,胰岛素刺激后,细胞

内P34<sup>cdc2</sup>激酶活性升高,但这并不能说明两者之间有直接关系。许多癌基因的产物如PP60<sup>c-src</sup>、C-abl的产物等是P34<sup>cdc2</sup>激酶的底物,受到该酶的调节,于是人们推测,细胞分裂过程中细胞发生的一些变化如附着力减弱,细胞变圆等,可能是P34<sup>cdc2</sup>激酶作用于癌基因产物而引起的。此外,发现P21<sup>H-ras</sup>和c-mos<sub>1</sub>产物均可作用于P34<sup>cdc2</sup>激酶,使之活性升高,提示癌基因的活化可能启动细胞周期的调控机制,使细胞不断增殖分裂,这为解释癌基因在肿瘤发生中的作用提供了新的途径。SV40T抗原样蛋白有促进DNA复制起动的作用,有人认为抗癌基因产物P<sup>53</sup>与P105-Rb都可与其结合,从而抑制其促复制的作用。P34<sup>cdc2</sup>激酶可使P<sup>53</sup>和P105-Rb磷酸化,磷酸化后的P<sup>53</sup>和P105-Rb与SV40T抗原蛋白的结合能力降低,抑制复制的能力因之减弱。

P34<sup>cdc2</sup>激酶的研究翻开了细胞周期调控研究新的一页,揭示了从酵母到人都存在相同的调节机制,但对其作用的环节还有待更深入的研究,如cdc<sub>2</sub>基因表达的调控,cdc<sub>2</sub>基因与其它cdc基因的关系,特别是生长因子、癌基因与P34<sup>cdc2</sup>激酶的关系更是广阔的研究领域。

(北京医科大学基础医学院生物化学教研室  
蔡家新、章坦君撰)

**单加氧酶及其化学模拟** mono-oxygenase and its chemical models 单加氧酶,又称羟化酶或混合功能羟化酶,其主要成份是细胞色素P-450。它主要存在于人的肝和肾皮质线粒体和动物的肝、脾和肾的皮质网中,是生物体内解毒系统的主要物质。它能催化有机底物的羟化(或环氧化)反应。其催化作用是通过O<sub>2</sub>分子的活化而实现的:



其中,O<sub>2</sub>分子的一个氧原子插入有机底物中形成羟基,另一个氧原子还原成水。当然,酶体系的催化作用还要电子授体(如NADH或NADPH)和其它物质的配合。

细胞色素P-450是德国Klignberg于1958年从鼠肝的微粒体中发现的。它是以血红素b(原卟啉IX的铁配合物)作为辅基的金属蛋白,其还原态(Fe<sup>1+</sup>)与CO生成的配合物使电子光谱的Soret谱带红移至不寻常的450nm处是它的主要特征,细胞色素P-450正是由此而命名的。现已清楚,它的血红素辅基的轴向第五配位是半胱氨酸残基的硫,具有较高推电子能力的硫的配位结合,对于P-450活化O<sub>2</sub>分子起着重要的作用。

在无酶的情况下,R-H羟化的活化能约为418~464kJ/mol,若要通过有机合成的方法把有机物直接羟化是很困难的。然而在单加氧酶的催化作用下,生物体却能在温和的条件下利用空气中的O<sub>2</sub>很容易地把有机底物直接羟化,这是由单加氧酶使羟化反应的活化能降低至38~71kJ/mol之故。若能把生物羟化过程成功地模拟到化工生产上去,那将对基本有机合成工业带来重大的突破。这也是近20多年来国内外对单加氧酶进行化学模拟研究持久不断的原因。

单加氧酶的化学模拟,主要是以一些较简单的金属配合物作为细胞色素P-450的模型物,并以这些模型物为主体组成模拟酶体系以模拟单加氧酶的催化性能。60年代至70年代,模拟酶体系的研究主要集中于由一些金属离子和简单配体分子所组成的多组份体系。例如Udenfriend体系是以Fe<sup>2+</sup>或Fe<sup>3+</sup>加EDTA作为活性物质,抗坏血酸或噻吨四氢噻吨作为电子授体,O<sub>2</sub>为氧源,羟化反应的底物是环己烷、乙酰替苯胺氮萘等;Ulrich体系以Cu<sup>+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Ti<sup>3+</sup>、Sn<sup>2+</sup>等金属离子加EDTA或巯基苯甲酸作为活性物质,O<sub>2</sub>为氧源,底物为甲苯、苯甲醚、环己烷等;Hamilton体系以Fe<sup>2+</sup>加邻苯二酚作为活性物质,H<sub>2</sub>(O<sub>2</sub>)为氧源,底物为卤代苯等。所有这些体系都能催化芳香烃或烷烃的羟化反应,但是催化活性较低。70年代末以来,模拟体系逐渐转向合成一些结构与P-450的活性中心更加类似的金属大环配合物作为模型物。大环配体无论是在电子因素方面还是在几何因素方

面,都优越于其他体系中所用的小分子配体,其中以金属卟啉配合物研究得最多。1980年 Groves 等以铁卟啉配合物作为模型物,以 O<sub>2</sub>或亚碘酰苯为氧源进行烷烃或芳烃的羟基化和烯烃的环氧化反应,取得较好结果。近年来,中国学者在利用金属卟啉配合物作为 P-450的模型物进行烷烃或芳烃的羟基化和烯烃的环氧化研究方面做了不少很有意义的工作。例如,1988年以来计亮年等合成了多种具有拉电子和推电子基团的金属卟啉配合物作为 P-450的模型物,研究了它们对苯和环己烷的羟化催化作用,羟化产率可达30%,并发现不对称的卟啉配合物有较好的催化活性。李志贤等合成了多种水溶性和非水溶性金属卟啉配合物作为模型物,研究了它们对苯丙氨酸(产物为酪氨酸和多巴)和苯(产物为苯酚)的催化作用,并用光谱电化学方法研究了双氧活化催化羟化的机理。

前已述及,细胞色素 P-450的血红素辅基中,中心铁原子的第五配位是半胱氨酸残基的硫,硫的配位结合对 O<sub>2</sub>的活化起着重要的作用。为了更好地模拟细胞色素 P-450,1982年 Collman 等合成了含“硫醇尾巴”的卟啉铁配合物,并研究了它们的轴向配位性能,研究结果表明,在碱性介质中,在 CO 的存在下,此模型物能形成六配位的 Fe-Fe(II)-卟啉-CO 配合物,此配合物具有细胞色素 P-450特征的 MCD 光谱,这说明了些类模型物更接近了细胞色素 P-450活性中心的结构。李志贤等也合成了两种“尾式”卟啉铁(II)配合物:中位-[邻-(3-巯基苯酰氨基)苯基]三苯基卟啉铁(II)和中位-[邻-(4-巯基苯酰氨基)苯基]三苯基卟啉铁(II),并研究了它们的轴向配位性能,得到了类似于 Collman 的结论。因此,含巯基(硫醇)“尾式”卟啉的金属配合物是模拟细胞色素 P-450活性部位较好的一类模型物,但至今未见此类模型物催化有机底物羟化反应的报道。

然而,至今单加氧酶的化学模拟研究,仍处于基础研究的阶段,距实用化还有相当的距离。相信在不久的将来,经过人们的努力一定会有突破性的进展。

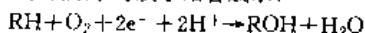
参考文献

- 1 Klingenberg M. Arch Biochem Biophys, 1958, 75: 376
- 2 Hamilton G. A. Molecular mechanisms of oxygen activation. Hayaishi O. (ed) New York, London: Acad Press, 1974
- 3 Groves J. T. et al. J Mol Catal, 1980, 7: 169
- 4 Collman J. P. et al. J Am. Chem Soc, 1982, 104: 1391
- 5 计亮年,等. 无机化学学报, 1988, 4(4): 54
- 6 李志贤,等. 厦门大学学报, 1990, 29(5): 546
- 7 Zhixian Li, et al. International Symposium on Applied Bioinorganic Chemistry, Huazhong University of Science and Technology Press, 1990, 169
- 8 Liangnian Ji, et al. Inorg. Chemical Acta, 1991, 178(1): 59
- 9 李志贤,等. 中国化学会第四届无机化学讨论会论文摘要集, 1992, 178

(厦门大学李志贤副教授撰)

细胞色素 P450单加氧酶及其化学模拟

cytochrome P450 monooxygenase and their chemical models  
单加氧酶是一类重要的金属酶,它通过两个电子和两个质子的参与,催化分子氧活化,分子氧的一个氧原子插入底物使底物发生加氧反应,另一个氧原子与质子结合成水:



细胞色素 P450(Cyto P450)是一种特殊的血红蛋白,是普遍存在的一组单加氧酶,因其还原型与 CO 结合会使 420nm 的 Soret 谱带分裂为 364 和 450nm 的谱带而得名。

Cyto P450 是由克林真伯格(M. Klingenberg)首先发现(1958),并经木村(T. Omura)和佐藤(R. Sato)验证和命名(1964)的一类 b 族细胞色素。它广泛存在于各种哺乳动物组织、昆虫、植物、酵母和细菌中,人体中以肝、肾、肺、脑、鼻膜和肠粘液等组织中浓度最高。有关 Cyto P450 的生物化学、药理学和毒

理学研究表明,Cyto P450在类固醇、脂肪酸和前列腺素等内源化合物的生物合成和生物降解的多种步骤以及药物、杀虫剂和化学致癌物等外源化合物的氧化代谢过程中起着极其重要的作用。它以烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(NADPH)为电子给体,催化分子氧对戊巴比妥,苯巴比妥等脂肪烃和芳香烃羟基化、氯甲桥苯等烯烃环氧化和含杂原子底物 N-脱烷基化(如美舍东, methadone),O-脱烷基化(如甲基吗啡碱)、氧化脱氨基化(如冬眠灵),S-氧化(如氯丙嗪)及还原脱卤化(如氟烷)等。与 Cyto P450 在生物合成、代谢和解毒中的有益作用相反,某些药物的毒害作用及化学致癌也与 Cyto P450 有关。已经对来源不同的 Cyto P450 结构进行了大量研究,其中来自兔肝的 P450<sub>LM2</sub>和假单胞菌(Pseudomonas Putide)的炭酮羟化酶(P450<sub>cam</sub>)研究得最多。1985年普罗斯(J. T. Poulos)成功地测定了 P450<sub>cam</sub>静态和底物结合态的晶体结构。P450<sub>cam</sub>的分子量为 45 000, 414 个氨基酸组成的多肽链形成一个近似于最大尺寸为 60 × 10<sup>-10</sup>m、最小尺寸为 30 × 10<sup>-10</sup>m 的三棱柱,其中 12 条螺旋链段占结构的 44%,而反平行的 β 折叠仅占 10%。P450<sub>cam</sub>的血红素(铁原卟啉 IX)夹在两条平行的螺旋链段间。由于肽链上半胱氨酸(Cys 357)的巯基硫在轴向配位,血红素的铁原子呈五配位状态,底物 2-苄酮与 P450<sub>cam</sub>结合时,是深入到位于血红素之上的袋囊,并紧接着 O 在血红素的键合位置。除了与邻近的疏水性脂族和芳香族残基保持接触,2-苄酮还通过其羰基氧与酪氨酸(Tyr 96)的羟基之间形成的氢键面稳定在袋囊中。已经证明,来源不同的 P450 都有类似的组成和结构。

血红素作为 Cyto P450 的活性中心在底物加氧反应中起着极其重要的作用,70 年代末 80 年代初,以金属卟啉配合物作为模拟主体的 Cyto P450 单加氧酶化学模拟研究引起了化学家的极大兴趣,测定包括氧活化和底物羟化整个催化过程中作为中间体的铁配合物的性质,尽可能弄清 Cyto P450 在催化过程的作用机理,是 Cyto P450 化学模拟研究的一个重要方面。在大量研究的基础上,1987 年曼苏伊(D. Mansuy)描述了一种较为人们所接受的 Cyto P450 催化循环机理:

(1)静态的 Cyto P450 存在着 5 配位的高自旋 Fe(II)卟啉配合物(第 6 配位位置空着)与 6 配位的低自旋 Fe(II)卟啉配合物(第 6 配位位置可能是含 OH 的分子)的平衡,当底物结合到蛋白链的疏水部位时,平衡移向高自旋态;

(2)NADPH 的一个电子转移到铁卟啉上,使 Fe(II)还原为 Fe(I);

(3)分子氧结合到 Fe(I)卟啉的第 6 配位位置,形成六配位的低自旋态稳定中间体;

(4)伴随着第 2 个电子离开 NADPH 转移到以上中间体,O-O 键断裂,生成不稳定的活性氧中间体[Fe(V)=O]和水;

(5)[Fe(V)=O]的氧向底物转移,使底物发生加氧反应,氧化型的 Cyto P450 再次生成,使循环闭合。

Cyto P450 催化循环中所形成的活性氧中间体[Fe(V)=O]的结构仍未确定,因为它寿命很短,难以进行直接的光谱测定。其它中间体的铁卟啉模拟化合物都已制备及表征。在应用铁卟啉模拟体系研究某些外源化合物的代谢过程时,有关含 Fe-N 键、Fe-C 键的底物与铁卟啉形成的稳定中间体的直接分离和表征,已有不少报道。

石油化工生产中,由烷烃和烯烃制取醇和环氧化物,需要高温高压等苛刻工艺条件,建立能再现 Cyto P450 所催化的主要反应的模拟体系,探索在工业生产中实现温和条件下烃类氧化的可能性,成为 Cyto P450 化学模拟研究中最活跃、最具挑战性的课题。人们对于作为潜在的氧化剂及酶模型金属卟啉进行了大量研究工作,Cyto P450 模拟体系通常包括:作为催化剂的金属卟啉配合物和轴向配体;给电子的还原剂;氧源和底物。目前所报道的模拟体系,使用的氧源包括:分子氧、亚碘酰苯、过氧化氢或有机过氧化物、次氯酸钠、氮氧化物(N-氧化物)和过硫酸钾等,尤以分子氧、亚碘酰苯和过氧化氢居多。1979 年田伏(J. Tabushi)

报道了以锰卟啉为催化剂、硼氢化物为还原剂、分子氧为氧源的 Cyto P450 模拟体系,实现了环己烯的催化氧化。已报道的以分子氧为氧源的模拟体系,还有以抗坏血酸、胶态铂、锌粉和  $H_2$  等为还原剂的。一般说来,这些体系都重现了 Cyto P450 的主要反应,但催化活性都较低,相对于还原剂的产率,烯烃环氧化为 0.1%~5%,烷烃羟化为 0.01%~0.5%。普遍认为,这是由于底物与过量的还原剂之间存在着对活性的金属卟啉氧中间体的竞争,还原剂还原氧中间体的反应比底物与氧中间体的反应快得多的缘故。加入咪唑作为金属卟啉的轴向配体,大大提高了体系的催化活性。据报道,以水溶性锰卟啉和 N-甲基咪唑为催化剂、二羟基吡啶为还原剂、黄素单核苷酸为电子转移催化剂的模拟体系催化橙花醇环氧化,相对于还原剂的产率达到 30%。以往的大量研究结果表明,以分子氧为氧源的模拟体系,苯环上带推电子取代基的四苯基卟啉衍生物的金属配合物催化活性较高。但 1990 年埃利斯(P. E. Ellis)发现,带五氟代苯基的四苯基卟啉衍生物的铁配合物有较高的催化活性和催化选择性,丙烷和异丁烷的羟化产率达 18%(相对于底物)。以单氧给体亚磺酰苯为氧源的 Cyto P450 模拟研究十分活跃。1979 年格罗夫斯(J. T. Groves)首先采用四苯基卟啉的铁配合物和亚磺酰苯组成模拟体系,实现了温和条件下烷烃的羟化和烯烃的环氧化。类似的体系已有许多报道。在这些体系中,不但再现了 Cyto P450 催化烯烃氧化时存在的如双键的立体选择性环氧化、烷烃 C-H 键的羟化、 $RCH=CH_2$  部份成醛  $RCH_2CHO$  及 N-烷基化卟啉的形成等反应,而且还发现了芳香烃羟化过程中羟化部位的氢原子向其邻位的转移(NIH 转移)。研究表明,铁卟啉和锰卟啉催化效果较佳。但简单的四芳基卟啉金属配合物在催化过程中容易降解,对烷烃等反应性较差的底物催化时更为严重。已经发现,在四芳基卟啉的芳基上引入卤原子,可使体系的催化活性和催化剂的稳定性得到改善。其中以特雷勒(T. G. Traylor)报道的用四-(2,6-二氯苯基)卟啉铁配合物  $Fe(TDCPP)Cl$  和四-(2,6-二氯苯基)八溴卟啉铁配合物  $Fe(TDCOBBP)Cl$  作为催化剂的体系对烯烃和烷烃的催化比较成功。以过氧化氢为氧源的模拟体系,只有在体系中加入一定量的咪唑才能有效地催化烯烃环氧化或烷烃羟化。据认为,除了作为轴向配体,咪唑还起着一种酸碱催化剂的作用,它的存在有利于过氧化氢的去质子化和水分子的脱离。已有报道,以过量 2~6 倍过氧化氢的  $H_2O_2-Mn(TDCPP)Cl$ -咪唑体系催化烷烃羟化,室温下 2h 内 50%~80% 烷烃已转化为相应的醇和酮。

Cyto P450 的化学模拟研究,在阐明 Cyto P450 单加氧酶的反应机理方面已经取得了重大进展,但是,对于 Cyto P450 催化循环中分子氧的活化和氧向底物的转移这两个关键仍然认识不多。从分子水平上对分子氧的活化和氧向底物的转移过程的研究,将是今后研究的重点之一。尽管近 20 年来在寻找可应用于有机合成化学的 Cyto P450 模拟体系方面作了大量的研究工作,并取得了许多有意义的结果,但是在分子水平上模拟 Cyto P450 单加氧酶,尤其是直接以分子氧为氧源的研究仍远远落后于应用方面的要求。对 Cyto P450 的活性部位进行模拟,通过对卟啉环进行化学修饰,合成更接近天然酶的卟啉配体;寻找和设计对底物的加氧具有高效、高选择性的模拟体系,仍然是 Cyto P450 化学模拟研究的一个重要方面。天然酶的蛋白质环境对酶的作用是至关重要的,对天然酶的微环境进行化学模拟是值得重视的研究课题。近年来开展的将金属卟啉接到可溶性高分子材料,或直接在有机、无机高分子载体上合成金属卟啉的研究工作,对于改善催化剂的催化活性和稳定性都有重要意义。总之,Cyto P450 的化学模拟研究方兴未艾,可以相信,随着对 Cyto P450 及其化学模拟体系研究的不断深入,人们最终将实现温和条件下烃类的选择性氧化。

#### 参考文献

- 1 Omura T, et al. *J Biol Chem*, 1964, 239, 2370
- 2 Groves J T, et al. *J Am Chem Soc*, 1979, 101, 1032
- 3 Tabushi I, et al. *J Am Chem Soc*, 1979, 101, 6456

- 4 Roulos J T, et al. *J Biol Chem*, 1985, 260, 16122
- 5 Mansuy D. *Pure Appl Chem*, 1987, 59, 759
- 6 Mansuy D. *Eur. J Biochem*, 1989, 184, 267
- 7 Ellis P E, et al. *Coord Chem Rev*, 1990, 105, 181
- 8 Gunter M J, et al. *Coord Chem Rev*, 1991, 108, 113
- 9 计亮年, 等. *化工进展*, 1991, 3, 9

(中山大学黄锦汪副教授撰;计亮年审)

**DNA 疫苗** DNA inoculation 又称基因疫苗。为了弥补无毒的基因工程疫苗不能激活 MHC I 分子以致很难激活 T 杀伤细胞的缺点,近几年来国外发展的一种新技术。把外源基因克隆在表达质粒上,直接注入到动物体内,使其外源基因在活体内表达,产生抗原从而激活免疫力。此技术优点不仅选择性强,而且可以有选择地激活不同的免疫途径,最大特点是导入体内的基因一定要在细胞内表达后才起作用,表达后的产物首先被 MHC I 型分子加工后而激活  $CD8^+$  T 杀伤细胞,而分泌型抗原表达后,分泌到胞外而被 MHC II 型加工,激活 Th 细胞或直接激活 B 淋巴细胞,使其产生抗体。

机体本身抵抗外来入侵物是靠两大免疫系统来完成的,其一是体液免疫,即我们常说的抗体形成产生的免疫。抗体是由血液和体液中的 B 淋巴细胞产生,它可以与靶主体液中的外来物结合后而使其清除。其二是细胞免疫。细胞免疫又根据主要组织相容性复合物(MHC)分子的不同分为两种,一种为 MHC I 型,另一种是 MHC II 型。它们的主要区别在于激活机制和效果。外源抗原通过细胞内的吞噬后,在细胞体内由 MHC II 型分子加工,使  $CD4^+$  T 淋巴细胞识别并使其激活,激活的  $CD4^+$  T 淋巴细胞一般是用以辅助激活抗原专一的 B 淋巴细胞,使其产生大量的专一性抗体,或激活 T 杀伤细胞,所以称这种 T 淋巴细胞为 T 辅助细胞(Th)。根据辅助细胞分泌细胞因子的不同,又分成 T 辅助 O 型(Th0)、T 辅助 I 型(Th1)和 T 辅助 II 型(Th2)。Th1 一般分泌有 IL-2、IL-12、TNF 和  $\gamma$ -IFN 等,它们是用来调动更多的 T 细胞,使其 MHC I 型分子表达,从而增强杀伤 T 细胞作用。Th2 一般分泌 IL-4、IL-5 和 IL-10 等,其可以激活并诱导 B 淋巴细胞产生在碍专一性抗体,而 Th0 细胞与 Th1 和 Th2 有重叠作用,其机理不十分清楚,所以通过诱导激活 MHC II 型的途径,可以产生有效的免疫反应。MHC I 型途径一般是使内部合成蛋白抗原加工产生小肽而使  $CD8^+$  T 淋巴细胞识别激活,诱导  $CD8^+$  T 淋巴细胞常伴有细胞杀伤和抑制性。 $CD8^+$  T 杀伤细胞可以通过释放水解酶和化合物把受到病毒感染或变异的细胞杀死。 $CD8^+$  T 淋巴细胞的抑制性一般是通过诱导使机体进入不反应状态。

自从 1961 年 Atanasiya 第 1 个用纯化的 DNA 直接注射到动物体内到 1990 年 John Wolff 和 Felgner 偶然发现用质粒 DNA 可以很好地使肌肉细胞转化表达,并提出用 DNA 注入机体应能产生免疫反应后,以 DNA 质料为材料的免疫方法开始开展起来。1992 年美国有 4 家实验室同时独立地开发出了这种 DNA 疫苗的雏形,从此之后这种方法风靡各地。当时 4 家发展的方法中都有许多不同之处,如 Merck 公司是直接的注射法, H. L. Robinson 和 S. A. Johnston 是采用基因枪轰击法, B. Wang 则发明了药物协助法。后两种方法都比直接注入法效果好,但基因枪使用复杂、成本高,将来推广取决于基因枪的改进。B. Wang 选用 Bupivacaine 药物是由于它是人们使用已久的麻醉药,无副作用,它可以使局部肌肉快速萎缩和更新。B. Wang 的实验证实用此方法可以使基因在体内的表达水平提高 20~50 倍。

爱滋病病毒(HIV)是一种造成人体免疫缺陷症的反转录双链 RNA 病毒,同其它反转录病毒一样,病毒表面膜蛋白包裹内部有核骨架和反转录酶、蛋白水解酶、整合酶及一些调节因子,加上正链的 RNA 遗传物质, HIV 进入体内主要是通过血液和体液几个途径,一旦进入体内, HIV 的膜蛋白会与  $CD4^+$  T 淋巴细胞结合而进入细胞内并反转录、整合在基因组中,从而开始了其生



命周期, HIV 感染后的 CD4<sup>+</sup>T 淋巴细胞会复制大量的 HIV 病毒, 同时 CD4<sup>+</sup>T 淋巴细胞自身死亡。反复多次后, 人体的大量 CD4<sup>+</sup>T 淋巴细胞数下降, 机体本身的免疫反应能力下降, 使许多其它的病菌有机可趁。

抵抗 HIV 感染的能力可以表达在两个方面, 一是阻止 HIV 进入细胞, 二是清除被感染的细胞。B. Wang 近几年的实验多选用膜蛋白和核蛋白的基因作为免疫源并构建成质粒, 发现仅采用膜蛋白区域就有可以激活动物产生中和抗体、Th 活性和杀伤 T 细胞的能力, 这种被激活的专一性抗体不仅可以结合多区域抗原决定簇, 同时对一些重要的功能区如 V3 区和 CD4<sup>+</sup>受体结合区也有结合。而且这种专一性的结合能力可以延续很长时间。这种能力在体外 HIV 感染系统中证明它可以有效地阻止 HIV 病毒进入人体细胞中。其中猴子注射了膜蛋白的 DNA 疫苗后, 它们可以有不同程度的抗感染能力。其中一组猴子有近于 100% 抗感染力的记录。在 T 淋巴细胞免疫方面其疫苗有着很强激活能力。所激活的 T 杀伤细胞中, 以 CD8 细胞为主。引人注意的是已经被 HIV 感染的大猩猩, 注入这种疫苗 3 个月后, 其体内的病毒数量明显下降。半年后降到测不出的水平, 就连用最敏感的 PCR 检测技术, 也检测不出 HIV 的 DNA。虽然这组实验所用猩猩数量很小, 结果需要重复, 但该实验支持了 B. Wang 的假说, 用此种 DNA 免疫技术不仅通过产生抗体预防病毒的感染, 同时更主要的是产生 T 杀伤细胞清除了已经感染的机体细胞达到治愈的目的。

DNA 疫苗不仅可以作用于病毒感染, 同时也能用于医治肿瘤。B. Wang 在小鼠的实验中证明, 如果用肿瘤专一性抗原基因作为免疫源, 注入小鼠体内 3 次后, 能 100% 阻止肿瘤细胞生长; 注射两次后, 阻止 75% 的肿瘤生长, 如注射 1 次, 阻止 60% 肿瘤生长。检查这些肿瘤生长受阻小鼠的免疫反应, 发现它们都有一个共同的特点就是体内专一性 T 杀伤细胞的活性极高, 而且都是在遇到肿瘤细胞后 7 天之间提高了 100 倍, 而且这种免疫力是有很长时间记忆的。由此可看出 DNA 疫苗的最主要优点在于可诱导很有效的专一性 T 杀伤细胞的能力而且没有副作用。

目前的研究表明, DNA 疫苗的安全性很高。对于一般疫苗的安全性应注意几个方面的问题, 一是无直接副作用, 二是无间接副作用。直接副作用在子它的毒性和机体耐受性, 间接副作用为注射疫苗后引起的其它疾病如癌症、自体免疫病等。除上述提及的 DNA 疫苗的安全性外, B. Wang 还用大量 DNA 疫苗注入猴子和兔子的急性毒理实验证明, 没有任何毒理反应, 对这些动物的长期观察也没有检查到任何毒理反应。所以从传统的标准来看 DNA 疫苗是安全的。另外我们为保险起见, 同时进行了测定了 DNA 是否会整合到机体的基因组之中的实验, 虽然实验花费的大量的精力, 但是十分必要。采用目前最灵敏的 PCR 方法证明测不出任何重组整合的质粒 DNA。1995 年 B. Wang 进行了全世界首例应用 DNA 疫苗技术的人体临床试验。虽然 DNA 免疫技术才发展几年, 有许多需要改进之处, 这种直接注入 DNA 质粒的技术有着广泛的应用前景。目前已经应用的例子有爱滋病毒、肝炎病毒、流感病毒、HTLV、肿瘤、疱疹、霍乱、狂犬病毒等, 还有许多正在开发研究之中。

参考文献

- 1 Tang DC, DeVit M, Johnston SA. Nature 1992, 356: 152~154
- 2 Davis H L, Michel M L, Whalen R G. Hum. Mol. Genet. 1993, 2: 1847~1851
- 3 Robinson H L, Fynan E F, Webster R G. Vaccines '93 Cold Spring Harbor Laboratory Press 1993, 311~315
- 4 Ulmer J B, Donnelly J, Parker S E, et al. Science, 1993, 259: 1745~1749
- 5 Sedegah M, Hedstrom R, Hobart P, et al. Proc. Natl. Sci. USA 1994, 91: 9866~9870
- 6 Agadjanyan MG, Wang B, Ugen, et al. Vaccines '94 Cold

Spring Harbor Laboratory Press 1994, 47~54

- 7 Conry R M, Lo Buglio A F, Kantor J, et al. Cancer Res. 1994, 54: 1164~1168
- 8 Wang B, Boyer J, Srikantan V, et al. Virol, 1994, 211: 102~112
- 9 Xiang Z Q, Spitalnik S, Tran M, et al. Viol. 1994, 199: 132~140
- 10 Wang B, Merva M, Dang K, et al. AIDS, 1995, 9: S159~S170

(美国宾西法尼亚大学王宾博士撰)

细胞色素 C 电子转移过程中的促进剂

fromoter of cytochrome C in electron transfer 细胞色素 C (Cyto · C) 存在于动植物体内的细胞膜上, 是生物体内呼吸链的基本环节, 在呼吸链中起传递电子作用。Cyto · C 在生物体内能进行可逆的氧化还原反应, 但在一般的金属电极 (如金、银、汞和铂等) 表面上 Cyto · C 的电化学反应是不可逆的。因此, 人们通常采用一种能够加速 Cyto · C 电化学可逆的氧化还原反应的物质, 而其本身在所研究的电位范围内并不经历氧化还原反应, 是电化学非活性物质, 这种物质称为促进剂。Cyto · C 在细胞的有氧代谢过程中是很活泼的, 电子在其还原酶和氧化酶之间传递, 每次只传递一个电子, 而且只需要 2 个分子互相碰撞, 氧的激活需要 2 个电子, 但一次只有一个氧原子与 Cyto · C 氧化酶偶联。Cyto · C 的氧化还原电位接近于氧的氧化还原电位, 从而, Cyto · C 电子转移过程中的促进剂一直是生物化学家和电化学家所共同关心的课题。

1977 年希尔 (H. A. O. Hill) 等人首次发现 Cyto · C 在促进剂 4,4'-联吡啶修饰的金电极上能进行直接的准可逆电化学反应; 1979 年希尔等人用电量一分光光度法证实了 4,4'-联吡啶在金电极表面形成吸附单分子层, 能使电极表面与 Cyto · C 之间直接发生单电子转移过程, 实验还表明: 1,2-二(4-吡啶基)乙烷也具有同样的促进作用。此后大量新的促进剂被发现, 其中大多数是有机小分子, 同时, 提出一些促进作用的机理。1983 年 Haladjan 等人研究了 15 种含 N 杂环有机化合物的促进作用, 用吸附法修饰金电极表面的 Cyto · C 电子转移过程, 结果表明, 只有 6 种含 N 杂环有机化合物具有良好的促进作用; 并着重讨论了 4,4'-联吡啶和其它促进剂在金电极上 Cyto · C 的还原影响, 发现 Cyto · C 与 4,4'-联吡啶分子发生竞争吸附, 提出促进剂分子比 Cyto · C 优先吸附的机理。1987 年 Y. Cui 等人用薄层光谱电化学方法研究, 得出 4,4'-联吡啶分子在铂电极上以“垂直”方向趋向电极表面的结论。1990 年 A. Czerwinski 等人研究 4,4'-联吡啶在金电极上吸附动力学, 提出吸附是涉及从金属表面水分子的取代一个中心反应, 吸附服从 Langmuir 型, 实验测量了一些吸附动力学参数 (如  $K_c = 3.48 \times 10^{-4} \text{mol}^{-1} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $E^0 = 22.5 \text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $\alpha = 25.5 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。

1984 年希尔 (H. A. O. Hill) 等人对 54 种双功能团的有机化合物进行研究的基础上提出促进剂分子必须至少具有两个功能团, 即具有 X~Y 结构, 其中 X 基团与金属表面相结合, 并且这种结合是不可逆过程; Y 基团则与细胞色素表面的氨基酸残基相结合, 以形成电子转移的通道, 从而加速细胞色素 C 的电化学氧化还原反应速度; ~ 是足够长的共轭键。虽然 2,2'-联吡啶和吡啶分子均有两个功能团, 但把金电极在它们各自的溶液中浸泡 0.5h 左右的吸附方法来修饰金电极, 然后把修饰的金电极转移到 Cyto · C 溶液中, 用循环伏安法测量没有发现任何电化学反应, 因而, Haladjan 认为这种有机分子对 Cyto · C 没有促进作用, 并得出结论, 具有促进作用的有机分子除了必须具备两个功能团外, 这两个功能团还必须在分子的两端, 而且此分子还必须具有一定的长度。但是, 1991 年, 中国科学院长春应用化学研究所于秀娟、陆天虹等人详细地研究了 2,2'-联吡啶、吡啶和 4,4'-联吡啶等对 Cyto · C 促进作用的特性, 发现经过长达数小时吸附后的 2,2'-联吡啶、吡啶修饰的金电极对 Cyto · C 的电化学反应也具有良

好的促进作用,其促进作用随吸附时间的增加而增强,在10h后达到一个稳定状态,而4,4'-联吡啶的吸附时间只要几分钟就能显示出很好的促进作用;1,4'-联吡啶在金电极表面的吸附能力远大于2,2'-联吡啶和吡嗪;表面增强拉曼光谱研究表明2,2'-联吡啶吸附到金电极表面是具有顺式结构,因此,他们认为:Hill和Haladnan所提出 Cyto·C 的促进剂分子结构要求并不是必要条件,加速 Cyto·C 电化学反应的促进剂并不一定必须具有 X~Y 结构,只有一个功能团的分子也能起促进作用。2,2'-联吡啶对 Cyto·C 的电化学反应的促进作用可能是电子通过大π键共轭体系传递给吸附在电极表面的 Cyto·C,然后再传递给扩散到电极表面附近的 Cyto·C,从而实现电子转移过程。

在具有一个功能团的分子也有促进作用的启示下,1991年曲晓刚等人研究了只有一个功能团的吡啶分子对 Cyto·C 的促进作用,结果表明,Cyto·C 在经过数小时吸附法制备的吡啶修饰金电极上也能发生准可逆的氧化还原反应,但不稳定,这可能是分子在金电极表面吸附的强弱对 Cyto·C 的促进作用有很大影响。他们试用电化学聚合的方法使吡啶聚合在电极表面,实验表明,聚吡啶薄膜修饰金电极对 Cyto·C 的电化学反应具有很好的促进作用,而且十分稳定,同时观察到聚吡啶薄膜上吸附有 Cyto·C,因此该修饰电极有可能用于生物分子的检测。

至今,以生物小分子为促进剂的研究还不多,1991年于秀娟等人系统地研究了嘧啶和嘌呤类生物小分子对 Cyto·C 电化学反应的促进作用,结果表明:不同化合物达到促进作用最佳值的吸附时间不同与化合物在金电极上的吸附能力、浓度有关,如嘌呤在几分钟的吸附时间内就能显示出很好的促进作用,有的化合物吸附时间为几小时,甚至为10h后,其促进作用达到最佳值。根据促进作用的强弱,把嘧啶和嘌呤类生物小分子分为3类:(1)嘌呤、腺酸、黄嘌呤、次黄嘌呤、腺嘌呤、腺苷和异胞嘧啶等,这类化合物对 Cyto·C 的电化学反应显示出较强的促进作用,发生准可逆还原反应,性能较稳定;(2)鸟嘌呤、胸腺嘧啶、尿嘧啶、二氢尿嘧啶、胞嘧啶、核苷、胞苷、鸟苷、胞苷和维生素 B<sub>1</sub>, 这类化合物在金电极上 Cyto·C 氧化还原的可逆性较差,且性能不稳定;(3)黄嘌呤核苷、6-糖氨基嘌呤和6-苯氨基嘌呤,这类化合物修饰的金电极上观察到不 Cyto·C 电化学反应的促进作用。

1991年陆天虹等人首次发现一些简单的无机阴离子(如 I<sup>-</sup>)也是一种很好的促进剂,并提出静电作用模型机理,Cyto·C 是由一个有氧化还原反应活性的铁卟啉基团(血红素)和其周围的肽键组成,血红素的部分边缘露出分子的表面,其露出的面积只占整个分子面积的0.06%,并被认为是分子的反应活性区域,它的表面电荷分布是不对称的,大多数带负电荷基团都位于它的背面,面带正电荷的基团集中在它前面的反应活性区域附近。在开路时,未修饰的金电极表面带正电荷,由于静电作用,Cyto·C 将以带负电荷的背面接近电极,反应中心区域远离电极表面,所以氧化还原反应不易进行而显示出高度的不可逆性;当碘离子修饰金电极时,电极表面带负电,Cyto·C 将以带正电荷的反应中心区域接近电极表面,故进行准可逆的电化学反应。

随着 Cyto·C 促进剂的研究深入,大量新的促进剂不断被发现,一些促进作用机理的提出,对促进剂分子结构要求的重新评价以及修饰电极方法的改进等,都必将推动 Cyto·C 促进剂研究的进一步发展,使研究内容更加丰富。目前该领域的研究热点为:(1)新促进剂的研究,特别是对生物分子以及无机离子的研究;(2)促进剂的作用机理的研究,国内外学者虽对促进剂的作用机理进行了探讨,但至今未能取得一致的结论;(3)研究促进剂在电极/溶液的界面现象,如测量电化学参数、促进剂与电极表面结合的强弱、取向等,从分子水平上弄清电子转移过程;(4)促进剂的应用,这方面的研究尚属开始。可以相信,随着研究的深入,无论在基础理论研究方面,还是在应用研究方面,Cyto·C 促进剂的研究对生物学和电化学这两门学科将会有深刻的意义。

#### 参考文献

1 Eddowes M J, et al. *J Chem Soc Chem Comm*, 1977, 21: 771

~772

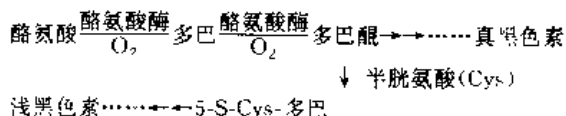
- 2 Eddowes M J, et al. *J Am Chem Soc*, 1979, 101: 4461~4464
- 3 Haladjian J, et al. *Electrochim Acta*, 1983, 28: 1823~1833
- 4 Allen P M, et al. *J Electroanal Chem*, 1984, 178(1): 69~86
- 5 Czerwinski A, et al. *Electrochim Acta*, 1990, 35(7): 591~594
- 6 陆天虹,等.中国化学会第6届全国电化学会议论文集,1991, C15~18
- 7 于秀娟,等.中国化学会第6届全国电化学会议论文集,1991, C16~17
- 8 吴华强,等.安徽师大学报,1992, 15(2): 44~48

(安徽师范大学吴华强副教授撰)

**黑色素 melanin** 黑色素是广泛存在于生物体内的重要色素,在人和动物的毛发、表皮(肤)和眼球组织中含较高,它具有保护体内细胞免受辐射损伤、防止内部组织过热等功能。人体中黑色素异常增加或减少都可能引起疾病,如恶性黑色素肿瘤中黑色素含量很高,而“白化病”患者却非常缺乏黑色素。研究黑色素在人和生物体内的功能具有重要的理论意义和现实意义。

黑色素主要分两大类,一类是真黑色素(eumelanin),它不含硫原子,呈黑色或暗棕色,如人体的黑发、乌贼鱼的墨汁中含有大量真黑色素,另一类是浅黑色素(phaeomelanin,或称脱黑色素),它含有硫原子,为黄色或棕红色,在人的红头发、公鸡红羽毛中含量较多。

1965年,陈(Y. M. Chen)等人研究认为生物体内黑色素的形成是一个十分复杂的过程,它与生物体含有的酪氨酸酶密切相关。酪氨酸酶普遍存在于人和动植物体内,它是由二价铜离子与酪蛋白结合的金属酶,兼有加氧酶和氧化酶的双重功能。在生物体内真黑色素的合成首先是酪氨酸在酪氨酸酶的作用下加氧生成多巴,多巴经酶促氧化生成多巴醌,以后再经非酶反应形成一系列中间产物-多巴色素、5,6-二羟基吲哚-2-羧酸、5,6-二羟基吲哚、5,6-吲哚醌等,这些中间产物(或称前体)经聚合形成真黑色素,浅黑色素的形成过程由酪氨酸到多巴醌与真黑色素是一致的,在多巴醌以后的反应中有半胱氨酸(Cys)参加,先生成5-S-Cys-多巴和5-S-Cys-多巴醌,经关环、脱羧变成苯吡啶的衍生物,后者再经醇缩合生成分子量更大的浅黑色素。黑色素的产生过程简述如下:



浅黑色素……→5-S-Cys-多巴

真黑色素形成的详细反应机理还不清楚,它的确切结构尚待进一步研究和确定。在实验室,真黑色素可用多巴经酪氨酸酶氧化或自动氧化合成;里珀(H. S. Raper)和玛森(H. S. Mason)等人分别于1928年和1948年在实验室合成。这些通过人工合成途径获得的黑色素与从生物体提取的黑色素类似,因而可用进一步研究黑色素的性质和功能。在动物体中,真黑色素是通过Cys的巯基与黑色素蛋白相连的,二者结合很牢,分离真黑色素需要浓酸长时间的水解。浅黑色素中最简单的是毛发色素B和C,可由人的红头发和鸡的红羽毛用稀酸提取,得到粉红色溶液,其颜色随H<sup>+</sup>浓度值的高低而改变,用碱中和至中性出现沉淀,继续加碱又重新溶解呈橙黄色,但在酸中加热则脱羧成红色。在鸡羽毛中还发现毛发色素E和F,它们在酸性溶液中呈红色,在碱性溶液中呈紫色。毛发色素B、C、E、F结构已清楚,它们的母体化合物已于1974年由伯劳泰(G. Prota)等合成。

黑色素的物理性质和化学性质多以真黑色素为研究对象。真黑色素极难溶解,它能吸收可见光和紫外光,因此很难用一般光谱法研究。黑色素含有稳定的自由基,多巴黑色素的电子自旋共振谱(ESR)缺乏精细结构,黑色素的自由基性质可能是它防护

辐射的原因。除正常的电子自旋外,黑色素经可见光或紫外光照射还能诱发附加的不成对电子,因此推测在视觉的光化学过程中黑色素可能起某种作用,一般化学处理不影响黑色素的 ESR 信号,但用高浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  离子、顺磁性的  $\text{Cd}^{3+}$  等离子可影响其信号,说明这些离子影响黑色素 ESR 谱原因是磁相互作用而不是化学相互作用。

1967年布瑞恩格(F. W. Bruenger)和1976年伯茨(A. M. Potts)等人的研究资料表明,黑色素的化学性质一般很稳定,但对金属离子有很强的亲和力,亲和力随原子量和离子电荷增加而增大。如它对碱土金属离子亲和力比对碱金属离子大,在二价阳离子中  $\text{Pb}^{2+}$  亲和力最强,  $\text{Cu}^{2+}$  次之,  $\text{La}^{3+}$  和  $\text{Gd}^{3+}$  的磁性不同,化学性质相同,它们对黑色素的亲和力相同,说明决定亲和力大小的是化学性质而不是磁性。亲和力的另一种解释是黑色素中含有羧基、羟基等阴离子自由基,它们可与金属离子配位。黑色素可参与某些氧化还原反应,如它能氧化 NADH,还原铁氰化钾等。当黑色素与蛋白质结合后,其自由基活性点被掩盖,氧化还原能力大大降低。例如黑色素瘤中的黑色素与蛋白质结合后不能氧化 NADH,但经水解分离后,它却具有氧化 NADH 的活性。过氧化氢、过氧乙酸等氧化剂能破坏黑色素并使之褪色。浅黑色素可溶于稀碱溶液,用 ESR 研究表明它含有稳定的自由基。从黑色素瘤中提取的浅黑色素 ESR 谱比较宽和宽,并有精细结构。1979年,汉森(Hansson)等认为其中含有锰离子。漂白粉等强氧化剂可以使浅黑色素脱色、漂白。

人体中局部缺乏黑色素引起的疾病是“白癜风”,即局部皮肤脱色症,产生的原因可能与体内缺铜、使酪氨酸酶减少或活性降低有关。用铜类药物或紫外线辐射治疗,会增强酪氨酸酶及其催化活性,促进黑色素的生物合成,使病情缓解,但完全缺乏黑色素的“白化病”者,皮肤、毛发乃至全身粉白,害怕阳光辐射,这是一种先天的遗传病,患者体内缺乏合成酪氨酸或酪氨酸酶的功能,不能在皮肤、毛发和眼睛中生成黑色素,此病还没有彻底的根治方法。

恶性黑色素瘤的产生涉及黑色素细胞的癌变,了解黑色素的合成过程和性质对黑色素瘤的检测和治疗具有重要意义。检测皮肤表面的黑色素瘤并不困难,但恶性黑色素瘤的早期诊断却非易事。人们从黑色素瘤病人的尿或血液中检测黑色素合成的前体物质,从中寻找它们与恶性黑色素瘤转移的可能联系。1974年,恩格卢朴(G. Agrup)等认为黑色素瘤中真黑色素和浅黑色素可能同时存在,这两种黑色素的前体分别是多巴和5-S-Cys-多巴,它们在黑色素瘤患者的组织和尿中已检测到,虽然健康人尿中也含有多巴和5-S-Cys-多巴,但浓度较低,而发现某些黑色素瘤转移病人尿的多巴排泄有异常增加。毛发色素 B 和 C 在健康人尿中尚未检测到,但在恶性黑色素瘤转移病人尿中已发现这两种色素。对恶性黑色素瘤转移的早期发现最有意义的是5-S-Cys-多巴的生化检测。当恶性黑色素瘤转移时,患者尿中5-S-Cys-多巴出现异常增加。1973年,罗斯门(H. Rorsman)等用改进的荧光法测定色素组织和尿中的5-S-Cys-多巴,最小检测量可达0.025 $\mu\text{g}$ 。这种生化检测法已成为监视黑色素瘤转移的常规方法,但此法也有一定的局限性,主要是5-S-Cys-多巴的排泄量还与日光曝晒有关,夏天的排泄量比冬天高,因此在冬季检查效果最好,或检查前四周内避免日光曝晒。除了生化法分析人体排泄的黑色素前体外,还可以用放射性同位素示踪的黑色素前体,使其选择性地达到合成黑色素的地点,用于检测和破坏肿瘤细胞。这种示踪法也可以不用黑色素的前体,而利用氯丙嗪、磷奎宁等某些多环化合物与黑色素的特殊结合能力来搜寻黑色素,检测或治疗黑色素瘤。其中 $^{131}\text{I}$ 示踪的磷奎宁已用于检测人体黑色素瘤的转移。

黑色素的研究虽然取得一些进展,但还有一些尚待深入研究和亟待开发的领域,包括真黑色素的确切结构,黑色素的生物合成反应的详细机理,黑色素的性质和功能,恶性黑色素瘤转移的早期诊断和较有效的治疗白癜风、白化病、恶性黑色素瘤等病的方法,都是引人注目的重要课题。

参考文献

- 1 Chen Y M, et al. Anal Biochem, 1965, 13: 234
- 2 Jimbow K, et al. J Invest Dermatol, 1976, 63: 374
- 3 Baldry P A, et al. J Chem Soc Perkin Trans. I, 1977, 1346
- 4 Prota G. J Invest Dermatol, 1980, 75: 122
- 5 赵良仲. 生物化学与生物物理进展, 1981, 4: 18
- 6 Robb D A. Tyrosinase, in Copper proteins and copper enzymes (Lontie R. Ed) Vol II, CRC Press, Boca Raton, 1984, 208
- 7 Brown D W, et al. Biopolymers, 1990, 29(3): 609-22
- 8 季立才. 生命的化学, 1991, 11(1), 3

(武汉大学季立才副教授撰)

褪黑激素

melatonin 1917年, McCord 等报道了牛松果体提取物可使两栖类动物的皮肤漂白。1958年 Lerner 及其同事成功地从牛松果体中分离、纯化出这种可使青蛙皮肤褪色的物质,并命名为褪黑激素(MLT)。1959年,他又测定了 MLT 的结构。在尔后的10年中, Weissbach 等人运用酶分析方法, Kiern 等人运用松果体的体外培养技术进一步证明了 MLT 的合成过程,从而确定了松果腺是一内分泌腺体——松果腺,开创了对松果腺及褪黑激素性质、功能的研究。

**褪黑激素的分布、代谢及周期性变化** 褪黑激素(MLT)广泛存在于全身各组织、器官,以松果腺的含量最高。人松果腺约含0.05~0.4 $\mu\text{g/g}$ ,血浆约含15~90 $\mu\text{g/ml}$ ,脑内的含量约为血液的9倍,以下丘脑最高,脑干和小脑次之,端脑相对较低。除了松果腺之外,脑、视网膜、副泪腺、消化道的某些细胞都可合成及分泌 MLT。但 Pang 等人通过切除松果腺的实验证明,血液中的 MLT 主要来自子松果腺。

来自食物的色氨酸是 MLT 的合成原料,在色氨酸羟化酶和5-羟色氨酸脱羧酶的联合催化下生成5-羟色胺(5-HT),在松果腺合成的5-HT并不作为神经递质,主要作为 MLT 生物合成的前体。在乙酰辅酶A的参与下,在N-乙酰转移酶(NAT)的催化下生成N-乙酰-5-羟色胺(N-A-5-HT),后者在羟基吲哚氧位甲基转移酶(HIOMT)的催化下,由S-腺苷蛋氨酸供给甲基,生成 MLT。每克人松果腺组织每小时能合成200 $\mu\text{g}$  MLT。

MLT 由松果腺细胞分泌后,通过腺体的毛细血管网直接进入人周围的静脉,血中 MLT 约60%~70%与血浆蛋白(主要是白蛋白)结合, MLT 在血中的半衰期约20min。大部分 MLT 通过血液循环至肝脏时,经酶的作用使6位羟化而失活,一部分在肝脏脱去乙酰基或吲哚环裂解而失活,代谢产物及少量 MLT 可直接通过尿、粪排出。

哺乳动物的 MLT 分泌呈现日节律性。通常 MLT 白天分泌量低,夜间可上升4~5倍。这种节律变化与光照、温度等环境因素有关。Reiter 等人在夜间给动物光照,可抑制 MLT 的分泌,血中 MLT 可降至白天水平。实验证明,黑暗可使支配松果腺神经元兴奋,其末梢释放去甲肾上腺素(NE)作用于 $\beta$ 受体,通过cAMP使 NAT 及 HIOMT 酶的活性上升,从而促进 MLT 的分泌,光照则相反。除了日节律外,女性血中 MLT 波动还与月经周期同步,排卵前 MLT 降至最低,月经来潮时达最高。由于 MLT 的分泌受光照、温度等环境因素的影响,因此,许多动物受一年四季日照长短、气温变化的影响而表现出 MLT 分泌的年变化节律,在远离赤道地区的动物尤其明显。

随着年龄增加, MLT 分泌量逐渐下降,以晚上分泌量下降为主。Reiter 等人的分析表明,29月龄大鼠与2月龄大鼠相比,白天 MLT 下降不明显,而晚上分泌量仅为2月龄大鼠的四分之一。

**褪黑激素的生理作用** (1)对生殖的影响。Reiter 等人的大量研究证明, MLT 对生殖系统有较强的抑制作用。随年龄增加, MLT 晚间分泌量下降与动物的性成熟密切相关。对幼年动物增加光照时间以减少 MLT 的分泌量,或者切除松果腺,都可使动物出现性发育提前,睾丸、卵巢的重量明显超过对照组动物。

Lang 等给出生20d的小鼠每天天亮9h后注射MLT,并分别在30、40、50、60、80、100、115d后杀死动物进行观察,发现持续注射MLT可使性成熟平均延迟20~30d。Reiter等人发现,某些季节性动物、短日照、寒冷引起MLT分泌量上升可导致动物性器官及副性器官功能减退和萎缩,睾丸和子宫幼稚化,从而控制了动物的动情周期。Gupta等人对临床性发育迟缓者的血样分析表明,患者晚间MLT的分泌量远远高于同龄人,与性发育前的儿童相似。MLT对生殖系统的作用机制目前尚不明确。Glass等人认为,MLT可直接作用于下丘脑视前区的多巴胺(DA)能神经元,抑制其轴突末梢 $Ca^{2+}$ 的内流,从而减少DA的释放量,由此减少受DA支配的促性腺素释放激素(GnRH)细胞释放GnRH。MLT还可直接作用于GnRH细胞上的MLT受体,外源MLT可抑制脑内及卵巢前列腺素(PG)的合成以及PGE和PGF的释放,而前列腺素与下丘脑激素的释放以及卵巢的功能有关,故认为MLT的作用可能是通过PG中介的。(2)对脑的影响。注射 $^3H$ -MLT的实验结果表明,脑内的吸收量远大于其他组织。同样,脑内的受体密度大于其他组织。其中以下丘脑、海马最高,脑干和小脑次之,端脑较少。这说明,脑是MLT的重要靶器官。对脑机能的主要影响如下:影响下丘脑的内分泌机能。注射MLT后,可明显抑制TSH、MSH、GH、FSH、LH、ADH的分泌。当切除松果腺后,可促进甲状腺体的生长,也影响甲状旁腺的分泌节律,使PRL的分泌受到抑制。对ACTH的测定结果不太一致,大部分学者认为MLT可使血液中ACTH含量上升,促进肾上腺皮质激素的分泌。去松果腺后,至少可看到ACTH分泌节律的紊乱或消失。Gupta等认为,内分泌系统的这些变化,都是MLT作用于下丘脑的内分泌细胞而引起的。对大脑机能的影响。MLT有较强的镇静和催眠作用。在猫和视前区植入MLT结晶体,15~30min后,皮层EEG出现同步化。给健康人注射MLT15~20min后即可引起睡眠。去松果腺的动物出现睡眠节律被破坏,小鸡的EEG去同步化,还可引起蒙古沙土鼠惊厥。脑室注射MLT,可抑制或减弱由感觉刺激诱发的癫痫样放电活动,这一效应可被纳洛酮翻转。MLT的抗癫痫效应与海马活动有关。MLT还有明显的镇痛效应,不仅可加强吗啡的镇痛效果,本身也有直接的镇痛作用,但其镇痛显效慢,效果较吗啡弱,持续时间长,可被纳洛酮翻转。另外,也有实验证明MLT可影响动物及人类的学习与记忆过程。MLT对脑的作用机制是多方面的。在脑内存在高亲和力的MLT膜受体,在大鼠的下丘脑、中脑、海马和纹状体还存在MLT胞液受体,以下丘脑和海马的受体对MLT的亲合力最高。MLT可能直接作用于脑细胞,通过PG、CAMP或CGMP的介导而影响细胞的机能。也有人认为,MLT还可作用于中脑的5-HT神经元,后者影响下丘脑的内分泌机能和皮层的兴奋性。许多实验证明,注射MLT可引起脑内5-HT、GABA、ACh、NE及 $\beta$ -EP等多种递质含量发生变化。(3)对免疫系统的影响。MLT对免疫机能的影响研究较晚,但已有实验证明,MLT可以提高机体的免疫功能。当机体受到物理、化学或病原微生物刺激而产生应激反应时,下丘脑、垂体部位可产生阿片样物质,同时,淋巴细胞也产生阿片激动剂,以提高机体的免疫能力。Maestroni等的一系列实验表明,MLT不仅可促进脑内释放阿片样物质,也可引起体外培养的淋巴细胞释放阿片激动剂。Del Gobbo等发现,切除小鼠松果腺后,血中的白细胞介素-2(IL-2)含量及NK细胞活力明显低于正常,当注射MLT后,IL-2含量及NK细胞活力又恢复正常。Feroli发现去松果腺小鼠可促进体内肿瘤的生长。Maestroni给健康人及免疫缺陷病人(包括爱滋病)午后口服MLT(20mg/d)后,发现血中的NK细胞及null细胞的数量及活力上升免疫功能得到改善。MLT对免疫系统的作用除了通过对中枢内分泌功能的调制外,还可能直接作用于外周免疫器官及淋巴细胞而实现的。

综上所述,MLT的作用是多方面的,其在生命活动中的地位仍然是一个谜。Armstrong等人认为,MLT作用主要通过通过对下丘脑内分泌的机能的调制而实现的。然而,最近的受体分析证

明,MLT受体广泛存在于全身各处的组织、细胞,因此,其外周作用不容忽视。由于MLT作用的广泛性,其是将机体的生理活动与环境的周期性变化相适应的中介物,是机体内的定时器。这种功能在胚胎期就已建立。MLT通过调节激素的分泌,神经系统的活动及免疫系统的功能,调节多种受体的敏感性,达到控制生理活动的节律性,控制个体的生长、发育、衰老乃至死亡整个生命周期(Maestroni实验表明,长期喂饲MLT的小鼠寿命比对照组动物长20%)。因此,对MLT生理功能的进一步探讨,对其作用机制的研究以及MLT的临床应用存在着广阔的前景。

(华东师范大学袁崇刚副教授撰)

**生长激素** growth hormone, GH 脊椎动物脑下垂体前叶 $\alpha$ 细胞分泌的一种不含糖的单链多肽,是脊椎动物正常生长发育所必需的重要激素。它对除神经组织以外的所有组织的生长均有刺激作用。其作用在于诱导分泌生长调节素以刺激软骨生长,使脑内积累增加氨基酸,促进蛋白质的合成;抑制肌肉组织对葡萄糖的利用而加速对脂肪组织的分解利用;还可以加强其它激素的作用等。

1970年, H. C. Chen等用沉降平衡法测定猪生长激素(pGH)分子量为22 000。以后的研究结果表明各种动物的GH的分子量很相似,平均分子量大约22 000。1983年, P. H. Seeburg等测定pGH由190个氨基酸残基组成,目前已知人、羊、牛等许多种动物的氨基酸顺序。人们对GH的经济作用也进行了许多研究。1972年, L. J. Machlin等、1985年, C. S. Chang等的研究表明给猪注射GH可使猪日增重提高6%~10%、增加瘦肉率、缩短育成期。1974年, Reklecska的研究表明给羊注射GH可以提高产毛量。1983年, C. J. Pell, 1985年, P. J. Eppard和D. E. Bauman等的研究表明给牛注射GH可以提高产奶量。而人生长激素(hGH)则是对缺乏这种激素的儿童进行治疗的唯一方法,研究表明每周肌肉注射6mg的hGH,治疗第一年身高可能增加6cm以上,而且还在探索用于改善烧伤、伤口和骨折的愈合、治疗缺陷性痰同化作用恶病质。70年代以前,人们只能利用天然的动物垂体提取GH, 1949年P. M. Cotes从牛垂体腺中分离出生长激素(bGH), 1963年Roos从尸体的垂体腺中分离出hGH并进行纯化。但正常垂体所含GH量很少, 1981年从一个尸体的垂体腺中仅能提取到4到6mg的hGH, 1986年, 产红高等从5 000个猪脑垂体中仅制得0.5g高纯度pGH。所以随着70年代后重组DNA技术的诞生,人们开始探索用基因工程方法生产GH。

在基因工程发展中, GH是第2个通过cDNA合成获得基因并在大肠杆菌(E. coli)中表达的。1977年, P. H. Seeburg等提取大鼠mRNA, 经反转录合成了大鼠GHcDNA, 通过粘性末端插入到质粒pBR322的内切酶Hind III切点。次年, 又将其插入到pBR322的Pst I切点, 构成重组质粒并在E. coli中实现表达, 为利用DNA重组技术生产GH开辟了道路。1979年, W. G. Roskam等将hGH的结构基因的重组质粒转化进E. coli C600中, 对1100个转化分子进行了菌落原位杂交和筛选, 酶切图谱分析证明实现了hGH基因的分子克隆, J. A. Martial等, D. V. Goeddel等分别采用不同的技术路线完成了hGHcDNA的体外重组和表达, 加州大学的Goodman实验室用反转录方法得到cDNA, 对hGH基因进行分离并在细菌中使之扩增。1980年, W. L. Miller等合成了bGHcDNA。1981年, 1982年, Keshet E.等先将bGH基因在E. coli HB<sub>101</sub>中实现表达后在E. coli HB<sub>101</sub>中构造了E. coli pBR及其衍生物——携带bGH基因的序列并使这一序列实现表达。1982年, R. P. Woychik等将bGH基因进行了克隆并对其核苷酸顺序进行了分析, 确定bGH完整基因约1800bp, 含4个间隔序列。1983年, P. H. Seeburg等分别从牛、猪脑垂体中提取Poly(A)mRNA, 反转录得到cDNA, 并以pBR322质粒为载体分别将其克隆到E. coli中实现了表达。1984年, 美国Amgen基因公司进行了鸡生长激素的研究, 同年, 日本的M. Ikehara等用化学方法合成了编码hGH192个氨基酸的基因, 并把此基因从

*E. coli* 色氨酸启动子开始插入到 *E. coli* 质粒的下游。1985年,日本 Susumu Sekien 等用 mRNA 反转录方法合成鲑鱼的 GHcDNA,并在细菌中实现了克隆和表达及分析了鲑鱼基因的核苷酸顺序。1986年,Luis B. 等将虹鳟鱼 cDNA 在 *E. coli* 中进行克隆和表达,并分析了虹鳟 GH 基因的核苷酸顺序。1987年,李显奎等用改进的 LiCl 沉淀法和寡聚(dT)-纤维素亲和层析法由猪垂体制得总 mRNA,反转录合成 cDNA,王华岩等将 cDNA 克隆到质粒 pUC<sub>19</sub> 中,用以转化 *E. coli* JM<sub>107</sub>,得到 2 500 个重组克隆,采用 pGH 探针进行原位杂交,筛选到 2 个阳性克隆,酶切分析证明克隆了 pGHcDNA。同年,D. Peter 等用寡聚核苷酸做引物直接改变 5' 端非编码区顺序,可使 pGH 基因在 *E. coli* 中的表达率提高 15%。1988 年澳大利亚 J. M. Orian 等把羊的 GH 基因克隆到载体 EMBL<sub>4</sub> 中并分析了基因顺序,发现在编码区有 97.5% 的密码子与牛的同源,东京大学 Miki Yato 等分析了山羊 GH 基因顺序,得到长 880bp 的 cDNA,东京实验室的 Akiko Saito 等在 *E. coli* 中克隆并表达了鳟鱼 GH 基因并分析了基因核苷酸顺序,台湾大学的 Huang Tsuchen 等提纯并克隆了鸭 GH 基因,并分析了其核苷酸顺序,日本 Nobuyuki Sato 等提纯并在 *E. coli* 中克隆了金枪鱼 GH 基因,并分析其核苷酸顺序,表明此 cDNA 由 911 个核苷酸组成。1989 年,Yair Koren 等将鲤鱼的 cDNA 克隆并分析了其核苷酸顺序,J. Lorens 分析了大西洋鲑鱼 GHcDNA 的顺序,贾锋等将 pGHcDNA 连接到 pUC<sub>19</sub> 的 SmaI 位点,转化到 *E. coli* JM<sub>107</sub>,酶切证明克隆了全长 pGHcDNA。1990 年,苏梯之报道将 pGHcDNA 进行了重组,再克隆到表达载体 PKK<sub>223-3P</sub> 和 P<sub>1PR</sub>,用抗 pGH 血清免疫沉淀法证明实现了 pGH 基因的表达。总之,近年来 GH 基因工程成为基因工程研究中较活跃的方面。在许多种动物中进行了研究,并在方法和技术路线上有许多探索,从基因的获得,载体的选择,重组 DNA 的构建,一直到克隆,表达各环节上都有发展和改进。

虽然 GH 的基因工程研究进展很快,但其大量生产问题尚未得以解决,所以探索 GH 基因的高效表达途径进而大量生产以至工厂化生产是目前和近年内的研究热点。如目前已发展了相当数量的载体,以改建的 λ 噬菌体为载体,将质粒中的有效片段插入到 λ 噬菌体中构成了 λgt<sub>10</sub>、λgt<sub>11</sub>、λgt<sub>12</sub> 及 λGEM<sup>-2</sup>、λGEM<sup>GEM-4</sup> 等,这些载体可获得大量重组 DNA,使克隆效率提高 10~50 倍。另外对各种动物 GH 的经济作用及作用机理、作用效果的研究有待进一步加深。美国已批准上市注射用 hGH 用于治疗儿童生长激素缺陷症及 bGH 用于提高产奶量,所以以基因工程方法大量生产 GH 用于治疗疾病和提高家畜生产性能,已成为极需深入开发的重要领域。

参考文献

- 1 Seeburg P H, et al. Nucleotide sequence and amplification in bacteria of structural gene for rat growth hormone. *Nature*, 1977, 270(5637): 486~494
- 2 Seeburg P H, et al. Synthesis of growth hormone by bacteria. *Nature*, 276: 795
- 3 Roskam W G, et al. Molecular cloning nucleotide sequence of the human growth hormone structural gene. *Nucleic Acids Res*, 1979, 7(2): 305~320
- 4 Miller W L, Martial J A, Baxter J D. Molecular cloning of DNA complementary to bovine growth hormone mRNA. *J Biol Chem*, 1980, 255(16): 7521
- 5 Woychuk R P, et al. Cloning and nucleotide sequencing of the bovine growth hormone gene. *Nucleic Acids Res*, 1982, 10(22): 7197~7210
- 6 李显奎,等.猪垂体总 mRNA 的提取,鉴定及其 cDNA 的合成. *生物化学杂志*, 1987, 3(3): 245~251
- 7 王华岩,等.猪生长激素基因(cDNA)的分子克隆. *北京农业大学学报*, 1987, 13(4): 379~386
- 8 Jacqueline M Orian, et al. cloning and sequencing of the

ovine growth hormong gene. *Nucleic Acids Research*, 1988, 16(18): 9046

- 9 贾锋,等.猪生长激素 cDNA 的分子克隆. *生物化学杂志*, 1989, 5(2): 136~142
- 10 苏梯之,等.猪生长激素 cDNA 重组及在大肠杆菌中表达. *生物化学与生物物理学报*, 1990, 22(2): 111~119

(东北农学院刘焯撰,盛志廉审)

**钙调素** calmodulin, CaM 钙调素的发现是 20 世纪 70 年代自 DNA 重组以来分子生物学领域最重大的发现之一。CaM 在生物细胞的各种过程中发挥着重要的调节作用。多年来,对这种蛋白质的研究十分活跃,为生物学开辟了一个新领域。

1967~1970 年间美籍华人张槐耀研究牛脑中环磷酸腺苷(cAMP)特异的磷酸二酯酶(PDE)活性时发现 CaM。起初还认为它是 PDE 激活剂,此后逐步认识到,它是一种具有多种调节功能的钙调节蛋白,广泛存在于生物体的真核细胞内,是细胞内信使 Ca<sup>2+</sup> 的重要受体,传递 Ca<sup>2+</sup> 对各种细胞功能调节信息。

这种物质曾先后有过多种名称,1978 年确定了 *Calmodulin* 的命名。1987 年,中国第 1 次钙、钙调蛋白与细胞功能专题会议(徐州)建议将 calmodulin 中文译为钙调素,缩写为 CaM。

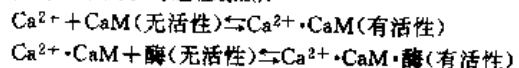
哺乳动物的许多组织中 CaM 含量丰富,大多数细胞为 μM 水平,其中以脑和睾丸含量最丰富,约占总蛋白含量的 0.2%~0.4%。在细胞周期的不同时期,CaM 分布也不相同。1986 年韦尔斯(M. J. Welsh)等发现:在间期 CaM 主要分布在细胞质的纤维性结构上,到了前期细胞质中 CaM 则变为弥散状分布,前中期时 CaM 主要分布在半纺锤体上,中期及后期 CaM 转移到染色体与纺锤体极之间,而未期则只在两极有 CaM 分布。植物 CaM 一般是在生长活跃、积极进行分裂的细胞中比较多,并发现 CaM 与植物输导组织的运输功能、植物纺锤体微管功能有关。

1986 年沃特朗(D. M. Watteron)等报告,牛脑的 CaM 具有 148 个氨基酸残基。该蛋白分子可分为 4 个区域,每个区域约包含 30 个氨基酸。第 1 区(8~40 残基)与第 3 区(第 81~113 残基)排列在一起,而第 2 区(44~76 残基)与第 4 区(第 117~148 残基)排列在一起。从原生动物四膜虫所纯化的 CaM,测得它由 147 个氨基酸残基所组成,其氨基酸末端被乙酰化。和牛脑的 CaM 相比,共有 11 个氨基酸残基发生了取代,少了一个氨基酸残基。苜蓿的 CaM 序列与牛脑的 CaM 相比,仅 13 个氨基酸的区别。在生物交叉反应中,发现牛脑 CaM 抗体可以识别棉花种子中的 CaM。表明 CaM 是一种进化上古老的、保守的蛋白质。

CaM 是一种耐热、酸性(等电点 3.9~4.3)、疏水性,分子量不同的球状小分子蛋白质,标准分子量为 16.7KD。CaM 分子上有两种结合 Ca<sup>2+</sup> 的部位,化学性质稳定,对多种酶结合有利。植物 CaM 的氨基酸组份与动物基本一致,所不同的仅在于植物有一个半胱氨酸残基,而且酪氨酸(1 个)比动物中(2 个)为少。CaM 的吸收光谱特点是 253、259、265、269、277nm 处有数个吸收峰。植物与动物来源的 CaM,其差别仅在于植物在 277nm 处吸收峰不明显。

CaM 的另一重要特性是可以相当专一地与一些药物结合,如某些抗精神病药物和局部麻醉剂。钙调素与这些药物结合后,就不能再与酶结合。因此,这些药物被称为 CaM 抑制剂,而用来探索 CaM 在细胞中调节功能。

CaM 的调节功能与 Ca<sup>2+</sup> 相关。CaM 具有 4 个 Ca<sup>2+</sup> 结合区,在静息状态下,细胞内 Ca<sup>2+</sup> 浓度很低,在 10<sup>-7</sup>M 以下,此时 CaM 无活性。当细胞受到外界有效刺激后,细胞内 Ca<sup>2+</sup> 浓度短暂上升达 10<sup>-5</sup>M,这一生物应答信号的传递以 CaM 为媒介。此时, CaM 与 Ca<sup>2+</sup> 结合并使其自身的构象改变,暴露疏水区,该区能与靶酶(CaM 依赖酶)相互作用,形成一个有活性的全酶。CaM 的作用可概括为以下两步可逆性反应:



当  $Ca^{2+}$  浓度降低到静息水平时, CaM 与  $Ca^{2+}$  离解, 酶活性亦降低到基础水平。

CaM 对细胞中酶的调节是多种多样的。除了在环核苷酸代谢中调节腺苷酸环化酶、磷酸二酯酶, 以及在蛋白质磷酸化作用中调节需要  $Ca^{2+}$  的蛋白激酶(PK)外, 还在肌动球蛋白收缩作用中调节肌球蛋白的轻链激酶, 在糖代谢中调节磷酸激酶, 在 Ca 泵中调节  $Ca^{2+}$ -Mg<sup>2+</sup>-ATP 合成酶, 在递质释放中调节需要  $Ca^{2+}$  的蛋白激酶。CaM 在突触的广泛分布和高活性, 表明它对突触的功能有重要调节作用。首先它刺激突触特异蛋白质磷酸化, 尤其是激活依赖 CaM 的蛋白激酶。

CaM 在细胞分裂过程中具有重要作用。在分裂中期, 染色体位于赤道区时, CaM 直接调节微管的聚合和解聚, 从而参与染色体运动。

CaM 对生物的生理功能是相当复杂的, 可以将其作用顺序分三步。(1)钙通道的开放。细胞膜上的受体蛋白分子接受信号后, 便开启了  $Ca^{2+}$  的载体, 通道打开,  $Ca^{2+}$  便流入细胞质内。(2)效应物蛋白的作用。在细胞质内  $Ca^{2+}$  结合到作为效应物的专一性蛋白质 CaM 上, 然后 CaM 便与专门的酶结合, 从而酶活化。(3)活化蛋白质的效应。含于 CaM 中的  $Ca^{2+}$  使专一性酶活化, 通过序列反应, 被活化的酶对靶细胞产生生理和药理学反应。

在细胞核中, CaM 与 DNA 的关系已得到初步揭示。细胞进入 DNA 合成期时, 需要足量的 CaM, 表示 CaM 可能影响 DNA 的合成。在一些动物细胞中, 还发现 CaM 拮抗剂抑制 DNA 的修复, 暗示 CaM 在 DNA 修复过程中亦起着某种调节作用。线粒体 CaM 的功能目前还不清楚, 但在动物线粒体中有 CaM 结合蛋白, 并发现 CaM 与线粒体的呼吸调节有关。许多 CaM 靶酶存在于细胞溶质部分, 细胞溶质 CaM 可能是通过直接影响其靶酶活性或通过对蛋白质磷酸化过程的控制, 而调节细胞生理过程。大量研究已证实, CaM 与信息跨膜传递、血小板凝集、癌细胞增殖、光合作用、胞内 DNA 的合成和皮肤纤维细胞低密度脂蛋白的合成等过程有关。CaM 还参与神经递质的合成与释放, 并与轴浆运输有密切的关系。可以说凡是与  $Ca^{2+}$  有关的生理现象, 几乎都与 CaM 有关。

在疾病防治方面, 如发现某种疾病的发生机制与 CaM 有关, 就可能用 CaM 拮抗剂治疗这种疾病。比较成功的例子是牛皮癣病, 1984年弗哈杰(A. Verhagen)等发现, 牛皮癣患者的皮肤细胞中 CaM 的浓度较高, 而且磷脂酶  $A_2$  的活性也比较高, 该酶受 CaM 的调节。1986年汉伯特(P. Humbert)等在治疗牛皮癣的药物中加入了 CaM 拮抗剂氯丙嗪, 收到明显疗效。几乎所有的恶性转化细胞中, CaM 的含量均有大幅度增加(至少升高2倍)。在体外培养中, CaM 拮抗剂可明显抑制肿瘤细胞与转化细胞的增殖。

CaM 不仅能促进胰岛素介导的胰岛素受体  $\beta$ -亚基磷酸化, 而且也能激活胰岛素介导的组蛋  $H_2B$  的磷酸化。胰岛素受体和 CaM 相互磷酸化, 在胰岛素作用机制中具有重要意义。它们分别通过影响胰岛素受体蛋白激酶活性和细胞内  $Ca^{2+}$  调节的两个主要途径, 来调节细胞代谢。深入研究 CaM 和胰岛素受体以及蛋白激酶 C 之间相互关系, 对于阐明含氮激素作用机理, 生物信息在细胞内的传递, 揭示细胞的代谢调节、生长、分化、增殖乃至癌变的本质等, 都具有重要意义。

CaM 本身无活性, 它执行生物学功能的关键在于它能够和钙调素结合蛋白(CaM-binding protein, CaMBP)结合, 从而引起 CaMBP 生物学活性的改变, 进而产生生理效应。正如通过寻找新的钙结合蛋白(CaBP)来研究  $Ca^{2+}$  的功能一样, 研究新的 CaMBP 已成为探索 CaM 未知功能的一个重要课题。

#### 参考文献

- 1 奇云. 钙调素. 广东生化通讯, 1988, 5: 107~109
- 2 奇云. 钙调素. 生物学杂志, 1990, 1: 6~8
- 3 Mckenon T A, et al. Calcium ion improves electrophoretic transfer of calmodulin and other small proteins. Anal

Biochem, 1991, 193: 125~130

- 4 Sellers P, et al. Thermodynamics of  $Ca^{2+}$  binding to calmodulin and its typtic fragments. Biophys Chem, 1991, 39: 199~204
- 5 Linse S, et al. Calcium binding to calmodulin and its globular domains. J Biol Chem, 1991, 266: 8050~8054

(安徽省淮南职业医专奇云副教授撰)

#### 抑制素

由性腺产生的一种糖蛋白激素, 由双硫键联结的两个不同的亚单位(即  $\alpha$  和  $\beta$  肽链)组成, 抑制垂体促性腺激素(尤其是滤泡刺激素 FSH)的产生和分泌。抑制素在人类和动物生殖生理活动中占有非常重要的地位, 并为人们寻找特异性干扰精子发生和滤泡生长的节育途径, 以及探索不育症的机理揭示了一个崭新的领域。

1923年莫特拉姆(J. C. Mottram)和克拉默(W. Cramer)推测睾丸曲细精管上皮分泌一种能够影响腺垂体细胞的特殊因子。1932年麦克拉夫(D. R. McCullagh)证明了促性腺激素增加和睾丸严重损伤的关系, 1951年纳尔逊(W. D. Nelson)确定了精子发生与 FSH 分泌有关。1966年斯坦伯杰(E. Steinburger)认为抑制素可能产生于输精管。1972年塞特切尔(B. P. Setchell)及其同事首次证实羊睾丸网液抑制素的存在, 与此同时, 弗兰奇蒙特(P. Franchimont)等人用正常人精液注射给去势雄性大鼠证明对垂体分泌 FSH 的负反馈作用。由此, 将抑制素这一领域的研究工作引向深入, 特别是随着蛋白质提纯放射免疫分析及分子生物学等技术的广泛应用, 使抑制素的研究工作取得了突破性的进展。

抑制素由双硫键联结的  $\alpha$  和  $\beta$  亚单位为不同基因产物。现已提纯及克隆了大鼠、猪、牛、羊和人抑制素  $\beta$  亚单位。抑制素  $\beta$  亚单位有两种, 即  $\beta_A$  和  $\beta_B$ , 已从大鼠、猪和人的卵巢中分离获得, 并确定了基因序列。另外, 研究者又从睾丸间质细胞和卵巢滤泡液中获得激动素(activin), 并证实为抑制素  $\alpha$  亚单位的二聚体, 即  $\beta_A\beta_A$ 、 $\beta_B\beta_B$  或  $\beta_A\beta_B$ , 亦可称为激动素 A、B 和 A-B, 能够刺激培养垂体细胞释放 FSH。根据抑制素的不同来源(精囊或前列腺), 分为  $\alpha$  抑制素和  $\beta$  抑制素。 $\alpha$  抑制素和  $\beta$  抑制素之间, 或与由卵巢分离的抑制素  $\alpha$  亚单位和  $\beta$  亚单位之间, 无任何同源之处。抑制素和激动素、转移生长因子  $\beta$  (TGF- $\beta$ )、红细胞分化因子(EDF)、苗勒氏抑制物(MIS)及 decapentaplegic 基因复合体(DPP-C)等转录物质都属于同一生长和分化调节基因族。

1985年伶(N. Ling)等从猪滤泡液分离两种形式(A和B)的抑制素, 即同一  $\alpha$  亚单位和不同  $\beta$  亚单位( $\beta_A$  和  $\beta_B$ ), 并证实其分子量为 32 000,  $\alpha$  和  $\beta$  亚单位分子量分别为 18 000 和 14 000, 弄清了两个亚单位 N 端 10 个氨基酸序列。同年麦森(A. J. Mason)等应用 N 端序列资料, 推导出  $\alpha\beta_A$  和  $\beta_B$  亚单位的肽类一级结构。两种形式的猪滤泡液抑制素都具有同样的生物活性, 在体外抑制垂体 FSH 的分泌。后来麦森等从人卵巢 mRNA 获得 cDNA 文库, 以猪滤泡液抑制素  $\alpha$ 、 $\beta_A$  和  $\beta_B$  亚单位 cDNA 作杂交探针, 获得人滤泡液抑制素  $\alpha$ 、 $\beta_A$  和  $\beta_B$  亚单位前体。其中,  $\alpha$  亚单位前体蛋白包含 335 个氨基酸, 分泌 134 个氨基酸的成熟人滤泡液抑制素  $\alpha$  亚单位;  $\beta_A$  和  $\beta_B$  亚单位前体蛋白分别包含 398 和 359 个氨基酸, 分泌成熟人滤泡液  $\beta_A$  和  $\beta_B$  亚单位分别包含 116 和 115 个氨基酸。1989年基南(D. Keinan)等应用猪和人卵巢抑制素  $\alpha$  亚单位核苷酸序列, 获得入睾丸抑制素  $\alpha$  亚单位前体蛋白为 336 个氨基酸, 成熟睾丸抑制素  $\alpha$  亚单位由 134 个氨基酸组成。

抑制素产生和分泌受促性腺激素和性类固醇激素的调节。在睾丸和卵巢抑制素可增加促黄体激素(LH)刺激雄激素的产生, 在胎盘分泌抑制素可抑制人绒毛膜促性腺激素(HCG)、促性腺激素释放激素(GnRH)和孕酮的分泌。在促性腺激素的调节下, 抑制素控制卵巢滤泡生长和排卵率以及睾丸的生精活动。研究者已从人、猴、羊、大鼠和小鼠丸中检出抑制素  $\alpha$  亚单位 mRNA; 人胎盘和猪卵巢也存在  $\alpha$  亚单位 mRNA, 其分子量(约

15 000)与灵长类和啮齿类睾丸 $\alpha$ 亚单位 mRNA 含量下降,揭示其基因表达需要垂体促性腺激素的维持。大鼠卵巢除了颗粒细胞外,内膜细胞,间质细胞及黄体细胞也均存在 $\alpha$ 亚单位 mRNA;不仅在成熟滤泡的颗粒细胞中,而且在各期滤泡的颗粒细胞中检出了 $\alpha$ 亚单位的 mRNA;在人黄体中检出了 $\alpha$ 和 $\beta$ 亚单位 mRNA;在颗粒细胞和黄体 $\beta_A$ 和 $\beta_B$ 亚单位 mRNA,随动情周期变化而发生明显变化。除了卵巢和睾丸以外,胎盘、垂体、肾上腺、骨髓、肾脏、脊髓和脑等部位也存在 $\alpha$ 、 $\beta_A$ 和 $\beta_B$ 亚单位的基因表达物质,而且在未成熟时含量高。由此推测,抑制素可能在脑和脊髓系统发挥神经调节功能;在胎盘和垂体可能通过外源抑制素调节,发挥旁分泌和自分泌作用;在骨髓 $\beta_A$ 亚单位 mRNA 超过 $\alpha$ 亚单位 mRNA,而且人类白血病细胞产生激动素,因此激动素 A 可能是红细胞分化的重要调节物质;在肾上腺皮质能够产生和分泌抑制素样肽,并存在 $\alpha$ 亚单位 mRNA,受促肾上腺皮质激素( ACTH)作用,可能发挥激素间的调节作用,激动素 A 也对 ACTH 刺激的肾上腺皮质类固醇生成直接的抑制作用。总之,抑制素和激动素对调节组织生长和分化(包括性腺)起到重要作用。

睾丸间质细胞提取物含有抑制素 $\beta$ 亚单位 mRNA,而无 $\alpha$ 亚单位 mRNA,说明间质细胞存在激动素;睾丸支持细胞不存在抑制素 $\beta$ 亚单位 mRNA 而含有 $\alpha$ 亚单位 mRNA,说明支持细胞不存在激动素。在未成熟和成年大鼠睾丸间质细胞含有抑制素及其亚单位的 mRNA,但是给予成年大鼠 LH 样激素不能刺激间质细胞产生抑制素。在动情周期中,抑制素 $\alpha$ 和 $\beta$ 亚单位表达的各自独立的改变,可能是由于抑制素和激动素两者精细地调节 FSH 释放的结果。在未成熟的灵长类卵巢颗粒细胞,激动素使芳香化酶对 FSH 应答的芳香化酶活性起到直接刺激作用,并且抑制 LH 刺激激素孕酮的产生,而抑制素则无副作用。用重组的激动素处理培养人卵泡内膜细胞可抑制通过 LH 和胰岛素样生长因子 I(IGF)刺激雄激素的生产;相反,重组抑制素明显地使之增加。1991年希利尔(S. G. Hillier)提出,抑制素和激动素增加卵泡细胞雄激素合成以维持颗粒细胞层雌激素合成过程中形成一个正反馈环。

抑制素的研究前景广阔,有许多问题值得探讨。抑制素的产生部位尚未完全清楚,其基因表达部位正在探索中。进一步弄清抑制素的产生部位,并对其基因表达部位的系统化有十分重要的意义。人们还应深入探讨抑制素和激动素在局部调节的作用机理,阐明两者与旁分泌系统许多物质在促进性腺激素作用下的相互关系。以往,有关抑制素的大量研究资料是从体外实验获得的。进一步工作应着眼于体内的研究,这样可获得抑制素在体内环境下的实际生理效应。抑制素的研究工作还仅限于实验室,抑制素的纯品和检测药盒还没有商品化,这就大大限制了这一领域的深入研究。今后在这一研究领域中还会取得更大的突破性成果。

(白求恩医科大学预防医学院龚守良教授撰)

### 金属离子与生物膜上膜脂的作用

the interaction between metal ions and membrane lipids 生命活动的基本单元是细胞,细胞上的物质除水之外,大部分存在于各种膜结构上。几乎所有重要的生命活动都是在生物膜上进行的。金属离子是生命活动中不可缺少的。金属离子与生物膜的作用影响着,在某些情况下决定着生物膜上的生命活动。

膜脂分子上基团的运动状态和膜脂分子的聚集状态决定膜的基本特性。所以,生物膜的相状态在离子—生物膜的相互作用的研究中首先被注意。由于生物膜的组成和结构极其复杂,所以,这方面的研究几乎都是在人工生物膜(脂质体, Liposome)上进行的。差示扫描量热(DSC),荧光光谱,顺磁共振,核磁共振,拉曼光谱,富利埃红外等都已用于这方面的研究。1974年查普曼(D. Chapman)等用 DSC 研究  $UO_2^{2+}$  对电中性的双棕榈酰磷脂酰胆碱(DPPC)脂质体的相变的影响时看到了  $UO_2^{2+}$  使脂质体的相变峰位移,同时出现新峰。同年,特劳伯利(H. Trauble)等用 N-芳基-萘胺(NPN)做为荧光探针研究了  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  和  $Mg^{2+}$ ,

$Ca^{2+}$ ,  $Be^{2+}$  等对阴离子型的磷脂酸(PA)脂质体的相变的影响。结果表明碱金属离子使相变温度降低而  $Mg^{2+}$  等使相变温度提高。此后,有大量这方面的研究报道。其中1977年查普曼(D. Chapman)等,杰因(M. K. Jain)等进行了系统的研究。1978年,范迪克(P. W. M. Van Dijck)等报道了  $Ca^{2+}$  引起的双组份的脂质体膜上的侧向相分离。1979年维尔(W. J. Vail)等,1987年蒂尔科克(C. P. S. Tilcock)等报道了  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  等使含有心磷脂(CL)的脂质体和由磷脂酰丝氨酸(PS),磷脂酰乙醇胺(PE)制成的脂质体出现六角 I 型( $H_I$ )相。1981年威尔斯特(J. Wilschut)等认为  $Ca^{2+}$  引起的  $H_I$  相的出现会在磷脂膜上造成带电荷的孔洞,膜的通透性,细胞的分泌作用、外放作用、受体丛集等均与此有关。

金属离子与膜脂的作用不仅会改变生物膜上膜脂的侧向分布,而且会改变膜脂在生物膜的里层和外层之间的分布。在细胞膜上,76%的磷脂酰胆碱(PC)和大部分鞘磷脂(SM)处在外层,而80%的 PE 和 PS 处在内层。1987年毕特波尔(M. Bubol)等报道,使 PE 和 PS 从生物膜的外层转移到里层需要有  $Mg^{2+}$  参加,而细胞内部的自由  $Ca^{2+}$  则抑制磷脂的转移。所以,细胞内自由  $Ca^{2+}$  的增加会导致细胞膜里外层之间磷脂分布的丧失。1990年汉斯莱特(U. Henseleit)等的结果表明,在离子通道 A23187 的存在下,  $Ca^{2+}$  和  $Sr^{2+}$  能使预先置于人的红细胞细胞膜外层的溶血磷脂酰胆碱和棕榈酰肉毒碱转入膜的里层,  $Mn^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  则使这种转移变慢。

金属离子的作用会使生物膜的性质改变。1981年科甘(U. Cogan)等的研究表明,生物膜外层的流动性高于里层,而细胞外的高浓度的  $Ca^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  与磷脂的结合使得里外层之间的膜的流动性的差别缩小。1990年瓦坦纳伯(H. Watanabe)等用自旋标志方法研究人红细胞的质膜的流动性,结果表明,  $Ca^{2+}$  使质膜的流动性下降。1991年榎本等研究对气味高度敏感的脂质体时发现,  $Ca^{2+}$  在脂质体外的存在会大大提高 PC—PS 脂质体在气味分子乙酸戊脂作用下流动性与电位的变化。

生物膜的融合和分裂是细胞之间和细胞器之间物质传送和信息传递的重要方法。1984年伯格恩(R. D. Bungoyne)发现,在分泌细胞的外放作用发生之前,会出现细胞内的局部细胞质里  $Ca^{2+}$  浓度的瞬间增高。1989年贝克斯(C. J. M. Beckers)等发现细胞内穿梭微囊与有关膜之间的融合也需要  $Ca^{2+}$ 。生物膜的互相融合要求膜脂分子相接触,这就必需排开存在于膜表面的结合水。1989年费更逊(G. W. Feigenson)报道,  $Ca^{2+}$  能与两个膜上的 PS 分子形成反式的络合物而排开膜表面的结合水,引起膜的融合,  $Mg^{2+}$  与 PS 形成的是顺式络合物(帕利斯 A. Porlis, 1979)。所以  $Mg^{2+}$  虽然也能使膜表面的负电位降低,使 PS 脂质体发生聚集,但不能引起融合。除了上述反式 Ca(PS)<sub>2</sub> 络合结构会引起生物膜的融合之外,  $H_I$  相的形成被认为是另一条使膜融合的途径。1990年奥提兹(A. Ortiz)等的研究表明,多价离子与生物膜中的 CL 的结合会在两膜之间形成  $H_I$  型结构面导致膜的融合。1991年雪列米捷夫(Ю. А. Шелепетева)等用  $La^{3+}$  诱导人红细胞融合,制得尺寸达400 $\mu$ m 的巨型红细胞。脂质体与细胞之间的融合也已经实现,1991年沙尔曼(M. Salman)等报道了在  $Ca^{2+}$  存在下旨质体与 Mycoplasma capricolum 细胞的融合。

碱金属离子与生物膜上膜脂的作用主要是静电屏蔽作用。大部分多价离子以离子云的形式存在于膜上负离子基团的周围,只有一部分多价离子与膜脂相结合。1981年麦克劳林(S. McLaughlin)等报道,  $Mg^{2+}$  和  $Ca^{2+}$  与 PE 的结合常数分别是2和  $3M^{-1}$ 。由于结合常数很大,所以结合速度由扩散速度控制。1987年,麦克唐纳(P. M. Macdonald)等报道,  $Ca^{2+}$  与 CL 的结合常数是  $20M^{-1}$ 。1989年亚可逊(M. A. Akesson)等研究  $Al^{3+}$  与 PC 脂质体的作用,结果表明,  $Al^{3+}$  被吸附的能力是  $Ca^{2+}$  的560倍。  $Al^{3+}$  在活度为  $5 \times 10^{-6}$  时就能中和植物细胞质膜的表面电荷,使表面电位从-30mV 变为+11mV,这与  $Al^{3+}$  能抑制根细胞对正离子的摄取相符。细胞膜表面的负电荷主要来自磷脂的唾液酸上的羧

基和磷脂分子头部的磷酸基。UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>只与生物膜上的磷酸基结合。1984年,仁托尔(R. Renthal)等用UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>来测定紫膜表面的磷酸基团数。1986年,帕斯克(L. Pasquale)等利用UO<sub>2</sub><sup>2+</sup>研究上述两类带负电的基团对细胞电泳速率的不同的贡献。1984年,赫伯特(L. Herbette)等用中子衍射研究Ca<sup>2+</sup>与PC的结合,结果表明,结合的Ca<sup>2+</sup>与磷酸基团的距离小于0.1~0.2nm。1987年麦克唐纳(P. M. Macdonald)等报道了用<sup>2</sup>H-NMR研究Ca<sup>2+</sup>与磷脂酸甘油(PG)-磷脂酰胆碱(PC)脂质的结合。他们发现,Ca<sup>2+</sup>在结合点上停留的时间短于10<sup>-6</sup>~10<sup>-5</sup>s。所以,Ca<sup>2+</sup>是处于膜表面的电位“槽”中,能在“槽”中自由流动。同年,塔特利昂(S. A. Tatulian)报道,金属离子与磷脂的结合点远少于基团数。1990年,谢维克(G. Cevc)在综述中列出了磷脂与一价,二价和三价金属离子的结合常数。

由于Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>等重要离子缺少易检测的光谱特性,所以不容易对它们与膜的结合状况进行即时观测。而镧系元素离子(Ln<sup>3+</sup>)的半径接近Ca<sup>2+</sup>,它们使生物膜融合的能力也与Ca<sup>2+</sup>接近。Ln<sup>3+</sup>的光谱特性十分有利于进行离子与生物膜的结合的研究。1983年,沙利斯(N. E. L. Saris)发现,Eu<sup>3+</sup>的发光强度与磷脂的头部基团有关。他还观察了在混合磷脂体系中Tb<sup>3+</sup>和Eu<sup>3+</sup>之间的能量转移。1989,1990年彼得森姆(M. Petersheim)等和孙(I. Sun)等报道,Ln<sup>3+</sup>与每种磷脂都能形成不止一种络合物。Ce<sup>3+</sup>的4f到5d的吸收峰的消光系数为10<sup>3</sup>M<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>。它的发射峰的强度比Tb<sup>3+</sup>或Eu<sup>3+</sup>大两个数量级以上,所以Ce<sup>3+</sup>被认为是研究离子与生物膜的相互作用的合适离子。1990年孙(J. Sun)等报道了Ce<sup>3+</sup>在PA脂质体上在不同的H<sup>+</sup>浓度值时形成3种络合物。

在生物膜上,蛋白质分子的周围往往结合着磷脂。在一般的情况下,带负电的PS往往富集在一些蛋白质附近。1985年,埃斯曼(M. Essmann)等报道,一个Na,K-ATP酶分子被66个磷脂分子包围着,而这是酶起作用所必须的,富集在酶四周PS使Mg<sup>2+</sup>在这区域的浓度增高,Mg<sup>2+</sup>使Na,K-ATP酶活化。1991年,卡哈纳(E. Kahana)等研究了Na<sup>+</sup>,Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>等对细胞骨架蛋白与人红细胞膜的结合的影响。结果表明,骨架蛋白不易从红细胞膜上脱落的原因可能是Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>使骨架蛋白和膜的负电位降低而减弱了它们相互间的斥力。

由于Ca<sup>2+</sup>,Mg<sup>2+</sup>是金属离子中在生命活动中处于首要地位的离子,所以,金属离子与生物膜上的磷脂的相互作用的研究集中在这两种离子的研究上。随着对其它金属离子的生理作用和毒性的了解,离子与膜脂的作用的研究正在向其它金属离子发展。稀土元素离子正在被注意。对铝、铅、镉、镍、铜、镉、汞等金属离子的研究也在逐渐开展。另一方面,研究正在向金属离子与生物膜的作用的部位、结合的性状和结构等深入。生物膜的表面都荷带电荷,而荷电的状态十分复杂。生物膜的荷电状态对离子—生物膜相互作用的影响也是正在被深入研究的重要方面,细胞是一个有机整体,蛋白质的作用是生命活动中的最活跃部分。金属离子与膜脂的作用对生物膜上蛋白质分子的结构与功能的影响甚至对整个细胞的影响是研究的另一个前沿。

**参考文献**

- Günther T. Magnesium in health and disease, Itokawa Y, J. Durlach, J Libbey, comp, Ltd, 1989, 3~10
- Sun J, et al. Biochim. Biophys Acta, 1990, 1024, 159~166
- Cevc G. Biochim, Biophys Acta, 1990, 1031, 311~382
- Wilschut J. Membran Fusion Wilschut J, D Hoekstra, Marcel Dekker, Inc, 1991, 89~126

(中国科学院化学研究所方一非研究员撰)

**硒的生物化学**

biochemistry of selenium 硒是基本微量元素又是天然存在的致毒剂,缺硒症与硒毒症的研究导致一门硒的生物化学的诞生。最早发现缺硒症的记录是13世纪马可波罗在中国发现的马蹄发瘸症,即现今称大关节炎。1957年美国

Schwarz以天然含硒的“猪肝营养素”(Factor 3)作为解决动物肝坏死的营养医治。从而发现一系列缺硒症都与器官病理有关,例牛羊的肌肉萎缩的白肉病、心肌衰退、心内膜硬化、精子损伤与生长激素不足等。这些病症临床讯号奇特,常常是轻微、缓慢发展,但在另外损伤时会以两次发作成急性,甚至危及生命直到死亡,同时硒毒研究也表明硒虽与砷是差一个原子序数的姐妹元素,但不能等同,1960年Frost证实硒与砷均有毒,但互相拮抗,而且硒对铅、汞与镉等重金属也有拮抗,从而拟定毒性标准,食物中硒含量小于5mg/kg,饮料中为0.5mg/kg,空气中为0.1mg/m<sup>3</sup>。1974年美国解除禁令批准其为非致癌食物添加剂可供使用。

事实上硒在自然界无处不存在,只不过含量极低。表1列出硒、砷、硫和磷在自然界的近似分布,实际上许多国家和地区含硒量远远低于这平均水准,北欧的斯堪达那维亚半岛和亚洲的尼泊尔是属最贫者,中国也存在相当大缺硒带。富硒地区当属硒矿区,美国科罗拉多州,中国恩施地区,由于含硒量高达90000mg/kg,所以导致硒中毒严重,症状涉及皮肤、神经和消化道系统等,必须以重视,美国不得不规定此地区牛羊肉一概不准食用。

**表1**

| mg/g |             |          |            |             |
|------|-------------|----------|------------|-------------|
|      | 海水          | 地球地壳     | 动物         | 植物          |
| 硒    | 0.001-0.004 | 0.05     | 0.44~4.0   | 0.01~1      |
| 砷    | 0.003       | 2~5      | 0.02~0.5   | 0.1~12      |
| 硫    | 900         | 600~5000 | 5000~10000 | 600~900     |
| 磷    | 0.07        | 1200     | 6000~10000 | 1 000~5 000 |

1959年J. L. Martin阐明硒在动植物中消化与代谢历程(图1),从中可知在自然界中从无机硒化物转变为有机硒化物,例硒代半胱氨酸,最后进入动物蛋白的生化途径。1973年之后10年大量发现哺乳动物器官内存在硒蛋白,由于量少又易变化,至今尚难清晰科学描述。(表2)

**表2**

| 研究者        | 发现年代 | 动物    | 器官               | 硒蛋白                 |
|------------|------|-------|------------------|---------------------|
| Pedersen   | 1972 | 羊、鼠、猴 | 肌肉、心脏、脑、膜        | G-蛋白                |
| Burk       | 1982 | 鼠、猴   | 血浆、肝             | Se-P蛋白              |
| Calvin     | 1978 | 鼠、公牛  | 精液               | Se-鞭毛蛋白             |
| McConnell  | 1979 | 鼠     | 睾丸               | 15000DAG蛋白          |
| Pond       | 1983 | 公牛、公羊 | 睾丸、精液            | >15000DAG蛋白         |
| Prohaska   | 1976 | 鼠     | 脑                | >15000和94000 Se-P蛋白 |
| Beilstein  | /    | 人     | 血红蛋白             | 珠蛋白                 |
| Burk       | 1981 | 鼠、羊   | 肝、肌肉             | 微粒体膜                |
| Wilhelmsen | 1981 | 鼠     | 肝、肾、脾、肠、肺、脑、膜、肌肉 | SDS-胶体份             |

1971年Rotruck在营养学和酶学之间架起桥梁。确认谷胱甘肽过氧化酶(GSHPx)可作为硒酶。1973年他又发现在酶的活性位置上硒对超氧自由基引起的癌症、老化和心肌梗塞防治有一定作用,同年由3位独立发现者一起开创硒的酶学。Turner和Stadtman鉴定了甘氨酸还原酶的亚单元是硒蛋白,Andressen介绍硒掺入进甲酸脱氢酶,这3种硒酶化学组成列于表3。

**表3**

| 酶        | 平均分子量 Mw(酶) | Mw(硒蛋白) | 每克分子酶中 硒蛋白当量数 | 每一蛋白 基中硒含量 | 硒化学形式  |
|----------|-------------|---------|---------------|------------|--------|
| 甘氨酸还原酶   | >450 000    | 12 000  | /             | 1          | 硒代半胱氨酸 |
| 谷胱甘肽过氧化酶 | 84 000      | 21 000  | 4             | 1          | 硒代半胱氨酸 |
| 甲酸脱氢酶    | 600 000     | 10 000  | 4             | 1          | 硒代半胱氨酸 |



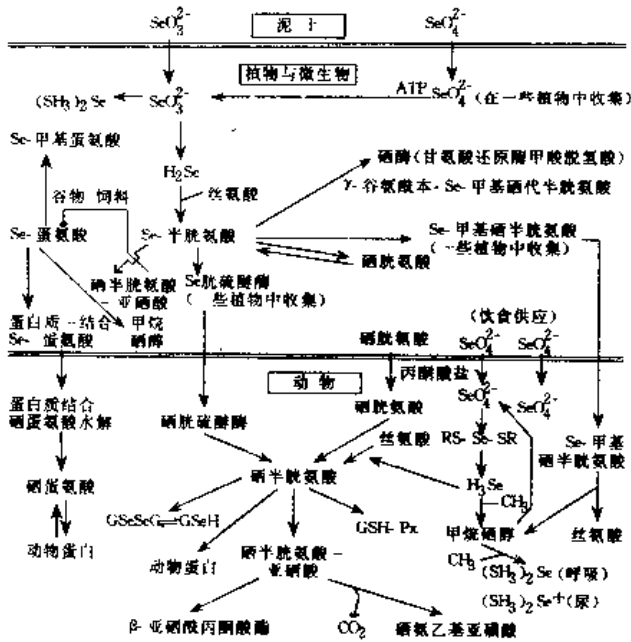


图1 在动植物中硒代谢历程图

1983年 Stadtman 已从细菌中成功鉴定6种细菌酶, 硒蛋白种类已高达9~23种, 同时她在生化合成硒蛋白中发现一个<sup>75</sup>Se标记大分子, 分子量约为天然存在硒蛋白A的2倍左右, 最后证实为<sup>75</sup>Se-改性脯氨酰氨基转移核酸(t-RNA), 其中含硒组元为5-[(甲氨基)甲基]-2-硒腺嘌呤核苷, 为此荣获1987年美国生化协会玫瑰金奖。表4列出她发现6种硒菌属细菌酶概况。

表4

| 酶             | 酶的来源 (细菌)                           | Mw(酶)    | 硒化学形式    |
|---------------|-------------------------------------|----------|----------|
| 甘氨酸还原酶        | 梭菌                                  | ~45 000  | 硒代半胱氨酸   |
| 氢酶            | 范氏甲烷球菌<br>Methanococcus Vannielli   | ~340 000 | 硒代半胱氨酸   |
| 烟酸氢化酶         | 贝氏梭菌<br>Clostridium barkeri 原岭发酵的梭菌 | ~300 000 | 不安定有机硒化物 |
| 黄嘌呤脱氢酶        | Purine-fermenting clostridio        | /        | 不明含硒有机物  |
| 硫解酶           | 克氏梭菌<br>Clostridium Kluveri         | 160 000  | 硒代蛋氨酸    |
| β-羟丁酰基-CoA脱氢酶 | 克氏梭菌<br>Clostridium Kluveri         | 260 000  | 硒代蛋氨酸    |

作为天然硒菌属研究的探针的人工合成硒蛋白已有非血红素铁蛋白-Se假单胞氧化还原蛋白、Se皮质铁氧化还原蛋白等和硒代硫磺酸酶, 基本上为天然蛋白中硫的同类物, Frank人工合成九肽(二硒代后叶催产素)。

我国对缺硒症和硒毒性研究有独到之处, 克山病预防就是成功的一例。中国医学科学院肿瘤医院于树玉所领导硒与癌症研究, 和启东肿瘤所合作研制富硒酵母作肝癌预防营养剂, 华中理工大学徐辉碧在硒酵母、富硒茶叶等研究和北京医科大学王夔人工化学合成硒蛋白研究都属于硒生物化学范畴, 也是中国在硒在医学上应用研究中力量最坚实的学科。

参考文献

1 Rosenfeld I, et al. Selenium Geobotany Biochemistry, Toxi-

city and Nutrition, 1964

2 Klayman D L, et al, Organic Selenium Compounds: their chemistr and biology, 1973  
 3 Schrauzer G H. Neuere Entwicklungen aus der Biologie, Biochemie und Medizin, Heidelberg Verlag Med. Fischer, 1983  
 4 Combs G F Jr, et al. The Role of selenium in Nutrition, 1986  
 5 Combs G F Jr, et al. 3rd International Symposium of selenium in Biology and Medicine. Beijing, AVI, 1987, 1~9  
 6 田中英彦, 左右田健次. 生体高分子へのセレンの特有的取り込み, 化学, 1987, 42(3): 214~215  
 7 Stadtman T L. Annu Rev Biochemistry, 1990, 59: 111~127  
 8 Stadtman T C. J Biol Chem. 1991, 266(25): 16257~16260

(中国科学院上海有机化学研究所徐思羽副研究员撰; 丁宏勋审)

生物化学工程 biochemical engineering

生物工程已经取得飞速的发展。不论是对微观世界的认识, 还是造福于人类都取得了巨大进步。生物工程是生物学、化学及工程学的有机结合, 其中生物化学工程(简称生化工程)已发展成生物工程的重要组成部分。

生化工程的发展可以追溯到数千年前。发酵工业是与现代化学工业同步发展起来的。有机染料及化学工业对非水溶剂的需求日增, 酿造技术及蒸馏技术的提高打开了用发酵法生产酒精的道路。第一次世界大战期间, 发酵法生产丙酮是继酒精生产后取得的另一重大进步。工业设备的消毒灭菌作为生化工程重要作业也日渐成熟。如何把实验室的细胞培养转变成发酵生产, 最典型的例子是青霉素。青霉素是1928年发现的, 由于战争的需要到1940年就实现了工业化生产; 早期产品质量极不稳定, 主要是染菌造成的, 以后消毒作业起了很大作用。发酵行业仍普遍采用的透平桨搅拌发酵罐就是在这一期间形成的。

50年代已有人认识到生物与化工相结合的必要性的。1959年, 英国唐纳(Donald)、克鲁格(Crook)和美国盖顿(Gaden)创办了第1个生化工程杂志, 即现今在美国出版的Biotechnology & Bioengineering。60年代初, 分子生物学打开了人们的视野, 重组基因已显示出诱人的前景, 生物工程的概念逐渐形成。1963年, 日本小叶修一联合美国汉弗莱(Humphrey)和澳大利亚麦利斯(Millis)在东京开设了第1个生化工程讲座, 强调多学科的互相渗透及共同努力, 并出版了第1本专著《生化工程学》。

现已确认, 生物生长及代谢过程同样遵循化学反应的有关规律及能量转换关系。微生物的生长既取决于内在的遗传性质, 也依赖于外部环境条件。生化工程的任务, 应保证微生物在最佳的环境条件下生长。生化工程包括生化反应工程学及产品后处理技术。生化反应工程学包括宏观反应动力学及生物系统的动量、质量及热量传递的研究以及生物反应器设计与放大, 环境条件的监测及最优控制策略等。多数情况下, 细胞系在液体中悬浮培养, 营养成分特别是氧的摄取则需经一连串质量传递过程。例如在液相悬浮培养中向细胞供氧要经过气相、气相边界膜、液相边界膜、液相主体及胞外液膜等一系列步骤, 然后才进入胞内参与反应。研究结果表明, 在这些步骤中, 主要阻力在气液交界处的液膜一侧。因此, 好氧发酵反应器的设计均应创造更大的气液界面面积以减少氧传递过程的阻力。动物细胞及植物细胞因对剪应力极为敏感, 而植物细胞又易成集团, 培养反应器中既要保证物料的混合、氧及营养物质的供应, 又应避免使细胞受到伤害, 因此需要特殊设计的反应器。

产品后处理技术之所以重要, 是因为生物产品在原始溶液中含量都很低, 例如氨基酸只有1%~1.6%, 工业酶为0.01%~1%, 胰岛素为0.003%, 而尿酸酶只有1.3×10<sup>-3</sup>%; 此外, 还因为原始溶液成分复杂以及稳定性差, 从而使后处理工艺在产品的成本构成中可达40%~80%。20世纪60年代以前生物制品的分

离纯化基本上是套用化工单元操作。到70年代各国均大力开发新技术。目前,絮凝技术已用于强化菌体的分离,微滤膜也用于分离微小细胞(一般 $0.5\sim 2\mu\text{m}$ )。在粗分离技术中细胞破碎包括球后、压力释放、冷冻加压释放等已发展成分离胞内产物的手段。而盐析、溶剂萃取、离子交换色谱及超滤膜已用于分离目的产物或进行浓缩富集。60年代合成了弱酸弱碱性离子交换树脂,从而使利用离子交换色谱对蛋白质及活性物质的纯化分离取得了较大进展。此外,针对生物制品的干燥技术如喷雾干燥、气流或流化床干燥及冷冻干燥也取得了长足的进步。

生化工程的另一贡献是在生物医学方面。60年代初,人工肾的基础性研究在美国取得突破。这是由医学、材料科学及化学工程多学科研究人员共同努力的结果。化学工程师把流体力学、膜传递理论及界面物理化学应用于该系统的设计,并配制出适宜的具有流变性质的高分子溶液,研究出用于血液净化的透析器,经不断改进,到60年代已开始进入实用化阶段。今天半透析半过滤方法已成为肾病患者标准治疗手段。人工肾的成功提供了制造肝、胰等其他较复杂人造器官的可能性。

在医药方面,分子生物学家已发现多种酶和抗体可用于抵抗多种疾病、代谢紊乱及遗传缺陷,生化工程师可帮助使这些物质高效而经济地实现生产。例如用中空纤维反应器已能有效地生产杂交瘤细胞及单克隆抗体。

在农业方面,由于生物学研究的深入,专一性对环境无污染的生物杀虫剂、除草剂的生产日益扩大,生化工程师正在做出努力通过过程设计、控制及分离工艺以确保其不含污染物,不会污染环境。植物细胞培养正致力于农业新品种的开发或实现天然生长的工厂化。已培育出抗性好、生长快、有机成分高的新品种如抗病树、无病毒土豆等。生化工程师正在帮助园艺师从手工作业转向用基因工程进行自动化生产。

展望未来生化工程的任务:(1)应努力提高生物反应器中目的产物的浓度;(2)应利用各种技术以提高碳源的转化率;(3)对复杂的生长过程要进行模拟,以便更有效地控制发酵和培养作业;(4)完善和开发新的后处理技术。

在英国用动物细胞培养生产药物及免疫试剂的反应器已达 $\text{m}^3$ 级的规模,不久将达到 $10\text{m}^3$ 级。植物细胞培养有些落后,目前部分高级药物仍从天然植物提取,性能不稳定。预期植物细胞克隆所取得的进展可以生产性能优越的植物细胞。为此需借助生物工程包括机器人以处理对机械剪切敏感的组织。美国正在研究复杂的生物系统如培养皮肤移植组织、外科手术中更换受创伤的躯干等。下一代用于治疗和免疫的药物将取决于三维分子结构的设计,即通过重组DNA合成药物,像干扰素、激素、血清蛋白、抗凝血因子等。此外,生物工程还将对食品、酿造、冶金、化工、环保、三次采油及农副产品加工产生重要影响。

生物工程领域存在着强烈的国际竞争,美、日及欧洲各国均处于领先地位。生物分子膜分离技术虽系美国首先发明,但日本生产的肾透析器在美国医院里却日益增多。英国建成 $2600\text{m}^3$ 大型连续化气升式发酵罐,在设备放大及控制方面取得巨大进步。酒精生产是古老的技术,但日本建起全新的固定化细胞连续生产示范厂。生物制品的世界市场据估计2000年将达到5600~6900亿美元,谁将首先占领世界市场已成为普遍关注的焦点。其中将为生物工程提供创造性活动的机遇。

#### 参考文献

- 1 Committee on chemical engineering frontiers (USA), *Frontiers in chemical engineering*, Washington D C, National academy press, 1988, 17~35
- 2 Peter Dunnill. *Biochemical engineering, its origins and exciting future*, chem engng, 1988, 455: 40~44
- 3 Suichi Aiba. *Horizons of biochem. engng*, Oxford univ. press, 1988, 3~21
- 4 合叶修一, 水井史郎著. 生物化学工程. 胡章助, 方常福, 吴维江, 等译. 北京: 化学工业出版社, 1984. 1~328

- 5 孙万儒. 生物技术产品后处理技术的发展. 化工进展, 1990, 4: 16~20
- 6 杨守志. 生物化学反应工程讲座. 化工进展, 1990, No6: 44~51; 1991, 1: 41~49; 1991, 2: 44~50; 1991, 3: 33~39

(中国科学院化工冶金研究所杨守志研究员撰; 陈家镛审)

### 固定化生物催化剂 immobilized biocatalyst

生物催化剂是指酶及具有酶活性的微生物、动物、植物的细胞和细胞器等。固定化生物催化剂是指受到物理化学等因素的约束, 被限制在一定的空间界限内, 并且保留催化活性, 能被反复或连续使用的生物催化剂。固定化的目的主要是为了克服游离生物催化剂的缺点(不稳定、不能回收及产品提纯困难), 改善催化剂的性能, 提高生物转化效率。固定化生物催化剂除基本保留游离催化剂的生物活力外, 还具有异相催化的优点, 反应器内催化剂浓度高, 催化剂微环境容易控制, 便于回收再利用和连续自动化操作, 因而在食品发酵、有机合成、化学分析、诊断治疗、环境保护、能源开发及理论研究方面得到日益广泛的应用。

早在1916年纳尔逊(Nelson)等就发现酵母蔗糖酶吸附在骨炭末上, 仍保持原酶活性。1953年, 格鲁布霍弗(Grubhofer)等为了有效利用酶, 首次用重氮化的聚苯乙烯树脂共价固定了羧基酶和淀粉酶。1960年以后, 固定化酶的研究迅速发展。凯特查斯基-凯特齐尔(Katchalski-Katzir)研究组在酶的固定化方法和固定化酶性质的基础研究中成绩卓著, 于1985年获“第1次日本国际奖”。1970年后, 微生物细胞的固定化发展迅速。1973年土佐哲也完成了氨基酸化酶的固定化, 并成功地用于DL-氨基酸的连续工业化生产, 这是固定化生物催化剂工业应用的首例, 于1983年获“第1次国际酶工程奖”。1973和1974年, 他又用聚丙烯酰胺包埋微生物, 分别用于L-天冬氨酸和L-苹果酸的工业生产。1980年后开始动、植物细胞器的固定化研究。

某种固定化生物催化剂能否应用于工业生产, 关键在于固定化方法要简单易行、费用低; 固定化后活性高, 操作半衰期要长。现在已经开发的固定化方法有:(1)靠共价键、离子键、物理吸附、生物亲和力等作用固定在不溶性载体上的载体结合法;(2)用双(多)功能试剂将生物催化剂交联在一起的交联法;(3)包埋在高分子凝胶、微胶囊及脂质体中和封闭在中空纤维、限制性超滤膜中的包埋法;(4)以上3种方法适当组合的复合法。这些方法各有所长, 应根据使用目的综合考虑, 选择相应的生物催化剂和适当的载体及固定化方法。同时, 固定化生物催化剂还应符合生物反应器的设计要求, 容易加工成型。

细胞固定化方法以包埋法为主。土佐哲也等继开发了聚丙烯酰胺包埋生物细胞后, 1979年又改用K-卡拉胶, 在温和条件下包埋微生物细胞, 从而避免了聚丙烯酰胺单体和聚合热对酶活力的损害, 提高了酶活性的固定化收率及其操作稳定性, 生产效率提高25倍。这主要是由于卡拉胶分子所带的阴离子与菌体膜表面的阳离子形成聚离子键, 加强了菌体与载体间的相互作用。用丝状真菌可生产很多有价值的代谢产物, 如酶、抗生素和甾体化合物等, 但用一般方法很难均一固定活性丝状菌, 即使固定了生产效率也低。1983年, 田中濑夫开发了一种先把丝状菌孢子固定化, 再在载体凝胶中培养固定化孢子、生长菌丝, 从而获得高活力固定化丝状菌的方法。他选用光交联树脂前聚体作为载体包埋数种丝状菌, 固定化孢子在载体凝胶中发展成菌丝。前聚体的链长对菌丝生长和羟化酶活性影响很大。用链长约40nm的前聚体固定化*C. lunata*可以得到最佳脱氧皮质甾酮的 $11\beta$ -羟化活性, 稳定性好, 能在100d反复使用50次。若活性降低, 在含底物的培养基中培养固定化菌丝, 可再活化。对于其它丝状菌和放线菌, 选择不同种类和不同链长的前聚体, 用类似方法也得到了高活性、稳定的固定化菌丝。用这种固定化菌丝或放线菌构成的生物反应器能代替原发酵法, 在多步复杂反应中连续生产高浓度产物。例如, 用氨基甲酸乙酯前聚体(PU-1)固定的放线菌*Streptomyces rimosus*构成的通气管型反应器能连续生产地霉素( $30\mu\text{g}/\text{ml}$ )

长达25d以上,前聚体固定化法简单,使用条件温和,不含使酶失活和破坏膜结构的低分子单体;载体凝胶网的疏密可通过改变前聚体的链长控制;可合成亲水性、疏水性和离子性前聚体,满足不同反应的需要。1984年,居乃境设计并制造了一种带有多孔转盘的固定化细胞生物反应器,非常适合于固定好氧的丝状真菌、放线菌等。因为多孔转盘交替进入液体和空气,易于供应氧气,细胞浓度高。他已成功地将此法固定泰国根霉和泡盛曲霉连续生产糖化酶;固定土曲霉连续生产衣康酸;固定金霉素链霉菌连续生产四环素。这种反应器的单位生产效率比传统发酵法和一般固定化方法要高。瑞典的莫斯贝奇(Mosbach)等人比较各种人工合成的高分子聚合物、多糖类、胶原等蛋白质类不同包埋载体的性能,结果表明,琼脂糖最适合包埋各类细胞,它孔隙大,有利于高分子物质扩散,且无毒,不影响细胞生长。1984年,他们曾用琼脂糖胶分别包埋杂交瘤细胞和淋巴细胞,生产单克隆抗体和白细胞间质素。用固定化动物细胞生产干扰素、胰岛素、生长因子等正在研究之中。用吸附或包埋法对藻类等各种植物细胞进行固定化,可以生产菸碱、蛇根碱等生物碱以及毛地黄甙等糖甙类物质。各种固定化生物催化剂可作为分子识别元件,因而在生物传感器的制备上获得广泛应用。已经开发出各种各样的酶电极、微生物电极、组织传感器和亚细胞传感器等。用生物传感器可监测发酵过程中的各种参数,测定醋酸、酒精、谷氨酸、氨和BOD。近年来,固定化生物催化剂用于有机相中的研究十分活跃。1990年,田中澂夫等成功地将疏水载体固定化的酵母脂肪酶用于具有旋光性有机酸的生产。河神(Kawakami)把溶于水或沉积在水溶胀的Sephadex上的醇脱氢酶分散在疏水硅酮聚合物中,制成的固定化酶可完成偶联醇氧化和醛还原,伴随着NADH再循环,包埋在硅酮聚合物和海藻酸混合载体中的固定化诺卡氏细胞,可由脂肪族烷烃生产环氧化物。对于不同底物,只要调节硅酮/海藻酸的不同比例,就可增加环氧化物的产量,产率优于液体培养中的游离细胞。这类疏水载体非常适用于有机溶剂中的生物催化作用。

后来居上的固定化细胞技术发展极为迅速,特别是固定化微生物的实际应用已超过固定化酶。至1990年,已有8种固定化微生物应用于工业生产。但是,在菌种的选育、载体的筛选与合成、固定化技术、生物反应器以及生产工艺等方面,仍需进行深入的研究。如何消除副反应,提高连续反应中的酶活性,设计适用于发热反应、固-液-气三相反应和多酶复杂反应体系的固定化方法及生物反应器,改善底物和产物的质量传递等是有待解决的主要问题。动植物细胞和细胞器的固定化仅处于实验或中试生产阶段,固定化方法并不完善,应用还刚刚开始,需要研究新的载体、新的固定化方法,研制高效率的生物反应器。生物体内外有相当多的酶促反应是在疏水介质中完成的,特别是有机合成反应,绝大多数是在有机溶剂中进行的,因此,疏水介质中固定化生物催化剂的开发与应用将是今后固定化生物催化剂的研究热点之一。

参考文献

- 1 千烟一郎,土佐哲也. 高分子,1986,35(6):540~543
- 2 土佐哲也,高田功. 水质汚染研究,1986,9(11):12~17
- 3 Rosevear A, Kennedy John F, Cabral Joaquim MS. Immobilized Enzymes and cells. Adam Hilger, Bristol and Philadelphia, 1987:1~221
- 4 田中澂夫. 触媒,1990,32(1):24~29
- 5 田中澂夫,川本卓男. 表面,1991,29(5):410~418
- 6 姜涌明,隋德新. 生物化学与生物物理进展,1991,18(1):26~31

(吉林大学酶工程国家重点实验室曹淑桂教授撰;罗贵民审)

细胞固定化的方法及应用

传统的悬浮法细胞培养成本昂贵,效率较低,已不能满足DNA体外重组与基因克隆技术发展的需要;固定化酶技术则由于酶本身作为蛋白质容易变性,限制了进行生物化学的研究,细胞固定化技术是细胞悬浮培

养技术和固定化酶技术结合的革新,自20世纪70年代末以乙醇发酵及藻类细胞固定培养为先导,得到分子生物学家和生物化学家的广泛重视,并已发展成为一种得到广泛应用的生物技术。近年来,细胞代谢途径及次生代谢产物生产、藻类细胞壁多糖作为固定代基质,基因重组后的细胞固定培养已成为细胞固定化技术研究的3个热点。

Radovich(1985)将细胞固定化技术按细胞与载体的相互作用关系分为4种:

(1)无载体固定化。通过絮凝剂如阳离子、阴离子聚电解质、矿物质胶体等的作用使细胞聚集。严格地说,这种方法不能称为固定化技术。

(2)共价偶合。通过交联剂的作用,使细胞连接到交联接次基上。

(3)吸附。通常是表面多孔性惰性载体引起细胞的附着。

(4)包埋。以水凝胶或膜作为半透性惰性物质能允许底物的流动而限制了细胞的流动性,利用多孔性纤维质如纤维素可以使细胞渗透进入孔隙内部,也能达到固定化目的,这是包埋的一种特殊形式。

C. D. Scot认为,以上4种固定化方式可以归纳为两大类:附着与包埋。划分的标准是附着细胞直接与底物接触,受外界环境影响较大,而包埋使细胞受到了更大的空间限制。

细胞附着不是简单的热力学吸附,故不能以Langmuir等温式来描述。Durand(1981)的研究结果表明,细胞的附着能力与细胞培养的年龄及细胞表面的电位有关。某些生物有机体必须与其他的有机体发生共生作用才能附着,或者需要通过离子间引力或化学键作用改变其表面的物理化学性质才能产生附着的效应。

包埋是目前使用的最广泛的细胞固定化方法,按照固定化基质材料的不同可以分为3类:凝胶、膜和多孔纤维。固定化机理研究有以下几方面。

(1)生物膜动力学:根据Donnan平衡原理,半透膜使细胞与大量溶液分离。这些被包埋在膜内的细胞分泌的粘多糖类聚合物起到了胶水的作用,使细胞对膜表面产生吸引,从而使细胞牢固地吸附。继续分泌产生的物质与膜表面的相互作用形成生物膜。KSuga应用旋转盘接触器得出了最佳膜厚度模型。

(2)质量转移:包埋载体的孔径应大于底物和产物的直径而小于细胞直径。这样才能保证底物、产物的自由扩散而防止细胞的流失。J. L. Iborra(1986)通过酶动力学方程的微积分推导表明:影响固定化细胞效率的决定因素是扩散速度和底物浓度。Damkohler Thiele模型为选择合适的固定化载体提供了数学理论基础。

(3)细胞形态与物理化学环境因子:细胞形态是细胞生存和生长的状态指数,反映了固定化细胞的生产效率。运用光电显微镜可以监测细胞的浓度,细胞在凝胶孔穴内繁殖,特别是靠近凝胶珠表面处,直到充满整个网络间隙,物理化学环境因子是指光照、温度、盐度、pH值、 $PO_2/PCO_2$ 、水活度、营养盐浓度等。这些因素不仅影响细胞的发育生长,而且会引起细胞主要代谢途径的改变。

细胞固定化的重要特征是提高了细胞的密度,为细胞生长提供了单一稳定的环境,并且保持了活性细胞的酶活性。附着固定技术容易造成细胞流失,虽然加入 $Al^{3+}$ 改变细胞表面电荷或加入戊二醛转化为共价交联可以使其性能得到改进,但是,包埋法拥有更大的S/V,并且由于水凝胶脱水收缩过程中引起细胞浓度相对提高,使细胞活性提高,因此,选择固定化基质进行合适的包埋成为问题的关键。

目前,包埋基质主要是包囊材料,如聚芳胺、环氧树脂、甲壳质、聚丙烯酰胺以及海藻多糖类。J. F. Kennedy(1982)认为:褐藻酸钙凝胶不仅价格低廉、无毒性、机械强度较高,而且它为微生物细胞提供了类似于天然细胞壁多糖的环境,有助于细胞的稳定化。

海藻多糖主要是琼胶、卡拉胶、褐藻胶。这些多糖随来源、季

节、种类的变化,其结构组成均有变化,从而其理化性质和生理功能有很大变化。如凝胶强度、生物配伍性等。

细胞固定化培养的理想结果是高体积生产率、高产物浓度、高选择性及低的原料消耗。分子生物学的 DNA 体外重组与基因克隆技术依赖于细胞培养,尔后才能优化杂交细胞,制作基因图。

原核细胞的克隆以质粒或噬菌体为载体,将外源基因片段与载体组成的重组 DNA 分子转入受体细胞。通过密集培养方式来增殖和表达。主要的受体细胞是大肠杆菌。D. W. Zabriske (1986) 的研究结果表明:质粒的拷贝数主要由质粒的遗传性决定,其生长条件受宿主细菌的遗传性影响,质粒的拷贝数影响重组蛋白质的生产和质粒的稳定性。

真核细胞不携带相当于质粒的附加体 DNA,因此需要来自 DNA 病毒或 RNA 病毒的基因作载体。但是,许多产物的生物合成途径极其复杂,需要许多基因同时进入变体细胞,相应的基因表达调节机制也有许多障碍。所以,通常采用真核细胞的直接培养。如果改变物理化学环境因素,如营养盐的胁迫条件、紫外光照、诱变剂等,能导致主要代谢途径的改变,然后筛选出能获得高产量的次级代谢产物的后基因突变体,用 CsCl 梯度密度离心法或热失活的方法加以鉴别,已用于研究细胞的染色体重排机制。对某些缺少原始分生组织的愈伤组织的培养也可用来生产特定的次级代谢产物。

固定化细胞具有固定化酶的功能,其原理是以整个细胞代替酶蛋白作为某一生物合成的催化剂。其主要的产物和用途有:

生物医药物质,主要是次级代谢产物,如甾类化合物、生物碱、类黄酮、类胡萝卜素及芳香族化合物,例如胡萝卜碱、蛇根碱、莽草酸、紫草宁、异喹啉等。

生物传感器:膜包埋法固定化细胞可以作为电化学分析的生物传感器,可以说是对酶电极应用的一种自然扩展。

废物处理:膜包埋法固定化细胞形成的生物膜可用于废水的硝化或脱硝。无氧过程处理有机污染物形成的甲烷可以作为再生能源,还能用于吸附除去溶解重金属。这不仅可以保护生态环境,而且为能源的节约开辟了新的道路。

化工商品的生产:目前主要用于乙醇生产。将酵母、乳清、葡萄糖、木糖、半乳糖等发酵,能得到乙醇及少量的丁醇、异丙醇混合物。如果能对酶的催化活性保持时间加以延长,底物的利用率就能得到提高,将会进行大规模工业化生产。蛋白质和多肽的生产具有很大的潜力,这些物质大多具有酶的功能,如纤维素裂解酶、 $\beta$ -乳糖酶等,有很高的经济价值,这些物质的生产还为生化合成机理的探讨提供了有说服力的实证。

综上所述,细胞固定化技术是细胞生物学、分子生物学和生物化学研究的有力工具。在细胞生物学、分子生物学的研究中,它与 DNA 基因克隆技术相辅相成,为基因图的制定及杂交细胞的优化提供了为数众多可供选择的细胞群落。在生物化学研究中,它使酶动力学研究趋向深入,对生物合成代谢途径的认识提供了支持和证明,并且可能推广到商品化工业生产,提供价廉质优的生物制品,还可能成为生态环境保护及废物处理的有力手段。

(中国科学院海洋研究所严小军博士撰)

## 生物物理学

### 扫描隧道显微镜及其生物学应用

scanning tunneling microscope and application to biology 扫描隧道显微镜 (STM) 是 20 世纪 80 年代初发展起来的研究物质表面结构的新型高分辨显微镜和表面分析仪器。它是由 IBM Zurich 实验室的 G. Binnig 和 H. Rohrer 等人发明的。1983 年,他们用自己研制的 STM 首次得到实空间的 Si(111) $7\times 7$  重构表面的原子分辨图像。此后,STM 在实验和理论方面都有很迅速的发展。自第一台 STM 问世以来,它的应用范围已经扩展到微电子工业、表面微加工、电化学、催化、生物、医学等多种领域,它可以用于研究不同

性质的表面,如半导体、金属、超导体、有机物、生物等,而这些样品又被允许处于多种环境之中,如超高真空、大气、水、电解质溶液、室温等。总之,STM 可以用于获得样品在实空间的表面形貌或表面的原子结构等对基础研究和实际应用都十分重要的信息。

扫描隧道显微镜的结构简单。它是通过一个尖端为原子尺度的针尖在压电陶瓷的驱动下沿样品表面扫描来获得表面的高分辨图像甚至原子分辨图像的。它的工作原理则是量子力学中的隧道效应。STM 的主要特点是具有原子水平的高分辨本领,其分辨本领横向能达到 0.1nm,纵向能达到 0.05nm 甚至 0.01nm。这样高的分辨本领是过去各种显微镜都无法达到的,不过正因为分辨本领高,它的视野相对较小;此外,它是在实空间成像,成像速度快。

1985 年,IBM Zurich 实验室的 A. M. Baro 等首先用 STM 观察到铺展在石墨衬底上的噬菌体  $\Phi 29$  的表面形貌,但是当时仪器的分辨率很低(大约数 nm)。随着 STM 的发展,它在生物方面的应用也越来越广,若按其研究对象的性质来分,主要有以下儿方面:

脱氧核糖核酸 (DNA) 1986 年, G. Binnig 等首次用 STM 观察到放在碳膜上的 DNA 样品,获得放大约 500 000 倍的图像。在图上可以看到一条很长的“Z”字形凹陷,其上的每一个重复周期长度约为 3.5nm,这与 DNA 双螺旋的螺距大致相等;除此之外看不到任何细节。1987 年, Lindsay 等又得到金衬底上水相下长约 50nm 的 DNA 片段的 STM 图,从图上可以看到 DNA 链像液晶一样密排着,每条 DNA 链的宽度和高度均为 2.0nm 左右,这与 DNA 双螺旋直径的理论值大致相等,然而对 DNA 的双螺旋结构仍无法分辨。1989 年初, Science 杂志上发表了美国 Livermore Lawrence 实验室的研究成果。Beebe 等人把溶于盐溶液的双链 DNA 铺展石墨衬底上,干燥后通过 STM 获得大气环境下 DNA 戊糖链的双螺旋图像,其螺距介于  $27\times 10^{-13}\text{m}$  与  $63\times 10^{-10}\text{m}$  之间,从该图能识别出 DNA 的大沟和小沟。其他如 Driscoll 等也观察到呈双螺旋结构的 DNA。1989 年,北京大学物理系和生物系用自制的 STM 也观察到金衬底上水相下双螺旋的 DNA,其形貌和尺度与理论都符合得很好。

蛋白质分子 1989 年 Reinhard 等人用 STM 观察到一种细菌细胞壁上呈六角形规则排列的蛋白质(简称 HPI Layer)。其样品制备的方法有喷镀 Pt/C 膜和不喷镀两种。当湿度控制在一定的范围以内时,不喷镀的样品也可以和喷镀的样品一样很好地成像。在他们得到的 STM 图中可以十分清晰地分辨出六角形蛋白质复合物中心约有 3nm 大小的孔。1990 年, Stuart Hameroff 等用 STM 对细胞质骨架的两种成分——微管 (Microtubuls, 简称 MT) 和中间纤维 (简称 IF) 作了研究,从所得到的 STM 图中可以看到重组装的微管(直径为 25nm 左右),由 5~6 根直径为 4.5nm 左右的原丝组成。用 STM 对中间纤维进行观察,可以分辨出直径为 10nm 的结构,它们是由周期为 6~12nm 的螺旋组成。但是由于测量的影响,微管和中间纤维的结构都有些被压扁。1991 年, King Lun Yeung 等用 STM 看到一种脂蛋白 (简称 LPIN),它是由 51% 的脂类和 46% 的蛋白质组成。这种脂蛋白能使耐寒的昆虫在寒冷的季节里细胞间形成冰晶,从而避免在细胞内形成冰晶。从 STM 图中可以看到由两条直径为 9~12nm 球形物组成的线状结构。若样品的浓度较高,它们在 HOPG 上能形成聚合物,用 STM 则可以观察到有序的 LPIN 链呈平行排列。同年, Lorie Haggerty 等用高浓度的溶菌酶和牛胰凝乳蛋白酶原 A 在石墨上沉积的方法使它们形成二维有序排列。他们观察到较高浓度(约 10mg/ml)的溶菌酶在石墨上形成周期为 4nm 的长程有序排列结构。较低浓度(约 2mg/ml)的溶菌酶在石墨上仍可形成松散排列的有序结构,但周期变为 8nm。同样,牛胰凝乳蛋白酶原 A 在石墨上也可形成有序排列。然而这两种蛋白质的 STM 图都没有显示出进一步的精细结构。1990 年,北京大学物理系和生物系合作用 STM 看到甘油水覆盖下角蛋白分子,在所得到的图中有一些长为几十纳米的条状结构,这是角蛋白多肽链的骨架,而

且沿着纤维的走向可以辨认出角蛋白分子的主链和侧链。

**脂膜** 1987年, A. Stemmer 等用 STM 观察一类由磷脂和蛋白重構而成的生物膜—Porin 膜, 从得到的图像中只能分辨出它与碳膜衬底的边界, 没有进一步的细节。

**糖类** 1991年, M. J. Miles 等研究3种多糖——黄原胶、纤维素天青和羟丙基纤维素 C 的表面结构。黄原胶的 STM 图呈现出 1.5nm 宽的、周期为 2.0nm 的条状物; 羟丙基纤维素 C 的 STM 图中可以看到长为 40~50nm 的分子, 分子的间距为 6nm, 高为 0.6nm (后两者与 X-射线衍射及期望值不符); 纤维素天青的 STM 的分子像是宽为 3.2nm 的条状物 (与期望值相符)。

其他如 D. C. Dahn 等在 1988 年用 STM 观察到一种古细菌 (简称 Mb) 细胞壁的外鞘, 但分辨率很低。

在用 STM 研究生物样品的过程中, 发现多数生物样品本身比较柔软, 当针尖向样品逼近时由于针尖与样品的相互作用, 很容易破坏样品表面使实验结果不正确, 所以通常选用具有刚性结构的生物样品作为研究对象, 或是采用低温技术, 使得样品因冷冻而变得较硬。另外, 由于 STM 的成像是依赖于针尖与样品之间的隧道电流, 在样品是绝缘体的情况下它不能正常工作, 大多数生物样品是离子型导体, 而不是 STM 所要求的电子型导体, 因此 STM 在生物学方面的应用有一定的局限性。因此, 为了不同的需要, 科学家们研究发展其它的扫描显微镜。这些显微镜与 STM 具有相同的扫描方法, 但它们是依赖于针尖与样品之间不同类型的相互作用而且提供样品的不同信息。它们组成一个扫描显微镜的大家族。用于生物学研究常用的扫描显微镜主要有:

**原子力显微镜 (简称 AFM):** 这种显微镜不依赖于隧道电流, 而是依赖于针尖的顶端与样品表面的原子之间的微弱的相互作用力。工作时迫使针尖紧靠样品表面, 并保持它们之间的相互作用力不变, 让针尖沿样品表面扫描, 就好像一个唱针沿着唱片的纹路运动一样, 根据针尖扫描时所感觉到的微小的跟踪力来获得样品表面的形貌图。在这极小的跟踪力作用下, 针尖能够不破坏样品表面而记录下单个原子信息。由于原子力显微镜不依赖于隧道电流, 因而它可以用来研究绝缘体。原子力显微镜在测量一些坚硬的表面时, 其分辨率可高达 0.1~0.2nm, 足以分辨单个原子, 但是在测量一些软材料的表面时 (例如生物细胞等), 由于针尖向样品表面逼近可能会使表面变形, 因此工作起来并不是十分理想的。1990年, P. K. Hansma 等用原子力显微镜得到单个血红细胞的放大像和氨基酸聚合链的图像。考虑到材料的物理硬度是原子力显微镜成功成像的一个重要因素, R. K. Hansma 等又设计了一个低温下的原子力显微镜。在这个原子力显微镜中样品被液氮冷冻而变得非常坚硬, 从而有利于原子力显微镜的使用。

**扫描隧道显微镜、原子力显微镜与其它扫描显微镜统称扫描探针显微镜,** 它们在显微技术上已显露出强大的生命力。新的扫描探针显微镜的发展显示出有可能得到的各种信息来研究亚微观水平生物过程的动力学 (如催化过程) 和大分子重组装等问题。但是扫描探针显微镜毕竟是一种新型仪器, 还处于发展的早期阶段, 并存在着许多未被克服的具有挑战性的障碍, 例如, 如何扩大显微镜的扫描范围, 以便能容易地找到感兴趣的区域; 如何使扫描探针显微镜对柔软的非导体成像; 如何才能找到一种固定生物样品的方法以便能控制它们的定位和分布; 如何识别和避免由于样品制备过程所引起的人工假象等。此外, 在仪器装置和样品制备方面也还需要进一步改进或提高。

**参考文献**

- 1 G Binnig, et al. Surface Science, 1983, 126: 236
- 2 G Binnig, et al. IBM J Res Develop, 1986, 30(4): 355
- 3 G. Binnig, et al. Phys Res Lett, 1986, 56(9): 930
- 4 P K Hansma, et al. Science, 1988, 242: 209
- 5 P Beebe et al. Science, 1989, 243: 370
- 6 牟建勋, 等. 电子显微学报, 1989, 8(4): 1
- 7 Pobert, pool. Science, 1990, 247: 634
- 8 Stuart Hameroff, et al. J Vac Sci Technol, 1990, A8(1): 687

9 King Lun Yeung, et al. J Vac Sci Technol, 1991, B9(2): 1197

10 M J Miles, et al. J Vac Sci Technol, 1991, B9(2): 1206  
(北京大学严隽珏副教授、任笑地硕士撰)

**蛋白质的荧光探针 fluorescence probe of protein**

荧光探针又称荧光探针, 是指某些小分子量荧光试剂或非荧光试剂, 与某些大分子结合, 使被结合的分子标记上发射特定波长的荧光。荧光探针可用于标记细胞及生物大分子 (如抗体, 蛋白质和核酸等), 在分子生物学、医学和法医学的领域中有着越来越多的研究和应用。

对于被研究的分子来说, 荧光的产生有内源与外源之分。内源荧光又叫内禀荧光, 是分子自身所具有的; 而外源荧光是指分子结合环境中的荧光物所获得的荧光。荧光探针属于外源荧光。在常温下, 特定能量 (波长) 的光照射荧光发色团, 产生小于入射光能量的特定波长的光叫荧光。产生荧光的前提是分子中具有共轭振动结构、刚性平面及适当的带电状态。在常温下, 大多数分子处在基态的最低振动能级, 当一定波长的激发光照射荧光发色团时, 受激分子的电子吸收具有特征频率的能量, 由原来的能级跃迁到第 1 电子激发态或第 2 电子激发态中各个不同的振动能级和转动能级。大多数分子在吸收光能激发至第一或更高的电子激发态的各个振动能级后, 通常迅速降落至第 1 电子的最低振动能级, 在这一过程中它们和同类分子或其他分子碰击而消耗相当于这些能级之间的能量, 因而不发荧光。由第一电子激发态最低振动能级继续往下降落至基态的各个不同的振动能级时, 这一部分能量则以光的形式发出, 所产生的光就是荧光。荧光具有激发能量和发射能量的特征性, 灵敏度高, 测定时操作简单, 样品用量少 (最低可到  $10^{-13}$  mol/L) 等优点, 使它在分子的定性分析和定量分析中获得大量的应用。

在利用荧光光谱对分子进行研究的过程中, 由于很多分子本身不具有发射荧光的能力, 因此, 必须给这些分子引进特征荧光探针, 让荧光探针结合在分子上, 从而研究被标记分子的性质和运动过程。根据荧光探针与分子的结合方式, 荧光探针可以分为共价探针与非共价探针。用于蛋白质分子的非共价荧光探针有 ANS, DNS 和 TNS 等。它们能与许多蛋白质分子结合, 根据结合以后荧光性质的变化, 可以判断蛋白质分子中是否有疏水微区。ANS (8-苯胺基-1-萘磺酸) 能与去辅基肌红蛋白或去辅基血红蛋白结合, 结合前在水溶液中 ANS 的量子产率和最大发射波长分别是 0.004 和 515nm, 结合后量子产率增高, 最大发射峰蓝移, 相应变为 0.98 和 454nm。由此可以推测, 与 ANS 结合的部位是疏水性很强的微区。其他实验资料表明, ANS 是与去辅基肌红蛋白或去辅基血红蛋白结合的部位是它们与血红素结合的部位。共价荧光探针有碘乙酰胺萘酚 (IAN), 它与巯基发生反应, 形成 460nm 的荧光。可应用该荧光探针研究蛋白质分子的空间结构与功能的关系, 在蛋白质分子中的两个已知位置上以共价键分别结合两个不同的荧光探针 A 与 B, 当 A 受光激发能将激发能转移到 B 上, B 便发射荧光。由于能量传递的效率与它们之间的距离的六次方成反比, 因此, 根据这一规律可以测定蛋白质分子中两个基团的空间距离。在法医学中, 利用蛋白质的荧光探针喷射物品上的指纹, 使指纹带上荧光, 进行指纹分析。在 DNA 及 RNA 的电泳分析中, 加入的溴乙啶 (E. B.) 分子能插入 DNA 双螺旋结构的两个碱基之间, 形成一种荧光络合物, 在 254nm 波长紫外光照射下, 发出橙黄色荧光。检测 DNA 的灵敏度达到 ng ( $10^{-9}$ g) 水平。另外, 在临床检验中所用的荧光酶联技术和荧光抗体分析技术是荧光探针在定性分析和定量分析中的成功典范。

荧光探针在蛋白质分子的结构与功能的研究中起到重要的作用。1979年, 中国邹承鲁等发现 3-磷酸甘油醛脱氢酶活性部位的底物荧光探针——NAD 荧光衍生物。应用该荧光探针标记酶的活性部位, 从而进一步证实酶的活性部位位于分子的有限柔性区域, 在变性过程中酶活性部位的空间结构首先遭到破坏 (He

等, 1991; Xie, 等, 1987; Ju, 等, 1988)。后来又发现蛋白质分子 N-末端的特异性荧光探针——羧酰及噻啉啉荧光衍生物(赫荣乔等, 1991)。与 dansyl-Cl(Gray, 1967)不同的是, 羧酰荧光探针是在温和的条件, 蛋白在较大程度上保持天然状态下形成的; 而 dansyl-Cl 本身具有较强的荧光, 在蛋白质分子变性的条件下与氨基结合使 N-末端带上荧光。应用羧酰及噻啉啉荧光探针能较为容易地证明新生肽链的 N-末端甲酰化的现象; 另外也通过这些荧光探针发现胰岛素分子 N-末端及附近区域在变性过程中存在一个相对稳定的变性中间态(赫荣乔, 1992)。

荧光探针在微量分析中亦有广泛应用前景。Udenfriend 首先引入荧光胺试剂将氨基酸、肽及蛋白质的测量提高到微微克分子的水平。但由于试剂昂贵, 产生荧光不稳定及其他原因限制了荧光胺的进一步应用。Both(1971)引入 OPT 作为一种廉价、高灵敏度荧光试剂。OPT 在碱性介质中, 当有还原剂如巯基乙醇(2-mercaptoethanol)、二硫苏糖醇等存在时, 在常温下与氨基酸发生反应形成强烈的荧光(Ex 340nm; Em 450nm)。OPT 不与脯氨酸和羟脯氨酸反应并且与胱氨酸及赖氨酸反应不完全。但它的灵敏度比茚三酮高 5~10 倍, 荧光产物亦有一定的稳定性。因此, OPT 荧光探针现已应用于氨基酸分析仪系统。最近, 上海生物工程中心李昌厚等人利用 OPT 与氨基酸结合形成荧光衍生物的特性和流动注射荧光分析法(LFA), 超微量分析了某些氨基酸, 取得较好的效果。

参考文献

- 1 Gray W R. Methods in Eeaymology, Hirs, C H N (Ed), Academic Press, New York, 1967, 11: 139
- 2 Roth M. Anal. Chem., 1971, 43: 880
- 3 Tsou C L, Xu G Q, Zhou J M, Zhao K Y. Biochem Soc Trans, 1983, 11: 425~429
- 4 Xie G F, Tsou C L. Biochim Biophys. Acta, 1987, 911: 19~24
- 5 Ju M, Tsou C L. in Advances in Membrane Biochemistry and Bioenergetics. Kim, C H., Tedeschi, H., Diwan, J and Salerno, J C., eds 1988, 507~515, Plenum Publishing Co. New York
- 6 He Rong-Qiao and Tsou Chen-Lu, The Biochem. J. (BJ), 1992, 287: 1001~8
- 7 赫荣乔, 邹承鲁. 生物物理学报, 1991a, 7: 430~437
- 8 赫荣乔, 邹承鲁. 1991b, 7: 363~369
- 9 He Rong-Qiao, et al. Biochim. Biophys. Acta (BBA), 1993, 1163: 315~20

(中国科学院生物物理研究所博士生导师赫荣乔撰)

**免疫胶体金探针技术** the technology of colloidal gold probes 金氨酸分子在还原剂的作用下聚合形成金颗粒, 由于颗粒间相互排斥的静电作用和布朗运动, 使整个系统保持在一个相对稳定的水溶胶状态下, 即胶体金。由于胶体金颗粒具有高电子密度, 且其表面能结合生物大分子[如抗体、金黄色葡萄球菌 A 蛋白(SPA)、植物血凝素、刀豆球蛋白 A 等], 所以将其包被上生物大分子后成为一种特异的在光镜和电镜下易辨认的标记物, 在医学及生物学领域可广泛用于有关抗原物质的分布、定位和发生的研究。

1962年, Feldherr 和马歇尔(Marshall)第1次介绍了胶体金可作为一种在电子显微镜下示踪的标志。1971福克(Faulk)和泰勒(Taylor)第1次将胶体金颗粒作为一种特异的标记物用于电镜研究, 他们把胶体金与兔抗沙门氏菌血清结合后, 与细菌一起培养, 在电镜下见到标记于沙门氏菌表面的胶体金颗粒, 一般认为这是最早使用的免疫胶体金探针技术。1974年, 罗马诺(Romano)等将胶体金标记在第2抗体(马抗人 IgG)上, 实现了间接免疫胶体金染色。1975年, 霍瑞斯伯格(Horisberger)等制备了胶体金-植物血凝素复合物, 应用于扫描电镜研究, 同时也用于

透射电镜和冰冻蚀刻电镜的研究。1977年, 霍瑞斯伯格(Horisberger)等建立了制备稳定的免疫球蛋白-金探针的基本方法, 他们将抗体用 0.05MN<sub>2</sub>Cl 透析, 用 0.2MK<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 调至 H<sup>+</sup> 浓度 10<sup>-7</sup> (即免疫球蛋白的等电点), 胶体金(5nm)的 H<sup>+</sup> 浓度 10<sup>-7</sup> mol/L, 同时用 PEG 作为稳定剂, 在此基础上制备出的探针可在 5°C 下保存 1 年以上, 并在使用中获得满意结果。同年, 罗马诺(Romano)等用胶体金标记 A 蛋白成功。1978年, Geoghegan 等首次报道胶体作为标记物应用于光学显微镜, B 细胞在用抗表面免疫球蛋白和金标记二抗染色后, 在明视野下易观察到阳性记物。

免疫胶体金探针的主要流程就是先利用还原反应制备出胶体金颗粒, 然后将其吸附到特异体羊抗免疫抗体或 A 蛋白等生物大分子上, 再利用 A 蛋白与 IgG 的 Fc 端结合或抗原抗体反应, 使金颗粒连接到抗原上, 以达到抗原定性、定位和诊断鉴定的目的。

进入 80 年代以后, 该项技术不断发展, 并开始在越来越多的领域应用。1980年, 罗斯(Roth)等利用胶体金-SPA-异硫氰酸荧光素系统在荧光显微镜下观察胰腺组织内激素的定位状况, 结果表明与经典的间接免疫荧光法和 SPA-胶体金免疫电镜结果基本一致。1981年, Danscher 创立了金颗粒银显影方法, 即免疫金银染色法, 这项新技术迅速地被应用于研究中, 而且大大提高了检测抗原的灵敏度。同年, Geuze 等证实 SPA-金技术可用于冰冻超薄切片。1982年, 罗斯(Roth)用 SPA-金探针对抗原的多重的和双重的标记定位进行研究。当首先使用较小的金颗粒时, 两种不同大小的金探针之间不发生明显的干扰。由于建立了精确判定 SPA-金颗粒大小的技术, 因而产生均一的小颗粒探针(4和 8nm)能更好地进行双重 SPA-金标记, 得到最高的标记密度(标记密度有时由于金颗粒直径的增大而骤然减小)。同年, Giunchedi 等首次将此项技术应用于植物病毒的研究, 他们应用金标记兔抗外源凝集素抗体, 发现大麦条纹花叶病毒(BSMV)外源凝集素分布在病毒粒体表面而不只是两端。1984年, 林(Lin)等用切片免疫金银染色法在光学显微镜下观察到 BSMV 侵染的植物中存在病毒粒体, 同时在电镜下观察到 BSMV 位于或靠近系统侵染的小麦根的顶端分生组织和芽尖。同年, 还是林(Lin)用金标记的 IgG 探针在 10min 内可从植物叶片浸出液中检出病毒, 达到快速检测的目的。1985年, 斯洛特(Slot)和 Geuze 改进了制备胶体金的单宁酸还原法, 通过改变 1% 单宁酸的用量得到从的胶体金颗粒 17nm 递减至 3.5nm, 使胶体金的制备变得更加简单、方便。1988年, 希姆勒(Himmeler)等将金标记的抗鼠抗体 IgG+IgM 用于李痘病毒(PPV)单克隆抗体(McAB)的早期筛选。对融合 10d 后的杂交瘤细胞进行电镜观察, 发现 3 组不同的 McAB 杂交瘤细胞系在 PPV 粒体表面的结合位置不同, 一组在病毒粒体的某几个位置发现结合有金颗粒, 另一组在整个粒体表面均结合有金颗粒, 再一组则发现金颗粒散在背景上而未发现 PPV 粒体结合, 从而确定了不同的抗原决定簇位点。在国内, 相宁等、周国义等用此项技术检测烟草花叶病毒、黄瓜花叶病毒、烟草脆裂病毒、大豆花叶病毒等均获得较好结果。1991年, 林和陈用该项技术研究了竹花叶病毒(BoMV)对竹子的侵染过程, 较清楚地揭示出 BoMV 和受该病毒侵染组织中特有的电子密集结晶体(Electro-dense crystalline bodies)的关系。同年, 加勒特(Gareet)等用疫金标记技术观察了马铃薯卷叶病毒在其主要蚜虫介体—Myzus persicae 身体中的位置。

免疫胶体金探针技术已引起人们日益浓厚的兴趣, 并且应用范围也日益扩大。该技术克服了免疫标记法的反应产物弥散、超微定位欠精确的缺点, 使解决一些很精细的定位问题成为可能。可望用金标记去研究和定位在受侵染植物中存在的对烟草花叶病毒的运输辅助作用的 30k 蛋白等, 胶体金作为光镜标记物是较新的、也是非常有用的技术, 并且已研制出极灵敏的免疫金银染色技术, 这方面的应用会有广阔前景。另外, 硝酸纤维素膜上的免疫金银染色将会给抗原蛋白的检测提供一个非常快速、简便

和灵敏的检测手段,但目前先要克服非特异显色高的问题。

#### 参考文献

- 1 王保乐, 胶体金探针及免疫金、免疫金银染色方法讲义, 1986
- 2 陈德蕙, 胶体金探针的制备及应用——免疫金染色和免疫金银染色技术, 1988
- 3 相宁, 张成良, 免疫胶体金探针技术在植物病毒研究中的应用世界农业, 1991, 9: 33~34
- 4 Annick Garret, Camille Kerlan and Daniel Thomas, Visualization of luteovirus in the vector aphid's body by two gold immunolabeling techniques: a comparative study Journal of virological methods, 1991, 35(1): 93~107
- 5 Na-Sheng Lin and Chin-Chieh Chen Association of bamboo mosaic virus (BoMV) and BoMV-specific electron-dense crystalline bodies with chloroplasts phytopathology, 1991, 12: 1551~1555
- 6 夏诗茂, 凌静萍, 洪涛, 免疫胶体金标记技术 (农业部植物检疫实验所相宁助理研究员, 张成良副研究员撰; 张作芳审)

**光学实时监测神经元膜电位** 运用光学方法研究神经元膜电位活动是1968年由L. B. Cohen等提出的, 他们发现枪乌贼巨轴突膜的内部光学特性随着动作电位而改变。同年, I. Tasaki等报道外部染色的轴突标本发出的荧光随刺激而改变。此后, Cohen实验室从1971年开始寻找能给出强光学信号的适宜化合物, 用以监视神经细胞膜的电位变化。到1978年, 他们所合成的一些化合物使信号噪声比提高100倍。

提供使用的膜电位分子探头已超过200种, 其中一些类型如下: XV11, 卟啉类, 用于测量吸收作用、双折射; RH1155, 氧磷醇类, 用于测量吸收作用; RH414, 苯乙烯基类, 用于测量荧光; XXV, 氧磷醇类, 用于测量荧光、吸收作用。对于染料光学特性的测定包括吸收作用、双折射和荧光3种信号的强度, 目的在于选出最高信噪比的物质。测量哺乳类动物大脑皮层时, 若没有在皮层下植入光导纤维, 则使用透射光是不可能的; 然而, 使用反射光可以测到较小的吸收信号(W. N. Ross等, 1977), 故可以使用荧光测定(H. S. Orbach等, 1985)。要选用一个电压敏感性分子探头监视神经细胞的膜电位变化, 应了解其时间分辨率。例如, 使用XV11染料进行枪乌贼巨轴突实验时, 它产生光学信号后继膜电位变化的时间常数小于0.01ms, 超过可兴奋细胞电学信号产生的速率, 因此, 同时记录电学信号与光学信号时, 波形吻合极好。

这些染料对神经细胞的药理作用很重要。在许多例子中得到最大光学信号所需的染料浓度(0.1~0.01mg/ml)尚低于可测出药理学效应的浓度。包括在枪乌贼巨轴突, 组织培养中的成神经母细胞、心肌、骨骼肌、藤壶的上颈神经节、胚胎鸡心、胚胎半月神经节、口神经节中进行的测定; 在行为观测中, 用染料与不加染料的正常藤壶进食行为没有差别; 长期饲养中的行为也未发现药理学影响(J. A. London等, 1987)。有些染料的分子在强照明下可以敏化具有活性的单态氧和其它自由基。这些活性基会破坏膜成分并损伤细胞(J. P. Pooler, 1972)。因此, 这种光动力学损伤限制了实验的持续时间。目前提供的几种透射分子探头连续使用1~5min可不产生显著损伤。如果只用直流记录, 每次测试50ms则可在出现明显损伤前进行1200~6000次测试。当然, 使用一些抗氧化剂清除自由基可能是有希望的。此外, 在强光照射下染料被漂白也是一个限制实验时间的因素。

精确测量光时会受到系统中固有散粒效应噪声的限制。这是由于光子发射和检测的统计学特性引起的, 从而使单位时间光子发射数量出现波动。钨丝光源平均发射 $10^{14}$ 光子/ms。发射数目均方根的偏移是单位时间光子发射数量的平方根, 即 $10^7$ 光子/ms。在受到散粒效应噪声限制的情况下, 信噪比与测得光子数的平方根及光子测量系统的频带宽度成正比。在这种条件下进行测量, 如果要改进信噪比就只能增强照明强度或测量系统的聚光效应,

或者降低放大器的频带宽度。实际上, 在1815C温度下, 钨丝发射 $10^{14}$ 光子/ms中只有一小部分到达光探测器, 一个理想的数值孔径(NA)为0.7的物镜可以收集0.06的发射光。但在发射和收集的光子中只有0.2是在可见光的波长范围, 其它均为红外线(热)。如果再加上通过干涉滤光片(30nm), 约只可透过0.05可见光以及集光器和空气—玻璃界面损失的光。那么, 真正能到达标本上的光一般都被降低 $10^{10}$ 光子/ms(L. B. Cohen等, 1986; H. P. Hopp等, 1990)。用于记录系统的光探测器选用硅二极管, 它比光电阴极射线管的信噪比至少高2.5倍。通过硅二极管将电压敏感性染料的发光效应转换为电学信号; 再经过放大器, 信号增益为±10V被送入多路调制器和模—数转换器。硅二极管排列呈方阵, 如 $10 \times 10$ 和 $12 \times 12$ 阵。由于生物标本多为近圆形, 所以方阵的四角部位可不利用。这样, 同时可监测多达124个位点。每个二极管的受光面为 $1.4\text{mm} \times 1.4\text{mm}$ 方块, 相邻方块的绝缘区厚度为0.1mm。近年已出现 $24 \times 24$ 二极管阵提供使用。与此相应, Cohen实验室也已完成464个探测器的监测系统。

光学记录方法用于神经系统研究时, 由于标本的形状各异, 而且不同的神经元直径相差很大, 可以从几个 $\mu\text{m}$ 到几百 $\mu\text{m}$ 。因此投射到一个固定大小的二极管阵上, 对于每一个探测器就可能具有3种不同的情况: 一个细胞的活动被记录在多个探测器上, 并产生相同的信号; 一个细胞刚好覆盖一个探测器的整个区域, 因此产生一个较强的反应, 其中有些探测器只投射到细胞的边缘, 则反应量较小; 一个探测器记录多个细胞的活动, 如3个细胞的切面都投射到一个探测器上, 可称为多细胞记录。

借助各种染料, 利用光学信号, 已经测试过多种类型标本膜的反应, 其中既有慢反应, 也有快反应。一些慢反应称为重新分配信号, 用于研究细胞或细胞器在悬浮液中的膜电位。这种信号的时程受膜通透性的限制。红细胞膜电位的时程可大于100ms, 面快反应适合于监视可兴奋膜电位变化。利用重新分配信号或快信号都可以在1~30ms内测定膜电位的变化, 但重新分配信号比快信号强10倍。另一方面, 如使用这两种信号测量1~3ms内短暂的电位变化时, 则快信号要比重新分配信号强10倍(H. P. Hopp等, 1990)。测试过快反应的标本包括: 骨骼肌和心肌的表面膜和t系统膜; 骨骼肌的肌浆内质网; 无脊椎动物神经系统中的神经元; Hobsoma唾液腺; 培养的成神经细胞、神经元; 哺乳类动物海马脑片; 脑体脑结构; 哺乳类动物视神经、神经垂体、下丘、蝶鞍嗅球; 活体哺乳类动物大脑皮层, 嗅球、蛙顶盖等(A. Crinvald, 1985)。

1991年,  $24 \times 24$ 探测器阵开始用于实验研究。由于分区更加精细, 进一步提高了空间分辨率, 这样对神经细胞的标定要求就更加广泛。即使在低等动物简单神经系统中, 如何分辨大量的中间神经元, 也是一个艰巨的任务。使用光学记录方法的好处是可增加对神经细胞生理反应群体的认识; 在一群被激活的神经细胞间存在的跟随关系及是否参与生理效应和行为问题的研究; 大脑和中枢神经元的机能构型, 发放的信号进行协同与拮抗以实现行为调控等问题的探索。总之, 许多这种类型的课题如果以电学记录方法与光学记录方法结合或配合使用, 将使大量假设得到验证。

为了说明光学记录技术的使用对脑研究的促进, 举出一个对熟知标本的研究可能是有益的。如海兔吸水管射水所引起的缩鳃反射, 一般认为其神经环路是简单而明确的(A. Crinvald, 1985), 由机械刺激兴奋感觉神经元, 通过兴奋性中间神经元连接运动神经元而支配鳃收缩, 最多包括由吸水管传入到24个机械感受神经元, 投射到6个运动神经元。Kandel实验室利用这个标本和图解已开展深入研究。直到1989年由Zecevic等用光学记录方法查明, 触动吸水管外皮引起缩鳃反射约涉及300个神经元。由此证明, 缩鳃并不是一个简单反射, 还需要确定触动水管外皮到底使哪个(些)“触觉神经元”兴奋, 缩鳃又是怎样使运动神经元激活; 此外, 其它又是些什么神经。这样, 才能进一步探讨与一次缩鳃反射机能相关的神经元间连接的特性及其构筑关系。当

然,涉及到各种反射的中间神经元群及其间的机能构筑也引人注意。

进一步改善光学测量膜电位信噪比的努力仍在继续,正从几个方面试探,发现具有其它较大变化光学特性的可能性,例如能量转换、圆二色性或吸收作用加强喇曼散射等特性;改进设备,如使用新光源,并对具有实体散射或厚度的标本使用共聚焦显微镜,均可大大改善空间分辨率;寻找或设计更好的染料。

(北京大学张人骥撰)

### 基体辅助激光脱附电离 matrix-assisted laser

desorption ionization 基体辅助激光脱附电离简称 MALDI,又称基体辅助激光解析电离,是20世纪80年代末才发展起来的一种新的有机大分子电离技术。随着生命科学特别是基因工程学的迅速发展,人们特别需要一种能快速、准确和灵敏地测定蛋白质、多聚肽等生物大分子分子量的技术。目前基体辅助激光脱附电离法能在几秒中内测定生物大分子的分子量高达20多万 Dal,只需样品两个微微摩尔,并由这项技术所需的激光能量很低,生物大分子电离后产生的碎片又少,使得对混合样品的测量成为可能。

基体辅助激光脱附电离技术是通过基体材料对激光的吸收、激发,然后从固体表面脱附出来,同时将分散在基体中的被分析有机大分子带出,这些有机大分子在气相中通过质子化转移反应成为完整的分子离子,通过离子透镜进入时间飞行质谱仪或其它类型的质谱进行质量分离,最后被离子探测记录下来。这项技术的关键是基体材料的选择,要求基体材料易气化,易溶解于水,在所用的激光波长上有很大的吸收系数。一般基体材料与被分析样品的摩尔比在1 000:1。

1987年之前,用激光脱附法测得的有机分子分子量最多只能到1 500,再大点的分子就极易被激光打碎,使得测定完整大分子的分子量非常困难。1987年9月,在德国举行的第4届有机固体离子形成会议上,会议负责人本明霍文(Benninghoven)宣读了由日本塔拿卡(Tanaka)递交的一篇论文。论文上的质谱图表明塔拿卡能够用激光脱附技术测到具有很大分子量的有机分子,但文章并没有说明用什么样的离子源,也没有详细说明离子产生的方法。直到以后人们才知道他们是用紫外激光作为样品的脱附光源,用蛋白质作为分析物,与一种液体和金属粉均匀混合在一起制成样品。这篇文章在会议上引起很大的轰动。

与此同时,德国希莱凯普(F. Hillenkamp)和卡提斯(M. Karas)也已开展这项工作。1988年8月,在法国举行的国际质谱会议上,他们宣布了他们的实验结果。他们找到一个较理想的基体辅助材料烟苯酸(Nicotinic Acid)。烟苯酸-[3]在常温下具有很低的蒸气压,易溶解于水,易升华,并且在他们所用的4倍频钕铝石榴石激光器的波长上有很大的吸收系数。他们把烟苯酸-[3]和蛋白质按一定比例溶解于水,然后取几点这种混合液在金属样品架上,干燥后放入真空样品室,将激光聚焦在样品上进行脱附电离,产生的离子进入反射式飞行时间质谱仪进行质量分离。他们观察到信噪比很高、信号很强的蛋白质质谱峰,测得的蛋白质分子量为25 000,并且他们用的蛋白样品很少,只有1微微摩尔,说明此方法很灵敏。以后,希-卡方法成为国际上用基体辅助激光脱附电离的主要方法。

1989年后,许多人致力于寻找合适的基体材料。到目前为止,至少已有300多种材料被研究过,但能应用的不超过10种。这方面工作比较突出的是当时在美国洛克菲勒大学工作的比弗斯(R. C. Beavis)和蔡特(B. T. Chait)。他们用胰岛素作为被分析的有机大分子,对几十种有可能作为基体辅助材料的分子进行了研究。他们用水和乙醇混合液(1:1)溶解胰岛素和基体材料,一般的浓度是每升水乙醇混合液溶解0.1g胰岛素和5~10g的基体材料,然后取1的混合溶液进行分析。最后他们发现4种比烟苯酸好的基体辅助材料,其中用得最广的是芥子酸(Sinapinic Acid)。这种基体特别适用于分子量大于1万的生物分子。他们已测得的

最大蛋白质分子量达11.6万,质谱的分辨率也从原来的几十上升到几百。尤其值得一提的是他们第1次用这种技术测得大分子负离子质谱,使得 MALDI 应用变得更为广泛。以后,又有一些很好的基体材料被发现,如2,5-双羟基苯甲酸(2,5-Dihydroxybenzoic Acid)等。1993年,美国麻省理工学院的比曼(K. Biemann)又发现2-(4-羟基联苯胺)甲酸是一个非常好的基体辅助材料,与目前其它基体材料相比较,它对分子的辅助效率高,即灵敏度高;样品应用时间长,一般在同一个样品点上,激光打几百次后,样品峰也不会明显下降,并可测到的大分子分子量高达25万。

基体辅助激光脱附电离技术,在实验中已取得很大的成功,但对它的机理研究还处于初始阶段,有许多工作有待于进行。目前已有一些科学家提出几个模型和理论,其中有弗特斯(A. Vertes)的均匀瓶颈模型(Homogeneous Bottleneck Models, 1990)、约翰逊(R. E. Johnson)的压力脉冲模型(Pressure Pulses Models, 1991)、比弗斯(R. C. Beavis)的喷射膨胀模型(Jet Expansions Models 1991)和德国的希莱凯普等提出的光化学电离模型。希莱凯普的理论最引人注目。他们提出的机理是:基体分子吸收到光子后激发到激发态,一部分被激发的基体分子失掉一个电子形成正离子自由基,而另一部分与未被激发的基体分子碰撞而得到电子成为负离子自由基。这些正负离子自由基又进行光化学反应,得到或失去氢离子,最后与被测的大分子进行质子转移电离反应,正基体自由基离子把氢离子转移到大分子上,使之成为正准分子离子;而负基体自由基离子从样品分子中得到氢离子,使之成为负准分子离子。这个模型能解释质谱图上出现的极大部分质谱峰。但目前还没有有很强有力的实验证明之,除非能把脱附和电离过程分开进行研究。

目前,基体辅助激光脱附电离还处于迅速发展阶段,发展的焦点主要集中在以下3方面:

(1)对基体辅助激光脱附电离理论的研究 这个问题不是一下子能解决的,需要大量的实验证明和技术改进而逐步了解。

(2)对基体辅助激光脱附电离质谱仪进行技术改进 具体的是改进系统样品靶和探测器的离子透镜;提高它的质量分辨率和灵敏度;或者改进质谱仪系统,使之小型化、商品化。这方面工作较有成就的是美国华盛顿大学的约翰斯彻(K. Jonscher)等人,他们发展了基体辅助激光脱附四极电离陷阱质谱仪(Matrix-assisted Laser Desorption-Quadrupole Ion Trap Mass Spectrometer),他们已能用这种质谱仪探测到分子量为26000的蛋白质。此方法的特点是仪器体积小,造价低,具有很高的质量分辨率,其质谱峰的半宽度可达到6000。

(3)对基体辅助激光脱附电离技术在生物化学和基因工程中应用的研究。人们已用这种技术测到分子量为4万的DNA,最近1 000个核酸组成的DNA完整分子离子也能被这种电离技术脱附电离出来。但还有许多问题有待解决,如当用桑格(Sanger)方法将一个链型的DNA分子分解成4组具有不同断尾的碎片时,要考虑到溶液组成对MALDI的影响。另外,在测量这些碎片时,怎样选择最佳基体材料和样品制备方法及质量的标定等问题也有待解决。还有,为了使大分子的分子量测得更加准确,质量分辨率有待进一步提高。可以预见,随着质谱仪分辨率和探测器灵敏度的提高及新的基体材料的发现,基体辅助激光脱附电离技术将进入新的发展和应阶段。

#### 参考文献

- 1 Tanaka K, Ido Y, Akita S, Yoshida T, Yoshida Y. Proceedings of the Second Japan-China Joint Symposium on Mass Spectrometry, Usaka, Japan, 1987
- 2 Karas M, Bachman D, Bahr U, Hillenkamp F. Matrix-assisted ultraviolet desorption of non-volatile compounds. Int. J. Mass Spectrom. Ion Proc, 1987, 78: 53~68
- 3 Beavis R C, Chait B T. Cinnamic acid derivatives as matrices for ultraviolet laser desorption mass spectrometry of



- proteins. *Rapid communications in Mass Spectrometry*, 1989, 3(12):432
- 4 Vertes A, Gijbels R. Homogeneous bottleneck model of matrix-assisted ultraviolet laser desorption of large molecules. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 1990, 4(6): 228~233
  - 5 Karas M, Bahr U and Giebmann U. Matrix-assisted ultraviolet laser desorption ionization mass spectrometry. *Mass Spectrometry Reviews*, 1991, 10:335~357
  - 6 Beavis R C. Matrix-assisted ultraviolet laser desorption: Evolution and principles. *Organic Mass Spectrometry*, 1992, 27:653~659
  - 7 Ehring H, Karas M, Hillenkamp. F. Role of photoionization and photochemistry in ionization processes of organic molecules and relevance for matrix-assisted laser desorption ionization mass spectrometry. *Organic Mass Spectrometry*, 1992, 27:472~480
  - 8 Juhasz P, Costello C E, Biemann K. Matrix-assisted laser desorption ionization mass spectrometry with 2-(4-Hydroxyphenylazo) benzoic acid matrix. *J Am Soc Mass Spectrom*, 1993, 4:399~409
  - 9 Karen Jonscher, Graeme, Ashley L. McCormack, Kohn R. Yates, III. Matrix-assisted Laser Desorption of Peptides and Proteins on Quadrupole Ion Trap Mass Spectrometry. *Rapid Communications in Quadrupole Ion Trap Mass Spectrometry*. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 1993, 7:20~26
  - 10 Wu K J, Steding A, Becker C H. Matrix-assisted laser desorption time-of-flight mass spectrometry of oligonucleotides using 3-Hydroxyptcolinic acid as an ultraviolet-sensitive matrix. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 1993, 7:142~146

(英国格拉利哥大学郑伟杰博士撰)

**电泳** electrophoresis 电泳法是利用各种带电粒子在直流电场中迁移的差别来进行分离的方法。它不仅是一种现象,也是一种有效的制备和分析方法。带电粒子可以是小的离子,也可以是生物大分子,如蛋白质、核酸、病毒粒子、细胞器、细胞等。它们在电场中迁移的特性取决于粒子的形状和大小、所带电荷的性质和数目、介质的阻力以及电场的强度。

电泳现象作为一种分离分析方法是1937年瑞典科学家梯塞列斯(Tiselius)建立“移界电泳法”(moving boundary electrophoresis)后才不断得到发展的。他成功地用移界电泳法将血清蛋白分成5种主要成分,即清蛋白、 $\alpha_1$ -、 $\alpha_2$ -、 $\beta$ -和 $\gamma$ -球蛋白。他设计的世界上第1台“自由电泳仪”使人们对血清蛋白的了解前进了一大步,他也因此在1948年荣获诺贝尔奖金。

由于自由溶液受热后发生密度变化,产生对流,使区带扰乱,分辨率不高。为了提高分辨率,主要着眼于消除欧姆热和寻找电渗低的介质,改进加样方法,使区带变窄。为了消除热,使电泳层尽可能薄,并采用各种方法冷却凝胶。聚丙烯酰胺是理想的低电渗介质。通过改变凝胶浓度可在电泳过程中引入一个新的分离因素,即分子筛效应。从而高分辨率。琼脂糖凝胶虽然稍逊于聚丙烯酰胺,但仍然不失为大分子电泳分离的介质,而且特别适合免疫电泳。

为了进一步提高分辨率,人们又改进了各种电泳方法。例如利用在两种不连续缓冲液界面上样品会发生浓缩的原理,建立了不连续电泳方法和仪器。将凝胶制成浓度梯度胶,扩大分子筛效应,称为梯度凝胶电泳。在凝胶中添加 SDS 或其他去污剂,可将蛋白质拆分成亚单位,这种方法常用于测定蛋白质亚分子量,这是生物化学研究中不可缺少的数据。根据分子量的不同可以用

来诊断疾病,如肾脏疾病。

利用凝胶中的  $H^+$  浓度梯度使各种蛋白质按等电点浓度在各自的等电点位置来进行分离的方法,称为等电聚焦电泳,具有很高的分辨率。使用载体两性电解质  $H^+$  浓度梯度分辨率可达  $H^+$   $10^{-3}$  mol/L 浓度,使用固相  $H^+$  浓度梯度可达  $H^+$  浓度  $10^{-4}$  mol/L。因此,使用等电聚焦技术可以分辨只有微小差别的蛋白质和同工酶,在医学上可以用于诊断疾病,如利用血红蛋白 A<sub>1c</sub> 电泳带的含量诊断糖尿病;利用乳酸脱氢酶同工酶的变化作癌的早期诊断;利用磷酸肌酸激酶诊断心血管疾病;在法医学上可以利用葡萄糖磷酸变位酶、酸性磷酸酶同工酶等来鉴别分型;在食品分析中,可以利用食品的蛋白谱或酶谱的差别鉴定、分析品种及质量,并确定其新鲜程度;在农业上可以借助于等电聚焦带进行品种鉴定,并为定向培育优良品种提供依据。

将不同原理的凝胶电泳作二维组合就成为各种形式的双向电泳。如等电聚焦-免疫电泳、等电聚焦-等速电泳、等电聚焦-常规凝胶电泳(滴定曲线)等。滴定曲线用于测定等电点和蛋白质的带电性质,可为层析分离提供依据。将一样品进行等电聚焦后,再在90°方向进行 SDS 电泳分离,是双向电泳最常用的方式。其分辨率极高,对了解基因表达产物、蛋白酶解图谱等工作提供极为丰富的信息,也可以用于解决医学上的一些疑难病症以及探求发病机制等。

基于抗原的电泳迁移率以及与抗体的专一性免疫沉淀的琼脂糖免疫电泳,可以在临床和基础研究中作为抗原和抗体的免疫学研究的重要手段。如火箭电泳来诊断肝癌,用免疫电泳鉴定一些生物制品的纯度,在农业上用免疫电泳鉴别杂交优势等等。

电泳转移是利用各种吸附的办法将 DNA、RNA 或蛋白质电泳后的区带吸附到硝酸纤维素膜上或其它处理过的膜或纸上,等于将一次电泳的结果拷贝成几份,再各自进行蛋白质、同工酶染色、放射自显影、免疫检测等,甚至作制备性洗脱。这是一种高效率的方法,是在一个缓冲液槽中放几个夹子,或直接在石墨电极之间铺以凝胶、转移用的膜和滤纸。为了增加转移效率,在阳极和阴极之间通以较大的电流,以使电泳后凝胶上的区带转移到膜上。

核酸电泳在遗传工程研究中占有极重要的地位。利用各种核酸电泳,可以分离分析核酸片断以及核酸分子中的碱基排列,从而对医学和农业的一些研究课题如分子病的探讨、基因重组的实践应用等作出贡献。

电泳仪是生化实验室常用的小型仪器,种类很多。随着技术的不断发展,电泳仪器的分析对象也越来越专一化。按形式可分为垂直型的和水平型的;按分析对象可分为蛋白质分析用的、核酸分析用的、细胞分析用的;按功能可分为制备型的、分析型的、转移型的、浓缩型的等。从垂直管型盘状电泳仪发展到垂直板状电泳仪,再发展到半自动和全自动水平平板电泳仪,其分辨率越来越高,操作越来越简单,电泳时间越来越短,功能越来越多。

用于分离 DNA 和 RNA 片断的潜水电泳仪,是一种桥式水平琼脂糖电泳仪。用于测定核酸序列的垂直板型电泳仪,增加凝胶板的长度可以提高分辨率。脉冲电场凝胶电泳对大到900万碱基对的 DNA 片断也能得到高分辨率的分离。

制备电泳仪具有分辨率高、分离量大、回收率高,并且不改变样品的物理化学性质和生物学性质等特点。与电泳仪器配套的有电源、循环恒温水浴、凝胶干燥器、透照仪、电泳浓缩器、光密度扫描仪等。

电泳法已成为生物化学、免疫学、分子生物学实验室以及与这些基础学科密切有关的医学、农业、林业、牧业、渔业、制药业及某些工业分析中必不可少的技术。特别是作为20世纪80年代技术革命标志之一的生物工程,有许多环节都离不开各种类型的电泳分离技术。因此,电泳法必然会在基础生物科学的研究以及在国民经济的发展中发挥日益重要的作用。

#### 参考文献

- 1 Righetti P G. Isoelectric focusing: Theory methodology

and applications Elsevier biomedical press, 1983

2 何忠效,等.等电聚焦.北京:科学出版社,1985

3 何忠效,等.电泳.北京:科学出版社,1990

(中国科学院生物物理所郭尧君研究员撰)

**生物大分子印渍技术** biological macromolecular blotting 把电泳分离后的生物大分子区带通过电或非电力转移于固定化载体纸或膜上使之固定化,用亲和结合技术一次或多次性地专一检出感兴趣的生物分子,这种技术称生物大分子印渍技术。

1975年,苏格兰爱丁堡大学 E. M. Southern 首创生物大分子印渍技术。他把限制性内切酶作用后的 DNA 片段进行琼脂糖凝胶电泳,然后把已分离的全部 DNA 区带通过毛细作用力转移到硝酸纤维素滤纸上,使各区带以非共价连接于滤纸而被固定化,再用经放射性标记的 RNA 作探针,对所得到的转移 DNA 谱进行 DNA-RNA 分子杂交反应,从而检出所需的 DNA 片段。由于这种转移过程类似于用吸水纸去吸干墨迹,使纸上染上墨渍,故 Southern 称之为 Blotting (印渍术或印迹术)。Southern 印渍术以后亦称南部印渍术(因 Southern 含“南部的”之意)或 DNA 印渍术。没过一年,法国 Chambon 小组用 Southern 印渍术研究鸡胚卵清蛋白基因时,发现了真核生物的基因有不编码的插入序列。这一杰出成果被创立 DNA 双螺旋模型的 Crick 誉之为分子遗传学中的一次“微型革命”。1977年,Alwine 等人将此术应用于 RNA 的研究,并首先采用重氮苯氧甲基纤维素纸,由此提出北部印渍术(Northern blotting)。1979年,Towbin 等人又把印渍术用于抗原检出,提出免疫印渍术(immunoblotting),以后这种免疫印渍术发展很快,取得许多研究成果。1981年,Burnette 把免疫印渍术称为西部印渍术(Western blotting)。Towbin 等人还创造性地使用电洗脱装置作为印渍动力,这不仅能真实地获得凝胶分离区带的复制品,而且也缩短了印渍时间。这种以电作为印渍动力的印渍术,也被称为电印渍(Electroblotting)、电洗脱法(Electroelution)、电转移(Electrotransfer)、电泳转移(Electrophoretic transfer)、横向电泳(Transversal electrophoresis)等。1982年,Reinhart 等人将等电聚焦法分离蛋白质的凝胶作为印渍模板,创造了双向印渍术,此被称为东部印渍术(Eastern blotting),即为蛋白质印渍术。在这种情况下,1983年 Gershoni 和 Palade 提出,印渍术不要以地区来命名,这一术语应和有关大分子合在一起使用,如 DNA 印渍术、RNA 印渍术、蛋白质印渍术等等。这样,以后又出现了许多名称的印渍术,如大分子印渍术、酶印渍术、脂多糖印渍术、配体印渍术、酶联免疫电转移印渍技术、麦胚凝集素印渍术、金印渍术、过氧化物酶免疫印渍术等等。其中有以欲检出的大分子命名的,也有以配体或染料命名的。值得一提的是还有一种点印渍术,其特点是不经凝胶电泳分离,直接把样品以小圆点或其他几何形状(如小方块)点于固定化材料上,然后用分子亲和技术检出。这就是说,这种技术除不经过凝胶电泳外,其它步骤和印渍术相同,故一般把点印渍术作为印渍术的一个分支。

生物大分子印渍术一般包括凝胶、电泳、印渍、印盖和检出等5个步骤。根据各步骤中不同的反应体系,还需增加不同的平衡洗涤过程。实际上,印渍术是把凝胶电泳技术、固定化技术以及分子亲和结合技术三者融为一体的一项综合性技术。其核心是把凝胶电泳已分离的区带转移和固定于薄的固定化纸上,并浓集于表面。这也就是将原来难以多次应用、难以作大分子复性处理和难以长期贮藏的凝胶改为可以承受种种处理、能多次应用又能长期贮藏的固定化纸。与凝胶相比,用固定化纸有以下的优越性:(1)湿的固定化纸是柔韧的,容易操作,绝不像凝胶那样易破裂、易变形。(2)被固定在固定化纸表面上的生物大分子,可以均等地和各种作为探针的配体接近,不会因凝胶孔径的位阻而使某些大分子配体不能进入凝胶产生亲和结合。(3)由于大分子被浓集于固定化纸表面,因此其后的鉴定通常只需少量试剂(4)去除变性

剂也比直接使用凝胶容易和彻底,能使生物大分子较完全地恢复到天然态。(5)对免疫印渍术而言,由于抗原已被固定化于印渍纸上,故可检出那些不会产生沉淀反应的抗原-抗体反应。(6)加工处理固定化纸的时间大为减少。(7)现在已能把一块凝胶同时转移到多张固定化纸上,使之进行多种鉴定分析。(8)固定化纸上的区带可以长期贮藏,由于区带较牢固地连接于固定化纸,经得起各种处理,可以连续分析。(9)探针与区带是非共价结合,故可被“抹掉”,再进行第2、第3探针的检验。(10)对同位素检出法而言,由于固定化纸很薄,可以提高放射自显影的效率;尤其是低能射线,也能通过印渍术而获得较满意的结果。

目前,印渍术已在以下几个领域得以广泛应用。(1)在免疫学领域的应用。印渍术是一种既快速又灵敏的筛选抗原抗血清的技术,和其他类似技术相比,它不需要预先提纯,不需要对抗原或抗体进行标记,可以直接用稀释过的抗血清得到免疫复合物。因此,免疫印渍术常被用于描述抗原特性,用于血清学上甄别目的;鉴定抗体特异性;制备表位谱,分析非抗体配体类对其受体的特异性结合;鉴定肿瘤相关抗原;检出免疫学上起交叉反应的蛋白质的电泳变异型,包括补体 C1g、次黄嘌呤核糖基转移酶、腺嘌呤磷酸核糖基转移酶以及低密度脂蛋白受体。印渍术还能分析那些溶解度差、而在其它抗原-抗体沉淀反应中常以污染物出现的那些抗原。总之,印渍术最广泛地应用于免疫学和医学临床检验。(2)在分子生物学领域的应用。最初,Southern 用印渍术研究 rRNA 的基因编码,以后,Chambon 小组又应用此技术研究鸡胚卵清蛋白基因,发现“真核生物基因具有不编码的插入序列”。印渍术还在分析 DNA 甲基化对基因表达关系中,发现甲基化程度和 DNA 的转录活性成反比。另外,印渍术还可用于检验和比较机体不同组织或不同发育阶段某些基因的特性;用于各种遗传疾病中功能畸变基因的分析。(3)在生物化学领域的应用。印渍术被广泛用于研究生物分子间的相互作用。例如 DNA-蛋白质和 RNA-蛋白质的相互作用;组蛋白 H<sub>2</sub>、H<sub>3</sub> 和 H<sub>4</sub> 之间的相互作用;外源凝集素与糖蛋白之间的相互作用;Gorelick 等人用印渍术查证了钙调蛋白与其结合蛋白间的结合。此外,印渍术也在酶单位的鉴定中发挥作用,甚至有人用印渍术测定酶活性;印渍术还能鉴定质膜的表面成分及其拓扑学、分析同工酶等。(4)在细胞生物学中的应用,由 Hayman 等人对正常鼠肾细胞(NRK 细胞株)进行分析,发现正常的 NRK 细胞被定位于纤维粘连蛋白和一种新发现的分子量为70kd的多肽上。(5)在植物生理学中的应用 Steup 等人用印渍术发现了菠菜和豌豆叶抽提液中葡聚糖水解酶类的多态性。(6)在生物物理学方面的应用。Erickson 等人发现把<sup>14</sup>C-或<sup>35</sup>S-标记多肽从凝胶转移于固定化纸上,能提高放射性自显影检出的效率。

印渍术从发现至今只不过十几年,但发展迅速,研究成果显著,已为世人重视。随着技术的不断改进,材料、设备的不断丰富、完善,印渍术将会显出更强的生命力。

#### 参考文献

- 1 Southern E M. J Mol Biol, 1975, 98: 503~517
- 2 Smith G E, et al. Biochem, 1980, 109: 123~129
- 3 Bowen B, et al. Nucl. Acids Res, 1980, 8: 1~20
- 4 Gershoni J M, et al. Anal Biochem, 1983, 131: 1~15
- 5 北京大学生物系遗传教研室编. 遗传学实验方法和技术. 北京:北京高等教育出版社, 1984
- 6 范培昌. 生物大分子印渍技术和应用. 上海:上海科技文献出版社, 1989

(华东师范大学李世昌副教授撰)

**生物磁学** biomagnetism 生物磁学又称磁生物学,是一门介于生物学和磁学之间的边缘科学。生物磁学经历孕育(约公元前2世纪~1875)、初创(1876~1960)和发展(1961年以后)3个阶段。生物磁学的研究内容主要包括,生物磁现象,外加磁场对生物的影响,采用磁学原理和磁性器件的磁生物工程,以及利用各

种磁学方法研究生物的结构和功能的关系等。

**生物磁现象** 生物之所以受磁场影响,主要是因为它们的体内具有微小的磁性微粒。如在向磁性细菌体内,就有10~20颗直径在 $500\sim 100\times 10^{-10}\text{m}$ 的微粒,这些微粒连成一条磁性链,化学成分是 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 。家鸽具有在成百上千公里外飞回鸽巢的本领,也被认为与鸽头部含有这种磁性微粒有关。鲨鱼、海豚、蜜蜂和某些鸟类等生物,也有按地磁场确定方向的本领。

从微观来看,构成生物体的各种生物材料也是有磁性的,如铁、镍、钴等属于铁磁性材料,磁化效应十分明显;另一些物质,如氢、氧、碳、磷等非金属元素,其分子和原子都具有磁矩。此外,含铁的血红蛋白、肌红蛋白和铁蛋白,含钴的维生素 $\text{B}_{12}$ ,含铜的血蓝蛋白和肝铜蛋白,这些生物分子在一定条件下会表现出顺磁性,因而其结构和功能便与其顺磁性有关。绝大多数生物组织在非匀强磁场中是朝磁场减弱的方向受力,因而具有抗磁性。

生物磁场极其微弱,易受到环境磁噪声的干扰,因而对检测生物磁场仪器的敏感性与分辨率要求很高。近年,由于高屏蔽效能的磁屏蔽室的建成,超导量子干涉式磁强计(SQUID)的应用,生物磁场的研究有了明显的进展。

**人体磁场的来源** 人体磁场的研究,是生物磁学中一个重要的分支。它的来源有两个:(1)生物电流。人体器官和组织在其活动中会产生诸如电子传递、离子转移、神经电活动等生物电过程。在这些生物电过程中便会产生频率和强度不同、波形各异的生物电流,由此产生微弱的生物磁场。(2)体内强磁物质的剩余磁场。当某些强磁性物质如 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 进入人体组织器官后,外加磁场可以将其磁化,外加磁场撤去,会产生剩余磁场。

**人体的生物磁图** 人体磁场随时间的变化关系被显示出来后,称为人体磁图。它同记录生物电场随时间变化的生物电图一样,也能提供人体的生理和病理状态的重要信息。已被测量的人体磁图主要有以下几种:(1)心磁图。人体心脏的心耳与心室肌肉的周期性收缩会产生复杂的交变生物电流,由此产生心磁场,其强度约为 $10^{-11}\sim 10^{-10}\text{T}$ 。心磁场强度随时间变化的曲线称为心磁图(MCG)。1963年,鲍利(G. M. Baule)与麦克菲(R. Mcfee)首次在磁屏蔽室内用线圈磁强计测量到人体心磁图。1970年,科恩(D. Cohen)等人首次使用SQUID作出较完美的心磁图。现已可用SQUID以及一个二阶导数梯度计耦合线圈辅助装置,在非磁屏蔽室房间里获得较理想的心磁图。心磁图在临床应用中比心电图具有更高的特异性和预期值。(2)脑磁图。脑磁场随时间变化的曲线,称为脑磁图(MEG)。脑磁图分为自发脑磁图和受激脑磁图两大类。自发脑磁图( $\alpha$ 节律)的最大幅值为 $10^{-12}\text{T}$ ,频率约为13Hz。当被测者闭眼时信号强,而睁眼时信号弱。癫痫患者的 $\alpha$ 节律信号值较正常人强。受激脑磁信号很弱,只有 $10^{-13}\text{T}$ 。用1mA幅值电脉冲信号刺激人的右手小指,可在大脑左半球罗兰多氏缝附近测到受激脑磁信号。用光信号刺激视觉,则在头后部枕外隆突附近测到视觉受激脑磁信号。用声信号刺激听觉,可在头侧部测到听觉受激脑磁信号。1972年,科恩用SQUID记录到第一张脑磁图。脑磁图有助于了解脑细胞群活动与皮层产生的特定功能之间的关系,并有可能成为诊断脑机能状态的新方法。美国已建立脑磁图研究中心,为癫痫患者作癫痫病灶外科切除手术前的定位诊断。意大利罗马生物磁学实验室对脑瘢痕、萎缩、肿瘤、血管瘤和钙化等进行脑磁图研究,取得很大成功。脑磁图法也可成为研究神经系统和实验心理学的重要实验手段。测脑磁图不要接触皮肤,不会引起伪差。低频或直流磁场可以穿过头颅骨,脑磁图不受其影响。脑磁图还可以确定脑内场源的强度与部位,并能直接反映脑内场源的活动状态。(3)眼磁图。眼球运动和外界光刺激会产生眼电流,由此产生眼磁场,其强度约为 $10^{-13}\sim 10^{-12}\text{T}$ 。眼磁场随时间变化的曲线称为眼磁图(MOG)。由于不同的眼球和眼球的不同运动方式,都会产生不同的磁场信号,因此借助眼磁图可以检查眼睛的某些病变。应用眼磁图的最突出的优点,就是测量时无需接触眼睛。(4)肺磁图。肺磁场最先由科恩于1973年探测出。进展较快,已在少数国家用于临床。肺磁场

不同于心磁场、脑磁场等人体磁场,它是由侵入肺中的强磁性物质产生的。进入肺中的强磁微粒,在外磁场的作用下被磁化而产生剩余磁场,其强度因肺中含强磁物质的多少而异,一般约为 $10^{-10}\sim 10^{-8}\text{T}$ 。肺磁场随时间的变化曲线称为肺磁图(MPG)。肺磁图的主要用途有:尘肺的早期诊断,评价肺的净化功能,肺部疾病的鉴别,细胞游动的磁性测量。另外,正在研究的还有肌磁图、胃磁图、肝磁图等。

**磁生物工程** 磁生物工程是利用各种磁效应和生物磁效应以及磁学方法和技术,设计和制作生物工程中的多种器械和装置。主要进展有:(1)核磁共振成像技术。核磁共振成像技术(NMRI)是利用核磁共振(NMR)显示某一元素(实际是某一核素)浓度或弛豫时间的二维的或三维的图像的技术。它的特点是能使活体生物组织成像,对生物体无损害;不仅能显示形态,而且能显示说明功能和代谢过程等生理生化的化学性图象像。它在临床应用可分为人体代谢的诊断、人体组织解剖学诊断。(2)核磁共振血流仪。该仪器可快速、准确、无损伤地测量外周动静脉和体内较深部位器官的血流速度。其工作原理,是根据血流磁化后的磁化强度与流速、流量都存一定的函数关系。(3)SQUID。SQUID是利用超导状态下的卓普逊效应(Josephson effect)工作的。自1970年SQUID应用于人体磁场测量以来,测量灵敏度分辨率不断提高,现已可测量 $10^{-14}\sim 10^{-15}\text{T}$ 的极微弱磁场。一次到高次梯度式SQUID的应用,可避免使用昂贵的磁屏蔽室,从单道到多道、从标量到矢量生物磁场的测量,已使其测量功能不断改善。SQUID目前有两型,直流感应型dcSQUID和高频型rfSQUID,前者的灵敏度高于后者。SQUID的工作条件是一270℃,要用液氮降温。若能用液氦代替液氮,将可降低使用费用。(4)磁性药物释放系统。采用化学的、生物的或物理的方法,可以制成磁性药物释放系统。该系统是含有磁粉(或向磁性细菌)和药物的微粒,可在外加磁场引导下聚集于靶部位,在该部位持续释放出药物,从而使疗效提高、副作用减小。微粒的直径可以在几微米到几百微米间进行调节,并可采取静脉注射、埋敷或内服等方式进入人体,以适应不同需要。采用超微粒的磁粉很复杂,而采用向磁性细菌合成磁性药物释放系统,可获得更好疗效。因为向磁性细菌粒子的直径为50~100nm,可在微血管等微小空间移动。

**磁场的生物效应** 外加磁场对生物的影响称为磁场的生物效应,是生物磁学的重要内容之一。近年,也有人将研究外加磁场对生物系统的影响的科学称为磁生物学。由于外加磁场的类型和生物层次的不同,磁场的生物效应也有不同的表现。磁场的生物效应可分为生物分子效应、细胞效应、组织效应和整体效应,这些效应对不同的生物体又是多种多样的。磁场对生物体的作用有下列共同点:(1)磁场作用阈值。磁场必须达到一定的阈值,才能产生生物效应,不同的生物其阈值不同。(2)场型分布的影响。磁场的类型和分布(恒定或交变,均匀或非均匀,N极或S极,低频或高频)对生物的作用有显著不同的影响。(3)磁场的滞后效应。磁场引起的生物学效应在时间上往往滞后。(4)磁场的累积效应。磁场的生物学效应与磁场作用时间的长短有关。(5)磁场的双向调节作用。磁场对生物体具有双向调节作用。如磁场可提高面神经的兴奋性,用于面神经麻痹的治疗;也可降低面神经的兴奋性,用于治疗面神经痉挛。

随着生物磁学的不断发展,磁疗已在疾病的临床治疗中得到广泛的应用。生物磁学的未来发展方向将是对磁场的生物效应、生物磁场和生物磁性进行更深入的研究。除此之外,生物系统磁法研究和磁生物工程的实际应用,也将有较大的进展。

**参考文献**

- 1 Nakanishi M, et al. Japan J Appl Phys, 1987, 126: 1050
- 2 Walker M M, et al. Bioelectromagnetics, 1989, 10(3): 261
- 3 Armstrong R A, et al. Ophthalmic Physiol Opt, 1989, 9(3): 299
- 4 Ahlfors S, et al. Physica B, 1990, 97: 165
- 5 奇云. 生物磁学与磁疗机. 现代医学与现代医用仪器. 北京:

中国医药科技出版社, 1990. 274~296

(安徽省淮南职业医专奇云副教授撰)

### 生物细胞冷冻蚀刻电镜技术

冷冻蚀刻电镜技术, 又称冷冻复型电镜技术, 是一种生物细胞电镜样品制备技术方法。利用这种方法所制取的复型膜, 可以充分显示细胞膜、核膜和各种细胞器膜表面微细结构的变化, 其分辨率可以达到2nm。优于透射电镜超薄切片法的分辨率(2.5nm)。因此, 该技术已成为近代研究细胞生物膜结构、开展分子生物学研究的重要形态学手段之一。

自从1950年以来, 在国外先后有霍尔(C. E. Hall)、梅里曼(H. T. Meryman)提出了有关冷冻蚀刻的雏形; 到60年代穆尔(H. Moor)、布兰顿(D. Branton)等, 使该技术得到改进并进入比较成熟阶段。1970年以后, 又经过斯蒂尔(R. L. Steere)、西占贡赤堀宏等的不断改进, 使该技术更加成熟, 并很快发展起来, 在国外文献中出现了大量以次序冻蚀刻法为研究手段的资料。

1978年河北医学院电镜实验中心, 在国内最先采用冷冻蚀刻技术, 并于当年9月在桂林召开的全国解剖学年会上发表了“冷冻蚀刻技术初步实验成果”的论文报告。1980年以后, 国内又有几个单位引进了有关实验设备, 并陆续发表了细胞学、组织学、肿瘤学、生殖生物学等医学生物学实验研究工作方面的学术论文, 并有李文镇等编写出版了国内第一部冷冻蚀刻技术专著—《组织细胞冷冻复型电镜图谱》。冷冻蚀刻法的技术特点: (1) 样品处理采用液氮冷冻, 尽量消除理化因素的损伤, 使细胞超微结构更近于生活状态; (2) 通过样品切断—蚀刻, 可充分显示不同层次的细胞膜微细结构及其膜表面镶嵌蛋白颗粒, 为生物膜和分子生物学研究提供了实验手段; (3) 采用投影喷涂制取铂—碳复型膜, 使电镜图像具有浮雕样的鲜明立体感, 可得到细胞超微结构的三维图象, 有利于细胞重建工作的开展; (4) 复型膜具有分辨率高, 能耐受电子束轰击, 可以长期保存等特点。

冷冻蚀刻法所需要的设备仪器, 主要包括两类: 一类是附件型, 此型仪器的代表设备是日本日立HFZ-1型切断装置、FE-1型冷冻蚀刻装置和HUS-5型真空喷镀仪, 又称“铜块法”; 另一类是专用型, 此型仪器的代表设备是日本生产的EIKO. FD-2A, FD-3A和西欧列支敦士登生产的Balzers-360型等冷冻蚀刻装置, 此类设备的许多技术程序均为自动操作与控制。尽管仪器设备不同, 其技术操作程序基本一致, 都需经过: 样品的预处理(戊二醛固定、甘油防冻处理)、样品及切断装置的液氮冷冻, 在一定真空度和温度下, 将放入喷镀仪中的样品进行切断和加温蚀刻, 对样品断面进行喷镀制取铂碳复型膜, 把样品入腐蚀液中用铜网捞取复型膜, 最后用透射电镜观察。

1980年以来, 冷冻蚀刻法的技术及有关理论方面, 国内外均有很大发展。在冷冻蚀刻技术方法上有了许多改进, 并出现了以“快速冷冻复型法”为代表的技术方法, 其主要技术特点是: 在样品的预处理中, 免去戊二醛固定和甘油防冻处理, 改用快速冷冻装置, 将新鲜样品放入其与浸泡于液氮中的电镀板快速接触冷冻, 再将冷冻后的样品放入FD-2A冷冻蚀刻仪上, 按常规技术程序操作, 直至制出复型膜。利用上述方法所得到的复型膜, 其细胞超微结构更接近于生活状态。该技术1979年由日本山田类智首创, 在中国由李向印等于1981年建立这一技术方法1983年正式发表了学术论文。在冷冻蚀刻技术理论方面, 1974年科勒(J. K. Kohler)等就冷冻蚀刻技术冰晶形成的理论方面, 提出了自己的看法; 菲希尔(K. A. Fischer)等通过实验研究, 提出了克服冰晶形成的条件; 松本明等, 又在当年对蚀刻真空度、蚀刻与样品温度的关系, 发表了学术论文。在中国李文镇(1982)、应国华(1990)等进行了有关实验研究, 先后发表了冷冻复型技术经验介绍, 冷冻蚀刻技术中的冰晶损伤, 冷冻蚀刻技术中常见的人工损伤与假象等论文, 从而使冷冻蚀刻法的操作成功率进一步提高, 使其技术应用进一步趋向成熟。此外, 根据生物样品的不同特点, 特别是针对一些微小的生物样品(例如: 细菌、游离细胞等),

中国学者创建了特殊样品的冷冻蚀刻法, 先后发表了游离细胞冷冻蚀刻技术, 细菌的冷冻蚀刻技术及其图象的识别等论文, 从而更加丰富和发展了冷冻蚀刻技术及其所观察的内容。

关于冷冻蚀刻法的技术应用, 国内外学者亦开展了大量工作。在生物膜结构学说方面, 1974年辛格(S. J. Singer)等, 利用冷冻蚀刻技术在证明生物膜液态镶嵌模型学说方面, 进行了广泛研究工作; 1975年胡伯特(F. Humbert)等在复型膜所显示的镶嵌蛋白质微粒大小及其形态等问题上, 发表了学术论文; 1975年丹尼尔(B. Daniel)等, 又在冷冻蚀刻劈裂面的命名方面提出了自己的看法, 使现在对此问题有了比较统一的认识, 即将膜的疏水后层面向胞质、核质、细胞器基质的面称为EF面, 把面向细胞间隙、内间隙的面称为PF面。在器官与组织学方面, 1974年伊藤(S. Ito)等, 利用冷冻蚀刻技术对消化系统进行了详尽研究, 提出了微绒毛EF面微粒少而平滑, PE面为凹面的看法; 当年史劳德(P. Claude)等, 在研究肾小体的冷冻蚀刻图象中, 发现球内系膜细胞突起附着于内皮细胞之外, 其细胞间隙连接较多, 故有调节肾小体面流量的作用; 1976年砂田行(I. Sadayuki)等利用该技术所进行的呼吸系统研究中, 证明I型上皮、毛细血管内皮上都只有紧密连接, 1983年马斯基(V. F. Mashansky)等, 对表皮及其他复层扁平上皮内的细胞连接进行了研究, 认为桥粒是其主要连接装置。在细胞学研究方面, 1975年斯维尔(N. J. Severs)等, 对核膜所作的冷冻蚀刻电镜观察中, 发现核膜的壁裂面可出现较其他膜结构更为复杂的情况, 核孔可出现多种多样的图象; 1978年郎格(R. D. A. Lang)利用该方法对线粒体进行了研究, 认为线粒体在体外培养情况下, 在培养基中加入不同离子有改变其通透性, 从而使线粒体基质的体积得以改变。在中国, 1979年雷建章等, 总结了国外利用冷冻蚀刻技术开展的细胞超微结构研究工作, 发表了《冷冻蚀刻技术在超微结构研究中的应用》论文; 1981年应国华等利用该技术对胃癌和乳腺癌细胞进行了观察研究, 发现胃癌细胞膜间隙连接减少, 紧密连接走行曲折复杂; 1981年王促涛等, 对胎儿肾脏的冷冻复型观察中, 证明了14周胎儿肾小管上皮细胞质膜平直无镶嵌连接, 但有较为复杂的紧密连接; 1982年汪德耀等, 对北京鸭精子发生过程中膜结构的变化情况, 作了冷冻复型电镜观察; 宁爱兰等利用该技术, 进行了维生素A对Eca109食管癌上皮细胞株作用的研究。1984年张朝佑等, 利用冷冻蚀刻法作了犬心肌房结细胞膜结构的观察; 1985年袁德霞等, 又开展了针刺足三里对甲状腺影响的冷冻蚀刻电镜观察; 1986年曾亦白等, 观察到细胞紧密连接的形成, 是由一个自侧膜向侧膜移动的极性化过程; 1991年陈细法等, 进行了纤毛细胞特化结构的冷冻蚀刻研究。

为了更好地发挥冷冻蚀刻技术在生物膜研究中的作用, 针对目前该技术存在的某些问题, 近几年在仪器性能方面, 进行了以下改进和提高: (1) 努力提高仪器的真空度, 由原来的 $1 \times 10^{-5}$ 托, 提高到 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-9}$ ; (2) 准确控制切断、蚀刻时样品的温度; (3) 将盲目、随机切断, 改为选择、定位切断; (4) 尽量减少投影喷镀及复型膜的厚度。经过上述改进的专用型冷冻蚀刻装置制出的复型膜, 具有反差适当、层次分明、分辨率高等特点, 而且可使实验成功率大为提高。此外, 为了观察生物结构在实验研究中动力学变化情况, 急待开发冷冻蚀刻法与放射自显影、细胞化学、免疫电镜等相结合的技术方法, 以得到膜内微粒, 如: 酶、蛋白、抗原和受体等的动态变化信息。

#### 参考文献

- 1 Bullivants, Advanced techniques in biological electron microscopy, 1973, 67~107
- 2 Fircher K A, et al. Freeze—fracture autoradiography. Feasibility. Jour Cell Biol, 1979, 70, 453
- 3 赤堀宏, 冻结试剂处理装置的开发. 日本电子显微镜学会第35回学术讲演会演预稿集, 1979, (35), 174
- 4 李文镇, 等. 冷冻蚀刻技术初步实验成果. 医学研究通讯, 1979, 1(1): 32~34

- 5 应国华,等.冷冻复型电镜技术.中华物理医学杂志,1979,1(1):28~31
- 6 雷建章,等.冷冻复型技术在超微结构研究中的应用.中华物理医学杂志,1979,1(2):91~94
- 7 山田英智.生物试料的冻结技法.电子显微镜(日),1980,14(2):70
- 8 应国华,等.胃癌细胞のべーえくべか 法いすち超微构造の观察.日本医床电子显微镜学会志,1980,13(3,4):255~260
- 9 李文镇,主编.组织细胞冷冻复型图谱.北京:人民卫生出版社,1981
- 10 李文镇,等.冷冻复型技术经验介绍和国外进展.电子显微学报,1982,1(2):16~19

(河北医学院电镜中心应国华撰;李文镇审)

**辐射生物物理学** radiation biophysics 研究电离辐射

生物学作用的学科(Niemann, 1982)。它主要研究辐射对生物系统作用的基本的物理、化学原初过程和规律,而不是个别生物或组织的具体效应。

人类及地球上的一切生物一直处在各种辐射的轰击之下,生命起源与物种进化都同辐射密切相关。很显然,随着核能的利用与核技术在医学、农业、食品保藏及科学研究中应用的日益广泛,辐射将继续是人类生活中的一大环境因素。由于电离辐射的生物学效应复杂多样,能治癌又能致癌,能抑制也能促进细胞分裂与生长,能致突变亦能诱导生物对损伤的修复功能等等。面对如此多样的效应和奇特的“双重性”,必须从辐射对机体影响的最基本作用中寻找共同规律,才能深入揭示辐射与细胞及生物大分子相互作用的基本过程并最终阐明其作用的本质。同时,这类研究对于了解最基本的生命现象(例如生物对有害环境因素的反应,遗传信息的保持和修复等)和阐明癌变、突变及衰老的分子过程也有重要意义。因此,日本“人类前沿科学计划”和美国 NRC《生物学中的机会》(1989)对此均给以高度重视。

19世纪90年代发现 X 射线(Roentgen, 1895)和天然放射现象(Becquerel, 1896; Curie 夫妇, 1898)后,电离辐射强烈的生物效应立刻引起物理学家、化学家和生物学家的注意,促进了多学科间的交流和合作,因此在20世纪初便产生了辐射生物物理学生物物理学最老的分支之一(Kunkel, 1972)。

继初期的上述观察之后是定性辐射生物学时期。其特点是强调形态学研究,而且基本上是纯实验研究。但即使那时也作出了重要观察,其中一些至今仍未完全阐明,如1921年 Holthusen 发现的氧效应;又如20年代 Christen 提出高能辐射生物学作用与组织吸收的能量密切相关的设想,促使物理学家研制出最早的剂量测量法并开创了定量辐射生物学的基础。1927年, Muller 证明 X 射线能诱发果蝇突变。这一发现不仅说明辐射防护的重要,对农业及遗传学研究也有重大意义,从而使本学科发展达到又一高峰。

定量辐射生物物理学发展的特点是应用数学和统计学方法解释实验结果(Blue 等, 1922; Dessauer, 1923)。辐射作用被作为机体吸收辐射能量(剂量)的函数来研究,试图从剂量效应曲线形状的数学分析,从宏观计算结果推断基本过程,得出有关作用机理本质的结论。这种解决途径最后导出了“击中”学说(Timofeeff-Resovsky 和 Zimmer, 1947)和“靶”学说(Lea, 1946)。尽管这两种学说都有局限性,但对辐射作用的现代理论探讨仍有重大影响。

如果说这门学科前40年的形成和发展主要取决于医学需要,那么从20世纪40年代起,核反应堆和核武器的出现则促进它的迅速成长。由于核武器的威胁,辐射防护研究得到加强;由于核反应堆能生产大量人造放射性核素,促进了核技术的广泛应用。50年代后,有了可靠的放射源、统一的剂量和一整套细胞生物学定量技术,特别是 Puck 和 Marcus(1955)首次建立哺乳动物细胞培养术并测定其辐照存活曲线后,细胞辐射生物学取得了长足

的进步。Barendsen 等(1963)和 Todd(1967)证明,细胞对不同类型辐射的敏感性不同,表明辐射能量沉积空间分布的重要性(物理阶段)。1971年, Adams 和 Chapman 等关于缺氧细胞化学增敏剂的研究导致放疗的改进(物理化学及化学阶段)。特别有意义的是1959年 Elkind 等发现哺乳动物细胞接受分次照射时可出现减弱(sparing)效应,说明活细胞能修复部分损伤。这无疑对生物界具有普遍重要性。进一步研究查明,细胞恢复过程发生于分子水平,由此开创了60年代末至70年代兴起的 DNA 损伤与修复研究的热潮。

80年代以来,随着 DNA 作为辐射关键靶分子的观点已被接受, DNA 损伤修复的研究受到广泛重视并取得快速进展。其中重要进展包括:(1)长期以来人们将 DNA 看成是一个均一的单位,由此发生随机的损伤和修复。这种观念现已被基因组内损伤的非随机分布和修复的不均一性所代替;(2)哺乳动物和人的 DNA 修复基因的分离和克隆难度较大,但已取得重要进展。1984年, Westerfeld 等分离并克隆出第1个人的 DNA 切除修复基因以来已陆续克隆出一批修复基因(Lehmann 等, 1992);(3)运用基因转移技术和辐射敏感突变细胞进行人类 DNA 修复基因的染色体定位和分子克隆获得成功,对 DNA 修复缺陷症的基因治疗提上了议事日程;(4)已发现众多的修复酶,其中较重要的有 poly $\beta$ , TopoI 和 II。这些进展无疑将人类 DNA 损伤与修复研究向前推进了一大步。

关于辐射生物学作用的原初过程,通常认为,从快速粒子穿过原子所开始的最原初物理事件( $10^{-18}$ s)到可能在照射后几十年( $\sim 10^8$ s)才出现的癌症和遗传性死亡,其时间跨度达27个数量级。整个时间进程可分为4个阶段(Boag, 1975; Chadwick 等, 1981):物理阶段( $10^{-18} \sim 10^{-12}$ s)、物理化学阶段( $10^{-12} \sim 10^{-9}$ s)、化学阶段( $10^{-9} \sim 10^0$ s)和生物阶段( $10^0 \sim 10^8$ s)。所谓原初过程一般可理解为1秒钟内发生的那些过程。原初反应是瞬时发生的,研究难度很大,但80年代以来进展加快,这主要由于研究方法的改善,目前已能应用 $10^{-9} \sim 10^{-12}$ s 级的脉冲辐解和激光光谱技术。同时为了解决室温下水溶液体系的 ESR 研究,发展了自旋捕捉技术和时间分辨的 ESR 技术。这些技术连同快速混合技术,使得从 $10^{-11} \sim 10^{-2}$ s 范围内实现了互相衔接的配套技术,从而可研究细胞内许多瞬态中间产物的结构变化与动力学过程并取得许多新结果。例如,过去认为辐射与化学致癌的机理不同,近年应用上述技术发现二者均能使机体产生自由基攻击 DNA 而致癌(Dizdareoglu 等, 1989)。

对于细胞存活曲线的数学描述,不断推出新的模型。1987年 Goodhead 曾列举并评价1972~1986年间不同学者提出的9种模型(实际已提出的模型更多),其中8种属于二元或多元作用理论范畴,另一种为修复模型。目前常用的模型有3种:(1)多靶单击模型,(2)带初斜率的多靶单击模型,(3)线性平方模型。1971年, Katz 也用多靶单击方程结合径迹结构理论描述细胞对不同辐射的剂量效应关系,把靶学说的抽象数学形式与射线穿过物质时发生的能量沉积过程的物理学描述联系起来。线性平方模型是1972年 Kellerer 等建立于微剂量学背景上的“二元辐射作用理论”模型,认为不同生物效应都取决于比能平方,而损伤是成对的亚损伤相互作用的结果,但所得真核细胞靶或位点的大小( $0.5 \sim 2\mu\text{m}$ )比1978年 Goodhead 用特软 X 线所得结果大得多,被认为不适用于哺乳动物细胞。1981年, Chadwick 等推出辐射作用的分子理论,也得到线性平方模型,但解释不同,方程参数涵义亦不同,其假设的核心是:DNA 双链断裂(dsb)是导致各种终点效应的关键损伤。1985年, Curtis 提出 LPL 模型认为,辐射的致死性损伤经历物理的(沿径迹的电离作用)、化学的(自由基产生)及生物的3个过程。前两个过程在0.1s内完成并引起 DNA 预损伤,若两个损伤非常靠近,可产生致死损伤,否则是潜在致死损伤(PLD),后者未经固定则可修复,若经固定则导致死亡。该模型又叫统一的修复模型。应用上述3种常用模型,1983年李冬华等用 $\gamma$ 辐照 HeLa 细胞实验结果发现,以模型(2)的拟合最好;1985

年丘冠英等对水稻种子的辐照实验表明,模型(2)和(3)的拟合较好,但模型(3)具有参数少且参数的生物学意义更明确等优点,因而是3个方程中的最佳拟合方程。该模型现已得到相当广泛的支持。

此外,关于重离子生物学作用、低剂量辐射的兴奋效应(hormesis)以及辐射作用的修饰等领域的研究近年也取得较快进展。

正如Alpen在其《辐射生物物理学》(1990)一书的引言中所说:“过去的10年,辐射生物学研究的发展类似于1895~1905年时期,后者是辐射与放射性发现的黄金时代”,“现在正处在重要发现的新周期的边缘”。展望本学科的未来,有以下若干发展趋势与热点值得重视:(1)进一步提高辐射研究时间分辨技术,向 $10^{-15}$ s以至更小秒级发展,以加速原初过程研究并促进自由基生物学的发展。(2)探明辐射诱发DNA或功能基因损伤的分子过程及辐射致突、致癌的分子机理,DNA分子损伤尤其是dsb和其他团簇损伤与生物终点效应的关系。(3)基因水平的DNA修复研究,特别是修复基因的分离与克隆,修复基因的选择性作用及其调控机理研究将带动整个DNA修复研究,成为当前研究热点之一。(4)低剂量辐射兴奋效应的分子机制及辐射生物学作用是否存在阈值的研究。(5)鉴于重离子的独特性质及其与太空飞行的关系,重离子辐射生物学作用的研究与应用将受到更大重视并取得突破性进展。(6)辐射在医、农及食品保藏等主面后应用将有更大发展。

#### 参考文献

- 1 Lea D E. Actions of Radiation on Living Cells, 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1955
- 2 Kunkel H A. Biophysic, 1972, 8: 83~87
- 3 Chadwick K H, et al. The Molecular Theory of Radiation Biology, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1981. Chap. 1, 10
- 4 丘冠英,等.植物突变育种专辑.原子能农业应用(增刊), 1985, 216~224
- 5 Alpen E L. Radiation Biophysics, New Jersey, Prentice Hall, 1990, 4~5: 111~142
- 6 丘冠英,等.辐射生物物理学.武汉:武汉大学出版社, 1990, 1~4: 87~108
- 7 Arrand J E, et al. Int J Radiat Biol, 1992, 61: 717~720
- 8 Olive P L, Int. J Radiat Biol, 1992, 62: 389~396

(武汉大学丘冠英教授撰)

**辐射生物剂量计** 是一种对受照个体的吸收剂量能准确及时地进行估算的生物学指标。生物学指标成为生物剂量计的必备条件:(1)受照后可引起机体相应的变化,该变化应是灵敏可靠的,并有一定的特异性;(2)在体内保留较长时间;(3)适宜作人体或群体检查;(4)有理想的剂量-效应关系。目前,人们公认人淋巴细胞染色体畸变可作为事故照射中的生物剂量计。如何准确估算受照者的吸收剂量,对辐射事故的处理、放射损伤的诊断、医护监督、辐射危险的定量估计、辐射致癌危险度的推算以及已患肿瘤受照者的病因学诊断等都是至关重要的。

**事故性照射的生物剂量计** 人们很早就发现,生物体会自发地出现染色体畸变,但其频率很低。1927~1928年,缪勒(Muller)和斯坦特(stander)发现辐射会使染色体畸变的频率显著增高。1938年,萨克斯(Sax)首先精确地估算了辐射诱发的染色体畸变。这一研究成果为其他学者所遵循和深入。1960年,莫尔海特等(Moorhead)提出人体外周血淋巴细胞标准培养法。人们运用这项技术对电离辐射诱发的染色体畸变进行大量的研究。包括:(1)研究辐射诱发染色体形态和结构的变化;(2)研究辐射诱发染色体畸变的剂量-效应关系。(3)研究染色体畸变形成的原发过程。研究结果表明,辐射可诱发染色体结构畸变,染色体畸变和吸收剂量之间有密切的线性关系。1962年,朋德等

(Bender)提出采用人外周血淋巴细胞染色体畸变量进行生物剂量测定。这一建议得到人们的赞同。许多学者对各种射线(X、 $\gamma$ 射线和中子等)、不同照射条件(离体的和活体的、急性的和慢性的、全身的和局部的等)诱发的染色体畸变及其剂量-效应曲线进行了研究,并根据染色体损伤情况,对各种不同的照射条件作了生物剂量的估算。1973年,世界卫生组织提出染色体畸变分析法,并提供4种数学模式进行剂量效应关系的研究。目前,染色体畸变在事故照射中仍是一个较适用的生物剂量计系统,并已成功地用于实践中。

**染色体畸变分析** 辐射诱发的染色体畸变分稳定性(Cs)的和不稳定性的畸变(Cu)。Cu中的双着丝点体、环和断片可作为辐射事故照射的生物剂量计。大多数研究者应用人外周血淋巴细胞,淋巴细胞大都处于Go期,不进行增殖,经刺激使其进入有丝分裂周期。为了避免不同分裂周期细胞混淆,通常用5-溴脱氧尿核苷处理,然后采用荧光加吉姆萨染色,确保检测照射后第一次有丝分裂的细胞。染色体畸变率(Y)与剂量(D)呈线性剂量效应关系。高LET辐射的剂量效应关系为 $Y=C+kD$ ,其中C为本底畸变率,低LET辐射为 $Y=c+aD+\beta D^2$ 。各实验室都需对不同辐射品质和不同照射条件建立各自的剂量效应曲线,然后根据体外观察到的染色体畸变率来估算体内的受射剂量。采用该系统检测X、 $\gamma$ 射线和裂变中子的剂量限值分别为0.05、0.1和0.01Gy以上,并可通过过度分散检验得出是否为局部照射的信息。染色体畸变方差大于平均值为局部照射,但不能确定局部照射的部位及其剂量。故本法适用于一次均匀的或比较均匀的全身外照射和一次均匀的或比较均匀的全身外照射复合烧伤的受照者,双着丝点体的自发率低,灵敏度高,并有一定的特异性,有明显的剂量效应关系。不足之处是畸变分析需丰富的经验和熟练的技术,费时,实现自动化较困难。

**胞质分裂阻断微核测定法(Cy-B法)** 该法由弗乃希(Fench)等在1985年首先建立,在培养过程中加细胞松弛素B,它在干扰细胞核分裂的同时阻止细胞分裂。于是,照后分裂一次的所有淋巴细胞的胞浆内出现两个核,以此计数双核细胞中的微核率。离体实验资料已表明,它比常规微核法更敏感、更准确,因为只记录第1次分裂细胞中的微核数。微核率与剂量之间有良好线性剂量-效应关系,但在照后较短时间内,微核率逐渐下降。它的优点是微核计数简单而快速,将来可发展成全自动化。缺点为敏感性比染色体畸变低,不能区别全身照射和局部照射。

其他用于估算事故受照剂量的方法尚有电子自旋共振技术、热前凝聚染色体断片分析法、持续性DNA损伤的定量测定法、毛发直径测定、毛发和皮肤成纤维细胞染色体畸变分析法等。这些方法有关应用于人体的资料是极其有限的,尚待进一步研究。

**早先受照的生物剂量计** 在受照人员中,早先照射特别是慢性长期受照多于事故受照人员。而对于早先照射,由于时间障碍,损伤和修复交替存在及受照情况的复杂性,使精确地估算受照剂量很困难。所以,对其剂量的估算已引起人们极大兴趣。目前国内外学者对它作了大胆尝试,并得到一些初步结果。

**血型糖蛋白A(GPA)基因位点突变分析法** GPA是人红细胞膜上的一种糖蛋白——MN型糖蛋白,由位于49<sup>28</sup>~431处共显性等位基因编码,组成NN、MN和MM三种血型系统。莱格路斯(Lauglois, 1986)等采用荧光标记的单克隆抗体和红细胞流式仪将辐射诱发的变异体从正常MN细胞中分选出来,计算出突变频率。该项技术适用检测低剂量的或慢性的受照者,重复性好,需血量少(1ml),经处理15~30min即可分析1个样本,剂量效应关系显著,变异细胞在体内可长期存在,其局限性是只能检测MN血型有稳定表型的变异体,仪器较昂贵。

**次黄嘌呤磷酸核糖基酶(HPRT)基因位点检测法** HPRT基因定位xp<sup>27</sup>。辐射作用于人外周血淋巴细胞HPRT基因位点,形成抗-硫代鸟嘌呤(6-TG)突变体,具有稳定的6-TG<sup>7</sup>表型。具有6-TG<sup>7</sup>的淋巴细胞在6-TG作用下仍能正常生存和分

裂,而正常细胞却不能分裂,甚至死亡。目前采用 $^3\text{H}\sim\text{TdR}$ 掺入放射自显影法、克隆检测法和胞松弛素B检测多核细胞法检测HPRT的突变频率。常用的为克隆分析法。研究表明,HPRT突变频率与剂量有一定的相关性。本法适用于检测半年内受照者。

**稳定性染色体畸变分析法** 辐射诱发的Cs在受照者体内并不影响或不严重影响细胞生存和繁殖,在体内有累加的性质,畸变率和累积剂量之间有可能存在一定的剂量-效应关系。对广岛、长崎原子弹爆炸幸存者细胞遗传学调查以及早先事故受照者的研究结果都证实,Cs为主要畸变类型,且能长期保持恒定,与剂量之间有一定的线性关系。研究采用常规分析法和G显带法。近年来发展一种快速分析人类染色体畸变特别是易位等结构畸变的新方法——荧光原位杂交法(FISH)。该法采用重复序列DNA探针检测特定染色体畸变,它分析快速,技术要求不高,对易位尤为敏感,检测易于自动化,且有明显的剂量效应关系。其不足之处是仍处于试验阶段,试剂价格昂贵以及对倒位、缺失不敏感等。本法适用于估算照射后较长时间的生物剂量。

其他如EB病毒相关抗体滴度测定,人类白介素A测定, $\beta$ 球蛋白测定等体细胞突变监测技术,已在国际上一些实验室建立,尽管有一定的应用潜力,尚需进一步验证。

用生物指标估算受照剂量,近年来取得迅速进展。虽然淋巴细胞染色体分析仍是主要手段,但它已不是唯一的定量分析手段,最好的办法似乎是联用多种分析法,取各自之长,使剂量估算更为精确。

(苏州医学院博士生导师郑斯英撰)

## 分子生物学

### 分子生物学中两种不同学派和生物产业形成

two different schools in the molecular biology and formation of the bio-industry 分子生物学历来存在结构论和信息论两大学派,简介这两个学派各自的观点,了解他们两次会合导致生物产业形成的始末,从中理出值得思考的规律,是所有投身于生物产业研究与开发的工作者必须具备的知识。1968年,美国斯坦特(G. S. Stent)较早对这两个学派做过一般性介绍,在生物学界和哲学界引起巨大反响,有关这方面的论著如雨后的春笋。但系统叙述这两个学派的学术思想分歧点,历史上他们曾发生的两次会合从而引导形成第1代生物工程产业——遗传工程和第2代生物工程产业——蛋白质工程,这是迄今中外文献中所从未讨论过的。

结构论又称三维结构论,主要研究生物分子形状及其发育、分化和向愈来愈高级的有机体演化的全过程。结构论认为分子结构是多态的,这对认识活有机体的机能至为关键;还认为一个细胞的生理功能只能用组成这个细胞的分子零部件的三维构象术语才能得到解释,因此主张要深入研究基因的发生和功能。此定义只提到功能,甚至连遗传信息都未提及,所以他们只热衷于测定这些生物分子的空间构型,而不是去努力探讨最复杂的生物学现象对物理学的依存性,也极少关注遗传学。至于生物分子功能也暂时放在一边,想留待以后再研究,而这些分子是从何而来的,可以说连想都没有想过。由此看出,结构论是要将物理化学的方法和概念应用到诸如核酸、蛋白质之类的生物分子结构研究中。他们实际上是生物化学的一个分支学科,主体是英国剑桥的物理学、化学大师们。

信息论又称一维结构论,中心课题是生物遗传信息。主张遗传学有其自主性,不应掺杂进物理学、化学的观点;对物理学本身也抱有极大怀疑,认为生物学家们别指望从物理学家身上找到什么普遍性的规律,而研究生物学能丰富物理学内容;倡导有选择

地研究遗传学,反对机械论和原子论,反对任何还原论的生物学和一切繁琐的分析;认为化学本身就是建筑在生理学基础上的,何必花那么大的力量去研究遗传信息载体DNA分子结构的几何学,有这么多人力物力还不如去研究这类分子结构的拓扑学,故而绝对不可以将基因(生物学概念)和分子(化学概念)等同起来,认为至关重要是研究遗传信息复制过程中贮存信息载体的一维结构性质,而非三维结构性质,此外还要研究含氮碱基特异配对的作用。至于其它的生物分子结构,尤其是蛋白质分子结构连提都没有提,他们的代表人物甚至错误地认为生物化学没有用或用途不大;实际上他们也确实是用这类生物分子的一维结构术语来解释微生物遗传学的,主体是噬菌体研究组成员。

两派虽有交流,但不理想,总是未跳出彼此所持的学术观点范畴。幸亏信息论者的第2号代表人物卢里亚(S. E. Luria)认识到DNA分子的化学知识对弄清DNA功能是不可缺少的,并果断地派遣他的学生沃森(J. Watson)赴丹麦学习生物化学。这位年轻的遗传学家,信息论者不期于1951年在意大利举行的一次学术报告会上,见到来自剑桥的年轻物理学家威尔金斯(M. Wilkins)的DNA分子微丝X-射线衍射图,给与他以巨大的启迪。DNA能够结晶,这是他从未想到的。他为了进一步获得这方面知识,便又从哥本哈根转到剑桥学习X-射线衍射技术,他给云集于剑桥的一大批结构论者带来了生物遗传信息的基本概念。在其时的结构论者方面,虽然在血红蛋白和肌红蛋白研究中有过出色的成就,但这些蛋白质是从何而来的却从未考虑过。沃森的到来使他们茅塞顿开,沃森实际上是在两个学派之间充当了架桥人的角色,另一方面又使他本人有机会与另一个关键人物,年轻的物理学家克里克(F. Crick)走到了一起。一个是遗传学家,一个是物理学家,前者是信息论代表人物卢里亚的门生,后者是结构论代表人物勃罗兹(F. Perutz)的弟子,他们在学术上是互补的,把各自代表的学派所取得的最新成就、资料、数据等揉合在一起。1953年经过他们的综合、分析,装配成一个DNA双螺旋立体结构模型,使人一目了然,它是20世纪生物学中最伟大的成就,标志着分子生物学诞生了,模型包含的普遍性遗传学涵义从细菌到人类是一概适用的,这是纯出于研究的需要,使这两个学派不知不觉地走到了一起,是结构论与信息论的第一次会合。

第1次会合所取得的划时代成就导致1973年首次成功地实现DNA重组试验,并形成第1代生物工程产业——遗传工程,为廉价地大量制造在工、农、医等各行各业有广泛用途的异源蛋白铺平了道路。但这只是如实地抄录、复制和表达自然界现有的各类蛋白质,而要使这类蛋白质具备人们需要的各类特性,最重要的是改变酶底物特异性,从酶分子活性部位剔除那些与生产日争的争底物的分子。这就需要对有天然蛋白质分子做某些目的明确的修饰、改造,甚至全程重新设计地球上所没有的新蛋白质分子。1978年,美国细菌遗传学家贺契生(C. A. Hutchison)联合一些生物化学家,运用结构论者桑格(F. Sanger)的DNA测序方法,用预先确定好顺序的寡脱氧核苷酸一小片段为诱变剂,实现“定位突变(side-directed mutagenesis)”,重组成功具有所需特性的突变株,从而产生具备生物学特性的蛋白质。1981年,美国尤勒姆(K. Ulmer)将此全过程冠以“蛋白质工程”名称,即利用X-射线衍射研究所获得的有关蛋白质二维构造方面的资料数据,再借助遗传水平上的变化来改变此蛋白的结构,合成新酶或新酶结构。以酪氨酸tRNA合成酶为例,分子结构中Thr51 $\rightarrow$ Pro,酶对底物的亲和性成百倍增长。由于目标明确,有巨额资金,市场前景广阔,这样便吸引来一大批世界一流专家。他们中间既有精通基因克隆、人工合成基因及寡核苷酸乃至定位突变操作能人,也有除这些遗传工程经典技术以外的诸如蛋白质结晶、分子结构测序、计算机成像模拟分子设计的巨匠。他们为了完成共同承担的课题及其开发,一切学科界限、门户之见、学术分歧等统统丢在一边,出于科研和高技术产业开发双重需要使他们再一次走到一起来了。参加到蛋白质工程研究实体来的有不少当年结构论者和信息论者的学生或学生的学生,他们由离异而趋向统一,构成新的

组合,把属于结构论和信息论两个学派所有的研究概念、方法、手段都使用上了,促进了这个新领域的飞速发展。单是世界工业酶生产首户,丹麦 Novo 公司一家先后就有5种经过蛋白质工程修饰过的具备所需特性的新酶投入市场。全世界已掌握其分子构造的蛋白质已达300种,每年还能弄清楚10~20种蛋白的构造细节,此外还将不断有全程人工设计的新生物分子问世。这是结构论和信息论两个学派的第2次会合,由于这后一次会合是与产业开发挂钩的,预期比第一次会合能带来更多的新成就,其发展也将更加迅速。

科学史中历来就有两大传统,以伽利略、牛顿和拉瓦锡为一方,以狄德罗、拉马克和哥德为一方。分子生物学中结构论者似乎倾向于前者,而信息论者似乎是倾向于后者,所以分子生物学中出现两个学派也是有其历史渊源的,不是孤立的现象,而是科学发展的历史必然,是科学研究自身发展的要求和机遇。两个或两个以上的不同领域、不同学派的知识、学术观点只是在解释某个特定问题上变得相互有联系,学科或学派的统一才得以实现。起初他们仅被视为有关学科的交叉研究领域或不同学派,以后在长期研究中由逐步建立起来的概念、关系、步骤、技术、标准等形成新的领域,从而形成新的学科。昨天的学科发展成为今天的交叉学科或不同的学派,而今天的交叉学科或不同的学派有可能发展成为明天的新学科。分子生物学中结构论和信息论的两次会合都反映了学科发展的上述规律:第一次会合导致 DNA 模型的建立,开始了“定则时期”(即 DNA → RNA → 蛋白质的“中心定则”),引导形成第1代生物工程产业——遗传工程;第2次会合导致形成第2代生物工程产业——蛋白质工程。

随着研究的深化,人们发现要使蛋白质在机体内充分显示其生理活性,就必须同存在于细胞表面的糖质协调一致。例如将糖质连接到诸如促红细胞生成素之类的重要重组分子上,便能大大改进后者的生物学特性。由于糖质是挂在被埋入细胞膜内的糖蛋白上,故它们又起着细胞的信息传递、识别和调节生物体内机能的作用。还由于包括癌细胞在内的病变细胞和正常细胞表面的糖质有所区别,故而据此可以诊断疾病,调节体内免疫机能。研究糖质的上述功能,并进而控制糖质合成和分解,以期加以有效利用。这不仅有助于弄清楚癌症的发病机理、疾病治疗和预防,还将为设计新药、人工脏器,开发功能性食品等另辟新径。这就是新崛起的糖质工程,它有可能构成为继遗传工程和蛋白质工程之后的第3代生物工程产业的支柱技术。由于糖质组成单位数量多,结构也极复杂,具有高度特异性。例如4种不同的核苷酸只能构成24种不同的四核苷酸,而4种不同的单糖却能组出35 560种构型各异、特性不同的四糖。它虽不直接受基因调控,但基因调控酶,酶产生糖质,所以它是基因的二次产物。用经过蛋白质工程操作过的高度特异的糖基转移酶,从活化单糖一步步组构新的糖链或改变它的侧链数目,或变换其位置,为设计新药提供新的武库。预期在作为第3代生物工程的支柱技术——糖质工程关键性实验中有可能实现结构论与信息论的第3次会合。

#### 参考文献

- 1 Watson J D, et al. Nature, 1953, 171 (4354): 737~738
- 2 Stent G S. Science, 1968, 160(3826): 390~395
- 3 Thuillier P. La Recherche, 1972, 23, 439~446
- 4 Hutchison C A, et al. J Biol Chem, 1978, 253(18): 6551~6560
- 5 吴明. 自然杂志, 1981, 10(4): 779~784
- 6 Ulmer K. Science, 1983, 219(4585): 666~671
- 7 吴明. 生物工程学. 过去—现在—未来. 上海: 上海知识出版社, 1989. 12~33

(中国科学院微生物所吴明撰)

**交联法在分子生物学研究中的应用** application of crosslink method in molecular biology studies 随着分子生物学研究的不断深入,人们逐渐认识到大部分重要生命活动并不

是归结于单一生物大分子的功能,而是依赖于两种或两种以上生物大分子的严格时空控制的相互作用。生物大分子的相互作用在分子生物学研究中占居愈来愈重要的位置。过去, X 线衍射、圆二色光谱、电镜等物理方法在阐明生物大分子相互作用的工作中作出了很重要贡献。但由于这些方法只限于体外观察,要求复杂、冗长的分离纯化过程,许多结果很难说代表生命活动的真实情况。有些对象(如某些生物大分子复合物实体中心的分子相互作用或瞬间存在的结构等)更是上述方法难以检测的。交联法可通过固定活体内的分子间相互关系,然后进行离体操作分析。在一般情况下,离体的实验条件和过程不会破坏这种被交联固定的空间关系。因而结果的真实性、准确性和以往方法相比,无疑有所改善,所测相互作用距离也短得多,更为可取的是在有些方法失效的情况下也可使用。

交联是一种共价结合,它既可出现在生物大分子间,也可产生于分子内。交联法利用生物大分子在一定条件下某个(些)功能团能发生化学反应、形成共价结合这一性质,以连接空间上毗邻的两个大分子或同一分子的两不同组分、从而固定体内、分子间的空间排列关系或其瞬间相互作用方式。形成交联的方法有物理法(主要是 UV 照射)和化学法(双功能试剂处理和核苷酸活类似物掺入)。其原理均是通过交联因素活化相邻的两功能基团以发生化学反应而形成共价结合。自70年代末期以来,交联法在遗传物质的高级结构、DNA 构象、RNA 立体结构、基因表达的调控、蛋白质合成等研究中应用。取得以下进展。

1. 在研究 DNA—蛋白质复合物中的应用。1985年, Solomon 等利用甲醛介导的 DNA—蛋白质交联研究了体内外 SV40 的染色质结构,并通过比较体外 lac 阻遏蛋白与 lac 启动子、 $\alpha$  蛋白与相应的 DNA、血清白蛋白与普通 DNA 3种复合物的实验结果,证明甲醛介导的 DNA—蛋白质交联可作为立体结构探针用于染色体结构的研究,衡量染色质区域的基因活性状态的指标。1979年 Lohr 等所做的交联实验表明,染色质的核小体排列与基因活性的调控是由于组蛋白八聚体对 DNA 顺序的选择性或者说是在 DNA 上核小体排列的周期所致,核小体排列方式的不同主要在子核小体核心颗粒以外间隔区的长短不同。交联后结果分析,得出了组蛋白八聚体中各组分的空间排列、各组蛋白单体与 DNA 的空间排列、H<sub>1</sub> 和八聚体与 DNA 的空间排列(Karpov, 1982)。

将腺病毒粒子用<sup>32</sup>P-磷酸和<sup>3</sup>H-精氨酸同时或分别标记,随即以 UV 照射,使空间相邻的核苷酸、氨基酸形成交联,发现蛋白 V I、V 在核心内与病毒 DNA 紧密接触,推测出病毒 DNA 的装配机制(Chatterjee, 1977)。通过组蛋白与 DNA 的交联发现,随着热激蛋白70基因的转录增加,编码区域的 H<sub>1</sub> 首先消失,随后所有的组蛋白都消失。在 DNase I 敏感区域的 5' 末端未发现任何组蛋白,并证明这为基因激活所必需。交联实验确定:在 lacUV5 启动子与细菌 RNA 多聚酶的作用部位中, $\alpha$  亚基不与 DNA 结合,而  $\beta$ 、 $\beta'$  和  $\sigma$  亚基与从 +30 到 -47 核苷酸之间的启动子相互作用,说明启动子的这一段与转录的启动有关。此外,交联的研究结果表明,无论是组蛋白、还是 RNA 聚合酶都是通过赖氨酸盐桥与 DNA 以离子键结合。

2. 在研究 RNA—蛋白质复合物中的应用。用异双功能剂(有两个不同的功能基团)处理 BMV 粒子,使其中的蛋白质与 RNA 交联,表明, BMV 外壳蛋白的188个氨基酸中只有 N 末端的80个氨基酸残基与 RNA 交联。提示两个  $\alpha$  螺旋(11~19, 20~80)在外壳蛋白—病毒 RNA 的相互作用中十分重要。利用 UV 照射分离的肝细胞和脾脏淋巴结淋巴细胞的胞核,发现 Poly(A)<sup>+</sup> hnRNA 与一种磷酸化蛋白交联。这种蛋白的分子量为110 000。如果用低浓度  $\alpha$ -鹅膏蕈碱抑制合成 hnRNA 的聚合酶,这种交联蛋白的相对量也降低。这两方面均说明此蛋白与 hnRNA 紧密相关。

真核生物 mRNA 5' 端的帽子结构除使 mRNA 5' 端免受外切酶降解外,还参与 premRNA 的加工。但哪些蛋白或多肽因子



参与对帽子结构的识别,一直不清。只有当1977年 Sonenberg 等通过将帽子结构已氧化的 mRNA 与结合于帽子结构中(或附近)的多肽共价交联,首先确定:在兔网织红细胞核小体的高盐洗脱液中,一种21 000的多肽与帽子结构交联。另外,28 000, 50 000, 80 000多肽也能以依赖 ATP-Mg<sup>2+</sup>的方式与氧化的帽子结构交联。Lee 等和 Edery 等在此基础上用交联法进一步研究,提出了帽子识别因子促进 mRNA-核糖体相互作用的模型,并为 Pelletier 等的交联实验研究所证实。通过250nmUV 照射 eIF-mRNA 非共价复合物,使两者交联,RNase 消化后的电泳实验表明,eIF-4A,4B,4C 以及 eIF-3 亚基都能与 SFV mRNA 交联,而不能与 rRNA 交联,说明 eIF 先与 mRNA 结合形成复合物然后与核糖体结合再完成起始过程。1985年, Tuko 等以铂化合物作为交联剂研究了 tRNA 与氨酰基-tRNA 合成酶的相互作用,阐明了合成酶对 tRNA 氨酰基的各自识别部位,初步解释了为何能通过此类合成酶准确地将记载在核酸序列上的遗传密码转变为蛋白质序列的信息。

为确定氨酰-tRNA 与核糖体结合位点的核糖体组分,1982年 Riehl 等用化学法将 tRNA<sup>phe</sup> 分子中的胞嘧啶转化为4-硫尿嘧啶(S<sup>U</sup>)。修饰后的核苷在335nm 光照下能与邻近的亲核基团形成交联。研究表明硫化的苯丙氨酰-tRNA<sup>phe</sup> 在 Poly(U) 存在的情况下与核糖体 P 位点结合。直接照射(S<sup>U</sup>)RNA<sup>phe</sup> / Poly(U)·70S 核糖体复合物,发现交联仅在30S 亚基中出现。产物分析表明苯丙氨酰-(S<sup>U</sup>)RNA<sup>phe</sup> 特异结合于 S10核糖体蛋白质。用 UV 照射大鼠50S 亚基,发现 UV 导致5SRNA-蛋白质交联。通过<sup>125</sup>I 标记蛋白质,RNase 消化和双向电泳,证明与5SRNA 交联的蛋白是 L5。这说明它们在空间上紧密相邻。

3. 在研究 DNA, RNA 空间结构和不同 RNA 间相互作用中的应用。将能形成 Z 型的 DNA 序列 (CT)<sub>21</sub>, (GT)<sub>17</sub>ATGT, (CG)<sub>6</sub>TA(CG)<sub>6</sub>克隆,以交联剂 TMP 处理这些质粒。发现:如果这些序列以 B 型(松散状态)存在,TMP 则可在其中形成较多交联;如果超螺旋 DNA 以 Z 型存在,交联数目则大大减少。这些序列的交联数目与 DNA 的超螺旋度相关。因此可用交联数量反过来检测 Z-DNA 的左螺旋度。这会使体内外的 DNA 构象测定大大简化。以 TMP 介导,用长波长 UV 照射 E. coli 16SrRNA,在空间相邻部位引入交联,然后用 RNase T1 部分酶解,分离交联片段,去除交联,进行序列分析即可定出交联部位。此法的交联定位准确度达士15核苷酸。严格控制 TMP 的反应,可获得更准确定位。根据交联部位和其已知的1级、2级结构,即可获得 RNA 分子的准确空间结构。1984年 Steiner 等发现,酵母 tRNA<sup>phe</sup> 中靠近密码子3'端的核苷酸在与 E. coli 核糖体结合时能与 mRNA 交联。tRNA 交联于对应密码5'位置上,说明密码子的第1个碱基配对在识别 mRNA 上的密码时至关重要。1985年, Rinke 等借助 TMP 交联研究了 U<sub>4</sub> 与 U<sub>6</sub> 碱基配对情况(snRNA 正是利用与 hnRNA 的碱基配对行使其功能)。得知 U<sub>4</sub> 的两个重叠片段(52~65)与 U<sub>6</sub> 的一个片段(51~59)交联。大部分 hnRNAP 或 pre-mRNA 含有 snRNA 的互补序列。剪切过程中,预期会形成不稳定的 snRNA-hnRNA 杂交产物,但一直未能找到。1982年 Pogo 等在 TMP 存在下用252nmUV 照射去除了 DNA 的核,终于找到了 snRNA-hnRNA 的交联产物,并证明在所有交联的 snRNA 中,U<sub>1</sub>占多数。

在蛋白质合成时,tRNA 是与核糖体的蛋白作用,还是与 rRNA 结合,一直不清。Chen 等将 E. coli tRNA<sup>Gly</sup> 20位的双氢尿嘧啶残基用光敏剂取代。光致敏交联后的分析表明,tRNA<sup>Gly</sup> 与核糖体中的 Poly(GU)片段交联,三分 二 的 tRNA 与30S 亚基的16SrRNA 结合,且结合于 rRNA 的5'和3'两端。此外,发现少量的 N-乙酰基丙氨酰基-tRNA<sup>Gly</sup> 交联于50S 亚基上的 rRNA,而不是在对嘌呤霉素敏感的区域。

近年来,交联法一方面已成为分子生物学的常规技术,一方面随着分化相关基因、癌基因、抑癌基因、细胞活性因子基因克隆与表达调控在分子生物学研究中所占比例愈来愈大,交联法的主

要应用亦逐渐集中于这些基因的结构、调控研究,此外,利用<sup>125</sup>I 标记的配基与其受体的交联,筛选各种配基对应受体的 cDNA 已逐渐发展成为最直接、有效的受体克隆途径,交联法的应用范围亦已由经典的核酸-蛋白质,核酸-核酸相互作用拓展到更为广泛的蛋白质-蛋白质相互作用。

参考文献

- 1 Lohr D, et al. Proc Natl Acad Sci. USA, 1979, 76: 6326
- 2 Karpov V L, et al. Nucleic Acids Res, 1982, 10: 4321
- 3 Pogo A S, et al. The Nuclear Envelope and the Nuclear Matrix, Alan R. Liss Inc. NY, 1982, 233
- 4 Riehl N, et al. Eur J Biochem, 1982, 128: 427
- 5 Steiner G, et al. Nucleic Acids Res, 1984, 12: 81821
- 6 Tuko M A, et al. Dokl Akad Nauk SSSR, 1985, 280: 1484
- 7 Solomon M T, et al. Proc Natl Acad Sci. USA, 1985, 82: 6470
- 8 Rink L, et al. J Mol Biol, 1985, 185: 721
- 9 Chatterjee P K, et al. J Mol Biol, 1986, 188: 23
- 10 Park L S, et al. Proc Natl Acad Sci. USA, 1992, 89: 4295

(北京放射医学研究所贺福初研究员撰;夏寿普审)

**分子进化** 比较地、定量地研究各类群生物间有关生物大分子的结构及顺序的异同,借以进行生物分类及亲缘关系的探讨,称为分子进化论或分子分类学。它是经典进化论与分子生物学相互交融形成的边缘学科,研究的对象是遗传信息分子——DNA、RNA,表信息分子——蛋白质、酶两大类分子,其发展经历了2个阶段:(1)60~70年代,蛋白质顺序分析和电泳技术的引入,发现特定蛋白质的氨基酸替换速度是基本恒定的。1962年 Zuckerkandl 和 Pauling 首先提出分子钟概念,日本学者木村资生于1966年提出了中立理论(Neutral theory),或称“突变——随机漂变理论”,使生物进化步入定量研究的新时期。(2)80年代以后,DNA 顺序分析,DNA 再结合和限制性内切酶,多聚酶链式反应等技术的应用,对基因有了进一步的认识,发现了外显子、内含子,复制 DNA,假基因,基因族,转座子等,发现核苷酸顺序的变化速度与其功能的重要性相关,提出了协调进化、水平基因转化等理论。

分子进化是通过基因突变,包括点突变和复碱基对突变实现的,前者包括替换、附加、缺失,后者有重复、插入和缺失、倒位和易位等方式。

当前分子进化领域有以下几个主要方面。

1. 核内 DNA 量的测定。一般用单套基因组的 DNA 含量表示,又称之为 C 值。常用 Feulgen 染色细胞光度测定法进行测定。C 值有2种表示法:(1)绝对法,以沙克(μg=10<sup>-12</sup>g)为单位,如人类和真兽类为3.5μg;(2)以某种生物的 DNA 量为标准,与其比较,按百分数对被测定生物进行标定。在整个生物进化中,从低等至高等,总趋势是 DNA 量的逐渐增加,如酵母菌为0.005μg,人类为它的700倍,但生物的机体水平与 DNA 量之间非完全平行,某些有尾类、肺鱼分别是真兽类 DNA 量的27和35~40倍。因此,C 值除了进化意义外,还有某些适应意义。核 DNA 有二种性质的 DNA 顺序组成,一种称为简单顺序,它是结构基因的组成成分;另一种是重复顺序,是调节基因的组分。这2种组分有不同演化速度,在进化中并不是同步按比例变化的,所以,近来不少研究对其分别测定。

2. 分子杂交。1960年 Doty 等首先发明分子杂交技术,常用的方法有2种:(1)DNA 热稳定性测定,即比较同源双链和异源双链之间解链热稳定性差异,解离温度是与 DNA 双链的[1]源程度相关的。所谓热稳定性就是50%的 DNA 双链被解离的临界温度,通常用 ΔTS 表示,它大致与被替换固定的碱基对百分数相等,与杂交 DNA 双链的非互补核苷酸成比例。对于简单顺序而言 1ΔTS≈1%核苷酸差异,与进化时间对应,是 1ΔTS=2~3 Ma(百万年)。(2)放射性同位素标定法:一般采用 C<sup>14</sup>、P<sup>32</sup>、H<sup>3</sup> 进行

标记。把2个不同来源(物种)的DNA分子加热,使其解开为单链,用琼胶固定,其中一个单链作同位素标记。把这些单链放入加热到60℃的琼胶中,使其按互补原则进行结合,放射性残留程度就是2种DNA分子结合的数量指标。

3. 内切酶片段长度多态分析。简称RFLP测定。此法利用能识别特定碱基对序列的限制性核酸内切酶对有关DNA分子进行单酶解、双酶解或不完全酶解,形成不同的片段长度,以统计其酶切位点的差异计算DNA碱基替换率。目前主要研究对象是MtDNA(线粒体DNA),它具有分子结构简单、分子量小、母系遗传、无组织特异性、提取方法简单、进化速度快等优点,其碱基突变率约为2%/Ma,适合于研究分异时间在一千万年以内的类群,即适用于种间和种内分化及亲缘关系的探讨。另一个研究对象是rDNA(核糖体DNA),是一种中等重复顺序,内含高度保守的编码区和进化速度相对较快的间隔区,后者的进化速度与核外MtDNA相比,是较慢的,因此,适合于研究分异时间在五千万年内的低级阶元。

根据内切酶物理图谱,按 Nei 和 Li (1979)公式进行类群间限制性位点共享度(S)的计算。

$$S = 2N_{XY} / (N_X + N_Y)$$

$N_X$  和  $N_Y$  分别表示 X 和 Y 类群的限制性内切酶酶切位点数。

之后,再计算两者间的遗传距离:  $P = -\ln S/6$

4. 聚合酶链式反应。简称PCR技术,是美国一公司于1985年发明的体外DNA扩增技术,方法简便快速。多采用耐高温的Taq DNA聚合酶,广泛用于遗传病早期诊断、胎儿性别鉴定、司法鉴定、癌细胞检测以及分子生物学的研究。在分子进化研究中也初露头角。例如对于古代冻死和馆藏标本中的DNA研究,甚至对于在一定埋藏条件下的化石DNA研究,而形成了分子古生物学一门新交叉学科。1990年在美国爱达荷州的中新世纪地层中发现的木兰花化石叶绿体DNA,是迄今所知最古老(17~20Ma)和最长(820bp)的基因密码。

5. 蛋白质氨基酸顺序的排列和替换。查明同源蛋白的氨基酸顺序、替换、附加和丢失,以探讨类群间的亲缘关系和异同程度。细胞色素C是最早被测定氨基酸顺序,用于大进化研究的蛋白质,随着顺序测定仪器改进,被测定的蛋白质会日益增加。每种蛋白有一定的演化速度,这样就可以进行类群间分异时间的标定。但是,不同的蛋白质有不同的演化速度,它可以用单位演化时间(EUP)表示,它约等于1%顺序相异的平均时间(Ma)。凡有较重要生理机能的,其演化速度低,适于研究高级阶元的演化,如细胞色素C(15Ma)、H<sub>3</sub>、H<sub>4</sub>(330、400Ma);而生理功能不太重要的,则有较快的速度,适合于低级阶元的比较,如免疫球蛋白和蛇毒蛋白,分别为1.7和0.8Ma。同样,亦可进行各种DNA的核苷酸顺序的测定和比较。

6. 蛋白电泳。蛋白质一级结构的改变,能产生电荷变化,在电场作用下,不同蛋白呈现不同的迁移率,可用电泳法进行测定。常用的有纸上电泳、醋酸薄膜电泳、淀粉电泳、琼胶电泳、聚丙烯酰胺凝胶电泳等。用电泳法测定特定的蛋白的电泳相似率和基因频率,然后算出遗传相似性和遗传距离。一般用 Nei's 公式:  $I = \frac{\sum X_i Y_i}{(\sum X_i^2 \cdot \sum Y_i^2)^{1/2}}$  (I 示遗传相似性, X, Y, 分别示 XY 居群 i 位点的基因频率),而遗传距离是  $D = -\log_e I$ 。根据对于两栖类和鱼类的白蛋白电泳研究,1 Nei's  $D = 18 \sim 19$  Ma。电泳法较适合于研究属种阶元分化。

7. 酶的研究。酶也是蛋白质,同功酶是主要研究对象,它可作为遗传标记,亦能定量地探讨亲缘关系。目前用于研究已有几十种同功酶。用电泳法来研究酶,测定基因频率,用遗传距离表示类群间的差异,一般用 Roger's 公式计算遗传距离  $D = \frac{1}{2} \sum (X_i - Y_i)^2$  (X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub> 分别为 X, Y 居群 i 等位基因频率)。遗传相似性  $S = 1 - D$ 。在总结已有资料的基础上,不同等级的类元

遗传距离有一个大致的数量估计,如属间为0.71~2.8,种间0.18~2.54,虽然总的趋势是随着亲缘关系的疏远,遗传距离渐次加大,但相邻类元间并无截然界限。

8. 免疫学研究方法。各类蛋白大分子都有免疫反应,抗原间的相互关系可用于分析类群间的异同程度和亲缘关系。免疫学方法很多,但目前用于进化研究的方法,常用微量补体固定法(MCF)。此法快速灵敏。可用单一纯抗原,也可用复合抗原,前者如白蛋白、运铁蛋白、Hb 和溶菌酶等;后者如血浆蛋白、白蛋白是最常用的抗原,以交叉试验测定类群间的免疫距离(I<sub>D</sub>),表示相互关系。白蛋白免疫距离 I<sub>D</sub> = 0.6Ma,而复合(白蛋白+运铁蛋白)抗原, I<sub>D</sub> = 0.2~0.3Ma。在 Nei's 电泳距离和免疫距离之间可作经验公式换算,如电泳距离与白蛋白免疫距离之间是: I<sub>D</sub> = 35 I<sub>D'</sub>,不同演化速度的蛋白质有不同的经验换算关系。

分子进化研究,在近期除了大量的蛋白质(酶)电泳和免疫学工作,采用RFLP和PCR技术对古今生物的MtDNA、rDNA、叶绿体DNA等大分子的研究,将是研究热点。随着分子生物学和进化论的发展,使得分子进化研究在定量地探讨生物亲缘关系和系统发育方面更准确更完善。这有赖于蛋白质氨基酸和核酸核苷酸碱基对顺序测定的自动化程度的提高,大量生物大分子顺序的直接测定;各类生物大分子突变率和进化速度的标定和资料数字学数字处理方法的不断完善。

参考文献

- 1 Dobzhansky T, et al. Evolution. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1977
- 2 李树深. 分子钟. 生物科学动态, 1983, 2: 13~21
- 3 Kimura M. The Neutral theory of Molecular Evolution. Cambridge University Press, Cambridge, London, New York, Rochelle, Melbourne, Sydney, 1983
- 4 李树深. 分子水平的分类学——分子分类学, 生物学通报 1986, 9: 4~6
- 5 Cann R L, et al. Mitochondrial DNA and Human Evolution. Nature, 1987, 325: 31~36
- 6 张亚平, 等. 大熊猫线粒体 DNA 九种限制酶图谱. 动物学研究, 1991, 12: 209~214

(云南大学李树深教授撰)

受体的分子生物学

受体分子生物学是分子生物学中正在发展的分支科学,它是以前进技术来研究受的基因、分子结构以及其作用机理的科学,它继承了受体的药理、生理及生物化学的研究成果,并将其深入以阐明其作用实质,使它更好的联系医学实际,过去用提纯法已曾证明受体都是蛋白质,还带有糖及脂肪等,结构复杂,多存在于细胞膜上或细胞内,结合配基后它能够将配基的作用发挥出来,以完成其对机体或细胞的应有作用。由于配基的种类极多影响机体的范围又非常广,深入研究确非易事,分子生物学的发展恰好有助于此。

从1960年到1980年药理学家 J. Black 与其他合作者应用药理学的方法完成了两种新药的研究并应用于临床,一种是组织胺 H<sub>2</sub>受体的拮抗剂甲氧咪胺(cimetidine),另一种是β肾上腺能受体的阻断剂心得安,前后化了十几年的心血,由此他获得了1988年的诺贝尔医学奖。在生理学方面早已提出的离子通道有了新的受体假说,又经用当时生物化学方法初步纯化了几种受体,如已得知像 N-乙酰胆碱受体(一种 Ca<sup>++</sup>通道)是由5个亚基即 α<sub>1</sub>β<sub>3</sub> 所组成,这就为今后了解其结构与功能打下基础。在生化方面,除已分离纯化某些受体分子外,对细胞内的类固醇受体做了比较详细的分析,明确了它在胞浆中先接受其相应的类固醇,以后又能通过核膜直接作用于活性染色体上,起着调节基因表达的功能。以上这些成就是可喜的,但受体究竟如何完成上述的作用,是否能用于其他,必需深入的研究,受体实际上是比另一些活性蛋白如酶更复杂更重要,实际意义似乎也更大,联想到其

研究的难度也会更大些。

从分子生物学的分类看,受体本都是蛋白质但又有糖化及脂化等,甚至不少受体可能还未发现或未搞清其结构,故只能以了解到的受体做以下的分类,从所处的地区应分为在细胞膜上、亚细胞器处及细胞浆或核内的,研究较多的是前者及后者。在细胞膜上,按受体分子结构及功能特点又大致可分为以下几类:(1)蛋白肽链较简单并只有一个跨膜区,功能也已明确为使配基进入靶细胞的,如低密度脂蛋白(LDL)受体。(2)蛋白肽也简单只有一个跨膜区,但基功能主要是受体本身首先磷酸化,及一系列反应来完成配基效应的,如各种生长因子的受体。(3)蛋白肽虽也只是一条链,但有数个跨膜区,其中大部分有多至7个跨膜区的,此类受体在执行功能时首先作用于G蛋白,然后再完成配基的效应,现统以R<sub>2</sub>G来代表,此类的代表如各种肾上腺能受体,只是亚类很多,另外还有其他种类的。(4)此类受体为多亚基蛋白,亚基的数目常有5个左右,形成一个可变的通道,每个亚基都比较复杂,肽链中常有多个跨膜区,跨膜间距即留在膜内外的肽链长短不一,其功能常是离子通道,如N-乙酰胆碱受体或GABA受体。(5)其他,包括一些尚未发现的。在细胞内的受体除没有跨膜区外,都有帮助整个受体穿过核膜的肽段,及能与基因结合的肽段,其他则与膜上受体类似,如都有配基结合区,常为二聚体等,这类受体的功能已知是参于调节基因的表达,至于亚细胞器上的受体也正在研究,报导较少,此处不多讨论。

上述分类的依据,完全是由于有了基因工程技术后,得到完整的受体基因,再译出其整个受体的多肽链,又与可能存在的细胞部位关系分析而成,也许会有不足之处,但原则是正确的。因为各类受体的功能都已得到满意的解释,下面将举一些研究实例来说明。

研究最早也是很清楚的要算 LDL 受体,生化学家 MS. Brown 与遗传学家 J.L. Goldstein 长期合作用分子遗传学方法不仅解决了 LDL 受体分子结构(也是一种糖蛋白),并结合此受体缺陷的遗传病,找出此受体基因的微小差错,与其影响功能的关系,由此他们在1985年获得了 Nobel 医学奖。此受体蛋白全长有839个氨基酸,其氨基端在细胞膜外,有292个氨基酸是配基结合区,但膜外总数有767个氨基酸,跨膜区只有22个氨基酸,膜内有50个氨基酸,所见的缺陷基因变异复杂并有多种。虽每处变异不多但影响很大。明显看到没有分子生物学的研究技术是难以完成的。

有关生长因子、分化因子及一些多肽激素的受体结构很相似,有单肽链也有二聚体的,但都只有一个跨膜区,说明两链首尾以双硫键相联,这类受体总肽链较长,像表皮生长因子受体就有1186个氨基酸,膜外区有621个氨基酸,其中有丰富的半胱氨酸以双硫键及氨基端的复合型糖链稳定配基结合区,跨膜区只有23个氨基酸,为疏水区,胞内区由542氨基酸组成,其中就带有一个酪氨酸激酶的肽段,这是受体实现功能的首先磷酸化部位,以后才会有一系列反应来完成表皮生长因子的效应,这类受体亚类也很多,因对细胞生长发育关系密切,故目前研究的较多(A. Ullrich, 1990)。对不少受体的结构与功能了解比较深入。

肾上腺能受体是生理学研究的重点,现在已知不论哪一种肾上腺能的受体都是R<sub>2</sub>G型,当第1个β<sub>2</sub>型被分子克隆分析清楚后,又发现人类的光受体(light receptor)即与色盲密切相关的红绿光受体也是这类结构,即它们都属于R<sub>2</sub>G的亚类(L. J. Emorine, 1989)。此类受体的肽链只是一条而且一般多只有400~500个氨基酸,像血管紧张素的受体只有325个氨基酸,大的如M-乙酰胆碱受体也只有不到600氨基酸。它们是以氨基端在膜外,随着肽链的延长,好象反复穿入膜内又穿出膜外那样,而形成了7个疏水跨膜区,羧基留在膜内。其中以跨膜区5至6之间肽链的长度变化最大,再加上其他肽链的变异,很自然会出现不同的分类,另外又有G蛋白也很复杂,故可分为多种,此类受体主要与神经系统关系密切,这类受体也是一个大类,其中包括有α<sub>1</sub> α<sub>2</sub> β<sub>1</sub> β<sub>2</sub> 5HT M<sub>1</sub> M<sub>2</sub>及多巴胺等等。目前有人正要根据其中分子结构

的特点来讨论不同亚型的多样性与超家族问题,这明显对研究中枢神经系统及神经递质作用的微细差别有极大的好处。

离子通道的研究至今仍存在两种分类法,即受体门控及电压门控,前者重点讨论配基的首要作用,后者强调的是电压变化及不同阳离子通过的关系。1987年有人把钙离子通道的一组以双氢吡啶为激动型配基的受体,用分子克隆法从家兔骨骼肌中得到其c-DNA,并获得其全部肽链结构,还比较了其结构上和一个压控钠通道的相似处,以及它们在兴奋-收缩偶联中的作用。此受体有1873个氨基酸,从氨基端开始(也在膜内)就以每组6个亲水片段(S<sub>1</sub>S<sub>2</sub>S<sub>3</sub>S<sub>4</sub>S<sub>5</sub>S<sub>6</sub>)在膜内外按α螺旋集中排列成一个结构域,共有4个结构域,其羧基端也在膜内。这也是它在T-管上的假想图,其中每个S<sub>4</sub>片段中都有5~6个碱性氨基酸如Arg或Lys,看来它们是造成电压改变、离子通道开关的关键。1989年他们又报导了另一个作用于骨骼肌上的Ryanodine受体的结构,并提出了此受体片段与N-乙酰胆碱受体α亚基跨膜区上的相似性,以及上两个受体在作用时出现的所谓足迹现象(L. J. Tanabe 1987; H. Takeshima, 1989)。

有关细胞内的受体目前了解的最深入,不但结构已知,还搞清了这些受体在结合配基后对基因表达调节的特点,并能绘出其立体结构,这类调节都是在表达基因的上游远端,结构大部属锌指型,却有锌参加的局部肽段与调节基因片段相结合的形象结构,调节作用复杂,甲状腺受体与雌激素受体也属此类(J. W. R. Schwabe, 1991)。近来又发现有一些其他多肽的受体本来是在细胞膜上的,但实际细胞中也有,为数还不少,其结构也正在研究(U. Marti, 1991)。

前面提到过受体在生物大分子中比酶更复杂,从以上介绍可知受体都有多个活性中心,而且彼此相互影响,其肽链的柔性变化经常是瞬间而可逆的,如以多个活性中心来比喻,都有一系列的连续变化,其中反应的特点已在不同的受体总作用时间上可看出,如LDL-受体一次作用大约需10min,属有磷酸化作用的则快的多,属R<sub>2</sub>G类的潜伏期约在0.1ms,而属离子通道的潜伏期仅在1~10ms,这些数字虽不准确但可用于了解该受体作用的特点。其次受体的配基非常广泛,范围远大于酶的底物,除了大小分子化合物外,现已知还应包括光、电、机械刺激等等。如最近又已找到听觉与味觉受体。从研究配基与受体的关系上看,也并不像酶的底物那样专一,它们有其亲和性的高低、有可饱和性、可置换性(同体或异体配基之间表现的相互作用)等特点,而受体分子的结构与数量又易受相应拮抗剂和激动剂的调节,如所谓的上调与下调,这些变化并能应用基因表达的原理来解释。为了更好研究受体的特性,1987年以来就有人用基因表达研究法把受体分子固定到某种细胞膜上,进行各种研究,这又为研究受体开辟了新的道路(T. Claudio, 1987)。

受体分子生物学研究有广泛的实用意义,不仅可应用于医学,另外对分子生物学本身也扩大了领域,如过去在分子生物学中研究单一蛋白结构的活性比较多,而受体活性已知与和它结合的另外蛋白有关,这就又扩大了研究蛋白与蛋白及蛋白与核酸等之间的结构相互关系(T. A. Waldmann, 1991),其次把它与生理学及药理学研究方法结合(D. J. Snyder, 1992),采用最新的物理化学理论与手段,深化分子生物学的理论,这将对生物的信息传递与生物能的转化研究都会起极大的作用。

参考文献

- 1 Brown M S, et al. A receptor-mediated pathway for cholesterol homeostasis, Science, 1986, 232, 34
- 2 Ullrich A, et al. Signal transduction by receptors with tyrosine kinase activity. Cell, 1990, 61, 203
- 3 Tanabe T, et al. Primary structure of the receptor for calcium channel blockers from skeletal muscle. Nature, 1987, 326, 313
- 4 Claudio T, et al. Genetic reconstitution of functional acetylcholinereceptor channels in mouse fibroblasts. Science,

- 1987, 238:1688
- 5 Emorine L J, et al. Molecular physiology of adrenergic receptors. *Progress in Asthma and COPD* eds Vermeire P, et al. 1989:113
  - 6 Takeshima H, et al. Primary structure and expression from complementary DNA of skeletal muscle ryanodine receptor. *Nature*. 1989, 339:439
  - 7 Schwabe J W R, et al. Beyond zinc fingers; steroid hormone receptors have a novel structural motif for DNA recognition. *TIBS* 1991, 16:291
  - 8 Marti U, et al. Localization of epidermal growth factor receptor in hepatocyte nuclei. *Hepatology*. 1991, 13:15
  - 9 Waldmann T A The interleukin-2 receptor. *J B C*. 1991, 266:2681
  - 10 Snyders D J, et al. Time-, voltage-, and state-dependent human immunodeficiency virus infection and re-infection: a model for protective immunity, with implications for the role of the virus as a protective antigen, and for the role of the virus as a protective antigen, and for the role of the virus as a protective antigen.

(中国医学科学院基础医学研究所蔡良婉教授撰)

### 细胞癌变分子机制 molecular mechanism of cell carcinogenesis

癌细胞是正常细胞在体内外因子的启动和促进下癌变而来。探讨正常细胞癌变机制则是癌症防治研究的基础。

20世纪以来,人们首先阐明了一些与癌的发生有关的化学诱癌剂和肿瘤病毒。50年代始从整体、细胞、亚细胞以及细胞代谢等不同水平研究致癌因子的作用机制及细胞如何癌变的。研究途径基本有二:一是探寻正常细胞转化为癌细胞的变化规律,为实验肿瘤学;另一是比较分析正常细胞与肿瘤细胞的差异,是50~60年代期间主要的研究方面。

到70年代,癌变学说形成两大派:一派是突变学说,一派是基因外恶变学说。关于突变说的种种假说:1909年 Murray 提出肿瘤起源于遗传物质的概念;1914年 Boveri 提出恶性细胞起源于一个染色体含量不平衡的细胞;1916年 Tyzzer 提出体细胞突变假说。关于基因外学说:1973年 D. E. Comings 的调控说,认为细胞基因组中均具有转化基因,转化基因的抑制解除导致细胞转化;1976年 H. C. Pitot 根据肿瘤细胞表型的多样化,提出翻译系统模板稳定性改变说;1976年 H. Busch 根据肿瘤细胞生物学特征与胚胎细胞相似,提出胚胎基因开关说;1976年 J. H. Frenster 则提出基因组 DNA 螺旋结构松弛说。到80年代,广泛引起人们兴趣的基因移位与重排,为癌细胞基因调控研究开拓了视野;特别是从70年代后期发展起来的 DNA 重组技术,使癌变机制研究跨入了分子水平研究阶段。

癌基因和原癌基因的研究发展了肿瘤分子生物学。癌基因是肿瘤病毒或肿瘤细胞中能诱发恶性特征的基因。1911年从鸡肉瘤分离得到 Rous 肉瘤病毒 RSV 后,一直到70年代初才从 RSV 中最早发现了第1个肿瘤基因或癌基因(Oncogene),即 src 基因。70年代末,大量化学致癌研究结果提示, DNA 是致癌剂的靶分子。R. A. Weinberg 和 G. M. Cooper 等实验室采用70年代末发展起来的 DNA 介导基因转染技术证实,在肿瘤基因 DNA 上存在有转化基因,而正常细胞基因组中则无。80年代初 M. Wigler, R. A. Weinberg 和 M. Barbacid 等人的实验室,用分子克隆技术从人的膀胱癌细胞株得到一转化基因,与 Harvey 肉瘤病毒的 oncogene 同源,在正常人基因组中存在有与之相类似的顺序。膀胱癌基因和相关的细胞顺序(原癌基因)的顺序分析结果指出,一个核苷酸的突变(点突变)可使原癌基因转变为具有转化性质的癌基因。随后利用转染技术和分子克隆技术发现了数十个癌基因,1987年实验资料证明原癌基因与果蝇基因有同源性,说明其顺序在演化过程中是相当保守的。因此80年代后期原癌基因的激活以及癌基因产物癌蛋白的生化性质及其作用机制成为

研究的热点。

原癌基因的激活方式归纳如下:(1)染色体易位;(2)原癌基因转导到逆转录病毒基因组上;(3)点突变;(4)插入突变;(5)基因扩增;(6)蛋白-蛋白的交互作用。上述易位、插入、扩增等变化均是随机的,只有在特定位点,才能激活原癌基因。突变也是随机的,可发生在编码区或在顺式或反式调节顺序上,所以突变引起的激活方式也是多样的。有资料说明,至少需要有两个以上的癌基因的激活和协同作用,才达终目标癌变。关于癌基因产物的生化性质及其作用已积累了一些资料。已知有如下几点:(1)具有蛋白质磷酸化激酶的性质,大多数癌基因产物具酪氨酸蛋白激酶活性,ras 基因产物具 GTPase 活性,促使蛋白质自身的磷酸化。(2)具有生长因子性质,自1983年 A. Johnsson 等证明猴肉瘤病毒基因 v-sis 与血小板生长因子(PDGF) $\beta$  键同源以来,又证明 v-erb B 癌基因与表皮生长因子受体(EGFR)的膜内区同源,集落刺激因子1(CSF-1)与 fms 癌基因产物同源,至今已有资料证明不少生长因子及其受体可归类于癌基因产物,与细胞的增殖有关。(3)起转录因子的作用,1989年 J. Sap 和 K. Damm 两实验室证明 v-erb A 蛋白是 DNA 结合蛋白,具有调节转录的作用。1990年 M. Kieran 等人先后证明 rel 癌基因产物具有转反调控功能。(4)起信号传导作用,如 p21 蛋白分布于细胞表面的内侧,在传导信号上起作用。推测传导途径是相当复杂的,90年代初仍处于积累资料阶段。

80年代以来,在癌变分子机制研究领域,又有一新的研究中心——抗癌基因研究。从证明抗癌基因的存在到分离、鉴定等都取得了一系列进展。

1969年发现正常细胞和肿瘤细胞融合后,转化表型受到抑制,因此推测在正常细胞基因组中存在有抑制癌变的基因。自70年代始至今,公认的抗癌基因或癌抑制基因(TSG)主要有 Rb 基因, Wilm 癌基因和野生型 p53 基因。

1. Rb 基因和 Wilm 基因。1970年 A. G. Knudson 在对视网膜母细胞瘤进行统计分析研究中发现,染色体13q14两个等位基因的丢失与癌的发生有关。另外对肾母细胞瘤(Wilm 瘤)进行同样的统计分析,发现其位于11p13染色体上的两个等位基因丢失与癌的发生有关。1986年 S. H. Friend 等和1987年 W. H. Lee 等通过对 Rb 基因克隆、鉴定、顺序测定,证实了其具有与癌发生的关系。1987年 B. E. Weissman 等将正常11号染色体用微细胞融合法导入 Wilm 瘤细胞中,能抑制肿瘤的发生。1988年 H.-J. S. Huiang 通过构建质粒和转染手段,将外源 Rb 基因导入人癌细胞中,结果引起细胞形态改变,生长速度减慢,在软琼脂上不能形成集落,在裸鼠体内不能生长。1990年对从11p13染色体克隆得到的 Wilm 瘤基因进行分析,结果指出它是一个具有锌指基因特征的基因。综合一些资料表明,Rb 基因表达产生的蛋白质是核磷酸蛋白,Rb 蛋白磷酸化与细胞周期有关,G<sub>1</sub>期 Rb 蛋白是去磷酸化的,在 S 和 G<sub>2</sub>期时呈磷酸化。Rb 蛋白具有与 DNA 结合的活性。因此认为 Rb 基因的丢失、突变和蛋白的磷酸化,可使 Rb 基因失活,导致对癌基因抑制的解除。

2. p53。也是一个核磷蛋白,在癌基因和抗癌基因产物中,是一个具有独特特性的蛋白。p53基因定位于17p14染色体上。1979年 D. P. Lane 等在 SV40 转化细胞提取物中首次发现。1980~1985年间,在进一步研究 p53 的性质中,最初认为它是一种过表达的肿瘤蛋白,后观察到它能与 T 抗原共沉淀,所以又认为它是一种肿瘤抗原;继而由于发现 p53 基因 DNA 或其 cDNA 克隆与 ras 基因共同可致细胞转化,所以又认为它是个癌基因;但在研究中发现 p53 功能的丢失有利于肿瘤的发生。一直到1988年发现了野生型 p53,人们才能解释上述现象。野生型 p53 等位基因能抑制转化细胞的增殖和动物肿瘤的形成,抑制细胞转化。突变型 p53 促进细胞转化,干扰野生型的功能,排斥野生型 p53 的负调控作用。野生型 p53 能与 DNA 结合,具有转录激活作用,而突变型则无此作用。1991年 I. C. Hsu 和 M. Ozturk 两实验室分别在南非和中国肝癌标本中发现,在 p53 基因密码子249有高频率的 G

→T 突变热点,显示 p53 基因突变是人类癌症中最常见的。

80年代以来肿瘤分子生物学的研究进展,使70年代时期的癌变学说的两大派渐趋汇合。癌基因和原癌基因、生长因子及其受体、抗癌基因几方面的研究进展提示人们认为,抗癌基因等抗癌因子的负调控和癌基因编码产物和生长因子及其受体等的正调控间的消长动态变化,导致了细胞癌变。这一过程相当复杂,还有许多环节需要探明,也是未来20世纪的研究热点。总结近期研究进展的取得提醒注意的是,基因工程、分子生物学以及细胞生物学研究技术的发展,对癌变机制的研究起了很大的推动作用,技术上的突破也不容忽视,需要不断地发展。

参考文献

- 1 Tabin C J, et al. Mechanism of activation of a human oncogene. *Nature*, 1982, 300: 143~149
- 2 eddy E P, et al. A point mutation is responsible for the acquisition of transforming properties by the T24 human bladder carcinoma oncogene. *Nature*, 1982, 300: 139~152
- 3 Friend S F, et al. A human DNA segment with properties of the gene that predisposes to retinoblastoma and osteosarcoma. *Nature*, 1986, 323: 643~646
- 4 Weissman B E, et al. Introduction of normal human chromosome 11 into Wilms tumor cell line controls its tumorigenic expression. *Science*, 1987, 236: 175~180
- 5 Huang H-J Su, et al. Suppression of the neoplastic phenotype by replacement of the Rb gene in human cancer cell. *Science*, 1988, 242: 1563~1566
- 6 Nigro J M, et al. Mutations in the p53 gene occur in diverse human tumour types. *Nature*, 1989, 342: 705~708
- 7 Chen P-L, et al. Genetic mechanisms of tumor suppression by the human p53 gene. *Science*, 1990, 250: 1576~1580
- 8 Hsu I C, et al. Mutational hotspot in the p53 gene in human hepatocellular carcinoma. *Nature*, 1991, 350: 427~428
- 9 Bressan B, et al. Selective G to T mutations of p53 gene in hepatocellular carcinoma from southern Africa. *Nature*, 1991, 350: 429~431

(中国科学院上海细胞生物学研究所张玉砚研究员撰)

β-内酰胺酰化酶的分子生物学

molecular biology of beta-lactam acylase 1929年 Fleming 发现了青霉素,40年代初青霉素开始应用于临床,对人类的健康作出了巨大的贡献。近50年来,人们试图找到比青霉素更好的抗生素从而推动抗生素的研究与生产。目前,虽然从自然界已发现近8 000种抗生素,但是,青霉素等β-内酰胺类抗生素仍不愧为抗生素中的佼佼者,它在整个抗生素工业总产值中占70%。不过,随着青霉素长期、大量地广泛应用,临床出现了病原菌耐药性的问题。因此,在β-内酰胺类抗生素构效关系研究的基础上,采取在天然母核上接不同的酰基侧链的方法,制出杀菌能力强、杀菌谱广、毒性低和耐酸性强的半合成β-内酰胺类抗生素已达3 000多种,投放市场的也有近百种,半合成β-内酰胺类抗生素的研究与开发已成为当今抗生素工业中一个十分活跃的领域。

青霉素酰化酶(Penicillin Acylase, penicillin Amidase, EC3.5.1.11)水解青霉素产生酰基侧链酸和6-氨基青霉烷酸(6-ApA),它是6-ApA生产中的重要工业用酶。根据酶底物专一性的不同,可分为青霉素V酰化酶、青霉素G酰化酶和氨基青霉素酰化酶。其中研究较多、应用较广的是大肠杆菌青霉素G酰化酶,该酶具有较广泛的底物专一性,水解反应最适H<sup>+</sup>浓度10<sup>-9</sup>~10<sup>-7</sup>mol/L,在较高的H<sup>+</sup>浓度条件下可进行合成反应,苯乙酸为竞争性抑制剂,6-ApA为非竞争性抑制剂。在发酵过程中酶的形成需要苯乙酸的诱导,产酶适宜温度在28℃以下,温度高于37℃时很少有酶的产生。此外,巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)、嗜柠檬酸克鲁氏酵母(*Kluyvera Citrophila*)、雷氏

变形杆菌(*proteus Rettegeri*)、球形芽孢杆菌(*Bacillus Sphaerius*)、粘桐节杆菌(*Arthrobacter viscosus*)和假单胞菌(*Pseudomonas sp. Strain G16*)等青霉素酰化的研究也有不少报道。

国内外一些实验室都先后开展了大肠杆菌青霉素G酰化酶的基因克隆与表达的研究。Mayer等于1979年首先由大肠杆菌ATCC 11105菌株克隆了青霉素G酰化酶基因,构建了5K(PHM12)高产工程菌。之后,Brus等和Oliver等发表了大肠杆菌青霉素G酰化酶的部分核苷酸序列。不久,Shumachetr,Oh和郭礼和等3家实验室先后报道了3个不同大肠杆菌菌株青霉素G酰化酶结构基因的核苷酸全序列,他们得到的结果证明,大肠杆菌青霉素G酰化酶的结构基因是由4个功能DNA片段组成:(1)编码26个氨基酸残基先导肽(leader peptide)的78bp;(2)编码209个氨基酸残基的α-亚基的627bp;(3)编码54个氨基酸残基的间隔肽(Spacer peptide)的162bp;(4)编码557个氨基酸残基的1671bp,此外,调节片段包括5'-端的两个环化受体蛋白的结合位点(cyclic AMP-receptor protein,CRP)、一个启动子(-35'和-10六聚核苷酸)和核糖体结合位点(RBS)以及3'-端的终止信号(Terminator)。青霉素G酰化酶基因表达的初级产物为94 000的前体肽,它像许多真核生物激素一样,需要经过多步蛋白质加工,最后形成一个具有催化活性的酶分子。首先,先导肽被切掉,它使蛋白的分子输送到细菌细胞膜空隙(Periplasmic Space)中;间隔肽切出后,产生α和β-亚基。据推测,在间隔肽的诱导下,两个亚基肽链折叠成特定的空间构象,此时,才成为有活性的酶分子,定位于膜空隙。这种转译后的蛋白加工在原核生物中实属少见。实验证明,加工时大肠杆菌青霉素G酰化酶前体肽对温度是敏感的。

半合成头孢霉素比半合成青霉素具有抗菌谱广、毒副作用小、耐酸、不易产生耐药性等优点,因而它倍受重视。从20世纪60年代出现第一代半合成头孢霉素以来,发展到80年代已出现第四代半合成头孢霉素,7-氨基头孢烷酸(7-ACA)是半合成头孢霉素不可缺少的中间体,7-ACA生产的传统工艺是化学裂解,其主要缺点是反应专一性差,产率低,副产物污染环境等。之后,便出现了酶促与化学处理相结合的“二步法”。但是,该工艺仍然存在操作步骤多、产率不高的问题。因此,人们试图通过DNA重组技术来改变这种状况。Isogai等人利用Fusarium Solani的编码D-氨基酸氧化酶(DAD)cDNA与Pseudomonas diminuta的编码戊二酰头孢霉素酰化酶(G1-7ACA acylase)的基因片段,成功地构建了一个合成7-ACA的杂合操纵子(Hybride operon),在Acremonium chrysogenum的碱性蛋白酶调控元件的控制下实现表达。尽管含有该杂合操纵子的头孢霉素高产菌株A. Chrysogenum BC2116的转化子只产生很少的7-ACA,暂时还没有什么商业意义,然而细菌和真菌两种不同的基因结合在一起引入工业微生物中,必竟是一次有意义的尝试。为了直接将头孢霉C(CpC)转化为7-ACA,1987年,Matsuda等由pseudomonas SE83菌株克隆到分别编码为GL-7-ACA酰化酶(acyI)和CpC酰化酶(Acy II)两个不同的基因,二者分别定位在2.5Kb和2.8Kb的DNA片段上,并完成它们的核苷酸的全序列测定,每个DNA核苷酸序列各有一个读框,编码两个大小不同的蛋白质亚基,其分子量为26 000和57 000。像大肠杆菌青霉素G酰化酶一样,头孢霉素酰化酶基因的表达初级产物也为一个前体多肽,经特殊蛋白加工后形成具有活性的酶分子。

acy II基因表达产物虽能水解CpC产生7-ACA,但是产率极低。鉴于pseudomonas S E83 CpC酰化酶与大肠杆菌青霉素G酰化酶的氨基酸有较高的同源性,而青霉素G酰化酶有较广泛的底物专一性,它也能作用于某些半合成头孢霉素,这就暗示有可能通过基因定点诱变,改变大肠杆菌青霉素G酰化酶的底物专一性,开发出更有效的CpC酰化酶。在这方面,Williams等迈出了第一步,他们通过定点诱变,获得了若干个突变体,结果证明,α-亚基Met168与底物结合有关,对酶的底物专一性起着关键

性作用。王敏等通过盒式定位诱变,得到了 Alal77、Thr177、Gly177、Arg177和 leu177等5个突变体,均失去了酶活性,即使在结构上与 Ser 相似的 The 也不能取代  $\alpha$ -亚基上的第177位 Ser,说明这个位置上的 Ser 是酶催化活性不可缺少的。

在酶的结构与功能研究方面, Hunt 等人已获得可供衍射的单晶,随着青霉素 G 酰化酶的晶体结构被揭示,将为酶蛋白分子设计提供依据,青霉素 G 酰化酶的蛋白质工程研究将会达到一个新的水平,从而进一步推动半合成头孢霉素工业的发展。

**参考文献**

- 1 Vandamme E J. Penicillin acylase and beta-lactamase. *Economic microbiol.* 1976, 5: 468~522
- 2 Mayer H, Collins J, Wagner F. Cloning of the penicillin G acylase gene of *E. coli* ATCC11105 on multicopy plasmids, in Timmis, K N, Puhler A (Eds), *Plasmids of Medical, Environmental and commercial Importance*. Elsevier, Amsterdam, 1979, 439~470
- 3 Oliver G and Valle F. *Gene*, 1985, 40: 9~14
- 4 Brus W, Hoppe. *J Mol Appl Genet*, 1985, 3: 30~44
- 5 Schmacher G and Sizmann. *Nucl Acids Res*, 1986, 14: 5713~5727
- 6 Oh S J., Kim, Y C., Park, Y W, Min, S Y, Kim I S, Kang, Gene, 1987, 56: 87~97
- 7 Matsuda A, Matsumura K, Yamamoto K, Ichikawa S, Komatsu, *J Bacteriol*, 1987, 168: 5815~5820
- 8 郭礼和,等. *实验生物学报*, 1989, 22: 90~110
- 9 Isogai T, Fukagawa M, Aromori I, Iwami M, Kojo H, Ono T, Ueda Y, Kohsaka M, *Imanaka Biotechnology*, 1991, 9: 188~191

(中国科学院生物物理所张其玖研究员撰;门大鹏研究员审)

**磷-32 酶法标记核苷酸**

enzymatic labelling of nucleotide with phosphor-32 遗传工程是依据分子遗传学原理,采用类似工程设计的技术手段,空间的改变生物体的遗传特征的一门生物学技术。磷-32 标记的核苷酸是研究遗传工程的工具,生物工程设计的好坏,空间改变与否都需要参与反应的标记核苷酸来提供科学的依据。遗传工程的核心就是脱氧核糖核酸,是遗传物质的基础。因此,自1958~1979年的21年中,曾有多名科学家因对 DNA 的研究获得诺贝尔奖金,由此说明此项工作的重要性 and 蓬勃发展的情况。而<sup>32</sup>P 酶标记的高比活性核苷酸主要用于遗传工程研究, DNA 缺口翻译标记,末端分析和分子杂交等工作的需要,为了能满足以上需求,<sup>32</sup>P 标记的核苷酸应具有高比活性,一般要在 2 000~4 000Ci/mmol(74 000~148 000GBq/mmol);高比浓度,最高可达 8.0~10.0mCi/ml(296-370MBq/ml);高放化纯度,通过高压液相分析>98%。其中重要的几种<sup>32</sup>P 磷标记化合物有 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]ATP, [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]-5'-三磷酸腺苷、三乙胺盐 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]Adenosine triphosphate triethylammonium Salt, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]ATP, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]-5'-三磷酸腺苷、三乙胺盐 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P] Adenosine triphosphate triethylammonium Salt, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P] dATP, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]-5'-三磷酸脱氧腺苷、三乙胺盐 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P] Deoxyadenosine triphosphate triethylammonium Salt, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P] dCTP, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]-5'-三磷酸脱氧胞苷、三乙胺盐, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P] Deoxycytidine triphosphate triethylammonium Salt。

<sup>32</sup>P 标记核苷酸的方法有化学合成法、化学-酶法和酶法等。由于前两种方法的操作程序长,产额低,产品的比活度低等,满足不了各方面研究的要求。酶法可弥补以上缺点,酶标记核苷酸的方法:

1. [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P] ATP. 1979年, T.F. Walseth 等在改进 P. E. Schendel 等人的方法基础上,用酶法制备了高比活性 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]ATP 和 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]ATP。 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]ATP 的制备是以 1- $\alpha$ -甘油磷酸经过 1- $\alpha$ -甘油磷酸脱氢酶、丙糖磷酸酶、乳酸脱氢酶等一系列酶

促转化,在 1- $\alpha$ -甘油磷酸转变为 3-磷酸时,在 3-磷酸甘油酸激酶、甘油醛-3-磷酸脱氢酶的催化下,对底物 ADP 进行基质水平的磷酸化。通过分子内部能量的重新分配,使分子中原来的低能磷酸键转变为高能键,然后使用 ADP,与外源磷-32 柱合成 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P] ATP。其标记样品可用 DEAE-Sephadex A-25 柱层析分离或用高压液相制备色谱 YWG-R<sub>4</sub>NC1 柱进行分离,其分离效果更佳。 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]ATP 的放化纯度可在 98% 以上,其比活度为 4 000~5 000Ci/mmol(148 000~185 000GBq/mmol)。

2. [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dATP. 酶促合成 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dATP 包括四步连续的酶促反应过程。首先,以酶法合成高比活性 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]ATP 作为前体,然后在 T<sub>4</sub>-多核苷酸激酶作用下,以 3-dAMP 为底物合成 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]-3'-dADP, [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]-3'-dADP 在核酸酶 P<sub>1</sub> 催化下酶解为 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P] dAMP, 继而在肌激酶和丙酮酸激酶作用下 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P] dAMP 磷酸化为 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dATP。其标记样品同样采用阴离子交换柱 DEAE-Sephadex A25 分离或用高压液相制备色谱 YWG-R<sub>4</sub>NC1 柱进行分离, [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dATP 的放化纯度可达 98%, 比活度为 3 000Ci/mmol(111 000GBq/mmol)。 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]ATP 的利用率可在 90%。

为获得高比活性 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dATP, 首先要标记高比活性、高放化纯度的 [ $\gamma$ -<sup>32</sup>P]ATP 作为进一步反应的前体。 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]ATP 和 [ $\alpha$ -<sup>32</sup>P]dCTP 制备方法类似以上的方法。

**参考文献**

- 1 Schendel P F, et al. *J Biol Chem*, 1973, 248: 8319
- 2 Walseth T F, et al. *Biochem Biophys Acta*, 1979, 526: 11
- 3 Johnson R A, et al. *Adnces in Cyclic Nucleotide Research*, 1979, 10: 153
- 4 田桂英,等. *核化学与放射化学*, 1986, 8(1): 32
- 5 何丽明,等. 第3次全国核化学与放射化学学术讨论会论文摘要集, 1990, 4

(中国原子能科学研究院仪明光撰)

**基因表达调控**

regulation on gene expression 遗传信息通过转录、翻译成执行生命活动功能的蛋白质称为基因表达。

在不同的发育阶段、遗传背景和内外生活环境中,不同个体、不同组织细胞的某些基因可表达,某些则不表达。例如癌基因虽普遍存在却不一定表达;人类在胚胎、胎儿和出生后等不同时期表达出不同种类的血红蛋白,研究环境条件不同因素使基因表达或不表达就是基因表达调控的内容。基因表达可在转录、转录后、翻译、翻译后、修饰各水平上调控。

1961年, Jacob 和 Monod 提出操纵子学说,合理解释了原核生物的转录调控。此后,其基本原理不断得到补充,一个典型的操纵子结构如下:

调节基因-启动子-操纵区-(数个)结构基因

启动子是 RNA 聚合酶结合部位,调节基因产生阻遏蛋白并可结合于操纵区。操纵区结合阻遏蛋白则阻止 RNA 聚合酶前移,关闭操纵子而使结构基因不转录。原核生物操纵子分为:

| 代谢类型 | 调控方式 | 小分子-大分子结合 | 效应  | 效应对结构基因的影响 |
|------|------|-----------|-----|------------|
| 分解代谢 | 可诱导  | 诱导物-阻遏蛋白  | 消阻遏 | 开放,转录      |
| 合成代谢 | 可阻遏  | 终产物-阻遏蛋白  | 阻遏  | 关闭,不转录     |
| 代谢调节 | 正调控  | cAMP-CAP* | 激活  | 促进,转录      |

\* CAP: 分解代谢基因活化蛋白

无底物时,分解代谢酶系统的基因操纵子关闭;底物(例如乳糖)作为诱导物可结合阻遏蛋白而消除阻遏。这样,乳糖诱导利用乳糖酶系统。合成代谢酶系统的操纵子通常开放,有合成产物(例如氨基酸)积累,产物结合阻遏蛋白而关闭操纵子。低等生物就这样巧妙地、经济地利用有限环境资源。

操纵子学说着重解释基因转录启动。以后,由于核酸序列分析普遍应用,还阐明了启动区的共同结构特点:开始转录前约 10

个核苷酸(-10区或Pribnow盒)常见序列为TATAAT;-35区是TTGACA,根据这些可查找未确定的操纵子。

在原核生物,转录终止由转录产物来控制,有需 $\rho$ (Rho)和无需Rho因子两种。在RNA 3'末端出现的茎环(局部双链)结构,可暂停转录前移,茎环后一串寡聚U有拆离RNA-DNA(产物-模板)杂化双链的作用,因而终止转录。

日前转录调控研究又从分子的精细水平回到和深化为细胞整体水平,操纵子只被视为基因表达调控的基本单元;成群操纵子组成更高级的调控网络,称为调节子和刺激干,其组成如下:刺激因子-传感器-信号-调节蛋白-被调节的操纵子群

传感器通常是膜蛋白,其功能是把环境刺激因子转换成生化信号。生化信号多种多样,有细胞结构、大分子,也有小分子。调节蛋白除包括上述的阻遏蛋白外,还有活化蛋白和RNA聚合酶的 $\sigma$ 因子。调节蛋白对其属下某些操纵子是阻遏蛋白,但对另一些操纵子则是活化蛋白,因此能对细胞整体起协调作用。调节子是一群受相同调节蛋白制约的操纵子,刺激子则是由同一刺激因子激发引起应答的操纵子群。操纵子群的基因表达产物(酶、蛋白质)又是执行近似或相关生命活动功能的。例如,大肠杆菌刺激子属下的操纵子至少有通透酶系、麦芽糖酶系、外膜蛋白等基因操纵子,共同应答细胞外渗透压变化而组成调控整体系统。SOS系统调节子是首先被发现的整体调控模式,几个操纵子的基因表达产物共同协调完成DNA损伤的修复工作。此外,功能广泛的蛋白磷酸化系统,应答氨基酸饥饿的严紧型系统,都是已阐明的这种整体基因调节的例子。

真核生物细胞也有类似操纵子的基因表达调控,由于真核基因的断裂性、分散性和可拼接性,操纵子不像原核生物那样典型。转录起始前-30区有TATA盒,-100区有CAAT盒,可认为是真核生物转录的启动子。增强子由十数个核苷酸序列作为核心,可远距离地、不同方向地控制启动子的活动。增强子最早发现于猿猴病毒SV40,它能使插入的珠蛋白基因增加表达几百倍,许多病毒和真核细胞中普遍存在的增强子核心序列是TGTGGGAATTAG,最近在原核生物也发现有增强子序列。

真核生物转录终止和转录后修饰密切相关。mRNA有聚腺苷酸尾巴,在DNA模板上并无相应的聚腺苷酸序列,这是转录后修饰加入的。模板DNA读码框架3'-末端往往有修饰点,共同序列为AATAAA,转录不在修饰点终止而往往向下延长几百至一千核苷酸。转录后把延长的部分切去而加入聚腺苷酸。修饰和终止的关系还是研究中的课题。若全序列资料具备,由起始密码ATG至修饰点AATAAA可定为一段读码框架。未成熟转录终止因近年在癌基因、免疫缺陷病毒(HIV-1,艾滋病病原体)中被发现而引起人们的研究兴趣。未成熟转录终止在原核生物中是早有描述的,包括极性突变、衰减和抗终止3种。极性突变指上游基因终止突变波及下游基因的转录表达;衰减则通过前导肽的翻译来控制结构基因是否表达;抗终止靠DNA短片段结合终止蛋白而利于转录。 $\lambda$ 噬菌体靠抗终止作用控制全基因组或分段表达,即控制溶原或裂解周期。真核生物的未成熟转录终止和原核生物这3种现象都有相似点,又发现于作为医学研究热点的基因上,因而有重要研究价值。

从细胞整体水平了解真核生物基因转录调控,可分顺式作用的DNA序列和反式作用的蛋白质因子两大类。前者主要指启动子和增强子,它们是较短、较保守的核苷酸序列,能和蛋白质因子特异性地结合而控制转录过程,但很多具体细节还在研究中。反式作用的蛋白质因子可统称为转录因子。真核生物有RNA聚合酶I、II、III,相应的转录因子称TF I、TF II、TF III。聚合酶II是转录mRNA的,因此对TF II也研究较多。TF II有IA、IB、ID、IE、F、J等多种。TF II B促进并和聚合酶一起结合模板DNA;TF II D结合TATA盒,与原核生物的 $\sigma$ 因子识别转录起始机理相似。对其他TF II的分子量、功能等方面都已初步了解。各种TF II和RNA聚合酶II共同组成起始前复合物(PIC)。TF II也已发现多种。

基因表达调控还包括翻译调控和翻译后修饰。由于mRNA(翻译模板)寿命极短,种类又多,故翻译调控的研究目前只限于对某些生理活性物质(例如干扰素)和药物如何影响翻译等方面。远远不及转录调控那样深入,而生产实践中提出的许多具体问题,则急待解决。例如用基因工程生产蛋白质制品,不少是糖蛋白形式方具活性。糖基化是翻译后修饰过程,而目前对这个过程缺乏深入了解,成为基因工程中一大难题。

基因表达调控研究,一直在操纵子模式影响下进行。现在可以看出,其核心问题在核酸分子与蛋白质分子,还有其他小分子之间的相互辨认和相互作用。在理论研究上,基因表达调控还会沿着分子互相识别、结合的方向深入下去。在应用上,用高效启动子构建表达质粒,增强子用于转基因动物研究,甚至插入基因下游加终止信号等,都可提高表达。这些研究还将在基因工程实践中继续发挥深远影响。医学上的生长、分化、发育、进化、突变、癌变、病毒感染、种属和个体特异性、环境因素与疾病等等问题,都需基因表达调控理论去作本质性解释,也将和这些领域的研究在互相渗透、共同促进中发展。

参考文献

- 1 Walker G C. Annu Rev Biochem. 1985, 54: 425~457
- 2 Booth I R, Huggins C F. Regulation of Gene Expression - 25 Years on. Cambridge Univ Press. Cambridge. 1986
- 3 Grosfeld F, et al. Cell. 1987, 51: 975
- 4 Kal S Y, et al. Nature. 1987, 330: 489~493
- 5 Bentley D L, Groudine W. Cell. 1988, 53: 245~256
- 6 Matsunami N, et al. Nature. 1989, 342: 934~937
- 7 Petterson S, et al. Nature. 1990, 344: 165~168
- 8 Sawadogo M, Conaway R C. Biochem. 1990, 59: 711~754
- 9 Conaway J W, Conaway R C. Science. 1990, 248: 1550~1553
- 10 Sharp P A. Nature. 1991, 351: 16~18

(广州中山医科大学生化教研室博士生导师冯润泉撰)

真核生物基因表达调控 regulation of gene

expression in eukaryotes 基因表达是指DNA转录为RNA和翻译成蛋白质的过程。基因表达的调节和控制是生物生长、发育和分化以及从受精卵发育成复杂、完整生物体的关键。真核基因的表达调控是目前最热门的研究领域,它对于解决生命活动一分化、发育和进化等重大理论问题以及对现代生物技术的发展都具有决定性意义。真核生物的基因表达调控要比原核复杂得多,真核生物的基因往往是连续的,以外显子的形式被内含子隔开,不同的外显子编码着一个蛋白分子的不同结构域。绝大多数真核DNA都不编码蛋白质,例如人的编码DNA只有5%。另外真核细胞转录和翻译是隔开的,这使得真核细胞在转录、转录后的加工、透过核膜以及翻译等水平上都有非常复杂的调控。

基因水平上的调控 (1)持家和奢侈基因。真核生物活表达的基因有1~2万个,这些基因中大约10%~30%在所有细胞中都表达,叫持家基因,其它基因只在不同细胞中表达叫奢侈基因。(2)基因丢失。现已证明,在细胞分化过程中,可以通过丢失某些基因而去除它们的活性,某些原生动、线虫和甲壳类动物在个体发育中,许多细胞常常丢失掉整条或部分染色体,只有产生生殖细胞的组织一直保留着整套染色体。(3)基因扩增。即某些特定的拷贝数大量增加的现象。首先是在非洲爪蟾中发现,其体细胞rDNA只有约500个拷贝,而在卵母细胞中增为200万,其目的是用来转录合成卵裂期所需要的 $10^{12}$ 个核糖体。有些外界因素也可以引起基因扩增,例如用二氢叶酸还原酶的抑制剂氨基喋呤处理离体培养的细胞,可以使该基因扩增到40~400个拷贝,从而产生更多的酶来对抗氨基喋呤,当氨基喋呤去除后扩增的基因便逐渐丢失到原来的数目,已发现若干可以扩增的基因。(4)基因重排。基因重排最典型的例子是哺乳动物免疫球蛋白编码区的连接。当免疫系统发育成熟时,淋巴细胞可以通过DNA重排

即同一染色体的不同区域的 DNA 通过重新排布而产生为上百万种抗体编码的淋巴细胞。

**转录水平上的调控** (1) Bratten-Davidson 模型。布里顿 (Bratten) 和戴维森 (Davidson) 所提出的复合控制系统转录模型: 在结构基因的 5' 端有一段 DNA 序列称为接受位点, 它可被某种激活因子 (RNA 或蛋白质) 所识别, 激活因子由综合者基因 (integrator) 产生。真核生物的综合者基因自身还受到与之相邻的感受位点控制, 感受位点接受激素等信号的调控, 因而一个特定的激活蛋白可以同时调控含有相应接受位点的许多结构基因的表达。如果一个结构基因拥有几个不同的接受位点, 每一接受位点可被一个特异性的激活因子识别, 它就可能作为不同的组成成员在不同的情况下表达。(2) 基因调控的顺式作用元件和反式作用因子。目前, 大量的研究都集中在转录的顺式作用元件和反式作用因子的相互作用等方面。RNA 聚合酶 I 转录的编码蛋白基因, 其顺式作用元件包括转录起点上游 30bp 处的 TATA 序列, 上游几百碱基对处的 CCAAT 序列或 GGGCGG 序列, 或其它基因的特异调控序列。在基因下游或下游远端或内含子内还有增强子序列, 在酵母细胞内有类似于增强子的上游激活序列, 有些基因还含有负调控序列抑制子等。这些序列都是反式蛋白作用因子的靶位点。已分离纯化的反式作用因子有几百种, 新的还在不断发现。结合在 TATA 附近 DNA 上的蛋白因子叫通用转录调控因子, 结合在上游 DNA 序列上的蛋白称为转录因子。反式作用因子一般都有不同的功能区域, 含有几十至几百个氨基酸残基。其中有的是结合特异 DNA 序列所必须的, 有的则是激活基因转录所必需的。不同功能区都有自己的特定结构。

蛋白因子 DNA 结合区的结构有多种不同的类型: (1) 螺旋-转角-螺旋型。这是研究比较清楚的一种, 最初发现于原核生物的激活和阻遏蛋白, 后来在果蝇早期发育的同源域蛋白中也发现了这种  $\alpha$ - $\beta$ - $\alpha$  结构。它们有一段约 60 个残基的高度保守区, 其  $\alpha$  为识别螺旋, 这些残基直接与靶 DNA 的大沟专一性结合, 另一个  $\alpha$  穿过大沟与 DNA 形成非特异性结合, 现在看来, 具有同源域蛋白存在于酵母到人的所有生物中, 它们大都是基因转录的调控因子, 其结合的 DNA 序列为启动子或增强子。(2) 锌指型。其功能区的每 30 个氨基酸残基就有一对半胱氨酸和一对组氨酸, 前者在反向平行的  $\beta$ -折叠中, 后者在  $\alpha$ -螺旋中。能和  $Zn^{2+}$  形成配位键。有 9 个这样的重复单位形成 9 个手指状结构, 它还含有若干疏水氨基酸起稳定作用, 极性 (碱性) 氨基酸起识别 DNA 结合位点的作用。(3) 螺旋-环-螺旋型。巴蒂蒙 (Batimone) 等发现, 在免疫球蛋白基因增强子结合蛋白的 DNA 结合区中存在两个两性的  $\alpha$ -螺旋, 被长短不同的肽段所隔开, 其 N 端邻近有一些碱性和强极性保守氨基酸区。 $\alpha$ -螺旋中也有些保守的疏水氨基酸残基, 分布于  $\alpha$ -螺旋的一侧, 它们可以形成二聚体和 DNA 结合。(4) 分子拉链。1978 年, 史蒂文 (L. M. Steven) 等已经证实, 很多调节蛋白可以和 DNA 一起“拉链”配对, 近来发现这类蛋白分子的“链齿”几乎都是由亮氨酸组成的故称之为亮氨酸拉链, 其机理是: 增强子和启动子形成几百碱基对组成的区域, 它们编织成若干“激发区”即 6~10bp 组成的特定序列, 一个典型的强化子或启动子通常含有 5~10 个激发区。简 (Tjian) 发现, 每个激发区代表了一个调节蛋白的结合位点, 当增强子与启动子的每个激发区都被结合, 基因才会明显表达。可见一些特定的基因表达需要一系列调节蛋白的完整排列。斯蒂文对结合蛋白的结构进行了详细研究表明, 它们具有氨基酸序列的统一性: 疏水的亮氨酸都在螺旋的“脊背”向外伸出, 而且间隔 7 个氨基酸残基, 使之沿螺旋形成直线排列。这种蛋白相互之间可以靠脊和脊之间形成拉链而结合在一起, 形成“卷曲螺旋”并形成“Y”字型。在字上端还存在着 Arg/Lys 碱性区, 它们正好分开分别结合到激发区 DNA 的大沟内并与之吻合。这种二聚体可以是同源的和异源的, 从而形成对称和不对称的结构与激发结合, 异源结合可以形成不同的拼图, 从而增加表达调控的多样性。替代实验表明, 转录激活能力与所带负电荷的量有关, 增加负电荷一般能提高激活转录的活性水平。基

因转录的起始过程涉及很多蛋白与 DNA, 蛋白与蛋白之间的相互作用的复杂反应, 不同基因表达受不同组合的蛋白因子的协同调控。

**转录的翻译控制** 现已证明, 虽然真核生物的翻译和转录不同时进行, 但仍存在着翻译产物对转录的调控, 其作用机制是: 先是共同的反式作用因子本身的翻译的调控, 然后这些因子透过核膜与反式作用位点结合来实现调控。

**转录后水平上的调控** RNA 在核中转录后还需要在 5' 加帽和 3' 加 polyA。RNA 在有关酶的作用下拼接或自我剪接, 或在 snRNP 的帮助下拼接, 切除居间序列, 才能形成 mRNA 通过核孔。显然 RNA 要经过编辑、加工才能翻译。进入 90 年代, 辛普森 (Simpson) 等在动核原生动物的线粒体中发现了 RNA 的编辑功能: 其线粒体含有一个小环 DNA 的一个大环 DNA, 大环中有一些隐避基因, 其阅读框缺少转录起始密码, 必须经过编辑才能翻译。还有一些基因缺少 50% 以上的 U, 需要经过编辑加上去, 这种编辑作用是通过小环 DNA 所编辑的指导 RNA 对大环需编辑的 RNA 配对, 剪接等一系列步骤来实现的。尚不知这种精确的编辑作用是否在真核生物中普遍存在。

**翻译水平的调控** 主要在两个方面: (1) mRNA 的稳定性, 例如持家蛋白 mRNA 一般是长寿命的, 而奢侈蛋白 mRNA 一般是短寿命的。(2) 翻译起始调控, 许多真核卵细胞都贮藏着暂不翻译的 RNA, 受精几分钟后开始翻译, 可能存在着某些控制核糖体-mRNA 结合的因子即招募因子。(3) 已经发现翻译控制 RNA (tcRNA), 它富含 U, 可以和 mRNA 上的 polyA 配对从而控制翻译的起始。另外还有一种小分子 RNA (iRNA) 不富含 U, 它可以与不同的蛋白质形成 10s 的核蛋白体 (iRNP), iRNP 抑制 mRNA 翻译起始, 它可能是与 mRNA 形成部分配对, 阻止核糖体-mRNA 的结合。

真核生物基因表达以及分化和发育的分子调控机制等方面的研究仍将是生物学研究的焦点和核心。把基因、分化和发育与定量化的数学、物理、信息论、控制论、混沌和系统论方法结合起来已经成为今后的主流, 并将取得重大突破。

#### 参考文献

- 1 Lawton A R, Krcade P W, Cooper M D. sequential expression of germline genes in development of immunoglobulin class diversity. Fed proc, 1975, 34: 33~39
- 2 Landschul W H, Johsin Z P F, L'Mcknight S. The DNABinding Doman of The Ratliver Nuclear Protein C EBP is Bipartite. Science, 1989, 243: 1681~1688
- 3 Ted Abel and Tom Maniatis. Action of Leucine Zippers. Nature, 1989, 341(6237): 24~25
- 4 Larry Simpson. RNA Editing—A Novel Genetic phenomenon, Science, 1990, 250: 512~513
- 5 敖世洲. 基因及其表达的调节控制. 《未来千年的生物科学》. 中国科学院生物科学与技术局, 中国科学院上海文献情报中心, 上海: 上海科学技术出版社, 1991. 33~38

(天津商学院食品工程系庞广昌教授撰; 周希澄审)

#### 原核细胞的基因表达调控 regulation of expression

in procarotes 任何细胞的结构、功能和行为特性都取决于基因的表达调控—遗传信息的转录, 翻译过程。不论是多细胞还是单细胞生物, 其生命周期都是不同的基因按严格的时空程序转录和翻译的结果。基因的表达调控一直是现代分子生物学和分子遗传学研究的焦点, 这个领域的突破将对整个生物研究和现代生物技术的发展起关键作用。

**转录的起始调控** 1964 年, 杰克 (F. Jacob) 和莫诺 (J. Monod) 首先提出了启动基因的概念, 认为启动基因启动 RNA 转录。他们还根据 50 年代、60 年代大量的实验证据得出了操纵元学说。在大肠杆菌或其它细菌中, 大量的实验结果都证明基因表达调控依赖于在转录水平上的阻遏蛋白, 它和蛋白基因前



面的一段叫做操纵子的 DNA 序列结合,从而抑制这些酶的转录。包括结构基因和控制区以及调控基因的整个核苷酸序列叫操纵元,就乳糖操纵元来说,从结构基因逆流而上紧挨着的 DNA 序列是操纵子,它是抑制基因 LacI 产物和阻遏蛋白的结合位点。阻遏蛋白本身有两个结合位点,一个是与操纵子结合的叫操纵子位点,另一个与诱导物结合叫做诱导物结合位点。当细胞中没有乳糖存在时,阻遏蛋白与操纵子结合,使操纵子及其后面的结构基因处于关闭状态,当细胞中有诱导物存在时,则阻遏蛋白与操纵子解离与诱导物结合,结构基因处于开放状态, RNA 聚合酶结合并转录。操纵子再向上便是控制区叫启动子,乳糖操纵元的启动子可以分成两部分,上游部分是 CAP-cAMP 结合位点,下游部分是 RNA 聚合酶进入位点,每个位点又可以分为两部分: CAP-cAMP 结合位点 I 和位点 II。RNA 聚合酶进入位点包括识别位点和结合位点, CAP-cAMP(cAMP 受体蛋白)是一个广谱的正调控因子,在原料短缺,尤其是葡萄糖短缺时,生成 cAMP,它和 CAP 结合再与 CAP-cAMP 结合位点结合,便可以激活糖代谢中涉及的一大批基因和操纵元。对于乳糖操纵元来说,基因表达需要具备两个条件: CAP-cAMP 结合,阻遏蛋白从操纵子上解离下来和乳糖结合。这就意味着细胞中缺少葡萄糖,又有乳糖存在时操纵元才处于活化状态, RNA 聚合酶在  $\delta$  亚基指导下(1)结合到识别位点上;(2)移动到起始位点;(3)形成开放性启动子复合物,开始转录,经过转录和翻译合成 Y、Z、A 3 种利用乳糖的酶。

乳糖操纵元的建立,使基因表达调控研究在分子水平上飞速发展,现在利用分子生物学技术已经弄清:(1) Pribnow box: 习惯上把开始转录的第 1 个碱基定为 +1,沿转录方向为下游用正值表示,上游用负值表示,已经发现在 -10 左右有一个碱基序列是 RNA 聚合酶结合所必需的,其碱基序列是 TATPuAT,它富含 TA,所以便于 DNA 解链。(2) Sextama box,它也是 RNA 聚合酶覆盖的位点,在 -35 附近,其序列为 TTGACA,它是 DNA 聚合酶最初的结合位点, RNA 聚合酶借  $\delta$  亚基的帮助识别该位点。(3) 转录终止需要有一个回文序列,富含 GC 区和终止信号, GC 结合力较大,从而使转录速度减慢,回文序列可形成一个茎环结构,便于转录酶在 P 因子的帮助下识别终止信号。

这种由诱导物和阻遏蛋白结合从而诱导相关的几个基因表达,在分解代谢中是普遍存在的,如具有双启动子的半乳糖操纵元,具有正控制和负控制两种调节蛋白调控的阿拉伯糖操纵元,组氨酸利用操纵元,麦芽糖调节子等。象这类可诱导操纵元在分解代谢中一般都有正负两种控制机制相互协调。CAP-cAMP 是正调控因子,它对很多操纵元都是正的调控,阻遏蛋白起负调控作用,由诱导物来解除它对转录的抑制。

翻译和转录的偶联调控 细菌中还有负责合成的操纵元,如氨基酸合成的操纵元。在没有外源氨基酸时,这类操纵元表达,使细胞合成足够的氨基酸来合成蛋白质,如果有外源氨基酸存在,则细菌就不再自己合成,使操纵元关闭,这类受终产物阻遏的操纵元叫可阻遏操纵元。色氨酸操纵元就是一例。

该操纵元编码 E、D、C、B、A 5 个多肽链,它们组成 3 个酶复合物催化由分支酸合成色氨酸。在 TrpO 和 TrpE 之间有一段 162bp(碱基对)的前导序列 L,它转录到 mRNA 中。1981 年,亚诺夫斯基(Yanofsky)小组根据对 trp 操纵元的多年研究,提出了衰减模型:当 RNA 聚合酶转录,随即核糖体结合于 mRNA 的 5'端,它同时覆盖着部分 DNA,沿 mRNA 5'→3'方向移动,当达到 AUG 起始密码时,开始翻译。如果处于高色氨酸浓度时, Trp-tRNA 也增多,正在翻译的核糖体就可以顺利进入前导区,遇到 UGA 便停下来,由于核糖体的位阻效应,使前导 RNA 不能形成保护子,于是前空白子的发夹结构也不能形成。此时 RNA 聚合酶向前转录,所转录的 RNA 和 8 个 U 序列便可能形成终止子茎环结构,核糖体到此遇到终止结构即停止,使基因表达出现衰减现象,表达率下降,只翻译前导肽,当细胞不存在色氨酸时,相应的 trp-tRNA 也不存在,核糖体沿 3'翻译到 Trp-Trp 密码

子,因缺少 Trp-tRNA 而停止,从而空间位阻阻止了保护子的形成而形成前空白子茎环结构,同时也阻止了终止子的形成,于是 RNA 聚合酶转录并翻译,结构基因得以表达。其生物学作用是,当色氨酸过量时,生物停止合成相应的酶系,当色氨酸不足时该酶系合成,现已证明这种衰减子的结构存在于苯丙氨酸、苏氨酸、亮和异亮氨酸等多种操纵元中。

翻译水平上的调控 (1)反义 RNA 的调控作用。1983 年西蒙(M. Simon)发现了反义 RNA 在翻译水平上的调控作用。反义 RNA 通过互补碱基与相应的 mRNA 的 S、D 序列(核糖体结合序列)、起始密码子结合,从而抑制相应的 mRNA 翻译。反义 RNA 实质上就是 RNA 的互补 RNA,由于它可以干扰相应 mRNA 的翻译,又叫干扰 mRNA 的互补 RNA(即 micRNA)。1984 年,艾赞特(Izant)等提出了用反义 RNA 治疗病毒病,现已取得了举世瞩目的进展。(2)miRNA 的寿命对基因表达的调控,不同的 RNA 有不同的降解速度,已经发现凡是影响终止中 D-Loop 结构形成的突变都会影响该 mRNA 的寿命,可见终止子还决定了 mRNA 的寿命。参与 mRNA 降解的主要是 RNA 酶 III,它需要特定的 2 级结构,终止子可在不同的程度上阻碍 RNA 酶 III 的降解。(3)蛋白质自身调控。有些蛋白质能直接控制自身 mRNA 的翻译能力。这类蛋白质主要是核蛋白或 RNA 结合蛋白,例如 RF<sub>2</sub>(翻译释放因子),它可以控制核糖体和 mRNA 的结合,也可能控制其 mRNA 翻译的终止,当 RF<sub>2</sub>供应充足时,RF<sub>2</sub>可以促使翻译提前终止,细胞内缺乏 RF<sub>2</sub>时,则核糖体通过移动一个核苷酸,“跳过”终止位点,合成完整的肽。再如,核糖体的绝大多数蛋白在每个核糖体中只有一个,因此它们的表达必须和 rRNA 协调一致。当细胞内核糖体蛋白缺少时即有游离 rRNA 存在时则核糖体 6 个操纵元的调控蛋白优先与 rRNA 结合,相应的核糖体蛋白得以翻译,当 rRNA 被饱和后,多余的调控蛋白就与 mRNA 的 S、D-序列结合,阻止了核糖体与 mRNA 结合,从而降低了有关基因产物的合成。

饥饿信号调控 在原核生物中还存在着一种转录翻译水平的严紧控制机制。当细胞遭到氨基酸饥饿时蛋白合成骤然下降,每个细胞中核糖体数目也随之减少, rRNA 合成降低到 10% 以下,称之为严紧控制。50 年代末,盖伦特(Gallent)等在氨基酸饥饿状态的大肠杆菌中发现一个电泳行为异常和严紧控制有关的斑点,称之为魔点(MS)后来证明它是 ppGpp 称之为魔点 I,或 pppGpp 称之为魔点 II。严紧控制的触发器是位于核糖体 A 位上的无负载 tRNA,而无负载 tRNA 也正是氨基酸饥饿的信号。1974 年,科克兰(Cochran)发现一种蛋白质因子(SF),是 relA 基因的产物,它可以在氨基酸饥饿时产生,催化(p)ppGpp 的合成,而后(p)ppGpp 抑制很多操纵元的表达,所以又称之为报警素。

除此之外,还有一种类似于 CAP-cAMP 的因子 GS(谷氨酰胺合成酶),在氮源饥饿和过量的情况下 GS 对调节分解代谢操纵元的转录起关键作用,它可以激活 glnA 和 hut 操纵元使谷氨酸减少,谷氨酰胺增加,以克服饥饿。

原核基因调控的研究将在下列几方面深入:(1)基因调控的分子机制;(2)环境因子和细胞生理状态,发育阶段对基因调控的影响;(3)从孤立的操纵子转录发展到细胞水平和代谢网络的系统研究;(4)从定性的研究到定量的研究和多学科合作。

参考文献

- 1 Jacob F, J Monod. Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins, J Mol Biol. 1961. 3:318
- 2 Galant J A. Stringent control in E. coli. Ann Rev Genetics, 1979. 13: 393~415
- 3 Yanofsky C. Attenuation in control of expression of bacterial operons. Nature. 1981. 289: 751
- 4 Yanofsky C. Transcription Attenuation. J Biol Chem, 263: 609~612
- 5 Green P J, et al. The Role of Antisense RNA in gene Regulation. Ann Rev Biochem. 1988. 55: 569~597

- 6 杨胜利. 原核细胞复制和表达调控. 生命科学, 1992, 4(1): 10~20

(天津商学院食品工程系庞广昌教授撰; 周希澄审)

### 克隆 DNA 的体外定位诱变 site-specific mutagenesis of cloned DNA in vitro

基因或其他遗传单位中 DNA 序列的细微改变往往影响到基因的功能。经典遗传学研究通常是依靠生物性状的改变筛选突变型, 然后经过基因克隆和测序, 找出突变型和野生型在 DNA 序列上的差别, 这种方法现在虽然仍在使用, 但缺点是很显然的: (1) 经典诱变方法能够产生的突变种类十分有限; (2) 诱变处理是用整个生物体, 要得到所需的突变, 几率是很低的; (3) 通常靠表型鉴别突变型, 那些在表型上难以和野生型区别的基因就无法筛选出来。由于重组 DNA 技术的发展, 现在可以采用和经典遗传诱变法相反的程序, 即采用各种化学方法或酶学方法对克隆的 DNA 片段进行诱变处理, 然后分析突变型遗传结构和功能的关系。这样的诱变效率极高, 位置不限, 而且无需考虑到它的表型变化。

20世纪70年代末期, 寡核苷酸人工合成的常规技术取得很大进展, 各种 DNA 聚合酶和连接酶的质量也得到改进。这些都为寡核苷酸引导的定位诱变技术的发展提供了必要的条件。

寡核苷酸引导的定位诱变就是利用人工合成的寡核苷酸为诱变引物, 按照设计好的方案在已知的 DNA 序列中准确地改变蛋白质氨基酸编码中一个或几个碱基, 以研究蛋白质结构与功能的关系。同样, 定位诱变还用于研究基因调节中转录、转译和 DNA 加工等和核苷酸序列改变的关系, 准确找出基因调控的关键部位, 以及构建新的克隆载体和嵌合基因, 如把启动基因、核糖体结合位点或多腺苷酸等信号加到表达质粒的指定位置, 除去不合适的酶切位点, 加上适合的酶切位点等。此外, 还能除去 DNA 片段中不需要的序列(如内含子)以及对蛋白质基因的不同结构域进行精确地拼接和融合等等。

寡核苷酸引导的定位诱变要求: (1) 待诱变的 DNA 片段克隆到能自主复制的载体上并已测序; (2) 以重组单链 DNA 为模板, 如常用的大肠杆菌 M13 单链 DNA 噬菌体等; (3) 人工合成的寡核苷酸为诱变引物; (4) 非诱变部分的 DNA 序列能忠实地复制。近年来, 随着 M13 类载体在 DNA 测序中广泛应用和核苷酸自动合成仪逐渐普及, 以及高质量的 DNA 聚合酶、连接酶的生产等, 上述条件在国内一般分子生物学研究单位已不难办到。

定位诱变的基本方法是通过一个诱变引物构成单点诱变、多点诱变、插入诱变和缺失诱变等。诱变的步骤一般包括: (1) 把待诱变的 DNA 克隆到 M13 噬菌体载体上, 并由重组 M13 噬菌体制备重组 M13 单链 DNA 模板; (2) 设计并合成寡核苷酸诱变引物; (3) 把诱变引物结合到重组单链 DNA 模板上; (4) 借助于 DNA 聚合酶、T4 DNA 连接酶和 4 种 dNTPs 使诱变引物沿着模板延伸并连接成异源双链 DNA, 新合成链中含有诱变点; (5) 异源双链 DNA 转化大肠杆菌, 分离出野生型的和突变型子代; (6) 筛选突变型子代; (7) 用核苷酸测序法证实突变型子代中含有所需的突变点; (8) 回收突变的 DNA 片段, 并用突变的 DNA 片段置换野生型 DNA 的相应片段。

以上由寡核苷酸引导的体外定位诱变技术, 原则上是普遍适用的, 但一般诱变的效率比较低, 主要原因是: (1) 在引物延伸连接反应混合物中, 除了异源双链 DNA 外, 还杂有相当多未结合引物的 ss-DNA 模板和引物延伸不完全的部分双链 DNA 分子, 这两类分子转化后都形成野生型子代。 (2) 在大肠杆菌中存在甲基定向的错配 DNA 修复系统, 主要修复非甲基化的 DNA。在细胞中新合成的 DNA 链尚未被甲基化, 其中错配的位置就会优先被修复, 从而防止突变的发生。同样, 定位诱变中在体外合成的突变 DNA 链也是未甲基化的, 转化到细胞后也会被修复, 因此在转化子代中主要是野生型的。 (3) 有些质量不高的 DNA 聚合酶 Klenow 片段仍然残存一些 5'-3' 外切酶活性, 在新链延伸过程中, 引物容易受到 5'-3' 外切酶的消化, 如果降解超过引物

上的诱变点, 新合成的链将是野生型的。为了提高诱变效率, 可以用蔗糖梯度离心法或凝胶电泳法分离异源双链 DNA, 或用硝酸纤维素滤膜分离除掉 ss-DNA 和选用 *mutL*, *mutS* 或 *mutH* 突变的大肠杆菌为转化宿主, 阻止错配 DNA 的修复, 增大突变型的比例; 以及用双引物法 (Zoller & Smith, 1987) 保护诱变引物不被 5'-3' 外切酶降解等等。这些改进措施虽然可以把诱变效率提高一些, 但突变型子代的筛选仍较困难。通常需要用杂交法, 以诱变引物为探针, 从众多子代噬菌斑中筛选出突变型子代, 但这毕竟是一项费时费事的步骤。

80年代中期, 随着定位诱变法在分子生物学研究中的应用, 研究工作者又设计出一些阻止野生型子代生长, 提高诱变效率的方法, 如缺口双链 DNA 法 (Kramer 等, 1984), EcoK/EcoB 循环选择诱变法 (Carter 等, 1985), 脱氧硫代核苷酸保护法 (Nakamaye & Eckstein, 1986) 以及含尿嘧啶单链 DNA 模板法 (Kunkel 等, 1987) 等。这些方法的诱变效率都能达到 50% 以上, 由于诱变的效率高, 只需分离少数噬菌斑就能得到所需的突变型, 大大简化了筛选突变型的手续。

含尿嘧啶单链 DNA 模板法是其中较为简便、适用范围较广的一种方法。所谓含尿嘧啶单链 DNA 模板, 就是在 DNA 模板中的少数胸腺嘧啶残基 (T) 为尿嘧啶 (U) 所取代。在大肠杆菌 *dut-ung-* 菌株中可以制备这种模板。在 *dut-* 突变型中没有脱氧尿苷酸酶, 细胞内的 dUTP 浓度高, 可以和 dTTP 竞争并参入到 DNA 中; *ung-* 突变型缺少尿嘧啶 N-糖基化酶, 这种酶的作用是降解 DNA 中的尿嘧啶。因此, 在 *dut-ung-* 突变型中 dUTP 可以取代 dTTP 参入 DNA 的一些部位, 并且不被清除掉, 任何常用的 M13 类载体都可以在 *dut-ung-* 宿主中培养制备含尿嘧啶的 DNA 模板。这种模板中通常每个基因组含 20~30 个尿嘧啶残基。在实验条件下含尿嘧啶的 ss-DNA 模板和正常模板没有区别, 模板中 dUMP 和 dTMP 的编码相同, 不会造成诱变。模板中的尿嘧啶也不会妨碍 DNA 的体外合成。当诱变引物沿着含尿嘧啶 ss-DNA 模板合成新链时, 底物中只加 4 种 dNTPs, 不含尿嘧啶。新合成的异源 RF DNA 转染野生型 (*dut+ung+*) 大肠杆菌后, 含尿嘧啶的模板链被细胞内的尿嘧啶-N-糖基化酶降解。由于模板链没有生物活性, 转染子主要来自诱变的互补链。单点诱变效率可达 50%~80%。此法除了需要一株 (*dut-ung-*) 菌株制备含尿嘧啶模板外, 别无其他要求。

聚合酶链反应 (PCR) 是 80 年代后期兴起的一项在体外大量扩增 DNA 片段的高新技术, 由于其方法简单快速, 近年来发展极快。PCR 技术略加改动也适用于 DNA 片段的定位诱变 (Higuchi 等, 1988)。PCR 定位诱变法对 DNA 模板无特殊要求, 无论单链 DNA 或双链 DNA 均可使用, 也可以用环状 DNA, 如重组质粒 DNA 为模板 (Hemsley 等, 1989; Jones & Howard, 1990)。由于 PCR 的引物是设在模板的两端, 若要把诱变点安排到 DNA 片段的任何部位, 必须对 PCR 扩增技术进行一些调整, 增加引物个数和 PCR 扩增反应次数, 手续较为繁杂。此外, *Taq* DNA 聚合酶中没有校正读码的 3'-5' 外切酶活性, 扩增的 DNA 片段愈长, 差错出现的几率也愈高, 这些都是有待克服的。

80年代中期以来, 飞速发展的定位诱变技术在分子生物学领域和蛋白质工程研究中起了很大地推动作用。近年来兴起的蛋白质工程中把这种方法称作“反向遗传学”, 它是目前分析蛋白质结构与功能关系的最有力的手段之一。随着这项技术的广泛应用, 定位诱变方法也必将得到进一步的简化和完善。

#### 参考文献

- 1 Kramer W, et al. Nucl Acids Res, 1984, 12: 9441
- 2 Carter P, et al. Nucl Acids Res, 1985, 13: 4431
- 3 Nakamaye K L, Eckstein F. Nucl Acids Res, 1986, 14: 9679
- 4 Zoller M J & Smith M. Methods Enzymol, 1987, 154: 367
- 5 Kunkel T A, et al. Methods Enzymol, 1987, 154: 367
- 6 Higuchi R, et al. Nucl Acids Res, 1988, 16: 7351
- 7 Hemsley A, et al. Nucl Acids Res, 1989, 17: 6545

8 Jones D H, Howard B H. *BioTechniques*, 1990, 8: 178

9 陈乃用. *微生物学通报*, 1991, 18(1): 27

(中国科学院微生物研究所陈乃用研究员撰)

### 异源基因在酿酒酵母中表达

*Saccharomyces Cerevisiae* 是单细胞真核生物,它不仅具有原核生物的生长快、便于培养和遗传操作等优点,还具有典型的真核生物的特性,并且不产生有毒产物,因而被认为是表达异源蛋白,特别是哺乳动物蛋白的最适寄主。用酿酒酵母表达和生产自然界稀少的医用蛋白更具有重大的社会意义和经济意义。此外,酿酒酵母又是最重要的工业生产菌株,但它只利用单糖和双糖进行发酵,将外源的碳水化合物水解酶系导入酿酒酵母,使其能直接利用例如生淀粉或粗纤维等进行发酵,生产酒精或其它有用物质。

表: 酵母克隆载体特性表

| 载体名          | 转化频率 (μm)DNA <sup>-1</sup>       | 拷贝数/细胞 | 在非选择培养基中的稳定性 | 存在的酵母 DNA 因素             |
|--------------|----------------------------------|--------|--------------|--------------------------|
| YIp(酵母整合型质粒) | 1~100                            | 1      | 很稳定          | 选择标记,染色体片段               |
| YEp(酵母附加体质粒) | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup> | 5~40   | 较稳定          | 选择标记,2μm 环               |
| YRp(酵母复制型质粒) | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>5</sup> | 3~30   | 很不稳定         | 选择标记,染色体,ARS             |
| YCp(酵母中心粒质粒) | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup> | 1      | 稳定           | 选择标记,染色体或 2μm 环,着丝粒(CEN) |
| YIpl(酵母线性质粒) | 10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup> | 5~30   | 很不稳定         | 选择标记,染色体或 2μm 环,端粒(TEL)  |

为使异源基因能在酿酒酵母中高水平表达,必须将异源基因正确地连接到酵母表达载体的启动子和终止子之间,构成一个表达框架。质粒载体在酵母中的稳定性和拷贝数是决定异源基因能否在酵母中表达或表达水平高低的重要因素。以 2μm 环为基础的高拷贝数载体可携带高剂量的异源基因,但会降低转化子的生长速度;此外,它在非选择条件下,每代约有 1% 的丢失率,因而在工业生产上是不可取的。采用整合型载体,将异源基因整合到酵母染色体中,虽然只有一个拷贝,但由于不影响细胞生长,并且高度稳定,因而仍能达到相当高的表达。例如,1988 年柯尔(Cole)等构建的含泡盛曲霉(*Aspergillus awamori*)糖化酶基因的酿酒酵母工程菌,在以 25% 可溶性淀粉为碳源的酒精发酵中,以 2μm 环为基础的工程菌 C468:YEpPM18 的酒精产量为 25.6g/L,碳源利用率为 68%,而用整合载体构建的工程菌 C162:YIpPM202 则分别达到 118.2g/L 和 93%。

用于酿酒酵母表达异源基因的启动子分两类:一类为组成型启动子(解糖启动了),例如 PGK(3-磷酸甘油酸激酶)、ENO1(烯醇酶1)、GAP(3-磷酸甘油醛脱氢酶)、ADHI(ADC1)(酒精脱氢酶)、TPI(磷酸二糖异构酶)、PYK(丙酮酸激酶)和 MFA1(信息素 α 因子)等基因启动子(Shuster, 1989);另一类为诱导型启动子,例如 PH05(酸性磷酸酯酶5)、GAL1(半乳糖激酶)和 GAL10(半乳糖差向异构酶)等基因启动子。不同的启动子对不同的异源基因的表达调节水平不同。例如 PGK 是一个强启动子,当存在于多拷贝质粒载体中时,PGK 酶产量达总细胞蛋白的 80%,这对寄主菌的生长是不利的;而生凝乳酶的产量仅为总细胞蛋白的 5%,α-干扰素仅为 2%(Mellor 等, 1983)。GAP 也是一种强启动子,海能等(1989)证明,在不同长度的 GAP 启动子片段控制下,水蛭素(hirudin)的表达水平明显不同。如含全长 GAP(1100bp)时,产量为 0.1~0.2mg/hr/L/OD<sub>600</sub>,并使拷贝数由 14 降到 4~5,GA-PCL(391bp)虽表达量可高达 2.7mg,但质粒易丢失,不适合生产应用。

培养条件可明显影响启动子的作用。例如,1982 年蒙特(Tuite)等证明,在用 PGK 启动子启动 α-干扰素合成时,在醋酸盐培养基中加入葡萄糖,可使产量提高 20~30 倍。又如 PH05 启动子,由于该基因的表达受培养基中无机磷的调节,在最适的无机磷和碳源的供应下,可在发酵过程中诱导细胞生长和产物积累。1989 年,海能等将强启动子 GAP 的下游启动子因子同调节启动子 PH05 的上游激活序列(UAS)结合,构建成兼具两种启动子特性的杂种启动子 PH05/GAP,对 Eglin 在酿酒酵母中表达有明显的解阻遏作用。

分泌信号是酵母菌表达的蛋白在起始分泌、糖基化、折叠和

已成为当前研究的另一热点,并且已取得突破性进展,这项研究的成功,将会引起发酵工业的革命性变革。

酵母克隆系统的建立始于 20 世纪 70 年代末。1978 年,伯格(Begg)和海能(Hinnen)等分别报道用含酵母核 DNA 的杂种质粒对酿酒酵母的成功转化。1979 年,斯特鲁尔(Strubl)等报道一套可供酵母转化用的 Y 载体,主要研究进展是利用酵母的内源 2μm 质粒片段或整个 2μm 质粒同表达框架(expression cassette)和选择标记融合,创造出高拷贝数的稳定的嵌合质粒。1981 年,希什曼(Hitzman)等第 1 个报道用酵母生产哺乳动物的白细胞 α 干扰素,表达系统为含 ADHI 启动子的表达框架。目前,已构建成功一系列可供酵母转化的克隆载体和表达载体(见下表),其中以 2μm 环为基础的载体,由于其具有较高的拷贝数、稳定性和转化效率而被广泛采用。

加工等方面不可缺少的因素。由于酿酒酵母的分泌系统与高等真核生物细胞的很相似,所以还能利用异源(如哺乳动物等)的分泌信号指导蛋白分泌。已有资料证明,许多哺乳动物蛋白能在酵母中合成,并以活性型分泌到胞外,分泌水平约为 50~100mg/L,这是用其它微生物寄主达不到的,这种水平对生产自然界稀少的医用蛋白非常有意义。

酵母的 α-因子是一种最有效的分泌信号,它是一种只有 13 个氨基酸组成的疏水短肽,主要结构基因 MFA1 编码前原 α 因子(pre-pro-α-factor)(ppaf1)。这种以 MFA1 编码的 ppaf1 前导区已被用于指导酿酒酵母分泌异源蛋白,例如表皮生长因子、α-干扰素、降血钙素、凝乳酶原、白细胞介素-2、胰岛素原和人免疫缺陷病毒蛋白等。

酿酒酵母能使表达的异源蛋白在分泌过程中发生糖基化和有效折叠。外源蛋白在酵母细胞中可发生 N-和 O-连接的两种糖基化,这与哺乳动物细胞中发生的情况很相似。例如,人 α-1-抗胰蛋白酶(α-AT),酵母细胞能像肝细胞一样地识别它,并把碳水化合物加到 3 个相同的天冬酰胺残基上,因而能被分泌到胞外,分泌的糖基化产物与天然的 α-AT 相同。酵母分泌的泡盛曲霉糖化酶、李氏木霉(*Trichoderma reesei*)的纤维素酶(CBH1 和 EG1)以及人粒细胞巨噬细胞群落刺激因子(GM-CSF),除有 N 糖基化外,还有 O-糖基化。但由于酵母的 O-糖基化结构与哺乳动物的 O-糖基化结构不同,不适于医用。有些蛋白还因外链碳水化合物(甘露糖)的加入而发生超糖基化。超糖基化蛋白本身虽不是酵母细胞胞外定位的屏障,也不影响离体生物活性,但由于有免疫原性而不适于医用。

寄主菌株的倍体性对附加体质粒的有丝分裂稳定性和 HBsAg 基因的表达有明显的影。例如,质粒 YEp13、pYF91 和 YEp13+HBsAg 在三倍体和大部分二倍体菌株中的有丝分裂稳定性明显高于单倍体菌株,大部分含 YEp13+HBsAg 和 pNMVG3954 的多倍体转化子,HBsAg 蛋白的产量较单倍体菌株高 2~4 倍(Voropayava, 1991)。发展适当的寄主菌株分泌途径的异源蛋白的分泌水平。例如海能等(1989)报道,用 amn9 突变体可减少外链加到 α-AT 或 HIV 衣壳糖蛋白 gp120 上,用蛋白酶缺陷型酵母表达人组织纤维蛋白溶酶原激活剂(t-PA),可使提纯过程不受蛋白酶降解。

利用酿酒酵母作异源基因表达寄主的研究虽然只有十几年的历史,但已充分显示出它的巨大生命力,已经有许多重要的医用蛋白可通过酿酒酵母进行生产,扩大酵母菌对碳源的利用也已取得突破性进展,直接应用粗淀粉和植物纤维素废物生产酒精,

饮料酒和其它有用物质将可能变成现实。但是,利用酿酒酵母生产异源蛋白还有一些不足之处,例如,表达水平和分泌水平还不够高;某些蛋白在酵母细胞中的糖基化与哺乳动物细胞的不同,甚至产生超糖基化,会产生不希望有的免疫反应而不适于医用。选择适当的寄主——载体组合、启动子、信号序列、转译后修饰和适当突变菌株,将有助于上述问题的解决。

**参考文献**

- 1 Bitter G A. In *Methods in Enzymology* (Berger, S. L., Kimmel, A. R. eds.), San Diego: Academic Press, 1987, 152: 673~684
- 2 Caunt P, Impoolsup A, Greenfield P E. *J Biotechnol*, 1988, 8: 173~192
- 3 Cole G E, McCabe P C, Inlow D. et al. *Bio/Technol*, 1988, 6: 417~421
- 4 Barr P J, Brake A J, Valenzuda P (eds.). *Yeast Genetic Engineering*, Boston: Butterworths, 1989, 83: 108
- 5 Barr P J, Brake A J, Valenzuda P (eds.). *Yeast Genetic Engineering*, Boston: Butterworths, 1989, 165~280
- 6 Spencer J F T, Spencer D M. (eds.). *Yeast Technology*, Berlin: Springer-Verlag, 1990, 366~386
- 7 Voropayava L A. *Genetika (Moscow)*, 1991, 27: 1143~1151

(中国科学院微生物研究所陈玉梅副研究员撰)

**植物病毒的分类与进化**

自从1892年 Ivanowski 首次发现病毒以来,在动物、植物、微生物上的发现有病毒存在。并且随着对病毒本质认识的深入,病毒定义所包含的内容也不断增加。现在认为病毒包括真病毒和亚病毒。真病毒指那些含有核酸和外壳蛋白质的病毒,而亚病毒包括类病毒、拟病毒和朊病毒,但 Brown 等(1989)将植物隐蔽病毒和真菌病毒,以及其他一些能引起植物不育、真菌死亡等特性而又不能水平传播的两链核糖核酸(dsRNA)统统归于一类称为 RNA 质粒。

Koitonow—Rezaian(1989)根据核酸序列,将已知16种病毒分为两组,其中一组为颗粒日灼类病毒(ASBV)组,仅含一个类病毒 ASBV;其他15种病毒都属于马铃薯纺锤块茎类病毒(PSTV)组,并进一步分为两个亚组,PSTV 亚组和苹果绣果类病毒(ASSV)亚组。其他亚病毒未见有分类报道。下面仅介绍真病毒(简称病毒)的分类

1961年前病毒分类没有太大的进展,1963年国际命名委员会(ICNV)成立。1965年 ICNV 筹备委员会(PCNV)采用 Lwoff 意见,起草了一份分类方案,将已知病毒分成21种39属。Gibbs 提出了密码程式,植物病毒曾广泛采用,但1977年 ICTV 决定以后不再使用)。1966年第1届 ICNV 会议,成立了植物病毒、无脊椎动物病毒、脊椎动物病毒、细菌病毒和密码程式分会及 ICNV 主席等组成的常务委员会,为开展病毒分类研究制定统一分类方案奠定了基础。1970年在 ICNV 会议上,植物病毒已正式承认了16个组,但没有设科和属,而动物和细菌病毒已有这些分类单元,这标志着植物病毒的分类基础已经形成。1973年 ICNV 更名为国际病毒分类委员会(ICTV)。1981年 ICTV 决定将病毒密码及信息分会更名为病毒信息常设委员会,在澳大利亚设信息中心,有专职人员收集、整理和散发病毒资料,ICTV 制定了病毒分类规则和细则,指出病毒“种”的概念是:它是由一组株系组成,这组株系来源不同或相同,具有一些相关而且稳定的性质,这些株系能与其他株系区分开来。种以下分类单元 ICTV 没有作定义,但 ICTV 推荐了6位权威病毒学家为植物病毒种以下分类制定了一个指南。ICTV 明文指出,目前的病毒分类系统不含任何进化及系统发育意义。以后 ICTV 又召开了3次大会,最近一次是1990年召开的。植物病毒新增加了许多新的病毒组和新种,但分类单元没有太大变化。到1990年为止,植物病毒已有32个组,2个科(名称沿用动物病毒科名),它们分别是,花椰菜花叶病毒组;联体病毒组;呼肠弧病毒科;植物隐蔽病毒组;烟草脆裂病毒组;烟草花叶病毒组;小麦上传花叶病毒组;大麦条纹花叶病毒组;马铃薯 X 病毒组;香石竹潜隐病毒组;苹果茎沟槽病毒组;马铃薯 Y 病毒组;甜菜黄花病毒组;玉米退绿矮化病毒组;大麦黄矮病毒组;芜菁黄色花叶病毒组;番茄丛矮病毒组;南方菜豆花叶病毒组;烟草坏死病毒组;香石竹斑驳病毒组;玉米雷亚朵非纳病毒组;欧防风黄点病毒组;豇豆花叶病毒组;蚕豆萎蔫病毒组;线传多面体病毒组;豌豆耳突花叶病毒组;香石竹环斑病毒

组;黄瓜花叶病毒组;雀麦花病毒组;等经易变病毒组;苜蓿花叶病毒组;弹状病毒科;番茄斑萎病毒组;水稻条纹病毒组。

现在病毒分类系统是一个实用而很不完整的系统,最主要的问题是分类理论上尚存在很大分歧,反映到分类上就表现在动、植物及微生物病毒采用的分类单元的不一,动物病毒及噬菌体已建立起科、属单元,而植物病毒则只采用“组”的形式。病毒作为一种非细胞生物没有性别分化及有关的生殖隔离现象,使得传统的种的概念很难应用于病毒,并且病毒又不象细胞生物那样具有化石可供研究其起源和进化。要建立起一个完整的病毒分类体系,首先要解决病毒“种”的概念及其鉴定标准,再则,要找出病毒起源和进化以及亲缘关系的证据检测方法。最近几年有多个病毒学家提出过病毒种的概念。其中以 van Regenmortel (1989)的建议最具有说服力,他认为,病毒作为一种生命形式,应该具有生物发展的一般规定,具有起源和进化,占有一定的生态位,而不能因为病毒不能进行有性生殖就不能进行种的划分,事实上细胞生物在划分种时,生殖隔离也并不是都作为一个必要条件来考虑的。他将种定义为:占有特定生态位的具有繁殖连续性的,共同具有一组特性的病毒类群。有一些植物病毒学家建议植物病毒也采用属、科分类单元,将已知的组分成不同的属,最有影响的是有人根据病毒形态和基因组的布局,将黄瓜花叶病毒组、雀麦花叶病毒组和等经易变病毒组命名为三分体病毒科。

病毒的起源和进化是困扰病毒分类的两大理论问题。有关病毒起源有多种假说,如病毒是最原始的生命物质;是从微生物退化而来的。是从细胞生物染色体核酸脱离出来的等等,但都未能找到有说服力的证据。最近几年来,由于核酸序列分析技术及限制性内切酶谱等分子生物学技术的发展,已找到了一些病毒进化和亲缘关系的证据,如 Goldbach(1987)通过比较病毒核酸序列及基因布局,发现植物正链核糖核酸(+RNA)病毒和一些动物病毒具有亲缘性,他将+RNA 病毒分成两个大组,与动物细小核糖病毒相关的,叫做类似细小核糖核酸病毒植物病毒,如豇豆花叶病毒组,线传多面体病毒组,马铃薯 Y 病毒组;与动物 a-病毒相关的叫做类似辛德华斯植物病毒,如烟草花叶病毒组,雀麦花叶病毒组,黄瓜花叶病毒组,烟草脆裂病毒组。而在类病毒和拟病毒中已经证实,通过核酸重组可以形成新的类病毒或拟病毒,因而认为自然界中核酸重组是病毒进化的途径之一。

随着工作的深入,会有更多的病毒被发现,新的分类单元会建立,分类系统会反映出病毒的亲缘关系,亚病毒的分类以及它们与其他生命现象的关系如 ds RNA 质粒,转座子等会得到阐明。

**参考文献**

- 1 R. H. Symons. The Intriguing Viroids and Virusoids; What is Their Information content and How did they Inolve
- 2 Goldbach R. Genome Similarities between Plant and animal RNA Viruses. *Microniological Sciences*, 1987, 4(7): 197~202
- 3 van Regenmortel M H V. Applying the Species Concept to Plant Viruses. *Archive Virology*, 1989, 104: 1~17
- 4 Frown F. The Classification and Nomenclature of Viruses. *Intervirolgy*, 1989, 30: 181~186
- 5 Brown F, Finnegan P M. RNA Plasmids. *International Review of Cytology*, 1990, 117: 1~56
- 6 朱水方. 植物病毒的分类与鉴定, 世界农业, 1991, 8: 32~35

(农业部植检所朱水方撰)

**番木瓜环斑病毒外壳蛋白基因克隆与表达**

cloning and expression of CP gene of PRV 番木瓜环斑病毒(PRV)是世界各番木瓜产区的毁灭性病害,尚无有效的防治措施。

1986年,埃布尔(P. P. Abel)等首次克隆了烟草叶病毒(TMV)外壳蛋白(CP)基因,并且利用农杆菌(*Agrobacterium tumefaciens*)叶盘感染法导入烟草细胞。CP基因在烟草中稳定遗传表达,使烟草普通花叶病发病期推迟13天以上。此后短短5年,世界各地科学家针对7组20多种植物病毒克隆了CP基因,其中7种已获得工程植物,它们对CP基因来源的病毒甚至异源病毒表现程度不同的抗性。

PRV CP基因的克隆与表达也取得较大发展。1985年,内格尔(J. Nagel)等合成并克隆了PRV-W RNA 3'区段cDNA,根据体外翻译结果及其与马铃薯Y病毒(PVY)组其他成员的研究结

果比较,推断 PRV CP 基因于病毒 RNA 的 3' 端。1990 年,奎马达 (H. Quemada) 等合成并克隆了 PRV HA5-1 RNA 的 3' 区段 cDNA。通过分析两个株系 RNA 3' 区段 cDNA 碱基序列和 CP 氨基酸顺序,提出 CP 基因序列,其长度为 864 碱基。

1990、1992 年,费奇 (M. M. M. Fitch) 等以未成熟胚、胚轴切段和体细胞胚为受体,用高速微弹法 (基因枪法) 将构建在 pGA482G 的 CP 嵌合基因导入番木瓜。对于卡那霉素选择培养基上生 3 周的愈伤组织,6 个月的体细胞胚进行报告基因  $\beta$ -葡萄糖苷酶基因 (GUS) 和新霉素磷酸转移酶 I 基因 (NPT I) 表达的检测,得到阳性结果。由转化细胞再生的植株在温室中对 PRV HA 有显著抗性,对来自泰国的 PRV 则几乎没有抗性。

1991 年,凌凯树等将上述嵌合基因通过叶盘感染法转化了烟草。试验结果表明转基因烟草 PRV CP 表达量占叶片总蛋白的 0.09%~0.25%,对烟草蚀纹病毒 (TEV)、PVY、胡椒斑纹病毒 (PeMV) 有较强的保护作用,但对非 PVY 组的黄瓜花叶病毒 (CMV) 无效。库胡尔 (A. R. Kuehule)、斯考查 (R. Scorza) 分别测到转基因烟草,李表达了 PRV CP,以期进一步验证其介导的异源抗性。

1991 年,叶长明等根据奎马达报道的 PRV CP 基因序列,在人工合成的两段引物引导下,以华南 PRV-Ys 的 RNA 为模板,反转录合成了 CP 基因 cDNA 第 1 链,并通过聚合酶链式反应 (PCR) 体外扩增得到双链 cDNA,然后克隆进大肠杆菌质粒载体 pUC18 和 pUC19。序列分析表明该基因与奎马达报道的差异较大,同源率为 89.3%,且少连续 6 碱基。Western blot 检测发现 CP 基因能在大肠杆菌中有效表达,在此基础上将 CP 基因插入 pRoK 1.35S 启动子和 nos 终止序列之间构建了植物表达载体 pRPC,通过“三亲交配”将此载体引入农杆菌 LBA4404,与其中的 Ti 质粒 pAL4404 构成二元载体系统。

1991 年,刘俊君等合成并克隆了 PRV-Sm 的 CP 的基因,此基因与国外报道的差异也较大,同源率为 88.43%,而与 PRV-Y 用类似的方法构建 CP 基因同源率达 96.1%。

有人认为 CP 基因只能表达对其来源的那种病毒或株系的抗性,奎马达的研究结果支持这种观点。但凌凯树等观察到一种 CP 基因工程植株对其他类似病毒或株系也有抗病效果。这又与上述观点相矛盾。显然对转 CP 基因植物的抗性机理还有待于深入研究。

PRV CP 基因转化番木瓜工作进展较为缓慢,这主要由于番木瓜组织培养和转基因技术研究跟不上。1990~1991 年叶克雄等在番木瓜人工种子和外源基因导入方面获重要突破。用这些技术已获得 PRV-Ys CP 基因转化的番木瓜愈伤组织,拟通过体细胞胚发生途径再生植株。

表达几种病毒 CP 转基因植物都有一定局限性,即只能抗一种或少数几种病毒,保护期还不能达到理想的长,当受到大量毒源重复接种时抗病性丧失或明显减弱。番木瓜是热带和亚热带多年生植物,传毒蚜虫周年保护较高数量,仅仅依靠 CP 基因难以取得理想效果。人们正着手克隆病毒核酸复制基因、抗体基因、核酶基因等可能更有希望。同时有必要将基因工程与常规育种结合起来,即在选育矮生、早熟、抗病品种的基础上引入抗病基因。由于番木瓜属于异花授粉作物,后代性状变异大,在保持品种的抗病性等优良性状方面,人工种子等无性繁殖技术将显示出特殊作用。

参考文献

- 1 Nagel J, Hiebert E. Virol, 1985, 143: 435~441
- 2 Fitch M M M, Manshardt R M, Gonsalves D, et al. Plant Cell Rep, 1990, 9: 189~195
- 3 Quemada H, Hostis B L, Gonsalves D, et al. J Gen Virol, 1990, 71: 203~210
- 4 Ling K S, Namba S, Gonsalves C, et al. Bio/Technology, 1991, 9: 752~758
- 5 Scorza R, Cordts J M, Mante L M, et al. Hortscience, 1991, 26: 786
- 6 叶长明, 叶寅, 骆学海, 等. 植物病理学报, 1991, 21: 1~4
- 7 叶寅, 叶长明, 骆学海, 等. 华南农业大学学报, 1992, 13: 6~9
- 8 Fitch M M M, Manshardt R M, Gonsalves D, et al. Bio/Technology, 1992, 11: 1466~1472
- 9 Kuehule A R. Plant Cell Rep, 1992, 11: 484~488
- 10 Suwenz L, Manishardt L. Hortscience, 1992, 27: 660

(华南农业大学叶长明博士撰; 范怀忠审)

细胞活性因子及其受体的分子进化规律

molecular evolutionary principles of cytokines and their receptors. 进化与发育是生物界基本的生命活动。19 世纪 70 年代, 海克尔 (E. Haeckel) 通过形态学的观察首次发现进化与发育的统一, 即“个体发育重现种系发生”的生物发生律。100 多年后的今天, 分子生物学虽然使生物学乃至整个科学发生了翻天覆地的变化, 但人们在分子水平上对进化与发育相关性的认识几乎仍是空白。近数年来, 贺福初等首次通过分析在发育过程中承担重要作用的细胞活性因子 (Cytokine) 及其受体的分子进化规律, 在分子水平上探讨了进化与发育的关系, 取得以下进展。

细胞活性因子与受体的协同进化规律 (1) 细胞活性因子与受体在纵向 (物种间) 进化中的协同: 进化纵向分析表明, 各细胞活性因子或受体的进化速率跨度较大 (如 bFGF 仅 C. 233 置换数/氨基酸  $\times 10^8$  年, 而 IL-6 为 13.87 置换数/氨基酸  $\times 10^8$  年), 似乎杂乱无章, 但将细胞活性因子和其受体的进化速率平等比较, 即可看到两者呈相关趋势。统计分析表明, 因子-受体的进化速率呈良好的线性相关 [ $r = 0.960, p < 0.0001, a = 0, b = 0.81430 \pm 0.0686 (SE)$ ], 这种因子、受体进化速率的一致性表明它们的协同进化 (concerted evolution)。对蛋白分子的进化研究除纵向分析 (对象为不同物种的同一种蛋白质) 外, 还可横向分析 (对象为同一物种或相近物种的功能不同但结构相似的因子)。

(2) 细胞活性因子与受体在横向 (因子间) 进化中的协同: 横向进化分析揭示, 在结构上有较高同源性的活性因子其各自对应的受体亦存在较高的同源性, 且各因子受体对 (组) 内的同源性程度很接近, 从而表明, 结构同源的因子其受体结构亦同源, 且同源性程度一致。结果从另一侧面揭示了因子与受体协同进化的现象。上述因子的组织来源、靶细胞、生物学作用和氨基酸顺序均不同 (受体亦如此), 从而揭示存在于上述因子、受体间的这种协同进化现象很可能是一个普遍规律, 上述因子作用于多种不同的组织、器官。为深入探讨细胞活性因子的分子进化与发育调控作用的关系, 贺福初等对调控发育阶段明确的两组造血细胞生成素 (hematopoietin) 进行纵向进化分析, 并将分析结果进行横向比较。

造血细胞生成素的发育相关进化规律 (1) 调控早期造血细胞分化的淋巴因子, 其种间进化距离大于调控晚期造血细胞分化的淋巴因子。以小鼠-人种间比较, 在 IL-1 $\alpha$ 、IL-1 $\beta$ 、IL-2、IL-4、IL-6 和 IL-7 的种间氨基酸差异%和进化距离中, 以 IL-6、IL-4 的种间差距最大, IL-1 $\alpha$ 、IL-1 $\beta$  次之, IL-2 与 IL-7 最小。研究结果指出, IL-6 与 IL-4 作用于造血干细胞向祖细胞分化的阶段, IL-2 与 IL-7 则作用于原 (pro) T、原 B 等较为分化的淋巴细胞阶段。除 IL-1 $\alpha$ 、IL-1 $\beta$  (它们仅刺激干细胞增殖而不影响其分化) 外, 调控早期细胞分化的淋巴因子其小鼠-人种间进化距离大于调控晚期细胞分化的淋巴因子。为检验“种间顺序差异%”、“进化距离”两参数对进化的代表性以及上述现象在物种间的普遍性, 进一步比较了四种生物 multi-CSF 和 3 种生物 GM-CSF 的种间差异与进化距离。(2) GM-CSF 与 multi-CSF 在多种生物间的进化分析: 无论是 GM-CSF, 还是 multi-CSF, 其种间差异和种间进化距离均随物种分歧年分增加而增大, 表明造血细胞生成素的种间氨基酸、核苷酸差异%以及种间进化距离可以衡量其进化程度。为确定上述现象是否存在于髓系细胞生成素中, 分析了调控髓系不同发育阶段细胞分化的因子的分子进化。(3) 髓系细胞生成素的进化模式与髓系细胞发育调控程序相关: 对小鼠、人 multi-CSF (又名 IL-3)、GM-CSF、G-CSF、M-CSF、Eo-CSF (又名 IL-5) 和 EPO 分别所作的种间氨基酸、核苷酸差异%和进化距离比较表明, 调控造血细胞发育阶段最早 (干细胞或多向性祖细胞) 的 multi-CSF, 其种间进化距离最大; 调控造血细胞发育阶段居中 (寡向性祖细胞) 的 GM-CSF, 其进化距离居中; 调控较晚发育阶段 (单向性祖细胞) 的 G-CSF、M-CSF、Eo-CSF 和 EPO, 其进化距离则最小, 且四者相近。此结果进一步支持了存在于淋巴因子中的调控细胞发育阶段愈早的造血细胞生成素其种间进化距离愈大的规律, 并表明这种规律普遍存在于淋巴系与髓系的发育调控因子中。结果还揭示了小鼠与长臂猿的 multi-CSF 的种间差异%及进化距离均高于小鼠与长臂猿的 GM-CSF 的种间差异%及进化距离。长臂猿与人种间亦见到相同的分析结果。从而表明, 前面在小鼠-人种间所观察到的“调控发育阶段愈早的造血细胞生成素其种间进化距离愈大”, 不是小鼠-人种间特有的现象, 而为一条较为普遍的规律。

“造血细胞生成素受体的发育相关进化”推论及验证 (1) 推论: 根据“细胞活性因子与受体的协同进化规律”和“造血细胞生成素的发育相关进化规律”, 以下推论应成立: 调控造血细胞发育阶段愈早的造血细胞生成素受体其种间进化距离愈大, 调控对等发育阶段的造血细胞生成素受体其种间进化距离相近。(2) 验证: 在 IL-2R $\alpha$ , IL-2R $\beta$ , IL-4R, IL-6R $\alpha$  和 IL-7R 中, 其小鼠-人种间差异以 IL-4R, IL-6R $\alpha$  较大, IL-2R $\alpha$ , IL-2R $\beta$  则与 IL-7R 相近。如前所述, IL-4, IL-6 调控造血细胞发育的阶段早于 IL-2 与 IL-7, 此结果支持上述推论。髓系细胞 3 个发育阶段相关的生成素受体的分子进化更是强有力地证实了上述推论, 从而验证了上述两规律的准确性与普遍性。

细胞活性因子与受体协同进化的普遍意义 协同进化现象曾在非转录间隔子 (nontranscribed spacer, NTS) 和多基因家族 (multigene family, mgf) 中观察到, NTS 和 mgf 中协同进化的各部分均位于染色体的邻近区域或同一区域。而上述 25 种因子中现只知道 M-CSF 与其受体位于同一染色体的相近区域, 已染色体定位的 EGF-EGFR, EPO-EPOR, INS-INSR, IGF-I-IGF-I-R 等均不在同一染色体上。从而提示, 细胞活性因子与其受体间的协同进化机制有可能不同于 NTS 和 mgf。它可能是由于细胞活性因子与受体相互作用的重要生物学意义, 使得一方成为另一方的选择压力, 而只有彼此匹配的突变才能在进化过程中固定而不被淘汰。这样, 协同进化现象有可能还存在于其功能依赖于两种或两种以上蛋白分子相互作用的体系中。实际上, 以往对 Port Jackson“活化石”鲤鱼和血红蛋白  $\alpha, \beta$  两亚基所作的进化分析就曾揭示过亚基间的协同进化现象, 只是未引起人们的注意。

造血细胞生成素发育相关进化规律与生物发生律的相似性 造血细胞生成素在同一物种间进化距离不同的原因可能有二: 一是它们的起源时间相同, 进化速度不同; 二是进化速度相同, 起源时间不同。据第 1 种解释, CSF 中, multi-CSF 的进化速率最大, GM-CSF 次之, 后四者最小。大量蛋白质的分子进化研究资料表明, 功能重要的蛋白质由于选择压力而进化速度较慢, 而进化速度快的蛋白质其功能较不重要。迄今研究结果均表明, 不是 multi-CSF 在造血细胞生成素中功能最不重要, 而是相反。据此, 贺福初认为第 1 种原因的可能性较小。据第 2 种解释, multi-CSF 的起源时间最早, GM-CSF 次之, 后四者最晚, 且彼此接近同时。如果此推论属实, 不难看到, 它们进化起源的先后次序与其调控造血细胞发育阶段的先后次序正好一致, 即造血细胞生成素在造血细胞发育调控中的先后次序重现其进化起源的先后次序。它与海克尔在形态上发现的“个体发育重现种系发生”的生物发生律惊人地相似, 两者之间的关系值得进一步研究。

细胞活性因子是 80 年代兴起的新型研究领域, 其分子进化规律的研究分支更只是在近几年由中国学者初创。未来研究的焦点将主要集中于: (1) 发育相关进化规律在细胞活性因子范围以外是否具有普遍意义; (2) 此规律与生物发生律的可能因果关系; (3) 此规律与造血细胞生成素进化起源的关系; (4) 协同进化规律的普遍性; (5) 协同进化的可能机制。

#### 参考文献

- 1 贺福初, 等. 细胞因子与受体的协同进化规律. 生理通讯, 1991, suppl 1: 21
- 2 贺福初, 等. 造血细胞生成素进化模式与造血系统发育程序的相关性研究. 生理通讯, 1991, ssuppl 1: 21
- 3 Fuchu He. Evolutionary pattern of hematopoietic growth factors recapitulates the hierarchy of hematopoietic-Molecular Biogenetic law. J Cell Biochem, 1991, 15F: 95
- 4 Fuchu He, Chu-tse Wu. Two principles of molecular evolution of cytokines. 2nd Int Congr on Cytokines March 23~26, 1992, Florence, Italy
- 5 贺福初, 等. 造血细胞生成素的分子进化与造血细胞发育的相关性研究. 科学通报, 1992, 13: 1226  
(北京放射医学研究所贺福初研究员撰; 吴祖泽院士审)

**DNA 复制** DNA replication DNA 储存有生物体的遗传信息, 研究 DNA 复制就是探索生物体增殖的规律。DNA 复制研究的内容包括 DNA 复制的方式、起点、方向和速度; DNA 合成的引发; DNA 链的延伸; DNA 合成的真实性和进行性; DNA 合成的终止和 DNA 链的分离, 以及 DNA 子链中错误的修正等。许多酶和蛋白质参与 DNA 复制, 包括 DNA 聚合酶及附属蛋白、解链酶、旋转酶、拓扑异构酶、单链 DNA 结合蛋白、引发酶、

DNA 连接酶, 以及与 DNA 复制起始有关的蛋白等。分离纯化这些酶和蛋白质, 并在体外重建出有完全活性的复制复合体是 DNA 复制研究的主要目标之一。研究 DNA 复制的起始, 研究参与 DNA 复制的酶和蛋白质的基因表达的调控及蛋白质功能的修饰调节, 对于了解生物体增殖规律具有重要意义。

自从 20 世纪 50 年代中科恩伯格 (A. Kornberg) 等首先从大肠杆菌分离纯化出 DNA 聚合酶 I 以来, 原核生物的 DNA 复制研究已经取得很大进展。对 DNA 合成过程与 DNA 聚合酶作用已研究得比较清楚, 而对 DNA 复制的调控还知道得不多, 对真核生物的 DNA 复制研究则差距较大。

通常 DNA 合成的开始要有一段 RNA 链作引物, 合成这段引物的酶称引发酶, 各种生物的引发酶差别很大。真核的引发酶与 DNA 聚合酶  $\alpha$  紧密结合在一起; 原核则不同, 有的引发酶与解链酶结合在一起 (T4 噬菌体), 有的甚至与解链酶在一条多肽链中 (T7 噬菌体)。大肠杆菌中引发酶与 dnaB, dnaC, draT 等近 20 条多肽链一起组成一个多功能的引发体。不同的引发酶作用机制差别也很大, 有的识别几个碱基, 有的合成引物较长但与其顺序无关, 有的只以核糖核苷酸作底物, 有的也以脱氧核糖核苷酸为底物合成 RNA-DNA-RNA 这样一种交替的引物。现在还不清楚引发酶如何识别它的启动子以及引物的合成如何终止。另外, 所有引发酶都从 5'  $\rightarrow$  3' 合成引物。在 DNA 合成时随链的合成方向与复制叉前进的方向是相反的, 引发酶如何在总体上随着复制叉沿着模板链的 5'  $\rightarrow$  3' 方向运动, 而又以模板链的 3'  $\rightarrow$  5' 为依据合成引物的机制也不很清楚。

除了以 RNA 作引物外, 也有一些例外。一些噬菌体与质粒靠专一的核酸内切酶水解产生 3' OH 作为 DNA 合成的引物。有的单链病毒像 Parvoviruses 靠 3' 末端折叠配对作为引物。腺病毒和枯草杆菌噬菌体  $\phi$ 29 则依靠专一的蛋白与核酸结合作为引物。现在有些病毒、微生物和动物细胞的引发酶的基因已分离到, 正在进一步进行研究。

在 DNA 新链的延伸中, DNA 聚合酶表现出极高的真实性和非常高的合成效率, DNA 合成的真实性由两步来达到。首先, DNA 聚合酶的聚合活性能选择正确的脱氧核糖核苷酸, 参入到引物的 3' 末端, 这也称“碱基选择”。这一步的出错几率约为  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。第二步由 DNA 聚合酶的 3'  $\rightarrow$  5' 的外切活性切去已参入到引物 3' 末端的错误的核苷酸, 称为“校正阅读”。这一步可使总的出错几率再下降两个数量级, 使总出错率降到  $10^{-6}$  以下。DNA 合成的真实性, 尤其对于 DNA 聚合酶在“碱基选择”中的作用机制, 仍是目前研究的热点之一。原核生物 DNA 聚合酶大多具有 3'  $\rightarrow$  5' 外切活性, 真核生物 DNA 聚合酶  $\delta$  和  $\epsilon$  具有 3'  $\rightarrow$  5' 外切活性, 说明由 3'  $\rightarrow$  5' 的校正阅读来保持 DNA 复制真实性的机制在原核和真核中也是相同的。

DNA 聚合酶的催化效率取决于 DNA 聚合酶催化反应的进行性。如果酶在将一个核苷酸加在 DNA 链上以后从引物末端解离下来再结合上去则需要约 1min, 而连续进行合成则只需 1 左右。已分离得到 DNA 聚合酶有的反应进行性高, 有的则较低。酶反应进行性高低与它们在体内的功能有关, 例如大肠杆菌 DNA 聚合酶 I 进行性低, 它的功能是填补 DNA 链的空缺, 在体内主要在修复 DNA 时起作用。大肠杆菌 DNA 聚合酶 III 合成进行性高, 主要在复制 DNA 时起作用。一些多亚基的 DNA 聚合酶的进行性经常与其中的某一亚基有关, 如 DNA 聚合酶 III 中的  $\tau$  亚基及 DNA 聚合酶  $\delta$  的附属蛋白。T7 噬菌体则利用大肠杆菌的硫氧还蛋白作为亚基来使 DNA 聚合酶具有高的进行性。DNA 聚合酶的催化合成反应的进行性仍然是目前研究的题目之一。

对 DNA 聚合酶的结构和构象现在还知道得很少, 现在唯一测出三维结构的是大肠杆菌 DNA 聚合酶 I 的 C 端大片段, 分辨率为  $2.75 \times 10^{-10} \text{m}$ 。从这个三维模型看, 酶的聚合活性和 3'  $\rightarrow$  5' 外切活性位于两个功能区中, 酶与 DNA 复合物的构象以及酶在催化 DNA 合成时构象的变化仍是需要解决的问题。现用 X-衍射已测到 DNA 聚合酶 I 大片段与 DNA 处于外切状态复合物的三维结构。用扫描隧道显微镜 (STM) 也观察到 DNA 聚合酶 I 大片段与 DNA 复合物的一种构象。

分离纯化 DNA 聚合酶的各亚基及其它蛋白因子, 研究它们的功能, 再重建出具有完全活性的 DNA 复制体, 才能说是对某一生物担负 DNA 复制的酶系统的一个完整的研究结果。日前, 大肠杆菌 DNA 聚合酶 III 基本上可以说达到了上述目标。

真核生物 DNA 聚合酶和其它复制蛋白的研究从 80 年代中以来取得了突破性的进展, 斯蒂尔曼 (B. Stillman) 实验室等用猴

猴病毒40(SV40)建立的体外DNA复制体系提供了有力的工具。从SV40环状双链DNA上的复制起始点开始进行的DNA合成,除需要由病毒基因编码的T抗原外,其他则利用宿主细胞的酶和复制因子。利用这一体系,证明DNA聚合酶 $\delta$ 及分裂细胞核抗原(PCNA)是SV40进行完整而有效的复制所必需的,从而确定除DNA聚合酶 $\alpha$ 外,DNA聚合酶 $\delta$ 也是细胞DNA的复制酶。用杂交方法证明,DNA聚合酶 $\delta$ 合成前导链,DNA聚合酶 $\alpha$ 合成前导链的第一条冈崎片段以及后随链。用SV40体外体系还分离纯化了RF-C等复制因子。

DNA聚合酶反应的物理化学研究得还较少。酶如何与单链的、双链的DNA结合,如何运动到引物末端,酶与DNA作用各状态的能级及构象,复制起始蛋白或复制体与复制起始点的识别还不太清楚。研究得较多的还是大肠杆菌DNA聚合酶I的大片段,用快速动力学研究了聚合过程的基本步骤,测定酶上二价金属离子结合位点时发现在底物dNTP及NMP存在时各有一个二价金属离子结合位点由弱变强。据测定,引物3'末端结合到酶的3'→5'外切活性时至少要拆开4对碱基。对大肠杆菌DNA聚合酶III的研究表明,它依靠ATP的活化与模板引物相结合。利用ATP类似物研究证明,有两种性质有差别的DNA聚合酶III。利用SV40体外体系已证明在引物末端从DNA聚合酶 $\alpha$ 向DNA聚合酶 $\delta$ 转换的机制,在这一转换中,RF C和PCNA起到识别引物末端及帮助转换的作用。

DNA复制叉的前进,要依靠解链酶来打开DNA双链,还要由拓扑异构酶来松弛超螺旋,单链结合蛋白可保护解开的DNA单链不被核酸酶水解,又防止它们重新回复成双链。正是这些众多的蛋白质帮助完成了DNA复制过程。根据大肠杆菌DNA复制提出来的假说认为,在复制叉的部位复制体有两个极相似的DNA聚合酶,它们随着复制叉前进方向一起前进,一个聚合酶合成前导链,另一个聚合酶合成后随链;后随链合成时通过成环使DNA链的延伸方向与复制叉的前进方向保持一致。当合成一定长度后环解开,又在近复制叉处形成新环。真核生物与原核生物有些差别,复制前导链与后随链的两个酶是不同的酶,而原核中两个酶的催化亚基是相同的。真核中已鉴定参与DNA复制的蛋白质还有单链结合蛋白RF-A、PRP1和PRP2两种引物识别蛋白,DNA聚合酶 $\alpha$ /引物酶的活化因子AAF、解链酶、拓扑异构酶。

染色体DNA复制如何起始是一个很不清楚的问题。大肠杆菌DNA复制起始点oriC是个245碱基对的区域。大肠杆菌的带有oriC区域的质粒给研究提供了便利。现发现有许多蛋白参与大肠杆菌DNA复制的起始,包括dnaA、dnaB、dnaC、HU蛋白、RNA聚合酶、拓扑异构酶I和RNaseH。引发酶、DNA聚合酶、解链酶、旋转酶和单链结合蛋白也参与DNA复制的起始。dnaA蛋白与oriC位点的相互作用使oriC区的DNA双链打开,在其它蛋白的共同作用下开始合成DNA。细菌内dnaA蛋白含量对DNA复制起始有很大影响,影响超螺旋密度的蛋白质(拓扑异构酶、旋转酶、HU)以及复制起始区附近的转录等因素也会影响DNA复制的起始。噬菌体DNA复制起始有它们自己的调控机制。对真核生物基因组复制的起始,现在利用病毒DNA作模型来进行研究。Papovavirus情况与大肠杆菌相似。SV40则有T抗原结合到专一的起始区域,用它的解链酶活性打开双链并开始复制。真核细胞基因组比原核大得多,分别安排在几十条染色体上,为确保DNA的有效复制,每条染色体上多点起始进行复制。在酵母中已鉴定出自复制顺序(ARS),带ARS的质粒能在酵母中自发复制,也已鉴定出与ARS结合的蛋白质。DNA复制如何在ARS上起始还需进一步研究。人染色体DNA复制起始也是多点起始且顺序专一性不高。此外,真核染色体DNA在一个细胞周期只能复制一次的机制还不清楚。总之,关于染色体DNA复制起始仍有许多工作要做。

已发现线状染色体DNA端点具有重复顺序,端点的存在与染色体的稳定及细胞分裂有关。在DNA合成结束后,由端聚酶在端区加长重复顺序,端聚酶是蛋白质和RNA的复合物,其中RNA是合成端区重复顺序的模板,蛋白质则是一种反转录酶。

DNA子链中的错误将由DNA修复系统来进行修正。DNA修复系统将依据DNA链上甲基化程度的高低来区别母链与子链。对于这些过程及作用机制还需要进一步研究。

原核生物两条DNA双链的分开据信与膜的结合有关。真核生物则依据微管的作用,染色体通过着丝粒与微管相连,在有丝分裂时沿着微管朝纺锤体端点移动。

对参与DNA复制的蛋白质的基因的克隆的研究也取得不少进展。如原核生物DNA聚合酶III的各个亚基已克隆,DNA聚合酶I的克隆为研究它的作用机理创造了条件。近年来真核DNA聚合酶及其他复制因子的基因研究也取得不少进展。例如,人DNA聚合酶 $\alpha$ 、 $\delta$ 、酵母DNA聚合酶I、II、III、人、鼠、果蝇等的PCNA均已克隆成功。比较它们的核苷酸顺序发现,人DNA聚合酶 $\alpha$ 与酵母DNA聚合酶I,DNA聚合酶 $\delta$ 与酵母DNA聚合酶III同源性很高,证明从低等真核生物酵母到哺乳动物DNA复制的蛋白质和机制都是保守的。现已对真核DNA聚合酶重新命名,使之统一起来。

虽然DNA复制研究已取得不少进展,但仍有许多问题尚不清楚。例如对大肠杆菌DNA聚合酶II、真核DNA聚合酶 $\epsilon$ 的功能还不清楚。复制蛋白质的修饰(如磷酸化)与它们功能的关系也未搞清。由于DNA复制与其他学科(例如细胞生物学、病毒学、肿瘤研究等)有着密切的关系,DNA复制研究的进展将为这些学科的发展创造条件。

#### 参考文献

- 1 Blow J. Nature, 1987, 326: 441~442
- 2 Kornberg A. J Biol Chem, 1988, 263: 1~4
- 3 McEnteny C S. Annu Rev Biochem, 1988, 57: 519~550
- 4 Beese L S, and Steity T A. Nucleic Acids and Molecular Biology ed. by Eckstein, F, Lilley, D M J (Spring-verlag Berlin Heidelberg), 1989, 3: 28~43
- 5 Burgers P M J. Prog Nucleic Acid Res, 1989, 37: 235~280
- 6 Tsurumoto, T Melendy, T, stillman B. Nature, 1990, 346: 534~539
- 7 So A G, Downey K M. Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology, 1992, 27: 129~155

(中国科学院上海生物化学研究所 陆长德副研究员撰)

**外源蛋白在大肠杆菌中的分泌** secretion of foreign proteins by *E. coli* 此项研究的意义在于了解外源(异源)基因产物跨膜转位和分泌的分子生物学机理,也直接与基因工程产物能否有效地形成工业化生产密切相关。要设计出有利于外源蛋白高表达又能高分泌的大肠杆菌系统,必须深入研究蛋白质分泌的规律。

早在20世纪70年代, Blobel和Sabtini(1970, 1975)用癌细胞材料研究免疫球蛋白(IgG)时发现轻链的mRNA全部存在于膜结合的核糖体上,并且发现在离体系统中转录时翻译产物比真正的轻链大一些,还发现在活体内有些从粗糙内质网上游离下来的核糖体上有两种肽,一种是已经加工过的,另一种是未经加工的。根据以上结果,提出蛋白质分泌的信号肽假说,这个假说认为:多肽链的转位和蛋白质的合成是紧密偶联的。根据对已知的原核生物中的信号肽序列氨基酸顺序的分析,发现信号序列有3个保守特性。1985年,Oliver编辑了细菌的信号序列表。

Inouge和Beckwith(1977)证实大肠杆菌的碱性磷酸酶合成与转位分泌到细胞周质空间按信号肽假说的途径。

Silhavy等(1979)设想大肠杆菌的 $\lambda$ 受体蛋白从细胞质转移到外膜上也通过相似的过程。

Walter(1981)和Meger(1982)在研究分泌蛋白质合成和运输机制时发现与内质网上的两种蛋白质有关:信号识别蛋白(SRP)和船坞蛋白。

普遍认为,一种蛋白质在大肠杆菌中能否分泌,不仅依靠信号肽,还有另外的两个因素,即成熟蛋白自身与分泌有关的结构和细胞的蛋白质转运机构密切相关。

Ferenci和Silhavy(1987)提出成熟蛋白序列对分泌的促进作用,并认为可能存在着有助于分泌的识别位点。

对蛋白质转运机构的研究,特别是对蛋白质运输和分泌有关的基因分析,近年来取得十分可喜的进展,用遗传学的和生物化学的方法鉴定的基因有6个:secA/prfD、secB、secE、secY/prfG、secF和secY/prfA。

1989年,M. Saier等报道大肠杆菌蛋白质分泌过程至少有25~30个不同基因参与。由于蛋白质分泌是一个跨膜转移的复杂过程,它的机理还不很清楚,因此提出几种假设模型:信号肽假说,膜触发假说,直接转运模型及环模型。还发现细胞中存在一类能帮助分泌蛋白的前体维持开放式构型,促进跨膜转位分泌的伴侣蛋白也称分子伴侣如SecB、GroEl/GroES、DnaK、Triggerfactor。

1992年, Cecile Wandersman 将大肠杆菌中蛋白质分泌的途径概括成3种类型: (1) 普遍性分泌途径(GSP); (2) 其它依赖信号肽途径, 代表性蛋白是 IgA; (3) 不依赖信号肽途径, 代表性蛋白是  $\alpha$ -溶血素( $\alpha$ -hemolysin)。

但是, 至今为止仍尚未在大肠杆菌中建立起一个能分泌外源蛋白的通用系统。在进一步对蛋白质跨膜分泌的分子生物学研究和从不同的基因工程菌分泌外源蛋白的特点中总结出规律的基础上, 构建一个具有高表达又能高分泌的通用性较宽的大肠杆菌是可能的。

#### 参考文献

1. Blobel G, B Dobberstein. Transfer of proteins across membranes. I Presence of proteolytically processed and unprocessed nascent immunoglobulin light chains on membrane-bound ribosomes of murine myeloma. *J Cell Biol.* 1975, 67: 838~851
2. Inouye H-J Beckwith. Synthesis and processing of an Escherichia coli alkaline phosphatase precursor in vitro. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1977, 74: 1440~1444
3. Silhavy T J, et al. 1979. A genetic approach to the study of protein localization in Escherichia coli. 1979. 203~254. IN M. Inouye (ed) Bacterial outer membrane: biogenesis and function Inc. New York.
4. Walter P, G Blobel. Translocation of proteins across the endoplasmic reticulum. III Signal recognition protein (SRP) causes signal sequence-dependent and site-specific arrest of chain elongation that is released by microsomal membrane. *J Cell Biol.* 1981, 91: 557~561
5. Saier M, et al. 1989 Insertion of proteins in to bacterial membranes. *Microbiol Rev.* 1989, 53: 333~366
6. Gunnar V H. The signal peptide. *J. Membrane Biol.* 1990, 115: 195~199
7. Kristina L B, T J Silhavy The genetics of protein secretion in E. coli *Trends in Genetics.* 1990, 6: 329~334
8. Cecile W. Secretion across the bacterial outer membrane *Trends in Genetics.* 1992, 8: 317~322
9. 陈永青. 细菌蛋白质分泌的研究进展. 载盛祖嘉, 陈永青编. 微生物遗传学综述文集. 北京, 科学出版社, 1993

(复旦大学生命科学学院陈永青教授撰)

**RNA 编接** RNA editing 现代生物学的核心问题是阐明真核生物的基因表达与调控机制。RNA 编接是向 mRNA 前体中插入或缺失数目不等的核苷酸残基, 从而生成成熟 mRNA 的过程。它是动基体原生动物锥虫 (Trypanosome) 等生物体基因的一种普遍而独特的转录水平调控方式, 对于分子生物学及遗传学研究具有重要意义。

1986年, 本(R. Benne)等人在布氏锥虫 (T. brucei) 和鞭生型短膜虫 (Crithidia fasciculata) 中首次发现了 RNA 编接现象。研究资料表明, 在它们的线粒体细胞色素 C 氧化酶亚基 I (CO I) 基因的转录物 5' 一端附近, 含有 4 个非基因组编码的尿嘧啶核苷酸 (U) 残基。由于这些额外编接的 U 序列的出现, 恰好形成完整的开放阅读框 (ORF), 从而抑制该基因分子内的移码, 产生有活性的 CO I。1987年, 费京 (J. E. Z. Feagin) 等指出, 布氏锥虫细胞色素 b 蛋白 (CYb) mRNA 的 5' 一端含有 34 个非基因组编码的 U 序列, 后者出现的结果是在 mRNA 中引入 AUC 起始密码子。1990年, 科斯劳斯基 (D. J. Koslowski)、巴特 (G. J. Bhat) 分别发现布氏锥虫细胞色素氧化酶 II (CO II)、NADH 脱氢酶 7 (ND7) 和 ATPase 6 (A6) mRNA 约 50% 的序列是由编接产生的, 如此广泛的编接作用也是非基因组编码的。

1987年, 鲍威尔 (L. M. Powell) 和陈 (S. H. Chen) 分别同时发现哺乳动物脱脂脂蛋白-B48mRNA 是通过 U 取代 DNA 编码的胞嘧啶核苷酸残基 (C) 产生的编接物。1988年, 托马斯 (S. M. Thomas) 发现副粘液病毒的 P 蛋白 mRNA 中编接了两个非基因组编码的鸟嘌呤核苷酸残基 (G)。1989年, 科威尔 (P. S. Covello)、高珀拖 (R. T. M. Gualberto)、拉马丁那 (L. Lamattina) 和黑塞尔 (R. Hiesel) 分别报道, 在高等植物月见草和小麦线粒体基因组编码的 NADH 脱氢酶亚基 I mRNA 中有 28 个位点发生向 U 的编接转变, 说明 RNA 编接现象广泛存在于真核生物中。但是, 迄今尚无报道在原核生物中是否存在 RNA 编接。

由于 RNA 编接表现上是在非基因组指导下进行的分子遗传学过程 (无 DNA 模板), 因此, 它的发生机制引起国际生物学界的高度重视。1988年, 爱珀瑞海姆 (J. M. Abraham) 应用 Northern 吸印杂交技术和 cDNA 顺序测定技术揭示, 编接是转录后发生的, 并可能是从 Ploy (A) 化的初级转录物 3' 一端逐步向 5' 一端进行; 同时指出, 核糖体与编接无关。1989年, 贝卡拉瑞 (N. Bakalara) 证实动基体原生动物利什曼 (Leishmania) 线粒体中存在末端尿嘧啶核苷酰转移酶 (TUTase) 和 RNA 连接酶活性。1990年, 珀罗姆 (B. Blum) 和贝卡拉瑞等在 RNA 编接机制研究中获得重大进展。他们在利什曼线粒体中发现一类新的称作指导 RNA (guide RNA, gRNA) 的重要分子, 提出动基体原生动物 RNA 编接的分子模型。动基体原生动物线粒体 DNA (kDNA) 非常特殊, 每个 kDNA 系统包括约 10<sup>4</sup> 个小环和 50 个大环 DNA 分子, 以高度有序方式排列在一起, 形成所谓的动基体。在用计算机搜寻已知的利什曼大环 DNA 顺序中是否存在能与编接 RNA 形成 G:U 碱基对位点时, 珀罗姆发现有 7 段大环 DNA 顺序可与 4 个 mRNA 前体形成 14 到 51 个碱基的正确配对 (包括形成 G:U 配对)。他们进而用相应的寡核苷酸探针针对线粒体 RNA 作 Northern 吸印, 证明这些用计算机确定的顺序确实是被转录的, 生成的转录物大小与 tRNA 相似, 他们称之为 gRNA。原则上, 这些 gRNA 的 5' 一端顺序可与未编接 mRNA 的相应区域形成多达 16 个碱基对的配对。这一潜在的相互作用引导珀罗姆提出 RNA 编接的机制是由 gRNA 指导下的单方向异源双链修复的观点。根据这一模型, gRNA 5' 一端可与转录后的未编接 mRNA 前体形成部分双链, 然后在此错区上游 (mRNA 5' 一端方向) 的第 1 个错误配对位点上进行一系列的修复反应, 包括在错配位点进行内切断裂, 由 TUTase 添加末端 U 残基和由 3' 一外切核酸酶或 TUTase 逆反应切除 U 残基或嘌呤核苷酸残基, 最后由 RNA 连接酶将修复位点重新连接起来。因此, 在动基体原生动物中发生的编接是由 gRNA 的顺序提供信息指导完成的。但是, gRNA 不是作为通常概念上的模板发挥其功能的, 因为, 编接插入的 U 是与 gRNA 中的 G 配对的, 而 G:U 碱基对不能满足任何已知的 RNA 或 DNA 聚合酶的专一性。尽管如此, 通过 RNA 编接的遗传信息传递仍然是通过形成互补碱基对完成的, 所以, RNA 编接实质上还是由基因组指导完成的。

1990年, 珀罗姆使用杂交选择技术分离测定了 Cyb 等 3 种基因的 gRNA, 发现在它们的 3' 一端都具有非基因组编码的 Oligo (U) 尾, 用计算机确定的二级结构说明, 这些 3' 一 Oligo (U) 尾参与识别编接位点和稳定初始的 gRNA-mRNA 前体杂交物。1991年, 珀罗姆应用聚合酶链式反应 (PCR) 和 Northern 吸印技术证明, gRNA 与 mRNA 形成杂交双链分子, gRNA 的 3' 一 oligo (U) 尾共价连接在 RNA 编接位点上, 说明编接插入 U 残基很可能是由于 TUTase 催化的转酯反应, 为其编接模型提供了重要证据。

1990年, 斯特姆 (N. R. Sturm) 应用 Northern 和 Southern 吸印技术及计算机分析, 发现动基体小环 DNA 编码了 CO II 的 gRNA, 首次揭示小环 DNA 的遗传学功能。同年, 斯特姆应用 PCR 和顺序测定技术扩增并测定了利什曼 CO II 和 Cyb 经部分编接后的 mRNA 和 cDNA 顺序, 结果表明, 编接按严格的 3' 向 5' 方向进行。但是, 1990年, 狄克 (C. T. Decker) 运用同样的技术, 测定了经部分编接的锥虫 Cyb 和 CO II mRNA 和 cDNA 顺序, 却发现锥虫 Cyb 和 CO II 的编接是随机进行的, 并不严格按 3' 向 5' 方向进行。据此, 狄克提出, 编接是在 gRNA 指导下随机插入和缺失 U 的平衡过程, 并由 gRNA 选择正确的编接产物。1991年, 科斯劳斯基用 PCR、cDNA 克隆顺序测定技术分析指出, 锥虫 ND7 和 A6 的编接也不是严格按 3' 向 5' 方向进行的。因此, RNA 编接方向及编接机制的阐明, 仍有待于更有力的生物化学及遗传学证据。

1991年, 格瑞夫 (J. Greeve) 应用无细胞提取物编接反应系统, RNase 处理和肝素-Sephrose 纯化方法证明, 大鼠 Apo-B48 mRNA 的编接不需要其它 RNA 参与, 是由一个纯蛋白性的编接酶催化完成的, 其编接机制与动基体原生动物的完全不同。1991年, 松默 (B. Sommer) 应用 PCR、基因组 southern 吸印及顺序测定技术发现, 在小鼠脑中谷氨酸激动的数种离子通道蛋白亚基中一个位点发生 A 向 G 的编接转变, 由此决定了该通道蛋白的生理学的和生理学的特性。1991年, 魏辛格 (B. Wissinger) 应用 PCR、cDNA 克隆顺序测定技术证明, 月见草线粒体 ND1 mRNA 通过反式剪接作用生成, 其外显子和内含子部分许多位



点均发生 C 向 U 编接转变,而且内含子顺序中发生的编接作用对于 ND1mRNA 的反式剪接是必需的。由此可见, RNA 编接的机制和功能是多种多样的,随物种不同而异。

应用 PCR、核酸顺序测定和分子杂交技术,今后将会在更多的生物体中发现 RNA 编接现象,找出 RNA 编接位点的核酸序列规律。配合遗传缺陷型、位点定向诱变技术和体外生物化学系统分析,可以将参与 RNA 编接的各种组分确定并分离纯化,并把它们重组成体外编接系统,从而阐明 RNA 编接的机制、生物学功能及其进化意义。

参考文献

- 1 Benne R. *Biochem Biophys Acta*, 1989, 1007: 131
- 2 Weiner A M, et al. *Cell*, 1990, 61: 917
- 3 Blum B, et al. *Cell*, 1990, 60: 189
- 4 Blum B, et al. *Cell*, 1990, 62: 391
- 5 Blum B, et al. *Cell*, 1991, 65: 543
- 6 Koslowsky D J, et al. *Cell*, 1991, 67: 537
- 7 Cattaneo R. *Ann Rev Genet*, 1991, 25: 71
- 8 Greeve J, et al. *Nucl Acids RES*, 1991, 19: 3569
- 9 Wissinger B, et al. *Cell*, 1991, 65: 473
- 10 Sommer B, et al. *Cell*, 1991, 67: 11

(中国药科大学药理研究室陈丁丁撰)

**启动子** promoter 通常指基因或操纵子编码顺序上游的一段 DNA 序列,启动子区域与 RNA 聚合酶结合,并使该酶达到正确的转录起始点,在启动子中包含基因调节的许多重要元件。

在原核生物, DNA 的转录均受单一的 RNA 聚合酶催化,这个酶在双链 DNA 上探寻其结合的位点,它借助于一种蛋白质的辅助因子( $\sigma$ 因子)识别特定的 DNA 区段,即启动子。在启动子的位置上 RNA 聚合酶的结合是紧密的。它引起双链 DNA 结构上发生一种伸展的变化, RNA 的合成便从这里开始。细菌启动子区约有 40 个碱基长,包括位于 RNA 合成起始点上游的 6 个碱基长的一个共同序列。这个序列叫作 Pribnow box (以研究者名字命名),将转录起始位点的核苷酸位置标记为 1,将此位置之前的核苷酸标记为负数,之后的标记为正数。有 5~6 个碱基将 Pribnow box 与转录起始位点分开。因此, Pribnow box 的中心位置在 -10。不是所有的启动子在这个区域里都有严格的序列,但类似于 T A T A A T 的顺序是常见的。Pribnow box 最后一个碱基往往是胸腺嘧啶。在 -35 左右还有一个保守的碱基顺序 T G T T G A C A。研究资料表明这个共有序列 (consensus sequence) 对于转录的快速起始和精确性是很重要的。

原核生物的基因调控是以操纵子为单位的。若干个功能相关的基因成簇分布,叫做基因簇 (cluster of genes), 处于同一个启动子的调控之下。细菌的 DNA 上有调节蛋白 (regulatory protein) 控制着 RNA 聚合酶进入启动子,调节蛋白的功能就是帮助细胞对环境作出感应的反应,以调节结构基因的转录速度。

调节蛋白有正调节和负调节两种。负调节蛋白作为阻遏子 (repressor), 它结合在靠近启动子的位点上, 这个位点叫操纵子 (operator), 操纵子与启动子有时是重叠一起的。阻遏子可与一种小分子的效应子 (effector) 结合, 使得阻遏子与其操作子结合位点之间有很高的亲和力。有一种效应子降低阻遏子对 DNA 的亲和力, 称为诱导子 (inducer), 例如乳糖代谢的产物乳糖是乳糖操纵子 (Lacoperon) 的诱导物。第 2 种调节蛋白起正调作用, 叫作活化物 activator, 它结合在启动子的激活子位置上, 增高 RNA 聚合酶与 DNA 结合的效率。

真核生物基因组的结构不同于原核, 基因的调节方式也不大相同。真核基因的转录由 3 种 RNA 聚合酶来进行。rRNA 由 RNA 聚合酶 I 转录, 小分子 RNA (tRNA 和 5sRNA) 由 RNA 聚合酶 II 转录, 编码蛋白质的基因则由 RNA 聚合酶 III 转录产生 mRNA。以 RNA 聚合酶 III 转录的基因为例说明真核生物基因的调节区的结构与功能。

蛋白质编码基因的最重要调节顺序位于编码区 5' 端上游区。真核基因的启动子通常就是指这上游区几百个乃至上千个碱基的 DNA 序列。启动子区内一定的序列在不同物种之间明显地保守。一个频繁出现的同源顺序叫 TATA box, 其中心常在 -25 位置上, 它对于转录起始位点的精确定位是很重要的。在这个意义上它同细菌启动子 -10 位置上的 Pribnow box 相似。不是所有

启动子的这个区域都具有严格的顺序, 但类似于 TATAAT 是常见的。在上游 -80 或 -100 附近有 CCAAT 的保守序列, 被认为对转录效率起作用。研究者们希望建立起一个图谱, 标明启动子区域内分布着哪些调节基因活性的元件, 在这些元件上起作用的是哪些因子。足迹法 (footprinting) 常用于确定特定的 DNA 序列上结合的蛋白质。这些 DNA 结合蛋白 (DNA binding protein) 作为转录调节因子, 有的是所有 RNA 聚合酶 I 转录基因所共同需要的, 有些是某类基因所特有的。例如在哺乳类动物中纯化出一种命名为 SP 的蛋白因子, 它与启动子上富含 GC 的区域有很高的亲和力, 它们之间的结合可能与 C 残基的脱甲基化是相关的。这是哺乳类动物 housekeeping genes 所共有的, 另有一些启动子上分布着某种基因所特有的元件。例如热激蛋白 (heat shock protein) 基因的 5' 端调控区有热激反应序列, 有的基因上有甾体激素 (steroid hormone) 受体结合位点。

启动子上另有一类十分重要的调节元件叫作增强子 (enhancers), 它们的作用在于提高转录效率。增强子通常位于基因 5' 端上游区, 有的也存在于转录区的间隔序列中 (例如玉米乙醇脱氢酶基因, 第一个内含子有一个增强子顺序), 有的存在于 3' 端侧翼序列中。增强子的功能并无基因专一性, 在基因工程中往往采用增强子加强某些基因的表达。

真核生物基因的表达是具有严格的时空顺序的。有的基因的表达是受发育过程调节的, 有的基因的表达具有器官的专一性, 有的基因表达是受环境因素诱导的。将这些基因的 5' 端上游区与报导基因 (reporter gene) 连接起来, 构成报告基因, 在转基因的实验系统中很容易检测出报告基因的活性强度, 从而判断启动子的功能。由于从多种植物转化的细胞获得再生植株已在许多植物中成为可能, 利用转基因植物的实验系统已经鉴定了许多启动子的特性, 例如一些贮藏蛋白的基因的启动子具有绿色植物组织专一性, cab 和 rbcS 的启动子具有绿色植物组织专一性。有些基因的产物是普遍存在于植物发育的各个阶段和不同器官, 称为 housekeeping gene, 但此种基因的产物也往往来自该基因家族的不同成员, 例如构成细胞骨架系统的一些多肽如微管蛋白, 看起来是属于 housekeeping 的表达方式, 但是基因家族的不同成员在不同的启动子来控制其表达, 有的在花器官中表达, 有的在根中表达。不同成员在不同时期表达强度不同。植物中还有许多基因是受环境因素诱导, 例如作为起防卫作用的一些基因往往在胁迫条件下表达, 有的在病害诱导下表达, 这种基因的调控系统在接受病原入侵信号时便迅速活跃起来, 特别是在那些抗性强的植物品种中, 防卫系统的基因具有很高的敏感性, 会迅速作出阻止病原入侵的反应, 即所谓的超敏反应 (hypersensitive reaction)。研究这些基因的启动子特性, 对于研究植物的抗病机理和将这种启动子应用于植物抗病的基因工程都是十分重要的。

参考文献

- 1 Watson J D, Tooze J, Kurtz D T. *Recombinant DNA A Short Course*. Scientific American Books, 1983
- 2 Freifelder D. *Essential of molecular Biology*, Jones, Bartlett Publishers, Inc, 1985

(中国科学院植物研究所基因工程中心实验室林忠平研究员撰)

**转录激活蛋白的分子结构** 基因表达的调控是真核细胞分子生物学研究的前沿领域, 其中转录水平的调控占主要地位。转录调节的基本环节是调节蛋白与特异 DNA 序列的相互作用, 因而调节蛋白的性质, 结构是分子生物学研究的重要内容; 对转录激活蛋白的最研究将为阐明真核基因转录的调控机制提供重要的线索。

在转录激活蛋白分子中, DNA 结合区和转录激活区分别位于两个结构域中。DNA 结合区有 3 种基本结构, 在细菌基因活化和阻遏子中首先发现的螺旋-转折-螺旋结构; 在真核基因调节蛋白中发现的锌指结构和亮氨酸拉链结构 DNA 结合区的结构特征决定着 DNA-蛋白质相互作用的特异性。转录激活区为带负电的亲水性  $\alpha$ -螺旋结构, 激活作用的强弱取决于激活区的负电性和空间结构。

转录激活蛋白是调节基因转录水平的反式作用子, 它和位于基因调控区的顺式作用因子结合, 便可作用于转录起始复合物, 从而激活基因的转录。某种转录激活蛋白吸能和相应的顺式调控区结合, 激活特定的基因转录, 因此, 激活蛋白分子必须具有两个功能位点—特异的 DNA 结合位点和转录激活位点。1988

年布西曼(A. Bushman)通过实验证明,原核生物的入抑制子的DNA结合位点与转录激活位点是处于同一结构域内,但这种情况仅限于原核生物。大量的研究表明,在真核生物中DNA结合位点和转录激活位点是位于同一分子的不同结构域中,并可以用基因重组的方法使这两个区彼此分开而不影响各自的功能。1987年马(J. Ma)等在研究酵母半乳糖代谢中发现一种称为GAL<sub>4</sub>的调节蛋白,对半乳糖代谢酶的表达起转录激活作用,GAL<sub>4</sub>的DNA结合区位于肽链的氨基末端,该区具有特异的结合DNA的能力,但无转录激活作用。1985年布伦特(RBrent)等将GAL<sub>4</sub>和GCN<sub>4</sub>(另一种酵母转录激活蛋白)分别和来源于细菌LexA蛋白的DNA结合区融合,得到的融合蛋白能在酵母细胞中识别和结合LexA特异的DNA位点,并激活转录。1988年韦伯斯特(N. Webster)等则将GAL<sub>4</sub>和GCN<sub>4</sub>的转录激活区分别与雌激素受体的DNA结合区融合,这类激活蛋白便能识别雌激素受体特异的DNA顺序,激活受雌激素调节的基因转录。这些实验都表明,真核生物的转录激活蛋白的转录激活区与DNA结合区是彼此分开的,转录激活蛋白作用的特异性是由DNA结合区作用的特异性决定的,而转录激活区的作用是非特异性的。

转录激活蛋白和特定的DNA调控区相互识别和结合的过程是真核基因组织特异表达性的基础,因此转录激活蛋白的DNA结合区是关键的一环。1986年罗宾(P. W. Robin)等通过X线晶体衍射分析首先证实了原核生物的λ抑制子、Cro蛋白和CALP(降解物激活蛋白)等调控蛋白的DNA结合区可以形成两个串联的α-螺旋结构,即螺旋-转折-螺旋结构,组成螺旋-转折-螺旋结构肽链的保守氨基酸包括:Gln(1位)、Ala/Gly(5位)-螺旋1、Gly(9位)-转折、Val/Ile(15位)-螺旋2。随后波特(M. Porter)等人发现这种结构也存在于真核生物,如酵母的MAT<sub>2</sub>调节蛋白和高等动物的Homeo盒蛋白家族。这类激活蛋白以二聚体的形式存在,在DNA-蛋白质复合物中,其中一个α-螺旋(“识别”螺旋)的氨基酸侧链与DNA碱基对发生顺序特异性结合,位于另一α-螺旋中的氨基酸和DNA中的磷酸戊糖骨架发生非特异性结合。另一种真核基因的转录激活蛋白的DNA结合区则锌指结构。锌指结构1985年由米勒(Miller)提出,以后柏克(Berg)又进一步完善。锌指结构可分为两类,一类是以TFⅡ<sub>A</sub>(RNA聚合酶Ⅱ转录因子A)为代表的C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>结构,即两个相邻的半胱氨酸残基和两个相邻的组氨酸残基之间相隔12个氨基酸残基,在锌离子作用下形成指状结构伸出到蛋白分子表面。另一类是C<sub>4</sub>锌指结构,即分子中具有两个以上的重复半胱氨酸残基供锌离子结合。体内外实验均证实,锌指结构和DNA的结合有密切关系。发生在GAL<sub>4</sub>锌指区的点突变可以导致GAL<sub>4</sub>功能的丧失,在体外不再结合DNA。还有人用糖皮质激素的锌指区代替雌激素受体的锌指区,可使这种杂合蛋白获得糖皮质激素受体特异的DNA结合能力。各种具有锌指结构的转录激活蛋白和DNA结合的情况多不相同。如TFⅡ<sub>A</sub>蛋白有9个锌指结构,与5S<sub>2</sub>RNA基因的调控区(约50bp)结构,调节5SRNA的转录;TFⅡ<sub>A</sub>的每个锌指结构和DNA双螺旋大沟内约5个核苷酸结合。ADR<sub>1</sub>(Z醇脱氢酶基因的调节蛋白)有两个锌指结构,它以二聚体形式识别并结合22bp组成的回文结构。进一步确定锌指数、识别的核苷酸与亲和力的关系具有十分重要的意义。1988年,蓝德夏尔斯(W. H. Landschaltz)等研究CyCs(细胞色素C基因调节蛋白)和癌基因产物Myc、V-jun、V-fos以及CBP(CAAT盒结合蛋白)的氨基酸顺序发现了第3种DNA结合区的结构,即亮氨酸拉链结构。在此结构中,每隔6个氨基酸出现一个亮氨酸,该区形成一个α-螺旋结构,亮氨酸位于螺旋的一侧,形成一个疏水面,象一个拉链。两个相同或不同的激活蛋白分子均可通过亮氨酸拉链形成二聚体。一些带相反电荷的氨基酸或疏水氨基酸形成盐桥或疏水键稳定α-螺旋结构。1988年舒尔曼(M. Schuermann)等发现fos蛋白和jun蛋白可以通过亮氨酸拉链形成同源二聚体,这种杂合分子具有更强的DNA结合能力,如果取代jun分子中亮氨酸拉链结构中的亮氨酸残基,jun便失去结合fos的能力。1988年路易斯(A. C. Lewis)证明CBP同样是以同源二聚体的形式存在,而且为其结合DNA所必需。

就转录激活蛋白的DNA结合区而言,转录激活区的结构却具有很大的共性。一种转录激活蛋白的激活区可以被另一种转录激活蛋白的激活区所代替,而不影响其激活功能。那么,是什么决定了激活区的功能呢?首先,激活区的强弱和激活区的负电性有关。1986年霍普(I. A. Hope)通过体外缺失分析表明,GCN<sub>4</sub>的激活区由分布在60个氨基酸范围内的负电区构成。1987年马等

人则发现GAL<sub>4</sub>的激活区较分散,由两个负电区组成,其中每一负电区和GAL<sub>4</sub>DNA结合区融合后,都能象完整的GAL<sub>4</sub>一样有效地激活转录。突变造成GAL<sub>4</sub>激活区的负电性增加可以导致激活功能的增强。因此,转录激活区都具有负电性特性。尽管如此,激活区的空间结构即α-螺旋结构也是激活功能发挥所必需的。1987年珍妮吉尔(E. Giniger)等发现所有的转录激活蛋白激活区都可以形成亲水性-螺旋;螺旋的一面是酸性氨基酸残基,另一面是疏水氨基酸残基。他们按照带负电的亲水α-螺旋结构特征成功地人工设计了有功能的转录激活区,而具有相同氨基酸组成但不能形成α-螺旋结构的肽链则不具有转录激活功能。1988年赖基(K. Lech)等还发现,磷酸化作用可通过增加转录激活区的负电性来增强激活功能,这种调节方式为环境信号影响转录蛋白的功能,进而调节基因的表达提供了一种途径。综上所述,激活区具有共同的靶位点,即某些共同的转录因子、RNA聚合酶等。支持这一结论的依据还有,RNA聚合酶Ⅱ的大亚基C端重复7肽结构(CT<sub>7</sub>)可以形成富含羟基的亲水性;1988年保罗(B. S. Paul)等证明CT<sub>7</sub>的MAB可以阻断转录起始,GCN<sub>4</sub>可以直接和RNA聚合酶Ⅱ发生结合等。

转录激活蛋白和DNA的特异性识别与结合是转录调控的重要环节。对于一种转录激活蛋白而言,其DNA结合区只具备3种结构的一种,而具有同一种结构的不同激活蛋白之间在细微结构上存在着差异,这种差异决定了各自结合DNA特异性,DNA结合区为什么会存在三大类型?是否具有第4种结构?这些问题以及转录激活蛋白激活蛋白激活转录的具体机制尚有待于进一步研究。此外,各类结构的功能不同。尤其是亮氨酸拉链存在于癌基因产物jun、fos、myc中并与细胞转化作用有关,因此应用3类结构来分析真核基因调控与生物分化、发育、转化等生命现象的联系将是一个非常有意义的课题。

#### 参考文献

- 1 陈红清. 核酸结合蛋白的“亮氨酸拉链”结构. 国外医学分子生物不分册, 1980, 12(3): 103~106
  - 2 Evans R M, Hollenberg S. MZinc fingergilt by association. Cell, 1988, 52~1~3
  - 3 冯博. I类真核基因转录调控的研究进展. 国外医学分子生物学分册, 1980, 12(3): 107~110
  - 4 冯博. 转录激活蛋白的分子结构研究进展. 生物化学与生物物理进展, 1981, 18(1): 11~15
  - 5 Paul B S. Transcriptional activation, acid blobs and negative noodles Nature, 1988, (19): 210~212
  - 6 Robin P W, ptashne M An a-belix determines the DNA-binding specificity of a repressor. TIBS, 1986, 11: 71~73
- (同济医科大学医学分子生物学室张大军、冯博撰, 皇甫永穆教授审)

**转座因子** 经典遗传学理论认为每一基因组的一系列基因的数目、位置、功能是固定的。麦克林托克(B. McClintock)在对玉米Ac-Ds因子系统的研究基础上, 1951年正式报告了关于“跳跃基因”的调控理论。但直到1968年在大肠杆菌半乳糖基因突变型中发现插入顺序后, 转座因子概念才被普遍接受。

转座因子是一类能从基因组的一个位置转移到另一个位置上去的遗传因子, 它的结构通式是在功能基因两侧有几个至数十个核苷酸对组成的反向重复序列(IR), 这对IR并不绝对互补。IR是转座行为必需的, 它的缺失, 转座因子便失转座能力。转座因子上基因编码的转座酶也是转座行为必需的另一条件。

#### 原核生物的转座因子

(1)插入序列(IS)。这是一类除了和它的转座作用有关的基因外不带其它基因的较小的转座因子。1968年霍尔敦(E. Jordan)等人报道研究大肠杆菌半乳糖基因的突变型中用λ噬菌体作溶源性转导, 因λ噬菌体是整合在gal基因旁边, 便可得到带有突变的半乳糖基因的DNA片段-λdgal<sup>m</sup>, 将它和来自野生型的λdgal<sup>+</sup>的DNA片段分别热变性再放在一起复性, 电泳下可看到形成的杂合分子有一小段突出的单链侧环, 它便是引起突变的插入序列IS<sub>1</sub>。1978年欧特勃勃(H. Ohtsubo)等人测定IS<sub>1</sub>长度为768bp, 它两端是18/23bp的反向重复序列。目前文献中IS至少有10余种。野生型大肠杆菌的DNA上有8个IS<sub>1</sub>, 5个IS<sub>2</sub>序列及别的插入序列。每种IS的两端都有反向重复序列, 它们之间是编码转座酶的基因, 当IS插入DNA时在靶位形成5~11bp

的同向重复序列。

(2)转座子(Tn)。是一类不仅有转座功能基因而且有其它功能基因(如抗药性基因、乳糖发酵基因)的较大的转座因子。1980年科亨(C. N. Cohen)等报道把抗药性质粒(R质粒)加热变性、退火复性后质粒呈哑铃状,两头是单链的大、小环,中间是两个反向重复序列-IS<sub>1</sub>形成的双链的柄。质粒中的一对反向重复序列与一个或几个功能基因构成了一个转座子,如 Tn<sub>3</sub>含有:氯霉素抗性基因、转座酶基因和编码一种阻遏物的调节基因,分子长5 000bp,两端各有38bp IR。

(3)噬菌体 Mu。它是大肠杆菌的温和噬菌体,为长37000bp的DNA,1979年喀霍曼(R. Kahman)报道 Mu 能作为“遗传学按钮”携带功能基因在寄主基因组和质粒之间转座,引起大肠杆菌几乎任何一个基因发生插入突变,它的两端无反向重复序列,但各有一个附着位点 attL 和 attR,单链 attL 的最初31个碱基和 attR 端部的91个碱基能形成复杂的2级结构,形如反向重复序列的互补结构,因而使它具有转座功能。

真核生物的转座因子

(1)玉米的转座因子。麦克林托克对籽粒的糊粉层出现色斑与花纹的品系研究时发现第九号染色体短臂上的一个位置经常发生断裂,形成“裂—合一桥循环”过程,她称这个断裂位置为解离座位即 Ds,并且她发现 Ds 能从染色体的一个位置转移到另一个位置上,使新位置断裂,而原位置不再发生断裂。Ds 是生物中第一个发现的第1个转座因子。Ds 的行为受控于另一个非连锁的 Ac 因子,Ac 因子本身也能转座,但不能使染色体断裂。1984年斯塔林格尔(P. Starlinger)等人分别从 Wx-m7 与 Wx-m9 玉米的 Waxy 突变种克隆 Ac 因子,测得 Ac 有4563bp,两端各有11bp 的 IR, TAGGATGAAA。从不同突变种克隆的 Ds 因子的分子差别较大,与 Ac 比较两端11bp 的 IR 基本相同,但中间的碱基序列缺失的数目有多有少,看来 Ds 因子是 Ac 因子的缺失突变体,失去了自律转座能力,只有 Ac 因子存在时,Ac 编码的转座酶被 Ds 利用而得以转座,因此 Ac 和 Ds 因子统称为 Ac-Ds 系统。Ac、Ds 因子都能使靶位产生8bp 的同向重复序列。

(2)反转病毒前病毒 DNA。1981年海伊瓦尔德(W. G. Hayward)等在利用鸟白血病毒诱导的淋巴瘤细胞研究致癌细胞研究致癌机理时发现了反转病毒前病毒的转座行为。反转病毒是一类单链 RNA 病毒,RNA 中部是特异性蛋白基因 gag,逆转录酶基因 Pol、病毒外壳蛋白基因 env,两端各有一个称 R 的序列,此外5'端有一个80~100bp U<sub>3</sub>序列,3'端有一个170~1250bp 的 U<sub>5</sub>序列,当病毒反转录成前病毒双链 DNA 时,两端发生重排,各形成一个称 LTR 的序列,LTR 结构为 U<sub>3</sub>-R-U<sub>5</sub>,U<sub>3</sub>和 U<sub>5</sub>中各有一段15bp 的 IR,这就使前病毒 DNA 具有类似转座子的能动性,能插入染色体的许多位点上,造成靶位有短的同向重复序列,并对附近的基因表达起调控作用,如插入原癌基因附近使其活化引起癌变。

(3)果蝇的转座因子。P 因子:1982年鲁宾(G. M. Rubin)从黑腹果蝇 P 品系杂种变异的 F<sub>1</sub>代果蝇中分离到 white 基因的突变种,并从 white 基因中克隆出插入该基因的 P 因子,它在果蝇染色体上有30~50个拷贝,不同 P 品系果蝇的 P 因子数目和位置各不相同。P 因子长2 907bp,两端有31bp 的 IR,中间有3个阅读框架(ORF)。P 因子可引起插入突变和染色体畸变,插入靶位后形成8bp 的同向重复序列。copia 族转座因子:1983年鲁宾指出 copia 族包括 copia, 412, gypsy 等因子, DNA 长度5~8.5kb,两端各有1个 LTR, copia 的 LTR 长度为276bp, LTR 的两端有短的 IR,它插入靶位时产生5bp 的同向重复序列。1986年马尔罗尔(R. L. Marior)报道 gypsy 因子长7469bp, LTR 长482bp,中间有3个 ORF, copia 因子可以插入果蝇的任何一条染色体,也可以独立于染色体外成为环状转座子。

(4)酵母的转座因子。1980年伊雷德(B. Grrede)等通过研究在面包酵母的营养缺陷型突变基因序列找到了引起插入突变的 Ty 因子,1985年梅洛尔(J. Mellor)指出 Ty 因子是一个家族,其成员 DNA 分子大同小异,有一成员的分子长度为5.87kb,两端各有一个称为  $\delta$  的335bp 的序列,中部是5.2kb 的  $\epsilon$  序列,  $\epsilon$  区域中有2个 ORF, tya 和 tyb, 1986年芬克(G. R. Fink)指出 tya 编码的蛋白与反转病毒 gag 基因编码的蛋白有同源性, tyb 编码的蛋白与反转病毒 pol 基因编码的蛋白有同源性, Ty 因子中的基因与果蝇 copia 族因子上有关基因也有同源性,而且它们在转座时都经过了 DNA-RNA-DNA 的反转录过程,说明 Ty 因子、反转病毒的前病毒及果蝇的 copia 族转座因子是一类结构与性质

相似的转座因子,它们与 Ac、En(Spm)等因子在某些方面有明显的不同。

上述的几种真核生物除了已介绍的转座因子外,有的还发现了其他转座因子。另外在金鱼草、大豆、蠕虫、蚕等真核生物中也发现了转座因子。甚至在人类,1983年罗勃森(D. L. Robbeson)等指出“Alu-功能基因-Alu”的结构类似转座因子。

原核生物的转座因子转座时大多数原位点转座因子保留下来,因此1979年莎皮诺(J. A. Shapiro)提出转座因子先复制版,复制出的 DNA 再转座的分子模型。玉米的 Ac 和 En 因子转座时,原位点的转座因子不保留,1985年塞蒂拉尔(H. saedler)提出植物转座因子的转座模型:转座因子编码的转座酶将靶位的同向重复序列交叉切开,并将新位点交叉切开,接上转座因子,同时使新靶位产生同向序列。酵母的 TY 因子、反转录病毒的前病毒、果蝇的 copia 族因子,它们结构相似,转座时则是经过一个由 RNA 反转录成 DNA,再插入到靶位的过程。转座因子转座受到其自身结构的调节,转座因子编码的基因产物、自身的 DNA 结构、末端反向重复序列都参与了转座过程,并对转座有调节作用。转座因子的基因组背景对转座也有着影响,金鱼草基因组中有 St 座位时, Tam3 切除的频率比没有 ST 时低1 000倍, St 可能是决定转座抑制物的一个相关因子。温度对 Tam3 的转座也有影响,在15°C 生长比25°C 生长时转座频率高1 000倍。转座是一个酶促反应,一些 DNA 重组缺陷突变型细胞(recA rccB recC 等)仍有 IS 插入突变发生,说明转座酶系与同源重组酶系是不尽相同的。1991年特斯曼(I. Tessman)等研究表明大肠杆菌的 LexA 蛋白具有抑制 Tn5 转座基因的作用,因此 recA 蛋白酶有增强 Tn5 活动的作用。对于转座因子的生物学意义作出肯定的结论显然为时尚早,但由于转座基因的转座则导致了非同源遗留物质的交流甚至物种间的基因交流;1991年伯特拉曼(J. Bertram)等的研究表明 Tn916 在自然条件下可以在革兰氏阳性和阴性菌之间转移,诺利摩托(M. Nomoto)等指出玉米的转座因子可以转座到水稻中,显然转座因子的存在增加了生物基因组的能动性。转座因子转座切割后靶位留下的“足迹”,必然引起基因产物的变化及遗传密码阅读框的改变,而使转座因子引起的不稳定的插入突变成稳定突变,便为该基因提供了演化条件。转座因子引起的染色体畸变和染色体重排,改变核苷酸顺序,这在进化上也是有着积极意义的。

转座因子的研究是当前遗传学中最活跃的领域之一,但仍有许多重大课题有待深入研究,如转座因子的来源、与染色体基因的关系、不同生物之间转座因子的横向转移、转座的机制、转座的内外影响因素、在进化上的意义以及在分子遗传学和基因工程中的应用等等。随着研究的深入,必将对转座因子和它的基因组中的作用更加清楚,对遗传物质及规律的认识也将会更加全面。

参考文献

- 1 R Kahman, et al. Nucleotide sequence of the attachment sites of bacteriophage MuDNA. Nature, 1979, 280, 247~250
- 2 C N Cohen, et al. Transposable Genetic Elements, Scientific American, 1980, 242, 40~49
- 3 P Starlinger. Transposable elements. Trends in Biochemical sciences, 1984, 9, 125~127
- 4 徐岗. 酵母转座子——TY 因子及其对基因表达的影响. 细胞生物学杂志, 1988, 10(3): 97~106
- 5 敖世洲, 等. 真核生物基因的结构和功能. 北京: 科学出版社, 1989, 192~216
- 6 B Charlesworth, et al. The population genetics of drosophila transposable elements. Annu Rev Genet, 1989, 23, 251~287
- 7 J Bertrameta. Natural transfer of conjugative transposon In 916 between Gram-positive and Gram-negative bacteria. Journal of Bacteriology, 1991, 443~448
- 8 Norimoto M, et al. Transposition of the maize activation elements in transgenic rice plants. Nucleic Acids Res, 1991, 19(3): 617~622
- 9 Chien-Tsun Kuan. LexA protein of Escherichia coli represses expression of the Tn5 transposase Gene. Journal of Bacteriology, 1991, 6406~6410

(九江师范专科学校许祖国撰)

**转化生长因子** transforming growth factor 转化生长因子(TGF)最初是指小鼠肉瘤生长病毒转化3T3细胞系所产生的肉瘤生长因子(J. DeLarco & G. J. Todaro, 1978)。由于其能刺激正常细胞在软琼脂层铺着不依赖性生长,故后被称为TGF。进一步发现TGF包括TGF $\alpha$ 和TGF $\beta$ 。虽然两者名字类似,但结构和功能却截然不同。TGF除了能使正常细胞转化外,在细胞增殖、生长和分化等基本活动中行使多种重要的调节作用和其他生物学效应。

TGF $\alpha$ 是由50个氨基酸组成的多肽,与表皮生长因子(EGF)的氨基酸顺序有40%的同源性(H. Marquardt等,1984)。从TGF $\alpha$  cDNA克隆的研究资料表明,TGF $\alpha$ 是以160个氨基酸的前体蛋白(pro-TGF $\alpha$ )形式而被合成(R. Derynck等,1984)。pro-TGF $\alpha$ 整个分子由四部分组成,即23个氨基酸组成的疏水性区域、成熟生长因子和糖基化位点的区域、跨膜疏水性区域和羧基端富含半胱氨酸区域。通过蛋白酶解,从pro-TGF $\alpha$ 分子的细胞外区域释放出成熟的小分子TGF $\alpha$ (T. S. Bringman等,1987)。对成熟型TGF $\alpha$ 多肽片段进行活性分析比较,证明第3对二硫键的片段(34~43氨基酸残基)和C末端多肽(44~50氨基酸残基)具有比其他部位片段更高的生物活性,与EGF受体结合和使成纤维细胞NRK-49F细胞的转化活性都较高。若第38位的酪氨酸被亮氨酸或组氨酸所代替,则生物活性明显下降(S. F. Peng等,1990)。pro-TGF $\alpha$ 也显示有生物学活性,跨膜pro-TGF $\alpha$ 能够诱导指示细胞上EGF受体的酪氨酸自身磷酸化(R. Brachmann等,1989),有生物活性的pro-TGF $\alpha$ 能提供一种局部的和持续的自分泌生长信号,但其在体内的确切作用仍然不清楚。

TGF $\alpha$ 通过与EGF受体结合和相互作用而实施其生物学效应。还未发现有TGF $\alpha$ 受体存在的证据。当然,还不能排除EGF受体上存在着对TGF $\alpha$ 和EGF两个各不相同的配体结合区域的可能性。根据体外各种培养细胞系统检测结果,TGF $\alpha$ 的效应基本上与EGF的相同;在体内和器官培养条件下,则TGF $\alpha$ 的效应更强。如在软骨组织培养时,TGF $\alpha$ 比EGF更能刺激Ca<sup>2+</sup>释放;低浓度的TGF $\alpha$ 即能诱导形成新血管,而同样浓度的EGF却不能(R. Derynck,1986)。然而,这两者在生物学活性的性质上未见有明显的差别。

TGF $\alpha$ 最初是从肉瘤病毒转化的细胞培养液中分离得到的,后来发现TGF $\alpha$ 不仅存在于其他多种转化细胞或肿瘤细胞中,也存在于胚胎组织。因而,曾认为TGF $\alpha$ 是转化细胞中表达的一种胚胎性生长因子。TGF $\alpha$ 的发现及其在转化细胞中异常表达,使人们提出了生长因子自分泌机制的假设,用以解释肿瘤细胞过度生长的现象(M. B. Sporn等,1980)。有证据表明,正常成体细胞也表达和合成TGF $\alpha$ 。正常小鼠角质细胞在体外持续增殖,必须依赖于EGF/TGF $\alpha$ ;另一方面,EGF或TGF $\alpha$ 又进一步促进并明显增高角质细胞TGF $\alpha$  mRNA表达水平(R. J. Jr. Coffey等,1987)。这种TGF $\alpha$ 分子自身诱导作用被认为是细胞增殖信号传导及组织各细胞必不可少的一种扩增机制。正常细胞既能产生又能对TGF $\alpha$ 起反应,表明正常细胞类似于转化细胞,也存在着自分泌方式的生长调节机制。事实上,除了TGF $\alpha$ 以外,其他生长因子如血小板生长因子(IDGF)(C. Betsholta等,1984)、胰岛素样生长因子(TGFs)(D. R. Clemmons等,1985)和白细胞介素(IL-2)(K. A. Smith,1982)等也是许多细胞自分泌刺激的例证。因此,自分泌作用已不再被看作只是导致转化细胞恶性增殖的一种途径,也是正常细胞生长调节的一种重要方式。

TGF $\beta$ 是由112个氨基酸组成的多肽,为亚单位,并通过二硫键相连的双聚体分子,分子量25kd,还原剂可破坏这种生长因子的双聚体性质,从而失去生物学活性(R. K. Assoian等,1983)。根据TGF $\beta$ 基因克隆和顺序分析,证明合成的TGF $\beta$ 是一类无活性的前体蛋白,由390个氨基酸组成。这种前体蛋白分子的C端经过酶解,得到含112个氨基酸的TGF $\beta$ 单体,同时还证明N末端内部有几个糖基化位点(L. E. Gentry等,1988)。这表明TGF $\beta$ 合成本身是一个甚为复杂的过程(L. E. Gentry等,1988)。研究发现,有不少蛋白分子或基因的结构和功能与TGF $\beta$ 密切相关。人血小板的TGF $\beta_1$ 与猪血小板和牛骨的TGF $\beta_2$ 两者都具有非常类似的生物学活性和受体结合特性(S. Cheifetz等,1987);从人和猪的基因克隆到的TGF $\beta_3$ 基因,以及从鸡软骨细胞基因库克隆到的TGF $\beta_3$ 基因,均与TGF $\beta_3$ 基因有高度的同源性(S. B. Jakowlew等,1987)。从小鼠胚胎癌细胞分离到分子量为15kd的TGF $\beta$ 样性质的多肽分子,能抑制角膜上皮细胞CCT/64株的生长;在EGF存在时,可以诱导成纤维细胞在软琼脂层形成集落,

并刺激其DNA合成(施渭康等,1989);此外,与TGF $\beta$ 分子结构明显相似的蛋白还包括:影响雌性生殖器官发育的缪勒氏管抑制物质(MIS)(R. L. Cate等,1988);与骨形成相关的骨形态发生蛋白(BMP)(J. M. Wozney等,1988);在研究果蝇、瓜瓣和小鼠早期发育相关基因过程中,又分别发现了dpp基因复合体(R. W. Padgett等,1987)、Vgl(D. L. Weeks等,1987)和Vgr-1基因(K. Lyons等,1989)。这些基因的顺序与TGF $\beta$ 有不同程度的同源性。因此,上述种种蛋白分子或基因就组成TGF $\beta$ 家族。尽管其中一些因子的生物学功能目前还不十分清楚,但初步结果表明它们与细胞生长、分化或胚胎早期发育中的组织、形态发生有着密切联系。

1990年,施渭康等用免疫组织化学技术证明,着床前小鼠胚胎TGF $\beta_1$ 很丰富;着床后TGF $\beta_1$ 与内胚层和中胚层分化有关,特别是对胚外组织及衍生于中胚层或间质细胞的一些组织的发生和发育起着重要作用;原位杂交也表明TGF $\beta_1$  mRNA位于胚胎骨、肝、巨核细胞和一些间质组织的衬垫上皮(J. N. Wilcock等,1988),TGF $\beta_2$  mRNA也位于邻近有上皮的间质组织。这些结果提示TGF $\beta_1$ 和TGF $\beta_2$ 的定位特征,表明它们在上皮细胞/间质细胞相互作用中扮演着重要角色;同时也指出小鼠早期胚胎发育期间的TGF $\beta$ 可能以自泌和侧泌方式调节细胞生长和分化。

各种正常细胞和转化细胞表面都有专一性的、亲和力有所不同的TGF $\beta$ 受体。解离常数为25~140pM,每个细胞约有2000~40000个受体,这决定于不同的细胞系(L. M. Wakefield等,1987)。已经发现,TGF $\beta$ 专一性地与细胞表面3种类型受体起反应。低分子量I型受体是细胞接受TGF $\beta$ 信号所必需的。另两类II型受体和III型受体能与TGF $\beta$ 起作用,有报告指出GTP结合蛋白可能参与TGF $\beta$ 信号的转导。用TGF $\beta$ 处理小鼠成纤维细胞,则GTP[ $\gamma$ S]结合和GTP酶活性明显增高;同样,用TGF $\beta$ 处理肿瘤上皮细胞抗TGF $\beta$ 突变株,则GTP[ $\gamma$ S]结合或GTP酶活性并不增强(P. H. Howe等,1987)。根据对缺失TGF $\beta$ I型受体的细胞突变株研究资料,也证明I型受体是转导TGF $\beta$ 信号所必需的。除了细胞表面TGF $\beta$ 受体类型变化以外,TGF $\beta$ 受体数目改变也会影响细胞对TGF $\beta$ 的反应性。激活的T细胞,亲和力高的TGF $\beta$ 受体数目增加,随之TGF $\beta$ 表达和合成也相应增加。T细胞用IL-2处理时,则出现IL-2受体高表达并伴随IL-2的合成和分泌;一旦高亲和力IL-2受体达到足够数目并与配体特异性相结合时,即发生DNA合成和细胞分裂。然而,用TGF $\beta$ 处理T细胞时,却抑制IL-2受体诱导合成IL-2的上调节(J. H. Kehri等,1986)。因此,T细胞对正(IL-2)信号和负(TGF $\beta$ )信号的反应决定于细胞所表达的专一性受体数目;同时,受体数目也可能被存在的生长因子本身所调变。

TGF $\beta$ 显示多种生物学活性(R. M. Lyons等,1990):(1)刺激培养在软琼脂层中成纤维细胞集落性生长,甚至也能刺激单层培养的成纤维细胞生长。据TGF $\beta$ 促有丝分裂活性的动力学研究,证明DNA合成始于TGF $\beta$ 处理细胞后36小时,同时引起细胞原癌基因c-sis表达和PDGF样物质合成。因此,TGF $\beta$ 对成纤维细胞的促有丝分裂效应很可能是由于c-sis基因诱导而间接产生的。(2)TGF $\beta$ 与其他一些生长因子相比,具有一种不寻常的特性,即对有些细胞又显示抑制其生长和诱导分化的作用。例如,诱导支气管上皮细胞终末分化,但也有抑制脂肪细胞和成肌细胞分化的报告。(3)调节细胞外基质成分的合成和降解,参与创伤愈合和胚胎形态发生过程。(4)抑制多种类型细胞增殖,包括上皮细胞、内皮细胞、淋巴样和髓性细胞等。试验证明TGF $\beta$ 对培养的人肝癌(BEL-7402)细胞和鼻咽癌(CNE1)细胞的生长有抑制作用,并对EGF促进上述癌细胞的生长效应产生拮抗作用。TGF $\beta$ 对细胞增殖抑制效应是可逆的,故而不可能是细胞毒的结果。生长迅速的小鼠角质细胞经TGF $\beta$ 处理1h,c-myc基因表达明显减少, $\beta$ -肌动蛋白和c-fos基因的表达却不受影响(R. J. Jr. Coffey等,1987),表明TGF $\beta$ 抑制基因表达具有专一性。由此可见,TGF $\beta$ 选择性地控制基因表达可能是其调节细胞生长的一个重要方面。

TGF $\beta$ 表达和合成对调控细胞生长和分化是至关重要的。TGF $\beta$ 能以TGF $\beta$ 类似方式自身调节mRNA的转录。许多培养的正常细胞和转化细胞由于TGF $\beta$ 存在而使自身TGF $\beta_1$  mRNA扩增2~3倍,小鼠成纤维细胞系AKR-2B甚至高达20~25倍。TGF $\beta_1$ 表达似乎有组织专一性,成年小鼠脾、肺和胎盘含有高水平mRNA。TGF $\beta$ 本身结构改变也是调节其对细胞生长作用的一种方式。许多工作者指出,培养细胞合成分泌的或血小板释放

的 TGFβ 为无活性形式的蛋白,不能与细胞表面受体起反应,因而也不会激起上述各种生物学效应。所以, TGFβ 激活是其行使生物学效应的必需过程。在实验室条件下,酸化细胞条件培养液或以酸性缓冲液提取组织中的 TGFβ,均可获得活化形式的 TGFβ。由此推想,无活性 TGFβ 是一种结合其他多肽的复合蛋白。用全长 TGFβ<sub>1</sub> 基因转染 CHO 细胞,随后扩增 TGFβ<sub>1</sub> 蛋白合成,结果发现 25kd 成熟形式的 TGFβ<sub>1</sub> 是以非共价键与其前体蛋白 N 末端肽部分相连,形成 110kd 无活性形式的复合物(L. E. Gentry 等, 1987)。酸化可以破坏这些非共价键的相互作用,释放出活性形式 TGFβ<sub>1</sub>。另外,实验资料也证明,通过蛋白酶(例如血清纤维蛋白酶)能降解 N 末端糖肽内部结构,引起无活性形式复合蛋白的构型变化,最终释放出成熟 TGFβ<sub>1</sub> 甚至 N 末端糖肽内部糖基化改变也能使 TGFβ 激活。总之,无活性状态 TGFβ 复合蛋白构型变化有可能激活 TGFβ, 释放出有活性的成熟 TGFβ。其他一些生长因子如 EGF、神经生长因子(NGF)和 IGFs 等也存在无活性形式的前体蛋白。这些前体蛋白激活和释放出成熟形式生长因子的机制可能各不相同。但是,一些包括 TGFβ 在内的生长因子无活性前体蛋白及其激活机制的存在,无疑在调节生长因子效应中起着重要作用。

已被分离和特化的各种生长调节因子日益增多。多数资料证明,有独特生物学活性的多种生长因子的协同作用是细胞正常增殖的必需条件;生长刺激和抑制两类因子之间的平衡调节作用是细胞正常生长的基础。仅就创伤愈合和胚胎正常发育过程而言,同样有包括 TGFβ 在内的多种生长因子参与协同作用,其中 TGFβ 参与调节细胞外基质成分的合成和降解。其他的生物学效应也有类似现象, TGFβ 在介导细胞对各种环境刺激反应过程中,可能于某一或几个环节起着重要的正/负调节作用。无论正或负生长调节因子的表达、合成、翻译后加工或活性等异常,都有可能致使细胞发生转化。有证据表明,一些转化细胞对正信号或负信号的反应性确已发生改变。即使如此,转化细胞中丧失正常生长控制的有关机制目前所知甚少。因此,要了解细胞转化的实质,有必要首先致力于研究并充分弄清包括 TGF 在内的生长因子在正常细胞中的作用。施渭康等成功地构建了猪 TGFβ<sub>1</sub> 质粒,并获得转染有这种外源 TGFβ<sub>1</sub> 基因的小鼠多能胚胎干细胞 EST-1 系;初步结果表明, EST-1 细胞类似于其亲本胚胎干细胞 ES-5 系,在体内有广泛的分化潜能,但其瘤性生长速度远比 ES-5 细胞慢得多。另一方面, EST-1 细胞在体外对维生素 A 酸等诱导的反应性也不同于 ES-5 细胞,前者多分化为成纤维细胞,后者主要为神经胶质细胞。这些均提示外源 TGFβ<sub>1</sub> 在调节 ES 细胞体内生长和体外分化细胞类型中起着作用(J. H. Lu 等, 1990)。EST-1 细胞系建立也为分析 TGFβ 在正常个体发育中的功能提供了条件。

参考文献

- 1 Marquardt H. et al. Proc Natl Acad Sci, 1984, 80: 4686~4688
- 2 Coffey R J Jr. et al. Nature, 1987, 328: 817~820
- 3 Cheifetz S. et al. Cell, 1987, 48: 409~415
- 4 Wozney J M. et al. Science, 1988, 242: 1528~1534
- 5 Gentry L E. et al. Mol Cell Biol, 1988, 8: 4162~4168
- 6 Brachmann R. et al. Cell, 1989, 56: 691~700
- 7 Lyons K. et al. Proc Natl Acad Sci, 1989, 86: 4554~4558
- 8 施渭康, 姚钰. 实验生物学报, 1989, 22(2): 213~223
- 9 施渭康, 等. 实验生物学报, 1990, 23(4): 495~507
- 10 Lyons R M, Moses H L. Eur J Biochem, 1990, 187: 467~473

(中国科学院上海细胞生物学研究所施渭康研究员撰)

集落刺激因子

the colong stimulating factors, CSF 造血祖细胞的存活、增殖及终末分化依赖于 一类糖蛋白调节因子称之为“集落刺激因子”(CSF)。根据其造血祖细胞克隆增殖的作用不同而命名为:“CM-CSF”刺激粒细胞和巨噬细胞的生成;“M-CSF”刺激巨噬细胞的生成;“G-CSF”刺激粒细胞的生成;“多能-CSF”(即白细胞介素 3, IL-3)刺激粒细胞、巨噬细胞、红细胞、巨核细胞、嗜酸粒细胞、多能祖细胞及造血干细胞的生成。

1966年, Pluznik 和 Sachs 及 Bradley 和 Metcalf 分别在各自的实验室里发展了一种半固体培养技术,用以在体外生长骨髓前体细胞。他们发现必须在培养物中加入组织或其产物,粒细胞-巨噬细胞群体才能在半固体培养基中增殖。因而他们提出,组织中可能含有一种刺激粒细胞和巨噬细胞增殖的特殊生长因子。然

而,由于 CSF 是一种高活性的因子,即使在含量最丰富的组织中,含量也很低,研究人员一直未能分离到这种因子。直到 1970 年以后,随着亲和层析和高压液相层析技术的发展,人们才得以提纯 CSF, 并且发现实际上有 4 种 CSF 存在。

1975 年到 1984 年,研究人员分别从人尿、胚胎及细胞中提取得到四种人的和鼠的 CSF。各种 CSF 由于糖基化水平不同,分子量相差很大。各种 CSF 由一个单一的基因编码,彼此间无紧密联系。GM-CSF、多能-CSF 及 M-CSF 的基因都位于第 5 号染色体的长臂,而 G-CSF 位于 17q21-32。四种 CSF 之间无序列同源性,且在其二级结构和亲水性方面无相似性。每种 CSF 有其特殊的膜受体,而不能与其他 CSF 受体结合, CSF 在很低浓度( $10^{-10}$  ~  $10^{-12}$  mol/L)占据少量受体,即可引起明显的生物学作用。

1984 年,对 CSF 的研究工作碰到了难点。靠提取方法获得的 CSF 产量很有限,因而难以对其生物学作用进行研究。1984 年到 1987 年间,由于分子生物学的发展而发生戏剧性的变化。3 年间,众多实验室分别克隆了四种 CSF 的 cDNA, 并利用哺乳动物、细菌或酵母的表达系统使其获得表达。大量重组的 CSF 为研究其生物学活性及动物临床实验提供了基本保证。

1987 年到 1989 年, Metcalf 等人对 CSF 的体外活性进行研究,结果发现各种 CSF 有以下共同功能:(1)刺激造血细胞增殖。集落形成细胞的细胞分裂需 CSF 持续存在, CSF 的浓度决定细胞周期的长短和产生子代细胞的总数目。(2)维系细胞存活。可能由于它们能调节 ATP 水平为基础的膜的完整性。(3)分化定型。(4)促进细胞成熟。(5)刺激终末细胞的功能活性。如刺激化学毒作用,吞噬作用和细胞毒作用而产生许多重要的生物活性物质。

1987 年到 1990 年,许多实验室开展了对 CSF 体内作用的研究。给成年小鼠注射 CSF 的结果表明,各种 CSF 能刺激相应细胞系的增殖,但作用方式相差很大。给以 CSF 至少在两方面是有效的:(1)预防或缩短使用细胞毒药物或骨髓移植后的骨髓抑制期。(2)增加抗感染的能力。

在体外实验的基础上,近年来研究人员开展了对 CSF 体内作用及临床应用的研究。早期临床实验结果表明,各种 CSF 有重要的临床应用价值。其潜在的临床应用价值如下:(1)预防或缩短癌症患者化疗和放疗后产生的骨髓抑制期。(2)增强正常人和免疫缺陷病人的宿主防御能力,治疗艾滋病(AIDS)。(3)治疗感染性疾病。(4)强化被削弱的免疫系统,用于骨髓移植。(5)治疗再生障碍性贫血、先天及后天性血细胞减少症。(6)诱导白血病前期及白血病的分化。(7)增加镰状红细胞贫血病人体内胎儿血红蛋白的产生。(8)临床诊断(检验其血清含量)。(9)治疗高脂血症。(10)辅助胎儿组织移植。(11)辅助基因转移疗法。

总之,作为能有效刺激宿主防御细胞增殖的生物制品, CSF 有着广泛的临床应用前景。中性白细胞的功能归根结底要靠成熟的效应细胞(如中性白细胞和巨嗜细胞)对于入侵微生物的杀伤能力。当骨髓不能制造出足够数量的中性白细胞或单核细胞时,宿主的防御能力就削弱。这类效应细胞的反应还取决于 T 淋巴细胞的协同作用。如果 T 细胞太少或 T 细胞功能太弱(如艾滋病患者或晚期结核病患者),巨嗜细胞就不能抑制体内的病原体。从临床观点来看,这样的故障显然是灾难性的。因此,有助于消除这类故障的 CSF 在医疗上有巨大的应用潜力。

目前,对 CSF 的研究方兴未艾。在基础研究方面,诸多实验室正在对其基因调控机制、结构与功能的关系及其与受体的相互作用等进行多方面的探讨;同时,研究人员将基因工程方面的一些新技术用于对 CSF 功能活性的研究,如借助转基因动物技术,探讨其生物学作用;应用“Knockout”新技术,造成选择性基因缺失的小鼠,进而了解相应基因的功能。在临床应用方面,人们在 I 期临床实验结果基础上,正在广泛开展 II/III 期临床实验的研究。近期的研究结果表明,各种造血生长因子的联合应用,更能产生意想不到的治疗效果。预期不久的将来,重组的各种 CSF 将在许多疾病的临床治疗中发挥愈来愈重要的作用。

参考文献

- 1 Pluznik D H. et al. Exp Cell Res, 1966, 43: 553~563
- 2 Cantrell. et al. Proc Natl Acad Sci, 1985, 82: 6250~6254
- 3 Kawasaki E S. et al. Science, 1985, 230: 291~296
- 4 Nagata S. et al. Nature, 1986, 319: 415~418
- 5 Yang Y C. et al. Cell, 1986, 47: 3~10
- 6 Groopman J E. et al. N Engl J Med, 1987, 317: 593~598
- 7 Antman K S. et al. N Engl J Med, 1988, 319: 593~598

- 8 Metcalf D. *Cancer*, 1990, 65: 2185  
 9 De Witte T, et al. *Blood*, 1992, 79(5): 1359~1365  
 10 Travis J. *Science*, 1992, 256: 1392~1394

(中国医学科学院基础医学研究室闻丹忆撰)

**表皮生长因子** epidermal growth factor (EGF) 表皮生长因子是一种单链多肽,于1959年被偶然发现。30多年来,已对表皮生长因子的理化性质、生物学效应及其作用机理等方面都进行了广泛深入的研究,取得累累硕果。由于发现和研究它的两位科学家成为1986年度生理学或医学诺贝尔奖的获得者,因而这个研究领域变得更加引人注目,成为分子生物学和肿瘤学的研究热点。这是因为对生长因子的深入研究不仅有助于了解正常细胞生长的规律,而且有益于揭示肿瘤细胞生长失控的机理。

1959年,科恩(Cohen)等在研究神经生长因子时偶然发现小鼠颌下腺提取物能使新生的小鼠提前开眼和门齿早萌。他们从这种提取物中分离出一种活性物质,证明是一种低分子量、对热稳定和不可透析的多肽。由于其能直接刺激表皮的生长和分化,故命名为表皮生长因子(EGF)。人的表皮生长因子于1974年被格雷戈里(Gregory)从人尿中分离提纯,因其具有抗胃酸分泌的作用,故又称为抑胃素。

鼠EGF是一分子量约为6(kd)、由53个氨基酸残基组成的单链多肽,分子内含3个二硫键,其等电点为4.6,氨基末端和羧基末端的残基分别为门冬酰胺和精氨酸。EGF分子中不含赖氨酸、丙氨酸和苯丙氨酸以及糖基,但具有抗原性。其构象以无规螺旋为主,少量 $\beta$ 片层结构,而 $\alpha$ 螺旋结构极少。人EGF也含53个氨基酸,其中37个与鼠EGF相同,3个二硫键的位置都相同,生物学效应亦相同。因此有人认为,人EGF是鼠EGF的进化产物。

EGF的主要合成部位在颌下腺,但将小鼠颌下腺切除,血浆中EGF水平未见明显下降,说明体内还有合成EGF的部位。肾脏、消化道、前列腺和肠等部位都能合成EGF;血浆、乳汁、唾液和尿液等体液中也都含有EGF。人EGF基因定位于4号染色体上(4q<sup>25</sup>~q<sup>27</sup>)。EGF的基因表达过程,与大多数多肽激素一样,先合成前体,再降解为成熟分子。1983年,斯科特(Scott)等测定了鼠颌下腺中编码EGF前体的mRNA结构,推测EGF的前体由1217个氨基酸组成,分子量为133kd,雄激素能增加颌下腺合成和贮存EGF,但不影响其分泌,而交感神经系统却控制着EGF的分泌释放。

EGF的生物学效应非常广泛,因而被称为多功能生长因子。它除了具有增殖效应外,还具有抗增殖效应以及许多与增殖无关的效应。EGF对细胞内的DNA、RNA、蛋白质及细胞外大分子的合成都有促进作用,因而是一个广谱的促分裂剂,它对鼠和人的许多正常细胞及某些转化细胞的增殖都有促进作用。对另一些细胞却有抗增殖作用,例如能抑制人表皮样细胞瘤细胞、毛发滤泡细胞和鳞癌细胞的生长。EGF具有与增殖无关的效应,且多种多样。它能增加物质转运及糖酵解,加快钙内流和磷脂酰肌醇代谢,从而促进4,5-二磷酸磷脂酰肌醇转变为甘油二酯和三磷酸肌醇,后者是新发现的第二信使,能控制细胞分泌、代谢和增殖等过程;能刺激磷脂酶A<sub>2</sub>的活性,促进花生四烯酸释放和前列腺素的合成;它既是肝再生的启动因子,又是促进因子,影响骨及钙磷的代谢;抑制胃酸的分泌;增强鸟氨酸脱羧酶的活性和提高多胺的水平等等。

EGF是通过位于细胞膜上的受体,发挥其大多数生物效应的。EGF作用的靶细胞表面存在着特异的EGF受体,其分子量为170kd,由能与EGF等相结合的高度糖基化的膜外部分、跨膜部分及膜内部分组成。膜内部分具有酪氨酸蛋白激酶活性。EGF与受体结合后,可通过多种方式如激活蛋白激酶、促进离子流动、经由环核苷酸或肌醇磷脂介导、或改变细胞骨架系统的结构等来启动细胞内一系列反应过程,最后引起靶细胞发生增殖分裂等效应。关于EGF的作用机理的详细过程尚未彻底明了,有待进一步阐明。

EGF的研究倍受人们重视的另一重要原因,是它与肿瘤有密切的关系。(1)EGF能促进正常细胞出现转化细胞的表现。例如EGF能诱导培养细胞多层性生长,且大大降低对血清的需要量。它还能诱导蛋白质酪氨酸残基磷酸化水平增高,提高细胞内代谢水平,引起体内纤维粘连蛋白丧失和纤溶酶原激活物增加。(2)EGF促进化学物质和病毒的致癌作用。罗斯(Rose)等早在1976年就发现EGF对甲基苯肼的致癌能力有明显的促进作用。(3)EGF、EGF受体与癌基因及其产物有关联,EGF对癌基因的

转化能力具有调节作用,而且EGF和数种转化蛋白都具有使蛋白质酪氨酸残基磷酸化的能力。EGF受体与癌基因产物在结构上也有相似之处,如EGF受体的某些酶解片段就与癌基因erb-B的转化蛋白在氨基酸顺序上有同源性。(4)EGF有免疫抑制作用。它可抑制免疫系统的功能,使机体自发消除肿瘤的能力降低。(5)EGF与转化生长因子在结构和功能上有相似或协同作用。转化生长因子(TGF)是一类能可逆地诱导非肿瘤细胞表达成转化性表型的多肽因子,可分为TGF $\alpha$ 和TGF $\beta$ 。EGF与TGF $\alpha$ 的结构相似,能竞争同一受体,同样有效地激活受体的酪氨酸蛋白激酶。EGF还对TGF $\beta$ 的作用有协同效应。因此,EGF与TGF在结构和功能上都有密切联系。⑥EGF与肿瘤的治疗。有实验证明,抗EGF受体的单抗可有效地抑制低分化鼻咽癌细胞在裸鼠体内的生长。其机理可能是抗EGF受体的单抗通过阻断受体,对抗EGF对肿瘤细胞的生长促进作用。哈维(Harvey)在1988年报道,用EGF可抑制鼠肺癌和阴道癌的生长。日本一个研究小组在1990年报道,用人EGF可抑制人乳腺癌和人食道癌细胞在转化小鼠体内的生长。人EGF还能治疗皮肤的真状细胞瘤。总之,EGF与肿瘤的发生、发展以及治疗都相关,这方面的研究进展是很快的。毋庸置疑,关于EGF以及其它生长因子与肿瘤关系的研究,将是近年内的研究热点,可望在探讨肿瘤细胞生长失控的机理上有重大的突破。

EGF的研究方兴未艾。1990年,洛根(Logan)提出生长因子的“胞内分泌”(intracrine)的新概念,即生长因子不分泌出细胞,不经胞膜受体的作用,直接作用于细胞核内,产生生物学效应。1987年,玛蒂(Marti)就发现靶细胞核内存在EGF的结合部位(即核内受体)。1989年,黄平等发现EGF能增强染色质蛋白激酶的活性。染色质蛋白激酶是核内的蛋白激酶,在调节细胞核的多种功能如基因表达中起重要的作用。这些结果揭示,EGF可能存在胞内分泌这种作用形式。如果该方式存在并确实具有广泛性,必将是今后令人瞩目的科研前沿领域。EGF的临床应用研究亦是近年内的热点之一,现在这方面的研究已露端倪。EGF已在外科手术伤、烧伤、创伤、糖尿病性皮肤溃疡、褥疮、静脉曲张性皮肤溃疡的治疗中应用,效果明显。EGF能促进角膜上皮细胞的增殖,故有望用以治疗角膜损伤、溃疡、化学烧伤以及促进移植角膜的存活。动物实验证明,EGF有抑制胃酸分泌,保护胃、十二指肠粘膜以及促进胃、十二指肠溃疡愈合的作用。因此,EGF可能成为治疗消化性溃疡的一种新药,为这类病人带来福音。今后,EGF在临床上的应用将会越来越广,因此,采用基因工程的方法生产大量的EGF,以供基础研究和临床治疗之用,这是既有经济效益又有社会效益的重大课题,值得高度重视。

#### 参考文献

- 1 Carpenter G, et al. *Annu Rev Biochem*, 1979, 48: 193
- 2 Cohen S. *Cancer*, 1983, 51: 1787
- 3 Gospodarowicz D. *J Pathology*, 1983, 141: 201
- 4 Goustin A S, et al. *Cancer Res*. 1986, 46: 1015
- 5 Stoscheck CM, et al. *Cancer Res*. 1986, 46: 1030
- 6 Burwen SJ, et al. *TIBS* 1987, 12(4): 159
- 7 黄平. 生命的化学, 1988, 8(6): 29
- 8 黄平. 生理科学进展, 1989, 20(1): 22
- 9 黄平, 等. 生物化学杂志, 1989, 5(6): 503
- 10 黄秉仁. 基础医学与临床, 1991, 11(1): 8

(湖南省益阳卫生学校黄平高级讲师撰; 卢义钦审)

**胰岛素样生长因子** insulin-like growth factor 胰岛素样生长因子(IGF)是一组结构与胰岛素相似的多肽,它既具有胰岛素样作用又具有促生长作用。它的发现和研究的加深了人们对某些疾病的认识,为临床诊断和治疗疾病开辟了新领域。

1957年,萨蒙(Salmon)等在大鼠血清中发现了一种具有促进软骨硫酸盐的硫酸化因子活性物质(SFA),这种物质能调节生长激素(GH)的促生长作用。1963年,弗罗埃斯克(Froesch)用放射免疫测定方法发现,血清中的胰岛素样活性物质远远高于胰岛素的放射活性,胰岛素抗体只能中和血中部分胰岛素活性,他们称不被胰岛素抗体中和的胰岛素活性部分为非抑制性胰岛素样活性(NSILA)。1973年,达勒克(Dulak)在研究细胞的体外培养时证明,大鼠肝脏存在一种促进细胞有丝分裂的因子,经纯化鉴定为一种多肽,称为增殖刺激活性(MSA)。继后的研究资料表明,SFA、NSILA、MSA都能介导GH的促生长作用,属于一组相似的多肽。1972年,人们将这组多肽称为生长介素(SM)。后来

有人从血浆中成功地纯化了 NSILA,发现它是由两种称之为胰岛素样生长因子 I 和 II (IGF-I 和 IGF-II) 的多肽组成,SM 的其他成员也是 IGF-I 和 IGF-II 或它们的变异体,于是 1987 年人们用 IGF 取代了 SM。

IGF-I 和 II 是 IGF 的两种主要形式,它们都含有 3 个链内二硫键,分别含 70 个和 67 个氨基酸残基,两者之间有 45 个氨基酸相同。IGF 的一级结构与胰岛素元十分相似,含有 A、B、C 三区,在 IGF 的 C 端还含有一个 D 区,而胰岛素元则缺如。IGF-I 和 II 与胰岛素元的同源性分别为 43% 和 41%。

目前,已从胎儿、成人脑组织、牛乳中分离出一种变异型 IGF-I,这种 IGF-I 的 N 端比正常少 3 个氨基酸。1985 年,扎姆斯坦因(Zumstein)等从人血清中分离出变异型的 IGF-I,其第 33 位丝氨酸被 DGC 三联所取代,并且在 C 端还含有由 21 个氨基酸残基组成的 E 区。1985 年,扬森(Jansen)从 cDNA 序列鉴定了另一种变异的 IGF-I,这种多肽的 29 位丝氨酸由 GPLR 四肽取代,并在 C 端亦含有 21 个氨基酸组成的 E 区。

人 IGF-I 和 II 基因分别位于染色体 12(12q<sup>22</sup>-q<sup>24.1</sup>) 的长臂和染色体 11(11p<sup>15</sup>) 的短臂,后者与胰岛素基因只相隔 1.4kb。1983 年,扬森等首次确定人 IGF-I 基因至少由 5 个外显子组成:外显子 1 含 5' 非翻译序列;外显子 2 和 3 编码信号区、整个 IGF-I 及 E 区的头 16 个氨基酸;外显子 4 和 5 含编码 E 区的其余部分及 3' 非翻译序列。IGF-I 基因转录可产生 IGF-Ia 和 Ib 两种 mRNA,翻译分别产生 E 区含 35 个氨基酸、由 153 个氨基酸残基组成的前体蛋白质 IGF-Ia 和 E 区含 77 个氨基酸、由 195 个氨基酸残基组成的前体蛋白质 IGF-Ib。大鼠和小鼠 IGF-I 基因与人的基因相似,也含 5 个外显子,也能编码两种前体蛋白质。人 IGF-I 基因总长为 30kb,由 1、4、4B、5-7 等 8 个外显子组成。外显子 1-4 及 4B 为 5' 非编码外显子,外显子 5-7 含编码 IGF-I 前体及 3' 非翻译序列。IGF-I 基因中只含 P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub> 三种启动子,P<sub>1</sub> 转录产生 3.3kbmRNA,P<sub>2</sub> 和 P<sub>3</sub> 转录产生 4.8kbmRNA。大鼠 IGF-I 基因与人的基因同源,含有 6 个外显子,外显子 4-6 的功能与人外显子 5-7 相同,外显子 3 编码 5' 非翻译区。

大量实验资料表明,IGF 可在多种组织中合成,如心、肝、肾、肺、骨骼肌、小肠及垂体等组织。一些细胞系如 BRL3A、大鼠肝细胞、人纤维肉瘤细胞、人乳腺癌细胞 T47D 及小鼠内皮细胞也能合成 IGF;肝脏是最主要的合成部位,激素是影响 IGF 合成的主要因素。GH 能直接促进体外肝细胞和纤维母细胞合成 IGF;它是调节 IGF 合成的重要激素。催乳素能促进大鼠肝脏合成 IGF-I。血小板衍生生长因子及成纤维细胞生长因子能促进人成纤维细胞合成 IGF-I。此外,促肾上腺皮质激素、甲状腺素、卵泡刺激素、黄体生成素能分别促进各自的靶细胞合成 IGF-I。营养状况对 IGF 的合成也有重要影响。1987 年,埃姆勒(Emler)及斯查奇(Schalch)证明禁食能减少大鼠肝脏 IGF-I mRNA 合成,恢复饮食则使 IGF-I mRNA 合成增加。另外,组织损伤后,IGF-I 合成呈反应性增加。

血液中存在大量的 IGF。1981 年,扎普夫(Zapf)等测得成人血浆 IGF-I 和 II 的浓度分别为 193±58 和 674±128ng/ml。血中 IGF 主要是以结合方式存在,游离的极少。在人体液中,80% 的 IGF-I 和 II 是与分子量达 150kd 的结合蛋白(BP)结合,少量的与分子量为 25kd 的 BP 结合。1980 年,霍尔(Hall)等证明,血中 IGF 浓度与年龄有关。在出生前,IGF-I 较低,童年时升高,青春期达峰值,此后则缓慢下降。1981 年,扎普夫用放射免疫测定法发现 IGF-II 在出生前较低,出生一年后达到成人水平。大鼠血液中 IGF-I 的含量变化与人的相同,而大鼠 IGF-II 则与人不同,在出生前 IGF-II 很高,出生后迅速下降。血 IGF-I 增多见于 GH 增多的情况,如妊娠、肢端肥大症;降低见于 GH 不足、肝病、营养不良等。血 IGF-II 升高见于患糖尿病母亲所产婴儿、胰岛素依赖性糖尿病、高血糖青少年患者,在 GH 缺乏患者及饥饿时 IGF-II 降低。临床可测定血清 IGF 帮助诊断上述疾病。血 IGF-I 及 II 和 150kd 的 BP 没有明显的昼夜节律性,而 25kd 的 BP 昼夜节律性明显,晚餐后 5~6h 升高,夜间达峰值,进餐可影响峰值的出现。柯兴氏病、肢端肥大症患者的 25kd 的 BP 节律性消失。

与其他激素一样,IGF 是与其特异受体结合而发挥作用的。目前,已鉴定出 IGF-I 和 II 两种受体,它们都定位于细胞膜上。IGF-I 受体是分子量为 300~500kd 之间的糖蛋白,其结构与胰岛素受体相似,由细胞外的两个 α-亚基和跨膜的两个 β-亚基组成。IGF-I 受体与 IGF-I 亲和力高,与 IGF-II 亲和力低,而高浓度的胰岛素才可与 IGF-I 受体结合。受体与配体结合后使细胞

内的 β 亚基酪氨酸残基磷酸化,从而引起细胞内信号传导,产生效应。IGF-I 受体与 IGF-II 受体不同,它系分子量为 250kd 的单链多肽,大部分位于细胞外,细胞外区由 15 个半胱氨酸残基和疏水区的重复序列组成。IGF-II 受体对 IGF-I 有高度亲和性,与 IGF-I 亲和力低,胰岛素不能与之结合。IGF-II 受体与配体结合后的细胞内信号传导机制尚不清楚。

IGF 具有广泛的生物学作用,它既是一种旁分泌激素,又是一种自分泌激素,还可能是一种内分泌激素。IGF 的主要作用是促生长和发挥胰岛素样作用。实验资料表明,IGF 能促进细胞 DNA 合成和细胞增殖,促进卵母细胞减数分裂,促进大鼠软骨和人皮肤成纤维细胞合成蛋白质。对胰岛素的靶器官尤其是脂肪、肌肉组织显示很强的胰岛素样效应,能促进葡萄糖向肌肉和脂肪组织转运,增强肌肉组织的糖元和蛋白质合成,促进脂肪组织糖的氧化和糖转变成脂肪,抑制脂肪组织的脂解作用,降低血糖。此外,IGF 还能促进成肌细胞、成骨细胞、脂肪细胞、突交胶质细胞的分化,促进红细胞的生长,促进乙酰胆碱和儿茶酚胺的释放,促进大鼠骨骼肌细胞原癌基因 C-fos 的表达。1984 年,扎普夫用重组 IGF 及从血液中分离的 IGF 进行体内研究资料表明,IGF 的作用依赖于其摄入的途径,静脉注入 IGF 引起急性胰岛素样效应,皮下注射则致促生长作用。

由于 IGF 具有促生长和胰岛素样作用,因而 IGF 在临床上可用于治疗多种疾病,如骨质疏松、糖尿病、GH 不敏感性疾病、抗 GH 的某些遗传性疾病;还可用于各种慢性伤口的愈合,如糖尿病、截瘫、四肢瘫痪、静脉曲张、动脉性疾病引起的溃疡及创伤、烧伤、骨折伤口愈合等。随着 IGF 的研究深入以及重组 IGF 和 IGFBP 的合成,将会进一步揭示出 IGF 对人体代谢的影响,IGF 将会更广泛地在临床促进生长、修复创伤组织及其他方面得到应用。

参考文献

- 1 Bhaumick B, et al. Life Science, 1988, 42(17): 1603~1614
- 2 尹宇辉,等. 国外医学,内分泌学分册, 1988, 8(2): 57~60
- 3 邓洁英. 中华内分泌代谢杂志, 1988, 4(3): 167~171
- 4 Sara V R, et al. Physiological Reviews, 1990, 70(3): 591~614
- 5 樊建平. 国外医学内分泌学分册, 1990, 10(2): 57~59

(湖南省益阳卫校陈明雄讲师、黄平高级讲师撰;卢义钦审)

α/β-干扰素受体

α/β-干扰素(IFN-α/β)是细胞因子网络中的主要负性调节因子之一(F. R. Balkwill 等, 1989),具有多种生物学功能。天然提取干扰素和基因重组的 α-干扰素已广泛用于毛细胞白血病(HCL)、慢性粒细胞性白血病(CML)以及一些病毒感染的治疗。

干扰素发挥功能时,首先与靶细胞膜上的受体结合,α、β 两种干扰素同一受体结合,而 γ-干扰素则与各自的受体结合(M. Aguet 等, 1989),尽管 α/β-干扰素受体在几乎所有细胞均存在,但其表达数极低,每个细胞一般有 10<sup>2</sup>~10<sup>4</sup> 个结合单位,这使得 α/β-干扰素受体的生化分离纯化和基因工程中的筛选遇到了很大困难。直到 1990 年, Gressor 的实验室才首次报道了一个用基因工程重组的、体外表达的、具有生物活性的 α-干扰素受体克隆,他们将 α-干扰素最敏感的 Daudi 细胞(来源于 Burkett's 淋巴瘤)基因转入小鼠 BTG9A 细胞,然后以人干扰素诱导的抗病毒活性筛选出阳性的小鼠转化细胞克隆,经扩增后,分离出阳性克隆中的 cDNA,得到约 5kb 长度的 DNA 片段,以此 DNA 片段作探针,再去筛选 Daudi 细胞 cDNA 基因文库,得到一个含 2.7kb 长度的 cDNA 克隆,该克隆能表达出具有抗病毒活性的受体蛋白。尽管该受体蛋白对 β-干扰素不够敏感,这一结果仍是干扰素受体研究中的一个突破。从 cDNA 序列分析,该 α/β-干扰素受体是一典型的细胞表面糖蛋白,有 557 个氨基酸残基, N 末端有一信号肽,分子量为 68 485,细胞外结构域很长,有 456 个氨基酸残基,穿膜区只有 20 个氨基酸残基,与其他一些生长因子受体相比,胞浆域较短(Hanks, 1988)。该受体蛋白有 20 个酸性氨基酸残基, 8 个碱性氨基酸残基,可见蛋白的等电点相当偏酸。Schwabe 等(1988 年)从 Daudi 细胞提取物中测得的 α-干扰素受体的相对分子量为 95~100kd,与之相比,该受体分子量的差别可能是糖基化造成的,该受体蛋白有 15 个可糖基化的位点, 12 个位于胞外区, 3 个位于胞浆区,与 γ-干扰素受体及已知的蛋白质进行氨基酸顺序比较,表明此受体是一新的蛋白质(G. Uze 等, 1990)。

$\alpha/\beta$ -干扰素与受体结合后通过尚未确定的G蛋白作用启动胞内的信号传递,传统的第二信使如cAMP、cGMP和 $Ca^{2+}$ 未见介入 $\alpha/\beta$ -干扰素信号传递, $\alpha/\beta$ -干扰素作用于细胞也不引起肌醇磷脂(PI)转换的加速和细胞内 $H^+$ 浓度的下降(Yan Cong等,1990),抑制干扰素与受体结合的内在化和降解,并不影响其抗病毒活性,表明干扰素降解产物也未介入信号传递(Andrew,1982)。所有这些结果反映了 $\alpha/\beta$ -干扰素信号传递的复杂性和独特性。

W. H. Yap等1986年首次报道,以 $\alpha/\beta$ -干扰素作用于人成纤维细胞,Daudi细胞及其细胞膜组分后甘油二酯(DAG)水平快速而短暂地升高,而三磷酸肌醇( $IP_3$ )水平却没有明显变化,DAG浓度在干扰素与细胞接触的30s就达到最大值,在30min内降至基线水平,这种变化方式表明DAG是 $\alpha/\beta$ -干扰素作用后在膜上诱导的早期变化,可能是干扰素作用的第二信号分子。细胞内DAG的来源主要通过两条途径:一是磷脂酶C(PLC)特异地降解膜磷脂;二是磷脂酶D(PLD)和磷酸化酶联合作用水解膜磷脂,加入PLC的抑制剂以降低DAG的生成,能使 $\alpha$ -干扰素诱导的人羊膜细胞和静止期成纤维细胞抗病毒活性下降,人工合成的DAG能够模拟干扰素诱导的抗病毒活性,在成纤维细胞中,人工合成的DAG 50 $\mu$ mol/L的抗病毒活性相当于100IU/ml的 $\alpha$ -干扰素(C. Cernescu等,1988)。这些资料表明,干扰素诱导的DAG的升高与其抗病毒活性有关。L. M. Pfeffer等(1990)进一步研究了 $\alpha$ -干扰素诱导的DAG的来源,证明 $\alpha$ -干扰素作用于Hela细胞后专一地引起磷脂酰胆碱(PC)的水解,DAG水平的升高与膜上PC水解及胆碱的释放在时间曲线上完全一致,而PI的转换和 $IP_3$ 水平均不受影响,从而证明了 $\alpha$ -干扰素通过PC水解产生DAG的途径。这一途径能很好地解释 $\alpha$ -干扰素作用后,细胞 $IP_3$ 和 $Ca^{2+}$ 浓度没有变化的事实。由于PC水解产生DAG在信号传递中的作用已有许多报道(Extron,1990),此途径的确定,提供了一个 $\alpha$ -干扰素不升高细胞内 $Ca^{2+}$ 浓度的DAG的来源。

磷脂酶 $A_2$ ( $PLA_2$ )特异地水解膜磷脂生成溶血磷脂(LysoPL)和花生四烯酸(AA),AA以3条主要代谢途径生成一系列生物活性物质。有证据表明,刺激 $PLA_2$ 活化是受体介导的一条信号通路(E. J. Van Ca Ven等,1989)。以 $PLA_2$ 的抑制预处理 $\alpha$ -干扰素作用的人羊膜细胞,能大幅度地削弱 $\alpha$ -干扰素诱导的抗病毒活性(G. P. remecz等,1989)。以 $\alpha$ -干扰素处理成纤维细胞能促进环氧化酶催化的前列腺素增加(Fitzpatrick,1980)表明花生四烯酸代谢介入了干扰素功能。

G. E. Hannigan等(1991)以 $\alpha$ -干扰素诱导胞浆因子活化并与干扰素刺激应答元件(ISRE)结合为模型,研究了AA及其代谢产物对干扰素诱导的胞浆因子与ISRE结合的影响。结果表明, $\alpha$ -干扰素能显著地刺激Balb/c 3T3细胞中AA的快速释放和溶血磷脂酰胆碱(LysoPC)同步升高,而溶血磷脂酰肌醇(LysoPI)则无变化,15min内达到高峰,加入 $PLA_2$ 抑制剂(BPB)能显著地抑制 $\alpha$ -干扰素引起的AA释放,抑制胞浆因子激活,外加AA并不能诱导胞浆因子的活化,如果在 $\alpha$ -干扰素作用同时,加入环氧化酶和酯氧化酶抑制剂(INDO和NDGA)分别抑制前列腺素和白三烯生成,反而使 $\alpha$ -干扰素诱导的ISRE结合活性提高了3倍,没有 $\alpha$ -干扰素存在,单以上面二种抑制剂处理细胞则没有抗病毒作用,以人成纤维细胞为对象也得到类似结果。有意义的是,将环氧化酶抑制剂与 $\alpha$ -干扰素在临床联合使用具有抗肿瘤协同活力(Kim,1989)。以上结果表明,AA代谢介入了 $\alpha$ -干扰素的信号传递,由于经PDGF处理的 $A_{31}$ 细胞也有AA的快速释放(Shier,1982),而 $\alpha$ -干扰素对PDGF具有拮抗作用,AA本身不作为 $\alpha$ -干扰素的第二信使,很可能是AA代谢的某种产物特异地传递 $\alpha$ -干扰素的信号。抑制实验表明,这种信号分子不是通过环氧化酶或酯氧化酶代谢产生。

佛波酯(PMA)能与DAG竞争直接激活细胞PKC,将PMA加入Daudi细胞内,能模拟 $\alpha$ -干扰素抗细胞增殖,PKC的抑制剂如staurosporine和H-7能选择性地阻断 $\alpha$ -干扰素诱导基因的转录,也降低 $\alpha$ -干扰素诱导的Hela细胞抗口炎疱疹病毒活性(N. C. Reich等,1990)。直接观察 $\alpha$ -干扰素作用后PKC的状况也表明,PKC的激活与 $\alpha$ -干扰素功能有关。将 $\alpha$ -干扰素处理人羊膜细胞使膜组分PKC活性升高,胞浆PKC活性则无变化(Premecz,1989)。 $\alpha$ -干扰素作用于Hela细胞后, $\beta$ 型PKC快速从胞浆组分转移到膜组分并激活, $\alpha$ 、 $\epsilon$ 型PKC活性没有变化, $\beta$ -PKC激活水平与 $\alpha$ -干扰素诱导的抗病毒和抗细胞增殖水平正相关(L. M.

Pfeffer等,1990)。并非所有干扰素均诱导PKC激活,在U937细胞中, $\alpha$ -干扰素能引起胞浆PKC的激活并向细胞膜区域移位,同时诱导细胞膜超极化, $\gamma$ -干扰素也导致细胞膜超极化但却没有PKC活化,加入H-7阻止PKC活化能够阻断 $\alpha$ -干扰素的信号传递而不介入 $\gamma$ -干扰素的信号通路(P. Csermely,1990)。尽管有众多报道PKC介入了 $\alpha$ -干扰素的信号传递,但Yan等(1989年)以PKC激活剂Dc8和PMA与Balb/c3T3小鼠细胞作用,用Northern Blot检测干扰素诱导基因2'5'-OASmRNA的水平,结果二者均无诱导作用,却有抑制作用LHannigan等(1989年)也提出 $\alpha$ -干扰素诱导2'5'-OAS的基因表达时,PKC没有信号传递作用。由于PMA、PDBU等与DAG在激活PKC的作用方式上有较大差别(M. D. Bazzi等,1989), $\alpha$ -干扰素作用于Hela细胞后,PKC活性升高,导致干扰素刺激基因(ISG)的转录增加,但加入PMA激活的PKC却不能使ISG转录(N. C. Reich,1990),加之PKC亚类在不同细胞内的分布及功能并不完全相同(Leach,1991),以PMA来模拟DAG,解释PKC的功能时应当慎重。所以不能排除PKC在 $\alpha$ -干扰素信号传递中的作用。

干扰素作用信号传入细胞后,首先激活存在于胞浆的蛋白因子,它们是DNA结合蛋白,激活后进入细胞核与干扰素刺激基因(ISG)的特殊部位ISRE(称为干扰素刺激应答元件)结合,促进基因表达。干扰素处理细胞后形成3种不同的DNA-蛋白质复合物。这些蛋白因子先后被命名为 $C_1$ 、 $C_2$ (M. R. Rutherford等,1988); $C_1$ (或M)和E(G. R. Stark等,1989);干扰素刺激基因因子(ISGF<sub>2</sub>)<sub>1</sub>、<sub>2</sub>、<sub>3</sub>、(D. S. Kessler等,1988),Stark等用亲和层析法纯化了这些因子,并以寡核苷酸探针筛选了表达型基因文库,获得了此3种蛋白因子的基因克隆。其中的E因子(65kI)在 $\alpha$ -干扰素加入30S即被激活,立即迁移入核内与ISRE结合,刺激基因转录,C因子(98kD)在加入干扰素之前就存在于胞浆,而L因子(150kD)则需加入干扰素数小时才被诱导出来,C因子和L因子与E因子结合在同-ISRE上,但结合方式与E因子不同,没有干扰素时,C因子就与ISRE结合发挥抑制作用,而L因子则可能对E因子刺激的基因表达起负反馈作用(G. R. Stark等,1989)。E因子(ISGF)最初是以ISGF<sub>3</sub>单体形式存在于胞浆,表现为非活性状态, $\alpha$ -干扰素的作用信号使两个单体产生变构结合成三聚体ISGF而被激活(Kessler,1989)。 $\alpha$ -干扰素对胞浆因子的激活均导致干扰素刺激基因(ISG)转录,表达出多种功能蛋白。干扰素刺激基因的5'上游区具有特殊顺序,一个是干扰素刺激应答元件(ISRE),是干扰素作用于ISG的特异增强子,在此Cis元件中,有两个隔开的共同片段GGAAA和TGAAAC,共同组成了胞浆因子的识别位点(A. C. G. Parter等,1988),例如在小鼠2'5'-OAS基因的-80到-52位靠近起始信号AUG处就存在这样的ISRE序列,另有一元件称E-IRS序列,靠近 $\beta$ -干扰素转录起始部位,可能是 $\beta$ -干扰素的特殊作用位点(Coodbourn,1986)。PDGF和IFN均能与诱导2'5'-OAS基因的ISRE结合;但PDGF和IFN激活胞浆因子的特性不一样,以PKC抑制剂Staurosporine处理后,PDGF的应答受到抑制,而IFN的诱导活性则不受影响,可能是PDGF和IFN通过不同途径激活胞浆因子,PDGF通过PKC而IFN不通过PKC(G. F. Hannigan等,1989)。有资料表明,PDGF处理 $A_{31}$ 细胞虽然与 $\alpha$ -干扰素一样诱导蛋白因子与ISRE,但诱导水平较低(Carcia-Blanco,1989)。

$\alpha/\beta$ -干扰素与受体结合后的信号传递机制已初具轮廓。由于 $\alpha/\beta$ -干扰素功能的多样性,某些功能只需短期处理,而另一些则需干扰素持续处理数小时甚至数天,干扰素与很小比例的细胞膜上受体结合就可抗病毒,而要抑制细胞增殖则需细胞上的受体大多数被干扰素占据,因而不能排除新的多种信号传递机制的存在。

细胞因子网络系统已受到了广泛关注。网络系统越来越复杂和精细,新的细胞因子不断被发现。细胞因子的受体和基因重组细胞因子的临床应用都积累了相当多的资料。Aguet(1990年)指出,在未来年代,这一领域面临的一个主要挑战便是填补受体与基因表达之间的精细环节。只有这样才能彻底弄清细胞因子的作用机制,解决所面临的众多理论和实践课题。干扰素作为细胞因子的最早成员,各方面的研究都比较深入,弄清其受体后作用环节,揭示其生物功能的机制,对于基础理论研究和指导临床治疗都具有重大意义;也可为研究其他细胞因子的作用机制提供一个模型。

(中国医学科学院血液学研究所李洲硕士、范启修教授撰)



**血型的分子基础** molecular base of blood group 血型

一般是指红细胞抗原的差别所形成的类型。自从1900年兰德斯坦纳(K. Landsteiner)首先发现人体A、B、O血型系统以来,已知红细胞有20多个血型系统。ABO血型系统是人类最基本的血型。兰德斯坦纳根据红细胞所含抗原不同,把人体血型分为A、B、O和AB 4种。在临床输血时,若血型不符合,将会使输入的红细胞发生凝集,引起血管阻塞和血管内大量溶血,造成严重后果。因此,数十年来在临床医学上十分重视血型研究。随着生物化学技术的发展和应用,对红细胞血型抗原分子结构逐步有所了解,这阐明血型物质的化学本质和进一步认识血型物质的生物学功能有着十分重要的意义。

ABO血型系统中ABH(O)抗原主要存在于子红细胞膜上的鞘糖脂。现在知道ABH(O)抗原不仅存在于红细胞上,还出现在唾液、胃液、精液等分泌液中。中国60%汉族人唾液中有ABH(O)血型物质。此外,在毛发上也有ABH(O)血型物质。在分泌液中和毛发上的ABH(O)血型物质主要以糖蛋白形式存在。例如胃液等外分泌物中,ABH(O)血型物质的抗原性由糖蛋白上寡糖链所携带。这些寡糖链主要通过O-糖苷键与水溶性粘蛋白相连接。

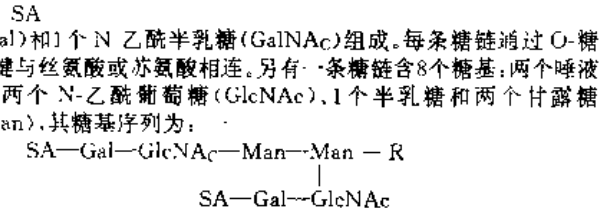
关于红细胞血型抗原化学结构的研究,开始于20世纪50~60年代,当时从人卵巢囊肿液等多种体液分泌液中分离出可溶性糖蛋白进行血型活性研究,并由此了解有关血型的分子基础和特性。1966年,华特金(W. M. Watkin)证实具有B血型特性的水溶性糖蛋白是由寡糖链非还原性末端的半乳糖基起免疫决定簇作用。1971年,雅特捷夫(S. Yatzyv)和弗鲁瓦斯(H. M. Flower)用正丁醇/水溶剂从B型红细胞中抽提出一种水溶性糖蛋白,具有很强的B血型活性,用咖啡豆半乳糖苷酶作用后可释放出半乳糖而导致B血型活性消失。80年代初,美国柯特斯坦(J. Goldstein)进一步用咖啡豆α-半乳糖苷酶使B型红细胞转化为O型红细胞并进行临床试验。血型的酶学转型是一项有应用前景的研究课题。在血型活性研究中应用凝集素(lectin)鉴定血型是一项较新的技术。利用某些凝集素具有血型专一性的特点,不仅可鉴别不同的血型,还可区别不同的亚型。华特金和摩根(Watkin and Morgen)发现,利马豆凝集素(PLA)对A型红细胞的凝集能被N-乙酰半乳糖(α-GalNAc)抑制,这表明A血型抗原的免疫决定簇是N-乙酰半乳糖。双花扁豆凝集素(DBA)的血型专一性为A<sub>1</sub>型,可用于鉴别A<sub>1</sub>和A<sub>2</sub>亚血型。两者在分子结构上的差别主要在于第2位糖基(Gal)与第3位糖基(GlcNAc)之间的连接方式不同,A<sub>1</sub>型为1→3连接,而A<sub>2</sub>型为1→4连接。以上的实验资料表明ABO血型的分子基础,即血型免疫活性的特异性主要决定于糖链的组成,尤其是决定于糖链的非还原性末端糖基的差异。下表为A、B和H抗原中寡糖链的化学结构。A抗原糖链末端为N-乙酰半乳糖(GalNAc);B抗原糖链末端为半乳糖(Gal),而N-乙酰半乳糖和半乳糖的差别仅仅是半乳糖的两位碳原子上有一个取代基(乙酰基)不同而已;H抗原糖链的末端基为岩藻糖(Fuc)。H抗原和A抗原或B抗原相比,仅在糖链末端少一个N-乙酰半乳糖或半乳糖。

表: ABH(O)血型抗原的糖链结构

| 血型抗原 | 糖链序列                                       |
|------|--------------------------------------------|
| A    | GalNAc—Gal—GlcNAc—Gal—GlcNAc—Gal—GalNAc—R  |
| B    | Gal—Gal—GlcNAc—Gal—GlcNAc—Gal—Gal—GalNAc—R |
| H    | Gal—GlcNAc—Gal—GlcNAc—Gal—GalNAc—R         |

红细胞膜上另一类血型抗原是血型糖蛋白(GP)。自1968年以来,已从红细胞膜上检出4种主要的血型糖蛋白。按福施梅尔(Furthmayr)命名原则,这4种血型糖蛋白分别为血型糖蛋白A(GPA或αGp)、血型糖蛋白B(GPB或δGp)、血型糖蛋白C(GPC或βGp)和血型糖蛋白D(GPD)。它们组成MNSs血型系统的抗原和Gerbich血型抗原。其中GPA为MN血型抗原,GPB为Ss血型抗原,GPC为Gerbich抗原。血型糖蛋白在人红细胞膜上是一类主要的跨膜蛋白。其中血型糖蛋白A的化学结构研究最深入。1978年,福施梅尔首先报道GPA肽链N端区31肽的氨基酸序列。随后完成了GPA全部化学结构的测定,GPA

分子由131个氨基酸组成,大致可分成3个部分:中间肽段(第73~92号)为疏水性的,可横穿膜脂双层;N端肽段位于膜外侧,与血型活性有关;C端肽段位于膜内侧,含较多酸性氨基酸。在N端肽段上分布有16条寡糖链,其中15条糖链的序列为SA—Gal—GalNAc—R每条糖链由两个唾液酸(SA)、1个半乳糖



这条糖链通过N-糖苷键与天门冬酰胺连接。在GPA分子中含糖量约60%,其中唾液酸(N-乙酰神经氨酸)含量尤为丰富,约占红细胞膜上全部唾液酸的一半以上。MN抗原活性与糖链上的唾液酸有关。MN抗原可分为M抗原和N抗原,两者的差异仅为1个唾液酸残基。M抗原的糖链经唾液酸酶作用去除1个唾液酸残基即成为N抗原,如果继续作用再去除1个唾液酸残基则抗原活性完全丧失。

红细胞膜上血型糖蛋白的分子结构研究,除了GPA外,其他几种GP由于含量较低,它们的结构研究进展较迟缓。20世纪80年代后期,基因工程技术促进了血型物质分子结构的研究。法国卡龙(Gartron)等人从人网织红细胞的DNA文库中钓出GPC的cDNA克隆,再通过道尔(Dahr)等的努力终于阐明了GPC(βGP)的全部128个氨基酸序列。1986年,赛勃特(Siebert)和福柯达(Fukuda)对GPA(αGP)的cDNA克隆并测定其核苷酸顺序,完全印证了GPA的氨基酸序列。这表明,利用基因工程技术为血型物质分子结构研究带来了新的希望,对血型分子基础研究的发展具有深远的意义。

**参考文献**

- 1 Warkins W M. Science, 1966, 152: 172
- 2 Hakomori S, et al. Biochem, 1968, 7: 1279
- 3 刘俊凡,等. 生命的化学, 1988, 8(3): 26
- 4 Goldstein J. Transfusion Medicine Reviews, 1989, 11(3): 206
- 5 孙册. 生命的化学, 1991, 11(3): 34  
(华东师范大学秦德安副教授撰,柯家康审)

**基因治疗** gene therapy 基因治疗是利用基因转移技术

将正常的外源基因导入生物体靶细胞内,以纠正或补偿其基因缺陷,从而达到治疗疾病目的的一种高技术。在国际上,基因治疗日益成为医学研究的热点,并取得一些成绩。中国也已把基因治疗研究列为国家高技术发展项目。

1980年,克莱因(M. J. Cline)等给两名晚期β-地中海贫血患者进行首次基因治疗试验,由于当时条件所限,试验失败。1983年,曼(R. Mann)等构建了包装细胞系,基因治疗随之活跃起来。大多数研究者致力于把外源基因导入小鼠骨髓干细胞,以纠正血液系统的遗传缺陷。1983年,乔伊纳(A. J. Oyner)等人首先在体外通过逆转录病毒(retroviral)载体,把新霉素抗性(neo)基因导入小鼠造血干细胞。1984年,安德森(W. F. Anderson)详细阐明了基因治疗的前景及其发展方向;威廉斯(D. A. Williams)等将neo基因和二氢叶酸还原酶(DHFR)基因导入小鼠造血干细胞。之后不久,威廉斯等用类似的方法首次将腺苷脱氨酶(ADA)基因导入小鼠体外培养的人类淋巴样细胞,并获得高效表达。1985年,科恩(D. B. Kohn)等把带有ADA基因的逆转录病毒载体导入非人灵长目动物体内,该基因可在动物体内持续表达数月。1989年1月,美国国家卫生研究院及其下属DNA重组委员会(NIH, Recombinant DNA Advisory Committee)批准了第一例人体内外源性基因表达的研究,获得成功。1990年9月又批准第一例人体的基因治疗(严重的ADA缺乏症)。这项研究进行得十分顺利,标志着基因治疗已步入临床应用阶段。

基因治疗的战略包括基因替代、基因修正、基因增强3个方面。基因替代是指用正常基因去替代变异基因;基因修正指特异性地修复变异基因序列,而不涉及靶细胞基因组的其它变化;基因增强是将有功能的目的基因转移到疾病细胞或个体基因组的某一部位上,以补偿缺陷基因的功能,这是目前研究较多、较成熟的

方法。

基因治疗有几个关键步骤,首先必须分离出引起疾病的基因以及在机体中插入有功能的片段,而且这种接受功能基因的细胞必须能在移植时存活下来。此外,它们还必须能够制造由插入基因所编码的蛋白质,也就是说它们可以表达这种基因。将外源基因转入靶细胞必须有一个高效的基因转移系统。

表1 各种基因转移方法的比较

| 类型      | 技术               | 效率                                 | 报告人                     |
|---------|------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 染色体转移   | 细胞融合             | 10-6                               | Kuddle 等(1975)          |
|         | 染色体介导的基因转移       | 10-6                               | McBride 等(1978)         |
|         | 微细胞介导的基因转移       | 10-6                               | Fournier 等(1977)        |
| 化学和物理方法 | 磷酸钙沉淀法           | 10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-7</sup> | Corman 等(1983)          |
|         | 原生质体融合           | 1~3×10 <sup>3</sup>                | Vincene 等(1981)         |
|         | 微注射              | 0.1%~1%                            | Casperchi 等(1980)       |
|         | 电穿孔              | 10 <sup>-3</sup> ~10 <sup>-5</sup> | Porter 等(1984)          |
|         | 脂质体载体            | 2×10 <sup>-4</sup>                 | Schaffer-Ridder 等(1988) |
| 病毒载体    | 激光               | 约6×10 <sup>-3</sup>                | Kurata 等(1986)          |
|         | 重组 DNA 病毒        | 10%~100%                           | Bachwal 等(1986)         |
|         | 重组 RNA 病毒(逆转录病毒) | 10%~100%                           | Eglitis 等(1988)         |

比较这些方法可以看出,逆转录病毒法是一种高效率的转移技术(转移效率高达10%~100%)。此方法使用缺失编码病毒功能蛋白基因(如 gag, pol, env 等)的重组逆转录病毒载体转染包装细胞,含目的基因的逆转录病毒载体可在包装细胞内大量复制,并利用整合在包装细胞基因组上的重组基因的产物包装成病毒颗粒,收集这些释放出的颗粒并以此转染靶细胞,使用被转染的受体细胞就可实现基因转移。这种缺失功能基因的逆转录病毒在靶细胞内不繁殖,不会扩散造成危害,目前已构建了各种用于基因转移的重组逆转录病毒载体和包装细胞系。

基因转移的方法很多,但概括起来主要有两条途径:一是先将目的基因导入靶细胞,再输入体内;二是直接将携带目的基因的载体注入体内靶器官,而无需中介的体细胞。

对靶细胞的选择限于一定范围,要求靶细胞易培养,易被基因修饰,且易再植入体内。最好有非复制期的细胞或周期性的干细胞,以便基因修饰永久存在。骨髓干细胞具有移植方便,繁殖力强,能分化成各系血细胞等特性。因此,血液系统的遗传病便成为基因治疗的首选对象。1980年,克林(M. Clin)第1个利用小鼠造血干细胞将外源基因导入小鼠体内。1985年,米勒(A. D. Miller)等用逆转录病毒作载体将人类β珠蛋白基因导入小鼠红白血细胞和人类骨髓干细胞,获得高水平的表达。1987年,科恩等用猿猴造血干细胞将人的 ADA 基因导入猿猴体内,结果在外周血细胞中表达出人的 ADA。可用于基因治疗的靶细胞还有肝细胞、血管内皮细胞、脑组织细胞、淋巴细胞、皮肤细胞和肌细胞等。1991年弗尔格纳(P. L. Felgner)等报告,无需将基因整合入宿主细胞基因组内,将基因直接注射入活体也可获得长效表达。

目前已明确多种遗传病是由单基因缺陷所致,因而基因治疗的主攻目标是单基因缺陷的遗传病,现已进行基因治疗研究的疾病有:(1)血友病,IX 因子缺陷症,Ⅷ因子缺陷症。(2)免疫缺陷病,ADA 缺陷症、嘌呤核苷磷酸酶(PNP)缺陷症。(3)尿素循环障碍,鸟氨酸转氨甲酰胺(OT)缺陷症、精氨酸琥珀酸盐合成酶(AS)缺陷症。(4)贫血,β-地中海贫血、镰形细胞贫血。(5)肺气肿,α<sub>1</sub>-抗胰蛋白酶缺陷症。(6)溶酶体贮藏障碍,葡萄糖苷脂酶缺陷(Gaucher 氏病)。(7)其它代谢病,苯丙氨酸羟化酶(PAH)缺陷症、次黄嘌呤-鸟嘌呤磷酸核糖转移酶(HGR)缺陷症。因为大多数癌症是异常的基因表达所致,或与之有关,所以癌症可以认为是一种遗传性疾病。最简单的基因疗法模型是那些因抗癌基因缺陷所致的肿瘤,如能恢复抗癌基因的表达,应该可以抑制或逆转癌症的表型。1990年,弗吉斯坦(B. Vogelstein)报告,引起癌症发生的原因主要在于抑癌基因的突变、缺失引起的效果积累。把克隆好的抑癌基因转入癌细胞,通过其表达来抑制肿瘤的生长,是肿瘤基因治疗的一种设想。1990年,默塞(W. E. Mercer)和阿普利(J. F. Apperly)等把抑癌基因 P53 的正常 cDNA 转入结

肠直肠癌细胞和神经胶质细胞瘤细胞,使肿瘤被抑制。1990年,罗森伯格(S. A. Rosenberg)等人发现,自转移性黑色素瘤患者身上获取肿瘤浸润淋巴细胞(TIL),将 neo 抗性基因通过逆转录导入 TIL 中,而后重新输入给患者,TIL 会集中分布于肿瘤所在部位。他们还以基因治疗为基础,把外源肿瘤坏死因子(TNF)基因转给 TIL,对50名黑色素瘤晚期患者施以肿瘤免疫治疗。如果利用逆转录病毒将毒素基因导入癌细胞内,这些毒素又能准确无误地定点表达,特异性杀死癌细胞。另一方面,将药物敏感基因定点导入癌细胞,可增强其对抗癌药物的敏感性。在理论上,把反义 RNA 引入癌细胞以抑制癌基因的表达,也具有一定的前景。1989年,安德克尔森(L. F. Anderson)报告,用重组逆转录病毒将 CD<sub>4</sub> 分子的基因导入人上皮细胞及小鼠成纤维细胞,体外培养的这些细胞表达了具有生物学活性的 CD<sub>4</sub>。现认为,CD<sub>4</sub> 是阻断人类免疫缺陷病毒(HIV)感染的关键。帕金森综合征基因治疗的研究也取得重大进展,已克隆出酪氨酸羟化酶(TH)的 cDNA 有四个亚型。通过逆转录病毒载体已将 THcDNA 的 1、2 两型转移至成纤维细胞、AtT 细胞等,均获得有活性 TH 表达。此外,用基因治疗技术促进伤口愈合、治疗肌营养不良、骨质疏松、类风湿性关节炎、中枢神经系统疾病和心血管系统疾病的研究也已展开。

目前,基因治疗的发展很快,从确定基因治疗的目标,选择靶细胞,寻找基因转移途径,到建立各种安全有效的逆转录病毒载体都取得显著成就。但实现真正的可靠临床治疗方法,还有许多尚待解决的问题。人们担心,外源基因的导入会扰乱正常基因的表达或激活相邻的原癌基因。此外,基因治疗还涉及到有关法律的及伦理的问题。尽管如此,基因治疗终将成为临床治疗疾病的一个重要领域。

#### 参考文献

- 1 Williams D A, et al. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1986, 83: 2566
- 2 Eglitis M A, et al. *Biol Techniques*, 1988, 6: 608
- 3 贺福初. 国外医学分子生物学分册, 1989, 11: 73
- 4 Sinkovics J G. *Anticancer Res*, 1989, 9: 1281
- 5 Anderson LF. *J Natl Cancer Inst*, 1989, 81: 1055
- 6 Rosenberg S A, et al. *N Engl J Med*, 1990, 323: 570~578
- 7 Felgner P L, et al. *Nature*, 1991, 349: 351~352
- 8 Wilcock D, et al. *Nature*, 1991, 349: 429~430

(安徽省淮南职业医专李道群副教授, 华东煤炭  
医专附院方坤撰, 姚士硕审)

#### 超声诱导基因转移 ultrasonic direct gene transfer

植物基因工程的关键技术之一,是将外源基因导入植物细胞。离体植物遗传转化方法,主要有(1)农杆菌 Ti 或 Ri 质粒介导法;(2)磷酸钙核酸沉淀吸收法;(3)PEG 介导 DNA 直接转移法;(4)脂质体载体法;(5)显微注射法;(6)电激基因转移法;(7)基因枪喷射法;(8)激光微束法等。而超声波法操作简便,设备便宜,不受宿主范围的限制,特别是它能将外源基因直接导入植物组织或带壁细胞。鉴于植物组织培养再生植株比原生质体再生更为成熟,因此超声波直接导入外源基因法可能适用于更多的物种。

1989年以来,中国农业科学院生物技术研究中心细胞室章力建、陈乐玫与清华大学生物科学技术系许宁等合作,发展了一种新的转基因方法——超声波法,可将外源基因直接导入带壁细胞。1990年6月,他们在世界上首次报道了利用超声波法将β-葡萄糖苷酸酶(GUS)基因导入小麦幼穗愈伤组织,并获得30%的GUS基因短暂表达。为了建立完整的技术体系,进一步在模式植物烟草上进行研究,以助烟草试管苗的叶片为外植体,将其切成小块,放入加有缓冲液的超声小室中,加入含PCaMV35S-GUS基因和Pnos-NPTII基因的PBI 121.1质粒及鲑鱼精DNA,进行超声波处理。同时设置加质粒不做超声,超声不加质粒以及不加质粒不做超声处理3种对照。结果超声转基因组GUS

基因的短暂表达率高达80%以上,叶片组织的平均转化面积高达70%~80%。获得转基因植株的频率,以起始外植体计算达到22.3%,R1代卡那霉素抗性及GUS酶活性检测证明外源基因已有性传递给子代。

1990年8月,丹麦 Joersbo 和 Brunstedt 也报告了用超声波法将 CAT 基因导入甜菜的根烟草的原生质体中获得短暂表达,发现超声波法所获得的短暂表达要比电激法高7~15倍。

综合分析国际文献报道,迄今已用农杆菌介导的基因转移获得成功的例子居绝大多数。其中根癌农杆菌占60.9%,发根农杆菌占18%,两者相加几乎达80%。然而,农杆菌具有宿主局限性,可侵染大多数的双子叶植物,但只感染少数单子叶植物,因而目前在获得转基因植物的54个物种中,单子叶植物只有禾本科4个种。由此看来,大多数禾谷类作物的基因转化仍是当今植物基因工程急需攻克的难关。由于超声波法无基因依赖性,应用该法在禾谷类作物遗传转化方面做了不少尝试,并取得一定的进展。清华大学生物科学与技术系和北京农业大学生物学院合作,以小麦幼胚(农大146号和京红5号)为外植体,将小麦幼胚置超声小室中,加入含PBI121质粒及鲑鱼精DNA的超声缓冲液,以0.5~2.0(W/cm<sup>2</sup>)脉冲超声波处理20~45min。处理后的幼胚在幼胚培养基上培养3个月后,超声处理后的幼胚分化出的愈伤组织中检测出GUS基因的表达,表达的最高频率达到67%。进一步由愈伤组织分化出的部分苗中,也检测到GUS基因的表达,而且就GUS基因表达率而言,品种间无明显差异。同时,他们还将玉米(*Zea mays* L. cv. HL)幼胚进行超声处理,将幼胚置超声小室中,加入含PBI121质粒及小牛胸腺DNA的超声缓冲液,经0.5~1.0(W/cm<sup>2</sup>)的脉冲超声波作用15~45min后,转到含2.0mg/L 2,4-D的N6培养基中培养,10d后,在诱导出的愈伤组织中检测到GUS基因的表达,最高频率达40%。实验结果表明,超声波作用的时间和强度以及幼胚状态对转化频率均有影响。

为了探索超声波法在动物细胞及微生物细胞上基因转化应用的可能性,清华大学生物科学与技术系做了大量实验。他们以0.5~2.0(W/cm<sup>2</sup>)脉冲超声处理海藻细胞、红细胞、酵母细胞以及人体肺癌细胞,并分别将外源荧光物质钙黄素导入以上细胞。这一实验结果表明,超声波法将在更广泛的领域中得到应用。

对于一个成熟、实用性强的转基因系统而言,必须具备以下条件:(1)高效,即获得转基因植株的频率高;(2)重复性高,即易于重复;(3)简易,即设备简单,易于操作;(4)快速,即由转化至获得转基因植株的时间相对较短;(5)无基因依赖性,即方法适用范围广,能在同一个植物种的许多基因型上成功,特别是在优良的栽培品种上成功。因为转基因的目的常常是希望以一个优良的栽培品种或有希望推广应用的品种(或品系)作起始材料,转进一个特定的目的基因,如抗病、抗虫基因等,使转基因植物既保留原有的各种优良农艺性状,同时又有新的目的基因控制性状。由于对超声波诱导基因转移的机理尚未研究清楚,目前在应用方面还存在着许多问题。为了进一步完善超声波转基因系统,使其具备高效、重复性高、简易、快速、适应性广五大特点,近年来,清华大学生物科学与技术系和中国农科院生物中心细胞室合作,对超声波法的机理进行了探讨。他们在报告中初步认为,超声波的空化作用可能是造成基因转移的主要原因。空化作用发生时,可以使细胞膜产生局部的和暂时的结构改变,造成一系列的穿孔效应,溶液中的DNA分子可以借此扩散进入细胞。另外,在空化中心会产生局部的高温高压,这也可能使细胞壁产生局部穿孔,使得DNA分子能够进入带壁细胞。在高等植物的许多组织中,细胞间的通道里往往存在着许多微小的气泡,这些气泡在超声波作用下将成为空化中心,从而对周围的细胞发生作用。由于这种气泡是普遍存在的,这就使得大量的细胞都能感受到超声所引起的空化作用。这可能是利用植物组织块进行超声基因转移效率比较高的重要原因。Potrykus在讨论作物基因转移中曾假设植物的细胞可分成对再生和转化呈感受态、或潜在感受态以及非感受态细胞。只有对再生及转化呈感受态的细胞才能产生转基因

植株。尽管这种假设还缺乏直接的实验证据,但若诱导因子能使更多的细胞摄入外源DNA,则细胞整合外源基因并再生成个体的机率也就越大。在超声处理中,由于超声波的反射和折射造成植物组织感受面积大,从而增加呈感受态的细胞,这也可能是造成基因转移频率比较高的原因之一。

超声波法确实是一个值得研究、很有前途的基因转移方法。今后主要的方向是弄清机理,在超声仪和转化系统上不断改进和完善,使其成为基因工程中基因转移的有力手段。

#### 参考文献

- 1 贾士荣,江苏农业学报,1990,6(1):44~47
- 2 许宁,等,生物物理学报,1990,6(2):281
- 3 Joersbo et al. Plant Cell Reports, 1990,9:207~210
- 4 Potrykus I. Biotechnology, 1990, 535~542
- 5 许宁,等,第四次全国基因结构、克隆与表达学术讨论会文集,1991.3
- 6 章力建,等,中国农业科学,1991,24(2):83~89
- 7 Zhang Lijian, et al. Biotechnology 1991,9(10)

(中国农业科学院生物技术研究中心  
陈乐玫副研究员撰;章力建审)

### 基因枪转基因技术

the technology of microprojectile bombardment gene transfer 高速基因枪是用于把外源基因直接导入细胞和组织的微粒子枪。基因枪转基因技术是美国 Sanford 等于1987年建立起来的。其后许多实验室报道了载有外源DNA的微粒子可被直接导入带壁植物组织和细胞,它不受寄主的限制,无基因依赖性,从而使许多难以导入外源基因的重要粮食作物的基因转化成为现实,推进了植物基因工程的进展。

自1987年Sanford等报告基因枪转基因技术以来,许多实验室对其机理和转化系统进行了研究。现已基本弄清其作用机理,并已在玉米、大豆等作物上获得转基因植株。

基因枪转基因的基本原理是有一套加速系统。最初是以火药爆发气体推进一颗塑料射弹,使其达到350~680m/s的高速。塑料射弹由前端的挡板止住,挡板中央有一小孔,射弹前端面上附着的载基因粒子(通常是金粒或钨粒)在冲击波及惯性的作用下高速通过小孔射向组织细胞,穿透细胞器膜,留在细胞器中,从而将外源基因导入细胞并整合到核基因组或细胞器基因组。也可利用弹前冲击波直接发射载基因微粒子,以获得更佳的分散度和力度。由于采用的微粒子化学上惰性的超细金属粒子,因此,大部分细胞被轰击转化后仍能正常生长发育,机械损伤至死的细胞很少。因此适用于各种植物组织细胞,如花粉、胚胎、叶片、分生组织和悬浮细胞培养物。

运用基因枪转基因技术,首先是成功地向外源基因导入洋葱、玉米、水稻和大豆细胞并获得短暂表达。在这之后,大量的报道集中在大豆和玉米两种作物上。MaCabe等报道,他们获得0.05%的大豆转基因芽,进而获得转基因植株。外源基因在大豆的花粉和子房中得到稳定表达,并且以无基因依赖性而优于以农杆菌为介导的大豆转化系统。Gordon-Kamm等成功地将抗除草剂基因导入玉米胚性悬浮细胞和胚性愈伤组织。经基因枪处理的细胞先放到不含除草剂的培养基中培养一段时间,再放到含适量除草剂的培养基中进行筛选培养,最终获得转基因植株。经分子杂交检测证明,抗除草剂基因已整合到玉米的基因组中,并已遗传到R1代。许多实验室应用这一转化系统,将外源基因导入棉花、大麦等作物细胞。

由于应用基因枪转基因技术在一些重要农作物的遗传转化上获得成功,引起生物学家、生物物理学家的普遍重视,近年来使这一技术不断完善和发展。

首先对基因枪本身做了许多技术上的改进,在火药爆发气体加速的基础上,又发展了其它加速系统。如电子发射技术,是利用电子控制水滴或突然释放压缩气体或氮气产生冲击波,对微粒子进行加速。Sautter等设计一种气体脉冲装置直接加速DNA

悬浮物,而不用微粒子载体。应用这种装置可以击中很小的组织面积,如小麦幼胚盾片,结果3%的细胞在1mm<sup>2</sup>的范围内获得报告基因的表达。PDS-1000/He(Bio-Rad 实验室)是近来发展的一种系统,它利用突然释放氮气压缩气体产生冲击波加速一个小薄塑料片进入金属滤网,而载有外源基因的微粒子用乙醇悬浮在小塑料片表面。Sanford 等应用这一装置对一些细胞和组织进行基因导入。通过实验,他们发现,与火药喷射气体加速装置相比,应用 PDS-1000/He 能提高微粒子的分散程度,减少受体细胞的损伤,从而提高基因转化频率。此外,他们又推出新型的 PDS-1000/He,这种装置不必将组织置于真空中,并能用手控制。通过变换不同长度和大小喷嘴通向不同的器官。由于可用手控制喷嘴接近受体组织,缩短微粒子的射程和减轻微粒子之间的摩擦,从而减少软组织的创伤,因此已用于活体动物及组织细胞的基因导入。中国科学院生物物理所姚山麟设计的 JO-700 型基因枪,采用密封样品室,减少对受体组织的污染,是目前世界上唯一的不必放在超净台内工作的基因枪。中国科学院微生物所燕义唐等用该基因枪将 RSV 外壳蛋白基因导入水稻悬浮细胞系,在含抗生素 G418 的培养基上筛选培养两个月后,获得大量绿苗。经 ELISA 分析及 Southern 检测证明,RSV 外壳蛋白基因已整合入水稻基因组。

1990 年以来,中国农业科学院生物中心细胞室陈乐玖用 JO-700 型基因枪已将 PBI121 质粒导入小麦悬浮细胞,及小麦幼胚,并获得短暂表达。基因枪转化的小麦悬浮细胞及幼胚在含适量 G418 抗生素的培养基中进行筛选培养两个月,在诱导出的愈伤组织细胞及分化再生植株的叶片中,仍能检测到很强的报告基因表达。在此研究基础上,将愈伤组织进一步选择培养,最终获可育的小麦转基因植株。Southern 检测证明,GVS 基因已整合到小麦基因组中。R<sub>1</sub>代 G18 抗性测试表明 NPT I 基因的传递符合孟德尔单基因显性遗传规律。

Paul christou 等通过电子发射技术加速载有 DNA 的微粒进入水稻幼胚,获得水稻转基因植株,经分子杂交检测当代的及 R1 的植株,证明外源基因已整合到水稻基因组,并遗传给后代。

在弄清基本原理的基础上,对影响转化频率的因素进行了研究。综合文献报道,影响转化频率的主要因素有(1)微粒子的冲量;(2)外源 DNA 量;(3)受体细胞单位面积所导入的微粒子量;(4)受体细胞的生理状态。而各因素都是受仪器不同条件控制,如微粒子的冲量与加速微粒子冲击波与微粒子形状、大小、样品室的真空度及微粒子的射程有关。对他们之间的关系进一步研究的结果表明,在高真空条件下,微粒子通过较长的射程可保持高速,因此说明,样品室的真空度、射程长短及样品所处的位置是基因枪的重要参数,可直接影响基因的转化频率。

随着不同类型基因枪的推出,基因枪转基因技术的应用的范围越来越广。文献报道,应用基因枪技术已扩展到可以将外源基因导入高等植物的组织器官、微生物及活体动物。

由于线粒体和叶绿体很难进行基因转化,因此对其研究受到阻碍。而应用基因枪可将外源基因导入线粒体和叶绿体,从而为深入这方面的研究提供手段。

应用基因枪转基因技术已将外源基因导入真菌和细菌细胞,如将外源基因导入使水稻胚细胞致病的真菌。以往对一些重要微生物的研究,由于很难被转化而受到限制。基因枪转基因对这一领域的研究提供了有效的方法。

基因枪在活体动物、动物细胞和器官、昆虫遗传转化方面的应用进展很快。据报道,用基因枪已将报告基因导入活体动物的皮肤、肝脏及肌肉组织,并获得表达。另外,应用基因枪还将外源基因导入鱼卵、果蝇幼虫。基因枪处理的鱼卵,70%存活并孵出幼虫,5%的幼虫检测到  $\beta$ -gal 基因的表达。报告基因导入果蝇幼虫并获得高频率表达。

基因枪转基因技术已成功地应用于许多物种及不同的组织、细胞、器官的基因转化。没有基因枪转基因技术的发展,许多重要作物的基因工程育苗的成功,如玉米转基因植株的获得是不

可能的。大量成功的例子证明,这一技术对动物的、植物的基因工程发展起了推动作用,特别是这一技术的应用已扩展到活体动物、器官、昆虫、鱼卵和幼虫的基因转化,预示着基因枪转基因技术在基因治疗、遗传免疫等研究领域也有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- 1 Klein T M, et al. High-relocity microprojectiles for delivery of nucleicacids into living cells, 1987
- 2 Sanford J C, et al. J Part Sci Techorol, 1987, 5: 27~37
- 3 McCabe D E, et al. Bio/Technology, 1988, 6: 923~926
- 4 Klein T M, et al. Bio/Technology, 1988, 6: 559~563
- 5 Baldarelli R M, et al. Nuc, Acid Res, 1990, 18: 5903~5904
- 6 McCown B H, et al. Plant Cell Reports, 1991, 9: 590~594
- 7 Vasil V, et al. Bio/Technology, 1991, 9: 743~747
- 8 燕义唐,等.表达水稻条纹病毒(RSV)外壳蛋白基因的转基因水稻植株全国植物分子生物学学术讨论会论文摘要汇编, 1991, 11(杭州)

(中国农业科学院生物技术研究中心  
陈乐玖副研究员撰;姚山麟审)

**酶工程** 酶是生物体内进行自我复制、新陈代谢所不可缺少的生物催化剂。由于酶能在常温、常压、中性 pH 等温和条件下高度专一有效地催化底物发生反应,所以酶的开发和利用是当代技术新革命中的一个重要课题。酶工程主要指自然酶制剂在工业上的大规模应用,由四个部分组成:(1)酶的产生;(2)酶的分离纯化;(3)酶的固定化;(4)生物反应器。酶工程是酶学、微生物学的基本原理与化学工程有机结合而产生的边缘科学技术。

人类对酶の利用源远流长,可上溯至几千年以前。一般认为酶工程的发展历史应从第二次世界大战后算起。从50年代开始,由微生物发酵液中分离出一些酶,制成酶制剂。60年代后,由于固定化酶、固定化细胞崛起,使酶制剂的应用技术面貌一新。70年代后期以来,由于微生物学、遗传工程及细胞工程的发展为酶工程进一步向纵深发展带来勃勃生机,从酶的制备方法、酶的应用范围到后处理工艺都受到巨大冲击。尽管目前业已发现和鉴定的酶约有8000多种,但大规模生产和应用的商品酶只有数十种。自然酶在工业应用上受到限制的原因主要有:(1)大多数酶脱离其生理环境后极不稳定,而酶在生产和应用过程中的条件往往与其生理环境相去甚远;(2)酶的分离纯化工艺复杂;(3)酶制剂成本较高。因此,根据研究和解决上述问题的手段不同把酶工程分为化学酶工程和生物酶工程。前者指自然酶、化学修饰酶、固定化酶及化学人工酶的研究和应用;后者则是酶学和以基因重组技术为主的现代分子生物学技术相结合的产物,主要包括3个方面:(1)用基因工程技术大量生产酶(克隆酶);(2)修饰酶基因产生遗传修饰酶(突变酶);(3)设计新的酶基因合成自然界不曾有的新酶。

1971年,第1次国际酶工程会议在 Hennileer 召开,当时酶制剂已广泛用于工业和临床。如千畑等人将固定化氨基酸化酶拆分氨基酸技术用于工业化生产 L-氨基酸,开创了固定化酶应用的局面,千畑也因此成为1983年酶工程会议受奖人。此后,固定化门冬氨酸酶合成 L-门冬氨酸、固定化葡萄糖异构酶(生产高果糖浆)等的工业化生产取得成功。固定化酶较自由酶具有很多优点:(1)稳定性高;(2)酶可反复使用;(3)产物纯度高,副产物少,从而有利提纯;(4)生产可连续化、自动化;(5)设备小型化,节约能源等。因此固定化酶研究仍是酶工程研究的中心,其应用范围越来越广。除应用于传统的食品工业(乳糖的分解、乳糖制造、牛奶消毒、酒精生产等)外,在其他领域如有机合成反应、分析化学、医疗、废液处理、亲和层析等也获得广泛应用。

在固定化酶的基础上又逐渐发展固定化细胞的技术。近年来,后来居上的固定化细胞技术发展更为迅速,在实际应用方面已大大超过固定化酶。在工业应用方面,利用固定化酵母细胞发酵生产酒精、啤酒的研究较引人注目。日本 Toshio Onaka 等用海

藻酸钙凝胶包埋酵母细胞,可在一天内获得质量优良的啤酒。法国 Corriell 等将酵母细胞固定在聚氯乙烯碎片和多孔瓷等载体上进行啤酒发酵中型试验,可连续运转8个月。中国上海工微所等单位也从70年代后期进行过类似的研究工作,用固定化酵母发酵啤酒的规模不断扩大,已正式投入大规模生产。

以往对微生物细胞固定化的厂家多集中在细菌和酵母。然而,很多具有工业生产价值的代谢产物(如酶、抗生素、有机酸和甾体化合物等)都是由丝状真菌生产的。目前用于固定丝状真菌的方法主要是吸附法和包埋法。但包埋法由于限制了足够的氧气供给细胞,使固定化丝状真菌生产代谢产物的效率非常低。瑞典 Mosbach 等得出一种利用高分子聚合物包埋各种细胞的通用的固定化方法,能固定细菌、酵母、动植物细胞及人工组建的细胞,生产各种代谢产物。1984年,他们曾用琼脂糖胶分别包埋杂交瘤细胞 LSP<sub>21</sub> 和淋巴细胞 MLA<sub>144</sub> 生产单克隆抗体和白细胞间质素。1980年, Wagner 等人报道,将大肠杆菌 ACTT11105 的青霉素酰化酶基因克隆到质粒上,获得产酶活力更高的大肠杆菌 5K (PHM12) 杂交株,并将此大肠杆菌杂交株固定,用于生产青霉素酰化酶。这是基因工程与酶工程相结合的第一例。近年来,有关藻类等各种植物细胞、原生动物的各种动物细胞固定化研究十分活跃。1980年, Lim 和 Sun 报道,用海藻酸钙包埋胰岛细胞可用于大白鼠糖尿病的治疗研究。

酶制剂的应用并不一定都需要固定化,而且用固定化的天然酶也仍有必要提高其活性,改善其某些性质,以便更好地发挥酶的催化功能。由此而提出了酶分子的改造和修饰。在第7届酶工程会议上以酶分子改造和修饰为主要内容的提高酶稳定性的研究占较大比例,它与基因工程的应用、活细胞的固定化一起,成为1983年酶工程会议最为活跃的三大领域。通常将改变酶蛋白一级结构的过程称为改造,而将酶蛋白侧链基团的共价变化称为修饰。酶分子经加工改造后,可导致有利于应用的许多重要性质与功能的变化。如德重等人利用蛋白水解酶的有限水解作用,已将 L-门冬氨酸酶的活力提高3~5倍。美国 Davis 等人还利用蛋白质侧链基团的修饰作用研究降低或解除异体蛋白的抗原性及免疫原性,以聚乙二醇修饰治疗白血病的特效药 L-门冬酰胺酶,使其抗原性完全解除。

在酶工程研究中,与酶分子本身不直接有关的有两项重要内容:酶生物反应的研究和酶抑制剂的研究。酶生物反应器往往可以提高催化效率、简化工艺从而增加经济效益。结合固定化技术,业已发展成酶电极、酶膜反应器、免疫传感器及多酶反应器等新技术。这在化学分析、临床诊断与工业生产过程的监测方面成为很有价值的应用技术。酶抑制剂,尤其是微生物来源的酶抑制剂多是重要抗生素。酶抑制剂还可在代谢控制、生物农药、生物除草剂等方面发挥特殊作用,其低毒性倍受人们欢迎。酶抑制剂的开发业已受到国际产业部门的重视。

从酶工程的进展和动态中可以预料,今后将会出现一批基因工程表达的酶制剂,亲和层析技术仍将得到广泛应用,并会出现一个应用经分子改造与修饰的酶制剂的热潮。异体酶的抗原性将得到解决。在酶活性的控制方面将会有较大突破,其中酶抑制剂与激活剂仍将受到极大重视,并在临床及工农业生产中发挥重要作用。在化学合成工业中,酶法生产将有重大贡献,模拟酶、酶的人工设计合成、抗体酶、杂交酶将成为活跃的研究领域。非水系统酶反应技术(反向胶团中的酶促反应,有机溶剂中的酶反应)也仍将是研究热点之一。

(山西大学分子科学研究所郝军山撰)

### 核酸分子杂交技术

technic of nucleic acid molecular hybridization 核酸分子杂交技术是根据同源 DNA 或 RNA 片断能互补杂交的原理而设计的一种诊断技术,是诊断传染病、遗传病的重要手段之一,在生物学和医学上有着广泛的应用前景。

1975年,斯莫森(E. M. Southern)首先创用 DAN 分子鉴定和杂交方法;1977年,阿维因(J. C. Alwine)建立 RNA 分子鉴定

和分析的 Northern 杂交方法;1978年,布拉希克(M. Brahic)建立基因定位和表达的原位杂交技术;1979年,瓦那斯(R. B. Wallace)建立分析 DNA 的寡核苷酸杂交方法;1980年,布朗兹玛(J. Brandsma)建立点杂交技术。

核酸分子杂交技术,由探针制备、样品处理和杂交反应3部分组成。

**探针制备** 在掌握目的 DNA 核苷酸序列基础上,应用分子克隆技术,将目的 DNA 序列扩增,亦可由 DNA 合成器制成含数十对碱基的寡核苷酸探针,用标记物加以标记,即可使用。新制备的单链 DNA 探针在正式使用前,应做性能试验观察效果。

**样品处理** 一般过程是浓缩样品,加去垢剂和蛋白酶,使样品中 DNA 释出,再经碱变性和加温,使 DNA 解离为两股单链,结合在硝酸纤维素膜或其它载体上。

**杂交反应** 将探针与样品在一定条件下杂交、漂洗。若样品不含目的 DNA,则探针被漂洗掉,载体上无标记物检出;若样品含目的 DNA,则探针与之杂交结合,不被漂洗掉,载体上可检出标记物。这一步涉及的因素有离子强度、pH、温度、反应时间、探针浓度和纯度等。

与传统检测技术相比,本技术由于仅与同源核苷酸序列杂交,而具有高度特异性;同时具有高敏感性如能检出含菌量仅为1000个或1μl血含25个恶性疟原虫的样品等。对于传染病,它能在可测抗体水平出现之前,检出病原体 DNA。即绕过基因产物(酶或蛋白质),直接检测基因进行诊断,因此其作出诊断的时间和检验过程所需的时间均明显缩短。此外,还具有重复性好,一次检测大量样品等优点。

这项技术在以下3个方面得到日益广泛的应用:

**传染病诊断** 用于检测目的病毒核酸,包括 EB 病毒、单纯疱疹病毒、乙型肝炎病毒等50种以上探针;在检测致病菌方面,已用于致病性大肠杆菌、结核杆菌、军团菌等多种细菌的检测,仅淋球菌即有质粒 DNA 探针、染色体 DNA 探针和 RNA 探针;在寄生虫学方面,用于锥虫、恶性疟原虫、黑热病原虫等检测。

**产前基因诊断** 用于血红蛋白病、血友病、苯丙酮尿症、舞蹈病等20多种遗传病的产前诊断。为实现人类优生目标开拓了崭新前景。

**人类个体身分鉴定** 用于运动员性别鉴定、亲子关系鉴定、罪犯身分鉴定;阵亡现役军人身分确定疑难者的鉴定;以及用于人类学、考古学、民族迁徙史等方面的研究。

该技术在实践中不断得到改进和发展。探针标记物,由放射性同位素发展为生物素、光生物素、化学发光物(吖啶酯等)和酶等;在探针方面,除 DNA 探针外,还研制出 RNA 探针;样品处理和杂交,应用高浓度硫氰酸胍,直接使细胞裂解释出核酸和解链,形成适宜直接杂交的液相环境,简化了操作过程,使整个技术朝着灵敏、快速、简便的方向发展。

1985年穆利斯(K. B. Mullis)和塞基(R. K. Saiki)等建立聚合酶链反应(Polymerase chain reaction PCR)。PCR 能在体外通过 DNA 聚合酶将目的 DNA 序列快速扩增10<sup>6</sup>倍,使极微量目的 DNA 扩增到可检测水平。这项技术使实验室获取目的 DNA 序列的工作变得简便而快速,使核酸分子杂交技术的敏感性和应用范围有了突破性进展,其灵敏度可达10<sup>-15</sup>g 水平。

核酸杂交技术作为“20世纪生物学一项杰出成就”,在相关领域有着十分广阔的应用和发展前景。

#### 参考文献

- 1 Southern E M. J Mol Bio, 1975, 98, 503
- 2 中国医学百科全书. 医学遗传学分卷. 上海, 上海科学技术出版社, 1984, 157
- 3 Saiki R K, et al. Science, 1985, 230, 1350
- 4 Thompson J, et al. Anal Biochem, 1987, 163, 281
- 5 Arnold Jr LT, et al. Clin Chem, 1989, 35, 1588
- 6 蓝鸿泰. 中华医学检验杂志, 1991, 6, 362~365

(南京雨花台区卫生防疫站戴启明副主任技师撰)

**核酸杂交技术** 1957年华尼尔(Warner)等首先发现polyA(多聚A)与PolyU(多聚U)能形成稳定的双链结构,但当时未引起人们的重视。直到1960年多堤(Doty)等发现肺炎双球菌的双链DNA可以通过物理的方法解离成2条单链,又要再聚合形成双链。这才使斯匹捷尔曼(Spiegelman)等按照氢键作用原理创建了核酸杂交技术。在此之前,人们对大分子核酸只能进行浮力密度、稀有碱基、碱基组成、 $T_m$ 值、感染力等特性测定。核酸杂交技术的建立,在核酸的研究领域内,增添了一个有力的分析和制备工具。已发展成为一项纯化特异核酸片段,比较核酸顺序,测定转录水平和研究基因表达的重要技术。在基因工程领域中,对重组DNA的检测,DNA重组载体的筛选和鉴定等,是一项极重要的技术。

1. 核酸杂交液相杂交的进展:液相法是斯匹捷尔曼(Spiegelman)等最先使用的一种核酸杂交方法。他们把DNA和互补的RNA混合在溶液中进行杂交反应,然后用氯化铯平衡密度梯度离心法分离出杂交链。由于在反应中会形成一些非互补的双链称为“端”和“环”。因而测定结果不太准确。后来作者加用RNase处理杂交后的混合物,结果降解了“端”和“环”,增加了杂交反应的特异性。1963年哈尔(Hall)等发现硝酸纤维素滤膜对单链DNA和DNA:RNA杂交链有特异的吸附能力,从而用滤膜过滤法取代了费时的氯化铯超离心法。但是在进行液相法DNA/RNA杂交时,DNA的再聚反应将使单链DNA的浓度下降,不利于DNA:RNA杂交链的形成。1971年斯西巴尔史(Szybalshi)等用不相互补的DNA单链来进行DNA/RNA杂交,克服了DNA再聚的缺点。同时又发挥了液相法中分子碰撞几率大,杂交反应时间短,产率高等优点,使液相法有了新的发展。

2. 固相杂交的进展:1963年尼格尔德(Nygaard)和哈尔(Hall)在研究RNA:DNA杂种分子时,发现存在于氯化钾溶液中的变性DNA(单链)和RNA:DNA杂种分子,通过滤膜时能被滤膜吸收,变性DNA的吸收率达90%以上。而未与DNA杂交的RNA以及天然的未变性DNA,则不被滤膜吸收。1965年吉利斯匹(Gillespie)等利用这一现象,设计了在滤膜上进行DNA/RNA杂交的方法。随后登哈德(Denhardt)又将此项技术引进到DNA/DNA杂交研究中。在滤膜上杂交操作的一般步骤是,溶解在盐溶液中的DNA经过加热或使用碱液变性之后,在预先经盐溶液浸泡洗涤过的滤膜上滤过。变性的DNA便吸收到滤膜上。洗涤滤膜,经过室温干燥之后,再真空加热至80℃进一步干燥。将此滤膜浸入含有放射性同位素标记的已变性的探针DNA混合液中,在保温下进行杂交,反应完毕,充分洗涤滤膜,干燥后计数测定或用放射自显影检查结果。滤膜上杂交遇到地最大问题,是在杂交反应时,一些未与滤膜上DNA杂交的探针DNA,也被滤膜吸收,造成本底过高导致结果不可靠。为尽可能减少探针DNA非杂交的吸收在滤膜上,采取了下列措施:(1)处理滤膜,在杂交反应之前,将已含有DNA的滤膜先浸入登哈德(Denhardt)(由蔗糖、聚乙烯吡咯酮、牛血清白蛋白和盐溶液配制而成)溶液中,在65℃保温6h,经过这样处理的滤膜,本底可由原来的80%降低至0.64%,而且对杂交反应影响不大。(2)使用合适的杂交反应溶液,以期达到尽量减少本底又不妨碍杂交反应的目的,狄马利(Demare)在对探针DNA的 $2 \times SSC$ (0.3mol/L氯化钠、0.03mol/L柠檬酸三钠)杂交溶液中,加入终浓度为30%的二甲亚砷,再以此溶液洗涤杂交后的滤膜,本底可降低至0.4%,达卫德(Dawid)将终浓度为50%甲酰胺加至杂交反应溶液中,并用50%甲酰胺的 $2 \times SSC$ 溶液洗涤滤膜,本底可降低至0.01%,杂交反应温度由原来的65℃降低至37℃。库利尔斯基(Kourilsky)使用含8mol/L尿素或50%甲酰胺的 $2 \times SSC$ 溶液,于40℃进行杂交反应也取得良好效果。(3)用合适的溶液洗涤杂交后的滤膜,除了上述用含有二甲亚砷或甲酰胺的溶液洗涤外,华尔纳尔(Warnear)还采用低离子强度,低 $H^+$ 浓度溶液( $3 \times 10^{-3}$ mol/L Tris-HCl  $3.98 \times 10^{-10}$ mol/L)洗涤滤膜,本底降至

0.004%。

3. 杂交作用方式的进展:(1)饱和杂交和竞争杂交:两者都建立于1962年,前者是固定了DNA的用量,然后逐渐加大互补RNA的用量而进行的一系列杂交反应。当RNA用量加大到杂交链不再增加时,就过饱和,后者是采用2种不同标记的RNA来竞争同一DNA。先固定DNA和第1种标记RNA的用量,然后加入用量逐渐增大的第2种RNA,从第2种RNA对第1种标记RNA的取代与否,可以判别2种RNA的顺序是否相同。(2)预饱和和竞争杂交:1967年卡色(Kasai)等用固定量的DNA滤膜,先和一系列用量渐增的未标记RNA作用,使达饱和。然后在各张滤膜上再加入足以饱和DNA的定量标记RNA来竞争。此法的分辨力比竞争杂交强。(3)彻底杂交:按1968年斯匹捷尔曼(Spiegelman)所述用固定量的RNA和一系列不同量的DNA滤膜杂交,在某一DNA量下,杂交反应不再增加就达到了彻底杂交。(4)夹心式杂交:1968年福吉纳格(Fujinaga)选用未标记的RNA饱和DNA滤膜,再加入同种标记的DNA进行再聚。从标记DNA与固定在滤膜上DNA的再聚量,即可知RNA的杂交量。(5)多步杂交:1971年波弗瑞(Bovre)等推广应用,这一技术是成功地将对放射性标记的RNA,从各种杂交链的DNA不洗脱下来,然后再重新与DNA杂交。如此反复多步杂交即可增加核酸杂交的特异性,但操作较繁琐。(6)PolyA杂交:已知哺乳动物mRNA、HnRNA均具有polyA顺序。1969年爱狄门茨(Edmonds)等利用这一特征发展了PolyA杂交法,这一方法对纯化、测定mRNA有独特的功效。(7)连续杂交:1973年施赫(Shih)等用固化RNA的纤维柱来提取相应的DNA。由于DNA是液相的,它的自身聚反应降低了DNA与RNA的杂交效率。作者使用了一个封闭的装置,使从RNA纤维柱上流出的再聚比链DNA的另一根变性柱中,再解聚成单链。然后重新被压回到RNA纤维柱上进行反应。这种连续杂交既能使40—50%的相应DNA形成杂交链,又具有高度的特异性,是纯化基因的一种方法。(8)DNA印迹转移杂交(Southern Hybridization):基因组DNA经限制性内切酶消化后,用琼脂糖凝胶电泳分离的DNA片段变性,然后转移至硝酸纤维素膜上并固定之,DNA片段在凝胶中的相互位置仍保留在滤膜上。用 $^{32}P$ -标记的DNA或RNA与固着在滤膜上的DNA杂交,然后用放射自显影术确定探针互补序列的位置,即所要定位的DNA序列的位置。Southern转移技术不仅通用于确定特定序列在克隆DNA中的位置,也能用于鉴别真核基因组DNA消化物中的特定序列,适用于对基因组DNA和DNA克隆片段的分离和纯化。(9)RNA印迹转移杂交(Northern Hybridization)分离纯化的RNA,用琼脂糖凝胶电泳分离RNA,已变性的RNA,按Northern转移技术,将RNA转移到硝酸纤维素膜上并固定之,用 $^{32}P$ -标记的DNA或RNA探针与固着在滤膜上的RNA杂交,然后用放射自显影检测探针互补的RNA序列。(10)点杂交(Dot Hybridization):1979年卡发多斯(Kafatos)等将纯化的少量RNA样本点到干燥的硝酸纤维素膜上,干燥固定后,用 $^{32}P$ -标记的DNA或RNA探针杂交,经放射自显影确定杂交的结果。(11)原位杂交:1967年弗兰迟(French)等首先在细胞水平上建立了原位杂交技术。他们把细胞染色体固定在载玻片上,与氘标记的互补DNA杂交,然后用放射自显影法对杂交位置做出鉴定。原位杂交技术,最初用来确定许多物种基因组内大量重复序列在染色体上的位置,随着技术的发展,成为研究基因在细胞核内的空间组编方式,及其在分化和发育过程中作用和表达方式等重要课题的有效手段。在染色体上基因定位的研究中,另一种重要改进是把染色体分带技术与原位杂交技术结合使用。这些方法,包括用胰蛋白酶或1%Lipso去垢剂处理后把姬姆萨分带的染色体预先拍照,或者在杂交反应以后用喹啉因芥子将染色体染色以获得Q带。此外,在杂交和放射自显影以后只要用瑞氏-姬姆萨染色,总能在中期染色体得到G带图。在电子显微镜下进行观察时可用带胶体金标记的过氧化氢酶或蛋白质处理杂交探针,得到极高的空间分辨率。该方法的应用,使人

们能更准确的测定基因及其转录产物在染色体上的确切位置。用电镜法研究细胞或组织块连续超薄切片的杂交图象,将为构筑特异 DNA 序列在单个细胞内组编方式的三维图像提供可能。

参考文献

- 1 Nygaard A P, et al. J. Mol. Biol. 1964, 9: 125
- 2 Gillespie D, et al. J. Mol. Biol. 1965, 12: 829
- 3 Denhardt D T Biochem, Biophys, Res Comm. 1966, 23: 641
- 4 Southern E J Mol. Biol. 1975, 98: 503
- 5 Thomas P S Proc. Natl. Acad. Sci 1980, 77: 5201
- 6 White B A and F c Bancroft. J. Biol. Chem. 1982, 257: 8569
- 7 Kafatos F C et al. Nucleus Acids Res. 1979, 7: 1541

(中山医科大学杨英浩撰)

单克隆抗体与杂交瘤技术 monoclonal antibody and hybridoma technology

1975年,克勒(G. Koehler)和米尔斯坦(C. Milstein)报道了用细胞杂交技术将小鼠骨髓瘤细胞与预先用抗原免疫的小鼠脾细胞(淋巴细胞)进行融合,可产生能分泌预

定的、单一特异性的抗体(单克隆抗体,简称单抗)的杂交瘤细胞。此后,此项技术在生物学、医学的各个领域得到应用,并为抗体产生和免疫球蛋白(Ig)遗传控制及基因工程制造人单抗的研究提供有力的手段。

1890年,贝林(E. A. Von Behring)首先发现免疫动物血清中存在能特异性中和白喉毒素的抗体。其后人们试图制造纯一的抗体和分析机体对某种免疫原的抗体反应。杂交瘤细胞由于继承了双亲的特点,既保存了骨髓细胞能在组织培养中无限迅速增殖的特性,又继承了亲代 B 细胞能产生特异性抗体的特性。这一技术的优点为:(1)特异性高。(2)供应量无限。(3)可用不纯抗原进行免疫获得纯抗体。(4)只要该抗原能在动物(如小鼠)中引起免疫反应,就有可能获得(拯救)所有特异性的抗体。(5)提高特异性 B 细胞的比例 10~100 倍。(6) B 杂交瘤能产生高分泌量的抗体,且与原 B 细胞是否高产无关。(7)抗体可以人工操纵、改造,如可将两种特异性的杂交瘤再次融合产生能分泌双特异性抗体的杂交瘤。(8)此原理已成功地应用到 T 细胞杂交瘤技术,以拯救 T 细胞的功能。下表简要说明单抗应用实例。

表1 单抗应用实例

| 用途           | 应用领域        | 实例                            | 报告人                            |
|--------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 分析抗原         | 细菌          | 使易于分类                         | Polin, 1980                    |
|              | 病毒          |                               | Flamand 等, 1980                |
|              | 寄生虫         |                               | Mitchell 等, 1980               |
|              | 细胞          | 至第四次国际人白细胞分化抗原会, 已有 78 种白细胞抗原 | Küapp 等, 1989                  |
|              |             | 组织相容性抗原分型                     | Steven 等, 1989                 |
| 纯化           | 因子 激素       | 干扰素浓缩(500倍)                   | Schulman 等, 1978               |
|              | 细胞膜         | 大鼠 Ia 抗原的浓缩(200倍)             | McMaster 等, 1979               |
| 测定和检定        | 粗制混合物       | 妊娠试验中测定人绒毛膜促性腺激素(HCG)         | Miggiano 等, 1980               |
| 表位分析<br>改变调节 | 抗原决定簇       | HIV-lmf 蛋白                    | Shi 等, 1991                    |
|              | 感染性         | 伯氏疟原虫(Plasmodium berghei)孢子虫  | Yoshida 等, 1980                |
|              | 毒性          | 地高辛过量                         | Mudgett-Hunter 等, 1980         |
|              | 功能          | 抗 Ly2 抑制性 T 细胞杀伤              | Hollander 等, 1980              |
| 选择           | 免疫原性        | 抗 Rh 因子                       | Koskimies 等, 1980              |
|              | 抗独特型        | 抗 NP 免疫反应的增强和抑制               | Reth 等, 1981                   |
|              | 突变体         | 组织相容性抗原                       | Holtkamp 等, 1981               |
| 定位           | 在器官中        | 甲型流感病毒                        | Gerhard 等, 1978                |
|              | 在体内         | 水蛭的神经系统                       | Zipser 等, M1981                |
| 免疫治疗         |             | 人体内肿瘤造影                       | Mach 等, 1991                   |
|              | 传染病         | Gram's 阴性菌引起的败血症              | Ziegler 等, 1991                |
|              | 抗排斥反应<br>肿瘤 | 肾移植后的排斥反应<br>恶性肿瘤的治疗          | Reinke 等, 1991<br>Dyer 等, 1992 |

有关杂交瘤技术 (1)免疫方法:许多不同的免疫方法和程序均有成功的报告,值得一提的是1984年施皮茨(m. spitz)的脾内免疫法,如果采用不开腹手术注射法更便于推广。此外,体外免疫法不仅对制造小鼠单抗有用,而更适合于制造人单抗。人 B 细胞体外免疫加氨基酸酯效果更为显著。这可能是产生分泌人单抗杂交瘤的成功关键。(2)提高融合率:如1984年罗(M. M. S. Lo)等及1985年卡斯腾(U. Karsten)等采用电融合法提高融合效应。1986年以来,史良如等在融合前将骨髓瘤细胞注射于小鼠皮下使之产生实体瘤,然后分离出瘤细胞进行融合的“活体瘤”法,可提高融合的成功率。1983年,西拉刚尼安(R. P. siranganian)等将加强免疫后的 B 细胞在融合前先注射到经放射处理的小鼠中,使特异性 B 细胞率放大,产生特异性单抗的杂交瘤率提高50倍。也有用“抗原-聚焦”融合法的,即将抗原共价结合到骨髓瘤细胞上再进行融合,以提高特异性杂交瘤产生率。(3)改进筛选方

法:迅速、正确地筛选出所需杂交瘤并及时克隆化,是杂交瘤技术成功的又一关键,其方法可按要求而异,如只需高滴度的和高亲和力的抗体,则可将杂交瘤上清液先稀释10~100倍,然后进行筛选,以很快去掉低产者;如只需某些类、亚类的单抗,则可应用特异性抗该 Ig 类、亚类的标记二抗来选择。此外,荧光活化细胞分类仪(FACS)的应用,大大加速了抗细胞表面单抗的筛选和分析。

单抗的大量生产技术 虽然鼠类腹腔培养杂交瘤细胞的体内法不适合工业化生产,且腹水抗体用于治疗有很多缺点,因此极需发展单抗的体外培养法。生物反应器、旋转滚动瓶培养系统、全程序控制的旋转瓶系统、微囊法、中孔纤维器及发酵罐培养法竞相发展。微囊法是将杂交瘤细胞包于直径为0.5~3mm的砂藻土的囊中(囊的外壁有半透膜)进行培养,以生产纯抗体,这是很好的主意,可惜有的杂交瘤不易成功。中孔纤维培养系统模拟体

内毛细血管原理,将几百根很细的中孔纤维排列在圆柱体中,细胞在含有半透膜性质的中孔纤维间隙生长,其密度可达 $10 \times 10^8/\text{ml}$ ,是较有希望的方法。美国 Bioresponse 公司的牛淋巴液体外循环生产单抗法也是以此为基础。目前,大规模生产单抗最成功的还是发酵罐培养法。英国 Celltech 公司 1988 年投产的气升法发酵罐,年产量可达 15kg 单抗 Ig。当然,大规模生产单抗有赖于细胞培养液,特别是低血清和无血清培养液的发展。

**免疫毒素** 它是细胞结合性抗体和毒素(细菌毒素,为假单胞菌外毒素 A 及白喉毒素等;植物毒素,如蓖麻毒 A 链)的耦联物,在某些肿瘤的治疗上获得令人鼓舞的结果,理论上也适用于传染病(如 HIV 感染)、真菌病和寄生虫感染及自身免疫病的治疗。特别是用于自身骨髓移植时清除恶性 B 细胞及同种异体骨髓移植时去除供者骨髓中的 T 细胞可减少移植宿主病(GVHD),但对某些肿瘤,如乳腺癌、结肠癌等不那么理想。

**人单抗的研究** 人单抗一直令人感兴趣,其原因是:(1)对某些抗原(RhD HLA),鼠类不能识别或反应很差。(2)鼠类单抗作为肿瘤造影、肿瘤或自身免疫病等治疗及被动免疫时,在人体内可引起免疫反应,清除单抗的作用和引起受体的副反应。人单抗体内应用可大大减轻此弊病,而且更适合于人效应细胞。此外,人单抗的研究可获得有别于鼠类抗体库的知识。1977年,舒泰尼茨(M. Sretnitz)第一个成功地获得产生人单抗的永久化细胞系,但以后的进展缓慢。关键是应用常规的小鼠杂交瘤技术制造人单抗难以成功。因为用来融合的人淋巴细胞多来自外周血淋巴细胞(PBL),其活化的淋巴母细胞比例太低;人免疫方法受限制;缺乏合适的人融合伙伴;应用骨髓瘤细胞系进行融合成功者不多,只有两组报道,如 1980 年奥尔桑(L. Olsson)和卡普兰(H. S. Kaplan)融合 U-266AR1 和人脾细胞(以前免疫过的供者)获得抗 DNP 中抗原的 IgG 抗体。最早采用且现仍应用的 E. B (Epstein-Barr)病毒转化技术可使 B 细胞活化、分裂,以制造分泌抗细菌、病毒、血细胞(第 1 个人单抗,即舒泰尼茨报告的抗 RhD 单抗,即用此法制备)、肿瘤细胞和自身抗原的抗体。但转化的 B 细胞比例和抗体产量低,且细胞系不稳定。近年来,也有不少人采用人淋巴瘤细胞系(LCL)作为融合伙伴,如 GM 1500 及由此派生的 KR4、KR12、WI-L2-729-HF2 和 1991 年兰加帕(N. Rangappa)等从此系又衍化出的 HOA-1、HOA-20。不少学者也试图用小鼠骨髓细胞作为融合伙伴,产生异种杂交瘤,但人染色体 2(含 K 链基因)常优先丢失。因此,有人又设想先将人的和小鼠的骨髓瘤细胞融合成为异种骨髓瘤细胞系,选择出合适的融合伙伴,但至今人单抗技术仍不成熟,寻找合适的融合伙伴是当务之急。

**鼠单抗改造与人化单抗** 1992 年戴欧(M. J. S. Dyer)综述:(1)嵌合型抗体:可用蛋白工程法,即应用化学法将鼠类单抗的 VH/VL 及 CH1 和 CL(Fab)连接到人 CH2/CH3 片段(Fc)上产生保持有鼠类单抗的结构,但有人抗体的效应功能。用遗传工程法,即克隆的鼠类 VH-VL 的 DNA 片段(抗原-结合区,即互补的决定簇区,CDRs 和骨架区残基,FRs)可插入到有人 C 区基因的质粒上,然后转染到骨髓瘤细胞中产生抗体。(2)遗传学上改变了的人单抗,又称人化抗体。1988 年,里希曼(L. Riechman)等创立了这种技术,它不是移植整个 V 区,而正好是将编码 6 个高可变区的 DNA(即 CDRs)引导到人高可变区的 DNA 顺序中,它们很像鼠类单抗的 DNA 顺序,但抗原性更接近于人。CAMPATH-1(一种抗淋巴细胞单抗)已按此法进行改造,这种“人化技术”已成功地应用于其它单抗的改进,如抗 Tac-H。进一步,应用基因工程方法来制造人单抗。当然,这些成功很大程度上来自于人们已发现许多 VH 等功能区(domain)单独也能结合抗原的启发。单链抗体对治疗体内造影药物过量中毒有其独特的优点。最初的抗体基因来自杂交瘤,然后克隆并完整表达在哺乳类动物细胞上。1988 年姜(Y. L. Chiang)及 1989 年奥兰(R. Orlang)报告的将抗体基因直接从免疫动物的淋巴细胞克隆表达在细菌上,然后通过筛选与抗原结合的抗体的方法有可能越过杂交瘤技

术。进一步,1990 年麦克卡弗蒂(J. McCafferty)等证明在丝状噬菌体表面表达抗体片段的可能性,且能正确折叠和结合抗原,这一发现打开抗体制备的新路子。抗体基因库可用 PCR 法放大,并克隆到噬菌体中。这样便产生大量的噬菌体库,每个都显示一种抗原结合特异性(估计可达 $10^6 \sim 10^9$ 个)。进一步,马克斯(J. D. Marks)等 1991 年已证明,应用噬菌体表达技术已能用未经免疫的供体的噬菌体抗体(phage 抗体)库(来自人 PBL 中 IgG 和 IgM 的 mRNA)分离出特异性抗原的人抗体。这说明有可能用这些库分离直接抗“自身”的或其它非免疫抗原的人抗体而不需要动物。

杂交瘤技术已证明是有用的,成千上万个广泛范围的单抗已被制备出来,并应用于研究和人类的健康管理。但制备单抗费时,而且此法主要适用小鼠,制备大鼠的单抗虽也较成功,但制备人单抗至今仍未过关。基因工程发展至今日,已从正常的未免疫动物克隆抗体基因并在噬菌体中表达分离特异性的抗体片段,这是令人鼓舞的,这种克隆技术或噬菌体抗体能否作为克隆-米尔斯坦杂交瘤技术的补充还是代替物?是否这就是长期以来人们向往的获得人单抗的普通途径?真的不要免疫动物就能制造人单抗?简单回答这些问题还为时过早。

#### 参考文献

- 1 Koehler G, Milstein C. Nature, 1975, 256: 495
- 2 Milstein C. Science, 1986, 231: 1261
- 3 Koehler G. Science, 1986, 233: 1281
- 4 James J. Scand J Immunol. 1989, 29: 257
- 5 Spooner R A, Lord J M. Tibtech. 1990, 8: 189
- 6 Winter G, Milstein C. Nature, 1991, 349: 293
- 7 Dyer M J S. Eur J Cancer, 1992, 28: 276
- 8 Chiswell D J, McCafferty J. Tibtech, 1992, 10: 80

(武汉生物所博士生导师史良如撰)

**基因工程抗体** genetically-engineered antibody 用分子生物学 DNA 重组技术改造制备而得的抗体,80 年代在单克隆抗体(mAb)应用研究的基础上开始发展,为一种具有实际应用前景的生物技术。

自 1975 年杂交瘤技术的发展和运用以来,已有一系列与抗原呈专一性结合的单克隆抗体出现。由于 mAb 具有专一性优点,诱使人们将其应用于体内外研究和临床诊断治疗。在体外免疫化学特征和抗原定量方面的研究中,mAb 显示出它的优越性;但在体内的应用上受到很大的限制。由于人-鼠杂交瘤细胞株的建立进展缓慢或者不稳定,现应用的 mAb 大多数是用小鼠或大鼠杂交瘤细胞株制备的,而鼠蛋白对于人体来说是异源蛋白,临床病人接受 1~2 次治疗即引起人抗鼠抗体反应。虽然,将小鼠免疫球蛋白的可变区蛋白和人的免疫球蛋白的恒定区蛋白偶联,可减低其对人体的免疫原性,但这需要制备大量蛋白进行分离提纯和偶联,即费时又昂贵。70 年代末分子生物学 DNA 重组技术的发展,80 年代免疫球蛋白的结构和重排机制的阐明,以及对免疫球蛋白氨基酸序列的了解,促进了基因工程抗体的研究和发展。

1983 年 V. T. Oi 等用基因工程手段和杂交瘤细胞制备得完整的抗体,具有一定的功能。同年, A. Ochi 等将克隆的免疫球蛋白的重链和轻链基因成功地小鼠骨髓瘤细胞中表达出具有活性的免疫球蛋白分子,为后来的基因工程抗体研究打下了基础。1987 年 Lee K. Sun 等将抗癌相关抗原的单克隆抗体基因的可变区重链(V<sub>H</sub>)和轻链(V<sub>L</sub>)DNA 片段,插入含有人 C 区基因 DNA 片段的哺乳类表达载体上,在小鼠骨髓瘤细胞中表达的产物具 IgG 功能,并能专一地与癌细胞表面抗原结合。

完整的免疫球蛋白是个大分子,分子量为 150kd,在制备和应用上有一定的限度。免疫球蛋白的较小片段,分子量为 12 000~50 000,不但保持有抗原结合活力,而且由于其能有效地浸入组织,易于从血清中排除,所以也利于应用。1984 年 S. Cabilly 等和 M. A. Boss 等分别将抗体 V 区片段在 E. coli 中表达,但产物



是非天然状态。1985年 C. R. Wood 等在酵母菌中表达的抗体 V 区蛋白仅小部分具有功能。一直到1988年 A. SKerra 等才成功地在 *E. coli* 系统中表达了  $V_H$  和  $V_L$  链,并组装成具抗原结合活力的片段。同年, R. E. Bird 等在重链可变区的 cDNA 3'端与轻链可变区 cDNA 5'端之间,用一寡聚核苷酸连接,在 *E. coli* 表达系统中表达得单链多肽,并在细菌内折叠成含有重、轻链可变区的抗体,其大小为完整免疫球蛋白的1/6。

1985年基因体外扩增技术多聚酶链反应的出现,推进和加速了基因工程抗体的研究。1989年 R. Orland 等首先采用 PCR 法,他们从1987年发表的 V 区基因氨基酸序列,找出小鼠免疫球蛋白重链和轻链中编码 V 区的核苷酸序列及其两边的保守区序列,以保守区序列为基础设计合成引物。根据 PCR 法中所需要的引物不一定要求与基因碱基完全配对,因而可在引物的适当位置上插入便于进一步构建质粒的限制性内切酶切位点。从杂交瘤细胞抽提 RNA,逆转录合成 cDNA 用 PCR 法扩增后,酶切切取所需 DNA 片段,构建含有 V 区基因的表达质粒。1989年 L. Sastry 等先建立小鼠重链区专一的 cDNA 库,再用 PCR 法扩增,然后构建得能表达重链 V 区的表达质粒。1989年 E. S. Ward 等用 PCR 法克隆表达  $V_H$  基因,表达产物具有结合抗原的亲合力,故又称为单区抗体。PCR 法的优点促发另一研究趋向,不通过杂交瘤技术,直接从致敏的动动物脾脏或淋巴细胞抽提核酸,用 PCR 法扩增后克隆。1989年 E. S. Ward 等从致敏动物脾脏 DNA 入手,扩增克隆重得  $V_H$  表达质粒。L. Sastry 等从致敏小鼠脾脏抽提总 RNA,逆转录为 cDNA,再用 PCR 法扩增后克隆。

1989年 M. Brüggemann 等用转基因小鼠表达人抗体。D. J. Chiswell 等在1992年第10期生物技术趋向杂志中介绍了近年来在剑桥开展的关于噬菌体抗体研究,即以噬菌体基因组为载体构建抗体表达系统。作者称此系统表达的产物为 'Coliclonal' 抗体,并认为此技术可能比传统的 mAb 技术更有应用前景。

基因工程抗体产物是完整的免疫球蛋白还是免疫球蛋白片段,则依据实验目的和应用目标而定。当进行免疫球蛋白结构和功能方面的研究时,需要完整的分子。因抗体的糖基化主要发生在重链的恒定区,糖基化与抗体介导的补体活化、抗体依赖细胞毒效应,以及抗体与 Fc 受体的结合有关。因此需要高水平表达系统。1990年 C. A. Hasemann 等用杆状病毒表达系统达到高水平表达完整的免疫球蛋白分子。当所需要的抗体仅用来作为一个具有专一识别功能的分子时,只要保存有抗原结合位点,无需考虑糖基化问题,所以表达产品为抗体可变区片段即可。或者如1984年 M. S. Neuberger 等将 Fab 与一便于检测的酶活性部分的 DNA 片段构成重组抗体,其表达产物即有抗原结合活性,又保持酶的活性,可用于免疫分析。近年来引起人们兴趣的是利用抗体片段构建重组免疫毒素表达系统。1989年 V. K. Chaudhary 等在抗人白细胞介素-2受体的单克隆抗体的 FvDNA 片段和部分绿脓杆菌外毒素基因间连接一连接肽序列构建质粒,在 *E. coli* 表达得单链抗体毒素融合蛋白,对带有白细胞介素-2受体的人细胞株具有强毒性,而对没有白细胞介素-2受体的细胞株则无毒性。1990年 V. K. Chaudhary 等在上述工作基础上,从对卵巢癌细胞专一的、分泌 OVB3抗体的杂交瘤细胞中抽提 RNA,采用 PCR 扩增法扩增后克隆,将含编码重、轻链的 DNA 片段与连接肽序列连接后克隆到含有部分绿脓杆菌外毒素表达载体上,在 *E. coli* 表达得重组单链免疫毒素,能结合或杀死带 OVB3抗原的细胞。

上述的联合抗体或抗体片段产物中的整合 V 区是鼠源的,所以对人类仍存在不可避免的异源蛋白的影响。展望未来,也是近期有关学术讨论会议的中心议题是如何避免人抗鼠抗体反应。人化抗体的研究可能是解除异源蛋白影响的途径之一。早在1986年 P. T. Jones 等根据抗原结合位点主要由 V 区基因中超变区编码的。免疫球蛋白超变区结构与抗原结构互补,故称之为互补决定区(Complementarity determining regions, CDRs)。他们尝试将鼠抗体上的 CDRs 移植到人抗体相应的 CDRs 位置,结果

仍显示与抗原结合的活力。作者推断此 CDRs 替代法可作为从相应的鼠单克隆抗体构建人单克隆抗体的方法。1988年 L. Riechmann 等将鼠抗人抗体重、轻链可变区6个超变区导入人的 IgG1 抗体中,称为整形抗体(Reshaping antibody),能用于人血清治疗。整形抗体即是用人工合成抗原决定簇的互补区的氨基酸序列,插入预定的人抗体 V 区框架区(Framework regions, FRs),由于人的 FRs 与小鼠的 FRs 序列间有最大的同源性,FRs 本身不与抗原分子直接结合,由而获得带有鼠型 mAb 上抗原结合位点氨基酸序列的人免疫球蛋白分子,即人化抗体,人化抗体研究中关键的问题是,如何使鼠 CDRs 插入人抗体 V 区后能维持 CDRs 的空间构型,否则会降低抗原结合活力。这或者通过筛选方法选择同源性较好的人抗体 V 区做为接受鼠 CDRs 的框架;或者鼠 CDRs 插入 FRs 通过定点突变法改变氨基酸残基,以获得活性较高的人化抗体;或者将鼠 CDRs 附近影响其空间构型的氨基酸残基一起插入人抗体 V 区 FRs 中。伴随蛋白质工程技术、计算机分析以及分子克隆技术的发展和综合应用,人化抗体基因的克隆和表达会不断地得到发展和应用。

参考文献

- 1 Skerra A, et al. Assembly of functional immunoglobulin Fv fragment in *Escherichia coli*. *Science*, 1988, 240: 1038~1041
- 2 Riechmann L, et al. Reshaping human antibodies for therapy. *Nature*, 1988, 332: 323~327
- 3 Better M, et al. *Escherichia coli* secretion of an active chimeric antibody fragment. *Science*, 1988, 240: 1041~1043
- 4 Orlandi R, et al. Cloning immunoglobulin variable domains for expression by the polymerase chain reaction. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1989, 86: 3833~3837
- 5 Ward E S, et al. Binding activities of a repertoire of single immunoglobulin variable domains secreted from *Escherichia coli*. *Nature*, 1989, 341: 544~546
- 6 Sastry L, et al. Cloning of the immunological repertoire in *E. coli* for generation of monoclonal catalytic antibodies; Construction of a heavy chain variable region - specific cDNA Library. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1989, 86: 5728~5732
- 7 Brüggemann M, et al. A repertoire of monoclonal antibodies with human heavy chains from transgenic mice. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1989, 86: 6709~6713
- 8 Chaudhary V K, et al. A rapid method of cloning functional variable - region antibody genes in *Escherichia coli* as single - chain immunotoxins. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1990, 87: 1066~1070
- 9 Hasemann C A, et al. High-level production of a functional immunoglobulin heterodimer in a baculovirus expression system. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1990, 87: 3942~3946
- 10 Chiswell D J, et al. Phage antibodies: Will new coliclonal antibodies replace monoclonal antibodies? *Trends in Biotechnology*, 1992, 10: 80~84

(中国科学院上海细胞生物学研究所张玉斌研究员撰)

**抗病毒植物基因工程** 抗病毒基因工程是指利用植物基因工程的技术将特定抗性基因导入植物体内并插入到染色体上,经过组织培养及植株再生,获得插入有抗性基因且稳定遗传的抗病毒工程植株。

1986年,美国比奇(R. Beachy)首次将烟草花叶病毒(TMV)外壳蛋白基因转入烟草培育出能稳定遗传的抗病毒工程植株,由此确定了抗病毒植物基因工程这一新的领域。与普通的抗性品种选育方法相比,抗病植物基因工程方法可克服种间差异的限制,缩短选育周期,获得稳定遗传的抗性。

抗病毒的植物工程采用的抗性基因一般是来源于病毒。通

过近年来的研究,采用策略有以下几种:

外壳蛋白基因策略 比奇等将 TMV 外壳蛋白(CP)基因转入烟草,转化植物中外壳蛋白基因的表达产物达到烟草叶片蛋白总量的0.1%。转基因烟草接种 TMV 后,能够抑制 TMV 的复制并在一定程度上降低或阻止 TMV 在植株体内的系统侵染,且能延迟发病12~30d。这一抗性按孟德尔定律遗传给后代。用同一 CP 基因转化番茄,其 CP 表达量为叶片总蛋白的0.02%~0.05%。大田试验也得到令人满意的保护效果。当对照番茄减产26%~35%时,转基因番茄未受到影响,其产量与不接种的相比无显著差别。就已有的资料看,除 TMV 外,在20多个植物病毒组中已用近10个组的代表性成员进行了该策略的遗传工程保护研究。1991年林(Ling)等的实验结果表明,转一种病毒的外壳蛋白基因的植物可获得对一些与其亲缘关系较近病毒的抗性。然而,如果转病毒外壳蛋白基因的植物所编码的病毒外壳蛋白能够包装其它一些虫传的病毒核酸,则存在构成新病原因子的危险性。一般认为,CP 介导的抗性是由于 CP 的积累封闭了病毒侵染的一个早期步骤——病毒粒子的脱衣壳。

病毒卫星 RNA 基因策略 1983年,田波等用能减轻症状表达的黄瓜花叶病毒(CMV)卫星 RNA 作为生物抑制剂防治 CMV 引起的病害获得成功。1986年,鲍尔库姆(Baul combe)等成功地将 CMV 1-17N 的卫星 RNA 的 cDNA 双体基因转化给烟草,转化植株接种 CMV 后,卫星 RNA 大量复制而病毒基因组 RNA 减少95%,且只在第1至第3片叶上形成斑驳,此后形成的叶片不表现花叶症状而接近正常的植株,对照空载体转化的植株,症状严重,植株矮化。1990年,赵淑珍等用 CMV 卫星 RNA-1 的 cDNA 单体基因转化番茄,同质结合的后代在田间表现出对 CMV 侵染的高度抗病性。卫星 RNA 基因的作用机制被认为是由于卫星 RNA 干扰了病毒基因组的复制。这一策略存在的危险在于减轻病毒症状表达的卫星 RNA 有可能发生突变成为加重症状表达的卫星 RNA 而使病毒病害加重。

病毒反义 RNA 策略 反义 RNA—基因编码链的互补链 RNA 对原核和动物细胞基因表达有抑制作用。曾寄希望于反意病毒 RNA 在抵抗植物病毒中发挥作用,但其转基因植物对病毒不表现抗性或抗性微弱。这一策略用于抗病毒基因工程植株的培育,前景并不理想。

与病毒复制相关基因的部分序列 1990年,Gol emboski 将 TMV UI 株系54kd 蛋白基因(病毒复制增殖相关的酶基因的一部分序列)转入烟草。抗性实验表明,这些工程植株抗病性高于外壳蛋白基因,显示出诱人的前景。然而,这一策略中转入基因交叉保护效果不甚令人满意,且其作用机理尚待进一步探讨。

核酶 核酶是一类具有特殊2级结构能够特异性催化切割其它 RNA 分子的小分子 RNA。原则上说,任何生物,包括病原 RNA,都可作为核酶的底物。已发现的绝大多数植物病毒,它们的基因都是由 RNA 组成的。根据这些病毒基因组的序列,设计恰当的核酶,转化植物体内使其在体内表达并有效切割病毒核酸,达到控制病毒病害的目的。有关这方面的研究已获得初步结果。

复合抗性基因策略 提高工程植株抗病性的一个可行途径是采用复合抗性基因的策略,即利用多个抗性基因共同作用与相互作用,从多个途径封闭病毒的功能表达,从而有效地阻断病毒在植物体内的增殖与传播途径。叶寅等将具有早期抗病毒侵染的外壳蛋白基因和晚期抗病毒复制的卫星 RNA 基因共同转化植物,获得在病毒的整个感染期间都能抗病的高抗工程植物,比单转卫星 RNA 基因的抗性提高一倍以上,比单转 CP 基因的工程植株的抗性提高2~3倍。

利用植物本身编码的抗性基因 有些植物在病毒侵染后产生各种类型的抗病性,分离克隆这些抗性基因则可用于抗病毒植物基因工程。然而已有的实验结果并不令人鼓舞。一个普遍的看法是,在植物本身的防御病害的机制被搞清楚之前,利用这一策略来提高植物的抗病性相当困难,或者可以说不可能。

此外,新的策略仍在探讨之中。这些策略是希望通过阻断病毒功能表达而达到抗病效果,如可封闭病毒的复制、基因表达及扩散功能等。1990年,希亚特(Hiatt)等在烟草中表达了来自动物淋巴细胞的抗体基因,这一成就可应用于抗病毒植物基因工程,即在植物体内表达中和抗体以封闭病毒颗粒。1991年,纳特杜尼斯(Natdoulis)提出核酸酶策略,其核心是以病毒的外壳蛋白与核酸酶相连接构建融合蛋白。这种拟外壳蛋白既可能包被病毒核酸,又可能在一定条件下降解病毒核酸。

一些已应用的策略都可获得不同程度的抗性,然而这些策略都有其各自的局限性与潜在的危险性。就已有的研究进展看,各种抗性基因的作用效果远远不足以达到推广应用的水平。在今后的研究中,以下几个方面将是研究的热点。(1)在现有的抗病毒策略的基础上进一步提高工程植株的抗性。(2)开展基础研究探索控制病毒功能表达而获得更有效更安全的抗病毒策略。(3)揭示植物自身的防御机制以提高植物的内在抗性。植物虽然没有动物那样完善的防御系统——免疫系统,但也有相当复杂与完善的防御体系。一旦植物的防御机制被揭示,就可以提高植物内在的“免疫力”。(4)以推广品种与性状良好的品种为材料培育抗病毒工程植株,并纳入常规育种和良种繁育体系,力图应用于实际生产。

参考文献

- 1 Powell Abel P, et al. Delay of disease development in transgenic plants that express the tobacco mosaic virus coat protein gene. *Science*. 1986, 232: 738~743
- 2 Tien P, Zhang Xuhua. Control of two plant viruses by protection inoculation in China. *Seed Science and Technology* 1983, 11: 969~972
- 3 D C Baul combe, et al. Expression of biological active viral-satellite RNA from the nuclear genome of transformed plants. *Nature*. 1986, 321(22): 446~449
- 4 Dani el N, et al. plants transformed with tobacco mosaic virus nonstructural gene sequence are resistant to the virus, *Proc Natl Acad. Sci. USA*: 1990, 87: 6311~6315
- 5 叶寅,等. 表达卫星 RNA 和外壳蛋白的高抗黄瓜花叶病毒的转基因烟草. *科学通报*, 1991, 22: 1759
- 6 Georges Natosulis, Jef D Boeke. New antiviral strategy using capsid—nucl ease fusion proteins, *Nature*. 1991, 352(15): 632~6355

(中国科学院微生物研究所叶寅撰)

逆转录病毒长末端重复序列的结构和功能

自 1970年 Temin 和 Baltimore 首次发现逆转录酶后,逆转录病毒的名字才被广泛采用,而且关于此类病毒复制的假说也被普遍接受,即由逆转录酶将病毒的 RNA 逆转录成 DNA 后整合到宿主细胞染色体上,整合的病毒 DNA 在宿主细胞 RNA 聚合酶 I 的作用下转录成 RNA,此 RNA 可作为子代病毒核酸被包装在病毒粒子内,或进一步剪接成 mRNA 再翻译成病毒蛋白。

逆转录病毒分布广泛,几乎各种动物都有感染。与大多数其它类型的动物病毒不同的是逆转录病毒感染很少导致细胞的破坏,一旦感染即可终身带毒,有些还可直接或间接导致肿瘤。逆转录病毒的这些特征与其前病毒 DNA 上的长末端重复序列(LTR)有密切的关系。

逆转录病毒的 RNA 和其复制中间体 DNA 的末端都含重复序列,但互不相同。在 DNA 末端含有一段非常小的重复序列(8~247个核苷酸),称为 r 系列,而病毒 DNA 的两末端都有一长末端重复序列。不同的逆转录病毒 LTR 都是 U<sub>3</sub>-R 和 U<sub>5</sub>3个区域组成,但大小不一。RNA 末端的重复序列对于病毒 DNA 的合成起重要作用,而病毒 DNA 的 LTR 对于病毒 DNA 的整合必不可少,并控制病毒 RNA 的转录,具有转录启动子等作用。

逆转录病毒 RNA 分子的5'末端有一帽子结构,其后是一段

长为8~247个核苷酸的系列(r),此系列在病毒RNA的3'末端重复出现,紧接着5'端r系列的是另一长为55~203个核苷酸的U<sub>5</sub>系列,在3'端与r系列相邻的是U<sub>5</sub>区域,大小为187~1194个核苷酸。在以病毒RNA为模板进行逆转录时,先从5'末端拷贝U<sub>5</sub>和R系列,此系列(DNA形式)被转移到3'末端,R系列与r系列结合作为引物再拷贝3'端的U<sub>5</sub>区,这样逆转录形成的U<sub>3</sub>-R-U<sub>5</sub>系列(即为LTR)作为模板合成另一拷贝的LTR,然后转移到病毒DNA的5'末端。在病毒RNA 5'末端U<sub>5</sub>系列之后是两个UMP残基(对鼠乳腺瘤病毒是GMP和CMP残基),接着就是18~21个碱基的系列,这一区域与对不同逆转录病毒具有特异性的一种细胞tRNA 3'端的核苷酸链是互补的。这种细胞tRNA是病毒负链DNA合成时的引物,目前已知的引物tRNA有赖氨酸(Lys),脯氨酸(Pro)和色氨酸(Trp)。整合的前病毒两末端都有LTR,而且排列方向相同,在每个LTR中,两极端的核苷酸是相互反向重复的,所以整个病毒DNA实际上也具有末端反向重复序列。

对于同一逆转录病毒来说,不同毒株的LTR的核苷酸系列和大小是相似的,但不同病毒之间有很大差异。系列分析结果证明各逆转录病毒的LTR之间也有一定的同源系列存在,这些同源系列可能对前病毒的整合以及病毒的RNA合成的控制起重要作用。LTR末端的反向重复序列大小在3~16碱基对之间,所以在整合的前病毒LTR的末端都是 $\begin{matrix} TG...CA \\ AC...GT \end{matrix}$ ,除MMTV外,所有未整合的病毒DNA末端反向重复序列都比整合的前病毒多2个碱基对。

在LTR的R区前75碱基对的U<sub>3</sub>区通常有一CCAAT系列,在R区前23碱基对的地方,总是有一 $\begin{matrix} GT & TT \\ CA & AA \end{matrix}$  AAG系列(即TATAA盒子),根据细胞基因结构特点推测,这些系列对于转录的启动起重要作用。R系列都是以G开始,这对于病毒RNA的帽子结构形成很重要。另外,R系列结尾总是CA,R-U<sub>5</sub>交界处之前20bp处有一 $\begin{matrix} A \\ G \end{matrix}$  TAAA系列,CA和 $\begin{matrix} A \\ G \end{matrix}$  TAAA可能都与Poly A形成有关。在R区末端之后10~25bp处的U<sub>5</sub>内有TTGT或一些密切相关的系列,这些系列可能对病毒RNA合成的终止起重要作用,据推测,靠近U<sub>3</sub>-R处的反向重复序列也可能对病毒RNA合成的终止起作用。

自从Hsu等(1978)首先发现LTR后,对于逆转录病毒的复制机制有了更进一步的了解,越来越多的研究结果发现逆转录病毒的LTR与真核基因的5'和3'末端非编码区具有系列同源性,由此推测LTR可能在宿主细胞RNA聚合酶Ⅲ的作用下发挥其转录启动作用。这一推测后来经过一系列实验得到证实,即对体外或游离的细胞核中的病毒转录体的化学分析,使用RNA聚合酶特异性的抑制剂以及含与外源基因相连的LTR重组子分析。Ju等(1980)通过对克隆的6种不同的禽逆转录病毒DNA的LTR系列分析,并与整合的前病毒比较,发现LTR的结构特征与真核及原核生物的可转位成分很相似,这表明LTR在病毒的整合过程起一定的作用。

LTR中含有转录启动子,其作用是受上游的顺式激活系列控制,在DNA转录起始位点下游的顺式激活系列也证明能影响基因表达。在启动子系列中其核心成分就是增强子,有几种逆转录病毒的增强子可以在多种细胞中激活转录(HTLV-Ⅲ等),而另一些病毒这种作用则比较特异,如BLV、HTLV-I和Ⅱ的LTR只能在有限的几种细胞内起转录启动作用。HTLV-Ⅲ和HTLV-I的LTR作为一种有效的启动子,其功能并不依赖于病毒相关的反式激活作用,但是,与HTLV-Ⅲ病毒感染相关的因子可以反式激活由HTLV-I、Ⅱ的LTR引导的转录,而不激活由BLV或HTLV-I、Ⅱ的LTR引导的转录。同样,HTLV-I、Ⅱ或BLV病毒感染也不能反式激活由HTLV-ⅢLTR引导的转录和表达。另一种慢病毒CAEV(山羊关节炎脑炎病毒)却缺乏这种

反应激活作用,这说明反式激活作用在致病性慢病毒中可能不是一种通性。

有实验证明在一个完整的疱疹病毒TK基因的任何一侧连接一个BSV的LTR,再将其注射到体外培养的TK<sup>-</sup>鼠细胞中,TK基因的转化率可提高20倍。同样,鼠肉瘤(MSV)的LTR也可提高克隆的病毒肿瘤基因(v-mos)的转化效率。

通常,病毒RNA合成是从5'末端LTR启动的,3'端的LTR也同样具有启动子作用,当前病毒整合到一个潜在的肿瘤基因邻近的位点时,其3'端的LTR可以启动这种肿瘤基因进行转录,导致肿瘤形成。由ALV引起的淋巴瘤是一个克隆的细胞群,每个肿瘤细胞一般都有多个病毒整合位点,其中至少有一个位点与细胞的肿瘤或相关系列相邻。在多数情况下,整合的前病毒都发生缺失或重排,尽管如此,被严重截短的前病毒对相邻的宿主细胞DNA的表达仍有促进作用。大多数ALV产生的淋巴瘤都携带有前病毒,这些前病毒都是整合在相同的宿主基因组的位点上,而且此位点是与细胞的骨髓瘤基因(c-myc)相邻或在其系列内,前病毒的整合导致c-myc基因转录效率显著升高。从ALV导致的淋巴瘤细胞中分离的DNA可以转化体外培养的NIH3T3鼠成纤维细胞成为肿瘤细胞,但从此淋巴瘤DNA中分离出前病毒及c-myc系列却不能转化NIH3T3细胞。这可能表明ALV导致的肿瘤需要两个步骤:即先对c-myc插入诱变,接着激活其它肿瘤基因重排。根据目前的研究资料,逆转录病毒引起的肿瘤发生机制可归纳为以下3条:(1)前病毒整合在细胞的肿瘤基因附近,其LTR启动相邻的肿瘤基因,使细胞癌变;(2)整合的前病毒被细胞修饰(如缺失或重排),隐含在病毒DNA中的肿瘤基因或相关系列复活;(3)前病毒的整合使细胞的某一基因失活,从而解除了对肿瘤基因的抑制作用。

参考文献

- 1 Shimotohno K, et al. Sequence of retrovirus provirus resembles that of bacterial transposable elements. *Nature* (London), 1980, 285: 550
- 2 Temin H M. Structure, variation and synthesis of retrovirus long terminal repeat. *Cell*, 1981, 27: 1
- 3 Hayward W S, et al. Activation of a cellular oncogene by promoter insertion in ALV-induced lymphoid leukemia. *Nature* (London), 1981, 290: 475
- 4 Varmus H E. Form and function of retrovirus provirus science, 1982, 216: 812
- 5 Temin H M. Function of the retrovirus long terminal repeat. *Cell*, 1982, 28: 3
- 6 Derse D, et al. Bovine leukemia virus long terminal repeat: A cell type-specific promoter. *Science*, 1985, 227: 317

(中国农科院哈尔滨兽医研究所童光志博士撰,卢景良审)

水稻外源基因转化

水稻外源基因的转化、表达及其转化植株的鉴定利用已进入实质性启动阶段。首先是因为水稻原生质体培养成苗技术取得了长足进展,其次为提高转化子植株分化率,开发新一代的水稻受体系统也获初步成功。另一方面,DNA直接转化手段从微生物、动物实验向植物细胞的有效移植,特别是外源基因的克隆、提纯、含有根瘤农杆菌、花椰菜病毒NOS、35S启动子的多种多样新质粒的构建以及高效启动子aefin的发现启用,都是为推动水稻等禾谷类作物基因工程研究不可或缺的杠杆和动力。据哈特(Hardt, 1990)估算,现有水稻推广品种的生产潜力可达218.2L/hm<sup>2</sup>,而第三世界国家的实产只有109.1L,其中72.8L减产于抗劣性;36.4L出于灌溉与施肥不当。对于前者基因工程有着较大的潜在优势;针对育种目标引入生产品种不足的性状,如抗病、抗虫等并避免不良性状的干扰;按照基因图、扩大基因库利用范围,不但从野生稻,甚至包括其他生物种属;鉴定后期表达的某些性状在个体成熟前即可按基因图着手;鉴定隐性可不必自交,节约时间,等等。为此美国洛克菲勒基金会从

1985年开始年投资600万美元支持国际水稻生物技术研究,并在以下方面取得了显著成果。开发水稻外源基因转化的高效受体系统,提高转基因植株的得率,开发和提高转化技术程序及新型设备,筛选并克隆具有重大经济效益的目的基因,体细胞工作、花培育种及RFLP技术,水稻基因工程技术不会取代常规育种,它只是带动常规育种进入新层次的阶梯,新型的转基因水稻材料仍然需要田间试验以确立自身的地位。

**水稻转化中的标志基因与报告基因** 水稻原生质体的转化率极低,进行转化细胞选择必需使之具有有效的选择标志。选择培养基能抑止植物细胞生长,但对转化细胞无碍或影响较少,这样经过一定时间的培养和扩增,转化子便会脱颖而出。目前使用广泛的标志基因多属对抗菌素的抗药性。如细菌中Tn5转座子来源的NPT-Ⅱ(新霉素磷酸转移酶)基因,所编码的新霉素磷酸转移酶通过对氨基葡萄糖苷类抗菌素的磷酸化,而使此类菌类失活,因之当培养基中含有一定浓度的卡那霉素或庆大霉素时,NPT-Ⅱ的转化细胞可以正常生长,非转化细胞则受到抑制。CAT(氯霉素乙酰转移酶)基因,来自细菌转座子Tn9,产物酶可催化氯霉素形成氯霉素-3-乙酸、氯霉素-1-乙酸及氯霉素-1-3-二乙酸。同位素<sup>14</sup>C标记氯霉素用层析法可将底物及其反应物分开。从放射自显影式直接测定放射性强度,即可估算CAT基因的表达活性,十分灵敏简便。hph(潮霉素磷酸转移酶),潮霉素β对大多数植物有毒害作用。把从细菌中分离获得的hph基因用作转化的选择标志,其作用高出NPT-Ⅱ20倍,对某些卡那霉素不敏感的基因型效果尤佳。从理论上说,所有在选择培养基上能存活并扩增的细胞克隆应都是转化细胞。但是选择剂并不一定完全抑制或杀灭非转化细胞,这样形成的转化克隆,特别是非单细胞起源的转化克隆常常是转化细胞与非转化细胞的嵌合体。报告基因是指可借以直接测定并确认在受体细胞或器官组织中得到表达的外源基因,在这一意义上抗菌素标志基因也就是报告基因。不过还有一些非选择标志基因,其表达产物,不仅可以定性、定量,而且还可以进行定位。在水稻转化中最为出色的此类报告基因应推GUS(β-葡萄糖苷酶)。杰夫逊(Jefferson,1986)首先将大肠杆菌中分离获得的GUS基因应用于植物细胞转化,并建立了一整套的检测系统。在转化细胞中GUS可使底物X-Glu(5-溴-4-氯-3-吲哚-β-葡萄糖苷酸酯)形成兰色沉淀而定位,也可以用荧光分光光度计作定量测定(底物为4-MuG,4-甲基伞形花酮-β-D-葡萄糖苷酸酯)。1990年胡等(Ching-yeh Hu)报道在水稻中并不能排除某些基因型中有细胞内源GUS的存在。加之在实验操作中可能产生的细菌污染而造成假阳性现象。因此选择适用的基因型是保证实验数据正确性的必要前提。

**植物细胞启动子与水稻转化** 在细菌中功能正常的基因在植物细胞中未必能够表达,原因是缺乏真核类植物细胞可以识别的启动子,因之用于水稻直接转化的基因必须采用质粒重组技术上在水稻细胞中可资识别的特异性启动子及有关末端顺序。当然作为选择标志NPT-Ⅱ或hph等抗药性基因也是重要的组成部分,有些甚至还包含有水稻ARS(自主复制顺)等特定的DNA顺序,事实上水稻基因工作中的启动子都是自然产品。NOS启动子是根瘤杆菌Ti质粒中胭脂碱合成酶的启动子,CaMV35S启动子是花椰菜病毒DNA分子转录mRNA(沉降系数为35S)的启动子。转化用基因DNA一般采取质粒分子的形态,便于保存扩增和大量提取。如常用的p<sup>121</sup>质粒,启动子为35S,结构基因GUS和一个NOS末端,选择标志为NPT-Ⅱ。1984年帕兹科斯基(Paszowski)等提供了有关用根瘤杆菌中Ti质粒直接转化烟草原生质体的第一手证据。但Ti质粒分子太大(约200000)提取困难,不久即为较小的大肠杆菌粒所代替,从而为构建层出不穷的新质粒转化水稻细胞开辟了广阔的前景。

**PEG法(Polyethylene glycol)** 通常用水稻原生质体为受体,经热激处理。PEG(分子量为4000~6000)浓度为40%,使用携带DNA(小牛胸腺DNA)时效果较佳。一般用量是1g材料游离获得的原生质体加2mlPEG溶液、15μg质粒线性分子(p<sup>121</sup>含

有GUS和NPT-Ⅱ基因)充分混和置于室温30min即可完成转化过程。1991年杨金水、南茜(Nancy)等采用新开发的部分酶解以及完整的悬浮小细胞团代替原生质体(转化率0.6%)亦获得良好结果(转化率0.5%~0.9%)。

**电击法** 基本原理是利用瞬间高压电脉冲在细胞膜上形成可逆性的微孔通道。处理电压300~900V脉冲时间为1.2~1.8μs,电容25μF。受体为原生质体或部分酶解小细胞团。使用PEG法后再进行电击法双重处理,转化率会有显著提高。

**基因枪法** 将DNA分子包被于微细钨粒表面,在爆炸压力下使钨粒高速穿透受体细胞或组织,介导外源基因DNA分子整合入核染色体并得以表达。其优点是可以直接瞄准芽或胚组织的分生细胞组织或胚性细胞,获得转基因植株。但钨粒透入深度有一定限度,命中原始分生组织的概率不高。1991年克里斯托(christou)以水稻未成熟胚片组织进行基因枪操作通过再分化成苗。在当代及有性后代中GUS基因均显示稳定遗传。

**低压脉冲电击转化** 为避免电击法对受体细胞的过度损伤、降低转化细胞得率和分化能力而设计的新型转化装置,由低压电击、脉冲时控和样品标3部分组成。特点是以低压脉冲代替高压电击,以长期作用代替瞬间效应。经过一系列测试和改进使用效果理想。转化率在电压3V/cm、脉冲时间30s、电击时间30min的条件下可达到8.2%。尤其是对大片段DNA分子转化可能具有现有转化手段所不具备的效果。

除此之外,水稻中必曾尝试用酚类诱导物诱导农杆菌直接转化及用花粉管带动外源基因进入受体细胞。但此类实验有些未获得转化植株,有些缺乏充分证据尚有待于验证。

外源基因在转基因水稻后代中的表现报道不多。巴特洛(Battraw,1990)在用电击法得到的当代GUS转基因水稻植株中发现只有1~2个分子拷贝整合进受体染色体组。基因表达区在维管束四周,但不具特异性。克里斯托的转基因水稻后代,GUS基因呈3:1孟德尔式分离,与烟草中NPT-11基因的转基因植物相类似。

在现有研究中目前可资实验的目的基因尚仅限于BT毒蛋白、抗菌肽基因等少数非水稻基因库源的材料。它们在水稻中的表达量及其抗虫、抗病的范围及能力仍缺乏可以确信的资料。在抗药剂方面,如抗Bialaphos的转基因植株,也见有报道(抗性达500ppm)。不少实验室正考虑水稻本身的基因分离,进行DNA大片段分子以及YAC(酵母人工染色体)基因库的研究。前景十分乐观。

#### 参考文献

- 1 Cocking E C, et al. Gene transfer in cereals. science, 1987, 236:1259~1262
- 2 Zhang W, et al. Efficient regeneration of transgenic plants from rice protoplasts and correctly regulated expression of the foreign gene in the plants. Theor Appl Genet, 1988, 76:835~840
- 3 Christou P, et al. Production of transgenic rice (oryza sativa L.) plants from agronomically important indica and japonica varieties via electric discharge particle acceleration of exogenous DNA into immature Zygotic embryos. BiolTechnology. 1991, 9:957~962
- 4 Lee N, et al. Huang s, Tan J Z, Testa D. Efficient transformation and regeneration of rice small cell groups. Proc Natl Acad Sci. USA:1991. 88:6389~6393
- 5 杨金水,等. 外源基因导入部分酶解的水稻小细胞团,及其转基因植株的再生. 植物学报,1991,38(11):825~832

(上海复旦大学遗传研究所葛荆麟教授撰)

**重组猪生长激素** 用基因工程技术(或称重组DNA技术)制备的猪生长激素。它与天然猪生长激素的化学结构完全相同或微有差异,具有与天然猪生长激素相同的或非常近似的物理

化学性质和生物学活性。

天然猪生长激素是由猪垂体合成并分泌出来的蛋白类激素,由190个氨基酸残基组成,含有两个二硫键,是单链的单纯蛋白质,分子量约为21 900。它的生理作用主要表现为促进猪的生长。已查明它对代谢有多种调节作用,其中包括促进蛋白质的合成和促进脂肪的分解动用。正常猪分泌适当而微量的猪生长激素,以维持猪的正常生长和调节代谢。已知幼龄猪分泌的猪生长激素较多,它在血液中的水平也较高,使幼龄猪的生长速度较快。以后随年龄的增长,猪血液中生长激素的水平逐渐下降,猪的生长速度也逐渐减慢,到一定年龄后生长就停止了。

从猪生长激素的生理作用可以预料,当猪长至适当年龄时投给它猪生长激素应能加快它的生长速度,并且使它多长瘦肉和减少肥膘。而投给的方法只能是注射,不能口服,因为猪生长激素是蛋白质,经过消化道时将受到破坏而失效。1972年,美国麦克林(J. L. Machlin)首先报道给猪注射猪生长激素的效果。其后,国际上许多实验室做了类似的实验,其中有的用的是天然猪生长激素,有的则用的是重组猪生长激素,显著提高了猪的生长速度和瘦肉产率,并降低了肥膘。而且由于实验猪的饲料消耗量与对照猪没有差异,因而显著提高了猪的饲料转化率。可见,给猪注射猪生长激素具有巨大的经济效益和社会效益,是发展养猪业,满足人们对猪肉特别是瘦猪肉日益增长的需求的良好措施之一。近年来,许多研究者还深入研究了给猪注射猪生长激素所以能够获得上述效果的作用原理,以及由于有上述效果而引起的广泛效益,其中包括对肉品加工业和减少环境污染等方面的效益。并且用大量的实验资料证明,食用注射过猪生长激素的猪肉对人是绝对安全的。

能否在生产中广泛应用猪生长激素的关键是如何制得大量而廉价的产品。以前制备猪生长激素的唯一方法是由猪垂体中提取。然而由于垂体中含量甚微,不可能大量获得。1983年,美国西博格(P. H. Seeburg)等首先报道用基因工程方法制得猪生长激素。制备的基本技术是:先由猪垂体中制得总 mRNA,经反转录获得总 cDNA,将此总 cDNA 重组在适当质粒中,用以转化大肠杆菌获得猪垂体的 cDNA 文库。由文库中筛选出猪生长激素 cDNA 基因。将此基因加以改造后再重组在适当表达载体质粒中,用以转化大肠杆菌,使猪生长激素基因在大肠杆菌中得到高效表达,产生出猪生长激素。最后以适当方法由大肠杆菌中提取出猪生长激素而获得产品。据报道,他们在高密度细菌培养条件下,每升培养物中约含 1.5g 猪生长激素,因而认为有可能应用于生产实践。1988年,中国齐顺章等也用类似方法在大肠杆菌中高效表达了猪生长激素 cDNA,并且由大肠杆菌中提取出高纯度的具有生物学活性的猪生长激素,用此产品在北京黑猪上做了实验,获得很好的效果。

当前国际上一些机构正在积极进行中试,准备投产。关键的问题是要尽可能降低成本。因为注射猪生长激素虽然能够显著增加猪肉的产量,然而由于农产品的价格低廉,如不能把重组猪生长激素的生产成本大大降低,则仍然无法推广使用。降低成本的主要途径是提高产率,其中包括提高单位体积细菌培养物中猪生长激素的产量和提高由细菌中提取产品的回收率。

中国是世界上养猪头数最多的国家,目前每年出栏4亿头。但是中国猪种多为肥肉型,中国有着使用猪生长激素的良好前景。同时,中国人口众多,猪肉又是中国人民的主要肉食品,目前养猪头数仍不能满足人们对猪肉特别是瘦猪肉日益增长的需要。而中国的耕地面积有限,人均占有粮食数量较低,不能指望用更多的饲料养更多的猪以满足人们对猪肉的需求。注射猪生长激素正是一种在不增加饲料消耗的前提下多产瘦猪肉的措施,因此将成为中国养猪业的一项重要措施。

(北京农业大学生物学院齐顺章教授撰)

**鸚鵡衣原体的细胞外膜抗原特性** 鸚鵡衣原体是一种人兽共患病的病原,世界各国都程度不同地流行着畜禽的衣

原体病。由于患病动物可长期排毒,有些动物为隐性感染,再加上抗原结构又很复杂,给这类疾病的防制带来许多困难,促使人们将重点放在引起不同动物及不同疾病的衣原体株的外膜抗原特性的研究上,因为外膜抗原不仅与病原的致病作用紧密相关,同时不同毒株的抗原性和免疫原性差异也与外膜抗原有密切联系。

衣原体的外膜抗原由多种成份组成,根据血清学反应特性可分为属特异性、种(亚种)特异性和血清型(株)特异性抗原。属特异性抗原是分子量为3000ku的脂多糖,所有的衣原体株均含有此种抗原。种特异性抗原和血清型特异性抗原是蛋白质,其分子量和反应特性在不同衣原体种和不同血清型间是有差异的。在沙眼衣原体中,155ku 外膜蛋白和主外膜蛋白(MOMP, 38~43ku)具有种特异性抗原活性,同时,MDMP 也具有特型异性抗原活性因为 MDMP 中各含有种特异性和型特异性抗原决定基。有些血清型的29~30ku 外膜蛋白也具有型特异性抗原活性。118ku 则是性病淋淋肉芽肿消眼衣原体株的独有外膜蛋白。血清型特异性抗原的重要性更在于不同的衣原体血清型与所引起不同的衣原体病有密切联系。佩雷斯—马蒂内斯(J. A. Perea—Martinez)根据分离自7种哺乳动物的25个衣原体株的外膜抗原反应特性,应用微量免疫荧光诊断技术将其鉴定为7个免疫型。免疫1型与反刍动物的流产、精囊炎、肺炎和隐性肠道感染有关;免疫2型与结膜炎、多关节炎、脑炎和肠炎有关;免疫3型衣原体株从牛和羊的肠菌丛中分离到,它对动物的致病作用有待鉴定;免疫4、5、6型分别与猪的多关节炎、亚临床性肠道感染、流产和肺炎有关;免疫7型则与猫的肺炎有关。禽源衣原体与哺乳动物源衣原体外膜抗原之间的差异更大,它们的外膜抗原组份完全不同,其 MOMP 不仅大小不同,也无抗原性和免疫原性相关性。

不同衣原体外膜抗原与其致病力、毒力和抗原性、免疫原性有联系。根据禽鸚鵡衣原体对细胞的感染性和引起的细胞病变作用,可分为高感染性群(HIG)和低感染性群(LIG)鸚鵡衣原体, HIG 的 MOMP 分子量为43.5ku,而 LIG 的 MOMP 分子量为45.5ku, HIG 的抗血清只与 HIG 的 MOMP 相反应, LIG 的抗血清只与 LIG 的 MOMP 相反应,但它们与哺乳动物鸚鵡衣原体的 MOMP 和沙眼衣原体的 MOMP 都不反应。感染哺乳动物的衣原体也有侵袭性株和非侵袭性株之分,它们在外膜抗原的结构上完全不同。非侵袭性株与引起动物的流产、副睾炎和隐性肠道感染有关,侵袭性株与引起动物的关节炎、结膜炎和肺炎有关。它们对小白鼠的致病力也不相同,侵袭性衣原体可引起小白鼠脾脏的高度增大和严重感染,而非侵袭性衣原体则无此作用。说明衣原体外膜抗原不仅与其毒力、致病力有关,也与引起的疾病种类不同有关。在外膜抗原分子的研究中,目前研究的重点是 MOMP 等外膜抗原,因为 MOMP 占外膜蛋白质总量的60%以上。用提纯的鸚鵡衣原体原生小体疫苗免疫羊只,免疫印迹试验表明,羊只主要产生抗 MOMP 的抗体,并且持续很久时间,对其他外膜抗原的反应较弱,抗体的持续时间也较短。其他试验证实, MOMP 特异性抗体对衣原体的传染性具有中和作用,说明抗 MOMP 抗体与机体的免疫保护力有关。因而 MOMP 是预防羊衣原体性流产病的一个很重要的免疫原,是未来亚单位疫苗和基因工程疫苗很重要的一个抗原成份。

除 MOMP 外,其他外膜抗原如60ku和100ku 等外膜抗原也参加了机体内的抗原抗体反应,与机体的免疫应答和免疫保护力有一定的联系。塞维尼尼(R. Cevenini)发现,在引起英国绵羊流产的鸚鵡衣原体 A<sub>22</sub>株外膜结构中,有一种分子量为89ku 的外膜蛋白质抗原,可刺激机体产生抗体应答,当用此89ku 特异性单克隆抗体处理鸚鵡衣原体原生小体时,可使原生小体的传染性丧失60%。在此外膜抗原分子中,不仅分布有鸚鵡衣原体种特异性抗原决定基,也分布有株特异性抗原决定基。对于在病原和机体相互作用过程中, MOMP 的作用及其他外膜抗原的作用以及它们之间的内在联系是什么,目前还不清楚。

由于鸚鵡衣原体宿主范围广泛(可感染17种哺乳类动物和BO多种禽类),抗原结构复杂,目前尚无大家所接受的血清型别

鉴定标准和公认的鸚鵡衣原体血清型别。近来人们通过外膜抗原的反应特性来进行鸚鵡衣原体的型别鉴定,因为将来生产的疫苗可能为血清型特异性的,尽管同一血清型可引起多种动物疾病,用此种疫苗免疫都可达到预防目的。在这方面人们利用 MOMP 抗原性的差异,已成功地对沙眼衣原体的血清型别进行了鉴定。日本的福士(H. Fukushi)用一种去污剂对衣原体原生小体进行处理,处理后的非可溶性物质用凝胶电泳分析,电泳带显示出 MOMP 和其他少量外膜多肽,再用抗 MOMP 抗血清免疫印迹试验做检查,发现不同衣原体毒株的 MOMP 抗原性有差异,利用此种差异性,将禽衣原体株鉴定为一个血清型,而将猫肺炎株和羊关节炎株鉴定为另一个血清型。不同宿主不同疾病衣原体株的外膜抗原结构不同。在麦克利纳根(M. McClenagan)等人试验所检查的8株鸚鵡衣原体中,根据其外膜抗原电泳图谱特征可分为4个型。1型包括3个羊流产株,尽管在90ku 外膜蛋白质的含量有差异,但它们的外膜抗原图谱十分相似;2型包括羊结膜炎株和羊关节炎株,它们与流产株和其他株的图谱完全不同;3型为禽株,尽管这些禽株之间的外膜抗原组份差异很大,但它们的外膜抗原大小及分子量相同;4型为猫肺炎株,它含有独特的 MOMP 及独特的外膜抗原电泳图谱。

在未来10~20年研究热点为:建立不同鸚鵡衣原体株的不同外膜抗原与引起不同动物疾病的内在联系,即该外膜抗原在引起此种疾病中的作用是什么;利用不同衣原体株的 MOMP 等外膜抗原的抗原性和免疫原性不同,对鸚鵡衣原体进行型别鉴定,建立大家所公认的血清型别,分别提取不同的外膜抗原,制造高免疫效力的亚单位多肽疫苗;将 MOMP 等外膜抗原的基因进行重组、克隆,在大肠杆菌中表达,生产基因工程疫苗。

#### 参考文献

- 1 Caldwell H D, et al. Antigenic analysis of Chlamydia by two-dimensional immunoelectrophoresis. A trachoma LGV-specific antigen. *J Immunol*, 1975, 115: 969
- 2 Salari S H, et al. Polypeptide composition of Chlamydia trachomatis. *J Gen Microbiol*, 1981, 123: 197
- 3 Caldwell H D, et al. Antigenic analysis of the major outer membrane protein of Chlamydia Spp. *Infect Immun*, 1987, 55: 1024
- 4 Perez-Martinez J A, et al. Antigenic diversity of Chlamydia Psittaci of mammalian origin determined by microimmunofluorescence. *Infect Immun*, 1985, 50: 905
- 5 Winsor D K, et al. Relationship between infectivity and cytopathology for L-929 Cells, membrane proteins, and antigenicity of avian isolates of chlamydia psittaci. *Ave Dis*, 1988, 32: 421
- 6 Fukushi H, et al. Immunochemical diversity of the major outer membrane protein of avian and mammalian chlamydia psittaci. *J Clin Microbiol*, 1988, 26: 675
- 7 Rodolakis A, et al. Relationship between virulence of Chlamydia Psittaci strains and establishment of persistent infection of McCoy Cells. *Vet Microbiol*, 1989, 19(1): 65
- 8 Anderson I E, et al. Efficacy against ovine enzootic abortion of an experimental vaccine containing purified elementary bodies of chlamydia psittaci. *Vet Microbiol*, 1990, 24(1): 21
- 9 Cevenini R, et al. Partial characterization of an 89KD highly immunoreactive protein from chlamydia psittaci Azz causing ovine abortion. *FEMS Microbiol Lett*, 1991, 81(1): 111
- 10 McClenaghan M, et al. Comparison of isolates of Chlamydia psittaci of ovine avian and feline origin by analysis of polypeptide profiles from purified elementary bodies. *Vet Microbiol*, 1991, 26(3): 269

(兰州兽医研究所段跃进、李英才副研究员、杨学礼研究员撰)

## 分子生物学在土壤微生物领域的应用

application of molecular-biology in soil microbes 土壤微生物最重要的作用是它们的生物地球化学活性。目前人们关注的是将原位土壤作为一个实体来研究土壤微生物生命活动的动态。显然,这类研究是和新技术的发展和运用分不开的。分子生物学在理论和手段上的突飞猛进,推动着土壤微生物研究进一步深入。

自1877年 Schloessing 发现土壤硝化作用开始,1891年 Winogradsky 发表硝化微生物研究报告以来,百年的土壤微生物学发展史的研究任务主要是根据农业生产的实际要求提出的。1945年,William Astbury 首次使用分子生物学这个名词。1953年, Watson 和 Crick 的 DNA 双螺旋结构模型的提出,开创了分子生物学的新纪元。分子生物学已成为生命科学里的一个带头学科,成为向生命世界争取自由的有力的武器。土壤微生物领域最具影响的课题无疑是分子生物学在土壤微生物领域的应用,主要有以下3个方面:(1)从土壤微生物中分离基因重新组合,然后将基因重组菌返回土壤以用于促进作物生长(如固 N 等)、控制害虫或降解污染物等不同的目的。(2)基因探测法及 PCR 在土壤微生物中的应用。(3) rRNA 顺序分析(主要是 16SrRNA 顺序分析)在土壤微生物分类、进化研究中的应用。

遗传工程菌——genetically engineered microorganism (简称 GEM)在土壤微生物领域的应用 GEM 的应用前景十分广阔。例如苏云金芽胞杆菌产生的  $\delta$ -内毒素蛋白,可用于防治鳞翅目昆虫,这种内毒素已商品化,用于生物防治已达20多年,但这种内毒素蛋白在使用时易被光解(日光分解)以及被土壤微生物分解。目前已将编码  $\delta$ -内毒素蛋白的基因从苏云金杆菌的一个亚种 Kurstaki 体内分出,转移到萤光假单胞菌体内。这种假单胞菌生活于玉米根际,用这种基因重组菌处理玉米种子,由于 tox 基因表达,这种假单胞菌亦能产生  $\delta$ -内毒素蛋白,并可直接作用于玉米植物,避免光解,因而可更有效地防治虫害,但目前使用遗传工程菌首先要考虑安全问题(对人、动物、植物,对土著土壤微生物区系在生态系统功能中所起的物质分解、能量流动的可能影响)。其次,重组基因在土壤环境中的稳定性如何、遗传工程菌的生存能力以及所携带的质粒或基因是否会扩散给土著微生物等等,都是目前土壤微生物研究人员所关注的。尤其是安全问题,实际上是关系到遗传工程菌能否实际应用。美国环保局 EPA 对此有严格规定,不单是土壤微生物领域的基因重组菌,所有的遗传工程菌在土壤中的行为必须在有安全保证的前提下才允许使用,因为谁也不能保证这些菌如用于工业等不同的目的时不会“泄漏”到环境中,而“泄漏”到环境中最后不是集中于地表水、地而水就是集中于土壤或底泥。实际上已有基因重组菌对土著微生物区系影响的报道。目前,这类研究相当多,但总的说来一般认为还是安全的。由于将遗传工程菌引入环境后存在重组基因是否稳定,引入的菌能否在土壤环境中生存,如能生存其生存能力又如何,其所携带的基因是否会扩散给土著微生物等等,因而引起很多关于质粒和重组基因以及遗传菌本身在土壤中的迁移、稳定、遗传工程菌在土壤中生存能力的研究。由于研究遗传工程菌引入环境后的安全及其生存能力、基因的稳定、扩散等问题的需要,导致了基因探测法与 PCR 技术引入土壤微生物。

基因探测法就是利用 DNA 碱基互补的特性,用限制性内切酶在不同的位点将目标菌的 DNA 或 RNA 切割成一个个大小不等的小片段,由于限制性内切酶对碱基识别的特异性,故切割位点也是特定的。然后用已知的 DNA 或 RNA 小片段(称为探针)与这些切割开的小片段混合,由于 DNA 或 RNA 碱基互补的特性,结构,相同的或类似的片段即与探针 DNA 杂交。目标菌的 DNA 与探针 DNA 是否有杂交和杂交多少可由  $^{32}\text{P}$ 、 $^{35}\text{S}$  等等标定的 Probe DNA(RNA)的放射强度测出,也可由萤光分析测出,即探针 DNA 由溴化乙锭染色,而 EtBr 在紫外光照射下呈萤光,或根据颜色反应测定,即先将生物素与 probe DNA 结合,然后以抗生物素蛋白(avidin)以及相应的酶与之起颜色反应;也有

用蛋白作连接将同位素标定的抗体与生物素结合的方法,测定方法较多,各有优缺点,但用得较多的为同位素标定及 EtBr 方法。至于目标菌与 Probe DNA 杂交,常用的方法为先将 DNA 从细胞中取出(用酶解或反复的速冻-升温方法)以氯化铯梯度离心,加入 EtBr,由于 EtBr 与 DNA 的亲合性,DNA 形成的带可在紫外光下呈荧光。DNA 经分离提纯、失活、酶解等处理,然置于支持物(醋酸纤维膜等)进行杂交。一般多将 DNA 小片段电泳分开,然后杂交的以放射自显影显示出来。此外,亦有先使目标菌在培养皿内长成菌后,用酶直接裂解细胞,然后放一滤膜将释出的 DNA 吸附进行杂交,即可知目标菌所在的菌落。除上述的各种方法外,还有将探针 DNA 与 rRNA 杂交然后用磁方法将未杂交的 DNA 与 rRNA 分开的等等。

由于用基因探测法检测的实际上是同源 DNA 或 RNA 片段,直接检测目标微生物的 DNA 或 RNA 与已知微生物的特征 DNA 或 RNA(即用来做 probe 的特征 DNA 小片段)的相似性,因为这是在分子水平上的检测,所以具有极高的准确性。近年来,基因探测法已逐渐应用到土壤微生物领域,随着 GEM 的应用而出现的安全性等问题都涉及到更有效地控制、监测土壤微生物的手段、方法。常规的培养基、常规的分选方法都有其局限性,不仅费时费事,灵敏度不高,且有的微生物在培养基中转接几代后会改变生理特性,还有的微生物是无法培养的。荧光抗体法,尤其是单克隆抗体法灵敏度高,可以识别单个细胞,但如识别一个微生物种则往往要一组不同的单克隆抗体,而且重复性也有问题。基因探测法的最大优点是:(1)不需培养微生物即可检测到(死的、活的均可测);(2)可从混合种群中检测特定微生物;(3)可测得自然界微生物群体中涉及到基因的改变与在群体中的转移。但目前的基因探测法也有一定的局限性,即一般要有一定的 DNA 量方可产生足够的检测信号(放射性、荧光等),而多聚酶链反应(PCR)可克服这一缺陷。

1985年,美国马利斯(K. B. Mullis)等创立 PCR 技术。它可以从极微量的生物材料中简便快速地得到大量特定的基因,或在众多复杂的生物基因中检测出单拷贝基因。其方法是将目标 DNA 链以限制性内切酶在特定的位点切割,在 95℃ 的温度下失活解链,然后降温在引物的引导下以目标 DNA 的单链为模板,以添加的核苷酸为原料合成目标 DNA,按(95℃ 模板变性→45~55℃ 引物复性→65~75℃ DNA 合成的顺序)经 20~30 个循环,即将原来的少量目标 DNA 复制百万倍以上。因此,PCR 的反应过程实际上是一个目标 DNA 的放大过程,即使原来只有一个目标 DNA,系 PCR 放大后也足以用基因探针测出。PCR 法现已推广应用到检测水体微生物及土壤微生物,但只是刚刚起步,实际应用中有时会碰到诸如土壤中释出的一些未知因素(如有机物或重金属等)对限制性内切酶活性的干扰等问题。随着 PCR 法在土壤微生物领域中的推广应用,这些暂时存在的技术问题正不断解决。

rRNA 顺序分析(主要是 16SrRNA 顺序分析)在土壤微生物分类、进化研究中的应用 rRNA 顺序分析的原理,是利用 rRNA 顺序(尤其是某些特征顺序或称信号顺序)的相似性确定微生物的亲缘、进化关系。因为 rRNA 在进化上较为古老且功能稳定,进化中较保守,并且容易从细胞中分离提纯。在 3 种 rRNA (5S、16S、23S)中,5SrRNA 分子太小(约 120 核苷酸),信息太少,故一般不用;16S(约 1500 核苷酸)、23S(约 3 000 核苷酸)含有一些高度保守的顺序区,故可用于分类及确定微生物的进化关系;其中 16S 比 23S 用得更多,因实验好做,其中某些 rRNA 顺序的高度保守区更是用作鉴定、检测微生物的根据,在 gene probe 中大量使用。目前,16SrRNA 顺序分析已广泛用于微生物分类与进化研究。由于 16SrRNA 顺序分析法的兴起,对微生物的进化认识已开始深入到分子水平,许多微生物的分类及进化地位已被重新改写。例如主要由于其特有的 16SrRNA 核苷酸顺序,并结合其与其他细菌不同的细胞壁结构(无肽聚糖,而是由 N-Z 酰葡萄糖胺和 N-Z 酰塔罗糖以  $\beta$ -1,3 糖苷键相连,短肽由 L 型氨基酸交

链的假肽聚糖)、细胞膜脂质联结为醚相联结而不是酯键相联等等,已将甲烷细菌、极端嗜盐细菌、极端嗜酸细菌及极端嗜热细菌单独分出为古细菌,与真细菌并列,共同组成原核微生物。16SrRNA 顺序分析在分类与进化研究上的重要性,对土壤微生物学的影响由此可以想见。

#### 参考文献

- 1 Obukowicz M G, et al. *Journal of Bacteriology*. 1986, 982~989
- 2 Holben W E, et al. *Appl Environ. Microbiol.* 1988, 703~711
- 3 Compeau G, et al. *Appl Environ. Microbiol.* 1988, 2432~2438
- 4 Holben W E. *Ecology*, 1988, 69(3): 561~568
- 5 Bej A K, et al. *Appl Environ Microbiol.* 1990, 307~314
- 6 Van Elsas J D, et al. *FEMS Microbiol Ecol.* 1990, 73: 1~12
- 7 Short K A, et al. *Appl Environ Microbiol.* 1991, 57: 412~418
- 8 Klingmuller W. *FEMS Microbiol Ecol* 1991, 107~116
- 9 Selenska S, et al. *FEMS Microbiolgy letters.* 1991, 80: 243~246
- 10 Pipke R, et al. *App Environ Microbiol.* 1992, 1258~1265

(南京大学叶定一博士、曹幼琴副教授撰,朱洪文审)

## 古生物学

**古孢粉学** Palaeopalynology 孢粉学是一门新兴的综合性科学,其名称最早是 1944 年由海德提出(H. A. Hydee.),它是古植物学的一门分支学科,是介于生物学与地质学之间。1969 年楚迪(R. H. Tschudy)等首次提出古孢粉学一词,它是古植物的一部分,研究这一学科的人用显微镜来观察地质历史时期中的孢子花粉和其他有关微体化石,进行分类比较和数量统计,并探索细胞壁或细胞膜中含有孢粉素或近似孢粉素物质微体化石的形态、分类、分布和生态等。

孢子花粉分析法,是用酸和碱浸解,用重液分离,即从沉积物中分离出孢子花粉和其它微体化石,又称孢型化石。孢型化石包括孢子花粉、疑源类、几丁虫、虫颚、以及微体藻群、几丁质真菌孢子和其真菌体微体有孔虫的壳体等。

古孢粉学在基础理论方面涉及到植物的系统发育、生理、生态、化学、地理和地质分布,古植物地理区系的形成与发展,各地质时期植物的演替和进化等问题。在应用科学方面,涉及到地层时代确定、海陆相地层的划分与对比、石油生成和时代、煤田地质、构造演化、古气候、古地理、沉积相、森林和草原形成与发展、古人类的地理环境等。

1950 年后古孢粉学得到迅速发展,从单纯孢子花粉形态描述深入到植物演化,古植物区系、海陆相沉积的划分与对比,古气候和古地理研究,并已发展到研究生物起源,陆生植物起源,裸子植物和被子植物起源的综合性学科。古孢粉学研究对象包括地质年代学、生物地层学、孢粉地层学和古生态学等。

根据 1977~1983 年克利姆普(G. O. W. Kremp)编辑孢粉数据库从元古代至第四纪有关孢粉学论文共计 12 000 篇,其中 80.0% 发表于 1950 年后。

自 1962 年在美国亚利桑那州成立国际孢粉学会(IFPS)以来先后还成立了美洲地层孢粉学联合会(AASP)和国际古生代微古植物学会(CIMP),此外还有各地区孢粉学会。

1950 年以前,没有专门孢粉学杂志,1954 年厄尔德曼(G. Erdtman)开始主编《Grana Palynologica》,后改为《Grana》。国际孢粉学会(IFPS)出版世界性的《Pollen et Spores》。1967 年美洲地层孢粉学会正式出版《Palynology》杂志,国际古生代微古植物学会为主出版《Journal of Micropalaeontology》,此外还有古植

物和孢粉学论评《Review of Palaeobotany and Palynology》等国际性刊物,对国际间古孢粉学学术交流起重要作用。

1957年美国宾夕法尼亚大学创办《化石孢子与花粉目录》,已出版34卷,记载了15 000种孢粉。1946年及1971年以来由埃森纳克第(A. Eisenack)等发表《化石沟鞭藻,刺球藻和疑源类化石目录》,已发行了多卷。1976年由詹森尼斯(J. Jansonius)等编辑整理《化石孢粉属征》整理出版4000余张卡片,对已发表的属重新厘定。

新技术和新方法的发展促使古孢粉学研究更深入,范围更加扩大。1940年腊斯克(Rusk)等发明电子显微镜,使古孢粉形态解剖研究得到进一步深入,扫描电镜已广泛应用于古孢粉学,可将外壁层纹饰放大1~2万倍,使属种的鉴定成为可能,解决了相差显微镜和光学显微镜所不能解决的问题。

电子计算机的运用,使古孢粉学开辟了新的前景,1967~1969年霍平(C. Hopping)提出用小数表明孢粉形状,孔槽纹饰和结构的方法,并在此基础上制成的穿孔卡片可快速地鉴定属种。计算机还可对古孢粉学进行模糊数学聚类分析,深入探讨古生态和古气候。

前寒武纪古孢粉近来已有迅速发展,过去人们对古老的生命知道甚少,由于疑源类在前寒武纪地层中很丰富,而且是具有地层应用远景的唯一化石,根据研究,疑源类最早出现在14亿年的前寒武纪地层中,早古生代是疑源类最发展时期。

陆生植物起源的探讨不仅是古植物学家关注的问题,也引起古孢粉学家极大兴趣,1959年霍夫迈斯特(W. S. Hoffmeister)在利比亚早志留世地层中发现具三裂孢子 *Ambitisporites* 和 *Punctatisporites*,1971~1985年格雷(J. Gray)等从北美、西欧及1988年理查森(J. B. Richardson)从北非利比亚晚奥陶世至早志留世发现具四孢子形的隐孢子(*Cryptosporites*)和小孢子后,证明了陆生植物起源于奥陶纪。

孢子花粉及其有关微体化石应用于地层时代的确定,划分与对比孢粉地层学,根据孢子花粉及其有关微体化石在地层中出现和消失可正确将地层划分到阶和阶以下地层单位。1981年,帕里斯(F. Paris)对西欧中奥陶世阿伦尼克阶至早泥盆世晚期艾姆斯阶几丁虫共建立了38带。1986年理查森(J. B. Richardson)等将老红砂岩大陆及其邻区志留纪—泥盆纪划分出19孢子带;1987年斯特里尔(M. Streel)等将西欧阿登—莱茵地区泥盆纪划分出51个奥佩尔带;1977年克莱顿(G. Clayton)等在西欧晚泥盆世至早二叠世共建立25个孢子带;1981年高联达将中国泥盆纪划分出8个孢子带;1985年将中国石炭纪划分出12个孢子带。孢子带的建立是古孢粉学的发展与深入和发展,例如 *Rettispora* *lepidophyta* 和 *Vallatisporites pusillites* 广泛出现在世界晚泥盆世地层中,是世界性的种,与划分泥盆纪和石炭纪最重要的化石。

古孢粉学是随着古植物学的基础理论和应用研究,以及植物学、地质学、地理学和考古学的需要发展起来的,为配合地质找矿和人类环境改造大自然的需要以及研究植物发展史,古植物区系和现代植物起源,古孢粉学有十分光明的前途。但古孢粉学本身的一些问题,如各地区古孢粉学序列的建立和健全,古孢粉的发生和其在植物系统分类上的位置及其亲缘关系,古孢粉地理分区和古植物生态学上的意义,以及古孢粉学在解决古地理学、古生态学和古气候学上的问题还有大量工作。

#### 参考文献

- 1 Tschudy R. H. et al. (eds.), *Aspects of palynology*, Wiley-Interscience, New York, 1969, 10201
- 2 Jansonius J, et al. *Genus file of Fossil spores and pollen*, Univ. Calgary, Dept Geol Spec Publ. 1976
- 3 Richardson, J. B. et al. *Silurian and Devonian spore Zones of the Old Sandstone Continent and adjacent Regions*, Geol Surv Canada Bull, 364, 1~79
- 4 Traverse A. *Palaeopalynology*, Boston: Unwin Hyman, 1988, 1~600

- 5 Gao Lianda. Late Devonian and Early Carboniferous Miospore Zonations and the Boundary of Devonian - Carboniferous in Chian. 11th. C. R. Inter. Strati. Geol Carb. (Beijing), V. 3, 1989, 165~181

(中国地质科学院地质研究所高联达研究员撰)

#### 疑源类

*acritarchs* 又称微古植物、抗酸微古植物,是分类位置不明的海相微体浮游化石,由一个有机壳体并包围一个中央空腔,形体多样;它可以是单细胞个体,也可以是结合于或藻类生命不同发展阶段。1963年埃维特(W. R. Evitt)和唐尼(C. Dowine)等将属沟鞭藻存在于地层中分类位置不明的有机壳体统称疑源类。1974~1981年威坎德尔(R. Wicander)等称为有机壳体浮游微古植物或浮游植物群,1974年威坎德尔(R. Wicander)将可能属于绿藻门的藻类从疑源类划分出来,其余为分类位置不明的藻类群,按照国际植物学命名规定,群之下分为亚群,亚群之下为形态属。疑源类分析研究方法与孢子花粉相同,故属于古孢粉学范畴。

疑源类从前寒武纪至现代的海洋中均有出现,最丰富是晚前寒武纪至志留纪,泥盆纪也较丰富,分异度最佳是奥陶纪,特别是早奥陶世。据统计,共有300个左右的疑源类属,90.0%的属都出现在前泥盆纪。疑源类自石炭统以后,在类型,分异度及出现频率上都急剧减少,它在地层上的重要性也随泥盆纪而结束。在晚古生代末期和中生代初期,具简单刺的小个体占优势,有时非常丰富,但在地层上延续时间长,在侏罗纪以上地层就不经常出现了。具有两个同心圆壳体的类型在晚白垩世又重新短暂出现,但未能进入第三纪,最后的长圆形类型的疑源类也在此层出现,但第三纪和第四纪疑源类报道很少。

至今已知最早期的微体化石出现是靠近南非巴伯东属于 *Swaziland* 系榕树林统磁石中,根据同位素年龄值大约有30亿年的历史,普遍认为是最早的沉积岩。在这些化石中,也有包括有固定微体生物化石,其中一种是细菌化石,1966年巴洪(E. S. Barghoon)等描述并命名为 *Eobacterium isolatum* 及椭圆形的其它藻类化石,1965年泰勒(S. A. Tyler)等和薛夫(J. W. Schopf)详细报道了加拿大安大略的冈弗林铁组属于前寒武纪微体疑源类化石,并命名为体论孢。

寒武纪早期出现大量的具刺类型疑源类是该化石从元古界至古生界演化史中重要转折点,在这一时期生物变化不是局部的,而是全球性的。寒武纪末和奥陶纪初,棘刺亚群和双型亚群的大量出现,致使疑源类分异度高,处于高度繁荣时期。1965~1973年马丁(F. Martin)、1970~1979年克拉默(Cramer)等,1959~1976年齐莫菲耶夫(B. V. Timofeev)和1965~1977年活弗尔多娃等先后研究了西欧、北非和原苏联早古生代疑源类,并建立了早古生代疑源类序列。1974年活弗尔多娃划出欧洲两个疑源类地理区,一个是波罗的海疑源类区,另一个是地中海疑源类区,并深入探讨疑源类与沉积相的关系。1977年普拉福尔德(G. Playford)和1974~1986年威坎德尔(R. Wicander)等对加拿大、美国和澳大利亚泥盆纪疑源类研究对泥盆纪地层划分与对比有重要作用。

斯托克曼(F. Stockmans)等曾系统研究比利时晚泥盆世至早石炭世疑源类。1982年雅各布森(S. R. Jacobson)对美国犹他州二叠纪和1970年萨尔吉特(A. S. Sarjeant)从巴基斯坦盐岭地区二叠纪和早三叠世地层中发现疑源类,这一发现对二叠纪和早三叠纪地层划分和沉积相的研究有十分重要意义。

疑源类研究在中国有很大发展,邢裕盛等(1974)对河北蓟景前寒武纪地层中发现丰富的疑源类,是中国最早关于前寒武纪疑源类的系统研究。该作者对云南、辽东、安徽和长江三峡地区晚前寒武纪和早寒武世疑源类系统研究,对前寒武系和寒武纪界线及疑源类序列的建立有重要作用。1988年马丁(F. Martin)等在吉林浑江地区早奥陶世地层发现丰富的,分异度高的疑源类。1986~1988年高联达在西藏珠穆朗玛峰地区晚泥盆世至早石炭世发



现丰富的疑源类,特别是早石炭世早期疑源类属种多,分异度高,这是目前所知世界上早石炭世保存最好,分异度高疑源类的最佳地区。

疑源类形态多样,1963年唐尼等将疑源类作为群(*Incertae Sedis*),其下为亚群(*Subgroup*),其名称包括描述主要形态特征的词干和有一个标准的词尾—*Omorphitae*,根据其形态特征,1963年唐尼等将疑源类分为8个亚群:(1)棘刺亚群(*Subgroup Acanthomorphitae*),指具球形到椭圆形的壳体和辐射状似刺的突起物的疑源类。(2)多角形亚群(*Subgroup Polygonomorphitae*)系指具有一个多角形或亚多角形的壳体,自角部伸出4~6枚中空的刺。(3)网膜形亚群(*Subgroup Herkomorphitae*),指壳体外缘有薄的隔片或网纹,此网纹可能为隆脊(*Dictyotidium*)或突起(如*Cymatiogalea*)具有简单或分叉的峰脊。(4)球形亚群(*Subgroup Sphaeromorphitae*),该亚群从简单的球形到椭圆形的壳体,具单层壁。(5)棱形亚群(*Subgroup Netromorphitae*),指壳体呈伸长的棱形壳体。(6)翼形亚群(*Subgroup Pteromorphitae*),指球形的壳体外缘具薄的赤道膜。(7)棱形亚群(*Subgroup Prismaticomorphitae*),指壳体多面体形,具有角或加厚的边缘,具有向外展开的顶点似刺的突起或似烟筒的突起。(8)双型亚群(*Subgroup Diacromorphitae*)指形状圆形到椭圆或哑铃形的壳体,两端具粗糙、颗粒或刺状纹饰。

此外还可划分出双圆形亚群(*Subgroup Disphaeromorphitae*)、双刺圆形亚群(*Subgroup Dinetromorphitae*)和扁平球形亚群(*Subgroup Platymorphitae*)等。

全世界还有许多地区尚未进行疑源类研究,还有大量的属种未被发现,因此这一工作仍将有很大发展前景,特别是在生物起源、真核生物起源方面有许多工作需要探索。总之疑源类在地质学、古地理学、古生态和沉积相方面研究刚刚起步,需要进行的研究工作甚多。

参考文献

- 1 Dowine C, et al. Dinoflagellates, Hystrichospheres and the classification of the Acritarchs. *Stanford Univ Publ Geol Sci.* 1963, 7(8): 1~16
- 2 Timoffev B V. Ancient Flora of the Baltic Region and Its Stratigraphic significance. *Tudy, VNIGTI (Leningrad)*, 1959, 129: 1~136
- 3 邢裕盛,等. 燕辽地区震旦纪微古植物及其地质意义. *地质学报*, 1973, 第1期1~31
- 4 Eisenack A, et al. Katalogy der fossilen Dinoflagellaten, Hystrichosphären und verwandten Mikrofossilien. 1973, 3, Acritarchs, part, 1. Stuttgart; E. Schweizerbart'sche 1104P
- 5 Playford G. Lower and Middle Devonian Acritarchs of the Moore River Basin, Ontario Geol Surv GCanada Bull., 1977, 279: 1~87
- 6 Cramer FH. Lower Palaeozoic Acritarchs. *Palinologia*, 1979, 1: 17~160
- 7 Gao Lianda. Late Devonian and Early Carboniferous Acritarchs from Nyalam County, Xizang (Tibet), China. *Rev Palaeobot Polynol.* 1986, 47: 17~30
- 8 高联达. 西藏聂拉木晚泥盆世至早石炭世疑源类(Acritarchs). 喜马拉雅岩石圈构造演化西藏古生物论文集. 北京:地质出版社, 1988. 384~423
- 9 高联达. 云南武定下奥陶统红石崖组疑源类. *地质论评*, 1991, 37(5): 445~455

(中国地质科学院地质研究所高联达研究员撰)

**几丁虫** chitinozoans 分类位置不明,生活在下古生代海洋中的微体化石。几丁虫形状似瓶形、特征显著,在地质年代确定和沉积环境研究有十分重要作用。

1931年埃森纳克(A. Eisenack)在研究北欧波罗的海地区奥陶—志留系沉积物中发现的一群有机壳体似假几丁质而命名,由C-H-O-N组成,类似孢粉质。50年代几丁虫研究得到迅速的发展,迄今为止,已描述几丁虫有40余属500余种,它的地质历程从奥陶纪—泥盆纪,但也有其它时代的报道,例如:1977年布洛塞尔(J. W. Blosser)等在美国亚利桑那州大峡谷晚前寒武系Chuar群(75±100)中发现几丁虫;1960年威尔逊(L. R. Wilson,等)从美国堪萨斯州密西西比亚系中发现几丁虫;1973年霍洛威茨(A. S. Horowitz)在以色列南部上石炭统和下二叠统发现几丁虫;1963年埃科尔斯(D. J. Echols)从美国堪萨斯州二叠系发现几丁虫,但对上述报道尚有一些争议。

几丁虫壳体直径范围大小是从30~1500μm,大部分在500μm以下。几丁虫个体小,抗酸,抗风化和抗高温变质的特点,演化迅速,可以保存在下古生代各种岩石中,因而引起人们的注意,特别在无大化石的浅变质岩石时代的确定方面具有特殊意义。

50年代,西方工业的发展要求寻找石油和其他矿产资源,1959~1962年陶古尔杜(Ph. Taugourdeau)等从北非阿尔及利亚撒哈拉沙漠的志留纪至泥盆系钻孔中发现了7 000个几丁虫个体,其中一半以上鉴定到种,并确定了每个层位几丁虫属种含量及分布,岩性和层位之间相互关系。在已发现500个以上的几丁虫种中,有1/4以上是研究石油有关地层中发现笔石确定的。现在北美,北美和澳大利亚正深入研究几丁虫不仅用于生油层和贮油层的时代确定,而且进一步探讨几丁虫在石油过程中的作用,确定石油的热变指数以找寻更多的石油。

几丁虫在地层时代的确定有重要作用,1981帕里斯(F. P. Paris)对西欧中奥陶世阿伦尼克阶早泥盆世晚期区艾姆斯阶研究,建立了38个几丁虫带,其中奥陶纪18带,志留纪和泥盆纪20带。1991年帕里斯将北冈瓦纳大陆奥陶纪建立了22个几丁虫带。几丁虫化石不仅可确定地层时代,而且可以进行大区域地层划分与对比和奥陶纪—志留纪,志留纪—泥盆纪界线地层研究。

几丁虫与沉积环境,古地理和古生态关系十分密切。几丁虫是海生微体化石,沉积环境的变化,海水温度,咸度对几丁虫属种变化的影响是非常明显的。1974年劳菲尔德(S. Luefeld)对瑞典戈特兰岛志留纪几丁虫研究后认为,该地区几丁虫距今4亿年前最适合的生活环境是在生物礁外缘30~40km的海水中,在该海域中生活的几丁虫既有浮游,也有底栖,并主要在低能的环境中生活。1980年帕里斯从西欧的研究中证明几丁虫主要在3种海域中生活:(1)潮间带和亚潮间带;(2)浅海;(3)外陆棚区。时代相同面环境不同,属种并不完全相同。几丁虫常与笔石、腕足类、三叶虫、珊瑚、疑源类、虫卵、孢子等共生,因此要恢复地质历史时期的古环境,古生态,几丁虫有重要作用。几丁虫的型态变异反映出受温度、咸度,以及埋藏时间影响而改变。

几丁虫仅保存外骨骼,称壳体,其成份由几丁质或假几丁质组成。壳体常呈瓶形、漏斗形、圆柱形或球形,它们总是以中心长轴呈辐射对称。几丁虫一般是结成链,其接触方式有极大的不同,可以是口孔与底或边与边相连接,或在一个囊状茧内松散相连(R. Kozlowski, 1963),在口孔与底相连的类型中,底可以仅在下一个个体的口孔中或较少是整个体室被包围住了;或者用尖突或结合器相连接,相连接个体的颈环或颈基包围着尖突或结合器。

几丁虫的某些种可以成簇出现,多到数百个壳体排成一行或数行;它们的口孔向一致的方向排列。有的种,如*Desmochitina minor*可以为单一壳体,也可以结成链条或成簇,有或无茧包围。

几丁虫壳体由体室和颈两部分组成,体室轮廓呈圆柱形、锥形、球形。壳体底部具一囊形结构,称复囊,其作用不甚清楚,复囊可能由于受压而形成的褶皱。壳体的基部称反口极,其形状呈扁平形或穹圆形。有些种类基部中央有小孔;少数种类中,小孔四周具同心纹构造称底脐。在串联的类型中彼此连接物称联桥。体室底部的两侧边缘称底缘,呈锐角或钝角形,有的底缘的两侧边缘伸出凸刺的附属物。

壳体的另一端称颈,常为圆柱形,颈的末端称假口,颈顶微

扩大而形成颈口状的颈环,完整壳体假口上具有一个口盖。透射光下几丁虫内部构造是一个略为圆柱形且明显可收缩的,位于颈下称颈塞或前体,它可能向口扩展,或被一个环盖所封闭。

几丁虫壳壁的结构还不甚清楚,通过红外线观察可见两层,内层薄而光滑呈外孔状海绵结构,外层厚而坚实。壳壁表面附生有中形状各异的纹饰,其形状呈简单的,短而中空的角度,刺状,疤状,叉刺或复杂的多枝状,条纹状,以及具有簇状或丝状等纹饰。

扫描电镜(SEM)广泛应用,对几丁虫壳体表面和内部结构,致使几丁虫研究进入了新的阶段,对过去透射光下的几丁虫需用SEM重新检查,厘订,使其更合理,更科学。

1931年埃森纳克开始描述几丁虫,但几丁虫名称却支持了它属于动物界而非植物界。埃森纳克最初认为是属于原生动物,有可能属于有壳变形类 *Thecamoebians* 的根足虫类 *Rhizopoda*, 其后他又认为与淡水鞭毛藻类的眼虫藻类有亲缘关系,后因几丁虫壳壁性质而被否定。

1968年埃森纳克(A. Eisenack)从瑞典戈特兰岛的 *Conchitina proboscifera* Eisenack 的20 000个个体标本进行微量元素分析。结果是:C=66.83%,H=5.277%,N=9.98,支持了几丁虫属于动物界的结论。

一些学者认为几丁虫可能是某些无脊椎动物的卵囊,里德(C. Reid)等认为几丁虫与丁丁虫有亲缘关系。1981年沙尔伦特(R. Schallreuter)在研究瑞典 Schoren 地区中奥陶世几丁虫时正式提议几丁虫属于植物界,并命名为几丁植物群。

综上所述,几丁虫的归属是一个非常复杂问题,它有可能属于已灭绝的一类动物。

中国虽已开展几丁虫研究,但世界许多地区尚未开展或研究很不深入。同时还有大量几丁虫属未被发现,尚未建立或建立世界性的几丁虫序列,在结合古地理,古生态,几丁虫性质等许多问题也还需深入,因此几丁虫研究有非常广阔的前景。

#### 参考文献

- 1 Eisenack, A. Neue Mikrofossilien des baltischen Silurs. I Paläontol Z. 1931, 13, 74~118
- 2 Taugourdeau, Ph. Les Chitinozoa. Techniques d'études, Morphologie et Classification, Soc Geol France Mem., 1966, V. 45(Mem. 104), 1~64
- 3 Combaz A. Microfossiles organiques du Paleozoique. Les Chitinozoaires, 1967, V 1 1~96
- 4 Combaz A, et al. Microfossiles organiques du Paleozoique. 2. Chitinozoaires. Commission international de Microflore du Paleozoique 1967, 1-43, editions du C N R S
- 5 Jansonius J. Classification and Stratigraphic application of Chitinozoa. Proc. Norrth Mmer. Paleont Gonv G. 1970, 789~808
- 6 Wrona R. Microarchitecture of the Chitinozoan vesicles and Its Paleobiological significance. Acta Palaeontologica Polonica. 1980, 25(1): 123~163
- 7 Paris E. Les Chitinozoaires dans le Paleozoique du Sud-ouest de l'Europe. Memoires de la Societe Geologique et minerologique de Bretagne 1981, 26, 1~412
- 8 Pais F. The Ordovician Chitinozoan biozones of the Northern Gondwana Domain. Rev Paleobot Oplynol. 1990, 66(1990): 181~209
- 9 高联达. 云南武定下奥陶统红石崖组几丁虫. 地层古生物论文集. 1986, 14: 131~152  
(中国地质科学院地质研究所高联达研究员撰)

**三叶虫** trilobites 三叶虫类是已经完全绝灭了的海生无脊椎动物化石,属节肢动物门三叶虫纲。生存于距今6亿多年至2亿多年的古生代地质时期。三叶虫形体各异,一般呈近椭圆形,腹

背扁平,大小悬殊,由于背壳横向可分为头、胸、尾三部,纵向又明显地分为一个轴叶和两个肋叶,因而得名。三叶虫种类繁多,演化迅速,适应各种不同的海洋环境。因而对于研究古代沉积环境、古地理和鉴定地层年代,划分对比地层都具有重要的地质学意义。三叶虫出现于早古生代寒武纪初期,是地球上最早大量成为化石的动物,其特征明显,保存完好,对于研究动物的分类和系统演化亦具有极为密切的古生物学意义。

对三叶虫的认识,首推中国明崇祯年间张华东在山东泰安大汶口发现的蝙蝠石(*Drepanura premesnili*)化石。继17世纪以来,三叶虫仅为化石收藏家所珍藏。正式描述和以插图记载的,始于鲁德(Lhwyd, 1698),称为三瘤虫。1745年林奈(Linne)曾叙述过几种三叶虫,并认为是昆虫类的一部分(即今之节肢动物),统称为奇异昆虫介(*Entomolithus paradoxus*)。虽然瓦伦堡(Wahlenberg, 1821)仍趋向于采用昆虫介(*Entomotractes*)一名,而且达尔曼(Dalman, 1826)又创用了古虫类(*Palaeodes*)一词意欲代替,但由于这类动物背壳的三分性极端明显,所以瓦尔其walch, 1771的“三叶虫”就普遍地被承认和应用了。

三叶虫的科学研究开始于19世纪早期,偏重于一些描述性专著,多为属种描述,个别学者进行了初步分类。如布朗尼亚(Bronghart, 1822)、达尔曼(Dalman, 1827)和昆史台德(Quenstedt, 1837)等。大量的研究工作是在近100年内进行的。19世纪中叶以来,不仅出版了很多区域性专著,对三叶虫进行了描述,积累了很多资料,如Joachim Barrande(1852, 1872)出版了他的两部巨著和60个4开的图版,描述了捷克斯洛伐克布拉格周围古生代地层中的三叶虫,内容详尽精确,具有开创价值。随后欧洲其它地区和各大陆的三叶虫动物群专著逐渐增多,而且对三叶虫的个体发育、系统演化、分类、分布及解剖特征等都展开了研究,发表了很多专题论文。著名的例如Stubblefield(1926)对舒马德虫(*Shumardia pusilla*)和卢衍豪(1939)对四川通仙寺虫(*Yuehsienzeella szechuanensis*)等个体发育的研究;Beecher(1894, 1895)和Walcott(1918)对附肢的研究等都极为重要。此一阶段各地区的主要研究学者及其重要著作发表时间略如列下:

研究捷克和斯洛伐克的有Barrande(1852, 1872), Novák(1883), Prantl(1947~1954)等;波兰有Kozłowski(1923), Kielan(1957)等;前苏联有Eichwald(1825), Schmidt(1881~1904), Opik(1937), Lermontova(1940~1955)等;斯塔得纳维亚有Angelin(1851~1878), Brögger(1878~1886), Warburg(1925~1939), Störmer(1939~1951), Troedsson(1937), Henningsmoen(1957)等;德国有Gürich(1901), R. Richter, E. Richter(1921~1956)等;英国有Salter(1853~1883), Woodward(1883~1902), Reed(1896~1934), Lake(1906~1946)等;法国有Rouault(1846), Thoral(1935~1948)等;北美有Hall(1862~1888), Ford(1872), Clarke(1890~1913), Billings(1859~1865), Matthew(1882~1897), Walcott(1886~1924), Raserti(1943~1955), Raymond(1913~1937), Beecher(1897), Kesser(1928~1942), Lochman(1936~1944), Whittington(1940~1953)等;南美有Kobayashi(1934~1951), Kayser(1882~1889), Ulich(1930), Harrington&Leanza(1938~1957)等;北非有Salter(1864), Hupé(1953~1955)等;澳洲有Whitehouse(1936, 1939), shergold(1975)等;亚洲有Lorenz(1906), Mansuy(1916), Walcott(1886~1924), Resser(1928~1942), Endo(1937), Reed(1896~1934), Kobayashi(1935), 孙云铸(1923~1939), 盛莘夫(1934, 1958), 卢衍豪(1939~1980)和张文堂(1949~1980)等。

中国是产生三叶虫最多的国家之一,从浙江到新疆,从东北到西南的古生代地层中都有三叶虫发现。建国前,除上述外籍作者外,孙云铸于1924年发表《中国北部寒武纪动物化石》,记载了三叶虫约40种;1935年又完成了《中国北部上寒武纪三叶虫化石》专著,记述约56种三叶虫,奠定了华北晚寒武世地层分层和化石分带的基础。1931年孙云铸和1934年盛莘夫分别研究中国

中部及南部奥陶纪和浙江早奥陶世三叶虫,共收集描述了约40种,为研究中国南方奥陶纪三叶虫提供了重要的材料。抗日战争时期,研究集中于西南诸省,对寒武纪和奥陶纪三叶虫做了不少工作,其中如孙云铸的滇西晚寒武世,盛莘夫的川黔边境奥陶纪,许杰的鄂西早奥陶世和卢衍豪的云南昆明早寒武世三叶虫的研究等。

后来三叶虫的研究有了很大发展,研究范围更为广泛,除修正和补充一些区域性专著外,并着重一些综合性总结研究和拓展了一些新的研究领域,在课题和研究技术方面都有所突破。区域性专著如卢衍豪等(1965)《中国的三叶虫》,张文堂、卢衍豪等(1980)《西南地区寒武纪三叶虫动物群》,Tjernvik(1956)的《瑞典早奥陶世地层及动物群》,G. Hahn,和 R. Hahn,(1975)的《晚泥盆世石炭纪和二叠纪的三叶虫》,Shergold(1975)的《澳大利亚西部昆士兰布克河构造带晚寒武世早奥陶世的三叶虫》等。权威的总结性专著为 R. C. Moore;等(1959)的《无脊椎古生物学导论 O 部》,对三叶虫的形态特征、个体发育、分类、分布和系统描述等都进行了精辟的综述。由于研究技术不断改进更新,标本加工精致,研究领域得以广泛深入,如用酸溶液浸泡硅质标本,可详细揭露内、外完整的外骨骼,可提供大小序列标本新而小的生长期,以便研究其蜕壳龄虫及种发生的大小变化(Sheldon, 1988)。光学和电子显微镜已被用于研究眼(Clarkson, 1966; Ahlberg, 1988)和表皮厚度(Fortey & Wilmot, 1991)及新的超微结构(Dalingwater 等, 1991)。结合地层层序仔细收集化石,可揭示一系列种的演化方向和种的群落与环境的关系(Courtesolle 等, 1991; Morzadec, 1992)。此外,对三叶虫的古生态学、古地理学(Henry & Destombes, 1991)、生物埋藏学、功能形态学(Speyer, 1988)、病理研究(Rudkin, 1984; Owen, 1985; 韩乃仁等, 1991)以及动物群时空分布的新资料等,都是今后需要深入研究的三叶虫古动物学。

参考文献

- 1 Moore R C, et. Treatise on Invertebrate Paleontology. Pt. O, Arthropoda 1, 1959, 560
- 2 卢衍豪,等. 三叶虫. 北京:科学出版社, 1963. 1~3
- 3 Tairbridge R W, Jablonski I. The Encyclopedia of paleontology, 1979, 828
- 4 Peter R S. Trilobite size--frequency distribution, recognition of instars, and Phylitic size changes, Lethaia, 1988, 21(4): 293~306
- 5 Stephen E S. Biostratigraphy and Functional Morphology of enrollment in two Middle Devonian trilobite, Lethaia, 1988, 21(2): 121~138
- 6 韩乃仁,等. 湖北莱氏虫的胸肋畸形. 古生物学报, 1991, 30(1): 126~128
- 7 Fortey R A, Wilmot N V. Trilobite cuticle thickness in relation to Palaeoenvironment, Palaeontologische Zeitschrift, 1991, Bd. 65, Heft 1, 2: 141~151. Z
- 8 Dalingwater J E, et al. Cuticular Ultrastructure of the trilobite *Ellipsocephalus polytomus* from the Middle Cambrian of Oland, Sweden, Palaeontology, 1991, 34(1): 205~217
- 9 Morzadec P. Evolution des Asteropyginae (Trilobita) et Variations eustatiques au Dévonien, Lethaia, 1992, 25(1): 85

(成都理工学院谭光弼教授撰)

**虫颚** *scolecodonts* 又称虫牙,是环节动物门中海生多毛纲动物口中成对嚼吃食物的器官,其形状由众多参差不齐的锯齿板组成,它的地质历程从5亿年前的奥陶纪至今,现仍生活在海洋中,但类别有很大不同。

1855年马萨隆哥(Massalongo)从意大利的第三纪地层中首

次记录了虫颚化石,1870~1880年海蒂(G. Hinde)研究了西欧和北美下古生代地层中的虫颚化石;1933~1969年埃勒(E. R. Eller)研究北美奥陶纪至泥盆纪的虫颚化石,并开始利用虫颚化石,来确定地层时代。1933年克伦艾斯(G. Cronois)深入研究虫颚化石的齿形模式,并以数字来显示虫颚颚片的各部位,使该化石研究进入了新阶段。

1965~1976年间陶古尔杜(Ph. Taugourdeau)先后研究北非和西欧志留纪至泥盆纪的虫颚化石,对该化石结构,形态进行研究,详细分类和命名,使之数字化,贮存在电子计算机内,供检索和鉴定属种之用。1971年詹森尼斯(J. Jansonius)等和1978年陶古尔杜对已发现的虫颚化石进行总结,共计79属,898种和变种,其中奥陶纪295种,志留纪152种,泥盆纪341种,其余为泥盆纪以后时代。中国虫颚化石研究甚少,还处于开始阶段。

研究证明,虫颚化石演化速率快,特征明显,易识别,易保存,抗酸、抗风化和抗高温(变质)等特点,在地质时代确定,沉积相,在古生态和古气候研究方面有重要作用。

虫颚的上颚由几丁质加碳酸钙组成,在现代属种中碳酸钙包裹在暴露部分之上。上颚化石并不常见,这说明它们可能主要或全部由钙质组成,因此在化学处理中遭到破坏。

颚片又称颚器,不规则,由3部分组成:即颚片,连结颚片的支柱板,又称载基板,基板可见一对或仅有一枚,这3部分在化石状态下是分散保存的。颚片总是成对的,不同种类的颚片其对数是不同的,有的种颚片有5对之多。具有5对颚片的分别称钳片(I<sub>s</sub>),是颚片中最大的一对,正常情况下呈瓜状,但并不一定。它们总是成对,其形状相似或略有不同。齿片(II<sub>s</sub>)也是成对的,但形状多变,正常情况下有两枚,有时其形状明显不相似,位置偏。锐齿片(III<sub>s</sub>)常以单片出现,位于颚器左侧,亦称不对称片,但板少数是对称的。IV<sub>s</sub>和间齿片都是成对的,但其形状不一定都相似。由这5个部分组成的颚片称为钳或螯。1984年埃德加尔(D. R. Edgar)将颚片分成3部分,即前颚片,后颚片和载板。

除颚骨本身外,在钳与齿板间还有间齿片,而且颚器可以有几对或一整圈的侧齿和前齿来加强。尽管虫颚形状有明显变化,左侧和右侧的板片通常还是易于辨别的,因为它们一般均向里弯曲,并有锯齿状,尖或倒刺状的内缘;朝下的一面具一槽,又称肌窝,是肌肉固着之处。

根据颚片的形态特征,可将颚片分为四种类型,即片颚型、栉颚型、钳颚型和齿颚型,无论何种颚片,在化石状态下常呈黑色而有光泽。

颚片因搬运和埋藏,或分析处理等因素,很难见到完整的颚片。颚片大小变化从几十微米至几百微米,现代海洋中环节动物的颚片从12.5cm至几米。颚片外形很像牙形石,但虫颚化石由几丁质或角质组成,牙形石由磷酸钙质组成,虫颚化石颚片基部有一个十分明显的肌窝,后者不溶于硝酸和氢氟酸。

1968年埃森纳克(A. Eisenack)从瑞典戈特兰岛奥陶纪虫颚化石的微量元素分析结果为:C=73.0%,H=6.05%,N=1.94%,证明有与几丁虫相似的组成成分。

环形动物海生多毛类许多属种是生活在现代海洋中,但个体均大于化石的海生多毛类。虫颚化石研究对探讨环形动物的演化有十分重要的意义,由于该化石特征明显,演化速率快,含量丰富,抗变质等特点,在确定地层时代,沉积相,古地理和古生态方面有独特作用。在石油,天然气勘探中确定其生成时代,石油的成熟度(热变指数)有重要作用。

虫颚化石常与笔石、三叶虫、腕足类、头足类、珊瑚、牙形石共生,在孢子花粉分析中,孢子、几丁虫、疑源类和虫颚化石共同出现在同一样品中,又称抱型化石或抗酸微生物。

目前虫颚化石仅在少数国家进行研究,它的重要作用正在日益显示非常广阔的前景。

参考文献

- 1 Snajdr M. On Errant Polychaeta from the Lower Palaeozoic of Bohemia. Sbornik Geol Surv Czechoslovakia, 1951, v. 18

- 241~296
- 2 Eller E R. Scolecodonts of the Delaware Limestone Devonian of Ohio and Ontario. *Ann Carnegie Mus.*, 1964, T. 36, art, 21, 229~275
  - 3 Kielan-Jawerwska Z. Polychaete jaw apparatuses from the Ordovician and Silurian of Poland and a comparison with modern forms. *Acta Palaeontologica Polonica*, 1966, 16, 1~152
  - 4 Schwab K W. Microstructure of some fossil and recent Scolecodonts. *J Paleont.*, 1966, 40(2), 416~423
  - 5 Jansonius J, et al. Scolecodonts: I. Descriptive terminology and revision of systematic nomenclature; II. Lectotypes, New names for Homonyms, index of speices. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1971, 19(1), 281~302
  - 6 Moreau-Benoit A. Recherches de Palynologie et de Plancologie. *Mem. Soc. Geol Mineral de Bretagne*, 1974, 1~248
  - 7 Mierzejewska G, et al. Electron microscope investigations of the fossil and recent Polyjaete jaws from the genus *Glycera SAVIGNY 1818*, France *Muzeum Ziemi*, 1977, 26, 127~130
  - 8 Taugourdeau Ph. Les Scolecodonts disperses. *Cahiers de Micropaleontologie*, 1978, 2:1~104
  - 9 Colbath G K, et al. On the chemical composition of fossil Polychaete Jaws. *J. Paleont.*, 1980, 54(2): 485~488
  - 10 Edgar D R. Polychaetes of the Lower And Middle Palaeozoic; a multielement analysis and a phylogenetic outline. 6th Int. Palynol Conf Calgary, Abstract, 1984, 39  
(中国地质科学院地质研究所高联达研究员撰)

**牙形动物门** *conodonta* 牙形动物是一类已经绝灭了的海生生物, 动物体本身两侧对称, 营自由游泳生活; 其硬体部分是该动物咀嚼功能的齿状体, 称为牙形石。牙形动物死后, 由于其个体微小, 硬体往往分散保存, 大小一般在0.1~1mm之间, 最大可达5mm, 硬体的颜色为琥珀色, 被埋藏后, 受地质温度作用的影响, 可由琥珀褐色变为黑色, 直至浅灰色, 透明或不透明, 变质后性脆, 常见有保存为碎片。化学成分磷酸钙, 一般不溶于弱酸, 较易从岩石中分离出来。牙形石最早由俄国潘德尔(C. H. Pander, 1856)描述, 虽令人迷惑, 但由于它演化迅速, 特征明显, 分布广泛, 很快成为一种重要的鉴定地层年代的标准化石。

**牙形动物的形态特征** 牙形动物是已经绝灭了的生物, 其软体形态曾长期围绕古生物学界, 引起大家种种推测。1983年Briggs等描述了产自苏格兰的爱丁堡(Edinburgh)北部下石炭统坎南阶格兰顿砂岩的薄层状纹层灰岩层中一块带有软体印痕的动物标本, 学者们认为是牙形动物本身。该动物个体长约40.5mm, 宽约1.8mm, 头部稍宽约1.95mm, 身体细长呈鳗形, 躯干后部分节, 有“V”字形构造, 尖顶朝向前端; 具有后鳍, 和尾鳍, 保存有轴迹, 在“头部”两侧具有叶状构造, 在两个叶状构造之间可能有一空腔通到口, 牙形石分子成3个分离的组合直接位于前方两个叶状构造之后, 类似的样品已发现5块, 其中4块发现于苏格兰的爱丁堡, 1块在美国威斯康星州志留系白云岩中。关于牙形动物的其它特征, 如取食方式, 生殖等由于保存的标本没有体现, 有待于进一步研究证实。

**牙形石的形态特征** 牙形动物的硬体牙形石个体微小, 形态多样, 一般划分为单锥型, 复合型和平台型。(1)单锥型。仅有一个齿锥, 牛角状或弯曲状, 分为主齿和基部, 主齿向尖顶逐渐变尖, 基部膨大; 主齿表面光滑或具有纵向脊线, 沟线, 肋等装饰; 主齿横切面呈现各种形态, 如棱形、圆形、近三角形等; 基部内有深浅大小不同的穴称为基腔。主齿断面和基腔的形态大小是属的主要特征。如 *Panderodus*。(2)复合型。除主齿外还具有细齿, 细齿数目不一, 始于基部, 据形态又可分为齿棒状(齿柄状)和齿片

状, 前者主齿明显, 且形成疏密不一的、分离的细齿, 如 *Hindeodella*; 后者主齿与细齿等大或稍大于细齿, 常彼此愈合, 如 *Ozakodion*。(3)平台型。由复合型的基部扩大而呈平台型, 由平台和齿片组成, 习惯上具细齿的一面称口面, 反之称为反口面, 其齿片的一端称为前端, 齿片上的细齿较高, 且排成一列; 细齿延伸至平台上, 齿体低呈瘤状称为隆脊。平台上可具有横脊、齿瘤等装饰。反口面发育基腔; 与口面的隆脊相对应的位置上发育龙脊, 如 *Polygnathus*, *Palmatolepis* 等。

1934年, Schmidt和Scott分别在欧洲和美国的晚石炭世黑色页岩中发现了牙形石自然集群, 即在一个层面上可见到不同“属种”的牙形石有规律的成对成行的排列在一起, 它保留了牙形动物的本来面貌, 被称之为自然集群(器官属)。由于地层中常见散落的分子, 给器官研究带来了不便。G. Klapper, 和C. M. Philip, (1971)通过奥陶纪散落牙形石的研究提出器官属恢复的依据: (1)在采集的大量样品中, 器官构成分子呈数学比例; (2)各分子地层时限的相似性; (3)各分子的大小、细齿、基腔特征、白色物质的分布和其它形态特征的相似性。

Sweet (1981, 1988)据器官属的构成将牙形石划分为锥形分子, 枝形分子和刷形分子。每种分子又可以进一步细分。

**牙形石的分类** 由于牙形石载体动物不明, 长期以来是以形态属鉴定描述, 自然集群被发现以后, 又有许多学者用器官属的概念进行鉴定描述, 这样就造成了两者并用的局面, 给分类工作带来了一定的难度, 但随着时间的推移, 研究的深入, 愈来愈趋向合理。

最早较高一级分类应是1926年Ulrich和Bassler的人为分类。比较有影响的是1962年发表的Müller分类, 将牙形石分为两目8个科。Lindström(1970)试图进行“生物”分类, 他根据自然集群的概念将牙形石83个属归入2个目20个科。1981年Clark在此基础上进行了充实补充, 对240个有效属中的180个归并为2目11个超科, 47个科。

1988年Sweet对前人工作进行了总结将牙形石划分为2个纲 *Cavidonti* 和 *Conodont*; 7个目1个未定名目, 其中 *Cavidonti* 分为 *Proconodontica* 和 *Belodellida*; *Conodonti* 分为 *Protopandrodontida*, *Panderodontida*, *Prionodontida*, *Prioniodontida*, *Ojarkodontida* 和一个未定名目, 又进一步细分为37个科。

**牙形动物的演化、地史分布和生态环境** 牙形动物的演化由于化石本身的原因, 虽然某些属种间的演化和大趋势已较清楚, 如原牙形石演化出副牙形石, 进一步演化出真牙形石; 单锥型→复合型→平台型。但整个门内的宏观演化并不十分清楚, 有待于进一步寻找证据。

最早的原牙形石见于前寒武纪晚期, 寒武纪( $\epsilon_1$ )以单锥型为主,  $\epsilon_2$ 出现副牙形石;  $\epsilon_3$ 出现真牙形石。牙形石第一次爆发性进化发生于奥陶纪(O),  $O_1$ 出现复合型牙形石;  $S_2$ (中志留世)出现平台型牙形石; 泥盆纪(D)为牙形石的顶峰期, 特别是  $D_3$ , 每公斤样品有时可达万枚牙形石。石炭纪仍较繁盛, 进入二叠纪锐减, 许多重要的分子绝灭; 三叠纪又有所恢复, 分布较广, 具有重要的地层意义。三叠纪未突然全部绝灭, 此后地层中再未发现, 曾有报道在白垩纪发现, 但后来证实是再沉积的产物。牙形动物绝灭的原因尚不清楚。

牙形动物生态环境是正常海洋环境, 营自由游泳, 所以各种海相岩石中都有可能存在牙形石。从牙形石在全球的分布统计证明, 牙形动物是一种喜暖的动物, 其分布受海水温度的影响, 主要分布于赤道两侧及暖洋流流域。

**牙形动物的分类位置** 牙形动物分类位置之争是古生物学中最富有色彩的争论, 关于牙形石生物学归属, 100多年来曾先后提出十多种假说, 从最低等的藻类到脊索动物门都有是牙形石的载体生物的假说。其中早期主要是鱼类和环节动物假说, 近来比较有影响的是1973年Melton和Scott在美国蒙大拿州石炭纪的熊溪灰岩中发现带有牙形石的动物, 建立了牙索动物亚门, 属

脊索动物门。后来经研究学者们认为这一动物不是牙形动物，而是吃牙形动物的动物。1983年 Briggs 等牙形动物的发现被称为是80年代古生物学的重大事件。1988年 Sweet《牙形动物门》一书的出版标志着牙形动物作为一个独立的门已为多数学者所接受。

**牙形石的处理** 牙形石产于许多类型的沉积岩中，一般用10%~15%醋酸溶蚀灰岩，经用100目分样筛冲洗，凉干，即可在残渣中挑获牙形石。牙形石比重为2.84~3.10，可用三溴甲烷与一般矿物分离，亦可用磁选器进行分选。

**牙形动物的研究意义和发展展望** 牙形动物由于演化迅速，特征明显，易于识别，具有重要的地层意义，是解决从C-T地层问题最为重要的化石，其研究精度可达几厘米。目前所建立的几个国际层型均以牙形石为标准。

运用牙形石的色度确定岩石的有机变质程度是新的应用方向。Epstein 等(1977)根据牙形石颜色的研究，确定了牙形石颜色与岩石变质温度的关系，建立了牙形石颜色变化指标 CAI，一般可分为5级：

|          |    |     |     |     |     |     |
|----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| CAI 值    | 1  | 1.5 | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 变质温度(°C) | 50 | 50  | 60  | 110 | 190 | 300 |
|          | ↓  | ↓   | ↓   | ↓   | ↓   | ↓   |
|          | 80 | 90  | 140 | 200 | 300 | 400 |

据此可绘制一个地区某时代的 CAI 等值线图，有效地用以确定岩石的有机变质程度，确定油气的未成熟区、成熟区和过成熟区，有着重要的经济效益。

随着时间推移，牙形动物在地层中应用将进一步进行，其软体的研究亦将进一步发展，特别是关于生物分类，各种生活功能，以及最终绝灭的原因，都将随着资料的增加而逐步澄清。

**参考文献**

- 1 Klapper G and J G. Johnson, Endemism and dispersal of Devonian conodonts. *Journal of Paleontology*, 1980, 54(2): 400~455
- 2 Briggs D E G, Clarkson E N K and Aldridge R J. The conodont animal. *Lethaia*, 1983, 16: 1~14
- 3 Aldridge R J, Briggs D E G, Clarkson E N K and Smith M P. The aggrinites of conodonts - New evidence from the Carboniferous of Edinburgh, Scotland. *Lethaia*, 1986, 19(4): 279~291
- 4 王成源, 牙形刺. 1987, 1~471
- 5 Walter C Sweet. The conodonts - morphology, taxonomy, paleoecology, and evolutionary history of a long - extinct animal phylum. 1988. 1~212
- 6 白志强, 白顺良. 早一中泥盆世之交华南板块的古地理位置. *地质学报*, 1990, 3: 199~205

(北京大学地质学系白志强教授撰)

**腹足动物口盖**

大部分前鳃亚纲的腹足动物有口盖。口盖也称厣。1950年，日本沈殿根据口盖背面的饰纹分为3种类型：螺旋型、同心圆型、薄叶型(爪型)。

中国和国外的贝类学家和古生物学家在描述腹足动物时，常忽视口盖，只简单的描述或画一草图。1757年法国 M. Adanson 虽注意到口盖，但未进一步研究，并认为腹足动物的口盖和壳体相当于斧足动物的左右壳体。1817年法国 G. Cuvier 已发现化石口盖。1962年英国 V. Fretter 和 A. Graham 提到 De Blainville 和 Lamarck，否认 Adanson 腹足动物的口盖和壳体同源的论点。1980年中国王惠基，1984年 M. Rohr 和 A. J. Boucot 发现螺旋型口盖背、腹两面的饰纹有矛盾。1961~1991年以来一些贝类学家和古生物学家对口盖进行了一些研究，并提出口盖由足腺分泌而成。1982年 J. Vovelle M. Grasset, 1983年 M. Grasset, M. Poulicek, M. Truchet, J. Vovelle 等认为口盖是腹足动物足部背部的口盖沟底和口盖褶分泌而成。

腹足动物的口盖在划分地层上有相当大的作用。因口盖的成分一般是有有机质，所以在沉积时遇到酸不会像有碳酸钙组成的壳体被溶解。特别在有些地层中无其他壳体化石，仅保存腹足类口盖化石时。另外口盖在地层中的分布也有一定的规律性。如江苏、浙江、江汉、山东、广东油田早第三纪地层中有 *Mirolaminatus* 属口盖，似乎可作为标准化石。美国加州上新统 *Euhexagon* 组中有 *Scaez* 的口盖作为标准化石。亚洲和美洲侏罗纪和白垩纪的地层中有 *Reesidella* 属。

腹足动物口盖在寻找各种矿产资源及划分地层时将是一种好的佐证，并能起到其他碳酸钙壳体化石不能起的作用，因此具有实际研究意义。

**参考文献**

- 1 Fretter V, et al. *British Prosobranch Molluscs*, Printed for the Ray Society, London; 1962. 76~82
- 2 王惠基. 江苏新生代腹足类的一些口盖化石. *古生物学报*, 1965, 13: 4. 618~628
- 3 中国下第三系腹足类的口盖化石. *古生物学报*, 1980, 18: 4. 311~320
- 4 Grasset, et al. *Donnees Histochimiques et Ultrasturcturales sur L, Opercule de Buccinum undatum (1.) (Mollusca), Gastropoda, Malacologia*, 1982, 22: 1~2, 251~255
- 5 Vovelle J, et al. *Etude Cytologie et Histochimique Comparée de la Formation de L, Opercule Corne Chez Iez Prosobranches*. *Malacologia*, 1982, 22: 1~2, 257~265
- 6 Grasset M, et al. *Composants accessoires de L, Opercule Proteique Tanne de Buccinum undatum (L.), Haliotis*, 1983, 13: 115~122

(上海自然博物馆王惠基研究员撰)

**古生物学与人类自然观**

palaeontology and natural outline of mankind 自然观是人类对周围自然世界的发生、发展的总看法或总观点，指导和影响着人类在自然界中生存。正确的自然观指导人类正确地认识世界，研究其规律，使自己适应这些规律，以求自身的发展，在改造自身的同时，对周围的世界进行改造，使周围世界更适应人类的生存，反之，错误的自然观，不是去认识世界，研究其规律，而是用头脑内的想象去看待世界，以此来指导自身的发展，其结果必然是停滞或倒退。纵观人类的发展，就是一部这样的历史。

人类并非一脱离猿类就具有正确的自然观，而是经过长期的发展、演变，经历了许多曲折逐步形成了目前占统治地位的、科学的、辩证的唯物主义的自然观。从其发展可以划分为四个阶段：古代，自发的唯物主义，朴素辩证法的自然观阶段；中世纪唯心主义宗教神学的自然观阶段；15~18世纪形而上学、机械唯物主义的自然观；19世纪以来，随着自然科学进入整理研究阶段，即从表象深入其内部，探索其规律，建立在科学基础之上的辩证的、唯物主义的自然观应运而生，成为人类认识世界的思想武器。

可以看出，自然观的发展是与人类所掌握的科学技术相适应的，随着人类对科学技术掌握的愈深入，人类的自然观就愈正确，进而又进一步推动科学技术的发展，这一良性循环使人类在近200年内有了突飞猛进的发展。

19世纪，人类发现了一些重要的自然规律，从而导致正确的自然观的形成。生物进化论(达尔文进化论)是最重要的发现之一，为正确的自然观的形成起着关键作用。古生物学是达尔文进化论的主要支柱，它的每一个成果，每一项发现，都是生物进化论的一个佐证，都对人类认识自然产生了一定的影响。

古生物学是研究地球地质历史时期的生物界及其发展的科学，其研究范围包括各地质时期地层中所保存的生物遗体和遗迹，以及一切与生物活动有关的地质记录。其研究成果向人们展现了“史前时代”地球上包括人类在内的整个生物界的发生、发展的历史，以及受环境控制自然选择的过程。在这段漫长的历史中

生物经历了从无到有,从弱到强;从有限的生境不断拓宽,最后征服了整个地球表层的每一个角落。这一过程不仅体现了生物自身在环境的控制下,身体的器官、机能不断发展,不断完善,而且也体现了由于生物的作用,地球逐渐由一个混沌的、死寂的世界演变为活跃的、生机勃勃的世界。这一过程被人类所认识,标志着人类认识观质的飞跃。

在人类的早期,具有生物形态的石头就曾引起哲人们的推测和认识,古希腊和古埃及的学者,就将贝壳化石作为海陆变迁的证据。中国古代学者沈括在《梦溪笔谈》中就论及化石,并得出古地理、古气候的结论。

进入中世纪,由于自然科学不发达,人们无法解释奇妙的世界,只好借助于上帝的帮助,从而引出了一系列自然界的神学解释,如地球是宇宙的中心,物种是上帝创造并保持不变,是相互孤立的、僵死的。

17~18世纪,自然科学刚刚起步,处于搜集资料、研究即成事物的阶段,形成了形而上学、机械唯物主义的自然科学观。进入19世纪,自然科学步入收获季节,出现了一大批影响科学,改变人类认识的成果。达尔文进化论就是其中之一,古生物学作为进化论的主要支柱起到了很重要的作用。拉马克(Lamarck)、达尔文(Darwin),实际上就是古生物学家,他们在观察研究现代生物的同时,都用相当的时间和精力用于古生物化石的研究,化石的证据是他们各自理论的基础。他们都注意到古生物化石与现代生物的相似与不同之处,这些即相似又有差异的生物是不同物种,还是祖先与后裔的关系?经过多年的研究,达尔文的《物种起源》问世了,达尔文进化论诞生了,即生物发展是一部由低级到高级,由简单到复杂在环境的控制下不断演化的历史。这一科学结论以及其它科学发现彻底冲垮了旧的自然观。辩证的、唯物的、科学的新自然观占据了统治地位,造成了此后200年科学技术及人类生活的飞跃发展。

古生物学后来不断发现的新证据,充实、完善并印证了生物进化的历史。30多亿年前的无花果树组岩石中(南非)低等藻类的发现;20多亿年前真核生物化石的发现;7亿年前左右无脊椎动物大爆发,3亿多年总鳍鱼类化石的发现,石炭纪爬行类化石的发现;1亿多年前始祖鸟的发现;以及新生代马、象、人类的演化,都以事实证明生物演化的历史。

1972年 Eldredge 和 Gould 根据古生物化石的研究结果提出了点断平衡论;1980年 Alvarez 根据白垩纪末期恐龙绝灭进行研究提出了新灾变论,对达尔文进化论提出了修订,认为生物在一定时期内演化是突变的,外因(环境)在演化时可能有关键的作用。90年代关于生命对地球的作用又有新的认识和突破。即地球之所以不同于其它已知的星体在于它具有一个由岩石圈、水圈、大气圈和生命总体构成了极其复杂、活跃的表层,这个表面层靠生命捕获、转化和储存太阳能,靠生命过程驱动物质和能量循环,靠生命活动实现自我调节和控制,并且靠生命和生命活动来保持其远离天体物理和热力学平衡的开放系统。换句话说,是因为有了生命才有现代地球。这些新观点将使人类对自然界的认识程度大大提高,进一步激励人类对自然界的探索。

世界各国政府都认识到正确的自然观对于加快人类发展的作用,在发达国家中几乎所有的大中城市都有自然博物馆,比较著名的有大英自然博物馆(英国);纽约自然博物馆;法国自然博物馆;莫斯科自然博物馆等。中国亦相当重视这方面的教育各大城市相继建立了自然博物馆,如北京自然博物馆,天津自然博物馆等。所有这些博物馆中,古生物化石、生物演化史为主要陈列内容,有的为专门的化石博物馆如自贡恐龙博物馆。随着包括古生物学在内的自然科学的不断发展,人类对自然界的认识将不断深入,其自然观也将不断发展,不断完善。

#### 参考文献

- 1 Eldredge N, S J Gould. Punctuated equilibria: An alternative to phyletic gradualism. in Schopf, T J M(ed), Models in Paleobiology. 1972, 82~115

- 2 Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, Michel H V. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary. Science, 1980, 208(4448): 1095~1108
- 3 孙荣圭. 地质科学史纲. 北京: 北京大学出版社, 1984
- 4 方宗熙, 江乃萼. 进化论. 北京: 高等教育出版社, 1986
- 5 张昉. 新地球观. 地球科学进展, 1992, 7(1)

(北京大学白志强教授撰)

**古生态学** paleoecology 古生态学的发展是相当广泛的,各种方法和手段不断涌现,其主要的内容总结如下。

**实证古生物学** 为1928年德国 Richter 所命名,系将均变学说的原理应用在古生物学方面,通常将其称为“将今论古”的方法。自20世纪30年代以来,德国的实证古生物学者,长期研究北海和波罗的海的生物及其环境,主要是研究潮坪地区的海洋生物的生态、死亡和埋藏规律,生物相和沉积相的关系,并用以解释化石古生态,取得显著成效。实证古生物学的代表性著作是 W. Schäfer (1962) 所著《北海潮坪的实证古生物学》。实证古生物学的成熟在于促进了浅海地区的海洋古生态学的发展。实证古生物学研究的内容非常广泛,但应用时应注意如下问题:时代越新应用价值越大,时代越老可以直接对比的生物类别越少;虽然各级别的分类单位(如科、属、种)都可以用来类比,但分类单位越小(种和属)效果越明显,因为即使在同一个属内不同的种可以有不同的生境;对研究的生物应当注意其生态发展历史的变化。

**形态功能分析** 古生态学研究早已采用的一种方法,用来解释灭绝生物的行为习性。1910年比利时古生物学家 L. Dollo 称为习性古生物学。这种方法主要是根据生物在进化过程中适应环境的自然选择,生物的功能依靠器官不断地专门化而完成,我们可以根据古生物的基本构造形态,判断其功能以及和环境的关系。功能形态分析经常适用于阐明灭绝门类化石的古生态研究。与功能形态分析有关的概念是70年代发展的形态建造。A. Seilacher (1970) 指出形态构造并非仅仅是由功能一个方面所控制,生物形态及其骨骼构造还决定于该生物的系统进化水平(即基因生殖作用)和生物骨骼结构(即生物化学作用)的影响。

**埋藏学(或埋葬学)** Weigelt (1919) 创立生物层积学,指出生物死亡后到尸体堆积受外界环境的影响。生物层积学是后来前苏联 Едревон (1940) 所创的埋藏学的重要组成部分。埋藏学研究生物死亡以后最终形成化石的全过程,以及所经过的复杂地质营力作用(风化、搬运、沉积、地球化学等作用)。所以要恢复古生物的生态,就必须研究埋藏学。化石的形成过程可划分为以下阶段:从生物的出生到死亡称为生物群落,研究生物群落的分布、生活习性、组成等属于生态学的范围,生物死亡以后的尸体堆积到最终埋藏以前,这一阶段称为尸积群(有些作者将尸积群专指由于同种原因,同时死亡的生物尸体堆积)。这一阶段以生物的因素为主,研究生物死亡原因,死亡地点尸体腐败的过程以及各种外力作用(特别是水的沉积作用)对尸体的搬运、破坏和磨损。生物遗体最终被沉积物埋藏以后称为埋藏群,经过固结和石化以后最后形成化石群。这一阶段主要影响因素是地球化学方面。从古生态的角度看,原地埋藏群落对恢复古代生物的生态环境可以提供直接的证据,但是经过搬运的异地化石组合更有助于阐明古地理环境和沉积条件,特别是水动力的强弱,离海岸的远近等外营力。前苏联 Б. Т. ЯНИН (1983) 出版了《埋藏学基础》一书,对埋藏学内容作了较全面的论述。

**定量古生态学** 随着古生态学研究的不断深入,原始资料积累达到了相当程度,加上现代生态学中定量方法的广泛应用,使得定量古生态学应运而生。古生态学的研究,比起一般古生物学的研究,所考虑的因素要多,复杂程度要高。定量古生态学较为系统的教科书是瑞典乌普萨拉大学 R. A. Reymont (1971) 所著的《定量古生态学导论》,包括了不少内容和相当多的数学思想,主要是各种统计方法,如定向分析、种群动态、生物的地理分布、多样性化石组合的定量分析等。

**遗迹学** 专门研究生物生命活动留下的痕迹,近年来发展很快的古生态学分支。遗迹化石是生物运动、觅食、居住等各种生命活动现象的证据,因此它具有指示动物习性和生活环境的意义。绝大多数遗迹化石形成之后不再移动位置,因此均代表原地埋藏环境。在地质时期相似的环境经常出现相似的遗迹化石。通过对遗迹化石群的分析,不仅能够揭示生物的行为习性,还可以对古生物群落的丰度和分异度、介质(水体或气体)状况、基底性质以及海洋深度等(A. Seilacher, 1967)提供丰富的证据。在滨海、浅海的生物遗迹,大多是由适应水流动荡,高能环境的滤食性动物造成的表生和内生(潜穴、钻孔)遗迹。生活在较深的静水环境(浪浪面以下)和深海底部的生物,则由食泥动物造成表面采掘食物的遗迹。遗迹化石的详细介绍可参考 W. Hantzschel 和 Frey R. W. 等1975年的著作。遗迹学是当前蓬勃发展的学科,从沉积学的角度将遗迹化石总称为生物成因沉积构造。它包括:(1)生物成层构造:如叠层石和生物滤变层等。叠层石的成因属于遗迹化石。(2)生物扰动构造:各种潜穴、爬迹、足迹、觅食构造和居住构造。(3)生物沉积构造:粪、粪粒、假粪粒。(4)生物侵蚀构造,钻孔、微钻孔和其他。

**古生态—岩相综合分析** 前苏联古生态学家 P. Ф. Геккер 创立了生态—岩相比较分析法,强调古生态学从野外工作到室内研究,始终要和沉积岩相学的研究相结合。在他一系列古生态学著作中展示出各种岩相内均含有其特殊的化石群。当岩相在空间上(地理上)作有规律的变化时,各岩相带所含的生物群相应的必定会发生有规律的递变。盖格所著《古生态学概论》,从1957年出版以来,已经被译成法文、英文、中文和日文。60年代以来苏联继续出版了《地史时期的生物与环境》杂志。代表前苏联古生态学当前的研究现状。化石群和岩相之间的相互关系主要是对底栖动物群影响显著,因为绝大多数海洋底栖动物的浮游幼虫对于海底的沉积类型有高度的选择性。同时底栖动物对周围环境有相当的依赖性。在分析化石和岩相关系时,应当考虑到游泳和浮游类型的生物并不经常依赖于岩相,同时也要注意化石群是否经过重新再沉积。再沉积的化石群和岩相并无直接关系。

**群落古生态学** 现代生物群落的研究是从19世纪后叶开始,应用到化石中是从20世纪60年代开始的。在生物系统分类上,同一种之间的个体组成居群,多种居群组成生物群落。居群是同种个体之间彼此有系统发生上的亲缘关系,生物群落不仅是居群之内互相有联系,而且受外界生存条件上的生态影响,群落中的居群彼此受营养结构上的联系,在同一生活区内以新陈代谢为基础,共同受外界条件的控制。因此群落是生态学的基本分类单位。生物群落包括生活在一定区域内的全部生物群,在生态系统研究中包罗万象,很难全部分析和描述,因此并不被人们普遍承认,很多人宁愿采用另一个名称群落或更小的分类单位共生。群落在生态学上主要是根据一两个类别或几个类别的生物组合来进行研究。由于在古生态学的研究中,有些生物常常很难保存(例如软躯体生物),不可能研究全部生物群,因此很自然的大多采用化石群落。在古生态学中,群落主要是研究:(1)群落中生物的相互作用,彼此的关系,如对抗的关系(捕食、寄生、竞争等)或和谐共生关系(如共栖、互惠等),即群落结构。(2)恢复古环境时研究群落中成员的出现、灭绝、丰度、分异度、优势度以及营养关系和外界因素的控制。(3)群落在地质历史中生态系统的变化和生物进化。群落在化石中的应用,早期的研究者如 J. A. Fagestrom (1964), R. G. Johnson (1960, 1970) A. M. Ziegler (1965), P. W. Bretsky (1969), K. R. Walker 和 L. P. Laporte (1970), E. G. Kauffman 等(1974),主要研究各时代群落的恢复和古环境的关系,70年代开始有人转向研究化石群落的功能构造以及决定生物分布的环境因素。恢复群落首先是扎实的生物分类和鉴定描述,同时在野外应当仔细研究化石群的埋藏学,没有这两方面的基础,群落就很难恢复。

**生态地层学** 是应用生态学和古生态学的原理和方法来解决地层划分,以提高地层对比的精确性。如 A. J. Boucot (1982)所

说:“应用生态地层学方法进行地层对比,并没有什么新奇的原理,所新的无非是努力把化石门类、生态、生物地理及生物演化诸方面的信息(资料)协调起来,再借助于沉积类型和地质时代等方面的资料,形成一个内在相关的统一体。为此目的,必须考虑群落一级的演化水平。O. H. Schindewolf (1954)首先提出生态地层学这个名称。H. D. Hedberg (1958)将生态地层学作为地层学的一部分,根据岩石形成方式或沉积环境进行地层分类,所以也叫环境地层学。A. Martinsson (1980)认为,生态地层学是以生态学为基础,应用生物和沉积两方面的证据(古生态系统)来划分地层。生态地层学的目的在于研究盆地和大陆边缘的历史,建立精确的地层对比。利用生物同非生物(沉积围岩)的资料,在对此中具有更高的可靠性,同时更有效的用于盆地分析。

**地球化学在古生态学中的应用** 生物骨骼外壳等硬体部分的形成受环境的直接影响,反过来生物死亡以后以及生活时期形成骨骼的化学成分又强烈的影响着周围的环境。地球化学方法在古生态学中应用主要有3个方面:碳酸钙骨骼中的地球化学证据;微量元素的地球化学证据;同位素地球化学的证据。

关于碳酸钙骨骼中的地球化学证据,从50年代开创研究现代生物和骨骼化石的  $\text{CaCO}_3$  与环境的关系以来, A. P. Vinogradov (1953), H. C. Urey (1951), H. A. Lowenstam (1954) 等人已证明,分泌碳酸钙质骨骼的许多藻类和无脊椎动物与局部地区的水温相关。碳酸钙质骨骼形成方解石和霏石,这两种矿物的比率随水温变化而不同,现代生物方解石和霏石的比值在寒冷水域中高,在温暖水域中则变低。霏石型的  $\text{CaCO}_3$  适应于温暖海域,如果其它条件不变,则沉积物中霏石型化石的数量越多,则这些生物曾经居住过的水域温度越高。可借霏石是不稳定的,随着地质时期的变化,霏石很容易变成方解石。所以白垩纪以前的地层中霏石很少保存下来,只有研究新生代的化石,这个方法能够起作用。有些著作研究生物碳酸钙骨骼方解石中镁的含量,证明在分泌方解石的许多海洋藻类和无脊椎动物中,方解石中的镁含量随着水温增高而增加。镁含量的增加是由于形成方解石时一部分钙被置换,因此居住在温暖水域的种比居住在寒冷水域的种镁的含量高,但这种关系在时代久远的情况下仍然是难于确定。因为高镁方解石不很稳定,在埋藏过程中间隙水容易将镁溶解掉。微量元素和环境有一定的关系。在化石骨骼中常含有一些微量元素,其中  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Sr}^{2+}$  (镁和锶)因为离子半径和  $\text{Ca}^{2+}$  十分接近,离子化合价与  $\text{Ca}^{2+}$  相同,所以易于在方解石或霏石中替代  $\text{Ca}^{2+}$ ; 所以  $\text{Mg}/\text{Ca}$  和  $\text{Sr}/\text{Ca}$  在骨骼中的比值与周围形成碳酸钙的水体成正比。 $\text{Mg}$  易溶解而  $\text{Sr}$  较稳定。

**陆相地层的古生态学** 陆相地层的古生态学主要包括内陆淡水环境古生态学和陆地古生态学两个方面。淡水环境的古生态学研究地史时期陆地上的河流、湖泊、沼泽等生物与生态环境的关系。目前对湖泊及沉积环境的研究分出一门独立的学科称为古湖泊学。在淡水沉积物中含有丰富的陆相化石,常见的有分裂细菌、各种藻类(以硅藻最为常见)、水生和陆生植物的大化石(包括根、茎、叶、果实和种子)、孢子花粉、昆虫、鞘变形虫、淡水双壳类和腹足类、介形虫、苔藓虫、鱼类、两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类,此外还可以找到陆相遗迹化石。利用这些化石配合岩石学的研究,往往可以取得指示古环境和古气候的显著效果。

由于内陆盆地的气候或其它因素的影响,有些地层中可能缺少大化石,在这种情况下微体化石能发挥很大的作用。由于微体化石的特性,利用它研究古生态学更有利于数理统计、地球化学分析和钻探取样。通常利用孢粉资料解释古气候,利用介形虫化石研究水的盐度和水温变化,利用硅藻研究水的分层、含氧量和  $\text{H}^+$  浓度。H. J. B. Birks 等人所著的《第四纪的古生态学》(1980)较多地介绍了这方面的成果。在陆地环境生活的脊椎动物和高等植物,在死亡之后往往要经过一定距离的搬运才能被埋藏保存成为化石,因此对它们的研究要比淡水环境困难。陆地脊椎动物的死亡和埋藏的来源主要有捕食、饥饿、疾病、种间斗争和自然界的一些偶然事件(灾变事件),这些事件使生物在短时间内

大量死亡,并保存了完整的化石群。

近年来得到飞速发展的陆生植物古生态学是陆相地层古生态学研究的重要内容之一,它的目的是依据植物大化石资料及所含化石的岩石学资料重建化石的个体和群落生态,进而推断和复原古环境和古气候。前苏联学者 A. Krassilov 著有《陆生植物的古生态》(1975),认为植物古生态主要研究三方面的内容:研究化石的搬运、保存和沉积特征,即植物化石的埋藏学;研究古植物的形态、结构,复原古植物营养体的大小结构和外貌,即生活型研究;研究古植被与环境、气候的相互关系。近年来许多学者开始注意到古植物与古生态系统中其它生物(如昆虫、菌类、脊椎动物)的关系;研究它们之间的生态依赖性。在古植物群落的复原和再造上,A. C. Scott(1979)提出了较为系统的方法,并复原了英格兰北部和苏格兰南部维士法阶的煤系景观。利用植物大化石资料做为古气候的指示也得到了很大发展。除了利用植物群落的分类特征和区系特征分析古气候之外,近年又出现了许多新方法和新理论,特别是在研究新生代被子植物化石时,美国学者 Dilcher(1973),Dolph(1979,1980),Wolfe(1978)等人提出了叶相分析的方法,利用被子植物化石叶的特征分析古气候,他们认为被子植物的叶级、叶缘、叶型、滴水叶类、叶脉密度、叶脉类型和叶质都指示不同的气候带和温度条件,这些指标统称为叶相。利用叶相分析除了可以确定古气候带之外,还可以得出平均温度和地史时期1年中最冷和最热月的差值——年较差。H. P. Bailey 和 D. I. Axelrod(1969)在研究大量现代植被和化石群的基础上提出的气候谱图,也是分析新生代古气候的有效方法,谱图可以提供月均温、有效温度、均恒性等古气候数据。植物除了叶化石之外,由其基于所形成的木化石也是古气候很好的“指示计”。据 Creber 研究,木化石的分类可以指示当时的气候条件。由于被埋藏的木化石基干的密度和直径可以推断出地史时期古森林的密度和森林生产力。通过研究气候的变化,植物产生了年轮,因此研究年轮的有无、宽窄可以推断季节的变化。总之陆相地层的古生态学主要采用古生物学、地质学、地层学、沉积学和地球化学等古生态学的基本原理和方法来分析和解释古代的陆相环境。陆相古生态学可以解释沉积矿产的形成环境,与煤、石油、铝土矿、钾盐、磷矿、硅藻土矿等有非常密切的关系。我国中、新生代陆相地层非常发育,大力开展陆相地层的古生态学研究不仅有重大的理论意义,而且有重大的实用价值。

#### 参考文献

- 1 杨式溥,主编. 古生态学——原理与方法. 北京:地质出版社, 1993
- 2 陈源仁,编. 生态地层学原理. 北京:出版社1992
- 3 Mckerrow W S. 主编. 化石生态学(图解指南). 杨式溥译. 北京:科学出版社, 1986
- 4 Dodd J R, Stanton Jr R J. 著. 古生态概念与应用. 徐珊红, 钱文龙, 王雪, 王金权, 李守军, 等译. 南京:南京大学出版社, 1989
- 5 Boucot A J 著. 海洋底栖古生态学. 陈源仁译. 北京:海洋出版社, 1991

(中国地质大学杨式溥教授、张建平副教授、杨洪博士撰)

## 微生物学

**微生物生理学** microbial physiology 微生物学重要分支学科,它研究各种类型微生物的形态、结构与功能,营养、生长与分化,以及新陈代谢的各种活动。在自然环境中,微生物相互之间、与动植物细胞之间以及与自然环境的相互作用,也应归属于微生物生理学的范畴。

#### 微生物生理学主要内容

1. 形态、结构与功能(morphology, structure, function),应用光学显微镜和电子显微镜研究各种类型微生物营养细胞、孢子

和子实体的形态,细胞器的结构与功能等。

2. 营养要求、营养料吸收(nutritional requirements, uptake of nutrients),不同类群微生物的营养要求是极不相同的。营养物质包括生命活动必需的10种主要元素和微量元素,具体则是碳源、氮源、能源和辅助营养物质,如维生素、金属离子等,营养物质如何进入细胞是重要的生理问题。已知的吸收机制约有四种形式,即简单扩散、促进扩散、主动运输和基因移位。按氧对微生物的关系而言,微生物可分为三种类型:专性好氧菌,有氧才能生长;专性厌氧菌,只有在无氧条件下才能生长;兼性厌氧菌,在有氧或无氧时均能生长。兼性厌氧菌又可分为两种类型,如乳酸杆菌,在有氧时能生长,但不能利用氧,而是耐氧的;另一种兼性厌氧菌如大肠杆菌和酵母菌,有氧时进行有氧呼吸,无氧时进行发酵,均可生活。氢离子浓度、二氧化碳等也都影响微生物的生长。营养料必须吸收,而代谢产物如二氧化碳、有机酸等,则须排出。与吸收机制相比,对代谢产物分泌了解却很少。

3. 生长与分化(growth, differentiation),生长生理学包括分批培养的不同生长时期(延滞期、指数期、稳定期与衰亡期),指数生长时期的世代时间、倍增时间,最大浓度和生物量得率,连续培养(如恒化器)中不同稀释度与细胞浓度、基质浓度、倍增时间和细胞产量的关系等。这些生长生理学知识既是微生物的特征,也是应用微生物学的基础。除营养料之外物理因素也影响微生物生长。各种微生物对生长所需温度各不相同,常温菌如酵母菌,在20~42℃生长最快。耐热菌在50℃以上生长最好。另外还有如海洋细菌,在20℃以下生长最适。微生物细胞的分化,是指从营养菌体产生不同的形态类型的营养菌体,如一种营养菌体分化为另一种形态类型的营养菌体或特殊的细胞类型(内生孢子、外生孢子)。微生物的分化给细胞的结构与功能带来了变化。较常见的营养菌体的分化实例,如节杆菌的球一杆形态转变,酵母菌和霉菌分化两型性,芽孢杆菌的孢子形成,酵母菌子囊孢子的形成,柄杆菌游动细胞与柄细胞的变化,放线菌的基生菌丝、气生菌丝和孢子,蓝细菌以及粘细菌的复杂菌体分化等。真菌营养菌体形态变化方式繁多,分类学研究都根据营养菌体和子实体形态结构等进行分类。

4. 碳的新陈代谢与能量代谢基本机制(mechanisms of carbon and energy metabolism),营养物质在细胞中的转化作用即新陈代谢,可简单分为3个阶段。营养物质如葡萄糖、长链脂肪或长链烷烃首先被降解为小分子(分解代谢),然后经中间代谢反应转化为氨基酸、长链脂肪酸、单糖、嘧啶和嘌呤碱、磷脂等,这些低分子化合物即成为细胞的结构单元。作为细胞组分的大分子如核酸、蛋白质、细胞壁、细胞膜,就是由这些结构单元聚合而成,大分子物质装配成为细胞器,最后成为细胞。营养物质的第一功能就是合成细胞,另一功能是提供细胞活动所需要的能量。(1)碳的代谢。地球上最丰富的有机物质是纤维素、淀粉等糖类物质,所以自然界生存的微生物所赖以生存的也主要是糖类。有关糖类酵解途径知之较详,计有己糖二磷酸途径EMP、己糖单磷酸途径HMP和磷酸酮糖途径ED。磷酸酮糖途径又分为磷酸戊酮糖途径与磷酸己酮糖途径,仅为少数细菌所有,如异型乳酸发酵乳酸杆菌、双叉乳杆菌和双歧杆菌。以上5个途径均有各自的關鍵酶,可作为鉴定一个途径存在的特征反应。EMP、HMP和ED途径广泛分布于各种微生物中,是糖的主要利用途径。在肠道菌(兼性厌氧菌)中糖代谢主要通过前两个途径,而在假单胞菌中则利用ED途径。两个途径共存时各自所占有的比例因培养条件影响而改变。(2)三羧酸循环是比较普遍存在于微生物的代谢途径。三羧酸循环的作用是通过脱氢将二碳化合物氧化为二氧化碳,参与反应的三种脱氢酶将氢传递到呼吸链,最后传递给氧,在这过程中有ATP形成,这是微生物取得可供利用的能量的主要途径。三羧酸循环不仅起到营养物末端氧化反应获得能量的作用,而且还有产生生物合成前体 $\alpha$ -酮戊二酸,草酰乙酸、琥珀酸的功能,用于合成氨基酸等。(3)呼吸链和电子传递过程中的磷酸化。细胞活动所需要的能量主要为ATP,大多数厌氧微生物仅



能通过底物水平磷酸化产生 ATP,而呼吸型微生物则通过呼吸链上的 ATP 合成酶产生 ATP。呼吸链(电子传递链)和 ATP 合成酶都位于原核生物的细胞膜和真核细胞线粒体内膜上。有关呼吸链组成与结构,氧化酶催化机制,质子传递都已基本了解。(4)微生物的特殊发酵。细胞的一切生理活动需要的 ATP,可由3种方式产生,即呼吸作用、光合作用和发酵作用。其中发酵作用合成 ATP 最为简单。发酵作用的特点是有有机物的降解产物既作为氢供体,又作为氢受体,被氧化的有机物最终以二氧化碳形式从细胞中释放,同时有 ATP 产生。常见的发酵产物有乙醇、乳酸、丙酸、丁酸、琥珀酸、乙酸、丁醇、丙酮等,其中多种是重要工业产物。(5)无氧条件下的电子传递。在有氧条件下,微生物以氧为底物,逐步脱氢反应的氢(电子),最后传给氧,同时获得较多 ATP。在厌氧条件下则进行发酵,如上所述,形成二氧化碳和有机酸或中性有机产物以及少量的 ATP。但一些微生物在厌氧条件下以硝酸、硫酸、硫、二氧化碳为氢受体,这类物质的作用如同氧一样,所以叫作“硝酸呼吸”、“硫酸呼吸”、“碳酸呼吸”等等。

5. 生物固氮、氮代谢(biological nitrogen fixation, nitrogen metabolism):微生物对自然界氮循环是十分重要的,缺少微生物的参与,自然界氮循环就不可能运转,高等生物也就不可能存在。氮循环包括大气中的氮的固定。据最近的估计,全球固氮量为  $175 \times 10^6$ t,其中生物固氮为  $90 \times 10^6$ t。生物中,原核生物是唯一能固定大气中氮分子的生物,其中有自生固氮与共生固氮之分。(1)共生固氮作用。在很久以前就受到人们的注意。根瘤菌属细菌能在豆科植物根部形成根瘤,是共生固氮的场所。这些细菌按宿主专一性及其他特征可划分为不同的种,如豌豆根瘤菌、苜蓿根瘤菌、三叶草根瘤菌、大豆根瘤菌等。不属于豆科植物的多种高等植物也具有能固氮的根瘤,这种固氮也是由于与原核生物放线菌弗兰克氏菌属(*Frankia spp*)菌类共生所致,其中最有效的固氮植物有木麻黄、枹木、胡颓子、沙棘等。蓝细菌也能与高等植物共生固氮。(2)自生细菌和兰细菌的固氮作用。较早为人所知的自生固氮细菌有梭菌属的和固氮菌属的菌类。后来用同位素( $^{15}\text{N}$ )证明,多种细菌具有固氮能力,如厌氧光合细菌、蓝细菌、肺炎克氏菌和硫酸还原细菌等。(3)固氮酶(nif 基因)的生物学和基因转移。通过对固氮酶的研究,人们认识到来源不同,所有的固氮酶对氧都是十分敏感的。显然,在好氧生活的固氮菌和固氮螺菌必须具备维持胞内低浓度氧的机制。肺炎克氏杆菌的 nif 基因已证明是染色体的一个基因簇,共有19个基因,编码两个蛋白:MoFe 蛋白和 Fe 蛋白。MoFe 蛋白由两种亚基组成( $\alpha_2\beta_2$ ),另外还有一个 Mo Fe 辅因子,由6个基因编码共合成。Fe 蛋白由两个相同基因编码的多肽组成,但须经过另一个基因编码的产物加以修饰,才成为有活力的 Fe 蛋白。将氮分子还原为两个分子的氮需要  $6\text{H}^+$ 。在肺炎克氏杆菌活体中, $\text{H}^+$ 来自丙酮酸,经黄酶,Fe 蛋白,Mo Fe 蛋白, $\text{H}^+$ 才传递给分子氮,从而产生氨。应指出的是固氮酶反应所需要的量是巨大的。固氮菌的两个固氮酶与克氏杆菌相似。另外,固氮菌尚有一种不含钼(Mo)而含钒(v)的固氮酶。有关固氮酶的调节,已积累大量资料。许多细菌只有在缺少可利用的氮源时才合成固氮酶。铵离子阻遏固氮酶的合成。有些细菌中,即使存在固氮酶,但它的活力也受到铵离子的抑制。但是,固氮作用除固氮酶复合物外,尚需要铁硫蛋白和保护固氮酶不受氧钝化作用的系统。

氮和硝酸等无机氮化合物在土壤中经历着多种化学变化,主要是氮的亚硝化和硝化作用,统称硝化作用,其次是反硝化作用,产生氧化氮和氮气。(1)氮的同化。据研究得知氮只能同化到少数几种氨基酸中,然后再由这种氨基酸作为氨基供体,将氨基转移给酮酸前体,以形成相应的氨基酸。具体地说,氮同化作用的途径是先合成谷氨酸(或谷氨酰胺)、丙氨酸和天门冬氨酸,然后由这几种氨基酸作为氨基供体,合成其它氨基酸。(2)氨基酸的合成。氮同产生的谷氨酸和天门冬氨酸分别是合成谷氨酰胺氨基酸与天门冬氨酸族氨基酸的前体。丝氨酸—甘氨酸族来自糖代谢的丙糖中间物,而芳香族氨基酸则来自戊糖中间物。这些合成的

生化学和调节机制已十分明了。自20世纪60年代末期谷氨酸(味精)发酵开始,到目前为止已有10多种氨基酸是应用微生物发酵生产的。多种微生物,如产氨短杆菌等。经过诱变育种,近年采用基因工程,其氨基酸产量已有较大幅度提高,形成巨大的工业。(3)嘌呤、嘧啶的代谢。嘌呤和嘧啶是生物体核酸的主要组成成分。最常见的嘌呤是腺嘌呤和鸟嘌呤,存在于 DNA 和 RNA 中。最常见的嘧啶是尿嘧啶、胞嘧啶和胸腺嘧啶,胸腺嘧啶主要存在于 DNA 中,尿嘧啶主要存在于 RNA 中。嘌呤生物合成途径已比较清楚。它是从5-磷酸核糖焦磷酸开始,经一系列酶促反应生成次黄嘌呤核苷酸,再由次黄嘌呤核苷酸转化为其它嘌呤核苷酸。嘧啶核苷酸是从氨甲酸与天门冬氨酸开始,经过一系列酶反应而合成为尿苷酸和胸腺嘧啶脱氧核苷酸。

脱氧核糖核苷酸是组成 DNA 的单体,由腺嘌呤核苷酸、鸟嘌呤核苷酸和胞嘧啶核苷酸经过4种蛋白的作用,还原成为相应脱氧核苷酸。

6. 自养微生物、甲基营养菌(autotrophs, methylotrophs):

(1)按照获得能量和合成细胞组的碳源,微生物可分为两大类群——自养微生物和异养微生物。自养微生物是一类能够在完全无机环境中生长的微生物,从利用光能或从氧化简单无机物获得能量,利用二氧化碳作为碳源进行生长,显然这一类群是具有特殊合成能力的微生物。相反的,异养微生物(heterotrophs)则须有有机化合物作为生长的能源和碳源。微生物界中异养微生物是占绝大多数的。自养微生物为数虽较少,但由于它们的特殊生物合成能力,在进化过程中占有特殊地位。自养微生物可根据所利用的能源划分为化能无机营养菌和光能无机营养菌。化能无机营养菌又称化能自养菌,能够在黑暗条件下以二氧化碳为碳源,从无机物的氧化作用中获得能量(ATP)和还原力(NADH、NADPH)。它们所能氧化的无机物有氨和亚硝酸,硫化氢及其它还原态硫化物,分子氢及亚铁离子(Fe)。根据所氧化的无机物,它们分别称为硝化细菌、硫化细菌、氢细菌和铁细菌。光能无机营养菌(光合细菌)具有光合色素即叶绿素、类胡萝卜素和藻胆蛋白,可以像绿色植物那样进行光合作用而生活。根据它们所含有的光合色素,大致可分为绿色细菌、紫色细菌和蓝细菌。(2)甲基营养菌。它是能利用一碳甲基化合物作为能源和碳源生长的细菌。甲基化合物指甲烷、甲醇、甲酸和甲胺[ $\text{CH}_3\text{NH}_2$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$ ,  $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ ]等。各国对甲基营养菌感到兴趣的主要原因是这类细菌能够将自然界丰富的一碳化合物变为单细胞蛋白(SCP)。它的代谢也有特别之处,从一碳构建碳链是它们共同的基本反应。一碳甲基化合物是有机物,所以甲基营养菌属于化能异养菌,可是这群细菌的许多生理特征与自养菌有相似之处,也列入自养菌。自然界有许多甲基营养菌,其中甲烷利用菌是甲基营养的主要类群。甲基营养菌的甲烷氧化是经过甲醇、甲醛、甲酸到二氧化碳。碳的同化途径知之颇详,计有丝氨酸—异柠檬酸裂解途径和单磷酸核酮糖途径。

7. 细菌的运动、趋化性(movement, chemotaxis):微生物运动和趋化性也是重要生理性状,已引起人们的注意,有关研究已很细致。

细菌的运动有两种主要形式,即游动和滑动。多种细菌,如大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌等能够游动,运动的细胞器为鞭毛,对鞭毛的结构、组分等都已详尽研究。滑动细菌在基质上进行移动,但不能在液体中游泳。趋化性是普遍的行为,近年来有关肠道细菌、新月杆菌等的趋化性现象已在分子水平加以研究,这些细菌对一个化学物质的反应决定于鞭毛平滑游动或翻滚,从而导致细菌向吸引物游动或者对驱逐物避开。新月杆菌的趋化反应在于极鞭毛的转动方向,鞭毛顺时针方向转动时菌体向前泳动,反时针方向转动则向后泳动。

今后的研究热点 从分子水平研究和认识微生物生理学诸多规律将起到主导作用。其次,在生物技术领域,特殊类型的微生物的酶及其产物的生理学问题会受到重视。因此,在今后10~20

年微生物生理学研究的主流可以预见如下:

1. 生理性状的调控—整体性调控:当代代谢途径研究已在酶水平上进行了大量工作,调控机制已都明确,计有诱导、反馈抑制、分解物阻遏等,深一步的研究则集中在关键酶的基因表达的调控,以及不同途径之间形成的整体性调控,例如,细菌对环境营养料限量做出的反应,都属于这一类型,明显的例子是无机磷和氮的限量。又如兼性厌氧菌如大肠杆菌对氧限量的适应性反应,关键的是两个转录调节子 ArcA 和 FNR,它们控制了对氧限量做出反应的基因网络的表达。上述对环境刺激所做出的响答信号的传导已证明是由一对蛋白起到居间作用,两者之间的相互沟通是由蛋白的磷酸化作用, DNA 顺序分析发现在一大类传感器调节物对子中,传感蛋白的 C-端相似,而调节蛋白的 N-端有同源性,传感蛋白 C-端磷酸化调节蛋白的 N-端, N-端的磷酸化改变了调节蛋白 C-端的活性,最后传递了响答。上面信号/调节物的作用机制,即成为今后不同类型细菌调控研究模式,无疑的它将促进这一领域的发展。

2. 新型类群微生物生理学研究:古细菌 (archaeobacteria) 是生物界 3 个界之一,包括嗜盐细菌、极端嗜热细菌、极端嗜酸细菌和绝对厌氧细菌。嗜盐细菌须在含 2.5~4.25mol 的食盐条件下生长。极端嗜热细菌等在 80~105°C 条件下生长分离出来。绝对厌氧的古细菌有甲烷细菌,已有多钟分离出来。这些古细菌具有不同于寻常真细菌的细胞壁和膜组分,其转录和翻译机制以及对抗生素抗性更接近于真核生物。多种生理特性也显示其不寻常性。嗜盐细菌的紫膜—细菌嗜紫红质在接受一个光子后能转移一个 H<sup>+</sup> 到膜外, H<sup>+</sup> 梯度推动 ATP 合成。这一光能向化学能转换可利用于生物传感器和芯片材料的开发。嗜高温菌的蛋白酶、淀粉酶、硫化酶具有高度热稳定性,既可为生物技术提供热稳定的酶,其顺序研究可为蛋白质工程提供改造蛋白质的依据。嗜酸热细菌,如硫杆菌属的细菌,能氧化硫化铁为硫酸,可用于煤的脱硫。耐酸热的机制如何,有重要理论意义。煤的脱硫技术,国外已进行中试,为减少大气中酸雨提供了可能的途径。

古细菌研究国外进展很快,特别是分子生物学方面。中国对古细菌基础研究甚少报道,在甲烷发酵、高温嗜酸热细菌方面进行了应用研究。

3. 植物微生物学 (plant microbiology) 的发展:(1) 有一群相近的细菌能在高等植物组织产生寄生或共生,重要的有农杆菌和根瘤菌,它们能转化植物组织成为冠瘿或根发病或者形成根瘤,同时固氮。冠瘿是由土壤根癌农杆菌 (*Agrobacterium tumefaciens*) 的致癌质粒 (Ti 质粒) 引起的。根癌农杆菌感染植物组织时, Ti 质粒的一段 DNA 转移到植物细胞并整合于染色体上,称作转移 DNA (T-DNA)。近几年来国外研究重点是对 T-DNA 进行结构功能分析,构建可作为外源基因的载体,以使外源基因在植物细胞得到表达。利用这些载体可以向各种植物细胞引入外源基因,研究外源基因在植物细胞中的表达,这既是细胞分化基础问题的研究,也可推动植物基因工程为农业生产实际作出贡献。(2) 微生物与植物细胞另一种相互作用是共生,如豆科植物与根瘤菌的关系,近几年已找出 10 个结瘤基因,成簇存在于巨大的 Sym 质粒上。结瘤基因的表达受到植物组织中黄酮的诱导;另外,异黄酮和黄酮醇则为抗诱导物。对结瘤固氮的深入认识,将对农业提供有益的指导。

4. 次生代谢产物 (secondary metabolites) 抗生素、生物药物(素)生物合成的调控:据 1984 年的统计,微生物所产生的 9 000 余种抗生素,来源于放线菌占 60% 以上,其中约有 90 种应用于人体、兽和农业、渔业。近年对放线菌次生代谢产物的研究趋向于认为它无抑菌活力,但有其它生理活性物质的筛选与开发, Monaghan 和 Tkacz (1990) 提出生物药物素 (biopharmaceutin) 这一名词,表示不具有抑菌活力,但有医疗作用的次生代谢产物。这是对放线菌代谢产物研究工作的又一次推动。现已有近 30 种生物药物素应用于医疗。

这些次生代谢产物的结构远不相同于初级代谢产物,它们

通过怎样的途径合成的,怎样调节控制其合成等一系列问题,既是生理学的重要理论课题,其研究成果也是可以指导实践的,在国外甚受重视,已有大量资料。中国在代谢调节方面也有创新,如焦瑞身及其合作者对硝酸盐促进力复霉素合成进行了多方面的研究,观测到硝酸盐不仅大幅度促进抗生素的合成,而且影响菌体的碳和氮的代谢途径,他们对硝酸盐的作用提出了反应模式,并对这种多效性作用提出“硝酸盐利用调节子”假说。抗生素研究在合成的调控之外,另一方面的进展是合成基因的克隆。D. A. Hopwood 及其合作者于 1984 年首先报道了次甲基霉素合成基因的克隆,到现在已有 20 多种抗生素合成基因克隆出来,毫无疑问,合成基因的克隆将大大推动这一生物产业的发展。

5. 致病微生物致病性 (pathogenicity) 研究:微生物的类型繁多,尽管其中仅有少数对人畜有致病性,但人们却深受其害。近年由于医药的进步,卫生条件的改善,严重的流行病基本上得到控制,但致病菌远未消灭,条件合适,还会有流行病出现。病原菌所以致病,可以从几个方面分析,如对宿主细胞的吸附,对宿主细胞正常生理的干扰、破坏,以及对宿主细胞防御的抵抗等。

6. 假单胞菌降解芳香烃及烷烃的研究:假单胞菌属细菌具有降解多种类型有机化合物的能力,所以是防止环境污染比较理想的微生物,而且降解途径的基因主要定位于各种降解质粒上,并可有细菌之间的接合传递,构建新的途径。除接合之外,近年基因工程更推动了新的降解途径的建立。为了防止环境的污染,假单胞菌生理学和遗传学研究应该受到重视。涉及到假单胞菌降解石油污染成功之例是 A. M. Chakrabarty 构建的“超级微生物”可降解多种石油组分,已获得美国专利,成为基因工程第一个专利 (1981)。

#### 参考文献

- 1 卫扬保. 微生物生理学,北京:高等教育出版社,1989
- 2 程皆能. 等. 微生物生理学. 上海:复旦大学出版社,1987
- 3 Dawes I W, I W Southerland. Microbial Physiology, second edition, Oxford, Blackwell Scientific Publication, 1992
- 4 Bennett J W, A Ciegler. Secondary Metabolism and Differentiation in Fungi, N Y Dekker, INC, 1983
- 5 Rose A H, Tempest. D W. Advances in Microbial Physiology
- 6 Neidhardt F C, et al. Escherichia Coli and Salmonella Typhimurium Cellular and Molecular Biology, 第一版, Vol 1, I, Washington D C; 1987. 1~1654
- 7 Gunsalus I C, Stanier R Y The Bacteria, Vol VI Archaeobacteria, edited C R Woese and R S Wolfe, N Y, Academic Press Inc., 1985
- 8 Monaghan R L, J S Tkacz. Ann Rev Microbiol., 1990, 44: 271~301
- 9 Chiao J S, et al. Biology of Actinomycetes '88 (Y. Okami 等主编), 1988 年国际放线菌生物学会议论文集, Tokyo, Japan Scientific Societies Press, 1988, 412~417
- 10 Malpartida F, D A Hopwood. Mol Gen Genet., 1984, 205: 66~73

(中国科学院上海植物生理研究所焦瑞身教授撰)

#### 微生物生态学

microecology 微生物生态学是研究微生物群与其宿主(人、动物、植物及微生物)相互关系的科学。微生物生态学重点研究正常微生物群与其宿主的相互关系,是生态学的微观层次。是细胞水平和分子水平的生态学,是生命科学的一个重要分支。微生物生态学以现代科学技术为基础,研究微生物群在宿主这一生命环境系统中的发生、演化、组成、结构、功能等,从而指导对疫病的防治和促进宿主的健康。

微生物生态学产生的背景 微生物生态学是从无菌动物学、悉生生物学及微生物生态学逐渐发展起来的。微生物生态学这一术语是 1977 年由联邦德国 Volker Rusch 博士首先提出的,并在德国墨尔本建立起世界上第 1 个微生物生态学研究所。虽然起步晚,但发展迅

速,成为现代生命科学中活跃的前沿学科之一,愈来愈显示其重要性。

从19世纪末到20世纪初,由于交往频繁,促进了世界烈性传染病的大流行,如霍乱、鼠疫、天花、伤寒等,席卷全球,夺取了亿万人的生命。迫使人们不得不集中主要精力去研究病原微生物,结果大部分传染病的病原体被发现了。但是,此时也形成了一种片面的错误的认识,认为微生物主要是有害的,其实,微生物对宿主(人类、动物、植物)在本质上或在主要方面是有益的。

自1945年以来,由于各种抗生素的问世,对防治传染病起到了不可磨灭的贡献,但是在治疗中出现了菌群失调和二重感染。因为抗生素无选择地把有益无益的微生物都杀死,也就是说,在消灭致病菌的同时,也消灭了对人、兽有用的生理性细菌,因而出现菌群失调症和二重感染现象。例如,在正常人的粪便中,约有5%分离到绿脓杆菌,但有些住院病人由于应用抗生素,其分离率高达40%,因绿脓杆菌对一般常用抗生素都有抵抗力,应用抗生素时抑制了肠内大肠杆菌及肠球菌,绿脓杆菌便过量繁殖,在某些条件下可能会引起泌尿道感染或败血症,Sharp曾对住院病人进行了观察,经土霉素治疗五天后,痰内念珠菌带菌率从32%增至61%,说明了土霉素治疗促进了念珠菌的增殖。一般来说,抗生素的抗菌谱愈广,发生菌群失调和二重感染频率愈高。由于抗生素的应用,使那些具有耐药性的潜在的病原微生物得以大量繁殖,不仅破坏了正常微生物群的生态平衡,而且促进了耐药性菌株的增加,抗生素的弊端,提醒了人们对微生物生态学的研究。

**正常微生物群及其与宿主的相互关系** 现代技术的发展,如生化技术、荧光技术、电泳技术、气液相色谱、基因工程、生物工程、厌氧菌培养技术及无菌动物的出现等,都大大促进了正常微生物群与宿主相互关系的研究。

正常微生物群是生物宿主(人、动物、植物及微生物)体表和体内的原籍微生物群,是微生物与其宿主在共同的历史进化过程中形成的生态学。正常微生物群对其宿主非但无害,而且是有益的和必要的。例如,豆科植物与根瘤菌、高等植物与真菌之间形成的共生互利现象(菌根),以及牛与瘤胃微生物等等。有关人类方面,瑞典 Gustafsson(1985)报道,一个健康成人全身寄居的微生物的重量总计为1271g(其中眼1g,鼻10g,口腔20g,皮肤200g,肺20g,肠1000g,阴道20g),大约100万个。而人体自身的细胞仅有10万亿个。就是说,每个人自身的细胞仅为所带全部细胞的10%,而90%的是菌细胞。正常微生物群含有种类繁多的酶系统,参与宿主能量、物质及遗传信息运转等一系列生理过程。因此有人认为,正常微生物群同呼吸、循环系统一样,是宿主的一个重要生理系统。

1. 营养作用。动物一般不能直接利用纤维素,因为动物缺乏消化纤维素的酶。但反刍动物能将微生物作为消化剂来分解这些纤维素。瘤胃内生长大量的具有分解纤维素能力的细菌和原生动物。这些正常微生物不仅帮助反刍动物消化草料,而且菌体还是动物蛋白质和维生素的来源之一。其他非反刍兽的纤维素消化主要在盲肠进行,其生化过程大体与瘤胃中相似。另外,哺乳动物肠内一些正常微生物,如双歧杆菌、乳杆菌、真杆菌、大肠杆菌等,能合成多种维生素(如K、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>6</sub>、B<sub>12</sub>、菸酸、泛酸、生物素和叶酸等)和蛋白质,供宿主利用。

2. 提高防御能力。对高等动物,肠道中厌氧菌占优势,约占90%以上,这些菌在代谢过程中可产生挥发性脂肪酸和乳酸,降低生境内H<sup>+</sup>浓度与Eh,从而抑制外菌的生长和繁殖。同时厌氧菌与粘膜上皮细胞紧密结合,形成一层生物膜,称膜菌群。这层膜对宿主起到了占位性保护作用。如果这层膜遭到抗生素或辐射破坏时,就会因外菌的侵入而导致肠首疾病。由于厌氧菌数量大,在营养争夺上处于优势,加之在厌氧条件下繁殖很快,因而限制了兼性菌的生长。此外,厌氧菌产生的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>对不能产生过氧化酶的细菌有抑制作用。

3. 免疫作用。正常微生物群能刺激宿主建立完备的免疫系统。在检查无菌动物的免疫系统时,发现其淋巴系统、抗体形成系

统等均发育不良。如无鸡回盲部的淋巴结比普通鸡小4/5。此外,从新生儿免疫系统的发育过程也可看出正常菌群的作用。

**微生物生态学的用途** 微生物生态学不仅是一门理论科学,其研究成果能起到指导实践的作用,而且它能与其它生命科学相配合,揭示生命的奥秘,帮助人们认识疾病的本质。如通过对正常微生物群的定性、定量和定位来检查,就会发现许多微生物由于量上的差别、宿主转换(易主)、定位转移(易位)等原因,使之从不致病转为致病。

微生物生态学可用于生理学监测。从微生物生态学观点出发,正常微生物群是动植物及人类个体重要的生理学组成部分,任何个体反应都可能通过正常微生物群的定性、定量及定位表现出来。因此,正常微生物群,正常微生物的代谢产物,以及正常微生物群与其宿主相互作用的反应,都可作为动、植物及人类个体生理功能检测的重要侧面和指标。在医学中,抗生素的应用易引起微生物失调。在应用过程中如不进行监测,将会导致在治疗甲病的过程中引起乙病的发生。在手术疗法、放射疗法、保健措施、中医中药、宇航员的保健监护等方面,要保持正常菌群与其宿主的最佳生态平衡,都必须进行生理学测定。

微生物生态学为保健医学提供了一些理论基础。人类能够从微生物生态学观点出发,使正常微生物群在内部结构上与其宿主建立起理想的最佳状态的微生物生态平衡,为提高健康水平和延年益寿的保健医学作出贡献。

(山东省农业科学院畜牧兽医研究所王世荣研究员撰)

**微生物降解** microbial degradation 随着工业废水排放农药的大量使用等造成的环境污染问题越来越受到关注,生物治理(主要指微生物治理)亦越来越受重视。不易进行非生物降解的污染物,其在环境中的滞留性主要取决于微生物能否降解及降解速率。因此,研究土壤微生物降解有助于弄清污染物在环境中的迁移转化规律,挖掘土壤微生物的净化能力,平衡生态系统,消除污染物对环境的隐患。

微生物具有代谢类型多的特点,几乎可降解或转化自然界存在的各种物质,尤其是有机化合物。早在1935年,前苏联就进行了微生物脱硫方面的研究。碳氢化合物的微生物降解亦早已被人们所重视。1946年,美国 ZoBell 报道有100多种微生物(包括细菌、酵母菌和霉菌)能在碳氢化合物的基质上生长,并降解之。1951年, Audus 提出了如下观点:微生物对农药降解的过程是微生物适应农药而生长的过程,多年施用某些农药的土壤,一般含有适应该地区农药生长的微生物。由于微生物繁殖迅速,个体微小,比表面大等特点,较其它生物更易适应有毒环境。

微生物降解的研究从60年代开始越来越活跃,从每年发表的文章、研究报告的篇数以及各种会议的次数看,称得上是土壤微生物领域最活跃的方面。1962年,前苏联 shubogzco 曾对20种化学物质的生物毒性和生物降解性进行了系统的研究。1974年以来,日本环境厅环境保健部保健调查室每年进行一次对自然环境中的化学物质及其降解性的研究。1979年潼口宽治指出,确定某物质的降解微生物,首先必须分离微生物纯种。这方面的报道日益增多,如从卤代的有机酸的脱溴中得到了节细菌属的细菌,降解2,4-D(2,4-二氯代苯氧基醋酸)的萤光假单胞菌,降解萘(有机环状化合物)的黄杆菌属细菌,降解DBP(苯二酸二丁酯)的气单胞菌属细菌以及降解多种染料的假单胞菌等,它们均生息于土壤中。1977年,美国 EPA 公布法令规定129种为重点污染物或优先污染物。1981年,塔白克等对上述污染物中的103种物质的生物降解性进行了系统的研究,并作评价:40%为易被降解物,29%为难降解物,31%为不易降解物。中国科学院微生物研究所、土壤研究所、沈阳林土所、湖北水生所、北京化工研究院环保所、吉林化工研究院、北京环保所及南京大学的研究人员在培养能代谢特殊有机污染物的菌株以及各种化学物质的生物毒性和降解性方面作了大量工作,并取得一定的成果。

土壤对污染物的净化能力是多方面的,但主要是土壤微生物

物对污染物的降解。1967年, Bunch 和 Chamber 提出三角瓶静培养筛选技术测定有机物好气条件下的降解效果。但静培养的很多条件与实际相差甚远, 如有些污染物不能均匀分散, 故在实践中不断改用新方法, 如摇瓶振荡试验、土壤渗透试验以及连续流反应器试验等, 以确定污染物的微生物降解性能。

微生物降解的研究发展相当快, 加之环境工程、环境化学等不同领域的相互渗透, 目前已有从土壤微生物学分出去自立一门环境微生物学的趋势。Environmental microbiology 在国外已被大家接受, 并且一般仅指微生物降解一类, Ames 实验等属于毒理学则不计入。Environmental Microbiology 由土壤微生物降解、海洋微生物降解及环境工程中的微生物降解诸部分合并而成。但这种独立亦是模糊的, 如果将微生物降解的大部分归入土壤微生物, 亦无人反对。污染物在环境中的最后归宿一般为土壤、底泥、地表或地下水, 这些人部分归于土壤微生物研究范围(一般认为除海洋外, 都算作土壤微生物的领域之内)。实际上国外这项工作的研究人员大部分是土壤微生物学家, 部分来自环境工程。因此, 微生物对环境中外来物的降解可以作为土壤微生物领域最为活跃的课题之一。

1972年 Matsumura, 1976年 Zabik, 1977年 Khan, 1978年 Hill 等的著作或评论论述了降解农药课题的各个方面。1982年, F. Matsumura 认为按降解的最终结果, 微生物代谢农药可分成酶性的和非酶性的两大类。酶性的包括农药作为微生物能源的异化作用和偶然代谢普通酶引起的代谢及模拟诱导代谢一共代谢。他们第一次对共代谢作了限制, 仅在微生物被与农药结构相同的化学物质诱导时, 才属之。共代谢对治理环境污染很重要, 常可通过几种微生物的一系列共代谢反应, 使一些农药全部降解。非酶性的即光化学反应、pH 变化、有机物和无机物的产生、辅助因子的产生等均由微生物或其产物引起或促进。微生物充当光敏化剂(Photosensitizers)和作为电子的供体、受体或化学反应基来促进光化学反应。

有机污染物方面以烃的降解研究得较深入。1977年 Higgins 和1978年 Watkinson 作了专著和综述。A. M. Chakrabarty 做了大量遗传学工作后指出分解代谢受体粒控制, 此类质粒统称降解质粒, 已在1975年的 M. L. Whellis 综述中做了全面总结。至今已发现降解性质粒近30多种。1984年, 王春生等报道了分离纯化降解性质粒 DNA 的简便方法。

早期的微生物降解主要是研究农药及其它污染物的好氧微生物降解, 以后逐渐转至厌氧降解和厌氧脱卤素(主要是脱氯)以及微生物可利用性与微生物降解的关系。由于自然环境中很多是厌氧环境, 如深层土壤、渍水土壤、底泥、地下水等等, 治理这些环境中的污染物必然涉及厌氧微生物降解。近年来厌氧微生物降解已越来越受重视, 如芳香烃的厌氧微生物降解、三氯乙烯(TCE)的厌氧微生物降解等。

微生物降解中逐渐引起重视的另一课题是污染物的微生物可利用性与微生物降解之间的关系。因为一般微生物降解实验无论是在实验室或在野外进行, 均采用加入目标化合物的方法, 而由此所得的动力学数据往往与实际微生物降解速率相去甚远。究其原因, 因为污染物进入土壤环境后, 一般须经过一段时间, 才能部分进入土壤内部结构或吸附于土壤孔隙(尤其是微小孔隙)的内部, 如系非离子型有机化合物, 则溶(或称“分配”)入土壤有机质部分, 因此土壤环境中这些化合物的解吸速率和扩散系数等往往是其微生物降解速率的限制性因素。由于新加入的化合物可影响降解速率, 所以研究其动力学模型必须考虑到这一因素并加以修正才能真正反映污染物在土壤环境中的微生物降解。因此, 近年来有关这类研究的报道也越来越多, 且正在呈现快速增长之势。

分子生物学在土壤微生物领域的应用日益引起人们的重视, 遗传工程菌(GEM)已用于降解污染物。大量的微生物降解研究结果说明微生物对含甲基的或氯取代基的芳香化合物的降解, 一般是经过苯环的邻位裂解途径或间位裂解途径, 但如果是甲基

的或氯取代的芳香化合物混合在一起, 则微生物难以降解, 因为生成不能降解的中间产物或有毒的中间产物。目前已将三种不同降解菌编码降解酶的基因组合成假单胞菌菌株 B13FRI (pFRC20P), 这种菌可将甲基芳香化合物与氯代芳香化合物的混合物降解。为了解决遗传工程菌引入环境后的安全及其生存能力、基因稳定、扩散等问题, 导致了基因探针法与 PCR 技术引入土壤微生物降解领域, 而16S rRNA 顺序分析则用于降解微生物的分类与进化的研究, 用作鉴定、检测微生物更为客观, 并对微生物的进化研究已开始深入到分子水平。

在环境污染中, 卤代化合物(主要是氯代化合物)是相当大的一类。这类化合物有的在好氧环境下不易被微生物降解, 在厌氧环境亦不易被微生物降解, 如含氯较多的某些多氯联苯(PCB)的同系物; 但在厌氧条件下, 某些土壤微生物用这些卤代化合物为电子受体, 在厌氧呼吸的过程中以氢取代氯, 为厌氧还原脱氯过程, 而脱氯以后的产物则可在好氧环境中被微生物彻底降解。因此, 通过厌氧、好氧的结合(如先厌氧, 然后再将污染的底泥、土壤等暴露于空气等等), 可望彻底治理这些污染的卤代化合物。厌氧脱卤(主要是脱氯)是目前微生物降解的研究热点。

#### 参考文献

- 1 Chiou G T, et al. Science. 1979, 206: 831~832
- 2 Knackmuss H J. Biotechnology. 1983, 173~190
- 3 Ogram A V, et al. Appl Environ Microbiol. 1985, 49: 582~587
- 4 Rojo F, et al. Science. 1987, 238: 1395~1397
- 5 Leahy J G, et al. Microbiological Reviews. 1990, 305~315
- 6 Abramowicz D A, et al. Biotechnol. 1990, 10: 241~251
- 7 Chaudhry G R, et al. Microbiological Reviews. 1991, 59~79
- 8 Edwards E A, et al. Appl Environ Microbiol. 1992, 794~800
- 9 Guerin W F, et al. Appl Environ Microbiol. 1992, 58: 1142~1152
- 10 Susan A G, et al. Appl Environ Microbiol. 1992, 58: 1392~1393

(南京大学曹幼琴副教授、叶定一博士撰; 朱洪文审)

### 微生物固定金属及其应用

immobilisation of metal by microbe it's applied 由生活细胞以及生活细胞产生并分泌到胞外的某些物质与金属之间发生反应, 从而使可溶性金属或金属微粒从溶液中分离出来的过程称为生物固定。生物固定也称生物吸附、生物吸收、生物浓缩和生物累积。研究微生物对金属的固定作用, 有重要的实用价值。可以利用微生物从采矿场、冶炼厂及其他有关工业排放的废液以及海洋、湖泊和河流中回收低浓度的金、银、铂、钯、铯等稀贵金属, 又可消除或降低有毒的和放射性的金属对环境的污染。这些微量的金属一旦排放, 在土壤中是稳定的, 将累积得越来越多, 对人和动植物造成极大的危害。因此, 许多国家都严格制定有毒物质(包括金属)含量的排放标准。用传统的方法如化学沉淀、离子交换、电解、蒸馏挥发及液-液抽提等方法处理大量废液是不经济的, 而利用微生物则可能有效和方便地解决这方面的问题; 还可利用微生物的这种能力净化由金属局部污染的地下水、地表水和湖水。

微生物需要多种金属元素作为无机营养, 但是过量的金属及其它金属元素的存在, 对微生物有抑制作用或毒害作用。某些微生物在其生活环境中形成适应高浓度金属的能力。微生物对金属的固定, 是对金属元素适应能力的一种方式。

微生物固定金属的方式和机制很多, 现归纳为两个方面: 微生物细胞对金属的固定作用和由生活微生物产生的某些物质对金属的固定作用。

微生物产生的某些物质对金属的固定 (1)硫化氢( $H_2S$ )的固定作用。生活在湖泊沉积物、沼泽地和缺氧土壤中的硫酸盐还

原菌,主要有脱硫菌属的菌类和脱硫肠杆菌属有机体,还原硫酸盐产生硫化氢( $\text{SO}_4^{2-} + 10(\text{H}) \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$ ),硫化氢和金属离子反应生成硫化物沉淀。Brierley等(1980)开始研究利用这种作用,设法降低矿区排放液中的酸度和金属的浓度。(2)有些细菌细胞表面的磷酸酯酶能裂解甘油- $\alpha$ -磷酸脂产生 $\text{HPO}_4^{2-}$ ,该物质也能固定金属离子。Macaskie和Deall(1988)用固定化的柠檬酸菌产生的 $\text{HPO}_4^{2-}$ - $\alpha$ -固定镉、铅和铀。1g细胞干物上累积9g铀。(3)由生活细胞产生的物质,可以作为螯合剂,在有些情况下可以收获并重复地使用。例如铁末沉着体,Lundgren和Dean(1979)指出,它是一种低分子量的铁离子专门配价体。从多种细菌中如假单胞杆菌、放线菌、固氮菌和节杆菌分离的这种物质是儿茶酚或羟酚的衍生物。Devoe和Hollein(1986)合成了一系列的能固定金属的儿茶酚及代用品,将该物以共价方式固定在高孔的玻璃珠上,能回收除铁以外的金属,用它处理核工业废液,固定铀、钍和铀,有效率大于99.9%。(4)由微生物产生的某些大分子的聚合物,它们能吸附可溶性的金属,用物理捕捉的方式凝聚金属微粒,包括多糖、核酸和蛋白质。有些已被开发用于处理工业废水。Bomstein(1977)从多粘菌、球粘菌、芽孢杆菌、明串珠菌、黄杆菌、小球菌和产碱杆菌等获得核蛋白作为凝聚剂,用于处理含金属的废液。Datrack(1987)对革氏(-)细菌、如陈胶菌、假单胞菌等产生的胞外多糖的组成、性质及固定金属的能力进行了较为详细的研究。

**微生物细胞对金属的固定作用** 微生物细胞壁对固定金属有很重要的作用。细胞壁的化学成分和结构与固定能力有关。如对于细菌来说,革氏(+)和革氏(-)有很大的差异,前者往往能固定较多的金属,因为它的细胞壁有很厚的肽聚糖结构,具有离子交换性质,能够和溶液中带正电荷的金属离子进行交换反应。此外,还有多种因素影响微生物对金属的固定作用。不同种的微生物,甚至同一种微生物不同发育阶段和真菌的菌丝体和孢子固定金属的能力也不同。外部环境条件也影响其对金属的固定。如溶液的 $\text{H}^+$ 浓度,温度,溶液中存在金属的种类、浓度,还有培养微生物的培养基成分,都能影响对金属的固定。

活的微生物细胞因其表面和胞内均能固定金属,因此可固定大量的金属。Charley和Bull(1979)用假单胞菌和金色葡萄球菌的混合物,每克干细胞物固定了300mg银。但是,使用活细胞存在一些缺点,为此,可采用具有固定金属能力的非活性代谢的休止细胞,也可用各种方法处死的死细胞,以及由细胞制备的衍生物来固定金属。杀死微生物细胞,可以用去垢剂、酸碱溶剂处理,也可用加热、冷冻及超声波等方法。这些方法有可能增强细胞壁的透性,破坏细胞膜或壁的构造,暴露出更多键合金属离子的位点,提高其对金属的固定能力。利用休止细胞或死细胞固定金属与生活细胞相比,在处理工业废液中有很多优点,因为工业废液的成分相当复杂,各种成分的含量、 $\text{H}^+$ 浓度及温度波动很大,生活细胞很难适应这种环境,而应用休止细胞或死细胞不需补加营养物质维持微生物的生命,还可利用某些食品、饮料、制药和其他发酵工业所产生的大量微生物细胞体,可减少操作过程,降低处理成本,有可能和现有的方法竞争。

以下介绍几方面的研究结果:1981年,美国新泽西州捷尔哈特(Engellard)矿物和化学制品有限公司发表了利用真菌从废液中回收微量金属的专利,回收率达到94%~98%。藻类是丰富的自然界资源,生活藻类细胞能从其生活环境中固定大量的铀、钍、金及其他多种金属。最近几年对藻类累积金的特性、最适条件和机理研究较为详细。固定能力较强的有小球藻、红藻、绿藻及棕色藻类,在最适条件下每克干细胞物可固定400mg的金,溶液中存在100~1000mg/L的铅、镉、银、铜和铀不影响其对金的固定作用。还可用不同的方法做成固定化细胞,经过反复使用多次,其固定能力没有下降,通过条件的控制还能选择性地回收不同的金属;从微生物细胞制备的衍生物用以回收金属。1988年,J. A. Brierley等用一株具有吸附金属能力的微生物(枯草杆菌,经加热、碱处理后制成一定大小颗粒状物质,在水溶液中稳定

并具有一定的机械强度,可以像离子交换树脂或颗粒活性炭一样装柱,让待处理的金属溶液通过,也可以装在反应器中使用,每克干物质可固定390mg的金,94mg的银,436mg的铀等。

硒被视为生命元素,是人和动物不可缺少的微量元素之一,但如果摄入过多,则可能引起生物畸形,甚至死亡。现已查明,在农业排放的水中、贵金属的尾矿池、采矿及冶炼过程有关的废液中均含有硒。许多研究资料表明,微生物通过几个机制能改变硒的氧化状态,使可溶性的硒从溶液中沉淀出来。1989年,P. B. Altringer等从农业排放液中分离得到一种细菌混合物,用这些细菌小规模连续处理农业排放液及尾矿废液,结果降低硒的含量,有效率达到96%。铝也是一种有害的元素,它与老年痴呆以及某些疾病有关。利用微生物有可能降低水中铝的含量,无疑对人体的健康是有益的。

研究微生物对金属的固定作用,在环保及回收金属方面有着重要意义,研究范围相当广泛,中国在这方面的研究仅仅是开始,在固定作用的机制及应用基础方面都有很多研究的内容。

#### 参考文献

- 1 Walter D. U. S. Patent No. 20689727, 2068927, 206898, 1981
  - 2 Patrick R. D. In Flocculation in Biotechnology and Separation system, edited by Attia Y. A., Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam., Printed in the Netherlands, 1987. 337~349
  - 3 Brierley J. A. U. S. Patent No. 4090894, 1987
  - 4 Kuyucak N, Volesky B. Biorecovery, Vol 1. 1989, 189~209
  - 5 Altringer P. B., Lersen D. M., Gardner K. R. In Biohydrometallurgy, edited by Joseph Salley, et al., Canmet, Canada centre for mineral and Energy Technology, 1989, 643~650
  - 6 Brierley C. L. In Microbial Mineral Recovery, editors by Henry, L. Ehrliand Brierley, C. L., McGraw-Hill Publishing Company N. Y., 1990
  - 7 黄淑惠. 吸附金 $\text{Au}^{3+}$ 的真菌筛选. 微生物学通报, 1991, 18(1), 11~14
  - 8 谭红. 利用酵母细胞快速富集溶液中的铀. 工业微生物, 1992, 1, 22~28
- (中国科学院微生物研究所黄淑惠副研究员撰; 裘荣庆审)

#### 草原土壤微生物生态系 the ecosystem of microorganism of the grassland soil

微生物在自然界中分布极为广泛,它们有巨大的生物化学活性,在自然界能量流动、物质循环等方面起着极其巨大的作用。土壤是微生物生存的天然培养基,也是自然界物质生物循环的重要基地。土壤微生物与草原植被和各种动物一起构成完整的草原生态系统,并在其中占有重要地位,起着多种多样不可代替的作用。土壤微生物种类与数量是决定土壤肥力的重要因素。研究草原土壤微生物种类与数量,测定其在能量流动和营养物质转化中的活性程度与功能作用,对于探讨土壤中有机物质的分解、土壤肥力、植物营养供应与植物生长有着十分重要的意义。

20世纪初,R. Warington曾做过土壤微生物的研究工作。最引人注目的是E. J. Russell和H. B. Hutchinson在1914~1918年用杀虫剂对土壤进行部分灭菌的研究工作。从那时起,土壤微生物的研究工作就一直没有停顿地发展着,先是原生动物和土壤细菌学方面的实验室工作,而在1940年以后就归并为土壤微生物学研究。

在国外,有关草原生态系统微生物活动更为详细的研究报道已由Coleman和Sasson作出。1980年Breymer报道了温带草地中的微生物种群及热带草地微生物种群,食腐真菌的作用,草原土壤中酶的含量以及环境因素对酶的影响等。同年,Coup Lond指出:微生物生物量超过大大小小的哺乳动物、鸟类、爬行动物、昆虫和全部无脊椎动物总和之数量;真菌是微生物生物量的主要组成部分;在干燥而炎热的砂壤土中真菌的生物量少于凉

爽、半干旱的粘土或温暖湿润的粘土中的真菌数量;真菌有4/5在0~10cm土层中;不论真菌还是细菌,其数量均随土层加深而减少。在草原土壤中,微生物构成一个重要的动态的营养物质贮存库。微生物生物量的日变化或季节变化都直接影响可给性营养物质的数量。

1985年,S. Higashida 等指出,日本北海道北部草场,土壤为重粘土的0~2cm土层中,细菌数量一年出现两次峰值,即5月、8月或9月;在较深的土层中微生物种群数量的变化不大。影响细菌数量高峰的因素是来自植被的物质供应,并且受土壤水分状况制约。Clark 和 Paul 报道,在0~30cm深度的土层中,草原土壤微生物生物量大约是200g/m<sup>2</sup>;微生物活动是草原生态系统中营养物质循环的最重要因素。真菌菌丝长度和真菌的孢子数量变化与细菌种群变化不同,因为真菌菌丝是真菌的活动形式,所以土壤真菌的季节变化可以考虑用菌丝长度来表示。真菌数量的变化不像细菌数量变化那样明显。同年,S. Higashida 等又报道草原土壤表层微生物活动的季节变化,指出在有大量有机物质累积在土壤表层的草地中,微生物活动是重要的,供给牧草生长的矿物营养是微生物活动的结果。1986年,S. Higashida 等又报道了草原土壤微生物活性与土壤性质的关系,指出在0~2cm土层中,真菌的数量与土壤的任何性质都不存在明显的线性关系。在5~15cm土层中细菌的所有测得值都与草原年龄成负相关,而与微生物基质水平成正相关;微生物所有测得值都与可交换性K成正相关,与土壤H<sup>+</sup>浓度呈负相关。

1992年~1994年李生再次进行“低山丘陵干草原土壤微生物氮素生理群研究”。指出低山丘陵干草原土壤中氨化生理群微生物数量少于苏打盐渍土草场和固定沙丘、沙地草场微生物数量。硝化生理群好气性固氮菌生理群微生物数量特别少。应采用各种生物措施,人工补种或飞播一些豆科牧草,增加土壤有益微生物数量,是提高土壤肥力的有效措施。

1979~1980年,廖仰南等人研究了内蒙古锡林河流域草原土壤微生物的季节变化及其土层垂直分布,发现微生物数量的土层垂直分布和季节性变化具有明显的规律性;微生物各种种群优势群属在不同季节和不同土层中的数量分布是具有一定优势交替规律的;微生物总量的分布与土壤肥力密切相关。1981~1982年,廖仰南等人又对内蒙古锡林河流域草原土壤微生物生物量及其季节动态进行研究,发现厚层栗钙土羊草草原和典型栗钙土大针茅草原,放线菌为优势群,其次是细菌,真菌较少;微生物总量,(0~70cm)羊草草原在1981年为1069.19g/m<sup>2</sup>,为大针茅草原的1.17倍;1982年羊草草原为大针茅草原的1.15倍。由此可见羊草草原的生产力高于大针茅草原。土壤微生物的土层垂直分布与植物群落根系生物量的分布相应呈正相关;微生物量分布与其相应土层的养分的分布趋势类同,说明土壤肥力与土壤微生物分布密切相关。同年,赵志山等人进行了“甘肃天祝山草原土壤肥力状况及微生物生态研究”,指出土壤微生物数量(包括总数与生理群数量)与土壤肥力有相依关系;草原土壤中有机质含量愈丰富,微生物数量也就愈多。1981~1986年,廖仰南进行了草原土壤微生物生物量测定方法的研究,指出在人工羊草草地、天然羊草草原和大针茅草原土壤微生物的研究数据证明,以干重换算法及与该法相应制订的计算公式,测定计算微生物生物量是可行的;应用干重换算法,只要辨认所计数微生物各类群菌落,即可分别求得各类群微生物的生物量。1982年,赵志山等,进行了“吉林西部羊草草原根际固氮菌的研究”,指出,吉林西部羊草草原土壤中存在数量较多的自生固氮菌,有的牧草根际土壤中这种菌的数量多于其它土壤中的数量;牧草种类不同固氮菌的分布、数量和种类也有差异,这与某些牧草的根系向土壤中分泌的物质有一定关系,但不同牧草根际土壤中固氮菌活性差别不甚大;扁豆根际土壤中固氮菌数量较多,固氮活性较强。1984年,东北师大杨靖春和中国科学院微生物研究所王大珍等人,在进行“东北羊草草原土壤微生物呼吸速率的研究”后指出,土壤微生物呼吸速率季节变化受土壤温度、水分的综合影响,而这两个因子几乎是同等重

要,因此,在东北羊草草原中,只有保持适宜的土壤温度和充足的土壤水分,土壤微生物呼吸作用才能正常进行,才能使土壤中动植物有机残体不断被分解,从而维持正常的能量流动和物质循环。1984~1987年,李生进行了“苏打盐土草场土壤微生物氮素生理群的研究”,1990年又进行“固定沙丘、沙地草场土壤微生物氮素生理群的初步研究”。1985年~1986年,孙炳寅等人进行了“互花米草草地土壤微生物生态分布及某些酶活性的研究”,指出互花米草的盐沼土中,细菌、放线菌、真菌的数量比对照的盐沼土多;15~30cm土层中细菌数最多;细菌总数的增减趋势是夏、秋两季多,冬、春两季较少;在光滩土壤中,脲酶和过氧化氢酶活性很弱,而互花米草土壤中这两种酶活性很强,但与种植年限和季节无显著相关性。

当今国内外对草原土壤微生物生态系统研究比较活跃的可以概括为以下几个方面:(1)各种不同草场土壤中微生物生物量;(2)各种不同草场类型微生物垂直分布和季节性变化规律;(3)微生物与环境条件微生物与产草量的相关性;(4)草原土壤微生物活性、酶的活性与有机质分解的相关性;(5)草原土壤微生物呼吸速率与有机质分解的相关性;(6)草原土壤微生物固氮作用;(7)各种不同草场土壤微生物氮素生理群等。

今后,除对上述几方面问题继续深入研究外,对草原土壤微生物各种不同功能生理群应开展大量研究工作。目前对氮素生理群的研究已引起重视。特别是对草原土壤生物固氮应广泛地开展研究,并以不断提高草原土壤的氮素营养水平为重点。对纤维素物质分解的生理群也应积极开展研究,因纤维素物质在土壤中积累的比较多。对各种生理群的活性应深入研究,通过研究摸清各种不同功能生理群的本底值,掌握其变化规律。通过改良措施增加草原土壤有益微生物数量,控制有害微生物数量,增强土壤生物活性,促使有机质的分解,使草原土壤微生物向着造福于人类方向发展。

#### 参考文献

- 1 Breyneyer A I. 1980, 609~655
- 2 赵志山,等. 中国草原, 1984, 3: 70~73
- 3 Higashida S, et al. Soil Sci. Plant Nutr, 1985, 31(1): 113~121
- 4 Higashida S, et al. Soil Sci Plant Nutr, 1985, 31(4): 647~651
- 5 廖仰南,等. 草原生态系统研究, 1985, 1: 166~179 181~192  
(内蒙古哲里木畜牧学院李生副教授撰;王国栋审)

**草原土壤微生物生态系——氮素生理群** the ecosystem of microorganism of the grass land soil — the nitrogen physiological colony 微生物是自然生物资源,在自然界能量流动、物质循环、维持生态平衡、净化环境中起着能动的生物化学作用。尤其是氮素生理群中各类群微生物数量多少,关系到土壤中含氮有机物质的转化、速效性氮素营养供应和土壤中氮素损失状况。土壤微生物直接影响着土壤肥力及植物生长。因此,摸清草原土壤微生物生态系——氮素生理群的本底值及其变化规律,就能科学地探索提高土壤肥力的途径,防止有机物质与氮素的损失。

国外对土壤微生物开展了一系列研究工作,其中以英国洛桑试验站从事土壤微生物学研究最具代表性;研究比较活跃的有以下几个问题,厌气性细菌及其在土壤中的活动;根际微生物;根部解剖学;土壤微生物和植物根系对磷素的循环;根瘤菌在土壤中的活动;硝化作用与硝化细菌;土壤原生动物;土壤真菌;化学农药的微生物学降解;杀生性处理对土壤微生物的影响及土壤中非共生固氮作用等。这些大致概括了国际上土壤微生物学的研究动向,反映了当前本学科的进展情况和研究水平。国外对草原土壤微生物开展了大量的研究工作。如 Doxtader (1969)、J. OHarris (1971)、Paul (1973)、Matador 和 Pawnee 等研究点对真菌和细菌等微生物的研究。1985年,Shuji Higashida 和 Kinya

Takao进行了“草原表层微生物数量的季节变化格局”的研究。1986年,Shuji Higashida和Knya TaKao进行了“草原土壤微生物活性与土壤性质的关系”研究。

1961年,中国陈华癸主编的《微生物学》阐述了氨化、硝化和反硝化作用,同时也指出非共生固氮作用。1981年,王芳玖进行了“草原生态系统氮素生理群的初步研究”,指出氨化生理群、硝化生理群、反硝化生理群、固氮微生物在不同土层深度及季节性分布数量,并发现在植物生育期内随着温度的不断提高和土壤水分的不断增加,土壤中氨态氮和硝态氮也出现增加高峰,这样植物可以得到较充足的氮素营养;还发现暗栗钙土羊草草场和典型栗钙土大针茅草场没有典型固氮菌,为了提高产草量可接种固氮菌剂,以改善固氮微生物的现状,提高草原土壤的氮素营养水平。1984~1987年,李生进行了“苏打盐土草场土壤微生物氮素生理群的研究”,报道了苏打盐土草场土壤氮素生理群、各类群微生物数量的土层垂直分布和季节性变化情况,指出:通过人工种草,可使氨化生理群微生物数量增加5/6,可使硝化生理群和好气性固氮菌生理群微生物数量增加6倍多,而使反硝化生理群微生物数量减少5倍多,从而有利于土壤中含氮有机物质的转化,减少氮素损失,增强土壤肥力,达到提高产量的目的。1985~1986年,孙炳寅等人进行了“互花米草草地土壤微生物生态分布及某些酶活性的研究”,也指出互花米草盐沼土中氨化细菌占优势,固氮菌、硝化细菌次之,反硝化细菌数量最少。1990年,李生又进行了固定沙丘、沙地草场土壤微生物氮素生理群的初步研究,指出固定沙丘、沙地草场土壤微生物氮素生理群各类微生物数量土层垂直分布和季节性变化规律,发现固定沙丘、沙地草场土壤中反硝化生理群微生物数量最多,是造成土壤中氮素损失的重要因素。提出:为了改善固定沙丘、沙地草场土壤中氮素营养水平,采取人工种草及农业技术措施可减少土壤中反硝化生理群微生物数量;固定沙丘、沙地草场采用人工补种豆科牧草,可增加生物固氮量,进而可提高土壤肥力和草场产草量,从而提高畜牧业生产的经济效益;固定沙丘、沙地草场,防止沙化和草场被破坏,必须采取围栏措施保护植被旺盛生长,由此可促进土壤微生物数量增加,维持草场的生态平衡。

随着生物科学研究的不断进展和深入,对草原土壤微生物生态不仅进行生物量的研究,还要对土壤中具有不同功能的生理群,对有机物质转化机制的研究加以重视,对氮素转化各生理群微生物的数量、变化规律及其功能机制的研究已引起注意。土壤中物质循环的化学元素中氮素占有特殊的位置,土壤氮素转化过程大部分是通过微生物途径实现的。含氮有机物质的矿化作用释放氮素,是供给植物生存必需元素的主要途径之一。因此,对草原土壤微生物氮素群的研究是一重要课题。深入研究草原土壤微生物氮素生理群与其生态环境的关系,以及如何控制环境条件,改良草场,采取生物措施,施入菌剂、人工补种豆科牧草等,从而增加有益微生物数量,减少有害微生物数量,促进草原生态系统氮素生理群的旺盛活动是今后研究的主要任务。这些对创造氮素的良性循环,改善草原土壤肥力状况,指导草业生产、提高畜牧业生产的经济效益,及造福人类具有重要意义,也是今后的研究方向和发展趋势。

#### 参考文献

- 1 陈华癸. 微生物学. 北京:北京农业出版社,1961. 309~343
- 2 Shuji Higashida, et al. Plant Nutr., 1985, 31(1), 113~121
- 3 Shuji Higashida, et al. Plant Nutr., 1986, 32(4), 587~597
- 4 孙炳寅,等. 生态学报, 1989, 3, 240~243
- 5 李生. 土壤通报, 1990, 5, 235~237
- 6 李生. 土壤通报, 1992, 4, 185~187

(内蒙古哲里木畜牧学院李生副教授撰;王国栋审)

**植物微生物区系** 指在一定时间、空间条件下植物体内外微生物的类群组成、分布以及随植物生长发育而变化的活动状况。一株植物并不是一个单一个体生物,而是包括许多微生物在

内组成的一个生物群体,在植物根、茎、叶、花、果、种子内外都有大量微生物在,植物体内外的这些微生物种类很多,常见的有真菌(霉菌和酵母菌)、细菌、放线菌病毒等,有的在植物体外,有的在植物体内;有的对植物有益,有的对植物有害。有附生、腐生、寄生、共生和抗生各种微生物。它们与植物特定的部位保持着密切的生态和营养联系,形成特定的微生物群落,如根际微生物、叶面微生物、种子微生物和植物维管束微生物等。研究植物微生物区系不仅对了解植物与微生物生态关系有重要理论意义,而且对开发利用植物体内有益微生物,控制有害微生物,促进农业生产发展也有重要意义。

植物微生物区系的研究开始于始于20世纪初。1903年布里(R. Burri)发现植物叶面常有细菌;1904年赫尔特纳尔(Hilfner L.)发现根际有更多的微生物;同年杜格里(Duggeli M.)发现种子有微生物;佛里曼(Freeman H. W.)发现黑麦草胚组织内有不致病的内生真菌。植物上的病原微生物发现的更早。这些是植物微生物的早期报道。以后对植物微生物的研究逐渐增多,特别在根际微生物和种子方面研究较多,研究的内容多集中在植物微生物的种类、数量变化和病原微生物。

50年代以后,植物微生物区系研究增多,内容更加广泛。包括植物微生物与植物生育期、根分泌物和脱落物,叶面外渗物和附着物、生态环境条件、植物抗病性、耕作栽培措施、病害发生和控制等的关系以及植物微生物间的相互关系等。1958年克拉里尼科夫(Красильников, Н. А.)发表了《土壤微生物与高等植物》。1959年王鸣岐发表“种子微生物与种子生理的现状和展望”。1981年贝克曼(T. P. Blakeman)发表了《植物叶面微生物生态学》论文集。70年代后曾多次召开叶面微生物生态学的国际会议。1985年魏德尔士(C. E. Windels)出版了《叶面生物防治论文集》。这些标志着植物微生物区系研究进入一个新的阶段。

1986年后河南农业大学曾对棉花根际微生物,黄瓜叶面微生物,西瓜维管束微生物和小麦种子内微生物进行研究。这些研究结果又丰富了植物微生物区系研究的内容。

根际微生物是指生长在植物根表面和近根表面土壤中的微生物。由于根的分泌物和脱落物的影响,在根际形成一个特殊的微生物群落,其种类、数量、优势种、抗生菌等都不同于土壤中的微生物群落。根际微生物包括细菌、真菌、放线菌等,有腐生、寄生、共生等,其数量超过土壤微生物的许多倍。根际微生物随植物生长发育、土壤条件、植物抗病性、耕作栽培管理措施等而有很大变化。棉花枯萎病品种根际微生物数量明显增多,棉花枯萎病田增施磷、钾肥,根际放线菌增多,枯萎病减轻。小麦、玉米喷施尿素后,根际细菌增多,真菌减少。根际微生物中有的对植物有益,如根瘤菌、自生固氮菌,有的产生生理活性物质,促进植物生长发育。有的是致病的病原物,有的是病害发生的“帮凶”,有的产生毒素使植物中毒,有的是抗生物,能抑制病原物的活动。根瘤菌是一类与植物根共生的真菌。有内生菌根、外生菌根和内外生菌根。能促进植物生长发育,对作物有增产作用。天麻没有菌根共生就不能正常生长发育。

叶面微生物是指生长在植物叶片表面的微生物,有的侵入叶片内部。由于叶面外渗物质和降落等的影响而形成特殊的叶面微生物群落,包括细菌、酵母菌和霉菌,还有病毒,而土壤中较多的放线菌和线虫在叶面极少。在植物生长的早期细菌较多,中期酵母菌增多,后期霉菌增多。有人测定牧草叶上的酵母菌可占叶片鲜重的1%左右。细菌中主要是革兰氏阴性菌,尤以欧氏植生杆菌为多;霉菌中以枝孢属和链格孢属的菌类多而普遍;酵母菌中以红酵母属酵母属,掷孢酵母属等为多。叶面微生物有附生、腐生、寄生和抗生,有的在植物叶面,有的在植物叶内;期还有不少是致病的病原物和抗生物。

叶面微生物随叶片的生长发育,叶面外渗物质、降落物、气候条件,叶而结构,植物种类不同而变化,有一个演替过程。植物叶片感病后往往招致更多的叶面微生物,特别是酵母菌和霉菌增多显著。叶面的花粉,昆虫的蜜露和排泄物也都有利于叶面微生

物的生长繁殖。

70年代后利用叶面微生物防治植物病害做了不少工作。为利用寄生菌、抗生素、占领菌、弱寄生菌来控制病害的发生和发展。

1924年里魏士(F. J. Lewis)首次发现云杉叶片内有真菌。以后又从烟草、咖啡和许多植物健康叶片内发现多种真菌,并不致病。

种子微生物是指生活在种子内外的微生物。种子微生物有的是从植物的营养器官蔓延到种子,有的是从周围环境中降落到种子上。常见的有真菌、细菌,而病毒和放线菌很少,有附生、腐生、寄生、共生和抗生,还有许多致病的病原体。常见的优势种有植生假单胞杆菌、链格孢、多主枝孢等。种子微生物随种子的成熟而变化,种类和数量越来越多。种子上还寄附有许多病原体。种子微生物对种子生理、贮藏和病害发生都有很大影响。

小麦、水稻开花时雌雄蕊上有许多附生的植生假单胞杆菌,它们给作物提供维生素、烟酰胺等,有利于种子形成。谷类作物种皮下有大量链格孢菌丝,有利于种子合成蛋白质。朱砂根果实内胚与胚乳间有一共生细菌,无此菌时就不能正常生长而早死。种子上的青霉、曲霉等多种微生物引起种子发热、霉变、发芽力下降、品质变坏等。播种或调运带有病原物的种子又能引起病害的发生和向外传播。造成重大损失。

植物维管束微生物是指生活在植物维管束内的微生物,有的在维管束外。有真菌、细菌、病毒、线虫等,有病原体和非病原体,还有抗生物。从西瓜、棉花、甘薯、黄瓜、高粱、玉米等植物维管束中都发现有大量的微生物,有的是病原体或抗生物;除病原体外,它们对植物没有明显的为害。植物维管束微生物因植物种类、地区、抗病性、生育期不同而变化。扬(T. R. Young)发现玉米茎内生真菌随玉米生育期的变化而先后出现5个不同的微生物群落。利用其中的非致病菌控制病害已有人开始研究。

植物微生物区系研究过去已取得很大成就。由于它涉及到植物、微生物、生态、农业等许多领域,对发展农业生产有重要指导意义,已越来越受到重视。它不仅对揭开高等植物与微生物的生态关系有重要意义,而且对发展农业生产也有重要意义。今后在根际微生物、叶面微生物、种子微生物等的研究方面都会有较大的发展。特别是如何控制有害的微生物,发展有益的微生物将是今后的研究重点;菌根的研究也将受到重视。

#### 参考文献

- 1 Blakeman, J. P. et, *Microbial ecology of the phylloplane*, 1981, Academic press, London.
- 2 Windels, C. E. et, *Biological control on the phylloplane*, APS press, USA.
- 3 王鸣岐, 种子微生物及种子生理的现状与展望, 复旦学报, 1959, 4: 197~205; 1960, 1: 121~143.
- 4 Rice, E. L., *Allelopathy*, 1984, Academic press, London.
- 5 Cook, R. J. et, *The nature and practice of biological control of plant pathogens*, 1983, APS press, USA.
- 6 Baker, K. F. et, *Ecological of soil-borne plant pathogens*, 1965, university of California press, USA.
- 7 Neergaard, P., *seed pathology*, 1979, The Macmillan press LTD., England.

(河南农业大学生物工程学院王守正撰)

**水中微生物** 水中微生物包括细菌、病毒、藻类以及原生动物等。自然界的江河、湖泊、海洋之中,由于无机物、有机物的存在,构成一个适宜微生物发育的环境。自然水体中,除天然寄生的大量微生物之外,还有一些由空气、土壤或工农业生产及生活污水而进入水中的过路微生物,其种类与习性同水体的物理的、化学的性状等条件密切相关,分布状况则依水的性质、来源不同而不同,在数量上保持一定的动态平衡,并具有净化作用。但是,当水体出现红潮现象时,即有某种藻类或微生物大量繁殖致

水体出现红色,则使动态平衡遭致破坏。

水与土壤接触最为密切,故水中微生物能高度反映土壤中微生物的成分和垃圾、生产废水、生活污水、人畜排泄物对土壤的污染,以及由此带来的病原微生物等。

水被土壤污染后,水中微生物的组成将有很大的变化,其中大多为需氧性芽胞杆菌,如枯草杆菌、芽状芽胞杆菌、蜡样芽胞杆菌、巨大芽胞杆菌等,也有克雷伯菌属菌类及阴沟杆菌。此外,还有存在于水底泥土中的假单胞菌、鞘细菌、放线菌、硫黄细菌以及真菌、原生动物和藻类。

在静水中,水霉菌和绵霉菌较多见,其中有的能使水生植物致病,有的能破坏鱼卵,可使淡水鱼大规模感染,影响水生生物的产量。在水面和水上层的微生物,多为需氧菌,浅水或水表还有一些具有光合作用的细菌。水的底部大多为厌氧菌,由它们分解有机物产生的有机酸、氢、甲烷等供上层水中微生物氧化和利用。在远离居民区的天然水中,微生物的数量较少,每毫升水中约几十到几百个细菌,假单胞菌、有色菌、无色杆菌较多见。

研究资料证实,人粪便可排出100多个型别的病毒,在未经处理的污水中,病毒的污染浓度可以达到10万个颗粒。被感染者的粪便可以排出高达100万个具有感染性的病毒颗粒/克。

肠道病毒中以脊髓灰质炎病毒和甲型肝炎病毒(HAV)对人的危害性较大。资料还证明肠道病毒对氯的耐受性远远超过致病菌。

水中微生物对人体一般为非致病性的,但受到人或动物排泄物污染的水,就可能成为经口传播疾病的传染源,也成为传播肠道传染病的重要途径。受病原微生物污染的水源引起伤寒、霍乱、痢疾、肝炎等传染病发生的事例并不罕见,接触或饮用啮齿动物带有钩端螺旋体尿污染的水,可引起钩端螺旋体病的发生。还有土拉热杆菌病、布鲁氏杆菌病致死的牲畜污染的水源,也可使人感染致病。

通过各种途径进入水体的病原微生物,大部分由于不适应水体环境而逐渐死亡,仅有少部分可以较长时间生存于水体环境中,它们的存活时间并不一致,一般认为肠道致病菌以霍乱弧菌、伤寒杆菌存活时间较长,通常在2~3周以上;痢疾杆菌存活时间较短,在井水中24h后即会减少50%。

某些致病菌如副溶血性弧菌、霍乱弧菌、绿脓杆菌和军团杆菌等尚能在水中生长繁殖。肠道病毒在水中存活时间,与水的温度和水的纯度有关,温度高存活时间短,温度低则存活时间长;此外,在严重污染的水中存活时间较长,而在蒸馏水中较在污染水中的存活时间更长。

根据水体的类型,水中微生物可分为3类:

**淡水细菌** 包括江河、湖泊、溪流及地下水流动中存在的细菌,以嗜冷菌为多,革兰氏阴性菌则有假单胞菌、无色菌、色素菌、发光细菌、尿单胞菌和弧菌属细菌;革兰氏阳性菌有微球菌和八叠球菌等。

江河、湖泊、池沼水中的细菌,除固有的淡水菌群外,尚受土壤细菌、粪便细菌、污水细菌流入的影响,故地表水中的细菌数,因场地、雨水和季节的不同而有所变化,每毫升水中可有数百乃至数千个细菌。地下水由于地层净化作用使细菌数显著减少,井水等地下水也因深度不同而细菌数也有所不同。至于自来水,则因净化处理和氯化消毒作用细菌数甚少。

**海洋细菌** 海水中含有约3%的食盐,其中适盐细菌多,由于这种条件形成海水中固有的细菌群。但是,海湾、外海、海流及水深等条件的不同细菌数也有差异。海洋细菌也多为嗜冷菌,假单胞菌细菌、弧菌属细菌、螺菌、无色菌、色素菌较普遍,而芽胞菌和球菌很少。海湾海水中,有来自内陆的淡水细菌、粪便细菌、污水细菌,使海产品受到污染,从而有引起消化道传染病和副溶血性弧菌食物中毒发生的危险。海水中,大肠菌、霍乱弧菌、蛭弧菌等革兰氏阴性菌很少能生存发育,陆系细菌无法在海水中长期存活。海湾海水每毫升细菌数可达数万个,而外海水每毫升仅有几十个细菌,至于深处海水细菌数更少。



**污水细菌** 污水中富有有机物及人畜排泄物,受到大量淡水细菌、粪便细菌、土壤细菌的混合污染,由此构成一个特殊的细菌群即污水细菌,其特征为:肠道细菌、变形杆菌和肠球菌较多,也有来自土壤的杆菌、梭菌、淡水细菌、弧菌和假单胞菌等。污水水源性传染病主要为消化道传染病,如痢疾、伤寒、沙门氏菌病、霍乱、甲型肝炎、脊髓灰质炎以及钩端螺旋体病等。加强水源卫生学管理,是消除、控制消化道传染病发生的重要途径,这是食品卫生、环境卫生上的重要课题。

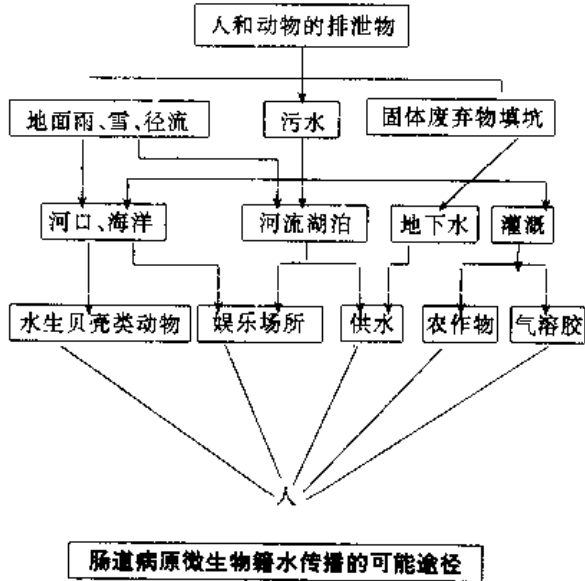


表: 水中重要的病原菌

|            |                                |
|------------|--------------------------------|
| 沙门氏菌属      | <i>Salmonella</i>              |
| 志贺氏菌属      | <i>Shigella</i>                |
| 致病性大肠杆菌    | <i>Enterophthogenic E Coli</i> |
| 霍乱弧菌       | <i>vibrio cholerae</i>         |
| 结核杆菌       | <i>tuberculosis bacillus</i>   |
| 空肠弯曲菌      | <i>Campylobacter jejuni</i>    |
| 小肠结肠炎耶尔森氏菌 | <i>yerstnia enterocolitica</i> |
| 绿脓杆菌       | <i>pseudomonas aeruginosa</i>  |
| 嗜肺军团杆菌     | <i>Legionella pneumophila</i>  |

表2 水中主要的人类肠道病毒

|                 |                                |
|-----------------|--------------------------------|
| 脊髓灰质炎病毒         | <i>poliovirus</i>              |
| 埃可病毒            | <i>EcHo virus</i>              |
| (人类肠道致细胞病变孤儿病毒) | <i>Enteric cytopathogchic</i>  |
|                 | <i>Human orphen virus ECHO</i> |
| 柯萨奇甲组病毒         | <i>Coxsackie A virus</i>       |
| 柯萨奇乙组病毒         | <i>Coxsackie B virus</i>       |
| 新型肠道病毒          |                                |
| 甲型肝炎病毒          | <i>Hepatitis A virus HAV</i>   |
| 轮状病毒            | <i>Rota virus</i>              |
| 呼肠病毒            | <i>Reovirus</i>                |
| 腺病毒             | <i>Adenovirus</i>              |
| 微小DNA病毒         | <i>parvovirus</i>              |
| Norwalk 病毒      | <i>Norwalk virus</i>           |

参考文献

- 1 户田忠雄,武谷健二著.户田新细菌学.1980.159~160
- 2 聂约伯,等著.预防医学微生物学.1981.347~348

- 3 王秀如,傅玉蓉著.卫生微生物学.1988.38~43
- 4 上海第二医学院,等编.医用微生物学.1988.32~33
- 5 尚德秋,等著.防疫检验.1991.94

(长沙市卫生防疫站李光忠撰)

**菌物资源**

**fungous resources** 菌物(fungus)是产孢生物,它与动物和植物并列,构成近化真核生物的3个独立的界,菌物界分三门:裸菌门、卵菌门和真菌门。真菌门又包括壶菌、接合菌、子囊菌、担子菌、半知菌以及各类中的地衣。菌物种类多、数量大、繁殖快、分布广,与人类关系极为密切。它是一个古老的谱系,在距今4亿多年的泥盆纪(Devonian)便已在地球上出现。菌物的种、属也非常丰富,据霍克斯沃思(D. L. Hawksworth, 1991)估计,全球有菌物150万种,但已发现的仅约1.1万属、10万种,中国仅报道约8 000种。菌种个体数量众多并具有多种孢子类型,繁殖速度快,产孢数量大,如紫芝每个子实体每天可产孢2.5亿个,并可连续产数月。菌物无处不在,地球上的任何地方,只要有空气便有菌物存在。

菌物是一类丰富的自然资源,它所蕴藏的经济潜能是极其巨大的,当代人类社会面临的粮食匮乏、能源危机、环境污染三大难题,在很大程度上都要依靠菌物来解决。

人类何时开始利用菌物资源尚难查考,但酿酒和采食蘑菇的历史却很悠久。

菌物的代谢产物,如乙醇、柠檬酸、酶制剂、甘油、甾醇、脂肪、塑料、抗生素、促生素、维生素、多糖体、萜烯类、生物碱等化合物,都是众所周知的有用产物,广泛应用于酿造工业、食品工业、制药工业、纺织工业、造纸工业、制革工业以及有机酸和酶制剂等生产中。特别应该强调指出的是,它们都能进行大规模的工业生产,因而显示出强大的生命力。有待开发利用的代谢产物,更是不可胜数。有些菌物还可用于有机化合物的转化、生物防治、污水处理、生物测定以及遗传学研究等。菌物蛋白质和次生代谢产物是另外两个有待开发的宝库。有的菌物能分解其他生物难以分解的木质素、纤维素等碳化物。这些碳化物都是工农业有机废弃物的主要成分。因此,在生产(栽培)食用菌和药用菌时,可以充分利用这些废弃物,如稻草、麦秸、棉子壳、玉米芯、锯末(屑)、蔗渣、酒糟、醋渣及其他“三废”物质,变废为宝。而种蘑菇后的下脚料,还可用作饲料或肥料,在节约能源、促进物质良性循环和保持生态平衡方面有着特殊意义,是当代组建生态农场、保护环境必须考虑的重要环节。

菌物对农、林业既有益又有害。菌物对植物的益处表现在多方面:有的与植物结成联盟(共生),形成菌根,帮助植物吸收水分和养料;有的产生促生素和抗生素,促进植物生长或抑制植物病害;有的寄生或消灭有害植物的昆虫、线虫及其他害菌。菌根是菌物与植物在自然界进行共生的一种普遍现象,它对植物的营养特别是磷的供应,起着必不可少的作用,为植树造林、节约肥料创造了条件。菌根是在19世纪中期被法、德、俄的一些学者先后发现的。1950年以后,许多国家才开始大规模的造林和引种工作,加速了对菌根的研究和应用,特别是近20年来,不仅发达国家,还有许多发展中国家(含中国),都加强了对菌根的研究和应用。

利用真菌消灭害虫,中国有着悠久的历史,早在公元304年前后,中国就有利用“黄柑蚁”消灭柑桔害虫的记载;西方直到1873年才提出用昆虫致病微生物防治害虫的设想。迄今全世界已描述的虫生真菌已超过70属500余种,其中有30种能人工生产。中国对白僵菌、日本对腐败节孢孢霉、美国对绿僵菌等都进行了深入研究和广泛应用。这种生物防治的最大优点是避免使用农药对环境的污染,此外,菌物在自然界的碳素循环中起着极重要的作用,把植物的枯枝落叶和木桩矿质化后归还给大自然。

作为食品的蕈菌,不仅味道鲜美、风味独特,而且营养丰富、热量低。它的蛋白质含量几乎比任何蔬菜都高,还含有矿物质、维生素、脂肪、多糖体、人体必需的8种氨基酸和微量元素(特别是Ge和Se),有的还具有防癌抗癌作用,故有“健康食品”之称,预

计20世纪90年代食用菌将快速增长。在1970年以前,西方国家栽培食用菌品种非常单一,几乎全部是双孢菇。由于各国栽培食用菌的历史长短不一,科技发展水平各有高低,栽培的种类各有侧重,栽培的方式各具特色。居民的饮食结构各有不同,生活习惯也各有千秋,因此研究的对象、深度和广度也有很大差别。全球可食蕈菌约2000种(中国已知720种)中,仅80种在进行实验栽培;在40种有经济价值的种中,约20种进行了商业性栽培,中国有10多种,1989~1990年度的总产量为191.6万吨,其中侧耳类80万吨,为世界第1位;木耳类36万吨、香菇21万吨、双孢菇17万吨、草菇11万吨、银耳10万吨、猴头菇9万吨,其他如金针菇、滑菇、元蘑、榆蘑、竹荪和灰树花等也有一定的产量,年产值约90亿元。食用菌,作为单位面积蛋白质收获量最高的作物,受到当今世界的高度重视。

菌物作为药物的来源十分重要。引起人类寿命第2次革命的青霉素,虽开了抗生素学的先河(1929),但利用菌物作药物,中国却有悠久的历史。真菌除直接被用作药材外,目前人们还广泛应用它的代谢产物,如抗生素和多糖体等。以前仅以中草药的方式治疗疾病,现在则多以提取或合成有效成分或深加工使之发挥更好的疗效。菌物的药用价值,自1929年青霉素发现以后,在国际上才日益受到重视。研究表明,产抗生素的优势类群主要是半知菌,具抗肿瘤物质的类群主要是担子菌。真菌抗生素作用范围甚广,对病原病毒、细菌、真菌、原虫和癌细胞的增殖都可产生拮抗作用。特别是对真菌多糖抗肿瘤原理进行了探讨,认为它能增强肿瘤病人的抵抗力,诱导干扰素的产生,提高肌体免疫功能,并具有选择性地杀灭肌体内部肿瘤细胞的作用。据1991年刘波等统计,现有药用菌物已达300种,其中不少是食药兼用。如从作用范围讲,有抗病毒的香菇和美味牛肝菌,抗细菌的产黄青霉和顶孢霉,抗真菌的灰黄青霉和毛头鬼伞,抗原虫的奥尔类脐菇和黄把菌,降低血糖和血压的灵芝,降胆固醇的冬菇,具有强心作用的草菇,止痛的安络小皮伞,增加胆汁分泌的假蜜环菌,防治冠心病的木耳,治疗消化系统溃疡病的猴头菇等等。中国现在制成药剂的有银耳冲剂、银耳多糖、银耳片、云芝肝泰、云芝多糖、香菇多糖、蜜环片、猴菇片、鲜菇王浆、至灵胶囊、美露芝、安络痛等20余种。自20世纪30年代德国人发现蘑菇提取物对小鼠肉瘤有抑制作用以来,日、美学者从菌物中筛选出50属近90种真菌具较强的抗癌活性物质。现有从采绒革盖菌生产的蛋白多糖(PSK),主治消化系统癌、乳癌、肺癌;从裂褶菌发酵液中提取的裂褶菌多糖,主治宫颈癌;从香菇子实体提取的香菇多糖,主治胃癌。这是当代菌物学受到空前重视的又一主要原因。

菌物学是生物学的重要分支学科,作为真核生物较原始代表的菌物,被推向生物工程的前沿。菌物的基因工程、蛋白质工程、酶工程、发酵工程以及菌物分子学等新学科、新技术应运而生。面对这种挑战,菌物学工作者肩负着双重的艰巨任务:一方面要抓紧进行中国菌物种类和资源的调查研究;另一方面要有重点地发展新分支学科和新技术,并用新理论、新技术去推动传统的经典菌物学的发展,挖掘、利用菌物资源,为实践服务。

#### 参考文献

- 1 无名氏. 真菌资源(国外动态). 北京:中国科学院微生物研究所,1970
- 2 余永年. 真菌与人. 北京:科普出版社,1980
- 3 刘波. 中国药用真菌,第3版. 太原:山西人民出版社,1984
- 4 应建渐,卯晓岚,等. 中国药用真菌图鉴. 北京:科学出版社,1987
- 5 杨新美(主编). 中国食用菌栽培学. 北京:农业出版社,1988  
(中国科学院微生物研究所余永年教授撰)

### 数值分类学在真菌分类中的应用

the application of numerical taxonomy to fungi taxonomy 数值分类学是20世纪50年代后期发展起来的不同于传统分类的新的分类方法,是生物分类学的一项重大突破。它依靠电子计算机,根据等权原则,按

运筹分类单位(OTU's)性状状态的全面相似性,将真菌分为不同的表观群。数值分类学在微生物分类中得到广泛应用,尤其是在细菌分类中的应用,已总结出许多分类分析方法,为此学科的发展和运用起了巨大作用,对推动整个细菌学的向前发展是十分有益的。

1963年,普罗克特(J. R. Proctor)等首次用数值分类的方法进行真菌的系统分类研究,以后许多学者开始在真菌分类中使用此方法,其中在半知菌、子囊菌和担子菌中应用的较多,尤其是对半知菌的“形式种”和“形式属”的认识缺乏遗传基础,其分类系统没有真正反映出它们之间的亲缘关系,它们之间只能说有相似性而不能说具有相关性。

在丝孢纲中的 *Leptographium* 属内,根据不同发育类型的休斯(B. J. Hughes, 1953)系统,把具有瓶梗的种划为一组,把具有共柄产孢体的种划为另一组。1964年普罗克特等选取55个形态学上的性状进行了数值分类研究,结果表明,按照萨卡都(P. A. Saccardo, 1886)的形态学上的半知菌分类系统,都属于 *Leptographium* 属的30个 OTU's 被分成两个明显分离的表观群:一类具有瓶梗,另一类具有共柄产孢体,并分别成立新属,这一结果与休斯的分类系统是一致的,并认为是合理的。

1966年,易卜拉欣(F. M. Ibrahim)等从长蠕孢属中全面选择了29个 OTU's,就形态、生理、致病性及培养特征方面的223个性状进行了聚类分析,给出了属和种的定界线,澄清了原来并不明确的一些属级关系,并第一次明确使用相似性数值规定种内、种间及属的分界。作为一种新的手段对过去一些分类比较混乱的种类提出了新的分类见解,并把定性的标准量化了。

1976年,惠雷(A. J. S. Whalley)对炭疽菌属英国种类就66个有性性状、141个无性性状及217个综合性状分别进行了聚类分析,结果表明,只采用有性性状进行的聚类分析结果支持以子座的颜色为主要分类依据分成有色组和无色组的结论;而只采用无性性状进行的聚类分析结果不甚理想;利用有性态和无性态综合性状进行的数值分类结果表明,子座有色的 OTU's 与无色的 OTU's 被分成两个清晰的表观群;而孔口为乳头状的 OTU's 与为脐状的 OTU's 之间不能明显分开,而在其他很多方面具有一致性,说明孔口的形状不能作为分组的主要分类依据,并认为只有用全面性状进行数值分类才是最理想的。

在担子菌中,用数值分类法对大型真菌——蘑菇类的研究是较突出的。1966年,肯德里克(W. B. Kendrick)等发表了对担子菌进行数值分类的一般性文章。1982年,沃尔夫(C. B. Wolfe)在 *Ixechnus* 属和 *Mucilopius* 属中选取11个 OTU's 并根据菌盖表面干燥与否、颜色、柄生囊状体及孢子在 Meker 试剂中的颜色、毛皮及担子在氢氧化钾中的颜色、沉降孢子影的颜色等18个性状,进行了聚类分析,结果明显地将它们分为两个表观群,显示了属级的关系,并在表观群内反映种的关系,从另一角度支持了以前一些学者的某些结论。沃尔夫对这一类真菌进行了长期研究,提出了很多分类单位,数值分类又给这些真菌以定量的分析,并证实两属的主要区别更多地表现在囊状体的性状上。

中国数值分类学在真菌分类中的应用研究起步较晚。1990年,郑传临等首次详细报道了中国黑粉菌属的聚类分析研究,对属中的51个 OTU's 选取33个形态学和生物学编码性状进行了系统的聚类分析研究,结果清晰地中国黑粉菌属分为3个表观群,填补了我国此项研究领域的空白。

在黑粉菌属中,茭白黑粉菌的归属问题一直是黑粉菌分类的争论焦点之一。1949年,刘慎谔根据阎玫玉(1935)的研究结果以及以此为模式种建立了菰黑粉菌属,将此菌命名为 *Yenia esculenta* (P. Henn.) Liou, 并建立了菰黑粉菌科,1974年余永年对此作了进一步的确认,认为此菌的萌发方式及进化介于黑粉菌科与腥黑粉菌科之间。郑传临等的聚类分析研究结果表明,茭白黑粉菌与大麦黑粉菌的相似水平达68%以上,且是一级水平上的聚合。1981年,柿岛真也将此二菌划为一类。郑传临等认为茭白黑粉菌仍拟放在黑粉菌属内为妥,学名保留为 *Ustilago*

esculenta P. Henn.、王云章(1964)、戴芳澜(1979)和刘惕若(1984)等在他们的著作中均未设立新科和新属,1989年程岩等也给予了否认。

假丝酵母菌属是高度异源性属,该属酵母菌的有性阶段可能是担子菌,也可能是子囊菌,因而其系统关系比较复杂。1975年,甘贝尔(L. Campbell)利用该属的标准描述性状数据对104种酵母菌作了聚类分析研究,并将其分为6大族群。1991年,史国利等对来自黄渤海湾的假丝酵母菌和部分标准菌共36株,分别测试了26项形态特征和58项生理生化特征进行聚类分析,将它们分为两大类,经测定类群间的代谢活性差异显著。

数值分类的优点在于有综合多种来源数据的能力,经过大部分分类过程的自动化,提高分类效能。由于真菌分类本身发展的水平直接影响数值分类学在真菌分类中的应用效果,所以需要在研究方法等方面有不断地改进和提高,特别是一些形态简单的真菌,由于人们对这些有机体的认识还不够深刻,常常不能确定哪些性状是本质的,哪些是非本质的,这很可能是整个真菌分类系统中认识不统一部分的主要原因之一,而数值分类学恰恰能在一定程度上解决这一问题。数值分类学的应用补充或校正了经典真菌分类学的不足,真菌分类学与数学相结合将有力地促进真菌分类学研究,这种新的方法在真菌分类中的广泛应用,对推动整个真菌分类学的向前发展将会是十分有益的。

参考文献

- 1 Proctor J R, Kendrick W B. Can J Bot. 1964(42):65~90
- 2 Ibrahim F M, Threfall. The applications of numerical taxonomy to the genus *Helmintosporium*. J Gen Microbiol. 1966.(42):5~7
- 3 Campbell L. Numerical analysis and computerized identification of yeast genera *Candida* and *Torulopsis*. J Gen Microbiol. 1975,90:125~132
- 4 Whalley A J S. Numerical taxonomy of some species of *Hypoxylon*. Mycopathologia. 1976,3:155~161
- 5 Wolfe C B. A taxonomic evaluation of the generic status of *Ixechnus* and *Mucilopilus* (Ixechineae, Boletaceae). Mycologia. 1982,74:36~53
- 6 郑传临,等. 黑粉菌属的聚类分析. 真菌学报,1990,9(3):196~201
- 7 史国利,周与良. 假丝酵母的聚类分析和代谢活性的研究. 真菌学报,1991,10(4):318~325
- 8 郑传临. 数值分类学在真菌分类中的应用. 北京农业大学学报.

(中国农业科学院植保所郑传临撰)

细菌分类中的核酸分析 analysis of nucleic acid in

bacterial taxonomy 细菌分类是微生物学领域里的一个传统学科,又是一个现代化的活跃发展的学科。在其发展过程中既积累了丰富的资料和经验,又不断吸收最新的研究成果。尤其在分类方法上更是不断吸收相关学科的成就。1873年,柯恩(F. Cohn)提出第一个细菌分类系统,依据细胞形态将细菌分成杆菌、球菌和螺旋菌。1900年前后,奥拉-杰森(Orla-Jensen)、科鲁伊沃(A. J. Kluyver)及戴尔夫特(Delft)研究小组逐步将生理和生化特征引入分类学,由此奠定了传统细菌分类学的基础。1957年,史尼斯(P. H. A. Sneath)将数值分类法引入细菌分类学,使细菌分类建立在大量表型性状的基础上。1960年,核酸分析方法引入细菌分类学。

细菌在进化过程中形成的差异无不记录在它们的DNA序列中。因此,通过核酸分析可以研究和认识细菌进化的历史。细菌分类中的核酸分析就是在体外用各种方法分析核酸的碱基组成、碱基排列、高级结构特性等,并将其用于细菌分类。这些方法的引入使细菌分类产生一次质的飞跃,使之从单纯依赖表型性状的实用分类逐步走向以细菌基因组的比较为依据的系统分类。迄今,

已经建立了分别适用于不同分类目的的一系列核酸分析方法,从大范围的进化关系到科、属、种的划分,直至种下分群和菌株鉴定,均有相应的核酸分析方法。

首先引入细菌分类学中的核酸分析是DNA碱基组成(G+C mol%)的测定(1960)和DNA-DNA杂交(1963)。1965年后,DNA-rRNA杂交和16S rRNA寡核苷酸编目逐步引入细菌分类。1985年出版的《细菌系统学中的化学方法》一书对上述方法有详细的总结。用于细菌分类的rDNA完整序列分析和部分序列分析则始于最近几年。此外,还有一些其它方法可以作为细菌分类的辅助手段,如DNA限制性内切酶酶切片分析、低分子量RNA电泳图谱、质粒电泳图谱以及rRNA的高级结构的测定等可用于分类,核酸探针技术可用于细菌的诊治。

细菌分类的基本单元是种。目前,细菌种被定义为“共有许多特征,并与其它菌株相区别的菌株群”。显然,这个定义中对种的界定没有一个明确的界限,这是因为传统分类中细菌种的划分没有统一的标准。例如沙门氏菌属和根瘤菌属曾分别以血清反应和寄主专一性作为分种的标准。这样,不同的菌群间种的界线不同,概念也不同。核酸分析方法的引入已经在改变着这种状态。

各种细菌都有其特定的DNA碱基组成(G+C mol%)和碱基序列,G+C mol%对于细菌种、属的划分有一定的帮助。一般认为,细菌种内G+C mol%的差异小于4%~5%,属内的差异则小于10%。但碱基组成只是对整个基因组的粗略比较,精细的、更有效的方法是比较DNA之间的碱基排列顺序,即DNA-DNA杂交。

变性的DNA单链在适当的条件下可以靠碱基互补配对自动形成双链,即复性。出现在异源DNA间的复性叫杂交,它的特点是具有不连续性,即只有关系密切的菌株间才可以出现DNA杂交。迄今,DNA-DNA杂交已成为细菌定种的一个主要手段。根据大量的实验结果,国际细菌分类学委员会建议,DNA同源性大于70%的菌株属于同一个种。这样,不同种的细菌就有了统一的、可比的标准。

DNA杂交中,异源种间的杂交值一般很低,这使得该方法不能用于测定远源关系。早期的研究资料表明,rRNA顺反子比整个细菌基因组要保守得多。而且rRNA存在于所有生物中,其序列上的差异只与进化时间有关。所以,它可以作为生物的尤其是细菌系统分类的信息来源。

DNA-rRNA杂交依据rRNA单链与负责其合成的那条DNA单链互补的原理来分析rRNA的同源性。De Ley及其同事用这种方法分析了大量的菌株,并据此将革兰氏阴性菌分为4个大群,因每一群都是科以上水平,故称为超科。这一成果首次为细菌科、属的划分提供了一个普遍适用的、稳定的实验依据。部分rRNA序列分析的作用与DNA-rRNA杂交相同。

16S rRNA寡核苷酸编目取得的最重要的成果是确定了第三生命形态——古细菌的存在。在此之前,普遍认为生物界有两大类群,即原核生物和真核生物。对大量16S(包括真核生物的18S)rRNA的比较表明,包括甲烷菌在内的古细菌与真细菌之间的差别就像它们与真核生物的差别一样大。这表明它们可能是由一个共同祖先沿不同的进化途径进化来的。

自Lane等建立了利用反转录酶的简便、快速的完整rRNA测序方法后,用寡核苷酸编目的比较少了。目前,rRNA测序技术已成为细菌系统分类的重要实验手段。这个方法的优点是可以积累不同生物的序列资料,建立一个不断扩大的数据库,可以对最广泛的生物类群进行比较得出其进化关系。

沃兹(C. R. Woese)认为,rRNA测序技术的出现使细菌系统进化成为可以通过实验进行研究的科学领域。他总结了这方面的大量材料,构建了一个较为系统和全面的细菌系统分类。在这个系统中,生物界被分成3大类:古细菌、真细菌和真核生物。其中,真细菌又分成紫细菌等10个门。

核酸分析方法现在已成为细菌分类中的主要手段,其广泛应用导致了从分类观念到分类标准的巨大变化,解决了一些传统

分类中长期存在的问题,为种的划分提供了稳定的基础,为系统分类提供了科学的实验依据。但是,核酸分析在细菌分类中的应用也还存在着与表型性状不对应的问题,也就是与传统分类不吻合的问题。

DNA 杂交得到的同源群有时与传统分类的种不吻合。如传统分类中脆弱拟杆菌的5个亚种是不同的DNA同源群,而假结核耶尔森氏菌和鼠疫耶尔森氏菌两个种、志贺氏菌和埃希氏菌两个属在DNA-DNA杂交中各为一个同源群,以寄主专一性和致病性为标准划分的一些种也与DNA-DNA杂交结果不符。

许多rRNA同源群研究结果与传统分类的安排不相吻合。rDNA同源群水平在不同的属内差异非常大。假单胞菌属和梭菌属中均包含多个rRNA同源群。相反,有些rRNA同源群则包含不止一个属,肠杆菌科尤为突出。同时,传统上受到重视的形态特征、能量代谢类型、细胞的分裂方式和细胞壁的有无等均与系统进化无关。例如,化能的水螺菌在系统分类中与紫色光合细菌是近亲。

对于核酸同源群与传统分类的差异,有的很快以核酸同源性为基础进行了修改,如脆弱拟杆菌已依据DNA杂交结果分成5个种;有的科、属也已按rRNA同源群重新划分;有些则修改较慢或仍维持原有分类,如上述提到的假单胞菌属和梭菌属等。这一方面因为实际需要,如志贺氏菌属和埃希氏菌属、鼠疫耶尔森氏菌和假结核耶尔森氏菌对人类健康有不同的影响,它们的合并会给目前的应用带来不便;另一方面,核酸分析目前还有缺陷。史尼斯从统计学的角度指出,序列分析结果存在误差,序列越短误差越大。所以,他认为DNA-DNA杂交结果最可靠。

基于这种状况,微生物学家中对未来的细菌分类产生两种看法,一种认为可以采取两种系统,即实用分类和系统分类。实用分类以表型相似性来界定分类单元,系统分类则仅以核酸同源性来界定。也有人认为,未来的细菌分类可以建立在系统进化的基础上。因为在很多细菌种、属中已经取得核酸同源群与表观群间的统一。而且古细菌的建立就是首先发现了它的16S rRNA序列与真细菌不同,尔后才发现它们在细菌壁和膜脂等方面与真细菌之间的差异。

目前在DNA同源性的基础上界定细菌的种已取得普遍共识,而在属、科及更高级水平上的分类,传统结果与核酸分析结果之间还存在很多差异。这些差异的解决一方面有待于人们对系统分类结果的逐渐适应;另一方面也待于系统分类的完善和成熟,有待系统分类与表型性状的联系。90年代格拉海姆(P. H. Graham)等提出根瘤菌新种、属描述的最小标准,建议以核酸同源性作为分类的基础,但要结合表型性状,不同的核酸同源群间必须有可供鉴定的表型性状。无疑这一建议将代表今后一段时期内细菌分类的发展趋势。

#### 参考文献

- 1 Woese C R, G E Fox. Proc Natl Acad Sci. USA, 1977, 74: 5088~5090
- 2 De Ley J. In Proceedings of the Fourth International Conference on Plant Pathogenic Bacteria, Angers, I N R A., 1978, 347~357
- 3 Goodfellow M, D E Minnikin (eds). Chemical Methods in Bacterial Systematics. London, Orlando, San Diego, New York, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo Academic Press, 1985
- 4 Lane D J, Pace G J, Olsen D A, Stahl, M L, Sogin, N R, Pace N. Proc Natl Acad Sci USA, 1985, 82: 6955~6959
- 5 Woese C R. Microbiol Rev. 1987, 51: 221~271
- 6 Krieg N R. Can J Microbiol, 1988, 34: 536~540
- 7 Grimont P A D. Can J Microbiol, 1988, 34: 541~540
- 8 Sneath P H A. Syst Appl Microbiol, 1989, 12: 15~31
- 9 Young J P W, H L Downer, B D Eardly. J Bacteriol, 1991, 173: 2271~2739
- 10 Graham P H, M J Sadowsky, H H Keyser, Y M Barnett, R S Bradley, J E Cooper, D J De Ley, B D W Jarvis, E B Roslycky, B W Strijdom, J P W Young. Int J Syst Bacteriol, 1991, 41: 582~581

(北京农业大学生物学院汪恩涛博士撰,杨苏声审)

**仓储病原细菌** 仓储害虫是在干燥而停止生长发育的贮藏物内独立繁殖的一类特殊害虫,随着化学农药防治弊端的出现,人类寻求无化害的微生物防治,鉴于此,仓储害虫病原细菌的研究和应用也随之诞生和发展。

公元前已有蜂、蚕罹病死亡而蒙受损失的记载。直到1870年,巴士德(L. Pasteur)才证明蚕腐烂(或软化病)是由一种芽孢杆菌引起的,从而奠定了昆虫病理学的基础。昆虫病理学主要是指对昆虫疾病病因、病征与疾病现象,以及其引起虫体内构造、化学、机能等变化的研究和利用昆虫病原体来防治害虫可能性(微生物治虫)的一门学科。

1901年,贝林纳(E. Berliner)从德国的一个面粉厂大批染病的地中海粉蛾中分离出一种芽孢杆菌,详细描述了该菌形态和培养特征,并命名为苏云金杆菌(简称BT)。1938年,第1个苏云金杆菌商业制剂Sporeine在法国问世。到50年代,它作为地中海粉蛾防治剂得到应用。1953~1955年,斯泰奥斯(A. E. Steinhaus)等证明蜡状芽孢杆菌是玉米象、谷象、美洲蠹蛾、印度谷螟等仓储害虫的病原菌。此菌是一种普通的分布很广的土壤腐生菌,能产生一种杀虫毒素——卵磷脂酶;同时报道粘质赛氏杆菌为多种仓储害虫的病原菌,为细腰温木白蜡蛾、大蜡蛾、谷象、米象、黄粉虫等,这种细菌普遍存在于昆虫肠道内,当昆虫肠道受机械损伤和受其它因子抑制时,菌进入血腔,使虫患败血症而死亡。这两种菌,由于致病力不稳定或其抗性较差,难于应用。

苏云金杆菌在仓储害虫和仓储产品中有着广泛的分布,迄今已分离筛选出大批BT原始菌株,这些虫种包括地中海粉蛾、大蜡蛾、小蜡蛾、一点谷蛾、印度谷螟、干果斑蛾、棉红铃虫、烟叶粉斑蛾、米蛾、毛毡蛾、紫斑谷螟等及小麦、玉米等粉尘。这些菌株符合德国柯赫(1843~1910)提出的柯赫假定,回接后使虫致病并能重新分离出来。同时,还观察到在地中海粉蛾种群、英国的和非洲的谷物、坚果仓库中贮藏害虫都曾发生苏云金杆菌流行病,这是因为仓库环境条件适宜于苏云金杆菌制剂的应用和害虫流行病的发生。

苏云金杆菌在仓储害虫中的应用有两个大的突破。

大蜡蛾在蜂巢中取食蜂蜜、蜂蜡,花粉破坏蜂巢等,对欧洲养蜂业造成很大损失。如用化学农药防治,不但伤害蜂群,而且污染蜂蜜等产品。在苏云金杆菌对人畜和蜜蜂的安全被证实后,北美、英国、德国、法国等国用苏云金杆菌防治蜂巢中的大蜡蛾已摸索出新途径。伯吉斯(H. D. Bruges, 1976)报道,将苏云金杆菌Thuricide 2%菌粉/蜂蜡(wt/wt)加2%特里通作为粘着剂并制成悬浮液,将悬浮液涂布于一个薄的蜂巢础滚筒上,约经40℃干燥处理(不可超过60℃),再把粘有芽孢和伴孢晶体的蜂巢础滚筒安放于蜂巢中,6年后仍有很好的防治效果。

1980年,美国农业部仓储害虫研究所梅克盖尼(McGaughey)应用苏云金杆菌制剂防治小麦的、玉米的仓储鳞翅目害虫获得突破性的进展。美国环境保护局(EPA)批准允许苏云金杆菌用于谷物害虫的防治,这也是第1种用于防治谷物害虫的长效微生物杀虫剂。具体使用技术是:应用苏云金杆菌制剂处理10cm厚的小麦层,接种1000粒虫卵,经100mg制剂/kg小麦处理,其防治效果达96.4%。当用于防治玉米害虫时,虫口下降92%,在贮藏期即使是盛夏,谷物表层温度高达38℃,苏云金杆菌毒力也不降低。贮藏中长期使用苏云金杆菌制剂,对寄生性小茧蜂和捕食性蜘蛛的发育没有影响。苏云金杆菌虽不能直接杀死谷蛾,却能抑制谷蛾的繁殖。刚孵化的谷蛾幼虫钻入谷粒前,短暂地接触谷物表面的苏云金杆菌制剂,可使下一代虫口减少三分之二。苏云金杆菌用于防治仓库越冬代棉红铃虫幼虫,也有很好的

毒杀效果。

苏云金杆菌用于食植物昆虫以来,在野外和实验室内均未曾发现产生抗性。1985年,梅克盖尼(Mcgaughey)报道印度谷螟经伴孢晶体和芽孢的苏云金杆菌商业制剂处理两代后,抗性增强27倍,处理到15代,抗性增强97倍,选出的纯抗性品系(R)与敏感群体(S)进行杂交以确定抗性是否有优势,结果表明,性连锁是接近的,在潜在敏感性中没有性相关的差异。应该查明,昆虫产生的这些抗性如果是普遍性的,则应及早研究抗性产生的对策。

为扩大苏云金杆菌杀虫谱和针对鞘翅目害虫筛选高毒力菌株,世界各国进行了大量工作,取得一些令人鼓舞的结果。1986年,美国赫奈施泰特(C. Hernstade)和1984年德国柯尔基(A. Kring)等筛选出对马铃薯叶甲虫和黄粉虫有高毒力的圣地亚哥亚种和拟步虫甲亚种,现在已扩大到对20多种鞘翅目有毒效;但对鳞翅目的、双翅目的害虫无毒性;这类菌株已在有关公司进入商业化开发阶段。1991年,中国罗绍彬等人报道了苏云金杆菌 Tm13<sup>+</sup>-14菌株,不但对鳞翅目的昆虫有高毒力,而且对鞘翅目害虫有高毒力,预计这类菌株将在2000年内成为鞘翅目害虫的防治剂。

1989年,英国马克德和阿德文(Mekdsd A. F. R. Andrew)从自然罹病死亡的马德拉蜚蠊尸中分离出一株蜡状菌株,10d 腹腔注射  $LD_{50} = 3.2 \times 10^4$  活菌/虫和口饲感染  $LD_{50} = 3.2 \times 10^4$  活菌/虫,虫感染后12h,观察到肠壁柱状细胞崩溃和细胞碎片。1989年,陈涛等人发现黑胸大蠊罹病,轻者食欲减退,行动迟缓;重者失去平衡,虫体翻转折倒,直至死亡,死虫逐渐变软变黑,组织腐烂发臭,提足即断,最后整体腐烂。然后进行病原细胞的分离筛选,共选出有效菌8株,CW-W-90-3菌(正在鉴定中)对黑胸大蠊毒力最高,经口饲试管培养液,15d 死亡50%,16~27d 达到高峰,死亡率为70%~85%,甚至100%。该菌还对德国小蠊、日本大蠊有毒性。对该菌杀虫毒素(PLC)的产生条件、制备纯化、毒力检测方法已进行研究,如果毒理试验对脊椎动物安全,则可能研制成一种长效防治蜚蠊的制剂。

陈涛等人受国家自然科学基金的资助,正在进行“仓储害虫

病原细菌的调查和评估”的研究,已从全国各地仓储害虫和贮藏产品以及粉尘中采集样本1707份,分离出原始菌株1975株,关于它们的分类地位及生态、分布的关系,对仓储害虫的病原性及致病力正在研究中。

随着昆虫病理学和微生物防治害虫科学的发展,对仓储害虫病原细菌的研究和应用起到了促进作用,而后者的发展又大大丰富和充实了前者。在仓储害虫中,鞘翅目害虫在种类和数量上均占第一位,故此领域今后的重点应放在鞘翅目害虫病原细菌的调查和应用上,不但应查明病原细菌的种类和分布,而且更重要的是筛选高毒力菌株,将其研制成仓储害虫的有效防治剂,使之在生产建设中发挥重大的作用。

(中国科学院武汉病毒研究所陈涛副研究员撰)

### 大肠菌群研究进展

大肠菌群是指一群以大肠杆菌为主的需氧及兼性厌氧的在37℃下24h内分解乳糖产酸、产气的革兰氏阴性无芽胞杆菌。

这群细菌在生化学、血清学性状方面不完全相同,根据靛基质、甲基红、v.p 试验及枸橼酸盐利用、H<sub>2</sub>S产生等生化学反应和明胶试验,以及动力、44.5℃乳糖分解能力等,可将其分为大肠埃希氏菌、弗劳地枸橼酸杆菌、克雷伯氏菌、阴沟肠杆菌4种。这是中国当前关于大肠菌群定义的基础。根据这一定义,大肠菌群的细菌基本上包括了正常人粪便中的全部革兰氏阴性杆菌。

大肠杆菌也即大肠埃希氏菌,是人和温血动物肠道中的正常菌丛,在粪便中大量存在。成年人的粪便,每克约有大肠菌83万至100万个。人自出生后即有大肠杆菌进入肠道寄生,并持续终身,通常并不致病,而且尚能合成部分维生素B及K供机体利用;某些菌株还能产生大肠菌素,抑制肠道致病菌和腐生菌的繁殖,减少蛋白质分解产物对机体的危害。不过,在一定条件下,大肠杆菌离开肠道侵入机体其他部位时,亦可引起疾病,所以大肠杆菌可被视作条件致病菌。此外,部分产生毒素的大肠杆菌,则有致病的作用,可以引起婴儿或成年人腹泻,称为致病性大肠杆菌。

表1: 大肠菌群分类

| 菌别            | I   | M | vi | C | H <sub>2</sub> S | 明胶  | 动力  | 44.5℃乳糖分解 |
|---------------|-----|---|----|---|------------------|-----|-----|-----------|
| 大肠埃希氏菌        | I   | + | +  | - | -                | -   | +/- | +         |
| qdEscherichea | I   | - | +  | - | -                | -   | +/- | -         |
|               | II  | + | +  | - | -                | -   | +/- | -         |
| Coh           | △IV | - | +  | - | -                | -   | +/- | +         |
| 弗劳地           | I   | - | +  | - | +                | +/- | -   | -         |
| 枸橼酸杆菌         |     |   |    |   |                  |     |     |           |
| Citrobacter   | II  | + | +  | - | +                | +/- | -   | -         |
| freundii      |     |   |    |   |                  |     |     |           |
| 克雷伯氏菌属        | I   | - | -  | + | +                | -   | -   | -         |
|               | II  | + | -  | + | -                | -   | -   | -         |
| Klebsiella    | △II | - | -  | + | -                | -   | -   | -         |
|               | △IV | - | -  | + | +                | -   | -   | +         |
| 阴沟肠杆菌         | I   | - | -  | + | +                | -   | +/- | +         |
| E. Cloacae    | △II | + | -  | + | +                | -   | +/- | +         |

△:拟列的。I、M、vi、C 分别代表靛基质、甲基红、vp 试验和枸橼酸盐利用4种生化学试验。

大肠杆菌于1885年由 T. Escherichia 首次分离鉴定,并定其属名为大肠埃希氏菌,是肠杆菌科埃希氏菌属1个种。

大肠菌群所包括的细菌,除存在于肠道者外,在自然界的土壤和水中也大量存在。肠道的大肠菌群最适宜的培育温度为37℃,当温度升高至44.5℃仍能发育;而自然环境中的大肠菌群最适生长温度为25℃左右,但在37℃也能生长,如温度提高到44.5℃就不能生长。所以,用提高温度的方法可以将来自自然环

境的和粪便中的大肠菌群区分开来。37℃培养生长的大肠菌群称为总大肠菌群,包括自然环境中的和人粪便中的大肠菌群;而44.5℃培养生长的大肠菌群则称作粪大肠菌群,只包括肠道中的大肠菌群。

粪便中除一般正常细菌外,也可能有肠道致病菌和病毒存在,因为粪便既有健康人的粪便,也有肠道病人或带菌者的粪便。如果食品或水受到粪便污染,就必须看作对人体健康具有潜在的

危险性,也即可能有肠道致病微生物的存在,从而具有通过污染的食品或水引起肠道传染病发生或流行的可能。因此,检查食物或水有无病原微生物,对于控制和防止传染病的发生至关重要,但在实际生活中,直接从自然环境或粪便中检出病原微生物是难以做到的,这一方面由于病原微生物数量远较非病原性微生物为少,检出机率极低;同时也难以解决直接检出在技术上的高难度要求,无法推广。

如果选择1种细菌,能反映粪便的污染状况,以这种细菌作为指标菌,用以评价食品的水体的卫生质量,那就较之直接检测致病微生物简易得多。

粪便中大肠菌群数量和种类繁多,分布广泛,它的存在与人类的活动场所以及有粪便污染的地方密切相关。它排出体外的存活时间和抵抗力,与肠道病原微生物大体相似,基本上具有作为指标菌的一般特性,1974年在中国即已作为粪便污染指标菌,并应用至今。

大肠菌群数的多少,表明粪便污染的程度,也反映对人体健康危害性的大小。同时,在一定程度上反映出食品在生产、加工、运输、储存等过程中的卫生状况,具有重要而广泛的卫生学意义。

人畜粪便对外环境的污染,是大肠菌群在自然界存在的主要原因,而大肠菌群不论在粪便中或是在外界环境,都是作为一个整体而存在的。细菌型别是多种多样的,在型别比例方面,粪便中的与外环境中的有所不同,但两者之间又是相关的。

大肠菌群由于外界生活环境的改变,诸如存在条件、人体肠道机能紊乱以及外界不同环境的影响,其生理特性会发生变异,使其群内菌型组成发生变化,甚至出现返祖现象。

研究资料证实,粪便排出体外后,开始时以典型大肠杆菌占优势,经过2~3周后,菌型发生变化,转而呈现非典型大肠杆菌(大肠菌群中的其他型别菌)占优势。还有资料证明,大肠菌群细菌在4℃冰箱保存一定时间以后,其形态和生化特性会发生变异,各菌型之间能互相转变。

正常人粪便中以典型大肠杆菌为主,而外界环境则以非典型大肠杆菌也即大肝菌群中的其他型菌为多。腹泻病人粪便,也发现非典型大肠杆菌明显增加。这与大肠杆菌排出体外受外界环境影响,以致在型别上发生变异的现象相类似。由此可以看出,大肠菌群的生化学分类并不稳定,是可以互变的。

一般认为,产气杆菌与粪便的关系不大,但实践中发现,产气杆菌不仅在外界环境可以检出,而且在粪便中也可以检出,尤以腹泻病人粪便检出率为高,这不仅表明为粪便污染,而且还可以认为是具有危险性的粪便污染。

大肠菌群作为肠道病原微生物的指标菌,尽管已经发现其有明显的不足之处,尤其是它在自然环境中的存活时间和对氧的抵抗力都不及肠道病毒,故尚待寻觅一个比它更为适宜的指标菌。所以,以大肠菌群作为评价食品的和水的卫生质量的主要指标,当前仍然在国内广泛应用。

(长沙市卫生防疫站李光忠撰)

**发光细菌** luminous bacterium 发光细菌是一类非致病普通细菌,在正常的生理条件下能发射出蓝绿色的可见光。由于发出的光属于冷光,同时这种发光又可以被有毒有害物质所抑制,因而研究发光细菌的发光现象对于仿生学和环境监测都具有重要意义。

1742年,贝克(Baker)第一个提出死鱼发出的光是由活物质引起的,但直到19世纪初,科学家们才真正搞清楚这种发光现象是由细菌引起的。此后,人们对发光细菌进行过广泛研究。20世纪70年代以来,在分类学方面采用现代科学技术进行分类;在生理学方面,对发光细菌的营养、生长和发光的关系、光反应与呼吸链的关系、萤光酶的合成与抑制等都有了比较清楚的认识;在化学方面,研究了萤光酶的结构和功能、反应机制、反应途径和中间产物;在应用方面,用发光细菌来测定环境中的有毒有害物质、评价环境污染程度。因此,对于发光细菌的研究引起许多学者的极

大兴趣。

发光细菌一般呈杆状或弧状,或球杆状。菌体大小为 $0.5\sim 1\times 1\sim 3\mu$ ,具鞭毛,能运动。单菌落发光明亮。一般37℃不再发光。革兰氏染色阴性,兼性厌氧生长,好氧发光。对盐类和盐浓度显得十分重要,NaCl、MgCl<sub>2</sub>和CaCl<sub>2</sub>都能促进发光细菌的生长和发光,但NaCl可以代替其它盐类。一般最适生长盐浓度为2.3%,最适发光盐浓度为3.3%。能利用糖类、有机酸类、醇类作碳源,多达十几种,属于“杂食”性细菌,特别是甘油对发光细菌的生长和发光都有利。

环境因子往往影响发光细菌的生长和发光。一般发光细菌可以在-12~40℃范围内生长和发光,最适温度为20℃,30℃时往往就不发光,但因种而异。发光细菌的生长和发光都需要一定的H<sup>+</sup>浓度值,最适生长H<sup>+</sup>浓度 $3.16\times 10^{-8}\sim 10^{-7}\text{mol/L}$ ,而最适发光H<sup>+</sup>浓度 $1.26\times 10^{-7}\sim 3.16\times 10^{-7}\text{mol/L}$ 。细菌虽然在厌氧的条件下可以生长,但不能发光。因为发光细菌的发光过程是绝对需氧的。因而可以利用这一特点来测定微量氧气。

在早期的发光细菌的分类研究中,一度曾出现非常混乱的现象。1971年,亨德里(Hendrie)对当时已经分得的发光细菌进行较为详细研究,将其分为5个种。1980年,鲍曼(P. Baumann)等应用分子生物学技术,如DNA/DNA杂交、免疫学试验、数值分析等分类技术,提出一个新的分类系统,并得到多数研究者的支持。他把已命名的发光细菌定为10个种(Species),分别属于弧菌属、发光杆菌属、另单孢菌属和异短杆菌属4个属。大多数为海水型,仅有两个种为淡水型。值得注意的是,1981年杨颐康等从中国沿海水域已分离到6种发光细菌,其中东方弧菌为我国独有的新种。

发光细菌的主要栖息地是海洋环境,少数生活于陆生环境。根据它们的生活习性,可分为寄生型的、腐生型的、共生型的和自由生活型的。在海洋动物的体表、内脏、发光器官中,海水和海泥中,都可分离到发光细菌。发光细菌在适当的条件下能发出蓝绿色的光。20世纪50年代就已经知道细菌发光需要萤光酶、还原性黄素单核苷酸、氧分子和八碳以上的长链脂肪醛等参与。1963年,黑斯廷斯(J. W. Hastings)通过大量研究资料,提出发光细菌发光的反应过程。

从反应历程看,还原型的黄素单核苷酸与萤光酶反应的结果形成萤光酶—FMNH<sub>2</sub>复合物——称作中间产物I。这种物质已经被分离获得。中间产物I很快与分子氧反应形成中间产物II。这种物质在低温条件(-20℃)下用柱层析的方法已经被提纯和研究。中间产物II在有醛存在的条件下连续产生中间产物III,处于激发态的产物IV在一定条件下转变成普通态,于是就产生光。

几种主要类群的发光细菌的萤光酶都被分离、纯化和研究。萤光酶是一种糖蛋白,在结构上十分相似,是一个二聚体,由两个不同的 $\alpha$ 亚基和 $\beta$ 亚基组成,不含金属辅基。1969年,黑斯廷斯等研究了哈维氏弧菌的萤光酶,它是一个分子量为79 000d的杂合分子,其中 $\alpha$ 亚基为42 000d, $\beta$ 亚基为37 000d。在5M尿素中用DEAE-Sephadex柱层析可以把两个亚基分离开来,并证明任何单个亚基都没有生物活性。但在适当的条件下把两个亚基结合起来,又可恢复成有活性的分子,而且萤光酶的催化中心在 $\alpha$ 亚基上而不是在 $\beta$ 亚基上。

1982年,贝拉斯(R. Belas)等采用基因工程的方法分离到费氏弧菌萤光酶两个亚基的基因LuxA和LuxB,并在大肠杆菌(E. coli)中得到表达。1983年,恩杰布伦特(J. Engebrecht)等从费氏弧菌的基因组中分离出发光系统的全部基因的DNA片段(16kb)。进一步的研究资料表明,发光细菌的发光系统共受7个基因控制,其中两个基因为萤光酶两个亚基编码,3个基因为发光反应所需长链脂肪醛的酶编码,另有两个基因为调节基因。以发光细菌萤光酶基因作指示基因,已成功地用于研究真核生物基因的表达。

发光细菌发出的光为蓝绿色的可见光,其频谱范围约在400~650nm之间,最大发射波长( $\lambda_{\text{max}}$ )在480~490nm,而且在体

内发光和体外发光基本是一致的。

发光细菌的发光现象是细菌正常新陈代谢的结果,当细菌接触到某些有毒有害物质时,就会影响或干扰细菌的发光能力,使发光强度下降。因此,可以根据发光细菌的发光强度的变化来测定毒物浓度,如测定重金属离子、农药、酚、氰化物等有机化合物或无机化合物;测定空气中的有毒气体;综合评价生活污水和工业废水对环境的污染程度。在医药卫生方面测定抗生素效价,测定血清的杀菌活性、测定致突变物质。还可以利用发光细菌的无细胞体系测定 FMN、RCHO、NADH,测定脱氢酶类以及与葡萄糖、乳糖等代谢有关酶类的活性。

在世界范围内的海域和陆生环境中虽然已分离鉴定了10种发光细菌,但还有许多海域的发光细菌资源并没有作全面深入调查,尤其是陆生环境的细菌,到目前只发现两个种。因此,发光细菌的分类工作仍需进一步研究。发光细菌所发射的光为冷光,这为仿生学研究提供了线索,在这方面深入研究还较少。发光细菌萤光酶分子生物学和基因工程研究已经取得一定成绩,但如何把萤光酶基因作为指示基因,以发光作指标用于基因工程研究,作为同位素和生物素探针的补充还需进一步做工作。发光细菌已经广泛地用于环境监测,但如何以发光细菌为指示菌建立环境监测的标准,以代替鱼的急性毒性试验,还需做大量的工作。

参考文献

- 1 Hendrie, et al. J Gen Microbial. 1970, 64: 151~169
- 2 Hastings J W, Nealson K M. Ann Rev Microbial. 1977, 31: 549~595
- 3 Belas R, et al. Science, 1982, 218(19): 791~793
- 4 杨顺康,等. 海洋和湖沼, 1984, 15(3): 258~264
- 5 Roman P Legocki, et al. Proc Natl Acad Sci. USA, 1986, 83: 9080~9084
- 6 吴自荣,等. 中国环境科学, 1987, 7(2): 60~63.
- 7 吴自荣,等. 中国环境科学, 1988, 8(1): 59~63

(华东师范大学吴自荣高级工程师撰)

**钩端螺旋体** leptospira 钩端螺旋体为原核细胞生物,属螺旋体目。它严格需氧,长链脂酸为其电子供体,横分裂繁殖。腐生性双曲状钩端螺旋体广泛分布于自然界,寄生性问号状钩端螺旋体在人兽间传播。

1907年,史蒂蒙森(A. M Stimson)首次观察到该螺旋体,1918年野口创立其属名。1937年,汤泽光在中国首次分离、报道钩端螺旋体。钩端螺旋体长10~20μ,直径0.1μ,螺旋细密,末端呈钩状,沿长轴快速旋转运动。1968年,安德森(D. L. Anderson)发现其外膜有5个电子密度区,包含脂类35.7%,蛋白45.8%和碳水化合物6.0%。外膜能刺激宿主产生保护性抗体,又是抗体-补体攻击的部位。1991年儒勒(R. L. Zuerner)指出,外膜中的主要蛋白质分子量为31 000,耐热,具有强抗原性。菌体为螺旋圆柱状,包括细胞壁、细胞膜和含有核质、核糖体的胞浆。轴丝由带有一串盘状结构的纤维和基体组成。1990年,戈登斯坦(S. F. Goldstein)用复合曝光摄影证实,轴丝在外膜和菌体间的旋转方向决定菌体末端形态及其运动方向。

1979年,国际钩端螺旋体命名委员会建议设立钩端螺旋体科,包含(1)钩端螺旋体属,包括问号状钩端螺旋体种、双曲状钩端螺旋体种和短小钩端螺旋体种。(2)细丝体属,包括伊利尼细丝体种和丁博维扎细丝体。传统采用血清学交叉凝集反应将种分为血清型,相近者归为血清群。1982年,特普斯查(W. J. Terpstra)报道问号状钩端螺旋体包括25个血清群,168个血清型;陈廷祥1989年报道,中国有其中18群,70型。由于血清学分类存在抗原交叉、抗血清非标准化等问题,约翰逊(R. C. Johnson)1968年根据三油酸酯酶活性对钩端螺旋体进行分类。1973年,瑞勒(E. Reimer)采用热解-气相-液相层析法鉴定钩端螺旋体。1991年,卡西普蒂(B. Cacciapuoti)对钩端螺旋体进行包含17个脂酸组的化学分类。1966年,哈帕勒(D. K. Haappala)依据鸟嘌呤和胞嘧啶(G+C)的比值将钩端螺旋体分为4组。1987年,雅苏达(P. H. Yasuda)用羟基磷灰石(DNA)杂交法鉴定38个钩端螺旋体血清型,从而建议依据其DNA相关性将钩端螺旋体分为12个基因组,得到广泛认同。

1957年,伊玛莫拉(S. Imamura)发现某些问号状钩端螺旋体提取物具有毒性。1964年,阿伦(V. M. Arean)以G<sup>-</sup>细菌内毒素分离法提取钩端螺旋体毒素未成功。1986年,文(T. V. Vinh)报道问号状钩端螺旋体脂多糖化学组成和超微结构与肠道G<sup>-</sup>菌相似却缺乏后者之内毒素活性,但其糖脂蛋白则可显著损伤培养细胞。1988年,鲍朗报道赖型钩端螺旋体糖脂蛋白对培养的血管内皮细胞有毒性。1991年,哈克(D. A. Haake)证实钩端螺旋体通过体外培养毒力减弱时,其外膜脂多糖分子量发生显著变化,脂多糖抗原可刺激宿主产生凝集和调理抗体,激活补体或调理巨噬细胞杀灭钩端螺旋体,1989年加斯特(B. H. Jost)和1990年边德维特(A. Midwinter)证实,针对脂多糖的最高抗体效价在6~10周,IgM为主。1990,1991年增泽俊幸报道,钩端螺旋体糖脂物质有较强的免疫性和保护作用,有发展成为新型疫苗的前景。

1984年,小林弘研制了钩端螺旋体型特异单克隆抗体,解决了日本主要菌型的分离鉴定问题。1985年,特普斯查根据单克隆抗体凝集反应型鉴别钩端螺旋体新菌株。同年,板本筛选出钩端螺旋体属特异杂交瘤细胞株。1987年,加斯特制备了一系列仅与问号状钩端螺旋体外膜反应的单克隆抗体。1991年,霍克(J. V. Hookey)用单克隆抗体鉴定了多株黄疸出血型钩端螺旋体。单克隆抗体可有效地分离钩端螺旋体抗原寡糖,分析其表面抗原物质及其组成。单克隆抗体的作用部位是钩端螺旋体外膜脂多糖抗原决定簇。1987年安德勒(B. Adler)指出,单克隆抗体与脂多糖不同亚单位作用决定其群、型特异性。1990年,塞格斯(R. Segers)致敏免疫缺陷小鼠而获得直接识别钩端螺旋体35kd外膜蛋白抗原决定簇的单克隆抗体,为分析其蛋白抗原提供了有效手段。

1981年,马歇(R. B. Marshall)首次应用限制性内切酶分析,发现了不同血清型钩端螺旋体DNA之间的差别。1986年,塞尔曼(A. B. Therman)认为该技术可有效地鉴别钩端螺旋体株。同年,勒费文(R. B. Le Febvre)建立适用于分析内切酶的快速简便的钩端螺旋体DNA纯化技术。1991年,爱利斯(W. A. Ellis)认为限制性内切酶谱鉴定分析钩端螺旋体精确可靠,可克服血清学方法的缺陷。1990年,巴瑞尔(C. Baril)采用脉冲场电泳法发现钩端螺旋体基因组DNA是一个环状的、约5 000kb的染色质。1991年泰勒(K. A. Taylor)指出,钩端螺旋体基因组包括3个不同DNA分子种类,总碱基对3 100kb,其中1个是线状的质粒DNA。1991年,儒勒采用锯齿形同源电场电泳证实钩端螺旋体基因组约4 750kb,包括4 400kb环状染色质和350kb环状质粒,以其基因组DNA为探针可杂交检测钩端螺旋体。1988年,冯爱斯(G. Van Eys)和儒勒分别建立重组DNA和rRNA探针印迹杂交技术。由于重复序列特别是rRNA的天然放大作用,探针特异性大大提高,敏感度达1×10<sup>3</sup>,并获得清晰简洁的杂交带型,有利于钩端螺旋体的鉴定。1972年,莫瑞司(O. N. Morris)指出,钩端螺旋体的rRNA由大小亚基组成。钩端螺旋体rRNA包含23s, 16s和5s三部分。1989年,福长仁测定了钩端螺旋体两个23s和16srRNA编码基因的序列,并发现编码5srRNA的单拷贝高保守基因。这些基因呈5'16s-23s-5s 3'顺序排列。1990年,戴维(H. S. Daid)认为某些问号状钩端螺旋体的23srRNA可进一步分为14s和17s两部分。1990年,霍克和帕拉兰特(P. Perolat)分别测定钩端螺旋体rRNA基因限制性图,其“rRNA指纹”可进一步区分雅苏达基因组。1989年,冯爱斯首次采用聚合酶链反应(PCR)检测微量钩端螺旋体DNA,并以PCR结合DNA印迹进行同源性分析。1991年,伍德沃德(Woodward)将重复序列合成引物用于(PCR)检测哈勒型钩端螺旋体,其敏感性和特异性超过现行的各种方法。1990年,鲍朗首次以PCR检测中国主要致病性钩端螺旋体,以rRNA为模板的PCR也在研究中。1984年,耶尔通(Y. Yelton)筛选出双曲状钩端螺旋体色氨酸互补基因,其

中2.8kb序列是编码53.5、23.6和22kb蛋白的必需部分。1988年,儒勒测定了一个与31.071kb氨基酸读码框架有关的精氨酸基因序列。1991年,斯坦蒙(L. V. Stamm)克隆 rec-A 互补基因,其表达产物为一个结构保守的43KD多肽。1988年,山口克隆出8个问号状大型钩端螺旋体种特异表达抗原。属特异外膜蛋白抗原也表达成功。1990年,理查德(C. Richard)从黄疸出血型钩端螺旋体克隆出数个氨基酸互补基因,除问号状以外的钩端螺旋体体缺如。1985年,丹(A. A. Dain)致力于致病性钩端螺旋体“溶血基因”的表达。1989年,德瑞尔(G. Del Real)也克隆一个编码溶血素和鞘磷脂酶C的3.9kb基因序列。1990年,塞格斯(R. Aegers)认为溶血素为一个1.668kb基因的读码框架产物。1990年,福长将仁则获得4.5kb可特异地与问号状钩端螺旋体DNA杂交的溶血素基因片段。上述研究资料表明,不同钩端螺旋体的溶血基因结构存在差别。

钩端螺旋体分子生物学将是一个活跃的研究领域。钩端螺旋体编码和调控基因结构与功能将是研究的热点。基因重组、核苷酸序列分析和单克隆抗体技术仍是主要研究手段。钩端螺旋体的毒性物质、保护性抗原和生物合成代谢的基因编码、调控和表达将是重要的研究内容。从分子水平发展敏感、特异而实用的钩端螺旋体检测、鉴定和监控系统也是一个重要的研究方向。基因分类学将形成一个可靠的和完善的理论和运用体系。钩端螺旋体的基因工程研究成果将有效地保护人类。

#### 参考文献

- 1 Marshall R. J Med Microbiol. 1981,14:163~166
  - 2 Yasuda P. Inter J Syste Bacteriol. 1987,37:407~415
  - 3 Midwinter A. J Med Microbiol. 1990,33:199~203
  - 4 Segers R. Hybridoma. 1990,9:275~283
  - 5 Baril D. FEMS Microbiol Lett. 1990,71:95~100
  - 6 Richard C. J Gen Microbiol. 1990,136:651~656
  - 7 鲍朗. 中华微生物学和免疫学杂志. 1990,10(5):277~281
  - 8 Van Eys G. J Clin Microbiol. 1991,29:1042~1048
  - 9 Zuerner R. Microbiol Pathogenesis. 1991,10:311~322
  - 10 Cacciapuoti B. Inter J Syste Bacteriol. 1991,41:295~300
- (华西医科大学鲍朗教授撰,余叶睿审)

#### 植物花螺原体

植物花螺原体是存在于植物花器上的螺原体,是螺原体的一种生态型。1978年,美国克拉克(Clark)在研究蜜蜂致病螺原体时首次发现蜜蜂螺原体不但在蜂房中传播,而且在蜜蜂采食的花上存在,从而发现螺原体存在于植物花上这一生态环节。克拉克认为蜜蜂螺原体病害的季节性暴发与其春天采食的花源有关。1978年,戴维斯(Davis)从蜂房附近最普遍的蜜源植物鹅掌楸的花上分离到蜜蜂螺原体。1980年,拉朱(Raju)等入还在其它植物的花上分离到蜜蜂螺原体。麦克伊(Mc Coy)从热带植物朱缨花(Calliandra haemstoecephala)花上分离到一个螺原体分离物 PPS<sub>1</sub>与引起法国蜜蜂五月病(Maydisease)螺原体(*Spiroplasma apis*)有共同的抗原关系。除上述与蜜蜂有关的分离物外,目前还分离到大量的花螺原体,证明螺原体在花上有广泛的分布。戴维斯报道,在99次鹅掌楸花的分离试验中有21次分离到螺原体。惠特科姆(Whitcomb)等人报道,从泽兰、鬼针草、夜来香和李属植物的花上分离到螺原体。中国研究植物花螺原体开始于1984年,在23种的植物花分离试验中,从油菜、紫云英、小旋花和白三叶草等4种植物中分离到18个分离物,其中小旋花分离物 CCH 为一新种,定名为 *Spiroplasma chinensis*。已知从花上分离的螺原体属于5个血清学分类组,其中包括两个亚组。

花螺原体目前仅在显花植物上发现。分离时用无菌镊子采取单朵花,分别置于新的塑料袋中带回实验室,在无菌操作台中将大的花瓣去掉,其余部分浸没于培养基中5min,然后将浸液通过孔径为0.45μm的微孔膜滤器除去细菌,滤液直接分装于加有新鲜培养基的无菌培养管中,30℃培养5~10d,每隔1~2d观察培养基中指示剂的颜色变化并取5~10μl培养基在1000倍的相

差或暗视野显微镜下观察是否存在螺原体。初分离物要马上在加有0.8%琼脂培养基的平板上进行3次克隆纯化。

已发现的花螺原体的营养要求相对较低,多数能在只含蔗糖、牛心浸出液和小牛血清或马血清的培养基中快速增殖,并产生大量的酸。而 W115花螺原体在较复杂的培养基 M1D 或 SP-4 中缓慢生长,培养基酸化也慢。除用于分类的血清学特征比较研究外,多数花螺原体只测定其脱氧核糖核酸中的 G+C 含量。中国花螺原体的 G+C 含量为29%。其它菌系 G+C 含量为25%。中国花螺原体还作了较为详尽的营养及理化特征研究。

花螺原体与昆虫之间有密切的关系。Clark 认为蜜蜂螺原体在蜜蜂群体内出现和消失的时间与植物开花时间一致,表明花可能作为传播中间体,后来大量花螺原体的发现进一步支持这一推论。在 I~2 亚组中,花螺原体菌系和昆虫分离的菌系同时存在,几个花分离物与蜜蜂分离物之间核酸杂交有高度的同源性,对蜜蜂致病。I~6 亚组中与花螺原体相似的菌系也从昆虫分离到,然而这一亚组对昆虫的致病性还不知道。在第 IV 和 VI 血清组中,都是花螺原体菌系与昆虫菌系共存,IV 组中几个与蜜蜂五月病螺原体相似的菌系在花上广泛分布。日前的观点认为,花上螺原体是携带螺原体的昆虫在取食花蜜时留下的,花仅是作为定居场所昆虫的传播中起作用,这一观点也被在食叶昆虫及非虫媒花上没有发现螺原体所支持。花螺原体是否能在花上繁殖并进入植物体内对植物产生影响尚一无所知。今后的研究将着重于花螺原体与昆虫的关系及其生态影响等方面。

#### 参考文献

- 1 Clark T B. Honey bee spiroplasmosis, a New problem for beekeepers. American Bee Journal 1978,118:18~23
  - 2 Davis R E. Spiroplasma associated with flowers of the tulip tree (*Liriodendron tulipifera* L.). Canadian Journal of Microbiology 1978,24:949~959
  - 3 Raju B C, et al. Helical, motile mycoplasmas associated with flowers and honeybees in California. Canadian Journal of Microbiology. 1980,27:249~253
  - 4 Davis R E, et al. Spiroplasma florica, a new species isolated from surfaces of flowers of tulip tree *Liriodendron tulipifera* L. International Journal of Systematic Bacteriology. 1981,31:456~464
  - 5 McCoy R E, et al. Powder puff spiroplasma, a new epiphytic mycoplasma. Microbiological Ecology 1982,8:168~180
  - 6 Whitcomb R F, et al. Wall-less prokaryotes from fall flowers in central United States and Maryland. Current Microbiology. 1982,7:285~290
  - 7 Mouches C, et al. Spiroplasma apis, a new species from the honeybee *Apis melliferum*, 1983
  - 8 Clark T B, et al. Spiroplasma melliferum, a new species from the honey bee (*Apis mellifera*). International Journal of Systematic Bacteriology. 1985,36:296~308
  - 9 Guo Y H, et al. Spiroplasma chinensis sp nov From flowers of *Calystegia hederacea* in China. International Journal of Systematic Bacteriology. 1990,40:421~425
  - 10 叶旭东. 植物花螺原体的分离培养及营养特征研究. 南京农业大学学报, 1991,14:58~62
- (福建农业科学院果树研究所叶旭东撰)

#### 毛菌纲真菌

*irichmycetes fungi* 毛菌纲真菌是附生于节肢动物内脏或外骨骼上的专性共生菌。长期以来它被认为是经济价值不大的真菌,加之它的分类地位也有争论,故未被重视而进行深入研究,但此类真菌的某些种能使寄主致死,这就在经济上、医学上显示其极为重要的作用。

对毛菌纲真菌的研究经历了4个阶段。第1阶段为1848~1904年,主要发现了毛菌纲的两个不同类群,即外毛菌目的和变



形毛菌目的某些种。1848年,美国莱迪(Ledy)首次在千足虫和甲虫的后肠内发现外毛菌目肠蕈毛属的几个种。不久,欧洲的利伯屈恩(Lieberkuhn)和申克(Schenk)分别在水生节肢动物的外骨骼上发现寄生变形毛菌。1895年,豪普特莱希(Hauptfleisch)在端足目动物的后肠中又发现了外毛菌目的第2个属即甲壳毛菌属真菌。第2阶段为1905~1928年,以莱热(L. Leger)为首的法国原生动物学家发现了外毛菌目的和变形毛菌目的许多种,并对它们的形态和分类进行一系列的研究。第3阶段是1929~1959年,莱热等又发现单毛菌目中的第1个单毛菌;普瓦松(Poisson)发现了内毛菌目中的内毛菌属真菌。在这一期间,除发现两大类新的类群外,以曼纳 Manier 为首的科学家们对毛菌纲真菌的生物学及其分类还进行了广泛的讨论。1960年以后为第4阶段,对毛菌纲真菌的研究进入趋于成熟的阶段。

毛菌纲真菌广泛地分布于世界各地。它们的寄主为海洋的、淡水的和陆地的节肢动物;最普通的种类可寄生在昆虫、甲壳动物及千足虫上;有的寄主,如黑蝇的幼虫,可受3~4种不同属的毛菌的侵染。一种毛菌纲真菌可以侵染多种节肢动物,但未发现其严格的专性寄生性。毛菌纲真菌与寄主的关系曾被列为寄生关系。1986年,利希特沃德(Lichtwardt)却提出大多数毛菌纲真菌和节肢动物的关系似乎是一种共生关系。毛菌纲真菌一般生活在节肢动物的后肠区,有的则附着在双翅目幼虫的中肠胃食膜内,也有些是生活在甲壳动物前肠上的。虽然毛菌纲真菌是通过寄主的肠腔获得营养的,但对寄主一般却无有害作用,个别毛菌如蚊刺须毛菌(*Smittium culicetae*)还可以给蚊子幼虫提供维生素B和固醇,以解决后者的营养不足。

有些报道资料证明,须毛菌属的几个种在实验室条件下可使寄主蚊子幼虫死亡,这就提示对蚊子进行生物防治的可能性。1966年,意大利科拉齐(Colluzzi)在经过23次的侵染试验,发现有27%(12%~87%)的冈比亚按蚊被致死。1978年,俄罗斯杜宾茨克(Dubinski)报道了须毛菌属的某个种(未正式确定种名),在实验条件下能使80%的尖音库蚊骚扰亚种和埃及伊蚊的幼虫死亡,且发现在垂死幼虫的腹部表皮下有一个由真菌菌丝组成的黑点。1981年,斯威尼(Sweeney)在澳大利亚又发现侵染另一种按蚊的新种致病须毛菌能使50%~90%的蚊子幼虫死亡,并发现这些被侵染的蚊子幼虫的腹部第5~6节段上有一个小黑点,他认为这可能是寄主的黑化反应,寄主的死亡是由于真菌穿入它们的血细胞、后肠上皮细胞和马尔丕基氏管细胞并在里面生长,使幼虫不能蜕皮所致;此外还发现菌丝可穿入昆虫的蛹和成虫。

对毛菌纲真菌的形态、生理、系统发育和与寄主关系等方面的研究只有在分离培养的条件下进行,目前只有两个属的种能以培养并用于试验,即毛菌属的和变形毛菌属的真菌。彼得森(Peterson)在1981年,利希特沃德在1983年,分别成功地分离到两个新的种:冬季类侧孢毛菌(*Genistellodes hibernus*)和星状煤袋毛菌(*Capniomyces stellatus*),这些新的菌种对养料的需要与其它真菌并没有什么不同。1960年,美国惠斯勒(Whisler)从广泛的寄主中第一次分离到外共生毛菌变形毛菌。1963年,克拉克(Clark)从蚊子幼虫中又首次分离到共生毛菌昆虫须毛菌(*Smittium culicis*)和蚊刺须毛菌。此后,加拿大、法国、新西兰、澳大利亚、日本、瑞典、瑞士等国的科学家们也分别在不同的寄主上分离到这两个属的不同种类的毛菌纲真菌。

毛菌纲真菌的菌体从简单到高度分枝,差异极大。菌丝的宽度从2 $\mu$ m到100 $\mu$ m以上,其长度从30~55 $\mu$ m,到1cm甚至更长。外毛菌的几个属还有二态性菌体,少数菌种是多态性的。经组织化学检验表明,菌体细胞壁的主要成分为几丁质(如单毛菌目的真菌)或纤维素(如外毛菌目的真菌)。对分离菌的两个种所进行的分析,其化学成分是不同的。1973年,桑加雷(Sangar)等分析了蚊刺须毛菌细胞壁,65%是碳水化合物,15%是蛋白质,13%为类脂,3%为灰分,有几丁质存在。1965年,特罗特(Trotter)等分析了变形毛菌的细胞壁,既没有几丁质也没有纤维素,但有半纤维素存在,菌体以固着器或特殊的吸盘与寄主牢固相连。不同

类群毛菌的固着器,其大小和形状是不同的。这一特点在分类上具有很重要的意义。毛菌纲真菌的繁殖方式,除单毛菌目的之外,主要是通过无性孢子繁殖。无性孢子有毛孢子、孢囊孢子、节孢子和变形细胞。单毛菌目真菌除能产生无性的毛孢子外,还可进行有性繁殖,产生接合孢子。

毛菌纲真菌的分类至今尚无一致的定论,因为许多毛菌不易培养,只有在解剖寄主的条件下才能显示其形态,但一经解剖,寄主被杀死,从而又会抑制毛菌的进一步发育。另外,毛菌的发育依赖于季节和寄主发育期,而且有些毛菌是二态性的甚至多态性的。1986年,利希特沃德提出分类时应掌握的几个标准:(1)寄主不应作为唯一的分类依据。(2)应用大量寄主作为样品,以了解种内可能发生的变异。(3)应在不同季节和寄主发育的不同阶段收集标本。(4)某种毛菌如在一种寄主内有形态上的变化,而在其他寄主中却无此情况,分类时就应谨慎。按照他的分类系统,将毛菌纲归入接合菌亚门,分4目,7科,39属,131种。

关于毛菌纲真菌的系统发育及其同其他真菌的关系已开始清楚,它们之间的亲缘关系也正在探索之中。1978年,莫斯(Moss)等提出单毛菌目真菌和梳霉目真菌间有其相似性,从而推测梳霉目真菌可能是毛菌纲真菌的祖先,因为两者的营养细胞、菌丝的基本成分及发育过程、无性繁殖器官、孢子附属物形成阶段以及有性繁殖产生接合孢子等方面都有其相似性。1972年,桑加雷通过血清学反应证明两者之间还存在免疫亲和性,抗须毛菌属真菌的抗体能和羽泡林氏梳霉、刺孢梳霉的抗原起反应,内毛菌目真菌、外毛菌目真菌和梳霉目真菌的关系比同单毛菌目真菌的关系疏远,这两个目真菌可能是由单毛菌目真菌进化而来的。关于变形毛菌目真菌至今还是个谜,因为它的生活史和能动的变形细胞均不同于毛菌纲中的其它任何一个目的真菌,而血清学反应表明它和单毛菌目真菌并无亲和性,更重要的是,它的细胞壁无纤维素或几丁质,从而缺乏真菌的基本特征,因此对变形毛菌目真菌是否是真菌还有疑问,它可能是原生动物的一个特殊类群,是从原生动物的祖先进化而来的。

目前还有大量的毛菌纲真菌未被发现,这主要是由于毛菌纲菌类不易培养,因此对毛菌的分类及分离工作的研究将有很大的发展前景。毛菌纲真菌同节肢动物的关系尚有待进一步探索,它们如能成为有害节肢动物致病菌,则在经济上及医学上均有着不可估量的意义。蚊子幼虫在实验室条件下能被毛菌侵害致死的试验结果,为生物防治的可能性提供了证据,这将是一个极有意义的课题。关于毛菌纲真菌的生理、系统发育等生物学方面的知识,总的说来还是很贫乏的,也是待开发的领域。

参考文献

- 1 Whisler H C. Nature. 1960,186:732~733
- 2 Clark T B, W R Kellen, J E Lindergren. Nature. 1963,197:208~209
- 3 Trotter M J, H C Whisler. Can J Bot. 1965,43:869~876
- 4 Sangar V K, R W Lichtwardt, J A W Kirsch, R N Lester. Mycologia. 1972,64:342~358
- 5 Moss S T, T W K Young. Mycologia. 1978,70:944~963
- 6 Peterson S W, R W Lichtwardt, B W Horn. Mycologia. 1981,73:477~485
- 7 Sweeney A W. Trans Brit Mycol Soc. 1981,77:55~60
- 8 Lichtwardt R W. The Trichomycetes - fungal associates of arthropods, New York Berlin Heidelberg Tokyo: Springer-Verlag, 1986. 95~101
- 9 Lichtwardt R W. The Trichomycetes - fungal associates of arthropods, New York Berlin Heidelberg Tokyo: Springer-Verlag, 1986. 135~137

(华东师范大学黄秀琴撰;吴治身教授审)

**核型多角体病毒** nuclear polyhednsis virus 核型多角体病毒(简称NPV)是昆虫寄主中特有的病毒,因其病毒增殖

的部位在细胞核内而得名。根据 1986 年国际病毒分类与命名委员会(ICTV)的决定,将核型多角体病毒归入杆状病毒科的 A 亚组。早在 1527 年,维达(M. Vida)首先从家蚕的脓病中发现家蚕的 NPV。1874 年,波兰(J. Bille)证实 NPV 是家蚕脓病的病原物。随着 1938 年电子显微镜的问世,对 NPV 生物学及分子生物学特性的研究亦愈加深入。主要研究内容可归结为:

**NPV 的形态结构和理化特性** 病毒粒子外面具有蛋白质性质的包涵体是 NPV 与其它动植物病毒完全不同的形态特征。包涵体大多呈多角形,亦称为多角体,直径从 0.5~15μm 不等,由内基质和多角体膜组成。内基质为单一蛋白,成立方形晶格排列。长杆状的病毒粒子被任意地包埋在其中。多角体膜较坚硬,由碳水化合物组成并含有少量脂和蛋白,非极性溶剂对多角体膜结构无影响。由于多角体的体积较大,纯化起来比较容易,匀浆因 NPV 感染致死的虫子后,多次低速差离心,获得多角体粗制品,放在 40%~65%(W/V)蔗糖梯度上 20 000r/min 离心 40min,纯的多角体带位于 53%~56%蔗糖浓度中。多角体相对比较稳定,在 4℃冰箱内保持其感染能力可达 10 年之久,但紫外光照射会显著减弱其感染能力。多角体蛋白本身不具有感染能力,被多角体蛋白包埋其中的杆状病毒粒子才是真正的感染实体。NPV 的病毒粒子由其中的核衣壳和外面的囊膜组成,前者包括 DNA 和碱性蛋白,碱性蛋白以中和磷酸分子的方式保持 DNA 的致密状态,其大小为 40~60×200~400nm。病毒粒子囊膜是脂蛋白的单位膜,三片层结构。多角体在 H<sup>+</sup>浓度 0.26×10<sup>-11</sup>mol/L 的碱性溶液内(0.1mol/L Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 0.17mol/L NaCl, 0.01mol/L EDTA)溶解,释放出具有感染性的病毒粒子。多角体蛋白的分子量为 29 000。而病毒囊膜蛋白的组分有十几种,分子量从 7500~160 000 不等。病毒 DNA 为双股 DNA,碱基成分达 37%~49%,DNA 分子量为 72~104×10<sup>6</sup>。

**在寄主体内和离体培养细胞中的增殖** 格瑞那多(R. Granados, 1980)对 NPV 在寄主体内的侵染途径作了详细的报道。寄主昆虫吞食 NPV 的多角体进入中肠,在肠液酶和碱性(pH10.9)的作用下,病毒粒子从多角体内释放出来,病毒囊膜与中肠柱状细胞的微绒毛融合并进入细胞质内。核衣壳通过核膜孔穿入细胞核内,在核内进行子代核衣壳的复制。这些子代核衣壳可能两种命运,一是转入细胞质内,以芽出方式获得囊膜后,进入血腔继续感染其它敏感细胞和组织;另一种可能在敏感细胞核内重新获得囊膜,随后被包埋进多角体蛋白内,形成新的多角体。一般情况下,多角体在感染后 24h 就可被发现。最终在感染组织的细胞核中形成大量多角体,使核膜和质膜破裂,直至宿主死亡。为了获得 NPV 在细胞内复制的精确资料,利用昆虫离体细胞进行 NPV 的研究是十分必要的。格瑞斯(T. Grace, 1962)最早建立了昆虫离体细胞株,从而为 NPV 在细胞内增殖机理的研究提供了可靠的保证。汉克和凡尔(F. Hink, 1973; L. Vaughn, 1970)用昆虫细胞株研究 NPV 的复制机制,建立离体细胞病毒测定法及使用离体细胞生产 NPV 方面都起过较大的作用。

**NPV 的遗传学研究** 自汉克(Hink, 1973)首次建立离体细胞株病毒空斑纯化方法后,使 NPV 病毒遗传学的研究向前推进了一大步。近年来发现 3 类 NPV 的突变型。布朗(Brown, 1979)等首先报道多角体形态变异株(Occlusion morphology mutant),它们在侵染的细胞核内仅形成一个立方形的多角体,对其突变原因和机理仍不清楚。另外两株为温度敏感型和 FP 突变型(Few Polyhedra),前者是指在正常温度下病毒在寄主细胞内不能完成正常的生活周期,卡斯特斯等(Carstens 等, 1991)证明这是由于病毒编码旋转酶基因的一个碱基发生变化而形成的。FP 突变株是指细胞核内的多角体少于 10 个,其突变原因可能是 FP 基因组的 HandIII 片段插入寄主的转移因子(TED)。通过这些突变型发生原因的研究,对于解决多角体形态决定因素、多角体形成机制及多角体功能等问题起着重要的作用。

**NPV 分子生物学的特性** NPV 基因组为双股环状 DNA 分子,可编码 100 多种多肽。近来,使用限制性内切酶分析、基因

克隆及分子杂交等方法建立了 NPV 的基因组物理图谱,第一个建立物理图谱的核型多角体病毒是首蓓银纹夜蛾核型多角体病毒 NPV 的 L-1 株,以后相继建立的还有黄杉毒蛾 NPV、粉纹夜蛾和美国棉铃虫的 NPV 等。NPV 基因组内含有同源重复顺序,分散在基因组的不同区段,这些重复顺序具有增强子的功能,可以促进晚早期基因的转录(Guarino 等 1986)。目前,研究最详细的基因是多角体蛋白的基因,该基因表达的多角体蛋白是病毒多角体的主要构成成分,在感染晚期大量表达,主要功能是保护病毒粒子抵抗外界环境中的不利因素,该基因有很强的启动子,常用来作为各种外源基因表达的载体(Fraser 等 1989)。对于病毒 DNA 的合成、基因组的转录、蛋白大分子的合成及基因表达的调控也进行了研究。目前已经证明病毒 DNA 复制的开始需要病毒特异多肽的合成(Gordon&Carstens, 1984);病毒转录是各基因按时间顺序的先后分期转录(Robel&Faulkner, 1984);病毒蛋白的合成也是严格按照时间顺序进行的(Miller, 1981);病毒基因表达的调控主要发生在转录水平上(Friesen&Miller, 1986)。由于研究时间的限制,还有许多分子水平的问题尚待解决。

根据上述 NPV 的特点,对 NPV 的深入研究具有重要的意义:(1)由于它对害虫的致死效力,可以发展 NPV 成为微生物杀虫剂。几十年来,注册的病毒杀虫剂有十几种,包括美国的 EL-CAR、TM BIOCONTROL-1、CYPHECK、NEOCHECK-S 等分别用于防治棉铃虫、黄杉毒蛾、舞毒蛾及松柏锯叶叶蜂等害虫。1982 年又生产一种广谱病毒杀虫剂,商品名为 SAN 404 IWDC。此外,在英国、芬兰、俄罗斯和中国,许多 NPV 也达到商品生产阶段。(2)由于多角体蛋白的基因的特殊性,可以作为外来基因表达的载体。自 1983 年斯密斯(E. Smith 等, 1983)成功地以核型多角体病毒作为表达载体,在昆虫细胞中表达人的 β-干扰素后,利用 NPV 作为载体已成功地表达了 400 余种外源基因的蛋白,上至高等动物,下至低级生物的外源基因。国际上正在进行此项工作的研究室共有 150 多个。

**参考文献**

- 1 Vaughn J L, Stanley S M. J Invertebr Pathol. 1970, 16:357
- 2 Hink W F, Vail P V J Invertebr. Pathol. 1973, 22:168
- 3 Smith G E, Summers M D, Fraser M. J Mol Cell Biol. 1973, 3:2156
- 4 Brown M, Crawford A M, Faulkner P J Virol. 1979, 31:190
- 5 Carstens E B, Tjia S T, Doerfler W. Virol. 1979, 99:386
- 6 Granados R R. Biotechnol Bioeng. 1980, 22:1377
- 7 Miller L K. J Virol. 1981, 39:973
- 8 Gordon J D, Carstens E B. Virol. 1984, 138:69
- 9 Friesen P D, Miller L K. Curr Top in Microbiol Immunol, New York:Springer Verlag, 1986. 31~49
- 10 Fraser M J. In Vitro. 1989, 25:225

(中国科学院动物研究所丁翠副研究员撰;蔡秀玉审)

**分枝杆菌质粒 mycobacterium plasmid**

**分枝杆菌的质粒** 1. 含有质粒的分枝杆菌。已被检测出带质粒的分枝杆菌有胞内分枝杆菌 *Mycobacterium intracellulare*、鸟分枝杆菌 *Mycobacterium avium*、或鸟胞内分枝杆菌 *Mycobacterium aviumintracellulare*、瘰癧分枝杆菌 *Mycobacterium scrofulaceum*、偶发分枝杆菌 *Mycobacterium fortuitum* 和耻垢分枝杆菌 *Mycobacterium smegmatis* 等。这些分枝杆菌质粒的分子大小很不一致,各分枝杆菌含的质粒数亦不相同,分子量一般在 2~11.8MD。其中研究最多的是鸟胞内分枝杆菌,其质粒 pLR7 的特征已知,存在于所有毒力株。其次是偶发分枝杆菌,其质粒 pLA5000 的核苷酸序列已被测定。

2. 分枝杆菌质粒的功能。(1)可作为流行病学调查的标志物,有些分枝杆菌带有较多的质粒,而且具有遗传稳定性菌株之间所含的质粒分子量即使相同,但其质粒图谱还是有区别的,例如鸟胞内瘰癧分枝杆菌的野生菌株与临床分离菌株的质粒就是

如此。1986年 Meissner 的研究发现,自然界烟尘中分离出的 MAIS 株的质粒携带率与临床分离的 MAIS 菌株的质粒携带率非常相似,二者的质粒图谱亦其相似,从而推断:感染人体的传播途径是通过自然界的烟尘。(2)质粒能调控细菌的限制修饰系统。Crawford 通过对噬菌体裂解的研究,证实了在鸟胞内分枝菌 LR25 菌株中存在着针对噬菌体的限制修饰系统。LR25 含有 11.2MD, 18.3MD, 107MD3 个质粒,它们只能被 JF<sub>2</sub> 噬菌体裂解。如将 LR25 菌株接种于含吡啶噻的培基内,消除质粒,则得到 LR103 菌株,失去了质粒的 LR103 菌株除能被噬菌体裂解外,也对 AN<sub>9</sub>, D302, VA<sub>9</sub>, JF 和 JF<sub>2</sub> 等多种噬菌体敏感,亦即丧失了限制修饰系统。有人观察到在结核杆菌中也存在限制修饰系统。(3)质粒能编码汞还原酶。在瘰癧分枝杆菌 W262 菌株中,曾提取到分子量各为  $9.5 \times 10^6$ ,  $1.0 \times 10^8$ ,  $1.15 \times 10^8$ ,  $1.85 \times 10^6$  四个质粒分子,它在含有  $100\mu\text{gHgCl}_2$  的培养基上能生长,W262 菌株经过在 MG 肉汤培养基中几次传代培养后,成为对  $\text{HgCl}_2$  敏感的 W262c 菌株,而 W262c 菌即不能在含有  $100\mu\text{gHgCl}_2$  的培基中生长,这是由于 W262c 菌株失去了  $1.15 \times 10^8$  这个 pVT<sub>1</sub> 的质粒分子。研究表明 W262 菌株可合成汞还原酶,将  $\text{Hg}^{2+}$  还原成挥发性汞,而 W262c 菌株无 pVT<sub>1</sub> 这个  $1.15 \times 10^8$  质粒,其细胞裂解物中检测不出汞还原酶的活性,说明 pVT<sub>1</sub> 质粒能编码细菌的重金属汞还原酶。

结核杆菌有无质粒 最早 Alberghina 等曾提出结核杆菌可能携带质粒的证据,是从有关耐药现象而推断的。Crawford 则谓结核杆菌 H<sub>37</sub>RV 的毒力决定因子可能与细菌带有质粒相关连。Franzblau 等亦提出,质粒可能与结核杆菌对某些抗菌素的耐药性有关。但以上 3 位作者都未提取出质粒,更无从探究其特性。

结核杆菌的耐药性是临床上很棘手的问题,由于临床上很多的因素,如结核病患者未规则服药,未履行全面监督或全程管理等,致使结核菌产生耐药性(耐 1、2 种或多种抗结核菌药),从而使治疗归于失败,使其中很多病人成为慢性传染源或难治愈患者。但即使进行了全面监督或全程管理治疗,也还有 5% 以下的复发或失败,其中就有些是老大难的慢性传染源患者。如果能提取出结核杆菌的质粒,并明确证实它与耐药性有关,甚至明确耐哪一种或哪几种药物,则将会有重大意义。因为在其它一些细菌中例如耐药绿脓杆菌的质粒,已得确证。

1990 年 Zainuddin 作了提取结核杆菌质粒的尝试,用直立的琼脂糖凝胶电泳对临床分离的 197 株结核杆菌耐药菌株进行了筛选,发现有些菌株除了染色体 DNA 区带清晰可见外,还可看到另一条泳动速度慢于染色体的荧光带。Zainuddin 认为可能就是结核杆菌的染色体外基因成分。这些质粒基因的构型不同于普通大肠杆菌,大肠杆菌的质粒常以双链、超螺旋共价闭合环的形式存在。众所周知,提取质粒的方法都是建立在质粒构型不同于染色体构型的基础上,染色体在细胞裂解过程中断裂成线性片段,因此用 AGE 及紫外光等方法对于以其它方式存在质粒无效;在其它细菌中质粒的另一构型是线形,然而,Zainuddin 所用的碱裂解法不可能分离到线形 DNA。其次,在 Zainuddin 所配制的电泳胶板上所有大于标准 15kb 的 DNA 都应有基本相同的泳动率,但却未见到与 23kb 标准片段共同迁移的其它 DNA 片段。Zainuddin 报道的染色体外 DNA 带可能有很多缺口,或不是共价连接;而是内粘连蛋白,或其它物质连接的环状分子。还需考虑的是结核杆菌质粒 DNA 以单链分子方式存在的比例,因氯化铯/溴乙锭很难和单链 DNA 分子结合,所以用 AGE 无法测出。

迄今国内外都还未能证实结核杆菌确有质粒,还需要设法从多方面修改过去所采用的方法来提取质粒,因为有一些非结核分枝杆菌早已发现有质粒,推断结核杆菌很可能也有质粒。但为何用提取非结核分枝杆菌质粒的方法不能提取到结核杆菌质粒,其原因除 Zainuddin 提到的以外,是否还在于:结核杆菌破壁难度较大。利用现有的破壁剂如环丝氨酸、甘氨酸和氨基青霉素等都未获成功,可能要另觅破壁的药剂或途径,例如电穿孔或脉冲

凝胶电泳等。关于结核杆菌有无质粒问题,虽然 Zainuddin 不能下结论,但可以肯定一点:在结核杆菌临床分离菌株中,有无质粒存在,仍缺乏可靠的证据。

从分子生物学水平上对质粒 DNA 进行研究,是当今前沿医学临床和基础的重点,必将阐明很多前所未知的症结,进入到更深奥的领域。在查到质粒 DNA 后,再从分子水平上探讨其特性,如耐药性(R-因子)等,则会为开辟消除耐药性提供广阔的途径和前景。

参考文献

- 1 Meissner P S, Falkinham J O ■. J Infect Dis, 1986, 153: 325~331
- 2 Hull S I, Wallace R T, Babey D G, et al. Amer Rev Respir Dis, 1984, 129: 614~618
- 3 Jones W D, David H L. Tubercle, 1972, 53: 35~42
- 4 Crawford J T, Bates J H. Gene, 1984, 27: 331~333
- 5 Ranzier J, Moniz - Pereira J, Gicquel - Sanzey B. Gene, 1988, 31: 315~321
- 6 Crawford J T, Cave M D, Bates J H. J Gen Microbiol, 1981, 127: 333~338
- 7 Meissner P S, Falkinham J O ■. J Bacteriol, 1984, 157: 669~672
- 8 Alberghian M, Nicoletti G, Torrisi A. Chemotherapy, 1973, 19: 148~160
- 9 Crawford J T, Bates J H. Amer Rev Respir Dis, 1986, 134: 659~661
- 10 Frankblau G S, Takeda T, Nakamura M. Microbiol Immunol, 1986, 30: 903~907
- 11 Zainuddin Z F, Dale J W. Tubercle, 1990, 71: 43~49

(武汉冶金医学高等专科学校张天民撰)

细菌抗砷特性

1968 年, Novick 等对金黄色葡萄球菌进行的研究表明,该菌的砷抗性与 3 个质粒(现已知是 pI258, pII47 和 pI524)有关,决定砷酸盐和亚砷酸盐抗性的遗传决定子是相互独立的。1973 年, Hedges 等在大肠杆菌中发现质粒 R773 对砷酸盐和亚砷酸盐具有抗性,并证明了在革兰氏阳性菌的革兰氏阴性菌中决定砷抗性的是质粒,为从分子和基因水平上了解细菌抗砷机理打下了基础。1981 年, Silver 等发现了大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的砷抗性是可诱导的,砷酸盐、亚砷酸盐和亚锡酸盐都可作为诱导物,抗性质粒的存在不改变大肠杆菌已有的磷酸盐吸收系统,表明抗性质粒提供了一个专一性的砷酸盐转移系统。1982 年, Silver 和 Keach 以及 Mobley 和 Rosen 都证明了在大肠杆菌中,由质粒控制的对于砷酸盐、亚砷酸盐和亚锡酸盐的抗性包括一个初级的含氧阴离子泵的作用,该作用不依赖电化学的质子梯度,而是利用细胞内的 ATP 作为阴离子转移的直接化学能。1983 年, Mobley 等首先将大肠杆菌质粒 R773 上的 4.3kb 抗砷片段克隆到质粒 pBR322 中,得到一个重组抗砷的质粒 pUM3,证明了在大肠杆菌中决定抗砷特性的是一个单一基因簇编码的含氧阴离子转移系统,此基因簇位于 91kb 的抗性质粒 R773 上,称为 ars 操纵元,该操纵元可被元素周期表第 V 族元素的含氧阴离子诱导。Chen 等(1986)和 San Francisco 等(1990)分别对大肠杆菌 ars 操纵元进行了序列分析,证明了该操纵元含有 4 个基因,分别命名为 arsR, arsA, arsB, arsC 基因。1992 年, Ji 和 Siver 将含有抗砷决定子的金黄色葡萄球菌质粒 pI258 以两种方向克隆到质粒 pSK265 中,得到质粒 pGJ101 和 pGJ102,这两个质粒都表现出了与 pI258 相同的抗砷酸盐、亚砷酸盐和亚锡酸盐的特性,说明砷抗性与与 pSK265 的阅读架(ORF)方向无关。另外,他们将 pI258 克隆到质粒 pUC19 的 LacZ 基因位点中,得到一个新的抗性质粒 pGJ103,将该质粒转入大肠杆菌中,发现转化子对砷酸盐和锡酸盐有较低水平的抗性,对亚砷酸盐则有较强的抗性,说明葡萄球菌的抗砷决定子能够在大肠杆菌中发挥作用。

通过对 pI258 的序列分析,他们证明了在 pI258 中,决定砷抗性的主要是 3 个基因,arsR,arsB,arsC。以上实验结果表明,大肠杆菌的 ars 操纵元与金黄色葡萄球菌的 ars 操纵元在结构上不完全相同。在金黄色葡萄球菌中,与大肠杆菌 arsA 基因同源的基因是缺失的,arsR 基因与 arsB 基因直接相连。但这两种菌的抗砷过程非常相似,都是由 arsR 基因编码的阻遏蛋白 ArsR 调控的。

**ArsR 蛋白的特性** 利用启动子探测载体,从质粒 R773 上克隆到的 727bp 的 EcoRI-Hind III 片段与 ars 操纵元的抗砷调控有关,这一片段包含了 arsR 基因,其基因产物 ArsR 蛋白经证明是一种反式作用调节蛋白,分子量为 13kD,尽管它必须结合到 DNA 的操纵部位才能发挥作用,但未发现有可识别的 DNA 结合位点。另外,质粒 R773 的砷抗性是诱导型的,而重组质粒 pUM3 的砷抗性则是组成型的,这说明在 pUM3 中起调控作用的 arsR 基因缺失,现证明在 pUM3 中操纵元结构基因的表达依靠质粒 pBR332 的 P<sub>1</sub> 启动子。菌体抗砷的快速调控通过许多不同的含氧阴离子进行,这些阴离子包括砷酸盐、亚砷酸盐和亚锡酸盐等。利用 arsR 基因与 β-内酰胺酶基因(blaM)的融合实验发现,β-内酰胺酶在靠近 ArsR 蛋白(共 117 个残基)的 C 末端(102 或 105 残基处)融合形成的嵌合蛋白保持了 ArsR 的调节活性。因此,基因的表达是诱导型的,而在靠近 N-末端(10~83 残基处)融合形成的嵌合蛋白则失去调节作用,基因的表达是组成型的。但当 arsR 基因与这些组成型融合子在一起以反式方式表达时,其调节活性仍能保持。现已搞清 arsR 基因的下游 DNA 序列对于调节不是必需的。综上所述可以得出结论,arsR 的表达是自动调节的,在没有砷诱导物存在时,ArsR 蛋白抑制表达,而当诱导存在时,表达可顺利进行。因此,尽管 ArsR 蛋白较小,又明显地缺乏 DNA 结合位点,但 ArsR 蛋白确是一种反式作用抑制物。

**ArsA 蛋白的结构与作用** 由 arsA 基因编码的 ArsA 蛋白已被纯化,是一种外周膜蛋白,并经证明是一种可被含氧阴离子激活的 ATP 酶,严格要求亚砷酸盐或亚锡酸盐为其底物,其余的含氧阴离子,如砷酸盐或磷酸盐都不能替代。ArsA 蛋白是 63kD 的蛋白质分子,其 N-,C-末端相互间表现出同源性,这是基因在进化过程中发生了复制和融合的结果。研究发现 ArsA 蛋白不同于以往发现的离子转移 ATP 酶,因为对离子转移 ATP 酶有抑制作用的物质,对 ArsA 蛋白活性没有影响。目前看来 ATP 似乎是 ArsA 蛋白唯一的核苷酸底物,而 GTP、UTP、CTP 或 ITP 的水解与 ATP 相比,活性小于 15%,但 ArsA 对于 ATP 的结合和水解是两个不相关的部分。ArsA 与 ATP 结合时不需要含氧阴离子,而 ArsA 以 ATP 酶形式发挥作用时,则需要核苷酸和含氧阴离子。ArsA 蛋白同其它蛋白一样,都可被蛋白酶降解。在胰蛋白酶作用下,首先形成一系列较小的片段,然后这些片段在很短时间内被降解掉。但这种作用受 ArsA 蛋白底物影响。当亚锡酸盐单独存在时,胰蛋白酶可将 ArsA 降解,说明 ArsA 与含氧阴离子底物结合时,其表面构象保持相对的稳定;当 ATP 单独存在时,胰蛋白酶对 ArsA 只有部分降解作用,说明 ArsA 结合核苷酸底物后,其表面构象发生了变化,不利于蛋白酶的作用;当 ATP 和亚锡酸盐都存在时,ArsA 蛋白形成的酶维持其原来的状态,几乎不被胰蛋白酶降解,这说明该蛋白与阴离子和核苷酸结合的区域是不同的,而且单独与 1 种底物结合同与 2 种底物同时结合时的表面构象完全不同。现已搞清,由 ArsA 蛋白构成的具有催化能力的酶是由 2 个 63kD ArsA 蛋白分子组成的二聚体。通常 ArsA 以单聚体和二聚体混合的状态存在,单聚体可聚合成二聚体,二聚体也可解聚成单聚体,二者维持着动态平衡,当加入阴离子后,这种平衡即被打破,向着形成二聚体的方向进行。所以阴离子在催化过程中的一个作用就是诱导形成二聚体。研究结果证明,ArsA 蛋白的每一个单聚体上有 2 个内在的核苷酸结合部位(在二聚体上有 4 个),尽管这两个部位相互间很相似,但它们不是等同的,功能也有差别。2 个部位都有催化作用,或它们相互间发生作用,现在还不清楚。

arsA 基因是目前仅在大肠杆菌中发现的抗砷结构基因,它

与 arsR 基因之间间隔着一段 439bp 的核苷酸序列。但在金黄色葡萄球菌中 arsA 基因缺失,而其砷化物排出系统也是依赖能量的。能量的来源大致有 2 种可能性:其一,葡萄球菌的排出系统中含有由染色体基因编码的 ATP 酶亚单位,水解 ATP 以供排出系统所需的能量;其二,由不同的系统(如质子动力)供给必需的能量,但二者都没有被证实。实验表明,葡萄球菌的 ars 操纵元在大肠杆菌中和在葡萄球菌中抗亚砷酸盐的浓度大致相等,但在大肠杆菌中未测出砷酸盐抗性。

**arsB 基因的表达特点及 ArsB 蛋白的作用** arsB 基因是大肠杆菌和葡萄球菌所共有的。由 arsB 基因编码的 ArsB 蛋白,分子量为 45.5kD。它在大肠杆菌和葡萄球菌中大小基本相同,其整体氨基酸组成的相似性达 58%。初步证明 arsB 基因产物是一个整合到膜上的蛋白,位于大肠杆菌膜内侧。arsB 基因的表达不依赖该基因的剂量,砷化物的排出和抗性是受位于膜上的 ArsB 蛋白的量限制的。ArsA 蛋白存在于胞质中,当有 ArsB 蛋白存在时,ArsA 蛋白通过 ArsB 蛋白与膜内侧结合(在膜外侧未发现 ArsA 蛋白),构成了膜结合的 ATP 酶,催化含氧阴离子的转移。已证明 ArsA 蛋白与膜内侧的结合需要完整的 ArsB 蛋白,这意味着这两个基因产物间有相互作用,但尚无证明这种相互作用直接的方法。在缺失 arsA 基因的菌株中,其 ArsB 蛋白仍可以其功能形式插入到膜中。研究发现不管是以复合体形式从细胞中分离得到的与膜结合的 ArsA 蛋白,还是在体外结合到分离的膜上的 ArsA 蛋白,都具有含氧阴离子激活的 ATP 酶活性。该活性与可溶状态下的 ArsA 蛋白相近。这些结果说明,arsB 基因的表达对于 ArsA 蛋白与膜内侧的结合必不可少,从而证实了膜组分 ArsB 蛋白起着将 ArsA 蛋白固定在膜上的作用这一假设。

arsB 基因表达不良会限制抗砷的水平。尽管所有的 ars 基因都包含在同一个多顺反子操纵元中,但它们的表达有差别。ArsA 和 ArsC 蛋白是大量产生的,与操纵元中质粒的拷贝数成正比。虽然 arsC 基因位于 arsB 基因的下游,但 ArsB 蛋白的量却与 ArsA 和 ArsC 蛋白的量相关甚大。那么是什么原因限制了 ArsB 蛋白的量呢?通过 ars mRNA 的 Northern 分析证明,ars 操纵元首先转录成为一个总长 4400 核苷酸的 RNA,然后再迅速裂解为两个较小的片段,一个为 2700 核苷酸,其中包含有 arsR 和 arsA 序列,另一个为 500 核苷酸,包含有 arsC 序列,而裂解部位恰在 arsB 序列内。4400 核苷酸转录物的半衰期小于 4min,而 2700 和 500 核苷酸转录物的半衰期大约为 10min。对 ArsB 翻译起始区域的分析表明,由于其结构的特殊性,当转录开始时,只有相当少的核糖体结合在上面,因而易于受核酸内切酶的作用。因此,低效的翻译起始再加上 arsB 信息的迅速损失,便导致了该蛋白的产量较少,这或许是细胞避免膜蛋白基因的过表达所形成的普遍机制。

**ArsC 蛋白的作用** 通过含氧阴离子泵而产生的砷化物的抗性(和转移)除需要 arsA 和 arsB 基因产物外,还需要 arsC 基因产物。arsC 基因是 ars 操纵元中最小的结构基因,其转录产物 ArsC 蛋白为可溶性的,分子量为 15.8kD,位于胞质中。研究发现 ArsA 和 ArsB 蛋白对于砷酸盐和亚砷酸盐的抗性是必需的,而 ArsC 蛋白对亚砷酸盐的抗性和转移并非必需,但对于砷酸盐的抗性和转移则是必不可少的。这意味着 ArsC 蛋白肯定是以某种方式参与了 ArsA 和 ArsB 蛋白的催化过程。Ji 等证明 ArsC 在其它 ars 操纵元基因产物缺失的情况下,能将砷酸盐还原为亚砷酸盐,后者被 ArsB 蛋白运出细胞。无细胞提取物的还原检测显示,还原性的硫化物二硫苏糖醇(DTT)可以强烈地刺激依赖 ArsC 的砷酸盐还原反应。纯化的 ArsC 蛋白在加入 DTT 和硫氧还原蛋白时,可将砷酸盐还原为亚砷酸盐。它是一种砷酸盐还原酶,酶活性存在于胞质中,而不在膜结合的部分或周质中。至于砷酸盐是以何种机制与能量相偶联,目前证据不足。

#### 参考文献

- 1 Kaur P, Rosen B P. Plasmid, 1992, 27: 29~40
- 2 Mobley H L T, Chen CM, Silver S, et al. Mol. Gen. Genet.

- 1983,191:421~426
- 3 Chen C M, Misra T, Silver S. J Biol Chem, 1986, 261: 15030~15038
  - 4 San Francisco M J D, Hope C L, Owolabi J B, et al. Nucleic Acid Res, 1990, 18: 619~624
  - 5 Wu J, Rosen B P. Mol Microbiol, 1991, 5(6): 1331~1336
  - 6 Tisa L S, Rosen B P. J Biol Chem, 1990, 265: 190~194
  - 7 Rosen B P, Weigel U, Karkaria C, et al. J Biol Chem, 1988, 263: 3067~3070
  - 8 Hsu C M, Rosen B P. J Biol Chem, 1989, 264: 17349~17354
  - 9 Rosentein P, Peschel A, Wieland B, et al. J Bacteriol, 1992, 174(11): 3676~3683
  - 10 Ji G Y, Silver S. Proc Natl Acad Sci USA, 1992, 89: 9474~9478

(山东大学徐海岩、  
颜望明撰)

### 食线虫真菌

nematophagous fungi 食线虫真菌主要包括两大类,即捕食线虫真菌和内寄生线虫真菌。前者指一类能通过其菌丝变态形成各种捕食器官(粘性菌丝、粘性分枝、粘球、收缩环、非收缩环、三维菌网)捕食线虫的真菌;后者指一类以其孢子附着线虫体表或通过线虫口腔进入体内、通过孢子侵入导致线虫死亡的真菌。食线虫真菌分布于真菌界的五个亚门,在自然界中对农作物病原线虫的生物防治起着极好的调控作用,已被用于动物线虫、植物线虫和食用菌线虫的生物防治。

1839年,科达(A. J. C. Corda)发表节丛孢新属新种多孢节丛孢,1852年,弗尼斯(G. Fresenius)报道了该属另一新种少孢节丛孢,但两个种当时都有被当作腐生真菌而描述的。1890年,沃罗森(M. Woronin)报道了少了孢节丛孢的菌丝以环状弯曲副合而形成复杂的菌网,然而却不知道该菌网形成的作用。1880年,佐夫(W. Zopf)最早观察到这种菌网粘缠住活线虫,最后杀死线虫。他对该菌捕食小麦瘿线虫的情况作了较详细的观察和描述,弄清了该菌是一种捕食线虫的真菌。与此同时,洛德(G. Lhde)在1874年首次报道了一种内寄生线虫真菌醋线虫钩孢,从而开创了食线虫真菌的研究历史。1933~1975年,美国的掘克斯莱(C. Drechsler)在美国进行系统广泛的调查,报道了大量食线虫真菌新种,由此引起世界范围内真菌学家和线虫学家的浓厚兴趣和广泛深入的研究。目前,全世界已报道的食线虫真菌计300多种。1977年,余永年报道虫生串孢壶菌为中国大陆首例报道。以后,张克勤、刘杏忠等对中国食线虫真菌进行了广泛的资源普查,目前中国已发现23属、80种。

食线虫真菌包括不同类群的真菌,涉及真菌的5个亚门,使其分类存在着一定的困难。施恩克(S. Schenck)、苏布拉玛尼亚(C. V. Subramania)、范奥施特(C. A. N. Vaan Ooschot)等对捕食线虫真菌分类进行了较多的评述,废弃了一些属,重新建立了不少新属,一些属的界限又被重新限定。施恩克1979年将顶孢霉属中捕食种类全部转入节丛孢属,并将 *Genicularia*、*Didymozoop haga*、*Candelabrell*、*Dactylariopsis*、*Duddingtonia* 等属全部作为节丛孢属的异名。苏布拉玛尼亚将小指孢霉属中分孢子具一中间极大细胞的18个种转入单顶孢霉属中。范奥施特通过发育学对节丛孢属进行重新评述。德胡格(De-Hoog)和范奥施特根据孢子发育类型将节丛孢属 *Duddingtonia*、*Geniculifera* 归入芽殖型,而将小指孢霉属、单顶孢霉属和 *Drechlerella* 归入菌丝型。加姆斯(W. Gams)1988年将内寄生线虫的真菌 *Acrostalagmus*、*Spicaria*、*Cephalosporium* 和 *Cephalosporiopsis* 全部作为轮枝霉属的异名,评述了已报道的寄生线虫的轮枝霉的全部种。

食线虫真菌对线虫的捕食机制和过程可分为4个阶段,即捕食器官形成阶段、捕捉阶段、侵入阶段和消解阶段。

食线虫真菌的形态建成主要是捕食器官的诱发。1973年库奇(J. N. Couch)报道线虫可以诱发形成捕捉器官;1938年康曼

丹(J. Commandon)和福布拉尼(P. Foubrane)用培养线虫的滤液诱发形成捕捉器官;1959年普拉梅(D. Pramer)和斯托利(N. R. Stoll)把能诱导捕捉器官形成物质命名为线虫素;1966年伍通(L. M. O. Wootton)和普拉梅证明小肽和氨基酸类物质,1989年张克勤证明无离子水诱导少孢节丛孢形成捕捉器官,故认为捕捉器官的形成不仅是线虫分泌的某种物质诱发的,而且也是食线虫真菌对特定不良环境的一种生存适应结果。

捕捉阶段包括吸引与粘着。掘氏圆锥梅里霉的粘性孢子及侵染结构对线虫有吸引作用,并且附着于线虫的特定区域。1985年杰耶普拉卡什(A. Jeyaprakash)证明秀丽隐杆线虫有由糖蛋白组成的化学接受子。粘着是识别的第二步,大多数食线虫真菌捕捉器官的粘性物质可以在电镜下观察到,粘性物质是一类多糖—蛋白质复合物。捕捉器官上具有凝集素(lectin),线虫表面具有相应糖蛋白受体,线虫与捕捉器官接触便被牢牢粘住。

侵入是酶的或机械的或二者皆有之尚未搞清。在捕捉器官侵染结构体中存在一定的电子密体细胞器,认为这些细胞器能分泌穿透几丁质的酶或消解线虫的水解酶,研究者认为掘氏圆锥梅里霉对线虫的侵入是酶软化寄主几丁质后再机械侵入。

消解阶段是从侵入结构穿透线虫体壁到线虫器官的解体。侵入结构进入成虫体后大量产生菌丝,线虫体内各器官逐渐分解直至解体,最后只剩一个空壳,其内含物全部被菌丝吸收。

食线虫真菌广布于世界各地,存在于各种环境,但不同地区优势种类不同。影响食线虫真菌分布存在的因素很多,如土壤理化性质、有机性、线虫密度、微生物区系、金属离子等等。研究认为土壤湿度是主要因素之一。

食线虫真菌对线虫的生物防治作用主要体现在两个方面,一是自然控制,即通过土壤本身存在的食线虫真菌的调控来抑制有害线虫的群体量;二是引入控制,即将食线虫真菌制剂施入土壤而直接防治线虫。自然控制在植物病原线虫的生物防治中起着极其重要的作用,已有一些成功的应用。克里(B. R. Kerry)1984年报道,在英国禾谷孢囊线虫危害严重的土壤中,连续种植单一禾谷类作物几年,该线虫的数量大大减少,研究其减少原因是95%以上的雌虫和卵被食线虫真菌寄生。建立起这样一个生物防治生态系统,便可较长时间使线虫对作物的危害自然控制在经济受害水平以下,在这样的条件下至少有6种孢囊线虫和根结线虫的种群日趋衰竭(克里,1987)。1989年杰弗(B. A. Jaffee)报道,在受到洛斯里被毛孢自然感染的土壤中,甜菜孢囊线虫对甘蓝根的穿透危害被抑制50%~77%。不同的衰退土壤中定植于孢囊线虫上的主要真菌不同。自林福特(M. B. Linford 1937, 1938)用捕食线虫真菌防治菠萝根癌线虫病以来,人们一直不懈地努力将有希望的食线虫真菌制剂引入土壤,防治植物病原线虫,目前已取得一些进展,已有3个商品制剂问世。捕食菌粗壮节丛孢,商品名Roya300,在法国用于防治双孢蘑菇菌丝线虫,使蘑菇产量比未施用该真菌的对照组提高25%;不规则丛孢,商品名Royal1350,以麦粒作基物生产,防治温室根结线虫比单独使用化学制剂和其它方法均好,大田施用对番茄根结线虫有一定防效;淡紫拟青霉是孢囊线虫和根结线虫雌虫和卵的寄生菌,在菲律宾已有一定规模的生产,商品名为Bioact,该制剂已较大面积用于大田防治,对多种重要作物线虫有较好的防效。用该线虫防治马铃薯根结线虫取得很好的结果。

随着食线虫真菌种类报道的不断增多,分类问题日益突出,在形态分类的基础上,结合生化分类和发育学研究,将有可能建立起更加合理的分类系统。捕食机制的研究是目前研究中较为活跃的领域,食线虫真菌捕食器官细胞壁与线虫体壁的亲和是极为有意义的研究课题。重要线虫的自然生物防治虽然在欧洲一些地方取得极大成功,但建立起这样一个自然控制体系至少需要几年甚至更长的时间,因此,研究的重点应集中在如何缩短建立这样一个控制体系的时间,要通过人为措施促使土居的强致病菌尽快占优势。施用食线虫真菌直接生物防治是研究的主要重点,随着

对菌株的遗传改良和与之配套的施用技术和生态环境的深入研究,线虫的生物防治有望取得长足的进展。

#### 参考文献

- 1 Kerry B R. Biological control in principle and practice of nematode control incrops. Academic press. 1987, 233~263
- 2 刘杏忠. 博士论文. 北京农业大学, 1991, 1~25
- 3 Jeyaprakash A, Jansson H B, Marban-Mendoza N. Caenorhabditis elegans: Lectin-mediated modification of chemotaxis. Exp Parasitol. 1985, 50: 90~97
- 4 Pramer D, Stoll N R. Nematic and phagocytic substance causing trap formation by predaceous fungi. Science. 1959, 129: 966~967
- 5 张克勤. 中国虫生真菌研究与进展, 1988, 1: 221~229
- 6 张克勤. 硕士论文. 贵州农学院. 1989, 1~75
- 7 张克勤. 真菌学报, 1991, 10: 132~140

(贵州农学院何世川教授、张克勤副教授撰)

**地下大型真菌** hypogeous macrofungi 俗称块菌和假块菌,是指子实体在地表以下或至少在腐殖质层以下发育和成熟的所有大型真菌。从分类系统上讲,其成员分布于接合菌亚门(含内孢霉1目)、子囊菌亚门(含3目)、担子菌亚门(含11目)和半知菌亚门(含1属)。属于子囊菌的块菌一般称为真块菌,担子菌中的块菌则被称为假块菌。真块菌中最重要的属,除块菌属以外,还有猪块菌属、费氏块菌属、囊被块菌属、齿块菌属、粗皮块菌属、鹅块菌属、地菇属和沙漠块菌属等。假块菌中常见的属有褐腹菌属、高腹菌属、腹菌属、插片包属、黑腹菌属和根须腹菌属等。迄今为止,世界上已报道地下大型真菌约90属,1 000余种。

地下大型真菌中的许多种类,特别是块菌属中的一些种,具有很高的经济价值。有的块菌的挥发物质中还含有某种性激素。

早在2 000多年前,南欧便开始采食块菌。意大利 Piedmont 的白块菌和法国 Perigord 的黑块菌都能食用。沙漠块菌又称黄块菌,是北非、西亚沙漠国家居民的珍饈。沙漠游牧民族还用这种黄块菌治疗眼睛红肿。亚洲利用块菌的情况不如欧洲。日本人用红根须腹菌做汤,称为“松露茸”;印度和尼泊尔的山民都有采食块菌的习惯。澳洲土著居民采食猪块菌。美洲大陆的印地安人将块菌作为食物和宗教仪式祭品;近年俄勒冈白块菌在美国太平洋西岸受到重视。中国利用块菌的确切记载甚少,在民间利用的地区也很有限。20世纪40年代,北京东安市场偶有瘤孢地菇出售,经追踪调查,可能采自冀南山区;80年代,在四川会东县山区,发现当地群众称之为“松毛茯苓”或“无娘藤果”的真菌,是真正的块菌,当地彝、汉族居民历来有采食习惯,有的还用于治疗肠胃不适和营养不良。

早期研究地下真菌的学者都是欧洲人。公元前350年左右,古希腊西奥弗拉斯特(Theophrastus)认为块菌是因朱庇特(Jupiter)神用雷电猛击地球而形成的。公元23~79年,罗马普利尼(Pliny)认为块菌是生物界的奇迹,因为它能在无根的情况下形成;这与我国四川会东县山民称它为“无娘藤果”有异曲同工之妙。直到19世纪初,荷兰帕松(D. C. H. Persoon, 1801)才描述了4个种;1729年意大利米切里(P. A. Micheli)首次提出块菌这一属名,并得到瑞典弗里斯(E. M. Fries, 1823)的认可。尔后,意大利鹤柯(V. Picco, 1788)和维塔底里(C. Vittadini, 1831)、法国的图拉斯尼兄弟(L. R. Tulasne & C. Tulasne, 1851)和马伦康(E. I. Malencon, 1938)、英国的雷(J. Ray, 1686)、匈牙利的科达(J. U. Corda, 1841)和霍洛斯(L. Hollos, 1911)、瑞士的费希尔(E. Fischer, 1897)、德国的赫西(R. Hesse, 1891)和俄国的巴柯茨(F. Bucholtz, 1901)等等,对地下真菌进行了大量研究工作和形态描述。在北美,主要是美国的哈克尼斯(H. W. Harkness, 1899)、吉尔基(H. M. Gilkey, 1916)、泽勒和道奇(S. M. Zeller & C. W. Dodge, 1918)、劳埃德(C. G. Lloyd, 1922)、科克尔和库奇(W. C. Coker & J. N. Couch, 1928)等,对北美地下真菌的研究作

出了贡献。此外,亚洲的中国、日本、印度和印尼也有零星的研究;澳洲和非洲也有人做了少量工作。

自20世纪30年代以来,关于块菌的研究有3篇重要的著作问世:第一是1938年瑞士费希尔(E. Fischer)发表的关于块菌分类的文章;第二是同年法国的马伦康(E. I. Malencon)的关于块菌的形态结构和子囊果发育方式的论文;第三是1939年吉尔基(H. M. Gilkey)出版的《北美的块菌》。50年代,对块菌分类工作又进入一个新高潮:首先,1950年纳普(A. Knapp)对欧洲块菌目详细研究后提出目下分4科;继而是一些地区性专著问世,如1954年美国吉尔基和英国霍克(L. E. Hawker)分别对其本国的有关块菌发表了专著,1956年丹麦的兰格(N. Lange)和1960年意大利的塞鲁提(A. Ceruti)也作出了类似的贡献。70年代以后,地下真菌研究中心转移到美国,以特拉普(J. M. Trappe)为代表的俄勒冈学派开展了大量而深入的研究,推动了这群真菌的发展,最后导致Trappe(1979)新系统的建立,并得到国际学术界的认可。中国对地下真菌进行较系统的研究是80年代才开始的。

块菌分类学研究,历来以子实体的形态学特征为依据,虽然比较形态学现在仍是这类菌的分类基础,但是利用现代其他科学的成就和新技术、新方法于块菌的研究,也已开展起来。如用气相色谱分析挥发性物质的组分,用电泳的方法区分疑难种,用子囊果蛋白质不同的组分订正以前仅根据形态所进行的分类等。

在中国古籍中似未留下有关地下真菌的可靠记录。最初报道中国地下真菌的是,1860年英国伯克利和柯蒂斯(M. J. Berkeley & C. E. Curtis),采自香港的一种地下黑根须腹菌;其后,1934年美国道奇和泽勒(C. W. Dodge & S. M. Zeller)所报道的由法格斯(R. P. Fargas)采自四川大巴山的浅色高腹菌;再后,1937年奥地利基斯勒和洛伟(K. Keissler & H. Lohway)发表采自云南丽江的两种腹菌,即含糊黑腹菌和红根须腹菌。1936年邓叔群首先报道一种大团囊菌;1980~1990年刘波和陶恺等先后共报道约20种地下菌,其中近半数是新种;1989~1992年张斌成和余永年共报道7种,其中4种为科学上的新种;此外,臧穆在1980和1986年、应建浙在1984年也曾报道过中国的地下真菌。迄今为止,中国已报道地下真菌20多属70余种。块菌是地下真菌的佼佼者,1990年王云报道中国有18个省、市、自治区有分布,特别是内蒙古西部、宁夏、甘肃、青海和新疆等省、区应是地菇的产地,西南亚热带在石灰质土壤上发育有栎林、鹅耳枥林的地方应为中国块菌的分布中心,预测资源丰富,将大有可为。

块菌的子囊果埋于地下,采寻十分困难。但是当其子囊果成熟时,常散发出某种芳香气味(含硫化物)来引诱小动物去挖食,借以传播孢子。人们利用这一特性,训练猪、狗去定位挖掘它们,几乎所有的地下菌都是菌根真菌,即真菌与植物共生形成菌根。因此,关于伙伴植物、菌根真菌、食菌动物三者相互关系的研究,是当前研究的热点,它不仅在生物学、生理学、生态学、演化学和遗传学方面有重要的理论意义,而且在森林生态系统的研究及其管理、动物、植物和菌物的资源保护和利用,以及造林和森林更新诸方面都有着十分重要的实际意义,这对推动形成交叉学科和边缘学科都大有裨益。所以,这方面的研究要求菌物学家、植物学家和动物学家三方面的密切合作。

块菌来源于真菌与树木共生形成菌根,因此难于像种蘑菇那样在室内进行大批量栽培或工厂化生产,但是现在已能半人工合成。根据不同块菌对环境条件的要求和伙伴树种的不同,栽培方法也不尽相同,但大体上可归纳为育苗、接种、合成菌根、菌根化苗木移栽建园(造林)、管理和采收数个环节。一般从栽下树苗到开始产块菌子囊果需时5~7a,以后年年有收,可连续收获数十载,每棵树每年平均可采收2kg块菌。洗净的优质块菌冷冻干燥处理后包装上市,其余依质量优劣加工成罐头(煮熟后腌制)、块菌片(腌制)或块菌酱等;蒸煮块菌时的蒸汽(含有芳香分子)也要回收,用于制块菌油或块菌酒。

块菌使西方生物学家着了迷,而在中国则是尚未开发的领域,等待着人们去努力发现。

参考文献

- 1 Vittadini C. Folicis Rusconi, Wilano, 1831
- 2 Fischer E. Die Natual Pflanz, 5b, 1938, 8: 1~42
- 3 Malencon M C. Rev Mycol Memoirs Hors ser. 1938, 1: 1~92
- 4 Gilkey H M. N Am Flora. 1954, 2: 1~36
- 5 Trappe J M. Mycotaxon. 1978, 9: 297~340
- 6 Liu B. China. Acta Mycol Sci. 1985, 4: 84~89
- 7 张斌成. 中国食用菌, 1988, 2: 8~10Z
- 8 王云. 第3届全国真菌地衣学术讨论会论文及论文摘要汇编. 北京: 1990. 30~33

(中国科学院微生物研究所余永年教授撰)

**单囊壳菌** *sphaerotheca* 单囊壳菌属子囊菌亚门核菌纲白粉菌目, 为一类专性寄生菌, 广泛分布于世界各地, 引起多种植物, 包括经济植物的白粉病, 是一类重要的植物病原真菌。

1851年, 莱韦莱(J. H. Leveille)首次以蔷薇单囊壳为模式建立了此属。这个属的真菌主要特征是菌丝体表生; 闭囊壳球形, 暗色; 壁细胞较大, 轮廓清晰; 附属丝丝状, 生子闭囊壳的上部或四

周; 子囊壳内含1个子囊; 子囊孢子单胞, 无色; 无性阶段产生串生、无色、单胞的“粉孢型”的分生孢子; 在扫描电子显微镜下观察分生孢子表面光滑, 无纹蚀。

关于单囊壳菌的早期研究主要进行闭囊壳发育方面的探索。1895年, 哈珀(Harper)对律草单囊壳的闭囊壳的形成进行研究, 并首次提出子囊菌的子囊壳是由产囊体和雄器结合而产生的理论。丹吉尔德(Dangeard, 1907)和克劳森(Claussen, 1905~1912)也做了结果类似的研究。以后有关该菌的研究则主要集中在分类方面。这个属内分种主要根据有性阶段的特征, 如菌丝体的质地(厚毡状或地毯状); 菌体寄生部位是否产生异常; 菌体着生位置; 附属丝形状、根数、长度; 子囊果大小; 子囊孢子数目、大小等。无性阶段的特征, 如分生孢子的萌发特征, 只作为属以上分类的依据。Hirata曾对生子17个不同寄主的4种单囊壳菌分生孢子做了萌发试验, 发现其分生孢子的芽管多为短而粗, 分叉角度大的双分叉式芽管。这与白粉菌科的其它属有区别, 但种间无明显差异。寄主种类在(白粉菌)单囊壳的分类中也同样占有重要的地位, 这种区别主要是植物科之间的差异。目前, 全世界已发现58种(变种)单囊壳, 寄生于36种植物上; 其中中国已发现24种, 寄生于18科51属85种植物上(表1)。

表1 世界单囊壳菌及其寄主科名与分布

| 菌名                                         | 寄主科名                                  | 分布          |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| <i>S. alpina</i> f. <i>alpina</i>          | 虎儿草科(Saxifragaceae)                   | 瑞士          |
| <i>S. alpina</i> f. <i>macrospora</i>      | 虎儿草科                                  | 欧洲、亚洲、北美    |
| <i>S. aphanis</i> var. <i>aphanis</i>      | 蔷薇科(Rosaceae)                         | 世界各地        |
| <i>S. aphanis</i> var. <i>hyalina</i>      | 蔷薇科                                   | 欧洲、亚洲、北美    |
| <i>S. aphanis</i> var. <i>physocarpa</i>   | 蔷薇科                                   | 北美          |
| <i>S. astilbicola</i>                      | 虎儿草科                                  | 亚洲          |
| <i>S. astragali</i>                        | 豆科(Leguminosae)                       | 欧洲、亚洲、北美    |
| <i>S. balsaminae</i>                       | 凤仙花科(Balsaminaceae)                   | 欧洲、亚洲       |
| <i>S. callicarpae</i>                      | 马鞭草科(Verbenaceae)                     | 亚洲          |
| <i>S. caricae</i> — <i>papayae</i>         | 番木瓜科(Caricaceae)                      | 日本          |
| <i>S. catalpae</i>                         | 紫葳科(Bignoniaceae)                     | 中国          |
| <i>S. cayratiae</i>                        | 葡萄科(Vitaceae)                         | 中国          |
| <i>S. colloniae</i>                        | 花忍科(Polemoniaceae)                    | 北美          |
| <i>S. crotonis</i>                         | 大戟科(Euphorbiaceae)                    | 印度          |
| <i>S. delphinii</i>                        | 毛茛科(Ranunculaceae)                    | 欧洲、亚洲、北美    |
| <i>S. dipsacearum</i>                      | 川续断科(Dipsacaceae)                     | 欧洲、亚洲       |
| <i>S. drabae</i>                           | 十字花科(Cruciferae)                      | 欧洲、亚洲、北美、冰岛 |
| <i>S. elsholtziae</i>                      | 唇形科(Labiatae)                         | 中国          |
| <i>S. epilobii</i>                         | 柳叶菜科(Onagraceae)                      | 亚洲、北美       |
| <i>S. erodii</i>                           | 牻牛儿苗科(Geraniaceae)                    | 欧洲、中亚       |
| <i>S. euphorbiae</i>                       | 大戟科                                   | 欧洲、中亚       |
| <i>S. euphorbiae</i> — <i>helioscopiae</i> | 大戟科                                   | 亚洲          |
| <i>S. euphorbiae</i> — <i>hirtae</i>       | 大戟科                                   | 亚洲          |
| <i>S. ferruginea</i>                       | 蔷薇科                                   | 欧洲、亚洲、北美    |
| <i>S. fugax</i>                            | 牻牛儿苗科                                 | 欧洲、亚洲、北美    |
| <i>S. fuliginea</i> var. <i>uliginea</i>   | 玄参科(Scrophulariaceae)                 | 欧洲、亚洲、北美    |
| <i>S. fuliginea</i> var. <i>sibirica</i>   | 玄参科                                   | 亚洲          |
| <i>S. fusca</i>                            | 爵床科、紫葳科、桔梗科<br>十字花科、花忍科、玄参科<br>茄科、败酱科 | 世界各地        |
| <i>S. helianthem</i>                       | 半日花科(Cistaceae)                       | 欧洲          |
| <i>S. hibiscicola</i>                      | 锦葵科(Malvaceae)                        | 中国、日本       |
| <i>S. intermedia</i>                       | 马鞭草科                                  | 日本          |
| <i>S. lini</i>                             | 亚麻科(Linaceae)                         | 欧洲、中国       |

(续表)

| 菌名                                                       | 寄主科名                  | 分布         |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|------------|
| <i>S. macularis</i>                                      | 桑科(Moraceae)          | 欧、亚、美洲和南非  |
| <i>S. mallooti</i>                                       | 桔梗科(Campanulaceae)    | 中国         |
| <i>S. melanopyri</i>                                     | 玄参科                   | 中国         |
| <i>S. mors-uvae</i>                                      | 茶藨子科(Grossulariaceae) | 北美、欧洲、中亚   |
| <i>S. mors-uvae</i> var. <i>astil</i><br>- <i>bicola</i> | 虎儿草科                  | 中国         |
| <i>S. niesslii</i>                                       | 蔷薇科                   | 欧洲         |
| <i>S. paeoniae</i>                                       | 毛茛科                   | 中国         |
| <i>S. pannosa</i>                                        | 蔷薇科                   | 世界各地       |
| <i>S. papaveris</i>                                      | 罂粟科(Papaveraceae)     |            |
| <i>S. parietariae</i>                                    | 荨麻科(Urticaceae)       | 亚美尼亚、哈萨克斯坦 |
| <i>S. phaseoli</i>                                       | 豆科                    | 亚洲         |
| <i>S. phytophila</i>                                     | 榆科(Ulmaceae)          | 北美         |
| <i>S. plantaginis</i>                                    | 车前科(Plantaginaceae)   | 欧洲、亚洲、北美   |
| <i>S. polemonii</i>                                      | 花忍科                   | 欧洲、亚洲      |
| <i>S. pruinosa</i>                                       | 漆树科(Anacardiaceae)    | 北美         |
| <i>S. psudofusca</i>                                     | 桑科                    | 日本         |
| <i>S. rosae</i>                                          | 蔷薇科                   | 中国         |
| <i>S. savulescui</i>                                     | 毛茛科                   | 欧洲         |
| <i>S. shepherdiae</i>                                    | 胡颓子科(Elaeagnaceae)    | 北美         |
| <i>S. sparsa</i>                                         | 萝藦科(Asclepiadaceae)   | 美国、加拿大     |
| <i>S. spiralis</i>                                       | 鼠刺科(Escalloniaceae)   | 阿根廷、巴塔哥尼亚  |
| <i>S. spiraeae</i>                                       | 蔷薇科                   | 欧洲、亚洲、北美   |
| <i>S. stephanandrae</i>                                  | 蔷薇科                   | 日本、中国      |
| <i>S. thalictri</i>                                      | 毛茛科                   | 欧洲、亚洲      |
| <i>S. verbenae</i>                                       | 马鞭草科                  | 世界各地       |
| <i>S. violae</i>                                         | 堇菜科(Violaceae)        | 北美         |

## 参考文献

- 1 Harper R A. Ber Deut Bot Ges., 1895, 13, 475~481
- 2 Claassen P. Boudiera Bot Z., 1905, 63, 1~27
- 3 Dangerd P A. Le Botaniste, 1907, 10, 1~385
- 4 Hirata K. Bull of the Chiba Coll. of Horticulture, 1942, 5, 34~39
- 5 Braun U. Nova Hedwigia, 1987, 89, 69~147
- 6 郑橘水, 余永年(编辑). 《中国真菌志》第一卷: 白粉菌目, 北京: 科学出版社, 1987. 306~338
- 7 袁自清, 王爱群. 真菌学报, 1991, 10(3): 182~184

(新疆八一农学院袁自清副教授撰)

**球壳孢目** sphaeropsidales 为半知菌亚门腔孢纲里的一个大目。菌丝体生于基质内或外生。分生孢子着生于分生孢子器里; 分生孢子器单生、聚生或生于真子座或假子座上, 表生、半埋生或埋生; 球形、孟形、烧瓶形、盾形或半球形; 顶部无乳突或有乳突, 或有长喙, 有孔口或无, 孔口多呈圆形或纵长裂口, 或开口很大呈杯状; 器壁由真菌的假薄壁组织组成, 黑色、褐色, 少数呈鲜明颜色, 膜质、肉质、蜡质、革质、软骨质或炭质; 单腔或多腔, 单孔口或多孔口, 或多腔共有一个孔口; 器壁外有时生暗色刚毛; 器内壁产生生长或短的、分支或不分支的分生孢子梗; 产孢细胞有全壁体生式、全壁芽生式或内壁芽生式; 分生孢子是干孢子或粘孢子。

1873年, 意大利萨卡多(P. A. Saccardo)将半知菌里球壳菌分属于叶点霉亚目和球壳孢亚目。1880年, 萨卡多根据产果类型将形成分生孢子器的归入球壳孢亚目, 将形成分生孢子盘的归入黑盘孢亚目。1884年, 在萨卡多的《真菌总汇》第3卷里将球壳孢

亚目下分4个科: 球壳孢科、鲜壳孢科、半壳孢科和裂壳孢科。1899年, 在该书第14卷里将半知菌纲的被果菌类下也分4个科(同上)。1910年, 波泰尼亚(A. Potebnia)在半知菌亚门里根据子实体的结构划分为5群, 其中球壳孢真菌里形成完整分生孢子器的属放入球壳孢目; 将不完整分生孢子器的属放入拟球壳孢目。1919年, 英国真菌学家格罗夫(W. B. Grove)采用腔孢纲一词, 包括黑分生孢子生于腔室里的无性型真菌。1935年, 格罗夫在半知菌亚门里分丝孢纲和腔孢纲两个纲, 在后者纲里包括黑盘孢目和球壳孢目。1971年, 安斯沃思(G. C. Ainsworth)等编著的《真菌辞典》第六版里, 将球壳孢目分4个科, 750属, 6 000种。1973年, 安斯沃思等编著的《真菌》4A卷里将腔孢纲下又分球壳孢目和黑盘孢目, 而球壳孢目里不分科。1980年, 英国萨顿(B. C. Sutton)在《腔孢纲》一书里根据产孢细胞类型, 在半知菌亚门下划分两个纲, 菌丝型半知菌纲和芽殖型半知菌纲。前者又分2个亚纲, 第1个亚纲是外生菌丝亚纲, 下分菌丝目; 第2个亚纲是内生菌丝亚纲, 下分内生菌丝目。后者也分2个亚纲, 第1个亚纲是外生芽殖亚纲, 其下有一个芽殖目; 第2个亚纲是内生芽殖亚纲, 其下有2个目: 瓶梗目和孔出目, 各目里又分亚目, 亚目下不分科。1983年, 英国霍克斯维思(D. L. Hawksworth)等在《真菌辞典》第7版里将腔孢纲分为3个目: 黑盘孢目、球壳孢目、盾壳孢目, 其下不再分科。属的划分主要根据分生孢子器特征, 产孢细胞类型, 孔口开裂方式, 分生孢子形状、颜色及有无隔膜等性状。中国已报导球壳孢目中有71个属, 1 212个种。

近年来对半知菌分类有3种学术观点, 一是以分生孢子生成方式为基础的, 以萨顿(1980年)系统为代表; 二是从全型真菌概念出发, 即从有性阶段和无性时期的整体考虑来建立分类系统, 以卢丘(1979年)(E. S. Luttrell)系统为代表; 三是在传统分类系



统基础上,吸收关于分生孢子和产孢细胞生成类型的新认识形成的分类系统,以安斯沃思——霍克斯维思为代表。球壳孢目真菌的产孢细胞着生于分生孢子器里,形状小又多为单细胞,远不如丝孢纲真菌的产孢细胞的产孢方式易于识别。在同一种里甚至在一个分生孢子器里常有不同形状的产孢细胞,即便如此,分生孢子的产生方式仍是分类的重要依据之一。

球壳孢目真菌多数仅见有无性繁殖的分生孢子阶段,目前已经发现的少数有性阶段孢子均是子囊菌。有的学者提出应从有性和无性阶段的全体上,即从全型真菌出发来认识和描述这些真菌。从目前已知的球壳孢目真菌的有性型来看,其有性阶段的子囊菌分散在核菌纲、腔菌纲和盘菌纲里,多数是属于球壳目和座囊菌目里的,有的无性属形态一致但其有性型却分别属于不同的子囊菌属;也有相反情况,即在同一个子囊菌属里,其无性属却分别属于形态差异很大的不同的无性属真菌,此外,在一些半知菌里包括球壳孢目真菌里,可能有永远丧失产生有性阶段孢子能力的类群。

今后随着研究技术手段的改进,如显微缩时摄影技术、电镜和冻蚀技术、分子生物和遗传工程新技术的应用,将会促进球壳孢目真菌的分生孢子和产孢细胞形成方式和结构和有性阶段的诱发形成等项研究工作的进展。

球壳孢目真菌里多数种是农作物、林木、牧草、观赏植物和杂草的重要病原菌,引起植物上发生叶斑、枝枯、溃疡、烂皮和果腐等侵染性疾病,有时为害相当严重,造成减产甚至绝收。重要的属有:壳二孢,盾壳霉属,壳囊孢属,色二孢属,大茎点霉属,壳孢属,叶斑菌属,茶点霉属,拟茎点霉属,叶点霉属,壳针孢属等。此外,在球壳孢目真菌里有少数种是其他真菌的重寄生菌,如白粉寄生菌属真菌重寄生于白粉菌目真菌上,锈寄生菌属真菌重寄生于各种植物寄主上的锈菌目真菌上;微小盾壳霉是核盘菌属真菌的重寄生菌。上述各重寄生菌均分布于世界各地,有开发研究成为生物防治农作物病害的生防菌剂的广阔前景。

参考文献

- 1 Saccardo P A. Sylloge Fungorum. 1884. 14. 1899. 3
- 2 Ainsworth G C. Dictionary of the fungi CMI Kew Surrey
- 3 Ainsworth G C. et al. The Fungi. 1973. 4
- 4 戴芒阔. 中国真菌总汇. 北京: 科学出版社, 1979. 818~1102
- 5 Sutton B C. 1974. 4 The Coelomycetes. England; CMI, Kew Surrey, 1980
- 6 Hawksworth D L. et al. Dictionary of the fungi, CMI, Kew Surrey, 1983

(沈阳农业大学白金铠教授)

**镰孢霉** fusarium 镰孢霉中的一些种类是重要的植物病原菌,可导致水稻、棉花、甘蔗、香蕉等发生病害,而且还可污染食品和饲料等,甚至产生毒素,引起人及动物中毒和死亡;也有些种类能寄生在有害昆虫上成为杀灭害虫的天敌;有的种类可生产真菌蛋白等有用代谢物。

16世纪,墨西哥土著居民印第安人首次发现了由串珠镰孢引起的玉米穗腐烂。林克(Link)1809年讨论了镰孢属的第一个种即粉红镰孢。1840~1841年,马蒂卡斯(Marticus)发现马铃薯腐烂病,与茄病镰孢有关。后来在皮齐戈尼(Pizzigoni)等的共同努力下,镰孢霉能使贮藏物腐烂的概念才被建立。1892年,阿特金森(Atkinson)等证明尖镰孢是使棉花发生枯萎病的病原菌。此后不久,从不同的植物寄主中也分离到这种病原菌。1890年,美国内布拉斯加的马、牛、猪在食用被串珠镰孢侵染的粮食后引起中毒。1904年,谢尔登(Sheldon)证实中毒是由子串珠镰孢产生的毒素所致。接着人们又发现镰孢霉可以感染人的眼睛、鼻子等,对人造成直接危害。

镰孢霉的分生孢子梗单生或集成成分生孢子座,分子孢子座为垫状的菌丝结构。分生孢子有两种类型,即大型分生孢子和小型分生孢子。大型分生孢子镰刀形,多细胞。1978年,芒福德

(Mumford)等证明在细胞隔膜中央有一个孔,并认为这些孔是子囊菌的典型特征。小型分生孢子卵圆形或椭圆形,多数为单细胞,在菌丝末端或中间部分可形成圆形或椭圆形的厚垣孢子。1981年,西顿(Siton)等发现厚垣孢子在土壤中可长期存活。镰孢霉的有性阶段属于子囊菌纲的赤霉属、蠕孢赤壳属、丛赤壳属和菌寄生菌属。在20世纪70年代,垣镰孢霉的分类是以孢子着生方式、大孢子形态及有无厚垣孢子等特征为基础的。70年代以后,布斯(Booth)等将产孢细胞作为分类的重要特征,对镰孢霉的分类性状有了更深入的了解。80年代以后,纳尔逊(Nelson)等采用天然物培养方法,对性状进行综合考虑,并提出每个种最重要的区别特征,从而使鉴定方法更为实用。

镰孢霉属大约有40个种,其中有一半以上为绿色植物的寄生菌。1971年,布斯把这些致病菌划分为3个主要的类群:使植物枯萎的有尖镰孢霉;侵袭禾本科植物的有串珠镰孢、禾本科镰孢、燕麦镰孢、黄色镰孢;引起根腐的主要是茄病镰孢。由于这些菌的67%左右都能产生厚垣孢子,故其存活力特别强,致使一些特效杀菌剂对它们无效。因此,要防治由镰孢所引起的植物病害,关键是消灭其厚垣孢子。布雷(Bourrent)等研究了营养、湿度等因素对厚垣孢子形成的影响,结果表明用直接的方法难以防治,实行轮作和改良土壤,最为有效。1984年,德赖斯代尔(Drysdale)等。有些毒素对寄主的作用途径已经清楚,如萎蔫酸通过脱水破坏细胞膜、整合金属离子降低呼吸速率;恩镰孢菌素为一种氧化磷酸化的解偶联剂(亨特 Hunter, 1967);亮红茶抑制TCA循环(克恩 Kern, 1972);抑制谷氨酰胺合成酶活性(鲁斯 Roos, 1977);番茄萎蔫素使植物过度蒸发引起干燥整合金属离子形成不稳定的螯合物;玉米赤霉烯酮可阻断H<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>的运输、抑制膜ATP酶的活性(维亚内 Vianello, 1978)。

1891年,沃罗宁(Woronin)发现俄罗斯东部和瑞典发生的人食用被镰孢霉侵染的粮食及用它制成的面包引起的头痛、呕吐、视觉失调等病症。此类情况至今世界各地时有发生。1970年,科尼希(Konishi)等报道马食用被污染的饲料后产生眩晕、呼吸困难等症状,导致10%~15%的马死亡。1984年,米罗沙(Mirocha)提出镰刀菌毒素病有以下3类:(1)食物中毒性白细胞缺乏症;(2)雌性发情综合症(由玉米赤霉烯酮引起);(3)拒食(由脱氧雪腐镰刀菌烯醇引起)。镰刀菌毒素的研究历经近1个世纪,对不少毒素除了解其所引起的中毒症状外,对其物理化学性质也搞得比较清楚。1971年,梯尔纳(Turner)鉴定了对人和动物有潜在毒性的镰刀菌素200种,发现这些毒素在一般情况下致病率是很低的。1984年,米罗沙提出确定镰刀菌素对动物的毒性应以致病动物的血、尿、粪便作分析对象,并强调毒素致病的机理是复杂的,不是通过单一的毒素起作用,有可能在生物混合物中伴随着其他的真菌毒素。另外,一种镰刀霉往往会产生一组毒素。1980年,斯温松(Swanson)发现生长在水稻上的三隔镰孢产生10种T-2镰刀菌毒素。

表1 12,13-环氧单端孢霉烯对埃及伊蚊的杀幼虫活性

| 名称         | 浓度 μg/ml | 致死率(%) |    |    |      |
|------------|----------|--------|----|----|------|
|            |          | 1      | 2  | 3  | (天数) |
| 二醋酸蕈草镰刀菌烯醇 | 25       | 10     | 19 | 49 |      |
| 乙酰蛇形菌素     | 25       | 19     | 24 | 26 |      |
| T-2毒素      | 25       | 27     | 67 | 81 |      |
| 二醋酸雪腐镰刀菌烯醇 | 25       | 5      | 8  | 22 |      |
| 致呕毒素       | 100      | 3      | 4  | 4  |      |
| 胺甲萜        | 1        | 54     | 67 | 73 |      |

镰孢霉通常分为12~16个组,其中有10个组可以寄生在昆虫上。1984年,克莱多(Claydon)等提出15种镰孢霉中有9种可致病,它们是茄病镰孢、半裸镰孢、蠕形镰孢、蠕状镰孢、砖红镰孢、串珠镰孢、尖镰孢、木贼镰孢、异孢镰孢,每种致病菌只有一种寄主。有些昆虫致病镰孢霉能产生单端孢霉烯族化合物。1975年,

格罗夫(Grove)等对这类化合物的杀虫活性作了分析,结果如上表1。

研究昆虫致病镰刀菌的目的在于合成新的杀虫剂。1979年,克莱多等对茄病镰孢、蝶形镰孢,1980年,格罗夫等对砖红镰孢3种致病菌的杀虫活性、毒素成分及其结构均进行了比较详细的研究。1984年,莫斯(Moss)等对单端孢霉烯族化合物、玉米赤霉烯酮的合成途径也进行了研究报道。

镰孢霉产生的对人类有用的代谢物颇多,有的已经成为商品或正在研制中,有些则尚待进一步开发,70年代初,苏罗木斯(Solomous)等接受了用真菌发酵生产食物蛋白的研究课题,通过大量的实验他们发现镰孢霉为最优者,并以禾本科镰孢霉为培养菌株;通过十年的毒性试验,证明这一菌株对人和动物是无毒的,也不危害小麦和玉米苗,且有很高的营养价值。

赤霉素(920)是人们熟知的植物生长激素。1978年,麦克迈利亚(Macmillan)等搞清了它的生物合成途径。1980年,诺布塔克(Nobutaka)等研究了来自真菌和植物的57种赤霉素结构,它主要被用在园艺方面,特别是用它控制水果早落,提高无核葡萄的产量和质量以及调节麦苗的伸长和均匀性。但是,赤霉素作为一种添加剂后,布洛克(Bullock)等认为它今后的生产趋势将减弱,现在它每年在世界市场上的数量不超过20t,而且有些国家(如英国等)已停止生产赤霉素。原因是在赤霉素的工业发酵过程中,菌体首先合成的是别卡韦林(Bikaverin),必须添加甘氨酸后才能加速赤霉素的合成,而别卡韦林的毒性太大,不能作为一种可食用的代谢物。

镰孢霉的分类系统目前还比较混乱,这对它的研究与开发应用造成了不少困难,因此分类方面的研究工作仍需加强。随着分子生物学的发展,对镰孢霉致病机理的研究以及有重大经济意义的代谢产物的开发和研制都将进一步深入。

参考文献

- Grove J F, Hosken M. *Biochemical Pharmacology*. 1975, 24:959~962
- Mumford P M, Pappelis A. *J Mycopathologia*. 1978, 64:63~64
- Sitton J W, Cook R. *J Phytopathology*. 1981, 71:85~90
- C Anderson, G L Solomons, in *The Applied Mycology of Fusarium* (edited by M O Moss, J E Smith), Cambridge: Cambridge University Press. 1984. 231~250
- C J Mirocha, in *The Applied Mycology of Fusarium* (edited by M. O. Moss and J. E. Smith), Cambridge: Cambridge University Press. 1984. 141~155
- Johad Bulock, in *The Applied Mycology of Fusarium* (edited by M. O. Moss J. E. Smith), Cambridge: Cambridge University Press. 1984. 215~229
- N Claydon and J F Grove, in *The Applied Mycology of Fusarium* (edited by M. O. Moss and J. E. Smith), Cambridge: Cambridge University Press. 1984. 117~128
- R B Drysdale, in *The Applied Mycology Fusarium* (edited by M. O. Moss and J. E. Smith), Cambridge: Cambridge University Press. 1984. 95~105

(华东师范大学黄秀琴撰,吴治身审)

水生丝孢菌 aquatic hyphomycetes

生活在淡水中的丝孢菌类,菌丝体发达,有性型不详。由分生孢子梗产生分生孢子进行繁殖。分生孢子具有适应水环境的形态特征。它在水环境中的物质转化及食物链中起极为重要的作用。

1894年已发现数种水生丝孢菌,而最先作大规模研究的是英国学者英戈尔德(C. T. Ingold),他于1940年观察到大量飘浮在水面的真菌分生孢子后找到这些孢子的真菌,1942年第一次分离出16种水生丝孢菌,因没有得到有性阶段而放在半细菌亚门。由此引起世界范围内真菌学家的极大兴趣和广泛研究。目前,

全世界已报道约80属、200种水生丝孢菌。为纪念英戈尔德的贡献,水生丝孢菌又称 *Ingoldian* 真菌。1986年,杨发蓉等报道的刚毛四枝孢为中国首例报道。余永年等进行了一系列的研究,目前中国已发现25属、50余种水生丝孢菌。

水生丝孢菌菌丝体分支、分隔,无色透明。分生孢子可分为分枝状和“S型”的两大类,前者更为普遍,后者孢子不分支。分生孢子的形态多样化,为分类提供了依据。但有些种间孢子十分相似,必须依靠分生孢子的发育才能准确分类。1942年,英戈尔德将分生孢子分为瓶梗型的和粉孢型的。1971年,肯德里克(B. Kendrick)认为粉孢子实际上是一种末端菌丝型孢子。一般认为孢子包括瓶梗孢子和菌丝孢子两大类。但有的种依然不好归类,还有的种可产生两种孢子,但瓶梗孢子是小型的,不能萌发生菌丝体,可能与性过程有关。水生丝孢菌绝大多数有性阶段未知,仅有15种发现了有性阶段,大多属于子囊菌,只有个别是担孢子。

表1 已报道的水生丝孢菌的完全阶段

| 无性型    | 有性型                             | 报告人                |
|--------|---------------------------------|--------------------|
| 大放线孢   | <i>Miladina lechithima</i>      | Descals 等(1978)    |
| 粗水线孢   | 软盘菌                             | Webster(1961)      |
| 隐水线孢   | 蜡盘菌                             | Webster 等(1979)    |
| 长水线孢   | 透明黑色团壳                          | Willoughby 等(1973) |
| 四节枝孢   | 四枝层杯菌                           | Abdullah 等(1981)   |
| 水生拟珊瑚孢 | 透孢黑团壳                           | Webster 等(1979)    |
| 泡拟珊瑚孢  | <i>Corollospora pulchella</i>   | Shearer 等(1971)    |
| 水生枣核孢  | 水生透孢团壳                          | Webster(1965)      |
| 叶生二型孢  | 叶生层杯菌                           | Abdullah 等(1981)   |
| 帚状鞭孢   | 帚状丛赤壳                           | Ranzoni(1956)      |
| 大多节孢   | 非洲层杯菌                           | Descals 等(1984)    |
| 奴地壳钉孢  | 奴地丛赤壳                           | Webster(1959)      |
| 细帚带孢   | <i>Leptosporomyces galzinii</i> | Nawawi 等(1977)     |
| 明丽三枝孢  | 明丽层杯菌                           | Abdullah 等(1981)   |
| 变孢霉属种  | 变孢层杯菌                           | Tubak(1966)        |

水生丝孢菌在水中的腐生范围很广,但主要是在双子叶植物的残体上生活。其营养要求已作系统研究,与一般真菌相似,碳源研究广泛;1963年桑顿(D. R. Thornton)对5种水生丝孢菌利用木糖、葡萄糖、果糖、蔗糖、麦芽糖、纤维二糖和淀粉的研究资料表明,这些碳源均能被利用,以葡萄糖最佳。1976年,萨泊克洛甫(K. Suberkropp)等首次证明水生丝孢菌释放果胶酶和纤维素酶。1977年,莱特利(E. Leithley)等证明奴地壳钉孢纤维酶、木质素酶和甘露聚糖酶的存在。1981年,琼斯(E. Jones)证明许多水生丝孢菌可以利用天然纤维素。1981年,萨泊克洛甫发现水生拟珊瑚孢5种水生丝孢菌均分泌胞外多糖酶,使羧甲基纤维素、木聚糖以及多聚半乳糖醛酸释放出蔗糖。1985年,查米尔(A. C. Chamier)总结水生丝孢菌分解多聚物的胞外酶的研究资料,认为水生丝孢菌可以产生果胶酶、木质素酶、纤维素酶、半纤维素酶、地衣多糖酶等,完全证明水生丝孢菌可以利用纤维素等多糖作为唯一碳源。在人工培养基上水生丝孢菌可以利用  $\text{NH}_4^+$  或  $\text{NO}_3^-$  作为唯一氮源,也能利用有机氮如氨基酸作为唯一氮源。水生丝孢菌生长必需矿物质,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  尤其重要,常是胞外酶的激活剂或抑制剂。生长最适  $\text{H}^+$  浓度为  $10^{-7}$ ~ $10^{-5}$  mol/L。最适温度为15~20℃,但在自然条件下可以促进该菌生长在较宽的温度范围内。通气量增加时菌丝产量随之增加,硫胺素等维生素可以促进其生长。在固体培养基上水生丝孢菌不产生分生孢子,但在水中很易产生孢子。1970年,米拉(K. Minra)等设计一种固体培养基可以提高产孢率。1964年,尼尔森(S. Nilsson)指出水生丝孢菌不一定在水中才能产生孢子。1972年,韦伯斯特(J. Webster)等发现水介质振动刺激水生丝孢菌产孢,很好地解释了自然条件下流动的水域水生丝孢菌要比静止的水域更丰富。温度、 $\text{H}^+$  浓度值以及紫外光对产孢也有影响,  $\text{Cd}^{2+}$  浓度大于100mg/L 时抑制产

孢。水生丝孢菌的弱寄生性也有报道。

水生丝孢菌发生有季节性变化。秋季是大发生季节,高峰期从8月至翌年2月。1973年,伊克巴尔(S. H. Iqbal)等的实验资料支持这一结论。温度是决定不同种类水生丝孢菌发生的一个重要因素。1984年,萨泊克洛甫等指出夏季基质少水生丝孢菌种类也少,但喜温种多在此时出现,秋冬季种类多,大多数是喜冷种类。水生丝孢菌在水中基质上发生有不同顺序。1967年,马克阿瑟(R. H. MarcArther)将槭树叶放在溪水中,发现起初三枝孢菌比奴地疣钉孢菌多得多,且发生极快,但3个月后消失也很快,此时奴地疣钉孢菌则大发生。这可能和营养特征有关。如粪生真菌一样,有一定的规律性,最初生长的是毛霉,继而为子囊菌,最后多为担子菌,水生丝孢菌在生态中作用的研究较为活跃。其在水环境的物质转化以及食物链中起着重要的作用,甚至是中心作用,它对树叶早期的降解比其它类群的真菌或细菌更为重要。在低氮、低温的水环境中,水生丝孢菌可以很快取代其它微生物。当水中树叶降解速度达到最大时刻,树叶上的总ATP含量和水生丝孢菌的产孢菌还吸收水中的营养,对以后的细菌或原生动物的生活更为有利。水生丝孢菌的传播是目前困扰菌物学家的一个问题。在同一水域中,可以借助分生孢子随水流传播,但是不同的水域常常有相同的种类。1973年,伊克巴尔等证明水生丝孢菌的分生孢子极易被水泡捕获,有人在一个天然水泡中观察到27种水生丝孢菌孢子。1975年,班多尼(R. J. Bandoni)认为孢子是由水泡随风传播的。但有人对此持怀疑态度,认为水生丝孢菌的分生孢子细胞壁很薄,不能在空气中长时间经受太阳的紫外线照射及干燥条件。1981年韦伯斯特认为水生丝孢菌是利用有性阶段在陆地上传播的。但是到目前为止,大多数水生丝孢菌的有性阶段未发现,这种推测似乎不够准确。还有人设想水鸟或昆虫传播水生丝孢菌的孢子,这个问题尚待研究。已发现全世界约30种水生丝孢菌存在于陆地环境,但仍为少数。

全世界还有很多区域尚未进行水生丝孢菌的采集和观察,还有大量的种类未被发现,因此分类工作仍将有很大的发展前景。水生丝孢菌的生理生化是近来研究中的一个活跃领域,进一步的工作将是系统化和深入化,推动其向分子水平发展。在此过程中还有新的多糖酶类的发现,同时胞外酶应用的探索也将是一个有意义的课题。水生丝孢菌的有性阶段虽很少被发现,但最近研究较多,并有人摸索出一些诱发其产生有性阶段的方法。如果从现代遗传学的方法着手探索其有性过程和诱发因素,不但对其本身有重大价值,而且对整个半知菌有性阶段的探讨也会有深远的意义。由于水生丝孢菌不少种类生活于洁净的环境中,对水质要求严格,这种特性也许可以使之作为环境监测的指示菌,但这还是一片有待开发的领域。

参考文献

- 1 Ingold C T, Amer J Bot. 1979,66:218~226
- 2 Yu YN, Li JL, Yu JQ. Acta Mycol Sin. 1988,7:139~148
- 3 朱旭东,刘晓娟,余永年. 真菌学报,1991,10:1~2
- 4 刘晓娟,朱旭东,余永年. 真菌学报,1992,11:111~118

(安徽省农科院郭书普撰)

新抗生素的研究

20世纪40~50年代发现许多临床上具有重要价值的天然抗生素,使不少传染性疾病得以控制。进入60年代之后,随着6-APA和7-ACA的大量制备,半合成青霉素和半合成头孢菌素得以蓬勃发展;这些半合成β-内酰胺类抗生素,不仅解决了耐药菌问题,而且具有广谱、低毒、高效等特点。80年代开始,全合成的吡嗪酸类抗菌药又迅速发展起来;这类抗菌药具有半合成青霉素和头孢菌素的优点,而且生产成本较低。因此,可以预测半合成β-内酰胺类抗生素和全合成的吡嗪酸类药物的兴盛时期,将会持续一段时间。

至今发现的微生物产生的抗生素已达8 000种左右,得到临床应用的有100多种。但是,80年代以来,临床上新增加的具有某些特点的天然新抗生素的数量只占新增加的化学合成新抗生素

的20%左右。因此,有些学者对从微生物中筛选新抗生素的前途产生了怀疑。然而,β-内酰胺类半合成抗生素和吡嗪酸类药物只能对付细菌性疾病;而严重威胁人类健康的肿瘤、病毒性病症和真菌性病征以及生理性疾病(血栓、糖尿病等)仍亟需有效的新药进行治疗。

80年代以来,新抗生素的筛选研究仍然取得飞跃的进展,新抗生素的数量与日俱增。据统计,1980年以后,全世界每年发现的新抗生素为369种,与60年代和70年代相比,速度加快了一倍。1980~1988年发现的新抗生素占自抗生素问世以来发现新抗生素总数的50%。在新抗生素的开发利用方面,不少是先发现新的母核化合物,然后经过化学改造或制备成合剂而用于临床,如由硫霉素到亚胺硫霉素。新抗生素研究有下述4个特点:(1)重视新筛选方法和模型的设计。“没有新筛选模型就没有新抗生素”的指导思想,已被各国研究人员广泛接受;过去的机遇和经验式筛选方法已逐渐被理性筛选或定靶筛选所代替;根据作用机制、耐药机制和新的生物技术而建立起来的多种方法已广泛得到应用。比较有效的模型有抗叶酸代谢模型;细菌D-丙氨酸二肽合成抑制剂方法;天然无活性链霉菌活化,调动沉默基因的模型。用这种方法已筛选到具有抗细菌和抗病毒活性的变活霉素;用抑制胆固醇合成限速酶(HMG-CoA还原酶)和血管紧张素转化酶(ACE)筛选抗高血压抗生素,得到重要的降血脂药物 Lovastatin;还有儿茶酚-O-甲基转移酶抑制剂等多种酶抑制剂的模型;另外,根据化学除草剂的作用机制建立了从微生物产物中筛选除草剂的方法,获得具有重要经济价值的 Bialaphos。在用松树线虫筛选抗寄生虫抗生素的研究中,得到具有开发前途的勤工俭学飞行霉素;在应用现代生物技术方面,英国 Hopwood 等用 DNA 重组技术获得世界上第1个新抗生素 Mederthodin A;中国学者用酶工程和生物工程的方法获得了丙酰螺霉素和抗肿瘤抗生素链黴菌酮。(2)扩大微生物产物的研究范围。近些年来,抗细菌抗生素的研究主要是针对耐药菌和条件致病菌;而对于抗肿瘤、抗病毒和抗深部真菌感染的抗生素的研究也逐渐受到重视;尤其是从微生物中筛选研究抗寄生虫剂、免疫调节剂、免疫抑制剂、酶抑制剂等生理活性物质,扩大了微生物代谢产物的应用范围。据报道,目前发现的阐明结构的酶抑制剂已有60多种,其中包括 ACE(用于高血压)、糖苷酶(用于控制体重、糖尿病和血脂蛋白过多症)、蛋白酶(用于肿瘤和肺气肿)、脯氨酸-4-羟化酶(用于纤维化)和磷脂酶(用于急性胰腺炎)等抑制剂。另外,聚醚类抗生素对于防治鸡瘟、增加肉蛋产量方面的经济效益甚为可观,因此,它们的发展也很迅速,潜力很大。(3)重视菌种开源工作。世界各国普遍注意对链霉菌属以外的稀有放线菌(小单孢菌、小双孢菌、小多孢菌、诺卡氏菌、游动放线菌、马杜拉放线菌等)和海洋微生物的研究与开发;作为抗生素产生菌的细菌和真菌,过去研究得尚不深入,现在越来越引起人们的关注。随着开源工作的深入以及新技术在微生物研究中的应用,人们对微生物产物的多样性有了新的认识。(4)化学分离和鉴别手段的改进。目前新抗生素的分离和精制普遍使用中压和高压层析、旋转薄层、分子筛和超滤膜等技术,过去筛选研究中容易漏掉的小组分或不稳定组分现在可以“捕捉”了。在鉴别和结构分析中,各种光谱技术起到决定性的作用;因为对抗生素研究建立了电子计算机检索系统,从而大大加快了新抗生素的研究进程。中国于1985年也建立了自己的新抗生素资料计算机检索系统。

新抗生素研究的突出进展,可举例如下:(1)超光谱抗生素硫霉素(Thienamycin)。迄今发现的抗生素中,硫霉素的抗菌效力最强,抗菌谱最广;虽然它是β-内酰胺类抗生素,但它不是青霉素或头孢素类的成员,而是一个碳青霉烯。硫霉素对厌氧菌和需氧菌、革兰氏阳性菌和阴性菌(包括绿脓杆菌)均有很强的活性。除了广谱和高活性之外,硫霉素还能耐质粒和染色体的β-内酰胺酶,而且对青霉素、头孢素和氨基糖苷类抗生素的耐药菌仍然具有活性。(2)新型降血脂药 Lovastatin。美国 Merck 公司的研究人员从微生物代谢产物中发现一种新降血脂药物 Lovastatin。

由于迄今为止所用的降胆固醇药都不够理想,因此,Lovastatin的出现较引人注目。它是羟甲基戊二酰辅酶A(HMG-CoA)还原酶抑制剂,其作用机制的研究表明,HMG-CoA的还原为胆固醇合成中的限速反应,该反应是被HMG-CoA还原酶催化的。Lovastatin通过抑制HMG-CoA还原酶而抑制胆固醇的合成;此外,细胞中胆固醇浓度的降低,能增强LDL受体的合成;受体数量的增加,能加速血液中LDL的清除,这种作用可以大大减小动脉硬化和冠心病形成的危险。(3)新型免疫抑制剂环孢素A。瑞士Sandoz公司从不完全真菌的产物中分离得到新一代免疫抑制剂环孢素A,该抗生素1983年首先在德国投入生产。它是一种环肽抗生素。由于它是符合第3代免疫抑制剂要求的第1个药物,因此在免疫抑制的研究领域倍受注目。环孢素A对淋巴细胞有选择性作用,主要作用于T辅助细胞和T效应细胞,从而在器官移植中阻断有关类型的细胞毒副反应;它对体液免疫和细胞介导免疫呈现出免疫抑制作用;与现在应用的免疫抑制剂相比,其突出的优点是对骨髓无抑制作用,这在骨髓移植方面有重要意义。(4)抗寄生虫抗生素Avermectin。农业存在的突出问题之一是蠕虫引起的牲畜传染病。为了对付这种疾病,过去进行了大量的化学合成药物的筛选;80年代初期也开始微生物药物的筛选。美国Merck公司和日本北里所的研究人员从一株链霉菌的发酵液中发现一组无毒代谢产物,被命名为Avermectins。这个混合物具有抗蠕虫的活性,能够杀死小鼠体内的线虫,但对细菌和真菌没有活性。Ivermectin对于以一只黑蝇为媒介的人盘尾丝虫病(又称河盲症)有特效;它可以干扰丝状线虫传播到人群,目前,世界上大约有2 000~4 000万人感染这种疾病(主要集中在非洲)。为了征服这种寄生虫病,1985年Merck公司宣布,免费为这种病人提供Ivermectin。(5)Bialphos类除草剂长期的动物实验已证明,目前广泛应用的两个合成除草剂(Alachlor和Atrazine)有致癌作用。日本明治制果公司从一株吸水链霉菌产物中分离得到Bialphos的类似物Phosalacme,它们均有抗细菌和真菌的活性以及除草剂作用。

随着已知抗生素数量的逐年增加,寻找新抗生素的难度也会越来越大;特别是发现临床有某些特点的、优于现有抗生素的新抗生素就更加困难。但是,80年代天然新抗生素研究的飞速发展表明,从微生物中筛选新药潜力仍然很大,新的筛选方法和模型的设计以及新技术特别是现代生物技术在微生物研究中的应用,将会大大增加获得新抗生素的可能性。

(中国医学科学院医药生物技术研究所吴剑波研究员撰)

## 食品真菌学

food mycology

食品真菌学是一门新兴学科,是食品微生物学的一个分支。从广义来讲,食品真菌学是研究真菌与食品之间(包括有益和有害两方面的)相互关系的科学。有的学者认为真菌有益的作用即真菌在食品生产中的利用应纳入食品发酵学的范畴,故从狭义来讲食品真菌学主要研究真菌与食品之间在自然条件下发生的相互作用而导致的食品污染、腐败变质以及真菌毒素的产生等。这一学科的基础理论和检测方法是食品细菌学以及真菌分类学、植物病理学等相关学科的影响下发展起来的,已成为食品企业管理卫生质量的理论指导,也是卫生部门进行食品卫生监督的科学依据。

有关真菌性食品腐败、中毒及预防的理论与实践已有数百年历史,但作为一门学科是第二次世界大战之后逐渐发展起来的,特别是20世纪60年代黄曲霉毒素的发现促进了这一学科的形成。1979年,彼查得(L. R. Beuchat)所著《食品和饮料真菌学》一书是这一学科的第一部专著。此后,世界各国的微生物学家对食源性真菌的分类、食品真菌生态学、真菌性食品腐败的特性及食品真菌检验的方法学等主题进行了广泛而深入的研究。

自然界中真菌的种类繁多,1983年版《真菌词典》收录的约有6 000属6 5000种,而与食品有关的或在食品中有重要意义的食源性真菌仅占其中很少一部分。1981年,萨姆森(R. A. Samson)介绍的食源性真菌有40属100种;1985年,皮特(J. L.

Pitt)和霍金(A. D. Hocking)描述了50属200种。但这些菌在分类学结构中分布相当广泛。许多学者认为食源性真菌的分类方法既要便于一般微生物检验人员掌握,又要尽可能准确鉴定到种,以有利于查找污染源,及时发现潜在的食品腐败菌及产毒菌。为此,一些学者对传统的真菌分类方法加以研究改进,使之形成独立的食源性真菌的分类系统。萨姆森及皮特分别提出的食源性真菌鉴定程序及方法已被各国真菌工作者广泛采用。

食源性真菌中最重要的菌属有曲霉、青霉和镰刀菌3个属,其中包括许多食品腐败菌及产毒菌。真菌毒素学的迅速发展促进了产毒菌的分类研究进展。20世纪60年代到70年代研究的焦点主要集中于黄曲霉寄生曲霉和其它产毒曲霉。由于青霉、镰刀菌的分类系统较为混乱,此两属中产毒菌种的报道常常因鉴定有误而不准确。1981年,弗里斯瓦德(J. C. Frisvold)提出的以青霉的次级代谢产物为依据的分类方法具有较大的分类学价值。1988年,皮特和雷斯特纳(L. Leistner)对青霉属中主要产毒菌做了系统综述。对镰刀菌属及其产毒菌的分类鉴定工作做出较大贡献的是以柏斯(C. Booth)为首由植物病理学、真菌学和真菌毒素学有关专家组成的国际合作小组,他们在进行了大量研究工作基础上分别提出了具有权威性并已广为采用的《镰刀菌分类鉴定图谱》(P. E. Nelson, 1983年)、《镰刀菌实验室指导》(L. W. Burgess, 1988)和《产毒镰刀菌的鉴定及毒素学》(W. F. O. Marasas, 1984)。

有关食品腐败菌的研究主要针对嗜干性真菌、抗热性真菌及抗防腐剂酵母等特殊菌群。1975年,皮特曾把11属44种霉菌和酵母列为嗜干性真菌,此后还陆续发现一些嗜干菌新种。这类菌能在水分活性( $A_w$ )0.35以下条件下生长,多引起干燥、高糖和高盐性食品的腐败。抗热性真菌种类较少,代表性菌种为丝衣霉,主要引起热加工酸性水果制品(果汁、水果罐头)等的腐败变质。1986年,金(A. D. King)曾对其特性、检测方法做了较全面的概述。对抗防腐剂酵母研究较多的是澳大利亚学者皮特等,他们指出拜耳酵母在 $H^+$ 浓度 $1.59 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ ,45°Brix含有800mg/kg的山梨酸或苯甲酸的果汁中仍能存活,是引起果汁变质甚至容器爆炸的最主要菌种,有效的监测方法是采用含醋酸培养基对原料、生产线及产品进行监测。

1989年,威廉姆斯(A. P. William)对食品真菌学的方法学进展做了综述。到目前为止,食品真菌学的常规检验方法仍以菌落计数法及霍华德菌计测法(HMC)为主。然而,许多先进的微生物学技术都可成功地用于真菌学检验,该领域的工作有很大发展前景。目前用于食品真菌学检验的方法主要有4种:(1)培养方法,包括稀释平板法即菌落计数法,是食品原料、加工食品及工艺卫生监测的主要方法。该法的关键是依据食品样品的性质和检验目的选择适宜的计数培养基。1985年,皮特提出的RBC和DRBC培养基已广泛用于粉状的、液体的食品酵母和霉菌计数。两种培养基均含有氧霉素和孟加拉红,后者还加有抗扩散剂-2,6-二氯四硝基苯,对根霉毛霉菌抑制效果最佳。如果主要用于食品酵母的分离计数,则以PDA、MEA等培养基为好。固体的或粒状的食品如谷物、坚果等农产品的监测,多用直接平板法,分离样品内部菌群。此外,还有用于产毒真菌的选择性分离计数培养基。1983年,皮特改进的AFPA培养基可在48h内快速鉴定黄曲霉和寄生曲霉。1983年,弗里斯瓦德提出的PRYS培养基主要用于分离贮藏谷物中产生棕曲霉毒素的纯绿青霉。1985年,皮特推荐的DCPA培养基分离谷物和饲料中镰刀菌及田野真菌如交链孢霉、弯孢霉等效果较好。(2)直接检查法,直接检查霉菌及其成分的方法与菌落计数法的概念不同,此类方法能检测出食品中非活性真菌的残体或代谢产物。HMC法已广泛用于番茄制品及其它水果蔬菜制品的检验,但其精确度差,有一定的局限性。1989年,威廉姆斯介绍两种真菌细胞成分——几丁质和麦角甾醇的化学分析方法,尤其适用于热加工食品污染程度的评价,但两种方法亦各有缺点。自1985年诺特曼(S. Notermans)等采用ELISA方法成功地制备出主要食品霉菌的特异性基因抗体以来,食品真菌

免疫学方法成为最具发展前途的快速检验方法。该法具有所有直接检查法的优点,选择性强,灵敏度高,能检测热加工的及非热加工的食品霉菌及毒素潜在污染水平。(3)真菌代谢指示物的检测:主要有细胞 ATP 含量测定法及电化学仪器监测法。这些方法反映的是细胞的生物量而不单纯是细胞个体数量,从而导致霉菌定量基本概念的改变。因为食品中潜在真菌毒素的产生与可见菌落数常常不相关而是与其代谢物的含量相关,而且微生物代谢物活性与食品腐败速率也密切相关。(4)腐败时间的预测方法:通过在各种储存条件下测量菌落生长速率而建立的数学模型来预测食品腐败情况。

1984年,在美国波士顿召开了首次国际性食品真菌学检验方法学术讨论会,对食品真菌分离计数方法及培养基的标准化问题取得了一致意见。1986年出版的《食品真菌学检验方法》一书(编者金等)收集了会议所讨论的8个主要议题,涉及食品霉菌和酵母检验方法探讨;不同类型培养基的应用;食品中真菌数的意义;真菌生物量检测方法以及食源性真菌的分类等,已成为食品真菌学的重要参考文献之一。

食品真菌学成为一门独立的学科只有很短的时间,尚有许多课题有待深入研究。随着现代生活的发展,食品生产、制造、储存和销售方式都有很大变化,有许多因素导致霉菌性食品腐败增多,迫切需要更为精确、灵敏而快速的检验方法。从基础研究角度来看如何准确测量真菌的生长,包括微生物学方法和化学的方法都将是今后研究的热点。真菌的选择性和鉴别培养基的研究者和细菌学相比寥寥无几,迫切需要开发,因为此类培养基利于对食品中潜在腐败真菌菌种、产毒真菌的快速鉴定,对食品质量的控制具有较大价值。食品真菌快速、简易的分类方法尚不成熟,也是实际工作中所迫切需要的。至于检验方法的标准化,食品中真菌及毒素含量标准的制定,预计今后将取得更大的进展。

参考文献

- 1 PiH J I, Hocking A D. *Fungl and Food Spoilage*. Sydney: Academic Press, 1985. 1~389
- 2 King A D PiH J I, Beuchat L R, et al. (ed.) *Methods for the Mycological Examination of Food*. New York: Plenilm Press, 1986. 1~292
- 3 Beuchat L R (ed.) *Food and Beverage Mycology*. 2nd edn New York: Van Nostrand Reinhold, 1987. 1~504
- 4 Samson R A, Reenen - Hoekstra E S. *Introduction to food - borne fungi*. 3rd edn Baarn, Netherlands: Centraalbureau voor Schimmel - cultures, 1988
- 5 Willams A P J. *Appl Bacteriol. Symposium Supplement*, 1989, 67, 61~67

(北京市卫生防疫站贾珍珍主任检验师撰)

发酵工程 fermentation technology

微生物发酵工程,是利用微生物的特定性状,通过现代化工程技术生产有用物质或直接应用于工业化生产的一种技术体系,是将传统的发酵与现代的 DNA 重组、细胞融合等新技术结合发展起来的现代发酵技术。其内容大体包括具有工业生产价值的菌种选育、最佳培养条件的选择、发酵反应器的设计操作和产物的提取精制。

人类对于有益微生物的利用已有悠久的历史。但是发酵工业的概念通常被认为是从20世纪40年代中期随抗生素工业的兴起而形成的。随后,柠檬酸、氨基酸、甾体激素、酶制剂、核苷酸、多糖、单细胞蛋白、部分维生素以及生物农药等发酵产品相继发展为独立的体系。利用某些微生物群进行工业规模的沼气发酵、含毒工业废水处理以及细菌浸矿等工作也显示出巨大的经济效益。利用微生物提高原油采收率、进行石油加工也取得了成效。发酵工程发展到现在,已经广泛地影响着医药、食品、轻工、化工、卫生、农业和石油开采等行业,成为国民经济的重要组成部分。

由于发酵工程在工业上具有投资少、见效快和污染小的特点,特别是20世纪70年代以来微生物代谢、遗传学、分子生物学

等基础学科的发展和基因工程、细胞融合技术的突破以及生化工程、分析检测技术的进步,使微生物发酵工程发生了重大的变化。同时,由于微生物发酵工程又是基因工程、酶工程的基础和必要条件,生物技术中的各人领域的研究成果一定要通过微生物发酵工程才能转化为生产力,获得经济效益或社会效益,可见发酵工程是整个生物技术最重要的组成部分,因而引起企业界和经济界的极大重视。80年代,日本发酵工业的年产值占其工农业总产值的5%,税收占其税收总额的8%~9%,成为日本国民经济的主要支柱之一。在美国,发酵工业年产值已达数十亿美元。

在分子生物学最新进展的推动下,国外的发酵工业已向应用微生物化学方向蓬勃发展,其情况和趋势主要反映如下:(1)微生物发酵工程自成新的工业体系,已知微生物可以生产200多种具有商品价值的产品,并不断地涌现出新产品,同类产品的更新换代也十分频繁。(2)微生物发酵工业的原料,已从过去的糖类(粮食、淀粉)系统扩展到石油、矿石、有机废弃物等,从而进一步扩大了发酵生产范围,使发酵原料系统发生了变化。(3)以传统发酵为核心,迅速发展起来的微生物发酵工程采用了新技术,使老的工艺技术提高到计算机化、自动化水平,从而使发酵工业保持高生产率。(4)产品的生产方式发展尤为迅速,如正在探索更加新型的连续生产方式,在发酵过程中连续或间歇添加底物,不断扩大应有范围,比传统的分批生产过程(分批发酵)具有更高产量的潜力,能减少催化剂(微生物)的损失;又如混合发酵、固体发酵、透析发酵、固定化细胞的应用等,使微生物发酵工业的生产工艺发生了变革。

由于研究工作缺乏长远规划和经济实力较差等原因,致使中国的发酵工业水平落后于世界先进国家。现就微生物发酵工程几个主要领域概述如下:

**抗生素** 目前世界各国可用发酵方法生产的抗生素约有400余种,其中广泛应用的大约120种,除了作为临床药品外,还用于兽药、饲料、植保和食品保鲜等方面。1980年,世界总产量约25 000t,其中青霉素、四环素、红霉素和头孢菌素4类抗生素的产值达42亿美元,最大的发酵罐为400m<sup>3</sup>。

中国从20世纪50年代初才开始研究和生产抗生素,现已建成一个完整的工业体系,抗生素的产量占世界第1位,1982年年产10 000t,其中发酵生产的9 000t,产值逾10亿元。目前国外所有的商品抗生素,中国几乎都能生产,现在投产的约80多种,有些品种的技术经济指标和产品质量达到世界先进水平,但仍有很多不足。

**氨基酸** 发酵法生产氨基酸是20世纪50年代末兴起的新兴工业,是微生物工程的一大类产品。在已知的20多种氨基酸中,国外用发酵法和酶法生产的达18种,总产量达40多万t,总产值16亿美元。日本技术水平和产量都居领先地位,年产20多万t。80年代以来,国外采用基因工程和细胞融合技术改造苏氨酸、精氨酸、色氨酸、组氨酸、赖氨酸和异亮氨酸的产生菌,其中苏氨酸和色氨酸已用工程菌正式投产,产量大大提高。

中国从1958年开始研究谷氨酸发酵,1965年用国产菌种投产。1960年开始其它氨基酸的发酵研究,以谷氨酸产生菌为出发菌株,经诱变选育和代谢调控,现已得到赖氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、色氨酸、苏氨酸、苯丙氨酸、脯氨酸、精氨酸、瓜氨酸、鸟氨酸、丙氨酸、天冬氨酸、和谷氨酰胺等14种氨基酸的产生菌。其中赖氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、丙氨酸等已初步形成生产能力,其它还处于研究发酵阶段。在菌种选育和代谢调控方面积累了一些经验,但从整体上看,与日本相比较还有很大差距。

**维生素** 目前用发酵法生产的有维生素C、B<sub>2</sub>、B<sub>12</sub>等,以V<sub>12</sub>产量最大,1982年世界产量约60 000t,以美国销售量最大,平均每人每年用70g。V<sub>12</sub>传统工艺是德国人 Reichstein 于1933年发明的。中国于70年代初发明了二步法发酵新工艺,1975年后相继推广应用,居世界先进水平。1981年,中国产量为3 000t,1982年为4 000t。

**核苷酸** 核苷酸是组成生物体遗传的物质基础——核酸的

成分,在食品(增鲜剂)、医药(医疗病毒病及某些代谢功能失调病症等)和农业(生长素)等方面具有应用前景。其生产方法有从菌体中提取核酸,再经酶法或化学法水解,也可以直接发酵生产。日本核苷酸产量居世界第一,1976年仅肌苷酸和鸟苷酸的产量就有5500t,主要用于强力味精。德国核苷酸产品约190种。中国从60年代开始研究,目前已有20多个品种,产量20多t,大都是用味精、啤酒和抗生素等发酵工业的废菌体为原料制得,做到资源、环保双收益。80年代又采用诱变育种技术培育成高产核酸酵母,其核酸含量为13.9%,以糖蜜为原料,核酸酵母的生产能力为 $6\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ 以上,较原有生产菌种提高两倍。

**多糖** 美国发酵生产的黄杆菌(Xanthan)1979年产量为18000t,主要用于油井压裂液和钻井泥浆添加剂。短梗霉多糖(普鲁兰)在日本已工业投产。作为血浆代用品的右旋糖酐已有50多年的生产历史。中国除右旋糖酐有少量生产外,尚无正式发酵工业产品。

**单细胞蛋白(SCP)** 微生物菌体中蛋白质含量占其干物质的45%~55%。20世纪80年代初,SCP产量最大的国家是前苏联,年产量120t,所用原料主要有石油烃、木材水解液、造纸废液、作物秸秆、废糖蜜和水解泥炭。古巴和一些东欧国家也都有年产吨级以上的工厂。英国帝国化学工业公司从20世纪60年代起就一直以甲醇为原料生产SCP,并已用DNA重组技术获得高产菌株,年产量几十t。中国年产量为10000t,但拥有丰富的可供利用的资源,如农作物秸秆、林业副产品、废糖蜜、泥炭等,具有广阔的开发前景。

**酒精及饮料酒类** 世界上许多国家都将开发纤维素资源生产代替石油的新能源(主要是酒精)列为开发新能源的重点项目。1981年美国建立了15个纤维素生产酒精的工厂,年产 $9.46 \times 10^6 \text{m}^3$ 。巴西1981年酒精产量为340t,在汽油中已掺入20%的酒精。同年中国的产量为53t,绝大部分是用淀粉质原料及废糖蜜生产,技术水平接近国外一般技术水平。

1980年世界啤酒产量为9400t,其中美国约占四分之一。饮料酒工业在中国国民经济中一直占有重要地位,1981年总产量为400多t,产值53亿元,80年代以来发展迅速,但工艺落后,周期过长,原料利用率低,用生物技术对现有产品生产的技术改造具有很大的潜力。

**细菌浸矿** 细菌浸矿主要用于贫矿、尾矿及精矿,涉及的金属有Cu、U、Co、Ni、Mn、Zn、Pb、As等10余种,但大规模生产的只有铜和铀。美国铜的10%以上产量为细菌浸出,加拿大铀( $\text{U}_3\text{O}_8$ )年产230t(1976)。据世界20个矿山的统计数字,每年用细菌浸出的铜达20万t,相当于中国1982年铜产量的80%。中国从1965年开始细菌浸矿的研究,1971年开始在铜铀工业上应用。

**其它方面** (1)沼气发酵:中国农村办沼气已走在世界前列;(2)微生物农药;(3)中国传统的酿造食品,如酱油、醋、豆制品等;(4)工业废水的处理已引起普遍重视;(5)微生物发酵生产生物可降解聚合物材料,如聚 $\beta$ -羟基丁酸。英国ICI公司1983年首先实现工业化,目前年产量以万吨计,日本、美国也在积极开发,中国尚处在研究阶段。

中国微生物发酵工程今后发展的重点:(1)提高和完善现有产业,如抗生素、氨基酸、维生素、酒精和饮料酒类等工业。(2)建立一批新产业。如用于石油开采的微生物多糖、细菌浸矿、微生物菌体蛋白饲料、微生物农药、食用菌等工业体系。(3)选育出一系列优良的菌种,适应微生物发酵工程发展的需要。(4)发酵反应器的设计和操作。(5)从基础研究着手,创建几种有重要经济价值的微生物新品种。

#### 参考文献

- 1 Forage A J, Righelato R C. Progress in Industrial Microbiology, V14. Amsterdam; Elsevier Sci Pub Co., 1978. 59~94
- 2 Chen T S. J Chem Technol Biotechnol. 1982, 32(7): 669~

673

- 3 合叶修一. 化学工学, 1982, 46(1): 26~32
- 4 刘芝兰, 张世炜, 卓仁禧. 生物科学动态, 1989, 6: 11~17
- 5 Wiseman A. Endeavour, 1992, 16(4): 190~13
- 6 Larroche C, Theodore M, Gros J B. Appl Microbiol. Biotechnol. 1992, 38(2): 182~187

(武汉大学刘芝兰博士、张世炜教授撰)

### 沼气发酵微生物 biogas ferment microbes 沼气发酵

是指有机物质在厌氧条件下通过多种功能不同的微生物代谢最终产生沼气的过程。参与沼气发酵的微生物统称为沼气发酵微生物。它们广泛的分布在自然界,特别是沼泽、粪池、污水塘和各种污泥中极为丰富。在整个沼气发酵过程中参与的微生物种类繁多,所进行的生理生化反应复杂。

1936年,巴克(H. A. Barker)提出两个阶段的理论,即:产酸阶段和产甲烷阶段。这一理论没有全面地揭示沼气发酵的本质。1979年,布赖恩特(Bryant)等提出沼气发酵的3个阶段理论及其3个生理群的作用学说;同时期,齐科斯(Zeikus)等提出沼气发酵4类群理论。3阶段理论和4类群理论实质上都是两阶段理论的发展,这种划分方法反映了沼气发酵的生化过程。

表1 产生有机酸的细菌

| 微生物                                | H <sup>+</sup> 浓度 (mol/L)                        | 温度 °C | 产物                           |
|------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|------------------------------|
| 蜡状芽孢杆菌 (Bacillus Cereus)           | $6.31 \times 10^{-6}$                            | 25~35 | 乙酸、乳酸                        |
| 克尼费哈皮芽孢杆菌 (B. Knelfe lkampi)       | $6.31 \times 10^{-6}$<br>~ $10^{-8}$             | 25~35 | 乙酸、乳酸                        |
| 巨大芽孢杆菌 (B. megaterium)             | $6.31 \times 10^{-6}$<br>~ $3.16 \times 10^{-8}$ | 28~35 | 乙酸、乳酸                        |
| 产琥珀酸拟杆菌 (Bacteriodes Succinogenes) | $6.31 \times 10^{-6}$<br>~ $3.16 \times 10^{-8}$ | 25~35 | 乙酸、琥珀酸                       |
| 产纤维二糖梭菌 (Clo. Cellulobiparus)      | $10^{-5}$<br>~ $3.16 \times 10^{-9}$             | 36~38 | 甲酸、乙酸、<br>乙醇、CO <sub>2</sub> |
| 溶解梭菌 (Clo. dissolvens)             | $10^{-5}$<br>~ $3.16 \times 10^{-9}$             | 35~51 | 甲酸、乙酸、<br>乳酸                 |
| Clo.idium thermocellulaseum (一种梭菌) | $10^{-5}$<br>~ $3.16 \times 10^{-9}$             | 55~65 | 甲酸、乙酸、<br>乳酸、琥珀酸             |
| 甲酸假单胞菌 (Pseudomonas formicans)     | .....                                            | 33~42 | 甲酸、乙酸、<br>乙醇、琥珀酸             |
| 生黄瘤胃球菌 (Ruminococcus flavefaciens) | .....                                            | 33~38 | 甲酸、乙酸、<br>琥珀酸                |

**发酵性细菌群** 已知在中温(35°C)沼气发酵过程中发酵性细菌主要包括梭菌属的、拟杆菌属的、丁酸弧菌属的、真细菌属的和双歧杆菌属的细菌。表1列出了常见沼气发酵过程中产生有机酸的一些细菌。

发酵性细菌产生胞外酶,将多糖先水解为单糖,单糖被细胞吸收并通过EMP途径产生丙酮酸,进一步发酵形成丙酸、丁酸、乳酸、乙醇等。乳酸是沼气发酵的重要产物,它参与发酵有两条途径:一是经EMP途径的同型乳酸发酵,如德氏乳杆菌和粪链球菌;二是经WD途径的异型乳酸发酵,如肠膜明串珠菌、短乳杆菌,其产物除乳酸外还有乙酸和乙醇等。蛋白质被厌氧菌分泌的胞外酶水解产生各种短肽和氨基酸,氨基酸经过脱氨基作用生成有机酸和氨。脂肪分解为脂肪酸和甘油。已经发现发酵性细菌群在糖酵解成为丙酮酸并进一步发酵产生有机酸的过程中受氢分压( $\text{P}_{\text{H}_2}$ )的影响,只有降低 $\text{P}_{\text{H}_2}$ 才有利于NADH恢复成NAD<sup>+</sup>反应,这一过程是在沼气发酵第一阶段细菌间的互营联合作用下进行的,如瘤胃月形单胞菌—产甲烷菌、S菌珠—布氏甲烷杆菌、生黄瘤胃球菌—产甲烷菌、白色瘤胃球菌—产琥珀酸弧菌等的互营联合作用。

表2 一些产氢产乙酸菌种

| 属名                                  | 种名                                   | 基质              | 研究者                 |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|---------------------|
| 互营单胞菌属<br>( <i>Syntrophomonas</i> ) | 沃尔夫互营单胞菌<br>( <i>S. Wolfei</i> )     | 丁酸及偶数碳原子<br>脂肪酸 | McInerney<br>(1979) |
| 互营单胞菌属<br>( <i>Syntrophomonas</i> ) | 嗜角皂互营单胞菌<br>( <i>S. sapovorans</i> ) | 饱和及不饱和<br>长链脂肪酸 | Roy<br>(1986)       |
| 互营杆菌属<br>( <i>Syntrophobacter</i> ) | 沃林互营杆菌<br>( <i>S. Wolini</i> )       | 丙酸等奇数<br>碳原子脂肪酸 | Boone<br>(1980)     |
| 梭菌属<br>( <i>Clostridium</i> )       | 布氏梭菌<br>( <i>C. bryantii</i> )       | 乙醇、丙酮酸等         | Stueb<br>(1985)     |

产氢产乙酸细菌群 1967年,布赖恩特等研究奥氏甲烷芽孢杆菌时发现,此菌不是纯种,而是由S菌株和M. O. H菌株(布氏甲烷杆菌)组成的一个共培养物;S菌株把乙醇氧化产生乙酸和H<sub>2</sub>,布氏甲烷杆菌是利用H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>的产甲烷菌,从而发现沼气发酵过程中一种新型的微生物间的关系—互营共生关系,也说明S菌是一种产氢产乙酸菌。近10年对沼气发酵过程中的产氢产乙酸菌的研究更加深入。表2列出了分离到的一些产氢产乙酸菌种。

研究清楚的同型产乙酸细菌有伍德乙酸杆菌[嗜乙酸梭菌],威林格乙酸杆菌、乙酸梭菌、基维产乙酸菌、嗜热自养梭菌、粘液真杆菌、嗜甲基丁酸杆菌。

产甲烷细菌群:自从亨盖特(R. E. Hungate)发明厌氧技术后,对产甲烷细菌的研究才取得迅速进展。产甲烷细菌隶属于原核微生物古细菌纲。巴克(H. A. Barker)将产甲烷细菌分为1个科、4个属、有8个种;《伯捷氏鉴定细菌学手册》第8版将产甲烷细菌列为1个科、3个属、共9个种;巴尔契夫和沃尔夫(Balck, Wolfe)把产甲烷细菌分为3个目、4个科、7个属、13个种;杰恩(Jain)和齐科斯(Zeikus)总结了对产甲烷细菌的研究进展和有关分子微生物学、免疫学和遗传学知识,在巴尔契夫分类系统的基础上进行改进,列为3个目(产甲烷杆菌目、产甲烷微菌目、产甲烷球菌目)、6个科(嗜热产甲烷菌科、产甲烷杆菌科、产甲烷微菌科、产甲烷八叠球菌科、产甲烷盘菌科、产甲烷球菌科)、14个属和两个未定属、16个种。

产甲烷菌的形态有球状的、杆状的、螺旋状的和八叠球状的4种类型;细胞结构的特点是原核细胞,细胞壁中不含肽聚糖而含有拟肽聚糖,所以对青霉素、环丝氨酸、万古霉素等缺乏敏感性,细胞膜的化学成分不是磷脂蛋白而是中性脂和极性脂。

产甲烷细菌,在生活过程中要求严格的厌氧和中性偏碱的环境,繁殖慢,倍增时间长,由数小时至数天才能繁殖一代;具独特的辅酶,如CoM、F<sub>420</sub>、F<sub>430</sub>等;只能利用一些简单的基质如甲酸、乙酸、甲醇、甲基胺、H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>产生CH<sub>4</sub>。已在某些甲烷菌细胞中发现质粒,如Thomm等人从甲烷球菌PL-12/M分离到质粒PMP1,Meil等人从热自养甲烷杆菌DSM<sub>2133</sub>分离到质粒PME2001;Wood等人从产甲烷菌C<sub>3</sub>分离到质粒PZLRB500;并分析了它们的限制酶酶切图,进行了体外重组和转化试验,还进行编码核糖体核糖酸(rRNA)、转移核糖核酸(tRNA)的基因研究;编码蛋白质基因已从产甲烷菌中分离出来并进行了克隆,利用营养缺陷型的方法已获得沃氏产甲烷球菌突变株并对它进行了转化试验,还筛选出该菌基因转化的潜在的克隆载体,这些情况展现了产甲烷细菌的遗传学和基因工程的开创性工作。

已有许多学者研究沼气发酵微生物的生态,诸如种群关系、数量、优势种群演替等方面均有许多进展。刘双江等研究了颗粒污泥形成的机理,认为颗粒污泥形成为细菌增殖、小颗粒聚合、初生颗粒污泥和成熟颗粒污泥5个阶段,一般为近球状、不规则的长杆状或钉状,外观整齐,表面光滑;而老龄颗粒污泥外观粗糙,表面有孔洞,可能是内部产生沼气造成的;颗粒中微生物分布为3层,外层细菌较少,以发酵细菌为主,次外层在中层以互营共生菌和产甲烷细菌为主,而颗粒中心可见到死亡的细菌存在;这一研究成果对深入解释沼气发酵各阶段互相制约的食物链关系和H<sub>2</sub>的转移具有重要意义。

参考文献

- 1 V S Bryant, M P, et al. Microbiol., 1967, 59: 20~31
- 2 V S Hungate, R E. Method in Microbiol, 1969, 38: 117~132
- 3 V S Balch W E, et al. J syst. Bacter, 1977, 27: 355~361
- 4 V S Zeikus, J G. Microbial populations in digestors, Anaerobic Digestion, Applied Science Publisher, 1979, 66~89
- 5 V S Bryant, M P. J animal science, 1979, 48(1): 193~201
- 6 V S Jain, M K, et al. Microbiol. 1983, 28(3): 143~177
- 7 V S Konbeiger, V. , et al. Mol Gen Genet. 1984, 198: 146~152
- 8 钱泽澍,等. 沼气发酵微生物学. 杭州:浙江科技出版社, 1986
- 9 张世炜,等. 产甲烷菌质粒检测初报. 中国太阳能学会全国学术讨论会论文集(生物质能专业分册). 香港:香港中华科技(国际)出版社, 1991. 139~145
- 10 刘序章,等. 产甲烷菌质粒中国太阳能学会全国学术讨论会论文集(生物质能专业分册). 香港:香港中华科技(国际)出版社, 1991. 141~145
- 11 刘双江,等. 中国沼气, 1992(2)  
(河北师范大学边文骅教授撰;武汉大学张世炜审)

植物学

植物起源、进化及其分类的研究方法 探究植物的

起源与进化、物种之间的亲缘关系及其分类依据,其方法不一,除由形态学角度考虑外,一般还还可由以下几方面着手:

染色体分析

1. 核型分析. 由于染色体是基因的载体,因而核型实际上就代表了种属的特征. 核型分析是在对染色体进行测量、计算的基础上进行分组、配对、排序并加以形态分析的过程,其大致步骤为:良好染色体制片的获得→对照片测量、配对、剪贴→计算、分析→结果展示:(1)计算、分析结果列表;(2)核型公式;(3)模型模式图。

获得良好染色体制片是准确进行核型分析的前提. 其中,首要条件是试验材料为分裂旺盛的组织(细胞),如根尖、茎尖、嫩叶、愈伤组织及花粉母细胞等. 至于具体处理方法,不同学者各有不同. 1952年,美国徐道觉首先采用低渗处理技术使细胞内的染色体分散而便于观察. 随着秋水仙素、8-羟基喹啉及地二氯苯等的应用,可使增殖中的细胞停止于中期并且染色体浓缩,从而有利于获得大量可供观察的中期分裂相. 植物细胞一般不经低渗处理,如需经低渗处理,则用酶溶去细胞壁. 陈瑞阳等在此基础上提出常规去壁低渗法。

根据试验材料的特性,可将核型分析方法分为两类:一是依据有丝分裂中期染色体的形态;二是依据减数分裂粗线期染色体的形态和行为. 前者的分析内容通常包括染色体组的基数、染色体的长度、着丝粒位置、随体的有无及其形状与大小以及副缢痕的有无和位置等. 其中着丝粒位置以臂比(长/短)表示,按Levan(1964)的规则对之分类. 最后,依Stebbins(1971)的核型不对称性分类标准分析核型对称与否. 若是后者,除进行与上述相仿的分析外,粗线期的二价染色体上的染色粒及染色节的数目、分布特点也可作为染色体个体性差异的标志。

通过核型分析探讨物种起源、进化、亲缘关系的研究者不少. 卢永根等(1990)比较了中国3种野生稻与栽培稻粗线期的核型,并以其结果进一步支持了颖关于“中国栽培稻起源于华南,华南分布的普通野生稻即为中国栽培稻的近缘祖先”的论点. 聂汝芝等(1989)对棉属二倍体野生种的核型进行分析,提出“分布于非洲南北的B组野生种为最原始的类型,以此为中心呈辐射状分化和迁移,形成了现今的特殊地理分布”吴世斌等(1985)亦由

核型入手讨论野生茄、栽培茄各类型的亲疏关系及其分类标准。

2. 带型分析。鉴于许多物种的各个染色体靠普通的制片染色方法不易精确地识别和区分,1968年染色体Q带技术出现以后,染色体分带技术便迅速发展起来,从而在一定程度上弥补了核型分析的不足,为进一步深入研究染色体开创了新途径。根据显带原理的不同,曾先后有染色体Q、C、G、R、N、T、H带的报道。Q带是因用芥子喹吖因染色而得名,其明亮的荧光带为富AT-DNA区,而荧光较暗的区域则为富GC-DNA区。R带与之相反,富GC-DNA区染色深,富AT-DNA区染色浅,它一般代表常染色,多在动物染色体上显示,G带代表中间异染色质,其带型一般与Q带相符,但也有少数例外,并且亦多在动物染色体上显示,C带代表组成型异染色质,植物中的C带研究得最多。N带则表示核仁组织区(NOR)上的异染色质,经 $AgNO_3$ 染色后,有转录活性的NOR呈黑色,这与其上rRNA编码的酸性蛋白有一定关系。至于T带及H带,却少见报道。

通常使用的染色体中期分裂相显带方法,在单倍体上只能显示大约320条带,较难分析染色体细微结构的异常。1975年,美国J. J. Yunis等建立的高分辨显带法,促使染色体带型研究取得长足的进展。该法的关键在于用氮甲嘌呤使培养的细胞分裂同步化,再以秋水仙胺短时间处理,从而获取大量晚前中期和早中期的分裂相,这些时相的染色体比正中期染色体长,故而显带后可见更多更细的带纹。此外,放线菌素D的运用,也可使染色体更为细长,所显示的带纹亦增多。

迄今为止,已对黑麦属、小麦属、葱属的60多种植物进行分带工作,为植物亲缘关系鉴定及栽培植物起源、进化的研究提供了可靠的依据。典型之例当首推普通小麦A、B、D染色体组的来源鉴定。据多年研究资料,A、D染色体组的来源已确定,但对B染色体组的来源仍看法不一。1974年以来,研究者们应用分带技术,发现在许多二倍体的近缘野生种中只有拟斯卑尔脱的带型与普通小麦B染色体组较为接近,从而为研究B染色体组的来源提供了新线索。

陈瑞阳等则综合运用核型分析及Giemsa N-带分析对中国云南小麦、西藏半野生小麦及新疆小麦进行研究,进而从细胞学方面支持了金善宝等入将云南小麦、西藏半野生小麦分别定为云南小麦亚种西藏小麦亚种以及将这两种小麦合并定为一个独立的原始栽培六倍体新种的观点,同时也说明我国小麦资源及类型丰富,是次生起源中心之一。卷丹曾一度被认为是同源三倍体( $2n=3x=36$ ),因为它在减数分裂时常形成多个三价体。后来有人用C-带法对其进行分析,发现其中两组染色体有相同带纹,为A染色体组,另一组的带纹与A不同,为B染色体组,即卷丹的染色体组应为AAB,属于异源三倍体。可见,形态上相同的染色体其来源也可能是不同的。由此也说明在核型分析的基础上结合染色体带型分析是必要的。

同工酶分析 大量研究资料表明,同工酶普遍存在于生物体中,已有50%以上的酶分子发现了其同工酶,可以进行同工酶分析的酶亦有100多种。其中,植物在遗传上已确定的同工酶就有酯酶、过氧化物酶、肽链内切酶等10多种。分析过的植物材料也种类繁多,粮食作物、经济作物、果树、花木、蔬菜、药材等等,都先后有不同学者做过各种同工酶分析,并以此为据进行物种的地理起源及其分布等方面的探索。

在水稻方面,中川原正弘(1978)正是利用同工酶分析法将从亚洲各国采集的1317个水稻品种进行酯酶同工酶分析,并得出“栽培稻起源于印度阿萨姆及中国的云南省”的结论。黄大年等(1988)对16个同基因组的野生稻种进行酯酶等电聚焦电泳分析,结果表明,酯酶谱既可作为野生稻分类的依据之一,又能揭示同一野生稻种内细微的遗传差异。在大豆方面,Gorman等(1977)利用乙醇脱氢酶、酸性磷酸酶、淀粉酶及四唑氧化酶的同工酶鉴定了113个大豆品种间的差异,从而认为这些酶的电泳变体具有品种特异性,可以用来鉴定并解决大豆品种的起源问题。Buttery等(1968)也曾利用圆盘凝胶电泳研究大豆种皮中的过氧

化物酶同工酶活性的高低,并据此将大豆品种分为两大类,彼此间酶的活性水平相差78倍。郝恩虎(1968)分别对野生的、半野生的、栽培的大豆进行酯酶分析,发现从野生大豆到栽培大豆,带幅由狭变宽,带色由浅变深,种间带位和带条数目也有差异,且野生大豆带型的递变与性状递变相吻合,因而认为“带幅的宽窄可作为大豆进化的生化指标”。徐豹等(1989)试图从不同进化类型大豆种子超氧化物歧化酶活性及酶谱的角度出发,分析大豆的起源与进化问题。对于玉米,李继耕等(1980)曾分析比较玉米属78个不同品种及其野生亲缘种的过氧化物酶及酯酶同工酶,从而提出“栽培玉米可能起源于南亚”。马德华等(1988)运用模糊聚类分析方法对辣椒过氧化物酶同工酶表现频率进行动态聚类,确定了普通栽培辣椒利用辣椒属其它物种基因的顺序,并对辣椒属植物的起源、分类进行了更为深入的探讨。在果树方面,类似研究也不乏其例。汪祖华等(1990)就是通过过氧化物酶及儿茶酚氧化酶同工酶分析,发现桃的叶柄谱型和花药谱型分别与果实肉质类型及花粉粘性存在显著相关性,并推测桃的演化途径为毛桃→硬肉桃→蜜桃→水蜜桃→蟠桃,油桃则由桃各种群突变演化而成,进而设想以果实特征为标准将桃划分为6个品种群。

同工酶分析的应用颇为广泛、深入,尤其在探究物种起源、地理分布、亲缘关系、进化程度及分类依据等方面更为突出。之所以如此,主要是由于同工酶作为遗传标志物具有下述几个优点:(1)可从同工酶的表面型上直接了解该个体的基因型;(2)在多肽产物水平上研究基因活性,就可能对各基因座作较精细的遗传分析,并避免来自其它基因座的干扰。因为形态学特征常是许多基因座相互作用的结果;(3)同工酶谱比较稳定,故可作为生理或遗传的研究指标;(4)能一次性处理大批样品,且所需样品量少。

应用同工酶时应注意两个问题:一是同工酶的活性、带数等在植物不同部位、不同发育时期有所变化,因此分析时应考虑到取样的全面性;二是同工酶谱容易因各种条件影响而有所差异,以最常采用的检测方法——电泳为例,从凝胶的浓度、pH值及试验过程的温度、光质、光强,到凝胶聚合的好坏、样品的离心程度、加样量大小等等,都会影响酶的活力大小及区带显示的清晰或模糊,从而使酶谱失真。因此,在实验技术上应力求精确、合理,以确保同工酶分析的准确。

孢粉形态分析 孢粉形态的研究早已应于植物分类,无论是日、科级还是属、种级的植物分类,它都可提供有意义的资料。如蕨类孢子、裸子植物花粉及被子植物花粉三者间就有明显不同,可作为它们的区分标志。在种的分类或品种鉴定方面,其运用价值亦有目共睹。刘金兰等通过扫描电镜观察棉属中G. Klotzschranum和G. davidsonii两个种的花粉结构、形态,提出将这两个棉种作为独立种。高锁柱等比较了桃属5个种、25个变种品种的花粉形态,结果表明,其花粉可作为种的分类和品种鉴定的依据;同时还依此探讨了种、品种的亲缘关系,其中新疆桃和普通桃亲缘关系较近。尤其引人瞩目的是,运用果树植物的花粉形态可以解决果树分类及品种鉴定工作中的某些问题。

在研究植物起源、演化方面,孢粉形态研究也有新成就。如发现于利比亚早志留世的缝孢子曾被认为是最早的陆生孢子,但通过分析却发现其结构特点与原始孢子不符,由此说明利比亚的三缝孢子可能还不是最原始的类型。如今,关于孢粉学与被子植物演化的研究已为世界各国孢粉学家注目。

至于孢粉研究中所采用的技术(或设备),除光学显微镜外,现代科学的发展正为之提供越来越多更为先进的新技术和新理论,大致包括扫描电子显微镜、超薄切片、电子计算机、荧光孢粉学、红外光谱、气相色谱及X射线等。可以预见,随着这些新技术的应用,孢粉学的研究将会出现一个新的局面。综上所述,探究植物起源、进化及其分类,除由植株形态结构方面考虑外,还可通过上述3个方面入手,并且以三者综合应用为最佳。

(福建农学院钟珍萍撰)



**蕨类植物的演化** the evolution of pteridophytes 陆生植物在地球上的演化和发展是现代生物学上最重要的理论问题之一;而蕨类植物的起源和演化在陆生植物的系统演化中占有极重要的地位,也是国际和国内研究的核心课题之一。

关于蕨类植物的起源长期争论不休,有些人认为起源于苔藓植物(Cambell, 1895)但大多数学者主张原始的裸蕨类植物是由藻类植物中绿藻的一些种类经过成功的登陆演化而来。

在古生代志留纪末期,地球上出现一系列的剧烈的地壳运动,陆地上升,海水退却,许多地方的浅海转为低湿平原,出现气候湿热等有利条件,使某些轮藻纲绿藻的后裔逐渐加强其孢子体适应陆生环境的变异能力,终于舍水登陆,产生了最早的以裸蕨植物为代表的第一批陆生植物。最早登陆的最原始的裸蕨植物是光蕨(顶囊蕨),光蕨的植物体非常矮小,高不过10cm,茎轴很纤细,二分叉枝无叶,具有维管组织,木质部细弱,由环纹管胞组成;茎的外部可能由一些具有叶绿体的薄壁细胞所组成,没有支持组织;表皮层细胞壁很厚,上面有气孔,茎的表面有角质层;孢子囊单个顶生,孢子同型,肾形,三裂缝;显然,这是最古老最原始的陆生维管植物。

1988年,美国泰勒(T. N. Taylor)提出光蕨类植物的概念,在这个化石植物类群里包括各种比较小的植物(除光蕨外,还有始加斯佩蕨、海德蕨、雅拉蕨等)。由原始的光蕨类植物复合体不断向前辐射演化,形成瑞尼蕨、工蕨、三枝蕨3个明显的不同类群,再由它们发展演化为不同类群的蕨类植物。

**瑞尼蕨型植物** 其代表是瑞尼蕨,为构造简单的小型草本植物。瑞尼蕨的显著特点是孢子囊单生于枝顶,椭圆形,孢子具有孢粉质的胞壁,三射线的裂缝。瑞尼蕨的能育和不育的顶枝简化,孢子囊聚合生长,并产生新的拟叶,由于枝的缩短致使囊位于拟叶上方的短枝顶端,演变成松叶蕨类。

**工蕨型植物** 工蕨是半陆生挺水植物,常发生“工”字形的分枝而构成一种特别复杂的盘根错节的状态。它的枝轴内部具有简单的单体中柱和外始式初生木质部。这都表明它的原始性质。工蕨不同于其它裸蕨植物的最大特点是它在枝轴顶部组成穗状的侧生孢子囊,孢子囊肾形,基部有短柄,上端有横裂缝,在早泥盆纪工蕨属植物出现以后漫长的演化岁月中,到早泥盆纪中期出现了星木属植物。星木是最早的原始石松之一,与星木同时或略晚出现的刺石松和镰叶刺石松也是原始石松类中最著名的代表植物;到了中泥盆纪,出现了原始鳞木。又经过1100多万年,石松植物向着两种类型发展,一种是草本的,一种是木本的,草本的类型又分两支各自独立发展,一支是由原始石松类(刺石松)经中、晚泥盆纪的似石松,发展成一直生存到现代的石松科植物;另一支可能由星木属植物,经过中晚石炭纪的似卷柏属植物,形成现代的卷柏科植物。木本类型的石松植物的先驱是发现于晚泥盆纪的鳞印木和圆印木,由它们进一步演化成典型的鳞木类植物。这些鳞木类植物都是高大乔木,如鳞木及封印木等,它们都是石炭纪和二叠纪时所形成的巨大石松植物,是当时沼泽森林的最重要的代表和主要造煤植物,进入三叠纪后迅速衰退。到三叠纪早期,由于气候变迁只留下少数鳞木类后裔——肋木。又过了200万年左右,肋木也绝灭了。由古生代的鳞木类,经早三叠纪的肋木或其近族而演化成为早白垩纪的古水韭属植物,然后再逐步演化发展到现代水韭属植物。

**三枝蕨型植物** 这一类型的主要植物有裸蕨。三枝蕨生存于早泥盆纪末,它的主轴粗壮,在主轴上生长着螺旋状排列的侧枝,侧枝从主轴长出后很快就发生一次相等的三叉式分枝,这种三叉式的分枝每小枝向前生长不远就又发生一次不等的三叉分枝和两次二歧分枝,然后在每个末级细枝顶端生长着成对的或3个彼此紧靠成束的孢子囊。从三枝蕨的分枝形成、枝轴的形态结构特别复杂以及顶生成束的孢子囊等特点看,它很像是裸蕨植物与更高级的维管植物之间的过渡植物或中间类型,在植物系统演化上有重要意义。由三枝蕨型植物发展为真蕨类和前裸子植物,后者再进一步发展演化成各类裸子植物。

楔叶植物或称木贼植物,是很特殊的一类维管植物。最古老的楔叶植物是出现于早泥盆纪晚期的原始叉叶蕨。到中泥盆纪又出现了叉叶蕨(海尼蕨),它们被看成是位于三枝蕨等裸蕨植物和典型木贼类之间的过渡类型。由原始叉叶蕨、叉叶蕨、芦形木等原始楔叶植物再经过古芦木、中芦木和繁盛于石炭纪、二叠纪的芦木等中间类型,才演化成中生代的早期类型。新芦木和似木贼是中生代的最为繁盛的木贼目的典型代表类型。侏罗纪的似木贼的形态特点和现代木贼十分相似,被看作是现代木贼属植物的直系祖先,从白垩纪起,经新生代直到现在,经过1亿多年的历史,以现代木贼属植物为唯一代表的这一演化支系没有发生大的变化而长期生存到现在。

真蕨植物是一个极其复杂的植物类群。它们出现于泥盆纪中期,至石炭纪、二叠纪时相当繁盛。它和石松类、木贼类和种子蕨植物共同组成晚古生代植物群的总面貌。由于真蕨植物的代表类群和大多数分布很广的古生代属种对潮湿环境依赖性很强,所以当二叠纪、三叠纪之交的世界性干旱气候来临时,随着新型裸子植物的兴起,绝大部分从地球上消失了。但是在晚三叠世和早侏罗世期间,当地面气候再度变得温暖湿润时,许多新的真蕨植物又从少数残存的分子中辐射分化出来,并且很快获得前所未有的大发展,其中不少科、属真蕨植物还一直繁衍到现代。

现在一般认为真蕨类植物中原始蕨亚纲植物是最原始的真蕨植物,大多数处于裸蕨植物和典型真蕨植物之间的地位,只生存于中泥盆世和晚二叠世。这些植物的茎、枝比较发育并有真根出现;侧枝或其末级枝开始扁化而趋于羽状,发育为大型叶,这些特点说明它们已接近典型的特别是厚囊蕨亚纲的真蕨植物,但是,它们的茎叶分化不很明显,分枝方式常具有二歧式的习性;孢子囊内部有自孢子囊柄延伸而来的维管组织,这些都是裸蕨植物中比较原始的性状。原始蕨亚纲植物的这种形态结构特征和二枝蕨相近,它们之间有一定的亲缘关系。因此,它们可以看作是二枝蕨型裸蕨植物发展到更为进化的典型的真蕨植物中间环节或过渡类型。在典型真蕨植物中比较低等的一个类群叫厚囊蕨亚纲植物,生存于中石炭世到现在。薄囊蕨亚纲植物是真蕨植物的高级类型,也是最占优势的类群,可能始见于石炭纪,主要生存于三叠世到现代。

蕨类植物是地球上古代的和现代的陆生植物一个重要组成部分,它的起源和演化在植物界的系统演化中占有重要地位。长期以来,在古生物学方面最有兴趣的研究课题之一是集中在陆生植物特别是陆生维管植物的起源和演化,植物学家虽然对陆生植物演化的各个方面进行了大量的研究,但是直到现在还没有任何令人满意的答案。新近研究的主要热点是:(1)陆生植物,尤其是陆生维管植物(蕨类植物)起源于哪一种藻类植物;(2)关于陆生植物起源的地质年代;(3)早期陆生维管植物的代表形态及它们是单元发生抑或多元发生以及如何演化等。另外,确认在早期的维管植物中是否有输导组织分子,也是争论的中心。

**参考文献**

- 1 Beck C B. Biol. Rev. 1970, 45: 379~400
- 2 徐仁. 生物史(第二分册). 北京: 科学出版社, 1980. 97~105
- 3 李星学, 周志炎, 郭双兴. 植物界的发展和演化. 北京: 科学出版社, 1981. 41~110
- 4 蒋悟生, 张芬棣, 等编译. 植物杂志, 1988, 3: 45~47
- 5 Taylor T N. The Origin of land plants Taxon, 1988, 37(4): 805~833

(兰州大学张耀甲教授撰)

**苏铁植物的进化** development of cycads 苏铁植物肇始于晚古生代,繁荣于中生代,尤以侏罗纪属种最多,且广布世界各地。白垩纪以后,属种渐少,有些绝灭,有些则流传至现代。现今苏铁类仅存1目3科10属近100种,分布限于赤道两侧的热带、亚热带地区。

苏铁植物是现存最古老而又唯一具羽状叶的裸子植物。

1919年, C. J. Chamberlain 把它们分为1科9属, 1959年, L. A. S. Johnson 再把它们分为3科10属。其中苏铁科(*gcadaceae*)和蕨铁科(*stanger-iaceae*)各含1属, 泽米科(*Zamiaceae*)含8属。东半球6属, 苏铁属(*cycas*)分布于中国南部、日本南部、东南亚、印度南部、斯里兰卡、巴布亚新几内亚、马达加斯加北部和澳大利亚北部; 二回泽米属(*Bowenii*)仅见于澳大利亚东北部; 大泽米属(*Macrozamia*)仅见于澳大利亚东部和西南部; 鳞泽米属(*Lepidozamia*)仅见于澳大利亚东部; 蕨铁属(*Stangeria*)仅见于非洲南部很小的地区。西半球4属: 高泽米(*Microcycas*)属仅见于古巴西部; 角泽米属(*Ceratozamia*)和提翁属(*Dioon*)仅见于墨西哥; 泽米属(*Zamia*)分布于美国佛罗里达南部、西印度群岛、墨西哥、中美洲、南美洲北部和西部。

中国仅有苏铁1属。特征: 茎柱状, 直立, 多不分叉, 表面有宿存的叶基及间鳞片之残余, 粗糙不平。木材为疏木型, 柔软而松散, 具宽的木射线, 输导组织很薄弱, 髓及皮层较厚。主根发达, 纤维状。侧根向上生长, 二分叉, 具珊瑚状菌根。叶二型。营养叶为1次羽状, 大型, 着生于茎顶。小羽片硬而尖, 仅具1中脉。苏铁的花有雌雄之分, 学术上分别称它们为大孢子叶、小孢子叶。大孢子叶全身密被黄棕色毛, 一般可分为不育的和能育的上下两部分。上部羽状分裂, 下部柄状, 两侧着生2~3对胚珠。无数大孢子聚生于茎顶而成蓬松的大孢子叶球。小孢子叶淡黄褐色, 楔形, 顶端盾状, 背面着生无数小孢子囊, 或称花粉囊, 数个1群, 放射状排列, 熟时纵裂。无数小孢子叶螺旋状着生于轴上, 组成柱状的小孢子叶球, 致密, 亦生于茎顶。苏铁类为雌雄异株, 生长相当缓慢, 即使在适宜的生态环境中生长, 也得20~30a才能开花。其它两科植物中国无分布, 间有引种的, 形态特征基本上和苏铁科植物类似。蕨铁科植物的茎呈块状, 潜藏于土中, 小羽片兼具中脉和羽状侧脉, 侧脉有时在叶缘联结。泽米科植物的茎直立或块状潜藏, 小羽片多脉, 二歧分叉, 但无中脉、侧脉之分, 孢子叶上部鳞片状、盾状或具角。

讨论苏铁类的进化, 要有古植物作为证据。虽然晚古生代的二叠纪已出现各种苏铁类的化石, 但多以营养叶的印痕为主。如蕨羽叶和带羊齿、卵叶等属的某些种; 中生代以后, 种类渐多, 除蕨羽叶属的之外, 尚有蕨羽叶、带羽叶、假蕨羽叶、大带羊齿和三角羽叶等属的, 可惜印痕化石无微观结构保存, 难以确定其确实的分类位置。况且晚白垩世以前, 与苏铁目种类共生的还有不少本内苏铁目的种类, 如侧羽叶、毛羽叶、拟泽米、耳羽叶、网羽叶、假苏铁、蕨羽羊齿和异羽叶等属的种类, 两目叶片近似, 极易混淆, 不能借以讨论苏铁类的进化问题。只有孢子叶, 特别是大孢子叶最可靠。可是, 孢子叶化石一样有“铁树开花”的情形, 极为罕见。已发现而重要的苏铁类大孢子叶有: (1) *Archaeocycas whitei*, 见于美国得克萨斯早二叠世晚期, 大孢子叶上部还不甚清楚, 胚珠长圆形, 倒披针形或菱形, 以宽基部斜着生, 4~6对, 紧靠, 外面有反卷的叶片覆盖。(2) *Phasmocycas kansana*, 见于美国堪萨斯州早二叠世晚期, 一种压型化石, 孢子叶上部未保存, 下部呈柄状, 两侧各1行可达15枚的胚珠, 胚珠间有球形小腺体。同时保存的1种带羊齿, 其侧脉间也有类似的腺体。复原后的孢子叶上部, 估计也为带羊齿。(3) 中国始苏铁, 见于中国山西早二叠世晚期, 孢子叶上部掌状条裂, 中央的裂片偶有伸长且呈羽状裂的, 下部柄状, 胚珠着生在柄部两侧或上下部的过渡处, 略下垂, 至少5对。营养叶可能为带羊齿。(4) *Palaeocycas-Bjuvia*, 见于瑞典晚三叠世晚期, 大孢子叶上部卵形, 全缘, 基部复原后有2对侧生的胚珠, 营养叶为带羊齿。(5) *Dioonitocarpidium*, 见于德国巴伐利亚晚三叠世晚期, 由 *Dioonites* 和类单蕨属组成, 共3种。模式种为 *D. Pennaeforme*。孢子叶轴很粗, 小羽片细长, 毛状, 基部着生1对胚珠。另外两种为 *D. keuperianum* 和 *D. liliensternii*, 孢子叶基部由全缘逐渐过渡至羽状全裂, 基部腹面着生2对胚珠。(6) *Beania*, 见于英国约克郡中侏罗世, 研究得较清楚的大孢子球, 呈柔荑花序状, 大孢子叶顶端盾状, 胚珠着生于盾下, 类似泽米属。

综览上述各种大孢子叶的形态特征, 并参照它们的层位关

系, 苏铁类可有如下进化规律: (1) 以多胚珠者为原始; (2) 大孢子叶上部越缩减越进化, 反之为原始; (3) 大孢子叶基部叶片状为原始, 柄状为进化; (4) 营养叶从全缘趋向羽裂。

有人认为, 美国堪萨斯州晚石炭世的 *Spermopteris coriacea* 是苏铁类的祖先。蕨叶的边缘有一环胚珠着生, 随着进化发展, 胚珠的数目减少和移向基部, 一方面叶基部的叶片向上缩减, 则向 *Phasmocycas* 过渡; 另一方面基部叶片不缩减, 却反卷以覆盖基部的胚珠, 则向 *Archaeocycas* 过渡。当 *Phasmocycas* 的胚珠数目进一步减至2对, 孢子叶上部缩减成卵形而向 *Palaeocycas-Bjuvia* 过渡, 当 *Palaeocycas-Bjuvia* 的孢子叶上部再退化成盾状, 胚珠着生于盾下, 则过渡到 *Beania*, 再过渡到泽米属。这可能是 *Phasmocycas* 向泽米属进化的一条路线。另一方面, *Phasmocycas* 的胚珠数目再减至1对, 孢子叶上部裂成羽状, 则向 *D. pennaeforme* 过渡。当 *Archaeocycas* 的孢子叶基部覆盖胚珠的组织退缩, 整个孢子叶从基部开始向顶端作由浅至深的羽状裂时, 则向 *D. keuperianum* 和 *D. liliensternii* 过渡。再向前, 有人认为会走向苏铁属。但是, 苏铁属只在东半球有分布, 此论似难成立。中国始苏铁大孢子叶的形态已酷似苏铁属, 但胚珠较苏铁属多。故两者关系分明, 而中间可能有过渡型。中国始苏铁的胚珠仅5对, 孢子叶上部已大大缩减, 远比美国同期的 *Archaeocycas* 和 *Phasmocycas* 进化得多, 说明其起源年代早得多。因此, 有人认为苏铁植物起源于中国, 它的祖先极可能生存于晚石炭世以前。20世纪80年代, 一种更古老的苏铁大孢子叶出现于中国甘肃晚石炭世, 下部未保存, 上部呈掌状, 类似始苏铁而不如始苏铁那样开展。此种大孢子叶的出现, 支持了苏铁于中国起源的设想。至于它的祖先, 更可能在石炭世时已有生存。苏铁营养叶的进化, 也有规律可循。古生代时为全缘的带羊齿型, 末期出现具齿和具裂的种类。中生代时, 具齿和具裂的类型分别走向半裂。在新生代时, 半裂衍变成全裂, 具齿的变成具单1叶脉的苏铁属型, 具裂的变成具多脉的其它属型。

关于苏铁植物的进化过程, 还有许多工作需要深入进行, 如寻找它们中间的过渡类型等。过去总以为苏铁植物的起源不早于晚三叠世, 这种论点由于晚古生代大孢子叶的大量出现而得到更正。尤其甘肃标本的发现, 可以认为苏铁植物的起源自晚石炭世开始, 而现代苏铁各属植物的地理分布仍有待进一步探索。

#### 参考文献

- 1 塔赫他间, A. n. 著. 匡可任, 等译. 高等植物学 I. 北京: 科学出版社, 1963. 263~281
- 2 Mamay S H. Palaeozoic origin of the cycads. US Geol Surv Prof Pap 1976, 934: 1~48
- 3 朱家桢, 杜贤铭. 植物学报, 1981, 23(5): 401~404
- 4 Taylor, Thomas N. Paleobotany: An Introduction to Fossil plant Biology. 1981. 388~401
- 5 福斯特 A S 等著. 维管植物比较形态学, 李正理, 等译. 北京: 科学出版社, 1983. 338~361

(中国科学院植物研究所朱家桢副研究员撰)

**北美红杉的起源和进化** the origin and the evolution of sequoia sempervirens 北美红杉又名海岸红杉, 简称红杉, 特产于美国加利福尼亚的海岸地带, 是裸子植物中唯一的自然六倍体, 因此它的起源和进化一直以植物自然之谜长期引起植物学家的浓厚兴趣。

由于红杉很可能是 AAAABB 的同源异源多倍体 ( $2n=6x=66$ ), 因此对它的染色体计数即是探索其起源的先驱工作, 这可追溯到1904年劳森(A. A. Lawson)对红杉雌配子体和体细胞染色体的观察( $n=16, 2n=32$ )。1943年, 日本斋能和中村首次完成了红杉染色体的正确计数  $2n=66$ , 并在观察了减数分裂时的染色体行为及分析了它和巨杉的形态特征后提出后者可能为红杉提供了一个染色体组。1945年, 多伊尔(J. Doyle)也认为红杉是以巨杉为代表的巨杉属的一个基本二倍体类型的衍生物。

1948年,美国斯特宾斯(G. L. Stebbins)正式揭开了探索红杉起源的帷幕。他以加利福尼亚州立大学和斯坦福大学的栽培红杉为材料观察了它的染色体和花粉母细胞减数分裂中期I的染色体配对行为以及间期细胞的核仁数,首先提出红杉是 $2n=6x=66$ 的古代自然六倍体杂种,假设它是染色体组组成为AAAABB的同源异源多倍体或是 $A_1A_1A_1A_1A_2A_2$ 或 $A_1A_1A_2A_2A_3A_3$ 的部分异源多倍体。他认为如果红杉有一个二倍体亲本幸存或留下近缘后代的话,繁殖器官特征与其极为相似的水杉(属)和巨杉(属)最为可能,但进一步通过形态学比较分析推测古代种“水杉”(以现代水杉为直接后裔或近缘)很可能是红杉的一个亲本,并否定了“巨杉”的可能性,另一个亲本已经灭绝。1970年,美国北卡罗莱纳州立大学的塞勒和西蒙斯(L. C. Saylor & H. A. Simons)分析了红杉的核型后竭力认为它是AAAABB的同源异源六倍体,并推测水杉可能为红杉提供了染色体组而成为亲本。1984年,美国田纳西州立大学的舒拉巴姆和查奇约(S. E. Schlarbaum & T. Tsuchiya)也分析了红杉的核型,并认为红杉的染色体组组成很可能是部分异源多倍体,但也不排除同源异源多倍体的可能性。然而,实际上像红杉这样的古代自然六倍体在现代已不再可能是部分异源多倍体,因为它在漫长的地质年代中不是向同源异源多倍体方向进化就是向典型的异源多倍体方向进化。他们提出水杉和巨杉由于其核型都有红杉所不具有的长着丝点区域染色体而不可能成为它的亲本,后者可能是某种杉木属植物。但红杉不具有长着丝点区域染色体可以用随体丧失、染色体形态变异或核仁显性现象使亲本的长着丝点区域染色体不一定在杂种得到完全表达来解释,至于杉木属植物就其与红杉在核型和形态上的巨大差异就更表明不大可能成为它的亲本。

李林初从斯特宾斯的“染色体研究常为进化学家和系统发生学家提供有价值的指路明灯”的理论及核型具有很大保守性的特点出发,认为同源异源多倍体红杉的AA和B染色体组组型必然与提供该染色体组的亲本的核型非常相像,而亲本的“候选”范围又必以红杉所隶属的杉科植物最为可能。他还进行了柳杉、水杉、水松、池杉、杉木、秃杉等的核型分析并收集了其他种类的核型资料包括对红杉的核型从AA和B染色体组作了核型再分析,并创造性地获取最能反映核型特征的平均臂比和染色体长度比等有关数据( $2n=20$ 的金松属植物和始终分布于南半球而早被认为与红杉起源无关的密叶杉属植物除外)作出比较研究,结果发现红杉—AA组型和—B组型分别与水杉和巨杉的核型非常相像和最为接近,从而认为分别以现代水杉和巨杉为直接后裔或留下的近缘的古代种“水杉”和“巨杉”很可能为红杉提供了AA和B染色体组而成为它的亲本,形成红杉核型的进化过程则可能为古代亲本种“水杉”AA和“巨杉”BB先杂交形成AB,它自然加倍产生异源四倍体AABB后又与AA回交成三倍体AAB杂种,后者再自然加倍形成同源异源六倍体AAAABB的红杉。李林初还就该细胞学结论寻找其他学科的支持。首先,如果红杉的确由“水杉”和“巨杉”杂交产生,那末它们必定在过去某个地质时期同地生长,尽管它们的后裔水杉和巨杉现在远隔重洋间断分布在东亚和北美。根据弗洛林(R. Florin 1963)提供的古植物资料,发现水杉属植物的和巨杉属植物的化石共存于新生代中新世(距今约3 000万年)的美国西部俄勒冈州及其附近,从而具备杂交的条件。值得注意的是,还可见红杉属植物的化石也在这里同时存在,表明此地可能就是红杉杂交起源的地点。1951年,日本三木茂等根据化石上的气孔大小也曾推断红杉至少在上新世就已形成。由此可见红杉起源的细胞学结论得到古植物学的有力支持。另外,肥田美智子(1962)、胡志昂(1986)、席以珍(1986)等从形态、解剖、植化、生化、孢粉学研究都表明红杉与水杉、巨杉间具有最为密切的亲缘关系;埃肯旺德(J. E. Eckenwalder, 1976)综合应用形态、解剖、胚胎、细胞、孢粉等方面的49个性状所计算的杉科各属间的百分相似性也以红杉(属)和水杉(属)、巨杉(属)之间的为最高。

红杉起源和进化的研究虽然取得较大的进展,但只标志着

在新起点上的开始。1989年,日诘雅博根据染色体的次缢痕特征认为杉科各属植物都不可能为红杉提供染色体组。李林初等对此论据和结论都持不同看法,可见关于红杉起源之谜的争论和探索还将持续下去。只有经过更深入的多学科、全方位的综合性研究,特别是通过分子遗传学等的进一步深入探索,才能得到比较完善的和客观的结论。

#### 参考文献

- 1 Florin R. Acta Hort. Bergiani, 1963, 20(4): 121~312
- 2 Salor L C, H A Simons. Cytologia, 1970, 35: 294~303
- 3 Eckenwalder J E. Madrono, 1976, 23: 237~256
- 4 Schlarbaum S E, T Tsuchiya. Pl Syst Evol., 1984, 147: 29~54
- 5 李林初. 云南植物研究, 1987, 9(2): 187~192
- 6 李林初. 自然杂志, 1987, 10(10): 751~756
- 7 李林初. 云南植物研究, 1988, 10(2): 201~204
- 8 Hizume M. Mem Fac Educ Ehime univ., Nat Sci., 1989, 9: 7~32

(复旦大学李林初副教授、上海市园林学校史美琪高级讲师撰)

#### 雌雄异株裸子植物的性染色体

现代裸子植物有12科71属700多种,其中苏铁科、银杏科、罗汉松科、三尖杉科和红豆杉科等8科28属380多种(中国有8科13属60多种,包括引入栽培的)是雌雄异株的裸子植物。植物的性别决定方式是多样的,通常由性基因或性染色体的差异决定。性别决定是细胞遗传学研究的重要内容之一,同时,对以生产种子为目的的裸子植物如银杏、香榧等能早期鉴别雌雄也具有实际意义。

自从1917年阿伦(C. E. Alleen)用唐氏囊果苔(*Sphaerocarpos Donnellii*,  $2n=14+XY$ )为材料,首次报道该植物的雌雄性别与细胞中某对性染色体的形态差异有关以来,在被子植物中据不完全统计,已报道具有性染色体或性基因的120多种,确定有性染色体的植物近10种。雌雄异株裸子植物的性染色体研究开展较晚,研究的种类也较少。早期主要集中在银杏属和苏铁属的研究。

1928年艾切霍恩(A. Eichhorn)首次提出银杏有随体存在,可能对性别决定有某些关系。1954年李正理(C. L. Lee)研究表明,具随体的染色体数目不同与银杏的性别有关。他发现银杏雌株的细胞中有4条具随体的染色体,随体位于一对最长的中部着丝粒染色体(m)的短臂上和一对短的亚端着丝粒染色体(St)长臂的端部;而雄株只有3条具随体的染色体,在一对短的St染色体的长臂端部,只有其中一条染色体具随体。1957年波洛克(E. G. Pollock)以银杏的幼叶和小孢子为材料,研究的结果与李正理较为一致。

在苏铁属和麻黄属中也有染色体具随体数目的差别与雌雄性别有关的报道。1962年亚伯拉罕(A. Abraham)等研究了篦齿苏铁,认为染色体的随体有无涉及性别决定,X染色体的一条臂的端部具随体,Y染色体无随体。1981年梅黑拉(P. N. Mehra)等对麻黄属的一个种(*Ephedra foliata Boiss*)的研究后,也提出染色体的随体可能涉及性别决定有些雌雄异株植物中性染色体形态上的差异可有与性别决定有关。1971年塞加瓦(M. Senawa)等对苏铁根尖细胞的观察,发现有性染色体存在。雌株的一对性染色体是同形的,为亚中着丝粒染色体(sm);而雄株的一对性染色体是异形的,其中一条与雌株的sm染色体类似,另一条是较短的中部着丝粒染色体(m)。但是,据寺坂对苏铁的花粉母细胞减数分裂的观察,变为苏铁中有否性染色体还有疑问。

裸子植物大多为乔木或灌木,生长期长,有的属种生长10多年后才能开花结实,而在开花前从植株的外部形态上无法正确地雌雄。有的属种分布域狭窄,已属珍稀濒危的植物。从已知雌雄性的成年树上直接采取如幼叶、茎尖、雄球花,花粉和雌配子体自由核开始时期的胚珠等作为染色体分析的材料,由于染色体较长,多弯曲重叠,不易铺展,有时影响染色体一些结构的观察。

通常最合适的材料是幼根的根尖分生组织。从成年树上剪取嫩枝扦插,促使生根,需时长达数月,有的属种的插枝还不易成活。取材难,是影响对雌雄异株裸子植物进行性染色体研究的一个原因。

对银杏性别决定的研究较多,除前面所述外,还有一些学者所获结果不同。如1954年纽科默(E. H. Newcomer)报道其雌雄性别与一对最长的染色体有关。雄株的这对染色体是异形的,其中一条为m染色体,另一条为sm染色体,而雌株的这对染色体是同形的。1988年陈瑞阳等用银杏雌雄株的根尖细胞,经纤维素酶和果胶酶酶解,去壁低渗法制片,然后用核型分析,Giemsa C带和银染法对其染色体进行分析,发现雌株有一对形态稳定的异形性染色体,分别为Z和W染色体,而雄株为一对同形的Z染色体。银染后,Z和W染色体的短臂顶端有NOR区(核仁组织区)。Giemsa c带法不能使其显带。第11对染色体长臂末端有NOR区,C带处理后,第11对的长臂末端和最长一对染色体的短臂末端和随体均显示清晰的带纹。

各学者对银杏性染色体的研究结果,出现的差异原因是多方面的,可能与所用的材料,染色方法和制片技术等有关。1954年李正理采用银杏的胚珠(雌配子体),雄球花,花粉和茎尖,材料未经前处理,固定后,醋酸洋红染色、压片。1957年波洛克用银杏的幼叶和花粉为材料,也用醋酸洋红染色、压片。随体的形态和数目是染色体组中较稳定的结构,也是比较容易断裂的部位。因此,银杏的性别决定是因雌雄株细胞中具随体的染色体的数目不同,还是与异形性染色体有关,还有待进一步研究。

1991年管启良等对中国特有的珍稀濒危植物红豆杉科白豆属的白豆杉,用雌雄株的嫩枝扦插生根,对根尖细胞染色体分析表明,白豆杉雌雄株的染色体数目均为 $2n=24$ 。雌株有一对异形性染色体,异配性别,属2W型;雄株是同配性别,为ZZ型。雌雄株的Z染色体较短,臂比在1.40以上,其余各对染色体,除一对为端着丝粒染色体外,其臂比在1.20以下。Giemsa c带可显示Z染色体长短臂的端带,W染色体较长,臂比1.07左右,不显带。

除上述因异形性染色体的存在与性别有关外,还有因雌雄株的染色体数目不同而与性别有关的报道。1988年日诘雅博等研究了罗汉松的性别决定。用根尖细胞染色体进行核型分析和荧光染料亮霉素A3(CMA)和4',6-二脒-2-苯基咪唑(4',6-Diamidino-2-Phenylindole 简称DAPI)染色。认为罗汉松雌雄株的染色体数目不同,核型也有差异。雄株 $2n=37=1sm+36T$ ,雌株 $2n=38=38T$ 。雄株的第1号最长的亚中部着丝粒染色体为Y染色体,第2号端着丝粒染色体为X1染色体,X2染色体不易识别。雌株的1、2号最长的端着丝粒染色体为X1染色体,另两条X2染色体也不易识别。其性别决定为xxy型。

裸子植物是与动物界的恐龙同时代的植物,起源和发展历史久远。而性染色体则时进化的产物。虽然对雌雄异株裸子植物的性染色体研究进展缓慢,仅涉及银杏、苏铁、罗汉松、红豆杉等几个科的部分属种。有的属种是否有性染色体存在尚无一致意见。但是,随着生物技术的发展,制片技术的改进,染色体分带、银染、荧光等技术的应用,以及不断创新和发展的新方法和新技术,必将增加各条染色体的识别标志,尤其对性染色体的鉴别,有利于推动雌雄异株裸子植物性别决定的深入研究。

#### 参考文献

- 1 Lee C L. Amer J Bot. 1954, 41: 545~549
- 2 Pollock E G. J Hered. 1957, 48: 290~296
- 3 Abraham A, et al. Ann Bot. 1962, 26: 261~266
- 4 Segawa M, et al. Jpn J Genet. 1971, 46: 33~39
- 5 中国科学院植物志编委会. 中国植物志. (第7卷), 1978
- 6 诘雅博, 等. 遗传, 1979, 33(6): 31~37
- 7 Mehra P N, et al. Cytologia. 1981, 46: 173~181
- 8 Hizume M, et al. Jpn J Genet. 1988, 63(5): 413~423
- 9 陈瑞阳, 等. 中国植物学会55周年年会学术论文摘要汇编. 1988, 431

10 管启良, 等. 遗传学报, 1993

(杭州大学管启良副教授撰)

### 植物细胞大量培养 large scale culture of plant cells

植物细胞大量培养是把植物细胞放到一个大型反应器中给与合适的条件进行培养,以获得各种产品的一门跨学科技术。它与传统的人工栽培相比具有以下特点:不受地理、土壤、气候以及自然灾害的影响;得到的产品无菌、无虫、无农药残留;通过改变培养条件和细胞系筛选,可以大大提高有用物质的产率,不仅节约能源,还可以减少占用的耕地面积;可以进行特定的生物转化反应,探索新的合成路线和获得新的有用物质。

1956年,美国鲁蒂恩(J. B. Routien)和尼克尔

(L. G. Nickell)首次提出从植物细胞培养物合成天然产物的专利,试图摆脱自然条件的限制,在人工控制条件下,利用植物细胞大量培养,生产各种药物。1959年,图勒克(W. Tulecke)和尼克尔首次用20L的硫酸瓶进行蔷薇茎段的细胞大量培养。1967年,考尔(B. Kaul)和斯塔巴(E. J. Staba)采用搅拌式发酵罐对小阿米进行细胞大量培养研究,并从培养物中得到第一个药用成分吡喃色酮,其含量占细胞干重的0.31%。1976年在原联邦德国召开第一届国际药用植物细胞与组织培养会议,使植物细胞大量培养的研究出现了新的热潮,加之当时微生物发酵技术进展迅速,各种各样的生物反应器如气升式的、气泡柱式的反应器相继得到广泛应用,更促进了此项研究的进展。1983年,日本三井石油化学工业公司正式宣布用两步法大量培养紫草细胞得到的紫草素作为染料和药物进行工业化生产。1984年,日本钟纺公司出售应用这种紫草素生产的“生物口红”,成了第一个通过细胞大量培养方法获得的商品。1988年,日本又成功地销售一种加入人参培养细胞抽提物的葡萄酒。在这一领域进展较快的还有英国、德国、美国、法国、荷兰等国,有近50多种植物进行了大量培养研究,中国在1980年以后开始应用细胞大量培养技术生产有用化合物,主要集中在一些名贵的中草药,如人参、三七、黄连、西洋参、三分三、紫草等,培养细胞中有用成分的含量大多接近或超过原植物,药理试验表明,培养细胞与栽培的中药基本相同。

目前,在植物细胞大量培养的全过程尚有几个环节需进一步革新和完善:(1)植物细胞在生物反应器(或者称大量培养装置)中生长缓慢、代谢率低,其原因,一是植物细胞加倍时间长,常常为20~60h;二是细胞在生物反应器中常常聚集成团块,很难在培养液中达到高细胞密度。由于细胞生长缓慢,致使培养周期长,不仅增加成本,还增加污染的可能性。(2)植物培养细胞中有用成分含量一般都比较低,其原因常常被认为是培养细胞的形态分化或形成有用产物的某一特定条件受到抑制,其化学特性也随之丧失,解决的办法是不断筛选高产细胞系进行器官培养以及进行次级代谢调控的研究。(3)由于植物细胞抗切变能力低,使得植物细胞在生物反应器中尚未达到一定的生长量就解体了,而不能保证有用物质的产率,因此,有必要研制适合于植物细胞生长的生物反应器以及选择优良的细胞系,抗切变力大小也应作为筛选高产细胞系的条件之一。(4)植物细胞在生长后期分泌大量的多糖和蛋白质,使培养物发粘,细胞被气泡、蛋白质和多糖混合的泡沫所包围,逐渐在生物反应器顶上形成一层覆盖物并越积越厚,但尚无理想的方式来防止泡沫的形成,应用消泡剂常常会抑制植物细胞的生长。(5)在大量培养过程中,每一细胞系都会有其合适的接种量,接种量决定于植物培养细胞开始生长所需时间,植物细胞的生长有其最低密度效应,如果接种量低于某一临界值,接种后的细胞生长将会很慢。(6)大量培养的后处理。后处理的具体内容包括:生物反应器的清洗、维修,有用成分的提取、分离。对于细胞培养物,有的有用成分分泌到培养液中,有的却贮存于细胞内的液泡或其它细胞器中,因此,后处理应根据其具体的情况而定。

植物细胞大量培养分为若干培养系统。成批培养,是一种封闭式培养系统,培养部分既不能进入也不能出去,它含有固定

的体积,当一种必需的营养成分耗尽时,细胞即停止生长,大多数植物细胞均采用分批培养系统培养。半连续培养,被认为是一种具有定时进出装置的开放型的分批培养系统,每隔一段时间收获一部分培养物,然后加入新鲜培养基,通过调节收获的数量和次数来保持细胞数量的恒定;由于不时加入新鲜的培养基,因此可以在较长时间内使培养细胞处于对数期生长。连续培养系统以一定的速率不断收获培养物,并不断补充新鲜的培养基,常常被分为封闭式的、开放式的和同步连续化培养三种类型。固定植物细胞培养系统,用来培养有用成分分泌到胞外的细胞系。

植物细胞大量培养的目标是实现产品的工业化生产,人们已看到了它的广阔前景,少数几种产品已实现商品化生产,但大多数仍处于实验室阶段,还有为数众多的具有重要经济价值的植物未能进行植物细胞大量培养的研究。因此,应加快适合于植物细胞大量培养的生物反应器的研制,了解有用物质的代谢机制和规律,扩大培养植物细胞的种类,探索最优化的培养条件和筛选高产细胞系。

参考文献

- 1 Tulecke W, Nickell L G. Science, 1959, 130: 863~864
- 2 Kaul B, Staba E J. Plant Med, 1967, 15: 145~156
- 3 Lee J M. Enzyme Microb Technol, 1986, 8: 260~265
- 4 Zhou L, Zheng G. Chin J Biotech, 1990, 6: 279~285
- 5 Zhou L, Zheng G. P. quinquefolium. Chin J Bot, 1991, 3: 161~165

(中国科学院昆明植物研究所周立刚硕士撰,郑光楨审)

植物染色体工程 chromosome engineering of plant

有目的的按照一定的设计有计划地通过染色体数目变异和结构变异,使原植物种染色体发生变异的方法和技术。可以概括为染色体的减(削减),加(添加),换(代换),易(易位)。减、加是在数目水平上;易、换是在结构水平上染色体的变化。植物染色体工程的用途很广,主要用于基因定位和异源基因导入。在农业上主要应用于创造新种质资源(包括合成新物种、改造旧物种)和培育作物品种,现已取得明显的经济效益。

自1937年发现秋水仙素在诱导多倍体方面有巨大效果后,1938~1942年间瑞典几乎将所有农作物某些种变成了多倍体;1939~1942年西尔斯(E. R. Sears)从不同种间创造了18个小麦双二倍体;前苏联学者10年间创造了将近100种不同类型的小麦双二倍体。1983年H. C. Sharma和B. S. Gill统计,小麦包括二倍体(AA),四倍体(AABB或AAGG)及六倍体(AABBDD)不同组染色体已与异源属,包括山羊草属,黑麦属,偃麦草属,簇毛麦属,大麦属,滨麦草属,赖草属等杂交(包括正、反交)成功139个组合。人们将异源种属合成双二倍体,作了一段以后,认为整套染色体导入后不协调,同时,许多不良性状也导入,合成一新种较易,成为一大作物品种。自1940年奥玛拉(J. G. O'mara)开始产生异附加系和代换系后,欧洲培育出一批小麦与黑麦的易位系(1B/1R)和代换系(1B-1R)在生产上发挥了极大作用。1983年在日本第6届小麦遗传会上发布统计鉴定出异源种,属导入小麦284个,包括异附加系157个,异代换系77个,易位系50个,其中以黑麦导入小麦最多,占39.75%(其中黑麦附加系53个,代换系21个,易位系23个)。

1986年11月在中国西安召开了第1届国际植物染色体工程学术会,反映了世界上在这个领域的进展,15个国家的代表100余人,涉及植物广泛,以小麦族中小麦、大麦、黑麦及其近缘属种为主,还有水稻、玉米、高粱、大豆、蚕豆、油菜、花生、芋头、山药、棉、麻、番茄、人参、百合、兰花、橡胶树、漆树等。1990年又在美国密苏里召开了第2届国际植物染色体工程会。李振声作了题为“中国的小麦染色体工程”的报告。中国从50年代开始进行的麦类远缘杂交实际上就有染色体工程的研究内容,至80年代才有组织地协作,经过“六五”和“七五”协作攻关,取得很大进展。现将国内外主要进展,综述如下:

多倍体 包括异源(双二倍体)和同源多倍体,已合成了小麦与黑麦、山羊草、簇毛麦、天蓝冰草、中间偃麦草、长穗偃麦草等各种近缘植物的双二倍体。尤其小黑麦已在生产上利用,严育瑞等培育的八倍体小黑麦“劲松5号”在丘陵、旱地产量稳定,品质也优于对照小麦阿勃,1991年已通过贵州省农作物品种审定,作为正式品种在丘陵山区示范推广。其他作物上多倍体育种也有进展,罗耀武将二倍体高粱三系诱变成四倍体三系,并配制成四倍体杂交种,表现籽粒大,蛋白质含量高,结实率高等优点;邹道谦用秋水仙诱变四倍体番茄,选出适合制罐头的优良品种;黄济民在试管内诱导成异源多倍体百合,花大保鲜长、耐贮藏、运输等优点;凌绪柏获巴西橡胶树多倍体;印度J. P. moss 株抗病野生二倍体花生加倍成同源四倍体,再与栽培四倍体花生杂交,从后代中选出高产抗病的花生新品种。

非整倍体 包括单体(2n-1),缺体(2n-2),三体(2n+1),四体(2n+2)等它们是染色体工程的基础材料,除中国春小麦单体系外,全世界已转育成新的单体系74套,中国近年已转育成麦1号(春),京红1号(春),中7902(春),阿勃(半冬),北京10号(冬),丰抗13(冬),甘麦8号(春),小偃6号(冬),苏麦3号(春)等单体系,特别是李振声等首次培育出蓝粒单体小麦和缺体小麦,从植株个体水平上从籽粒颜色就能鉴别染色体数目,缺单体已有4D,3A,4A,5A,6A,1B,7B,2D,3D等9种,自交选择出4D,5A,6A,3D,2D等5种白花结实的缺体小麦。并建立了缺体育种技术,为植物染色体工程开创了新途径。其他作物燕麦,棉花有单体,烟草单体系也完成一套。从1901年Blakoslee等创造第一套曼陀罗三套以来,在玉米、大麦、黑麦,水稻,棉花,番茄,金鱼草许多植物上都有三体系统,近年,中国沈阳农学院获大豆三体,齐齐哈尔师范学院获甜菜三体,武汉大学张迁壁等(1986)采用组织培养法繁殖、鉴定了水稻三体系,已分离出12种,初级三体均有显著不同的形态特征。

异附加系、异代换系和易位系 异附加系是在小麦细胞中附加一对异源染色体,不仅是制造代换和易位系的基础,还可用以探查附加异染色体带何种有用基因。中国已建立小麦附加天蓝冰草染色体,簇毛麦染色体和黑麦染色体3类。郝水等用八倍体小麦中1到中5与小麦回交后经细胞学鉴定得到带有冰草染色体组E和F的各7种普通小麦一天蓝冰草异附加系,共两套,14个,有的抗病,有的高蛋白含量。刘大钧等获得小麦一簇毛麦二倍体附加系,有6种即V2, V3, V4, V5, V6和V7,细胞学鉴定已稳定。还获得小麦一簇毛麦2V, 3V, 4V, 6V, 异代换系簇毛麦的抗白粉病基因定位在V2染色体上,控制护颖颖脊刚毛基因定位在V6, V7上。还有普通小麦一簇毛麦V2异代换系对白粉病免疫。马缘生等得普通小麦一黑麦附加系,附加“1R”的,抗白粉病高蛋白、赖氨酸含量,染色体稳定在2n=44(90%左右),还获得褪下显茎毛“Hp”基因5R和4R, 6R二体附加。小黑麦易位系“75-4045”,它是1B/1R易位。汪丽泉等获矮秆,大穗,高蛋白和抗黄矮花叶病的小一大麦异附加系6个。

在结构水平上,最成功的是李振声等将长穗偃麦草有益基因导入小麦,育成“小偃6号”新品种,是易位系,在黄河流域11个省推广2千多万亩。还有不少代换系,其中“蓝粒”小麦就是一对长穗偃麦草4Ael代换了小麦一对4D染色体,“蓝粒”是一种很好的遗传材料。瑞典Hagberg, Arne 1986诱导了大麦60个重复染色体,并进行仔细研究,10%有生活力,并较原基因型的结实性高,有些籽粒产量高于原品种“Bonus”。

在进行染色体工程研究中发现新种质资源很重要。陈淋阳等发现中国特有的华山新麦草(Psathyrostachys huashanica Keng),耐瘠薄土壤,抗条锈、叶锈和白粉病,用其与小麦人工杂交授精结合幼胚培养获得成功。董玉琛等发现硬粒小麦杰勒多522(DR147)及波斯小麦达金尼库姆(PS5)具有使小麦属间杂种染色体自然加倍的特性,可简便的获得双二倍体。

不断改进工程程序也很重要,中国已有创建,胡含等在染色体工程程序中引入花药培养技术,建立了花粉植株的染色体工程

新体系,不经过受精过程即可直接获得缺体、单体以及各种异附加系和异代换系。李振声在发现小麦标记性状的基础上,开发了一种缺体回交法,不用异附加系也可创制异代换系,从而简化了染色体工程程序。

70年代兴起的植物染色体显带技术,在中国张自立、朱凤绥等建立了植物高分辨带—C带技术,在小麦、大麦、黑麦、玉米、蚕豆上获成功,使染色体显示出比C带、N带、Q带多得多的带纹。近年借助图象处理的计算机分析,可消除图象上的污迹,使染色体轮廓清晰并可分割放大,取出每条染色体,把缠绕部分删除,把弯曲的染色体图象拉长、拉直,根据染色体长短的带型进行同源配对,即可进行带型分析制出标准带型图,模式图,这项技术对染色体工程研究极为有利。再有在分子水平上用“RFLP”(DNA限制性片段长度多态性)检测,是一种新的非常丰富的遗传标记,在染色体工程技术中也是很重要的基础研究。

#### 参考文献

- 1 马缘生. 世界农业, 1987, 12: 33~35
- 2 胡含. 植物细胞工程与育种. 北京: 北京工业大学出版社, 1990. 125~131
- 3 Gordon Kimber. Proceedings of the second international symposium on chromosome engineering in plants. 1990. 1~6
- 4 Internation Wheat GenetiWes Symposium. 1993. 6~7. 32~33

(中国农业科学院作物品种资源所马缘生撰)

### 高等植物 PEPCase 的基因克隆、表达与转移

clone, expression and transformation of phosphoenolpyruvate carboxylase gene in higher plants 磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPCase, EC. 4. 1. 1. 31)是C<sub>4</sub>植物光合CO<sub>2</sub>固定的关键酶,具有从光合CO<sub>2</sub>固定到氮同化的各种功能。它不仅存在于高等植物中,在细菌及蓝绿藻等低等植物中也存在。

1973年蒂因(I. P. Ting)等发现,在高等植物中,PEPCase主要以4种同工酶形式存在,即C<sub>4</sub>光合型同工酶、C<sub>3</sub>光合型同工酶、CAM型同工酶和非绿色型同工酶。由于PEPCase的结构与功能的多样性,近年来其基因结构与表达的研究受到极大的重视。20世纪80年代初以来,PEPCase的基因克隆、表达与转移研究已经取得较大进展。

1984年S. Hisataka等对原核生物E. coli的PEPCase基因的克隆,和1985年K. Tsutomu等对倒囊藻中光合型PEPCase基因的克隆,为高等植物PEPCase的基因克隆奠定了基础。1985年,日本、美国的3家实验室几乎同时完成了玉米PEPCase的cDNA克隆。马克(H. H. Mark)等纯化其mRNA,体外翻译选择富含PEPCase mRNA的区带,作为模板反转录成cDNA,构建了cDNA文库,再鉴定出两个PEPCase cDNA克隆pPC1和pPC2。I. Katsura等则以表达型质粒pSI4001为载体,筛选到一个克隆pM52;pM52克隆虽然接近完整的PEPCase cDNA,但仍缺乏5'一端上游不翻译区序列。于是,Y. Shuichi等以改进的方法得到4个更为完整的克隆pM 499、pM 500、pM41、pM530。将诸多克隆的3'一端不翻译区相比较,发现Poly(dA)拖尾在PEPCase的基因家族中有多结合位点,其结合位点的不同是3'一端长度不均一性的原因。对pM500克隆5'一端序列分析发现,其中只有一个蛋氨酸密码,在一序列的附近也发现有CGCCATG(G)这一真核生物翻译起始的特征序列,再将推测的氨基酸序列与实际测定的序列相比较,便准确地确定了PEPCase的翻译起始点。

自1981年开展PEPCase分子遗传研究工作以来,绝大部分研究者均以玉米为材料,近来人们又对CAM植物及其它C<sub>4</sub>植物进行研究。1988年,朱根(M. S. Jurgen)等以兼性植物冰叶苣荬菜为材料,在盐胁迫诱导CAM碳同化类型的状态下,克隆了cDNA,从中筛选到4个克隆。1990年,克劳德(C. Claude)等又对高粱PEPCase cDNA克隆进行了较为深入的研究。

在PEPCase cDNA克隆及基因结构初步分析的基础上,人们对其基因克隆进行研究。理查德(L. H. Richard)等以EMBL3为载体构建了玉米的基因文库,从中筛选到5个PEPCase基因克隆,但未对其进行亚克隆,将各克隆片段分别与不同来源(根、黄化叶及绿叶)的DNA及mRNA杂交,发现其中有3个可同时与根、黄化叶及绿叶中的DNA、mRNA杂交,而另一个只与绿叶中的mRNA杂交,这表明决定C<sub>4</sub>光合型PEPCase的基因是单拷贝的。K. Takao的研究资料也表明,决定根部PEPCase的基因也是单拷贝的。这些都表明高等植物的PEPCase基因是由一个小的基因家族构成。马克(H. H. Mark)等用cDNA探针进行的Southern杂交结果表明,PEPCase的基因家族约由6个成员组成,其中不同的重复序列决定不同的PEPCase同工酶,决定非绿色型的、C<sub>3</sub>型的等同工酶的PEPCase基因克隆尚未鉴定出来,家族中各成员的相互关系及其进化历程等尚无直接证据。但以不同克隆片段为探针的大量Southern杂交实验结果则暗示,C<sub>4</sub>型PEPCase基因是其它PEPCase基因通过基因重复进化而来(O. Bjorkman, 1976)。

1989年,理查德等克隆了PEPCase基因后,又对包含C<sub>4</sub>光合型PEPCase基因的H1A14克隆进行了详细的结构分析。几乎同时,M. Makoto等也报道了玉米PEPCase全基因为6. 781kb,外显子、内含子的数目及5'一端调节序列的分析也相同,而转录起始点除了在一84有一个外,认为在一81位也有一个起始点。约翰(C. C. John)等又以Mesembryanthemum crystallinum为材料克隆了CAM型PEPCase的基因,并进行了全序列分析。

1989年,理查德进行Northern杂交发现,C<sub>4</sub>型PEPCase在幼叶、绿叶、内叶鞘、穗、幼茎、根外皮及种子中都有表达,只是在不同部位的表达程度不同而已,并非叶片专一,也不是Kranz环依赖型的。1986年,马克等和理查德等以不同PEPCase同工酶的cDNA克隆为探针的杂交实验结果则表明,不同类型的PEPCase同工酶在不同器官中表达有差别。

研究资料表明,维管束鞘细胞的核基因中有PEPCase基因存在,但实际却不表达(通过免疫组织化学定位法已确认PEPCase存在于叶肉细胞而不存在于维管束鞘细胞)。1989年,N. Jarunya等对DNA甲基化的研究资料认为,维管束鞘细胞中DNA的甲基化导致基因结构上的差别,可能是PEPCase基因不能在维管束鞘细胞表达的原因之一。

PEPCase基因表达受光、盐逆境的调节已有较多研究,受氮代谢与温度的调节也有一些研究。总之,对PEPCase基因表达的研究尚不够全面与深入,尤其在表达机理方面还有待探讨。

向C<sub>3</sub>植物导入具有高CO<sub>2</sub>亲和力的C<sub>4</sub>型PEPCase的基因,以期在光合碳同化水平上提高C<sub>3</sub>植物的光合效率,是植物高光效遗传工程育种的重要方向之一。1988年,D. Tagu等将PEPCase的cDNA(来自高粱cDNA克隆pP26B, 1. 35kb)与NPT I基因PCaMVNEO(具卡那霉素抗性)以共转化方式直接导入C<sub>3</sub>植物矮牵牛的原生质体中,并成功地分化出愈伤组织与植株,转化效率达50%~80%。对筛选出的抗卡那霉素的愈伤组织及再生植株,分别以NPT I及PEPCase的cDNA为探针进行Southern杂交,结果表明两者均已整合到核基因中,但有的只与两者之一杂交,有的却同时与两个探针杂交,说明共转化中的基因整合是相互独立的。1991年,董龙英、凌俊等将具有全编码序列及3'一终止信号的2. 0kb玉米PEPCase cDNA克隆到Binary vector PBin 19质粒中,通过农杆菌介导的Leaf-disk方法转入C<sub>3</sub>植物烟草中,研究其转化效率、瞬间表达及基因整合等,此项开创性工作仍在进行之中。

80年代以来,PEPCase的基因克隆、表达与转移方面的研究已经取得较大的进展,但仍有一些关键问题尚待解决,如PEPCase基因家族的精细组成尚未了解,有些成员的基因克隆尚未得到,基因结构中光调节启动子及一些重复序列的功能尚无准确的实验数据,在基因序列与酶功能结构域间的关系、转基因方法的有效性以及获得稳定遗传的高光效转基因植物等方面,都

有待深入研究。

参考文献

- 1 Hisataka S, et al. Gene, 1984, 31: 279
- 2 Mark H H, et al. J Biol Chem. 1986, 261(13): 6132
- 3 Richard L H, et al. Proc Natl Acad Sci USA. 1986, 83: 2884
- 4 Tagu D, et al. Protoplasma. 1988, 146: 101
- 5 Richard L H, et al. Plant Mol. Biol. 1989, 12: 579
- 6 Claude C, et al. Nucleic Acids Res. 1990, 18(3): 658
- 7 董龙英, 凌俊. 植物生理学通讯, 1991, 27(6): 407~412
- 8 凌俊, 等. 植物生理学报, 1992, 18(3): 225~232

(安徽师范大学吴晓东副教授撰; 孙昌璜审)

木本植物基因工程研究

自80年代初美国首次通过基因工程手段培育出抗卡那霉素的烟草植株以来, 至今已有近40种转基因植物问世。它们当中绝大多数是草本农作物, 如烟草、大豆、棉花、蕃茄等, 而木本植物的例子十分少见。和草本植物相比, 木本植物具有多年生的显著特征, 这一性质极大地妨碍了木本植物传统育种工作的开展。而基因工程的应用能大大缩短育种周期, 从提高育种效率的角度看, 基因工程对于木本植物遗传改良的意义更为重大。不管是草本或是木本, 植物基因工程研究的开展主要包括以下方面: (1) 基因克隆、序列分析及基因调控机制等方面的分子遗传学基础研究; (2) 基因转移、细胞转化技术体系的构建; (3) 细胞培养和再分化技术的研究。

木本植物基因工程研究进展

1. 基因克隆及基因调控机制的研究, 木本植物分子遗传学基础研究方面的进展明显落后于草本植物。在木本植物中, 迄今已被克隆并阐明了碱基序列的基因总数不超过20个, 主要有与光合作用有关的基因、外凝集素基因以及与植物保护反应有关的基因等。(1) 与光合作用有关的基因。在木本植物基因表达调控的研究中, 一个重要的发现是松属树木等裸子植物的一些光合作用关键基因不受光的调控。聚光性叶绿素蛋白基因(*cab*)和核酮糖二磷酸羧化酶小亚基基因(*rbcS*)是位于核DNA中的同光合作用有关的两个基因。在被子植物中, 这两种基因的表达受光的调控, 在光照下表达(合成有关蛋白质或酶), 一旦转入黑暗中, 表达立即停止。而在裸子植物的松树中则不是如此, 黑松、欧洲赤松和花旗松的*cab*基因和*rbcS*基因在黑暗中也能同样高水平地表达。烟草、水稻等草本农作物的叶绿体DNA的全部基因序列已被阐明。有关木本植物的叶绿体DNA至今只从针叶树中克隆出了4个基因, 即: 花旗松和黑松的*rbcL*(核酮糖二磷酸羧化酶大亚基基因); 山地松的*psbA*(光系统II的D<sub>2</sub>蛋白基因)、*gidA*(叶绿素合成基因)和*fixC*(叶绿素合成基因)。已经知道, 被子植物的*rbcL*和*psbA*基因受光的调控。但对黑松叶绿体DNA的研究表明, 其*rbcL*和*psbA*基因的表达同前述核DNA中的*cab*基因一样, 是不受光照调控的, 在黑暗中能同样表达。*fixC*和*gidA*是最早发现于原核生物绿藻和苔藓植物地钱叶绿体DNA中的基因, 它们同黑暗状态下的叶绿素合成有关。1991年, Ludholm等首次从针叶树(山地松)叶绿体DNA中发现并克隆出了这两个基因, 其它研究者在云杉和银杏等裸子植物的叶绿体DNA中发现了类似的碱基序列。但在被子植物的叶绿体DNA中, 迄今尚未发现类似序列。*fixC*基因和*gidA*基因在针叶树中的发现为阐明裸子植物光合作用基因调控机制提供了一个重要线索。针叶树叶绿体DNA的遗传方式及结构也有很多特殊点。已研究过的草本植物叶绿体DNA都是母系遗传, 但DNA限制性片断多态性分析和种间杂交的结果表明, 针叶树叶绿体DNA是父系遗传的, 这一点已在花旗松、松及云杉等树种中得到了证明。被子植物的叶绿体DNA长度为135~160kbp, 通常含有一组反向排列的携带有核糖体RNA基因的重复序列。但在花旗松和火炬松的叶绿体DNA中不存在这一反向重复序列, 因此其长度较短, 仅为120kbp。(2) 其它基因。人们早就发现昆虫危害或其它机械损伤能诱导马铃薯、蕃茄等草本植物体内某些基因(损伤激活基因)的

表达, 合成出能干扰昆虫消化功能的胰蛋白酶抑制多肽。在木本植物杨树中也发现了类似的基因调控现象。从杨树中克隆出了损伤激活基因的cDNA, 通过对其进行测序得知其表达产物之一类似于大豆的胰蛋白酶抑制多肽, 另一种表达产物类似于壳多糖酶。在杨树木质部的贮存蛋白中, 通过对其cDNA序列的分析, 也发现了与壳多糖酶同源的氨基酸序列。能凝集动物红血球的蛋白质-外凝集素(lectin)常见于草本植物的种子中。在木本植物的接骨木、刺槐和国槐树皮部中也发现了外凝集素的积累, 其积累量呈现季节性变化, 秋冬季大量形成, 春季消失。外凝集素基因的这种表达调控方式被认为可能同自然界的光周期有关。吉田等(1992)从刺槐中克隆出了外凝集素的cDNA并测定了其碱基序列。

2. 木本植物的细胞转化研究。(1) Ti质粒介导的细胞转化。Ti质粒是致瘤农杆菌(细菌)中独立于核DNA之外的小分子环状DNA。在致瘤农杆菌侵染植物的过程中, Ti质粒中的一段DNA(T-DNA)能够转移到寄主植物核DNA中并得到表达。将希望导入的外源基因插入T-DNA区段, 然后借助致瘤农杆菌的侵染作用即能实现植物细胞的转化。Ti质粒介导转化法在应用上的一个局限性是对于非致瘤农杆菌寄主植物难以奏效。致瘤农杆菌的寄主主要限于被子植物中的双子叶植物, 而单子叶植物和裸子植物(针叶树等)对此菌的侵染不敏感。木本双子叶植物的杨树是致瘤农杆菌的主要寄主之一, Ti质粒介导的细胞转化技术已在杨树的基因工程中得到了富有成效的应用(实例后述)。由于针叶树对致瘤农杆菌不敏感, 所以在植物基因工程开展的早期, 一般认为Ti质粒介导的细胞转化不适用于针叶树。Pythoud等(1987)详细研究了致瘤农杆菌对针叶树细胞的侵染过程, 发现虽然被侵染部位不一定被诱导出明显的肿瘤, 但Ti质粒上的部分DNA片断是可以转移到针叶树细胞中去的。这一发现说明Ti质粒介导法也是适用于针叶树的细胞转化的。(2) DNA直接转移。此法是把纯化的外源DNA直接引入受体细胞, 理论上对任何植物的细胞都能适用, 从而避免了Ti质粒介导法在适用植物种类上的局限性。DNA直接转移技术目前主要有电穿孔法、PEG诱导法和基因枪法, 其中前两种方法需要先将受体细胞经脱壁处理制备成原生质体, 而基因枪法可直接运用于有壁细胞。通过基因枪法已成功地将来自昆虫的荧光素酶基因导入了花旗松细胞, 将Bt基因导入了杨树细胞, 将卡那霉素基因导入了美国鹅掌楸细胞, 其中后两种树种从转化细胞分化出了转基因植株。

3. 向木本植物导入的外源基因和转基因植株的获得状况。在植物基因工程研究中, 将外源基因导入植物并获得转基因植株的目的是: (1) 探讨植物基因调控机理, 充实发展植物分子遗传学基础理论; (2) 对受体植物进行遗传改良, 获得新品种为生产实践服务。根据上述目的, 迄今为止向植物导入的外源基因可以分成两类, 一类为标志基因, 用于跟踪探讨基因调控规律, 同时还用来作为筛选鉴定已转化细胞的标志; 另一类为目的基因, 也即符合遗传改良目的基因。标志基因的表达产物容易检测, 便于追踪基因的表达过程和筛选被转化细胞。已被导入木本植物的标记基因主要有: NPT(新霉素磷酸转移酶)基因, 能使受体细胞获得卡那霉素抗性, 从而便于筛选转化细胞; GUS(葡萄糖醛酸酶)基因和nos(胭脂碱合成酶)基因, 分别赋予受体细胞以葡萄糖醛酸酶和胭脂碱合成能力, 便于检测基因的表达; CAT(氯霉素乙酰转移酶)基因, 能赋予氯霉素抗性, 便于转化细胞的筛选。这些基因都来自细菌(大肠杆菌或致瘤农杆菌)。其它还有来自昆虫的虫荧光素酶基因, 其表达产物在虫荧光素存在下可发出荧光。目前以遗传改良为目的而导入木本植物的基因有: 来自沙门氏菌的*aroA*基因和来自放线菌的*bar*基因, 两者都能使受体植物获得对除草剂的抗性; 来自苏云金杆菌的Bt基因和来自马铃薯的蛋白酶抑制多肽基因(*pin2*), 能赋予或增强受体植物的抗虫性或机械损伤的保护反应能力。已被导入了某些标志基因的木本植物目前已有近20种, 其中针叶树有花旗松、云杉、落叶松和火炬松, 其余都是被子植物。对针叶树导入基因后只获得了细胞或愈

伤组织水平上的短暂表达,而由转化细胞分化出完整转基因植株的实例目前只有杨树(3种)、核桃、苹果、鹅掌楸和猕猴桃,它们无一例外都是被子植物。在这些木本被子植物中,只有杨树获得了具遗传改良意义的转基因植株。通过Ti质粒介导法已分别把aroA基因和bar基因(de Block, 1990)导入了杨树,获得了具除草剂抗性的转基因植株;通过基因枪法把Br基因导入了杨树,获得了抗虫植株。

#### 木本植物基因工程的存在问题

1. 有利于遗传改良的外源基因来源贫乏。目前,向木本植物导入的为数不多的基因多属标志基因,没有实际的育种价值。已导入的极少数具遗传改良意义的基因,也同标志基因一样,大都是来源于细菌(或放线菌)的控制单一性状的简单基因。由于木本植物自身的特点和人类经济活动的需要,对木本植物需要赋予的性状要比对草本农作物的更趋复杂和多样化,它们大都是多基因控制的性状,如木材性质、树干通直性、纤维素含量、耐瘠薄性、耐风沙或抗旱性等。很明显,如此复杂而多样化的性状表达仅靠细菌提供基因是难以满足的。木本植物的驯化程度低,遗传多样性远比草本的栽培农作物复杂,其自身就是一个丰富多彩的基因库,有待于开发利用。但这又有待于木本植物的基因定位、克隆、测序等基础研究的深入开展,而目前有关木本植物分子生物学方面的基础研究是非常薄弱的。

2. 细胞培养和分化诱导技术有待突破。80年代以来,以Ti质粒介导法为中心的各种DNA转移技术发展很快。对于木本植物的基因工程来说,目前实现细胞转化已不是难题,最大的问题在于如何使已转化细胞分化成完整植株。目前除杨树及少数果树以外的大多数木本植物尤其是针叶树的细胞培养技术还极不完善,从体细胞诱导再生植株还十分困难。迄今为止未能获得针叶树转基因植株的主要原因不在于细胞转化技术,而在于无法将转化的细胞诱导成完整植株。细胞分化诱导技术的建立已成为决定木本植物基因工程能否广泛开展并走向实用化的关键环节之一。

#### 参考文献

- 1 Yamamoto N, Mukai Y, Matsuoka M, et al. Light independent expression of cab and rbcS genes in dark-grown pine seedlings. *Plant Physiol*, 1991, 95: 379~383
- 2 Parsons T J, Bradshaw H D, et al. Systemic accumulation of specific mRNAs in response to wounding in poplar trees. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1989, 86: 7895~7899
- 3 McCown B H, McCabe D E, Russell D R, et al. Stable transformation of *Populus* and incorporation of pest resistance by electrical discharge particle acceleration. *Plant Cell Rep*, 1991, 9: 590~594
- 4 Fillatti J J, Sellmer J, McCown B, et al. Agrobacterium mediated transformation and regeneration of populus. *Mol Gen Genet*, 1987, 206: 192~199
- 5 程东升. 日本的林业生物技术研究现状. *世界林业研究*, 1992, 3: 70~75

(东北林业大学林学系程东升教授撰)

### 植物诱导抗病性研究

review on the recent progress and prospect of the plant induced resistance 植物诱导抗病性是指植物在诱导因子的作用下产生的能够抵抗原来不能抵抗的病原物侵染的一种抗病性能,或称获得性免疫。植物诱导抗病性作为一种现象在20世纪初就已被观察到,后来也不断被人发现和证实。50年代高又曼首先提出了“诱导的抗侵染保护反应”的概念,但当时的观点只局限于植物受病原物侵染刺激后而产生的保护反应,与目前诱导抗病性的概念是有明显区别的。70年代以后,植物诱导抗病性研究日渐增多,其研究成果越来越受到人们的高度重视。人们发现,许多生物包括真菌、细菌、病毒,致病菌或非致病菌,活体、死体或其代谢产物,甚至一些非生物因子如重金属、无机化合物、紫外线等都能诱导植物产生抗病性,并且在几

十种植物的上百种病害上都得到了证实。目前,植物诱导抗病性已成为植物病理学、植物生理学乃至生物化学领域最活跃的研究分支之一,有些研究成果已在生产上开始推广应用,为植物病害的防治开辟了一条新途径。

#### 植物诱导抗病性的特性

许多研究表明,植物诱导抗病性同一般植物固有的抗病性相比,具有以下特性:(1)植物诱导抗病性的产生必须有诱导物存在。诱导物可以是生物性的,如弱致病的或非致病的真菌、细菌和病毒等,生物的代谢产物,非生物因素(包括物理的和化学的)等。(2)诱导处理可以使感病植物表现抗病,抗病植物更加抗病。如利用葫芦藓孢等诱导物处理黄瓜,可使感病的黄瓜品种抵抗炭疽病等病害,并且使已经抗病的品种抗病性增强。(3)诱导物与病原物之间没有明显的专化性,诱导抗病性多表现为多抗性。如用烟草坏死病毒(TNV)诱导处理黄瓜后,能使黄瓜抵抗10余种病害。(4)植物经诱导处理后需经一定间隔期(迟滞期)才能产生诱导抗病性。这种间隔时期因不同植物和诱导物而异,一般几天即可。(5)诱导处理的时间以幼苗期为好,成株期处理效果较差。如在幼苗期用非致病的炭疽菌诱导处理黄瓜,可使黄瓜产生对炭疽病较好的诱抗效果,但开花后再进行诱导处理,这种效果就很差。(6)植物经诱导处理后,有的表现为阶段性抗病,有的表现为终生抗病,多次诱导可延长诱导抗性保持的时间。(7)诱导抗病性的产生,一般需要一定的温度和光照条件。

植物诱导抗病性的诱导因子 诱导因子是指能诱导植物产生抗病反应的物质和因素。大量的研究证明,能够起到这种作用的诱导因子种类很多,包括生物性的和非生物性的2大类。

1. 生物性诱导因子。(1)利用病原物的非亲和小种(株系)作为诱导因子。Müller用马铃薯晚疫病病菌的非亲和小种接种马铃薯薯块,获得了对亲和小种的抗性;Elliston等用菜豆炭疽菌的非致病小种处理菜豆,使菜豆产生了对致病小种的抗性反应;Littlefield发现用无毒小种预先接种亚麻叶片,可诱导亚麻产生对亚麻锈病菌有毒小种的抗性。Ouchi等在大麦白粉病,Cheng等在小麦秆锈病,岩野正敬在水稻稻瘟病等诱导方面得到了相同的结论。(2)利用病原物的弱致病株系作为诱导因子。这方面研究最突出的例子是病毒。Salama发现利用TMV的弱毒株系G预先接种烟草,8d后再用中毒株系L和强毒株系S接种,基本上不表现症状。大鸟信行等用番茄病毒病的弱毒株系L-11A和L-11A-237接种番茄,获得了对强毒株系的保护作用。我国张秀华和田波等用化学诱变法获得了番茄花叶病毒的弱毒突变体N-14,接种番茄幼苗后,可保护番茄免受强毒株系的侵染。Schnthorst等和吴海耻在棉花黄萎病,吴昔昌等在黄瓜枯萎病等病害上也发现了类似的结果。(3)利用植物病原物的近似种作为诱导因子。陈延熙等用红麻炭疽菌处理苹果,使其产生对苹果炭疽病菌的免疫反应;刘英慧等用香蕉、菜豆和红麻上的炭疽菌处理黄瓜幼苗,可使黄瓜产生对炭疽病菌的抗病反应;于思勤等用茄病镰刀菌处理西瓜,使其免受西瓜枯萎病菌的侵染。类似的例子还有很多。(4)利用植物自身的病原物作为诱导因子。Kuc'等发现用瓜类炭疽菌在黄瓜第1真叶上进行诱导接种,1周后植株就产生了对病菌自身的免疫反应,这时如再用病菌进行接种则不产生病斑或病斑很少,后来他们在西瓜、甜瓜上也获得了同类的结果。Jenns等发现利用烟草坏死病毒(TNV)处理黄瓜,可使黄瓜产生对多种病害的抗性,而TNV本身对黄瓜也有一定的致病性。Cohen等发现利用烟草霜霉病菌孢子囊悬浮液注射烟草的茎,经过一段时间后可使全株免受霜霉病菌的侵染。(5)利用病原物的处理物作为诱导因子。Cheorgin发现,将根瘤细菌加热杀死,然后注射到天竺葵植株上,24h后再用有毒力的活菌在原接种点接种,并不形成肿瘤,如事先未进行处理的则形成肿瘤。Lovrekovich等和Sequeira等把烟草野火病菌或青枯病菌加热致死并用来处理烟草叶片,可分别诱导产生对这2种病菌的抗性。前苏联学者发现用接骨木镰刀菌菌丝浸出液处理马铃薯薯块并在生产季节再次喷雾,明显提高了马铃薯对晚疫病等多种病害的



抗性,防治效果甚至超过了杀菌剂。(6)利用生物性激发子作为诱导因子,激发子(Elicitor)是一种能够诱导植物产生抗病反应(或产生植保素)的特殊物质,目前这种物质已从真菌细胞壁、微生物代谢产物以及植物细胞壁等处分离得到。它与活菌一样也能诱导植物产生抗病反应。李洪连等发现从诱抗菌菌丝细胞壁中获取的激发了,与活的诱抗菌一样能诱导黄瓜产生对炭疽病的抗病反应。从目前已得到的生物性激发子来看,多数属于多糖类化合物(葡聚糖),部分属于糖蛋白、多肽、酶、脂肪酸类化合物。有人设想如把激发子从生物体内大量提取出来,或进行人工合成并工厂化生产,将会对植物病害的防治产生很大的作用。

2. 非生物性的诱导因子。除了生物诱导因子外,还有一些非生物的物质和因素也能诱导植物产生对病害的抗性,主要包括物理因素和化学物质2大类。(1)物理因素类的诱导因子。一些物理因素如冷冻处理、高温处理或紫外线照射能够引起植保素的产生和积累,诱导植物产生抗病性。如菜豆下胚轴经紫外线照射24~48h,可使感病的菜豆品种变为抗病,此时再接种菜豆炭疽病菌,病菌就很难侵染。Lyon等发现大豆的茎经冷冻处理后可导致植保素的积累。Hargreaves等发现菜豆下胚轴细胞受到损伤后也会引起植保素的累积。(2)化学物质类的诱导因子。有些化合物本身没有杀菌作用,但处理植物后却能诱导植物产生抗病反应。如盐酸普鲁卡因处理黄瓜根部,可诱导其抗白粉病;苯硫脲处理黄瓜根部,可使黄瓜黑斑病大为减轻,这种防病作用的原因是苯硫脲可提高黄瓜体内过氧化物酶的活性,并产生木质化反应,使病菌难以侵染。将水稻幼苗根部用二氯丙烷处理后,也可诱导水稻抗稻瘟病。另外,乙烯、聚丙烯酸、多聚腺苷酸、阿斯匹林、三氯甲烷、化学除垢剂等也能诱导植物产生抗病反应。有人还发现用重金属盐如HgCl<sub>2</sub>等处理马铃薯芽管组织,可引起植保素(日齐素)的产生和积累。范桂芳等研究发现,对氨基苯磺酸钠能提高小麦品种的抗锈能力。雷新云等人研制出植物病毒病诱抗剂NS-83,它不仅能钝化病毒和抑制病毒侵染,还能诱导植物体内过氧化物酶的活性,提高抗病能力。

植物诱导抗病性产生的机制

1. 诱导抗病性与植物保卫素。许多研究表明,植物受诱导后多数能产生植保素,它是一类特殊的化学物质,平时在植物体内含量很小,一旦受到某种诱导后则大量产生和积累,一般分子量较小,具亲脂性,对病原菌具有很高毒性,但专化性不明显。目前已在22个科的植物中发现数百种植保素,以豆科和茄科植物为最多。

2. 诱导抗病性与植物体内酶的活性。植物受诱导后,与抗病反应有关的酶活性显著增强,如Kuc<sup>1</sup>等发现黄瓜受诱导处理后体内过氧化物酶活性明显提高;李洪连等发现黄瓜经诱抗菌处理后,体内过氧化物酶及其同工酶、多酚氧化酶、苯丙氨酸解氨酶活性都显著增强。这些酶在植物的抗病代谢过程中都起着十分重要的作用。

3. 诱导抗病性与植物组织的木质化反应。许多研究都证明,木质化反应是诱导抗病性产生的重要机制之一。Ride发现用非致病的灰葡萄孢对麦叶进行带伤接种,接种点附近迅速木质化,可使麦叶免受病菌侵染。Hammerschmidt等和李洪连等研究发现黄瓜叶片用诱导菌处理后,升表皮组织木质化程度加强,使病菌难以侵入。木质化反应一方面增强了寄主细胞壁和表皮组织的抗侵入功能,另一方面也使病菌的致病过程受到抑制,同时木质素的前体物质对许多病原菌也是有害的。

4. 诱导抗病性与免疫信息物质。Kuc<sup>1</sup>等发现黄瓜受诱导后体内可产生一种“免疫信息物质”,并可通过韧皮部上下传导,使植株产生系统免疫,而且能嫁接传给接穗。这种免疫信息物质在葫芦科内没有属、种和品种的专化性,用已产生免疫反应的黄瓜作砧木嫁接感病的西瓜和甜瓜接穗,也能使西瓜和甜瓜获得免疫。Kuc<sup>1</sup>等在烟草上也发现了相似的结果。有些学者还报道杨树和枫树受到微生物侵染或其它因素诱导后,会产生一种挥发性信号物质,并可引起周围邻近树木产生免疫反应。

植物诱导抗病性研究的前景 越来越多的研究证明,植物具有抵抗各种病害的潜在能力,人们可以采用适当的诱导处理使这种潜能表达出来,变感病的品种为抗病品种。目前,这方面的研究已有不少成功的事例,并且这个领域的研究成果已引起植物病理、植物生理生化、分子生物学以及微生物学等学科工作者的高度重视。

植物诱导抗病性研究不仅可以揭示植物和微生物之间复杂的相互关系,具有十分重要的理论价值,而且对于植物病害的防治工作也具有相当重要的应用价值和现实意义。由于采用适当的诱导处理可使感病植物表现抗病,而且抗性比较稳定,还能抵抗多种病害,它克服了以往一些防治措施存在的不足,如抗病育种年限太长,抗病品种的农艺性状(包括产量)往往不如感病品种;化学防治易污染环境,并且引起病菌产生抗药性;一些重要的作物病害如棉花黄萎病、瓜类枯萎病、植物病毒病目前仍缺乏有效的药剂和抗病品种等问题。因此,一旦在诱抗因子的筛选和诱抗技术方面取得成功,将会在生产上得到迅速而广泛的应用。如番茄病毒病的弱毒疫苗在国内外广泛应用就是一个很好的例子。很显然,植物诱导抗病性研究将成为植物病理学学科研究的一个新的研究领域,它的研究成果将为植物病害的防治开辟一条新的途径——诱导免疫。

虽然诱导抗病性在现象上已被认识很久,但对其研究广泛而深入的开展只不过是近20a左右的时间。从目前的研究成果和水平来看,还不能象人或动物使用疫苗那样对植物进行大规模免疫化处理,诱导抗性技术离生产上广泛应用还有很大距离。但是,作者相信随着科学工作者逐渐的高度重视和不懈的辛勤努力,诱导抗性技术作为防治植物病害的一种新手段在不远的将来一定会变为现实。目前,国内许多单位已开始了这方面的研究。

从日前的研究现状和进展来看,作者认为植物诱导抗病性研究今后应注重解决以下几个方面的问题:(1)针对生产上目前难以防治的病害进行研究,如土传病害、病毒病害和重要的叶部病害等,这样,一旦取得成果容易在生产上推广。(2)加强诱抗因子筛选的研究,诱抗因子筛选的范围要广,包括生物的和非生物的,非致病的、弱致病的或强致病的微生物,微生物代谢产物及其提取物等。(3)重视诱导抗性研究的深度,如诱导抗性产生的机制、诱导抗性的遗传规律,诱抗物的激发子、植物受诱导后产生的植保素和免疫信息物质等,甚至可以考虑将激发子、植保素和免疫信息物质进行人工合成和工厂化生产。(4)要对诱导抗性技术进行实用化研究,使其简便易行,成本低,防效好,易于被生产上接受,诱抗剂或诱抗疫苗还要做到易于生产、运输和保存。

参考文献

- 1 于恩勤,等. 西瓜枯萎病的生物防治. 果树科学,1980,6(4): 23~30
- 2 王守正,等. 蔬菜诱导抗性研究现状. 中国蔬菜,1992,(5):46~49
- 3 刘英慧,等. 西瓜炭疽病人工免疫研究. 植物病理学报,1989,19(2):86~90
- 4 李洪连,等. 黄瓜对炭疽病诱导抗性的初步研究 I. 诱导抗病机制的研究. 植物病理学报,1993,23(4):327~332
- 5 李洪连,等. 诱抗菌激发子诱导黄瓜产生对炭疽病的抗性. 植物生理学报,1993,19(4):313~319
- 6 陈延熙,等. 苹果炭疽病人工免疫研究. 生物防治通报,1985,1(1):16~18
- 7 高又曼,曾士迈,等译. 植物侵染性病害原理. 北京:农业出版社,1958
- 8 雷新云,等. 植物诱导抗性对病毒侵染的作用及诱导物质 NS-83的探讨. 中国农业科学,1987,20(4):1~6
- 9 Cohen Y, et al. Evaluation of systemic resistance to blue mold induce in tobacco leaves by prior stem inoculation with *Peronospora hyoscyamitabacine*. Phytopathology, 1981, 71: 783~787

10 Kue' J. Induced immunity to plant disease. *Bioscience*, 1982, 32: 854~860

(河南农业大学植保系王守正教授撰)

**植物的热激蛋白** heat shock protein in Plants 在高于生物正常生长温度8~12℃的温度下,生物体内合成的一些新蛋白质称之为热激蛋白(heat shock protein, HSP)。这种现象首先由 Ritossa 于1962年在果蝇上发现。至今,可以说所有生物包括微生物、昆虫、哺乳动物、藻类、高等植物都对热激产生反应,合成 HSP。有关 HSP 的文献相当丰富,本文将近年来有关植物 HSP 的产生、分布、功能和基因表达调控的文献资料作简略综述。

**植物 HSP 的产生和分布** 在热激处理后3~5min 内 HSP mRNA 的量增加,20min 时可以检测到新合成的 HSP。让植物一直处于热激状态,HSP 的合成一般只持续几个小时。HSP 可存在于植物细胞膜、细胞核、细胞质和各种细胞器中。尤其是少 HSP 可与细胞膜相结合,这似乎表明 HSP 对高温下膜执行其功能起着一定的作用。

#### 植物 HSP 的功能

1. HSP 对植物正常的生长、发育的作用。HSP 有一部分是组成型表达的,起着管家基因的作用。看来它们对植物正常的生长、发育是必需的。有这样一个有趣的实验,在百合小孢子发育的某个特定阶段,在无热激存在时出现某些小分子量的 HSP mRNA。同时发现减数分裂期特异性 cDNA 克隆 EMPR-C<sub>6</sub> 与这些小分子量的 HSP mRNA 结合在一起。这似乎表明 HSP mRNA 与植物细胞的减数分裂有关。某些 HSP70 的表达具有组织和发育阶段的特异性。低分子量的 HSP 的 mRNA 可出现在植物胚胎发育的早期。某些小分子量的 HSP mRNA 还可以在豌豆和小麦的成熟种子中出现。上述事实从不同角度证明植物 HSP 与其本身的生长、发育密切相关。

2. HSP 与植物的耐热力(thermotolerance)。高温热激下产生的 HSP 是否可提高植物的耐热力,许多学者对此进行了大量的研究。神、丙二酸可诱导高粱的小苗产生 HSP,而神和丙二酸处理后的高粱小苗具有较强的耐热力,这就间接证明了 HSP 与植物耐热力有关。还有一些更加直接的证据,如用不能合成 HSP 的突变体、HSP70 合成受阻的细胞以及不能合成 HSP70 的细胞为材料,发现热激时这些细胞对热敏感性增加甚至死亡。但也有相反的观点,即使没有 HSP 的产生,生物照样具有一定的耐热力。因此,这一问题有待进一步研究。

3. HSP 与肽链的折叠、蛋白质的组装和转运有关。HSP 可以充当分子伴侣的作用。分子伴侣是指那些与新生肽链折叠、蛋白质的组装和转运有关的特殊的蛋白质分子。真核生物中的 HSP90、HSP70、HSP60 都具有这种功能。Pelham 等人证实 HSP 参与蛋白质的折叠过程并可防止高温下蛋白质发生变性以及聚集。Nover 等认为高温下番茄的 HSP 在细胞质聚集成颗粒状结构可能对蛋白质的合成机器起保护作用。也有人认为这种由 HSP 形成的颗粒状物质可以与新生肽链结合,对新生肽链有一定作用。Bip(一种结合蛋白)是 HSP70 类似物,存在于内质网中,与种子贮藏蛋白的累积有关。通过对 HSP70 氨基端进行晶体分析,发现它具有 ATPase 的活性。HSP60 可以与 RuBPC 结合,参与 RuBPC 的组装过程。虽然缺乏直接的证据,小分子量的 HSP 也可能具有分子伴侣的作用。因为与 HSP70 相类似,小分子量的 HSP 广泛存在于植物细胞的细胞质、内质网和叶绿体中。由于 HSP 具有分子伴侣的作用,因此有人作了个大胆的推测,认为正是由于 HSP 的分子伴侣作用使得植物细胞具有耐热能力。

#### 植物 HSP 基因表达的调控

1. 植物 HSP 基因在转录水平上的调控。植物 HSP mRNA 的快速积累主要是由 HSP 基因转录水平提高所致。已经发现在 HSP 基因转录中起调控作用的 DNA 序列,称之为热激元件(heat shock element, HSE)。它首先是在果蝇的 HSP70 基因中发

现,为一种顺式作用元件,位于热激蛋白基因5'端的启动子区域。近年来发现 HSE 由多个5'-nGAAn-3'序列反向重复而成。已有不少证据表明 HSE 专门负责 HSE 基因在热诱导下进行转录表达。Baumann 等(1987)对转基因烟草中的大豆 Gm HSP17.3-B 基因5'端进行一系列启动子缺失,发现-115与-298之间有多个 HSE,其中-181至-154这段 DNA 对于 Gm HSP17.3-B 基因转录的诱导起决定性作用。Strittmatter 等(1987)从大豆 HSP17.3-B 基因启动子区域(-76到-41)分离出两个相互重叠的类 HSE 序列,把这两个相互重叠的序列插在 CaMV35S 启动子(花椰菜花叶病毒35S 启动子)上游-46bp 处,转基因烟草可在没有光照的情况下热诱导表达该基因;当它们插入到豌豆 rbcS-3A(1.5二磷酸核酮糖羧化酶小亚基3A 基因)启动子上后,结果 rbc S-3A 基因的表达可以在光中被热诱导。既然大豆的 HSE 类似于植物中的 TATA 盒子,那么植物受到热激时究竟需要多少个 HSE 才足以使 HSP 基因热诱导表达呢?Schöffle 等和 Wing(1989)均认为单个非重叠的 HSE 就足以使植物的 HSP 基因受热诱导表达。在植物中,与热激元件相结合的热激转录因子(heat shock transcription factor, HSTF)也已经被鉴定出来,并且发现它与 DNA 相结合的结构域与酵母和果蝇 HSP 基因的 HSTF 相似。

2. 植物 HSP 基因在翻译水平上的调控。热激可以改变受刺激细胞的翻译机器,从而使细胞倾向选择 HSP mRNA 而不选择非 HSP mRNA 进行翻译。植物的不同发育阶段对 HSP mRNA 也表现出选择作用,而且这种选择作用与细胞分化程度的高低有关。胡萝卜球形胚时期对 HSP mRNA 具有较强的选择性,此时往往选择大部分的 HSP mRNA 进行翻译。虽然愈伤组织中 HSP mRNA 的量大大多于球形胚中的 HSP mRNA 的量,但是,由于这种选择性的存在,导致愈伤组织和球形胚二者的 HSP 量没有多大差别。所以,HSP 的合成在某种情况下受到翻译水平的调控。

当前热激蛋白研究中存在的问题及今后研究的方向

植物细胞在受热激时能合成 HSP。未受热激的植物细胞也能合成某些 HSP,而且不同的细胞组分中存在不同类型的 HSP。这些结果表明 HSP 在植物的基本的生命过程中起一定的作用。但是热激下产生的 HSP 与未受热激时产生的 HSP 之间有无联系?它们的关系怎样?这是一个值得研究的问题。

植物的 HSP 与其本身的耐热性有关,但是是平行关系还是其它一种什么样的关系,改变植物 HSP 的表达能否提高植物的耐热性能,这些问题目前还无法回答。从现有的文献来看,还没有任何有关转基因植株中 HSP 表达量增加或减少的报道,更没有 HSP 量的增加可使转基因植物的耐热能力提高的报道。如果转 HSP 基因植株中 HSP 量增加后确实可以提高其耐热力,那么就可以断定 HSP 具有增强植株对高温的忍受能力的作用。看来这些问题尚需探讨。目前已经获得了一些 HSP 的抗体以及 HSP 的 cDNA 探针,这些将可能有助于上述问题的解决。

HSP60、HSP70、HSP90 可以改变其它蛋白质的构象或有利于它们的组装,充当分子伴侣的作用。分子伴侣是当今国际上蛋白质研究的一个热点,其作用的分子机理已经有一些假说,但尚需进一步深入研究。弄清楚分子伴侣的作用机理对于揭示植物细胞耐热性的本质无疑是十分重要的。

叶绿体是植物细胞所特有的细胞器。HSP60 参与叶绿体 RuBPC 的组装过程。有人企图利用 HSP60 实现 RuBPC 的人工组装。这是有目的地改造叶绿体,从而提高作物光合效率的一种新尝试。

毫无疑问,只有在彻底弄清楚 HSP 诱导的机理以及各种 HSP 的作用以后才有可能有目的地利用 HSP 改良作物,为农业生产服务。

#### 参考文献

- 1 Baumann G, Raschke E, Bevan M, et al. Functional analysis of sequences of a soybean heat shock gene in transgenic tobacco plants. *EMBO J*, 1987, 6: 1161

- 2 Bouchard R A. Characterization of expressed meiotic prophase repeat transcript clones of liliun; meiosis - specific expression, relatedness, and affinities to small heat shock protein genes. *Genome*, 1990, 33: 68
- 3 Ellis RJ. proteins as molecular chaperones. *Nature*, 1987, 328: 378
- 4 Hall BG. Yeast Thermotolerance does not require protein synthesis. *Journal of Bacteriology*, 1983, 156: 1363
- 5 Nestor R A, Zimmerman J L. Heat shock gene expression if controlled primarily at the translational level in carrot cells and somatic embryos. *Plant Cell*, 1992, 4: 657
- 6 Novot L, Scharf K-D, Neumann D. Formation of cytoplasmic heat shock granules in tomato cell cultures and leaves. *Mol Cell Biol*, 1983, 3: 1648
- 7 Pelham HRB. Speculations on the functions of the major heat shock and glucose regulated proteins. *Cell*, 1986, 46: 959
- 8 Schöffle F, Pieping M, Bauman G, et al. The function of plant heat shock promoter elements in the regulated expression of chimaeric genes in transgenic tobacco. *Mol Gen Genet*, 1989, 217: 246
- 9 Strittmatter G, Chua NH. Artificial combination of two cis-regulatory elements generates a unique pattern of expression in transgenic plants. *Proc Natl Acad Sci, USA*, 1987, 84: 8986
- 10 Wing D, Koncz C, Schell J. Conserved function in *Nicotiana tabacum* of a single *Drosophila* Hsp 70 promoter heat shock element when fused to a minimal T-DNA promoter. *Mol Gen Genet*, 1989, 219: 9

(中国林业科学院邱德有、北京大学朱激撰)

### 植物抗病基因工程的研究进展

植物病害数目多达数百种, 几乎所有作物在生长期内都会遭受到不同程度的危害。就主要作物之一的水稻而言, 每年遭受病害的损失就达数十亿美元。怎样有效地防治植物病害, 减少巨大损失, 满足日益增长的世界人口需求, 是农业生产上的当务之急, 而防治植物病害的根本途径归根到底依赖于培育抗病品种。采用常规方法进行抗病育种, 不仅受到物种间的限制, 而且要固定一个抗病性状进入栽培品种费时巨大, 常常需要10年之久, 何况要寻找一个具有独立抗病性状的物种也是非常困难的。现代生物技术的发展, 使得将外源抗性基因导入栽培品种, 赋予其特定抗病性成为可能, 从而大大加速了抗病育种的进程, 开辟了抗病育种的新时代。目前针对单链 RNA 病毒, 采用的外壳蛋白基因途径比较成熟, 一些重组植株已进入大田试验, 可望在20世纪末应用于农业生产; 而针对不同病菌(细菌、真菌)的固有特性, 采用不同策略的抗病基因工程正在发展中, 可望近期内有所突破。

#### 抗病毒基因工程

1. 外壳蛋白途径。1986年 Beachy 研究小组首次将烟草花叶病毒(TMV)外壳蛋白基因(CP 基因)导入烟草, 培育出抗 TMV 的烟草植株。开创了抗病育种的新纪元。至今采用这一途径, 针对黄瓜花叶病毒(CMV), 苜蓿花叶病毒(ALMV), 马铃薯 X 病毒(PVX), 马铃薯 Y 病毒(PVY), 烟草线条病毒(TSV), 烟草脆裂病毒(TRV), 水稻条纹叶枯病毒(RSV)等主要病毒, 成功地构建出各种抗病毒工程植株。这些表达病毒外壳蛋白基因的植株其抗病程度与细胞中该基因的表达水平一般成正比, 即外壳蛋白基因的表达水平越高, 其抗病力越强。进一步试验发现转基因植物还能交叉保护其它株系或相关病毒的侵染; 田间试验表明这些工程植株的抗病性与室内相当, 农艺性状与对照无明显差异。Nelson 等对转 TMV CP 基因的重组番茄进行田间试验, 结果对照几乎 100% 都发生症状, 果实减产 26%~35%, 而转基因番茄(VF36)发病率仅为 5%, 产量几乎不受影响; 同时他们还发现, 表达

TMV 的 UICP 基因的重组番茄能交叉保护 TMVmPV230 的 3 个强株系的感染。这些结果都显示出外壳蛋白途径在农业生产中防治病毒病的潜在威力。第一批转基因烟草经历了室内、温室、田间试验后, 在 1995 年前后将应用于大田生产。

2. 其它途径。除了外壳蛋白这一有效途径外, 近来还开创出多种抗病毒基因工程的新方法。1986年 Baulcombe 等成功地将 CMV 卫星 RNA 导入烟草, 获得的表达全长序列卫星 RNA 的工程烟草植株, 对该病毒或相关病毒的复制和症状表现有抑制效果。1988年, Yamaya 等获得了表达 TMV 弱毒株完整基因组的工程植株, 这种植株生长正常, 不表现明显症状, 而对 TMV 有交叉保护作用, 且其保护作用比表达外壳蛋白植株的强。但是上述这 2 种重组植物都成了病毒“贮存库”, 弱毒株、卫星 RNA 都有突变成强致病力株系的危险, 因此有必要构建缺失突变株才能很好地克服这些潜在缺陷。1990年, Golcemboski 等将 TMV ul 株系的非结构基因(54KD 基因)导入烟草, 获得了对 TMV 免疫性抗性的工程植株, 引起了人们对病毒非结构基因的极大兴趣。但 54KD 基因重组植物的比较专一的获得抗性若变得广谱一些, 在农业生产的应用价值会更大。

以上是利用病毒基因组的有用基因的研究, 抗病毒基因工程的有用基因的另一部分是来自植物等生物体的基因, 例如病毒复制抑制因子、致病相关蛋白、抗体、核酶的基因等。其中致病相关蛋白工程已获得了重组植株, 只是抗性不理想; 而病毒复制抑制因子、抗体、核酶等工程的设想很好, 展现出许多诱人的前景, 但目前还处于起步阶段, 还有一些需要解决的技术难题。

采用基因工程使植物获得抗病性能有多种途径, 归结起来, 基因的来源有来自病毒本身的, 也有来自植物等生物体的, 其作用机制有影响病毒复制的, 也有影响其转移的, 但至今还是利用病毒外壳蛋白基因策略的效果最好。尽管如此, 这种转基因植株也只是延迟一年生植物的病毒病的发生, 而且目前能转移基因的主要是 RNA 病毒, 因此植物抗病病毒基因工程还有许多问题有待解决。

#### 抗细菌基因工程

1. 单一基因控制的抗性。植物病原细菌、真菌具有细胞结构, 且侵染致病机制复杂, 这就给用生物技术来防治这两大类病害带来了困难。植物与病原菌相互关系的分子基础研究, 为用基因工程技术培育抗病菌工程植株积累了知识, 目前抗病菌基因工程已经展开, 并取得了一些有意义的进展。

烟草野火病菌(*Pseudomonas syringae* pv. *tabaci*) 侵染烟草叶片后, 产生一种细菌毒素即烟毒(tabtoxin), 干扰寄主细胞代谢并间接影响叶绿素的合成, 形成野火病症。日本人率先从该菌中分离出解毒基因, 并导入烟草, 获得的重组植物能降解该菌分泌的烟毒素, 不形成病斑。最近 Herrera-Estrella 等报道了类似的结果, 他们将抗 phaseolotoxin 基因导入烟草, 获得了耐 phaseolotoxin, 并抗该菌侵染的工程烟草植株。针对病原菌的致病毒素, 克隆解毒基因采用基因工程技术来培育抗病品种是抗菌工程的可行途径。但是针对寄主特异性毒素, 从其分泌菌中分离其解毒基因的努力, 多年来却未能如愿以偿, 确是一件遗憾的事。

水解酶尤其是几丁质酶在体外具有抑制病原菌生长的生物活性。1991年, Broglie 等将蚕豆的几丁质酶基因与强启动子 CaMV35S 连接, 在烟草和芜菁中得到了高效表达, 获得的抗性植株显著抑制病原真菌(*Rhizoctonia solani*) 的生长, 延迟了立枯病的出现。蚕豆与烟草的几丁质酶性质有所不同, 如底物特异性、Vmax 和 Km、稳定性等, 也许正是由于病原菌与所不熟悉几丁质酶相遇才导致植物抗病性的出现。将烟草的碱性液泡几丁酶基因转入近缘种的烟草中, 虽然获得了高效表达, 却没有表现出对 *Cercospora nicotianae* 的有效的保护作用。

核糖体灭活蛋白(RIP)来自植物, 是一类作用于真核生物细胞核糖体、抑制蛋白质合成的蛋白毒素。RIP 不灭活自身的核糖体, 却能特异性地作用于亲缘关系较远的种类, 如真菌的核糖体。1992年, Schell 等将受控于仿诱导启动子的大麦 RIP cDNA 导

入烟草,获得能抗土壤病原真菌 *Rhizoctonia solani* 的重组植株。在此例中,外源 RIP 在寄主细胞中未表现出毒性,转基因烟草仍能生长、传代。但 RIP 对宿主细胞的潜在毒性依然存在,这一点要特别注意,这是确保 RIP 在作物防卫中的成功应用的关键。在策略上可以通过使 RIP 分泌到胞外或液泡中,或是设计成诱导型表达,来减轻 RIP 产生的宿主毒害作用。另外,几丁质酶和葡聚糖酶具有降解真菌细胞壁、抑制真菌生长的功能,如果 RIP 与这两种酶协同作用,也许会显著提高抗菌或抗病能力。

抗性基因不仅来自高等植物和病原菌,例如,来自牛的溶菌酶,在体外对多种革兰氏阳性菌和阴性菌有抗性,包括农杆菌属、假单胞菌属、黄单胞菌属等的一些植物病原菌。初步实验证实,让牛的溶菌酶基因在烟草中表达,对野火病菌的侵染有一定的抵抗作用。

寻找抗菌基因进行抗病基因工程是一项长期而艰巨的任务。作者等曾从对水稻白叶枯病菌拮抗作用很强的芽孢杆菌中纯化出几种抗菌蛋白,将编码这些抗菌蛋白的基因导入水稻制作重组植株的工作还在进行中,效果如何倍受关注。

2. 多基因控制的抗性。植保素(phytoalexin)和木质素在细胞内的积累或在细胞壁上的沉积直接表现为抗病效应,而它们的生物合成和沉积过程是受多基因控制的。弄清其生物合成途径,找出协调多个相互独立的防卫基因的调控基因,是调控多基因防卫系统,提高抗病效果的关键。PAL(phenylalanine ammonia-lyase)是合成木质素单体以及某些植保素(pterocarpan and furanocoumarins)的关键酶。对含 PAL 基因的重组植物的分析结果表明,PAL 基因表达水平高的植物中 phenylpropanoid 积累和抗菌活力都得以增加;此外,表达 peroxidase 基因的重组烟草体内不仅该酶的活力大大增加,而且还增加了对 *Peronospora parasitica* 的抗性。

植物病原菌常常不能耐受非寄主植物的 phytoalexin,因此,让病原菌与非寄主的 phytoalexin 相遇,是提高植物抗性的又一条新路子。将花生的 stibene 基因导入烟草,结果在烟草中合成了新的 phytoalexin resveratrol。但是,还未见这种新的 phytoalexin 对提高抗性的效果究竟如何的报道。近来不少研究进行了这方面的探索,这不仅在抗病育种方面有重要价值,而且是对研究 phytoalexin 生物合成机制的贡献。

位于植物细胞壁中的负电性过氧化物酶(peroxidase),能催化产生酚基以形成木质素的氧化型聚合物,另外也可能参与与保卫机制有关的胞壁结构蛋白交联反应。往烟草中导入番茄的过氧化物酶基因,在其自身的启动子或 CaMV35S 启动子的控制下过氧化物酶活性大大增加,同时也加强了对 *Peronospora parasitica* 的抗性,抑制了病症的发展和病原真菌的孢子形成。

在植物抗病保卫机制被激活的初期,信号的识别和传导是非常重要的。已经发现,十八肽 systemin 是在植物受伤后诱导全株性保卫机制的信号分子;而水杨酸则是由过敏性坏死引发全身性保护反应的信号传递因子,它在烟草内的受体是一种约650KD的可溶性多聚体。在信号传导与信号响应过程中,常伴随着胞内外离子浓度的改变。当植保素被激发合成时,先出现氢离子的内流和钾离子的外流,随即出现钙离子内流,导致胞液中植保素含量增加。进一步弄清其内在机制,对开辟新的抗病工程途径尤为重要。

抗菌基因工程经历几年的徘徊之后,终于走出了低谷,近来常可见到一些成功的报道。只要加强植物与病原菌相互作用的分子基础研究,加强重组植物中抗性基因跟踪分析,就一定能用生物技术制作出能在农业生产上应用的抗病原菌的重组植物新品种。

#### 我国的现状及存在问题

1. 现状。80年代中期特别是实施863计划以来,根据 Beachy 的外壳蛋白途径,以流行于我国的主要农业病毒为材料,克隆外壳蛋白基因,进行抗病工程,培育出抗 TMV、CMV 等病毒的工程烟草植株,目前已进入规模大田试验,与此同时也成功地构

建出能表达 CMV 卫星 RNA 的重组植株,也表现良好的抗 CMV 特性,这些都大大缩短了我们与世界的距离。在抗细菌病基因工程方面,我们把精力集中在抗菌蛋白途径上,纯化出一批抗菌蛋白,可至今未见有表达抗菌蛋白的重组植物的报告。在抗真菌病基因工程方面进展不大,有待进一步加强。抗病基因工程研究不仅可以为农业生产提供具有特定抗病性的品种,而且是植物与微生物相互作用分子基础研究、分子生物学、基因工程方面综合国力的显示,因此有必要进一步加强。

2. 存在问题。(1)基因工程与基础研究。近几年来我们习惯于运用基因操作技术,以我国的生物资源为材料,克隆国外已有的基因,这对赶上世界水平起到了一定的作用,但我们不能满足于此,必须基础研究与基因工程并重,在进行基因工程的同时加强基础研究,深入研究植物与微生物相互作用的分子基础,去创造新的抗病途径;深入研究重组植物的抗病机制,去发展现有的抗病途径。只有这样我们的研究才真正有生命力,否则的话与世界缩短了距离还会拉大。(2)基因工程与常规农业技术。采用基因操作获得的只是一种人工种质新材料,而不是生产上可以立即应用的新品种,必须经过常规的育种程序,将重组植物的外源基因稳定延续给后代或通过有性繁殖转移至其它品种,此后该品种还必须在合理的栽培措施的紧密配合下,才能实现最终价值。运用基因工程技术进行的抗病育种,并不是一个单一的技术,而是多学科(分子生物学、基因工程、植物病理、遗传育种、组织培养等)的紧密合作才能完成的工作。必须将生物技术与传统技术合理配合,科学组装,才能有效地解决农业生产中的问题。(3)基因工程与环境生态平衡。前几年由于遗传工程生物野外试验法规尚不健全,重组植物很容易进入大田试验,这为我国在这方面的研究赶上世界水平开了绿灯,但基因工程技术在带来明显经济利益的同时,亦有可能带来一些潜在问题,我国是一个农业大国、一个发展中的国家,还是要有个法规,加强管理,以防万一。固然作物的生长位置较为固定,且多为一年生植物,加之目前导入的几乎都是单基因,但并不等于就没有问题。对特定的基因工程生物体在非受控条件下可能造成的生态后果必须加强研究,作出较可靠的预测及综合的生态评价后,再在农业生产上推广应用。

#### 参考文献

- 1 Powell Abel P, et al. Science, 1986, 232: 738~743
- 2 Nelson R S, et al. Bio/Technology, 1988, 6: 403~409
- 3 Loesch-Fries L S, et al. EMBOJ, 1987, 6: 1845~1852
- 4 Baulcombe D C, et al. Nature, 1986, 321: 446~449
- 5 Yamaya J, et al. Mol. Gen. Genet. 1988, 315: 173~175
- 6 Golemboski D B, et al. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1990, 87: 6311~6315
- 7 Cutt J R, et al. Virology, 1989, 173: 89~97
- 8 Anzai H, et al. Mol. Gen. Genet, 1989, 219: 492~494
- 9 Fuente-Martinez J M, et al. Bio-Technology, 1992, 10: 905~909
- 10 Broglie K, et al. Science, 1991, 254: 1194~1197
- 11 Neuhaus J M, et al. Plant Mol. Biol. 1991, 16: 141~151
- 12 Logemann J, et al. Bio/Technology, 1992, 10: 305~308
- 13 Christopher, J Lamb, et al. Bio/Technology, 1992, 10: 1436~1444
- 14 Jinyuan Liu, et al. Chinese J. of Biotech. 1992, 8: 187~194
- 15 Elkind Y. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1990, 87: 9057~9061
- 16 Kolattukudy P E. In Molecular Signals in Plant-Microbe Communication Verma, D. P. S. (Ed) CRC Press 1992. 65~83
- 17 Hain R, et al. Plant Mol. Biol. 1990, 15: 325~335
- 18 田颖川等. 中国科学 B 辑, 1990, 8: 822~831
- 19 Yie Y, et al. Molecular Plant-Microbe Inter actions, 1992, 5: 460~465
- 20 Dazhong, Wen, Chin. J. Appl. Ecol. 1992, 3: 371~177

(清华大学刘进元教授、余荔华博士撰)

**突变体在植物激素研究中的应用** use of mutants on phytohormone research 自从1956年 Phinney 最早发现了缺少 GA 的玉米矮生突变体以来,到目前为止,人们已经获得了许多突变体,它们对研究植物激素的生物合成途径,生长发育的激素控制以及在分子水平上研究激素的机理等,有着特殊的意义,有些突变体还有商业价值。

植物激素突变体可以分为两类:(1)影响激素水平的合成突变体,(2)影响激素反应的敏感性突变体。最常见的合成突变体是阻断激素合成的某些步骤的突变体,如缺少 GA<sub>1</sub>的矮生豌豆和玉米,缺少 ABA 的番茄萎蔫突变体,藓(*Physcomitrella* sp.)

是细胞分裂素过量产生(over producing)的突变体等。绝大多数突变体是属于敏感性的类型,它们影响激素的亲合力或受体分子,它们在表型上与合成突变体没有什么差别。

GA 突变体

1. 玉米,Phinney 最早证明玉米节间伸长是受激素基因控制的。玉米矮生的表型可以从幼苗到成熟的不同时期表现出来。影响玉米高度的突变体有30多个,涉及5个非等位基因 d<sub>1</sub>,d<sub>2</sub>,d<sub>3</sub>,d<sub>5</sub>,an<sub>1</sub>。这些突变体的表型特征是在外加 GA<sub>3</sub>后,植物恢复正常高度。矮化的植株比正常植株体内 GA 活性小,因此认为这些突变体的矮化,是因为 GA 生物合成途径中不同的步骤受到抑制的结果。此外,还有另外5个非等位基因的突变体 D<sub>8</sub>,pe<sub>1</sub>,mi<sub>2</sub>,na<sub>1</sub>和 na<sub>2</sub>,它们对外加 GA<sub>3</sub>反应很小或无反应。

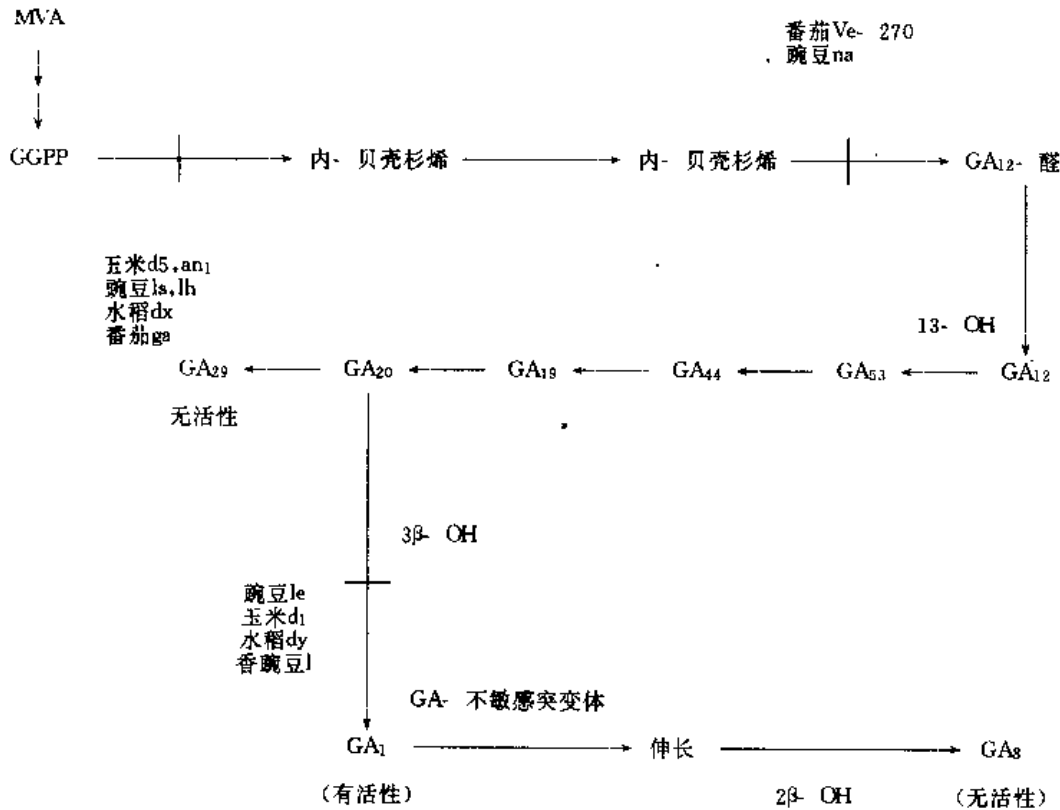


图1 GA生物合成的13-羟基化途径及合成突变体可能的作用位点

GA 合成的途径是从甲瓦龙酸(MVA)起始。二甲烯丙基焦磷酸酯(DAMPP)与三分子异戊烯基焦磷酸(IPP)缩合,形成牻牛儿苗基焦磷酸(GGPP),环化形成珂巴基焦磷酸(CPP),进一步环化形成内贝壳杉烯,然后形成 GA<sub>12</sub>醛。GA<sub>12</sub>醛是所有 GA 的前体。玉米中从 GA<sub>12</sub>醛开始,通过13-羟基化,产生 GA<sub>53</sub>、GA<sub>44</sub>、GA<sub>19</sub>、GA<sub>20</sub>、GA<sub>1</sub>。此外,这个途径的副代谢产物还有 GA<sub>17</sub>、GA<sub>29</sub>、GA<sub>8</sub>,它们都是无活性的。现已证明玉米的伸长与 GA<sub>1</sub>的控制有密切关系,而与植株中总体 GA 无关。

d<sub>5</sub>阻碍 CPP 环化成为内贝壳杉烯。这个步骤是由内贝壳杉烯合成酶所催化的。正常玉米幼苗茎的无细胞抽提物可以合成内贝壳杉烯,但 d<sub>5</sub>幼苗的抽提物,无论以甲瓦龙酸为底物还是以 GGPP 或 CPP 为底物,合成的贝壳杉烯速度只有正常幼苗中1/5。

d<sub>1</sub>的基因阻碍 GA<sub>20</sub>→GA<sub>1</sub>,这个步骤是3β-羟基化。这个基因的作用位点可以从下列实验得到证明。(1)用[<sup>13</sup>C,<sup>3</sup>H]GA<sub>20</sub>双标记物供给正常幼苗,产生 GA<sub>29</sub>和 GA<sub>1</sub>标记物,而 d<sub>1</sub>幼苗只产生 GA<sub>29</sub>及其分解物,不产生 GA<sub>1</sub>。(2)在 d<sub>1</sub>幼苗内 GA<sub>1</sub>(包括其无活性代谢物 GA<sub>8</sub>)比正常幼苗中少2%。(3)d<sub>1</sub>幼苗中 GA<sub>20</sub>(无

活性代谢物 GA<sub>29</sub>)的积累比正常幼苗中多10倍。

d<sub>2</sub>可能控制7C-氧化步骤即 GA<sub>12</sub>醛→GA<sub>53</sub>。因为在幼苗上加 GA<sub>53</sub>醛没有活性,加 GA<sub>53</sub>则叶鞘伸长。d<sub>3</sub>可能控制13-C-羟基化步骤,因为幼苗加 GA<sub>12</sub>醛不表现活性,而加 GA<sub>53</sub>醛则表现活性。

现在发现了约20个以上 GA 不敏感型的玉米突变体,如 D<sub>8</sub>。它的表型特点是叶片短而宽,卷曲,节间短,雌雄穗小,花粉发育好。这组突变体对外加 GA 无反应,说明它们的作用是在 GA<sub>1</sub>合成以后的步骤。虽然,从 GA 被受体接受到伸长所发生的事件还不清楚,但用这类突变体可以解释这些步骤。例如,GA 可以改变微管和微丝的取向,这对细胞的伸长是十分重要的。突变体影响伸长可能是改变了表皮细胞的长度或每个节间的细胞数目。所以利用敏感突变体研究伸长的生理过程是有意义的。

2. 豌豆,Brian(1957)最早研究豌豆节间伸长基因。但在60~70年代并不了解高生与矮生豌豆在 GA 类似物上有什么区别。近来证明豌豆的矮化也受 GA<sub>1</sub>基因控制。高生型(Le)豌豆体内有 GA<sub>1</sub>,在光下生长的矮生型(le)则没有 GA<sub>1</sub>,le 阻碍 GA<sub>20</sub>→GA<sub>1</sub>的3β-羟基化步骤。在 Le 中,[<sup>3</sup>H,<sup>13</sup>C]GA<sub>20</sub>可以转变为 GA<sub>1</sub>,

GA<sub>8</sub>或GA<sub>29</sub>,le中[<sup>3</sup>H,<sup>13</sup>C]GA<sub>20</sub>不能转变为GA<sub>1</sub>,只产生少量GA<sub>8</sub>。这表明le是一个渗漏突变体(leakymutant)。这些资料证明GA<sub>1</sub>是le豌豆中唯一影响伸长的激素,就如d<sub>1</sub>在玉米中,dy在水稻中一样。在豌豆中除le外,还研究了7个非等位基因,它们是na, lh, ls, la, cry, lk, lm, 有些是GA敏感突变体。豌豆突变体lv的反应与光有关。在暗或远红光中lv与正常野生种Lv在节间长度上没有区别,在连续红光或白光下,lv的节间缩短,但它们的GA<sub>1</sub>或GA<sub>20</sub>水平在光下并没有改变。因此认为可能是光通过光敏素系统影响GA的敏感性而不是影响GA的水平而控制伸长。

除对玉米、豌豆的突变体做了较详细的研究外,近年来也用突变体研究了牵牛、水稻、小麦、番茄、拟南芥和四季豆的有关伸长基因。

**ABA突变体** 已经研究的ABA合成突变体有番茄萎蔫突变体flc, sil, nol, 土豆萎蔫突变体dp, 豌豆萎蔫突变体wil, 拟南芥萎蔫突变体aba等,这些突变体导致ABA的水平降低。玉米vp-5, w-3, vp-7突变为体是由于阻碍类胡萝卜素合成而降低ABA水平。现在认为ABA合成途径是:(1)直接的C<sub>15</sub>途径,即法尼基焦磷酸(FPP)环化及氧化;(2)间接的C<sub>40</sub>途径,从紫黄质分解。目前,更多的研究者支持后者。例如,玉米突变体阻碍类胡萝卜素合成,并导致ABA水平降低,这暗示ABA合成需要类胡萝卜素中间产物。利用类胡萝卜素合成的抑制剂支持这个结论。如果C<sub>40</sub>中间产物断开得到ABA的C<sub>15</sub>前体,则将会形成两种副产物,C<sub>25</sub>(一次断裂)或C<sub>10</sub>(两次断裂)。Taylor用缺少ABA的番茄突变体,发现了一个C<sub>10</sub>产物,2,7-二甲基-2,4-辛烯酸(ODA)。在flc和sit突变体中ODA水平比野生型中高,这表明在C<sub>40</sub>前体物断裂后,flc和sil中ABA合成受阻。在nol突变体中OAD水平比野生型中低,这表明not中ABA合成的抑制是在C<sub>40</sub>前体物断裂后,flc和sit中ABA合成受阻。在not突变体中OAB水平比野生型中低。这表明not中ABA合成的抑制是在C<sub>40</sub>断裂过程时或断裂以前,植株受到水胁迫时更是如此。Lindforth等证明在flc和sit中以如同ODA一样的方式积累2-反式-ABA-醇,并达到足以降低ABA水平的近似量。这证明2-反式-ABA-醇为ABA合成的中间产物。Parry等研究了紫黄质分解的产物,<sup>14</sup>C-叶黄氧化素,转化成ABA。他们发现在野生和not突变体中发生转化,而在flc, sit中只限于位置上的转化。这些结果与Lindforth的结果是一致的。但是详细的中间产物与这3种基因的作用仍不清楚。

ABA萎蔫突变体的表型特点是气孔不关闭,植株萎蔫。突变体的叶片比野生型失水快,它们的叶片离体后严重失水,对干旱的反应是不积累ABA。同时,虽然在水分胁迫下,气孔导度仍很高。土豆突变体在缺水5d时,基部叶片导度仍为0.9~1.0cm·s<sup>-1</sup>,此时叶片已萎蔫。而同样萎蔫程度的野生型叶片(13d不给水),导度下降到0.1~0.4cm·s<sup>-1</sup>。

从拟南芥、大麦、水蕨类Ceratopteris等植物中分离得到了ABA不敏感的突变体。这些突变体对外加ABA不表现敏感性。有些突变体只影响一部分敏感性,如拟南芥abi-3只降低种子休眠,而“cool”大麦突变体用ABA处理后不关闭气孔。这些结果证明,对ABA的各种作用,种子休眠、幼苗生长、气孔关闭来说,至少有某些共同的步骤。在拟南芥中至少有2个作用位点。突变体似乎只影响某一个生理过程,所以它是受体突变体。

**生长素突变体** 虽然在生长素合成突变体方面做了很多研究,但到目前为止,还没有检测到高等植物的生长素合成突变体。原因可能是这种基因是致死的,或是对它们表现形式还缺乏了解。Blonstein等(1988)从*Nicotiana plumbaginifolia*原生质体中发现一个突变细胞系,是生长素缺陷型突变体。它们的幼茎即使嫁接到野生的烟草上,也不能获得再生植株。它的生长呈丛生状,顶端优势弱,叶子生长慢,叶片干枯前,老叶上出现褐色斑点,并发生脱落死亡,证明它是生长素缺陷型。蕨*Physcomitrella patens*从原叶状体转变成茎丝体,需要生长素和细胞激动素。有的突变体不能完成这个转变,可能是生长素强烈分解的结果。巨型浮萍(*Lemna gibba*)变种是由于游离IAA的增加,但其基因控制和IAA改变的意义不太明确。拟南芥有色氨酸合成突变体trpl-1,它生长缓慢,叶卷曲,丛生,花不育,其体内IAA含量低。

用遗传操作手段可以通过转基因植物提高内源生长素水平。例如,致癌农杆菌T-DNA上合成生长素的基因已经被分离出来,并转到矮牵牛中,在启动子控制下得到表达。结果这些植物中IAA含量比野生型产长10倍,植物顶端优势明显,节间变长,叶子卷曲,木质部和韧皮部增加,能单性结实,这些性状是因为IAA过量产生所致。用这种转基因植物研究生长素过量产生在特定组织中的作用有广阔前景。

生长素敏感突变体比合成突变体更为普遍。番茄横向重力性(dgt)突变体就是一例。对外加IAA不敏感,下胚轴不伸长,不产生乙烯。认为是它的生长素原初作用位点受到影响所致。但现有资料还不能说明这一点。这个突变体的表现也与乙烯有关,所以它是一个乙烯突变体。

近来King等研究了*Nicotiana plumbaginifolia*化学诱变突变体。培养基中加入20μmol·L<sup>-1</sup>NAA,野生型生长受抑制,根、芽畸形,而抗生长素突变体生长正常。在加20μmol·L<sup>-1</sup>BAP培养基上,抗细胞激动素突变体茎叶正常。此外,还从这种植物突变体的原生质体中筛选出生长素自养型(auxin auxotroph)和温度敏感型的个体。在加NAA的培养基上,野生型生长正常,而生长素自养型突变体则生长受抑制。这说明它们生长不依赖于生长素。

生长素自养型突变体和野生型分别培养在33℃+生长素,33℃-生长素,26℃+生长素,26℃-生长素的条件下,在33℃+生长素处理中,突变体叶子变褐或退色,芽生长较差,说明这个突变体对温度敏感,而且其生长不需生长素。

用筛选出的*N. plumbaginifolia*突变体研究IAA代谢,结果表明在野生型和突变体细胞中,IAA半衰期为20min。IAA最初的代谢产物为IAA-天冬氨酸和IAA-葡萄糖酯。当培养基中不含IAA时,野生型和突变体二者在代谢上表现不同。突变体中IAA-天冬氨酸代谢快,半衰期27min,而野生型中为9.5h。

**细胞激动素突变体** *Physcomitrella patens*是细胞激动素过量产生的突变体,它的iPA和ZT含量比野生型高100倍。配子托数量多,就像野生型用细胞激动素处理一样。表明细胞激动素对配子托的形成有重要作用。体细胞杂交证明至少有3个基因控制着细胞激动素的产生。也有细胞激动素缺失突变体,它不产生配子托,加细胞激动素就可以产生。这可以用来研究蕨的细胞激动素合成。可惜在高等植物中还没有发现细胞激动素合成突变体。但从致癌农杆菌中已分离出细胞激动素合成基因,并在高等植物中得到表达。

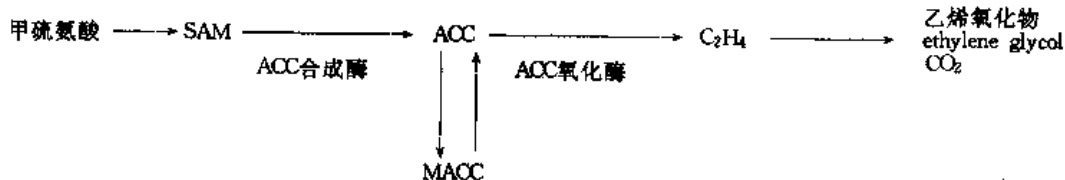


图2 乙烯的生物合成与代谢

乙烯合成途径被许多酶所催化,ACC合成酶是限速酶,它对乙烯合成很重要(图2)。

Zobel (1973) 发现了一个番茄缺乙烯突变体 *dgt* (*diageotropica*), 其表型特点是茎与根水平生长(横向重力), 茎细而坚硬, 叶呈深绿色, 偏上性, 初生根和不定根不分枝。外加乙烯( $<0.005\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ )后, 突变体生长正常。此突变体对 IAA 反应不敏感, 即加 IAA 后, 不能使乙烯的合成增加。由于 IAA 可以促进 ACC 合成酶活性, 促进乙烯生成, 因此认为 *dgt* 是一个乙烯合成突变体。此突变体及其等基因亲本 VFN8, 适用于研究 IAA 诱导的乙烯生成, 及其在控制植物形态学和生理学方面的相互关系。也有人用它研究干旱条件下乙烯生成。

*dgt* 组织中的酶活性可以因为受伤或厌氧条件而提高, 故有人认为也许基因是与 IAA 受体有关, 而不是与乙烯合成途径本身有关。

成熟、衰老、脱落突变体 已筛选出了几个与番茄成熟性状有关的突变体。*rin*, *Nr*, *nor*, *alc*。它们的特性如表1。这些果实不易变软的特性, 特别适合做商品, 运输方便, 耐贮藏。可随市场需要而催熟出售。

表1 番茄成熟突变体的特性

| 特性   | Nr | rin | nor | alc |
|------|----|-----|-----|-----|
| 乙烯跃升 | 下降 | 无   | 下降快 | 下降  |
| 呼吸跃升 | 下降 | 无   | 无   | 下降  |
| 色泽变化 | 橙  | 黄   | 黄   | 粉   |
| 软化   | 慢  | 很慢  | 很慢  | 慢   |

现在认为乙烯发生有两个系统。系统 I 是成熟前小量的乙烯产生, 系统 II 是成熟过程中乙烯自我催化步骤。*rin* 比正常番茄乙烯减少是由于系统 I 受到影响。无论是哪个系统, 乙烯合成的途径是一样的。只是用乙烯合成还不能解释为什么 *rin* 即使加了乙烯也不变软变红。可能乙有几个受体, *rin* 是影响受体2, 3, 因此转化酶和 PG 酶活性受到抑制; *Nr* 是影响受体2。这称之为多元受体机理(图3)。也有人用 *rin* 和 *Nr* 研究了花和叶的脱落。

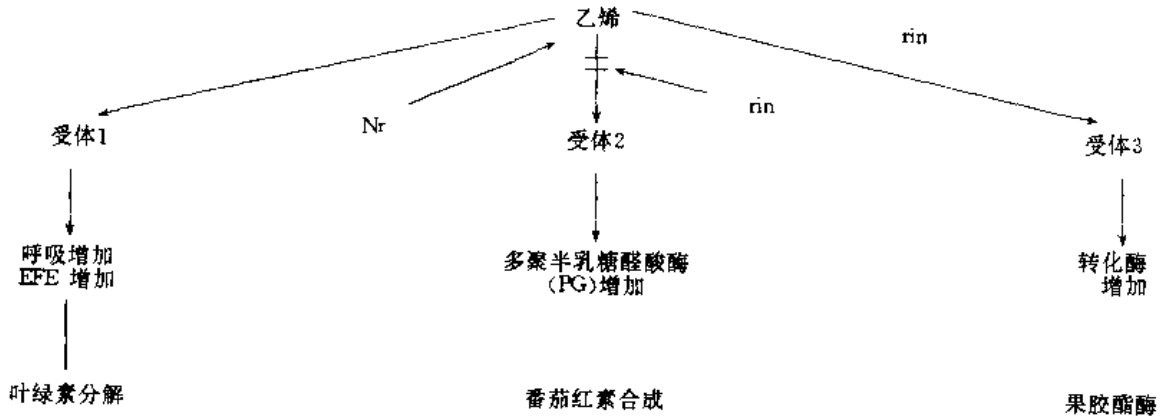


图3 *rin*和*Nr*突变作用的多元受体机理

最近报道, 用拟南芥抗乙烯突变体 *er* 研究乙烯对叶片衰老的作用。*er* 是抗乙烯突变体, 它的特性是在空气中含  $15\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$  乙烯中放3d, 叶能保持绿色, 而野生型则衰老变黄。*er* 的离体叶圆片, 无论在光下或暗中, 叶绿素分解都慢。光下突变体乙烯合成更快。BA 减慢野生型和突变体叶绿素分解, ABA 则加速分解。ABA 处理能增加突变体乙烯产生, 但 AOA 阻止乙烯合成时, ABA 也使突变体衰老变黄, 说明 ABA 促进衰老不是通过乙烯合成的增加, 乙烯只是叶衰老的一个因子。

植物激素突变体的研究前景广阔。这一领域的工作在我国基本上是个空白点。

参考文献

- 1 Reid JB. Phytohormone mutants in plant research. *J Plant Growth Reg*, 1990, 9: 97~111
- 2 Reid JB. The genetic control of growth via hormones. In: Davies PJ ed. *Plant hormones and their role in plant growth and development*. Martinus Nijhoff, Wordrecht. The Nederland, 1987. 318~340
- 3 Reid JB, Davies PJ. The genetics and physiology of gibberellin sensitivity mutants in peas. In: Karssen CM, Van Loon, Vreugdenhil (eds). *Progress in plant growth regulation*, 1992. 214~225
- 4 Taylor I B. ABA deficient mutants. In: Thomas H. Grierson D(eds). *Developmental mutants in higher plants*. Cambridge University Press, Cambridge, 1987. 197~221
- 5 Quarrie SA. Use of genotype in endogenous abscisic acid levels in studies of physiology and development. In: Hoad

- GV, Lenton JR, Jackson MB, Atkin RK (eds). *Hormone action in plant development*. Butterworth, London, 1987. 89~105
- 6 Blonstein AD, Vahala T, Koornneef M, et al. Plants regenerated from auxin-auxotrophic variants are inviable. *Mol Gen Genet*, 1988, 215: 58~64
- 7 King PJ, Blonstein AD, Fracheboud Y, et al. A genetic approach to auxins and cytokinins. In: Pharis PR, Rood SB (eds), *Plant Growth Substances*. Springer-Verlag, Berlin, 1988. 32~44
- 8 Zobel RW. Some physiological characteristics of the ethylene-requiring tomato mutant *diageotropica*. *Plant Physiol*, 1973, 52: 383~389
- 9 Tucker GA, Schindler CB, Roberts JA. Flower abscission in mutant tomato plants. *Planta*, 1984, 160: 164~167
- 10 Zacarias L, Reid MS. Role of growth regulators in the senescence of *Arabidopsis thaliana* leaves. *Physiol Plant*, 1990, 80: 549~554

(中国农业大学农业生物学院韩碧文教授撰)

**花粉发育的超微结构** 20世纪30年代以来, 人们利用透射、扫描、冷冻蚀刻的方法, 结合生理、生化、细胞化学、放射自显影、荧光显示和图像分析等技术研究花粉发育的超微结构与功能的关系, 阐明了花粉的发生、发育过程及其成熟时的形态结构和功能, 为植物分类学、遗传育种学、细胞生物学、生理学和形态发生学等学科的研究提供基础理论资料。

小孢子是小孢子母细胞减数分裂的产物。很久以来,揭示减数分裂过程系列变化与小孢子发生发育的关系一直是人们研究的热点之一。关于小孢子母细胞的壁积累胼胝质并最终被包围的生物学意义有两种见解,R. N. Kapil 等(1978)认为此现象是减数分裂的先决条件,也是后来4个减数孢子转变为小孢子的前提;而 Johri(1984)则认为花粉母细胞孤立化未必是减数分裂的先决条件,因为当胼胝质壁孤立性母细胞时,细胞器、细胞质已通过各种方式进行了重新组装,完成了消除孢子体信息的程序,因此胼胝质壁只是保护使之不再受邻近孢子体信息的干扰,从而转向单倍配子体的发育。樊汝汶等(1992)报道,在中国鹅掌楸花粉母细胞减数分裂启动时,细胞质和细胞器的变化与胼胝质的积累是同步发生的。

Heslop-Harrison 等(1966)在扫描电镜下观察到大多数植物的胼胝质壁并不是连续的,而表现为筛网状。陈祖德等(1988)报道,在知母的四分体小孢子的胼胝质壁上也间断分布着胞质通道。但是,有的植物(如矮生菜豆)的四分体小孢子的胼胝质壁上并无胞质通道。因此,胼胝质壁的功能,或如同分子筛,控制着细胞间的物质交流,成为减数分裂同步性的原因,或使小孢子间保持相对的独立性;尹晋芳等认为,或因种而异,或二者兼而有之,是因发育时期不同而异。此外,胼胝质壁可以控制花粉外壁的形态建成。R. G. Stanley(1974)等认为,核把信息通过胞质送到胼胝质壁层,形成印章一样的负模板,然后压制出外壁上特有的雕纹。

在减数分裂过程中,小孢子母细胞内部发生深刻的变化,主要体现在胞质融合与胞质重组,最早在月见草属植物中发现胞质融合现象。郑国鎔等(1955)不仅发现百合的小孢子母细胞间,染色质与细胞质均可以通过胞间连丝进行穿壁运动,而且还发现胞间连丝通道的数量是变化的,表明通过形成次生胞间连丝以提高胞质融合的效率。黄芪和多合花粉植物属梅笠草属的胞间通道存在于减数分裂的全过程,表明小孢子母细胞胞间染色质的转移是没有时间性的。总之,胞质融合不仅对细胞间的通讯具有重要作用,而且经过细胞间的物质交换最后形成的小孢子,至少有一部分含有的遗传物质的质和量都会改变,结果将会影响遗传进程的控制。小孢子母细胞适应减数分裂的需要,保持着较高的代谢水平,随着核的巨变,细胞器及内含物均发生变化。1971年,学者们对紫露草属的和百合属的植物进行了详尽的电镜研究,发现线粒体和质体的变化最为明显。线粒体的结构由复杂到简单,直至小孢子形成后,线粒体才恢复为具有充分发达嵴膜的正常形态。同时,质体也有相似的变化,主要表现在片层结构的减少,不能沉积淀粉。研究资料证实,这一现象也存在于其他植物中。Heslop-Harrison 称这种现象为胞质重组,是减数分裂的普遍性状,因为由二倍体向单倍体转变需要合适的物质环境。从四分体中释放的小孢子具有浓厚的细胞质和细胞器,可以经过进一步的分裂、分化形成雄配子体。

小孢子第一次有丝分裂时细胞器的分布有着决定性的意义。在被子植物的雄配子体发育过程中,质体的不等分布非常普遍。R. Hagemann(1981)根据细胞学分析,将被子植物分为4种类型:番茄型,生殖细胞与精子中不含质体;茄型,只在幼嫩的生殖细胞中含质体,成熟生殖细胞或精子中质体退化;小麦型,生殖细胞与精子具有质体,但在受精过程中质体与精核脱离;天竺葵型,生殖细胞与精子都具质体,并转移到合子中。值得注意的是,营养细胞中脂体的分布更为特殊。陈祖德(1988)等发现在知母小孢子向二细胞花粉过渡时期,脂体紧密地排列在生殖细胞的周围,并将其称为“脂体冠”。“脂体冠”并不稳定,部分脂体可能扩散到胞质中,“脂体冠”形态已在多种植物中得到印证。微管微丝作为细胞骨架的构成成分,一直受到学者们的注意。在生殖细胞分裂分化过程中,其形状发生一系列的变化,而且不同植物的生殖细胞及精子的形状也不相同。朱澄等(1979)证明小麦精细胞的胞质中有微管和大量与精细胞纵轴平行的纤丝状结构,并发现微丝与肌动蛋白有相似结构,认为这不但与精子的形状而且

也与精子的运动有关。J. M. Sanger 和 W. T. J. Jack-son 等(1971)曾有实验资料证明生殖细胞中的微管对维持细胞的形状有一定的作用。20世纪80年代末90年代初期,在百合等植物的花粉管中发现微丝束,探讨了其与细胞质运动的关系。到目前为止,学者们已在多种植物中证实微管可以维持生殖细胞与精子的形状。在生殖细胞和精子中,微丝是否普遍存在以及微丝的功能,是学术界的研究热点。

生殖细胞分裂前夕为裸细胞,而在发生早期或游移于营养细胞中时曾有胼胝质素壁(樊汝汶等,1992)或纤维壁。生殖细胞形成后不久即进行DNA复制,接着进行有丝分裂。但在离体培养的花药组织和经过低温处理的植物中,生殖细胞可以进行无丝分裂。孙敬三等(1984)将生殖细胞的分裂划分为劈裂和碎裂两种方式,无丝分裂没有适当的机制保证遗传物质在细胞中平均分配,可能导致精细胞间的倍性差异,对生物个体的发育存在一定的影响,这是值得深入研究的课题。营养细胞是维持生殖细胞分裂的能量来源之一。研究发现,营养核的形态结构在生殖细胞的分裂过程中发生巨大的变化,生殖细胞在分裂早中期以前与营养核紧密贴合。越来越多的资料表明,营养细胞在生殖细胞的分裂过程中有着不可或缺的作用。

1970年,W. A. Jensen 等报道在棉花花粉管中的两个精细胞首尾相连,并同营养核也连接在一起。1984年,C. R. B. Dumas, 综观不同植物的研究报道,提出雄性生殖单位的概念,意指两个精细胞与营养核在生殖过程中是一个功能统一的传送单位,存在着物理上的连结或结构上的连接。随着先进的定量细胞学和三维重构技术的应用,进一步确证在十几种被子植物中具有雄性生殖单位,并提出精子异型性的概念,即从一个生殖细胞来源的两个姐妹精细胞之间存在形态结构和遗传上的差异(胡适宜等,1990)。雄性生殖单位概念的建立和精子异型性的确认,把被子植物双受精作用的研究提高到了一个新的水平,已取得了选择性受精和配子水平的识别作用的超微结构证据。但雌性生殖单位是否是被子植物的普遍特征尚有待于广泛的调查研究。

在减数分裂完成后,包围在胼胝质壁内的小孢子开始在胼胝质壁和质膜间积累壁物质。花粉外壁的表面可以形成各种各样的雕纹,关于它的起源和控制机理有两种不同的观点:当小孢子仍被胼胝质壁包裹时,外壁的雕纹已经形成,其中胼胝质壁起很大的作用;雕纹是在外壁发育的最后阶段形成的。但无论雕纹何时形成,其形成过程都受核信息的控制。大多数学者认为外壁的图式受控于二倍体的染色体组。至于花粉壁雕纹如何受核基因的控制,则是值得深入探讨的问题。

成熟花粉壁明显地区分为外壁和内壁两层;外壁又分外壁外层和内壁,其中外壁外层包括覆盖层、基粒棒层和基底层。熊足铁筷子花粉成熟时,首先形成原外壁,随后积累迂曲的片层,构成原基粒棒,并逐渐沉积孢粉素形成基粒棒,然后基粒棒两端扩展形成覆盖层和基底层,最后形成外壁内层和内壁。研究资料证实,外壁内层及内壁由纤维素构成,外壁外层则由孢粉素组成。花粉壁的组成物质分别来源于小孢子和花粉绒毡层。参与壁形成的细胞器为内质网和高尔基体。有关资料表明,许多植物花粉壁的形成过程及组成成分非常相似,但也有特殊情况,如 *Tapenochilas* 的小孢子从四分体释放后外壁无基粒棒,仅由紧密相连的排列无序的小棒组成,其外有厚的成层覆盖物,无孢粉素沉积。另外,在复合花粉春兰中,尽管花粉壁也分外壁和内壁,但因所处部位不同,外壁结构存在很大差异。裸子植物的外壁内层通常为3层型的片层结构(罗汉松属的个别种除外),德花杉(席以珍,1986)的花粉最为典型。片层结构的厚度和数目在各属间是不同的。杉木为5~8层,水杉为10~15层。关于花粉内壁的研究报道甚少,仅知道它和外壁内层同时发育,主要成分是果胶纤维,且在萌发孔区域明显增厚。

花粉壁蛋白分外壁蛋白和内壁蛋白两种。外壁蛋白由孢子体的绒毡层细胞合成,于花粉发育后期被转移至外壁,存在部位因种而异。内壁蛋白是花粉本身的细胞质合成的,小孢子发育时,



质膜径向排列的小管伸进发育的内壁,同时沉积相当数量的蛋白质,以萌发孔区域最为丰富。花粉壁蛋白被认为是孢子体和配子体亲和性的识别物质,近期有人观察到花粉壁蛋白和柱头乳突细胞的表膜结合。花粉壁蛋白的研究为探讨不亲和性机理以及寻求克服方法提供了新的思路和途径,并已取得显著成果。

电镜研究表明,花粉发育的每个时期都可能发生败育。绒毡层的败育直接导致营养物质的缺乏,使小孢子一直处于饥饿状态,并不会适时地释放胼胝质酶,使小孢子非正常消解,导致小孢子发育异常。在小孢子发生过程中,小孢子母细胞长期被厚厚的胼胝质壁包裹或过早消解,以及四分体小孢子的胼胝质壁过早或过迟地消解或根本没有形成胼胝质壁,都会导致减数分裂不能正常进行,或因没有启动因子而无法开始,甚至形成小孢子后也会发生败育,从而影响形成正常的花粉粒。

液泡系是一个溶酶体系统,已在许多植物的细胞中观察到异常活动的液泡系,尤其在发生败育的绒毡层细胞、小孢子母细胞、四分体小孢子及正在发育的小孢子细胞中,这种现象更为明显(H. G. Dickinson, 1971; 胡适宜等, 1974)。细胞中的液泡内常含有正在消解的细胞器和细胞质,最后导致细胞的“空泡化”,最终整个细胞解体死亡,造成花粉质量的降低。

关于植物雄配子的研究进展很快,是植物生殖生物学的核心问题之一。随着花粉的人工培养和人工分离精子的操作技术的完善以及生理生化、细胞化学和图像显示技术的应用,对于植物雄配子的电镜研究会日趋深化,并向着植物实验生殖生物学的方向深入开展。

(南京林业大学尹增芳、樊汝议撰)

**植物花粉活体剥壁技术** 指指采用物理的或化学的方法简单而快速地除掉花粉粒的外壁,分离出大量具有活性花粉原生质体的技术。这是近几年发展起来的新技术,花粉原生质体具有单倍性、结构简单、群体数量大从面构成一个天然单倍体系统及发育同步四大特点。因此,被普遍认为是遗传操作、突变研究的卓越体系,是花粉生理学、个体发育、体外模拟受精、细胞杂交、外源基因转化等研究的重要材料。由于烟草、矮牵牛等植物花粉在培养基上诱导胚胎发生成功,这意味着从花粉原生质体诱导再生植株的可能性,自然也就成为作物育种研究的材料。关键问题在于如何排除外壁的障碍,这一问题一旦解决,将大大地推动植物生物学、细胞工程、作物遗传育种等研究和生产应用。

近10多年来,对花粉发育的各个时期都有学者进行原生质体的分离研究。在小孢子母细胞至四分体时期其细胞壁质地为胼胝质,在花粉管时期其管壁质地为果胶质、纤维素和胼胝质。这两个时期均可用果胶酶、纤维素酶、胼胝质酶降解而分离出原生质体。但从花粉时期(小孢子至花粉成熟)分离出活的原生质体成功者甚少,因为这个时期外壁发育业已完成,外壁质地为孢粉素,它是类胡萝卜素和类胡萝卜素酯的氧化多聚化的衍生物,质地坚固,具抗酸、抗碱、抗生物分解的特性,除掉外壁并保存花粉原生质体的活性是非常困难的。早在20世纪70年代,Power(1973)、Bajai 和 Davey(1974)等实验研究除掉外壁分离出活性的花粉原生质体,他们对烟草及茄科、禾本科的几种植物进行实验,但效果不好。1974年, Southworth 试用30多种强酸、强碱、强氧化剂、洗涤剂、有机溶剂等分解外壁,发现仅有极少数试剂有效,但同时也杀死了原生质体。以后这方面的研究工作长期处于停滞状态。到1985年,Loewus 等用 MMO·H<sub>2</sub>O(4-methyl morpho-line N-oxide monohydrate)处理花粉,分离出大量的麝香百合花粉原生质体,但试剂和高温使原生质体严重失活。1983年, Bajai 用解株酶、牛磺结合机械搅拌分离矮牵牛、烟草、小麦的成熟花粉具活性的原生质体。1982年,朱徽、胡适宜等用高折酶(Macerozyme R-10)和纤维素酶(Onozuka R-10)从烟草花粉管分离出活性的亚原生质体,继后以同法分离出金鱼草、木番茄、朱顶兰、王百合、溱丹、君子兰、烟草的花粉管的活性亚原生质体并作了培养实验。1987年,周婧利用花粉水合作用导致外壁破裂,加超声波处理,

用果胶酶、纤维素酶降解内壁分离出鸢尾、风雨花、萱草三种植物的大量的具活性的花粉原生质体,并进行了初步培养,观察到萱草花粉原生质体细胞壁再生、管状及其它多种结构的形成以及生殖核的一二次分裂。综上所述,近10年来从花粉母细胞至四分体时期和花粉管时期用酶解法分离出较多植物的活性原生质体,而真正从花粉时期分离出活性的原生质体的植物还很少。

1985年以来,兰盛银、徐珍秀致力于花粉壁剥离观察研究,借助于自行研制的剥离喷射仪(ISC-A)产生的任意向散射离子的适当冲击将花粉粒的多层壁随机地剥开,暴露出多层壁的内外侧面置于扫描电镜下,观察到用常规方法无法观察到的掩盖于壁层结合面上的结构现象,获得200多种植物花粉被剥光外壁(仅存内壁)的原生质体,并对这种原生质体的表面形态结构进行了研究。到1990年,已剥离观察了225种(75科)常见植物花粉粒。大量地剥离实验证明,花粉粒外壁虽然坚固,但是其伸缩性极小,具有脆性,采用离子冲击技术比较容易将外壁除掉而获得仅由内壁包裹的花粉原生质体,内壁可以容易地用果胶酶和纤维素酶完全消化。这一阶段的工作为花粉粒的活性剥壁作了必要的准备。在此基础上自1991年开始转入花粉粒活体剥壁研究,主要采用两种方法:(1)冷冻花粉离子剥离法。对剥离喷射仪作适当的改进,将样品台的水冷却室改制成液氮冷冻装置,以管道连到机壳外,可随时加入液氮以冷冻样品铜台,并特制一套专用子剥壁的高压脉冲电源(2 500~6 000V,连续可调)。将成熟的新鲜花粉用10%的蔗糖液浸泡3~5min,使之充分吸水,再离心收回,置于滤纸上以吸去花粉粒表面附着水,再放到被液氮预冷的样品铜台上,花粉粒很快就被冷冻成冰粒,再罩上真空罩开机抽到6.67Pa托时,接通脉冲高压开关,并顺时针调整电压调节旋钮使高压指示约为4 000~5 000V,真空罩内便发出红紫色光柱,这是离子和金属粒子相互碰撞所致,这些离子和部分靶电极发出的钨粒子冲击冰冻的花粉粒,可将花粉粒的外壁剥光,这一处理要控制在50s内完成。停机后,取出花粉粒用25℃的10%蔗糖溶液解冻,经镜检约有30%~60%的花粉粒被剥去外壁。其剥壁率因不同植物而异,一些具半覆盖层的花粉(如油菜、丝瓜)和无覆盖层的花粉(如芝麻、油桐)剥壁率可高达60%~70%;具全覆盖层外壁的花粉(如玉米、小麦、棉花)剥壁率偏低,约30%~50%。再用酶液消化内壁(酶液包括2%纤维素酶、2%果胶酶、0.5%葡萄糖硫酸钾),在25℃暗室中酶解1h可消化内壁,用染色法(用氯化三苯基氮唑, TTC)作初步的花粉原生质体活性测定,有一定的成活率。花粉原生质体的成活率与加高电压处理的条件有密切的关系,电压越高,处理的时间越长,其成活率越低。实验证明,以6 000V电压维持5min,基本上不能存活,以3 000V40~50min为宜。在这种剥离方式中,用上述酶液预酶解新鲜花粉1h后,再作冰冻剥离处理,可大幅度地提高花粉剥离率。(2)用插入式探头的超声波剥离花粉壁,类似细胞破碎机原理。将鲜花粉用上述酶液酶解1h后,放入特制的可以用冰水混合液冷却的杯中,再以插入式探头的超声波作剥壁处理。杯需用导热良好的材料(如合金铝或黄铜)制作,杯的结构是,中央有一个小杯用以盛冰水混合液,其外圈形成一道环形槽用以盛酶液和花粉混合液,该槽的外圈又是一道环形槽用以盛冰水混合液,当超声波探头插入花粉混合液震荡时迅速升温,其热量可从内外两个方面被吸收以保护花粉活性。超声波的输出功率最好能调至250W,频率调至20万Hz以上,处理20min左右,中间暂停2~3次,作间歇处理,以便严格控制花粉混合液升温(控制在35℃以下),有利于提高花粉原生质体成活率。实验证明,这种方法比前一种方法好。花粉剥离率虽然也因不同植物而异,但一般都能达到80%,成活率也明显提高,其成活率与处理时使用的超声波频率和功率有密切关系。实验证明这两种方案都是可行的,但都不太稳定,在许多方面尚须改进,其难点在于既要提高花粉壁剥离率又要尽可能提高花粉原生质体的成活率,在仪器使用参数方面和剥壁处理条件方面都需要围绕这一问题进行实验研究。

基于花粉原生质体在植物生物学、细胞工程、遗传操作等研

究方面的重要用途,如何除掉花粉外壁障碍的研究在今后一段时期内将是一个热门课题,可能从以下几条途径突破这一难题。(1)继续寻找新的生物酶类,尤其要寻找一种能完全消化组成花粉外壁胞壁素的酶,这条途径对于保证分离得到的花粉原生质体的活性将是十分有利的。(2)采用电技术,例如高压脉冲电产生冲击离子的技术,加上酶液分解综合作用,也不失为一种可能的途径,但这种方式可能要牺牲一部分花粉原生质体的活性。(3)采用超声波之类的机械振动原理加之酶解的综合作用除去外壁,这是很有前途的方法,问题在于要通过大量实验寻求最佳振幅和频率,并创造最佳的散热条件,把花粉壁离率和花粉原生质体成活率兼顾到理想的程度。

#### 参考文献

- 1 Power J B. Plant Tissue and Cell Culture Oxford; Blackwell, 1973. 118~119
- 2 Bajai Y P S, Davey M R. Fertilization in Higher Plants Amsterdam. 1974. 73~80
- 3 Southworth D. Amer J Bot., 1974, 36~44
- 4 Bajai Y P S. Rev Cytol., 1983, 16: 113~141
- 5 Loewus F A. et al. plant physiol., 1985, 78: 652~654
- 6 朱徽,王铮,胡适宜. 实验生物学报, 1985, 18: 135~141
- 7 兰盛银,徐珍秀. 华中农业大学学报, 1986, 5(1): 1~6
- 8 Lan Shengyin. Proc. XIth Int Cong On Electron Microscopy. 1986, 8: 3263~3264

(华中农业大学兰盛银撰)

### 被子植物的双受精 double fertilization in angiosperm

受精是指两个配子的融合,由此发育成一个具双亲遗传性的新个体。双受精则是被子植物特有的,指花粉管中放出的两个精子,一个与卵结合发育成胚,一个与中央细胞的极核(通常两个)融合发育成为胚乳。人类取自植物界的各种果实中的种子都是双受精的产物。由于双受精是被子植物产生种子的关键步骤,人们一直对此给予极大的关注,力求了解其过程与实质,以求最终能控制它。

1884年,斯特拉斯伯格(Strasburger)就已观察到被子植物中精子与卵融合的现象,但尚不了解花粉管放出的第2个精子的命运。1898年,俄国纳瓦兴(Nawashin)、1899年法国奎纳德(Guignard)几乎同时发现被子植物受精的双重性质,即花粉管放出的两个精子都参与授精,一个精子与卵融合,另一个精子与中央细胞的两个极核融合。以后广泛的研究资料证明双受精在被子植物中普遍存在的。现已公认双受精具有重要的生物学意义。精子与卵的融合提供了重新组成基因组的机会,能丰富后代的遗传性。精子与两极核融合产生胚乳。胚乳具有父母双方的遗传性。胚利用这种具双重遗传性的胚乳作为养料,使其能巩固杂合性,并更富生命力。因此,有人认为双受精是被子植物繁荣发展的一个内在因素。

双受精发现以后的很长时间里,由于研究局限于光学显微镜水平,有关双受精的许多问题始终不能澄清。20世纪60年代开始,由于透射电子显微镜的广泛应用,同时引入了其它细胞生物学方法,如荧光显微术、图像分析术、放射自显术等,围绕受精问题进行了大量工作,揭示了许多以往观察不到的现象,如肯定了精子的细胞性质,除了具核外还有细胞质,其中含有细胞器,再如花粉管尖端的超微结构,顶端生长机制,助细胞的结构特点及吸引花粉管的功能;对卵细胞壁的不完全性、精卵细胞融合方式与核的融合方式等,都有了一定的了解。对双受精过程的了解可分3个步骤来说明:第一步是精子在胚囊中的放出。被子植物的精子是由花粉管送到卵旁的。1968年,詹森(W. A. Jensen)报道在棉花花粉管到达胚珠时,胚囊中的一个助细胞已先行解体,花粉管通过其珠孔端的丝状器穿入解体的助细胞。玉米、大麦、番茄等均是如此。有的植物被花粉管穿入的助细胞是在花粉管进入后才退化的,如荠菜、矮牵牛、向日葵、蓝猪耳等。花粉管进入

助细胞的细胞质后很快停止生长,其内容物通过末端的孔(如矮牵牛、荠菜、白花丹)或末端侧面的孔(如棉花)放出,放出的有营养核、两个精子和少量花粉管的细胞抽。第二步是一个精子与卵细胞融合,另一个精子与中央细胞融合。有些植物的卵和助细胞合点端不具细胞壁只有质膜包围(如棉花、玉米、蓝猪耳);而1968年舒尔茨(R. Schulz)等报道荠菜卵和助细胞合点端细胞壁呈蜂窝状,这样的结构非常有利于精子接触卵与中央细胞。但在白花丹,拉塞尔(S. D. Russell, 1980, 1983)报道了胚囊中没有助细胞,卵细胞壁是连续的,在珠孔端有类似丝状器的结构,花粉管通过这“丝状器”部分穿入细胞壁,在卵和中央细胞之间放出内容物,此时卵细胞壁破裂,在卵和中央细胞之间大部表面没有细胞壁。1974年,詹森根据对数种植物进行的电子显微观察,提出一个精子进入雌性配子的模式图。按照这个假说精子被释放入解体的助细胞,此细胞的质膜已消失,两个精子供借内容物释放时的力量移到卵与中央细胞的质膜处并与之接触,相接触的质膜融解,两个精核分别转移到卵和中央细胞的细胞质中。但是,精子的细胞质是否参与融合尚未有定论。在棉花、大麦、矮牵牛中由于在受精卵中未观察到精子细胞质,认为只有精子核进入雌性细胞。但是拉塞尔(1980, 1983)报道,在白花丹受精的卵和中央细胞中都发现精子的线粒体和质体,说明精子细胞质参与融合。不过莫根森(H. L. Mogensen, 1988)又报道大麦在精卵融合时,精子细胞质不进入卵内。第三步是雌雄配子核的融合。对棉花(W. A. Jensen, 1964)和矮牵牛(J. F. Van Went, 1970)等进行的电子显微观察说明雌雄核融合的步骤是:两核外膜局部接触和融合,邻近和附着的内质网参与这一过程,两核内膜相接触和融合,两核间形成桥,核质相通,桥不断扩大,使两核合并。

进入80年代以后,植物胚胎学与多个学科交叉渗透,大量运用细胞生物学和分子生物学的研究方法,使对双受精的了解有了新的突破。在运用连续超薄切片、计算机辅助三维重构技术和定量细胞学方法研究花粉管与精子后,1984年杜马(C. Dumas)等提出“雄性生殖单位”的概念,即指在被子植物雄配子体中精细胞与营养核及一对姐妹精细胞之间存在结构上的连接,成为一个单位,一起被送入胚囊。现已在十种植物中观察到这种现象。雄性生殖单位是否普遍存在还有待广泛的调查。另外,在数种植物中发现精子的异型性,即一对姐妹精子在细胞的大小、形状和细胞质中细胞器的含量都有明显的差异。一般较大的一个精细胞具较长的细胞质扩展部分,通常与营养核紧密联结。白花丹(S. D. Russell, 1984)的大精细胞含质体较少却含大量线粒体,小的精细胞含质体多而线粒体少。与精子的异型性相联系,又发现了偏向受精,意即两个精子有倾向地分别与卵和中央细胞融合。1985年,拉塞尔在棉花中发现含大量质体的较小的精子选择与卵融合。这就提出了雌雄配子之间的识别问题。在受精作用的实验研究方面,已由体内实验为主转向以体外实验为主,而且实验手段精密化、高层次化,由器官、组织操作向细胞、原生质体操作方向发展。现已成功地从多种植物花粉中分离出大量生活的精子。另外,用酶解法从多种植物的胚珠中成功地分离出胚囊或其成员细胞的原生质体,为开展体外雌雄性细胞融合创造了条件。德国科学家已成功地把玉米的精子与卵细胞分离出来,用电融合方法使之成为“人工合子”,然后用单细胞培养技术使融合细胞分裂成多细胞结构,从而首次实现了雌雄配子的体外融合,即真正的离体受精。

根据研究现状,有关双受精的研究呈以下趋势:(1)由于“雄性生殖单位”的发现,雄配子的研究成为热点。现对雌配子的研究也给予应有的重视,已从多个角度开展研究。(2)对双受精的研究除在结构方面继续深入外,在功能方面把配子间的相互识别和受精机理作为中心课题来研究。在操作方面则在雌雄生殖细胞的分离、保存、培养、融合、转化方面的全面进行攻关。(3)在研究中愈来愈多地应用细胞生物学的和分子生物学的新方法,如计算机辅助三维重构、共焦激光扫描显微术、单克隆抗体技术等。对双受精机理的认识加上现代生物技术的成就,使“受精工程”逐渐

成为现实,这将在植物育种和改良工作中引起变革。

参考文献

- 1 Russell S D. Amer J Bot, 1983, 70: 416~434
- 2 Russell S D. Proc Natl Acad Sci USA, 1985, 61: 29~6132
- 3 Knox R B, et al. Ann Bot, 1987, 60(4): 15~37
- 4 Mogensen H L. Proc Natl Acad Sci USA, 1988, 85: 2594~2597
- 5 胡适宜. 植物学报, 1990, 32(3): 230~240

(福建省亚热带植物研究所张振珏副研究员撰)

体细胞无性系变异 somaclonal variation

体细胞无性系变异是指由离体培养而诱发产生的变异。这一现象早在60年代随着植物组织培养技术的发展及应用,已被许多学者发现、报导。但着为术语直至1981年由Larkin和Scawcroft系统总结而提出。这一名词现已广泛为各国学者承认、引用。1986年Evans进一步将这一现象细分为体细胞无性系变异,专指起源于体细胞培养的变异;生殖细胞无性系变异,指由花药/子房培养之生殖细胞起源的变异;及原生质体无性系变异,指由原生质体培养引起的变异。但文献中很少有人采用,而仍然统称为体细胞无性系变异。

体细胞无性系变异的广泛性:这里广泛性有两层意思,一是指这种变异所涉及的种类之广泛。在木本、草本植物,一年生、多年生,无性生殖、有性繁殖,自交、异交,农作物、经济作物、观赏、园艺植物等等几乎所有通过离体培养获得植株再生的植物种类均有发现。另一层意思是指所涉及之性状、变异的内容十分广泛。几乎涉及农作物的所有性状。如水稻的体细胞无性系变异包括有植株形态、高矮、叶片大小形状、分蘖数与习性,抽穗期、穗形状、大小、花器的结构、育性甚至粒形、粒重、米粒的化学成分、抗病虫性、抗逆性等等。

此外几乎所有植物在离体培养时,随着培养时间的延长,培养物会逐渐丧失植株再生能力,这实际上也是体细胞无性系变异的一种表现。很可能是在培养过程中细胞全能性基因发生了突变或丢失。培养时间越长,发生这种变异的可能性的机会越大。

在应用方面,体细胞无性系变异为一类崭新的变异源,除了直接为农作物育种提供了新的种质资源外,由于这种变异来自于离体培养,在实用上可以控制培养条件而达到“定向变异”的目的,例如作者等在培养基中加入胡麻叶斑病原菌毒素,在敏感品种IR54中获得抗胡麻叶斑病品系。利用代谢中的反馈抑制现象, Schaeffer等获得含高赖氨酸的水稻,并证明这种特性是遗传的。在培养基中加入高浓度的NaCl或其他盐而造成强大的选择压,经过反复多次选择, Vajrabhaya获得适于盐碱地区种植的耐盐水稻品系。这一方法将水稻推广到过去不能种植这种作物的盐碱地区,扩大了水稻的种植面积。Larkin等在小麦与远缘杂交相结合,通过离体培养而获得具有Aegilops, Agropyron, Elgmus, Haynaldia及Hordeum等异源染色体片断的代换系,培育出抗病、抗逆(包括抗盐、热、酸及金属等)的新品系。由此可知,作为细胞工程的一种方法-体细胞无性系变异,所存在的巨大经济潜力。仅以开发与利用盐碱地而言,如运用排灌系统的农业工程方法,使盐碱地区能种植水稻,将要花费大量的人力、物力与资金。而用抗盐细胞系的离体筛选,只需用少量的经费就可以达到这一目的。

虽然专门设计一些实验,来研究影响体细胞无性系变异的因素并不多见,但却有很多报导论及这些因素。物种的生殖制度及倍性,对体细胞无性系变异具有极大的影响。一个无性生殖的种及多倍体种,能够忍受染色体数量与结构的变异。而二倍体种及育性生殖的种,则难以忍受这类变异。同一物种的不同品种,在同一条件下,再生植株所产生体细胞无性系变异也不同。这就是基因型的作用。不仅如此,即使是同一品种不同的外植体,或同一外植体在不同的发育时期,离体培养时,所获得的再生植株之体细胞无性系变异的种类、频率亦不相同。以上所述的因素可

以归纳为内因。而影响体细胞无性系变异的外因有培养条件,包括培养基成分、培养时间、方式,继代的次数、培养物之植株再生的方式等等。培养基的成分以植物激素,如2,4-D影响最大。Deambrogio发现,在大麦的体细胞无性系中,发生白苗及不育的变异均有自含2,4-D的培养基。但Batliss认为2,4-D的作用是增加了去分化形成愈伤组织而导致染色体变异。在小麦Larkin和Scawcroft发现,经过愈伤组织阶段而再生植株者,发生变异率也愈高。相比之下,由体细胞胚胎发生途径而再生植株的,由于避过了不稳定愈伤组织阶段,无性系相对整齐一致、变异少。我们在水稻上, Hanna等在Panicum上, Haydu在Pennisetum上,以及Dale在Loliceum上都得到了类似的结果,认为这是由于愈伤组织在遗传上是不稳定的,特别容易产生变异之故。

虽然目前对体细胞无性系变异已进行了大量研究,但对引起这种变异的原因及其机制的研究却很不够。染色体变异是一种了解最清楚的引起体细胞无性系变异的原因, Niizeki, M.对烟草,系统地研究了由组织培养引起的染色体变异,发现它几乎包括了书籍的各种染色体变异的类型。不仅如此,体细胞无性系变异还能引起理化诱变难以获得的突变类型。在水稻上作者获得包括5对非同源染色体的多易位杂合体以及影响染色体配对的非联会及联会消失突变。而在理化因素诱发突变中,仅发现两对染色体的简单易位而从未发现涉及5对非同源染色体的多易位及染色体联会的突变。

转座子是讨论得较多的一种引起体细胞无性系变异的可能的原因。由于转座子的作用而使结构基因钝化,改变基因的活动规律,使沉默基因活跃起来而导致严重的重复与缺失。Secor等在马铃薯的体细胞无性系中发现17个性状同时与亲本品种不同,在65个体细胞无性系中平均每个无性系有7种性状与亲本不同。这被认为是典型的转座子作用的结果。而诱变处理是不可能同时产生那么多的突变的。作者等于1985年,在IR<sub>51</sub>的体细胞无性系(R<sub>2</sub>)中发现一种雄性不育突变,它的花药内没有花粉粒,叶片色深,上面布满了褐色的小斑点。1986年,在同一品种的R<sub>1</sub>中发现了一株表现完全一样的雄性不育突变,后者乃是这一突变的隐性纯合体。后来还从这种隐性突变以及它的回复变,这在理化诱变中完全是不可可能的。很可能这是转座子的作用所致。其他可能的作用机制还有DNA Amplification(扩增),基因特别是多基因的体细胞重组,体细胞姐妹染色单体的交换,核苷酸的甲基化等。但到目前为止都还没有直接的实验证明。在分子水平上直接给出体细胞无性系变异发生原因的证据,研究出影响特定性状的体细胞无性系变异的因素,以能更好地控制这类变异发生的种类与频率,为农作物的品种改良创造出所需要的种质乃是这一领域今后需要迫切解决的课题。

参考文献

- 1 Larkin P J, W R Scawcroft. Somaclonal variation: a novel source of variability from cell culture for plant improvement, Theor Appl Genet, 1981, 60: 197~214
- 2 Evans D A, W R Sharp. Somaclonal and gametoclonal variation In: Handbook of Plant Cell Culture, Eds by Anurimoto, PV, et al, 1986, Vol. 4: 92~132
- 3 Sun Z X, Zheng K L. Somaclonal variation in rice. In: Biotechnology in Agriculture and Forestry, Vol 11; Somaclonal variation in crop improvement Ed. by Bajaj YPS, Springer Berlin Heidelberg, 1990, 288~325
- 4 Ling D H, et al. In vitro screening of rice germplasm for resistance to brown spot disease using phototoxin, Theor Appl Genet, 1985, 71: 133~135
- 5 Schaeffer G W, et al. Segregation for endosperm lysine in F2, F3 and F4 progeny from a cross of in vitro - selected and unselected cultivar of rice, Theor Appl Genet 1989, 77 (2): 176~183
- 6 Vajrabhaya M, et al. Somaclonal variation for salt tolerance

- in rice, In: *Biotechnology in agriculture and Forestry Vol. 14: Rice*. Springer Berlin Heidelberg, 1991. 368~382
- 7 Scowcroft W R. Genetic variability in tissue culture; impact on germplasm conservation and utilization, IBPGR Report, AGPG; IBPGR1984, 84: 152
  - 8 Larkin P J, Scowcroft W R. Somaclonal variation and crop improvement. In: *Genetic engineering of plant*, Ed by Kosuge T, et al. Plenum, New York, 1983. 289~314
  - 9 凌定厚, 等. 籼稻体细胞无性系表现式样的研究. 中国科学院华南植物研究所集刊, 1989, Vol. 5, 131~139
  - 10 Hanna W W, et al. Uniformity of plants regenerated from somatic embryos of *Panicum maximum* Jacq. (Guinea grass). *Theor Appl Genet*, 1984, 67: 155~159
  - 11 Ling D H. male sterile mutants from rice somaclones In: *Biotechnology in Agriculture and Forestry Vol. 14: Rice*. Springer Berlin Heidelberg, 1991. 347~367
  - 12 Secor G A, Shepard F J. Variability of protoplast-derived potato clones, *Crop Sci*, 1981, 21: 102~105

(中科院华南植物研究所凌定厚撰)

**植物体细胞无性系变异** 在离体培养下植物体细胞可以形成不定分生组织, 由这种组织再生的植株(SC<sub>1</sub>)中出现的遗传变异和由植物体细胞或组织培养物自身出现的遗传变异称为体细胞无性系变异(ScV)。象其他变异一样, 大多数 ScV 对植物有害, 少数有利。因此, 在利用植物生物技术进行育种和微繁殖过程中, 研究并掌握他们的变异机制和揭示其遗传稳定性规律, 无论在遗传学基础研究和遗传育种实践方面都具有十分重要的意义。

在遗传上无性系维持稳定性的传统观念过去一直在园艺学家的头脑中根深蒂固, 这种观念在 1969 年受到美国园艺学家亨兹(D. J. Heinz)和米(G. W. P. Mee)的挑战。他们发现, 在植物细胞培养物和 SC<sub>1</sub> 中染色体组会逐渐产生一些变化。然而这种现象在当时并未引起震动。1976 年斯克文(R. M. Skirvin)等人的系统工作才开始引起普遍关注。他们研究了芳香天竺葵愈伤组织 SC<sub>1</sub> 中出现的一些变异, 认为花的大小、叶形及油组分等性状的变异是由愈伤组织的年龄和供体植株的基因型决定的, 并进一步肯定, 在依赖无性繁殖或无融合生殖的作物中, 组织培养方法适于产生育种上有益的变异性, 从而首次提出“愈伤组织无性系变异”的概念。自 1970 年开始, 奥诺(K. Oono)用了 5 年对水稻花药和胚培养的 SC<sub>1</sub> 经三代自交后进行了多性状的综合分析。他发现, 自交一代无性系(SC<sub>2</sub>)中出现的许多变异到自交二代(SC<sub>3</sub>)时发生分离, 在自交三代(SC<sub>4</sub>)中就能达到育种上理想的纯系状态。这些 ScV 的频率很高, SC<sub>2</sub> 有两个以上性状产生变异的个体占 23%。同期阿洛瓦利亚(B. S. Ahloowalia)报道了黑麦草杂种培养物减数分裂过程中出现染色体相互易位、缺失和倒位现象。由于这些重要的早期研究工作, 1981 年澳大利亚的拉金(P. T. Larkin)和斯科克罗夫特(W. R. Scowcroft)在他们自己和前人工作的基础上, 创造了新名词——ScV (Somaclonal variation), 用来定义植物离体培养条件下产生的种种变异类型。至此正式拉开了这一研究领域的帷幕。

自拉金以后, ScV 的研究集中在揭示其遗传变异的类型上。首先发现的是染色体数目的变化, 通常这种变异出现在组织培养早期, 已获得 SC<sub>1</sub> 的单体和三体植物有橡树、黑麦草、小麦和马铃薯(G. P. Creissen, et al.)等。其次, 培养的植物细胞中存在一系列染色体结构重排现象。1981 年贝利斯(M. W. Bayliss)借助 C-带技术深刻地再现了全部的染色体结构变异, 如缺失、易位、倒位及小片段染色体的扩增导致的 ScV 是 1986 年由布莱蒂尔(R. I. S. Brettell)等人证实的。他们从小麦体细胞克隆中分离出 DNA, 限制性图谱分析表明, 在 4 条电泳谱带中有一个克隆的 2.5kb 谱带相对含量减少 80%。这种缺失的 1RrDNA 变异是遗

传的, 与供体比较发现这个变异是在培养过程中产生的。同年, 他们又从玉米胚培养物 SC<sub>1</sub> 中分离出一个在乙醇脱氢酶 Adh1-IF 和 Adh1-1S 性状上杂合的变异株。自交后这个杂合变异性状精确地按孟德尔规律分离, 而其他四个由相同胚产生的 SC<sub>1</sub> 是正常的。因此肯定, 该突变也是培养过程中发生的。用 Adh1-1S 的克隆片段 pLS. 1 为探针把这个突变基因分离出来, 序列分析发现, 此新突变与 Adh1-1S 基因序列的唯一差异是在外显子 6 区域内产生一个单碱基突变, 结果使酶蛋白分子上的谷氨酸转变成赖氨酸。真核基因分子遗传分析技术的发展拓宽了对基因调控的认识疆域。过去一些受核单基因控制的表型现在证明与多基因族的调控有关。例如, 小麦胚培养物 SC<sub>1</sub> 麦醇溶蛋白的 ScV 由第一组和第六组染色体上的多基因族编码。此外, 玉米胚培养物 SC<sub>1</sub> 玉米醇溶蛋白基因杂交探针的分析结果表明, 可转移因子有参与 ScV 的迹象。

随着 ScV 的深入研究, 已经从不同种植物的大量实验结论中总结出一些 ScV 的基本特性: ScV 在植物种属间广泛存在, 它只与通过愈伤和细胞悬浮培养的再生过程有关, 与顶端和腋生分生组织的再生过程无关; ScV 的频率虽然难以估算, 但在分子水平上比自然突变率约高 10<sup>3</sup> 倍, 在表型水平上变异频率则更高; ScV 包括全部的表型性状范围, 从如白化这种简单的质量性状到诸如光周期和产量这样的数量性状; 杂合供体的 ScV 可以是隐性纯合突变, 如芥菜型油菜的隐性性状黄色种皮, 培养物的 SC<sub>1</sub> 能够产生整个群体定向变迁的 ScV; ScV 并非都是稳定的, 有些是非遗传的(外遗传, epigenetic), 有些自交时稳定, 但与供体基因型杂交时却发生分离; 可转移因子可能参与了 ScV; ScV 包括了遗传变异的全部类型, 线粒体和叶绿素基因组可能也不例外。

ScV 的原因虽然尚不清楚, 但据染色体水平的变化断定至少存在 5 种因素: (1) 基因型, 现有实验数据表明, 同一物种不同品种之间产生 ScV 的性状和频率各异, 例如, 在秋海棠的一个品种里 ScV 有 43% 是变异株, 但在另一个品种中却只有 7%。(2) 供体植株的倍性, 一般而论, 多倍体的变异范围比二倍体的大, 而后的变异程度比前者高。(3) 不同的再生系统, 通常原生质体再生途径产生的 ScV 比其他任何再生系统获得的变异程度大且频率高。(4) 不同组织来源的外植体, 例如马铃薯块茎外植体比叶肉外植体 ScV 的频率高, 菊花花瓣愈伤比茎尖愈伤 SC<sub>1</sub> 的 ScV 频率高。(5) 培养基成分, 其中最有可能导致 ScV 的组分是植物生长素 2, 4-D。

目前 ScV 的研究方法主要包括, 用同一供体非同源组织或器官做外植体, 研究 SC<sub>1</sub> ScV 的外植体效应; 利用不同的再生系统、培养条件和继代时间的长度揭示 ScV 的类型和特性; 设立对照(包括姊妹体细胞克隆对照和供体对照)系统以阐明预存变异与 ScV 的差别, 研究变异的起源; 采用同功酶和蛋白质系统或 DNA 标记探针方法, 从分子水平上认识 ScV 的机理。在作物改良方面, ScV 的选择方法有: 确定适宜的选择时机以期获得稳定遗传的 ScV 性状, 如杂合体中的隐性突变则需从 SC<sub>2</sub> 开始选择才能行之有效; 若要从 SC<sub>2</sub> 开始筛选隐性突变的 ScV, 单倍体培养则能大幅度提高选择效率; 在抗性育种中, 直接进行离体选择也是提高选择效率的有效途径。

ScV 的机制是复杂的, 初步研究发现了一些有趣的问题。ScV 与诱变的本质区别是什么? 有证据表明, 后者的隐性变异多于显性变异, 而前者的显性变异比隐性变异高。另一个引人注目的现象是杂合供体的 SC<sub>1</sub> 能出现隐性纯合的 ScV, 多代自交不发生分离, 但是当与供体基因型正、反交时却表现出回复性状。这种奇特的无规则分离类型与孟德尔式分离方式大相径庭。此外, 如何理解 ScV 发生的高频率? 显然不能用自然突变加以解释。为什么形态性状的 ScV 比分子水平的 ScV 频率高得多? 目前虽然提出了少数几个一般性解释, 如对应位基因缺失, 半合子性等, 但是这方面的基础知识仍然十分零碎。在作物改良方面, 是否可以利用组织培养中的 ScV 更有效地导入异源种质? 或引进品种潜在的种质? 这些问题将是未来 10~20 年 ScV 的研究热点。

参考文献

- 1 Reinz D J, Mee G W P. Chromosome numbers of some Saccharum species hybrids and their suspension cultures. *Am. J. Bot.* 1969, 56: 450~456
- 2 Larkin P T, Scowcroft W R. somaclonal variation—a novel source of variability from cell cultures for plant improvement. *Theor. Appl. Genet.* 1981, 60: 197~214
- 3 Greissen G P, Karp A. Karyotypic changes in potato plants regenerants from protoplasts. *Plant Cell, Tissue Organ Culture*, 1985, 4: 171~182
- 4 Brettell R I S, et al. Molecular analysis of a somaclonal mutant of maize alcohol dehydrogenase. *Mol. Gen. Genet.* 1986, 202: 235~239
- 5 Larkin P T. Somaclonal variation, history, method and meaning. *Iowa State J. Res.* 1987, 61: 393~434
- 6 Karp A. Can genetic instability be controlled in plant tissue culture? *Newsletter Intl. Assoc. Plant Tissue Culture*, 1989, 58: 2~11
- 7 Kierk D. How to measure somaclonal variation. *Acta Bot. Neerl.* 1990, 39: 129~144

(河南大学生物系张大卫撰)

植物体细胞胚胎发生及植物细胞全能性

somatic embryogenesis in plant cells and plant cell totipotency

20世纪50年代末, Steward(1958)在美国, Reinert等(1958)在德国同时发现从培养的胡萝卜根部细胞中产生一种在形态上与合子胚相似的结构, 这种结构可以发育成完整植株。因此就称之为胚状体。后来根据其起源于离体培养的植物体细胞, 一般称之为体细胞胚。胚状体一词仍继续使用, 但其含义尚包括由花药培养得到的单倍体的花粉胚等在内。

1981年, 周俊彦曾列表统计了由体细胞产生胚状体的植物共有43科, 92属的106种。根据截至1992年上半年的文献, 已在70个科, 230个属, 310个种(包括少数杂种)植物的离体培养中得到体细胞胚, 与1981年的统计相比, 科的数目增加60%, 属的数目增加1.5倍, 而种的数目增加近两倍, 其中主要包括:

(1)禾本科作物中的燕麦、薏米、稗、大麦、水稻、黍、小麦、黑麦、玉米、小黑麦。此外还有新竹、慈竹、芦苇、苏丹草以及野麦草等。(2)豆类植物中的大豆、菜豆、豌豆、蚕豆、豇豆, 以及若干豆科牧草如紫云英、鹰咀豆、岩黄耆、羽扇豆、苜蓿及红豆草等。(3)伞形科植物, 包括许多药用植物如当归、白芷、柴胡、延胡索、欧当归、川芎、石防风, 以及毛地黄、天仙子、人参、黄连、乌头、乌蕨莓等。(4)蔬菜及花卉植物如葱、莴笋、紫背天葵、黄瓜、仙客来、山药、黄花菜、风信子。(5)蔷薇科植物及其它果树植物如: 山楂、枇杷、草莓、苹果、梨、蔷薇、悬钩子、番木瓜、椰子、龙眼、芒果、香蕉、枣梨、葡萄。(6)林木中有桦木、茶树、板栗(自然杂种)、金鸡纳树、沙枣、白蜡树、胡桃、落叶松、郁金香、松树、杨树、银色油橄榄、云杉、希蒙德里木、栎、巨杉等。(7)茄科植物及其它经济作物如烟草、枸杞、番茄、甜菜、荞麦、棉花、向日葵、亚麻、番薯。

可以看出, 几乎在所有重要农业、园艺、林业中的经济作物以及药用植物中均已成功地诱导了体细胞胚胎发生。这表明在最近10年里科学家集中力量在研究对人类生活和生产密切相关的植物的体细胞胚胎发生; 在深入研究体细胞胚胎发生机理的同时, 着重研究了主要农林、园艺作物的不同遗传型对体细胞胚发生的影响及其体细胞胚发生、发育和转变成植株的最适条件。对有些重要作物还开展了人工种子的应用研究, 这些为今后在农林生产中实际应用这一形态发生途径提供了条件, 也进一步证明体细胞胚发生的普遍性。

早在20世纪初, Haberlandt(1902)企图在组织培养中产生出完整植株, 从而证明细胞的全能性(totipotency), 但没有成功。此后半个世纪内, 所有的植物组织培养研究都在力图证明这一

点。体细胞胚胎发生过程的发现为植物体细胞的全能性找到了最充分有力的证据。

事实上, 植物体细胞不仅在离体条件下才产生胚状体, 在某些活体植物中也常发生由体细胞产生的与合子胚相似的结构, 文献中通常称之为不定胚或无性胚。无性胚通常发生在某些植物的子房、胚珠、珠心乃至胚囊中。据 Tisserat 等统计, 已有记载的活体产生不定胚的种类包括63科, 143属, 250多种植物, 其中大多数植物只能偶而在不正常的条件下(如有性生殖过程或合子胚发育受阻等)产生不定胚, 但也有些植物如具多胚现象的柑桔类植物, 常可伴随正常的有性繁殖过程, 在胚囊中产生无性胚, 它们和合子胚可以同时发育成熟。柑桔也是在离体条件下最容易产生体细胞胚的植物之一。许多其它已诱导出离体体细胞胚发生的植物在自然界也能产生无性胚, 只是自然发生不定胚的频率要低得多。事实上此二者都同样表明植物体细胞具有全能性。

这些在活体中或在离体条件下由非合子的体细胞发育成的胚状体, 其形态和功能与合子胚相同, 并最后可发育成完整植物体。这表明体细胞也具有像合子一样的全能性, 即由一个细胞发育成一个完整植株的能力。不过这种能力在大多数植物细胞中并不存在, 在多数植物中合子细胞经过分裂和分化, 形成各种不同的组织和器官以构成完整植物体。与此同时, 由合子分裂产生的所有细胞都分化成适应特定功能的细胞, 多数细胞甚至丧失分裂的能力, 即使在茎尖分生组织中的细胞也只能分裂和分化产生茎和叶, 而不能产生根。在有些情况下, 无论在活体中或在离体条件下, 由茎产生不定根, 或由根产生不定芽。这种器官再生常常涉及许多细胞, 而且这些参与新的不定根(或芽)组成的细胞本身也只是改变为与原所属器官不同的另一类细胞, 它本身就不再是原所属器官的细胞了。因此, 一般认为细胞在其分化过程中丧失了其全能性。不定胚的发生, 可以说明在有些植物中有些细胞(主要是与有性繁殖过程有关的器官和组织如子房、胚珠甚至胚囊成分等)在特定的生理环境中由于局部的内源植物激素水平的改变而恢复了全能性, 但这种现象在植物中并不具有普遍性。离体条件下的器官发生与在活体中的器官再生(不定芽、不定根的产生)一样, 也不能证明细胞的全能性; 而在如此众多的植物中, 在各种不同的外植体来源的植物细胞和组织培养中, 体细胞在离体条件下转变成类似合子的体细胞胚原始细胞, 由此单个细胞经过体细胞胚发生阶段最终发育成一个完整的植物体, 最有力地证明了植物体细胞普遍地具有全能性。这也是植物细胞区别于动物细胞的一个很重要的特性。

参考文献

- 1 周俊彦. 植物生理学报, 1981, 7(4): 389~397
- 2 Ammirato P V. Handbook of Plant Cell Culture London, Macmillan Publishing Co. 1983. 32~123
- 3 James D J. Biotechnol. Genet Eng Rev. 5. 33~79
- 4 Pierik R L M. Vitro Culture of Higher Plants, Martinus Nijhoff Publishers, 1987, 21~27
- 5 Rangaswamy N S. Proc Ind Acad Sci Plant Sci. 1996. 247~271
- 6 Tulecke W. Cell, Tissue Culture in Forestry 1987, 2: 61~91
- 7 Vajrabhaya M. Cell, Tissue Culture in Field Crops Improvement 1988, 24~32
- 8 Williams B G, Maheswari G. Ann Bot. 57, 443~462

(中国科学院西北植物研究所周俊彦研究员、郭扶兴副研究员撰)

植物组织培养的器官分化及其应用

organ differentiation of plant tissue culture and its application 近年来由于植物细胞全能性的证实, 植物体细胞通过人工培养方法, 经过细胞的器官分化可获得再生植株。在此基础上发展到单倍体育种, 无性系快速繁殖, 原生质体培养, 体细胞杂交, 基因的转移, 细胞悬浮培养产生胚状体以研制人工种子等等。因此, 离体

的植物组织和细胞培养是一个良好的研究体系,人为给予各种条件并加以调控,从而塑造一种或多种的器官分化途径,不仅可阐明有关的细胞分化现象,而且可开拓许多实际应用的前景。

1902年,哈伯莱德(G. Harberlandt)即预言植物细胞具有全能性。1934年,温特(F. W. Went)发现了生长素——吲哚乙酸,随后相继发现吲哚丁酸及萘乙酸、2,4-D等人工合成的生长调节物质。1937年,怀特(P. R. White)发现维生素B族是根尖培养中必需的成分,并首先建立了人工合成培养基,1943年又出版了第一本专著——《植物组织培养手册》,始有较大的发展。这一期间李继侗和沈同(1933)用银杏胚乳提取物,使银杏胚培养获得成功。1934~1940年,罗宗洛和罗士韦研究了玉米等根尖的培养。1940年,俄非毕克(J. van Overbeek)用椰子的液体胚乳于培养基中,使心形期的曼陀罗杂种幼胚培养成功。1945年,斯柯克(F. Skoog)和崔澈发现腺嘌呤促进细胞分裂,并诱导烟草茎髓愈伤组织形成芽。1945年,罗士韦发现在光照下石刁柏茎尖可以重复切割培养,1946年在菟丝子茎尖培养中观察到花芽形成并开花。1952年摩尔(G. Morel)等将感染病毒的大丽花茎尖切离培养,获得去病毒植株。1953年,缪尔(W. H. Muir)发明床架振荡的液体培养法,即细胞悬浮培养技术,以后还设计看护培养技术,诱导单细胞生长分裂使培养获得成功。1956年,米勒(C. O. Millie)发现了激动素,随后又发现了一系列类似化合物,将其统称为细胞分裂素。1958年,瑞奈尔特(J. Reinert)和斯梯瓦尔特(C. Stewart)分别发表了由胡萝卜根髓愈伤组织制得的单细胞,经悬浮培养产生大量的胚状体和由此发育生长的小植株,首先证明了高等植物细胞的全能性。1960年,柯金(E. C. Cocking)采用纤维素酶和果胶酶等制剂分离番茄根尖,获得大量的原生质体。1962年,村重(T. Marashige)和斯柯克(F. Skoog)发表了促进烟草愈伤组织快速生长的培养基成分,即目前通行并卓有成效的MS培养基。1964年,嘎哈(S. Guha)等培养毛叶曼陀罗未成熟花药,发现由胚状体形成的小植株并证明起源于花粉粒,系单倍体植株,从而发展了单倍体育种技术。1971年,长田(T. Nagata)与建部(I. Takebe)首次报道烟草原生质体通过细胞壁的再生,细胞分裂再生出完整植株,再次确认了细胞(原生质体)的全能性。1972年,卡而松(P. S. Carlsoh)完成了粉蓝烟草和郎氏烟草的原生质融合,实现了细胞杂交。

植物组织培养的器官分化途径,除上述茎尖培养、愈伤组织的器官分化和胚状体方法外,1958年魏克松(M. Wickson)和锡曼(V. Thimann)发现用外源细胞分裂素,可促进休眠的侧芽萌动形成丛生枝,将嫩梢重复切割,可不断复制出大量小植株,这第4种再生植株方式也成为木本植物快速繁殖的重要方法之一。1960年,摩尔(G. Morel)用兰属植物茎尖培养形成原球茎,达到去病毒和快速繁殖的目的,成为再生植株的第5种方式,一年内一个茎尖可繁殖出400万株,使许多国家兴起兰花工业,成功地将66属以上兰种植物进行试管繁殖。1957年,罗勃(S. M. Robb)在百合鲜茎的鳞片切块培养中,观察到由分化出的芽形成子鳞茎。1975年帕瑞克(R. L. M. Pierik)在风信子小鳞茎切块培养中也分化出小鳞茎。1971年,锡摩生(J. Simonsen)用唐菖蒲球茎茎顶培养可诱导形成小球茎。1990年李文安用观叶海棠叶柄和叶片培养,直接分化形成小圆球茎。1963年,李正理等在草石蚕的离体茎端及1967年,俄卡萨瓦(Okazawa)在马铃薯的匍匐茎或茎切段培养中,均观察到块茎的形成。1991年,李文安用花叶芋的叶柄或叶片培养形成小芋块,其上分化出芽和根。这是鳞茎植物、球茎植物、块茎植物经组织培养产生再生植株的6、7、8种方式。

1973年,檀恩(T. van Tran)等人发现用烟草开花植株茎表皮的3~10层细胞进行薄层培养,在培养基和环境条件的调控下,不仅从外值体分化出芽和根,还可直接分化出花芽,形成花芽的数目在供体植株上是从下至上的增加,提出成花梯度的假说。这为组织培养能直接分化出繁殖器官,大为缩短植物的开花周期开拓了新的途径。1989年,李文安进一步发现烟草薄层培养成花

的能力,随供体植株开花期的盛衰而变化,并且花序的苞叶离体培养也能直接分化出花芽。花卉植物如万寿菊的薄层培养应用于无性系快速繁殖,具有提早开花的效果。

植物组织培养的上述各种分化途径,在当前这一技术还处于依赖经验的情况下,除在理论上深入研究植物细胞分化的机理外,同时也在实际应用方面进行了开拓。中国在“六五”、“七五”(1980~1990年)规划中,中国科学院北京遗传研究所和植物研究所报道了适合禾本科稻、麦组织培养的 $N_6$ 和马铃薯培养基,提高了再生植株的分化率,并可用于花药培养,为国外所引用。70年代初,中国的上千个机构从事单倍体育种,据统计现已有23科52属160多种植物获得单倍体植株,其中至少24种以上是中国学者首先完成的,并获得了新品系或新品种水稻60个,小麦20多个,甜(辣)椒5个及一批有意义的成果。进入80年代,中国近3000个单位开展了无性系快速繁殖珍、稀、名、优等濒危植物的研究,有的已进入不同规模的应用阶段成为生产实体。香蕉、甘蔗、草莓、葡萄、菠萝、桉树及各种观赏植物,脱毒的马铃薯、苜蓿、香石竹等均已推广应用。1970年,上海植生所开始试制EA<sub>3</sub>-867纤维素酶制剂,其效能与日本的产品相同。中国在玉米、小麦、水稻、小米、高粱、大豆、芸苔类、马铃薯、地瓜、黄瓜、胡萝卜、枸杞、茯苓、桑树、杨树等植物上均已获得原生质体再生植株。1977年村重(T. Murashige)提出植物体细胞胚可像种子一样应用的人工种子的设想。10余年来在胡萝卜、芹菜、柑桔、苜蓿、玉米、甘蔗、石刁柏、黄连、刺五加等植物均已获得重大进展,有的国外研究者已申请专利。中国也已开展此项研究,特别在采用顶芽、腋芽、小鳞茎等包裹制作人工种子,如百合、花叶芋及桉树、桑木、杨树也获得较多成就。植物体细胞杂交方面,据统计种内杂交有8例,种间杂交有32例,均以茄科植物为主,其中中国也有2例。1981年,拉尔金(P. J. Larkin)等报道,从甘蔗中筛选出抗眼点病和斐济(Fiji)病的突变体也推广应用。目前至少在14种植物筛选出31个表现型,其中有14个再生出植株,5例报道了所选择的性状能经有性过程传递。中国在抗病、抗盐、抗冷、抗除草剂、抗4-氧酮氨酸的突变体或变异体的筛选上,也获得一些成就。这些突变体在理论研究,为原生质体融合和遗传操作,并导致作物改良提供材料方面均有很大意义。自1976年倍堡(Y. P. S. Bajay)开始报道以来,植物组织细胞培养物的超低温保存及其种质库的建立,日益受到重视。芽、茎尖、花粉、胚状体和幼胚,愈伤组织与悬浮培养的细胞、原生质体等培养物,在液氮超低温贮存后,仍能保持很高的存活率并能再生出新植株,对植物种质的长期保存将做出重大贡献。

#### 参考文献

- 1 Murashige T. The impact of Plant Tissue Culture on Agriculture. Canada, Uni of Calgary, 1978. 518~524
- 2 Tran Thanh Van K. Ann Rev Plant Physiol. 1981, 32:291~311
- 3 Collins G B. Plant Cell and Tissue Culture Washington, D C, National Academy Press. 1982. 230~253
- 4 Bhojwani S S, Razadan M K. Plant Tissue Culture Theory and Practise Amsterdam Elsevier; 1983. 1~10
- 5 Tran Thanh Van K, et al. Handbook of Plant Cell Culture-New York: Macmillan Publishing Company, 1986. 4:316~335
- 6 罗士韦, 许智宏, 主编. 经济植物组织培养. 北京: 科学出版社, 1986
- 7 孙敬三, 陈维伦, 主编. 植物生物技术和作物改良. 北京: 中国科学技术出版社, 1990
- 8 李修庆, 主编. 植物人工种子研究. 北京: 北京大学出版社, 1990
- 9 陈英, 主编. 植物体细胞无性系变异与育种. 南京: 江苏科学技术出版社, 1990
- 10 李文安. 植物的器官分化与试管植物. 植物生理专题讲座(第

2册).北京:科学出版社,1992

(中国科学院上海植物生理研究所李文安  
研究员撰;罗士韦审)

**植物幼苗形态学** morphology of seedling

幼苗是由种子产生的。蕨类植物以下的有胚植物由孢子产生的幼小植物体称为孢苗。幼苗是种子植物个体发育中的一个阶段,其形态学特征和前期的种子、后期的成年植株,既有联系又有区别。根据个体发育可以重演系统发育的生物学规律,植物幼苗在一定程度上能够反映植物的系统进化关系,因而能够补充经典植物分类学在某些方面的不足,提供更充分的论据。此外,掌握植物幼苗的形态学特征,对遗传育种、森林更新、植被调查和杂草的化学防除等,都有重大的意义。

19世纪初,德堪多(A. P. de Candolle)、贝恩哈迪(J. J. Bernhard)等人已区分出幼苗各部分的形态。1885年,克莱布斯(G. Klebs)根据子叶的数目把幼苗分为3大群。1892年,卢伯克(J. Lubbock)发表两本关于植物幼苗形态学和分类学方面的经典著作。20世纪初,布兰德札(G. Brandza)、伯基尔(I. H. Burkill)等人研究了某些科、属植物的幼苗,并用幼苗的形态特征探讨该科、属植物的系统发育。1955年,中国赵璜发表《关于幼苗形态研究的初步报告》一文,但未引起重视。1957年,伦纳德(J. Leonard)根据幼苗的形态特征,把苏木亚科中非洲产的喙果族的和罗晃族的植物幼苗分为7个类型,并对这两个族中的属作了调整。后来,布雷南(J. P. M. Brenan, 1967)在《热带东非植物志》的苏木亚科中采用了他的意见。黄晋华在1962年就著有《树木幼苗图说》,后来(1980)又从植物幼苗形态的角度出发,发表植物某些性状演化和植物的亲缘关系的论述。1963年,格鲁什维茨基(И. В. Грушицкий)根据子叶的功能,第1次明确提出双子叶植物的留上萌发应区分为两个类型,一是吸收功能的子叶,属原始类型;一是贮藏功能的子叶,属进化类型。杜克(A. Duke)在60年代发表了几篇关于植物幼苗的文章,对幼苗的形态有较深入的研究,并提出隐子叶和显子叶的概念。70年代初,伯格(D. H. Burger)写了一本热带乔木和灌木幼苗的专著,描述了印尼爪哇地区木本植物的幼苗。后来,沙波迪(V. Csapody, 1968)发表《中欧双子叶植物幼苗》,穆勒(F. M. Muller, 1978)又写了《西北欧低地植物幼苗》一书。1980年,沃格尔(E. F. de Vogel)发表《双子叶植物幼苗》,把双子叶植物幼苗区分为16个类型,并讨论了类型之间的关系;各论分科描述了印度尼西亚的树木幼苗,书中图文并茂。以上所说的绝大部分是双子叶植物的幼苗。

对单子叶植物幼苗进行系统研究是从萨金特(E. Sargeant, 1903)开始的,她做了大量的幼苗解剖工作,得出单个子叶是由于两个子叶合生的结论。阿伯(A. Arber, 1925)在她一本单子叶植物形态学专著中,研究了这类植物幼苗的子叶维管束,认为单子叶植物幼苗只有一个子叶,是由于植物本身的生长节律所控制的。30年代,博伊德(L. Boyd)写了一本单子叶植物幼苗的专著,涉及了除兰科外所有单子叶植物科的幼苗。她重视环境对植物的影响,在科中用生态型分类,并提出了子叶的形态、幼苗的进化等7个问题。

裸子植物的幼苗形态研究,多是在裸子植物或林业方面的专著中顺便提及,或是一些星散的文章中提到。比较系统的研究是希尔和德弗雷尼(T. G. Hill and E. de Fraine, 1908~1910),除了对形态描述外,还对幼苗的子叶迹和根初生木质部的关系进行了讨论。后来,布雷奥(E. Boureau, 1938)和德费雷(Y. de Ferre, 1965)根据子叶迹和根初生木质部的关系,把松柏类植物幼苗的子叶分为A、B、C、D 4个类型,并讨论了这4个类型之间的进化关系。

生产实践也广泛地利用幼苗形态的知识,如化学除草就要求在苗期能识别杂草,以便尽快将之消灭。从30年代迄今,世界各国都有一些杂草幼苗的论著,如库默尔(A. P. Kummer, 1951)描述了300种美国和加拿大农田杂草幼苗;钱塞拉

(R. I. Chancellor, 1961)记载162种英国的杂草幼苗;瓦西里琴科(Н. Т. Васильченко, 1979)写了一本书,记载前苏联常见杂草幼苗将近400种;颜玉树(1989)写了两本中国常见农田杂草的书。其次,是森林、植被调查和定位研究等需要识别林木的幼苗。1960年,瓦西里琴科记载前苏联林木幼苗约700种;1978年,马大浦等从林业生产的角度出发,编写一本树木种苗图谱,记载中国主要林木种苗100种。最后是在遗传育种方面,利用幼苗的形态特征预测成年植株的性状,如美国的布尔邦克(L. Burbank, 1847~1926)和前苏联的米邱林(И. В. Мичурин, 1855~1935)的工作是众所周知的。1961年,哈斯科尔(G. Haskell)对幼苗形态在植物遗传育种上的应用,做了较全面的评论。

80年代以来,植物幼苗形态的研究工作向纵深发展,如在有关豆科植物系统进展的研究中,就有史密斯(D. L. Smith, 1981)和杜克(1981)关于豆科植物幼苗的文章;1991年,克利福德(H. T. Clifford)发表文章对双子叶植物幼苗的萌发做了综述性的评论。沃尔茨(Ph. Woltz, 1968~现在)继布雷奥和德费雷之后,对裸子植物幼苗的维管系统做更深入的研究,试图把松柏类植物幼苗的子叶类型在裸子植物幼苗中广泛应用,并阐明其系统发育的问题。单子叶植物的禾本科植物是形态上很特殊的一个科,其胚和幼苗的结构很特殊,胚芽鞘、中胚鞘的本质是什么,至今仍未解决;印度植物学家沙河(C. K. Shah, 1989)等用组织化学的方法进行研究,认为胚芽鞘、胚根鞘、外胚叶、舌突、盾片和胚轴等6个区域都属于子叶,这样的见解有助于解决禾本科的系统问题。王世金等(1983)用禾本科植物幼苗的形态学特征,把禾本科植物的幼苗分为3个类型、7个亚型,后者相当于现代禾本科分类的7个亚科,这说明幼苗的形态特征确能反映植物的系统关系。总之,用幼苗的形态特征来探讨植物各级类群的系统发育仍是很活跃的一个研究领域。

**参考文献**

- 1 Lubbock J. A contribution to our knowledge of seedlings. London: Kegan Paul Trench, Trubner and Co, 1892. 1; 608. I; 646
- 2 Boyd L. Monocotylours seedlings, Morphological studies in the post - seminal development of the embryo. Edinb; Trans Proc Roy Soc., 1932. 1~224
- 3 Васильченко, И Т Входы деревьев и Кустарников, СССР; Изд Акад. Наук. 1960
- 4 Burger, D H. Seedlings of some tropica trees and shrubs mainly of South East Asia. Wageningen: Center for Agricultural Publishing, 1972
- 5 马大浦,等. 主要树木种苗图谱. 北京:农业出版社,1978
- 6 Vogel E F de, Seedlings of dicotyledons, Washington: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1980
- 7 Ye Nenggan. Studies on the seedling types of dicotyledonous plants. New Jersey; Phytologia, 1983, 54(3): 161~218
- 8 王世金,郭本兆. 植物分类学报,1983, 21(1): 1~21
- 9 叶能干. 生物学通报,1988, 9: 6~8
- 10 叶能干. 植物学通报,1993, 10. 增刊: 11~17

(贵州农学院叶能干教授撰)

**植物轴器官的异常结构** anomalous structure of plant axis

在维管植物中,少数种类轴器官的结构不同于一般的结构类型,从而归入异常结构的范畴。异常结构在蕨类植物、裸子植物和被子植物等不同类群的植物中都能见到。植物异常结构的研究不仅能丰富植物解剖学领域的理论知识,而且也可作为植物药材、木材的显微鉴别和原植物鉴定以及某些经济植物优良品种的选育提供科学依据。

1828年,米贝尔(Mirbel)最先报道了Calycanthus occidentalis 茎的维管周围存在有4个异常维管束。1884年,德里里(De Bary)在《显花植物和蕨类植物营养器官的比较解剖学》中

描述了异常的次生长。1893年,申克(Shenck)对植物的异常结构进行了较为全面的评述。1926年,普法伊弗(H. Pfeiffer)在前人工作的基础上编著了《异常次生加厚生长》一书,将双子叶植物的异常结构归纳为8种类型。藜科的和苋科的植物轴器官内普遍存在有异常结构,1937年,乔西(A. C. Joshi)对这两个科植物的异常结构进行了比较解剖学研究。1941年,科克雷尔(R. A. Cockrell)对马钱属26种植物的木材异常结构进行了解剖学观察,并指出这些植物的异常结构可作为木材鉴定指标。1934~1953年,莫斯(E. H. Moss)对菊科、柳叶菜科和景天科的许多旱生植物轴器官中的木间木栓作了一系列报道。这种异常结构对植物适应旱生环境具有重要的生态学意义。由于植物异常结构的类型很多,发育方式比较复杂,许多学者对各种不同类型异常结构的发生和发育过程进行了较为详细的研究,并提出许多不同的观点。植物的异常结构往往也是为适应某些生活习性和生理功能而发生的结构变异。A. Fahn(1967)和E. Zamski(1977)年利用放射自显影技术证实异常结构中的韧皮部在植物的生命活动中起着重要作用。纵观植物异常结构的研究历史,它已经渗透到包括比较解剖、木材解剖、生态解剖、发育解剖和生理解剖等植物解剖学的各个领域。

根据已经发现的异常结构,可以划分为初生的和次生的两大类。前者包括内生韧皮部、髓维管束和皮层维管束等。内生韧皮部主要存在于茄科、葫芦科、夹竹桃科、萝藦科、旋花科和千屈菜科等科的植物中,位于茎正常木质部的内方呈束状或边缘的带状出现。内生韧皮部一般与初生维管束共同起源于原形成层,它可作为辅助的同化物运输系统。1981年,库奥(J. Kuo)认为内生韧皮部也可能接受来自木质部的含氮化合物。髓维管束出现在髓的周围或中央区,有内韧型、外韧型、周木型和周韧型等多种类型。由于它存在于双子叶植物的毛茛科、苋科、伞形科和菊科等毫无亲缘关系的植物中而很难解释其系统演化关系。皮层维管束存在于有限科、属植物茎的皮层中,对其发育过程所知甚少。有些双子叶植物的茎中由于同时存在髓维管束和皮层维管束而类似于单子叶植物的散生维管柱。

异常的次生结构在维管植物的各个类群中均有发生。大多数蕨类植物缺乏次生结构,但水韭属的和瓶尔小草属的*Botrychium lunaria*植物的轴器官中存在有多种方式的次生长。裸子植物的买麻藤类从形态学的角度来分析,是一群自相矛盾的植物,在轴器官的结构上也表现出异常特征,正常维管柱的周围可形成3~4轮异常维管束。

双子叶植物的异常次生结构类型极其多样。塞加藤属植物的茎、蕈茸植物的根在发育过程中维管柱裂分成多个,每个裂分的维管柱可形成各自的周皮,何首乌块根中正常维管柱周围可产生多个周韧型的维管束,在结构上类似于中央的正常维管柱。韧皮部呈束状、带状或径向条状嵌入次生木质部中是双子叶植物异常次生结构的又一种类型。1933年,国际木材解剖学家联合会(IAWA)命名委员会把这种类型的异常结构定义为内涵韧皮部或木间韧皮部。具内涵韧皮部的植物多属于蕈本植物。在双子叶植物中最为常见的异常次生结构就是正常维管柱的周围产生多轮呈同心环状排列的异常维管束,包埋在薄壁或厚壁结合组织中。这种类型的异常结构的发育相当复杂,长期以来一直存在着争论。1965年,鲍尔弗(E. Balfour)等认为这些多轮的异常维管束是由一轮永久活动的形成层分化形成的。K. Esau(1969)、W. V. Baird(1980)和A. Fahn(1982)等主张是由多轮先后发生的短命形成层产生的。中央种子目的大多数植物具此种异常结构,为此,1988年蒂莫宁(A. K. Timonin)通过对这类植物的比较解剖学研究,探讨它们的系统演化关系。在一些地下贮藏器官中,如萝卜、甘薯和桔梗,次生木质部的薄壁组织细胞不断分裂,产生多育的贮藏薄壁组织,并从中产生三生维管束,以适应贮藏功能。1981年,陆徽韵等认为甘薯块根中的这种异常结构特征可作为高淀粉育种的早期鉴定指标。

单子叶植物通常缺乏次生结构,但龙血树属的和茶藨属的

植物轴器官的薄壁组织中分散有次生维管束。这些次生维管束是由一种特殊的侧生分生组织——次性加厚分生组织向内分化形成的。

植物的异常结构,特别是异常的次生结构的发生和发育涉及到已分化成熟的细胞脱分化和再分化。利用细胞化学和电子显微技术揭示整体植物中细胞脱分化和再分化的规律性,不仅对进一步认识植物细胞全能性的本质有意义,而且对解决植物的营养繁殖,如扦插、嫁接等以及创伤愈合等生产实际问题具有重要价值。另外,异常结构产生的原因、在植物生命活动的生理功能和在植物系统演化中的意义仍有待进一步深入研究。

#### 参考文献

- 1 Balfour E. *Phytomorphology*, 1965, 15(2): 111~122
- 2 Esau K, et al. *Ann Bot.* 1969, 33: 807~819
- 3 Kuo J, et al. *Ann Bot.* 1981, 48(3): 403~406
- 4 Fahn A, et al. *Bot Gaz.* 1982, 143(3): 353~357
- 5 张泓, 等. *西北植物学报*, 1986, 6(2): 111~119
- 6 Timonin A K. *турнал Общій биологич. JLx2*, 185~201
- 7 胡正海, 张泓著植物异常结构解剖学北京: 高等教育出版社, 1993

(西北大学张泓副教授撰; 胡正海审)

#### 根的形态解剖 morphology and anatomy on root

根是维管植物体轴的一部分,被认为是一个独特的器官,它与茎虽在顶端发育方式、次生结构等方面存在相似之处,但在顶端组织的位置、层次、附属物,初生结构中表皮、皮层的特化,初生维管组织的发育方式和排列、侧根起源以及维管形成层与木栓形成层的来源等方面却存在明显差异。根的异常结构、根瘤与菌根、根的起源与演化以及根一茎之间的过渡等亦为人们所关注。

在根端分生组织研究中, Nageli 提出顶端细胞学说; Hanstein 提出组织原学说; Schuepp 提出体帽学说。种子植物原分生组织常有2~3层原始细胞,低等维管植物常有一个四面体的原始顶端细胞。根端分生组织中的“不活动中心”,早期不被认识,后 Clowes 应用放射自显影技术证明它的存在。根冠的中央柱细胞中具淀粉体,起重力传感器的作用,这在光学显微镜下早已观察到,然而电镜下其动态结构则是80年代才发现。

根的表皮特化为吸收组织,表皮多为单层,有的发育成多层。细胞壁不均匀栓化加厚称为根被。皮层由薄壁组织构成,有的具通气组织,有的含淀粉粒或结晶,但存活长者可发育成厚壁组织或偶见厚角组织。内皮层细胞壁具有凯氏带特化,电子显微镜观察表明,凯氏带处质膜加厚,且紧附着细胞壁,无胞间连丝通过。维管柱(中柱)为星状中柱。中柱鞘是一层或几层保持分生组织性细胞,可产生侧根、不定根、不定芽,并参与形成形成层,有的还具裂生分泌道。初生木质部与初生韧皮部相间排列,木质部脊的数目在不同种或同一种植物中有所不同。种子植物的侧根由中柱鞘产生,属内生型,有的内皮层也参与它的形成。蕨类植物的侧根主要起源于内皮层,根茎之间的过渡被认为在下胚轴,其维管束常出现分叉、倒转和并合的现象。

在形态学研究中,1930年 Goebel 引用同源根与异源根来说明维管植物胚中第一根起源的两种模式: 裸子植物和被子植物是异源根植物,根、茎在胚轴相反的两端,低等维管植物为同源根植物,其第一根在胚轴侧面生长。1949年, Troll 认为异源根植物具明显的根系统,包括主根和侧根;同源根植物除第一根在胚上以外,其后的根都是从孢子体的茎上发生,这种根没有明显的根系统,在低等维管植物中存在,故应把它称为初生同源根,而许多被子植物,特别是单子叶植物,初生根是短命的或发育很差的,侧生根主要从茎的不同区域形成,故应把它称为次生同源根。1974年, Foster 和 Gifford 对不定根作了新的解释: 不定根不应指正常生长状态下在茎等处长出的根,而应限定在插条愈伤组织再生的或离体脱分化再生的根。1990年, Gn An-gen 等又将次生同源根特称为拟不定根以示区别。1977年, Tamura 等在毛茛科幼



苗的研究中发现不定根发生的位置及发达与否与初生根和下胚轴有关,初生根枯萎,下胚轴发达,不定根产生;而初生根与下胚轴皆枯萎,不定根发达,且发生在子叶节处。

根冠中向地性刺激的电学显微镜研究表明,淀粉体能传递重力刺激到含有平衡囊的细胞质上,淀粉体沉到这种细胞的下方,把内质网和其他细胞器移到细胞的上半部(Fahn,1982)。1973年,Juniper和French认为平衡囊中具两种高度流动性的成分:淀粉体和内质网。而1972年Sievers和Volkman则认为向地性可能是通过淀粉体对静态内质网复合体的一种压力扩展的鉴别功能。根的伸长区重力反应原因尚不明了,但有证据表明,脱落酸的分布是不均匀的。

通过对根毛研究发现在某些植物中能保持几个月的生活能力,这种长命根毛,人们怀疑它是否参与水分和无机盐的吸收。根毛在鸭趾草等科植物中可在表皮下层发生。

关于维管柱即中柱的概念,Esau(1977)作了新的解释:应只指维管系统,而不是体轴中央柱的维管组织和结合在一起的基本组织。鉴于内皮层不仅能由皮层最内一层细胞产生,也能由中柱细胞分化,因此内皮层和中柱鞘都不是构成中柱的必要的条件。

根中央的髓,有人认为起源于原形成层的一部分,或认为由基本分生组织所衍生。原生木质部脊的数目,认为二原型和四原型是原始的类型,单原型可能为退化的类型(Eames,1961)。木质部脊的数目一方面在某些类群中是恒定的,甚至在某些科有系统分类的价值,例如二原型在石竹科、十字花科占优势;四原型在大戟科占优势(Foster和Gifford,1974);另一方面,原生木质部脊的数目在同一植物不同根之间,甚至在同一种根的不同水平上也有变化,例如毛茛在子叶节区的拟不定根为四原型,在下胚轴与初生根连接处的拟不定根为二原型(汪矛等,1991)。此外,维管柱在某些科属植物中具特异结构,如旅人蕉科和美人蕉科的某些植物其中央具许多分散的导管束和分开的内生韧皮束(Tomlinson,1969),这种异常结构对系统分类研究将是有益的。

根与根际微生物研究具很大应用价值。已经发现与固氮微生物共生的非豆科植物有400多种。菌根研究特别是VA菌根的研究,在国内外多见报道,其根部皮层细胞中可见真菌形成的泡囊与丛枝结构,它在抗御干旱、抵抗病害及营养等方面均起明显作用。

关于根的起源,由于化石不完全等原因,仍存在很多尚待探索的问题。1967年,Troll反对认为根起源于茎状轴的意见,而主张根是所有维管植物形态组成的基本器官。1991年,谷安根等在对毛茛科幼苗子叶节区进行研究后认为,被子植物的根有可能不是任何具星状中柱的低等维管植物的茎干直接演化来的,而系由子叶区尚保留的单中柱所衍生;维管植物根中的星状中柱与具小型叶低等维管植物茎干中的星状中柱在系统发育过程中应各属彼此平行发展的演化枝。

根一茎之间的过渡研究。有关资料表明,在毛茛科等幼苗的解剖中发现,根一下胚轴—子叶的初生维管组织是连续的,而上胚轴的维管组织是通过后形成的维管分子连接的。根—茎维管组织转换中常出现的分叉、倒转与合并现象在星叶草、齿叶铁线莲、花生、镰形角果毛茛等材料中均不存在(李正理,1987;谷安根,1990;郑相如,1990;汪矛等,1991)。关于根—茎过渡区研究的途径,谷安根等(1990)认为,子叶节区是古老轴性器官的保留,至今尚保留原生中柱状的中柱,因此应以子叶节区为中心,向下为子叶节—根过渡区,向上为子叶节—茎过渡区的新途径。

根的形态解剖研究仍是一个活跃的研究领域,热点问题有:根的发育形态学研究,根的初生维管系统研究,根的木材解剖研究和根瘤与菌根研究等。电子显微镜、显微外科手术、放射自显影技术等现代研究手段已为该领域的研究注入新的活力。

参考文献

1 Foster A S et al. Comparative Morphology of Vascular Plants. 1974, 2nd. ed. 李正理等译,维管植物比较形态学,北京,科学出版社,1983. 480~485

2 Esau K. Anatomy of Seed Plants. 1977, 李正理译. 种子植物解剖学,上海,上海科技出版社,1982. 153~178  
 3 Tamura M, et al. Jpn. Bot; 1977, 52(10); 2943~304  
 4 Fahn A. Plant Anatomy, 3rd ed., Oxford: Pergamon Press, 1982. 253~270  
 5 李正理,等. 植物解剖学. 北京: 高等教育出版社, 1984. 166~182  
 6 Gu An-gen, et al. Cathaya, 1990, 2; 171~180  
 7 谷安根,等. 植物研究, 1991, 11(4); 107~116

(北京农业大学汪矛副教授撰; 郑相如审)

**形成层** cambium 形成层是维管形成层的简称。它是裸子植物和绝大部分双子叶植物轴器官侧面所具有的一种分生组织,是侧生分生组织的一种。它的活动产出木质部和韧皮部。因此,研究它的发生和活动机理及影响其活动的条件,不仅是植物学和林学研究的基本理论问题,也对林业管理和林产品生产有着重要的指导作用。

18世纪中叶,法国达汗木(Duhame)第1次使用现代概念的“形成层”一词。1863年,萨尼奥(Sanio)第1个阐明了原形成层和形成层的差别,把它界定为侧生分生组织。20世纪20~30年代,贝利(Bailey)等对其结构和类型进行了一系列研究;50年代,班南(Bannan)和伊稍(Esau)又作了大量工作,阐明了形成层出两种细胞——纺锤状原始细胞和射线原始细胞组成,前者纵向伸长,在弦切面上两端尖锐,横切面上则为径向扁平;后者在横切面上为由里向外辐射状排列的径向稍长的细胞,在弦切面上组成一个呈纺锤状排列的细胞群,规则地分布在纺锤状原始细胞间。他们还指出,根据弦切面上纺锤状原始细胞的排列方式可将形成层分成两类,其端壁整齐地排列在一个水平上的叫叠生成层,如豆科中蝶形花亚科和云实亚科的绝大多数种等;早大牙交错排列的则为非叠生成层,如裸子植物的和被被子植物的杜仲等。

20世纪50年代班南、60年代卡特逊(Catesson)和威尔逊(Wilson)以及70年代巴特菲尔德(Butterfield)对形成层细胞的分裂方式进行了大量研究。根据子细胞的未来命运,把这种细胞分裂分为两类:(1)分化分裂。分裂产生的两个子细胞中的一个将分化为木质部或韧皮部母细胞,另一个则继续维持原始细胞的形态。其分裂方向平行于弦切面,又称作平周分裂,是活动期主要分裂方式。(2)增殖分裂。其分裂产生的两个子细胞都将发育为形成层原始细胞,用以增加其自身,多发生于生长季的末期。纺锤状原始细胞的增殖方式在叠生成层为垂周分裂,而在非叠生成层则为不等垂周分裂和假横分裂两种。而射线原始细胞的增殖方式除少数植物中有通过纺锤状原始细胞的侵入生长使射线原始细胞群一分为二外,多由纺锤状原始细胞分裂形成,其方式主要有横分裂、不等垂周分裂和不等横分裂3种。

20世纪20年代起就不断有人研究形成层活动的年节律性。不过以前的研究多集中于北温带树种,70年代起对热带树木的研究才逐步多起来,特别是80年代以来,以色列和印度的植物学家作了大量工作。方(Fahn,1990)在总结这些研究资料时指出,形成层的活动节律大致有3种类型:(1)北温带和地中海地区的植物,每年春季开始活动,夏末秋初进入休眠,因此形成较清楚的年轮。(2)某些热带荒漠的灌木,每年雨季伊始开始活动,旱季开始时进入休眠,有的有年轮有的无年轮。(3)生长在有限的区域中的热带的和亚热带的树木,通常全年都在活动,有的种也有生长轮,而生长轮的存在与否甚至在同一种的不同个体间都会有很大变化。方和魏荣(Weiring)等的一系列研究资料说明,北温带树木的形成层通常在春季开始活动,绝大多数裸子植物和具散孔材的双子叶植物,都是芽萌动及幼叶展开后,从芽基部开始并逐步向下传导,去芽和使用外源IAA的试验说明,由芽合成并经形成层和分化中的维管组织向下传导的IAA诱导形成层活动的开始。而绝大多数具环孔材的双子叶树木,其形成层则在春天芽展开前就开始活动,而且无论去芽还是环割都不能阻止这一过程。

70~80年代,巴尼特(Barnett)和利特尔(Little)等人的研究资料说明,在形态上看到形成层活动开始前,首先在此区域出现生物化学变化,如过氧化物酶同工酶带数目减少和浓度降低。随后细胞形态发生变化,径向直径增大,壁变薄,光镜下初生纹孔场变得不明显,电镜下可看到逐步出现高密度的粗糙型内质网、多聚核糖体、液泡数目减少体积增大,高尔基体数量增加,并出现微管。至于形成层活动开始时是先形成那种维管组织,随植物的种类而异。方等的研究说明,绝大多数北温带树木,如梨属的和欧洲赤松等,都是先形成韧皮部后形成木质部。崔克明等(1992)及西狄奇(Siddiqi, 1991)等的研究资料说明,构树和一些热带桑科植物是韧皮部和木质部同时形成。据阿基茂(Ajmal, 1987)报道,一些热带树种是先形成木质部后形成韧皮部。其后的一些研究资料说明,形成层休眠的开始与芽的休眠和温度无关,日照的缩短则可能是诱导其进入休眠的一个重要因素。内源激素的测定说明,形成层区域生长素的降低和脱落酸的增加与其进入休眠是一致的。休眠出现的最早迹象也是生物化学的变化,如过氧化物酶同工酶带数目的增加和浓度的增高。形成层细胞停止分裂,随之形态上发生与活动期相反的变化。一般概念的休眠分为两个阶段,休眠的开始一段为生理休眠,一旦进入生理休眠,无论是环境条件如高温、长日照,还是外源激素都很难打破,此阶段结束就进入被动休眠期,此期给以高温或施以外源 IAA 都可使之开始活动。

20世纪20年代詹斯(Janse)和40年代斯诺(Snow)曾就形成层发生的机理分别提出形成层环理论,60年代沃伦-威森(Warren Wilson)提出梯度诱导学说,布朗(Brown)和萨克斯(Sax)提出物理压力学说。80年代以来,这方面的研究发展很快,概括起来可分两个方面:其一是拉森(Larson)进一步发展了伊稍和方等人的原形成层和形成层是同一种组织的不同发育阶段的思想。崔克明(1992)在此基础上又根据一系列实验资料提出形成层的发生和分化表现出细胞分化的阶段性,认为从顶端分生组织历经剩余分生组织、原形成层、后形成层、形成层到成熟维管组织是同一个细胞分化过程的不同分化阶段,其间有一个临界期,此期前的分化过程是可逆的,即可以脱分化,一旦过了这一时期就不可逆了。其二是位置效应在形成层发生和活动控制中的作用。1982年,柏林(Berlin)在一篇综述中第一次讨论了形成层的位置效应问题;1984年,萨克斯(Sachs)和沃伦-威森从不同角度讨论了这一问题。后来的许多研究,资料又从各个方面为这一理论提供了新的证据,这些研究资料表明,任何细胞一产生就在植物体中占有一特定的位置,从而获得此处所具有的位置信息;任一点的位置都具有纵向的、径向的和切向的3个方向的信息。80年代,后期萨克斯、利特尔和萨维治(Savidge)等的一系列研究资料说明,纵向信息来自茎端和根端,主要是茎端的芽合成的生长素以波动的形式通过形成层带和分化中的维管组织向下传导,它们决定着形成层纺锤状原始细胞的形态和排列方向。萨克斯等人还证明,蔗糖可能是另一种纵向信息。这些纵向信息与形成层活动可能是一种正反馈关系。根据沃伦-威森和布朗等的研究资料,径向信息主要是生长素和蔗糖的浓度比在径向的梯度及径向的物理压力,它们决定着形成层衍生细胞的分化方向。切向信息可能就是纵向信息和径向信息在切向的分布,决定着特定位置上组织的切向式样。

形成层的活动式样及其发生机理的研究仍是目前研究的热点,从分子生物学角度对这一问题的研究还刚刚起步,可以预计,不久的将来就会成为新的热点。

#### 参考文献

- 1 Barlow R W, et al. *Possional Controls in Plant Development*. Cambridge, Cambridge University Press, 1984
- 2 Ajmal S, et al. *IAWA Bull.* 1987, 8: 275~283
- 3 Roberts L T, et al. *Vascular Differentiation and Plant Growth Regulators*. Berlin Springer-Verlag, 1988
- 4 Iqbal M. *The Vascular Cambium*. Research Studies Press,

Taunton, 1990

- 5 Siddiqi T Q. *IAWA Bull.* n s. 1991, 12: 177~185
- 6 崔克明. *植物学通报*, 1991, 8: 22~29
- 7 崔克明. *植物学通报*, 1992
- 8 崔克明. *植物学报*, 1992, 8: 275~283

(北京大学崔克明副教授撰)

**木栓形成层** phellogen 又称 cork cambium。它是侧生分生组织的一种,它的活动产物构成植物体的次生保护组织——周皮。研究它的发生和活动式样及影响条件不仅是植物学一个基本理论问题,而且对一些贮藏器官的贮藏和商用木栓的生产都有着重要的指导作用。

1884年,巴瑞(Bary)在他的专著中描述了木栓形成层及其活动产物——周皮。20世纪20年代惠特茂(Whetmore)、50年代史密斯森(Smithson)、60年代惠特茂和70年代阿咨(Arsee)等都描述了木栓形成层的结构。它由一种在横切面上呈长方形、切向伸长、径向扁平的原始细胞组成,在弦切面上呈规则的多角形,在径向切面上呈纵向略伸长的长方形。它们的原生质体具有各种大小的液泡,并含有叶绿体、单宁类物质。除了发育出皮孔的地方外,细胞间没有胞间隙。

20世纪50年代史密斯森、60年代鲍文(Bowen)、惠特茂及70年代阿贝(Arbel)和阿咨等广泛而深入地研究了木栓形成层的发生。他们揭示出,木栓形成层通常随着植物伸长生长的停止、形成层的发生而发生。但随着形成层的不断活动,最初发生的木栓形成层也往往被新发生的代替,而且在植物的一生中不断更新,因此发生的部位也不断深入。随着植物种类的不同,可发生于形成层以外的不同细胞层,软木栎、夹竹桃等由表皮层发生,而杨属的、胡桃属的大多数植物则由皮下层细胞发生,不过由表皮发生的只分裂几次就失去作用。还有一些植物,如刺槐和松属植物是由表皮下2~3层的皮层细胞发生;更有甚者,像侧柏属的、石榴属的植物,是紧靠韧皮部发生,或直接从韧皮部薄壁细胞发生;裸子植物和双子叶植物则由内皮层发生。

在那些相继发生木栓形成层的植物中,每一个生长季中可相继发生两层木栓形成层,后形成的叫附加木栓形成层。后来发生的一层一层逐步深入,直至次生韧皮部。这种木栓形成层一般有两种类型,一是最初由深层细胞发生的植物,如葡萄属植物其活动形成的周皮常成一完整的圆柱;另一类是最初由表皮层或皮下层发生的植物,如松属植物,其木栓形成层没有形成完整的一圈,而是断断续续使周皮呈鳞片状或甲壳状。

20世纪70年代,阿咨和利菲希咨(Lipshchitz)等人指出,无论由哪层细胞发生,都是那些将要形成木栓形成层的细胞先分生组织化,中央液泡消失,原生质体体积增大,所含单宁和淀粉逐步消失,随之发生平周分裂,形成两个外形相似的子细胞;靠里的一个多发育为栓内层细胞,而靠外面的一个则继续进行平周分裂;里面一个子细胞继续维持分裂状态,外面一个则分化为木栓细胞;它们除进行平周分裂外,也周期性地垂直周分裂,以与轴的不断增粗保持一致。

20世纪60~70年代,许多学者还研究了木栓形成层的发生及其活动的持续时间。他们发现,最初发生的木栓形成层活动一段时间后,就由较深层新发生的代替,第1层就逐步失去作用。过一段时间再发生第3层……有的植物第1层发生的当年就发生第2层。苹果和梨树在第6或第8年发生第2层。埃倭特(Evert)(1968)等报道,石榴属的和杨属的树木最初发生的木栓形成层可持续活动20~30a。阿咨等1977年发现,角豆树的木栓形成层可持续活动40a。也有少数种如软木栎和假木贼属的和梭梭属的树木其木栓形成层可持续活动一生。

在生长季中,木栓形成层向内外两边产生数目不等的衍生细胞,向外产生的木栓细胞大大多于向内产生的栓内层细胞,一个生长季可以向外产生多达20层的木栓细胞,而栓内层则只有一两层。

木栓形成层的活动也表现出周期性,明显地分为活动期和休眠期,但这种周期的长短随种而异。有些植物,如椴属中几个种,其活动周期与维管形成层一致,但有些植物就不一致,如洋槐1年有两个不连续的周期,金合欢属的一些种甚至1年有3个周期。

从20世纪20年代起就一直有人在研究影响木栓形成层发生和活动的因素,而且多采用创伤系统的方法。1954年,莱鲁克斯(Leroux)对柳树用萘乙酸诱导形成木栓形成层。60年代,鲍杰(Borger)等研究了外界条件对木栓形成层的发生和活动的影 响,指出阳光、高氧和干燥有利于周皮的形成,但当时的实验手段无法把木栓形成层的发生和栓质化过程分开。60年代末,考尔(Kahl)等人解决了这一技术难题,将此项研究工作推进了一大步。70年代,特别是80年代以来,许多学者研究了影响木栓形成层发生和活动的条件。考茨洛斯基(Kozlowski, 1972, 1987)、鲍杰(1972)和利弗-耶杜牟(Lev-Yadum, 1990)等证明,生长素类有利于木栓形成层发生而不利于其衍生细胞的栓质化,而乙烯的作用则与之相反。李正理等在80年代取得的一系列研究资料也证明这一点,并证明赤霉素和细胞分裂素也有与生长素类似的作用。另外,高湿、短日照和低温等外界环境条件有利于木栓形成层的发生而不利于细胞的栓质化,反之亦然。

有关木栓形成层发生和活动机理的研究较少,概括起来大致有两种假说,一是卡特(Cutter)1978年提出的内部张力说,认为由于维管形成层的不断活动使茎干不断长粗,而体轴最外面的表皮或周皮都没有相应增加其周长,这就形成一种张力,从而诱导木栓形成层的发生和活动。1年中有两个或3个活动周期的树木,活动周期明显依赖于维管形成层的活动,即维管形成层开始活动以后,茎部增粗,使维管柱表面的组织紧张,引起木栓形成层活动,既发生平周分裂向外产生木栓层,也发生垂周分裂增加其周长,从而减轻紧张,木栓形成层停止活动,维管形成层继续活动,一段时间后就又重新刺激木栓形成层的活动。但李正理等在有关剥皮再生的研究中却发现,多数情况下是先发生木栓形成层后发生维管形成层。二是位置效应说,认为木栓形成层是体轴中最接近表面的分生组织,它向外产生的衍生细胞就是植物体的外表面。这一特定的位置主要靠两方面控制其发生和活动。李正理和崔克明有关剥皮后破坏暴露面的实验资料说明,即使与四周都无连系也能发生木栓形成层,这就说明纵向信息和弦向信息对木栓形成层的发生和活动不起控制作用。(1)表面效应:处于外界环境直接接触的表面位置决定着木栓形成层的发生及其衍生细胞的分化命运。20世纪20年代以来大量有关马铃薯块茎创伤周皮发生的研究资料说明,外界环境中的空气、湿度、光照等条件可使表面形成一封闭层,并诱导其下产生赤霉素等植物激素,进而诱导木栓形成层发生。(2)径向信息:大量研究资料说明,无论是IAA的极性运输还是非极性运输都不通过木栓形成层及其相邻组织,因此这里所需要的IAA可能是由木质部向外作径向运输,在径向末端积累就引起木栓形成层的活动。

20世纪90年代研究的热点仍是木栓形成层的活动式样及影响其发生和活动的条件,研究的深度会逐步增加。随着分子生物学方法的引入,这项研究工作会有较大的进展。

#### 参考文献

- 1 Fahh A. Plant Anatomy. 3rd ed. Oxford: Pergamon Press, 1982. 358~372
- 2 李正理,崔克明. 植物学报, 1985, 27: 1~6
- 3 Cutter E G. Reading. 1987, 253~259
- 4 Li Zhengli, Cui Keming. IAWA Bull n s. 1988, 9: 375~383
- 5 Lev-Yadum S, Aloni R. IAWA Bull n s. 1990, 11: 289~300

(北京大学崔克明副教授撰)

**植物组织培养快速繁殖** plant tissue culture and rapid propagation in vitro 植物组织培养就是取植物的细胞、或

者组织、器官、幼胚,在无菌的人工培养基上分化、生长和发育。

植物无性繁殖,是农业、林业和园艺繁殖无性系的重要手段,主要采用嫁接、扦插、压条、分根等方法或利用块茎、球茎、鳞茎和宿根进行繁殖。但传统的方法繁殖速度慢,而且系数低,且限于少数植物。近年来,组织培养快速繁殖法已发展成为植物无性繁殖法的重要手段,多应用于名贵花卉、无毒果树苗木及珍稀濒危植物的繁殖。一些发达国家的苗木生产已大量采用组织培养方法进行工厂化生产。植物组织培养由于效果好,繁殖速度快,周期短,并能发展无病毒苗木,经济效益高,为植物的繁殖创造了一个新的生产领域。

1902年,德国哈勃兰德(Haberlandt)提出细胞全能性的假说,认为植物的器官、组织可以不断分割,直至单个细胞;每个细胞都具有分裂、分化、生长发育的能力。20世纪20年代初,美国劳毕斯(Robins)用无菌的人工培养基培养根尖和茎尖获得成功。20世纪30年代中期,美国怀特(White)用番茄和小麦根尖;法国盖则瑞特(Gantheret)用玉米根尖和柳树形成层;中国李继侗用银杏胚,罗宗洛和罗士韦用禾谷类根尖,分别进行培养并长期继代培养成功。20世纪40年代后,美国斯库克(Skoog)和中国崔微用烟草茎段研究生长素和腺嘌呤对根和芽的形成的作用,而且发现,两者用量的比例关系到根和芽的分化,相对多的生长素有利于根的分化,而相对多的腺嘌呤则有利于芽的形成。20世纪50年代,斯库克和米勒(Miller)发现激动素,用它代替腺嘌呤,其效果更好。20世纪60年代,斯梯沃德(Steward)等用胡萝卜根的细胞培养成为植株,进一步证明高等植物体细胞的全能性。以上理论为植物组织培养快速繁殖的发展奠定了基础。

20世纪60年代,法国莫勒(Morel)首先用快速繁殖的手段繁殖兰花的无病毒苗,并实现工厂化生产,此后工厂化育苗相继在各国广泛开展。为了达到快速繁殖的目的,很多研究者研究了培养基的成分。例如MS培养基是美国的米拉什其(Murashige)和斯库克合作研究的。目前广泛应用的培养基还有怀特(White)培养基及改良怀特培养基、米勒培养基(Miller, 1963)、H培养基(Bourgin和Nitsch)、B<sub>5</sub>培养基、N<sub>6</sub>培养基、努森(Knudson)培养基等。严格地说,每种植物都可以找出它最适合的培养基。20世纪80年代,中国组织培养快速繁殖及工厂化育苗发展很快。广东顺德等地用组织培养大量生产无毒优质香蕉苗,山东临朐中国北方果树苗木场大量繁殖优质无毒果树苗,上海、广州、深圳、北京等地进行了名贵花卉苗木的工厂化生产,石家庄等地毛白杨优株工厂化育苗等都已成功。

组织培养快速繁殖主要步骤包括培养基的配制、外植体接种、芽的分化和根的诱导及试管苗移栽几个环节。外植体消毒要求只杀死菌类而不杀死植物组织。常用的杀菌剂有次氯酸钙、次氯酸钠、过氧乙酸、氯化汞和抗生素等,所用的浓度和消毒时间因植物组织种类、发育时期及含菌量不同而不同。

芽的分化和试管苗生长主要取决于培养基中激素的成分和配比。在这方面的研究很多,但往往因植物不同而不同。一般常用的细胞分裂素有激动素(KT)、6-苄基嘌呤(BAP)、玉米素(ZT)和异戊基腺嘌呤(Zip)。在快速繁殖中,一般用6-苄基嘌呤比激动素的效果好,常用的浓度在0.1~4mg/L之间,随着浓度升高,芽的分化数量增加,但浓度过高反而有抑制作用。生长素虽然不能促进芽的分化,但是一般植物芽的分化需要它与细胞分裂素浓度有一定的比例。当细胞分裂素的相对量大于生长素时,有利于芽的分化和生长;反之,则有利于根的生长。例如在山楂苗快速繁殖的实验中,在MS培养基中附加0.5 mg/L IAA、1 mg/L 6-BAP,是芽分化和生长的最佳配比。

为了加快繁殖,也可以使植物组织在含高浓度生长素的培养基上先脱分化形成愈伤组织,然后再分化形成不定芽或胚状体原球茎等,继代培养后萌发成为小植株。也可以将愈伤组织打散,再进行液体转动培养、浅层培养、振荡培养,促进胚状体、芽和原球茎的分化,这样可使愈伤组织细胞同时分化出大量的胚状体和原球茎,分别在兰花和胡萝卜等植物上获得成功。

试管苗生根需要营养水平较低的培养基,一般不加细胞分裂素,只加生长素,经常用的有:吲哚乙酸(IAA)、萘乙酸(NAA)和吲哚丁酸(IBA)3种,合适浓度多在0.1~2mg/L之间。随着生长素浓度增高,生根加快,但生长素浓度过高,愈伤组织生长量大,根短粗。合适的生长素浓度下,茎基部愈伤组织小,根多而较细。但是,不同的植物诱导生根时所需要的生长素种类和浓度是不同的。也有些植物在芽和根的诱导过程中细胞分泌褐色物质,限制芽和根的分化。一般防止褐变的方法为在培养基中加抗氧化剂、抗坏血酸、半胱氨酸或加入0.5%~1%的活性炭来吸附那些有害物质(如多酚化合物),而促进根的分化。对于难生根的木本植物还可采用混合生长素,或加入其它促进生根的物质如根皮苷等。试管苗在生根培养基上一般一周后即开始分化根原基,2~3周根长好就可移栽。

试管苗移栽一般在温室内进行。通过锻炼,试管苗由半自养状态进入自养阶段。要求相对湿度在90%以上,温度在25℃左右,光照由强转弱,移栽基质为砾石和通透性好的沙性土壤。移苗后一周要注意通气及浇水。

为了降低成本,提高经济效益,又研究了试管苗的自然光培养和培养基的重复利用等有关试管苗工厂化生产的配套技术设施及器皿,还进行了试管苗的扦插与嫁接的实验,在果树、花卉、无籽西瓜等已大量应用于生产。目前,组织培养快速繁殖已紧密结合育种、选种、引种以及脱病毒和现有当家品种的提纯复壮。另外,结合无土栽培,可以提高移栽成活率,促进苗木的生长,产生无公害的果实,也是人们研究和应用的热点。同时,体细胞在一定营养成分的液体培养基中进行培养,可产生多细胞团,一般在含有2,4-D的培养基中可发育出球形胚,通过同步增殖发育成为成熟的胚,将胚状体取出并用藻酸钙等材料包裹形成人工种子。但是,在土壤中人工种子发育为植株的最高频率为20%,在生产上尚难应用。人工种子技术仍是当前体细胞胚胎学及遗传学中的一个重要研究课题。

#### 参考文献

- 1 Murashige T, Skoog F *Physiol Plant*. 1962, 15, 473~497
- 2 Morel G M. *Amer orch soc bul*. 1964, 33, 473~478
- 3 罗士韦. *植物生理学报*, 1978, 4(1), 91~113
- 4 崔敬, 等. *经济植物的组织培养与快速繁殖*. 北京: 农业出版社, 1983
- 5 王玉英, 等. *中国农业科学*, 1983, (1), 24~28

(中国科学院植物研究所王玉英研究员撰)

### 难培养植物组织的培养方法

植物组织培养是供给离体的器官、组织或细胞以生长发育所必需的营养物质和光、温等条件,经过无菌的培养和诱导,最终获得再生植株或无性细胞系的技术。用于组织培养的离体材料称为外植体,供给离体材料的植株称为供体。植物组织培养根据细胞的特性分为体细胞培养和性细胞培养。植物组织培养是细胞学、植物学、植物生理学、微生物学、遗传学、分子生物学、生物化学、生物物理学等多学科综合发展的产物。

1665年英国Robert Hooke发现了第1个植物细胞。1839年德国Schleiden和Schwann首次提出:“细胞是有机体。整体动物和植物乃是细胞的集合体。它们依照一定的规律排列在动植物体内”,从而确立了细胞学说。1902年德国Haberlandt根据细胞学理论提出了高等植物细胞的全能性,即单个植物细胞具有发育成完整植株的潜在能力,从此开始了植物组织培养。1958年,英国Seward和法国Reinerl将胡萝卜韧皮部细胞培养成完整的植株。使体细胞培养成植株首次获得成功。1964年,Guha和Maheshwari将南洋金花离体花药培养成植株,使性细胞培养成植株获得成功。

70年代以来植物组织培养的发展很快,培养材料范围迅速扩大,从低等植物到高等植物,从裸子植物到被子植物,从草本植物到木本植物,组织培养技术已广泛应用于实验植物学的各个领

域。组织培养的材料包括植物的根、茎、叶、花、果、胚、胚珠、子房、原生质体、单细胞、多细胞等。培养方法有液体培养、固体培养、微室培养和发酵罐培养等。使用的培养基种类不断增多,辅助手段有原子能、激光、电脑、现代生物物理和生物化学技术。以生产为目的的试管苗公司在世界上如雨后春笋。

尽管植物组织培养发展快,应用领域广,但按常规组培方法,总有一些植物材料经过很多努力都很难培养成功或组培率极低。有的很难诱导脱分化形成愈伤组织,有的很难诱导芽的分化,有的很难使芽生根。如木本植物直干蓝桉的试管芽难分化根;水稻花培出愈率低,白化苗多,绿苗少是普遍现象。多年来水稻的组培率一般为1%~2%。许多植物的花培很难达到生产需要的要求。

难培养植物组织的培养方法突破了常规组培方法,是应用基因活化处理提高组培率的一种新方法。其特点是把植物组培工作的重点放在供体植株的基因活化处理上,而不是按常规放在取材以后的处理和培养基的配制上。它首次将植物增产剂应用于植物组织培养,作为基因活化剂的主要原料。应用这一新方法,可使难培养植物直干蓝桉的试管芽生根率达100%;水稻花培的出愈率达50%以上,最高达100%;绿苗率最高达100%。

1990年,余素芹首创一种“难培养植物组织的培养方法”,根据细胞遗传和分子遗传的理论;基因表达首先要活化,任一细胞类型的出现都是基因活化表达的结果,提出了培养率低说明基因活化程度低,要提高植物组织培养率必须先进行基因活化处理的观点,并发明了这一新方法,使一些难培养植物的组培成功率取得突破性进展。

在植物组织培养工作中,过去主要是在外植体的处理和培养基的研制上下功夫,而对供体的处理研究不多,尤其没有考虑到用增产剂处理供体会促进植物组织培养中的基因表达,过去的研究对单因子考虑多,忽视了真核生物中的基因调控信号除细胞外的诱导物,大量的主要是机体内产生的一些引起基因表达的物质。综合应用植物生长调节剂对供体进行基因活化处理,有助于机体内产生启动基因表达的物质。以处理供体为主,辅以对外植体的处理,配以最适培养基是难培养植物的组培实现基因活化提高组培率的关键技术路线。

难培养植物组织的培养方法的创立,通过基因活化处理,提高了组培率。这一方法有助于推动实验植物学各个领域的发展,有助于植物基因工程的研究,并为探讨基因表达的机理提供了实验基础。

#### 参考文献

- 1 郑国锴. *细胞生物学*. 北京: 人民教育出版社, 1991. 3~6
- 2 赵世绪. *作物生殖生物学*. 北京: 北京农业大学出版社, 1996, 85~107
- 3 袁文达. *园艺植物组织培养*. 上海: 上海科学技术出版社, 1986. 3~107
- 4 杨增海. *园艺植物组织培养*. 北京: 农业出版社, 1987. 1~7
- 5 孙勇如. *遗传学手册*. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1989. 124~129
- 6 Z H Zhang. The practicability of anther culture breeding in rice, *Review of Advances in plant Biotechnology*, 1985~88, 1989. 31~40
- 7 胡含, 等. *植物细胞工程与育种*. 北京: 北京工业大学出版社, 1990. 7~43

(贵州省农科院水稻研究所余素芹撰)

### 呼吸途径和能量对种子萌发的调节

呼吸代谢是生物氧化的过程,能量转变的阶段,物质转化的枢纽,它在植物生命活动中起着重要作用。呼吸途径改变可调节生理功能进行。据阎隆飞研究,呼吸途径和能量对植物生理功能的调节,表现在离子吸收和运输、有机物的转化的运输、细胞的生长和衰老、器官的形成和脱落、种子的发育和萌发。

呼吸途径对种子萌发的调节 随着科学技术的发展,得到呼吸途径有6条之多,各有一定的独特作用。

1. 磷酸己糖途径对种子萌发的调节, Roberts(1964)认为水稻种子休眠的解除,依赖于糖酵解—三羧酸环(EMPP—TCAC)途径,可是加入氰化钾(KCN)、硫化氢(H<sub>2</sub>S)叠氮化钠(NaN<sub>3</sub>)或二氧化碳后,种子不但不延长休眠,反而促进萌发。Gaber(1967)用同位素示踪法研究大麦种子时得出,在吸水3小时里从EMPP转入磷酸己糖途径,是休眠种子转入非休眠种子的重要关键。种子生活细胞内,至少有EMPP-TCAC和HMP争夺氧气;HMP的末端氧化酶(即多酚氧化酶)对氧的亲合力,比EMPP-TCAC的末端氧化酶(即细胞色素的末端氧化酶)对氧的亲合力弱。因此前者在和后者争夺氧气时,往往失败(Hendricks et al. 1972)。当细胞色素氧化酶被抑制时,则氧不被该途径的还原型辅酶I(NADH)的氧化所还原,而供HMP的还原型辅酶I(NADPH)的氧化所利用。HMP的限速程序是NADPH的再氧化。凡是刺激NADPH再氧化的物质,如增加氧气、给予赤霉素(GA<sub>3</sub>)等之所以能解除种子休眠,可能是由于抑制了过氧化氢酶活性,使过氧化氢经过过氧化物酶和吡啶核苷酸苯醌还原酶,而且醌的氧化还原相连接,促使NADPH再氧化成为NADP<sup>+</sup>,从而激活了磷酸己糖途径所致。

测定HMP两个关键性酶(葡萄糖-6-磷酸脱氢酶和6-磷酸葡萄糖酸脱氢酶)的活性大小,便可知道HMP的活动强弱,再者测定C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>比率,亦可表示HMP同EMPP—TCAC的比率。当C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比为0.68时,则表示HMP占有一定比率。例如,大麦种子休眠期和萌发时HMP的相对活性不同:休眠种子的C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比为0.44,而萌发种子的C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比为0.7。这充分表明,HMP对休眠种子解除具有重要作用。有人以GA<sub>3</sub>、干藏后熟的胚,呼吸抑制剂丙二酸等,都能引起呼吸途径中C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比减小,导致种子萌发。Bewley等(1980)研究结果,也支持HMP增强,而克服种子休眠。他们以丙二酸处理燕麦胚,测得C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比为0.73~0.80,发芽率达83%,对照的C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比为0.83~0.85,发芽率只17%;又以α-巯基乙酸处理大麦种子,C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比只0.03~0.04,发芽率高达89%,而对照的C<sub>6</sub>/C<sub>1</sub>之比为0.36~0.42,发芽率只8%。

2. 乙醛酸循环对种子萌发的调节。Wright(1966)以GA<sub>3</sub>处理榛子种子,乃能解除休眠,浸渍到48小时之后,子叶内异柠檬酸裂解酶活性提高7倍;用α-<sup>14</sup>C乙酸研究证明子叶内脂肪变成蔗糖的数量增我,这可能是由于乙醛酸循环活动的结果。康明等(1986)以GA<sub>3</sub>处理油桐种子,胚乳和子叶的异柠檬酸裂解酶活性,分别为对照的3.2倍和1.7倍,种子发芽率比对照高35%。

能量多寡对静止种子萌发的调节 种子萌发是核酸复制、转录、翻译的开关重新打开,是胚体代谢缓慢和生长发育停滞的复苏,促使胚体发展成为一株幼苗。利于萌发有两个代谢:其一为降解代谢,把胚乳或子叶的大分子有机物分解,运于胚部,供给细胞生长所需要的物质和能量;其二为合成代谢,把小分子有机物合成核酸、蛋白质、脂肪、糖等,作为新细胞、新组织、新器官所需要的结构物和调节剂。这些合成需要大量腺苷三磷酸(ATP),故ATP能够调节胚胎的生长。

1. 能量调节静止种子萌发的事实。Pradet(1969)首先发现莴苣静止种子吸胀5小时,ATP含量从原来为零的水平,上升到每克干重400纳克分子,静止种子小在吸胀30min时,胚中的ATP水平升高5倍。萝卜静止种子的ATP、ADP(腺苷二磷酸)、AMP(腺苷一磷酸)含量,依次为0.1、0.9和2.2纳克分子/每颗。吸胀1hATP增到2.5倍,而ADP、AMP分别下降到0.3和0.1纳克/分子每颗。种子的ATP增加,胚根和鲜重都增加(Mordland, 1974)。这种ATP升高和AMP下降,表明种子能荷的增加。

Atkinson(1969)指出,能荷是生活细胞能量状态的定量指标,是研究种子萌发的动力参数。Pradet曾将吸胀莴苣种子放在空气中萌发,ATP含量很高,而ADP和AMP很低,这时ATP/

ADP比值很大,达到4~10,种子生出根来。与此同时,他把一部分吸胀种子移于氮气中,氧化磷酸化受到抑制,ATP含量急剧下降,能荷低到0.5以下,几乎没有萌发。这时诱出腺苷酸激酶,将ADP转变为ATP和AMP(2ADP⇌ATP+AMP),暂时补充ATP亏缺,维持种子生活。

2. 能量调节静止种子萌发的模式。Khan等(1985)依据呼吸途径和能量多寡,提出能量在调节种子的休眠和萌发中具有关键作用。种子生活细胞能量少时,一则可诱导静止种子转入休眠或已解除休眠的再次休眠;而能量多时,则可促使静止种子萌发。生活细胞能量的变动,决定于当时种子所处下列环境条件。

在低水势、高温、抑制剂和其它不利于种子萌发的障碍条件下时,呼吸代谢缓慢,所形成的少许能量被用于促使静止种子休眠或能萌发的种子而再次休眠。反之,在水分、温度、氧气和刺激剂利于静止种子萌发的适宜条件下时,所形成的ATP较多而用于推动种子萌发。由此,提出过一种能量调节种子休眠或萌发的模式图。

3. 能量调节静止种子萌发的机理。莴苣种子在低水势、高温、抑制剂的影响下,呼吸代谢只形成少量的ATP,这只能诱导静止种子转入休眠或克服了休眠种子再次休眠,而不足以促使种子进行萌发。

用KCN、N<sub>2</sub>、DNP等处理种子,前两种抑制了呼吸代谢过程,后一种改除了氧化磷酸化,于是形成的ATP很少,能量水平很低,既不能使种子转入休眠,又不能使种子进到萌发,而仍然保持原来的静止状态。洗去上述化学药剂之后,则呼吸代谢增强,ATP形成很多,从而促使种子萌发。

在农林生产中的低温层积、排水通气、给予光照,以及施用GA<sub>3</sub>、乙烯、细胞分裂素等,都能提高呼吸强度,形成大量ATP,而加快种子萌发。

#### 参考文献

- 1 Roberts, E. H. *Physiol. PL.*, 1964, (17)14~29
- 2 Gaber, S. D. *Ph. D. thesis*, 1967, Manchester university
- 3 汤佩松, *植物学报*, 1979, (21), 2期。
- 4 阎隆飞, *植物生理生化进展*, 1982, (1), 23~30
- 5 Bewley, J. D., Black, M., *Physiol and Biochemis of Seeds*, 1982, Vol. 2, Spring-Verlag, Berlin, Heidelberg, New zork
- 6 康明, 彭幼芬, *中南林学院学报*, 1986, (2), 121~127

(中南林学院彭幼芬撰)

### 植物的呼吸代谢 respiratory metabolism of plant

呼吸代谢是植物的一个重要功能,在植物生理、生化研究中倍受重视。其研究范围包括:底物的氧化代谢、能量转换、电子传递及其和其他代谢活动的关系。早在19世纪初科学家们就已涉足这一领域,直至20世纪40年代以前,以巴赫(Bax)为代表的大量工作限于呼吸作用总过程即气体交换和末端氧化酶活动。由于生理学和生物化学的发展,植物呼吸代谢的研究在20世纪40~50年代初有了迅速的推进,对呼吸代谢途径、中间代谢及其有关的酶系统与能量关系作了深入研究。有关工作在杰姆斯(W. O. James, 1953)的《植物呼吸作用》一书中有系统的总结和分析。到20世纪50年代初,有关底物代谢途径的工作已基本完成,作出了详细的代谢图。1956年,汤佩松以底物水平代谢研究的证据为依据,首先提出“呼吸代谢多途径”的观点,后为众多学者所证实。20世纪50年代中期,呼吸代谢的研究重点开始转向线粒体结构、功能即电子传递及转能活性。1955年以前,邦纳(W. D. Bonner)等就植物线粒体的形态、膜的性质以及酶活性作了系统而详细的报道,表明线粒体外膜有直径25~30×10<sup>-10</sup>m的微孔,可让分子量较大的物质自由通过,其上还含有很多功能蛋白。线粒体内膜有很大的表面积,以折叠的形式包裹在外膜内,膜上有呼吸链的全套酶系。在内膜的内侧含有转能装置,用电冰冻裂法在电镜下可观察到洋葱根尖线粒体这一装置的实体,内外膜之间含有调节细胞能量状态的腺苷酸激酶。由内膜包围的衬质空间

含有克雷布斯(Krebs)环的全套酶系、线粒体半自主复制的基因组(A. Tsagoloff 1970)。20世纪80年代,有人证明衬质中还含有大量的钙离子,是细胞钙代谢的调节库。兰斯等(C. Lance 1968)不少实验室对电子载体在内膜上的定位及各自的光谱学特性进行的系统研究资料表明,植物线粒体内膜上除有与动物相同的黄素蛋白、铁硫蛋白、琥珀酸脱氢酶、UQ、Cyto. C、cyto. b及cyto. aa<sub>3</sub>外,还有动物线粒体内膜没有的NADH脱氢酶和交替氧化酶存在。1965年,邦纳证明植物线粒体能较好地氧化外源NADH;同年,莱林格(L. A. Lehninger)指出动物线粒体缺乏这一功能。1973年,道斯(R. Douce)等证明植物中有两个外源DADH脱氢酶,其中一个位于线粒体外膜上,和动物线粒体中对鱼藤酮不敏感的NADH-cyto. c还原酶系统相似,但它不是呼吸链的组成部分;另一个NADH脱氢酶位于线粒体内膜外表面,为抗霉素A抑制,它的充分活化需要Ca<sup>2+</sup>,Ca<sup>2+</sup>的作用是使其与内膜结合得更为紧密(T. B. Storey 1974)。艾丘默(H. Ikuma 1964)等首次报道了绿豆线粒体中有交替氧化酶存在;斯琼班(G. R. Schonbaum, 1971)等指出该酶的专一抑制剂为水杨酰氧肟酸(SHAM)和对苯氧肟酸(CLAM);索洛莫斯(T. Solomos 1977)测得了该酶对O<sub>2</sub>的K<sub>m</sub>值比细胞色素氧化酶高10倍。法夫拉姆布等(H. A. Fairlamb, 1977)的报道认为交替氧化酶的活性中心含有一个Cu原子和一个Fe原子。1978年,里奇(R. P. Rich)和帕默(J. M. Palmer)分别从植物线粒体中分离出交替氧化酶,指出该酶催化泛醌(UQ)的氧化,将UQ的电子直接传给分子氧,其可能机理是:功能基团将Fe-Cu中心的两个电子传递给分子氧形成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>;另一可能是用活性中心的4个电子去还原O<sub>2</sub>直接形成H<sub>2</sub>。1986年,邦纳再次从Arum线粒体中分离和部分纯化了交替氧化酶,证明它有好几个含金属铁的活性中心能与O<sub>2</sub>结合。伊桑(E. T. Eltohon, 1987)等从Savromatum guttatum线粒体中纯化了交替氧化酶,确定其分子量为28000da,还获得了它的抗体。

关于植物呼吸链中电子载体的排列顺序,1980年戴维斯(D. D. Davies)根据帕默(1977)和里奇(1979)中点电位测定,结合热力学、相对反应动力学多方面参数和呼吸抑制剂的作用位点,参考动物线粒体电子传递链结构图,绘出了植物线粒体电子传递载体的排列顺序和转能部位图,将该图与动物电子链比较时,可见细胞色素(cyto)主链与琥珀酸氧化基本相同;有两点不同,是帕默(1976)指出,在加cyto. c时外源NADH从UQ处进入电子链,其P/O值与琥珀酸氧化相似,伊德曼(K. Edman 1985)证明植物线粒体还能氧化NADPH,但最适pH值低于NADH的氧化;另一点是从UQ处分出一条交替氧化支路或称抗氧电子传递链。现已得知,所有的植物分离线粒体中,当Co. NaN<sub>3</sub>和KCN存在时,均有残余呼吸存在,它可为SHAM抑制。邦纳认为交替途径的出现与UQ的还原状态有关。兰伯斯(H. Lambers, 1985)认为交替途径是在细胞色素途径近于饱和状态才出现的,这一现象称“溢流”作用。穆尔(L. A. Moor, 1988)指出,交替途径的出现决定于胞库的氧化还原态,不能认为是简单的“溢流”。斯蒂金克(F. E. Stegink, 1986)设想有一种特异蛋白是UQ与交替氧化酶之间偶联电子流的基本物质,它可能是抗氧呼吸酶之间偶联电子流的基本物质,并可能是抗氧呼吸的限速因子。可见对抗氧呼吸出现的机理目前尚未有一致意见。由于人们已经从植物线粒体中分离、纯化出交替氧化酶蛋白的实体,表明抗氧电子传递链的存在是无疑的,现已肯定植物线粒体中至少有4条电子传递途径,它们是:(1)定位于线粒体内侧的对鱼藤酮、抗霉素A、氰化物均敏感的内源NADH氧化的细胞色素呼吸链;(2)定位于线粒体内膜内侧对鱼藤酮不敏感的琥珀酸氧化途径;(3)定位于线粒体内膜外侧的外源NADH氧化途径,对鱼藤酮不敏感,为抗霉素A抑制;(4)由UQ分支的抗氧电子传递途径。1979年,汤佩松实验室以水稻幼苗为材料在同一种植物线粒体中观察到这4条途径,从而证明电子传递链也是多途径的。

将蕴藏在生物分子中的化学能转化为细胞生活可利用的

自由能是线粒体最重要的功能。植物电子传递过程中也有3个转能部位。大多数植物紧密偶联的线粒体其呼吸控制比可达到3~7。1976年帕默指出,比值的差异来源于底物种类,以苹果酸为底物时ADP/O近于3,琥珀酸近于2,外源NADH为1.5。1969年,斯托尔莱(T. B. Storey)等证明交替途径中也有能量转换反应。臭葱线粒体以苹果酸和琥珀酸为底物,在缺乏CN<sup>-</sup>时ADP/O分别为1.9和1.3,有0.3mM CN<sup>-</sup>时分别为0.7和0。20世纪60年代初至70年代中,米切尔(P. Mitchell 1976)在对线粒体转能机理深入研究的基础上提出“化学渗透”假说,其中心思想是,在电子传递过程中氢离子作跨膜运动,形成“质子电化学梯度”,或称“质子动力势”,它是ATP形成的动力。这方面以植物线粒体为对象的研究很少。因为植物线粒体蛋白产率低,实验难度大,然而里奇(R. P. Rich)(1976)指出,米切尔学说中作为质子位移的Q循环对植物线粒体不只有质子动力势的作用,同时还是交替氧化酶反应中氧与UQ相互作用的连接。米南齐(A. B. Melandri, 1977)则发现光合细菌的载色体用抗霉素A处理时电子传递和光合磷酸化均受到抑制,而质子电化学梯度不受影响。刘存德等的实验资料证明转能活性与线粒体的状态及环境温度有关,发育不完整的线粒体转能活性低,发育完全的线粒体在低温条件下转能活性也很低;线粒体的转能活性受线粒体膨胀和收缩功能的调节,当用细胞松弛素B抑制线粒体膨胀和收缩时,其转能活性明显降低(邹喻萃, 1984)。

20世纪30年代,英国科学家将呼吸的原理用于水果、蔬菜保存,40年代发展成为气调贮藏技术。1970年,刘存德等设计的薄膜气调在中国广为使用。莱昂斯(J. M. Lyons, 1970)首先报道了小麦线粒体氧化活性和冷害的关系。雷桑(A. K. Raison 1979)报道了温度与线粒体膜相变的关系。杨福愉等(1982~1986)较系统地研究了水稻、玉米线粒体膜的流动性、呼吸控制、抗氧呼吸与幼苗冷害的关系,证明耐寒的水稻和玉米品种经4℃低温处理后,上述过程没有变化,不耐寒的明显降低。用荧光探针ANS和自旋标记5-NS对水稻和玉米线粒体膜流动性进行研究,证明抗冷的品种其线粒体膜的流动性比不抗冷的大。种子活力是农业增产第一个重要环节,而活力的强弱受呼吸代谢的严格控制。1987年刘存德等提出能荷是种子活力的最好指标。

线粒体具有半自主复制的能力。研究资料表明,植物线粒体基因组(mtDNA)有很多特点,它远远大于动物的和其它真菌的mtDNA;由复合式环形分子构成,有很多重复序列,种间关系密切的植物线粒体DNA,高度保持着原初序列,和其它细胞器之间常发生DNA序列的移动;除大分子量的mtDNA外线粒体中还存在着一些小分子质粒DNA。哈克(E. Hack, 1984)发现黄瓜线粒体中F<sub>1</sub>-ATPase的第9亚基为线粒体DNA合成,还首先证明玉米线粒体的F<sub>1</sub>-ATPase的α-亚基由线粒体基因组编码,在动物中它们都由核基因编码。有人还证明细胞色素氧化酶的I、II、IV基均由线粒体编码。但巨大的植物mtDNA还能编码哪些功能蛋白,尚待研究。

雄性不育的培育是作物三系和两系配套育种的关键。大量研究资料表明,雄性不育基因定位于线粒体上。1988年,玛卡里夫(A. C. Makareff)系统研究了萝卜雄性不育基因,证明它定位在线粒体上,识别出3种基因转录改变,它们分别是atpA(F<sub>1</sub>-ATPase复合体本α-亚基)、atp6(F<sub>0</sub>-ATPase亚基6)、CoxI(细胞色素氧化酶亚基I)。观察到不育的萝卜品种(ogura)mtDNA的限制性图谱和正常的mtDNA有很大不同,在357kb的mtDNA中有15kbDNA序列,在正常的mtDNA(242kb)中不存在。atp6基因分析表明,不育的ogura萝卜中,在5'端有105个氨基酸阅读框架结构,编码12052-Da的多肽,这在正常萝卜的mtDNA中未曾发现,认为105序列的出现可能对线粒体功能有不利影响,因而影响到转能装置H<sup>+</sup>-ATPase的合成。1990年,科内特(B. M. Connert)等用牵牛花悬浮细胞研究表明,CMS系细胞的抗氧呼吸明显低于可育细胞,认为抗氧呼吸的缺乏可能导致CMS成为表现型。由此可见基因表达也受呼吸代谢的制约。

参考文献

- 1 James W O. Plant Respiration. 1953.1~53
- 2 汤佩松,等. 植物学报,1956,5,377~397
- 3 Mitchell P. J Theor Biol. 1976,62:327~367
- 4 Stumpf P K, et al. l Metabolism and Respiration. D D Davies ed. 1980
- 5 刘存德,等. 植物生理通讯,1982,5:26~31
- 6 Douce R. Mitochondria in Higher Plants, 1985,45~237
- 7 Makaroff C. A et al J Biological Chemistry, 1989,264:11706~11713
- 8 Connett M B, et al. Plant Physion. 1990,93:1634~1640

(中国科学院植物研究所刘存德研究员撰)

植物呼吸代谢的多样性

varieties of plant

respiratory metabolism 高等植物与高等动物间的一个重要的区别在于动物能快速位移,躲避逆境,内环境相对稳定,生理过程变化较小,而植物的内环境随外界环境的变化而变化。同时,植物的生理状况还随着生长和发育的进程而不断变化。植物在长期进化过程中,产生多条呼吸代谢途径。1956年,中国汤佩松首次提出植物呼吸代谢多样性的观点。呼吸代谢的多样性主要表现在呼吸的化学历程、呼吸链的电子传递途径和末端氧化系统3个方面。

**呼吸途径的多样性** 植物中存在糖酵解(EMP)、磷酸戊糖途径(HMP)、三羧酸循环(TCA)、乙醛酸循环和乙醇酸途径等。虽然植物体内同时存在这些不同的呼吸途径,但并非这些途径都是以相等的速度或比例运行多个途径的运行速和运行比例取决于植物生长发育进程以及外界环境的变化。汤佩松(1979)证明水稻幼苗中存在上述诸途径,现以水稻为例加以叙述。(1)糖酵解(EMP)。是指淀粉或其它6碳糖转变为丙酮酸的一系列反应。丙酮酸以后的变化视条件而定,无氧条件下,可进行酒精发酵、乳酸发酵以及产生丙酮、丙酸、丁二醇等发酵产物。水稻种子萌动至破胸阶段,由于氧气很难进入种皮,主要进行酒精发酵;在有氧条件下,丙酮酸经三羧酸循环彻底氧化。(2)三羧酸循环(TCA)。它是丙酮酸在有氧条件下被氧化成CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O的过程。它提供的能量比糖酵解提供的要多得多,它不仅是糖代谢的重要途径,而且是各类有机物相互转变的枢纽。水稻虽有较强的发酵系统,在缺氧条件下可通过无氧呼吸获取部分能量短期维持生命,但其生长发育主要靠TCA途径提供物质和能量。(3)磷酸戊糖途径(HMP)。在有氧情况下,大多数植物细胞葡萄糖的氧化是通过糖酵解——三羧酸循环这条主线来实现的,但某些植物或处于特定生理状况下的植株可通过HMP途径进行代谢。这是一条仅次于EMP—TCA的重要途径。当主线的酶系统受到抑制时,HMP途径往往能代替主线运行,能有效地供应生命活动所需的能量。正常情况下,植物的有氧呼吸以EMP—TCA的比重最大,HMP较小,但在干旱、受伤或染病等逆境情况下,后者就会加强。水稻籽粒成熟过程中HMP途径和EMP—TCA并存,在乳熟后期前者有加强的趋势。(4)二羧酸途径(DCA)。它是由两分子乙酸合成琥珀酸、延胡索酸和苹果酸的途径,它起着补充三羧酸循环的作用。有迹象表明,水稻幼苗存在二羧酸循环。(5)乙醛酸循环。

它是异柠檬酸在异柠檬酸酶的作用下裂解为乙醛酸,乙醛酸通过苹果酸酶的作用与乙酰辅酶A结合,形成苹果酸、草酰乙酸。乙醛酸循环发生在乙醛酸循环体中,为一独立的呼吸途径,它与EMP—TCA及HMP等途径最主要的区别是前者为脂肪氧化分解的途径,后者为糖氧化分解的途径。通过示踪试验肯定水稻中存在乙醛酸循环。(6)乙醇酸途径。是指由乙酰辅酶A产生乙酸、乙醇酸,以后每一氧化阶段都在氧化酶的作用下进行并形成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>又在触酶的作用下放出O<sub>2</sub>,这一系列的过程称为乙醇酸途径。乙醇酸氧化酶是该途径特有的酶,虽然该途径在获得能量方面没有什么作用,但能产生H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,放出O<sub>2</sub>;水稻根部长有该酶存在,该途径产生的O<sub>2</sub>可直接为根系所用,还可用于氧化根域的还原物质,使水稻适应于还原条件的水田中生长。总之,水稻呼吸代谢的多条途径是水稻在长期进化过程中形成的,它保证水稻对多变环境的适应性。

尽管对各条呼吸途径在植物一生中各自所起的作用还很不清楚,但初步看来,年轻的生长旺盛的组织TCA似乎占主要地位,组成原生质的蛋白质物质基础氨基酸以及糖类、脂肪代谢生能等都主要是通过TCA完成的,TCA在植物呼吸代谢中处于核心地位;HMP则在老组织中及形成次生物质(生物碱、植物激素、核糖、细胞壁物质等)和脂肪合成方面占优势地位;乙醛酸循环主要执行脂肪的降解与转化功能。

**呼吸链电子传递系统的多样性** 20世纪50~60年代对线粒体研究的结果证明它是细胞进行呼吸代谢的重要场所,可完成呼吸链电子传递和偶联磷酸化的全部过程,呼吸链各组分和ATP复合体在线粒体内膜和嵴两侧的分布是不对称的。Plamer(1976)认为植物中至少存在5条不同的电子传递途径,即主路、支路1、2、3及抗氧支路。电子传递主路已经较为清楚,而抗氧支路在70年代才开始深入研究,它广泛地存在高等植物中,与某些植物的开花、种子萌发、果实成熟时的呼吸跃变和植物的抗寒、伤呼吸以及组织分化等密切相关。关于抗氧支路电子在主路上的分叉点有不同的意见。一般认为在UQ处分叉,但1980年杨福愉等则认为主链的分叉点应在cytb之后,而且可能从cytc<sub>1</sub>开始。关于抗氧呼吸的研究目前主要集中在交替氧化酶上,由于交替氧化酶的电子顺磁共振和分光光度参数尚不明确,该酶极不稳定导致酶纯化困难,造成对它的性质认识不够,甚至认为抗氧的耗氧是脂肪酸过氧化作用的结果。但最近有两篇重要的论文报道了对交替氧化酶纯化所取得的进展,Bonner(1986)等用去氧胆酸钾和十二烷基麦芽糖苷从欧海芋线粒体中纯化交替氧化酶,纯化样品经金属元素分析,表明只有铁与其活性有关,且该酶可能含有几个结合O<sub>2</sub>的金属中心;Elthon和Mcintosh报道,从地涌金莲线粒体中得到了纯化166倍的交替氧化酶,用此制得的多克隆抗体至少可与3种共纯化的蛋白质(35KD、36KD、37KD)发生免疫沉淀反应,并且抗36KD蛋白的抗体可与存在交替途径的其他植物(如Vignaradiate, Arumcitalicm)线粒体总蛋白发生免疫沉淀反应。有证据表明,致热源可诱导地涌金莲出现抗氧呼吸并同时伴随着35KD和36KD蛋白质的表达。Berthod等用辐射失活分样法测定臭菘和地涌金莲线粒体交替氧化酶的功能分子量约为28KD。对交替氧化酶的结构及性质尚需进一步研究。

表1

各种末端氧化酶主要特性的比较

(薛应龙,1987)

| 酶       | 金属辅基         | 需要辅酶 | 定位         | 与O <sub>2</sub> 的亲合力 | 与ATP的偶联 | CN的抑制 | CO的抑制 |
|---------|--------------|------|------------|----------------------|---------|-------|-------|
| 酚氧化酶    | Cu           | NADP | 细胞质        | 中                    | —       | +     | +     |
| 抗坏血酸氧化酶 | Cu           | NADP | 细胞质        | 低                    | —       | +     | —     |
| 乙醇酸氧化酶  | 黄素蛋白         | NAD  | 过氧化<br>物酶体 | 极低                   | —       | —     | —     |
| 细胞色素氧化酶 | Fe           | NAD  | 线粒体        | 极高                   | +++     | +     | +     |
| 交替氧化酶   | Fe<br>(非血红素) | NAD  | 线粒体        | 高                    | +       | —     | —     |

末端氧化系统的多样性 自 Warburg 在 20 世纪 30 年代发现呼吸酶以来,植物体内的末端氧化酶多样性的存在已被充分证实。研究得比较多的有以下几种酶,其主要性质见下表。另外,过氧化物酶和过氧化氢酶是否归属于末端氧化系统尚存在分歧意见,表中未列出。

综上所述,植物呼吸代谢的多样性已经得到普遍的证实,其主要电子传递链及有关呼吸酶都研究得较为清楚,但仍有问题尚待进一步研究:(1)交替氧化酶的分离、纯化及其特性鉴定以及抗氧呼吸的生化步骤;(2)抗氧支路在主路上的分叉点以及电子流向该支路的生理意义及其功能;(3)末端氧化过程及其与环境间的相互作用,种子和果、蔬成熟过程中呼吸途径的交替与调控;(4)呼吸代谢各途径的“转轨”控制以及各条途径的开闭控制;(5)呼吸代谢的分子生物学基础,利用主路或支路缺失突变体进行深入研究以及抗氧呼吸的研究,将是今后呼吸代谢多样性研究的热点。

#### 参考文献

- 1 汤佩松. 生物科学动态, 1965, (3): 1~13
- 2 Palmer J M. Annual Review of Plant Physiology. 1976, 27: 133~157
- 3 Solms T. Annual Review of Plant Physiology. 1977, 28: 279~297
- 4 汤佩松. 植物学报, 1979, 21(2): 93~106
- 5 邹喻萍, 等. 植物学报, 1979, 21(3): 199~207
- 6 杨福愉, 等. 中国科学(B辑), 1980, (1): 60~66
- 7 Laties G G. Annual Review of Plant Physiology. 1982, 33: 519~555
- 8 Hou G L, S L Chung. Plant Physiology. 1984, 75: 876~878
- 9 Walter D, Bonner J R, et al. Plant Physiology. 1986, 80: 838~842
- 10 Thomase, Elthon Bonner J R, et al. Plant Physiology. 1986, 80: 378~382

(安徽师范大学周阮宝副教授撰)

**卡尔文循环** Calvin cycle 光合作用的光反应结果生成 ATP 和  $\text{NADPH} + \text{H}^+$ , 植物利用这些物质的能量, 才能将  $\text{CO}_2$  还原成为碳水化合物。  $\text{CO}_2$  被还原成糖的过程是在叶绿体的间质中进行的。 1946 年, 卡尔文(Calvin)等用  $^{14}\text{CO}_2$  示踪方法开始这方面的研究工作, 并于 1954 年提出  $\text{CO}_2$  被固定和还原过程的骨架。 为此, 卡尔文获得 1961 年诺贝尔奖金, 并把这一过程称为卡尔文循环, 或称还原的磷酸戊糖途径、光合环和 C3-途径。

在卡尔文循环中关键反应是在核酮糖 1,5-二磷酸羧化酶—加氧酶(Rubisco)催化下  $\text{CO}_2$  和核酮糖 1,5-二磷酸(RuBP)反应生成 2 分子的 3-磷酸甘油酸(3-PGA), 这个反应是一复杂过程, 当烯醇式的 RuBP 与  $\text{CO}_2$  反应后, 首先形成 2-羧基-3-酮基核糖醇 1,5-二磷酸; 然后再水解成 2 分子的 3-PGA。 这里的 Rubisco 需要  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{CO}_2$  形成酶- $\text{CO}_2$ - $\text{Mg}^{2+}$  复合物而被活化, 但这个  $\text{CO}_2$  不是被固定的  $\text{CO}_2$ 。 Rubisco 还有另一催化活性, 即它也能使 RuBP 与  $\text{O}_2$  结合生成 1 分子 3-PGA 和 1 分子磷酸乙醇酸, 后者是光呼吸的底物。 在绿色植物中 Rubisco 还有它特有的活化酶和抑制剂。 此酶是由 8 个大亚基和 8 个小亚基组成的全酶, 催化部位是在大亚基上, 由此它可有 8 分子的  $\text{CO}_2$  同时被固定。  $\text{O}_2$  是 Rubisco 羧化反应的竞争性抑制剂。

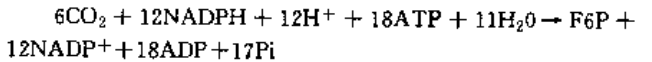
利用 ATP 在磷酸甘油酸激酶的作用下使 3-PGA 磷酸化产生 1,3-二磷酸甘油酸, 它再通过甘油醛 3-磷酸脱氢酶的作用利用  $\text{NADPH} + \text{H}^+$  还原成 3-磷酸甘油醛(3-GAP), 这两个反应中释放的 ADP 和  $\text{NADP}^+$  可由光反应再生成 ATP 和  $\text{NADPH} + \text{H}^+$ 。

在卡尔文循环中 3-GAP 有 4 种方式被利用, 分别是:(1)由磷酸三碳糖异构酶作用异构化生成磷酸二羟丙酮(DHAP), DHAP 可自叶绿体中输出进入细胞质, 用于糖酵解或蔗糖合成;

(2)由醛缩酶作用, 3-GAP 与 DHAP 形成果糖 1,6-二磷酸(FBP), FBP 再通过果糖双磷酸酯酶的作用脱去磷酸产生果糖 6-磷酸( $\text{F}_6\text{P}$ ); (3)在转酮基酶催化下,  $\text{F}_6\text{P}$  与 3-GAP 反应, 生成等量的木酮糖-5-磷酸( $\text{Xu}_5\text{P}$ )和赤藓糖-4-磷酸( $\text{E}_4\text{P}$ ), 在醛缩酶的作用下,  $\text{E}_4\text{P}$  再与 DHAP 反应, 形成景天庚酮糖 1,7-二磷酸( $\text{Su}_7\text{P}$ ),  $\text{Su}_7\text{P}$  通过景天庚酮糖双磷酸酯酶作用脱去磷酸, 产生景天庚酮糖-7-磷酸( $\text{Su}_7\text{P}$ ); (4)在转酮基酶催化下,  $\text{Su}_7\text{P}$  与 3-GAP 反应, 生成  $\text{Xu}_5\text{P}$  和核糖-5-磷酸( $\text{R}_5\text{P}$ )。  $\text{Xu}_5\text{P}$  在差向异构酶作用下异构化, 生成核酮糖-5-磷酸( $\text{Ru}_5\text{P}$ ),  $\text{R}_5\text{P}$  也可在异构酶作用下形成  $\text{Ru}_5\text{P}$ 。 最后, 在 ATP 和磷酸核酮糖激酶存在下,  $\text{Ru}_5\text{P}$  磷酸化产生  $\text{Ru}_6\text{P}$ ,  $\text{Ru}_6\text{P}$  又可再进行羧化反应, 形成循环反应过程。

从定量关系看, 如果通过这一循环产生 1 分子六碳糖( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), 则需要 6 分子的  $\text{CO}_2$ , 而 6 分子  $\text{CO}_2$  被固定又需要与 6 分子的 RuBP 作用, 产生 12 分子的 3-PGA, 它的磷酸化和被还原成三碳糖(3-GAP), 需要 12 分子 ATP 和 12 分子  $\text{NADPH} + \text{H}^+$ 。 12 个 3-GAP 中的 5 个转变成 5 分子的 DHAP, 其中 3 分子 DHAP 与 3 分子 3-GAP 缩合成 3 分子  $\text{F}_6\text{P}$ , 如果其中 1 分子  $\text{F}_6\text{P}$  将转移出去用于形成淀粉, 则还剩下 2 分子  $\text{F}_6\text{P}$ 。 4 分子 3-GAP 和 2 分子 DHAP (共有 30 个碳原子), 它们正好可生成 6 分子  $\text{Ru}_5\text{P}$ , 这 6 分子  $\text{Ru}_5\text{P}$  磷酸化还需要 6 分子 ATP, 最后产生 6 分子 RuBP。 这样, 循环可继续下去。

因此, 6 分子  $\text{CO}_2$  在这一循环过程中需要 12 分子  $\text{NADPH} + \text{H}^+$ 、18 分子 ATP 和 11 分子的水, 形成 1 分子  $\text{F}_6\text{P}$ 、12 分子  $\text{NADP}^+$ 、18 分子 ADP 和 17 分子的无机磷酸( $\text{P}_i$ )。 即每固定 1 分子  $\text{CO}_2$  需要 2 分子  $\text{NADPH} + \text{H}^+$  和 3 分子 ATP。



自 Calvin 等提出碳素还原原后, Norris 等用兰藻、甲藻、绿藻、轮藻、黄藻、红藻、苔藓、蕨类和种子植物等 9 门 27 种植物进行研究, 结果证明这一循环是植物界普遍存在的共同现象。 在这一循环中其运转速度受许多因素的调节, 它们是:(1)ADP 和  $\text{NADP}^+$  的反馈调节。 在全日光照下光合作用速度受 Calvin 循环反应速度的限制, 而不受电子传递和光合磷酸化速度的限制, 这是因为  $\text{NADPH} + \text{H}^+$  和 ATP 受到使用速度的限制, 而不受形成速度的限制, 光反应的速度是快的。 只有  $\text{NADP}^+$  和 ADP 再产生后, 它才能迅速地被光反应还原和磷酸化, 从而 Calvin 循环中的这两种产物反馈调节 Calvin 循环的运转速度。 在叶绿体中每毫克叶绿素约含有 10~20ng 分子  $\text{NADPH} + \text{H}^+ + \text{NADP}^+$  和 40~60ng 分子 ADP+ATP, 它们每秒钟约相互转换 2~3 次。(2)无机磷酸的调节。 每 3 分子的  $\text{CO}_2$  被固定, 就要有 1 分子  $\text{P}_i$  进入磷酸三碳糖(TP)。 如果叶绿体外  $\text{P}_i$  增加, 则 TP 将从叶绿体中输出, 每 1 分子 TP 输出就会有 1 分子  $\text{P}_i$  进入叶绿体。 TP 输出增加, 从而不再再生 Calvin 循环中的 RuBP,  $\text{CO}_2$  固定的速度变低, 当细胞质  $\text{P}_i$  浓度过高时, 则 TP 全部输出,  $\text{CO}_2$  同化甚至可以停止; 如细胞质和叶绿体  $\text{P}_i$  浓度低时, 则叶绿体中的 ADP-葡萄糖焦磷酸化酶活化, 有利于淀粉的合成。(3)质量作用的调节。 光合环中 3-PGA 还原成 GAP 是分两步进行的, 第一步先形成 1,3-二磷酸甘油酸, 第二步再形成 GAP, 这两步反应合在一起, 是一个可逆系统。 糖酵解中发生的就是上述反应的逆反应。 控制着这一反应方向的是 ATP 的浓度或 ATP 的供应。 当 ATP 供应充足时, 反应依光合环的方向进行, ATP 供应不足时, 即 ADP 大量存在时, 则反应依逆反应进行, 影响光合环的运转。(4)酶合成的调节。 Calvin 环的反应是生物化学反应, 是酶促反应, 许多因素影响酶合成的量, 如 Rubisco 小亚基的合成受光调节。 因此, 酶的合成受基因表达的各种因素影响。(5)酶活性的调节。 光对光合环中酶活性有重要的调节作用, 它可分为直接的和间接的调节。 间接的是指光通过光合作用的反应而造成叶绿体间质中一种利于酶起催化作用的条件, 例如使其中的  $\text{H}^+$  浓度下降,  $\text{Mg}^{2+}$  浓度增大, 变构酶效应剂的形成等等。 当光反应进行时光合膜中的电



子传递引起质子自间质、向类囊体腔内运转,同时发生  $Mg^{2+}$  自类囊体向间质中运转,其结果是间质中  $H^+$  浓度  $10^{-7}mol/L$  左右减至  $10^{-8}mol/L$ ,  $Mg^{2+}$  浓度也增高,受到  $H^+$  浓度和  $Mg^{2+}$  影响最明显的是果糖双磷酸酯酶和景天庚酮糖双磷酸酯酶活性增强。所以,在光下这两种酶的活性强,而在暗中则无活性,防止无效循环。光直接的调节作用是指光通过某种机理而直接使某种特定的酶活化或钝化。现在对光使光合环中酶活化的机理有两种观点,一种是 Buchanan 提出的硫氧还蛋白(Td)为中介,另一种是 Anderson 提出的光效应中介体(LEM)。

Buchanan 发现高等植物的叶绿体中有一个铁氧还蛋白/硫氧还蛋白体系,起着对某些酶的光调节作用,这一体系包括硫氧还蛋白(Td)、铁氧还蛋白(Fd)和铁氧还蛋白—硫氧还蛋白还原酶(FTR)。还原型 Td 能把靶酶活化,还原型 Td 的形成,是由于氧化型 Fd 在光合作用光反应中被还原后,在 Fd-Td 还原酶的作用下,使 Td 还原。现在公认的 Td 能活化的酶有 Calvin 环中的果糖双磷酸酯酶、景天庚酮糖双磷酸酯酶、磷酸核酮糖激酶和 NADP—磷酸甘油醛脱氢酶。此外, Rubisco 也已知受到光的活化。

Anderson 发现在类囊体膜上有一种蛋白,它能对酶起调节作用,Anderson 称之为光效应中介体(LEM)。此外,她还从叶绿体中分离出一种可溶蛋白,称之为谱调酶(modulase)。LEM 首先被还原的 Fd 还原,还原的 LEM 再使谱调酶还原,最后再还原靶酶。Buchanan 和 Anderson 的两种模型相同之处是:(1)最初的还原剂是 Fd;(2)都使靶酶的二硫键还原成巯基。他们的模型不同之处是: Buchanan 认为中介的还原剂是可溶蛋白,且在光下增加靶酶的巯基数而被活化;而 Anderson 认为中介的还原剂是膜蛋白,在光下只是改变了靶酶中的巯基位置而被活化,靶酶的巯基数没有增加。

参考文献

- 1 Kelly G J. et al. Ann Rev Plant Physiol. 1976, 27: 181~205
- 2 Buchanan B B. Ann. Rev. Plant Physiol. 1980, 31: 341~374
- 3 Woodrow I E. et al. Ann Rev Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1988, 39: 533~594
- 4 Salvucci M E. Physiol Peant. 1989, 77: 164~171
- 5 Keegstra K. Cell, 1989, 56: 2447~253

(北京大学吴光耀教授撰)

**C<sub>4</sub> 和 C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 植物** C<sub>4</sub> plants and C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> intermediates 高等植物在光合类型上可分为 C<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>、CAM 三大类。C<sub>4</sub> 植物如甘蔗、玉米、高粱等,其光合型是 1966~1970 年由海奇—斯莱克(Hatch-Slack)系统阐明的,它不同于 50 年代卡尔文(Calvin)提出的 C<sub>3</sub> 光合型。其特点是在光合 CO<sub>2</sub> 固定与同化上具有 C<sub>4</sub> 途径,并且存在于叶肉细胞内的 C<sub>4</sub> 途径和维管束鞘细胞内 C<sub>3</sub> 途径是相互协调的,其机理的阐明是现代光合研究史上的一个重要里程碑。由于 C<sub>4</sub> 植物光合器官的结构与功能具有 CO<sub>2</sub> 浓缩系统,因此在高光、高温、高氧分压、干旱条件下比之 C<sub>3</sub> 植物有较高的光合速率,遗传育种工作者试图用 C<sub>4</sub> 途径改造 C<sub>3</sub> 植物,以提高主要农作物如稻、麦、大豆等的光合生产力。

1954 年,美国考兹夏克(Kartschak)等报道了甘蔗的光合最初产物是 C<sub>4</sub> 双羧酸。1960 年,卡皮罗夫(Karpilov)在玉米中也观察到同样结果,但均未引起重视。直到 1966~1970 年,澳大利亚 Hatch-Slack 用酶学和 <sup>14</sup>C 标记系统地研究了 C<sub>4</sub> 途径,使光合碳代谢研究继 Calvin 环后又出现一个新高潮。有关研究人员从叶形态解剖、生化代谢和酶活性等方面系统地提出 C<sub>4</sub> 双羧酸途径的运转模型。至 70 年代中期,肯尼迪(Kennedy, 1974)、塞尔(Sayer, 1977)、卡乃(Kana, 1975)等从光合进化的观点,对 C<sub>4</sub> 和 C<sub>3</sub> 植物进行了比较,发现自然界有其解剖和生化特性属于 C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 中间型植物。有关研究人员为 C<sub>4</sub> 光合进化和光呼吸降低的机制提供了证据,为 C<sub>3</sub> 植物提高光合效率提供了途径。由于 *Flaveria* 属植物和 *Atriplex* 属植物是具有 C<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub>、C<sub>3</sub> 多种光

合型的植物,通过属内种间杂交研究了亲本和子代的光合 CO<sub>2</sub> 交换特性和酶活性的遗传传递,表明 C<sub>4</sub> 光合特性通过遗传操作可不同程度地在 F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub> 中得到遗传表达。

据上野修(1987)报道,C<sub>4</sub> 植物有 18 科,196 属,约 1000 种。这类植物起源于热带、亚热带,多分布在低纬度地区。由于长期的适应驯化它们的光合器官结构、生化途径、环境调节显著不同于 C<sub>3</sub> 植物的综合性状。布莱克(Black, 1973)和拉奇(Laetsch 1974)对此已有详细的比较和评述,其要点为:(1)叶片内部有 Kranz 结构,鞘细胞内有许多叶绿体、线粒体、微粒体,这是高效利用 CO<sub>2</sub>、防止外漏、降低 CO<sub>2</sub> 补偿点的基础。(2)1970 年 Hatch-Slack 提出 C<sub>4</sub> 植物光合具有 C<sub>4</sub> 代谢循环和 CO<sub>2</sub> 浓缩机制。催化这一反应的关键酶为 PEP 羧化酶,而催化脱羧的有 3 种酶,据此可将 C<sub>4</sub> 植物分为 3 种类型。由于叶肉细胞内 PEP 羧化酶与 CO<sub>2</sub> 亲和力高,有 CO<sub>2</sub> 泵的作用;在维管束鞘细胞中,核酮糖二磷酸羧化酶—加氧酶(Rubisco)作用部位的 CO<sub>2</sub> 浓度比 C<sub>3</sub> 植物高 10 倍,故能提高 Rubisco 羧化效率,降低加氧反应(光呼吸)和气孔导度,这是 C<sub>4</sub> 植物高效利用光能和水分的原因。(3)伯克曼(Björkman, 1981)、爱德华和古森本(Ewards and ku, 1985)对 C<sub>4</sub> 植物的光合特性及对外界环境的响应,作了大量评述。C<sub>4</sub> 植物 CO<sub>2</sub> 补偿点在 0~10ppm,表现光呼吸力很低。在空气 CO<sub>2</sub> 浓度下,光合可达到饱和速率。在空气氧水平下,光合、量子效率和羧化效率不受影响。C<sub>4</sub> 植物光合光饱和点和光合最适温度较高,在高光、高温及相对湿度较低条件下,C<sub>4</sub> 植物的光合效率高于 C<sub>3</sub> 植物。但在光强及温度较低条件下,C<sub>4</sub> 植物光合效率并不比 C<sub>3</sub> 植物高,因为它们各有其最适的生态环境。

据爱德华(Ewards 1987 年)报道,C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 植物有 5 科,7 属,22 种,多分布在热、干旱、盐碱土生境内,诸如沙漠、干旱地带。C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 植物的叶解剖构造和光合特性处于 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 种中间。Ewards(1983)报道,C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 植物维管束鞘细胞中基粒片层结构具有 PS II 活性,这一点与某些 C<sub>4</sub> 植物不同。虽然 Kranz 结构没有 C<sub>4</sub> 植物明显,但鞘细胞内含有大量线粒体,且位置与叶绿体靠近,这种超微构造与降低光呼吸的机制有关。

80 年代初,布朗(Brown)和哈立代(Holaday)等对 C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 植物光合特性作了大量研究。通常 CO<sub>2</sub> 补偿点为 1~5μl/L 到 39μl/L; C<sub>4</sub> 种为 0~5μl/L; C<sub>3</sub> 种为 50μl/L。CO<sub>2</sub> 补偿点对 O<sub>2</sub> 的敏感性: C<sub>4</sub> 种当 O<sub>2</sub> 的浓度增到 50% 之前,CO<sub>2</sub> 补偿点不变;而 C<sub>3</sub> 种随 O<sub>2</sub> 浓度增加而增加; C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 种则呈双相反应。另外,门森(Monson, 1984)对 C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 种的氧抑光合和氧抑羧化效率作了研究,有的种如 *F. anomala* 和 *F. linearis* 与 C<sub>3</sub> 种接近或相等,表明它缺乏 CO<sub>2</sub> 浓缩机制;有的种如 *F. ramosissima* 表现有较低的值,表明有一定的 CO<sub>2</sub> 浓缩机制。 $\delta^{13}C$  值可反映不同植物经 PEPC 固定 CO<sub>2</sub> 的能力。奥雷(Oleary, 1981)、门森(Monson, 1986)、陈(Chen, 1987)报道, C<sub>4</sub> 种  $\delta^{13}C$  值较低为 -11‰~-16‰, C<sub>3</sub> 种较高为 -25‰~-30‰, C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 种中偏 C<sub>4</sub> 型的 *F. brownii* 在 -15‰~-17‰, 其 CO<sub>2</sub> 的 65%~70%, 经 C<sub>4</sub> 途径, 25%~33% 经 C<sub>3</sub> 途径被同化, C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 种中偏 C<sub>3</sub> 型  $\delta^{13}C$  在 -22‰~-33‰。

对植物光合进化的过程有各种设想。较多的人认为从 C<sub>3</sub>→C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub>→C<sub>4</sub> 种。史密斯(Smith, 1974)、克伦沙(Krenzer, 1975)、爱德华(Ewards, 1987)认为;在地球演化过程中,大气环境中氧气不断增加,CO<sub>2</sub> 减少,特别在干旱地区气孔阻抗增加,CO<sub>2</sub> 供应受到限制,C<sub>3</sub> 植物首先应能有效地固定光呼吸释放的 CO<sub>2</sub>, 产生降低 CO<sub>2</sub> 逸失的机制。其中 PEPC 活力的增强使 C<sub>3</sub>→C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 进化跨进一大步。尔后,随着 Kranz 结构和 C<sub>4</sub> 途径的完善,逐步从 C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 向 C<sub>4</sub> 种进化。

阿登(Adam, 1986)从 PEPC 同工酶谱和多肽图谱证明 C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub> 种与 C<sub>3</sub> 种相似,说明是 C<sub>3</sub>→C<sub>4</sub> 不是 C<sub>4</sub>→C<sub>3</sub>—C<sub>4</sub>。C<sub>4</sub> 光合的遗传表达一直是人们注目的问题。长期以来人们曾试图将 C<sub>4</sub> 光合导入 C<sub>3</sub> 植物,以提高 C<sub>3</sub> 植物的光合效率。Björkman(1971)曾用 *Atriplex* 的 C<sub>4</sub> 和 C<sub>3</sub> 种杂交,并未见光合能力提高。至 80 年代,

海格(Hague)、葛(Gee)等用 *Atriplex* 的 *rosea* (C<sub>4</sub>) 和 *Triangularis* (C<sub>3</sub>) 杂交,看到用 *A. rosea* 作父本, F<sub>1</sub> δ<sup>13</sup>C 值类似 C<sub>4</sub> 型。焦德茂(1991)用 *F. brownii* (偏 C<sub>4</sub>) 和 *F. floridana* (偏 C<sub>3</sub>) 杂交,看到用 C<sub>4</sub> 作父本, F<sub>1</sub> 光合特性类似 C<sub>4</sub> 型。F<sub>1</sub> CO<sub>2</sub> 补偿点与 C<sub>4</sub> 亲本相似,与正反交无关。有关结果在更多的杂交组合中得到证实。另外, Rikishi(1988)在 *Atriplex* 属中用 *A. rosea* (C<sub>4</sub>) × *A. patula* (C<sub>3</sub>) × *A. rosea* (C<sub>4</sub>), 通过叶解剖构造、光合特性和光合酶 PEPC、PPDK 的鉴定,得到偏 C<sub>4</sub> 的材料。

近来关于 C<sub>4</sub>、C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub>、C<sub>3</sub> 植物中 C<sub>4</sub> 途径的研究,主要集中在光合酶的生化 and 基因的比较上。日本松岗(1987, 1989, 1990)的系列研究报道了 C<sub>3</sub> 植物水稻和 C<sub>4</sub> 玉米在 PEPC 和 PPDK 基因结构和光调表达上有一定的相似性。今后有关 C<sub>4</sub> 光合的调节、进化、遗传将会用分子生物学的知识和技术进行全面的。由于 C<sub>4</sub> 光合特性是核质多基因控制的综合性状,因此今后将会从分子和遗传水平上全面了解 C<sub>4</sub> 光合基因的结构、表达和修饰改造,并逐步地利用重组基因转移的技术提高光合效率和生产力。

**参考文献**

- 1 Hatch M D, Slack C R. *Ann Rev plant physiol*, 1970, 21, 141~162
- 2 Black C C. *Ann Rev plant physiol*, 1973, 24, 253~286
- 3 Laetsch W M. *Ann Rev. plant physiol*, 1974, 25, 27~52
- 4 Edwards C E, Ku M S B. *The Biochemistry of plants*, 1987, 10, 275~325
- 5 焦德茂,等. *植物生理学报*, 1991, 17(3): 225~231

(江苏省农业科学院焦德茂撰, 崔继林审)

**植物生长调节物质**

目前公认的内源植物激素有 5 类: 即生长素类(auxin)、赤霉素类(GA)、细胞分裂素类(CTK)、脱落酸(ABA)和乙烯等。它们对植物的生命周期起调控作用。人们在模拟植物激素的研究中,合成了许多对植物的生长、发育具有调控作用的活性物质。因此,把对植物具有调控的活性物质统称为植物生长调节物质。

植物生长调节物质的研究,对于阐明植物生命周期的调控机理,从而开发出栽培的新技术,为人类提供丰富的食物和充足的饲料。因此,对植物生长调节物质的研究,不仅有理论意义,而且具有重要的应用价值。

1. 生长素: 1934 年荷兰柯格尔(F. Kögel)首先从人尿和玉米苗顶芽中分离出具有促进植物生长的活性物质,经鉴定为吲哚-3-乙酸(IAA)。以后又从高等植物中分离出其前体(如吲哚-3-乙醛、吲哚-3-乙腈、吲哚-3-乙酰胺及葡萄糖芸苔素)及其代谢物(3-吲哚甲醛及 3-吲哚甲酸)。

1968 年丸茂等从未熟豌豆种子中分离出 4-氯-3-吲哚乙酸(甲酯)及其前体 4-氯色氨酸,前者对子叶鞘伸长的活性比 IAA 强 10~13 倍;而 5,6-二氯吲哚-3-乙酸(5,6-Cl<sub>2</sub>-IAA)是活性最强的生长素;各氯代-IAA 对芽鞘的生长活性强的顺序如下: 5,6-Cl<sub>2</sub>-IAA > 4-Cl-IAA > IAA > 2,5-Cl<sub>2</sub>-IAA > 2,6-Cl<sub>2</sub>-IAA > 2,4-Cl<sub>2</sub>-IAA > 2,7-Cl<sub>2</sub>-IAA。

IAA 的结构与活性的研究结果发现 α-萘乙酸(NAA)、4-卤代苯氧乙酸及 2,4-二氯苯氧乙酸(2,4-D)等模拟物有较强的生理活性。此外,还发现 2,4-二氯茴香醚、4-氯苯氧异丁酸(PCIB)及 2,3,5-三氯苯甲酸(TIBA)及马来酰胺(MH)等具有强的抗生长素活性,而 5,7-二氯吲哚-3-异丁酸则是最强的抗生长素;从竹柏中也分离出六种竹柏内酯(nagillactons)也具有抗生长素活性。

IAA 的生物合成: 色氨酸 → 吲哚-3-丙酮酸(或色胺,葡萄糖芸苔素) → 吲哚-3-乙腈(或乙腈) → IAA。

IAA 的代谢途径: 在氧化酶或过氧化酶作用下,可与天冬氨酸或葡萄糖结合,在植物组织中通过氧化代谢,最终生成 2-羟基-3-甲基吲哚;另一报道,IAA 在水稻中的代谢,其最终产物有玉米胺、2,6-二羟基咪唑-4-羧酸、3,3-二吲哚甲烷及吲哚三聚物。

生长素可诱导或促进根、茎细胞的伸长和分裂、木质部与初

皮部的分化,促进不定根的形成和单性结实等生理作用。

2. 赤霉素(GA): 1938 年日本东京大学藪田贞治郎和佳木谕介从水稻恶苗病菌的代谢物中分离出促进植物生长的活性物质,并命名为赤霉素。1954 年美国北方研究室(NRRL)与英国帝国化学工业公司(ICI)的研究者竞相投入赤霉素的研究。从 1957~1968 年 ICI 研究组从赤霉菌的培养液中分离出 9 种新的赤霉素(GA<sub>7,9-16</sub>)。至 1979 年已从真菌代谢物中分离出 25 种赤霉素。

1958 年马克米兰和苏特(J. MacMillan, P. J. Suter)从豆科未熟种子中分离出赤霉素 GA<sub>1,5,6,8</sub>;以后许多植物生理学家先后报道高等植物中存在着类赤霉素。1968 年后采用 GC/MS 鉴定法,从高等植物中已鉴定出 56 种赤霉素(GA<sub>3-9, 13, 15-35, 37-39, 43-46, 48-55, 58-68</sub>),在低等植物(如藻类)也发现类赤霉素(GA<sub>35</sub>),至 1990 年已分离出游离型赤霉素 84 种,结合型(赤霉素苷或糖酯)14 种。

1978 年美国柯莱等(E. J. Corgy, et al.)成功地完成立体专一性的全合成赤霉素(GA<sub>3</sub>),这是合成复杂天然产物最光辉的成就。

赤霉素的生物合成已用标记的 2-<sup>14</sup>C-乙酸及 2-<sup>14</sup>C-甲羟戊酸喂赤霉菌的培养基,然后测定 GA<sub>3</sub> 中 <sup>14</sup>C 的位置,并提出如下生物合成途径: 乙酸 → 甲羟 → 戊酸 → 内根-贝壳杉烯 → GA<sub>12</sub>-7-醛 → C<sub>19</sub>-GA<sub>3</sub>。在高等植物中 GA<sub>3</sub> 的生物合成与霉菌的相似。

赤霉素的代谢: GA<sub>3</sub> 在叶率牛未熟种子中,分出唯一的代谢产物赤霉噻酮(Gibberethione); GA<sub>4,20</sub> 在菜豆种子中的代谢途径: GA<sub>4</sub> → GA<sub>4</sub>-GE<sub>3</sub>; 而 GA<sub>1</sub> → GA<sub>3</sub> 或 GA<sub>3</sub>-GE<sub>3</sub> 或 GA<sub>1</sub>-GE<sub>3</sub>。

赤霉素的生物活性: 以 GA<sub>7,3,1,32</sub> 最高,而以 GA<sub>17,28,43,51</sub> 的活性最低。

赤霉素的主要生理作用,最突出的生理作用是促进顶芽伸长;诱导长日照植物开花;打破休眠,促进发芽;诱导形成无籽果实(如生产无籽葡萄);影响性别: GA<sub>3</sub> 能增加瓜类的雄花数;活化水解酶,增加 α-淀粉酶的活性。

抗赤霉素,例如吡啶醇(Amyridol)、抗倒胺(inabergide)、多效唑(Paclobutrazol)、特效唑(Uniconazole)等速效生长抑制剂,主要是抑制赤霉素的生物合成,其作用靶位是阻碍内根-贝壳杉烯氧化成内根-贝壳杉酸。多效唑在我国已广泛用于培育壮秧,控制果树夏梢生长,防止小麦、油菜、大豆等作物的倒伏,并获得增产效果。

3. 细胞分裂素(CTK): 1955 年米勒等(C. O. Miller, et al.)从富含 DNA 的鲑鱼精液的水解物中分离出高活性物质,它在低浓度(1μg/L)能促进烟草髓的细胞分裂,并将此活性物称为激动素(Kinetin)。1963 年新西兰的莱萨姆(D. S. Lethem)首先从玉米仁中分离出玉米素(Zeatin)及其 9-核糖苷。玉米素对植物细胞分裂有很高的活性,并将这活性物质统称为细胞分裂素(Cytokinins)。以后采用高效液相色谱法(HPLC)纯化新细胞分裂素,并用质谱(MS)鉴定其结构,例如玉米素的类似物 N<sup>6</sup>-异戊烯基腺嘌呤、二氢玉米素及其 N-核糖苷和 O-葡萄糖苷等。

6-苯氨基嘌呤(BAP 或 6-BA)是合成的高活性细胞分裂素。以后从杨树叶及马蹄莲果实分离出有细胞分裂素活性的邻羟苄基-9-核糖腺嘌呤(O-OH-9R-BAP)。

生物合成与代谢,从许多的实验结果表明,游离型的细胞分裂素其前体是 t-RNA 或 AMP,在酶促下发生异戊烯基化,形成细胞分裂素核糖苷,再生成 N<sup>6</sup>-异戊烯基腺嘌呤(ip)。至于邻羟苄基-9-核糖-BAP 的生物合成尚不清楚。玉米素类的代谢是多样性的,可以通过如下一个或多个的基本反应: (1) ip 类侧链反位端甲基的羟化; (2) 玉米素侧链的还原; (3) 异戊烯基侧链的断裂; (4) O-上或 N-上的葡萄糖基化; (5) 环上被丙氨酸取代; (6) 碱基-核糖核苷-核苷间的互变。

N<sup>6</sup>-取代腺嘌呤的生物活性: 3-甲基-2-丁烯基 ≥ 苄基 ≥ 正戊基 > 2-咪唑甲基 ≥ 异戊基 ≥ 正丁基 ≥ 正丙基 > 乙基 > 甲基。

细胞分裂素的结构改造研究发现, N-(2-氯吡啶基)-N'-苄基

脲(KT-30)具有强细胞分裂素活性(是BAP的10倍以上,接近玉米素),日本已商品化(フルソツト液剂)。5(6)-氯-2-甲基苯咪唑(商品名 Rozalin)也具有细胞分裂素活性,可使棉花、番茄的产量增加。

此外,还发现4-异戊烯氨基-2-甲基吡咯[2,3-d]-嘧啶和4-丁氨基-2-甲硫基嘧啶[2,3-d]吡啶,2-烷氨基-4-氯-6-乙氨基-3-氮嘧啶及N-氨基甲酸苯酯等是有效的抗细胞分裂素。

4. 脱落酸(ABA);1964年阿迪考特(F. T. Addleott)研究组对未熟棉铃大量脱落的物质原因进行研究。终于从225Kg未熟棉铃中分离出9mg活性物,对棉铃脱落有很高的活性,并命名为脱落酸(以前称休眠素或离层酸 $I$ )。以后从白桦树的幼芽,无花果叶中均可分离出脱落酸;另从感染青霉病的橙中也分离到脱落酸。

脱落酸具有促进离层形成,诱导休眠,促使叶片气孔关闭,抑制蒸腾。它是生长素、赤霉素、细胞分裂素的拮抗物,它们在植物生长、发育过程中起着相互制约的作用。

生物合成与代谢:1970年泰勒(H. F. Taylor)等从菜豆幼苗中分离出黄原素(Xanthoxin),其2Z,4E-黄原素有很高的抑制活性。黄原素是紫黄质(Violaxanthin)的光氧化产物之一。因此,脱落酸的生物合成途径为紫黄质 $\rightarrow$ 2Z,4E-黄原素 $\rightarrow$ 5-(+)-ABA。另一途径是:(+)-3R-甲羟戊酸 $\rightarrow$ …… $\rightarrow$ 焦磷酸法呢醇 $\rightarrow$ …… $\rightarrow$ (+)-ABA。

ABA的代谢途径:ABA $\rightarrow$ 6-羟甲基ABA或菜豆酸(PA) $\rightarrow$ …… $\rightarrow$ DPA及表-DPA。

ABA的生物合成、作用机理及生理作用仍有许多未被认识,值得深入研究。

ABA的立体专一性合成已取得进展。但至今尚未找到简易的合成方法。1990年吉川情道等报道, $\alpha$ -(2-氯或3-氯苯甲醛脞氧基)脂肪酸具有ABA活性,能抑制发芽和生长,使叶片气孔关闭,抑制 $\alpha$ -淀粉酶的活性。

5. 乙烯与乙烯释放剂;果实成熟、植物黄化或组织受伤时,乙烯的生成量就会增加。它能使植物茎叶上偏上性生长;促进果实成熟,器官(叶、花、果实等)脱落,抑制细胞伸长,诱导花芽形成和开花,促进呼吸及蛋白质合成,提高细胞透性和过氧化氢酶及多酚氧化酶的活性,并参与调控生长素、赤霉素的生理作用。

生物合成:1979年杨祥华提出蛋氨酸在植物体内转变成乙烯的生物合成途径:蛋氨酸 $\rightarrow$ S-腺嘌呤蛋氨酸 $\rightarrow$ ACC $\rightarrow$ 乙烯。

利用高纯度标记的 $^{14}C$ -乙烯来确定其代谢产物。研究结果表明,在氧存在下,乙烯在植物体内氧化成二氧化碳,同时代谢成乙二醇及其结合物。

乙烯的作用机理曾提出与金属受体(含铜酶)相结合,其详细过程尚待研究。

乙烯是气体,给使用和研究带来不便。因此,研究出许多乙烯释放剂。如乙烯利、矮壮素、比久( $B_9$ )等已在农业生产上应用。

上述5类植物激素的生理作用已进行了深入的研究;它们在生长、发育过程的动态变化也有综述文章,而其作用机理尚待深入研究。

1970年美国农业部的米切尔(J. W. Mitchell)研究组开始研究花粉中的活性物质,经过近10年的大量工作,终于在1979年从40Kg油菜花粉中分离出4mg高活性的油菜素内酯(Brassinolide, BR)。以后日本东京大学农学院横田孝雄等从栗树虫瘿中分离出栗甾酮,从白菜、油菜、茶叶、扁豆、水稻及蚊母树中分别检测出油菜素内酯、栗甾酮、油菜甾酮、扁豆甾酮、28-去甲基油菜素内酯。以后又从香蒲中分出香蒲甾酮。这些类似油菜素内酯的活性物质通称为油菜素甾醇(Brassinosteroids)。通过与已知植物激素的生理效应的比较研究,结果表明,油菜素内酯具有促进植物细胞的伸长和分裂的双重效应,有别于生长素和细胞分裂素。它在高等植物中普遍存在。已分离出23种油菜素甾醇及其糖苷。至1988年已用超微量分析法(GC/MS法)共检测出61种油菜素甾醇。因此,许多植物生理学家认为它是第6类植

物激素。

油菜素甾醇的合成、结构与活性的关系,已开展广泛的研究。由于它具有独特的生理效应,且用量极微( $10^{-8}$ 级)则能显示出强生理活性,在农业上应用已显示出增产效果。关于生物合成和作用机理尚待深入研究。

1988年吉原照彦和幸田泰则从100kg马铃薯鲜叶中分离出2.7mg块茎形成物质——块茎酮酸(Tuberonic acid),其有效浓度 $0.01\sim 0.1\mu\text{g/g}$ 。以后从甘薯、甜菜、菊芋、大豆、玉米等作物中检测出块茎酮酸是一种葡萄糖苷,结构与植物界普遍存在的生长抑制剂——茉莉酮酸相似。茉莉酮酸及其甲酯在 $10^{-5}\text{mol/L}$ 时的活性为块茎酮酸的67%~58%。块茎酮酸的主要生理作用是抑制赤霉素的生成,促进块茎(根)细胞放射方向的肥大,并与细胞分裂素一起促进块茎的膨大,然后由ABA诱导休眠,使块茎停止生长。块茎酮酸的生理效应、生物合成与代谢,以及对其他植物激素的关系,尚待研究。

1960年美国耶鲁大学高尔斯敦(A. W. Galston)实验小组对多胺(如腐胺、胍精胺、精胺与亚精胺)进行了系统的研究,它具有刺激植物生长和防止衰老,促进花芽分化和不定根的形成,可使菊芋块茎细胞分裂和生长,刺激形成层带分化和维管组织形成,延迟或阻止黑暗中燕麦、豌豆等叶片叶绿素的丧失,并能提高蛋白酶或RNase的活性。

多胺在高等植物分布广泛,主要分布在分生组织中,但不能在植物体内运输。而其前体(精氨酸、赖氨酸、蛋氨酸)则可从贮存部位运输到生长活跃部位,在精氨酸脱羧酶(ADC)和鸟氨酸脱羧酶(ODC)作用下转化为多胺,其生物合成及代谢途径已有较深入的研究。人们认为,多胺是植物生长发育的调节物质,作为植物激素作用的媒介,类似AMP起“第二信使”的作用。

1977年约可耶马(H. Yokoyama)报道增产胺(DCPTA)能使银胶菊的根茎中橡胶积累增加2~6倍;显著地提高大豆中蛋白质、脂肪的含量和产量;提高柠檬中香精油含量,降低柠檬苦素含量;使长春花组织培养中生物碱含量提高(约22%)。结构与DCPTA类似的二乙胺基乙醇的己酸酯能提高胡萝卜的产量和质量( $\beta$ -胡萝卜素增加53.5%),并能显著地提高萝卜、番茄的产量。这类新型植物生长促进剂已用于中草药的组织培养,以大幅度提高其有效成份。

1976年美国威斯康辛大学里斯(S. Ries)从苜蓿中分出一种植物生长活性物质称为正三十烷醇。它在低浓度( $0.01\sim 2.0\mu\text{g/g}$ )时,能促进种子发芽、生根,细胞分裂和伸长,提高叶绿素含量,增强光合作用,促进开花,增加开花数,促进对养分的吸收,增加干物重,并能提高一些酶的活力,提高作物的抗逆性,对某些作物有增产效果。1989年里斯发现水稻苗用三十烷醇(TRIA)处理后会诱发出一种高活性物质(TRIM),经结构测定为 $\beta$ -L(+)-腺苷,其有效浓度为 $10^{-12}\text{mol/L}$ (约3ng/g),具有促进植物吸水 and 生长,增加干物重,这是首次从植物体中发现的植物生长调节物质。

植物化学杀雄剂(或称化学杂交剂)近20年来也是研究的热点。已发现十几种新型杀雄剂。例如RH-531, CHA-811, Fenridazon等对小麦、水稻、玉米有很高的杀雄效果。RH-531与乙烯利或蛋氨酸混用(处理水稻),可降低用量,提高选择性和杀雄效果,可望获得实际应用。

1990年岩村俊报道两个开花素——2-2-氨基-4-氯-6-环己氨基-S-三氮嘧(也是一种杀雄剂)和3,4-二氯苯氨基甲酸丙酯,它能诱导花芽形成,促进短日照植物开花。

目前对三唑类、茉莉酮酸(酯)、块茎酮酸、DCPTA及其类似物, BX-112, 季铵季盐类以及低聚半乳糖醛酸等新型植物生长物质,进行了广泛的研究,有些已在农业生产上推广应用,取得良好效果。植物的化学调控是农业生产的一项新技术,可以获得高产优质的农产品,应当引起足够的重视。

参考文献

1 N. Takahashi, Chemistry of Plant Hormones, CRC Press,

- Inc., 1986
- 2 片山正人, Studies on chlorinated indole auxins and auxin, 植物的化学调节, 1991, 26(1): 11
  - 3 F Skoog, R Y Schmitz, Biochemistry and physiology of cytokinins, in Biochemical Action of Hormones, 6, Litwack, G. Ed., Academic Press, New York, 1979, 335
  - 4 Yang S F, N E Hoffman, Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants, Ann. Rev. Plant Physiol., 1984, 35: 155
  - 5 横田孝雄, Study on bio organic chemistry of natural brassinosteroids, 植物的化学调节, 1987, 22(1): 10
  - 6 吉原照彦, 幸田泰刚, Potato tuber-inducing substance, 植物的化学调节, 1989, 42(2), 147; 化学と生物, 1989, 27: 53
  - 7 潘瑞炽, 多胺是植物生长发育的调节物, 植物生理学通讯, 1985, (6): 63
  - 8 K Luerssen, Triazole plant growth regulators: effects and mode of action, Sterol Biosynth. Inhib., 1988, 305
- (厦门大学化学系郭奇珍撰)

**渗透调节** 渗透调节是植物在逆境条件下主动积累渗透物质,降低细胞渗透势,以维持细胞膨压稳定,它是作物抵抗逆境胁迫的一种主要方式。在水分胁迫下,植物细胞的水势降低,为维持压力势基本不变以保证体内生理生化过程的正常进行,细胞即以降低渗透势来进行调节。降低渗透势有三种途径:一是细胞内水分减少;二是细胞体积减少;三是细胞内容质增多。渗透调节仅指通过代谢活动使细胞内溶质主动增加的过程。渗透调节是植物抗逆性的一个重要的生理机制。

渗透调节现象首先在低等植物真菌、蕨类、苔藓、地衣等中发现。这些低等植物与外界的水分交换主要依靠细胞或组织本身与外界的渗透平衡来实现。在高渗环境(干旱或盐渍)下,它们可主动积累渗透性物质以降低渗透势,维持膨压和生长。1931年, Walter 观察到水分短缺下高等植物的渗透势降低。但是早期的研究者未能认识到渗透调节在高等植物中的有益作用。70年代,大量研究资料证明,在某些植物的叶片,下胚轴、根和生殖器官中均可发生渗透调节,以完全或部分地维持膨压。Jones, Morgan 和 Turner(1977, 1978)用高粱证明了渗透调节可部分地维持膨压。在缓慢缺水条件下,渗透调节可使组织维持膨压,以保持持续的扩张生长。渗透调节能力较强的植物其气孔关闭的水势值更低,这样可使植物在一定干旱胁迫下维持较高的气孔导度,有利于光合作用进行和碳水化合物积累。Morgan 系统地研究了不同基因型小麦的抗旱性与渗透调节的关系,提出了渗透调节受单基因控制的观点,并于1991年证明了渗透调节基因位于小麦7A染色体上。渗透调节的物质基础因植物种类而异,低等植物和盐生植物中主要是无机离子( $K^+$ ,  $Cl^-$ 等)、多元醇(包括甘油醇、甘油、环乙醇等)、氨基酸;高等的淡水植物主要是有机酸的钾盐,可溶性糖,氨基酸;在维管植物中主要有脯氨酸和甜菜碱。

1954年, Kemble 和 Macpherson 在多年生燕麦草中首次发现萎蔫导致蛋白质降解,其它自由氨基酸的量小于其降解蛋白质中的存在量,只有脯氨酸大量积累,超过其结合在蛋白质中的实际量;后来发现水分胁迫引起脯氨酸积累(Steward等, 1966)。在正常情况下,细胞内脯氨酸含量一般为0.2~0.69mg/g干重,缓慢失水时可增加到40~50mg/g干重。(Palti 1973),脯氨酸在细胞内的绝对量只有几千个 $\mu\text{mol/g}$ 鲜重。Leigh(1981)观察到细胞质中的脯氨酸可比液泡中高1.5~98倍,故称其为细胞质渗透物质。Le Rudulier(1982)深入研究了高等植物脯氨酸代谢途径认为脯氨酸来源于谷氨酸或鸟氨酸,分别由不同的酶催化。在逆境下脯氨酸积累,原因有:一是合成加强,二氧化碳受抑,中间产物亦可向脯氨酸转化,三是蛋白质合成能力降低,脯氨酸渗入到蛋白质中的机会减少。脱落酸也可引起脯氨酸的大量积累。Steward 研究了缺水情况下植物细胞积累脯氨酸的生理生化机

制,并提出脯氨酸可作为渗透调节的观点物质。在低等植物如藻类、苔藓、原核生物沙门氏菌中脯氨酸积累主要起渗透调节的观点已被广泛接受;但在高等植物中还无定论,大多数学者的观点认为脯氨酸在高等植物中积累是一种逆境的伤害反应,与抗旱性无关(王邦锡, 1989),但不可否认其主动积累对渗透调节是有贡献的。

Storey等(1976)首先发现盐分和水分胁迫可引起大麦积累甜菜碱;此后其他学者 Hanson(1978)、Hity(1980)均对甜菜碱的积累机制进行了大量研究。Lawton(1978)证明,甜菜碱合成前体为光呼吸途径产生的甘氨酸和丝氨酸;另外,甜菜碱也可由胆碱氧化而来;甜菜碱也是致中细胞质渗透物质。

作为渗透调节物质的可溶性糖有蔗糖、葡萄糖、果糖、半乳糖,无机离子主要有 $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^-$ ,  $NO_3^-$ ;氨基酸以脯氨酸为主,另外有天门冬氨酸。植物正在展开的叶片、正在伸长的下胚轴和花序,它们的渗透调节完全依赖于光合产物的输入。正在扩张生长的叶片中主要积累葡萄糖,已展开的叶中以蔗糖为主。另外,高爱丽等(1990)观察到在小麦中干旱初期主要积累可溶性糖,后期则主要为游离氨基酸,二者相互补偿,构成渗透调节的物质基础。

水分胁迫诱发渗透调节的机制是由于失水引起的膨压和细胞容积的变化,直接导致膜运输和膜的电学性质的改变。Zimmercar(1978)等提出了机电模型,大意是细胞受到水分胁迫时膨压迅速改变,引起原有的电场分布、电致泵和被动的离子运输系统发生变化。压电是另一种机电现象,可能参与膨压感觉,既一定方向的压力或张力可诱导在特定结晶表面产生正的或负的电荷,这种现象已证明能够在生物材料上发生,故可能在膨压调节中起作用。但关于渗透调节的细微机制还不清楚。

不同植物品种间渗透调节能力差异很大,这与植物系统发育有关。中生的阴生植物渗透势大致为-0.5MPa,旱生植物渗透势为-3.0~-4.0MPa,一些盐生植物更低。一些栽培作物保持膨压时水势变化范围如下:高粱水势从-1.0~-1.6MPa;玉米-0.9~-1.8MPa;小麦从0.6~-1.3MPa;甜菜-0.6~-0.8MPa;苹果-1.8~-2.6MPa。已经发现高粱、小麦、棉花等作物基因型之间渗透调节能力不同。另外还有许多内外因素影响着渗透调节能力的大小。现已肯定延伸生长的器官如根、叶、下胚轴、芽和花穗等在水势下降过程中常发生渗透调节。植物经预先水分胁迫经历或缓慢的水分亏缺可表现出渗透调节能力,而且水分胁迫速度越慢或干旱循环次数越多,渗透调节能力就越强。光照强度和 $CO_2$ 浓度等因素也可影响渗透调节,这说明它主要是通过影响光合作用影响渗透物质。除水分状况外,季节、日照变化以及温度、湿度均影响渗透调节。

1991年, Morgan 在深入研究小麦品种间渗透调节遗传差异的基础上,把渗透调节基因定位于7A染色体上。小麦基因型之间渗透调节的差异,由位于单一位点的等位基因所控制。因此,可通过杂交育种方法选择具有高渗透调节能力的品种,为抗旱育种开辟了新的道路。Kuch等(1981)利用大麦胚的诱变体,经4-羟脯氨酸筛选,得到富含脯氨酸的新个体,它在脱水情况下体内也能积累大量脯氨酸,并且有较旺盛的生长势,更重要的是这种抗性具有稳定的遗传性。基因工程的手段应用到沙门氏菌(Salmonella SPP)脯氨酸基因研究,并把此基因经克隆转移到无脯氨酸基因的菌株中得到表达,这种新菌株含较高的脯氨酸,可在0.8mol的NaCl中生长。中科院上海植生所正在进行渗透调节基因向苜蓿中转移的工作。在水分胁迫下植物表达出一种小分子蛋白质(Osmotin),具有渗透物质特性,利用分子生物学手段,分析其编码基因,并进行克隆和转移。但是对Osmotins的功能还不够清楚。最近汤章城等发现,经渗透胁迫的高粱根中大量积累 $K^+$ ,同时质膜上新增加一个66KD的蛋白质,他们认为此蛋白质与 $K^+$ 的大量吸收有关。渗透调节基础研究方面,人们把注意力集中在渗透调节与生长、光合作用、气孔特性等过程的关系上;渗透调节与蛋白质结构和酶活性的关系研究。期望从这些基

基础研究入手,深入研究渗透调节的机制和作用。另外,人们也正在扩大寻找具有高渗透调节能力种质资源或基因源,进行渗透调节的遗传分析和基因改良。

渗透调节作为植物抗旱性的机制之一,在现在以至今后一段时间内将成为最活跃的研究领域,其中利用分子生物学手段寻找渗透调节基因,并克隆和表达,试图转移到农作物中以提高抗旱性,将成为最有吸引力的研究方向。同时,利用常规的杂交育种手段进行以渗透调节为指标的抗性育种,也将逐渐开展起来;在基础研究方面,继续研究渗透调节的机理及其与其它生理过程如生长、光合、气孔运动、酶活性等的关系。另外,寻找具有高渗透调节能力的植物种质资源或基因,也将成为一项十分重要的工作。

参考文献

- Blum A. Osmotic adjustment and growth of barley geotypes under drought stress. *Crop Sci.* 1989,29:230~3
- Cutler J M, et al. Dynamics of osmotic adjustment in rice. *Crop Sci.* 1980,20:310~318
- Henson I E, et al. Osmotic adjustment to water stress in pearl millet. *Plant Cell Environ.* 1983,5:147~154
- Jin J, et al. Biophysical parameters and early slower expansion of stressed maize leaves. Shifts in yield threshold counter to osmotic adjustment. *Plant Physiol.* 1984,76:174~182.
- Morgan J M. A gene controlling differences in osmoregulation in wheat. *Aust. J Plant Physiol.* 1991,18:149~157
- Santamaria J M, et al. Contribution of osmotic adjustment to grain yield in *Sorghum bicolor* (L) moench under waterlimited conditions. I. Water stress before anthesis. *Aust. J Agri Res.* 1990,41:51~65.
- 王玉国,等. 水分胁迫下高粱叶片的渗透调节与延伸生长的关系. *植物生理学报*,1991,17:37~43
- 荆家海,等. 玉米叶片生长部位的渗透调节和生物物理参数变化. *植物生理学报*,1988,14:385~390
- 贺志理,汤章城. PEG 胁迫下高粱根中 66KD 多肽的增多与 K<sup>+</sup> 累积增加的关系. *科学通报*,1993,38:2181~2184  
(西北农业大学杨根平博士、高俊凤教授撰;荆家海教授审)

植物的水分利用效率 water use efficiency (简称 WUE)

植物产量和水分消耗之间的定量关系。研究的主要目标是谋求如何最有效地利用水分,即以最低限度的用水获取最大的产量或收益。植物产量主要来自光合作用。水分消耗主要是通过蒸腾作用(大田应包括蒸发)。陆生植物由于经常处在水分不足的环境中,在蒸腾作用和光合作用之间常出现尖锐的矛盾。协调和解决这一矛盾,是提高和保证旱地作物产量的必由之路。测定植物的水分利用效率(WUE),可表达二者之间的定量关系。其测定和表达的指标,最早用需水量、蒸腾系数、蒸腾效率,后改用蒸腾比,最近多用 WUE。这些名词含义本质相同,但又有差别,可互相换算。

自 1890 年美国 King 首先研究田间作物需水量开始,这方面的工作普遍展开。19 世纪末和 20 世纪的前 50 年,人们对土壤含水量、气候条件、植物营养状况、害虫等进行了比较系统和深入的研究,发现作物产量和水分利用之间是完全相关的。但由于盆栽试验和大田试验结果之间较大的矛盾一时无法调和,该研究曾一度受到波折和阻碍。1958 年,de Wit 对前人研究资料进行分析,将盆栽试验和大田试验结果完美地统一起来,把植物水分利用的研究极大地向前推进了一步,堪称现代研究之里程碑。他认为,在半干旱地区,产量和水分利用之间的关系为  $Y = mT/E$  (式中, Y 为干物质产量; T 为蒸腾量; m 为仅依赖于种或品种的作物因子,是一常数; E<sub>0</sub> 为自由水面蒸发)。在湿润地区,水分不受限制,太阳辐射是限制因子,此时,  $Y = nT$  (n 为一常数)。在此之后

提出的各种模型都是以此为基础的。

对植物的水分利用效率进行理论分析,可以得出植物在一定条件下能达到的最大 WUE。把它和实际测定的数值比较,可找出二者之间的差距和原因,据此制定改进措施。植物在吸收 CO<sub>2</sub> 进行光合作用的同时向大气散失水汽,这就是光合(P)和蒸腾(T)。Kramer(1983)根据 CO<sub>2</sub> 和水蒸汽进出叶片扩散常数的不同得出最大 WUE 为:

$$WUE = \frac{P}{T} = \frac{\Delta CO_2}{\Delta H_2O} \cdot \frac{\gamma_a + \gamma_s}{\gamma_a + \gamma_s + \gamma_m} \text{ 或 } = \frac{C_a - C_i}{W_i - W_a} \cdot \frac{g_{CO_2}}{g_{H_2O}}$$

式中, ΔCO<sub>2</sub> 和 C<sub>a</sub> - C<sub>i</sub> 为细胞质体中 CO<sub>2</sub> 浓度与大气中 CO<sub>2</sub> 浓度之差; ΔH<sub>2</sub>O 和 W<sub>i</sub> - W<sub>a</sub> 为细胞间隙中水汽浓度与大气中水汽浓度之差; γ<sub>a</sub> 为气孔扩散的界面阻力; γ<sub>s</sub> 为气孔阻力; γ<sub>m</sub> 为叶肉阻力; g<sub>CO<sub>2</sub></sub> 及 g<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 分别为 CO<sub>2</sub> 和水汽经扩散途径的传导率。g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/g<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 水汽和 CO<sub>2</sub> 在空气中的扩散常数比,即 D<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/D<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 1.56 或 D<sub>CO<sub>2</sub></sub>/D<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 0.64。

由于水分是由叶肉细胞壁表面蒸发,通过细胞间隙和气孔进入大气的;而 CO<sub>2</sub> 除了经过上述途径外,还要通过叶肉细胞壁、原生质膜、胞质水相、叶绿体膜、光反应和暗反应,才能被固定到光合产物中去。因此,Nobel(1980)进一步将与 WUE 有关的植物叶片解剖性状参数导入以上公式,用来说明和计算叶片解剖构造及其与 WUE 之间的定量关系。他用 CO<sub>2</sub> 的细胞传导 g<sub>CO<sub>2</sub></sub> 和叶肉细胞壁面积与叶片表面面积之比(A<sub>叶肉</sub>/A<sub>叶片</sub>)的乘积来表示 CO<sub>2</sub> 的叶肉传导(或其倒数叶肉阻力),由此得

$$WUE = \frac{g_{CO_2} \cdot (A_{叶肉}/A_{叶片}) \cdot (C_a - C_i)}{[g_{H_2O} + 1.56 g_{CO_2} (A_{叶肉}/A_{叶片})] (W_i \cdot S - W_a)}$$

此式表达了大气(C<sub>a</sub>, W<sub>a</sub>)、叶温(W<sub>i</sub>·s)、大气(g<sub>H<sub>2</sub>O</sub>)、细胞性状(g<sub>CO<sub>2</sub></sub>和叶片解剖特性(A<sub>叶肉</sub>/A<sub>叶片</sub>)等因素对 WUE 的影响。

从上面的公式看,似乎各种植物的 WUE 应该相同。但在相同的自然或栽培条件下,测定结果差别很大。如一般中生植物,几乎包括全部农作物,其需水量变动在 200~1 000 之间,相差达 5 倍。极端情况下有低至 20 和高达 2 000 的。显然在后一种情况下植物已很难存活。对作物需水量之间这种较大的差异,过去一直没有作出正确的解释。60 年代,对 C<sub>4</sub> 植物和 CAM 植物代谢途径的研究发现,得知除去极端条件外,这种差异主要是由植物本身决定的,包括形态、解剖及生理生化作用的不同。现已知道, C<sub>4</sub> 植物 WUE 比 C<sub>3</sub> 植物高 2.5~3 倍, CAM 植物的 WUE 最高。

同一种作物的不同品种 WUE 也有差别。Dobrenz 等(1971)在控制条件下研究了 7 个苜蓿品种的需水量,结果为 732~968,并发现品种之间需水量的差异是由于干物质累积不同造成的。还有许多研究也都表明,不同的小麦、棉花、玉米等品种之间均有 WUE 的差异。多种作物的杂交种比纯自交系具有较高的 WUE。此外,同一作物在不同的生育期 WUE 不同。

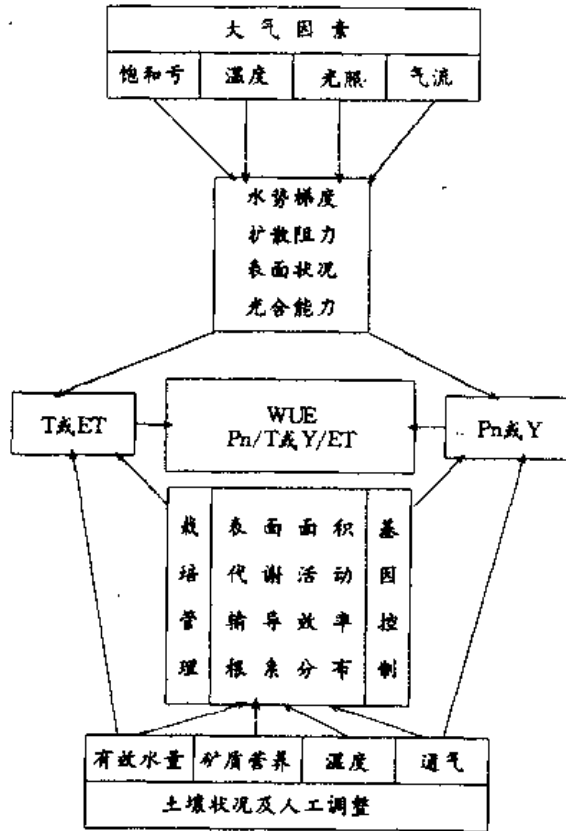
一般认为,WUE 是一个可遗传的性状。不同的植物种或品种间 WUE 的差异,为选择和利用高 WUE 植物,节约用水提供了依据。这样,即可通过引种和选种来提高栽培作物的 WUE。

植物的一切生命活动均受外界环境的影响,WUE 也不例外。植物 WUE 主要包含光合和蒸腾或蒸发蒸腾两部分,凡能影响这两个过程的因素都会影响 WUE。除常见的大气温度、湿度、光照、气流、土壤水分和矿物质营养外,种植密度、生长调节物质和蒸腾抑制剂、土壤覆盖、灌溉次数、空气中 CO<sub>2</sub> 浓度、病虫害等均影响 WUE。王韶唐(1987)将这些因素总结如下图。

近年来国际能源危机使人们越来越重视作物生产中的水分利用,除提高 WUE 外,重要的途径就是提高水分的有效利用。这在干旱半干旱地区尤为重要。大家知道,在干旱半干旱地区,降水较少,水分亏缺是影响作物产量继而影响 WUE 的重要因素之一。但即使这有限的降水也远没有得到充分有效的利用。研究表

明,这主要与土壤瘠薄有关。因此提出了“培肥地力,以肥调水”的说法,有关栽培和耕作措施也广泛应用,取得了很好的经济效益,但对其生理机制的研究尚很不足。赵立新等(1991)的研究表明,旱地施肥可普遍提高冬小麦的 WUE,高的可达 48.36% (以经济产量计),并对旱地“以肥调水”的生理机制作了一些探讨。另外一条有效途径是发展节水型农业,主要指在干旱半干旱地区,在作物生长发育的水分临界期,给以一定量的灌水,以获得较高的产量和 WUE。

随着科学技术的发展,测试手段不断更新,光合作用和蒸腾作用机理的研究不断深入,加上电子计算机的普遍应用,使得能够在土壤—植物—大气系统中深入地研究作物 WUE,更精确地估算某一地区某一作物能达到的产量及当地农业生产潜力,为当地农业区划,生产计划,作物布局及改进耕作制度提供科学依据,进而使整体经济规划建立在可靠的基础之上。



影响WUE的因素 T—蒸腾,ET—蒸发蒸腾; Pn—净光合; Y—干物质产量。

参考文献

- 1 de Wit C T. Transpiration and crop yields. Versl Landbouwk Onderz 64. 6 Inst of Biol, Chem Res. On Field Crops and Herbage, Wageningen, The Netherlands. 1958
- 2 Dobrenz A K, et. al. Crop Sci. 1971, 11 : 124~125
- 3 Nobel P S. Leaf anatomy and water use efficiency. In N C Turer, P J Kramer (eds.). Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress. Awiley-Intersci. Pub. 1980, 43~55
- 4 Kramer P J. Water Relations of Plants. Acad Press. 1983, 390~415
- 5 王韶唐. 干旱地区农业研究, 1987, 2 : 67~80
- 6 赵立新, 荆家海, 王韶唐. 植物生态学与地植物所学报, 1991, 15(4) : 330~343

(西北农业大学植物生理教研室赵立新硕士、荆家海教授撰)

植物体氮素的挥发损失 nitrogen loss from plants

by volatilization 是指植物生长过程中由其地上部分(主要是叶子)挥发损失的氮素,这是植物—土壤体系中氮素损失的一条重要途径。

19世纪,舒尔茨(E. Schulz)等就报道了在种子发芽和早期生长阶段,植物体会以某些气态形式损失氮素,但布劳夫斯(J. Blawes)等却未曾发现这种损失。以后戴维得森(J. Davidson)把消毒及未消毒的冬小麦及豇豆种子直接在开氏瓶中的蒸馏水中发芽,然后测定其氮素含量。结果植物生长14d之后,全氮量并无变化。他由此推断,种子发芽期间没有氮素的气体损失。1862年维克(W. Wicke)首先提出植物地上部分损失气体氮素。他发现有的植物在生长过程中,有的在开花阶段,会由地上部分释放三甲胺。1905年维尔萨斯(M. Wilfarth)等发现,春小麦成熟以前3周,地上部分的干物质增加,但氮素却减少20%,残茬及根系中的氮素也减少29%。类似的损失也在大麦、豌豆和芥菜中发现。他们认为这些减少的氮素,或者以气态逸失于大气之中,或者以其他形态归宿于土壤之内。

1928年可莱因(G. Klein)等检测了14种植物叶子和70种植物花中的挥发出来的含氮化合物,发现所有供试植物的花与叶子均产生氨,其中12种植物(特别是花)还能释放出胺。1968年马丁(A. E. Martin)等把无芒虎尾草种植在施用了<sup>15</sup>N标记的硝酸钾或硫酸铵的气体渗漏计土壤中,27d之后发现,硫酸铵以氨形式挥发损失了0.6%的氮素,硝酸钾挥发损失了0.1%的氮素。施硫酸铵后,土壤H<sup>+</sup>浓度虽为2×10<sup>-6</sup>mol/L,也有可能由土壤逸失一些氮素,然而,在硝态氮处理的系统中,土壤中挥发氨的可能性甚小。因此作者认为,植物可能损失氨。1975年格拉维尔(E. T. Craswell)等在叶子衰老阶段捕获到大量氨气。植物体挥发氨得到了确证。植物体氨的挥发量因测定方法不同而有很大差异。1978年其图特(C. A. Stutte)等应用高温化学发光技术研究表明,叶面积指数为5的作物,每平方米叶面平均每分钟损失9nm氮,相当于每公顷10周内损失38kg氮,但其他技术测定表明,损失较小。挥发损失主要发生在植物开花成熟阶段。在这个生理阶段,蛋白质在衰老的叶子中分解,释放出氨,从而使氨的气态损失发生。氨挥发损失的机制,除Klein等提出的氨及胺形成的7种可能的生物化学过程以外,另一个原因是氨在光呼吸的氮循环中、在硝态氮转变为胺氨酸的过程中以及在蛋白质分解中是一个重要的中间物质。在蒸腾流中,持续供应低浓度的铵,可能还与一些叶细胞渗出结合在一起,就会使气孔下腔形成一定的氨分压,当其超过大气中氨的分压时,就会出现氨的净释放。温度高,叶子衰老,可能是影响其释放的主要条件。Stutte等报道,来自叶子的气流是上述损失的根源。

除氨外,植物还可以以其他还原形态损失氮素,包括HCN和胺类。1945年夫兰茨克(C. J. Franzke)等由高粱植株测出了微量的HCN,但每秒每立方米的流量低于2.5pmol。胺类是重要的一类挥发物质,在植物中广泛存在,易于由花及叶中挥发损失。胺类含量与花发育阶段紧密相关,因而这种损失可能有季节性。1949年可康维尔(B. T. Cromwell)发现,一年和山旋 *Mercurialis annua* 叶子中的甲胺花期最高,此后下降。1966年里卡得森(M. Richardson)发现, *Sorbus aucuparia* 及欧洲花椒及单籽山楂 *Crataegus monogyna* 中胺的释放与花蕾开放密切相关。各种胺类损失的数量还难以用现代技术精确测量和区别他们。

植物体也可能以氧化态的气体损失氮素。正常情况下细胞质中的硝酸可还原成亚硝酸,但亚硝酸累积有潜在危害,可能出现氮素氧化化合物的挥发。1956年伊万斯(H. J. Evans)等发现,大部分(80%)亚硝态氮以NO及N<sub>2</sub>O形式释放。1969年波特(L. K. Porter)观察到,亚硝酸与植物体中存在的胍类物质或与有机物质起反应时,主要气体产物是NO。1979年柯未拍(L. Klepper)观察到,给大豆叶子施用一定量的光合抑制剂可以阻止

亚硝酸还原,引起 NO 及少量 NO<sub>2</sub> 释放;黑暗条件下,施用 2,4-D 可增加大豆硝态氮还原,既能引起亚硝态氮的同化,也能引起 NO 和 NO<sub>2</sub> 的释放,最大释放量是每克鲜重每分钟释放 2,4ugNO 和 0.07ug NO<sub>2</sub>。1979 年邱其尔(K. Churchill)等在小麦上证实有 NO 和 NO<sub>2</sub> 的释放,但数量较少。

研究植物氮素的气态挥发损失除采用特殊的生长室(可以收集挥发出来的气体)以外,现在广泛应用两种技术:一是同位素<sup>15</sup>N 交换;另一个是高温化学发光技术。应用后一技术可以测定来自叶中的含氮化合物的总损失。

植物体氮素挥发损失的机理至今并未完全清楚,影响植物体氮素挥发的因子也未完全查明,植物挥发损失氮素在氮代谢过程中的意义和作用,对农作物产量和质量的影响至今仍然不清楚。进一步研究这些问题,对于了解植物—土壤体系中氮素的循环有重要意义。

参考文献

- 1 Eggleton W G E. Grass plant, Biochem J. 1935,29:1389~1397
- 2 Richardson M. Phytochemistry. 1966,(5):23~30
- 3 Porter L K. Soil Sci Soc American. 1969,(33):696~702
- 4 Klepper L. Atmos. Environ,1979,(13):537~542
- 5 Churchill K. Pesti Biochem Physiol. 1979,(12):156~162  
(西北农业大学李生秀教授撰)

**光合作用调节酶 RubisCO 的研究** studies on ribulose biphosphate carboxy lasel oxygenase 在植物光合作用过程中,CO<sub>2</sub> 被 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶(即 RubisCO,EC 4.1.1.39)在叶片中固定。RubisCO 存在于所有绿色组织叶绿体的间质中,含量占叶绿体可溶性蛋白质的 50%,故埃利斯(Ellis,1979)认为它是生物圈中最丰富的蛋白质,同时它又是光合作用的关键酶。

1947 年,威德曼(Wildman)和邦纳(Bonner)利用超速离心法在叶片提取液中发现并命名了部分 I 蛋白(FIP)。1956 年,韦斯巴奇(Weissbach)从叶片中提取并纯化了二磷酸核酮糖羧化酶(RuBPC),且发现 RuBPC 就是 FIP。以后的研究资料表明该酶同时具有加氧酶的性质,故又重新命名它为二磷酸核酮糖羧化酶/加氧酶。

卡尔文(M. Calvin)等首先记载了由 RubisCO 催化的反应。1957 年,巴沙姆(Bassham)和卡尔文报道了在藻类悬浮液中的光合 CO<sub>2</sub> 固定的最初产物是 3-磷酸甘油酸(PGA),当时催化 CO<sub>2</sub> 固定的酶被称为羧基歧化酶,并证明它与植物叶片提取物的可溶性蛋白超速离心分析时所发现的“部分 I 蛋白”相同。RubisCO 催化 CO<sub>2</sub> 共价结合到 1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)上,同时六碳中间物水解形成两分子 PGA,其中之一带有来自 CO<sub>2</sub> 的碳。当 RuBP 结合到 RubisCO 的活性位点上时,它也会受到 O<sub>2</sub> 的进攻得到 2-磷酸乙醇酸(P-glycolate)和 PGA。P-glycolate 是导致光呼吸的起始中间物(Bowes 等,1971)。羧化和加氧相互竞争。

RubisCO 的分子量为 550 000,由 16 个亚基组成,其中 8 个大亚基(L)分子量为 51 000~58 000,8 个小亚基(S)的为 12 000~18 000。1977 年,吉恩森(R. G. Jensen)和巴尔(Bahr)认为,大小亚基形成一个 L<sub>8</sub>S<sub>8</sub> 的结构。这个十六聚体在多种变性条件下会解离成亚基。大亚基含有活性位点,小亚基的确切功能尚未了解。查普曼(Chapman,1987,1988)等和李立人等(1990)对 RubisCO 四级结构的研究资料表明,每两个大亚基成对交互结合,并沿四重轴排列成一个八聚体(L<sub>8</sub>)大亚基核,8 个小亚基以两个四聚体分别排列在大亚基核两端的大亚基裂隙中间。

研究资料表明,高等植物 RubisCO 的大亚基由叶绿体基因组编码,在叶绿体内 70S 核糖体上首先合成一个比成熟肽多 1 000~2 000 的前体,然后在叶绿体间质中被加工后与小亚基装配成全酶。小亚基由细胞核基因组编码,在细胞质 80S 核糖体上

合成一个比成熟肽多 4 000~6 000 的前体,小亚基前体在转运肽引导下通过叶绿体膜输入叶绿体,然后在叶绿体内被蛋白酶水解,切除氨基末端的转运肽后变成成熟的小亚基。1980 年,埃利斯(Ellis)等发现,豌豆的完整叶绿体在光照下,其新合成的同位素标记的大亚基与另一个叶绿体间质蛋白结合,形成标记的大亚基—结合蛋白复合物,然后,该标记的大亚基再出现在 RubisCO 中。这似乎说明这种结合蛋白在叶绿体中起着使大小亚基装配成全酶的作用。在此研究资料的基础上,埃利斯等提出高等植物 RubisCO 大小亚基合成及装配过程的假设模型。

1986 年,赫明森(Hemmingsen)首先从豌豆中提纯了 RubisCO 亚基结合蛋白。1991 年,李立人等改进了纯化方法,使收得率提高 12 倍,这将有利于进一步研究该蛋白的性质与作用机理。1989 年,罗伊(Roy)对亚基结合蛋白参与叶绿体中 RubisCO 的装配的机理提出假设性的模型。1988 年,从蚕豆和小麦 cDNA 文库分离的结合蛋白的 α-亚基基因已被赫明森(Hemmingsen)等进行克隆及序列测定,这两种不同植物来源的结合蛋白的 α-亚基,与推测的氨基酸序列有 80% 的同源性。豌豆结合蛋白的 α-亚基及 β-亚基基因已完成克隆和序列测定(Roy,1989)。

为研究 RubisCO 装配的机理以及通过遗传操作对其结构与功能的影响,一般将 RubisCO 大小亚基的结构基因在大肠杆菌中表达为有活性的酶。原核生物的大小亚基结构基因均定位在一个 DNA 分子上,并共同被转录。高等植物的大小亚基基因分别存在于不同的细胞器中,因此装配过程较原核生物复杂。至 90 年代,利用表达质粒和噬菌体可使许多作物的 RubisCO 大小亚基在大肠杆菌中合成。范德维斯(Van der Vies,1986)等认为,合成的水平和次序可用不同的启动子进行调节,从而可选择亚基库的大小和比例以控制装配的最适条件。高等植物大亚基基因克隆在表达质粒和噬菌体中通过 Lac 或 λPL 启动子可在大肠杆菌中获得高水平的表达,蛋白量可达大肠杆菌总蛋白量的 2%。然而,萨默维尔(Somerville,1986)等的研究资料表明,不论是高水平的或低水平的表达,所产生的大亚基都是不溶解的和无活性的。

80 年代以来,有人利用改变 pH 值或离子强度等方法将一些原核生物的 RubisCO 成功地进行了大小亚基的解离和重组。这些实验资料证明,酶的催化部位虽在大亚基上,但小亚基是维持酶活性所不可少的组分(D. B. Jordan 等,1985)。然而,高等植物的 RubisCO 迄今还不能有效地进行大小亚基的重组。1989 年,李立人等将结晶纯化的烟草 RubisCO 进行固定化,并成功地进行大小亚基的解离和重组。近年来,李立人等对高等植物 RubisCO 大小亚基的表达也在进行多途径的研究。

1956 年,卡尔文提出关于结合到 RubisCO 上的 RuBP 羧化反应机理。自 1987 年开始,安德鲁斯(Andrews)、洛雷默(Lorimer)以及乔尔(Johal)等对此也进行了广泛研究。与此相反,对加氧酶的反应机理却知之不多。

1987 年,伍德罗(Woodrow)和伯雷(Berry)发表了有关植物体内 RubisCO 活性调节的研究结果。1987 年,占恩森(R. G. Jensen)对 RubisCO 的激活、抑制、离体叶绿体的 CO<sub>2</sub> 固定能力丧失等调节机制进行了综述。

RubisCO 是一种双功能调节酶,能够调节光合作用和光呼吸作用,从而影响植物产量。有人估计,如果抑制 RubisCO 的加氧酶活性,或增加羧化酶活性,主要农作物的净光合速率可提高 20%~30%,因此,以改善 RubisCO 活性为目标的遗传工程研究引起人们重视。国内外对 RubisCO 的结构、功能和遗传信息的定位做了大量工作,并明确了它还是一个极好遗传标记,可用来探讨植物细胞的核质关系,研究自养生物的遗传、进化等重大生物学问题。

参考文献

- 1 Jensen R G, Bahr J T. Ann Rev Plant Physiol. 1977,28:379~400
- 2 Hemmingsen S M, Ellis R J. Plant Physiol. 1986,80:269~

276

- 3 Jensen R G, et al. Progress in photosynthesis research, 1987, 3: 273~279
- 4 Chapman M S, et al. Nature, 1987, 329: 354~356
- 5 李立人, 等. 中国科学(B辑), 1988, 3: 264~270
- 6 李立人. 生物科学信息, 1989, 1(1): 12~15
- 7 李立人, 李粹芳. 生物化学与生物物理学报, 1989, 21: 215~220
- 8 李立人, 等. 植物生理学报, 1990, 16(3): 293~300
- 9 李立人. 植物生理学通讯, 1991, 27(4): 241~245
- 10 李立人. 植物生理学, 1992, 18(2): 217~223

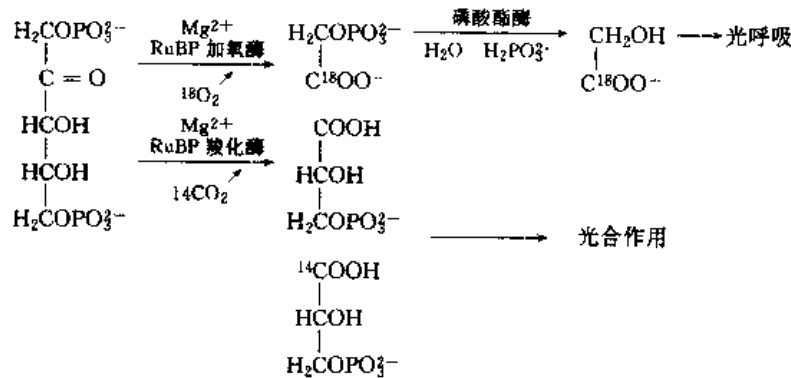
(安徽师范大学生物系吴晓东副教授撰; 孙昌瑛审)

**光呼吸作用及其生化特征** photorespiration and its biochemical character 植物的绿色组织在光下吸收氧气和释放二氧化碳的生理过程, 称光呼吸。这个过程只有在光下才能进

行。现知光呼吸与光合作用密切相关, 只有在光合作用进行时才能发生光呼吸。

1968年美国 Tolbert 提出光呼吸概念。但是在此之前, 人们已知在完整叶片中 CO<sub>2</sub> 的同化产物有乙醇酸、甘氨酸、丝氨酸等化合物的存在。至 1971 年他提出氧化光合碳循环的整个化学历程, 以后有所补充。

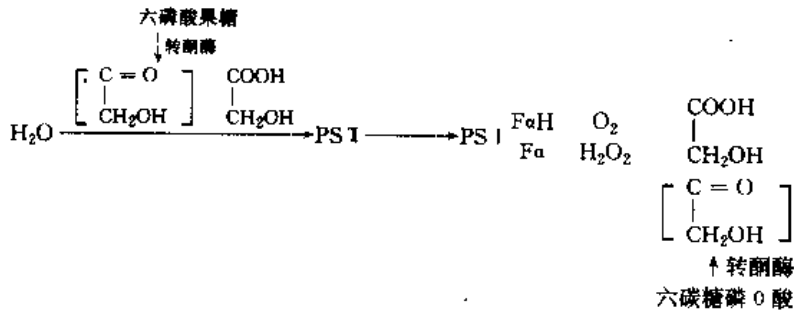
光呼吸是一个氧化过程。被氧化的底物是乙醇酸。乙醇酸是光合作用产物之一, 它主要是通过 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶—加氧酶(RubisCO 酶)作用生成的。20 世纪 70 年代发现该酶具有双重催化功能之后, 对光呼吸的底物乙醇酸来自光合作用才得到肯定的。RubisCO 酶既可催化 1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)在 Mg<sup>2+</sup> 参与下羧化成二分子的磷酸甘油酸, 也可以催化 RuBP 在 Mg<sup>2+</sup> 参与下加氧生成一分子磷酸甘油酸与一分子磷酸乙醇酸。磷酸乙醇酸在磷酸酯酶催化下转变为乙醇酸。这就是光呼吸底物的来源。此酶在催化羧化反应时称 RuBP 羧化酶, 催化加氧反应时则称 RuBP 加氧酶。具体催化反应如下:



Rubisco 酶活性比值大小或其催化反应的方向取决于大气中 CO<sub>2</sub> 与 O<sub>2</sub> 浓度的高低, 即决定于 CO<sub>2</sub> 与 O<sub>2</sub> 浓度及 RuBP 对二者的亲和性。O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 对这两个反应互起竞争抑制作用。在高 O<sub>2</sub> 低 CO<sub>2</sub> 条件下, 抑制羧化反应而促进加氧反应; 在低 O<sub>2</sub> 和高 CO<sub>2</sub> 条件下, 则抑制加氧反应促进羧化反应。所以, 反应的方

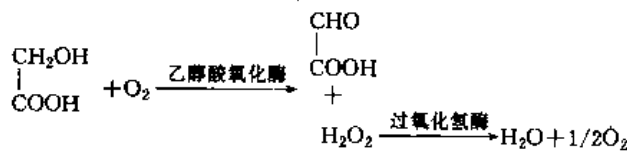
向受 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比率的调节。现已知在通常大气的 O<sub>2</sub>(21%) 和 CO<sub>2</sub>(0.03%) 浓度下, RuBP 就会发生加氧反应。

此外, 有人认为也可以通过还原光合碳循环中转酮酶的作用形成少量的乙醇酸。其反应如下:



乙醇酸在叶绿体内合成后便转移至过氧化物酶体(简称过氧体)中, 并在乙醇酸氧化酶作用下氧化为乙醛酸, 同时生成

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 其反应过程如下:



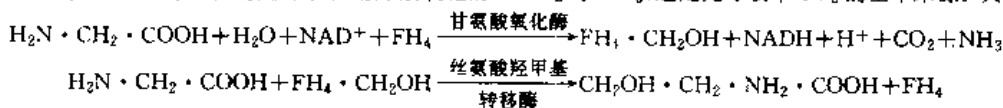
后者在过氧体内的过氧化氢酶作用下分解为 H<sub>2</sub>O 与 O<sub>2</sub>, 以解除 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对过氧体膜的破坏作用。

乙醇酸是氧化光合碳循环——光呼吸的重要产物, 是过氧体中代谢的分岔点。乙醛酸的出路有如下几个: (1) 在过氧体内经过两种转氨酶的作用转变为甘氨酸。(2) 被氧化生成的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 非酶促氧化生成 CO<sub>2</sub> 和甲酸, 甲酸再行分解为 CO<sub>2</sub>。此反应曾被

认为是光呼吸释放 CO<sub>2</sub> 的途径之一。但是, 最近有人用完整的过氧体试验证明, 不管有无 NH<sub>2</sub> 基供体, 都不能使乙醇酸代谢经过脱羧释放出 CO<sub>2</sub>。这样, 乙醛酸的这条出路似乎不应存在。(3) 乙醛酸可以从过氧体返回叶绿体, 在叶绿体内由乙醛酸还原酶还原成乙醇酸或脱羧生成 CO<sub>2</sub>。现在认为在叶绿体内脱羧反应释放出的 CO<sub>2</sub> 可能只占光呼吸放出 CO<sub>2</sub> 的 1/10 或更少些。(4) 乙醛酸

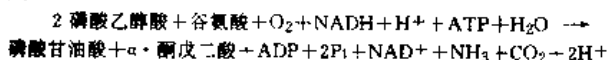


可被乙醇酸氧化酶氧化成草酸。最近有人证明在草酸进一步氧化的过程中生成的 NADH 可作为硝酸还原反应的还原剂,从而为光呼吸的氮循环提供有力的佐证。可见乙醇酸在光呼吸代谢反应中是一个重要的调控部位。但是,乙醇酸是在何种因素调控下行何种途径,以及各种代谢途径的比例是多少现在仍不清楚。1981 年 Chang 等人证实,对菠菜过氧体喂以乙醇酸,在没有谷氨酸提供时,会大量积累乙醇酸,当提供谷氨酸后,随着甘氨酸形成,乙醇酸的积累量逐渐减少。这个结果与 1976 年 Vakilina 等报道的硝态氮与氨态氮对 C<sub>3</sub> 植物和 C<sub>4</sub> 植物的光呼吸和乙醇酸氧化酶



反应形成的 NH<sub>3</sub> 则立即用于谷氨酸的合成。这无疑要将光合作用产生的能量消耗掉一部分。

丝氨酸由线粒体转回过氧体后,在上述转氨酶作用下转变为羟基丙酮酸。1989 年梁焱用完整的菠菜过氧体实验证实,除丙氨酸转氨酶、色氨酸转氨酶外,甘氨酸转氨酶也参与由羟基丙酮酸到丝氨酸的转氨作用,给光呼吸的转氨作用提供新的依据。在过氧体内羟基丙酮酸被 NADH 还原为甘油酸,后者在叶绿体并在甘油酸激酶作用下转变为磷酸甘油酸,进入还原光合碳循环。这样,整个过程称为乙醇酸循环,它由乙醇酸途径(乙醇酸→甘氨酸)及甘油酸途径(丝氨酸→甘油酸)组成。整个循环的总反应是:



从上式可以看出,每 2 分子磷酸乙醇酸转变为一分子磷酸甘油酸即放出一分子的 CO<sub>2</sub>。由光合作用所同化的碳,因光呼吸循环会损失掉 1/4。整个循环涉及叶绿体、过氧体与线粒体 3 个细胞器。

要维持光呼吸的循环正常运行,还原当量(NADH)的正常供应是必需的。1971 年, Tolbert 提出氧化光合碳循环的整个化学历程时,即提出由苹果酸与天冬氨酸穿梭作用来完成的思想。1983 年, Schmitt 等人用黑麦完整的过氧体实验,认为此穿梭系统不能提供过氧体以 NADH。原因是:(1)产生 NADH 的苹果酸脱氢酶和谷草转氨酶的活性不足以维持光呼吸循环的速率。(2)尽管过氧体内苹果酸同功酶占细胞总量的 40%,但谷草转氨酶只占细胞的不到 7%。(3)加入苹果酸和谷氨酸后,过氧体只能缓慢地还原加入的 NAD,在加入外源的谷草转氨酶后, NAD<sup>+</sup> 的还原速率才会极大地增高。(4)供应苹果酸和谷氨酸,在缺少外源的 NAD 时,过氧体不能将羟基丙酮酸还原成甘油酸,只有加入外源 NAD,这种还原反应才能进行。1984 年,梁焱等用菠菜完整过氧体实验证实,由羟基丙酮酸→丝氨酸的转变中,最大活性不是在加入谷氨酸时获得,而是在加入丙氨酸后获得的;他们还发现,由甘油酸转变为丝氨酸过程中, NAD、丙氨酸和甘油酸是绝对必需的,并可用 α-酮戊二酸和天冬氨酸代替草酰乙酸。1987 年,梁焱对过氧体内甘油酸转变为丝氨酸时 NAD 的供应做了实验,结果证实过氧体膜能缓慢地透过 NAD/NADH,提出膜的转运载体可能参与菠菜叶片过氧体 NAD/NADH 的再产生的穿梭系统。

由于在整个乙醇酸循环中,每二分子的乙醇酸释放出一分子的 CO<sub>2</sub>,余下一分子磷酸甘油酸再入还原光合碳循环。即在一般大气条件下,光呼吸氧化的碳元素要占光合固定碳元素的 25%~30%。由于光呼吸不断进行,光合强度下降可达 50%,使净光合效率降低,因此关于光呼吸这一植物正常生命活动是有害还是有害,迄今仍未澄清,也是国内外研究者急于解决的课题。

从能量代谢方面来看,光合作用的光合磷酸化为 CO<sub>2</sub> 的同化提供了 ATP 和 NADPH,并将光能转变为同化产物中的键能。呼吸作用则分解有机物释放其中的键能生成 ATP 和 NAD(P)H,以便用于细胞内各种生命活动。光呼吸乙醇酸循环生成的

活性均有影响是一致的(他们曾观察到将硝酸盐供给玉米植株,则细胞内乙醇酸氧化酶活性较高,而烟草则是以氨态氮处理的酶活性较高)。可见乙醇酸的多头途径受某些因素的制约。

乙醇酸在过氧体内由丝氨酸乙醇酸转氨酶或谷氨酶-乙醇酸转氨酶作用后,被氧化成甘氨酸。1984 年梁焱证实,绿氨酸、谷氨酸和丙氨酸在转氨作用的氨基供体的相对贡献是 100、100、60。甘氨酸转移至线粒体后,在四氢叶酸(FH<sub>4</sub>)参与下,发生脱羧与脱氨反应,由二分子甘氨酸转变为一分子丝氨酸,同时释放出 CO<sub>2</sub> 与 NH<sub>3</sub>,这是光呼吸中 CO<sub>2</sub> 的基本来源。其反应过程如下:

中间产物如甘氨酸、丝氨酸可供合成蛋白质及其它化合物的原料,而磷酸甘油酸进入 C<sub>3</sub> 循环补充了循环的碳架,推动 C<sub>3</sub> 的循环,此是合成过程的一部分,是与光合作用分不开的。甘氨酸氧化中发生脱羧反应,释放出 CO<sub>2</sub> 招致碳的损失,但伴随着脱氨反应与 NADH 的生成又为谷氨酸的合成与 ATP 的生成做了准备,所以乙醇酸循环既合成又分解,既氧化又还原,既吸能又放能,这是与其它循环不同之处。

1983 年,陈锦强等用高水平硝态氮培育黄麻植株,其光合强度、光呼吸光合比值及硝酸还原酶活性、乙醇酸氧化酶活性均比铵盐为氮源培养的植株高,用抑制甘氨酸脱羧反应抑制剂异烟肼处理叶圆片,则硝酸还原受阻,说明光呼吸与硝酸还原具有一定联系,可能是由草酰乙酸-苹果酸穿梭为在细胞质使硝酸还原提供了还原剂 NADH,如果乙醇酸循环中甘氨酸脱羧反应产生的 NADH 确能为硝酸还原提供还原剂的话,光呼吸在硝酸盐的同化中确会起积极作用。

乙醇酸循环中,甘氨酸的脱羧是在线粒体内进行的,以 NAD<sup>-</sup> 为其电子受体。在线粒体内三羧酸循环(TCA)中的苹果酸脱氢酶与异柠檬酸脱氢酶也是以 NAD<sup>+</sup> 作为电子受体。80 年代初,一些研究者已开始研究线粒体内甘氨酸氧化与 TCA 循环的关系,试图说明光呼吸与暗呼吸之间的关系。1990 年,张少红用豌豆叶片线粒体的实验证实,线粒体中甘氨酸、苹果酸与异柠檬酸的氧化速率均受光的促进。甘氨酸氧化会抑制苹果酸与异柠檬酸的氧化,而其本身不受影响。用异烟肼抑制剂处理,或是提高 NAD<sup>+</sup> 的浓度均会降低甘氨酸氧化时对苹果酸氧化与异柠檬酸氧化的抑制。线粒体氧化甘氨酸、苹果酸与异柠檬酸的 K<sub>m</sub> (NAD<sup>+</sup>) 值分别是 66.67 μmol/L、119.1 μmol/L 和 152.2 μmol/L。甘氨酸氧化时抑制苹果酸与异柠檬酸的氧化是由于甘氨酸在竞争 NAD<sup>+</sup> 中占了优势。已知绿色叶片在照光下 TCA 循环仍在进行,以提供合成过程所需要的碳架,但 TCA 循环在光下运行较暗慢, TCA 循环的限速酶-异柠檬酸脱氢酶的活性受抑制是其主要原因。

还有不少研究者从光、温度等方面做了研究。已知在饱和光强以上照射植株叶片常会引起光合抑制,此种光合抑制现象不但在叶片,就是在叶绿体与类囊体也能观察到。此种现象在碳代谢受限制的条件下尤为明显。其实质是多余的光能不能排散而引起光氧化。1978 年, Powles 等用离体叶片在无 CO<sub>2</sub> 与不同 O<sub>2</sub> 浓度下进行光合抑制处理,发现随着 O<sub>2</sub> 浓度从 7% 提高到 21%,光合抑制迅速被缓解,甚至完全消除。因而认为 O<sub>2</sub> 促光呼吸起着保护作用。已知绿色叶片经照光产生的 Mehler 反应是一个不可避免的过程,并藉此排除多余的能量。显然,植株是通过光呼吸与 Mehler 反应以保护光合作用的正常进行。1989 年,王荣福等人分别用两种水稻品种进行实验。他们发现在 1%~30% 的 O<sub>2</sub> 浓度范围内,无 CO<sub>2</sub>,在 2000 μE·M<sup>-2</sup>·S<sup>-1</sup> 光照条件下,处理 3h,两种水稻光合抑制程度会随着处理期间 O<sub>2</sub> 浓度的增高而被缓解。但是当 O<sub>2</sub> 浓度高于 30%,两种水稻均会出现光抑光加重现象,并且将这样处理的样品放置在正常生长条件与 800 μE

·M<sup>-2</sup>·S<sup>-1</sup>时,光合速率分别被抑制28%与20%。他们认为光呼吸在光抑光合中只能在短时间内起缓解作用,O<sub>2</sub>通过Mehler反应来排除多余的能量,以及超氧化物歧化酶(SOD)清除由Mehler反应产生的活性氧(O<sub>2</sub>·OH·O<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>),保护光合膜的作用可能性则更为主要。

植株在逆境(大气污染、低温、干旱、盐渍、强光)的条件下,体内的活性氧代谢会失调,在一定程度上会增加机体内活性氧的含量,从而加剧膜脂过氧化作用,破坏生物膜的结构,使膜差别透性丧失,代谢紊乱,植株衰老并遭受伤害。现知植株在逆境条件下呼吸强度会发生不同程度的改变。光呼吸作用是否可以看作是植物进行光合作用的一种抗逆性的表现,关键是植株叶片细胞内的乙醇酸氧化酶(GO)与SOD之间关系是怎样的。1991年,杨礼锐等用不同浓度的Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>处理菠菜叶片,得知GO活性的变化与SOD活性的变化相一致,呈平行关系,而且低浓度的处理中,GO活性的改变是SOD活性改变的2.5-3倍,当SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>浓度超出一定阈值(100ppm)后,GO活性下降也较SOD活性下降的少,预示GO对环境改变较之SOD更为敏感。可能环境因子首先作用于GO,然后包括SOD在内的保护酶系统再行使各自的生化反应。1988年,Sandalio等人在西瓜的过氧体中发现有SOD。1989年,Rio等人见到豌豆叶片过氧体膜上NADH诱导超氧自由基,提出O<sub>2</sub>的产生可能是过氧体的普遍代谢性质,并进一步推论过氧体膜上存在有与活性氧有关的作用。

有关RuBP羧化酶活性与乙醇酸氧化酶活性之间的关系,是1982年高煜珠等人用不同水稻品种间的实验获得的。他们证实凡是RuBP羧化酶活性较高的品种,其乙醇酸氧化酶的活性一般也较高,因此它们之间的相互关系也从生化基础上反映了光合作用与光呼吸之间的相互关系。

随着分子生物学的发展,人们已着手对RuBP羧化酶的基因进行改造。主要是改造RuBP羧化酶的大亚基,加强其羧化能力削弱其加氧作用,从而加强光合强度降低光呼吸强度,以达到增产目的。另一方面,则是从改造乙醇酸氧化酶的基因入手。1986年Gerdes等人报道,扁豆转绿时总RNA和mRNA的含量增加与乙醇酸氧化酶的活性有平行关系。用分离编码的乙醇酸氧化酶的mRNA体外转译合成乙醇酸氧化酶蛋白,与从植物提取的乙醇酸氧化酶分子量(43kd)一致。随着与光呼吸相关的酶的mRNA分离的成功,编码这些酶的基因将被克隆,定会使人人们对光呼吸机理的认识更向前推进一步。

#### 参考文献

- 1 Chang C C, et al. Plant Physiol. 1981, 67(5):1003~1006
- 2 Schmitt M R, et al. Plant Physiol. 1983, 72(3):728~743
- 3 李明启. 植物学通报, 1985, 2(1):1~7
- 4 梁峥. 云南植物研究, 1987, 9(4):449~454
- 5 王荣福, 等. 江苏农业科学, 1988, 4(2):1~8
- 6 Sandalio L M, et al. Plant Physiol. 1988, 88(4):1215~1218
- 7 del Rio, L A, et al. Plant Physiol. 1989, 89(3):728~731
- 8 张少红, 等. 植物生理学报, 1990, 16(2):185~191
- 8 杨礼锐, 等. 植物学通报, 1991, 81(1):43~47

(华南农业大学杨礼锐副教授)

**光合细菌 P870** 1952年, L. N. M. Duysens 发现酒色硫细菌可以通过照光产生1%~2%的红外区吸收光谱变化,主要在870nm和蓝区吸收降低。后来其他工作者发现用氧化剂处理细菌可产生同样的光谱变化。1965年, R. K. Clayton 指出此吸收变化是由于叶绿素分子中1%左右的特殊叶绿素分子在经历氧化反应,这个反应不但量子产率≥90%,而且可以在低到1K的温度下发生。当时尚未弄清这个吸收变化是由于大多数叶绿素分子经历小的变化或是少数叶绿素分子经历大的变化引起的。1978年, R. K. Clayton 和 W. R. Sistrom 发现在一个含有正常数量叶绿素但不能进行光合作用的球形红假单胞菌的PM-8株

突变体里,照光时不产生这种吸收光谱变化。用强氧化剂K<sub>2</sub>IrCl<sub>6</sub>处理正常细菌的载色体时可将大多数叶绿素分子氧化,使其漂白失色。但那些少数特殊叶绿素分子可以抵制这种氧化,并且还可以通过照光氧化而产生吸收变化。以上两个实验得出这一概念:通过照光产生的少量吸收光谱变化是代表细菌里由少数特殊叶绿素分子构成的成分所产生的氧化反应,而且它代表光合细菌的原初电子供体的氧化反应。这个原初电子供体称P870。

1968年, D. W. Reed 和 R. K. Clayton 用去垢剂细菌载色体分离反应中心复合体时指出后者氧化还原时产生的光谱差代表了原初电子供体的吸收光谱。这个光谱差在870nm处有较大降低(含叶绿素b的细菌这个变化在960nm处),在≤600nm和385nm处也有降低,在800nm处有个蓝移。整个吸收光谱差类似于细菌叶绿素有机溶液的氧化还原光谱差,特别在蓝绿区、红外区,由于色素分子间的强烈相互作用,原初电子供体细菌叶绿素分子的吸收带从770nm红移到865nm。

1987年,葛培根和 V. A. Shuvalov 描述了3种色素分子细菌膜(球形红假单胞菌R-26里的集光色素复合体B850、球形红假单胞菌R-26反应中心复合体,绿色红假单胞菌反应中心)的圆振二向色谱,显示在红外吸收圆振二向色谱分两个谱带:正850nm带和负876nm带,根据激子相互作用理论,这种情况是由于B850复合体里叶绿素分子是以二聚体形式存在,假如叶绿素二聚体激发到单位或三重线激发态,激子相互作用消失,负带也消失。

20世纪50年代Commoner等观察到光合细菌经光化学电荷分离产生带正电荷的原初电子供体P870<sup>+</sup>应该显示EPR信号,后证实大多数光合细菌原初电子供体自由基的EPR信号的g值是2.0025±0.0002, ΔH=9.66,绿色红假单胞菌的ΔH=11.86。

由于陆续发现,①EPR信号与照光产生的869nm吸收率变化比是1:1,②闪光产生的EPR信号的上升时间受限于测量仪器的时间分辨率,即低于1μs,③EPR信号在1.5K下仍能可逆地产生;④EPR信号和860nm吸收率变化有同样的衰变动力学;⑤EPR信号和860nm吸收率变化有同样的作用光谱;⑥EPR信号和860nm吸收率变化可以同样地通过化学氧化导致;⑦缺乏反应中心的球形红假单胞菌突变体细胞不能产生自由基EPR信号。

一般认为细菌叶绿素是原初电子供体的成分。鉴于吸收光谱变化已明确证实光合细菌的原初电子供体由细菌叶绿素组成,将P870<sup>+</sup>的ERP信号与氧化细菌叶绿素分子在溶液中的EPR信号比较可获得证实。结果发现两者有相同信号形状和g值,仅线宽不同。Norris等认为这个差别是归因于原初电子供体叶绿素的二聚体,而且那个单电子在两个叶绿素分子上是“非定域的”。这个叶绿素分子对间还含有1个水分子。

1975年, G. Feher 等给出了Bchl<sub>a</sub><sup>+</sup>溶液和球形红假单胞菌R-26载色体的电子核磁共振谱,显示载色体hfs常数恰是单体叶绿素自由基的一半,说明原初电子供体是叶绿素分子二聚体,那单电子在两个叶绿素分子间是非定域的。

**细胞色素的低温氧化反应** 50年代光合细胞色素的氧化反应已由很多工作者研究过,后来发现细菌里的C型细胞色素被光照射时氧化的速度很快,最早测量的数值是20μs。不过氧化了的细胞色素在室温下重新还原要慢得多。1960年Chance和西村对光合细菌里的C型细胞色素光氧化与温度的关系作了一个重要的观察,他们发现酒色硫细菌在80K下照光时它的一个低电位细胞色素C553还可以经历氧化,这个细胞色素叫做C423.5。

酒色硫细菌的C型细胞色素在300K和200K照光时的氧化速度差不多一样,不过在200K细胞色素重新还原的速度变慢了10倍,更重要的是在液氮温度(77K)下细胞色素的氧化速度更快。可是在这个温度下,氧化的细胞色素不能重新还原,因此即使再加闪光,也看不到氧化反应了。

后来 Chance 和 Devault 对细胞色素光氧化与温度的关系作了详细的测量。他们用 10ns 长的 694nm 激光作为闪光去测量酒色红硫细菌细胞色素 C 的氧化速度。室温下  $t_{1/2}$  是  $\sim 2\mu s$ , 这个速度随温度的降低而变慢。在这段温度中, 活化能等于 13.8kJ/mol。这活化能代表细胞色素的血红素作转动或振动扩散使叶绿素分子达到最适当位向所需的能量。等温度达到  $\sim 100K$  或更低时, 速度慢到恒定的 2.3ms, 此后与温度无关。

这个细菌的 C 型细胞色素在低温下用恒定时间氧化, 这确定地证明反应中心叶绿素和细胞色素间的电子传递是经过电子隧道穿透方式进行的。这就是说, 细胞色素的电子可穿透一个比它自己的动能要大的势垒。根据量子力学计算, 这个势垒的幅度是 0.3~1eV, 宽  $(3\sim 8)\times 10^{-9}$ 。

电子隧道穿透是一种量子力学特性, 这就是说, 颗粒的波动性可使它穿透一个能量比它的动能还要大的势垒, 穿透的几率与反应体间的距离相关, 这种电子传递方式最适应于存在蛋白膜上的不易移动的成分, 或是在低温下迁移率低的反应成分。因此除了这个细胞色素与反应中心叶绿素之间的直接电子传递外, 在几种情况下电子传递也用这个方式进行。

**细胞色素与反应中心叶绿素分子间的直接电子传递** 1968 年 Parson 发现用 20ns 闪光去氧化酒色红硫细菌载体的 P870 时所产生的吸收减低的速度很快, 在 0.5 $\mu s$  以下, 同时可以看到这个变化的复原(衰变)也很快, 只要 1~2 $\mu s$ 。这个吸收变化复原照讲应该是代表 P870<sup>+</sup>重新回到 P870 的吸收变化。问题是还原 P870<sup>+</sup>的电子是从哪里来的? Parson 发现细胞色素 c (C555) 氧化时的吸收光谱变化与 P890<sup>+</sup>重新还原具有同样的速度, 而且这个细胞色素氧化的量子产率也差不多是等于 1。这些结果很清楚地表明 P870<sup>+</sup>是直接从 c 型细胞色素 C555 提取一个电子去还原自己。Parson 用了一个很灵巧的实验方法利用 P870 和 C555 的吸收变化动力学去间接地推测受体的性质。当第 2 次闪光是在第 1 次闪光后 500 $\mu s$  时发射的情况下, C555 的氧化吸收变化可以测量到。当两个闪光间的时间差是 1ms 时第 2 次闪光效果最大。如果两次闪光间时间差短, 第 2 次闪光的效果就小, 当两次闪光的时间差是 60 $\mu s$  时, 第 2 次闪光的功效只有第 1 次的一半。一直等到两次闪光的时间差是 3 $\mu s$  时, 它们的总效应就如同只有第 1 次闪光一样。这个观察可以最简单地解释是因为电子受体 A<sup>-</sup>还没有充分的时间来传递走它原来接受的电子, 回复到氧化状态。换言之, P870 就没有适当的反应配合, 因此不能被氧化。再者, 酒色红硫细菌载体里每个 P870 有两个 C555, 所以只有第 2 次闪光能氧化 P870, 载体里有足够的 C555 去供应电子给 P870<sup>+</sup>。第 1 次闪光后氧化的 C555 要在 10ms 以后才能被受体侧来的电子重新还原。因此第 2 次闪光所氧化的 C555 是第 1 次闪光后剩余的一半未氧化的 C555。这些结果显示每个 P870 可以氧化两个 C555 细胞色素。

**用细胞色素 C 作次级电子供体的模型反应** 从球形红假单胞菌突变体 R-26 分离出的反应中心复合体已经失去了原来所含的细胞色素, 葛培根、Reed 等在 1970 年在就利用这个复合体加进哺乳动物的 C 型细胞色素去检验光活化后氧化的反应中心叶绿素是如何与外加的细胞色素相反应的。

因为这反应中心复合体已失去次级电子供体, 在没有外加电子供体时, 虽然闪光可以在 1 $\mu s$  内氧化 P870, 但是它衰变(即重新还原)很慢。P870<sup>+</sup>可以用外加的还原 PMS 去供应电子。用 0.1mmol/L 浓度的还原态 PMS 时, P870<sup>+</sup>可以在 36 $\mu s$  内还原。在室温与 0℃ 间, 这个反应的活化能是  $\sim 25.1$ kJ/mol。

外加的(还原状态)哺乳动物(牛心)细胞色素 c 也可以高效地供应电子给 P870<sup>+</sup>。当外加的细胞色素 C 浓度适当高时, P870<sup>+</sup>的还原时间( $t_{1/2}$ )可以短到 25 $\mu s$ 。就是在完整的球形红假单胞菌细胞里, P870<sup>+</sup>被内源的细胞色素 C<sub>2</sub> 还原的  $t_{1/2}$  也只是 12 $\mu s$ 。所以外加的(牛心)细胞色素 c 供应电子的速度比细胞里也只慢一半! 假如温度从室温往下降, 这个反应的  $t_{1/2}$  也增长。从室温下降至 0℃, P870<sup>+</sup>的还原速度和细胞色素 c 的氧化速度可以

用来作 Arrhenus 标绘图。从这图可以计算出在这段温度里反应的活化能是  $\sim 50.2$ kJ/mol。不过反应溶液一旦冰冻, 反应也就停止了。

对这个反应系统闪光不但可以在 870nm 处测量 P870 产生的吸收变化, 同时也可以可以在 550nm 处测量细胞色素 c 氧化时所产生的吸收变化。870nm/550nm 的吸收变化比是 5.8。因为细胞色素 c 的吸收系数已准确地知道, 如果采用那时通用的 P870 的吸收系数, 870nm 和 550nm 所产生的吸收变化指出 P870<sup>+</sup>细胞色素 c 的比值是近于 1。Parson 等利用这个反应重新测量了 P870 的准确克分子吸收系数。

1970 年, 葛培根等发现在浓度比等于 10 时, P870 的整个吸收变化可以在  $t_{1/2} = 25\mu s$  内复原。这种情形相当特殊, 因为 P870<sup>+</sup>复原的速度是恒定的, 与细胞色素浓度无关, 仅是在  $t_{1/2} = 25\mu s$  内还原的部分随细胞色素/P870 的浓度改变。这种情形似乎表明 P870 必须有一个在适当位向上结合的细胞色素才能接受它的电子。至于细胞色素/反应中心叶绿素比例是 10 时才能在 25 $\mu s$  内全部还原似乎暗示每个反应中心是与 10 个细胞色素相结合, 但可能指示有很多细胞色素是结合在不适当的位向或成分中。通过超过滤实验我们观察到反应中心与 24 个细胞色素相结合。1980 年 Rosen 等用平衡透析测量反应中心上所结合的细胞色素数目, 观察到每个反应中心结合一个细胞色素。不论是在氧化或还原状态, 也不论是哺乳动物的或是从同种细菌分解出来的细胞色素 C<sub>2</sub>。这些新实验结果指出我们以前用的反应中心复合体可能不够纯。后来也知道这制品还含有未分解的细胞色素和醌, 特别是磷脂, 结果不纯的反应中心制品可能具有很多无关的结合位置。葛培根等指出 P870<sup>+</sup>的衰变速度对 H<sup>+</sup> 更敏感些。电位相反离子间的反应速度随离子强度的增高而减低也符合于电解质溶液理论。

P870 和细胞色素间静电吸引力的存在也可以从赖氨酸聚合体对它的影响得到证实。我们发现, 加进赖氨酸聚合体到反应系统可以减弱 P870<sup>+</sup>与细胞色素间的偶联反应。当赖氨酸聚合体(分子量是  $\sim 150000$ )的深度仅是 0.3 $\mu mol$  时, 偶联的反应失去一半。当赖氨酸聚合体的浓度是  $\sim 0.5\mu mol$  时,  $t_{1/2} = 25\mu s$  的反应完全消失。这些结果当然是因为带多个正电荷的赖氨酸聚合体可能与带负电荷的反应中心复合体相结合, 结果阻止后者与细胞色素结合。

**参考文献**

- 1 Leigh JS, Dutton PL. Ann N Y Acad Sci, 1973; 222, 840
- 2 Slooten L. Isolation and Properties of Reaction Centers from Photosynthetic Bacteria, Leiden, 1973, 119
- 3 Shuvalov, et al. Dokl Akad. Nauk SSSR, 1976, 985
- 4 葛培根. 光合作用. 合肥: 安徽教育出版社, 1990, 60~69  
(安徽省农业科学院朱永和撰)

**植物细胞生物转化** biotransformation by plant cells

植物细胞生物转化, 是利用植物细胞的酶系统将加入到培养基中的底物转化为其它产物的生理生化过程, 即有目的地完成有机物质特定官能团的代谢反应。生物转化能获得用常规有机合成方法难以完成的化合物, 产生巨大的经济效益。此外, 生物转化有利于阐明生物合成途径和机制, 发现新的具有高度专一性的酶系统。

1970 年以来, 由于植物细胞培养技术的发展, 以及植物次级代谢规律和酶学研究的逐渐深入, 使得植物细胞或器官能容易地在人为控制条件下生长。人们已能利用微生物进行菌体、杀虫剂、抗生素、前列腺素等多种化合物的生物转化的研究, 并实现了氧化、还原、异构化、羟基化等复杂的生物转化反应。由于微生物细胞生物转化酶系统的局限性, 人们开始利用植物细胞的特殊酶系统进行生物转化的研究, 主要进行的是菌体、生物碱和强心甙的生物转化。1980 年以来, 利用植物细胞进行生物转化的研究十分活跃, 并取得较大进展, 已成功地利用烟草、人参、紫草、毛地

黄、长春花、胡萝卜等培养细胞系完成了有效成分的羟基化、氧化、还原、配糖化、水解、酯化、异构化、环氧化等生物转化反应,同时筛选了一批转化能力强且专一的细胞株,有的生物转化已显示出工业应用前景。

到1991年止,已利用植物细胞进行生物转化的化合物有芳香族化合物如酚类、苯胺类、肉桂酸及其衍生物;香豆素类化合物;生物碱如莨菪烷生物碱、异喹啉生物碱、吲哚生物碱、麦角生物碱;各种蒽类化合物和甾体化合物等。按生物转化机制主要分为:(1)羟基化作用。这类反应常常具有立体专一性,如烟草细胞培养物具有羟基化反式甲基团的能力。毛地黄毒甙和 $\beta$ -甲基毛地黄毒甙加入到希腊毛地黄细胞培养液中,能在C-12位上发生专一性羟基化,且90%的羟基化产物能分泌到培养基中,仅10%贮存在细胞中,既有利于后处理加工,又有利于用固相细胞培养技术低成本地进行生物转化,以生产高效的强心甙药物——异羟基毛地黄毒甙和 $\beta$ -甲基异羟基毛地黄毒甙。(2)醇和酮之间的氧化还原反应。该转化反应具有高度的立体专一性,制备手性化合物很有用的方法。如烟草培养细胞能立体选择性地氧化某些化合物如龙脑的羟基。(3)配糖化反应。植物有效成分中,配糖体常常是一些药物的重要来源,而其甙原常常不呈现药效或者药效很低,因而甙原的配糖化备受重视,较为成功的例子是利用筛选的熊果和长春花细胞系进行熊果甙的生物转化,其转化前体是廉价的对羟基苯酚,而获得的转化产物熊果甙被广泛用作尿道消毒和皮肤黑色素合成的抑制剂。日本横山等对熊果甙转化机理进行了较详细的研究,找到了促进该化合物转化的种种因素如高产细胞系的筛选、葡萄糖和蔗糖的浓度、一些抗氧化剂的加入、怎样获得高细胞密度及培养过程中连续加入前体等。在20升的生物反应器中,转化的熊果甙的产量达9g/L。(4)酯化。一些有机酸与底物分子的羟基反应,形成一些水不溶性化合物,且很容易从培养液中抽提出来,剩下的培养基可以再循环使用。(5)此外,还有一些其他的生物转化反应,如碳碳双键的加氢反应、分子的异构化、环氧化、降解反应以及脱氢等。

植物细胞生物转化有着广阔的前景,但仍有许多问题需要解决,主要是对次级代谢产物的生物合成途径及其酶系统的了解还不够。此外,在细胞培养系统尤其是在多相培养系统中进行生物转化的方法学仍有待改进。值得一提的是,从1981~1991年,固相化植物细胞培养技术有了长足的进展。采用固相化植物细胞培养技术具有许多优点:固相化细胞能抵抗切变力的伤害;培养细胞使用期长,获得生物产量高,从而使底物的转化率提高,便于操作和连续的化学后处理,可有效地降低生产成本。

植物生物转化的目标之一是将廉价的前体转化为有价值的、贵重的植物产品。因此,今后应进行高产专一性细胞株的筛选,以提高生物转化速率。因培养细胞在大体积的生物反应器中完成的转化反应与在小规模培养条件下完成的转化反应尚有差异,因此还必须进行比拟放大以及大体积培养条件下的生物转化的动力学研究。

#### 参考文献

- 1 Kurz W G W, et al. *Advances in Applied Microbiology*. 1979, 25: 209~240
  - 2 Reinhard E, et al. *Advances in Biochemical Engineering*. 1980, 16: 49~83
  - 3 Suga T, et al. *Phytochemistry*. 1990, 29: 2393~2406
  - 4 Kawaguchi K, et al. *Phytochemistry*. 1990, 29: 837~843
- (中国科学院昆明植物研究所周立刚硕士撰;杨崇仁审)

**植物中的钙调素** calmodulin in plant 外界环境对植物生命活动有着广泛而深刻的影响。植物只有有效地适应不断变化的环境才能生存。随着植物中钙调素(calmodulin)的发现,以及 $Ca^{2+}$ 作为第二信使理论的确立,植物如何感受和传递环境变化的信息开始逐步得到解答。植物钙调素的重要性在于它与 $Ca^{2+}$ 结合后可以调节细胞内多种酶的活性和生理过程。 $Ca^{2+}$ 和

钙调素已被确认是植物中偶联外界刺激与细胞生理反应的信使系统。

1978年,安德森(J. M. Anderson)等发现植物中有类似动物钙调素的蛋白因子;1980年,他们纯化了这种因子并通过详细的理化性质比较研究鉴定该因子为植物钙调素。

钙调素是一种酸性的、耐热的、很保守的钙调节蛋白。用SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳法测定植物钙调素的分子量,有 $Ca^{2+}$ 时约15 000 000,无 $Ca^{2+}$ 时则为17 000 000~19 000 000。钙调素分子有4个 $Ca^{2+}$ 结合部位。钙调素与 $Ca^{2+}$ 结合后发生构象变化,形成有活性的 $Ca^{2+}$ -钙调素复合物。该复合物可与一些酶结合并激活它们。各种植物钙调素都能激活牛脑环腺苷酸磷酸二酯酶。植物中受 $Ca^{2+}$ 和钙调素调节的酶有NAD激酶、 $Ca^{2+}$ -ATP酶、 $H^{+}$ -ATP酶、奎尼酸氧化还原酶,以及某些蛋白质激酶。

钙调素对酶的激活作用可被一些药物如茶碱抑制。这些药物作为钙调素拮抗剂可用于探索钙调素参与调节的生理过程。由钙调素拮抗剂了解到钙调素参与调节的植物生理过程有光合作用、植物激素作用、光敏色素有关的生理反应、向重力性生长、呼吸作用、气孔开闭、衰老以及酶分泌等。

细胞中的钙调素分布的研究是探讨钙调素生理功能的基础。1982年,武藤用酶法和放射免疫分析法对小麦叶细胞的测定资料表明,钙调素主要存在于细胞溶质部分(88.0%),少量的钙调素存在于线粒体(7.8%)、叶绿体(3.6%)和微粒体中(0.6%)。1984年,比鲁(R. L. Biro)等发现燕麦黄化苗的细胞核和细胞壁中存在钙调素。1989年,柯林治(M. Collinge)等证明钙调素存在于豌豆细胞质膜中。一般认为钙调素在细胞中的广泛分布是钙调素功能多样性的反映。

$Ca^{2+}$ -钙调素复合物对酶活性的调节,既可通过 $Ca^{2+}$ 水平的变化来进行,也可在 $Ca^{2+}$ 浓度不变情况下通过钙调素水平的变化来进行。因而细胞中钙调素水平的变化是钙调素参与调节细胞功能的一个重要方面。1989年,埃尔南德斯·尼斯塔尔(J. Hernández-Nistal)等指出脱落酸和高温处理能分别降低和提高鹰嘴豆胚轴中的钙调素水平。1989年,耶拿(P. K. Jena)等研究了生长素和光对钙调素基因表达的影响,证明生长素可提高草莓果实中的钙调素mRNA水平,而光照则可提高玉米根中的钙调素mRNA水平。1990年,布拉姆(J. Braam)等发现风吸、雨淋及触碰等刺激均可诱导拟南芥中钙调素基因的表达。可见钙调素在植物感受外界环境变化以及对这些变化作出反应的信息传递过程中具有十分重要的意义。

在植物生长发育及形态建成过程中,钙调素分布和钙调素水平的动态变化可能具有重要意义。1989年,蒂默斯(A. C. J. Timmers)等指出胡萝卜体细胞胚胎发生过程中,在形态上出现极性变化以前已出现活性钙调素的极性分布变化。1991年,科库西(M. Cocucci)等发现在种子萌发早期钙调素水平迅速提高,当种子萌发被光或高温抑制时钙调素的这种增加便不再出现。科库西等认为钙调素在种子萌发过程中具有重要的作用。

在植物钙调素基因研究方面,已经从大麦和马铃薯中分离出钙调素的cDNA克隆,并已完成顺序分析。钙调素的cDNA克隆已被用于研究植物组织中的钙调素mRNA水平。1989年,林格(V. Ling)等发现大麦幼苗的各种组织中均有钙调素mRNA,种子和胚芽鞘与叶和根相比,含有较多的钙调素mRNA。1989年,耶拿(P. K. Jena)等指出马铃薯的各种组织中都可检测出钙调素mRNA,其中葡萄茎顶端钙调素的mRNA含量最高,这表明钙调素在块茎形成中起某种作用。钙调素cDNA作为探针,将被广泛地用于钙调素基因表达的研究中。

对于钙调素这种无酶活性的蛋白质,拮抗剂试验、酶激活分析法和免疫测定法是探索钙调素生理功能的重要方法。

钙调素拮抗剂已被广泛地用于研究植物中钙调素的作用。不过,钙调素拮抗剂除了能够以依赖钙离子方式同钙调素结合

外,它们还能同其他一些生物分子发生作用并进而影响到细胞功能。因此,在拮抗剂试验中应尽可能采用低拮抗剂浓度以削弱其非特异效应。为了确认钙调素拮抗剂的特异性效应,还应该用对钙调素缺乏抑制作用的拮抗剂类似物作为阴性对照。总之,由拮抗剂试验得到的结果一般是较为初步的,有待于生化方面的研究来进一步确定。

根据钙调素能够激活一些酶的活性,通过测定某一特定酶(例如NAD激酶)的激活活性,便可以确定植物组织中有无钙调素以及钙调素含量的多少。这种研究钙调素的方法被称为酶激活分析法。该方法测出的是活性钙调素。植物中常有一些抑制钙调素激活酶活性的抑制因子或钙调素结合蛋白,它们的存在会导致酶激活分析法的测定值偏低。

免疫测定法是以钙调素抗体为探针研究钙调素的分布、水平和功能的方法。虽然钙调素是一种高度保守的蛋白质,但不同来源钙调素的抗体对不同来源钙调素的亲和力仍是有差异的。对于植物钙调素,植物钙调素抗体的亲和力要大于动物钙调素抗体的亲和力。因此,研究植物钙调素应尽可能使用植物钙调素抗体。钙调素抗体的专一性在免疫测定法中是至关重要的。1991年,雅布伦斯基(P. P. Jablonsky)等研制成功植物钙调素单克隆抗体。由于单克隆抗体比多克隆抗体的专一性更强,植物钙调素单克隆抗体将成为阐明植物钙调素生理功能的有力工具。

钙调素偶联外界刺激与细胞生理反应是通过与细胞中的多种效应分子相互作用来完成的。这些效应分子包括钙调素调节的酶以及钙调素结合蛋白等。进一步的工作将会鉴定出植物中新的受钙调素调节的酶。依赖钙调素的一类蛋白质激酶通过磷酸化其底物蛋白可调节多种细胞功能。因此,纯化钙调素调节的蛋白质激酶和其作用的底物进而阐明这些底物的功能将是植物钙调素研究中的一个活跃领域。识别、鉴定植物钙调素结合蛋白方面的工作亦可望全面展开。在植物中构建钙调素突变系统,结合基因转移技术,将使植物钙调素功能研究跃上新台阶。

参考文献

- 1 Piazza G J. Calcium Binding Proteins, 1988, 127~143
- 2 Jena P K, et al. Proc Natl Acad Sci USA, 1989, 86: 3644~3648
- 3 Ling V, et al. Plant Physiol, 1989, 90: 711~719
- 4 Braam J, et al. Cell, 1990, 60: 357~364
- 5 Cocucci M, et al. Physiol Plant, 1991, 82: 143~149
- 6 Jablonsky P P, et al. Plant Sci, 1991, 76: 175~184
- 7 李家旭,等. 植物学报, 1992, 34: 257~263

(河北师范大学李家旭撰)

植物铁素营养 iron nutrition in plants

植物因缺铁而发生黄叶病的现象十分普遍。潜在性植物缺铁的土壤占世界上面积的25%~40%,且分布范围极广。因此,研究铁的生理功能和吸收机制,探讨如何提高根际土壤中铁的有效性是很重要的课题。

1843年,Griseb最早证明了石灰引起失绿现象是由于植物缺铁造成的。铁在植物体内的生理作用是多方面的。首先,铁与叶绿素合成和叶绿体结构的完整性有关。当植物缺铁时,叶绿素合成受阻,叶绿体膜、叶绿素-蛋白质复合体、类胡萝卜素、反应中心及其相联系的电子载体等一系列捕光器的合成也受到影响;叶绿体片层减少,片层垛叠结构消失,基粒少而小甚至消失。其次,由于铁具有易形成螯合物和价数变动的特性,在植物体内以各种形态与核酸和蛋白质(酶)结合,作为重要的电子传递体或催化剂,参与氧化还原反应和植物体内激素水平的调节过程,对植物的光合、呼吸、固氮等生命活动产生深刻的影响。另外,铁还参与核酸和蛋白质的合成。

植物从土壤中吸收的铁元素只有很少一部分是依靠质流。过去认为一种可能的机理是根与土壤含铁氧化物接触,通过降低pH值或降低氧化还原电位,或者两者兼有形成对铁吸收有利的

微域环境。

20世纪80年代以来,本学科的研究重点已转向植物种类和品种根系特性。1985年,Bienfait提出的植物体内存在着两套铁利用系统的假说,即基本系统和诱导系统。基本铁还原系统存在于单子叶植物的和双子叶植物细胞的质膜上,而且倾向于还原离子态Fe<sup>3+</sup>(如铁氰酸盐)而不是络合态的Fe<sup>3+</sup>,其活性不受植物铁营养状况的影响。诱导系统局限于根表皮层细胞质膜上,且被铁胁迫所活化。

Römhold和Marschner(1986)根据处于缺铁胁迫下植物因种类和品种差异所作出的不同反应,提出双子叶植物和非禾谷类单子叶植物的特异吸收机理模式(Strategy I)和禾谷类植物分泌植物铁载体的特异铁吸收系统(Strategy II)。

双子叶植物和部分单子叶植物在受到缺铁胁迫时,表现为形态和生理生化反应的适应性变化。首先,根系生长减慢,侧根丛生,根尖端区增粗,并有大量根毛产生。在根段增粗区表皮层细胞和根毛中都有相当数量的转移细胞,这里将成为质子分泌和铁还原作用的中心部位。其次,根尖端区质子分泌能力增强。缺铁时,质子分泌作用可能由质膜上的ATP酶所驱动的。K<sup>+</sup>影响这一过程。最后,缺铁植株根表面的铁还原作用有显著提高。介质中的Fe<sup>3+</sup>到达根表面后必须首先还原成Fe<sup>2+</sup>才能被双子叶植物吸收。处于缺铁胁迫下的植物可释放出一些还原性物质,如番茄分泌咖啡酸,烟草分泌核黄素,在一定条件下可将Fe<sup>3+</sup>还原成Fe<sup>2+</sup>,释放出H<sup>+</sup>,从而酸化根际环境。但是,有试验资料表明,缺铁时分泌的还原性物质对Fe<sup>3+</sup>的还原量只占植物根系总还原量的10%。推测根系释放的还原性物质可能主要起着络合剂的作用,与土壤中的Fe<sup>3+</sup>形成络合物从而增加可溶态铁浓度。另一部分Fe<sup>3+</sup>则主要由位于根尖端区表皮层细胞质膜上的铁还原酶还原成Fe<sup>2+</sup>,再经输送蛋白进入细胞。铁还原酶是一种诱导酶,缺铁胁迫时该酶活性迅速增强。还原反应的最适H<sup>+</sup>浓度10<sup>-5</sup>~10<sup>-4</sup>mol/L,低于3.16×10<sup>-8</sup>mol/L时还原酶的活性完全受抑制。且此酶还倾向于还原络合态Fe<sup>3+</sup>,与基本铁还原系统截然不同。因此,缺铁胁迫下植物根系的质子分泌过程能促进铁还原酶活性和还原性物质与Fe<sup>3+</sup>的络合,介质的酸化还能促进还原性物质从根内释放。还原剂与Fe<sup>3+</sup>络合后可提高根际土壤中络合态铁浓度,它们到达根系表面又被质膜上的铁还原酶还原成Fe<sup>2+</sup>进入细胞。所以,缺铁胁迫下分泌还原性物质和铁还原酶在根系铁还原过程中的作用是相互补充的。此外,Landsberg(1986)报道了缺铁植物根尖端区有苹果酸和柠檬酸的积累,它们或者作为络合剂参与Fe<sup>3+</sup>的还原过程,或者通过影响异柠檬酸(或苹果酸)脱氢酶活性来提高铁还原酶的电子供体NAD(P)H的水平,进而提高Fe<sup>3+</sup>的还原能力。

禾谷类植物同上述植物有所不同,根际铁有效性机理有其特殊性。这类植物根部能分泌出类似麦根酸的一些对Fe<sup>3+</sup>有很高亲和力的化合物,统称为植物铁载体。当处于缺铁胁迫下,很多禾谷类植物都能分泌植物铁载体,而且它的分泌在时间上呈现明显的昼夜节律。一旦缺铁胁迫解除,其分泌量则减少。植物铁载体的分泌与植物的耐铁贫瘠能力成正相关。植物铁载体与介质中的Fe<sup>3+</sup>络合,将Fe(OH)<sub>3</sub>凝胶溶解。这种络合溶解能力不受介质pH值影响,Ca<sup>2+</sup>的影响也很小,这同EDTA或DTPA与Fe<sup>3+</sup>的络合作用有显著差异。在碱性的CaCO<sub>3</sub>体系中,后者对Fe(OH)<sub>3</sub>的溶解能力显著下降。因此,在石灰性土壤上植物铁载体比EDTA或DTPA可提取更多的Fe<sup>3+</sup>。植物铁载体Fe<sup>3+</sup>的络合物可被禾谷类植物根尖端直接吸收,无需经过Fe<sup>3+</sup>还原成Fe<sup>2+</sup>的过程。大麦吸收植物铁载体铁络合物比吸收Fe-EDTA或Fe-DTPA等人工合成的络合态铁或微生物铁载体——铁络合物要容易。虽然Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>对植物铁载体Fe<sup>3+</sup>的络合有干扰,但禾谷类植物只吸收植物铁载体—Fe<sup>3+</sup>络合物,具有很强的选择性。这一吸收过程受低温和代谢抑制剂影响,而H<sup>+</sup>浓度和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的抑制效果不大,是一种耗能的主动吸收过程。此外,在禾谷类植物根部细胞内也出现有机酸的累积,但不能导致介质

酸化。

植物的铁素营养,除了依靠植物本身对 Fe 的吸收能力外,与土壤铁的有效性密切相关。土壤的 H<sup>+</sup> 浓度和氧化还原电位能显著改变铁对植物的有效性。H<sup>+</sup> 浓度高时(酸性土壤),沉积铁的溶解度提高,可改善土壤的供铁状况;H<sup>+</sup> 浓度低时(中性或碱性土壤),铁的溶解度很小。K<sup>+</sup> 能矫正花生叶片的缺铁失绿症状,而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 使 H<sup>+</sup> 浓度降低, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 则能升高根际土壤 H<sup>+</sup> 浓度。土壤中存在有机酸通过络合作用可显著提高土壤中可溶态铁的含量。土壤微生物的活动,影响根际土壤的 H<sup>+</sup> 浓度和氧化还原电位,促进 Fe<sup>3+</sup> 的还原和吸收。已知土壤中某些真菌或细菌可分泌能与 Fe<sup>3+</sup> 配位形成稳定螯合物的一些复杂有机物(称为铁载体),如 ferrioxamine B(Fe<sup>3+</sup>-DFOB), rhodotorulic acid(Fe<sup>3+</sup>-RA)。这类铁载体能促进铁在土壤中的扩散和移动。就燕麦而言,DFOB 比 EDTA 更有效。Fe<sup>3+</sup>-RA 能使离体蚕豆叶片恢复绿色,而 Fe<sup>3+</sup>-EDTA 则不能。Agrobacterium 能使处于缺铁胁迫下的双子叶植物和单子叶植物吸收更多的铁和合成叶绿素。当然,并非所有的微生物铁载体都促进植物对铁的吸收,如 Pseudobacterium 就抑制高等植物对铁的吸收。此外,Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup> 等微量元素也对此有影响。

植物因种类和品种的不同,对根际铁的有效性有很大差异。选育耐铁贫瘠能力强的品种,培育铁高效型植物基因型品种使之适应石灰性土壤,才是控制缺铁胁迫的最有效方法。在钙质土壤上栽培柑桔和葡萄,还可将果子品质好的接穗嫁接到铁高效型的砧木上。在农业生产实践中,可以将铁高效型植物和铁低效型植物轮作、间作或套种,以提高土壤铁的有效性。除此之外,铁肥的合成和应用将缓解缺铁现象的加剧,叶面喷施铁肥(螯合态铁)效果更佳。

研究植物利用土壤中铁的机理已取得很大进展,特别是该领域的热点——植物铁载体方面的研究有新的突破。但麦根酸类物质在植物体内的合成途径,以及禾谷类植物对铁——植物铁载体具有很强选择性的特殊铁吸收系统尚待进一步研究。双子叶植物和某些单子叶植物在受到缺铁胁迫时诱导出铁还原酶,其组成和结构以及调控因子尚不清楚。在缺铁胁迫下根系形态变化、质子的分泌与体内激素水平的关系方面还有待澄清。选育铁高效型植物品种,开发在石灰性土壤上肥效高且持久及经济合理的铁元素肥料是急待解决的问题。

#### 参考文献

- 1 Brown J C. *PL Cell Environ*, 1978, 1: 249~257
- 2 Olsen R A, et al. *Jpl Nutri*, 1980, 2: 647~660
- 3 Landsberg E C. *J Pl Nutri*, 1982, 3: 579~591
- 4 Romheld V, et al. *Pl Physiol*, 1983, 71: 949~954
- 5 Bienfait H F. *J Bioenerg Biomembr*, 1985, 17: 73~83
- 6 Landsberg E C. *Pl Physiol*, 1986, 82: 511~517
- 7 Neilands J B, et al. *Ann Rev Pl Physiol*, 1986, 27: 187~208
- 8 Romheld V, et al. *Adv Pl Nutri*, 1986, 2: 155~204
- 9 施卫明,等. *植物生理学能讯*, 1990, 2: 1~7
- 10 Rosenfield, et al. *L Pl Physiol*, 1991, 95: 1120~1124

(安徽师范大学谷雨萍硕士撰)

#### 韧皮部装载和卸载

phloem loading and unloading  
溶质通过韧皮部的运输包括溶质向筛分子的转移、筛分子装载、沿筛分子的溶质运输和韧皮部卸载四个步骤。韧皮部装载和卸载主要研究高等植物体中有机溶质在源端装入筛分子和在库中卸出的过程、途径和机理。装载和卸载控制着物质运输的方向、运输量和分配方式,从而协调整体植株生长发育。

植物体中有机溶质装载的研究最早始于 1956 年齐格勒(H. Ziegler)对蜜蜂腺组织中磷酸酯酶活性的观察。然而后来的研究主要受到动物方面研究的启发。1965 年,克雷恩(R. K. Crane)报道总结了肠壁细胞和其它动物组织中糖和氨基酸与钠离子的协同转运,钠离子泵对 ATP 酶专一抑制剂苦毒毛茛花子苷敏感。

1970 年,韦斯特(L. C. West)发现大肠杆菌对乳糖的吸收与质子吸收相偶联,并在化学量上呈 1:1 的关系。这些成果促进了对质子—糖协同转运在细菌、真菌和单细胞藻类中情况的广泛研究。1977 年以来,许多实验室以高等植物为材料,获得大量的实验证据,使人们对高等植物韧皮部中有溶质跨膜转运的一般理解进入分子水平。

从叶肉细胞到韧皮部,胞间连丝急剧减少,而且叶肉细胞中糖的浓度比筛分子低 1/2~2/3。糖向筛分子的转运主要通过质外体来进行。显然,装载是一个跨膜的转运过程,它所需要的能量来自筛分子中质子跨膜转运所产生的电化学势梯度,后者则依赖于膜上的质子泵。1970 年,希金博特姆(N. Higinbotham)等提出高等植物中存在电致质子泵的证据。用一氧化碳和氰化物抑制电致泵时,膜发生去极化作用。1975 年,琼斯(M. G. K. Jones)等人观察到在 H<sup>+</sup> 浓度 3.16 × 10<sup>-6</sup> mol/L 向介质中加入葡萄糖,线虫诱导的凤仙花巨大根细胞的膜电位上升约 30~100mV。蔗糖试验也表现出类似的膜去极化作用。而糖转运后膜电势的恢复速度则依赖于更低的介质 H<sup>+</sup> 浓度。另一方面,哈钦斯(V. M. Hutchings)1978 年发现离体蕈麻子叶细胞吸收蔗糖后,介质 H<sup>+</sup> 浓度降低。但糖与质子转运的比值不等于 1。哈钦斯认为组织中可能存在着非质子推动的蔗糖载体或质子再循环。同时,质子外流与钾离子内流相偶联,其比值为 1,这表明在钾离子与质子间存在某种电偶联的或载体调节的交换作用。1977 年科默(E. Komor)等进一步证实,蕈麻子叶主动吸收蔗糖时,组织呼吸速率增高,且其周围介质 H<sup>+</sup> 浓度发生瞬时降低,并产生短暂的质子内流。此外,高钾离子浓度(100mM)导致膜去极化,也强烈地抑制对蔗糖的吸收。与此同时,拉库逊(R. H. Racusen)等发现离体雨树叶细胞在外源蔗糖刺激下膜电势发生有节奏的变化。蔗糖诱导的膜去极化发生时,介质 H<sup>+</sup> 浓度值下降。1978 年,吕特杰(U. Lüttge)等在研究浮萍叶中葡萄糖主动运转时也获得了类似的结果。这些研究资料表明高等植物体内存在着质子—有机溶质的协同转运。

韧皮部中有机溶质的装载受到外源 ATP 的促进和呼吸抑制剂的抑制,因而被认为是依赖于能量消耗的主动转运过程。1973 年,吉尔德(J. Gilder)等人运用酶的细胞化学定位和电镜技术观察到南瓜筛分子质膜表面显著的 ATP 酶活性,并为其它试验资料所证实。1977 年,贾昆塔(R. T. Giaquinta)发现甜菜韧皮部对蔗糖的吸收依赖于介质 H<sup>+</sup> 浓度。马利克(F. Malek)等在蕈麻中也获得同样的结果,并认为装载过程受钾离子促进,为解偶联剂 CCCP 强烈抑制。质子外流引起蕈麻中空叶柄中的灌注介质 H<sup>+</sup> 浓度上升。但在灌注介质中加入糖或 CCCP 后,明显可见其 H<sup>+</sup> 浓度下降,而且当 H<sup>+</sup> 浓度陡度逆转时,葡萄糖外流,这意味着膜束缚的质子泵 ATP 酶向膜外排出质子并在膜两侧建立起电化学势梯度,作为对电化学势梯度的应答,质子将重新进入膜内侧,与此同时糖协同转运完成装载过程。至于钾离子的内流,可能是由于质子外流或电致质子/钾离子反向转运所致。无疑,钾离子的转运方向与糖和阴离子的转运方向相同。但麦克罗比(E. A. C. MacRobbie)1971 年就曾经指出,韧皮部液流中糖与钾离子的比值在 3~27 之间,因而电化学势梯度将主要贡献于糖向膜内侧的装载。尽管已有相当多的生理学的和生物化学的证据支持韧皮部装载遵循质子—糖协同转运机理,但筛分子质膜上质子—糖载体的生化性质和作为质子泵的膜束缚的 ATP 酶的特性仍有待确定和深入研究。

1977 年,马利克曾在蕈麻子叶中观察到,当 pH 值逆转时葡萄糖和果糖的转运方向改变,但在代谢库中有机溶质的卸载仍不可能通过质子梯度的逆转来实现。库中往往具有高水平的生长素浓度,它刺激质子外流而不是内流。1980 年,盖格(D. R. Geiger)等人提出韧皮部卸载可能以一种简单的被动扩散方式进行。从理论上讲,韧皮系统膜透性的局部增大或者在韧皮系统外维持一个低的可扩散溶质浓度是可能的。在低等植物中已经观察到有机溶质的被动渗透和再吸收。1978 年,海泽(W. Heyser)等人证实,在

玉米叶片的自由空间,韧皮部维持着稳定的蔗糖浓度,任何代谢性消耗或转化酶的水解作用都可能导致蔗糖在消耗部位的连续渗漏。

然而,在不同的植物体中存在着各种各样的代谢库。1985年,索恩(J. H. Thorne)提出至少有几种机制和结构特化调节着韧皮部卸载。1983年,贾昆塔等人、1985年高格勒—施马尔施蒂格(J. Gougler—Schmalstig)等相继提出在甜菜幼小的叶片和玉米根尖的卸载直接经共质体途径来完成。从能量学的角度出发,它优于质外体途径,但在甘蔗茎和玉米种子韧皮部筛分子壁中存在着高活性转化酶。1972年,格拉斯柴斯(K. T. Glasziou)等指出甘蔗中糖的卸载包括蔗糖从筛分子中卸载,在壁中水解、已糖在贮藏细胞中的积累以及在液泡中蔗糖的再合成等4个步骤。1983年,美国、荷兰、澳大利亚学者开始利用空种皮技术研究豆科植物的韧皮部卸载。1985年,索恩提出卸载部位包括由筛分子、伴胞和各种韧皮薄壁细胞的质膜构成的联合体系。蔗糖经筛分子质膜表面的载体转运至自由空间并进入薄壁细胞,最后经液泡膜载体转运至液泡中。从动力学曲线来看,手术后空种皮中的蔗糖迅速外流至介质中,在大约120~150min后蔗糖外流趋于稳定。帕特里克(J. W. Patrick)和斯库斯勒(J. R. Schussler)等人分别于1982年和1984年讨论过光敏色素在韧皮部卸载中的作用。但是,吉福德(R. M. Gifford)指出,尽管已经观察到光敏色素对稳态卸载的适度影响,但仍缺乏韧皮部细胞功能受光敏色素调节的直接证据。

卸载过程的深入研究展示出不同植物的不同代谢库可能采取不同的卸载方式,但是排除筛分子质膜的调节作用来看待韧皮部卸载仍有商榷的余地。更好的研究系统和研究方法的探索将为这一领域提供新的知识。

参考文献

- 1 Highinbotham N, et al. J Membr. Biol. 1970, 3: 210
- 2 Giaquinta R T. Plant Physiol. 1977, 59: 750
- 3 Komor E, et al. Plant Sci Lett. 1977, 9: 153
- 4 Baker D A. New Phytol. 1978, 81: 485
- 5 Hutchings V M. Planta 1978, 138: 229
- 6 Komor E. Phloem loading and unloading. in Progress in Botany. 1983, 68~75
- 7 Thorne J H. Sieve tube unloading. in Phloem Transport New York, Alan R Liss Inc 1st ed. New York, Heidelberg Berlin, Tokyo, Springer-Verlag, 1983. 211~224

(吉林大学杨雄硕士撰)

生长延缓剂 growth retardant

生长延缓剂是指那些专门抑制植物顶端下部区域(亚顶端分生组织区)的细胞分裂与伸长的化合物。它们能使植物的节间缩短,植株变矮,但叶片数目、节的多少和顶端优势相对不受影响,它们是使节间伸长的赤霉素的拮抗物。主要包括四大类:一是甾类化合物,以矮壮素(CCC)和缩节胺(DPC)等为代表;二是含氮杂环化合物,现在研究发现的有吡啶、嘧啶、三唑、咪唑和降冰片二氮杂环丁烯等5种类型,研究较多的有多效唑、特效烯、抗倒胺等;三是环己烷三酮,以cimetacarb和LAB198999等为代表;四是赤霉素运输的阻抑制剂,仅有比久。当今农业生产上应用的植物生长调节剂主要是生长延缓剂,如矮壮素、比久、缩节胺、多效唑和抗倒胺等,应用价值较大,对提高农产品的质和质量起到不可忽视的作用。

矮化作用是生长延缓剂的基本生物学效应。1949年,米切尔(Mitchell)等首先发现 nicotinium 化合物中某些物质可以使菜豆茎的生长减慢,其中效力最高的化合物是2,4-DNC。用1%的药液处理,使幼嫩植物的第一节间比对照缩短1/4。其后,科学家们相继报道季铵盐、磷化合物和福斯方等具有矮化效应。1960年,托伯特(Tolbert)发现一组新的季铵盐化合物,以矮壮素为代表,可使多种植物的节间缩短、变粗,与赤霉素的作用相反。1962年,里德尔(Riddle)等发现新的化合物比久,不但使株高生长受

到抑制,而且使花期推迟1~2a。利弗(Lever)等(1982)报道三唑类化合物多效唑是一个广谱性的药剂,对多种植物具有矮化效果。70年代末和80年代初,BASF公司报道缩节胺和特效烯等一系列药剂具有矮化增高作用,具有较高的应用价值。

生理生化效应的研究是应用生长延缓剂的基础。生长延缓剂均使植物体内赤霉素的含量降低,外用赤霉素可使延缓效应逆转。内源赤霉素含量的降低是由于生长延缓剂抑制内源赤霉素的合成和运输。甾类化合物主要阻止赤霉素合成中从牻牛儿苗基牻牛儿苗基磷酸形成贝壳杉烯的闭环过程。含氮杂环化合物抑制从贝壳杉烯生成贝壳杉烯酸的3个氧化过程。环己烷三酮可阻抑从赤霉醛氧化生成GA<sub>3</sub>的5个反应步骤。比久可阻抑赤霉素或赤霉素的前体物质向生理活性部位的运输,同时还促进赤霉素的分解代谢和结合失活。众多研究资料表明,一些生长延缓剂不仅使内源赤霉素含量减少,而且也影响植物体内的细胞分裂素、乙烯和脱落酸。在绝大多数情况下,对内源生长素的影响相对较小,但是药剂之间和物种之间也存在着一些差异。尤康唑处理豌豆植株使生长素含量降低。多效唑处理水稻幼苗,使体内生长素含量减少52.5%,是由于多效唑促进了IAA氧化酶的活性。多数生长延缓剂使乙烯释放量降低。特效烯阻抑植物体内乙烯合成,使大麦、油菜、向日葵的乙烯释放量减少。而多效唑可增加水稻幼苗的乙烯释放量。特效烯处理大豆幼苗、尤康唑处理水稻幼苗和缩节胺处理棉桃均使植株体内细胞分裂素含量及活性增加。三唑类化合物处理植株可导致豆类、油菜、大麦体内脱落酸含量增加,缩节胺处理棉花,使棉铃中脱落酸含量大大高于对照;特效烯处理苍耳的离体叶片,可阻止脱落酸氧化生成无活性的菜豆酸。由甾类化合物引起的生长延缓现象不仅可用赤霉素逆转,而且可用不同的植物甾醇逆转。甾类化合物中的矮壮素和AMO-1618抑制烟草等作物中甾醇和类萜的生物合成。含氮杂环化合物有类似的作用。在真菌麦角甾醇合成过程中,它们阻止14α-脱甲基氧化过程。生长延缓剂具有降低蒸腾的效应。利用发育不完全的离体大麦叶片研究表明,特效烯、矮壮素、HOEO74784和粉锈宁减少水分蒸腾,只有对照的48%~92%。BAS111...W和啉啉醇则对大麦的水分蒸腾无影响。但BAS111...W可明显降低离体油菜叶片的水分蒸腾。生长延缓剂可提高植物的抗逆能力。用福斯方和矮壮素处理过的植物,会明显对缺水、霜冻、盐害、干旱和低温等方面的危害产生抗性。多效唑可以改善黄瓜、水稻和大麦的抗低温能力。特效烯可提高燕麦、小黑麦、水稻幼苗和小麦后期植株的抗寒力, BAS111...W对油菜幼苗有效。特效烯、多效唑、粉锈宁、flurprimidol和尤康唑处理植株,可显著提高抗旱力。处理植株抗逆力的提高,是生长延缓剂改变了体内激素平衡,提高了ABA、GA,启动了抗逆基因,导致一系列抗逆生理生化过程的发生,使生理形态指标发生改变,诸如细胞内含糖量、渗透浓度、可溶性蛋白质和脯氨酸及叶片光合速率的增大,气孔变小,叶绿素含量提高等。

研究资料表明,在禾谷类作物拔节初期施用生长延缓剂均可使植株显著降低,基部节间变短变粗,茎壁厚度增加,茎壁纤维素和木质素含量增多,机械组织发达,而对穗下节间影响较小。但也有报道多效唑既可缩短大麦茎秆基部节间,又可增长穗下节间,有利大穗的形成。作物的不同、品种的差异和环境的改变均会导致矮化效应的变化。倒伏是制约禾谷作物高产的关键因素之一,利用生长延缓剂的矮化效应,可以大大减轻高氮和不利自然条件造成的倒伏危害。矮壮素和缩节胺的应用已成为很多地区禾谷类作物生产中的有机组成部分。三唑类化合物如多效唑、尤康唑和抗倒胺等已在禾谷作物中表现出较好的降低防倒效果,具有诱人的应用前景。促蘖促根,培育壮苗,用生长延缓剂浸种或在苗期叶面喷施,可使小麦、小黑麦、水稻等的幼苗叶片、叶鞘变短,苗高降低,分蘖发生早而多,根系重量增加,根冠比增大。多效唑和特效烯对水稻、小黑麦和小麦等有较好的矮化促蘖促根效应。水稻一叶一心期喷施多效唑解决了水稻老苗弱苗独苗的问题,已成为中国水稻大面积生产的重要增产措施之一。特效烯浸

种有利培育多穗矮壮秧和水稻机械栽插。苗期喷施多效唑有利于防止油菜高脚苗,并已成为油菜大面积生产中推广的增产措施。过旺的营养生长是无限花序植物的花、果实脱落的重要原因。利用生长延缓剂在一定时期处理植株,可有效地控制营养生长,减少营养器官对光合产物的竞争,使光合产物向生殖器官运输,减少花和幼果的脱落。蕾花期喷施缩节胺对棉花有很好的矮化效果,能有效控制过旺的营养生长,提高单株结铃数和铃重。叶面喷施 Triphenol, BAS111...W 可使油菜株高降低,分枝部位降低,分枝变短,冠层结构有利于光的截获,角果脱落减少。叶面喷施多效唑对大豆也具有类似效果,株高降低,分枝缩短,花荚脱落减少。开花期一次高剂量喷施比久使蚕豆株高降低,同化物向果荚分配的比例大大提高,单株结荚数显著增多。多效唑可控制苹果、柑桔、梨、杏、樱桃和胡桃等果树的营养生长,促进枝条发育,提高坐果率,增加产量。

生长延缓剂的效果大小受到多种因素包括物种、品种、栽培措施、气候因素和药剂本身及其浓度的影响,因而带来药效的变化和重演性较差。因对矮壮素反应的不同,人们把小麦品种对矮壮素的敏感性分为敏感、中等和迟钝3类。多效唑在日均温20~30℃范围内对水稻幼苗的控长率大于日均温低于10℃的控长率。矮壮素在高氮条件下对小麦有更好的降高防倒的增产效果。药剂效果与药剂本身及其浓度密切相关。一般浓度越高,药效期越长;药剂效果与药剂浓度多呈二次曲线( $Y = a \pm bx \mp cx^2$ )的关系。

生长延缓剂对农业生产有着不可低估的贡献,未来仍将具有广阔的应用前景。今后的研究方向仍然是基础研究和应用研究相结合。重点研究新型生长延缓剂的生理形态效应和已有生长延缓剂的新的生理形态效应,并结合植物生产实际,运用生长延缓剂的某些效应解决制约产品质量和量的问题,诸如运用三唑类化合物防止麦类作物倒伏和早衰的技术及运用生长延缓剂提高逆境条件下植物的抗逆性等,均值得深入研究。生长延缓剂的基础研究还很薄弱,应该进一步加强。植物对生长延缓剂的吸收、运转,体内作用部位、受体和位点;对内源激素的作用机理及其相互关系;提高植物抗逆性的机理;环境变化导致药效改变的机理和在植物体内及土壤中的残留残毒等方面均是基础研究的活跃领域。药剂浓度与药效的关系和最佳使用浓度范围及其与环境因素(特别是温度和氮肥)的相互作用是应用生长延缓剂的基础。上述各方面研究的突破有利于学科的发展和生长延缓剂在农业生产中应用,必将为农业生产的发展作出新的更大的贡献。

#### 参考文献

- 1 Graee J E. *Ann Rev Plant Physiol.*, 1987, 38: 419
- 2 王熹,等. *作物学报*, 1988, 14(2): 89~95
- 3 张远海,等. *植物生理学报*, 1988, 14(4): 338~343
- 4 Yang W Y. *Plant Growth Regulation*, 1988, 7: 289~301
- 5 Rademacher W. *Acta Horti*, 1988, 239: 477
- 6 王熹,等. *作物学报*, 1990, 16(1): 91~95
- 7 何钟佩,等. *作物学报*, 1990, 16(3): 252~258
- 8 Rademacher W. *Plant Biochemical Regulators*, Marcel Dekker, Inc., New York: 1991, 169~199

(四川农业大学杨文钰副教授撰;李尧权审)

### 光周期与植物的雄性不育

photoperiod and male sterility in plants 植物的雄性不育是杂种优势利用的基础。国际上玉米、小麦等作物三系的配套及中国三系杂交水稻的成功,证明雄性不育的重要意义和应用价值。湖北光周期敏感核不育水稻(PGMR)是国内外仅见的水稻种质资源(农垦58s)。光周期诱导水稻雄性不育是独特而罕见的遗传现象,水稻光敏感核不育基因的发现和研究,不仅在植物光周期理论、植物发育生理学和植物遗传学理论方面有着特殊意义,更重要的还在于它拓宽了作物育种途径、方法和杂种优势的应用范围,并对水稻生产有巨大的实践意义,同时也是研究光周期诱导雄性不育机理和光周期调

控基因表达的典型材料。

1920年, Garner 和 Allard 首先在烟草(*Nicotiana tabacum* CV)中发现昼夜的相对长短可决定植物的开花及其它许多反应,并明确提出光周期和光周期现象的概念。随后,许多学者相继发现植物对光周期的反应多种多样,除了涉及到植物的营养生长、花原基形成外,还能影响花器官的发育包括花粉的育性等。也就是说,光周期不仅能诱导和调节开花,而且能控制性别表达。1937年, Eghi 根据植物生殖器官诱导和植物发育对日照长度需求的先后顺序,将植物划分为4种类型,即短日植物、长日植物、短长日植物和长短日植物。1985年, Kneit 进一步将植物开花诱导与花器官发育对光周期的需求分为5种类型:诱导和发育需同一种光周期;诱导为光周期所控制而发育为日中性;诱导为日中性而发育受光周期控制;诱导与发育需不同光周期;诱导与发育均为日中性。上述 PGMR 即属于第一种类型的;诱导和发育均需同一种短日光周期。印度学者 Kaul(1988)在《高等植物的雄性不育》一书中对约300篇文献的分析后指出:出现雄性不育(mst)的植物分布于43科、162属的植物及其杂种中。经过试验的41种雄性不育植物中,对环境敏感的约占70%,其中约50%对温度敏感,13%对光周期敏感。由此可见,光周期诱导的雄性不育现象存在于高等植物中,并占有一定比例。

1938年, Neidle 在研究苍耳(*Xanthium Pennsylvanicum*)的氮素营养与光周期现象的关系时,曾发现其小孢子发生过程受LD的影响,产孢子组织体积减小一半,花粉育性由95%降到29%。但到1942年 Nielson 才在大豆(*Biloxi Soya bean*)中首次明确提出光周期能够影响其小孢子发生过程,即光周期所引起的雄性花粉败育现象。随后, Madsen (1947)在 *Cosmos Sulphureus* (CV)中, Knox 和 Heslop-Harrison (1966)在毛茛双花草(*Dichanthium aristatum*)中, G. Moss 和 Heslop-Harrison (1968)在玉米(*Zea mays*)中, Fisher (1972)在小麦(*Triticum aestivum* L.)中相继发现光周期诱导植物雄性不育现象, Knox 等(1966)发现毛茛双花草在生长135d以后,经SD处理40d,首先形成的花序至少是部分的雄性可育,完全的雄性可育只有在40dSD之后又加60~70d的LD条件才能获得;从135d以后连续的SD处理,花序差不多都是败育的。他们对诱导花粉败育的细胞学基础研究,揭示了4条途径。这些途径的差别表现在偏离正常发育的时间及最终结局的类型方面。在所确认的4条途径中,异常的最初迹象都见于绒毡层。因此,日长诱导的败育一定是绒毡层功能失常的结果。

有关光周期控制植物雄性器官育性机理研究的报道不多。早期工作主要集中在花药败育途径的细胞学研究、植物激素和营养物质的研究。研究资料表明,叶片中内源激素的含量受日照长度的影响,而内源激素如生长素、赤霉素、细胞分裂素等的平衡改变即可影响花药的发育模式(Vince-Prue 1975)。其它方面的研究较少。

直到1973年,石明松在湖北仙桃晚粳农垦58(*Oryza sativa* Subsp. *Japonica*)大田中发现光敏感核不育水稻以来,有关 PGMR 的细胞学、遗传学、生理生化、光温生态、遗传育种及分子生物学等方面的研究工作才得以全面展开,而且在湖北省科学技术委员会、湖北省农牧业厅、农业部、国家自然科学基金、863计划等单位项目的资助下,取得了可喜的进展,转育和选育了一批新的光(温)敏核不育系,初步实现了两系配套,并选配了一批新组合,有些组合已进入生产试验和示范阶段。这一成果在世界尚属首创。最近,美国农业部的有关人员也报道了类似的材料,称为性别转换水稻(Sex-switching rice)。他们发现这种水稻在夏威夷12h日照下表现为正常可育,在加利福尼亚15h长日照下为雄性不育, J. N. Rutger (1990)称之为光敏雄性不育现象。但他们的研究尚处在对新材料的认识阶段。

近20年来对 PGMR 农垦58s 的研究资料表明:农垦58s 在生长发育过程中存在着两个光周期反应(元生朝等1987),在24~30℃温度范围内,其花粉育性严格受光周期所控制,长日照下



不育,短日照下可育,并且表现出明显的光温互补效应(张自国等,1992)。育性转换的光周期敏感期在2次枝梗及颖花原基分化期到花粉母细胞形成期(刘文芳等,1987)。光敏不育特性由核内1~2对主效隐性基因控制,并受弱效(微效)基因修饰(朱英国等,1992)。初步探明光敏色素作为光周期信号的受体(李合生等,1990,1991),Ca<sup>2+</sup>-CaM作为第2信使,都参与农垦58s育性的调节(于青等,1992)。叶片蛋白质在不同光周期条件下58s和58存在着遗传背景的差异(王台等,1992;肖翊华等,1993)。58s及其转育的PGMR叶片中稳定存在MW60kD蛋白质,另有MW35kD蛋白质对光周期反应比较敏感;在育性转换的光敏期,有一个MW56600的叶蛋白,只在长日照不育条件下特异表达(白书农等,1990;毕学知等,1993)。这一发现不仅从分子水平深化了对PGMR育性调控机理的认识,而且为新不育系的转育、选育提供了一个鉴定指标。58s在长日照下SOD、POX、IAA氧化酶等多种酶的活性均有显著变化,从而影响物质和能量代谢的改变及IAA的亏缺,最终导致雄性不育(邹国林等,1991;王志强等,1990;徐孟亮等,1990)。此外,研究资料还表明乙烯、雄性激素、雌性激素等参与了农垦58s育性转换的调节(骆炳山等,1993;陈克成等,1993)。这些研究成果对植物生理遗传学和光周期理论及水稻发育生物学的发展具有重要意义。

由58s花培获得的自然加倍的纯合二倍体植株,保持了长日不育、短日可育的遗传特性,并初步证实梗稻品种感光性与光敏不育性呈独立遗传,但二者有一定的相互作用(王明全等,1991;薛光行等,1991)。对农垦58s光敏感雄性不育基因的染色体定位研究资料指出,光敏不育基因ms<sup>ph</sup>可能位于西村氏的第2染色体上(张端品等,1990)。现已构建成农垦58s和N5047s核基因文库(徐琼芳等,1987;岳彬彬等,1990)。

迄今为止,已育成并通过技术鉴定的光(温)敏核不育系达20多种。粳型N5088s是目前实用性最好的光敏核不育系,选配的优良两系粳杂组合,累计种植13333ha以上,取得增产增收的良好效果,从而基本上探明了光敏核不育性用于两系杂交粳稻育种的特点和强优势组合选配的规律,并使其种子生产技术基本配套,从理论到实践将两系杂交粳稻应用于生产;还证明光敏核不育性用于水稻轮回选择育种的可行性。

人们在研究中逐步注意到温度在光敏核不育水稻育性转换中的作用,从而发现和转育了一批温度敏感型核不育水稻(袁隆平,1990,1992)。目前对于光敏核不育水稻的研究热点主要有:(1)在控制光温条件下研究与育性转换有关的特异蛋白质的鉴定、纯化、克隆及时空顺序;(2)利用mRNA体外翻译、Western blot、原位杂交等技术,进行育性基因的定位及时空特异性表达研究;(3)光敏不育性遗传背景的研究;(4)光敏不育系育性转换的光周期和温周期反应关系的研究;(5)光敏核不育性在水稻籼粳亚种杂交中应用的研究。

参考文献

- 1 Vince-Prue D. Photo periodism in Plants, London: McGraw Hill, 1975. 30~69
- 2 石明松、石新华、王良华,等,HPGMR 专刊, 2~6
- 3 Kaul M L H. Male Sterility in Higher Plants, Berlin: Springer-verlag, 1998. 1~3
- 4 袁隆平. 中国农业科学, 1990, 23(3): 1~6
- 5 肖翊华主编. 光敏核不育水稻的光周期及其生理学. 武汉: 武汉大学出版社, 1993. 3~31

(武汉大学毕学知硕士撰;陈克成审)

植物的准性生殖

plant parasexuality 20世纪50年代起,逐渐在一些过去认为没有有性生殖的植物中发现一种类似于有性生殖的生殖方式,称之为准性生殖。后已知半知菌纲的真菌、子囊菌纲的真菌和担子菌纲的真菌,以及原核生物中的细菌、噬菌体和蓝藻中的一些种类有准性生殖过程。准性生殖的发现,对物种有性生殖进化过程的了解和分类群及进化系统的确定有

着重要的意义,对病害的防治应从新的观点加以考虑,为应用微生物培育优良新品种开辟了新途径。

由于准性生殖是逐渐被发现的,其表现形式也不一致,所以对其含义的解释以及哪些植物有准性生殖过程的认识很不一致,甚至造成一些混乱。从真菌体细胞遗传物质重组过程的研究中发现,这个过程能达到像有性生殖时减数分裂重组的相同效应。所以,1954年Pontecorvo建议将真菌的体细胞重组现象称为“准性”。1956年,Wollmann和Jacob还认为原核生物没有与真核生物相当的有性过程。到1964年,的Wagner和Nitchell才证明在细菌和噬菌体中也有遗传情报由一个个体传输到另一个个体的可能,但这种重组程序不是以减数分裂为基础的。从原核生物遗传重组过程的实质来看,它们与真菌的准性生殖并无绝然界限。直到1973年贝克(Baker)等在致力于有性生殖进化方面的研究中,进一步确认在原核生物中也存在“准性”生殖过程。据近代对准性生殖的理解:(1)遗传可以通过有性生殖来实现,而在没有有性生殖的某些植物中,也可以通过准性生殖来实现;(2)有性生殖是指通过两个性细胞(雌配子与雄配子或卵与精子)的结合,形成新个体的生殖方式,准性生殖则是一种类似于有性生殖,但比有性生殖更为原始的一种生殖方式;(3)准性生殖在某些真核的真菌中是以体细胞的重组方式来实现的,在此过程中可以有核的融合,但没有减数分裂;而在原核生物中,则是在受体细胞中插入来自供体细胞的遗传性不同的DNA片段,并把这种DNA片段或它的拷贝重新组合成为新的遗传物质的过程。

据现在认识,其重组的过程首先是两个在形态上没有区别,但在遗传性状上可以有差别的亲本体细胞(单倍体)的结合,而亲本体细胞联结后只进行质配,其中的细胞核并不相互融合,并能彼此无关地各自继续分裂,从而形成一个能独立生活的异核体的阶段。其次,是在异核体中可以有少数细胞核进行融合,产生双倍体的杂合子。产生杂合子的频率极低,大约从一个异核菌丝体中产生双倍体杂合子的数目仅为10<sup>-6</sup>。再次,由于双倍体杂合子极不稳定,在其进行有丝分裂过程中,有极少数双倍体核会发生染色体交换(即体细胞重组)和单倍体化,从而可形成极少数的具有新的遗传性状的单倍体杂合子(子代)。半知菌纲的真菌一般不产生有性生殖,但墨曲霉和产黄青霉等能发生准性生殖。体细胞重组在担子菌纲中的裂褶菌属和鬼伞属、子囊菌纲中的脉孢菌属等均已证实。在原核生物的细菌和噬菌体中证明它们也有遗传信息由一个个体传输到另一个个体的可能(Lederberg, 1947)。这里关于遗传信息的传输即是原核生物的准性生殖,是指在受体(雌的)细胞中插入来自供体(雄的)细胞的遗传性不同的DNA片段,并把这种DNA片段或它的拷贝整合成为受体细胞基因组的一部分。DNA片段从供体转入受体有转化、转导、溶原转化和接合等四种方式。转化的过程大体是:DNA一般以双链的形式附着在感受态的受体细胞,几分钟后,其中一条单链以线状顺序进入受体细胞并整合到受体DNA链上;另一条链则被酶解而最终消失。已发现只有在某些属的细菌可以有转化,其中包括链球菌属、噬血杆菌属、芽孢杆菌属、奈瑟氏球菌属和单孢杆菌属的菌类。随着更深入的研究,将有更多的种属被发现,转化可能是十分普遍的现象。然而,即使在转化率高的那些种中,其不同菌株间也不一定都可转化,只有那些处于所谓“感受态”的菌株才能转化。转导是指通过温和型噬菌体的媒介,把供体细胞中的DNA片段携带到受体细胞中,从而使受体细胞获得供体细胞部分遗传性状的现象。转导通常有两种形式,即局限性(专化性)转导与普遍性转导。不是所有的温和型噬菌体都能转导,也不是所有细菌都是可以转导的,现在已知的有大肠杆菌以及沙门氏菌属的、志贺氏菌属的、变形杆菌属的、假单胞菌属的、葡萄球菌属的和芽孢杆菌属的某些种有转导现象。溶原转化是指一个通常温和型噬菌体感染其寄主而使之发生溶原化时,噬菌体的基因可以加入到寄主的基因组中,而使寄主获得免疫以外的新的性状。例如用 $\phi$ 15噬菌体溶原化时,沙门氏菌的细胞表面多糖类结构会发生变化;又如用 $\beta$ 噬菌体溶原化时,不产生毒素的白喉棒状杆菌

菌株会转变成产毒素的致病菌株。接合是指细菌细胞与细胞间接触的遗传重组过程,即一个供体细菌的染色体片段,经过细胞质桥传递到受体细菌上,而且传递的是大片的基因组,而不是像转化和转导那样仅仅是传递小片段的DNA。接合现象除了研究最清楚的大肠杆菌外,志贺氏菌属的、沙门氏菌属、假单胞菌属的、赛雷氏菌属的和弧菌属的等一些种都已被证明。原核生物中比细菌更古老的蓝藻是否也有类似准性生殖的遗传物质重组的过程呢,由于目前对其重组的机制还没有研究清楚,所以还不能肯定;但蓝藻遗传物质的表现与细菌相似,都构成环形DNA索形式。1973年,Asato和Ginza从组囊藻中分离出环形的DNA分子,这是可与细菌的准性过程相比较的。从系统发生上蓝藻也与细菌有密切关系,其细胞的构造、核糖体与核糖核酸组分和合成等也与细菌相近似。所有这些,都比较接近于认为蓝藻是有准性生殖过程的。

植物的准性生殖过程是逐渐被发现的,而且仅是在很少一些属种中被发现,在大量的植物物种中,尤其是那些没有有性生殖过程的种类中其准性生殖过程的存在急待发现,特别是利用分子生物学的成就对本领域的深入研究有着广阔的发展前景。准性生殖过程的机理探索也不很深入,因此生理、生化分子遗传学等对本项研究也将发挥重要的作用。利用准性生殖的研究成果,指导育种工作已成为活跃的领域之一。最后,随着准性生殖过程在更多的植物种类中被发现,对不同类群有性生殖的比较,无疑对植物界进化系统的确立与完善也将起到重要作用。

#### 参考文献

- 1 Wollmann E L, Jacob F. Scientific American, 1956, 1~7
- 2 Cairns J. Sci Amer. 1966, 241, 37~44
- 3 Asato y, Ginoza H S. Nature (Longd.) New Biol., 1973, 224, 132~133
- 4 Baker R R, Parker G A. Acta Biotheoret, 1973, 22, 49~77
- 5 Bergteld R 著, 罗迪安译. 植物的性别. 北京: 科学出版社, 1982. 84~144
- 6 武汉大学、复旦大学生物系微生物教研室编. 微生物学. 北京: 高教出版社, 1987. 278~314

(武汉大学李益健教授撰)

**植物它感作用** allelopathy of plants 一种植物产生化学物质并排放到环境中从而对它种植物产生影响的作用称为植物它感作用,也有人称之为相生相克或异株克生。一种植物释放的化学物质,根据作用对象和浓度的不同,可能产生抑制作用,也可产生刺激效应。

早在公元前5世纪Democritus、公元前3世纪Theophrastus就分别提到植物间存在化学物质的相互作用。中国后魏贾思勰的《齐民要术》记载:“慎勿于田地中杂种芝麻,落地两损,而收菲薄”。19世纪初叶,Decandolle报告几种植物的根分泌物对普通作物有害。Schreiner等则发现一些作物和以前种过这些作物的土壤中存在有毒物质,对许多作物有害。1940年, Bode报道洋艾分泌的苦艾素对临近的茴香植物产生不良影响,第1次提供了植物代谢产物影响其它植物的确凿证据。1944年, Bonner发现银胶菊残株产生反式肉桂酸对银胶菊幼苗有毒。分离鉴定它感化合物,从而确定它感作用,开始于20世纪中叶。

迄今发现的它感作用的化合物都属于次生代谢物质, Rice (1984)把它们大体可归为14类,即:水溶性有机酸,直链醇,脂肪族醛和酮,简单不饱和内酯,长链脂肪酸和多肽,萜酮、萜醇和复合酮,酚、苯甲酸及其衍生物,肉桂酸及其衍生物,香豆素类,类黄酮,单宁,类蒽和甾类化合物,氨基酸和多肽,生物碱和氰醇,硫化物和芥子油苷,嘌呤和核苷。其中以酚类和类萜化合物最为常见。

植物向环境释放它感物质的途径有4条:根系分泌、受雨露淋洗、直接挥发、植物残体和枯枝落叶经微生物分解后的产物释放到土壤中,最后一条途径释放的它感物质对农业生产的影响最

大。

它感物质的一个显著特点是作用的选择性和专一性。例如黑胡桃产生的胡桃醌抑制苹果树的生长,但对梨、桃、李无害。弯叶画眉草产生的它感物质刺激向日葵的生长,但抑制玉米和小麦生长。刺激或抑制作用还随浓度而异。同一种它感物质对同一作用对象,浓度低时可以产生促进作用,而浓度高时则产生抑制作用 (Stevens等, 1985)。凤眼莲释放的它感物质对藻类起作用时,就有这种浓度效应 (孙文浩等, 1988)。

植物分泌的它感物质往往不止一种成分,它们分别作用,也可能产生增效作用,高酥油草抑制豌豆、绿豆等植物的生长和种子的萌发,它的粗提物含有酚类化合物等多种次生物质,表现很强的抑制活性,分离提纯后的各个成分的抑制活性反不如混合物强,指示诸成分产生增效作用 (Mandava, 1985)。植物分泌的它感物质除了对它周围的植物产生相生相克作用外,有一些还能对微生物或动物发生作用 (Kauffman等, 1989)。同一种植物的不同品种或品系产生某一种它感物质的能力可有很大差异。例如燕麦各种品种产生莨菪亭的能力很不一样 (Fay等, 1977)。黄瓜有的品系显著抑制一些杂草种子的发芽,有些品系则无效,另一些甚至有促进生长的作用。

环境条件能影响它感物质的产生和释放。例如缺水导致暂时萎蔫时燕麦分泌莨菪亭最多。土壤缺氧使玉米更多地分泌氨基丁酸、丝氨酸、天门冬氨酸和组氨酸。凤眼莲的根系如果处在强光下克藻物质的产生、分泌受到抑制 (孙文浩等, 1989)。

微生物影响它感物质的产生和分泌。例如一些细菌培养物使燕麦释放的莨菪亭增加3倍。有的根系分泌物原本无毒,进入环境后经过微生物作用而变为有毒,例如桃根分泌的扁桃苷对桃树幼苗无害,经微生物分解产生的苹果醛则颇有毒性。微生物还影响它感物质在土壤中的持久性。已从栽培作物的土壤分离出一些真菌,能将阿魏酸和香草醇转变成香草酸,丁香醛成为丁香酸, *p*-羟基苯甲醛变为 *p*-羟基苯甲酸,这些中间产物对许多植物有毒性,因此在分解过程中克制效应仍会持续一段时期。与此不同,它感活性很强的莨菪亭和反式肉桂酸因被细菌分解而失活较快,在土壤中的作用期往往只有几天。

它感作用在实践中的应用意义主要有以下几个方面:(1)杂草的防治。分离、鉴定对杂草有毒的它感物质进而人工合成之,可为杂草的化学防治提供新的高效的除草剂。(2)利用有益的植物组合,避免有害的搭配。有的作物在混作、间作和套作中能通过分泌物促进另一方作物的离子吸收和积累。田间作物中间增植“伴生植物”是一种增产措施。所谓“伴生植物”是指经过特殊挑选的具有某种相生相克机制的植物,它本身不以收获为目的,而是发挥对主要作物的相生效应对杂草的相克作用。轮作是减少它感物质对一年生作物产生负面影响的最好办法,既可以最大限度地利用轮作中一茬有明显它感作用的植物产生相生相克效应,又可以使土壤中对下一茬有毒害效应的它感物质不致过多累积。(3)水草的生物控制。水草过度的生长常阻塞灌溉渠道,降低水库水质,带来一连串生态问题。如牛毛毡、钻叶慈姑等能抑制乃至清除池塘水草如菹草、加拿大伊乐藻等。(4)藻类的生物控制。水体富营养化是一个世界性的环境问题,特别是城市中小水域,由于污染负荷重,大量营养物质积累,导致藻类繁生,水色浓绿或浑浊,甚至变黑变臭,影响景观和卫生。利用能分泌克藻物质的植物如凤眼莲,把它们布置在水面,一方面通过凤眼莲快速生长的特点大量吸收营养元素N和P,为水中的N、P提供输出的渠道,降低富营养化的程度,一方面通过凤眼莲的它感效应来清除繁生的藻类,使水变清 (孙文浩等, 1989)。其他在森林抚育和更新、植物保护、医药卫生等方面都可找到应用它感作用的实例,它的潜在的应用前景不容忽视。例如从它感现象的研究开发出新的、高效的、高度专一的和可生物降解的除草剂、杀虫剂、杀菌剂、杀藻剂等。在植物的种质资源中筛选它感性状,用常规育种技术或现代生物技术(细胞融合、基因工程)把这种性状转移到丰产的栽培品种中去,使该品种具有对某些杂草的竞争优势,或具有天然防

病抗虫的特性,将是一个诱人的发展方向。

它感效应的研究需要生物学家和化学家的通力合作。随着近代有机化学的进步,越来越多的精密分析、测试仪器的问世,使分离、纯化、鉴定它感物质成为可能。它感化学也已蓬勃发展起来,成为生态化学的一个重要分支(Thompson, 1985)。生物学中牵涉到植物生态学、生理学、微生物学、遗传学等领域,这些领域的专家对它感现象的逐一发现,它感性质的次第揭示已做了许多贡献。但是这一领域尚有许多问题等待人们解决。例如它感物质在植物体内的产生及其解毒过程;影响它感化合物合成、释放和分解的因素及其作用方式;它感化合物多方面效应的研究和开发;植物对它感化合物的抗性和敏感性的原因;分子水平的作用机理;它感化合物多产品系和抗性品系的培育等等。

参考文献

- 1 Bode H R. *Planta*, 1940, 30: 567~580
- 2 Bonner J, Galston A W. *Bot Gaz.* (Chicago), 1944, 106: 185~198
- 3 Fay P K, Duke W B. *Weed Sci.* 1977, 25: 224~130
- 4 Rice E L. *Allelopathy*. 2nd ed., Orlando. Academic Press, 1984, 266~291
- 5 Mandava N B. *Amer Chem Soc.* 1985, 33~54
- 6 Stevens K L, Merrill G B. *Amer Chem Soc.* 1985, 83~98
- 7 Putnam A R, Tang C S. *The Science of Allelopathy*. New York, John Wiley, Sons. 1986, 1~22
- 8 孙文浩, 俞子文, 余叔文. *植物生理学报*, 1988, 14: 294~300
- 9 孙文浩, 俞子文, 余叔文. *环境科学学报*, 1989, 9: 188~195
- 10 Kauffman W C, Kennedy G G. *J Chem Ecol*, 1989, 2051~2055

(中国科学院上海植物生理研究所余叔文研究员撰)

植物的向性运动 tropic movement of plant

植物在空间的取向受环境条件如重力、光照、水分及化学物质刺激的影响。在这些外界单方向的刺激下,植物产生的定向生长运动称为向性运动。它发生的条件是要有单方向的刺激。根据刺激种类的不同,可以相应地称为向重力性、向光性、向水性和向化性。其方向与刺激方向有关,凡朝向刺激来源的为正向性,背向刺激来源的为负向性,还有横向性等。它发生的部位是正在生长的区域。当根、茎、叶等器官两侧生长速率不同时,必将造成发生部位在位置上的移动。植物的向性运动是植物适应环境、有利生长的生物学特性。

植物在外界刺激下重新取向的过程一般分感受、转导和响应三阶段。1991年,石川等应用视频转换系统精确地测定了玉米根的向重力性反应。发现约35%的样品受重力后稳定地向下弯曲,速率为 $1.4^{\circ}/\text{min}$ 。但其余65%的样品,在达到垂直指向前,有弯曲返回现象;重新弯曲时,还可在垂直指向周围来回摆动。

根冠是感受重力的部位,摘除根冠或移植根冠,根会失去或恢复顺应重力的特性。根冠细胞里有感受重力的细胞器如淀粉粒,常称平衡石。虽然1989年卡斯特(T. Caspar)等以重力刺激无淀粉的拟南芥突变体根仍显示稍后的向重力性反应,却仍然认为淀粉粒并不是适应重力所必需的。然而1990年库切拉(U. Kutschera)等发现水中生长的芽鞘缓慢弯曲时,在薄壁细胞里有大量的淀粉粒,因此它的沉积仍是重力感受时的变化。芽鞘、胚轴里淀粉粒的沉积也与感受重力的变化呈正相关。1990年,石川等用玻璃毛细电极测定了菜豆根伸长区细胞间电势的变化。发现水平放置时,皮层细胞上侧电势在30s内可达到 $-154\text{mV}$ ,而下侧仅为 $-62\mu\text{V}$ 。这种电势急剧的不对称变化仅发生在伸长区,可能意味着伸长区也感受重力刺激。

1924年,卓罗德尼(N. Cholodny)提出重力刺激可产生某种延长细胞物质不对称的分布;1928年,温特(F. W. Went)也提出类似看法;1937年蒂曼(K. V. Thimann)称之为Cholodny—Went经典学说。它认为生长素的不均匀分布引起组织不对称的

生长。长期以来,生物试法、色谱法都证实水平放置的根、茎的上侧生长素减少,下侧生长素增加。因根对生长素的敏感性较强,故生长素将抑制组织下侧的生长而导致根正向重力性,而茎对生长素的敏感性较差,故生长素将促进组织下侧的生长而导致茎负向重力性,该学说也一直用以解释向光性。

一度认为重力刺激也产生脱落酸的不均匀分布。但1986年穆尔(R. Moore)等发现不能合成ABA的玉米突变体也表现顺应重力的特性,且只有ABA的浓度远远超过体内状态时,ABA才起作用。

1986年,伊万斯(M. L. Evans)等发现在垂直取向的根中, $^{45}\text{Ca}$ 均匀分布,而水平取向的根中 $^{45}\text{Ca}$ 向着下侧运动。还发现根冠中钙调素的浓度是伸长区的4倍,并且施加钙调素的抑制剂将会阻碍弯曲,因而提出钙泵—生长素泵学说,即:根受重力刺激时,淀粉粒沉降到细胞下侧的含钙很丰富的内质网上,所产生的压力将诱使钙释放,当其细胞质内的钙浓度升高到一定水平时,钙就会激活无活性的钙调素。随之,它又将激活细胞下侧膜内的钙泵和生长素泵。在这两个泵的作用下,钙和生长素在根冠下侧增多并聚积,从而引起处于不同位置的根内发生不同变化。

1989年,巴拉塔(P. A. Balatti)等发现狗牙根匍匐茎重力刺激后乙烯水平的上升与重力弯曲呈正相关,并且可促使ACC合成酶及乙烯形成酶系的形成,故认为乙烯也与向重力性有关。1991年,弗里德曼(M. Friedmann)等发现刺激3min后就产生32KD的和35KD的多肽,认为这也许是刺激后发生的最初生化变化。1989年,麦格鲁(B. A. McClure)等应用组织印渍技术发现大豆的重力弯曲与一系列的mRNA的不对称分布有关,而这正是生长素所控制的基因表达。1990年,尼克(P. Nick)等用荧光抗体标记发现玉米芽鞘的外层表皮细胞的微管,在生长慢的一侧纵向分布的频率增高,这与IAA处理结果相类似。1990年,扬(L. M. Young)等发现玉米根冠生长素不对称分布的动态变化与弯曲速率的变化平行相关,且下侧与上侧的生长素之比为1:6时弯曲最快。但1989年罗勒保(P. A. Rorabugh)等发现玉米胚轴两侧的生长素相等,他们注重组织对生长素的敏感度。以米—曼氏动力学分析剂量—反应曲线时,发现生长素—受体的结合与酶—底物的结合相类似,可用 $V_{\text{max}}$ 和 $K_m$ 来描述。下半部 $V_{\text{max}}$ 通常高于上半部,表明在下半部有更多的生长素结合位置。上半部的 $K_m$ 通常大于下半部,表明上半部结合位置对于生长素有较低的亲和力。1991年,帕克(K. E. Parker)明确提出经典学说可以解释某些植物,但并不适用于所有植物。

1989年,利奥波德(A. C. Leopold)等发现重力刺激一旦撤销,玉米根的弯曲随之减小以至消失。这种效应叫回跳。它可能来自刺激前的记忆。

茎尖是感受光的部位。根据单子叶植物向光性作用光谱的研究,发现向光弯曲的作用高峰位置在蓝光区和紫外光区,这与黄素的吸收光谱极其相似。所以光的受体可能是质膜上的黄素。以经典学说解释组织向光性,较长时间占优势。认为生长素的侧向运输,向光而生长素的降解和钝化,向光面和背光面生长素合成的减少和增加,向光而生长素向基运输速率减低,都是生长素不均匀分布的原因,并由此背光面伸长加快,向光面伸长减慢而导致向光弯曲。但有些学者认为上述看法的缺陷在于生长素多是外源施加,且内源生长素多用生物试法测定。他们发现组织向光弯曲时,两侧的生长素含量并没有多少差异。

1986年,野口等发现单侧光照后向光面的顺式和反式萝卜宁含量在1h达高峰,比背光面多3~3.5倍;而萝卜酰胺在光照1~2h后,向光面的含量也增加;也有人提出是黄质酸、脱落酸等。正是这些抑制物的不均匀分布造成组织弯曲。

1990年,尼克(P. Nick)等还研究了光照和重力刺激引起的空间记忆之间的关系。发现光刺激诱发的效应是稳定的,短时间的重力刺激不能抵消向光性,但长时间的重力刺激可以消除向光性。1987年,刘易士(J. Lewis)等发现红光对向重力性反应变化敏感,且不能被远红光所逆转,认为光敏色素是唯一与向重力

性变化相关的色素。1990年,高桥等认为机械刺激(触摸、滚动等)诱使乙烯水平上升,亦可引起向性弯曲。

根还具有向水性、向化性,它们使植物根系总是朝着肥水较多的土壤生长。因此,可利用肥水来调节作物根系的生长,如蹲苗。花粉管的生长亦具向化性。雌蕊丝状器或珠孔附近组织可分泌向化性物质,使花粉管可向着向化性物质浓度高的方向伸长,顺利地到达子房、胚珠和进入胚囊,有利于授精作用的完成。利用表面、琼脂槽及角度检测法进行分析,认为没有万能的特定物质,除Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>是向化性物质外,还可能有氨基酸、肽、胺等。

随着太空技术的发展,人们都渴望揭示向性运动的机理。进一步的工作是确认各种向性运动的规律,确认最初发生的事件及关系,完善和修正上述学说,寻找它们之间的联系,并能用以指导生产。

参考文献

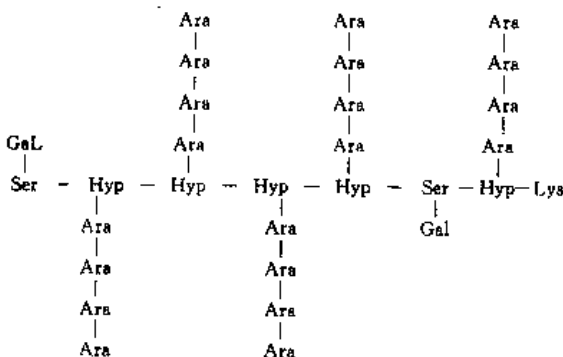
- 1 Evans M L, et al. Science. 1988, 4: 56~63
- 2 Belatti P A, et al. Plant Physiol. 1989, 91: 1251~1254
- 3 Rorabaugh P A, et al. Plant Physiol. 1989, 91: 1329~1338
- 4 Bruinsma J, et al. Physiologia Plantarum. 1990, 79: 700~704
- 5 Nick P, et al. Planta. 1990, 181: 162~168
- 6 Friedmann M, et al. Plant Cell Physiol. 1991, 32(2): 299~302
- 7 Ishikawa H, et al. Planta. 1991, 183: 381~390
- 8 Parker K E, et al. Physiologia Plantarum. 1991, 82: 477~482

(北京师范大学张崇浩副教授撰)

**伸展蛋白** extensin 伸展蛋白是植物初生细胞壁中一类富含羟脯氨酸的糖蛋白(HRGP), 1960年,由英国D. T. A. Lamport和D. H. Northcote首次发现;同年,美国D. K. Dougall和K. Simbayasi也独立发现了它。因当时猜测这种蛋白质可能与细胞生长时的细胞壁伸展性有关,所以, D. T. A. Lamport将其命名为伸展蛋白。

伸展蛋白中的羟脯氨酸含量一般为蛋白质的30%~40%,其它含量较高的氨基酸是丝氨酸、缬氨酸、苏氨酸、酪氨酸、组氨酸和赖氨酸。伸展蛋白中糖的组分主要是阿拉伯糖和半乳糖,含量为糖蛋白的26%~65%。透射电镜下,伸展蛋白单体为具纽结的杆棒状结构。

1973年, D. T. A. Lamport提出伸展蛋白由重复的基本结构单位所组成(见下图)。主链是由丝氨酸和4个羟脯氨酸构成的五肽段,即Ser-(Hyp)<sub>4</sub>。其中,半乳糖与丝氨酸相联,而阿拉伯糖则与羟脯氨酸相联。



1985年, J. Chen和J. E. Varner首次建立了胡萝卜伸展蛋白的cDNA克隆和基因组文库,并从DNA序列推断出一个有306个氨基酸残基、富含脯氨酸的多肽,其中五肽段Ser-(Pro)<sub>4</sub>重复了25次。由于伸展蛋白中的羟脯氨酸是脯氨酸的羟化产物,

所以这一发现及随后其他研究组用菜豆、牵牛等植物中伸展蛋白的cDNA或基因组克隆获得的研究结果都说明Ser-(Hyp)<sub>4</sub>的确为伸展蛋白中重复出现的特征性结构单位。

但是,1987年后的很多研究资料表明,某些伸展蛋白并不含有典型的Ser-(Hyp)<sub>4</sub>结构。例如, Tierney等发现胡萝卜根细胞壁蛋白P33中的重复肽段为Pro-Pro-Val(或Ile)-His-Lys; Averyhart-Fullard等发现大豆细胞壁蛋白的重复肽段是Pro-Pro-Val-Tyr-Lys;李雄彪等发现甜菜伸展蛋白的重复肽段为Ser-Hyp-Hyp-Val-His-Lys或Ser-Hyp-Hyp-Val-His-Glu-Tyr-Pro-Hyp-Hyp。因此,李雄彪等在1990年提出伸展蛋白的特征性结构单位是Ser-Hyp-Hyp-X-Hyp-Hyp,其中X是不固定个数的氨基酸残基,而典型的Ser-(Hyp)<sub>4</sub>只是Ser-Hyp-Hyp-X-Hyp-Hyp中X不存在时的特例。

可溶性的伸展蛋白单体(亦称前体)在分子间发生交联后成为不溶性的多聚体,这是一般情况下难以分离到大量伸展蛋白的原因。伸展蛋白mRNA在与膜结合的核糖体上翻译成肽链后,在信号肽的作用下进入内质网并在这种膜系统中进行羟基化和糖基化,然后被分泌到细胞壁中。

单子叶植物中HRGP含量较低,但是富含苏氨酸与羟脯氨酸的糖蛋白(THRGP)和富含缬氨酸与羟脯氨酸的糖蛋白(HHRGP)含量较高。HRGP、THRGP和HHRGP都是细胞壁中的结构蛋白。

由于同种植物中存在不同结构的伸展蛋白,而异种植物的伸展蛋白之间存在结构上的差异,所以编码伸展蛋白的基因不是一个,而是一族。伸展蛋白基因的表达受多种因素的调控。例如,植物体内的因素包括遗传密码使用的倾向性和发育程序等,而环境因素则包括机械损伤、乙烯处理、病原侵染或植物抗毒素诱导剂处理等。

伸展蛋白的重要功能之一是作为初生细胞壁的结构成分,它们不仅可以在其分子内、分子间发生交联,而且可以和细胞中纤维素、半纤维素和果胶等其它组分发生交联,使细胞壁成为具有一定弹性的和硬度的结构。由于植物被机械损伤、病菌侵染或高温处理后,细胞中伸展蛋白的mRNA含量和细胞壁中的伸展蛋白含量都明显增加,所以一般认为伸展蛋白参与植物对逆境的抗性作用。此外,也有研究资料表明,伸展蛋白与种子的生长和成熟有关,有的研究者则认为伸展蛋白可能是将多糖从细胞质运到细胞壁的载体。

已经知道,单子叶植物和双子叶植物中的伸展蛋白在结构上存在差异。但是,这种结构上的差异是否反映功能的不同则不完全了解。另外,高等植物和低等植物中是否普遍存在伸展蛋白,它们的结构和功能是否相同,都是需要深入研究的问题。由于伸展蛋白不仅能发生分子间的交联,而且可与其组分交联,所以对于这类交联的化学本质的研究比较活跃,从分子水平阐明伸展蛋白和细胞壁其它组分的交联,对于了解细胞壁的精微结构及调控细胞的生长具有十分重要的意义。伸展蛋白在植物抗逆性中的作用机制及其利用将成为伸展蛋白研究中的另一个重要课题。此外,伸展蛋白的生物合成细节,特别是其蛋白质合成后的羟基化和糖基化的过程,也都有待在分子水平作出更加明确的说明。

参考文献

- 1 Lamport D T A, et al. Nature, 1960, 188(4751): 665~666
- 2 Lamport D T A, et al. Biochem J. 1973, 133: 125~131
- 3 Chen J, et al. EMBO J. 1985, 4: 2145~2151
- 4 Wilson L G, et al. Plant Cell and Environment, 1986, 9: 239~260
- 5 Li Xiongbiao, et al. Plant Physiol. 1990, 92: 327~333
- 6 李雄彪, 吴奇. 植物细胞壁. 第1版. 北京: 北京大学出版社, 1993. 67~84

(北京大学李雄彪教授撰)

## 植物激素在植物体细胞胚发生中的作用

the role of plant growth regulators in somatic embryogenesis of plant 植物体细胞胚发生研究的中心课题是体细胞胚发生和植物激素的关系。然而使用不同植物、不同外植体,甚至在不同的实验室进行研究所得到的结果常常不一致。

**生长素的作用** 最早在胡萝卜,后来在许多单子叶植物中发现,体细胞胚发生似乎只与生长素(主要是2,4-D)有关。胚性愈伤组织诱导要求较高浓度的2,4-D(1~5mg/L)。但必需将此愈伤组织转移到不含2,4-D,也不含其他植物激素的基本培养基或者仅含很低浓度的2,4-D(小于0.1mg/L)的培养基才能产生体细胞胚。后来的研究资料证明,单子叶植物中许多农作物和禾本科牧草胚性愈伤组织诱导都只要求2,4-D或其他生长素类物质,而且其体细胞胚发生可以在基本培养基上完成。这表明体细胞胚发生和其他植物激素并无关系。

**细胞分裂素(CTK)的作用** 研究资料表明,越来越多的植物其体细胞胚发生要求生长素与细胞分裂素同时存在,有一些禾本科植物如玉米等最初的实验资料表明,生长素是诱导体细胞胚发生的唯一因素。但后来的研究资料则表明,至少在有些材料中体细胞胚发生的后期要求有CTK存在,其他如在洋葱、稗、蟋蟀草、海枣、甘蔗等单子叶植物中,体细胞胚发生都要求生长素和CTK(或椰乳,其中含有CTK)同时存在。Weigel(1985)在大麦中证明体细胞胚诱导只有在含有IAA、2,4-D和一定浓度的2ip(1.5 $\mu$ M)的培养基上才能完成,如果无2ip或2ip浓度为3.0 $\mu$ M即产生根或芽。对油椰,Hanowar和Hanowar(1984)的研究资料表明,抗生素2(P-氯苯氧)2-甲基丙酸或7-吡-吡啉处理可促进体细胞胚发生,但用一种CTK的拮抗物8-吡-鸟嘌呤处理却抑制体细胞胚发生。因此,CTK在体细胞胚发生中是不可少的。

但是,在鸭茅中内源的和外源的CTK都表现出对体细胞胚发生有抑制作用。Wenck等(1988)指出,鸭茅体细胞胚发生对遗传型有很大的依赖性,在非胚发生的遗传型中CTK浓度高于胚发生型的3~4倍;在胚发生遗传型中加入0.001~0.1 $\mu$ M的外源玉米素即可使胚数减少20%~80%。

在双子叶植物如草莓、苹果、荞麦以及裸子植物云杉和杨树、松树等也都要求生长素和细胞分裂素同时存在。在板栗属的一个自然杂种,其子叶外植体在含有2,4-D+BA或KT的培养基上产生胚性愈伤组织,胚性愈伤组织在含有2,4-D+KT或ZT的培养基上才能形成球形胚至鱼雷形胚,转移到BM或仅含ZT的培养基上才能形成植株(Gonzales等,1985)。在欧尚香的细胞培养中,Frust等(1984)发现在含2,4-D的细胞培养基中加入2ip可明显地提高细胞密度和体细胞胚的数目,认为CTK可能直接促进细胞分裂,增加胚性细胞的数目,结果使胚数增加。

但是,Smith(1988)将萌发的胡萝卜种子培养在基本培养基上,在萌发孔附近形成愈伤组织和体细胞胚,并可产生次级胚。如果将种子一分为二即大大减低其反应。

以上结果表明,无论在单子叶植物或双子叶植物,CTK对于体细胞胚发生都是重要的。通常情况下,可能由于外植体或胚性愈伤组织本身含有相当数目的内源CTK供胚发生之需,因而不必要另加外源的CTK,只有在内源CTK不足时才需要另加外源CTK。特别在培养单细胞或原生质体时,细胞内的CTK可能太少,所以一般都需加外源CTK。在胡萝卜萌发的种子中,由于本身可产生足够的植物激素,故无需再加外源激素。

**乙烯的作用** 除生长素与CTK之外,最近还有关于胚发生与乙烯的关系的研究。Rourstan等(1989)用乙烯产生的抑制剂氯化钴、氯化镍、水杨酸等乙基水杨酸等处理胡萝卜细胞培养物,结果显著地促进体细胞胚发生,同时有效地抑制乙烯的产生,胚的数目与乙烯产生受抑制成正比。Biddington等(1988)在培养基中加入另一种乙烯产生抑制剂AgNO<sub>3</sub>来增加野白菜花药培养中胚状体的产量。Vain等(1989)在玉米未成熟胚培养中和Pua(1990)在花椰菜原生质体培养中用AgNO<sub>3</sub>处理,都明显提高胚

性愈伤组织和胚的产量。在巴西橡胶中也得到类似结果(Auboiron等,1988)。

Songstad等(1988,1989)在玉米和鸭茅培养中,用乙烯合成前体ACC(氨基环丙烷羧酸)处理培养物可抑制99%的胚发生;但用AVG(氨基乙氧基乙烯基甘氨酸,乙烯合成抑制剂)处理叶片,减少乙烯的发生,却未能促进胚发生。

**多胺的作用** 关于多胺与体细胞胚发生的关系,Montaque等(1978,1979)在胡萝卜的胚发生细胞中首先证明,在无2,4-D的培养基上,24~72h内细胞中的腐胺水平较在含2,4-D的培养基上高出一倍,亚精胺和精胺的水平也有变化,<sup>14</sup>C-精氨酸参入胚发生细胞腐胺的速率也较非胚发生细胞高一倍。腐胺合成的重要酶-精氨酸脱羧酶(ADC)的活性在胚发生细胞中也二倍于非胚发生细胞。二者间的差别在转移后6小时即开始显现,周俊彦等认为,这些结果表明多胺和ADC在胚发生过程中起一定作用。

Bradley等(1984)在胡萝卜细胞培养中将腐胺加入含2,4-D和精氨酸的培养基中培养之后,转入含精氨酸不含2,4-D和腐胺的培养基中形成圆球胚并停止发育;再转入不含精氨酸的BM中,胚可同步地迅速发育,这种方法可能用于控制胚的发育,便于进行发育的生化研究以及大规模生产体细胞胚。周俊彦等认为,精氨酸和腐胺对胚发生的作用可能与其控制乙烯合成有关;因此,乙烯、2,4-D、精氨酸和腐胺对胚发生起着一种互相关联的作用。精氨酸参与体细胞胚发生过程与Montaque等(1979)的研究结果也是一致的。

在胡萝卜培养中用抑制多胺合成酶活性的各种试剂,如用二氟甲基精氨酸(DFMA,Feirer等,1984)、环己基磷酸铵(CHAP,Khan等1991)、二环己基硫酸铵(DCHAS,Fienberg等,1984)、甲基乙二胺双胍基脘(MGBG,Papa等,1988)处理胚性细胞都抑制多胺的生物合成,同时抑制体细胞胚的发生。MGBG是S-腺嘌呤基蛋氨酸(SAM)脱羧酶的专性抑制剂。SAM本身为乙烯合成的前体物。因此,Minocha等(1990)认为,可能在多胺和乙烯生物合成途径之间存在着对于SAM利用的竞争,这对于体细胞胚发生的调节是非常重要的。

上述研究结果虽然证明多胺在体细胞胚发生中起重要作用,但它们并不能取代植物激素。因此,这些结果并不支持Galston(1983)提出的关于“多胺具有植物激素或其第二信使的功能”的假说。但多胺对于其他激素,特别是乙烯的生物合成确有很大影响。研究者多将多胺和植物激素放在一起讨论。关于多胺在体细胞胚发生过程中对乙烯及其他激素作用的机理尚待进一步研究。

**其他植物激素的作用** Brown等(1989)指出,小麦未成熟胚培养在含ABA0.1mg/L的培养基中可促进胚性愈伤组织产生和增加体细胞胚的数目,同时抑制愈伤组织的生长和器官发生。在此培养基上产生体细胞胚的愈伤组织的频率可达20%;ABA为1.0mg/L时达10%,而对照仅为2.5%。ABA在大麦和玉米培养中也能促进体细胞胚的发生。ABA对胚性愈伤组织和体细胞数目的影响,与在培养基中加入蔗糖等提高渗透压的处理结果大体相近,增加蔗糖3%~6%,胚性愈伤组织的增加比例为8%~14%;添加5%的PEG(聚乙二醇)则可达25%,对照仅为3%。由此推断,提高渗透压可能引起细胞内CTK含量减少,ABA增加。Qureshi等(1989)用小麦晚期(开花后21~25d)的未成熟胚进行培养,ABA及其类似物均可抑制胚的过早萌发,并增加胚性愈伤组织和再生植株的数目,而在早期(开花后10~14d)的未成熟胚中ABA处理有相反的效果。周俊彦等认为,在早期,胚发育不需要ABA,内源ABA即可满足其需要;而在后期,胚中ABA为正常发育所必需的。这与Quratrano等(1989)在小麦合子胚培养中的观察结果相一致。小麦未成熟合子胚培养在不含ABA的培养基上,胚发育停止,而在含ABA的培养基上,胚可合成和积累成熟胚所特有的蛋白质,并加速发育成熟。周俊彦等认为ABA对与成熟胚特有的蛋白质合成有关的基因的表达有

调节作用。对其他植物如芹菜、胡萝卜、苜蓿等关于 ABA 的作用研究,多为促进体细胞胚发育成熟和转变成植株以及人工种子的实际应用。

此外,还有研究资料表明,GA<sub>3</sub> 生物合成抑制剂、丁二酸一单一-2,2-二甲酰酐等处理柑桔的胚性愈伤组织可增加其体细胞胚发生(Spiegel-Roy 等 1986),噁啉醇处理芦笋体细胞胚可降低其不正常胚的比例(China 等 1984)。这表明 GA 对体细胞胚胚发生有不良影响。

对棉花,油菜素内脂(BR)可促进体细胞胚诱导。0.01mg/L 的 BR 单独使用或与 2,4-D、IAA 或 KT 结合使用,均可明显提高胚性愈伤组织的诱导频率及单位鲜重的胚状体个数。有人认为油菜素内脂也是一种植物激素。上述结果表明,至少对棉花,它可单独诱导体细胞胚发生,说明它具有类似植物激素的活性。

关于植物体细胞胚发生与植物激素的关系,从研究结果可以看出:(1)植物激素在体细胞胚发生中具有极大的重要性,除个别的情况外,几乎所有植物体细胞胚发生均要求至少一种外源激素的存在;(2)不同植物、不同发育时期以及不同来源的外植体,其体细胞胚发生对植物激素的要求以及后者作用的方式和效果均不同;(3)由于植物激素之间存在有复杂的相互作用(Latham 等,1978),植物体内每一种激素的浓度或活性的改变都可直接使其它 1~2 种植物激素的活性增强或者减弱;后者又可影响到第 3、4 种植物激素发生改变,加上还牵涉到与某种激素代谢有关的物质如多胺等的合成和代谢,最后反馈到原初的激素。因此,可以说改变任何一种激素,其结果必然改变植物体内部的总的激素平衡状况。在离体培养条件下外源激素和培养物内源激素之间的相互作用也是十分复杂的。由于外源激素(植物生长调节剂)的浓度一般较内源激素高得多;有些人工合成的生长调节剂其活性较相应的内源激素更强,而且植物细胞内常无相应的分解酶使其发生代谢变化,因此,通常外源激素在体细胞胚发生中起决定性作用,但有时由高活性的外源生长调节剂引起内源激素的巨大变化,反过来也会影响前者的效果;(4)有些非激素的因子如一些有机的和无机的化合物可能作为激素合成的抑制剂或促进剂,甚至有些物理因素如光照、温度、渗透压的变化最终也能影响到内源激素水平的变化,影响到植物体细胞胚的发生。

植物体细胞胚发生是一个非常复杂的生理过程。在离体条件下研究体细胞胚发生必须考虑到多种植物激素的作用,以及内源激素和外源激素之间的相互作用,这方面的研究尚待更进一步地深入,才能阐明植物细胞全能性、细胞的分化(脱分化和再分化)以及植物在离体条件下形态发生的调节控制的机理。

#### 参考文献

- 1 周俊彦. 植物生理学报, 1982, 8(1): 91~99
- 2 Songstad D, et al. Plant Cell Rep. 1988, 7: 262~265
- 3 Wenck A R, et al. Plant Physiol. 1988, 88: 990~992
- 4 Vain P, et al. Plant Cell, Tis Org Cult. 1989, 18: 143~151
- 5 Brown C, et al. J. Plant Physiol. 1989, 133: 727~733
- 6 Qureshi J A, et al. Plant Cell, Tis Org Cult. 1989, 18: 55~70
- 7 Roubie C A, et al. Plant Sci. 1989, 65: 45~54
- 8 Roustan J P, et al. Plant Cell Rep. 1989, 8: 183~185
- 9 Puc E C. Plant Sci. 1990, 68: 231~238
- 10 Khan A J, et al. J Plant Physiol. 1991, 137: 446~452

(中国科学院西北植物研究所周俊彦研究员

郭扶兴副研究员撰)

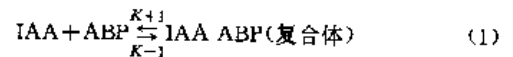
### 植物生长结合蛋白 auxin binding protein (ABP)

生长素是五大类植物激素中的一类。五大类激素是指生长素、细胞分裂素、赤霉素、脱落酸、乙烯。生长素发现于 1928 年,随后确定其化学结构为吲哚乙酸,简称 IAA。除 IAA 是天然生长素外,还有许多人工合成的生长素,如 NAA、2,4-D、MCPA 等。合成生长素已广泛用于农业生产,对防止落花落果、无籽果实生产,调节

休眠萌发、发芽生根等都起一定作用。

近年来人们才发现,IAA 必须先与植物体内的某种物质结合才能发挥作用;此物质是一种特异的蛋白质,称为 IAA 结合蛋白,简称 ABP。IAA 和 ABP 形成复合物,依靠蛋白质的特性,使此复合物能够渗入到细胞的膜组分上,实现 IAA 调节质膜对水分和物质的透性,改变细胞的 H<sup>+</sup> 浓度,实现细胞的迅速生长。此复合物也能渗入细胞核内,与 DNA 一起在核小体中调控 DNA 的复制和转录,实现 IAA 调节酶合成的特有功能。1990 年前后,人们才把 IAA 结合蛋白提纯并阐明其氨基酸顺序(一级结构)。1991 年又把 ABP 的基因分离出来,阐明其基因的核苷酸顺序。这些发现不但在植物激素研究中的重要意义,即使在植物分子生物学领域中也占有显著位置。因为外源喷施激素,对不同环境中不同品种的不同植物有很不相同的效果。这是由于它们内在的结合蛋白含量不同。要改变激素效应敏感性必须先改变植物内源激素结合蛋白的含量。通过基因工程技术,把 ABP 基因导入对 IAA 不敏感的植物,就有可能提高它对激素的敏感性。

在研究 IAA 与 ABP 结合时发现,植物体内有许多种物质都能与 IAA 结合,但其结合力有差别。有些物质与 IAA 结合力低,它们含量又很多,结合是不专一的,称非专一结合。有些物质细胞内含量很少但结合力高,称专一结合。与 IAA 形成专一结合的蛋白质才是 IAA 受体。结合力高低是以解离常数(K<sub>d</sub>)来表示的。每种结合蛋白都有不同的 K<sub>d</sub> 值。故 K<sub>d</sub> 值是结合蛋白的重要特性之一。



这表示 IAA 与 ABP 在细胞中不断结合又不断解离。

$$K_d = \frac{K^{-1}}{K+1}$$

公式中 K 表示是一个常数。当达到平衡时,

$$IAA \cdot ABP = ABP_1 \frac{IAA}{IAA + K_d} \approx ABP_1 \frac{IAA_1}{IAA_1 + K_d} \quad (2)$$

式中 ABP<sub>1</sub> 是 ABP 的总量。因为在外加 IAA 的情况下,IAA<sub>1</sub> 的量远远超过 ABP<sub>1</sub> 的量,所以绝大多数的 IAA 不是成复合体,而是游离在液体中,故 IAA(游离)几乎等于 IAA<sub>1</sub>。

在结合蛋白分子上与 IAA 结合的位点称为生长素结合位点,简称 ABS。一个蛋白分子上可以有一个 ABS,也可以有几个 ABS。近年来国际上把研究的重心转到激素的结合位点上,不但研究激素与结合位点的结合动力学,还要研究结合位点的结构与结合功能的关系。ABP 一级结构的阐明为这方面工作奠定了基础。

细胞中 ABS 含量是在不断改变的。以烟草细胞为例,它一个细胞周期为 40h。在此 40 小时内 ABS 含量有剧烈的升降变化。当细胞分裂中期来临时,ABS 迅速增加;在 G<sub>1</sub> 期初即快速减少。这为研究植物细胞分裂的机理及 IAA 在其中作用指出了希望。

在研究 ABS 时发现,IAA 的抑制剂 NPA 与 IAA 对结合位点有竞争结合的作用。其所以能抑制 IAA 流出细胞质膜,可能正是由于 IAA 运出质膜的结合位点被 NPA 占据所致,但其竞争效应又不完全。所以 Depta 等提出“三点”模式说,认为在同一结合蛋白上既有 IAA 结合位点又有 NPA 结合位点,两个位点既在同一蛋白分子上又有一定距离,故既有竞争,又竞争不完全。

IAA 结合位点的研究同时也推动着其他四类激素结合蛋白的研究工作,并正在向为农业服务的方向进行。

#### 参考文献

- 1 Moore T C. Biochemistry and physiology of plant hormones. Springer-Verlag Press, 1979
- 2 Inihara N, et al. Auxin-binding protein located in the endoplasmic reticulum of maize shoots; molecular cloning and complete primary structure. Proc Natl Acad Sci. USA, 1989, 86: 3564
- 3 Depta H, Rubery PH. A comparative study of carrier participation in the transport of TIBA, IAA, and 2,4-D by

- Cucurbita pepo hypocotyl segments, J Plant Physiol. USA, 1984, 111: 371
- 4 Venis M A. Hormone receptor sites and the study of plant development. in Hoad GV ed. "Hormone action in plant development" Butterworths Press. 1987. 53
- 5 张德颐, 朱治平, 主编. 植物分子生物学与生物工程. 北京: 科学出版社, 1991. 38
- 6 陈瑞, 张德颐, 等. 水稻幼叶中 ABA 亲和力强的结合蛋白. 植物学报, 1992, 34: 185
- 7 邢惕, 张德颐, 等. Characterization and possible function of binding sites for NPA in Acer pseudoplatanus L. cells. Chinese J Bot. 1992, 4: 26

(中国科学院上海植物生理研究所张德颐撰)

**大麦醇溶蛋白 hordein** 根据 Osborne 溶解度分类法, 大麦胚乳蛋白可分成清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白。其中醇溶蛋白占总蛋白的 40%~60%, 是种子蛋白的重要组成部分。然而无论从必需氨基酸含量还是从氨基酸平衡看, 醇溶蛋白都不理想, 致使大麦营养价值偏低, 影响人畜利用。因而人们对醇溶蛋白进行了许多方面的研究, 包括蛋白的组成、结构及利用多态性进行品种鉴定、基因定位和遗传、蛋白质体和发育中醇溶蛋白积累, 高赖氨酸突变体及与醇溶蛋白的关系等。

**醇溶蛋白的组成、结构和多态性** 大麦醇溶蛋白由氨基酸组成, 分子量等分为 A、B、C、D4 组。

**A 组醇溶蛋白**, 占总醇溶蛋白含量的 1%~2%, 分子量为 20 000 000 以下, 等电点 pI 5.5~7.0, 含有比 B 组、C 组多肽明显低的谷氨酰胺、脯氨酸和相对高的赖氨酸, 表现很小或几乎没有遗传变异, 并且很有可能不存在于蛋白质体, 因此一般倾向于认为 A 组多肽不是醇溶蛋白。

**B 组醇溶蛋白**, 是大麦醇溶蛋白的重要组成部分之一, 占总醇溶蛋白的 70%~90%。分子量据不同测定方法有所不一, 用电泳法为 35 000 000~46 000 000, 用平衡超速离心为 32 000 000~35 000 000。等电点 pI 6.0~8.0。富含谷氨酰胺、谷氨酸(Gln+Glu 35.4 摩尔百分数)、脯氨酸(20.6 摩尔百分数), 但比 C 组醇溶蛋白略低一等; 必需氨基酸、碱性氨基酸和碱性氨基酸缺乏; 较特殊的是相对富含硫氨基酸(半胱氨酸 2.5 摩尔百分数), 致使 B 组醇溶蛋白多肽部分以单体、部分通过二硫键以聚合体形式存在于生物体。关于 B 组醇溶蛋白末端氨基酸的研究远落后用羧肽酶 Y 水解法测定 C-端, 认为 C<sub>2</sub> 多肽可能有两类, 即-Val-Ser-COOH。关于 C 醇溶蛋白二级结构, 不少人认为是 β-折叠, 没有 α-螺旋和 β-片层, 是由于脯氨酸的存在, 在 N-端每隔 2、3、4 个残基就出现 1 次脯氨酸, 而形成 α-螺旋或 β 片层的最小残基数分别为 5、6。

**D 组醇溶蛋白**, 占总醇溶蛋白 2%~4%, 分子量为 100 000 000 以上, pI 8.0 左右, 含有较多甘氨酸。品种间变异很小, 单向电泳仅具一条带, 但双向电泳或其为他高分辨率方法表明它包含若干等电点不同的多肽, 并可能以聚合的形式存在于生物体。

众多证据表明 B 组醇溶蛋白和 C 组醇溶蛋白有极明显的多态性, B 组至少三四十个多肽, C 组至少有一二十个多肽, 每种多肽在品种和地理上的分布有差异, 同一组内各多肽分子量、等电点等不同, 却有相似的氨基酸组成和末端氨基酸序列。对这些现象目前一般认为编码 B 组醇溶蛋白、C 组醇溶蛋白的 Hor2、Hor1 位点是多基因簇, 由一原始基因经重复、趋异形成的紧密连锁基因群。由于醇溶蛋白不承担重要生理功能, 可以忍受较多突变, 故有明显的多态性。点突变、缺失和/或插入可能对多态性起作用, 除了造成等电点和溴化氰断裂型改变外, 后者通过不对等交换或对错误配对 DNA 的修正, 改变了多肽分子量。这些趋异途径也可解释同组多肽有不同的等电点和分子量却有相似的末端氨基酸序列。有研究资料表明, 组内各多肽在序同源程度上表现

出差异, 这可能暗示重复、趋异是在长时期内分几次发生的。可能由于检测方法限制和等位基因剂量效应干扰, Hor1、Hor2、Hor3 位点内部未见重组报道, 而这种重组在决定不同多肽在现代大麦系列中的分布可能起了重要作用。

**醇溶蛋白基因定位及遗传** 醇溶蛋白各组多肽基因及定位长期以来颇受重视。一致认为 Hor1、Hor2、Hor3 位于第 5 染色体。其中较完整的连锁图由 Jensen 和 Shewry 提出。二者结果基本相似, 但 Hor1-Rps4 间图距相去甚远, 分别为 1.5cm 和 15.9cm, 原因不明。Shewry 认为 Minn 与 Hor3、H、Rps 不连锁, 但 Jensen 以为 Minn 与 necl 间有松散连锁(36.8±4.2); 现有倾向认为 Minn 可能并不真正位于第 5 染色体, 有待进一步证明。另据报道, 抗白粉病基因 Mlao、Mlle 与 Hor1、Hor2 连锁, Hor1、Hor2 间距 0.161±0.026cm, Mla 位于二者之间, 跟 Hor1、Hor2 间距 +0.064±0.020 和 0.082±0.24。Hor1、Hor2 和 Mla、Mlle 的紧缩密连锁, 客观上造成某些抗白粉病基因与特定醇溶蛋白等位基因联合; 在一些情况下, 育种时引进抗白粉基因, 同时也就把某些醇溶蛋白等位基因引进来。这一连锁, 意味着醇溶蛋白分析可作为抗白粉病育种的初级检测。从杂交子二代分离看, Hor1、Hor2、Hor3 均为 1:2:1(P>0.05), 表明是共显性遗传。

比较大麦醇溶蛋白基因位置与相应基因在小麦上的位置很有意义。小麦高分子量型蛋白(HMW)由等位基因 Glu1 编码, 位于第 1 同源染色体长臂, 距着丝粒 9cm。大麦第 5 染色体着丝粒可能位于 fs2 的短臂端, 这样, Hor3 距着丝粒大约也是 9cm。小麦 W-型醇溶蛋白与 C 组醇溶蛋白同源, 由 Gli1 编码, 在第 1 染色体短臂, 距 Glu1 66cm, 与 Hor1 和 Hor3 的间距(64.8±3.3cm)很接近。小麦 r-型醇溶蛋白与 B 组醇溶蛋白多肽氨基酸组成相似, 由 Gli1 编码; 这样, 小麦 Gli1 可能对应于大麦的 Hor1 和 Hor2。小麦醇溶蛋白基因 Gli2 在第 6 同源染色体短臂。

**利用醇溶蛋白多态性进行品种鉴定** 不同种与品种醇溶蛋白并不完全相同, 构成了差异。由于多肽是基因产物, 因而特征多肽是相对稳定的; 虽然环境因子可能影响蛋白含量, 但特征多肽的有无全然不受影响, 这样, 醇溶蛋白就成为品种的标记或“指纹”, 广泛应用于品种或种的鉴定。分离各醇溶蛋白多肽的方法有电泳, 包括早期使用的淀粉凝胶电泳(SGE)、尿素-聚丙烯酰胺凝胶电泳和目前广为使用的十二烷基磺酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)、等电聚焦凝胶电泳(IEF)及双向电泳。随着生物技术的不断更新, 目前多采用高效液相色谱, 其中用得最多的是反向高效液相色谱(RP-HPLC), 不仅加快了分析速度。结果还可自动分类, 鉴别出一些电泳无法甄别的相似品种。Bateg 提出的离子交换柱层析也可快速而精确地分离多肽, 而所需设备比较简单。Deichl 和 Donhauser 发展了定量免疫法, 即以醇溶蛋白多肽为抗原的抗原抗体反应, 可以定量、检测到一些不易区分的品种, 并且构建的单克隆抗体有可能允许在短时期内检测大量样品。如果说上述方法是以多肽为目标, 那么 Burt 和 Rivin 提出的方法是直接对准基因。他们以醇溶蛋白基因 DNA 限制性酶切片段长度的多态性为指纹, 即以 DNA 限制性核酸内切酶(Hind III 和 Eco RI)酶切 Hor1、Hor2、Hor3, 再通过吸印转移法, 用 C 组醇溶蛋白、B 组醇溶蛋白、D 组醇溶蛋白 cDNA 克隆与酶切片段杂交, 差异表现为杂交片段数目和/或电泳迁移率不同, 达到鉴定目的。

**蛋白质体和发育中醇溶蛋白积累** 1981 年, Milfin 指出, 大麦醇溶蛋白在粗糙内质网合成并聚集成团, 然后从内质网破出, 形成不规则沉淀体(蛋白质体), 其表面没有完整的膜, 但有许多小泡, 并与粗糙内质网仍有粘连。

据 Rahman 观察, 大麦受精后胚乳发育远比胚早, 14a 胚乳液状体, 18a 电泳检测不到特征带型, 但此后醇溶蛋白合成迅速增加, 20a 胚乳达干重的 40%, 可见电泳带型, 22a 胚乳已达干重的 60%。在发育过程中, 幼小胚乳时 C 组醇溶蛋白达到高峰, 约占总醇溶蛋白的 20%, 但渐减至 26a 的 14%, 并稳定下来; 相应

观察到 B<sub>1</sub> 的增加,从幼小组织的 30% 到成熟种子的 50%。由此可见,Hor2、Hor1 的表达是有差异的。另外,若硫成为限制因子,也将导致 B 组、C 组比例的改变,因为合成 B 组醇溶蛋白需要含硫氨基酸,而 C 组肽几乎不含半胱氨酸,籽粒发育过程中的 A 组醇溶蛋白的相对量也渐减。值得注意的是组内各多肽积累速率也有差异如 B 组醇溶蛋白、B<sub>1</sub> 相对增加,而这种增加不可能是其他 B 组分转化造成的。因为一方面从溴化氰切带型看,B<sub>1</sub> 有两个高等电点多肽,它们与 B<sub>2</sub>、B<sub>3</sub> 的多肽明显不同;另一方面,检测到 mRNA 的变化与之吻合,cDNA 克隆杂交也证明之。这意味着同一复合基因簇的表达有所不同,而这一基因簇很可能受律动调节。但也有人认为这是由于 mRNA 稳定性不同造成的。

大麦高赖氨酸突变体及其与醇溶蛋白的关系 最初,人们在玉米中发现高赖氨酸突变体,随后在大麦、高粱等作物中也陆续发现。大麦有 18 种突变体或系列,对其中部分进行了遗传分析和基因定位,主要涉及的染色体有第 1、5、6、7 号。

Ris $\phi$ B<sub>3</sub> 有影响但小于前者。在相关的 mRNA 上也看到了这种表象。值得注意的是 Ris $\phi$ 1508 中并未发现 Hor2 位点的严重缺失(对比 Ris $\phi$ 56)。B<sub>1</sub> 和 B<sub>3</sub> 的相对比例也受另两个突变基因的影响,它们是 Ris $\phi$ 13 第 6 染色体上的 *lyt5f* 和 Ris $\phi$ 7 的未定位高赖氨酸突变基因。所有这些突变基因可以认为是调节者,可位于也可不位于第 5 染色体。这些基因可能还存在多效效应。

Kreis 等研究了 Rir $\phi$ 56 后认为,其醇溶蛋白量比通常的品种降低 30%,其中 B 组醇溶蛋白减少 3/4,C 组醇溶蛋白增加一倍多,D 组醇溶蛋白没变化。电泳表明并非所有的 B 组醇溶蛋白多肽受到同样影响,一些在亲本是主要的条带消失了,而较弱带却大大地加强。从发育胚乳提取 Poly(A<sup>+</sup>)RNA 体外合成多肽,发现缺少合成 B 组醇溶蛋白主要多肽的 mRNA 而有合成次要多肽的 mRNA,后者的量为提高;有非常多的 C 组多肽的 mRNA,分子克隆杂交也显示缺少与 B 组醇溶蛋白相关克隆杂交的 Poly(A<sup>+</sup>)RNA 而含有与 C 组醇溶蛋白相关克隆杂交者。进一步从发育中的 Carlsberg (Ris $\phi$ 56 亲本)和 Ris $\phi$ 56 提取 DNA,以限制性核酸内切酶 Hind III 消化,用电泳分离片段并转移到硝化纤维膜,再与<sup>32</sup>P 标记的克隆 PC179(与 B 相关)DNA 杂交,Carlsberg I 有 11 个残基片段能杂并,每个单倍体基因组至少有 13 个与 B 组醇溶蛋白有关的基因拷贝,而 Ris $\phi$ 56 可杂交的仅 2 个 Hind III 酶切片段(24kg. 76kd)。遗传分析表明 Ris $\phi$ 56 突变位点在 Hor2,估计 Hor2 的缺失片段至少约 9 个。与亲本比较,没有证据表明 Ris $\phi$ 56 的 B 组醇溶蛋白基因序列发生重组或改变;发育过程中也无基因放大,因而不太可能是放大机理变异造成的改变。

上两例高赖氨酸突变体虽然最终都表现为醇溶蛋白减少,赖氨酸含量增加,但机理完全不同。

醇溶蛋白基因位点是紧密连锁的基因群,在杂交时很少发生基因内重组,因而想通过杂交从若干系列聚集更多的高赖氨酸醇溶蛋白多肽而得到一高赖氨酸品种似乎是不可能的。目前在大麦中提高赖氨酸育种方法主要有两种,一是通过诱变,使调节基因发生碱基突变,以控制醇溶蛋白合成比例;另一是通过遗传操作,对醇溶蛋白结构基因进行修饰。

#### 参考文献

- 1 Batey I L. J. Cereal Sci., 1984. 2: 241~248
- 2 Brandt A. Carlsberg Research Communications. 1985. 50 (69): 333~345
- 3 Burbidge, M. J. Seed Sci. and Technol., 1986. 14(3): 619a~629
- 4 Deichl A Donhauser S. J. of Institute of Brewing, 1985. 91, 133
- 5 Festenstein G N, shewry P R. Planta, 1984. 162: 524~531
- 6 Giles B E. Evolution. 1984. 38(1): 34~41
- 7 Griffiths D W. J. Sci. Food Agric, 1987. 38: 229~235
- 8 Pomortsev A A. Genetika. USSR, 1985. 21(4): 629~639

9 Shewry P R. Heredity, 1983. 50(2): 179a~189

10 Talham A S. Biochem. J. 1985. 226: 552~562

11 Thompson R D. Plant Science Letters, 1983. 29: 295~304  
(中国水稻研究所湛小燕撰)

**油菜甾醇内酯** brassinosteroida S. BRS 油菜素内酯 (Brassinolide), 简称 BR, 是 1979 年格鲁夫 (M. D. Grove) 等首次从油菜花粉中分离获得的一种具有调节植物生长活性的甾醇化合物。随后,又从不同植物材料中发现并分离得到许多与 BR 相关的甾体化合物,这些天然的以及有关的化学合成的甾体物质统称为油菜甾醇内酯,亦有人称其为第六激素。由于 BR 的生理活性极强,具有促进农作物增产和提高抗逆性等应用前景,日益受到广泛的关注和重视。

20 世纪 30 年代,美国农业部即着手从花粉中提取促进植物生长物质的研究。1970 年,米切尔 (J. W. Mitchell) 等将油菜的和桉木的花粉提取液施于菜豆第二节间,能产生一种异常生长,不仅伸长,还有膨胀、弯曲反应,于是提出油菜花粉中含有新的脂类激素,称为油菜素 (brassinin)。1972 年,他们证明油菜素能提高作物产量和提高种子活力。为了分离活性成份,1975 年美国农业部利用菜豆第二节间伸长为生理系统,从 227kg 油菜花粉中分离纯化得到 10mg 结晶物,经 X-光衍射分析确定其结构为 22R, 23R, 2a, 3a-四羟基-24-甲基-B-高-7-氧-5 $\alpha$ -胆甾烷-6-酮,命名为油菜素内酯。BR 及其相关类似物广泛存在于植物界,已发现 30 余种。目前查明含有 BRs 的高等植物有被子植物 13 种,其中双子叶植物 10 种,单子叶植物 3 种,还有裸子植物 2 种以及 1 种绿藻,它们分布于植物的各种器官,如花粉、种子、茎、叶等,以花粉和未成熟的种子含量最高。

迄今为止,所有天然的 BRs 都是 5 $\alpha$ -胆甾烷衍生物,与植物甾醇一样分为 C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 类,即在 C<sub>24</sub> 上分别无置换基、有甲基(次甲基)和有乙基(次乙基),其他的构型特征为:(1)A/B 环反式稠合,A 环为 2 $\alpha$ 、3 $\alpha$ -顺式羟基(香蒲甾醇和茶甾醇仅 C<sub>3</sub> 位有  $\alpha$  或  $\beta$ -羟基);(2)B 环的氧化状态可分为内酯型的、酮型的和非氧化型的。根据上述结构特征,美国和日本等国先后完成化学合成。1986 年横田等和 1988 年曼德瓦 (N. B. Mandava) 详细叙述了 BRs 化学结构与生物活性的相关性,建立了水稻第二叶片倾斜、菜豆第二节间伸长等式羟基,侧链 C<sub>22</sub>、C<sub>23</sub> 为 R 或 S 构型羟基;(2)B 环氧化状态的活性顺序为 7 员-一氧内酯型最强,6-酮型中等,非氧化型最弱。在天然的或合成的化合物中,油菜素内酯是活性最强的一种。

是活性最强的一种。

大量生测试验资料证明,油菜素内酯具有极强的生理活性,具有与生长素和赤霉素相似的促进生长作用,其有效作用浓度为 nM-pM,比赤霉素作用浓度  $\mu$ M 低得多。1979 年,约普 (J. Hyopp) 等在绿豆的和豌豆的下胚轴伸长试验中,发现 BR 与 GA 混合处理有明显的加成作用。1985 年,滕见报道生长抑制剂 ancymidol 可抑制 GA 引起的黄瓜下胚轴伸长的促进效应,而 BR 引起的促进生长效应则几乎完全不受 ancymidol 的抑制,进一步说明二者在促进生长效应中的作用位点不同。

BR 和 IAA 都能促进赤豆上胚轴、玉米中胚轴伸长和菜豆钩状体开放,两者混合处理有明显的增效作用,并且这种增效作用只有在先用 BR 处理、后用 IAA 时才会发生,处理顺序颠倒就没有这种效应,若用生长素抑制剂 TIBA 和 PC1B 能够抑制上述反应。1985 年,滕见观察到黄瓜下胚轴和菜豆第一节间弯曲是由于 BR 提高了组织敏感性,如果再用 IAA 处理可以产生几倍的生长反应,因此他们把 BR 视为增强剂。BR 和 IAA 均刺激乙烯生成,BR 是通过诱导乙烯前体 ACC 和 MACC 而起作用,BR 和 IAA 对乙烯生成表现加成作用。生长素参与 BR 的作用方式尚不清楚。1983 年,科恩 (chon) 和门特 (W. J. Meudt) 强调指出,在菜豆上 BR 的作用与 IAA 代谢无关,既不影响 IAA 合成,也不影响其降解。1991 年,吴登如和赵毓楠报道绿豆上胚轴经 BR 处理能维



持较高的 IAA 水平,并显著抑制与 IAA 代谢密切相关的 IAA 氧化酶和过氧化物酶活性。1985 年,横田孝雄提出油菜素内酯的作用可能是增强组织对生长素的敏感性,并且参与与生长素作用有关的限速步骤,从而促进组织生长。

BR 与细胞分裂素之间的相互作用因实验材料而异。在促进黄瓜子叶扩张中,BR 有类似细胞分裂素的作用,不过 BR 的效应仅为相同浓度激动素的 50%,而在小麦叶片展开中则 BR 效应明显高于 BA 的效应。另外,1986 年赵毓橘等曾经提出 BR 对绿豆上胚轴具有保幼延衰作用,但不能阻止离体叶片衰老。赵毓橘发现,BR 促进子叶衰老,ABA 作为生长抑制剂却对 BR 诱导的离体黄瓜子叶衰老过程有强烈的阻抑作用,其作用机理尚待研究。

1987 年,Mandava 等以绿豆上胚轴为材料,用核酸和蛋白质合成抑制剂均能抑制 BR 诱导的合成作用。同时,凯内特(Kanilish)等也曾报道 BR 明显增强绿豆、菜豆的 RNA、DNA 聚合酶的活性和促进 RNA、DNA、蛋白质的合成。最近,克洛士(S. Clouse)报道大豆上胚轴用 BR 处理后能够在体外合成新的多肽化合物。徐如涓和赵毓橘报道,光、暗条件下 IAA 氧化酶同工酶谱不同。上述这些结果表明,BR 可以增强基因表达,诱导新的特异蛋白质的合成,进而调节植物的生长发育过程。

BRs 在农业上的应用研究已经有很大进展。早期用油菜素粗提物施于菜豆曾获得豆荚增产 43.6% 的明显效果。美国农业部和日本农业研究单位报告极低浓度的 BRs ( $10^{-4}$ ~ $10^{-2}$ ) 可以促进多种粮食作物及蔬菜生长和增加产量。中国自 1985 年开展油菜素内酯化学合成和应用研究以来,在小麦、玉米、烟草、瓜果、芹菜等作物上已取得明显的增产效果。BRs 应用于农业主要表现在:增加作物产量,提高作物的抗逆性,减轻某些农药(如除草剂)的药害和提高作物抗病能力。

油菜素内酯类化合物的研究方兴未艾,很多领域需要深入研究。BR 在体内的生物合成途径及生理生化作用机理尚不清楚。BR 是植物激素中唯一的甾体激素,因而从细胞水平和分子水平更深入地研究 BR 调节植物生命活动的规律,不仅具有理论意义,对现代农业发展也有重大的实际意义。

参考文献

- 1 Mitchell J W. Nature, 1970,225:1065~1066
- 2 Crove M D. Nature, 1979,281:216~217
- 3 Yopp J H. et al. Physiol Plant, 1979,46:247~254
- 4 Kalinich J F. et al. J Plant Physiol, 1985,120: 207~214
- 5 Yokota T. et al. Plant Growth Substances, 1985,129~138
- 6 Mandava N B. et al J Plant Physiol, 1987,128: 53~65
- 7 Mandava N B. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol. 1988,39: 23~52
- 8 Clouse S. et al. 200th Meeting Amer. Chem Soc. 1940  
(中国科学院上海植物生理研究所王玉琴副研究员撰)

大豆同工酶类 soybean isozymes 同工酶指分子结构及理化性质不同而催化作用相同的酶,它代表着基因的多型性。

同工酶广泛存在于植物的不同种类、不同品种和不同器官以及生长发育的不同时期。研究同工酶对于探究大豆遗传育种和变异、起源和进化、分类以及生长发育和病理生理等方面有着理论意义和实践意义。在大豆中已发现有 28 种同工酶。

大豆同工酶电泳位点的遗传模式及定位研究对遗传育种工作中的基因连锁图谱的建立非常重要,它能帮助解决大豆图谱非常不完全的问题。1968 年,巴特里(Buttery)和巴泽尔(Buzzell)首先用电泳法发现不同大豆品种种皮的过氧化物酶(POD)活性有高低之分,后来证实这是由一对基因控制的。显性基因(Ep)决定高活性,而隐性基因(op)决定低活性。1978 年,戈尔曼(M. B. Gorman)和基安格(Y. T. Kiang)发现乙醇脱氢酶(ADH)具有 4~5 个基因控制的遗传模式,淀粉酶及四唑氧化酶也具有各自的遗传控制模式。1983 年,他们又研究另外 8 种同工酶。到 1991 年

止,人们已先后对 24 种大豆同工酶进行了电泳位点的遗传模式的研究(基安格等,1987,1989;杜恩格 J. Y. H. Doong,1988)。

人们围绕大豆同工酶之间以及它们与其他抗病及形态学性状之间的连锁关系做了大量的测定工作。1980 年,希尔德布兰德(D. F. Hildebrand)等人首先报道了 Ap(酸性磷酸酶)与 Ti(胰蛋白酶抑制剂)连锁,属于大豆连锁群 9。之后,人们在研究中发现 Ap 与 Lap<sub>1</sub>(亮氨酸氨肽酶)、Pgd<sub>1</sub>(磷酸葡萄糖脱氢酶)与 Pgi<sub>1</sub>(磷酸葡萄糖异构酶)、Lap<sub>1</sub> 与 Ti、ACO<sub>3</sub>(乌头酸酶)与 Sp<sub>1</sub>(淀粉酶的一个位点)连锁,还发现 Ep 与 Fr<sub>1</sub>,Adh<sub>1</sub> 与 W<sub>1</sub>(花色)、Idh<sub>1</sub>(异柠檬酸脱氢酶)与 F 及 R<sub>1</sub>(结瘤反应性状)、ACO<sub>2</sub> 与 R<sub>2</sub> 等都有连锁关系。所有研究中其它各项均是独立遗传的。

在品种分类及鉴定方面,开展工作最早的是巴特里和巴泽尔,他们根据大豆种皮中 POD 活性高低将大豆分成两大类。戈尔曼、基安格及奇安格等人则在这方面做了大量较为系统的工作。他们在 1982 年建立了大豆 12 个同工酶谱类型图,并利用此同工酶系统将 253 个供试品种中的 168 个鉴定出来。1987 年,杜恩格与基安格等人建立了大豆 16 个同工酶谱类型图,列出 367 个品种的 8 种同工酶谱类型。因这些研究工作作为大豆遗传育种及品种分类、鉴定提供了有用的依据而得到应用。1980 年,韦特(Wetter)发现大豆一烟草体细胞杂种中天门冬氨酸氨基转移酶与 ADH 同工酶谱皆具有来自双亲的一些酶带。刘学军、苗以农(1991)则发现具有杂种优势的大豆后代辽豆 3 号及吉林 21 其 POD 同工酶谱具有偏父现象。基安格等人(1983)还认为由同工酶位点计算出的遗传距离可成为选择成功父母本的指标。刘德璞等人(1989)发现 DNA 导入后引起突变的材料的 SOD(超氧化物歧化酶)同工酶谱具有供体的一些同工酶谱带,证明 DNA 导入的成功及在突变育种上的可能性。人们还利用同工酶技术发现了分别缺失 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub> 以及同时缺失 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub>,L<sub>2</sub> 和 L<sub>3</sub>(L: 脂肪氧化酶)的大豆材料,也获得 β-AM 和腺酶分别缺失的品种(希尔德布兰德,1981;喜多村,1983,1986)。这些材料的发现对大豆遗传育种和上述酶类生理作用的研究很有意义。

同工酶技术的应用在研究栽培大豆的起源、进化、分布及其与野生大豆的关系方面也取得一些进展。1982 年,海莫威茨(T. Hymowitz)等人测定了 SBTi A<sub>2</sub> 和 Sp<sub>1</sub> 电泳位点在 15 个亚洲国家和地区大豆群中的分布,结合电泳结果和其它方面的资料指出,来自亚洲的大豆可分为 3 个基因中心,包含 7 个种质库,认为大豆是由中国传向其它亚洲国家的。奇安格与戈尔曼(1981,1984)则发现野生大豆无论是杂合频率还是酶多态水平都高于栽培大豆,认为这是由于野生大豆要适应各种复杂环境,而栽培大豆的酶多态性则由于长期驯化而损失。布罗茨(S. L. Broich)、虞京藏(1983)及徐豹等分别对大豆 Ep 基因频率、酯酶谱及 SOD 活性的分析表明,野生菌种>中间型>栽培种;徐豹(1990)还提出大豆 SOD 变异的可能途径。

大豆同工酶类生理作用研究较多的有脂肪氧化酶(LOX)、POD 和 SOD。大豆含有大量的 LOX,它使大豆产生豆腥味,降低了大豆制品的食用价值和营养价值。这是由于 LOX 引起酶促脂质过氧化作用所致。有人认为 LOX 还与衰老有关,其活性随植株生长而增加,并在加速衰老实验中随种子活力下降而降低。但旺(J. YWang),1990 年的研究资料表明,LOX 的 3 个同工酶带之一,L-2 可能在保持种子活力及大豆生长方面起一定作用,而不是促进衰老,从而认为 LOX 并不是种子衰老的原因。A. Kaeperska 1985 年报道由 LOX 催化的多不饱和脂肪酸的氧化的加强,导致 ACC 产生的乙烯的增加。但 LOX 确切的生理功能还不十分清楚。

POD 同工酶是人们研究最多多功能却非常不明确的一种酶。它广泛存在于植物体内,可能参与调节吲哚乙酸水平、乙烯的形成、细胞壁形成,调节膜的透性、脂肪酸氧化,控制 O<sub>2</sub> 透过种皮的种子休眠及抗病等多种生理过程,有人认为它可作为细胞分化的指标。在对大豆 POD 同工酶的研究中,齐哥德勒(J. A. Zygadlo) 1982 年,刘学军、苗以农于 1990、1991 年发现大豆各

器官在生育过程中表现具有特殊差异的特有同工酶谱。衰老和人工衰老引起不同 POD 同工酶谱带的消失或迁移率发生变化,种子活力也下降(A. S. Rao, 1986)。种子中 POD 主要分布在种皮中,可能与种皮的硬化、抵抗传染病及种子的贮存质量有关(巴特里等,1968;艾尔曼,1976)。对 POD 与抗病的关系研究较多。拉马拉基(N. V. Rameraje, Urs)1974 年报道感病的大豆植株同健康植株相比,POD 活性要增强,抗病品种要高于不抗病品种。宋英淑(1986)则发现抗旱性越强的品种,其叶片 POD 活性的相对变化越小。

SOD 是清除 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 专一性的酶。近几年来,它在高等植物的氧伤害、器官衰老及逆境中所起的防护作用已逐渐获得证实。大豆,随种子成熟,其 SOD 活性增强,但各谱带在种子发育过程中同步表达(庄炳昌,1986)。1990 年,罗广华等发现高氧促使大豆幼苗内产生 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 速率增长,同时又使幼苗内 SOD 活性水平提高以减轻 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 增高引起的细胞伤害。梁峰等人 1991 年发现,聚乙二醇处理种子后, SOD 活性高于受低温吸胀冷害的种子叶的活性,认为 SOD 保护正在修补的膜系统免遭伤害。

同工酶的研究和利用显示着广阔的前景和强大的生命力,但还有许多工作要做。大豆的遗传连锁图谱非常不完全,还需在同工酶分离分析技术进一步完善的基础上做大量细致的工作。未来 10~20 年,多种同工酶系统将成为大豆品种的鉴定、分类及育种工作中非常重要的工具,使这些方面的工作向分子水平发展。各种同工酶尤其是同工酶谱中各条带的生理功能还远未搞清楚,但这方面的工作将继续进行并可能有所突破。

参考文献

- 1 Buttery B R, I. Buzzell Crop Science. 1968, 8, 722~725
- 2 Gorman M B, Journal of Heredity. 1989, 69(4): 255~258
- 3 Kiang Y T, Gorman M B. Soybean. In Isozymes in Plant Genetics and Breeding Part B. 1983, 295~328
- 4 Wetter L R. Chromosome and isozyme studies on cells derived from protoplast fusion of *Nicotiana glauca* with *Glycine max - Nicotiana glauca* cell, hybrids Theoretical and Applied Genetics. 1980, 57(6): 273~276
- 5 梁峰,等. 植物生理学报, 1990, 32(7): 538~543
- 6 徐豹,等. 植物学报, 1990, 32(7): 538~543
- 7 刘学军, 苗以农. 中国油料, 1992, 1: 12~14

(东北师范大学刘学军撰)

植物的硝酸还原酶 nitrate reductase in plants

植物吸收利用的无机氮有 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (主要是 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)。NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 进入植物体内的同化过程是: 外界 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>  $\xrightarrow{\text{吸收}}$  体内 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>  $\xrightarrow{\text{硝酸还原酶}}$  NO<sub>2</sub><sup>-</sup>  $\xrightarrow{\text{亚硝酸还原酶}}$  NH<sub>4</sub><sup>+</sup>  $\xrightarrow{\text{谷氨酸合成酶}}$  谷氨酸  $\xrightarrow{\text{谷氨酰胺合成酶}}$  谷氨酰胺

转氨酶 → 其他氨基酸 → 蛋白质。硝酸还原酶(简称 NR)是这一过程的第一限速酶,它具有以下特点:(1)植物中显著的诱导酶之一,易被诱变得到突变体;(2)酶结构复杂,由多个亚基组成,含有不同组分酶,其活性易受体内内外因素影响;(3)是氮素代谢的关键酶,影响农作物的总氮和蛋白氮水平,与作物的耐肥性有密切关系,并同时具有功能多样性的特点,对植物的其它代谢过程如能量代谢、铁离子同化与运转、水分胁迫、光呼吸、氯离子的还原、分子氧(O<sub>2</sub>)的分解释放等也有重要影响。NR 在植物基因表达、蛋白质分子基础研究和植物代谢途径及调控研究中占有十分重要的地位。

1952 年, H. Evans 和 A. Nason 在红色链孢霉最早发现 NR, 并于次年在高等植物中发现它, 此后发现 NR 广泛分布于细菌、真菌和高等植物的根、茎、叶、胚、子叶、盾片、糊粉层、花粉粒等多种组织和器官中, 因植物的种类和器官的不同, NR 分布及活性有很大的差异, 多以叶片活性最强。有些植物 NR 则存在于

特定类型的细胞中, 如 C<sub>4</sub> 植物的叶绿细胞、玉米根部表皮细胞等。现已证明, NR 一般定位于细胞质中, 而不在叶绿体或其他细胞器中。NR 有以下几种类型:(1)单特异型 NADH:NR (EC1. 6. 6. 1), 主要存在于高等植物和某些藻类中;(2)双特异型 NAD(P)H:NR (EC1. 6. 6. 2), 主要存在于酵母、绿藻和高等植物中;(3)单特异型 NADPH:NR (EC1. 6. 6. 3), 主要存在于霉菌中;(4)Fd:NR, 只存在于低等生物中。NADH:NR 是高等植物中最普遍存在的一种形式。在一些热带豆科植物中仅含有 NAD(P)H:NR, 无 NADH:NR; 玉米盾片和根中 NADH:NR 与 NAD(P)H:NR 并存。在水稻和大麦中也发现有 NAD(P)H:NR。有迹象表明 NAD(P)H:NR 似乎存在于所有单子叶植物特别是根中, 其功能尚不清楚, 尤其是有 NADH:NR 存在时, NAD(P)H:NR 是如何起作用的, 有待于进一步研究。

NR 的分子生物学研究的技术难点是有生化特性纯酶的制备与鉴定。Blue Dextran-Agarose 亲和层析, 并加入蛋白酶抑制剂的方法(Solomonson 1975, Campbell 1986)及单克隆抗体与免疫电泳新技术的采用, 推动了 NR 的纯化和特性的研究。对针链藻、南瓜等 10 多种植物中分离出的高纯度的 NR 进行比较, 酶的分子量从 75~460kd 不等, 亚基数目也不相同。但一般认为酶是由相同亚基组成, 持“NR 由两个 100kd 左右的亚基组成”的观点者居多。以南瓜子叶为例来说明 NR 的结构与特性。南瓜子叶的 NR 是由两个完全相同的亚基组成的二聚体, 亚基分子量为 105~115kd, 由 FAD、亚铁血红素(以 cyt b557 形式存在)和铜辅因子 3 部分组成, 每个亚基可独立完成催化作用。该酶可被看作一个多中心的氧化还原酶复合体, 在催化 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 还原过程中, 其

电子传递路线为 NAD(P)H  $\xrightarrow{I}$  (FAD  $\xrightarrow{II}$  cyt b557  $\xrightarrow{III}$  Mo)  $\xrightarrow{IV}$  NO<sub>3</sub><sup>-</sup>。除作为电子载体外, 部位 I 还具有脱氢酶的功能, 能利用 NAD(P)H 还原 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Fc[CN]<sub>3</sub>、哺乳类细胞色素 C 等, NR 对 Fe<sup>3+</sup> 的还原功能可能对植物体内铁离子代谢起着重要作用, 该部位能被巯基试剂(ρ-HMB)强烈抑制; 部位 IV (末端 NR)能利用 FADH<sub>2</sub> 或还原态 MV 还原 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 氰化物和叠氮化物是该部位的底物竞争性抑制剂。Solomonson(1986)获得该酶的两个多肽片段, I: 分子量较小, 含 FAD, 能利用 NADH 还原 Fc(CN)<sub>3</sub>; II: 分子量较大, 含 Mo 元素, 可利用还原态 MV 还原 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 这直接证明 NR 有两个活性中心。NR 催化反应的双位“乒乓”稳态动力学机制也支持该假说。不过, 在某些植物中还发现其他动力学机制, 如随机序列快速平衡机制、底物随机结合和产物“乒乓”释放机制等。就 NR 的氨基酸组成而言, 通过对烟草、大麦、玉米等基因的克隆及其核苷酸顺序的确定, 再由上述几种 NR 基因推译出的氨基酸顺序有 80% 的同源性。此外, 将烟草 NR 基因推译出的氨基酸顺序与已知顺序的其它蛋白质比较, 发现 NR 的 cyt b557 和脱氢酶组分(包括活性中心 I)分别与哺乳类细胞内质网上的 cyt b5 和 NADH-cyt b5 还原酶(一种黄素脱氢酶)惊人的相似。这些结果将有助于 NR 生化特性的深入研究。

NR 是植物的诱导酶, 对 NR 的诱导机理有酶蛋白从头合成和酶前体活化两种观点。Funkhouser 等(1983)认为小球藻中存在 NR 前体, 并已分离得到酶的脱辅基蛋白——酶前体。张德颐也报告了有酶前体的存在, 在非诱导条件下植物组织含有一定的 NR 活力也是 NR 前体存在的佐证。Somers 等(1983)用火箭免疫电泳技术证明 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 诱导 NR 活性从零逐渐增大, 与 NR 蛋白质水平增高呈平行关系, 否定了酶前体的存在。Campbell(1986)进一步用酶联免疫吸附法(ELISA)发现玉米 NR 蛋白合成先于 NR 活性的出现。由此看来, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 诱导 NR 蛋白的合成, 酶活的表达受其他因子影响。进一步深入到核酸水平研究发现 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的主要作用在于 NR 基因表达的启动, 光则可能主要通过光敏素系统作用于 NR-mRNA 的转录。有人推测, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 可能通过与一种 NR 调节蛋白结合, 然后插入 NR 基因附近的核苷酸序列, 活化 NR 基因表达的启动子, 使 NR-mRNA 被有效地转录。也有人认为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 可能不是直接活化 NR 基因的效应物, 而硝酸盐同

化过程中的某些中间产物可能与 NR 基因活化有关。20 世纪 70 年代以来,用细胞突变体的方法,已从烟草、大麦等植物中得到两类 NR-突变体,相辅因子基因突变型和脱辅基蛋白基因突变型,它们的杂种细胞又可恢复 NR 活力,表明它们的基因型是互补的。Miller(1983)的烟草 NR-突变体杂交试验结果指出, NR 受到两个不连锁基因的控制,它们就是酶的脱辅基蛋白结构基因。Sherrard(1976)等指出,小麦中 7B 和 7D 两条染色体参与 NR 活力的调节。林振武(1989)报道,水稻 NR 诱导形成受到基因转录的控制,认为至少有两个基因位点参与酶活力的调节,一个是酶的编码基因,参与酶的合成;另一个是酶钝化蛋白基因,参与酶的衰减。NR 蛋白的合成调节可发生在基因水平、转录水平和翻译水平上;NR 翻译后的活性调节则主要通过酶的活化与钝化、氧化与还原两个系统来调节。现已从高等植物中分离得到 NR 稳定因子、活化因子、钝化因子和抑制因子,它们对 NR 都具有特异性。引起酶失活的钝化蛋白有 NR 结合蛋白和 NR 水解蛋白,对 NR 专一性的水解蛋白已分别从玉米和小麦中分离出来。植物体内 NR 有氧化(活性态)和还原两种状态,体内许多代谢物(如 NADH)影响该酶两种状态的可逆转变,从而调节 NR 活性。

NR 极易受体内外环境因素的影响。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的吸收与输送以及从贮存库中的释放,直接影响 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的底物效应;光、pH 值、植物激素和有机酸对 NR 活性也有很大影响。低 pH 作用于 NR 的从头合成,而不是对酶前体的简单活化,作用机理尚不清楚。至于植物激素,一般认为 6BA 促进 NR 活性而 GA、ABA 则抑制 NR 活性;但也有 ABA 促进 NR 活性的报道,植物激素在调节 NR 活性中的作用值得深入研究。

NR 的研究正由细胞水平不断深入到分子水平,成为被充分研究的植物酶之一。可预料以下几方面将是研究的热点:(1)NR 结构与特性的深入研究,包括 NR 的初级结构、高级结构及其催化机制,植物种间 NR 差异及其在进化上的意义;(2)NR 基因及其表达,利用分子克隆技术,开展 NR 基因分离、鉴定和克隆、表达的研究;(3)NR 诱导机制和活性调节,利用分子生物学技术,在 NR 基因水平、转录水平和翻译水平上进行研究;(4)NR 功能多样性的进一步研究;(5)NR 的应用研究,如 NR 与生化育种、NR 与作物固氮以及最终采用遗传工程手段利用 NR 基因改变 NR 活力,调节植物的氮代谢,从而提高作物的产量与品质。

参考文献

- 1 Miguel G, et al. Annual Review of Plant Physiology. 1981, 32:169
- 2 Sinha S K. The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants. 1981, 145~169
- 3 Kleinhofs A, Warner R L, Narayanan K R. Molecular, Cell Biology 1985, 2:91~121
- 4 汤玉玮,林振武,陈敬祥. 中国农业科学, 1985, 6: 39~45
- 5 林振武. 植物生理学通讯, 1987, 6: 8~13
- 6 Wilbur H. Physiologia Plantarum 1988, 74: 214~219
- 7 林振武,汤玉玮. 中国科学(B辑), 1989, 4: 379~385
- 8 Srivastava H S. Phytochemistry. 1992, 31: 2974

(安徽师范大学周阮宝副教授撰)

**植物几丁酶** 植物几丁酶是一种把几丁质分解为 N-乙酰氨基葡萄糖或寡聚 N-乙酰氨基葡萄糖的水解酶,几丁质是大多数植物病原真菌细胞壁的主要成分之一。在甲壳动物的外壳和昆虫表皮中也有丰富的含量,在高等植物中至今未发现该酶的底物几丁质存在,但却广泛存在有几丁酶。因此,植物几丁酶的结构、特性与功能引起植物分子病理学家们的重视。

1934 年,格拉斯曼(W. Grasmann)发表了甜杏分泌液中存在几丁酶活性的报道。20 世纪 60 年代以来,在高等植物中检测出几丁酶活性的报道越来越多。从已经纯化的植物几丁酶的性质来看,其分子量在 25 000~35 000 之间,大多数植物几丁酶的等电点在 H<sup>+</sup>浓度 10<sup>-8</sup>mol/L 以上,少数为酸性蛋白。1979 年,莫兰

诺(J. Molano)等以几丁质凝胶为吸附剂,用亲和层析法分离纯化了麦胚几丁酶,用 SDS 聚丙烯酰胺凝胶电泳法测定其分子量为 33 000,用 Sephadex G-75 柱层析测定的分子量则为 29 000。他们测定的等电点在 H<sup>+</sup>浓度在 6.31 × 10<sup>-10</sup>~3.16 × 10<sup>-8</sup> mol/L 之间。1982 年,佩格(G. F. Pegg)等人用等电聚焦的方法纯化了番茄的几丁酶,番茄几丁酶表现出内切酶活性,其分子量在 27 000~31 000 之间,等电点为 pH8.5,最适反应温度在 44°C 左右,最适反应 H<sup>+</sup>浓度在 7.943 μmol/L 左右, Km 值为 10.46 mg 几丁质 ml<sup>-1</sup>, Vmax 为 97.8 μgN-乙酰氨基葡萄糖 h<sup>-1</sup> ml<sup>-1</sup>。植物几丁酶有较高的热稳定性。1983 年,博勒(T. H. Boller)等人的试验结果显示,50°C 下处理 4h,菜豆几丁酶的活性只损失 35% 左右。此外,植物几丁酶抗水解蛋白酶的能力也较强。

植物几丁酶是可以诱导的。乙烯、重金属离子处理、病原菌的侵染、昆虫取食和机械损伤等均可诱导植物几丁酶活性的提高。1970 年,艾贝莱斯(F. B. Abeles)报道,用乙烯处理后,蚕豆叶片的几丁酶活性比对照提高 5 倍。1983 年,博勒等人用乙烯处理菜豆,发现施用乙烯 6h 后,几丁酶活性上升,24h 后比对照高 10 倍。1988 年,博勒等报道,用烟草花叶病毒接种黄瓜后,叶片几丁酶的比活提高近 5 倍,而且胞间液中的几丁酶比活比叶片中几丁酶的比活高 20 多倍,原生质体中的几丁酶活性只占总活性的 5% 左右,因此认为几丁酶活性主要存在于细胞间隙中。1986 年,梅特劳克斯(J. P. Metraux)等用致病性真菌、细菌和病毒接种黄瓜叶片,接种的第一初生叶的几丁酶活性提高 600 多倍,而未接种的第二叶的几丁酶活性也提高 100 多倍。这表明,植物几丁酶的诱导不仅具有原位性,也具有系统性。1986 年,罗比(D. Roby)等人用从甜瓜炭疽病中提取的诱导物处理甜瓜叶片,6h 后几丁酶活性上升,24h 后其活性为对照叶片的 2~10 倍,叶片乙烯的含量也伴随着几丁酶活性的提高而上升。用乙烯生物合成的抑制剂处理,乙烯和几丁酶活性的提高被抑制。另一方面,用乙烯的前体物处理则能使几丁酶活性增强。1987 年,藤峻也等人用球毛壳菌的菌丝体、几丁质和脱乙酰几丁质处理胡萝卜培养细胞,诱导几丁酶活性明显上升。同年,欣希(H. Shinshi)等从烟草培养细胞中分离纯化两种几丁内切酶,其分子量分别为 34 000 和 32 000,在没有激素的培养基上培养,几丁酶的含量增加约 5 倍,占细胞可溶性蛋白的 8%,这种诱导作用可被添加生长素和细胞分裂素所抑制。莱格兰德(M. Legrand)等则从烟草叶片中纯化了 4 种几丁内切酶,它们在烟草花叶病毒侵染时出现,其中两种为酸性蛋白,分子量分别为 27 500 和 28 500,占诱导产生几丁酶的三分之一左右;另外两种为碱性蛋白,分子量分别为 32 000 和 34 000,其比活比酸性几丁酶高。

植物几丁酶与组织和器官的发育相关。1988 年,莫克(F. Mauch)等研究豆荚发育和成熟过程中几丁酶活性的变化,发现几丁酶随着豆荚的成熟而活性增强。豆荚中的几丁酶有两种,Ch<sub>1</sub> 和 Ch<sub>2</sub>。前者可以被诱导,后者则在成熟过程中积累。欣希等人的测定结果表明,在烟草的下部叶片和根中,几丁酶活性较高。几丁酶占可溶性蛋白的 1%~4%,而在近顶端的叶片中则未能检测出几丁酶活性。

试验结果表明,植物几丁酶的调控可能是在蛋白质翻译水平上进行。1986 年,罗比等用放线菌酮作阻断剂,使甜瓜叶片几丁酶的诱导被抑制。布罗格列(K. E. Broglie)等在同年报道的研究资料中指出,几丁酶的合成可能在膜结合的核糖体上进行,并存在加工后翻译的过程。1987 年,欣希等指出,烟草几丁酶的产生至少部分是在 mRNA 水平上调控的,其方式与 β-1,3-葡聚糖酶很相似,二者是协同调控的。生长素和激动素是在 mRNA 水平上起作用来控制几丁酶的合成的。

许多植物在受到病菌侵染或用某些化学物质(如氯化汞)处理后,会产生一些蛋白质,这类蛋白质被称为 PR 蛋白(Pathogenesis-Related Protein)。PR 蛋白的功能还未完全弄清楚。许多研究结果表明,PR 蛋白是植物保卫机制的一部分。植物

几丁酶与PR蛋白有密切关系。1986年,梅特克劳斯(J. P. Mettraux)等纯化了黄瓜的一种PR蛋白并证明它就是几丁酶。1987年,莱格兰德(M. Legrand)等证明,烟草的PR蛋白中有4种是几丁酶。1990年,皮尔波因特(W. S. Pierpoint)鉴定了烟草PR蛋白中的第5种几丁酶。纳泽(W. Nasser)等于1988年报道玉米PR蛋白中有4种是几丁酶,有两种是 $\beta$ -1,3-葡聚糖酶。在1990年他们又鉴定出第5种是几丁酶的玉米PR蛋白。1988年,科姆布林克(E. Kombrink)等在马铃薯叶片产生的PR蛋白中鉴定出6种是几丁酶,两种是 $\beta$ -1,3-葡聚糖酶。1991年,布罗尼尔(R. Bronner)等用螨虫接种欧白美,在产生的PR蛋白中也发现几丁酶的存在,并认为该酶可能对植株抗螨的抗性有作用。

植物几丁酶在离体条件下对某些真菌有抑制作用。1983年,施拉姆多姆(A. Schlumberg)等证明麦胚凝集素中抑制真菌的物质是几丁酶,当去除几丁酶后,麦胚凝集素就失去抑菌能力。1988年,布罗凯尔特(W. F. Broekaert)等的研究结果表明,曼陀罗的几丁酶能够有效地抑制绿色木霉和布拉克须霉的孢子萌发,并对绿色木霉菌丝体的生长也有抑制作用。同年,莫齐(F. Mauch)等的研究资料显示,豆荚的几丁酶能有效地抑制绿色木霉,而对其它供试真菌无明显抑制作用。但是,当几丁酶与 $\beta$ -1,3-葡聚糖酶共同作用时,能有效地抑制供试18种真菌中的15种。他们认为,由于多数真菌细胞壁的外层是 $\beta$ -1,3-葡聚糖,内层是几丁质,所以,当两种酶协同作用时,抑菌能力更强。

有关不同抗病性品种几丁酶在诱导性方面的差异报道不一。1981年,佩格(G. F. Pegg)等比较了对番茄黄萎病抗性不同的两个番茄近基因系的几丁酶与 $\beta$ -1,3-葡聚糖酶在接种黄萎病孢子后的变化。试验结果表明,植株下部茎的这两种酶的活性在接种后明显提高,但抗病品系的酶活性比感病品系的低。1988年,赫德里克(S. A. Hedrick)等报道说,用炭疽病孢子接种菜豆,抗病品种几丁酶诱导速度快于感病品种。而莫克等1984年用枯萎病感染豌豆荚时,感病品种与抗病品种的诱导曲线相似,未发现显著差异。

植物在遭受病菌侵染时,体内的几丁酶活性大幅度上升;在多种植物的PR蛋白中均发现几丁酶的存在;离体试验条件下,植物几丁酶对一些病原真菌有明显的抑制作用,当它与 $\beta$ -1,3-葡聚糖酶协同作用时,抑菌能力更强,抑菌谱更广。联系到高等植物中未发现有几丁质的存在,而广泛存在几丁酶这一事实,推断植物几丁酶在植物的保卫机制中有重要作用。如何提高植物几丁酶的组成或诱导水平,以增强作物对多种病害的抗性,是植物病理学家、作物育种家和分子遗传学家们感兴趣的问题。在植物抗病基因工程中,几丁酶被认为是很有利用价值的基因之一。

#### 参考文献

- 1 Pegg G F, D H Yong, Purification and Characterization of chitinase enzymes from healthy and *Verticillium albo-atrum*-infected tomato plants, and from *V. albo-atrum*. *Physiological Plant Pathology*. 1982, 21: 389~409
- 2 Boller T, Gehri A, Mauch F, U Vogeli. Chitinase in bean leaves induction by ethylene, purification, properties, and possible function. *Planta*. 1983, 157: 22~31
- 3 Broglie K E, Gaynor J J, R M Broglie. Ethylene-vegetal gene expression molecular cloning of the gene encoding an endochitinase from *Phaseolus vulgaris*. *Proc. Natl. Sci. USA* 1986, 83: 6820~6824
- 4 Mettraux J P, T Boller. Local and systemic induction of chitinase in cucumber plants in response to viral, bacterial and fungal infections. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 1986, 28: 161~169
- 5 Shinshi H, Mohnen D and J R F. Meins Regulation of a plant pathogenesis-related enzyme, Inhibition of chitinase and chitinase mRNA accumulation in cultured tobacco tissues by auxin and cytokinin. *Proc Natl Acad Sci. USA*; 1987, 84:

89~93

- 6 Hedrick S A, Bell J N, Boller T, C J Lamb. Chitinase cDNA cloning and mRNA induction by fungal elicitor wounding and infection. *Plant Physiol*. 1988, 86: 0182~0186
- 7 Kombrink E, Schroder M, K Hahlbrock. Several pathogenesis-related proteins in potato are 1,3- $\beta$ -glucanases and chitinase. *Proc Natl Acad Sci. USA*; 1988, 85: 782~786
- 8 Mauch F, Mauch-Mani B, T Boller. Antifungal hydrolase in pea tissue I. Inhibition of fungal growth by combinations of chitinase and  $\beta$ -1,3-glucanase. *Plant Physiol*. 1988, 88: 936~942
- 9 Nasser W, Tapia M De, G Burkard. Maize pathogenesis-related proteins characterization and cellular distribution of 1,3- $\beta$ -glucanase and chitinases induced by bromo mosaic virus infection or mercuric chloride treatment. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 1990, 36: 1~9
- 10 Bronner R, Westphal E, F Dreger. Pathogenesis-related proteins in *Solanum dulcmaria* L. resistant to the gall mite. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 1991, 38: 93~104

(西南农业大学裴炎博士撰)

#### 酶法分离胚囊

enzymatic isolation of embryo sacs 酶法分离胚囊为进一步研究被子植物的雌配子体开辟了新途径。酶解法分离出的胚囊,立体感强,保持完好的整体性。此方法操作简单,特别适合于进行大孢子和胚囊发育时期的研究。结合组织化学与细胞生理学研究,可以更深入了解胚囊的生理生化特征,同时还可与正在发展中的遗传操作和生物工程技术相结合,从而开创受精工程的新领域。

1960年,Forbes用酶解法分离雀稗属植物成熟胚囊成功,采用的是酶解涂抹技术,将雀稗属植物的子房酶解、染色后,在解剖镜下手工剖出胚囊进行观察。此后,国内外对胚囊的酶解给予重视。70年代以来,前苏联萨拉托夫大学的Тырнов, Енальцева等人在这方面开展了大量工作,根据从文献中了解的简略情况,他们已由10科25种植物的固定胚珠材料中分离出完整的胚囊进行显微观察,烟草、列当生活胚囊也已分离成功,并尝试进行离体培养,但未曾报道具体方法。前苏联研究者多用自制的蜗牛胃液酶辅以果胶酶。

在中国,近年来许多研究者也已试验成功。从现有资料看,Енальцева等和中国研究者的方法虽然不尽相同,但在酶解与机械振荡相结合,不用徒手解剖方法分离胚囊这一点是一致的。此法可以同时制备大批材料,尤其适于分离体积小或较为幼期的材料。1982年,周燧、杨弘远用果胶酶与纤维素酶的混合液由烟草、蚕豆与紫茉莉的胚珠中分离出完整的胚囊,这一实验结果证明酶法分离胚囊是一项切实可行的新技术,具有操作简单、快速,能保持胚囊的完整性以及显微镜观察效果良好等优点。1984年,杨弘远、周燧又在泡桐与芝麻两种植物上作了更系统的工作,收到肯定效果,表明这一技术特别适用于多胚珠材料大孢子发生时期的快速鉴定。此外,如欲进行显微光度测定,采用未切破的整体细胞也是有利的。接着,周燧、杨弘远金鱼草上,首先以固定胚珠为材料,分离出受精前特别是受精后不同时期的胚囊,并在此基础上试探分离活的胚囊获得成功。这个实验有两方面进展,一方面,不仅分离出受精前的胚囊,而且也分离出受精后的胚囊(从花粉管进入胚囊直至上百个胚乳细胞时期);另一方面,不仅由固定材料而且也初步由新鲜胚珠中分离出受精前后的胚囊。1985年,胡适宜等从新鲜烟草胚珠中分离出胚囊细胞的原生质体,包括卵细胞、助细胞、中央细胞和反足细胞的原生质体,这是第一次成功,表明被子植物裸露的雌配子原生质体可以被分离,在遗传操作和植物细胞生物工程中的应用,显示出巨大的潜力。此外,在分离花粉管原生质体方面,他们也已获得初步成功,其中一部分原生质

体是含有核的。如能将分离的带雄核的及带雌核的原生质体在体外融合,则这一离体条件下人工控制的融合程序接近自然的受精作用,他们称为受精作用的体外模拟。由于分离的雌雄性细胞的直接融合,在育种工作中作为组合不同基因组、创造新物种的一种途径,具有独特的价值。

关于酶解胚囊方法,中国学者先后建立起两种酶解分离胚囊的方法,即酶解过程结合连续振荡法和酶解压片法。1990年,邓秀新等以几种果树为材料,利用酶解方法分离胚囊,获得较好的结果。1991年,邱德勃等用酶解压片技术又成功地分离巴西橡胶树和番木瓜两种热带作物不同时期的胚囊。酶法分离胚囊是一种探索中的技术,迄今还是不太成熟,存在的问题首先是酶解的效果亦因植物种类、发育时期与组织性质的不同而异,酶解效果不够稳定、容易发生破损或质壁分离。易受胚囊发育时期、酶的种类与浓度、酶液的H<sup>+</sup>浓度、酶解温度与时间等多种因素的影响。另外,观察方法尚待改进,固定材料经透明与染色后有好的显微观察结果;活胚囊则迄今较难鉴定内部结构。如何保持离体胚囊的生活力亦有待今后研究。分离的胚囊和胚囊细胞原生质体混杂在大量的体细胞中也难以应用,因此还需要进一步改进分离方法和寻找简便的提纯技术。

用酶解技术分离胚囊,开拓了研究与控制胚囊发育的新前景,可以直接对裸露的活胚囊进行其它方法比较难以进行的组织化学的与细胞生理学的研究,尤其是胚囊内酶的组织化学、细胞渗透压与pH值等生理指标的测定等将会因之改观。活胚囊的分离是实现胚囊离体培养这一重要目标的必要技术前提。

参考文献

- 1 周嫦,等.植物学报,1982,24(5):403~408
- 2 杨弘远,等.植物学报,1984,26(4):355~358
- 3 周嫦,等.实验生物学报,1984,26(4):141~146
- 4 胡适宜,等.植物学报,1985,27(4):337~344
- 5 邱德勃,等.植物学报,1991,33(5):350~355
- 6 邓秀新,等.果树科学,1990,7(2):71~74

(东北农学院胡宝忠硕士撰;桂明珠审)

**甜菜碱和碱合成酶** betaine and betaine synthase 甜菜碱是一种非毒性的渗透调节保护剂。一些植物和其他生物在受到盐碱胁迫和水分亏缺时积累大量甜菜碱,使细胞在低渗透势环境条件下得以继续进行正常的代谢。甜菜碱生物合成的调节控制及其相应的遗传操作研究对认识植物渗透调节机理和培育高抗盐碱和干旱作物品种有重要意义。

甜菜碱为一类季铵化合物,通式为(R<sub>4</sub>N<sup>+</sup>X<sup>-</sup>)。最简单也是最早被发现和研究最多的是甘氨酸甜菜碱,通常简称甜菜碱[(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>N<sup>+</sup>+CH<sub>2</sub>COO<sup>-</sup>]。1863年,乌西曼(A. Husemann)等从灌木中宁枸杞首先分离得到甜菜碱;现已在28科178种的植物以及在动物、真菌、海藻和细菌中发现有甜菜碱。1975年,史托利(R. Storey)等首先看到,干旱和盐碱胁迫引起植物甜菜碱积累。以后在许多植物中发现同样现象,表明甜菜碱积累与渗透调节有关。1977年,维琼斯(R. G. Wyn Jones)等提出溶质相互隔离假说,即液泡积累无机盐,主要是K<sup>+</sup>,胞质积累有机渗透调节物质,使胞质维持与内(液泡)外环境渗透平衡,又能避免胞质高浓度的无机离子对酶和代谢的毒害作用。在诸多的代谢物中,最合适的有机渗透调节剂就是甜菜碱,它的溶解度很高(160g/100ml水,25℃),不带净电荷,高浓度对许多酶和代谢过程没有影响或有保护作用,能显著减少高盐和低水势对细胞的有害作用,在体内能迅速合成和积累到很高浓度(100μmol/g鲜重)而起渗透调节作用。在研究过的150多种代谢物中,甜菜碱是最好的渗透调节剂。1986年鲁宾森(S. P. Robinson)等和1990年阿拉卡瓦(K. Arakawa)等证明,菠菜、大麦受渗透胁迫时,甜菜碱含量增加6~7倍,催化其合成的甜菜碱醛脱氢酶活性增强3倍。合成的甜菜碱30%~40%定位于叶绿体,其浓度可达300mmol/L,为叶片浓度的20倍。这是溶质分隔假说最有力的证据。植物受盐碱

和水分胁迫积累甜菜碱是一种生理适应功能,盐碱胁迫的影响比水分胁迫更大。高等植物如大麦受胁迫时,甜菜碱在成熟叶片合成,然后运输到幼叶、芽和根。合成的甜菜碱代谢很慢,因此其含量主要由合成来调节。这与脯氨酸(另一种有机渗透调节剂)极不相同。在脯氨酸,胁迫解除后,其含量随即降低。1985年,卡尔纳(L. Cairney)等首先发现微生物有两个甜菜碱运输系统,称为ProP和ProU。植物可能也有类似的运输系统,不过研究工作远没有微生物的研究工作深入。

1970年,波曼(M. S. Bowman)等,1978年汉森(A. D. Hanson)等用放射性同位素试验证明高等植物和其它生物一样,甜菜碱由胆碱经两步酶催化反应合成,即胆碱-2H<sup>+</sup>甜菜碱醛NAD<sup>+</sup>NADH甜菜碱。1975年汉森等认为,合成的场所在叶绿体,两步合成反应可以分开进行。催化前一步骤的胆碱氧化酶是一种单加氧酶,受光刺激和对二氯苯基二甲脲(DCMU)敏感,反应依赖氧和来自光合系统I(PSI)的还原能力。1993年贝纳特(M. Burnaet)等部分纯化了高等植物的胆碱单氧合酶,分子量为98000,还原能力由铁氧还蛋白提供。动物的胆碱是定位于线粒体内膜的黄素蛋白胆碱氧化酶,其分子量为74000。在一些微生物,胆碱为膜结合的黄素蛋白胆碱氧化酶,其分子量还不清楚;在另一些微生物,则为黄素蛋白胆碱氧化酶,其分子量为120000~140000,由两个分子量为66000~72000的亚单位组成。此酶为双功能酶,能同时催化甜菜碱醛氧化成甜菜碱。催化后一步骤的是甜菜碱醛脱氢酶。1981年潘(S. M. Pan)首先从菠菜叶片分离得到甜菜碱醛脱氢酶,认为该酶定位于胞液;1986年维格尔(P. Weigel)等认为定位于叶绿体,胞液中有一个同工酶。1987年阿拉卡瓦等、1989年维尔特涅尔(E. A. Weretilnyk)等和1993年梁铮等分别从菠菜纯化出甜菜碱醛脱氢酶和制备出了该酶的抗血清。菠菜的甜菜碱醛脱氢酶的分子量为120000左右,由两个亚单位组成,亚单位分子量为60000~63000。该酶的等电点为5.7,最适H<sup>+</sup>浓度在3.16×10<sup>-10</sup>mol/L左右,对其底物甜菜碱醛非常专一,其K<sub>m</sub>为2.08×10<sup>-4</sup>mol/L,对电子受体NAD的K<sub>m</sub>为0.38mmol/L。一些微生物的胆碱氧化酶同时具有氧化甜菜碱醛的能力,不过对甜菜碱醛的K<sub>m</sub>(5.8mmol/L)比对胆碱的K<sub>m</sub>(1.3mmol/L)高4倍。在动物,胆碱的氧化定位于线粒体,第一酶为胆碱脱氢酶,与内膜相结合,而甜菜碱醛脱氢酶则定位于线粒体基质,已部分纯化。甜菜碱合成酶的这些差异表明演化上植物的胆碱氧化与其他生物不同。

甜菜碱在一些植物和微生物的渗透调节中起中心作用,合成途径非常简单,进行分子遗传操作非常方便,甜菜碱合成酶基因可能是最重要和最有可能的胁迫抗性基因之一。1988年维尔特涅尔等认为,菠菜甜菜碱醛脱氢酶由一个核基因编码,并于1991年首先获得编码菠菜甜菜碱醛脱氢酶的cDNA克隆,长1812bp,其开放阅读框架1491bp;1992年麦占(K. F. Mecue)等从甜菜克隆了甜菜碱醛脱氢酶的cDNA,长1.7kb,含编码500个氨基酸的开放阅读框架,其中83%的氨基酸与菠菜酶的相同。1988年,安德逊(P. A. Andresen)等鉴定了大肠杆菌的胆碱脱氢酶、甜菜碱醛脱氢和胆碱运输系统基因,分别命名为betA、betB和betT。

菠菜甜菜碱醛脱氢酶的cDNA基因将被引入模式植物和没有甜菜碱积累或甜菜碱合成很弱的重要农作物,如水稻、玉米等研究其表达的调节控制,该酶的结构基因克隆将进行。胆碱氧化酶的纯化及性质将全面阐明并获得转基因作物。随着甜菜碱合成酶基因表达与调控研究进展,高抗盐抗旱作物品种将会培育成功,同时在分子水平和基因水平阐明植物渗透调节机理是一个十分诱人的研究领域。

参考文献

- 1 Wyn Jones G R, R Storey. The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants, New York: Academic Press, 1981. 174~204
- 2 Pan S M, R A Moreau, C Yu, et al. Plant Physiol, 1981,

- 67(6);1105~1108
- Hanson A D, R Grumet. Cellular and Molecular Biology of Plant Stress, New York; Alan R Liss, Inc., 1985. 71~92
  - Higgins C F, J Carney, A Douglas, et al. TIBS, 1987, 12(1); 339~344
  - Arakawa K, T Takabe, T Sugiyama. J Biochem, 1987, 101(6); 1485~1488
  - Weretilnyk C F, A D Hanson. Proc Nalt Acad Sci. USA; 1990. 87(7); 2745~2749
  - Liang Z, Y Zhao, Y C Li, et al. Chinese Sci Bull, 1991, 36(17); 1477~1480
  - Liang Z, A L Luo, L Tang, et al. Chinese J Bot, 1993, 5(1); 8~64

(中国科学院植物研究所梁峥研究员撰; 刘存德审)

### 植物细胞、组织培养中的甾体激素

植物细胞、组织培养为研究甾体激素及其代谢提供了良好的实验系统。近年来,许多甾体激素已从组织、细胞培养中分离出来;同样,许多含甾体激素的植物材料被用作细胞培养材料,用于研究其生物合成和转化。在某些甾体代谢过程中,酶的缺失会使次生代谢产物在细胞、组织培养中累积起来,利用这一特别,适当选择所需的代谢产物,进行大量细胞悬浮培养,进行甾体激素的生物合成和转化,生产所需要的物质,这是十分有利的。但是,在植物细胞、组织培养物中所需物质浓度较低,这可通过筛选植株、添加代谢前体、改变培养基和改变培养条件等办法来解决。

1966年,本菲斯特(Benvniste)等从烟草组织培养物中分离到阿屯醇。而在植物界广泛分布的甾体是谷甾醇和豆甾醇、菜油甾醇。薯蓣皂甙元是甾体激素的起始原料。1967年,柯尔(B. Kaul)从三角叶薯蓣的细胞培养物中分离到薯蓣皂甙元,托米塔(Y. Toita)从山草藓愈伤组织中还分离出 furostanol 糖甙和 P-rotokoronin。而丝兰植物的根、茎、叶、根茎、种子、种皮等组织培养物中所产生的甾体皂甙元是不相同的。

表: 表丝兰植物各部分组织培养中产生甾体皂甙元

| 皂甙元名称  | 根、茎、叶 | 种子、种皮 | 幼苗 |
|--------|-------|-------|----|
| 萨尔斯皂甙元 | ×     | ×     | ×  |
| 吗尔考皂甙元 |       | ×     |    |
| 新麦脱皂甙元 |       |       |    |
| 海柯皂甙元  | ×     | ×     | ×  |
| 曼诺皂甙元  |       | ×     | ×  |
| 薯蓣皂甙元  | ×     | ×     |    |
| 菝葜皂甙元  | ×     | ×     |    |
| 替告皂甙元  | ×     | ×     |    |

×为含有皂甙元的部分

上表说明,选择植物的何种组织或器官作为细胞、组织培养材料,以便获得所需皂甙元是有意义的。

赫斯(M. Heins)在毛花毛地黄的组织培养物中将 $\beta$ -甲基毛地黄毒甙糖化成 $\alpha$ -甲基地高辛,这一转化反应的发现具有一定的经济意义。因为在毛花毛地黄植物中含有毛地黄毒甙和地高辛,使资源得到合理利用。

1974年,斯托赫士(S. J. Stohs)利用三角叶薯蓣的细胞悬浮培养研究添加标记的 $^{14}\text{C}$ 、 $^{26}\text{C}$ 胆甾醇对薯蓣皂甙元生物合成的影响,他观察到胆甾醇几乎是等量参入到标记的薯蓣皂甙元中,如果用标记的环阿屯醇或胆甾烷三醇与山草藓薯蓣细胞悬浮物一起培养时,在培养液中能分离到具有标记的薯蓣皂甙元、雅姆皂甙元、托柯皂甙元。从三角叶薯蓣的细胞悬浮培养物中能将标记的 $4\text{-}^{14}\text{C}$ - $22\text{m}^{23}\text{H}$ -谷甾醇参入到薯蓣皂甙元中,不过参入量仅为胆甾醇的 $1/8$ ,如将谷甾醇侧链上的两个C除去之后,剩下的

就是胆甾醇,它就能等量参入到薯蓣皂甙元分子中。1979年,米赫塔(R. Mehta)研究 *Trianthema portulacas-tum* 幼苗的愈组织生物合成蜕皮激素的情况,他发现不同的植物生长激素的作用是不相同的;用2,4-D处理后,蜕皮激素含量最高;用NAA处理,愈伤组织生长量最高;激动素与2,4-D结合处理,既增加蜕皮激素含量又增加愈伤组织生长量;而增加激动素的浓度,反而会抑制蜕皮激素的生物合成。

1975年,希诺特里(A. Hirotsani)研究毛地黄细胞悬浮培养物对 $5\beta$ -孕烷-3,20-二酮和 $5\beta$ -孕烷- $3\beta$ -羟基-20-酮的生物转化时发现,5天之后就产生了 $5\beta$ -孕烷- $3\beta$ -羟基-20-酮及其糖甙, $5\beta$ -孕烷- $3\beta$ , $20\beta$ -二醇和 $5\beta$ -孕烷- $3\beta$ , $20\alpha$ -二醇单糖甙, $5\beta$ -孕烷- $3\alpha$ - $20\alpha$ -二醇。三角叶薯蓣和桂竹香的细胞悬浮物的微粒体,能迅速转化黄体酮(Pro-gesterone)成 $5\alpha$ -孕烷- $3\beta$ -羟基-20-酮和 $5\alpha$ -孕烷- $3\beta$ , $20\beta$ -二酮。这两种产物在细胞悬浮培养中是并存的。关于三角叶薯蓣细胞悬浮培养物对 $^{14}\text{C}$ -雄烷 $\Delta^4$ - $3,17$ -二酮的转化,经15d的培养之后,主要产物是 $5\alpha$ -雄烷- $3\beta$ -羟基-17-酮和 $5\alpha$ -雄烷- $3\beta$ , $17\beta$ -二醇,后才随培养时间的延长而增多。胡若雅观察到毛地黄细胞悬浮培养物能将毛地黄毒素转化成麦毒素和紫黄洋地黄糖甙A和B,当培养至26d时,毛地黄毒素转化成的第一个产物是麦毒素。柯尔从薯蓣细胞培养物中分离到皂甙元,其得率达干细胞重的1%。斯托赫士在三角叶薯蓣细胞悬浮培养中,添加100mg胆甾醇于100ml培养液中,能后高薯蓣皂甙元产率达2.5%(干重);0.1ppm的2,4-D或西吗三嗪,对植物细胞悬浮培养和皂甙元累积都有利。但抗坏血酸不仅抑制细胞生长,也抑制皂甙元的产生。帕麦尔(M. A. Palmer)发现金藻具有转化外源环阿屯醇、羊毛甾醇成为 $24\beta$ -乙叉 $\beta$ -乙叉甾醇的能力。格瓦甫(Kuapp, Fr)用金藻转化岩藻甾醇[ $7\text{-}^3\text{H}$ ]-28-异岩藻甾醇成为 $24\beta$ -乙叉基甾醇,并发现具 $24\text{-}\beta$ -乙叉基团的甾醇转化率最高,这说明此基团对转化是重要的。克拉得(L. Claude)利用绿藻将 $24\text{-}\beta$ -乙叉-25-甲叉甾醇转化成 $\gamma$ -谷甾醇和 $24\text{-}\beta$ -乙叉基甾醇。赫斯将烟草组织培养物标记 $\text{C}^{14}$ -环阿屯醇培养7d之 $\gamma$ -环阿屯醇、谷甾醇、豆甾醇、油菜甾醇。托米塔(Y. A. Tomita)用唇形植物的细胞培养物转化 $\text{C}^{14}$ -山楂酸,分离出一表山楂酸,并证明它是由甾3-衍生物生物合成的。

从植物细胞、组织培养物中分离、转化的各种甾体激素,现在已经超过50种,而且用植物细胞、组织培养方法所获得的许多生物合成的甾体激素也远不止本文所介绍的。植物细胞、组织培养的研究为生产稀有的、天然的或别的途径难以取得的甾体激素具有很大的潜力。如果对代谢产物的生源途径有所了解,通过添加前体物或改变代谢途径就能获得在完整植株中都无法达到的产量。用细胞、组织培养方法比用化学方法更为经济。然而,植物细胞、组织培养中甾体代谢的研究才开始不久,需要逐步完善。

### 参考文献

- Benvniste p. Biosynthesis of sterols n tobacco tissues grown in vitro: Identification of cyclooucalenol and obtusifoliol Sterol biosynthesis in tobacco tissues cultivated in vitro. Kinetics for mation of sterols and their precursors Biochemistry, 1969, 9: 526
- Stohs s J Metabolism of 4 - Cholesten - 3one to  $5\alpha$ , - cholestan - 3 - one by leaf homogenates Lioydia, 1974, 37: 504
- Stohs S J. Prototokoronin Tissue Cultures of Dioscorea Tokoro Phylochemistry. 1974, 13: 729
- Tomita Y. et al. Structure and Biosynthesis of prototokoronin in Tissue Cultures of Dioscorea Tokoro Phylochemistry 1974, 3: 729.
- Palmer M. A. et al. Goodwin the conversion of  $5\alpha$  - Lanost - 24 - Ene -  $3\beta$ , $9\alpha$  - Diol and parkeol into poriferasterol by the Alga *Ochromonas Malhamensis*.
- 罗士韦. 我国植物组织培养工作的进展自然科学年鉴. 1980
- 徐成基. 动物甾体激素在农业中的应用国外农业科技. 1980,

1:42~45

(中国科学院成都生物所徐成基撰)

**植物中的甾类激素及其功能** 甾类激素主要包括动物性激素、皮质激素和油菜素内酯等儿大类。

**甾类激素在植物中的存在** 1933年,Butenandt和Jacobi在油棕果仁中分离出雌酮。同年,Skarzynski在黄花柳雌花中鉴定出雌三醇。许多研究者致力于这方面的研究工作,他们的研究资料表明,甾类激素至少存在于许多植物的多种组织和器官中,如根、茎、叶、花、果实、种子、花粉和茎尖等。发现的甾类激素主要有雌激素类、雄激素类和皮质甾类激素,有关雌激素存在的报道最多。在雌激素中主要有雌酮、雌二醇和雌三醇以及玉米赤霉烯酮,其中前三种是动物的雌性激素,而玉米赤霉烯酮最早是从玉米赤霉菌中分离出的,它具有动物雌性激素的作用,现在又从植物中检测出来,并有报道它可能与植物的春化作用有关。植物中检测出的雌激素有孕酮、雌酮、雌二醇和表孕酮等,动物的孕激素孕酮也已从某些植物中检出。

植物中的甾类激素含量有很大差别,即使应用同一种材料,用同样的提取步骤,不同的研究者得到的含量亦可能相差数千倍。究其原因,主要是检测的方法不同,其可靠性也不同。早期的研究方法是原始的、不具特异性的,如生物测试法和颜色反应等。现在人们使用高度灵敏和特异的方法来检测,这些方法包括放射免疫法和气谱、质谱联用等,检测出的含量亦更加接近实际值。根据北京大学实验室近期用放射免疫法测得的结果,估计植物中雌激素的含量在 $10^{-11}$ ~ $10^{-10}$ g/g水平。

**甾类激素在植物体内的转化和代谢** 植物体能够合成和代谢甾类激素。Young等曾观察到菜豆幼苗可以从外加 $^{14}$ C-甲瓦龙酸、 $^{14}$ C-雌酮和 $^3$ H-雌酮硫酸合成雌二醇。Young等将菜豆幼苗与 $^{14}$ C-雌酮、 $^{14}$ C-雌二醇和 $^3$ H-雌酮硫酸一起保温,发现雌酮和雌二醇可以相互转化。用菜豆叶匀浆,并加NAD做辅助因子,雌酮可在体外被转化为雌二醇。这说明植物体内含有合成雌二醇的酶系统。Hewitt等曾报道,菜豆叶片可将雌二醇氧化成雌酮,外加的 $^{14}$ C-雌酮可被还原为 $^{14}$ C-雌二醇, $^3$ H-雌酮硫酸可被转化为 $^3$ H-雌酮和 $^3$ H-雌二醇以及一些未被鉴定出的极性物质。Lin等观察到生长的黄瓜植株和豌豆可将雌二醇转化为许多其它的雌性激素。Hirota和Furuya培养的烟草细胞可将外加孕酮转化成一一系列的代谢产物。雌二醇和表雌酮也可很快地被代谢。

Bennett和Heftmann发现止泻木可以将外加雌二醇酮转化为孕酮,而且孕酮可很快地被代谢掉。用桂竹香、毛地黄和毒毛旋花的叶片匀浆,Stohs和EL-Olcmy亦把雌二醇酮转化成孕酮。雌二醇酮和孕酮已从植物中分离出来,推测它们很可能是合成其他甾类激素的中间产物。已有证据表明,雌二醇酮可转化为许多其它的甾类化合物,其中有一种皮质甾类即11-脱氧皮质甾酮。

**外源甾类激素对植物营养生长的影响** 外源甾类激素对植物生长的影响是多方面的,尽管这方面的报道很多,但结果不一致。就雌激素来说,它们对植物顶端生长的影响有3种不同的结果,即促进生长、无作用和抑制作用。如雌酮和雌二醇在适当浓度下对矮生豌豆幼苗和向日葵幼苗的生长起促进作用。有些植物如松树幼苗、豌豆和菜豆幼苗在雌激素处理后无变化。而有的植物如独行菜幼苗在雌酮处理后生长受到抑制。对植物根的生长,雌激素的作用也不尽一致,有的研究工作者观察到促进作用,有的报道有抑制作用。较新的研究资料表明,较高浓度雌激素抑制根的生长,而且对离体根的抑制作用要比对完整幼苗根的抑制作用强。除了上述的影响外,雌激素还能打破植物顶端优势,促进侧芽发生,对于有些植物种子的萌发也能起促进作用。

有关雄激素类对植物生长影响的报道尚不多,但现有资料似乎表明孕酮能够抑制幼苗生长。另一类甾类激素——皮质激素对植物生长影响的研究主要是由Geuns及其同事进行的。他们观察到许多糖皮质激素对植物的影响都是促进性的,如促进绿

豆幼苗生根和根的伸长,促进下胚轴伸长等。皮质醇和皮质酮就属这一类。而多数盐皮质激素如11-脱氧皮质醇等抑制根和下胚轴生长。

甾类激素对植物营养生长的影响有许多不一致之处。造成这些不一致的原因可能是各种植物材料对甾类激素的反应是浓度依赖的和组织特异的,也可能是植物对甾类激素的吸收性和敏感性不同,或是不同条件造成的结果。

**甾类激素与植物生殖过程的关系** 许多甾类激素对植物开花和性别表达均有影响。雌激素中的雌二醇可以促进浮萍、甘蓝、菊苣和西洋红开花。雌激素还能增加女娄菜、黄瓜和喷瓜的雌花比例发生变化或使雌花向雌性方向发育。而雄激素如睾酮、雌酮可以减少上述植物的雌花比例或使雌花向雄性方向发育。也有一些研究资料表明,雌雄激素对某些植物开花和性别表达无显著影响。

研究者们还探讨了内源甾类激素的变化与植物生殖过程的关系。Kopcewicz和Chrominski用2-氯乙基磷酸处理西葫芦,使之雌性化后,植物体内雌激素含量升高。Kopcewicz观察到菜豆花芽形成期间雌激素开始出现,随着花的发育雌激素含量逐渐升高,豆类发育阶段雌激素含量又下降,在成熟的种子中未发现雌激素存在。在诱导开花条件下,短日植物白苏和红叶藜以及长日植物天仙子 and 西洋红中雌激素含量均增加。在需要春化的植物风信子中,对鳞茎的冷处理可引起类似雌激素物质的含量上升,而且叶片和花序中的含量最高。孟繁静等在植物中鉴定出玉米赤霉烯酮,并发现此物质的消长情况与冬小麦的春化作用深度同步,当玉米赤霉烯酮的积累达到高峰时,标志春化作用的完成。周水春和曹宗巽发现在西瓜花蕾出现之前就有少量雌酮产生,随着花蕾的发育直至开花,雌酮含量也增加,这表明雌酮与成花过程有密切关系。Bonner等在诱导开花的长暗期之前施用甾类合成抑制剂SKF7997,抑制了苍耳的开花诱导,这暗示成花激素的合成受SKF7997的抑制,而且这种激素很可能是甾类化合物。但这种抑制不能被几种甾类物质或其前体所逆转。Leshem也观察到甾类合成抑制剂SKF7997 A3可以抑制培养的甘蓝切段开花,只有雌酮能够逆转这种抑制作用。北京大学实验室最近的研究资料表明,雌二醇和雌激素总量在兰州百合子房和花柱中最高,大白菜的花和雌蕊也含有较多的雌激素,这似乎显示了雌激素与植物生殖过程有关。结合上还有有关甾类激素促进开花和影响性别表达的实验,可以推测甾类激素,特别是雌激素,可能积极参与并推动植物有性生殖过程。

**甾类激素对植物其它方面的影响** 雌激素可以使植物中生长素、赤霉素和细胞分裂素活性增加,但对脱落酸活性无影响。皮质醇能提高绿豆幼苗中多胺含量,雌二醇和皮质醇还能促进核酸合成。

己烯雌酚是一种人工合成的比雌二醇活性更强的雌激素,它可以抑制植物的离子吸收和质膜的ATP酶活性。玉米赤霉烯酮也能抑制离子吸收和抑制ATP酶活性,并能使细胞膜电势去极化和抑制 $H^+$ 分泌。最新的研究资料表明皮质醇可以提高膜的渗透性。由此看来,甾类激素对植物的影响也许是通过细胞膜来实现的。

甾类激素广泛存在于植物体内,能被植物体代谢,而且对植物的生长发育过程有多方面的作用。但这些工作尚缺乏系统性。以后的研究应集中在:(1)继续运用高度灵敏和特异的方法,如气谱、质谱联用和放射免疫法等来检测植物中的甾类激素,以确定其生理浓度及在植物界存在的普遍性。(2)运用标记化合物进一步研究甾类激素的合成和代谢以确证其生物合成和代谢途径。(3)目前对甾类激素的生理功能应仿照对已有植物激素的研究建立一系列生物测试法,且离体与整体植物兼顾。(4)甾类激素的作用机理,其作用位点,受体或结合蛋白的存在以及它们如何影响植物生长发育过程所需的各种酶的活性,影响DNA、RNA及蛋白质合成,在用甾类激素处理植物后是否有特殊蛋白质或酶出现等问题均有待深入研究。

## 参考文献

- 1 孟繁静,等.植物学报,1986,6(4):262
- 2 王煥民,曹宗巽.植物生理学报,1986,12(3):216  
(北京大学张劲松、曹宗巽教授撰)

## 苯基脲衍生物的细胞分裂素活性 cytokinin

activity of phenyl urea derivatives 关于某些苯基脲类化合物能促进植物细胞分裂的特性,最早是 Shants 和 Steward(1952、1955)在椰子胚乳汁液(椰乳)中发现的。椰乳是植物组织培养中常用的一种天然有机附加物。一般都认为它可以促进培养细胞的分裂。现已查明,椰乳中含有多种氨基酸、碳水化合物、维生素以及多种植物激素和其他生理活性物质。Shants 等当时报告从椰乳中分离出一个具活性的组分,经鉴定为 N,N'-二苯基脲(DPU)。但一直未得到其他作者证实。因此 DPU 可能并不存在于椰乳或其它植物体中。Shants 等所得到的 DPU 可能是所用的试剂不纯带进来的。但无论如何是 Shant 等首先指出 DPU 具有刺激细胞分裂的活性,虽然他们认为这种活性很低,而且不稳定。Bottomley 等(1963)认为 DPU 活性不稳定,可能是其中含有抑制活性的杂质,掩盖了活性反应。他们将 DPU 用几种不同溶剂进行多次重结晶,然后进行生物试验,发现 DPU 在 10mg/l 浓度时确实具有稳定的、可重复的活性。但其所用 DPU 不是从椰乳提取的。Bruce 和 Zwar(1966)发表了对 500 多种苯基脲类化合物的研究结果,发现其中有半数以上都具有类似的活性。

与此同时,Skoog 等在组织培养研究中也发现一种存在于动物 DNA 的降解产物中的物质,具有刺激植物细胞分裂的活性,分离和鉴定结果表明,这种物质为 6-咪唑氨基嘌呤(动力精,KT),在很低浓度(1.0mg/l)即可促使细胞分裂。后来又在一些植物中发现一些天然存在的、具有与 KT 同样活性的物质,如玉米素、2iP 以及一些人工合成的类似物质,如 BAP 等。所有这类物质与 KT 一样都是腺嘌呤在 N<sup>6</sup>-位置上的取代衍生物,其间的主要区别仅在于 N<sup>6</sup>-位置上的取代侧链不同;基于这类物质分子结构和活性的相似性,即具有促进细胞分裂活性的,腺嘌呤在 N<sup>6</sup>-位置上的取代衍生物,Skoog 等统称之为细胞分裂素(CTK)。

一般认为,对于 CTK 的活性,一个完整的腺嘌呤“核”的存在是十分必要的;其次在 N<sup>6</sup>-位置上侧链的长短、结构和饱和度对活性影响也很大。科学家们试图以此为基础进一步阐明 CTK 的作用方式和机理等,并已取得相当进展。

广泛的研究资料表明,CTK 的活性不仅限于促进细胞分裂,作为一种植物激素,它与其它植物激素一起对植物的生长发育、植物细胞在离体条件下的分裂生长、脱分化和再分化以及形态发生等起重要的调节作用。

这些关于 CTK 的研究结果为进行 PUD 的活性研究提供了一个重要的依据。一般研究者也都是用 CTK 作为标准或对照来研究 PUD 的活性表现及其强弱,根据在各种不同植物中应用 PUD 所得的结果,PUD 活性可概括为以下几个方面:(1)促进细胞分裂与种子萌发,打破芽的休眠,促进芽的生长。(2)促进愈伤组织的诱导和生长,促进离体条件下的形态发生(器官发生和体细胞胚胎发生)以及促进芽的繁殖。(3)通过对内源的 CTK 及其它激素的作用影响植物的代谢、生长发育、衰老成熟及形态发生。虽然大多数 PUD 的活性较 CTK 低,但也有如 4PU-30 和 TDZ 具有比 CTK 更高的活性。(4)总之,CTK 活性谱中每一种效应均已在 PUD 中找到。1991 年周俊彦等在乌菝莓中发现 TDZ 对体细胞胚发生有明显的促进作用,最近国外学者也在花生、天竺葵等植物中观察到相同结果。填补了以往这方面的空白。因此,“PUD 的活性谱充分证明它是一种完全合格的 CTK”(Latham, 1978)。

PUD 的分子结构与其活性的关系,据 Bruce 等(1966)的广泛研究,可得出以下结论:(1)对于活性的最低结构要求,N-苯基脲即可满足,亦即只需一个-NH-CO-NH-的“桥”和一个平面

的环。当然 N-苯基脲的活性很低。(2)苯基脲中苯环上的氢原子被 Cl、NO<sub>2</sub> 等负电性原子或原子团取代,可明显增加其活性。(3)N-苯基脲在桥的另一端出现第 2 个苯环可大大提高其 CTK 的活性,即 N,N'-二苯基脲的活性较 N-苯基脲要高得多,但此第二个苯环上如有氢原子被取代,一般会降低其活性。(4)PUD 的一个苯环中的氢被甲基取代所产生的化合物,可抑制 CTK 或其他 PUD 的 CTK 活性。(5)分子中“桥”的结构对活性也很重要。如使-HN-CO-NH-变成-HN-CS-NH-(硫脲)会大大降低其活性。但是有些硫脲类化合物也具有一定活性,“桥”如发生其它改变或被破坏,即得到无活性的产物。

Isogai 等研究了苯基脲的吡啶取代化合物,发现其中有些化合物具有很高的活性。如 N-(4-吡啶基)-N'-苯基脲(4PU)在吡啶环上的氢原子被负电性原子所取代,可大大提高其活性。如 N-(2-氯-4-吡啶基)-N'-苯基脲(4PU-30)和 N-(2,6-二氯-4-吡啶基)-N'-苯基脲,都具有很高的 CTK 活性。

Arndt(1976)报道了一种新的棉花落叶剂,代号 SN49537,是一种苯基脲的噻重氮取代化合物,其化学名称为 N-1,2,3-噻重氮-N'-5-苯基脲,简称噻重氮苯基脲(TDZ)。这种化合物具有非常高的 CTK 活性,如用其它杂环代替其中的苯环却均可使其活性降低。

对于这种活性的解释,最初认为 PUD 可能是 CTK 合成的前体物,它在细胞中的代谢物可能被用来合成 CTK 在 N<sup>6</sup>-位置上的侧链。有人曾经设想在这两类化合物如 4PU 和 BAP 之间用一些中间产物如资料腺嘌呤等连结起来说明二者互相转变的可能性。另一种说法认为,PUD 可调节 CTK 的代谢、合成、分解和结合等,这些说法的基本出发点是:在细胞中真正起作用的是 CTK,而 PUD 仅起间接的作用。但已有的研究资料表明 PUD 在细胞中的主要代谢产物为糖苷,而 TDZ 则在细胞中非常稳定,在培养 33d 内几乎不发生分解,而且 PUD 的作用可“立即”发生,无“滞后期”,这些证明 PUD 的作用并不是间接的。

用 CTK 活性抑制剂(CTK 拮抗物或抗 CTK)进行研究则表明:无论在诱导细胞分裂和促进生长、延缓衰老,还是在组织培养中的器官发生等方面,CTK 的拮抗物对 PUD 和 CTK 产生相同的抑制效应。Kurosaki(1981)用 N-苯甲基 N'-4-溴苯基脲(BP)和环丁氨基-2-甲基吡咯[2,3-d]嘧啶(CP)这两种 CTK 活性的竞争性抑制剂分别与不同浓度的 BAP 和 4PU 结合处理烟草细胞,以不加抑制剂的 BAP 和 4PU 所达到的最大鲜重为 100%,加入一定量的 CP 和 BP 以后,活性明显降低;但只要适当提高 BAP 或 4PU 的浓度,仍可使活性达到 100%;将结果绘成 BAP、BAP+CP、BAP+BP 和 4PU、4PU+CP、4PU+BP 的浓度活性曲线,可得两组各自互相平行的 3 条曲线。这些结果令人信服地表明:CP 和 BP 对于 BAP 或 4PU 均有交叉的竞争性抑制作用。也就是说,CP 和 BP 都是 BAP 和 4PU 的竞争性抑制剂;一个 BAP 的活性位点可以被一个 PUD 竞争性地占据,反之亦然。因此不可避免的结论是:PUD 和 CTK 应具有共同的活性位点、相同的作用方式和机理。但是,这个结论似乎有悖于常理。一般认为一种高度特异性的生物学活性与诱导这一活性的物质的分子结构的特异性密切相关。这是细胞内化学识别机制的基础。但无论从分子立体化学角度考虑,还是从分子电学的角度考虑,CTK 和 PUD 均为两类完全不同的分子,很难设想两者在细胞中可能在同一位置引起完全相同的反应。从所了解的程度看,就关于 CTK 作用以及对植物细胞的分裂、分化、生长及形态发生等的调节机理的研究结果及对这些结果的解释,应持谨慎的态度。因为单纯用 CTK 进行研究无法解决上述问题,必须对 CTK、PUD 及其它一些无嘌呤环但具有 CTK 活性的化合物如 2-苯并噻唑基氧乙酸和某些硫脲衍生物等进行更加深入的比较研究。

PUD 除了以上与 CTK 表现一致的方面之外,也有其特殊性,首先,这种特殊性的一个最明显的例子是 DPU 可以在一次培养中诱导出 CTK 自养性及关于激素代谢的遗传调节方面的



研究结果。这表明 PUD 对激素代谢的影响大大超过一般 CTK。很可能 PUD 不仅能作为 CTK 在细胞中发挥作用,而且能同时起着改变 CTK 代谢及其遗传控制的作用,且这种改变可以在很短的时间内完成,因此利用 PUD 可能对 CTK 自养性的产生及其遗传调节等方面的机理做更深入的探索。其次,不同 PUD 的 CTK 活性相差极大,特别是其中有些化合物如 4PU-30、TDZ 等在烟草、番木瓜中诱导细胞分裂和愈伤组织生长的活性,可能高达一般 CTK 的千倍以上,而且 PUD 的分子中一个原子或原子团的改变可能引起其活性不仅是成倍地而且常常是 10 倍、100 倍增强或大幅度减弱(如 4PU 变成 4PU-30,就使其活性增加近 100 倍),这些都是 CTK 所难以达到的。最后,人们至今未能在植物体中发现天然存在的 PUD 或其有活性的代谢物;无论是 PUD 或 TDZ 等,都是人工合成的产物。这一点与 CTK 也明显不同,后者在植物体中有天然产物,可以与合成的类似物相互参照进行研究,PUD 就缺乏这样一个参照系,而且用放射性标记化合物研究证明:PUD 的主要代谢产物为糖苷,而 TDZ 则在细胞中非常稳定,不仅在 48h 内不发生代谢,而且在 12~33d 内 TDZ 仍然是未分解的有活性分子,在  $\beta$ -葡萄糖苷酶作用下也只有极少数分子在其完整结构上发生小的改变,产生一些活性较低产物,如 N-对羟基-苯基-N'-1,2,3-噻重氮-5-脲。这种情况无疑增加了其研究的难度,对有关 PUD 在细胞中代谢及受体识别等的研究很少,其原因可能与此有关。

总之,近 30 多年来对 PUD 的 CTK 活性研究已做了大量的工作,虽然与一般 CTK 的研究相比现有的结果只是初步的,但已显示出其重要性;加强这方面的研究,对于植物生长发育及形态发生机理的理论探索和植物生长物质的实际应用均有重大的意义。

参考文献

- 1 Shants E M, et al. J Amer Chem Soc. 1955, 77: 6351~6353
- 2 增田忠雄,等著. 辽宁铁岭农学院植物激素翻译小组译. 植物激素 4 细胞激素. 北京, 科学出版社, 1976. 231~320
- 3 Letham D S. A Comprehensive Treatise. Elsevier/North-Holand. 1987. 1: 205~263
- 4 Mok M C, et al. Hort Sci. 1987, 22: 1194~1197
- 5 Reynold J F. Hort Sci. 1987, 22: 1192~1194
- 6 Preece J E, et al. Hort Sci. 1988, 23: 1071
- 7 Chalupa V. Biol Plant. 1989, 30: 414~421
- 8 Fasolo F, et al. Plant Cell, Tis Org Cult. 1987, 16: 75~87
- 9 周俊彦, 郭扶兴. 植物生理学通讯, 1990, 5: 7~13
- 10 Leblay C, et al. Plant Cell Tis Org Cult. 1991, 25: 99~105

(中国科学院西北植物研究所周俊彦研究员、郭扶兴副研究员撰)

茶多酚

tea polyphenols 茶多酚在茶树中的含量高,在新梢中高达 20%~35%(干物重);分布广,全株各器官均含有;变化大,受内外因素影响最显著,是影响茶叶品质的主要化学成分。它是由黄烷醇类(儿茶素类)、黄酮醇类、黄醌醇类、4-羟基黄烷醇类、花青素类和酚酸、缩酚酸类所组成。前 5 类都具有 2-苯基苯并吡喃的基本结构,统称类黄酮物质,主要区别是羟基的取代数量、位置、C 环的氧化程度和成苷的糖不同而衍生出很多类黄酮化合物,目前在茶叶中已分离鉴定的此类化学物质有 30 多种。第 6 类是一些含有酚基的羟基化合物。由于这些物质的分子结构中都有多个酚性羟基并集于茶叶中构成一群多酚复合物,总称为茶叶中的多酚类物质,简称为茶多酚,与从前称为茶单宁、茶鞣质的化合物是同物异名。这是缩合单宁与能鞣皮为革的水解单宁(如五倍子单宁)属两类不同的物质,这是常被混淆的。

茶多酚的含量随生态因子和品种不同而异。光强温高的季节和地域的茶叶含量高,所以夏季和低纬度、低海拔地区所产的茶叶茶多酚含量高。因茶树体内的代谢类型和代谢方向不同,所以茶多酚含量还受到品种和栽培措施的制约。茶树的产品器官是幼嫩的茶芽,采摘时嫩度不同,含量也有差异,以采摘 1 芽 2、3 叶的标准为高。从茶树上采下的茶芽,根据茶多酚在加工过程中的氧化程度和方式不同,可以加工成红、青、白、黑、黄、绿 6 大茶类。茶多酚的含量以酶促氧化发酵的红茶最低,以加工一开始就用高温钝化酶活性不发酵的绿茶含量最高,半发酵的青茶(乌龙茶)、微发酵的白茶、非酶促自动氧化后发酵的黄茶和黑茶等茶多酚的含量介于红、绿茶之间。

茶多酚亲水性强,易溶于水、乙醚、甲醇、乙醇、乙酸和乙酸乙酯中,而对苯、氯仿、石油醚等难溶。由于分子结构中有共轭双键生色基团和羟基等助色基团,所以具有不同的颜色,在 200~400nm 处有深度的紫外吸收峰,多酚羟基与舌黏膜的蛋白受体和口腔黏膜的蛋白质发生凝固形成不透水层,味觉的反应就是涩味。酚性羟基电离使其水溶液呈酸性, H<sup>-</sup> 浓度的 10<sup>-4</sup>~10<sup>-3</sup> mol/L。对酸、热较稳定,在碱性、光照或酶的催化下易氧化聚合生成红棕色的氧化产物。

茶多酚的化学性质主要表现为:(1)抗氧化性。这是由酚性羟基的供氢能力所决定的,其氧化还原电位依如下次序上升: L-EGCG < 没食子酸 < L-EGC < 杨梅苷 < 茶没食子素 < 芸香苷 < 绿原酸 < L-EC < L-ECG < L-C。其中儿茶素的抗氧化性能依次为: L-EGCG > L-ECG > L-EC。茶多酚被氧化后生成的醌很易缩合或聚合成分子量逐步增大的红棕色聚合物,如茶黄素、茶红素、茶褐素等。在多相体系中与 VE、VC、卵磷脂、柠檬酸等合作使用,可偶联增效。(2)对金属离子的沉淀和还原。茶多酚对重金属、铁离子和钙离子的沉淀还可通过酸使沉淀再度溶解。通过还原作用,把有毒的 Cr 还原为 Cr,把不易被人体吸收的 Fe 还原为 Fe,并能与铁离子生成蓝黑色的络合物,与铝离子生成黄色络合物等显色反应。(3)对蛋白质的作用。茶多酚的酚性羟基与蛋白质胶原相结合产生沉淀,具收敛性和抑菌作用。

茶多酚急性毒性试验[小鼠(NIH)灌胃 LD<sub>50</sub> = 2.5~9.3g/kg]、亚急性毒性试验(0.1% 饲喂小鼠 6 周,血红蛋白、红细胞数、白细胞数、体重、肝、胸腺、脾脏的细胞数和器官体重比无显著差异)、长期毒性试验(按成人剂量的 21、107、214 倍 3 个剂量灌大鼠胃连续 4 个月,终身饲喂果蝇和家蝇均无药物毒性反映)、遗传毒性试验(Ames 试验、骨髓 PCE 微核率测定、骨髓细胞 SCE 测定、果蝇 SLRL 诱变性试验均为阴性)、蓄积性试验表明有中等蓄积性。鉴于茶多酚的安全性,全国食品添加剂标准化技术委员会第 11 届年会就对茶多酚的技术指标、安全性试验、使用范围及使用量进行评审,同意列入使用卫生标准名单。

由于茶多酚结构中具有连苯酚基或邻苯酚基,作为抗氧化剂的活性应高于一般非酚性的单酚羟基类抗氧化剂,因此,以茶多酚作为天然抗氧化剂已在食品、医药业中引起极大的关注并有大量的研究报告。自由基医学认为机体过量自由基的毒性反应与炎症、自身免疫病、肿瘤、衰老、放射损伤、缺血再灌注综合症、心血管病的成因直接相关,因此,能调控机体自由基失衡的抗氧化剂将有助于上述病症的治疗。茶多酚结构上的特点,使其具有很强的清除自由基的能力。自由基学说以茶多酚所作的多种药理药效研究所取得的肯定性结果提供了理论依据。在人类已为众多的合成药物的毒副作用损害健康付出代价后,一些先进国家在致力于寻找和开发天然药物时,茶多酚的研究日益受到国内外研究者重视。由于其自身的多酚羟基结构,决定它的易反应性和强烈的生理活性,尤其是高度抗自由基功能,使它具有重要的应用价值,预测茶多酚在功能性食品及食品的保鲜、医药、日用化工品(口腔保健及化妆品等)甚至贵重金属提炼、天然色素等方面将有一个大发展的前景,但必须多学科配合共同攻关才能走向实用化。进一步的工作是在加强基础理论研究,从分子水平阐明茶多酚的构效关系的同时,要加强系统化和深化的研究。茶多酚是一种高效低毒、资源丰富的植物性活性成分,中西医结合开发成天然药品具有中国的特色和优势,将低值资源开发成高值产品,为振兴华茶、为人类健康作出贡献。

提取茶多酚的技术,传统工艺是用多种有机溶剂,柱分离是

发展的方向,钙或铁的沉淀法脱咖啡碱的程度高,但前者所用试剂廉价易得,设备简单,不失为一种经济有效的技术,为茶多酚的商品化生产开创了一条可行的途径。

(浙江农业大学杨贤强撰)

**月光花素** calonyctins 从月光花叶中分离出来的一类新的天然植物生长调节物质。其中含量最高、活性最强的部分,已于1973年纯化得到晶体,称为月光花素甲。其生物学效应表明它是抑制型物质,经化学和波谱分析,确定它是两个糖苷类同系物的混合物,分别称为月光花素甲(I)和月光花素甲(II)。

1962年,厦门大学王再生等在学习月光花与甘薯嫁接的增产经验时发现,月光花汁液能抑制甘薯插枝的根生长。次年就用两种浓度的月光花叶水提液喷洒甘薯“黄竖旗”叶面,结果增产,并发现薯块膨大先抑制后促进的现象,初步证明月光花叶内含有能使甘薯增产的活性物质。后厦门大学生物学系用月光花叶提取物对甘薯、花生、小麦、水稻、大豆、芹菜、萝卜、马铃薯等10多种作物进行喷洒叶面或浸种,结果表明,只要处理的浓度和时期得当,都能增产。在中国北方地区,其效果更明显,增产高的达20%以上。然而,由于叶片中活性物质的量因栽培地区、采收时间和提取方法的不同而变化,当时以鲜叶或干叶重量作为计量指标是不准确的,急需研制稳定可靠的计量方法。1968年,王再生、黄厚哲等建立了月光花叶活性物质的生物鉴定法——稻根抑制法。利用活性物质抑制水稻种苗不定根的生长,在一定量范围内,浓度增大,抑制效应增强,直到根系完全受抑制。以其临界抑制浓度作为计量指标,称为一个“稻根抑制单位”,并以所用的稻种命名。同时发现不同类型品种敏感性不一,一般粳稻比籼稻敏感,晚籼比早籼敏感。当时从21个品种中筛选出敏感稻种“科情3号”来检测,所得结果简称“科情单位”。以后又筛选得到几个更敏感品种来应用,如“吉梗60”、“京引3号”等。

稻根抑制法的建立使生产应用和理论研究都在准确计量基础上进行。1968年,首次在吉林浑江试用,以0.2“科情单位”月光花叶提取物处理甘薯,增产达31.4%,1974年用1“吉梗单位”(“吉梗60”较“科情3号”敏感5倍)处理,增产29.2%,结果基本一致。1972年用此法跟踪层析级分使月光花素甲的分离提纯顺利进行,用提物或纯品作试验,均常用此法测不同植物的敏感性。

1972年,厦门大学植物激素组对月光花叶活性物质进一步分离提纯。1973年,月光花叶用95%乙醇粗提,经丁醇萃取,再经中性氧化铝柱和硅胶柱层析,得到几个有生理活性的组分,其活性最强的组分之一用稀乙醇重结晶,得到白色棒状晶体(熔点161~169℃),称为月光花素甲。定性分析及红外谱检查表明它是还原性内酯糖苷。将糖苷降解,其糖分经鉴定为6-去氧己醛糖。1979年厦门大学激素组与中国科学院化学所协作,初步确定月光花素甲为11-羟基十六烷基酸乙酯与5个6-去氧己醛糖结合而成的糖苷。1986年厦门大学化学系与法国尼斯大学和南希大学协作,采用400MHzBRUKER核磁共振仪和各种脉冲程序对月光花素甲进一步研究,确定月光花素甲是两个分子量相差28a. m. u.的糖苷类同系物分子的混合物,这两个分子分别称为月光花素甲(I)和月光花素甲(II)。它们均由两个糖苷配基(即贰元)和4个鼠李糖连接而成内酯类低聚糖苷。其中一个糖苷配基各为一个11-羟基-十六烷基酸和11-羟基-十四烷基酸,另一个配基是相同的,为2-甲基-3-羟基戊酸。糖的构型以及彼此连接方式和糖与配基之间的连接方式基本搞清楚,后续的结构工作是设法分开这两个糖苷分子,进一步确定其分子结构。

月光花素甲对多种植物根系生长具有明显的抑制效应。如露白的稻粒或菜籽浸入试液中,根生长受抑制;稻芽切去胚根或甘薯剪下茎条浸入,其不定根生长也受抑制。这种抑制效应后期可转化为促进效应。转化的快慢随处理浓度、处理时间、物种特性和外界环境而异。但转化必定通过植株生长发育过程来实现,促进根系生长(包括块根膨大,如甘薯、萝卜等)都只在后期出现。

月光花素甲对多种植物地上部生长也有初期明显抑制、后期抑制转化为促进效应。具体情况依物种特性、植株发育阶段、处理浓度以及培育条件等而变化。例如,使叶片宽厚浓绿,叶柄粗短,生长旺盛而延迟抽薹(如叶菜类芹菜延迟39~46d抽薹,增产明显);使块茎增产(如马铃薯始花期喷洒,增产15.1%~20%;川苡效果类似);提早并增加分蘖,分蘖节间粗短(如小麦、水稻);促进花芽分化,提高开花数(如用7.5~30mg/L月光花素甲浸种花生“69194”,使其首期开花数增加20%,总开花数增加8.6%~17.6%;提高果实的饱满程度和重量(如花生、小麦)等。用1~3mg/L月光花素甲处理经过长期培养、只增殖而未能出苗的11个品种水稻愈伤组织出苗。月光花素甲(1~100mg/L)能抑制“京引3号”稻苗第2叶鞘生长,推迟芹菜、胡萝卜抽薹开花,对大麦 $\alpha$ -淀粉酶没有明显诱导活性,而赤霉素(0.1~10mg/L)的效应正相反。如果混合应用,其效应相互抵消,抵消程度与浓度有关。用月光花素甲处理水稻“金早6号”的幼苗和愈伤组织,结果表明50mg/L处理(显示抑制)的呼吸强度降低,而过氧化物同工酶活性提高,1mg/L处理(显示促进)的则相反。用月光花素甲处理水稻“广包”幼苗,根尖细胞分裂率也表现出先抑制后促进的现象,和转化时间长短与所用浓度大小相反的规律性。处理后受抑制的根尖切片,光镜显示导管分子分化加速,中柱鞘提早出现不少将成为侧根原基的分生细胞团;透射电镜进一步显示根前端薄壁细胞内膜系统与对照后段开始分化的细胞相似,壁较厚而不均匀。

月光花素的研究结果表明,月光花素甲是一类抑制型的生长调节物质,能使多种作物增产。今后若干年,将月光花叶提液处理农作物作为农业常规手段以提高产量是完全可能的。至于理论研究方面,20世纪内将继续摸清月光花素甲的作用机理和规律并在生产上加以应用。对月光花素甲在细胞、分子水平的效应研究应该有新的发现。

#### 参考文献

- 1 厦门大学植物激素研究组,厦门大学学报(自然科学版),1974,1:40~50
- 2 生物系植物激素研究组,厦门大学学报(自然科学版),1975,2:25~42
- 3 郭奇珍,等,厦门大学学报(自然科学版),1980,1:83~90
- 4 王再生,等,厦门大学学报(自然科学版),1980,2:105~109
- 5 黄海水,等,厦门大学学报(自然科学版),1986,5:588~593
- 6 胡友川,等,有机化学,1989,9:141~145
- 7 胡友川,等,有机化学,1989,9:146~150

(厦门大学徐罕伦副教授撰;黄厚哲审)

#### 脱落酸

abscisic acid 1963年,美国阿迪科特(F. T. Addicott)等从未成熟的棉铃中提取出一种促进棉铃脱落的激素,命名为脱落素I。同期,英国韦尔林(P. F. Wareing)等从短日条件下桦树与槭树的叶片中提取出一种促进芽休眠的激素,命名为休眠素。后来证明,脱落素I和休眠素是同一物质。1965年确定其化学结构。1967年在加拿大渥太华市召开的第6届国际植物生长物质会议上,把脱落素I和休眠素统称为脱落酸(简称ABA)。

**化学结构与生理活性** ABA是15碳的倍半萜烯化合物,化学名称为3-甲基-5-(1'-羟基-4'-氧-2'-6'-三甲基-2'-环乙烯-1'基)2,4-戊二烯酸,分子式是 $C_{15}H_{20}O_4$ ;难溶于水或苯,易溶于甲醇、丙酮、乙醇、乙酸乙酯和碱性水溶液。

ABA有两个旋光异构体。天然的ABA是右旋的,以(S)-ABA[或(+)-ABA]表示,抑制快反应和慢反应;它的对映体为左旋的,以(R)-ABA[或(-)-ABA]表示,只抑制慢反应。人工合成的ABA是右旋(+)-ABA和左旋(-)-ABA各占50%的外消旋物(±)-ABA,熔点为190℃。右旋的和左旋的ABA在大多数的情况下具有相同的生物学特性,但在导致气孔的关闭方面(-)-ABA没有活性。

第2位碳上的羧基与氢的排列不同而有顺式(cis)异构体和

反式(trans)异构体。天然的 ABA 都是顺式的,熔点为 160°C,植物提取液中只有少数的反式 ABA。环上的双键及羧基对 ABA 的活性都是很重要的。

2-顺-4-反式 S-ABA 普遍存在于植物体中,还在植物组织中发现与天然 S-ABA 有关的化合物,如 2-反式 ABA 菜豆酸、2-反式菜豆酸、脱落酸基-β-D 吡喃葡萄糖苷等,但这些物质的活性都较低,菜豆酸(phaseic acid)的生理活性只有 ABA 的十分之一。在植物体内的分布和运输 ABA 在植物界广泛分布。根据用旋光色散法对各类植物进行抽样测定的结果,ABA 存在于全部维管束植物中,包括被子植物、裸子植物和蕨类植物。非维管束植物中,除 7 种真菌外,其他真菌、细菌、藻类和苔类中尚未发现有 ABA 存在。苔类和藻类植物中含有一种化学性质与脱落酸相近的生长抑制剂,叫作半月酸。

高等植物各器官和组织中都有 ABA,其中以将要脱落或进入休眠的器官和组织中较多。植物体内 ABA 含量一般为 0.03~4.0mg/kg 鲜重。水生植物中含量较低,为 3~5μg/kg 鲜重。禾谷类植物叶片中含量为 50~500μg/kg 鲜重。植物体内 ABA 含量常受环境影响,除了水分胁迫外,低温、高温、盐渍、水涝、缺氧、缺乏营养元素、红光照射、病毒感染、真菌感染、寄生植物的寄生与铵中毒等均可不同程度地刺激 ABA 合成。例如水分亏缺可以促进 ABA 的生物合成,玉米叶片相对含水量从 97% 下降到 80% 时 ABA 含量提高 13 倍,短日照和低温的作用也可使 ABA 含量大幅度增加。植物器官在发育过程中 ABA 含量也有很大变化,如棉铃在落铃期和开裂期 ABA 达到最高水平,含量较其他时期高出数十倍之多。

脱落酸没有极性运输的特性。在菜豆叶柄切段中,<sup>14</sup>C-ABA 向基部运输的速度是向顶部运输速度的 2~3 倍。ABA 主要以自由型的形式运输,也有部分以 ABA 糖苷形式运输。ABA 在植物体内的运输速度很快,在茎或叶柄中运输速度大约是 20mm/h。

合成与代谢途径 质体是细胞内合成 ABA 的主要部位。Milborrow 发现鳄梨与蚕豆的离体叶绿体与白色体都能合成 ABA。合成 ABA 的初始前体是甲瓦龙酸(MVA),3,5-二羟基-3-甲基戊酸,从它生成法尼基焦磷酸(FPP,C<sub>15</sub>)后有两去路:(1)C<sub>15</sub>直接途径,经脱氢、环化异构生成 α-或 r-苜香义乙醇,再生成 α-或 r-苜香义乙酸(α-或 r-INAA),最后生成 ABA。本途径主要存在于真菌(蔷薇生尾孢)等。(2)C<sub>40</sub>间接途径,光合成 C<sub>40</sub>的类胡萝卜素(紫黄质)经光或生物氧化(脂氧合酶作用)而裂解为 C<sub>15</sub>的黄氧化素(XAN)转化为 ABA。本途径主要存在于高等植物。

ABA 代谢也有两条途径:(1)氧化作用。经 6-羟甲基脱落酸(HMABA)转化为红花菜豆酸(简称 PA),再还原成二氢红花菜豆酸(DPA)。(2)结合作用。常见的有脱落酰葡萄糖酯(ABAGE)和脱落酰葡萄糖苷(ABAGS);二氢红花菜豆酸-4'-β-D 葡萄糖苷(DPAGS)在某些植物中含量甚高,它也是 ABA 的代谢产物。

生理效应与应用 80 年代后,对 ABA 的生理和生化研究进入一个新高潮时期。过去 ABA 只被看作是一种生长抑制因子,其实 ABA 在植物整个生长发育过程中具有多方面的调控作用。

(1)促进与抑制生长:施 ABA 浓度小于或等于 10<sup>-7</sup>mol 时可促进离体黄瓜子叶生根与下胚轴的伸长,刺激单性结实种子的发育等;但大于或等于 10<sup>-7</sup>mol 时会抑制茎、下胚轴、根、胚芽鞘或叶片等器官的生长。用生长素类(NAA,IBA)处理仍不能生根的外植体往往存在着较高的内源 GA 含量,用 ABA 处理可促进其生根。如石刁柏雄株茎段置于 10<sup>-7</sup>mol/L ABA 的 MS 培养基上,15d 和 30d 后生根百分率为 33.3% 和 66.3%,对照一直无根出现。用 100mg/L ABA 可显著减少麦、稻的“穗芽”现象。

(2)维持芽与种子的休眠:落叶树木的潜伏芽,红松、小麦种胚及马铃薯块茎的休眠与体内 GA/ABA 的激素平衡有关。J. E. Villers 认为,ABA 之所以能使种子的休眠保持下去,就是因为它能抑制某一种特殊蛋白质合成的缘故。它的作用在于抑制

RNA 和蛋白质的合成,从而抑制茎和侧芽生长,与 GA 有拮抗作用。ABA 促进芽和种子休眠。大麦糊粉层中 ABA 诱导形成一种特异性蛋白质,是 α-淀粉酶的抑制剂。这种抑制效应发生在转录和转译水平。它可通过抑制或促进来调节特异基因的表达。

(3)促进果实与叶片的脱落:ABA 通过促进离层的形成而促进叶柄等的脱落。棉花受精后 5~10d,幼铃的 ABA 含量剧增,此时正是脱落敏感期。棉铃开裂时,ABA 含量再次上升,表明棉铃的脱落与衰老均与 ABA 有关。脱落酸对脱落的促进作用,主要在于减低或抵消 IAA、GA 及 CTK 对衰老的延缓作用,促进器官的衰老,脱落的发生则是器官衰老的结果。ABA 也是果实成熟衰老的促进剂,能促进跃变型的和非跃变型的果实成熟和衰老。Osborne 认为,ABA 只能促进已经开始衰老的过程加速进行,却不能成为诱导衰老的起因。

(4)促进气孔关闭:ABA 可使保卫细胞 K<sup>+</sup>外渗增加而失去膨压,导致气孔关闭。将离体叶片表皮漂浮于各种浓度的 ABA 液面上,在一定范围内气孔的开度与 ABA 浓度成反比例。这已成为检测 ABA 的一种生物试法。ABA 可使气孔快速关闭,对植物又无毒害,是一种极好的抗蒸剂。

(5)对开花与性分化的效应:在长日条件下,ABA 可使草莓与黑莓顶芽休眠并促进开花。GA 能使大麻的雌株形成雄花,此效应可被 ABA 逆转,但是,ABA 却不能使雄株形成雌花。黄瓜茎端 ABA 与 GA<sub>4</sub> 水平与花芽性别分化关系密切,较高的 ABA/GA<sub>4</sub> 比值有利于黄瓜雌花分化,反之,则有利于雄性分化。乙烯利会促进 ABA/GA<sub>4</sub> 比值的上升。苹果生理分化中期 ABA 含量的增加是花芽分化所必需的,高含量的 ABA 利于花芽分化,并且适当施 N 肥利于增加 ABA 的累积。

(6)提高抗逆性:ABA 能提高植物对低温、高温、干旱、水涝、盐渍等逆境的适应能力,因此有“逆境激素”之称。1983 年, Singh 等首次报道了烟草盐适应悬浮培养细胞中的盐胁迫蛋白,至今已发现近 20 种植物中存在盐胁迫蛋白。ABA 诱导烟草植物对盐的适应性诱导 Osmotin 的产生,从盐渍渍导体内 ABA 含量的增加,ABA 可促进脯氨酸的累积,从而增强植物的耐盐性。ABA 可以诱导渗透压素的合成,内源 ABA 的含量与渗透压素的合成具有相关性。推测氯化钠诱导渗透压素的合成过程如下:氯化钠胁迫→ABA 含量增加→渗透压素开始合成→渗透压素积累→渗透压素参加渗透调节过程→细胞增强了抗盐性。Waldman 等(1975)指出,苜蓿幼苗体内赤霉素和脱落酸(ABA/GA)平衡关系的变动调控着抗寒基因的表达。Robertson 等从 ABA 处理过的植株中分离到的 mRNA 进行体外转译,发现 ABA 诱导植物耐寒过程中,基因表达发生显著的变化,其中一种编码 20kd 的多肽的新合成的 mRNA 和 ABA 诱导的耐寒性增强密切相关。这种 20kd 的多肽也可被 ABA 诱导的抗寒油菜植株中分离到的 mRNA 转译。Chen 与 Li 曾提出低温锻炼顺序假设:低温→糖的积累→渗透浓度提高→游离 ABA 含量增加→诱导特异蛋白质合成→增强抗寒性。ABA 对植物抗寒力的诱导具有某种“扳机作用”。ABA 提高植物抗寒性的分子机理较复杂,它是通过诱导某些特异性基因的表达,间接地提高植物的耐寒性。

#### 参考文献

- 1 Chen H H. plant cold Hardiness and Freezing stress, Academic press, New York:1982. 5~22
- 2 Whenhan R J, et al. Physiol plant patho. 1985, 26: 379
- 3 Singh N K, et al. Proc Natl Acad Sci. USA: 1987. 84: 730
- 4 Guerrero E D, et al. Plant Physiol, 1988, 88: 401
- 5 Mohapatra S S, et al. Plant phy siol, 1989, 89: 375
- 6 刘祖祺,张连华.园艺学报,1990,17(3),197~202
- 7 刘祖祺,林定波.园艺学报,1993,20(4),335~340

(南京农业大学刘祖祺副教授撰,周雯审)

实成熟是指果实停止增大和增重以后,由于内部生理生化变化而导致果实成为可食用状态的过程。过分成熟的果实易受机械损伤和病原菌的侵染,造成经济损失。因此,果实成熟和延缓衰老的研究具有理论意义和实用价值。

20世纪20年代末,英国金德和威斯特(F. Kidd & C. West, 1922)开创了果实成熟生理的研究,侧重于成熟过程中果实颜色、质地、风味的变化与果实呼吸的关系。1928年,布拉克曼(F. F. Biachman)提出结构组抗学说,认为在未成熟的果实组织中有一种天然组织抗,使果实保持鲜嫩状态,当组抗降低时果实开始过渡到成熟和衰老;组抗大的果实合成代谢与降解代谢保持平衡;组抗降低时降解代谢大于合成代谢。果实对病菌的免疫能力也随组抗降低,其表现为淀粉降解和糖化,叶绿素分解失绿,细胞壁变薄,果实软化,原生质膜透性增强,果实褐变和出现病菌感染斑点。塞勒(J. A. Sacher, 1966)观察到组织中自由空间增大,支持结构组抗的假说。普拉特(H. K. Pratt, 1969)提出乙烯是果实成熟的启动子之后,布雷迪(C. T. Brady, 1970)报道,当果实成熟时膜脂成分和物理性质发生改变;勒里(S. Lurie, 1983)等报道苹果磷脂在跃变高峰时减少,膜脂中固醇与磷脂的比值较跃变前增大。许多文献报道(S. F. Yang, 1984等)果实成熟的一切代谢过程几乎都与乙烯有关,无论内源的或外源的乙烯都能诱导呼吸跃变期提前出现退绿和新色素的形成;乙烯还诱导芳香类物质的释放和使果实软化。

玛普桑(L. W. Mapson, 1969)采用气调法贮存果实,就是通过降低贮藏室的氧分压和提高二氧化碳分压吸去乙烯来控制果实成熟、延长果实供应时间的。索洛莫斯(J. Solomos, 1978)观察到乙烯和氰化物都有诱导马铃薯呼吸跃变出现的作用,同时都能提高酶途径中FDP和TP含量,降低G6P、3-PGA和PEP含量,以加速糖酵解的速度。(J. B. 阿丹斯 1981)和罗恩(K. S. Rowan)同样观察到鳄梨和香蕉在呼吸跃变上升时G6P, FDP下降。查尔默斯等(D. J. Chalmers, 1971)认为PFK是番茄果实呼吸跃变上升的调节者。80年代的研究资料表明,焦磷酸—果糖—6-磷酸转移酶(PFP)对呼吸跃变的上升起调节作用。本纳特(A. B. Bennett, 1987)观察到鳄梨成熟时PFK和PFP在各阶段均存在,但当 $F_2, 6P_2$ 存在时PFP的活性增强10倍,同时PFK和PFP活性相似,在跃变高峰出现的一瞬间 $F_2, 6P_2$ 含量增长比跃变前期高80%~90%,因此认为果实成熟时呼吸增加为PFP活化,而PFP又为 $F_2, 6P_2$ 激活。斯特特(M. Stitt, 1966)证明胡萝卜和马铃薯用乙烯处理后 $F_2, 6P_2$ 大增。1980年,富勒和尤伊达(E. Furuya & K. Uyeda)用鼠肝证明 $F_2, 6P_2$ 是PFK的活化因子。最近的研究资料表明,植物细胞质中 $F_2, 6P_2$ 的靶酶是PFP,  $F_2, 6P_2$ 有激发PFP活性的作用,而PFP可代替PFK,因而认为在呼吸跃变中PFP起很重要作用。1989年,吴敬贤等关于香蕉成熟中PFP作用的研究资料同样证明,在跃变期PFP活性比PFK约高5倍, $P_2, 6P_2$ 在跃变上升期高21倍,此时PFK提高2.5倍,认为PFP的活性为组织中 $F_2, 6P_2$ 浓度调节,后者与酶的结合及其活性受酶的底物F6P和温度调节,但PFK活性受ATP浓度的调节不受 $F_2, 6P_2$ 的影响,认为PFP对果实成熟具有重要的生理作用。古登奥夫(U. W. Goodenough, 1972)指出,番茄在呼吸跃变时 $CO_2$ 的产生与苹果酸代谢明显相关,当果实成熟时苹果酸由积累变成消耗,这一过程与柠檬酸合成酶和苹果酸脱氢酶下降有关,同时证明在番茄果实中存在与NAD连接的苹果酸脱氢酶,它位于线粒体内膜上,同时存在与NADP连接的苹果酸酶,它位于线粒体外膜上。1990年又发现成熟的番茄NADP—苹果酸酶活性在采后两天的绿熟果中为0.69m mol NADP分<sup>-1</sup>·鲜重<sup>-1</sup>·蛋白<sup>-1</sup>·4d(始红期)仅为0.23m mol,指出在番茄成熟时碳水化合物代谢在细胞质和线粒体中有交替性变化。实测结果表明,在绿熟期线粒体TCA运转产生2mol  $CO_2$ ,细胞质脱羧产生1mol  $CO_2$ , 现红初期TCA产生0.8mol  $CO_2$ , 苹果酸脱羧产生4mol  $CO_2$ , 全红期二者均产生0.8mol  $CO_2$ 。1984年,吉弗里(D. Jeffery)将乙烯对番茄成熟过程中某些酶的影响分为

3类:酶活性变化与乙烯作用无关的类型,如柠檬酸合成酶、苹果酸脱氢酶其比活变化不依赖乙烯;乙烯不启动酶的合成,但加强酶的活性,如叶绿素降解酶;乙烯不但启动酶的合成,还提高酶的活性。早在1953年,米勒(L. A. Miller)将果实的呼吸跃变归因于线粒体解偶联作用。兰什(C. Lance, 1967)证明番茄和鳄梨线粒体在整个呼吸跃变过程中均保持着完整性和偶联功能。近10年中关于果实成熟中线粒体的转能活性作了大量研究。拜尔(J. B. Biale, 1978)报道,鳄梨在呼吸高峰时R. C.和ADP/0也达到最大值,但被氧化的底物不同,效应也不同。以琥珀酸为底物时与成熟无关,以丙酮酸为底物氧化效率增大,此时加入TPP有增效作用。扬等(R. E. Young, 1982)用 $P^{32}$ 参入法研究资料表明,高峰期 $P^{32}$ 参入磷脂的量比前期高10倍,由此认为磷酸化受体的亏缺是呼吸跃变上升的原因之一。本纳特(A. B. Bennett, 1987)用核磁共振技术(NMR)研究呼吸跃变与 $P^{31}$ -NMR波谱的关系,证明 $\beta$ -ATP峰与呼吸跃变峰一致,在跃变高峰时ATP比前期增加86%~94%。

果实成熟时的呼吸跃变机理虽已研究了80余年,但其实质仍未弄清。不少研究者指出,结构组抗的理论不能解释成熟过程发生的全部现象,成熟过程绝不只是物质的降解代谢,某些物质的合成作用也很活跃;质膜透性变化是成熟的结果,而不是诱发成熟的原因;免疫能力下降发生在成熟后期。休尔姆(A. C. Hulme, 1954)观察到L-亮氨酸参入蛋白质的活动在呼吸上升期参入量最大。马雷等(N. Marei et al, 1971)观察到无花果成熟过程中不仅有核糖体、RNA和蛋白质合成,还有DNA、25S、18S rRNA和5S rRNA的新合成,并受乙烯的促进。因此,有人认为果实成熟是基因组按时空程序表达的结果。80年代初,英国格里桑(D. Grieson, 1983)和美国莱蒂斯(G. Laties, 1984)实验室分别研究了多聚半乳糖醛酸酶(PG)和纤维素的基因表达。这两个酶的功能是使细胞壁降解,从而导致果实软化。最近,格里桑和美国迪拉佩拉(D. Dellapenna, 1990)证明PG是一个阶段专一性和组织器官专一性表达的酶,其专一mRNA是番茄成熟初期开始转录的,随着果实成熟酶蛋白急剧的增加,同时PG活性也随之增强。他们还分离、纯化了PG蛋白,确定该酶是有3个同工酶的糖蛋白,分子量为47kd的同工酶I是降解细胞壁的主要酶。他们已获得PG的cDNA克隆和核基因组克隆及调节该酶表达的一段启动子基因,并作了序列分析,证明PG基因在该基因组内是一个单拷贝基因,全长74506P。最近,格里桑等又将PG5'端1.45kb的完整启动子基因与CAT—NOS基因连接,构建成融合载体,将其转到番茄细胞中,发现其再生的转基因番茄的成熟果实中具有CAT活性表达,而在不成熟的果实、叶片和根中没有CAT活性表达,表明PG具有成熟特异性表达的启动子。1988年,格里桑和希海(R. E. Sheehy, 1988)相继公布了他们构建成功番茄PG的反意RNA系统,即将PG反意基因接在CaMV35S和NOS3'基因之间,构建成双元载体进行转化,获得转基因番茄植株,从该植株获得的番茄红果其中PG活性下降99%。该番茄在常温下贮藏的货架寿命比普通番茄长4倍,证明利用基因工程技术可专一地抑制PG的表达。前面已经提到乙烯是果实成熟和器官衰老的重要激素。1990年,格里桑(D. Grieson)发现一种与伤乙烯释放有关的蛋白,分子量为3.5kd,并获得它的cDNA和核基因,测定了全序列。利用反意RNA技术证实控制该基因表达可有效抑制果实成熟。最近,西洛吉斯(A. Theologis, 1990)等将乙烯合成的前体ACC合成酶的基因从番茄中克隆出来,测定了全序列,同时证明ACC合成酶基因为一基因家族,有5个拷贝,命名为LE—ACC<sub>1</sub>IA、LE—ACC<sub>2</sub>IB、LE—ACC<sub>3</sub>、LE—ACC<sub>4</sub>和LE—ACC<sub>5</sub>。其中,LE—ACC<sub>1</sub>IA与IB之间的氨基酸同源率为95%,其余3个同源率为50%~70%,在果实中表达出两个同工酶,它们的cDNA氨基酸同源率为68%,分别命名为ACC<sub>1</sub>和ACC<sub>2</sub>,各自的cDNA克隆命名为PTA<sub>ACC2</sub>、PTA<sub>ACC4</sub>,编码的蛋白分子量分别为54.7kd和53.5kd。用反意RNA技术导入番茄其子代纯合子的乙烯释放量较对照者低

99.3%,成熟比对照者慢,在常温下放90~100d不转红,表明用基因工程技术控乙烯合成可能有很大的应用前景。

参考文献

- 1 Hulme A C. et al. *The Biochemistry of Fruits and Their Production*. New York: Academic press, 1970. 315~378
- 2 Sacher J A. *Rev Plant Physiology*, 1973, 21: 197~224
- 3 Sofomos T. et al. *Colloques internationone C N RS*, 1976, 221~228
- 4 Riend J. et al. *Recent Advances in the Biochemistry of Fruits*. AP, 1981, 89~104
- 5 Friend J. et al. *Recent Advances in the Biochemistry of Fruit and Vegetable*. London: Acadmic prees, 1981, 22~45
- 6 Grierson D. et al. *Postharvest Physiology and Crop Perservation* New York: Plenum, 1983, 45~69
- 7 Sheehy R E. et al. *Pro Natt Acad. Sci USA*; 1988, 85: 8805~8809
- 8 Smith C J S. et al. *Plant molecular biology*, 1990, 14: 369~79
- 9 Dong J G. et al. *Planta*, 1991, 183: 38~45
- 10 Li N. et al. *Plant Molecular Biology*, 1992, 18: 477~487

(中国科学院植物研究所刘存德研究员撰)

果实完熟过程中的激素调控 phytohormonal control of fruit ripening

果实长成以后,通常可在一个较短的时间内完成颜色、质地和风味的转变,达到可食用的良好品质。这个变化过程即称果实的完熟。随着对果实完熟生理研究的深入,人们越来越认识到果实完熟受基因的控制,植物激素可能是完熟基因表达的启动因子,而应用植物生长调节剂则是控制果实完熟的有效手段。业已探明,不仅是乙烯,而且其它激素如脱落酸、生长素、赤霉素和细胞分裂素都从不同方向影响果实的完熟,但它们的调控机制感很清楚。

(1)乙烯对果实完熟的调节作用发现最早,早在1924年, Denny 就发现乙烯能促进柠檬变黄及呼吸作用上升。但当时没有比较好的方法来分析从植物体内放出的微量乙烯,只有在果实完熟后放出大量乙烯时才能测出,所以当时许多人认为,乙烯不是导致完熟的原因,而是果实完熟过程的产物。后来 Burg 利用气相色谱分析仪测定了11种果实组织内部乙烯的含量和释放速度,结果发现,香蕉、芒果果实完熟过程的产物。后来 Burg 利用气相色谱分析仪测定了11种果实组织内部乙烯的含量和放速度,结果发现,香蕉、芒果、鳄梨等跃变型果实在呼吸跃变前就有足够引起呼吸上升的乙烯存在。现已证明:乙烯在诱导某些果实完熟过程中起着重要的作用。它可以诱导呼吸跃变、果实软化及果色的转变,在商业上调控果实完熟的进程大多都是通过对外源乙烯的调控来实现的。

乙烯的作用首先表现在对乙烯生物合成的调节上。McMurohie 和 Yang 认为植物体内乙烯的合成有两个系统,所有植物组织在生长发育过程中都能放出微量的乙烯,这种乙烯的合成系统称为系统一,由其合成的乙烯称为系统一乙烯,非跃变型果实或未成熟的跃变型果实内产生的乙烯,就是系统一乙烯。而跃变型果实完熟前大量释放的乙烯是由不同于系统一的另外一系统合成的,称为系统二乙烯,它既可以随果实的自然完熟而产生,也可被外源乙烯所诱导。Yang 等指出,跃变型果实系统二乙烯的产生是被系统一乙烯或外源乙烯的产生是受乙烯或外源乙烯通过两具关键酶起动的。跃变型果实系统二乙烯产生时,果实中 ACC 合成酶或/和(EFE)的活性都很低,用乙烯处理这种果实后,ACC 合成酶或 EFE 的活性会很快增加,随后产生系统二乙烯。在完熟诱导过程中,不同果实的这两种酶活性变化情况不同。

(2)近年来,人们发现许多果实的完熟受 ABA 的控制,乙烯的调节作用却并不重要。ABA 对完熟的调控在非跃变型果实中表

现比较明显,这些果实在完熟过程中 ABA 含量剧增,乙烯生成量减少,外用 ABA 能促进柑桔、葡萄、草莓的完熟,而乙烯对这些果实则起不到促进完熟的效果,跃变型果实在完熟时期也发现 ABA 增高的现象。由于乙烯与 ABA 两者在植物组织中常常相伴产生,在时间上不易分出它们的先后顺序,因此也难以确定它们的因果关系。但是,经 ABA 处理番茄柑桔、苹果、杏、芒果、香蕉等果实,能促进这些果实乙烯的生成、吸呼升高和果实的完熟。张微等认为在苹果、杏等跃变型果实中,ABA 首先刺激乙烯的生成,然后再间接地对完熟起调节作用。Ras-mussen 认为 ABA 积累到一定程度之后,触发乙烯的生成,其生成量并不因以后 ABA 含量的增减而变化。

也有不少试验仍然认为果实完熟时乙烯起主导作用,ABA 的增加是乙烯生成的伴生现象。北川利夫测得在树上未长成的李果实中就有很高的 ABA 含量。蔡龙铭根据对跃变型和非跃变型果实梨、香蕉、猕猴桃、柑桔等乙烯、ABA 和呼吸量的研究,认为 ABA 和完熟的关系没有乙烯和完熟的关系那么密切。

(3)Frenkel 报道内源 TAA 可使跃变型果实延迟完熟,认为这类果实开始完熟可能是由于生长素失去激素作用所致。Biale 认为一些果实在完熟之前, LAA 必须先经氧化,使其浓度降低后,果实才能完熟。抑制果实完熟的物质(生长素等)是在叶内合成,经叶柄进入果实。当果实完熟时,过氧化物酶(PRO)及 IAA 氧化酶的活性均有增加,PRO 的增加有助于 LAA 的降解。Pingwa 提出 LAA 在进入果实之前,在果柄中先被氧化分解。这样就可以认为生长素是对果实完熟发生抑制作用的因素之一。

生长素抑制完熟的机理可能是果实组织内生长素的水平影响着乙烯的敏感性, Yang 认为生长素能促进乙烯的生物合成,所以生长素的作用一方面直接调节组织对乙烯的响应,与乙烯起相反的作用,另一方面又参与诱导乙烯,促进完熟。Vendrell 把整个香蕉浸泡在 2,4-D 溶液中,促进了果肉的完熟,而推迟了果皮的完熟 24h 后,80%的 2,4-D 浓度高,对乙烯不敏感,而由果实都高浓度的 2,4-D 浓度低,对乙烯敏感,从而促进了果肉的完熟,而推迟了果皮的完熟。Frenkel 等将吲哚乙酸或 2,4-D 渗入绿色的巴黎,促进乙烯的发生,但延迟完熟。说明在该代谢条件下,生长素推迟完熟的效应人于诱导乙烯产生的效应。

(4)细胞分裂素对果实完熟的影响研究得不多。Abdel-Gawad 等曾发表细胞分裂素抑制完熟的报道。Kano 用离体培养方法研究细胞分裂素和 ABA 对草莓完熟的交互作用,发现高浓度的 ABA 促进果实完熟,而低浓度的细胞分裂素有利于 ABA 活性的表现,从而认为细胞分裂素不直接调节完熟。Brun-sma 报道 ABA 促进香蕉果皮着色,BA 抑制着色,认为 BA 抑制 ABA 的活性。

赤霉素可阻止柑桔果皮的变黄和果实的脱落,能抑制胡萝卜素的积累和果实变软。GA<sub>3</sub> 还可使已变黄的脐橙重新转绿,使有色体重新转变为叶绿体。赤霉素还具有延缓柑桔、番茄、香蕉、芒果、梨等果实完熟的效果。但 GA<sub>3</sub> 在改变着色的同时,不能改变呼吸高峰,GA<sub>3</sub> 推迟完熟的效果可为施用外源乙烯所抵消,乙烯可能具有促进赤霉素转化为无活性的水溶性物质的作用。在柑桔果皮中引入<sup>3</sup>H-GA<sub>3</sub>5h,再用乙烯处理,结果有 59.7%的 GA<sub>3</sub> 转变为无活性的水溶性物质。而放于空气中的对照,只有 37.0%的 GA<sub>3</sub> 转变为水溶性物质。

完熟前果实中各种内源激素都发生有规律的变化。普遍表现为赤霉素和细胞分裂素的减少,ABA 或乙烯的升高。

Richmond 在鳄梨果实呼吸高峰升高的前半期观察到放射性氨基酸结合成蛋白质的量增加。Frenkel 发现抑制蛋白质合成的环己亚胺也有效地阻止完熟。他还观察到在跃变上升早期,放射性氨基酸结合到蛋白质上比上升开始前更多。Hulme 等看到完熟的苹果也增加 RNA 的合成。已经知道,在跃变期及随后一段时间内,番茄进行多聚半乳糖醛酶(PG)的合成。鳄梨也进行纤维素的合成,还从完熟过程中的鳄梨果实内提出了 3 种 Poly(A<sup>+</sup>)-RNA。Dellapenne 等从完熟番茄中提出 Poly(A<sup>+</sup>)-

RNA 做成 cDNA 文库,然后将 cDNA 文库嵌入表达质粒,通过 PG 抗血清表达产物进行免疫扫描,鉴别出了一种分子量为 54 000 的多肽,它由一条 2100 的 mRNA 编码。这种 mRNA 在未开始成熟的果实中没有,只有在成熟时才能测到,其含量随成熟的进展而迅速增加。

证明果实在成熟过程中酶的活性是基因活化表达的结果,果实的成熟受基因控制。

Hulme 等发现,乙烯对呼吸跃变前的果实有增加 RNA 合成的作用。Marei 用乙烯刺激无花果成熟时,放射性尿苷结合到 RNA 碎片上显著增加。当乙烯诱导鳄梨产生呼吸跃变的初期,单位鲜重所含多聚核糖体增加了 3 倍,用掺入蛋白质合成前体来测定蛋白质的合成也得出同样的结论。Speirs 等和 Grierson 等分别测定了番茄系统二乙烯产生前 48h 内 mRNA 组成的变化,发现有 6~8 种 mRNA 增加,只有少量的 mRNA 减少。Lincoln 用乙烯处理长成的未成熟番茄,在 0.5~2h 内就能测到 4 种新的 mRNA。在番茄自然成熟过程中,其中 2 种 mRNA 的蓄先于乙烯的增加,而另 2 种 mRNA 随乙烯的增加而增加。用乙烯作用的专一抑制剂 MBD 处理未成熟的果实,可抑制这 4 种 mRNA 的产生。说明这种 mRNA 基因的诱导都要有乙烯的参与。

由于番茄成熟突变体的发现,使植物激素与成熟基因的研究获得新的进展。不易成熟的番茄突变体 rin(在第 5 条染色体上突变)和突变体 nor 在第 10 条染色体上突变)成为非跃变型果实。这两个突变体果实不能产生系统二乙烯,果实也不能正常成熟。给予高浓度的外源乙烯,rin 果实能着色,但不软化。泽野等研究 rin 突变体番茄和普通番茄成熟过程中植物激素的变化时,发现果肉中 ABA 都在采后第 9d 达到高峰,ABA 的绝对量 rin 比正常种高。正常种在果实转色期出现乙烯和呼吸高峰,rin 种没有出现乙烯和呼吸量的上升。乙烯处理 rin 果实能提高 EFE 的活性,但不能诱导系统二乙烯的产生,ACC 合成酶也没有增加。因此系统二乙烯的诱导是直接受基因控制,外源乙烯对系统二乙烯的诱导是通过激活系统二乙烯基因而起作用的。进一步证实了成熟是一个受小基因组控制的特定发育时期。

果实成熟是一个由基因调控的过程,这一过程为植物激素和别的未知因素所启动。植物激素在跃变型果实成熟过程中的调控作用,可能是通过内源植物激素体内平衡使组织对乙烯的敏感性改变,使控制系统二乙烯产生的基因为系统一乙烯所活化,随着乙烯产生的增加,另一种基因才得以表达。

进一步的研究可以入 熟基因本身的结构、定位、表达和调控,内源激素的平衡和基因表达的关系等方面着手。搞清楚植物激素调控成熟基因的分子机理,以及诱导系统二乙烯产生的具体方式,对于进一步了解果实成熟的启动过程,从而入为地调控这个过程都具有重要意义。

(浙江省农业科学院园艺研究所丁长奎撰)

**植物表面温度 (Tps)** 植物表面温度是由土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 内的能流和水气流所决定的。不同环境区域的 Tps 不同,即使同一环境下的不同植物或植株的不同部位其 Tps 也不同。Tps 在植物生命活力与地理分布中起着主导的和直接的作用,虽与气温密切相关。研究 Tps,对农林植物的布局、引种、农田管理、产量、病虫害等方面具有极为重要意义和广阔的应用前景,同时也为农林生态学研究提供一个有力的连结手段。

1857 年,维谢洛夫斯基 (K. C. Веселовский) 在《论俄罗斯气候》一书中就提出 Tps 有别于气温 (Ta) 的观点和确定 Tps 的重要性,引起大气物理学、植物学、植物生理学和生态学等领域学者的极大兴趣和广泛研究。1964 年,林纳科 (E. T. Linacre) 收集与分析了北极至南非大田作物和温室特定条件下各种植物的叶温资料。1956 年,拉施科 (K. Raschke) 和布德科 (M. И. Булько) 分别研究了植物单叶的和植被表面的温度的模拟模型,并逐步得到发展和完善。1968 年,盖茨 (D. M. Cates) 阐明了蒸腾与 Tps 的关系。后来又相继出现用冠层温度 (Tc) 估算蒸腾的诸多模型,

如 Monteith 模型、Bartholic 模型和 Brown—Rosenberg 模型。Tps 既是植物对环境综合因子反应的一个重要指标,也是与生理过程相关的一个重要因子,因而有许多研究者都围绕 Tps 与所关心问题之间的关系开展工作,在一些专题预报等方面取得进展。1983 年,江爱良等首先报道中国东部季风区和西部季风区 Tps 的分异。

1981 年,蒙蒂思 (J. L. Monteith) 的叶气温差 ( $\Delta T$ ) 模型性地阐明: $\Delta T$  随着日射增强或植物表面吸收日射的增强而提高,风速和湿度的降低又加强这一进程,在天气湿润(干燥)条件下,随着气孔开度增大(减小),即蒸腾增加(减小)而降低(增高),并且随着气温升高即饱和水汽压斜率增大而减小等等。1969 年,内岛善兵卫等通过模拟研究资料指出,具有单面气孔的叶面 Tps 高于双面气孔的。1980 年,仓石晋等观测 126 种植物的最高叶面温度 (MLST),发现禾本科植物高于草本植物,二者中以攀缘植物较高。1979 年,仁藤伸昌等观测日本广岛市行道树 MLST,并据此划为分辐射型 ( $Tps > Ta$ )、气温型 ( $Ta > Tps$ ) 和中间型 ( $Ta = Tps$ )。其中,具有较高 MLST 的植物可以忍受严酷的环境条件,也能减少水分消耗。他们建议在夏季少雨区,应选择叶温高的植物作为行道树种。1964 年,林纳科认为当  $Ta < (> 35^\circ\text{C}$  时,  $Tps > (<) Ta$ 。1970 年,德雷克 (D. G. Drake) 等的风洞试验结果支持这一论点。但是,1981 年蒙蒂思通过计算指出,  $Tps = Ta$  的临界值并非稳定不变,而是若干微气象变量和气孔阻抗的函数。因叶、叶柄、茎、根、果和生长点处于不同微境下和能量交换的差异,致使各部位 Tps 不同。有人测定田间玉米茎不同部位之温差在中午可达  $6^\circ\text{C}$ 。这种温差的生物学意义尚不清楚。虽然,水稻的光合作用和生长最适温度均低于日本稗,但二者却有相似的地理分布和生长季节。1978 年,长谷川朗经水浸盆栽对比试验提出这是水稻具较低 Tps 所致。1958 年,布德科计算前苏联部分地区 Tps,发现  $\geq 10^\circ\text{C}$  的植物表面积温与空气积温的差值东部 > 西部,极北地区最大。1983 年江爱良等和 1986 年卫林等,据改进的布德科模型探讨中国东部季风区与西部季风区部分相近纬度地区的 Tps 分布,揭示这种差值西部 > 东部,并认为使用 Tps 指标能克服区划中东西部气温指标不等价缺陷。但上述 Tps 计算式有待完善,加强计算结果可信度的研究也十分必要。

Tps 与植物蒸腾密切相关,改变土壤水分将导致 Tps 变化。以 Tc 为基础用于作物水分胁迫指数的研究较为广泛,并提出许多重要指标。如据  $\Delta T (Tc - Ta)$  的协迫一度—日概念 (SDD)、农田内 Tc 变异 (CTV)、协迫与未受协迫度的冠温差 (CTD) 和据  $\Delta T$  与空气水汽压差 (VPD) 之关系导出的作物水分协迫指数 (CWSI) 等。理论和经验结果表明, CWSI 在干旱地区能较好地成为监测作物水分动态和制定灌溉的指标,但在热带季风前的干热季使用 Tc 则更好,因 Tc 或  $\Delta T$  受风速、气温、净辐射和根系生长因素影响较大,从而影响水分协迫诊断精度。1982 年,伊德索 (S. B. Idso) 得出 26 种植物  $\Delta T$  与 VPD 之间具有显著负相关,并得到其他研究资料的支持。据此关系及结合热量平衡方程,1986 年奥图尔 (J. C. O'Toole) 估算出空气动力阻抗 ( $Ra$ ) 和作物阻抗 ( $Rc$ )。1977 年,伊德索等观测田间小麦叶温,发现叶—气温差与谷物产量呈显著负相关。1985 年,史密斯 (R. C. G. Smith) 等也证实这一关系。然而这一关系随地域而异,其他作物尚未见报道。这为通过卫星遥测 Tc 和 Ta 来估算全世界小麦产量的可行性带来希望。1977 年,美国用卫星测定 Tps 预报柑桔等的霜冻。1988 年,刘宁 (R. Leuning) 等详细地讨论了辐射霜冻期影响叶温的环境与植物形态因子,并且用微气象和数值技术建立平衡叶温预报方程。据农田表面热量平衡方程和空气动力学理论,用 Tps 来计算农田蒸散 (ET) 的研究也有进展。

Tps 的研究落后于 Ta 的主要原因在于测量技术。测量 Tps 的仪器可分两大类,即接触型的(如热电偶、热敏电阻)和非接触型的(如红外测温仪、遥感红外成像)。前者能同时多点观测和直接获取 Tps—Ta 差值,但因感应器需接触被测物表面,改变微环境而影响测量精度;后者则克服上述不足,它准确、迅速,结合通

感技术可进行区域测量,特别是微电脑的应用,解决了因  $T_a$  不同的仪器补偿问题,但其缺陷是被测对象以外的辐射源影响难以隔绝。由于  $T_{ps}$  变异性大于  $T_a$  和受环境因子和植物形态瞬时变化及区域面积等的影响较大,给  $T_{ps}$  观测规范化和准确性带来一定影响。因而,许多学者试图用模拟法来确定  $T_{ps}$ 。1992年,马友鑫等总结国内外  $T_{ps}$  的经验模型和理论模型。

有关  $T_{ps}$  的观测仅在特定研究工作中使用,资料少而零星分散具可比性差,因此对不同植物的  $T_{ps}$  观测和资料收集工作今后将十分活跃。使用航空技术特别是卫星遥感技术进行区域  $T_{ps}$  观测仍是一个有力手段,同时提高分辨率和准确性的研究也十分必要。如果能研制出一个较完善的  $T_{ps}$  模拟模型,既能有效地探明  $T_{ps}$  的区域分异规律,又能较圆满地解释植物—地理分布的某些重要现象,将为克服  $T_a$  某些缺陷带来希望,同时也能促进地球大气总循环模型研究。随着观测  $T_{ps}$  手段的进步和普及,大量  $T_{ps}$  资料的获得,它在发掘自然热量资源,指导农林布局、区域引种驯化和土地区划规划,尤其在农田管理(农田水分动态、灌溉、霜冻、热害、作物产量和病虫害预报等领域具有广阔应用前景。同时研究植株不同部位之间的  $T_{ps}$  差异对物质转移的影响、分生组织温度对短期可逆过程和长期不可逆过程的作用以及病虫害与寄主  $T_{ps}$  间的关系,也将进一步渗透到植物生理生态学的领域。

#### 参考文献

1. Monteith J L. *Plants and Their Atmospheric Environment*. Blackwell Scientific Publications (London), 1981. 1~29
2. Khera K L, Sandhu B S. *Agric for Meteorol*, 1986, 3: 245
3. 张鸿儒,卢振民,牛文元. 农田生态系统能量物质交换. 北京:气象出版社,1987. 156~164
4. 马友鑫,张克映. 应用生态学报,1992, 3: 1~91

(中国科学院昆明生物研究所马友鑫撰)

## 植物病毒株系间交互保护和遗传工程交互保护

traditional and genetic engineering cross-protection between virus lines of plant Mokinney(1929)发现病毒株系间存在交互保护作用,即植物系统感染病毒的某一株系后,可以免受同一种病毒其他株系侵染。这一发现开创了植物病毒学研究的新领域。

株系间的交互保护作用 株系间的交互保护作用是株系相互作用的一种方式,现已发现存在于许多病毒种株系间。但随着株系间也可能没有交互保护作用。Yeh和Consalves(1984)通过化学诱变从夏威夷野生型番木瓜环斑病毒株系中获得了弱毒株系  $HA_{5-1}$ ,这一弱毒株系对夏威夷 PRV 株系有较高等度的保护作用,目前已在生产上广泛应用;但是  $HA_{5-1}$  的保护作用在不同地方应用表现不同。一般认为:交互保护作用仅仅发生在亲缘关系密切的株系间,而在亲缘关系较远的株系间只有微弱的,甚至没有交互保护作用。

株系间交互保护作用的机理:(1)通过竞争病毒复制中可能利用的病毒复制酶和复制位点来阻止后侵入病毒的复制;(2)先侵入病毒和后侵入病毒的 RNA 通过互补等作用而可能导致了交互保护;(3)病毒衣壳蛋白直接或间接参与了交互保护作用。这3个基本原理间并不相互排斥,因此可以认为交互保护作用可能是其中一点或二点,甚至是全部综合作用的结果。目前认为在交互保护作用中,衣壳蛋白可能扮演了十分重要的角色。概括起来,衣壳蛋白的作用可能有:(1)减少病毒侵染和复制的位点;(2)抑制侵入病毒的脱壳;(3)在病毒侵染早期阻止病毒 Striposomes 的形成和发挥其功能作用。

#### 遗传工程交互保护

1. 利用病毒来源的抗病基因进行基因工程的途径及抗性机理。1980年,Hamilton根据病毒株系间的保护机理,提出代表单一病毒保护基因(如外壳蛋白基因)克隆的 cDNA 如果能在转化的植物细胞中表达,那么这种表达可能导致对植物的直接或间接

的保护反应,从而抵抗攻击株系的侵染。1986年Powell等首次获得表达 TMV 外壳蛋白基因的转基因植物后,Hamilton的设想就变为现实。1987年Nelson等首次提出,将这种转基因植物获得的对其相关病毒的侵染和复制等抗性称为遗传工程交互保护作用,随后这一概念得到广泛的支持。目前利用病毒来源的抗病基因进行抗病基因的构建和在植物中的表达主要有7条途径:(1)利用病毒外壳蛋白基因抑制病毒侵染;(2)利用反意 RNA 阻断病毒复制;(3)利用无翻译能力的正意 RNA 干扰病毒复制;(4)利用卫星 RNA 干扰病毒复制;(5)利用复制酶基因干扰病毒复制;(6)利用转移蛋白基因限制病毒在植物体内的运转;(7)利用 Ribozyme 裂解病毒基因组。

利用病毒外壳蛋白基因介导的遗传交互保护作用应用得最广泛、成功的报道最多,所涉及14个病毒分类组中至少19种病毒。这些众多的转基因植物在实验室条件下,都表现了对各自病毒的抗性,其中表达 TMV 衣壳蛋白基因的番茄、表达 PVX 和 PVY 衣壳蛋白基因的马铃薯、表达 ToMV 衣壳蛋白基因的番茄和表达 TMV 和 CMV 衣壳蛋白的双抗转基因烟草在大田的抗性与在实验室测定的结果相一致。

利用反意 RNA 片段封闭病毒基因组上重要的片段,如病毒复制酶结合位点、病毒装配位点、核糖体结合位点,从而阻断病毒复制,这在理论上是完全可行的。但从目前世界上利用此途径的报道来看,只有个别效果好。Lindbo和Dougherty(1992)构建了 EV 的反意衣壳蛋白 RNA 嵌合基因,所获得的表达反意衣壳蛋白 RNA 序列的转基因植物,能够延迟或减轻症状发生,甚至达到无症的抗性程度。

利用无翻译能力的正意 RNA 干扰病毒复制,是近几年发展起来的新途径。Lindbo和Dougherty(1992)利用移码突变获得 TEV 无翻译衣壳蛋白能力的正意 RNA,其转基因烟草植株对 TEV 的侵染表现高抗和免疫。

已知有些植物病毒,如 CMV、TAV、TRSV 存在卫星 RNA,而大多数卫星 RNA 可干扰同源病毒的复制而减轻症状。其中 CMV 和 TRSV 的卫星 RNA 基因被合成并转入烟草和番茄,使之获得了耐病或抗病性。

利用复制酶基因干扰病毒复制也是一种较新的途径。Golemboski等(1990)将构成 TMV 复制酶之一的 54KDa 蛋白基因(来源于 TMV-U1)转化烟草,用 TMV-U1 接种后 48 天都无症状,而且在接种叶也探测到病毒的存在,用高浓度的 TMU1 和它的 RNA 接种也表现高抗;但用 TMV-U2、TMV-L1 或 CMV 接种,转基因植株则不表现抗性。类似的结果还在 PVX、PEBV 上取得成功。

利用转移蛋白基因限制病毒在植物体的运转,以及利用 Ribozyme 裂解病毒基因组的途径,目前正在探索试验阶段,未见成功的报道。

2. 转基因植物对不同种病毒和株系的抗性表现。通过克隆一个株系的衣壳基因而获得的转基因植物的抗性测定结果表明:抗性存在于克隆株系或与克隆株系相关的株系间,而对亲缘关系较远的株系或非相关病毒只有较弱、极弱或没有抗性。Anderson等(1989)获得了表达 TMV-U1 或 AIMV 的衣壳蛋白转基因烟草后,进行了不同株系和非相关病毒的攻击接种,结果表明:表达 TMV-U1 株系衣壳蛋白的烟草对 TMV-U1 的侵染有较高的抵抗力,而对分离于豇豆的 cc-TM 株系的侵染,其抵抗力显著降低,对于非相关病毒 PVX、PVY、CMV、AIMV 的侵染,基本上没有抵抗力。同样表达 AIMV 衣壳蛋白的转基因植物,其抗性测定的结果与此相似。Van Dun等(1988)将 AIMV、TRV、TSV 的衣壳蛋白基因和突变的 AIMV 衣壳蛋白基因导入烟草,表达正常衣壳蛋白基因的植株对各自克隆的株系的病毒粒子都表现高抗,但对其它种病毒(非克隆病毒)的侵染则没有抗性,甚至表达突变 AIMV 衣壳蛋白基因的烟草也丧失了对 AIMV 的抗性。Tumer等(1991)认为这种抗性的丧失是 AIMV 衣壳蛋白第 2 年氨基酸突变的结果,他指出 AIMV 衣壳蛋白的第 2 个氨基酸是衣壳蛋

白介导的遗传交互保护作用的关键。

Sanders等(1992)将表达 TMV-U1 株系和 ToMV-c 株系的衣壳蛋白的转基因番茄在大田试验中,分别用 TMV 两个株系(U1 和 Pv230),以及 ToMV4 个株系(L, Epcot, C, Aucuba)攻击接种,表达 TMV-U1 衣壳蛋白基因的番茄对 U1 和亲缘关系密切的 Pv230 表现高度抗性,而对 ToMV 的 4 个株系具有极低或没有抗性。对 ToMV-C 衣壳蛋白的转基因番茄,对 ToMV-C 和 Epcot 表现抗性,但对另两个株系 L 和 Aucuba 没有抗性。

Namba 等(1991)和 Quemada 等(1991)对表达 CMV 不同株系衣壳蛋白基因的转基因植物用不同的 CMV 株系攻击接种,结果也表明了转基因植物的抗性强弱基本上是由攻击株系和克隆株系亲缘关系的强弱来决定的。

遗传工程交互保护作用是十分复杂的。表达某些病毒衣壳蛋白基因的转基因植物对同组的其它种病毒也显示了较高度度的抗性。表达 SMV 衣壳蛋白基因的烟草植株能够抗 TEV 和 PVY 病毒的侵染;表达 PRV 衣壳蛋白基因的烟草植株对 TEV, PVY 和 PeMV 的侵染显示了较高的耐病性。表达 WMV-I 和 ZYMV 衣壳蛋白的转基因烟草对 BYMV, PeaMV, CYVV, PeMV 和 TEV 都有不同程度的抗性,其中表达 WMV-I 衣壳蛋白基因比表达 ZYMV 衣壳蛋白基因的抗性高。这些结果表明,表达马铃薯 Y 病毒组中某一病毒的衣壳蛋白基因的转基因植物,当用同组的其它病毒攻击接种时,在一定程度上能够延缓病状的发展。这种仅限于马铃薯 Y 组内对非相关病毒所表现出的遗传交互保护现象似乎有异于传统的株系间交互保护现象。Lindbo 和 Dougherty(1992)构建了 TEV C-端和 N-端以及 C-端和 N-端都截短的衣壳蛋白基因,其获得的表达变异衣壳蛋白基因的转基因植物,比表达全长衣壳蛋白基因的转基因植物具有对 TEV 更强的抗性。他们指出在植物中表达的变异衣壳蛋白使攻击病毒的功能紊乱,特别是抑制病毒的系统运转。这一理论认为,在马铃薯 Y 组中这种宽广抗性的原因可能在于一种病毒的衣壳蛋白的表达对另一种病毒是异源的,这种异源的衣壳蛋白相当于 TEV 截短的衣壳蛋白,这样一种病毒的衣壳蛋白的基因的表达破坏了另一种病毒的正常生理功能,从而使另一病毒失去或减弱了对表达马铃薯 Y 组中某一病毒衣壳蛋白的转基因植物的侵染能力。

#### 参考文献

- 1 Yeh S D, et al. *Phytopathol.* 1984, 74, 1086~1091
- 2 Harrison B D, et al. *Nature*, 1987, 328, 799~801
- 3 Gerlach W L, et al. *Nature*, 1987, 328, 802~804
- 4 Anderson E J, et al. *Phytopathol.* 1989, 79, 1284
- 5 Stark D M, et al. *Bil/Technology*, 1989, 7, 1257
- 6 Colemboski D B, et al. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1990, 87, 6311
- 7 Turner N M, et al. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1991, 88, 233
- 8 Namba S, et al. *Gene*, 1991, 81, 794
- 9 Quemada H D, et al. *Phytopathol.* 1991, 81, 794
- 10 Ling K, et al. *Bio/Technology*, 1991, 9, 752
- 11 Namba S, et al. *Phytopathol.* 1992, 82, 940
- 12 Lindbo J A, et al. *Mol Plant-Microbe Interact.* 1992, 5, 144~153

(安徽省农业科学院罗守进撰)

**植物抗旱性** plant drought hardiness 植物抗旱性的研究,包括植物对干旱的原初感应,干旱对植物造成的影响和危害,植物抗旱性的生理学、生物化学和分子生物学方面的机理,通过改变植物遗传性和改进栽培技术的方法提高植物的抗旱能力。这些研究将使人们能更加有效地利用植物资源和水分资源。

研究的重要课题之一是确定研究指标。一般认为,应该包括环境水分指标、植物水分状况指标以及干旱条件下植物形态、生理和生物化学的指标。1983年克雷默(P. J. Kramer)提出,水分

势表示土壤—植物—大气系统中水分自由能状态,是研究植物抗旱性最有效的参数。至于其他生理和生物化学指标的选择,要注意所选用指标与系统中水势状况有良好的内在相关关系,并在较大范围内的物种之间有明确的含义。

人们关于干旱对植物生长发育造成的影响有比较清楚的了解。按照肖(T. C. Hsiao)于1973年提出的观点,当水分亏缺时,植物水势和压力势下降,首先受到影响的是和植物压力势密切相关的生理过程,如气孔开闭和生长速率。水势的变化还会改变水分在植物体内的分布。在干旱条件下,植物代谢紊乱,最明显的改变是因气孔对二氧化碳的阻力加大而引起的光合作用下降。严重的水分亏缺,会引起植物永久性萎蔫,代谢及结构发生不可逆变化,直到造成植物死亡。1957年,艾尔金(W. J. Iljin)提出的机械损伤理论认为,植物组织失水和复水过程中,如果细胞壁与原生质收缩吸胀不协调,会造成细胞水平的伤害。巯基理论则认为,脱水造成的蛋白质中异常二硫键形成是造成蛋白质变性的重要原因。

1979年特纳(N. C. Turner)建议,根据植物对干旱条件反应的差异和适应或抵抗危害的方式,将植物抗旱机制分为3类:逃旱性,高植物水势情况下的耐旱性,低植物水势情况下的耐旱性。植物可以通过迅速的个体发育及发育的可塑性来逃避干旱。

干旱时,植物只有通过加强水分吸收并同时限制水分丢失,才能保持正常的水势。1983年,乔丹(W. R. Jordan)的研究资料说明,发达的根系是小麦和高粱在干旱年份维持水分吸收和较高产量的重要因素。1979年戴维斯(W. J. Davies)证明,根系的渗透调节作用可以促进根系发育和水分吸收。另一个决定植物吸水的因素是根部对水分运输的阻力。植物降低失水的途径之一是减少植物所截获的辐射及减小有效蒸腾面积。气孔调节是植物降低水分散失的另一重要途径。

一些植物可以忍受植物水势降低造成的影响。其机理为植物水势降低的情况下保持膨压,或者原生质可以忍耐脱水。1970年,韦瑟利(P. E. Weatherley)的研究资料说明,植物维持膨压主要是通过渗透调节来实现的。1974年,沃尔特(H. Walter)首次提出降低渗透势有重要的抗旱性意义。许多小分子物质,如无机离子、单糖、氨基酸等,在渗透调节中起重要作用。植物细胞忍耐脱水的能力取决于细胞失水后细胞膜结构的完整性和原生质由液态转变为高粘度态的能力。1965年,韦布(S. J. Webb)提出水分替换假说,认为植物失水后,耐旱性强的细胞膜成分中的水分子可以被其他多醇(如肌醇)替换,这种替换可以保护膜膜的完整性。1977年,陈穆蒂(K. S. Amuti)的研究资料表明,寡聚糖、低分子多肽、糖蛋白和脂可以在脱水的情况下保护膜及胞质中的蛋白质成分。

80年代以来,人们在植物对干旱的感受及抗旱性机理方面,做了大量的细胞和分子水平的研究工作。

植物在环境水势降低但尚未引起细胞脱水时,某些“感受器官”可以感受水分胁迫的威胁,产生某种“信号”,并将这些“信号”运送至“防卫器官”,调动某种“防御系统”,防止或减轻失水对植物及其造成的进一步细胞水平和分子水平的危害。1985年~1987年,戴维斯等的分根试验资料证明,分布在低水势上层的根尖可以感受环境水势的下降,产生某些化学物质,这些化学物质作为“信号”,由木质部随蒸腾流运送至地上部,引起气孔开放度和生长方面的调节以适应干旱条件。人们对感受器官的本质还没有清楚的认识。1990年,科斯格罗夫(D. J. Cosgrove)提出的假说认为,感受器可能是某种膜外的蛋白质或聚糖,它们的构型受到环境水势的调节,而其变化又会启动膜上的离子通道和“信号”的合成。

1986年,舒尔茨(E. D. Schulze)将气孔在干旱条件下的关闭机制归纳为两个主要假说,即:气孔对环境水势变化作出直接反应和气孔通过植物水势变化而对环境水势变化作出间接反应。按照第一假说,气孔对空气湿度的响应是表皮的一种特性,表皮的水分散失是直接由大气中饱和蒸气压亏缺所决定的。表皮组织的



膨压变化启动气孔保卫细胞的运动。而第2种假设认为,随着环境水分状况的改变,植物体内整体水势发生变化,并形成脱落酸的重新分配,质外体局部区域内脱落酸浓度增高,进而调节气孔开闭度。

1990年,曼斯菲尔德(T. A. Mansfield)总结了脱落酸在植物抗旱性中的作用机理,认为:(1)质外体脱落酸浓度升高是使气孔关闭的信号之一;(2)脱落酸作用位点处于气孔保卫细胞的细胞膜外侧;(3)脱落酸可以增加根系中水分传导;(4)脱落酸通过某种需能过程改变细胞膜上质子通道特性,从而改变细胞内外离子浓度;(5)脱落酸可以改变钙离子通道性质,调整细胞中钙离子及钙调蛋白复合体的浓度,而后者可以作为第2信使调节其他蛋白质和酶的结构和性质;(6)脱落酸可能参与某些和抗旱相关的基因的启动与关闭。

多胺及谷光甘肽和植物抗旱性的关系引起人们的重视。多胺在植物体中可以稳定酸碱度,防止游离氨离子的毒害作用,它也可以作为氮的储存形式。谷光甘肽则可作为抗氧化剂,保证蛋白质含硫基团的正常状况,防止蛋白质和酶变性失活所造成的损伤。

干旱条件下植物基因调控和表达是植物抗旱研究的重点。通过干旱处理或体外聚乙二醇处理,植物组织蛋白质成分发生明显改变,形成特异的蛋白质成分。1984年,比尤利(J. D. Bewley)对玉米幼苗进行高温、干旱、渗透胁迫以及脱落酸处理,证实这些条件都可以诱导一种分子量为70KD的蛋白质。用果蝇热激蛋白的探针技术检测,这种蛋白和热激蛋白是一致的。1988年,夸里(S. A. Quarrie)用mRNA体外翻译以及转录抑制剂的研究资料表明,植物在缺水条件下基因调控是在转录水平和翻译水平进行。1988年格罗雷(F. D. Guerrero)提出,干旱条件下形成的蛋白质可能包括一些促进脱落酸合成抑制生长及参与渗透调节的酶成分,这些蛋白可能具有直接保护功能。1986年,佩勒姆(H. Pelham)证实70KD蛋白可以和其它蛋白质聚合,维持蛋白质的构象稳定。1988年,基里科(W. J. Chrigo)发现这种蛋白质可以促进过膜蛋白的运送,因为它可以防止蛋白质过度折叠对过膜运送造成的不利影响。1991年,米什堪德(M. L. Mishkind)认为在干旱条件下形成的蛋白质富含甘氨酸,所以具有较高的亲水性,可能会和细胞中的蛋白质发生亲水结合而起保护作用。

植物抗旱性研究工作将在以下方面取得突破性进展:第一个方面是抗旱性机制的研究,如植物体内干旱“信号”的产生、传递和最终效应;细胞水平抵抗干旱的途径;激素受体的研究以及干旱下生物化学变化的因果关系分析。另一个方面是研究与抗旱性有关的基因及其表达的研究,如分析干旱胁迫蛋白的抗性功能以及利用突变体、DNA探针和高度专一性抗体研究和抗旱性有关的基因的调控机理。

#### 参考文献

- 1 Hisao T C. Ann Rev Plant Physiol. 1973, 24: 519
- 2 Kramer P J. Water relations of plants. New York: Academic Press, 1983. 390
- 3 Bewley J D, et al. J Expt Bot. 1983, 34: 1126
- 4 Heikkila J J, et al. Plant Physiol. 1984, 76: 270
- 5 Turner N C. Aust J Plant Physiol. 1986, 13: 170
- 6 Schulze E D. Ann Rev Plant Physiol. 1986, 37: 247
- 7 Davies W J, et al. Plant Cell Environ. 1990, 13: 709
- 8 Grantz D A. Plant Cell Environ. 1990, 13: 667

(北京农业大学生物学院沈黎明教授撰)

**植物抗寒性** plant cold hardiness 低温是限制植物自然分布和作物栽培区域的重要因素。植物抗寒性则是制订农业区域化的主要依据。低温伤害分为两种类型:冷害与冻害,也可统称为寒害。

**冷害与抗冷性** 冷害是指摄氏零度以上的低温对植物所造成的伤害。当温度处在0~20℃时,虽无结冰现象,但能引起喜温

植物的生理障碍,使植物受伤甚至死亡。植物对摄氏零度以上低温的适应力叫作抗冷性。不同植物不同生育期冷害表现不同。起源于热带、亚热带的喜温植物,如香蕉、番茄、黄瓜、水稻等,在10~12℃以下温度时就会产生冷害。另一种是生长在温带的植物,如冬小麦等的幼苗能抵抗冬天的冰害,但在春天小孢子发育成四分体阶段,拔节孕穗及开花受精时期遇到摄氏零度以上的低温也能引起冷害。种子萌发期冷害主要表现在吸胀冷害、延迟萌发、降低发芽势发芽率,还易并发病害等。苗期冷害主要表现为叶片失绿和青枯萎蔫。低温强光加速叶绿素光氧化,新生叶片中尚未参与叶绿体结构组成的叶绿素分子最易被破坏。水稻在幼苗期遇冷害,常发生白苗或节间白的症状。一般叶片冷害症状为叶表面产生斑点及变色坏死;木本植物出现芽枯、顶枯,自顶端向下部萎蔫,破皮流胶及脱叶。水稻减数分裂期和花期遇16~20℃的低温,花粉不育,延迟开花或闭花不开,受寒露风的为害提高空秕率。果实、蔬菜贮藏冷害症状为变色,局部坏死,形成凹陷斑点等。根据植物对冷害的反应,可把冷害分成三种类型:直接伤害、间接伤害和次级胁迫伤害。摄氏零上低温伤害机理的研究,过去曾有过生理干旱、有毒物质中毒和新陈代谢失调等假说,这些都是次生现象。近年来,生物膜的研究初步阐明冷害首先伤害细胞膜结构,特别是首先降低膜的流动性,从而导致细胞膜ATP酶的失活,结果使植物体细胞对物质的主动吸收和运输能力降低。同时使物质被动转移和渗漏,即细胞内溶质外渗,水分散失,细胞丧失膨压,导致植物受害后的萎蔫现象。

1973年莱昂斯(J. M. Lyons)提出,当温度降至某一临界值时,生物膜首先发生脂质的物相变化,这时膜脂从液晶相变为凝胶相,膜脂上的脂肪酸链由无序排列变为有序排列,使生物膜的体型和厚度发生减缩,从而产生孔道和龟裂,膜脂相变导致膜透性增大,使膜内的水溶性物质被动渗漏,结果胞内离子和基质失去原有平衡,膜结合酶的活化能提高,膜结合酶与游离酶间的反应速率失去平衡,随后产生物质代谢的失调。若低温强度轻或作用时间短,膜脂未发生降解,相变是可逆的;若低温强度大或者持续时间较长、反复次数多,膜脂发生降解,细胞内有毒物质大量积累,便形成不可逆的伤害。

1975年, Yamaki指出冷害的不可逆性与膜蛋白结合磷脂的状态有关,而与膜脂降解无关;当膜蛋白的疏水性呈稳定状态时,伤害是可逆的,膜蛋白疏水性呈不稳定状态时伤害是不可逆的。

1970年, Kuiper指出膜脂中不饱和脂肪酸含量随生长温度的降低而增多,低温有利于不饱和脂肪酸的形成,抗冷性强弱和含不饱和脂肪酸多少相关。品种间不饱和脂肪酸含量的差异在任何生长温度下都能表现出来,因此可作为抗冷性的生化指标。

1980年,王洪春等分析了206个水稻品种的干胚膜脂和脂肪酸组成,结果表明,不饱和脂肪酸含量越高,水稻耐冷性越强。脂肪不饱和度增大,膜的流动性增强,膜结合酶活性增强、相变温度下降,抗冷性提高。

1985年刘鸿先等指出,温度下降时,黄瓜子叶超氧化物歧化酶(SOD)活性下降先于膜渗漏的增加。低温下, SOD中铜离子释放出来,超氧化自由基增加,加速膜脂过氧化作用。膜中蛋白质和酶分子的聚合和交联,引起膜结构和功能的破坏,尤其在有光照的低温条件下,冷敏感作物叶绿体中的SOD活性下降,膜脂过氧化作用速率比无光照的低温下要快,表现在丙二醛(MDA)及H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>形成与积累。SOD活性可为鉴定和选育抗冷性品种的又一生化指标。

低温锻炼是提高抗冷性的有效途径。经过适当锻炼,膜的不饱和脂肪酸含量增加,相变温度降低,透性稳定,细胞内NADPH<sub>2</sub>: NADP比值增高,ATP含量提高, SOD活性增强,脯氨酸增加,可提高抗冷性。另外,使用化学调控也可提高抗冷性,例如玉米、棉花种子播前用TMTD(福美双)处理,可增强抗冷性。细胞分裂素、脱落酸、茉莉酸、PP<sub>333</sub>等生长物质有提高抗冷性的作用。

**冻害与抗冻性** 摄氏零度(冰点)以下低温对植物所造成的

伤害叫冻害。植物忍受或抵抗冰点以下的低温而不受损伤的特性为抗冻性。抗冻性是耐寒植物固有的遗传特性,这种遗传特性只有在特定的环境条件诱导下,通过代谢和原生质体结构的改变才能表现出来。植物在特定的低温下抗冻遗传特性予以表达或发育的过程,叫作抗寒锻炼或称寒冷驯化。

不同植物具有不同的抗冻性,通常一年生植物不具备抗冻性,越年生的和多年生的草本植物能忍受 $-20\sim 25\text{C}$ 低温。多数温带落叶树木的皮层和形成层经锻炼后冬季能抵抗 $-60\text{C}$ 左右的低温。还有许多木本植物的部分组织在严冬时能深超冷到 $-40\text{C}$ ,如苹果树射线薄壁细胞;但一旦超过过冷限度,则会结冰死亡,形成黑心。有些无深超冷的木本植物,冬季可抵抗 $-196\text{C}$ 的低温。种子的抗冻性有的很强,短时期内可经受 $-100\text{C}$ 以下的冰冻,植物的愈伤组织在液氮下( $-196\text{C}$ 低温)保存4个月仍有活性,可见冰冻对植物影响是十分复杂的。

自然界发生冻害时,一般降温的幅度愈大,霜冻持续时间愈长,解冻愈快,对植物危害愈重;在缓慢的降温与缓慢的升温解冻,植物受害轻。植物受冻后叶片呈水渍状,酷似烫伤,细胞失去膨压,组织柔软,冻害重则叶色变褐,最后干枯死亡。

植物受冻害的主要部位是细胞膜。冻害可分为胞内结冰和胞间结冰两种。胞内结冰,温度下降急剧,强度大,速度快,胞内胞外均被速冻,冰晶直接破坏细胞结构,导致细胞死亡;胞间结冰时,细胞间隙内蒸汽压降低,但细胞内含水量较大,蒸汽压较高,根据蒸汽压力差的梯度,胞内水分不断外渗,致使原生质过度脱水,使蛋白质变性和原生质不可逆地凝胶化。冰晶愈结愈大,造成机械压力,细胞变形。另外,当温度快速回升冰晶融化时,细胞壁易吸水恢复原状,而原生质来不及吸水膨胀,而被撕破。一般情况下,大多数经抗寒锻炼的植物能忍受胞间结冰的胁迫,例如白菜及花叶甘蓝等在冬季虽被冻得像玻璃一样透明,在解冻后仍能正常生存。

**冻害损伤的机理** 1962年李维特(J. Levitt)提出硫氢基假说,认为当植物组织结冰脱水时,硫氢基(-SH)减少,二硫键(-S-S-)增加,二硫键由蛋白质之间-SH氧化形成;当解冻再度吸水时,肽键松散,但-S-S-键牢固保存,因而蛋白质结构被破坏,引起伤害与死亡。所以,组织抗冻性的基础在于阻止蛋白质分子间二硫键的形成,当植株脱水后,组织内-SH多,-S-S-少的则抗冻性强。

李本湘与简令成等认为冻害首先是损伤细胞膜结构,最初是改变膜上的功能蛋白质,然后引起生理生化过程的破坏。低温一方面引起细胞质膜ATP酶活性降低和失活,使细胞对物质主动吸收和运输功能降低,物质的被动转移和渗透增加,细胞内的溶质 $\text{K}^+$ 和糖等外渗,水分散失,丧失膨压,使细胞与外界物质交换失去平衡。另外,冻害激活细胞内部一些细胞器上的ATP酶的水解活性,由此导致生物合成速度降低和停止,整个生理生化过程遭到破坏。若冻害时间较短,伤害是可逆的,若冻害持续时间长,则成为不可逆的伤害。可见植物的抗冻性主要决定于细胞膜在结冰时的稳定性。

**植物抗寒锻炼与抗寒基因表达** 抗冻性是植物对摄氏零度以下低温长期适应的一种遗传特性,是一种诱发性基因。抗寒锻炼是需要能量的代谢过程。越冬植物必在秋季短日照和低温条件下逐渐停止生长活动及积累物质的基础上,抗寒基因才能启动表达抗寒力。因此,降低生长活动是提高抗寒力的前提条件。通常抗寒力的发育需经诱导、建成和保持3个阶段。当气温回升时可解除锻炼。激素是抗寒基因表达的启动因子,ABA被认为是可传导的抗寒促进剂,ABA或ABA/GA平衡关系调控着抗寒锻炼,起到“扳机”的作用。1982年,Chen和李本湘提出抗寒基因表达的假说:低温 $\rightarrow$ 糖的积累 $\rightarrow$ 渗透浓度提高 $\rightarrow$ 游离ABA含量增加 $\rightarrow$ 诱导蛋白质合成 $\rightarrow$ 增强抗寒性。已有数十种植物获得特异抗冻蛋白质。极地比目鱼抗冻基因导入玉米、烟草、番茄等植物并表达成功。这是一个突破性创举。

抗寒锻炼过程中,植物的形态结构及生理生化发生一系列

变化。首先可见生长停止或休眠;核仁周围亮环变小,核膜孔逐渐关闭;线粒体变小,数量增加;叶绿体内淀粉消失,拟脂颗粒增多,相互聚集、嵌合和拉链;大液胞分隔成许多小液胞,液胞吞噬细胞质;质膜内陷成波浪状,韧性增强,出现质壁分离。另外,细胞内含物种类和浓度改变,可溶性糖,可溶性蛋白质及某些氨基酸(特别是脯氨酸)、RNA和抗坏血酸含量增加,总含水量下降,束缚水/自由水比值升高。膜的组分改变,磷脂数量与种类增加,磷脂酰乙醇胺(PE)、磷脂酰胆碱(PC)含量增加,脂肪不饱和度增加等。这一切利于膜结构功能的稳定性增强,提高植物的抗冻力。

#### 参考文献

- 1 Waldman M, et al. *Exp Bot.* 1975, 26: 853
- 2 Levitt J. *Responses of plants to Environmental stresses.* New York: Academic Press. 1980. 1
- 3 Paul H Li, Sakai A *Plant cold Hardiness, Freezing stress.* New York, London: Academic press. 1982
- 4 刘祖祺, 王洪春. 植物耐寒性及防寒技术. 北京: 学术书刊出版社, 1990
- 5 刘祖祺, 张连华. 园艺学报, 1990, 17(3): 197~202
- 6 刘祖祺, 林定波. 园艺学报, 1993, 20(4): 335~340

(南京农业大学刘祖祺教授撰; 张石城教授审)

#### 太阳紫外线辐射对植物的影响

1971年, J. J. Molina和Rowland曾就制冷系统大量耗用氟氯烃造成同温层臭氧出现部分空洞, 向人类发出了不可低估这一后果的警告。根据科学家最近测算, 同温层臭氧浓度近年来约下降2%~4%, 导致温带地区地球表面生物有效紫外线辐射增加8%(M. M. Caldwell等, 1977)。根据B. Palenik等1991年的研究报告表明, 紫外线辐射的增加会左右生物活性自由基的产生, 有机物的光分解以及痕量金属元素的可利用性等化学环境的变化, 而这些变化对生物既可能有害也可能有益。许多研究表明, 波长短于290nm的紫外线波段其能量很容易被蛋白质吸收, 它对植物的光合作用、蒸腾强度、叶片伸长、呼吸作用以及生物量的配置等都会产生影响。

有证据表明, 全球正在出现臭氧层的逐渐消蚀。由于同温层臭氧吸收大量的紫外波光, 因而臭氧减少将导致有更多的紫外线辐射到地球表面上。

1. 臭氧变化与紫外线辐射。臭氧是大气中很小的一个组分。但它是大气中唯一吸收波长短于300nm光的一种气体, 使这些短波光不能透过大气层辐射到地球表面, 人们将波段为320~420nm辐射称之为UV-A辐射, 波段为280~320nm的辐射称之为UV-B辐射, 在短波段, 臭氧对UV-B的吸收性能很高, 少量的臭氧就足以完全阻断全部紫外线辐射, 但是, 在长波段它的吸收能力很弱。M. M. Caldwell等(1981)测算了波长和太阳光谱辐射度的关系。他指出, 臭氧层的降低将会使UV-B辐射显著增加。但波长从290~315nm之间波距仅为25nm。这一区间, 由于臭氧的吸收将会使UV-B辐射以4个数量级下降。

科学家在研究臭氧变化时已提出了“光谱适应性”这一概念。它表明由于臭氧减少使太阳辐射发生变化的模式与生物光反应的特殊光谱特性之间的适应性。光谱适应性是对臭氧变化进行生物评价的一个重要基准值, 通常以辐射放大因子(RAF)来表示。RAF值就是指一定数量的臭氧降低使生物有效辐射的相对增加量。

2. 紫外线辐射与纬度的关系。据测算, 太阳UV-B辐射随海拔增加而变化。海拔每增加1000m, UV-B辐射增加14%~18%(M. M. Caldwell等, 1980)。在自然界, 臭氧层有一个自然的纬度梯度, 在赤道臭氧层最薄, 而在两极臭氧层最厚。在不同纬度时太阳UV-B辐射发生的变化大于臭氧减少UV-B辐射预期发生的增加量, 在北纬40度的6月21日, 16%的臭氧浓度下降将导致生物有效辐射增加47%。这相当于在臭氧浓度不降低

时,纬度南移20度(Caldwell,1986)。天气晴朗时,在热带和北美温带地区,UV-B辐射差异很可能达2个数量级。因此,在温带地区即使臭氧浓度下降颇大,其有效的UV-B辐射强度可能仍不及赤道热带地区,但是在赤道地区,臭氧的减少会导致UV-B辐射超过近代地物史上地球表面所承受过的辐射剂量。

就太阳紫外线辐射本身总量而论,由于臭氧降低而引起的紫外线辐射增加量是微不足道的。但是,增加的这部分紫外线会对人类赖以生存的生态环境产生重大的影响。正是这种增加的UV-B短波辐射往往控制和改变了植物体内的许多重要光化学反应和生理过程。紫外线辐射,尤其是UV-B辐射一般认为是一种有害的辐射。但是增加UV-B辐射对植物乃至延伸到整个生态系统的潜存影响和后果,是一个较为复杂的研究领域。Caldwell(1981)概括了太阳UV-B辐射增加对高等植物可能会引发的影响和后果。

1. 对植物生长的影响。人们研究UV-B对植物生长的影响,将着眼点主要放在光合作用上。W. Iwanzik等(1983)指出,UV-B辐射会导致光合作用部分抑制,这是由于UV-B辐射被光合系统Ⅱ反应中心吸收所致。在实验室或温室条件下,用类似于太阳UV-B辐射处理许多植物后获得的结果已经表明了UV-B辐射对光合作用的伤害作用(W. B. Sisson,1981; A. H. Teramura等,1984)。但Mirecki等在田间条件下,用滤片除去天然的UV-B辐射,或用UV-B辐射灯补充正常的太阳辐射,都很难看到这2种处理在整个生长季会对植物的光合作用和生长产生预期的影响。他们认为在田间条件下不能检测到UV-B辐射影响的部分原因,是植物在田间条件下比在温室或实验室显示了更大的变异性;田间条件降低了植物的敏感性;而C. W. Warrner(1981)和R. M. Mirecki(1984)则认为在田间条件下植物除受到太阳UV-B辐射外,还受到强可见光辐射,而在强可见光条件下生长的植物对UV-B的敏感性大大降低。R. H. Biggs(1981)对生长在控制环境室低光辐射下的19种大豆进行了比较,发现所有供试大豆受到UV-B暴露后,都降低了叶面积生长,各品种之间在降低的程度上有相当大的差异。根据R. M. Mirecki(1984)的研究,UV-B辐射处理能使大豆的纯光合作用降低的程度上有相当大的差异。根据R. M. Mirecki(1984)的研究,UV-B辐射处理能使大豆的纯光合作用下降13%;非气孔导性下降29%,气孔导性下降27%。同时指出,大豆对UV-B的敏感性受长波光的影响。一种在UV-B处理前或处理时提供的高光合电子流密度光照(PPFD),能明显降低大豆对UV-B辐射的敏感性,他们获得的结果进一步论证了A. H. Teramura(1983)关于高光辐射能降低或消除UV-B辐射对大豆和小麦叶片光合作用的抑制影响的结论。M. Tevini(1983)和C. T. Beggs(1986)等则认为,不能简单地从降低光合作用来评价UV-B降低植物生长的影响。实际上,由于UV-B引发的吲哚乙酸(IAA)及光氧化作用和(或)对DNA的直接伤害都会加重降低植物生长的作用。另外,其他发色团化合物也会延缓和降低植物生长。

除了降低生长以外,UV-B辐射也会使不同植物器官的生长位置发生变化,如改变节间长度以及叶和茎的形态。P. W. Barnes(1988)认为,对孤立生长或单个培养的植物,植物器官在生长位置和形态方面不会受到明显影响,但对混交的群生植物就不同。这些形态变化会使一种植物比另一些植物截留更多的阳光,从而出现种间的竞争变化。J. F. Bornman等(1991)用纤维光学显微探针研究增加UV-B辐射对油菜、苜蓿等植物叶片光学性质的影响,发现UV-B暴露会使叶片的光学微环境发生变化。这些变化是由叶片色素含量和解剖结构的变化而引起的。

2. 对植物次生化学特性的影响。K. Hahlbrock(1979)和E. Wellman(1983)等指出,对UV-B波段的光谱吸收相当专一的光系统能缓解高等植物中莽草酸途径改变的诱发。这条途径参与了从黄酮类到绿原酸和木质素等多系列植物化合物的合成。植物体内生物合成的调节,不仅取决于如生长阶段、组织类型等内源因素,也取决于如损伤、病原侵入和各种非生物环境变化等外源因

素,但是,在生物合成的控制中,光诱发起着特别重要的作用。根据Hahlbrock等的研究表明,一些光系统如植物色素,蓝光受体和UV-B受体等参与这种调节作用。肉桂酸(Cinnamic acid)是作为UV-B受体的竞争者,UV-B辐射能使该酸的反式异构体转变为顺式异构体。可以设想该酸异构体的数量和结构形态在完成苯丙氨酸氨化酶的调节作用中起着重要作用,而该酶是莽草酸途径的一个关键酶。陈树元(1990)在康乃尔大学与Mandl合作进行的UV-B辐射对草本植物(Landsberg)色素合成影响的研究,也发现经UV-B处理的植株叶片中黄酮类化合物明显增加。根据M. Jacobs等(1988)的研究表明,莽草酸途径的产物在植物的生长调节和基因引发等生化过程中起着多方面的作用,特别是有大量证据表明黄酮类化合物作为“内部的过滤器”在生化调节中起着重要的作用,因为它能吸收和有效地降低辐射到植物组织上的UV流量。如果增加UV-B辐射能引发莽草酸途径产物发生变化,就会带来在群落和生态系统水平上的许多影响。因为该途径产物是高等植物抗食草动物和病原体的重要化学保护物质,而且它们也决定了农作物尤其是叶类蔬菜的质量。J. D. Horner(1988)的研究表明,植物体内酚化物含量变化不仅对每株植物,而且对已死植物的分解都有影响,因为酚化物尤其是木质素含量对枯枝落叶分解的速度和程度以及对营养循环起着重要作用。在分解和营养方面的变化会对包括矿质营养循环和碳链的裂解在内的生物地化循环产生影响。碳链的裂解对全球CO<sub>2</sub>水平上升尤为重要。另一方面,由于全球CO<sub>2</sub>含量增加,为植物的次生代谢提供了更多的碳素,这又会造成植物酚化物含量的增加。不同种类的植物,不仅在莽草酸途径的代谢产物方面,而且在不同的光系统参与生物合成的调节程度上都各不相同。S. D. Flint等(1985)植物有保护自己免受过多UV-B辐射危害的自我保护机制。日本科学家研究了从紫外到红外(260~735nm)不同波长的作用光谱对高粱幼苗花青素形成的影响,发现在波长290、650、385和480nm处出现4个作用峰,而以UV-B辐射(290nm)产生的峰值最高。又根据这些作用峰对远红外光辐射有不同反应,因而认为UV-B诱发花青素的形成中涉及到二种不同的光受体,一种为不受红外光影响在290nm处有一吸收峰;另一种则对红外光敏感,能吸收蓝光和远红外光的植物色素。

3. 对植物生殖生长的影响。J. F. Jackson等(1983)指出,DNA吸收了UV-B后能加快成熟过程和导致遗传性DNA的损伤。据Beggs等的研究,植物体内有修复系统,它们能有效地恢复某些受到损伤的DNA。S. D. Flint(1983)和F. W. Martin等(1970)发现,在雌性萌发器官周围吸收UV的组织能很好地保护这些生殖器官。在UV对花粉影响的研究方面,Uber指出,UV能透过植物的花粉壁。P. L. Pfahler(1981)发现,UV辐射能抑制花粉管延长,Flint等(1984)认为,接近温带地区太阳强度的UV-B辐射并不会显著抑制某些温带植物的花粉萌发。但是,在热带地区现有强度的UV-B辐射,已有记录表明能抑制某些植物花粉的萌发。不过,在这方面被研究的植物种类寥寥无几,热带植物的花粉萌发特性尚待研究,是否现有的UV-B辐射或提高太阳UV-B辐射会引发萌发组织的遗传基因变化,目前仍然还是一个尚待解决的问题。

(江苏省植物研究所陈树元撰)

### 杉科的细胞分类学研究

杉科共有10属(连同金松属),包括水杉、秃杉、红杉、巨杉、杉木等珍稀植物和重要经济林木18种,进行该科的细胞分类学研究对探讨细胞遗传学和进化规律及对生产实践都有十分重要的意义。随着细胞学的崛起,细胞分类学也应运而生,后者业已证明特别适合于探索植物类群的进化和相互亲缘关系,它使杉科的系统演化研究提高到了一个崭新的水平。

早自1847年恩德利彻(S. Endlicher)就已进行杉科的细胞学研究,但从细胞学角度讨论科内成员间的亲缘关系及起源直到1943年才开始,即日本斋藤和中村提出巨杉可能为六倍体红杉

( $2n=6x=66$ )提供了一个染色体组,接着进行该研究的还有斯特宾斯(G. L. Stebbins 1948)塞勒和西蒙斯(L. C. Saylor & H. A. Simons, 1970)等。1984年美国舒拉巴姆和查奇约(S. I. Schlarhaim & T. Tsuchiya)提出了柳杉属的核型较为原始而与其他各属均较疏远,水杉属、红杉属、巨杉属、和落羽杉属的核型较为相似而中等进化,杉木属和台湾杉属的核型不对称而比较进化;金松属鉴于其独特的 $2n=20$ 则主张将它另立成金松科,由于他们用以比较的核型散点图多达9幅并缺乏进行比较的客观标准,因此其结论的主观性较大而比较粗糙,若要4个中等进化和2个较进化的属作进一步的进化水平和亲缘关系分析就很难进行。1989年,日本爱媛大学的日诘雅博把杉科的8个属分成5个组群(柳杉属、落羽杉属、水松属、巨杉属、水杉属、台湾杉属、杉木属、红杉属)并称与皮尔格梅尔基奥尔(R. Pilger & H. Melchior, 1954)系统较吻合。李林初认为该划分由于单从细胞学资料考虑并过于强调了染色体次级痕迹的数目和位置而不尽合理,事实上与皮—梅系统的分类也存在较大差距。

李林初充分地运用了斯特宾斯的“核型愈不对称就愈进化,而核型不对称性的增加,是指染色体两臂长度不等,或是同一核内的不同染色体大小不等”的染色体进化理论,充分发挥了它在进化和系统发生研究上有价值的作用,创造性地从杉科植物的核型资料中抽提出最能表明核型特征和不对称程度的染色体长度比(反映不同染色体大小)和平均臂比(反映“染色体两臂长度”)两项数据(李林初, 1989, 1992)进行定量比较,并同时以此为纵、横座标绘制了杉科的核型座标图,形象和直观地显示各属(种)植物的核型不对称和进化程度及相互的亲缘关系。李林初结合前人的多学科研究资料和系统学结果首次提出了一个杉科的新系统。

1. 杉科的6个亚科, (1)柳杉亚科。柳杉属植物具有杉科中最低的平均臂比和染色体长度比,最原始而疏远于其他各属,因此由它单独组成柳杉亚科。与韦茨顿(R. Wettstein, 1924)、早田文藏(1931, 1932)、皮尔格和梅尔基奥尔(1954)、肥田美智子(1957, 1962)、埃肯旺德(J. E. Eckenwalder, 1976)将它列入单型的分类群的意见一致。(2)落羽杉亚科。水松属和落羽杉属植物具有最为接近的平均臂比和染色体长度比并相对独立于其他各属,因此由该2属组成落羽杉亚科,比柳杉亚科进化。与早田文藏(1931, 1932)、巴克霍尔兹(J. T. Buchholz 1948)、皮尔格和梅尔基奥尔(1954)、肥田美智子(1957)、埃肯旺德(1976)等将两属置于同一分类群的意见一致。(3)红杉亚科。水杉属、红杉属(—AA和—B组型)、巨杉属植物具有最相近的平均臂比和染色体长度比而相对独立于其他属,因此由它们组成红杉亚科,比落羽杉亚科进化。与肥田美智子(1957)将它们纳入一个组群的意见一致。李林初(1988)还根据胞核学和形态学、古植物学等资料推测同源异源六倍体(AAAABB)的红杉可能在中新世的现美国俄勒冈州及其附近杂交,起源于分别以水杉和巨杉为直接后裔或留下近缘的古代亲本种“水杉”和“巨杉”,这样红杉亚科即为由血缘关系很近的成员构成的自然类群。(4)密叶杉亚科(新组合)。密叶杉属植物的核型直至最近刚由李林初(1992)所揭示。虽然该属植物的平均臂比和染色体长度比与红杉属的相近并部分重叠,但仍显示了它的相对独立性。密叶杉属除了分布于南半球的特点外,一系列形态学、孢粉学、胚胎学特征(C. G. Elliott 1951, M. Brennan & J. Doyle 1956, R. N. Konar & Y. P. Oberoi 1969, M. D. Peters 1983)都支持它具有独立的系统地位,因此由该属单独组成密叶杉亚科可能是合适的,它比红杉亚科进化。与韦茨顿(1924)、皮尔格和梅尔基奥尔(1954)和埃肯旺德(1976)将它列入单型分类群的意见一致。(5)杉木亚科。杉木属植物具有相近而较高的平均臂比和染色体长度比而独立于其他属,因此由它单独组成杉木亚科,比密叶杉亚科进化。与早田文藏(1931, 1932)、佐竹襄辅(Y. Satake 1934)、皮尔格和梅尔基奥尔(1954)将该属列入单型的分类群的意见一致。(6)台湾杉亚科Taiwanoideae(Hayata)L. C. Li(新组合)。台湾杉属植物具有杉科中最高平均臂比和染色体长度比,最进化而疏远于其他属,

因此由它单独组成台湾杉亚科,与皮尔格(1926)、早田文藏(1931, 1932)、皮尔格和梅尔基奥尔(1954)将该属纳入单型分类群的意见一致。

金松属的特殊染色体数目 $2n=20$ 不同于其他所有杉科各属( $2n=22$ )并与它们都疏远而较原始,因而支持早田文藏(1931)将它从杉科另立为金松科而与特哈拉(M. Tahara, 1937)、衡能(1942)、舒拉巴姆和查奇约(1976, 1985)、日诘雅博(1989)等的意见一致,也与雷达斯(M. Radais, 1894)、萨克斯顿(W. T. Saxton, 1913)、皮尔格(1926)、埃肯旺德(1976)等的分类处理相吻合。

2. 杉科的两条演化路线从李林初(1992)的座标图可以十分形象地看到杉科植物的核型座标点构成了2条可能存在的演化路线,即柳杉属→水松属、落羽杉属→台湾杉属的A进化路线和水杉属、巨杉属、红杉属→密叶杉属→杉木属的L进化路线。前者具较低的斜率( $Ka \approx 0.58$ ),以平均臂比迅速增加、染色体长度比较慢上升为特征;后者具较高的斜率( $Kl \approx 1.20$ ),以染色体长度比较快上升和平均臂比缓慢增加为特征。该结论也得到形态学、解剖学、胚胎学等资料的支持。

杉科的细胞分类学研究还有待于进一步深入,包括把各属(种)的核型分析提高到群体水平以及进行分子生物学研究。随着其他学科对杉科演化研究的继续深化和进行多科性的综合探讨,才能使得细胞分类学研究结果得以不断完善,最终获得为客观的杉科系统演化结论。

(复旦大学李林初副教授撰)

## 松科的细胞分类学研究

松科是世界分布的裸子植物大科,含10属230余种,绝大多数是森林树种及用材树种,有些种类可作化工原料及药用。对该科进行细胞分类学研究在科学上和生产上都有极重要的意义。

早在1891年,范·蒂海姆(P. Van Tieghem, 1891)就已开始在松科的系统学研究,后杰弗里(E. C. Jeffrey, 1905)、维海泼(F. Vierhapper, 1910)、皮尔格和梅尔基奥尔(R. Pilger & H. Melchior, 1954)、普赖斯等(H. J. Price, 1987)、弗兰克斯(M. P. Frank, 1988)、纳泼一律和胡玉燕(K. Napp-Zinn & H. u., 1989)等主要以形态特征为依据进行研究;该科的细胞学观察亦自1933年就已进行,有萨克斯和萨克斯(K. Sax & H. J. Sax, 1933)、塞勒(L. C. Saylor, 1964, 1972, 1983)、朱至清和孙敬三(1981)、张学方等(1982, 1984, 1985)、刘玉红和李慧学(1985)、日诘雅博(1988)、陈维新等(1989)、李林初(1991~1993)等,但多缺细胞分类内容,如有也只限于个别属(种)的。把松科的细胞学资料与各属间的亲缘关系联系起来的仅见日本日诘雅博,他将全科的核型划分成7个类型并与皮尔格和梅尔基奥尔的松科系进行比较,但还没有应用核型资料来讨论松科的分类问题。因此严格来说,就整个松科的细胞分类学研究,迄今还是空白。

李林初(1994)运用斯特宾斯(G. L. Stebbins 1957)的遗传、进化理论,结合松科核型资料进行各属的比较研究,并结合前人的系统学结果及形态、解剖、孢粉、生化、古植物等学科的资料,对松科各分类群的安排进行了重新调整。

### 松科的4个亚科

1. 松亚科仅含松属。该属植物的核型多具12对全为中部着丝粒的染色体或少数种有11对中部着丝粒和1对近端着丝粒染色体,构成独特的 $2n=24(0)m+0(2)sm$ 的核型组成;染色体长度比均小干2,没有臂比大于2的染色体,全为最原始的1A核型类型,这也是松科各属中绝无仅有的;该属具有松科中最低的平均臂比(1.12)、染色体长度比(1.59)及核型不对称系数(52.77%),表明与其他各属较为疏远并最原始。在形态学上,松属植物也有一些与其他各属不同的特征:2至数枚针形叶一束生于鳞叶液部极度退化的短枝顶端;球果第2年稀第3年成熟;种鳞背部上方具鳞盾和鳞脐;种子位于种翅基部的一对钩瓜内。由此可见,从胞核学资料看将松属单独建立松亚科是合适的,并得到形

态学特征的支持,它是松科里最原始的亚科。这与维海泼、皮尔格和梅尔基奥尔、塔赫他间、郑万钧和傅立国、弗兰克斯等将松属单独纳入松亚科(松属)的分类相一致,但这些系统(除弗兰克斯)都把松亚科(松属)列于最后而一般表明它较为进化,本系统对此不予支持。至少弗洛林(R. Florin 1963)的化石资料也表明松属是松科中最原始的属之一。

2. 冷杉亚科。包括银杉属、云杉属、铁杉属、雪松属、油杉属、冷杉属。这些属的枝型不规则交叉出现 11~7 对中部着丝粒和 1~5 对近中着丝粒染色体,构成  $2n=24=(22\sim 14)mt(2\sim 10)sm$  的核型组成,具有 1~5(0)对臂比大于 2 的染色体,核型类型为 2A(少数 1A 或 2B)。它们的平均臂长、染色体长度比及核型对称系数也比较接近,平均值分别为 1.37、1.66 和 56.06%,均高于松属。由这些核型特征相近的 6 个属组成冷杉亚科是合适的,也得到它们的花粉具明显的气囊或不具气囊但有皱边的孢粉学特征的支持。这是松科里中等进化的亚科。该组成范围与维海泼、皮尔格和梅尔基奥尔、塔赫他间、郑万钧和傅立国及弗兰克斯系统的冷杉亚科亚科的组成基本相同,表明在一定程度上与他们的相吻合。

3. 落叶松亚科。包括落叶松属、黄杉属。它们(除  $2n=26$  的花旗松)的核型十分相近,有 6 对较长的中部着丝粒染色体和 6 对较短的近中或近端着丝粒染色体,构成  $2n=24=12m+12(sm, st)$  的核型组成,有 6 对染色体的臂比大于 2,为 2B(少数 2A)核型类型。两属的平均臂长、染色体长度比及核型不对称系数最接近,其平均值分别为 1.72、2.03 和 59.31%,是松科中最大的;花粉都不具气囊和皱边而区别于其他各属;弗洛林(F. Flous, 1936)、多伊尔(J. Doyle, 1945)、尼曼(G. J. Niemann, 1980)等、普拉格(E. M. Prager, 1976)等、普赖斯等从形态、化石、传粉机制、植化、平均抗原距离及免疫试验等也都认为这两属近缘;哈特(J. A. Hart, 1987)运用 48 个性状进行的聚分析亦表明了它们的相近关系,因此由黄杉属和落叶松属组成落叶松亚科无疑是合适的,它是松科里最进化的亚科。这与弗兰克斯将该两属(还有银杉属)纳入同一亚科(冷杉亚科)的分类也相吻合。

范·蒂海姆、皮尔格和梅尔基奥尔、塔赫他间、郑万钧和傅立国等系统根据兼有长枝和短枝的两型性形态学特征把落叶松属、雪松属和金钱松属组成落叶松亚科,但弗兰克斯指出长枝和短枝的两型现象在裸子植物(如 *Sciadopitys*, *Ginkgo*, *Phyllocladus*)和被子植物(如 *Berberis*, *Cotoneaster*)中普遍存在,松科的各个属也都或多或少地呈现两型性,这可能是趋同演化的结果,因此他认为根据长、短枝特征划分的落叶松亚科是人为的。尼曼等、普赖斯等从植化、免疫学研究也支持这个意见。细胞学资料已经表明了落叶松属及黄杉属的核型与雪松属 [ $2n=24=18(20)m+6(4)sm$ ]和金钱松属 [ $2n=24=4sm+40t(4SC)$ ]的大相径庭,弗洛林等、胡志昂等(1984)的化石、植化、生化资料也表明落叶松属与金钱松属、雪松属并不近缘。由此可见,把落叶松亚科的成员由原来的调整为落叶松属和黄杉属得到多学科的支持,从而表明了它的准确性。雪松属如上纳入冷杉亚科是合适的,金钱松属则可另立亚科。

4. 金钱松亚科(新亚科)仅含金钱松(属)。该属有与其他松科各属不同的染色体数目。2 对近中着丝粒染色体和 20 对端部着丝粒染色体(包括 2 对具明显的次缢痕)构成特殊的  $2n=44=4sm+40t(4SC)$  的核型组成。臂比大于 2 的染色体达 21 对,染色体长度比大于 2,为松科里唯一的 3B 核型类型。金钱松还有许多不同于其他各属的形态性状,短枝叶之簇状密生,辐射开展呈圆盘状,脱落后有密集成环状的叶枕;雄球花圆柱形,下垂,多数簇生于短枝顶端,有细梗;种鳞卵状披针形,两侧耳状,先端钝而有凹缺;成熟时球果半张开,种鳞与基部合生的苍鳞连同崩解的球界中轴一起脱落。姚璧君等(1987)的比较解剖观察还表明唯金钱松的叶独具 3 个树脂道,它的维管束鞘内没有厚壁细胞形成的“维管束帽”;尼曼等的植化研究也认为它与其他各属隔离。由此可见将金钱松属单独提升为金钱松亚科可能是适当的。前文已述

金钱松属实际上并不与落叶松属、雪松属近缘及弗兰克斯已将它从落叶松亚科分离出来亦从另一侧面支持建立金钱松亚科。

#### 松科核型的演化

根据细胞学资料,松科核型的演化可能包括  $2n=24$  的主枝和  $2n=44$  的旁枝。演化主枝为松亚科(松属)→冷杉亚科(银杉属→云杉属→雪松属→铁杉属→油杉属→冷杉属)→落叶松亚科(黄杉属→落叶松属),以染色体的形态变异导致核型不对称性渐增而进化为特点,反映在中部着丝粒染色体依序减少( $24m \rightarrow 12m$ )而近中着丝粒染色体渐次增多( $0 \rightarrow 12sm$ ),平均臂比(1.12→1.72)、染色体长度比(1.59→2.03)、核型不对称系数(52.77%→59.31%)、臂比大于 2 的染色体对数( $0 \rightarrow 6$ )逐渐增大,核型类型依 1A→2A→2B 的方向演进。在形态上反映为球果的苞鳞从无到有、由小到大不断完善发育及苞/种鳞长度比按序渐增的演化趋势。化石资料也基本上支持这样的演化顺序。

演化旁枝可能为铁杉属→金钱松属(亚科)。关于金钱松  $2n=44=4sm+40t(4sc)$  核型的起源, T. N. Khoshoo(1959)和 F. Mergen(1961)认为可用染色体着丝粒断裂来解释,洪德元(1990)也指出裸子植物中染色体数目变化大多是罗伯逊易位引起的。因此它的 20 个 I 型染色体(40t)很可能由起源者的 10 个中部着丝粒染色体(20m)断裂产生的, 2 个 V 形染色体(4sm)则由原来保持不变。从松科的核型资料来看,虽然符合于起源者的  $20m+4sm$  的核型式样存在于云杉属、铁杉属、雪松属,但似乎仅有铁杉属较为可能,因为只有该属与金钱松(属)同具晚白垩纪的化石及更为相近的形态学特征。晚白垩纪可能就是金钱松起源的地质时期。鉴于松科中  $2n=44$  的仅金钱松 1 种,因此该演化旁枝可能是个盲枝。

松科的细胞分类学研究刚刚开始,还有许多工作有待深入,包括在群体水平上进行属、种的核型比较及作分子水平的研究等。随着多学科对松科演化研究的继续深化,必将使得细胞分类学结果得以不断完善,最终获得比较客观的松科系统演化结论。

(复旦大学李林初副教授撰)

#### 聚金属元素植物 plant of accumulation of metallic element

植物中几乎含有地球表面所有的元素。它们主要来自植物赖以生存的土壤、水和大气中的无机元素、化合物和离子。这些元素有些是植物大量需要的营养元素,有些是微量营养元素,有些元素对植物的作用尚未被认识或正在认识。在金属矿区,在采矿、选矿、冶炼以及其它受重金属污染的地区和高背景区,环境中金属元素含量过高,有些植物能大量地吸收聚集某些金属元素,或忍耐或发生某些变异,有些植物则中毒死亡。聚金属元素植物的研究,在植物找矿、环境保护、地方病的研究等方面具有重要的意义。

在古代,人们就注意到植物对金属元素的聚积作用。如《博物志》记载:“积艾草三年后,烧,津液下流成铅(即铅)锡”。随着化学分析技术的发展,人们对植物聚积金属元素的状况逐步认识。较早研究的是金属矿区植物中金属元素的含量。1922 年以后相继发现植物中的微量营养元素及含量。1900 年, Lungwitz 分析了植物中的金。1938 年 Tkalic、1939 年 Brubdin 和 Vogt 利用聚金属元素植物进行植物地球化学勘查矿床的研究。意大利 Vergnana(1947)发现了镍的高积累者布氏香芥(*Alyssum bertolonii*);美国的 Cannon、加拿大的 Wareen 等从生物地球化学角度研究了许多聚金属元素植物。前苏联 A. П. Виноградов、中国的侯学煜等,研究了不同土壤上的聚金属元素植物。

Peterson(1971)和李长复(1990)对植物异常吸收积累金属元素及其机制进行了较全面的论述,列举了一些植物金属元素含量异常高的数值。如蛇纹岩土壤上的十字花科植物布氏香芥干物质中的镍含量高达 1%,这个属大约有 50 种植物具有这种能力;富含钴的土壤上的野百合(*Crotalaria cobalticola*)灰分中的钴含量达 1.8%,钴积累者的钴/镍比大约为 5,非积累者为 0.05。黄荇属(*Astragalus* sp.)的植物是铀的积累者。唇形科的罗勒

(*Becium homblei*) 干物质中的铜含量达 0.3%; 苜蓿菜属植物 (*Thlaspi calaminari*) 灰分中的锌含量达 13%; 生长在汞矿上的纸皮桦 (*Betula papyrifera*) 含有 1150mg/L 的汞(灰分)。1977 年, Purves 论述了环境中微量元素的污染问题。受铅污染的大气、土壤上的牧草灰分中的铅含量达 3 000mg/L, 未受污染植物中的铅含量为 10~100mg/L。生长在镉污染土壤上的莴苣叶干物质中的镉含量为 668mg/L, 植物中正常的镉含量水平低于 1mg/L。

近些年来, 一些研究者相继报道了许多金属元素超积累者, 并把积累的临界值规定为  $>1 000\text{mg/L}$  (占干物质)。1983 年, Reeves 等报道了中欧两种铅和锌的积累者。Brooks (1987) 列出了 144 种镍的超积累者。1985 年, Brooks 综述了中非、南非的铜、钴、铬、镍的超积累者。1982 年, 侯学煜提出了中国的聚铝、锰等植物种类, 如红毛杜鹃 (*Rhododendron vialii*) 干物质中的含量铝为 0.412%~2.732%, 比一般植物的铝含量高出自倍至千倍; 锰的含量为 0.160%~0.320%, 比一般植物的锰含量高出自 10 倍至 100 倍。利用植物法勘察金矿, 聚集金的植物种类近年来引起人们的极大的兴趣。1982 年, Brooks 列出 134 种植物含金量的数值, 有不少植物是金的聚积者。Valente 等 (1986) 报道了金矿区植物羊茅 (*Festuca ovina*) 的金含量高达 65.4ng/kg, 而一般植物中的金含量小于 2ng/kg。

据报道, 植物中的金属元素主要来自金属矿区的和污染区的土壤, 根吸收的这些元素, 首先在根中积累, 然后部分地被转移到植物体的其它部分。此外, 植物的地上部分可以从大气中吸收金属元素。Smith (1975) 报道了生长在交通要道路边的树叶和小枝的铅含量, 比背景含量 (1~4mg/L, 占干物质) 高出 10~100 倍; 酸模叶蓼 (*Polygonum leptophyllum* var. *Salicifolium*) 在大气、土壤中含量较低的地段, 地上、地下部分汞含量的比值为 1 左右, 而高汞的地段其比值为 4。许多研究资料表明, 植物的不同部位、同种植物在不同生长季节, 甚至同一株植物的不同方位, 聚积金属元素的状况不一样。大多数报道的植物中金属元素含量, 是指植物的绿色部的含量, 即草本植物的地上部分、木本植物的叶, 有时也包括一些嫩枝。就植物不同部位金属元素含量而言, 多数的报道是根  $>$  茎 (或枝)  $>$  叶。

植物吸收积累金属元素是非常复杂的, 最主要的决定于种的特点和发育阶段, 也决定于环境的化学性质。1984 年, Kovalevskii 根据植物与土壤的关系, 提出生物障 (bio-barrier) 的概念, 把不同的生物体 (实际上是植物) 对不同元素的吸收积累分为无障生物体、半无障生物体、有障生物体和背景障生物体。无障生物体富集的元素与土壤中该元素的含量成直线比例关系, 占所研究的植物种类的 5%; 背景障生物体富集的元素含量接近于所调查生物体的当地背景值。不同的元素障特征不一样。如金的无障生物体, 在研究的 178 种生物体中占 29%; 铅的无障生物体, 在 280 种生物体中占 4%; 锌的无障生物体为零。可以认为聚金属元素植物多为无障生物体和半无障生物体。孔令韶等 (1991) 对矿区植物与土壤之间金属元素含量进行了相关分析, 把植物分为相关关系达显著水平、有相关关系但未达显著相关水平、基本上没有相关关系 3 类植物。第 1 类大体上与无障生物体和半无障生物体相当, 第 3 类相当于背景障生物体。聚金属元素植物与其它环境化学性质的关系, 近些年进行了深入、广泛的研究, 如元素在环境中存在的状态 (有效态等)、土壤  $\text{H}^+$  浓度的影响、土壤有机质的状况、元素之间的拮抗、相促作用的影响等。

聚金属元素植物, 大多数具有对金属忍耐能力, 或为忍耐生态型, 指示植物。近几十年来相继报道了细弱剪股颖 (*Agrostis tenuis*) 是铜、锌、铅、镍的忍耐生态型, 羊茅是铅忍耐生态型。1985 年, Brooks 论述了镍、铜、钴的忍耐植物区系等。Peterson (1971) 详细论述了植物的忍耐机制: (1) 有毒元素被细胞排斥或部分排斥; (2) 有毒元素受细胞壁的限制, 如锌、铜、钴等常被细胞壁粘附, 沉积在细胞壁内; (3) 元素进入细胞参与新陈代谢或与另外的化合物结合转换成非活性部分, 毒性降低。Antonovics

(1971) 就植物忍耐金属元素的生态学、忍耐的演变、忍耐的机制和遗传以及忍耐植物的应用等问题进行了综述。

聚金属元素植物的研究来源于实践, 应用于实践。(1) 聚金属元素植物和忍耐变异生态型植物应用到地质矿产普查上, 已形成较完整的矿产勘察的植物学方法。(2) 环境科学和环境保护工作的发展, 促进该领域的发展和运用。如近些年来利用凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 吸收积累金属元素的能力, 广泛地进行了净化污水的研究和实践, 利用聚金属元素植物忍耐作用进行采矿、尾矿区及矿渣上植被的恢复和重建, 如英国已经和正在进行这方面的工作; 抗污染植物的选择及污染区的绿化等。(3) 微量元素与健康, 地方病的研究和防治, 植物聚积金属元素的研究, 是当前研究的重要方面之一。聚合金属元素植物的应用也为考古提供了重要线索。

#### 参考文献

- 1 Stewart W D P. Blue-green algae, A treatise on dinitrogen fixation (Hardy WF et al eds) Section II Biology. Wiley, New York, 1977. 67~123
- 2 Tyagi VVS, et al. Dinitrogen fixation by blue-green algae. Ann Rev. plant Sci. 1980, 1: 1~36
- 3 黎尚豪. 固氮蓝藻作为晚稻肥源的研究. 水生生物学集刊, 1981, 7: 417~424
- 4 Bothe H, et al. Physiology and biochemistry of  $\text{N}_2$ -fixation by cyanobacteria. Advances in nitrogen fixation research (Veeger C et al eds), Nijhoff/Junk, 1984. 199~210
- 5 Houchins J P. The physiology and biochemistry of hydrogen metabolism in cyanobacteria. Biochem Biophys Acta, 1984, 768: 229~255
- 6 陈因. 蓝藻的固氮作用. 生物固氮 (尤崇构等主编). 北京: 科学出版社, 1987. 266~294
- 7 曾定. 固氮生物学. 厦门大学出版社, 1987. 64~116
- 8 Stewart W D P. Some aspects of structure and function in  $\text{N}_2$ -fixing cyanobacteria. Ann Rev Microbiol. 1988, 34: 497~536
- 9 王业勤, 等. 蓝藻分子遗传学十年研究进展. 水生生物学报, 1991, 15(4): 356~367

(中国科学院植物研究所孔令韶研究员撰; 李长复审)

**蓝藻的固氮作用** nitrogen fixation of blue-green algae 研究蓝藻固氮的意义有多方面: (1) 固氮量大, 仅次于豆科植物-根瘤菌共生固氮系统; (2) 能同时进行固氮和光合作用, 集两大生理过程于一身; (3) 蓝藻是原核生物中唯一进行光合放氧固氮的类群, 在进化上占有特殊地位; (4) 固氮时放氢, 从能源开发角度说, 它可能是一个有希望的太阳能生物转换系统。现已查明, 有分属于 11 个科 30 多个属的 120 多种蓝藻能够固氮。从形态学上分有异形胞蓝藻、异形胞蓝藻和单细胞蓝藻 3 类, 分别在空气中和微氧或无氧下行自生固氮, 其中有些种类还能和细菌、藻类、苔藓、蕨类、裸子植物甚至被子植物联合固氮或共生固氮。

1928 年证实蓝藻能固氮。随后人们对固氮蓝藻的种类、生态分布和生理习性进行了调查。40 年代后集中在整体水平上对蓝藻固氮生理和生化进行研究。60 年代初, 随着体外非细胞固氮的成功, 蓝藻固氮研究逐步进入分子生物学水平。

**蓝藻固氮酶的特性** 蓝藻无细胞制剂固氮研究几乎和巴氏芽孢梭菌同期进行。由于方法复杂, 以致迄今对蓝藻固氮研究仍然没有像对自生固氮菌那样深入。蓝藻固氮酶也是双蛋白系统, 其米氏常数在 0.002~0.006 之间, 有 ATP 时放氢, 对氧十分敏感, 其辅铁蛋白的分子量为 220000, 由分子量分别为 52 800 和 55 000 两种类型亚单位组成, 等电点为 4.72~4.99。铁蛋白由两个分子量同为 30 000 的亚单位组成, 一级结构测定已经完成, 不含色氨酸。两种蛋白的氨基酸组成, epr 等波谱信号和金属元素

含量均与别的固氮生物相同。其钼铁蛋白可与棕色固氮菌的及多粘芽孢杆菌的铁蛋白重组固氮性,铁蛋白可与棕色固氮菌的、多粘芽孢杆菌的及深红螺菌的钼铁蛋白重组固氮活性,与巴氏梭菌钼铁蛋白重组的活性较低。近来发现蓝藻中也有第2种甚至第3种固氮系统存在。目前关于蓝藻固氮酶学方面的报道不多。

**蓝藻固氮的活性部位** 绝大部分固氮蓝藻属于具有异形胞的一类。异形胞只有PS I,不含锰离子和藻蓝素,不放氧,不同化CO<sub>2</sub>。一段时期内曾有蓝藻固氮场所为何的争议。认为异形胞是固氮部位的依据有:(1)异形胞的存在和蓝藻固氮能力有一定关系;(2)有结合态氮时蓝藻固氮和异形胞形成同时受到抑制;(3)异形胞具有固氮作用所需要的条件,异形胞具有固氮活性。认为固氮部位不一定在异形胞中的依据是:(1)能固氮的粘球藻属于没有异形胞的蓝藻类型;(2)N<sub>2</sub>示踪法测得柱胞鱼腥藻的固氮能力比异形胞强;(3)无氮培养基中生长的固氮蓝藻有时异形胞数量并不多。现在对异形胞是蓝藻的主要固氮场所的争议不大,且进一步查明,异形胞固氮形成的氯化物中有5%~6%留在异形胞里,其余迅速以酰胺形式经过微孔输给营养细胞,而既有PS I又有PS II的营养细胞固定CO<sub>2</sub>形成的产物以麦芽糖形式也经微孔运给异形胞,两类细胞相互配合保证固氮的进行。但是,无异形胞的蓝藻固氮部位如何仍值得探讨。

**蓝藻固氮和光合作用的关系** 蓝藻固氮依赖于光,光合作用影响固氮酶活性和合成。经用抑制剂、远红光和红光处理以及异形胞和PS II/PS I活性比值相对高的蓝藻光漂白细胞为材料,证明蓝藻和PS I直接联系,和PS II的关系是间接的。但是,蓝藻细胞内还原剂最终还是靠PS II供给,因此在一定条件下,作为光合产物的碳水化合物和ATP的还原剂库亦制约固氮。光合形成的还原剂和电子通过还原的铁氧还蛋白(Fd)或还原的辅酶II(NADPH)传给固氮系统。质体醌(PQ)也有可能作为非环式电子传递和环式光合磷酸化的辅助因素影响蓝藻的固氮作用。蓝藻固氮和光合作用之间的关系很复杂,其中需要研究的问题很多,如光合形成的能量和还原力在固氮、CO<sub>2</sub>还原、放氢以及其它生理过程之间的去向调节机制,固氮和光合作用的功能部位是否统一?光对两个过程是否同时起作用?两个过程的电子载体和供体是否相同?无异形胞的蓝藻光合产氧和固氮所需还原条件如何克服?有异形胞的蓝藻除了空间上隔离之外,有无别的方式?它们在时间和步序上的调控机制如何?都待阐明。

**蓝藻固氮和光呼吸** 耗氧的光呼吸也存在于蓝藻细胞中,它和固氮酶竞争还原剂。低CO<sub>2</sub>、高O<sub>2</sub>和高强光都能促进光呼吸而降低固氮活性,因而抑制光呼吸乙醇酸代谢途径中乙醇酸氧化酶活性的抑制剂(如NaHSO<sub>3</sub>)可以降低蓝藻光下吸氧量从而促进固氮。光呼吸和固氮之间的联系机制依然不清,研究者也不多,应该予以重视。

**蓝藻固氮的暗过程** 蓝藻固氮本身是个暗反应。暗中国固氮酶反应所需的还原剂来源有几种说法:(1)在某些情况下丙酮酸可促进固氮。根据在柱胞鱼腥藻中检测到丙酮酸、Fd氧化酶存在的实验资料认为,丙酮酸代谢的生理作用在于还原成氨时,所需的还原态Fd的量。但也有人报告说丙酮酸促进固氮的能力极微,因而认为其作为生理电子供体作用可能很有限;(2)戊糖磷酸氧化也可能是固氮的还原剂来源,它向暗呼吸提供NADPH以支持固氮;(3)三羧酸循环/乙醛酸支路则可能是为氮还原成氨提供碳架,间接支持固氮。基本上已确认蓝藻固氮中电子传递顺序为:NADPH<sub>2</sub>→Fd→NAD还原酶→Fd→固氮酶或丙酮酸→Fd→氧化酶→Fd→固氮酶。目前对蓝藻固氮暗过程研究进展不大,报告也少,理应深究。

**蓝藻固氮和氮代谢** 蓝藻的氮代谢指氮的吸收、循环再利用和氮的释放两个方面。第一,放氮。蓝藻在固氮的同时放氮。从固氮效率来说,放氮是能量损失过程,但从开辟能源来说,则是一种生物产氮体系。一般认为放氮是固氮酶催化的,其依据是:(1)它和固氮一样依赖于光;(2)固氮酶的天然底物N<sub>2</sub>抑制放氮;(3)CO不抑制放氮却抑制固氮;(4)NH<sub>4</sub><sup>+</sup>及光合抑制剂和抑制

固氮一样,也抑制放氮;(5)在有异形胞的蓝藻中放氮主要在异形胞中进行等。近来有资料认为,蓝藻中有一种称为可逆性氨酶的物质也参与放氮。此酶对CO和O<sub>2</sub>敏感,不受N<sub>2</sub>和C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>的影响,不需要ATP,缺钼时放氮减弱,细胞经光漂白后则增高。放氮的电子载体和供体的细节尚不清楚。由于放氮和固氮在很大程度上是固氮酶催化的,因此推测放氮的电子载体和供体与固氮是一样的,而对非固氮酶以外的酶催化放氮中的电子传递情况还一无所知。第二,吸氮。绝大多数实验资料确认,包括分子氮循环再利用在内的蓝藻所吸收的氮可以支持固氮,提高固氮效率,吸氮和固氮之间一般呈现同时起伏变化的关系。通常认为吸氮由氨酶催化。吸氮酶有膜结合态和可逆而又可是可溶性的两类。蓝藻中是否有不同氨酶参与吸氮,尚无定论。迄今只见到膜结合态氨酶参与吸氮。近年来有人报告认为固氮酶也催化吸氮,其吸氮能力常以固氮酶基质(N<sub>2</sub>·C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)为转移。有两种利用氮的途径:一为通过呼吸途径的催化羟化反应,此反应不一定需光,以氧为末端电子受体,可为蓝藻固氮提供额外能量,并可除去固氮酶上多余的氧或积累的氢,保护该酶免受伤害;另一为通过光合链的Hattori反应,此反应在光照无氧下提供电子到PS I,经Fd传给固氮酶以利固氮的进行。蓝藻的品系类别、藻龄、气体和培养基组成、金属元素镍和钼、光温条件等都制约吸氮。氮代谢研究中需待阐明的问题很多,诸如参与氮代谢的酶类、氮代谢的途径和机制、氮代谢与包括固氮在内的其它生理生化过程的关系和调节,以及如何提高氮的利用效率和产氮率等等。

**蓝藻固氮和氮代谢** 蓝藻固氮生成氨基本上也是通过谷氨酰胺合成酶(GlnS)作用将氨基转移到谷氨酸上形成谷氨酰胺输出到异形胞中,而谷氨酸则来自营养细胞。GlnS已从某些蓝藻异形胞中提纯出来,其活性受反馈抑制,Mg<sup>2+</sup>对其有调控作用,有些还受光的影响。尚未发现蓝藻中存在GlnS腺苷化反应,因此其参与固氮的调节机制可能和别的固氮生物有异。氨、谷氨酰胺、尿素、氨甲酰磷酸和硝态氮化物都阻抑蓝藻固氮酶合成,有些藻还受精氨酸的阻抑,天门冬氨酸则无效。据研究,氨本身并不直接阻抑固氮酶合成,而是与氮代谢有关的某些产物才有此效应。有人认为氨及其代谢物通过抑制异形胞分化调控固氮,而抑制固氮活性也主要是通过固氮酶竞争ATP或还原力,并非直接调控异形胞中固氮酶的合成。此外,蓝藻固氮产物有部分分泌到胞外(主要是氨)。也有酰胺、氨基酸、肽和某些生理活性物质)、分泌量约占总固氮量的20%~30%,高者60%~80%、共生条件下分泌氮多些,不受C/N比影响。分泌物也影响其自身固氮,可减少对固氮酶合成的阻抑。蓝藻固氮酶合成及其调控机理是固氮研究中的热点之一,而氨及其化合物的释放还牵涉到蓝藻的生产应用效果,所以这方面的问题始终引起研究者的重视。

**蓝藻的固氮遗传** 从生化途径探讨蓝藻的固氮遗传,由于研究方法不完善,进展不大。20世纪80年代,采用亚硝基胍、紫外线照射及转座子插入等诱变得得到了一些nif<sup>-</sup>和her<sup>-</sup>(分化异形胞)的突变体,再加上基因转化、接合转移和异源DNA杂交探针等技术的广泛应用,人们对蓝藻固氮遗传才有了较多的了解。在基因转移方面,已有一些单细胞蓝藻可被转化,一种广宿主范围的接合性质粒RP-4能有效地在大肠杆菌与单细胞或丝状蓝藻之间接合,在PDS<sub>410t</sub>或PGJ<sub>24</sub>质粒协同下,它能转移含有PBR<sub>322</sub>质粒的蓝藻。在固氮基因组成、结构和基因簇方面已发现:(1)在丝状蓝藻(如鱼腥藻)的营养细胞和异形胞中都有nif基因簇,一般情况下只有后者能表达。营养细胞染色体上的nif结构基因中nifD和nifH相连并共转录,nifK与nifD被11kb的DNA片段相隔,有自己的启动子,并有第2个nifH,其转录条件与nif基因相似。营养细胞分化为异形胞时有两处发生变动,一是切除介于nifD和nifK之间的无nif信息的11kbDNA片段时,nifHD和nifK即相连而并存于一个操纵子内,而切除下来的11kbDNA则形成环状分子存留于异形胞内;另一是nifHDK的右方有11对重复顺序的重排,nifS(或V)基因右侧25kb处的DNA亦发生取代作用。现在对调控这些nif基因重组的分子机

理尚不清楚。(2)nifV(或nifS)不在nifKDH下游,而在上游,它们的极性相同。鱼腥藻7120固氮酶结构基因nifKDH的核苷酸已进行顺序分析,其中nifH的顺序相当保守,nifK和nifD基因大小相似,核苷酸顺序没有同源性,但其 $\alpha$ 和 $\beta$ 亚基中5个半胱氨酸的位置是保守的,nifK和nifH5'端的调节顺序中有两个共同顺序,其同源性可能在nifK和nifH—nifD的协调控制上起作用。在调控方面,发现在有氮或无氮条件下蓝藻都合成GlnS,但调节情况有异。有氮时,GlnS转录可为相距64000的两个启动子启动(其中一为nif启动子),无氮的固氮条件下只用nif启动子。外源氮只部分调控nif和het的表达,在某些蓝藻(如鱼腥藻7120)中nif的调控不依赖于ntr,nifA产物。

蓝藻固氮和农业生产 据统计,蓝藻所固定的氮量为16~89kg/ha,不仅对水稻有增产效应,对其它作物亦有益。多年来,人们已在养殖方法和应用技术上取得一定的进展,但迄今蓝藻的肥效常不稳定,这除了由于蓝藻固氮产物氮不截留在细胞中或排到胞外的量少之外,与人们对蓝藻固氮的生理生化过程乃至分子生物学机制和调节的了解尚不透彻也有关系。因此,必须加强蓝藻固氮的基础研究,同时也要探讨提高现有固氮蓝藻固氮效率的途径,寻找新的高效固氮蓝藻,扩大固氮生物资源。

#### 参考文献

- 1 Stewart W D P. Blue-green algae, A treatise on dinitrogen fixation (Hardy WF et al eds) Section I Biology. Wiley, New York, 1977, 67~123
- 2 Tyagi VVS, et al. Dinitrogen fixation by blue-green algae. Ann Rev. plant Sci. 1980, 1:1~36
- 3 黎尚豪. 固氮蓝藻作为晚稻肥源的研究. 水生生物学集刊, 1981, 7:417~424
- 4 Bothe H, et al. Physiology and biochemistry of  $N_2$ -fixation by cyanobacteria. Advances in nitrogen fixation research (Veeger C et al eds), Nijhoff/Junk, 1984, 199~210
- 5 Houchins J P. The physiology and biochemistry of hydrogen metabolism in cyanobacteria. Biochem Biophys Acta, 1984, 768:229~255
- 6 陈因. 蓝藻的固氮作用. 生物固氮(尤崇构等主编), 北京: 科学出版社, 1987, 266~294
- 7 曾定. 固氮生物学. 厦门: 厦门大学出版社, 1987, 64~116
- 8 Stewart W D P. Some aspects of structure and function in  $N_2$ -fixing cyanobacteria. Ann Rev Microbiol. 1988, 34: 497~536
- 9 王业勤, 等. 蓝藻分子遗传学十年研究进展. 水生生物学报, 1991, 15(4):356~367

(中国科学院上海植物生理研究所陈因教授撰)

#### 螺旋藻属 spirulina turpin 螺旋藻属蓝藻门颤藻科。

1827年,由特皮(Turpin)建立,但因条件所限未提到藻体有横壁。1852年,斯梯曾伯格(Stizenberger)因螺旋藻有明显横壁,另外建立了节螺旋藻属。1932年,吉特洛(Geitler)据非吉尼(Figini)等人对无壁螺旋藻处理结果(经化学和染色能显出横壁),将螺旋藻属和节螺旋藻属合并成螺旋藻属。20世纪50年代后,电镜的应用使螺旋藻具横壁得以证明。1970年以后,伯里利(Bourrelly)根据培养时有的螺旋藻丝呈现直线状,而有的颤藻则呈现螺旋状提出螺旋藻应归入颤藻属,此意见未被广泛接受。1982年底,卡鲍内拉(Carbonera)等从免疫电泳、基因、亚显微结构等方面证实螺旋藻不应归入颤藻属,从而使认识一致起来。螺旋藻属已分离和描述的约有35种,中国有5种。螺旋藻多生活在盐碱水域,淡水中也有分布,是一种极有开发前景的藻类蛋白质资源。

螺旋藻被食用由来已久。墨西哥特克斯科克湖和非洲的乍得湖是螺旋藻的天然产地,当地人食用从湖面采收的藻类已有数百年历史。1521年,西班牙贝尔纳尔·迪亚斯·德尔·卡斯梯洛

(Bernal Diaz delcastillo)和墨西哥博物学家弗朗西斯科·埃尔纳德斯(Francisco Hernandez)到达墨西哥时,第一次记述了从特克斯科克湖内用螺旋藻制作的蓝绿色“饼”。1940年,法国藻类学家丹吉尔特(Dangeard)研究并报道了当地人从乍得湖采作食物的螺旋藻干物质。1964年,比利时植物学家丁·利昂纳德(J. Leonard)经观察后指出螺旋藻蛋白质含量达干重的70%。1966年,法国人克莱门特(Clement)和利昂纳德等对螺旋藻进一步作了报道。法国、意大利、日本、墨西哥等对实验室的或自然条件下生长的螺旋藻干粉进行分析并证实了利昂纳德的数据,螺旋藻含蛋白质65%、碳水化合物19%、色素6%、脂类4%、纤维3%、灰分3%、氨基酸组成平衡合理,富含 $\beta$ -胡萝卜素和多种维生素以及生物活性物质等。毒物学家杰曼·钱莫罗(German chamorro)费时两年半,耗资数百万法郎,对实验动物完成了螺旋藻系统性毒理学研究,未见异常现象和病理学效应,并于1980年发表了6万余字的报告。近20多年来,世界许多国家相继对螺旋藻进行了研究、培养与开发利用。80年代初,中国对螺旋藻进行了研究,近几年在开发应用上取得了较大的进展。

螺旋藻,一般有多个短圆筒形细胞组成藻丝体,无鞘,丝体呈松或紧的规则螺旋弯曲,有的种细胞内近横壁处有颗粒,藻体蓝绿色,无异形孢和厚壁孢子,丝体有时出现空细胞。其繁殖以母细胞横裂产生子细胞导致藻丝加长,也可由数个细胞的短丝发展成孤状或具螺旋的丝体。1980年,柳文·雷日费(Lewin. Razpha)指出培养过程中螺旋藻能产生不卷曲的变异株。商树田也多次发现,在低温或营养不良时,个别种的藻丝一旦变直即不能再恢复弯曲,此现象有待深入研究。国内外资料表明,生产上多采用钝顶螺旋藻和极大螺旋藻。

螺旋藻含叶绿素 $a$ ,是光能自养原核藻类利用二氧化碳或碳酸氢钠为碳源,以硝酸钠或尿素等为氮源,在满足磷、钾、钠、钙、镁、铁、氯、硫等矿物质营养条件下合成蛋白质等有机物,其光能转化率可达18%,光合效率达43%。实验室培养螺旋藻一般以赞拉克为经典配方,它营养全面,效用时间长,但价格昂贵,生产上难以应用。各国藻类工作者因地制宜研制出许多培养基配方,如印度的CFTRI等。

为获取优质高产螺旋藻,需满足其所求条件。研究证明,当满足营养与温度要求时后,在光饱和范围内光照强则产量高。连续过强光照能引起藻丝光休克(漂白致死),可采取选种驯化,提高接种浓度、搅拌、遮荫等措施防止。藻液 $H^+$ 浓度 $10^{-6}$ ~ $10^{-9}$  mol/L,有利于 $CO_2$ 的蓄积和碳酸的吸收,光合作用增强; $H^+$ 浓度小于 $10^{-6}$  mol/L会产生伤害作用,而 $H^+$ 浓度大于 $10^{-8}$  mol/L则光效较低,同时容易滋生杂藻。生产中7~9月份易发生虫害,如轮虫、致倦库蚊、水蝇等,尤以轮虫危害大,致可招致灭性后果,应采取清洁环境、设滤虫网框和少量低毒的或无毒的药物综合防治;细菌性病害尚未发现。1986年以来,中国科技人员研制了多种螺旋藻培养基,证明用尿素代替硝酸钠(0.5~3.5g/L)供应氮素,以0.1g/L施用两次比施用一次0.2g/L的效果好,能避免氨中毒;施用农用磷酸二氢钾(或过磷酸钙)与氯化钾分别代替磷酸氢二钾与硫酸钾,生物产量无明显差异,但生产成本可降低。

螺旋藻比小球藻、栅藻等真核藻类有更多优点,它既可工业化生产,又可土法放养,技术操作简便易行,因而使其成为被联合国粮农组织推荐、国际厂商竞相生产加工的生物产品。到1993年,世界已有10多个国家和地区大规模商品化生产螺旋藻,如法国、日本、德国、墨西哥、乍得、美国、意大利、印度、以色列和中国的台湾、海南省等。近几年应用藻粉开发的新产品有几十种之多,如西欧注重保健食品、药品,天然色素、系列化妆品的开发;亚洲注重在对虾、鲍鱼、观赏金鱼等的饲料;世界一些国家和国内一些单位正致力于研究、开发以螺旋藻为原料的抗辐射、抗缺氧、抗肿瘤、抗衰老药品,用螺旋藻制剂治疗多种溃疡病、贫血症、糖尿病、某些肝病和视觉障碍病症等。日本从螺旋藻提取葡萄糖、 $\beta$ -胡萝卜素抗癌药物等。此外,螺旋藻有高活性酶类,可作为光合



制氢的生物材料,自然条件下,螺旋藻属的一个种能固定空气中的氮。但不断使螺旋藻高产、优质、降低成本仍是个重要问题;加强藻种的提纯复壮和分离、选育驯化,势在必行。日本研究人员已利用遗传操作培育出4°C条件下生长的螺旋藻,开展原生质体融合及基因重组方面的高生物技术研究以及在药品、保健食品、饵料等方面的深入研究、应用等已成为较有前景的课题。

参考文献

- 1 Orio Cifferrri. *New Scientist*, 1981,9(24):810~812
- 2 Backer E W, et al. *The Indan Approach*. 1982,1~216
- 3 Venkataraman L V. *Blue green alga spirulina*. 1983,1~100
- 4 农业部螺旋藻协作组. 蓝藻—螺旋藻开发利用与生物技术资料汇编. 1985,1~72
- 5 阿尔贝,萨松著,贾谦待译. 生物技术—挑战与希望. 北京:科学技术文献出版社,1986. 231~235
- 6 商树田,等. 江西农业科技,1987,2:1~84
- 7 韩迎山. 植物杂志,1990,6:4~5

(北京农业大学生物学院商树田撰)

**轮藻植物** *chrophyceae* 轮藻植物由于所含色素及光合作用形成的产物与绿藻门的藻类相似,有的学者将它归入绿藻门的一个纲。但由于其营养体的构造和生殖器官与繁殖方式都较为复杂,与绿藻区别较大,所以有些学者把它单独列为一门,即轮藻门。轮藻植物在进化分类系统中有特殊的地位,常被认为是由藻类植物演化为苔藓植物的中间过渡类型,在植物细胞学和生理学的研究上,轮藻植物至今仍作为重要的实验材料而被利用。除此之外,轮藻植物近数十年中也被利用作为肥料、灭蚊虫、医疗疾病、水质监测和地质勘探等方面。

轮藻植物多生于淡水,少数种类分布于咸水湖或海滨半咸水的浅水区。植物体有类似根、茎、叶的分化,外形很像水生高等植物中的金鱼藻,中国俗称为水茴香或丝草。又由于体表常被有大量钙质,坚硬而脆,所以在国外常称为石草或脆草。假根生于泥中,分枝或不分枝,由单列细胞组成,有的生有单细胞的或多细胞的珠芽。茎直立于水中,多呈绿色或灰绿色,由单细胞的或多细胞的节和节间组成,节上轮生小枝。雌雄同株或异株。生殖器官生于小枝的节上或小枝轮的基部。藏精器圆球形,桔红色或棕褐色,外壁由8个、或罕为4个盾状的细胞构成,精细胞呈螺旋形,顶生两条鞭毛。藏卵器多呈椭圆形,外有5个左旋的螺旋细胞所包围,顶端具有5个或10个短小的细胞所组成的小冠。有性生殖为卵式生殖,也可用珠芽或断裂等方式行营养繁殖,不产生无性孢子。

1587年,J. Dalechamps 首先依据形态学的和生态学的特征,把轮藻植物放在木贼属和杉叶藻属中。1719年,Sebastian vaillant 才把它从其它属中提出来,并建立了轮藻属。1737年,林奈(Linnaeus)沿用了轮藻属这个属名,并把它归入藻类植物。19世纪中叶以前的许多学者,都是把轮藻作为高等植物来处理的。直到1897年,德国H. Nigula 支持林奈早期的意见,把轮藻视为是藻类植物中的一个类群(门),并认为轮藻起源于绿藻门中的鞘毛藻属,是藻类进化为苔藓植物的过渡类型。从此,轮藻属于藻类植物的概念,在植物分类学家中取得比较一致的意见。

关于轮藻在分类系统中的位置,可以归纳为两种意见:Fritsch(1935)、C. M. Smith(1938)、R. D. Wood(1947)等人认为轮藻的色素成分和同化产物与绿藻相似,因而把它作为绿藻门中的一个纲或绿藻纲中的一个目;而Pascher(1925)、Zaneveld(1940)、Imahori(1954)等人认为轮藻和其它藻类之间在形态构造、繁殖器官与繁殖方式方面有很大差别,所以主张列为独立的一个门,即轮藻门(Charophyta)。中国饶钦止和韩福山以及《中国淡水藻类》(胡鸿均等,1980)中均赞成把轮藻提升为单独的一个门,这是因为轮藻植物体具有类似根、茎、叶的分化,而且具有与高等植物颈卵器相似的藏卵器,结构复杂的藏精器含有多数椭圆形的叶绿体,与苔藓植物相似的原生体,以及具有一种绿藻所没

有的特殊化合物——类黄酮。以上特性说明轮藻和绿藻有很大的差别,应作为藻类的一个特殊而独立的较为高级的类群,不应隶属于绿藻。

建立轮藻植物的分类系统,用以说明轮藻植物各类群之间的亲缘关系、进化规律,便于检索与鉴定物种。但是在轮藻植物的分类中,由于轮藻各类群在历史发展过程中多已绝灭,古轮藻又是以藏卵器化石作为分类的唯一依据,因此很难建立一个反映轮藻各分类群彼此亲缘关系全貌的分类系统。目前学者一般都将轮藻植物单独列为1门(轮藻门)、1纲(轮藻纲);包括古(化石)轮藻在内,轮藻纲包含3个目:(1)直立轮藻目。包括蕾形轮藻科和直立轮藻科。(2)右旋轮藻目。仅有右旋轮藻科。(3)左旋轮藻目。本目包括始轮藻科、古轮藻科、棒轮藻科、孔轮藻科和轮藻科5个科。现在存留的轮藻已知的近400种,它们的藏卵器都是由5个左旋细胞组成的,所以都把它们归属于左旋轮藻目、轮藻科中。轮藻科植物广布于世界各地,共分7属,其中最常见的是丽藻属、轮藻属及鸟巢藻属等3个属,拟丽藻属、灯枝藻属和丽枝藻属仅发现于欧洲和亚洲的部分地区,原轮藻属还只在澳洲有发现。在现代轮藻分类中,国内外目前一般采用的是J. Groves的修订系统(1935),世界上许多国家,如美国、英国、马来西亚、日本、印度、澳大利亚、南非等都已有了本国的轮藻专志,中国的《轮藻志》一书已于1990年完稿。该书采用的系统主要是根据1935年J. Groves 制定的,由四川大学韩福山1982年修订,以及随后李尧英等稍加修改的系统。共收入中国轮藻植物163种和32个变种,其中有70种和22个变种为中国特有种类,15种为热带、亚热带的种类,6种为温带种类,其余为世界性的或普生性的种类。中国的轮藻植物分属于丽藻属、轮藻属、鸟巢藻属、拟丽藻属和灯枝藻属等5个属中。丽枝藻属和原轮藻属在中国尚无发现。

中国幅员辽阔,轮藻植物种类繁多,没有采集过的地区,未经研究过的种类,都是很多的。就全世界来说,也有很多区域尚未进行采集和研究,还有很多种类有待发现,因此分类和系统的建立还有很大的发展前景。轮藻是一类大型的淡水藻类,也是一类具有开发前景的植物资源。由于轮藻喜生于清洁和富含钙质的水体中,因此,轮藻可利用为水质监测指示植物或水体净化植物。古轮藻则对于探矿,特别是在石油勘探中所起的指示作用已被应用于实践,这是由于轮藻的茎、小枝及藏卵器的表面多积累有大量的钙质,易于保存为化石;其次轮藻是形成石油的重要有机物,也是陆相地层产油的伴生物;此外,轮藻的地质历程较短,藏卵器小,易成完整化石等,因此国内外地质学工作者多认为轮藻化石是勘探石油矿层的一种比较理想的生物化石。总之,有关轮藻化石的研究已成为一个很活跃的主题,特别是中国已在陆相油田开发的理论与实践取得举世瞩目的成绩。

参考文献

- 1 Grove J. *J Linn Soc Bot.*, 1924,46:359~376
- 2 Imahori K. *Ecolot Phytoogeography and Taxonomy of the Japanese Charophyta*, Kanazawa Univ. Japan. 1954. 1~42
- 3 韩福山. 植物分类学报,1958,7(2):135~190
- 4 Wood R D, K Imahori, J Cramer. *Weinhein*, 1965, 1~904
- 5 饶钦止,李尧英. 植物分类学报,1974,12(3):349~369

(武汉大学李益健教授撰)

硅藻

**硅藻** *diatoms* 硅藻是一类广泛生活在水中或潮湿的岩石、土壤中的单细胞自养植物。不同种类的硅藻,对生活环境,尤其对温度、盐度和H<sup>+</sup>浓度反应敏感,因此又被誉为指示生物。硅藻细胞有3类:营养细胞(行无性分裂的主要细胞)、增大孢子或复大孢子(行有性结合或同配结合而成)、休眠孢子或休止孢子(在环境变化或不适时,由营养细胞分裂产生或在细胞内部产生)。

1702年,勒文霍克(A. V. Leeuwenhock)在显微镜下首先看到硅藻,但正式定名为硅藻的第1个种 *Bacillaria paradoxa* 是1788年由格梅林(J. P. Gmelin)确立的。

硅藻与其它藻类的区别在于细胞壁是硅质化的。根据1984年李家维等的研究资料认为硅质是硅酸 $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ 的聚合作用和沉积矿化作用的结果。硅藻细胞壁通常称为壳体,壳体包括上壳和下壳,上壳由上壳面 and 上壳环组成,下壳由下壳面和下壳环组成。两壳套合形状像火柴盒或培养皿。硅藻壳薄,无色透明,壳壁厚 $0.08\sim 2.35\mu\text{m}$ ,比重为2.07。硅藻大小变化很大,从几 $\mu\text{m}$ 到几百 $\mu\text{m}$ 。硅藻有各种各样的形状,圆形和长形是基本形状,壳面上排列的繁杂而美丽的几何形花纹,随种类不同而异,圆形者几乎呈放射状排列,长形种类均为左右对称排列。从1788年发现第一种硅藻以来,经过近200年的探索发现,硅藻已成为藻类界12门中最大的1门——硅藻门(*Bacillariophyta*)。1932年,米尔斯(F. W. Mills)发表的硅藻索引中记载的硅藻有295属、7717种。1967~1978年范兰丁厄姆(S. L. Van Landingham)的硅藻目录,共记载294属、10789种硅藻。1990年金德祥指出,至1987年为止,硅藻有近300属、11200种,其中中心纲(Ceutriales)约3500种,羽纹纲(Pennatales)约有7700种。中国目前已记录的硅藻约110属、1300种左右。全球现已出现的硅藻数目如此庞大,而为每个硅藻种确定适当的分类位置都曾经历多次变革。1824年,瑞典艾加德(C. A. Agardh)首先发表Systema Algarum硅藻系统,将硅藻作为1个目Diatomeae,依硅藻的外形特征下分3科、9属。1833年,库津(F. T. Kützting)依硅藻有无中结将其分为3类、72属。1872年,史密斯(H. L. Smith)根据硅藻壳面的形状和构造,将其分为3大类、15科和115属。1896年,范霍尔克(H. Van Heurck)认为将硅藻分为1科、3亚科、218属为宜。硅藻较为完善的分类系统是1928年由卡斯顿(G. Karsten)建立的,他将硅藻正式列入门,门下为中心目、3科、6亚科、100属;羽纹目,下设4亚目、6科、82属。20世纪60年代前基本上沿用卡斯顿的分类系统。随着电子扫描镜的应用,1964年又引起硅藻分类的一次革命。1964年后,亨德(N. I. Hendey)等根据新发现的构造特征和形态变化,对硅藻科及科以下的分类单位进行了修改。1972、1975和1977年,哈斯里(G. R. Hasle)根据对硅藻构造的深入研究,依据硅藻壳面出现的两种突起:唇形突(隙状突)和支持突在硅藻中的数量、分布情况,提出以此作为种、属甚至科的分属根据。硅藻的分类随着人们对构造认识的不深入,分类系统更接近于自然规律。1981年,朗德(F. E. Round)提出,最老的硅藻起源于海相,然后从海相演化到陆相。1982年,金德祥从地质角度进一步肯定海相中心纲比羽纹纲原始,硅藻的祖先应是圆形的。关于硅藻的起源与演化必然涉及硅藻研究的另一个重要内容:化石硅藻。1978年,范兰丁厄姆曾在她的硅藻索引中承认其中1种*Pyxidicula liasica* Roth是硅藻化石。在地层中揭开硅藻历史的是1927年汉那(G. D. Hanna)从美国加利福尼亚莫罗诺页岩中发现晚白垩纪硅藻开始的。1932年,福蒂和苏赫兹(A. Forti & P. Suhulz)在德国的早白垩世(Early Cretaceous)Albian沉积里发现10种硅藻之后,1949年朱斯(A. P. Jouse)在前苏联的平扎地区早白垩纪海相沉积中记录了3属硅藻。海相硅藻在晚白垩纪以后进入繁盛期。陆相地层硅藻化石的研究,其广度和深度均不及海相地层的。1968年,武潘和小罗伯利希(H. Tappan & A. R. Loeblich, Jr.)认为,第三纪时出现了日益占统治地位的底栖羽纹类硅藻,并于渐新世侵入淡水中生活。同年,劳曼和安德鲁斯(K. E. Lohman & G. W. Andrews)研究了美国怀俄明地区非海相硅藻化石,在出现的9属37种和变种硅藻中,其中7种已被记录,1新属和27种是首次描述的,地质时代毫无疑问地被确定为晚始新世,成为20世纪90年代止记录的最老陆相硅藻。陆相硅藻达到繁盛阶段,是从新第三纪开始,众多新科、新属种的羽纹类被发现,与海相中心类在晚白垩世及其以后地层中科、属种的被发现是极其相似的,也可以说是中心类和羽纹类在不同的环境(海相和陆相)和不同的地质历程出现的两个盛期。尽管硅藻在地史上出现的可靠记录是在1亿2千万年左右的早白垩世,但许多硅藻学家认为硅藻的出现要比记录的要早。1972年,西蒙森提出,硅藻的前身是一种无

硅质壁的单细胞藻类,不能成为化石。1990年,朗德等指出,在白垩世以前的硅藻,由于成岩作用使其改变而消失,但没有理由怀疑硅藻的出现可以超出化石记录的时间。1990年,加斯(F. Gasse)等在对硅藻做了初步的生物化学实验后认为,硅藻的出现应早于最老的化石硅藻记录。由此可见,硅藻的起源还待追溯。硅藻地层学的研究已进入研究硅藻种的分布,特别是对化石种的生存期(Stratigraphic ranges)为基础的近代硅藻地层学以及对若干硅藻种的地层分布,进而到属与种的进化亲缘关系的逐渐查明。1974年,朱斯编纂了自渐新世至现代的硅藻种生存期。1961年,西蒙森(R. Simonsen)就以Denticula属中种间的亲缘关系提出在层位上的分布。1973年,施拉德进一步建立了Denticula属种在地层中的演化系列。1977年,安德鲁斯建立了海相*Delphineis*属在划分美国东部中新世一晚中新世地层的标准化石。1982年李家英首次提出*Tetracyclus*属中的许多种在陆相中新世地层中所起的标志种作用。1985年,范兰丁厄姆综合总结苏联和美国陆相新第三纪化石硅藻的地层和地理分布,她还指明一些标志种的生存期。同时,与前硅藻地层学同步进行的硅藻生态学研究 and 古生态学研究已成为硅藻研究的重要内容,意在弄清硅藻的生态环境和再造古地理的本来面貌。

中国硅藻研究历史较短,化石硅藻的研究也仅进行了陆相新第三纪及第四纪地层工作,海相地层也仅局限在第四纪,因此有待进一步扩大和深入研究硅藻的领域。

#### 参考文献

- 1 Gmelin J F. systema Naturae, 1788, 13(6): 3903
- 2 Smith H L. The Museum of the Boston Society of Natural History. The Lens. 1872, 1: 228
- 3 Rothpletz A Z Dtsch geol Ges., 1896, 48: 910
- 4 Van Heurck H. A Treatise on the Diatomeae. Translated by W E Baxter. London: William Wesley, Sons, 1906. 35: 558
- 5 Hasle G R. Two types of valve processes in centric diatoms. Nova Hedwigia, 1972, 39: 55~78
- 6 Van Landingham S L. J Cramer Germany, 1967~1978, 1~7
- 7 Simonsen R. Bacillaria, 1979, 2: 9~71
- 8 金德祥. 海洋硅藻学. 厦门: 厦门大学出版社, 1990

(中国地质矿产部地质研究所李家英副研究员撰)

#### 发菜

*nostoc flagelliforme* 发菜是早生蓝藻类低等植物,属蓝藻门念珠藻科念珠藻属。其植物体内细胞呈念珠状排列,为丝状体,颜色黑绿,呈毛发状,故称为发菜。它分布在中国、法国、前苏联等国。发菜营养丰富,味道鲜美,珍稀名贵,研究它的特性并对其进行开发利用有重要经济价值。

1873年, Nylander 在法国发现了发菜。1930年, Feremy 认为发菜的分布可能是世界性的。据已有资料报导,在美国、墨西哥、索马里、阿尔及利亚、摩洛哥、法国、捷克、前苏联、蒙古和中国的干旱、半干旱地区均有分布。由于发菜结构简单又兼有光合和固氮功能,引起国内外学者的重视和强烈关注,于是他们便对发菜的生物学特性如光合作用、固氮功能、氨基酸成分、酶活性等方面进行研究。如德国 Scherer(1984)对发菜等3种固氮蓝藻的水分吸收、光合、呼吸、固氮特性及抗旱性等作了大量研究工作;德国康斯坦茨大学也从事发菜固氮作用及固氮酶方面的研究。在中国,中国科学院北京植物研究所、内蒙古大学、宁夏大学、宁夏农业科学院、甘肃省生物研究所、甘肃师范大学、青海师范大学、南京大学、北京大学、兰州大学、内蒙四子王旗科委等单位先后对发菜的生物学特性、分布、生境以及人工培养等进行了研究。

在研究发菜分布、形态、生物学特性的基础上,近年来,人们又进一步从发菜的营养价值、资源的开发利用、人工繁殖等方面开展研究。内蒙古大学雍世鹏等的研究资料表明,发菜具有良好的营养价值:蛋白质含量在20%以上,脂肪含量低于0.3%,并含有甘氨酸、天冬氨酸、苯丙氨酸等17种氨基酸。除色氨酸外,人

体正常生理代谢所必须的其它7种氨基酸在发菜中完全具备,是植物性蛋白中含量较高的,接近于“完全蛋白质”,属人体营养中较理想的蛋白质食品。此外,发菜还含有较多的钙、磷、铁、钾等矿物质和维生素,每100g发菜中含钙1 008~2 560mg、磷16~45mg、铁52.5~200mg、钾120~213mg、碘11.8mg、维生素C1.14mg、维生素B<sub>1</sub>0.46mg、维生素B<sub>12</sub>0.23mg。

发菜还有滋补的医疗价值,其中的精氨酸对一些疾病引起的高血脂症有明显的医疗效果;同时有清热解毒、凉血明目和降压及发汗、利尿、利胆、清热、清滞、化痰、理肠除垢等作用。常食用发菜对高血压、心血管病、营养不良、贫血、慢性支气管炎等症都有疗效。

发菜很受人们喜爱,尤其深受港澳同胞、各地海外华侨欢迎,成为中国出口的重要土特产之一,畅销港、澳、日本、东南亚、南洋各地。由此看出,发菜是一项很重要的自然资源。近年来内蒙古大学、中国科学院兰州沙漠研究所等单位多年深入内蒙古、宁夏、甘肃、青海等地发菜产区调查,从调查中看到,这几年来由于国内外市场对发菜的需求日增,发菜价格猛涨,人们则掠夺式地对发菜进行采收,致使发菜资源面临枯竭之危险。例如:(1)据1980年上海科技出版社出版的《中国淡水藻类》一书中记载,发菜丛径可达50cm,而1988~1991年跑遍甘肃、宁夏、内蒙古一些发菜产区,从未见到这样大的发菜团,绝大多数的团都只有数厘米而已,甚至只是些发菜单丝或节段。(2)有些发菜产区群众说:过去他们那里许多地方的发菜都长得很好,俯首一揭就是一大片,如今却没有了。(3)中国发菜的主要产区之一——甘肃省张掖地区,20世纪60~70年代每人每天可采收到发菜1kg,如今每人每天采收到50g都已相当困难;该地区在1983年以前平均每年可收购到发菜20 000多kg,1984年以来平均每年只能收购到3 000多kg,如今更少了。(4)有些原为盛产发菜的地方,如今发菜已近绝迹。

为了使发菜资源能永续利用,研究者们一次又一次地提出要对发菜进行合理的开发利用与保护,包括设立发菜管理机构,对发菜的采收进行全面管理;定期实行封育和实行分区轮采,使发菜有休养生息的机会;禁止用耙具耙搂和把发菜连在一起刮刨拉走的采收方法,以保证发菜生态环境和草场植被不受到破坏;严禁在发菜集中分布区开荒和大量樵柴,以保证发菜的生长发育不受到严重影响和破坏;建立发菜自然保护区等。

进行发菜的人工繁殖也很重要,可使发菜资源得到一部分补充。基于此,多年来中国有不少单位先后开展了人工繁殖发菜的试验,但是发菜的人工繁殖在国内外都是个大难题。中国科学院兰州沙漠研究所、甘肃省张掖科技处等单位的科技人员,在中国科学院兰州分院科技发展基金资助下,在进行发菜的基础理论研究中,通过多年的大量调查研究与周密的科学分析,认为发菜的人工繁殖有可能获得成功。因此,在进行发菜生态学生物学特性的研究时,根据发菜的特性以及吸取前人的经验教训,从1989年开始正式开展了人工繁殖发菜的试验研究。经过3年多的时间和采用多种技术措施,终于使发菜人工繁殖的试验获得了初步成功:(1)在野外播放发菜的试验,1年半中能使发菜增长3~5倍;(2)在田间的试验,6个月能使发菜增长100.5%~176.6%;(3)在室内的试验,3个月中能使发菜增长100%~180%。1992年上半年在中国科学院兰州沙漠研究所实验室内的试验,10天中可使发菜增长5%~10%,最高者可达20%~40%。目前存在的主要问题是,在试验中发菜的增长率尚不够稳定,尤其是在室内进行试验的条件下,对发菜生长发育所需的温度、湿度、光照、通风等因素还不容易掌握好而常会出现发菜增长率时高时低的现象。在发菜人工繁殖试验已取得初步成功的基础上,试验工作正在深入一步进行中。

目前掠夺式采收发菜的现象在短时期内难以制止,在今后5年左右国内发菜资源预计会减少70%以上,10年内有一半以上的发菜产地其发菜将绝迹。如何对发菜资源进行合理开发利用与保护,以及人工繁殖发菜则是今后5~10年中发菜领域的研究热

点;在此期间发菜的人工繁殖试验研究必将取得突破性进展,室内繁殖有由目前3个月左右翻1番达到翻3~5番的可能。

参考文献

- 1 朱浩然,赵英华,钱凯先. 南京大学学报(自然科学版),1982,1;117~124
- 2 王助陵,顾龙云. 植物学报,1984,26(5):484~488
- 3 Scherer S, et al. Oecologia Berlin, 62:418~423
- 4 崔志有. 植物生态与地植物学丛刊,1985,9(3):223~229
- 5 钱凯先,朱浩然,陈树谷. 植物生态学与地植物学学报,1989,13(4):97~105
- 6 钱泽璞,施定基,王发珠. 植物学报,1992,34(3):219~225
- 7 施定基,周国飞,方昭希. 植物学报,1992,34(7):507~514
- 8 刘家琼,丘明新,马迁科. 中国沙漠,1993,4(待刊)

(中国科学院兰州沙漠研究所刘家琼副研究员、丘明新副研究员撰;王助陵审)

龙脑香植物 *gurjun diplerolar paseae* 属双子叶植物

龙脑香科,该科植物是构成东南亚热带雨林的标志性骨干植物,以其单叶大而互生,托叶大而早落,腋生圆锥花序,萼筒分裂,结果时增大成翅状为特点。这一大群植物又以树木高大挺拔,材质优良,广泛应用于建筑业,同时树干内富含树脂和木油,广泛应用于医药和漆工业。因此,龙脑香植物也是湿热地区极重要的经济植物。

从1805年J. F. Gaertn以来,先后开展了大量的龙脑香料植物的系统分类工作。据H. K. Airy Show所修订J. G. Willis的《有花植物与蕨类植物辞典》第8版(1973)记载,龙脑香科约有15属580种,属植物分类学上的中型科。

龙脑香植物属热带分布,主要生长发育在东南亚和非洲的热带地区,从印度尼西亚、马来亚、泰国、越南、缅甸、印度、斯里兰卡等直达非洲,常成连续的混交林分布,仅有少数成纯林发育,其中以赤道两侧的加里曼丹岛分布的属种最多。

龙脑香科植物木材的特性与利用研究 据C. R. Metcalfe, L. Chalk综合报道,该科植物除分布于非洲两个属(Monotes, Maquesia)的种类之外,其它各属植物均为东南亚地区重要的商品用材,其特点是树木高大,材质较好,出材率高,加工性能好,适合于一般的建筑业与工业用材,广泛用于房屋建筑、船舱龙骨、车厢车架、桥柱坑木和室内装修,也是很好的胶合板原料。如市上常见的柳安层板,主要是用娑罗双属各种植物制成的。

对本科植物有用化学成分的研究,据Burkill(1935)记载,在越南产的*Vatica dveri*种树干内所产的树脂,常用来生产丙酮和亚甲醛;而*Dipterocarpus*属某些树干内生产的树脂,可作药用和填塞船舱缝隙。又据R. Hegnauer(1966)在植物化学分类中记载,将本科植物各部分的有用化学成分归纳为香树脂、多酚、单宁和脂肪油等,它们分别产自树干的心材、树皮和种子中。其中,香树脂中的古芸香精油和龙脑香树脂是这一科植物的两种重要产品。特别是龙脑香树脂和挥发油是医药工业制取冰片(即右旋龙脑)的主要原料。另外,还含石竹烯、葑草烯、 $\alpha$ -古芸香烯、龙脑香醇酮、龙脑香二醇酮、 $\beta$ -榄香烯以及一些芳香化合物等。在树脂中,除达玛烷外,还含有熊果烷和齐墩果烷化合物。其中齐墩果乙酯、山楂酸、亚细亚酸等具有止痛、防腐和抑制金黄色葡萄球菌的作用。多酚化合物的种类很多,主要是花色素和柔花酸,香豆素极少出现。另外,在娑罗双属植物木材中还分离到0.5%的岩白菜素。单宁肯在双翅龙脑香、娑罗双、*Vateria*、坡垒属的某些种中可含到21%,而在*Maquesia*属植物中则有很多的缩合单宁存在。各种龙脑香植物种子的种仁中含脂肪油15%~70%,由于不饱和脂肪酸含量很高而成为比较有名的产物;这些从娑罗双属植物中得到了的油称Bernel-Talg;从*Vateria*属植物种子中得到的油称Malabar-Talg;在其脂肪酸中油酸含37%~48%,硬脂酸含40%~44%。

近来有关龙脑香植物药物疗效和有效成分的研究还在深入

的开展中,如 D. P. Richardson (1989) 等人报告 *Dipterocarpus kerrii* 植物的树脂中有很强的杀菌活性,并从中分离到四个倍半萜,其中有两个是新化合物。

中国南部地区地处于东南亚热带的北缘,龙脑香植物比较稀少,而且多是 20 世纪 50 年代结合橡胶宜林地考察时才先后发现 5 属 12 种,其中双翅龙脑香属 3 种、坡垒属 5 种、青梅属 2 种、娑罗双属 1 种、赛娑罗双属 1 种,且仅分布在海南、广西、云南、西藏等省区的南部地带。

由于本科植物种类较多,标本又难于采集,虽然在近 200 年来已有不少分类与利用方面的资料报道,但迄今尚不见专科专著问世。不过已有 P. S. Ashton 等在开展这方面的研究工作,不久的将来可期待问世。中国对龙脑香植物的研究更少,直到 60~70 年代才先后鉴定了名称,其中多数为中国北缘热带条件下发育的新种。正因为中国发掘龙脑香植物较晚,迄今对它的利用与发展研究不多,可以说还处于发掘物种、订正名称、资源保护等初级阶段。至于资源利用与发展才刚起步,如龙脑香植物的种群发展研究、引种驯化研究及育苗造林技术研究等还正在进行之中,有关树脂中有效化学成分研究在我国还是空白,这一系列工作均有待进一步深入。

#### 参考文献

- 1 Metcalfe C R, et al. A natomy of the dicotyledons. 1950, 1~10
- 2 Hegnauer R. Chemotaxonomic der pflanzen. 1966, 34~40
- 3 Cheung H T, et al. Chem Soc. 1968, 9:1047~1051
- 4 Cheung H T, et al. Phytochemistry. 1972, 11:1771~1780
- 5 Willis J C. A dictionary of the flowering plants and ferns. 1973
- 6 成俊卿,等. 中国热带及亚热带木材识别、材性及利用. 北京: 科学出版社, 1980. 413~417
- 7 Ashton P S, Steenis C G J. The Nether-lands. 1982, 9(2) (中国科学院昆明生态研究所刘伦辉译)

### 当归属综合分类 synthetic taxonomy of angelica L.

本属由林奈(Linnaeus)建立于 1753 年,隶属于伞形科前胡族。由于其形态变异较大,历来对属的范围大小有不同的处理和看法,曾先后从本属分出若干个小属,如古当归属、柳叶芹属、山芹属和山芹属。在近代的植物志著作中,仍存在“广义、大属”和“狭义、小属”两种观点。

当归属植物多学科综合分类,是应用近代植物学各分支学科,如形态解剖学、孢粉学、细胞学、遗传学和植物化学等研究手段来探讨种类划分、亲缘关系、属的分合和系统等分类问题的。广义的当归属全世界约 100 种,主要分布于东亚和北美。在东亚的种类中,我国约占一半,近 37 种。因此,开展我国当归属多学科综合分类研究,在一定程度上代表了东亚地区当归属的系统分类研究,并为东亚、北美植物区系的亲缘关系提供更为丰富的例证。同时,为当归属药用植物资源的进一步开发利用提供科学依据。

当归属植物是伞形科中有重要药用价值的大属之一。据袁昌齐等(1988)整理记载,我国近 37 种当归属植物中,约 23 种可供药用。在围绕药源的开发利用方面,开展了从原植物本草考证、分类鉴定、有效成分分离提取、药理到栽培技术、病虫害防治、采收加工等一系列研究工作。在本草考证方面,黄胜白、陈重明等(1988)考证了中药当归的原植物为当归。宋万志等(1965)考证了白芷的原植物为白芷。在有效成分分离提取上,中国 23 种当归药用植物中,有 17 种进行了分析研究。以当归为例,根含挥发油,主要为单萜和倍半萜,特殊香气成分为亚丁基苯酞(约占 11.3%),另含藁本内酯(约 47%)、苯戊酮羧酸、阿魏酸、烟酸、丁二酸、棕榈酸、当归芳酮、尿嘧啶、香荆芥酚蔗糖(约 40%)以及 13 种氨基酸等药用成分或营养成分。药理上,不同提取物对人体子宫分别有兴奋或抑制作用,对心血管系统有抗心律失常、扩张血管和抑制血小板聚集作用,其他尚有保肝、镇痛、镇静和抗菌消

炎等作用。在栽培方面,当归为低温长日照发育类型,宜栽植于海拔 2 200~2 900m 土质肥沃疏松的坡地,其种子在室温下一年即失去发芽力,发芽最适温度约为 20°C。在生产上,早抽薹是影响当归质量的一个重要问题,已着手从改进育苗技术、降低“种子”含糖量、提高含氮量和把种子贮藏温度降至 0°C 以下两个方面进行解决。

当归属多学科综合分类伴随着该属药用植物的深入研究,围绕着近缘小属的分合和种类划分而逐步发展起来。1966 年,尼科诺夫(G. K. Vikonov)等研究了远东地区当归及近缘小属 13 个种果实的香豆素总含量,根据含量高低分为两类:高山芹属植物为含量高的第 1 类,柳叶芹属植物和山芹属植物为含量低的第 2 类,当归属植物则跨两类。1968 年,诺兹等(E. G. Zog)研究了当归及近缘小属 18 个种香豆素成分及含量,并结合形态特征把当归属 3 个种归入山芹属,2 个种归入高山芹属。1986 年,哈博等(J. B. Harborne)报道,中国东北地区山芹属植物在叶和果实中存在丰富的香豆素成分,而当归属植物在这些部位的香豆素却较为贫乏,他又结合山芹属植物果实结构和花粉形态的特殊性,支持将山芹属独立的观点。显然,这个研究中关于山芹属植物果实香豆素含量的高低与尼科诺夫等的研究不完全符合,可能因各自依据的种类和研究手段的差异所造成。1969 年,皮麦洛夫(M. G. Pimenov)根据果实形态等 26 个性状在属内的分布,用数学分类和原始的分支分类两种方法对比研究,把前苏联广义的当归属分为 3 个亚属 9 个组 13 个亚组。1970 年,又根据 16 个种的叶柄解剖,探讨了叶柄解剖的类型、演化关系和系统学价值。1977 年,古特雷兹·布斯迪罗(M. Gutierrez-Bustillo)根据当归属 6 种、古当归属 3 种的果实解剖,比较了两个属植物背棱和侧棱的形态、油管数目、位置和形状、维管束数目、中果皮木质化程度等特征,支持古当归属独立的观点。1981 年,迪托马索(J. M. Ditomaso)在系统比较美加州北部当归属 89 个居群外部形态、幼苗和叶柄解剖等性状形态变异的基础上,结合地理分布把 89 个居群划分为 5 个种,作出了较为合理的分类处理。1984 年,秦慧贞等观察了我国当归属(广义)34 种的果实解剖,也支持近缘小属的独立并认为当归属植物具有比较原始的解剖学特征,其他小属植物可能分别与当归属的某些种类有共同的祖先。1987 年,陈晓亚等根据紫花前胡和朝鲜当归在一般形态、叶柄解剖、气孔类型和根部香豆素成分等方面的相似性,支持紫花前胡从前胡属 *Peucedanum* 分出,归属于当归属并成立紫花前胡组的分类观点。1990 年,王年鹤综合本属植物所含香豆素的分布类型及合成途径,把当归属分为 3 个类型:Ⅰ类只含较高进化类型的线型呋喃香豆素;Ⅱ类含演化高的线型呋喃香豆素和演化较低的角型呋喃香豆素;Ⅲ类含演化高的线型呋喃香豆素和角型呋喃香豆素。这对当归属下组的划分有一定意义。

对当归属植物的细胞学研究也是多学科综合分类的有力工具之一,发展较快。到 1990 年为止,全世界已报道了约 78 种当归属植物的染色体数目,绝大部分种类为  $n=11$  的 2 倍体植物。1974~1977 年,秦野一彦等(K. Hatano)先后报道了日本 13 种当归的核型,并据核型相似性程度分为 6 个类型,发现狭叶当归(*A. anomala*)为异源多倍体复合体;深入研究了东当归(*A. acutiloba*)种群复合体的核型和杂交亲和性,从而推测某些变种间可能的演化关系,并观察了不同杂交组合  $F_1$  的可孕性及花粉母细胞减数分裂染色体行为,提出染色体畸变可能是东当归种内分化的重要因素之一。1975~1978 年,荒野久男等(H. Amano)报道了日本 12 种当归和 2 种山芹的核型,指出紫花前胡和毛当归(*A. pubescens*)在核型上的相似性。山芹(*O. sieboldii*)的核型极不对称,标志着较高的演化水平。1981~1991 年,潘泽惠等先后报道了国产当归属 16 种的染色体数目和 13 个种的染色体核型,并首次报道了  $n=9$  这个基数。根据核型的不对称性程度和外部形态,分析了各种类的演化水平,结合四川当归属种类及地理分布,提出四川地区可能是该属植物的原始中心和演化中心之一。

上述各项研究对探讨当归属的植物系统分类和演化仅在各

分支领域内提供有价值的资料,还欠系统和完整,尚需各分支学科进一步配合,更广泛、更深入地开展各种类的综合研究,特别是东亚—北美和中国—日本共有种的综合研究,并逐步深入到居群变异和演化途径上。在研究手段方面,除常规的化学成分和核型分析外,需注意蛋白质、同工酶分析和染色体分带甚至分子生物学等各项新技术的应用,使当归属植物多学科综合分类这个较为活跃的领域在对各分支学科的不断综合中迅速发展。

#### 参考文献

- 1 Pimenov M G. Prir Otd Biol. 1970, 75(3): 66~76
- 2 Arano H. et al. La Kromosomo, 1979, 2(15-16): 417~426
- 3 袁昌齐,等. 南京中山植物园研究论文集, 1983, 1~17
- 4 秦慧贞,等. 南京中山植物园研究论文集, 1984~1985, 6~12
- 5 Harbone J B, et al. Biochemical Systematics and Ecology, 1986, 14(1): 81~83
- 6 潘泽惠,等. 植物分类学报, 1991, 29(5): 431~438

(江苏省植物研究所潘泽惠研究员撰;  
余孟兰审)

### 独活属的生物学与化学

独活属(*Heracleum* L.)是伞形科的一个重要类群,早地后汉时期《神农本草经》中已有记载,其后历代本草对其形态特征、功效、药用价值等都有记述,是常用的传统中药,广泛用于治疗肠胃气痛、腹胀、外感、咳嗽及慢性气管炎。

20世纪50年代以前,主要从植物的外部形态及少量的植物解剖学工作,研究该属的分类学,探讨属的范围、种的划分、系统位置及经济意义;60年代以来,进入微结构的观察分析,深入研究独活的生物学与化学,为该属的系统分类、资源的开发利用,积累了丰富的资料。

独活属全世界90余种,非洲东北部和北美山区各工种,其余种类分布于欧亚大陆,自喜马拉雅、斯里兰卡、泰国至远东、西伯利亚、北欧、地中海东岸;其分布的密集中心在高加索,约25种;喜马拉雅和中国西南部的横断山区,约40种;多数种类分布于海拔5000m,极少数种类出现在海拔260m的低山丘陵;该属植物为多年生草本,生长在阴湿沟道,林绿草地、高山灌丛草甸或阴蔽的碎石坡地上。

独活属为瑞典植物学家C. Linnaeus于1753年建立,当时包括欧洲产的奥地利独活*H. austriacum*,西伯利亚独活*H. sibiricum*,高山独活*H. alpinum*,和欧洲独活*H. spondylium* 4种。其后200多年来,各国植物学家做了大量工作,主要有C. P. Ledebour(1827)记载了独活植物约70余种;C. B. Clarke(1879)曾记载了印度北部13种,斯里兰卡8种;L. Diels(1901—1912)、H. de Boissieu(1903)、H. Wolff(1930)等,相继发表了该属的一些新种;I. P. Mandenova(1950—1951)记载了高加索及苏联产的31种独活;P. H. Davis(1972)记载了土耳其产的14种独活;E. Nasir(1972)记载了巴基斯坦产的6种独活;W. A. Cannon(1979)记载了尼泊尔有9种;单入骅、王铁僧(1992)记载了中国独活属26种,上述工作为独活属的深入研究奠定了基础。

独活属自建立以来,由于各国学者对属的范围存在不同认识,种数不断增加,至1975年该属种的名称已达190余个,但多数学者认定,独活属的伞形花序外萼花具辐射瓣,果实内的油管不达果体基部,这是区别于伞形科其它属的主要特征,因此独活属实际上仅90余种。I. P. Mandenova(1951)根据花的颜色、果实中油管的形状、与果体长度的比例、叶片分裂形式及毛被等,将产于苏联的独活属植物分为5个组7个系;单入骅、王铁僧(1992)将中国的独活属植物分为少管组 *Sect. Wendia* (*Hoffm*) *Manden.*, 独活组 *Sect. Heracleum*, 长毛组 *Sect. Villosa Manden.* 和多裂叶组 *Sect. Millefolia* T. S. Wanget Shan 4组。

近半个世纪以来,结合解剖学、细胞学、孢粉学和化学,对独

活属进行广泛深入研究。独活属的解剖学工作,首推G. P. Majumdar(1939—1947),对欧洲独活的导管壁次生加厚、导管多穿孔板的发生、厚角组织细胞的微细结构、茎叶的组建与光的关系等进行了研究。余孟兰等(1966)报道了永宁独活*H. yungningense* Hand. —Mazz. 等4个种根的解剖结构。I. F. Satsyperova等(1978)研究了苏联独活的叶柄解剖结构指出:独活属叶柄维管束在横切面上有O—型和V—型两种排列形式,并认为V—型较O—型进化。何兴金、溥发鼎(1991)观察了平截独活*H. vicinum* Boissieu 等115种及1变种的叶柄解剖结构,绝大多数的叶柄维管束为O—型,仅裂叶独活*H. millefolium* Diels 及其变种,长裂叶独活*H. millefolium* var. *longilobum* Norman 为U—型排列。

M. Th. Cerceae—Larrival(1971—1977)对绵毛独活*H. lanatum* Michx 等6种的花粉形态进行了研究;O. Tavoda(1982)观察了欧洲独活的花粉形态;席以珍等(1983)对短毛独活*H. moellendoffii* Hance 等3种的花粉形态作了观察;王萍莉、何兴金等(1991)对城口独活*H. fargesii* Boissieu 等14种的花粉形态作了光镜和扫描电镜观察,以上研究表明,独活属的花粉形态,主要分为矩型或近矩型及赤道收缩两种类型,是伞形科中较进化的类群之一。

R. I. Gagnidze(1975)、L. Constance等(1976, 1982);潘泽惠等(1981, 1985)研究了独活属的染色体数目,绝大多数种类 $2n=22$ ,为一倍体,但也出现四倍体和非整倍四倍体,如,P. Subramanian(1986)报道的印度南部产的单叶独活*H. hookerianum* Wight. et Arn. 等8个种的染色体数目为 $2n=14, 40, 44, 46$ ,其核型分析结果,均为不对称核型;秦慧贞等(1989)观察了产于云南的思茅独活*H. heenryi* H. Wolff, 染色体数目为 $2n=44$ ;何兴金、溥发鼎(1991)研究了渐尖叶独活*H. franchettii* Hiroe 等9种及1变种的染色体数目及核型, $2n=22$ ,其中长裂叶独活90% $2n=22$ ,仅个别植株 $2n=24$ ;这些种的核型为对称和稍不对称型。从近年对独活属细胞学的研究中看出,由北向南染色体多倍化和核型不对称性有加强的趋势。

20世纪50年代有关独活属化学成分的研究尚少,M. Fujita等(1954)研究绵毛独活*H. lanatum* Michx 根的化学成分;70年代以来,无论研究范围和深度都有很大进展,对该属一些种的根、叶、果实化学成分进行较深入的研究,由于白亮独活*H. candicans* Wall. ex DC. 的根中,呋喃香豆素(Furanocoumarins)含量高达5%—7%,从而引起人们重视,M. Bandopadhyay等(1970)先后分离出17个呋喃香豆素即:独活素(Heraclenin)、独活脑(Heraclenol)、8—牧牛儿补骨脂素(8—geranoxypsoralen)、花椒毒素(Xanthotoxin)、花椒毒酚(Xanthotoxol)、补骨脂毒素(Psoralen)、佛手柑内酯(Bergapten)、特—O—葡萄糖甙—独活醇(Tert—O—B—gincosyl—heraclenol)、特—O—甲基独活醇(Tert—O—methyl—heraclenol)、欧芹乙素(Imperatorin)、白亮独活素(Candicanin)、比克白芷素(Hyakangelicin)、别欧前胡素(Allouperatorin)、栓果芹酮(Isoheraclenin)、牛防风素(Sphondin)、异补骨脂素(Isoposoralen)及简单香豆素瑞香素(Daphnetin)。周爱玲等(1983)从白亮独活根中首次分离出前胡武元(Marmesin)。O. Molho等(1971)从斯里兰卡独活*H. ceylanicum* Gardn 等18个种的根、叶和果实中分离出呋喃香豆素化合物16个,多数与白亮独活根中所含的成分相同,其不同的成分有:甲氧基欧芹酚(Osthol)、水芹蝶呤(Phellopterin)、茵芹素(Pimpinellin)异茵芹素(Isopimpinellin)、异佛手柑内酯(Isobergapten)、当归素(angelicin)。孙汉董等(1978, 1982)报道了中国特有的白云花*H. rapula* Franchet、糙独活*H. scabridum* Franchet 和思茅独活根的化学成分,并从思茅独活根中分离出与上述不同的成分,长前胡丙素(Turgeniifolin C)、r—菠甾醇(r—spinasterol)。张涵庆等(1986)从糙独活果实中分离出异茵芹素和比克白芷素。独活属

不同的种、或同种的根、叶、果实之间,它匀的化学成分都有差异。

该属植物多分而于高海拔地区,不易获得标本和实验材料,有必要继续收集足够的材料。该属细胞学的研究,特别是核型分析工作较少,不到20种,但从现有的资料已能看出,其对探讨该属的细胞地理,具有重要的学术价值。该属化学成分仅接近1/3的种作过分析,该属约13种供药用,其有效成分与种间关系及地区差异,还待研究。独活属肯有丰富的种质资源,对该属生物与化学的进一步研究,将更充分合理地开发利用及有效地保护独活属资源。

(中国科学院成都生物研究所傅发鼎研究员撰)

**杜鹃花属植物** plants of the genus *rhododendron* 杜鹃花是世界上的著名木本花卉,有较高的观赏价值。据报道,近又发现有部分种类可供药用、食用和提取芳香油等化工原料。在植物的系统演化位置上,它属于被子植物门双子叶植物纲的离瓣花亚纲至合瓣花亚纲的关键地位,对于它的全面研究在解决合瓣花亚纲植物的起源与进化,发掘植物资源的多种经济用途,都有重要的意义,而且本属植物种类繁多,分布比较集中。

中国古代即对杜鹃花有研究。汉朝出版的《神农本草》中有羊躑躅为有毒的下品药物,羊食其叶则躑躅而死的记载。而用现代科学方法对于杜鹃花的研究,仍要以1753年瑞典植物学家林奈(Carl Linnaeus)在《植物志种》一书中首先记载的5种杜鹃花为起点,次年(1754年)他又发表了《植物志属》,建立了杜鹃花属和落叶杜鹃花属。以后,在1796年沙里斯贝(R. A. Salisbury)将此两属合并,当时的工作主要是研究欧洲的、北美洲的及亚洲温带地区的植物。1926年,布鲁梅(C. L. Blume)又根据热带、亚热带地区的种类发表了两个新属,其中越橘杜鹃属植物产于爪哇,常绿杜鹃属植物产于日本等地。1834年,季东(G. Don)再次给予合并,而沿用 *Rhododendron* 杜鹃花为属名至今。

20世纪初叶,英国福斯特(G. Forrest)、亨利(A. Henry)、肯多瓦尔德(Kingdon-Ward)、美国洛克(F. Rock)、威尔逊(E. H. Wilson)在中国西南地区大量采集过杜鹃花,经各国科学家的研究认为有许多新发现。以后再由英国爱丁堡皇家植物园的塔格(H. F. Tagg)对于常绿种类做了系统研究,英皇家植物园的哈钦松(J. Hutchinson)对于有鳞种类,美国哈佛大学安诺德树木园的伦德利(A. Rehder)对于落叶种类都分别做了系统研究。1930年,由英国杜鹃花学会组织出版的《杜鹃花种志》一书,汇集前期的工作资料,进行全面的总结,将全属分成43组(Series)约669种,不包括热带地区的种类。从1980年开始至今,英国爱丁堡皇家植物园的库伦(J. Cullen)及张伯林(D. F. Chamberlain),新西兰的菲利普森(M. N. Philipson)和(W. R. Philipson)等先后发表四篇专著性论文,对杜鹃花属又有许多调整,再次总结杜鹃花的研究成果,全世界共有杜鹃花560余种,加上特产于热带地区的种类,现在全世界共计有杜鹃花850余种。

1949年,荷兰斯来梅(H. Sleumer)发表了《杜鹃花属的分类系统》一文,首先提出属的科学分类系统,他将全属分成8个亚属、19个组,在部分组以下再分成亚组。中国采用现代科学方法研究杜鹃花是从1931年胡先甫发表采自广西罗城的小花杜鹃开始的。1935年,方文培经过系统研究,发表《中国的落叶杜鹃》一文,记载了中国的落叶杜鹃32种,分别就亚属及各个种的特征、地理分布、栽培方法等作了全面论述;1939年他又发表《近时采集之中国杜鹃花》,主要是根据蔡仁昌、汪友谦、俞德浚、郑万钧、蔡希陶等前此10多年在全国各地所采之标本,经深入研究之后所著的论文,共记载120余种,其中有金山杜鹃、西南杜鹃、海绵杜鹃、珙通杜鹃、弯尖杜鹃和刚毛杜鹃等几新种;1942年,他刊行《峨眉植物志》时,又记载了峨眉山的杜鹃花20种,多半是该山的特产,并首次配有精美的图版。1989年,方明渊等在完成《中国

植物志》的编著和杜鹃花的研究总结时统计,中国共有杜鹃花属植物550余种,约占全世界种类的65%,是世界上杜鹃花属的最大分布中心;另一个地区是马来西亚诸岛屿,分布着280余种主产于热带的种类。

1978年,塞施(A. Seithe)发表《杜鹃花的毛及分类学》的论著,报告了他对于265种杜鹃花毛被的研究结果,他将毛被成分成分枝毛、不分枝毛、腺毛、鳞片等四大类约43种形态,说明杜鹃花属植物毛的类型极为复杂,他认为杜鹃花毛被的类型是重要的分类特征,并提出各类有关毛的演化趋势。

有关杜鹃花的细胞学研究,至今仍然甚少。1950年,英国皇家园艺学会的贾拉克阿梅(E. K. Janak Ammal)发表了他研究的360种杜鹃花的染色体数目,基本上代表了全属内43组的各种染色体类型,2n=26,四倍体为52,六倍体为78,八倍体为104,十二倍体为156,多倍体多集中在有鳞亚属内,八倍体及十二倍体多集中在有鳞大花组内,四倍体至六倍体多集中在高山杜鹃组内。不同的染色体数目,对于杜鹃花属内各组植物的演化趋势有一定的指示作用。可是后来的评论者认为当时的细胞学研究没有留下凭证标本,并且种的鉴定也不够准确而降低了它的科学价值,从此以后无人从事更进一步的研究工作。

1978年,在美国纽约植物园举行的第2届国际杜鹃花会议上,哈宝尔(B. J. Harborne)、肯(L. B. King)及衣温斯(D. Evens)、斯柏氏曼(W. Spethmann)分别从植物化学的角度,就次生代谢物质、黄酮类化合物、棉子皮亭、香豆素、杜鹃花亭等物质在杜鹃花不同种类中的分布状况进一步说明它对划分杜鹃花各分类群有重要的参考价值,并且认为现在植物化学研究得出的结论与形态研究得出的结果多数也是一致的,这些化合物对形态分类中部分疑难种的划分及各类群间亲缘关系的探索都有一定的指导意义。

解剖学方面的研究尚在继续进行,DNA方面的研究刚刚起步,系统的报道不多。关于植物地理学方面的研究报告,1982年前后有张伯林及昆明植物所的工作者对本属植物的起源及区系形成有过一些探讨。

杜鹃花属是种子植物门中种类繁多的大属之一。自1949年荷兰植物学者斯来梅发表了属的分类系统以来,为本属植物的系统研究奠定了科学的基础;1978年~1982年,英国库伦及张伯林对斯来梅的分类系统做了部分修订;1987年德国斯伯氏曼根据植物化学的研究结果,又对之进行很大的调整,组及系都分得较小,但对斯伯氏曼的调整目前尚未取得共识。现在还有许多学者正用多种学科的手段探索本属植物的亲缘关系,力图建立一个科学的自然分类系统。另外,杜鹃花作为重要的园林植物,在本世纪初已有400余种被引种至英国爱丁堡皇家植物园并育成许多新品种,传播至欧洲、美洲及大洋洲各国。我国是杜鹃花的主要原产地,为全世界所瞩目。杜鹃花属植物,不仅可用美化环境,供人观赏,而且有些种还有重要的使用价值。如产于青海的珙属杜鹃,产于东北的兴安杜鹃、产于广东的紫花杜鹃可供药用,治疗慢性支气管炎;还有烈者杜鹃、耳叶杜鹃及长蕊杜鹃等种类的花芳香,可以提取芳香油;川、滇、藏等区的大白杜鹃可作蔬菜食用。杜鹃花的经济用途还在不断扩大。

#### 参考文献

- 1 Stevenson J B. The Species of *Rhododendron*. 1936
- 2 方文培. 中国植物学杂志, 1935, 2(2): 598~642
- 3 方文培. 中国科学社生物研究所丛刊, 1939, 12: 1~88
- 4 Sleumer H. L. Botanische Jahrbucher and Pflanzenged aphic 1949, 74: 511~552
- 5 Cullen J A. the Royal Botanic Garden, Edinburgh, 1980, 39 (1): 1~207
- 6 Chamberlain D F. the Royal Botanic Garden, Edinburgh, 1982, 39(2): 209~486.

7 Spethmann W. *Plants Systematic and Evolution*, 1987, 157 (1/2), 9~32

(四川大学方明渊教授撰)

**山茶属植物的核型** karyotypes in the genus *Camellia*

山茶属植物原产中国,是典型的华夏植物区系的代表。至1991年已发现343种、1亚种、27变种,按张宏达的分类系统分为4个亚属、20个组。茶组植物是世界上著名的非醇类健康饮料——茶叶的原料植物;油茶组植物是中国南方各省主要的食用油料作物;红山茶组和金花茶组植物是世界上名贵的木本花卉。研究山茶属植物的核型,对山茶属植物的遗传、育种、进化和分类及开发利用等方面的研究都具有重要意义。

○ 山茶属植物染色体研究有较长的历史。T. M. Rinaga 等(1929, 1932)首次报道了山茶属植物的染色体数目  $n=15, 2n=30$ 。早期,由于实验技术的缺陷,难以进行以染色体形态学特点为主要内容的核型分析。广泛地研究山茶属植物的染色体数目是从1952年开始的。E. Fukushima 等(1966)首次对山茶属植物进行核型分析。K. Kondon 等(1979)首次研究山茶属植物的染色体带型,至1977年已对24种山茶属植物(包括221个园艺品种)进行了染色体数目统计和对其中6种进行了核型分析。研究资料表明,山茶属植物是一个以  $x=15$  为基数的多倍体系列,染色体数目的范围是  $2n=30\sim 120$ 。在24种中已知17种(占70.8%)是二倍体种,其它7种是多倍体系列。80年代中国黄少甫等(1981)、黄锦培等(1982)及李光涛(1983)等进行过一些研究,而后许多学者相继进行了研究。李光涛等(1990)对已发表过染色体数目和核型的山茶属植物进行过讨论,至1991年已发表107种山茶属植物的染色体数目和43种植物的核型的研究报告。

在107种植物中二倍体种有72种,占67.29%;多倍体种有35种,占32.71%。有15种多倍体每种具有两个以上的多倍体类型,最多有5个类型,通常每种为2~3个多倍体类型。1种为六倍体和具有六倍体这一等级的种,占35种多倍体种的60%。六倍体可能是山茶属植物多倍体进化的一个适宜等级。山茶属植物的多倍体主要分布在山茶亚属的油茶组和红山茶组。茶组植物已发现49种(包括变种,下同),在已报道染色体数目的22种(包括58个栽培品种)中除小叶型的栽培种茶和滇缅茶(大叶类)发现有多倍体园艺品种,其余20种大叶型的野生种都是二倍体。在茶的多倍体无性系中,其体细胞中非整倍体细胞的概率高达20.29%;同时也存在相当一部分二倍体细胞,其细胞概率高达32.31%。这种镶嵌现象在茶种的无性系中相当普遍。从产量上看,多倍体茶树比二倍体茶树高0.5~2倍,与茶叶品质有关的化学成分的含量三倍体品种明显地高于二倍体品种,抗寒、抗旱性也强于二倍体品种。关于茶种内各变种的演化,李懋学等(1985)认为可能是在二倍体水平上进行的,多倍化并不是其进化的主要趋势。山茶花是世界著名花卉,目前广泛研究和栽培的主要是云南山茶( $2n=90$ )、红山茶( $2n=45, 75$ )、茶梅( $2n=45, 75, 90, 105, 120$ )。油茶组广泛栽培的有油茶等11种,其中多倍体种占40%。在已发现的金花茶组的22种中,已知10种是二倍体种。福岛茶二等(1966)根据山茶属植物中通常四倍体较少,多数是三倍体和六倍体的事实,认为山茶属植物多倍体进化中三倍体显示了重要的作用。但黄少甫的研究结果与福岛茶二等人的结论并不完全一致。庄端林等(1984)则认为许多多倍体种是由杂种起源的。

43种山茶属植物的核型主要是由m型染色体(变异范围10~26条染色体,以二倍体种为例,下同)和sm型染色体(变异范围4~20条染色体)构成,有15种的核型出现st型染色体(变异范围1~4条染色体)。随体染色体数目在0~6条之间,通常为2或4条。核型类型主要是Stebbins(1971)核型分类的2A型,极

少数种为1A或2B型。

金花茶组10个种的核型主要是  $24m(2SAT)+6sm$  和  $20m(2SAT)+10sm$  两类,核型中只有两条随体染色体。红山茶组与金花茶组某些种的核型非常相似,只有随体染色体的数目及位置有差异。另外,红山茶组多数种中观察到4条次缢痕染色体。廖汉忍等(1991)根据核型和植物形态,将小果金花茶变种上升为种,即 *C. microcapa*。黄少甫等(1986)的研究资料表明茶梨油茶应为一个独立的种,而不应作为红皮糖果茶的异名。已研究核型的16种茶组植物中,五室茶系和五柱茶系的种的主要核型为  $22m+8sm$ ;秃房茶系和茶系的种的主要核型为  $20m+10sm$ 。各个种之间只是随体染色体数目和位置略有差异。李光涛等(1990)研究了白毛茶的核型和植株形态后认为白毛茶的变种名应划归普洱茶种之下,即 *C. assamica. var. pubilimba* (Chang) Li. K. Kondo (1979)指出,在滇缅茶和茶中种内有各自的主导核型外,种内尚有一定程度的变异,主要是同源染色体的异型化;随体染色体数目在不同的细胞中有一定变异;并指出随体染色体数目对于茶种来说没有分类学意义。K. Kondo(1975)还指出在茶和红山茶各栽培品系范围广泛的形态变异与其范围广泛的核型变异是相联系的。李光涛等(1990)的研究资料表明,茶组16种植物的核型中约有4对同源染色体存在杂合现象。

山茶属植物染色体带型研究目前只有普洱茶等6个种的研究报告。李斌等(1987)根据带型研究认为,茶树染色体在进化过程中不可能是着丝点处断裂,很可能与染色体的易位和缺失等结构变异有关;并发现茶树染色体的中间带是不稳定的,表现出多态性和杂合性。

核型分析按国内外统一的植物核型分析方法进行。关于制片方法,大多数作者主要是以种子根尖为材料,用传统的压片法,也有以茎尖为材料的去壁低渗法。去壁低渗法有很多优点,但对乔木型的野生山茶属植物来说可重复性不高。由于山茶属植物属于典型的异花授粉植物,用种子作为材料,其结果同源染色体之间出现杂合现象,导致核型的多态性。李光涛等认为宜采用茎尖作为材料,而山茶属植物常野生于原始森林,取到茎尖的时机不多,且困难很大。另外,对去壁低渗法进行改进,以适应各种野生植物的制片,并探索分带技术的工作正在进行。

中国对山茶属植物的研究和利用有着悠久的历史。随着植物染色体技术的发展,国内许多单位相继开展了山茶属植物的染色体研究,山茶属植物核型研究是当前一个活跃的研究领域,其结果将给山茶属植物的起源、演化、分类、育种和遗传变异的研究带来新的突破。该领域在今后20年内的研究热点将是以下两个方面:(1)细胞分类。利用核型资料探讨山茶属植物的系统进化和分类。如杜琪珍等(1990)按化学分类法将茶组植物分为五室茶(相当于  $22m+8sm$  核型的五室茶系和五柱茶系的种)和三室茶(相当于  $20m+10sm$  核型和秃房茶系和茶系的种)两个种,核型研究结果支持上述观点。(2)了解山茶属中作为饮料、油料和观赏三个领域的植物资源的染色体数目和核型,开展单倍体和多倍体育种,包括自然多倍体品系的利用和进行种间杂交、属间杂交,培育出多抗、花色艳丽、花期长的多倍体观赏品种和高产优质的饮料、油料新品种。

**参考文献**

- 1 Kondo K. *Biotropica*, 1977, 9(2), 86~94
- 2 Kondo K. *J Breed*, 1979, 29(3): 205~210
- 3 黄少甫,周启仁. *广西林业科技*, 1985, 1: 15~20
- 4 李光涛,梁涛. *广西植物*, 1990, 10(2): 127~138
- 5 李光涛,梁涛. *热带作物学报*, 1991, 12(2): 47~51

(云南省思茅农业学校李光涛、梁涛撰)

**甜味蛋白** *thumatin* 从一种叫 *Thaumatococcus daniellii* Benth 的热带作物的果实的胶质假种皮中分离出来的可食用

的蛋白质,比蔗糖甜10万倍。但移植在西非以外地区的模拟环境中 *T. daniellii* 不能产生正常的含甜味蛋白的果实。

**生物学基础** 甜味蛋白是由一个基因家族编码的,已知最少存在5种蛋白产物:thaumatin I, I, II, b, c。它们的分子质量均约为22ku,其中最主要的是两种,22.209ku的 thaumatin I 和 22.293ku的 thaumatin II。thaumatin I 和 thaumatin II 的区别仅在于5个保守氨基酸的变化。L. Eddns 等(1982)合成并测定 thaumatin I 的 cDNA 序列,甜味蛋白翻译的起始产物是 N 端含有22个氨基酸残基,C端含有6个氨基酸残基的甜味蛋白前体。在加工成熟过程中,这些氨基酸残基可被剪切掉而成为有活性的含207个氨基酸的甜味蛋白。M. Witty(1990)认为在 *T. daniellii* 中这些被剪切掉的多肽含有定位甜味蛋白的信息。甜味蛋白等电点 pH 值为 12,在生理环境中其中一些带电荷的极性氨基酸经化学修饰后进行功能分析,H Vander Wel(1994)认为它是引起甜觉的主要功能基因。Kirm 等(1994)对 thaumatin I 的晶体结构分析表明包含3个结构域。其核心结构域为一夹在两个锁钥结构中的含11个片层的 $\beta$ 折叠片结构。除N端片层和C端片层这两个折叠片互相平行外,其他 $\beta$ 片层均为反平行。在 $\beta$ 折叠片的一边存在两个 $\beta$ 突起。另两个结构域位于 $\beta$ 片层的同一侧。一个结构域一端为环状,一端为 cis 构象脯氨酸残基的 $\beta$ 带状结构,另一个结构域富含二硫键,从 $\beta$ 折叠片层向外展开,它含1个 $\alpha$ 螺旋和3个短的螺旋片段。蛋白质点突变结果分析显示这两个结构域是甜味受体的识别区域。甜味蛋白的这种富含二硫键的稳定结构可使其经高温煮沸1h后仍可复性成天然结构。

当甜味蛋白的浓度稀释到 $10^{-8}$ mol/L的阈值时,再也觉察不到甜味,J. D. igginbotham(1979,1981)研究表明,此时甜味蛋白可以起到选择性地增强其他物质的味觉强度的作用。如它可以使薄荷的感觉浓度阈值下降90%。B. M. Menco 等(1993)用5nm的金颗粒标记纯化的甜味蛋白蛋白质去观察甜味蛋白在猴子舌头上的分布。结果显示,金标记甜味蛋白只结合在味蕾小孔中的一种带电荷性质不明的似海绵状的分泌物中。味蕾中的微纤毛不含金标颗粒。甜味蛋白的味觉受体复合物是包括甜味蛋白结合区域,未知分泌物和味蕾微纤毛的复合结构。

高等双子叶植物中都存在与甜味蛋白类似的蛋白质。P. Frendo 等(1992)报道,非生物环境可以诱使玉米产生一种类似于甜味蛋白的蛋白质,同源性可达50%~60%。D. Robert 等(1994)总结指出,多种植物中发现的甜味蛋白类似蛋白大都与渗透压紧张有关,其功能大致有3种:抗真菌活性, $\alpha$ -淀粉酶活性和蛋白酶活性。

#### 基因工程

1. 在原核系统中的表达。L. Edens 等(1982)分别在半乳糖启动子和色氨酸启动子下游克隆进甜味蛋白 I 型的前体蛋白质的逆转录 cDNA,在大肠杆菌中进行了低水平的表达。每个细胞约500个分子。但是分离出来的基因产物比预计的要大,可能是大肠杆菌不能完全加工甜味蛋白基因的起始转录前体,留下了N端信号肽序列,很可能C端多肽也没被剪切掉。可惜大肠杆菌的表达产物并不具备甜味蛋白所具有的甜味。C. Hingworth 等(1989)将甜味蛋白 I 的 cDNA 克隆在 2-淀粉酶诱导的编码序列下游,在枯草杆菌中表达了 $\alpha$ -淀粉酶-甜味蛋白的融合蛋白,表达产物在培养基中浓度可达1g/L,但也没有甜味。

2. 在真菌系统中的表达。C. Hingworth(1989)在 *S. lividans* 中表达了 $\beta$ -半乳糖苷酶诱导肽-甜味蛋白融合蛋白。Y. T. Hahm 等(1990)成功地在曲霉中利用酵母中的3-磷酸甘油醛脱氢酶启动子表达了分泌性的甜味蛋白。但其产物均无甜味。

为了在酵母中表达出天然性状的甜味蛋白,J. H. Lee 等(1988)根据 thaumatin I 的 cDNA 序列合成了甜味蛋白基因,在合成基因中改用了酵母偏爱密码,并去除了氨基端和羧基端多肽编码序列,在5'端插入了甲硫氨酸密码子。此合成基因被置于3-磷酸甘油酸激酶启动子下游在 *S. cerevisiae* 中表达。表达的重组甜味蛋白不能溶解,可占酵母不溶解蛋白的20%。由于天然甜

味蛋白二硫键数目减少时,其正常二级结构不能形成,会呈不溶性性状,因此推测可能是由于二硫键结构不能正常形成才导致产生不溶的甜味蛋白。有意义的是,此不溶性的重组甜味蛋白在体外经变性,再复性后会产生甜味。J. L. Weickmann 等(1994)实现了甜味蛋白在酵母 *Saccharomyces cerevisiae* 上的高效表达。其产物与天然甜味蛋白仍有很大差距。

3. 在高等植物中的表达。M. Witty(1990)应用毛根转化技术将甜味蛋白基因插入马铃薯基因组中。甜味蛋白 I 先被克隆在植物穿梭载体 pWINT2 中的花椰菜花叶病毒启动子 CaMV35S 下游,然后将此克隆载体与农杆菌 Ti 质粒一起接种在马铃薯愈伤组织中。待毛根组织形成后,可以分离培养出完整植株。此转基因毛根组织具有天然蛋白特有的甜味,表达的甜味蛋白的浓度约为 $3 \times 10^{-6}$ mol/L。并且整个植株都是甜的。

#### 参考文献

- 1 Edens L, et al. Gene, 1982, 18(1): 1~12
- 2 Witty M. Trends in biotechnology, 1990, 8(5): 113~116
- 3 Vander Wel H. Thaumatin 1994, 1994, (1): 115~122
- 4 Kirm S-H, et al. Thaumatin 1994, 1994, (1): 135~149
- 5 吕利群等. 生物化学与生物物理学进展, 1997, (24): 36~38  
(安徽大学张林维撰)

## 动物学

### 脊椎动物起源地 the habitat of the earliest vertebrate

脊椎动物起源于海洋还是淡水,是动物学家长期以来非常感兴趣和争论不休的问题。因为脊椎动物的机体结构(包括具成对特殊感官的头化、高效能的循环系统和排泄系统以及骨骼的存在等特征)能够使其成为大型的和采取主动生活方式的动物,并且也决定包括人类在内的所有脊椎动物的进化模式。这些重要特征在早期脊椎动物的演化中,肯定是伴随着对环境的适应而逐步进化的。因此,要合理地解释这些特征的产生和进化,都与脊椎动物的起源地分不开。

1932年,史密斯(Smith)根据圆口类动物、软骨鱼类和硬骨鱼类肾小管、肾小囊的结构特征推断,脊椎动物可能是起源于淡水。某些古生物学家(Romer 和 Grnve, 1935)也主张脊椎动物起源于淡水。他们认为鲨鱼与海生真骨鱼类对海水环境有根本不同的适应方式(鲨鱼用尿素调节,真骨鱼类为低渗调节),很可能这些鱼类的祖先都生活于淡水,分别独立地进入海水生活,因而产生不同的调节方式,以对抗高盐海水的危害。

但是,多数学者主张脊椎动物起源于海水。因为最早的脊椎动物化石——上寒武纪和下奥陶纪的异甲类的骨片是存积在海洋环境中的(R. H. Dennison, 1956; A. J. Boucot 等, 1983)。从寒武纪到志留纪,这些鱼类化石在北美、欧亚和澳大利亚都有分布,但在较冷的西伯利亚和中国没有分布(McFarland, 1979)。说明这些最早的脊椎动物是在温暖的浅海中生活。根据这些古生物学的资料,有些学者提出来自海产原索动物的早期脊椎动物演化的假说,其中著名的有 Jollie(1982)、Norheutt 和 Gans(1983)及 Mallatt(1985)。他们认为,栖息于海洋环境中的原始脊椎动物可能经历了某种变态,幼体为悬浮取食者,成体为捕食者;这种主动捕食的生活方式不仅导致了头化,而且也促进了有效的循环、呼吸、肌肉质消化管的进化和加强糖酵解的代谢方式的发展。原始脊椎动物生活在沿岸海洋环境中,偶尔暴露于被雨水或从陆地流入的水所冲淡的海水中,导致球状肾的发展。汤姆森(K. S. Thomson, 1977)进一步解释了化石鱼类整列鳞的存在,提出骨骼的起源与电功能接受器有关,认为这种整列鳞骨板内的孔道系统内有感受细胞,可以接受电信号,而孔道之外的地方可以阻止电信号传导。

海水起源说也有一些难以解释的问题。原始脊椎动物的捕食生活方式对于说明在海水环境中的头化是必不可少的,但它得



不到现存原索动物生活方式的证据;也不能被早期甲冑鱼类的躯体结构所支持。所谓球状肾是通过偶尔暴露在沿岸稀释的海水环境中而进化的说法,也不能解释为什么生活在同样环境中的大多数无脊椎动物都没有发现相应的结构。对于严格海水生活的盲鳗的球状肾、鳃、肾离子吸收泵的存在也不能作出合理的解释。

由于所发现的异甲类化石仅限于成体,而且是零散分布的,化石沉积地缺乏与典型的海洋区系的联系(L. B. Hatead, 1973, 1985),说明最早的异甲类可能不是生活于一般的海洋环境。有人认为最早的脊椎动物有一个远海稚鱼期,但不能排除早期发育和未成熟阶段的淡水栖息地。鉴于上述情况,格里菲斯(Griffith, 1987)提出溯河洄游假说。脊椎动物的海生原索动物祖先——一个似头索类的滤食者,在寒武纪由海洋进入河口以获得丰富的浮游生物(Russell-Hunter, 1970)。它们经常地、有规律地暴露在河口固有的盐度非常低的环境中,导致球状肾的进化、肾的钠保留和鳃离子吸收泵的发育。这种脊椎动物祖先(原索动物)的繁殖开始发生在海洋,以后是河口,最后进入淡水河流,使易受伤的滤食性幼虫避开竞争者、捕食者和不稳定的河口环境,在淡水河流限制性很强的区域内繁殖,更加强了成体发现配偶的可能性。但淡水河流的生产力是很低的,并且寒武纪还未出现显花植物,不能提供有机碎屑,河流可能呈荒芜状态,不利于幼体以后的生长。因此,这种寒武纪的原始脊椎动物采取洄游的生活方式,繁殖和幼体发育在淡水,成体取食在食物丰富的河口和沿岸区。这与现生七鳃鳗、鲟鱼和某些真骨鱼类的生活方式相一致。

溯河生活史对脊椎动物祖先骨骼的起源提供了非常满意的解释。由于淡水河流的低生产力以及在某些情况下食性的变化与变态有关,大多数现生溯河鱼类在产卵洄游过程中很少取食。为对胚胎的早期发育提供矿物质和其它营养物质,淡水鱼类和洄游鱼类的卵积存有丰富的钙和磷蛋白,其中磷蛋白来源于雌体肝脏内合成的卵黄蛋白,这种蛋白质的合成和血钙水平的提高都受雌激素的控制(P. K. T. Pang, 1973)。应该指出,这种雌激素诱导的卵黄发生在盲鳗内是唯一得到证明的内分泌功能(J. Y—L. Yu等, 1981)。鱼类的骨骼可作为矿物质贮存库,它是促性腺激素和雌激素的靶组织,能为卵的发生和发育提供必需的钙和磷。这对原始溯河脊椎动物是特别重要的,因为它们溯河产卵中不取食。

溯河生活方式对早期脊椎动物的头化提供了合理的功能上的解释。溯河鱼类的稚鱼和幼鱼为了在变态前停留在出生地水域,就需要有关水流方向和定位的感觉信息,成体在海洋和溯河产卵洄游期间也需要定位,确定产卵场的方向,感知水流方向和速度的变化(R. J. F. Smith, 1985),所以发展出侧线器官感觉水流的变化,由侧线衍生出几个半规管可感觉几个平面的速度变化。异甲类动物发育不完善的眼虽然不能作为有效的获取食物的感官,但可以作为通过陆地标志定向的装置。嗅觉在定向中也起着核心作用。因此,溯河的生活方式很容易解释脊椎动物特殊的嗅觉、视觉、侧线的水流感觉和半规管的加速度感觉在原始脊椎动物中的演化,以及为什么这些感官和脑的调整作用位于动物的前部或上端。

由溯河原始脊椎动物很容易衍生出不同的渗透调节类型。可以认为严格海水生活的盲鳗是丧失淡水生活的幼体阶段,而由大的能够提供丰富营养的卵发育而成。盲鳗的等离子渗透调节是由低渗透调节对策次生性的衍生而来。一个物种生活在海洋中的时间越长,血液电解质水平就越高(Griffith, 1981)。盲鳗始终处在高盐环境而不暴露于淡水或盐度低的水域中,在海洋环境中具有最长的演化史,因而在所有脊椎动物中具有最高的电解质水平。盲鳗肾脏和鳃部离子运输泵的存在,是溯河生活史的遗迹。海生脊椎动物低离子浓度的最合理的解释是进化过程中某一阶段淡水生活的结果。

脊椎动物在溯河过程中,要经过较持久的游泳,有时是在激流中逆流而上,因此作为对代谢需求和运动方式的适应,它们发展有效的循环、呼吸和消化系统以及加强糖酵解的能力。另外,

发育、变态、生长、繁殖渗透调节的内分泌控制,也可以通过这种溯河洄游的生活方式得到合理的解释。

由于脊椎动物祖先是广盐性的,因而在志留纪末和泥盆纪初存在的脊椎动物各系统类群,如臂甲类、异甲类、盾皮鱼类、棘鱼类、腔棘鱼类和辐鳍鱼类都能同时进入淡水;如果脊椎动物起源于海水,这种现象就很难解释。纵观无脊椎动物,就没有这样大量的侵入。

溯河洄游学说是在淡水起源学说的基础上增加一个溯河洄游的成分,原始脊椎动物的生活史是介于严格的海洋和淡水栖息地之间的类型,这不仅与古生物学的资料相一致,而且能满意地解释脊椎动物一些重要特征的起源。因此,这是关于脊椎动物起源的一个有生命力的假说。

#### 参考文献

- 1 Smith H W, Q Rev Biol. 1932, 7: 1~26
  - 2 Romer A S and Grove B H. Am Midl Nat. 1935, 16: 805~856
  - 3 McFarland W N, et. al. Vertebrate life. New York: Macmillan Publishing Co. Inc., 1979. 60~70
  - 4 Jolliffe M. 1982. of the chordates, Zool J Linn Soc. 1982, 75: 167~188
  - 5 Northcutt R G, Gans C Q. Rev Biol. 1983, 58: 1~28
  - 6 Mallatt J. Evolutionary Bioloy of primitive fishes (Edited by Foreman, R. E. et al.) New York: Plenum Press, 1985. 59~68
  - 7 Griffith R W. Comp Biochem physiol. 1987, 87A: 523~531
- (山东大学生物系王金星副教授撰;赵小凡审)

**孤雌生殖** parthenogenesis 孤雌生殖和雌核发育都是指卵子在不接受雄性遗传物质的情况下所进行的胚胎发育。前者指卵子不需要精子刺激就自发启动的发育,而后者则指卵子必须经精子刺激而启动的发育。研究动物孤雌生殖现象,对于了解精子在受精和胚胎发育中的作用、染色体倍数、纯合与杂合及非整倍体对胚胎发育的影响等发育生物学问题以及生产纯系动物都具有重要意义。

许多有性生殖动物的卵子可不经精子的受精作用而自发激活,开始胚胎发育,产生新的个体。这一现象叫天然孤雌生殖。自1762年Bonnet发现蚜虫的天然孤雌生殖现象以来,许多学者陆续报道了轮虫、线虫、蠕虫、环节动物和昆虫等无脊椎动物,以及少数蜥蜴和鸟类的天然孤雌生殖(Saunders, 1982)。有些动物由于群体中无雌性个体或雄性个体很少,故以孤雌生殖作为一种必需的生殖方式。这种孤雌生殖称为必需性孤雌生殖,大多数孤雌生殖动物都属此类,还有一些动物依环境不同来决定是否进行孤雌生殖,这种孤雌生殖称兼性孤雌生殖。蚜虫在夏天的适宜环境下营孤雌生殖,但到冬天又开始以受精卵的方式进行繁殖。在蜜蜂,蜂王在蜂巢中所产的未受精卵注定发育为单倍体的雄蜂,而所产的受精卵则发育为工蜂(Saunders, 1982)。

根据卵母细胞减数分裂的情况可以把孤雌生殖分为几类。在果蝇,第2次减数分裂所产生的极体充当精子而使卵子“受精”后发育。在另一种昆虫 *Moraba Virgo* 和蜥蜴,卵母细胞在减数分裂前染色体加倍,经过两次减数分裂后产生正常双倍体的孤雌生殖卵。有一种蝗虫 (*Pycnoscelus surinamensis*) 的生殖细胞根本不进行减数分裂,而是经过两次有丝分裂形成卵子。上述动物孤雌生殖产生的个体均为双倍体的雌体(Gilbert, 1985)。还有些动物营单倍体孤雌生殖。在这些动物,孤雌生殖不仅作为生殖的手段,而且也是决定性别的方法。在膜翅目动物(蜜蜂、胡蜂、蚂蚁),未受精的单倍体卵子孤雌发育为雄的,而受精的双倍体卵则发育为雌的。单倍体雄性个体的生殖细胞不发生第1次减数分裂,第2次减数分裂后产生两个精子(Gilbert, 1985)。至今仍保留孤雌生殖方式的最高等动物是火鸡,有些品种火鸡可经孤雌生殖产生出雌性个体(Harada, 1981)。尽管这些孤雌生殖的火鸡具

有双倍体的染色体,但新近研究资料证明,其发育开始于单倍体细胞,后来由于DNA复制不伴有胞质分裂而产生双倍体细胞(Markert, 1981)。

哺乳动物卵子也有自发孤雌活化现象,但并不能发育到产仔。LT/SV品系小鼠的卵子排出后不经任何刺激便可自发发育,有些可达桑椹期或囊胚期。若把这些孤雌生殖胚胎置入假孕雌体内,便可以着床,但大都在妊娠期第6天或第7天停止发育(野口基子, 1986)。Austin(1956)和Barros(1972)发现,排卵后17~22h仓鼠卵母细胞约有80%发生自发活化,出现两个原核或分裂为2—细胞。Chang(1950)在未交配的雪貂输卵管和子宫中获得2~6细胞期的自发孤雌生殖胚胎,并证明其染色体为单倍体的。谭景和(1985)发现,排出30h的猪卵个别的发生自发孤雌活化现象,出现原核,细胞质开始分裂。此外,这种孤雌活化现象在大鼠(Austin等, 1954)、马(Van Nierkerk等, 1966)、类人猿(Saglik, 1938)和人类卵子中都有发生的报道。

有些动物卵子虽然不能自发进行孤雌生殖,但经人为刺激便可使其活化,发育到一定时期甚至产生个体。这种现象叫人工孤雌生殖。人工孤雌生殖最早是由Hertwig等(1896)在海胆进行的。他们用马钱子碱处理成熟海胆卵子而启动其发育。以后其他学者陆续报道低渗海水或高渗海水、各种盐、弱有机酸、脂肪溶剂(如甲苯、乙醚等)、尿素、蔗糖、机械震荡、电刺激、高温或低温均可引起海胆卵的孤雌发育(杨增明等, 1989)。朱洗等(1961)用带血球的玻璃针刺蛙的或蟾蜍的卵子,结果都能发育,少数的可发育成幼蛙或成蛙。他们还成功地将人工孤雌生殖的蟾蜍经冬眠、催青而产卵并正常受精发育出没有外祖父的蟾蜍。此外,用蛙的成体或胚胎组织、鸡和小鼠的胚胎组织以及人的睾丸组织提取物可诱导蛙卵孤雌发育到囊胚期。

机械刺激、温度变化和电流等物理刺激以及酶处理、渗透压变化、麻醉剂、蛋白合成抑制剂等化学刺激均可激活哺乳动物的卵子进行孤雌发育。最早进行哺乳动物人工孤雌生殖研究的是Pincus等人。他们(1939)把兔卵在体外于10℃下存放24h再移入假孕兔输卵管时,有相当数量的卵子发育到囊胚期。Pincus等(1940)还把兔输卵管拿出体外在冷水中冷却使卵子受到冷处理而孤雌发育,出生活兔。但是,Chang(1954)重复他们的实验时,既未发现胚胎着床,也未观察到发育超过囊胚期的孤雌发育胚胎。Graham(1970)和Kaufman(1975)用透明质酸酶和链霉蛋白酶处理小鼠卵子引起孤雌活化,有的发育到囊胚期。1970年, Tarkowski等用电流刺激小鼠输卵管腹膜部,诱导卵子孤雌发育超过着床期,最多可达8个体节。1977年, Uehara等用细玻璃针刺刺激仓鼠卵质膜,使80%的卵子发生孤雌活化,发生皮质反应,排除第2极体并形成一个原核。Kaufman(1982)和谭景和(1988)用含低浓度酒精的培养液体外处理小鼠卵母细胞获得很高(90%~97%)的活化率。酒精活化后用松胞素诱导产生的小鼠双倍体孤雌胚可发育到肢芽期(Kaufman, 1983)。1991年, O'Neill等尝试用氯化铯诱导小鼠卵孤雌活化,并发现该方法优于其它现存的诱导卵孤雌活化的方法。适应胚胎细胞核移植技术的需要,人们进行各种动物卵母细胞体外电活化的研究,其中如Collas等对小鼠卵母细胞、Onodera等对兔卵母细胞、Ware等对牛体外成熟卵母细胞、Pugh等对猪体外成熟卵母细胞进行的研究,分别找出不同动物卵母细胞电活化的最佳条件,如电脉冲次数、强度、持续时间以及卵龄等。其中,小鼠、兔和绵羊卵电活化的孤雌生殖胚都已发育到囊胚期;兔电活化孤雌胚在移植到受体后可着床发育到妊娠10~11d,但未能出生个体(Ozil, 1990)。

上述引起卵子孤雌生殖的因素都不是特异性的。因此,卵子之所以能被激活而进行孤雌发育,其决定因素可能在卵子本身,刺激因素仅仅是起到模仿精子的刺激、启动卵子反应的作用。例如,当用玻璃针刺刺激蛙卵时,可引起皮质反应的发生。用A23187处理可激活大多数海胆卵子发生类似于受精的变化,卵黄膜举起,出现耗氧峰及DNA和蛋白质合成的增加(Steinhardt等, 1974)。Brandriff等(1978)用这种方法获得双倍体孤雌发育的海

胆。用针刺仓鼠卵子(Uehara等, 1977)和用酒精刺激小鼠卵子(Gulyas等, 1985)均可使其发生皮质反应。用苯甲醇(Cuthbertson等, 1981)或电刺激(Rickords等, 1992)活化小鼠卵子都出现类似于受精时出现的细胞内钙离子浓度升高。

哺乳动物孤雌发育胚胎不能发育到期的原因可能有:(1)单亲纯合子使隐性致死基因得以表达;(2)缺乏精子来的遗传物质(杨增明等, 1989)。Surani等(1984)把一品系小鼠受精卵的雌原核或雄原核移植到另一品系小鼠单倍体孤雌活化卵中发现,只有移植雄原核时胚胎才能发育到后期;移入雌原核的卵发育到妊娠中期(最多25个体节)夭折,胚外组织很少。1984年, Mcgrath等把小鼠受精卵的雄原核移植到去雌原核的受精卵中,所组成的具有两个雄原核的胚胎多数在卵裂早期停止发育,最多发育到6~8个体节期,但胚胎具有发达的滋养层组织。上述实验结果说明:(1)非单亲纯合的双雌核胚胎或双雄核胚胎都不能发育到后期;(2)雌原核对胚胎早期发育至关重要,雄原核为胚外组织发育所必需。目前认为,雌雄原核的这种差异是由于其在父母体内配子发生过程中发生印迹作用,使功能有所分工所致。为营救孤雌生殖胚胎,培育育种上特别珍贵的单亲纯合动物, Surani(1977)和Markert(1986)采用把孤雌胚与正常受精胚胎嵌合的方法得到含有单亲纯合生殖细胞的小鼠。

近年来对动物孤雌生殖的研究已有很大进展,但仍有很多问题亟待解决。除了进一步完善经嵌合体营救孤雌胚的方法外, Yanagimachi(1990)还预计,将来有可能设法阻止配子核印迹作用的发生而培育出孤雌生殖哺乳动物。

#### 参考文献

- 1 Kaufman M H. Cambridge University Press, 1983
- 2 谭景和. 畜牧兽医学报, 1985, 16: 1~6
- 3 Surani M A H, et al. Biol Reprod., 1987, 36: 1~6
- 4 杨增明, 等. 生物学杂志, 1989, 22: 54~58
- 5 Yanagimachi, R. In: Bavistetr, B D, et al. (eds.) "Fertilization in Mammals" Serno Symposia USA, Norwell, MA, 1990. 401~411
- 6 Ozil J P. Development, 1990, 109: 117~127
- 7 Rickords L F, et al. Reprod Devel., 1992, 31: 152~159

(东北农学院谭景和教授、中国科学院动物研究所杨增明博士撰)

### 动物多倍体的遗传和进化 genetics and evolution of polyploid animal

动物中的多倍体多发现于低等动物。Salemaa发现甲壳纲中冰川残留种 *Pontoporeia affinis* 是两性生殖的多倍体,染色体数目  $2n=52$ ,核型中有96个染色体臂,而它的二倍体祖先 *P. femorata* 染色体数为28,染色体臂数为50。鳃足亚纲的 *Artemia salina*, 陆生动物 *Trichoniscus spp* 则是无性生殖的多倍体。在涡虫纲、寡毛纲中的多倍体则常常是两性同体的个体。昆虫中已报道的多倍体有近百种,合都是以孤雌生殖方式繁殖的。有的多倍体有假受精现象,即需要精子来激发卵的发育,但精子不给发育的卵子任何遗传物质。在脊椎动物中,1945年, Svardson首先发现鲑科中存在多倍体类型。根据染色体臂数,有无多价体,核DNA含量和通过电泳区分的复等位基因位点,认为该科所有种,包括鲑鱼和茴鱼等都是四倍体。同鲑鱼一样,整个胭脂科的鱼也都是四倍体。在鲤科中,金鱼是明显的四倍体。在鲑科中除发现一些四倍体物种外,还发现裂腹鱼,昆明裂腹鱼和大理裂腹鱼是六倍体。在作为活化石的古鱼类中,也存在着多倍体,如北美洲匙吻白鲟和鲸鲛鲟是四倍体。在两栖爬行类中,多倍体的种和种群的数量在不断增加,几乎所有的多倍体都与二倍体有关。许多种有在形态上非常相似的二倍体“同形种”,但没有象鱼类那样有明显的多倍体科、属。无尾两栖类中,巴西的 *Ceratophrys dorsata* 和阿根廷的 *C. oruafa* 都是八倍体。六倍体的物种有 *Xenopus ruwenaoriensis*。四倍体的物种有非洲的爪蟾、美洲的雨蛙和新疆的绿蟾蜍等。北美的食用蛙是三倍体物

种。有尾两栖类中,多倍体蝶螈主要是三倍体类型,如 *A. trembaysi*, *A. platyneum* 和 *A. texanum* 等。爬行类中,蜥蜴的三倍体较多,如 *Lacerta armenica*, *L. dani*, *Cnemidophorus opifae* 和 *C. velox* 等。到目前为止,鸟兽中尚未发现有多倍体物种。

在动物多倍体的研究中,多价体联会一般被当作同源性的证据。在减数分裂中若出现多价体,推测该多倍体是同源多倍体。南美洲的 *Odontophrynus americanus* 有  $2n=44$  的二倍体和四倍体。观察二者的减数分裂行为,发现雄性二倍体的 *D. americanus* 具有 11 个二价体,而四倍体 *O. americanus* 从一个精母细胞有一个四价体到 11 个四价体不等,大部分精母细胞的四价体都在 6 个以上。这些具有四价体的多倍体被认为是同源多倍体。然而,对于一个同源多倍体来讲,不时发生的突变会改变原来的遗传和染色体结构,可能会丧失同源性,使同源多倍体逐渐二倍体化。二倍体化致使基因组中就遗传物质的染色体数目讲是多倍体,就染色体上特性基因表达水平来讲是二倍体。有人对鲑科虹鳞鱼的异柠檬酸脱氢酶进行了电泳分析,发现在一个位点有 4 个等位基因,  $A, A', A''$  和  $A$ 。这与四价体的存在是一致的,即是同源多倍体。但在褐鳞鱼中,山梨醇脱氢酶又有两个独立的基因位点,表明这个同源四倍体已发生了二倍体化。用 DNA 分子杂交的方法可检出同样基因位点的 2 个基因 1% 的碱基误配,并可用来在种属水平上确定分类单位和发生分化的时间。用限制性内切酶直接研究 DNA 的多样性,也是一种十分优越的方法,很大程度上避免了基因剂量问题,在电泳结果含糊不清的一些研究中,广泛采用这种方法。但限制性图谱的方法也有一定的局限性,大部分酶也只能识别 4~6 个核苷酸长的顺序,在大部分 DNA 中平均几百个核苷酸才有一个这样的顺序,只有碱基的变化正好发生在限制性酶识别的顺序中,才能被检测出来。要作根本的比较, DNA 顺序的测定是唯一的方法。

动物多倍体的起源,一般认为孤雌生殖的多倍体首先经过一个孤雌生殖的二倍体阶段,建立了孤雌生殖的繁殖形式后再发生多倍体化。二倍体的形成概括起来有 3 种方式,二倍性卵的受精、杂种发生和第二极体的保留。三倍体是通向多倍体的中间阶段,它向四倍体发展有可能是成熟分裂受抑制或出现核内有丝分裂,产生二倍性配子,与正常的单倍性配子结合,发展形成四倍体个体,再有可能是三倍体个体产生的二倍性配子相互结合,形成四倍体。如正常孤雌生殖的三倍体雌蜥蜴卵受精后,有时偶尔产生雌性或雄性的四倍体,形成四倍体的物种,然而,有些四倍体更有可能是来自于二倍性的受精卵的加倍。减数分裂或成熟分裂的异常是导致四倍体的主要原因。环境因子,如冷、热刺激或辐射等作用于二倍性受精卵,可使染色体加倍,形成多倍体。许多多倍体动物的起源都与更新世剧烈的冰川作用有关,可见环境因子在多倍体形成中的重要作用。倍性更高的多倍体,可能从四倍体发展而来。

动物多倍体在进化上的意义最主要的是它为动物进化中的重要步骤提供了必要的额外的和没有受约束的基因位点。两栖类比鱼类 DNA 水平显著增加可能就是由多倍性提供的,其他一些重大的进化步骤可能也与 DNA 水平的增加有关。越来越多的多倍体动物,在适应性方面明显胜于二倍体的物种。在蜥蜴类中,孤雌生殖的三倍体蜥蜴已取代和消灭了它们的两性生殖祖先。单性生殖与多倍体有双重关系。它提供了一种新种形成的,可能还没有完全稳定的繁殖机制,同时又为额外出现罕见的多倍化事件提供了充分的机会。鱼类中,一般化类型中的 DNA 含量最高,最特殊化的 DNA 含量最低。在鱼的一些类群中,专化作用和 DNA 继续丢失,使 DNA 可能下降到能容许的最低水平,再低就不能发生额外的适应性。如果没有足够的未承担任务的 DNA 为常常与适应相辐射有联系的各种新种编码,就是发生了一种导致适应上突破的专化作用,进化上也不能利用它。解决这个问题最有效的途径是通过多倍体化。随着各种新技术的应用对动物多倍体研究的影响,从群体、细胞和分子水平的研究中,得到越来越多的数据表明自然发生的动物多倍体,在群体遗传学和物种形成中可能

起着一种有意义而重要的作用。

参考文献

- 1 Rahn I M, A Martinez. Can, J Genet Cytol. 1983, 25: 487~494
- 2 Salenaa H. Hereditas. 1984, 100: 53~60
- 3 Bogary J P, et al. Can J Genet cytol. 1986, 2(8): 605~617
- 4 Bularova N, et al. BOLL ZOOL. 1987, 54(4): 289~292
- 5 Ferrier V, Jaylet A. Chormosorma. 1978, 69: 47~63
- 6 Lewis W H. Polyploidy; Biological relevane. 1980. 277~378  
(新疆师范大学吴敏副教授撰)

**动物红细胞的免疫功能** 动物的红细胞是血液的主要成分,占血液有形成分体积总量的 99.7%。具有数量多、分布广、代谢快。在血管内周流不息等特点。功能上除了具有携氧、运输气体、调节体内酸碱平衡保持机体内环境平衡等功能外。还具有重要的免疫功能。红细胞可通过其膜上的  $C_{3b}$  受体与血液循环中的免疫复合物相结合。促进吞噬细胞的吞噬作用。免疫复合物被吞噬后即被排出体外,以减少其对动物机体的危害。

20 世纪 80 年代初,美国学者塞格(Siegel)等人在研究人和灵长类动物的红细胞生理功能时,发现红细胞可通过其膜上的  $C_{3b}$  受体可把循环系统中的抗原-抗体-补体复合物清除掉。同时也可与癌细胞粘附,被粘附的癌细胞则容易被吞噬细胞捕捉与吞噬。从而防止癌细胞的播散。因此而提出红细胞免疫系统的新概念。这一研究成果立即引起世界各国学者们的关注。随后进行了大量的研究。我国学者郭峰等人于 1982 年对人的红细胞免疫功能进行了初步探讨。张德成、陈思义于 1988 年首次报道了黑白花奶牛红细胞的免疫功能。其后有关人和动物红细胞免疫功能的报道逐渐增多,充分证实了红细胞确实具有非常重要的免疫功能。

红细胞膜上的  $C_{3b}$  受体是一种糖蛋白或糖脂。它是  $C_3$  裂解后产生的片段。这些片段可作为细胞上特异性受体(补体  $C_{3b}$  受体)的配体。 $C_{3b}$  配体与相应的  $C_{3b}$  受体的相互作用就可引起细胞效应。这是补体  $C_{3b}$  发挥生物学作用的重要分子学基础。因此,在功能上则具有免疫粘附作用和吞噬调理功能。Siegel 等人通过研究发现,人和灵长类动物的红细胞膜上存有  $C_{3b}$  受体,而且他根据 Fearon 的资料,计算出每毫升血液中红细胞膜上  $C_{3b}$  受体的数量约为  $5.10 \times 10^{12}$ , 每个红细胞膜上约有 950 个  $C_{3b}$  受体。 $C_{3b}$  受体主要是存在于红细胞膜上,约占其总数的 95% 以上,因此,测定  $C_{3b}$  受体,红细胞是最理想的细胞。红细胞在血液中的数量明显多于白细胞,比白细胞多 3 个数量级。因而在血液循环中,免疫复合物遇到红细胞的机会,可能要比遇到白细胞的机会要大 500~1000 倍。从而揭示,清除血液循环中免疫复合物的主要是红细胞,而非白细胞。红细胞  $C_{3b}$  受体在结合了补体  $C_{3b}$  后,运行至肝、脾等器官时,巨噬细胞可将免疫粘附的复合物夺下,而将红细胞释放回血液循环系统,同时对那些结合有特异性抗体-抗原-补体复合物的红细胞则将其吞噬。以达到清除血液循环中大量潜在的致病性免疫复合物的目的。红细胞膜上的  $C_{3b}$  受体与免疫复合物之间的相互作用,约西达(Yoshida)等研究进一步加以说明:(1)在补体的参与下,红细胞膜上的  $C_{3b}$  受体可与免疫复合物发生免疫粘附;(2)携带免疫复合物的红细胞,在  $C_{3b}$  灭活剂等的作用下,能释放免疫复合物;(3)释放免疫复合物的红细胞,仍保留携带免疫复合物的功能;(4)红细胞在反复携带免疫复合物和反复释放免疫复合物之后,可丧失携带免疫复合物的能力。除此,红细胞还有识别抗原、增强吞噬细胞吞噬作用的功能。红细胞对自我和非我抗原具有识别功能。1982 年伽维(Garvey)曾将  $^3H$  标记牛血清白蛋白注入新生兔体内,发现牛血清白蛋白粘附于红细胞膜上。用外周血涂片和组织切片放射自显影法显示,血液循环中的红细胞和肝、脾血管内的红细胞表面均粘附有  $^3H$  的牛血清白蛋白。若将  $^3H$  标记的兔血清白蛋白注入新生兔体内。则不出现上述现象。同时,红细胞还可以对机体内产生的各种变异细胞,均

可作出相应免疫应答反应。1981年 Siegel 等人推测,红细胞可阻止癌细胞在血液循环中的播散。癌细胞表面覆盖有抗体和补体,红细胞可通过其膜上的  $C_{3b}$  受体与癌细胞粘附,粘附的癌细胞容易被吞噬细胞吞噬;红细胞对侵入机体的细菌、病毒等亦具有免疫粘附作用,被粘附的细菌或病毒也容易被吞噬细胞所吞噬。

红细胞免疫粘附抑制因子是一种不耐热的物质,56℃,30min 即可灭活,主要的作用是抑制红细胞  $C_{3b}$  受体的活性,这种抑制因子可能是一种大分子物质,但目前还不能提纯。在不同状态下动物机体血清中红细胞免疫粘附抑制因子的含量各不相同。其红细胞膜上  $C_{3b}$  受体的活性亦各异。

目前测定红细胞免疫功能的方法有免疫花环法、放免法、酶联法、发光法、红细胞培养技术等。但常用的为免疫花环法。用免疫花环法测定各种动物红细胞上  $C_{3b}$  受体结合的花环率分别为:黑白花奶 4.56±1.31,水牛 9.19±2.08,山羊 8.74±1.10,猪 8.14±1.25,鸭 11.97±4.13,鸡 10.10±1.91,恒河猴 12.83±1.95,老虎 11.50±0.79,云豹 11.88±0.82,金猫 11.83±1.25,大灵猫 9.28±1.61,小灵猫 9.21±1.81,水貂 9.60±1.10 等。上述结果充分表明,动物种属不同,其红细胞上  $C_{3b}$  受体的数量和活性有明显的不同,而且也表明动物红细胞免疫功能的完善程度与其进化程度密切相关,越是进化程度高的动物,其红细胞上  $C_{3b}$  受体的数量和结合率就越多,红细胞的免疫功能也就越强。同时动物患病后,特别是与免疫功能改变的有关疾病后,其红细胞膜上的  $C_{3b}$  受体的数量和结合率发生明显的减少。如山羊传染性胸膜肺炎(5.54±1.19),猪瘟(5.20±0.84),鸡传染性法氏囊病(5.20±0.45),鸡马立克氏病(5.09±1.13),鸡霍乱病(5.19±2.12),鸡传染性支气管炎(6.80±1.41),水貂阿留神病(7.10±3.70)等。这充分表明检测动物红细胞上  $C_{3b}$  受体的数量和花环结合率,对某些疾病具有诊断意义。

从 1981 年 Siegel 等提出红细胞免疫系统新概念至今,研究发展非常迅速,发现红细胞参与 r-干扰素、免疫球蛋白等的调控,并可促进吞噬细胞的吞噬功能。展望未来,红细胞免疫功能的研究将会有新的突破。首先是红细胞的免疫物质与遗传关系的研究,现已知  $C_{3b}$  受体 2 个等位基因共同编码是常染色体显性遗传,基因定位于 1 号染色体 q<sup>22</sup> 区,  $C_{3b}$  受体 mRNA 的多态性与  $C_{3b}$  受体等位基因分子量的多态性相关;其次是红细胞免疫与白细胞免疫之间关系的研究;从现有资料证实胸腺素、转移因子对细胞免疫粘附功能有增强作用,似乎说明白细胞免疫对红细胞免疫有调节作用。反过来,红细胞免疫对白细胞免疫是否也有影响呢? 这些问题均需进一步研究证实;第三是红细胞免疫与神经内分泌关系的研究,现已证明神经内分泌产物 β-内啡肽可影响白细胞免疫功能,因白细胞膜上有 β-内啡肽受体,近来研究红细胞膜上亦有 β-内啡肽接受点,对红细胞免疫粘附功能也有调节作用,这种调节作用是否与剂量有关值得进一步探讨。红细胞膜上是否还有其他激素受体,在应激状态下红细胞免疫功能下降与哪些激素变化有关,仍需深入研究;第四是红细胞免疫在临床疾病诊治中应用的研究。国内外学者经过大量的研究证明,红细胞免疫功能的检测对自身免疫性疾病、免疫缺陷病、肿瘤、传染病以及与免疫改变的其他疾病均有诊断意义。但是,一种疾病的整个病程中(从发病到痊愈或死亡)有没有规律性的变化值得深入研究。同时要设法从细胞中提取免疫物质应用于某些疾病的治疗亦是今后研究的方向。另外,祖国医学和兽医学理论用免疫学理论及技术加以解释也是今后研究的方向。现已证明针灸对红细胞免疫功能有增强作用。总之,红细胞免疫功能的研究有着广阔的前景,这不仅在理论上大大充实了红细胞的生理功能,而且在临床实践中具有深远的现实意义。

#### 参考文献

- 1 Siegel I, Liu T L, Gleicher N. The re-a-cell system. Lancet, 1981, 11(8246): 556
- 2 Siegel E, Gleicher N. The red cell immune adherence (RC-LA) assay, Its application in Cancer and autoimmune

disease. Immunol. Communication, 1981, 10: 433

- 3 Yoshida K, Yukiama Y, Miyamoto T. Interaction between complexes and  $C_{3b}$  receptors on erythrocytes. Clin. Immunol. Immunopathology, 1986, 39: 213
- 4 Garvey I S. Immunity and the red blood cell. Lancet, 1982, 1(8265): 223
- 5 郭峰, 虞紫茜, 赵中平. 红细胞免疫功能的初步研究. 中华医学杂志, 1982, 62(12): 715
- 6 张德成, 陈思义. 黑白花奶牛免疫功能初探. 浙江农业大学学报, 1988, 14(2): 161
- 7 陈国强, 张德成, 陈思义. 红细胞  $C_{3b}$  受体研究的新进展. 中国免疫学杂志, 1991, 7(增刊): 7
- 8 张德成, 陈思义, 李进昌. 猪瘟病红细胞免疫功能的变化. 中国免疫学杂志, 1991, 7(增刊): 116
- 9 张德成, 陈思义, 李进昌. 鸡马立克氏病、霍乱病和传染性支气管炎红细胞  $C_{3b}$  受体的变化. 中国病理生理杂志, 1991, 7(6): 591
- 10 张德成, 陈思义, 吴润增, 等. 小灵猫和大灵猫红细胞免疫调节功能的研究. 兽类学报, 1991, 11(3): 200

(浙江农业大学张德成撰)

### 脊椎动物多倍体

vertebrate polyploid 通常脊椎动物生殖细胞具有单套基因组,称为单倍体;体细胞具有两套基因组的称为二倍体;比二倍体多一套或多套基因组的称之为脊椎动物多倍体。它是通过多倍体化或基因组重复实现的,是进化中 DNA 量递增的重要方式。多倍体在植物中相当普遍,无脊椎动物中亦为数不少,但在脊椎动物中却比较少见。脊椎动物多倍体的发现和研 究,不仅对于研究进化生物学、物种形成、受精生物学、胚胎发育的启动机制、两性动物如何产生无性克隆动物的机制等理论问题有重要意义,而且对于增加动物生产量、提高和改良品种性能等生产实际亦有重要的作用。

比卡克(M. L. Beak)于 1966 年首先发现一种南美趾蟾无尾两栖动物是两性四倍体。同年前苏联契尔法斯(H. B. Черпач)报道了银鲫是非两性生殖的二倍体。60 年代,美国学者又发现分布在美国西南部、墨西哥北部的孤雌生殖的鞭尾蜥多倍体。尔后,在世界各地陆续发现不少的脊椎动物物种或居群,并对它们在自然条件下和实验室饲养条件下进行多学科综合研究,包括形态学、分类学、生态地理分布、遗传学(染色体、基因频率、酶、蛋白电泳、线粒体 DNA 等)、细胞学、组织胚胎学、生物化学、组织器官相容性(皮肤移植)等,对其起源、分类、进化、发生机制等问题进行了探讨,取得不少有意义的结果。

脊椎动物多倍体化一般导致染色体数目(臂数)、核 DNA 和基因位点的倍性增加,还发现某些多倍体的细胞大小和体积发生倍增现象,减数分裂时常有多价体出现。随着时间的推移和突变的积累,多倍体逐渐二倍体化,表现出核 DNA 量、某些基因位点的次生性减少,多价体的减少以至消失等。按发生时间的迟早,脊椎动物有老多倍体(如鲤亚科的和胭脂鱼科的鱼类)和新多倍体(如鲑鳟鱼类)之分。

脊椎动物多倍体的起源有两个途径:一是直接从二倍体类型起源,其中又有两种方式:(1)二倍性配子的形成和相互结合;(2)二倍性合子受环境条件诸如温度、射线和某些化学物质的影响直接得到四倍体胚胎。第二个途径是通过单雌三倍体类型作为中间桥梁间接地向四倍体(偶数多倍体)发展。三倍体类型的减数分裂一旦被抑制或出现核内有丝分裂,将产生三倍性配子,如果此配子与单倍性配子相结合,将会形成四倍体合子。

关于单雌三倍体,一般认为是杂交起源的,根据杂交亲本可分为同源多倍体和异源多倍体两种类型,前者亲本为同一物种,后者则为不同的物种,分布在墨西哥西北部的胎鳉科(*Poeciliopsis*)属有 3 个单雌性三倍体物种,就是由两个同域分布的 *P. monoche* 和 *P. lucida* 杂交得来的。它们的生殖方式是雌核

发育(gynogenesis),其配子发生是成熟分裂前进行核内复制,使其成为六倍性,尔后正常的减数分裂形成三倍性配子,接受同种的或异种的精子刺激而不融合,最后发育为三倍体胚胎。据研究,云南高原湖泊的高背鲫大致亦有相似的生殖方式。塞欣斯(S. K. Sessions) 1982对北美大湖地区的三倍体有尾类 *Ambystoma platineum* 和 *A. tremyblayi* 作了细胞遗传学研究,表明这两种三倍体是由同域分布的 *A. jeffersonianum* 和 *A. laterale* 杂交形成的,杂交所得雌性在卵子发生时显示前双线的染色体复制,形成二倍性卵子,这种卵子分别与上述两个亲本种的雄性精子结合而成两个全雌性三倍体物种。研究得较好的美洲单雌性三倍体鞭尾蛇,采用孤雌生殖方式。美国学者科尔(C. J. Cole)对野外的和饲养在实验室已有七代的无性生殖的血色鞭尾蛇(*C. exsanguis*)的观察研究,表明群体内无一雄性个体,在雌性生殖道内没有发现精子,组织学观察证明该种是雌性,因此它是一种全雌性物种。多学科研究资料表明该种是由 *C. burti* X *C. inornatus* X *C. scalaris* 杂交得来的,又如单性鞭尾蛇(*C. uniparens*)是由两个同域分布的亲本种 *C. inornatus* 和 *C. burti* 杂交而来。据知,约有10种鞭尾蛇多倍体物种是杂交起源的。

脊椎动物多倍体有两种生殖方式。一是两性生殖,一般偶数多倍体采用,如鲑鳟鱼类、鲤亚科的和裂腹鱼亚科的鱼类、鲟鳇鱼类以及大多数无尾类多倍体。二是非两性生殖,它包含两种类型:(1)孤雌生殖,如大多数三倍体单雌爬行动物;(2)雌核发育,如某些鲫鱼、鳅科鱼类,鲟形目胎鲟属的和帆鳍属鱼类,鲤科鲃属的鱼类等水生脊椎动物。非两性生殖方式一般为奇数多倍体所采用。

脊椎动物多倍体形成的细胞遗传学机制包括:(1)卵母细胞的核内有丝分裂,使染色体加倍;(2)减数分裂异常,极体被裹入与雌原核结合而形成双倍核;卵子过熟及温度刺激,阻止极体排出而成双倍核;(3)受精卵首次分裂失败亦可使染色体加倍。根据这些机制,多倍体可用人工方法进行诱发,通常有(1)生物学方法。即杂交,特别是远缘杂交方法,但在脊椎动物中未见成功报道。(2)化学方法。多采用纺锤体抑制剂,如秋水仙素(碱),使染色体加倍。(3)物理方法。包括温度(冷休克、热休克)、射线、静压力等。这些方法曾获得鱼类的和两栖动物的人工多倍体,但其经济效益远不如植物多倍体的显著。

通过近30年的研究,已知脊椎动物多倍体主要发现在性染色体尚未分化或处于分化初级阶段的鱼类、两栖类和爬行类,而鸟类和哺乳类中未见报道。在圆口纲和软骨鱼纲中有为数很少的多倍体,硬骨鱼纲的软骨硬鳞鱼亚纲的鲟科鱼类有不少多倍体物种,如中国一类保护动物中华鲟  $4X=240$ 土;在真骨鱼类中,鲤形目的鲑鳟鱼类、鲤形目胭脂鱼科中的中国亚洲胭脂鱼  $4X=100$ ;鲤科的鲤亚科和裂腹鱼亚科鱼类,  $4X=100$ 、 $6X=150$ 土。鲃亚科金钱鱼属和鲈鱼属,鲃亚科中结鱼属、四须鲃属和鲃属的某些种为四倍体,  $4X=96\sim 100$ 。还有雅罗鱼亚科的鲃属、拟鲤属的某些种(居群)为三倍体或四倍体。此外,鳅科的花鳅属和泥鳅属的某些种为四倍体。鲟形目中胎鲟科帆鳍属和胎鲟属的某些种(居群)为三倍体。肌鳍鱼亚纲非洲肺鱼属的 *Pnotopterus dolloi* 也是多倍体物种,  $4X=68$ , DNA量 163pg。

有尾类中钝口螈属有两个三倍体( $3X=42$ )物种,另有四倍体( $4X=56$ )居群。螈科中的 *Pseudobranchius striatus*  $4X=64$ 、*Sireniac ertina*  $4X=52$ 。无尾类中则爪蟾属、*Neobatrachus*、*Ceratophrys*、*Odontophrynus*、*Pleurodema* 蟾属、蛙属、*Tomeptema*、*Phyllomedusa* 盘舌蟾、雨蛙等属的一些种和居群为多倍体。两栖类的多倍体约有23种(居群)。

爬行动物的多倍体则有白齿蜥科鞭尾蛇属的,壁虎科地蜥属、蜥虎属、锯缘蜥属、异背蜥属的,鬣蜥科蜡皮蜥属的某些种和居群为多倍体。

上面所列表明多倍体在整个脊椎动物中所占比例是很小的,且主要出现在低等脊椎动物内。在鱼类可见到整科(胭脂鱼

科)、整个亚科(鲤亚科、裂腹鱼亚科)、整个属(金钱鱼属和鲈鱼属)为多倍体类群;而两栖类和爬行类则主要在种级和居群的分化上。脊椎动物多倍体主要分布在高纬度高海拔地区和环境条件恶劣的顶极群落生态龛里。对于它们特别是单雌多倍体如何进行分类命名,有人则主张只要它们具有可鉴别的性状组合,有独立基因库,占据特有的生态龛及地理分布,有生殖隔离,均应予分类命名;也有相反的主张。

孤雌生殖的单雌爬行动物是当前的研究热点。采用多学科特别是细胞遗传学、分子生物学及超微形态学等学科的综合研究途径,继续在全球各地发现更多的脊椎动物多倍体,探讨其进化机制,寻找有效的人工培育多倍体的方法,将是今后的主要任务。

参考文献

- 1 李荫深. 动物学杂志, 1980, 2: 52~54
- 2 Sessions S K. Chromosoma, 1982, 84: 599~621
- 3 Cole C J. Scientific American, 1984, 250(1): 94~97
- 4 Cole C J, et al. , New Evidence and a Review. Amer Mus Novitates, 1989, 2905: 1~38
- 5 Verjehhoek R C, et al. In: Evolution and Ecology of Unisexual Vertebrates, edited by R. M. Dawley et al. , Bulletin 466, New York State Museum, Albany, New York, USA, 1989. 19~23

(云南大学李树深教授撰)

成熟促进因子 MPF 脊椎动物的胚胎发育开始于成熟雌雄配子的结合。

在大多数脊椎动物里,卵母细胞在卵巢内生长,发育至一定阶段后便停止于减数分裂前期I,它们不能受精,卵母细胞必须经过成熟阶段,即完成其第1次减数分裂发育成为成熟的卵子后才能与精子结合,完成受精过程。所谓卵母细胞的成熟过程是指在适当的性激素刺激下使卵母细胞恢复减数分裂,包括卵母细胞核(胚泡)破裂(简称GVBD),染色体浓缩,第1次减数纺垂体的形成,并排出第一极体。一般来说GVBD可作为卵母细胞成熟的第一标志。

在对两栖类卵母细胞成熟的研究中,格尔多(Gurdon 1967)发现用促性腺素处理带有滤泡膜的卵母细胞能引起GVBD,但把促性腺素注射进卵母细胞内,则不引起GVBD,因而提出促性腺素的作用是间接的。Masui和Markert(1971)也证明激素对胚泡(GV)的间接作用。他们证明:将豹蛙的卵母细胞在GVBD阶段前先用孕酮处理,再把这种卵母细胞质注射进未经处理的受体卵母细胞内,能诱导后者发生GVBD。他们也发现除去卵母细胞的核(GV)后,用孕酮处理卵母细胞也同样出现能诱导发生GVBD的细胞质活性,显然,孕酮处理后卵母细胞的细胞质能诱导发生GVBD的能力与胚泡的存在无关。此外接受孕酮处理过的卵母细胞质的卵母细胞,除了能引起GVBD外,还使卵母细胞经历了进一步的成熟变化,包括卵母细胞表面收缩,核染色体浓缩到中期阶段以及极体形成。由引可见,由于成熟诱导物刺激卵母细胞表面而在卵细胞内出现了负责促进成熟的细胞质因子; Masui和Markert(1971)为这种细胞质因子定名为:“促成熟因子(MPF)”。独立于这种与胚泡本身无关的促成熟因子的存在表明它是一种细胞质活性产物。

MPF有如下作用,Reynhout和Smith(1974)适当剂量的将一种两栖类处于成熟过程中的卵母细胞质用显微注射的方法注入另一种两栖类的卵母细胞中能引起后者成熟,这证明卵母细胞中的MPF并无种类特异性。Kishimoto和Kanatani(1977)也证明,将1-甲基腺嘌呤(1-MA)处理不同种海星的卵母细胞后将它们的细胞质在物种间转移,能使受体卵母细胞感应成熟。

用成熟诱导物,而不是甾族激素引起的成熟卵母细胞质内能发现MPF。用汞剂(Brachet 1975),离子交换剂A23187(< Wasserman和Masui 1975),巯基毒素(Baltus 1977)和La离子(Schorderet, Slotrine等1976)处理爪蟾的卵母细胞后也在其细胞质内检测出了MPF。这些结果说明,MPF不是卵母细胞上的

受体分子和甾族激素之间的反应产物。

处于卵子发生早期各阶段的卵母细胞不能对成熟诱导物发生反应,而MPF对这种早期卵母细胞的影响已由Hanocq—Qwertier(1976)用爪蟾得到证明,他们发现从成熟卵母细胞得到的MPF能引起诱导早期卵母细胞的GVBD及染色体浓缩,虽然因其纺垂体不能形成而不发生减数分裂。处于成熟过程中的卵母细胞质对小的,不成熟的卵母细胞的相似影响已由Batakier(1978)用小鼠证明。他把处于成熟过程中的卵母细胞质与小卵母细胞用灭活的仙台病毒进行融合,观察到后者的GVBD和染色体浓缩到中期相。这些结果清楚地说明MPF是一种普遍存在的,能促使细胞核发生减数变化的细胞质因子。

利用注射成熟卵母细胞质诱导成熟的卵母细胞里发现MPF在扩增。为了检测受体卵母细胞内MPF活性感应扩增的机理,Masui和Markert(1971)在豹蛙卵母细胞内进行了一系列的胞质转移,转移细胞质的量为60nl,约为卵母细胞体积的3%。先将孕酮处理过的卵母细胞质转移到未经处理的受体卵母细胞内,然后从第一受体再转移到第二受体,从第二受体到第三受体,每隔24h转移1次。尽管最初经孕酮处理过的供体的细胞质经一系列转移后明显地被稀释了,但在每次转移后,在受体内转移的细胞质,几乎仍以相似的频率(75%~90%),诱导卵母细胞成熟。因此,在转移细胞质后的24h内,被转移的细胞质显示了能刺激受体卵母细胞内MPF的增加,把它的活性增加到相当于供体的水平。根据观察推断这是由于MPF的自动催化扩增作用所致。

从两栖类卵母细胞中提取MPF是相当困难的。因为MPF活性极不稳定,如果匀浆,它就会失活。在离心提取时发现当添加EGTA到提取液中去,则其活性就变得相对稳定,另外为了保持它的活性必需有 $Mg^{++}$ 存在, $Ca^{++}$ 浓度低到 $10^{-5}M$ 时,MPF就迅速钝化了。MPF活性与4.13及30S的大分子有关,对热不稳定,对蛋白酶敏感。由含NaF或钼酸铵的甘油磷酸缓冲液的蔗糖溶液组成的提取液对稳定MPF的活性是最基本的,ATP可以增强MPF的磷酸化作用。Drury(1978)的胶体过滤实验已指出MPF具有 $0.6\sim 1.0\times 10^6u$ 分子量的大分子。

1988年Lohka等人才从蛙卵中提纯了MPF,并发现MPF至少包含两种蛋白质,一种是cdc2蛋白激酶,另一种成分则为周期素(cyclin),两者相互结合形成的复合物即为促成熟因子(MPF)。

对MPF的结构与功能的研究导致了对细胞分裂机制的进一步阐明。例如在过去对酿酒酵母和裂体酵母遗传学的研究中,早已识别了控制细胞分裂的基因族(cdc)。遗传学家们已分离、鉴定出一批停滞于细胞周期不同阶段的突变体。尽管这两种酵母在进化上存在着显著差异,但是两者均具有同源细胞周期调控基因,其中裂体酵母的cdc2基因和酿酒酵母的cdc28基因是高度保守的,互为同源物,均可编码一种34kd的蛋白激酶( $P_{34}cdc2/28$ )。Gautier(1988)的研究表明爪蟾 $P_{34}cdc2/28$ 同源物是MPF的一个组分,可与其他多肽形成复合物而使其他特异性蛋白发生磷酸化,从而产生子与分裂相关的细胞结构的改变,几年之内,在多种其他生物包括蚌、蛙、海星甚至人类中也发现了酵母cdc2蛋白激酶的同类物,从而把曾是默默无闻的酵母遗传学的工作推到了细胞周期研究的中心位置。

蛤蚧周期素A和B与 $P_{34}cdc2/28$ 相联合即具有B1组蛋白激酶活性和 $P_{13}$ 结合活性,且分子构成不相同,一种含周期素A,另一种含周期素B,两种之间的差别在于含有周期素B的复合物的H1组蛋白激酶活性较强,这样就易于使H1组蛋白发生磷酸化,从而使染色体浓缩甚至卷曲起来。这样看来,爪蟾卵母细胞中与 $P_{34}cdc2/28$ 相关联的 $P_{45}$ 多肽及Hela细胞中 $P_{62}$ 蛋白都有可能是周期素。由于周期素的不同,MPF也有可能存在着不同形式。如将酵母中的周期素(cyclin)放进人类细胞便不会得到相同的反应。也许周期素就是这样一种物质,它能使得酵母细胞区别于人类细胞。

根据以上结论,Draetta(1988)等提出了细胞周期的调控模

型,他认为活性MPF是由cdc2和周期素所组成的复合物。周期素是必需成分,而且周期性地发生解除,但cdc2却是始终存在的。周期素在中期/后期的过滤阶段即发生水解,从而使MPF失活,这样细胞就回到了间期。

尽管研究者们已经确定了调控细胞周期的中心环节,但是MPF激酶的靶蛋白(底物)尚未完全被阐明。令人惊奇的是美国马里兰州生物中心的van de Waude(1988)观察到mos原癌基因编码的蛋白很可能是MPF的另一成分——周期素。由此看出癌基因的致癌机理很可能是因为在静息状态下也异常地表达出分裂时的特征。

由于MPF的高度纯化才使得细胞分裂周期的调控机理得到进一步阐明,以及找到癌基因的天然靶位。

虽然,目前对几种动物卵母细胞中的MPF的结构和功能已有了相当的了解,但仍有很多复杂的问题有待探讨,特别是作为基因活动的产物,它在促进卵母细胞的成熟和细胞分裂方面与其他多种因子如何发生协同调控作用,仍是一个正在深入研究的重要问题。

(中国科学院发育生物学所毛钟荣撰,严绍颐审)

### 哺乳动物染色体高分辨显带研究

染色体高分辨显带(CHRB)指通过某种处理,获得细胞有丝分裂早期(晚前期、前中期和早中期)染色体,此时期的染色体较常规方法获得的中后期染色体细而长,可得到更多更细的显带带纹,从而提高人类对染色体结构研究的分辨力。哺乳动物染色体高分辨显带的技术建立与研究是哺乳动物细胞遗传学的一项突破,大大提高人类对染色体形态结构在细胞水平上的分析能力。它对子动物染色体结构细微异常的诊断,研究动物染色体的进化,分析种间染色体带型同源性,探讨动物种间的亲缘关系;基因精确定位都具有极其重要的意义。

染色体高分辨显带技术的中心是获得早期细胞分裂相染色体。1938年莱文(Levan)首先把纺垂体阻断剂秋水仙素引入到细胞收集。秋水仙素和乙酰甲基秋水仙碱仍为中后期细胞收集时广泛采用的化学物质。利用秋水仙素或乙酰甲基秋水仙碱短时间和低浓度处理也可获得少量的长而细的前期或前中期染色体。1976年犹尼斯(J. J. Yunis)等采用氮甲嘌呤(MTX),1978年维埃加斯—佩克尼奥(E. Viegas-pequignot)利用高剂量胸腺嘧啶脱氧核苷,1981年达特里劳克斯(B. Dutrillaux)等采用5-溴脱氧尿嘧啶(BUdR)诱导细胞分裂S期阻断,然后结合阻断解除进行哺乳动物细胞同步化培养,根据培养条件,S期阻断剂以及阻断解除和染色技术,获得高分辨G带、R带或在同一标本片上显示高分辨G和R带。1981年戈亚纳斯(V. J. Goyanes)1984年艾柯奇(T. Ikeuchi),1983年松原,1983年伦内(M. Rønne)和1981年于汝棠(R. L. Yu)等分别建立了BRdU-Hoechst33258,溴化乙锭,吡啶橙,脱氧腺苷—脱氧胸苷簇(dA-dT clusters)和放线菌素(AMD)等干扰染色体正常凝缩的物质,进行非同步化细胞培养,获得高分辨染色体的方法。

1984年马西乌利斯(A. Maciulis)等提出了马前中期染色体高分辨G带核型和模式图,马前中期高分辨染色体G带核型所包含的带数与Reading会议标准核型相比,带的数量由442条增加到852条。他们还马前中期染色体高分辨G带核型中每条染色体的带型逐一做了详细描述。1985年,罗马戈纳诺(A. Romagnano)等还对马高分辨染色体R带进行了研究。1985年,贝拉尔迪诺(D. Di. Bernardino)等由前中期分裂相获得牛的高分辨RBA带核型以及模式图。牛前中期水平单套染色体带数可达521条,183(35.1%)为阳性,257(49.3%)为阴性和81(15.6%)为可变带。前中期带数约比早中期多50%。他们还与牛的标准G带模式图(显示310条带)作以比较,发现前中期带数比其多约70%。1981年,陈文元等采用MTX或TdR细胞同步化技术制备了前期染色体标本,提出了中国家猪染色体高分辨G带核型模式图,家猪高分辨单套染色体带数为444条。7个中国家猪品

种未发现高分辨 G 带和 R 带带型有明显差异。1987 年, 伦内等人提出家猪前中期 R 带核型, 并对染色体进行了光度测定, 制定了 400 条带水平模式图。1991 年耶尔勒 (M. Yerle) 利用氨甲喋呤诱导同步化法进行家猪高分辨 GTC 带研究, 提出了 539 条带的模式图。1989 年, 门什厄尔 (S. H. Mensher) 制作了绵羊高分辨 G 带核型标本, 但未绘制模式图。作者未介绍高分辨染色体标本的分裂时期和带数。同年, 门什厄尔等还提出山羊染色体高分辨 G 带核型和 367 条带水平模式图。他们还详细叙述了每条高分辨染色体的带型特征。1987 年, 贝拉尔迪诺等获得山羊前中期高分辨染色体 R 带核型, 山羊前中期单套染色体带数约为 510 条, 187 条 (36.7%) 阳性带, 251 条 (49.2%) 阴性带和 72 条 (14.1%) 可变带。1984 年, 陈宜峰等对恒河猴外周血淋巴细胞的晚前、前中、早中和中中期染色体进行了 G 带研究, 并绘制了恒河猴前中期和中中期染色体的 G 带模式图, 结果表明晚前期染色体的带数大约 600 条带, 中中期有 287 条带, 而前中期和早中期染色体带数则居于上两者之间。1987 年, 耶尔勒等获得家兔染色体高分辨 G 带核型和模式图, 单套晚前期染色体有 622 条带, 他们发现, 在许多染色体中, 中期时作为参照的界标带而在晚前期不清楚。所以, 有的中期的界标带对于识别早期染色体不能再作为参照, 例如, 1q2.1 浅带。对于某些染色体, 同一带在中期和晚前期保持一致, 例如: 16q2.1.1。1988 年, 波尔森 (Birger Strandby Poulsen) 等提出了家兔染色体高分辨 R 带核型和 492 条带的模式图, 205 条 (42%) 为阳性带, 210 条 (43%) 为阴性带和 77 条 (15%) 中性强度带。1989 年, 佐藤 (H. Satoh) 等利用高分辨染色体技术获得挪威正常大鼠早中期染色体高分辨 G 带和 Q 带核型, 达到 457 条带水平。他们结合 G 带和 Q 带分别绘制了 300 条和 400 条带水平模式图。1987 年, 伦内等提出了 525 条带水平的褐家鼠高分辨染色体 G 带核型和模式图。大约 223 条 (43%) 为阳性带, 149 条 (28%) 为阴性带和 152 条 (29%) 为中性强度 R 带。1987 年, 索耶 (Jeffrey R. Sawyer) 等制作了 DBA/2 小鼠晚前期高分辨染色体 G 带模式图。晚前期染色体的带数为中中期 (230 条) 的两倍多, 达到 500 条带水平。他们还对小鼠晚前期中每条染色体的 G 带带型进行了详细描述, 无疑对小鼠的高分辨染色体研究具有重大意义。

哺乳动物染色体高分辨显带方法是在借鉴人类染色体研究, 并在此基础上发展起来的, 进行染色体高分辨显带研究的哺乳动物种类还很有限, 至今尚未建立有关哺乳动物染色体高分辨显带的国际标准化体制。因此, 应进一步广泛而深入地开展工作。

参考文献

1 Di Berardino D, et al. Cytogenet Cell Genet, 1985, 39, 136~

139  
 2 Jeffery Sawyer R, et al. Chromosoma (Berl), 1987, 95, 350~358  
 3 Mogens Rønne. J Dairg Sci., 1989, 72, 1363~1377  
 4 Mensher S H, et al. The Journal of Heredity, 1989, 80(2), 150~155  
 5 李来记. 遗传, 1991, 6: 38~40  
 6 陈文元, 等. 遗传学报, 1991, 18, 2, 120~126  
 7 M Yerle, et al. Cytogenet Cell Genet, 1991, 56, 45~47

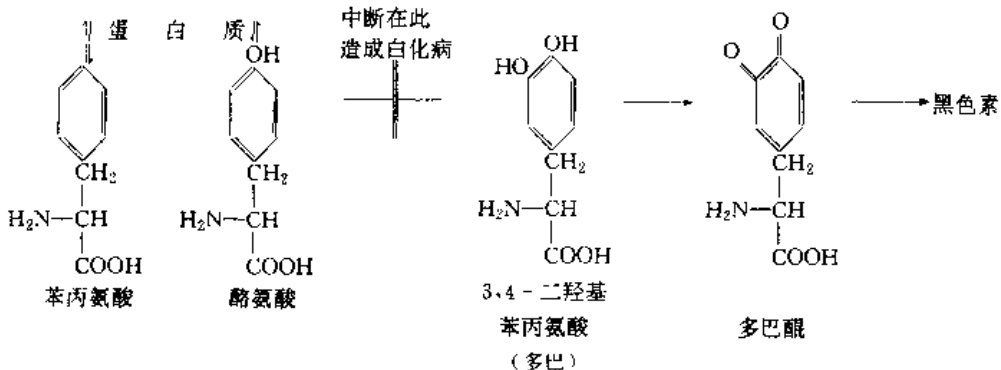
(中国人民解放军农牧大学李来记撰; 祖国庸审)

白化动物

动物的白化突变个体, 在自然界较多是鸟类, 如麻雀、澳大利亚的白鸚鵡、白家燕、印度孔雀、白色的黄咀朱顶雀、奶油色的白咀鸡等; 在两栖爬行动物中的白化个体, 如瑞典报道的白化黄腹蟾蜍、白化蛇等; 哺乳动物中的白化个体较少见, 曾报道过的西欧白狼、坦桑尼亚的局部的长颈鹿、泰国的白化猫、白化鼬、白化食蟹猴、印度白化虎、苏联白化水牛、赤道几内亚的白猩猩、白化绿猴及白化指猴等。中国也发现过许多种, 如白化竹鼠、白松鼠、白鹿、白貉、白花面狸、白獐、白化熊、白蛇、白化黑线仓鼠、白化水牛, 尤其国内报道 (1981~1991) 年间白化猴特别多, 已有 6 种 16 只, 如猕猴、短尾猴、熊猴、台湾猴、黑叶猴、川金丝猴都出现过白化个体, 国外报道过的白化型狼猴已达 15 种之多 (Hill, 1974)。

对于动物白化的研究, 在历史上很早期即引起了科学家们的重视。他们曾对一些白化突变个体, 例如: 西欧白狼、白鼬、白化猫、白虎、白化指猴、白化绿猴等等进行详细描述, 认为某种白化动物即是某种动物中的一个单独的“种”。但是, 上述白化动物虽然发现, 毕竟只是为数极少的个体, 当然不能成为某一个物种, 可是, 发现他们的描述都有一个共同的特征: 皮肤缺乏色素, 被毛洁白或略带淡黄色, 眼在光照下呈透明红色, 亦有畏光现象。原来与人类的白化遗传病的特征相似, 白化动物也是由遗传基因突变而引起的。

从人类遗传病的研究资料得知: 人类白化病是由于酪氨酸酶的改变而引起的, 也就是说, 由于主管酪氨酸的基因突变而造成酪氨酸酶的缺乏或功能不正常。研究表明: 白化动物体内的黑色素细胞数量是正常的。由于全身黑色素细胞缺乏酪氨酸酶, 或者是酪氨酸酶虽然存在, 但它不能发挥正常作用, 这种酶使酪氨酸氧化生成 3,4-二羟基苯丙氨酸 (黑色素的一种前体)。由于白化动物缺乏这种酶或酶活性不足, 造成黑色素的生物化学反应被阻断, 生成黑色素不足。其反应式如下:



1961 年 Witkop 指出, 有很多白化个体是能够产生酪氨酸酶, 也能产生 DOPA (3,4-二羟基苯丙氨酸), 只是由于一个不同的基因位点上的影响, 使酪氨酸酶不能起正常作用的缘故, 所以缺乏正常黑色素。

细胞中黑色素的多寡决定着肤色、毛等颜色从黑色、栗色、褐色、浅褐色……白色不等。据马努塔 (G. Man unta, 1967) 报

道: 白化动物的毛发含有黑色素。经测定, 牛的黑毛含黑色素最高, 平均为 68.69 ± 13.00mg/g; 白毛和白化动物的毛含黑色素量相似, 白化牛毛含黑色素为 18.00mg/g, 所以, 他认为白化动物不能产生黑色素的定义是不正确的, 从我们做的白化猴毛囊的孵育试验及福特纳黑色素染色也证实了这点, 白化猴毛球中也存在有酪氨酸酶, 只是不能起到正常作用而已。

正因为形成黑色素的不足,故出现白化动物全身被毛白色或略带淡黄色。皮肤缺乏正常色素而显得美丽。虹膜呈浅灰蓝色。瞳孔红亮(因为眼珠内缺乏色素,而受光照呈现出血液颜色的缘故)。

由于白化动物的出现率极低,而且是呈单个地分布在不同地区,容易遭受自然选择的作用而被淘汰,所以,基本上是自生自灭,期望在野生状态下形成白化动物群体是不可能的,只有人为地安排、系统地进行培育工作才有成功的可能性。

在科学技术很发达的国家都非常重视实验动物的培育工作,特别倾向于培育近交系和基因突变品系的实验动物。白化品系的培育将会为分子生物学、遗传学、医学生物学等科学提供一个遗传背景单一、标准化的实验研究模型。

在国内,军事科学院利用突变白化的黑线仓鼠,进行白化品系的培育;中国农科院特产研究所正进行白兔的培育工作;医科院医学生物研究所曾利用突变的白化树鼯培育白化品系;广州仲凯农业技术学院猴场正进行白化猴的培育等等。

海尔(Hill, 1974)报道:1932年伦敦动物园利用一只白化型的白顶白眉猴与同种正常型的猴交配,试图获取白化猴的新品系,但直到1954年均未获得白化型的纯合体,1966年10月,在西班牙属地赤道内亚森林中,一只白母猩猩被猎手射杀后,它怀抱一只小猩猩当即被捕。发现白猩猩的消息传开后,许多动物学家先后赶到那里进行深入调查。据鉴定,这是一只白化雄猩猩。后来它被运往巴塞罗那动物园。当它性成熟后,与两只毛色正常的猩猩交配,生下一雄一雌,均为正常型猩猩,动物园期望它能在白化猴的培育方面建立功勋,以成为白猩猩的鼻祖。但直到1991年11月时仍称它为世界上唯一的一只白猩猩。

在实验动物中最常用的小白鼠、白兔等,就是利用单只白化这突个体而培育出来的。而高等动物由于性成熟晚,生殖周期长,生育力低,显然比进化地位低的、性早熟、生殖周期短、生育力强的动物所需的培育时间长。

邹淑基等在白化猕猴的培育工作中,就是利用亲代隐性基因纯合的方法,培育出了白化后代,即利用雄性白猴与正常的雌猕猴(褐色)交配,其子一代的毛色与正常雌猕猴毛色相同。因为显性掩盖了隐性性状。虽然子一代的白色性状不能表现出来,但在子一代的生殖细胞中却已储存有白化的隐性基因(称为杂合子)。假如用子一代与其亲代的白猴回交(父女近亲繁殖),则白化的隐性基因即有50%的可能性纯合而变成双隐性的纯合子,白色即成为显性性状而表现出来,即形成白猴;假如不进行父女近亲繁殖的回交,而用另外一只白化猴交配(称测验杂交)而隐性基因的纯合率也为50%(即为1/2的可能性产出白猴);或者,在子一代中运用近亲交配(兄妹近交)则隐性基因纯合率为25%,一旦在后代中产出白猴,即可利用白猴与白猴交配后代必然是双隐性的白化后代,也就是说:双亲都是白猴,其子代非分之百是白猴。基于这样的遗传规律,已于1988年获得家养下产出的第一只白猴。由此证明猴类的白化病的遗传方式,仍属于单基因遗传,为常染色体隐性遗传。

(中国科学院昆明动物研究所白寿昌、邹淑基撰)

**动物杂交试验** 杂交既可充分利用群体间的杂种优势,又可大大扩展杂种群体间的杂种优势,因而已被作为一种主要生产方式和育种手段而应用于遗传资源的利用和开发,杂交并非任意选择几个亲本,采用一种方式都可获取最佳效果。要获取最佳效果,需进行具体的杂交试验。杂交试验主要分为设计、分析两个部分。

**动物杂交试验设计** 1. 群体间的组合设计。20世纪初, Schmidt(1919)即提出了一种称为完全双列杂交的设计方法。这种方法要求对P个种群间的所有二元杂交组合或再加上纯繁组合统统进行试验。它可充分剖析观测值的各种变因,估计各种交配甚至某些遗传参数。但是它的试验规模随着P的增大而急剧地增大,以至有些时候让人无法承受。人们又提出了一种不完全

双列杂交设计法。这种方法可把完全双列杂交方案的组合数降低一半,即在包括纯繁时为 $P^2/2$ 、在不包括纯繁时为 $P(P-1)/2$ 。可以看出这种方法随着P的增大仍有急剧增大试验规模的趋势,尽管没有完全双列杂交那么剧烈。鉴于,人们更进一步地提出了几种部分双列杂交设计法,具体包括三角、因子、循环等多种。它是按照一定要求从不完全双列杂交试验的组合中挑选部分组合进行试验。其组合数为 $PT/2$ , T在包括纯繁时小于P、在不包括纯繁时小于P-1。所有这些方法放在一起构成了所谓的双列杂交设计体系,并被广泛地应用于各种作物的杂交试验当中,一方面进行配合的测定、一方面进行遗传参数的估测。尽管如此,它们却不能毫无变化地全部推广应用到动物杂交试验的设计中去。这是因为它们都是针对作物的特点而提出来的,而动物具有下列几个特点:(1)试验经费极其昂贵,同是一个样本单位,动物所要求的费用不知是作物的多少倍,因而其对试验规模的限制也就较作物的大的多。(2)容易受各种环境因素影响,而且这些环境因素难以控制,因而其对试验条件,设备的要求也很高,使得试验规模同样无法铺得太大。(3)母畜对于后代的产前产后影响即母体效应一般难以忽略,加上一个群体的公畜亚群和母畜亚群因各自选择强度不同而具有不同的遗传基础,因而不能认为正交、反交没有区别,尤其是在同时要观测多个性状时。以上这些特点使得完全双列杂交试验越发因其规模太大而受到客观条件的限制,而不完全双列杂交试验及上述的各种部分双列杂交试验则不能提供完整的信息。潘玉春(1988, 1991)针对动物的上述特点及当前的历史条件和环境而归纳和提出了6类动物用的群体间的组合设计,正反循环以及完全双列。这些方法各有其适用条件和功用。

2. 种畜配种及其后代抽测。在实际的动物群体中,种畜的数目无论公畜还是母畜大多数情况下都不是太多,而且公畜往往尤甚。如果杂交组合较多,要达到一公配一母的要求显然是困难的。同时,大多数种畜之间都或多或少地存在着亲缘相关,要是不予以人为地安排,则将使得后代在血缘上极不清晰,试验无法进行分析。此外,多胎动物一窝可产多头后代,假若一窝产的很多,则很难全部进行试验,那么是选一头进行试验还是选多头进行试验呢?对于这些问题,潘玉春(1991)作了一定探讨,并据配种时的公母比例、母畜所产后代被观测的个体数目以及不同组合所涉及的种畜是否相等等提出了8种配种抽测方式,这些方式同其所提出的6类群体间的组合设计方法相结合可以形成40余种设计方案。

3. 试验指标和参数。国外众说纷纭,大致说来,存在3个系统:一是 Diskerson(1969)提出来的,包括群体差异、杂种优势和重组效应3个部分;二是 Henderson(1948)提出来的,包括一般配合力、特殊配合力、母体效应和剩余反交效应等;三是由 Moan 和 Fewson(1966)提出来的,主要包括利润函数中的各种组合均数。3类指标各有特点。第一类对杂种生产性能的各种影响因素剖分得十分完整,但是多数情况下却无法进行估计。第二类比较适用,但却只适于完全双列杂交试验。第三类虽同杂交的终极经济效益直接挂钩,但是却没有的试验估计方法。国内则长期采用杂种优势和杂种优势率作为取舍候选杂交组合的标准。但是这两指标就其实质而言,反映的仅是杂种高于亲本均值的部分,因而并不适宜。吴仲贤(1984)、吴仲贤与李照定(1986, 1988, 1991)以及李照定(1991)又提出了杂种遗传力、在作力及环境力的概念,只是其中许多问题尚在研究当中。另一方面,潘玉春(1991)针对其所提出的40多种设计方案给出了相应的试验指标。这些指标主要分为两类:一类为绝对值指标,如一般配合力、母体效应等等;另一类则为相对值指标,各种各样的决定系数。其中这些所定义的決定系数对于指导杂交亲本/组合以及个体的选择和杂交育种均有很大的参考价值。

4. 设计中的一般性问题。包括试验材料、试验条件、试验场地、试验期限、组合初选、样本容量以及设计原则等等。潘玉春(1991)结合动物的特点对其作了系统探讨。

**动物杂交试验分析** 1948年, Henderson 即给出了一种分析



简单的完全双列杂交试验的最小二乘法。这种方法可用于次级样本含量不等资料。但是因其假定亲本群体完全纯合,所以使其应用存在一定的局限性。国内对杂交试验的分析,曾经长期局限在仅计算均数、标准误以及杂种优势或杂种优势率上。吴仲贤与张文灿(1983)以及曹胜炎(1989)曾对杂种优势和杂种优势率的显著性检验问题作过探讨。除此之外,虽然有些试验对配合力进行分析,但许多时候都盲目地照搬作物中的以次级样本含量相等为前提的 Griffing 法。因对动物杂交试验而言,其资料一般具有这样几个特点:(1)次级样本含量不等,(2)不同的亲本群和杂种群往往纯合程度不同,(3)牲畜之间有时存在亲缘关系,(4)试验区组可能不止一个。这些特点使得杂交试验的分析极其复杂。对此,潘玉春(1991)曾把 BLUE 和 BLUP 的基本原理同具体实际相结合,给出了其所提出的 40 余种设计方案在各种情况下的分析方法。具体包括:(1)首先给出了一种最简单情况下的分析方法。这种情况即随机效应和误差效应的方差与协方差矩阵已知,或除了误差效应之外别无其它随机效应,而误差效应不仅独立且同分布。(2)鉴于客观实际很难符合上述这种情况的要求,又给出了一种 BLUP 与 REML 相结合的分析各种试验的两步估计法。(3)考虑到杂交试验大多时候都涉及许多参数,而且随机效应和误差效应的方差与协方差常常未知且不同质,因而进一步地提出了一种逐步分析方法。

动物杂交试验虽然已经进行如此多的研究,但是仍然存在许多问题,例如:(1)如何同时测定生物学的和经济学的参数,(2)如何同时考察多个性状,(3)如何通过一个试验获得可以用于评定其它组合、其它方式的参数,(4)如何才能更加彻底地剖析杂种生产性能的各种成因,像重组损失,(5)如何抽取样本才更具代表性,(6)如何协调和组织整个试验工作等等,都有待进一步研究。

参考文献

- 1 Henderson C R. Estimation of general, special and maternal combining abilities in crosses among inbred line of swine. Phd Thess, Iowa state Coll Libr, 1948
- 2 吴仲贤,等. 杂种优势及其统计检验. 遗传, 1983, 5, 24~26
- 3 潘玉春. 动物杂交试验中的正反交循环设计法. 遗传学报, 1988, 15, 430~435
- 4 潘玉春. 经纬杂交试验分析新法:一般最小二乘. 遗传学报, 1991, 18, 23~32
- 5 潘玉春. 动物杂交试验理论研究:[博士论文]. 东北农学院图书馆, 1991

(东北农学院潘玉春博士撰;盛志廉审)

动物的性别决定、性别控制

决定动物的性别在于精子,而不是卵子。精子因为携带有 X 性染色体或 Y 性染色体而分为 X 精子和 Y 精子,它们分别与性染色体均为 X 的卵子结合,于是形成雄性(XY)和雌性(XX),从而决定胚胎不可逆地朝向某种性别发育。长期以来,科学家们企图利用分离 X 和 Y 精子的方法来对后代的性别进行控制。

**动物的性别决定** 在哺乳动物中,除生殖细胞(精子和卵子)外,每个细胞都含有一对性染色体,雄性染色体组及雌性染色体组分别为 XY 与 XX。而生殖细胞是单倍体,只含有一个性染色体。正常受精时,胚胎发育为雄性或雌性,决定于同卵子(带有一个 X 染色体)结合的精子是携带一个 X 染色体或是带有一个 Y 染色体。因此,精子内的不同性染色体决定动物的性别。

(1)睾丸决定因子。最近发现 Y 染色体上有一个叫作睾丸决定因子(TDF)的单个基因,是这个基因启动雄性性别的发育,提供向睾丸发育的遗传开关。如果没有 TDF,卵巢分化基因将会表达,卵巢控制基因发挥作用,性腺向卵巢发育,因此 XX 个体或 Y 缺如的个体发育为雌性;不论多少 X 染色体,只要 Y 染色体存在,表型就是雄性。TDF 是在对性染色体与性别不符的罕见病例

研究时发现的,这种病人从父亲接受了一个异常的染色体,他们发现一旦 TDF 从 Y 染色体转移到 X 染色体,后代中有 2 个 X 染色体,因为其中有一个 X 染色体携带 TDF,于是后代不成为女性而发育成男性,而一些具有一个 X 染色体和缺乏 TDF 的 Y 染色体,后代就发育成女性。

(2)Y 染色体性决定区的定位。1959 年,发现小鼠(Welshons 等)和人(Jacobs, Ford)的雄性决定因子是 Y 染色体。1960 年, Jacobs 进一步将人的探索范围缩小到 Y 染色体的短臂。后来在研究 XX 型男性的遗传基因过程中发现这种男性 X 染色体携带有来自父亲 Y 染色体的睾丸决定因子,它位于 Y 染色体短臂内邻近 X-Y 配对交换区间。Page 等(1987)又进一步缩小范围, TDF 应在配对交换区上,其 DNA 的碱基对为 140,将其全部分离进行克隆,得到一个高度保守的基因。该基因为一种含锌的蛋白质编码,很可能是与 DNA 结合的转录调节因子,这个基因被命名为 ZFY,很可能就是 TDF。Paler(1989)进一步研究表明, TDF 不是在这个位置上,而是在另外部分。由于能得到更多的 DNA 标记物,搜索范围便又缩小到 35 碱基对。1990 年, Koopman 发现了一个单拷贝基因,它所编码的氨基酸序列高度保守,这基因又被命名为 SRY(Y 染色体的性决定区)。但目前还不能断言 SRY 即 TDF,但可以作为 TDF 的最有希望的候选基因。

**动物的性别控制** 根据精子所携带的性染色体的不同,以及 DNA 含量的不同,建立了各种分离 X 精子和 Y 精子的方法,以达到控制后代性别的目的。为了判定精子分离效果,还要根据受精试验和胚胎的染色体检查结果,以及后代性比变化加以判定。

(1)Y 精子的 F 小体检测。Caspersson 等(1968)以奎纳克林-马斯塔德氏法对男性染色体染色,发现 Y 染色体长臂发出的荧光比其他染色体强,并且在分裂期间发现细胞中有很亮的斑点,这种亮点称为 F 小体。Barlow 等(1970)以同样的方法试验,结果有 39%~47%的人精子显现 F 小体,因而可用于识别人的 X、Y 精子。F 小体并非在全部哺乳动物精子中见到。人和大猩猩的精子中已发现有 F,也有在家畜精子中出现的报道。实验证明,显现 F 小体的精子一定是 Y 精子,而无 F 小体的则是 X 精子。

(2)沉淀法。1971 年, Schilling 报道了用不同基质如脱脂奶粉、葡萄糖、柠檬酸钠、甘油及卵黄等可使牛精子沉淀。X 精子一般比 Y 精子比重大,前者为 1.1141g/cm<sup>3</sup>,后者为 1.1134g/cm<sup>3</sup>;牛 X 染色体的面积比 Y 染色体大 1 倍,因此将沉淀于底部大多为 X 精子用于输精,结果有 70%的胚胎为雌性。但是精子的比重和大小与精子的成熟程度有关,成熟度越高,比重越大,另外离体精子还因稀释液的渗透压而有变化。有报道,人精子不论是否带有 F 小体,其细胞核面积并无差异。

(3)电泳法。Kaneko 等(1983, 1984)、Mohri 等(1988)用自由液流式电泳法处理人的精液,通常射出的精子全带有负电荷,而 X 染色质含净负电荷可能比 Y 精子高。因此在 pH7.4 时经电泳处理,靠近正极多为 X 精子,靠近负极的多为 Y 精子。日本树田博司等取正极精子给牛输精,得到 42♀:10♂的显著性比差异。Engelmann 等(1988)用此种方法得到了完全相反的结果,因为 X、Y 精子间的膜电荷差别不明显,有必要作进一步研究。

(4)白蛋白液中泳动。即是使精子通过不同浓度白蛋白的粘稠液层。美国曾有 40 多个研究单位将此法用于人类,获得 73%~76%的男孩,分离出的精子有 85%的 Y 精子。White 用此法将分离后的绵羊精液进行输精,结果顶部精液雄性为 36%,而底部精液雄性为 75%。也有相反的实验结果,可能因物种不同而有差异

(5)Sephadex 凝胶柱过滤法。Steen(1975)用 Sephadex G50 柱过滤人的精子,滤出的精液中 70%为 X 精子。Corsom 等(1984)用此法得出了类似的结果,输精后的 17 个胚胎中有 4 个为雄性,13 个为雌性。Adjmeelja(1987)曾将此法用于有男孩的丈夫的精液,用分离出的 X 精子进行人工授精,所生 48 个孩子

全部是女性。

(6)激光细胞分离器法。根据精子发出的荧光强度施加微弱的正电荷或负电荷,使精子处于电场中而分离。Johnson(1989)用激光结合荧光染料分离X精子和Y精子,分离出来的精子必须除去尾部和膜的染色剂方可用于人工授精。在兔子试验中,输入X精子形成94%的雌性胚胎,而输入Y精子的获得91%的雄性胚胎。在猪的试验中约有75%的后代性别与预测的相符。此种方法目前还未进入实用阶段,因为分离精子过程很费时,受孕率也较低。

#### 参考文献

- 1 树畜产の研究,1987,9,3~6
- 2 Palmer M S. Science Progress, 1989, 73, 245~261
- 3 中烟丰. 家畜繁殖学杂志, 1989, 5~25~28
- 4 Bradley M P. Journal of Dairy Science. 1989, 72, 12
- 5 Anne McLaren. Nature. 1990, 346, 216~21

(张一玲撰)

### 鸟类的原生殖细胞 *primordial germ cells in the aves*

鸟类原生殖细胞是由胚盘的上胚层细胞形成的,它以较大的体积和大量的糖元极易与体细胞区别开。如同其他脊椎动物一样,鸟的原生殖细胞内也有类似生殖质的生殖颗粒。鸟类原生殖细胞具有运动能力,基迁移方向与生殖腺原基吸引能力有关,与胚体内细胞外基质的合成在时空上有密切的关系。它是一种研究转向决定和转基因研究的一个较为理想的实验材料。

鸟类原生殖细胞,当它在组织或未分化性腺中常有伪足(T. Fujimori, 1976),因此在不同时期其形状略有不同。由于原生殖细胞有大量糖元,所以用PAS方法即可识别。细胞质内有大量细胞器,在原生殖细胞进入运动之前细胞质内有大量的微管和成束的微丝,它们主要分布于质膜附近,这就奠定了它具有运动能力的结构基础(刘荣秀, 1990)。在胚胎发育第10期,位于生殖新月区的原生殖细胞常呈灶状聚集,相邻的原生殖细胞有桥样结构,可能与同步成熟有关(刘荣秀, 1990)。在细胞核内缘有少量异染色质,常染色质则为均匀分布。有1~2个核仁,光镜观察核为实线条状嗜洛洛宁染色。如以RNA酶处理,核仁则不着色。根据嗜洛洛宁染色和RNA酶处理后不着色的结果,表明核仁成分为核糖核酸,但它能否表示是真正的核仁尚待进一步研究(T. Fujimoto, 1976)。1987年张天荫报道,在鸟类原生殖细胞中还没有找到生殖质一类的物质。刘荣秀(1990)报道,孵育36小时位于生殖新月区的原生殖细胞,其细胞核内、核膜间及胞质有一种圆形的电子致密颗粒(电子较密小体)。这些颗粒由点状电子致密点构成,埋于特别细的盘曲成海绵状纤维之中,其间充满基质,结构和其他动物的生殖颗粒极为相似,它是由核内产生,进入核周池,借膜破裂方式进入细胞质的。这与无尾类动物的情况十分相似(S. Holwill等, 1987)。

P. D. Nieuwkoop等(1979)指出,鸟类原生殖细胞来自胚胎早期的初级下胚层。根据自80年代以来的研究资料证明,它不是来自下胚层而是来自上胚层。H. Eyal-Giladi等(1981)将X<sup>+</sup>期鸡和鹌鹑胚盘上下胚层作嵌合胚胎,体外培养,当孵育到7~8期,用Feulgen染核异染色质作标记,证明原生殖细胞来自上胚层。(L. A. Sutasurya 1983)等通过分别培养X<sup>+</sup>期-4期鸡胚上下胚层证明,在原条形成时原生殖细胞自上胚层逐步移向下胚层,在4期时还有许多原生殖细胞仍位于上胚层中,到6期时其数目则相当少。L. E. Urven等(1988)利用一种抗小鼠胚胎肿瘤细胞单抗EMA-1作标记,通过免疫组化方法证明鸡胚原生殖细胞来自上胚层。这种标记方法时间短,并更可靠,一直可保持到配子发生前(W. Loveless等1990);以一种低聚糖抗原FC10-2作标记也证明鸡胚原生殖细胞是来自上胚层的。

M. Ginsberg等(1987)将X-X<sup>+</sup>期胚盘透明区的中央盘、边缘带和暗区进行分割培养,结果表明鸡胚原生殖细胞主要来自胚盘透明区的中央盘,并证明早在X期就已决定。当然,不同的

鸟类孵育前原生殖细胞在透明区分布的位置略有不同,鸭分布不规律,鹌鹑则位于胚盘的前半部(D. Cuminge等, 1989)。当原生殖细胞从上胚层移到下胚层后,由于下胚层的形态发生运动将它带到生殖新月区内。在4~8期原生殖细胞从生殖新月区的内胚层脱离开,位于内外胚层之间。当10期胚外中胚层侵入生殖新月区并开始形成血岛时,它就进入血管。此时胚胎前端已形成血管内,在12期可于胚外血管中找到原生殖细胞,13期胚胎开始心跳和血液循环(D. P. Nieuwkoop等, 1979)。15期原生殖细胞在卵黄动脉后1.2mm处进入相当加厚的脏壁中层体腔上皮,并入原生殖细胞的加厚上皮向将来生殖腺方向移动,16期后通过体腔角向体壁中层方向移动,最后到18期以加厚上皮位于体腔角和中肾之间即将来生殖嵴处。这表示开始并入原生殖细胞加厚的脏壁中层上皮成为生殖嵴表面的上皮(A. Nakamura等, 1987)。约在孵育3d形成未分化性腺。

M. Nakamura(1988)统计,在正常发育情况下约有20%原生殖细胞不进入生殖腺而到达别的组织中,其中90%是进入头部神经管四周的间叶组织,这也许与头部微血管网发育早也较发达以及血流较慢,导致“误入歧途”的。

为了探索原生殖细胞迁移的原因,Simon将带有生殖新月区胚盘前半部侧连于带有生殖腺原基胚胎的后半部,结果前者的原生殖细胞通过血液循环进入后者的生殖腺原基;如将去除生殖新月区的胚盘同正常胚盘作连体,结果两个胚胎的生殖腺中均有原生殖细胞,这表明原生殖细胞是通过血液循环从胚外进入胚内生殖腺的(P. D. Nieuwkoop等, 1979),并认为可能是生殖腺上皮产生一种物质吸引原生殖细胞。为了证实后一种情况, T. Fujimoto等(1984)将两天到两天半胚胎的原生殖细胞和同期生殖嵴原基一起培养,发现原生殖细胞向生殖嵴迁移,最终到达生殖嵴原基。Kawana等(1986)进一步将原生殖细胞与同期几种原基(神经管、心脏、尿囊、肝和生殖嵴)作等距离共培养,证明原生殖细胞向生殖嵴原基作定向移动,表明生殖嵴确具一种吸引原生殖细胞的能力。如将原生殖细胞培养于缺乏生殖嵴原基的胶原蛋白培养基上,它就不运动,如带有生殖嵴原基就能产生伪足(T. Kawana等, 1987)。这种生殖腺原基具有长距离吸引原生殖细胞的能力。在哺乳类动物也得到证明;还发现在培养基中有生殖嵴可使体外培养的原生殖细胞在培养物中消失的时间延长。(I. Godin等, 1990) Roguska等(1971)将小鼠后肠移到鸡胚生殖腺区,发现鸡胚生殖腺上皮也可以吸引小鼠的原生殖细胞,表明这种吸引能力还没有物种的区别。

至于生殖腺原基分泌什么物质吸引原生殖细胞的迁移, W. J. Swartz(1975)认为是一种类固醇物质,其根据是他将一种雄激素或雌激素注入孵育33h的鸡胚,由于激素的干扰,所在检查孵育到5d的鸡胚生殖腺时发现其中原生殖细胞数大为减少。这种意见还没有得到更多学者的证实。

原生殖细胞本身具有变形运动的能力。如将14~16期的原生殖细胞培养于有鸡胚背系膜的培养基上,其运动速度平均为26μm/h,最大可达58μm/h,其迁移方向由下面的间叶细胞长轴的方向决定(T. Kawana等, 1984)。这与无尾两栖类动物和哺乳类动物的情况十分相似。Y. Ando等(1983)在体内找到原生殖细胞正通过微血管内皮间隙进入胚内腔壁中层之间的图像,这些原生殖细胞先粘附在血管内表面,然后产生一个膨大的伪足状突起通过血管壁内皮的缝隙进入脏壁中层。

M. Nakamura等(1990)将10期胚胎后部1/3切去,当孵育到18期,集中于胚体的原生殖细胞有90%位于头部神经管四周,他们认为由于缺乏生殖腺,头部血管内皮和间叶细胞可能对血液循环中的原生殖细胞有一种亲和能力,导致它们集中于头部。

所有羊膜动物的原生殖细胞最终一定要集中并通过肠背系膜而到达生殖腺原基,而它在胚体组织间的迁移与细胞外基质密切相关。

E. Urven等(1989)将抗片层蛋白、纤连蛋白、硫酸软骨素、

蛋白多糖和胶原蛋白 IV 标记细胞外基质证明, 原生殖细胞的迁移与基质在时空上的出现密切相关。这种时空关系在无尾两栖类动物和哺乳类动物均已得到证实。

无论由生殖质决定还是由诱导而形成的原生殖细胞, 它们都是在通过一定的迁移途径到达生殖嵴的过程中实现其分化的。因此, 许多学者通过异位移植的原生殖细胞来研究决定了的细胞是否一定按其原定方向分化为生殖细胞。

M. Nakamura 等(1988, 1991) 虽在鸡胚正常发育的或切去生殖腺的原基中都发现有许多原生殖细胞进入胚胎头部神经管四周的间叶细胞, 由于他们没有进一步研究其后来的命运, 所以还不了解其分化情况。但是, 人们在无尾两栖类动物已取得许多结果。C. Wylie 等(1985) 将爪蟾 45 期胚胎的原生殖细胞标记后注入囊胚后期(9 期)的囊胚腔中, 结果它可分化为 3 个胚层的细胞, 表明原生殖细胞的分化是由其最终所处的部位决定的, 也表明它是一种多潜能细胞。移核实验资料也证明原生殖细胞核的多潜能性比同期其它体细胞大得多。L. D. Smith, (1965) J. H. Cleine (1986) 将爪蟾受精卵倒置后发现所发育的胚胎许多原生殖细胞位于前肠, 这些异位的原生殖细胞则分化为食道的或肠的上皮细胞。K. Ikenishi 等(1988) 将  $3H$ -胸腺嘧啶标记的原生殖细胞移植到神经胚内胚层的前半部和后半部, 结果前者的原生殖细胞由于无法迁移到生殖嵴, 以后就分化为食道的、胃的和肠的上皮, 只有后者可迁移到生殖嵴而分化为生殖细胞。因此, 他们认为对于原生殖细胞的分化, 内胚层特定的部位是一个必不可少的条件。这种受到不同于原来外界环境的影响而向不同于原来的方向进行分化的转向决定, 原生殖细胞可能是一种很好的研究对象。

B. C. Wentworth 等(1989) 提出将鸟类原生殖细胞作为一种有用的基因转移工具。他用采用紫外线照射早期鸡胚的生殖新月区域或以二甲磺酸丁酯注入鸡胚杀死原生殖细胞以及用雄鸡和雌鸡交配的方法获得不育的胚胎, 然后将所需研究的原生殖细胞注入不育胚胎来研究其发育和子代的情况。他们将显性的野生鹌鹑的原生殖细胞作为施主注入不育的隐性白羽鹌鹑胚胎受体中, 得到两个白色雌性的和一个白色雄性的子代, 然后分别再与隐性白羽鹌鹑交配, 结果在其子代中获得白羽的和体被野生型羽毛的杂合性子代。J. N. Petite 等(1990) 将芦花洛克鸡胚 X 期胚盘注入白来抗鸡胚胎的胚下腔, 53 个实验中获得 6 个羽毛表现型为嵌合体胚胎, 其中一个孵化为雄性, 他们把它与芦花洛克母鸡交配, 其目的为测定施主细胞并入宿主卵中达到何种程度, 在获得 719 个后代中有两个表现型为芦花洛克, 表明施主细胞中的原生殖细胞已并入宿主胚胎的卵中, 从其血液和精子 DNA 指纹图像来看不同于来抗鸡。从嵌合体血液 DNA 指纹图像来看仅为芦花洛克所有。因此, 实验结果表明分离芦花洛克 X 期胚盘细胞提供了来自神经嵴的色素细胞、红细胞和生殖细胞。所以, 他们认为这种移植胚盘细胞技术可能有助于禽类转基因以及通过体外培养建立多潜能干细胞的研究。

参考文献

- 1 Eyal-Giladi H. et al. J Embryo Exp Morph. 1981, 65, 139
- 2 张天荫. 细胞生物学杂志, 1987, 4: 145
- 3 张天荫. 原生殖细胞(丁汉波等主编·发育生物学). 北京: 高等教育出版社, 1987
- 4 Urven E. et al. Anat Rec. , 1989, 224: 24
- 5 Wentworth B C. et al. Poultry Sci. 1989, 68, 799
- 6 Loveless W. et al. Development, 1990, 108: 97
- 7 刘荣秀. 动物学报, 1990, 36, 114
- 8 Petite J N. et al. Development, 1990, 108, 185
- 9 Godin I. et al. Development, 1990, 108, 357
- 10 Nakamura m. et al. Anat Rec, 1991, 229, 109

(山东大学张天荫教授撰)

哺乳动物早期胚胎发育 development of mammalian

early embryo 动物胚胎发育涉及到生命的延续, 是奥秘的生命现象的焦点之一, 历来受到人们的关注。早在公元前 5~4 世纪, 希腊希波克拉底(Hippocrates)和亚里士多德(Aristotle)即观察了鸡、鸟贼和蜜蜂的胚胎发育变化。可是, 胚胎学真正形成一门独立的学科则是在 17 世纪以后。直到 19 世纪 40 年代, A. von Kolliker 发现精子是由精巢细胞形成的。1876 年, O. Hertwig 在地中海海胆中观察到精子入卵和两个核结合的现象, 这是对授(受)精作用最早的描述。

哺乳动物胚胎发育研究工作在取材和技术上难度较大。然而这方面的研究有着特殊意义, 因为人类本身即属于哺乳动物, 与人类关系密切的家畜也是哺乳动物。因此, 对哺乳动物发育生物学的研究不仅有重要的理论意义, 而且与人类生存利益密切相关, 它成为当前发育生物学中的主攻领域。

在哺乳动物中, 小鼠是研究胚胎发育的理想材料。特别是自 1956 年 W. K. Whitten 首次创用小鼠早期胚胎体外培养液之后, 许多学者体外培养小鼠早期胚胎相继获得成功。这一技术上的突破性进展, 有力地推动了哺乳动物早期胚胎发育的研究。

从卵受精到着床前这一时期的胚胎称为早期胚胎。在此发育时期, 胚胎大体上可分为受精卵、2 细胞、4 细胞、8 细胞、桑椹胚和囊胚几个发育阶段。其中几个关键性的发育变化是受精和雌雄原核的形成与汇合、8 细胞胚的挤紧作用、滋养层细胞的分化。

哺乳动物的卵子为均黄卵, 物质分布比较均匀, 无明显的极性, 只是把极体所在的部位称动物极, 相对的一侧称植物极。在动物极有一无微绒毛区, 亦无 Con A 结合部位, 质膜下方无皮质颗粒, 此区域约占细胞表面的 20%, 精子不在此区内入卵。精子入卵的部位是在植物半球。受精后 1~2h, 卵排出第 2 极体; 4.5~6.5h, 形成雌雄原核; 雌原核靠近第 2 极体, 体积小于雄原核; 8~10h 开始合成 DNA, 持续 4~8h(因品系而异)。与此同时, 两个原核向中央汇合; 约在 22h 发生第 1 次卵裂, 在第 1 个细胞周期中  $G_2 + M$  的时间约为 3~8h, 细胞质分裂时间长约 5~10min, 第 1 次卵裂面与极体所在的部位一致。第 2 个细胞周期长约 18~22h, 其中 S 期 4~7h,  $G_2 + M$  约 12~15h。在第 2 次卵裂时, 两个分裂球不同步分裂, 一个较早, 因而形成短时间的 3 细胞胚胎。第 2 个分裂球的分裂面与前一个的分裂面垂直, 使 4 个分裂球呈十字交叉形排列。经过 3 次卵裂, 胚胎进入 8 细胞阶段, 这是哺乳动物早期胚胎发育的关键时期之一。胎盘动物胚胎在此阶段要发生挤紧作用, 分裂球间接触面积扩大。灵长类的和人的胚的挤紧作用发生在 16 细胞阶段。有袋类胚胎不发生挤紧作用。挤紧作用使分裂球之间不仅接触面加大, 而且在接触面的质膜上装配成紧密连接和间隙连接结构, 从而使胚胎内部与外界相通的细胞间隙被封闭, 相邻细胞间建立通讯关系。挤紧作用使胚胎发育为囊胚建立起结构基础。

学者们对挤紧作用的化学的和结构的变化做了较详细的研究, 实验资料表明分裂球的表面和内部都发生明显变化, 开始出现极性。胚胎经第 4 次卵裂变为桑椹胚(16 细胞), 此次的卵裂面与细胞的游离面平行, 外分裂球仍保持极性。第 5 次卵裂后, 胚胎内部先分裂的细胞之间出现裂隙, 此即囊胚腔的开始, 这时胚胎的细胞数为 30~34 个。在其他胎盘动物中, 囊胚腔出现的时期有所不同, 大鼠胚和猪胚约在 30 个细胞时, 家兔胚为 128 个细胞, 仓鼠胚则为 16 个细胞, 某些原始胎盘动物甚至要更早。

在囊胚中产生两种细胞, 一种是在胚胎外周的扁形细胞, 称为滋养层细胞; 另一种位于胚胎内部, 偏向囊胚腔的一侧的细胞群, 称为内细胞团细胞。胚胎本体是由内细胞团发育而成。两种细胞系的产生是胚胎细胞的第 1 次分化。Tarkowski 等(1967)和 Hillman 等(1972)的研究资料表明, 桑椹胚的表面细胞分化为滋养层细胞, 内部细胞发育为内细胞团, 他们主张, 桑椹胚细胞的分化命运是由位置效应决定的, 这就是所谓的内—外学说 (inside—outside hypothesis)。另有实验资料证明, 将桑椹胚细胞分散开重新聚集, 被包围在内部的细胞全部分化为内细胞团, 外圈细胞分化成滋养层细胞。虽然在桑椹胚中细胞的位置决定其分化命

运,但在早期,细胞仍具有可塑性,在16细胞阶段把内部细胞移到胚胎外表则可发育成极性表型细胞。由于细胞的不对称分裂和细胞内微管分布,使桑椹胚的表层细胞出现极性,滋养层细胞系的产生与细胞的极化有关。滋养层的重要功能是运输囊胚腔液和调节囊胚腔液的离子组成。滋养层细胞的顶面膜上有 $\text{Na}^+$ 通道,基侧膜上有 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ATP酶;经此酶的介导,滋养层细胞以主动运输的方式驱动液体穿胞进入囊胚腔,促使囊胚腔逐渐扩张。

在早期胚胎发育过程中,细胞的发育潜能有所变化。受精卵具有分化出各种组织发育为完整个体的潜能,这种能力称为全能性。 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 分裂球(相应发育阶段的1个分裂球)仍具有全能性。在囊胚阶段,滋养层细胞系只能分化出胚外外胚层组织,不能产生胚内组织,失去全能性。可是中晚期囊胚内细胞团的原始外胚层细胞仍具有分化出各种组织的潜能,具有多能性。Evans和Kaufman(1981)即是利用内细胞团细胞的这一性质建立了可以在体外传代培养的小鼠多能胚胎干(ES)细胞。Eistetter(1989)用16~20细胞桑椹胚建立多能ES细胞亦获得成功。ES细胞具有胚胎细胞的性质,可分化出各种组织,包括生殖细胞,是制作嵌合体动物和转基因动物的理想材料,应用价值很高。为了抑制ES细胞在体外培养过程中发生分化,需要有抑制分化的因子存在,因而必须使用成纤维细胞作为饲养细胞,但这却会增加操作技术的复杂性。最近发现,白血病抑制因子(LIF)可有效地抑制ES细胞的分化,LIF是一种糖蛋白,分子量为 $43 \times 10^3$ ,LIF的提纯和应用必将简化培养ES细胞的操作步骤,有利于ES细胞的广泛应用。

早期胚胎在基因组程序表达的调控下有条不紊地发育。对细胞中mRNA的定量和定性分析表明,调控机制是由母本转向胚胎的。受精卵继承相当量的母本RNA,这些RNA是在卵母细胞发育中积累的,受精后被动用。在一细胞胚胎中,前体mRNA的合成极少,其蛋白质合成的信息主要来自贮存的母本mRNA。这些早期合成的蛋白质的主要功能是调节胚胎细胞核基因组的活性。在第1次卵裂之后,mRNA的含量迅即下降。在2~4细胞阶段,核仁分化,转录和翻译活动活跃,合成各种主要的RNA和组建细胞器的蛋白质成分。由于受精作用激发了胚胎发育,在不同阶段发生不同基因表达,合成不同的蛋白质产物。8细胞阶段开始出现阶段专一胚胎抗原1(SSEA-1);囊胚阶段,滋养层细胞的重要表型特征是合成细胞角质蛋白。早期胚胎中尚存在转录后和翻译水平的调节,其详细机理尚有待于进一步研究。

对哺乳动物早期胚胎发育规律的研究已获得许多成果,有的已陆续转化为生产力。受精卵的基因导入技术导致“超级小鼠”的诞生,为结合遗传工程创造新种哺乳动物预示可能性。体外受精和胚胎体外培养技术,使试管婴儿和试管动物的孕育获得成功,为克服不孕症和促进家畜良种繁育提供了手段。胚胎移植、胚胎切割、胚胎冻存、性别鉴定等技术已在家畜良种繁育方面得到应用。由此可见,围绕哺乳动物早期胚胎所创立的发育工程是在理论研究的基础上兴起的并形成一个活跃的研究领域,发展前景十分广阔,它必将为提高人类自身素质和创育新良种家畜做出更巨大的贡献。

#### 参考文献

- 1 Evans M J, et al. Establishment in culture of pluripotential cells from mouse embryo. *Nature*. 1981, 292: 154~156
- 2 Johnson M H. A role for cytoplasmic determinants in the development of mouse early embryo? *J Embryol, Expt Morphol*. 1986, 97 suppl, 97~121
- 3 沈三兵,等. *实验生物学报*, 1988, 21: 189~196
- 4 Pederson R A. potency, lineage, and allocation in preimplantation mouse embryos. In: *Experimental approaches to mammalian embryonic development*, ed by Rossant J, et al. Cambridge University Press, Cambridge. 1988. 3~34
- 5 Eistetter H R. Pluripotent embryonic stem cell lines can be established from disaggregated mouse morulae. *Dev Grow*.

Diff 1989, 31: 275~282

- 6 Pease S, et al. Isolation of embryonic stem (ES) cells in media supplemented with recombinant leukemia inhibitory factor (LIF). *Dev Biol*. 1990, 141: 344~352
- 7 Heath J D, et al. Growth and differentiation factor of pluripotential stem cells. *J Cell Sci*. 1990, suppl 13: 75~85
- 8 韩贻仁. *细胞生物学杂志*, 1990, 12: 154~160
- 9 Robinson D H, et al. Epithelial sodium conductance in rabbit preimplantation trophectodermal cells. *Dev Biol*. 1991, 147: 313~321
- 10 Maro B, et al. Cell polarity and microtubule organization during mouse early embryogenesis. *Dev* 1991, suppl 1: 17~25

(山东大学韩贻仁教授撰)

#### 哺乳动物授(受)精 fertilization in mammals 授

(受)精是指两性配子(精子和卵子)相互结合而形成合子的过程,它标志着胚胎发育的开始,也是一个新生命的起点。研究、了解哺乳动物授(受)精的过程和机理,无论对于探索生命的发生、发展的奥秘,还是对于提高动物繁殖力、控制人类的生育以及进行生物工程研究都具有十分重要的理论意义和实践意义。

长期以来,人们对哺乳动物授(受)精进行了广泛的研究。Barry(1843)、Bischoff(1854)和Meissner(1855)最早报道了免精子进入卵子的现象。但最早系统描述哺乳动物授(受)精的还是Van Beneden,他观察到兔子(1875)和蝙蝠(1880)雄原核及其与卵子的融合,并证明第1次卵裂的染色体均等地来源于精子和卵子。随着组织学技术的改善,Sobotta(1895)首先观察到小白鼠精子入卵后第2次减数分裂的完成和第2极体的排除。后来,Sobotta(1910)对大白鼠,Lams(1913)对豚鼠,Mainland(1930)对雪貂做了类似的观察。在形态观察的基础上,人们又开始把配子分离出来,观察其在体外条件下的发育情况。Shenk(1878)首先进行了兔卵子的体外培养和体外受精;Long(1912)用小白鼠和大白鼠配子进行了受精实验。继1951年Austin和Chang同时发现精子获能现象之后,Dauzier(1954)进行了兔体外授(受)精并观察到体外卵裂。1959年,Chang把体外受精兔卵移植给受体母兔,出生第一批体外授(受)精哺乳动物。

由于电子显微镜的出现和体外授受精技术的不断完善,人们对哺乳动物授(受)精的过程和机理有了比较深入的了解。授(受)精并不是精子机械地穿入卵子的简单过程,它包含着两性配子间一系列复杂但又十分协调的相互作用。两性配子都必须首先做好准备才能进行正确的相互作用,完成正常的授(受)精过程(谭景和,1988)。哺乳动物的精子不同于水生无脊椎动物的和高等脊椎动物的精子,它们在刚离开雄体时还不能马上授精,只有在雌性生殖道内呆一段时间之后才获得授精能力。精子在雌性生殖道内发生生理变化而获得授精能力的过程叫获能(Austin, 1960)。获能时精子的主要变化之一是其质膜的生化变化,其中包括外周糖蛋白的逐渐去掉或改变、面有糖蛋白的重排、膜胆固醇的减少以及某些膜磷脂的成分和分布的变化(Yanagimachi, 1988)。这些膜变化的结果是便于精子发生顶体反应(Yanagimachi, 1989)。精子获能,在正常情况下在发情雌性动物的生殖道内进行,主要是在输卵管峡部进行(Hunter, 1987)。在人工培养基中精子也可以获能。

精子在输卵管峡部停留一段时间之后便开始向输卵管壶腹部迁移。在排卵前很久就交配的动物,精子开始迁移的时间是一程度地与排卵相同步的(Smith等,1987)。即使在排卵时或排卵后交配的动物,精子也要在输卵管峡部停留一段时间再迁向壶腹部。并不是所有的峡部精子都向壶腹部迁移,只有少量精子到达壶腹部参与授精(Smith等,1987)。开始向壶腹部迁移的精子已完全获能,一旦接触卵子便可使之受精(Yanagimachi, 1989)。这些精子往往表现出一种特殊的激烈运动,称为超常运动

(Yanagimachi, 1981)。超常运动是由于精子获能时尾部质膜的分子变化所致,它有助于精子的迁移和穿过卵子外面的附属结构(Yanagimachi, 1988)。

顶体完整的获能精子可以穿过卵丘,但不能穿过透明带(Yanagimachi, 1989)。要穿过透明带,精子必须发生顶体反应(Austin 等, 1958)。所谓顶体反应,就是精子头部的顶体外膜与精子质膜发生多处融合并破裂,释放出顶体酶类的过程(谭景和, 1988)。顶体反应发生的机理是,获能时精子表面的大分子外衣被去掉,暴露出顶体上方质膜中的受体,后者与透明带糖蛋白或其它因子结合后便引起顶体外膜与质膜的点状融合。在仓鼠和小白鼠,于到达透明带表面发生顶体反应的精子不能与透明带相结合,故无法穿入(Gwatkin, 1977)。精子与透明带结合靠透明带上的精子结合受体与精子表面的透明带受体相识别并结合来完成。小白鼠透明带上有 3 种精子结合受体:糖蛋白 ZP<sub>3</sub>、ZP<sub>2</sub> 和 ZP<sub>1</sub>。顶体完好的精子头部质膜先与 ZP<sub>3</sub> 相结合,后者便激发顶体反应(Wassarman, 1987),然后,顶体反应后的精子再以其顶体内膜与 ZP<sub>2</sub> 相结合,保证精子固着在透明带上,释放水解酶溶解透明带(Bleil 等, 1988)。关于精子穿入透明带的机理,目前有两种假说:一是机械说,认为顶体反应主要是暴露出由顶体内膜和其下方物质构成的穿孔器,精子靠穿孔器和机械运动穿入透明带;二是酶说,认为透明带表面发生顶体反应的精子释放的透明质酸酶可溶解透明带外层中的透明质酸,顶体蛋白酶水解某些糖蛋白使透明带软化,顶体内膜上结合着的顶体蛋白酶随着精子的运动而分解透明带分子(Yanagimachi, 1988)。

穿过透明带的精子头立即附着到卵质膜上,而后精卵质膜相互融合,精子进入卵细胞质。在有袋类动物,精卵融合过程开始于顶体内膜和卵质膜之间(Rodger, 1982)。而在真兽哺乳类动物,精子则先以其赤道段质膜与卵质膜相融合(Moore, 1983),只有发生过顶体反应的精子其赤道段质膜才能与卵质膜相融合(Yanagimachi, 1988)。精子赤道段质膜与卵表面微绒毛发生融合,而后融合膜破裂形成一个通道,使精子核与卵细胞质相混。精子质膜与卵质膜融合成一个连续的细胞膜,包着合子。

精卵质膜融合时,精子质膜上的特殊蛋白质嵌入卵质膜而使后者的膜脂类发生紊乱(Yanagimachi, 1987)。结果,卵质膜通透性改变,钙离子大量流入或自卵内钙库释出。钙的增多激发细胞内外的 Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> 交换,使胞质内 H<sup>+</sup> 浓度下降,解除抑制蛋白的抑制作用,导致氧化、脂类代谢及蛋白质和 DNA 合成等代谢途径的活化。卵子活化的明显形态变化是皮质颗粒与卵质膜融合并将其内容物外倾到卵周隙中,即所谓的皮质反应。外倾出的皮质颗粒内容物中含有的蛋白酶或糖苷酶溶解 ZP<sub>3</sub> 而阻止其它精子与透明带相结合,引起所谓的透明带反应。皮质颗粒的膜或其内容物还改变卵质膜的性质,阻止补充精子穿入卵质膜,引起所谓的卵质膜反应(Yanagimachi, 1988)。

精卵融合后,遏止在第 2 次减数分裂中期的卵母细胞核恢复减数分裂,排除第 2 极体。剩下的单倍体染色体,后来形成核膜而组成雌原核。同时,精子核膨大,去掉原有核膜,再形成新的核膜而成为雄原核。精子核在卵内的解聚和膨大靠精核解聚因子的作用。在有些动物,精核解聚因子的活性与生发泡的破裂有关(Yanagimachi, 1988)。原核核膜主要来自内质网,但雄原核一部分核膜来自未崩解的精子核膜(Longo, 1985)。原核发育期间 DNA 大量合成。在有些动物,也开始转录 RNA 和合成新蛋白质(Yanagimachi, 1988)。卵细胞质内存在着雌原核生长因子和雄原核生长因子。在不良条件下体外成熟的卵子内不出现雄原核生长因子。卵内的雄原核生长因子量是有限的,多个精子入卵时,由于对该因子的竞争,只有几个形成雄原核,或全都不能形成雄原核(Yanagimachi, 1988)。精卵融合使卵细胞质中的骨架系统也被激活,并发生重新组装而把两原核拉到细胞中央。接着,两原核核膜崩解,两套单倍体染色体混合成一套双倍体染色体而排列到第一次卵裂的中期分裂板上。大多数哺乳动物从精卵融合到第一次卵裂的时间为 12h 以上。对于人,这一阶段则至少需要

24h(谭景和, 1988)。

授(受)精是动物生命周期的最关键过程之一。了解授(受)精过程对于人类优生和提高动物繁殖力都非常必要,许多问题还有待进一步研究。据 Yanagimachi(1990)预计,未来对授(受)精的研究将主要集中在:(1)卵丘在授(受)精过程中的作用;(2)顶体与精子穿过透明带的关系;(3)制作人工透明带,用以检查精子与透明带的相互作用;(4)精卵质膜融合及原核融合,研究顶体反应后精子质膜是否也具有像病毒那样的促融蛋白,促进精卵融合;精卵质膜是否带有互补分子,保证融合前二者牢固结合。(5)易化授(受)精,主要研究用某些药品促进运动性差的精子的活力,便于穿过透明带;将不活动精子注入卵周隙内授精,在透明带上造洞,协助精子进入。

参考文献

- 1 Austin C R. The Mammalian Egg, Oxford, Blackwell, Company, 1961
- 2 Gwatkin R B L. Fertilization Mechanisms in Man and Mammals. Plenum Press, New York, 1977
- 3 谭景和. 生物学通报, 1988, 11: 12~14
- 4 Yanagimachi R. Mammalian fertilization, In: E. Knobil et al. (eds.) The Physiology of Reproduction. Raven Press, Ltd. New York, 1988. 135~185
- 5 Yanagimachi R. Sperm Capacitation and gamete interaction, J Reprod Fert Suppl. 1989, 38: 27~33
- 6 Yanagimachi R. Research on Mammalian gametes and fertilization: My personal view, In: Bavister, B D et al. (eds.) Fertilization in Mammals, Serno Symposia USA, Norwell, MA. 1990. 401~411 .

(东北农学院谭景和教授撰)

哺乳动物体外发生

通过人工将雌性或雄性配子在体外成熟、受精和发育,这种孕育哺乳动物新的生命开端的方法。当前只能使合子体外发育到胚泡(囊胚),要完成胎儿发育的全程,还需移入受体母亲的子宫。由此而诞生的新生幼仔叫试管动物,人则称试管婴儿(Test-tube Baby)。体外发生的主要意义是能充分挖掘良种母畜的生殖潜力,提供丰富的卵源,培育新的生命;不仅是扩大珍稀濒危动物繁殖的新途径,也是人类不育症患者的福音,民族优生的有效手段。其主要内容是卵细胞体外成熟,培养条件的优化,精子获能;体外受精和体外发育等。

早在 1878 年维也纳的 Schenk 首先报导培养卵子的工作,但体外受精未获成功。1912 年 Mark 等进行小白鼠的培养,结果进展不佳。衡量培养效果的标志是卵子的存活力和发育状况,而其影响的关键因素是培养条件与方法。及至 50 年代前后,在培养基、培养系统上有了较大的改进,从而取得了明显的进展。Chang (1946)、Hammond (1949)的主要贡献是发现应向生理盐溶液中添加适量的血清或蛋白,补偿了酸性 pH 值,使体外卵裂成功。Whitten (1956、1957)的最大成就是指明应提供的气相条件是 5%CO<sub>2</sub> 与空气或氮,而不是 CO<sub>2</sub> 与氧的混合气体。Yanagimachi (1963)的贡献是用液体石蜡复盖培养基液面以稳定 pH 和渗透压。Brinster (1963)的贡献是发现刚受精的卵不能利用复杂碳水化合物应以丙酮酸盐或乳酸盐代替葡萄糖。由于早期的出色成就,Whittingham (1968、1976)取得小白鼠卵体外受精、体外发育到胚泡而后再移植成功。Dorfman (1969)培养殖大白鼠卵成功。早期发现牛血清对牛胚有致毒作用,Rowson 等 (1969)应用 TCM-199 合成培养基体外培养牛胚并移植成功。实践证明,要使哺乳动物胚胎体外培养并移植成功,必须选用钾、钠、钙盐平衡,渗透压适宜的碳酸氢缓冲液,补加血清或蛋白;抗生素,对刚受精卵应以丙酮酸盐或乳酸盐作能源,以液蜡复盖液面,并有稳定的 5%CO<sub>2</sub>、空气或氮的混合气相培养系统。胚胎体外培养成功的基础无疑为卵母细胞体外成熟和受精提供有益的经验。Pincus (1939)取人卵巢未成熟卵体外培养到产生第一极体。1955

年 Chang 培养兔卵巢滤泡卵母细胞至第一极体出现;1957 年发现精子获能的规律;1959 年他将由供体输卵管采到的卵母细胞,在体外用获能精子受精体外发育后移植给受体,得到了成活的仔兔。从此人们开始相信哺乳动物精子入卵前必须获能,获能才能参与受精,受精可在体外完成的事实。体外受精的技术得以迅猛发展,先后已有 20 种实验动物和家畜取得体外受精成功,10 多种获得试管个体。Edwards(1978)等成功地获得世界上第 1 个“试管婴儿”布朗路伊丝(Louise Brown),Bracktt(1982)获得第 1 头“试管牛”,Balmaceda(1984)获得“试管猕猴”,日本花田章(1985)获得“试管羊”等。现在哺乳动物体外发生的研究已在世界许多国家开展并应用,进展比较迅速。

关于对滤泡卵母细胞(简称卵泡卵,是卵巢中尚未成熟排出的卵)的研究利用,早期人们仅作探索性的研究,体外培养进展到初级卵母细胞阶段。但广为研究和利用是在家兔体外发生成功之后。采集卵泡有以下几种途径:自然发情母畜的输卵管;自然发情或人工诱导发情母畜卵巢成熟的滤泡和屠宰母畜卵巢未成熟或行将闭锁的滤泡。前两种途径采到的卵泡卵已是成熟或正在成熟的卵子,体外受精不需要培养或稍事培养即行。取得体外发生和移植成功的有小白鼠(Makherjee, 1972),兔(Brackett, 1973)和人。但是由未成熟或闭锁滤泡中啄出的卵泡卵行体外受精时必须经体外成熟培养,这个过程是指将生发泡破裂前的初级卵母细胞,在特定的条件下培养到第一极体排出,并进入第 2 次成熟分裂中期。人工培养卵泡卵,无论在培养液、培养条件以及培养系统上都与同类早期胚胎的培养程序相似,但所不同的是卵泡卵体外成熟要在培养液中添加适量的激素,因为它在体内自然成熟过程是受其调控的,所以人工模拟成熟要加 FSH 和 LH,此外有人添加雌二醇, PMSG, HGG 和催乳素的。近期还有人另加卵巢滤泡细胞或输卵管上皮细胞与卵泡卵进行共培养。已经取得卵母细胞体外成熟的有小白鼠(Cross 等, 1970),兔(Motlik, 1974),牛(Shea 等, 1976; Parrish 等, 1986),羊(Moor 等, 1977; Staigmiller 等, 1984)和马(Fulk 等, 1981)等。卵母细胞体外受精存在一定的难度,为了简化其复杂程序,人们把体外成熟的卵母细胞移入已交配的母畜子宫,使之体内受精发育,然后再回收用于移植,取得成功的有兔、牛、羊和猪等。体外成熟的卵泡卵在体外或体内都能正常受精和发育的事实,这就为利用卵泡卵代替输卵管奠定基础。从体外发生的发展远景来看,这是一项十分重要的研究领域,因为可以更好利用屠宰或老残母畜的卵巢,不仅可以更充分地挖掘家养母畜的繁殖能力,而且有望解决难以获得的珍稀濒危野生动物的卵源。利用卵巢,乃是一个十分丰富、经济而又重要的卵库。

哺乳动物体外发生的主要条件是精子的成熟和获能。和低等脊椎动物不同,鱼类、两栖类动物的卵子和精子可以在体外直接接触,完成受精,而哺乳动物直接射出的或由附睾中采出的精子不能体外受精,只有当这些精子在雌性生殖道内停留一段时间之后取出来才能完成体外受精。这一现象是 Chang 和 Austin(1951)发现的。精子在存留期间形态和生理上发生了一系列的变化,才获得与卵子结合的能力, Austin 将此现象叫“精子获能”。人们了解,精子是在雌性生殖道的旅程中获能的,获能起始于子宫而完成于输卵管,输卵管是最有效的获能部位。精液射入阴道的动物(兔),获能部位始于阴道。精子在发情母畜体内获能完成较快。但在体情母畜体内较慢。人们还了解,体外受精必须用成熟的精子,成熟的精子才能获能。成熟的精子应取自射出的或附睾尾部,附睾头部的精子尚未成熟,不能获能。Chang 等(1975)发现,哺乳动物精子获能无种的特异性,如滤泡液、眼前房等组织器官液也能使精子获能。获能的精子如与精液再混合,便会发生去能,去能精子还可再次获能,可见体内获能是一个非常复杂的、反复的过程。至于精子能否在体外获能?回答已是肯定的了。早期,人们曾用  $\beta$ -淀粉酶,仙台病毒用于家兔;滤泡液、血清用于仓鼠;环腺苷酸用于大白鼠精子体外获能。其后发现人工合成液可使动物精子体外获能,近年来,人们用  $Ca^{++}$ 载体对山羊,用肝

素、胺基葡萄糖对牛的精子体外获能均有成效,近期还有人用改变培养液的  $H^+$ 浓度或渗透压使精子体外获能,取得显著效果。

哺乳动物体外发生有其十分复杂的过程,研究难度极大,时至 90 年代,虽已取得不少突破性进展,但仍处于试验阶段。展望未来,从生殖工程和遗传工程的发展动向,从畜牧生产、临床医学和人类优生的应用趋势,它仍是一个极为重要和十分活跃的研究领域。体外成熟的卵母细胞和体外获能的精子不如自然的受精率高;对卵泡卵尚未达到充分利用,有待在研究条件和方法上的改进和提高。哺乳动物受精是一个特别复杂的问题,弄清精子体外获能的机理有利受精机理的解决。腹腔镜和 B 超等先进手段正走入试管动物的临床研究,不仅对家畜繁殖而且对珍稀濒危野生动物的增殖和保护都有积极意义。日本三浦猛(1989)试管培养鳟鱼精子成功,这是精母细胞体外成熟的首次突破,引起人们的极大兴趣与关注,这一成果的应用,对家畜和濒危动物的人工繁殖将起主动作用,也是男性不育症患者的特大喜讯。

#### 参考文献

- Whitten WK. Culture of tubal mouse ova. Nature. 1956, 177:96
- Chang MC. Fertilization of rabbit ova in vitro Nature (Lond.) 1959, 184:466~467
- Brinster RL. A method for in vitro cultivation of mouse ova from two-cell to blastocyst. Exp. Cell Res. 1963, 32:205~208
- Yanagimachi R. Fertilization of hamster eggs in vitro. Nature. 1963, 200:218~232
- Kirton KF, et al. Sperm capacitation by uterine fluid or Beta-amylase in vitro. Science. 1965, 150:618~619
- Whittingham DG. Fertilization of mouse eggs in vitro. Nature. 1968, 200:592~593
- Rowson LEA. Fertility following egg transfer in cow, effect of method, medium and synchronization of oestrus. J. Reprod. Fert. 1969, 18:517~523
- Stephoe P C, Edwards, R. G. Birth after the reimplantation of human embryos. Lancet. 1979, 2:880
- Edwards R G, et al. Human conception in vitro. Academy Press. London. 1980
- Balmaceda G P, et al. Successful in vitro fertilization and embryo transfer in cynomolgus monkeys. Fertil. Steril. 1984, 42:791~795
- Parrish J J, et al. Role of heparin in bovine sperm capacitation. Biol. Reprod. Suppl. 1986, 1:221
- 尹海林. 小鼠体外受精获能成功, 科学通报, 1987, 19:1519~1520

(西北大学马玉斌教授撰)

#### 体外受精 in vitro fertilization

体外受精又称试管动物技术,是指把体内受精动物的卵子和精子取出在试管内混合、受精而形成胚胎的过程。在哺乳动物,体外受精胚胎一般在体外发育到一定时期后移植到受体雌性动物输卵管或子宫内,妊娠到产仔。体外受精的主要意义包括:(1)使人们有机会在体外避开母体影响去研究受精和早期胚胎发育的形态、生理和生化变化及其机理;(2)提供大量精确控制发育阶段的胚胎,用于转基因动物、细胞核移植和胚胎性别鉴定等胚胎工程的研究;(3)治疗人类因输卵管阻塞等因素造成的不孕症;(4)挽救濒危物种。

1878 年,Shenk 最先尝试哺乳动物体外受精,进行兔体外受精实验。1912 年,Long 用大白鼠和小白鼠做了体外受精试验。由于未能排除孤雌生殖和转移到受体母体输卵管之后发生受精的可能性,加之判断受精的组织学标准不恰当,故使得上述早期的实验结果大都令人难以置信(Gwatkin, 1977)。直到 1951 年 Austin 和 Chang 发现精子获能现象之后,体外受精技术才有了

突破性进展。1954年, Dauzier 等把从兔子宫收集来的精子与卵子放在一起培养, 观察到合子的卵裂过程。1959年, Chang 把采用 Dauzier 等人的方法受精的兔卵子移植到受体母兔体内, 获得世界上首批体外受精动物。随后, 许多人相继在绵羊、仓鼠、小白鼠、人、大白鼠、猴、山羊、猪和牛等哺乳动物获得体外受精胚胎, 其中移植后获得试管动物的有小白鼠、大白鼠、人、牛、恒河猴、狒狒、山羊、绵羊、猪和猫等。

体外受精技术的关键是卵子的准备、精子的获能处理和早期胚胎培养。

各种哺乳动物最早的体外受精妊娠, 都是用子排卵前后获取的体内成熟卵子体外受精的。由于体内成熟卵子必须经手术获取, 以及超数排卵的排卵数和排卵时间都很不稳定, 故它并不是理想的卵子来源。实践证明, 自屠宰动物卵巢取未成熟卵母细胞并在体外培养成熟可为体外受精提供丰富而便宜的卵子来源。1985年 Tsafiri 报道, 自小的有腔卵泡分离的初级卵母细胞在体外培养相当于体内从 LH 高峰到排卵之间的时间就能恢复减数分裂而到达第 2 次减数分裂中期。实验动物已经证明, 只有当雌性动物达到一定年龄(小白鼠 15~21 日龄; 仓鼠 23 日龄; 大鼠 20~26 日龄)时其小的有腔卵泡卵母细胞才具有这种完成减数分裂的能力(Toyoda 等, 1990)。但在家畜还没有这方面的资料, 只能根据卵泡的大小和卵丘卵母细胞复合体的形态来选择卵母细胞。在猪(Motlik 等, 1986)和牛(Suss 等, 1988), 自 2~5mm 卵泡获取的包有多层卵丘细胞的卵母细胞体外成熟效果很好。但直径小于 1mm 卵泡的卵母细胞在体外则不能恢复减数分裂或不能停顿在中期(Tsafiri 等, 1975), 而大于 5mm 的卵泡则往往是闭锁的。早期的研究资料证明, 尽管体外完成减数分裂的卵母细胞看起来形态正常, 但其机能未必正常; 移植到受体后只有 1% 发育为活胎儿(Trounson 等, 1977)。体外成熟卵母细胞最常见的机能异常是不能使精核解聚和形成雄原核(Motik 等, 1974)。为提高体外成熟卵母细胞的质量, 近年来人们详细考察了激素(猪, Yoshida 等, 1989; 牛, Stubbings 等, 1988; 羊, Moor 等, 1977)、卵泡液(牛, Liefried 等, 1980; 猪, Naito 等, 1988)、颗粒细胞(牛, Critser 等, 1987; 羊, Crozet 等, 1987; 猪, Mattioli 等, 1988)、血清或白蛋白(Younis 等, 1989)、培养温度和碳酸氢盐(Eng 等, 1986)、生长因子(Down, 1989)以及肝素(Down, 1989)等对卵母细胞体外成熟的作用, 取得很大进展。由于有人证明, 在 LH 刺激后卵母细胞必须在卵泡内经过 6~8h 的诱导期才能在生理上完全成熟(Moor 等, 1981), 故卵母细胞体外成熟的方法趋于用颗粒细胞与包有卵丘细胞的卵母细胞共同培养, 以模仿卵泡内诱导期所发生的细胞间相互作用。在绵羊(Stagmiller 等, 1984)、牛(Liefried 等, 1987)和猪(Mattioli 等, 1988)实验都证明, 颗粒细胞可促进卵母细胞的生理成熟。1990年 Toyoda 等报道, 猪和牛的卵泡液都可促进体外成熟卵母细胞的生理成熟。在牛(Critser 等, 1986)、绵羊(Cheng 等, 1988)和猪(Mattioli 等, 1989)等动物, 体外成熟卵子体外受精后移植都已成功地产生后代。

早期成功的体外受精都是用体内获能精子做的。但自 1964 年 Yanagimachi 等取得仓鼠附睾精子的体外获能成功以来, 精子体内获能已基本为体外获能所取代, 至今研究过的所有动物的附睾精子都可用基本相同的方法在体外获能。所用的培养液是改良的 Krebs-Ringer 或 Tyrode 氏液加牛血清白蛋白。1989年, Bavister 在培养液中加入精子运动因子牛磺酸或亚牛磺酸和激活因子肾上腺素获得仓鼠体外受精的满意效果。Ball 等(1983)和 Nagai 等(1984)用附睾精子的体外获能的方法获得牛和猪的体外受精成功。许多人研究了家畜刚射出的精子体外获能方法, 其中用钙离子载体 A23187 处理的方法适用于多种动物精子(Toyoda 等, 1990)。1986年, Parrish 等在培养基中加肝素使牛精子体外获能成功。1988年 Niwa 等证明, 在含有肝素的受精液里加入咖啡因可大大提高牛卵子的体外受精率。1986年 Hamano 等证明, 授精前把猪精子以高密度进行前培养可使其获

能。1991年吴光明证明, 猪精子高密度前培养与咖啡因结合起来的体外获能方法明显优于咖啡因结合肝素的精子获能方法。1987年, Crozet 等应用“上游”法使绵羊刚射出的精子体外获能成功。1989年, kusunoki 等把山羊刚射出的精子置于不含底物的 BO 液中密封试管培养, 体外获能成功。

各种动物胚胎体外培养时都于不同时期出现发育阻断现象, 但人们已找到一些克服阻断的方法。最初, 为了克服阻断, 人们把牛的和羊的体外受精胚胎先移植到中间受体(绵羊、牛或兔)输卵管内, 使其发育到桑椹胚或囊胚后再移植给受体(Lu 等, 1987)。新近出现的共同培养方法在逐渐取代中间受体培养法。1988年, Goto 等把与卵丘细胞共同培养发育的牛体外受精囊胚移植后妊娠成功。与体内发育相比, 用卵丘细胞共同培养的胚胎发育率相当低(Toyoda 等, 1990)。同时, 用输卵管组织(Eyestone 等, 1989)或滋养层泡(Heyman 等, 1987)进行共同培养最有可能导致发明成分明确的家畜胚胎培养基。1989年 Pollard 等报道, 用极化单层输卵管上皮细胞共同培养的牛体外受精胚胎, 通过 8-细胞阻断到达 16-细胞至囊胚期的比例高达 70%。

关于精子获能, 卵母细胞成熟和胚胎发育等步骤的调节因子还知道得很少, 体外成熟卵母细胞体外受精的妊娠率还很低, 还需要先进的技术才能常规应用于畜牧生产实践。

#### 参考文献

- 1 Gwatkin R B L. Plenum Press, New York, 1977
- 2 Bavister B D, et al. *Therogenesis*. 1988, 29: 145~154
- 3 Toyoda Y, et al. *IVF in domestic animals*, In: Bavister, B D et al (eds.) *Fertilization in Mammals*, Serno Symposia USA, Norwell, MA, 1990. 335~347
- 4 Gordon I, et al. *Therogenesis*, 1990, 33: 77~87
- 5 徐君. 西南民族学院学报(自然科学版), 1991, 17: 97~102
- 6 吴光明. 东北农学院博士论文, 1991

(东北农学院谭景和教授、华南师范大学吴光明博士撰)

**精子获能** capacitation 哺乳动物精子不同于海生无脊椎动物的和低等脊椎动物的精子, 它们在离开雄体时还不能马上使卵子受精, 只有在雌性生殖道内呆一段时间才获得授精能力。精子在雌性生殖道内停留并发生一系列生理变化而获得使卵子受精的能力的现象称为精子获能。研究哺乳动物精子获能的过程和机理, 对于了解哺乳动物授(受)精机理, 改进体外授(受)精技术以及控制人类生育都具有重要的意义。

1951年, 张明觉(M. C. Chang)和奥斯汀(C. R. Austin)分别在兔子和大鼠发现精子获能现象。他们通过把精液注射到大鼠卵巢囊或兔输卵管内的方法观察到, 精子必须在雌性生殖道内停留一段时间才能穿透卵子外面的附属结构。为验证这一实验结果, 1954年奥斯汀又进行了一组实验, 他把大鼠的正常交配时间(排卵前 8~10h)改为排卵后 3~10h 交配。结果发现, 尽管交配后半小时精子就到达受精部位, 但只有到交配 2.5~3h 精子才开始穿入卵子。同年, 蒂博(C. Thibault)等人证明, 从交配后 12h 兔子宫收集的精子在体外可以使卵子受精, 但从直接射出的精液取来的精子则不能使卵子受精。1957年, 张明觉又发现, 当把输精后 6h 自子宫取出的精子放回精液内制成悬浮液再放入输卵管内时, 精子便失去授精能力。但当把这样的精子悬液再放到子宫内一段时间后, 精子便又恢复了授精能力。奥斯汀把获能精子遇到精液而失去授精能力的现象叫作“去能”, 去能精子在子宫内又恢复授精能力的过程称为再获能。于是, 人们推断, 精液里一定有某些抑制物(去能因子)粘附到精子表面而阻止其授精。

尽管对精子获能的确切机理尚不完全清楚, 但奥斯汀(1985)、克萊格(E. G. Clegg, 1983)和奥利芬特(G. Oliphant, 1985)都提出它是逐渐去掉精子于附睾内成熟期间和接触精液后附着或整合到其头部(特别是顶体区)质膜上的某些物质的过程。结果, 暴露出精子的一些受体部位, 使其能够特异性地与卵子受体或释放的某些物质相互作用并于接触卵外附属结构时发

生顶体反应。1989年,柳町(R. Yanagimachi)提出获能的主要步骤之一是精子质膜的生化变化,包括外周糖蛋白的去除和改变,固有糖蛋白的重排以及膜脂类成分的改变等。1972年约翰逊(W. L. Johnson)等证明,把兔精子放到子宫内10h后则失去与抗精清的荧光抗体相结合的能力。1973年奥利芬特等证明,抗精清蛋白的抗血清能使刚射出的精子凝集,但不能凝集已在子宫内培养12h的精子。1975年希尔(W. B. Schill)等发现,抗猪精清蛋白酶抑制因子的荧光抗体可结合到刚射出的精子上,但不能与在子宫内停留一段时间的精子相结合。1986年,奥卡贝(M. Okabe)等应用单克隆抗体证明,来自小鼠附睾体的一种抗原不断结合到精子质膜上,附睾尾部精子顶体部质膜上都有这种抗原。但当精子进入卵周隙后,此抗原于膜上消失。同年,他们还证明,另一种抗原在附睾精子质膜上检测不到,但却明显地出现在获能后小鼠精子头部质膜上。1986年J. K. Volgmayr等发现,绵羊刚射出的精子于子宫液内孵育期间从表面释放出3种糖蛋白,同时也吸收一种蛋白质;在输卵管液内,精子自表面释放两种蛋白质,当把精子先放入子宫液再入输卵管液培养时,则它们自输卵管液内吸收多种蛋白质。这说明,体内获能期间精子表面既释放又吸收某些成分。戈登(L. M. Gordon)等1985年发现,质膜上的外周蛋白易被螯合剂或强度升高的离子所释放,故柳町(1988)认为精子质膜上释出的一定是外周蛋白,很可能是粘连蛋白。因粘连蛋白在膜内起固着固有蛋白的作用,所以它们的释出一定有利于精子质膜内固有蛋白在脂质双层之间更自由运动。1984年,特萨利克(J. Tesarik)应用冰冻断裂方法证明,在豚鼠的和人的精子获能过程中,质膜固有蛋白发生位移,出现许多无固有蛋白区。1982年比尔勒(E. L. Bearer)发现,这些无固有蛋白区很少,甚至不含胆固醇和阴离子磷脂。1979年戴维斯(B. K. Davis)发现,大鼠精子体外获能期间,培养液中的白蛋白可接受到由精子质膜释放的胆固醇。获能期间精子质膜的这些变化显然有利于顶体反应时顶体外膜与精子质膜相融合。1976年戴维斯发现,用富含胆固醇的培养液处理兔体内获能精子可大大降低其授精能力。

1990年弗雷泽(L. R. Fraser)提出,不仅精子顶体反应和超激活运动需要钙,而且获能过程本身也需要钙。1978年辛格(J. P. Singh)发现,精子获能期间钙的摄入量增加。1985年蒙克斯(N. J. Monks)推测,钙的增多可激活腺苷酸环化酶。1984年斯坦(D. M. Stein)发现,在获能期间精子腺苷酸环化酶活性增强。1985年海因(R. V. Hyne)提出,该酶活性增强便激活依赖cAMP的蛋白激酶,使某些膜蛋白磷酸化,导致膜通透性改变。1981年曼(T. Mann)等还发现,此酶系统的激活还与获能开始和结束后精子的运动加强有关。1985年贝尔(E. J. Boell)报道,精子获能期间糖分解速度和耗氧量都大大提高。1988年柳町指出,这种代谢增强可能与获能精子在顶体反应前出现的超激活运动有关,特别是获能精子质膜的改变有利于精子运动装置得到能量。

不同动物精子在雌性生殖道内获能所需的时间不同,不同动物精子体内获能开始和完成的部位也不同。1985年古尔第(J. E. Gould)和兰伯特(H. Lambert)证明,在阴道射精动物(如兔子和人)获能过程开始于精子通过子宫颈或其粘液时。1969年贝德福德(J. M. Bedford)证明,先经子宫液再经输卵管液处理的兔精子获能效果最好。1988年柳町报道,子宫内射精动物(如许多啮齿动物和猪)精子主要是在输卵管内获能。1984年亨特(R. H. F. Hunter)证明,尽管获能部位不同,但各种动物精子总是在输卵管峡部停留一段时间才最后到达壶腹部。1986年菲尔斯特(N. L. Frist)等发现,只有发情期羊输卵管液才能使牛精子获能和发生顶体反应,而黄体期输卵管液则不能使牛精子获能和发生顶体反应。1988年柳町综述指出,有许多物质被认为是体内获能剂,其中包括β-淀粉酶和β-葡萄糖苷酶、蛋白酶和唾液酸苷酶、芳香基硫酸酯酶、墨角藻糖苷酶和乙酰氨基葡萄糖、碳酸酐酶、固醇硫酸酯酶、氨基己糖多糖、儿茶酚胺以及牛磺酸和亚牛磺酸。他同时

指出,各种动物精子体内获能条件种间特异性并不严格。

在体外,不加任何雌性生殖道成分便可使精子获能和授精。但这并不意味着体外获能条件与体内的是等同的。1981年P. Viriyapanich和1982年西迪基(A. K. S. Siddiquey)都报道,体内获能精子的授精效果要远远超过体外获能精子。但不同动物精子体外获能条件有很大差别,同时有着严格的种间特异性。1990年戈登(I. Gordon)等报道,牛精子最好的体外获能方法是用改良的Tyrode-Lactate液加肝素。1990年M. Yoshida等用TC-199培养液加咖啡因进行精子获能获得猪体外授精成功。1985年帕里什(J. J. Parish)等证明,5mM葡萄糖可抑制肝素对牛精子的获能作用。1979年迈兹尔(S. Meizel)等发现,仓鼠精子必须在含有儿茶酚胺类(如肾上腺素)和牛磺酸或亚牛磺酸的培养液内才能存活和获能。除培养液成分外,还有其它一些因素影响精子体外获能(柳町,1988)。大多数动物精子在37~38℃下能够充分获能,但绵羊的和猪的精子则必须在39℃下获能。在相同条件下,某些动物个体的精子获能速度要比另一些个体的快得多。刚射出的精子不如附睾尾部精子容易获能。尽管1972年格沃特金(R. B. L. Gwatkin)等报道卵丘细胞在体外可以使仓鼠精子获能,但其在获能和授精中的作用尚有争议。

人们对精子获能仍有许多问题亟待解决。其中有:(1)为什么体内获能精子的授精效果比体外获能精子好;(2)精子获能的确切生化机理是怎样的;(3)卵丘细胞在精子获能中的作用;(4)精子在输卵管峡部贮存期间与输卵管上皮之间的相互作用等。

参考文献

- 1 Austin C R. Membrane Fusion events in fertilization, J Reprod. Ferti 1975,44:155~166
- 2 Gwatkin R B L. Fertilization Mechanisms in Man and Mammals Plenum Press, New York; 1977
- 3 Yanagimachi R. Mammalian fertilization, In: E. Knobil et al. (eds) Physiology of Reproduction, Raven Press Ltd, New York; 1988. 135~185
- 4 Yanagimachi R. Sperm capacitation and gamete interaction, J Reprod Fert Suppl. 1989,38:27~33
- 5 Gordon I, K H lu. Production of embryos in vitro and its impact on livestock production, Theriogenology. 1990,33:77~87
- 6 Fraser L R. Sperm capacitation and its modulation, In: Bavister, B D et al. (eds) Fertilization in Mammals, Serno Symposia USA, Norwell, MA. 1990. 141~153

(东北农学院谭景和教授撰)

透明带反应 zona reaction 在单精受精动物(包括哺乳动物),若有多个精子入卵(多精受精)胚胎就会早期死亡或发育异常。经长期进化,动物发生许多阻止多精入卵的机制,其中最重要的是透明带反应和卵质膜反应。哺乳动物成熟卵子质膜下分布着一些单层膜包着的皮质颗粒,受精时,立即引起卵子发生皮质反应,皮质颗粒与卵质膜相融合并将其内容物胞吐到卵周隙中。胞吐的皮质颗粒内容物中含有蛋白酶和糖苷酶,可溶解透明带表面上的精子结合受体,阻止其它精子穿入透明带,即为透明带反应。胞吐后的皮质颗粒膜便补到卵质膜上,这些膜或皮质颗粒内容物便改变卵质膜性质,阻止多余精子进入,即为卵质膜反应(谭景和,1983)。研究透明带反应的机理,对于了解哺乳动物受精机理,提高动物繁殖率,控制人类生育和优生优育具有重要意义。

1956年,澳斯汀(C. R. Austin)等最早提出透明带反应的概念。后来,不少学者实验证明皮质颗粒引起透明带反应。1971年巴罗斯(C. Barros)等发现,用受精时仓鼠卵子所排除的物质(主要是皮质颗粒的内容物)处理的卵子不能再受精。1973年格沃特金(R. B. L. Gwatkin)证明,从受精或电刺激后小白鼠的和仓鼠的卵母细胞收集来的皮质颗粒物质可改变卵子透明带,致使精子

指出,各种动物精子体内获能条件种间特异性并不严格。



不能与之结合。1974年,斯坦哈特(R. A. Steinhardt)用钙离子载体 A23187 激活仓鼠卵子提前释放皮质颗粒而引起透明带反应。1977年沃尔夫(D. P. Wolf)用皮质颗粒浸出物引起小白鼠卵子的透明带反应。

1980年邓巴(B. S. Dunbar)等证明,猪透明带含71%蛋白质,19%中性己糖,2.7%唾液酸和2.4%硫酸。各种动物透明带都含有几种糖蛋白。1988年柳町(R. Yanagimachi)报道,透明带主要靠非共价键来维持其结构完整性,尽管分子间也有一些二硫键存在。1984年伊斯特(L. J. East)等证明,小白鼠透明带的ZP2遍及整个透明带分布。同年赫德里克(J. L. Hedrick)证明,猪的ZP1、ZP2和ZP3都分布在透明带外表面上。1980年,菲利普斯(D. M. Phillips)用扫描电镜观察发现,透明带的外表面为有窗的网格状结构,而内表面则为不规则的颗粒状结构。1984年塔尔博特(P. Talbot)证明,透明质酸就分布在透明带外层的网格状区内。

一些学者证明海胆卵子的皮层颗粒内有一种类胰蛋白酶蛋白,其作用是使卵黄膜举起和灭活精子受体(格沃特金,1977)。1975年卡罗尔(E. J. Carroll)等把这种蛋白酶分离成两类,一类叫卵黄膜分层酶,能使卵黄膜与卵质膜分离开来;另一类叫精子受体水解酶,可改变卵黄膜表面而阻止精子的结合。1974年格沃特金等证明,从受精仓鼠卵子收集的皮质颗粒物质不仅改变仓鼠透明带,阻止多精入卵,而且对小白鼠卵子也有作用,即不具有种属特异性。这种物质对热敏感,用胰蛋白酶抑制因子处理可使其失去作用。这说明,哺乳动物的透明带反应也是一种类胰蛋白酶蛋白引起的。这与1971年哈特曼(J. F. Hartmann)提出的“透明带内的精子受体对于蛋白酶具有敏感性”的观点是相符合的。1975年奥伊卡娃(T. Oikawa)等人证实,胰蛋白酶可阻止仓鼠卵子的体外受精。1976年,列平(V. S. Repin)等用1%的十二烷硫酸钠溶解大白鼠的和小白鼠的透明带并将所得溶液进行电泳分析,结果发现,受精之后有新的蛋白带出现。这表明,受精时有些透明带蛋白发生水解。然而,1977年格沃特金则认为,由于皮质颗粒内容物必须弥散通过卵周隙和穿过透明带,故能够到达透明带表面而产生与外部应用蛋白酶所产生的同样变化的酶活力可能是不足的。实际上,1975年奥伊卡娃等人已发现,当把仓鼠卵子接触胰蛋白酶的时间减少到10min时,既不阻止受精发生,也不损失其与麦芽凝集素相结合的能力。他们还观察到,在胰蛋白酶中浸25min的卵子仍能被麦芽凝集素凝集,而从输卵管取来的受精卵子则不能为该凝集素所凝集。

1985~1987年瓦瑟曼(P. M. Wassarman)等的研究资料证明,至少在小白鼠,透明带反应是由于皮质颗粒胞吐释放出的蛋白酶或糖苷酶水解(灭活)糖蛋白ZP3所引起的。ZP3的主要作用是使小白鼠精子牢固结合到透明带上。ZP3一旦水解,透明带无法固着精子,也不能催化其发生顶体反应。结果,精子便不再能穿过透明带(柳町,1988)。1989年莫勒(G. G. Moller)等证明,A23187活化的小白鼠卵子排除一种蛋白酶,可水解ZP2,阻止顶体反应后精子与透明带的结合。该酶特点是对胰酶抑制因子不敏感。

海胆卵子受精后除了精子受体失活和卵黄膜举起而外,卵黄膜还发生硬化,不再为巯基乙醇所溶解(格沃特金,1977)。1971年拉利耶(R. A. Lallier)发现,施用蛋白交连抑制剂可阻止海胆卵子受精时卵黄膜的硬化。因此,他认为卵黄膜之所以发生硬化,是由于二硫键形成和肽链间发生交连的结果。在某些哺乳动物,受精后透明带也发生硬化。1980年古利亚斯(B. J. Gulyas)等证明,小白鼠卵子皮质颗粒含有一种过氧化物酶,催化二酪氨酸交连而使透明带硬化。1967年索劳斯(D. Szollosi)认为受精后透明带对蛋白酶和巯基乙醇抵抗力的增强与阻止多精入卵有关。但格沃特金(1977)则认为这是不可能的,其根据是仓鼠卵子透明带具有很强的阻止多精入卵的能力,但其受精后对蛋白酶和巯基乙醇的抵抗力并不增强,而不具有阻止精子入卵能力的兔卵子透明带在受精后对蛋白酶和巯基乙醇的溶解作用却表现出明显

的抵抗力。格沃特金认为,透明带防止多精受精主要与其精子受体溶解有关而与硬化过程无关,后者的作用在于保护卵裂胚胎顺利通过输卵管运输到子宫。

通过研究自然交配或人工授精后进入卵周隙和卵细胞质的精子数目发现,不同动物阻止多精入卵的机制不同。有些动物主要靠透明带反应来阻止多精入卵,如仓鼠、狗、田鼠和绵羊就是如此;有的动物则主要依靠卵质膜反应来阻止多精受精,如兔、鼠和金花鼠。还有一些动物,如大白鼠、小白鼠、豚鼠、猫和雪貂则既依靠透明带反应又依靠卵质膜反应来防止多精入卵(T. Ducibella 1991)。1985年A. H. Sathananthan等证明,人类卵子在体外受精时发生强烈的透明带反应。他们发现,即使用过量的精子授精,大量的精子结合到透明带表面上时,多余精子也很少穿过透明带内层。1984年,克罗泽(N. Crozet)在牛和绵羊、1991年谭景和等在山羊都发现穿入受精卵透明带的多余精子均位于透明带外层。这说明,透明带反应的部位很可能在其内层。

不同时期卵子透明带阻止多精入卵的效力不同。1971年张明觉(M. C. Chang)等发现,从排卵前卵泡收集的卵子体外受精的多精受精率要明显高于新排卵的卵子。1970年赞布尼(L. Zamboni)认为,这是由于迁移到卵外周部皮质颗粒数目不足的缘故。1977年格沃特金发现,刚排卵(注射HCG后17h)收集的新鲜仓鼠卵子体外受精时全部为单精受精,但在注射HCG后21h和24h收集卵子时,每个卵子中的平均精子数分别为1.3和8.6个。

透明带反应是哺乳动物受精的重要方面。在过去,人们对其过程、性质及种属差异进行了广泛的研究,取得重要进展,但仍有许多问题未解决。1990年柳町提出,今后10a将是与透明带和卵质膜相互作用的精子表面物质认识有重大进展的时期。在不久的将来,人们将有可能无负作用地阻止或促进精子与透明带和精子与卵子间的相互作用;可以通过化学的或基因工程的方法人工合成透明带或其某种成分(如ZP3),用以研究不同动物间的精子与透明带的相互作用。例如用带有透明带分子的小白鼠透明带来检查人精子的受精能力。

#### 参考文献

- 1 Gwatkin R B L. Fertilization Mechanisms in Man and Mammals. Plenum Press, New York, 1977
- 2 Yanagimachi R. Mammalian Fertilization, In: E. Knobil et al. (eds.) The physiology of Reproduction Raven Press, Ltd. New York, 1988. 135~185
- 3 Yanagimachi R. Research on mammalian gametes and fertilization: My personal view, In: Bavister, B D et al. (eds) "Fertilization in Mammals" Serno Symposia USA, Norwell, MA. 1990. 401~411
- 4 谭景和,等. 山羊卵子受精及原核期胚胎质成分的微细结构研究. 解剖学报, 1991. 22: 309~312
- 5 Ducibella T. Mammalian egg cortical granules and the cortical reaction, In: Wassarman, P M (ed.) Elements of Mammalian Fertilization Volume I, CRC Press, 1991, 205~231

(东北农学院谭景和教授撰)

**贝类神经内分泌学** 双壳类的神经系统通常由3对神经节组成,即脑神经节、足神经节和脏神经节。近几年的研究已经在贝类神经节及其他组织中发现了具有激素作用的生物活性物质,其中大多为生物活性肽类(BAP)。

在贝类神经内分泌研究中常用的方法包括:

1. 染色方法。常用于神经分泌细胞的定位和神经内分泌系统的形态学研究。
2. 切除和移植实验。为了证明某些神经内分泌器官的调控作用,过去常常采用这种方法,但在双壳类中用处不大,因为手术常常引起贝类损伤。

3. 细胞和器官培养方法。通常也是用来证明神经内分泌器官的调控作用,常用固体培养基,以比较靶组织单独培养或与神经节一起培养的组织学变化。这种方法只能用于定性研究,很难得到可重复的定量结果,而且由于外植体的异质性及神经激素从培养的神神经节向其他组织扩散的不均一性,实验往往需要大量重复,才会得到具有统计学意义的结果。

4. 生物化学方法。主要用于神经激素的提取、分离、纯化和特性的研究。常用色层分离法来纯化神经激素,包括粒径选择、离子交换和色层聚焦等步骤,但需要的样品量较大,如对于贻贝,每次色层分析需要1 000~1 500个脑神经节。近年来,一些先进的分析技术正被引入贝类神经激素的鉴定和纯化中。Reis-Henriques 等用气质联用色谱法(GS-MS)和放射免疫分析(RIA)等方法,在贻贝(*Mytilusedulis*)中分离鉴别出8种甾醇类化合物,证明在贝类中也有性激素存在,高效液相色谱(HPLC)被用于前列腺素类和单胺类(多巴胺和去甲肾上腺素)的分析中。

5. 细胞免疫化学方法(IC)。细胞免疫化学方法在肽能系统

的研究中十分重要,利用 IC 可以证明细胞中某些神经分泌产物的存在及其在神经元中的转移,IC 还是不同类型细胞定位的重要手段。多肽抗体在细胞免疫化学中的应用,使某些未知生物活性多肽(BAP)的分离和鉴定成为可能,应用这种方法已在贻贝中鉴定出脑啡肽类似物、 $\alpha$ MSH 类似物等的存在。获得贝类神经激素免疫学特征的另一条途径是制备脑神经节提取液的单克隆重抗体,可以通过选择在细胞免疫化学中只识别一种神经分泌细胞类型的抗体,来筛选某种激素的单克隆重抗体。应用这种方法, Van Minnen 和 H. H. Boer 制备了 *L. stagal* 整个中枢神经系统提取液的单克隆重抗体(ALMA),并将 ALMA 用于生物活性物质的分离纯化中,定位了产生排卵激素的尾背的细胞(CDC)、产生生长激素的浅绿色细胞(LGC)和产生雌性促性腺激素的背体(DB)。

在贝类中已发现或已分离纯化的神经激素种类繁多,下面仅以贻贝为例列表 1、表 2。

表 1 在贻贝(*Mytilus edulis*)中已发现的神经激素

| 神经激素                  | 来源            | 作者                                         |
|-----------------------|---------------|--------------------------------------------|
| 生长激素释放抑制因子            | 脑神经节和血淋巴生殖腺小管 |                                            |
| CCK 类似物               | 脑神经节          | Mathieu and Van Minnen, 1989               |
| FMRF <sub>a</sub> 类似物 | 脑神经节足神经节      | Martin et al., 1986                        |
| $\alpha$ MSH 类似物      | 足神经节          | Martin et al., 1986                        |
| hCG 类似物               | 血淋巴           | Martin et al., 1991                        |
| 脑啡肽类似物                | 脑、足、胃神经节      | Anderson et al., 1986, Martin et al., 1986 |
| 内啡肽类似物                | 消化腺和消化道上皮     | Anderson et al., 1986                      |
| 性激素                   | 整体            | Reis - Henriques et al., 1990              |

\* 包括孕激素、雄烯二酮、睾酮、5 $\alpha$ -脱氢睾酮、17 $\beta$ -雌二醇、雌酮和雄烷二酮。

表 2 在贻贝(*Mytilus edulis*)中已分离纯化的神经激素

| 神经激素               | 来源          | 性质            | 分子量     | 作者                                          |
|--------------------|-------------|---------------|---------|---------------------------------------------|
| 促生殖原细胞有丝分裂因子(GMSF) | 脑神经节        | 酸溶性、亲水性、热稳定性  | <5 000  | Mathieu, 1985, 1987<br>Mathieu et al., 1988 |
| 糖原转运激素             | 脑神经节侧神经节血淋巴 | 部分热稳定性被胰蛋白酶失活 | >20 000 | Mathieu et al., 1991                        |
| 促糖原合成因子            | 脑神经节        |               | 1 500   | Maehiwu et al., 1991                        |
| 促精白合成因子            | 脑神经节        | 亲水性多肽         | 1 000   | Toullec et al., 1988                        |

细胞化学研究将神经分为 a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub>、a<sub>3</sub>、a<sub>4</sub> 4 类,并发现 a<sub>1</sub> 型细胞的神经分泌周期与配子发生的周期密切相关,说明这些细胞可能在生殖调控中起作用。所有神经节都含有 a<sub>1</sub> 型细胞,其中脑神经节含有 75% 的 a<sub>1</sub> 型细胞。Lubet 的发现切除脑神经节可引起配子释放,这可以解释为脑神经节里存在着一个排卵抑制因子,当然也可能是由于手术引起脑神经节中促排卵因子的释放。通过采用固体培养基的器官培养实验, Lubet 和 Mathieu 证明贻贝的脑神经节具有促性腺的功能,生殖原细胞有丝分裂、雌性生殖细胞减数分裂的重新启动,雌性生殖细胞卵黄发生前期和卵黄发生期都是由脑刺激的。脏神经节也有这种功能,但不如前者重要。到目前为止,已在贻贝的脑神经节和血淋巴中分离纯化到了一个促生殖原细胞有丝分裂因子(GMSF),可在 C18 反相柱上分离,用甲醇洗脱,说明其具有亲水性。这个因子可促进生殖原细胞的 DNA 合成,提高性腺的 ATC 酶活性。有意义的是,在贻贝中也已鉴定出 8 种性激素。它们的含量与生殖周期密切相关,说明性激素参与贻贝的生殖调控,性激素可能通过调节内源单胺类的代谢而起作用。单胺类(如多巴胺)和血清素(5-HT)参与扇贝

(*patoupectenyess-oensis*)的生殖调控,在脑神经节或生殖腺中已发现许多血清素能神经元,并已鉴定出有内源 5-HT、多巴胺和去甲肾上腺素存在。在生殖期多巴胺的含量很高,产卵后含量下降。应用 HPLC 技术, Osada 等在 *P. yessoensis* 脑神经节和生殖腺中发现 5 种前列腺类物质,其中 PGF<sub>2 $\alpha$</sub>  在生殖期卵巢中含量很高,产卵时则明显下降。Matsutani 等认为高含量的 PGF<sub>2 $\alpha$</sub>  可以在卵子成熟前阻止排卵,直到其发育成熟,当卵发育成熟后 5-HT 或多巴胺释放,阻止 PGF<sub>2 $\alpha$</sub>  继续产生,开始排卵。升温可提高 5-HT 的含量,因此升温或注射 5-HT 的含量都可引起排卵。紫外线处理的海水和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 也通过多巴胺能-血清素能机制诱导排卵。目前,这个结果已被广泛应用到贝类的人工养殖上,利用温变刺激、紫外线照射海水和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 等可有效促进性腺发育,诱导产卵。

器官培养实验证明,脑神经节可促进糖原转运,而脏神经节则可促进糖原合成。Robbins 已从脑神经节的酸抽提物中鉴定出一个糖原转运激素(GMH)。GMH 通过剂量依赖方式抑制糖原合成,促进糖原转运。在血淋巴中也发现具有 GMH 活性。有越

的是,在GMH的色层分离中,还同时发现了一个具有拮抗作用的因子,只不过其作用在未分离的抽提物中被GMH所掩盖。在贻贝,糖原的转运和储藏周期与其生殖调控的年周期密切相关。这种代谢由内分泌调控,因而也与生殖调控有关。

1971年,Lubet首次在覆螺 *Crepidada fornicata* 中发现了一个贝类生长激素。应用包含所有细胞类型的外套膜边缘体细胞酶解悬液,醋酸铵缓冲液从贻贝脑神经节中鉴定出一个蛋白合成激活因子(PSAF),在血淋巴中也存在着一个类似的因子。它们以剂量依赖的方式作用于体细胞,同时又可促进RNA和DNA的合成。有意义的是,这个因子并不是种特异的,它对于其他双壳类也有活性。

神经激素的提纯可望在水产养殖上得到广泛的实际应用:(1)神经激素可用于养殖种类的性成熟控制、幼虫和幼贝的生长,以及营养效率的提高,因而可能对双壳类的育苗和中间暂养有用,剩下的主要问题是给药的方法,是通过食物途径还是直接施药于水环境中;(2)有些神经激素已得到完全分离纯化,并已获得其氨基酸顺序,如已经知道 *L. stagnalis* 的排卵激素(CDCH)由36种氨基酸组成。(R. H. M. Ebbernk等,1985)这就为人工合成这些激素提供了可能性,尤其重要的是,已知氨基酸顺序,就可以人工合成其mRNA,进一步合成cDNA,这将为基因工程在水产养殖上的应用带来极大的方便,因而具有广泛的应用前景。

中国在贝类神经内分泌学研究方面基本上还是空白,国内尚无人进行这方面的工作。随着贝类养殖业的发展,许多生产上的问题需要从神经内分泌学上来解决,开展这方面的研究已成为当前的急需。

(中国科学院海洋研究所王春德撰)

### 以海洋动物为模型的神经生物学

神经生物学的起源可追溯到公元130~200年,罗马医生盖伦在不同节段上切断人的脊髓,观察原有功能的丧失。随后,神经生物学研究逐渐形成两个主要分支:神经解剖学和神经生物学。

20世纪60年代初,随着神经生物学与其许多学科在发展过程中自然交叉、综合,不同科学的理论、技术大量融合,逐步形成了“神经科学”的概念。鉴于神经科学取得的重大进展,以及这些进展所揭示的广阔前景,科学家认为神经科学的发展正处于关键时刻。

1. 生物电信号的产生及传播种。海洋动物枪乌贼(*Loligo pecki*)的巨大神经纤维为科学家弄清所有神经细胞产生并传播电脉冲的机制起了关键作用。霍奇金、赫胥黎和艾克斯也因此于1963年获得了诺贝尔奖金。

2. 神经细胞的轴浆运输。同样,也是由于一些海洋动物如枪乌贼、龙虾及沙蚕等具有巨大轴突而成为重要的研究材料。从而使这个领域得到重要的进展和突破。

3. 学习与记忆的神经机制。学习和记忆是脑的高级神经活动,近十几年来,学习与记忆已成为神经科学中颇富成果的研究领域。海洋动物在学习与记忆研究过程中也起了举足轻重的作用,例如软体动物海兔(*Aplysia*)具有习惯化(habituation)和敏感化(sensitization)的初级学习形式;海螺(*Hermisenda crassicornis*)具有条件反射学习方式。

4. 感觉生物学及行为调控。海洋动物特别是低等海洋无脊椎动物大多具有敏锐的感觉机制,以感受生存环境中的各种信息(如光、声、化学信息、电、磁、热学等),从而表现出相应的行为反应如摄食、御敌、生殖、附着、集群、洄游等。海洋动物感觉生物学及行为调控研究是一个既具有理论意义又具有广阔应用前景的领域。

一般认为,许多海洋动物都代表着生物复杂性进化过程中的早期阶段,从而常常具有较简单的结构。研究简单的生物系统经常能够使我们很容易地看到问题的本质。在神经科学的发展中,通过分析简单的神经系统来研究脑的高级整合功能,已被证

明是极富成效的。这些研究的基本前提是:无论是简单的还是复杂的神经系统,就其生物电信号的发生、传输、处理而言,存在着相同的原理;而组成神经系统的基本单位——神经元的结构和功能则是相似的。

中国进行神经生物学研究的历史不长,开展海洋动物神经生物学研究的历史更短。这些研究工作主要涉及以下几方面。其一,神经系统的大体解剖及神经元的结构与功能。这方面的工作比较零散,可供参考的资料亦不多。徐科等对中国对虾(*Penaeus chinensis*)腹神经索巨大神经纤维结构和功能的研究最具有代表性,有一定的特色、系统性和深度。1961年,首次报道了中国对虾腹神经索中巨大纤维的传导速度非常高,竟超过了哺乳动物最大纤维的最高值,为80~20m/s。后来Kusano和Hama等人在日本对虾(*Penaeus japonicus*)腹神经索中发现了类似的现象,也开展了类似的研究。神经元结构和功能方面的工作还有对沼虾(*Macrobrachium nipponense*)神经纤维髓鞘的超显微结构的研究;对乌贼(*Sepia esculenta*)神经的研究;对沼虾腹部肌肉感受器的研究;对中国对虾牵张感受器的研究等。其二,感觉生物学及行为调控。感觉生物学研究的内容较广,包括视觉、听觉、化学感觉(嗅觉、味觉、内部化学感觉及趋化性等)、电感觉、磁感觉、热感觉等。近年来,国内较活跃的研究领域包括视觉和听觉,化学感觉研究也在逐步展开。

国际上,视觉生物学的研究一直是感觉生物研究中最活跃的领域。研究内容大致包括:(1)视网膜的结构和功能;(2)视中枢的结构和功能;(3)视觉运动和模式识别。在中国,水生动物视觉生物学及行为调控的研究大致涉及3个方面内容:视觉运动反应(Optomotor reaction);视觉通道的结构及视网膜运动反应(retino motor response);视网膜电生理特性。

视觉运动反应,是指动物为了将其视野内的运动目标保留在视网膜的一点上而产生的一种移动反应。研究水生动物视觉运动反应,对于阐明其趋流和集群机制、探讨其视觉特点和游泳能力具有重要的理论意义,并且在设计、改进渔法和控制海洋经济动物的行为上也有较大的实用价值。

何大仁等(1985)对鲮鱼(*Mugil cephalus*)、鲮鱼(*Laieolabrar japonicus*)、黄鳍鲷(*Sparus latus*)、鲤鱼和鲫鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)等5种幼鱼进行了视觉运动反应实验,并将幼鱼对运动条纹的反应分成三个阶段:跟随、活泼运动和无反应,结果表明反应率随照度的降低或屏幕转速的提高而下降;另外,对尼罗罗非鱼(*Tilapia nilotica*)、鲫鱼(*Carassius auratus*)、太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)幼体和缢蛏(*Saunovacula amstricta*)幼体等也进行了类似的研究。

在光诱渔中采用什么颜色的光源来诱集鱼群最有效?针对这个问题,有人对三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*) (郑微云,罗会明,1979)、孔沙丁鱼(*Sardinella perforata*)、勃氏银汉鱼(*Atherinableekeri*)、长毛对虾(*Penaeus peicillatus*)、黄鳍鲷幼鱼、鲤鱼幼鱼等,利用行为学方法进行了对色光的趋光反应研究。结果表明,这些动物都具有不同程度的色觉。

视觉通道的结构及视网膜运动反应;硬骨鱼视网膜具有脊椎动物视网膜的一般特征,常用作研究脊椎动物视网膜一般特性及视觉信息在视网膜中加工、传输的材料。组织学方法与其他方法相结合,已成为揭示鱼类视觉特性及阐明其趋光机理的重要手段。这方面的工作包括对普通鲮鱼(*Mugil cephalus*)和黄鳍鲷等的视网膜结构的研究。

部分鱼类视网膜中的视锥、视杆和色素上皮褐色素会随环境光强变化而发生相对位置的改变,这一现象被称为鱼类视网膜运动反应(章厚泉,何大仁,1989)。国内这方面的研究包括对黄鳍鲷和普通鲮鱼的研究,对鲑鱼石斑鱼(*Epinephelus foriv*)、大弹涂鱼(*Boleophthalmus pectinirostris*)的研究,以及对青石斑鱼(*Epinephelus owoara*)的研究等。

视网膜电生理特性,视觉膜电图(ERG)是视网膜的综合电活动,在很大程度上反映了视系统的基本功能。杨雄里等在这方

面做了系统、深入的工作,他们研究了 *Decapterus maruadsi* 和鲈鱼视网膜电图的适应特性和 B 波段在明适应过程中的变化,以及鲫鱼视杆和视锥系统的相互作用。另外,有人研究了 *Sebastes marmoratus* 视网膜感受系统的适应特点以及 *Sebastes marmoratus* 的色觉,指出它的辨色能力较弱。

虽然声诱和声驱渔业在国际上已得到广泛应用,但是国内对水生动物听觉研究与视觉研究相比,相差甚远。

行为学方面的工作包括对两种鳗科鱼类 (*Ophiocephalidae*) 声反应特性的研究,罗非鱼 (*Tilapia macrocephala*) 对低频声刺激的听觉行为等。有人利用电生理方法研究了宝石鱼 (*Hemichromis limaculatus*) 气鳔的听觉功能。

有些研究涉及水生动物的声信号。水生动物的发声与行为有密切关系,这方面的研究对水生生物资源的合理开发利用很有意义,有报道记录了厦门港入海处海洋生物噪声以及舟山海域的生物噪声。有人对鲛鱼的求偶声进行了初步研究。

化学感觉(主要包括嗅觉和味觉)在许多水生动物生活诸如摄食、御敌、生殖、附着、集群和洄游等方面起着主导作用。国外对水生动物化学感觉的研究大致包括行为、感受器结构、感觉神经元对信号的编码等;国内的研究开展得较迟,并且主要是形态学方面的工作。行为学方面的工作还处于初步,主要探讨水生动物化学感觉对其摄食行为的调控作用。

神经生物学在国际上已成为生物中最活跃的领域之一。在中国科学院的《1986~2000 年生物学规划》里,神经生物学被列为四大优先发展领域之一。由于海洋动物作为神经生物学研究对象具有许多不能替代的优点,故海洋动物神经生物学的研究正受到越来越高的重视。

开展海洋动物感觉生物学及行为调控研究的作用表现在:(1)理论方面,研究感觉生物学即研究各种感觉器官结构和功能和关系,即研究动物对外界信号(光、声、化学信号、电、磁、热等)的识别、接受、调制并产生行为反应的过程,对这些过程机制的了解为人们研制高效的生物传感器以及发展神经计算机打下了基础;(2)应用方面,海洋动物的行为主要受各种外界信号的调控,系统研究它们的感觉生物学,对经济动物的人工养殖、有害生物的防除及海洋渔业均具有重大意义;(3)正因为海洋动物的各种行为都受外界信号的调控,并可以通过研究加以掌握,因此,海洋动物感觉生物学及行为调控的研究方法,给所有的海洋生物学家提供了一个有益的武器。从此,海洋生物学家们可以以神经生物学家眼光去研究海洋生物。比如,生态学家可以以神经生物学的观点去分析海洋动物种内和种间的相互关系(即信息生态学);渔业生物学家可以利用神经生物学家结论去预测鱼群,甚至可以对鱼群进行人工调控。

(中国科学院海洋研究所陈楠生撰)

**脊椎动物小脑 EGL 的发育** the development of cerebellar EGL in vertebrate 自从 1858 年赫斯(Hess)首先描述了小脑皮质的外颗粒层(External Granule Layer—EGL)存在以来,许多人陆续发现,在鸟类、哺乳动物以及人类的胚胎期小脑皮质都存在 EGL,并在生后仍继续存在一个时期,以后逐渐变薄和消失。

EGL 是由覆盖在脊椎动物小脑皮质外部表面的细胞增殖而形成,又称胚胎颗粒层或边缘层。由于动物的种属不同,EGL 出现的时间以及在生后持续存在的时间均不相同,但是,各种脊椎动物的 EGL 发育、消长规律却大致相同,均在胚胎期出现,生后继续分裂增殖,达高峰后变薄,最后完全消失。EGL 细胞位于小脑皮质外部表面的软脑膜下方,细胞排列较紧密。当小脑叶片形成后,位于叶片顶部的 EGL 细胞层次稍少于叶片间沟及间沟底部。EGL 细胞的形态特点,根据对鸡、鸟、大鼠、小鼠及人的 EGL 的观察,其基本的细胞形态特点是胞质很少,核呈圆形或梭形,核质致密深染,不见核仁,不易区分细胞类型。在 Golgi-Cox 氏染色切片中,可见到少数细胞具有两极胞突,与脑表面平行。EGL

在生后逐渐增殖过程中,仔细辨认细胞可分为内外两层,外层细胞为圆形的或椭圆形的,与小脑叶片表面平行;内层细胞为梭形的,与叶片表面垂直排列。

关于 EGL 的组织发生,存在争论。但是大多数学者似乎同意沙珀(Schaper)的观点。沙珀认为,脊椎动物在神经发生的早期阶段,神经管壁的神经上皮细胞增殖,产生的新细胞向外迁移,覆盖整个小脑外部表面,于是产生 EGL;此时的 EGL 细胞仍然表现出生发特点,可以继续增殖,即所谓 EGL 增殖细胞。1966 年,弗吉塔(S. Fujita)等应用累积注射 <sup>3</sup>H-胸腺嘧啶进行放射自显影术分析小鼠小脑 EGL 的组织发生,其实验结果进一步证实沙珀的观点。实验资料还证明,EGL 的外层是增殖细胞,具有合成 DNA 的能力;而内层为非增殖细胞,是由外层的增殖细胞所产生的成神经细胞,不具备合成 DNA 的能力。EGL 增殖细胞的增殖分化过程是通过 3 个连续阶段完成的。I 阶段:EGL 增殖细胞分裂增殖,产生它们自己同类型细胞。II 阶段:EGL 增殖细胞产生成神经细胞,即内颗粒层及分子层神经细胞的前身细胞,这种神经细胞不具备合成 DNA 的能力,故称为 EGL 的非增殖细胞,直接位于 EGL 增殖层之下。III 阶段:成神经胶质细胞形成阶段,由 EGL 增殖细胞产生的少量的成胶质细胞向其它层迁移,此阶段仅存在于 EGL 消失前很短的时间内。

EGL 增殖细胞是一种分裂旺盛的细胞,由它产生的成神经细胞(在第 II 阶段产生的)呈放射状迁移,分别进入分子层及内颗粒层,生成分子层的星形细胞、蓝状细胞以及内颗粒层的颗粒细胞。经放射自显影术已证实,进入内颗粒层的细胞通过分子层是很快的,仅几个 h 就能进入内颗粒层,并在那里发育成成熟的颗粒细胞。EGL 是否产生小脑浦氏细胞仍有争议。有人认为浦氏细胞中的一部分是由 EGL 发生的。但近来大多数人认为浦氏细胞是直接由室管膜神经上皮细胞向外迁移而分化发育成的。除此之外,室管膜神经上皮细胞还产生内颗粒层的高尔基(Golgi)氏细胞以及小脑大多数神经胶质细胞。

关于 EGL 的消长情况,除人类的 EGL 成熟及消长的变化未见记载外,其他脊椎动物如鸡、鸟及鼠类等的 EGL 变化均见有记载,其变化规律基本相同。据文献报道,大鼠的 EGL 首先出现在胚胎第 3 周即胚胎最后一周,一直持续到生后头 3 周。在此期间,EGL 厚度在生后第 10d 达到高峰,以后逐渐变薄,最后于 21d 前后消失。大鼠由于种类的不同,EGL 的消长时间亦略有差别,所以有人观察到有的大鼠 EGL 在生后 24d 才消失。有关小鼠 EGL 的研究报道亦较多,较早期的报道见于 20 世纪 60 年代初的原联邦德国曼(R. L. Sidman)和米尔(I. L. Miale)对小鼠小脑的观察结果。1965 年,吕卫曾详细观察小鼠小脑的生后发育状况,发现 EGL 厚度在生后 4~5d 达高峰,由 7~8 层密集排列的细胞组成,以后细胞层次逐渐减少。与此同时,分子层及内颗粒层相应逐渐变厚,于生后 18~20d 时 EGL 趋于消失,完全被分子层取代。1966 年,弗吉塔(S. Fujita)应用放射自显影术研究小鼠 EGL 的消长过程,发现小鼠于生后 5~7d EGL 细胞层次最多,达 6~8 层,见深染密集核,其标记细胞及标记分裂细胞所占比率达高峰,10d 时细胞层次为 4~5 层,并发现内颗粒层有大量标记细胞,证明在 10d 时已有大量 EGL 细胞迁入内颗粒层。

现已发现 EGL 的消长与分子层、内颗粒层以及浦氏细胞的分化成熟之间存在有极为有趣的奥妙关系。许多实验资料已证明,EGL 细胞增殖停止即是细胞分化的开始。大鼠在生后 10d 左右,EGL 细胞增殖达高峰,同时,由它产生的成神经细胞(即分子层及内颗粒层的神经细胞前身)开始逐渐分化与迁移。EGL 消失时,也正是它所衍生的神经细胞成熟之时。这与动物开始出现行为表现及小脑成熟密切相关。1971 年,艾迪生(W. H. F. Addison)饲养的大鼠生后裸体无毛,眼睑紧闭,躺卧无力,出现行为约在生后 32 周半,小鼠在生后 22 周半,这正是小脑 EGL 消失时间,也正是浦氏细胞、内颗粒层及分子层细胞成熟的时间。

在脑发育过程中,血液中某些因子,尤其甲状腺激素对 EGL 的增殖发育具有明显的影响。此外,营养状况亦具有重要意义。

许多研究资料已经证明, 新生期甲状腺功能低下(甲低)或甲状腺功能亢进(甲亢)均能明显影响小鼠 EGL 的增殖时间及分化开始时间。1972 年尼科尔森(J. L. Nicholson)和 1977 年劳德(J. M. Lauder)等人应用注射  $^3\text{H}$ -胸腺嘧啶放射自显影术研究甲低大鼠和甲亢大鼠 EGL 细胞增殖的动力学变化, 观察了 EGL 的标记指数、分裂指数以及死亡指数等项指标, 并计算了 EGL 的细胞周期及其各时期的时间变化。其结果是, 甲低动物小鼠 EGL 增殖缓慢, 增殖期延长, 故 EGL 消失延迟, 由于 EGL 增殖延长, 引起向内颗粒层及分子层细胞分化亦延长。另外, 还发现甲低大鼠小鼠存在暂时性细胞数量减少以及永久性的细胞体积减小和排列密度增大; 细胞数量暂时性减少, 推测是因为 EGL 细胞增殖率降低的结果, 而细胞体积减小则是造成脑重量减轻的主要原因。新生期甲亢动物, 小鼠 EGL 细胞的增殖过早终止伴 EGL 过早消失, 标记指数及分裂指数明显降低, 这是因为细胞周期变短且细胞增殖提前停止之故。由于 EGL 过早终止增殖, 故引起分子层及内颗粒层细胞过早分化, 而使颗粒细胞、星形细胞以及蓝状细胞最终数量减少。另外, 细胞总数永久性减少则造成脑重量减轻, 但不伴有细胞排列密度及细胞大小的改变。

近年, 许多关于碘缺乏所致脑发育缺陷的实验研究, 都集中观察了小鼠 EGL 发育情况, 并把它作为脑发育的一个极重要指标。1985 年, 李健群(J. Q. Li)等人观察了缺碘大鼠小鼠 EGL 的发育情况, 发现 EGL 细胞消失延迟较正常大鼠落后 5d 左右。1982 年波特(B. J. Potter)等及 1987 年玛诺(M. T. Mano)等分别在缺碘绵羊及猕猴中观察小鼠 EGL 的发育情况, 测量了 EGL 的厚度以及细胞增殖和消失情况, 发现 EGL 细胞消失延迟, 从 EGL 向内颗粒层迁移减少。1991 年, 黑劳易(M. Hiroi)等在甲基亚硝基脲经过胎盘引起子代大鼠脑发育异常的研究中, 也以小鼠 EGL 的发育作为一项重要指标, 观察了小鼠 EGL 的发育及消长情况。

在脊椎动物小鼠发育过程中, EGL 出现较早, 它作为一种生发细胞继续增殖、分化、迁移, 产生分子层及内颗粒层的神经细胞以及一部分神经胶质细胞。另外, EGL 细胞覆盖在小脑表面, 极易辨认和观察, 又是各种脊椎动物所共同具有的小脑生发细胞, 这就为人们研究正常的或病理性脑发育提供了非常可取的实验指标。可以推测, 利用定量组织学、生物化学以及原子示踪等方法研究小鼠 EGL 出现的时间、消长情况、细胞增殖和迁移、细胞周期以及细胞合成 DNA、RNA、蛋白质等情况将能为深入探讨脑发育开辟新的领域, 是一项既准确又易掌握的实验指标, 具有重要的应用价值。

#### 参考文献

- 1 Miale I L, et al. *Exptl Neurol*, 1961, 4: 277~296
- 2 吕卫. *解剖学报*, 1965, 8(3): 386~392
- 3 Fujita S, et al. *Comp Neurol*, 1966, 128: 191~208
- 4 Addison W H F. *J Comp Neurol*, 1971, 21: 459~487
- 5 Nicholson J L, et al. *Cell proliferation and differentiation*, *Brain Res*, 1972, 44: 13~23
- 6 Lauder J M. *Brain Res*, 1977, 126: 31~51
- 7 Potter B J, et al. *Neuropathology and Applied Neurobiology*, 1982, 8: 303~313
- 8 Li JQ, et al. *Neuropathology and Applied Neurobiology*, 1985, 12: 261~276
- 9 Mano M T, et al. *J Neurological Sciences*, 1987, 79: 287~300
- 10 Hiroi M, et al. *Medicine and Biology*, 1991, 122(5): 199~203

(中国地方病防治研究中心阎玉芹副研究员撰; 李健群审)

**内皮** 分布在循环系统腔面的单层扁平上皮称内皮。其超微结构呈现为有一般的细胞器但不发达, 表面有胞质突起, 细胞之间有紧密连接和缝隙连接, 其特点是具有有利于物质交换的胞质内

小泡或内皮窗孔。近年来关于构造比较简单的内皮的研究进展迅速, 许多概念得到更新并推动医学临床工作的进展。

**内皮的分泌功能** 1987 年 Vane 等提出内皮是一个内分泌器官, 他的这种新概念的提出是基于科学家们发现内皮有许多分泌功能。例如: (1) 内皮源性舒张因子(EDRF)。1980 年, Furchgott 等观察到乙酰胆碱的舒张血管作用要通过内皮释放一种松弛血管平滑肌的物质称为 EDRT, 损毁血管内皮则这种舒张血管作用消失。1983 年, Angus 等在人、兔、猫、狗、大鼠、豚鼠的多种动物的血管中证实上述研究结果。(Martin, 1986)等发现内皮细胞也能自发释放 EDRF, 抑制体内缩血管物质的作用, 这可能是机体调节心血管系统功能活动的又一重要机制。高血压和心脏病的发生发展可能与血管内皮细胞的功能有关。此后, 科学家们进一步阐明了 EDRF 有抗血小板凝集作用, EDRF 的化学结构是氧化氮(NO); 发展能促进体内 EDRF 合成和释放的药物将成为药物研制的一个方向, 等等。(2) 内皮素 1988 年《世界高血压通讯》创刊号提出“内皮素的发现是高血压研究的一个里程碑”。yanagisawa(1988)从猪主动脉内皮中分离并纯化一种活性多肽, 称为 endothelin, 是至今所知体内最强的缩血管物质。1988 年, Hirata 证实大鼠动脉平滑肌细胞具有特异的内皮素受体, 一个平滑肌细胞上约有 11 000~13 000 个结合点。1988 年, DeNucci 等报道内皮素可作用于邻近的平滑肌, 使血管收缩是旁分泌作用, 引起自身释放 EDRF 是自分泌作用, 通过这两方面的作用调节局部血管紧张和血流。中国对内皮素的研究也取得一些成果, 例如观察到内皮素可显著增强培养的主动脉释放血管紧张素 I。(3) 促收缩因子。1990 年 Guidry 等发现主动脉内皮细胞可产生一种因子, 能够直接作用于成纤维细胞, 通过成纤维细胞的作用使胶原收缩, 推测此种因子在创伤收缩过程中有一定作用。(4) 前列环素。它有抗血液凝集作用和血管舒张作用。前列环素可刺激血小板或血管平滑肌中的腺苷酸环化酶而介导其生理功能。(5) 硫酸肝素蛋白多糖(HSPG)。1990 年, Agostine 等提出内皮细胞分泌 HSPG, 分泌后聚集在细胞外基质中, 具有抗凝血作用。(6) 内皮还可以合成以下活性物质: platelet-activating factor、tissue plasminogen activator、interleudin-1、various growth promoting factor 等等。

**内皮的日周节律** 有的器官中内皮细胞呈现日周节律变化。1989 年, Matsushima 用定量电泳方法研究小鼠松果腺, 发现白天毛细胞血管内皮的孔多, 胞质中小泡多, 常见小泡聚集在一起; 晚上毛细胞血管管径变小, 内皮细胞腔面常凹陷为不规则的分支的裂隙, 裂隙中充满血浆, 呈现为中等电子密度或高电子密度。

**内皮的组织化学反应** 不同部位的内皮有不同的组织化学反应, 同一部位的相邻内皮细胞也有不同的组化反应, 这已被许多实验资料证明。例如, 1990 年 Lincoln 等用免疫组化方法观察到肾动脉内皮血管加压素阳性、5-羟色胺阳性, 免疫反应阳性细胞仅占内皮细胞 10% 以下, 血管紧张素 I 阴性, 而肠系膜动脉内皮细胞以上三者均为阳性, 阳性细胞也占内皮细胞 10% 以下。小血管内皮为碱性磷酸酶(AP)强阳性。人体有 3 种 AP 的同功酶, 内皮含哪一种? 1989 年, Zoellner 等阐明内皮的 AP 是属于肝/骨/肾同功酶, 但其生理作用尚待研究。1991 年, Tomlinson 等用免疫组织化学法观察到大鼠主动脉的和股动脉的内皮细胞约有 30% 呈现出血管紧张素 I 阳性, 而肺动脉为阴性。上述 3 种血管的内皮中大多数细胞有内皮素阳性反应。内皮细胞其他组化反应有 ATP 酶阳性、核苷磷酸化酶阳性、5'-核苷酸酶阳性、腺苷酸环化酶阳性等。

**人的内皮细胞特有的细胞表面标志** 1989 年 Muller 等报道了一种由人的内皮细胞合成的结构膜蛋白, 这种蛋白不存在于其他类型细胞, 可作为人的内皮细胞的独特的细胞表面标志, 称为 hec7。用免疫荧光组化和免疫电镜术观察到 hec7 存在于内皮细胞之间的细胞连接处, 广泛存在于弹性动脉、肌性动脉、小动脉、毛细血管、毛细血管后微静脉、静脉。

内皮细胞尚待研究的问题还很多, 如它还能分泌哪些活性

物质,目前已知的活性物质可否用人工合成用以治疗目前临床尚无特效疗法的疾病,是否各器官的内皮都有日周节律,各部位的内皮各具有哪些组织化学的和超微结构特点及生理功能,等等,都有待继续探索。

参考文献

- 1 Vane J R, et al. The endothelial cell as a metabolic and endocrine organ. Trends in Pharmacological Sciences. 1987, 8: 491
- 2 Furchgott R F, et al. The obligatory role of endothelial cells in the relaxation of arterial smooth muscle by acetylcholine. Nature. 1980, 288: 373
- 3 Yanagisawa M, et al. A novel potent vasoconstrictor peptide produced by vascular endothelial cells. Nature. 1988, 332: 411
- 4 Hirata Y, et al. Cellular mechanism of action by a novel vasoconstrictor endothelin in cultured rat vascular smooth muscle cells. Biochemical and Biophysical Research Communications. 1989, 154: 3, 868
- 5 DeNucci G, et al. Pressor effect of ET. Proceedings of the National Academy of Science. 1988, 85, 9797
- 6 毕万里,等. 内皮素对心血管系统内血管紧张素Ⅰ释放的影响. 生理学报, 1990, 42: 3, 248
- 7 Guidry C, et al. Endothelial cells secrete a factor that promotes fibroblast contraction of hydrated collagen gels. The J of Cell Biology. 1990; 110: 529
- 8 Agostini A I, et al. Localization of anticoagulant active heparan sulfate proteoglycans in vascular endothelium; antithrombin binding on cultured endothelium cells and perfused rat aorta. The J of Cell Biology, 1990, 111: 1293
- 9 Lincoln J, et al. Localization of vasopressin, serotonin and angiotensin I in endothelial cells of the renal and mesenteric arteries of the rat. Cell and Tissue Research. 1990, 259, 2, 341
- 10 Tomlinson A, et al. an immunohistochemical study of endothelial cell heterogeneity in the rat, observations in "en-face" Hauthen preparations. Cell and Tissue Research 1991, 263, 173

(华西医科大学方一心撰)

亲缘识别 kin recognition 社会生物学理论预测动物对亲属和非亲属的行为反应不同。研究资料表明,很多不同类群动物具有识别其近亲的功能。动物怎样完成这种高度准确性的辨别,是自 20 世纪 60 年代末期以来愈来愈活跃的研究领域。

60 年代以前,动物的利他行为,一直无法用达尔文的自然选择学说解释。例如,在以互助和利他主义为特征的蜜蜂社会中,众多不育的工蜂为一个能生育的个体——蜂王(在遗传学上工蜂和蜂王互为姐妹)进行劳动,而自身付出很高的代价。关于动物利他行为进化的现代知识,大部分来自英国汉密尔顿(W. D. Hamilton)的研究结果。1964 年,梅纳德史密斯(J. Maynard Smith)提出亲缘选择的概念;同年,汉密尔顿提出亲缘选择理论,但直到 70 年代中期美国哈佛大学的威尔逊(E. O. Wilson)所著的《社会生物学:新的综合》和英国牛津大学的道金斯(R. Dawkins)所著的《自私的基因》两本书出版后,这一理论才受到重视。

亲缘选择的假设是,社会行为直接地与内在适合度相关,并且因亲缘关系不同而改变。适合度是衡量一个动物个体存活和繁殖成功机会的一种尺度,而内在适合度是指一个个体在后代中传播自身基因的能力有多大,但不一定是通过自身繁殖的形式。当遗传上与某一动物有亲缘关系的个体存活下来并进行繁殖时,该动物便取得繁殖的成功。亲缘选择理论的核心是选择在适合

度大的个体,而不管这个个体的行为是否对自身的存活和繁殖成功有利。个体间亲缘关系越近,所含相同基因就越多,即使利他行为可能给利他主义者带来危险,但利他主义者仍然会帮助自己的亲属,因为这样做能增加把与利他主义者相同基因遗传给后代的可能性。所以,个体喜爱帮助近亲或与之合作,而不乐于帮助远亲或非亲属。亲缘选择理论解释了亲属间的利他行为,是对达尔文自然选择学说的扩展。

亲缘选择要求动物个体对不同程度的亲属及非亲属的行为反应不同。因此,个体需要迅速识别亲属,包括远亲和近亲。关于亲缘识别的概念应当指出的是,在行为水平上可能察觉到的只是亲缘辨别,即对亲属和非亲属的不同行为反应,而不是亲缘识别。亲缘识别是亲缘辨别的基础,至少从外表上看是一种不可见的神经过程。未能证实亲缘辨别的存在,并不能当作未发生亲缘识别的证据。动物可能能够识别,但缺乏适当的动机把它转化为辨别,即行为上的不同反应。这是 80 年代后期的研究成果。

根据 80 年代对亲缘识别的研究资料,亲缘辨别影响动物对亲属和非亲属行为偏向的机制大致有 5 类:(1)基于空间位置和分布的辨别。如果动物在一特定地点上相遇的只是亲属,或这样的可能性相当大,动物就可能不需要区别亲属和非亲属,这使得亲缘辨别的行为投资节约下来。(2)基于熟悉和先前联系的辨别。如果动物在社会生活中明确地仅与亲属来往,它们就可以通过熟悉来相互辨别。(3)基于表现型匹配的辨别。如果表现型相似性和基因型相似性紧密关联,辨别可能因表现型的比较而引起。一个动物判定和另一不熟悉个体的亲缘关系,可借助于把了解和记住的参照模板(自己的或亲属的特征)与不熟悉个体的表现型进行比较。(4)基于识别基因的辨别。如果识别等位基因不仅编码基因型相似的表现型特征,而且编码辨别先前从未见过个体的能力,则在没有学习到识别模板情况下也可以辨别。(5)基于“绿胡须效应”的辨别。如果等位基因表达的不仅有导致表现型的特征(如道金斯提出的“绿胡须”)和辨别该特征的能力,而且还对辨别了的个体表现出利他行为,但汉密尔顿认为这种机制不太可能出现。

这些机制中任何一种都能单独起作用,也可以相互配合共同起作用。水生动物(鱼和蝌蚪等)的亲缘识别依赖于水中传播的化学信号。鸟类是依赖于固定的遗传信号(如羽衣的色彩)或可变的信号(如鸣叫声)。大部分种类的昆虫和哺乳动物,嗅觉信号是识别亲属的基础。雄性小鼠和卡斯卡迪蛙的蝌蚪都能够辨别出从未见过的兄弟姐妹,但不能肯定其亲缘辨别机制是学得的表现型匹配还是天生的识别基因。事实上巴纳德(C. J. Barnard)认为这两种机制间的差异无关紧要,因为两种机制都能使动物辨别不熟悉的亲属,其进化结果是相同的。对汗蜂的研究确定了表现型匹配的证据,担任守卫蜂巢入口的汗蜂,根据与它饲养在一起的个体表现型相似性,能够辨别出不熟悉的汗蜂,让虽不熟悉但能发出同巢气味的蜂进入巢内。识别基因机制难以确定,但对小鼠择偶偏爱性研究得出一种与遗传识别系统相一致的证据。小鼠能够在可能的配偶中间辨别出在主组织相容性复合基因(H-2)上仅有一个遗传位点之差的对方。雄鼠偏爱与 H-2 型不同于自己的雌性交配。这种择偶偏爱性是基于由遗传决定的、与特定的 H-2 等位基因有关的气味。

亲缘识别的主要功能是有利于个体的存活和繁殖的成功,它至少以 4 种方式影响着动物的内在适合度:配偶选择(如避免近亲繁殖);利亲属主义;亲属间竞争;集群。

90 年代,亲属识别的研究方法多是观察动物对不同亲缘关系气味的选择,和在强制条件下比较有亲缘关系动物之间和无亲缘关系动物之间的行为差异。未来的亲缘辨别研究方法是在尽可能模拟动物自然生活条件下进行研究,和野外与实验室研究的结合。

参考文献

- 1 Hamilton W D. Journal of Theoretical Biology, 1964, 7: 1~52

- 2 Wilson E O. *Sociobiology: The New Synthesis*, 1975
- 3 Dawkins R. *The Selfish Gene*, 1976
- 4 Fletcher D I C, Michener, C D (Ed) *Kin Recognition in Animals*, 1987
- 5 Waldman B, Frumhoff P C, Sherman P W. Mechanism of kin recognition. *Journal of Theoretical Biology*, 1988, 128: 159~185
- 6 Barnard C J. *Advances in the Study of Behavior*, 1990, 19: 29~81
- 7 Hepper P G. (Ed.) *Kin Recognition*, 1991  
(北京师范大学房继明副教授撰; 孙儒求审)

**小型哺乳动物种群调节** population regulation in small mammals 种群调节的中心是种群数量的调节。对一定地区哺乳动物种群数量调节的研究, 具有重要实践的意义及理论意义。掌握种群调节原理, 有助于预测种群变化的极限, 并可利用稳态调节机制, 人为控制其出生率及死亡率, 从而达到一定地区内动物数量的合理管理及控制。对于小型哺乳动物种群调节比较系统的研究始于 20 世纪 20 年代初, 首先由休伊特(HEWITT, 1921)及埃尔顿(ELTON, (1923)提出种群数量周期性波动的思想(Krebs, 1974), 但当时多侧重于对现象的描述, 直至 40 年代初, 埃尔顿(1942)对哺乳动物数量变动作了深入分析以后, 种群动态及其调节机制的研究才作为独立的研究课题蓬勃开展起来(杨荷芳, 1982)。关于种群数量变动机制, 过去曾有内因与外因、生物因素与非生物因素、密度制约因素与非密度制约因素等观点的争论。早期学派多偏重于种群自身以外的各种影响因素, 如气象、捕食关系、寄生、疾病等因素的作用, 而真正的内因学派即强调种群自身内部各种影响因素的调节作用, 如内分泌、行为、遗传等, 是从 50 年代以后发展起来的, 并已形成种群内部自我调节的各种学派。内因学派均以与密度有关的反馈调节原理为基础, 均承认种群动态的相对稳定性。自我调节学派注意到种群内各成员之间的相互关系, 强调种群个体的异质性及形态、生理、生态的适应性。而外因论者则强调外部因子的差异而忽视种群成员之间差别, 把种群个体对于外界环境的反应看作是简单的、一致的。自 50 年代以来, 自我调节学派对数量高峰后跌落的解释, 强调调节因素不在外部, 而在种群本身。60 年代以来, 特别强调社群因素的功能, 如社群结构、社群行为、心理等。70~80 年代不仅重视对繁殖、死亡的作用原理的研究, 而且对活动(扩散)的作用亦引起较多的重视。现着重介绍已引起广泛关注的种群内部调节学说。

**紧张学说及行为—内分泌负反馈调节学说** 1950 年, christian 提出紧张学说, 最初他用一般综合性适应症解释雪兔种群周期性变动的特征, 这种适应性是在高密度下对紧张产生的非特异性反应。随后, 他又以大量实验种群资料阐明紧张对于繁殖及死亡两个方面的作用原理, 强调这些调节因素是依赖于密度的。低密度时对出生率、死亡率及活动影响较小, 而高密度时, 则产生降低出生率、影响母体授乳、阻滞幼体发育、增加迁出、减少迁入以及提高死亡率等作用。紧张刺激首先通过感觉通路作用于下丘脑、垂体, 使垂体前叶促肾上腺皮质激素分泌增加, 进而刺激肾上腺分泌肾上腺皮质激素, 然后又反馈影响垂体, 使促性腺分泌量减少, 影响排卵、植入或胚胎存活, 导致生殖力下降。Hristian 曾用社群压力来表示个体间相互作用所产生的社群心理紧张强度, 60 年代以后他更多地强对地于繁殖的作用及对幼鼠存活、性成熟等影响, 较少涉及生理衰竭及种群数量暴落的问题。1964 年, 他与戴维斯(davis)又提出行为—内分泌负反馈调节机制, 将内分泌生理调节与社群行为联系起来, 如啮齿动物进攻性行为可以通过感觉机制作用于垂体, 垂体分泌的激素又反过来调节其他器官的功能。这一机制出现的另一种类型是致病性, 由进攻性行为引起的反馈机制影响以下过程: 抑制免疫、炎症及吞噬作用, 增加病原性。这种反馈调节机制可以认为是一种稳态调节机制, 其生物学意义在于制止种群数量无限增长, 免于破坏

其栖息环境, 从而保证种群完整性及相对稳定性。这一机制对于大多数小型啮齿动物是较为普遍的, 而且在其他脊椎动物中亦有所反映。这一学说至今在自然种群方面的例证尚少, 而且亦有一些争论, 但却已受到较为普遍的重视, 在北美及北欧一些国家研究较多。中国亦已开展种群调节机制方面的研究, 如杨荷芳等(1979)及曾晋祥等(1980)的研究, 均论证了种群密度负反馈调节机制, 为自然种群的调节提供了例证。目前尚有许多理论与此学说有关, 如亚当斯(adams, 1971)等认为控制种群的重要因素是从属动物从中心区扩散的行为, 而扩散又是紧张的结果, 因此认为紧张与行为是哺乳动物种群调节的两个因素。由于对社群因素和作用的重视, 至今普遍认为密度的含义已不能完全反映其实际内容, 除了空间和数量两个含义外, 还应包括社群因素的概念, 但也尚未找到理想的表达方式。

**行为—领域学说** 温—爱德华兹(Wynne Edwards, 1962)从种内竞争角度探讨了行为—领域的调节作用, 提出了这一学说, 认为社群行为可通过限制生存于特定栖息地的动物数量, 即通过排除过剩者来调节其数量。这种机制传递与数量有关的信息, 优势个体能忍受不利气候、食物及隐蔽条件, 而从属个体则不能忍受而死亡。他用下列表达式表示种群的稳态机制: 增补+迁入=不能控制的丧失+迁出+社群死亡率。他认为许多高等动物是通过增补、迁入、迁出和社群死亡率等内因来控制密度的, 在他的假说中掺入了社群紧张学说的一些因素, 但它更多联系自然种群形式给予解说。

**遗传学说** 首先由 Chitty(1960)提出, 他强调种群内部个体间的异质性。认为种群个体体质随密度面变化是行为类型选择的结果, 是由遗传特性所决定的, 种群增长期是一种遗传类型占优势, 而下降期则是另一种占优势, 认为种群自我调节是通过体质的恶化而实现的。这一学说是通过塞明诺夫(Semenoff, 1968)及 Tamarin 等(1969)发现田鼠高低密度间的遗传差异而取得进一步发展的。以后将行为与遗传相结合, 出现行为—遗传机制的 3 种假说: Chitty(1967)认为密度增长期选择攻击性更强的个体; Charnov 和 Finertg(1980)认为密度增长长期相邻个体亲缘关系减弱, 即 KIN 学说(亲属选择学说)。Smith 等(1975)认为在高密度时, 近亲繁殖产生更多杂合子。因此杂合子与攻击性是相关的。Tamarin(1985)认为以上 3 种假说是可以用试验进行验证的, 今后趋向将是运用放射性同位素与电泳相结合的新技术进行分析和验证, 再予以客观评述。

**生境地块—扩散学说** 是由 Lidicker(1975)提出的。他注意到种群不同发展阶段生境的异质性, 并提出饱和和前扩散的理论, 以解释田鼠周期数量变动规律。另外, 如 1978 年, Getz 提出的社群崩溃学说, 则是强调外激素的控制作用。不难看出, 自我调节学派各学说之间并不相互排斥, 而彼此均有交叉和渗透, 就某单一学说来说均各有侧重, 片面性在所难免, 在进一步研究中有必要对某些有效因素作综合探讨。

由以上资料可见, 种群数量变动调节机制极为复杂, 而且争论较多。从发展趋势看, 已经逐渐走向揭示本质的实质性探讨。这一问题的全面解决则将依赖于各学科之间的沟通和渗透。

#### 参考文献

- 1 Elton C S Voes, Mice and Lemmings, Oxford: Clarendon Press, 1942: 1~469
- 2 Christian J J. *J Mammal*, 1950, 31: 247~259
- 3 Chitty D *Can J Zool*, 1960, 38: 99~113
- 4 Wynne—Edwards V C. *Animal Dispersion in Relation to Social Behavior*. New York, Hafner, 1962
- 5 Krebs C J, J H Myers, *Adv Ecol Res*, 1974, 8: 267~399
- 6 Lidicker W Z Jr. *Small Mammals, Their Productivity and Population Dynamics*. London: Cambridge University Press, 1975, 103~128
- 7 杨荷芳, 周庆强, 钟文勤, 等. *动物学报*, 1979, 25(2): 154~167

- 8 Charnor E. et al. *Oecologia*, 1980, 45, 1~2  
 9 杨荷芳. 动物学杂志, 1982, 6: 49~54  
 10 Tamarin R H. *Acta Zool. Fennica*, 1985, 173: 19~21  
 (中国科学院动物研究所杨荷芳研究员撰)

**兽类年龄鉴定** mammalian age determination 在动物种群动态研究中, 掌握种群年龄结构有助于估算个体生长率、性成熟年龄、最高寿命及平均寿命、种群出生率和死亡率等。高等动物年龄结构, 是种群动态非常重要的指标之一。由于得自野外的材料, 年龄多是未知的, 因此, 研究年龄鉴定的方法, 是研究种群年龄组成不可缺少的工作。

自20世纪50年代起, 在兽类的年龄鉴定中所采用的方法很多。根据不同动物类别及类型(包括不同体型、不同寿命期限、不同栖居环境等)选用的鉴定方法各异。对于具体物种来说, 虽然均有其适宜的某些鉴定方法, 但至今还没有统一的趋势。

体重、胴体重、体长和尾长等是身体增长的明显指标, 其增长与年龄直接相关。用此作为年龄指标, 无论在野外或在实验室, 操作极为简便, 已为许多作者所采用。诸葛阳等(1978)、王岐山等(1984)对黑线姬鼠的年龄划分法已被认为是较好的方法。张俊等(1984)和洪朝长(1987)也用此法分别鉴定了棕色田鼠和褐家鼠的年龄。对猕猴的体重与年龄的关系已有诸多报道(曾中兴, 1963)。张洁(1985, 1986, 1989)利用胴体重区分了黑线仓鼠、大仓鼠、黑线姬鼠的年龄。鲍毅新等(1986)和王岐山等(1984)以体长作指标分别研究了黑腹绒鼠和黑线姬鼠的年龄。李玉春等(1990)对大仓鼠的9项生长指标进行排序, 认为以胴体重最好, 其次是体重、体长等。在对这些动物的比较研究中, 已证明寿命短的动物, 其身体大小量度及增长与年龄关系较长寿命者更为密切。其不足之处是个体的体重变异较大, 且季节性体重变化可对年龄划分有所影响(Shvarts, 1964; Zejda, 1971)。肌肉及软组织部分延伸性变化极易在小型兽类体长测量中造成较大的人为误差(Jewell 等, 1966)。

牙齿磨损程度与年龄增长成一定比例。许多作者以牙齿的磨损程度研究白尾鹿、高鼻羚羊、叉角羚、野牛和马鹿等大型兽类的年龄; 在小型兽类中也得到广泛应用, 如灰旱獭、长尾黄鼠、达乌尔黄鼠、灰鼠、长爪沙鼠、黑线仓鼠、黄毛鼠、小家鼠、巢鼠等种类。罗泽琦(1963)和祝龙彪等(1982)对黑线姬鼠的年龄进行了鉴定。Crowder(1957)、Morris(1972)、Dapson(1966)划分了一些鼯鼠的年龄。杨士剑等(1989)用下颌臼齿的齿突高度将臭鼯鼠划分成4个年龄组。在牙齿磨损的研究中, 一般采用牙齿的磨损面积、齿尖高度或磨损面与齿列长乘宽之比作指标。虽然牙齿磨损的个体变异幅度较大, 且受土壤类型(Lord, 1959)等某些外在因素的影响, 但仍然是一种有效的方法。李玉春等(1989)对黑线仓鼠进行14项生长指标及上臼齿磨损程度的比较分析, 表明以牙齿磨损指标最为合适。

Schultz 等和曾中兴等根据乳齿和恒齿出现的次序及发育情况划分了猕猴的年龄。结果表明此方法在雄猴只适用于出生到8岁左右的个体, 而雌猴只适于出生到9岁左右的个体。用齿序来估龄时, 动物的年龄愈小则准确性愈大。在具体应用时, 应注意影响出牙的各种因素, 如动物的营养和健康状况、出牙变异性和性别差异等。寿振黄等(1959)以臼齿齿根分叉与否及分叉后的长度变化作指标研究了红背鼯鼠的年龄。

以牙齿切片观察白质及齿质增生层(沉积环)的数量, 能较准确地计算出动物的实际年龄。此方法对长寿命的动物适用, 寿命短于1年者无用。已包括海象(Laws, 1952)、驼鹿(Sergeant 等, 1959)、大熊猫(魏辅文等, 1988)、熊类(Willy, 1974; Stoneberg 等, 1966; Craighead 等, 1970; 刘相文等, 1986)、黑鹿(盛和林等, 1981)和黄羊(姜兆文等, 1991)等动物。

Robertson 等(1954)认为河狸头骨的某些骨缝及荐椎骨彼此间的愈合情况, 可以作为年龄指标。李贵辉等(1990)根据头颅矢状嵴生长发育的规律将猪獾划分成4个年龄组。施银柱等

(1978)和梁杰荣等(1989)以上颌腭桥部分的特征鉴定高原鼠兔的年龄。郑生武等(1984)对头骨各部长及体重、体长等12个指标的分析表明, 在高原鼠兔年龄鉴定中以顶嵴间宽作指标最好, 而以眶间宽和额骨长为最差。

借助X光机, 用软骨骨的骨化程度作为年龄鉴定指标, 首先是由Thomen 等(1946)在测定棉尾兔年龄时所采用。后来Petrides(1951)和Sullivan 等(1956)以此法鉴别狐鼠、灰松鼠及红狐、灰狐的年龄。Wagenen 等(1958)报告用X光摄影猕猴四肢骨的研究结果, 此方法适用于鉴定5岁3个月以下的雌猴和6岁半以下的雄猴, 大于这个年龄便不适用。

阴茎骨与性成熟关系密切。许多作者(Marshall, 1951; Kirkpatrick 等, 1957)在对松貂、灰鼠等雄性的年龄鉴定时, 多以阴茎骨的重量变化区分幼年动物和老年动物。Elder(1951)以此法划分了水貂的年龄, 结果指出, 在性成熟以前, 阴茎骨的长度与重量的增加是相吻合的, 但到较大的年龄时, 重量的增加又比长度要显著, 因而以重量作为指标比长度好。刘相文等(1986)的研究资料表明, 阴茎骨长度对6岁以下的黑熊和3岁以下的棕熊是一项较可靠的年龄指标, 而对老龄个体却不准确。

根据角的形态能划分黄羊的年龄, 但仅能区分幼年、1~2岁以及2岁以上的3个年龄组(赵育堂, 1982)。一些作者采用双重磨片法和蚀刻法确定磨片上显示的生长层与角鞘上凸“嵴”的关系, 对喜马拉雅塔尔羊(Gaughley, 1965)、岩羚羊(Bargagli 等, 1984)、日本藏羚(Miura, 1985)和鹅喉羚(朱润美等, 1992)等种类进行年龄鉴定, 其结果与牙齿切片基本相符。

由于眼晶体终生生长, 故其干重指标可用作年龄指标。自20世纪50年代Lord首次应用眼晶体干重研究棉尾兔的年龄结构以来, 现已扩展到许多动物, 如黑线姬鼠(Adamczewska-Andrzejewska, 1973; 肖增桔等, 1982)、社鼠(鲍毅新等, 1984)、黄胸鼠(鲍毅新等, 1991)、褐家鼠(Yabe, 1979; Hardy 等, 1983; 陈荣海等, 1987)、喜马拉雅旱獭(黄孝龙等, 1985)、獾(陆厚基, 1983)、毛冠鹿(盛和林等, 1983)、黄鹿(盛和林等, 1986)、黑尾鹿(Connolly 等, 1969)、叉角羚(Kolenosky 等, 1962)等。晶体干重指标对小型兽类年龄的鉴定, 其准确度高, 而对大型的长寿命兽类的老年个体其准确度要差一些, 但仍比其他生长指标优越。但该方法要求严格的标准化操作程序, 否则对所获结果影响极大。不同浸泡浓度、不同浸泡时间均可造成重量的明显差异(Friend, 1967)。

鉴定兽类年龄的方法很多, 各有利弊。确定和选用鉴定年龄的方法, 应视种的特性及其影响因素, 同时亦应考虑方法的相对准确性及可行性。研究更科学、实用的年龄鉴定方法, 仍是今后重要课题。

#### 参考文献

- 1 朱盛侃, 等. 动物学杂志, 1965, 4: 145~148
- 2 曾中兴. 动物学杂志, 1965, 5: 193~195
- 3 Morris P A. *Mammal Review*, 1972, 2: 69~104
- 4 鲍毅新, 等. 兽类学报, 1984, 4(2): 127~137
- 5 王岐山, 等. 兽类学报, 1984, 4(2): 117~126
- 6 刘相文, 等. 兽类学报, 1986, 6(3): 161~169
- 7 魏辅文, 等. 兽类学报, 1988, 8(3): 161~166
- 8 杨荷芳. 生态学杂志, 1990, 9(2): 54~55
- 9 李玉春, 等. 兽类学报, 1990, 10(2): 121~127
- 10 朱润美, 等. 动物学研究, 1992, 13(2): 95~99  
(浙江师范大学鲍毅新副教授撰)

#### 蛋白质电泳在动物分类学中的应用

the application of protein electrophoresis in animal taxonomy 经典的分类学主要以形态特征为依据。随着科学的发展, 对物种的概念已扩展到生物学和种群的特点, 单一个体的形态特征难以说明分类学上的许多问题。20世纪80年代, 国内外应用各种电泳技术从分子水平进行动物分类, 丰富了分类学。1974年, 艾弗斯



(Avisear)根据电泳分析材料,论述了其在分类学研究中的价值,并认为种间的系列化差异对描述和鉴定不同物种有一定的参考意义,并可比较容易地分辨出同属物种,而超出常规的分类准则。在分类学上应用电泳技术,可为形态分类增加比较客观的手段。最近的研究资料表明,蛋白质不仅作为基因的产物受到重视,而且它的电泳行为(泳动速度)和区带数目的变化隐藏着生物进化的历史。

1937年,提瑟利乌斯(Tiselius)首先用界面电泳法将血清蛋白质分离成5种成分,即白蛋白、 $\alpha_1$ 球蛋白、 $\alpha_2$ 球蛋白、 $\beta$ 球蛋白和 $\gamma$ 球蛋白。这种电泳法是在没有支持物的液体中进行的,利用腹体溶液(蛋白质溶液)和溶剂(缓冲液)间能形成界面性质来观察电泳物质的移动和分离。此后,这一技术得到迅速发展。1963年前,大部分研究者采用此法阐述单一蛋白质的变异,现已用于分析同一生物的不同蛋白质。这些多位点的研究方法适于研究基因的变异性和种群结构,并逐步向分类学渗透。20世纪80年代开创了蛋白质各种显带染色法,对许多蛋白质都能进行正确的鉴定。通过进一步捕捉蛋白质电泳图谱上发生的微小变化,可以更加深入地考虑种的分类地位及进化发生的机制和原因。目前国内外陆续发表了很多动物在电泳行为进化与分类上的研究成果,大多涉及脊椎动物的进化与分类;如周虞灿等把蛋白质电泳结果用于啮齿动物和两栖、爬行动物的分类,王金星等(1987、1989)用乳酸脱氢酶和酯酶同工酶对鱼类进行了某些比较。

自从知道基因的本质是DNA,蛋白质是它的遗传信息产物,所以在蛋白质水平上研究物种种群的分类地位和进化更为合适。由于蛋白质的一级结构不同,高级结构(构象)也就不同,在物理的、化学的和生物学的性质方面自然有所差异。用以分析鉴定这些差异的电泳种类有淀粉凝胶电泳、醋酸纤维薄膜电泳、琼脂糖电泳、聚丙烯酰胺凝胶电泳和薄层等电聚集电泳等。因电泳法具有快速、经济和分辨力高的优点,在鉴定一些近缘种的分类地位方面已显示独特的效力,并成为分子分类学的一项基本技术。

用于分类学的非酶蛋白质有血红蛋白、铁传递蛋白和血清蛋白;许多学者还将肌浆蛋白、眼晶体蛋白及蛇毒蛋白作为分类研究对象。

血红蛋白是血液中运输氧的蛋白质,含4条多肽链,其中两条为 $\alpha$ 链,两条为 $\beta$ 链;每条链环绕一个血红素。弗恩(Fyhn)等详细研究了亚马逊河流域某些鱼类血红蛋白的异质性,讨论了某些目、科动物之间Hb的变异程度。周虞灿等首次把Hb电泳结果用于啮齿动物的分类,他们根据电泳的区带数目(成分数)和区带成分在电泳图谱上分布的不同、反映泳动率(电泳行为)不同,即蛋白质分子结构不同,进而反映遗传型差异,探讨了高原鼠兔的分类地位,支持并证明某些分类学家的观点,把高原鼠兔从达乌尔鼠兔中分离出来,成为一个独立的种。史瀛仙等(1984)曾用薄层聚丙烯酰胺凝胶电泳对扬子鳄和密河鳄Hb比较,从分子水平上看出这两种鳄鱼亲缘关系十分接近,但还有细微差别,仍支持这是两个独立物种的观点。

铁传递蛋白(Tf)是一类能转运 $Fe^{3+}$ 的铁结合蛋白,在血液中的约占0.3%,称血清铁传递蛋白(Sero-Tf)。乳腺、泪腺的分泌液中有乳铁传递蛋白(Lacto-Tf)。鸟类卵中发现有卵铁传递蛋白(Ovo-Tf)。其中研究最多的是Sero-Tf,其主要功能是作为铁的载体运载供铁网织红细胞进行血红蛋白的生物合成。1973年,查普曼(Chapman)报道大型哺乳动物如奶牛、马等的Tf都有变异型。马类Tf多态也有记录。米勒(Muller,1976)发现,小型哺乳动物Tf多态现象虽不及大型哺乳动物广泛,但也有报道。1983年,多勃洛瓦斯卡(Dobrowolska)用电泳统计遗传学方法研究波兰某地农田中普通田鼠、黑线姬鼠和黄喉姬鼠的Tf变异,结果发现3种鼠的电泳谱带各不相同。周虞灿等从青海、新疆捕获8种啮齿动物,用圆盘电泳分析了Tf成分,用铁的特异染色法鉴别Tf,分析Tf在8种鼠类中多态程度,为利用蛋白质多态性进行分类提供了参考。

血清蛋白是血液中的一组蛋白质,常用来测定血清蛋白值。布拉温(Braun)等报道树鼩血清蛋白电泳成分的百分比,为树鼩目的分类地位提供了有价值的资料。周虞灿等利用电泳方法比较3种鼠兔的血清蛋白质,为鼠兔属的分类作了订正。赵小凡、卢浩泉(1986)用十二烷基磺酸钠(SDS)聚丙烯酰胺凝胶电泳法,比较了黑线姬鼠长江亚种和华北亚种的血清蛋白质,亚种间的显带差异鲜明可见。

肌浆蛋白为横纹肌肌浆的水提取物,是一类较稳定的蛋白质,具有物种的特异性,在鱼类分类方面有较多报道。王可玲(1983)等分析了我国舟山近海带鱼及其相近种小带鱼的肌浆蛋白,结果两种带鱼电泳图谱有明显的种间差异。啮齿动物肌浆蛋白的SIS-电泳区带多而清晰,种内差异不明显,而是种间区分的较好指标。

眼晶体蛋白已知有 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 3种可溶性蛋白及不溶性硬蛋白,其氨基酸组成各不相同。洛特曼(Rotmann)早已证实晶体组织的遗传特性。藤尾久芳、马克脱(Markert,1965)、卢什(Lush,1970)与怀脱(Whitt,1973)等在鱼类遗传学中运用眼晶体中酶图谱,论述了鱼类的进化与分类地位。戴维(David)等比较了豹蛙眼等12种组织的肽酶同工酶,其谱带有特异性,作为说明眼睛进化速度的典型例子。1984年,郭永远等首次把晶体蛋白电泳结果用于两栖、爬行动物分类,探讨了蜥蜴科同某些种的分类地位,并说明晶体蛋白在物种内较稳定,实为实验分类学的理想材料。

利用蛇毒蛋白的电泳方法用于毒蛇分类也有报道。1983年,蒙义文报告了中国产蝮属8个样品及尖吻蝮1个样品的双向电泳图谱的比较分析,随蛇种亲缘关系的疏远,亚种间、种间和属间样品的电泳图谱差异越来越大,为一些以形态分类有疑难的毒蛇提供了有价值的检测手段。

用于分类学的酶蛋白质,如用电泳法识别的酶亚型,通常叫同工酶(Isoenzyme)。它是指基团相同而对分子结构不同的同类酶蛋白而言。同工酶也是发育与进化的遗传标志。

乳酸脱氢酶(LDE)同工酶是一种糖代谢的关键酶。根据图谱条带数、区带的迁移率、区带的间隔和活性强弱方面的差异,讨论了许多鱼类的分类地位,两栖、爬行与小型哺乳动物中也有少量报道。

酯酶(Es)同工酶是催化脂类化合物水解的酶系,对药物也有毒作用。肝脏中Es的活性较强,并有物种的特异性和种间差异。在鱼类分类与软体动物分类中已有报道,经Es电泳法证实耳萝卜螺和克氏萝卜螺为同物异名(王恩义1984)。

苹果酸脱氢酶(MDH)同工酶是三羧酸循环中重要的脱氢酶之一。叶炳辉(1984)分析了4种蜉蝣前胸肌肉MDH同工酶,比较谱带条数和迁移率,但不及Es同工酶差异显著,故MDH同工酶是否能作为分类的生化依据,尚待研究。

当然,电泳技术应用于动物分类尚有一定局限性,因并非所有突变分子都能用电泳法检测。电泳分析样品要求新鲜的成年健康活体,目前作为形态分类的补充是非常可靠的。今后这一方法必将有更大的发展。

参考文献

- 1 周虞灿, 兽类学报, 1981, 1(1), 39~42
- 2 周虞灿, 兽类学报, 1982, 2(1), 43~49
- 3 朱蓝非, 等, 水产学报, 1983, 7(2), 145~152
- 4 蒙义文, 等, 两栖爬行动物学报, 1983, 2(1), 9~13
- 5 王可玲, 等, 鱼类学论文集(第三辑), 北京: 科学出版社, 1983, 41~46
- 6 王恩义, 动物分类学报, 1984, 9(3), 333
- 7 史瀛仙, 等, 两栖爬行动物学报, 1984, 3(2), 21~24
- 8 赵小凡, 等, 兽类学报, 1986, 6(1), 57~62
- 9 杨幼凤, 等, 动物学杂志, 1988, 23(3), 46~50
- 10 Markert C L, et al. J Exp Zool, 159, 319~332

(山东大学卢浩泉教授撰)

**土壤原生动物** soil protozoa animalecule 土壤原生动物指主要生活在表层土壤间隙水和表膜水中的单细胞动物。大部分土壤原生动物具有适应土壤环境的形态特征,被认为是土壤有机整体的一部分,在陆地生态系统物质分解及食物链中起极为重要的作用。

19世纪的微生物学家就已在土壤中发现原生动物,但至20世纪才广泛地把原生动物认为是土壤群落中活跃的成分。1909年,沃尔夫(S. Wolff)报道了土壤原生动物有助于病原菌的传播。1916年,沃克斯曼(T. Waksman)观察到土壤原生动物中普遍存在的是鞭毛虫类,在土壤表层12cm左右处数量最多,30cm以下则没有。土壤原生动物计数方法经过卡特勒(D. W. Cutler)等改进之后,对一些细菌和原生动物群体的试验培养和田间条件下的研究便开始进行。大多数试验是探讨土壤细菌与土壤原生动物的相互关系。逐步发现土壤原生动物在选择食物方面并不是没有区别的,进一步证实土壤原生动物是噬菌的。虽然像土壤温度、湿度这些环境因素对原生动物的生长及活性有影响,但尚不能证明这些自然因素与野外土壤中原生动物群的大部分变化之间的相关性。由于发现细菌培养的代谢活性有时受原生动物刺激而不是抑制,从而对噬菌性的土壤原生动物类群是土壤肥力改善的无益生物因素的假说产生异议。例如,自生固氮菌在土壤原生动物存在时比没有原生动物时能固定更多的大气氮素。土壤细菌和原生动物的混合培养,能够比等量细菌的单独培养产生更多的CO<sub>2</sub>及NH<sub>3</sub>。20世纪60年代前,未能证实原生动物种的分布与特定的地理区域或重要土类以及多数的广域环境因素具有相关性。但是发现土壤原生动物是普遍存在的,同一个种在寒带、温带及热带土壤中都存在。在所检验的土壤中,没有一个是完全没有原生动物的。在耕作土壤中通常发现处于土表以下10~12cm处原生动物的种类最多,而很少的种发现处于底土层。土壤中虽含有大量食物,但在任何时候都不能任原生动物随意利用。因此,1971年威廉姆斯(S. T. Williams)等证明原生动物在营养限制条件下,与其它异养性的土壤微生物共同生存于土壤中。杉东(H. Sandon)等人早就认为许多土壤原生动物的体型很小,可能反映土壤中营养缺乏,虽然土壤中这些类型的原生动物也可能是其他环境中属于同一个种的不同发生型。但是在实验室培养的原生动物,饥饿可以导致形成短小体型。1967年,斯道特(J. D. Stott)等指出,土壤中降低氧压以及减少食物供给可以导致原生动物体型变小。还了解到温度可以影响原生动物的体形。影响土壤原生动物的因素除水分外,最重要的是通气、温度及H<sup>+</sup>浓度。原生动物在复杂的土壤、微域环境中生存就需要对环境条件有很大的适应性。1967年诺兰德(L. E. Noland)等认为,迅速的隐进包裹和脱出包裹是土壤原生动物的生命特性。许多试验资料已证明,原生动物包裹对极度干燥、温度、H<sup>+</sup>浓度及气体环境具有抵抗力,许多活跃的土壤原生动物显示出对这些环境因素具有很大的适应性。早在1927年杉东根据研究世界文献得出结论,大多数土壤原生动物的种一般也存在于一些富含有机质的淡水或海水中,只有21种是土壤中特有的;虽然现在这些种类数量有所扩大。上述这种环境可能为外来生物提供一系列的生态条件,似乎也适于土壤生物。但是,一些普通淡水原生动物不存在于土壤中的事实证实了杉东的观点,即土壤原生动物并不是一种没有专性类型的偶然集合体。可惜,对土壤原生动物不同的生理学要求仍然了解很少。1980年,班姆福斯(S. S. Bamforth)认为在植物根围,微生物和原生动物的数量要比其它土壤中多几倍,因为小型裸变形虫和鞭毛虫能够充分利用微小孔隙。原生动物通过捕食细菌等微生物而增强营养物质的矿化作用,并使它们更适于植物吸收。因此,土壤原生动物可增强对营养物质再循环的影响。1986年福斯纳(W. Foissner)证明,土壤原生动物可以作为土壤环境生态指标的指示者。

有人曾对大多数土壤原生动物分布机率的研究资料进行综述,认为除泥炭土以外,土壤氮素含量与鞭毛虫、变形虫和纤毛虫的一些种的数量具有正相关,有利于细菌养分的数量确实是最重

要的因素。20世纪60年代以来,由辛(B. W. Singh)及斯道特改进的环式稀释培养方法对土壤原生动物的定量分析具有革命性的意义。除传统的基础性调查外,人们开始从生态学角度研究陆地生态系统中原生动物。近些年,国外许多学者在不同类型陆地生态系统中研究土壤原生动物的个体生态学、区域地理学、植物根际原生动物生态学及其在陆地生态系统物质分解与循环过程中的作用,并发展到借助土壤微形态技术研究土壤微域环境条件与原生动物的相互关系。另外,在农业、林业和环境保护方面,有人利用原生动物作为土壤肥力和土壤污染程度的指标。在中国,土壤原生动物研究几乎是空白,只是崔振东1980年以来在长白山森林生态系统连续做过一些调查。

早期关于土壤原生动物群落的大小与广域气候条件或总的细菌群体之间寻求相关的企图大部分是失败的,关键是对土壤微域环境了解甚少。土壤水分是活跃的原生动物主要要求之一,而其有或无对微域环境有极大的影响。1973年,达必社(J. F. Darbyshire)在不同吸力条件下培养纤毛虫和固氮菌的试验资料证明,吸力大,孔隙内水分不足或脱水,使土壤原生动物变为静止状态并大多形成包裹,直至被毁灭。

在对各个原生动物种在微域环境中如何活动有更多的了解以前,除了对有机质的分解及对微生物的摄食控制其数量以外,论及土壤原生动物任何其他特殊作用尚为时过早,还需深入研究。今后能结合计算土壤微生物群体的现代方法进行总的生态研究将是原生动物学研究的趋势。

#### 参考文献

- 1 Darbyshire J. F. in Soil Microbiology, 1975, 147~160
  - 2 Bamforth S. S. Terrestrial protozoal., 1980, 27, 33~36
  - 3 Foissner W. in Progress in Protozoology, 1986, 1
  - 4 崔振东, 动物学杂志, 1989, 24(2): 43~47
  - 5 Foissne W. Zoological Science, 1990, 7: 155~165
- (中国科学院动物研究所崔振东教授撰)

**蛭类与医药** leeches and medicine 蛭类俗称蚂蟥,属环节动物门蛭纲(Hirudinea),中国约有近100种,其中无吻蛭目(Arhynebobdellida Blanchard, 1894)、医蛭科(Hirudidae Whitman, 1886)的一些种类不仅是传统中药材,而且在现代医药中也具有广阔的应用前景,人们称这些蛭类为医学蛭类。

中国《本草》中谓蚂蟥“主逐恶血、瘀血、月闭,破血消积聚……”。明朝李时珍在《本草纲目》中记载蚂蟥主要用于治疗女子月闭、跌打损伤、漏血不止以及产后血晕等症。古籍中还记载有把饥饿的蚂蟥装入竹筒扣在洗净的皮肤上令其吸食浓血以治疗赤白丹肿,以及将蚂蟥研成干粉末与其他中药配伍治疗跌打损伤等症。现代中药药典中则记载蚂蟥的功能是破血通经、消积散瘀、消肿解毒和堕胎。还有人试验用活蚂蟥与纯蜂蜜加工制成外用药水和注射液用来治疗角膜斑翳、老年白内障的初发期和膨胀期患者,能使混浊体逐渐透明。几个世纪以前,西欧国家也已开始使用医蛭治疗心血管疾病、神经系统疾病和炭疽、青光眼和乳突炎等。

现代医学又发现医蛭有许多新的用途。1884年,威尔士海克拉夫特(J. B. Haycraft)首先发现医蛭咽部具有水溶性的抗凝血物质。1904年,雅各比(C. Jacoby)将这种物质命名为“水蛭素”(Hirudin)。1955年,德国马克沃德特(F. Markwardt)从医蛭中成功地分离出水蛭素的纯品,从此水蛭素的分离、纯化和活力测定技术日臻完善。水蛭素是一种由65个氨基酸组成的低分子量(7000)多肽,其中谷氨酰胺和天门冬酰胺的含量较高,其等电点较低(3.8~4.0),热稳定性随H<sup>+</sup>浓度的增高而增强,在室温下能长期稳定,在70℃以下可以保持活性,干燥也可保存1a。在水溶液中加入百里酚结晶能保存6个月。水蛭素通过阻塞血液中凝血酶底物的结合基因致使凝血酶失去活性;它被木瓜酶、胃蛋白酶和枯草杆菌蛋白酶破坏,却不受纤维蛋白酶、胰蛋白酶和糜蛋白酶A的影响。水蛭素的一个抗凝血酶单位(AT-u)是指

在 37℃ 下使 1 个单位的凝血酶失活所需要的水蛭素量, 1 个抗凝血酶单位对应于 0.1 μg 的纯水蛭素。水蛭素是已知最有效的天然抗凝剂, 在治疗某些血液疾病方面优于肝素, 它能更有效地抑制凝血酶诱发的弥散性血管内凝血和静脉血栓形成, 在处理诸如败血性休克和遗传疾病等缺少抗凝血酶 III 的病例方面显示出巨大的优越性。杜拉纳(P. Durana)曾用医蛭头部提取物治疗气喘、鼻炎和痉挛等变态反应。塔戴(J. H. Tardy)曾用水蛭素治疗牛皮癣。在医蛭唾液腺分泌物中发现的蛋白酶抑制剂 Eglins 对于防治肠内皮溃疡以及与败血症有关的凝血因子非特异性蛋白水解有明显的疗效。另一种蛋白酶抑制剂 Bdelins 在进行血纤维蛋白溶酶的抑制处理时能够发挥特殊效用。前列腺素也可消散血栓, 可用于治疗动脉粥样硬化、脑血管梗塞以及帮助分娩。以色列科学家还从医蛭唾液腺分泌物中分离出至少 4 种抑制血小板聚集的活性物质, 而血小板聚集正是引起动脉粥样硬化和心肌梗塞的主要原因。但是, 在临床研究方面的报道很少, 这是因为从医蛭体内提取的生物活性物质数量太少, 如果制备成制剂成本太高, 这就限制了在临床上的应用。整形外科和显微外科医生发现利用医蛭可以清除手术后血管闭塞区的淤血, 使静脉血管通畅, 减少组织坏死的发生, 为静脉血管形成侧枝循环赢得时间, 从而大大提高再植或移植趾指、脚趾、耳朵、鼻子等手术的成功率。这一方面是医蛭吸血促进血液循环; 另一方面利用医蛭唾液腺分泌物中的多种活性成分的抗凝血、溶解血块以及血管扩张作用, 证明它是一种安全、简便和经济的方法。1985 年 8 月, 美国波士顿一家儿童医院为一个 5 岁的男童被狗咬掉的耳朵做再植手术, 3d 后再植的耳朵因血液无法回流变成紫黑色, 有坏死的危险, 最后医生借助 30 条饥饿的医蛭终于保住了这双耳朵。1987 年, 中国科学院水生生物研究所水蛭课题组与湖北医学院附属第二医院骨科协作, 在中国首先用饥饿的日本医蛭 (*Hirudo nipponia*) 吸血治疗数例断指再植术后阻塞性充血。此外, 还有报道中国医生用医蛭处理皮瓣静脉淤血和治疗脉管炎; 俄国医生用医蛭治疗耳鸣以及用于口咽缺损再造手术后的治疗者。欧、美出售活医蛭及其产品的公司已发展到 7 家以上。法、德等国也将合成水蛭素的基因转移到酵母菌和大肠杆菌中, 利用遗传工程的方法生产出廉价的重组水蛭素。中国有着丰富的医蛭资源可以利用, 但尚无水蛭素等产品出售, 有关医蛭生物活性物质的研究正处于起始阶段。吉林省红光制药厂生产的抗出血性中风中成药口服液—脑血康, 山西省云中制药厂生产的抗动脉粥样硬化新药—活血通脉胶囊, 已在海内、外销售, 其临床试用效果明显, 此两种中成药均系用取食螺类而不吸食哺乳动物血液的光润金线 (*Whitmania laevis*) 蛭和宽体金线蛭 *Whitmania pigra* 干品制成, 故可判断有效成分不是水蛭素而是其它活性物质或生物碱。由于这两种金线蛭是东亚特有, 也是中药药典中规定的种类, 很有必要开展金线蛭的资源保护和生殖生物学研究。

作为现代蛭类研究的一个热点, 许多国家都在加紧开展医蛭生物活性物质结构、功能以及药理和药效等应用前景的研究, 从事此项研究工作的有以德国伊尔福特(Erfurt)医学科学院药理学和毒理学研究所马克沃德特, 以色列里格比(M. Rigbi)以及俄国巴斯柯娃(I. P. Baskova)为首的一批蛭类生物化学家, 还有以英国索耶(R. T. Sawyer)和德国弗里茨(H. Fritz)为首的一批蛭类医学应用和临床学专家。美国、德国、英国、法国、日本、俄国和匈牙利等近 10 个国家已公布了医蛭制剂研究的专利, 还多次召开专门的国际学术会议进行交流, 国际水蛭科学家协会也于 1990 年宣布成立。随着对医蛭活性物质认识的不断深化, 它们可望在医学临床上得到广泛的应用, 也将在其他生命科学中发挥更重要的作用。

参考文献

- 1 Kaiser B, Markwardt F. Thrombosis Research, 1986, 43: 613~620
- 2 Lent C. Nature, 1986, 323: 494
- 3 Sawyer R T. Leech Biology and Behaviour, Vol. 1, Oxford,

- Clarendon. Press, 1986. 467~505
- 4 Baskova I P, Nikonov G I. Dokl Akad Nauk SSR, 1987, 292(6): 1492~1493
- 5 Righi M, Levy H, Iraqi F, et al. Comp Biochem Physiol, 1987, 87B(3): 567~573
- 6 Upton Plastic and Reconstructive Surgery, 1987, 79(2): 311
- 7 杨渣, 彭建强, 等. 中华医学杂志, 1988, 68(12): 717
- 8 彭建强, 龚选举, 等. 湖北医学院学报, 1988, 9(4): 341~344
- 9 周易勇, 杨渣, 等. 天然产物研究与开发, 1991, 3(4): 54~57
- 10 欧兴长, 丁家欣, 张玲, 等. 中国药学杂志, 1991, 26(7): 396~399

(中国科学院水生生物研究所杨渣副研究员撰)

**扬子鳄** *alligator sinensis* 扬子鳄又称“鼉”, 属爬行纲, 为中国特有的珍稀野生动物; 肉食, 营穴居生活, 在生态系统中有重要地位; 鳄类的身体构造是现存爬行动物中最高等的的一个类群, 研究扬子鳄形态、生态、个体发生和进化途径, 可以扩大和丰富生物学的基础理论。鳄类是恐龙的近亲, 研究鳄类对了解神秘的恐龙世界有不可估量的作用; 此外, 鳄皮可制革, 内脏可供药用, 肉可食, 其经济价值也有待进一步开发利用。

中国对扬子鳄的记载已有 3 000 年以上的历史。1879 年, Fauvel 首次命名为 *Alligator sinensis*, Boulanger(1890)注意到扬子鳄有一系列特征和南美眼镜鳄 *Caiman* 相近。Mook(1923)记述了扬子鳄头骨并指出和密河鳄的不同处。Pope(1932)对扬子鳄的生活习性有简短叙述。肖之的(1934)报道了扬子鳄的生活状况。Deraniyagala(1951)研究扬子鳄的属名。薛德庠(1954)记述了扬子鳄的体形与生态。朱承璋(1954, 1957)将前人的资料和自己的研究成果相结合, 较系统地报道了扬子鳄的分布、食性、繁殖、洞穴和活动规律。张孟闻(1957)介绍了鳄目的情况。黄祝坚(1959)补充记述了扬子鳄的形态和生活习性。Cohen 等(1970)研究了扬子鳄的染色体组型。

1975 年开始, 陈壁辉等对扬子鳄进行系统的研究, 包括种群分布和数量的历史变迁、栖息地、食性、繁殖、冬眠、洞穴、活动规律等。陈壁辉等在获得扬子鳄野外繁殖知识的基础上, 于 1976 年孵出 16 条幼鳄, 首次获得室内人工孵化幼鳄成功, 1982 年获得大规模人工孵化幼鳄成功, 同时获得人工饲养成鳄成批产卵并孵出大量幼鳄。到此, 扬子鳄人工繁殖这一难题基本得到解决。截至 1992 年, 人工养殖的扬子鳄已逾千条; 1992 年 3 月, 东京“濒危动植物种贸易公约国际组织成员会议”上已将扬子鳄由一类保护动物降为二类保护动物, 肯定了中国保护扬子鳄所获得的成果。

有关扬子鳄的人工饲养及繁殖技术虽已获得成功, 但在幼鳄人工饲养过程中, 因其卵黄硬结而导致死亡是世界养鳄业中共同存在的一个问题。陈壁辉等从生态学和生理学两方面对这一问题进行研究探索, 通过对出生后幼鳄的野外生态条件、能量代谢等分析测定, 得出开食时间过早是导致幼鳄卵黄消化困难并形成硬结的原因, 并提出解决办法: 将幼鳄饲养室温度提高至 30~31℃ 以加速幼鳄卵黄吸收; 同时延缓开食时间, 孵出后 18~20d, 触摸幼鳄腹部, 当卵黄吸收时, 再开始喂食(其他国家孵出后 7~9d 开始喂食)。采用上述办法, 再未出现因卵黄硬结导致幼鳄死亡的现象, 从而大大地提高了幼鳄成活率。

另外, 梁宝东发现, 扬子鳄卵在孵化前头 20d, 湿度为 95% 以上, 20d 后降低至 90% 左右, 能提高孵化率。张正东等对如何提高幼鳄成活率进行了研究; 王朝林等对提高人工饲养室内初生扬子鳄的出生率和存活率提出自己的看法。

扬子鳄的基础理论的研究也取得可喜的进展。张孟闻等(1978)报道了有关扬子鳄的研究历史、形态、分布、生态。丛林瓦等(1980)记述扬子鳄的皮肤系统。1981 年, 陈壁辉、Myrna 和黄祝坚研究了扬子鳄栖息地、数量、叫声和繁殖行为。王树(1981)

介绍了鼋属分布、鳄类化石及扬子鳄一般情况。王歧山等(1983)研究了卵壳的化学元素组成。徐钦琦等(1984)研究了鼋属的进化和地理分布。1975~1978年陈壁辉和李炳华等进行了扬子鳄的野外生态调查、人工孵化、幼鳄饲养及部分形态学研究,花兆合对扬子鳄皮肤系统、肌肉系统、循环系统、内分泌器官进行解剖学研究;上述3人于1985年合作出版了《扬子鳄》专著;1990年陈壁辉又主持了扬子鳄组织学研究,已经完成嗅觉器官(吴孝兵等,1992)、视觉器官、听觉器官等的组织学研究;关于扬子鳄其它器官,系统的组织学和胚胎研究仍在进行中。

关于扬子鳄分类地位的探讨,已成为国际学术界所关注的热点。自 Fauvel 将扬子鳄定名并归于 *Alligator* 属后,对此学术界一直有争议。1923年,Moore 发现扬子鳄与同属的密河鳄头骨有差异。1947年,Deraniyagala 认为扬子鳄更相似于眼镜鳄(*Caiman* 属),并将其另立新属 *Caigator*,1951年又撰文阐述了他的观点,但一直未能得到承认。1970年,Cohen 等总结现存21种鳄的染色体组型,得出扬子鳄与密河鳄染色体组型基本一致的结论。1984年,史瀛仙等仔细比较和分析了扬子鳄和密河鳄染色体,发现两者在第6、7染色体间存在着显著统计学差异,并指出可能是染色体的臂间倒位和相互易位造成的。1981年,Densmore 等利用生化方法和免疫学技术,对21种鳄蛋白质组成和各种鳄所具有的独特抗原进行研究,指出扬子鳄和密河鳄蛋白质相似性较其它同属种间蛋白质相似性要差。Coulson 等(1983)也发现两者蛋白质具有很大差别。莫鑫泉等(1988)用重聚动力学方法比较研究扬子鳄、密河鳄基因组的中度重复序列的种类、数量和拷贝数,发现有较大差别;1991年,他又利用 DNA-DNA 杂交法研究扬子鳄、密河鳄等4种鳄的 DNA-DNA 相互杂交,其结论是在4种鳄中扬子鳄与密河鳄关系最远,而与泰国鳄关系较密切,从而对扬子鳄目前的分类地位的正确性提出质疑。陈壁辉又从解剖组织学角度探讨了扬子鳄的分类地位;1989年,他研究扬子鳄舌腺时,发现扬子鳄舌腺有泌盐功能,而生活于北美洲的密河鳄则无此功能。盐腺是动物生活于高盐度环境中的一种适应器官。扬子鳄生活于淡水却有盐腺,而密河鳄除生活于淡水外还能生活于咸淡水交汇处的沼泽地带,反而无盐腺,这说明扬子鳄起源于海水中,而密河鳄祖先生活于淡水中。传统观点认为扬子鳄与密河鳄同属一属,有一共同祖先,这与上述结果相矛盾。1991年,陈壁辉又对扬子鳄的背腺进行观察研究,发现其幼鳄的背部两侧皮肤上可见各种不同程度呈退化状态且与密河鳄相似的背腺,而成鳄却难以找到,说明扬子鳄祖先与密河鳄一样具背腺,而现在扬子鳄背腺是一种退化器官。通过观察分析扬子鳄的繁殖生态,陈壁辉(1991)认为从这种退化背腺看,扬子鳄在进化过程中又前进了一步,而密河鳄仍保持着原始状况。吴孝兵等对扬子鳄视觉器官进行组织学研究发现,扬子鳄睫状肌为横纹肌,与 Underwood(1970)所报道的密河鳄不同;对其视细胞超微结构观察发现,视细胞椭圆体内线粒体嵴突与其长轴相平行,而 Kalberer 等(1963)观察密河鳄线粒体嵴突与其长轴相垂直,从其行为上看,差异亦很大,扬子鳄能造极其复杂的洞穴系统作为栖息、调温、避敌、越冬之用,密河鳄以原始的方法适应环境,如冬天进入深水中越冬。

陈壁辉(1991)认为,无论从解剖学、细胞学或分子生物学、生态学角度看,将扬子鳄和密河鳄归并成一属是不合适的,他建议将扬子鳄从 *Alligator* 属中分离出来,另立新属。

关于扬子鳄今后的研究热点,陈壁辉等总结为以下几点:(1)扬子鳄在生态系统中的地位及它和人类的关系。(2)扬子鳄潜在的经济意义。(3)形态学、生理学、胚胎学、生态学等方面的深入研究。(4)系统发生、分类地位及分布特点的进一步探讨。(5)种群数量的恢复和发展,特别是恢复野生鳄种群数量的研究。

#### 参考文献

- 1 Cohen M M, Gans C. The Cytogenetics. 1970, 9: 81~105
- 2 陈壁辉,等. 扬子鳄. 合肥:安徽科技出版社,1985

- 3 陈壁辉,等. 动物学报,1989,35(1):28~32
- 4 Chen Bihui. Asiatic Herpetological Research. 1990, 3: 129~136
- 5 陈壁辉,等. 动物学报,1991,37(1):16~21
- 6 陈壁辉,等. 大自然,1991,3:25~26
- 7 莫鑫泉,等. 中国科学(B),1991,10:1047~1053  
(安徽师范大学吴孝兵副教授撰,陈壁辉审)

#### 鼠耳蝠染色体 the karyotypes of the myotis 鼠耳蝠

鼠耳蝠属动物在翼手目中是一个大属,全世界约有94种,占翼手目动物总数的10%。分布在中国的鼠耳蝠有22种,占世界鼠耳蝠属种数的23%,占中国翼手目总数的24%。从染色体分析来研究鼠耳蝠属动物的分类及进化过程,对于目前的形态分类学及系统进化研究具有重要意义。

鼠耳蝠染色体的研究,是随着60年代染色体制备技术获得突破性进展而发展起来的。最早做出巨大贡献的是美国 Baker Patton(1976),他们对美国和中南美的18种鼠耳蝠的核型做了报道,进行了组型分析。此后,Stralkov 和 Volobuv (1969),Harada 和 Yocida (1978),Bickham(1979),Bickham 和 Hafner (1978),Harada 等(1980),Harada 等(1985),Ando 等(1987)及张继道等(1985)分别对欧洲、非洲、日本、赤塔、中国等地的32种核型作了报道。Bickham 和 harada 等对有关耳蝠进行了G带、C带的研究,Ando,等(1987),对个别种进行Q带的研究,Bickham(1979)为鼠耳蝠绘制了G带模式图,提出了染色体G带系统命名法。

从已报道的50种鼠耳蝠核型看(自然科学版),它们是一个非常保守的类群,其核型基本上具有以下4个共同特征:(1)除绒鼠耳蝠外,几乎所有种的二倍体数为44(2n=44);(2)所有种均具有3对大的和1对小的双臂染色体(M),除个别种染色体臂数为52和54外(NF=52,54),大多数种的臂数为50(NF=50);(3)所有种的X染色体为中部着丝粒染色体(个别种例外),Y为端部着丝粒染色体;(4)C-带研究表明,所有常染色体和X染色体有一个清晰的着丝粒区C-带,Y染色体大部分为异染色质。这些C-带区域经G-带处理亦深染。

鼠耳蝠属动物的核型虽然基本相同,但在历史演变中,分布在新旧大陆的某些种同样发生了某些微小变异。主要表现在:(1)美国的长耳鼠耳蝠、毛鼠耳蝠、大棕鼠耳蝠等核型中,第21对染色体由端着丝粒染色体演变为中部着丝粒染色体(M),NF=52,Y由核型中最小的成分演变为相当于第19对染色体大小的端着丝粒染色体(T)。(2)仅第21对染色体变为中部或亚中部着丝粒染色体(M,SM),其他成分未发生变化。象意大利的长指蝠,捷克斯洛伐克、突尼斯的小鼠耳蝠等,它们的第21对染色体演变为亚中着丝粒染色体(M)。(3)其他成分未变,仅Y染色体由核型中最小的成分演变为较大的相当于第19对染色体的端着丝粒染色体。象中国的大足蝠,意大利、日本的普通鼠耳蝠等。(4)来自日本的 *M. prunosus* 除第21对常染色体变为双臂染色体,Y变为大小相当于第19对常染色体外,NO.1由大的中部着丝粒染色体,经近着丝粒区倒位变为大的亚中着丝粒染色体,X经NO.17常染色体重复复制,易位到它的短臂上,由中等大小中着丝粒染色体,演变为大的亚中着丝粒染色体。这种核型,在鼠耳蝠核型中是少见的。(5)染色体组成与其他鼠耳蝠有明显不同的为中国绒鼠耳蝠,二倍体数为48(2n=48),臂数为54(NF=54),是目前已报道鼠耳蝠染色体数最多的一个种。

关于鼠耳蝠属种间进化机制,大部分学者认为主要是由于异染色质衍生和罗伯逊易位造成的。C-带和G-带的研究为此提供了一定证据。原始种的微小Y染色体,在历史进程中,由于异染色质衍生而逐渐演变为较大的,相当于No.19大小的染色体;原始种的第21对染色体为微小的端着丝粒染色体,在进化中由于异染色质增长和适当的近中着丝粒倒位,而逐渐演变为小型双臂M染色体(如毛鼠耳蝠)多态性的小型SM或M染色体。这

些 M 或 SM 型染色体和经异染色质衍生而形成的 Y 染色体,经 C-带处理,均表现为异染色质型。日本 M. Harada 和 T. H. Yoseda 为 NO. 21 染色体的进化提出了假设的进化途径,即: (A)→(M<sup>H</sup>)→(SM<sup>H</sup>)→(M)。

关于鼠耳蝠属祖先的核型,张维道(1987,1989)根据在同一个分类阶元中,染色体数目多,具有较多端部着丝粒染色体为较原始类型,反之则为较进化类型的观点,提出了分布在中国的绒鼠耳蝠(*M. Isniger*)可能是现存鼠耳蝠属中最原始的种,其核型可能最接近原始祖先核型的假设。它的演化将遵循罗伯逊易位(主要是着丝粒融合,和衔接易位。类似于绒鼠耳蝠的鼠耳蝠属祖先,在历史进程中,大部分个体由于衔接易位,其核型中 4 对端着丝粒染色体(T)衔接易位为两对较大的端着丝粒染色体,从而由 2n=48, NF=54 的核型演变为 2n=44, NF=50 的核型,如中华鼠耳蝠等;鼠耳蝠祖先的另一些个体,核型中可能有 2 对 T 染色体衔接为 1 对 T 染色体,另有 2 对 T 染色体于着丝粒处融合为 1 对双臂染色体,从而形成 2n=44, NF=52 的核型,如长耳鼠耳蝠等。在进化中,可能也有些小型 T 染色体丢失,而直接形成 2n=44 的核型。在外界条件影响下,由于染色体着丝粒融合和衔接易位是随机的,所以不同种间由衔接易位而形成的某些 T 染色体或由着丝粒融合而形成的 No. 21M 染色体或 SM 染色体的结构成分不一定相同,从而形成外部形态有一定不同,而核型又基本上保持一致的种类众多的鼠耳蝠。

目前,对鼠耳蝠染色体的研究,主要从两方面进行:(1)继续对尚未进行核型分析的 40 多种鼠耳蝠进行核型调查,查清这些种的染色体组成;(2)深入开展 C-带、G-带、Q-带、核仁区的银染,提高高分辨染色技术。根据对果蝇染色体观察到的可诱导的突变进行遗传分析提示,结构基因总数大约相当于染色粒数目。70 年代发展起来的高分辨分带技术,使染色体显示丰富的带纹或染色粒,这些丰富的带纹具有种的特异性,可以鉴别染色体易位、倒位、缺失、衔接易位及重复复制的变化。如果结合联合会复合体的观察,C-带、Q-带、核仁形成区的银染,就有可能使生物形态、构造和染色体的结构组成统一起来,就会使核学知识真正成为分类学的一个重要指标。但普及高分辨分带技术,并使其规范化,同时进行联合会复合体观察,将有助于搞清楚鼠耳蝠属动物系统分类及核型进化。

参考文献

- 1 Baker, et al. *J M Mammal*, 1967, 48: 270~287
- 2 Strelkov, et al. *Pro II Conference of the USSR Mammlogy*, Moscow, 1969, 14~15
- 3 Harad, et al. *Chromosoma*, 1978
- 4 Backham. *Cytologia*, 1979, 44: 780~797
- 5 张维道. *安徽师大学报*, 1984, 2: 42~47
- 6 Harada, et al. *Experientia*, 1985, 41: 1610~1611
- 7 张维道. *安徽师大学报, 兽类学报*, 1986, 6(3): 233~236
- 8 Ando, et al. *J mamm Soc Japan*, 1987, 12: 25~29
- 9 张维道. *安徽师大学报*, 1989, 2: 71~79

(安徽师范大学张维道副教授撰)

喜马拉雅旱獭研究 study on *marmota himalayana*

喜马拉雅旱獭又名哈拉、雪猪、曲娃(藏名译音),体形肥硕粗大,体长超过 400mm,有的可达 650mm;后足长为 80mm 左右,尾长超过头躯长的 1/3,耳高 20~25mm;四肢短而粗,前足 4 指,后足 5 趾,指端具爪,爪发达适应于掘土,雌兽乳头 5 对或 6 对;自鼻端经两眼眉间到两耳前方之间有似三角形的黑色毛区,即“黑三角”,此“黑三角”愈近鼻端愈窄,色调愈黑;嘴四周为黄白色、淡棕黄色或桔黄色;眼眶黄色;面部两颊到耳外侧基部呈淡黄褐色或浅棕黄色,明显有别于“黑三角”;耳壳呈深棕黄色或深黄色;颈背和体背部同色,呈沙黄色、棕黄色或草黄色;毛基为石板色、中段草黄色或淡黄色;毛尖黑色;背部至臀部黑色毛尖多而显著,常形成不规则的黑色细斑纹;体侧黑色毛尖显然较少;体腹面

毛稀,毛色呈灰黄色、淡棕色或草黄色;肛门四周和外阴周围呈深棕色或深棕黄色毛区;四肢或足上面呈淡棕黄色或沙黄色,下面与体腹面同色;足掌和爪黑色;尾巴背面毛色与体背相同,末端约 1/4 为黑色或黑褐色;尾腹面近基部 1/2 为棕黄色或褐黄色,端部 1/2 为黑褐色;毛色随年龄、地区不同而变异。幼体毛色多较成体为暗、有少数白化个体。

头骨粗壮结实,略似三角形。鼻骨较宽而长,前端略超过门齿,后端超过前颌骨后缘,入额骨前端。眶上突发达,向下外方微弯。眶间区凹陷较浅而平坦。颧弓后部明显扩张,鳞骨前下缘的眶后突起甚小,矢状脊明显,在顶骨长度 1/3 处的前方分叉,而与眶后突接联呈 Y 型,幼体头骨无矢状骨脊,脑颅平滑。枕骨大孔前缘呈半椭圆形。腭弓狭长,其后缘超过前颌骨的后缘。腭孔较中国其它诸种旱獭的腭孔长,长 8.1~9.1mm。下颌骨的喙状突后缘近乎垂直,不显著向后弯曲,喙状突与关节突之间的切迹深而较窄。

牙齿的齿式  $\frac{1,0,2,3}{1,0,1,3} = 22$ 。上门齿大,前面无沟。上颌第 3 前臼齿显著,呈圆柱形。上颌前第 4 前臼齿较大,并臼齿化。上颌臼齿前两枚几乎等大,第 3 臼齿较大,均具发育较好的原尖、前尖和后尖,且沟深脊显,下颌第 4 前臼齿之原小尖及下原尖发达。

喜马拉雅旱獭的寿命在 8a 以上,其中 1 龄组为当年幼体,2 龄组为第 2 年的亚成体,3~6 龄为第 3~6a 的成体,第 7~8 龄组为第 7~8a 的老体。

生态 喜马拉雅旱獭是青藏高原广泛栖息的动物,它的数量不因草甸草原上植被群落的不同而发生显著变化,主要受地形的影响,山麓平原和山地阳坡下缘是喜马拉雅旱獭集聚的高密度区,阶地山坡和河谷、沟壁为中等密度集聚区,其他地区均为少数或没有,这是最一般的规律。

喜马拉雅旱獭营家族生活,通常数个家族形成一个群落,群落中个体活动及取食范围互有通达,个体接触密切。群落中常有个体迁出迁入现象。

旱獭的洞穴由主洞(越冬洞)、副洞(夏洞)及临时洞(避敌洞)组成。主洞构造复杂,洞深,洞口较多,内有窝巢,巢内垫有干草。副洞构造较浅而简单,洞口 1~2 个。临时洞为逃避敌害之用,其构造简单,多在巢域的外围。

喜马拉雅旱獭是冬眠动物,整个冬眠期约 140d,每年 3 月底陆续出蛰,10 月中旬陆续入蛰。地面活动时间约 7 个多月,各地出入蛰的时间随各地物候期而有所不同。在室内饲养条件下,旱獭仍有冬眠期,但时间要相对短得多,约 110d 左右。地面活动范围以 6 月份最大,9 月最小,雄体大于雌体,成体大于幼体,最远可距居住洞口 130m 左右。旱獭具有一定强度的迁移性,37% 属于短距离的或远距离的迁移,其中短距离迁移占 20%,远距离迁移占 17%,最远在 1~2a 内可迁移至 3 000m。旱獭广泛栖息于青藏高原的嵩草草甸草原及针茅草原,主要分布在东经 75°~105°,北纬 27°~39°。国外见于喜马拉雅山及喀喇昆仑山南坡的克什米尔、尼泊尔、不丹和印度北部等地。国内广泛分布于青藏高原、甘肃祁连山地、阿尔金山及川西北、滇西北等地。垂直分布范围一般多在海拔 2 800~4 000m 之间,最低 2 500m,最高 5 200m(唐古拉山)。从嵩草草甸草原到针茅草原地带均有分布,分布形式随地形不同而异,在山地多呈带状分布,在平坦地区多呈岛状栖息或弥漫式的栖息,存在个别小片孤立的栖息洞群。

食性和食量 野栖喜马拉雅旱獭以沙草科的、禾本科的植物叶、茎及豆科植物的花为食,且有季节变化。春季以青干草为主,日采食量平均 350g,夏季以沙草的与禾本科嫩叶为食,日采食量平均 500g 左右,秋季食沙草科的与禾本科茎叶外和种子,大量采食豆科植物的花(如兰花刺豆),日采食量 500g 左右。此时是喜马拉雅旱獭增肥最旺时期(解剖成体腹腔内白色脂肪约 500g 左右,背部与会阴部的白色脂肪约 750g 左右)。喜马拉雅旱獭在室内饲养条件下表现为杂食性。

繁殖特征 旱獭为 1 年繁殖 1 次的啮齿动物,3 岁始达性成

熟,雌性成獭每年仅有一半参加繁殖,妊娠期32~34d。喜马拉雅旱獭种群雌性比径卡方检验基本符合1:1的关系。动物种群繁殖力的又一重要指标取决于性成熟的成年个体占整个种群的比重。据1982~1984年对青海湖东北岸的调查,达性成熟的旱獭占整个种群的平均值为50.67%。喜马拉雅旱獭的种群繁殖力与种群密度有关,当种群密度大幅度下降时其繁殖力即相应提高,参加繁殖的雌性成獭占具有繁殖力的雌性成熟群体的百分数可高达82.5%,产仔数也可以由年平均数4.71只增至年平均6.93只,说明旱獭密度下降时产仔数明显增多,说明喜马拉雅旱獭动物种群本身存在一种自动调节能力,当种群密度离开平均水平上升或下降时,就有一种使种群重返原来水平的倾向,并且种群数量上升或下降越剧烈,这种相反的倾向也就越明显;换言之,它是随着密度而变化的,是受密度制约的,可以把这种作用称之为反馈。

喜马拉雅旱獭繁殖力较弱,每100只雌性成獭繁殖量为255.67,即繁殖季节过后,旱獭种群数量只能增加雌性成獭的2.55倍;但数量大幅度下降时,在其种群内因作用下将明显增加,最高可增加雌性成獭的5.65倍,与小型啮齿动物相比,旱獭种群数量增加的幅度是有限的。

喜马拉雅旱獭不管数量变动如何,种群年龄组成不变,性别关系不变,成獭占种群的1/2左右。

旱獭9、10月份进入冬眠期,3、4月出蛰,在草地上活动时期的生态习性是变化的,这些变化反应其生理特点,生态期大致可归纳为:(1)出蛰期。旱獭出蛰时间各地不一,随物候期而异,一般为3月下旬至4月中旬,出蛰期约为半个月。刚出蛰活动范围小,离洞较近,仅在中午出洞晒太阳,很少觅食。(2)繁殖期。随着旱獭活动增强即进入繁殖期,平均每天出入洞达10多次,串洞、追逐,吃食时间少。(3)哺育期。仔獭于6月上旬始出生,活动少;为保护幼兽成兽守望增多;仔獭出生有很大一部分不能成活。(4)育肥期。自7月至9月,旱獭活动增多,觅食时间增长,幼兽活跃,取食频繁。为觅食方便,成獭可离开主洞,自挖住洞,但距家族主洞均不太远。此期旱獭渐肥,脂肪积累越来越多。(5)入蛰前期。9月以后气候渐冷,植物枯萎,旱獭家族集中于衔草、清理冬眠洞,出入洞频繁。随着气温持续下降,9月底10月初即堵洞,进入冬眠期。

**遗传及生理变化** 旱獭这一野生哺乳动物细胞遗传特征,用雌雄各6只样本外周血淋巴细胞培养方法,对染色体核型进行研究,结果染色体数目为 $2n=38$ ,常染色体中有24个中着丝粒染色体和12个端着丝粒染色体,12个端着丝粒染色体。X为中着丝粒染色体,Y为端着丝粒染色体。

另一个涉及到遗传背景的问题就是生理功能的遗传基础以及种群遗传。其同功酶和乳酸脱氢酶的应答,用聚丙烯酰胺凝胶电泳,对冬眠期的和非冬眠期的喜马拉雅旱獭心、肾、肝和骨骼肌4种组织的乳酸脱氢酶、同功酶谱分布及酶活力进行研究,结果不同组织的酶谱明显不同,且有多亚带和多态现象,冬眠期各组织的总酶活力高于非冬眠期。

喜马拉雅旱獭是耐低氧动物,采用封闭式流体压力呼吸器(Coreeki,1975)测试,当环境温度在15℃时,旱獭的耗氧量是2.24ml。

喜马拉雅旱獭的一些生理指标测定,用3雌2雄5匹成獭测得均值如下:体重3.35kg,代谢体重2.47kg,体温26.1℃,心率每分钟160次,呼吸频率每分钟21次,每分钟耗氧量0.027L,每分钟产生 $CO_2$ 0.0212L,呼吸商0.75,每小时产热量是33J,其基础代谢量每小时干克体重是13.7J。

喜马拉雅旱獭血相正常值,血红蛋白103~207g/L,RBC(2.78~5.67) $\times 10^{12}$ /L,WBC(2.6~12.718) $\times 10^9$ /L,中性WBC13.6%~79.2%,淋巴细胞18.0%~86.6%,单核细胞0%~2.7%,嗜酸性白细胞0%~2.3%,嗜碱性WBC0%~0%,以上数值是在玉树地区从100匹成年旱獭现场测得的。

**经济意义** 旱獭肉、骨和油脂均可入药,在藏医中谓其头盖

骨(烧成灰,研细)能治水肿;鲜肉和肉干能去寒气,治妇科病;胆汁(胆囊凉干去膜,研细)可治食物中毒,药物中毒及外伤生肌;油脂煎制能去寒气。旱獭皮经加工染色后适制皮领、皮帽和裘衣。

1989年,喜马拉雅旱獭在青海省实验动物中心人工驯化繁育成功,初步建立起人工种群,向实验动物种群进化。

#### 参考文献

- 1 黄孝龙. 兽类学报,1984,5(4):10~16
- 2 黄孝龙. 兽类学报,1986;6(4):307~311
- 3 梁杰荣. 高原生物学集刊,1986,5:91~97
- 4 黄孝龙. 动物学杂志,1986,21(4):29~31
- 5 王懋钦. 兽类学报,1989,9(3):173~175
- 6 刘国富. 遗传学报,1990,17(2):130~135

(青海省地方病防治研究所黄孝龙副主任医师撰;吴祥林审)

**大熊猫** giant pandas 从动物学的角度来看,大熊猫的起因,最早是从小熊猫(*Ailurus fulgens*)开始的。这种动物的体型很小,于1825年首次在喜马拉雅山南麓发现,以后又在四川西部发现。19世纪中叶,法国戴维(P. David)来华传教,并接受法国自然历史博物馆的委托,代为收集中国的动植物标本。1869年3月,他在四川省穆坪(今宝兴县)一农户家获得一张大熊猫皮,并把它当成一种新发现的黑白熊(*black and white bear*),以*Ursus melanoleucus*种属名发表。1870年,经米勒—爱德华(Milne—Edwards)研究后,认为它不是熊而是与小熊猫相似的另一只熊,主张立一新属*Ailuropoda*。至此,西方一些动物学家为了区别在亚洲发现的两种熊,把先发现的小熊猫称为*little panda*或*red panda*,把戴维描述的黑白熊称为*giant panda*。

20世纪30年代,当大熊猫首次在重庆北碚展出时,说明文字的标题采用了横书,题名为猫熊(根据英文*cat bear*译名)。当时汉字一般都采用直书。从右往左读,于是前来参观的人凭习惯将横书的“猫熊”读成了“熊猫”,一错数十年。由习惯所致,人们不再将“熊猫”订正为“猫熊”了。

大熊猫起源于祖熊(*Ursavus*),虽然早有议论,但因缺乏可靠的化石证据而进展甚微。1981和1983年,由于在云南禄丰和元谋找到了大熊猫的直接祖先*Ailurarctos*和*Ursavus*,为大熊猫起源于祖熊说奠定了重要基础。在大熊猫的种系进化中,它们的形态与机能是统一的。不同种类的形态特征又是在适应环境中逐渐产生的。依其时序,可以划分为4个发展时期。

1. 始发期:时代为晚中新世。如上所述,大熊猫的直接祖先始熊,其前臼齿已经具备了大熊猫“齿型”,即前附尖发育,舌侧有小的前内尖( $P^3_4$ );颞弓前端基部位于 $P^4-M^1$ ,表明咀嚼肌的发育。但是始熊前臼齿的结构还未脱离熊类的基本性质,如宽度小于长度>咀嚼面的结节少,且不发育。始熊前臼齿的这些变化,是有机体适应环境与环境对立统一的结果。中国保护大熊猫研究中心(1987)对大熊猫现生种的生态观察,揭示了这类动物在野生状态下取食主要靠前臼齿的撕裂、切割机能,所以前臼齿得到了发展,而门齿退化。这种适应进化,客观地反映了始熊与大熊猫的自近裔关系,同时也体现了始熊是介于祖熊与大熊猫之间的中间环节,始发期的代表。

2. 成长期:时代为早更新世。主要标志是:(1)体型小(比始熊稍大,比化石大熊猫约小1/3);(2)前臼齿前附尖发达, $P^3_4$ 前内尖粗壮, $P^4$ 有臼齿化趋势;(3)臼齿咀嚼面总是宽大于长;(4)牙齿轴柱直径减小,密度增大;(5)耳窝及下颌联合部得到了发展;(6)颞弓前端基部位移前( $P^4-M^1$ )。1~6点的特片与大熊猫小种(*Ailuropoda microta*)者相符。

大熊猫小种是1956年在广西柳城巨猿洞最初发现。迄今,已增加到了7个化石地点,比始熊的生活区增大了许多,北至秦岭南麓,东抵长江三峡,南过广西柳江。各地点发现的哺乳动物化石,都具有明显的东洋界动物区系的特征,显示出气候湿

热,森林茂盛。此时的大熊猫小种,它的颊齿结构已具备了食竹的功能。在其进化水平上,上升到了 *Ailuropoda* 的成长阶段。

3. 鼎盛期:时代为中更新世。其后,北温带的自然环境及气候变化极其显著,但是由于云贵高原的迅速升高和秦岭山系的形成,阻碍了西北季风南下的势头。由大熊猫小种进化来的巴氏亚种随着体型的增大和加重(比小种大1/3),食物需求量随之增加,进而从隔离、封闭的分布状态,开始由高原(云、贵、川)渐向东南开阔地扩散,广布于中国华南的珠江流域、华中的长江流域以及华北的少部分地区。此外与广西毗邻的越南、老挝和与云南相毗邻的缅甸等地也有了大熊猫的足迹。

鼎盛时期的大熊猫,颅骨结构粗壮,短宽,颧弓骨板隆起高度超过75mm,是大熊猫小种的2倍。颧弓前端基部进一步前移(P<sup>4</sup>-M<sup>1</sup>),把咬碎、切割竹子的力量集中在2个牙齿(P<sup>4</sup>-M<sup>1</sup>)上,无疑是效能更高的。这样可以使咬肌、关节和下颌骨的作用力集中于一点,既可以节省肌肉的咬合力,又会减少牙齿及骨因力量分散而造成损伤的可能。

舌状的下颌关节后突及半圆形的关节面,大大增强了关节头与窝之间的固定作用和咀嚼功能。两侧颧弓间的宽度相当颅长的90%(黑熊55%),加之额部侧壁向内紧缩,耳窝甚为宽阔,充分显示出为容纳高度发达的咀嚼肌而增加空间体积的特点。

发达的矢状脊、项脊和冠状突,为强劲的咀嚼肌、枕肌扩大附着面;项脊增高,乳突发达,扩大了枕骨项面肌肉的附着面,从而增强了头部与躯干间的稳固性;由横向隔板组成的发达的额突,起到了咀嚼力过猛时,损伤脑颅的作用。宽大的臼齿和发达的内齿带,为适庆碾磨了或坚硬的植物根茎具备了条件。

可以推测,巴氏亚种的这些功能形态和以吃竹子为主的生理条件是同步发展的。这种发展的种,它们以不可估量的生命力,向四方扩散,一旦得到一个适当的生存空间,有无限新的食源,供它们食用,它们就得到大发展,达到 *Ailuropoda* 属的鼎盛时期。

4. 衰败期:时代为晚更新世。大熊猫的衰败,气候因素起着一定的作用。晚更新世晚期,即大致相当于25000a(B.P.)以后,进入晚大理冰期,年平均气温可以比现代低5度,致使海平面大幅度下降,降至比现在低130~140m(龙联元,1985)。这个时期大熊猫数量,从各地(指长江以南地区)发现的化石材料看,相对的减少一些。进入全新世早期,大约8000~7000a(B.P.)以后,在广西来宾巴拉洞(6500B.P.)、浙江金华双龙洞(7815±385,B.P.)、河南浙川下王岗(7000,B.P.)等新石器时代遗址里还有大熊猫亚化石出土,但数量十分有限。

据史料考证,康熙年间,中国人口达1亿,原始农业出现了一次较大的发展时期(与高跃亭口头交换意见,1991),大片树木和竹林被开垦,许多珍稀动物,如长臂猿、大熊猫等原先广泛的栖息地不断遭到侵占,生存空间越来越小,随着自然环境的改变,动植物区系的演化,生存在粗犷地(云、贵、川)的大熊,迫使它们一步步退缩到了青藏高原的东缘和秦岭山区的腹地。而生活在开阔地的大熊猫现已绝迹。衰败期的大熊猫已是现生种 *Ailuropoda melanoleuca* 了。体型比巴氏亚种约小1/7~1/8。矢状脊与耳脊衔接部位后移,耳肌附着面相对缩小。牙齿咀嚼面的皱褶相对减少。湖北咸宁、贵州普定以及陕西汉南陵从葬坑出的大熊猫颅骨就具有这些特征。

大熊猫的衰败,除了上述因素外,还有它自身的原因,如繁殖率及幼仔成活率低,自卫能力差等等,也会造成大熊猫数量的减少,甚至消亡。

在大熊猫的研究领域里,20年纪内的研究热点为:(1)大熊猫起源于亚洲还是欧洲;(2)大熊猫起源于祖熊,其地质时代如何;(3)大熊猫食竹的习性起于何时(指地质时期);(4)大熊猫牙齿构造与功能和食性的关系;(5)大熊猫面临绝迹的主要因素及生态环境;这些研究热点的领域比较广泛,它包括古生物学、古环境学和环境保护学等。希望能彼此配合,综合研究,特别要加强牙齿超微结构的研究,利用国内、外的先进技术与实验条件,力争

取得明显的进展或新的突破。

(中国科学院黄万波研究员、顾玉珉副研究员撰)

### 猕猴的生殖生理

1925年美国耶鲁及1927年前苏联苏呼米建立猴试验基地,提供了许多猕猴的资料,使非人灵长类动物迅速地被选择作用有关生殖生物学研究的动物模型,特别是猕猴(*macaca ma latta*)的生殖生理特性,研究得更为详尽,如月经周期28d,经量/体重比率,性激素周期变化的图型,一胎妊娠及哺乳过程等与人类极为接近。在生殖生物学研究方面的重要性,是其他种类动物所无法替代的。前苏联科学家把猴类称为人的实验替身。美国NIH于1980年就其所属7大灵长类动物中心,20年工作总结非人灵长类特别适于下述研究:生殖生物学、人口控制、母婴关系、新生儿疾病、免疫病、肿瘤、智力障碍、营养、传染病、心血管病、环境卫生、中枢神经系统疾病和行为科学等。

1. 雌性猕猴生殖器官。猕猴的寿命为30岁左右,雌猴约4岁生产第1胎,20~22岁失去生育力,在其一生中可分娩15~17胎。猴和人子宫是单室,子宫底通常是扁平的,但猕猴和大猩猩的子宫底是圆的,猕猴宫颈高度弯曲,甚至与子宫底成直角,造成剖宫取内膜及置入宫内节育器的困难。穹窿几乎是子宫的两倍长,阴道下段加宽成为深的漏斗状,使阴道内检查及收集经血造成一定困难。相反,狭小的阴道口,又使阴道药环及其它阴道剂型药物不易脱落,是此类研究的良好动物模型。

2. 性周期变化。月经周期平均28d,经期平均2~6d,出血量0.051~1.321ml/kg体重,与人类月经失血量与体重比率非常接近(Shaw,1972)。周期可分卵泡期(约13d),黄体期(15d)。

严格而言,人和一些非人灵长类不表现发情(或不明显),低等哺乳动物只表现发情,猕猴的性周期介于人和低等哺乳类之间,表现月经周期存在发情现象,主要有性冲动(求偶现象)周期性变化。(1)性皮肤变化:性皮肤是猕猴生殖生理的特性之一,有的学者认为可把性皮肤看作第2性征,可引起雄猴的注意,是雄猴接受雌猴排卵的信号,有利于及时交配受孕生育延绵种族。(2)基础体温:猕猴在排卵周期中,晨体温呈双相,排卵日约升高2℃左右,并直到下次月经来潮仍然保持较高水平。(3)阴道细胞学变化:1945年Davis等采用阴道粘膜活组织检查法,每周检查一次,发现阴道细胞有明显的周期性变化。猴子阴道细胞分四种:无核鳞状上皮细胞,表层上皮细胞,中层上皮细胞及副基底上皮细胞。一般来说,猕猴整个周期内细胞成份变异比人类为得大而明显。(4)血清生殖激素动态变化:卵泡期开始时人猴大约20~50个初级卵泡发育到次级卵泡,但猴于完成发育之前,除2个卵泡留下来,其余全部退化,一个直径到约1mm之前也发生闭锁,另外一个继续进入第3阶段,而人卵巢内只存活一个次级卵泡继续发育,体积较大。

FSH卵泡期开始上升,直到即将排卵前形成高峰,其水平约为先前浓度的两倍,此后水平下降,保持较低的基线水平。LH的水平在卵泡期早期比较平稳,即将到中期之前稍升高,继之,出现一个极大的LH峰,约达基线的10倍,峰值后24h内出现排卵。

E<sub>2</sub>大体来说周期第19d开始上升,排卵前出现高峰,雌激素水平猴与人类类似,但有两点显著不同:绝大多数猴雌激素周期中峰与LH中峰同时发生,而人类E<sub>2</sub>周期中峰通常先于LH峰(Coker 1969);人能观察到黄体期血E<sub>2</sub>峰值,但猴仅偶尔见到(Hokehkiis 1971)。福建计划生育科学技术研究所资料16%雌猴见到E<sub>2</sub>峰值。Neill(1967)比较猕猴和妇女整个月经周期中的血浆孕酮水平,两者图型基本一致,但定量比人高3~4倍。

3. 雄性的生殖生理。雄猴约5~6岁具有生育力。猕猴的精液的凝结,对精子活动提供一种保护机制,在阴道5min内开始液化,约30%液化,人与猴不同之处,在射精后20min内完全液化。血清雄激素未成熟雄猴平均值为135±66ng/ml,成熟雄猴平均值为670±35.9ng/ml(Bennett 1973)。

4. 生殖季节性变化。猕猴的生殖活动非季节性变化,是众所

不大,有些限于实验室用的反应和试剂也可采用,例如维梯希反应可通过改变反应条件而得到符合 SP 配比要求的不同顺反比的产品,常被采用。马尾松毛虫 SP 即使在同一实验室采用同一合成路线,所得产品的性诱活性会因批号不同而有很大差异,大概是有杂质起抑制作用,但尚未找出这种杂质。亚洲玉米螟也有这种情况。SP 生物合成的研究做得还很少。初步探索表明可从乙酸合成十六碳酸,经脱氢形成双键,缩短或加长碳链,再改变功能团而得。实夜蛾属昆虫 SP 大多是醛类,而腺体贮存的是醇,释放时氧化成醛。佟林生(J. H. Tumlinson)将谷实夜蛾的腺体浸在和烟芽夜蛾 SP 相当的醇中,前者的召唤就能对后者产生强引诱。罗洛夫已从雌虫分离得 11 位脱氢酶,还发现欧洲玉米螟 SP 前体  $\Delta 11$ -十四烯酸的反顺比都是 70:30,而在最后一步功能化生成 SP 时,才在不同地区分化出 99:1,65:35 和 3:97 3 种种型。科隆(J. A. Klun, 1984)将雌性美洲棉铃虫成虫的头胸之间结扎,就不能产生 SP,向这种结扎成虫注射同种雌虫的或异种雌虫的脑提取液就能使它产生 SP,表明 SP 的产生由脑神经肽控制。

鳞翅目昆虫性信息素化学的研究已有较大的进展,有些已在综合防治中得到应用,如棉铃虫、亚洲玉米螟、甘蔗条螟等。这些应用实例激励着研究工作的深入。但昆虫的行为是复杂的,还有体形小、夜间行动等情况影响实地观察。特别是在生物合成、感受机制以及遗传学等方面,还有许多工作留待昆虫学家和化学家去努力合作,创建先进的实验手段。

#### 参考文献

- 1 Henrick C A. The synthesis of insect sex pheromones. *Tetrahedron*, 1977, 33: 1845-1889 汉译:昆虫性信息素的合成. 北京:科学出版社, 1979. 132
- 2 Inscoc M N. Insect attractants, attractant pheromones, and related compounds, in *Insect suppression with controlled release pheromone systems*. Kydonieus A F and Beroza M, eds. CRC Press Florida, 1982, 2: 201-265
- 3 Henrick C A, et al. Some aspects of the synthesis of insect sex pheromones, in *Insect pheromone technology: chemistry and applications*. Leonhardt, B A., Beroza, M eds ACS Symp Ser. 190 1982, 27-60 汉译:昆虫激素, 1986, 1: 60-78
- 4 Hecker, E. Butenandt, A *Bombykol revisited—reflections on a pioneering period and on some of its consequences*, in *Techniques in pheromone research*. Hummel, H. E. and Miller, T A eds Springer. New York, 1984. 1-44 汉译:化学生态物质, 1987, (1): 36-57
- 5 李正名, 刘孟英. 化学生态物质, 1987, (1): 1-5
- 6 杜家纬. 昆虫信息素及其应用. 北京:中国林业出版社, 1988. 221 页(2个)
- 7 华湘翰, 王新珍. 化学生态物质, 1989, (1) 专辑: 155 页(2个)
- 8 Bader T C. *Experientia*, 1989, 45(3): 248-262
- 9 Mayer M S, McLaughlin, J R CRC, Press Florida, 1991, 1083

(江苏省激素研究所华湘翰副研究员撰)

### 昆虫种群空间格局 *spatial pattern of insect population*

昆虫种群空间格局,指种群个体在生境空间的分布状况,它是由物种的内禀生物学特征和环境异质性综合作用所决定的。理论上,种群空间格局的研究对于了解种群结构、种群空间动态、数量动态以及行为特征都具有重要意义。它又是种群抽样技术的理论基础,而抽样调查则是进行昆虫种群研究以及害虫管理的研究和实施所必不可少的技术手段。另外,种群空间格局的信息对于种群时空动态模拟、种间作用关系模拟以及昆虫抽样数据代换(使之适宜于统计分析)等也具有重要价值。

昆虫种群空间格局的研究,主要以分析抽样样本单元(一般

是昆虫生境单元,如一株林木)中种群个体数这一随机变量的统计特征为基础。种群空间格局一般分为 3 种基本类型:聚集型——种群个体在生境空间非随机地分布,其概率分布为邻接分布;随机型——种群个体在生境空间呈随机分布,其概率分布为 Poisson 分布;均匀格局——种群个体在生境空间完全均匀分布,概率分布为正二项分布。种群空间格局的研究方法包括频次分布拟合  $X^2$  检验法、扩散型指数法和回归模型分析法。频次分布拟  $X^2$  检验法,就是用抽样样本空间单元中昆虫个体数这一随机变量拟合概率分布类型,如负二项分布、Neyman A 型分布、Poisson-二项分布、Ades 分布、Weibull 分布等;该法是最早研究种群格局的方法,始于 20 世纪 30 年代,盛行于 30~60 年代,这一期间所用频次分布均为离散型概率分布,至 60 年代末被其它二分布方法取代,但至 80 年代一些学者开始探讨将连续型概率分布(Weibull 分布、Ades 分布)用于描述空间格局,并着力探讨空间格局特征参数与种群密度关系。扩散型指数是 20 世纪 50~60 年代初生态学家提出的一些测定种群聚集程度的指标(也称聚集度指标),这些指标都是种群抽样方差( $S^2$ )与种群密度( $m$ )的简单函数。拓散型指数所能提供的空间格局信息有限,而且也不便于分析与种群密度的关系,因而对空间格局研究贡献不大。Taylor(1961)、Iwao(1968)分别提出的 Taylor 幂法则模型和 Iwao(1968)线性回归模型奠定了用回归模型分析法研究空间格局的基础。

Lloyd(1967)提出种群平均拥挤度的概念,用于度量种群间个体的拥挤效应,并推导出与种群密度和方差间的关系。日本岩俊(1968)认为种群平均拥挤度与种群密度存在线性回归关系。该方法一提出,就被广泛采用。徐汝梅等(1984)认为在昆虫自然种群平均拥挤度与种群密度间关系一般为非线性关系,他们将岩俊模型作出改进。于秀林等(1986)又作出进一步改进。

岩俊方法实际上是基于 Lloyd(1967)的聚集指数推导出来的。而 Taylor(1979, 1984)指出负二项分布参数作为聚集指标存在严重缺陷,但该方法目前仍是研究空间格局最常用的方法之一。

1961 年 Taylor 通过对大量生物种群抽样调查资料分析,得出种群抽样方差与密度间存在幂函数关系,并将幂法则模型应用于种群时空稳定性的分析。

马占山(1991)认为,种群空间格局是种群密度序列上山聚集型、随机型、均匀型构成的连续系统,并提出种群聚集临界密度的概念。基于 Taylor 幂法则模型,推导出用物种的特征参数测定种群空间格局的法则。

Perry 和 Taylor(1984)将 Ades 分布族应用于描述昆虫种群空间格局。Ades 分布族是一组 3 参数的分布族,其中两个参数  $\Gamma$  和  $\gamma$  为整个分布族构造,另一参数  $\lambda$  对每个分布各异。他们的研究资料表明,Ades 分布拟合种群空间格局的频次分布优于负二项分布,而且 Ades 分布的 2 参数  $\Gamma$  和  $\gamma$  与 Taylor 幂法则的参数  $b$  和  $\log^a$  是一致的,特别是不同物种的 Taylor 幂法则回归线相交时(即  $b$  值不同时)对于同样值和方差不能完全包含的信息。总之,Ades 分布与 Taylor 幂法则的兼容性和对应性表明频次分布方法与回归模型法相结合分析可能获得更加全面的信息。马占山将 Weibull 分布应用于种群空间格局的研究也获得类似的结论。

种群空间格局研究一般以昆虫的自然生境单元(如一株植物)为基础,但也可从其它层次展开(如可以是生境单元,如植株枝条或叶片)为取样单元分析种群空间格局;另一方面可以从更宏观角度研究种群在空间的分布。Taylor 等认为种群存在于经度、纬度、时间构成的三维体中,以种群所有个体分布在三维空间中,则种群结构为一网状结构,形似蕨类植物的中柱结构。对此种群模型作时间截面,即得到某一特定时间种群在空间的分布。而在某一经纬地对种群作一截面,则代表种群的局部密度或一个个体群的变化。个体群间没有固定界限,它们之间通过个体迁移而不断交换个体。显然,传统生命表技术实际上是后一种截面,而正是种群附在空间运动调节着种群的动态,昆虫种群动态就是



高。布里格斯(G. G. Briggs)1986年合成的法尼烯醚衍生物,活性比天然物高。BX的种属专一性不高,一般在同科中可混用,如蚜虫的法尼烯。有些蚁类有属专一性,如蚁科大多虫种用低级酮,但猛蚁用甲基水杨酸甲酯和邻氨基苯乙酮等,表现出属专一性,还有从BX的化学结构纠正蚁种归属的例子。社会性昆虫中不同社会等级的成员的分泌物有差异。亲缘较远的一种猛蚁和一种农蚁用同一种甲基庚酮为BX,可能是属于拟态组合。BX的结构与活性关系在各种信息素中最不明显的。臭蚁的BX为2-庚酮,将羰基换到3位或4位,或链长增加一、二个碳,都有相当高的活性,其之换成骨架链相似的乙酸正丁酯,活性也不相上下。但在美国德州切叶蚁和佛罗农蚁中也曾发现BX有手性专一性的例子。

有关追迹信息素(简称ZX)的报道较少,主要是在蚁科、白蚁和毛虫用于指引食源、返巢和迁移等行动。ZX的产生部位有杜氏腺,毒腺及其它多种腺体。化学结构有长链,大环,杂环等,大多采用多组分体系,种专一性差,许多同属异种可用同样的结构。结构-活性关系较严格,例如,阿根廷蚁用顺9-十六烯酯ZX,对反式异构体无反应。ZX的持效时间有很大差别,长的可达数天,短的只有几分钟。ZX还可以通过分泌量的多少,表明食源质量和距离远近。菲茨杰拉德(T. D. Fitzgerald, 1976, 1979)和贝克(T. C. Baker, 1981, 1982)曾分别设计了几种测定追迹行为的设备。

苹绕实蝇在产卵时留下一分子量为1万的蛋白质,其它雌蝇的腿能感知这种蛋白质而不再重复产卵,称为产卵标记信息素。这种信息素在地中海实蝇、大菜粉蝶和小菜粉蝶中也有。大菜粉蝶的幼虫散发一种气味,随虫口密度增加而在空气中达到一定浓度时,雌蝶就不再来产卵,称为产卵阻止信息素。

昆虫信息素除鳞翅目XX已有不少应用实例外,IX防治几种小蠹也已取得一定成绩。另外,产卵标记信息素和BX也很有希望,有待于开发应用。

#### 参考文献

- 1 Karlson P, Luscher M. Nature, 1959, 183(4653): 55~56
- 2 Mitchell E R. Management of insect pests with semiochemicals: concepts and practice. Plenum 1981 汉译: 信号化合物防治害虫, 北京: 中国林业出版社, 1986. 283
- 3 Hummel H E, Miller T A. Technique in pheromone research. Springer 1984. 464pp 汉译: 昆虫行为的生物测定方法. 化学生态物质, 1988, (1): 49~64
- 4 Kerkut G A, Gilbert L L. Comprehensive insect physiology, biochemistry and pharmacology. 9 Behaviour Pergamon. 1985. 735pp 汉译: 聚集信息素. 化学生态物质, 1990, (1) 57~77; 报警信息素. 化学生态物质, 1992, (1) 19~28(2): 49~64. 79
- 5 Дебедева КВ: Ж Всес. хим. Общ 1984; 29(1) 54~63; 1988; 33(6): 678~686. 汉译: 昆虫信息素及其在植物保护中的应用. 昆虫激素 1985, (1): 49~55; 化学生态物质 1991, (1): 30~38
- 6 Prestwich G D, Blomquist G D. Pheromone biochemistry. Academic. 1987, 565
- 7 高桥正三. 化学同人, 京都, 1987. 180
- 8 杜家纬. 昆虫信息素及其应用. 北京: 中国林业出版社, 1988. 221
- 9 Justum A R. Gordon RFS. Wiley, 1989. 369
- 10 张宗炳, 曹骥主编. 害虫防治: 策略与方法. 北京: 科学出版社, 1990. 579~593

(江苏省激素研究所华湘翰副研究员撰)

**鳞翅目性信息素化学** chemistry of lepidopteral sex pheromone 昆虫信息素是信息素中研究得最早最深的一类, 其中又以鳞翅目昆虫性信息素(简称SP)为最。信息素的化学研究

范围包括组成结构鉴定、化学合成方法、生物(体内)合成途径和释放后的去向, 这些工作又涉及接受器官的电生理学、产生和释放的部位以及生物活性的测定方法。1959年, 德国布腾南特(A. Butenandt)首先完成了家蚕SP的结构鉴定, 揭开了SP化学研究的序幕, 其高活性(1ml中只要含200个分子的空气流过, 雄蛾就有反应)和高的物种专一性引起人们极大的关注。紧接着, 1960和1966年美国雅各布森(M. Jacobson)发表了舞毒蛾的和棉红铃虫SP的结构, 可是实地应用都诱不到蛾子, 后来证明两种结构都是错误的。说明凭早期的分离技术, 要从大量的生物材料中找出含量极微的活性物质十分困难。1971年, 日本汤岛健和玉木佳男首先报道了双组分SP的例子: 茶小卷蛾和同属的另一种卷蛾用同样两种SP化合物, 靠配比不同实现生殖隔离。此后, 多组分SP的例子不断出现, 原来鉴定为单组分的, 包括家蚕, 也找出另外的组分。还发现许多趣事, 有些同属昆虫用同样的化合物而另加一种抑制组分排斥异种。欧洲玉米螟的双组分SP的配比可以因地区不同而从97:3变到3:97, 黄地老虎也有类似的地区差异, 称为SP多型现象。用欧洲玉米螟的SP组分不管怎样改变配比, 在中国除新疆伊宁地区以外都诱不到玉米螟。经深入研究, 程志清等在1980年鉴定了组分和欧洲玉米螟不同的亚洲玉米螟SP, 开创了用SP区分从形态上无法区分的虫种的先例。

现代微量化学分析方法, 特别是色谱法和质谱法的进步, 使SP的鉴定方法渐趋成熟。已有上千种鳞翅目昆虫的SP成分被确定, 大多是10~18个碳的直链化合物, 含1~2个双键, 末端是醇、醛或乙酸酯功能团。根据这个规律, 可以从亲缘关系提出候选化合物, 经触角电位筛选, 最后经实地生测确定具有性诱活性的化合物组合, 称为性诱剂。只有从活体实测的组分才能称性信息素。活体实测主要有腺体提取和气流收集两种方法, 但也有关键组分检测不到的例子。从活体鉴定的大豆食心虫SP在田间诱不到虫, 加入近缘种的一种微量的关键组分就能诱到, 但这种组分从活体(体形极小)很难检测到, 说明SP结构鉴定方法还需要进一步完善。许多研究者设计了从单个昆虫测定SP组分和释放量的方法, 得以找出个体差异和同一个体的时间差异。

SP大多由雌虫产生, 也有少数由雄虫产生的例子, 但诱力比雌虫弱得多, 有的只是作为对雌虫的应答, 多数属接触SP。雄性SP的结构有吡咯咪唑酮、吡喃酮、γ-内酯、倍半萜和长链脂肪酸等。新斑蝶亚科雌蝶不会从植物摄取防卫用的吡咯咪唑(pyrrolizine)生物碱(PA), 而要靠雄蝶在交配时给与, PA就成为雌性SP。

SP在感受细胞中受酯酶的作用发生酶促分解而消失。在体外, SP的不稳定因素主要是醛的氧化和共轭二烯的异构化。用橡胶胶载体时要注意橡胶加工助剂能引发这两种反应。在实际应用中, 可用SP的模拟物拟信息素, 例如用顺5(11)-十六碳烯代替顺11-十六碳烯醛能干扰二化螟的化学通信, 以避开醛的不稳定因素, 把共轭二烯制成羰基铁的络合物, 既可控制释放, 又可避免异构化。

将离体家蚕雄蛾触角置于正负玻璃微电极之间, 当含有雌性SP的气流吹过触角时, 能产生触角电位。罗洛夫(W. L. Roelofs)根据这个实验资料研制出触角电位仪(EAG), 现在已能记录单个嗅觉细胞产生的电位。雄蛾触角一般有数千个含SP受器的感觉毛, 一个受器只对专一组分产生反应(有些类似物有弱反应), 这一点对确定SP次要组分特别有用, 但要注意起抑制作用的组分也有反应。能产生触角电位的化合物不一定能引起行为反应, 能引起行为反应的化合物则一定能产生触角电位。EAG已成为筛选SP组分的极有用的工具, 还可以和色谱仪出口连接而作为区分活性段分的判据。在风洞中观察行为反应, 可以了解SP各组分不同职能。有些虫种的各个组分是整体协同起作用, 另一些虫种则各个组分在行为的不同阶段各司其职。粉纹夜蛾SP的有些组分可以互相代替, 缺少其中之一, 行为反应不受影响, 称为备用组分。黄地老虎也有这种情况。

鳞翅目昆虫SP的结构简单, 化学合成困难不大, 且因用量

周知的现象,其主要表现如下:(1)分娩:几乎每个月都有分娩,但有一个主要的分娩季节,印度北部野生条件下4~5月或9月,驯养条件下,苏呼米3~5月,昆明观察109例,93.6% 2~6月分娩,其中71.56%在3~6月为高峰期。(2)月经周期:昆明猕猴全年行经,但10月至次年1月较高,占58.1%~81.5%,这是雌猴发情交配和受孕的主要季节,2~3月行经51.9%~60%,但8~9月仅2例分娩,可能与无排卵周期有关。(3)性皮肤肿胀:生殖季节雌性猕猴性皮肤肿胀较明显,颜色较鲜艳,而非生殖季节肿胀较弱,颜色较浅,雄猴亦然。(4)交配活动:雌雄猴交配活动几乎全年都有,而8月至次年1月间每月交配和射精次数较多,其中9~11月为高峰期,与雌猴月经周期的高峰基本吻合。(5)睾丸大小:Sade(1964)对86只猕猴进行189次睾丸测量(左侧睾丸长度加宽径),8~12月是大睾丸季节,1~7月是小睾丸季节。(6)精液变化:10~12月生殖季节精液和体积,总精子数和活力明显高于非生殖季节1~7月,精子的畸形率和死亡率明显降低。

5. 妊娠与分娩。猕猴妊娠早期常出现类似月经周期的阴道出血现象,有人称之为子宫内膜破坏性出血。昆明猕猴妊娠期168±7d。妊娠并发症主要是流产和死亡,占总妊娠17.8%,双胎率2.6%,类似与人1.15%,胎位不正常臀位高达12%(人是4%),猕猴常发生贫血和细菌性肺炎,死亡率较高不孕症15%~30%,亦较人(10%~15%)为高。

人类的分娩不存在昼夜节律性,光线不会抑制妇女的分娩活动,妇女的分娩通常是白天和黑夜各占一半,可是,光线会抑制猴的分娩活动,大多数在夜里进行,且常在上半夜,最短分娩时间42min,最长4h45min。在苏呼米养猴场当上午发现分娩阵缩停止,立即把它安全转移到黑房,帮助它尽快恢复阵缩和结果分娩,有利于母婴安全。在分娩前一些天改变昼夜节律时,可使分娩从黑夜转到白天,有助于探讨分娩活动和机制。

6. 试管婴猴的研究。当前体外受精和胚胎移植术(IVF/EP)的研究,在人类解决不孕症取得可喜的成绩,促进畜牧业人工繁殖获得很大的经济效益,使猕猴试管婴儿诞生却寥寥无几,美国俄勒冈灵长类中心研究处地领先地位,中国华南濒危动物所等单位近年研究有一定的进展,正在努力填补这项空白。

#### 参考文献

- 1 Balin H, et al. Med, 1969, 2: 273
- 2 Breckwoldt M, et al. Fert Steril, 1971, 22: 451~455
- 3 Wallach, Edward. Prostaglandins, 1975, 9(4): 645
- 4 Batta S, et al. Bio Repro, 1978, 8: 264~8
- 5 Knobil E, et al. Releasing Hormone Science, 1980, 207(21): 1371
- 6 Wildt L, et al. Science, 1980, 207(21): 1373
- 7 Wickings E J, et al. J Reprd Fert, 1980, 63: 129
- 8 Lanzendorf S E, et al. Biol Repro, 1990, 42: 703~711
- 9 欧阳子焯,等. 动物学报, 1987, 33(3): 204~209

(福建计划生育研究所魏振年主任医师、莫铭祥撰)

## 昆虫学

### 昆虫信息素 insect pheromones

唐代段成式的《酉阳杂俎·虫篇》记述了“蚂蚁发现食物后能回巢召集同伴去共享,就像会说话一样”。19世纪初,休伯(Huber)报道了蜜蜂工蜂面对刚切下的蜜饼会表现出对抗行为。1879年法国法布尔(J. H. Fabre)用笼内的雌性天蚕蛾把几公里以外放飞的150头标记雌蛾全部引回。1932年贝特(A. Bethe)提出这种引诱剂的作用和体内的激素相似,称之为外激素(ectohormone)。1959年卡尔森(P. Karlson)创立了信息素(pheromone)这个词,定义为:由动物分泌释放的一种物质,使同种接受者产生一种特定的反应,为量之微和激素相当。在国外,ectohormone这个词已完全由

pheromone 取代,国内有些学者仍将pheromone译作外激素,在中国台湾则较多使用与荷尔蒙(激素)相当的音译名费洛蒙。信息素还有个近义词叫信号化合物(semiochemicals)在昆虫学界也广为使用,后者包括种内和种间两方面,而前者限于种内,且强调其作用量和激素相当。

信息素按传递方式可分嗅觉、口感和接触等;按功能有性行为、聚集、报警、追迹和产卵等,这些总称为行为引发(releaser)信息素,与之相当的是生理引导(primer)信息素,如维持蜂群社会秩序的蜂王信息素。蚂蚁死后会被运出巢外,但如将死蚁用溶剂洗涤,再投入巢中,就不会被运出,而是作为食物,将洗液滴在滤纸上投入巢中,会被当作蚁尸而运出,洗液中的主要成分是蚁尸分解生成的油酸,可称为殡仪信息素。信息素的功能有兼具性,如蜂王信息素兼具性诱功能,许多报警信息素能召集同伴共同御敌,兼具聚集功能。

鳞翅目性信息素(以下简称XX)是信息素中研究得最深的一种。鳞翅目以外的XX和鳞翅目相比,活性要低得多,交配行为中较多地利用视听等其它感觉;其化学结构多种多样,种专一性和结构与活性相关性较差。1971年鲍维尔(W. S. Bowers)发现植物成分大根香叶烯对美洲大蠹有性兴奋作用,荷兰的培森(C. J. Persoons)在1979年从美洲大蠹粪便提取物鉴定了大蠹酮B的结构,其骨架和大根香叶烯相同,后来确定的大蠹酮A的骨架也相同。大蠹酮B的活性约为A的30倍,两者单用均有活性,合用时活性可相加,但无增效作用。大蠹酮还能使同属的澳洲大蠹、日本大蠹以及同科不同属的东方蠹起性兴奋作用,只是反应阈值比美洲大蠹高 $10^2$ ~ $10^4$ 倍。日本的深海浩从德国小蠹体表提取物鉴定了XX为3,11-二甲基二十九烷酮-2及其29位上有醇和醛功能团的两种衍生物。改变碳链长度、甲基位置或功能团,可以有多种类似物有较高的活性,其中有的反应阈值不到原XX的10倍。德国小蠹是群集性昆虫,不需要远距离作用XX,而是用接触XX来辨认性别。雌性家蝇表皮也有一种性别辨认XX,将这种提取物施于雌蝇,雄蝇就误认为同性而不予交配。身长只有2.5mm的药材甲的雌性XX是吡喃酮衍生物,亲缘关系不很相近的家俱窃蠹的XX也是这种化合物。原来这两种甲虫不处在同一生境,不会发生乱交,近来药材甲已成为仓库和商店的害虫,今后二者能否和平共处,将是很有趣的课题。

聚集信息素(简称JX)的发现和研究表明大多是在鞘翅目,特别是小蠹科。许多树种受害后能分泌防御物,使害虫厌食或中毒,进攻性小蠹能利用JX集大群于一树,传播大量病菌,置该树于死地而停止分泌防御物,小蠹遂得以安居,繁衍后代。西尔维斯坦(R. M. Silverstein, 1966)首先鉴定了美国加州五刺齿小蠹JX的3种成份,至今已有40余种昆虫JX得到鉴定。小蠹JX主要是类萜,多数是利用植物单萜转化而得。单萜本是植物的防御物,对小蠹有毒,小蠹能靠共生微生物把它解毒而成为有用的JX。作为JX原料的单萜可以从呼吸和进食两条途径摄入。JX的释放,经粪便是一种方式,另外的分泌腺的发现还不多,对于需要快速释放的虫种,光靠粪便释放显然是不够的。为了防止食源很快耗尽,还要用抗JX来避免过度聚集,已发现环己烯酮衍生物有抗聚集作用。一种虫的JX对另一种虫可以是聚集抑制剂,这有利于食源分享。松小蠹的JX是R-(+)-小蠹二萜醇,对五刺齿小蠹有抑制作用,而后者所用的S-异构体又对前者起抑制作用。

报警信息素(简称BX)的使用主要在等翅目、膜翅目和同翅目,以蚜虫、角蝉、蜂、蚁最普遍。有战斗力的虫种接受BX后会引发起进攻行为,例如,蜜蜂工蜂向BX源汇集,叮咬时螫针会继续散发BX,有螫针刺入的入侵者更成为群攻目标,受激工蜂的上腭腺也产生BX,召集和激怒工蜂。无战斗力的虫种则采取疏散的办法免遭捕食。有些膜翅目昆虫在巢附近接受BX后会向入侵者进攻,而在离巢远时,因势力单薄只能疏散逃避。鲍维尔(W. S. Bowers)1972年鉴定了6种蚜虫的BX主要成分均为易被空气氧化分解的E-β法尼烯,接着和日本西野亲生(C. Nishino)合作,于1976年合成了法尼烯模拟物,报警活性较低,但稳定性

种群密度面在空间(经度、纬度、时间)三维体中的空间结构动态。目前种群动态的研究主要是对种群空间经纬截面研究,而忽略了种群空间分布研究。而实践上种群空间分布可以从种群大范围时空抽样调查资料绘制。Taylor 等用 Taylor 幂法则模型以及所提出的描述种群空间运动行为的 $\Delta$ 模型,研究种群的空间分布和模拟种群的时空动态。

关于种群空间格局的研究所采用的方法有待进一步发展和完善。值得探索的有:(1)从空间统计学寻找适合的统计方法;(2)非参数统计法由于不受参数统计分布的限制,刀切法,自助法等可能更适于分析昆虫种群的统计特征;(3)应用随机过程理论将扩散、迁移及其他行为机制与空间格局、空间分布研究相结合;(4)计算机绘图技术、地理信息系统(GIS)以及模拟技术,特别是 Monte Carlo 随机模拟方法等在种群空间格局和分布研究中将会成为有效的技术手段。

参考文献

- 1 Patil G P. (ed). Spatial Pattern and Statistrial Distributio-ns; Statistreal Ecology, Volume I. Peem Sta Un. Prers. 1971
- 2 Iwao S. The m \* --m Statistry as a Comprehergruc Method for Analyziny Spatial Patrems of Brologral Popalations and its oppheaftron to Samplray Problem JTBP, Synthema. 1977.17:21~46
- 3 Taylor L R. Assessing and Interpetiny the Spatrol Distr-ibution of Isert Populations. Amu Rev Gnfomat. 1984.29:321~57
- 4 Taylor L R. Synoptic Bynamics. Migrotion and the Rothems ted Insect Soræy. J Animal Ecol. 1986.55:1~18
- 5 徐汝梅. 昆虫科群生态学. 北京:北京师范大学出版社. 1987. 7~37
- 6 马占山. 用 Weibull 分布模型研究昆虫种群空间格局. 生物数学学报. 1991.6(3):34~45
- 7 马占山. 1991 Taylor 幂法则的进一步解释与种群临界密度. 《青年生态学者论丛》第 1 卷, 北京:中国科学技术出版社, 1991. 284~288
- 8 马占山. 刀切法估计动物种群扩散型指数. 生物数学学报. 1989.4(2):125~31
- 9 马占山. 油松毛虫在油松不同轮枝层分布的空间格局及其变化规律研究. 林业科学. 1990.26(6):514~526
- 10 马占山. Taylor 种群动态空间行为调节学派发展现状. 《青年生态学者论丛》第 1 卷, 北京:中国科学技术出版社, 1991. 294

(北京林业大学马占山硕士撰;张执中教授审)

**昆虫免疫** 它是昆虫防御病原和寄生物保护自身的防卫能力。昆虫免疫反应没有免疫球蛋白的参与,没有完整的补体系统,免疫反应的专一性不强,其特点是反应期较短,可快速杀灭活菌,并能诱生广谱性抗菌蛋白质,及时提供辅助性防卫物质。昆虫完整的表皮和肠道某些结构(围食膜)和生化性质可限制病原或寄生物侵入,或对侵入异物限制其活动,或阻止其进一步发育,起屏障性防卫作用。昆虫血腔中含有的血细胞成份和体液因素是昆虫免疫系统的主要成份。

昆虫免疫研究始于 19 世纪。美国科瓦列夫斯基(Kowalevsky, 1883, 1887)和法国柯纳特(Cuenot, 1896)分析了血淋巴清除细菌过程中血细胞的作用。1920 年,法国梅泰利尼科(Metalnikow)和里昂的巴约(Paillot)确证了在鳞翅目幼虫中注入稀释的细菌培养液,可获得抗菌活性。此后 10 多年发展为两个不同的学派,梅泰利尼科(1933)强调抗菌力主要由细胞反应维持,而巴约侧重细胞产生的可溶性体液因子参与免疫反应;然后的研究几乎中断。50 年代后期对昆虫免疫中细胞因素和体液因素的性能进行了新的研究尝试;关于细胞免疫反应,自从电镜问

世后,以一系列细胞生理的研究澄清了在吞噬作用和包被作用中各类循环细胞的作用,启示昆虫具有与脊椎动物淋巴组织结构和功能上明显同源性的网状造血组织。60 年代和 70 年代早期,对昆虫免疫体液因素的研究确认非为哺乳动物的抗原——抗体反应。80 年代开始出现突破性进展,从鳞翅目昆虫血淋巴中已分离到一些可诱导的抗菌因子,它们的结构、性征显示为具潜势的抗菌肽类,目前在鳞翅目、双翅目和脉翅目的代表种类中已定出它们的性征,并已基因克隆;其他免疫成份和酚氧化酶系统,在虫体内激活可促进免疫细胞的免疫行为,对了解昆虫免疫识别和黑色素化过程的分子机制已有深入,对几种昆虫血淋巴凝集素和粘附因子等已取得若干有价值的资料,对昆虫探究“非己识别”的分子机制奠定了基础,并显示出可能的应用前景。

**细胞免疫** 昆虫血腔中的血细胞种类,各种昆虫不尽相同,主要包括原始血细胞、颗粒细胞、浆细胞、小球细胞和类绿色细胞等,其中直接行使防卫反应的血细胞为颗粒细胞和浆细胞,这两类血细胞称为昆虫的免疫细胞。颗粒细胞内含多数颗粒,组织化学证明内含有粘唾液素和其它糖蛋白或中性粘多糖,这些颗粒是凝集素的贮存场所。浆细胞溶菌体内富含酸性磷酸酶,硫酸素焦磷酸。古普塔(Gupta, 1986)认为,颗粒细胞行使与高等动物 B-和 T-淋巴细胞以及巨噬细胞和多型核白血球的等同功能,而浆细胞与脊椎动物的杀伤 T-淋巴细胞和巨噬细胞作用相似。昆虫免疫细胞膜的超微结构和分子结构目前全然不知,一般认为含有糖脂和糖蛋白成分,在糖脂和糖蛋白分子上通常发现的单糖是半乳糖、甘露糖、岩藻糖、半乳糖胺、葡萄糖和唾液酸。

颗粒细胞和浆细胞和免疫功能包括吞噬作用、结节形成和包被作用。当侵入异物小数量少时,单个颗粒细胞和浆细胞可将其吞噬,1901 年梅奇尼可夫(Metchinikoff)首次报导一种金龟子的血细胞趋向炭疽杆菌和白喉杆菌释出物移动。吞噬过程一般包括几个连续性步骤:(1)趋化作用。吞噬细胞对侵入异物的定向移动反应。引起趋化因素来自虫体体液的类补体物或细胞的某些释出成分。一些微生物如细菌和病毒可产生趋化物质,对昆虫起外源趋化因素的作用。(2)调理作用和识别作用。昆虫吞噬细胞具有识别“己与非己”的能力,遇到病原微生物等颗粒物后,通过识别其表面的某些性征-免疫识别受体,并借助某些体液因素(调理素)的协同作用可促进对异物的吞噬。(3)吞入作用。吞噬细胞与异物颗粒接触后,可形成局部的胞饮囊将之吞入(如细菌病毒等)形成吞噬小体,或伸出伪足将颗粒物包入。(4)杀灭、消化。吞入异物后由于细胞代谢加强糖酵解作用,吞噬小体内酸度增加,可起抑菌和杀菌作用,同时吞噬细胞的溶菌酶可水解细菌的胞壁进一步杀灭。

侵入小型异物数量多时,两类细胞即将之凝聚,形成结节,附于虫体的一定部位,然后杀灭。侵入异物较大时(线虫)则由颗粒细胞释出类似酸性粘多糖的粘调性物质,覆于异物表面,作为信息动员浆细胞趋向异物,与颗粒细胞协同将异物包被形成厚的黑色鞘,此不透性屏障可阻止寄主和寄生物代谢物质的交换,引起异物死亡。

**体液因素** 昆虫体液免疫因素目前研究最多的是凝集素、酚氧化酶和抗菌蛋白质等。

1. 凝集素:它是体液免疫因素的主要成分,能凝集脊椎动物的红血球和一定的微生物,它来源于血细胞,其他非血细胞来源有脂肪体和围食膜等。凝集素是一类对糖基有特异性结合力的蛋白质(糖蛋白)。在比较免疫学中,昆虫凝集素类似于脊椎动物的免疫球蛋白,起抗体作用,借荧光标记或同位素标记法等可证明免疫细胞表面受体位点的存在。1952 年伯恩海莫(Bernheimer)最早报导了鳞翅目昆虫血淋巴中的凝集素,在 46 种幼虫中发现 10 个种有凝集素。迄今已在双翅目、鳞翅目、膜目、直翅目、鞘翅目、竹节虫目和蜻蜓目的昆虫有了凝集素报导,研究较多的种类如麻蝇,体壁致伤后诱生的凝集素已鉴定其由 6 个亚单元组成,该凝集素对半乳糖有专一性(Komano, 1980, 1981)。凝集素的生物学功能可凝集侵入的微生物,实验证明,美洲大蠊经注入四膜

虫后,凝集素可使之凝集不动(Seaman, Robert, 1968);锥虫病原媒介昆虫—猎蝽含有两种凝集素可凝集锥虫。已知一些甲壳类动物的凝集素在免疫中有调理作用(Rowley, Ratcliffe, 1980),关于昆虫凝集素的调理作用报导较少,已知美洲大蠊凝集素无调理作用(Ratcliffe, Rowley, 1983),而亚洲玉米螟凝集素有一定的调理作用(程振衡、孙勇, 1992),表明不同昆虫防卫机能不同,各种体液因素发挥的作用不同。

2. 酚氧化酶:昆虫免疫反应中黑色素的沉着与愈伤、结节形成和包被作用有关,这些反应源于血淋巴中酚氧化酶及其底物的存在。除极少数报导外,目前已知酚氧化酶均以酶原形式—原酚氧化酶存在。原酚氧化酶存在于血细胞中,还存在于血浆和血清中,在常态昆虫中血浆中还存在原酚氧化酶的抑制物。原酚氧化酶在免疫反应中的激活包含一个序列性活化阶梯(Soderhall, 1986),活体外实验可为蛋白酶、 $\beta$ -1,3-聚糖和脂多糖活化,细菌胞壁和酵母胞壁水解物在活体内可加强原酚氧化酶的活性。原酚氧化酶的激活酶为一类丝氨酸蛋白酶,需要有 $Ca^{+2}$ 的存在方能发挥作用。原酚氧化酶的活化产生一些粘稠性的粘附蛋白质,可作为一种调理因子的来源,在“非己”识别中起重要作用,提供分子信息促进血细胞的吞噬作用和包被作用。也有人认为,原酚氧化酶系统的活化产物粘附蛋白质多少类似于高等动物补体系统的C3b和C5b,有抗微生物和水解异物的性质,其作用犹如高等动物免疫反应中补体系统的旁路途径。研究较多的家蚕原酚氧化酶分子量已知为80 000,由两个亚单元组成(Ashida, Dohke, 1980);家蝇纯化的酚氧化酶,含有很高的分子量为340 000(Yamanura, 1980)。

3. 抗菌蛋白质,它是一类有助于吞噬作用的体液因子,不直接加害微生物。昆虫血淋巴中的某些天然成份可能有抗菌作用,但这方面报导很少,经诱生免疫可产生抗菌活性物质。波曼(Boman)等以大天蚕滞育蛹作实验,经注射非致病性的或热灭活致病菌,产生3类抗菌蛋白质:天蚕素、攻击素和溶菌酶。天蚕素和攻击素在活体外对数种革兰氏阴性菌有活性,其靶标为细胞膜。已知天蚕素的分子量为4 000,含有一个碱基肽链,其中主要的是天蚕素A和B。攻击素为6种相近的蛋白质,分子量为2 000~2 300,对大肠杆菌有活性,与天蚕素结合有增效作用,二者可能有不同的靶标。在大天蚕和数种其它昆虫中有溶菌酶(Boman Hultmark, 1987),早期已知溶菌酶是血淋巴和肠道中主要的抗菌因素(Mohrig, Messner, 1968)。蜡螟和家蚕的溶菌酶是最早分离纯化的抗菌蛋白质,(Powning, Davidson, 1973, 1976),溶菌酶主要破坏革兰氏阳性菌,对胞壁骨架起破坏作用。以麻蝇实验致诱诱导的一类抗菌蛋白质麻蝇毒素I是几乎相同的3种蛋白质的混合物,这些蛋白质由39个氨基酸残基组成,其不同处仅仅是2-3个残基,对大肠杆菌有活性。

昆虫的免疫系统具有复杂的多组分特性。免疫中主要的监视功能由循环着的免疫细胞进行,这些细胞的反应对所有类型的人侵异物均可快速减低其为害数量,其中主要功能由颗粒细胞和浆细胞行使。目前对它们识别异物的分子基础仍不清楚,仅初步证明血细胞表面膜存在凝集素的受体位点。原酚氧化酶系统在识别中的作用尚属推论性质,因为该系统的复杂性,在活化阶梯中产生的设想性识别分子还未分离到。血细胞的防卫反应在结节形成和包被作用中包含有血细胞—入侵物和血细胞—血细胞之间协同的防卫反应,其间的信息联系尚不知。体液因素中溶菌酶、天蚕素和攻击素等抗菌蛋白质来自血细胞和脂肪体,在常态昆虫血淋巴中存在这种蛋白质,在防卫反应中血细胞可释出信息物启动脂肪体合成补充性抗菌蛋白质加强防卫能力。活体外实验还证明,细菌表面膜的成分可作为脂肪体合成抗菌蛋白质的激发剂;关于免疫反应中基因表达的控制和它们的作用方式,目前一些实验室正在研究之中。

昆虫免疫研究当前的侧重点是理论上从分子水平阐明“己与非己”的识别机理,世界上各有关实验室分别从凝集素和酚氧化酶两类体液因素方面在继续深入研究。另从应用前景着眼,也

已得到若干启示,已报导的主要是昆虫抗菌肽被认为在水解途中起抗菌作用,如天蚕素其靶标为细胞膜,此专一性和稳定性可确定在细菌感染中有抗菌的实用性。一些有益的微生物能被选择用于克隆抗菌肽。凯斯蒂(Casteels, 1990)、江森(Josson)等以本身对肽有抗力的乳酸杆菌建立了可用的表达系统。卡亚(Kaaya, 1989)报导,溶菌酶在人、家畜和家禽中用以抗御细菌感染存在潜在势能。此外,抗菌肽的克隆对植物数种疾病有较高的抵抗力,还有在成熟种子的贮存蛋白质中产生抗菌活性肽表现也有可能。关于凝集素在机体内的生理功能受到人们的重视,有些凝集素可促进淋巴细胞行有丝分裂,还能凝集肿瘤细胞和形变细胞,可作为研究细胞表面结构和功能的探针,目前已成为生物学和医学某些研究领域不可缺少的探测工具。1982年,中岛(Nakajima)等对麻蝇凝集素的研究表明,小白鼠巨噬细胞借之可使癌细胞溶解,展示昆虫凝集素存在可喜的应用生物工程近代技术人工大量生产用于实践的新型抗生素和新型的无公害杀虫剂已有可能,预期不久的将来会有商业产品逐步面市。

#### 参考文献

- 1 Boman H G, Hultmark D. *Ann Rev Microbiol.* 1987, 47: 103~26
- 2 Dunn P E, et al. *Ann Rev Entomol.* 1986, 31: 321~39
- 3 Gotz p, Boman H G. *Insect immunity.* in "Comprehensive insect physiology, biochemistry and pharmacology." (ed. Kerkut, G A, L I Gilbert)" vols. 3: 453-85. pergamon press. New York
- 4 Hoffmann D, Hoffmann J A. *Res Immunol.* 1990, 147: 895~960
- 5 Kirschbaun J B. *Ann Rev Entomol.* 1985, 30: 51~70
- 6 Ratcliffe N A. *Immunology, Letters.* 1985, 10: 253~70

(南开大学程振衡撰)

### 中国常见蚤类生态学

ecology of common fleas in china 蚤类生态学研究,始于19世纪末。1897年绪方(Ogata)、1898年西蒙兹(Simond, 1898)分别发现鼠蚤传播鼠疫。后经拉姆(Lamb, 1909)、贝卡特和马丁(Bacot & martin, 1914)及伍连德(1936)等研究证实,确立了印鼠客蚤的传播机制,从而引起普遍的重视和广泛的研究。近几十年来,随着除害灭病工作的开展,流行病学和医学昆虫学方面的重大发现,促进了蚤目分类、生态和防治方面的研究。

蚤类人工养殖 蚤种采自啮齿动物窝巢和鼠体。将采来的一定数量的雌雄性成蚤,在显微镜下鉴定分类,放入高34cm、直径28cm的玻璃缸中饲养,缸底部衬垫4~6cm厚的潮湿细砂和锯末(用8孔/cm筛网过筛1:1混合加水拌匀),其表面均匀撒上幼虫饲料(猪干血粉和酵母粉各半),中间插一根直径2cm,长20cm的两端开口玻璃管,以备加水调节湿度之用,缸口用丝筛绢覆盖,橡皮圈固定。将小白鼠装入长20cm、直径3cm、孔径1cm的铁丝笼中。再将鼠笼放入缸内,鼠死后检查更换。培养缸置于恒温箱内,定期取出表面培养物,用8孔/cm筛网将蚤筛出,放入另一个缸内培养,每天集蚤1次,即可取到新羽化蚤。

蚤类的变态发育 蚤类是完全变态的昆虫,其全部生活史可以分卵、幼虫、蛹(茧)成虫4个阶段。

卵:多为椭圆形,绝大部分蚤种卵为白色,有的浅黄色,个别种呈浅黑色。卵壳表面光滑,其大小同蚤种成虫的大小有关,通常长径为0.4~2mm左右。刚产的卵有粘性,因蚤种的不同有的散在(如斧形盖蚤的卵),有的2~4枚成堆(如似升额蚤介中亚种的卵),大部分卵产于寄主动物的巢内。卵期一般几天,视温湿度条件而不同,在同等温湿度条件下也有差异,如斧形盖蚤在19~21℃,相对湿度77%~88%的条件下,最短3d,最长9d,多数卵在4~5d孵化,其孵化率约为57.6%。

幼虫:蛆形,无眼无足,口器为咀嚼式,一般分3龄,脱皮3次;刚羽化而未进食的幼虫为白色,进食后胃肠变为暗黑。以后

在结茧前2~3d不进食,食物被消化完后,身体又变白,这时活动力减弱。成熟3龄幼虫体长约4~6mm,共分14节。1龄幼虫头部背面具1骨化较深的刃形刺(破卵器),上颚具齿。幼虫形态、破卵器形状、大颚齿数、体节毛序、尾梳排列等因种属不同而有显著差异,可作为幼虫分类的主要特征。幼虫在自然条件下以成虫的粪便,寄主脱落的皮屑以及宿主的粪便为食。人工饲养幼虫,采用旱獭、羊、猪、兔、小白鼠的干血粉和酵母粉加于细砂和木屑培养基的表面,可获得良好的效果。最近发现幼虫有食蚤卵、死幼虫和受伤成蚤的现象。幼虫期发育个体不同,羽化天数也有差异,人工养殖时,在同等条件下,有些按期结茧化蛹,有的则长达1月之久,如斧形盖蚤在温度20~23℃,相对湿度88%~100%,食料以旱獭的或兔的血粉和酵母粉条件下,最短11d,最长31d,多数在16~25d结茧化蛹。化蛹率约为58.1%。

**蛹:**幼虫在化蛹之前表面结茧。茧为白色,椭圆形,初结的茧有粘性,表面粘附着尘土、碎屑等物,具有保护作用。初结茧而尚未变为成虫雏形之时,在茧内呈折状。虽然已停止活动,但仍为幼虫状态,此期之前蛹期,一般经2~4d蜕皮化蛹。蛹为梭形,长约2.7mm,宽约1.7mm,初为白色,逐渐变浅黄色和棕色。体分头、胸、腹3部,已呈成虫的雏形。待成熟苏醒后破茧而出。蛹期羽化天数的长短取决于周围温湿度条件,如谢氏山蚤在温度21~22℃、湿度88%~100%的条件下,最短6d,最长19d,多数可在8~13d羽化。如果温度低则延长其羽化天数。多数蚤类羽化雌先于雄,一般雌性比雄性早羽化3~4d,其性比雌多于雄,雌雄性比如斧形盖蚤为1.4:1(137:98),谢氏山蚤为1.137:1(182:160),方形黄鼠蚤蒙古亚种为1.05:1。

**成虫:**成虫出茧后即可找宿主吸血,以维持生命和繁殖后代。常见的蚤类如类新蚤,刚羽化的幼蚤第1天即可吸血,第2天可以交尾;方形黄鼠蚤蒙古亚种雌性幼蚤在羽化的第4天即可产卵,最初产卵数较少,平均每昼夜约产卵1.55枚,其孵化率也低,约33%左右,以后随蚤的成熟,产卵数逐渐增加,孵化率也提高,成年蚤平均每昼夜可产卵3~4枚,孵化率约80%左右。又如印鼠客蚤和人蚤,在泡血条件下,可连续产卵,1只雌蚤每日产卵2~10枚,猫栉首蚤达1000枚。一些营固定的和半固定的宿主的蚤类产卵更多。

**世代发育:**一般在比较适宜的温湿度条件下,各种蚤类在发育有效温度范围内,温度愈高其生活史周期愈短,反之则愈长。印鼠客蚤从卵发育到成虫,适宜的温度范围在20℃~30℃之间,最适温度为24℃左右;温度高到35℃,蛹不能羽化,低于16℃可使幼虫大量死亡;适宜的湿度在70%~90%之间,最适湿度为80%~85%,高至100%或低于60%幼虫不能存活。在适宜的温湿度范围内完成世代发育平均雌性32d,雄性36d。在湿度88%~100%、营养充足的条件下完成世代发育,斧形盖蚤在温度20℃~23℃时,最短23d,最长57d,多数为31~49d,羽化率约为69.5%;谢氏山蚤在温度为19℃~22℃时,最短24d,最长67d,多数为29~46d,羽化率约为57.7%;方形黄鼠蚤蒙古亚种在19℃~21℃时,最短26d,最长47d,多数为31~40d,羽化率约为91.2%。

**蚤类与宿主的关系** 蚤类宿主非常广泛,寄生于啮齿目动物的蚤类最多,这具有重要的流行病学意义。蚤类对宿主的选择性基本上可以分为3种类型:(1)多宿主型,例如人蚤,中国记录的寄生动物的达36种(哺乳动物35种,鸟类1种)。又如类新蚤,在东北和内蒙古东部草原上几乎都能从各种啮齿动物体上和窝巢内采到。(2)寡宿主型,最为多见,如方形黄鼠蚤,主要寄生于黄鼠属动物。印鼠客蚤主要寄生于家鼠属,啮齿动物。但它们也可见于同一栖息地带的其他种属的啮齿类。但这是偶然的,不能保证它们长期生存。(3)单宿主型,严格地说,只寄生于一种特异性宿主的,比较少见,如甘肃和青海两省的谢氏山蚤、斧形盖蚤、腹囊纤蚤深广亚种的主要宿主是喜马拉雅旱獭。蚤类对宿主的选择虽然如此,但也没有绝对严格的界线,很多蚤类当它们失去本宿主时,在饥饿情况下也吸其他动物的血充饥。人们习惯于把其

宿主分为主要宿主、次要宿主和偶然宿主。主要宿主是蚤类种族延续繁殖的可靠保证,次要宿主可供蚤类生活一段时间,甚至繁殖几代,但不能保持长久。如猫栉首蚤,主要宿主是猫,而在实验室内更换小白鼠为宿主,开始活跃,并能繁殖几代,嗣后逐渐衰弱直至死亡。偶然宿主只能供蚤类一时性吸血,并不能繁殖,如禽角叶蚤在饥饿时也吸小白鼠血,生活1周后便死去。近年来,实验资料证明,寄生于主要宿主喜马拉雅旱獭的谢氏山蚤改用阿拉善黄鼠给血,斧形盖蚤改用小白鼠给血,寄生于主要宿主阿拉善黄鼠的方形黄鼠蚤蒙古亚种改用小白鼠给血,获得成功,都能吸血并能繁殖。

**种群数量的季节消长** 在鼠疫自然疫源地疫源动物的染蚤率、蚤指数的季节消长与鼠疫的流行密切相关。进行蚤类种群数量动态的研究,对流行病学分析和对鼠疫动物病预测预报等都具有重要意义。在家鼠鼠疫流行中,印鼠客蚤的指数很重要。Hurst在研究科伦坡鼠疫时指出,只有印鼠客蚤指数相当于1或高于1时,鼠疫在家鼠中才能流行。有人在对前苏联外高加索山前平原鼠疫疫源地流行病学评价中提到,同形客蚤指数相当于1或多年超过1的水平,通常是确定该区动物流行病的重要标志。

蚤类1年内的发生和数量变化具有典型的季节特点,在不同季节有不同的优势种蚤类。如后弯怪蚤及畸形蚤等均属于冬季蚤。除冬季蚤有较严格的季节性外,春秋蚤和夏季蚤的数量也有明显的变化,如臀突客蚤在大沙鼠体上一年四季均可发现(在准噶尔盆地西部),但一年有两次高峰(4~5月,7~8月)。蚤类季节消长在很大程度上取决于气候条件和宿主的生态学特征,如广东沿海和海南岛属于热带气候,印鼠客蚤在当地可终年繁殖,在雷州半岛遂溪县4~6月为最高峰,在福建6~8月为最高峰。寄生于喜马拉雅旱獭的斧形盖蚤和谢氏山蚤在青藏高原也是一年两个高峰,分别出现在春季的4、5月份和秋季的9月份。

**生存期限** 蚤类的生存期限(即成虫寿命)特别是在感染、蛰伏、菌栓形成和游离后的生存期,在流行病学上具有重要意义。决定蚤类寿命的因素比较复杂,大致可归纳为3类:首先是蚤种的因素,如寄生于大沙鼠的纳氏客蚤比簇鬃客蚤较早死亡。其次是性别的因素,蚤的平均寿命都是雌长于雄。再次是环境因素,其中重要的是食物和温湿度。印鼠客蚤在良好的环境中不食可活43d;而毛新蚤可活350d;方形黄鼠蚤可活267d,在定期饱食条件下毛新蚤可活1725d。有些野鼠蚤感染鼠疫后,可活较久,如俄罗斯期小黄鼠的几种蚤在相当于越冬的低温中感染后可活206~396d,而在150~206d时仍能传染。印鼠客蚤和其带病蚤在适宜的气候条件下可携带具有毒力的鼠疫菌1~1.5月甚至更长,染疫蚤比未染疫蚤寿命较短,形成菌栓的蚤平均只能存活1周左右。

迄今在中国各鼠疫自然疫源地内检出的疫蚤计达36种(含亚种)。蚤类在人畜动物间可传播的疾病除鼠疫而外,还有鼠原性斑疹伤寒、兔粘液瘤、野兔热、绦虫病、旋毛虫病和其它多种病原体传染病,其中鼠疫最为严重。传播鼠疫最有效的方式是通过菌栓蚤的叮咬,其染疫蚤前胃细菌繁殖堵塞,吸血时血液不能进入中肠,吸入食道的血冲刷前胃的菌栓,血液连同被冲刷掉的鼠疫菌反吐至宿主微血管内,从而造成宿主感染;由于菌栓蚤始终处于饥饿状态,需要不断叮咬和吸血,这就造成扩大传播鼠疫菌的可能性,并保证鼠疫菌在媒介和宿主间的不断循环。至于其他如未形成菌栓的传染,宿主动物吞食疫蚤,蚤的带菌口器、带菌粪便、破碎的疫蚤等经皮肤或粘膜伤口感染,虽有可能,但是次要的。

#### 参考文献

- 1 李贵真. 蚤类概论. 北京:人民卫生出版社,1960.85
- 2 纪树立. 中国蚤类鉴定,中国医学科学院流行病学微生物学研究所,1960,13
- 3 柳支英,等. 蚤类. 武汉医学院,1982.8~83
- 4 纪树立,等. 鼠疫. 北京:人民卫生出版社,1988.175~193
- 5 肖柏林,董桂琴. 动物学研究,1985,6(4):1~10

- 6 肖柏林,董桂琴,张全芬.中国地方病学杂志,1986,5(2):125  
 7 肖柏林,王敦清.昆虫学报,1988,31(1):96~98  
 (青海省地方病防治所肖柏林主管医师撰)

### 秆蝇科系统分类 the systematic study of chloropidae

秆蝇科(Chloropidae)为双翅目无瓣蝇类一重大类群。幼虫多为植食性,如麦秆蝇、稻秆蝇、茶秆蝇等为农业主要的害虫;也有一些是捕食性的与寄生性的,在生物防治上有一定利用价值。

1758年,林耐(C. Linnaeus)命名了第1种秆蝇 *Musca frit Linnaeus*, 1761年又描述了第2种秆蝇 *Musca saltatrix hinnaeus*。后来,比杰凯大(C. Bjerkander)、法布尔(J. C. Fabricius)等描述了几种秆蝇,但仍然包括在广义的蝇属 *Musca* 内。直到1803年,秆蝇属才为梅根(J. W. Meigen)所建立。至今全世界已知秆蝇科约160属,2000余种,分属于3个亚科。

1910~1912年,比克(T. Becker)对世界各地理区系的秆蝇属种作了全面综述性研究,为秆蝇科分类奠定了良好的基础。1932~1933年杜达(O. Duda)发表了古北区秆蝇科分类的专著,系统地研究了古北区秆蝇的属种。前苏联纳里特舒克(E. P. Nartshuk)从20世纪50年代开始一直从事古北区的秆蝇区系与系统分类的研究,发表有关秆蝇的论著40余篇,在1970年完成了前苏联欧洲部分秆蝇科分属分种检索表,很有实用价值;在1984年完成了古北区秆蝇名录。美国萨伯罗斯基(C. W. Sabrosky)从20世纪30年代起主要从事北美秆蝇科分类研究,对世界秆蝇区系分类也有较大贡献,先后在1965年、1977年、1980年、1989年完成了新北区的、东洋区的、非洲热带区的和澳洲区的秆蝇名录,对前人的研究工作做出许多重要的订正和综述性总结。

近20年来,秆蝇科地区性分类研究进展迅速。英国斯宾塞(K. A. Spencer)于1977、1978、1986年相继发表了有关新西兰的、澳大利亚的秆蝇科分类的区系性论著;1981年,英国迪明(J. C. Deeming)发表了研究非洲热带区秆蝇科的文章。1983年,日本上官健吉发表了日本秆蝇科系统分类的专著,包括53个属143个种(其中有两个新属和1个新亚属,34个新种);印度居里安(P. T. Cheriun)近年来有关于印度及邻近地区秆蝇新属和新种的报道。

在区系分类取得迅速进展的同时,秆蝇科分类系统研究也取得重要进展。瑞典安德森(H. Andersson)1977年发表了特别针对东半球秆蝇属的分类和系统研究的专著,全面地研究了98个属和亚属的秆蝇形态和雄性外生殖器及其亲缘关系,讨论了秆蝇科内主要特征的演化,利用雄性外生殖器特征评价秆蝇高级分类阶元及其间亲缘关系尚属首创,仍然采用传统的把秆蝇科分为奇鬃秆蝇亚科、长缘秆蝇亚科和秆蝇亚科的系统,奇鬃秆蝇亚科包括5个属(其中有两个新属),长缘秆蝇亚科包括两个族,即雄秆蝇族与长缘秆蝇族,前者包括6个属而后者包括41个属和亚属并分属于9个属组,秆蝇亚科包括46个属和亚属并分属于12个属组。1983年,上官健吉在他的专著里对安德森所分的属组作了修订,增加6个新属组,1983年,纳里特舒克根据比较形态研究及特征分析提出秆蝇新的分类系统,在秆蝇分族方面作了有益的尝试;把传统的秆蝇科提升为总科Chloropoidea,分为奇鬃秆蝇科和秆蝇科;秆蝇科又分为4个亚科,即Rhodesiellinae、Oscinellinae、Hippelatinae与Chloro~Pinae、Rhodesiellinae亚科分为3个族(包括两个新族),Oscinellinae亚科分为9个族(包括4个新族),Chloropinae亚科分为8个族(包括5个新族),纳里特舒克的新分类系统还存有争议,尚未完全被人们所接受。1989年,萨伯罗斯基对安德森1977年把奇鬃秆蝇亚科分为5个属存有异议,认为其中3个属存有异名关系,这样该亚科实际只有3个有效的属。

目前,中国已知秆蝇58属、160余种(其中90余种仅局限分布于台湾省),都为外国专家比克(1911)、杜达(1933~1934)、纳

里特舒克(1962)等研究报道,缺乏系统研究。近年来,杨集昆、杨定开始从事中国秆蝇系统分类研究,发表了两个新属及10余个新种。

秆蝇发生在所有动物区系,与人类关系密切,目前全世界还有很多区域尚未进行采集和观察,还有大量的种类尚未发现,因此区系分类工作仍有很大发展前景,进一步的工作无疑将丰富秆蝇的区系组成,进而促进秆蝇的区系起源和演化的研究。近年来,分属分类是一个活跃的领域,进一步的工作将深化这方面的研究,无疑将推动秆蝇系统分类的发展。对大多数种秆蝇的幼期形态尚未观察,进行幼期形态与分类研究,将会对建立合理的分类系统提供有力的证据,解决分类系统上尚存的有争议的问题。

#### 参考文献

- 1 Andersson H. Ent Scand Suppl., 1977, 8:1~200
- 2 Spencer K A J R, Soc N Z. 1977, 7:533~472
- 3 Deeming J C. J Nat Hist., 1981, 15:789~828
- 4 Kanmiya K. Mem Ent Soc Wash., 1983, 11:370
- 5 Nartshuk E P. Ent Obozr., 1983, 62(3):638~648
- 6 Spencer K A J. Nat Hist., 1986, 20(3):503~615

(北京农业大学杨定撰)

### 蜉蝣目 ephemeroptera 蜉蝣目属昆虫纲有翅亚纲原变

态类,是一类古老而原始的有翅昆虫。根据现有资料,昆虫学家们承认有翅昆虫的祖先应是原始的无翅昆虫中的缨尾目昆虫(如衣鱼等),而缨尾目昆虫的腹部有3条分节的长尾丝,在现代有翅昆虫中,也唯独蜉蝣还保持着2~3根这样的尾丝,它们的其它原始特征(如在成虫期要继续蜕皮,可推测早期的这种又变又不变的有翅昆虫是非常珍贵的材料。所以,近来有的昆虫学家把蜉蝣誉为昆虫界的“鸭嘴兽”。因通过古蜉蝣的研究,对地层的鉴定和矿产资源的开发利用等都具有重要的应用价值。

蜉蝣稚虫生活在水中,可在静水中营攀援营、水底匍匐生活和潜掘生活,也可在急流中自由游泳、附着和在落叶、草根、苔藓中栖息。它的口器具有完整的功能,以适应摄食习性。腹部第1~7节的侧面或背面有成对的气管鳃。一般每蜕皮一次长出一对鳃,也有在第2龄时就长出全部鳃的。有的种类常有4对或几对鳃已退化,还有全部退化。鳃的形状各异,但多数呈叶状。肌肉的收缩使鳃作间歇而持续地前后振动以进行呼吸。稚虫是天然水域鱼类的优良饵料。1888年,美国福皮斯(Forbes)第一次发现大型底栖匍匐的蜉蝣稚虫被鱼类吞食,并占整个鱼类食料的5%~40%(一般约为20%)。在大西洋沿岸水域中的羊肉鲷、河鲈、鲱鱼等都喜食蜉蝣稚虫。近年来,中国科学院南京地理湖泊研究所的科学工作者在普查中发现云南抚仙湖中的云南倒刺鲃、云南光唇鱼和湖四齿鲃的食料中,蜉蝣稚虫竟占80%~90%。以蜉蝣目的、襀翅目的和毛翅目(简称EPT)的昆虫为主体的底栖水生昆虫群落的研究和在水质监测中的应用,日益显示出它的重要性,有的学者已把蜉蝣目昆虫称作水质监测的卫士。

中国对蜉蝣的研究,自东周(公元前661~651)《诗经》开始就有文字记载。在历代著作中,如《淮南子》、《夏小正》、《蜉蝣赋》、《本草纲目》等对蜉蝣的生态都作了较生动的描述,为蜉蝣的研究提供了宝贵的资料。1761年,瑞典林奈(Linnaeus)第一个以科学命名记述了中国双翼二翅蜉(*Cloeon dipterum*);嗣后,英国伊顿(A. E. Eaton)、西班牙纳瓦斯(P. L. Navas)、德国厄尔默(G. Ulmer)、日本今西锦司和上野益三等都对中国的蜉蝣目昆虫进行过研究。其中,纳瓦斯记述中国蜉蝣共18种,分别隶属4个科7个属,厄尔默的工作较系统,他于1932~1933年修订发表了中国的蜉蝣成虫的科、属检索表,为研究中国的蜉蝣目昆虫的系统分类打下了基础。1935年,他又发表了《中国蜉蝣名录》,共记载47种,分别隶属9个科、15个属。今西锦司和上野益三主要对中国台湾、内蒙古和东北地区的蜉蝣作了调查研究。

中国生物学家秉志率先研究了蜉蝣目昆虫的化石种类,于1928和1935年先后报道3个新属和4个新种。对蜉蝣目昆虫进

行系统研究的当首推徐荫棋,他于1931年发表《中国蜉蝣的两个新种》一文,1935年又撰写《扁蜉属的形态学、解剖学和生态学》,后陆续发表《中国的蜉蝣》系列论文,对中国的蜉蝣研究进行了初步总结,共报道64种,其中详细描述了24种,充实和丰富了1935年胡经甫发表《中国昆虫名录》中记载的9个科、16个属、41种蜉蝣。但由于抗日战争爆发,徐氏的研究被迫中断。直至1963年,在徐荫棋的指导下由尤大寿、归鸿着手恢复这项研究工作。1978年以后仍在徐荫棋的指导下,南京师范大学生物系组织动物教研室部分人员为填补中国昆虫系统分类学中的空白,继续承担这项研究工作。

在分类区系研究方面,科技发达的国家早有专著问世。如1935年美国厄达姆(J. G. Needham)、特拉弗(J. R. Traver)和徐荫(Y. C. Hsu)联合著《蜉蝣生物学》记载北美蜉蝣共507种。1976年埃德蒙兹(G. F. Jr. Edmunds)、詹森(S. L. Jensen)和伯纳(L. Berner)又合作出版了《北美洲和中美洲的蜉蝣》一书,对蜉蝣目昆虫的分类系统作了新的修订并鉴定蜉蝣达622种。英国基姆斯(D. E. Kimmins)对储存在英国自然博物馆里的模式标本进行研究,1970年报道了305种。1979年麦坎(T. T. Macan)著有《英国蜉蝣目稚虫检索表》一书。1983年,埃利奥特(J. M. Elliott)和洪佩斯克(U. H. Humpesch)著有《英国蜉蝣目成虫检索表》。1992年,瑞士施图特曼(D. Studemann)等著有《瑞士昆虫志——蜉蝣目》。1979年,日本御势久右卫门发表了《日本产蜉蝣》系列论文,报道成虫约100种,已定名的稚虫约60种。法国莱斯塔奇(J. A. Lestage)、戴蒙林(G. Demoulin)、德国厄尔默、缪勒(I. Muller - Liebenau)、俄罗斯契尔诺娃(O. A. Tschernova)、加拿大弗拉南根(J. F. Flannagan)等都在本国的蜉蝣分类研究中取得大量的成果。其中,有的已涉足非洲、东南亚和拉丁美洲等地。

中国自20世纪80年代以来,南京师范大学生物系蜉蝣研究课题组,有计划地在各大行政区系统地进行调查研究,他们的足迹遍及西藏、海南、吉林、陕西等省、区,填补了过去的部分空白。对所采集的标本,经研究发表了一批成果:有论文40余篇,报道两个新属、3个属的新记录,59个新种、两个种的新记录。由尤大寿、归鸿主编的《中国经济昆虫志——蜉蝣目卷》等著作已完成,记述了两个亚目、4个总科、10个科、37个属共106种,并列有科、属及种的检索表。1979年洪友崇在《中国科学》上发表小蜉科新属——喜治属(*Philolimnias gen. nov.*)和喜治小蜉新种(*Philolimnias sinica sp. nov.*),1986年,林启彬在《华南中生代早期的昆虫》一书中记述了多脉重蜉(*Palaenophemera tensivena gen. et sp. nov.*)和棒形菜小蜉(*Clephemera clava gen. et sp. nov.*)病新属新种。洪、林两氏还鉴定了多种蜉蝣化石,对开展小蜉的研究作了贡献。此外,1991年吴兴永等对蜉蝣卵壳表面雕纹进行显微观察,1992年苏翠荣对蜉蝣触角的显微观察,1992年吴细、归鸿对蜉蝣稚虫蛋白质和酯酶同工酶的研究,都旨在对蜉蝣系统发育和新分类方法进行探索,但工作还只是刚刚起步。

随着科学的发展,对蜉蝣的研究也不断扩展和深入,除分类区系、生物学、生态学等外,稚虫的研究在水质监测中的应用发挥着越来越大的作用。近年来,美国在应用各种多样性指数、生物指数评价水质的基础上,又提出综合性采样法和科级水平生物指数评价法,以寻找一条快速、有效评价小溪、河流和湖泊大量水质的途径。南京农业大学杨莲芳等采用上述技术,研究中国安徽“九华河水生昆虫群落结构和水质生物评价”的报道(1992),是推动中国这方面工作的良好开端。

中国幅员辽阔,生态环境复杂,对蜉蝣进行基础理论和实际应用的研究,与先进国家相比,在人力、物力的投入和技术水平等方面都还有一定的差距,特别是如何在高新技术的起点上使蜉蝣的研究工作深入到微观世界——细胞和分子水平上的探索,需要努力。

参考文献

1 尤大寿,等. 南京师范学院学报(自),1979,1:57~63

2 归鸿,等. 昆虫知识,1982,6:33~37  
 3 归鸿,等. 南京师范大学学报(自),1992,15(1):60~62  
 4 Needham J R, et al. The Biology of Mayflies with a systematic account of North America species. Comstock, Ithaca, 1935. 1~192  
 5 Edmunds G F Jr, et al. The Mayflies of North and Central America. University of Minnesota Press, Minneapolis, 1976. 1~48

(南京师范大学归鸿教授撰;尤大寿审)

**麦蛾科** gelechiidae 麦蛾是一种微小的蛾子,头通常平滑,有朝前向下弯曲的长鳞片;单眼经常存在,无毛隆;触角简单或有短纤毛,柄节极少有带;喙基部密被鳞片,下颚须4节褶叠于喙基部上方;下唇须3节,细长,通常上举或后弯,极少平伸;第2节腹面常具毛簇或粗鳞片,第3节尖细;后足胫节有长鳞毛;前翅广披针形,无翅痣;径脉4(R<sub>4</sub>)和径脉5(R<sub>5</sub>)常共柄,径脉5到达前缘,后肘脉(C<sub>u</sub>P)退化(代之为折痕或翅褶)或缺失;雌性在径脉上有一排由强烈弯曲的鳞片组成的翅缘沟;后翅一般呈梯形,外缘常弯曲或内凹,顶角凸出,肘脉有时具基带,径脉1(R<sub>1</sub>)存在;径分脉(R<sub>a</sub>)和中脉1(M<sub>1</sub>)通常在基部接近或共柄;中脉3(M<sub>3</sub>)和肘脉1(C<sub>u1</sub>)合生或共柄,很少分离;一般缺后肘脉,腹部极少有背刺。

幼虫多样。幼虫腹足有排列成两横行或椭圆形的双序趾钩;胸足偶而减少,但前足极少缺失;隐蔽取食嫩芽或卷叶、缀叶、潜叶、蛀茎或种子,危害花、果实或腐生等,钻蛀块茎的种类对寄主往往造成毁灭性的危害。幼虫一般下地或在隐蔽处结茧化蛹,蛹下颚须存在,有臀棘。

雄性外生殖器的形式和结构多样,少数是不对称的,从简单退化变化到部分综合。第8腹板有时分裂成端叶盖住外生殖器。延长的背兜通常有粗短的爪形突。颚形突发达,多呈钩状。抱器瓣一般较狭窄或为棒状,抱器背有时分离,抱器腹基部通常发达。囊形突有时与中腹合并。阳茎通常强壮有膜,角状器常存在。

雌性外生殖器交配孔从膜质可变化到强烈骨化,有时呈精致的泡沫状多孔结构,或有时具突起的交配孔板。囊突单个或成对,形状不一,多数较显著。

本科为Stainton于1854年建立。1925年Meyrick将全世界的麦蛾种类分成9个组,目前已重组上升为9个亚科和3个科,但还不稳定。例如,有人仍将*Lecithoceridae*视为麦蛾科的一个亚科,而分裂出去的*Symmocidae*则归为遮颜蛾科(*Blastobasidae*)的一个亚科(Hodges,1978)。也有人认为后者仍属于麦蛾科的一个亚科(Bradley,1987)。本科全世界已记载500多属,53000多种。本科较高水平的研究主要在美国、英国、捷克和前苏联。美国和前苏联的专家主要侧重于本国麦蛾的研究,英国专家进行过若干属的世界订正,捷克专家研究全世界的一个族(*Gnorimoschemini*)。各发达国家均有人进行麦蛾科昆虫区系的研究。

中国麦蛾科昆虫研究,正如杨集昆在《华北灯下蛾类图志》(上)一书中指出的那样,本科昆虫一般提到的有20~30种,该书记载了麦蛾科12种常见种。刘友樵在《中国蛾类图鉴》(1)一书中记载19种常见种。以上两书除重复的种类外,合计记载我国常见麦蛾25种,其中有11种危害树木,5种危害农作物,3种为世界性严重害虫及检疫对象。实际上,查阅大量文献的结果表明,中国被描述过的麦蛾科昆虫已达300种,除近年中国定名的几种外,其余均为外国人在1935年以前采得中国标本陆续在国外研究发表的。根据已经掌握的标本来看,中国该科的种类远在1000种以上。

本科昆虫多为农林害虫,其中麦蛾*Sitotroga cerealella* (Olivier, 1789)、红铃麦蛾*Pectinophora gossypiella* (Saunders, 1844)和马铃薯麦蛾*Phthorinaea operculella* (Zeller, 1873)是世界大害虫或国际检疫对象。今后的研究特点将是,发达国家在研

究清楚本国区系的基础上,对发展中国家的区系将表现出较大兴趣,以期搞清世界区系;发展中国家将逐渐搞清本国的麦蛾及其它小蛾的区系。

参考文献

- 1 刘友樵,等.中国蛾类图鉴(1).北京:科学出版社,1981,134,38图版
- 2 杨集昆.华北灯下蛾类图志(上).华北农业大学,1977,299,12图版
- 3 李后魂.中国麦蛾科新纪录.西北林学院学报,1990,5(3):8~12
- 4 李后魂.异脉筛麦蛾的鉴别(鳞翅目:麦蛾科).西北林学院学报,1990,5(4):48~51
- 5 李后魂.中国轻麦蛾属研究(鳞翅目:麦蛾科).昆虫分类学报,1991,13(2):87~92
- 6 Hodegs R W. The moths of Ameica North of Mexico, Fase. 6. 1 Gelechioidea, Cosmopterigidae. London: 1978. 1~166, 1~6
- 7 Holloway J D, et al. CIE guides to insects of importance to man .1. Lepidoptera. London: 1987. 1~262
- 8 Meyrick E. Lepidoptera Heterocera Fam. Gelechiidae, Gener Insectorum . 1925, 184: 1-290, 1~5
- 9 Satter K. A. catalogue of the family-group and genus-group names of the Gelechiidae, Holcopogonidae, Lecithoceridae and Symmoxidae (Lepidoptera). Bull. Br. Mus. Nat. Hist. (Ent). 1973, 28: 4, 153~282

(西北林学院李后魂副教授撰)

**异脉筛麦蛾** ethmiopsis prosetrix meytick 异脉筛麦蛾属鳞翅目麦蛾科麦蛾亚科筛麦蛾属。1935年,Edward Meyrick根据采自上海、浙江(天目山)的4只雄蛾建立了该种,第2年他又在采自山东(泰山)的标本中发现几只。1969年,Clarke在其著作中根据选模标本发表了异脉筛麦蛾的头部、翅脉和雌性外生殖器照片图版。1990年,李后魂根据在陕西采得的标本记述了雌蛾及该种翅脉多变的现象。

**形态特征** 翅展12~18mm。头桔黄色,头顶密被粗鳞毛。触角黑色,每节基部围有桔黄色鳞片。下唇须第1节和第2节黑色,第2节端部白色,第3节白色,其外侧三分之一处有黑纹。下唇须第三节的着生有两种情况:多数个体上举过头顶;少数个体咧向外侧且前伸,Clarke(1969)发表的照片图版正是后一种情况。胸部黄褐色,前缘外侧和外缘中部有黑点。翅基片中部黑色,边缘灰白色或全部为灰白色。前翅青灰色至桔黄色,有三纵列不规则的黑斑,其中前缘中部、中室基部和端部的三个黑斑最显著。外缘有一列小黑斑,内缘近基部的黑斑有若干粗而硬的鳞片突出边缘,缘毛褐色杂有黑色鳞片。后翅黑褐色。雌雄个体翅脉均有较大变化,形成一系列的过渡。多数个体前翅R<sub>4</sub>和R<sub>5</sub>脉共柄,其它脉均单独生出,但可以见到下列情况:(1)R<sub>3</sub>脉在中室内有部分残留,其副室痕迹清晰可见;(2)M<sub>3</sub>和C<sub>u1</sub>脉共柄;(3)R<sub>4</sub>和R<sub>5</sub>脉的柄在基部和M<sub>1</sub>脉分离一段后并接再分开;(4)R<sub>4</sub>和R<sub>5</sub>脉共柄后再和M<sub>1</sub>脉共柄;(5)R<sub>3</sub>和M<sub>1</sub>脉共柄后再和R<sub>4</sub>共柄;(6)R<sub>4</sub>和R<sub>5</sub>脉完全愈合。后翅有两种情况:(1)R<sub>5</sub>和M<sub>1</sub>脉共柄,M<sub>3</sub>和C<sub>u1</sub>脉共柄;(2)M<sub>3</sub>和C<sub>u1</sub>脉共出一或分别发出。足浅褐色至黑色,前足和中足胫节中部及端部外侧各有一白色横纹。各跗节端部白色。腹部褐色,背面较腹面色深。

**雌外生殖器** 爪形突近椭圆形,顶端中部略凹陷,两侧密被长刚毛。骶形突发达,高度骨化,基部三分之一处开始强烈向上弯曲,中部略为膨大,末端尖。抱器瓣基部三分之一狭窄,中部宽大突出,端部圆钝多刚毛。囊形突发达,末端尖。阳茎中部强烈弯曲,基半部膨大,端半部细,末端尖。

**雌外生殖器** 产卵瓣多刚毛,前表皮突不及后表皮突的一半长。第八腹节后缘中央凸起,两侧凹下,凸起的中央向前有一

段纵脊。交配孔周围呈网状。交配囊内壁密布小刺,囊突圆盘状有齿。

分布 上海、浙江(天目山)、山东(泰山)、陕西(杨陵、兴平、彬县、澄城)。

参考文献

- 1 Caradja A, Meyrick E. Materialien zu einer Microlepidopteren - Fauna der chinesischen Provinzen Kiangsu, Chekiang und Hunan, Berlin; R. Fridel änder, Sohn. 1935. 1~96
- 2 Caadja A, Meyrick E. Dt. Ent. z. Iris 1936, 50: 135~159
- 3 Clarke J F G. Catalogue of the type specimens of Micro-cribed Edward Meyrick, London: Brit. Mus. (Nat. Hist.). 1969, 7: 1~531
- 4 李后魂.西北林学院学报,1990,5(4):48~51

(西北林学院李后魂副教授撰)

**蜜蜂的记忆** 蜜蜂容易人工养殖,通过训练可以用于开展与学习行为有关的实验研究。记忆是蜜蜂在识别过程中与学习行为有关的特性,蜜蜂记忆的机理和现代的数字计算机完全不同。对蜜蜂记忆机理的研究,对进行现代智能机联想记忆的仿生学探索,有着重要的意义。

蜜蜂在寻找食物源的过程中需要学习许多东西,比如花的位置、形状和路标等,而记忆在这些学习行为中是非常重要的。1987年,门泽尔(R. Menzel)总结了用行为实验研究蜜蜂记忆的结果。实验表明,经过简单的一次联想学习试验,蜜蜂会发生4个顺序的记忆阶段,即:(1)工作记忆:持续时间很短,仅为1分钟,它非常地控制着学习行为。对遗忘处理,反向学习,衰退试验及酬赏时间是非常敏感的。它存在于同侧脑包括触角叶。(2)早期记忆:(1~3min),最初非常地控制学习行为,但是很快会失去这种能力(2~3min)。对反向学习,衰退试验及酬赏时间是不敏感的,可以被遗忘处理消除。脑两侧的蘑菇体都有这种记忆痕迹。(3)晚期记忆:是在学习试验4分钟以后的时间里,随着时间变化,它增强了对学习行为的控制(强化作用),并且增加了反向学习的困难。在12h以后晚期记忆就要退化,对遗忘处理不敏感。晚期记忆痕迹在脑中的位置还不清楚。(4)永久记忆:仅在多次学习试验以后才能建立,对蜜蜂的终生都是稳定的,只有经过新的学习试验才能改变。

关于蜜蜂对位置记忆、花形状记忆和路标记忆的研究,可以归纳为两种模型,即参数模型和图像模型。1931年,赫茨(M. Hertz)提出蜜蜂对形状识别是非常粗的,主要依据空间频率。比如说,一个图像的边缘长度与面积之比值,即单位面积所含边缘长度。蜜蜂对每单位面积含较长边缘的形状,有一种很强的自发偏向。1972年,安德森(A. M. Anderson)的实验表明,蜜蜂的形状识别能力取决于图形强度(颜色面积)参数,图形强度大时对蜜蜂视觉的刺激就大。根据实验结果,安德森提出了两个重要参数:形状面积(A);边缘长度与围绕面积之比值(轮廓密度CD),并在1977年归纳出经验规律:

$$\text{对测试形状反应的百分比} \propto 1 / (CD_T - CD_E) \times (A_T - A_E)$$

其中,CD<sub>T</sub>是训练形状的轮廓密度,CD<sub>E</sub>是测试形状的轮廓密度,A<sub>T</sub>是训练形状面积,A<sub>E</sub>是测试形状面积。安德森的经验公式反映了在测试形状和训练形状之间,轮廓密度和形状面积两参数的各自差别越小,反应率越高。1972年,克鲁斯(H. Cruse)由实验结果得出一个微分函数来描述蜜蜂模式识别:

$$U = C_1 f_1(R^+, R^-, G, A^+, A^-) + C_2 f_2(K^+, K^-, A^+, A^-)$$

其中G为正模式与负模式重叠的面积,R<sup>+</sup>(R<sup>-</sup>)为正(负)模式不重叠部分面积,K<sup>+</sup>(K<sup>-</sup>)为正(负)模式的轮廓长度,A<sup>+</sup>(A<sup>-</sup>)为正(负)模式的形状对照值。从公式可以看出,克鲁斯由实验得出了这样的假设:蜜蜂模式识别的一部分是比较两形状的二维交叉对比;另一部分是两形状之间轮廓长度的对比。对比差别越大,越易识别。总之,参数模型认为蜜蜂记忆的是空间频率



和某些其它的参数,例如颜色、面积、线性角度分布等。

1987年,古尔德(J. L. Gould)最先提出图像模型。他设计了一些实验方法,用一对空间频率、颜色面积和线性角度等参数完全相同的酬赏刺激(S+)和非酬赏刺激(S-)训练蜜蜂,并通过互换S+和S-的左右关系来消除位置对蜜蜂的影响。测试蜜蜂分别在参数完全相同的“花”之间和参数完全相同的路线之间进行识别的结果表明,形状和路线记忆是图像的记忆。并根据视觉分辨率和记忆分辨率的测定结果,确定了形状和路线的记忆是不真实的,它们有不同分辨率,因而是分别存储的。

利用在阴天移动蜂巢的实验,1987年,戴尔(FC. Dyer)揭示了蜜蜂形成对太阳方位角移动的空间及时间模式的细致记忆,并且能够用位置路线作为学习参照物。蜜蜂的舞蹈语言反映了太阳位移速率有规律的时间变化,因此,太阳航线的特征一定被存储在蜜蜂记忆里。蜜蜂有使用天体线索导航寻找不熟悉食物源的能力,当路线逐步熟悉时,它们也能够用显眼的路线导航,在多云天即是如此。蜜蜂用显眼的路线导航有两种看法:1981年,魏纳(R. Wehner)认为蜜蜂记住了在熟悉的搜索路径中遇到的路线顺序,即特定路线。对另一次搜索路径,一个不同的特定路径将被记住。古尔德认为蜜蜂有识别图,即能够整合和利用在去不同终点的各个途径中搜集的信息,取一条新的直接到终点的路线。识别图假设和特定路径假设的主要差别是:后者中的蜜蜂仅知道沿同一路线路线之间的关系;识别图允许动物理解在各个路线路线之间的空间关系。

1988年,古尔德用一些图像变换对蜜蜂进行实验。发现在一个图像(S+)和其镜像之间选择时,蜜蜂明显地喜爱S+;在S+的镜像和一个新模式之间选择时,蜜蜂绝大多数是选择S+的镜像;在一个新模式和S+经旋转90°或S+上下倒置得到的模式之间进行选择时,蜜蜂不表现出优势选择。这种镜像模糊在动物中从头足纲动物到哺乳动物都存在。在人类的婴儿识别小写字母“b”和“d”时就存在镜像模糊,对于“b”和“p”以及“b”经旋转90°而得到的图像则不表现类似的模糊。这在蜜蜂学习记忆的研究中具有普遍的意义。

1990年,哈特恩(J. H. van Hateren)让蜜蜂在取相互垂直方向的两个随机条状模式之间进行识别,发现蜜蜂仅依据条状模式的取向这一参数就能够进行识别,但是不能识别取同一方向的两个不同随机条状模式,即蜜蜂不能形成随机条状模式的映象。因此,他认为蜜蜂不是依据字母式图像(极为逼真的映象)进行识别的。

1990年,本哈姆欧(S. Benhamou)将已经发表的各种动物(不仅指蜜蜂等昆虫,也包括哺乳类和鸟类等其它类动物)的行为实验结果进行了概括性总结。将动物具有依据空间记忆确定宏观运动中位置和方向的能力归纳为存在两种编码处理系统:(1)依据一个外部参照物为核心的编码记住动物想要返回某地的方向和位置,这涉及到处理由那个地点和动物所在的位置而感觉到的一系列邻近路线提供的信息,与动物自身的方位(位置和取向)无关。(2)动物返回某地的方向和距离,是依据一个自我为中心的编码而记住的,与动物的自身方位有关,涉及到处理由动物运动(旋转和平移)提供的路径依据信息。他认为两种编码处理是相互补充的,自我为中心编码处理的精确性随路途的长度增加而降低,动物在最终路程的调整阶段,通过将自我为中心的编码处理移到外部参照物为核心的编码处理(依据附近路线)来调整最终路程的不精确性。

对蜜蜂的记忆虽然在其行为实验方面已经开展了许多研究,但蜜蜂记忆的方式仍然是一个活跃的研究领域。如果从感觉信息加工处理的角度研究蜜蜂记忆,不仅对其自身有重大价值,而且对改善现代人工智能机联想记忆功能的探讨也会有深远的意义。用电生理方法和组织学方法研究蜜蜂记忆的报道还不多,因此结构和功能的探索也将是一个有意义的课题。

参考文献

1 Anderson A M. J Comp Physiol. ,1977,114:335~325

2 Gould J L. Science, 1985,227:1492~1494  
 3 Gould J L. Science, 1986,232:861~863  
 4 Menzel R. Neurobiology and Behavior of Honeybees 1987, 310~325  
 5 Hateren J H. van J Comp Physiol. , 1990,167:649~654  
 6 Benhamou S. J Theor Biol. 1990,145:1~12

(高奔撰)

**中华虎凤蝶** 中华虎凤蝶是著名的珍贵蝴蝶,属鳞翅目、凤蝶科、虎凤蝶属,学名 *Luehdorfia chinensis* Leech (1893~1894),濒危,其华山亚种 *L. C. huashanensis* Lee (1981)系国务院批准公布的国家二级保护动物。

虎凤蝶属蝶类的色彩、斑纹在种间区别细微,而同种个体之间翅面斑纹的变异幅度却可以很大,因此,许多年以来由于没有找到明确的形态区别,使得世界上不少蝶类专家对本属蝶类的鉴定感到困惑,以致长期存在着混淆和误订现象。1893~1894年,利奇(J. H. Leech)在《中、日、朝蝶类志》一书中,将中华虎凤蝶误认为日本虎凤蝶 *L. japonica* Leech (1889)的一个变种,而不是一个独立的种。1906年,塞茨(A. Seitz)在《世界大鳞翅目志、古北区蝶类》一书中认为本属只有乌苏里虎凤蝶 *L. Puziloi* Erschoff (1871)一种,而将日本虎凤蝶和中华虎凤蝶都误订为前者的亚种。此后,1905~1911年维里蒂(R. Verity),1918年罗思柴尔德(W. Rothschild)以及1932年罗森(R. Roson)等也和利奇一样都存着混淆和误订。直至1978年,李传隆根据幼期形态,指出中华虎凤蝶既不是乌苏里虎凤蝶的变种,也不是日本虎凤蝶的变种,而是一个独立的物种。1981年增加一种,即长尾虎凤蝶 *L. longicaudata* Lee。这样,到目前为止,本属共4种。虎凤蝶属蝶类是亚洲东部地区的特产。中华虎凤蝶迄今已知产于中国陕西、安徽、江苏、浙江、江西、湖北,其华山亚种目前仅知产于陕西华山;长尾虎凤蝶产于陕西太白山;乌苏里虎凤蝶产于中国的辽宁、吉林及朝鲜、日本的北海道和本州、俄罗斯的符拉迪活斯克等地;日本虎凤蝶则仅产于日本本州。

关于中华虎凤蝶生物学的、生态学的特征以往缺乏了解,近年来逐步明确,研究进展迅速。目前已知中华虎凤蝶在各地均一年发生一代,以蛹越冬,越冬,蛹多在枝干上、枯枝落叶下及石块缝隙中。羽化时期因纬度、海拔高度而有差别。在杭州,2月下旬至3月上旬开始羽化,羽化高峰在3月中下旬。中华虎凤蝶又称惊蛰蝶,指的就是早春(春梅开花时)出现,羽化早;在海拔较高、遮荫重、春天回暖迟的场所,则羽化迟。产卵高峰在3月中下旬,孵化高峰在4月上中旬,化蛹高峰在5月中旬。

成虫交配在10~16h进行,以12~13h最多,交配通常持续20~30min,雄蝶可交配多次,雌蝶只一次。未经交配的雌蝶也能产卵,但未受精卵均不能孵化。产卵前期晴天1d,若遇低温阴雨可延长至17d。14~17h产卵,卵产在叶背,以长势好、面积在15cm<sup>2</sup>以上的叶片上为主。卵,偶见单产,绝大多数疏松地群集一起,卵粒间距大多1~2mm,最小的为零。一张叶片上最多可有两堆卵,每堆有卵2~35粒。室内观察结果,雌蝶平均寿命12.9d,雄蝶11.5d,雌性比为46.7。卵发育起点温度为7.68℃,有效积温为111.40日度,孵化率为93.7%~95.6%。幼虫孵化主要在8~14h。初孵幼虫群集叶背取食,头部一律朝向叶缘,排列成弧形或不规则形。一龄前期取食下表皮和叶肉,残留上表皮;稍大则咬食成孔洞或缺刻,最后有的只剩下叶缘或叶柄。叶片食尽时,甚至取食叶柄等。平均一头幼虫取食叶面积25362mm<sup>2</sup>,1~3龄合计只占2.39%,5龄却占89.68%。食叶面积对数值依虫龄呈直线增长,lgY=0.7531+0.6815×r<sup>2</sup>(r<sup>2</sup>=0.9774)。幼虫期平均36.3d,蛹期长达307.5d。蜘蛛和病原菌是其主要天敌。

关于中华虎凤蝶的寄主植物,目前仅知杜衡和细辛两种,1992年童雪松等报道,在人工饲养中也可取食福建细辛和尾花细辛,但分别依赖这两种细辛能否顺利完成发育尚不明确。以杜衡叶粉(叶因子)干酪素、酵母粉、蔗糖、维生素、山梨酸、琼脂等

为原料的半纯饲料业已试验成功。

根据近年研究结果,中华虎凤蝶所以稀少的主要原因可分析、归纳为:(1)年发生世代数少,生活周期较长,一年只发生一代,数量自然远比不上一年多代的种类。(2)寄主植物数量不多。目前仅知取食杜衡叶和细辛叶,杜衡、细辛一般数量不多,且常作为中草药而遭采摘。(3)早春低温阴雨影响交配、产卵。成虫羽化早,羽化期一般都会遇到反复多次和较长时间的寒潮(如1988年3月15~29日,杭州基本上为低温阴雨天气,日平均温度为 $7.21^{\circ}\text{C}\pm 1.64^{\circ}\text{C}$ )在此期间成虫不活动,不交配、不产卵,待寒潮过后,许多成虫衰竭,62.5%未交配、产卵即告死亡。(4)有些年份后期羽化的雌蝶无雄蝶配对。因寒潮接连侵袭雌雄羽化高峰日相差颇远,致使相当数量的雌蝶得不到交配的机会。(5)化蛹、羽化率低。幼虫期死亡率较高,室内精心饲养的,化蛹率为62.8%~65.5%。蛹期长达300d以上,且不在土中,在野外很容易受到天敌的袭击和种种不良环境条件的影响而告死亡。人们某些活动,例如毁林垦荒、破坏生境、滥摘寄主植物、任意捕杀甚至私自出口,更进一步使其濒临危境。

对于中国的珍贵特产中华虎凤蝶,国际上十分关注。当前除有必要继续调查其分布与寄主植物之外,为了切实做好保护工作,研究的重点首先应该是:(1)进行深入的生物学的、生态学的观察,具体、细致地掌握其交配、产卵对环境条件的要求,温湿度对其种群的影响,天敌种类及其抑制作用,滞育情况,等等。(2)改进人工饲料。(3)提高饲养技术(包括人工辅助交配技术)。(4)优化蝴蝶公园设计方案。

#### 参考文献

- 1 李传隆. 中国蝶类幼期小志, 中华曲凤蝶, 昆虫学报, 1978, 21: 161~162, 图版工
- 2 Vietmeyer D. Butterfly farming in papua New Guinea, National Academy Press, Washington D C U S A. 1983. 1~34
- 3 胡萃, 等. 珍稀、濒危昆虫. 中华曲凤蝶的生物学, 昆虫学报, 1992, 35: 195~199
- 4 胡萃, 等. 珍稀、濒危昆虫. 中华虎凤蝶的半纯饲料, 浙江农业大学学报, 1992, 18: 1~6
- 5 童雪松, 等. 中华虎凤蝶的生物学特性观察, 动物学研究, 1992, 13: 4

(浙江农业大学胡萃教授撰)

**天蚕** *antheraea yamamai guerin-meneville* 天蚕属鳞翅目天蚕蛾科, 是珍贵的大型野生绢丝昆虫。中国分布于黑龙江、吉林、辽宁、广西、四川、贵州、云南等地, 国外分布于日本、朝鲜。天蚕丝比桑蚕丝伸力强, 光泽优美, 呈独特的天然葱绿色, 不褪色, 难再着色, 因而被视为珍品, 有“金丝”、“丝中钻石”等美称。由于其丝织品坚韧, 号称“天蚕3代”, 在日本常作为遗产。随着社会向高消费发展, 天蚕丝在妇女装饰品、与桑蚕丝制作复合丝织品及西装面料等方面的需求日益增长, 国际市场上价格昂贵, 比桑蚕丝、柞蚕丝高数十倍, 颇具开发利用价值。

1781~1788年日本已兴起天蚕饲育业, 1869~1911年为鼎盛时期, 以后病害蔓延曾经衰败。20世纪50年代以来, 日本不少学者开始一系列研究。1974年日本政府颁布了《传统工艺品产业振兴法》, 1978年指定天蚕丝为传统工艺品。日本长野县蚕业试验场、农林水产省蚕丝试验场和信州大学纤维学部等数十个研究机构都相继投入研究, 并于1986年开始正式出版《野蚕研究会报》, 主要内容为天蚕。中国东北早在本世纪30年代即进行试养, 50~60年代作研究, 但都未能得到发展。80年代以来, 无论基础研究和饲养均进展较快, 东北有野生天蚕丝, 浙江有人工饲养所得天蚕丝小批量出口。

天蚕的显微结构和超微结构 Hinton(1969, 1970)、铃木诚一等(1979)、神田俊男(1979)、川上敏行等(1980)、胡萃等(1991), 先后对天蚕的卵的显微结构和超微结构作了观察。1991年胡萃等报道, 卵表面基本结构与柞蚕的相似, 但微细结构差异

明显。受精孔外腔卵饰小叶细长, 中央略凸起, 受精孔管11~13条, 气空围壁分大小两型, 大型围壁式气孔之内存在着档板样结构, 可能具有调节启闭的功能。1991年, 洪健等应用扫描电镜对幼虫头壳及触角、单眼、口器等表面微细结构进行观察, 并作了龄间异同的比较。1991年, 黄恩友对幼虫头部刚毛胸腹节毛瘤形态、数量及排列方式作了描述。1988年, Okui和1991年叶恭银等观察了幼虫趾钩形态、数量、排列方式及长短等。在赤牛弘(1985, 1988)的研究基础上, 胡萃等(1991)观察了丝腺显微结构和超微结构、丝腺腔中液状丝物质的超微形态及其与茧丝结构的关系; 洪健等(1991)观察了天蚕成虫触角表面微细结构, 感觉器类型、分布及两性间差异。

天蚕的饲料植物和人工饲料 天蚕以壳斗科栎属植物和杨柳科的蒿柳为食料。若林已喜雄等(1984)比较了4、5年生栽培麻栎、野生麻栎和枹栎饲育天蚕的实绩, 以栽培麻栎最佳。栗林茂治(1990)报道麻栎是日本代表性最佳树种。在此基础上, 叶恭银等(1991)比较了白栎和麻栎的饲育结果, 证实白栎优于麻栎。此外, 高其康等(1991)观察了白栎、麻栎等6种壳斗科植物叶片的超微结构。杨世忠等(1991)作了利用蒿柳饲育天蚕的试验。1960年日本开始天蚕人工饲料研究。70年代中期才达到接近鲜叶育的水平。嗣后, 樋口芳吉(1981)、松田基一等(1984)、中嶋福雄等(1987)和松冈良彰等(1987)先后报告了多种配方。配方分含有栎叶粉和不含栎叶粉两类, 前者饲育效果接近鲜叶, 后者则不很理想。樋口芳吉(1981, 1990)比较了数种叶粉为叶因子的饲育实绩, 均以麻栎为最佳。杉田英夫(1982)和迁厚生(1987)分别对人工饲料育的光照条件和容器内环境作了研究, 以光照8h、通气性好的为宜。1991年, 胡萃等采用正交试验法以白栎叶粉为叶因子进行筛选, 选出适合稚蚕期的配方7种, 全龄期的3种; 提出稚蚕期饲料育、壮蚕期鲜叶育的饲育方式, 为提早饲育和一年多回育奠定了基础。

天蚕的生物学特征 天蚕在日本1年1代, 以蚁蚕在卵壳内越冬, 翌年4月下旬至5月上旬孵出, 7月上旬结茧, 部分7月下旬羽化、交尾产卵, 夏季滞育蛹则于9月下旬羽化、交尾产卵, 产卵后10d胚胎发育完成, 变成幼虫, 但不立即孵出。在中国东北也是1年1代, 5月上旬蚁蚕孵出, 6月下旬至7月上中旬结茧, 7月下旬至8月上旬羽化交尾产卵, 无夏季滞育蛹出现。幼虫一般4眠5龄, 全期约45~50d, 也有3眠4龄和5眠6龄的。Kuribayashi等(1984)和中嶋福雄(1987)报道了幼虫以麻栎为食料时的摄食量、消化量和消化率。1991年, 胡萃等以白栎为饲料就天蚕主要生物学特性、营养指标、幼虫取食行为及幼虫体重增长等进行系统研究。此外, 坂手荣等(1981)研究了光照和温度对解除蛹滞育的效果。铃木诚一等(1987)研究了光周期对卵孵化、幼虫生长及成虫羽化的影响。

天蚕的生理生化 天蚕以蚁蚕在卵壳内滞育越冬, 历期达270h左右。铃木幸一等(1986, 1987)和谈恩智等(1986)利用咪唑类化合物(KK~42)处理蚕卵, 打破滞育。在此基础上, 钟香巨等(1991)明确了 $\beta$ -蜕皮素、早熟素I或KK~42结合低温( $5^{\circ}\text{C}$ )处理, 均能使滞育终止。先以低温处理, 后用药物涂布的效果为佳。1991年Koichi等对其滞育调控机理作了探索。1989年, Toshiharu测定了卵胚胎发育期间和滞育期间糖源和游离糖含量的变化。1989年, 田中一行等研究了天蚕、柞蚕及其杂交种精巢发育和配子形成过程。1989年, 古泽寿治等研究了胚胎发育及休眠过程中卵蛋白SDS~聚丙烯酰胺电泳图谱的变化。1986年, Kato等测定了夏季滞育蛹耗氧量。1990年, Kiuchi应用放射免疫测定法测定了幼虫孵化至化蛹过程中蜕皮甾酮滴度的变化。1986年, 加藤义臣研究了蚕茧色彩变化与光照的关系, 明确光线强度为4000Lux时结绿茧, 光照时间长, 绿色越深。1990年Kato等报道, 当熟蚕排粪尿时, 需要蓝色光或4000Lux白光照射才能营绿茧, 茧色决定于两种色素, 即蓝色素I和黄色素I, 前者推测为胆绿素, 后者尚不明了。田村侵树(1985, 1987)、Tamua等(1988)分离鉴定了丝心蛋白mRNA, 并已建立了基因克隆。李

振刚等(1991)利用激光微束将天蚕丝腺中取得的模板活性染色质转移到柞蚕受精卵中,初获成功。

**蚕饲养和制种** 日本和中国至今已在蚕卵保藏方法、饲养时期、饲养方式、饲养环境、天敌防治、制种方法和制种环境方面做了许多工作。如中鸣福雄(1974、1975、1987、1989)对蚕卵冷藏温度、时间、催青温度等作了系列研究,认为长期冷藏以0℃为宜。高藤弘(1981)探讨了各龄蚕摄水的情况,明确以壮蚕为多。Kuribayashi(1988、1990)探明饲养以温度1~2龄29℃、3龄27℃、4~5龄25℃;相对湿度80%;光照时间10~12h,气流0.1~0.2m/s为宜。胡萃等(1991)提出中国江南最适宜饲养时期为4月上中旬至5月;杨世忠等(1991)认为在中国东北为6月上中旬至7月。东海林衡(1990)探讨了壮蚕饲养适宜密度,为即不超过200头/m<sup>2</sup>。胡萃等(1991)、杨世忠等(1991)、张涛等(1991)从不同角度对多种饲养方式作了比较,均认为稚蚕期可以较高密度群育。板林坚五等(1988)作了涂布粘胶剂和二噁农药剂防治天蚕放养林蚁类试验。小林胜等(1982)、张秀珍等(1989)报道了核型多角体病毒的形态、毒力等。密田和彦(1990)、刘淑敏等(1991)报道了微孢子病孢子形态毒力。制种方法归纳起来有竹笼中配对法、跑蛾法、剪翅法以及拴雌蛾法等,交尾率一般为70%~80%左右。赤沼1934)、孙文明(1983)、谈恩智等(1988)、杨世忠等(1991)、陈连忠等(1991)先后都作过研究,一般以拴雌蛾、放雄蛾自由交尾的成功率为高。西村国男(1960)、樋口芳吉(1974)、阿部弘等(1978)、今田邦信等(1987)先后探讨了制种适宜温湿度和气流等,一般要求温度低于20℃,温度高且有微风的环境。有水富男(1988)探讨了温暖地区制种方法,浙江在7~8月高温条件下进行制种已初获成功。此外,岩本素直等(1982)研究了种茧保护方法。丸山诚(1982)研究了雄蛾再交、雌蛾及雌蛹冷藏对产卵的影响。

**茧丝性状及其加工** 1984年,山田政拔对茧层氨基酸、灰分、含水量、溶解度、缫丝率等理化特性进行了分析,并探讨了其与饲料的关系。1984年,高林千幸探讨了茧层构造和煮茧特性。1984年,坪井恒等分析了缫丝特性。1984年,足立重信探讨了缫丝技术。1991年,刘冠峰等分析了以白柞为饲料的蚕茧茧丝性状和缫丝特性。1991年,孙云嵩对蚕茧作了热重和差热分析。1991年,王云翹等测定了茧层氨基酸和无机元素。1991年,纪涛等测定了蚕层的红外光谱,鉴定了蚕丝蛋白结构。1991年,华跃进等测定了荧光光谱。1991年,叶恭银等观察和分析了茧层表面的白色粉末。1991年,刘冠峰等探讨了工厂缫丝技术。1991年,徐小民探讨了绢丝梳纺工艺。此外,日本学者还研究了与桑蚕丝复合缫丝的技术。

今后重点研究方向:(1)系统选育优良品种;(2)深入研究病害流行规律和防控措施;(3)改进饲养技术,节省劳力,降低成本;(4)提高制种技术;(5)提高缫丝和深加工技术;(6)开展基因工程研究,开发利用丝心蛋白基因。

**参考文献**

- 1 中嶋福雄.天蚕饲养方弓制系まも農山漁村文化協会,1987
- 2 赤井弘.天蚕サイエンス入門ス,1990
- 3 胡萃.天蚕研究论文集.上海:上海科技出版社,1991  
(浙江农业大学叶恭银、胡萃教授撰)

**楼网蛛及其生殖腺**

*psecchus and its epigynum* 楼网蛛为中国、澳大利亚、和东南亚各国山地林区的大型蜘蛛(体长14~22mm),属节肢动物门蛛形纲蜘蛛目。蜘蛛居山岩缝隙或灌丛土穴中,网织于缝穴口,孔密而不规则,呈盖楼幕屏状,故名。网大(0.36~0.8m<sup>2</sup>)且粘着力强,能粘捕各类型山林害虫,对维护森林生态平衡有较重要作用。由于该蛛机敏异常,遇惊就潜遁深处,很难采集。且雌蛛生殖腺发育变化较大,雄蛛出现时间很短(仅见于5~6月间),难以配对鉴定,给分类增加了难度。

1869年,英国坎布里奇(O. P. Cambridge)首次在斯里兰卡采到楼网蛛,但他当时把它误定为漏斗蛛科隅蛛属(*Tezenaria*)

的种类(*T. torvus* 即今之 *P. torvus*)。1878~1890年,瑞典托雷尔(T. Thorell)和法国西蒙(E. Simon)创立了楼网蛛科和科下的两个属:楼网蛛属(*Psecchus*)和华美蛛属(*Fecenia*),但对其分类地位却长期争议不休,如有人认为应归属漏斗蛛科(A. Petrunkevitch, 1923),也有主张归为暗蛛科(A. Lamere, 1931; W. Bristowe, 1938)等。直至1967年,莱蒂南(P. Lehtinen)在对世界筛器蜘蛛系统进行研究时,对楼网蛛科作了基本定论,科特征为具管状网与平展网双套构型;8眼2列,皆黑;第一、二对步足特长;有筛板等。同时,莱蒂南还对两个属的特征作了详细的列表比较。1982年,美国利瓦伊(H. W. Levi)对该科20种蜘蛛作了系统整理,出版关于楼网蛛的首部专著。利瓦伊的书中包括1914年勃兰(L. Berland)在中国贵阳发现的 *P. sinensis*, 1924年钱柏林(R. V. Chamberrin)采自苏州的 *P. mimus*, 1963年申格尔(E. Schenkel)在四川发现的 *P. sinensis* 和李长林在台湾报道的 *P. torvus*。

1985年,尹长民、王家福报道了大陆的楼网蛛属5种,其中除 *P. ghecuanus* (采自云南)为已知种外,另4个新种为 *P. senoculata* (宋大祥, 1988年认为是 *P. mimus* 的异名)具雌雄模式标本, *P. tungpingensis*, *P. kunmingensis* 和 *P. quiyangensis* 均以雌性标本鉴定订立的。1990年,王家福又报道了华美蛛属一新种 *F. hainangensis*, 也仅见雌蛛标本。至此,从所有报道统计,至今中国已记载楼网蛛共2属9种,占全球楼网蛛种类的1/3。

蜘蛛和其它适应陆生的体内受精的节肢动物一样,都具有角质化外生殖器。由于生殖隔离,不同种的生殖器结构不同,雌雄生殖器的结构关系犹如匙锁关系,有何种雄生殖器,就有与之相适应的雌生殖腺(又称外雌器),借以阻止异种间的交配和保持种的相对稳定性,因而生殖器特征早就成为鉴别种的主要依据,成为当代蜘蛛分类学所必需进行的重要工作内容。1948年,康斯托克(J. H. Comstock)在其《蜘蛛学》一书中对此作了较系统的论述。1983年,中国尹长民、王家福对蜘蛛触感器基本类型及其演化作了专题研究,在技术处理上有新的改进。但如前述,楼网蛛雌蛛难得,国内外专家往往仅以采得雌蛛单性的生殖腺结构特征来鉴定种或拟定新种,而对生殖腺的发育变化尚未见专题报道。

1983~1988年,徐亚君对采自皖、浙的 *P. sinoculata* (= *P. mimus*) 的生殖腺发育变化进行了系统观察。楼网蛛生殖腺中央为一中板,形态随种而异; *P. mimus* 中板呈瓶状,而其前亚成蛛、亚成蛛的不同发育阶段,生殖腺角质化轮廓清晰,俨然如另一种的成熟个体。如此各期生殖腺形态发育发生系列的变化,易使据有标本不丰的学者造成分类学上的错误和混淆。

将不同发育阶段的雌蛛生殖腺剥离下来,放置于常温下10%KOH液中浸泡24h以溶化附于生殖腺周的软组织,发现在亚成蛛早期生殖腺仅为左右近乎平行的一对条状阴影,而在稍后的阶段中呈现出已角质化的紫红色括号状的对称结构,此时的生殖腺结构特征,与 *P. mimus* (Levi 1982年认定为 *P. sinensis* 的同种异名是错误的)、*P. sinensis* 和波科克(R. I. Pocock) 1899年在印度发现的 *P. alticeps* (Levi 1982确定为 *P. torvus* 的同种异名)及李长林记述台湾的 *P. torvus* 等的生殖腺图几乎完全一致,难辨彼此。对进一步发育的生殖腺进行KOH处理时,发现生殖腺为双层结构,原外层括号形态系亚成蛛的末次蜕皮,而内层才是成蛛早期的生殖腺形态结构,二者特征殊异;后者内面观出现一大一小球状受精囊及鸟喙状交媾管,生殖腺周缘密生一系列长乳毛,此形态与成蛛较近似,但仍有明显差异,其中还有过渡型的形态变化,直至老熟个体的形态特征。

从上述生殖腺系列化的比较发现,楼网蛛的分类是十分复杂的。除了证实莱蒂南描述斯里兰卡的 *P. torvus* (Lavi, 1982,) 生殖腺呈相向的“3”字形,台湾的 *P. sinensis* 生殖腺呈双锤形与 *P. mimus* 明显有别(雌蛛触感器也各异)可肯定为独立种外,莱蒂南借用他认为是 *P. torvus* 同物异名的 *P. alticeps* (印度标本)的生殖腺早期形态,则与 *P. mimus* 无异,尤其是莱蒂南归纳 *P. mimus* 鉴别特征为“筛板前有一白斑点”,在中国楼网蛛中有此白

斑的并非一种,不能作为鉴别特征。此外,申格尔、李长林等都以亚成蛛生殖腺作为依据鉴定标本,这些都是值得再研究的。有鉴于此,对1985年以后中国发现的诸多以个别的或少数的雌体生殖腺特征订立的新种,也还应经受今后发现较多的地模标本进行雄蛛触肢器鉴定或雌蛛生殖腺系列化比较的考验。

楼网蛛的有关研究自坎布里奇(1869年)至今,主要凭形态特征异同鉴定种并确定其等级,成为分类系统,并研究其地理分布等的系统分类学,这确实“是一门最初步又最广泛的生物学”(辛普森 Simpson, 1961),因为必须经过分类之后才能进一步研究其行为学、生态学、生物地理学等等。从分类学而言,自20世纪50年代起,现代分类学派崛起,如1950年亨尼希(W. Hennig)倡导的“分支分类学”,1957年肖克(R. R. Sokal)等提出的“数值分类学”等正迅猛发展。因而作为森林害虫天敌的重要生态因子楼网蛛而言,不仅多数已知种仅依据雌蛛定种而须采到雄蛛以配对,或更多的雌蛛作生殖腺系列化比较鉴定尚需今后的大量工作,而且还有大量种类有待发现,并应应用现代的分类方法,通过多学科渗透去研究。同时,诸如楼网蛛行为学研究、空间格局、种群、群落等生态学的研究,楼网蛛地理分布局限性的现代生物地理学的研究等,都是广阔、活跃的研究领域,极有发展前途。

#### 参考文献

- 1 Chamberlin R V. Proc V S Natl Mus. 1924, 63(13): 2
- 2 Schenkel H. N 25A 1963, 20~21
- 3 Lehtinen P. Ann Zool Fennici, 1967, 4: 282~283
- 4 Levi H W. The spider genera Psecchrus and Fecenia (araneae: Psecchridae) Panific Insects, 1982, 24: 114~138
- 5 尹长民,等. 湖南师大自然科学学报, 1985, 1: 19~27
- 6 徐亚君. 动物学杂志, 1988, 23(1): 43~45
- 7 宋大祥. 动物学集刊, 1988, (6): 123~125
- 8 王家福, 湖南师大自然科学学报, 1991, 3: 257~258  
(徽州师专徐亚君教授撰, 宋大祥审)

## 人类学

### 人类种族研究 research of homo sapiens race 种族

(或人种)是指体质形态和总体基因内容具有相同特征的人群。人类地域群体的血缘关系,表现在人体外表有着许多类似可遗传的种族特征。对人类种族特征的分析研究,对解决人类本身特有的生物学和历史学的问题,诸如种族起源和分布、混血与相互影响,反对种族主义以及种族、民族、文化在不同社会经济发展阶段和不同自然地理条件下的相互关系,有着重要意义。

瑞典林奈(Linnaeus, 1707~1778)首先提出人类种族的科学分类。1735年,他以形态特征肤色为主把人区分为欧洲白种人、亚洲黄种人、美洲红种人、非洲黑种人。1775年,德国布鲁门巴赫(T. F. Blumenbach, 1752~1810),以发色、肤色、头型等形态特征,提出把人分为高加索人种、蒙古利亚人种、阿美利加人种、尼格罗人种和马来人种。但均未发现澳大利亚人种。直到1870年,英国赫胥黎(T. H. Huxley, 1825~1895)通过对世界人类的颅骨化石的体质测量性状研究,并结合有关种族资料分析后,科学地把人类分为4大人种:澳大利亚人种、尼格罗人种、蒙古人种、欧罗巴人种,为现代人类区分4大人种奠定了基础。此后,世界各国不同时期的人类学家先后提出许多人类种族分类法。1885年,法国勃罗卡(Broca)和托皮那(Topinard)提出人类分3大人种和16个地区种群类型。1900年,但尼克(Denikes)又提出把人区分为6个大种族和29个族群类型。1924年,英国哈顿(A. C. Haddon)以人类头发的特殊差异和其他体质特征相结合,提出分为:(1)羊毛状(卷缩)发种;(2)波状发种;(3)直状发种,并又细分为37个地区种群。

1932~1949年间,中国在人类种族研究方面取得丰硕成果,

主要专著有黄新民的《世界人种问题》、蒋由智的《中国人种考》、吴泽霖的《现代人种》、林惠祥的《世界人种志》、李学曾的《五洲种族地理》和蔡元培的《世界人种志》等。

20世纪50~60年代,人类种族研究已广泛采用人类化石研究成果和现代人类体质形态、血型、肤纹等观察、测量所积累的统计分析资料。当时,许多学者运用辩证唯物主义的生物学观点研究人类种族特征、种族起源及其地域分布的历史和现状。诸如,前苏联对种族系统分类影响较大有捷别茨(T. Ф. Дебеу.)、切博克萨罗夫(H. H. Чебоксаров)、涅斯屠尔赫(M. Ф. Нестурх)等,美国蒙坦古(M. F. Ashley Montagu)、日本小山氏和近藤四郎以及横山又次郎等,还有库恩(C. S. Coon)、托马(A. Thoma)等许多欧美学者。他们共同关注的中心议题有人类起源于一祖还是起源于多祖,现代人种起源于一元还是多元,现代人类种族系统分类等。

20世纪70~80年代,人类种族研究除应用以往方法外,还应用分子生物学等先进的新技术取得重大进展,但现代各大人种起源仍为悬而未决的问题,存在着枝状大烛台模式(或系统说)和诺亚方舟模式(或迁徙说、代替说)之争。

系统说 认为各大人种是遍布于旧大陆的直立人独立地进化到古代智人,再发展为现代人。理由是现代地理人种的解剖特征有与史前人类特征相符的征状,通常称之为地方连续性。1946年,魏敦瑞(Weidenreich)提出现代四大人种,分别是由中国北京直立人、印尼爪哇直立人、非洲赞比亚的布罗肯山人和斯虎尔类型的早期智人,演化发展为现代黄种人、澳大利亚棕种人、非洲黑种人和欧洲的白种人。1962年库恩和1965年泰辛托希(N. W. G. Macintosh)的著作中也表达了类似意见。关于库恩提出的直立人种的亚种问题,已波及中国,中国吴汝康和许多外国人类学家对“亚种”持否定的看法。

布雷斯和沃尔波夫(Brose & Wolpoff)先后指出,在旧石器时代中期的人类,由于有了更特化的工具来代替以前用前部牙齿,强调文化和咀嚼功能的改变,促使在整个旧大陆旧石器时代晚期已有地区分异的远古智人在当地转变成现代智人。中国学者曾提出类似的观点。

迁徙说、代替说 设想现代人类起源于某一特定区域,通过迁徙而散布到旧大陆的其它地方。在这种诺亚方舟模式中,当地的早期智人可能完全被新来者所取代。这样,似乎就有了一个单独的起源和范围广泛的迁徙过程,这个单一的地区现在还不能完全肯定,现已有西亚(即地中海东岸及其附近地区)、西欧和非洲这3种单独起源说。许多外国学者,如前苏联科学家都拥护单元论。即现代人类形成于一个地区。(1)西亚起源说。大约在旧石器时代中晚期相交之时,在地中海东岸开始的人类智人化过程,这些迁徙流动着的智化种群,从地中海东岸向西北扩展到欧洲,向南扩展到非洲,向东扩展到亚洲大陆腹地直到太平洋海岸。(2)西欧起源说。认为西欧有旧石器时代中期最好的化石记录,西欧有许多辉煌的考古学遗址,表明旧石器中期的工具制作技术向晚期工艺技巧转化的材料。特别是法国南部和西班牙北部有壁画的洞穴,使人相信欧洲就是现代智人诞生地。(3)非洲起源说。英国剑桥大学于1987年3月举行了“现代人类的起源与散布行为和生物学方面的透视”讨论会。3个研究方向中的每一个都认为现代智人起源于非洲,继而取代了其他地方更原始的人类,这种意见得到更有力的支持。例如,威尔逊和他的同事们,用一种分子生物学的方法所作的科学实验结论认为:“所有的现代人类都是从大约20万年前生活于非洲的一个人种派生出来的,在以后约10万年间通过迁徙散布到旧大陆的其他地方。他们认为,迁徙中很少或没有出现过与当地已经存在的古代早期智人发生混种繁殖”。芝加哥大学理查德·克莱因说:“最有说服力的事实来自克萊西河口岸”。史密斯说:“这个证据使我相信非洲可能是现代各人种的发源地,但我仍不接受完全取代说”。中国人类学家一般也不同意完全取代说。他们认为,“中国发现的人类化石不仅为亚洲黄种人的起源提供了重要的根据,也为澳洲人和美洲人

起源提供了不可缺少的证据”。

根据现有的各方面的证据和有关种族特征地域分布的新资料,关于人类种族最初分为澳大利亚人种、尼格罗人种、蒙古人种和欧罗巴人种这四大种群的论点日益得到证实。

外国遗传学家,如杜比宁等在其著作中根据血液因素的遗传特征,证明人类十分明显地分为东部的澳大利亚人种和蒙古人种,西部的尼格罗人种和欧罗巴人种。

研究牙齿结构及其在时空上变化的种族牙科学表明,依据“铲形门齿”和“卡提里隆起”的种族遗传特征,也可说明人类分为上述东西方两大支和4大人种。

肤纹和色盲等遗传特征研究也为种族区分为东西方种群提供了科学依据。东方种群中的斗型纹线明显多于西方种群;色盲在东方种群少些,西方种群多些。

根据上述血液、牙齿、肤纹等许多特征及其他非适应性特征说明,澳大利亚人种与尼格罗人种有显著差异。澳大利亚人种与尼格罗人种的血缘关系并不比其他各大种群近些。所谓“赤道人种”的含义不具有起源上的意义,而只具有地域性描述的性质。1975~1976年间,布鲁克编著的各大种族和地区种族及混合过渡种群类型和人口数表,也分为人尼格罗人种、欧罗巴人种、蒙古人种(亚美人种)和澳大利亚人种。

根据第12届国际人类学与民族学大会有关文件,对1988年~2000年人类学和民族学提出展望,至21世纪初的研究热点为:(1)腊玛古猿在人类进化系统中的地位。(2)人类起源的时间和地点等最根本的问题。(3)各大人种是如何起源的。(4)南方古猿之前存在着一个很大的空白,至今没有任何肯定的化石资料。(5)直立人的起源与系统地位。今后,将进一步扩大对世界人类的群体遗传学的免疫球蛋白同种异型Gm因子和线粒体脱氧核糖酸mtDNA等分子生物化学方法以及统计多元分析等新技术、新方法的应用研究,并进一步应用古地磁测定法和钾氩测定法、扫描电镜等新技术和新方法,准确界定古人类起源的绝对年代。

#### 参考文献

- 1 吴汝康,自然杂志,1978,1(3):153~159
- 2 Huchington H N and others. The living Races of Mankind, 1985
- 3 Service Elman R. A century of controversy Ethnological issues from, 1985, 1860~1960
- 4 赵桐茂,等.人类学学报,1987,6(1):1~8
- 5 王令红.人类学学报,1987,6(1)10~15
- 6 赵俊智,金天明.民族、种族、文化,1989,108~199
- 7 吴汝康.古人类学,1989,191~211
- 8 Helms Jantib. Black and white Racial Edenhiy Theory Research and Practice. New York: Greenwood press. 1990
- 9 吴汝康.人类学学报,1992,11(2)109~111

(上海自然博物馆郭常富撰)

### 中国的猿人化石 ape-man of china

1894年始有“猿人”这个名称。1890年荷兰杜布亚(Dubois),在印度尼西亚旅行,发现一块化石;1891年,他又在梭罗河畔找到一个头盖骨化石;以后再次找到人的股骨化石。1894年杜布亚把这些化石定名为*Pithecanthropus erectus*,前面的属名中*Pithec*在希腊语里是猴类之意,*anthropus*在希腊语中是人,两者合在一起,译成汉语就是人们常说的“猿人”。杜布亚从腿骨形态推测这种人可以直立行走,就以此作为种名*erectus*。属、种合在一起,译成汉语就称为直立猿人。1940年魏敦瑞(Weidenreich)把爪哇发现的化石称为爪哇直立人(*Homo erectus javanensis*)。1951年梅尔(Mayer)又提出猿人、古人、新人合为一属,1958年7月,在一次国际会议上,根据命名优先权的规定,采用林奈(Linnaeus)在1758年命名的*Homo*这个属,正式取消了*Pithecanthropus*属名,保留了原先的*erectus*种名,并沿用至今。“猿人”的属名修订以后,杜布亚建立的种名保留下来,把相同类型的种名作为亚种名看待,如周口

店北京猿人,改名为直立人北京亚种*Homo erectus pekinensis*,爪哇猿人改名为直立人同名亚种*Homo erectus erectus*。但是,亚种的概念也随时间发生变化,有些古人类学家主张不建亚种。20世纪20年代,在北京附近的周口店发现了猿人头盖骨及其文化遗存,证明了这种人会用火、打制石器,以狩猎、采集为生。为此,杜布亚在爪哇发现的化石,也就被人们承认是猿人了。第二次世界大战时丢失了终止了周口店的发掘。建国以后,立即恢复了发掘工作。于1951年发现了5个牙齿;1959年发现了一块老年妇女的下颌骨;1966年发现了一块颞骨及连有顶骨的枕骨。1966年发现的这些化石与1934年在附近发现的颞骨(现仅存模型)等正好是同属一个头骨,结合在一起,构成了较完整的头盖骨,也就是称为5号头骨的头盖骨。中国古人类学发展,除周口店这个含猿人的化石地点外,相继在我国北方和南方发现了多处含人化石的地点。1963年在陕西蓝田陈家窝子发现一下颌,次年在蓝田公王岭又发现一个不太完整的头骨。这些材料统称为蓝田猿人。1991年,经薛祥煦研究,认为陈家窝子的猿人下颌骨与公王岭的头骨,应分属不同的亚种,前者订名为直立人蓝田亚种(*Homo erectus lantianensis*),后者订名为直立人公王岭亚种(*Homo erectus gongwanglingensis*)。进入80年代,在安徽和县陶店发现一较完整的头骨,被称作和县猿人,和县猿人材料还包括一块下颌及9个牙齿;1985和1986年在四川省资中县庙宇镇龙骨坡一洞穴堆积里,发现了一块猿人下颌,其上还带有2个牙齿(P<sup>4</sup>-M<sup>1</sup>)。另外还有1个上门齿,被称为巫山猿人;湖北省郧县清幽乡弥陀寺出土的2个较完整的头骨,也属于猿人,但目前尚无正式文章发表。目前,中国境内发现猿人化石共有10个地点。

上述10个猿人化石地点中,以巫山猿人最为古老,地质时代为早更新世早期,距今204~201万a;元谋猿人、公王岭蓝田猿人为早更新世晚期,前者距今175万a(近来有不少学者认为不大于100万a),后者距今115万a,陈家窝蓝田猿人为中更新世,距今65万a。周口店的北京猿人为中更世,在周口店生活的时间较长,大约在距今20~50万a;和县猿人的时代稍晚,距今约25万a,其余的郧县猿人、南召人等为中更新世晚期。上述猿人化石中,巫山猿人、北京猿人、和县猿人、郧县龙骨洞猿人、庙后山人均发现在溶洞里;元谋猿人、蓝田猿人、郧县清幽乡猿人均出自河流阶地或者土状堆积中。

猿人的共同形态特点是:头盖骨前方、眼眶上部形成了粗壮的圆枕,眼眶后部收缩得较窄,额部低平,有些头骨在头顶中间从额骨到顶骨有低的矢状脊,头后部枕骨上有一加厚部分称为枕圆枕,在枕圆枕处使枕骨形成一个锐角,其下部为颈部肌肉附着面。脑量在1000ml左右。猿人下颌骨前部是向后收缩的,没有下颌颌;中更新世的猿人牙齿通常较大,门齿基部有一结节,两侧有隆起的脊,形成一铲形,故称铲形门齿,两侧的牙齿通常也较大,特别是齿根虽不太长,但较粗;早更新世的巫山猿人门齿也是铲形门齿,但其基部结节不如中更新世猿人门齿的大;下第2前臼齿后部略长,第1下臼齿不如中更新世猿人的大,很接近现代人的大小,然而,这两个牙齿有长而粗的齿根。猿人的肱骨及大腿骨骨壁比较厚,中间的髓腔比较小。有些学者根据肢骨推测猿人的身高在1.6m左右,其体重是40~50kg。

人类学界把猿人的演化分为两个阶段,即早期猿人和晚期猿人,上述猿人化石都属于晚期猿人。目前在中国还没有被公认的早期猿人。早期猿人被认为是能人(*Homo habilis*)。这种人类化石起初发现于非洲坦桑尼亚的奥杜威峡谷。其材料包括下颌、头骨碎片及手骨,后来又在肯尼亚的特卡纳湖的东岸库比福勒和南非发现了能人化石。它们生活在150~200万a,根据能人材料的特征,人类学家认为它们是直立人的祖先。

能与南方古猿比较,头骨较大,脑量大约在600~800ml,头骨较薄,眉脊不像直立人那样成为圆枕,头也比较圆,不像直立人那么低,枕骨上也没有明显的圆枕,枕骨下部颈肌附着处比直立人短,面部较像南方古猿,鼻骨扁,面颊较突,前面的牙没有变小,臼齿比较窄,特别是下臼齿较窄。这种人能制造简单的工具。

在能人之前,人类更早的祖先现在还不清楚,曾经一度被认为是人类祖先的拉玛古猿,近些年来研究这类化石的学者则认为拉玛古猿和西瓦古猿是两性之差,应是猩猩的祖先。因而能人之前,人类演化的环节就缺失了。又由于人类学界一些人认为能人是早期猿人,所以人类起源于非洲。然而也有不少人认为,亚洲人类化石很丰富,且70年代末期以来,在中国云南禄丰发现的化石也很丰富,很可能人类的祖先来自亚洲,这是一个老问题,而且是一个世纪以来都未能解决的问题,之所以进展甚微,主要原因是缺乏可靠的化石证据。由此可见,有关人类起源之谜,有待更多的学者去探索和发现。研究的课题有:(1)除上述所提的有关人类起源于亚洲还是非洲的问题以外,还有中国直立人如北京猿人是否是智人的直接祖先;(2)在生物学领域里,对群体的研究是很重要的,现在所发现的直立人化石多为不整的颅骨和牙齿,且数也少。因此,材料的积累成了世人所盼;(3)直立人的直接祖先——南方古猿还有疑意;(4)直立人的年代,由于测试手段和地区性的差异,尽管在进化水平上是一致的,但两者的年代却相差甚远。

### 参考文献

- 1 吴汝康,等著.人类发展史.北京:北京科学出版社,1978
- 2 吴汝康,吴新智,张森水,主编.中国远古人类.北京:北京科学出版社,1989
- 3 黄万波,等主编.巫山猿人遗址.北京:北京海洋出版社,1991  
(中国科学院顾玉琨副研究员、黄万波研究员撰)

表 1

中国的智人化石

| 化石名称 | 出土地点                        | 标本                                                                  | 距今年代<br>(万年) | 发现年代                |
|------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------|
| 大荔人  | 陕西省大荔县段家山解放村边的甜水沟           | 完整头骨一个                                                              | 18-23        | 1978                |
| 金牛山人 | 辽宁省营口市金牛山                   | 一个相当完整的头骨及体骨                                                        | 16-31        | 1984                |
| 许家窑人 | 山西省阳高县古城公社许家窑村东南 1km 的梨益沟西岸 | 顶骨 12 块、枕骨 2 块、颞骨和下颌各一块,儿童上颌一块,单个牙齿 3 个                             | 10-12        | 1976、1977<br>和 1979 |
| 丁村人  | 山西省襄汾县丁村                    | 3 个牙齿及婴儿顶骨残片一块                                                      | 16-21        | 1953、1976           |
| 马坝人  | 广东曲江马坝乡狮子山                  | 一个头盖骨                                                               | 12.9         | 1958                |
| 银山人  | 安徽省巢湖市银屏区岱山公社               | 枕骨及上颌骨各一块                                                           | 22(?)        | 1982、1983           |
| 长阳人  | 湖北省长阳县赵家堰区黄家湾乡下钟家湾龙洞        | 残破上颌骨和一枚白齿                                                          | 19           | 1956                |
| 山顶洞人 | 北京周口店龙骨山山顶洞                 | 完整头骨 3 个、头骨残片 3 块、下颌骨 4 件、下颌残片 3 块、牙齿数十个<br>(所有标本于 1941 年与北京猿人一起丢失) | 2            | 1933                |
| 柳江人  | 广西柳江县新兴农场通天岩                | 完整头骨 1 个、胸椎 4 块(其上带有不等长的肋骨)、腰椎、骶椎、右侧髌骨及股骨一段                         | >6.7         | 1958                |
| 资阳人  | 四川资阳县黄鳝溪                    | 头骨化石一个                                                              | 0.7          | 1951                |
| 穿洞人  | 贵州省普定县城北 6km 的穿洞            | 挤压变形的头骨(包括顶骨、枕骨、颞骨及部分额骨)                                            |              | 1982                |

有关智人的阶段论,大致有两种意见:一是将智人的演化分成两个阶段:一段称为早期智人;一段称为晚期智人。中国的早期智人和晚期智人在上表中以长阳人及山顶洞人之间为分界;即大荔人、金牛山人、许家窑人、丁村人、马坝人、银山人、长阳人属于早期智人;山顶洞人、柳江人、资阳人、穿洞人等为晚期智人。两个时期的智人在形态上的区别在于早期智人是直立人与晚期智人之间的过渡类型,早期智人有一发育的眶上圆枕,该圆枕不像直立人那样与颞骨之间有深凹,但还相当突出,前额部分不像直立人那样低平,而是已经隆起,头后的枕骨高度也增加,颌部已向后退缩,即面部较直立人垂直。牙齿仍然比较粗大,这些特征分别可以在马坝人、大荔人、许家窑人等化石材料上可以见到。晚期智人则与现代人差别甚少,其眶上圆枕被明显的眉脊所代替,有些眉脊甚短,额部高起;在女性头骨上出现额结节,顶骨部也成为拱形,枕圆枕不明显或变短和变低,枕骨和鼻骨有所增高,脑量平均达到 1 500ml 左右,牙齿较直立人或早期智人缩小,无论是头骨还是肢骨其骨壁变薄,髓腔相应的增大。大腿骨骨干较

**中国的智人化石** sapiency man of china 智人(*Homo sapiens*),包括化石智人和现代人,中国发现的化石智人十分丰富(见下表)。

除表中记述的化石外,还有在周口店龙骨山新洞(原第四地点)、辽宁本溪庙后山、辽宁喀左鸽子洞、陕西长武、呈贡龙潭山、河南浙川、贵州桐梓、内蒙自治区的河套人、广西来宾人、云南丽江人、陕西的黄龙人等,大多数材料为牙齿,也有少量头骨等残片。

智人的起源有两种不同的看法,一种是从各地不同的直立人发展而来。持这种理论的学者认为,现代人的形态差别是有很强地方性特征,进而提出:中国猿人是现代人的祖先,中间有马坝人和大荔人等过渡类型的早期智人;印度尼西亚的爪哇直立人,是经路林人到现代人;欧洲是由海德堡人到现代人。另一种意见是现代人的起源源于一个共同的古代人,理由是现代智人的解剖结构相似,不可能在不同的地区形成。由 DNA 分析显示,在 4 万年前,欧洲人与亚洲人是从共同祖先分化来的;11 万年前,欧、亚人与非洲人已经分离。还有学者认为:现代人起源于非洲的一个直立人的祖先,然后扩散到欧、亚大陆,以后直立人又回归非洲,再演化为现代人。以上种种见解,均没有充足的说服力,例如 DNA 所测的现代人之关系,对其分离年代是无法确定的;直立人往返的迁徙即使存在,也不可能彻底。更何况直立人迁徙还要受到各种自然条件的限制。总之,这还有待人类学进一步的探索。

直立人直。另一种意见是将智人划分为化石阶段和现代人阶段。这两个阶段的形态是明显的,不再赘述。不过人类学家多采用前一种划分方案。

智人出现的地质时代为晚更新世,而晚更新世的年代在地质年表上为 12~1 万 a。但是,从目前的年代测定看,例如轴系法测得的大荔人为 18~23 万 a,巢湖银山人为 22a 年。这些数字恰好体现了智人与直立人生活在同一时期或同一自然环境里。巢湖银山人同和县人便是一例。前者属早期智人,后者属晚期猿人,两者相距不足 50 000m。出现这种情况的主要依据是年代测定。而不是人类学自身的特征显示的结果。由此看来,这种演化上的交叉现象,除了加强年代学的研究,还必需深化人类学的研究。

智人演化的热点包括:(1)智人起源于一个地区即一个中心地还是有多个起源中心;(2)智人是由直立人进化而来,还是直立人的某一支进化而来或智人是否是现代人的直接祖先;(3)智人化石的形态差别与种族的起源有无联系,是否是个体差异;(4)智人出现的时间,有学者认为有个阶段与后期的直立人是同

步的。

总之,直立人和智人的研究热点较多,古人类学家还需在欧、亚、非大陆寻找遗迹,进行不懈的探索。

#### 参考文献

- 1 陈铁梅,原恩训,高世君.人类学学报,1984,3:259~269.
- 2 原恩训,等.华南若干旧石器时代地点的轴系年代.人类学学报,1986,5:179~190
- 3 吴汝康,吴新智,张森水.中国远古人类.北京:科学出版社,1989

(中国科学院顾玉珉副研究员、黄万波研究员撰)

**人类进化** 人类进化的过程是人类历史最初的一段。1856年,德国杜塞尔多夫附近的尼安德河谷的采石工人发现一些化石,它们一度被学术界认为是近代病态的或不正常的人骨。随着越来越多的类似化石及伴生动物和石器被发现,这类化石才被确认为古代人类所遗留。1859年,达尔文(C. Darwin)出版了《物种起源》;1863年赫胥黎(T. H. Huxley)出版了《人在自然界中的位置》;1871年达尔文发表了《人类起源》,奠定了人类起源于古猿的理论基础。1891年,杜布哇(E. Dubois)在印尼爪哇的特里尼儿河畔发现了直立猿人的化石,使人类的历史向前推进大约50万年。1929年,裴文中在北京周口店发现了一个完整的猿人头盖骨,才使该论断得到广泛的承认。1925年,达特(R. Dart)宣布在南非的汤恩发现了更早新世的人类幼儿头骨,命名为南方古猿非洲种。1964年,利基(L. S. B. Leakey)等将60年代在坦桑尼亚的奥杜瓦依峡谷发现的一些化石定名为能人,作为人属最早的种;结合他在同一峡谷发现的大约180万年前的石器,便把人类的历史又向前推了100余万年。1973年约翰逊(D. Johanson)等在埃塞俄比亚的阿法尔地区发现一批300多万年前化石,命名为南方古猿阿法种,因为其形态表明这种动物能直立行走,故被认为代表最早的人类,但是迄今尚未发现大约同时代的石器。

人类进化可分3个阶段,即南方古猿(含能人)、直立人和智人。南方古猿阿法种的标本代表最古老的人科动物。就牙齿和头骨而言,与其说他们像人,还不如说更像中新世的古猿。例如其犬齿很大,上下犬齿稍有重叠,下第一前臼齿呈扇形,两侧的齿列平行;头顶的矢状脊和头后的枕脊相连;脑量很小,大的约500ml,小的可能不足400ml;他们的上肢与躯干长度之比大于现代人,腕骨、手骨和脚骨与现代人很不同;男女身高相差颇大,分别约为1.5m和1.2m,这种性别差异与现生的实行一夫多妻制的猿类相近;肢骨和脚印表明他们在地面时用两脚行走,屈膝屈髋,效果比现代人差得多,也有相当长的时间在树上攀爬。

较晚的南方古猿有两类,即粗壮型的和细致型的。粗壮型的生活在100万~200万年前。其中最著名的标本是1959年在坦桑尼亚奥杜瓦伊发现的,当时定名为“东方人”的头骨;后来与肯尼亚发现的同类标本均被称为南方古猿包氏种。粗壮型标本也发现于南非,这些标本则被命名为南方古猿粗壮种。1985年从肯尼亚图尔卡纳湖以西发现一个颇完整的头骨(KNM-WT17 000),距今约250万年,被称为南方古猿埃塞俄比亚种,其脑量仅410ml,被认为是粗壮型南方古猿的祖先。细致型南方古猿的学名是*Australopithecus africanus*,面部较粗壮型为轻巧,仅发现于南非。这两型南方古猿后部牙齿相对地都比现代人大多,粗壮型的尤甚。他们的下颌因而也粗壮得多,头骨结构的差异也主要基于咀嚼力量的不同。细致型南方古猿的身高约为107~145cm,粗壮型的约为145~165cm。

能与南方古猿最大的区别在脑量。能人脑量平均为646ml,粗壮型的和细致型的南方古猿的平均脑量分别为504和450ml。前齿较大也是能人区别于南方古猿的一个特点。能与粗壮型南方古猿差别明显,但与细致南方古猿就不易区分。1972年发现的KNM-ER 1 470号能人头骨脑量达775ml,大大超出已知的南方古猿脑量的范围。能人身材可能比南方古猿为高。能人的时代为150万~240万年前。从200万年前开始,人属动物

和南方古猿属动物在非洲同时并存了至少100万年。

直立人不再局限于非洲,还扩展到亚洲和欧洲。他们身材较高,脑更大,文化遗物更丰富,更精致。直立人的头骨比能人的和南方古猿的更接近现代人,但与后者相比仍有显著差别,如脑量较小(775~1 225ml)、颅顶较低、前额扁塌、有发达的眉脊和枕脊、脑颅在眼眶后显著缩狭、枕部与项部之间成角状转折、脑颅最宽处接近颅底、嘴部较向前突、无颈、牙齿较大、髓腔为牛齿型等。

最完全的直立人骨架是发现于肯尼亚图尔卡纳湖以西的KNM-WT15 000号标本,包括面骨及许多体骨和肢骨。这个骨架属于一个大约12岁的男孩,身高大约165cm。当他成年时身高可达182cm,其脑量估计为900ml。体骨和肢骨均与现代人基本一致。非洲的直立人还发现于肯尼亚、坦桑尼亚、阿尔及利亚、摩洛哥、埃塞俄比亚等地。

中国也发现过许多直立人化石,最著名是北京周口店的属于40余个个体的遗骨。云南元谋两枚上门齿可能是中国最早的直立人标本。现有的中国最早的直立人头骨发现于陕西蓝田公王岭,距今约100万年。中国最晚的直立人头骨发现于安徽和县,年代约为20余万年。

印度尼西亚的爪哇也发现过不少直立人化石,如特里尼儿和桑吉兰等地的标本。欧洲也有一些材料被归入直立人,如海德堡人、阿拉戈人等等。

早期智人的化石比直立人多,但分布地区并不明显扩大,形态上还保存一些与直立人相似的特征,如眉脊、枕脊、低的颅顶、突出的嘴部等,但一般比直立人为弱。早期智人中较著名的有欧洲的尼安德特人、中国的大荔人、非洲赞比亚的布罗肯山人等。

晚期智人头骨的形态与现代人的已无明显差别,故又被称为解剖学上现代的人类。他们的分布扩展到大洋洲和美洲。较为重要的化石发现于中国的柳江和山顶洞、西亚的加夫洋和斯克虎、欧洲的克鲁马农和普舍莫斯提、非洲的奥莫和博尔德洞以及澳洲的蒙戈湖和科阿等地。

由于人类化石不易发现,数量不丰,年代测定又不易十分准确,故关于人类进化争论甚多。例如人科起源于何地的何种古猿,能人和南方古猿是否是同时并存的两支古人类,谁是最初工具的制造者,非洲、亚洲和欧洲的一般被归于直立人的标本是否各自代表不同的种或亚种,直立人是否是人类进化的旁支等。研究的热点集中于两个问题:一是最早人类的起源,二是解剖学上现代人的起源。前一个问题的重点是人类起源于何种古猿,虽然有些古猿如拉玛古猿等一度曾被推测为人类祖先,但至今未发现任何化石古猿堪称人科近祖。围绕后一个问题,一派赞成多地区起源论,认为亚、非、欧和澳洲的解剖学上的现代人分别起源于各该洲或邻近地区的较早人类;另一派主张替代论,认为各地的现代人在10万~20万年前都起源于非洲或西亚,然后扩散到其他各地,替代当地的原住人群。今后解决这些问题可能取得的进展则依赖于发现更多的化石并作深入的研究。

#### 参考文献

- 1 吴汝康,等.人类发展史.北京:科学出版社,1978.1~363
- 2 吴汝康.古人类学.北京:文物出版社,1989.1~256
- 3 吴汝康,等.中国远古人类.北京:科学出版社,1989.1~437
- 4 Poirier F E. Understanding Human Evolution. 1990.1~356 Prentice-Hall Inc

(中国科学院古脊椎动物与古人类研究所吴新智教授撰)

**体质人类学** physical anthropology 又称“生物人类学”、“自然人类学”、“狭义人类学”、“人类学”。是人类学(Anthropology)的主要分支学科之一,是研究人类群体体质特征及其形成、发展规律的科学。通过对测量人体各部位、比较解剖、研究遗传变异和调查民族体质等方法,探讨人类自身的起源、分布、演化和发展、人种的形成以及现代人种、种族、民族的体质特征及分布等问题,主要分支学科有:人体测量学、人种学(或种族

人类学)、人类进化学、体质构造人类学、人类遗传学、化石人类学、骨骼人类学、人体形态学、生理人类学等。英、美两国常将体质人类学与文化人类学(Cultural Anthropology)并列为人类学的两大部分,而欧洲大陆的人类学则专指对人类生物性的研究,实际上仅指体质人类学。

体质人类学又分为古人类学(Paleoanthropology)和今人类学(Neoanthropology)两部分。古人类学是通过古人类及猿类化石的研究,寻找人类的起源和分析古人类早期生活、生产和社会活动形式。古人类学的研究与体质学、古生物学、考古学以及现代的物理、生理、化学等自然科学有密切关系。今人类学研究现代人类体质特征和类型以及人群的生理、生化特点,灵长类的行为特征、群体遗传变异的规律等。今人类学的研究与人体形态学、解剖学、生理学、心理学、生态学、甚至社会科学许多方面的研究有关系,由此也可以看出体质人类学的研究成果有较大的实用价值。例如许多工业日用品的生产规格与型号的标准,服装鞋帽工业中各种产品以及各种规格型号的设计标准重工业部门和国防部门设计机械和研制现代化武器,都需要大量的人体测量资料;公安部门刑法技术的研究也对人类提出了许多新课题;医学卫生和体育部门也要求对各地区不同年龄时期的居民进行人类学的研究和测量统计。体质人类学不仅是一门理论的、而且也是实用的科学。

国外体质人类学的研究结合形态学、生态学、生理学、解剖学、心理学、考古学、优生学等多种学科,运用现代科学技术,取得了很多研究成果,可以说对体质人类学的研究既有一定的广度,又有一定的深度。

人类学创始于18世纪末19世纪初,德国布鲁门巴(Brumenbe)最早提出根据颅骨测量来给人种分类。德国布罗卡(Broca)发明了几种人类学测量器,开创了颅骨学和人体测量法。人类学这个名词出现于19世纪初,法国物理学家种让·雅克·昂佩勒(J. Y. Aenpelr)在1830年制订科学分类表时,把它划为一个单独学科。早期人类学主要研究各人种之间体质方面的差异。1863年英国在伦敦成立人类学会,才把人类体质的研究独立出来,称之为体质人类学。特别是达尔文(Darwin)的进化论为体质人类学,研究人类起源问题奠定了基础。1856年在德国尼安德特河谷发现的古人类化石及其他古人类化石,为人类起源、体质形态和人类种族研究,为从人类学中专门分出体质人类学创造了条件。人类学包括体质和文化两大部分。美国波亚士(Poyas)继承了德国维尔(Vierchu)的传统,对成人生长、儿童发育、影响智力发展等因素进行了研究他在《民初心理》一书中说,人类各种族的体质形态基本相同,只因地理、气候、社会、文化、经济、心理的因素而产生了不同的量变。美国辛格顿(Singleton)在《应用人类学》一书中把人类学分为四大部分:体质人类学,研究人体的生物特性;文化人类学,研究科学是怎样发展的,并阐明科学的价值;语言人类学,研究人类的语言问题;考古人类学,研究史前人类的发展,利用考古学资料进行研究。美国韦士勒(Weshler)说:“人类学是研究人的科学,包括所有把人类当作社会的动物而加以讨论的问题。”英国马列(Malley)说:“人类学是沉浸于演进的概念之全部人类史,以演进中的人类为主题,研究在某时代某地方的人类,肉体与灵魂二方面皆加以研究。”伦敦大学人类学专家马林瑞斯奇(Mallinuskki)说:“人类学是研究人类及其在各种发展过程中的文化的科学,包括人类的躯体、种族的差异、文明、社会构造,以及对于环境之心灵的反应等问题的研究。”美国弗兰茨·波亚士所著《人类学与现代生活》一书早在1945年就已译成中文并由商务印书馆出版。

日本在第二次世界大战以前采用欧洲大陆式,1934年建立了日本民族学会。早在1884年就成立的日本人类学会是研究体质的。战后随着美国学术思想的渗透,目前日本同时使用民族学和文化人类学两个用语,学者们根据自己的爱好任选其一。大阪国立民族学博物馆是日本民族学的研究中心,高等学校逐渐用文化人类学来代替民族学。朝鲜、越南采用欧洲大陆式即以体质人

类学作为学科名称。

20世纪20年代初,通过翻译原著以及当时留学德、法等国学习民族学的老一辈学者如蔡元培等先生的介绍,民族学传入中国,在当时的中央研究院建立了民族学研究机构。1934年成立中国民族学会。20~30年代留美、英学习人类学的逐渐增多,其后我国既用“民族学”也用“人类学”来称呼这一科学。各地相继建立和增设教学、研究机构,北方以中央研究院和燕京、清华、南开、辅仁大学为中心,南方以中山、岭南、中央、金陵、厦大、复旦、四川、云南等大学为中心,有十几所高等学院开设人类学或民族学课程。1946年至1948年间,暨南、清华、中山、浙江四所大学先后成立人类学系,1949年台湾大学设立考古人类学系(后称改人类学系)。20年代至40年代的主要研究成果有:黄新民的《世界人种问题》、陈翰笙的《人类的历史》、蒋由智的《中国人种考》、裴文中的《中国猿人化石的发现》、吴泽霖的《现代人种》、林惠祥的《世界人种志》、张资平的《人类进化论》等著作。同时还翻译了一些国外体质人类学著作。建国初期体质人类学的研究主要在中国科学院古脊椎动物与古人类研究所进行。1976年后人类学得到了重视并有了较大的发展。1981年在北京成立了中国人类学会。一些体质人类学工作者对国内少数民族进行了体质调查,编印了《中国八个民族调查报告》一书。同年,中山大学复办人类学系,在学科内容上包括文化人类学(民族、考古学、语言学)和体质人类学,厦门大学人类学系与台湾大学人类学系都属这一类型。1985年中国人类学会和上海人类学会在复旦大学举办了体质人类学培训班,复旦大学编印了《人体测量手册》一书,较详细地介绍了人体测量和骨骼测量的技术和方法。1979年至1986年国家教委、国家体委和卫生部组织了两次全国范围内青少年体质、形态的普查,收集了许多有价值的资料,为研究中国青少年体质、形态特征提供了大量的参考资料。

当前,世界上有的国家、有的人类学者专门研究人类学在生活、生产和生命有关科技上的应用问题,并使之理论化、序列化,成为一种学科体系,命名为“应用人类学”或称“实用人类学”。应用人类学的分支学科也正在不断扩大。人类学在科技上的应用效果比较明显,更容易被人们发现。这主要是人类学学科内部的分支学科体质人类学和文化人类学的结合,或人类学与其他学科如物理学、生物化学、分子生物学、医学和宇航学等结合,可以发挥多种性综合研究的作用所致。

#### 参考文献

- 1 黄新美. 体质人类学基础. 广州:科学普及出版社广州分社, 1983. 1~3
- 2 中国人类学学会. 人类学研究. 广州:中国社会科学出版社, 1984. 27~29
- 3 Tyloy E B. Primitive Culture, New York, Harper To Chhoo-oks, 1987. 41~44
- 4 大谷武一译. 体育序说(日文第5版), 1988. 65~72
- 5 拉德克利-布朗. 社会人类学方法(中译本). 济南:山东人民出版社, 1988. 31
- 6 当代体育新学科编写组. 当代体育新学科. 成都:四川教育出版社, 1990. 45~54
- 7 蒋广学, 朱剑. 世界文化词典. 长沙:湖南出版社, 1990. 31
- 8 黄淑娟. 中山大学学报(社科版), 1991, 2, 80~87

(华南师范大学关文明副教授撰)

**人体测量学** anthropometry 它是用测量方法研究人体(尸体与活体)体质特征的科学,是人类学的一门分支学科,隶属于人体形态学和机能学的范畴。用人体测量方法可以了解人类在系统发育和个体发育过程中各种变化现象,也有助于了解古代的及当代的各个不同种族体质构造的异同和不同生活环境下人体变化的规律。因此,人体测量技术对于人类进化和对人体形态结构、生理机能的研究均具有重要意义。随着现代科学技术的发展,各学科之间相互渗透,人体测量学早已超越传统的人类学范



围,不仅与生物医学工程学、人体工程学、仿生学、法医人类学等各学科相结合,而且成为这些学科的重要组成部分;此外,还与工业、国防、宇航、医疗卫生、教育、体育、艺术等部门有着密切关系。

早在两千多年前中国已有对人体测量记载。但是,真正系统的人体测量工作则是从18世纪开始,由欧洲一些国家的科学家所创立,如法国道本顿(L. J. Daubenton)、荷兰凯伯(P. Camper)、德国马丁(R. Martin)、英国皮尔逊(K. Pearson)、美国摩尔顿(S. G. Morton)、意大利塞尔吉(G. Sergi)、俄国阿努钦(И. Анучин)等。他们在建立测量方法或研制测量仪器,为人体测量学的建立和发展作出了贡献,他们的许多著作和详细阐述的人体测量方法,至今仍为各国人类学家所采用。到19世纪末,各国普遍开展了人体测量工作,但为了使测量数据与研究成果能互相比较,必须有统一的国际标准,于是1892年在莫斯科、1906年在摩纳哥和1912年在瑞士日内瓦举行的国际史前人类学与考古学大会上通过了两个报告,即《统一颅骨的国际协定》,和《统一活体测量的国际协定》制定出51种测量项目和49种补充规定,自此,各国采用的测量方法渐趋一致。

为了搞好世界范围的体质研究,世界上还建立了国际体力研究委员会、国际生物学发展规划理事会和世界卫生组织等,这些组织制订了一系列体质测定方案,包括医学检查、体格和人体组成的测定,生理学检测和人体素质测验等。随着测量指标的扩展,测量方法日益增多,经验不断丰富,人体测量数据被许多其他学科和部门借鉴和采用,对卫生保健、体育选材、法医鉴定、医疗器械设计、国防工业、宇航工业、轻工业、美术雕塑等方面均有很大实用价值,具体讲可归纳为4个方面:(1)用于儿童、青少年体质发育研究。如美国通过体测制定了全国性的体育锻炼标准。(2)用于体育科学和选拔人才研究。从测量某些专项运动员体质入手,分析和研究从事一定运动项目所需的身体条件,制定不同运动项目的训练方案,评定运动员的训练水平,为运动生物力学的研究提供必要的参数,从而为选拔优秀运动员提供科学依据。(3)用于国防工业研究。随着航空航天工业的发展,在进行工具、仪表、机器或工程系统设计时,应把人和机器全盘考虑,使设计的机器、仪表、各种显示和操作装置的尺寸和布局更合理并方便人的使用,这样才能使整个系统发挥最佳效果,这对于宇宙飞船、飞机、坦克和潜艇等的设计显得尤为重要。此外,在选择兵种如空军、坦克兵以及特种兵等均要以人体测量数据作为依据。(4)用于工业生产研究。在轻纺工业,人体测量是制订鞋帽、服装和针织内衣等规格的依据,以此拟定服装型号和规格系列化标准。建筑行业根据人体尺寸资料拟定住房的适合层高、门窗、通道、生活设施、卫生设施的大小和合理布局等。人类学家在研究各民族之间的亲缘关系和民族起源等方面,均需要运用人体测量方法,并以测得的数据为依据。

人体测量仪器的研制和革新为人体测量学的发展提供了必要的条件。现在国际上通常采用的是马丁在1928年编著的《人类学教程》中所提出的测量原则和项目,并采用由他创制的马丁人体测量仪。除了马丁测量仪外,还有戴维斯(B. T. Davis)测量仪和日本的大川测量仪等。在测量方法还有测面积的双重求积仪法,测体积的排水法、体模型法、照相测量法等。中国,过去用的测量工具全靠进口,1949年以后由于政府对人体测量工作重视,于1979年由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所和南昌市青云谱计算机厂共同研制了人类学测量仪器并在全国推广使用。

进入20世纪70年代,美国米托斯(D. Meadows)和日本高崎宏创立了莫尔拓扑法这种光测方法,不用接触人体即可获得所需要的测量数据,适合于活体测量,既方便又迅速,并可将信息储存和再利用。根据莫尔拓扑法原理设计影像云纹图像仪,则对人体表面、骨骼以及脏器等都能测得表面面积的图像。

1972年,Hounsfield生产的计算机断层扫描仪(CT),对软组织区别能力大大超过X线,能从断面(横断面和矢状切面)观察人体。1976年,李斯托(Livingston)首先用CT研究了人脑;同

年,Eyler等用CT和超声图像对人体头部及内脏器官进行断面测量,使人体测量从体表进入体内,由形态结构到生理机能,使测量内容更加扩展和深化。1983年,格鲁特(J. Groot)发表了利用现代最先进影像技术——核磁共振,对人脑和脊髓进行研究;也有科学家用NMR对人体脏器进行断面测绘。此外,还有利用激光、超声波、回声探测、核素、肌电、心电、脑电等对人体进行测量,以适应各种需要。随着新科技飞速发展,人体测量方法也在不断更新,测量内容和范围不断扩展,为人体测量学展示美好前景。

#### 参考文献

- 1 Hounsfield G N, Part I. Br J Radiol. 1973,40:1016~1022
- 2 Eyler. ER, et al. Radiology. 1976,119:487~488
- 3 Barbara L. Carter, et al. Cross-sectional Anatomy. Computed tomography and ultrasound correlation. Appleton Century Crofts. New York, 1974. Anthony Harris, Human Measurement. Published by Heinemann Educational books Ltd. 1978
- 5 Stephen A. et al. An Atlas of Cross-sectional Anatomy. Computed tomography, ultrasound, Radiography, Gross Anatomy. Medical Depart. Harpet, Raw. Publishers Hagerstown, Maryland, New York, San Francisco, London, 1979
- 6 Jack de Groot. Update, Magnetic Resonance Tomographic Imaging of the Head and Spine. Printed in USA 1983
- 7 吴汝康,等. 人体测量方法. 北京:科学出版社,1984
- 8 Armellini F, et al. Minerva-Endocrinol. 1991 Jan-Mar, 1691. 21~5
- 9 Durnin-JV. Acta-Paediatr-Scand -Suppl. 1991,374:89~94
- 10 Kayner-HC, et al. Nephron. 1991,59(1):33~40

(南通医学院陈昌富教授译)

#### 优生学

eugenics 研究如何改良人的遗传素质,使人类产生优秀后代的学科。优生学的主要理论基础是人类遗传学。优生学的思想和措施起源很早,公元前古希腊柏拉图在《理想国》一书中就曾指出择偶和生育年龄对后代有重要的影响。同时古希腊各国还有处死有缺陷婴儿的习俗。中国先秦古籍《左传》中也有“男女同姓,其生不蕃”的记载优生学为英国高尔顿(F. Galton)首创。19世纪中叶,高尔顿在达尔文进化论思想启发下,致力于人类学、遗传学、人类种性改良等方面的研究,于1883年在他的《对人类才能及其发展的调查研究》一书中,首次提出了“优生学”的概念,这是人们公认的优生学作为一个独立学科出现的标志。“优生学”一词源于希腊文 eugenes,本意为“生好的”,译为“优生学”。后来人们把优生学分为积极优生学和消极优生学两个部分。1960年美国斯特恩(C. Stern)又建议改称演进性优生学(或称正优生学)和预防性优生学或称负优生学。优生学的发展史曾经历过曲折的历程。自1883年之后,优生学得到了较快的发展。1904年高尔顿在伦敦大学开设了优生学讲座。1908年他参与创建英国优生学会,同年该会的机关刊物《优生学评论》出版,接着优生学很快地在各国传播。1905年德国勃洛志(A. Pieicz)联合德、奥、瑞典、瑞士等国有关研究人员建立了“国际民族卫生学会”,这是第1个国际优生组织。不久“美国养殖协会”(后改为美国遗传学会)设立了优生部。1912年在伦敦举行了第1届国际优生会议,成立了“国际永久优生委员会”,因此在20世纪初出现了国际性的优生运动。1926年美国也正式成立了优生学会,他们在应用1900年法国人 Binet 所创立的智商(IQ)测验法的基础上,注意了对智力低下遗传方面的研究。1935年前后,美国、丹麦、挪威、瑞典、瑞士、德国等先后制订了优生法规。由于早期优生学者的偏见和遗传学知识的贫乏,优生学的发展曾误入歧途。其中突出的表现为本世纪初叶,德国的优生学者提出

了种族卫生学,宣传北欧人是优秀人种,并提出了要防止优秀的雅利安人血统被劣等民族污染的主张,他们的理论被纳粹分子利用,为希特勒大规模地屠杀犹太人提供了舆论和理论依据,对公众产生了相当大的不良影响,在很长的一段时间内使人们对优生学产生了很大的误解,使前苏联等一些国家曾一度将优生学研究列入禁止的范围。第二次世界大战后,优生学走上正轨,并赋予了新的内容。现在,在一些国家中,已将优生学列入教学内容,制订了优生法规,取得了一些优生实践成果。1948年6月,日本国会通过了以法律的形式推行优生学,并在高中课本中加入优生学内容,经过40多年的实践后,日本在推行优生学方面已取得了显著的成效。美国从60年代开始,很多大学、医院都设立了医学遗传学的研究机构,广泛开展了遗传咨询工作,并从1979年开始,以法律的形式明文规定每年拨专款进行“出生缺陷”的研究,结果

使先天愚型、黑朦性痴呆、半乳糖血症、苯丙酮尿症等患儿出生率明显下降。

近年来,由于“试管婴儿”开始在临床上应用,许多学者提出了一些演进性优生措施。

#### 参考文献

- 1 [日]木村贤生,高庆生译.从遗传学看人类的未来.北京:科学出版社,1985
- 2 严仁英.实用优生学.北京:人民出版社,1986
- 3 [日]米本昌平,由翰章译.国外社会科学,1986,1:20~32
- 4 杜传书.医学遗传学基础.北京:人民卫生出版社,1989
- 5 程焉平.松江学刊(自然),1989,4:45~48

(四川师范学院余绍华副教授撰)

# 医药、卫生

**医学美学** medical aesthetics 一门自然科学和社会科学相交叉、医学和美学相互渗透的跨学科新兴边缘学科,是研究人类在维护和塑造自身美的创造性活动中体现出来的一系列医学美现象和医学审美规律的科学。

**医学美学概述** 随着医学模式的转变,“健康”概念的更新以及医学软科学研究的深入,医学美学有广义和狭义之分。广义的医学美学是研究蕴含在医学科学一切领域的医学美现象和医学审美规律的科学,是维护人类健康,创造完美机体所迫切需要的科学。同医学法学、医学伦理学、医学人类文化学等交叉学科一样,属于卫生软科学范畴(其中美容技术属卫生硬科学),涉及到自然科学和人文社会科学的诸多领域,其内容和范围十分广泛。如无论是医防保健人员,还是病人,健康人群,其共同的审美目标是维护和塑造人体美;医学美学的开拓,把“美”的光辉折射到病人身上,使医患和谐,同步进入两个更高层次,即满足患者高层次审美心理需求的同时,促进医者高层次审美境界的升华;医学美学是由医学教学和科研工作者、美学教学和科研工作者与临床医生(尤其是人文医学,应用美学和整容学科医生)3支队伍为之共同奋斗的交叉学科,缺一不可;医学美学还包括医学理论美学,临床医疗美容、预防保健美学和医院管理美学4个部分。狭义的医学美容只是狭义的医学美学,它仅仅属于临床医疗美容学中的一种技艺实践。

1. 医学美学的对象。医学美学是研究医学和医学审美的一般规律,是对医学审美活动中出现的医防保健人员与患者、社会人群之间的一系列审美关系进行探索和追求,并对这些医学审美关系的调理。也就是说,医学美学所研究的特定对象是医生在保障人类健康、长寿、愉快、幸福的过程中,始终存在着的医防保健人员、病人、健康人群和医学审美环境四者之间审美关系,以及由此产生的审美意识,审美实施,审美评价和审美教育,从而认识一系列医学美学现象和医学审美规律。

2. 医学美学的任务。从宏观上看,自人类出现以来,一直致力千解决3大问题:(1)提高人类自身质量;(2)提高人际关系的质量;(3)提高人类生存与发展的空间的质量。实际上就是不断追求,推进与提高3个和谐、即人自身的和谐,人际关系的和谐,人与自然环境及社会物质环境的和谐。追求、推动与提高3大和谐,是整个人类的根本目的,也是医学和美学的根本目的。

3. 医学美学的作用与评价。医学美学是各种学科互相融合、相互渗透和健康发展的—门为人类健美服务的新兴学科,它要体现基础研究、理论研究与临床实践三结合的精神。因此,医学美学的作用与价值应为:(1)为医学教育的重要内容之一;(2)应从人类计划生育与优生优育做起;(3)为体育健美运动提供必要的理论依据;(4)为预防医学的实践提供有力的支持;(5)在临床诊疗中有不低估的指导作用。

**医学美学与相关学科的关系** 医学美学与各相关学科的关系都离不开德、智、体、美理想人格的四个重要组成部分。真善美的统一,是德育、智育、体育和美育全面和谐的发展,是每一个人的共同愿望。就医学美学的建设而言,美育对于培养医务人员的理想人格,使他们在医学实践中掌握医学美、发展医学美和创造医学美,为社会物质文明和精神文明事业作出贡献具有重要的现实意义。

## 中外医学美学简史

1. 中国医学美学史。远古—春秋(公元前475年以前)中医美学思想萌芽时期。使用打制石器、弓箭;衣着从披挂树叶、兽皮,发展为丝麻织布,缝制衣服;居处从山野洞穴,发展为构木为

巢,建造房屋,以及人工取火的发明和针药治病医术美学问世等。

春秋—三国(公元前474~公元265年)中医美学思想初创时期。外科专家华佗创造运用“酒服麻沸散”施行外科手术;经典著作《黄帝内经》中就论及人与自然的整体美、阴阳五行的平衡美、脏腑经络的协调美、七情因素的修心美和防治疾病的辩证美等,是中医美学思想形成的早期。

晋—元(公元265~1368年)是中医美学思想发展时期,如西晋时王叔的《脉经》,晋代杰出的针灸家皇甫谧的《针灸甲乙经》,隋唐时期的《唐书·百官志》,对狂犬病和天花防治,斑疹伤寒的预防接种以及脉学、针灸、病因症候医学理论,临证医学中的外科、儿科、药理学、方剂学等不仅对临床实践有效指导,而且维护了人体美的原则,扩大了医学美学思想的范畴,对世界医学道德产生了一定的影响。还有隋代巢元方的《诸病源候论》、唐代王焘的《外台秘要》、孙思邈的《备急千金要方》等,对人的生长发育,生老病死,性别差异,个体特征以及个体健美的法则充分体现了健身求美观点,发展了人类延长寿命的医学美学科学。

11世纪30年代,在前人欧希范《五脏图》的基础上,杨介绘制的求真求美医学绘图人体解剖图《存真图》,元代孙焕的《内照图》,宋代王惟一《铜人腧穴针灸图经》等既是中国医学美学教育的珍宝,也是现代医学绘图,模型的开创。宋、金、元时代的中医美学思想很活跃,是百家争鸣,兴旺发达的一个时期。

明—清(公元1368~1840年)是中医美学思想延续时期,叶天士温病的卫气营血辨证,吴菊通的三焦辨证;李时珍的《本草纲目》,清朝诸人获《坚砖集》以及清代的陈梦雷《古今图书集成医部全录》,吴廉的《医宗金鉴》,纪昀总纂的《四库全书·医书类》;柯韵伯的《寒来苏集》;尤在泾的《金匱要略心典》等,都以各自在防治疾病中的辩证美,收录了许多图文并茂、丰富多彩、具有文学性修饰美,和追求美的医学思想,使之不断延续至今。

2. 西方医学美学思想简史。西方医学美学思想,是以公元前5世纪左右的古希腊雕塑《米罗的维纳斯》这样的稀世瑰宝和罗马医学、美学为基础,随着自然科学的进步和人们审美意识的不断完善逐渐形成和发展的。公元前5世纪中期迈伦的“掷铁饼手”杰作和公元前6世纪的毕达哥拉斯最美的比例“黄金律”,就充满着青春的活力和健康美。

文艺复兴时期的意大利达·芬奇的《蒙娜丽莎》;维萨里(Vesedlus)的《人体之构造》;拉美特里(L. eme tris)的《人是机器》;卡巴尼斯(Cabanis)的《人的肉体和精神的关系》等,对于现代解剖学与生理学、心脏学与血液学的发展,对临床医学和预防医学的形成,以及对医学美在矫形、美容等方面追求都有很深邃的启示。有力地推动了现代医学审美认识的进步和基础医学的发展。古代埃及葛伦维尔的《木乃伊论》,19世纪诊断技术的进步发展,雷奈克发明的听诊、体温测验法;黑姆霍兹发明的检眼镜;英国贾西亚发明的喉头镜;以及后业的X射线、紫外线和放射线同位素与电子计算机在医学上的应用,促进了“医学—科学与人类”的医疗实践与美的创造和医学审美的发展,改变了自身健美状况的前进。关于医德与医美问题,希腊医学代表人物希波克拉底的《誓言》、《论医生》、《医术规则》、《医理》等著作中,更具体,集中和突出地反映当时医生之间和病人与家属之间的关系,他们“一切为了病家的利益”的行医目的,施治主导思想和宗旨以及要求医生重视自身的品德美,增强处理人际关系的审美意识和审美修养等都充分显示了他的崇高医德思想,严谨的治学重医精神。

我国医学美学的现状 爱美是人的天性,也是社会文明程度标志。为了医学实践求美的经验理论的提高和推广应用,使广

大医务工作者,把握好医学美的客观规律,更好地解除病人的心身疾病痛苦,满足人们追求美的正当要求。我国于1987年2月在江西宜春召开了全国第1次医学美学学术讨论会后,激发了医务工作者的积极性。据不完全统计,在中华医学会直接领导和各方面关心支持下,1989年4月安徽首先成立了安徽省医学美学研究会;1990年10月成立了中华医学会医学美学与美容学会;到1991年,中国(包括台湾在内)已有30个省、市、自治区分别成立了医学美学与美容学会(或协会、研究会),或筹备委员会、学科专业组,并先后召开了近百次学术交流会和讨论会,以及有关各专题学习班,共收到各类医学美学论文1922篇,正式发表200余篇。1980年以来,创建了初具规模的名列世界前茅的中国最大的中国医学科学院整形医院,随后又先后建立了国防科工委医学美容专科医院;南昌市中西医结合医院医学美容专科;湖北武昌一九三医院医学美容部;天津市医学美容中心;安徽皖南医学院附属弋矶山医院整形外科美容中心,以及铜陵人民医院美容中心等军地内外数十家医学美容院、美容科、美容部,在各临床医学美容实践中采用手术整形、电子疗法、医用激光、低温医疗、物理疗法、中西医药疗法、倒模面膜、皮肤磨削术、皮肤按摩术、音乐和语言一系列医学美容方法,以及先进医疗美容仪器,为人们的心身健美做出了贡献。自1986年邱琳枝、彭庆星主编的我国第1部《医学美学》问世之后,丁惠孙主编的《医学美学》,王高松教授编著的《整容术》,曾昭明主编的《医学皮肤美容》,高景恒等主编的《实用美容术》,马元、彭庆星主编的《实用护理美学》,李树莱、张超英编著的《保健美容》,张卫、张自清编著的《美容整形术》,东方医学美学所主编出版的《医学美学文集》第1辑,辽宁省人民医院、沈阳军区总医院主办出版的《实用美容带形外科杂志》,张凤翔主编的《医学整容与美容保健》,日本佐藤好司著,于淞译的《中医皮肤美容学》,王玉祥、陈言汤编著的《实用美容整形手术图解》(王守华著的《实用针灸美容手册》,邱琳枝、安之璧等主编的《简明医学美学》等44部专著接连出版问世,将大大推动医学美的发展。他们以内容丰富新颖,富有改革开拓精神的大量珍贵实践资料,在回顾中外医学美学思想历史演变的基础上,以马克思主义审美观为指南,吸取当代美学研究新成果,联系医学科学的理论基础和应用实践,既论述了医学美学的概念、对象、任务和作用;也阐述了现代宏观医学模式中的医学审美目标,审美环境和审美处理;对于临床医学,预防医学,精神医学,运动医学,康复医学,老年医学,医学工程,护理美学,中医美学和医学插图等学科领域中的许多特殊审美问题,都作了全面介绍和叙述;尤其是对医务人员的内在美,外在美和现代医院管理中的美学,医学美,健康美学,医学美感,医学审美评价,审美修养及审美教育等问题的论述,给人以启迪。

医学美学作为医学领域的一个学科体系的构想已基本形成,正在逐步完善和迅速发展,并得到社会广泛承认,而且从一个新人侧面指导临床实践相结合,给广大患者、残疾人和有强烈医学美感需求的健康人群带来福音,显示出它坚强的生命力。

#### 参考文献

- 1 邱琳枝,彭庆星. 医学美学,天津:天津科学技术出版社,1988
- 2 东方医学美学研究所主编. 医学美学文集(第1辑),1989
- 3 马文元,彭庆星. 实用护理美学,天津:天津科学技术出版社,1989
- 4 中华医学会医学美学与美容学会简报,1989~1992  
(安徽医科大学第一附属医院柯海龙副教授撰)

**实验外科进展和展望** the advance and prospect of research in experimental surgery 实验外科是以模拟人体进行动物实验为基础,藉以阐明疾病机理、摸索新的手术类型、评价和预测手术效果、打开手术禁区、培训与锻炼外科人才和提高医疗质量、促进各手术专业发展的桥梁学科或专业,是外科学的重要组成部分,亦是临床外科及手术专业不可缺少的基础。历史已经证明,外科作为一门临床学科,是步步依靠实验外科,从实验研究

中吸取营养而不断取得进展的。如果没有实验外科的紧密配合,临床外科要进一步提高是十分困难的。由此可见,实验外科对各手术专业学科的发展具有举足轻重的作用。

实验外科学作为实验医学的分支,起始于19世纪初,当时曾有人进行过动物外科实验,其中有俄国的H. П. Ипполитов(1810~1881),他将一些新的手术方法经动物实验成功后应用于临床,取得了良好的效果。这是实验外科的萌芽。实验外科的真正兴起和迅速发展则是随着实验动物科学的创建而形成而获得的。1907年,C. C. Little在W. E. Castle指导下建立了世界上第1株近交品系动物——小鼠DBA;1928年J. A. Reyniers和1930年B. Gustafsson研制成功两型金属隔离器,取得了无菌隔离技术的初步突破。1946年美国劳帮德实验室Reyniers等人育成无菌大鼠,使实验动物科学的基本技术和理论得以初步建立,实验外科亦正式形成,但其工作基本上只是局限于无菌概念、无菌操作技能和普通动物的实验研究等初期发展阶段。1956年,联合国教科文组织(UNESCO)与医学科学国际组织协会(CIOMS)以及生物科学协会联合会(IUBS)共同创建了国际实验动物委员会(ICLA),这个组织本着促进实验动物国际合作、实验动物标准化和收集、传播有关实验动物科学技术情报,出版实验动物科学公报(ICLAS Bulletin)等宗旨进行工作,全世界已有40多个国家参加这一组织,这对推动和促进世界各地实验动物研究和实验外科等专业的发晨起了积极作用。1957年,Trexler在金属无菌隔离器的基础上创造了塑料薄膜隔离器,改进了无菌技术,推动了无菌动物工作的发展,无菌兔、猫、狗、猪、羊、牛、驹、猴等动物相继培育成功。1959年,Reyniers主编出版了《无菌脊椎动物现状》专著,使无菌动物的概念和特征更趋明确。按照胎盘屏障概念等基本观点,实验动物可培育和区分为无菌动物(Germ-free animals)、悉生动物(Gnotobiotic animals或GN动物,包括单菌动物、双菌动物和多菌动物)、无特定病原体动物(Specific pathogen-free animals、SPE动物)、清洁动物(clean animals)及普通动物(conventional animals或称经典动物 classic animals)。在实验动物生活环境方面亦逐步形成了无菌屏障(绝对屏障)、无特定病原体(SPF)屏障(相对屏障)环境、卫生环境和开放环境等标准规范条件和格局。随着实验动物科学理论与技术的日臻完善,实验外科亦进入全面深入发展的时期。在休克的实验研究方面,确立了微循环学说;器官移植通过动物实验取得了技术突破,开始进入临床试用的重要发展时刻;1954年Murray在实验研究的基础上首先施行同卵双生姐妹间的肾移植获得成功,受体者于术后长期生存;1962年Murray又第1次用尸体肾进行人的异体移植而受体者长期存活,从而打开了脏器移植大门。1960年,美国Jacobson和Saruaaz开创了显微血管外科技术,他们用放大25倍的手术显微镜吻合26条口径在1.6mm以上的动物小血管,术后小血管通畅率达100%,这一实验结果为1962年Malt和1963年陈中伟等在临床取得断肢再植、断手再植成功奠定了基础。1955年,美国成立了世界上第1个人工内脏器官学会(简称ASAIO),对人工脏器的研制和实验研究起了很大的促进作用。自1960年起,动物科学和实验外科进入了具有划时代意义的发展阶段,亦即实验可以保证生产和供应各种规格的高质量商品动物,从而使实验外科亦步入了脏器移植和生物医学工程的崭新时代。在脏器移植方面突破了3个重要关键问题:(1)离体供移植用的器官能始终保持活力的低温保存法创制成功。此种方法包括Belzer于1967年发表的持续低温脉冲式机器灌注和1969年Collins创用的细胞内液型低温储存(包括长效单纯冷保存液UW、Ross液和HC-A液等)。(2)显微血管吻合技术和吻合器械过了关。(3)HLA配型和免疫抑制药物(硫唑嘌呤,1961年;类固醇药物强的松等,1964年;抗淋巴细胞球蛋白ALG,1969年;环孢霉素CSA配合甘露醇,1979年;FK506,1984年)的相继应用,使现代器官移植的概念进一步明确,并在临床应用方面取得基本成功。虽然FK506已成为抗免疫排斥效果最好、毒副作用最少的药物;肾、肝、心、胰脏与胰岛、心肺、肺、小肠、脾、骨髓、甲状

旁腺、肾上腺、睾丸以及胸腺等脏器组织的同种异体移植已先后在临床开展应用,但免疫排斥的问题仍未完全解决。1988年, Madsen 创用基因工程技术使组织相容性抗原造成免疫耐受的实验动物为解决脏器移植排斥开辟了新的途径。至于吻合血管的游离皮瓣、游离肌肉、游离骨、游离骨膜、游离足趾和游离大网膜等自体组织移植则已逐步完善,开始普遍推广使用。随着人工心脏使试验动物存活达 300 余天的可喜进展,1982年,美国犹太大学 Devrise 首次对 1 名心脏病晚期患者置换了永久型人工心脏取得初步成功;其后,人工器官医学工程研究在世界各地兴起了热潮,取得了新的进展。不同规格的 Toflon(聚四氟乙烯网络结构材料)人造膨体血管已在血管外科方面取得良好效果;自 1960 年 Hanken 首创球型瓣膜进行心脏瓣膜置换术成功后,人工心脏瓣膜已发展成生物瓣和机械瓣两大类,其中硅橡胶球形瓣和各向同情碳侧倾碟瓣及新型 G-K 钩孔碟型瓣等机械瓣经动物实验证明结构合理、性能良好而已在临床应用。由于医学生物学材料的发展,医用生物材料的动物实验研究十分活跃,研究的重点是筛选复合材料体系、确定生物检测和标准化,以及材料与制品对机体的安全性、相容性和界面作用机制。这些材料的研究为研制人工器官提供了必要的物质基础。因此,有人预言 21 世纪的医学特点之一是人工器官在临床医疗中被广泛应用。1962 年, Clark 和 Lyons 首次报道生物传感器的酶电极应用于医学检测后,随着微电子技术的发展,生物传感器(包括细胞型即 FET 型和神经纤维型即光极型)已飞速向微型化、集成化、智能化、多功能化和纤维化发展,并已着手研究合成分子传感系统,这无疑将为人工脏器器和生物医学监测装置的进一步研制开创新的基地和提供新的手段。1963 年,美国 Cooper 和 Lee 设计创造了冷冻技术设备,并经动物实验研究后应用于临床近丘脑手术取得成功,从而掀起了冷冻治疗及低温医学研究的热潮,通过大量实验研究,已基本阐明了低温保持生命的机理及其变化过程,并进一步探索研究避免杀伤性温度(-30~-40℃)而进入胶相状态以保证生命的方法,这方面的动物实验研究将为生命科学和脏器移植的发展作出贡献。

中国实验外科的起步较国外要晚 10~15 年,但在脏器移植、人工器官研制和实验动物基地的建立等方面亦已做了大量的工作,取得了明显的成绩,有些研究项目已达到和超过国际先进水平,在一些有条件的单位,实验外科亦已初具规模。1963 年 9 月起,北京积水潭医院开始作兔耳血管吻合研究,使 1mm 直径以下的微血管吻合通畅率达 100%,至 1964 年 3 月,该院进一步获得了兔耳完全离断再植研究的成功,从而使中国显微外科技术达到了国际先进水平。经多年的肾、肝移植动物实验后,1974 年首次报道了中国肾移植病例;1978 年又发表了肝移植报告。这对推动中国脏器移植研究起了非常积极的作用。在人工器官研制方面,继 1960 年上海报道研制成人人工心脏后,北京、天津、上海、广州、大连、四川、西安、石家庄等地先后开展了人工血管和人工心肺、肾、胰及心脏瓣膜等各种人工器官的研究,取得了可喜的进展。但就总体而言,中国实验外科的发展与先进国家相比尚有不小的差距,亟待大家重视和努力。没有实验外科的先导,就很难有临床的新突破与发展。

回顾过去,展望未来,通过生物医学工程技术,脏器将能根本解决移植的免疫排斥问题;冷冻医学将为长期保存脏器和生命奠定基础,最终将使脏器移植的难关被完全突破。真正的具有生物信息调控作用的智能人工脏器将在临床应用。总之,实验外科必将为包括颅脑在内的脏器移植和人工智能脏器置换以及生命再现等的实现而造福人类。

#### 参考文献

- Collis G M. Lancet, 1969;1:219
- Murray J E. Ann. surg. 1976;184:565
- 高朋根,等. 国内外医学科学研究进展, 1981, 144
- 刘恩祺,等. 分析仪器, 1983, 5:1
- 冯友贤,等. 国内外医学科学进展, 1984, 4:102

- 夏德生. 国内外医学科学进展, 1985, 5:54
- 杨子彬. 国内外医学科学进展, 1986, 6:168
- 刘恭植. 实用外科杂志, 1991, 11(3):117
- 张肖红. 实用外科杂志, 1991, 11(3):155
- 胡同增, 主编. 实验外科学. 北京:人民卫生出版社, 1991, 1:4  
(安徽医科大学第一附属医院 陈国钧 教授撰)

### 医学实验动物科学 medical laboratory animal science

专门研究医用实验动物的生物学特性、遗传育种、饲养繁殖、质量控制、疾病防治及开发应用的科学。它是生命科学研究的基础条件,也是衡量现代生命科学研究水平的重要标志。

亚里斯多德(Aristotle)最早进行动物解剖学和胚胎学实验,创立了以描述为特征的生物学,以揭示不同动物间的内部差异。Erasistratus 被认为是最早进行活体实验的人。1895 年, Nattall 和 Thierfelder 培养成无菌豚鼠。1928 年, W. Harvey 发表了动物心脏与血液运动研究的成果。实验动物在生理学、实验药理学、微生物学等领域也作出巨大贡献。

现代实验动物科学的诞生,认为在 1950 年前后,其间美、英、法、日等国家相继建立了有关的组织机构。原因是发现用于药物和细菌性检定的动物,即使用同一方法进行实验,常会得到不同的结果,因此展开了实验动物科学化、现代化的运动。

用于生物医学研究的种类繁多,从低等的昆虫(果蝇)到高等灵长类(猴子、猩猩),由于分类位置不同,生物学特性相差很大。实验动物生物学特性的研究,主要有生命过程、生殖生理、染色体数、解剖生理、内脏差异、血清生化性状及新陈代谢等。不同种类的动物,其性成熟、妊娠期、胚胎各器官发育程度、出生到性成熟的体重增长、每胎产仔数及寿命差别很大。如小鼠妊娠期 18~22d,产仔 1~14 只,寿命 2~3a,恒河猴妊娠期 150~180d,产仔 1 只,寿命达 20a。不同动物的性周期、发情、排卵时间和方式有差别;解剖生理、血清生化性状及新陈代谢也有差异。在生物医学研究中,利用某些动物与人相似的特性,通过动物试验,对人类疾病、病理生理、药物效价与安全进行推断和探讨。

实验动物的培育、繁殖及动物实验,经常应用遗传学原理进行工作。1909 年 Little 在研究小鼠毛色基因时,首先采用近亲繁殖育成 DBA 近交系,并与 Tyzzer 合作,利用日本华尔滋小鼠与 DBA 系之间的杂种进行肿瘤移植试验,所得数据揭示与遗传有关。随后采用近亲繁殖和选择有关性状育成了若干近交品系,分别得到对特定肿瘤高敏感品系,开创了实验动物遗传性状研究的新局面。1985 年,国际公布的标准近交系小鼠有 237 个品系,大鼠有 107 个品系。由于近交系具有实验结果可重复性等许多优点,在西方国家使用近交系动物进行研究占全部实验动物的 80%以上。除肿瘤学研究外,免疫学、微生物学等领域的研究也日益增加。

近交系的培育,常根据所期望获得或改变某个特性的决定进行选择繁殖。在动物繁育中,常有个别基因发生变异,丧失了原有的正常功能,这种变异称为突变。1978 年公布的突变基因,小鼠有 648 个,大鼠 105 个,兔子 76 个,豚鼠 38 个。这些突变动物有些具有与人类某些疾病相似的特征而用作动物模型进行研究,如肥胖(ob)小鼠、自发性高血压大鼠(SHR)、自体免疫小鼠(NZB)等。

在药理、毒理及生殖生理等领域的研究中,为了使实验结果具有一般性和普遍性因而具有代表性,因而采用远交繁殖方法,即以趋向最小近亲繁殖系统维持动物群体。这种动物的遗传基础广泛,个体间差异较大。中国最常用的远交系为昆明小鼠。根据研究课题或或繁殖的需要,有时采用两个或多个品系进行杂交繁殖。

为保证使用动物的可靠性,经常要对各系动物进行遗传质量检定,确定各品系动物是否具备应有的遗传特性,是否发生变化和混进其他动物血统或交配错误等。检定方法有同系异体组织

移植法,即根据近交系动物的遗传纯合性,同一品系的个体之间能互接受组织移植的原理进行;其次是毛色基因交配测定法,可以把隐藏的毛色基因显示出来;第三是生化标志基因的测定,许多常用的近交系小鼠,已知有20个以上的生化多态型位点,不少位点的特性属于免疫学的,但多数可用淀粉凝胶电泳进行鉴别;第四是下颌骨检测法,每一近交系动物各有其下颌骨形态特点,可用计算机计算鉴别,此法复杂,不常使用。

微生物是影响动物健康和实验结果的重要因素,它与宿主共生或共栖,易受实验改变和影响实验结果的准确性。如绿脓杆菌感染可明显改变照射后的生存曲线(Flynn,1963);鼠肝炎病毒对试验产生免疫抑制作用。对于不同的实验目的,要求选择尽可能有利于实验结果解释的动物,并尽可能排除动物中带有影响实验结果的各种微生物。通过微生物检定,按对微生物控制的净化程度把实验动物分为4个等级。1级动物为普通动物,要求排除传染给人的疾病,饲养于开放环境,饮水、垫料、饲料不经高压灭菌,供教学示范用。2级动物为清洁动物(CCV),来源于3级动物,要求饲养于有中效过滤空气的半屏障系统或层流柜中,饲料、垫料及用具经消毒处理,工作人员进入动物饲养室要穿消毒的专用拖鞋和干净衣服、帽子、口罩,最即经过淋浴。3级动物为无特定病原体(SPE)动物,来源于无菌动物或悉生动物,要求饲养于屏障系统,系统中的空气须经中效的或高效过滤除菌并保持室内正压,饮水、垫料及用具均经高压灭菌处理。工作人员进入饲养室必须经过淋浴,用灭菌的衣服、口罩、帽子及专用拖鞋;工作完毕后,只能从污染走廊出来。4级动物为无菌(GF)用和悉生(GN)的动物。无菌动物是采用无菌技术剖腹取仔,在手术隔离器内培育成功的;悉生动物是人为地把指定的微生物菌丛定居于无菌动物体内而得。四级动物必须饲养在经无菌处理的隔离器内,工作人员不直接接触动物,而是通过隔离器手套进行操作,其饮水、饲料及一切用具无经过严格的无菌处理,一切物品的传入都要经过隔离器的灭菌渡舱。不同微生物控制程度的实验动物的优缺点见表。

为保证使用和繁殖动物的微生物质量的可靠性,经常要对不同等级的动物进行微生物质量检定,符合标准的由实验动物管理委员会发予合格证书,准予使用。微生物检定的项目是细菌、病毒、寄生虫及支原体。

表1 不同微生物控制程度的实验动物的优缺点比较

| 项 目      | 普通动物  | SPE 动物 | GF 动物 |
|----------|-------|--------|-------|
| 传染病      | 有或可能有 | 无      | 无     |
| 寄生虫      | 有或可能有 | 无      | 无     |
| 试验结果     | 有疑问   | 准确     | 准确    |
| 应用的动物数   | 多或大量  | 少量     | 少量    |
| 长期实验     | 困难    | 可能好    | 可能好   |
| 死亡率      | 高     | 低      | 很低    |
| 长期实验的存活率 | 约40%  | 约100%  | 约100% |
| 实验标准设计   | 不可能   | 可能     | 可能    |
| 统计价值     | 不准确   | 可能好    | 很好    |
| 实验结果讨论值  | 有疑问   | 高      | 很高    |

动物的饲养环境是影响动物健康和动物实验结果的因素之一。不同种类动物的饲养环境,对温度、湿度、气流、风速、粉尘、臭气、噪音、光照、饲养方式、动物密度、落下菌数及卫生要求都有一定的要求和规定。中国卫生部1989年发布的《医学实验动物管理实施细则》中有些已有规定。

实验动物使用的饲料多数是根据配方特制的混合饲料,要求根据各种动物的不同生理学特性和生长发育的不同阶段的需要,制定营养成分和所含有害物质的最大安全限量。

在医学实验动物中,最为活跃的研究领域为免疫缺陷动物和野生运动模型的开发应用。1962年,Issacson和Cattanach首

先发现裸鼠,后证实为11号染色体的基因突变伴有先天性胸腺发育不良。1969年,Rygaard首先成功地将人类恶性肿瘤移植到裸鼠体内,肿瘤存活并生长,开创了免疫缺陷动物研究和应用的新局面。到1988年,已召开6次有关裸鼠研究和应用的国际学术会议。免疫缺陷动物品系的培育已从啮齿类动物扩展到牛、马等大型哺乳类动物;啮齿动物已从单一细胞免疫缺陷发展一联合免疫缺陷(如T和B细胞缺陷小鼠);从自发性空变的先天免疫缺陷到后天获得性免疫缺陷,免疫缺陷动物已成为免疫学、肿瘤学、细胞生物学和遗传学研究的重要工具,越来越受到人们的密切关注。

野生动物资源的开发应用也十分活跃。多乳房大鼠已广泛应用于寄生虫研究,如马来丝虫(Rehrany et al,1975);喇叭尾大鼠用于发育模型(Wright,1975)和免疫反应的胸腺作用(Boraker,1975)。中国科技工作者也在积极开发野生动物资源,如用于出血热研究的黑线姬鼠(张为彬、李老占,1987);用于HBV试验的树(虎其芳等,1981);用于甲型肝炎病毒感染研究的红面猴(浙江人卫卫生院,1981年);还有小型猪、长爪沙鼠等。中国的野生动物资源十分丰富,仍有待人们努力开发应用。

#### 参考文献

- 1 Henry, et al. The Laboratory rat, 1980
- 2 Joan staats. cancer research, 1985, 3(45): 949~977
- 3 张业彬, 李老占. 动物学杂志, 1987, 22(5): 29~31
- 4 郑杰. 北京实验动物科学, 1988, 5(4): 3~7
- 5 卫生部, 医学实验动物管理实施细则, 1989  
(中国药品生物制品检定所张业彬撰)

**无菌动物和悉生动物** germ free animal and gnotophoric animal 随着医学生物技术的不断发展,在揭露生物奥秘和探索未知疾病病原学的研究中,需要大量地使用实验动物,而它们多数均在通常开放条件下饲养,外观看似健康,实际上有潜在的微生物在动物体内存在,在实验研究工作中会干扰实验结果;为此,要取得精确的实验研究结果,就需要不带有或少带有微生物的实验动物,供科学研究,其中使用比较多的是无特定病原体(specific pathogen animal 简称SPF动物)。而供做比较尖端的、要求水平高的科研实验结果,使实验结果不被外来因素干扰,重复性好,精确度高,则需用无菌动物(gnotophoric animal 简称GF动物),及悉生动物(简称Gn animal)。

无菌动物泛指动物体内不带有微生物的动物,其中包括细菌、现有病毒学检测技术检测到的病毒机体内外寄生虫。无菌动物中的“无”实际上是相对而言,并非绝对的。由于普通动物体内的内脏器官、血液等,在通常情况下相应是无菌的,其母畜在妊娠期间,胎儿在子宫内生长发育时,胎盘是它的过滤微生物的屏障,可以排除微生物对胎儿的侵袭;因此,当胎儿足月成熟时,即将分娩,则可在无菌条件下进行人工剖腹产手术,摘除母畜的子宫,放在无菌解剖隔离器(isolator)内打开子宫,取出胎儿,送入另一无菌隔离器内,用人工哺乳饲养,或依赖已经培育成功的无菌保姆母畜带乳,可培育成无菌动物。无菌隔离器内凡与动物有关饲养的饲料、饮水、垫料、笼具等一切用品均应采用高压蒸气灭菌,或用放射线 $\gamma$ 射线灭菌后方可使用。饲养工作人员均应经过严格培训,具有一定的无菌操作技术,方可上岗进行无菌的严格的管理工作,否则,会带来微生物的污染,造成损失。悉生动物来自无菌动物,在人为条件下给无菌动物接种,叫悉生动物。它和无菌动物相同,必须在无菌隔离器内饲养,严格地无菌饲养管理,以免带来交叉感染。接种一种菌的,叫单菌的(monoxenic)悉生动物;两种菌的,叫双菌的(dixenic)悉生动物;3种菌的叫3菌的(Rtrixenic)悉生动物;多种菌叫多菌的(Polyxenic)悉生动物。

无菌动物的研究最早始于19世纪后期,距今已100多年,一些科学家最初先从植物能否在无菌情况下生长,进行了研究。其后,巴斯德(Pasteur)对无菌动物进行过研究,他判定如果动物体内缺少细菌,是难以存活的。而有的科学家则提出了相反的意

见,争论不休。这时,鲁尔等(Lutull et al)于1897年对无菌豚鼠进行了饲养研究,而存活期十分短暂,但打破了巴期德氏的结论,为无菌动物研究奠定基石。20世纪初期,由于医学生物学家发现了维生素丙(D.C),而豚鼠体内又不能合成D.C,它对于豚鼠是不可缺少的,因而,对豚鼠在无菌情况下存活的研究,取得较大进展,柯亨弟(Cohendy et al)等在研究中,使无菌豚鼠存活了16~19d。后来,雷尼尔斯等(Reyniers et al)在已经有了维生素A、B、C、D等发现的基础上,对无菌豚鼠的研究获得更大进展;他们饲养在无菌条件下的豚鼠存活了两个月左右;最后,美国Notre Dage大学的非利普斯等(Philip)在研制出满意的豚鼠饲料配方后,在饲养无菌豚鼠上,不但能够存活,而且开始繁殖。为什么科学家先集中力量从无菌豚鼠的饲养进行研究?这是因为豚鼠的妊娠期长(69~72d),仔鼠出生时,身体已被毛,睁眼,长出细齿,在母鼠哺乳1周左右后,即可开始采食,这是有利于人工哺乳成活的有利因素。而家兔、小鼠等实验动物则不相同,妊娠期短,仔鼠出生后,身体裸露,眼、耳孔均未打开,人工哺乳存活较难。实验无菌大鼠最早于1943年由雷尼尔斯(Reymers)等开始研究,直到1948年曼斯他伏桑(Gustafsson)培育成功;其后,普利桑慈(Plesants)于1959年亦相继培育成功。并于同年培育成功无菌小鼠。鲁可克(Luckey)于1963年培育出无菌家兔。至于无菌狗、猫、猪、羊、猴等均在20世纪中期培育成功。美国于1948年在Lobund饲养小组努力研究下,成功地饲养出无菌鸡,并育成成鸡,产卵,孵化出雏鸡。目前,世界上除美国、日本外,英、法、德、意、匈、澳大利亚、比利时、独联体等国家也相继建立起包括无菌动物在内的实验动物中心,实验动物研究工作取得很大进展。中国实验动物研究工作起步较晚,但在广大科技工作者和饲养人员共同努力下,从1979年开始有了飞速地进展,目前上海生物制品研究所、中国医学科学院实验动物研究所相继于1983年后,研究培育成功无菌豚鼠和无菌家兔,他们还开展了无菌裸鼠的饲养研究,填补了实验动物学的空白做出了努力。

无菌动物由于长期在严密的控制下在无菌隔离器内饲养,它与普通开放条件下的普通实验动物比较,在形态学和生理学方面都有了很大的改变,比如无菌家兔、无菌豚鼠的消化道,特别是盲肠比普通动物要大5~6倍;肝脏重量减轻,网状内皮系统中脾脏缩小,网状内皮细胞功能降低,因此对微生物特别敏感。无菌鸡较普通鸡生长发育好,而无菌家兔和豚鼠则较普通家兔、豚鼠生长缓慢一些。一般无菌动物的寿命均比普通动物长。总之,无菌动物与普通动物在形态学、生理上的差别十分明显,这也是与它们各自的生活条件的改变有关的。

对于无菌动物的饲养条件,科学工作者最早采用的是玻璃、木材、铁和不锈钢等材料制做无菌隔离器的主体部分;用高压蒸气消毒灭菌,由于制做繁杂、笨重、费资昂贵,操作十分复杂困难,很难推广。随着科学技术发展,1957年美国P.C. Trexler在印第安州圣母大学Lobund研究室制造出用塑料薄膜的无菌隔离器主体部分,它是由无毒的聚氯乙烯原料制成,其余部分有耐酸硷的橡胶手套等,这种隔离器具有质地轻便、操作方便、透明易观察内部动物等的优点,同时最大的优点是其价格较之以上的材料便宜了许多,而且随着不断改进,使用了过氧乙酸消毒剂的使用,对于推动饲养无菌动物的研究工作起了巨大的作用。可以说是一场技术革新的革命。当然目前已有更多的材料如纤维、玻璃钢、硬质有机玻璃等亦可制做无菌隔离器,饲养无菌鸡和其他实验动物。

无菌动物由于不带有微生物,它的用途十分广泛,它在研究微生物的拮抗作用,对某些致病病因的探讨,研究病毒的生物学特性等结果十分准确可靠;在免疫学方面的研究,当机体受感染后,对机体感染和免疫系统之间关系的探讨;此外,在放射医学研究、营养代谢的研究、老年病、毒理学的研究,以及在宇宙航天研究中均能派上用场。1962年美国格拉斯哥医院格瑞斯特(Grist)在30年前(1962)在非近交系中偶然发现的裸鼠(无毛小鼠)培育成功,它在免疫学研究、肿瘤移植等研究上用途十分广泛,四年

之后弗兰拉根(Flanagan)又证明其染色体上有一种无毛基因;之后,潘梯路易斯(Pantelouris)于1963年又发现裸鼠没有胸腺,缺少T细胞。目前这种裸鼠与别的品系小鼠交配培育成许多带有裸鼠基因的小鼠,成为远交系裸鼠,已为广大医学生物工作者大量研究用,这种裸鼠亦需在无菌条件下饲养,虽属突变系小鼠,也可归纳为无菌动物的范畴。去年,在美国Jackson研究所召开的国际免疫缺损小鼠研讨会,曾多次提到一种scid小鼠,它虽有毛,但缺少T、B、K细胞,而且胸腺萎缩,是一种联合免疫缺损的小鼠,它亦需在无菌条件下饲养,是免疫学和肿瘤移植研究较之裸鼠更好的动物模型。悉生动物由于来源于无菌动物,它在人工接种单菌、双菌或多种菌后,因此含有对单菌、双菌或多种菌的抗体。因此,在生物医学研究中被认为较之无菌动物更易于维持饲养的动物,但在生物医学研究中用途较广泛。用悉生动物研究可观察到微生物与微生物之间,及其与机体互相间的关系,和菌群失调现象。还有,某些悉生动物给予物理、化学等及其他致病因子时,则可观察到机体、微生物和致病因子三者间相互作用的关系。1879年曾召开过第17届国际悉生动物研讨会,交流各国在利用悉生动物在医学生物、免疫学研究的成果。

#### 参考文献

- 1 钟仁仁,等.哺乳类实验动物.北京:人民卫生出版社,1983
- 2 施新猷.医用实验动物学.西安:陕西科技出版社,1989
- 3 前岛一淑.实验动物的无菌技术.北京:人民卫生出版社,1983
- 4 景绍亮,等.无菌豚鼠饲养方法及其特征和应用的研究.中国医学科学院实验动物研究所,1988年学报
- 5 王荫槐,等.无菌兔的培育和饲养.中国医学科学院实验动物研究所,1988年学报
- 6 朱美芬,等.无菌动物细菌学监测问题的探讨.上海实验动物科学,1986,6(1):30~31
- 7 朱美芬,等.无菌小鼠细菌学监测方法及其结果.上海实验动物科学,1986,6(1):72~74
- 8 王德斌,等.无菌动物和无特定病动物简介.上海实验动物科学,1983,3(2):119~121
- 9 张周,等.应用空气层流室繁育裸鼠.上海实验动物科学,1990,10(1)
- 10 Ediper, et al.裸体小鼠的繁殖和大量生产(1)、(2).上海实验动物科学,1981,1(1、2)
- 11 Scid小鼠在生物医学及农业科学中的应用研讨会.北京实验动物科学,1991,4
- 12 Thomas D. Luckey Germfree Life and Gnotobiology 1863
- 13 Jorgen Fogh. The nude Mouse in Experimental and clinical Research Doi 2 1982

(卫生部北京生物制品研究所万邦元撰)

## 预防医学、卫生学

**行为医学与健康** behavioral medicine and health 1992年世界卫生组织(以下简称WHO)公布一个新数字:人类死亡因素中,60%是不良行为引起的,较1977年美国因不良生活方式和行为致死者占48.9%又增加了11%;而中国调查的结果占37.3%,见表1。

表1 中美两国影响健康的四个主要因素

| 因素                | 生活方式<br>和行为 | 人类生物学<br>因素 | 环境<br>因素 | 保健<br>服务制 | 总计  |
|-------------------|-------------|-------------|----------|-----------|-----|
| 中国<br>(1981~1982) | 37.3        | 31.9        | 20.1     | 10.8      | 100 |
| 美国<br>(1977)      | 48.9        | 23.2        | 17.6     | 10.3      | 100 |

从表1可见,中美两国都是生活方式和行为居4种因素的首位。无论在脑血管病、心脏病、恶性肿瘤和意外死亡前4位死因以及全部死因,都是生活方式和行为占首位。

按生物医学模式,心血管疾病是因血脂过高、动脉硬化引起,恶性肿瘤因致癌物激活。随着人们认识层次的深化一转变到生物心理社会医学模式,看到在这些生物学因素背后存在大量的社会和行为因素。摄入动物脂肪过多行为才引起高脂血症,使胆固醇积蓄于动脉壁而致硬化;吸烟行为既可加速动脉硬化(特别是冠状动脉),又可增加血小板的粘滞度,易使血栓形成,造成心肌梗死;身体缺少锻炼行为,使心肌收缩力不强,适应性差;吃盐(钠)过多行为,导致钠潴留体内水分,增加血容量,血管呈高压引起高血压;A型行为(争强好胜、时间紧迫、无端敌意)激活神经和内分泌系统的兴奋性反应,引起冠心病、高血压和糖尿病等。

据卫生部信息中心预测,高血压病在90年代后将增加3倍。全球每年有250万人死于与烟草有关的疾病(慢性支气管炎、高血压、冠心病、恶性肿瘤等)。WHO估计全世界有10亿人有精神心理障碍。北京、天津成年妇女半数超过平均体重,是高血压和心脏病的祸根。据预测,2000年中国约有10%的居民患高血压。1984年WHO专题报告提出,防治恶性肿瘤要靠社会和行为习惯。

行为= $f$ (个人·环境), $f$ 为函数,环境包括自然环境和社会环境。1978年在美国耶鲁通过的行为医学定义是:“把健康和疾病有关的行为科学技术和生物医学技术结合起来,用于疾病的预防、诊断、治疗和康复的一门边缘学科”。国外医学院校讲授此课约200学时左右,并有日益增加的趋势,以适应行为干预的需要。

美国自60年代以来用行为干预措施防治心血管病;在1963~1980年期间,烟制品减少27.1%,奶和奶油减少24.1%,牛油减少33.3%,蛋类减少12.3%,动物脂肪和油减少38.8%,植物脂肪和油增加57.6%,鱼类增加22.6%(含不饱和脂肪酸较多),因而使同期各年龄、不同性别和种族的人群的冠心病和脑血管病死亡率明显下降,见表2。

表2 美国各年龄组脑血管病和冠心病下降情况

| 年龄组(岁) | 脑血管病 | 冠心病  |
|--------|------|------|
| 35~44  | 46.1 | 44.8 |
| 45~54  | 42.3 | 38.3 |
| 55~64  | 52.9 | 38.0 |
| 65~74  | 53.2 | 37.0 |
| 75~84  | 49.7 | 34.0 |
| 85以上   | 44.4 | 25.6 |

上述情况不仅美国如此,十几个发达国家皆有此倾向,使这些国家人群的平均寿命在70年代后又逐步延长,结束了50~60年代徘徊不增的局面,他们的经验主要是进行了行为干预。

日本原为胃癌高发国,通过少吃盐制品、多吃新鲜蔬菜和牛奶,使胃癌患者死亡率1982年比1950年下降36%。美国制订1980~2000年防治癌症计划,主要通过减少吸烟(由37%减到<15%吸烟率),减少脂肪摄入(占热量<30%),增加纤维素(由10g增到20~30g)3项主要行为措施,预期可使癌症患者死亡率下降50%。

美国卫生部1990年对预防保健战略作评价时指出,1972~1984年心脏病患者死亡率下降33.9%,中风患者死亡率下降47.8%。提醒卫生部,过去的临床战略不仅成就不大,而且使卫生经费开支从占国民生产总值的6%增到11.7%还嫌不足,因此必须转而实行行为干预战略。

不良生活方式和行为主要包括形成习惯的不良生活方式和行为(烟、酒、饮食失调等)、成瘾行为、自杀行为、致意外行为、神经症行为以及A、B型行为等,它们具有泛影响性、层次性、累积性和靶器官(系统)的相对特异性。行为诊断可通过临床或现场

观察、仪器测定、问卷调查和情境模拟等获取信息。行为研究重归纳、看事实,动态地直接地研究人的活动。例如,中国某大学对35年学生休学原因分析资料,因病学休学的以神经衰弱和精神病为最多,占52%,证明与社会心理因素密切相关,其他名牌大学也有此倾向。美国加州人口实验室用前瞻方法研究个人行为因素与寿命的关系,经15a观察,得出永不吸烟、经常锻炼、少量饮酒或不饮酒、每天睡眠7~8h、保持合理体重、不吃零食、坚持吃早餐共7个因素都有者,比只有2~3个因素者增寿11a(45岁以上)。又如人的智力、情绪和生理节律周期分别为33、28、23d,若3种周期处于低潮时,人的注意力往往不集中,常发生意外。浙江汽车运输公司据此原理管理532名汽车司机,3个节律均处于低潮者不出车,6个月使车祸发生率下降41.6%,受伤人数减少40%,死亡人数减少88.8%。

医学的研究重点在高危人群、高危环境和高危反应者。丧偶者、离婚者、离退休者、失恋者、失学者、失业者、残疾人等为高危人群。社会动乱、家庭不和、经济破产、法律处分、水旱火警等灾害等为高危环境。上述3个节律处于低潮时为高危反应。中医说喜怒忧思悲恐惊“七情”可致病皆为高危反应。故国内外学者制订紧张生活事件量表,把高危因素变作生活变动单位(LCU相当分数),以便量化。

心身医学家的研究资料表明,有爱情生活、人际交往良好、积极乐观的人,通过心理神经免疫学作用,使T细胞等体内“信息物质”大量产生,有助于防止感冒,加快伤口愈合,抵抗癌症生长,减少心身疾病的发生。中国初诊病人的1/3、美国初诊病人的1/2为心身疾病,被临床医生忽视而当作躯体性疾病来治,常事倍功半。

不良生活方式和行为又称自身创造的危險性或慢性自杀,要靠自我保健去克服。自我保健不是各自为政,而是激发人的潜能(目前只用了百分之几),加上社会支持和医生指导。健康教育可提高人们自我保健意识和知识,自觉改变不良行为。美国7个州高血压患者经过10年健康教育,有24%的人血压降至正常水平;1982~1985年,因高血压到医院接受检查和监测人数增加52.7%,其他原因就医者只增加4.8%;1979年每日人均摄人钠量为4~10g,1982~1984年已减到2~3g;1985年与1979年相比,群众认识高血压可能是冠心病的因素由24%升到92%,78%的人认识高血压与中风有关,91%的人认识吸烟与冠心病有关(原为32%),86%的人认识胆固醇与冠心病有关(原为11%),60%的人认识糖尿病与冠心病有关。通过健康教育提高人们的认识,自觉执行自我保健措施,取得表2所述冠心病和高血压发病率下降的明显效果;其他疾病也有类似情况。因此WHO认为健康教育是“90年代的卫生战略”。

健康教育是通过传播与教育的方法向全社会普及卫生科学知识,强化人们的健康意识,建立或改变与健康相关的行为,促进人群健康的一项事业。WHO认为:“健康教育是有关个人、集体和社区一切影响健康的信念、态度和行为的的活动,以及为了健康而进行改变过程的努力”。两个定义都强调落实行为改变。过去人们称卫生宣传,意思不够准确。现代健康教育认为:知识、态度、信念、行动(KABP)是健康教育的4个环节。适应人们生活方式的改变,建立新的生活方式和行为模式,是健康教育的根本任务。

行为医学是健康教育的基础学科,有人说健康教育工作者是“改变人类行为的工程师”。行为的产生受知识、个性、信念、态度、需要和价值观影响,通过注意、认识、联想、信眼、需要、决心、行动等一系列心理活动而形成。故进行健康教育需研究健康行为学、健康传播学、健康心理学、公共关系学等。上海已把健康教育作为实现2000年卫生发展规划的首要任务;天津市“四病”(高血压、冠心病、癌症和脑卒中)防治规划中,提出“永不吸烟、少吃钠盐、合理饮食、经常锻炼”作为目标的健康教育要求。

行为医学虽然已成为世界各国研究的热点,但同时也有不少难点。热点是由于“生活方式病”比重越来越大,研究行为干预



以对付心脏病、高血压、恶性肿瘤和意外死亡的挑战。难点是行为形成的多因果性、行为发生的多变性、行为测定的复杂性,而它对健康影响有潜袭性(即不易为人知晓,发觉时已晚)、累积性(不发生急性危害,一旦形成不易消失)、泛影响性(无特异定位,影响广,常突破某一脏器系统而致病),加上过去对行为科学缺乏认识,给研究工作带来一定困难。研究和开展行为医学必须结合“人人享有卫生保健”的目标进行。不少学者认为21世纪将是“行为科学时代”。

#### 参考文献

- 1 David C. Pearson et al. Preventive Medicine, 1987, 16: 783~795
- 2 梁浩材. 社会医学, 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988, 56~57
- 3 美国1990年国家卫生目标的中期评价(卫生部信息中心内部交流), 1989, 9~13
- 4 陈心广. 行为医学, 上海: 上海科学技术出版社, 1989, 7~45

(中山医科大学梁浩材教授撰)

### 环境医学展望 prospects for environmental medicine

环境医学是环境科学的一个重要分支,它研究环境与人体健康的关系,特别是研究环境污染与破坏的健康效应,包括探索污染物在人体内的动态和作用机理,查明环境致病因素和致病条件,阐明污染物对健康损害的早期反应和潜在的远期效应,以便为制订环境卫生标准和预防措施提供科学依据。

20世纪50年代以来,世界环境遭受严重污染,引起一系列的重大公害,如英国伦敦烟雾事件,美国洛杉矶光化学烟雾事件,日本水俣病、痛痛病、四日市哮喘以及米糠油事件等,夺去成千上万人的生命;加之严重威胁人类生命的癌症以及非特异性疾病发病率 and 死亡率增高,引起人们对环境污染所致人群健康损害的高度重视。

70年代以来,一些国家对环境污染与人群健康进行广泛深入研究,由环境卫生学中逐渐产生一个新的分支学科——环境医学。前苏联学者曾提出“环境医学”概念,主要研究环境因素的健康效应,以与传统的卫生学概念相区别。欧美各国,几乎在同期内亦先后形成这一新学科。

中国环境科学学会于1979年成立,下设环境医学专业委员会,1982年召开全国第一届环境医学会议。在中国,为适应环境保护事业发展的需要,全国建立起各级环境保护监测站、环境保护科学研究所,同时在卫生防疫系统内,增设环境卫生监测机构,开展环境污染对人群健康效应的调查研究,并取得显著成绩。为培养从事环境医学专业工作的专门人才,1987年武汉医学院增设环境医学专业。这一切表明环境医学已经以一门独立的学科问世。

环境医学主要是研究环境污染与破坏的健康效应。研究领域较宽,有环境流行病学、环境毒理学、公害病及其预防、环境卫生标准等。其主要任务是为工业污染环境所致的健康危害提供强有力的科学证据,借以唤起人们解决发展与环境间的深刻矛盾,具体可概述为以下几方面:

**研究环境因素的健康效应** 从宏观的和微观的角度研究环境因素(物理的、化学的、生物的、社会文化的因素等)对健康和疾病的影响。

**研究与环境有关的疾病** 研究污染引起的环境病、公害病、肿瘤等发生、发展的规律,为进一步控制和治理这些疾病提供科学依据与办法。

**进行环境医学监测** 通过对环境致病因子、生物材料、人体健康状况、疾病谱的监测和个体剂量监测等,阐明环境污染物、地球化学元素等对人体健康的影响,以建立环境负荷和人体负荷的数据库。

**研究和制定环境卫生基准**,为国家制定环境卫生标准提供科学依据。

**从医学角度进行环境影响评价的研究** 基于上述任务,环

境医学当前主要研究课题有:(1)研究严重危害人体健康的疾病的流行特点和规律,进而阐明环境病因、发病机制和对人群的危害程度,以便提出早期诊断和预防的措施。(2)深入开展环境毒理学研究。(3)利用现代分子生物学等的理论和方法,研究环境污染所引起的亚临床变化和检出高危人群,为健康预报和早期诊断提供依据。(4)深入开展环境卫生标准和环境监测方法的研究。

现实生活要求环境医学工作者充分利用现代医学技术的新理论、新方法,从整体、器官、细胞、亚细胞和分子水平研究环境及环境污染对人体健康的影响;探讨环境中各种有害因素的作用条件、作用机理和对人体健康可能产生的近期和远期危害;研究与环境因素密切相关的各种疾病的早期预报指标和方法,充分运用环境流行病学、环境毒理学和临床医学等研究方法,多方面探讨环境中有害因素与人体健康和疾病的关系。

#### 参考文献

- 1 杨铭鼎,主编,环境卫生学,北京:人民卫生出版社,1980
- 2 Howe G M. et al. William Heineonane Medical Book, London, 1980
- 3 Rall D P. Rub. Health and prev. Med. 11th ed., New York, 1980, 543
- 4 曲格平. 环境保护, 1980; (5): 1
- 5 姚志麒, 陈秉衡主编, 环境卫生学, 北京: 人民卫生出版社, 1986
- 6 宋广舜, 等主编, 环境医学, 天津: 天津科学技术出版社, 1987

(安徽医科大学祁家骥教授撰)

### 环境卫生学研究进展 prospects of research in environmental hygiene

环境卫生学是预防医学的一门重要分支学科,是环境科学的一个组成部分。它研究自然环境和居住环境与人群健康的关系,阐明环境对人群健康影响的发生和发展规律,为制订环境卫生标准提供依据,并研究利用有利环境因素和控制不利环境因素的预防对策。

环境卫生学的研究对象是以人类为中心的环境。它包括自然环境与生活居住环境。前者含地球上的大气圈、水圈、土壤圈、岩石圈和生物圈;后者指人类为从事社会集居生活而建立的城乡生活居住环境。环境卫生学和其他科学一样,是人类在同自然环境长期斗争与适应过程中逐渐产生并发展起来的。人类一方面不断改变自身的功能以适应自然环境;另一方面不断改造自然环境使之适合于自身的生存和发展。早在2000~3000年前,中国古代《黄帝内经》一书就贯穿着人与天地相应的思想,“天地”泛指自然环境,相应即相互联系,说明人体与天时地理等环境因素的对立统一关系。在中国古代文化宝库中,对环境卫生曾有许多远见卓识和贡献。例如从一些古代城市的平面图和挖掘的城市遗址可看出,当时城市建设已注意选择地势、建筑方位、水源等。中国周代都城采用“前朝后市,左宗右社”的规划布局,把城市分为行政区、商业区、宗庙区、住宅区等,类似现代城市的功能分区。此类事例不胜枚举。在欧洲古希腊希波克拉底(Hippocrates)也曾写有《论空气、水和土壤》的著作,阐述外界环境因素对人体健康的影响。

18世纪末到19世纪初,欧美一些国家相继实现工业革命,建立了资本主义工业。工人生活在恶劣的劳动环境和生活环境中,车间、厂矿有害有毒气体弥漫,粉尘飞扬,居住拥挤,营养不良,以致疾病蔓延。19世纪末至20世纪初,社会生产和科学技术迅速发展,给人类创造了现代物质文明和日益丰富的物质生活条件,但与此同时,工农业生产排放大量有毒有害污染物——废气、废水、废渣严重污染大气、水、土壤等自然环境,破坏生态平衡,使人类生活环境质量急剧恶化,一些工业发达的国家环境污染日益严重,造成污染和中毒事件不断地发生,公害病猖獗,保护环境已成为刻不容缓的社会需求。60~70年代,世界范围内兴起了保护环境运动,医学界也广泛深入地开展了环境污染与健康的研究。

究。

环境卫生学的代表著作,首推前苏联马尔捷夫 1951 年所著《коммунальная гигиена》(中译本称《环境卫生学》),其内容主要是论述城镇居民区的市政设施、建筑、给水、排水、废物及废水处理等方面的卫生学问题和相应的技术措施。

环境污染逐渐加重和扩展,远远超出“居民区”,甚至到达人迹罕见的南极、北极、冰雪高原以及大气平流层。显然环境卫生学再沿用“居民区”这个概念已经不够了。在中国环境卫生工作与研究受前苏联影响很大,中国环境卫生学教材,虽然几次较大修订,但基本上还是沿着马氏环境卫生学思路,多年来,其重点均为环境调查评价与卫生监测,很少涉及环境污染对人群健康影响的调查研究,这种状况直至 1973 年中国召开第一次全国环境保护会议以后才逐渐有所改变。医学院校的环境卫生学教学与科研以及在卫生防疫站的实际工作,逐渐转向加强环境污染与人体健康关系的研究。

现代科学技术的发展,推动环境卫生学向纵深发展,可概括为以下几点:

**研究领域逐渐拓宽** 环境卫生学,在 20 世纪 70 年代初以前基本上是在宏观世界体系下进行大气、水、土壤、住宅卫生等研究,现阶段环境卫生学也从微观世界来研究外界环境对人体健康的影响,如对人体的研究已进入分子医学水平,目前有的国家还将食品卫生、乳制品卫生、社会心理因素对健康的影响列入研究内容,这就意味着近代环境卫生学,既研究生活环境,也研究生产环境,既考虑自然环境,亦注意社会环境,这对深入研究环境因素与健康的关系是十分有益的。

**对环境致病因子的研究越来越重视社会心理和生活方式对健康的影响** 随着科学进步,人们对环境致病因子的认识在不断深化。20 世纪 50 年代以前,人们关注的是生产环境有害因素对工人健康的损害;50 年代末,生活环境(空气、水、食物和住宅)对人群健康的作用日益受到人们重视,现阶段人们已经注意到社会环境和生活方式对健康的影响,如强调住宅的社会心理学效果以及社会心理紧张因素与癌症发病率关系等研究。

**研究方法与手段越来越先进** 如对环境毒理学研究已深入到亚细胞结构和分子水平,已普遍采用分子探针、单株细胞培养、微电极测量技术以及计算机定量分析方法;在环境流行病学及机体神经损害的研究方面,已广泛采用脑血流图、肺脑仪、神经传导仪和断层扫描等先进手段进行病原学监测及疾病诊断等,这对探讨环境有害因子的疾病前期效应和控制环境有害因素对人群健康的影响均具有重要作用。

**多学科交叉渗透** 环境卫生工作与研究涉及诸多学科,如必须应用现代医学各门学科(生理学、生物化学、病理学、微生物学、分子生物学、卫生毒理学、卫生统计学、流行病学等)的新技术和新方法,特别要采用流行病学调查与毒理实验研究相结合的方法,分别从宏观上研究环境与人群健康的关系,从微观上研究环境因素对机体的整体、器官、细胞、亚细胞到分子水平的作用机制和可能产生的近期的和远期的影响。此外,在环境卫生学研究中,越来越注意运用数学、统计学、计算机学、环境化学、环境医学、环境系统工程学、环境保护法学等。

**多方位协作** 环境卫生学无论是对大气、水、土壤等污染状况的调查与监测,还是对环境致病因子的研究,或是对预防对策的探讨与制订等,通常非一人一地所能解决,必须广泛开展多方位协作,有时还必须开展国际间合作,方可奏效。

环境与健康已成为当代社会人们共同关心的重大问题。公共场所和服务性行业的卫生研究,恶性肿瘤、心脑血管疾病的环境致病因素的研究与探讨,新的有毒化学品和有害物理因素以及城乡建设规划等研究与探讨等已成环境卫生学重要研究课题。可以预见,随着社会生产力的发展和科学技术的进步,环境卫生事业将会有更为广阔的发展前景。

#### 参考文献

1 杨铭鼎,主编.环境卫生学.北京:人民卫生出版社,1980

- 2 Rall D P. Pub. Health and prev. Med. 11th. ed., New York, 1980, 543
- 3 胡汉昇.中国百科全书,(环境科学·环境医学),北京:中国大百科全书出版社,1981
- 4 徐幼云,等主编.环境卫生工作手册,北京:人民卫生出版社,1983
- 5 姚志麟,陈秉衡主编.环境卫生学,北京:人民卫生出版,1986
- 6 蔡宏道,主编.中国医学百科全书(环境卫生学).上海:上海科学技术出版社,1987
- 7 童世庐.环境与健康,1989,6
- 8 祁家骥,主编.中国百科大辞典(医药卫生).北京:华夏出版社,1990
- 9 李修松,主编.当代学科大全.合肥:安徽人民出版社,1990  
(安徽医科大学祁家骥教授撰)

#### 氟与健康

fluorine and health 氟是人体必需微量元素,适量时对人体健康有利,但是过量又可引起氟中毒,包括地方性氟中毒和工业性氟中毒。前者又称为地氟病,遍及世界各地,尤以发展中国家为严重。中国除上海市外都有地氟病流行,氟斑牙患者几千万,氟骨症患者几百万,重症患者成为不可逆转的终身残废。且由于氟是电负性极强的化学元素,几乎可以和所有阳离子发生作用,这就注定了氟病的复杂性,成为迄今尚未取得突破性进展的原因之一。至于包括国防工业日益广泛应用有机氟与健康的关系,还只有少量研究,说明氟与健康的关系是富有生命力的和需要认真探索的课题。

从 1916 年 Black 发现氟中毒早期体征氟斑牙症,1931 年 Churchill 证实它和水氟有关,1939 年 Dean 提出至今仍在应用的氟斑牙分度法,1942 年 Dean 提出饮水氟 1.0~1.5ppm 有利于防龋,成为尔后各国饮水氟卫生标准的基准值,1945 年美国开始在自来水中加氟以来,全世界几十个国家和地区先后在自来水中加氟,亿万人口饮用加氟水,含氟牙膏也应运而生。利用氟来防龋,成为氟与健康的主题,放松了过量氟引起氟中毒的研究。尽管 1973 年 Roholm 报告了 68 例工业氟中毒病例,同年 Shortt 报告了印度 10 例地氟病患者表明氟中毒是全身性病变,不仅仅侵犯牙齿;1957 年 Габювич 强调社会经济水平和本病的密切关系;1963 年 Л. П. Крепкоговкин,1965 年 Leathewood 先后报告越南、泰国在饮水氟低的情况下,由于食品氟高引起氟斑牙流行的事实,都难以改变单一氟源(水氟)、单一体征(氟斑牙)和兴氟利以防龋的传统观念。这是一段漫长的弯路。究其原因,集中到一点,是思想方法的片面性、传统的医学教育分科过细、缺乏人以及人和环境的整体观念和单一学科孤军作战造成的结果。直至 1976 年贵阳医学院等单位以卫生科技人员为主体,会同环境地质、地球化学以及临床各科人员,回顾了历史,总结了前人的经验教训,在饮水氟只有 0.18ppm 的中国贵州省毕节地区发现了在高氟的地质背景下,由于燃煤烘烤玉米、辣椒等主副食品,极大地增加了这些食品的和空气的氟含量所导致的非水源性氟病区。这些工作以及魏赞道所提出的“多氟源、总摄入量”的概念,有力地推动了氟研究的发展。譬如 1979~1982 年卫生部委托贵阳医学院、四川医学院、辽宁省卫生防疫站联合主持的有 18 个单位 32 个省市参加协作的中国饮水氟最高容许浓度研究,就是以总摄入量为基础进行流行病学调查和动物毒理实验,提出了 0.6mg/l 为中国饮水氟最高容许浓度,成人日摄入量以不超过 4mg 为宜的报告,受到各方面的重视。这和 1984 年 Teotia 提出的饮水氟应在 0.5ppm 以下,1986 年 Scott 提出的只要经济许可,饮水氟应远远低于 1.0ppm 以下的意见是一致的。这项研究工作生动地说明,由于氟的来源很多,在不计算总摄入量的情况下,看到水氟低就去加氟是十分不安全的。正是在这些研究结果的影响下,中国广州市在 1983 年宣布停止加氟,在国内外引起强烈反响。该市经过 18 年加氟后调查表明,龋患率虽有所下降,但平均仍在 42% 左右,而平均氟斑牙率竟高达 52%。研究资料表明,龋

因的原因是多方面的,卫生习惯好坏便是一个重要的环节。而适宜氟与过量氟的过渡带又很窄,这就增加了饮水加氟的不安全性。80年代以来,世界范围的饮水加氟热正在降温,和中国一样,许多国家和地区已停止饮水加氟。在漫长的历史时期中,世界范围的饮水加氟与反对加氟之争,已到了白热化的程度。1986年在广州市召开的第3届中国氟研究协会学术会上,把“除氟害、兴氟利”定为共同的指导准则。

**基础研究** 70年代后期,Susheela通过动物实验提出胶原蛋白是氟化物作用的靶子。1982年她又通过实验表明,氟中毒家兔骨和肌腱中羟脯氨酸、饱和醛和赖氨酸减少,脯氨酸增高, $C^{14}$ -脯氨酸摄取率减低,认为氟可干扰胶原蛋白的羟化过程。1983年Mohan通过实验表明,氟中毒家兔尿氨基葡萄糖苷和羟赖氨酸水平降低,而羟脯氨酸水平增高,揭示胶原分解加速,胶原交联不足。1984年,Anasay对幼鼠骨折恢复期氟化物对骨胶原合成作用实验指出,实验组骨胶原合成不完全,而对照组正常。1985年,詹重方则对氟中毒孕妇引产胎儿长骨的研究表明,在光镜、电镜下已发现组织学改变,又一次证明氟离子可通过胎盘进入胎儿。1985年,于燕妮等探讨了氟骨症患者血清 $T_4$ 、 $T_3$ 、TSH含量变化。1987年,肖志忠等就氟对大鼠血清蛋白 $^{3}H$ -亮氨酸掺入的影响表明,摄入过量氟可抑血清蛋白质的合成。1988年,刘万兴等测定氟中毒仔鼠脑组织 $\alpha_2$ 和GABA受体密度探讨氟对大鼠发育中大脑的影响。结果表明,实验组仔鼠脑组织存在较高密度的 $\alpha_2$ 和GABA受体。1990年T. K. Das等报告兔子实验表明,慢性氟中毒可引起继发性肾上腺机能不全。而1991年李健学的实验报告指出的氟对有关蛋白质和氨基酸毒作用的分子及量子机理,同时探讨氟对氟性肾损伤的拮抗效应和机理,反映了当前氟研究高层次的最新水平。

**流行病学研究** 70年代,中国对地氟病开展了大规模调查,历时10年,已基本弄清病区分布情况。1989年1月出版的《中华人民共和国地方病与环境图集》发表了全国地氟病的分布情况。从“多因素、多元素”概念出发探讨氟病流行特点,是80年代的一大进展。1981年,Teotia提出的氟中毒流行模式表明氟源是一方面,另一方面则是由于饮食不足、营养失调。1982年,王笃圣等对氟病区营养调查资料表明,尽管摄氟量相当的病区,蛋白质、钙不足,维生素C及 $B_2$ 缺乏者氟骨症患病率要高。1981年Kasjenenko调查乌克兰的氟病时发现,虽然水氟未变,但6个村寨的氟中毒患病率比30年前低得多,论为是社会卫生条件改善而提高了对氟的耐受性,而营养又起着重要作用。

**微量元素在氟病流行中的重要作用**,已日益受到关注。1980年Jolly,1982年Krishnamachari先后报告高钼、缺铜锰为氟骨症膝外翻的原因。1987年Mittal所做动物实验表明,加铜可预防氟中毒家兔骨质疏松。1990年Yoshida等报告,用50mg氟/天饲养大鼠一年,引起机体内微量元素的变化,镁和钙、铝、铁、铜、锌都有较好的正相关。随着调查研究工作的深入开展,近10年来,中国先后在新疆、贵州、陕西发现了氟砷、氟铝、氟硒联合中毒病区,患者体内微量元素关系极为复杂,进一步揭示氟病研究的复杂性。

**测定方法研究** 1985年在日本举行的第14届国际氟学术会上表明,日本在这方面的研究取得了突破性进展。一方面是将经典的氟分析方法和微量氟分析化学的各种分离手段联合使用,以达到排除干扰、浓缩或分离样品中微量氟的目的。另一方面,是将新开发的超微量分析法应用于氟的微量分析。

**防治研究** 从30年代起人们就不断探索地氟病的治疗药物,但是至今仍未找到特效药。理论上说,凡可和氟离子结合的如钙、镁、铝等都可作为治疗药物,但效果也不理想。1975年Rao用蛇纹石治疗10例患者,近10年来蛇纹石及其制剂成为中国治疗氟病的主要药物,但仍存在疗效不一致或无效以及易于混合石棉致癌的问题。1991年,刘海滨等通过系统研究认为经精选的蛇纹石确有良好疗效,在严密检验前提下无致癌危险。1980年,周琳业等用硼砂治疗31例患者,效果明显。1988年高淮钢等对氟

中毒动物加硼治疗后,促进氟的排出,骨中Cu、Mn明显增加。

中药方剂在中国得到广泛应用。以中药茯苓冲剂、复方硼砂片、茯苓丸、骨灵仙等效果较为显著。

事实说明,预防无疑是重要的环节。1987年中国政府拨款在三峡地区进行的改灶降氟试点工作,历时3年完成15万户的改灶任务。有的氟病区,如广东潮阳上坑村、河南偃师县的山化乡,按照防病治病和脱贫致富相结合的原则办事,取得显著效果。1991年,魏赞道等在第五届中国氟协学术会上提出了地氟病既是地球化学性疾病,又是社会性疾病,严重地受社会经济、文化、教育、风俗习惯的制约的概念,论述了落实初级卫生保健措施,开展以降低总摄入量为中心的综合治理的必要性。即在从多种途径降低总摄入量的同时,多方面加强预防保健以提高人群的抗氟、抗病能力。

应该指出,地氟病的防治任务仍然十分艰巨。如何从社会医学原则出发,针对本病的复杂性采取政府协调、负责,群众参与的方式,针对“多元素、多因素”的特点,继续开展包括社会医学、管理科学在内的研究,是当务之急。与此同时,要把工业氟、有机氟与健康及疾病关系的研究提到日程上来。

#### 参考文献

- 1 Dean H T. Pwb Heal Rep., 1935, 50(13):421
- 2 Shortt H E. et al. Indian J. Med. Res., 1937, 25(2):533
- 3 Rohelm. Fluorine Intoxication, London: Lewis J. K. 1937
- 4 Rao N V R N. Fluoride, 1975, 8(1):12~13
- 5 Krishnamachari K A, et al. Fluoride, 1982, 15(2)
- 6 Suoheela A K, et al. Fluoride, 1982, 15(1)
- 7 贵阳医学院主编. 地方性氟中毒. 贵阳:贵州人民出版社, 1986
- 8 魏赞道,等. 国内外医学科学进展, 卫生部科教司、上海科技情报所, 1986
- 9 魏赞道,等. 流行病学进展. 北京:人民卫生出版社, 1990
- 10 魏赞道,等. 氟研究通讯, 1991, 6(1):4~6

(贵阳医学院魏赞道教授撰)

#### 空气污染与肺癌 air pollution and lung cancer

人呼吸的并非纯净的空气,空气中都不同程度地含有来自人类生产、生活活动所产生的夹杂物或称污染物。工业革命以来,尤自二战以后,大气污染日益明显,以1952年伦敦的烟雾事故最令人瞩目。

半个世纪以来,国内外资料表明,多种常见癌症如胃癌、肝癌、子宫颈癌的发病率与死亡率都有平、降趋势,而肺癌在大部分国家不论是农村还是城市,其发病率和死亡率均呈增长趋势,且速度较快而跃居于第1、2位。各国肺癌发病率与死亡率相悬殊,一般工业发达国家高,发展中国家低,大城市比中小城市高;城市比农村高。我国肺癌的发病率与死亡率与世界各国相比居下水平,但发展趋势类似,因此空气污染是最受重视的一个致肺癌因素。在污染空气的中能检出的致癌物质为多环芳烃及其衍生物,某些无机元素砷、铅、镉、镍等,其中致癌性最强的是多环芳烃类化合物中的苯并芘[B(a)P],它的致癌性已为动物实验所证实。

吸烟是人类肺癌最重要的危险因素和主要病因,且已经国内外大量的人群流行病学调查所确认。吸烟者患肺癌的危险性为非吸烟者的10.8倍。中国每年有20万人因吸烟引致肺癌而死亡,即使被动吸烟人群,危险性也相应增加,据调查报道,丈夫吸烟的妇女其肺癌的危险性比其他被动吸烟妇女高30%。

上海曾对大气污染轻、中、重3类地区作过调查,发现不论男、女在3区不吸烟人群的肺癌标化死亡率都无显著差别,这一结果与以往美国和英国所进行的大规模的队列研究结果相仿,说明一般的大气污染对吸烟人群未必有强的致癌作用。但男性吸烟者的肺癌标化死亡率从市区到郊区仍呈适度下降趋势,说明吸烟与一般大气污染可能有致癌的协同作用。

近年来开展的非吸烟者肺癌病因因素研究表明,女性肺癌的发生与烹调时产生的菜油油溶性烟雾有关。云南宣威地区肺癌发病率为全国之冠,妇女肺癌高发尤为突出,而妇女大都不吸烟,主要由于室内的煤烟污染,且经深入调查证实,室内空气污染物中含大量致癌B(a)P,且其浓度与肺癌死亡率间呈剂量反应关系。因此,吸烟与空气污染在致肺癌的因素中谁更重要,要视具体条件而定,在一般性空气污染条件下,吸烟可能是肺癌的主要因素,而在严重的空气污染条件下,则吸烟因素又可能被掩盖。吸烟实际上也是一种个体制造的空气污染,香烟在燃烧时可产生1000多种有害成分,其中主要有毒物质有尼古丁、焦油、CO、放射物质以及强致癌物B(a)P和镉等。

在空气中除存在种种化学性污染物外,还存在放射性物质。在低层大气中存在的主要放射性物质为氡及其短衰子体。氡的衰变子体具有化学活性的,吸入后沉积于肺,衰变放出 $\alpha$ 、 $\gamma$ 射线,对肺产生危害。一般情况下氡及其子体在大气层中存在浓度较低,但在特殊的地域、燃气和室内建材条件下也可大为增高,据美国的估计,肺癌患者约有10%与室内氡污染有关。

肺癌按病理学分类有不同类别。环境污染与肺癌类型有关,由呼吸道侵入的以鳞癌为多,由其他途径侵入的以腺癌为多。

前述种种因素均为环境因素,即属外因。肺癌发病的潜伏期很长,可延迟几十年,在此期限内,外环境因素的变化强度错综复杂,即使在条件等同的外环境中,个体发病情况也不尽相同,这取决于个体的易感性不同。随着分子生物学的发展,70年代以来,对癌基因的研究已成为肿瘤基础研究中最活跃的领域之一,对癌易感性的认识不断深入,癌基因是正常基因组织部分,很多种癌已经找到其相应的癌基因,现已发现20余种癌基因,肺癌与Kras癌基因突变有关。相应癌基因如何在外环境下调控、活化以至表达,有其一套复杂的机理和系统,而个体之间各有所异,即表现为人的易感性。

#### 参考文献

- 1 姚志麟,主编.环境卫生学,北京:人民卫生出版社,1986.59
- 2 关乃源.工业卫生与职业病,1987,13(4):245~248
- 3 Nero AV Jr. Controlling Indoor Air Pollution Scientific American 1988,258:42~48
- 4 E. 帕尔曼多,著.贾立斌,译.癌基因上.上海:海医科大学出版社,1990.8~10

(中国预防医学科学院环境卫生与卫生工程研究所王菊凝研究员撰)

## 中国高层楼房供水卫生研究

the sanitar. research to supply water in high-rise in China 高层楼房供水卫生又称楼房二次加压供水卫生或高层建筑二次供水卫生,是给水卫生中的新课题,是自来水卫生问题的延伸。梵文医术和埃及碑文中,已有关于水处理知识的记载。Hippocrates(公元前460~前354年),曾推荐用布袋滤水,后被称为“希波克拉底袋”。

公共给水在古代就有所发展,随着都市化的进展,其重要性更加明显。John Snow于1854年在伦敦市区所进行的详细的霍乱流行病研究,断定供水是传播霍乱的根源。19世纪中期,英国William Budd指出,传播伤寒的最主要的方式之一就是饮水。如1907年Hazen所述,过滤可除去水的混浊和颜色,并能除去大约99%的细菌。Johnson于1908年所引用的加氯消毒是水处理中最大的进展,使水质发生了根本的变化。在此时期水净化技术已有许多精心的改进,但在基本概念上突破不多。随着都市化住宅屋顶蓄水池的建盖,在设计、选材及卫生防护方面的问题,必然暴露出来。

60年代以来,城市楼房建筑向高层发展。中国长春市卫生防疫站为探讨集中式给水,经庭院地下、地下室、锅炉房等贮水设施贮水,经水泵加压把水送到顶楼水箱,靠自然高差再把水送到各用水房间,经以上环节后自来水水质有无改变或污染,于1983年4~6月进行了卫生学调查和水质评价。通过对34件入楼水和

末梢水进行配对检验,结果表明除氯化总铁外,其他指标变化不大。统计学处理后差异不显著。故此种供水方式是基本符合卫生要求的。由于一些高层楼房把楼下贮水设施安装在锅炉房内,大部分贮水设施防锈、防尘和除污措施不佳,使自来水入楼后受到不同程度的污染,末梢水质有所改变,尤其总铁超标件数较多,检验值(标准0.3mg/L)有的高达3.0mg/L。

沈阳市楼房二次加压供水卫生现状调查(1987)计1388处,占全市总用水量的4.7%。蓄水池(箱)大部分卫生状况较差,没有防尘盖及防护带,有涂料的占调查总数的41.1%。细菌总数、耗氧量、U值检验 $P < 0.01$ ,从而看出蓄水池及管网受到更为突出的有机物的污染。

李宝云等(1987)的《高层楼房水箱水质监测分析》披露,监测的27个水箱中5个为钢板加水磨石结构,22个为水泥地,水箱平均容积为11.3m<sup>3</sup>,平均蓄水量为8.44m<sup>3</sup>,供水624户、2330人。水箱监测分表层水、底层水。底层水与自来水有显著差异的( $P < 0.05$ )有9项,占12项T检验的80%。其9项是色度、混浊度、H<sup>+</sup>浓度、氯化物、耗氧量、总大肠菌群、细菌总数、铅、硝酸盐氮。表层水与底层水有显著差异的( $P < 0.05$ )有5项,占40.6%,如色度、耗氧量、总大肠菌群、细菌总数、铅。

昆明市高层楼房27个水箱,水质监测共计756项次,底层水共有18个项次超标,总大肠菌群最超标7932倍。底层水铅浓度与浊度,经相关分析有中度相关。有两水池(1975年建造),一个呈墨绿色,另一个有藻类生长,均有异臭。浊度超标17.6~127倍,总大肠菌群超标75.6倍。

从北京市高层建筑二次加压供水设施卫生学评价(1990)水质分析结果中可以看出,钢板水箱的水色度明显高于水泥水箱;新建成投用的水箱水色度、浊度、亚硝酸盐氮等严重超标;经水箱储存后,水中余氯含量有下降趋势,表明存在二次污染的条件。有机物主要来自水箱涂料,包括可疑致癌物、促癌物、致植物、致畸致突变物。

锦州市的《二次加压供水污染的事故调查》令人触目惊心。两年内曾发生3起污染事故:(1)1987年8月,西民生住宅楼由于大雨后生活污水灌入蓄水池使水污染,在调查的674人中,有77.6%的人发病。(2)1988年1月,市兽医学校的地下蓄水池,因溢流管直接连在下水井中,下水管受冻而被堵塞,致使污水流入蓄水池,在调查的600人中有100人发病。(3)1989年5月,平安小区住宅楼蓄水池溢流管经一缓冲井连在下水井中,因无人清理而堵塞污染了水,在调查的787人中有354人发病。经检测水中总大肠菌群数达2380个/L,细菌总数达10000个/ml。发病者有恶心、腹痛、腹泻等症状,发病时间集中,发病率显著高于未饮用污染水的居民。经济损失近万元。

江苏省南京的材料(1987)表明,40幢住宅楼顶水箱,经浮球阀控制充水,水在水箱内贮留时间为19~30h。其中4幢楼为铁制水箱,共12只,使用年限为7~10a,均无防锈措施。其余水泥制水箱108只,有32只未加盖。水箱自使用以来均未清洗,水箱内壁及底部淤泥沉积,现场观察可见红虫、孑孓。铁制水箱内外层锈蚀,隔夜水呈现红色。二次供水组居民的消化道症候群(反酸、腹部不适、腹痛、腹泻)人数比对照组多( $X^2 = 48.47 P < 0.01$ )。调查证实,居民消化道症状发生率,随细菌总数的增多而升高( $r = 0.9815 P < 0.05$ );水箱贮存19~30小时余氯含量降低,细菌总数增加( $r = -0.4193 P < 0.05$ ),呈负相关。

吉林省卫生防病中心(1988)《二次供水对人体健康的影响》分析出,对消化系统和对老年人及儿童的影响情况如下:如二次供水环节较多,多属生物性污染,水中致病菌进入人体后会造成流行性腹泻、痢疾、肠伤寒、肝炎、二次供水在水箱内停留,使水中铁含量下降,较一般水质软,长期饮用易患心脏病、高血压、心血疾病,对儿童的智力发育和佝偻病也会产生一定影响。

为了有效地管好二次加压供水卫生,阜新市制定了《办法》、《标准》,实行依法和标准管理。采取分层次各部门的系统管理和职能部门科学管理办法。(1)分层次系统管理:①由政府组

织卫生、城建、建委行政领导部门按“办法”要求,通过现场全面考察,检查主管部门的供水工作,每年一次。②供水的主管部门按照“标准”要求,管理供水单位改建,对供水单位、扩建和新建供水设施进行审查和检查督促。③产权单位,以各种工作制度管理供水站,建立健全检查、消毒、报告等制度。达标,二次加压卫生管理,有人管、有人查、有人发现问题,有人报告、有人负责。(2)卫生职能部门实行科学管理;重点是监督、监测。对新建、扩建供水设施参与选址和设计审查、竣工验收、建档、发放卫生许可证。对供水人员培训、体检、日常卫生和水质监测。防止污染的措施有“布、距、分、抗、供、管”6项做法。(1)供水站布局:实行3室1池格局,设休息室、操作室、机房室和贮水池。(2)三管分开保持一定距离:上、下水管分开,分建于楼前上水,楼后下水,两管相交处、下水管接口处、下水井内衬处均用有机硅水泥砂浆防护。(3)泵房和贮水池分开。(4)地下贮水池抗污染的作法:贮水池高出地面;水池不设地下溢流管;设工作口、观察口,口有盖有盖,并设水位自控器。池体防渗漏,采用钢筋有机硅混凝土结构,或内衬4cm厚有机硅水泥砂浆防池体渗漏。(5)供水方式:采用闭路循环供水。(6)管理:水站设防护围栏,场地保持清洁;贮水池半年至1年清洗1次;供水前检查水中余氯,无氯不供水,工作人员体检、培训1年1次。

江苏省陶炳根等建议:高层二次供水设施的卫生管理制度,由住宅楼群的所属单位执行,定期冲洗去除污垢,专人负责维护、检修、检查、加盖、加锁等防尘消毒措施的落实。高位水箱的设计可以改进,把水箱的水平底部改为漏斗状,出水管由侧面改在漏斗底部,淤泥不易沉积,并在出水口处装上排水阀门,易保持水箱清洁。

(昆明市卫生防疫站李宝云主任医师撰;钱碧玉审)

## 饮水消毒 disinfection of drinking water

饮水消毒是为消灭水中病原体,使饮用水细菌学指标达到卫生标准规定,确保饮用安全所采取的卫生措施。饮用或接触病原体污染未经消毒的水可致介水传染病,如由细菌引起的霍乱、副霍乱、伤寒、细菌性痢疾、腹泻及其他肠道传染病;由病毒引起的病毒性肝炎、脊髓灰白质炎、病毒性痢疾、传染性结膜炎;由寄生虫卵引起的血吸虫病、钩端螺旋体病、阿米巴痢疾等。此类疾病来势凶猛,波及面广,发病率和死亡率均较高。

饮水消毒可分为物理法和化学法两大类。煮沸、紫外线照射等属于物理法,这类方法仅适用于分散供给饮用水的特殊场合。投加消毒剂的方法属于化学法,因其适用于各种规模的水厂,是饮水消毒研究的重点。

投加氯或含有效氯化合物杀灭水体中病原体的方法称为氯化消毒法。早在1846年, Semmelweis首次用氯水在病房中消毒,使产妇的产褥热死亡率由12%降到1.27%。1881年,德国细菌学家在实验室证明,次氯酸可将培养的细菌杀死。1897年,在英国Maidstone伤寒病流行时, Sims Woodhead曾用漂白粉对供水消毒。1902年,在比利时小镇Middelkerke首次用次氯酸钙处理水。1903年,比利时 Maurice Duyk将氯酸钾和草酸混合制成氯气对饮水消毒。1915~1925年间,主要用次氯酸消毒,并对饮水氯化抱有怀疑和偏见。1925年以后出现液氯消毒,但对加氯消毒真正产生兴趣是在1935年以后。从1945年起,水厂加氯逐步达到半自动化,并对消毒效果和影响因素进行了系统的研究。20世纪50~60年代,氯的制剂增多,消毒效果提高,并逐步实现自动化。

目前,大中型水厂大多数用液氯作消毒剂。氯有特异臭味,在常温下加压至0.608~0.907MPa成为液氯,可用钢瓶贮藏和运输。氯加入水中迅速水解, $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^- + \text{HOCl}$ ,形成的中性次氯酸分子体积小,当其扩散到带负电荷的细菌表面时,能穿透细菌的细胞壁,进入细胞内部,并氧化细胞中磷酸丙糖脱氢酶的巯基,使酶系统破坏而导致细菌死亡。次氯酸在水中可以离解: $\text{HOCl} \rightleftharpoons \text{OCl}^- + \text{H}^+$ ,其速度随水温和 $\text{H}^+$ 浓度而变

化。在常温和 $\text{H}^+$ 浓度大于 $10^{-5}\text{mol/L}$ 时,100%的次氯酸呈分子状态。随着 $\text{H}^+$ 浓度降低,HOCl逐渐减少, $\text{OCl}^-$ 逐渐增多。当 $\text{H}^+$ 浓度小于 $10^{-10}\text{mol/L}$ 时,HOCl几乎全部离解成 $\text{OCl}^-$ 。次氯酸根离子也有杀菌能力,但因与细菌带同名电荷,杀菌能力较弱。

影响加氯消毒效果的因素有:(1) $\text{H}^+$ 浓度,控制水的 $\text{H}^+$ 浓度,可提高HOCl百分率。 $\text{H}^+$ 浓度为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 消毒效果最好。 $\text{H}^+$ 浓度小于31.62nmol/L,效果明显减弱。(2)水温:常温范围内温度变化对氯消毒效果的影响不明显。但如水中存在氨氮,可与氯作用生成杀菌能力较差的氯胺。水温越高,氯胺消毒效果越好。(3)浑浊度:水中的杂质要消耗一部分氯,且微生物可隐藏其间。因此,水越浑浊,消毒效果越差。(4)接触时间:投氯量适宜,接触时间长,消毒效果好。但过长期余氯会散失。一般要求水与氯的接触时间不少于30min,氯胺消毒应不少于2h。(5)氨氮:游离氨与氯结合成化合性氯,可降低氯的消毒效果。(6)投氯量:为杀灭水中细菌等微生物,氧化水中有机物及还原性无机物所需的氯量称为需氯量。投氯量包括需氯量和余氯量。水质、接触时间相同,投氯量越大,消毒效果越好。但水中余氯不宜过多,过大不仅浪费,还会因氯气味使用户反感。实际的投氯量应通过实地试验确定。

根据水源水质条件,加氯点可选择在净水过程的混凝沉淀之前、过滤之前或过滤以后,也可在滤前和滤后各加氯一次,有时还可在配水管网中加氯,以保证管网末梢要求的余氯量。为保证安全和准确计量,应采用加氯机投加液氯。

小型水厂和分散式给水可用漂白粉或漂粉精作消毒剂。为适应农村饮水消毒的需要,根据电解原理研制的能在现场制备次氯酸钠的设备,即次氯酸钠发生器正在推广应用。次氯酸钙与次氯酸钠在水中生成次氯酸根离子,然后水解成次氯酸,其消毒效果比液氯差。

因杀菌效果好,价格低廉、设备简单、操作管理方便,能保持一定的余氯,且适用于各种规模的水厂,故氯化消毒的应用和研究一直持续至今。但到1974年,荷兰Rook和美国Bellar等分别报道在自来水中检出以氯仿为主的三卤甲烷类化合物,并指出三卤甲烷在水源中含量很少,主要是在氯化消毒过程中形成。据此,1975年美国环境保护局对80个典型城市的自来水和水源进行普查,结果是:在水源中三卤甲烷类化合物含量很少,但氯仿在80个城市的自来水中皆可检出,并确认是氯化消毒后形成的。1976年美国国立癌症研究所报告,口服大剂量氯仿可使实验动物大鼠和小鼠发生癌肿。这些报道使人们对饮水氯化消毒的安全性产生了怀疑。为此,各国学者相继开展了大量的调查研究工作。1985年Lucas报道,用气相色谱-质谱仪联机分析已从饮水中鉴定出1100种以上的有机物,其含量多为 $\mu\text{g/L}$ 水平或更低。美国对饮水中350种有机物污染物的毒性已进行鉴定,其中属致癌物18种,可疑致癌物69种,致突变物47种。当然,众所关心的是:长期饮用氯化消毒水是否能导致癌症发病率增高。由于该问题涉及因素很多,近几年虽做了大量工作,但仍无一致结论。多数认为,人群长期饮用氯化消毒水,其膀胱癌、胃癌、结肠癌、直肠癌的发病率比不饮用氯化消毒水者高。

如何减少氯化消毒过程生成的不利副产物是当前和今后应重点研究的课题。主要途径有:(1)减少可形成有机卤化物的前体物质;(2)改变加氯点和加氯方式,减少产生卤化反应的机会;(3)采取净化措施,除去已形成的有机卤化物;(4)选用无不利副产物的消毒剂。

目前看来,臭氧( $\text{O}_3$ )较有实用价值,且部分水厂已经采用。臭氧加入水中立即放出氧化能力很强的新生态氧,它可杀灭一切细菌,对病毒、芽孢等也有很好的杀伤效果,但其机理尚不清楚。臭氧消毒接触时间短,不受水中氨氮和 $\text{H}^+$ 浓度的影响,还能氧化水中有机物,对除铁、除锰、除臭、去色、去味均有良好效果。臭氧不能贮存,宜就地生产,就地使用。生产臭氧耗电量大,成本较高,且在水中维持时间短,无持续杀菌能力。消毒过程产生的副产物及其毒性尚有待深入研究。

二氧化氯( $\text{ClO}_2$ )也是一种较有前途的消毒剂。早在20世纪40年代就有过用 $\text{ClO}_2$ 消毒饮用水的报道,因其使用和制造比氯麻烦,一直未推广应用。1981年,美国规定饮水中总三卤甲烷不得超过 $100\mu\text{g/L}$ , $\text{ClO}_2$ 取代液氯的研究又被重视。 $\text{ClO}_2$ 是深黄绿色气体,可用氯与亚氯酸钠或盐酸与亚氯酸钠作用制备。为保证操作,要求在空气中的浓度不超过10%。浓缩加压会使它变得不稳定,加稳定剂后虽可贮藏一定时间,但成本增加,故宜就地生产,就地使用。 $\text{ClO}_2$ 是强氧化剂,在水中与有机物形成三卤甲烷的可能性小。但可将硫化物氧化成硫酸盐离子,将氰化物氧化成氰酸盐、二氧化碳和氮,将溶解性二价锰氧化成不溶性高价锰,还可氧化水中的酚。与水中的氨不起作用,不会形成氯胺。其消毒能力次于臭氧而比氯强,且有比臭氧优越的持续消毒效果,无令人厌恶的氯味。 $\text{ClO}_2$ 可还原为亚氯酸盐。从20世纪70年代末期起,不少学者研究了二氧化氯、亚氯酸钠对实验动物与人体健康的影响。如1979年Heffernan用含 $500\text{mg/L}$ 亚氯酸钠的饮水喂养大鼠76d,大鼠的红细胞数及血红蛋白含量皆有降低。饮水中亚氯酸钠降到 $10\text{mg/L}$ 则无不正常现象。1982年,Lubbers等以自愿者作实验,被试者分别饮用含二氧化氯、亚氯酸钠、氯酸钠各 $5\text{mg/L}$ 的饮水连续84d,经检查,被试者的血液、尿液分析皆无不正常,但个别被试者由于患有葡萄糖-6-磷酸脱氢酶(G-6-PD)缺乏症,其血液学与血液化学数值在正常范围内有所变化。目前认为,如用一般饮水消毒用浓度,二氧化氯、亚氯酸盐、氯酸盐对正常人体不致引起不良反应,但应特别注意其溶血作用和对甲状腺素的影响,用量亦应限制。美国环境保护局建议,二氧化氯、亚氯酸盐、氯酸盐的总量应不超过 $1\text{mg/L}$ 。

可供消毒饮水的制剂很多,如氯胺、碘和溴制剂、卤间化合物、过锰酸钾和高铁酸钾、过氧乙酸等。但至今尚未找到一种十分理想的消毒剂,对饮水消毒的研究仍需继续下去。

#### 参考文献

- 1 Bull R J. *Envir. Sci Technol.* 1982, 16: 554~559
- 2 Herren-Freund S L, et al. *Envir. Health Perspect.* 1986, 69: 59~65
- 3 Condie J W, *J Am Water Works Assoc.* 1986, 78(6): 73~78
- 4 Kohei Urano, et al. *Water Res.* 1991, 25(12): 1459~1464  
(同济医科大学罗启芳教授译)

**矿泉水与健康** 矿泉水是一种特殊水,不宜作为一般饮用水,也不宜作为一般生产用水。它是一种冷的或热的具有保健意义的、高矿化度的或有特殊成分的水。它不同于一般地下水,在于它所含物质与所具功能与一般地下水有明显的、实质性的差别。

要给矿泉水下一个科学的定义较困难。因为将可溶性物质高于 $1\text{g/L}$ 者称为矿泉水,但有名的矿泉水可溶性物质往往少于 $1\text{g/L}$ ,如称含有生理活性物质如碘、溴的水为矿泉水,有时有保健功能的却是其中的有机物,如前苏联纳弗土沙(нафтуса)矿泉水;有时有特殊生理作用的又是含有一定量氧的水。从广义上讲,所有天然水都含有一定的矿物质,少的如雨雪水,多的如盐井水,含量可达 $500\sim 600\text{g/L}$ ,但这都不是一般概念的矿泉水。所以,虽然在16世纪的文献中已有“矿泉水”的记载,然而无论从化学上或物理上对矿泉水尚不能形成一个明确的科学定义,而客观需要对矿泉水有一个相对说明,或者下一个有相对意义的定义。一些国家采用的规定(定义)大同小异。1981年世界粮农组织/世界卫生组织(FAO/WHO)在《天然矿泉水法典标准》(C. S108-1981)中提出的定义是:(1)天然矿泉水以含有一定量的矿物质和微量元素或其他组分为特征;(2)是地下承压层水的天然出露或由钻井取得;(3)其化学成分、流量和温度保持相对的稳定;(4)是在保证原水细菌学安全、卫生的条件下开采;(5)除本标准许可的规定外,不得进行任何处理;(6)符合本标准所有条款的规定。这里所指的矿物质、微量元素或其他组分的“一定

量”在不同的国家也不完全相同,如多数国家规定矿泉水中的矿物质盐不得少于 $1000\text{mg/L}$ ,或者游离二氧化碳在 $250\text{mg/L}$ 以上,对微量元素的含量也有具体的规定。

1987年12月29日发布的《中国饮用天然矿泉水标准》(GB8537-87),规定矿泉水水质的界限指标有9项,除游离二氧化碳或矿化度分别不得少于 $250\text{mg/L}$ 、 $1000\text{mg/L}$ 外,还规定了锂、锶、锌、碘、硒、溴和偏硅酸要达到的界限值。一个国家对本国的矿泉水资源按本国标准进行评价时,除了视其水质是否符合各项界限指标之外,还要注意水中的某些元素及污染物指标不得超过标准规定的限量值。

对矿泉水开发的认可有规定的程序。前苏联规定,瓶装矿泉水采用的是经前苏联卫生部批准的天然矿泉水;英国规定矿泉水的开发要有英格兰的和威尔士的地区委员会或伦敦自治区委员会的认可,在中国则要经省(直辖市、自治区)矿泉水技术评审组(或委员会)认可,出省或出口销售的则要经由卫生部、轻工业部和地质矿产部有关专家组成的国家矿泉水技术评审组的认可。

以上是指一般饮用的矿泉水,还有供医疗用的和浴用的矿泉水及其相应标准,这种矿泉水的特征是矿化度或者特殊成分含量较高。如前苏联规定医疗矿泉水的矿化度在 $2\text{g/L}$ 以上。日本规定疗养泉中9种特殊成分的界限值,其中如总硫应达到 $2\text{mg/L}$ ,游离二氧化碳应达到 $1000\text{mg/L}$ 等。1964年中国卫生部、科委在第1次理疗疗养专业会议上拟定了《中国医疗矿泉水标准(草案)》,1981年对《标准草案》进行了修订,但修改后的标准至今未由国家正式颁布。

人体血液中各种化学元素的含量与地壳中元素的丰度有密切的相关性。人类主要通过食物、饮水从环境中获得所需的化学元素来维持正常的新陈代谢。如果这种关系失调,就会出现病态,矿泉水则是良好的矿物质补充源。矿泉水中含有一定量的 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、微量元素和某些其他成分,如溴、游离二氧化碳等。 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 能维持细胞与体液的水分平衡,影响神经传导,对肌肉和心肌正常跳动有重要作用; $\text{Ca}^{2+}$ 有明显的生理功能,不仅是强壮骨骼与牙齿所必需,对心跳的调节、血流的凝调和神经传导都很重要; $\text{Mg}^{2+}$ 也是维持心血管正常功能所必需的。重碳酸盐类对消化系统有良好的生理调节功能,能促进胃酸分泌过多慢性胃炎,胃和十二指肠溃疡,慢性肝、胆、胰、尿道炎症和糖尿病、草酸尿等代谢病患者康复。重碳酸盐泉水多含有游离二氧化碳,中国广东龙川的矿泉水和黑龙江五大莲池的矿泉水均属此类。含重碳酸盐的氯化物泉水对胃液分泌不足慢性胃炎有良好的缓解作用。硫酸盐矿泉水能促使肠蠕动,达到一定浓度者能治疗习惯性便秘,使肥胖症患者减肥。中国的矿泉水多以偏硅酸达到界限指标为其特征。硅有促进生长发育的作用。中国河南省陕县温塘矿泉水的偏硅酸含量为 $58.8\sim 64.5\text{mg/L}$ 。1991年,中国预防医学科学院环境卫生监测所陶勇、王华敏等对长期饮用该矿泉水的村民健康进行调查,结果表明该村男、女小学生身高分别比对照村高 $3\text{cm}$ 和 $5\text{cm}$ ;体重增加 $2.7\text{kg}$ 和 $4.6\text{kg}$ ;居民期望寿命比对照村高3岁;平均死亡年龄延长5岁;两村居民的白细胞数和患病率也有显著性差异。动物实验资料还表明,温塘的矿泉水有抑制肿瘤生长的作用。1973年,WHO专家委员会提出有14种微量元素被认为是动物所必需的,即铁、碘、铜、锌、锰、钴、钼、硒、铬、镍、锡、硅、氟和钒。1982年,孔祥瑞提出人体必需的14种微量元素中包括上述WTO提出的除硅以外的其余13种和锶。随着科学技术的进步,很可能又有新的其他元素加入必需微量元素的行列。所谓必需的微量元素,即人体在饮食中持续缺乏这种元素可导致非正常的生理变化,加入这种元素达到生理需要量后即可恢复正常状态的一种元素。微量元素参与人体酶、激素、核酸的代谢,具有巨大的生物学作用。这些元素在矿泉水中或多或少存在。中国矿泉水中的微量元素以含硅、锶较多,其次为锌、锂、硒。硅除了能促进骨骼的正常发育外,还有保护心血管系统的功能。中国国标规定偏硅酸的界限值为 $25\text{mg/L}$ 。锶在自然界分布很广,是人体骨骼及牙齿的

正常组成成分,临床上有用溴化镉、碘化镉治疗荨麻疹的。但摄入过多的镉会引起镉中毒,中国规定矿泉水中镉的界限指标为0.2mg/L,限量指标为5mg/L。日本规定镉的界限值为10mg/L,远高于中国的规定。锌是人体必需微量元素,人体缺锌的病理状况包括生长停滞和少年期性不发育,特异性味觉和创伤愈合受损,免疫缺陷,体质虚弱。通过补锌,可以改善这些症状。镉对中枢神经系统有调节作用,能安定情绪,改善造血功能,提高人体免疫功能,在临床上用于治疗精神病及白细胞减少症。硒是谷胱甘肽过氧化物酶结构中的必需成分,该酶与维生素E在代谢方面的功能相似,即催化H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的还原,抑制过氧化作用而引起的细胞损坏,对人体有抗衰老、抗慢性病作用。矿泉水中还有其他人体必需的如铁、碘、钴、铜等元素。

矿泉水的开发利用改变着人类的饮料结构。1990年,美国的矿泉水销量达30亿美元。在中国沿海地区,特别是广州、深圳一带,矿泉水正在逐渐取代甜饮料。饮用矿泉水已成为一种时尚,一种文明富裕的象征。这种文明也象征着健康。

#### 参考文献

- 1 吴联熙,译. 环境与健康杂志,1986,增(3):54~58
- 2 陶勇,等. 环境与健康杂志,1992,9(3):101~103
- 3 孔祥瑞. 必需微量元素的营养、生理与临床意义. 合肥:安徽科学技术出版社,1982. 3~14
- 4 陈学存,等译. 人体营养的微量元素(1)(世界卫生组织专家委员会的报告)国外医学参考资料卫生学分册,1974,(1)24~26
- 5 吴柏龄,译. 硒的生物化学 国外医学卫生分册,1984,(6)338~340

(中国预防医学科学院环境卫生监测所  
徐方研究员、陶勇助理研究员撰)

**村镇规划卫生** villages and small town planning sanitary 村庄是村民生活和生产活动的基地,分中心村(村民委员会所在地)和基层村。集镇则是农村一定区域内的政治、经济、文化、科技和服务中心,为区或乡(镇)人民政府所在地,有中心和一般集镇之分。村镇就是村庄和集镇的总称。

中国前人早就十分重视住宅卫生。晋代张华的《博物志》关于“居无近绝溪、群塚、孤壘之所,近此则死气阴匿之处也”,就是指建造住宅首先要选择好地基,远离不卫生的场所。30年代初,梁漱溟发动的“乡村建设运动”也曾风靡一时,倡导“使社会重心从都市移植于农村”和“动员农民讲究卫生”等。

发达国家由于大城市人口急剧膨胀,也回头转向农村的开发。早在1959年,美国联邦政府就通过了印地安区卫生设施法,依据此法,印地安人卫生服务总部的环境卫生处直接主持乡村建设规划的制订与全部环境卫生建设的实施。仅20年时间,就将一个落后的居民区建成为住房、供水排水、污水污物处理等设施均达到先进水平的社区。前苏联对农村规划卫生制订了19个卫生法规与标准,作为卫生监督的依据。国外还有一些发达国家的村庄和小城镇,不仅具有畅通的道路和电信设备,而且有完善的上水、下水和污水、污物处理设施,以及设备良好的医疗服务、学校、幼儿园、文化中心、商业中心等,城乡差别大大缩小。前联邦德国、匈牙利还注重乡村和家庭环境的绿化和美化,许多住宅被绿围红绕的花丛所覆盖。

调查现状,找出问题,规划试点,健全法规,是现阶段中国村镇规划卫生所采取的主要步骤和措施。1984年,全国爱国卫生办公室抽样调查23个集镇规划卫生现状;随后又配合建设部在四川的三水镇、安徽的七里塘镇和江苏的暮溪镇进行综合规划试点;1988年组建了村镇规划卫生标准研制组,已经完成5个大项共25条卫生要求和29项卫生标准值的制订(待审批,暂称标准建议值,下同)。其中农村住宅卫生和粪便无害化卫生标准是引用GB9981-88、GB7959-81的原来标准。现将其主要内容作一介绍。

住宅区有合理的人均占地面积、建筑密度及公共绿地面积,是保证住宅区内有良好的日照、采光、通风、绿化、改善微小气候、方便生活和家务劳动的主要条件。根据全国31个新村和19个集镇的调查分析和建设部的有关规定,同时也参考国外的一些做法,提出住宅区人均用地面积南方不少于50m<sup>2</sup>,北方不少于60m<sup>2</sup>(WHO为60m<sup>2</sup>左右,前苏联1~2层建筑为60m<sup>2</sup>)。建筑密度南方不大于40%,北方不大于35%。按照这一建议值,可保证每人有8~10m<sup>2</sup>的居住面积,25m<sup>3</sup>左右的居室容积以及10m<sup>2</sup>的绿地面积。当建筑密度为39%时,如果布局合理,住宅中的卫生间距、采光系数、自然照度系数都可达到卫生要求。

卫生防护距离标准建议值:产生有害因素的乡镇工业、养殖业、交通运输、粪便垃圾处理及农贸市场等场所与居住区之间设置适宜的卫生防护距离,是保证住宅区环境免受污染的主要措施。这次标准建议值是依据各自主要的有害物质最高容许浓度,通过现场卫生监测、模式推算以及询问调查等多方面综合论证,同时参照国外的有关资料进行比较后才确定的。

垃圾与粪便处理场、化粪池。当前国内农村垃圾粪便污染环境的问题比较突出,无害化处理率很低,最好的嘉定县也只有11.72%,大部分县几乎完全没处理,制定适当的卫生防护距离实在必要。辽宁省卫生防疫站张利伯等以国内外有关研究资料为佐证,提出粪便垃圾处理场、垃圾堆肥场、垃圾卫生填埋场的卫生防护距离各为300m,小三格化粪池集中设置场、大三格五格化粪池为30m。其理由:前苏联规定设备完善的垃圾场设置卫生防护距离为300m,不完善的为500m,有机液态生活垃圾和固体腐烂废弃物则为1000m。日本西田曾在研究各种除污设施所<sup>①</sup>产生的恶臭波及范围时指出:人粪便处理场完全脱臭,恶臭可达500m,反之可达1~4km。污水处理场如脱臭,恶臭可达0.5km,反之可达1~3km。泮顺昌在《城市垃圾填埋卫生标准》中提出500m的卫生防护距离。管镇奎在《城市公共厕所卫生标准》中,提出旱公厕的卫生防护距离为30m。

垃圾场的苍蝇有很大的卫生流行病学意义,而Miyajima等<sup>②</sup>利用原子标记法研究垃圾场家蝇最大飞行距离可达5km,但捕获蝇中标记蝇只占家蝇数的0.06%,因此,它不能作为制订垃圾场卫生防护距离的依据。

农贸市场,指有建筑界限的农副产品商品市场。以1987年对18个集镇农贸市场环境卫生现状调查为依据,提出人均面积不得少于0.7m<sup>2</sup>(以平常日累计赶集人数计),其中包括人均0.15m的停车场。对规模小的农贸市场,可沿集镇街道设摊,街中心留出一般车行道,车行道两边以林带间隔。这样可节约用地(如另辟市场,以隔三设一集,土地利用率仅为15%),群众买卖也方便,但对牛马木材等大商品交易则可放在集镇边缘“分市”布置。

给水、排水。要求按《生活饮用水卫生标准》选择水源,首先选地下水源,尽量集中供水,便于卫生管理。以地而水为水源者要求净化处理和消毒,按全国爱国卫生办公室农村改水方针执行。

1976年,部分省、市的城市医院污水调查资料表明:肠道致病菌检出率高达48%~100%,国外医院污水中检出沙门氏菌率为68%,志贺氏菌检出率为28%。乡镇医院(卫生院)比起城市医院的污水污染程度相对要小得多,但对传染病的污水仍不可轻视,故《标准》要求进行严格的处理和消毒。对工厂和其它农副业生产场(所)的污水,也要求消毒,在达到国家有关标准后才可排放,以保护环境,保障人群健康。

道路。据调查,国内公路穿越村镇,甚至穿越住宅区的例子不少,由此产生的交通污染和交通安全事故时有发生。因此,提出1~4级道路应避免穿越村镇,机动车辆避免穿越住宅区。此外,公路对农村学校、医院(卫生院)也有一定的噪声干扰。据调查,中学和小学大门前的Leq噪声平均值为72.7dB(A),而教师的讲课声级平均为72dB(A),如保证学生能100%听清教师的讲课,则要将环境噪声级衰减到50dB(A),最高允许值为55dB

(A), 而将环境噪声从原来 72.7dB(A) 衰减至 55dB(A) 所需距离, 经计算为 120m, 还有空气吸收引起的噪声衰减可达 0.5dB(A) 左右, 故《标准》建议对学校 and 卫生院都提出了离交通干线的距离不得小于 100 米的规定, 以保证教室和病房的安静。

《国家中长期科学技术发展纲领》中提出: “为了改善人民的生活环境与居住条件, 要提高城市与村镇建设规划、建筑设计、施工管理的技术水平”。围绕这一要求, 应尽早抓紧技术立法, 制定村镇建设环境卫生法规以及《村镇规划卫生标准》中还需增补完善的内容。依据国情, 研究适用又符合安全卫生的给水排水系统, 以及垃圾、粪便和污物的收集、清运系统和无害化处理措施。对目前正在试用和个别地区推广的除氟、除铁改水方法, 沼气池、三池五格化粪池、生物发酵高温堆肥的无害化效果, 要进一步系统和深化研究, 以便能在更多地区和不同条件(特别是各家各户内)下推广应用。

#### 参考文献

- 1 徐芳, 等. 村镇规划卫生标准研究论文报告集, 北京: 全国爱卫办, 1990, 4~99
- 2 冯华. 中外村镇建设比较研究, 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 191~192

(宁夏回族自治区卫生防疫站匡颖亮副主任医师撰)

### 化工健康监护 health surveillance in chemical industrial

在化工企业实行的职业健康监护, 旨在认识、评价和控制职业危害, 完善三级预防体系, 保护和促进职工健康, 并使工业卫生工作达到管理科学化、技术规范化的。

1960 年前后, 西欧工业发达国家如德国开始做职业人群的健康管理工作。1972 年前后, 美国的一些大型化工企业开始做健康监护工作。在 1983 年前后, 中国上海市一些化工企业开始做健康监护的试点工作。1985 年, 中国化学工业部组织工业卫生考察组对美国若干化工企业的健康监护进行考察, 其后结合中国化工系统工业卫生工作实践, 提出化工健康监护初步模式。经试点, 于 1988 年化工部制订并颁发了《化工健康监护技术规定》, 并于同年又发布了《化工系统健康监护管理办法》, 至此, 化工健康监护模式基本形成。

健康监护分为宏观调研型的、微观企业型和监察型。宏观调研型健康监护是在全国或一个地区内, 主管部门对其所属企业内存在的职业危害因素及其作业环境污染程度进行调查; 对作业人群的健康状况及其受到职业危害因素的影响程度进行监测; 把作业环境与人群健康联系起来进行分析、评价, 得出结论, 以指导工业主管部门制订工业卫生政策和为采取防治措施提供科学依据。微观企业型健康监护是在一个企业内对作业环境的有害因素进行定点、定期监测或个体监测、生物监测; 对作业人群进行就业前体检和定期体检; 对工人的缺勤、工伤、疾病、异常生育、死亡等进行登记, 把监测和登记的信息在一个信息系统内进行处理, 定期做分析、评定, 得出结论, 并写出健康监护报告书。监察型健康监护是工业主管部门或有关劳动卫生部门对企业实行工业卫生监察, 抽查企业的作业环境有害因素监测结果及作业人群的职业病发病率, 根据企业的生毒点合格率、职业病发病率、有毒作业分级、生产性粉尘危害程度分级等资料来决定对企业是否要限期整改、治理或罚款。

化工健康监护是以企业型健康监护为基础, 以宏观调研型健康监护为指导, 以监察型健康监护为辅助的复合型职业健康监护。

化工健康监护的工作内容有接触控制、医学检查和信息管理 3 个部分。

接触控制包括区域监测、个体监测、职业接触史调查和接触评定等内容。重点在区域监测。凡存在于作业环境的有害因素都应定点、定期地进行监测。监测点有统一的设定原则, 监测点一旦设定, 一般不能轻易变更。监测周期也有统一规定。职业接触史调查包括职工的作业岗位、工种、职业危害因素接触情况及相

应作业年限、工作调动情况等。接触评定是每个监护周期末对监测结果进行汇总、分析, 对劳动环境、个体接触、群体接触做出评定。劳动环境评定分为 4 级, 评定的主要依据是监测点合格率。点合格率在 85% 以上, 评定为 1 级(优); 70%~85% 为 2 级(良); 50%~70% (不含 70%) 为 3 级(中); 50% 以下为 4 级(差)。

医学检查包括健康监护体检、疾病登记和健康评定等内容。体检分为就业前体检和定期体检。新入厂和新调入有毒有害作业岗位的职工均应进行就业前体检, 旨在建立个体健康档案和发现职业禁忌证。对每个监护对象按监护周期进行定期体检。检查项目分为基本项目、特殊项目和补充项目。基本项目是反映一般健康水平, 每个受检者均要查的项目, 如心肺听诊、白细胞计数等。特殊项目是对职业病诊断有意义的特异项目, 补充项目是各单位根据自己的工作实践而选择的一些检查项目。疾病登记是把职工中发生的职业病、常见病、工伤、异常生育和死亡等情况进行正确分类, 按标准代码及时登入职工健康档案和工业卫生档案。健康评定分为个体健康评定和群体健康评定。个体健康评定是定期对每个监护对象逐人做出健康评定, 包括是否诊断为职业病, 或是否确定为职业影响人员(观察对象), 有无职业禁忌证, 是否患有其他疾病, 是否重点监护。群体健康评定在个体健康评定和群体接触评定的基础上进行, 评定内容包括体检各种项目阳性检出率、职业病发病率、患病率、常见病患病率、异常生育发生率、死亡统计等, 并运用职业流行病学等方法对早期健康损害和工作有关疾病进行分析。

信息管理是在建立职工健康档案和工业卫生档案的基础上, 对接触控制和医学检查的定期性信息和经常性信息及时输入, 并定期进行处理和输出健康监护报告。职工健康档案是给每个监护对象建立一份档案, 内容包括一般情况、职业史、历次体检记录及个体健康评定, 应保存至职工离职后 50 年。工业卫生档案包括一般工业卫生档案、毒物档案、区域监测登记、个体监测登记、职业病登记、常见病登记、异常生育登记、一级预防登记、死亡登记等各种登记表和健康监护报告书。工业卫生档案要永久保存。健康监护报告书分为群体报告和评价书两种。群体报告是企业每年一季度将上一年度本企业的职业人群的健康监护和医学检查资料进行汇总分析, 提出评价意见和防治措施的文件, 由 5 种表格构成。评价书是企业在全员监护的每个周期末将本周期内历年的全部健康监护资料进行汇总分析, 提出评价意见和防治措施的文件, 由 10 种表格构成。

健康监护要顺利开展, 加强管理是关键。化学工业部于 1988 年 7 月的发布《化工系统健康监护管理办法》, 这份行政法规文件使化工健康监护管理有了法律依据, 保障此项工作能在化工系统顺利开展。健康监护工作质量是此项工作的命脉, 只有不断提高工作质量, 才能使健康监护工作不断深入发展。化工部劳动安全司于 1989 年 11 月 28 日颁发了《化工健康监护质量考核办法》。本办法通过四项考核指标, 能保证化工系统健康监护工作质量不断提高。目前健康监护工作正在化工系统健康发展。

(化学工业部孙维生副主任医师撰)

### 生物监测及其阈值研究进展

生物监测(Biological monitoring)是有计划地衡量有害物对生物体接触水平的动态系统活动。它概括了生物体对有害物的接触、摄取、代谢转化、与靶组织作用和排泄等众多过程作用的综合结果。能够反映生物体从各接触途径(吸入、经皮和经口)所摄入的有害物总量; 能在接触(就业)前或在对照人群中检测了解当地的该有害物在生物体内的本底水平, 能估测生理蓄积或引起作用的有害物的量和多种有害物接触所产生的联合作用; 以及由于个体的劳动、生活、负荷和生理条件的不同, 能综合各个体差异因素等; 以弥补环境监测中多以测定空气中有害物的浓度, 而不能合理和精确的反映生物体真正接触有害水平的不足。

自 Elkins(1954)首创生物监测和提出(1967)生物阈值(Biological threshold Limit values, BTLV)以后, 人们以采集血、



尿、呼出气、毛发、指甲、汗液、粘液、精液和皮肤、脂肪、肝、鼻粘膜的活检标本,以及手术和尸检的组织标本等生物样品,检测其中的有害物本身及其代谢产物,或是生物体的无损性效应产物的量,与接触有害物的程度,与生物体反应程度间的关系展开了研究。

在研究具有在体内蓄积的有害物时,一般根据生物体吸收有害物后,在其器官、组织或血液中所检出的量,以估量其接触水平;对一些在生物体内迅速转化与排泄的有害物,则可检测该有害物或其代谢产物的排出量,以推算其接触水平。但有害物在体内受多种因素的干扰,特别是体内各反馈系统的各自调节机理的参与,使这种剂量反(效)应关系更具复杂,使个体间的差异更为明显。生物监测的研究,又受检测方法,采样技术和采样时间的不同而影响,以及某些有害物的代谢产物或效应的无特异性等,迄今能进行生物监测的有害物所见不多。

建立一项生物监测,除需了解该有害物的毒作用的特点和其毒代动力学外,尚应具备的基本条件为:(1)被检测物具有一定的特异性;(2)取样对人体无损、能为人群所接受;(3)样品被检物较稳定,能贮放和便于运送;(4)有害物在体内的质和量的时相变化较明确,可确定其最佳采样时间;(5)检测方法可靠、精密、易行、价廉,且有质量控制。(6)检出结果能作出正确的解释和合理的评价;(7)有参比数据,如正常范围参比值、超限接触值等。

生物阈值(BTLV)的研究,近10年国际一些学者提出了一些新的名词,如生物质量准则(Biological Quality Guide, BQG, 1977, 欧共体)、职业性生物接触限值(Biological Occupational exposure limits, BOEL, 1980, WHO)、生物效应水平(Healthy relevant biological effect level)和生物接触限值(Biological exposure limits, 1983)、容许生物水平(Permissible biological levels, 1983)以及生物接触指数(Biological exposure indices, BEI, 1983, ACGIH)等。因此在引用此类参比值时,宜注意其来源、性质和其含意。

生物阈限制是衡量接触者接触有害物程度的另一种尺度。虽BTLV与空气有害物接触限值(TLV-TWA)相比有其一定长处,但亦有一定的局限性,如无可靠的检测方法;不同区域和/或不同人群间可比性较差;不适用于环境中有害物浓度波动大,生物半排期短,且主要呈急性毒性效应的有害物和所检出的结果受分析方法影响较大,而需用标准的采样方法和分析方法等。BTLV亦有一个保护水平的问题,由于生物材料中有害物或其代谢产物的量不同,可以是正常值、容许吸收值、亚临床中毒值或临床中毒值。一般认为BTLV的制订应在低于可检出的健康损害的量,仅在仅是生物体反应的水平,应能反映在生产和生活环境综合接触影响下不引起有效效应的接触程度。

美国政府工业卫生医师协会(ACGIH)所公布的BTLV称其为生物接触指数(BEL),是空气中有害物阈值的一种生物当量;是表示接触者对有害物的生物反应的警戒水平,或其组织、体液或呼出气中有害物或其代谢产物的警戒水平。大多数有害物最初的吸收和消除较快,一般半排期仅几小时,甚至几分钟,致使检测的结果解释更为复杂,使一个工作班中接触有害物的体内平均负荷量估测发生偏高或偏低。生物监测一般是无法检出工作班中短暂的过量接触,因为有害物及其代谢物的消除和接触有害物所引起的生物学改变是动态的,所以在制订BTLV时,应规定特定的采样时间和适用于8h的接触。

由于对有害物的摄取及其在组织内的分布和所检测指标间的关系所知不多;有关有害物的毒代动力学研究多以实验研究为基础,与人的实际接触(浓度的波动、多种有害物的联合接触和体力负荷不同等)迥异;对生物监测水平与接触者心理、生理功能不良作用的关系所知无几;以及接触者对所接触的有害物敏感性差异变化较大等;迄今仅有50种左右的有害物适用作生物监测。

制订一个有害物的BTLV所需的依据有:(1)收集到该有害物的在体内的吸收、分布和排泄的毒理资料;指出在一定的接触

期限为有害物可能吸收量,以及非职业性接触的可能性,以期获得可影响总接触量的全部接触源的结果。而后列出有害物的代谢途径和其半排期,以预测工作周内体内有害物质的蓄积量。指出代谢产物与蛋白结合和共价结合的可能性,前者可降低排泄速率,后者与发生的毒作用有关等。(2)收集该有害物现行车间空气容许浓度的制定依据和其高危人群。(3)提供有害物检测指标,生物样品检测方法、采样(严格的采集时间和注意防污染事项)和保存;非职业性接触水平和正常水平及变异范围;列出影响检测结果的因素,包括遗传和疾病等。若有害物的半排期<5h,则采集生物样品的时间可在下一个工作日的班前、工作班内和/或工作日的班末;若半排期>5h,则采样时间可在下一个周的工作周开始和/或工作周末的班末。半排期越长,蓄积性越高的有害物,采样时间无严格的规定。(4)判断BTLV时需特别考虑人群的研究结果,有害物的毒代动力学以及可能影响BTLV的倚倚和异议。

可见生物监测和其阈值研究的进一步展开,很重要的一个环节是生物样品监测检验方法的研究。近年中国已组织了15个单位参加的协作组,以血、尿和呼出气为主要的生物样品,对30余种已有车间空气容许浓度的有害物和/或代谢物(或酶活性),以不同仪器分析生物样品51种监测方法作出鉴定和列为标准。并为统一监测方法的研究,制订了《研究生物监测检验方法指南》,规定了生物样品中有害物或其代谢物测定方法内容、要求和程序,以使生物监测和限值的研究规范化、经常化和科学化。最终生物监测和BTLV的研究必将与车间卫生标准相似,成为评价接触有害物的危险度的一种有力的工具。

(上海市劳动卫生职业病防治研究所傅慰祖撰)

## 中国乡镇企业中职业危害的防治研究 prevention and cure of occupational harm of small town factories in china

乡镇企业的发展,促进了农业的发展,在国民经济发展中占有重要地位。但是,由于各种条件的限制,多数乡镇企业作业场所劳动卫生状况不佳,存在着比较严重的粉尘、毒物、噪声等职业危害的影响。所以,开展乡镇企业职业危害的研究,对于改善劳动条件,保护环境,保障从业人员的身体健康,十分重要。

中国乡镇企业中职业危害防治的研究工作,实际上是从1970年以后开始的,随着当时小水泥、小化肥、小煤窑、小机械等简称“五小工业”的发展,其职业危害已经引起社会的关注。围绕着如何防治“五小工业”中的粉尘、毒物等危害,全国各省市均开展过一些研究,中国医学科学院卫生研究所卫生防护研究室(现为中国预防医学科学院环境卫生与卫生工程研究所通风研究室),作了大量工作先后在广东省兴宁县、江苏省无锡市、山东省高密县等地开展乡镇企业防尘、防毒工作试点,他们与当地卫生防疫、劳动及工业主管部门配合,对乡镇企业的作业环境进行劳动卫生调查与监测,对从业工人进行健康查体,对已有防护设施进行效果评价,基本摸清了这些地方的乡镇企业职业危害现状,本着因地制宜、节约实用的原则,帮助乡镇企业进行粉尘、毒物等危害严重岗位的通风除尘、排毒设施设计,并在同类企业中推广,收到明显效果,起到指导工业卫生、劳动保护、乡镇企业管理人员开展职业危害防治工作的作用。

1980年以来,中国乡镇企业有了迅速发展,仅从就业人数来看1980年为3000万人,1990年则增至9000万人,相当于农村剩余劳动力的50%,许多乡镇企业已发展成外向型企业,其规模、设备都是70年代所不可比拟的。但是,绝大多数乡镇企业仍存在着厂房设备简陋、人员流动性大、原材料和资金缺乏、产品不固定、作业场所劳动卫生条件差、职业危害严重的问题。《健康报》1987年11月14日披露,山西省现有职业病患者30344人,其数量居各省之首。该省县以上企业11509个,乡镇企业356262个,接触有毒有害作业工人278万。《健康报》1988年11月29日头版载文:“天津每5名乡镇企业职工中有1人从事有毒作业”,该市38.4%的乡镇企业属于有毒有害场所,从事有毒有害

作业的职工占全市乡镇企业职工的 20.5%，其中半数以上为女性，童工的比例不小。该市调查了 12 个区县的 7 407 个乡镇企业及 461 233 名作业工人，对其中 231 个粉尘、毒物重点作业工厂进行作业环境监测，取得 1 800 多个样品，并对 4 882 名从事有毒有害作业工人进行了职业性查体；作业环境监测结果表明，粉尘样品合格率为 17%，铅尘、铅烟样品合格率分别为 47%、9.3%。4 个铅作业危害较严重的乡镇企业，铅中毒患病率高达 16%，铅吸收检出率高达 32.4%，其中 90% 是女工。苯作业未成年工占 25.1%，铅作业中 18 岁以下工人占 18.9%，这些企业中 70.2% 的有毒有害作业场所没有防尘防毒设施。《健康报》1989 年 5 月报道：“辽宁省乡镇企业劳动卫生状况堪忧”，沈阳市苏家屯沙河乡一个生产滴滴畏的工厂，工人们裸手包装，皮肤病发病率 100%，70% 以上的工人血中胆碱酯酶活性下降，存在着明显的有机磷中毒症状。全省乡镇企业为 13.8 万家，接触尘、毒、物理因素危害的工人已达 15 万之多……。山东省截止 1987 年底，据对 13 个市(地)38 个县(市、区)5 031 个乡镇企业抽样调查，有 85% 的企业存在着不同程度的职业危害，35% 的职工接触有毒、有害因素，粉尘、毒物、噪声等有害因素监测达到国家卫生标准者为 32%，超标率高达 68%，尘、毒平均超标为 49 倍，最甚者超标竟达上千倍，此种情况尚不包括占企业总数 90% 以上的村及村以下企业。在诸多职业危害因素中，粉尘占的比重最大，全省监测粉尘作业点 2 300 多个，达到标准的只有 17.7%，有 1 900 多个作业点超过国家卫生标准，超标率为 82.3%。有 25 个县、市对 18 000 多名粉尘作业工人进行体检，确诊尘肺病人 76 名，观察对象 333 名，两者合计检出率为 3.35%。工业噪声监测超标率为 72%，某县监测 36 个作业点，最高竟达 138dB(A)，超标率为 94.5%。对从事有毒作业的 10 700 多名职工查体，检出职业病患者 72 名，上述情况说明当前乡镇企业职业危害的严重性。卫生部针对这一问题，组织 15 省市开展了乡镇企业卫生服务需求与对策的调查研究，山东省劳动卫生职业病防治研究所赵中酒等人撰文提出，粉尘防治是当前职业危害防治的重点。卫生部全国项目办公室《乡镇企业职业卫生服务需求与对策研究个案调查总结》中指出，乡镇企业卫生管理力量，卫生部门职业卫生服务、监督和经济、实用、高效的治理技术是明显的薄弱环节，认为企业承包合同中应规定有劳动卫生内容，此外还应加强乡镇企业建设中通风、防尘、防毒、防噪声等防止职业危害设施要与厂房等主体工程实行，同时设计、同时施工、同时投产(三同时)的管理工作。近年来，在开展职业危害调查的同时，中国预防医学科学院环境卫生与卫生工程研究所通风研究室继续与各地合作，除开展培训工作外，还开展了建材釉砖厂、石棉厂、瓦厂等乡镇企业主要生产工序的通风除尘措施的研究，对冲击——喷雾联合除尘器在陶瓷、耐火、建材等行业中的应用效果进行评价和推广。以上研究为进一步做好乡镇企业中职业危害的防治工作打下了基础。

根据国家 10 年发展规划，乡镇企业将继续高速度发展，就业总人数将达 15 000 万，年产值将达到 13 500 亿元，年增长率为 11%。乡镇企业由于从业人员年龄较小，许多职业危害如尘肺病的发生还需要有一个过程，估计今后相当一段时间内职业病会呈上升趋势。今后开展乡镇企业职业危害防治工作必须实行研究重点的转移，不应只停留在职业危害的现状调查上，应以治“本”为主，要健全乡镇企业安全卫生立法，加强防尘防毒基础设施的建设，从预防性卫生监督入手，进行设计卫生审查，凡不执行“三同时”的企业不得投产。对职业危害严重的企业要加强经常性监测监督，对已经查出的职业病人应马上调离、治疗和妥善安置，应坚持就业前体检避免有禁忌症的人员从事其不应该从事的工作。要广泛开展宣传教育，提高工人自我保护意识，加强企业管理水平，实行综合治理。要继续开展适合中国国情的卫生防护技术措施的研究和推广，使其早日发挥经济效益和社会效益。

(山东省卫生防疫站胡坤元副主任医师撰)

## 职业性颈臂疾病 occupational cervico-brachial

disorder, (OCD) 职业性颈臂疾病是劳动过程不良所造成的一类职业性征候群。它可由肌肉骨骼反复活动引起，也可由静力负荷造成，可以是功能性的，也可是器质性的，精神和环境因素在发病中起重要作用。与职业性颈臂疾病类似的术语有颈肩腕综合征、职业性肩颈疾病、职业性颈上肢疾病、颈上肢肌肉疾病等。

因不良的劳动过程引起的包括职业性颈臂疾病在内的慢性肌肉骨骼损伤十分普遍，在一些国家已成为主要职业卫生问题，其患病率在职业性疾病中仅次于职业性皮肤病，居第 2 位。它也是工作年龄组人群丧失劳动力的主要原因，给工作和经济带来巨大损失，美国、瑞典等国每年花费在此方面经费均在百亿美元之上。各国医学家、人类功效学家及政府有关部门对职业卫生问题均已给予高度关注，日本卫生学会还设立了专门研究机构——职业性颈臂综合征委员会。本病的病因、病理、流行病学及人类功效学等方面的研究已成为职业卫生领域热点之一。1979 年沃斯(Waris)对职业性颈臂疾病的定义、病因学及病理学进行过详细阐述。

肩颈臂部肌肉骨骼负荷不同的职业人群，职业性颈臂疾病患病率差异很大，负荷重的职业人群存在较高的患病危险性。患病率较高的职业有：(1)键盘操作者(如打字员、计算机操作员等)；(2)职员、编辑、抄写员；(3)会计员、现金出纳员；(4)缝纫工、绣花工、印刷工、手工艺工人；(5)生产流水线上装配及包装工作人员；(6)电焊工及电镀工；(7)邮局分拣工；(8)医院化验员、牙科医生；(9)汽车驾驶员；(10)其它肩颈肌肉负荷重的职业工作者。

职业性颈臂疾病为多因素疾病，属与工作有关的疾病。肩颈臂部局部肌肉静力负荷较大和/或反复性高节奏活动是其发病基本因素，工作设备不良的功效设计、不良的工作姿势(如长期伏案工作，长期从事超过肩水平的举臂工作等)、不良的工作环境(如振动、照明不足等)、工作安排不当(如生产定额过大，超时工作等)、家务过重、精神紧张或抑郁等因素在发病中皆起重要作用。其病理改变主要有以下几方面：

附着点损伤 肌腱、韧带和关节囊的胶原纤维以球形附着在骨骼上，繁重的工作可引起血流重新分配，大量的血液流向工作肌肉，造成附着点局部缺血，长期供血不足，局部组织出现退行性变，其内部出现微小断裂，导致局部炎症和疼痛发生。

退行性关节病变 某些工作需要关节承受重复性脉冲负荷，这种脉冲负荷通过影响关节软骨而增加关节发生退行性变的危险性。

肌腱损伤 肌腱强度较低，易发生断裂，静态作业时骨骼对肌腱的压迫和肌腱本身持续性紧张，均可影响其血液循环，而导致肌腱退行性变，棘突上韧带和肱二头肌肌腱为无血管区，更易出现微小断裂和退行性改变。在举臂工作过程中，位于粗隆沟的肱二头肌长头肌腱和它的滑膜腱鞘在小粗隆处会发生磨擦，造成肌腱和滑膜的毛细血管充血、水肿和细胞浸润，而出现肱二头肌肌腱炎。

肌肉损伤 肌肉损伤表现为：(1)机械性损伤：缺乏锻炼的新工人突然承担肩颈臂部肌肉负荷很重的工作，可造成肌肉的 Z 板断裂，肌纤维的代谢物外流，直接刺激或引起水肿间接刺激神经纤维感受器而出现肌肉疼痛。经过一段时间锻炼后此现象不复存在。(2)缺血 肌肉收缩时，由于内部压力升高而影响其本身血液循环，静态作业的等长收缩肌群更为突出。循环不良可导致乳酸等代谢产物的堆积、肌肉内 pH 值降低，许多酶的活性受抑制，APT 合成减少，造成肌功能下降和肌肉疼痛，经常发生缺血，肌肉在形态学上和能量代谢方面都可出现累积性损伤。(3)能量代谢障碍：当肌肉的能量需要要超过能量产生时，肌肉痛即可出现；而肌肉的能量耗竭具有一定选择性，一些低阈的运动肌群特别敏感，这是一些从事静态作业而肌负荷并不高的人也出现肌痛的原因之一。

椎骨退行性变 工作时颈部肌肉长时间等长收缩和棘突上韧带长时间紧张的职业(如伏案工作)，可因循环和营养障碍，造

成肌肉劳损,棘突上韧带及关节囊松弛,使椎体正常结构失稳,继之椎间盘和椎骨的营养代谢障碍,最后导致骨赘形成。骨赘压迫邻近血管、神经而出现一系列临床症状。

职业性颈臂疾病临床主要表现为肩颈臂部的疼痛、僵硬、痉挛、麻木、感觉异常、活动受限,肌肉压痛,颈椎及肩关节骨赘、韧带退行性变等。因个体损伤部位及临床表现特点不同,常被诊断为颈椎病、颈肌肉紧张综合征、肩关节旋转套囊炎、肩关节炎、胸腔出口综合征、肌筋膜炎等。

日本职业性颈臂综合征委员会,建议把职业性颈臂疾病分为5个临床级别:(1)Ⅰ级:仅有主诉,无临床所见;(2)Ⅱ级:患者颈、肩和前臂肌肉发硬和过敏;(3)Ⅲ级:即Ⅱ级症状加上诸如敏感、肌张力减弱和感觉过敏等临床表现;(4)Ⅳ级:除Ⅲ级的严重型外,尚出现腱鞘囊肿、自主神经系统障碍和脑力障碍;(5)Ⅴ级:不仅在工作上,而且在日常生活中存在严重障碍。

本病客观诊断指标缺如,故诊断难度较大。尽管许多学者从肌电图频谱、神经传导速度、局部温度、血清中肌酶含量等方面进行许多探讨,但尚未发现有诊断价值的生理、生化及形态学指标。临床只能根据职业史、现场功效学调查、结合症状及体征、排除其它原因引起的肌肉骨骼损伤综合判定。

此类疾病治疗原则是避免患者局部肌肉骨骼的进一步损伤,以缩短恢复时间。具体措施为停止原工作,采用按摩、牵引、理疗、针灸、中药内服外敷等手段治疗,疼痛严重者可服用止痛剂。但上述治疗方法因无理想的控制试验来评价其治疗效果,故疗效不能肯定。

职业性颈臂疾病的预防,应从劳动者自身保健、工作组织和功效设计等方面着手。让劳动者了解本疾病的早期症状,以便及早发现问题,及时得到诊治;采取有规律的工间休息,避免发生局部肌肉过劳;工作采取轮换制,避免长期从事单一工种;合理安排工作及劳动强度,如伏案工作每天持续工作时间不应长于4h;键盘操作员击键率每小时应小于10 000次,且每天总击键时间不长于4~5h;工作台等生产设备的设计符合功效学,使肌肉骨骼负荷减小到最低程度,如工作时肩外展角和头前倾角均小于30°;参加适当的体育锻炼,改善肩颈臂部血液循环,防止或延缓局部组织劳损的发生。

客观诊断指标的缺如及评判标准的不一,使许多资料难以进行比较,因此制定科学的流行病学调研方法显得十分重要。从生理、生化及影像学等角度寻找客观诊断指标,制定统一的诊断、分级标准及流行病学调查研究方案;研究制订局部肌肉负荷客观指标,以及该指标和功效学有关指标与此类疾病的接触水平(剂量)一反应关系将是今后重点研究的方向。

#### 参考文献

- 1 Hegberg M. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1984; 53: 269
- 2 Hegberg M, Wegman D H. *Br J Ind. Med.*, 1987, 44: 602
- 3 鲁锡荣, 国外医学(卫生学分册), 1990, 4: 196
- 4 朱启星, 中华劳动卫生职业病杂志, 1990, 8(6): 363
- 5 朱启星, 职业医学, 1992, 19(2): 68

(安徽医科大学朱启星副教授撰)

#### 焊接职业危害

19世纪末,焊接技术正式应用。20世纪30年代以来,前苏联、美国、德国等均陆续介绍过一些有关焊接职业危害的情况。1959年,周德林发表了电焊作业劳动卫生情况调查,以后兰州、北京、上海、大连等地为保护焊工健康也作了很多调查研究。

焊接是工业中最应用广泛的一种工艺,估计全球焊接工人约有数百万之多。焊接技术种类很多,除常用的电气焊外,还出现了氩弧焊、等离子焊、真空电子束焊、激光焊和超声波焊等新工艺。电焊是利用电弧放电产生的热量熔化焊条和焊件,形成牢固结头的工艺过程。焊条由焊芯和药皮组成。焊芯可传导电流,本身可熔化形成填充金属;药皮在焊接过程中具有稳弧、造气、造

渣、脱氧、掺合金和粘接等作用,可保护金属防止空气的侵入,以达到净化焊缝金属的目的。

电焊时可产生大量的金属氧化物及其它物质的烟尘,呈气溶胶状态逸散于空气中。1962年乔锡彬和1977年甘肃省卫生防疫站介绍,焊尘粒度一般为0.05~0.3 $\mu$ m,球形,带有不同极性电荷,可相互凝集为粉尘。焊尘的成分随焊条、母材金属及其药皮成分而异。经光谱分析,焊尘中有20余种元素,含量较多的有铁、锰、铬、镍、硅、钙、钾、钛等;对焊尘进行X线衍射分析,其成分主要是Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(33%~56%)、SiO<sub>2</sub>(10%~20%)、MnO<sub>2</sub>(5%~10%)以及氯化物等。除焊尘外,电焊时也可产生有毒气体如CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,有时有HF。焊尘和毒气的浓度取决于使用焊条的牌号、直径、药皮厚度、焊接电流用量、电压大小、焊接时间长短、焊件的外形、通风条件等因素。焊接时除产生的粉尘、毒气外,尚有高温、紫外线、高频电磁场、电离辐射等。上述有害因素常同时存在,对人体健康产生联合作用。

焊接时炽热的金属颗粒和落渣飞溅可引起皮肤灼伤;电焊设备故障可致电击伤;夏季在狭窄通风不良处焊接,还可引起中暑。

电焊时产生的电弧温度高达3 000℃~6 000℃或更高,等离子焊可达15 000℃~33 000℃,因此可产生很强的中波的和短波从紫外线,若防护不好,可引起焊工暴露皮肤的红斑反应和急性角膜结合膜炎。电焊时产生的红外线和可见光,长期作用则可引起白内障和视网膜脉络膜损伤。

电焊工尘肺是电焊工长期吸入焊尘而得的一种肺部疾患。早在1936年,英国Doig和McLaughlin就报道了30例船厂电焊工工人,发现X线胸片上出现细小点状阴影,呈弥漫分布,但无自觉症状。后对死亡焊工进行尸检,发现肺内主要是铁末沉着,并未发现纤维化。若焊工脱离电焊作业后,肺内的结节、阴影可变淡、消失,故60年代前国外有不少学者认为是一种单纯的铁末沉着症,属良性尘肺。1980年,海老原勇等通过7例电焊工尘肺的尸检,发现肺内有明显的粉末沉着和生性纤维病灶以及肺泡壁纤维化。1989年邹昌洪等报道5例电焊工的病理分析,发现肺泡壁和细支气管出现广泛的粉尘纤维灶和结节,伴有肺间质的纤维化。肺组织元素分析表明,铁、锰含量较不接尘的人员约高10~100倍,而游离二氧化硅含量却低10倍,这说明电焊工尘肺是以氧化铁为主的多种金属和其它粉尘所致的混合性尘肺,其致纤维化作用虽不明显,但长期吸入也致肺组织的弥漫性纤维化。在电焊工尘肺发病情况调查方面,1984年毛宗敏在743名电焊工工人中发现尘肺患者79例,患病率为10.93%。1982年前苏联Aopamra报道,前苏联北方边疆地区184名电焊工工人中有12例尘肺发生。1987年中国卫生部已把电焊工尘肺列为法定职业病之一。

电焊工尘肺合并肺癌,是因焊尘中含有铬、镍等致癌物质,近年来已屡有焊工中肺癌发病率增高的报道。有人抽样抽查1943~1973年共1 059名电焊工工人的死亡原因,发现死于肺癌者17人,其SMR为150;焊接工龄在50年以上的281人中,发现5例肺癌,SMR为175,高于普通人群。邹昌洪报道的5例电焊工尸解中,有两例死于肺癌。Sjögren检查170名电焊工的肺组织,发现有8例肺癌,1例胸膜间皮瘤。这一问题值得今后深入观察研究。

电光性眼炎是焊接作业中最常见的职业病。焊接时若缺乏防护措施,发病率可高达90%以上。在发病老工人中,有的曾发生数十次以上的电光性眼炎。由于电光性眼炎康复快,绝大多数预后良好,无后遗症,故其远期不良影响常被忽视。目前已知反复发生电光性眼炎,可并发角膜溃疡、角膜浸润,以及角膜遗留色素沉着、角膜变性,个别情况还可以影响视网膜。另外,电焊工的视力普遍下降,北京医科大学附属医院调查发现,在电焊工中近视率高达32.7%。1991年李林报道,通过家兔试验发现,焊接时电弧照射后,家兔角膜上皮内SOD(超氧化物歧化酶)含量降低,MDA(丙二醛)含量升高。故认为电光性眼炎与脂质过氧化的发

生、发展有关。

锰中毒是焊工长期吸入含锰焊烟引起的一种中毒性疾病。动物试验证实,吸入含锰量较高的焊尘后,肺、脑等内脏器官含锰量增高。60年代前,国内外焊工发生锰中毒的报道较多,近年来,因高锰焊条应用量大为减少,故锰中毒的报道已较少见。

氟化物在碱性低氢型焊条烟尘中含量较高,可经呼吸道进入体内,并蓄积于肺和骨骼。Nalon报道,在空气中氟化物超标2~6倍的作业环境下,工龄10~15a的工人中有73.8%出现骨像改变。国内杨肖汇等对313名电焊工进行骨骼X线摄片,发现可疑氟骨症52名,1期氟骨症10名,检出率为19.8%。电焊工氟骨症的特点是发病缓慢,多数在接触10a以上才发病,骨质损害以骨密度增高和骨质疏松的出现为主。

使用碱性低氢型焊条、锰焊条及钢焊条时,所产生的氯化铁、氧化锰、氧化锌等金属氧化物烟尘,可引起金属烟热,尤其在氯化钠、氯化钾烟尘并存时,可促使其发生。1990年,Sjogren报道了焊接工人接触不同金属烟尘与神经精神病症之间的关系,发现焊工长期接触含铝、铅、锰的烟尘,可出现头晕、记忆力减退、注意力不集中、精神抑郁、肢体麻木等症状。焊接时产生的有毒气体除可致神经衰弱候群外,还可引起咽痛、咳嗽、胸闷等呼吸道慢性症状。在通风不良处用碳棒做电弧焊接,曾经有导致CO急性中毒的报道。

氩弧焊接、等离子焊接工艺使用含1%~2.5%的氧化钍钨棒和金属钍,在通风良好处作业的工人,其呼吸带粉尘和钍、钍浓度及 $\gamma$ 射线剂量一般均低于容许标准。等离子喷焊时,离子流以高速从枪体喷出,产生频率在1000Hz以上的较强的噪声[90~123dB(A)]。

预防职业性危害,国内外着重从改变工艺入手,如何用半自动焊接、自动焊接代替手工焊接,采用低尘、低毒的碱性焊条等。焊接作业点应装设固定式的或移动式的局部通风装置,还可使用送风面罩或防尘面罩。焊工和辅助工必须使用相应的防护眼镜、防护鞋与绝缘胶鞋等。氩弧焊和等离子焊除应对弧区实行密闭、通风净化、消除放射性物质和烟天外,其作业场所可采用湿式清扫,饭前用肥皂洗手。高频电磁场可按高频屏蔽方法防护。焊接工人每年应进行一次体格检查,凡有神经精神、肝、肾、心血管和呼吸系统疾患者,不宜从事焊接工作。

焊接职业危害中急性发作的常见疾病首推电光性眼炎,长期慢性疾病中最常见者则为电焊工尘肺。把电焊工尘肺看作是单纯的铁末沉着症的观点,渐趋否定;尘肺合并肺癌的问题,正为大家所重视。新焊接工艺的职业危害尚有待于进一步阐明。对在密闭容器和特殊环境中(坦克等)的焊接工人,如何改进其劳动条件,还是一个难题。

(山东省劳动卫生职业病防治研究所乔赐彬研究员撰)

## 蛋白质与职业中毒 protein in occupational toxication

蛋白质是生物体最重要的组成成分,是一切生命活动的主要物质基础。人体的各种生理机能之所以能正常进行,无不与蛋白质有关。在职业医学领域中,当外源性化学物质作用于人体时,发生一系列复杂的生物转化过程,可以出现急性的、亚急性的、慢性的损害。这些现象都是毒物分子和生物分子相互作用的结果。其中与蛋白质有着密切的关系。

19世纪中期,荷兰G. Mulder首先从动植物体中提取一种与生命存在有关的共同物质,并将此种物质命名为蛋白质。1820年,Braconnat发现了甘氨酸,从此揭示了蛋白质分子基本结构单位是氨基酸这一奥秘。随着科学技术的发展,对蛋白质的研究日趋深入,目前已知构成人体的蛋白质种类约10万种以上,结构复杂,功能各异。

1. 膜蛋白质。它是与磷脂分子共同构成的细胞内膜结构,对外的有害物质侵入对生命所必需的各种物质成分的破坏或抑制代谢起到屏障作用。红细胞膜蛋白就是镶嵌在脂质基质中的一种蛋白质,可分膜外表面蛋白质和膜内表面蛋白质。前者中很多

是载有红细胞抗原和/或受体的蛋白质,或者是运载蛋白质;后者有些是酶,有些是膜骨架蛋白质或血红蛋白。膜蛋白质能起载体或特殊通道的作用。在外源性化学物的作用下,可影响生物膜的功能。如芳基卤化物在混合功能氧化酶的作用下产生活性氧,活性氧将会氧化蛋白质的巯基,使细胞的蛋白质包括膜蛋白、酶蛋白、血红蛋白等受到损害,破坏生物膜的正常功能。

2. 血红蛋白。血红蛋白是目前人们对它的结构和功能研究得最为清楚的蛋白质之一。它具有重要的生物学作用。因血红蛋白可以运输 $O_2$ 、 $CO_2$ 和 $H^+$ ,把 $O_2$ 输送给有机体各组织,再将体内代谢的最终产物 $CO_2$ 输出体外,同时参与体内 $H^+$ 代谢的调节。当外源性化学物如一氧化碳的作用下,一氧化碳和血红蛋白结合形成HbCO,破坏正常血红蛋白向组织递氧的能力,导致组织呼吸障碍。又如苯的氨基、硝基化合物在体内经代谢转化,其转化物苯胺和苯醌亚胺使血红蛋白氧化成高铁血红蛋白,当超过机体生理还原能力时,就发生高铁血红蛋白血症,出现化学性紫绀。血红素是血红蛋白的辅基,又是珠蛋白肽链上的重要结合成分。当体内吸收过量铅时,铅抑制卟啉代谢过程中的重要酶(ALA脱水酶、粪卟啉氧化酶、血红素合成酶等),使血红素合成发生障碍。血红素合成异常影响珠蛋白的合成诱导和控制。这为铅中毒贫血机理及生化诊断指标的应用,提供了有力的依据。

3. 血浆蛋白质。它是血浆中含量最多的固体成分,是多种蛋白质的混合物,也是外源性化学物在体内运输、分布、贮存等过程中最为常见的结合蛋白质。当发生中毒性病变时,血浆蛋白质成分、浓度常有改变。其中白蛋白是主要的一种蛋白质,许多外源性化学物的主要载体与它结合,对研究化学物的分布、消除以及了解在肝肾疾病状态下所产生的改变等方面都有十分重要的意义。如四氯化碳和乙醇可以迅速破坏肝肾细胞内质网,致使白蛋白合成能力急剧降低。又如进入体内的铝,因与运铁蛋白铁的的结合部位有很强的结合力,使运铁蛋白运输铁的功能受障碍,成为铝的主要载体,促进铝在体内分布,引起肺纤维化及神经系统的损伤。

4. 金属硫蛋白。金属硫蛋白(MT)因含有大量的金属和硫而得名。是亚细胞结构中的一种低分子量蛋白质。与汞、镉、铜、银等金属具有很强的亲和性。MT的生物学作用,目前从对酶的活性、激素的效力、全身及细胞内的氧化还原电位的维持及对金属的解毒作用的影响等多方面正在进行深入的研究。首先,MT参与重金属的解毒,接触重金属将诱导MT合成,从而使机体增强对金属毒性的耐受力。若在接触重金属之前增高MT水平,因进入体内的重金属与MT结合,分布于细胞浆中,对于重要的细胞器起到保护作用,所以认为MT是细胞防御机制不可分割的一部分。如在镉的作用下,镉在肝内诱导合成MT,被诱导合成的MT与镉相结合,发挥其解毒作用。但当摄入的镉量超过被合成的MT时,镉作为自由离子游离出来,出现毒性作用。其次,MT是铜、锌等有生理作用金属的贮存库。在这些金属的内环境稳定中起重要作用。MT可调节许多需要锌的细胞过程,如复制、转录、蛋白质合成与降解及能量代谢等。

5. 低分子量蛋白质。指比白蛋白分子(69 000)小的蛋白质而言,如 $\alpha_2$ 和 $\beta_2$ -微球蛋白( $\beta_2$ -mG)、溶菌酶、视黄醇结合蛋白、肌红蛋白、免疫球蛋白轻链和重链等。外源性化学物及其代谢产物主要是经肾脏随尿排出,其次是经肝、胆通过消化道随粪便排出。有些毒物在经肾脏排出过程中,由于生物转化产物与细胞成分主要是与蛋白质的共价结合,结合最多部位是近端小管,这是引起职业性肾脏损害的一个重要方面。肾脏对毒物的清除包括肾小球的滤过、肾小管的重吸收及肾小管的分泌功能。常见的重金属毒物如镉、铅、铊和某些工业溶媒等引起的肾损害早期表现,主要是肾小管的重吸收功能障碍,对于蛋白不能很好地重吸收,出现以低分子量蛋白为主要成分的蛋白尿,在临床诊断方面较为常用的低分子量蛋白主要是 $\beta_2$ -mG。肾损害进一步发展可累及肾小球,使肾小球通透性改变,尿中出现白蛋白及分子量大于白蛋白的血浆蛋白成分。毒物经消化道胆汁排泄是重要途径,在胆汁中

的毒物如金属都是与蛋白相结合的。

在解毒治疗方面,根据蛋白质的结合部位被毒物占领,为减轻毒物的蓄积和加速排出,针对性地给以蛋白质结合部位与毒物发生竞争的毒物,如EDTA与DTPA是迄今用于治疗重金属中毒症的主要螯合剂。在评价和监测化学物接触水平方面,蛋白质加合物具有一定的价值。1974年瑞典Ellenberg等在血红蛋白加合物方面进行了一系列研究,首先提出用血红蛋白加合物作监测环氧乙烷的接触指标,证实了环氧乙烷与DNA共价结合的同时也可与多种组织蛋白共价结合,其结合水平与剂量相关。化学物与生物大分子的共价结合的研究,也是当前国际研究的热点之一,对化学物在体内分布、消除及对机体危害评价等方面均有重要的意义。

#### 参考文献

- 1 Perutz M F, et al. J. Mol. Biol., 1965, 13: 646-678
- 2 日本微量元素研究会,第5回微量元素研究会シンポジウム,1986
- 3 吕伯钦,等.生化毒理学导论,北京:人民卫生出版社,1987
- 4 吉村哲郎.膜融合—蛋白质核酸酵素,1991,36(11):1797-1803

(北京医科大学阿拉塔研究员撰)

**砷中毒** arsenic poisoning 砷广泛存在于自然界,并多以重金属的砷化合物和砷化物形态存在于金属矿石中,地壳含砷量为2~5mg/kg;海水约为5ng/L。

砷化合物的应用在中国有两千年历史。北魏郦道元(416~527年)著《水经注》即有砷硫化物开采记载;明代李时珍《本草纲目》记有砒霜冶炼及危害。

1882年,Paris首先在接触砷烟尘工人中发现阴囊癌,怀疑与砷有关。1888年,Hutchinson证实砷剂治疗牛皮癣引起皮肤癌。Buchanon收集了1915~1918年在美国发生的18例二氯化砷中毒及1939年报道1例三氧化砷溅到腿上第5天死亡的病例。Watrous和McCaughy(1945年)对66名非凡拉明制造工人和30名对照工人列举了砷中毒可疑指征。Holmgvist(1951年)和Pinto(1953年)等指出冶炼厂空气中三氧化二砷对皮肤、眼结膜和呼吸道粘膜刺激引起炎症。1959年云南省报道了某硫磺矿、砒霜厂、炼锡厂566人砷中毒调查并拟定了砷中毒诊断标准,早期表现及防治办法。湖南、广西、新疆等省约有200余篇有关砷中毒报道。

接触砷的机会主要有含砷矿石开采、冶炼、有色金属、半导体化合物生产、医药、颜料、玻璃、制革、油漆、印刷等行业及毒鼠剂、杀菌剂、防腐剂的生产和贮存、运输、使用以及“三废”处理不当都可增加砷接触机会,出现职业和环境污染所致的砷中毒。

**理化特性** 元素砷原子量为74.91,密度为5.73,熔点为814℃,615℃升华,不溶于水,溶于硝酸和正水,潮湿空气中易氧化。

砷化合物种类很多,常见的有三氧化二砷(砒霜),分子量为197.82,密度为3.74~4.15,熔点为275~315℃,193℃升华,易与氧化剂氧化成五氧化二砷或盐类,与浓盐酸共煮可成三氯化砷,与碱、盐生成亚砷酸盐或砷酸盐,在还原剂作用下生成砷和砷化氢。

**毒理作用** (1)吸收和代谢 砷可经呼吸道、消化道、皮肤进入人体,95%~99%与血红蛋白结合贮存于红细胞内,经血液分布各组织器官,特别在皮肤、毛发和指甲贮存,体内经甲基化反应后80%~90%经肾脏由尿排出,其余由消化道、乳腺、汗腺,部分由汗腺排出,还可通过胎盘屏障。一般一次大剂量砷摄入,约70 $\mu$ g砷才能恢复正常。(2)毒性:砷的氧化物和盐类大部分属高毒物质,三价砷毒性大,毒性大小还与溶解度、分散度等有关。人的中毒剂量个体差异很大,敏感者1mg可中毒,20mg可致死。一般认为三氧化二砷中毒剂量为5~50mg,致死剂量为70~180mg。吸入砷化氢5000mg/m<sup>3</sup>可立即致死,50mg/m<sup>3</sup>30min后

死亡,10mg/m<sup>3</sup>出现中毒症状。

**中毒机制** 砷化合物能与体内巯基酶结合,使多种酶受到抑制,影响细胞正常代谢,起到原浆毒作用,使神经系统、心、肝、肾、胃肠受损,并直接损害毛细血管或作用于血管舒缩中枢,使血管平滑肌麻痹,毛细血管扩张,血管通透性改变。

砷化合物对线粒体呼吸有明显抑制作用,砷酸盐可减弱线粒体氧化磷酸化反应或使其过程解耦联。砷化合物可与DNA聚合酶结合,对DNA合成与修复有影响,砷酸盐还可取代磷酸盐与DNA链结合,造成染色体畸变。

砷化氢经呼吸道进入人体,95%~99%与红细胞血红蛋白结合形成血红蛋白过氧化物,通过谷胱甘肽氧化作用使还原型谷胱甘肽氧化成氧化型谷胱甘肽引起溶血,红细胞钾泵作用破坏,细胞肿胀、溶解,导致肾功能衰竭。

**临床表现** 砷中毒可影响全身各系统,早期症状与进入途径有关:(1)急性砷中毒:呼吸道吸入者,最初见上呼吸道黏膜刺激症状,咳嗽、胸痛、呼吸困难、声音嘶哑、鼻塞、鼻粘膜充血、溃瘍、鼻衄、眼结膜充血、畏光、视力模糊、皮肤黏膜刺激斑状等。经口摄入者,主要见消化道症状,恶心、呕吐、腹胀痛、腹泻,重者水样大便或米汤样大便,电解质紊乱,尿闭。随之可出现眼脸浮肿、乏力、肌肉疼、头昏等神经系统症状,轻者以上症状逐次减轻,重者意识丧失、昏迷、休克,或呼吸血管舒缩中枢麻痹、死亡。急性中毒后1~1周,部分患者可出现中毒性周围神经炎,此周围视野缩小,肝区不适等症候,Mass纹并不多见。心电图约50%出现异常,多数患者肝酶有损伤,肝大,部分发展为肝化,实验室检查肝功能异常,SGPT增高,贫血,白细胞减少,尿砷、发砷明显增高。砷化氢中毒,潜伏期1~2d,头痛、头晕、全身乏力、畏寒,初期酷似感冒,随之肾区疼痛,面色苍白,重者出现酱油色尿,呼吸困难,肾功能衰竭,休克、死亡。(2)慢性砷中毒:除有较轻症状外,主要有:①皮肤色素沉着:特点是边缘不清,呈雨点状或花斑状褐黑色色素沉着,其中夹杂有色素脱失斑,分布在身体非暴露部位,以胸背部、大腿多见,色素沉着触砷者一般占2.11%,砷性皮肤癌占8.7%,出现最短时间两年。②皮肤角化过度:角化或粒状或融合成片状突起,上有鳞屑,质硬,约0.2~1cm,分布多在掌、跖及摩擦部位,一般触砷10a 9%,20a以上23.18%出现角化最早4a,角化发展成皮肤癌比率为10%。砷可使人体外周血淋巴细胞微核率、染色体畸变、SCE增高,长期接触砷所致皮肤癌、肺癌潜伏期为10~20a,对20例肺癌组织砷含量测定为507.8mg/100g(F肝),非触砷为4.32mg/100g,前者为后者的116.5倍。

**诊断** 有明确触砷史,典型临床表现为尿、发砷增高,并注意与症状相似的疾病作鉴别诊断。尿、发砷正常水平报告较多,一般认为尿砷超过0.2mg/L,发砷超过0.5mg/10g为异常。

**治疗** (1)急性经口服砷中毒者,先于胃内注入解毒剂,然后洗胃。(2)巯基类解毒剂:二巯基丙醇、二巯基丙磺酸钠、二巯基丁二酸钠、巯卡扑替特、二巯基琥珀酸等,结合中药治疗效果更佳。用药量及时间根据病情变化决定,并辅以对症、支持疗法。(3)皮肤角化可外用加口维甲酸,3个月后63.5%角化变平、缩小、脱落。Ballage报道27/60部分角化退化,24/60角化完全退化。有报道口服维甲酸和维生素丙可抑制砷所致癌变。

砷化氢中毒治疗重点应针对溶血及保护肝肾功能,根据病情给与地塞米松、维生素B族支持疗法,必要时透析、换血疗法。

**预防** 采取各种措施减少砷接触机会,加强生产、使用、运输、贮存管理,建立有关制度,防止各种途径砷污染,加强个人防护,做好健康监护,严禁禁忌证患者从事触砷工作。

(云南省职业病防治研究所陈洪域主任医师撰)

**急性氨中毒** acute ammonia poisoning 氨(NH<sub>3</sub>)在自然界是动植物中含氮物质的分解产物。20世纪发明了合成氨的方法,成为重要的化工原料,广泛用于制造硝酸和氮肥。据不完全

统计,中国目前直接从事合成氨和氮肥生产的工人近10万人。氨为强碱,遇水产生强烈腐蚀性,并有明显的着火和爆炸危险性。1965年以来,中国因意外事故等原因而致急性氨中毒者近1500例,居刺激性气体中毒的第2位,对人们的健康危害很严重。因而如何有效地防治氨中毒,是职业医学研究的一个重要课题。

急性氨中毒的病例报道始于1938年。60~70年代国外对氨的毒理学有较多研究。氨可由呼吸道吸入,吸收的氨大部分经肝脏转化为尿素由肾脏排出。1979年海顿(D. V. Hattin.)等的研究资料证明,接触氨的病例,尿中羟基赖氨酸的排出与正常人比较有显著意义。羟基赖氨酸的增加是因为小气道和软组织的蛋白质退化、大量的急性损伤所造成,认为可作为肺组织胶原破坏的代谢指标。动物实验发现,氨可使糖的中间代谢发生紊乱,并使三羧酸循环发生障碍,降低细胞色素氧化酶系统的作用。大鼠急性氨中毒两小时的 $LC_{50}$ 为 $7.65\text{g}/\text{m}^3$ 。氨对人的毒性见下表。

表1 氨对人的毒性

| 浓度 $\text{mg}/\text{m}^3$ | 时间 min | 反 应           |
|---------------------------|--------|---------------|
| 3 500~7 000               |        | 立即死亡          |
| 1 750~4 500               | 30     | 可危及生命         |
| 700                       |        | 立即咳嗽          |
| 553                       |        | 强烈刺激现象        |
| 175~350                   | 28     | 鼻、眼刺激,呼吸及脉搏加快 |
| 140~210                   |        | 有显著不适,但尚可工作   |
| 140                       | 30     | 眼及上呼吸道不适、恶心头痛 |
| 70~140                    |        | 可以工作,呼吸变慢,    |
| 70                        |        | 皮肤电阻逆转        |
| 62.7                      | 45     | 鼻、咽刺激感        |
| 9.8                       |        | 无刺激作用         |
| <3.5                      |        | 可识别气味         |
| 0.7                       |        | 感觉到气味         |
|                           |        |               |

国内外对氨的接触阈值以及氨对人体影响阈值的报告不一。国外报告作业环境中氨的最大允许量(MACs)规定不同,美国、日本等为 $50\text{mg}/\text{m}^3$ ,南斯拉夫等为 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 。意外事故中氨浓度难以准确测定,同一环境中吸入量与个体差异也不同。多数学者认为,中毒程度存在明显的剂量——反应关系。

氨是水溶性很强的刺激性气体,具有强碱性。一次大量暴露于氨的环境下可立即发病。轻者出现眼、上呼吸道刺激症状以及化学性支气管炎,较重者可出现化学性肺炎、肺水肿、喉头水肿或反射性喉头痉挛而致闪电式死亡。其肺水肿潜伏期较短,最短约15min,一般在1~6h左右,肺水肿发生越早,病势越凶险。由于氨有强烈腐蚀作用,使组织蛋白变性,脂肪组织皂化,破坏细胞结构,造成组织溶解性坏死,故重症患者呼吸系统的腐蚀破坏可十分严重。临床可见口腔及咽部粘膜糜烂,有白色伪膜形成;气管、支气管粘膜坏死脱落,可致气道堵塞窒息或肺不张;尚可见气管穿孔、气管食管瘘、急性肺出血、气胸、纵隔及皮下气肿等并发症,并继发严重肺部感染及全身代谢障碍。尸检可见肺泡壁透明膜形成,小支气管及周围肺组织大片出血、坏死,多发性肺脓肿,典型肉质化。国外尸检病例尚发现广泛脑出血、出血性胃炎及出血性肝坏死。这些都是其它刺激性气体中毒难以与之相比的,处理上也远较一般刺激性气体中毒棘手。急性氨中毒可伴眼、皮肤灼伤。眼灼伤可见结膜充血、水肿、糜烂,甚至角膜溃疡穿孔,可遗留视力减退甚至失明。1969年海曼(V. N. Highman)报告两例大量接触氨引起眼压早期升高者最终导致青光眼。格兰特(Grant)等通过动物实验证明,裸露的眼角膜受伤是由 $\text{H}^+$ 浓度决定的, $\text{H}^+$ 浓度 $10^{-12}$ ~ $10^{-11}\text{mol}/\text{L}$ 可致眼角膜严重损伤,胺离子5s内可穿过角膜屏障进入前房,30s可皂化脂肪膜,破坏细

胞膜,很快穿过上皮。皮肤灼伤以暴露及潮湿部位多见,液态无水氨可因其冰冻效应而致皮肤冻伤。较大面积皮肤灼伤伴肺水肿者抢救治疗难度大,早期以抢救肺水肿为主、兼治皮肤灼伤的成功率较高。急性氨中毒可伴肝脏损害;尚可有一过性心、肾损害;个别病例可有消化道出血、消化道溃疡或急性胃炎。有研究资料表明,高浓度氨还可通过三叉神经末梢支反射作用而引起心脏停搏和呼吸停止。对中枢神经系统的作用为先兴奋继而转为抑制。较重患者可有血氨增高,但未见因此而致氨中毒的报道。

1965年以来,中国急性氨中毒的报道较多,但多偏重于临床。有关诊断分级的研究国内外尚不统一。中国在急性氨中毒临床方面取得的明显进展之一是在1983年制订了《职业性急性氨中毒诊断标准及处理原则》(以下简称“氨标”),1985年5月又对“氨标”进行修订,将血气分析列为诊断分级的重要数据,并将“成人型呼吸窘迫综合征(ARDS)”概念引入“氨标”。1987年5月25日“氨标”在中国实施。

急性氨中毒易导致ARDS。1987年以来中国陆续有这方面报道,是职业病临床研究的重要课题。有资料报道急性氨中毒致ARDS占刺激性气体中毒首位,故临床救治难度大,死亡率很高。急性氨中毒抢救的关键在于早期采取有效措施,尽早中断损伤环节,避免ARDS发生,主要有以下几方面:

关于肺水肿 通过近年来的研究和临床观察证实,中毒性肺水肿有一个由量变到质变的过程,其肺间质和肺实质水肿往往混合存在,难以严格分开,并常由一个过程发展到另一个过程,化学性间质性肺水肿的早期过渡到肺泡型肺水肿的间隔期很短,短到几小时甚至几分钟,故胸片不易检出单纯的间质性肺水肿。肾上腺皮质激素的应用疗效肯定,使用原则为早期、足量、短程。早期应用可预防和减轻肺水肿,促进水肿液吸收和肺泡表面活性物质的生成,对预防肺泡壁透明膜的形成可能有实际意义,并可抑制病程后期肺组织纤维化,减少后遗症。用量不足,时间过长,肺水肿控制多不理想,且易使肺内感染加重,低氧血症难以纠正,并诱发上消化道出血等。

关于氧疗 如何合理选择氧疗方案是临床抢救重度氨中毒的难题。中国有使用高压氧治疗取得疗效者。但目前认为高压氧弊大于利,对肺泡I型上皮细胞有损害,易产生氧中毒,形成透明膜肺,不宜采用。呼吸机机械通气目前公认以选用呼气末正压呼吸(PEEP)为佳。但临床实践应用PEEP抢救急性氨中毒可导致严重的难以逆转的压力性创伤,致使肺泡破裂、气胸、纵隔及皮下气肿。氨对呼吸道的腐蚀破坏、严重感染亦为压力性创伤的病理基础。故PEEP是否适用于急性氨中毒的抢救,应慎重对待和进一步探讨。目前有采用面罩人工手法气囊间断加压给氧,或高浓度氧低潮气量手法通气,取得一定疗效,未见压力性创伤,似值得提倡,但这方面病例报道尚不多。

关于肺部感染 急性氨中毒合并肺部感染十分严重。其感染原因:(1)广泛的呼吸道灼伤创面、坏死组织、水肿液及炎性渗出物,为病原微生物的侵入提供了条件,且为细菌生长的良好培养基;(2)呼吸道组织结构破坏,正常的净化屏障功能、清除异物及细菌的功能丧失;(3)较长时间应用糖皮质激素,降低机体免疫机能;(4)各种医疗措施的实施,如气管切开、机械通气的应用等均均为肺部感染的诱因;(5)肺部感染病原菌为多重性,细菌耐药严重以及真菌感染等。肺部感染往往随肺水肿发生后1~2d迅速出现或同时存在,中毒早期即应通过静脉足量联合应用抗生素,把握治疗主动权,用药疗程要足,不适当的减量或停药可致感染再发而不易控制。应重视病原学诊断。

严重眼灼伤愈后不理想。国外有应用胶原酶抑制剂L-半胱氨酸有效地预防通过静脉兔眼穿孔,证明其预防人眼角膜溃疡亦有效,并认为软角膜接触晶片促进角膜上皮愈合有望成功。用角膜移植治疗严重氨灼伤,目前尚无成功的报道。

急性氨中毒经治疗多数患者可顺利康复,少数重症患者可遗留肺纤维化、支气管扩张、慢性支气管炎、肺通气功能及弥散功能降低、喉炎及不同程度的视力损伤等。

氮对机体的腐蚀坏死作用及其并发症,在早期治疗方面尚缺乏满意预防措施,这是临床应进一步研究和努力的方向,这方面研究的进展,对提高治愈率,降低病死率,减少后遗症,防止ARDS的发生将起积极作用。急性氮中毒患者血氮究竟有什么变化,文献报告不一,临床尚缺乏系统观察。急性氮中毒致ARDS在发病机理,诊断及治疗上有什么特点,病程进展规律,与其它刺激性气体中毒引起的ARDS在临床表现、诊治、预后等方面的共性与个性如何?尤其是合理氧疗方案的选择,有效的药物及其它措施等,仍将是今后研究的热点。要完成以上研究课题,应提倡基础医学和临床各有关学科的密切配合,相互协同,并从多方面积累资料和经验,进行有设计内容的系统观察,以期在这一领域取得新的进展。

参考文献

- 1 Lamar C. Toxicol APPL Pharmacol., 1970, 17(3): 795~803
- 2 Clifford A J, et al. Proc. Soc. Biol. Med., 1972, 140(4): 1447
- 3 NIOSH. Criteria of recommended standard for occupational exposure to ammonia, 1974, 24~44
- 4 工业毒理学编写组. 工业毒理学上册, 上海: 人民出版社, 1976. 235~239
- 5 Hatton, D V, et al. Archives of Environmental Health, 1979, 34: 83~86
- 6 Subcommittee on Ammonia Committee on Medical and Biologic Effects of Environmental pollutants, Ammonia. Baltimore

(大连化学工业公司医院吕淑秋副主任医师撰;王世俊审)

尘肺的防治——矽肺发病机理研究现状

prevention and treatment of pneumoconiosis; proceedings on the pathogenesis of silicosis 尘肺是指在劳动生产过程中吸入一定量的粉尘引起的以肺组织纤维化病变为主的全身性疾病。它是目前中国发病率最高、危害工人健康最严重的职业病,而矽肺又是尘肺中危害最严重的一种。矽肺是机体长期吸入游离二氧化硅粉尘所致。尽管有关的肺发病机理的学说有数十种,但在历史上引起学者们关注的主要有下表所列的几种。迄今为止,没有一种学说能够比较完全满意地解释矽肺发病机理。因此,阐明矽肺发病机理对于防治矽肺具有重要的意义。

表1 几种重要的矽肺发病机理学说

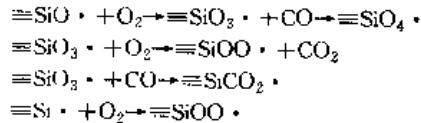
| 名称       | 作者             | 年代   |
|----------|----------------|------|
| 机械刺激学说   | Arnold         | 1885 |
| 中毒学说     | Kettle         | 1926 |
| 表面吸附学说   | Jager          | 1950 |
| 硅酸聚合学说   | Helt 和 Osborne | 1953 |
| 免疫学说     | Vigliani       | 1958 |
| 硅烷醇学说    | Stober         | 1961 |
| 溶酶体受损学说  | Allison        | 1966 |
| 致纤维化因子学说 | Heppleston     | 1971 |

目前,大家普遍认为肺巨噬细胞吞噬石英后,含石英尘的囊泡与初级溶酶体融合,成为次级溶酶体,继而次级溶酶体破裂,其中的水解酶释放到胞浆导致巨噬细胞死亡,石英又释出,再由其它肺巨噬细胞吞噬,如此循环,导致细胞不断破坏,释放出致纤维化因子,刺激成纤维细胞合成,分泌胶原纤维,导致肺纤维化。1982年, Davis 证明不仅破坏的肺泡巨噬细胞可以释放致纤维化因子,而且肺泡巨噬细胞功能改变如膜的通透性增强也可以释放致纤维化因子。进一步证明致纤维化因子本质属于蛋白质,分子量为14 300。Schmidt 利用人血单核细胞与石英尘培养发现致纤

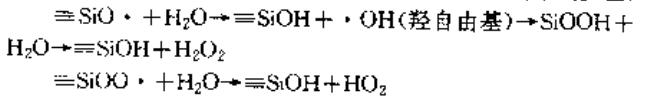
维化因子就是白细胞介素-1(IL-1),李玉瑞等证实,铜蓝蛋白也是一种致纤维化因子。石英导致肺泡巨噬细胞受损是矽肺发病的中心环节,近几年大量的研究工作多数集中在石英尘如何引起肺巨噬细胞膜系统受损。下面简述有关理论进展。

硅烷醇基团与生物膜的作用:在石英的分子结构中,硅氧键(Si-O)断裂时,大气中的水分子与断裂表面的Si-O作用形成硅烷醇基(Si-OH)。该基团的主要特点是活性大,具有一定的能量,易于形成氢键,能够进行氢交换和电子传递,对大分子肽、蛋白质、磷脂有较强的吸附力。石英尘与次级溶酶体膜上的蛋白质和磷脂作用,在巨噬细胞损伤中起着重要作用,硅烷醇基与蛋白质分子上的羰基的氧形成氢键(OH……O=C),使蛋白质构象内在的氢键被拉长、断裂,蛋白质片段键合在石英尘表面上,蛋白质原来的空间构型消失而失去生物活性。硅烷醇基团上的羟基与次级溶酶体上的磷脂基形成氢键(OH……O=P),同时在体内H<sup>+</sup>浓度3.98×10<sup>-8</sup>mol/L时,硅烷醇基可部分电离成SiO<sub>2</sub><sup>-</sup>,与膜磷脂分子头部带正电的-N(CH<sub>3</sub>)<sup>+</sup>形成离子键,离子键和氢键的作用,使脂质构型被破坏,损伤膜的完整性。在硅烷醇基团形成过程中,同时伴随着羟自由基(·OH)和过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)的产生。这些自由基均可损伤生物膜。

脂质过氧化反应对生物膜的作用:大量的体内外研究资料证明,石英尘诱发肺巨噬细胞膜脂质过氧化反应是导致膜损伤的重要原因之一。硅烷醇基团在形成过程中除了产生自由基外,石英在碎裂或研磨过程中硅氧键断裂,还可产生硅自由基和硅氧自由基。Hochstrasser 等利用电子自旋共振(ESR)技术证实新鲜研磨的石英尘可以产生等量的硅和硅氧自由基,这些自由基在真空状态下或外界大气环境中保持长达几个月。硅自由基和硅氧自由基可和O<sub>2</sub>、CO反应生成新的自由基,反应式如下:



这些粉尘自由基大都位于粉尘表面,在空气中可自行衰减,半衰期为30h,在平衡磷酸盐缓冲液中半衰期为几分钟。石英尘与空气中的水接触时,除了形成硅烷醇基团外,还具有下列反应:



利用电子自旋共振技术证实石英与水作用产生的·OH和石英的剂量呈剂量反应关系,并且与石英的粒子结构表面新鲜程度有关,石英尘与冰反应可使高锰酸钾发生还原反应,证明H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的存在。

肺泡巨噬细胞在吞噬石英尘过程中,属于需氧过程,消耗大量的氧分子,同时伴随大量活性氧的产生,如超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)、·OH和单线态氧分子<sup>1</sup>O<sub>2</sub>,大多数的O<sub>2</sub><sup>-</sup>又转变成H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。

上述所有硅自由基、硅氧自由基和氧自由基均可作用于肺泡巨噬细胞膜系统不饱和脂肪酸,其中α-亚烯碳和其上的丙烯氢之间的碳氢键的键能最小,处于部分活化状态,因此这个氢易被自由基作用发生均裂,形成不饱和脂肪酸自由基,称作脂自由基(R·);接着经共轭化和氧化形成脂过氧自由基(ROO·),然后作用于另一分子不饱和脂肪酸上同一位置的H,形成新的脂自由基,本身则成为脂氢过氧化物(ROOH)。这种物质很不稳定,能自发地或在过渡金属离子如Fe<sup>2+</sup>的催化下发生均裂,成为脂过氧自由基,并引发脂质过氧化的连锁反应,如此连锁反应下去,脂质过氧化破坏就愈来愈大。脂过氧自由基还可与一分子不饱和脂肪酸相作用,形成一分子新的脂自由基,本身分解成丙二醛(MDA)、乙烷及戊烷等。MDA能与含游离氨基的磷脂酰乙醇胺、蛋白质或核酸等交联成Schiff氏碱,破坏细胞的结构和功能。

此外,氧化自由基还能破坏核酸、碳水化合物和蛋白质的结构,导致细胞受损。

钙稳态对生物膜的影响:肺泡巨噬细胞内游离钙的增加是细胞受损的又一重要原因。在受损过程中,细胞内游离钙的升高可促进细胞进入不可逆损伤阶段。Kane 将石英尘与  $P_{380}$  巨噬细胞在体外培养 3h,当石英尘为 150ug,  $Ca^{++}$  为 1.8mM 时,60% 的巨噬细胞死亡;培养液中无  $Ca^{++}$  时,所有细胞均存活,提示石英尘导致细胞的死亡与细胞外液中  $Ca^{++}$  浓度呈良好的正相关。当培养液中加入 EGTA 以降低培养液中  $Ca^{++}$  浓度时,随 EGTA 浓度的增加,石英尘引起的巨噬细胞乳酸脱氢酶释放逐渐减弱。石英尘可以促进巨噬细胞对  $Ca^{++}$  的摄取,呈剂量—效应关系,致使胞内的游离钙升高。目前,认为石英尘所致胞内游离钙升高主要原因有以下几方面:石英尘和肺泡巨噬细胞共同作用,细胞内还原型谷胱甘肽(GSH)外流,导致细胞内 GSH 耗竭,位于线粒体膜、内质网膜上  $Ca^{++}-Mg^{++}-ATPase$  (钙泵)巯基失去保护作用,活性被抑制。 $Ca^{++}-Mg^{++}-ATPase$  在调节  $Ca^{++}$  跨质膜转运中起着重要的作用,由于该酶活性被抑制,可迅速导致线粒体、内质网  $Ca^{++}$  隔离屏障消失,细胞浆内游离钙升高。由于石英尘对肺泡巨噬细胞脂质过氧化损害,细胞膜通透性增强,大量的细胞外钙内流入胞浆中,细胞内游离钙也可以升高。细胞内游离钙的升高,可以激活某些  $Ca^{++}$  依赖性磷脂酶,使细胞膜降解,产生游离脂肪酸溶血卵磷脂等毒性物质,进一步损伤细胞,体内许多重要的酶如蛋白酶、核糖酶、腺苷酸环化酶的活性均由  $Ca^{++}$  调控。 $Ca^{++}$  的升高,导致细胞信息、电解质、能量平衡紊乱,影响细胞的功能, $Ca^{++}$  直接影响细胞骨架结构的形成,胞浆内游离  $Ca^{++}$  的升高,导致微管形成受阻,和已形成的微管解聚,表现为细胞表面出现疣状物,最后出现“孔洞”、破溃,直至细胞死亡。石英尘和肺泡巨噬细胞体外共同孵育以及矽肺患者肺泡巨噬细胞均可见到上述改变,说明肺泡巨噬细胞胞浆中游离  $Ca^{++}$  的升高和肺泡巨噬细胞的损伤有直接的关系。

近年来,除了对肺泡巨噬细胞受损在矽肺发生发展中的作用研究较多外,肺泡巨噬细胞分泌细胞因子对肺纤维化的发生也是大家关心的问题。目前对纤维粘连蛋白(Fn)、肿瘤坏死因子(TNF)、血小板源性生长因子(PDGF)、血小板活化因子(PAF)、类胰岛素生长因子(IGF-1)、白细胞介素-1(IL-1)、白三烯类(LTB<sub>4</sub> 和 LTC<sub>4</sub>)、前列腺素类等已做过研究,这些因子在体内作用复杂,互相调控,形成网络结构,解开这些因子的谜对于阐明矽肺发病机理、寻找有效的治疗药物有重大的意义。

#### 参考文献

- 1 Kane AB, et al. J Cell Biol, 1980, 87: 643
- 2 Schmidt, JA, et al. J Clin Invest, 1984
- 3 Deis GS, et al. Lung, 1986, 164: 139
- 4 尹宏,等.中华劳动卫生职业病杂志, 1991, 9(6): 324~326  
(山西医学院郭肃教授,刘保连副教授撰)

**石棉肺** asbestosis 1907年 Murray 首次描述石棉能引起肺弥漫性间质纤维化。1924年 Cooke 提出“石棉肺”一词。1924~1930年,随工业使用石棉的增加,本病更广泛地被认识,并有系列病例报道。1935年 Lynch 等首先报告美国 40 例石棉肺病人中有 3 例发生支气管源性肺癌,其后为很多学者所证实,并确认肺癌为石棉肺的并发症。直到 1950 年, Wiss 等报告才确认间皮瘤与接触石棉相关。1960 年, Wagner 报告南非石棉工人发生间皮瘤之后,更引起人们的重视。

石棉肺是因长期吸入石棉粉尘并蓄积于肺内所致的肺纤维化。疾病的严重程度取决于所接触的石棉类型、接尘时间、环境中粉尘浓度和肺内沉积的石棉纤维量。尘性弥漫性纤维化是本病的突出特点,故石棉肺为弥漫性纤维化型尘肺的典型代表。结节性病变更少出现,尘斑不多,肺门淋巴结生性病变轻。临床 X 线表现为两肺出现粗细不等的不规则影和胸膜病变。肺功能损伤以限制型为主。石棉肺一般比矽肺进展缓慢,潜伏期长达 10~15

年,常呈进行性经过,当继发感染、吸烟以及同时接触其它粉尘特别是矽尘等,可加速疾病进展。

肺组织中石棉纤维类型:有两种类型,一种为裸纤维,另一种为石棉小体,又称包裹纤维。肺内可吸入性石棉纤维自亚微颗粒到 200 $\mu$ m,以 3~5 $\mu$ m 居多。各种石棉纤维进入肺内后,均可发生断裂和溶解,其中温石棉因富含氧化镁,在肺内易溶解,因而自肺内清除比青石棉和铁石棉快,从肺内回收的石棉也多为闪石类。光镜下能见到的石棉纤维数量有限,呈透明或淡蓝色杆状,偏光镜和相差显微镜下更清楚,大量存在的短纤维只能用电镜才能证实。石棉小体是吸入石棉的标志,系石棉纤维被巨噬细胞吞噬后,由一层含铁蛋白和酸性粘多糖包裹沉积于石棉纤维之上形成的,铁反应阳性,故又称“含铁小体”。石棉小体长约 10~300 $\mu$ m,以 30~50 $\mu$ m 的居多,粗 2~5 $\mu$ m,典型者呈金黄色,哑铃状或念珠状结构,轴心为无色透明的石棉丝。可见于巨噬细胞内外,单个或成群地位于肺泡和细支气管的腔壁内或纤维化病变中,其数量的多少与石棉肺程度不一定平行。Churg 及 Ashcroft 等用电子衍射, X 线能谱分析及组织消化过滤等技术,对不同人群肺组织内石棉纤维和石棉小体进行定量研究发现,由于环境污染,非接尘人群每个人肺内都可能有石棉纤维存在,电镜下检出的石棉纤维平均达  $18 \times 10^{10}/g$  干肺组织,光镜下为  $5 \times 10^7/g$  干肺组织。Churg 曾分析 600 个石棉小体,发现 98% 为闪石类,仅 2% 为温石棉。具有石棉接尘史者肺内石棉负荷提高 20~40 倍,石棉肺和间皮瘤者更高,可达 100~1 000 倍。人体和动物自然染尘研究证实,石棉肺纤维化病变严重程度与肺内石棉粉尘负载呈正相关。肺内石棉纤维与石棉小体的比值一般为 5:1~10 000:1。须指出,人肺内各种有机的或无机的纤维均可形成“含铁小体”,采用 X 线能谱、电子衍射等技术对组织中尘粒及含铁小体的轴丝进行化学分析或晶相学分析,方可准确定性。

石棉肺病理改变:石棉被吸入肺组织后,主要沉积于呼吸细支气管及其相邻部位,早期引起以巨噬细胞为主的细支气管肺炎,继后,局部呼吸细支气管和肺泡壁呈细细胞性或/和纤维性肥厚,伴石棉小体形成。随粉尘负荷加重,病变进展,纤维化向纵深扩展,呼吸细支气管周围及其远段受累肺泡层次增多,并突破小叶范围,致小叶间隔和胸膜以及血管、支气管周围胶原纤维增生,相邻病灶融合连接,进而胸膜下区和肺深部形成粗细不一的纤维条索和网架,成为中期石棉肺的改变,特别以双肺下叶显著。晚期出现广泛而严重胸膜下区尘性纤维化,伴局灶性或弥漫性蜂窝变,少数病例可出现大块纤维化。残存细支气管腺瘤样增生,无气肺胞上皮立方化,可伴肺动脉高压所致的中小动脉肌壁肥厚和血管改建。石棉肺病理诊断主要依据是:(1)肺弥漫性纤维化;(2)肺组织中查见石棉小体和/或石棉纤维;(3)确切的石棉接触史。早期时,至少在呼吸细支气管与邻近肺泡存在零散的纤维化病灶伴石棉小体或石棉纤维沉积。如果只查见石棉小体或石棉纤维而缺乏肺纤维化改变,则石棉肺诊断证据不足。反之,有肺纤维化而缺乏石棉小体或石棉纤维的病例,即使病人有确切的接尘史,也不能作出完全的石棉肺诊断。石棉肺的病理分期,国内外都是根据肺弥漫性纤维化的病变范围和病变的严重程度两项指标进行综合评价。中国须按已公布实施的国家《尘肺病理诊断标准》(GB8783-88)进行诊断分期。

石棉肺合并结核远比矽肺者少,其经过和预后也比矽肺结核者良好。中晚期石棉肺患者常合并肺内感染,以小叶肺炎居多。晚期石棉肺患者由于全肺弥漫性纤维化伴一定程度肺气肿,容易导致肺心病。

石棉胸膜斑:被看作是接触石棉的又一病理学和放射学标志。从接触石棉到明显胸膜斑出现,一般需 10~20 年时间。所有商品石棉都可诱发胸膜斑。胸膜斑多分布于胸廓下份外侧、脊柱旁和膈肌中心腱上,单侧性或双侧性。眼观为局限性胸膜增厚的纤维斑块,高出表面,周界清楚,表面光滑,乳白色,斑片或结节状,有时伴钙盐沉着,质坚硬,切面一致性软骨样。镜检,由玻璃样变胶原纤维层层重叠,平行于表面,其中相对无血管,无细胞,



有时见钙盐沉着。

石棉与肿瘤:石棉纤维的致癌性已为人们所公认。石棉不仅危害接尘工人,而且污染环境,危害普通人群。一些国家已将石棉作为法定致癌物严加控制。石棉诱发肿瘤包括肺癌、恶性胸(腹)膜间皮瘤及消化道癌等。1982年Craighead报道,石棉工人肺癌率占21%,胸膜间皮瘤占8%,腹膜间皮瘤占5%。国内报道78例石棉作业工人尸检中肺癌21例(26.9%),恶性间皮瘤7例(8.9%),消化道癌6例(7.6%)。

石棉诱发肺癌潜伏期一般在20年以上,以外周型腺癌多见。常见于双肺下叶纤维化区域。石棉的致癌性以青石棉最强,其次是温石棉和铁石棉,归因于石棉纤维的特殊物理性能,吸附于石棉纤维的多环芳烃物质,石棉中混杂的某些稀有金属或放射性物质及吸烟等综合因素的协同作用。

恶性间皮瘤主要发生在胸膜,其次为腹膜,偶见于心包膜。石棉肺患者尸检中胸膜间皮瘤发病率较普通人群高20~30倍。肿瘤的发生不存在剂量—效应关系。Wagner把不同品种石棉引入大鼠胸腔,发现青石棉和温石棉诱发间皮瘤最多。国内报告温石棉注入大鼠胸腔后,恶性间皮瘤率为45.8%。病理上胸膜间皮瘤呈灰白色,单发或多发性结节状,或包裹整肺呈弥漫分布,可浸入肺内或累及周围组织器官。组织学特点具有双向分化,表现为四种类型,即上皮型、肉瘤型、不分化型和混合型。近年实验研究资料认为,石棉具有诱变作用,并归因于石棉纤维的直接物理作用,诱变主要发生在染色体水平;同时石棉纤维还可导致细胞内氧自由基活性基团的形成,引起DNA损伤进而使细胞的癌基因表达或抗癌基因失活,于是细胞发生转化,并获得肿瘤特性。

石棉对人体的危害是多方面的。预期良性石棉损伤即石棉肺和胸膜疾患将会减少;由于石棉职业接触和环境污染而诱发的恶性肿瘤危险将会增多。因环境污染而引起普通居民,特别是农业人口中的“地方性石棉病”,均已成为当前世界关切的环境医学课题。

#### 参考文献

- 1 Craighead J E. et al. Arch. Pathol. Lab. Med., 1982, 106 (1): 544~596
- 2 Churg A. Fiber counting and analysis in diagnosis of asbestos related diseases. Hum Pathol., 1982, 13: 381~392
- 3 Parkes W R. Occupational lung disorders, 2nd ed. London: Butterworths, 1982, 248~296
- 4 王炳森,等. 中华劳动卫生职业病杂志, 1987, 5: 134~137
- 5 程德成,等. 中华劳动卫生职业病杂志, 1987, 5: 208~210
- 6 王明贵,等. 中华劳动卫生职业病杂志, 1988, 6: 9~12
- 7 Libbus B L, et al. Cancer Res., 1989, 49: 5713~5718
- 8 郑志仁,等. 环境病理学, 济南: 山东科学技术出版社, 1991, 175~186
- 9 李洪洋,等. 华西医科大学报, 1991, 22(1): 46~50

(华西医科大学李洪洋教授撰; 郑志仁审)

### 支气管肺泡灌洗在矿山尘肺诊治中的应用

application of bronchoalveolar lavage in the diagnosis and treatment of pneumoconiosis 尘肺是指在劳动过程中由于吸入一定量的生产性粉尘引起的以肺组织纤维化病变为主的全身性疾病。在矿山劳动卫生工作中,最主要的任务之一是防治尘肺的发生、发展。据1990年全国尘肺流行病学调查结果,矿山工人尘肺例数位居首位。支气管肺泡灌洗(BAL)是诊治肺疾患的一种日益受到重视的方法,其基本原理是用支气管镜或Carliens双腔管深入肺内部,通过管道注入液体并回收。不仅可以直接获取肺脏深部泡腔内的有形的或无形的成分进行检测分析,作病因诊断;还可以清除肺泡内沉积物,去除病因,起到治疗作用。根据灌洗范围不同,可分为全肺的、肺叶的、肺段的或亚肺段的灌洗,根据不同目的,选择不同的灌洗方法。如用于诊断肺部疾患可选用肺叶灌洗或肺段灌洗,用于治疗可选用全肺灌洗,后者又可分为

全肺大容量灌洗和全肺小容量分叶灌洗,前者是指给予大量的液体一次灌洗单侧肺或双侧肺,后者则是指一次灌洗一个肺段或肺叶,连续灌洗一侧肺或双侧肺。

1919年,Winterz利用BAL治疗肺炎双球菌引起的实验性肺炎。1967年,R. Ramirez用大容量灌洗治疗肺泡脂蛋白沉着症患者。1974年Reynolds把支气管肺泡冲洗液(BALF)中的蛋白、细胞作为肺部感染、结节病、原发性间质性肺炎、过敏性肺炎等肺疾患的辅助诊断指标。1982年,Mason利用全肺灌洗治疗1例混合尘肺。1988年第7届国际尘肺会议报道,不仅应用BAL方法研究有毒物质的肺毒性的及职业性的肺间质性疾患的鉴别和早期诊断,而且从细胞和分子水平研究职业性肺疾患的病变和发生机理,在临床应用也取得一定成果。中国于80年代中后期先后在山西、广西、南京等地系统地开展了支气管肺泡灌洗在实验性尘肺和尘肺患者中的应用,分析了BALF中磷脂、磷脂亚类、蛋白、细胞和酶的变化,探讨了上述指标在尘肺早期诊断中的意义。

矿山尘肺种类较多,但以矽肺最为严重,发病率高,进展快。尽管各种尘肺致病因素即粉尘的成分不同,但其发生发展遵循一定的规律,早期表现为肺泡巨噬细胞数量增加,功能活跃,肺泡I型上皮细胞受损,I型上皮细胞增生增殖,分泌大量的肺表面活性物质;随着病变的发生发展,肺纤维化逐渐加重,细胞学数量改变不明显,但功能有明显的变化。因此,利用BAL获取肺内细胞和生化成分,对于辅助诊断尘肺、评价尘肺发生发展具有一定的意义。矽肺患者BALF中细胞总数明显增加,以肺泡巨噬细胞和淋巴细胞为主,中性粒细胞较少,速发型矽肺细胞总数明显高于一般型矽肺。Voisin报道94例煤矿接尘工人BALF中细胞学变化,细胞总数高于非接尘工人,以肺泡巨噬细胞和淋巴细胞为主。山西医学院郭秉等,从80年代初曾在动物体上进行多次实验研究BALF,结果表明大鼠经气管注入石英尘后,BALF中细胞总数明显增多,染尘后7天中性粒细胞明显增加,认为是一种早期非特异性反应;随着染尘时间的延长,肺泡巨噬细胞增多。大鼠自然染石英尘也表明,染尘后90天BALF中细胞达高峰,以肺泡巨噬细胞为主,是正常组的19倍,以后逐渐下降,但仍高于正常组2~3倍。而煤石英尘和煤尘组BALF中细胞数虽然增加,但远不如石英尘组明显。不同性质的粉尘对BALF中细胞数的影响不同,而且各种粉尘的理化特性、毒性与BALF中细胞学的改变有一定的关系。

矽肺病人BALF中的肺泡巨噬细胞存活率与正常人无明显差异,约90%左右,但功能差异较大,活性氧自由基增加约为正常人的2~7倍,重新加入石英后,肺泡巨噬细胞活性氧只有轻度的增加,而正常肺泡巨噬细胞可增加5倍左右。活性氧的主要功能是作用于细胞膜上多聚不饱和脂肪酸,使其氧化成饱和脂肪酸,从而使细胞受损。矽肺、煤矽肺患者肺泡巨噬细胞脂质过氧化物增加,说明活性氧在肺泡巨噬细胞受损过程中一直起作用。染石英尘大鼠,BALF中肺泡巨噬细胞脂质过氧化物在染尘早期升高幅度高于染尘晚期,而超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-px)和还原型甘谷胱甘肽(GSH)含量一直处于低水平。煤石英对肺泡巨噬细胞脂质过氧化物影响较弱,SOD和GSH-px变化不明显。由于活性氧自由基的持续作用,矽肺病人和煤矽肺病人肺泡巨噬细胞体积增大,细胞表面伪足,皱褶减少,呈光亮或平滑状,细胞有时出现不规则形改变,细胞膜出现许多囊泡样改变和“网眼”、“洞”样结构,呈衰老型细胞,即细胞的反应能力减退,细胞毒性产物增多(如溶酶体),细胞膜流动性、通透性均发生改变。肺泡巨噬细胞除了本身功能发生改变外,可以释放大量的水解酶(如胶原酶、组织蛋白酶、弹性蛋白酶等)破坏组织细胞,促进尘肺的发生发展。肺泡巨噬细胞受损还可以释放大量的炎性介质和致纤维化因子,矽肺患者和煤矽肺患者肺泡巨噬细胞酸性磷酸酶和磷脂酶A<sub>2</sub>活性升高(主要功能是分解磷脂产生花生四烯酸,合成白三烯和前列腺素类炎性介质)。染石英尘大鼠肺泡巨噬细胞白三烯(LTB<sub>4</sub>)和前列腺素(PGE<sub>2</sub>)分泌增

加。矽肺患者肺泡巨噬细胞分泌纤维粘连蛋白、肺泡巨噬细胞来源的生长因子(AMDGF)和白细胞介素-1(IL-1)均高于正常人;将矽肺患者肺泡巨噬细胞上清液加入纤维母细胞培养体系中,纤维母细胞摄取 $^3\text{H}-\text{TdR}$ 明显增加,说明肺泡巨噬细胞不仅有促进纤维母细胞生长作用,而且还可促进胶原纤维的合成和分泌。

尘肺的发生、发展不仅和肺泡巨噬细胞有关。而且还和淋巴细胞的功能有关。粉尘对肺泡巨噬细胞功能的影响,改变了肺脏局部免疫功能,矽肺病人BALF中 $\text{CD}_4$ 、 $\text{CD}_8$ 下降[4], $\text{CD}_3$ 和 $\text{CD}_4$ 细胞数量下降,并且和接尘工龄及尘肺病变有关。

在尘肺病形成过程中,BALF中生化成分也发生明显变化。矽肺大鼠BALF中总脂、磷脂及其亚类二棕榈酰卵磷脂(DPPC)含量均有不同程度的升高,以早期为明显,大约为正常组的5~10倍,晚期大约为正常组的1倍,煤石英组没有石英组明显。病理结果提示,磷脂的改变主要和肺泡I型上皮细胞数量增加和功能活跃有关。同时,由于肺泡巨噬细胞受损,许多酶类释放入BALF中。Salnonnze检查16例煤工尘肺BALF中糖甙酶和蛋白酶,N-乙酰- $\beta$ -氨基葡萄糖甙酶和 $\beta$ -N-乙酰半乳糖胺酶活性升高。王力珩报道矽肺患者BALF中单胺氧化酶同工酶谱中 $\text{MAO}_3$ 构成比高于 $\text{O}^+$ ,后者又高于接尘作业工人,乳酸脱氢酶同工酶谱 $\text{LDH}_4$ 构成比高于接尘工人。染石英尘大鼠BALF中脂质过氧化物、GSH-px、GSH和IgG、IgA含量均高于对照组。

详细的BALF中细胞和生化成分分析,对于研究矿山尘肺的发病机理及早期诊断具有一定的意义。

进入肺内的粉尘大约98%被排出体外,只有1%~2%长期滞留在肺泡内,这些粉尘与吞入的肺泡巨噬细胞是尘肺的主要致病因素。利用BAL方法,可以排出大量的分泌致纤维化因子的尘细胞和粉尘,可能延缓尘肺病期的升级,甚至对X线胸片尚未出现病变的接尘工人及 $\text{O}^+$ 工人进行灌洗也可能防止或延缓其发病。

1982年,Mason对1例尘肺患者进行灌洗治疗,BALF中主要是含石英的巨噬细胞和粉尘,清除物干重25g,其中含 $\text{SiO}_2$ 135mg,治疗后病人症状立即得到改善,但肺功能未见明显好转。对实验性狗矽肺进行BAL,矽肺病理包括矽结节、肺胶原含量较未灌洗组明显减少,X线胸片上类圆形阴影数量减少,阴影缩小。对120例尘肺患者进行肺叶灌洗,有1/4患者感到症状减轻。谈光新等对54例矽肺和其它尘肺进行单侧大容量灌洗,洗出肺泡巨噬细胞大多在 $1 \times 10^7 \sim 10^8$ ,少数为 $1 \times 10^9$ ,对照组为 $1 \times 10^6$ ,细胞分类95%~98%为肺泡巨噬细胞,一侧洗出的 $\text{SiO}_2$ 含量约半数在30mg以上,1/3在70mg以上,少数高达200mg,通气功能好转者占33.3%,近期疗效显著,病人胸闷、气急、咳嗽、咯痰好转率分别为92.5%、81.6%、86.1%和84.8%。1991年,北戴河工人疗养院开展双侧同期大容量灌洗治疗煤工尘肺,共观察25例,治疗1周后,病人症状减轻,半年后随访23人症状持续好转,24人半年内未发生呼吸道感染,体重增加2~6kg,肺功能轻度改善,灌洗出残渣多者达4g。

目前,国内外逐渐开展BAL用于尘肺的诊断和治疗,由于该方法无创伤,不仅可直接获取病变部位的生物材料,还能洗出病原,改善症状,其应用前途是值得重视的。但也存在一些问题,如远期疗效究竟如何,由于灌洗过程中肺处于缺氧状态,肺表面活性物质大量损失,对机体的损伤和修复如何,以及操作过程中对肺有无损伤,都是值得研究的课题。

#### 参考文献

- 1 Mason CR, et al. Am. Rev. Respir. Dis., 1982, 126: 1102
- 2 Voisin C, et al. Rev. Fr. Med. Resp., 1983, 11: 455
- 3 海老原勇,等.劳动科学,1986,62:325
- 4 Costable U, et al. chest, 1987, 91: 110
- 5 谈光新,等.中华劳动卫生职业病杂志,1990,8(4):220
- 6 刘保连,等.职业医学,1992,19(5):267~268

(山西医学院郭肅教授、刘保连副教授撰)

**农民肺** farmer's lung 又称霉菌尘肺,是由吸入发霉草料或谷物粉尘所引起的一类肺部疾病,是外源性过敏性肺炎最常见的典型代表。本病自1932年Campbell首次报告,1944年Pickles称之为“农民肺”以来,已在世界范围引起广泛重视,陆续有许多研究报道和综述。本病在美国高发地区占农业人口的3%~5%,在英国则高达8.6%~9.6%。1964年以来,英国已把此病列为职业病而给予补偿。国外,1958年才开始有农民肺的病理报道。70年代曾报告,由于吸入发霉草料所致的外源性过敏性肺炎也见于牛马类动物。中国是农业大国,但有关资料报道很少。车东瑗等1982年首次报告1例慢性农民肺患者尸解病例,并进而调查湖南省洪湖县380例农民,农民肺发病率为5.26%,加上许多可疑病例,估计实际发病率远高于此数。

农民肺的病因已相当清楚,主要为致病真菌。在英国以微小多孢子菌和嗜热放线菌为主;在美国至少有5种放线菌,芬兰报告有6种放线菌的11种真菌与农民肺发病相关。中国车东瑗等(1986)从患者痰液中分离培养出高温放线菌48株,其中4个代表株分别在家兔肺内复制出典型的急性的和慢性的农民肺病变。在潮湿地区,气温适宜,贮藏的干草或谷物产热而又通风不良的条件下,以 $30\text{C} \sim 60\text{C}$ 最利于嗜热真菌大量繁殖。Gregory(1964)发现霉菌所含孢子高达 $1\ 000 \times 10^6/\text{g}$ 。Lancey(1964)报告,某农场室内空气霉菌孢子高达 $16 \times 10^8/\text{m}^3$ 。在此种环境条件下工作的农民,每分钟沉积在肺组织内的孢子数可达 $0.75 \times 10^6$ 。农民大量吸入这种霉菌粉尘几小时后就发病,以冬季和早春多发,41~60岁男性农民最多受害,甚至可发生局部地区的暴发流行。

农民肺的发病机理主要是Ⅲ型变态反应。第1次吸入霉菌抗原致敏的患者,体内产生以IgG为主的沉淀素抗体;再次吸入霉菌尘后在肺组织内形成抗原-抗体-补体免疫复合物,主要沉积在肺泡腔和肺泡壁内,甚至沉积在毛细血管和小血管壁内,伴随大量中性粒细胞浸润和炎性渗出,致强烈的肺炎或细支气管肺炎和肺实质损伤改变。研究发现,多数病人体内可检出沉淀素抗体,霉菌浸出液皮内试验呈阳性反应;Pepys(1965)用微小多孢子菌浸出液给病人吸入激发试验可以引起疾病发作,且在肺的病变部位查到微小多孢子菌的孢子及免疫复合物和 $\text{C}_3$ 沉积。在反复发作的慢性病例,肺内T细胞总数明显增多,伴有淋巴细胞浸润的典型肉芽肿成分,揭示N型细胞免疫反应的参与。

本病分为急性期和慢性期,临床病例约1/3为急性,2/3为慢性。任何年龄均可发病。急性期者往往在接触霉菌后1~12小时发病,出现发热、寒颤、不适、咳嗽,多伴胸闷、气急,严重者可有紫绀、心动过速、两肺湿罗音和喘息表现。X线检查急性期者呈细小斑片状或大片状浸润影,反复接触者晚期则出现广泛的不规则条索影,乃至蜂窝肺的形象。肺功能多显示顺应性降低、限制性通气障碍和弥散障碍。重症者往往于晚期合并肺心病和心衰竭。

农民肺在病理上也相应地分为急性期(包括亚急性)和慢性期。

急性期 资料多来自肺活检或动物实验。肺炎表现为肺泡腔内浆液充填(肺水肿),中性粒细胞、巨噬细胞和淋巴细胞浸润。肺泡壁充血,伴单核细胞浸润,致肺泡间隔增厚。Barrowcliff(1968)报告1例;17岁男性患者,吸入霉菌粉尘后出现急性呼吸窘迫症,12天内死亡。尸解发现,两肺膨胀,切面全肺散在粟粒样小结节,扣之实感;镜下,小叶中心急性细支气管炎肺炎,伴闭塞性细支气管炎。渗出细胞含中性粒细胞、嗜酸性粒细胞、淋巴细胞和浆细胞。肺泡隔毛细血管内有血小板纤维蛋白栓形成。死者血清学检出抗微小多孢子菌的沉淀素抗体。作者认为病变属于Ⅲ型变态反应的表现。肺水肿一般于1~2周内消退。此时病理特征更加显著:(1)上皮样肉芽肿最具特征(急性肉芽肿性肺炎),呈非干酪坏死性小结节,酷似结节病所见,两肺散在,形态不规则,但肺的基本结构仍保存。肉芽肿由上皮样细胞、郎

罕氏细胞或异物巨细胞构成,外周为淋巴细胞所围绕。有的巨细胞内可见双折射异物颗粒或针形裂隙,其性质有认为可能是霉草尘内的植物性颗粒或结晶物。Seal等(1968)认为,上皮样肉芽肿可在急性发病3周内形成,1年左右消退,皮质激素治疗可加速其消散。(2)肺泡腔内大量巨噬细胞浸润,并形成泡沫细胞,类似脱屑性间质性肺炎的改变。(3)有的病例肺泡隔内淋巴细胞和单核细胞浸润显著,须与淋巴细胞型间质性肺炎相区别。(4)终末支气管和呼吸细支气管往往受累(此有助于与它型间质性肺炎相区别),管壁肉芽肿性病变突入管腔,可致气道闭塞。同时伴气道粘膜的炎性改变,甚至坏死,脱落,溃疡形成。此种阻塞性细支气管炎是本病的常见特征之一,但因受累细支气管数量不多,故一般阻塞性通气功能障碍不明显。此外,肺组织内还可见过敏性血管炎、细支气管周围炎和肺泡Ⅰ型上皮细胞增生等改变。

慢性期:多数病例由反复急性发作进展到慢性期,也有不少病例可长期低浓度吸入霉草尘导致慢性进行性疾病,而无明显的急性期。慢性期病变主要是全肺程度不等的非特异性弥漫性纤维化或肺硬化和蜂窝肺。眼观,两肺胸膜增厚,表面凹凸不平,切面出现粗细不等的灰白色纤维索条或网架,其中散插大小不等的实性硬结,余肺往往气肿和细小支气管扩张,严重者即呈蜂窝样外观。镜下,全肺弥漫性胶原纤维化,主要在肺泡隔、终末支气管和呼吸细支气管周围及血管周围,导致正常结构破坏。局部肺组织内,特别是纤维化明显区段内,常可见不同程度的淋巴细胞浸润和淋巴滤泡形成。含双折射颗粒的异物巨细胞亦常见。多数病人因继发肺动脉高压,肺内血管发生相应的病变,即肌型肺动脉和细小动脉肌层显著增厚,内膜纤维增生,管腔狭窄。国内报告的1例慢性农民肺,除纤维化病变外,在呼吸细支气管和肺组织内查见异物肉芽肿散在分布;心重720g,右心室壁极度肥厚。

本病诊断依据:(1)霉草或谷尘接触史;(2)典型的临床表现;(3)限制性通气功能障碍;(4)血清沉淀素凝集试验阳性;(5)肺活检可见典型外源性过敏性肺炎或肉芽肿性间质性肺炎改变。急性期须与流行性感冒、急性支气管炎、肺炎、急性粟粒性肺结核、变应性支气管哮喘相鉴别;慢性期须与其它型弥漫性肺纤维化相鉴别。职业史、病因学和免疫学检查为确诊的必要条件。症状严重时使用肾上腺皮质激素,疗效明显。预防措施主要在于防止谷草发霉和与之脱离接触。

#### 参考文献

- 1 Seal RMG. Pathology of the acute and chronic stages of farmer's lung. Thorax, 1968, 23: 451~468
- 2 Pepys J. Hypersensitivity diseases of the lung due to fungi and organic dusts. Basel; Karger, 1969
- 3 Spencer H. Pathology of the lung. Oxford; Pergamon press, 1977, 1(3): 440~443
- 4 Parkes W R. Occupational lung disorders. London; Butterworths, 1982, 359~414
- 5 Morgan W K C, Seaton A. Occupational lung diseases. Philadelphia; Saunders, 1984, 589~590
- 6 车东瑗,等. 同济医科大学学报, 1986, 1: 36~42
- 7 赴鸣武. 中国医学百科全书(肺病学). 上海: 上海科技出版社, 1986, 101
- 8 李洪洋. 环境病理学. 济南: 山东科技出版社, 1991, 209~217 (华西医科大学郑志仁教授撰; 李洪洋审)

**职业癌** occupational cancer 职业癌是由接触职业性有害因素引起的恶性肿瘤。随着工农业的发展,人们在生产环境中接触的致癌因素,包括物理性的、化学性的和生物性的致癌因素越来越多,职业癌的发病率和死亡率逐渐升高,其危害亦日益受到人们的重视。

早在1775年,英国波特(Pott)即报告扫烟囱工人阴囊癌增多,首次提出职业癌的问题。1895年,德国瑞恩(Rehn)首先报告染料厂工人发生职业性膀胱癌,从此开始怀疑化学物质引起癌瘤。1915年,日本山坂、市川用煤焦油第1次诱发家兔皮肤癌成功,开创了化学诱癌实验的先河。1922年,英国肯纳韦(Kennaway)从煤焦油中分离出多种多环芳烃,其中有几种诱发实验性皮肤癌成功,证实化学物质可诱发癌瘤。1945年,英国凯斯(Case)进行了染料工业中膀胱癌的流行病学调查,其结果证实乙萘胺及联苯胺的致癌性。1951年,美国科来松(Clayson)研究了致癌物的代谢,引起人们对致癌物代谢的研究兴趣。1967年英国、1972年日本分别制订了有关致癌物的法规。到1991年底为止,世界卫生组织(WHO)国际癌症研究中心(IARC)已经确认39种化学物质或生产过程对人类致癌,其中24种为职业性致癌因素,见下表:

据一些国家调查结果表明,职业癌占癌症的1%~2%。1973~1975年中国肿瘤死亡回顾性调查结果指出,中国每年有80万人死于恶性肿瘤,其中职业肿瘤如按1%~2%估算,即中国每年因职业癌死亡8000~16000人,这在职业病死亡中居首位。

职业癌的特点 (1)具有较明显的职业性致癌因素接触史,职业癌中以肺癌最多,其次是膀胱癌、皮肤癌等,这可能与生产工人在作业环境中以吸入致癌物为主有关。呼吸道总面积约为150m<sup>2</sup>,而皮肤的表面积为1.5m<sup>2</sup>,而且致癌物侵入肺泡后不易咯出。(2)职业癌有一定潜隐期。职业性肿瘤患者自接触致癌因素至临床发病有一定的时间间隔,这个时间间隔叫潜隐期。职业性肿瘤的潜隐期通常为15~20a,最短者约2~5a,长者达30a以上。因为肿瘤从细胞恶性变开始,须经30代以上的增殖达到一定的数量和体积,临床上才能被发现,所以职业性肿瘤有一定的潜隐期。(3)职业性肿瘤都有一定的好发部位,即靶器官。如镍、铬等多致肺癌,芳香胺引起膀胱癌,砷致肺癌和皮肤癌。

职业癌的发病学说 (1)电子转移系统缺失学说:是从量子生物学水平说明癌症的发生的,该学说认为癌症的发生是由于体内电子传递链的中断。(2)体细胞突变学说:认为癌症是由于体细胞突变,突变的细胞不断复制,并向恶性转化,形成癌症。(3)化学致癌的阶段学说:认为癌症的发生分为启动阶段和促进阶段,细胞在启动剂的作用下发生启动,然后要经过促进剂的多次促进才能发展为癌症。(4)非基因损伤学说:认为由于细胞分化不良导致癌症,如石棉、矿物纤维等可引起癌症,但并不损伤DNA。

职业癌的研究方法 (1)流行病学的调查,这是确定职业癌最基本的研究方法,没有职业肿瘤流行病学调查资料或者资料不足,就不能确定职业肿瘤。(2)动物诱癌实验方法,主要用于鉴定生产过程中某些物质是否具有致癌性和致癌性的强弱。(3)快速检测方法,主要是检测生产环境中某种物质的致突变性,来推测该物质的致癌性。此方法的优点是快速、简便、省钱、省力;主要缺点是近年来发现致突变与致癌性的符合率仅有50%~60%。到目前为止,已经发现的致突变物有数万种,可是,证据充足的职业性致癌因素仅有20余种。

通过工程手段可以减少或不接触致癌因素,从而预防职业癌的发生。目前虽然大多数学者已经承认致癌物质无“阈限值”,就是说多数人接受“致癌物一次打击学说”,但是,减少对致癌物的接触毕竟能够降低职业癌的发生率。

随着工农业的发展,职业癌的问题逐渐突出,职业癌的研究日益受到人们的重视。目前,职业癌的研究热点有:职业癌的一级预防和二级预防;如何制定化学致癌物的卫生标准;癌前病变的化学阻断;职业癌的特异性诊断指标;高危人群生物监测指标的研究,特别是寻求中间终点指标的研究;比较快速的整体动物实验方法的研究等等。

表1 世界卫生组织癌症研究中心(IARC)确认对人致癌的化学物质、工业或工业过程(1991)

| 中文名                   | 英文名                                                                      | 靶器官               |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1. 4-氨基联苯             | 4-Aminobiphyl                                                            | 膀胱                |
| 2. 砷和砷化物              | Arsenic and its compounds                                                | 皮肤、肺、肝            |
| 3. 石棉                 | Asbestos                                                                 | 肺、胸膜、胃肠道          |
| 4. 金胺制造业              | Auramine manufacture                                                     | 膀胱                |
| 5. 硫唑嘌呤               | Azathioprine                                                             | 造血系统、皮肤、肝         |
| 6. 苯                  | Benzene                                                                  | 造血系统              |
| 7. 联苯胺                | Benidine                                                                 | 膀胱                |
| 8. 双氯甲醚<br>(和工业品氯甲甲醚) | Bischloromethyl ether<br>(and technical grade chlormethyl ether)         | 肺                 |
| 9. N,N-双(2-氯乙基)-2-萘胺  | Chloronaphazine                                                          | 膀胱                |
| 10. 苯丁酸氮芥             | Chlorambucil                                                             | 造血系统              |
| 11. 铬和铬化物             | Chromium and its compounds                                               | 鼻腔、肺              |
| 12. 环磷酰胺              | Cyciophamide                                                             | 膀胱、造血系统、卵巢        |
| 13. 二乙基己烯雌酚           | Diethylstilbestrol                                                       | 子宫、阴道             |
| 14. 结合雌性激素            | Conjugated estrogens                                                     | 子宫、阴道             |
| 15. 赤铁矿开采(氡?)         | Haenite mining(Radon?)                                                   | 肺                 |
| 16. 异丙醇制造业            | Isopropyl alcohol manufacture                                            | 肺                 |
| 17. 苯丙氨酸氮芥            | Melphaian                                                                | 造血系统              |
| 18. 芥子气               | Mustard gas                                                              | 肺、鼻               |
| 19. 马利兰(二甲黄酸丁脂)       | Myleran                                                                  | 造血系统              |
| 20. 2-萘胺              | 2-Naphthylamide                                                          | 膀胱                |
| 21. 镍和镍化物             | Nickel and its compounds                                                 | 鼻腔、肺              |
| 22. 镍精炼工业             | Nickel refining                                                          | 肺、鼻               |
| 23. 非那西丁              | Phenacetin                                                               | 肾                 |
| 24. 煤烟                | Soot                                                                     | 肺                 |
| 25. 常春新硷              | Treosulphan                                                              | 造血系统              |
| 26. 氯乙烯               | Vinyl chloride                                                           | 肝                 |
| 27. 制靴鞋等皮革业           | Boot and shoe manufacture                                                | 鼻腔、肺、膀胱           |
| 28. 淋巴瘤综合化疗           | Combined chemotherapy of lymphomas                                       | 造血系统              |
| 29. 家具和柜橱制造业          | Furniture and cabinet making                                             | 鼻                 |
| 30. 橡胶工业(某些工种)        | Rubber industry (certain jobs)                                           | 肺、胃、肠             |
| 31. 吸烟                | Tobacco smoke                                                            | 呼吸道、上消化道、膀胱、肾盂、胰腺 |
| 32. 酒精饮料              | Alcoholic beverage                                                       | 口腔、咽、喉、食道、肝       |
| 33. 页岩油               | Shale-oils                                                               | 阴囊                |
| 34. 煤焦油沥青             | Cool-Tar-Pitches                                                         | 皮肤(阴囊癌)、上消化道      |
| 35. 焦炭工业              | Coke Production Industry                                                 | 肺、皮肤              |
| 36. 画家                | Painters                                                                 | 肺                 |
| 37. 矿物油               | Mineral oils (Such as mulespinning,<br>metal machining, Jute Processing) | 呼吸道、上消化道、皮肤       |
| 38. 氡及其子体             | Radon and its decay Products                                             | 肺                 |
| 39. 毛沸石               | Erionite                                                                 | 胸膜间皮              |

## 参考文献

- 1 International Agency for Research on Cancer (IARC) Monographs, 1972~1991, 1~51
- 2 Alderson M R. Occupational Cancer, London. Butterworth, CO. (Publishers) Ltd, 1986; 1~193
- 3 毕文芳, 等. 卫生研究, 1989, 18(6): 7~10
- 4 毕文芳, 等. 卫生毒理学杂志, 1990, 4(4): 232~233
- 5 江泉观主编. 基础毒理学, 北京: 化学工业出版社, 1991: 311~331
- 6 Bi Wenfang, Richard Hayes, Feng Peiwen, et al. Amer. J. of Ind. Medicine, 1992, 21: 481~499  
(中国预防医学科学院劳动卫生与职业病研究所毕文芳研究员撰)

**职业性皮肤病** occupational dermatoses 职业性皮肤病是由于各种职业性有害因素作用于皮肤及其附属器所引起的病变。本病可见于从事各种工业、农业以及其它任何行业和工种的人群; 其中以工业职业性皮肤病较多见, 据统计, 约占整个工业职

业病的50%~60%，预计随着中国经济建设的发展，工业以及其它行业中的职业性皮肤病发病情况势必日趋复杂。因此，重视开展职业性皮肤病的研究，对于保障广大职工身心健康，提高工作效率，促进生产发展，是一项至关重要的任务。

中国对于职业性皮肤病的研究，是从新中国成立以后才开始的。青岛医学院穆瑞五主编的《职业性皮肤病》是中国第一部有关职业性皮肤病的专著。上海医科大学杨国亮教授早在1957年就发表了《中国职业性皮肤病问题之商榷》论文。他们均曾为中国的职业性皮肤病研究做过大量开拓性工作。在前人工作基础上，中国皮肤科医务人员对危害广大劳动人民健康的职业性皮肤病调查研究和防治工作，并取得可喜的成绩。在工业性皮肤病方面，对沥青、石油、炼焦、合成树脂（塑料）、合成纤维、玻璃纤维、橡胶、印染、涂料、电镀及制药等工业系统的职业性皮肤病研究较多。对上述各种行业中职业性皮肤病的发病情况、临床表现及致病原因均有不少调查研究报道，并能结合各行业生产环境的实际情况，提出一些切实可行的预防措施。在农业性皮肤病方面，全国各地对稻农皮炎的两种主要临床类型（浸渍糜烂性皮炎和动物血吸虫尾蚴皮炎）的流行病学特点、病因和发病机理均有比较深入的了解；同时，也摸索出一套简便易行、行之有效的防治方案，有效地控制了本病在中国广大水稻种植区的流行。在其他职业性皮肤病方面，如对演员中常见的戏剧油彩皮炎，从事海产养殖业渔民中常见的刺胞皮炎（水母、海葵等），畜牧业职工中的挤奶员结节以及煤矿业中的多发病足癣及化脓性皮肤病等均曾有过不少调查研究报告，有效地控制了这些皮肤病的发生。

近年来，对职业性皮肤病的研究主要集中在以下几方面：

**职业性接触性皮炎和湿疹** 据统计，这种类型皮肤病约占职业性皮肤病的80%~90%，无论对职工健康抑或是对生产劳动影响均较大，因而有关这方面的研究工作也最多、最深入。本症几乎遍及各行各业，特别是多见于合成树脂、橡胶、印染、电镀、玻璃纤维、制药、炼焦及各种化学工业，亦常见于农、林、牧、渔及水产养殖、加工等行业。其临床表现与一般接触性皮炎相同。王侠生等对电镀业职业性皮肤病的调查和金属盐接触性皮炎研究表明，重铬酸盐及镍盐均为主要的致敏物，而镍盐致敏的持久性更甚于铬盐，少数出现多元性敏感。对环氧树脂皮炎的研究表明，低分子环氧树脂，固化剂二乙烯三胺及稀释剂环氧丙烷丁基醚是主要的致敏因素。王侠生对橡胶中促进剂4,4-硫双吗啉、2-巯基苯并噻唑及吗啉代巯基苯并噻唑致敏作用的研究资料显示，它们既具致敏作用，又具对皮肤的刺激作用，其结构上的-S-S-、S-S-及-SH在致敏中起主要作用。香兰素是常用的食用香料，工人在其生产过程中发生的皮炎主要由中间体对亚硝基二甲苯胺盐酸盐致敏所致，而与香兰素无关。工人在青霉素制造过程中发生的皮炎主要由甲醛、普鲁卡因、乙醇及成品青霉素粉等所致。De Groot等对化妆品皮炎致敏原的研究资料表明，主要致敏原分别来自护肤用品、指甲油、香水、头发化妆品、除臭剂和唇部化妆品，其致敏原组分主要为防腐剂、香料和乳化剂。在临床上对化妆品皮炎的诊断有一定难度，Taylor甚至认为在未作斑试之前，有50%的患者或医师不认为发生的皮炎与化妆品有关。手部湿疹的病因探索是近年来研究热点之一，王侠生等通过对320例手部湿疹的研究发现，在职业性手部湿疹中，对铬、镍及钴盐类致敏是一突出问题。而理发业者的手部皮炎则主要是由巯基乙酸、氢氧化钠（氨）的原发性刺激所致。对本症的实验诊断研究，目前仍以皮肤斑试贴试验最为常用。在欧美一些国家均有标准斑试系列及斑试器供临床应用。但对试验技术及反应的解释方面还有不同看法。Fischer对此作了专题论述，指出斑试仍然是确定接触性致敏原的标准手段。有关斑试标准化、确定致敏原、斑试技术训练及体外试验等问题均有待进一步研究。

**职业性痤疮** 是常见的职业性皮肤病之一，一般分为两类，即因经常接触原油及其分馏产物或煤炭及其分馏产物引起的油疹和长期接触卤代芳香族化合物如三氯苯、多氯化萘、多氯（溴）联苯、多氯酚化合物及聚氯乙烯热解物等引起的痤疮疹。职业性

痤疮的主要特点在于患病不受年龄限制，皮损好发于指背、手背、面、耳及阴囊等；基本损害为黑头粉刺、角化性毛囊性丘疹以及发病与工龄、接触量呈正相关等。

**职业性黑变病** 在石油、焦油、橡胶、染料、制药等化工企业中比较常见。此外，表演艺术工作者由于油彩化妆，电焊工因紫外线照射所致的黑变病亦非少见。石油、焦油及其分馏产物中的脂肪烃、环烷烃及芳香烃等化合物；橡胶制作中应用的促进剂D、M、DM、CZ、TMTD、DTDM，防老剂D、A、MB等；染料中的偶氮染料、苯绕蒽酮；制药业中的氯丙嗪、吡嗪酰胺；油彩中的立索尔大红、银朱R、氧化铁红及香精等等均为其主要致病因素。本病的临床特点是在发病前常有接触性或光敏性接触性皮炎反复发作史，少数人可无明确的皮炎发作史。色素沉着好发于面部及手背、前臂等暴露部位。皮损呈大小不一片状或网状，色灰褐、黑褐，间有毛细血管扩张或角化性毛囊性丘疹。

**职业性皮肤溃疡** 本症特指在生产劳动中皮肤直接接触铬、铍等化合物所致的特异性“鸟眼状溃疡”。本症现已少见。溃疡好发于手指、手背及前臂等，单个或多发，典型的多呈圆或椭圆形，周边有宽约2~4mm的暗红色堤状隆起，溃疡表面覆以灰黑色痂，发病初期可伴疼痛。病程经久难愈，愈后留下萎缩性疤痕。

**职业性皮肤癌** 职业性皮肤病约占职业性肿瘤的35%。已经明确可诱发皮肤癌的致病因素有四类：即多环芳烃、无机砷、紫外线与电离辐射。多环芳烃中的3,4-苯并芘、3-甲基胆蒽已被公认为致癌物质，广泛存在于煤烟、焦油、杂酚油、页岩油中。无机砷中具致癌作用的主要为三氧化二砷。含砷矿石的开采与冶炼为主要的接触砷危害的职业。紫外线的致癌光谱为256~320nm，其致癌机理可能与紫外线照射引起DNA中胸腺嘧啶二聚体的形成诱发细胞突变有关。电离辐射致癌可见于长期接触X射线或放射性元素（如Ra、<sup>60</sup>Co）的工作人员。职业性皮肤癌的临床主要特点是：潜伏期较长，数年至数十年；常先有慢性皮炎、角化过度或疣状增生等改变；以鳞状癌或基底细胞癌表现为多见。

展望未来，职业性皮肤病防治研究工作的重点应结合各地区工农业及其他行业的实际情况，有计划地摸清各种厂矿企业职业性皮肤病的发病情况，特别是各种新兴工业中各种职业性皮肤病的发病情况，弄清一些新的致敏原及其致病特点。在发病机理方面，着重研究原发性刺激和接触性变态反应。关于本病的防治，仍以采取综合性防治措施为原则，应结合各种行业、工种实际情况，和企业单位医务人员及有关领导共同讨论，制订切实可行的防治方案，包括各种皮肤防护剂以及皮肤清洁剂的研究。

（上海医科大学皮肤病学研究所王侠生教授撰）

**室内甲醛污染的健康效应研究进展** progress in research on health effect of indoor formaldehyde (HCHO) pollution 甲醛(HCHO)是一种沸点低、易挥发、无色而有刺激性的气体。广泛用于人类生产、生活的诸多方面，有的工业生产以甲醛为原料，医院、科学实验室常用作消毒剂和防腐剂。建筑和装饰材料中含甲醛。此外，交通运输工具排放的废气、吸烟的烟雾中都含有甲醛。由于人们普遍接触甲醛，故对其危害性作了一系列的研究。

甲醛属刺激性毒物，可引起眼、鼻、上呼吸道、皮肤刺激症状，如流泪、眼结膜充血、鼻粘膜干燥、咳嗽、皮肤干燥、皸裂以及接触性皮炎等。80年代以来，人们对甲醛危害性研究和认识更加深入，现已知甲醛可致人体多器官系统受损害，还是一种潜在的致癌物。

近年来甲醛致神经衰弱候群、神经行为改变被认为是对人体健康主要的危害之一。1988年，中国钱仁俊等报道直接接触甲醛作业工人极易出现头痛、头昏、记忆力减退和睡眠障碍等症状。另有人对长期从事解剖的组织学工作者进行的行为功能研究发现，他们的记忆力、敏捷度、平衡功能、协调功能和选择操作与每天接触甲醛的持续时间有关(P<0.05)，其中头昏、平衡失调

症状发生率高。

甲醛可致呼吸系统受损害。国外文献报道,木材加工业工人经常出现呼吸道不适感、嗅觉下降、最大肺活量(FVC)下降。加拿大某地殡葬服务工人的慢性支气管炎和呼吸困难发生率高于正常人群。此外,甲醛作业工人咳嗽、咳痰症状均明显增多。中国的全国职业病调查结果表明,工人肺功能受甲醛影响的程度与接触工龄成正比。

目前人们所关注的是甲醛对肝脏毒性问题。甲醛在体内代谢主要是经过肝脏,当体内甲醛含量超过肝脏解毒能力时就可损害肝脏。国外曾有多起居住在含甲醛建筑材料的活动房内发生急性中毒性肝炎的报告。中国管小琴实验证明,甲醛可引起小鼠肝细胞结构和功能的损害,现证明甲醛对人的肝脏具有潜在毒性。

甲醛可致其它器官系统损害,如血液系统、内分泌系统等。有人报道,贫血、出血性疾病与接触甲醛有关,并与接触工龄成正比。另有数据表示,接触甲醛 $2 \cdot 87\text{mg}/\text{m}^3$ 的工人血红蛋白、白细胞计数下降。国外学者认为,甲醛接触者出血倾向可能与肝功能受损有关。有关内分泌系统受损的报告为,甲醛接触者出现手颤、眼颤、手掌多汗、肢体麻木和指端触觉降低,女工出现月经失调症状。

最为人类关注的首推甲醛与肿瘤的流行病学研究。经动物实验证实,甲醛可致大鼠鼻腔肿瘤之后,人们对甲醛与人类肿瘤关系作了一系列探讨。美国环境保护局80年代的流行病学调查证实,接触甲醛人群的呼吸道癌症发生率显著升高。目前,甲醛已被美国职业安全卫生研究所(NIOSH)定为人体可疑致癌物。中国通过对上海、无锡等地职业接触者的流行病学调查证实,甲醛接触者恶性肿瘤及某些部位肿瘤的死亡危险性有增加趋势。上海的职业危害调查指出,甲醛还有促癌作用。另有实验表明,接触甲醛职业工人外周血淋巴细胞染色体畸变率显著增高,推断甲醛是人的染色体裂变剂。还有一组制衣工人口腔癌和结缔组织癌死亡率的队列回顾研究资料表明,口腔癌、白血病和淋巴组织增殖瘤的发生随甲醛暴露的时间增长而增高,且在职业工人发生率最高。甲醛还与皮肤癌、前列腺癌、胃癌、脑瘤的发生明显相关。目前,甲醛与肺癌、肝癌、膀胱癌的关系尚在作深入研究。

鉴于甲醛对人体健康有种种危害,如何保护人群免受甲醛危害已成为人们迫切要解决的问题。作为防护措施,首先应尽快制定安全可靠的甲醛浓度标准。当前有关甲醛浓度标准尚不够健全,下表列举几国甲醛浓度标准供参考。

表1 不同国家有关甲醛浓度标准

| 国别 | 醛浓度标准           |                                     |
|----|-----------------|-------------------------------------|
| 中国 | 居民区大气卫生标准       | 一次MAC $0.05\text{mg}/\text{m}^3$    |
|    | 车间甲醛MAC         | $3\text{mg}/\text{m}^3$             |
|    | LDC614.37 商场(店) | GB9670-88 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ |
| 日本 | 室内甲醛浓度          | $0.13\text{mg}/\text{m}^3$          |
|    | NIOSH 规定 TWA    | $0.02\text{mg}/\text{m}^3$          |
|    | STEL            | $0.12\text{mg}/\text{m}^3$          |
| 美国 | ACGIH 规定 TWA    | $1.2\text{mg}/3^3$                  |
|    | STEL            | $2.5\text{mg}/\text{m}^3$           |
|    | OSHA 推荐 PEL     | $3\text{mg}/\text{m}^3$             |

注:MAC,最高允许浓度;NIOSH,美国职业安全局与卫生局;ACGIH,美国政府工业卫生工作者会议;OSHA,美国职业安全与健康署;TWA,时间加权平均限值;STEL,短时接触限值;PEL,允许接触水平。

其次,防护措施应考虑以无毒的或低毒的化学品代替甲醛,此项工作有待深入研究。另外,加强甲醛接触者自身防护也是行之有效的措施之一。随着人类社会的进步和科学技术的发展,保护人群免受甲醛危害是可以办到的。

#### 参考文献

- 1 张一辉,等. 职业医学,1985,12(2):41~43
- 2 张瑞德. 国外医学,卫生学分册,1989,16:46
- 3 Holmess D L, et al. Arch Environ Health,1989,44:222~226
- 4 蒋学之,等. 中国工业医学杂志,1990,3:12~14
- 5 管小琴,等. 中华劳动卫生职业病杂志,1990,8(2):111~113.
- 6 蒋学之. 卫生标准年刊,1985,(2):56~58
- 7 金复生,等. 中华劳动卫生职业病杂志,1992,10(5):277~287
- 8 Stagner L T, et al. Am. J. Ind, 1988,13:667~670
- 9 韩友圻. 消毒与灭菌,1989,6:169~172

(上海市中山医院风华硕士,安徽医科大学祁家骥教授撰)

#### 植酸的营养学研究 studies on phytic acid in nutrition

植酸(六磷酸肌醇酯)主要存在于植物的种子、根、块茎中,以谷类、豆类及油料作物种子含量最多,并集中于豆类子叶及谷类糊粉层。随谷类加工精度提高,产品中含量降低。它作为络合剂和抗氧化剂对许多营养素产生影响,进而影响机体营养及健康状况。

1872年,首先由Pfeffer从植物种子中分离出植酸;1897年Winterstein确定其化学结构;1919年由Posternak首次合成成功。1910年,Starkenstein发现植酸可使钙沉淀;1920年,Morgan首次描述其通过络合吸附金属离子。1934年,Bruce等认为植酸在人体内的主要作用是使膳食中的钙不被吸收利用。20世纪40年代,McCance等在成人、儿童、婴儿及狗身上证实,它还可抑制镁、磷的吸收。1965年Vohra报道,在 $\text{H}^+$ 浓度 $3.98 \times 10^{-6}\text{mol}/\text{L}$ 的条件下,植酸与金属离子形成复合物的稳定性从高到低的顺序为: $\text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Mn}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ 。由于伊朗中南部流行的乡村病被怀疑为是食用未发酵的tanok面包引起的锌缺乏症。1960年,O' Dell将植酸钠加入酪蛋白中喂仔鸡,观察到其体重明显低于对照组。随后在大鼠、猪等身上也得到证实。1986年,Morris总结了先前诸家有关植酸对无机盐及微量元素影响的研究资料得出暂时性结论:植酸可降低钙、镁、锌的生物利用率;对硒、铜、锰没影响;人体可利用植酸中的磷,但受钙抑制;由于植物性食品铁的吸收率低及其他膳食成分的存在,使评价植酸对铁利用的影响变得复杂。1964年,Graf发现植酸可与游离铁络合,抑制由铁介导的氢氧游离基( $\cdot\text{OH}$ )形成,呈现抗氧化作用,因而受到人们重视,使植酸的营养学研究范围扩大。

近年来,有关植酸对锌吸收利用影响的研究很活跃,并且重点转向选择简便实用的预测指标。1976年Oberleas指出,植酸/锌摩尔比值(Phy/Zn)是评价植酸对大鼠锌利用的较好指标。Davies(1979)观察到,该比值超过10,大鼠血浆锌明显降低。Lo(1981)用同位素示踪法得出结论,该比值超过12,大鼠锌利用率降低。Oberleas(1966),Heth(1966),Forbes(1984)等注意到,钙加重植酸对锌吸收利用的抑制。Davies(1979)在饲料中加镁也有类似作用,但不及加钙严重。从诸多动物实验结果可见,饲料中钙、锌、植酸、动物锌营养状况及生理状况均影响锌的吸收利用。1985年Davies等建议,用植酸 $\times$ 钙/锌摩尔数/公斤饲料作为预测指标。他们用自已及其他研究者的实验资料得出结论,该比值为3.5时,大鼠生长显著减慢;Fordyce证实,该比值优于Phy/Zn。

1981年,Reinhold给两男子食用发酵的bazari面包(占总热能的60%,植酸摄入量2.9g),两者日锌平衡值分别为1.3、1.6mg;改食未发酵的tanok面包(植酸摄入量4.7g),使Phy/Zn从12升至17,两者锌平衡值分别降至0.1、-0.4mg。Morris1983年报道食用加全麦麸和去植酸麦麸松饼(Phy/Zn分别为11.8、1.2)的成年男子的锌平衡情况,在15天实验期的头5

天,全粪组粪锌排出量增加,表现吸收值为负,但随后10d粪锌减少,表现吸收值变正且较大,可能系适应及内环境稳定调节所致。1980~1987年间,Sandstrom进行了一系列人体研究。他用碎牛肉作为基础膳食蛋白质的主要来源,并分别用大豆分离蛋白、大豆粉、大豆浓缩蛋白替代基础膳的30%蛋白质对8名回肠开口术者进行研究,4组的Phy/Zn分别为2.3、5.8、8.1、8.9,测得锌表现吸收值分别为13.2、1.8、9.2、16.2 $\mu\text{mol/d}$ ,均未出现负锌平衡。他的另一项类似研究资料提示,当Phy/Zn为10时,对锌利用的抑制达临界水平。他以谷类、黑麦、大麦、燕麦片、小麦、黑小麦配成Phy/Zn范围3~16的膳食研究发现,锌吸收率与Phy/Zn呈负相关,回归方程为:吸收率=27-1.15(Phy/Zn),以此算出使吸收率降至最大吸收率1/2的Phy/Zn为13。1987年Ellis计算了不同人群自选膳食的Phy/Zn,美国混食者Phy/Zn食Phy/Zn超过10的仅5%,而美国及生活在美国的印度素食者Phy/Zn达80%(平均Phy/Zn15),尼泊尔妇女Phy/Zn达96%(平均20),但未研究他们的锌营养状况。由于人类膳食较复杂,干物质及热能密度变化大,Bindra(1986)和Ellis(1987)建议用植酸 $\times$ 钙:锌毫摩尔数/天( $\text{Ca} \times \text{P}/\text{Zn}$ )作为预测指标,但成人与儿童热能摄入不同,因而Mills和Davies建议用植酸 $\times$ 钙:锌毫摩尔数/1000kcal(4.2MJ)( $\text{CP} : \text{ZE}$ )。Ellis和Wise(1987)认为,评价人的锌吸收利用时,Phy/Zn、 $\text{Ca} \times \text{P}/\text{Zn}$ 和 $\text{CP} : \text{ZE}$ 限值分别定为10、200、100可能是适宜的。Cossack(1983)观察到,5名男子食用Phy/Zn9.5、 $\text{CP} : \text{ZE}90$ 的大豆膳3个月出现负锌平衡。雷嗣安(1989)将北京人托学龄前儿童实验膳Phy/Zn提高至10.64,尚未对锌吸收率和存留率产生影响。Gibson对安大路学龄前儿童调查发现,106名儿童中,超过Phy/Zn限值的仅两名,超过 $\text{CP} : \text{ZE}$ 限值的22人,以发锌含量(界限1.07 $\mu\text{mol/g}$ )分组,低发锌组 $\text{Ca} \times \text{P}/\text{Zn}$ 及 $\text{CP} : \text{ZE}$ 显著高于高发锌组,身高也与 $\text{CP} : \text{ZE}$ 有关。高永清对安徽学龄前儿童调查发现,因钙摄入量较低,用上述 $\text{Ca} \times \text{P}/\text{Zn}$ 及 $\text{CP} : \text{ZE}$ 限值无法判断其锌营养状况。

1988年Carnovale发现,蛋白质的消化率与植酸含量呈负相关,但不同来源的蛋白质受影响的程度不同。1989年Knuckles证实,植酸可抑制胰蛋白酶及胃蛋白酶的活性,对后者影响较大。1980年Jenkins注意到,富含植酸的豆类比谷类释放碳水化合物缓慢,Yoon(1983)发现,人体血糖升高的程度与食物中植酸含量呈负相关,生理条件下的培养液含2%植酸时,唾液淀粉酶活性受抑制,淀粉消化率降低50%,而钙可与植酸形成络合物抵消此作用。Thompson认为,植酸使餐后血糖上升缓慢的机制可能有三:(1)通过二价离子与淀粉络合蛋白结合;(2)与淀粉酶活性所必需的钙络合;(3)直接与淀粉通过磷酸键结合。1987年Inagawa证明,植酸可抑制牛乳糖苷酶对乳糖的水解,提醒注意豆奶类配方食品中植酸与乳糖含量,以免引起乳糖不耐症。1988年Knuckles、1989年Nyman证实,由于植酸抑制脂酶活性(植酸、二价离子及磷形成三元复合物)而降低脂质的消化率。Klevay在饲料中加植酸导致大鼠毛发Zn/Cu降低,出现低胆固醇血症,支持高胆固醇血症的Zn/Cu学说。

1985年,Graf根据植酸的抗氧化作用认为,它可能是控制结肠癌发生的重要因素,后得到流行病学调查结果的支持。在一些食物中,植酸与膳食纤维含量密切相关。但在含纤维素的食物中,仅谷类含植酸高,与结肠癌发生呈负相关。与结肠癌发生呈正相关的高肉类高脂膳食含铁丰富,又具有过氧化特点,一些致癌物就是通过铁催化脂质过氧化产生的,植酸几乎完全能封锁这一过程。1987年Nielsen报道,饲料中含0.6%,1.2%植酸均能抑制大鼠结肠上皮细胞的增殖。Shamsuddin分别在给大鼠注射致癌物前后,通过饮水给植酸(含量1%~2%),均可使大鼠肿瘤发生率降低,注射前给植酸还可使肿瘤体积较对照的小,结肠腺窝有丝分裂率明显降低,有丝分裂数减少,肠道中( $\cdot\text{OH}$ )也减少。Elsayed(1987年)及Ullan(1991年)均证实,植酸可降低致癌物诱导的大鼠结肠癌的发生率。

由于已认识到人类膳食组成的复杂性,有关植酸对无机盐及微量元素吸收利用影响的研究将向多因素综合分析方向发展,并将重要因素体现于预测指标中,确定适宜的限值,便于实际应用。受植酸影响的营养素种类的研究也将扩展。特别是植酸对健康有益作用的发现,将可能使研究方向由设法降低其在膳食中的含量转向寻找适宜的摄入量,以达到既消除其“抗营养”作用,又发挥其预防及控制营养性疾病作用的目的。

#### 参考文献

- 1 Davies NT, et al. Br. J. Nutr. 1979, 41:509~603
- 2 Yoon Jh, et al. Am. J. Clin. Nutr. 1983, 38(6):835~842
- 3 Morris ER. Phytic Acid: Chemistry and Applications, Minneapolis: Piatas Press, 1986: 58~76
- 4 Ellis R, et al. J. Am. Dietet. Assoc. 1987, 87(8):1043~1047
- 5 Knuckles BE, et al. J Food Sci. 1988, 53(1):1348~1350
- 6 雷嗣安,刘胜杰. 营养学报, 1989, 11(3):211~213
- 7 Nyman ME, et al. J Food Sci. 1989, 54(5):1332~1335
- 8 Gibson RS. Biol Trace Elem Res. 1991, 30(1):87~94
- 9 Ullan A. Carcinogenesis (London), 1991, 11(12):2219~2222
- 10 高永清,秦树阳. 中国科协首届青年学术年会兴皖之光论文选集. 合肥:安徽科技出版社, 1992. 497~503

(安徽医科大学高永清副教授撰)

#### 硒营养学

selenium-nutrition 早期的资料把硒看作是有毒的,1943年曾将硒定为致癌元素。直到1957年,施瓦兹(K. Schwarz)发现硒能使维生素E缺乏的大鼠免于肝坏死,从而才明确硒与营养的关系。随后不断地发现因进食贫硒饲料而出现的一些动物硒缺乏病,如小鸡的渗出性素质病,火鸡的胫肌病,猪的肝坏死及绵羊的白肌病等。1978年,中国科学家证实硒缺乏是克山病的一个基本病因,硒可以有效地预防克山病,从而首次证明硒是一种人类必需的微量元素。但硒摄入过多也会蓄积于组织中而显示其毒性。引起硒中毒的原因和硒缺乏一样,也主要是由于地理上的硒分布不均匀所导致的。如美国南达科他、怀俄明和内布拉斯加等州的部分地区,富硒的土壤导致植物中含硒量过高而使牧放的动物中毒。人类硒中毒最初偶见于工业接触所致的职业性中毒,以及在美国由于生产时的失误,将实际每片含27.3mg的硒片当做150 $\mu\text{g}$ 的出售,结果造成服用者中毒。1961年,中国湖北省恩施县所暴发的原因不明的脱发脱甲病,直到1966年杨光圻等从病区送检的有毒玉米中发现硒含量高达44mg/kg,对照以往动物硒中毒的症状,才证实为硒中毒。主要原因是该处富硒煤经风化和雨水冲刷,煤中的硒进入土壤,再经食物链而进入人体。早期对硒营养作用的研究集中于它与维生素E的关系,并把它看作是一种抗氧化剂。1973年,罗特鲁克(J. T. Rotruck)等发现硒是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-P<sub>x</sub>)的必要成分,这种发现提示硒是通过这种酶而发挥其抗氧化作用的。从此,对硒营养作用的了解有了突破。但是近年来提出的许多硒的生理生化作用并不都与GSH-P<sub>x</sub>有关,即硒还具有不由GSH-P<sub>x</sub>介导的生物活性,从而促使人们对硒的功能开始新的讨论和研究。

硒的营养作用 硒以GSH-P<sub>x</sub>的形式在体内发挥抗氧化作用是已被公认的。GSH-P<sub>x</sub>催化还原型谷胱甘肽成为氧化型,同时使有毒的过氧化物还原为无害的羟基化物,从而保护组织细胞特别是生物膜免受过氧化氢的损害。维生素E在体内的主要功能也是抗氧化作用,它能阻止生物膜中不饱和脂肪酸的过氧化反应,减少过氧化脂质的生成。一旦过氧化脂质生成,又可由GSH-P<sub>x</sub>催化将其还原。因此,有许多证据表明硒与维生素E在抗氧化作用上有协同及互补的作用。

从现有的资料看来,硒在体内主要以硒蛋白的形式发挥作用。1988年,比尼(D. Behne)等报道在动物细胞中至少有13种

硒蛋白已被鉴定,但已明确其特定功能的仅仅是 GSH-P<sub>x</sub>。1987 至 1990 年间,贝克特(G. J. Beckett)和阿瑟(J. R. Artur)等人多次报道对鼠肝微粒体 I 型碘化甲状腺氨酸 5'-脱碘酶(ID-1)的研究资料,发现硒缺乏可使该酶活性显著性降低,并证实该酶也是一种含硒蛋白质。

硒与其它元素的相互作用很早就有报道。硒能拮抗砷中毒。硒能拮抗汞中毒及镉中毒。镉对血硒浓度也有影响。新村哲夫测定了日本的镉污染区居民和非污染对照区居民的尿、血硒浓度,发现痛痛病患者及镉污染区男性居民全血硒浓度降低。但迈耶(S. A. Meyer)等对大鼠的实验资料表明,当硒摄入量增加时,镉的这种影响则消失。崔瑞等研究了铜、锌、镉对小鼠肝、肾、血、脑中硒含量的影响,结果发现由于与硒共同摄入铜或锌或镉,降低了硒在肝、肾和血液中的积蓄,这些部位的硒含量均低于或显著低于纯硒组。银对缺乏维生素 E 的大鼠和小鸡是有毒的,分别产生与硒缺乏相似的肝坏死和渗出性素质。硒能拮抗砷的部分毒性作用,可使进食富硒饲料的大鼠体重增加,使硒中毒程度降低,但未能改变大白鼠的肝退化功能。

大量的实验资料表明,硒具有明显的抗肿瘤作用。流行病学的调查也发现地质环境、膳食所决定的人群血硒水平与肿瘤的发生率及死亡率呈负相关。由于机体的免疫功能与肿瘤的发生、发展有密切的关系,故人们认为硒的抗肿瘤作用部分是通过调节和增强机体免疫功能来实现的,而实际上许多实验资料也证明补硒能维持或提高实验动物的体液和细胞免疫能力。斯波尔赫兹(J. E. Spallholz)及谢菲(B. E. Sheffy)等报道给实验动物补硒后,使其产生的抗体滴度是低硒组的 7~30 倍;硒还能促使产生 IgM 的细胞数目增多及 IgM 合成增加。马丁(J. L. Martin)等报道补硒后的豚鼠对二硝基氯苯所致的迟发性超敏反应比未补硒对照组敏感得多,并且饲料中持续补硒的小鼠对移植的皮肤排斥反应比食正常饲料的动物更快。还有一些资料表明,硒能增强 T 淋巴细胞对有丝分裂原或同种抗原刺激的增殖反应;能增强巨噬细胞对巨噬细胞活化因子的反应性,降低巨噬细胞对淋巴细胞的抑制作用;还能增强自然杀伤细胞的活性。总之,硒对免疫系统的影响是多方面的。进一步探讨其影响机制,弄清硒对肿瘤发生、发展及预后的影响途径,对于最终将硒用于人类肿瘤的防治具有重大意义。

如上所述,硒有抗突变和抗肿瘤能力。但也有实验资料表明硒的无机化合物对细菌、酵母及哺乳类细胞具有诱变性。1989 年,卡里尔(A. M. Khalil)等还报道了他们用亚硒酸钠和硒代蛋氨酸对分离的内外周血淋巴细胞的 DNA 损伤作用。结果表明两种硒化物的细胞畸变率都随剂量的增加呈明显增高趋势。另外,戴维(J. David)等报道了 1983~1985 年在美国 Kesterson 国家野生生物保护区对水鸟的胚胎死亡和畸胎所进行的研究。由于 Kesterson 水库受到高硒农业废水的污染,致使保护区内各种水生动物含硒量明显高于对照区。研究结果表明,水鸟胚胎对环境中硒有高度的敏感性,导致死胎率、畸胎率明显升高。考虑到硒类化合物的潜在遗传毒性作用,与其有益的一面相比,研究这类化合物对人体遗传危害的可能性则显得更为重要。

在人类,硒缺乏是克山病及大骨节病的一个主要病因已得到证实。1990 年,范德巴斯(J. B. Vanderpas)等还报告了对扎伊尔北部地方性甲状腺肿大地区碘及硒与克汀病关系的研究资料。通过对非缺碘、中度缺碘及重度缺碘 3 个地区的研究,发现克汀病患者血清硒及红细胞 GSH-P<sub>x</sub> 浓度均显著低于非缺碘对照地区,并认为这种硒缺乏与非地方性粘液水肿型克汀病发生率有关。在中国青海省的一些碘缺乏地区与硒缺乏地区相重叠,而这些地区的粘液水肿型克汀病也比其它省单纯缺碘地区更为常见。但目前还没有更多的资料来评价碘和硒同时缺乏对甲状腺功能的影响作用。

**硒的需要量** 由于中国出现的克山病和大骨节病可通过补硒来预防,以及在芬兰东部、新西兰东部低硒地区的流行病学调查中发现以心肌梗塞为主的心脏病发生与低硒状态有关,而美国

高硒地区多种心脏病的死亡率又明显低于低硒地区,特别是发现因硒缺乏使癌的发生、死亡率升高。于是,人们考虑以硒作为这些疾病的预防药。但硒的营养安全带宽,如果摄取营养水平的 10 倍量可能引起中毒,而摄取其 1/10 量则又会导致缺乏病。因此,人体对硒需要量的研究是硒营养学中的一个重要课题。以往的研究主要是通过动物实验及理论上的推测来获得数据。鉴于中国兼有世界上罕见的低硒地区和高硒地区,并且都出现了相应的缺乏病和中毒症。因此,中国的这些地区是研究人类硒需要量的最佳实验基地。杨光圻等从 1982 年开始研究人体硒需要量。他们在中国西南低硒地区进行硒的最低需要量和生理需要量的研究,测出成人每日最低硒需要量为 17 $\mu$ g,生理需要量为 40 $\mu$ g,用安全因子处理后得出满足最低及生理需要的每日膳食供应量分别为 22 $\mu$ g 及 50 $\mu$ g。动物实验表明硒的抑癌作用大都接近中毒剂量,因此,在疾病防治上就涉及到硒的最大安全摄入量。杨光圻等 1985~1988 年间在恩施高硒地区测得的结果表明,成人每日最高界限摄入量分别为 750~850 $\mu$ g,用不同的安全因子处理后,得到非高硒地区和高硒地区最高安全摄入量分别为每日 400 $\mu$ g 和 500 $\mu$ g。1990 年,他们的这些研究数据得到 3 个国际组织(FAO/WHO/IAEA)联合召开的国际会议的承认和采用。

总之,硒的营养保健作用仍是一尚待开垦的领域。多种硒蛋白的提纯及功能研究;硒与其它元素相互作用机制;硒遗传危害作用的证实;硒的抗癌机制;硒对心血管病的预防机制等等,均有待于进一步研究。随着各种机制的阐明,硒也将作为保健、预防药进入一个应用时代。

#### 参考文献

- 1 张学林,等. 中国地方病防治杂志, 1988, 3(5): 279~281
- 2 Dreosti I E, et al. Prescribing trace elements in clinical practice. Australian Prescriber, 1989, 12(2): 39~44
- 3 Rurk R F. J Nutr, 1989, 119: 1051~1054
- 4 Khalil A M. Mut Res, 1989, 224: 503~506
- 5 Arthur J R, et al. Hepatic iodothyronine 5'-deiodinase: The role of selenium. Biochem J 1990, 272: 537~540
- 6 杨光圻,等. 卫生研究 1990, 19(5): 25~29
- 7 Vanderpas J B, et al. Am. J. Clin. Nutr, 1990, 52: 1087~1093
- 8 朱明. 国外医学卫生学分册, 1991, 18(6): 342~346

(湖南湘潭卫校余庆辜副教授撰;李文杰审)

**辐照处理食品** irradiation of foods 食品经钴-60、铯-137 的  $\gamma$  射线,或能量范围在 1.5~10MeV 的高压电子束辐照处理后,食品成分发生一系列辐射化学反应,达到抑制食品发芽、消灭虫害、杀灭微生物、延长保质期及货架寿命或改变食品品质、增加经济效益的目的,是和平利用原子能的一个方面。

食品的种类和品质各异,对射线的敏感性不同,辐照处理食品必须在保证不改变食品品质、感官性状及卫生安全的情况下进行。所以,对不同品质的食品,必须根据辐照目的选择辐照剂量和探索辐照工艺,这样才能保证商业利益,达到辐照处理食品的目的。

**辐照抑制发芽** 洋葱、葱蒜、大蒜、马铃薯等具有生活细胞的新鲜蔬菜,在贮藏及运输时容易发芽而失去经济价值。为解决青黄不接期的市场供应,采用破坏心芽酶活性的辐照剂量,可达到抑制或延缓发芽的目的。这类食品的细胞对辐照耐受力很小,如果剂量偏高,心芽被照枯死,在贮藏和运输过程中很易黑心或发生黑斑而失去商业价值,所以辐照处理这类蔬菜时,一般采用低剂量辐照,抑制其发芽即可,辐照剂量范围在 0.05~0.15kGy。

**辐照延长保存期** 番木瓜、香蕉、苹果、番茄、桃、李、樱桃、葡萄、覆盆子、龙须菜、草莓、蘑菇、芥菜等鲜果,由于细胞同样具有生命,采摘后保质期很短,严重影响货架寿命。辐照可抑制酶活性,延缓后熟时间,达到延长保质期,减少经济损失的目的。这



类鲜果对辐照的耐受力很小,辐照范围一般为0.25~2.5kGy。

某些鲜果不可用 $\gamma$ 射线辐照。例如用 $\gamma$ 射线辐照柑桔时,剂量达到0.5kGy就会生异味。要杀灭柑桔表面的绿霉菌或蓝霉菌,则需要辐照2.5kGy,但这样柑桔表面的油腺会遭到破坏而产生黑斑,失去商业价值。所以,柑桔只能用表面杀菌的电子加速器产生的电子束进行辐照。

**辐照杀灭害虫** 大米、稻谷、小麦、面粉、板栗、干果、可可豆、香料、佐料、调味品等含水量少的食品,贮藏期极易生虫,每年虫害造成的损失约为15%~25%。这类食品对射线的耐受力稍大,但辐照剂量过大,食品品质会受到损伤,例如辐照剂量超过0.45kGy时,大米会发黄,且辐照剂量越大品质损伤越重。但可杀灭这类食品中的昆虫,例如谷仓虫、米象、面粉甲虫、豆子象虫等,辐照剂量只要达到0.1~0.2kGy即可。所以,使用杀虫剂量不会影响这类食品的品质。为了减少日益严重的农药污染,保证主食的卫生安全性,这类食品辐照剂量应在0.1~1kGy范围内。

辐照杀虫应在食品入仓前进行,对已入仓的或已出现虫害的谷物仓库,常采用安装在汽车上的流动式辐照源。 $\gamma$ 射线是一种贯穿辐射,能杀灭已钻入食品内部或仓库裂缝中不易被农药消灭的害虫。

对于果、调味品、脱水蔬菜等食品,除了要消灭害虫外,更重要的是防止生霉,这样才便于贮存更长时间,辐照剂量应达到10~80kGy。

表1

食品中某些细菌的辐照D<sub>10</sub>值

| 细菌       | 英文名称                            | 辐照时的培养基 | D <sub>10</sub> 值<br>kGy |
|----------|---------------------------------|---------|--------------------------|
| 假芽孢铜绿菌   | (PS. Aeruginosa)                | 营养肉汤    | 0.03                     |
| 假芽孢荧光菌   | (PS. Fluorescens)               | 营养肉汤    | 0.02                     |
| 假芽孢膝曲菌   | (PS. Genuiculata)               | 营养肉汤    | 0.05                     |
| 大肠杆菌     | (E. coli)                       | 营养肉汤    | 0.1~0.2                  |
| 金色葡萄球菌   | (S. Aureus)                     | 营养肉汤    | 0.1                      |
| 金色葡萄球菌   | (S. Aureus)                     | 干燥状态    | 0.65                     |
| 放射线真菌    | (M. Radiodurans)                | 生牛肉     | 2.5                      |
| 放射线真菌    | (M. Radiodurans)                | 生鱼      | 3.39                     |
| 枯草芽孢杆菌   | B. Subtilis (spores)            | 盐水      | 2.6                      |
| 枯草芽孢杆菌   | B. Subtilis (spores)            | 豌豆浓汤    | 0.35                     |
| 梭状肉毒芽孢杆菌 | C. Botulinum (Spores) A 12885 型 | 磷酸缓冲液   | 2.41                     |
| 梭状肉毒芽孢杆菌 | C. Botulinum (Spores) A 12885 型 | 罐装鸡肉    | 3.11                     |
| 梭状肉毒芽孢杆菌 | C. Botulinum (Spores) A 12885 型 | 罐装咸肉    | 1.89                     |
| 梭状肉毒芽孢杆菌 | C. Botulinum (Spores) B 53 型    | 磷酸缓冲液   | 3.29                     |
| 梭状肉毒芽孢杆菌 | C. Botulinum (Spores) B 53 型    | 罐装鸡肉    | 3.69                     |
| 梭状肉毒芽孢杆菌 | C. Botulinum (Spores) B 53 型    | 罐装咸肉    | 2.04                     |
| 梭状孢子形成菌  | C. sporogenes (PA · 3679/52)    | 磷酸缓冲液   | 2.09                     |

利用辐照能引起食品品质发生变化的原理,有用辐照处理提高食品品质获得成功的事例。例如中国用 $\gamma$ 辐照使苦涩辛辣、入口冲、带甘薯味、饮后常令人头痛、头胀的甘薯白酒的口味变得醇和,刺辛辣喉减轻,香味增加,毒性下降,加速酒的陈化过程。 $\gamma$ 射线可引起食品成分发生一系列放射化学反应,对食品品质的影响,并不都是提高品质,所以研究辐照工艺是关键。而辐照工艺的成败,则需要消费者对它的评价。

**辐照食品的商业化** 通过大量的研究工作,辐照食品工艺取得很大成功,找出了不同品质食品的最佳辐照剂量。由于辐照食品卫生安全性研究的成就,世界各国批准辐照食品可以商业化的国家已达40个以上。批准最多的食品是辐照马铃薯,批准最早的国家是前苏联,在一个国家里批准品种最多的国家是荷兰,其次是前苏联、加拿大、意大利等。中国在“六五”计划期间,批准7种辐照食品,即辐照大米、香肠、洋葱、大蒜、马铃薯、蘑菇和花生

**辐照处理肉类食品** 肉类食品中的微生物可使食品腐败变质而使人致病。辐照处理可以控制或杀灭微生物,达到延长保藏时间、预防食物中毒的目的。东南亚国家进行鱼和鱼制品的辐照研究,其目的就是延长鲜鱼和加工鱼的货架寿命。美国陆军对肉类采取彻底灭菌的办法,可使辐照肉类在没有冷藏设备的条件下保存几年,这在战争时期可保证部队供应,特别在长期宇宙航行、潜艇、坑道边防哨所、海岛等地,贮藏这种辐照食品具有特殊优点。

微生物种类很多,对射线敏感性各不相同。即使是细菌类,对射线的D<sub>10</sub>值也各不相同(见下表)。一般辐照12个D<sub>10</sub>值,就能彻底杀灭细菌。根据细菌的D<sub>10</sub>值和对食品辐照的要求,例如杀灭肉类、家禽、蛋类及动物饲料中的沙门氏菌,以延长货架寿命,辐照5~10kGy即可;辐照后准备贮藏于0~4℃冰箱中的肉类或肉制品,辐照0.5~10kGy即可。但杀灭引起食物中毒的梭状肉毒芽孢杆菌,则需要辐照40~60kGy才能达到目的,用这一剂量辐照后的肉类或肉制品可以不用冷藏。

**辐照工艺与辐照食品的品质** 室温辐照的鲜肉常带红色,具醛类或类似蘑菇的异臭。改在氮气中辐照,则产生硫醇臭,只有在低温真空条件下辐照才不具任何异味。辐照后的鲜肉,由于结缔组织断裂使肉质较细嫩,厨师及老人较欢迎。同样,对其它食品辐照都会引起食品品质的改变。所以,辐照处理食品必须进行辐照工艺的研究,达到既能保藏又不影响食品品质的目的。

仁。世界上建立的辐照工厂已达数十座,随着原子能和平利用事业的发展,辐照处理食品将会更加拓宽其领域。

#### 参考文献

- 1 松山晃. 原子力工业, 1977, 23(5): 22~27
- 2 田岛真. 食品照射, 1979, 14(1~2): 49; 67
- 3 陈科文. 辐照保藏食品, 北京: 科学出版社, 1982

(四川省劳动卫生职业病防治研究所  
张道徽研究员撰; 陈科文审)

**辐照食品的卫生安全性** wholesomeness of irradiated foods 人们在接受辐照食品之前, 总要提出有关卫生安全方面的问题, 它包括如下五个方面:

经过辐照的食品是否带有感生放射性或残留放射性物质 研究结果指出, 食品使用钴-60、铯-137的 $\gamma$ 射线或能量范围在

1.5~10MeV的电子加速器产生的电子束进行辐照,照射源不接触食品,不会残留放射性物质;照射源本身根本不具备生产感生放射性能量,所以不会产生感生放射性;即使辐照剂量高达120kGy的鲜肉,辐照后立刻测定,也未见感生放射性增加。

**辐照是否会造食品营养价值的损失** 辐照食品与其它方法处理的食品一样,辐照剂量越高,营养成分损失越大。营养成分的损失与采取的辐照工艺条件密切相关。高剂量辐照的肉类,若采用低温真空包装,营养成分损失可大大降低。有资料表明,辐照食品中蛋白质、脂肪、碳水化合物含量很少发生变化,与加热食品在营养质量上基本相同,某些维生素虽有损失,但保留量仍高于同类加热食品。例如在-80℃辐照48kGy的猪肉、其硫胺素和吡哆素的含量高于加热处理的猪肉;辐照0.3~0.6kGy的马铃薯,维生素B<sub>1</sub>的含量比蒸汽处理的马铃薯高得多。在混合膳食中,辐照食品可以保持较高的营养价值,根本不用担心营养价值不足。

对不加热的动物饲料,营养价值可随辐照剂量的增加而下降。小麦辐照2kGy进行杀虫后,小麦的营养价值不变,照射10~60kGy后,营养价值可损失6%,但用于杀虫剂量一般不超过10kGy,所以对营养价值的影响不大。

**辐照对食品病原微生物的作用** 辐照处理食品,可以抑制和杀灭食品中的酶、微生物及昆虫。由于生物种类不同,对射线的敏感性也各有差异。例如细菌和细菌之间的差别就很大,冷冻鲜鱼中的假单胞菌,在0℃也能繁殖,辐照剂量0.5~1kGy即可致死;对热不敏感的沙门氏菌,辐照7kGy即可杀灭。引起食物中毒的肉毒杆菌,辐照剂量要高达39~48kGy才能使之灭活。对已产生的细菌毒素,辐照并不能使之失活,所以禁止辐照已腐败的食品。目前用彻底灭菌剂量处理的食品,国际上已达到每吨只有1个细菌的水平,在一般加工条件下,要使微生物体内酶的活性丧失,辐照剂量应高于杀灭微生物本身的辐照剂量。

**辐照食品有无毒性** 辐照食品的毒理学试验,是决定辐照食品前途的关键。中国及国外进行的大量动物毒理学试验及人体试食试验,在临床、血液学、血液生化、病理组织学、多代动物繁殖试验及致畸试验中,均未发现任何不良影响。1955~1959年,美国组织志愿者对54种辐照食品,其中肉类11种、鱼类5种、水果9种、蔬菜14种、谷物9种、其它6种,分别进行人群试食;中国1983~1985年由志愿者对大米、香肠、鲜猪肉、白酒、花生仁、苹果、蔬菜等30多个品种的辐照食品进行单独的或混合“全膳”食的3个月人群试食,受试者经过全面医学检查,无一例出现异常反应。

在长期毒理学试验方面,中国用小鼠、大鼠及狗等动物,对辐照8kGy的香肠、辐照0.5kGy的大米、辐照2~4kGy的白酒,辐照30~60kGy的鲜猪肉,分别进行8个月或2~4年或4代的长期饲养试验;美国陆军用大鼠、小鼠、大鼠、狗、猴等动物对22种有代表性的辐照食品进行长期观察,最短8~12个月,最长两年或4代,结果在动物的生长率、繁殖率、寿命、血液学、生化、病理组织学等方面,均未发现毒性反应。

在长期饲养试验中,一些学者观察到辐照食品可影响到大鼠的生殖力,幼鼠的体重较轻;小鸡生长慢,鸡的生蛋率极少及大鼠出血等现象,经研究认为:这是由于辐照食品中维生素E、K被破坏所致。食品中补充了维生素E、K后,这种现象即可消失,它不属于辐照食品的毒性反应。

大量动物试验、人群试食和化学分析报告,均未见辐照食品存在毒性和致病因素,世界卫生组织对辐照食品的毒理学数据非常满意。

**辐照食品对子孙后代的影响** 能否致畸、致癌、致突变?据统计,人类先天畸形除约12%为遗传因素外,80%以上都属不明原因,包括食品在内是值得重视的因素。辐照食品能否影响遗传因子,能否致畸、致癌、致突变,对子孙后代有何影响,是人们最关心的问题。

致畸试验和致癌试验作为评价辐照食品卫生安全性的指

标,国内外均是结合慢性毒性试验或多代繁殖试验进行的。动物摄入大量辐照食品,不出现慢性毒性,不致畸,不致癌,则可预测人类食用它也是安全的。

中国及国外学者,用不同品种的辐照食品,或用全辐照混合饲料所作的动物试验,连续观察2~4代,有人甚至观察8代,均未见对两种以上刚断奶的动物有寿命、致畸、致癌、显性致死作用,对其微核分析、染色体畸变分析、Ames致突变反应及生殖功能和寿命等方面也无不良影响。

关于突变问题,1966年FAO/IAEA/WHO专家委员会在审查生长在辐照培养基上的果蝇有突变率增高的报告时指出,该报告不足以说明辐照食品中存在使人体也发生突变作用的毒性物质,随后各国学者加强了致突变作用的研究。

1970年,WHO在巴黎成立了国际辐照食品研究计划署(IFO),以推动辐照食品的卫生安全性方面的动物实验研究。1972年,前苏联学者发现,用H<sup>+</sup>浓度10<sup>-2</sup>mol/L的45%乙醇溶液对新辐照马铃薯的提取液,能增高小白鼠性细胞显性致死率。1975~1976年,印度学者用新辐照小麦饲养大白鼠12周后,发现其骨髓细胞多倍体增加。各国学者追踪试验结果,纷纷否定了上述试验。所以,1976年FAO/IAEA/WHO专家委员会在批准辐照马铃薯可供人类食用时表明:新辐照马铃薯的乙醇提取液对小鼠出现致突变的结果,是对辐照毒理学的一个贡献,它促使人们进一步用化学方法查明诱变物质的化学性质,然而这一结果仅适宜辐照后数小时马铃薯,辐照马铃薯煮熟后,这种致突变作用就消失了,因此辐照马铃薯供人食用是安全无害的,给予无条件批准。对印度辐照小麦的追踪试验表明,该报告所作的对照小鼠骨髓多倍体值太低,所以1976年FAO/IAEA/WHO在批准辐照小麦时指出:辐照小麦在贮藏12周后,不再引起动物多倍体增加,鉴于辐照小麦一般都要贮藏12周以上,实际食用时并不存在问题,何况一些报告是用辐照后24小时的小麦进行的试验,并未见多倍体增加,所以辐照小麦供人食用是安全无害的,给予无条件批准。

大量卫生安全性试验资料表明,辐照食品没有感生放射性产生,没有残留放射性物质污染,没有防腐防虫的农药添加剂,无致畸、致癌、致突变物质产生,对人们及子孙后代安全无害,是一种营养成分保留较好,致病菌少或无致病菌,卫生安全的食品。所以,1982年FAO/IAEA/WHO已将原来准许辐照剂量在1kGy以下的食品可以不作动物卫生安全性试验的规定,放宽到辐照10kGy以下也可不作卫生安全性试验。D.G.Chapman认为辐照处理食品与加热、冷冻处理食品一样,都是无害的物理加工方法,同时反对将它的卫生安全性与食品添加剂等同看待。

#### 参考文献

- 1 Elias Dr P. 食品照射 1976,1(1):64~69
- 2 户部满寿夫,小林和雄. 原子力工业,1977,23(5):13~16
- 3 陈科文. 辐照保藏食品. 北京:科学出版社,1982
- 4 程海昌,等. 食品卫生学进展,1984,2(2):62~67.
- 5 张道徽,等. 食品卫生学进展,1984,2(2):13~17.
- 6 陈科文,等. 食品卫生学进展,1985,3(1).

(四川省劳动卫生职业病防治研究所  
张道徽研究员撰;王瑞淑审)

#### 化妆品细菌污染

bacteria pollution of cosmetic 化妆品都是由许多原料组合而成的,其中大多添加构成微生物碳源的甘油和山梨糖醇等,或添加构成氮源的氨基酸衍生物。微生物一旦污染了化妆品,便会利用化妆品中含有的脂肪、蛋白质、无机盐和各种营养物质迅速生长繁殖,其中致病菌可能从与人体接触的各个部位侵入各个组织和器官造成种种危害,严重者可致人于死命。为保障人们身体健康,加强对化妆品卫生管理,提高产品质量,保证化妆品的使用安全是非常重要的。

在化妆品中最常见的病原微生物是各种致病菌。1946年在新西兰由于爽身粉中滑石粉的污染而引起新生儿破伤风。

Wilson 对未开封的和使用的眉目化妆品进行微生物学检查,结果细菌的污染率为 12%。Ahearn 等也证明,睫毛膏在使用前的污染率仅为 1.5%,使用中的污染率则急剧增加到 60%。有人证明,在 70%~80% 的洗发膏中都能检出洋葱假单胞菌和恶臭假单胞菌。Malcom 氏等发现,洗发膏中的污染菌大多数是水柄性细菌。

《中国化妆品卫生监督条例》于 1990 年 1 月 1 日施行,《化妆品卫生监督条例实施细则》于 1991 年 3 月 27 日发布。国内各地卫生监督机构于近年对化妆品进行监督检查。1985~1986 年对广东、辽宁、北京、上海、天津、广州市采集的 483 分各种化妆品中,有 228 件(47.2%)检出细菌,有 69 件(14.3%)细菌总数为 71 000 个/g 或 ml,其最高值达  $17 \times 10^5$ 。在 483 分受检样品中有 17 分检出粪大肠菌群,阳性率为 35%;11 分检出绿脓杆菌,阳性率为 2.3%;广州市调查的 104 件样品中有 1 件检出荧光假单胞杆菌,1 件检出变形杆菌;广州市和天津市调查的 204 件样品作了霉菌总数检验,有 42 件检出了霉菌,其中  $\geq 1 000$  的 7 件(3.4%)。1989 年李昆林对各类化妆品 148 个品种进行卫生质量检测,生产企业抽检样品中细菌总数超标率为 15.0%。周萍等对 100 分样品用查氏法检出真菌 63 630 株,分属 5 个属:10 个种,用沙氏法检出真菌有可致病的黄曲霉和可引起深部皮肤感染及呼吸道疾病的根霉和芽枝霉 3 种。1988 年,朱海燕、方企圣对 214 分化妆品虎红培养基进行霉菌检测,总检出率为 77.7%,以洗发护发品与膏霜乳类最高,分别为 82.61% 和 80.8%。1989 年冯忠生等对 126 个样品进行微生物检测。微生物超标率为 46.03%,霉菌检出率为 62.70%,蜡样芽胞杆菌率为 39.68%,总大肠菌群检出率为 19.85%。

各种化妆品都是施于皮肤(或毛发)表面,对皮肤起清洁、保护、修饰作用的。它们对皮肤健康起到暂时的美化作用,还应当有利于保护皮肤的健康,防止皮肤病的发生,延缓皮肤的衰老。化妆品被污染后,变质、发霉、腐败,当使用受微生物污染的化妆品后,这些微生物可以通过各种途径侵入人体,引起人类的多种疾病。它们会在皮肤上大量生长繁殖,侵犯皮肤的各个部分。金黄色葡萄球菌和链球菌污染化妆品,可引起各种皮肤化脓性感染,严重者还可发生败血症;绿脓杆菌污染化妆品,可引起皮肤和眼的感染,严重的还可导致眼睛完全失明。污染化妆品的真菌中还有可引起人体许多部位感染的白色念珠球菌,可引起脑膜炎的新型隐球菌。

国外 Wilson 等调查表明,化妆品霉菌污染率为 12%。天津的检出率为 35%,南宁为 90%。化妆品中霉菌及其产生的毒素是引起皮肤光过敏性皮炎、过敏性皮炎、皮肤变态反应的重要原因,重者尚可导致机体中毒诱发癌症。1963 年上海分析 2 776 例接触性皮炎,化妆品及日用品引起的 358 例,占 12.8%。

引起化妆品微生物污染的原因,主要是中国大多数厂家设备比较落后,未能形成生产密闭自动化装置,多处于人工分装阶段。原料来源复杂,包装容器没有严格消毒,车间空气没有经过净化处理,工人生产没有严格的卫生制度等。因为化妆品污染来自生产过程,空气是污染的重要来源,一般空气中的微生物数约为  $8 \sim 35 \times 10^2/\text{m}^3$ ;其次是人,附着于两手的细菌有时可超过  $10^6$ ,存在于人头皮上的微生物数约  $1.4 \times 10^2/\text{m}^2$ 。1989 年,冯桢智等对 18 家化妆品生产厂进行生产全过程的细菌污染检测,生产环境、生产器具、工人的手、半成品、原料及生产用水超标率分别为 39.6%、21.2%、41.9%、14.3%、9.4%。生产设备、器具受污染以及卫生制度不健全,工人不注意个人卫生,是造成产品受污染的重要因素。1990 年,包秀英等对 8 家化妆品厂进行调查,膏霜灌装室空气细菌与一般卫生状况呈负相关,空气细菌与尘埃粒呈正相关。1991 年从广州市产品抽检分析,大型厂产品全部合格,中型厂超标率为 10.9%,小型厂超标率为 20%。

要确保化妆品卫生质量,卫生监督部门要严格把关,从厂址选择开始,要求厂房要有足够面积方能投产。加强对从业人员卫生知识培训。特别要管好小型厂。

为控制化妆品被微生物污染,大多数厂家均在生产中加入防腐剂,目前用量最大的是对羟基苯甲酸酯类(尼泊金)、杰马尔-115、道维希尔 200、布罗波尔。但防腐剂能引起变态反应,其对皮肤的刺激性和过敏性仅次于某些香料。厂家对生产环境杀菌多用次氯酸钠,操作者消毒手指多用季铵盐类和葡萄糖酸洗必太。紫外线对工厂环境、器具、装置、包装材料等杀菌效果较好,但要检测紫外灯照射强度。1984 年,丁兰英等对 697 支灯管,经用强度计检测仅有 120 支照射强度达  $70 \text{uw}/\text{cm}^2$  以上,合格率为 17.2%。为确保化妆品卫生质量,各厂家一定要执行《中国化妆品卫生监督条例》及《实施细则》。

20 世纪以来,生物学界致力研究“动、植、飞、潜”各类生物及人类之生长奥秘,将“细胞生长因子”应用在美容保养。因此,重点应考察化妆品对人体的安全试验。为控制化妆品微生物污染,开发高效防腐剂并与对羟基苯甲酸酯类合用,发挥协同作用是发展趋向;随着高科技发展,化妆品生产车间生产流程应实现全密闭自动化,用电脑代替人工操作;车间应使用高效空气颗粒过滤器,以控制化妆品受微生物污染。

#### 参考文献

- 1 袁成宴,等. 中华皮肤科杂志,1963,9(4):235
- 2 丁兰英,等. 消毒与灭菌,1963,9(4):235
- 3 朱海燕,等. 环境与健康杂志,1988,5(6):31
- 4 林秀人,日用化学工业译丛,1989,3:34
- 5 冯忠生,等. 环境与健康杂志,1989,6(1):33
- 6 周萍,等. 中国公共卫生,1989,5(2):28
- 7 冯桢智,等. 中国公共卫生,1990,6(12):558
- 8 包秀英,等. 环境与健康杂志,1991,5(6):199

(广州市卫生防疫站黄兰芳副主任医师撰;卢月恒审)

#### 医院感染 nosocomial infection

医院感染又称医院获得性感染或医院内感染。其定义是发生在医院中的一切感染,包括外源性感染即交叉感染和内源性感染又称自身感染。前者是能够通过改善医院环境卫生与严格消毒、隔离等有效方法而控制的感染,故又称可预防性感染;后者指免疫功能低下患者由自身正常菌群引起的感染,故又称不可预防性或难以预防性感染。医院感染已成为人们注目和研究的课题。

公元 325 年始出现医院的模式,当时只用于收容传染病人以及为社会经济水平较低下者或贫民提供医疗服务。由于条件很差,医院感染非常严重。“文艺复兴”之后,出现了近代医院,但医院感染也很严重。第一次世界大战后,出现了现代医院,其具有现代技术、设备、管理以及职业道德水平,医院感染也随着改变其特点,并不断增加威胁,例如细胞毒性药物、免疫抑制剂及放射疗法等,可损伤机体的免疫系统;由于治疗技术进步,使造成抵抗力低下的某些慢性疾病,如糖尿病、肝硬化及肿瘤等患者的存活时间延长;各种侵入性操作,如导尿管、静动脉插管、气管插管、监控仪器的探头以及各种内窥镜的应用,可损伤机体的防御屏障;新的抗生素不断出现及大量使用,引起机体正常菌群失调及耐药性产生;由于免疫抑制剂的出现,使器官移植手术有了新的飞跃,部分地解决组织排斥问题,但随之而来的是免疫功能受损;以上原因极易使患者发生感染,也使医院感染有了新的特点。

医院感染会给病人增加痛苦,甚至造成死亡,也会造成巨大经济损失。世界各地医院感染患病率在 3%~20%,平均 9%。中国的医院感染患病率为 8.4%,1988 年 10 月~1989 年 11 月,医院监测资料显示发病率为 9.72%。

医院感染是现代医疗实践的一大障碍,已成为全世界医学界的研究课题之一。国际上成立了“国际医院感染联合会”,出版医院感染刊物,召开多次医院感染学术会。1990 年中国出版了世界上第一部《医院感染学》,并创刊了《中国医院感染学杂志》。1989 年中国成立了医院感染学组,1992 年成立了医院感染控制学会。

医院感染学的流行病学是研究医院人群中医院感染的分布

频率及其决定因素的,可为制订医院感染的预防与控制措施提供科学依据。具体包括医院感染的流行病学监测,医院感染的传染链,医院感染流行或暴发的调查,以及控制措施的评价。在流行病学研究方法中,分子流行病学应用的较多。细菌的耐药性、毒力因素等是由质粒介导的,质粒可以在菌种内和种间转移,引起医院感染的传染性质粒传播,造成质粒流行或医院感染的暴发。因此,对质粒进行流行病学调查,是了解医院菌株变化趋势的重要途径。在分子流行病学中,应用核酸探针,可以直接从被检样品中发现病原体,成为快速的特异诊断方法。尤其对不易培养或培养时间较长的病原体如病毒、厌氧菌,是一种有效的方法。

通过流行病学调查,常见的医院感染部位,国外以尿路感染、外科伤口感染及下呼吸道感染占前3位;而国内以下呼吸道感染第一位,发病率约为1%,病死率高达50%,其次是尿道感染和伤口感染;还有医院感染败血症等其他部位感染。

引起医院感染的病原体,从过去革兰氏阳性球菌为主变成现在的以革兰氏阴性杆菌为主,其中条件致病菌占很大比重。医院感染的病原体可以是典型的致病微生物,如肝炎病毒、沙门氏菌、结核分枝杆菌等,但主要是由条件致病菌引起的,如大肠杆菌、表皮葡萄球菌、绿脓杆菌、白色念珠菌等。这些细菌对正常人群不致病,但对病人,尤其是对免疫功能低下者能引起严重的感染。目前又发现了新的医院感染病原体,如嗜肺军团菌、阴沟杆菌、粪团肠杆菌、洋葱样假单胞杆菌、粘质沙雷氏菌等。在医院感染病原学研究方面,除了注意发现新的病原体,并作相应研究外,对真菌、厌氧菌及病毒作为医院感染的病原体研究还远远不够,是今后重要的研究方向。同时,因为新的抗生素不断出现,便随之也不断出现新的耐药菌株。细菌的耐药性与致病性的关系密切,提倡合理使用抗生素,降低医院抗生素压力,从而减少细菌耐药性的产生,是一项十分重要的措施,同时对控制病房中耐药细菌交叉传播也至关重要。在合理使用及限制性使用抗生素方面,应研究使用广谱抗生素的利弊;研究细菌药敏试验结果与临床疗效不一致的原因;进行各病房“老细菌”种类、耐药谱及其引起的院内感染,医院感染暴发中微生物标记的应用,定植/感染率的监测,带菌者危险因素的研究等。对临床细菌学检查,目前不能适应医院感染研究的需要,应开发新的快速培养、快速鉴定分型以及快速药敏试验方法。应用单克隆抗体、PCR、核酸探针、质粒及质粒酶切片模式分析及细菌分型等方法,以用于发现并鉴定医院感染的病原体。

医院感染判断标准,即在病人入院时不存在也不处于潜伏期,而是在医院内发生的感染,同时也包括在医院感染而出院后发病的人;有明确潜伏期的病,从患者入院的第1天算起,超过平均潜伏期发生的感染称医院内感染;潜伏期不明确的病,规定在患者入院48h后出现的感染。若病人发生的感染直接与上一次住院有关,也为医院感染。在原有已知病原体基础上,又培养出新的病原体称院内感染。其医院感染的诊断依据,主要靠临床资料、实验室检验结果及其他检查资料和医生的判断。其中下呼吸道感染病原学诊断,一直是难以解决的问题,因为痰培养物不能代表下呼吸道感染的病原菌。近年有人采用套镜加塞的导管(TPC)或保护性标本刷(PSB),以光纤镜取洗液作标本培养。TPC有高度的特异性。在卡氏肺孢子虫患者的检查中,PSB与经支气管活检和开胸肺活检结果基本相符。

医院感染疾病的治疗,使用抗生素仍是主要手段,其他治疗方法只起辅助作用。但必须及时发现耐药菌株对药物剂量和联合用药问题进行核定,并寻找新的抗生素。在治疗的同时注意采取其他措施,例如,国际上针对白细胞减少症开展了大量研究工作,其中有避免扰乱宿主的防御系统,避免扰乱宿主的正常菌群,对潜伏性感染源的治疗,采取保护性隔离、去污染等措施,对难以预防的自身感染治疗取得了可喜的成就。

医院感染的预防,主要是积极开展医院感染的监测与控制,二者密切结合。通过监测了解易导致医院感染发生的薄弱环节,不妥的消毒隔离方法等,为控制医院感染指明重点;了解医院感

染的基本数据、医院感染的发展趋势,如发病率趋势,病原体变迁趋势,细菌耐药性变化趋势等;监测首先是全面监测,再向目标监测转化;监测资料应贮存于计算机,因此需要研究用于医院感染的各种计算机软件。

现代医院感染的预防与控制措施,仍以切断感染的传播途径为依据。70年代初,美国疾病控制中心制订了“医院内应用的隔离技术”,提出7种隔离预防要求,70年代中期在美国93%的医院推广应用;1983年进行修改,包括严格隔离、呼吸道隔离、结核病隔离、接触性隔离、引流物/分泌物隔离、血液/体液隔离。国内医院内隔离预防,在传染病方面已有比较完善的国家法规,但对医院感染隔离预防方法,尚有待完善。预防医院感染的消毒与灭菌工作主要是用物理的与化学药物方法,在这方面需研究表面消毒新药剂及新器材。对内窥镜快速高水平消毒尚无好的方法,对病房消毒监测及对消毒剂耐药菌株的分子生物学研究都需要努力。应用菌苗和疫苗预防医院感染也取得一些效果,如有人研究利用绿脓杆菌的脂多糖进行特异性的自动免疫,以及研制疱疹病毒疫苗等,但没有应用于临床。对免疫功能低下患者用特异性抗体被动免疫是可行的。但寻找自动免疫途径还需很大努力,白介素1和2、胸腺素、干扰素及单克隆抗体在医院感染的治疗、预防中的应用,正在深入研究。

(第三军医大学流行病学研究室薛国文教授撰)

**医学灭鼠** medical oeratzation 在人类能够感染的疾病中,与鼠类有直接关系或间接关系者在50种以上。据统计,有史以来死于鼠源疾病的人数远远超过直接死于战争者。由于各种鼠类的流行病学重要性与其数量(密度的高低和分布区的大小)密切相关。所以,降低鼠密度或压缩其分布区,可削弱、控制以至扑灭这些疾病的流行,以预防和控制疾病为目的而采取的灭鼠和防鼠措施,即为医学灭鼠,意义很大,日益受到重视。

医学灭鼠的历史,如从人类认识鼠源疾病起计算则可追溯到公元前。例如《黄帝内经》(公元前3~7世纪)就记载了恶核病,即鼠腺疫。但明确鼠类与人类得病的关系要晚,为防病开展灭鼠活动更晚。张杲的《医说》(1189)和李时珍的《本草纲目》(1578)都相当准确地描述了鼠类对人类感染钩端螺旋体病的作用。至于有计划的灭鼠防病活动则始于20世纪。1908~1914年,美国为控制鼠疫在加州开始大面积疫区的灭鼠工作,短期效果好,但旋即证明疫源地内仍有鼠间鼠疫。1933~1941年和1947~1956年前苏联采取整片清除的战略,在13.5万平方公里的面积上消灭主要宿主小黄鼠,收效显著。由于灭鼠地区从1938年起未检出鼠疫菌,1950年前苏联正式宣布该地已清除鼠疫疫源性,1956年停止灭鼠,再度证实鼠间鼠疫流行,只取得短期效果。

中国的灭鼠防病工作始于1947年东北鼠疫区处理,1959年起对内蒙通辽以黄鼠为主要宿主的疫区进行了高质量的成片灭鼠,主要宿主的密度低于0.1只/公顷。随后,在其他疫区也相继开展了类似工作。这些疫区灭鼠后,鼠密度显著下降,疫情迅速消失,但中断灭鼠活动后,密度恢复,疫情再现,只有生境已经改变的地方,如通辽疫区,疫情未有反复。流行性出血热疫区的灭鼠防病活动始于1959年,由于面积太小,对疫情的控制未起显著作用。直到1986年以后,采取大面积、高标准的灭鼠措施,疫情方逐年下降。以1986年全国发病人数为100,1987~1992年分别为56.22、44.41、34.55、35.05、39.75和40.21。医学灭鼠的主要特点是:

(1)要求高。必须使主要传病鼠种的密度降到相当低的水平,才能减少鼠源疾病的发病人数。在绝大多数情况下,鼠密度和发病人数并非直线相关。除了由鼠类机械性传播的疾病以外,鼠密度低于流行阈值才能有明显作用。预防不同疾病的阈值各异,甚至对于同种疾病,由于宿主鼠类不同,指标也有差别(见下表)。

(2)面积大。最好覆盖整个疫区,否则效果不佳。从推理上说,疫区内各部分的鼠密度和疾病流行强度不同,作用也异,只处理关键地块可以事半功倍。但关键地块的确定很难,而且它不断

表 1

| 疾病     | 主要宿主   | 密度阈值      |
|--------|--------|-----------|
| 鼠疫     | 达乌尔黄鼠  | 0.1 只/公顷  |
| 鼠疫     | 长爪沙鼠   | 0.2 只/公顷  |
| 鼠疫     | 喜马拉雅旱獭 | 0.02 只/公顷 |
| 流行性出血热 | 褐家鼠    | 1%        |
| 流行性出血热 | 黑线姬鼠   | 1%        |

变动,只能成片灭鼠。如疫区在城市或农村,应全市或全村灭鼠,若在野外,则以河流、裸岩等天然屏障为边界成片处理,无屏障处理需建立定期灭鼠的防护带。

(3)需要巩固期。其久暂视病种和要求而异。控制由鼠类机械性传播的疾病和人、鼠共患病(如鼠疫),灭鼠可迅速奏效;但若控制对人致病、对鼠近乎无害的疾病(如流行性出血热),则需使鼠密度至少在1~3个月内保持在阈值以下。如欲长期控制以至扑灭疫情,除非能够彻底改变鼠类的生境,均需不断地采取灭鼠和防鼠措施。

(4)尽可能减少人和鼠接触,避免在灭鼠时造成人的感染。鼠间疫情严重时,不能使用鼠夹、电子猫等必需接触死鼠的方法,养猫同样可导致疫情扩散,而且家猫可传播流行性出血热、弓形体病等。有些鼠源疾病通过节肢动物传播给人,防治这些疾病时,应防止鼠死后体外寄生虫离体叮人和寻找新的宿主。为此需同时采取杀虫措施。

(5)注意生态效应。由于医学灭鼠范围大,时间长,要求高,必须选用安全可靠、对生态系统干扰较少的方法。除整治环境,改变生境外,目前多采用以毒饵法为主的综合措施,合理使用高效、安全的抗凝血灭鼠剂,禁用强毒急性药物。不过,大范围内鼠密度长期保持低水平,必然影响鼠类的野生天敌。

除针对性很强的疫区灭鼠外,在中国,医学灭鼠还包括爱国卫生运动中的灭鼠活动。此项工作从1987年起已有具体指标,要求撒粉调查的鼠迹阳性率不超过5%。到1991年底,90%以上的省会市和直辖市已经达标,基本控制了鼠害,减少了鼠源疾病的发病人数。此项活动正逐渐向中、小城市和农村发展。

今后医学灭鼠的主要任务是:(1)继续确定在控制各种鼠源疾病时对各种主要宿主必须达到的灭鼠指标(鼠密度、灭鼠范围和持续时间)。目前掌握的仅有鼠疫和流行性出血热的宿主鼠类中的几种,多数病种和鼠种不明。(2)在阐明各种鼠源疾病流行机理的基础上,正确评价灭鼠对防病的作用及其在所有防治措施中所占的位置。因为灭鼠不一定是预防鼠源疾病的唯一手段或最佳手段,尤其是有的疾病除鼠类外还有其他兽类宿主(如钩端螺旋体病的流行,有时与猪的关系更密切),灭鼠往往不够。(3)继续改进灭鼠技术,尤其是提高环境防治措施的作用。

#### 参考文献

- 汪诚信,潘祖安.灭鼠概论,北京:人民卫生出版社,1981.187~231
- 纪树立.鼠疫,北京:人民出版社,1988.132~398
- 汪诚信.灭鼠技术与策略,北京:中国科学技术出版社,1990.211~255

(中国预防医学科学院流行病学微生物学研究所  
汪诚信研究员撰;王美秀审)

**计划免疫** expanded programme on immunisation 随着免疫学和疫苗学的发展,越来越多的疫苗相继问世,使很多用疫苗可以预防的疾病得到控制。

70年代中期,世界卫生组织估计亚洲、非洲、拉丁美洲发展中国家(不包括中国)年出生8000万新生儿,但接受百日咳、白喉、破伤风、麻疹、脊髓灰质炎和卡介苗免疫的儿童还不到10%,因上述疾病每年夺去500万儿童生命,另有500万儿童因患上述

疾病留有失明、耳聋、瘫痪和智能低下等后遗症。

由于世界各国成功地执行消灭天花的规划,消灭天花活动取得巨大进展,1974年世界卫生组织吸取开展消灭天花经验,并参考一些国家实施常规免疫成功地降低麻疹、脊髓灰质炎、白喉、百日咳等发病的经验,1977年建立了扩大免疫规划(EPI),制定了3个长期目标:到1990年使世界上所有儿童都能得到免疫(1982年确定接种率目标为80%)以降低6种主要疾病——白喉、百日咳、破伤风、麻疹、脊髓灰质炎和结核病的发病率及死亡率。“促进各国依靠自己的力量,实施免疫工作,并将免疫工作纳入全面卫生工作之中;促进各区(世界卫生组织所划的6个区域)都能自力更生地生产及检定各类疫苗。”这一规划目标得到世界卫生组织各成员国的支持,特别是发展中国家为此竭尽全力。

中国自1950年10月即颁布了《关于发动秋季种痘的指示》,与此同时,针对一些传染病实施了预防接种,60年代初中国消灭了天花。1967年卫生部颁布了预防接种办法,一些地区的预防接种已从一年几次不定期的突击接种逐步改为有计划按免疫程序实施接种,计划免疫一词逐步为人们所接受,实质上中国计划免疫与国外扩大免疫规划内涵完全一致。

1982年,计划免疫在中国形成了一致的概念,即根据传染病的疫情监测和人群免疫水平分析,按科学的免疫程序有计划地利用疫苗进行预防接种,以提高人群免疫,水平达到控制传染病的目的。

1978年,世界卫生组织成立EPI顾问小组,每年对全球活动进行一次评价并提出策略和措施,为了实现目标,世界卫生组织进行了人员培训、提高疫苗质量、扩大冷链覆盖面,保证疫苗冷链冷藏,通过各种措施提高接种率,改进监测技术,实行病例诊断标准化,使EPI的各项管理制度逐步规范化。由于国际组织的赞助,加上全球共同努力,至1991年底,全球1岁以内儿童卡介苗接种率已达90%、百日咳3针接种率83%、脊髓灰质炎疫苗3次服苗率85%、麻疹疫苗接种率80%,世界卫生组织宣布全球已按期实现1990年EPI目标。由于疫苗接种率的提高,发展中国家每年减少百日咳死亡病例56.5万,减少麻疹死亡病例192万,预防了44.2万脊髓灰质炎病例,此外由于推行孕妇接种破伤风类毒素,每年预防了72.3万新生儿破伤风死亡病例。

中国的计划免疫工作与全球同步,1982年成立全国计划免疫专题委员会,制定了1982~1990年计划免疫工作规划及目标,在联合国儿童基金会援助下,建立了冷链系统的试点,逐步推广到全国,各项管理制度逐步规范化和标准化;特别是中国政府1985年8月宣布,为加速中国计划免疫活动,提出12月龄内儿童计划免疫使用的每种疫苗接种率1988年以省为单位实现85%;1990年以县为单位实现85%。1989年3月和1991年3月由卫生部、世界卫生组织和联合国儿童基金会组成审评组共同对中国计划免疫进行审评,审评结果表明,我们不仅按期实现了两个85%的接种率目标,而且每种疫苗接种率都超过95%以上。由于中国疫苗接种率的提高,对1990年的全球1岁以内儿童实现目标作出了突出贡献。

计划免疫最终目标是控制和消灭相应的针对疾病,世界卫生组织提出优先消灭和控制脊髓灰质炎、新生儿破伤风和麻疹。

**消灭脊髓灰质炎** 1988年5月13日第41届世界卫生大会宣布要在2000年全球消灭脊髓灰质炎,这个目标的定义是指2000年没有野病毒引起的脊髓灰质炎病例;在社区环境和人群中没有脊髓灰质炎野病毒。世界卫生组织总结了美洲区消灭脊髓灰质炎的经验 and 策略:(1)成立区域协调委员会和技术咨询组。(2)广泛进行社会动员。(3)提高和保持高接种率,在常规免疫的基础上要开展补充的免疫策略即强化免疫。这种强化免疫对于那些近年来仍有病例的地区十分重要。此外,对可疑脊髓灰质炎病例的地方实施疫苗应急接种以切断野病毒传播。(4)建立有效的流行病学监测系统,其中包括使用统一的诊断标准,建立疫情周报系统,加强主动监测,提高报告质量,建立报告病例奖励制度。(5)建立实验室网络。目前,美洲在消灭脊髓灰质炎方面取得

令人瞩目的进展,全区 47 个国家,1991 年仅有两个国家报告 7 个确诊病例(哥伦比亚 6 例,秘鲁 1 例)。1993 年的报告,已有 20 个月没有野毒引起的病例。

中国卫生部已宣布 1995 年全国消灭脊髓灰质炎规划,1992 年全国脊髓灰质炎发病率降到 0.01/10 万,1995 年要达到无野毒引起的麻痹型脊髓灰质炎病例。中国消灭脊髓灰质炎主要策略是(1)通过常规免疫达到和保持高免疫接种率。(2)在重点地区开展强化免疫活动。(3)加强流行病学监测和实验工作。(4)控制暴发流行。(5)实施研究。(6)改进监测和评价工作。全国各地正认真按照这些策略积极工作,与此同时,努力使疫苗由糖丸剂型改为液体剂型,改进疫苗热稳定性保证免疫成功率以及完善免疫程序等。此外,正积极开展对脊髓灰质炎快速诊断及环境中野毒的监测方法和野毒株和疫苗株的鉴别方法的建立。

**消灭新生儿破伤风** 1989 年 5 月世界卫生大会决议宣称,1995 年消除新生儿破伤风,其主要措施,一是推行新法接生,二是给孕妇接种两针破伤风类毒素。但截至 1990 年底,世界卫生组织估计,发展中国家孕妇接种两针破伤风类毒素接种率仅为 34%,每年仍有 50 万新生儿死于新生儿破伤风,要实现 1995 年消除此病的目标,还要做艰巨的工作。中国的一些调查资料表明,新生儿破伤风是新生儿的第 2 大死因。如林良明报告,农村新生儿破伤风死亡率平均高达 4.8/1000 活产儿。苏万年对 1 690 名育龄期妇女的调查发现,具有破伤风抗毒素保护水平者仅占 38.22%。1991 年起卫生部已布置 300 个妇幼保健项目县全面开展孕妇和育龄期妇女进行破伤风类毒素免疫并要求做好新法接生工作。

**控制麻疹** 自 60 年代中期,大多数国家开展了麻疹活疫苗免疫,对降低麻疹发病率及死亡率起到明显作用,但麻疹仍是儿童死亡的主要原因之一。经过研究和实践,人们对麻疹疫苗初次免疫起始月龄、初次免疫抗体的免疫持久性有了较清楚的认识,多数学者认识到麻疹活疫苗一次接种不可能维持终生免疫。王树声和戴斌等分别在无自然麻疹的隔离海岛及农村进行的观察表明,麻疹活疫苗初次免疫抗体可维持 7 年或更长。因此,中国规定 7 岁儿童进行一次加强免疫,加强免疫后抗体能很快提高,但又迅速下降到再免疫前水平。对于青少年如何保持免疫至今国内外无统一认识。目前,麻疹出现两个高发年龄组,一是未到规定免疫月龄如 6 月龄左右发病,另一是青少年乃至成人中发生暴发流行。美国自 1978 年开始宣布消除麻疹,其主要措施是使人群达到和维持高度免疫水平、积极的监测以及快速切断传播。美国原定 1982 年 10 月 1 日前消除本土麻疹,这一目标虽未实现,但发病率降至较低水平。

1989 年 5 月 42 届世界卫生大会宣布,90 年代 EPI 的新目标是:(1)达到和保持高的接种率,2000 年免疫接种率达到 90%。(2)控制针对疾病,包括 2000 年全球消灭脊髓灰质炎,麻疹比免疫前降低发病率 90%,1995 年消除新生儿破伤风。(3)改进监测工作以准确评价规划的进展。(4)引入新的或改进现有的疫苗,促使其能在公众中应用。(5)利用 EPI 的系统促进其它初级保健活动。

中国的任务已在 90 年代中国儿童发展规划中规定,保持高水平的计划免疫覆盖率,到 1995 年以乡镇为单位进行计划免疫(包括破伤风类毒素的接种)接种率达 85%,2000 年达 90%,1995 年消灭小儿麻痹症,消除新生儿破伤风,与实行免疫前相比,麻疹死亡率降低 95%,发病率降低 90%。

(卫生部北京生物制品研究所苏万年研究员撰,章以浩审)

**城市异动儿童计划免疫管理** EPI management of transferred children in cities 1978 年第 3 届世界卫生大会制定了《扩大免疫规划》(简称“EPI”),提出 1990 年以前将使全世界儿童都获得卡介苗、百白破混合剂、脊髓灰质炎疫苗、麻疹疫苗四种生物制品的免疫接种,针对性预防结核病、百日咳、白喉、破伤风、麻疹、小儿麻痹症 6 种传染病。80 年代初,全球 80% 以上的

国家和地区参加了“EPI”活动。中国的计划免疫实质就是全球“EPI”在中国的具体实施,也是实现“全球 2000 年人人享有卫生保健”总目标的重要组成部分,是中国政府承诺世界卫生组织、联合国儿童基金会等国际组织合作项目之一,对于维护儿童的生存具有极其重要的意义。1989 年 3 月和 1991 年 3 月世界卫生组织、联合国儿童基金会和中国卫生部两次联合审评计划免疫工作,宣布中国已如期实现了“2 个 85%”的接种率目标。

每天都有新的生命在诞生。以往的儿童免疫成果不能证明今天和明天免疫工作,因此须将计划免疫始终看成是从零起步的工作,坚持长期不懈的努力,保持和提高接种率水平,直至所针对的传染病在全世界被消灭为止。中国在改革开放、经济活跃、人口流动增大的情况下,做好城市儿童计划免疫管理显得更为重要,基层卫生保健工作者首先要对适龄接种儿童建立免疫卡、证,即“双卡”制,并用活“双卡”。

为每名应免疫儿童建立“接种证”和“免疫卡”,作为儿童免疫接种的原始记录凭证和开展计划免疫工作的基础资料。只有建立“双卡”,才能保证免疫对象明确、及时接种、不重不漏、减少疫消耗,同时也为免疫的效果观察、考核、检查和异常反应的调查提供原始资料。“免疫卡”一般由负责接种单位保存,适用于人口异动较大的城镇,农村亦可使用,优点是方便转卡;“接种证”一般由儿童家长保存,每次接种带证记录,配合医生及时按程序完成各次免疫接种,并作为儿童入园、入校的免疫凭证。

建立儿童免疫卡、证是一项相当细致复杂的工作,为使每一个儿童都能获得免疫机会,必须与当地的计划生育、妇幼保健以及公安等部门密切协作,建立必要的制度,如妇幼部门在签发出生证或新生儿申报户口时同时建卡,最后由基层防疫机构查漏补缺,以保证全体儿童建卡。

城市人口最近几年来异动增大,7 岁以下儿童随家庭迁移率在 2%~5% 之间。在人口密度大的城市人口流动不断增加情况下,异动儿童免疫接种卡管理更为困难,对于免疫卡,既要保持免疫史原始记录的真实性,又要保持整洁规范,因此儿童免疫卡应随儿童异动及时转至迁移地区,防止丢失或重新登记时的“笔下接种”。从以往的实地调查发现,原始卡的转卡率只有 41%,当原始卡未转移,迁入的儿童不得不重建新卡,可采取以“接种证”和家长证实的方法建卡,称为“过卡”。迁入的儿童要见户口建卡,结合见人建卡。大量的调查资料说明,新生儿出生后 79% 在 3 个月内登记户口,在 1 岁内完成“四苗”基础免疫机率最大;15% 新生儿在 3~4 个月内登记户口,只要取得家长的密切配合,也可按免疫程序完成“四苗”接种。这两部分儿童的接种可超过 85%,但达到接种率 95% 以上有困难,因为仍有 5% 新生儿超过 9 个月才申报户口,这部分儿童在 1 岁内无法完成基础免疫,故对不及时上户口和无户口儿童必须上户建卡建证,以提高接种率。异动儿童的管理,新生儿出生后登记户口前,到住地基层保健单位领取儿童接种卡再登记户口,并做好 7 岁以内儿童的免疫卡的转卡工作,尤其是 0~3 岁内的转卡,这是做好儿童基础免疫以及流脑、乙脑的初、复免疫的重要措施。0~3 岁儿童凭接种证入园入托,入学儿童凭免疫接种证入学,接种卡由原接种单位保存备查。

(长沙市卫生防疫站刘意群副主任医师撰,王长江审)

**狂犬病免疫预防及控制** the immune prevention and control on rabies 狂犬病又称恐水症,是一种自然疫源性疾病,属人畜共患的动物源性传染病,由感染狂犬病毒引起。所有的温血动物都可以感染狂犬病,以哺乳类动物更为敏感,健康人可通过咬(抓)或从粘膜、或从皮肤破损伤口感染,在特定情况下也可通过呼吸道传染。狂犬病毒对神经组织有强大的亲和力,发病主要是由于病毒侵袭中枢神经所致。狂犬病的临床特征为脑脊髓炎,主要表现为兴奋、恐水、咽肌痉挛、进行性瘫痪,最后呼吸、循环衰竭,患者昏迷死亡。

对狂犬病缺乏特效治疗方法,患者病死率高,几近 100%,居传染病之首位。感染狂犬病毒后潜伏期较长,用自动免疫可获

得良好的保护作用,因此用狂犬疫苗在暴露前进行预防或暴露后免疫接种防止发病是预防狂犬病的必要手段之一。

狂犬病早在13世纪即在野生动物中流行。西欧于16世纪起主要在犬中广泛流行。19世纪以来有些国家对传染源特别是犬采取严格措施。20世纪50年代起一些国家进行以免疫犬为主的措施,使狂犬病得到控制或消灭。据WHO Bogel提供的资料表明,全世界有87个国家仍存在狂犬病(统计156个国家、地域,不含中国),加拿大狂犬病基本消灭,美国自60年代起年平均只发生两例,且其中有一部分为输入性狂犬病。流行较严重的有印度、埃塞俄比亚、泰国等。据严需章估计中国解放前每年有5000例以上,城乡均有流行,解放后党和政府采取一系列措施,60年代城市狂犬病基本消灭,农村狂犬病也大幅度下降,但是,近年来由于养犬者逐渐增多(多作为玩赏动物饲养),发病率呈逐年上升趋势。

有关狂犬病毒在自然界究竟以何种方式保存下来,尚不甚了解,迄今在这方面的报道也不多。狂犬病自然贮存宿主为野生动物,家畜为偶然宿主,其传染源主要有:(1)患病家畜,其中犬占90%,猫占5%,牛、羊、猪、马、驴等占0.2%;(2)野生动物,狼、狐、獾、浣熊、蝙蝠占0.3%;(3)狂犬病患者唾液。

法国巴斯德(L. Pasteur)首先从死于狂犬病动物的脑组织中发现传染物质——滤过性病毒。1882年,他用狂犬病毒在家兔连续传代,获得毒力减弱的固定毒,并试制成疫苗用于疯犬咬伤的小孩,成功地使小孩免于发病;以后国际上用类似的方法获得许多固定毒,并试制出不同疫苗,用于预防医学。1980年以前中国生产的羊脑狂犬疫苗也用类似的方法,但因其中含髓磷脂可引起严重中枢神经变态反应而停用。在发展中国家仍使用脑组织疫苗(成脑、乳鼠脑)。1983年,WHO在日内瓦召开的狂犬病专家会议上决定,制备狂犬病免疫疫苗,须用非神经组织代替脑组织。

狂犬病的免疫预防:过去认为犬感染狂犬病后会发病死亡,对咬入动物要作一定时间观察后再决定接种与否。1960年,巴西福塔莱萨接种中心分析18例狂犬病人,其中7例是由健康犬咬伤发病的。中国也屡有报道,如1987年湖北省鹤峰县9例狂犬病人,其中两例是健康犬致伤后分别于64d、129d发病死亡,而肇事犬仍健在,说明狂犬病存在隐性感染。因此,在疫区无论病犬、健康犬咬(抓)伤后均应立即进行免疫预防。

狂犬病的免疫预防接种应按三步并重的处理原则施行:(1)及时、彻底、正确的清洗伤口;(2)及时足量地使用抗狂犬病血清;(3)及时使用狂犬疫苗进行全程免疫。1991~1992年湖北黄石市两例狂犬病人,因犬咬伤后只注重注射狂犬疫苗而未清洗伤口和注射抗血清,分别于伤后25d、132d发病死亡。另外,值得注意的是处理时间、注射部位和细胞免疫也极为重要。Murphy等证明了从局部伤口至侵入周围神经至少需72h。1988年6月,在法国召开的人用狂犬疫苗应用和效力的WHO合作中心负责人会议上,巴斯德研究所的Tsiang介绍对大鼠背部感觉神经节体外感染狂犬病毒,病毒在神经轴内移动的速度是1mm/h,且不受细胞外抗血清的影响,说明注射时间至关重要,暴露后伤口应在3h内处理,抗血清、狂犬疫苗在24h(最好不超12h)内使用,不宜超过72h,否则病毒一旦侵入神经细胞,用抗血清也不会生效。Dr Baer观察发现狂犬疫苗注入人体不同部位会产生不同程度的抗体应答,其中注射三角肌的抗体应答滴度最高,臀部肌肉注射滴度最低,这是由于臀部脂肪影响疫苗的吸收与免疫效果发挥所致,而三角肌较接近腋下淋巴结,有利于免疫力的产生;另外,狂犬疫苗在人体免疫后所产生的保护效果不仅在子抗体应答,产生的干扰素和细胞免疫也起着重要作用,从狂犬病死者身上发现T细胞失活,也提示细胞免疫的重要性。1988年WHO建议:(1)注射部位由臀部改为上臂三角肌;(2)有免疫缺陷或服用免疫抑制药物(包括抗癌药)者或暴露48h后才开始免疫接种者,首次量需加倍。

狂犬疫苗,国外已相继报道了人二倍体细胞疫苗(HDCV)、恒河猴二倍体细胞疫苗(RDRV)、提纯的浓缩鸭胚疫苗

(PDEV)、原代胎牛肾细胞疫苗(FBKCV)以及经WHO检验合格并推荐用传代(Vero)细胞大量生产狂犬疫苗,其中有的疫苗已大量投入使用,并证明其免疫效应和流行病学效果均较好。中国研制成功的地鼠肾组织培养疫苗,自1981年起广泛应用以来统计的发病率,副作用均大幅度降低。随着分子生物学的迅速发展,狂犬病的亚单位疫苗和合成疫苗的研究已先后开展。1983年Reagan等已开始研究狂犬抗独特型抗体疫苗,但是有的疫苗由于生产条件要求高,工艺精而复杂,导致成本高,价格昂贵,以致在发展中国家不能广泛使用。目前狂犬疫苗研究的新动向主要是发展遗传基因工程疫苗,应用遗传工程技术,利用活痘病毒携带狂犬病毒的糖蛋白基因,制成一种高效的“灭活”狂犬病疫苗,为制备具有安全、高效、价廉的狂犬疫苗开创了新的途径,也为各种疫苗的发展以及联合疫苗联合免疫奠定了基础。

犬类免疫是控制狂犬病发生的根本措施;1951~1970年,美国动物检疫结果表明,狗狂犬病阳性率由65%下降至13%;相反,野生动物阳性率由21%上升至73%;这种由家犬为主转变为野生动物为主的易位从大量流行病学资料来看是带普遍性的。在发达国家,如北美和欧洲,以对动物实行大面积、强制性的疫苗接种来控制狂犬病,取得了预期的效果。如美国1940年发病人数为5000例以上,1965年则少于10例,近几年接近零,他们把控制狂犬病的重点放在动物特别是野生动物。中国由于地广、犬多、野生动物种类繁多,不易管理,当前主要是控制犬的狂犬病流行。

目前,许多国家对控制狂犬病采取捕杀野犬、加强检疫和对家犬的定期预防接种,已取得明显效果,在疫苗、抗血清和诊断液生产的标准化以及监视疫情、互通情报和提供信息等方面已有国际合作,这对控制和消灭狂犬病极为有利。

为控制犬的狂犬病,大幅度降低人的发病率,首先应加强卫生宣传教育,提高群众对狂犬病危害性及防治方法的认识;其次应控制传染源,加强对犬的管理和免疫,消灭病犬,并加强对疫区疫情监视;第三应加强对狂犬病的科研工作,不断提高疫苗质量和发展新型疫苗,实施以“预防为主”的方针。

#### 参考文献

- 1 褚菊仁. 狂犬病的预防, 卫生部长春生物制品研究所, 1987
- 2 林放涛. 狂犬病毒与狂犬病的研究, 卫生部武汉生物制品研究所, 1988
- 3 王绍华. 兽用狂犬病疫苗的进展及狂犬病的防制, 1988
- 4 武汉生的制品研究所. 犬病及其免疫预防, 1990, 19
- 5 Lun Et, et al. J Infect Dis, 1983, 147(3): 467
- 6 Diet Zschold ischolb B, et al. Vitol, 1983, 124(2): 330
- 7 Bogel K, et al. Bull WHO, 1986, 64(6): 883
- 8 朱家鸿. 狂犬病疫苗研究进展, 中国人兽共患病杂志 5(6): 32-33 1989

(湖北省黄石市卫生防疫站聂彦萍主治医师撰)

#### 卫生法学

卫生法学是卫生学和法学之间的交叉学科。它研究卫生法的制订和执行。卫生法是国家制订或认可的,并由国家强制力保证实施的社会卫生保健方面行为规范的总和。这一定义包括如下4层含义:(1)卫生法是国家制订或国家认可的,具有强制性。这一强制性是由国家机器的强制力来保证实施的。强制性是所有法律所共有的,而卫生法比其他许多行政法都更具有强制性。例如产品的各种质量标准中,有卫生学意义的指标不是指导性的,而是强制性的,产品必须达到规定的质量标准,达不到就不能出售,否则就是违法。而无卫生学意义的标准项目则是指导性的。(2)社会卫生保健方面的法律关系总体包括两个方面,一方面为政府卫生行政部门,另一方面则为被监督管理的相对人,两方面都应该遵守卫生法所定的行为规范。(3)在诸多行为规范中,卫生法只指那些由国家制定或认可的。此外,还有一些非法定的行为规范,如道德规范、宗教规范和企业内部的或其主管部门对所属企业规定的规章制度等行为规范但都不包括在法定行为规范中。(4)“总和”的含义是包括法律、条例及其所派生出来

的法规、行政规章。法规一般是指国务院一级颁发的,而有关主管部门颁发行政规章则为。国家卫生标准、卫生管理办法、标准的检验和测试方法等都属于行政规章。这些派生出来的规范性文件 and 原始的卫生法或卫生条例合成一个小的体系,这个体系就是“总和”。

卫生法学有两种广义和狭义的区别。从卫生角度而言,是第1种广义、狭义的区别。狭义卫生学是指预防医学事业范畴的,而广义卫生学是在狭义卫生学的概念之外还包括医疗、药政、中医、护理等一切与医药卫生有关的范畴。第2种广义、狭义的区别。狭义的“法”只指某一具体的正式法律本身,而广义的“法”则包括前述的“总和”。

从广义卫生学的角度来看卫生法,它应该包括如下几方面:

预防医学事业方面:(1)食品卫生法;(2)营养管理法;(3)劳动卫生法(包括防治粉尘、职业性有害气体、有害物理因素的法律);(4)环境卫生法(包括化妆品、日用化学品卫生法);(5)学校卫生法;(6)射线防护法;(7)传染病防治法(包括单行的性病防治法、单一传染性疾病预防法)。

药品法制管理方面:(1)药政法(或药品管理法);(2)医疗器械及类药管理法;(3)毒麻药管理法;(4)成瘾药物及精神作用药物管理法。

有关医药管理及医药卫生工作人员的法律:(1)医务人员法(包括医师、卫生医师、中医师、中级医疗护理人员、卫生防疫技术人员的培训、考试、资格认定等有关法律);(2)医疗机构管理法;(3)医疗事故处理法。

医疗争议方面方面的立法:(1)脑死亡法;(2)器官脏器移植法;(3)安乐死法;(4)试管婴儿、人工授精有关法律。

从各个领域法律的基本性质划分还可以分为组织法、实体法、程序法3部分。

卫生法与其他法律有密切的衔接关系,其中主要的有环境保护法,具有保护环境、保护健康的含义,但其中有大量的属于环境治理、保护风景区和名胜区以及保护生态系统、防止地基下沉等与卫生、健康无关的法律,故环保法不属于卫生法。

劳动安全法及劳动法与劳动卫生法有衔接,但涉及安全保护、劳动保险、劳资纠纷等属于保护劳资双方合法权益之列都不属于卫生法。

商品质量监督法与食品卫生法、化妆品卫生法、药品管理法都有衔接,但商品质量监督法的中心在于保护消费者的经济利益,这一点有别于卫生法。

卫生法与其他法律的关系,基本要求是必须遵守在层次上高于卫生法的宪法和基本法,而同一层次的其他行政法与卫生法之间则主要是处理好各司其职、互相衔接的关系。这样卫生法就成为国家法律体系里的一个组成部分。宪法是一个国家的根本大法,卫生法当然应该服从宪法的规定,自不必谈。而我国的基本法,如刑法、民法通则、刑事诉讼法、民事诉讼法、行政诉讼法及其他较重要的部门法(如妇女权益保护法)都是经过人民代表大会审议通过的,其级别、层次都高于各行政法,因此其中的各项规定,卫生法都必须无条件地遵守。如在卫生法中不再规定构成犯罪时刑罚的种类,只需依据刑法中规定处理即可;卫生法中也不再规定领取卫生许可证的年龄下限,民法通则中有关民事责任年龄的规定即可。行政诉讼法规定了对行政权的行使中有何不服的可以申请行政复议,也可以起诉,因此在卫生法和卫生条例中,凡是原来没在条文中规定是否可以选择的,则一律按行政诉讼法的规定执行。

卫生法的执行必须依照卫生法的规定。执行机构、执行人、受约束的相对人都必须是法律、条例规定的。卫生行政部门或卫生监督机构执行法定的行政权时,不论是形成权、管理权还是命令权、处罚权,其对象、内容、幅度等都必须符合卫生法律、条例的规定。超出法定职权范围即为超越职权。在执行处罚权时特别应该掌握相对人违法的确实证据,处罚的幅度也要有法律、法规、行政规章的根据。

执行行政权必须坚持“法律面前人人平等”的原则。对于执法机关是否依法执行,有两个对此进行监督的法律和法规,即行政诉讼法和行政复议条例。

卫生法学的研究方法主要有3种方法:(1)历史考据法;(2)调查研究;(3)比较法学研究法。

卫生法学与各学科的关系:首先卫生法学是卫生学与法学的交叉学科,因而卫生学和法学都是卫生法学的重要基础。没有坚实的卫生学基础,对于卫生法中要求的分寸心中无数。没有法学的基础,又难于在业务实践中准确而有充分法律依据地依法行政。

卫生经济学是卫生法学的另一个重要基础学科。任何法律规定都必须与经济分析结合起来,不考虑经济的卫生法学主张很容易脱离社会生活而成为纯技术科学。

社会学与卫生法学往往有共同的研究课题,例如吸毒既是社会学研究的课题,也是卫生法学研究的课题。卫生法学研究的课题可以从社会学研究中取得更深刻的认识。

#### 参考文献

- 1 WHO International Digest of Health Legislation
- 2 实务卫生行政六法,新日本法规出版株式会社,1984
- 3 陈明光主编,医学法学导论,北京:中国科学技术出版社  
(哈尔滨医科大学刘志成撰)

**食品卫生法** food hygiene law 食品卫生法是调整因保证食品卫生、防止食品污染和有害因素对人体的危害,保障人体健康活动中产生的各种社会关系的法律规范的总称。

食品指各种供人类食用或者饮用的成品和原料,以及按照传统习惯既是食品又是药品的物品,但是不包括以治疗为目的的物品。食品是人类生存和发展最重要的物质基础。食品不卫生,或是由于食品本身含有毒素,或是由于食品在生产、制造、储存、运输、销售过程中被有害物质污染,就会使食用者发生疾病,损害健康,甚至危及生命,影响后代健康。在日本,慢性甲基汞中毒造成的“水俣病”,慢性镉中毒造成的“骨痛病”等公害病,使成千上万的人丧失劳动能力。1981年,西班牙的食油中毒,造成900人死亡,24900余人致残的惨重后果。1989年,中国广东省陆丰等地有56人因饮用掺有甲醇的白酒而丧生。

为防止食品被污染和有害因素对人体造成的危害,世界各国在加强食品卫生管理的基础上,制定具有国家强制力的法律法规,对食品卫生进行强制性管理和卫生监督。英国从13世纪起禁止在食物中掺假;1872年颁布了《严禁食品或饮料掺假法》,后几经补充修改,于1955年通过《食品与药物法》。1906年美国制定《纯洁食品与药物法》,1979年通过修订的《食品、药品、化妆品法》。世界卫生组织和联合国粮农组织(FAO)发起,开展了食品卫生管理的国际合作,建立国际性的食品法规联合委员会,主要制定世界性食品卫生标准,向各国政府提供建议;对农药残留量、食品添加剂等开展毒理学研究和评价,规定最高容许量标准;帮助参加国培训人才等工作,尽可能在食品卫生立法,食品卫生标准以及有关理论、方法学等方面取得一致或近似的看法,使国际间的食品供求工作得以顺利进行。

中国自周代的《周礼》始,历代文献均有关于食品卫生立法的记载。1953年,卫生部颁发了新中国建国后第1个食品卫生法规《清凉饮食物管理暂行办法》;1965年卫生部、商业部等联合颁布《食品卫生管理试行条例》;1979年国务院制定颁布了《中华人民共和国食品卫生管理条例》。1982年11月19日,五届全国人大常委会第25次会议通过了《中华人民共和国食品卫生法(试行)》,并于1983年7月1日起在全国试行。

食品卫生法规定,凡在中华人民共和国领域内从事食品生产经营的都必须遵守食品卫生法。食品卫生法适用于一切食品、食品添加剂、食品容器、包装材料和食品用工具、设备,也适用于食品生产经营的场所、设施和有关环境。对违反《食品卫生法(试行)》的主要内容有:食品必须符合卫生规定,食品应当无毒、无



害,符合应当有的营养要求,具有相应的色、香、味等感官性状。与食品卫生密切相关的食品添加剂、食品强化剂、食品容器、包装材料、食品用具、设备以及生产、经营管理办法,应符合有关卫生规定,食品不得加入药物,按照传统既是食品又是药品以及作为调料或者食品强化剂加入的除外。专供婴幼儿的主、辅食品,必须符合国务院卫生行政部门制定的营养、卫生标准。(2)实行卫生许可证制度。食品生产经营企业和食品商贩,必须先取得卫生许可证。可向工商部门申请开业登记或变更登记。申请发放卫生许可证时,食品生产经营者必须接受食品卫生监督机构的预防性审查,即将食品卫生方面的问题控制在生产和经营开始之前,对生产经营条件不符合卫生要求者,食品卫生监督机构可以提出改进意见,符合卫生要求后发放卫生许可证。对已经取得卫生许可证的严重违反食品卫生法者,食品卫生监督机构报经县以上人民政府批准,可吊销其卫生许可证,同级工商行政管理部门同时吊其营业执照。(3)实行国家和地方两级食品卫生标准制度。食品卫生法规定,国家卫生标准、卫生管理办法和检验规程,由国务院卫生行政部门制定或者批准颁发。国家未制定卫生标准的食品,省、自治区、直辖市人民政府可以制定地方卫生标准,报国务院卫生行政部门备案。(4)食品采购证制度。生产经营者采购食品,应当按照国家有关规定索取的范围和种类由省、自治区、直辖市卫生行政部门规定。(5)食品新资源审批制度。利用新资源生产的食品、食品添加剂的新品种,生产经营者在投入生产前,必须提出该产品卫生评价和营养评价所需的资料;利用新的原材料生产食品容器、包装材料和食品用具、设备的新品种,生产经营者在投入生产前,必须提出该产品卫生评价所需的资料。上述新品种在投入生产前还需提供样品,交按照规定的食品卫生标准审批程序报请审批。(6)从业人员定期健康检查制度。食品卫生法规定,食品生产经营人员每年必须进行健康检查,新参加工作和临时参加工作的食品生产经营人员必须进行健康检查,取得健康证后方可参加工作。凡患有痢疾、伤寒、病毒性肝炎等消化道传染病(包括病原携带者)、活动性肺结核、化脓性的或者渗出性的皮肤病以及其他有碍食品卫生的疾病的,不得参加接触直接入口食品的工作,以防止患病的从业人员对食品造成污染。(7)食物中毒报告制度。食物中毒事故往往中毒病人多、病情急、进展快、社会影响大。食品卫生法规定,发生食物中毒的单位及接收病人进行治疗的单位,除采取抢救措施外,应当根据国家有关规定,及时向所在地食品卫生监督机构报告,以便及早弄清中毒原因,采取紧急控制措施,防止食物中毒的继发和扩展。(8)实行食品卫生监督制度。食品卫生法规定,各级卫生行政部门领导食品卫生监督工作。县级以上防疫站或者食品卫生监督检验所为食品卫生监督机构。食品卫生监督员由合格的专业人员担任,由同级人民政府发放证书。为了搞好预防性卫生监督,食品卫生法规定,食品生产经营企业的新建、扩建、改建工程的选址和设计应当符合卫生要求,其设计审查和工程验收必须有食品卫生监督机构参加。

食品卫生法规定,违反食品卫生法的行为人,应负以下责任:(1)行政责任。对违反食品卫生法情节较重的,食品卫生监督机构可以给予以下行政处罚:警告并限期改进;责令追回已售出的禁止生产经营的产品;没收或者销毁禁止生产经营的食品、食品添加剂;罚款;责令停业改进;吊销卫生许可证。吊销卫生许可证或者罚款5000元以上,必须经县以上人民政府批准。上述各项行政处罚可以单独或者合并适用。没收的物品由食品卫生监督机构监督处理。(2)民事责任。违反食品卫生法造成食物中毒事故或者其他食源性疾患的,应当负损害赔偿责任。受害人有权要求损害赔偿,由县以上卫生行政部门处理。当事人不服的,可以向人民法院起诉;也可以由受害人或者其代理人直接向人民法院起诉。损害赔偿包括医药费、误工工资、生活补助费、丧葬费、亲属抚恤费。损害赔偿要求,应当从受害人或其代理人知道或应当知道被损害情况之日起1年内提出,超过期限的不予受理。(3)刑事责任。违反食品卫生法造成严重食物中毒事故或者其他严重食源性疾患,致人死亡或者致人残疾而丧失劳动能力的,根据不同

情节,对直接责任人员分别依照中华人民共和国刑法的规定,追究其刑事责任。对情节较轻,依照中华人民共和国刑法规定可以免于刑事处罚的,由主管部门酌情给予行政处分。

(上海医科大学刘本仁教授撰)

**传染病防治法** infectious diseases control law 传染病防治法是调整因预防、控制和消除传染病的发生和流行,保障人体健康活动中产生的各种社会关系的法律规范的总称。

传染病指有致病性的各种病原体或毒素从受感染的人、动物或宿主传染给易感者所引起的疾病。传染病具有传染性、流行性和反复性、突发性等特点,不仅威胁公民个人的健康和生命,而且对人群和社会构成威胁和危害。

中华人民共和国成立后,人民政府大力开展传染病防治工作。1955年国务院批准颁发了《传染病管理办法》,1978年又修订改为《急性传染病管理条例》。这些办法和条例,对中国传染病的预防和控制,特别在消除古典型霍乱、消灭天花和控制鼠疫以及其它一些严重传染病流行方面,起到了重要作用。1989年2月21日,第7届全国人民代表大会常务委员第六次会议通过了《中华人民共和国传染病防治法》,并于1989年9月1日起施行。1991年12月6日,经国务院批准,卫生部发布了《中华人民共和国传染病防治法实施办法》。传染病防治法在总结新中国建立以来传染病防治工作贯彻预防为主方针的实践经验基础上,借鉴国外传染病防治工作的经验,对传染病的预防、疫情的报告和公布、控制、监督以及法律责任等作了明确规定。凡在中华人民共和国领域内的一切单位和个人,必须接受医疗保健机构、卫生防疫机构有关传染病的查询、检验、调查取证以及预防控制措施,并有权检举、控告违反传染病防治法的行为。

传染病防治法的主要内容是:

**传染病的分类** 传染病防治法从中国国情出发,根据传染病的危害程度和应采取的监督、监测、管理措施,参照国际上统一分类的标准,将全国发病率较高、流行面较大、危害严重的35种急性的和慢性的传染病列为法定管理的传染病,并分为甲、乙、丙三类,实行分类管理。甲类是指强制管理的传染病:鼠疫、霍乱。乙类是指严格管理的传染病:病毒性肝炎、细菌性和阿米巴性痢疾、伤寒和副伤寒、艾滋病、淋病、梅毒、脊髓灰质炎、麻疹、百日咳、白喉、流行性脑脊髓膜炎、猩红热、流行性出血热、狂犬病、钩端螺旋体病、布鲁氏菌病、炭疽、流行性和地方性斑疹伤寒、流行性乙型脑炎、黑热病、疟疾、登革热。丙类是指监测管理的传染病:肺结核、血吸虫病、丝虫病、包虫病、麻风病、流行性感冒、流行性腮腺炎、风疹、新生儿破伤风、急性出血性结膜炎,还包括除霍乱、痢疾、伤寒和副伤寒以外的感染性腹泻病。国务院可以根据情况增加或者减少甲类传染病病种,国务院卫生行政部门可以根据情况增加或者减少乙类、丙类传染病病种。

**传染病预防的规定** 传染病预防是传染病管理工作中一项极其重要的措施。传染病防治法规定,要开展预防传染病的卫生健康和爱国卫生活动,实行有计划的预防接种,加强传染病病菌(毒)种管理,控制传染病与自然疫源地,做好受病原体污染物的卫生处理。

**疫情的报告和公布** 及时、准确、完整地报告疫情对于正确地通报和公布疫情,及时控制传染病有重要意义。传染病防治法规定,任何人发现传染病病人或者疑似传染病病人时,都应当及时向附近的医疗保健机构或者卫生防疫机构报告。执行职务的医疗保健人员、卫生防疫人员为责任疫情报告人。责任疫情报告人发现甲类的、乙类的和监测区域内的丙类传染病病人、病原携带者或者疑似传染病病人,必须按照国务院卫生行政部门规定的时限向当地卫生防疫机构报告疫情。发现甲类传染病和乙类传染病中的艾滋病、肺炎疽病人及其疑似病人时,城镇于6h内,农村于12h内报出疫情;发现乙类传染病病人及其疑似病人时,城镇于12h内,农村于24h内报出疫情;发现传染病暴发、流行时,应尽快报告。卫生防疫机构发现传染病流行或者接到甲类传染病和乙类

传染病中的艾滋病、炭疽中的肺炭疽的疫情报告,应当立即报告当地卫生行政部门,由当地卫生行政部门立即报告当地政府,同时报告上级卫生行政部门和国务院卫生行政部门。

公布和通报疫情,能增强个人的和群体的防护意识,有利于加强全社会的协同动作,更好地预防和控制传染病的发生与流行,同时也是中国作为世界卫生组织成员国所必须承担的国际义务。传染病防治法规定,国务院卫生行政部门应当及时地如实通报和公布疫情,并可以授权省、自治区、直辖市政府卫生行政部门及时地如实通报和公布本行政区域的疫情。

**传染病控制的规定** 传染病防治法对于传染病控制的规定包括:(1)强制隔离治疗:对甲类传染病病人和病原携带者,乙类传染病中的艾滋病病人、炭疽中的肺炭疽病人,予以隔离治疗。隔离期限由医学检验结果确定。凡拒绝隔离治疗或者隔离期未满擅自脱离治疗的,可以由公安部门协助隔离单位采取强制隔离治疗措施。(2)强制医学观察:对疑似甲类传染病病人,在明确诊断前,应强制其在指定场所接受医学观察。(3)控制传播措施:对除艾滋病病人、炭疽中的肺炭疽病人以外的乙类、丙类传染病病人,根据病情采取必要的治疗和传播的措施;对传染病病人、病原携带者、疑似传染病病人污染的场所、物品和密切接触的人员,实施必要的卫生处理和预防措施。(4)紧急控制措施:这是为了控制传染病暴发、流行时影响群众生产、生活及人身自由的重大行政措施,包括限制或者停止集市、集会、影剧院演出或者其他人群聚集的活动;停工、停业、停课;临时征用房屋、交通工具;封闭被污染的公共饮用水源。(5)宣布疫区和疫区封锁:甲类、乙类传染病暴发、流行时,县级以上地方政府报经上一级地方政府决定,可以宣布疫区,在疫区内采取各项紧急控制措施,并可以对出入疫区的人员、物资和交通工具实施卫生检疫。对甲类传染病疫区,可由省、自治区、直辖市政府决定实行疫区封锁。封锁大中城市的地区或者跨省、自治区、直辖市的疫区,以及封锁疫区导致中断干线交通或者封锁国境的,由国务院决定。(6)尸体的强制措施:患鼠疫、霍乱和炭疽死亡的病人,必须将尸体立即消毒,就近火化。患其它传染病死亡的,如病毒性肝炎、伤寒、副伤寒、艾滋病、白喉、脊髓灰质炎的病人尸体亦应消毒后火化。在不具备火化条件的农村、边远地区,尸体消毒后,可选远离居民点500m以外、远离饮用水源50m以外的地方,距地面2m以下深埋。医疗保健机构、卫生防疫机构必要时可以对传染病病人尸体或者疑似传染病病人尸体进行解剖查验。

**传染病防治工作的领导和监督管理** 传染病防治法规定,各级政府领导传染病防治工作,制定传染病防治规划,并组织实施。各级政府卫生行政部门对传染病防治工作实行统一监督管理,有权对传染病的预防、治疗、监测、控制和疫情管理措施监督、检查;责令被检查单位或者个人限期改进传染病防治管理工作,对违反传染病防治法的行为给予行政处罚。国务院卫生行政部门可以委托其他有关部门卫生主管机构,在本系统内行使上述职权。各级各类卫生防疫机构按照专业分工承担责任范围内的传染病监测管理工作。各级政府卫生行政部门和受国务院卫生行政部门委托的其他有关部门卫生主管机构以及各级各类卫生防疫机构内设立的传染病管理监督员,执行卫生行政部门或者其他有关部门卫生主管机构交付的传染病监督管理任务。传染病管理监督员由合格的卫生专业人员担任,由省级以上政府卫生行政部门聘任并发给证件。

**法律责任** 传染病防治法规定,对于实施违反传染病防治法规定的行为,按照行为的性质及给社会造成的危害程度,可依法追究行为人的行政责任或刑事责任。(1)行政责任:违反传染病防治法的有关规定,由县级以上政府卫生行政部门责令限期改正,可以处以罚款;有造成传染病流行危险的,由卫生行政部门报请同级政府采取强制措施。(2)刑事责任:违反传染病防治法的有关规定引起甲类传染病传播或者有传播危险的;从事实验、保藏、携带、运输传染病菌种、毒种的人员,违反国务院卫生行政部门的有关规定,造成传染病菌种、毒种扩散,后果严重的,从事传

染病的医疗保健、卫生防疫、监督管理的人员和政府有关主管人员玩忽职守,造成传染病传播或者流行,情节严重,构成犯罪的,分别依照或比照中华人民共和国刑法的有关规定追究刑事责任。

#### 参考文献

- 1 新中国预防医学历史经验(第3卷).北京:人民卫生出版社
- 2 陈明光,刘本仁,曹开宾,达庆东.北京:中国科学技术出版社
- 3 刘本仁.法学概论与卫生法.上海:上海科技出版社
- 4 陈明光,刘本仁.卫生法学.上海医科大学出版社

(上海医科大学刘本仁教授撰)

### 国境卫生检疫法 frontier health quarantine law

国境卫生检疫法是调整因防止传染病由国外传入或由国内传出,实施国境卫生检疫,保护人体健康活动中产生的各种社会关系的法律规范的总称。

“检疫”一词系从意大利文 quaranta 演变而来,原是指对传染病患者或染疫船舶隔离40d的意思,它是对可能与传染病病源接触过的人或其他生物的活动加以限制,直到确认他们未曾受感染为止的一种措施。国境卫生检疫是在一个国家国际通航的港口、机场、车站、陆地边境和国界江河的口岸(简称国境口岸)设立国境卫生检疫机关,实施传染病检疫、监测和卫生监督的综合措施。国境卫生检疫的对象是入境、出境的人员、交通工具、运输设备以及可能传播传染病的行李、货物、邮包等物品。国境卫生检疫法对维护国家的主权和尊严,控制国际间传染病的传播,保障人体健康具有重要的作用。

国境卫生检疫是随着交通工具的发展和疾病传播而产生的一种防疫措施。14世纪中叶,由于航海贸易的发展,鼠疫由东方侵入地中海沿岸的国家和地区。为了防止鼠疫的传播,1374年威尼斯首先颁布对所有来往客商,无论是已受感染的或有感染嫌疑的一律不准进城的规定。1448年威尼斯港成立检疫站,规定疫船或疫区来船必须在检疫锚地停留40d。1710年英国实施检疫制度后,各国相继仿效成立检疫机构,实施国境卫生检疫。1878年美国颁布《全国检疫法》,执行港口检疫。为了有效地防止传染病的传入,控制疾病在国际间的传播,世界各国必须共同采取行动,制定有效的防御措施。1851年在巴黎召开了第一次国际卫生会议,签订了第1个国际卫生规则,规定对进出港口的船舶要实施检疫、消毒隔离等措施。1951年第四届世界卫生大会通过了《国际公共卫生条例》。1969年,第22届世界卫生大会对《国际公共卫生条例》作了较大修改,更名为《国际卫生条例》,成为各个会员国共同参照的卫生检疫标准。

中国的国境卫生检疫始于1873年,但检疫主权掌握在外国人手里。中华民国时期,在上海成立了海港检疫管理处,收回了检疫管理权;1930年公布了《海港检疫章程》。中华人民共和国成立后,1950年颁布了《交通检疫暂行办法》;1957年12月由全国人民代表大会常务委员会通过颁布了《中华人民共和国国境卫生检疫条例》;1986年12月2日,第六届全国人民代表大会常务委员会第十八次会议通过了《中华人民共和国国境卫生检疫法》,1987年5月1日起施行。国境卫生检疫法是在总结建国以来国境卫生检疫工作的经验基础上,参照《国际卫生条例》和国际惯例而制定的。1989年3月6日,经国务院批准,卫生部发布了《中华人民共和国国境卫生检疫法实施细则》。1979年6月,中国正式承认《国际卫生条例》,因此,国境卫生检疫还要履行《国际卫生条例》中规定的成员国的义务和责任。国境卫生检疫法规定,中华人民共和国缔结或者参加的有关卫生检疫的国际条约同本法有不同规定的,适用该国际条约的规定;但是,中华人民共和国声明保留的条款除外。

国境卫生检疫法的主要内容:

**法定的传染病** 国境卫生检疫法规定的传染病有两类。一类是检疫传染病,有鼠疫、霍乱、黄热病,这与《国际卫生条例》规定完全一致;为了保留我国今后宣布新检疫传染病的独立性和机动性,国境卫生检疫法授权国务院确定和公布其它检疫传染病。

另一类是监测传染病,由国务院卫生行政部门确定和公布。1980年6月,中国卫生部将世界卫生组织推荐监测的疟疾、回归热、流行性感、麻疹伤寒、小儿麻痹症和中国南方有流行的登革热列为监测传染病。近年来,艾滋病在世界范围广泛传播,并已传入中国。因此,卫生部已确定艾滋病为监测传染病,并于1987年12月经国务院批准,由卫生部、外交部、公安部、国家旅游局等联合发布了《艾滋病监测管理的若干规定》。

**疫情报告与通报制度** 国境卫生检疫机关发现检疫传染病或者疑似检疫传染病时,除采取必要措施外,必须立即通知当地卫生行政部门,同时用最快速的方法报告国务院卫生行政部门,最迟不得超过24h。中华人民共和国与外国之间的传染疫情通报,由国务院卫生行政部门会同有关部门办理。在国内或者国外某一地区发生检疫传染病流行时,国务院卫生行政部门可以宣布该地区为疫区;对疫区实行边境封锁或者采取其他紧急措施,由国务院决定并宣布。

**传染病检疫制度** 传染病检疫是防止传染病传播所采取的卫生措施。入境的交通工具和人员,必须在最先到达的国境口岸的指定地点接受检疫。除引航员外,未经国境卫生检疫机关许可,任何人不得上下交通工具,不准装卸行李、货物、邮包等物品。出境的交通工具和人员,必须在最后离开的国境口岸接受检疫。国境卫生检疫机关发现检疫传染病的染疫人,必须立即将其隔离,隔离期限根据医学检验结果确定;对检疫传染病染疫嫌疑人实施就地诊验或者留验,留验期限根据该传染病的潜伏期确定。对患检疫传染病而死亡的尸体必须就近火化。对来自检疫传染病疫区,或被检疫传染病污染,或发现有与人类健康有关的啮齿动物或者病媒昆虫的交通工具、行李、货物和邮包等,实施消毒、除鼠、除虫或者其他卫生处理。国境卫生检疫机关依据检疫医师提供的检疫结果,对于未染有检疫传染病或者已实施卫生处理的交通工具,签发入境检疫证或者出境检疫证。检疫证书是国际交通工具的通行证,没有检疫证书的交通工具不得入境或出境。对具有外交身份的旅行者,按照《国际卫生条例》规定,不享有国际检疫豁免权。如其不具有必要的预防接种证书,根据情况,可予以实施就地诊验、留验或者隔离。《中华人民共和国外交特权与豁免条例》规定外交代表的私人行李免受查验,但检疫法规规定管制的物品,可以查验。

**传染病监测规定** 传染病监测是对法定的监测传染病进行调查、研究和预测,并采取必要的预防、控制措施。传染病监测的对象包括入境的、出境的交通工具、人员、食品、饮用水和其他物品以及病媒昆虫、动物等。接受入境、出境检疫的人员,必须根据检疫医师的要求,如实填报健康申明卡,出示某种有效的传染病预防接种证书、健康证明或者其他有关证件。国境卫生检疫机关应当阻止所发现的患有艾滋病、性病、麻风病、精神病、开放性肺结核病的外国人入境。对患有监测传染病的人、来自国外监测传染病流行区的人或者与监测传染病病人密切接触的人,国境卫生检疫机关应当区别情况,发给就诊方便卡,实施留验或者采取其他预防、控制措施,并及时通知当地卫生行政部门。

**卫生监督制度** 卫生监督是国境卫生检疫机关执行卫生法规和卫生标准所进行的卫生检查、卫生鉴定、卫生评价和采样校验。卫生监督范围包括对国境口岸、交通工具和食品饮用水的卫生监督。国境卫生检疫机关设立的国境口岸卫生监督员,执行国境卫生检疫机关交给的任务。国境口岸卫生监督员在执行任务时,对国境口岸和入境、出境的交通工具进行卫生监督和技术指导,对卫生状况不良可能引起传染病传播的因素提出改进意见,协同有关部门采取必要的措施,进行卫生处理。

**法律责任** 对违反国境卫生检疫法,逃避检疫,隐瞒实际情况的,国境卫生检疫机关可以根据情节轻重,给予警告或者罚款处罚。对引起检疫传染病传播或者有引起检疫传染病传播严重危险的,依照《中华人民共和国刑法》第178条规定:“违反国境卫生检疫规定,引起检疫传染病的传播,或者有引起检疫传染病传播严重危险的,处3年以下有期徒刑或者拘役,可以并处或者单

处罚金”。

(上海医科大学达庆东副教授撰)

**药品管理法** drug administration law 调整监督管理药品的生产、经营、使用、进出口,保证药品质量,增进药品疗效,保障用药安全等活动中产生的各种社会关系的法律规范的总称。

药品指用于预防、治疗、诊断人的疾病,有目的地调节人的生理机能并规定有适应症、用法和用量的物质,包括中药材、中药饮片、中成药、化学原料药及其制剂、抗生素、生化药品、放射性药品、疫苗、血液制品和诊断用药品等。药品是用于防病治病,抢救病人的一种特殊商品,其质量不好、品种不全、数量不足,使用不当,就会导致贻误病情、危害健康,直至致命。世界卫生组织公布的资料表明,世界上有1/3因病死亡者,其实并不是疾病本身所致,而是死于不合理用药。1938年,美国的磺胺剂造成107人中毒死亡;在日本,因长期服用8-羟基喹啉,有8000多人失明或下肢瘫痪;60年代初,联邦德国的“反应停”药害案,造成了10000名婴儿畸形;1991年统计,中国1770万聋人中有300万是应用耳毒性药物致聋的。

为保证用药安全有效,世界卫生组织和各国政府都设有药品管理机构,并通过药品立法对药品进行严格的监督和管理。美国国会于1848年通过禁止药物掺假的法令;1906年由西奥多·罗斯福总统签署了《纯净食品与药物法》;1980年5月国会能过修订的《美国联邦食品、药品、化妆品法》。英国议会于1955年通过《食品与药物法》,并在对所有有关药品管理法规进行检查的基础上,1968年颁布了《药品法》。日本议会于1874年公布药政法规,1943年制定药事法,1979年通过修订的《药事法》,并于1980年施行。世界卫生组织在药品质量控制方面,倡导药品生产质量管理规范制度(Good Manufacturing Practice, GMP),编辑出版国际药典,建立药品的国际质量标准,主持药品的统一国际命名,出版“Pharmaceutical Information”,通报有关药品功效和安全的情报。联合国订立了《1961年麻醉品单一公约》、《1971年精神药物公约》和《禁止非法贩运麻醉药品和精神药物公约》(1988年)。

中国古代就注意药品管理。唐朝设有药藏局,规定由药师管理并修订颁发了《新修本草》作为国家药品法典。宋朝设有“和剂局”,元朝设有典药局,由政府经营制药、卖药,并使用国家组织编修和颁布的方剂、本草为制药、卖药之依据。清《新刑律》规定,对合药不如本方、违方治疗疾病、封题错误者要法办。国民政府建立后,先后公布了《药师暂行条例》(1929年1月)、《修正麻醉药品管理条例》(1929年4月)、1930年出版《中华药典》。中华人民共和国成立后,1963年经国务院批准,卫生部颁布了《关于加强药政管理的若干规定》;1979年国务院批准下达《药政管理条例》(试行)。1984年9月20日,第6届全国人民代表大会常务委员会第7次会议通过了《中华人民共和国药品管理法》,1985年7月1日起施行。此后,国务院批准颁布了《中华人民共和国药品管理法实施办法》(1989年2月)、《麻醉药品管理办法》(1987年11月)、《医疗用毒性药品管理办法》(1988年12月)、《精神药品管理办法》(1988年12月)、《放射性药品管理办法》(1989年1月)等配套法规;卫生部制定发布了《新药审批办法》(1985年7月)、《新生物制品审批办法》(1985年7月)、《药品监督员工作条例》(1987年3月)、《药品生产质量管理规范》(1988年3月)、《医院制剂管理办法》(1989年3月)、《进口药品管理办法》(1990年11月)、《药品广告管理办法》(1991年6月)等配套规章。此外,1985年中国加入了联合国《1961年麻醉品单一公约》和《1971年精神药物公约》,1989年又加入联合国《禁止非法贩运麻醉药品和精神药物公约》,从而成为国际公约的重要参加国之一。

《中华人民共和国药品管理法》对药品生产企业、药品经营企业、医疗单位的制剂管理、一般药品和特殊药品的管理、药品的包装、分装、商标、广告以及药品监督和违法者应负的法律等作了具体规定。它适用于中国领域内的药品生产经营企业、医疗单位、科学研究单位,不论是国营的、集体的,还是中外合资经营

的、外资兴办的以及医药商、个体开业医。

《中华人民共和国药品管理法》的主要内容有：(1)实行许可证制度。为了加强对药品的监督和管理、保证药品的质量、杜绝生产、销售假药、劣药。药品管理法规定，凡开办药品生产企业，须经所在省、自治区、直辖市卫生行政部门申请批准，发给“药品生产企业许可证”；开办药品生产、经营企业凭“许可证”到工商行政管理部门办理“营业执照”。无“许可证”者，工商行政管理部门不得发给“营业执照”；办理“许可证”前，应事先取得当地药品生产主管部门的同意。医疗单位配制制剂须经所在省、自治区、直辖市卫生行政部门审查批准，发给“制剂许可证”。“药品生产企业许可证”、“药品经营企业许可证”、“制剂许可证”的有效期限由国务院卫生行政部门规定，到期重新审查，合格者发证，不合格者责令限期改进，改进后不合格者不发许可证。(2)实行国家的地方两级药品管理标准制度。药品管理法规定，国务院卫生行政部门颁布的《中华人民共和国药典》和药品标准为国家药品标准；国家药品标准中没有列入的其他药品，省、自治区、直辖市可以制定地方性药品标准。凡符合国家药品标准或者省、自治区、直辖市药品标准的药品，方可在国内销售。(3)新药审批制度。新药是中国未生产过的药品，包括国内外均未生产过的药品，国外已有生产或仅有资料报道的仿制药品，以及由一般药品配伍的新组方药品。国家鼓励研究、创制新药。药品管理法规定，研制新药须经国务院或者省、自治区、直辖市卫生行政部门批准。完成临床试验或者临床验证并通过鉴定的新药，由国务院卫生行政部门批准，发给证书。新药投入生产，须经国务院卫生行政部门批准，并发给批准文号。但是生产中药饮片除外。国务院卫生行政部门和省、自治区、直辖市可成立药品审评委员会，对新药进行审评，以加强药品质量管理。(4)药品淘汰制度。对已生产、销售，但经过使用证明疗效不确，不良反应大或者其他原因危害人民健康的药品，国务院卫生行政部门决定撤销其批准文号，停止生产和销售。药品淘汰前，须经药品审评委员会对已经生产的药品进行再评价。国务院卫生行政部门作出淘汰药品的决定，具有法律效力，全国必须遵照执行。已被撤销批准文号的药品，不得继续生产、销售；已经生产的，由当地卫生行政部门监督销毁或者处理。不执行的，按制售假药处理。(5)特殊药品特殊管理制度。国家对麻醉药品、精神药品、毒性药品、放射性药品实行特殊的管理。特殊药品的标签必须印有规定的标志。麻醉药品，包括原植物，只准由国务院卫生行政部门会同有关部门指定的单位生产，并由省、自治区、直辖市卫生行政部门会同有关部门指定的单位按照规定供应。进口、出口麻醉药品和国务院卫生行政部门规定范围内的精神药品，必须持有国务院卫生行政部门发给的“进口许可证”和“出口许可证”。对国家特殊管理的药品，由国务院制定具体管理办法。(6)从业人员定期健康检查制度。药品管理法规定，药品生产企业、药品经营企业和医疗单位直接接触药品的工作人员，必须每年进行健康检查。患有传染病或者其他可能传染药品的疾病的患者，不得从事直接接触药品的工作，以防止药品污染后成为传播疾病的媒介，危害人体健康。(7)实行药品监督制度。国务院卫生行政部门主管全国药品监督管理工作，县级以上卫生行政部门行使药品监督职权。县以上卫生行政部门可以设置药政机构和药品检验机构，承担具体的药品监督管理和监督检验任务。县以上卫生行政部门设药品监督员。药品监督员由药学技术人员担任，由同级人民政府审核发给证书。药品监督员有权按照规定对辖区内的药品生产企业、药品经营企业和医疗单位的药品质量进行监督、检查、抽验，必要时可以按照规定抽取样品和索取有关资料，有关单位不得拒绝和隐瞒。药品监督员对药品生产企业和科研单位提供的技术资料，负责保密。药品监督机构有权调查药物中毒事故；调查和监督处理假劣药；对违反药品管理法的行为，依法予以行政制裁。

药品管理法规定，违反药品管理法所应承担的法律责任按照违法行为的性质以及轻重不同分为行政责任、民事责任和刑事责任。(1)行政责任。对违反药品管理法者，根据情节轻重，县以

上卫生行政部门可以给予警告、罚款、没收假劣药品和非法所得，责令停产、停业整顿或者吊销许可证。以上处罚可以单处，也可以并处。处以停产、停业7d以上或者吊销“药品生产企业许可证”、“药品经营企业许可证”的，需报同级人民政府决定。(2)民事责任。违反药品管理法，造成药品中毒事故的，致害单位或者个人应当负损害赔偿责任，受害人可以请求县级以上卫生行政部门处理；当事人不服的可以向人民法院起诉。受害人也可以直接向人民法院起诉。损害赔偿要求，应当从受害人或者其代理人知道或者应当知道之日起1年内提出，超过期限的，不予受理。(3)刑事责任。对生产销售假药，危害人体健康的个人或者单位直接责任人员，要追究刑事责任。对生产、销售劣药，危害人体健康，造成严重后果的个人或者单位直接责任人员，也要追究刑事责任。

(上海医科大学达庆东撰)

**卫生服务研究** health services research 探讨卫生服务与提高居民健康状况的关系，寻找改善卫生系统的功能及提高卫生事业效益的途径，为合理组织卫生事业提供科学依据，是卫生服务研究的主要任务。卫生服务研究人员普遍关心的三个问题是：提高卫生服务的普及程度和群众利用卫生服务的水平，降低医疗费用，提高卫生事业的经济效益；提高卫生服务的质量。卫生服务研究的结果可以为解决上述问题提供基本理论及方法。

卫生服务研究、生物医学研究和行为医学研究是卫生科学研究的3个组成部分。美国卫生服务研究工作得到卫生行政部门、科学研究单位和教育机构的重视。联邦卫生人类服务部下属八个直属研究机构之一的，国家卫生服务研究中心，负责全国卫生服务研究的计划、组织、协调、实施、研究经费分配、成果评价等。约翰霍普金斯大学成立了卫生服务发展研究所，对卫生服务的理论和方法进行系统研究。美国20多所公共卫生学院开设卫生服务的研究课题；哈佛大学成立了由医学院、公共卫生学院、管理学院等组成的卫生服务研究所，在医学、技术、经济、管理和行为等领域重点研究科学技术应用于卫生服务。英国卫生部门科学研究事业分为两类：生物医学科学由科学院管理；卫生服务研究，由卫生部门领导。世界卫生组织提出的卫生系统研究的含义与卫生服务研究相同，研究目的、内容和方法与卫生服务研究相似。专家委员会提出卫生系统研究的目的是：改进卫生系统工作，提高卫生服务的效益，应用社会科学知识，促进生物医学知识应用于卫生系统；推动多学科、多部门协作；采用调查方法收集信息；提供制订卫生计划及决策的基本程序与方法等。世界卫生组织提出卫生服务研究的内容包括：社会因素对卫生系统的影响，评价人群医疗需要量，合理分配和使用卫生资源、卫生系统的组织结构，提供卫生服务、经济支持、组织管理，社区参与以及测定卫生工作的结果。

中国卫生服务研究工作起始于1981年。第1阶段是中美卫生科技合作在上海县进行卫生服务描述性研究。第2阶段是推广上海县卫生服务研究的经验。1985~1986年，全国性的农村和城市卫生服务调查在10个省内开展，10年期间全国统计有150个省、市进行了卫生服务抽样调查。第3阶段卫生服务研究从描述性研究向分析性研究发展，研究范围从医疗向卫生防疫、妇幼卫生等方向发展，逐步向医疗保健制度、卫生人力需要量预测等方向发展。

中国卫生服务研究已经形成比较完善的体系，主要内容包括：(1)医疗需要量是人群健康状况的客观反映，根据人群患病率和疾病严重程度提出对门诊、住院、预防保健和疗养康复服务的客观需求。反映疾病频度的统计指标有：两周每千人患病人数，每千人患慢性病人数；反映疾病严重程度的统计指标有：每千人患两种及两种以上疾病人数、每千人患重病人数，两周每千人因病卧床人数及天数，两周每千人患病天数，反映因病丧失劳动能力的统计指标有：两周每千人因病伤休息工人数及天数，两周每千学生因病伤休学人数及天数等。(2)卫生服务利用的是综合

描述卫生系统工作的客观指标,反映门诊服务利用的指标有:两周就诊率、患者就诊率、未就诊率、年人均门诊次数及未就诊原因等;反映住院服务利用的指标有:每千人口年住院率、每千人口住院天数、年人均住院天数、未住院率以及未住院原因等;反映预防服务利用的主要指标有:四苗接种覆盖率、孕产妇系统管理率、健康儿童系统管理率以及生长发育监测率等。(3)卫生人力、费用、设施、装备、信息和知识技术是卫生资源的重要组成部分。衡量一个国家或地区卫生资源的主要指标有:每千人口卫生技术人员数、每千人口医师数、每千人口病床数、年人均卫生事业费、卫生经费占国民生产总值百分比、卫生事业费占财政支出百分比等。

卫生服务研究的主要任务是分析社会卫生状况,了解人群的卫生服务需求,分析卫生部门可能提供的资源,提高卫生服务利用率,最大限度满足人群的卫生服务需要。卫生服务研究是从卫生服务的提供者、接受者和决策者三方面相互联系,研究卫生部门为了一定目的使用卫生资源,向居民提供卫生服务(医疗、预防、保健、疗养康复服务等)的过程。

卫生服务研究的方法主要有:描述性研究、分析研究、实验性研究、理论研究、系统分析研究、综合评价研究、投入产出研究、发展预测研究等。

卫生服务研究的理论和方法一旦和实际问题相结合,就可以推动卫生事业科学管理的进程,为卫生事业改革提供科学依据。卫生服务抽样调查是提供卫生信息的基本手段,正在从一次性抽样调查向重复抽样调查及连续性抽样调查的方向发展,成为一种制度化的卫生信息收集方法。卫生服务研究提供信息,可以为确定工作重点,制订卫生政策、卫生计划和评价提供科学依据。卫生资源分配(人力、病床、经费等)应该建立在测定服务需要量的基础上,而服务需要量应该满足人群的医疗卫生需要,即对人群健康状况进行科学分析。根据上述原理,中国正在开展的卫生人力需要量预测、医疗成本核算,改革社会保障制度如推行健康保险及集资医疗制度等,都需要应用卫生服务研究的成果。

#### 参考文献

- 1 顾杏元、龚幼龙,社会医学,上海:上海医科大学出版社,1990,9:86~102
- 2 Thomas Choi, Jay N. Greenberg Social Science Approaches to Health Services Research, Health Administration Press Ann Arbor, Michigan 1982
- 3 龚幼龙. 卫生服务研究, 卫生管理函授学院, 1987  
(上海医科大学龚幼龙教授撰)

**卫生人力发展** 卫生人力,是指经过卫生职业训练能够根据人民群众需要而提供卫生服务的人员。卫生人力是反映一个国家卫生服务水平的重要指标。在卫生资源中,卫生人力起着决定性作用。卫生人力的数量、质量、结构、分布、使用和管理直接影响卫生服务的数量和质量,也影响卫生服务系统的发展,影响社会需求的满足程度。

发达国家和发展中国家都十分重视卫生人力发展研究。70年代以前,研究侧重于增加卫生人力的数量,提高教学质量,探索比较统一的训练卫生人员的标准,促进卫生人力合理分布;70年代以后,逐步应用现代计划技术制订卫生人力发展规划,对卫生人力规划、培训和管理重新定向,使卫生人力发展适应卫生服务的需要,为2000年人人享有卫生保健的战略目标服务。

中国卫生人力的系统研究起步较晚。1983年,卫生部使用多元线性回归模型对全国卫生人力需要量进行预测,江苏、吉林两省也开展了卫生人力需要量预测研究工作。以后在研究内容和方法上都有发展,卫生人力需要量预测方法从单一预测方法发展到利用综合性预测方法,如应用“医院规划模型”预测2000年全国的和西藏自治区的卫生人力需要量;预测对象从卫生人员总量预测扩大为对医疗、防疫、妇幼保健及各种专科医师需要量预测;研究范围从单纯需要量预测扩展为需要量、供应量预测,探求卫生人员供需平衡的途径;研究内容从人力规划扩大为培训规划

和管理,将卫生人力发展的3个组成部分作为一个有机整体来研究,如世界银行卫生IV贷款项目,在福建等6个项目省开展卫生人力发展研究工作。卫生人力发展与卫生系统协调发展将中国卫生人力发展研究引向一个新的阶段。

卫生人力发展由规划、培训和管理3部分组成。卫生人力规划是卫生人力发展的第一步。规划是为实现预定卫生目标,提高人民健康水平,估计需要卫生人员的数量和种类的过程。卫生人力规划的程序:现状分析,未来卫生人力需要量预测,未来卫生人力供应量预测,需要量与供应量匹配,解决人力失调问题,组织与管理,制订人力发展策略,制订详细的人力发展规划,规划的执行、监督与评价。检验卫生人力规划的最终结果是看卫生人力的产出在多大程度上满足卫生系统的需要量。从某种意义上讲,卫生人力发展的核心是卫生人力的培训,是对卫生技术人员进行基础的和专业的知识训练,使卫生技术人员在数量和技能方面符合卫生服务的需要。在现代社会,卫生人力培训成为日益复杂的活动,同卫生系统的其他部门一样,卫生人力培训需要社会经济部门,特别是教育部门的投入,并同这些部门相协调。卫生人力发展要达到预期目的,在卫生人力规划和培训之后,应加强卫生人力的使用管理,激发卫生人员工作积极性,提高工作效率,合理分布卫生人力,适应人群对卫生服务的客观需要。

规划在社会发展中起着越来越重要的作用。许多国家加强了卫生人力预测的研究。美国在卫生人力方面的研究比较早,研究的范围也比较广泛、深入,特别是1975年美国卫生服务资源局进行的1990年专业医师需要量预测,对22个专科需要量及医师总需要量进行了中期预测,针对不同情况采取相应的调整对策,提出的建议被国会采纳,对改善美国卫生人力供求关系发挥了重要的指导作用。中国卫生部及江苏、吉林等省进行的卫生人力需要量预测,如东县妇幼卫生人力需要量、供应量预测,苏州市卫生防疫站卫生防疫人员需要量预测等结果对决策部门也都提供了重要的参考数据。

卫生人力预测研究的首要任务是选择科学的、切实可行的预测方法,但能够用于卫生人力预测的方法并不多,因为卫生人力发展与社会经济、文化教育的发展紧密相连,影响因素复杂,难以拟合许多预测模型的应用条件。目前国内外常用的卫生人力预测方法主要有世界卫生组织推荐的4种,即:卫生需要法、卫生需求法、服务目标法和卫生人力/人口比值法。此外,还有趋势外推法、专家评论法(如特尔非法)、收集管理部门意见法、数学模型法及最近推出的比较综合性的医院规划模型法,每种方法需要的基础资料和适用范围不尽相同,预测过程也有所区别,因此,预测前要注意不同方法的特点,结合具体情况加以选择,也可把两种或几种方法结合起来运用。

目前,卫生人力发展与卫生系统不相协调,卫生人力规划、培训和管理之间脱节,人力管理能力薄弱,许多国家缺乏有效的管理机制及制订政策的能力;人力规划的重点建立在以医院为基础的治疗服务模型之上,缺乏对卫生服务以及社会需求的整体研究;在人力培训方面,以课堂为中心、教师为中心的传统观念阻碍了以社区为中心、以问题为中心的教学方法的推广。

针对上述问题,卫生系统应总结卫生人力发展工作的经验和教训,阐明卫生人力政策,说明需要加强的领域。人力资源管理是人力发展3个环节中最迫切需要加强的一个领域,加强管理人员的培训工作是提高管理水平的重要环节,应重视培养领导人才,使其具备卫生服务和教育系统两方面知识,具有决策、规划、经济和管理等知识和技能;明确卫生人力政策,建立卫生人力发展的权威机构,协调和评价卫生人力政策对卫生服务系统的影响,广泛吸收社会各界参与卫生人力发展工作,行政部门、社区领导、群众和专业人员都应关心卫生人力发展,医学教育和医务卫生人员更应努力促进教学与服务相结合,使卫生人力的培养和使用适应卫生系统的客观需要。按世界卫生组织倡导的,卫生人力发展应同卫生系统协调发展,将卫生人力的规划、培训和管理同人人享有卫生保健的战略目标联系起来,使卫生人力资源满足社

区人群的客观需要。

#### 参考文献

- 1 Hall T H, et al. Health Manpower Planning Geneva, WHO, 1978
- 2 江苏省医学情报研究所, 江苏省卫生人力需求量研究(内部资料)
- 3 Karen R. Health Resources Administration, U. S. A. 1981
- 4 Hall T H. Human Resources for Health, A Tool Kit for Planning, Training and Management
- 5 Tomas Fulop, et al. Reviewing Health Manpower Development Geneva, WHO, 1987
- 6 韩复笑. 卫生人力发展研究. 长春: 吉林省教育出版社 1988
- 7 卫生部人才预测小组, 西藏卫生行业专门人才需要量预测(内部资料)
- 8 龚幼龙. 中国卫生事业管理, 1991, 10: 508~511
- 9 严非. 中国公共卫生事业管理, 1991, 7(3): 155~159

(上海医科大学严非、龚幼龙教授撰)

**卫生管理教育** 卫生管理教育是医学教育的一个分支, 它培养各级各类现代卫生管理干部, 是医学专业的一个亚专业, 属于医学专业的文、理、工科类专业。

卫生管理专业教育在国外已有几十年的历史。首先在美国兴起, 现在美国有 80 多所院校设有卫生行政专业和医院管理教育专业, 加拿大也设有医院管理专业。在中国开展卫生管理教育始于 1979 年, 在广西南溪山举办的卫生局局长学习班; 卫生管理学学历教育, 是从 1981 年哈尔滨医科大学招收第 1 期卫生管理干部专修科开始的, 1985 年安徽医科大学招收第 1 期 5 年制卫生管理专业本科生, 同年, 西安医科大学与美国阿拉巴马大学合办第 1 期卫生管理硕士研究生班。1986 年, 国家教委经过论证, 把卫生管理专业列入高等医药本科专业目录; 同年, 国家教委学位委员会授予哈尔滨医科大学和华西医科大学卫生管理专业硕士学位授予权。从此, 中国卫生管理教育形成了有普通卫生管理教育和成人卫生管理教育两大类, 大专生、本科生和研究生教育 3 个层次, 在职短期培训和正规学历教育相结合的卫生管理教育体系。随着卫生管理教育的发展, 卫生管理教学机构相继建立, 1981 年卫生部决定按大区建立卫生管理干部培训中心, 分别设在哈尔滨医科大学、北京医科大学、西安医科大学、华西医科大学、同济医科大学和上海医科大学, 加上北京中医学院, 共设立 7 个国家卫生管理干部培训中心; 以后卫生部又支持建设 6 个卫生管理干部学院, 有黑龙江、四川、吉林、广西的卫生管理干部学院, 河北职工医学院和安徽医科大学的卫生管理学院; 80 年代中期以来, 有些医学院校和职工医学院也办起了卫生管理专业。这些教学机构的建立, 促进了卫生管理教育的发展, 培养了数以千计的现代卫生管理人才, 推动了卫生管理向科学化、现代化发展。

80 年代前期, 全国各地都在积极开展各种形式的卫生管理教育工作, 但很少进行这方面的研究。1984 年 9 月在成都召开的中国社会医学与卫生事业管理学第 1 届学术讨论会, 所交流的卫生管理类 68 篇论文中, 没有 1 篇是卫生管理教育方面的。开始进行卫生管理教育的研究, 是在 1987 年以后。80 年代中期, 卫生管理教育蓬勃发展, 学历教育与学位教育迅速发展, 各类短训班遍地开花, 从而引起卫生管理界的关注。1987 年 11 月, 卫生部教育司组织有全国 12 所院校参加的“卫生管理教育 8 年回顾和效益分析”的全国性调查研究, 这一研究包括学历教育的卫生管理干部专修科和各级各类卫生管理干部的短训班; 有卫生厅(局)长管理科学讲习班、县级卫生机构“六长”卫生管理考试培训班、中医院院长管理培训班、各类卫生管理短期培训班和卫生管理函授教育等 6 个方面, 调查研究的大量数据资料表明, 各类卫生管理教育取得了显著的成果和效益。

进入 80 年代末期以来, 中国的卫生管理教育处在相对缓慢发展的时期, 但对卫生管理教育的研究却较前深入了一步。由于

卫生管理教育“热”已经过去, 而且逐渐走向“低谷”, 这时许多卫生教育专家深深感到中国卫生管理教育发展的曲折, 是缺乏科学理论和政策指导所造成的, 从而促使他们对中国卫生管理教育发展的基本理论、战略思想及政策措施进行广泛的研究。

近几年中国卫生管理教育的研究可以归纳为两类: 一类是卫生管理教育宏观管理研究, 主要研究中国卫生管理教育的战略思想、体系模式、政策措施、效益评估等, 提出中国卫生管理教育应以本科教育为基点, 向上发展为研究生教育, 向下伸延为大专教育的教育体系模式; 中国卫生管理教育应当实行普通卫生管理教育与成人卫生管理教育并重, 坚持“两条腿走路”的发展方针; 中国卫生管理教育应与医学教育的发展相适应, 按比例协调发展; 中国卫生管理教育的合理结构, 包括以大区合理布局的地缘结构, 以卫生管理为主体、配以医院管理、卫生经济学等亚专业的专业结构和大专、本科、研究生等不同水平的层次结构等卫生管理教育理论和政策措施。另一类是卫生管理教育微观管理研究, 主要研究各类卫生管理教育的培养目标、课程设置、教学实习模式、教材及师资队伍、教学内容更新和教学方法改进等, 发表了一批很有意义的研究论文, 这些论文论述了卫生管理本科在卫生管理教育中的基点地位和关键作用, 是衡量卫生管理专业教育质量的主要依据, 是卫生管理人才的重要来源; 提出卫生管理专业的培养目标应明确为哪个管理层次和培养何种规格的管理人才; 提出卫生管理人才的知识结构应是动态的 T 型结构; 卫生管理专业的课程体系, 应在保证相应文化水平的基础上重点突出专业基础课和专业课; 卫生管理专业的实习模式应是在管理岗位头习的基础上开展小课题研究, 全面训练管理能力; 卫生管理专业教师队伍的建设, 要在加强专业理论提高知识的同时, 加强实际管理能力的锻炼和提高, 下基层挂职锻炼是较好的方式; 教材建设要注意“两个引进”的消化吸收, 即引进国外管理理论和引进工业企业管理理论, 必须强调消化吸收, 紧密结合卫生管理实际, 逐步形成具有中国卫生管理特点的学科体系。

展望今后的卫生管理教育的研究发展, 仍然应将重点放在中国卫生管理教育的战略方针和政策措施等宏观管理问题上, 因为这些问题如果得不到解决, 卫生管理教育就不可能发展。全国卫生管理教育学会学术年会主要讨论的也是这些重大问题。随着改革开放政策的贯彻和卫生改革的深化, 卫生管理教育的重要性会被越来越多的人重视, 特别是各级政府主管部门的重视, 上述问题研究也会逐步深化并取得共识, 形成中国卫生管理教育发展的战略思想和模式, 从而促进中国卫生管理教育有较大的发展, 以适应卫生事业发展对现代卫生管理人才的需求。

#### 参考文献

- 1 毛磊. 中国农村卫生事业管理, 1988, 12: 28
- 2 毛磊. 中国社会医学, 1988, 6: 12
- 3 毛磊, 等. 中国社会医学, 1991, 2: 32
- 4 中国农村卫生事业管理(1991 年增刊), 1991, 11(81)

(西安医科大学毛磊撰)

**医学教育** medical education 医学教育是在不同水平上以培养各类卫生技术人员为目标的教育活动, 属职业技术教育领域。当代医学教育, 按系统结构分为初等医学教育、中等医学教育和高等医学教育, 按过程结构分为医学生医学教育、毕业后医学教育和继续医学教育。

现代医学教育制度起源于文艺复兴后的欧洲大学, 到 19 世纪末和 20 世纪初, 就国际范围来说, 大体上形成 3 种类型的教育制度: (1) 以大学为基础的医学教育, 以德国为代表, 其特点是医学教育同大学相结合, 教学与科研并重; 普通教育与医学教育并重, 并以普通教育为先导, 建立医前教育和专业教育; (2) 以医院为基础的医学教育, 以英国为代表, 医学院建立在医院里, 注重理论学习与临床实践相结合; (3) 大学与医院相结合的医学教育, 以美国为代表, 前两年以大学为基础, 实行以学科为基础的基础医学教育, 后两年以医院为基础, 实行导师指导下的临床见习。

战后时期,就国际范围来说,鉴于卫生服务的发展对人力的需求,WHO于1948年对医学教育提出了发展数量和提高质量的目标,各国政府都致力于开办新的医学院校,以增加卫生人力的数量。据1987年WHO的报告,全世界的医学院校总数已从1950年的527所增加到1986年的1353所。年毕业生已从1955年的66200人增加到1983年的269000人。随着医学院数量的增加,全世界医生的总数也从1955年的124万人增加到1983年的250万人。

60年代以前,医学院校的数量已有很大的发展。就世界大多数医学院校来说,其教学活动的组织基本上以学科为主;就方法来说,学生是被动地接受知识的灌输。为此,从1952年开始,美国西余大学医学院率先进行以器官系统为中心的综合课程改革。此后,这一改革迅速向世界其他地区发展。经过近十年的教改试验,在国际范围内开始打破传统的课程结构,形成3种医学课程模式:(1)以学科为基础的课程模式,根据教学需要将全部课程区分为必修课、指定选修课和自由选修课。这是目前世界上大多数医学院校所采用的课程模式;(2)综合性医学课程模式,按照器官系统或问题把相关学科的内容综合成整体,加强理论同实际的联系。据统计,70年代,30%的美国医学院,50%以上的加拿大医学院、15%的欧洲医学院、20%的日本医学院、22%的澳大利亚医学院和30%的马来西亚医学院按这种方式进行教学。(3)以能力为基础的课程模式,根据卫生人员日常工作中所涉及的各种问题为基础,并以解决各种卫生保健问题所必需的能力为目标,培养学生解决问题的能力。这种课程结构为大多数按社区定向的医学院校所采用。

1972年前,尽管医学院校的数量和招生人数不断增长,但是,按照传统的医学教育质量观,医学教育的重点仍然是面向医院,以疾病为中心。各发展中国家的医学教育界意识到,按照发达国家的医学教育模式培养人才,势必难以适应自身以初级卫生保健为中心的卫生服务的需求;在发达国家,由于专科医疗的迅速发展和高新技术在医疗实践中的广泛应用,医疗费用迅速上涨。因此,不论发达国家还是发展中国家,面临的共同目标是发展面向社区的、以预防保健为中心的新型医学教育体制。为适应上述目标,1972年WHO制订了医学教育同社会卫生服务需求相适应,以及卫生服务与医学教育发展相协调的政策;在1978年的世界卫生大会上,进一步提出“2000年人人享有卫生保健”的全球目标,并把改革医学教育、发展同本国卫生服务需要相适应的医学教育制度作为实施上述政策和目标的一种策略,在全世界掀起了新的医学教育改革高潮。

综观近20年来国际医学教育改革的发展,其基本趋势是:

**实施医学教育改革的策略** 由于各国医学院校进行改革的内部条件(学校的传统和教师的支持水平)和外部条件(卫生服务需求)很不相同,在改革中所采取的策略也不相同。总的来说,其基本策略有三,即改革教学内容、改革教学方法,或内容改革与方法改革并举。大多数发展中国家,由于现行的医学教育制度和课程计划主要按照发达国家的模式建立的。因此,为适应自身以预防保健为重点的初级卫生服务的需要,其改革的目标是改变传统医学教育制度同本国社会需求不相适应的状况,其改革的重点是教学内容而不是教学方法。在发达国家,医学院校毕业生面向社区不是主要问题,重要的是如何教会学生学习,以培养学生通过自己的努力去解决面临的卫生问题,因此,其改革的重点是教学方法。还有一些建校历史较长并已形成办学特色的医学院校,由于实施全面的教学改革较难为教师所接受,所以改革策略采取在保持传统医学教育制度的基础上进行教学内容和教学方法的改革。据1987年报告(A. Kaufman),在40所对国际医学教育改革产生较大影响的医学院中,其中14所以教学方法改革为目标的医学院,有12所分布在发达国家,仅两所分布在发展中国家;11所以教学内容改革为目标的医学院,有8所分布在发展中国家,仅3所在发达国家。15所以教学内容改革为重点并对教学方法同时进行改革的医学院,有10所在发展中国家,5所在发达国

家。

**实施教学方法改革的途径** 为适应发展中的医学科学和改变中的卫生服务需求,不论采用何种策略实施改革,其基本的方法和途径是:(1)教学活动展开的小型化,打破传统的以教师为中心的班级授课制,采用诸如小组教学、导师制、学生自主学习制、医学生互教互学制等所谓微型教学制度。(2)课程安排短程化。把课程从学科中分化出来,分解成以问题为中心或以器官系统为基础的多学科结合的中短程课程,缩短每一课程的学时。为利于中短程课程的安排,许多学校将1学年改为3个学期或将每学期分成若干个学期。(3)教学场所和教学方法多样化。为使教学活动同社区初级卫生保健相联系,教学活动从课堂、实验室、大学医院等扩大到可以利用的社区医院、社区卫生保健站等。教学方法采用早期接触临床,以问题为中心的教学、讨论式教学、自主学习等,以培养学生分析问题、解决问题的能力。(4)教学手段的现代化。以计算机为基础的第3代教具迅速发展并逐步在医学教育中应用,据美国医学会报道,1986~1987年度,全美83%的医学院校应用计算机辅助教学。

**实施教学内容改革的途径** 为加强理论同实践的联系,教学内容的改革除调整传统的以学科为主的课程结构,发展以器官系统或以问题为中心的综合性课程外,还大力发展按初级卫生保健定向的社区医学课程,并以此作为加强医学教育同社区卫生服务相关连的主要途径。例如在美国,大多数医学院已把社区医学或家庭医学课程列入必修课计划,并在第4学年安排集中的社区医学实践,97%的医学院校还利用社区卫生机构进行初级卫生保健实践。据WHO报道,38个发展中国家的487所医学院中,已有459所把社区医学列为医学院的必修课程。

在中国,自中华人民共和国成立以来,医学教育事业得到迅速的发展。据统计,中国的医学院校已从1949年的38所发展到1991年的137所,在校学生已从1949年的15234人增加到1991年的近20万人。为适应中国卫生事业发展的需要,近10年来,在医学教育的许多方面进行了改革,主要成果有:(1)设立为适应不同层次需要的新学制(3.5、7年制);(2)调整专业设置;(3)进行课程改革;(4)加强预防战略,发展面向农村和城市地段以初级卫生保健为内容的社区医学教育;(5)改革传统的教学方法,注重学生能力的培养;(6)发展视听教育,广泛采用新的教学手段;(7)改革传统的考试评价方法;(8)发展毕业后医学教育和继续医学教育。

纵观国内外医学教育的发展,当前面临的主要问题是:国际范围内医学教育和卫生人力资源分布不平衡的状况依然存在;医学院校毕业生地理分布城市化的趋势仍很严重;部分国家医学院校毕业生已开始出现供大于求的情况;医学院校毕业生向发达国家流动的情况依然存在;医学教育同社会卫生服务需求不相适应的状况仍有待进一步解决。可以预料,为实现1988年世界医学教育会议爱丁堡宣言所提出的各项议题,适应21世纪卫生服务的需求,医学教育发展和改革的趋势将会持续进行下去。

#### 参考文献

- 1 AAMC J. Medical Education, 1984; 59(11); 2
- 2 Kantrowitz M, et al. Innovative Tracks at Established Institutions for the Education of Health Personnel, WHO Offset Report Publication, Geneva, 1987, 101
- 3 Richardson R, et al. Innovative Schools for Health Personnel, WHO Offset publication, Geneva, 1987, 102
- 4 梅人朗. 上海高教研究, 1987, 2: 50~52
- 5 梅人朗. 上海医科大学学报(人文社会科学), 1988, 1: 59~61
- 6 世界医学教育联合会, 医学教育, 1990, 5: 1~48
- 7 西园昌久著, 米亚译. 国外医学(医学教育), 1991, 4: 165~168

(上海医科大学陈刚撰; 梅人朗审)

毕业后医学教育 postgraduate medical education 毕

业后医学教育是一类旨在向医学院校毕业生提供的以培养临床专科医师或生物医学研究人员为目标的教育领域,通常包括住院医师培训和医学研究生教育。

欧洲的大学,早在12世纪即建立了学位制度,规定取得学士学位的医生需经两年以上的专业培训或医学研究,然后才可申请行医执照或第2级学位,这一制度一直延续到19世纪。20世纪以后,随着医学科学的发展和卫生服务需求的改变,欧洲各国相继以法律或通过各专业团体章程的形式,对医学院校毕业生毕业后教育的时间、培训方法以及证书或学位的授予标准等作出明确规定,逐步形成正规化的毕业后医学教育制度。例如英国,根据1944年Goodenough提出的建议,从1951年开始,对医学院校毕业生作出“要给予平衡的临床训练,逐步增加医疗责任”的规定,建立了正规化的毕业后医学教育制度。在法国,1862年政府教育部曾就毕业后医学教育作出正式规定,到20世纪初,许多大学的医学院制定了颁发专科医师证书制度,到1952年,全国开始形成正规化的毕业后医学教育制度。在德国,1901年,政府规定所有医学院校毕业生都必须在医院完成一年的实习期训练,从1953年起,逐步形成制度化的毕业后医学教育。

在美国,1893年约翰斯霍普金斯医院开设了第一个正规的住院医师培训项目。1910年,根据Flexner报告,从1914年开始,各专科学会相继作出毕业后医学教育的规定,到1950年,在全国形成规范化的住院医师培训制度。目前,据AAMC报告,在全美国的6000所医院中,经批准可以提供住院医师培训项目的医院有1570所,经各专科委员会认可的培训项目有6319个,涉及24个领域的51个专业,在各医院接受住院医师培训的医学院校毕业生逾8万人。另外,在各医学院校接受生物医学研究生教育的医学院校或相关学科的毕业生达21000多人。

在日本,战前时期,仿照德国的医学教育制度,建立了实习医师训练期。1968年,在废除实习医师制度以后,厚生省建议医学院校毕业生在通过国家医师资格考试以后,应在厚生省指定的医院完成为期两年的毕业后培训,然后方可开业或到大学的研究生院攻读第二级学位,毕业后培训的费用由政府提供。但是,由于这一建议是非强制性的,因此,日本的毕业后医学教育尚未制度化。据1985年统计,经厚生省认可的培训基地有大学医院80所,综合性教学医院194所,精神病院15所,每年在这些医院接受毕业后培训的医学院校毕业生逾1万人,当年政府提供的培训经费逾1700万美元。

在各发展中国家,由于高等医学教育基本上是在第二次世界大战以后随着政治上的独立而建立的,因此,除少数国家,如印度、缅甸、斯里兰卡、埃及,在1970年以后,按照原宗主国的教育制度建立了各自的毕业后医学教育外,大多数发展中国家的毕业后医学教育仍然是一个发展中领域,医学院校毕业生都倾向于到发达国家接受毕业后教育。例如在美国,据美国外国医学院校毕业生考试委员会(ECFMG)报告,1979年向该委员会申请这项考试,以便进入美国各医院接受毕业后教育的外国医学院校毕业生为12318人,其中8652人来自各发展中国家,占申请总人数的70.2%。

纵观各国现行的毕业后医学教育制度,其共同的特点是:(1)它是在完成医学院教育后实施的,所以它是医学院教育的继续;(2)它是由经国家或专业团体认可的医学院或医院相关的系科提供;(3)具有明确的目标,通常按专业进行定向培养;(4)完成培训以后,住院医师要通过国家认可的资格鉴定考试,医学研究生要通过考试和论文答辩,及格者授予专科医师证书或相应的学位。

从培训制度上来说,根据培训目标,通过两种途径来实施,一是通过住院医师培训计划,以培养各科临床专家,例如美国、加拿大、日本、德国、法国、独联体各国、英国,按各专业的培养目标,培训期限从3年到7年不等,通常第1年在临床各科轮转,接受基础性临床技能训练,第2年以后在各专科实行导师监督下的专业训练,训练期末参加考试;另一是在完成一定时间的住院医

师训练以后,通过医学研究提出论文,通过考试和答辩,然后授予硕士学位或博士学位,培训期限3~5年。例如英国,医学院校毕业生在完成几年的住院医师培训,再作1~1.5年的临床研究,完成论文后,可以申请外科硕士学位或内科博士学位。在美国,由于医学研究生教育仅限于生物医学领域,所以,医科的或相关学科的毕业生可以直接申请进入研究生院学习,经5年左右的培训,毕业时授予哲学博士学位。

早在1931年,中国南京中央医院在沈克非的主持下,曾试行住院医师培训制度,对培养目标、招生方法、培训计划和培训期限都作出明确的规定,在1931~1937年期间,每年从上海、南京、北平招收30~40名医学院校毕业生进行正规的住院期培训。但是,就全国范围来说,毕业后医学教育一直未形成制度。新中国成立以后,随着高等医学教育事业的发展,中国部分医学院校在生物医学领域开始建立研究生培养制度,但是,直到1986年以前,正规化的住院医师培训一直未形成制度。为适应中国卫生事业发展需要,从1986年开始,经卫生部批准,在浙江医科大学和杭州市卫生局所属医院开展了正规化住院医师培训的试点工作。此后,上海市、长春市和北京市也先后开展了正规化住院医师培训试点工作。关于医学研究生教育的发展,据我国卫生部报告,自1949年到1965年,各医学院共招收研究生1185名,其中已毕业629名。1966~1976年因“文化大革命”,研究生教育停止招生。1978年,中国恢复研究生培养制度,此后,医学研究生教育得到迅速发展。据报告,目前全国有博士点400个,硕士点1415个,在1978~1988年期间共招收医学研究生20087名,其中毕业的硕士生14320名,博士生405名。

回顾国内外毕业后医学教育的发展,一个共同的趋势是,住院医师培训已日益制度化,并从管理上通过法律或专业团体规定的章程,对住院医师培训项目作出认可。例如美国,1972年后,根据美国医学会(AMA)制定的《住院医师培训项目认可标准》,各专业委员会分别制定了专科住院医师培训项目的认可准则,逐步将评估的重点从对提供住院医师培训的医院转向按专业定向的各类住院医师培训项目的质量。目前,尽管各国对医学院校毕业生接受毕业后培训是非强制性的,但是,鉴于毕业后医学教育制度对提高医疗服务价值的价值,这一培养制度一直得到政府的支持,并为越来越多的医学院校毕业生所接受。据报道,在美国有95%的医学院校毕业生,在日本有80.4%的医学院校毕业生都进入住院医师培训机构;其他毕业生,有的攻读生物医学研究生,有的成为社会医学的或生物医学的研究人员,或在高度专业化的医学中心继续接受培训。

#### 参考文献

- 1 Crowley A E, Etzel S L, et al. JAMA, 260(8):1093~101
- 2 AMA. Directory of Residency Training Programs, Chicago, 1990
- 3 朱潮,主编.中外医学教育史.上海:上海医科大学出版社,1988
- 4 卫生部继续医学考察组,国外医学(医学教育分册),1988,9(4):154~159
- 5 Council on Medical Education, JAMA, 1990, 263(21):2927~2930
- 6 许文博,等.国外医学(医学教育分册),1990,11(4):145~149
- 7 刘秉勋,等.医学教育,1990,11(2):1~6
- 8 Calman K G, Donaldson M. Journal of Medical Education, 1991, 25(1):51~59

(上海医科大学梅人朗教授撰)

**继续医学教育** continuing medical education 继续医学教育,是一种旨在向在职卫生专业人员提供的以学习新理论、新知识、新技术、新方法为目标的,持续终身的教育制度,它是为适应医学科学技术发展和卫生服务需要而产生的。



继续医学教育,作为一种教育观念,尽管早在19世纪末即已出现,但是作为一种教育制度,则主要是在20世纪50年代以后才得到发展。例如俄国,在1890年,彼得堡医师讲习所就开办了医师进修课程。1930年,美国也开始为从事医疗工作的开业医师提供进修课程。还有许多国家的医学团体通过举办专题讲座或临床病理讨论会等形式,为在职卫生人员提供进修学习的机会。但是,这种偶发性的学习,既无全国性专门机构组织实施,也无政策上或制度上的支持。所以,就大多数国家来说,1950年以前,一直未形成一种具有明确目标的继续医学教育制度。

战后时期,由于医学科学的发展和卫生服务需要的改变,促进了教育观念的转变。例如在1944年的英国教育法和1956年的法国教育法,以及50年代初联合国教科文组织,都明确地提出终身教育的思想。50年代初,国际医学界在这一背景的影响下,提出了在医学职业生涯中建立医学教育连续统一体的构想,在改革医学院教育、完善毕业后医学教育的同时,大力发展继续医学教育,并通过立法或政策干预,使继续医学教育向制度化和规范化方面发展。

从1927年开始,前苏联政府就提出了加强医师进修教育的规定,并在各地开办了以提供继续医学教育为目标的医师进修学院。1938年,前苏联卫生部根据医学训练法,进一步作出在农村地区从事基层卫生工作的医师每3年,在城市地区从事基层卫生工作的医师每5年必须参加一次进修的规定。到1970年,前苏联卫生部又作出了在职中级卫生人员每3~5年必须接受为期5个月左右进修培训的规定。因此,前苏联是世界上最早实行制度化继续医学教育的国家。

在美国,1970年以前,除1941年通科医师学会在其章程中提出强制性继续教育,1965年俄勒冈州医学会作出医师要接受继续教育的规定外,美国卫生主管当局、美国医学会和其他医学专业团体,对在职卫生人员的继续教育既无法律规定,也无制度上的要求。从1972年开始,美国医学会提出继续医学教育的定义和目标,并于1979年7月正式作为众议院的一项政策予以公布,从而使继续医学教育迅速向制度化方面发展。目前,美国有22个州的卫生当局为再注册目的制定了要求医师定期参加继续教育的法律。有21个州的医学会、13个全国性医学专科学校,以及22个全国性医学专业委员会,对会员作出了要求定期参加继续教育并以此作为保持会员资格的规定,从而使美国的继续医学教育从自愿参加的偶发性学习向强制参加的有组织学习方面发展。与此同时,日本、德国、澳大利亚、英国和法国等国的医学团体也对继续医学教育作出制度上的规定。日本医师会建立了参加继续教育自愿申报制度,规定医师每年应完成50学时的继续教育课程,其学分由地方医师会审核,然后由日本医师会会长签发证书。自1970年开始,澳大利亚医学会就提出,从事实际工作的医生,为保持专业水平、技能和效率,参加继续医学教育是必不可少的。根据这一政策,妇产科医师学会率先作出会员必须定期参加继续教育的规定,该会的章程规定,会员第1次注册的有效期为10年,在有效期限满前3年,每一会员必须完成100学时的继续教育课程方准再注册。第2次注册以后,在册会员每5年应完成100学时的继续教育课程,否则将取消会员资格。在德国,继续医学教育由各州的医师协会组织实施,例如黑森州,要求在职医师每3年应完成至少60学时的课程,其中36学时必须在州医师进修中心学习。英国和法国,尽管对医师参加继续教育尚未从制度上作出规定,然而,继续教育课程近几年来也得到了发展。例如英国皇家医学会在每一地区指派一名继续医学教育导师,由这一导师组织该地区的继续教育。在法国,1971年国民议会通过了继续医学教育的法律,并按这一法律在全国建立起继续医学教育系统。

大多数发展中国家对在职卫生人员的继续教育也受到重视。例如朝鲜,卫生部规定,在基层卫生机构工作的医科毕业生,毕业后4~5年要分批到医科大学的进修部轮训,时间6~12个月不等,主要学习现代医学和专门化课程。非洲地区,在非洲医

学基金会的帮助下,已在肯尼亚、苏丹、乌干达、坦桑尼亚、赞比亚和埃塞俄比亚等国开展了有组织的继续医学教育活动。在坦桑尼亚,已把继续医学教育列入国家卫生人力开发计划,建立有全国性继续医学教育网络。

早在1930年,中国即开办了医学进修教育。新中国成立以后,为适应卫生事业发展的需要,在大力发展高中等医学教育的同时,通过各省市医师进修学院和在各医学院校建立的医学进修基地,有组织地开展了在职卫生人员的进修培训和继续教育。据1988年统计,全国已建立86个卫生干部专修科,54所职工医学院,202个函授部,仅通过各种短训班就为近30万人提供了进修学习的机会。但是,直到1990年以前,中国的继续医学教育一直作为医学进修教育的一部分,对继续医学教育的定义、目标和任务、实施方法、评价和经费支持等均无法可循。因此,为使中国的继续医学教育规范化、制度化,1991年7月,卫生部公布了《继续医学教育暂行规定》,对继续医学教育的定义、目标和任务、组织管理、内容和形式、考核以及经费等都作出明确规定,并建议在全国范围内扩大继续医学教育的试点工作。

纵观国内外继续医学教育的发展,从办学形式来看,除原苏联、中国、朝鲜主要通过集中办班和离职培训外,大多数国家都是根据个人的学习需求,采取在职培训的方法,其基本方式是专题讲座、研讨会、学术会议、自学学习。从发展趋势来看,尽管各国实施方法不甚相同,但是,把继续医学教育作为医学教育的一部分,已越来越为医学界所接受。为保证继续医学教育的质量,并使共同本国的卫生人力政策联系起来,一些国家已经或正在建立继续医学教育项目的认可和证书授予制度。例如美国,于1979年在芝加哥成立了继续医学教育认可委员会,并于1982年10月29日正式通过了继续医学教育主办单位和项目认可的基本要求 and 指导路线,只有符合这一标准的单位才能提供继续医学教育项目。据报道,目前经这一委员会批准的继续医学教育主办单位有470余个,经认可的项目逾1万种。

为提高继续医学教育的效果和效率,除编制各种便于自学的教材和各种学习资源外,还广泛采用包括通讯卫星在内的各种现代化教学媒体,使高质量的继续医学教育项目能即时传送到每一用户。美国医学界预言,到2000年,继续医学教育将普及到每位医生的家庭。

当前,就多数国家来说,继续医学教育还是一个发展中的教育领域,个人对继续医学教育需求和实施效果的评价、学习内容的选择、教学方法和学习资源的开发都是有待进一步研究的课题。就管理工作来说,对医师参加继续医学教育是否要通过立法手段实行强制性制度,还有争论;要在国家或地区一级建立规范化的继续医学教育制度,还有许多工作要做;正如1989年12月在美国召开的第3届国际继续医学教育大会指出的:继续医学教育正面临着全球的挑战。

#### 参考文献

- 1 WHO. Continuing Medical Education in the USSR. WHO Chronicle, 1970, 24(5): 216~218
- 2 Department of PCQ and Department of CME, JAMA, 1978, 240(26): 2848~2853
- 3 ACCME, Essentials and Guidelines for Accreditation of Continuing Medical Education, Chicago, 1984
- 4 Vartanian F, JAMA, 1987, 258(11): 10~13
- 5 蒯强,等. 国外医学(医学教育分册), 1987, 8(1): 12~15
- 6 Vodratski V, J. of Medical Education, 1988, 22: 468~473
- 7 梅人朗, 继续医学教育, 1991, 5(2): 85~89

(上海医科大学梅人朗教授撰)

**医学教育测量与教育评价** 教育测量和教育评价,是根据一定的标准对受教育者在教育过程中所产生的思想、学业、品行和个性等方面的变化进行估价的过程。教育测量是运用考试和评定的方法客观地对学生是否达到教育目标的程度进行定量

分析,而教育评价则是以测量结果具有多大的价值为着眼点,结合其他有关材料,对学业成绩进行综合判断。在医学教育领域,根据评价的目的,通常分为配置性评价、形成性评价、和总结性评价3类。

医学教育评价产生于对医学生学力的检验,12世纪以后,随着牛津、剑桥、巴黎等大学学位制度的建立,考试制度也得以建立和发展。直到19世纪中叶,医学考试主要采用口试和笔试论述题。由于这两类方法评分易受主观影响,不能对医学生的知识与技能作出科学的评价,因此,19世纪中叶以后,教育评价研究主要集中在测量技术的探索。1864年,英国格林威治医学院院长G. Fisher编制了“量表簿”,试图为医学考试提出标准。

19世纪以来,特别是第二次世界大战以后,不论是发达国家还是发展中国家,医学院校和医科毕业生均有很大的增加,为加强对医学生的管理,保证向社会提供合格的医生,各国政府或医学团体都十分重视对医学生或医科毕业生知识和技能的测量。美国早在1915年就成立了非官方的全国医学考试委员会(以下简称NBME),并于1916年首次举行了NBME考试,开创了现代医学教育考试之先河。但是,由于各国教育制度和卫生管理制度不同,故医学考试制度不甚相同。综观各国现行的医学考试制度,大体上可分为3种类型:(1)由大学或医学院校主持的考试,其目的是对医学生在完成某一课程或某一阶段学习后的专业水平作出鉴定,以便决定是否具有进入下一阶段学习或准予毕业的资格,实施这一考试制度的有新西兰、法国、奥地利、荷兰、葡萄牙、前南斯拉夫、马耳他、土耳其、菲律宾、巴基斯坦、孟加拉国、斯里兰卡、赞比亚、尼日利亚等国的医学院校。(2)由政府授权进行的国家考试,这是一类由政府教育主管当局通过法律程序建立的以授予学位或证书为目标的国家医学考试制度,通常由国家认可的校外考试团体或在政府代表的监督下授权各医学院校所主持的考试。实施这一考试制度的国家有前民主德国、前苏联、缅甸、肯尼亚、塞内加尔、瑞士、贝宁、智利、加纳、意大利、利比亚、马来西亚、苏丹、多哥等国。(3)根据医疗法规,由医疗执照管理部门所主持的医师资格鉴定考核。实施这一考试制度的国家,医科毕业生不仅要参加以取得学位为目标的学历考试,也要参加授予医疗执照为目标的医师资格鉴定考试,并以通过学位考试作为申请医师资格鉴定考试的必要条件,此即所谓的双重资格鉴定考试。目前,实施这一考试制度的国家有美国、加拿大、日本、韩国、菲律宾和约旦等。

近代医学考试评价是建立在R. W. Tyler, 1940年提出的以教育目标为评价中心的理论基础之上的。1948年在波士顿召开的美国心理学大会上,根据这一理论,韩国提出对教育目标进行分类的建议。随后,在教育领域陆续出现Bloom等(1956年)、Gagne(1965年)、Ausubel等(1969年)和Merrill(1971年)等4种教育目标分类学理论。鉴于Bloom等的教育目标分类学理论反映了教育工作者(不是心理学家)所得出的结论,具有较高的可操作性,其理论曾列为美国教育研究的重大成果而受到广泛的重视,对教育评价工作影响很大。在医学教育领域,1966年,伊利诺斯大学医学教育研究中心的McGuire对Bloom等的教育目标分类学理论进行了简化,并首次成功地用于医学考试。1977年,WHO医学教育专家委员会在Bloom等的教育目标分类学基础上,结合医学教育特点,提出医学教育目标分类理论,并建议以此作为医学教育测量的理论基础。目前,从多数国家的医学考试制度来看,如美国医学院校的考试包括NBME考试和日本国家医师考试等,在考试内容和方法的设计上都以Bloom等的教育目标分类学理论为基础。根据这一理论,学习过程被区分成3个领域,即认知领域、精神运动领域和情感领域,每个领域又由低到高分成若干个层次。为综合评价学生,应对其知识、技能和态度3个方面进行评定。

战后时期,一方面由于医学科学技术的发展,要求学生必须学习的知识越来越多,如何采用合适的方式来评定学生的知识、技能和态度日益受到人们的关注。另一方面,由于教育科学和心

理测量学的发展,也为考试方法的改革提供了依据。因此,自1950年以来,医学考试方法已有重大改革。在认知领域的测量方面,为提高测量的信度和效度,1950年初,美国率先在NBME考试中部分采用以多选题(以下简称MCQ)为主要形式的客观性考试方式。据1952年Cowles和Hubbard的研究资料表明,NBME考试中,内科学和药理学采用论述题得分水平与在校相应成绩的相关性系数分别为0.21和0.18,而在MCQ中的得分水平与在校相应成绩的相关系数为0.37和0.49。根据这一研究结果,自1954年起,NBME第I、第II部分考试全部改为MCQ形式。据梅人朗报告,日前已有32个国家的考试团体和医学院把MCQ作为医学考试的主要方式。美国、前联邦德国、日本、马耳他、斐济、哥斯达黎加、贝宁等国的医学考试已完全采用MCQ。在实验室和临床技能的考试,绝大部分国家传统习惯均以评分量表为测试工具,在实验室或病床边对学生进行现场观察评分,这种方法评分主观,而且考试组织工作不便。为克服这一弊端,自1960年以来,许多国家医学院校或考试团体大力发展以模拟技术、录像及其它声像材料为基础的考试方式,来客观地测试医学生解决问题的能力。目前,在医学考试中常用的模拟方式有模拟病人、模拟模型、书面模拟(PMP)和计算机模拟等。美国NBME第III部分临床技能考试,自1961年起,已将在病床边进行的实践操作考试和口试改为PMP的形式,大大提高了考试的信度。

80年代以来,对中国医学考试制度和考试方法的改革,已经引起医学教育工作者的重视。目前,中国对医学生的评定主要由各医学院校自己组织的考试来决定,医学考试通常由各校各教研室自行组织,毕业时或阶段学习结束时是否要对学生进行综合性考试由各校自行决定。医学考试方法,自1982年卫生部组织13所医学院校医学专业毕业生统一考试中首先全部采用MCQ方法以来,各校组织的考试都在传统考试方式的基础上部分地采用MCQ为主要形式的客观考试方法。目前,少数医学院校还在开展以电子计算机模拟、录音、录像等为基础的考试方式的改革试验。

综观国内外医学考试方法的发展,由于各国教育制度和卫生管理体制不同,医学考试制度也不相同,但是,就多数国家来说,现行的考试方法均建立在Bloom等的教育目标分类学基础之上。从发展趋势来说,由于MCQ考试技术的发展,认知领域的测量倾向于采用固定应答型(客观性)的和自由应答型(主观性)考试方法进行复合测量,以提高考试的可靠性和有效性。在各型多选题考试中,鉴于K型题具有较高的猜测得分概率,自1990年起,美国NBME已决定予以取消。对实验室和临床技能的考试趋向于采用模拟病人、PMP、计算机模拟和客观的有结构的临床考试(简称OSCE)等客观性考试方法,以提高技能考试的可靠性。但是,根据Bloom等教育目标分类学理论,对医学生和医科毕业生的综合评价,应包括知识、技能和态度3个领域,但从各国现行的医学考试方法来看,如何评价学生的态度是一个有待开发的领域。由于各种考试方法会影响到教学内容和教学方法的选择,因此,如何把考试方法的改革同教育过程改革联系起来是一个各国医学教育工作者普遍关心的问题。

#### 参考文献

- 1 WHO. Technical Report Series 608, Geneva, 1977
- 2 Hubbard J P. Measuring Medical Education—the Tests and Experience of the National Board of Medical Examiners, 1978
- 3 Hubbard J P. et al. NBME, 1985
- 4 张玉田,等编,学校教育评价。北京:中央民族学院出版社,1987
- 5 梅人朗,等编,医学考试的理论与实践。上海:上海医科大学出版社,1990

(上海医科大学陈刚、梅人朗教授撰)

personnel 社区医学教育是一种根据社区卫生保健需要和可利用的卫生资源,以个人、家庭和人群的健康促进、疾病预防、治疗和康复为重点,以培养从事初级卫生保健的社区卫生人员为目标的教育活动。

1948年,当世界卫生组织(WHO)成立时,在它的宪章中就明确地提出不分种族、宗教信仰和社会地位,人人有权利均等地享有卫生保健的主张。当时,鉴于各国卫生人力资源的地理分布不平衡,主要是基层特别是农村缺少合格的卫生人员,WHO在国际卫生人力开发计划中提出卫生人力培训同社区卫生服务需要相关联的政策,为各会员国所接受。

50年代初,在WHO上述政策的支持下,许多医学院校开始设立社区医学系或社区医学教研室,把社区医学作为医学院校的一门必修课或选修课,并以此作为实施上述政策的一种策略。但是,实践证明,仅把社区医学作为一门课程,不同参与社区实践联系起来,不仅缺乏明确的目标,也难以实现医学教育同社区卫生服务需要相结合的预期目标。为此,从1965年开始,麦克马斯特大学医学院率先进行社区医学教育试验;到70年代中期,全世界又有近20所医学院校进行了面向社区的医学教育改革试验。在各国医学院校改革实践的基础上,根据1978年世界卫生大会提出的发展初级卫生保健事业,实现2000年人人享有卫生保健的全球目标,1979年,WHO在牙买加首都金斯敦召开了有19所实行社区定向型医学教育的医学院校代表参加的医学教育会议。在这次会议上,一致通过了改革传统的教育,发展社区医学教育的倡议,从而使社区医学教育在国际范围内得到迅速发展。近10余年来,不论发达国家还是发展中国家,在医学教育改革实践中,发展社区医学教育已日益成为加强医学教育同社区卫生服务需要相联系的一种策略。据报告(H.G. Schmidt等),1990年全世界实施社区医学教育的医学院校已达167所,其中非洲22所、美洲45所、中东地区21所、欧洲39所、东南亚地区20所、西太平洋地区20所。在这167所医学院中,54所医学院完全按社区定向,实行以社区为基础,通过积极参与解决社区卫生问题的实践来进行教学;还有113所医学院在保留传统医学教育制度的基础上,通过加强社区医学教育和社区医学实践的方法来进行教学。以实施社区定向型医学教育著称的医学院校有加拿大的麦克马斯特大学医学院(1965)、喀麦隆的福迪大学医学院(1968)、尼泊尔的特里勃哈温大学医学院(1972)、荷兰的林堡大学医学院(1974)、以色列的本古里安大学医学院(1974)、墨西哥的自治大学医学院(1974)、美国的密执安大学上半岛卫生教育社团(1974)、澳大利亚的纽卡斯尔大学医学院(1975)、菲律宾的塔克罗班卫生学院(1976)和美国的新墨西哥大学医学院(1979)。

实践证明,由于不同国家的医学教育制度和不同社区医学教育的组织结构不很相同,因此,在实施社区医学教育过程中所采取的策略和方法也不同。根据近20年来各国进行社区医学教育的实践,就国际范围来说,其实实施方式大体上有以下4种类型:

以社区定向的课程 这是一种按社区卫生保健需要定向的课程,它是50年代开始在原社会医学和预防医学课程的基础上发展起来的。到70年代中期,大多数医学院校都开设了社区医学课程,并以此来取代原社会医学课程。70年代中期以后,为适应发展初级卫生保健的需要,在许多临床学科也相继建立以社区定向的课程,诸如社区内科学、社区外科学、社区儿科学、社区精神医学、社区妇产科学、社区老年医学等等。还有许多课程,例如酗酒、营养、医学道德、吸毒等专题,尽管没有冠以“社区”的名称,但从课程特点来看,也属于社区定向型课程的范畴。以社区定向的课程,可以作为医学院必修课的一部分,也可以作为选修课的一部分。由于这类课程是在保留传统的、以学科为基础的结构,所以课程内容和教学方法仅在有限程度上反映社区医学教育的原则。在教学过程中,除安排一定时间的社区实践外,基本上是在医学院校范围内实施,课时从几小时到数百小时不等。这是目前大多数医学院校,特别是那些已经形成自己特色的老院校所采用的一种方法。

以社区为基础的教育 这是一种按社区卫生需要,并利用社区卫生资源组织的教学活动。在教学实施过程中,师生不仅作为社区卫生队伍的一员,广泛参与社区实践,也包括社区卫生部门和其他相关部门的成员广泛参与教学过程的组织与管理,这是目前大多数按社区定向实行医学教育改革的医学院校实行社区教育的一种方法。

以社区为基础的学习 这是一种在社区与一级的和二级的卫生服务机构中进行的教育活动,其基本做法是,让学生在当地卫生人员指导下,学习进行社区医学实践所必需的知识技能。其方法是让学生向某一家家庭建立联系,在教学期间由这一学生对这一家庭的卫生保健进行系统随访,参与社区发展,使学生了解卫生部门同社区其他相关部门的关系,参加社区调查,了解社区的卫生服务需要,实施社区卫生计划,包括预防接种、健康教育、妇幼保健等社区实践;在一级的和二级的医疗机构学习常见病的防治;参与社区初级卫生保健的管理实践。这是许多医学院校组织社区现场教学的一种方法。

以社区为基础的教育计划 这是1970年以后发展起来的,以培养家庭医生或社区医生为目标的培训项目,它是一种按相关社区中个人、家庭和人群的卫生服务需要定向的教育制度,整个教育计划的目的、目标和组织形式都是根据医学院校毕业生将来为之服务的社区的卫生服务需要来限定,并按照综合性卫生和保健的概念,重组基础医学与临床医学课程,全面实施以社区为基础,以问题为中心的多学科综合教学,这是目前按社区定向实行医学教育改革的医学院校,如麦克马斯特大学、林堡大学的医学院所采用的一种方法。

实践证明,加强社区医学教育是促进医学教育同社区卫生服务需要相联系,实现人人享有卫生保健的策略。为阐明社区医学教育的实施效果,1987年,WHO卫生人力开发处和社区定向型医学教育机构网络(NCOEHS)曾对10所医学院校采用通讯调查和现场考察的方法进行评估。评估的项目包括:(1)社区医学教育对卫生服务的影响;(2)社区医学教育对本国卫生人力培训制度的影响;(3)社区定向型医学院毕业生的质量。结果表明,实行社区定向教育的医学院校,不仅有效地改善了社区居民对卫生服务的利用,而且对本国医学教育的发展和改革也产生了积极的影响。各医学院校通过社区医学教育实践和社区参与,对卫生服务,包括对卫生设施、卫生人员和初级卫生服务的利用,以及卫生服务质量的提高是明显的。例如本古里安大学医学院,通过教学实践,该校师生为两所地区医院和160个卫生中心提供服务。在过去5年中,已有100余名医生到社区服务,35名完成专业培训的毕业生到社区开业,每年至少有50名毕业生到社区参加至少一年的初级卫生保健实践,使社区缺医的状况迅速缓解,初级卫生保健的质量全面提高。新墨西哥大学、麦克马斯特大学和特里勃哈温大学的医学院还在城镇社区和农村社区开办社区医院和门诊部,广泛组织师生参与社区实践,大大改善了社区居民对卫生设施和卫生人员的利用状况。从毕业生的质量来看,根据10所医学院报告,同其本国按传统方法进行教学的医学院相比,在诸如国家医师考试或实习期临床能力考核中,按社区定向进行培训的毕业生均达到相同的水平,在解决社区卫生问题的能力毕业后愿意到社区或农村行医的动机和态度还明显优于其他医学院校的毕业生,还没有一所医学院报告因实施社区医学教育而导致毕业生质量下降的情况。鉴于这一新型医学教育模式对卫生事业发展的积极影响,这些学校进行社区医学教育试验的成果对各国卫生人力培训制度,包括政府的卫生人力政策、医学院的结构和管理、教育内容和方法、毕业生的分配和使用等方面已经或正在产生影响,许多国家都把发展社区医学教育作为实施初级卫生保健的一项政策,鼓励在新建的或已建的医学院推广,为实施社区医学教育的学校提供政策上、管理上和财政上的支持。

早在50年代,中国许多医学院校即开始在城乡社区建立社区教学基地,广泛组织师生参加社区卫生实践。中国在发展社区医学教育、培训乡村医生方面的经验受到国际医学教育界的重

视。自1980年以来,为实施农村卫生发展战略,普及初级卫生保健,中国的医学院校已把发展社区医学教育列为重要目标。据中国卫生部向WHO提供的报告,在1983~1984年度的114所医学院中,已有112所医学院根据医生在社区中的任务来制定培养目标;有86所医学院校安排一定时间,让学生参加社区的初级卫生保健实践,以学习开展初级卫生保健的方法;有95所医学院校开设了社区医学、社会医学与预防医学等以社区定向的课程;有43所医学院校把卫生服务的管理列为必修课;有12所医学院校安排了以社区为基础的现场教学;有75所医学院校把学生放到社区中去,作为卫生队伍的一员,接受多专业协同作业训练。目前,尽管中国的社区医学教育还是一个发展中领域,但是,许多医学院校的试验成果已在国内外产生影响。正在进行社区医学教育试验的医学院校主要有上海医科大学上海县教学基地、西安医科大学汉中分校和安康分校、上海第二医科大学、首都医学院、九江医学专科学校等。西安医科大学和九江医学专科学校已经成为社区定向型医学教育机构网络(NCOEHS)的正式会员,上海第二医科大学已经成为该网络的联系会员。

纵观国内外社区医学教育的发展,可以看出一个明显的趋势:尽管这一新的医学教育模式还处在继续试验阶段,但社区医学教育已越来越为国际医学教育界所重视,实行社区定向型医学教育的学校不断增加。当前,不仅在高等医学教育领域,而且在中初级辅助卫生人员的培训中也广泛地采用社区为基础,以问题为中心的方法。

#### 参考文献

- 1 WHO. Community-based education of health personnel, Technical Report Series Geneva, 1987, 746
- 2 Kantowitz M, et al. Innovative tracks at established institutions for the education of health personnel, WHO Offset Report Publication, Geneva, 1987, 101
- 3 Richardson R, et al. Innovative schools for health personnel, WHO Offset Publication, Geneva, 1987, 102
- 4 梅人朗. 国外医学(医学教育分册), 1988, 9(3): 97~103
- 5 Hamad B. Medical Education, 1991, 25(1): 66~72
- 6 Lepreau F J. JAMA, 1991, 263(12): 1624~1625
- 7 Henk G, et al. Network of community-oriented educational institutions for the health services, Academic Medicine, 1991, 66(5): 259~263

(上海医科大学梅人朗教授撰)

**重症监护病房** intensive care unit 简称ICU,又称加强护理单元、加强监护病房、加强医疗病房。这一概念起源于分级护理。其发展已经有40多年历史。美国于1953年在康涅狄格州的曼彻斯特纪念医院首先开展,5年后,美国有150所医院先后推广。60年代,英国、德国、日本等相继设立ICU。从此,ICU护理在国际上盛行起来。ICU的主要特点是能够跨学科集中人力、物力、运用先进诊疗设备和技术对临床各科危重症病人全面进行生理、病理变化的综合监视、治疗和护理,以提高治愈率、降低病死率和病残率。ICU是当代临床工作的需要,是衡量现代医院水平的重要标志。

根据不同要求,ICU可分为:(1)重症集中监护病房;(2)冠心病监护病房;(3)麻醉及术后监护病房;(4)新生儿监护病房;(5)肾透析病房;(6)呼吸监护病房;(7)神经监护病房;(8)创伤监护病房;(9)烧伤监护病房。有的医院还设有急症监护室,如在某一病区内,设一房间收住本病房的监护病人,则称监护室。

ICU设施:ICU多设在与麻醉、手术科室相邻的地方。室内设有空调、通讯系统、压缩空气、氧气输送管道及先进的照明装置等。总监护站位于中心部,医护人员可以隔着玻璃观察到所有病人,也可通过闭路电视、综合监护仪和通讯预警系统及时了解病人的各种信息。ICU病床具有多功能的特点,可随意迁移、自动升降调节床面高度和角度,病房常自配翻身、牵引、功能操练、传

呼报警、X线检查或计算机文件处理装置等。每个病人床头都设有至少一个监护仪,该监护仪可把有关信息,如生命指标、房室压、心电图传递给监护站的综合监护仪,也可在屏幕上直接显示。ICU通常备有:(1)急救复苏器材,如气管导管、除颤器、起搏器、心脏按压器等;(2)呼吸用器材,如氧气吸放器,中心吸引器、潮气量计、氧及二氧化碳流量计等;(3)循环用器材,如各种血液动力学监测仪、量记录仪、辅助循环设备等;(4)其它器材,如静脉切开包、气管切开包、开胸包、缝合包、动脉加压输血管微量注射器泵、电子自动输液泵、血液净化器、X光线机等专用器材。

ICU的人员配备与管理与普通病房有很大不同。它平均每张床需配备1.25~1.50名医生,2~4名护士,0.25~0.50名护士长。此外,还需配备仪器维修和化验检查人员。上述人员都经过专门训练,具有适于ICU工作的基本条件。他(她)们是一个急救复苏、对严重呼吸循环、代谢疾病或损伤等有着多学科临床经验的工作体。在抢救治疗工作中,他们各负其责,而又紧密配合。ICU工作人员严格掌握收治原则,严格遵循无陪制度、消毒隔离制度和各项责任制,无论是管理人员、工作人员、还是患者、探视者,出入ICU时都应更换衣、鞋、帽。综合性ICU遇到难以解决的问题时,可请有关科室协助处理。一旦病人转危为安,即指生命指征稳定1~3d后,病人就可能回原病房继续观察治疗。科主任是ICU的最高行政业务领导,必要时院长可直接参与ICU的管理。

ICU护士的特殊职能:由于ICU护士不但是医疗工作监护者,实施者,又是先进仪器的使用者,所以对她们要求有其特殊性。除了应具有一般护士的基本素质外,还应具有获取知识、独立工作、进行非语言交流的能力,特别是应具有急救复苏、仪器使用及相关学科的理论和技术。ICU护士要善于继续学习,更新知识,掌握ICU内所有仪器的性能、操作规程,并能对有关数据、图像、检验结果作出正确分析与处理,这是完成ICU护理工作的重要一环。ICU护士还应具有应急处理问题的能力,能借助仪器有目的、有计划、主动地对一般病情,尤其对突发病情进行周密监视。如发现监护仪显示心电图异常,就应立即行描绘心电图监视并打印记录。紧急情况下,在医生未到之前护士有权采取果断措施,赢得抢救时间,ICU护士应学会在非语言交流中观察病情。例如对极度衰竭、接受气管切开,气管插管、人工呼吸治疗。暂时失去语言能力的病人,除了通过触、听、嗅觉直接观察病情外,还要从其手势、表情、体态、眼神中会意到需要,以帮助病人克服语言障碍,渡过生命危险期。ICU护士需常常对病人和自己的心理状态进行调控。病人由于环境设备特殊,气氛紧张、检查频繁,医务人员陌生等原因,产生濒临死亡的恐惧心理,护士则由于整日接触危重患者,工作紧张繁忙等因素而产生情绪波动。这两者都属心理问题,都需要及时进行调整和控制。一些国家的ICU机构往往把心理调控能力做为护士能否胜任在ICU特殊环境工作的重要考核条件。

近年来,一些国家的ICU已从综合性逐渐向专科性方面转化。专科性ICU的优越性在于,专科病人集中,业务环节减少,医疗护理程序简化、医疗护理质量提高。与此同时,ICU内的某些有创监测手段也正在被无创技术所取代。例如,用正电子计算机显像技术(PET)监测冠状动脉血流及颅内占位病变;用实时多普勒超声心动(RTED)或(NCCOM<sub>3</sub>-R<sub>6</sub>)监测心脏结构与功能变化;最近,非侵入性光电化学传感诊察技术也开始用于ICU,以监测血气、电解质、红细胞压积、血红蛋白、血糖等;有的医院甚至成立了非侵入性ICU,如非侵入性呼吸ICU(NRCU)等。

ICU的服务质量除了人的因素外,还取决于诊疗设施电子计算机化的程度。如利用呼吸数据翻译系统(RESPI.D)监测呼吸功能指标;利用NecoM<sub>3</sub>-R<sub>6</sub>监测心血管病理生理进程;利用SSEP<sub>3</sub>(躯体感觉激发电位)监测病变部血管变化;利用APACHE I早期发现败血症;利用人类声音报警装置监测病人心理、躯体疾病状况;利用检验结果报警系统监测病变的发生、发展与转归。由此可见,上述常有电子计算机的监测设施将有助于

扩大和提高ICU的效能。目前国内某些ICU机构已按需装配了上述的某些设施。ICU的计算机系统可在ICU内外形成网络联系,总监护站在综合监护仪可收集来自不同方面的不同信息,能对病人心、脑、肾、肝、肺等重要脏器进行全面监测,以利于明确诊断、制定用药,指导手术,评估预后,总结经验和学术交流。更进一步地还可利用监护仪与医生办公室、主任室、影像室、及化验室联网,甚至于与银行、保险公司联网。最近,ICU内计算机系统有向着更高层次的微型化、网络化和智能化发展的趋势。

(安徽医科大学第一附属医院韩培华撰)

**ICU与诊治** ICU拥有高技术 and 训练有素的医护队伍,应用先进的现代化设备,以危重病人为服务对象,通过对呼吸循环功能、代谢状态和机体内稳态的动态监测,作出迅速和准确判断,及时有效地施行急救治疗措施,使病人渡过危重阶段。在危重病病人的救治中,显示出优越性和卓著效果。

ICU的发展:早在19世纪50年代,南丁格尔(Nightingale)

即把有希望救活的重伤员集中安置在靠近护士站的地方,使这些危重病人能得到仔细观察、精心护理和及时治疗。在她的观念启发下,开始术后恢复室的工作。第一次世界大战后建立起来的麻醉后恢复室和军队中的休克治疗组织,是ICU的前驱。1923年,美国Dandy率先为脑外科病人开术后恢复室。1930年,Kirschner在德国建立了术后恢复室和ICU病房。1952年,丹麦等北欧国家和1955年美国脊髓灰质炎流行中,大量病人集中治疗,麻醉科医师进入传染病房,和传染科医师协作进行气管插管和人工通气等治疗,使病死率明显降低。通过实践证实:将危重病人集中观察、细心护理、加强治疗可显著地提高医疗质量。1958年,美国Safar建立了第1个由麻醉科管辖的具有现代规模的综合性ICU。在此基础上1970年美国兴起危重病医学,并作为专业学科迅速发展。80年代后,中国各大医院才纷纷建立ICU。1982年,北京协和医院开设外科ICU第1张病床。ICU现已成为市级以上医院的重要组成部分和中国等级医院评定内容之一。

表 1

ICU 诊治评分表(TISS)

| 4分                     |    | 2分                    |    |    |
|------------------------|----|-----------------------|----|----|
| 1. 心搏骤停或(和)48h内曾除颤者    | 4分 | 11. 连续应用抗心律失常药        | 2分 |    |
| 2. 控制呼吸或(和)同时行呼气终末加压   |    | 12. 心律转复              |    |    |
| 3. 间断或连续使用肌松药行控制呼吸     |    | 13. 应用降温毯             |    |    |
| 4. 动脉内连续注药治疗           |    | 14. 周围动脉置管            |    |    |
| 5. 应用 Swan Ganz 导管     |    | 15. 快速洋地黄化            |    |    |
| 6. 心内起搏                |    | 16. 脑水肿或体液超负荷而需积极利尿   |    |    |
| 7. 透析治疗(包括腹腔透析)        |    | 17. 积极纠正代谢型碱/酸失衡      |    |    |
| 8. 人工低温                |    |                       |    |    |
| 9. 应用休克裤               |    |                       |    |    |
| 10. 心排血量测定             |    |                       |    |    |
| 11. 输血小板               |    |                       |    |    |
| 12. 动脉内反搏辅助循环          |    |                       |    |    |
| 13. 应用膜式肺              |    |                       |    |    |
| 3分                     |    | 1分                    |    |    |
| 1. 胃肠外营养或肾脏后体液调节       | 3分 | 1. 中心静脉压              |    | 1分 |
| 2. 准备应用起搏术             |    | 2. 两处以上静脉输液           |    |    |
| 3. 胸腔引流                |    | 3. 慢性肾衰透析治疗           |    |    |
| 4. 辅助呼吸或加用呼气终末加压       |    | 4. 气管造口 18h 以内者       |    |    |
| 5. 输高浓度钾液(高于 60mmol/L) |    | 5. 气管造口后护理            |    |    |
| 6. 经鼻或口气管插管            |    | 6. 气管插管能自主呼吸者         |    |    |
| 7. 支气管内吸引              |    |                       |    |    |
| 8. 重复血气分析, 出血而需住院      |    |                       |    |    |
| 9. 频繁输注血液成分            |    |                       |    |    |
| 10. 连续应用血管活性药          |    |                       |    |    |
|                        |    | 1. 心电图监测              |    |    |
|                        |    | 2. 需每小时观察生命体征或重要神经体征者 |    |    |
|                        |    | 3. 长期抗凝治疗             |    |    |
|                        |    | 4. 控制出入量              |    |    |
|                        |    | 5. 多处伤口换药             |    |    |
|                        |    | 6. 复杂管牵引              |    |    |
|                        |    | 7. 褥疮溃瘍治疗             |    |    |
|                        |    | 8. 持续导尿               |    |    |
|                        |    | 9. 辅助性吸氧              |    |    |
|                        |    | 10. 伤口、瘘管或肠瘘的广泛冲洗     |    |    |

现代规模的ICU,根据收治病人情况有以下3种模式:(1)综合ICU,是面向全院各科危重病人的,其优点是人力、物力相对集中,工作效率高,但专职ICU医师要精通各专科危重病病人的诊断治疗,是有一定困难的。(2)专科的ICU,只收治某专科或某一病种病人,如心脏病的CCU,新生儿的NCU,呼吸科的RCU等,由专科医师管理,他们有较强的专科处理能力,但对调控病人生理功能和维持机体内稳态有憾不足。(3)外科ICU或内科ICU,为大科的ICU,兼有专科ICU及综合ICU特征,既节省人力、物力,又对大科病人的病情比较熟悉,适合于一般综合性医院。

综合性医院ICU床位占医院总床位数的1%~5%不等,普通医院约占1%~2%,接受危重病人多的重点医院或中心医院

可达5%。为便于管理,1个单元的ICU床位设置以6~12张为宜,每床占地面积12~14m<sup>2</sup>,床间距至少1.5m,辅助用房面积应与床位面积相等,或再增加50%。ICU的布局原则:(1)中央控制台或护士室能随时观察到每个病人;(2)有最短的急救治疗距离;(3)有充分的面积放置药物、仪器;(4)人员、物品、室内空气最好保持单向流动;(5)有清洁区和次清洁区之分,最好有隔离病房。

综合ICU的医师和护士是危重病医学的专业工作人员,应经过专门培训,业务能力强,有高度责任感及奉献精神。医师和床位的比例为1:1~1.5;主任医师,主治医师,住院医师应定为1:2:5,必须有1名副主任医师以上有威望的高年医师负责全面工作。专职医师应具有多学科知识,熟练的监测、急救与复苏

技术,和丰富的处理危重病人经验,麻醉科有经验的医师,在这方面则有相对优势。但专职医师不可能精通各专科疾病,专科性很强的问题要采取会诊方式妥善处理。ICU的护士是ICU中重技术力量,必须经过正规培训,能掌握使用监护仪、呼吸机等,有一定应急处理能力。护士和床位的比例为2~3:1;主管护师,护士:护士为1:3~8。一个完善的ICU除医师、护士外,还应配有呼吸治疗师、检验师、生物医学工程人员等。

综合ICU的病人来自全院各临床科室,专科ICU只收治本专科的危重病人。收治的急重症病人,应是经加强监测和治疗后有可能好转者。按现代护理观点,根据需要加强护理的工作量和时间,将病人按病情轻重程度分为病危(随时需加强护理,时间在16~24h)、病重(护理时间12h左右)、一般和能自理4类,ICU收治的病人属第1、2类。适应症:(1)各种疑难或复杂的大手术后者,(2)麻醉手术期间发生严重并发症者,(3)各类休克及严重创伤者,(4)心功能不全,心衰或严重心律不齐者,(5)呼吸功能不全或呼吸衰竭者,(6)急性肾功能不全者,(7)重症代谢障碍者(8),急性药物中毒者,(9)脏器移植术后者(10)心肺复苏后

者。

非收治适应症:(12)脑死亡病人,(2)病因不能纠正的濒死状态者,(3)急性传染病者,(4)恶性肿瘤晚期者,(5)精神病患者,(6)慢性疾病者。

诊治措施记分系统简称TISS(表1),系计算医护人员为ICU危重病人采取的诊断治疗措施的记分。积分在4分以上为收治指征,4分以上为病情重笃。此外还有APACHE评分法,该评分法不仅根据病人送往ICU时的急重病的生理状态,还包括发病前的3~6个月健康状况,来估计病情,判断预后。早在1981年,美国华盛顿大学医疗中心就将APACHE用于疾病预后判断,1985年发展为APACHE I,1990年,美国40个医院统计17457个病例结果,提出APACHE II。APACHE记分法和死亡率呈正相关,积分10分以下,死亡率在10%以下。若积分在40分以上,则死亡率达90%以上。APACHE II包括3部分:(1)急性生理记分0~60,称APS(Acute Physiology Score),(2)年龄评分0~6,(3)病前健康记分0~5(表2)。

表2

APACHE II 疾病分级评分系统

| 生理指标                                   | 不正常高限  |             |             |             |            | 不正常低限     |           |           |        |
|----------------------------------------|--------|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------|
|                                        | +4     | +3          | +2          | +1          | 0          | +1        | +2        | +3        | +4     |
| TC(直肠)                                 | >41°   | 39°~40.9°   |             | 38.5°~38.9° | 36°~38.4   | 34°~35.9° | 32°~33.9° | 30°~31.9° | <29.9° |
| MAPkPa                                 | ≥21.33 | 17.33~21.2  | 14.67~17.2  |             | 9.33~14.53 |           | 6.67~9.20 |           | 6.53   |
| P(心率)                                  | >180   | 140~179     | 110~139     |             | 70~109     |           | 55~69     | 40~54     | <39    |
| R(呼吸)                                  | >20    | 35~49       |             | 25~34       | 12~24      | 10~11     | 6~9       |           | <5     |
| $P_{aO_2}$ (A-a)Do <sub>2</sub><br>kPa | 66.67  | 46.67~66.53 | 26.67~46.52 |             | <26.67     |           |           |           |        |
| $F_{iO_2}$ (0.5)Pao <sub>2</sub>       |        |             |             |             | >7)        | 61~70     |           | 55~60     | <55    |
| H(μmol/L)                              | ≥20    | 25.1~20.4   |             | 31.6~25.7   | 46.8~32.4  |           | 56.2~47.9 | 70.8~57.5 | <70.8  |
| Na <sup>+</sup> (mmol/L)               | >180   | 160~179     | 155~159     | 150~154     | 130~149    |           | 120~129   | 111~119   | 110    |
| K <sup>+</sup> (mmol/L)                | >7     | 6~6.9       |             | 5.5~5.9     | 3.5~5.4    | 3~3.4     | 2.5~2.9   |           | <2.5   |
| Crmg/100ml<br>(肌酐)                     | 5.5    | 2~3.4       | 1.5~1.9     |             | 0.6~1.4    |           | <0.6      |           |        |
| Ht(%)                                  | >60    |             | 50~59.9     | 46~49.9     | 30~45.9    |           | 20~29.9   |           | <20    |
| WBC<br>10 <sup>9</sup> /L              | >14    |             | 20~39.9     | 15~19.9     | 3~14.9     |           | 1~2.9     |           | <1     |
| 昏迷记分<br>Glasgow                        |        |             |             |             |            |           |           |           |        |
| A:急性生理总分                               |        |             |             |             |            |           |           |           |        |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mmol/L) | ≥32    | 41~51.9     |             | 32~40.9     | 22~31.9    |           | 18~21.9   | 15~17.9   | <15    |

B:年龄评分:

≤44 0

45~54 2

55~64 3

C:病前健康

急诊手术后 5

选择性手术后 2

65~74 5

≥75 6

记分 APACHE I 总分

= A+B+C

ICU中的监测和加强治疗:ICU中的监测治疗,必须有现代化仪器设备,重点是满足呼吸、循环、代谢状态的监测和治疗,如循环方面:心电示波,应有心率紊乱分析、有创及无创血压测定、心输

出量测定等,并应有输液泵、除颤器、主动脉内气囊反搏装置等,呼吸方面:有呼吸波形、频率、潮气量、气道阻力等监测,应备有血气分析仪、氧及二氧化碳浓度监测仪。ICU需有几种类型呼吸机、雾化吸入器、气管插管及气管切开的设备。简要介绍见表3。

中国ICU的建立已受到重视,因为ICU能明显提高医疗质量,降低死亡率,成功地抢救许多过去难以救治的病人。但有关ICU模式、设备的配置、由于仪器故障所致意外以及MSOF的治愈率、CPCR的成功率、电子计算机资料处理等,有待进一步探讨和提高。

表3 按系统进行的重症监测和加强治疗

| 器官系统    | 重症监测要点                                                            | 加强治疗项目                                                                          |
|---------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 心血管系统   | 非侵入性和侵入性血压、肺动脉压监测,心排血量、血容量,连续 EKG 和脉搏监测,心律失常监测,中心静脉压,心血管功能的动态趋向分析 | 经输液泵给高效能药物(如受体阻滞药、兴奋药、抗心律失常药、血管活性药),各种扩容增量剂(输血、输液),扶助循环措施(主动脉内气囊泵,体外循环转流),安装起搏器 |
| 呼吸系统    | 各种呼吸参数的监测如频率、形态、潮气量、分钟通气量,不同的机械通气类型和压力,SPO <sub>2</sub> ,血气分析     | 长期机械通气,体外氧合措施                                                                   |
| 中枢神经系统  | 病程中神经系统监测(神志、瞳孔大小、反射状态)包括 EEG 和颅内压、透发电位                           | 颅内内外稳态的维持                                                                       |
| 体温调节和代谢 | 连续体温监测,水、电解质和酸碱状态监测,肝功能试验,氮平衡,血浆蛋白,血糖、乳酸盐                         | 人工降温,酸碱和电解质失衡的纠正氮平衡,进行人工营养,利尿,血液透析,换血疗法                                         |
| 肾脏      | 记录每小时尿量,测定 BUN 全身水分状态(如 Na, Hct, CVP)及肾功能(清除率和渗透压)                | 血液透析,腹膜透析,血液过滤                                                                  |
| 止血功能    | Quick 试验,部分凝血酶时间,凝血酶时间,纤维蛋白原,凝血酶凝固时间,乙醇试验,血小板计数,抗凝血酶Ⅲ             | 凝血的治疗如纤维蛋白溶解,肝素,浓缩血小板治疗,凝血因子治疗如 FⅠⅢⅠ 等                                          |
| 胃肠系统    | 不正常的胃肠道丧失引起的氮失衡                                                   | 根据氮失衡状态进行肠道外输入和营养治疗                                                             |
| 内分泌系统   | 密切观察有无出现昏迷(糖尿病-高血糖症),血钙含量                                         | 昏迷的治疗(糖尿病性的、垂体性的、低血钙性的 Addison 危象,甲状腺危象,粘液水肿性的等)                                |
| 感染      | 细菌培养和药敏                                                           | 有目的大剂量抗生素治疗                                                                     |

## 参考文献

- 1 Editorial views, Anesthesiology, 1977, 44: 81
- 2 谢荣, 国外医学(外科学分册), 1983, 6: 338~340
- 3 马遂, 国外医学(麻醉学与复苏分册), 1984, 5: 218~223
- 4 刘俊杰, 赵俊, 现代麻醉学, 北京: 人民卫生出版社, 1987, 1295~1301
- 5 Wong D F, et al, Can. J. Anesth., 1991, 38(3): 374~377
- 6 Wright D, et al, The Lancet, 1991, 338: 676

(安徽省立医院麻醉科高玉华撰)

**医院护理管理** nursing management of hospital 医院护理管理是医院管理的重要组成部分,它是研究护理事业管理活动的基本规律和方法的科学。是一门新兴的交叉科学。护理管理是以提高护理服务质量为主要目的的工作过程。

历史上从有了医学就有护理工作的内容,“三分治,七分养”是对护理工作的高度概括。护理学发展成为一门独立的学科,是从19世纪中叶开始的。南丁格尔——近代护理学的奠基人开创了科学的护理专业,创办了世界上第一所培养护士的学校,为近代护理专业奠定了基础,也推动了护理事业的发展。中国的护理工作也有100多年的历史,1884年上海开办第一所护士学校,1921年北京协和医学院开办了高等护士教育学校,为中国培养了护理师资、管理人才。后来陆续办护校,直至1949年新中国成立前夕共有108所护校。在革命战争年代,也重视培养战地救护的护理人员。随着医疗卫生事业的发展护理队伍日益扩大,由1949年新中国成立时3万余人至今已达100余万人。停办30多年的高等护理教育已于1984年恢复,现中国高等院校有11所设立了护理系本科;1991年北京医大开始招收硕士研究生,一些省市举办大专,夜大,职大,函授等教育,有计划地培养护理人才,护理教育体系逐步完善,有中专、大专、本科等,已向多层次、多序列发展,培养师资管理、科研等骨干,促进了学科建设,发展了护理事业。

南丁格尔在创建近代护理学的同时,也进行了护理管理的实践。她把所学的科学知识有机地用于护理及管理的实践,她的病房管理和医院管理经验为后来的医院管理工作奠定了基础,同

时在实践中总结出一套医院管理的经验、管理理论,并沿用至今。护理管理以人、财、物、时间、信息、技术等作为研究对象,在护理管理过程中运用系统论、控制论、信息论和数理统计等方法,来确定管理目标,制定计划、实施方案,应用信息反馈和所量控制对护理工作的未来进行预测和评估,以达到最佳的管理效果;运用现代科技手段,如信息系统的建立与电子计算机的应用,建立信息库、电脑监护、计算机处理,以提高护理管理现代化水平,促进护理事业不断发展。护理管理是一门科学,也是一门艺术,在管理中运用科学的管理知识,应具有观察局部而联系全局。

护理管理分为组织管理和技术管理两大部分:(1)组织管理包括建立健全医院护理指挥系统;确定各级护理管理人员的职权和各级护理人员的职责范围;制定护理规章制度;根据各专科和部门护理工作性质、任务,合理地配备人员、设备、物品等。在组织管理中抓好人事管理,居一切管理之首;其目的在于开发人力资源,发掘人的潜力,调动各级护理人员的积极性,使其智能得到高效能的发挥。对人员编制的管理应遵循的原则是根据功能需要,在配备护理单元时要考虑医院的性质、规模和任务,如综合性教学医院,任务繁重,应增加教学编制。能级对应原则:应根据护理工作具有高度的科学性、技术性、严密性和复杂性的特点,在人员配备上视其工作能力、资历、技术职称和护士自身的素质、不同层次结构,做到按职上岗,各司其职。如500张病床以上的医院,护理部主任、科护士长应由正副主任护师担任;病区护士长或带教护士老师应由主管护师担任;责任护士应由护师担任。动态发展原则:人员编制根据医院整个发展趋势安排,要有预见性,发展新业务、新技术,需要增加护理人员。如设立ICU、CCU病室等应按监护床位相应配护理人员,如实行责任制护理应有相应的人力,以保证此项工作的顺利进行。护理部要有自主权,同时应考虑临时指令性任务,要有所安排,以保证院内工作正常运行。护理人员绝大多数系女同志,有其生理特点和特殊性,在编制中应有一定比例的机动数。(2)技术管理的目的是使护理、科研、教学等业务工作达到高质量,因此它是医院管理工作的重要组成部分;医疗护理技术管理质量的好坏,对保障病人生命安全,促进病人早日康复、预防差错事故,和提高医疗质量起决定作用。技术管理需要建立各项护理技术管理制度和质量标准,运用技术为病

人服务,必须做到安全、可靠、准确、及时。技术管理是在医疗护理过程中综合协调各部门、各环节的技术活动,如实施急诊、抢救危重病人过程中的技术措施;计划诊疗和计划护理、查房、病例讨论、消毒隔离卫生管理等,使工作忙而不乱,做到技术操作常规化、工作程序化、质量标准化、设置规格化。对发展新业务、新技术和重点科室的建设、临床科研等必须做到培养人才在前,以适应发展的需要。对护理质量标准的控制和评估,做到有计划、有措施、有检查、有评价。护理技术操作规程包括基础护理技术操作和专科护理技术操作,各项操作的制定都是以医学基础理论和护理学原理为指导,护理工作必须严格遵照执行。整个医院的管理工作是以质量管理为核心,以技术管理为重点,以组织管理为保证。护理质量标准是管理的基础,是评价工作质量的标尺。而标准化管理是多种责任制在管理上的综合体现,如岗位责任制、技术责任制、质量责任制、经济责任制,这不仅强调个人责任,要使工作质量达标,更应发挥整体效能,因此工作要求有效率指标、质量指标、操作指标、管理指标。在护理标准化管理中,其基本方法是目标管理法,要实现总体目标,必须有分目标,定科室、单位或个人的目标,把目标任务分解到人、落到实处。质量管理是标准化管理的核心。护理工作实行3级控制,在自控、互控、逐级控制时,必须严格要求,做到对工作、对病人有高度的责任感,检查相互督促,提高护理人员的业务素质 and 职业道德修养。管理水平的高低要体现社会效益和经济效益。质量管理要完善登记、统计工作,各项工作有数据指标。这些数据都直接反映工作效率和管理水平、技术水平和人员素质的高低。

#### 参考文献

- 1 陆忠,现代医院管理.哈尔滨:黑龙江科技出版社,1984.12:198~206
- 2 郭子恒,等.医院管理学(第2版).北京:人民卫生出版社,1985.4:59~187
- 3 黎正良,等.实用护理管理学.西安:陕西科技出版社,1990.8:27~162
- 4 王英下,等.医院管理学.合肥:安徽科技出版社,1991.4:99~120,185~191
- 5 王冬,等.现代医院管理理论与方法(第1版).上海科技文献出版社,1992.3:384~392

(安徽医科大学第一附属医院李从斌副主任护师撰;马维通审)

### 护理管理在冠心病监护病房的特殊地位

the special situation of nursing management in coronary care units

冠心病监护病房(CCU)是随着现代科学发展和医学科学进步而创建的新兴护理单元,具有特殊的职能与现代化的仪器设备,是先进医疗、护理技术集中的场所,有利于病人检查、治疗、病情监测及抢救等工作。

CCU始建于1962年,当时主要针对AMI死亡者中60%~70%因致命性心律失常死于发病1~2h内而设。此后,CCU必需的治疗方法中规定有直流电击、经静脉安置人工起搏器、胸外按摩等。

CCU的开展,使AMI者院内死亡率从40%降至30%。70年代,CCU增加了S-W导管血流动力学监测,超声心动图,心肌同位素扫描,右室梗塞诊断与治疗,心脏破裂预防,亚硝酸剂静脉注射及Ca拮抗剂等对梗塞后心绞痛的治疗,心律失常药、多巴胺等新型强心剂的应用,血管扩张剂的应用,IABP等。使AMI死亡率从30%降至20%。

80年代后,闭塞血管再灌注疗法的应用,为血栓溶解疗法(冠状内静脉)、经皮冠状动脉扩张法(PTCA)的应用使AMI者死亡率从20%降至10%。

由于CCU病房的特殊性,因此护理管理工作占有举足轻重的地位,其组织管理,主要是人员选择,力量配备,技术健全,以确保监护工作的正常运行,并逐步实现微机管理。监护病房应有专科主任和护士长负责,并委派受过专业训练的医师、护师或有

经验的高年护士来担任监护工作。护理人员配备应为床位与人员之比1:2~3,实行24h三班轮流值班,日夜不间断监护。应建立一套完整、有效、科学的规章制度,如监护病房的管理制度、岗位责任制、交接班制度、消毒隔离制度、仪器使用保管维修等制度,才能保证各项护理工作相对稳定的情况下惯性运行,达到提高护理质量工作效率。

监护病房导致新型护士的出现,监护系统成功的关键首先取决于护理人员的能力,护理人员必须经过有关专业的高级训练,不仅需要一定医学理论知识与素质修养,还要有一定诊断疾病与紧急处理的能力,熟练掌握专科各种危急疾病的知识、心电图知识、监测内容的各种知识、急救处理及各种急救仪器的操作,并能结合病情正确分析监测资料,从而提高监护系统的效率。

卓有成效的监护病房应设计特殊、设备先进、技能娴熟人员等条件,为病人提供最佳服务,监护病房应设在安静环境中,避免干扰,并与相关科室邻接(如麻醉科、放射科、急诊科等)。

病室为单间组成的开墙式病房,由中心护士站直接监测或闭路电视监测。室内应采用空调系统控制室温,照明系统应是高效而可变的,尽量接近自然光。室内每床占地面积至少为10~15m<sup>2</sup>,并有充分余地放置急救仪器和辅助设备。每个病床间应由屏风或布帘相隔。为完成其监护目标,室内必须具有检测、评定和治疗设备。

检测设备:包括心电监护仪、心电图机、X-射线机。心电监护系统分为总监护仪与床旁监护仪两个部分,其间是有线联系或无线电遥感联系。总台设在护士中心站,它可以监测病人心电、心率、心律、血压、呼吸、体温、血氧分析等,并具有储存、重放、记录、报警等功能。

评定设备:包括血流动力学监测仪及血气分析仪。

治疗设备:包括除颤仪、呼吸机、起搏器、急救车、急救药品、中心供氧与吸引装置及接地良好的电源插座。

监护范围:不稳定型心绞痛者;梗塞前综合征者;急性心肌梗塞者;严重心律失常者;心源性休克者;心源性晕厥者;心力衰竭者;电复律者;安装人工心脏起搏器。

监护时限:急性心肌梗塞者一般监护3~5d,伴并发症时可延长监护时间,非心肌梗塞者视病情而定。病情稳定者可转入普通病房。

监护方法:接待病人入监护室,并做好解释、安慰工作,消除紧张恐惧感,以配合治疗。选用胸前导联按常规部位以固定,并将心电信号引出显示于示波器上,持续监测,在监测过程中若出现警戒性心律失常的信号应及时给以处理,但必须做到“三早”(早期发现、早期诊断、早期治疗。)病情恶化或危重者应严格卧床休息,勿用力,以防心衰或突然死亡。对危重病人拟定护理计划,做好护理记录,随时观察病情变化。注意饮食、大小便护理,给以清淡、高热量饮食、少食多餐,禁烟酒等,保持大便通畅,常规给缓泻剂及便前2~3min口含消心痛或硝酸甘油,以防心绞痛发生。常规给以氧气吸入。可根据病情决定用氧时间及流量。熟练掌握电复律术、心肺复苏术、心脏起搏术等抢救技术。

#### 参考文献

- 1 黄体钢.冠心病.天津:天津出版社,1988
- 2 黎正良,王桂英.实用护理管理.西安:陕西出版社,1990
- 3 包世宠.编译.冠心病监护手册.上海:复旦大学出版社,1990
- 4 Thom-son.国外医学(护理分册).1991.3:82

(安徽医科大学第一附属医院丁佩玉主管医师撰;朱怀玺审)

### 洁净手术室的建立和手术室无菌环境管理

build up of clean operative theater and management of its clean environmental 手术室是对病人施行手术诊断、治疗和对危重病人进行紧急抢救的重要场所。术后患者发生感染是外科等手术科室的严重并发症之一,不仅影响手术的效果,而且关系到患者安危,为了防止术后感染,应建立洁净手术室,加强手术室的无菌环境管理。



近年来,随着航天工业技术的进步,建立了净化室,用以除去空气中的粒子。空气中的微生物是以粒子为载体的。因此,将工业净化室可引入医院,建立洁净手术室,可减少微生物对患者的感染。最早采用这一技术的是美国和日本,它们分别在1966年和1970年建立洁净手术室。洁净手术室采用高效过滤器和空调系统,保持手术室的无菌环境。高效过滤器可以滤过空气中 $0.3\mu\text{m}$ 以上的粒子达99.92%,保证室内高度净化;空调系统将洁净的空气经过湿化、加温或冷却与送风机共同作用,将其送入手术间,手术间的空气保持正压,防止外界空气流入。狭义的洁净手术室是指室内气流保持一定速度和方向的层流,广义的洁净手术室分为层流式的包括垂直层流型的和水平层流型的,非层流式的包括定向风化型的和秘流型的。层流式的,垂直层流是将高效过滤器装在手术间顶棚上,气流垂直下降,回风口设在除外墙及门口处的所有靠地坪的墙面;水平层流是将高效过滤器装在手术病人脚部一侧墙面,水平送风,回风口设在相对一侧近墙面的顶棚上。国外资料认为,利用层流空调方式的洁净手术室,每小时换气500~600次,感染率可以接近零。中国在80年代初开始建立洁净手术室,如沈阳部队总医院于1982年建立,该手术室将手术间按无菌等级分为较高的一级和较低的二级,分别设两个空调系统,空气分别循环,互不相混,一级手术间每小时换气不少于25次,二级的不少于15次,采用乱流式高效空气滤过空调系统,洁净空气由手术台上方顶棚孔板送入,由手术间四壁回风口收回,再掺入空调机处理。该院建立洁净手术室后,于1982年4月至1984年3月共施无菌手术4519例次,发生感染3例(0.06%),较未建洁净手术室采用常规药物消毒时施4031例次无菌手术,发生感染17例(0.42%)相比,感染率显著下降。

为了保持手术的无菌环境,应加强手术室的无菌环境管理,要将医护人员与病人进出手术室的线路分开;更衣鞋帽应标准化,清洁鞋与污染鞋不踏在同一块地方;接送病人的担架、推车应分为室内的和室外的,防止车轮从外部带入细菌;推车用后,用清水刷洗车身和软垫上沾染的污垢、血斑,然后用消毒剂擦拭,20~30min后用清洁的抹布擦净,每周随各手术间消毒时用过氧乙酸熏蒸消毒,软垫上所用的布单均经高压灭菌,实行一患者更换一单;强调调身穿洗手衣裤,不准工作人员将自己的任何物品带入手术室;手术期间医护人员不得随意进入其他手术间,尤其是一般手术间的医护人员不得进入无菌手术间;手术室消毒程序化,每次术毕要清洗手术床和地面,先用化学消毒剂擦洗,后用自来水冲洗,每周刷洗一交内墙;重视空气消毒,除按规定时间更换新鲜空气及术前1h、术后进行紫外线照射外,每周用甲醛或乳酸熏蒸封闭消毒,或用过氧乙酸喷雾,或用净洁剂消毒。国外医院手术室的清洁卫生是由医院家政科管理,家政科的工作人员由医院外的服务公司派来医院工作,服务公司有自己的化验室和消毒车间,清洁工由医院招聘,家政科挑选、训练和管理。

#### 参考文献

- 1 朱淑婷,国外医学(护理学分册),1985,6(2):74
- 2 郭子恒,等.医院管理学.北京:人民卫生出版社,1985.525~526
- 3 熊凤岩,译.国外医学(护理学分册),1986,7(1):16
- 4 王立阁,等.中华护理学杂志,1986,21(3):115
- 5 李学增,国外医学(护理学分册),1993,18(5):315

(安徽医科大学第一附属医院施亦文主任护士师撰;王蔚董审)

**中国卫生总费用研究** 近年来,许多国家的学术机构开始系统、全面地研究卫生事业的经济活动。他们所采用的方法是“卫生事业资金的筹集与支出调查”。试图利用这种方法收集、整理、分析、评价卫生事业的经济活动。在20世纪50年代,发达国家就有人开始进行全国性调查。1963年,英国艾贝尔·史密斯受世界卫生组织的委托,使用专门的调查表对发达国家和发展中国家的卫生筹资与支出进行了第1次系统的比较全面的调查。1967

年,艾贝尔·史密斯又进行了第2次规模更大的研究,包括29个国家,其中有21个是发展中国家。以后,菲律宾、卢旺达、韩国、孟加拉等国先后进行了卫生事业资金筹集与支出的调查、研究。

1967~1977年,日内瓦桑多兹卫生和社会经济研究所与世界卫生组织合作,首先进行一次小规模的研究,规划、制定和检验了一种简单的、快速的、比较节省的卫生事业资金筹集与支出的调查方法。这种方法比较适合在发展中国家使用。首先,他们在九周内,使用一部分时间在波茨瓦纳进行了十分详细的全面调查,但包括撰写调查报告,只用了3个人,发现该国的卫生费用总额比以前想像的要高得多,占国内生产总值的5.3%。其中45.6%来自政府,33.2%来自外援,个人支付卫生费用占卫生总费用的16%。以后,又有塞内加尔和卢旺达进行了卫生费用调查。1981年,多哥也使用卢旺达使用过的方法进行另一次卫生事业筹资与支出的调查,进一步确认调查方法的可行性。

1978年,世界卫生组织举行了一次研究小组会议,讨论卫生事业筹资问题,审查了工作,并提出发展计划。会后,在波茨瓦纳进行第2次卫生事业资金筹集与支出调查。1980年,世界卫生组织举行一次地区间的卫生事业资金筹集与支出调查的讲习班,以后,在世界卫生组织的支持下,美国公共卫生协会和桑多兹研究所合作,于1980年末在加蓬龙举行了为期两周的短训班。

1983年,艾贝尔·史密斯与麦克共同撰写了《卫生事业筹资计划的编制》,其中详细讨论了卫生总费用的概念、调查方法、评价指标。同年,法国杉地尔撰写了《评价和分析卫生费用的方法》,深入讨论了卫生总费用评价的原则,现成的或收集的统计信息,统计信息的处理以及从卫生服务管理角度如何分析这些信息等。

中国对卫生总费用的研究是从80年代初开始的。1981年,世界银行对中国卫生事业进行了第1次考察,参加这次考察的英国N. Prescott与中国卫生部计财司合作对中国卫生总费用进行了估计与测算。计财司估计与测算了中国1980年卫生总费用(122.10亿元);N. Prescott估计与测算了中国1981年卫生总费用(141.84亿元)。上海医科大学和上海县卫生局,在美国哈佛大学教授Parker的帮助下,研究了上海县的卫生总费用。哈尔滨医科大学卫生管理专业的学员,调查、研究与评价分析了黑龙江省宁安县、北京通县、大连金县以及长春市、沈阳市、哈尔滨市的卫生总费用。

1987年,世界银行对中国卫生部门进行第2次考察,卫生部计财司在哈尔滨医科大学的帮助下又一次计算与分析了中国卫生总费用。世界银行专家在中国政府官员与专家的帮助下,对中国近20年的卫生总费用进行了估计与测算。与此同时中国卫生部计划财务司、哈尔滨医科大学、同济医科大学也相应地估计与测算了中国80年代的卫生总费用,并对90年代中国卫生总费用进行了预测。与此同时,在世界银行的帮助与指导下,在卫生部统计信息中心和国外贷款办公室的支持下,区域卫生发展规划的三城市进行了卫生总费用的预备性调查和初步评价,哈尔滨医科大学、同济医科大学、西安医科大学以及中国卫生经济研究所继续提供技术援助。

卫生总费用的调查研究资料不仅对政策分析有用,而且开始在效益评价中发挥作用。在卫生部计财司和健康报社倡导以及一些专家学者的参与下,洛阳、四平、苏州、沙市以及阿城市在卫生总费用调查的基础上,利用卫生总费用数据进行了区域投资效益的综合评价。上海市卫生局和上海医科大学对上海市卫生总费用也进行了调查研究和分析评价。总之,卫生总费用的调查研究和分析评价,开始逐步成为中国卫生政策分析、规划制订与效益评价不可缺少的经济信息。

卫生总费用,是卫生事业在一定时期内为了提供卫生服务而消耗的活劳动与物化劳动的货币表现。从经济上看,资金与费用都是社会劳动的货币表现,但资金是一定时点上存在或占用的社会劳动的货币表现,而费用是一定时期消耗的社会劳动的货币表现。所以,资金表现为货币的存量,而费用表现为货币的流量。

货币的存贮与流贮是从两种不同的角度看待与认识同一事物。如果是纵向认识货币的流转,看到的是卫生事业消耗的费用。所以从经济上研究卫生费用,注意的是卫生事业在一定时期货币的流入与流出,而且是为了实现特定目标而发生的流入流出。

货币流入卫生事业,通常表现为费用的筹集或表现为财务收入。但从卫生事业的筹资者——政府、企业与个人来看,卫生费用的筹集也表现为这些筹资者的支出:财政支出、企业劳保医疗支出、个人医疗消费支出。在卫生服务的提供者医院、卫生防疫站看来,卫生事业的筹资表现为单位的财务收入、上级拨款收入和业务收入。

货币流出卫生事业,通常表现为费用支出,即卫生事业的各项支出、正常经费支出、专项拨款支出、专用基金支出以及基本建设支出,但作为卫生总费用的一部分,这些支出必须有明确的卫生目的。

从运动中把握卫生总费用,可发现卫生总费用的流入、分配、使用与消耗呈现3种形态,形成3个数据。(1)卫生筹资总额。这是在一定的地区范围内、在一定时期社会各界用于卫生事业的费用支出总额。动作的主体是社会各界,包括政府、企业、团体与个人为了接受卫生服务而支付的费用,包括政府预算内卫生支出、劳保医疗支出、集资医疗支出以及个人支付的医疗卫生费。这是卫生事业货币流转的入口,它记录下一定地区的社会各界在一定时期向卫生事业投放的社会劳动的货币表现。(2)卫生事业的总收入。这是在一定地区时期内卫生事业各单位实际接受的货币总额,如果一个地区在一定时期社会各界投放于卫生事业的费用都流入当地的卫生事业各单位,则卫生总筹资应该等于卫生事业单位总收入,但在实际生活中却存在着重大差异。于是就有如下的关系式:卫生总筹资=卫生事业总收入+外地来本地就医患者的卫生支出-本地患者去外地就医的卫生支出。(3)卫生事业总支出。这是一定地区在一定时期内,卫生事业各单位为了提供卫生服务而实际支出的费用。卫生事业总收入可以大于、等于或小于卫生事业总支出。现实生活中常常发生这样的事情,卫生事业单位的收入大于支出,出现经费节余,节余的经费转化为基金留待以后使用;上级拨款的专项拨款尚未用完,留待明年使用;基本建设投资任务尚未完成,明年继续使用。这种情况下尽管发生卫生筹资和卫生事业单位的收入,但严格地说,尚未发生资金的消耗。所以,真正的卫生总费用应该是实际消耗即支出的社会劳动。最后,还需区别流入与投入,流入的货币并不等于卫生投入,投入的经济学定义是资源的消耗或社会劳动的消耗,如果没有发生资源的消耗,实际就并没有发生卫生投入。

西方国家通常把卫生总费用称为卫生费用。在中国加上“总”字,是为了与人们的习惯相适应。在中国,卫生部门常常把卫生事业费误认为是卫生费用,其实,卫生事业费只是政府卫生支出的一部分,在卫生总费用当中大约只占20%上下,只有随着卫生总费用的调查研究深入发展,那种把卫生事业费等同于卫生费用的错误观念才会逐步改变。

卫生经费是指卫生事业经常性的支出,它是使卫生事业在原有规模上继续维持下去而支付的金额。所谓卫生事业规模不变,指卫生事业的财产价值保持不变。如果卫生事业的财产价值发生变化,它增值了,年末财产价值大于年初财产价值,为使财产价值增值而支付的费用就不是卫生经费,而是卫生事业投资性支出。

中国卫生事业常常使用卫生事业专项拨款购置新设备,尽管人们将购置新设备的资金叫做专项经费,但其经济本质很可能是使卫生事业现有规模扩大而支付的投资。所以,从经济学的观点看,投资性支出是指使卫生事业的现有规模扩大而支付的费用,要看年末财产价值比年初增加多少,这个增加值才是投资性支出。从行业看,卫生总费用就是卫生事业的总筹资与总支出。所以,准确地确定卫生事业的界限,是正确计算与统计卫生总费用的必要前提。

世界卫生组织在给发展中国家编写的卫生总费用调查研究

指导手册里,向人们推荐了一个划定卫生事业界限的标准,但又指出这个标准并不试图囊括各个国家可能制订的所有条款。同时指出,每个国家对各自特殊需要的安排,不可避免地要作出国家一级决定。重要的是,一切决定都要有详细记录,以便在今后研究时可以互相比照。这就是说,在给中国卫生事业划定界限时,要在世界卫生组织提出的标准指导下,从中国的具体国情和经济理论出发,独立自主地确定我们卫生事业的界限,定出自己的标准。

参考世界卫生组织的标准,从中国具体国情与经济理论出发,杜乐勋等建议用以下标准来确定中国卫生事业的界限。标准之一:卫生事业应该以防病、治病和增进群众健康为己任的事业;只要这个机构、单位或个人的事业以防病、治病、增进群众健康为宗旨,为事业发展的目标,这个事业就是卫生事业。标准之二:卫生事业应该在医学与公共卫生学指导下开展工作。因此,应该有卫生专业人员的指导或直接参与。标准之三:确定卫生事业的界限时,要考虑收集整理与分析数据的现实可能性。如果由于国家法律、规章、制度与规定的限制,一些应归入卫生事业费用的资料很难收集、整理,就不如作出详细记录,在横向、纵向比较时具有可比性即可。如果上述3个标准成立,中国卫生事业应该包括个人卫生保健服务、公共卫生保健工作和科学研究、人力投资和物力投资3大部分。

个人卫生保健服务:包括预防、治疗与康复性的服务,以及对上述服务的支持性的与后勤保障性的服务,必须有明确的保健目标,有卫生技术人员的业务指导与管理。因此,美容的太阳镜,作为补充食物的维生素,不包括在内。按照中国的公费医疗与劳保医疗制度和医院财务制度,住院期间病人的伙食费不计入卫生费用。

公共卫生保健工作:包括劳动卫生、环境卫生、营养与食品卫生、儿童与少年卫生、学校卫生、放射卫生、精神卫生、健康与疾病的监测与流行病学调查、妇幼卫生、计划生育、优生优育等等。从中国国情出发,为避免收集数据的范围失控,下列项目不计入卫生费用:以力所能及的价格供应基本住房的费用;企业发放的劳保用品;对灾区和赤贫户发放的食物或发放的救济金;企业劳保设备支出;垃圾及粪便的收集与处理费用;打扫卫生的群众性活动以及各单位、各系统检查卫生的费用。由卫生部门组织的卫生检查与监督所需费用,计入卫生费用。农村除供水不符合卫生标准,居民经济困难,由政府或其他组织出资或补助的改水投资外,其他水利建设和改水投资不列入卫生费用。个人购置的营养保健补养性药品与医疗用品,含有药物的或可充当药物的保健食品或用品不计入卫生费用。

卫生事业的界限会因为医学科学与卫生事业的发展而变化,上述标准也要随着时代的进步而逐步趋向完善。

#### 参考文献

- 1 Mach E P, Abal - Smith B. Planning the finances of the health sector W. H. O, 1983
- 2 杜乐勋. 卫生发展研究. 北京:北京科学技术出版社, 1989. 6
- 3 杜乐勋. 卫生经济学基本原理. 北京:中国经济出版社, 1991. 12

(哈尔滨医科大学公共卫生学院杜乐勋撰)

## 中国医学

**中医人工智能系统** 中国传统医药学蕴藏着防治疾病和延长寿命的瑰宝。千百年来,历代医家从各自不同的角度进行继承和发掘,积累了丰富的知识和经验。然而个人的精力和经验毕竟是有限的,为此,国内中医药学界与计算机技术领域的有识之士,一直在进行中医人工智能系统的探索和开发工作。中医人工智能系统经过研究和摸索,在其应用的某些方面已取得可喜的成果,在某些方面得到了应用。但是,作为一门新兴学科仍是不够

成熟的,仍缺少系统和完善的理论,人们不得不通过中医人工智能的某个方面、某个专家系统来认识它的思想、技术和方法,可以说中医人工智能系统将是中医研究和发展的方向。

在中医领域,人工智能突出体现在中医智能诊断系统上。其方法是:把临床各种常见病、多发病的辨证思维规律分门别类地编制成软件,赋予电子计算机,使其按软件中的指令产生与中医临床相一致的辨证思维活动,再使其输入设备具有模拟医生望、闻、问、切的四诊方法收集病人症状、体征、舌苔、脉象等病变信息的功能,从而使软件可以模拟中医的辨证思想进行智能化的诊断。

中医人工智能系统的研制,最早是在70年代末期,由于受当时计算机技术发展状况的限制,大致采用TRS、APPLE、PDP11、DJS等机器环境下的BASIC语言系统,其数学模型大都采用中医专家系统的基本结构模式,即在充分理解中医治疗经验的基础上建立起知识表达式,并按中医辨证论治的特点和理、法、方、药的治疗处理过程,对专家治疗疾病的思维推理进行模拟,以达到中医人工智能系统能够像名医那样为病人治病的目的。

早期的中医人工智能系统知识的数量大多在1000条以下,知识的层次也基本上是单一化的,知识管理问题并不十分突出,一般是以单一病症为主的人工智能系统,因此这些系统在设计知识库时比较注重知识的使用而不太重视知识的管理。设计方法是把中医的传统知识引入系统,再利用专业知识解答各种问题,其开发途径是手工式的,即面向一个应用域,利用编程语言等进行实际编程及运行程序,修正直至完成,它基本上是在一个相当狭窄的领域中处理问题,自知程度较低,没有多少关于它们自身的知识,因此管理自身的能力很差。

计算机技术的发展推动了人工智能的发展,也加快了中医人工智能的进展。计算机无论是在工具软件、语言条件、内存容量、运行速度、图形功能、人机界面等方面都有日新月异的进展。迄今,中医人工智能系统经过医疗单位的使用后,基本上达到了系统设计的目的,例如,模拟专家系统的应用,解决了边远地区缺少名医的困难。如由中医研究院西苑医院和中国科学院软件研究所历经10年开发出的中医专家系统,目前已汇集10多位名老中医的诊疗经验,涉及妇科、内科、儿科、皮科等20余种病。

开发中医人工智能系统的方法一般有3种:(1)选定某位专家,对其所擅长的某一病域进行研究。(2)研制通用的中医诊疗程序。(3)整理和分析各名医所发表的专著和医案,将他们治同一种病的经验之精华熔于一炉,开发出中医电脑辨证论治的综合软件系统。这些诊疗系统在医理设计、程序设计,选择合理的数学模型以及确定相应的数据结构等方面进行了有益的尝试,从而使一些名老中医的宝贵经验得以完整保存,代代沿用。另一方面,中医学的整体理论体系和辨证论治的特色促使人工智能在知识工程的知识表达、知识获取与知识自学习等方面取得了一些极有价值的进展。

开发中医人工智能系统最主要的困难在于知识工程发展还不完善,还不存在严格定义好的、可供系统开发人员所遵循的规范,知识工程主要还是一种靠技艺和技巧来工作的艺术。目前,人工智能的知识工程的水平在推理方面主要是基于机器定理证明演绎反证法,基于符号模式匹配的链接法,带有置信度的证实法。还有正在发展中的D-F证据推理系统上建立起来的方法。在知识库建造方面,实质上仍是依据“多层次套表”来构建数据库。

现在已有人探索模仿生物神经系统来研究知识工程的知识获取环节的方法。神经系统特点是以模式处理为基础,以学习控制或自组织适应,以并行方式处理问题。在1991年10月举行的国际传统医药大会上,北京市妇产医院和北京高新技术发展贸易有限公司推出的赵松泉老中医诊治女性不孕症专家系统,就是采用人工神经网络和规则相结合的混合式系统结构,采用机器学习的方法获取辨证知识,在系统结构、知识表达、知识自学习和自组织等方面做了大胆的尝试和创新。

今后,中医人工智能系统将向深度和广度两方面发展。(1)较大的适用范围,包括诊断、治疗、保健、养生等。(2)各种处理技术的进一步完善,包括解释技术、知识获取技术、搜索策略和似然推理技术等方面,其中知识获取技术和似然推理技术将会是人们兴趣较大的研究课题。知识获取将不仅包括知识的增加、删除和修改,也将包括知识的一致性和完整性、知识库缺陷的发现等。

如何将中医临床经验更恰当地形式化,采用合理的、更有效的表达方式,如何将各种决策技术、推理方法和软件技巧灵活运用,更深刻地体现中医学的内在联系、中医临床的推理过程和思维逻辑,如何更充分地利用各种智能技术和软件技巧,进一步提高症状采集过程的智能化程度和人机界面的方便性,将是今后研究工作面临的课题。

#### 参考文献

- 1 秦鸾烈,鲍亦万,主编.中医计算机模拟及专家系统概论
- 2 何华灿,主编.全国人工智能会议论文集
- 3 郭绍璐,编著.人工智能、专家系统及智能计算机
- 4 杨根子,邓晓军,编.人工智能与诊断专家系统
- 5 葛可强,编.专家系统导论

(杨培坤,杜清撰)

**医学考古与文物** the medical archaeogy and cultural relics 医学考古可为研究医学史提供实物证据,通过科学考古所得到的医学文物构成具体的医学物质史料,可以证实、补充、修正已有的文字记载,使人们了解到医学文化的真实历史,从而更好地探讨古代医学发展的规律。

医学考古的崛起,本借助于考古学,1936年王吉民倡议筹办医中博物馆,在中国首开医学文物、文献的征集工作。1937年4月,国立上海医学院举办首届医学文献展览。1938年,中华医学会医史博物馆正式成立,医学文物从此有了专门的归宿。

宋大仁、耿鉴庭对医学文物较为重视。宋大仁于1945年发表《医药与书画》一文,将经籍图志、石刻木简、法帖壁画中有关医药文物译作介绍;1958年,他又撰写《文物史迹对研究医史的重要性》,明确指出医史研究与考古发掘之间的依赖关系。耿鉴庭《医药金石过眼录》是较早介绍医药文物的文章。但是直到50年代末,医学与考古这一重要课题在医史界并未引起足够的重视,以《中华医史杂志》为例,从1947年创刊到1959年,仅刊出两篇该类文章。1958年,《中医杂志》曾连载各历史时期的医学文物照片,《中华口腔科杂志》亦有关于原始人类口腔疾病的报道,但均未见更深层次的论述。值得一提的是1958年朱孔阳发现了清代余梁哈著另处等,这种直接由考古调查发现医药遗迹,在医学史上尚属首次。

随着考古事业的日益发展,不少重大的考古发现和医学文物陆续出土,填补了医学史上的一些空白。在云南元谋猿人的遗址发现的炭屑和烧焦的骨头,西安半坡遗址表现的具有卫生意义的居住设施,河姆渡遗址发现的干栏式木结构建筑,都可以看出原始人已具有卫生保健思想。砭石为中国最早使用的一种医疗用具,是石器时代的产物。马继兴、高世荣等就考古发现的各种形制的砭石作了探讨,指出针刺外科用具圆针、锋针、铍针、三棱针等是由原始人的生产和生活用具刮割器、石铍、石砭、石镰、骨针、骨锥等发展而来。

夏朝文化遗址河南郑州二里头发现量器(爵、盃、觚、尊、盂、彝、彝)等,说明有着药物效应的酒当时已为人们所普遍饮用。全套青铜盥洗用具(盘、勺、壶、盂)也在商周考古遗址中发现。从河北藁城出土的商代外科用具砭和储备药用的植物种子桃仁、杏仁,陕北清涧出土的商周间鬼方族人体骨骼结构石雕图,都可看出奴隶社会的医学较之原始社会有了很大的提高。成周时期的传世文物玉佩,其上文字经郭沫若考释后得知是气功功法铭文。1975年,湖北云梦出土1000多支秦简,贾静涛、张慰丰作《云梦秦简与医学、法医学》一文,阐明在世界医学史上属于领先地位的我国古代法医学在战国时期已初具规模。

汉代的医学文物出土的非常丰富,有两具保存完好的新鲜古尸,3起医学简牍——马王堆三号汉墓古医书、湖北江陵张家山医书竹简《引书》及《脉书》、甘肃武威汉代医简《治百病方》,说明当时医学和防腐科学在世界医学史上绝无仅有。马王堆三号汉墓出土的14种古医书,其著作年代均在秦汉以前,皆未见于历代著录,填补了医学史上的重要空白。当前医史界对马王堆古医书的研究广泛深入到内科、外科、妇科、养生、经络、药物、药剂、医疗体育、时间医学、优生学等各个方面。马继兴《马王堆出土古医书》一文和周一谋《马王堆医书考注》一书,有较全面的评价与剖析。如果说上述这些医书用文字表达了汉以前的医学成就,那么河北满城刘胜墓出土的金银九针、医工铜盆、银滤药器等,则以精美的实物展示了汉代医学高度发达的状况。

敦煌医籍自20世纪初流落异邦,国内一直罕见。马继兴将国内外所藏80余种医卷子以搜集、整理,分为11大类,编成《敦煌古籍考释》一书,使它们的学术价值和成就得以昭示,校勘和发现了古佚医书,丰富了隋唐前后的医学典籍。西安南郊何家村出土的唐代药材和医药器具,贵重豪华,玲珑别致,显示出唐代炼丹化学和医药学的长足发展。

宋、元、明、清时期重要的医学文物都有发现。宋天圣《新铸铜人腧穴针灸图经》残石的出土,校正了现存明刻本。福建泉州出土的宋代海船中进口的香料药物,韩国近年在新安海域打捞的中国元代沉船上发现的瓷药盒、药研,是古代中外医学交流的见证。张厚埔考察了山西芮县永乐宫元代壁画,发现5幅与医学内容有关,这是继敦煌壁画后发现的又一医药壁画。江苏江阴曾二度出土明代外科器具,其中铁柳叶刀和现代手术刀相差无几,银丝编成的疝气托同现代疝气带同理。此外,还有少数民族的医学文物出土,如云南功县和双柏县发现的彝族医书等。仅就以上粗略概说即可见历代医学文物在医学史上不可估量的价值。夏鼎、马继兴、戴应新等对重要医学文物均有论述。

医学考古为研究医学史开辟了新的途径。目前这门学科虽然还很稚嫩,但在医史研究中已显示了强大的生命力。可以预期,对遗存的医学物质史料和文献史料进行医学的历史的综合研究,首先对大量考古发现的医学文物进行整理分析,复原各历史时期医学的面貌,揭示该时期的医学状况和特征,探索其内涵,更深入地阐明古代医学历史发展的成就与规律,仍是医学考古领域今后研究的热点。当然,要期待有更高层次的理论上的突破,除了有望于新的重大的科学医学考古发掘和发现外,还应当进行深入的全方位的综合性研究。

#### 参考文献

- 1 朱孔阳. 中医杂志, 1962, 2: 37~38
- 2 夏鼎. 考古, 1977, 2: 88~89
- 3 马继兴. 文物, 1978, 1: 56~58
- 4 马继兴, 等. 文物, 1978, 11: 80
- 5 贾静涛, 等. 中华医史杂志, 1980, 1: 15
- 6 马继兴. 中华医史杂志, 1980, 1: 41~46
- 7 戴应新. 考古, 1983, 2: 180~186
- 8 陆肇基. 中华医史杂志, 1987, 1: 1~7
- 9 张厚埔. 中华医史杂志, 1988, 1: 62~64

(上海中医药大学高毓秋副研究员撰; 郭天玲审)

### 中医体质学 constitutionology of traditional chinese medicine

中医体质学是以中医理论为主导,研究人类各种体质特征、体质类型的生理、病理特点,并以此分析疾病的反应状态、病变的性质及发展趋向,从而指导疾病预防和治疗的一门学科。它认为,体质是先天遗传和后天获得所形成的在形态结构、功能活动方面固有的、相对稳定的个体特征,并表现为与心理性格的相关性。体质表现为在生理状态下对外界刺激的反应和适应方面的某些差异性,以及病变过程中对某些致病因子的易罹性和病变发展过程中的倾向性。中医体质学是以中医理论为主体,吸收现代体质人类学和现代医学等相关学科内容而建立和发展起

来的一门交叉性、应用性学科,主要研究范畴为人类体质特征、体质类型及其与健康、疾病的关系;研究内容包括体质本质、结构、体质类型的表现规律,体质与发病,体质与疾病的诊断、治疗,体质与健康保健、养生等。

有关中医体质理论,最早见于秦汉时期的《黄帝内经》,对体质的形成、体质特征与分型、体质与疾病发生、转归及治疗的关系等方面已有一定的论述。东汉《伤寒杂病论》,从临床医学角度对体质辨证及治疗用药方面作了充实。至明清时期,医家从体质与温热病关系、体质与内伤外感杂病在临床上的应用作了进一步丰富和发展,并对体质病理状态下的常见类型作了初步观察和归纳。

70年代末,王琦等率先倡建中医体质学说,系统整理了中医有关体质若干方面的论述,并于1982年出版了中医学第一部体质专著《中医体质学说》。该书不仅全面总结了中医学对体质与发病、体质与诊断、体质与治疗的有关论述,而且分析探讨了中医体质分类的理论基础及形成不同体质的各种因素,提出体质是“同病异治”、“异病同治”理论的重要物质基础,通过临床调研,首次提出现代中医临床常见的七种体质类型,奠定了中医体质研究的理论和实践基础。匡调元从体质病理学角度提出六种体质病理类型,并探讨了体质与中医“证”的关系。此后,中医界分别从体质学概念、体质与临床辨证治疗、体质类型的划分及与疾病的关系、不同年龄阶段的体质特征等方面对中医体质学进行了探讨。近年来,这门学科从理论到临床,研究方法不断丰富,研究水平不断提高,研究范围不断扩大,新的学科理论、新的技术方法的引入,传统方法与现代方法相结合的研究思路,使中医体质学研究逐渐走向成熟。

从体质的形成来看,体质的本质是由遗传和发育两方面决定的;从表现特征看,应包括形态结构、生理机能、代谢特征及心理素质等方面的内容。研究者认为,只有从人体阴阳气血的多少以及脏腑功能活动的盛衰方面探讨体质现象的成因、分类,才能抓住体质现象的本质。王琦等通过对肥胖人痰湿型体质采用多指标、多层次的系统研究方法所得的资料表明,痰湿型体质与非痰湿型体质无论在脂代谢、糖代谢、能量代谢、微循环、血液流变学等方面以及在免疫遗传学的基因和抗原分布频率方面,都具有明显的差异性,初步揭示了中医痰湿型体质的本质特征,并为其他体质类型的基础研究提供了方法论基础。

胡文俊通过对健康青年人的调查资料表明,健康青年人的体质并非都属于“正常质”,而是具备所有体质类型的“原形体质”,有协调型的、功能偏亢型的、偏弱型的、偏亢与偏弱兼类型的、偏亢或偏弱型的主要指脏腑气血功能的变化特征,并表现出男女性别的差异。

不同年龄及不同性别的群体,具有不同的体质特征和体质类型。既往比较侧重于对成年人的体质研究,近年来对小儿体质和老年人体质,从体质特征、体质类型分布规律及与疾病的关系等方面进行了探讨。对于小儿体质的研究,皇甫燕根据小儿身长、体重、营养发育、面色、头发、舌象、脉搏、血红蛋白及过去史、营养史、个人史等方面,以中医理论为依据,将小儿体质划分为正常型的、脾胃虚弱型的、肝肾不足型的、肾气不足型的、血虚型的。苏树蓉认为,小儿“纯阳”之说与“稚阴稚阳”说揭示了小儿体质特点的共性,并根据小儿个体阴阳的消长的生理差异,将小儿体质划分为均衡体质、痰湿体质、阴虚体质、气血虚体质和阳虚体质等类型。

对于老年人体质的研究,周天寒认为老年人具有精血亏虚、脏腑失养、正气内虚、肺脾气虚、神气不足、心肝血虚等体质特点。许多研究资料表明,在老年人中异常体质与年龄基本呈正相关性,随着年龄的递增,正常型体质者越来越少,异常型体质者越来越多。朱秉匡等通过对60岁以上老年人调研发现,在1075例老年人中,属异常体质者多达97.02%,且异常体质者常常是两种以上的异常体质相兼出现,较少有单纯一种体质类型者。

不同性别体质研究方面,现代研究者均认为男女具有不同

的体质特点和体质发展过程。由于女子有经、带、胎、产等特殊生理特点,决定男女在解剖、生理等形态机能方面的差异。杨新中等研究了正常妊娠对妇女体质的作用,认为妊娠后妇女体质可有阴阳寒热、气血运动、形体肌肤、脏腑功能、心理性格等抗病能力的改变。对于男女性别的不同体质分布规律,何裕民的调查资料表明,在男性中属正常体质者明显多于女性;在男女体质病理类型分布中,阴虚体质和阴阳两虚体质女性均显著多于男性,而瘀滞体质则男性明显多于女性,并且不同年龄具有不同的分布规律。

对于不同地域的体质分布规律。中医体质理论认为,由于地理区域的不同,受水上性质、气候类型、生活条件等因素的影响,可形成不同的体质分布物质特征。现代研究资料表明,不同地理区域的人群,体质结构具有明显的差异,尤以病理体质为显著。如北方人群的阳虚体质比例高于南方,南方则阴虚体质比例多于北方,痰湿体质则青海、西藏和东南沿海地区明显高于长江中下游地区。

对于体质的分型,现代中医一般是临床角度根据发病群体中的体质变化、表现特征及与疾病的关系等方面作出分类。由于研究者采取的分类方法、观察角度不同,对体质划分的类型及命名方法也有所不同。主要分类方法有:(1)七分法。王琦等最早分为正常质、阴虚质、阳虚质、痰湿质、湿热质、气虚质和瘀血质。(2)六分法。匡调元分为正常质、晦涩质、腻滞质、燥红质、迟冷质和倦耗质。(3)九分法。毋国成分为无力质、苍白质、粘液质、紫滞质、迟弱质、盗热质、冷激质、奋力质和结障质。另外还有十二分法、四分法和五分法等。

体质分型标准化的研究,即如何对人群体质现象作出分类,是中医体质学重视的问题。1989年,以王琦为组长的国家自然科学基金会资助课题《肥胖人痰湿型体质的基础研究》,通过全国范围内大样本群体调研,已总结出体质分型规范化、量化研究方法,并建立了痰湿型体质的定量规范化判断标准,为体质分型标准化方法的全面建立提供了理论基础和方法论基础,反映中医体质现代研究水平、以临床应用为目的的体质分型理论、方法、判断标准正得到实现。

中医体质理论认为,不同类型的体质决定不同个体对某些疾病的易感性和病理过程中的倾向性,因此,不同疾病的易感体质、同种疾病而不同体质病演变规律,各类疾病的发生常见于哪些体质类型等问题,已成为重要研究内容。随着体质理论研究的不断深入,初步揭示了某些疾病与体质类型间的关系,为临床治疗学提供了新的依据。如杨常青研究总结了肝病不同体质类型的分布规律,发现和平时占3.3%,阴弱质占40.5%,阳弱质占24.8%,阴盛质占1.7%,阳盛质占15.7%,湿腻质占8.3%,瘀滞质占5.8%;并进一步研究分析了体质类型与肝病证候的发生、病性、病位及病势之间的关系,以及肝病证候对体质的影响等之间的规律。麻仲学等研究了老年人胃病与体质之间的关系,发现异常体质者较正常体质者易患胃病,尤以易患胃气壅塞证为最多,胃病的燥红质较其他病种的燥红质更易对肝、肾产生影响,突出表明中医先后天互相影响理论的正确性。陈荣升、张伯勋等发现,中风患者以阴虚阳虚体质者及痰湿体质者为最多,与年龄职业有一定相关,显著高于其他体质类型,并与体型相关。张宗岐等的研究资料表明,肺癌患者的体质以气虚质最多,阴虚质较少。肺癌属气虚型体质者,对化疗较敏感,且血象下降最明显,但生存期却最长;而痰湿瘀阻体质者对化疗敏感性差,恶化比例最高,生存期也最短。陈伟民的研究资料表明,高血脂症患者中以痰湿体质和痰瘀并见体质为最多。

中医体质学认为,不同类型的体质决定对某些疾病的易感性和病理过程中的倾向性差异。王琦等对痰湿体质者与常见相关疾病关系的研究,应用现代临床流行病学方法,初步证实肥胖人常见的高脂血症、冠心病、脑中风、糖尿病的发病与痰湿型体质的内在相关性联系,结论提示,高脂血症中痰湿型体质者患病率为71.56%,冠心病中痰湿型体质者患病率为58.5%,脑中风中痰

湿型体质者患病率为59.38%,糖尿病中痰湿型体质者患病率为65.94%,揭示了体质类型与相关疾病的内在联系,为临床体质辨证、治疗提供了新的思路和方法。

王琦根据传统中医药理论,结合对痰湿型体质的生理生化研究资料,制定了具有改善痰湿型体质作用的药物,经药理研究证实,该药具有较好的改善痰湿型体质的药理作用,初步证实体质具有可调性的设想,从而为从改善体质入手,消除个体的病理状态,达到防病治病的目的,提供了重要理论依据。

体质现象作为人类生命现象的一种重要表现形式,它与健康、疾病的关系日益引起现代科学工作者的重视,中医体质学将以新的成就为人类防治疾病、健康保健作出贡献。

#### 参考文献

- 1 匡调元,中医病理研究.上海:上海科技出版社,1980
- 2 王琦,等.中医体质学说.南京:江苏科技出版社,1982
- 3 毋国成.新中医,1983,9:1
- 4 皇甫燕.浙江中医杂志,1986,(8):379
- 5 苏树蓉,等.首届全国中医体质学说学术研讨会论文集,1987
- 6 杨常青.黑龙江中医学院研究生毕业论文集,1987
- 7 胡文俊.湖南中医学院学报,1987,2:97
- 8 麻仲学,等.中国医药学报,1987,2(5):137
- 9 何裕民,等.中国医药学报,1989,4(4):33
- 10 王琦,等.肥胖人痰湿型体质的基础研究,国家自然科学基金会资助课题,1992

(中国中医研究院王琦教授、苏庆民讲师撰)

#### 中医养生学 traditional chinese regimen 中医养生学

是在中医理论指导下研究人类生命规律、阐述强身防病方法,以达延年益寿的理论和方法的科学。中医养生学源远流长,内容丰富多采,已成为中医学的重要组成部分。

中医养生学经过长期实践与经验积累,已形成相对稳定的学科体系,并有相对独立的、丰富的理论与大量的、别具一格的手段。中医养生学的理论体系,在气一元论、阴阳五行、脏腑经络、天人相应及整体恒动观等理论的指导下,提出形神共养、协调阴阳、谨慎起居、和调脏腑、动静适宜、养气保精、气血通调、养正祛邪、综合调理、因人因时因地摄生诸原则。中医养生所采取的方法和手段涉及到诸如时令、地域、精神、饮食、起居、睡眠、房事、劳逸、劳作、运动等方面,还有大量的延年益寿药以及保健气功、针灸、推拿、按摩等。这些方法与措施具有简、便、廉、验等特点。

中医养生学的形成和发展经历了漫长的岁月,从远古时期到春秋战国,由秦汉晋唐到宋元明清直至近代的各个不同历史阶段,都有许多养生学观点的形成、养生学家的出现和养生学专著问世。其中最具有代表性的观点有老子的“淡然无为,神气自满”;庄子的“吹呿呼吸,吐故纳新,熊经鸟申,为寿而已”;董仲舒的“以中和养其身者,其寿极命”;华佗的“人体欲得劳动,但不当使极尔”;葛洪的“养生以不伤为本”;孙思邈的“善养生者,则治未病之病”、“安身之本,必资于食”;张景岳的“人于中年左右,当大为修理一番,则再振根基,尚余强半”等;代表性的养生学著作有《黄帝内经》、《养生论》、《抱朴子》、《养性延命录》、《寿亲养老新书》、《摄生消息论》、《遵生八笺》、《老老恒言》等。

新中国成立后,中医养生学得到了新的发展。50年代中期,中医养生事业开始复兴。由于这一时期受财力物力的限制,中医药的重点是治疗那些严重危害劳动人民健康的常见病、多发病,故而气功养生率先兴起。《因是子静坐法》一书的作者蒋维乔,将其多年研究所得“呼吸习静养生法”介绍给广大读者,并于1937年出版了《世间禅》,推广佛家养生功法。与此同时,上海市成立了(功疗养所,标志着中国气功养生走上一个新的台阶。该所成立后开展了一些引人注目的气功养生项目,并对气功与经络的关系以及对经络的探测与证实进行了探讨。1958年,中国科学院动物研究所成立老年学研究室,进行老年生物学研究,整理传统延寿方药,并与北京医院共同着手进行某些中医药抗衰老作用的研

究。60年代初,李经纬探讨孙思邈的养生思想,明确提出“养生长寿学”这一学科概念。武汉医学院等单位对武汉地区、广西都安、巴马等瑶族自治县长寿老人进行调查,积累了大量第一手资料,工作卓有成效。1964年11月,中华医学会在北京召开了第1次全国老年学与老年医学学术会议,制订了一系列继续开展工作的计划,其中也包括中医养生学的研究内容。进入70年代末期,随着国际上老年医学的迅速发展及社会老龄化趋势日益明显,中医养生学更加受到社会重视。1980年6月,中国中医研究院西苑医院成立岳美中学术经验研究室,开始总结名老中医的经验,进行中医老年医学和抗衰老医药研究,曾先后发表《补益类长寿植物药概述》、《抗衰老动物药概述》等论文。1981年以来,《中华老年医学杂志》、《老年学杂志》、《中国老年》、《长寿》及《中医杂志》、《中华医史杂志》等报道和发表了大量的中医养生学研究成果和论文。其后,一方面组织力量对古代养生方面的珍本、善本进行整理出版;另一方面,今人的中医养生学研究专著也不断问世,如林乾良的《养生寿老集》,樊清泉主编的《养生保健集》,李聪甫的《传统老年医学》,孙博泉的《历代长寿方精选》,魏太星主编的《老年保健丛书》,王峻的《延年益寿精方选》,江克明主编的《抗衰老方剂词典》,陈可冀主编的《抗衰老中药学》,《慈禧太后医方选议》,《中国传统老年医学文献精华》,王其飞的《中医长寿学》,郑古文主编的《中医养生学》以及施纪主编的《实用中国养生全书》等。尤其是气功锻炼方面的著述大量涌现,为普及和提高气功锻炼水平作出有益的贡献,如马济人的《中国气功学》,周德丰的《气功康复养生精要》,林雅谷主编的《中国医学百科全书·气功学》,方春阳主编的《中国气功大成》等,不下300余种,充分反映了这一时期中医养生学的研究进展和取得的成果。1988年4月,中国首届康复疗养养生学术研讨会在青岛召开,120余位康复、疗养、养生专家云集一堂,交流了中医养生学研究成果,约略归纳,中医养生学在下列几个方面取得令人满意的收获:一是对各地长寿老人进行调查,整理总结出许多有指导意义的经验,如生活有规律,劳逸结合,饮食适度,性格开朗,气功导引等,均是抗衰老的重要措施。二是中医衰老指数与人体中医年龄的研究获得成功,为延缓衰老的临床研究提供了简便易行的考核指标,为测度历法年龄与生物学年龄之间的偏离度提供了具体方法。三是中药抗衰老研究取得了一定突破,对我国古代绝大部分延年益寿耐老药进行药物化学成分分析,并从免疫、代谢、内分泌、微量元素等方面进行了大量的药理研究,有的研究甚至是从细胞传代和寿命试验等角度进行的,有相当的深度。与此同时,大批抗衰老新药不断推出,如“清宫八仙糕”、“清宫寿桃丸”、“春回胶囊”、“玉宝三鞭丸”、“康宝戒”、“还精煎”、“活力苏”、“春春宝”、“益寿康”等先后问世,既满足了国内外抗老健身的需要,又推动了中医养生学的发展。四是气功养生在全国蓬勃发展,气功研究所的研究侧重于气功疗法的应用与机理的探讨,气功辅导站的设立使鹤翔庄气功、内养功、内丹功、强壮功、祛病延年功、不老回春功、大雁功、太极混元一气功、站桩功等形式多样的功法得到普及,从而满足了各阶层人群的需要。五是在养生学教育方面有所建树,如《长寿》、《中国老年》、《中医临床与保健》等杂志设立了“中医养生”栏目,为养生学知识的普及作出了贡献。80年代末期,通过反复论证,经国家教委批准,在高等中医教育体系中设立了“中医养生康复专业”,编写了《中医养生学》等专业教材,并已开始在北京、南京等中医学院招收本科生,中医养生教育从此纳入正规教育的轨道,可以培养出专门的技术人材。六是由于中医养生事业的发展,养生学理论与方法的推广普及,中国人民的身体素质得到提高,寿命逐步延长。据有关部门统计,中国人均寿命在20世纪30年代为35岁,50年代为51.2岁,80年代则跃为67.9岁。

随着中医养生学的不断发展和提高,传统的抗衰老方药将在更大范围内得到开发和利用;中医关于致衰原因和机制的传统认识将有助于人们更好地把握衰老的本质和规律;中医养生方法和手段将在不断挖掘、整理、利用的过程中受到现代老年医学的

高度重视。可以相信,中医养生学一定会为世界人民的健身延寿作出更大的贡献。

#### 参考文献

- 1 林乾良,等. 养生寿老集,上海:上海科学技术出版社,1982
- 2 马济人. 中国气功学,西安:陕西科技出版社,1983
- 3 林水森,等. 中西医结合杂志,1984,4(11):655
- 4 陈可冀,等. 中医杂志,1985,26(7):25
- 5 李春生. 中医杂志,1988,29(2):59
- 6 刘古文,等. 中医养生学,上海:上海中医学院出版社,1989
- 7 王文健,等. 中医杂志,1989,30(9):44
- 8 孙福立,等. 中国医药学报,1989,4(2):10
- 9 周文良. 北京中医学院学报,1990,13(5):1

(安徽中医学院王键副教授撰,李洪涛审)

《内经》治则的近代研究 治则是《内经》理论的基本内容之一,其丰富的论述奠定了中医治则理论基础,《内经》治则的近代研究主要情况如下。

刘长林从哲学角度探讨《内经》治则,指出该书总结的治则生动地体现了先秦两汉以来朴素辩证法的许多精华,是古代辩证法在医学实践领域的成功运用。刘时觉用认识论分析《内经》中的每个治则,概括为:治病求本即认识事物本质;标本论治着重抓主要矛盾和矛盾的主要方面;三因制宜强调具体情况具体分析;反治理论阐述如何透过现象看本质;同病异治、异病同治体现了处理矛盾的共性和个性;既病防变则从发展、联系的观点认识疾病,提供治疗依据。这是用唯物辩证法的认识论探求《内经》治则的本质,为临床治疗开拓思路。

历代学者虽对治则进行了研究和阐发,但对治则概念尚欠明确清晰的定义。20世纪80年代以来,有关讨论较为热烈。吴润秋认为,《内经讲义》等将治则定义为“治疗疾病的法则”,则势必造成治则与治法的内容相互混淆,因而建议修订为“治疗疾病的基本原则”,这样可使治则的概念比较准确和规范,而且合乎《内经》有关治则学说的基本思想。同时,他对治则所包含的范畴亦加以明确的界定:治则是中医学基本学术思想在治疗学上的体现,对治疗疾病具有根本性指导意义,是指在任何疾病的治疗过程中都必须遵循的基本原则。其内容包括治病求本与标本缓急、协调阴阳、扶正祛邪、因势利导、因人因地因时制宜、治未病等。至于“实则泻之、虚则补之”、“正治反治”、“异病同治”等则均属于“治病的理法”,或称“治疗法则”,是在治则直接指导下确立的。吴润秋则认为治病的一般法则和各种治法的运用,受到一定的论治思想所制约,《内经》中的治疗思想如同作战的战略思想,故治病求本、协调阴阳、治未病等等都应属于治疗方面的战略思想,而非一般治则。邱幸凡撰文提出,治未病、治病求本、因势利导、整体治疗、饮食调治及心理治疗等都是《内经》一系列完整的治疗思想的组成部分。可见,对治则的定义和内容的讨论实质上是循名求实,讨论的各方都不否认这些治则是高度抽象的,对具体的治法具有指导意义。

《内经》治则的专题研究,近年来比较常见。“治病必求于本”为《内经》治则之首,强调治病必须首先探求疾病的根本,然后针对根本进行治疗。对这句原文中“本”的解释,历代医家多有发挥,李国卿等曾整理归纳为八种:(1)阴阳为本;(2)肾之阴阳为本;(3)脾肾先天后天之本;(4)病因病机为本;(5)病因病经为本;(6)证之表里寒热虚实为本;(7)以证为本;(8)阴阳之邪为本。并据《素问·阴阳应象大论》全文分析,认为以人体阴阳之气为本较为恰当。

《内经》曰:“谨察阴阳之所在而调之,以平为期”,这就明确提出了协调阴阳的治则。吴润秋认为协调阴阳主要体现在调阴阳的目的和手段。他指出“以平为期”是明确治疗目的,治疗太过或不及,都不能达到“平”的目的。协调阴阳,在针药、疗程等方面应有一定的限量,否则可能造成机体新的阴阳失调。而调阴阳的手段主要有二:一是阴随调,如阳不足者扶之,阴气盛者抑之,肺

气虚者补之,肝阳亢者潜之;二是阴阳互调,阴病可伤阳,阳病可及阴,治疗则当阴病治阳,阳病治阴。此乃《内经》阴阳虚实治则的总结。

成肇智提出顺势治则是《内经》的一条重要治则,系指据病势发展盛衰规律和患者机体抗病自然趋势而确立的相应的治疗原则。他认为《内经》中虽无“顺势”一词,但其观点是非常明确的,如《灵枢·五乱》:“顺之而治”;《师传》:“未有逆而能治之也,夫唯顺而已矣”。他综合《内经》中的顺势治则,概括为五个方面:即顺应正邪进退之势而治;顺应脏腑气机之势而治;顺应经气运行之势而治;顺应天时地理之势而治;顺应病人情志之势而治。蔡定芳则从机体抗邪力与护正气趋势着眼,提出《内经》的因势立则说,并具体列举三对治则:抗邪力趋势向外宜散,护正气趋势向内宜收;抗邪力趋势向上宜越,护正气趋势向下宜降;抗邪力趋势向下宜下,护正气趋势向上宜升等。这些论述是对《内经》因势利导治则的深化。

《内经》在提出“人与天地相参,与日月相应”的同时,归纳出“是以因天时而调血气”之治疗原则,其中又特别强调“月生无泻,月满无补”,这提示月相变化与人的机能状态存在着某种联系。曾有学者对此进行研讨,但因需大量的科学实验予以证实,故至今仍有待进一步深入探究。

标本缓急亦为《内经》治则之一。然《内经》标本涵义甚广,吴润秋指出标本有三义:一是病为本,工为标。二是标本先后,病因为本,证候为标;里病为本,表病为标;脏病为本,腑病为标;先病为本,后病为标。三是标本反治,如《素问·至真要大论》:“病反其本,得标之方”。以喘急气粗、大便不通为例,单用泻肺平喘而病不已,采用通泄腑腑之法从标而治,腑通而喘平。故标本治则的临床意义大有研究之价值。蔡定芳详细分析《素问·标本病传论》治则部分,明确指出标本理论中知逆与从、缓急与急、察间与甚,是3个关键所在。知逆与从,以定夺治本抑或治标;缓急与急,乃急则治其标、缓者治其本之依据;察间与甚,以决断并治或独治。掌握此三者,临床则能执简驭繁。

迟华基对《内经》“阳病治阴,阴病治阳”之治则进行探讨,认为可从3个方面理解:(1)据“阳胜则阴病,阴胜则阳病”,从因论治,皆为实证。阳病者治以温热药,驱逐阴寒之气以救其阳;阴病者当以寒凉药物,损其亢阳以救其阴。(2)据“阳虚则寒,阴虚则热”之原理,阴病为虚热证,阳病为虚寒证,皆为虚证,宜用温热壮阳之剂消其阴翳,以甘寒之品滋枯润阴。(3)据“善用针者,从阴引阳,从阳引阴”之理,进而推广之,则表里、气血、经络、脏腑、上下、左右皆分阴阳,在阳之病从阴分治疗,诱邪外出;在阴之病治于阳分,导邪外出。

逆治与从治为医家熟知的《内经》治则,但一般皆从正治法与反治法来理解。欧阳兵对“逆治”、“从治”涵义进行了较深入的发掘和分析,认为其涵义还包括如下两点:一指调理气机的逆治与从治。从治是顺其脏腑气机运动之生理而治,多用于脏腑气机正常运动受阻之病例,如肝郁不舒,治以疏肝解郁;逆治谓逆脏腑逆乱之气机而治,如肝升太过用平肝潜阳法。二指标本逆从。即急则治其标,缓则治其本的应用。如脾虚泄泻,日久脾气益亏,继发下血之证,其病虽发于本,但下血证急,故当逆取,先求其标。如脾虚泄泻,易受外邪侵袭,但其证不急,可从本而治之,泄止则后天强健,他病易已,故为从治。这是从不同的侧面发挥《内经》之治则。

徐荣斋等对《脏气法时论》中的治则部分进行探讨,总结出五脏苦欲的不同治则。认为五脏“苦”与“欲”实质上是五脏的十类不同病证,其补泻治则针对性强,每脏“苦”、“欲”的治则各有侧重,药食五味的施用是突出其补泻原则。

综上所述,有关《内经》治则的研究目前尚囿于文献研究方面。如何在整理《内经》治则的原文基础上紧扣本义,适当引伸,结合临床实践,探讨其运用范围与价值,则是值得进一步研究的课题。此外,对《内经》治则的实验研究几乎还是一个空白,应在文献研究的基础上结合相关学科开展起来,这些可望在不长的

时间内有所进展。

#### 参考文献

- 1 蔡定芳. 吉林中医药, 1981, 4: 1~4
- 2 蔡定芳, 等. 辽宁中医杂志, 1982, 1: 3~8
- 3 刘长林. 内经的哲学和中医学的方法, 北京: 科学出版社, 1982, 248
- 4 迟华基. 山东中医学院学报, 1986, 1: 40
- 5 吴润秋. 湖南中医学院学报, 1986, 2: 1~3
- 6 刘时觉, 等. 中医杂志, 1987, 10: 33~34
- 7 李国卿. 吉林中医药, 1988, 3: 3
- 8 成肇智. 《内经》顺势治则初探, 1990, 1: 4~7
- 9 吴弥漫. 中国医药学报, 1990, 1: 55~58
- 10 欧阳兵, 等. 成都中医学院学报, 1990, 4: 43~33

(上海中医学院陈农副教授、周西琳副教授撰)

### 中西医结合对“肾”本质的研究

Studies of integrated traditional and western medicine on the kidney in traditional chinese medicine 中医有心、肝、脾、肺、肾五脏之说,其中以“肾”最受历代医家重视,喻为生命的根本,至明代形成命门学说。命门有肾阴、肾阳两个对立部分,相互依赖并进行调节。肾的生理功能涉及面很广,如与生长发育、衰老、生殖、骨骼、呼吸、脑、髓、发、耳、齿等均有密切关系。因此,这项研究的成果将为生命本质和中医“证”本质的研究提供重要的素材。

1960年,上海医科大学首先发现肾阳虚证病人具有隐潜的肾上腺皮质功能减退,由此开始采用现代科学最新技术,有系统地研究肾的本质。1964年,得出肾阳虚病人有下丘脑-垂体-肾上腺皮质轴不同环节(层次)、不同程度功能紊乱这一结论,从而证明“证”是有物质基础的。经过国内外学者多方验证,比较一致的看法是肾与内分泌的关系最为密切。1979年,占一步在下丘脑-垂体的另两个靶腺(甲状腺与性腺)轴三个水平上作全套功能测定的研究,在同一病种里选择不同证(肾阳虚证组与无特殊证组)的病人进行比较,并同时与65岁以上的老年人(生理性肾虚)组也作对比观察,得到如下结论:(1)肾阳虚证者下丘脑-垂体-靶腺轴上存在广泛的隐潜性病变,其主要病理环节是下丘脑的调节功能紊乱,用补肾法治疗对其有调整作用。(2)老年人甲状腺及性腺轴的异常改变和肾阳虚证甚为类似,故肾阳虚证的外象意味着下丘脑-垂体-靶腺轴有一定程度的未老先衰。在上述研究成果指导下,结合传统中医理论与经验,显著提高了一些难治性疾病的防治效果。如根据《难经》认为肾在“男子以藏精,女子以系胞”乃有“肾主生殖”之说,对100例育春期无排卵型功能性子宫出血病人采用不同治法观察疗效,对肾阳虚证者用补肾法可使排卵率达90%以上,且多数能怀孕,对脾虚证用补脾胃法,排卵率仅有20%~30%,说明补肾可使卵巢功能得以恢复。多囊卵巢综合征是由于下丘脑-垂体-性腺(卵巢)轴功能失调而致排卵障碍,对133例曾用多种方法治疗无效的病人,采用补肾化痰法治疗,获排卵率82.7%,明显比96例用西药促黄体生成激素释放激素治疗的排卵率(53.1%)为高。对其中18例病人作下丘脑-垂体-卵巢轴的全套功能或激素动态测定,说明补肾药的主要调节机制在下丘脑,但对垂体、卵巢各个水平也都起一定作用。肾积水病人约半数出现肾阳虚症状,对100例患者用温肾利水法治疗,治愈率达71%。动物实验表明,温肾药物可提高儿茶酚胺含量并作用于肾盂输尿管,促使肾盂输尿管的活动增强从而消水排石。说明温肾药除能改善下丘脑-垂体及靶腺功能外,对植物神经系统及神经递质也具有调节作用。儿童肾病综合征应用糖皮质激素(简称激素)后,缓解率可达77%~88%,但停药后复发率仍有53%,同时有长期大剂量应用激素造成自身肾上腺轴受抑制等副作用。对100例应用激素治疗的肾病综合征不同阶段先后配合滋肾阴与温肾阳中药,完全缓解率达90%,复发率则降至22%,且可明显减轻激素副作用。临床与动物实验均证明,在用激素早期配合滋肾阴中药,在渐减激素后期

配合温肾阳中药,都可有效地拮抗激素的反馈内抑制作用。这也证明,用大剂量激素时机体的内在实质,早期属于阴虚内热,后期属于阴阳两虚,阳虚为主,也可说是激素应用过程中肾中阴阳转化的过程。关于衰老的原理有多种学说,但神经内分泌和免疫功能的改变对于全身性衰老无疑起着重要作用。中医认为肾为先天之本,肾虚辨证标准如腰脊酸痛、腿软、双耳失聪、齿发脱落、性功能减退等都属衰老的表现。从上述肾虚证与老年人的对比研究已推论主要发病环节均在下丘脑,故衰老是生理性肾虚,按理补肾法应能延缓衰老。在两组正常老年人共计137例,均随机分为补肾、健脾、对照组作双盲试验,连续服药3个月左右,服药前后所测指标结果显示补肾法可明显提高老年人的下丘脑—垂体—肾上腺皮质与性腺功能,而健脾组与对照组(服安慰剂)均无明显作用,说明补肾法在神经内分泌系统上延缓衰老的作用比健脾法明显。在另一组细胞免疫功能偏低的老年人中,补肾法可显著提高细胞免疫功能。将相应的老龄大鼠分补肾组与对照组,并与小龄大鼠比较下丘脑—垂体—性腺轴上的指标,采用下丘脑双氢睾酮受体的结合反应、人绒毛膜促性腺激素兴奋试验、睾丸的病理学定量研究,结果老龄补肾组检测数据都介于老龄对照组与小龄组之间,说明补肾药不仅作用于下丘脑,且对性腺轴的脏器、细胞、分子各个水平都进行调节。按中医对哮喘“发时治肺,未发治肾”的治疗理论,已预见补肾法具有预防哮喘发作的作用。在7批共419例用补肾的“温阳片”以预防哮喘季节性发作,获显效以上者占63.4%~75.0%;而用安慰剂的对照组5批共135例,获显效以上者仅14.0%~22.2%。在取得疗效基础上,进行内分泌研究,发现哮喘病人即使无肾虚表现,也有潜在的肾阳虚证变化(下丘脑—垂体—肾上腺皮质轴功能改变)。温阳片调整肾上腺皮质轴的功能可减轻哮喘的发作,犹如肾上腺皮质激素的作用,却无长期应用激素产生内抑制的弊端。免疫方面的研究资料显示,温阳片可提高抑制性T细胞功能,使血清免疫球蛋白E的季节性升高受抑,从而预防哮喘的季节性发作,也表明温阳片对哮喘病人的神经内分泌和免疫功能减退者具有同步调节作用,并可推论其作用点在下丘脑。

上述研究资料从理论上阐明了中医“肾”的主要功能为调节下丘脑的神经内分泌及免疫功能,并在实践中证明补肾法在生命的各个不同阶段均能有效地纠正这一调节功能紊乱。虽然整个生物学科已进入从细胞、分子水平探索生命本质的时代,同时更需要与从整体、脏器水平研究生命本质的中医理论取长补短,相互结合。1977年,巴塞多斯基(H. O. Basedovsky)证明下丘脑存在免疫调节中枢,免疫细胞内则可产生ACTH类的激素、内啡肽类的递质,神经内分泌和免疫系统以双向网络协调,3个系统之间已没有明确的界限,从而首次提出“神经—内分泌—免疫调节网络学说”。自1987年以来,网络学说已成为世界性研究的热点,因此将网络学说的研究手段引入肾本质的研究,将为生命本质、延缓衰老、中医“证”本质的研究作出有益的贡献。

#### 参考文献

- 1 沈自尹. 科学通报, 1961, (10): 51~53
- 2 沈自尹. 中华内科杂志, 1976, (2): 30~33
- 3 李超荆. 中医杂志, 1982, (6): 69~71
- 4 胡国让, 沈自尹, 施寿珠. 中医杂志, 1983, (5): 33~35
- 5 相连卿, 沈自尹. 中西医结合杂志, 1983, 3(6): 353~355
- 6 王文健, 沈自尹, 张新民. 中华老年杂志, 1985, 4(4): 198~200
- 7 俞瑾. 中西医结合杂志, 1986, 6(4): 218~220
- 8 许得盛, 沈自尹, 胡国让. 中西医结合杂志, 1988, 8(6): 330~332
- 9 张新民, 沈自尹, 王文健. 中医杂志, 1991, 32(11): 43~45
- 10 沈自尹. 中国中西医结合杂志, 1993, 13(6): 364~366

(上海医科大学沈自尹教授撰)

#### 攻邪学说 doctrine of dispelling the evil 所谓攻邪学说,

是以攻击邪气为治病的首要任务,强调邪留则正伤、邪去则正安的一种学说。张从正力主攻邪,善于运用汗、吐、下3法而成为攻邪学说的代表。其学说成因较多,除私淑刘河间以攻邪气为主要目标等原因外,其中一个不可忽视的重要因素,即隋唐以后,方士多以长生、房中之术惑众,富者穷其私欲,朝夕服饵,而丹砂、硫黄、金石燥烈之品积久化热,且张氏生于北地,其人秉赋多强,夏则曝日以勤劳,冬则延炕以取暖,加之兵火连年,瘟疫流行,热病甚多,而时医嗜补,崇尚温燥。如此诸热交作,误死者不可胜数。张氏目睹时弊,在《儒门事亲》中指出“庸医之治病,纯补其虚,不敢治其实,举世皆曰平穩,误人而不见其迹……虽终老而不悔”。并说:“夫补者人所喜,攻者人所恶,医者与其逆病人之心而不见用,不若顺病人之心而履利也”。可见当时医者、病家喜热恶凉、喜补恶攻的偏见,已相沿成习。张从正精究经旨,并通过临床实践,指出论病首重邪气,治病先祛邪气的卓越见解。

攻邪理论的确立,源于《内经》,基于实践,认为人体之所以发病,是由于邪气侵犯的结果。他说:“夫病之一物,非人身素有之也,或自外而入,或由内而生,皆邪气也”。邪气的由来不外天邪、地邪、人邪三个方面,即“天之六气”、“地之六气”、“人之六味”,此为“发病之三也”。说明三者之太过则变为淫邪,一旦侵犯人体,超过机体调节适应能力,就会导致疾病的发生。这些来自七情内伤、饮食失节或自外感六淫之邪,则当驱逐之。因此他说:“邪气加诸于身,速攻之可也,速去之可也,挽而留之何也?”,留邪则伤正,邪不去则正不安。所谓“先论攻其邪,邪去而元气自复也。”

此外,张从正治病还重视血气流通,他从《素问·调经论》“五脏之道,皆出于经隧以行血气,血气不和,百病乃变化而生”诸说中体会到《内经》“惟以血气流通为贵”,因而树立了血气“贵流不贵滞”的观点,治疗疾病时总以祛邪为急,藉以攻邪手段达到恢复人体气血流通的目的。

张从正的攻邪学说对后世产生了深远影响,即东垣、丹溪发挥内伤者,亦尝谓“相火元气之贼”、“火与元气不两立”之说,重视邪气的危害,其治法亦多受张从正的启发。特别是丹溪,既重视由阴亏而引起相火妄动的内在之邪,又不忽视由外而来或由内而生的湿热之邪,所谓“湿热相火为病甚多”。尤其重要的是,他提出了“气血冲和,万病不生,一有拂郁,诸病生焉。故人身起病多生于郁”的精辟结论,对由于气、血、痰、火、食、湿、郁结而产生诸郁证俱用辨证论治法则,为后世所宗,至今为临床所沿用。

明清时期,发挥攻邪学说者更是不乏其人。明代吕复用汗吐下法治验颇多,其用方大抵与张从正相似,并称“张子和医如老将敌,或陈兵背水,或济河焚舟,置之死而后生”,可谓私淑张从正攻邪之典范。能继承张从正攻邪之说而主张最力者,莫如明末医家吴又可,其创温疫之论,认为温疫乃六淫之外的一种“戾气”,主张戾气致病,通过透达膜原、攻下涌吐等法以逐邪外出,可以看作是张从正攻下论在传染病治疗中的运用,故前人说他“俨然一张子和”,洵非虚语。继吴又可之后又有戴天章,把吴氏之法从瘟疫扩大到整个温热病范畴。

随着温病学说的不断发展,明清医家不论在攻邪理论上,还是在临床治疗上,都大大发展了张从正的攻邪学说。在理论方面,有柳宝诒“邪热入里则不复他传,故温热病热传胃腑,得攻下而解者十居六七”;叶天士“再论三焦,不得从外解,必致里结,里结在何,在阳明与肠也,亦须用下法”等。在治疗上,如用汗法,却有别麻桂,提出“更有不求汗而自汗解者”的观点。下法方面,其方剂也有不少创新,最著名者如《温病条辨》中所列的五首承气汤等等。

王清任、唐宗海继承张从正的攻邪学说,认识到瘀血是妨碍血气流通的内在之邪,亟宜攻之去之。王氏治病最重气血,他说:“无论外感内伤,要知初病伤人何物……所伤者无非气血”,故定论“治病要诀在明白气血”。他根据瘀血所在部位不同,制订了少府逐瘀汤、血府逐瘀汤、补阳还五汤等不少著名的方剂。唐宗海在《血证论》中强调祛瘀血以生新血的作用。他说:“瘀血不去,新



血具无生机”，用活血化瘀药物可达到止血的目的。此说充实了中医学祛邪安正的内容。

近年来通过对通里攻下、清热解毒及活血化瘀等治法的临床总结，进一步发展了张从正的攻邪学说。如天津南开医院根据“以通为用”的原理，对急性阑尾炎、急性肠梗阻、溃疡病穿孔、胆道蛔虫症、急性胆囊炎等急性腹内脏器的疾病，采取以中药为主的非手术治疗，取得一定的疗效。通里攻下还具有抗感染、排毒素的作用，是一种祛邪扶正的积极措施，目前已广泛用于急性传染病如乙型肝炎、病毒性肝炎、急性菌痢及部分心血管疾病，如高血压所引起的中风等。

过去被人们所忽视的吐法，近几年来不少学者对之十分关注，一致认为吐法含义广泛。它不仅能治急病重病，而且可愈疑难杂病，往往收到预料不到的效果。朱勉生认为：凡痰涎、宿食、酒积、瘀血、热毒等有形实邪留滞人体上部（以胸膈为主，下至胃脘，上至头面）导致的实证、杂证、急证、怪证，尽管变态百端，皆可考虑用吐法。又如长沙市传染病院等单位用藜白散、利喉散、稀涎散、消喉散、生熟巴豆散等，方中有巴豆、雄黄、牙皂、白矾、郁金等药，治疗小儿白喉痉挛、喉梗阻，服药后往往先吐后泻，或但吐不泻，能较快减轻喉腔充血水肿，改善通气功能，使绝大多数患儿免于气管切开术，发挥了很好的急救作用。

综上所述，张从正“陈莠去而肠胃洁，痼痼尽而营卫昌”，“损有余即所以益不足”的法邪即扶正的观点，是经得起临床实践检验的，正确选择“汗、吐、下”3法并灵活应用于临床，必将进一步提高以中医中药为主，中西医结合治疗各科疾患的疗效。

#### 参考文献

- 1 张从正. 儒门事亲. 上海: 上海卫生出版社, 1958
- 2 刘树农, 等. 上海: 上海中医药杂志, 1981; (7): 18
- 3 任应秋, 等. 中医各家学说. 上海: 上海科技出版社, 1986  
(南京中医学院徐荣庆教授撰)

### 命门的研究进展 study development of the meinman

命门, 是人体生命之本, 自《内经》时期至近代, 历代医家对命门之研究都极其重视。张鑫华总结, 自《内经》以来诸名医对命门部位的阐述, 认为有目、肾、子宫、丹田、产门、心包、任督脉等多种认识, 即这些部位亦称命门。命门亦分布于头部太阳穴、天庭, 中庭、司空、印堂, 手指小指及耳部等处。蔡友敬认为, 命门部位乃上指睛明穴, 下指两肾, 由三焦和督脉联系上、下命门, 构成命门系统。张鑫华探讨命门生理作用, 认为与精神因素有关, 精血藏于命门, 命门之火引发欲念, 命门之气与寿命相关, 命气温养脏腑, 命门与膀胱相表里, 命门与肾三焦关系密切, 命门连胞室通督脉, 命门具有督脉之用, 人身之膜发源于命门。故上则包脾连胃, 联络心肺之膜; 下则包肾络肠之膜; 命门主脑, 具有髓髓作用; 肝为命门之母, 各脏腑得命门之气, 才能发挥其职能。姜春华谓命门为独立的脏器, 温煦脏腑之作用超过肾, 命门概括肾, 肾的阴阳限于局部, 命门阴阳统括周身内外上下。

**命门的脉象** 张鑫华据古代记载的命门脉象, 认为其出于尺部、右尺。有的古代医家认为, 右尺非候命门相火。命门脉象, 宜沉实、微沉。命门病理脉象, 指尺部浮数, 为遗精之症; 尺部浮弦, 为水停体内; 浮芤, 便血; 浮细虚, 汗出; 命门脉沉数, 消渴; 命门脉沉迟, 小便清长或频数。命门的病理变化, 因命门为水火之宅, 命门水亏的病理表现, 症见面赤红嫩、口渴咽焦、引水自救、或五心烦热、吐血衄血、咳嗽遗精、津液枯竭、中风痲痹等。命门之火不足, 可见肠鸣泄滑、反胃吞酸、畏寒洒洒、阳痿、二便失禁、腰脊如折、水肿胀满、哮喘、五更泄、痢疾、便秘等症。

**命门的治法** 据历代医家对命门治法的探讨, 张鑫华总结命门治法有温补, 甘温除大热, 引火归原, 补肝以生命门之火, 温补督脉, 温补兼汗法、泻法、消法、清法等。调治命门的方剂主要有右归丸、右归饮、固阴煎、菟丝煎、荡阴救命汤、养火助阴汤、安脉汤、辟寒丹、崔氏八味丸、七宝美髯丹、还少丹、四神丸、随补羊肉羹、保元汤、黄芪汤、补中益气汤、左归丸、左归饮、六味丸、丁

香柿蒂汤、中满分消汤、导气汤、荔子散、利火汤、解毒汤、三豆汤、救土通肠汤、禹功散、金鬃煎等。调治命门的药物主要有附子、肉桂、胡桃肉、阳起石、益智仁、肉苁蓉、狗阴茎、五味子、菟丝子、川椒、蛤蚧、人乳、桑螵蛸、辛夷、牵牛子、雀卵、胡芦巴、鹿角胶、雄蚕蛾、鹿茸、沉香、蛇床子、淫羊藿、仙茅、元参、生地、桃仁、大黄等。

俞济人用温补命门法治疗白血病 1 例获良效。吴日辉以四神丸加黄芪、白术、附子等健脾益肾药治疗两例顽固性命火衰的泄泻, 获显效。张鑫华运用加味补肾丸温补命门法治疗近视眼有效。王寿源针刺命门、委中穴治疗急性胃肠炎 26 例见良效。张鑫华运用命门学说治阳痿、中心性视网膜炎、急性充血性青光眼、不育症、恶性淋巴瘤、子宫功能性出血、先兆流产、脑血栓形成、支气管扩张咯血等获显效。

吴敦序据 10 多年临床和实验研究资料证明, 命门不是一个脏器, 而是一个系统, 它以下丘脑为中枢, 一方面通过垂体、肾上腺皮质、甲状腺和性腺作用于全身; 另一方面通过交感神经(包括肾上腺髓质)作用于全身, 对周身阳气起促进作用。张鑫华认为相火、肾阳、肝火本为一物, “命门—相火—寄于肝胆”这一理论与肾上腺皮质机能密切相关, 78 例肾阳虚(命门火衰)者, 24 小时 17-羟类固醇排泄量明显低于正常人。甲状腺功能减退者, 服补肾阳药有效; 甲状腺、肾上腺、性腺功能减退者, 用补肾药见显效, 他认为脑垂体—性腺功能和肾阴肾阳(即命门之火)有密切关系, 张鑫华综合近年研究资料, 认为对命门真阴的物质基础的研究, 几乎是空白。邵念方据现代医学对命门的实验研究资料, 认为命门的物质基础可能是环核苷酸。

**阴虚火旺和命门火衰** 宁一亭等在对阴虚火旺、命门火衰病人 12 时辰渗透压和尿量曲线初步观察中, 以每时辰(2h)留全尿一次, 正常人组 10 例, 连续 48h; 阴虚火旺组(10 例)和命门火衰组(9 例), 连续 24h。结果显示: (1)尿渗曲线。正常人组 12 时辰中西时最低, 亥时最高, 平均尿渗变化幅度为  $810 \pm 43 \text{ ml/kg 水}$ ; 阴虚火旺组曲线处于高水平并接近正常人组曲线, 尿渗变化幅度为  $880 \pm 47 \text{ ml/kg 水}$ ; 与正常人组相比差异非常显著 ( $P < 0.01$ )。命门火衰组平均尿渗量  $463 \pm 43 \text{ ml/kg 水}$ , 显著低于正常对照组 ( $912 \pm 42 \text{ ml/kg 水}$ ) 和阴虚火旺组 ( $881 \pm 31 \text{ ml/kg 水}$ ), 均与正常人组有差异, 差异非常显著 ( $P < 0.01$ )。 (2)尿量曲线。正常人组峰值在酉, 谷值在亥时, 其他两组有一定移位。昼夜总尿量, 正常人组为  $1213 \pm 58 \text{ ml}$ , 阴虚火旺组为  $944 \pm 103 \text{ ml}$ ; 命门火衰组为  $1337 \pm 245 \text{ ml}$ , 无统计学意义。 (3)昼夜尿溶质总排量, 正常人组为  $766 \pm 23 \text{ mg/L}$ , 阴虚火旺组为  $499 \pm 38 \text{ mg/L}$ ; 命门火衰组为  $294 \pm 48 \text{ mg/L}$ , 均显著低于正常组 ( $P$  均  $< 0.01$ ), 且后两组之间差异也非常显著 ( $P < 0.01$ )。提示人尿渗与尿量曲线有一定时辰节律性, 可证实肾脏的尿稀释功能和尿浓缩功能明显受肾中阳气和命门真火的影响和调节。张鑫华据近代医学对命门有关的方剂的实验研究资料, 认为六味地黄汤、七宝美髯丹等均有, 提高机体免疫功能、抗老延寿之功。右归丸有增强细胞免疫、调节肝细胞变化的作用。补命门之气的补中益气汤, 可增强机体网状内皮系统吞噬功能。四君子汤在补中益气汤中, 促进细胞免疫作用最强, 亦有促进淋巴细胞转化及活性玫瑰花结形成作用。据现代医学对治命门主要药物的实验研究资料, 补命门的苁蓉、淫羊藿、肉桂、附子等能使低下的 DNA 合成率提高。李功如从对苁蓉抗老作用的实验研究结果发现, 苁蓉使小鼠红细胞超氧化物歧化酶(SOD)的活性明显增强, 使小鼠心肌脂褐质含量明显降低, 延长果蝇的平均寿命、半数致死天数和最高寿命, 说明具有抗衰老作用。淫羊藿茎叶中含淫羊藿甙, 其根中含去甲基淫羊藿甙及维生素 E, 动物实验证明, 本品具有雄性激素样作用, 有促进精液分泌、间接兴奋性欲作用。附子含乌头碱, 经动物实验, 附子煎出液有强心作用, 可增强心搏。肉桂可促进消化吸收机能, 缓解平滑肌痉挛, 有扩张血管作用, 所含挥发油成份为苦艾素, 含鞣质、胆硷、维生素 A、B、C 等。补命门的五味子作用于核酸和环核苷酸系统, 可使 cAMP/cGMP 比例趋于正常, 调整免疫功能, 有兴奋

呼吸中枢增强体力、视力,加强了子宫收缩作用,有降低激素副作用。补命门之水以配火的元参、生地,能提高T细胞比值,提高淋巴细胞转化率,使先进的DNA含量降低,调整“命门之火”以调整核酸代谢。祛瘀毒阻于命门的桃仁等,对特异性免疫有促进作用。清命门之火的大黄,可提高白蛋白,降低球蛋白,以调整免疫功能。黄芩、黄连,亦能提高机体免疫功能。蛇床子,动物实验证明有雄性激素样作用。鹿茸精,系雌性内分泌素,可增强心功能,消除心肌疲乏和衰弱,增加红细胞、血红蛋白及网织红细胞。菟丝子等亦能提高机体免疫功能。

由于命门是人体先天真阴真阳之气的蕴藏之所,命门之气是维持生命的原动力,故近代医学已开始用实验研究方式探索其本质;这对研究人体科学具有重大意义。

#### 参考文献

- 1 俞济人. 上海中医药杂志, 1963, 4: 23
- 2 王寿源. 福建中医药, 1965, 3: 103
- 3 吴日辉. 新中医, 1980, 5: 19
- 4 邵念方. 山东中医学院学报, 1980, 1: 14
- 5 蔡友敬. 福建中医药, 1981, 1: 3
- 6 吴敦序. 上海中医药杂志, 1981, 6: 36
- 7 姜春华. 安徽中医学院学报, 1982, 2: 34
- 8 张怀安. 辽宁中医杂志, 1982, 5: 31
- 9 宁一亭, 等. 中医杂志, 1983, 11: 69
- 10 张鑫华, 等. 命门学说应用荟萃. 上海: 上海中医学院出版社, 1990. 1~8

(青岛医学院附属医院张鑫华主任医师撰)

**精气神理论及其研究** study on essence, Qi and vitality 精、气、神是人体生命的根本,故又称“人之三宝”。《灵枢·本脏》说:“人之血气精神者,所以奉生而周于性命者也”。精、气是构成人体和维持人体生命活动的基本物质,神则是生命活动的反映,前者是物质基础,后者为功能表现。精气神理论是研究人体精、气、神的涵义、来源与生成、生理作用及其相互关系的理论,是中医学理论体系的重要组成部分。进行精气神理论探讨和研究,对于继承和发扬中医学具有重要意义。

精气神理论源于先秦,形成于《内经》。在古代,人们就认识到精气是构成世界的最基本物质,如《易·系辞》说:“精气为物”。神,是指事物变化无穷、奇妙莫测之义。《易·系辞》说:“阴阳不测之谓神”。《内经》中广泛论述了精、气、神的含义、来源与生成、相互关系及其生理作用,形成较为完整而系统的精气神理论。《素问·金匮真言论》说:“夫精者,身之本也”,指出精是生命的根本。精有先天之精与后天之精之分。先天之精禀受于父母,是构成胚胎的原始物质;后天之精来源于饮食水谷,故称“水谷之精”,水谷之精可以化生气、血、津液等,成为各脏腑功能活动的物质基础。气是构成人体生命活动的基本物质,如《灵枢·决气》说:“上焦开发,宣五谷味,熏肤,充身泽毛,若雾露之溉,是谓气”。由于气的分布及其功能活动各异,故又有元气、宗气、营气、卫气之分。神是人体生命活动的总体现,包括人的精神、意识、思维活动。人体精、气、神的关系表现在:神是在精、气机能活动的基础上产生的,神不能脱离精气而存在;而神又是精、气的统帅和主宰者。

后世医家在《内经》的基础上对精、气、神理论多有阐发。如张仲景创立神志疾病的辨证论治体系;刘完素提出气的“亢害承制”理论;李时珍提出“脑为元神之府”;张介宾则主张“命门之火,谓之元气,命门之水,谓之元精”;王清任提出“灵机记忆不在心在脑”等等,皆丰富和发展了精气神理论。

现代精气神理论的研究大致可分为两个阶段:50年代初至60年代中期,多为文献整理和理论探讨;自70年代末至今,除文献综述与理论探讨外,还有现代实验研究和临床观察。

在文献综述和理论探讨方面,张登本认为精有广义、狭义之分。广义之精功用有三:(1)调节全身各脏腑之精;(2)化生血液;

(3)不断转化为肾精、肾气、肾阴、肾阳,进而完成肾脏的复杂功能。狭义之精具有生髓充骨补脑、维持生长发育及转化为生殖之精的作用。张伯讷指出:《内经》提到的精既有先天之精含义,又包括气、血、津液、水谷精微在内的精微物质。张氏认为张景岳的“补气以生精”和“补精以生气”的治法正说明肾中精和气是可分而不可离的。张珍玉、刘承才提出精是生命的基础,是人体正气之本。刘树新认为,精、气、神为人生三宝,其中以精为物质基础。临床治疗再生障碍性贫血常用补肾精之药而获效。刘氏认为精的盛衰关系到疾病的发生、发展与转归。因此,在摄生方面首当重视精的摄养。魏长春指出:衰老与精亏肾衰有关,应用保肾养精药为延年益寿的重要方法。

对于气的研究,除对气的概念、作用等进行文献整理外,还表现在运用现代科学的知识和方法,对气本质进行深入的探讨。目前,对气本质主要有如下看法:(1)力能说:包括各种“力”、“能量”和能谱代谢等观点。(2)活细胞说:认为“元气”本质相当于活细胞。(3)核酸说:孔庆洪、刘亚光等提出“气是核酸”说。(4)人体场说:蒋华荣认为气是一种运动变化着的场,其性质同电磁场颇相类似。精子与卵子结合成受精卵,生命场开始建立;人体死亡,生命场消失。(5)信息说:唐学正认为,气的概念是不同历史条件下“信息”的同义语,因此气的运动形式也是信息传输过程。(6)带电粒子说:刘业光认为,气的物质基础与人体中进行定向运动的带电微粒有关,气的功能可能是进行定向运动的带电微粒的调整能力。总之,对气的本质,从物质概念而言,有核酸说、活细胞说、环核苷酸说、信息说、人体场说等;以气的功能而言,则与神经系统的功能、造血功能、免疫功能等有关。国外对气本质的研究,林功铮归纳为:能量说、生物电说、光能说、电—光效应说、动力说、神经说、整体系统脏腑功能说、场力学说等11种观点。

对于神的认识,除对神的含义、生成、作用、生理病理等进行文献整理和理论探讨外,80年代以来突出表现为对神的归属,即心主神明与脑主神明问题之争。姜全章认为,“心藏神”之说在中医学理论形成中起到了积极作用,但验之临床多有不符,故不宜继续沿用。凡属神志方面的疾病,皆与脑有关,故以“脑藏神”较为确切。李玉和通过对脑的理论探讨,认为在“脑为元神之府”的理论已成体系的今天,还提“心主神明”显然不符合现实。任继学等认为,中医“脑”在生理上以督脉、经脉、脊髓为传导反射之路,以神经作为其神机与机体内外、上下互通信息之路。此外,宋一亭、潘文全、董建华、许庆友等从不同角度探讨脑主神的论点。刘兴仁在探讨了《内经》、《本草纲目》有关脑的论述之后指出:(1)《内经》未明确指出“脑主神明”;(2)李时珍“脑为元神之府”只是只言片语,而其辨证仍然以心为主;(3)“脑主神明”违背了中医学理论原旨。柯新桥、张超群通过对心主神明理论形成基础的探讨论证了心主神明的正确性。另外,张铭韬、张庆祥、毛克勤、于鸿玲、李永光等分别从不同角度论证了心主神明的论点。

在对精、气、神的实验研究方面,朱梅年认为肾精主生殖、生长发育、主骨华发等功能,恰好与微量元素锌、锰通过内分泌系统、酶系统对核酸及3大物质代谢所发挥的作用相一致。指出锌、锰是肾精功能的物质基础。柴立等通过对肾精与微量元素的研究表明,肾精亏虚与锌、锰缺乏的病因符合率达95%以上。柴氏认为从微量元素角度来探讨中医肾藏精理论是很有意义的。张同贵认为,肾精可能是核酸、激素、酶类和微量元素等。宋知行认为,精很可能是指那些蕴藏能量的营养物质和参与调节的酶、激素(及维生素)之类。

对于气的实验研究,胡国庆等对气虚患者进行甲皱微循环测定,结果表明气虚证者管袢轮廓模糊、血色淡红、流态断续状、管袢夹状减少、血流速度减慢、血流量降低,且上述表现在心气虚、肺气虚、脾气虚、肾气虚各证间无明显差异。应用补气理血药后观察显示:微循环夹管袢增加,血流速度明显加快,血流量明显增加,从而认为“气对微循环有调节作用,特别是参与了微循环灌注量的调节”。朱崇顺等从血流变角度对气虚进行了大量临床观察和实验研究,结果是气虚或阳虚动物皆出现血液流动及形态

的显著异常,表现气虚或阳虚动物的血管中存在着淤血或血淤的倾向。鲍延熙等对30例气虚型的或血淤型的冠心病患者测定心室收缩时间、心尖搏动图、心功能、血液粘度、甲皱微循环和血浆环磷酸腺苷,发现气虚型的主要改变表现在血液动力学方面。刘春福等对气虚患者应用淫羊藿冲剂后,以原子吸收光谱法测定患者的微量元素和免疫功能,结果血清中铜、锌、镁含量均较治疗前降低,Cu/Zn比值升高。刘氏认为在内分泌—激素—LEM(白细胞内源性物质)的调节下,通过营养免疫作用形成系统完整的自稳机制,这与“正气存内,邪不可干”十分相似。另外,还有人从免疫机能、细胞电泳、血小板聚集水平等方面探讨了气虚的本质。

对于神的现代研究,70年代武汉医学院一附院、天津市和平医院从现代医学角度对心主神明的实质进行研究,观察到心脏外科手术应用体外循环时,特别是在阻断主动脉后多数病人意识和呼吸均消失,心脏复跳后又能清醒;去脑的人或动物虽可出现抽搐,但意识却仍然存在。从生物物理学角度来看,克罗默对人体生物磁场的测量结果证实心磁比脑磁强百倍,而心磁场、脑磁场又受地球的和太阳的磁场影响并与知觉、精神活动有关,故心磁可以干扰、调控脑磁代谢。邓铁涛认为,中医心主神明显然是把循环系统和高级神经系统合起来归属于心。

目前,精气神理论的研究已取得较大成绩,文献研究使精气神理论得到系统的整理与发掘,而采用现代科学技术和方法进行研究,在深入探讨精气神实质上取得了可喜成果,以气的研究为中心精气神理论进入世界医学行列。今后精气神理论的研究应继承与发扬、借鉴与创新并举,而以发扬、创新为主。该领域的研究热点为:(1)中国哲学气范畴与中医学气理论的比较研究;(2)专题文献研究,包括精气神的基本概念、理论体系的研究;(3)动物实验的研究;(4)多学科多层次对精气神理论进行研究;(5)精气神理论的临床研究。

#### 参考文献

- 1 天津市和平医院心外科,天津医药,1975,6,304
- 2 A·H 克罗默,王鸿儒,等译.生命科学用物理学.北京:人民卫生出版社,1980,400
- 3 柴立,等.微量元素,1986,1,31
- 4 姜全章.黑龙江中医药,1987,3,17
- 5 王明辉.中国医药学报,1987,5,43
- 6 林功铮.中医年鉴(1986).北京:人民卫生出版社,1987,430
- 7 刘兴仁.北京中医学院学报,1988,11,15
- 8 张庆祥.全国第2届中医基础理论学术会议论文摘要汇编,1990,69
- 9 胡国庆.上海中医药杂志,1990,5,46

(山东中医学院刘承才教授、张庆祥硕士撰)

**藏象学说** viscera—state doctrine 通过对人体生理、病理现象的观察,研究人体各脏腑、组织、器官的生理功能、病理变化及其相互关系的学说,是中医理论的核心。藏,指藏于体内的脏器,即脏腑;象,指表现于外的生理、病理现象。藏象学说贯穿于中医理、法、方、药、养生、防病等各个方面,因此为历代医家所重视,也是现代医学科学工作者研究的中心和热点。深入探讨和研究中医藏象学说的实质,将促进中医理论的发展,也有助于提高中医辨证论治疗效和养生保健的水平,为临床实践提供理论依据,为祖国医学的整理提高,揭示其理论的科学性,开拓更广阔的思路。

藏象学说理论产生于《内经》,它以古代解剖知识、对人体生理病理现象的观察以及反复的医疗实践为基础,通过“以表知里”的整体推导方法而形成。后世医家在《内经》基础上结合各自的医疗实践,使其进一步丰富、发展和完善。《难经》的30~47难即专论脏腑,并首先把命门作为脏腑概念提出;东汉张仲景等的著作中均有脏腑专论;朱丹溪首先提出肝主疏泄、肾主闭藏的理论。自1962年湖北中医学院第2届西医学学习中医班发表《从脏腑学说来看祖国医学的理论体系》一文后,中医学术界在某一脏腑功

能的专题讨论、藏象学说有关术语的探讨及对古代医家有关藏象理论的继承和阐发等方面,展开了新的探索;临床研究也在脏腑辨证、五脏治法、脏腑同治、按五脏与所属器官组织进行治疗及中西医结合治疗等方面有所发展。方药中指出藏象是疾病定位的物质基础和定性的唯一依据,并提出以脏腑为中心的规范化课题。王元洪等根据“脾开窍于口”的理论,以健脾法治疗复发性口疮获得良效。临床采用通里攻下法治疗外科急腹症,开创了中西医结合的新局面。1960年,国内外已有“证”的动物实验研究;1976年,已有从“肾开窍于耳”入手的实验研究。上述研究成果都丰富和发展了中医藏象理论。但不少医家已认识到单纯理论探讨或加以临床验证的中医传统研究方法,在探讨中医藏象理论的本质方面显然是不够的,因而开始探讨新的研究思路和方法。

随着高新科学技术的发展,引用现代科技方法和手段对中医藏象学说进行多学科、多方位、多层次、多指标研究,已成为一大趋势。不少学者运用系统论、控制论、信息论等研究分析中医藏象学说理论体系。有人认为藏象学说中的五脏是对人体五大功能系统的概括,中医学所谓某一脏器的功能,可以包括现代医学几个脏器的功能;而现代医学所指某一脏器的功能,可能分见于中医学多个脏器功能之中。有人结合现代生物钟理论探讨脏腑昼夜节律,为中医按时论治、择时用药提供了理论依据。简沛海认为中医藏象学说“以象知藏”法实质上是用信息分析研究而知病的方法。张绍铭认为中医藏象思想蕴含着生物全息理论。还有人从细胞水平认识中医藏象,并提出肾代表细胞核、脾代表细胞内蛋白质、肺代表线粒体、肝代表细胞内大部分膜状结构、心代表能量的看法。以上学者都从不同侧面对藏象学说提出了新的认识,有利于藏象理论的发展和探讨。但哪一种理论更深入更能体现中医藏象学说的实质,通过什么方法和途径才能将这些理论统一起来并验之于临床实践,这是理论领域的一个难题。

随着藏象理论研究的深入,特别是受现代医学研究方法的影响,藏象学说的实验研究已初具规模。研究方法多是从对微量元素和激素水平的测定,或中医脏腑证候的定量化、规范化、诊断的客观化、标准化和动物实验等方面入手。王冠庭等测定了慢性肝病虚证(肝阴虚、脾气虚)患者血中微量元素变化,结果两组虚证的表现均与锌、铜代谢失调有关。蔡铁勇进一步研究证实,肝病患者因体内铜、锌代谢异常而影响视觉功能;血浆中锌水平降低,可引起视神经炎;铜代谢异常,可引起视网膜色素变性;这也是“肝开窍于目”理论的物质基础。肝脏有病是由于胆酸脂酶减少,乙酰胆碱数量增多,cGMP水平增高,cAMP降低,cGMP/cAMP比值升高,致使某些小血管痉挛、微循环障碍,出现“爪甲不荣”现象。初步研究证实,中医所述肝脏与神经、内分泌、血液、免疫、运动等系统功能有关。对肾实质研究比较一致的看法是:肾与神经、内分泌、免疫等有较密切的关系;肾阳虚与下丘脑—垂体—肾上腺皮质、性腺、甲状腺等3个轴功能紊乱与低下有关,初步说明“证”是有物质基础的。对心实质的探讨和实验研究,主要从冠心病和高血压着手,并侧重于“证”的实质探讨。而周桐声则以灸感对“心主汗”理论进行论证,指出对盗汗的治疗,凡属灸感感传能够发生者,皆以心脏为其终点,从而为心与汗的关系找到了依据。广西中医学院探讨肺主气实质,选择符合肺气虚证内科病人40例,进行免疫功能(E-玫瑰花结形成试验,IgA、IgG、IgM及C<sub>3</sub>)测定,生化指标, $\alpha_1$ -抗胰蛋白酶( $\alpha_1$ -AT)、血真性胆碱脂酶(ChE)活性测定及肺血流图等检查,结果表明患者有免疫功能低下,植物神经紊乱、肺血流灌注量及 $\alpha_1$ -AT减少、ChE活性增高,初步认识了肺气虚的病理生理学基础。一些单位研究结果表明,脾与植物神经、垂体—肾上腺皮质、免疫、消化系统及3大物质代谢有关。北京中医研究所研究发现脾气虚患者从口腔到结肠,从消化吸收到消化道运动,都显示明显的机能障碍,初步奠定了脾的病理生理学基础。动物模型的实验研究也是中医藏象研究的重要环节,并取得一定进展。以上研究方向和手段虽成为探讨中医藏象理论的主导方向和方法,但目前所选指标只能反映脏腑某一方面的情况,根据需要与可能进行探索,这是否是探讨中医

藏象学说本质的可靠途径?用现代医学某些指标验证中医藏象理论,就是使中医藏象学说中的模糊定性概念,特别是中医的“证”量化、客观化了吗?中医藏象理论来源于人,动物模型如何制作才更符合临床实际?在实验过程中,怎样才能选择符合中医藏象理论、特异性强、阳性率高、重复性好的客观指标?等等,所有这些都是实验研究亟待解决的课题。

中医藏象的实质问题,在理论上以什么作为沟通 and 同化中西医两者的桥梁,以及实验研究的方法等都将在今后得到进一步探讨和研究。鉴于中医学藏象学说的整体观念,不囿于简单地以现代医学已有的脏器理论与知识去阐释中医藏象学说,而是以中医藏象学说的传统观念与思维逻辑为指导思想,通过多指标综合研究,纵横联系,进行中医及中西医结合研究,希望能通过深入探讨和研究,把握住中医藏象学说的基本观点,并循着前人的思维逻辑,吸取、运用多学科的新知识、新技术,缜密设计每项科研环节,以期达到揭示中医藏象理论实质、对中医藏象学说有所发展和创新的目标。

**参考文献**

- 1 方药中. 辨证论治研究七讲,北京:人民卫生出版社,1979,70
- 2 王元洪. 中医杂志,1981,22(7):40
- 3 王冠庭等. 中西医结合杂志,1981,1(5):2
- 4 周楣声. 中医杂志,1983,24(1):58
- 5 许自成. 新中医,1984,16(6):18
- 6 蔡铁勇. 国外医学(神经病学神经外科学分册),1985,12(5):244
- 7 张铭韬. 中医药信息,1986,3(6):5
- 8 郭金龙. 北京中医学院学报,1986,9(5):29
- 9 徐铃. 第一军医大学学报,1987,7(34):179
- 10 阎沛海. 贵阳中医学院学报,1989,1~12

(山东中医药大学迟华基教授、魏凤琴讲师撰)

**肾主生殖的研究 the kidney and reproduction**

肾是中医脏腑学说中一个重要部分,其功能与人的生殖功能盛衰相关,临床上不同的补肾疗法对女性从青春期、生育期、更年期到老年的神经生殖内分泌免疫功能失调病均有一定效果。这形成了肾主生殖的新概念,也提示其具有较高的研究价值。

过去中医治疗月经失调病各家侧重不一,有从肝者、从脾者,或从肾者、从气血者而辨证论治,且个案报道多,由于缺少某些临床和实验室群体指标,因此在整理、提高、推广方面受到一定限制。

1958年,李超荆按《内经》:“女子七岁肾气盛,……二七而天癸至……月事以时下,故能有子也”的理论,结合患者表现交感神经或副交感神经活动占优势的现象与肾阴虚、肾阳虚的关系,以基础体温和阴道脱落细胞涂片为指标,用补肾药治疗无排卵性功能性子官出血病,取得排卵率 72.8% 的较好疗效,于是提出肾主生殖的设想,认为中医的肾虚可能与现代医学中下丘脑—垂体—卵巢轴功能的调节相关。在这个基础上,1972年俞瑾按肾阳虚者下焦湿聚为痰的理论,结合临床表现,用补肾化痰法为主治疗多囊卵巢综合征,113例患者中排卵率达82.7%;1986年,又从垂体和卵巢激素的变化观察到补肾治疗可以提高垂体 FSH 分泌,使血 LH/FSH 比值正常而诱发卵巢排卵,在某些兼有肝经症状者血 PRL 水平升高,用清肝补肾药可使血 PRL 下降再出现排卵,是辨病与辨证结合的例证,也是中医“肝肾同源”的微观证据;又在补肾治疗下丘脑垂患者中功能低下性闭经中发现,补肾药可提高垂体的反应性而获排卵率 76.3%,但对高促性腺素性闭经者则按临床表现用滋阴清热药结合大量雌激素,可使卵泡发育排卵或妊娠,提出补肾药对下丘脑—垂体—卵巢轴有多水平、多途径调节的设想;又通过补肾法对黄体不健、性早熟、反复性自然流产、胰岛素拮抗性无排卵、免疫性不孕等病的疗效,观察到补肾药不仅对神经生殖内分泌、免疫系统而且对肾上腺功能紊乱者亦同时有调节作用。1980年张丽珠报道补肝肾药加氟氢可的松可将

继发闭经者(71例)妊娠率提高到58%。1982年,符式桂按肾主生殖的理论报道月经的人工中药周期,在19例无排卵者中,6例妊娠,3例排卵。1982年,葛秦生将补肾活血药结合绒毛膜促性腺激素(HCG)或乙底酚治疗各种排卵障碍病人,95例患者的排卵率达72.6%,效果优于单用中药或西药组。同年,菅井正朝也报道补肾活血药结合hCG等方法,使31例排卵功能障碍性不孕者中10例妊娠。1982年徐晋勋报道补肾药有类雌激素样作用。1985年,余运初报道补肾阴肾阳药并用可使大鼠垂体反应性增强,并可使去甲状腺和去肾上腺大鼠出现的卵巢LH/hCG一受体减少现象得以恢复,但单用补肾阳药作用不明显,而活血药可以增加大鼠卵巢子宫静脉血中PGF<sub>2</sub>含量。1991年,俞瑾等报道补肾药的有效部分存在于水溶成分中,在雄激素致不孕的大鼠中发现补肾药水溶部分使其垂体的LH含量及分泌增加,垂体促性腺细胞粒溶等变性现象消失,使卵巢内原来升高的睾酮和雌二醇水平降为正常,使肾上腺内升高的睾酮含量也降为正常,并使卵巢内雌激素、孕激素受体明显增加,黄体增多。

以上实验结果提示,补肾药在促排卵这个中枢一下丘脑—垂体到卵巢极为复杂的调控中,确有多个水平、多个途径、多个腺体的作用。80年代初期,叶雪清、李超荆等也发现补肾为主的疗法对更年期妇女的神经、内分泌、免疫功能失调有调节作用,宏观上提示肾与妇女(也包括男子)一生中神经内分泌免疫功能调节有关系,这种关系还不局限在内分泌腺、免疫系统和神经系统,而且对体内其他各脏器功能的调节也发生作用;同时也从微观上提示中医肾的研究既要宏观联系为指导,也要从分子生物学甚至更为发展的机体复杂调控水平进行研究。中药的成分很复杂,中医中药并举的研究对机体复杂的调控现象研究是个有利的条件,因此中医必与生命科学的研究共同长存、共同促进。

**参考文献**

- 1 李超荆,等. 肾的研究,1964,35
- 2 张丽珠,等. 中华妇产科杂志,1980,15:48
- 3 葛秦生,等. 中医杂志,1982,23:339
- 4 符式桂,等. 中医杂志,1982,23:31
- 5 菅井正朝. 中医の补肾疗法による排卵障碍と不妊の治療にフソて中医臨床,1982,15
- 6 余运初,等. 中西医结合杂志,1985,5:201
- 7 俞瑾,等. 中西医结合杂志,1986,6:218
- 8 俞瑾,等. 中西医结合杂志,1989,9:548

(上海医科大学妇产科医院俞瑾教授撰)

**肾虚证研究 study on kidney deficiency syndrome**

肾在中医脏腑理论中是特别受到重视的器官。肾藏精,主人体生长、发育与生殖,故称“先天之本”。《医统正脉全书》说:“肾乃生气之原,为先天立命之基”。肾的生理功能很广,但又有其具体内容,如肾主水、肾主纳气、肾主藏精、肾主生殖、肾主骨、肾开窍于耳等,所以肾是宏观的功能概念,涉及到人体的水液代谢、泌尿、生殖、生长发育、骨的生长、老年及延缓衰老等。因而肾的功能对人体极为重要。五脏之伤,穷必及肾。在临床上也非常重视肾的作用,许多疾病,只要有肾虚见证,均可调整肾阴肾阳论治。因此,通过对肾虚证的研究探讨中医肾的本质,不仅能丰富和深入阐明中医脏象学说和生理、病理等方面的理论,发展现代医学,而且在临床医学对疾病的预防与治疗,延缓衰老、异病同治等方面具有开拓思路、提高疗效等特殊意义。

以往的研究揭示,肾的功能首先与机体内分泌系统有密切关系。主要表现在下丘脑—垂体—肾上腺皮质轴、甲状腺轴、性腺轴3大内分泌轴的关系上。下丘脑—垂体—肾上腺皮质轴,发现肾阳虚患者尿17-羟皮质类固醇的排泄量降低,表明有不同程度的肾上腺皮质功能减退;还发现对促肾上腺皮质激素的反应延迟。当应用助阳药后,可使肾上腺皮质功能恢复正常。而肾阴虚患者尿中17-羟皮质类固醇不正常升高,应用某些滋补肾阴药可予调整。下丘脑—垂体—甲状腺轴,研究发现,肾阳虚患者血中

甲状腺素( $T_3$ )水平降低,对促甲状腺激素释放激素兴奋试验延迟,用助阳药治疗可使之恢复正常。而甲状腺功能亢进患者出现阴虚火旺证候,可用滋阴药治疗。下丘脑—垂体—性腺轴:研究发现,男性肾虚患者血中雌二醇( $E_2$ )、黄体生成素(LH)偏高、睾酮(T)水平偏低, $E_2/T$ 比值增高。对性腺激素释放激素兴奋试验,分泌反应延迟,用温补肾阳药治疗,可调整这种功能紊乱。在女性,下丘脑—垂体功能减退,常表现为阳虚见证,可用温补肾阳药治疗。补肾治疗青春期功能性子宫出血,在调整周期和促排卵方面有效率在92.3%以上。补肾化痰法治疗多囊卵巢综合征,可使排卵率达83.1%,妊娠率达50.6%。以补肾法治疗下丘脑—垂体功能失调性闭经,排卵率达76.9%。补肾不是激素替代治疗,而是改善人体自身调节功能。上述3条轴的病理生理改变,都可从动物实验中得到证实。

其次,肾与植物神经系统功能有关,肾阳虚者常表现交感神经活动减弱,而肾阴虚者常表现交感神经活动亢进。上述功能障碍,均可经调补肾阴、肾阳治疗。

其三,通过肾主骨的研究资料证明,骨的生长发育除有赖于物质原料的补充外,还受甲状腺、甲状腺及垂体生长激素维生素 $D_3$ 的调节,这些激素的作用与肾功能有关。如维生素 $D_3$ 必须通过肾脏最后转化为 $1,25$ -双羟- $D_3$ 才具有生物活性,因此被认为是肾的内分泌功能。对再生障碍性贫血患者,采用调补肾阴肾阳的药物,肾脏产生促红细胞生成素,作用于骨髓,刺激红细胞生成。其他如“肾开窍于耳”、“肾主黑”等等也进行了不少研究。总之,研究资料表明中医五脏中的肾是机体多系统、多器官、多层次的功能综合表现。

近期研究有以下结论:(1)肾阳虚证不仅有肾上腺皮质轴紊乱,而且在不同靶腺轴也有不同环节、不同程度的功能紊乱,是神经内分泌系统中的一种隐性变化。(2)肾阳虚证具有多靶腺功能紊乱,两组平行观察未见轴间相互影响的证据,可推论肾阳虚证的主要发病环节为下丘脑的调节功能紊乱。(3)老年人甲状腺轴与性腺(男)轴的异常表现和肾阳虚证甚为类似,因此肾阳虚证的外象又意味着下丘脑—垂体及其某个靶腺轴上有一定程度的未老先衰。此外,对肾与生长激素也进行了深入研究。生长激素与泌乳素对人体的生长发育、物质代谢、生殖功能皆有重要意义。在生长激素和泌乳素的调控中,多巴胺起主导作用。故多巴胺—生长激素、泌乳素这一系统与中医肾本质有关。观察到已届肾虚之年的正常老年人睡眠期生长激素水平明显低于正常青壮年人,而且对GRF的反应也明显减弱,说明生长激素的储备功能低下。老年人泌乳素分泌呈增高趋势,睡眠期泌乳素值和对灭吐灵的反应都较青壮年人为高。老年人经温肾治疗后,肾阳虚的症状有好转,生长激素与泌乳素分泌功能出现变化,说明生长激素和泌乳素是中医“肾”功能的一个组成部分。又观察到老年动物下丘脑多巴胺含量较青壮年动物为低,为衰老时神经内分泌变化的一个重要组成部分,而补肾药可提高老年大鼠多巴胺含量。

近期还应用分子生物学方法研究肾虚证,发现当切除甲状腺或肾上腺引起卵巢功能减退时,卵巢促性腺激素的受体数目和亲和力均降低,此时用补肾药治疗则可使受体数目和亲和力有所恢复,提示肾虚可能伴有受体功能降低。

此外,在肾虚证的研究中还应用cAMP、cGMP、SOD、红细胞免疫功能、微量元素等技术方法,对阐明肾虚证机理,从各种侧面提供了依据。综合研究资料表明,肾虚证是机体多系统、多器官、多层次的功能改变的综合表现。

在今后的研究中,根据肾阴虚、肾阳虚的临床表现,观察分析并改进某些生理生化指标,找出其相关性和内在联系以说明肾的生理功能,在老年医学及延缓衰老研究中阐明和运用中医肾的学说仍然占有重要地位。但在深入研究过程中,必然要应用实验病理动物模型以模拟肾虚证的临床表现,然后阐明其生理机制,虽然以往已经提出肾阳虚或肾阴虚动物模型,但今后的肾虚证研究中动物模型仍是研究的热点。

近年来,整个生物学科已进入从细胞水平、分子水平探索研

究生命本质的时期,从宏观进入微观水平的研究,因此必须进行多项指标综合分析,找出其相关性和规律性,再与整体水平的研究相结合,这是肾虚证研究的一个趋向,只有这样,才能对中医所谓的肾有深入全面的了解。

神经与内分泌方面乃是肾虚证研究的重点之一,下丘脑以及下丘脑以外的部位、神经递质、内分泌激素的研究将有助于深入了解肾虚证的病理生理机制。

研究肾虚证,了解肾本质,可能会形成一个新的概念或学说,而且必然会进一步提高临床疗效。

#### 参考文献

- 1 上海第一医学院驻象主题研究组. 中华内科杂志, 1976, 1(2): 80
- 2 沈自尹, 等. 中西医结合杂志, 1982, 2(1): 9
- 3 王文健, 等. 中西医结合杂志, 1982, 2(3): 149
- 4 李超荆. 中医杂志, 1982, 23(6): 69
- 5 张凤山, 等. 中医杂志, 1982, 23(8): 60
- 6 李炳如, 等. 中医杂志, 1984, 24(7): 63

(上海第二医科大学丁钰熊教授撰)

### 脾虚证研究

脾的主要生理功能是主运化,即运化水谷精微和津液,故是气血生化之源。气血是人体生命活动的物质基础,所以称脾为“后天之本”。李中梓《医宗必读》说,“一有此身,必资谷气,谷入于胃,洒陈于六腑而气至,和调于五脏而血生,而人资之以为生者也,故曰后天之本在脾”。在中医传统理论的基础上,应用现代科学技术开展脾虚证的研究,进一步了解脾的本质,这对丰富中医象学说的认识,将病因学、病理学和防治原理提高到一个新高度,从而使中医基础理论研究能更好地发扬固有特色和优势,为医学发展作出重要贡献具有积极的意义。

脾胃学说在中医理论中占有重要地位。随着医学的发展,脾胃学说经历了四个阶段,即秦汉时期脾胃学说奠基阶段,宋金时期脾胃学说充实阶段,明清时期脾胃学说完善阶段,新中国成立后脾胃学说发展阶段。中医脾的功能基本上属于现代医学消化系统的生理范畴,脾主运化即消化吸收营养代谢等,并影响其它系统的生理活动,如免疫、造血、肌肉运动等等。通过临床和动物模型研究脾虚证,主要围绕3个方面,即消化系统、神经—体液调节系统、免疫系统,运用与之相应的50多项客观指标进行研究,初步证实脾与消化系统关系密切。如正常人口腔接受酸刺激后,唾液淀粉酶活性升高,而脾虚证患者接受酸刺激后唾液淀粉酶活性降低。脾虚证患者的血清胃泌素水平、胃酸分泌功能和胃蛋白酶活性均有所降低,胃张力降低,胃排空时间延长,小肠吸收功能降低,胰外分泌功能偏低,也证明脾与神经系统功能有关,通常表现为交感神经兴奋性偏低,副交感神经兴奋性偏亢。脾还与免疫系统有关,研究资料证明,脾虚证患者的免疫功能偏低,外周淋巴细胞计数、总E玫瑰花环形成细胞率及E玫瑰花环形成细胞比率均偏低,NK细胞杀伤和结合活性均明显低于正常人。

近年来,脾虚证的研究有以下3个方面引人注目。首先,建立脾虚证动物模型进行实验研究已引起重视。以中医“脾主运化”、“脾生湿”、“脾主肌肉”、“脾为气血生化之源”等理论为指导,采用大白鼠、小白鼠、豚鼠等动物,以大黄、番泻叶、利血平、控制饲料、过劳和饮食失节、偏食等致虚的方法,研究出多种“脾虚”动物模型,为深入研究脾虚本质提供了良好基础。把临床研究和动物实验研究相结合,这是目前对脾虚证研究的新趋势。其次,采用机能与形态的结合的方法是研究脾虚证的新思路。研究资料初步表明,脾气虚证的慢性萎缩性胃炎,可见固有膜内均有大量淋巴细胞和浆细胞浸润,腺体减少、萎缩和肠腺化生。另有报道称,脾虚组的十二指肠肠炎较多,碱性磷酸酶和酸性磷酸酶在十二指肠绒毛功能部增强,顶部减弱,微绒毛稀疏、缩短,绒毛上皮细胞间隙增宽,杯状细胞、内分泌细胞、隐窝处低分化细胞、上皮内淋巴细胞浸润及固有膜各种炎性细胞增多,脾虚证消化道组织学的改变和消化机能改变相一致。第三是多系统、多指标、多

层次的研究。除了消化道、消化腺的机能研究外,还应用 cAMP、cGMP、多巴胺、 $\beta$  羟化酶、乙酰胆碱、胆碱酯酶、5-羟色胺、组织胺、17-羟类固醇、17-酮类固醇以及微量元素、血液循环等多项生理生化指标,证实脾虚时均有不同程度的变化。

综合现代研究资料,中医所述的“脾”显然是以消化吸收营养代谢功能为主,并包括最易受此影响的器官系统(免疫、造血等)功能,在神经-体液系统的调节下,协调活动,组合成一个“综合功能系统”,它的功能状态决定着出生后机体的生存与发展,故称“后天之本”。

今后研究的热点,一是脾虚动物模型的不断完善与广泛应用。根据中医传统病因造模是脾虚动物模型一大特色,脾虚动物模型的研究思路活跃、方法多样,同时也为临床研究提供了手段。二是加强临床研究,尤其是开展“方证学”研究将会引起广泛的重视。三是分析与综合相结合的研究,将在脾虚证的研究中占有更重要的地位。因为中医所指“脾”是人体多器官、多系统功能活动的综合表现。通过中医脾虚证研究以了解脾本质,将可能成为中医脏腑及证候研究的突破口,将对医学理论作出贡献。

#### 参考文献

- 1 金敬善,等. 中西医结合杂志,1982,2(1):25
- 2 张育轩,等. 中医杂志,1983,24(8):72
- 3 郁仁存,等. 中西医结合杂志,1984,4(1):13
- 4 李振华,等. 河南中医,1986,3:1
- 5 刘尽忠. 河南中医,1986,4:16
- 6 危北海. 天津中医,1987,(2):12
- 7 张祥德. 河南中医,1987,5:23
- 8 许长照,等. 中西医结合杂志,1987,7(12):732
- 9 尹光耀. 中西医结合杂志,1988,8(9):527
- 10 沈洪,等. 江苏中医,1988,4:43
- 11 郝玉明,等. 山西中医,1989,5(3):14
- 12 李近生,等. 中医研究,1990,3(2):19

(上海第二医科大学丁钰熊教授撰)

**经络现象** phenomenon of meridians 机体由于某种原因引起沿古典经络循行路线出现的各种生理、病理现象,如循经感传、循经性感异常、循经性疼痛、循经性皮肤病或皮肤显痕等现象均称为经络现象。研究经络先从经络现象入手,掌握规律,无论是对针灸临床实践还是对经络实质的探讨,都是具有重要意义的。近20年的研究资料证明,经络现象在人群中确实具有一定的普遍性,并有它的特点和规律。

循经感传现象是最常见的一种经络现象,系指用毫针或其他方法刺激穴位时所产生的“得气”感觉从受刺激的穴位开始沿古典经络循行传导的现象。这种现象过去有经络反应、经络敏感人、经络走行、循行感传、针响等名称,1979年中国全国针灸针麻会议上统一命名为循经感传现象(P·S·C)。这种循经感传现象,在古书中并无明确的说明,直到1950年日本长滨善夫和丸山昌期,才在一例感传显著者身上系统地对十二经和奇经八脉进行循经感传的观察,写丁《经络之研究》一书。国内也先后有关于经络现象的报道。但以为这仅仅是个别现象,因而未受到应有的重视。1971年,中国人民解放军三〇九医院连续发现8例具有循经感传现象的患者,他们与中国科学院生物物理研究所、北京大学生物系保定地区医院协作进行了循经感传现象的普查,根据1000例的统计分析,认为循经感传显著的人和循经感传现象的存在是客观的,有一定的普遍性,从而引起各方面的注意。1973年,卫生部颁发了经络感传现象普查工作的统一方法和分型标准,全国20个省、市、自治区按此标准做了17万例的调查,根据28个地区和单位对63228人的统计,感传出现率由5.6%~45.2%不等,对于感传显著者,其出现率约为4%~13%之间(1972年三〇九医院等在北京保定地区任选1000名年龄在15~60岁之间,1/3是病人,2/3是健康人,结果感传显著者有13人,计13%。1977年、1988年两年中,安徽医学院等四省协作组在安

徽蒙城县普查311853人,基本是健康人,年龄在14~63岁之间,结果感传显著者有50人,计4%)。中国援外医务人员对莫桑比克人(203例)和几内亚人(123例)患者进行了调查,证明循经感传现象在非洲的黑色人种中也同样存在。从国内普查资料的统计分析来看,循经感传在人群中的出现率与地区、民族、性别可能无关,与年龄、遗传因素有一定关系,根据3个省对10998人按年龄分为3组,6~20岁为一组,21~40岁为一组,41~72岁为一组,结果经统计学处理,愈年轻其感传出现率愈高。但其他省市的观察结果也有与此相反的。对6例感传显著者的30名直系亲属调查发现,其中感传显著者6例(20%),较显著者15例(50%),远比一般人群为高。在循经感传者的家系调查中,发现其中一组配偶双方均为感传显著者,其下代24人中,感传出现率为87.5%(21人),显著型出现率为45.8%(11人)。多数资料表明,感传与疾病有关,特别是神经系统的损伤或疾患(如截瘫、脊髓灰质炎后遗症、脑血管意外、神经官能症、精神病等),这种病人的感传出现率高于正常人。

根据普查结果,循经感传现象的主要特征是:(1)循经扩布。感传的路线与古代经络路线基本一致,但也有一定差异,表现为不及、超过、串行或不循经等。安徽医学院等4单位观察3494条循经感传路线,并绘制26幅单经感传的路线图,其特点是:在四肢,感传线较为集中,在躯干和头颈部则较分散,与古典经络图谱比较,看到在四肢基本一致,在躯干常有偏离,在头部则差异较大,有感传路线的衔接、流注、交叉和交会等现象。(2)慢速传导。感传的速度较周围神经慢,在每秒几毫米至几十厘米之间,在关节部位,速度往往变慢,超过关节,又重新加快。各家测定结果:三〇九医院等:1.36cm/s~9.06cm/s;焦顺发:1.0cm/s~72.0cm/s;陈漠训等:5.6cm/s~16.8cm/s;孟昭威等:2.7cm/s~8.0cm/s。(3)双向循行。在躯体(除四肢末端)上任何一穴给予刺激时,一般均可自该穴位发生相反方向的感传。(4)回流现象。当在感传延伸过程中突然停止穴位刺激,一部分人的感传就此消失,但也有不少人当穴位刺激停止后,感传并不消失,而是沿原路线回传至原刺激点。(5)可以阻滞。在感传线上施以机械压迫,局部注射普鲁卡因或生理盐水,以及局部冷冻降温等均可使感传阻滞。在阻滞点的远侧(对针刺穴位而言)感传消失,近侧则保持不变或有所增强。机械压迫的有效阻滞压力一般为500~1000g/cm<sup>2</sup>,引起冷冻阻滞的穴位深部温度为21.6±0.4℃,感传一旦被阻滞,它所引起的脏腑功能变化即显著降低甚至消失,解除阻滞,感传的效应又恢复。(6)感传的宽度不均。感传多为线状、绳索状,粗细如绒线至筷子,在感传过程中有宽度基本保持不变的,也有线状与带状交替出现的。一般在四肢多较细,在0.2~2cm之间,进入躯干后可变宽达10cm以上。(7)感传有趋病性。针刺不经过病所的经脉穴位时,有些受试者的感传首先沿针刺穴所属经脉的路线循行,至病所附近后偏离该经脉而转向病所。(8)不同个体,不同刺激源可产生不同性质的感传。感传的性质因个体差异与刺激方法不同而有多种多样的描述,如水流感、蚊走感、虫样蠕动感、痠、麻、胀、热感等。针刺及压穴时,多为痠、胀、麻感,低频电脉冲刺激多为电麻感,虫跳感;灸刺激,多为热感、麻苏感等。循经感传现象的这些特征表明经络确有其特殊性,这种特殊性用目前医学知识尚难对它作出恰当的解释。

循经感传现象是一种主观的感觉传导现象。如何客观地显示这种现象,以便建立客观的方法,是目前研究力图解决的一个课题。已做的工作可归纳为间接显示与直接显示两类。间接显示主要是以脏腑器官能对循经感传的效应性反应为指标,如效应器官的生物电描记(心电、脑电等)、肠鸣音监听和胃肠蠕动X线监视、肾功能测定、血管容积描记、血流图、甲皱微循环观察等。用这些指标客观显示循经感传的效应,一般来说都获得较为满意的效果,但不能直接显示感传的轨迹。直接显示是指在体表直接显现出感传的轨迹,如感传线上各种生物物理特异性的测定(经络电探测、经络发光探测,经络红外线成像和放射场照像、经络声探测等)及肌电的瞬间变化、循经血流图、循经痛阈或耐痛阈测定

感传线的电泳漆显示、同位素示踪等,均取得一定结果,但总的说来,重复性不高,仍处于实验阶段,有待进一步探索。

循经性疼痛与循经感觉异常也是一种经络现象。1959年,肖友山首先报道了沿胆经抽痛的病例,到目前统计已达200多例。循经性疼痛性质为钝性轻痛或压痛,有的疼痛难忍,疼痛区域边界模糊,不伴红、肿、热等现象。循经性感觉异常的性质多种多样,如麻感、痒感、痒感、灼热感、热流感、冷气感和吹风感等,分布于体表,呈带状,宽度在0.5~3.0cm左右,与古典经脉循行路线吻合。

循经性皮肤病和循经性皮肤显痕,被称为“可见的经络现象”。1958年,张鸣九报道脊柱结核病人沿肝、肾两经出现皮疹的病例。以后陆续有报道,仅北京市第六人民医院皮肤科到1979年为止,就见到各种循经皮损的病例108人,计138经次。国外也有报道。循经皮肤病共有15种,包括表皮及真皮上部的病理变化,循经性排列的有疣状痣、色素痣、皮肤萎缩、皮肤色素沉着、白癜风、湿疹、神经性皮炎、扁平苔癣及银屑病,有真皮血管扩张、血管缺少、出血以及胶原纤维变性,有鲜红斑痣、贫血痣、紫癜及硬皮病,有皮肤附属器的病理变化皮脂腺痣及汗孔角化症等,可广泛分布于十四经及带脉上,并有变异存在。用温热、艾灸、针刺、电针或电脉冲等方法刺激一定穴位,在某些人身上可诱发循经分布的,呈带状的各种皮肤显痕,如循经性白线、红线、皮下出血或皮丘带等,到目前共报道18例,国外也有报道。此外,还有报道过其他一些可见的循经现象,如沿经出现的汗毛竖立、出汗、带状皮肤脱毛和皮下条索状物等。

经络现象(循经感传)的本质以及它与脑和神经的关系都是当今研究的热点。许多学者认为,对经络现象的研究,应从整体综合上跨越方法论的困境,打破传统的分析式思维方式和狭窄的学科分界,引入诸如复杂巨系统、非平衡态、非线性、混沌、自组织现象和耗散结构等理论,以跟踪脑与神经科学研究的新成果。

参考文献

- 1 肖友山,中医杂志,1959,8:66~67
- 2 循经感传现象调查协作组,全国针灸针麻学术讨论会论文摘要(1),1979,119~220
- 3 安徽、福建、陕西、辽宁4省十四经感传图谱协作组·全国针灸针麻学术讨论会论文摘要(1),1979,203
- 4 陕西中医学院,现代经络研究文献综述.北京:人民卫生出版社,1980.1~19
- 5 何庆年.针灸研究进展,北京:人民卫生出版社,1981.21~26
- 6 李定忠.针灸研究进展,北京:人民卫生出版社,1981.14~21
- 7 张如心,第2届全国针灸针麻学术讨论会论文摘要,1984,189

(安徽中医学院针灸经络研究所许冠群研究员、陈向华助理研究员撰)

经络实质研究

经络是经脉和络脉的统称。它在人体中具有运行气血、联系周身、调节机能的作用。经犹如直行的径路,是经络系统的主干;络则有网络的含义,是经脉的细小分枝。经络学说就是阐明经络在人体生命活动中的生理作用和病理变化规律的学说,是中医学的重要组成部分。它虽然是一个古老的理论,但经络研究所要解决的实际上却是当代生物学研究领域中的某些前沿问题。对经络实质的阐明,必然极大地推动中医学和整个医学科学的发展。

经络学说是古人在长期的医疗实践经验中形成的。它主要根据古人对针灸治疗过程中所出现的各种经络现象的观察,对穴位主治性能的归纳,以及对人体解剖和生理知识的认识,在古代朴素的唯物主义哲学思想影响下,建立和发展起来的。早在《黄帝内经》中,经络学说的概貌已基本形成,后世医家又不断加以补充,终于形成一个比较完整的理论体系。然而由于历史条件的限制,在古典医籍中对经络虽然已有很多具体的描述,甚至还绘制出经络循行路线的模式图,铸造了人体经穴铜人模型,但有关经

络的物质基础则没有作出确切的说明,对所观察到的各种经络现象,也没有能作出合理深入的解释。因此,古人所说的“经络”究竟是指人体内的哪些结构,“经络”的实质究竟是什么,已成为多年来生物界、医学界密切关注的问题。国内外学者也从不同的角度出发,对经络实质提出过各种不同的设想和假说,但目前还没有得到完全的阐明。

纵观国内外的研究成果,对经络实质的看法主要可概括为3种观点:第一,“经络”是以神经系统为主要基础,包括血管、淋巴系统等已知结构的人体功能调节系统。第二,“经络”是独立于神经、血管、淋巴系统等已知结构之外(但又与之密切相关)的另一个机能调节系统。第三,“经络”可能是既包括已知结构,也包括未知结构的综合功能调节系统。在上述观点中,第1种与第2种观点之间意见分歧较大,第3种观点则较为兼容并蓄。但就每一个研究者来说,对问题的看法也不是绝对的。不同的观点常常相互影响,互相渗透,只不过所强调的重点有所不同而已。针对上述3种观点,我国学者从不同角度阐述了自己的看法,提出一些假说,其有代表性的假说如下:

**经络与神经体液综合调节机制相关假说** 认为经络学说是中医关于人体机能联络调节的理论,而现代医学则认为人体机能活动的调节,人体各个部分各种功能之间的相互联系,是通过神经体液综合调节机制而实现的,故经络对机体的调节作用与神经体液调节作用有密切的关系,许多实验资料也支持这一观点。但有些事实目前难以用一般的神经、体液调节机制加以解释,因而认为经络与神经体液调节“相关”的提法比较妥当。

**经络—皮层—内脏相关假说** 中国医学科学院的研究者认为,经络与内脏有着肯定的联系,而大脑皮层与内脏也有着肯定的联系,因而推测经络、内脏和大脑皮层之间也必有联系。基于这种认识,进行了大量的实验观察。张锡钧提出“经络—皮层—内脏相关”的假说,认为经络系统是与其神经系统、血管系统、有密切关系的特殊的传导系统,它对电、磁、声、光、机械刺激、化学刺激等有特殊反应。

**体表—内脏植物性联系假说** 季仲朴在1981年提出这种假说。其依据是:(1)首先任何穴位都有神经纤维,即便是在血管周围也不能排除神经末梢,当麻醉阻滞神经传导后,一切穴位刺激就毫无效果;(2)循经感传的感觉过程必然经过外周神经(也包括植物神经)到达高级中枢,否则就不可能产生感觉;(3)“气至而有效”在效应器产生功能变化是由穴位刺激,经过各级中枢产生的调节反射;(4)体表穴位因内脏疾患产生病理学反应物和其他病理生理变化也可以理解为反射现象;(5)从穴位循经到效应器,所有生理病理变化、生物物理变化大都属植物性的;(6)形态学、组织化学关于交感神经调节局部血流的研究支持此假说。

**第3平衡系统假说** 循经感传是最主要的经络现象之一,鉴于经络系统的主要作用就在于调节体表和内脏的相互关系,使体表的和内脏的机能活动保持相对的平衡,因此经络系统也是一个平衡系统。1978年,孟昭威依据循经感传的传导速度,提出经络系统是第3平衡系统的假设。其论点如下表所示:

表1

| 平衡系统        | 速度         | 作用       |
|-------------|------------|----------|
| 第1平衡系统 躯体神经 | 100m/s(传导) | 快速姿势平衡   |
| 第2平衡系统 植物神经 | 1m/s(传导)   | 内脏活动平衡   |
| 第3平衡系统 经络   | 0.1m/s(感传) | 体表—内脏间平衡 |
| 第4平衡系统 内分泌  | 以min计(作用)  | 整体慢平衡    |

**二重反射假说** 汪桐于1977年提出此假说。认为针刺穴位一方面可以通过中枢神经系统引起通常的反射效应(即长反射);另一方面,由于局部组织损伤而产生的一些酶化学物质作用于游离神经末梢,引起一系列的局部短反射,从而引起循经出现的各种经络现象。此假说可以比较圆满地解释针刺穴位时出现的反射

效应和各种循经出现的经络现象。

**轴索反射接力联动假说** 在对针刺时循经出现的红线、皮丘带等经络现象与皮肤三联反应的特点进行分析对比的基础上,张保真在1980年提出“轴索反射接力联动假说”。认为穴位中的感觉神经末梢受到各种形式的刺激发生兴奋,神经冲动即向中传导至该轴索分枝的分岔处,然后反转逆向,沿另一分枝传向皮肤,在此分枝的终末处释放扩张血管的或其他的效应物质,使皮肤的小动脉扩张,微血管的通透性提高,接近此分枝终末的肥大细胞进入活跃状态。小支脉扩张形成潮红,微血管通透性升高形成风团,由穴位直接刺激引起的和由轴索反射引起的肥大细胞活动改变了中间物质的成分和含量。这些中间物质能将信息从一个神经元的轴索终末传递给下一个神经元的轴索终末。如此一个接一个地传下去,潮红或/和风团就从局部延伸成为跨过若干个皮节的红线或/和皮丘带。

此外,还有经络电通路假说、经络波导管假说等等。所有这些假说均有待于在今后的工作中加以验证,但活跃的思路和从各个不同角度进行广泛的探讨,集思广益,对于阐明经络实质,无疑是必要和有益的。从已经积累的资料来看,今后经络实质的研究热点,必然会涉及到人体已知结构的已知功能、已知结构的未知功能,可能还有未知的物质或结构的未知功能。经络学说所阐述的,或许正是今天还没有完全认识到的人体机能调节过程中的一个新的整合水平。

#### 参考文献

- 1 汪桐,皖南医学 1978,11(8)
- 2 季仲朴,中医杂志 1981,22(8):47
- 3 张锡钧,等,中西医结合杂志,1983,3(5):264
- 4 李鼎主,编,经络学,上海:上海科学技术出版社,1984.11
- 5 张保真,等,西安医学院学报,1984,5(1):90
- 6 胡翔龙,主编,中医经络现代研究,北京:人民卫生出版社,1990.10

(安徽中医学院针灸经络研究所许冠芬研究员、许能贵助理研究员撰)

**经穴—脏腑相关研究进展** 经穴—脏腑相关又称体表—内脏相关,即体表经穴和相应脏腑之间存在一定的联系,一方面,脏腑的病变可以在体表的相应经穴上出现反应;另一方面,刺激体表的经穴又可以治疗相应脏腑的疾病。经穴—脏腑相关研究,对促进经穴诊断的完善,探讨针灸治病的规律,提高临床疗效,揭示经络实质均有重要的意义。

脏腑病变在体表经穴上出现反应,早在两千多年前的中医医籍中就有记载,如《灵枢·九针十二原》谓:“五脏有病也,应出十二原。明知其原,睹其应,而知五脏之害矣”。现代研究资料表明,脏腑病变在体表经穴上出现反应有几种表现形式:(1)经穴部位感觉异常。如盖国才报导100例冠心病患者,在神堂穴出现压痛反应的有95例,而100名健康人中仅4例为阳性。各类癌症患者,新大都穴(髂横纹与膈横纹联线中点偏外下5cm)均出现明显压痛,通过100例验证,基本符合。日本赤羽幸兵卫发现,脏腑病变,相应经脉的井穴或某些背俞穴对热的敏感度发生改变。测定时将热源匀速地上下移动点触穴位,当受试者感到烫时,记下移动的次數作为知热感度数值,也可将热源置于穴位附近,把出现烫感所需的时间作为知热感度的数值,数值高者为虚的表现,低者为实的表现,正常人左右同名穴的知热感度基本对称,发生病变时,则不对称,失去平衡。(2)经穴皮下出现各种反应物。脏腑发生病变时,用按压、循摸的方法,常可在呈阳性病理反应的穴位皮下摸到形似麦粒或黄豆状结节反应物或条索状反应物,有时还可触及穴位下组织松弛、凹陷、隆起或坚硬等反应。(3)经穴皮肤温度的变化。林惠兰等报道,对60例肝经实热患者双侧肝俞、太冲穴皮肤温度进行测试,发现肝俞穴皮肤温度较健康人增高 $0.38^{\circ}\text{C}$ ,太冲穴增高 $0.39^{\circ}\text{C}$ 。在肝经实热的重型组20例中,肝俞穴皮温比健康人增高 $0.7^{\circ}\text{C}$ ,太冲穴比健康人增高 $1.55^{\circ}\text{C}$ 。李佩

群等报道,113例肺癌患者,两侧肺俞穴皮温平均温差为 $0.8^{\circ}\text{C} \pm 0.036^{\circ}\text{C}$ ;两侧新大都穴皮温平均温差为 $0.91^{\circ}\text{C} \pm 0.038^{\circ}\text{C}$ ,而无肺癌患者的两侧肺俞穴皮温平均温差仅为 $0.31^{\circ}\text{C} \pm 0.024^{\circ}\text{C}$ ,两侧新大都穴皮温平均温差为 $0.19^{\circ}\text{C} \pm 0.02^{\circ}\text{C}$ ,经统计学处理,P值都小于0.001。(4)经穴皮肤电变化。一般认为经穴导电量与电位呈平行关系,即经穴导电量降低时,经穴电位也降低。脏腑有病时,常在同名经脉及其有关经脉上出现导电量偏高(实证)、偏低(虚证)或左右失衡等异常变化。经穴导电量的改变,可以反映相应脏器疾病发生发展过程中各不同阶段的病理变化,因此经穴皮肤电变化可作为诊断疾病的指标。此外,许多脏腑疾病在耳穴上也出现反应。许瑞征等报道,对344例肺癌患者和292例健康人的观察表明,肺癌患者的耳廓反应物(软骨增生)显著大于健康人( $P < 0.01$ )。朱元根等报道,用家兔造成心包炎模型后,家兔耳廓低电阻点增多,主要集中于“胸”区中部的一个线状隆起部位,该部位的低电阻点数增加,经统计学处理有显著性差异。

针刺经穴对脏腑器官功能影响的研究主要集中于以下两个方面:(1)针刺经穴对心脏机能影响。针刺内关后,可使冠心病心绞痛患者的症状减轻,各项指标提示患者的心肌收缩力增强,左心功能得以改善。针刺患者心包经中冲、大陵、内关、曲泽穴位,对风湿性心脏病、心律紊乱、急性心肌梗塞等患者都具有改善症状的作用,并且在针刺中出现循经感传“气至病所”时疗效尤其明显。针刺心包经经穴对心脏功能的影响在动物实验方面也得以证实。针刺动物相当于人体心包经的穴位,也具有调整心脏功能的作用。结扎家兔冠脉左室支造成其供血区急性缺血,电针心包经“郄门”,膀胱经“胃俞”穴均有减轻心肌损伤的作用,而电针其肝经“中都”穴则无明显作用。用异丙肾上腺素造成家兔实验性心动过速,针刺“内关”后,使心动复常的恢复时程和最早恢复时间均于“足三里”组和对照组,但“内关”和“神门”、“天泉”组的针刺作用相类似。用垂体后叶素造成家兔急性心肌缺血或心动过缓时,针刺“内关”能使心率加快,并有促进缺血心肌增加血运的作用,此种效应优于“足三里”组和对照组,但和“神门”组的针效相比却无显著差异。这表明心包经、心经的穴位和心脏之间存在相对特异性的联系。(2)针刺对胃功能的影响。以胃电为指标,观测到电针足三里对胃电影响均较阳陵泉和非经穴明显。以正常人和慢性萎缩性胃炎患者的血清胃泌素为指标,发现针刺足三里后正常人血清胃泌素值显著升高,其强度可与试餐试验相比拟;萎缩性胃炎患者对针刺足三里及试餐后的胃泌素反应比正常人反应值稍低,且反应增高时间出现较迟,而针刺合阳穴,胃泌素波动甚微。在动物实验方面,静脉滴注五肽胃泌素增强狗幽门平滑肌兴奋性,使基本电节律加快,这时针刺双侧“足三里”可使基本电节律减慢,而电针双侧“合阳”穴基本电节律也有下降趋势,但作用不如电针“足三里”明显。用狗做慢性实验,通过胃窦收集胃液,观察针刺穴位对五肽胃泌素所致胃液分泌泌液的影响,结果电针“足三里”胃液分泌下降,cAMP含量亦下降,而电针“合谷”后胃酸分泌无显著下降,胃液中cAMP含量反而显著升高。这表明胃经经穴和胃之间存在相对特异性联系。

关于经穴—脏腑相关联系的途径,从神经体液方面研究较多。用辣根过氧化物酶法(HRP)观察体表穴位传入及传出神经元的节段性分布,发现于“神门”穴区注入10%的HRP,可在脊神经节 $C_3 \sim T_2$ 节段见到标记细胞,尤以 $C_3 \sim T_1$ 节段的标记细胞较多。此外,在脊髓前角外侧壁和星状神经节内也见到标记细胞。这提示:“神门”穴区与心脏传入神经的节段在 $T_1$ 及 $T_2$ 有互相交汇及重叠。当针刺“神门”穴时,感觉冲动可能影响心脏感觉纤维的胞体,进而影响运动神经元而进行调整。用家兔实验性胃溃疡耳廓低电阻的模型,在同时切断右颈交感神经节、右耳诸感觉神经和一段颈总动脉后,胃溃疡期间右耳出现的低电阻点极显著地比左耳减少。经组织化学检查证实,右耳肾上腺素能神经纤维基本消失,从而说明胃与耳壳低电阻联系的主要途径之一是交感神经。利用埋藏微型电极刺激家兔胃迷走神经,随着刺激时间的延长,兔耳壳低电阻点亦随之增多,停止刺激后,低电阻点逐渐



减少,恢复到原来的水平;切除一侧交感神经后,再刺激迷走神经,低电阻点的变化则不十分明显。故认为胃与耳壳皮肤的联系中,交感神经是外周传出途径,而迷走神经是向中性传入途径。进一步的研究资料表明,经穴脏腑相关的联系不仅与外周神经有关,而且与中枢神经也有关系。电针“内关”促进心肌缺血性损伤恢复的作用与 $\alpha$ 受体、 $\beta$ 受体、星状神经节、下丘脑、脑干网状结构等有关。电针“足三里”调整“胃气上逆”的研究资料表明,针刺信息在中枢的传递途径由背索和腹外侧索传向高级脑部,背索中的针刺信息在抑制“胃气上逆”中起重要作用,其作用部位是连合核和结合臂旁核。中缝大核及其鸦片受体和中枢的5-羟色胺参与上述的针刺抑制效应,脑啡肽还参与针刺信息的传递。此外,经穴一脏腑相关与体液因素也有关系。将两只家兔的颈动脉与耳静脉相联,通过预置的心脏刺激电极刺激其中一只家兔的心脏,4h后停止刺激和交叉循环,并同时测量两只家兔的耳穴导电量,结果两只家兔耳廓各测定点的平均导电量均有增加。可见经穴一脏腑相关与多种因素有关,它们的联系是一种多途径、多层次的联系。

关于经穴一脏腑相关问题,虽然还有一些争论,但大量的研究表明,经穴一脏腑之间存在一定的特异性联系,为现代生理学提出一个引人注目的新领域。20世纪的研究热点:(1)用多指标进一步探索脏腑病变在体表经穴上出现反应的规律,提高经穴诊断的准确性。(2)经络在经穴脏腑相关中的作用。

#### 参考文献

- 1 许瑞征,等.全国针灸针麻学术讨论会论文摘要(1),1979,87
- 2 林惠兰,等.第2届全国针灸针麻学术讨论会论文摘要,1984,221
- 3 朱元根,等.第2届全国针灸针麻学术讨论会论文摘要,1984,234
- 4 张洪林,等.针刺研究,1986,11(1):73
- 5 汤德安.针刺研究,1987,12(4):278
- 6 朱元根,等.第1届世界针灸学术大会针灸论文摘要,1987,274
- 7 李佩群,等.中国针灸,1988,8(2):32
- 8 季钟朴.现代中医生理学基础.北京:学苑出版社,1991.402~403

(安徽中医学院针灸经络研究所许冠群研究员,晏义平助理研究员撰)

**气功偏差** 气功是一种身心并练的锻炼方法。在练功过程中,部分练功者会出现一些异常反应,其主要表现可分为躯体性的和精神性的两方面。前者如气滞、气乱行等感觉异常及心悸、腹胀、遗精等多系统生理机能的失调,后者包括感觉障碍(幻觉等)、注意障碍、妄想、情感障碍甚至类似精神分裂症发作的一些表现。当这些异常反应严重影响练功者的正常生活,且不经医治不能缓解时,便称之为气功偏差。对气功偏差现象的深入探讨,不仅有助于气功学科及人体科学的发展,也可为研究精神病的发病机理提出新的思路;作为一种较特异的文化现象,它也可成为民俗学甚至东西方文化比较研究的极有价值的课题。

在古代,由于气功传承范围和形式的局限性,气功古籍中类似气功偏差的描述比较少见。古人从医学角度论述气功偏差较完备者首推清代张璐,其《张氏医通》设走火入魔专题,对修行、坐禅所致精神异常的中医药治疗方法阐发甚精。

1950年,上海市卫生局曾组织部分气功师讨论气功锻炼出偏的问题,将出偏的内涵主要定义为胸闷、憋气等生理功能的失调。1959年,周潜川著《气功药饵疗法与救治偏差手术》,首次专门论述了气功偏差现象。自1979年开始,气功疗法逐渐在全国普及,因练气功出现气功偏差的现象也引起医务界及心理学界的关注。

对气功偏差的诊断,国内尚未有统一的观点。单怀海、魏良玉等采用精神卫生评定量表等诊查方法,观察近百例因气功偏差

而求诊的练功者,发现大多有类似精神分裂症、癔症和混合神经症的表现。张燕玲从临床角度认为气功偏差患者不同程度存在精神的及生理的异常,属于精神病的范围。《中国医学百科全书·气功学》将乱动不止、气感乱行、走泄、病情加重及惊功和入魔等练功反应,称之为练功偏差。部分气功界人士承认气功偏差现象,但认为医学界对偏差的诊断有扩大化倾向,其中陆流的观点较具代表性。他认为,气功偏差是指功夫性偏差,没有功夫也就谈不上偏差,决非一般修炼者所能有的。气功初学者往往会遇到许多问题,一是由于意念运用不当,影响气机或产生幻觉,引起不适;二是气行攻病而产生的翻病现象;三是修为不得法,如一知半解或急于求成等原因致生诸般不和,这些练功产生的现象不能与偏差混为一谈。陆流指出,走火入魔属于气功修炼中的翻病现象,也是初步练功者因功理性攻病而引致的精神性疾病的一种发病现象。走火是指炼功中火热之气道行乱窜的反常现象,入魔则是指初学者患有或潜伏有精神问题而发作的一种迷乱现象。鉴于效应与偏差的难以区别,柳培生等还提出外气测定以判断是否出偏的方法。也有部分气功家明确反对气功偏差的提法,甚至否定气功有偏差。严新认为,气功没有副作用,练功没有偏差。有些大的气功反应实际上是气功治病反应,所谓走火入魔是一种功能态,不是偏差。沈昌指出,炼气功不会出偏,人们之所以认为存在偏差,是对气功反应没有透彻的认识。

有些学者已注意到,对气功偏差认识分歧的部分原因是现代医学概念和气功学术语未能统一的缘故。徐洪涛、吕广君指出,气功偏差的临床表现十分复杂,加之一种表现有多种称谓,或一种称谓又表示几种不同的临床类型,这给科研及交流带来了不同程度的混乱。他们建议引入“气功综合征”的概念,以利于把医疗气功纳入现代医学体系。

对气功偏差的产生原因,一般认为主要有以下几个:(1)练功不当,包括功法选择不当、多种功法同练、急于求成等;(2)对练功效应或气功练功退病现象缺乏认识,出现反应后或害怕或追求或自以为出偏;(3)缺乏明师指点。单怀海等报道,70%以上的偏差症患者都是因盲目自练导致的;(4)练功者的个性心理特点有易出偏倾向。张宏堡等指出,一半以上的出偏者是其采用的功法与其性格类型不适应而造成的。

许多报道资料表明,绝大多数气功偏差可以在较短时间内纠正。气功同样是主要的纠偏方法。周潜川将它分为内景导引和外景导引两种,并提出对气机凝聚等偏差现象的较详细的手法纠偏法。《中国医学百科全书·气功卷》对内气不止、走泄等介绍了自我拍打、按摩及调整呼吸等纠偏法。自1988年始,《气功》杂志等有关刊物专门辟设“气功偏差与纠偏”栏目,气功界及医学气功界许多学者撰文介绍应用自我导引、外气调理、针灸、点穴按摩及中药辨证施治等方法纠偏的经验。这些方法种类繁多,但一般原则相同:(1)强调松静自然;(2)正确理解动态反应。陆流、莫文丹等指出,方法和观点的纠正即是偏差的纠正;魏良玉、张燕玲等认为,偏差症可按精神病对症治疗,通过对一些以精神障碍为主要表现的较严重的偏差症患者应用三环类抗抑郁药等精神病对症治疗,表明西药治疗在一定范围内较之单纯气功纠偏更具优越性;马济人等指出,对部分病痛明显的出偏者,纠偏治疗过程,必须停止练功或改练基础功法。

北京西苑医院气功科等有关单位的部分病例材料表明,极少数异常反应或症状较难调治,有的甚至持续数年。对这类在练功过程中出现严重异常反应的发生机理,医学气功界也存在不同意见。周潜川认为气功纠偏须以占得先机为要,久则变生诸端,纠正不易。陆流认为其中部分病例纠治较难是因为其练功前即有精神病迹象,气功只是诱发或加重患者原有的症状。陆流还提出“心理性功偏症”的概念,用以指那些因对正常的气功反应缺乏认识或个性心理有缺陷而自认为出偏者,难调治性偏差大多属于此类。也有人认为,这类患者中大多数不能称为气功偏差;其异常反应的产生有着人格基础或环境因素,纠正或治疗其所谓偏差,实质上涉及到改变其人格状态以及环境诸因素的配合等,这是相

当困难的。同时,由于许多功法直接或间接脱胎于佛家的或道家的修炼方法,有些异常反应的产生有其渊远的文化背景联系,故单纯以气功调理或药物治疗殊难奏效。

气功偏差可以避免,这是气功界较一致的观点。为安全起见,绝大多数功派的均建议精神分裂症、严重的神经官能症、癫痫等病患者禁练或慎练,并对练功环境、时间、准备活动及惊功处理有具体要求。林中鹏等在其气功学著作中对健身类气功的练功注意事项有详细阐述。张天戈等提出防治偏差的重要原则为:一是用现代科学观点,宣传讲解气功反应,引导练功者正确认识;二是医疗气功要遵循辩证选功原则,注意练好基础功法。至于功至较深境界所出现的种种可喜可爱、惊人骇人的现象,严新、王力平、张义尚等均肯定有这种功境反应。如何对待这些反应,他们的观点基本相同,主要有两点,一是定心不动,不随缘转,所谓见怪不怪,其怪自败;二是注重修德,注重正心正念的把持,切不可起对抗心、恐惧心、欢喜心等,同时需深切了解天地人三才一贯、人身与自然息息相通之理,正确对待。陆流还指出,为了防止那些隐性个性及心理不健全者学功出现偏差,可以进行学功前调查,但这必须由相当有功夫的气功师进行。

气功偏差的存在,在一定程度上影响着气功疗法的普及,如何防偏纠偏将是气功界的主要研究课题之一。同时,由于偏差现象的特殊性,将会吸引部分医学家尤其是精神病学家参加研究工作,从而逐步形成对气功偏差现象的统一性认识。气功偏差实际上属于气功反应范畴,如果能从现代精神医学、心理学、传统气功学及人体科学诸方面综合性地、不带偏见地加以考察,或许能找到解开气功治病机制的突破口。

#### 参考文献

- 1 周潜川.气功药饵疗法与救治偏差手术.1959,220
- 2 马济人.中国气功学,1983,254
- 3 林雅谷,主编.中国医学百科全书(气功学),1988,25
- 4 魏良玉,等.练功偏差躯体和障碍研究气功,1990,1:10~13
- 5 陆流.气功医术知识揭秘,1991,160
- 6 徐洪涛,吕广君.中西医结合杂志,1991,11(4):235

(中国中医研究院西苑医院吕广君、蔡俊撰)

### 中医阴阳学说 yin-yang doctrine in TCM 阴阳学说

属中国古代哲学思想范畴,是古代朴素唯物观和辩证法的体现。阴阳学说渗透到中医学领域,不仅对中医理论体系的奠基起到决定性作用,而且成为中医理论体系中的一个重要组成部分。结合中医理论和哲学对阴阳学说进行理论研究与实验研究,不仅能阐释阴阳学说的丰富哲理和科学内涵,而且能对其局限所在有较深的认识。

自战国时期的《黄帝内经》奠定了中医基本理论体系以来,历代医家均将阴阳学说用于对人体生理活动及病理变化的阐释之中,指导临床诊治疾患。清朝末年戊戌变法以后,对阴阳以及五行、运气等开始有较大的争论,争论的中心已涉及到阴阳学说在中医学中的存废问题。1917年,余云岫认为阴阳是“玄虚之学”,“都是说谎,是绝对不合事实的”,“阴阳之说与其纪万物之法至谬误疏陋,不足为精审学术之根基也明矣”。这种对阴阳学说的不甚理解而导致的机械唯物主义认识对学术界影响颇大。1924年,梁启超提出阴阳是“二千年来迷信之大本营”,“并不含有何等神秘之意味与矫诬之术数”;章太炎、严复等也持同样态度。对此,有一些中医界的和学术界的人士进行了针锋相对的评论和批判。1931年杨则民指出:“今之浅人视阴阳二字即为迷信之代词,不知宇宙对立者也”。郭沫若也肯定阴阳是反迷信的,不过他们的影响不大。另一方面,在此时期由于西学传入中国,中医界、学术界有许多人采用当时自然科学的某种理论附会于阴阳,给予解释。如陈无咎以为“阴阳就是正负”;袁复初称“电波与吸引力皆谓之阴”,“磁波与辐射线皆谓之阳”等等。总的来说,20世纪前半叶,中医界及哲学界对阴阳起学说的论争虽已涉及阴阳

学说存废的根本性问题,但由于对阴阳学说的了解和重视不够,对其科学性的认识明显不足,争论没有起到应有的作用。

对阴阳学说进行研讨的一个重要方面,是从哲学理论角度对其内涵的辩证法思想给予肯定,同时也指出其不足之处。1980年,徐木林将中医阴阳学说与古代希腊哲学作了比较,认为古希腊哲学把世界本源归于永恒的火和水,是以一种形而上学的简单形式来表述唯物观和辩证观的。中医阴阳学说认为客观存在的万事万物都可分为阴阳两大类,阴阳之中再分阴阳,说明阴阳对立统一是一切事物运动变化和生长毁灭的根本,这是西方哲学所不可比拟的。1981年,贝润甫用现代调节控制理论分析阴阳调节的3种形式:一是阴阳对整体的控制调节,调节机体内环境以及内外环境之间的协调平衡;二是阴阳之间互相资生的促进性调节;三是阴阳之间互相制约的抑制性调节。阴阳二者通过相辅相成和相反相成以维持平衡协调的控制作用。1982年,刘长林对《内经》中的阴阳学说作了分析,认为其对辩证地把握事物矛盾运动具有积极意义。但是阴阳的朴素性与现代辩证法的矛盾范畴根本不同,矛盾范畴适于一切领域,是事物和现象最抽象、最一般的概括,而阴阳却还具有特殊的规律性。《内经》把一切矛盾统归于阴阳,没有正确说明普遍和特殊的辩证关系,使不同的质无法区别,这是其重要的高限所在。1984年,陈一列认为阴阳平衡论应以阴阳协调论代替,人体生理活动的各个方面每时每刻都在发生变化,机体有序不乱的运动是阴阳的协调所致,结合现代“耗散结构”理论说明只有人体内部非均匀而有序不乱的运动,才能发挥各个脏腑组织的协调功能,因而阴阳协调论符合生命运动的基本特征。1991年,薛雨芳提出阴阳自和论是中医对生命机体自组织现象的认识和概括。阴阳自和在不同条件下可出现阴阳相和、阴阳失和以及阴阳拒和的不同状态,使机体呈现出健康、疾病和死亡。总之,中医阴阳学说虽源于古代哲学,但当其与医学科学知识密切结合之后,使之从简单到全面、从零碎到系统、从笼统到具体,有了本质意义上的发展,但需防止其局限性对人们思想的束缚。

从科学实验角度对阴阳学说实质的探索,既有效,也很迅速。随着分子生物学的发展,1973年美国生物学家Goldberg根据环磷酸腺苷(cAMP)、环磷酸鸟苷(cGMP)对细胞功能的相对抗作用,认为这就是阴阳学说的物质基础。1979年,夏宋勤等的实验研究资料指出:阴虚时cAMP含量明显增高,cAMP/cGMP比值无明显降低;阳虚时cGMP含量明显升高,cGMP/cAMP比值明显降低。1983年北京市中医研究所报道,阳虚都有cAMP/cGMP比值降低,但有时主要是由于cAMP降低,有时主要是cGMP升高。此即阴有余或者阳不足均可表现为阳虚的道理所在。1979年邱安莹等从甲亢阴虚患者中测定cAMP/cGMP比值升高,cAMP增高或cGMP降低说明了阳过盛或者阴不足均可表现为阴虚的道理。核酸(DNA/RNA)的传递复制调节是细胞能量代谢的重要基础。1977年上海中医学院经过动物实验说明助阳药物能使阳虚动物肝、脾核酸含量上升,肝细胞琥珀酸脱氢酶活性上升,使升高的肝糖元含量下降,并有保护阳虚动物的肝细胞及脾脏淋巴细胞的作用。滋阴药能在阴虚动物的肝、脾核酸合成升高时使之降低;反之,肝脏核酸合成率降低时,滋阴药又可使之升高,并能使降低的肝糖元上升。

现代免疫系统的调节也能够反映机体阴阳调节的道理。1979年邱安莹等对44例阳虚病人的细胞及体液免疫功能检查发现有25例减低,而细胞免疫以B细胞花环减低较多。说明阳虚时免疫功能减退。1979年上海市卢湾区医院对51例肺心病患者缓解期的中医辨证治疗和生化检查,提示益气温阳药能提高患者垂体-肾上腺皮质系统兴奋性,同时能恢复免疫缺陷。而益气滋阴药也能使细胞免疫功能低下者得以恢复。

内分泌与内分泌抑制的对立统一规律较多地论证了阴阳学说调节控制的科学性。1979年开始,沈自尹等根据肾阴肾阳为全身阴阳之根本,阴阳之间互限互制的观点,作了大量实验研究。实验结果表明肾阳虚患者尿17羟皮质类固醇低于正常,ACTH2

日静脉点滴试验呈现延迟反应,认为肾阳虚与垂体-肾上腺皮质系统功能低下有关。并通过血-11羟昼夜节律测定,进一步说明肾阳虚患者的下丘脑-垂体-肾上腺皮质系统功能紊乱。沈氏采用测定血浆 ACTH 和皮质醇的方法,得知肾阳虚病人的垂体与肾上腺皮质功能处于一个低水平的平衡,而温补肾阳法可以纠正这种低水平的平衡。针对病理的低水平平衡和健康的生理水平平衡,提出了垂体-肾上腺轴的“阴阳常调论”。1986年沈氏从微观入手探讨不同模式的阴阳调节,如把垂体与靶腺看作阴阳对立面,老年人太极拳锻炼后垂体的代偿性分泌能使靶腺分泌达到或接近正常水平。这是通过阴阳对立运动,在动态中维持机体内环境相对平衡的一种加强型反馈模式。1980年邝安荃等和1982年赵伟康等均发现甲减患者多有肾阳虚的表现,运用温补肾阳药物后 BMR 趋于正常。1991年武文斌的实验研究认为甲状腺激素水平高低是阴虚、阳虚病变的物质基础之一,脱碘酶的活性是阴虚、阳虚的关键之所在。血清  $rT_3$  浓度可作为阴虚、阳虚辨证及治疗疗效判定的一项客观指标,较  $T_3$ 、 $T_4$  更具敏感性和准确性。

神经系统调节和控制着入体的生理活动,交感与副交感之间的相互拮抗作用也体现了矛盾的对立统一。1981年杨榛等对87例溃疡病胃大部切除术患者手术前后植物神经功能状态的测定,结合中医辨证分型,发现阴虚型与交感反应型的指标变化趋向一致,阳虚型与副交感反应型的指标变化趋向一致。通过体温的观察,对“阴虚则热,阳虚则寒”的实质提出科学地论证。

此外,有人从阴阳离子的相互关系来探讨阴阳学说的科学内涵。1982年杨天权从阴离子隙(简称 AG)来探讨阴阳理论的实质。认为细胞外液中有阴阳离子各 155mEG/L 即为阴阳平衡,阴阳离子之间互相制约依存。统计 100 人次 AG 中代谢性酸或碱中毒表明,AG 上升会导致高 AG 代谢性酸中毒(阴阳失调)甚至死亡(阴阳离决)。1984年汪建从碱中毒和酸中毒的临床表现与中医阳虚和阴虚证的证候表现相似,说明  $HCO_3^-$  与“阴”,而  $H_2CO_3$  与“阳”,有着内在联系, $HCO_3^-$  与  $H_2CO_3$  的比值维持在 20:1 才能保证机体内环境的稳定,即酸碱平衡。因此可以把  $HCO_3^-$  与  $H_2CO_3$  比值的改变作为阴虚和阳虚定性定量的客观指标之一。

阴阳学说是中医基础理论的一个重要部分,对其内涵的深刻分析有利于整理和提高中医基础理论。现代所注重的科学实验方法以论证和阐明阴阳的实质是目前研究的热点,这对传统的中医理论的发展是个推动。今后对阴阳学说的研究除宏观上的分析之外,重点在于进行微观上的研究。一方面采用多学科的实验手段,一方面注意从临床中予以验证,并发展有组织的协作研究方式,将零散的有关研究加以系统整理,在定性的基础上努力做到定量的客观测定,为逐步统一认识、阐明阴阳的实质打下基础。

#### 参考文献

- 1 天津市和平医院心外科,天津医药,1975,6:304
- 2 克罗默 A H 著.生命科学用物理学.王鸿儒,等译.北京:人民卫生出版社,1980,400
- 3 柴立,等.微量元素,1986,1:31
- 4 姜全章.黑龙江中医药,1987,3:17
- 5 王明辉.中国医药学报,1987,5:43
- 6 林功铮.中医年鉴(1986),北京,人民卫生出版社,1987,430
- 7 刘兴仁.北京中医学院学报,1988,11:1~15
- 8 张庆祥.全国第2届中医基础理论学术会议论文摘要汇编,1990,69
- 9 胡国庆.上海中医药杂志,1990,5:46

(安徽中医学院吴华强教授撰)

**天人相应学说** the theory of the character of man changing with nature 天人相应学说是中医学关于人与天地自然的关系,即人体与环境的统一性学说。人与天地自然的关系,就是人体与天地自然相应的关系。这种关系主要是通过天地阴阳

气交法来说明的。天地阴阳气交变动呈现明显的时间程序和地域差别;人体生理活动和疾病过程,也无不与天合度、与地同纪而产生与之相应的同步变动。这种相应的变动,包括人体主动地和被动地顺应自然而生存的能力。所以养生防病、辨证论治,都当遵循因时制宜、因地制宜的原则,这就是天人相应学说的精神实质。

气,就是促成天地万物生长壮老不已的“大气”,其在天者称为“天气”,包括一切天空因素,属阳,具有发散、清轻、温热的性质;其在地者称为“地气”,包括一切地面因素,属阴,具有凝敛、重浊、寒凉的性质;还包括“人气”,是人体一切脏腑之气的总称,是作为天地合气而存在的形态,与天地万物之气源出一体。由此可见,天地万物都是由气构成,万物的多样性只不过“同气异形”而已。所谓气交,即天气与地气升降相交的运动。天空因素与地面因素相互作用,阴气上升与阳气下降互为因果,这种永恒的、有规律的升降运动,导致岁气和时令变迁的周期性、节律性,使万物生长壮老变化不已。所谓岁气,指每年的气候变迁,在 60 年中有周、纪之序。所谓时令,指一年之中的气候变化,有春夏秋冬四时之序,有月廓空满和昼夜更迭。人作为天地万物的组成部分,生活在气交之中,必定受气交变化规律的支配与影响而产生与之相应的生理活动和病理变化。此即《素问·六微旨大论》所云:“气交之中,人气从之,万物由之,此之谓也”的道理。古代医家曾深刻地描述过人体脏腑经络气血津液的产生、趋向和盛衰,与四时更迭、月廓空满和昼夜交替同步的程序性变动,以及人的体质、寿夭与地域环境的关系,并指出岁气、时令、环境等阴阳气交的节律性变动,是疾病发生和影响其病理机转的重要因素。然而,诚如《素问·宝命全形论》云:“天覆地载,万物悉备,莫贵于人”。人之所以贵于万物,就在于他是“知万物者”,能“法天则地,随应而动”。所以,天人相应学说,不仅阐述了天地气交法则对人体的影响,以及人体对其响应的本能活动,而且更加强调整能动地顺应这种法则,以达到养生防病治病的目的。

由天人相应学说派生出来的五运六气学说,用以预测 60 年一周纪和一年四季气候的周期性变化特点,与人体疾病发生及其防治的关系,被认为是古代的医学气象学;以天人相应学说为指导,循时序变化进行养生保健的四气调神学说,以及按时序取穴进行针灸治疗的子午流注学说,顺时序采药、用药、遣方和服药宜忌学说,还有因地域不同而治疗有异的异法方宜学说,被称为古代的环环医学等等,都是天人相应学说的具体运用,而迄今不衰。现代的一些研究资料证明天人相应学说的正确性。李继贵根据近年来有关生理化学测定指出,人体内皮质激素、核酸代谢、胆碱酯酶及神经内分泌释放都呈周期性变动,且非只人类,几乎囊括一切生物,原因是由于时序的变迁带来自然界温度、湿度、光度、气压等因素的改变,使天地间的一切生物都随之产生一种周期性地自动调节其生理活动的本能,以适应外界环境的变化。这即“万物由之”之明证。刘宏阳综述指出,血浆皮质醇在秋冬季节每日平均浓度和分泌总量高于春夏季节;血中  $T_3$  和  $T_4$  浓度呈季节性改变,夏季最低而冬季最高;用光电仪测定人体体表发光值,则夏季高于冬季。这些都符合四时之序。调查资料(10~25 例)表明,女性月经周期平均为 29.5d,一个朔望月(新月一满月一新月)正好是 29.53d,即 29d12h44min2.8s;而人的出生率在满月前后最高,新月出现时最低;同时以相同的朔望月统计,从末次月经开始日算起,孕期为 9.50±0.1 月,从受孕之日算起,为 9.00±0.50 月,就是说在朔望满月前后受孕最多,证明月满人气血盛、月空人气血衰之说。刘宏阳综述国内外学者的研究资料表明,人体血红蛋白含量、白细胞数、血糖含量、血中氨基酸含量、血中各类激素含量、尿及盐类排泄量、肝脏合成代谢以及细胞速度等,几乎全部有 24h 节律性变化。同时,他对 182 例死亡病例的死亡时辰的分析,也基本符合旦慧、昼安、夕加、夜甚的规律,客观地证明昼夜气交变动对人体生理病理的影响。由于天人相应学说的阐述与方兴未艾的现代时间生物学的观点不谋而合,已经引起不少国外学者的关注,称子午流注学说为“中国式生物钟”。

称天人相应学说为“中医时间医学”、“中医时间生理学”、“中医时间病理学”……。然而,中医天人相应学说比现代时间生物学或时间生物医学的内涵更加丰富。其主要不同之点在于:现代时间生物学或时间生物医学尚处于观察、研究阶段,而天人相应学说一直是与实际应用密切联系,从古到今就是中医作为观察人体生理活动和病理变化以及养生防病、辨证论治和预后推测的理论指导,积累的经验十分丰富。中医天人相应学说内容博大,大有发掘潜力,以之为基础创立具有中国特色的现代时间生物学或时间医学,无疑对人类卫生保健和医疗事业是一大贡献。

#### 参考文献

- 1 李继贵,云南中医学院学报,1981,2:6
- 2 刘宏阳,北京中医学院学报,1984,4:40

(成都中医学院郭子光教授撰)

### 中医病理学 pathology in traditional chinese medicine

从传统中医理论体系中逐步发展起来的一门既有分化意义又有综合意义的新学科,是中医学的一个重要分支。它以中医理论为主,研究人类疾病的发生机制,包括病因与条件、疾病演变的过程及其规律、恢复健康、产生并发症及死亡过程。它赋有中医学的鲜明特色,上承生理学,下启药理学与临床各科,在中医理论体系中占有特殊的地位。随着中医学的发展,其重要性将日益显著。

1949年以来,尤其是1959年全面开展中西医结合的研究工作以来,国内外学者对中医理论进行了广泛的研究,其中相当一部分,如四诊、八纲的研究,虚证的研究,活血化瘀法的研究等等都可归属于中医病理学研究的范畴,且已有专著问世。本文仅就较少论及的一些重要课题的现状与进展作一扼要评述。

**中医病理学理论体系的建立** 在传统中医学中只有病因与病机的提法,而无病理学这门分支学科,没有实验研究,更无完整的理论体系。但对疾病的原因与机理的论述却很早、很多也很深刻。如《内经》曾以阴阳学说为理论基础提出关于病邪的观点,说:“夫邪之生也,或生于阴,或生于阳”。所谓邪,即致病因素。汉·张仲景在《金匮要略》中说:“千般灾难,不越三条,一者,经络受邪,入脏腑,内所因也;二者,四肢九窍,血脉相传,壅塞不通,为外皮肤所中也;三者,房室金刃,虫兽所伤。以此详之,病由都尽”。隋·巢元方著《诸病源候论》总结了隋以前的医学成就,论述了各种疾病的病因、病机与证候学。目前公认此书为现存的第一部中医病因病机学专著。宋·陈无择提出内因、外因、不内外因的分类法,当然并不十分理想。李东垣《内外伤辨惑》乃强调外感与内伤两类,多为后代医家所称颂。到明清时代,除吴又可可在戾气致病问题上略有突破外,此后数百年间,中医病因学研究甚少进展。直到1979年匡调元根据传统中医理论并结合现代研究,确切地指出中医病因学是研究疾病发生的原因与条件的学说,并将其具体内容归纳为:六淫、时行疫疠之气、金刃跌仆、水土不服、饮食不节、中毒、精神因素、体质因素、胎传、房劳伤与误治等11类,并分别进行了论述。匡氏还指出中医学特有的多病因原理,即疾病的发生是内因与外因同时起作用的,外因也往往与六淫诸气杂合而至,作为内因的体质因素也是十分复杂的,可变的。之所以要强调多病因原理,其目的在于说明中医学的综合性思路与西医学的分析性思路是不同的,因此,当开展中医病因学的现代化实验研究时须有特殊的、与此相应的设计。

关于病因学,匡氏认为它是研究病因作用于人体后开始产生疾病的机理和病证演变与转归方式的学说,其基本规律包括:正邪相争、阴阳失衡、新感与伏邪、染易、传变与转归以及复发等。

关于病机学,匡氏认为这是探讨疾病发生、发展和结局的基本规律的学说,它着重研究病后体内发生反应的全过程及其规律。它与发病学略有不同之处在于发病学仅研究病因与机体开始作用时的相互关系及其发病方式。病机学总论包括:阴阳失调、邪正虚实、寒热进退、表里出入及升降失常;各论则为各种病机学说,如脏腑病机、经络病机、气血病机、六气病机、伤寒六经病机、

温病卫气营血病机、津液病机、痰饮病机、体质病机及心神病机等。对于病机学说,匡氏又指出中医学有多病机原理的特点,即任何致病因素,不论外感或内伤,只要作用于人,几乎能牵动上述各种病机,也就是说脏腑、气血、经络、津液、心神等全部都可能产生反应,受到干扰,只是轻重不等、主次不同而已。由于这种多病机现象的客观存在,造成中医临床辨证的复杂性和治疗措施的多样性。只要恰当地切断任何一组主要病机环节都可能获效,但效果可能不一样。因此,中医临证见仁见智的现象比较普遍,且往往令人难于理解,其实,这可以用多病因、多病机原理予以解释。

匡氏近年又提出,上述病因学、发病学与病机学只是中医病理学总论的内容,应增加中医病理生理学(包括症状病理学、证型病理学与病型病理学)及中医治疗病理学(包括治则病理学、中医与方剂病理学)作为各论。这样,现代中医病理学的理论体系才能建成,才能切实起到在理论上承上启下的作用,才能逐步通过现代科学研究成为世界医学体系可以接受的理论。上述见解对于中医学的全面发展及其学科建设是有意义的。

**新的发病原理——“整体制约论”** 中医辨证论治的核心是“证”。证是中医学术思想特有的概念。目前对证的认识并不统一,研究的方法还不成熟。匡调元于1977年提出:证是机体在致病原因和条件的作用下,整体体质反应特征和整体与周围环境(包括自然界与社会)之间、脏腑经络与脏腑经络之间、细胞与细胞之间、细胞与体液之间相互关系紊乱的综合表现;证是生命物质在疾病过程中具有时相性的本质性的反映;是一种以临床机能变化为主的“整体定型反应形式”。西医学病的概念与此不同,是“以局部结构变化为主的定型反应形式”。证具有整体性、定型性、定系性、制约性及及时相性等5个主要特征。匡氏通过对“证”及辨证论治全过程的分析,并结合临床病理研究结果,提出了关于人类疾病发生发展的新原理:“整体制约论”。整体制约论认为:(1)人与周围环境,包括自然界与社会,处在一个共同的统一体中,二者处于既矛盾又统一的斗争过程中,而人应处于主导地位,二者之间的相互关系紊乱即能导致疾病。(2)人是一个整体。任何疾病都是整体性疾病,不能仅仅理解为局部细胞的疾病。但可将人体内各部分按解剖生理特点分成多个系,如脏腑、经络、组织、细胞等等。任何系不能凌驾于整体之上,只有在整体中才具有系的意义。(3)各系之间是相互依存、相互制约的。这种正常的相互关系紊乱,即意味着疾病的发生。产生疾病的原因只能从导致上述相互关系紊乱的因素中去寻找。(4)个体体质状态在发病中具有重要意义。(5)在疾病过程中可以产生各种证。证是整体体质特征与前述种种相互关系紊乱的综合表现。不同的病证具有其特定的病理基础。(6)疾病是一个新的矛盾,显示着发展的连续性和相对的阶段性。疾病处于不同的阶段具有不同的矛盾特征,即意味着各部分之间的相互关系紊乱具有特定的内容。这是证的时相性。证的有规律的传变称为“证的演生”。中医辨证论治的精髓之一就在于采取不同的方法处理不同的证。(7)疾病过程中的一切病理变化必然要在代谢上、机能上及结构上反映出来,而且三者是辩证统一的、相互制约的、同步变化的。疾病同时反映着整体机能性定型反应形式与局部结构性定型反应形式,它们都取决于共同的生命物质的新陈代谢过程;(8)在人体内存在着一种由人体生命物质特有的矛盾性决定的、从进化过程中获得的自动控制能力。这是一种维持机体相对平衡的自限和自愈能力。辨证论治就是因人、因时、因地制宜地针对个体患者调整其各系之间的具体紊乱,促进其自限和自愈机能,使之在新的水平上重新恢复相对平衡。

1989年,匡氏又对“证的演生”作了专题研究,认为“证的演生”就是前述整体机能性定型反应形式在疾病过程中所显示的有规律的传变与转化过程,是证的时相性的具体表现,是疾病本质性的反应形式。要把握证的本质,必须研究证的演生,如同西方医学研究局部结构变化的定型反应形式时必须研究组织发生和形态发生一样。人们只能从运动中把握事物的本质。这一认识迄

今为止尚未引起人们的重视,或者说人们尚未认识到证的演生的重要意义。同年,匡氏以整体制约论的发病原理研究了西医“病”的概念,对4例有代表性的临床病理的研究结果表明:微观的细胞水平的病变也是完全符合整体制约论原理的。由此可以说明中医的病因病机学原理可以渗入西医病理学,以促进西医病理学的革新,同时也表明西医病理形态学所采用的微观的细胞水平的根据是中医病因病机学所缺乏的,彼此可以取长补短,相互渗透,从学术上彼此结合而推陈出新。这正是中医现代化与中西医结合所要求的。

传统中医学所以能久行不衰,其主要原因在于她有独特而完整的理论体系与行之有效的临床治疗经验。中医理论的精髓在各家学说,而其核心则是病因病机学说。离开病因病机就无法认识证,无法正确地选方遣药,便会不知其要,流散无穷,甚至陷入瞎子骑盲骡的困境。这个事实已为大多数有识之士所接受。但以下几个重要问题尚未获得真正的解决:(1)中医理论的科学性究竟有多大?如何用现代科学方法验证其科学性?(2)临床治疗有效的机理何在?(3)在东西方文化大交流的浪潮中,中医学应向何处去?这些都是与中医病理学直接有关的,也是发展中医必须解决的战略问题。制订战略方针的正确与否取决于制订战略者对医学科学史的认识是否正确。目前急需解决好3个主要问题:(1)制订中医病理学研究的具体规划;(2)培养一支合理的科研队伍;(3)找好理论研究的突破口,并下决心创立一个具有中医学特色的新学派。

#### 参考文献

- 1 匡调元. 中医病理研究. 上海:上海科学技术出版社,1980
- 2 匡调元. 中国医药学报,1986,2:43
- 3 匡调元. 人体体质学. 上海:上海中医学院出版社,1991

(上海中医学院匡调元研究员撰)

**中医体质病理学** constitutional pathology of traditional chinese medicine 80年代以来,中医界对体质学说的研究产生了浓厚的兴趣,并取得了一些进展。

追溯自春秋战国到1949年间,学术界对体质问题有过不少论述。《素问·异法方宜论》说:“医之治病也,一病而治各不同,皆愈何也?岐伯对曰:地势使然也”。古人早已发现不同地域的人体质不同,好发疾病不同,故应因地制宜。《灵枢·阴阳廿五人》将人的体质分成25种类型;《通天》将人的体质分成5种类型;《顺逆肥瘦》还有壮人、瘦人和适中常人;《卫气失常》有肥、膏、肉和众人等分型法。《类经》指出过体质的遗传性,称“禀赋为胎元之本,精气受于父母者是也”。《小儿药证直诀》描述了小儿的体质特征,称“小儿五脏六腑成而未全,全而未壮,脏腑柔弱,易虚易实,易寒易热”。《内经》对各年龄组入群的体质特征早有论述。《证治准绳》更论及妇女的年龄与体质诊疗的关系,称“妇人童幼,天癸未行之间皆属少阴;天癸既行皆属厥阴;天癸既绝乃属太阴”。《金匱要略》指明妇人产后的体质状态与好发病:“新产妇人有三病,一者病痉,二者病郁冒,三者大便难”。《丹溪心法》提出“产前当清热养血”的观点;《医学入门》则说“产后百病皆血虚火盛,瘀血妄行而已”。以上主要为生理范围内的论述,对后世学术思想发展之影响较大。

关于体质病理学的研究亦颇深刻,如《医宗金鉴》说“人感受邪气虽一,因其形脏不同,或从寒化,或从热化,或从虚化,或从实化,故多端不齐也”。《医门棒喝》说:“六气之邪,有阴阳不同,其伤人也,又随入身之阴阳强弱变化而为邪”。这是中医学对体质与病因、与发病、与病变类型相关的精辟论述。关于治疗,《内经》说过“必先度其形之肥瘦,以调其气之虚实,实则泻之,虚则补之……先问其病,以平为期”。由此可见,治疗体质比治疗证更为重要。

综上所述,可见:(1)关于人类体质、体质与疾病相关的论述,中国早已有之,而且都是西方体质人类学与医学中从未论述过的;(2)历代医学对人体体质的观察是缜密的、正确的,辨质论

治的效果是卓越的;(3)但是,在这些论述中缺乏明确而科学的体质概念,所有理论探讨也是分散的,始终没有形成一个完整的理论体系。

西方医学界与体质人类学界对体质的研究也由来已久,自公元前400年Hippocrates开始到目前为止,有代表性的体质分型学说约有32种之多,但自19世纪后半期Pasteur发现细菌及Koch关于结核病的实验研究结果发表以后,很多人把热情倾注于疾病的外因研究。同时,德国病理学家Virchow创立了以局部定位论为主导思想的“细胞病理学”学说。从此,内因性的整体性的体质研究长期以来被忽视了。直到由于生物科学在基因遗传学说方面获得了突破,免疫学说提出了令人信服的新论据,对疾病的内因——体质的研究才在西医学中出现了重新被重视的苗头。1959年,Roney提出了所谓医学体质人类学的观点。1975年,Hertzberg认为目前作为“人类因素工程学”的分支“工程人类学”专业已经形成。1983年,Wienker在第52届美国体质人类学会议上提出:日前已初步形成了一个新的学科“生物医学体质人类学”。这一趋向值得我们重视。在西方,长期以来,体质问题一直留给体质人类学家,而医生中却较少有问津者。西方新兴的“功能性生物类型学”也是由人类学界提出来的。人们看到,在目前西方医学体系中,体质的研究仍然是被忽视的,还没有从巴斯德时代与Virchow的局部定位论中苏醒过来。由于西方体质人类学家大多数不熟悉临床诊疗实践,因此,对体质病理学的研究,不论从理论认识上还是实际应用上都远远落后于中国的现状。

自1949年到1992年间的研究工作划归现状部分。1957年,曾昭耆的《中国古代“气质学说”与“体型学说”》,分析了阴阳二十五人与五态之人的意义。1965年,劳如玉的《小儿体质初探》一文曾讨论“纯阳”与“稚阴稚阳”论的源流和理论形成过程。而后的10余年很少有人深入研究过中医的体质理论。1975年,匡调元在《中西医结合途径的探索》一文中指出中医辨质论治的观点,并开始离开阴阳廿五人的体质分型传统,指出中医学中的“体质学说是西医理论中没有的,正是中医学的精华所在,也是我们创立新理论主要着眼点”。1977年,匡氏发表了《体质病理学研究》,论证了体质学说中以下几个原则:(1)提示了新的体质概念,认为人类体质是人群及人群中的个体在遗传的基础上,在环境的影响下,在其生长、发育的衰老过程中形成的机能上、结构上与代谢上的相对稳定的特殊状态。这种特殊状态往往决定着它对某些致病因子的易感性及其所产生病变类型的倾向性。(2)对体质形成的主要机理及其物质基础进行了探讨。(3)根据中医学关于阴阳、寒热、虚实、气血、燥湿等基本理论与临床观察结果将人类体质分成六个主要类型,即正常质、燥红质、迟冷质、腻滞质、倦惰质和晦涩质。(4)对体质与病因、与发病的关系进行病理学的论证。(5)论证了中医特有的辨质论治的原理,并使之落实在药物和食物的体质宜忌上。1980年,匡氏在《气象病理与体质病理》中讨论了体质类型与外感六淫易感性的规律,对中医学中“同气相求”的发病原理作了阐发。1981年又在《论证的演生》一文中论证了体质类型及其产生病变类型倾向性之间的关系,提出了“势”、“病势”、“质势”及“质化”等新概念。1984~1985年间,匡氏在美国研究了白种人与黑种人的体质类型,结果表明,前述分型学说同样适用于白种人与黑种人。1986年,匡氏提出创立“人体体质学”的建议。

在此期间,有人发表了《略论祖国医学的体质学说》及出版了《中医体质学说》,其内容仍在体质病理学的框架与范围之内。苏树蓉按匡氏体质类型学说对小儿体质之诊断进行了实地研究,作出了有说服力的论证。对中国人的体质普查工作应以何裕民和周国雄为代表。何氏的普查资料证明肥胖人群中阳虚和痰湿体质比例偏高,而瘦削人群中阴血虚或阴虚火热体质比例偏高。周氏论证了体质类型的遗传学基础。1989年,匡氏发表了《体质要素理论》,指出体质要素是构成人体的生命物质在机能、结构与代谢上反映出来的、必要的、可测定的“分析单元”。同年,匡氏出版了《体质食疗学》,比较全面地论述了辨质论食的理、质、方、药、提

出了“治质之法”，即燥红质用滋阴清热润质法，迟冷质用壮阳祛寒温质法，倦弱质用益气生血健质法，腻滞质用除湿化滞利质法，晦涩质用行血消瘀活质法，正常质用平补阴阳强质法。在各法之下列出代表性食谱及其功效、主治，且按中药方剂君臣佐使的模式作出食谱配伍与释义。此书为按照不同体质类型改良人类膳食结构提供了实践经验与理论基础。1991年，匡调元出版了《人体体质学》，系统地论述了与体质学有关的重要原理，并构建了独具特色的理论体系。以整体论为指导的人体体质学已被还原论拆成无数碎片的人重新组装到一起，人作为完整的“人”在医学中开始复活了。人体体质学为研究人类生老病死的全过程设计了一个个性化模式。该书还提出生物学与医应该重新定向的问题，认为应将研究的重点从外因转向内因，从局部转向整体，从以还原论分析法为主转向以系统论综合法为主，这样可以促使医学科学进入一个崭新的历史时期。

有鉴于此，匡调元等以纯种 Wistar 大鼠为研究对象进行了常体、寒体与热体的实验研究。他们从自然群体中成功地筛选出常体、寒体与热体大鼠，然后分别进行机能的、结构的与代谢的测试，结果发现：寒体组大鼠在 ADK 活性、细胞能荷及肝脏  $\text{Na}^+/\text{K}^+-\text{ATPase}$  活性方面比热体大鼠低， $\text{T}_3$ 、 $\text{T}_4$ 、孕酮和睾酮含量也比热体大鼠低。热体大鼠肝脏组织的 PAS 阳性反应物质及 ATPase 活性高于寒体大鼠，SDH 则寒体大鼠较高；但甲状腺组成的 SDH 及 ATPase 则在热体大鼠最低。在电子显微镜下见热体组肝细胞内腺粒体密集，粗面内质网与核糖体轻度减少；寒体组肝细胞内电子密度减低，腺粒体轻度变形，核糖体与内质网显著减少，细胞内脂滴增加。睾丸超微结构变化显示热体组支持细胞有变性变化，细胞核电子密度减低，有致密染色质块，间质细胞内又见溶酶体增加；寒体组精细胞及支持细胞内腺粒体变性，嵴缺少，溶酶体数量增加，支持细胞内核心呈浓缩块，间质细胞内腺粒体显著变性，细胞核不规则，染色质浓缩。常体组之肝组织与睾丸组织则均未发现异常变化。寒体组的生理机能比热体组低，寒体组反应缓慢，在冷水刺激后复温时间延长，热体组则相反。热体组活动频繁，易咬人，游泳试验耐力大，大便干结，在测定脑电图时常被咀嚼肌电子干扰，解剖时动脉血呈鲜红色，流速快；寒体组活动迟缓，少咬人，游泳试验耐力差，大便薄稀，在测脑电图时未见咀嚼肌电子干扰，解剖时动脉血呈暗红色，流速慢。热体大鼠淋巴细胞体外增殖及 DNA 损伤后修复能力均较寒体大鼠有更高的水平，而常体大鼠居于两者之间。免疫功能测定结果表明。总补体 ( $\text{CH}_{50}$ ) 测定，白细胞介素 I 测定及脾脏淋巴细胞转化率的测定结果，显示寒体组和热体组的免疫反应均高于常体组。其意义与机理有待进一步研究。他们还用热性食物五香粉与寒性食物冰淇淋分别喂常体大鼠，一个半月后，发现常体组动物分别趋向寒体与热体，说明食物能影响体质之形成。此后，他们又用热性食物喂寒体动物，寒性食物喂热体动物，一个半月后，结果表明两组动物均向常体转化。这说明食物对体质具有调整作用。上述实验初步证明中医体质病理学理论的正确性，并为深入进行体质病理学的其他重要原理提供了实验方法与物质基础。同时，上述实验证明食物对人类体质的影响是不容忽视的，人们的膳食结构急需合理调整。

虽然人体体质学，尤其是体质病理学研究已经取得可喜的进展，但按现代科学体系的规范化要求来衡量，还有很多重要课题亟待研究。中医体质理论是在中医理论体系的框架中建立起来的，迄今为止，它还没有完全摆脱中国古代实用科学的形态。实用科学的表现形态是借助于经验的规律，而不是借助于理论概念、定理与公式，并缺少定量的表达，对于一些参数之间不建立函数关系，也没有将科学实验引进研究工作。因此，关于体质学的实验研究目前国内外均属空白。匡调元指出，通过实验研究应阐明的主要问题有：体质形成的机理，体质类型的标准模式，各型体质的物质基础，体质在病因学与发病学的实际意义以及体质治疗的病理学与药理学基础等。如果不完成这些主要任务，体质学要想立足于现代科学之林是十分困难的。如果研究者能在正确思想

的指导下，认真总结自然科学发展的历史经验，对体质学说进行系统研究，并运用现代科学技术加以提高，人体体质学有可能作为一个崭新的学派屹立于医林之中，对人类医学作出较大的贡献。

#### 参考文献

- 1 匡调元. 成都中医学院学报, 1978, 2: 1
- 2 匡调元. 体质食疗学, 上海: 上海科学技术出版社, 1989
- 3 匡调元. 人体体质学, 上海: 上海中医学院出版社, 1991
- 4 张伟荣, 等. 中西医结合杂志, 1991, 11(8): 477
- 5 丁毓兴, 等. 中西医结合杂志, 1991, 11(9): 550  
(上海中医学院匡调元研究员撰)

**中药与免疫** 随着免疫学理论、方法和技术的发展, 正在形成一种与中药学互相渗透的交叉学科——免疫中药学。它对于防治免疫性疾病、促进免疫学的发展, 研究和阐明中药传统理论的内涵等, 都有着十分广阔的前景。

**免疫促进药** 其对免疫反应起促进作用, 提高免疫系统的功能, 增强免疫力, 使免疫反应有利于患者康复。现已发现, 部分补益药、温阳药及少数活血化瘀、清热解毒药具有不同的免疫促进作用。

1. 促进细胞免疫: 细胞免疫主要是 T 细胞及其亚群参与, 一些非特异性免疫细胞协助 T 细胞发挥免疫作用。许多疾病患者, 如感冒、肝炎、肿瘤及中医辨证为气阴两虚者, 均与细胞免疫功能低下有关。经研究, 多数扶正中药, 如黄芪、黄精、党参、鸡血藤、当归、女贞子、枸杞子、北沙参、白术、茯苓、补骨脂等用于肿瘤病人, 观察巨噬细胞吞噬率, 有明显促进作用。曹先兰等报道, 紫河车、肉桂、刺五加、人参、黄芪、灵芝等可以促进血液中白细胞数量的增加, 对放射性白细胞减少者有促进恢复作用。白花蛇舌草、怀山药、黄连、甘草、白术、人参、黄芪等可增强嗜中性白细胞的吞噬功能。网状内皮系统的功能是机体防卫功能的重要组成部分, 对感染、辐射、肿瘤等致病因素的防御及特异性免疫反应的形成有重要作用, 是天然免疫和获得性免疫之间的重要环节。段学智等研究发现, 云芝、甘草、香薷能促进单核巨噬细胞、系细胞的增加。郑汉臣等报道, 党参、白术、刺五加、黄芪等能明显增加单核巨噬细胞系统吞噬功能。北京市临床医学研究所发现, 龟板、牡蛎、鳖甲、白芍、沙参等可明显刺激网状内皮细胞吞噬能力。许多清热药对感染性疾病有良好的治疗作用, 但在体外抑菌能力大多不明显, 近些年发现这类药物中不少具有免疫促进作用, 如白花蛇舌草能刺激网状内皮系统的增生, 使淋巴组织中网状细胞显著增生, 胞浆丰富; 增强白细胞及吞噬细胞的功能。此外, 紫花地丁、蒲公英、鱼腥草等对网状内皮系统的吞噬功能均有促进作用。张蕴芬等亦发现党参、黄精、白术、苡仁、天冬等可促进 T 细胞比值。蔡泽泉等报道, 鹿茸、菟丝子、桑寄生、猪苓、首乌等可促进淋巴细胞转化, 增加免疫球蛋白的含量, 增强免疫功能; 茯苓多糖、银耳多糖、香菇多糖和蛇毒、蟾酥、斑蝥等都具有促进吞噬细胞功能、提高淋巴细胞转化率、提高机体免疫功能的作用。

2. 促进体液免疫: 体液免疫主要由 B 淋巴细胞分化的浆细胞产生的各种抗体 IgA、IgG、IgE、IgM、IgD (尚有补体参与) 完成, 体液中含有多种能杀伤外来抗原或靶细胞的非特异性免疫因子, 如补体系统、备解素、干扰素等。经研究发现, 部分中药对这类体液免疫因子有影响。中国医学科学院病毒学研究所发现, 黄芪、菜豆可诱导干扰素。崔文英报道, 香薷是补体使其  $\text{C}_3$  激活剂, 枳壳、陈皮、麻黄、人参、当归等乙醇浸膏, 在体外能抑制补体使其含量减少。中国医学科学院流行病防治研究所的动物实验证明, 苡米、当归、黄芪能促进小鼠免疫早期反应阶段的脾脏抗原结合细胞的增生, 女贞子、苡仁、天冬、麦冬、猪苓、补骨脂对羊红细胞免疫小鼠后脾脏抗体生成细胞的增生有促进作用。刘亚光发现, 菟丝子、黄芪、紫河车、地黄、人参可促进抗体产生。中国医学科学院报道, 生地、熟地、黄芪、党参、茯苓、白术对 IgG 有促进作用; 紫河车、生地、熟地对 IgA (血清型) 有促进作用; 何首乌、灵

芝、仙灵脾对 IgA(分泌型)有促进作用;黄芪、云芝、蜂巢对 IgM 有增强作用。这些药物的免疫促进作用机制大致可归纳为:一是作用于环核苷酸系统(cAMP/cGMP)的调节免疫功能,如黄芪、白术、防风等;二是通过植物凝集素(PHA)使淋巴细胞及白细胞值升高,促进 T 细胞分裂、增殖,如菜豆、扁豆等;三是含有生物活性多糖,能激活 T 细胞,如银耳、茯苓、灵芝等;四是提高核酸(DNA)的合成率,从而促进抗体、补体、干扰素等的产生。另有一些中药本身就含有抗体,如紫河车等。

#### 免疫抑制药

1. 抑制抗体。姜梅通过动物实验发现,益母草对小鼠免疫抗体的产生有明显的抑制作用。陈泽霖等报道,甘草能抑制 IgG、IgM、IgE 的产生,甘草甜素尚可抗过敏和延长移植片生存的时间,能使由 A、B、O 型血型不合而产生的抗体效价明显降低,预防由此产生的新生儿溶血症。现已发现,肉桂、大枣对抗体或补体活性,补骨脂对不同的血浆蛋白有不同程度的抑制作用,广泛用于银屑病、白癣等疾病的治疗;桃仁、红花、川芎、芍药、当归既有体液免疫抑制作用,又有细胞免疫抑制作用。

2. 降低 cAMP/cGMP 比值。龙振华等报告,雷公藤提取物可选择性地影响免疫活性细胞 cGMP 的代谢,提高 cAMP/cGMP 比值,从而抑制免疫功能,增强机体对自身抗原的耐受性,减轻或控制自身免疫损害。

3. 有皮质激素样作用。邓文龙报道,中药昆明山海棠有免疫抑制作用,但不引起胸腺、脾脏等免疫器官的萎缩,甚至对脾脏有增重趋势,治疗免疫亢进性疾病,有皮质激素样作用,但无激素样副作用。

4. 阻止 T 细胞发育。姚楚铮等报道,金钱草可作用于胸腺髓质的网状上皮细胞和 Hassall 氏小体,从而阻碍 T 细胞的发育,并影响 B 细胞发育,发挥免疫抑制作用。

5. 清除抗原。现已证实,蒲公英、银花、黄连、黄芩、徐长卿、鱼腥草、连翘等可以促进白细胞等吞噬细胞清除抗原的作用;斑蝥、鹅血等有直接杀灭癌细胞亦即抗原的作用;鸡血藤、红花、丹参对已沉积的抗原抗体复合物有促进吸收和消除作用;柴胡、防风等可以产生许多游离抗体,以中和进入体内的过敏原。

6. 抑制过敏介质的释放。骆和生等报道,麻黄、细辛、虫衣、防己、冬花等祛风除湿药,能抑制过敏介质的释放而起到抗过敏反应的作用。刘正才报道,桂枝、甘草、黄连、丹皮的复方能抑制支气管肥大细胞脱颗粒;苍耳、麻黄、肉桂、公丁香共研末敷脐,可提高患者血清 IgG 水平和 T 细胞比值。IgG 可中和过敏原, T 细胞能抑制 IgE 产生。雷公藤、昆明山海棠能抑制抗体,从而减轻抗原抗体复合物反应,并逐步消除其反应。目前已有不少雷公藤制剂上市,对多种免疫亢进性疾病有效。此外,白花蛇舌草、银花、连翘、蒲公英、地丁、麻黄、地肤子、苍术等有清除抗原作用,丹参、桃仁、全蝎等有抑制抗体等作用。

**双向免疫调节药** 中药的双向免疫调节,是指中药对机体免疫表现为两种相反的作用,使偏盛或偏衰的免疫状态得以调节,从而趋于正常的动态平衡。这已受到国内外医药界的关注,也是免疫学理论研究中的重大课题。中药的双向调节作用可以分以下几种情况:(1)剂量不同,效果不一:如人参皂甙剂量为 500 $\mu$ g,可增强小鼠脾脏 NK 细胞的活性,而达到 5mg 时,却呈现抑制趋势;银花少量可以兴奋网状内皮系统,大量则呈抑制作用;板蓝根低浓度时呈现免疫增强作用,高浓度时呈现免疫抑制作用。(2)机体免疫状态不同,效果不一:如小鼠在应激状态下,甘草对其腹腔巨噬细胞的吞噬功能起促进作用,如处在正常安静状态下,则呈抑制作用。五屏分散对处在不同免疫状态下的溶血空斑(PFC)的实验结果是:当 PFC 基数偏低时,用药后升高;当 PFC 基数偏高时,用药后降低。(3)炮制或提取方法不同,效果不一:如牛膝的水溶性部分能抑制过敏介质的释放,醇溶性部分则能促进其释放。干地黄的水提取物能使外周血液中 T 淋巴细胞数显著增加,而醇提取物则使之减少。(4)对不同的免疫功能,作用不一:如甘草对抗体产生有促进作用,而对巨噬细胞的功能有

抑制作用。

目前,对中药免疫学研究多是动物的或体外的实验结果,病例观察较少,也常缺乏对照组,且其中不少实验结果报道不一。同时,由于免疫学发展较快,许多新方法还没有运用到中药免疫领域,研究有待深化和展开。该领域 10~20 年的研究热点将是:(1)在研析中药免疫作用的基础上开发保健抗衰老、抗癌、抗类风湿、抗炎等药品。(2)通过对免疫双向调节药物或方剂成份与作用的研究,有可能出现全新的免疫类新药。(3)从免疫学的角度进一步科学地阐明传统中药学理论的深刻内涵,建立中药免疫学。

#### 参考文献

- 1 刘正才. 浙江中医杂志, 1980, 1: 4
- 2 马振亚. 陕西中医学院学报, 1991, 4: 28

(安徽中医学院池建淮, 万毅撰)

**病证参合诊治** combined diagnosis and treatment of differentiations of a disease and its syndrome 借助于传统的四诊方法及现代的有关实验室检查手段,在广泛搜集具体患者所患疾病的历史与现状的基础上,辨识病(包括中医和西医)与证,然后择其一或兼其二而治之的一种诊疗方法。

病证参合诊治源于《内经》,创立于《伤寒杂病论》。前者如《素问·至真要大论》病机 19 条中,以证断病机者有眩暈、胀满等,以病断病机者有痞、痿、痿等。后者如《金匱要略》,非但均以“病脉证治”命其篇名,而且对胀满、呕吐、下痢、黄疸等侧重于辨证论治;对百合病、阴阳毒等则侧重于辨病论治;对于疟病、肺病等又兼顾辨病与辨证论治。后世医家多予遵从,如叶天士谓“病有是证,有变证,有转证,必灼见其初终转变,胸有成竹,而后施之以方”。自 50 年代兴起中西医结合以来,病证参合诊治被赋予新的内涵,提出辨西医的病,辨中医的证,在西医病名诊断的基础上进行中医辨证分型。70 年代后期,中医界有识之士从临床实际出发,认识到辨证的局限性和单纯辨病的片面性,再次明确提出辨病与辨证相结合的思想,从而在全国范围内掀起了病证参合诊治的形式、内容和方法的热烈讨论。尽管这场讨论曾引起不少的歧见,迄今尚未结束,正朝着纵深方向继续发展,但却已一致肯定这一诊疗方法的重要性和必要性,只不过认为两者结合的具体方法仍有待不断深化与完善而已。

从各家见解来看,这场讨论所涉及的问题颇多,归纳起来主要有三:一是病证参合诊治并非中西医结合时所创之法,而是中医一贯倡导之法,只不过在中西医结合过程中被赋予新的内涵罢了,因此在实施这一诊疗方法之时,究竟是从中医角度考虑,还是从中西医结合角度进行。二是中医及中西医所诊断的证与病区别何在,关系如何,又应怎样结合。三是对于辨病之专方专药与辨证之遣药组方的关系应如何处理。对上述问题,有代表性的观点是:岳美中主要强调从中医自身的角度进行病证参合诊治,指出“仲景的书,外感杂病,分论各治,示入在辨证中注意辨病,把专方专药与辨证论治紧密结合起来”;认为《伤寒论》诊治的特点是“示人先辨病,再辨证、脉”,做到既“辨明空间上客观存在的‘证’,又认识在变化发展时间上的‘候’,辨得了证候,治病则左右逢源,无往不利”;“《金匱要略》的最大特点是按病用药,专病专方专药,例如茵陈是黄疸病的专药,泻水水黄芪是主药,治疟母用鳖甲煎丸,治肠痈用大黃牡丹皮汤等等”,可以说“按证候用药是《伤寒》,按病用药是《金匱》”。由此推知,“专病专方是中医的基本思想”,否则《伤寒杂病论》各篇何以皆标明“病脉证治”?至于“何谓病?何谓证?”那就是“病者,本也,体也;证者,标也,象也。有病始有证,辨证方能识病”,假若“不能辨病,焉能识证?”然“目前中医学界存在两种倾向:一是不辨证论治,只强调专方、单药;一是只强调辨证论治,随证下药。两者均有所偏,未能称是。余谓中医治病必须辨证论治与专方专药相结合,对于有确实疗效的专方专药必须引起高度重视”。因此,“欲使医业精进,还必须于专病专方上认真下一番功夫”。姜春华教授则兼重中医及中西

医两种形式的病证参合诊治,认为“西医喜欢寻找有效方剂、有效药物,希望能找到治疗某一个病的有效方药,因此努力于‘为病寻药’;中医则强调辨证论治,用辨证的方法来用药,不喜欢一病一方。个人看法二者不能偏废。对于已经确诊的病找一种针对性的方法去治疗,这是理所当然的”,但“即使找到针对性的方药,也不能丢掉辨证论治”,因为“辨证论治是建立在整体观念、动态观念、朴素的唯物辩证法的基础之上”的,这种辨证“毕竟反映了人与疾病斗争以及各有关方面的情况,体现了个交织一起的焦点”,可见辨证论治“与对证治疗的意义截然不同”,舍去辨证论治也就“忽视了人体和其他因素对于病的作用,也丢掉辨证论治中看似治证而实际是治病的方法”,尽管辨证的意义如此重要,“但是我们又不能满足于‘证’”,其原因就在于“现代医学科学的物理的、实验室的检查所得出‘病’的证据,超出了中医的望闻问切”,“所以辨证与辨病对中医本身来说,也应辨证地结合”,即“中医除掉以西医的病为主体外,还要根据中医辨病的原则去辨病,同时也根据中医辨证的精神去辨证”,“譬如疟疾是一个病(其中可能包括其他的病),治病可以用常山、草果、槟榔、蜀漆,古代经验方中多用这类药,可是疟疾又有寒疟、瘧疟、劳疟、虚疟、痰疟之分,寒者温之,热者凉之,虚者补之,有痰者吐之,这些是辨证。单纯用治病药(西药如奎宁之类),如果确实是疟,也确实有效,我们可单独使用,以针对病为主,可以不拘热多寒多。有时也不要绝对,如劳疟、久疟又当注重人体。又如传染性无黄疸型肝炎,转氨酶升高,中医一般用清热解毒以治‘病’,但也有从辨证角度考虑,对某些人体有某种倾向的方药也能下降转氨酶”。相反地,“只重在证,即单纯对阴阳气血脏腑病因而反映的‘证’进行治疗,而把中医原来能治病的方法丢掉,则其疗效也成问题”。张笑平教授所重视的并非是辨证论治而是病证参合论治,但若从当前的临床实际而言,又应当从中西医结合的角度来寻找病证参合诊治的途径和方法,认为“西医的辨病是立足于认识疾病的全过程,主要是从微观角度,借助于各种实验研究的手段,旨在探求包括特定病原体在内的足以引起某种疾病的具体致病因子作用于不同个体而表现出来的共同性病理变化,即存在于该种疾病过程中的一般矛盾;而中医的辨证是偏重于认识疾病处于某一阶段的横断面,主要从宏观角度,在天人合一的整体观念指导下,运用逻辑推理的‘黑箱’研究方法,以便寻找不同个体因精神、营养、体质状况及其所生活的特定时空环境等因素对所患疾病的具体致病因子施加反作用所发生的特异性病理变化,即存在于某一患者的特殊矛盾。由于临床实践早已证明,虽然也有极少数病证可呈平行分布,即某病均为某证或某证均为某病,但绝大多数病证则呈交错分布,即一病分属数证或一证分涉数病,更何况还有无证可辨之病与无病可辨之证。前者如某些隐匿型慢性肾小球肾炎与无症状性血脂血症等病,后者如因阳虚与阴虚所致功能性低热等证,所以不论辨证或辨病,都有其不足之处,唯有同时借助两者,才能纵横交错地揭示所患疾病的本质,从而拟定更加切合实际的治疗方法”。并认为开展中西医结合的病证参合诊治“不仅可使中医诊断与疗效判断有了客观指标,而且在设计治法和组方选药方面便于充分地吸取和运用有关发病原理以及中药药理药化研究的最新成果,实不失为提高中医临床疗效和加速中医现代化进程的一种重要手段和途径”。其方法主要可分为舍病从证、舍证从病、病证兼顾三种形式。

必须指出,上述观点虽都有助于深化和完善这一诊治方法,但所谓无证可辨之病与无病可辨之证,均非真正的“无”,只是在疾病的初始阶段尚未表现出来,或者尚未仔细地搜集到,或者运用现有诊疗技术尚难以发现其病证而已,因此在临床实践中,决不可滞留于这种“无”的水平,相反地应当尽一切努力查其无显其有,从而使诊断得以进一步地深化;其次辨病分期加辨证分型论治的方法,并非是中西医病证参合诊治的最佳方法,决不能以此为满足,务须进一步探索,争取将人、病、证及时、空等因素融合于一起考虑;再者所谓“舍病从证”或“舍证从病”的施治方法,只

能在中医辨证与西医辨病截然不同时使用,而决定从舍的标准应以足可获取最佳疗效为原则。

总之,病证参合诊治方法的讨论和阐发,已被公认为不仅是开展中西医结合的基本途径,而且是当代中医提高临床诊治效果的重要手段,同时还是中医在现阶段继续发展的必然趋势。预期10~20年内,在解决所存在的问题方面可获得突破性进展。

#### 参考文献

- 1 张笑平. 新医药学杂志, 1977, 8: 26~29
- 2 欧阳琦. 新医药学杂志, 1978, 2: 39~40
- 3 潘文奎. 新医药学杂志, 1978, 2: 41~43
- 4 危北海. 中医杂志, 1979, 11: 19~20
- 5 王羲明. 中医杂志, 1980, 6: 9~10
- 6 北京西苑医院编. 岳美中医话集. 北京: 中国古籍出版社, 1981. 12~66
- 7 姜春华. 姜春华论医集. 厦门: 福建科技出版社, 1986. 576~584
- 8 张笑平. 中国医药学报, 1988, 8(2): 53~55
- 9 张笑平. 安徽中医学院学报, 1988, 1: 1~4

(安徽中医学院张笑平教授、纵横讲习、安徽省郎溪县卫生局王年法副主任医师撰)

**辨证论治** 中医学的重要内容之一,是中医理论联系实际、指导临床实践的精华和特征所在。辨证论治是在中医学理论指导下,通过望、闻、问、切四种诊病方法所获得的临床资料,对疾病表现的具有内在联系的各种症状进行分析,结合周围环境、正气强弱与疾病特点加以综合考虑,从而确定病人所患证候,并进一步制订治法及选择相应的方剂药物,对病人进行治疗。

在长期的医疗实践过程中,古代医家创造了各种辨证方法,如八纲辨证、病因辨证、气血津液辨证、脏腑辨证、经络辨证、六经辨证、卫气营血辨证及三焦辨证等。这些辨证方法,从不同的角度总结了认识疾病证候的规律。它们各有特点,在诊断疾病时互有侧重,但又相互联系与补充。其中,八纲辨证用于确定疾病性质,是其他辨证方法的基础;病因辨证可以区分致病原因;脏腑辨证、经络辨证能够落实病变部位;气血津液辨证可判定人体生理功能与体液、营养物质等的异常变化;六经辨证、卫气营血辨证及三焦辨证则用于诊断外感热病。

辨证论治不同于西医学的辨病论治。后者系针对疾病的表现特点及病情发展的独特规律进行治疗,不同的人在同患同一疾病后所接受的治疗往往相同。辨证论治则对患有相同疾病的病人,根据他们表现不同的证,分别采用相应的治疗方法。辨证论治也不同于对症治疗,后者在治疗时针对症状采取头痛医头、脚痛医脚的办法;而辨证论治则属于上升至寻找症状的本质,在认识层次上高于对症治疗。辨证论治针对的是体现病人整体反应状态的证。在治疗时可因人、因时、因地而灵活变化,能够适应临床上的错综复杂变化,所以具有良好疗效,在临床上获得广泛应用。长期以来,人们一直对它进行研究,试图阐明机制并加以发展,以便进一步提高治疗效果。

辨证论治的概念,最早起源于汉代张仲景的《伤寒论》。此书首次提出诊断六经病的病证,并以“辨太阳病脉证并治”等作为篇名。以后,通过历代医家的研究,使之在理论和临床实践上都有很大的发展,形成了系统、完整的辨证论治体系。

自1959年开始,中国开展了对辨证论治的科学研究,研究内容包括以下几个方面:

**证候规范化的研究** 证候规范化、标准化属于辨证论治研究的基础工作。迄今为止,除了在确定证的概念,明确病、证、症之间的关系,拟定常见证候条目,研究文献沿革等方面进行研究外,还根据临床需要制订某些常见证候诊断标准,如瘀血症等。

**证的实质研究** 采用现代科学技术方法与手段进行证的实质研究,在很多方面取得进展。主要有:(1)脾虚证的研究,除了对中医理论的“脾主运化”进行研究外,还开展了关于“脾主肌



肉”、“脾统血”等方面的研究。结果发现脾虚证与消化系统的消化功能障碍、分泌功能障碍、植物神经功能失调、内分泌及免疫功能改变等有关。(2)肾虚证的研究:上海医科大学从1959年开展对“肾”实质的研究,发现肾阳虚证具有下丘脑—垂体—肾上腺皮质轴功能紊乱的特点,初步证明“证”有一定物质基础,表现为肾阳虚证不仅是肾上腺皮质轴有功能紊乱,而且在不同靶腺轴有不同环节、不同程度的功能紊乱;肾阳虚证的主要发病环节为下丘脑(或更高中枢)的调节功能紊乱,中药温补肾阳后,各靶腺功能均有一定程度恢复;老人在甲状腺轴与性腺(男)轴的异常表现和肾阳虚证类似,故肾阳虚证意味着下丘脑—垂体及某靶腺轴有一定程度的未老先衰;肾虚证时,出现包括神经体液系统、肝脏、免疫系统和肥大细胞在内的广泛的系统、器官及细胞的病变,使用补肾中药可以使这些器官在组织学、组织化学及细胞结构方面的异常变化趋于正常。(3)瘀血症的研究:瘀血症是临床常见证候。通过临床及实验研究,发现瘀血症与微循环障碍、血液流变学异常、血小板功能及生化代谢异常、内脏及肢体血流量,体质特点及免疫功能等之间存在一定的联系。

**辨证微观化的研究** 由传统的根据脉证等的宏观辨证发展到结合实验室的有关指标异常的微观辨证,是辨证论治的进一步的发展,是辨病与辨证相结合的一种尝试。通过实验室研究,发现中医的不同证有着不同的物质基础。实验室指标包括生化、病理、免疫等方面的变化,已被结合到证的诊断标准中,可用于诊断及鉴别诊断。如阴虚肝火旺患者的尿17-羟排量增高;阴虚心火旺患者的尿儿茶酚胺排量增高,阴虚心肝火旺者则上述两项指标均增高;肾阴虚心火旺(心肾不交)者的尿儿茶酚胺排量增高,而尿17-羟排量降低。经过辨证治疗后,随着病情改善,上述指标也相应趋于正常。

**辨证的动物模型研究** 在通过临床观察研究辨证论治的同时,国内外学者致力于研制证的动物模型,近年制成的中医证候的动物模型有10余种。制作方法主要是病因模拟、症状模拟、治疗反应模拟等。造模因子有用药物(考的松、大黄、利血平)、饮食不当(猪油、醋、蔬菜)、劳逸过度、物理的和精神刺激(声、光、温度、惊吓)等。通过动物模型的实验研究,揭示了一些中医理论实质,为中医理论找到了科学依据。

日本学者对辨证论治亦开展了一系列的研究工作。从1980年开始,由官方资助,对包括证在内的中医药重要内容进行研究。1986年,日本科学技术厅调查局出版了这些研究成果的报告书。在证的研究中,由于心脑血管病、肿瘤及一些难治疾病多与瘀血有关,因而瘀血症的研究受到高度重视。继1983年寺泽捷年制订瘀血的诊断标准后,1986年小川新又参考我国的血瘀证诊断试行标准,提出国际瘀血诊断标准试行方案。这些学者对瘀血症的成因、病理变化及实验室指标等方面都作了大量的研究工作。除了瘀血症外,日本对脾阴虚证、肝气虚及肝阳虚证、冷症等都进行了研究。在证的动物模型方面,获田善一培育出在遗传上对药物有高度应答性的动物,对这种动物给予病因则得出一定病症的动物模型。他还采用遗传工程技术研制出证的动物模型。

**辨证论治是中医学的核心及精华**。证是辨证论治的基础。国内从1959年开展证的实验研究以来,迄今全国已有26个省、市、自治区及解放军共计上百个单位开展了这方面的研究工作。内容包括证的概念探讨与规范化,证的实质(脾虚、肾虚、瘀血、血虚、气虚及郁证、痰证等),疾病辨证分型,辨证微观化,治则方药研究,动物模型等。近年来的研究热点集中于证的规范化标准化、证的实质和证的动物模型3个方面。过去,由于在证的概念及规范化方面认识不一,因而对研究结果未能取得统一认识。现在业已从基础理论和广泛采集临床样本着手进行规范化研究,可望在证的规范化、标准化方面有所突破。另外,通过对证的实质与动物模型研究的进一步深化,从临床及实验两个角度对证进行研究,研究思路有所创新,不断开发新的研究领域,有可能进一步提高中医的辨证论治水平和临床治疗效果,使中医学能为人类的医疗保健作出更大贡献。

## 参考文献

- 1 陆寿康. 中医杂志, 1984, 25(6): 43
- 2 杜如竹. 中医药研究资料, 1986, 1: 4
- 3 沈自尹. 中医杂志, 1986, 27(2): 55
- 4 陈小野. 中国医药学报, 1987, 2(1): 50
- 5 桑滨生. 中医药研究资料, 1987, 6: 21
- 6 获田善一. 第2届日中和汉药医学药学研究讨论会文集, 1987, 135
- 7 王建华, 等. 中医基础理论研究进展, 1990, 111~127

(北京中医学院杨维岳撰)

**中医“证”的客观化研究** 辨证论治是中医学理论的精髓,是提高临床疗效的主要手段。辨证是论治的前提和基础。

证,即证候。它既反映病态时外在的临床症状,还是患者病因、病位、病势、病理的概括,还是中医整体医学的模式,并具有动态性。中医运用望、闻、问、切四诊手段识别证候,以阴阳、表里、寒热、虚实八纲等不同方法来分析归类各种证候,这便是辨证过程。

中医辨证宏观概括多,微观指标少;模糊推理多,精确统计少;主观臆断多,直观判断少。为使辨证更加精确,必须开展“证”的客观化研究。这在理论与临床上均具有实际意义。

证可相分虚实两类。60年代以来,在对其客观化的研究中,纷纷引进现代科学的手段并研制实验动物模型,从临床观察到实验研究,从功能代谢到病理形态,从整体与器官水平到细胞与分子水平,都有深入的探索,而且涉及到多学科、多层次。具有代表性的是虚证中的心气虚、脾气虚、肾气虚,实证中的瘀血、肝郁、气滞。据以往的重要研究所获得的初步结果,心气虚证,患者左心室功能有不同程度的减弱,非特异性细胞免疫低于正常而体液免疫无变化,血液流变学中全血粘度、血浆粘度皆高于正常,内分泌及代谢功能一般均趋于低下。脾气虚证,在高级神经中枢、植物神经系统、内分泌、免疫、消化等领域选择70多个观察指标,其中大多集中在消化系,共有50多个,比较有特异性的首推小肠木糖吸收力下降和口腔唾液淀粉酶活性降低。研究结果表明,脾气虚证同小肠消化功能降低有密切关系。动物模型大多采用以大黄、番泻叶等泻剂为主的造模方法,虽然在消化、代谢、免疫等功能和宏观外形上获得与人体相似的脾气虚证表现,但造模方法同中医理论相差太大。肾阳虚证,患者垂体和肾上腺皮质功能均处于低下状态。靶腺激素水平的降低并导致垂体激素的上升,从而促使靶腺激素水平的复常。肾阳虚证患者虽然垂体和肾上腺皮质功能同趋低下,但这是处于一种低阈平衡状态。再从甲状腺轴与性腺功能的研究中,发现肾阳虚证者垂体和靶腺间的应答能力及反馈调节也处于同样的低阈平衡,如用温补肾阳法治疗便能恢复到常阈的平衡,从而提出“阴阳常阈调节论”。近来有人研究老年肾阳虚证主要原因为SOD活性下降、脂质过氧化反应增强而导致的细胞老化。

瘀血症显示微循环障碍、血液流变学失常、血小板功能及生化代谢的变异、内脏及肢体血流量减少等变化,其中的某些结果已被列作瘀血症的参考诊断指标。有些学者根据中医“气血相关论”,由肝郁气滞着手来研究瘀血症,可惜“肝郁动物”模型多采用大剂量注射四氯化碳、橄榄油等造成中毒性肝炎,这同中医情志致郁的理论及临床实际相差甚远,从而影响研究工作的深入。

近年来,众多的研究者认识到开展“证”的客观化研究工作必须创建中医实验医学,而其中必不可少的手段是动物模型。由于在造模方法上遵循中医学理论,采用宏观外形与微观指标同步观察,代谢功能与结构形态同步观察的方法,使实验动物模型更接近于人体病态,更符合中医临床实际。于是“证”的客观化研究取得长足进展,有了一些较完善的初步结论,在脾气虚证和肝郁证的研究中尤为突出。

根据《难经》“饮食劳倦则伤脾”的理论,中国中医研究院基础所采用驴和大鼠同步造模的方法,并以健脾益气方药复健佐

证。在宏观辨证上探索计量诊断,对驴的宏观辨证共选八项指标:食量减少,体重下降,肚胀变深(消瘦),挽力、尾力、四肢力下降(疲乏无力),口色变浅(舌质淡胖),毛色粗乱无华(毛发不荣),大便稀软,脉虚。后6项作0~2分的3级评分,总分达10分以上者可以判断脾气虚证。大鼠的宏观辨证表现为体虚、尾细淡、体重下降、眼眯、拱背、懒动、游泳时间缩短。微观形态结构的变异:胃粘膜上皮糜烂破溃,十二指肠小肠微绒毛顶端破损脱落,表面细胞衣结构消失,血小板形态变异;心肌和骨骼肌正常线粒体数明显减少,呈肿胀、膜结构破坏、嵴消失;骨骼肌Z线增宽,肌浆网扩张,糖元和脂肪明显减少,ATP含量显著下降,SDH及CCO反应减弱而LDH及PTK反应则明显增强;重要器官如心、肝、脾、肾、胸腺、淋巴结重量明显减轻。功能代谢异常有:红细胞膜的COA受体发生变构,膜上唾液酸和ATP含量降低,导致红细胞膜上的离子交换功能障碍而缺氧,产生生物氧化过程能量转换效率的低落。血清锌和铁的含量显著减少,影响酶的活性,特别是血清亮氨酸氨基酶的活性显著降低而导致蛋白代谢中必需氨基酸转换上的障碍。机体免疫功能亦呈低下状态。经复健治疗后,这些微观层次的结构和功能大多能复常。上述改变,反映脾气虚证时机体的能量代谢、能源物质的转化和利用发生障碍,亦证实中医理论“脾主升,运化津液”的功能。

由于中医与中兽医学术同源相同,辨证方法的原则一致,驴和大鼠同步造模观察,提高了动物模型的可信度。由于抓住了“脾主升,运化津液”的功能,突破了70年代以来脾气虚证研究徘徊于“胃主降,受纳,腐熟水谷”的框框。从小肠吸收功能障碍到能量代谢的异常,从口腔至肛门的消化系统全面观察到运化津液和脾主肌肉的深入,这是脾气虚证研究的重大进展。

根据《临证指南医案》“情志不遂则郁而成病”的理论,中国中医研究院基础所采用激怒伤肝造模的方法获得“肝郁动物”,并以疏肝理气方药复健验证。在临床选用具有肝郁证的高血压病、冠心病、胃溃疡病患者同步验证,发现肝郁证并非肝脏本身的病变,而是机体的一种情绪应激反应。患者与动物实验均有血瘀证的存在,表现在血液流变性的异常,如全血粘度、血浆粘度、血浆比粘度、热沉淀蛋白含量显著增高,扩大型血小板数量明显增多,血小板的聚集率增高,用电镜观察呈明显的“粘性变态”,血液有明显的高粘、稠、凝、聚倾向,患者的甲皱微循环有严重的障碍,而用疏肝方药治疗后大多能复常,证实“肝郁引起气滞,气滞导致血瘀”的中医理论。进一步观察这个病理过程又发现:肝郁患者血5~羟色胺含量明显升高,引起高级神经系统活动的紊乱。用先进的单纤维记录电生理学方法,观察肝郁动物交感节后皮肤缩血管神经特异性通路的调节性紧张明显升高,对各种内外环境的刺激出现明显的应激反应,心电图有效不应期的复极化时间明显延长,离体心肌细胞的电兴奋性明显下降。用先进的血管内皮细胞培养技术,发现肝郁动物内皮细胞变态,胞质颗粒与空泡增多,分泌PGI<sub>2</sub>明显降低,TXA<sub>2</sub>增高,电镜见到其线粒体、内质网等膜结构破坏,表明有内皮细胞的损伤及其代谢功能的障碍,致使PGI<sub>2</sub>-TXA<sub>2</sub>和cAMP-cGMP这两对调节系统的失衡,构成血瘀证发生的分子生物学基础。另外,肝郁动物在病理检测上未见到脏器的器质性改变,但肾球旁细胞内肾素颗粒明显增加,肾上腺皮质的束状带细胞数量亦明显增多,体内的儿茶酚胺分泌水平明显升高,表明情绪应激对垂体-交感-肾上腺的影响。初步结论是:肝郁证是高级神经活动紊乱,其病因是情志异常。肝郁引起的气滞是机体应激反应。最高层次是交感中枢及其外周特异通路的调节失常;中间层次是心血管功能变化,引起微循环障碍和血管内皮结构损伤以及交感肾上腺系统的调控失常,引起血小板功能与形态异常;基础层次是继发生血管活性物质PGI<sub>2</sub>-TXA<sub>2</sub>及cAMP-cGMP的平衡失调,血瘀证是血液有形成分的粘凝聚状态。建立以血管运动功能紊乱的气滞假说,上联情志病因所致的肝郁,下及凝血变化的血瘀证,较以往单纯的血瘀、肝郁研究均富有新意。

中医“证”的客观化研究可望取得突破性进展的热点有4

个:在“证”的宏观辨识上追求规范化、实用化、计量化;抓住主症定性,参考兼症定位;四诊中以较客观的舌脉诊为准,尤其要“舍症从舌”;症状应用计分评定法。“证”的客观指标应选择辨证特异性强、灵敏度高者,可分两个层次,低者首先分虚实证来定性,高者应定位和定量化。“证”的动物模型要在中医理论指导下引进西医“病”的概念,制作“病证结合”的中医实验动物模型,创建中医实验医学。“证”的研究方法要多学科、多层次,强调临床与实验同步(临床抓疗效,实验选指标);形态与功能结合(结构上的超微变化和功能上的相关性);辨证与论治互证(突出主要证候,强调有效方药)。

#### 参考文献

- 1 须惠仁,等. 中医杂志, 1989, 6: 44~47
- 2 王淑兰,等. 中医杂志, 1990, 3: 49~51
- 3 李凤文,等. 中医杂志, 1991, 3210: 46~48
- 4 韩明向,等. 安徽中医学院学报, 1991, 10: 4

(中国中医研究院沈绍功主任医师、深圳市罗湖中医院刘小康副主任医师撰)

### 中医证候规范 standard regulations of TCM's

Zhenghou 中医证候规范是指中医学对证候的名称、概念、临床表现、诊断要求和疗效判断等所形成的公认的统一标准。它既可由学术权威机构颁布,亦可在历史发展过程中约定俗成。辨证施治是中医学的基本特点和优势之一,其最为关键的前提即系准确辨证,这就需要制定切实可行的证候规范,从而为开展科学研究、提高医疗水平和改进教学提供共同的可比度量的检测依据,同时也有利于中西医结合,推动中医药学术的国际交流。因此,中医证候的规范化是有关中医学学术发展的必需的基础工作,已经引起医学界的广泛重视,并从不同角度进行深入探讨。

早在《黄帝内经》就对一些证候就有了明确描述,如水胀、风水、石水、行痹、脊痹、痛痹等等。后世医家在总结前人经验的基础上,对八纲证候、气血津液证候、脏腑证候、经络证候、六经证候和卫气营血证候等先后作了创造性的发展。新中国成立以后,60年代中期出版的高校教材《中医诊断学讲义》继承整理历代学术成就,结合临床实际,就常见证候给予初步的规范表述。1984年和1986年曾先后两次召开全国范围的中医证候规范研究会议。在1990年全国中医病名与证候规范研讨会上,经过讨论将“证候”定义为:证候是疾病发生和演变过程中某一阶段本质的反映。它以某些相关的脉症,不同程度地揭示病因、病机、病位、病性、病势等,为防治提供依据。这一定义的确立已成为研究证候规范的基础。卫生部组织编写的《中医证候规范》对证候的命名提出的要求是:以正名为主,别名或异名不可太多;要充分体现中医学学术特点;命名需确切,不可含糊不清;命名应据情分别提出1级、2级、3级证候,以组成体系序列。关于证候规范的原则和方法,各地专家发表了众多精辟见解。黄星垣认为:证候应该既能反映传统理论体系的连续性,又能反映有效指导临床的实用性,还要反映当代学术成就的进展性。季绍良指出:证候规范必须符合继承性、准确性、实用性、先进性和稳定性的要求。孟庆云提出:证候规范化应有如下几个特征:一是模型性;二是约定性;三是层次性;四是稳定性。吴正治提出证候规范应注意以下几点:(1)历史与逻辑的统一,搞好文献整理;(2)证候标准的制定必须坚持宏观与微观的辩证统一;(3)病名规范和证候规范同步进行;(4)处理好继承与创新的关系;(5)理论与临床密切结合的原则;(6)标准的制定宜逐步分级进行。孟庆云认为证候规范化应从以下几个方面考虑:(1)继承整理,明确概念;(2)法规性的规范要有实验依据;(3)解决病名落后于临床的问题;(4)利用现代科学技术,促进症状规范的现代化。季绍良遵循理论联系实践的原则,提出首先是尊重传统,广泛收集文献资料;其次是建立中医病证流行病学,把证候规范建立在牢固的临床基础之上;第三是组织临床验证、反复修订。此外,还有学者对现行证候的规范提出了自己的看法。朱文锋认为:规范的证名一般应具有准确具

体的病位、病因、病性内容,用词精炼明确且具有中医学特色。据此,他对现用的高等中医院校 8 种教材进行了调查,概括了其中证候不规范的 5 种情况:(1)证名含义歧化;(2)分证形式不统一;(3)病位阙如或不准;(4)病性概括欠佳;(5)证的名实不符。经统计 8 种教材共有 1 019 个证,符合规范要求者 387 个,仅占总数的 38%,表明证候规范化的迫切性。于慎中提出证候规范化应充分考虑存在的问题,提出要注意:(1)“四诊”微观指标的确定;(2)原有证候内涵太广,规范时要进一步分化;(3)要注意到异病同证的共性与个性;(4)固有的证候满足不了临床需要;(5)证候的名称、标准不统一,某些证候的有无尚有分歧;(6)现有的主要诊断指标和具有特异性的指标缺少明确的规定。这些问题的提出,对开拓证候规范研究的思路,有其一定的意义。

1990 年中华全国中医学会在长沙市召开的“全国中医病名与证候规范研讨会”上,归纳总结了证候规范化的方法主要有:(1)文献整理法。文献整理工作是在历史逻辑辩证统一的思想指导下进行的。首先是考察理论客观基础的历史性,对常见证候的理论渊源和沿革作全面清晰的调查和把握,把古今医家关于该证的论述加以综合分析,初步概括出证候规范的综述。其次是坚持科学理论逻辑结构的完备性,使理论体系真实地再现和反映客观对象的实质内容。湖南省中医药研究院和云南省中医研究所的专题组,运用该法分别整理出《中医病名诊断规范初稿》和《中医疾病的整理研究》。前者包括 557 个规范病名,104 个规范证名;后者总结了各科病名约 3 671 个条目和证候各 525 个条目。这些工作虽然有待于深化和补充,但已首开先河,为系统的证候规范打下了良好的基础。(2)专家咨询法。在文献整理的基础上制定证候规范草案,广泛征询中医和中西医结合专家的意见,并据而进行修订,最后再请他们审定。(3)现代科学技术实验研究法。即在中医理论指导下,借助现代科学技术如微量元素检测、细胞分光技术、放射免疫技术等方法从微观的深度研究证候的敏感性、特异性指标,使之量化。于钰熊等通过建立类阴虚、类阳虚、类血虚和类血瘀四种动物模型,观察了体表(耳)和内脏(肝、肾、肠)的微循环变化。结果表明,不同的证候有不同的微循环改变特点,从而为证候规范提供了客观指标。(4)临床流行病学调查法。把古今医案包括现代中医院的病案资料进行大标本的回顾性调查研究,再作多因素分析,得出症状对证候诊断的贡献度和证候诊断对症状的依赖度,从而制定出一组症状或几组症状作为证候诊断的用量数表示的依据。陈国林等运用该法制定了中医肝病 9 个证候的辨证标准,就 5 对临床上难以鉴别的证候用逐步回归计量法鉴别诊断,符合率为 86.5%~100%,并结合大量调查数据,讨论了肝病的病因,病机特点,了解 9 个证候的构成以及肝病证与证、证与病之间的关系,同时根据症状出现率和程度数量化后,采用电子计算机进行计量鉴别诊断,不仅使证候诊断标准有了量的指标,并为肝病辨证明确了规范。(5)DME 方法。该法是把群体作为研究对象,运用调查、统计、分析的原理和方法与临床相结合,取得可信的资料,再作前瞻性的实验研究。湖南中医学院和常州市中医院分别用此法对血瘀证和肾虚诸证的诊断规范化进行评价,明确了有关症状指标的意义。(6)电子计算机临床模拟实验法。这是十余年来中医临床科研方法的进展之一。湖南中医学院和湖北省中医药研究院课题组,将此法用于病证规范研究,并取得了较好的效果。赖世隆等应用临床流行病学方法对 203 例内科疾病患者(血瘀证 96 例,非血瘀证 107 例)的 148 项症状和体征进行调查,并借助电子计算机应用多元分析等数理统计方法对调查资料进行处理,探讨了血瘀证宏观辨证的计量方法。本研究资料提示,中医证候的特定症状、体征的有机组合的内在联系,在一定程度上阐明了证候宏观诊断的规范依据。(7)卫生行政部门或专业学术机构制定标准法。目前诸方法中之有效的方法就是卫生行政部门和全国性专业学术会议或机构对相关的病证规范作出明确的规定,并颁布试行。如全国中西医结合研究会于 1982 年制定了心虚、肺虚、脾虚、肾虚、气虚、阴虚和阳虚等 7 个证候的辨证参考标准,每一证候均列出临床表现和诊断

要求。卫生部药政局颁发了《中药治疗慢性支气管炎的临床指导原则》等近 10 种标准,中华全国中医药学会各分会也相应地制定和颁布了各自学科范围内的某些病证的诊断及疗效评定标准。

中医证候规范过程也存在一些问题与难点,专家们认为:首先是与证候规范化有紧密联系的相关学科领域未形成规范,如中医基础理论部分的名词术语等。其次是缺少权威性的研究机构,部分医务人员对规范化缺乏正确的认识,因而使研究工作难以开展,已颁布的标准在临床上难以推广施行。三是缺少全国性的统一协作组织,研究工作未能形成有力的阵势,既浪费人力物力又难以出成果。

中医证候规范化与中医药学术的发展有着密切的联系,引起各地专家学者的关注和卫生行政部门的高度重视,并已出现一批值得肯定的成果和专门论著,如赵金铎等主编《中医证候鉴别诊断学》,邓铁涛主编的《中医证候规范》,冷方南主编的《中医证候辨治规范》等。预计该领域近 20 年内的研究热点是:(1)中医证候规范的需求日益迫切,将会吸引更多的专家学者对其研究工作的原则、方法、步骤及其具体工作展开更深入的讨论,且可形成一致性意见。(2)证候规范将会作出精确明晰的表述。这种表述仍是宏观定位,整体定性,主症加次症,舌脉合参。(3)对常见证候将会有较客观的量化诊断指标。(4)证候规范化的深入必将促使相关学科规范工作的进行,从而推动整个中医药学术的发展。

#### 参考文献

- 1 沈自尹,等. 中西医结合杂志,1986,6(10):598
- 2 赖世隆,等. 中国医药学报,1988,6(3):27
- 3 朱文锋. 中国医药学报,1989,4(4):53
- 4 黄星垣. 中国医药学报,1990,4(5):3
- 5 季绍良. 中国医药学报,1990,6(5):5
- 6 申春梯. 中国医药学报,1990,5(5):67
- 7 全国中医病名与证候规范研讨会秘书组. 中国医药学报,1990;5(5):3
- 8 陈国林,等. 中国医药学报,1990;6(5):66
- 9 于慎中,等. 医学与哲学,1990;11:16

(安徽中医学院孙益鑫副教授、王建青讲师撰)

**卫气营血证候实质** the nature of the symptom—complex of wei—qi—ying—xue 卫气营血辨证为清代叶天士所创立,是温病辨证施治的理论依据,对于急性传染性感染性疾病及感染性疾病的治疗有着指导作用。随着中医药治疗急症工作的深入开展,借助现代科学手段,从多方面揭示了卫气营血证候不同阶段机体所发生的相应变化,在探明其实质方面取得了成果。卫气营血证候实质的揭示,不仅使外感热病的宏观辨证与微观辨证相结合,从而提高中医药疗效,而且有助于推动温病学理论体系的现代化。

对卫气营血证候实质的研究始于 70 年代初,主要运用病理学和解剖学的方法,发现卫分证以上呼吸道炎症及体表神经—血管反应为主,局部病理表现主要为充血水肿、变性为主,其中也可能以某一组织或脏器的某部分病变为主,但其改变往往是可逆的。营分证除各种传染病之特殊病理变化进一步加重外,还以显著的中枢神经系统变性、坏死,凝血功能紊乱以及血管壁的中毒性损害进一步发展为特征。病至血分阶段,多种重要脏器的中枢神经系统、心、肺、肾、肝等损害更为严重,出现 DIC,广泛出血以及急性肾上腺皮质机能不全等。

近年来,对卫气营血证候实质的研究更为深入。以微循环与血液流变学变化而言,徐氏等对 103 例温病患者的微循环形态与功能进行了观察,并运用积分计算的方法,得出微循环诸指标改变的积分在卫气、卫营、卫血、气营、气血、营血之间,差异皆非常明显( $P < 0.01$ ),表明卫气营血各阶段都有微循环形态改变与功能障碍,并随卫气营血病程的发展而逐渐加重。徐氏等还先后测定 158 例温病患者的血液流变学指标,结果在温病卫气营血各阶段均有显著的或非常显著差异,符合其演变规律,证明卫气营血

全过程之血液流变学改变属“高粘综合征”，反映了温病过程中均有“瘀血”存在，且随卫气营血的变化而加重。

以免疫学改变而言，上海市传染病院对 35 例各型乙脑者作了 LBT、IgG、IgA、IgM 测定，发现各型乙脑 IgM 均有明显增高，IgG 变化不大，IgA 均偏低。卫气型 LBT 偏高，气营型 LBT 则略低于正常，营血型均偏低，反映了邪陷营血、邪盛正虚与细胞免疫反应低下有关，而卫气型患者细胞免疫功能亢进为邪盛正虚的表现。程氏等测定 60 例肺炎和 11 例败血症患者气分阶段的免疫功能，发现肺炎组血清 IgG、IgM，败血症组血清 IgG，较正常对照组显著提高(P<0.01, P<0.05)，亦证明温病气分阶段免疫功能较强，正气旺盛，容易祛邪外出。

以生化学改变而言，何氏观察 23 例营血症病例的血钠、钾、氯水平，发现 21 例钠、氯降低，提示高热失水伤津；增高者仅 2 例，可能与发热、脱水有关；而钾测定结果则相反，仅两例降低，其余 21 例均增高，可能为高热尿少或酸中毒，大量钾自细胞内移出所致，此似可作为高热伤津的辨证参考。许氏采用放射免疫分析法对 51 例处于气分阶段的温病患者进行血浆皮质醇的动态测定(8、16、24 点)，结果血浆皮质醇含量除 8 点与正常人无显著差异外，其余各点均显著高于正常人(P<0.01)。血浆皮质醇含量的增高，与机体受到外邪刺激而表现出的应激反应有关，支持气分正气尚盛、抗邪有力的温病学理论。程氏检测表现为气分证的 60 例肺炎、11 例败血症患者的酸碱平衡失调情况，发现呼吸性碱中毒最多，其次为代谢性酸中毒及碱中毒，而呼吸性酸中毒比较少，且上述酸碱平衡紊乱多属代偿性，说明气分阶段机体的代偿功能尚强。钱氏按卫气营血不同阶段检测 61 例流行性出血热患者周围血液的中性粒细胞 NAP、POX 活力，结果表明，各型 NAP 阳性率、积分值有非常显著性差别(P<0.01)，NAP 阳性率、积分值明显低于对照组，二者有非常显著性差别(P<0.01)；NAP 阳性率、积分与血尿素氮、肌酐呈正相关；POX 阳性率、积分与血尿素氮、肌酐呈负相关；POX 积分与 NAP 积分呈负相关；NAP 阳性率、积分与白细胞计数呈正相关，说明中性粒细胞酶代谢参与出血热卫气营血传变机理。此外，徐氏等分别对 186 例患者卫气营血各阶段血中内毒素含量进行动态观察，发现卫气营血各阶段均有内毒素血症存在，但无规律性变化。

上述研究结果已初步阐明温病卫气营血证候的实质，综合言之，卫分证为感染性疾病的初期阶段，机体对致病因子处于防御反应状态，尚未发生机能的或代谢的明显障碍；气分证为感染性疾病的中期或极期阶段，机体对致病因子呈亢进性反应，造成机体和代谢发生较为明显的障碍；邪入营血为感染性疾病的危重阶段，不仅机体代偿不足、抗损伤作用衰退，而且多系统如心、肝、肾、肺等脏器功能严重障碍，尤其是神经系统障碍和微循环系统障碍更为突出。近年来，温病动物模型研究的结果也证实上述观点。

当然，要真正揭示卫气营血证候实质仍须做大量工作，今后的研究热点集中在以下几方面：(1)加强整体研究，卫气营血证候是体内多系统、多器官病理改变的反应，任何单一指标均难以揭示其本质，因此必须注重多系统、多指标的观察，在此基础上进行综合分析和统计处理，从中揭示规律。(2)联系具体病种研究，温病包括的范围较广，既有传染性疾病疾病，又包括某些感染性疾病，不同的病种其卫气营血的病理变化有其特殊性。因此，研究卫气营血证候实质，必须结合具体病种进行，才能找到卫气营血证候带有普遍性的客观指标。(3)注重传变规律的研究，温病过程中可随病情演变而有卫气营血证候传变，然其传变的具体条件是什么，有哪些规律可循，抓住卫气营血证候传变规律的研究，对于揭示其本质有着积极的意义。

参考文献

- 1 许志奇, 四川中医, 1983, 5, 11
- 2 程远伦, 四川中医, 1983, 6, 57
- 3 徐应抒, 等, 中西医结合杂志, 1986, 5, 283
- 4 徐应抒, 等, 中医杂志, 1986, 8, 39

- 5 钱士明, 陈秋燕, 南京中医学院学报, 1987, 1, 22

- 6 马健, 蔡定芳, 上海中医药杂志, 1988, 4, 32

(南京中医学院马健博士撰; 孟澍江审)

脉象图与脉诊客观化 sphygmogram and pulse-taking objectification

自古至今中医诊病非常重视脉诊，而各种脉象的辨别依据仅是医生的指下感觉，对其判断主观成份太多，不同脉象很难界定，故不同医者对同一脉象很难统一认识。从 50 年代起，国内不少学者应用仪器开展脉象图的描记工作，借助判读脉象图使医者便于识别不同脉象。脉象图且有保存记录、连续观察、前后对比等优点。脉象图的研究为今后实现脉诊客观化奠定了基础，脉诊客观化对于提高脉诊的临床应用价值具有重要意义。

60 年代以来，脉象图研究逐渐深入，但以平脉、弦脉、滑脉和细脉的研究最广泛，不仅详论了脉象图特征，规定其各项测量指标的参数范围，而且对脉象形成机制等进行了初步探讨。机制探讨多从 3 方面论述：一是心脏收缩推动血液在血管中流动时所受阻力，特别是小动脉对血流呈现的阻力，又称外周阻力；二是动脉血管充盈程度；三是动脉血管的弹性。平脉、滑脉者，血管弹性良好；平脉者，外周阻力在正常范围；滑脉者，外周阻力减小；弦脉者，血管弹性降低，外周阻力增大；细脉者，血管充盈度减小。至 70 年代，国内共描记了 3 500 余例脉象图，包括 31 种中医脉象。1983 年陈德奎等采用动物实验方法，探讨了弦脉与滑脉的血液流变学变化。1975~1983 年，上海市脉象研究协作组的研究资料表明，30 岁以下的青年人多见滑脉、平脉；弦脉的检出率于 40 岁以后随年龄增长而增高，这是因为老年人的血液流变学参数与青年人相比存在着很大差异，随着年龄的增长，心血管系统出现生理性的自然老化倾向。高血压病患者多见弦脉。妊娠妇女滑脉检出率达 98.75%。正常人脉象图随昼夜交替而变化。1983 年，马仁美等研究发现，练气功者运气时很快出现典型的滑脉图，停止运气后，滑脉图很快转变为其他脉象图，证实存在“气至则滑脉至，气止则滑脉止”的现象。

80 年代以来脉象图的研究更加深入。殷文治等突破过去那种只是通过临床切脉和脉图绘制对脉象图进行分析的局限，开展了桡动脉脉图法检测循环功能的研究，并以心功能检测作为对照，求得出现平脉、滑脉、弦脉、涩脉、结脉、代脉时的循环功能参数，讨论从功能性弦脉演变为硬化性弦脉的机制和辩证意义。对不同疾病不同证候的脉象图研究，也取得较大进展。费兆麟等描记分析了慢性胃炎与阴虚火旺患者的脉象图。林礼务等研究发现，慢性支气管炎者多呈滑脉图形，肾虚者多呈细脉、弱脉象图；冠心病者多呈弦脉或弦细脉象图。上海市脉象研究协作组观察呼吸系统、消化系统、循环系统、内分泌系统疾病以及急腹症、肿瘤等 30 多个病种 4 300 多例患者，测绘出 12 种脉象图，并对部分脉象图与中医辨证之阴虚、阳虚、肝阳上亢、肝风内动、气阴两虚、心气虚、心阴虚、思虑伤脾等证候的关系进行了探讨。张镜人等应用桡动脉脉图(RPT)法对左室收缩时间间期(STI)进行了测定，结合临床资料判断左心室收缩功能，证明脉图法测定 STI 可作为无创伤性左室功能测定方法，并且认为它可用以判断左心室收缩力，可列作气虚辨证的一项客观指标。STI 异常是一种半定性的指标，据此不能作出心脏病的病因诊断。陈可冀等观测到促脉、结脉、代脉的病人饱餐后，其脉象图促、结现象变得更加明显，脉率增高且伴有波幅改变。

近年来，通过对高血压病、陈旧性心肌梗塞、冠心病、慢性胃炎等疾病的不同证候以及对心气虚、肝郁脾虚等证候类型的脉象图参数进行检测，发现不同证型的脉象图参数存在着一定的差异，对辅助辨证及鉴别证候具有一定的意义。费兆麟等通过对 62 例慢性胃炎患者脉象图的观察，发现脾胃气虚型者右关脉明显减弱；湿困脾胃型者右关脉增强；肝郁气滞型者左关脉增强；阴虚内热型者左关脉减弱，印证了“左关候肝，右关候脾胃”之中医传统学说。1986 年，黄世林等著书详论了脉象图方法、平脉和病脉脉

象图诊断标准、各种脉象的脉象图特征及临床意义,并附有临床病例的脉象图分析,内容全面,脉图成谱,是我国第一部脉象图研究专著。1991年,张威多等利用脉象图——寸口脉图、人迎脉图诊断冠心病,为心电图正常的轻症冠心病或不典型冠心病提供了早期诊断依据,并对冠心病特征性脉象图、诊断依据和鉴别诊断作了说明。

脉象图的出现标志着中医已掌握了实现脉象信息采集客观化的有效方法。但因各自所采用的仪器结构、性能不同,描记方法不同,故所绘各种脉象图的波形、各项测量指标的参数亦不一致,无法统一脉象图诊断标准,影响了脉象图的临床推广应用。今后的研究工作,应首先统一描记方法与描记结果,统一诊断标准,继之开展以中医理论为指导的各种病理脉象的全面研究。这对寻找临床辨证可靠依据以及疾病早期诊断和特异性诊断的指标,可望取得突破性进展。在脉象信息处理方面,采用微机脉象图判读,做到自动识别,完全实现脉诊客观化,将把中医脉诊提高到现代化水平,为中医学的发展做出贡献。

#### 参考文献

- 1 殷文治,费兆馥.上海中医药杂志,1983,1:47
- 2 陈德奎,李惜惜,等.中西医结合杂志,1983,3(4):232
- 3 黄世林,孙明异,中医脉象研究.北京:人民卫生出版社,1986
- 4 沈礼勇.山东中医学院学报,1990,14(2):49
- 5 张威多,张威勇.山东中医学院学报,1991,15(5):24

(山东中医药大学徐洪文教授撰)

**癌症患者青紫舌与舌脉异常** 青紫舌是中医血瘀证重要证候之一,但舌脉在传统中医舌诊中较被忽略,近年来已引起普遍重视。舌脉系指舌腹面两条静脉,卷起舌尖即可见到。在癌症诊断和治疗中,舌脉异常和青紫舌具有相同的重要价值。全国近30个单位大协作调查12448例癌症病人,青紫舌占53.45%;而与之相对照的5578例正常人,青紫舌仅占19.9%,癌症病人有青紫舌者为正常人2.7倍。后又调查万余例患者,结论相似。另调查1046例癌症舌脉异常者,占49.7%,相比5403例正常人,有青紫舌者仅占6.35%,前者为后者7.8倍。

青紫舌和舌脉常在癌症诊治中应用:(1)用于粗筛。1976年,河南省安阳县首先报道用舌象初筛食管患者,普查1315正常人中,紫舌192人,非紫舌1123人,经食管拉网检查,紫舌组中有食管癌22人,占11.7%,而非紫舌组均阴性。1978年,河北省肿瘤防治研究所亦以舌诊初筛食管癌、贲门癌,>30岁者189人,青紫舌174人,经拉网检查有8例癌症,而非紫舌192人中,无一例癌症。(2)辅助诊断。董国琛报道原发性肝癌患者,舌的两侧边缘呈紫色或青色有条纹状的或不规则的斑状黑点,境界分明,易于辨认,名为“肝癭线”。76例中有此线者59例,占77.69%。时隔13年,江苏省启东市观察28例原发性肝癌患者,具“肝癭线”者虽仅占39.3%,但与肝炎(10.2%)、其它癌症(0%)、其它疾病(1%)相比,差别显著, $P<0.01$ 。(3)用于辨病。白血病患者,紫舌常见于肝脾肿大和伴神经系统症状和出血者,故急性白血病患者紫舌表现远不及慢性白血病患者。(4)用于分期。上海中山医院分析100例肝癌,I期患者紫舌者占16.7%,II期患者紫舌者占43.5%,差别显著。北京广安门医院观察61例食管癌患者舌象,早期多淡红色及鲜红色,中期暗红色及青紫舌,晚期多光红色。上海肿瘤医院观察1238例肝癌患者,硬化型II期者紫舌占36.5%,III期者为51.49%,差别显著, $P<0.01$ 。中期者舌脉红紫色和淡紫色的占71.79%,晚期者舌脉青紫和紫黑色的达69.23%,差别亦显著, $P<0.01$ 。(5)用于分型。上海华山医院对548例癌症辨证分为虚证117人、虚实夹杂证321人、实证110人等3组,紫舌比例依次为5.98%、32.71%、40.00%,舌脉重度异常比例依次为9.72%、41.00%、53.85%,差别显著, $P<0.001$ 。(6)估计预后。陈效莲分析中药合并放疗的食管癌261例,其中72例舌现瘀斑,占28%,经中药治疗后,自行消退的共28例,占50.3%;瘀斑未退即死亡13例,其中6例死于肝转移。

可见青紫舌和舌脉异常在癌症临床应用范围较广,实用价值亦较大,值得重视。

癌症患者青紫舌和舌脉异常形成原理为:(1)微循环障碍。湖南中医学院对癌症与非癌症各50例患者的舌尖掌状乳头进行微循环的显微观察,癌症组中青紫舌19例(占38%),舌脉曲张46例(占92%);非癌症组中则分别为6例(12%),24例(48%)。两组掌状乳头血管清晰者分别为20%、55%,欠清楚者分别为50%、35%,磨损不清者分别为30%、10%,差别显著。可见微循环障碍是形成青紫舌与舌脉异常的原因之一。(2)血高铁血红蛋白。山东医科院观察93例癌症,其中红舌组19例,可疑暗青紫舌组41例,明显青紫舌组33例,这3组血高铁血红蛋白含量分别为 $0.028\pm 0.014\%$ 、 $0.086\pm 0.013\%$ 、 $0.1\pm 0.02\%$ ,青紫舌组明显偏高。若以 $>0.05\%$ 为界,3组分别为21.05%、60.98%、75.76%,有极显著差异, $P<0.005$ 。舌色与血高铁血红蛋白有关。(3) $H^+$ 浓度。湖南中医学院分析癌症与非癌症各50例患者,舌面 $H^+$ 浓度 $\mu\text{mol/L}$ 者分别为48%、40%, $100\text{nmol/L}$ 者分别为38%、34%, $10\text{nmol/L}$ 者分别为14%、26%。癌症青紫舌居多,故青紫舌偏酸性较多。(4)血液流变性。上海华山医院分析520例癌症患者,舌色分为淡红、红绛、暗红、青紫等4组,其血液粘度正常率分别为38.33%、16.75%、11.02%、4.32%,逐组下降, $P<0.005$ 。372例舌脉依正常及轻度异常、中等异常、重度异常分为4组,其正常率分别为39.29%、34.12%、10.17%、5.67%,亦逐组下降, $P<0.005$ 。另统计530例癌症患者舌脉与血液流变性、免疫功能、内分泌功能等三者关系,舌脉异常与免疫功能、内分泌功能均无关,而只与血液粘度有关,特别与纤维蛋白原、红细胞压积、全血粘度关系最为密切。江苏省中医研究所观察癌症紫舌与非紫舌各23例,正常人100例,其血液流变性九项指标中,紫舌组血浆粘度、血沉、血沉方程常数K值、纤维蛋白原等值均高于非紫舌组及正常人组,全血粘度紫舌组高于非紫舌组。研究青紫舌和舌脉异常与血液流变性关系文献最多,血液流变性改变是形成青紫舌和舌脉异常本质的原理已获公认。(5)免疫功能。河南省肿瘤医院观察55例食管癌患者化疗前后玫瑰花结形试验(ET-RFC)及紫舌变化发现,完全缓解与部分缓解患者中,57.1%的ET-RFC值上升,32.1%紫舌消失;无效及恶化患者中,77.6%的ET-RFC值下降,50%舌象恶化。(6)酸碱血气分析。贵阳中医学院等单位观察以肺癌为主的46例癌症患者,对照组87例均为50~60岁无慢性肺心病的,近1个月内无感染的健康老人,以及295例慢性肺心病患者,发现癌症患者具有6类舌质:淡白、淡红、红、淡紫、绛紫、青紫,其 $H^+$ 浓度逐组下降,29.51~34.67 $\text{nmol/L}$ ,且均为碱血症。与对照健康人组40.72 $\text{nmol/L}$ 相比, $P<0.01$ ;而 $P_{\text{CO}_2}$ 则逐组递减,与健康人组相比亦有差异,但 $P_{\text{O}_2}$ 无差异。另比较癌症组与慢性肺心病组的紫舌组(淡紫、绛紫、青紫),后者 $P_{\text{CO}_2}$ 值上升, $P_{\text{O}_2}$ 值下降, $P<0.01$ 。说明慢性肺心病患者通气不足,癌症患者通气过度,而健康人通气正常。由于癌症患者过度换气造成碱血症,氧离曲线左移,加重组织缺氧,故在相同 $P_{\text{O}_2}$ 条件下,癌症患者缺氧更为严重,水电解质紊乱,脑血管强烈收缩,支气管平滑肌收缩,气道阻力增大;特别在淡白、淡红、红、淡紫、绛紫、青紫等各舌质组中,逐组加重,这对进一步阐明各类舌质形成原理及其差异有重要意义。(7)微量元素。贵阳中医学院等观察食管、贲门、肺等癌146例,非癌肺疾病患者227例,正常人319例,检测血清锌与铜及全血锌、铜、铁、锰、镁等微量元素,发现血清锌中位数癌症紫舌组为0.909( $\mu\text{g/ml}$ ),非紫舌组为0.978,非癌症紫舌组为1.09,非紫舌组为1.186,除癌症与非癌症两组非紫舌间无差别外,各组 $P<0.05$ 或 $0.01$ ;血清铜中位数依次为1.308、1.269、1.155、1.00,各组 $P<0.05$ 或 $0.01$ 。癌症患者血清锌低于非癌症患者,血清铜则高于非癌症患者,两组中紫舌者又低于和高于非紫舌者。全血锌、铜结果相似,全血铁肺癌紫舌组含量低于非癌紫舌组,全血锰肺癌紫舌组含量则高于非癌紫舌组,全血锰肺癌紫舌组含量则高于非紫舌

组,  $P$  均  $< 0.01$ , 可见微量元素多寡确可影响各类舌质的形成。其机制有待深入研究。(8)形态学。上海第九人民医院以光镜检查 5 例舌鳞癌患者(紫舌 4 例, 红紫舌 1 例), 镜下粘膜上皮有不同程度增生, 上皮表层不全角化, 增生, 棘细胞肿胀, 毛细血管扩张、充血, 慢性炎细胞浸润。电镜检查一例舌鳞癌患者, 镜下角化层增厚 8~9 层, 伴少量残留细胞核, 颗粒层核周有空泡, 棘层中棘细胞内有大量空泡, 细胞间不连接, 细胞间隙明显增宽, 淋巴细胞浸润, 血管扩张。

#### 参考文献

- 1 中医诊断协作组, 肿瘤, 1987, 3: 129
- 2 陈健民、胡彩仙, 中西医结合杂志, 1988, 10: 590
- 3 中医诊断协作组, 肿瘤, 1988, 5: 280
- 4 陈健民, 国内外中医药科技进展, 1989, 138
- 5 胡彩仙, 陈健民, 中西医结合肿瘤杂志, 1991, 1~2: 32  
(上海医科大学附属华山医院陈健民副教授撰)

**舌诊** 舌诊又称望舌, 是中医诊断学的重要组成部分, 它随着中医学的发展而逐步完善, 成为中医诊病的一种特殊诊断方法。由于舌诊能客观、灵敏地反映机体的某些疾病, 又简便易行, 无创伤性, 因此, 成为中医客观化、规范化研究的重点内容之一。新中国成立以来, 中西医工作者不但对中医舌诊进行了大量的临床观察, 还运用多种现代科学的手段, 如血液流变学、血液动力学、微循环、病理学、细胞学、生物化学、免疫学、微量元素分析等对舌诊进行研究, 并取得了一定的进展。

早在春秋战国至汉代的中医典籍如《内经》、《伤寒杂病论》中, 就已有关于望舌诊病的记载。到元代, 舌诊已发展为诊断外感病的一种诊法, 并出现舌诊专著《伤寒金镜录》。清代温病学家叶天士将舌诊与卫气营血辨证联系在一起, 创立了温病的验舌诊断方法。傅松元著《舌胎统志》, 又将舌诊的适用范围扩充到内伤病。曹炳章著的《辨舌指南》(1917), 集历代医家关于舌诊之论述及中西医对辨舌察病的研究和见解熔为一炉, 是新中国成立前论舌诊病的集大成者。陈泽霖所著的《舌诊研究》, 基本反映了新中国成立后 50~60 年代舌诊研究的概况。

舌诊的主要内容包括望舌质与望舌苔两个部分。舌质指舌的肌肉脉络组织, 又称舌体。舌苔是舌面上附着的一层苔状物。舌质与舌苔的表现统称为舌象。正常舌象被概括为“淡红舌、薄白苔”, 即舌体柔软, 活动自如, 颜色淡红润泽, 舌面上铺有薄薄一层颗粒均匀、干湿适中的白苔。病理舌象由舌质、舌苔的异常变化反映出来。舌质的改变, 主要反映内脏的虚实和气血盛衰的变化。舌苔的异常, 主要表示疾病的性质、病邪的深浅及胃气的存亡。

望舌质的内容包括望舌神、舌色、舌形、舌态 4 个方面。舌神分有神、无神, 用以反映人体正气的存亡。异常的舌色有淡白、红、绛、紫 4 种。淡白舌主虚证、寒证; 红舌主实热证与虚热证; 绛舌主邪热入营与阴液损伤; 紫舌主热证、寒证与瘀血。舌形的异常变化有 7 种: 苍老舌主实证、热证; 娇嫩舌主虚证、寒证; 瘦薄舌主气血阴液亏虚; 肿胀舌主热证, 中毒病证; 裂纹舌多主热证, 虚证; 芒刺舌见于热盛内结; 齿痕舌多属脾虚, 水湿内停。望舌态指观察舌体动态的异常变化, 临床可出现萎软舌、强硬舌、震颤舌、歪斜舌、吐弄舌、短缩舌等, 多属重症。或为正虚, 由气血阴液亏虚、筋脉失养所致; 或为邪实, 由痰湿阻络、热入心包、肝风内动所致。

望舌苔的内容包括望苔色与望苔质两个方面。临床苔色有白、黄、灰、黑 4 种变化。白苔多主表证, 寒证。黄苔主里证, 热证。灰苔主里热证, 寒湿证。黑苔主里证热极, 又主寒盛。苔质的异常变化有: 厚薄反映病邪的部位和病势的进退, 薄苔为病邪在表, 厚苔为病邪入里; 润燥测知津液的盈亏, 润苔为津液正常, 燥苔为津液受损, 滑苔为水湿内停, 腐苔见于痰浊, 食积内停; 腻苔主脾失健运, 湿浊内盛; 剥苔主胃之气阴损伤; 有根苔多属实证, 热证, 胃气未衰; 无根苔主久病之虚证, 寒证, 表示胃气已败。

舌象的系统临床研究和实验研究始于新中国成立以后。正常舌象的研究资料表明, 淡红舌形成的有关因素为: (1)舌粘膜下固有层毛细血管数目, 血管壁结构、功能以及舌部微循环的正常状态。(2)血液中红细胞、血红蛋白的含量和正常的血氧饱和度。(3)舌上皮各层细胞的结构的排列, 特别是角质层的厚度, 可影响固有层血管红色的透出度。舌苔变化的主要因素为: (1)基底细胞的增殖速度。(2)溶酶体及其所含水解酶可影响角化速度。(3)桥粒的存在与自溶速度。桥粒消失, 相应部位的细胞则脱落。(4)膜被颗粒为细胞之间提供粘合的物质。(5)口腔内局部环境理化因素的改变。

临床常见异常舌象的研究资料表明, 淡白舌的形成与贫血、全血粘度和血浆渗透压降低、白蛋白合成障碍、组织水肿、消化功能障碍及某些内分泌机能不足有关。显微镜下观察微循环, 淡白舌的舌尖蕈状乳头萎缩, 数量减少, 血色变淡。病理切片显示舌粘膜变厚, 棘细胞大量增生。红绛舌多发生于急性化脓性感染、脱水、外科手术后、维生素 B 族的吸收利用障碍、基础代谢率升高、上消化道炎症、交感神经亢进导致唾液浆液分泌过少、高氮质血症、一定程度的缺氧及酸中毒, 尚与性激素的变化有关。病理切片可观察到丝状乳头明显萎缩, 粘膜固有层的毛细血管数目增多、扩张充血或出血。紫舌多见于心血管疾病、肝胆系统疾病与肿瘤, 其形成主要与血氧饱和度下降、静脉瘀血、血粘度与血小板聚集性升高、毛细血管扭曲畸形和脆性增强等因素有关。紫舌的微循环障碍明显。齿痕舌与贫血、血浆蛋白下降引起的组织水肿有关。舌部血管的平滑肌细胞、舌肌细胞内水肿滞留也是齿痕舌形成的原因。光剥舌的舌印脱落细胞显示, 中层细胞大量出现, 尤其是小多角形细胞的数量与病情的轻重成反比, 说明有上皮细胞脱落过快、营养不良和炎症的存在。裂纹舌的形成与舌粘膜萎缩有关。超微结构示次级乳头缺乏, 真皮乳头泡沫细胞减少或消失。白苔常出现丝状乳头的变化, 如白厚苔的丝状乳头角质突起增多而致密。通过荧光舌象还观察到, 病理性白苔与正常白苔的红色荧光发生率及白色荧光发生率有显著差异。黄苔多见于炎症感染与发热。当白细胞  $> 1.5$  万/ $\mu\text{l}$  时, 黄苔出现率可达 72.9%。胃粘膜充血、水肿、糜烂出血时, 多出现黄苔。黄苔时可见丝状乳头增生, 角化增剧, 舌粘膜表面聚集大量细胞及炎症渗出物。黄苔的形成与优势菌群产生的色素及霉菌生长有关。灰黑苔可见于高热、脱水、毒素刺激、中枢神经系统及胃肠功能失调、霉菌与产色微生物增殖、慢性炎症及肾虚时, 病理切片可见粘膜上皮增厚、乳头延长、基底细胞增生, 棘细胞层上部细胞间桥消失, 伴有明显空泡和角化, 丝状乳头表面覆有角化与角化不全物质及成堆球菌、霉菌的菌丝、芽胞等。厚腻苔多见于急重症如心血管病、脑血管病、肝炎、乙型脑炎等, 亦与消化功能紊乱密切相关。厚苔时的酸刺激后唾液淀粉酶明显降低。腻苔的形成与上皮细胞角化不全有关。厚腻苔时的唾液溶菌酶下降明显。

舌脉的研究在 70 年代以后发展较快。1983 年明确规定了“舌脉”的名词及分部。正常人的舌脉隐现于舌粘膜下, 舌脉主干的长度不超过舌尖到舌下肉阜连线的  $3/5$ , 舌脉管径以 2.7mm 为界。异常舌脉主要表现为舌脉曲张, 除主干长宽超出正常外, 舌下外带尚可能出现血管扩张。舌脉曲张是瘀血的重要特征, 多见于肿瘤、心血管疾病和慢性肝病, 其形成与静脉瘀血、静脉压升高、缺氧、血液的高粘状态等因素有关。

经过大量的实验研究及临床观察, 各种舌象的形成原因已经初步阐明, 并且基本掌握了急性感染性疾病、高血压病、脑血管疾病、冠心病、肺心病、慢性胃部疾患、肿瘤病症的舌象变化规律。为了便于统一标准观察舌象, 在 80 年代开始研制舌诊仪, 利用仪器获得舌质、舌苔的信息, 并进行计算机处理, 这一工作促进了舌诊的客观化研究。在基础理论研究方面, 还开始利用舌象动物模型, 以促进对人类舌象变化机理的探讨。今后, 将通过进一步研究来阐明各种病证的舌象变化机理, 使舌诊成为中医独特的并与现代科学相结合的诊断方法之一。

#### 参考文献

- 1 戴豪良,等. 中医杂志,1982,5~62
- 2 陈泽霖,等. 中西医结合杂志,1984,4~255
- 3 陈连起,等. 中医杂志,1987,1~57

(北京中医学院杨维益、梁峰撰)

**截断扭转疗法** 系针对疾病的特定病程阶段明显的或潜在的自然发展趋向,采用一定的治疗措施加以截断,从而扭转病势,使其向有利的方向转化。

“截断扭转”疗法由姜春华于1978年正式提出。他针对叶天士所创立的卫气营血的温病传变规律以及“在卫汗之可也”、“到气才可清气”、“入营犹可透热转气”、“入血直须凉血散血”等治疗原则,结合临床诊疗实际,认为叶氏虽然已揭示了温病的发展规律,但没有掌握温病的有效治疗方法。于是提出治温病要使用截断扭转疗法,即在温病的初起时使用苦寒清解之剂以阻遏病势,扭转疾病的进一步发展,使温病在初起阶段即被消灭,不必拘泥于叶氏的定论。并举肠伤寒与大叶性肺炎为例,认为治肠伤寒,不必分卫气营血步骤,开始即用大黄、黄芩、黄连;治大叶性肺炎,不用卫分气分之说,初则以鱼腥草、鸭跖草之类清热解毒,疗效均很高。此说一出,即引起中医界的强烈反响,或褒或贬,不一而足。以沈仲圭为代表的反对者的主要观点是,姜氏斥叶氏能识温病,而不能治温病之论有失公允,并强调温病初起即用苦寒沉降之品有悖温病分阶段辨证论治的精神。同时,重申隶属于温病范畴的肠伤寒,初起绝不可舍上焦而治下焦,径用苦寒沉降,都遏病邪,隶属于风湿范畴的大叶性肺炎,初起又“必须宣透”,切不可过用寒凉,影响气机。且以《中医辞典》所载类似截断方药的时下习用的“感冒退热冲剂”,用治感冒发热、上呼吸道感染,无论风热、风寒效均不佳为例以说明之。然而以蒋振华为代表的赞成者,则从不同的角度举例证实,温病早期使用苦寒清解之类方药,确实有助于截断温病的传变,扭转病势发展,提高温病的治疗效果,而在使用过程中并未发现影响病邪宣透的弊端,并在其方药应用的具体形式上有所改进和发展,如采用多剂型、多途径的给药以有效地针对温病传变迅速的特点,把住气分关。随着争鸣的展开和时间的推移,这一疗法已成为外感热病的常用治法。张笑平认为,截断扭转疗法实属中医度势论治派生而出的一种逆势治法,此法合之为一,分之又当为二,即截断与扭转实为有着一定差异的两种治疗方法,其差异就在于具体疾病所呈自然发展趋势的表现程度存在隐显之别,由此分别所生治法的立足点则有防、治之异,即扭转疗法是指借某种针锋相对的治疗方法和措施来扭转具体疾病已经出现的明显发展趋势;截断疗法是指借某种离防于治、防治结合的方法和措施来阻断具体疾病即将出现的潜在发展趋势(这里所说的潜在发展趋势,乃指从脏腑间生克制化关系所引出的定向转变),从而在理论上将截断扭转疗法归属于中医“逆势论治”范畴,并与“顺势论治”一起,纳入中医的度势论治学说。

综上所述,“截断扭转疗法”已被中医界承认和采用,目前该法被广泛地运用于对外感热病和内伤杂病的治疗,但单纯地运用传统的脏腑气血、六经和卫气营血等辨证理论已不能适应当前临床的实际需要。故此,如何运用现代科学技术、中西医结合方法,深入探讨不同病种的病理变化和发展转变的规律,寻找针对某一病种的特效方药或系列方药,以及有效剂型和给药途径,使之能迅速阻遏病势发展,已成为当前和今后一个时期对“截断扭转疗法”进一步研究和深化的方向。

#### 参考文献

- 1 姜春华. 新医药学杂志,1978,8,8~13
- 2 沈仲圭. 新医药学杂志,1978,11:6
- 3 姜春华. 新医药学杂志,1978,12:3
- 4 萧康伯. 新医药学杂志,1979,3:15
- 5 向柏森. 新医药学杂志,1979,3:16
- 6 杜树明. 中医杂志,1987,7,69~70
- 7 蒋振华. 新医药学杂志,1979,3,14~15

- 8 张笑平. 江西中医药,1988,1:39
- 9 张笑平,主编. 现代中医各家学说. 北京:中国中医药出版社,1991,23~26

(安徽中医学院张笑平教授撰)

**解表法的临床与机理研究** 解表法,又称汗法,是指应用发汗、解肌、透疹等方药,或采取针灸、推拿、熏蒸等外治措施,以祛除在表病邪的治疗方法。解表法的主要作用机理是通过疏表发汗、开泄腠理、调和营卫、宣发肺气使六淫邪气从卫表外解。解表法是外感病初起表证的主要治法。外邪入侵,卫气郁遏,腠理闭塞,汗液不得外泄,必须采用解表法,使腠理开泄,邪气祛除,营卫协和,阴阳平衡而早期康复。由于大部分感染性疾病早期均表现为表证,见有恶寒、发热、头痛、身痛、脉浮等症,解表法能使之得到解除,避免病邪日久入里。其他肌表病变如疮疡、发疹等,以及部分各科杂病均可用解表法而取得疗效。

《内经》早已指出发汗是解除表邪和退热的重要方法。如《素问·阴阳应象大论》:“其有邪者,渍形以为汗;其在皮者,汗而发之”;《生气通天论》:“体若燔炭,汗出而散”;《玉机真藏论》:“今风寒客于人……可汗而发也”等论述,并载有发汗的多种具体方法,包括渍形、热浴、药熨、按摩、针刺、服药等。《伤寒论》详细地讨论了汗法的运用,所述有关条文达140条之多,主要用于太阳经证、太阳经合病、自汗证等,对汗法的适应证、使用宜忌和误汗的变证、逆证及其救治方法均有明确表述。《金匮要略》还用汗法治疗风湿、历节、温疟、水气、溢饮、肺胀、产后中风、劳复等病证。自宋代朱肱指出用麻黄、桂枝等解表剂要因人而异,不可墨守陈规后,金代刘完素提倡治疗外感热病表证用辛凉或甘寒之剂以发表。金代张从正更明确地将解表法区分为辛温、辛凉二法,强调因地、因时、因人制宜:“南陲之地多热,宜辛凉之剂解之;朔方之地多寒,宜辛温之剂解之。午未之月多暑,宜辛凉解之;子丑之月多冻,宜辛温解之。少壮气实之人,宜辛凉解之;老耆气衰之人,宜辛温解之。病人因胃寒食冷而得者,宜辛温解之;因役劳胃暑而得者,宜辛凉解之。病人禀性怒急者,可辛凉解之;病人禀性和缓者,可辛温解之。病入两手脉浮大者,可辛凉解之;两手脉迟缓者,可辛温解之”,并将汗法列为祛邪三法之首,指出除辛散解表内服药外,“灸、蒸、漂、洗、熨、烙、针刺、砭射、导引、按摩,凡解表者,皆汗法也”。清代叶桂创立的卫气营血辨证,指明汗法是外感热病卫分证的主要治法,所谓“在卫汗之可也”。他直接采用辛凉之品或用辛温配辛凉等而制定的辛凉解表法,包含不少新意。清代程国彭详述了汗法的应用,指出“有当汗不汗,不当汗而汗,当汗不可汗而妄汗,当汗不可汗而又不可以不汗,汗之不得其旨”等误治情况,使解表法的运用更趋完善。

近代对解表法的应用更为具体精细,分类颇多,迄今尚未能统一。如近年朱建贵以病邪有异、兼夹不同、体质悬殊,将针对表证的汗法分为:(1)辛温发汗法,用于风寒束表之证;(2)辛凉疏表法,用于风热袭表之证;(3)益气解表法,用于气虚外感之证;(4)温阳发汗法,用于阳虚外感之证;(5)养血发汗法,用于血虚外感之证;(6)滋阴发汗法,用于阴虚外感之证;(7)化湿发汗法,用于外感夹湿、湿在肌表之证;(8)润燥发汗法,用于外感燥邪之证;(9)利水发汗法,用于外感风邪、内停水饮之证。而田广秀等认为汗法除分辛温发汗法用麻黄、桂枝等和辛凉发汗法用桑叶、菊花等2类外,还演变为以下几类:(1)扶正解表,如参苏饮;(2)滋阴解表,如加减葶苈汤;(3)养血解表,如葱白七味饮;(4)祛湿解表,如九味羌活汤;(5)理气解表,如香苏饮;(6)祛暑解表,如香薷饮;(7)利水解表,如越婢汤;(8)祛痰解表,如仙方活命饮。董淑范则提出汗法的变化应用有13种之多:(1)发汗解表,包括辛温发汗、辛凉发汗、清暑祛湿解表及益气、助阳、养血等解表法;(2)解表散寒、祛邪止痛,如痛证用川芎茶调散、吴茱萸汤等;(3)解表散邪止痉,如痉证用羌活胜湿汤;(4)解表清热、利湿退黄,如阳黄兼表邪用麻黄连翘赤小豆汤;(5)发汗宣肺、行水消肿,如阳水用越婢加术汤、防己黄芪汤;(6)解表清热止痢,如治

痢疾初起用人参败毒散；(7)解表祛邪、化湿止泄，如治泄泻用藿香正气散；(8)解表疏邪、化浊止呕，如治呕吐用玉枢丹；(9)调和荣卫止汗，如自汗用桂枝汤；(10)发汗祛邪平喘，如治哮喘用麻杏石甘汤；(11)发汗化饮，如治支饮用小青龙汤；(12)发汗祛邪消痈，如治肺痈用银翘散等；(13)解表散邪止咳，如治咳嗽用三拗汤等。

对解表法作用机理的认识已逐渐有所深入，但仍存在分歧。如不少学者仍强调解表法是针对解除表证的一种治疗方法，认为汗法是促进汗腺分泌、通过发汗解除表证，是开泄腠理、调和营卫、祛除表邪的一种治疗方法；是运用各种发汗药物组成适当方剂，当邪在皮毛、肌表尚未入里之时，使邪从外解以控制疾病发展，达到早期治愈目的的一种治疗方法；是使由于外邪侵袭肌表、破坏营卫的自稳调节功能而失稳态恢复到适度稳态的一种治疗方法。但另有不少学者则认为解表法不独治疗表证，也可治疗某些里证。因为汗法不独用于外感病表证，在各科杂病中运用范围也相当广泛，如黄疸、水肿、痹证、胃脘痛、老年性尿频、泄泻、无汗症、带下、胸痹、多种变态反应性皮肤病、痲疹、结膜炎等均可用解表法而取得显效。因而认为只要具备下列条件即可使用汗法：其一，凡邪客于肌肤、毛窍、筋骨、玄府、营卫腠理等部位；其二，凡因冒雨涉水、感受风寒、水饮内留、水湿泛滥、冷热失调、营卫失和等病所致各种病证；其三，凡具有疼痛（身痛、腰痛）、身拘板实，或恶风、或恶寒，或汗出，或咳嗽，或水肿、纳差、舌苔白或腻、脉浮大而长等脉证。有人还注意到解表法与调理脾胃的关系至为密切，认为营卫出于中焦，卫表之气宣达与脾胃功能有密切关系，故增益胃气可助解表祛邪，而临床许多方药既可治表，又可调理脾胃；“阳气闭塞”是表证与脾胃不调的共同病机，畅达阳气是共同的转机。解表法结合现代疾病的临床运用，近年也取得不少新进展。伍炳炳将解表法用于治疗各种肾炎取得较理想疗效，分型施治为：(1)风寒束肺型：表实用麻黄加术汤，表虚用防己黄芪汤；(2)外寒内饮型：小青龙汤加减；(3)外寒里热型：越婢汤加减；(4)风湿在表型：麻黄杏仁薏苡甘草汤；(5)风湿郁热兼入血分：麻黄连翘赤小豆汤；(6)风热型：桑菊饮、银翘散。刘兴福用解表法使全身发汗治疗破伤风55例，结果治愈51例，平均住院天数仅11.9d。他如董长富用重剂越婢加术汤合乌头汤加减作为汗法基本方治疗类风湿性关节炎；阮诗玮采用汗法治疗夏季热，均获得良好疗效。

解表法的实验研究也已取得一些成果，归纳其所阐明的作用机理有以下几个方面：(1)抗菌、抗病毒作用。如菊花、牛蒡子、白芷、细辛、桂枝、桉柳等发汗解表药均有抗菌作用，麻黄、藁本、白芷、桔梗、柴胡等有抗病毒作用。(2)抗炎、解热作用。其解热原理包括排除致热源、镇静体温中枢、舒张皮肤血管，所含挥发油可使汗腺分泌加强等。(3)镇静、抗惊、镇痛作用。(4)调整免疫功能。如麻杏石甘汤、银翘散都有促进巨噬细胞或白细胞的吞噬能力，桑菊饮加减比合霉素吞噬指数大2.8倍，吞噬力量高2.6倍；又如感冒合剂可限制病毒在激活的淋巴细胞内繁殖，抑制脾脏抗体形成细胞，减少免疫复合物形成。(5)扩张血管，改善循环状态，增加心肌营养，提高心血管生理功能，偏凉性的解表方药还能降压、减慢心率，偏温性的解表方药能升压、加快心率。(6)改善机体反应状态，排泄病理产物，调整代谢状况，促使病变向好的方向转化。(7)祛痰、镇咳、止喘作用。其机理与内含祛痰、平喘、镇咳成分，可抗菌消炎，减轻炎症刺激，能改善循环状况等因素有关。(8)利尿作用。解表方药多因含利尿成分，因而可改善肾血流量，部分影响肾小管重吸收，抗变态反应，改善内分泌调节机能，退热而使水液损耗下降等到利尿作用。(9)增强消化功能。解表药有提高味觉、刺激嗅觉反射、促进消化液分泌、恢复胃肠正常容积、促进肠蠕动等作用，从而增强消化功能。通过实验，证实解表方药往往能同时起到驱除病因、解除症状、调节机体的反应状态等作用。

解表法的文献研究方面已做了大量工作，全面理解与掌握前人的临床经验与学术思想已较成熟，虽有分歧意见，只要进一

步明确其应用范围就可取得共识。实验研究还较初步，大多停留在一些现象的观察，汗法透汗的定量分析和各种汗法的具体作用环节将是20世纪内的重点研究课题，至于全面解释本法在治疗疾病中所起的作用仍需做进一步的努力。

#### 参考文献

- 1 赵章忠. 中医年鉴, 1984, 60~62
- 2 田广秀, 等. 河北中医, 1984, 2: 11
- 3 朱建贵. 中级医刊, 1985, 2: 17
- 4 董淑范. 中医函授通讯, 1988, 2: 20
- 5 万友生, 等. 中医杂志, 1989, 4(7): 4
- 6 陈景河, 等. 中医杂志, 1990, 3: 4
- 7 闵漱石. 上海中医药杂志, 1990, 5: 6
- 8 周文祥. 陕西中医, 1991, 4: 191

(上海中医学院赵章忠教授撰)

#### 通里攻下法 the method of relaxng the bowels in order

to eliminate the internal heat 通里攻下法简称下法，是根据《素问·阴阳应象大论》“其下者泻之于内”及“其实者散而泻之”等原则制定的，通过通便、下积、泻实、逐水以消除燥结、积滞、实热、水饮等证的一种治疗方法。具有荡涤胃肠、泻热散结、活血化瘀、清热解毒等功用，临床根据药物的性味和功用特点分为寒下、温下、润下、攻补兼施。实证、本虚标实证、虚实夹杂证者，都可应用下法治疗。

在通里攻下法研究领域，治疗急腹症是一个十分活跃的课题。1958年，天津医学院吴威中在中西结合领域探索了用下法治疗急腹症的可行性；60年代中期，用下法治疗急腹症进入大量临床实践阶段，《中华外科杂志》等刊物登载了大量文章，验证其有效性，研究其规律性。70年代，下法治疗急腹症进入机理研究阶段。临床、实验研究的逐步深入使其作用机理得到初步阐明，科学性得到充分论证，并于1971年召开第1届中西医结合工作会议上，交流了急腹症研究经验。其后，天津南开医院和遵义医学院共同创办了《中西医结合急腹症通讯》，又共同主编了《新急腹症学》，汇报了研究成果。

80年代至今，通里攻下法研究进入新的发展阶段。由于基础医学的研究深入和先进诊疗仪器的出现及新的实验方法的应用，下法已不局限于急腹症，而扩大到其他系统的疾病，有关机理研究也向纵深发展。

在通里攻下法诸多功用之中，增强胃肠道功能、消除梗阻是最重要的作用。因为胃肠道等消化系统疾病病位在六腑，而“六腑以通为用”，“不通则痛”。不通——胃肠道、胆道、胰管的梗阻——是急腹症的基本病理，而疼痛是其临床主要表现。因此，下法治疗急腹症，主要是疏通梗阻、解除疼痛。由于某些梗阻本身就具备一定的可解除性，所以，通过有效地调节胃肠道运动，梗阻就有可能被解除，正常的通畅性一经恢复，疼痛也就随之消失，此即“通则不痛”。下法治疗梗阻，正是通过这种机理来实现的。实验资料表明，所有通里攻下方药都具有增强胃肠道运动的作用，其作用多来自增强胃肠道内液量和兴奋平滑肌两个方面。因在使用家兔小肠分段结扎法比较通里攻下方药对肠腔内液量影响时，发现大承气汤组肠腔内液量为生理盐水组的数倍以上，而去芒硝、巴豆组的，甘露组的，大黄组的肠腔内液量相当于生理盐水组的2~3倍，显然复方大承气汤作用强于单味药。此外，大黄的泻下作用还与肠道内粘膜向肠道内分泌水分有关。对于兴奋肠管机理的研究，天津南开医院发现，大承气汤不仅能提高炭末在完整小鼠消化道内的推进率，而且对摘除双侧肾上腺、切断双侧迷走神经及用阿托品阻断后的小鼠仍有作用，而且只口服有效，静脉给药无效。由此认为大黄、大承气汤类通里攻下方药对肠管的作用，可能是直接兴奋肠管平滑肌的结果。临床用下法治疗机械性的、麻痹性的、粘连性的、蛔虫性肠梗阻的、肠扭转的、肠套迭等急腹症及内热积滞的、热结旁流诸证，都证明具有增强胃肠道运动、消除梗阻的作用。



调节胆系功能、利胆排石也是下法的一个重要作用。胆附于肝,有经脉互相络属,胆汁来源于肝之余气,肝的疏泄功能正常与否直接影响胆汁的分泌排泄。若胆道梗阻,胆汁排泄不畅,则发为胆囊炎,进而影响胰液分泌排泄,则又易发胰腺炎。胆系疾病的特点是淤和滞。胆汁胰液淤滞不畅,日久发为胆囊炎、胰腺炎、胆道结石诸症。下法治疗胆系疾病的目的是疏通淤滞,它是通过影响胆汁的流量及胆道括约肌的运动来实现的。实验表明,通里攻下方药能明显影响胆道运动,增强胆分泌和排泄胆汁的功能。动物模型显示,下法方药能增加肝胆汁流量,降低奥狄氏括约肌的紧张力,而对胆石症,胆道括约肌收缩波呈先减少再加强的双向变化,排石前收缩波增多,波幅增高,然后突然消失,压力下降,表明胆囊胆道括约肌运动的改变可能是排石的动力之一。由此可见,通里攻下方药治疗胆系疾病有利于排泄胆道内淤积的胆汁及结石,降低胆系压力,缓解胆绞痛。临床用法治疗急性慢性胆囊炎、胆道蛔虫、胆道结石等疾病及黄疸、胁痛证,也是基于这种原理。

增加肠血流量也为下法所特有。血液以流通为顺,停则瘀滞;瘀血一经形成,则影响局部或全身的血液流通,产生疼痛,进而形成症积,产生“瘀血不去,新血不生”等不良后果。实验资料表明,通里攻下方药能增加肠血流量,活血化痰,对治疗炎症疾病和出血性疾病有着重要意义,它能增加肠壁及腹腔脏器的血氧供应,有利于保存肠壁生理功能,消除瘀血,改变肠腔内腐败物质分解及细菌学状态,有利于腹腔渗出液的吸收。实验资料表明,大黄、芒硝、巴豆对小鼠腹腔内瘀血有加速吸收作用,利于炎症和瘀血的消散。临床以下法治疗急性慢性肠炎、阑尾炎、坏死性肠炎、出血坏死性胰腺炎、伤寒肠出血、痢疾等,都证明下法兼具活血化痰作用。

此外,下法还能促进腹膜吸收,控制感染。腹膜对等渗液、血液、炎性渗出物、微生物颗粒有强大的吸收能力。研究资料表明,部分通里攻下方药有加强腹膜对瘀血和炎性渗出物吸收和抗菌消炎作用。如大黄有效成份是蒽醌衍生物,其中尤以大黄酸、芦荟素对金黄色葡萄球菌、溶血性链球菌的抑制作用最强。大承气汤对炎症早期患者具有调整毛细血管通透性和减少渗出液的作用,对炎症后期增生的肉芽组织有明显的抑制作用,临床用以治疗腹膜炎、肠炎、阑尾炎、痢疾等。

近年来,有关通里攻下方药研究取得新的进展。北京中医学院王永炎领导的中风病研究组,采用通腑化痰法治疗中风病,取得了可喜的成绩,为下法的研究开辟了一条新的途径;用于肝硬化、肝腹水、上消化道出血、流行性出血热、糖尿病、弥漫性血管内凝血、重症肝炎等疑难病的治疗,以下法为主,配合其他治法如活血化瘀等,都取得一定成绩。

由此可见,通里攻下方药具有多方面的药理效应,而尤以大黄和大承气汤表现得最为明显。尽管下法临床应用范围非常广泛,但只是在治疗消化系统疾病方面研究得比较深入细致,对其他疑难病症尚缺乏系统的探讨。今后在开展生理、病理学研究的同时,还要开展系统药理学及临床药理学的研究,使其既有深度又有广度。

#### 参考文献

- 1 吴威中. 中西医结合杂志(中西医结合 30 年特集 I), 1988; 8: 49~51
- 2 田在善, 等. 天津中医, 1988, 1: 25~28
- 3 俞平, 等. 中草药, 1988, 19(12): 34~37
- 4 何国兴, 等. 中医药信息, 1989, 2: 38~43
- 5 王智华, 等. 上海中医药杂志, 1990, 12: 40~42
- 6 尤胜义, 等. 中西医结合杂志, 1991, 11(3): 162~164

(中国中医研究院周超凡研究员、于智敏硕士撰)

**清热解毒法的临床与研究** 清热解毒法是指清解邪热毒火的一种治疗方法。清热解毒法具有清热、泻火、解毒作用,不仅有抗菌、抗病毒、消炎、解除毒素作用,而且还有调整免疫功

能、改善微循环、调整脂质代谢、保护细胞功能、抗肿瘤、抗突变反应等作用。感受风热、暑热、湿热、燥热等温热之邪;或先受风寒、寒湿、凉燥诸邪,郁而化火;或七情郁结,或偏嗜炙火燥辛热之品,或过服温热之剂,以致脏腑阴阳气血失调,遂成阳热亢盛之变。热盛则成毒,直接感受疫毒或毒邪亦可成毒。其证或发于头面,或聚于胸膈,或充斥内外,或壅遏上下,见有头面红肿、咽喉不利、胸膈烦热、口舌生疮,或语言错乱、发斑、吐血、衄血,或便秘溲赤、下肢红肿,或痈疽疔疮等各种热毒炽盛之症,皆当以清热解毒法治之。由于热毒之证广泛地存在于多种外感热病或内伤杂病过程中,清热解毒法对其具有确切疗效,故此法的具体应用和作用原理具有重要的研究价值。

《内经》虽尚未明确提出清热解毒法,但其“热者寒之”的治疗原则已包含寒凉的清热解毒药的运用。《伤寒论》中的大黄黄连泻心汤、黄连汤、白头翁汤等方药,《金匱要略》中应用的多种清热解毒方药,均充分表明仲景已将清热解毒法广泛地应用于临床。唐朝孙思邈已明确提出热毒概念,并主张对外感热病当着重应用清热解毒法。《外台秘要》引崔氏方的黄连解毒汤(黄连、黄芩、黄柏、栀子)是以解毒为目的而确立的第1方,旨在直解心经火毒,并可治一切火毒壅盛于三焦之证。此后,医家创立的清热解毒之剂相继不绝,如《卫生宝鉴》载有普济消毒饮以治大头天行;《疫疹一得》立有清瘟败毒饮,称其为大寒解毒之剂,治温疫一切火热毒毒;《妇人良方》创仙方活命饮,为清热止痛消毒良剂,对一切疮疡热毒皆有良效;《医宗金鉴》出五味消毒饮,亦系清热解毒、消散痈肿疔疮之名方;《验方新编》载四妙勇安汤,配活血止痛于清热解毒方中,可使脱疽热毒逐步散解;《外科全生集》制犀角丸,集清热解毒、化痰散结、活血祛瘀于一体,可令癰肿、瘰疬、流注等病证之热毒消减。其他更有西黄丸、牛黄醒消丸、内疏黄连汤、清咽利膈汤、外科蟾酥丸、六神丸等相继发明,近年又有大量草药发掘应用,于是清热解毒之法日趋丰富。现常用于临床的清热解毒药计有大黄、黄芩、黄连、黄柏、栀子、金银花、连翘、蒲公英、紫花地丁、蚤休、贯众、白薇、射干、马勃、山豆根、挂金灯、金果蓝、大青叶、板蓝根、紫草、绿豆、半枝莲、半边莲、鱼腥草、金荞麦、红藤、败酱草、白花蛇舌草、白毛夏枯草、白头翁、秦皮、马齿苋、穿心莲、鸡胆子、土茯苓、墓头回、野菊花、千里光、四季青、万年青、牛黄、犀角等。

近年来对清热解毒法应用于急性传染病或其他感染性疾病的临床疗效作了不少观察,如浙江省余姚县人民医院协定的乙脑1号方(鸭跖草、大青叶等)和乙脑2号方(生石膏、大青叶等)治疗流行性乙型脑炎,能迅速控制高热而取得良好疗效;湖南省湘潭县中医院用乙脑合剂(银花、连翘、蟾蜍菊等)治疗重型乙型脑炎,也取得卓效。济南市传染病院用清热解毒汤加减(大青叶、栀子、黄连等)治疗暴发型肝炎,南京市传染病院用虎黄合剂(虎杖、生大黄、苦参等)为主治疗重症肝炎,于厥然而用清解活血汤(金钱草、败酱草等)治疗慢性活动型肝炎,均取得较好效果。武汉市传染病院等用清热解毒药治疗流行性出血热,其病死率显著低于对照组。南京中医学院附属医院等用清热解毒四方为主治疗流行性出血热 285 例,也有明显的降温和阻断病程演变的效果。周仲瑛用清瘟合剂治疗流行性出血热,其降温效果及对病情程度、免疫功能、血液流变学的影响等均明显优于对照组。祝江迁等用“热毒清糖浆”(金银花、大青叶等)治疗小儿外感高热 174 例,结果是速效 31 例,显效 71 例,良效 45 例,有效 25 例,总有效率为 98.85%。刘征利等用清热解毒灵(金银花、板蓝根等)治疗儿童流行性咽结膜炎,也取得很好疗效。他如流行性腮腺炎、肠伤寒、麻疹并发肺炎、风疹、流脑、痢疾、猩红热、百日咳、坐板疮、急性扁桃体炎、急性咽炎、支气管扩张感染、胸膜炎、肺炎、结核病、肝胆感染、泌尿道感染、结膜炎、外科感染、普通感冒、慢性咽炎、带状疱疹等用清热解毒法治疗也均取得不同的较好疗效。清热解毒方药也被广泛应用于各科杂病中,如中风、高血压、老年性痴呆、心血管疾病、慢性支气管炎、肺心病、慢性鼻窦炎、慢性胃炎、风湿热、各种皮肤病、各种妇科疾病、伤骨科病证及虫蛇咬伤

等伴有热毒证候者,各种报道都反映出获得良好效果。恶性肿瘤多应用大剂量清热解毒药以清解其热毒,如半枝莲等治原发性肺癌、肠癌,龙葵草等治肝癌、骨癌,山豆根等治鼻咽癌、膀胱癌,白花蛇舌草治食道癌、肠癌等,山慈菇、蒲公英等治乳癌,土茯苓等治宫颈癌,紫草、穿心莲等治绒毛膜上皮癌等均取得一定疗效。

实验资料表明,清热解毒法具有多方面的药理作用:(1)抗病原微生物作用。绝大多数清热解毒药,可直接抑制或杀灭多种细菌,且相互有协同作用。有些清热解毒药对耐抗生素的细菌依然有效,如连翘、穿心莲、板蓝根等对耐药的绿脓杆菌有效。连翘、贯众、蚤休、板蓝根、黄连、黄芩、紫花地丁、鱼腥草、紫草等均有抗病毒作用。白头翁、黄连、苦参、鸡胆子有抗阿米巴原虫作用,白头翁、苦参有抗滴虫作用。不少清热解毒药的抑菌有效成分已被提取,如黄连的黄连素,黄连、黄柏的小檗碱,黄芩的黄芩甙和黄芩素,金银花的绿原酸,连翘的连翘酚,秦皮的秦皮乙素,鱼腥草的癸酰乙醛等。对部分有效成分的作用原理也取得明确认识,如黄连素通过干扰细菌对维生素的利用,抑制微生物的糖代谢和抑制细菌蛋白的合成等多个环节而发挥抗菌作用。(2)解毒作用。许多清热解毒方药具有明显的解毒作用,能迅速地改善急性感染性疾病的毒血症症状。其机理也是多方面的,主要为中和内外毒素,使细菌内毒素灭活,加速毒素从体内廓清,对抗病原微生物毒素的病理反应等。黄连等在未达到抑菌作用浓度时亦能明显抑制金黄色葡萄球菌凝固酶的形成并减弱其毒力,同时还能促进白细胞的吞噬功能。(3)解热作用。清热解毒药如牛黄、黄连、黄芩、金银花、连翘、大青叶、紫草、穿心莲等对非特异性刺激所致的发热模型具有明显的解热作用,其作用原理并非发汗散热,主要是通过增强肾上腺皮质功能、消除病原微生物以及减少内源性致热物质的释放来实现。(4)抗炎作用。清热解毒药多对炎症早期毛细血管通透性升高,及渗出、水肿或炎性增生有明显的抑制作用;抗炎作用还包括通过皮质激素等多种途径来实现。如金银花能抑制炎症渗出及炎性增生,连翘只抑制炎性渗出,黄芩的黄芩素能阻止变态反应中抗原抗体复合物的形成,复方连翘注射液(连翘、金银花、黄连、板蓝根)对人工关节炎的抗炎作用与提高肾上腺皮质功能有关。(5)调整免疫功能。黄连、黄柏、黄芩、金银花、鱼腥草、穿心莲、白花蛇舌草、广豆根、大青叶、野菊花等均能增强细胞吞噬能力,黄柏、白花蛇舌草、金银花还能促进脾脏抗体生成细胞增生,金银花、山豆根、三草汤(白花蛇舌草、夏枯草、甘草)能促进抗体生成,白花蛇舌草、黄柏更能使T细胞增殖,金银花、蒲公英、黄连、黄芩、紫花地丁尚可促进淋巴细胞转化,鱼腥草还能提高溶菌酶活动和血清溶菌素水平,增强机体非特异性免疫功能。清热解毒口服液(银花、连翘、黄芩、地丁等)对环磷酰胺所致免疫功能低下的小鼠外周血白细胞、IgG、溶血素等具有明显的提高作用。(6)抗肿瘤作用。清热解毒药具有多方面抗肿瘤作用,如可激发或增强淋巴细胞的细胞毒作用,控制肿瘤周围炎症和其他感染,调整机体免疫功能,增强或调整巨噬细胞的吞噬能力,提高肿瘤细胞或外周血细胞的cAMP水平及cAMP/cGMP比值,由此抑制肿瘤细胞增殖使其向正常逆转;对肿瘤细胞的DNA和RNA合成抑制,阻断肿瘤增殖,降低畸变染色体ph<sup>1</sup>阳性细胞的出现率,增强肾上腺皮质功能,抗炎及排毒作用;直接抑制肿瘤,阻断细胞在致癌物质作用下发生突变,提高造血功能,增强体质等。(7)保肝与利胆作用。连翘、蒲公英可使四氯化碳性肝损伤的大鼠血清转氨酶下降,肝脏脂肪变性减轻、坏死组织修复、细胞中糖元和核糖核酸含量接近正常,茵陈、大黄、垂盆草、连翘、金银花、栀子、败酱草等有保护肝细胞、抗脂肪肝、抑制肝纤维化、促进肝细胞再生、降低血清转氨酶,促进白蛋白合成、抑制丙种球蛋白升高等作用。大黄、茵陈、栀子、蒲公英等均有明显利胆作用,黄柏与黄连素还能增进胆汁分泌,黄芩煎剂及其乙醇提取物能增加犬、兔的胆汁排泄量,蒲公英、连翘能促使动物胆囊收缩,奥狄氏括约肌松弛。(8)其他作用。犀角、牛黄、紫草、连翘、夏枯草等有一定强心作用;夏枯草、黄连、黄柏、黄芩、射干、紫草有降压作用;夏枯草、鱼腥草、苦参等有利尿作用;黄

芩有抑制甘油三酸酯形成和脂肪分解作用,抑制葡萄糖的脂肪生成作用,抑制脂质过氧化作用及抗变态反应作用,抗血栓形成作用;大黄有抑制胆固醇吸收及促进胆固醇排泄作用,其所含多糖也对高血脂有一定防治作用。黄连解毒汤还能增加脑内血流量,尤其是大幅度增加大脑海马旁回的血流量,减轻记忆障碍。

尽管目前有关清热解毒法的研究已积有大量资料,取得一定成果,且对其临床应用范围和某些治疗作用的作用原理已有一定认识,但对清热解毒法的总体分析还需加强,临床应用有待进一步开拓,不同方药的适应证和疗效差异还应验证研析,作用原理也有待深入研究。当前的主要目标在于明确清热解毒法针对辨证得出的各种热毒证的本质和治疗的基本作用原理。深入观察、全面总结清热解毒方药的种种药理作用,弄清各种药理作用在不同清热解毒方药中所占的地位,可望取得较大进展。

#### 参考文献

- 1 赵章忠. 中医年鉴. 北京: 人民卫生出版社, 1983, 104~106
- 2 欧阳雄. 中成药研究, 1987, 12: 36
- 3 朱湘洲. 湖南中医学院学报, 1988, 4: 25
- 4 吴成. 陕西中医, 1988, 11: 511
- 5 高钦颖. 中国中医药年鉴, 北京: 人民卫生出版社, 1989, 331~333
- 6 周如珍, 等. 中成药, 1991, 1: 28
- 7 程炎农. 中医临床与保健, 1991, 1: 37
- 8 王名洲, 等. 山东中医学院学报, 1991, 4: 50
- 9 王林, 等. 中成药, 1991, 7: 27
- 10 丁懿莹. 中成药, 1991, 8: 28

(上海中医学院赵章忠教授撰)

**祛湿法的临床与实验研究** 凡能祛除湿邪、治疗各种湿证的方法为祛湿法。它具有化湿利水、通淋泄浊的作用。早在《素问·至真要大论》中就对湿邪致患的治疗提出了“湿淫所胜, 平以苦热, 佐以酸辛, 以苦燥之, 以淡泄之, 湿上甚而热, 治以苦温, 佐以甘辛, 以汗为故而止”的治疗原则, 后世医家多遵此而立法组方。温病学派的形成, 推进了祛湿法的探讨、运用, 如薛生白所著《湿热病篇》, 对湿热类湿病的治疗进行了系统论述, 创制芳香化浊、苔寒燥湿、淡渗利湿等具体方法, 这些治法至今仍为临床所常用。

祛湿法治疗泌尿系统疾病的研究为广大学者所注重。急性肾炎水肿, 用祛风渗湿法治之, 常能迅速取效; 急性膀胱炎用利水渗湿法治疗疗效肯定, 一般服药 1~6 剂均能治愈, 具有疗效好、时间短之特点。慢性肾炎是临床十分常见的病证, 临床表现有虚实之异, 对于以邪实为主的疾患, 可根据辨证灵活运用祛湿法治疗。如水湿滞留证, 治以利水逐邪法; 湿热内蕴证, 治以清利湿热法; 湿浊壅积证, 治以化湿祛浊法。而对于虚实夹杂证, 在扶正的同时运用渗湿泄浊法, 多能取得较好治疗效果。对于急性肾盂肾炎和慢性肾盂肾炎急性发作的治疗, 无论是湿热型的还是热毒型的, 或为脾肾两虚兼湿热型的, 均用清利湿热法为主进行治疗, 常用方药如八正散, 疗效可高达 90% 左右, 较西药治疗对照组为优。在此基础上, 有学者对清利湿热的代表方药八正散进行实验研究, 发现八正散对尿道致病性大肠杆菌的直接杀灭和抑制作用不明显, 但能明显抑制大肠杆菌菌毛的表达从而抑制大肠杆菌对尿道上皮细胞的粘附, 而大肠杆菌的菌毛粘附到尿道上皮细胞上是尿路感染的始动因素。采用利水渗湿法治疗产后癃闭的临床研究取得显著成效。产后癃闭的患者在服用利水渗湿方剂如五苓散后, 大多 1~2 剂即可恢复正常排尿。对尿路结石病证的研究, 大多数学者认为是肾亏湿热下注所致。急则治其标, 以清利湿热、排除结石之效果。如采用石苇、瞿麦、萹蓄、海金沙、金钱草、鸡内金等与活血化瘀之品同用, 常能收到排石病除之佳效。在前列腺炎的治疗中, 用清利湿化浊法亦多有较好疗效。祛湿法治疗肠道传染性和感染性疾病具有十分重要的作用, 如用清热化湿法治

伤寒、副伤寒病证,疗效令人满意,多数患者于服药两天后体温下降,5d左右恢复正常。但在治疗中对具体病证必须权衡湿热的轻重,对症用药,对于小儿副伤寒沙门氏菌肠炎的治疗,用清热燥湿法疗效显著,治愈率可达100%。在婴幼儿轮状病毒性肠炎的治疗研究中发现,运用化浊渗湿法效果好,收效快,退热和止泻的天数均较西药对照组为优,经统计学处理,两组间有非常显著的差异,表明化浊法是治疗该病的有效方法,应作为首选疗法之一。有学者用化湿和中法治疗急性腹泻患者,收效亦非常显著,患者服药1~2d后症状即基本消失,无不良反应。治疗肝胆疾病,如茵陈平胃汤用于急性黄疸性肝炎,治愈率达97%。对于重症病毒性肝炎,在用清热利湿法后,患者存活率达60%,而对照组为31%。实验发现,清热利湿法能明显降低小鼠中毒性肝炎的死亡率。有学者将婴幼儿黄疸分为阴黄和阳黄施治,阳黄治以清热利湿,阴黄治以健脾化湿,治愈率为72%,胆红素与肝功能恢复正常亦较对照组为快。治小儿胆汁淤积综合征用清利湿热法,一般服药后黄疸即开始消退,6~12剂后基本退清。对胆道结石症采用清利湿热的胆道排石汤治疗,效果满意。研究资料表明,胆道排石汤可增加胆道括约肌的运动,使其关闭时间缩短,开放时间延长,胆道管径增宽,胆汁流量增加,具有防止结石形成和排石作用,并有改善肝细胞之功能。治疗胆囊炎亦以清利湿热法为主要方法,如以清热利湿为法则组成的清热利胆汤治疗胆囊炎效果显著,研究中发现其具有明显抑制胆道厌氧菌繁殖、改善胆汁中多种细菌的感染状态之作用。治疗痹证,许多学者首重祛湿法。有人指出治疗风湿性关节炎宜分清寒湿与湿热两大类,寒湿治以温化寒湿,湿热治以清化湿热,无论散寒或是清热皆以化湿为主治之,多能收到较好疗效。类风湿性关节炎,目前普遍认为可分为风寒湿型的、寒湿型的、湿热型的、风湿热型的和肝肾亏损型的。对前4型的在疏风散寒清热时,要重视化湿通痹为治。肝肾亏损型的亦应兼以祛风湿以止痛,不可一味专补。焦树德提出治疗痹证,着痹应以祛湿为主,行痹治以祛风为主,但不可忘记祛湿,痛痹在散寒同时亦应重视化湿,可收到较为满意的疗效。利水渗湿法在治疗美尼尔氏综合征方面取得较好疗效,如用利水渗湿法代表方药五苓散治疗美尼尔氏综合征,具有显效、速效的特点。在随访中还发现,本法对美尼尔氏综合征的发作有一定的预防作用。此外,对中年妇女特发性水肿单纯性肥胖症、原发性青光眼和中心浆液性视网膜脉络膜病变均有以本法治疗获效的报道。艾滋病中期的脾虚湿阻之证,用健脾化湿法治疗能使病情获得一定程度的缓解。

祛湿法的临床和实验研究取得了较大的进展,在许多方面都显示出它是中医具有特色的治法,有着较好的研究前景。但总的说来,研究深度还不够,许多研究还停留在初期阶段。应用祛湿法在治疗慢性肾炎、急慢性肾盂肾炎、急慢性病毒性肝炎和肠道炎症疾病等方面的研究,应作为今后的主攻方向,组织力量,协同攻关,可望取得一些突破性的进展,研制出一些具有显效、特效的药物,以使其在中医治疗中发挥更重要的作用。

#### 参考文献

- 1 王永钧. 中医杂志, 1987, 9
- 2 裴学义, 等. 中医杂志, 1988, 2
- 3 徐景藩, 等. 中医杂志, 1988, 12
- 4 焦树德, 等. 中医杂志, 1988, 4

(上海中医学院张国庆撰)

### 养阴生津法的临床与实验研究

养阴生津法又称滋阴法,是指滋养阴精津液以治疗疾病的方法。它具有滋生阴液、恢复和改善脏腑功能以治阴液不足之证和抗老延年的作用。先天阴液不足,后天供养不足,及高热、亡血、失精、劳倦和汗、吐、下或服用燥热食品、药物太过,均可导致全身的或脏腑的阴液耗损,失却滋养濡润各脏腑、组织的作用,从而出现全身性的及各脏腑的阴虚证候或早衰征象,这时必须采用滋阴生津方药补养荣润,以恢复机体脏腑功能,延年益寿。由于外感热病最易耗伤阴液,

故在其病程中尤需重视养阴生津法的应用。

早在秦汉时期的《内经》就有“精不足者,补之以味”,“阴阳俱不足者,调以甘药”等记述。《伤寒杂病论》除创立泄热存津、急下存阴等祛邪以保津法外,还制定了不少养阴生津方药以治疗阴虚燥热之证,奠定了养阴生津法的基础。至唐代,王冰已明确指出“寒之不寒,责其无水”,“无者补之,虚者补之”的原则,由此“壮水之主,以制阳光”的滋阴法受到普遍重视;孙思邈所创的滋阴解表法又扩展了养阴生津法的应用范围。金元以来,养阴生津法更被医家所推重,朱丹溪尤其强调主静而养阴,十分注重“补肾水”、“生精”等滋阴法。明代张景岳提出“阴中求阳”、“阳中求阴”的原则,开辟了巧妙运用本法的新途径。至清代,随着温病学说日趋成熟,养阴生津法越来越被广泛地运用于外感热病的临床。如喻昌创养阴以滋肺燥,魏玉横重生津以养肝阴,叶天士倡甘寒生津、咸寒增液两大法门,吴鞠通力主温热当重清润以滋阴液,雷少逸强调热病应时刻顾其津液等,使养阴生津法的理论基础与具体应用日臻完善。

近代对养阴生津法的分类尚未完全统一。章真如罗列的养阴生津法有滋阴解表、滋阴清热、滋阴利湿、滋阴熄风、滋阴润燥、滋阴清火、滋阴生津、滋阴清营、滋阴凉血、滋阴通络、滋阴补心、滋阴柔肝、滋阴疏肝、滋阴平肝、滋养肝肾、滋阴养胃、滋阴润肠、滋阴补肺、滋阴清肺等19法。而周光耀则归纳为养阴解表、养阴清肺、养阴清心、滋养胃阴、滋阴柔肝、滋阴熄风、滋阴培元、滋阴利湿、滋阴润肠、滋阴解毒等10法,并于每法又有不同用方,如滋阴利湿法就有3个方面:一是阴虚生热、水热互结,用猪苓汤加味;二是湿热蕴结下焦,化火伤阴,用萆薢分清饮合知柏地黄丸;三是湿热恋肝、伤阴阻气,用一贯煎合茵陈蒿汤加减。在外感热病方面,养阴生津法的运用甚为普遍,几乎贯穿于各种病证的始终,只是更偏重于后期罢了。如赵金铎认为温病初起以逐邪为主,达到保障护阴目的;后期则以扶正为主,直接以生津养阴为目的,间接可养阴退热;也有“保”、“养”兼顾之法,如滋阴解表、清气生津、增液通下、壮水泻火、养阴搜邪等。陈光新对43例各种温病在辨证论治基础上进行清热与清热养阴两种疗法的临床观察,结果是清热组治愈率为66.6%、有效率为71.43%,而清热养阴组治愈率为86.36%、有效率为95.45%,两者具有显著性差异。说明养阴生津法在温病治疗过程中有提高疗效作用。在内、外、妇、儿各科杂病方面,养阴生津法也有广泛的应用价值,临床用养阴方药治疗肺结核、肺气肿、慢性支气管炎、支气管哮喘、慢性咽喉炎、冠心病、风湿性心肌炎、慢性肠炎、慢性胃炎、慢性肾炎、慢性肾盂肾炎、尿毒症、血尿、乳糜尿、慢性前列腺炎、血精、垂体功能低下、甲亢、外伤性蛛网膜炎、截瘫、神经衰弱、耳源性眩晕、耳鸣、低热、多种血液病、变态反应性疾病、肥大性关节炎、周期性麻痹、外科手术、老年性白内障、玻璃体混浊、黄斑变性、中心性视网膜炎、角膜炎、青光眼、慢性葡萄膜炎、神经性皮炎、骨折、月经失调、产后虚弱等均有大量报道,各取得不同程度的良好疗效。养阴方药能改善高血压患者的症状,与西药降压药有协同作用。由于肿瘤患者多有津液耗伤,故养阴生津法对治疗肿瘤或化疗、放疗及手术后都有广泛的应用价值。养阴生津法是以平衡阴阳来消除疾病的一种治疗方法,可增强机体功能活动,补充营养物质,改善新陈代谢,提高抗病能力。养阴生津法常用的药物有地黄、麦冬、沙参、玉竹、石斛、玄参、白芍、阿胶、龟板、鳖甲、天冬、百合、女贞子、旱莲草、何首乌、枸杞子、桑椹子、山萸肉、酸枣仁、西洋参等。宜区别脏腑而选用,如养心阴用生地、枣仁,养肝阴用芍药、萸肉,养脾阴用沙参、玉竹,养肺阴用麦冬、百合,养肾阴用地黄、枸杞等。有人指出,滋阴药用量宜大,煎煮宜久。但由于滋阴药多寒凉滋腻,易引起纳呆腹胀,故用时当顾及胃气。

养阴生津法的实验研究已有长足进展。(1)免疫方面,对肿瘤患者用养阴生津法进行治疗前后免疫指标测定,发现治疗前免疫力均显著下降,而治疗后可明显提高。治疗阴虚型肺结核也可使淋巴细胞转化率显著提高。上海中医学院的研究资料证明,滋阴药物能使肝、脾的核糖合成率升高者降低、下降者升高。沈阳

医学院发现生地、芍药、阿胶等养阴药对健康人淋巴 T 细胞和 B 细胞均有不同程度的激发转化作用。北京市临床医学研究所、上海中医研究院等又发现三甲养阴汤有明显的刺激网状内皮系统吞噬能力的作用,鳖甲、玄参、麦冬能延长抗体存在时间,生地、杭芍、女贞子、旱莲草、北沙参、麦冬、玄参、天冬等均可抑制免疫功能亢进,对抗变态反应性病变,减轻或消除免疫抑制剂的副作用。李萍等对六味地黄丸和地黄所作的免疫药理研究资料表明,它能使环磷酰胺所致小鼠胸腺、脾脏重量减轻,血清特异性抗体水平下降和淋巴细胞转化率降低,恢复或接近对照组(正常)水平,由此证明该方药有保护机体免疫功能作用。王裕生等对何首乌的实验资料也证明,该药有促进人的淋巴细胞转化、激活 T 淋巴细胞的功能,提高淋巴细胞转化率,诱导  $\gamma$ -干扰素,延缓胸腺退化等作用。(2)内分泌方面:滋阴方药可使肾上腺皮质功能偏低者升高,偏高者降低;能降低甲状腺机能亢进,调整性腺功能。六味地黄丸有降血糖作用,可能与影响胰岛功能有关。实验还发现养阴药何首乌能使摘除双侧肾上腺小鼠的肝糖元大大提高,养阴药天花粉有可能通过对抗假孕小鼠体内黄体激素作用而发挥抑制蜕膜反应作用。(3)代谢方面:实验资料表明,养阴生津方药能调节抑制产能途径,有加强糖原、蛋白质合成及刺激生长等作用。不少养阴药还有补充无机盐、调整水电解质平衡、减轻血管通透性、改善肝肾等脏器循环的功能。首乌、桑椹子、黑芝麻、金樱子、玉竹、黄精、枸杞、百合、胡麻等养阴药均有降血脂作用。六味地黄汤也能降低血清胆固醇、甘油三酯,增高 HDL-C、HDL-C/TC 的比值,并能减少内脏脂肪沉积,还能降低血钾,提高血钠和血蛋白,降低尿中酮体水平。(4)神经系统方面:通过研究条件反射活动、肾上腺素试验、血管容积试验、前庭时值测定、指端脉搏描记、皮肤电活动测定、24h 尿去甲肾上腺素测定、冷压试验等,证明养阴生津药能纠正皮层抑制过程减弱和植物神经功能紊乱,具有镇静神经中枢、降低交感神经兴奋作用。(5)循环系统方面:玉竹、地黄、首乌、玄参、沙参、女贞子等均有直接强心作用。首乌能减慢心率,改善心肌缺血,减少病变毛细血管数,降低冠脉阻力。女贞子制剂能增加离体兔心冠脉血流量,临床治疗冠心病心绞痛疗效显著。六味地黄汤有扩张血管、降低胶原等作用。黄松章发现阴虚证患者的红细胞压积降低、纤维蛋白元增多、血浆粘度升高和血沉加速,同时有血钾偏低、钾钠比值降低、血浆蛋白胶体渗透压偏高和尿 17 酮、17 羟升高,经用养阴方药治疗后大多数指标异常值即趋向正常,临床症状也得到改善。牛元起等又发现养阴生津药具有明显的拮抗内毒素所致的血压下降作用,并将血压维持在较高水平,改善血液粘度,增加外周灌流量,调节机体功能而达到抗休克目的。杨进通过养阴方药(麦冬、元参、玉竹、石斛)对家兔实验性弥漫性血管内凝血防治作用的观察,发现能减轻实验动物在注射大肠杆菌内毒素后所引起的全血粘度明显下降,避免低凝状态,减轻出血倾向和组织细胞的损害。(6)消化系统方面:多数养阴药对阴虚型慢性肝炎有效,能加强肝脏解毒能力,改善肝功能。实验资料表明,枸杞能抑制脂肪沉积,促进肝细胞再生,女贞子能保护大白鼠因四氯化碳所造成的肝损害;鳖甲可软化纤维组织、纠正血清白蛋白与球蛋白的比例倒置等。养阴生津方药还能通过调整电解质平衡,降低交感神经兴奋性,提高迷走神经张力,促进腺体分泌,提高消化酶质量,增强消化功能。(7)泌尿系统方面:养阴方药含有强心、利尿成分和无机盐,通过降低交感神经兴奋性、舒张血管,使肾有效血流量增加、调节激素分泌等途径起利尿和改善肾功能作用。六味地黄汤还能降低实验性高血压,促进肾脏对体内代谢产物——尿素的排泄,改善肾功能,降低病死率。(8)造血系统方面:养阴生津法可不同程度地提高偏低的红细胞、血红蛋白、红细胞压积、白细胞、血小板等数值。(9)抑癌作用:继发现天门冬、枸杞子等具有抑癌作用后,六味地黄汤对抑制诱变的和自发的肿瘤的动物实验受到人们重视。陈培丰根据养阴药治疗晚 3 期肺癌有改善症状、控制癌灶发展、延长患者生存期等作用,用养阴清热方药进行动物实验,发现对小鼠 Lewis 肺癌的抑癌率达 33.7%,治疗后的荷瘤小鼠的淋

转率高于未经治疗者,说明养阴药能发挥机体的免疫能力,可提高 NK 细胞活性。此外,玉竹、黄精、首乌等还具有抗衰老作用,各种养阴药因含有糖、蛋白质、磷脂、有机酸、多种维生素等营养物质而具有营养价值,部分养阴药如玉竹、百合、女贞子等还有抗真菌作用,白芍、地骨皮等对痢疾杆菌有抑制作用,山萸肉对脊髓灰质炎病毒、黄精对疱疹病毒和腺病毒、地骨皮对流感病毒 68-1 病毒株具有抑制作用,六味地黄汤对实验肾虚动物的牙周组织具有保护与修复作用,六味地黄丸还具有抗低温、抗疲劳、耐缺氧等作用。

由于养阴生津法的临床应用很广,具体方法与方药种类较多,因而进行更全面的临床应用研究,观察不同病种、不同证型采用何等不同养阴方药可达最佳疗效,仍是今后的重要研究课题。养阴生津法对机体各方面的作用,实验研究已积累大量资料,但尚需就不同方药和不同具体治法进行对比观察,本法与其他治疗方法对机体的不同作用也有待于深入分析研究。

#### 参考文献

- 1 赵章忠. 中医年鉴. 北京:人民卫生出版社,1983,106~108
- 2 李萍,等. 中国免疫学杂志,1987,5:296
- 3 牛元起,等. 天津中医,1989,6:31
- 4 涂建中. 浙江中医杂志,1989,11:493
- 5 陈培丰. 浙江中医学院学报,1990,3:29
- 6 蔡家骏,等. 中西医结合杂志,1990,5:295
- 7 赵良辅. 中西医结合杂志,1990,7:433
- 8 杨进. 中医杂志,1990,9:50
- 9 陈光新. 中国医药学报,1991,2:22

(上海市中医医院赵坚撰,赵章忠教授审)

**益气法的临床与实验研究** 益气法是指补益五脏诸气不足的方法,具体有益心气、补肺气、补中气、补肾气等法。五脏虽均可出现气虚证,然而以肺主一身之气,而脾气升发则元气充沛,故益气之法,又以补益脾肺之气为主。早在《内经》就有“损者益之”,“形不足者,温之以气”的治则,后世著名医家张璐指出:“气虚者,补之以甘”。所以益气之法当以甘温之品为主。随着时代的发展,人民生活水平的提高,益气法的临床运用更为广泛,并且在实验研究方面亦取得令人瞩目的成绩。

益气法对心血管疾病的防治作用研究为许多学者所重视。冠心病在临床十分常见,其中以气虚证和气阴两虚证为多,用益气法治疗能明显改善症状和各种实验室指标。目前,对冠心病是以气虚为本、血瘀为标这一本虚标实的认识已趋于一致。益气法能推动血液运行,改善心功能而发挥其治疗作用。由于心主血脉,心气虚则致血行瘀滞,故运用益气法治疗心血管疾患时多配伍活血药物。急性心肌梗塞病情危重,临床表现多为气虚血瘀,采用益气活血法进行治疗,患者死亡率较西药对照组低,经统计学处理有显著差异,表明益气活血法可明显提高急性心肌梗塞患者的存活率。在肺心病急性发作期采用益气活血法治疗,有效率可达 90% 以上,优于西药组;并发现用益气法治疗肺心病,对酸碱平衡无明显影响,但能显著提高血二氧化碳分压和血氧分压,从而改善肺心病的低氧血症而发挥治疗作用。益气法治疗病毒性心肌炎取得较满意的疗效。如用益气方剂玉屏风散可使其症状、体征及心电图明显改善并加快痊愈。对于房室传导阻滞,心脏手术后出现发热者,用益气法常能取得满意疗效。有学者对益气法治疗心气虚证的作用原理进行了较深入的研究,发现益气法可明显增强左心室收缩力,以发挥益气强心、推动血液运行的功能;在病理情况下,这种作用更为显著。在实验中还发现益气药物可通过抑制心肌细胞内磷酸二酯酶的活性,使心肌细胞内 cAMP 水解减少,含量增加,属于非洋地黄类药物;并发现其能够明显抑制血小板聚集,防止血栓形成,增加心肌营养血流量。有学者运用益气方剂生脉散治疗心血管重症患者,取得较好效果,发现其有明显强心升压作用,并有正性肌力作用,能增加冠状动脉血流量,改善心肌缺血状况,调整心肌代谢,降低氧耗,改善微循环。

益气法治疗慢性胃炎和消化道溃疡的研究已取得一定进展。如用四君子汤为主治疗胃炎、胃与十二指肠溃疡的气虚证患者,收效迅速。实验资料表明,该方药对大鼠的胃肠推进功能有抑制作用。益气药物党参对大鼠的应激型溃疡有治疗和促进痊愈作用,并能抑制胃电和胃的运动;对豚鼠离体回肠显示有拮抗乙酰胆碱作用。治疗慢性非特异性肠炎,用益气健脾法疗效肯定。

近年来,益气法被广泛运用于恶性肿瘤的治疗,取得显著进展。恶性肿瘤患者常表现为气虚证候,用法益气治疗可明显缓解病情,延长生存期。有学者研究发现,运用益气法治疗恶性肿瘤,小肠的木糖吸收功能试验明显改善,症状缓解,体重增加,胃肠排空减缓,患者的免疫功能增强显著。如用健脾益气法治疗 I 期原发性肝癌,疗效优于对照组,肿瘤生长减缓,患者生存期延长。还研究发现,益气法能保护恶性肿瘤患者的造血功能和免疫功能免遭放疗和化疗的毒性损伤,凡在放疗和化疗中加用益气法治疗的患者,疗效明显优于单纯放疗、化疗的效果并减少并发症,延长存活期。实验资料表明,益气药物可促进荷瘤机体的免疫功能;改善骨髓造血功能,增强放疗、化疗效果,改善荷瘤机体状态和防止并发症。

应用益气法治疗小儿疾病显示出良好的前景。用健脾益气法治疗脾虚易感儿患者,治愈率明显高于西药对照组。治疗后,患儿木糖吸收率恢复正常,免疫功能指标显著改善,厌食多汗等症状消失,体重增加。用益气法治疗小儿佝偻病,治疗后颅骨软化消失,各种症状和体征消失或改善,实验室异常指标基本恢复正常,较对照组为优。用益气法治疗小儿缺锌症取得满意效果,以益气药为主制成的“复儿康”等糖浆有益气补中、开胃健脾之效。本药除含锌外,并有改善肠道对锌的主动转运功能,调节肠道粘膜细胞的含锌量,从而增加机体对锌的吸收。

益气法的抗衰老作用的研究十分令人瞩目。细胞的传代是生命延续的标志。益气药物如党参、人参、黄芪等对细胞传代有较大影响,可提高人胚肺二倍体细胞的密度,促进淋巴细胞体外有丝分裂,延长人羊膜细胞的生存期等。而且黄芪、人参、白术能明显延长动物如家蚕、果蝇、小白鼠、鹌鹑的寿命。对年老动物,益气法有促进抗体生成,加强机体的免疫功能,并改善机体代谢过程及耐缺氧、抗疲劳能力。益气法能提高脑血氧的利用率,改善老人的记忆力。这些均展示出益气法在抗衰老中有着广阔的应用前景。

应用益气法治疗慢性肾炎和慢性肾功能衰竭亦有着较显著作用。慢性肾炎和慢性肾功能衰竭,临床常表现为脾胃气虚或脾胃气阴两虚证候,治以益气或益气养阴多有较好疗效,如采用益气养阴胶囊治疗慢性肾炎,效果令人满意,并发现益气养阴胶囊有明显抗血小板聚集、释放和调节 6-酮前列素  $F_{1\alpha}$  的平衡作用。慢性肾功能衰竭为本虚标实之病证,益气法运用机会十分多,但多与其他扶正祛邪的方法互相配合使用,单独使用者较少。

近年来有学者探索用益气法治疗艾滋病。艾滋病患者的早期多属脾胃虚损型,以消化道症状为主,腹泻呈稀水状。用益气方药如补中益气汤、香砂六君子丸等为主进行施治,能不同程度地缓解病情,收到一定效果,但由于尚属初步研究,又受到种种因素限制,研究不够深入,难以确切评价。

益气法治疗血液系统疾病的研究亦为许多医家所注重。如对再生性障碍性贫血患者运用益气生血法治疗,疗效明显。治疗白血病用益气药物可使患者较快地度过化疗的骨髓抑制期,并能降低复发率,延长存活期。对白细胞减少症患者运用益气的黄精糖浆治疗亦取得较满意的效果。治疗丝虫性乳糜尿,不少学者在临床研究发现以益气法为主施治,疗效满意。益气活血法治疗糖尿病,能使高血脂动脉硬化指数明显改善,可有预防 II 型糖尿病血管病变的作用。

另外,益气法治疗女性节育术后肝郁证的疗效显著,因其术后多有气虚,虽表现为肝气郁结,但以气虚为主。

综观近年来的研究成果,显示出益气法在临床治疗中具有

重要作用。但是,对益气法临床和实验的研究多较分散,选题重复较多,指标不够统一。今后的研究重点,将是应用益气法预防和治理心血管病;益气法对消化道疾病、恶性肿瘤及艾滋病的防治亦有较好的研究前景。

参考文献:

- 1 中西医结合杂志,1986,12
- 2 李春生,中医杂志,1988,1
- 3 许健中,等,中西医结合杂志,1988,1
- 4 廖家桢,等,中医杂志,1990,2

(上海中医学院张国庆讲师撰;赵章忠教授审)

活血化瘀法 the method of promoting blood circulation

to remove blood stasis 活血化瘀法是指应用调畅血行、祛除瘀滞的药物以解除血瘀、血结所致各种疾病的治疗方法。活血化瘀法应用指征主要有:舌质青紫或舌体有瘀点、瘀斑;疼痛拒按,痛处不移;病理性肿块,血管异常,各种出血;月经紊乱,经期腹痛,色黑有块;脉涩或结代,以及肌肤甲错、肢体麻木或偏瘫,精神狂躁或健忘等。实验室检查见微循环障碍、血液流变学异常、血液凝固性增高,或纤溶性降低,纤维组织异常增生、特异性新技术显示血管阻塞等。常用活血化瘀药有丹参、川芎、水蛭、当归、赤芍、桃仁、药花等 40 余种。

早在春秋战国时期,《黄帝内经》就有关于瘀血病因病理的记载,初步形成活血化瘀的治疗思想。东汉张仲景总结了血瘀证的辨证论治规律,制定十几个活血化瘀方剂。晚清王清任(1768)、唐容川(1892)对活血化瘀法的发展作出了杰出的贡献。王清任创立了以活血化瘀为主的方剂 33 首,主治各类瘀血症 50 余种。其中补阳还五汤、通窍活血汤、血府逐瘀汤、膈下逐瘀汤、少腹逐瘀汤等已成为活血化瘀的名方。

新中国成立后,对活血化瘀法进行了较多的文献整理、临床观察及实验研究,将这一治法置于现代科学基础之上,在临床各科不断攻克痼疾,引起国内外学者的重视。早在 1960 年,中国医学科学院血液学研究所首先创制了活血化瘀方 605,治疗硬皮病、血栓闭塞性脉管炎等取得可喜的疗效。1971 年,北京地区冠心病协作组用活血化瘀方冠心 I 号治疗冠心病 484 例,总有效率达 83.0%;继之全国各地广泛开展了活血化瘀的临床实践。1981 年,由姜春华主编的《活血化瘀研究》问世,标志着活血化瘀法由临床实践深入到机理的探讨。1982 年 11 月和 1986 年 11 月在上海、广州举行的第 1、2 届全国活血化瘀研究学术会议,对活血化瘀研究的系统化、规范化和广泛化起到了积极的推动作用。

从 1971 年到 1991 年,活血化瘀的临床和实验研究取得了较大进展。据上海医科大学情报研究室 1986 年对 1949 年以后发表的文献资料统计,应用活血化瘀法治疗的疾病已达 414 种,其机理的探讨已深入到细胞水平。活血化瘀研究资料表明,活血化瘀法具有多方面的作用,可应用于多种疾病。防治血栓形成、改善微循环是活血化瘀法最重要、最有效的作用之一。徐理纳、金惠铭、翁维良等进行的药理实验表明,活血化瘀药物通过影响血小板环核苷酸代谢,抑制血小板的粘附、聚集、释放功能,并抑制凝血因子,增强纤维蛋白溶解性,降低血液粘稠度,改善血液流变性,使血液浓、粘、聚化状态得到改善;消除血栓和血栓形成的条件,加快微血流速,改善微循环。因此,临床应用活血化瘀法治疗冠心病心绞痛、心肌梗塞、脑血管病、血栓闭塞性脉管炎以及溃疡病、萎缩性胃炎等均取得良好的疗效。1971 年至 1981 年,北京地区西苑、阜外、同仁等医院先后应用冠心 I 号(川芎、丹参、红花、赤芍、降香)治疗冠心病心绞痛病人 800 多例,总有效率均在 80% 以上,心电图改善率在 21% 以上。

活血化瘀法对结缔组织作用的研究是活血化瘀开拓治疗领域的重要方面。中国医学科学院活血化瘀研究协作组、成都第二人民医院、李景德、柴甫本等通过临床实验认为,活血化瘀法可以调整结缔组织的代谢,抑制成纤维细胞亢进的胶原合成,从而抑制结缔组织细胞的增殖、胶原纤维的增生,促进纤维组织的吸收

和组织修复。因而活血化瘀法在治疗皮肤灼伤瘢痕、肝硬化等结缔组织增生性疾病取得令人满意的疗效。

随着活血化瘀法研究的深入,抗炎、治疗急慢性炎症是活血化瘀法作用之一已被临床和动物实验所证明。中国医学科学院药物研究所活血化瘀治则研究组、山西医学院等单位的研究资料表明,活血化瘀对炎症第1、2期或急性、亚急性炎症有对抗作用,通过解热镇痛、增加吞噬细胞数量,直接抗菌、抑菌等机制,减轻或抑制炎症反应,促进机体的恢复。临床对急性单纯性阑尾炎、急性单纯性胆囊炎、急性化脓性扁桃腺炎、盆腔炎、慢性气管炎等有明显的疗效。

应用活血化瘀法调节免疫功能是70年代末提出的研究课题。初步的临床及实验资料表明,活血化瘀法可以抑制过敏介质释放,解除平滑肌痉挛,抑制变态反应性炎症和血凝抗体及抗体形成细胞,调节免疫功能,因此对免疫性疾病有较好的治疗作用,如硬皮病、系统性红斑狼疮、ABO新生儿溶血症、肾小球肾炎等。活血化瘀法对免疫系统的调节作用体现于既能抑制免疫反应,对免疫性疾病具有较好的疗效,又可提高机体免疫功能。实验资料表明活血化瘀代表方之一的补还五汤有促进免疫基因合成,特别是免疫基因与蛋白质合成因而有增强机体非特异性免疫功能的作用。日本熊泽义雄的实验资料表明,活血化瘀药当归具有调节免疫内环境稳定性的作用。当归的免疫促进多糖体作为致有丝分裂因子对小鼠B细胞有直接作用,使B细胞活化,使一部分抗体产生细胞分化的能力。

此外,活血化瘀法能降低血凝,减少肿瘤区周围蛋白元的沉积,利于肿瘤药物和免疫活性细胞进入癌组织,减轻或防止放疗给机体组织带来的纤维化。有些活血化瘀药如三棱、莪术、斑蝥等能直接破坏或抑制肿瘤细胞,活血化瘀方药能调节物质代谢及能量代谢,对动脉粥样变的发展具有抑制作用;活血化瘀法还能促进细胞分裂、成熟和形成骨组织,促进钙盐的沉积和折骨的愈合。

已经证实,对许多非传统的病种用活血化瘀法有理想的疗效,有些甚至比传统病种疗效更佳。因此,继续探索活血化瘀法治疗的病种有发展前途。活血化瘀法并非万能之法,如何准确恰当地使用本法不但对活血化瘀法本身的研究有价值,而且对中医其他治法的研究也有影响。活血化瘀法的使用标准,即“血瘀证”的本质,仍然是人们关注的问题。传统的活血化瘀作用指征已被现代医学所完善和补充,但这些标准的完善性和合理性也有待深入探讨。活血化瘀药物的研究直接影响着活血化瘀机理的阐明,活血化瘀药在亚细胞水平上、在神经-体液、受体和分子水平上是如何发挥作用的,活血化瘀药物与脏器功能恢复的关系,药物配伍后整体作用机制等问题需要进一步研究。特别是个别的传统活血化瘀药经现代药理证实活血化瘀作用并不十分理想,而有些非活血化瘀药又具有比较理想的活血化瘀作用,如何把传统的认识与现代的药理指标结合起来也是活血化瘀研究的课题之一。活血化瘀法在肿瘤领域中还有许多题目值得探讨,尽管血瘀证在恶性肿瘤病人中普遍存在,但活血化瘀法在肿瘤领域中的应用研究远逊于心血管系统的为差,一些实验结果还存在着矛盾,活血化瘀法是抑制还是促进肿瘤的扩散和转移等问题也是人们关注的焦点。疾病的预防将越来越受重视的研究领域。研究活血化瘀法在疾病预防中的应用有着广阔的前景,特别预防血栓形成引起的疾病,活血化瘀法有一定的价值。

#### 参考文献

- 1 姜春华,活血化瘀研究,上海,上海科学技术出版社,1981.12
- 2 中国人民解放军一五七医院西医学习中医班,北京,人民卫生出版社,1982.2(1)
- 3 翁维良,中西医结合杂志(1988年中西结合30年特集)
- 4 陈可冀,血瘀证与活血化瘀研究,上海,上海科学技术出版社,1990.2
- 5 姜春华,活血化瘀研究新编,上海医科大学出版社,1990.2
- 6 郭仁存,实用中西医结合杂志,1991,4(3):189~192

(中国中医研究院周超凡研究员、刘艳芳硕士撰)

### 中医治则

principles of treatment in TCM 中医治则肇始于《内经》,补充于历代,发展至今已经形成内容丰富的治则学理论体系,并成为中医基础理论的重要组成部分。近年来,中医界开始重视治则学的研究,对中医治则的基本理论和文献、临床等现代研究都有了新的进展,为发展、完善中医治则学作出了贡献。

以往研究,主要侧重于对中医治则基本理论的探讨和文献研究。在对中医治则基本理论的探讨方面,如对治则的概念,周超凡定义为“中医治则是在中医理论指导下制定的,对保持健康和祛除疾病、恢复健康具有普遍指导意义的防病治病规律”。对治则哲学思想的认识,刘时觉等认为,中医临床治疗追求的是“平”,中医治则也提出了“以平为期”的治则,明确以恢复机体阴阳平衡,内环境处于稳态为中医治则的直接目标,这也是最高目的。“平”就是中医治则哲学思想的核心。对治则层次的划分,周超凡提出3层次理论:治病求本、以平为期为第1层次的总则;治未病、扶正祛邪、调整阴阳、随证治之为第2层次的治则;寒者热之、热者寒之、燥者润之、坚者削之等数十种治则为第3层次治则。孙世发也持3级治则的分类法,但具体的划分原则却有所不同。关于治则与治法的关系,周超凡认为“治则治法既有区别又有关系”,它们之间的关系如同战略与战术的关系。关于治则与辨证论治的关系,王尔玺认为:“治则不受辨证论治的指导和约束”;周超凡认为:“治则不完全受辨证论治的指导”;陈厚忠专门探讨了治则在辨证论治中的作用。在研究文献方面,徐荣斋等有计划地研究了《素问》阴阳应象大论、标本病传论、脏气法时论等篇中的治则理论;李家庚阐述了《伤寒论》中的扶阳气法;张俊探讨了《金匱要略》虚劳病的治则;王绪前也系统论述了《伤寒杂病论》的治则;赵成春重申《温病条辨》“养阴保津”为温病的重要治则;赵绍琴对“在卫汗之”的意义讨论得比较深入,等等。

中医治则的近期研究,主要集中于临床研究及现代研究。治则在临床研究可以起到两方面的作用:一是验证,对现有的治则在临床实践中进行验证;二是创新,通过临床实践总结出新的治则理论。

就验证而言,北京中医医院和解放军海军总医院在关幼波的指导下,联合进行攻关,通过分4组治疗病毒在体内滞留日久的慢性乙型肝炎,对扶正祛邪、标本论治、随证治之等治则进行了参照验证。陈文伯在开展男性不育证的临床研究中,在审证求因、辨证论治过程中,以调整阴阳的治则理论为指导,制定了育阴、温阳、补肾精、益肾气、增肾液诸法,取得良好效果。张伟治妇产科不孕症采用3步法:(1)经期因势利导,以调经和血为先;(2)经尽3d,宜健脾补肾,使化源充、精血足;(3)经后7d,宜舒肝通络,以迎“候”之期,应用于临床,疗效卓著。徐振华在中医调整阴阳的治则指导下,采用益气养阴、滋阴、益气健脾等治疗方法治疗恶性肿瘤112例,有46例存活5a以上,15例存活10a以上,两例超长期生存,并指出“恰当时地调整阴阳的变化,是治疗恶性肿瘤的关键”。胡剑北在“因时制宜”原则的指导下,根据生物体的生物节律,选择针灸时间和所取穴位,发现家兔WBC总数以午时(11~13h)偏高,酉时(15~17h)偏低,二者有显著差异( $P < 0.01$ );不同时辰,家兔WBC总数上升程度不同,酉时上升最快,维持时间最长,午时上升最慢,维持时间最短,两者有显著差异( $P < 0.01$ )。鲍景隆在“惊者平之”、“虚者补之”治则的指导下,采用补益气血、益智安神、活血通脉法治疗早搏45例,显效率达38%,总有效率达80%。刘乾和在治疗过敏性鼻炎过程中,根据“急则治标”、“缓者治本”原则,将过敏性鼻炎分为发作期和歇止期分阶段论治,采用培土生金法治疗48例,有效率达100%。苏诚炼根据《内经》“虚者补之”、“损者益之”治则,采用扶正益阳为主的方法治疗艾滋病,也取得一定疗效。张存明等用通法治疗眼科疾病,认为“通则目明,不通则暗”,“实者通有余,虚则以疏为补”,对通法研究颇深。这些都从临床角度对中医治则治法进行了不同程度的验证。

在创新方面,许多单位和个人在总结临床经验的基础上,提出一些新的治则。如姜春华提出的“截断扭转”理论,包含着对温病治则的突破。他认为,治疗温病,不必拘泥于“卫之后方言气,营之后方言血”的顺应疗法,主张先症而治。其“截断扭转”的3项原则是:(1)重用清热解毒抑制病原,使病程阻断或缩短;(2)早用苦寒攻下,迅速排泄邪热温毒;(3)及时活血化瘀,滋补肾阳。这一法则经各地许多单位验证,证明对乙脑、急性肺炎、败血症、菌痢、流行性出血热等疾病能显著提高临床疗效,缩短病程。谢沛荣提出小儿肺炎恢复期的中医治则,认为中医治疗不外两大法则,一是清解余邪,二是培元固本,前者重化痰、祛瘀、清热,后者重益气生津。吕昌宝认为,在传统的中医八法中应加入利法、通法、平法、收法四法,以补八法之未备。辛增平根据患者病情的危急程度(包括疑难顽症)体质强弱、发病季节、居住地区和组方配伍时看药的需要以及药物的质重、性味、新旧的不同,提出大剂量用药的治则等等,在一定程度上都是对中医治则的创新。

中医治则的现代研究有两大特点:一是采用多学科的知识与手段一起攻一个专题;二是注意中医治则与其他中医理论如脏象、病因、病机的现代化研究相交叉,尤其注意与证、法、方、药的研究相结合。如龚坚认为,免疫功能低下往往表现为虚证,脾、肾三脏无论何脏虚,其免疫指标均低于正常,尤以肾虚明显,说明“虚”与细胞免疫之间有内在联系。为扶正固本治则和提高细胞免疫两者的统一提供了科学依据。程远运用广义热力学中的整体论、本质论、调节论研究“阴平阳秘”、“以平为期”、“治病求本”、“扶正祛邪”等治则。胡晓雁应用耗散结构论、协同中医学理论解释“阴平阳秘”并非隶属于阴阳平衡,而是在一定的区间内的反向同步运动,初步揭示了“调整阴阳”的本质。励奇娣采用 $\gamma$ 线吸收法研究老年人骨皮质中的骨矿含量,发现肾虚是造成骨质疏松症的主要原因,并以“平调阴阳”治则为指导,采用益肾填精、调补阴阳、祛风化湿、活血通络之法,从一个侧面阐明“平调阴阳”、“虚者补之”治则。孙华丽在放射治疗恶性肿瘤的过程中,采用随机分组法观察扶正增效方的放射增效作用,结果表明,扶正培本药物能减轻放射反应,保护造血功能和免疫功能,照射的抑瘤率明显高于单纯照射组,为扶正固本治则提供了理论依据。陈永光也从中医学阴阳与免疫、阴阳失调与免疫失控以及平衡阴阳与免疫调控等几个方面阐述了“平调阴阳”治则的细胞免疫学基础。

中医治则学研究虽然已经起步,但面临的困难很多。目前这种零散的、自发的研究状况不会很快有明显的改观。根据中医治则研究的现状,在治则研究的组织工作方面,应由国家有关部门统一作出规划,从国家到省市中医院校建立起中医治则研究室,配备相应的人才和实验基地,做到有组织、有计划、有目的地开展中医治则的教学、科研工作,以期使中医治则既完善中医基础理论,又更科学地指导临床实践。

#### 参考文献

- 1 徐荣斋. 浙江中医学院学报, 1981, 4: 1
- 2 周超凡, 等. 北京中医学院学报, 1987, 3: 7
- 3 孙世发. 北京中医学院学报, 1987, 3: 10
- 4 陈厚忠. 湖南中医杂志, 1987, 3: 12
- 5 刘时觉, 等. 中医杂志, 1987, 10: 53
- 6 王玉玺. 中医杂志, 1987, 10: 54

(中国中医研究院周超凡研究员、于智敏主治医师撰)

**按摩** 又称推拿或按跷,属中国传统康复治疗方法。点穴、拍打、捏脊、捻筋、弹筋、踩跷等疗法均属按摩范畴。按摩治疗主要以手法治疗为主,间或辅以器械,通过在患者体表的一定部位或穴位进行操作,来改善机体生理的和病理的过程,进而达到医疗、康复的目的。

2000多年前,中国《黄帝内经》中就有很多关于按摩的记载。《内经》(素问)记有:“按摩可使筋节舒畅,血脉流通,盖按其经络,则郁闭之气可通,摩其壅聚,则凝结之肿可散也”。这是中医

理论对按摩作用机制的最早解释,从中可见古人对按摩治疗疾病的认识主要建立在中医经络学说的基础上。现代医学对按摩机理的研究,已涉及循环、神经、消化、免疫及运动等系统。研究方法也从宏观进入微观,从单纯临床经验、疗效及手法的总结,发展到用现代医学的思维方法及其科学手段揭示按摩对人体生理和病理的影响。

1960年赵鞠等最先观察到在背部两侧按摩不仅使局部毛细血管扩张、血流旺盛、皮温增高,而且对肢体远端部位也有影响。同时期南京中医学院则报道了按摩能使血压下降。1979年郑凤胡等观察到按摩能使冠心病患者冠脉血流迅速好转,心电图S-T段和T波改善。80年代,朱金山等许多学者证实按摩对高血压患者具有降压作用。1984年潘崇海等对按摩降压机理进行了研究,发现按摩降压与高血压按摩后患者全身血管扩张,总外周阻力降低有关。同时也有动物实验表明,对大鼠腹部做按摩能使股动脉血压下降。按摩对微循环亦有良好的影响。1984年黄金德观察到按摩后手外伤患者甲皱微循环障碍明显改善。1992年刘克俭等发现,腹部按摩能使脑动脉硬化患者甲皱微循环改善,同时可以增加其脑电图波幅,缩短流入时间,改善脑动脉搏动性供血强度。以上研究表明,按摩治疗疾病与其调节和改善局部及全身的血液循环有关。1984年起刘志诚等接连报道了按摩对调节血液循环具有重要作用的单胺类物质的影响。发现按摩能引起血浆中去甲肾上腺素和多巴胺含量的下降,且儿茶酚胺下降的程度与按摩疗效有关。刘氏等还发现按摩能使血浆5羟色胺和组胺浓度降低,认为按摩疗效与其对血液中单胺类物质的调整有关。许多学者则强调按摩作用与其对神经系统的调节有关。60年代赵氏等观察到按摩后患者脑电图 $\alpha$ 波增强现象,表明按摩能使大脑皮层的有序化程度增高。1984年嘉脱(A. Sato)报道,手法刺激鼠脊柱胸段可引起肾上腺素能神经活动立即明显减低。1986年威尔伦(H. T. Vernon)观察到,脊柱手法治疗的刺激通过传人纤维到达中枢和丘脑下部,使内啡肽和脑啡肽分泌增加。这些研究证实,按摩确实可引起神经-体液调节的一系列改变,按摩治疗疾病与神经反射有关。但中国按摩治病的一个主要特点是循经取穴地进行按摩。有实验表明,按摩脾俞、胃俞、足三里等穴位可引起胃运动的变化,而按摩非穴位区则胃运动无明显改善。临床按摩疗效也并非完全能用神经反射或神经体液的调节解释。因而按摩机制的研究仍有必要对经络本质进行更深入的探讨。

按摩可增强机体抵御外邪侵袭的能力。赵氏等在实验对象背部两侧按摩,观察到受试者白细胞总数轻度增高,白细胞嗜菌指数明显增加,补体效价升高,反映了按摩可引起机体非特异性免疫功能一时性增强。1991年,朱升朝等还观察到按摩可使咳嗽小儿体液免疫球蛋白IgA、IgG含量增高。

按摩对运动系统疾患的疗效确切,具有修复创伤和整骨复位的功能。赵氏等对家兔损伤跟腱创伤处进行按摩前后局部组织光谱和电镜的观察,发现对肌腱的创伤组织较后期应用按摩可促进坏死组织吸收,并促进成胶交替地使创伤组织修复到最完善的程度。同时有动物实验表明按摩可促进猴子因坐骨神经切断后再次缝合引起恢复的腓肠肌萎缩缓解。70年代赵鞠在腰椎间盘突出症患者的手术过程中做腰引伸的按摩手法,发现有些病例的突出物可以回纳复位。同时做直腿抬高并牵拉下肢时,可见椎间盘突出处的神经根有一定的移动度,并受到牵伸。这表明中国按摩的另一个特点是具有解剖力学基础。中国按摩流派中的伤科按摩八法就是“摸、按、端、提、推、拿、按、摩”,表明整骨与推拿密切结合进行。

按摩治疗疾病的疗效还取决于手法的强弱及优劣。有研究表明,强而快速的推拿可使神经系统兴奋,弱而平稳的手法则使神经系统抑制。在腹部进行较强烈的手法刺激可使胃肠分泌机能由低下迅速变为活跃。在临床对消化不良和便秘等疗效较好。在腹部应用安抚舒适的手法可减缓胃肠蠕动,对慢性腹泻效果较好。很多学者亦观察到按摩对胃肠蠕动和胆囊舒缩具有双向调节作用。1991年王茂音等观察到按摩可以影响体内的自由基代谢,

使腰椎间盘突出症和颈椎病患者增高的尿谷胱甘肽过氧化物酶及巯基物含量明显降低。并发现自由基的改变与按摩疗效有关,因而提出尿中谷胱甘肽过氧化物酶和巯基物含量的测定可作为按摩疗效的客观评定指标。

目前中国按摩疗法用于康复医疗,在病种上已涉及内、外、妇、儿、五官、杂病等领域。但用于治疗颈肩腰腿痛等运动系统疾患所占比重较大。80年代以来按摩用于心胸血管疾患,如冠心病、中风等及老年性糖尿病的康复已取得肯定的疗效,但还有待进一步总结和提高。

中国按摩流派繁多,手法各有特点,目前在手法名称和分类上还较为混乱,尚缺乏一个统一的标准。因此使按摩手法的规范化和进行统一分类,是按摩研究的一个重要课题。在按摩的学术交流上,目前还是以介绍手法经验和按摩疗效的多,对按摩机理研究的少,而对按摩机理研究的难点和热点是对按摩的经络学基础的研究。采用现代科学的理论和方法,探讨经络的本质,对于按摩机制研究的深入和突破都将具有重要意义。

参考文献

1. 赵翔等. 安医学报, 1960, (2): 73
2. 郑凤胡, 等. 上海中医药杂志, 1979, (6): 12
3. 潘崇海, 等. 上海中医药杂志, 1984, (6): 18
4. 龚金德. 上海中医药杂志, 1984, (5): 34
5. 刘克俭, 等. 按摩与导引, 1992, (3): 1
6. 刘志诚, 等. 安徽中医学院学报, 1984, (6): 46
7. Sato A, et al. JMPT, 1984, 73: 141
8. Vernon H T, et al. JMPT, 1986, 90: 118
9. 朱升朝, 等. 按摩导引国际学术研讨会论文集, 1991, 29
10. 王茂音, 等. 安徽医科大学学报, 1990, (2): 144

(安徽医科大学第一附属医院陈惠德主治医师撰)

推拿按摩手法治疗颈椎病机理研究

颈椎病是由于感受风寒湿或劳损、外伤等因素所致颈椎骨、关节、椎间盘及周围软组织的退行性变,刺激或压迫颈神经根、脊髓、椎动脉、颈交感神经等而出现的复杂的综合征候群,又称为颈椎综合征。多发于30~60岁的中老年人。轻者影响劳动,重者可造成残疾。随着人们对本病认识的不断深入,发病确诊率有逐年上升趋势。中医学虽无此病名,但在古典医籍中早有类似记载,属于颈项痹、颈肩痛、项强、头痛、眩暈、痿痹等证范畴。对于本病的治疗,我国在长期医疗实践中积累了丰富的经验,治疗方法独具特色,有牵引、手法、中药、针灸、挑灸等以及一些中西医结合的非手术疗法。其中,推拿按摩手法是重要疗法之一,除对脊髓型颈椎病疗效较差外,对其他类型颈椎病都可取得较满意效果。常用的手法有推、拿、按、摩、揉、滚、牵、扳、旋、提、拨、弹等。有关推拿按摩手法治疗取效的机理,自1982年来,不少学者进行了探索,主要有以下几个方面:

手法的综合作用 韦贵康等根据病情辨证施法,分别用侧旋提椎、旋转复位、分筋理筋、定位揉按等手法治疗135例患者,主要症状改善率为90.3%;243例患者颈性血压异常改善率75.5%。另对颈性脑血流图异常、高血脂、视力减退的病例,症状均有不同程度的改善。认为手法有舒筋、活络、调理气血、整复移位的作用。治疗效果可能是通过缓解局部肌痉挛、松解软组织粘连、恢复正常解剖结构、消除局部炎症刺激、调节神经功能、改善血液循环实现的。郑效文等通过实验观察认为,推拿手法可使椎间孔的形状和大小发生改变,作用于神经根周围的环境,减轻或解除对神经根的刺激和压迫。王金柱综合常用的24种手法,组合为点穴、理筋、拿法、揉法、拨筋、端提、旋转、振动等八法,治疗颈椎病取得满意疗效,认为手法的治疗作用有:(1)疏通经络,消瘀止痛。(2)增大椎间隙及椎间孔,解除对神经根的压迫。(3)松解神经根及软组织粘连。(4)缓解肌肉痉挛,恢复颈椎活动。(5)减轻肌肉僵硬,防止关节僵直及畸形。这些论断,大多是根据施行手法后颈椎病症状和体征的改善而总结出来的概念性结论。

手法对椎—基底动脉供血及脑血流图的影响 王以慈用坐位颈椎定点旋转复位法治疗颈椎病139例,观察手法前后患者脑血流图的变化,结果表明,脑血流图于复位后,其椎动脉供血有所增加,认为椎动脉血流图可作为判断颈椎错缝后坐位颈椎定点旋转复位法疗效的一项客观指标。龚金德等对10例椎动脉型颈椎病患者进行推拿前后的脑血流图检查,发现波型、重搏波、上升时间、波幅等在第1次推拿后无明显改变,经10次推拿后,以上指标均有不同程度的改善。因而认为推拿的疗程一般以20~30次为宜。袁靖观察按摩治疗100例颈椎病的椎动脉血流变化,血流图各项指标按摩后均有不同程度的改善,统计学处理有显著差异。认为血流图方法不仅能客观地准确反映脑部搏动性血液供应增减状况,而且可以分析血管弹性和紧张度,可作为判定疗效的定量指标。王军等用手法治疗25例颈椎病(包括神经根型、椎动脉型及二者混合型)患者,作治疗前后脑血流图测定,结果是推拿后上升时间无明显变化,而波幅显著增高,流入容积显著增大,提示推拿后椎动脉与脑的血液循环均得到改善。认为手法的作用在于疏通气血、整理关节、振奋阳气、温濡血脉,因而取得良效。

手法对甲皱微循环的影响 倪文才等对30例椎动脉型颈椎病患者用点按棘突、旋转复位、分筋理筋手法治疗,并观察手法前后甲皱微循环的变化,结果显示,手法治疗后全部病例甲皱微循环皆有管祥增粗或血流增速;应用人体平衡仪检查人体重心偏移形态及程度,证明手法后有显著改善,说明手法治疗后椎动脉系的血循环得到改善。顾华等对59例神经根型颈椎病患者用牵拉复位、分筋理筋、按摩等手法治疗,观察手法前后患肢无名指甲皱微循环,结果显示,手法后患肢甲皱微循环改善,清晰度增大,单位面积内管祥数量增多,异常管祥减少,排列较前整齐,流速加快,病人临床症状亦获得缓解。认为手法的作用是纠正解剖位置的异常,恢复脊柱的内平衡,缓解神经根的压迫,减轻对神经根的刺激,促进神经根周围炎症水肿的消散和吸收,使交感神经的兴奋性恢复正常。通过疏通经络、行气活血、舒筋活络,气血运行得以调畅。

手法对皮肤血液循环的影响 刘少坪等用按摩手法治疗椎动脉型颈椎病38例,观察按摩前后局部皮肤血液循环的变化,发现按摩一次后变化不明显,按摩10次后有非常显著性差异。还观察到皮肤血液循环的改善与治疗效果大致呈平行关系。

手法对颈椎性杂症的作用机理 近年来发现颈椎病可引起许多杂症,如血压异常、视力障碍、慢性腹泻、吞咽障碍、耳鸣耳聋等,用手法治疗,同样可取得好的效果。韦贵康等曾先后对颈椎病性血压异常(高或低)进行临床治疗,总有效率为88.9~89.4%。认为颈椎性血压异常是由于外伤、劳损,使颈椎轻度移位或肌肉痉挛或炎症等局部改变,刺激颈交感神经节,使其支配的脑内血管运动中枢或上肢血管机能紊乱而造成中枢性的或外周性的血压异常。手法治疗在于纠正颈椎轻度移位,或解除局部痉挛,改善血循环,消除炎症,从而缓解对颈交感神经节的刺激。按中医理论解释为:以通为手段,整复不正之椎骨,疏散停滞之淤结,理顺不调之气血。手法作用在于“正则通”、“松则通”、“顺则通”、“动则通”,以“通”使气血脏腑功能恢复正常而奏效。张长江等用坐位颈椎定点旋转复位法治疗颈性视力障碍114例、206只眼,总有效率为83%。认为手法使患椎恢复其原来的解剖位置,促使受损软组织修复,恢复颈椎正常的或代偿性的内外平衡关系,解除因患椎移位对血管、神经、脊髓的刺激压迫,使临床症状和体征消失或减轻。贾振富用牵引及手法治疗颈椎病引起的视力减退104例,发现视力有改善,认为与改善椎动脉供血状况有关。徐山等用按摩复位手法治疗颈椎性腹泻200例,治愈129例,好转64例。认为颈椎性腹泻的发生是由于颈椎椎体发生移位,椎动脉可直接受压或交感神经纤维受刺激而发生血管痉挛,出现椎—基底动脉血流量减低,继发下丘脑缺血,使内脏功能失调,引起长期慢性腹泻(五更泻)。手法复位矫正颈椎错缝,恢复颈椎内外平衡关系,可使血流量增加或恢复正常,使椎—基底动脉供血得到恢复。按中医理论解释,认为颈性腹泻为肾虚虚



证,颈项为督脉之所过,督脉总督一身之阳经,沿督脉循行部位行手法治疗,可使其肾阳虚得到改善,恢复下丘脑之功能,从而达到治五更泻的效果。徐山等通过钨剂X线透视动态观察,发现手法后小肠蠕动由快变为正常,痉挛或紧张的结肠得到缓解,排便时间明显延长。

对手法治疗颈椎病取效机理的研究,着重在于手法对椎—基底动脉供血状况及交感神经刺激方面的检测,大量资料证实,手法对改善椎动脉供血、缓解交感神经刺激症状,促进局部血循环、缓解局部肌痉挛等方面有着显著的作用,与中医学认为手法可以行气活血、通经活络、舒筋解痉、化瘀止痛、调畅气机的机理是一致的。但还有许多问题值得进一步探索。例如诊断颈椎病的主要指标是X线片的异常改变,而手法治疗对颈椎病X线的异常改变多数不能用作判断疗效的标准。有的学者观察手法仅对颈椎的生理曲度、小关节半脱位等有明显影响,对椎间孔狭窄、椎间隙狭窄有部分影响,而对其他异常则几无作用,认为应以颈椎病的临床症状改善与否作为判断疗效的主要标准。可见,X线诊断标准与疗效指标间的不一致还有待深入探讨。此外,颈椎病CT、MRI、肌电图、诱发电位的诊断研究较多,而手法对这些方面的影响的研究,迄今资料甚少,需深入探索。即使是已知的“机理”,确定性的量化指标亦较缺乏;值得提出的是手法本身存在的质量问题。手法熟练、经验丰富的临床家,治疗效果就好,手法生疏或不得要领者,手法效果可能就差或无效,甚至出现医疗事故(已有不少报告)。手法质量直接影响治疗效果,因此,不能笼统地评价手法的作用。在进行手法机理研究中必须考虑到手法的质量因素。如何使手法统一而规范化,是一个有待解决的更复杂的问题。

#### 参考文献

- 1 龚金德,等.江苏中医杂志,1982,1,58
- 2 王以慈.辽宁中医杂志,1982,4,46
- 3 韦贵康,等.中医骨伤科杂志,1986,2(1):36
- 4 顾华,等.中医杂志,1987,4:278
- 5 刘少坪,等.中华理疗杂志,1988,3:154
- 6 徐山,等.中华中医骨伤科杂志,1988,4(3):16
- 7 贾振富.中国骨伤,1990,2:25
- 8 王军,等.山东中医杂志,1991,10(6):28
- 9 王金柱.中国骨伤,1992,5(2):19

(山东济宁医学院王广智教授撰)

**针灸学** 针灸学是在中医学理论指导下对经络、腧穴、刺灸技术以及防治疾病研究的一门学科。它以临床应用为主,继承传统经验并开展基础研究工作。针灸疗法临床应用广泛,可治疗内外妇儿等科许多种病症,起着主治或辅助治疗的作用,此外还被用于兽医临床。由于它操作方便,疗效确实,费用低,对有关条件要求不高,因此千百年来能在社会上世代流传,不断发展。

早在唐代,针灸就已向日本、朝鲜等国传播。20世纪50~60年代针刺治疗急性阑尾炎与菌痢和70~80年代针灸治疗免疫性疾病、急性脑血管病等的临床与机理研究成果,尤其是70年代针麻下施行手术的成果公诸于世以后,针灸被公认为世界医学的重要组成部分。世界卫生组织确认43个病症针灸疗法并向世界推广,认为这是实现“2000年人人享有卫生保健”战略目标的重要途径之一。1987年11月世界针灸学会联合会成立,由中国医师担任第一任主席,并把总部设在北京,这在我国所有自然学科中是首例。针灸学在中医药各学科中率先走向世界。

针灸学的发展经历了漫长岁月,针刺工具从砭石演变到今天的不锈钢针与无菌针,从一个侧面反映了它的发展。传统针灸方法同现代科技的结合,促进了激光穴位照射疗法、电针疗法等众多新疗法的问世,揭示了借鉴并吸收科技进步成果的重要性,也反映针灸疗法向无创伤方式过渡的动向。此外,现代科学方法与技术也较多地被引进实验针灸研究领域,终于导致实验针灸学的诞生,丰富了针灸学的内涵,这是针灸学发展的必然。实验针灸教学的开展结束了针灸专业教学无实验课的历史。可以认为,

针灸学是中医学科中最先引进现代科技技术,开展多学科协作研究,探索科研开放格局最为活跃的学科。

50年代以来,经络研究始终是中国医学科学研究的重要课题之一。当经络的形态学研究陷入困境之后,学者们总结了经验教训,依据“肯定现象、掌握规律、提高疗效、阐明本质”的思路继续开展研究,经过探索,取得了显著的进展:(1)肯定了循经感传等经络现象的存在,揭示这是人类普遍存在的一种生命现象;(2)能以多种指标检测和显示经络的循行路线,其中以同位素示踪与经穴皮肤电阻抗的研究为多;(3)有人入在经络线组织生理学研究中发现,围绕在某些血管周围的神经纤维与肥大细胞是经络信息传递的物质基础,这显示经络不仅是存在的而且有其形态结构;(4)循经声信息检测和应用热象图仅显示感传引致的升温区循经迁延等也取得某些有意义的结果;(5)对经穴—脏腑相关及其联系途径进行研究后认为,穴位功能有其相对特异性,内脏病变时在体表可出现某些规律性的反应,这些反应可以客观测试,也可直接观察,结果能够重复,针灸可对脏腑功能产生调整作用。另外,中国学者还从不同角度提出某些有关经络实质的假说,正在进行验证。应当看到,过去多次出现的对经络研究某些夸张的报道,曾引起对此项研究的某些误解。有学者认为,过去的研究对经络的生物学特性重视不够。循经感传现象虽已肯定,但经穴与脏腑的具体联系途径尚不清楚,脏腑活动调节规律也远未掌握。还有学者认为,如果把经络“线”与经穴—脏腑联系调节等功能活动分离开,孤立地去考察它的物质基础,所得结果可能会偏离经络的本质。

腧穴的研究主要围绕其结构与功能两方面展开。形态学研究迄今未能找到尚未被认识的特殊结构。作为感受装置,腧穴的最主要结构基础是针感受装置的结构,而作为效应装置,其结构基础同形成低电阻点、活动点、压痛点和穴位下硬结的结构基础密切相关。研究资料显示腧穴感受刺激的特点是:只有有限程度的适宜刺激,有其特殊的感觉阈限,对不同能量形式的刺激有不同的适应性。腧穴在病理状态下可反映病候,检查腧穴可协助诊断并指导选穴。腧穴功能历来是用它的主治病症来表达的,有学者认为建立在实验基础之上,结合治疗作用的研究,对腧穴功能作系统的表述将会逐步实现。至于腧穴功能特异性研究,迄今尚不够系统,总体上仍停留在效应观察的水平,有待深化。有人发现腧穴有增强药物作用的功能,针药并用可增强针刺麻醉的效果,表明揭示产生腧穴与药物、针药结合协同作用的奥秘,会有利于利用腧穴功能的这一特性提高针灸疗效。

近年来,运用现代科学方法与技术,在刺灸方法有关参数的测定与分析比较、原理探讨等方面,也取得新的进展,并形成多种新疗法,研制不少新的测试、诊断和治疗器具,丰富了针灸治疗学的内容,也促进了经络、腧穴的研究。研究资料已证明,不同针刺方法引致的生理效应存在明显的差异,不同灸法的温度曲线有其各自的特点,不同参数的电针刺激效应也是不同的。这些均提示在临床应用时应有所选择。研究资料还显示,针灸作用是多种因素相互作用的结果,因此在设计实验方案或评估针灸疗效时还需综合考察各有关影响因素的作用,孤立地强调其中某一因素而忽视其它因素,往往难以达到预期的疗效,妨碍客观地评估疗效或实验结果。

针灸的应用及其研究是针灸学术的主要方面,近年来也在原有基础上取得新的进展。如通过研制电子计算机专家系统总结老中医临床经验,在取得疗效的基础上,结合基础研究开展针灸治病的机理探讨;加强针灸治疗脏腑病的研究,尤以心脑血管病与免疫相关性疾病(如桥本氏甲状腺炎、甲亢症、类风湿性关节炎、慢性乙型肝炎、过敏性哮喘、乳腺增生病、难治性肺结核和恶性肿瘤等)的研究引起更多的关注,取得重要进步;为适应社会新需求开展针灸戒烟、减肥等研究;开始重视针灸预防疾病与延缓衰老的研究;针灸和药物并用的规律与提高疗效的研究已有可喜的苗头;重视在针灸治疗中对影响疗效的某些因素进行比较分析,如对化痰灸治疗支气管哮喘中炎症化脓与否;施灸季节和施

灸时疼痛与否对疗效的影响作了比较,进一步认识到时间因素对针灸作用的影响,时间针灸治疗学的研究得到重视;艾灸法的应用与研究受到进一步重视,积累了新的科学资料;针灸临床研究思路与方法的探讨与交流较前活跃。但是,继承针灸老专家经验的工作尚待深化;日常针灸医疗中病种颇狭窄,长期形成的临床工作格局仍限制着针灸医疗潜力的充分发挥;重针刺轻艾灸、重治轻防的倾向依然未明显改变;临床研究成果的推广效果不显著;在医治心脑血管病、慢性乙型肝炎、恶性肿瘤、难治性神经精神疾病中,针灸还未能充分发挥一个方面军的作用等等,这些问题必须引起足够注意,以期针灸这一非药物疗法在防治疾病中发挥更大的作用。同时,针灸治病与机理研究涉及到不少尚未被现代生物科学所认识的生命科学内容,其研究成果将为人体生命科学的进一步探索开辟新的思路与途径。

国际科学界把90年代定为“脑的10年”,针灸学科应在“脑的10年”所规划的神经科学蓬勃发展的大背景下来规划针灸的临床与机理研究,以求针灸学术取得更快更大的发展。

#### 参考文献

- 1 林文注. 实验针灸学. 上海:上海中医学院出版社,1989
- 2 季钟朴. 中医经络现代研究·序言. 北京:人民卫生出版社,1990
- 3 国家中医药管理局科技司. 健康报,1990,2(10)
- 4 张保真. 健康报,1991,10(12)
- 5 陈汉平,等. 上海针灸杂志,1989,1:1

(上海市针灸经络研究所陈汉平教授撰)

**针灸—免疫研究** 系应用针灸学与现代免疫学理论、方法和技术,探讨刺灸腧穴对机体免疫功能进行调节的效应、规律及机理。此方面的研究已成为继针刺镇痛临床与原理研究之后,针灸学同现代医学科学相互交叉的又一颇为活跃的研究领域,其研究成果将有利于更客观地认识针灸调节功能的作用,指导治疗和丰富实验针灸学的内涵。

从50年代起,中国已有人应用免疫学方法与技术研究针灸的作用,随后为阐明针灸治疗急性阑尾炎、急性菌痢和自身免疫性疾病的机理而开展的研究取得了新的进展。以往的研究资料反映,刺灸腧穴可不同程度地调节机体特异性或非特异性的体液与细胞免疫功能,显示了在防治疾病方面的价值,也为针灸消炎镇痛、抗菌抗病毒抗毒等作用提供了实验依据。在针灸—免疫效应表达上,刺灸腧穴往往优于非腧穴,刺灸不同的腧穴具有相对的特异性,腧穴可增强药物穴位注射后的免疫效应;刺灸腧穴有增强药物功效的作用。有关学者认为,腧穴在针灸—免疫作用方面的这些特性值得进一步研究、验证并加以利用。通过归纳针灸治疗免疫相关性疾病过程中抗感染、抗自身免疫病理、抗过敏和抗癌作用的某些规律性现象,认识到针灸作用大多不是直接针对致病因子,病变组织的的而主要是通过调节体内失衡的免疫功能而实现的,并且具有整体性与双向性特征,即在不同水平上对多个器官、系统正常的或异常功能的产生影响,但对正常功能的影响一般仅限于生理范围内,对向相反方向偏离的功能可产生反向性的调节作用。所以,针灸作用是一种良性的调节作用。这是针灸治病既可产生疗效又不引起毒副反应的生理学基础。可以认为,针灸疗法在调节功能这一重要环节上发挥着比药物更符合生理学规律的作用。研究资料还表明,只有当外周神经传入机能健全、中枢神经功能正常,针灸才能发挥其调节免疫功能的作用,生理浓度的皮质醇等物质对针灸—免疫效应的发生是必需的。这些初期研究资料已提示神经、内分泌激素参与针灸—免疫作用过程的调控。

近期研究进展主要在于:(1)治疗:对慢性乙型肝炎、急性病毒性肝炎、无症状乙型肝炎病毒携带者、难治性肺结核、急性菌痢、间日疟等的治疗结果表明,针灸可有效地对抗病毒、细菌或原虫感染,是通过加强或调节患者免疫防卫功能而发挥抑制感染的作用。治疗过敏性哮喘的资料证实,针灸对血清总IgE与特异性

IgE均有降低作用,并可使外周血嗜碱性粒细胞数与脱颗粒能力下降,CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞数增加,T细胞亚群异常的比例关系得到明显纠正,从而改善免疫机能状态,提高患者抗过敏抗过激的能力。有人在建立外分泌液中SIgA超速离心分离测定方法的基础上,对本病患者粘膜免疫功能和针刺对它的调整作用进行研究,表明患者粘膜呈SIgA免疫高反应状态。呼吸道粘膜SIgA量增多,可能通过介导嗜酸粒细胞脱颗粒引起迟发型炎症反应,并同免疫调节机制失调有关。患者经治疗后均获较好效果,认为针刺降低血清IgE含量,为控制本病发作的第1级机制(IgE介导的肥大细胞脱颗粒引起的速发型变态反应),减少粘膜外分泌液中的SIgA含量,为阻断发病的第2级机制(SIgA介导的嗜酸粒细胞脱颗粒引起的迟发型炎症反应)。针灸治疗自身免疫病是近几年开展较多的研究项目,如桥本氏甲状腺炎、甲亢、类风湿性关节炎、慢性非特异性溃疡性结肠炎等。桥本氏甲状腺炎患者经艾灸治疗后,在症状体征明显改善的同时,血清抗甲状腺抗体结合率、K细胞活性和Th/Ts值均明显下降。外周血淋巴细胞在体外经PWM刺激后,分泌甲状腺抗体的水平与Th/Ts值呈显著相关性,艾灸后随着后者值的下降,淋巴细胞分泌甲状腺球蛋白抗体和甲状腺微粒体抗体水平也相应降低,提示艾灸纠正该病患者自身免疫异常是通过调节T淋巴细胞亚群间的关系而实现的。血清TSH受体抗体在甲亢发病中是一个重要的中间环节,原发因素可能同细胞免疫异常有关。针刺治疗甲亢有效,降低患者血清T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>含量和TSH受体抗体活性,可能同针刺后CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞增加,CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞减少、纠正CD<sub>4</sub><sup>+</sup>/CD<sub>8</sub><sup>+</sup>异常比值相关。通过临床与动物实验已初步显示,针灸可通过调节免疫功能而产生一定的抗癌作用,并对癌前病变增殖向癌发展起某种阻断作用。(2)预防:研究资料表明,针灸可较有效地预防实验性结核病与流感,其机理同针灸增强巨噬细胞吞噬能力、T细胞转化功能或通过提高血清干扰素效价,活化巨噬细胞有关。临床与动物实验资料提示,针灸具有延缓衰老的作用。当隔药灸关元等穴后,健康老人NK细胞活性、淋转功能明显提高,自身花环形成率降低,失调的T细胞亚群比例得到显著纠正,延缓免疫功能的增龄性紊乱。上述预防性研究有利于纠正本领域重治轻防的倾向。近几年已开始重视对影响针灸—免疫效应的因素如腧穴、针灸术式、刺灸时机等进行分析比较,从而有利于进一步认识针灸—免疫作用规律,改进疗法,提高疗效,也有利于提高实验结果的重复率。(3)机理研究:由于认识到体内存在着神经—内分泌—免疫调节环路,有关学者研究了不同神经递质系统在针灸—免疫过程中的调控作用,或对电针过程中纹状体内亮啡肽对免疫反应的调节进行探讨;或为针刺影响免疫功能在中枢有神经激素的调节、在外周通过神经肽同免疫活性细胞受体相互作用的机理提示了物质基础;或利用免疫组化方法观察到电针可激活淋巴细胞上未结合的亮啡肽受体活性而调节细胞免疫功能,电针后在内源性阿片样肽释放增加的情况下,对NK细胞活性、淋巴细胞环核苷酸与受体的影响,均可能通过内源性阿片样肽受体起作用。上述实验资料提示,针刺信息可从外周传至中枢神经,影响不同递质类型神经元活动,经过中枢的整合,一方面调控内分泌系统的功能,使垂体释人有关激素,调节免疫功能;另一方面又通过中枢下行通路引起植物神经系统释放某些递质以及脑啡肽等物质,通过免疫器官或淋巴细胞又可释放具免疫活性的多肽物质影响外周神经,进而影响中枢递质神经元与内分泌系统的活动,实现反馈性调控,形成调节环路,共同维持机体的自稳态。但迄今为止,针灸—免疫作用的内分泌机制的研究,似乎尚未真正起步。由于认识到除神经—内分泌调节外,免疫系统的平衡还有赖于自身调节,针灸—免疫作用在这个层次的机制研究较整体调节层次者多,但大多数限于T辅助细胞和抑制细胞相互关系、巨噬细胞以及这些细胞产物水平上。另外,在研究中已经应用红细胞花环技术,观察到针灸调节功能同它影响红细胞免疫粘附活性有关。

随着免疫学的发展,认识到治疗自身免疫性疾病应通过调节功能的途径以期重建免疫系统稳定性,因而免疫调节剂的研究

与应用受到重视。从上述资料所展示的针灸对免疫系统功能良性的调节作用,不难看出同免疫调节剂有类似之处的针灸疗法,是实现上述治疗战略的一种重要手段,今后应对治疗自身免疫性疾病等的腧穴与刺灸方法及其它相关因素加强研究,阐明其作用规律、原理和调控机制。过去,由于往往把神经系统、内分泌系统和免疫系统割裂开来进行研究,从而影响了从更深层次上阐述针灸一免疫作用的机理。今后,应用免疫生理学的最新知识,跟踪“脑的10年”中神经科学研究的新成果,研究中枢神经递质与内分泌激素在调控针灸一免疫反应中的作用,探讨其反馈调节途径以及它们同免疫细胞表面受体的关系等,将对阐明针灸一免疫作用规律与机理具有重要的意义,也将对临床治疗起指导作用。

#### 参考文献

- 1 赵建础,等. 陕西新医学,1983~1984
- 2 成柏华,等. 针灸与免疫功能研讨会论文汇编,天津,中国针灸学会,1988:186
- 3 夏韦江,等. 上海市针灸杂志,1986,3:1
- 4 胡国胜,等. 上海针灸杂志,1990,4:4
- 5 何金森,等. 中国针灸,1990,6:19
- 6 翟道扬,等. 上海针灸杂志,1990,2:32
- 7 喻国雄,等. 上海针灸杂志,1990,1:30
- 8 赵粹英,等. 上海针灸杂志,1990,4:1
- 9 杨永清. 上海中医学院博士学位论文,1991:1
- 10 陈汉平. 上海针灸杂志,1992,1:39

(上海市针灸经络研究所陈汉平教授撰)

### 针灸对内分泌系统功能调节作用的研究进展

the advancement of adjustment of acupuncture and moxibustion to the internal secretion system 近年来针灸对内分泌系统功能调节作用的研究很多,涉及内分泌系统各个方面,并有许多新发现,如针灸对下丘脑—垂体—肾上腺皮质、对甲状腺、对性腺系统、对交感—肾上腺髓质及对胰岛等内分泌功能的调节作用。

**针灸对垂体—肾上腺皮质系统功能的调节作用** 针灸可影响肾上腺皮质激素的合成,并对血浆皮质激素水平起良性的调整作用。成柏华报道,针刺治疗不同疾病后血浆皮质醇含量具有双相变化,凡疗效明显者,其血浆皮质醇含量原来高者降低,低者升高。针刺急性心肌梗塞和风湿性心脏病患者的双侧内关穴,原来血浆皮质醇水平低者,针后可使之升高,原来水平高者,针后下降,趋向正常范围。有人报道,针刺支气管哮喘急性发作期患者,针后血浆皮质醇显著增加,针刺前后相比有非常显著差异,而且有较长的后效应。王友京报道,在针刺镇痛或针刺麻醉过程中,针刺对垂体—肾上腺皮质功能主要呈现增强的趋势。动物实验也显示针灸对本系统功能有调整作用。电针“足三里”,既能使正常家兔肾上腺皮质醇及皮质酮的合成呈双相性变化,又能抑制分别处于捆绑、冷、热3种不同应激状态下的家兔肾上腺激素的含量。刘金兰等对失血性休克家兔针刺“人中”,发现可促使肾上腺皮质细胞合成激素能力增强。有人针刺正常大鼠“足三里”,结果针后促肾上腺皮质激素(ACTH)活性显著增高,针后5min仍高于针前水平,1h后降至针前水平。在注射氢化考的松造成的肾上腺皮质减退的动物模型上,以弱电针刺激双侧“肾俞”可使该动物模型血浆中皮质激素含量明显增加,与单纯注射药物组相比, $P < 0.001$ 。国外资料表明,电针能有效地抑制大鼠戒断症状及吗啡成瘾小鼠血浆内ACTH和皮质酮水平的升高。赵湘杰等人的研究资料还表明,针刺能干预肾上腺皮质系统的反馈调节功能。当针刺“足三里”或静脉注射利血平后,血浆皮质醇浓度均增大,电针作用可能是由于解除了肾上腺素系统对腺垂体ACTH抑制性影响所致。针刺已注射地塞米松的大鼠可以使被抑制的肾上腺皮质激活,说明针刺能有效地拮抗外源性激素对肾上腺皮质轴的反馈性抑制。

针刺对肾上腺皮质系统的促进作用,已得到形态学的证实。袁德霞报道,在电针镇痛引起肾上腺皮质细胞机能活性增强时,

从电镜观察到肾上腺皮质血管扩张,内皮细胞肿胀,吞噬小泡增多,结缔组织增宽,特别是束状内带及网状带变化显著。有人观察经电针诱导30min后所摘取的实验动物肾上腺组织切片证实,皮—髓型细胞中儿茶酚胺、囊泡脂状体内含物减少,巨噬细胞的核膜出现小泡,泡膜上有丰富的颗粒,泡旁有线粒体堆积。也有人用艾灸肾俞、关元治疗氢化考的松动物模型,显示施灸后肾上腺皮质增厚,束、网两带的胞体和胞核增大。

**针灸对垂体—甲状腺系统功能的调节作用** 以往的临床和实验资料表明,针刺穴位不同,刺激手法不同,对甲状腺功能的影响也不相同,无论是切断交感神经或是迷走神经,针灸均可调整其损伤后的甲状腺滤泡变化,使原滤泡扩大者缩小,缩小者扩大,起到双相调整作用。何金森等报道,针刺治疗甲状腺机能亢进患者,治疗前或治疗后病情未获控制的患者TSH明显低于正常,而 $T_3$ 、 $T_4$ 显著高于正常,治疗后病情控制的患者谷TSH明显升高, $T_3$ 、 $T_4$ 显著下降。胡国胜等用艾灸治疗甲状腺机能减退的桥本氏甲状腺炎,治疗前血清总 $T_4$ 、 $T_3$ 含量偏低,TSH含量偏高,治疗后 $T_3$ 、 $T_4$ 升高,TSH降低。吴泽森报道,针刺内关、合谷、间使、足三里、三阴交等穴,甲亢患者血清中 $^{131}I$ 抑制率明显升高。有人报道针刺治疗甲亢患者2~3个月后,在 $T_3$ 、 $T_4$ 含量下降的同时,尿17-羟、17-酮含量也下降。何金森报道,甲亢患者血清TBII与 $T_3$ 、 $T_4$ 含量呈显著的正相关,针刺治疗后,TBII活性明显下降,同时 $T_4$ 、 $T_3$ 含量也显著降低,甲状腺激素受体抗体活性以治疗后病情控制者下降最为明显,针灸的疗效对血清TBII活性有关,针刺两个疗程比针刺一个疗程更有利于活性进一步降低。恒健生也同时报道,针刺治疗三个疗程的复发率比仅治疗一个疗程的甲亢患者低。

**针灸对垂体—性腺系统功能的调节作用** (1)促性腺激素和性激素:针灸对其调整作用主要表现为促进排卵。莫晓明报道,关元、中极、子宫、三阴交及肝俞、肾俞、十七椎下、三阴交两组穴交替针灸治疗排卵功能障碍患者,每周3次,连续治疗3个月,20例B超示无排卵发育者,治疗后15例有卵泡发育,内分泌指标变化表明针刺对卵泡刺激素(FSH)、黄体生成素(LH)、血浆雌二醇( $E_2$ )具有双相调节作用,即使高者降低、低者升高,总的趋向正常范围。俞瑾在电针促排卵有效基础上,对10例确诊无排卵患者进行电针治疗,并测定其治疗前后血FSH、LH水平的变化,结果电针后排卵5例(当月妊娠者3例),其血FSH、LH均上升。有人通过动物实验证实针刺可激发排卵。卓廉士通过动物实验观察针灸对血浆睾酮(P)及附性器官的影响,发现针灸小白鼠“关元”穴,有促进睾酮分泌、增加附性器官重量、提高性腺机能的作用。吴泽森报道,针灸治疗多毛症可使多毛症患者的血浆P水平明显下降,24h17-酮的高排量恢复至正常水平。在大鼠皮下注射 $E_2$ 造成乳腺增生症的动物模型中,针刺后可使升高的 $E_2$ 含量降低,P、T含量升高,从而达到治疗乳腺增生症的目的。熊鸿翔等报道,针刺和隔姜灸治疗男性不育症患者,治疗前绒毛膜促性腺激素(HCG)和T低于正常对照组,治疗后回升达到正常水平。(2)泌乳素和催产素:以往的研究资料表明,针灸具有良好的催乳作用。刘继章报道针灸治疗特发性高泌乳素血症,针刺百会、气海、足三里等穴,不仅降低泌乳素PRL,而且还降低过高的黄体生成激素。此外,动物实验揭示电针可使家兔垂体后叶催产素分泌增加。

**针灸对交感—肾上腺髓质系统功能的调节作用** 针灸对交感—肾上腺髓质系统机能也具有双相调节作用,并借此途径积极参与升压、镇痛等作用的形成活动。60年代就有人根据穴位注射可以使失血性休克狗的外周阻力增高的事实,认为这一作用可能是借交感—肾上腺髓质活动实现的。动物实验证明了这一点。针刺家兔“足三里”不仅使外周血液中的肾上腺素含量增加,连续针刺数天,还可以使肾上腺髓质内肾上腺素细胞以及去甲肾上腺素细胞明显增多,胞体增大,胞集反应加深。针刺“人中”可阻止失血性休克家兔肾上腺髓质儿茶酚胺的减少,延缓休克的发展,使死亡率降低。李家玲报道,针刺清醒狗“足三里”,结果表明针灸

可以兴奋交感—肾上腺髓质系统,使肾上腺髓质释放儿茶酚胺增多,并具有穴位相对特异性,而儿茶酚胺水平提高则可以加强针刺“足三里”的镇痛和调整效应。

针灸对胰岛及其他内分泌系统功能的调节作用 以往的临床和实验资料表明,无论是针刺人或实验动物,均可使血糖高者下降,低者升高,同时对甲状旁腺手术后血钙下降患者有调整作用。张涛清等人的研究资料表明,针灸能使胰岛素含量得到调整,加强胰岛素对糖的合成、酵解和组织利用。还能使血中 $T_3$ 、 $T_4$ 下降,提示血中甲状腺素含量降低会减少对糖代谢的影响和有利于血糖下降。针灸对其他内分泌系统功能的调整作用也有很多报告。赵建础等人的动物实验资料表明,针刺或电针均可使垂体后叶抗利尿素及血管加压素释放并呈增加趋势,还有报道显示针灸可使血浆中血管紧张素 I 或增或减,并呈时程性双向改变。

针灸治疗内分泌疾病虽已取得不少成果,但在疾病的治疗范围以及针刺治疗的机理方面还需进一步拓展和深入研究,还有许多空白点需要填补。针灸治疗某些内分泌疾病如甲亢等,虽已达到相当水平,但仍有进一步深入研究的必要,目前已证实神经—内分泌系统同免疫系统之间有着密切的联系,而且是双向联系,一方面免疫系统及其产物可以调节神经—内分泌功能;另一方面某些神经—内分泌激素可以影响和调节免疫功能。所以,甲亢患者垂体—甲状腺功能恢复正常之反馈调节是否与针刺后机体异常的免疫功能得到纠正有关?此外,在抗衰老方面,人体内分泌系统经针灸得到调整,是否可增强机体的免疫功能,从而达到延年益寿的目的,均有待进一步研究阐明。

#### 参考文献

- 1 刘金兰,等.中国针灸,1986,6(2):33
- 2 何金森,等.上海针灸杂志,1986,2:5
- 3 王友京,等.针刺研究(增刊),1988,24
- 4 吴泽森,等.中医杂志,1988,1:46
- 5 张涛清,等.中国针灸,1988,8(4):189
- 6 俞瑾.中西医结合杂志,1989,4:199
- 7 莫晓明.上海针灸杂志,1990,3:8
- 8 卓康士.云南中医学院学报,1990,3:45
- 9 刘继章.中医杂志,1990,10:40

(上海市针灸经络研究所郑蕙田研究员撰)

### 针灸仪器研究

现代针灸仪器,是以经络学说为理论基础,应用各种现代科学技术,紧密结合经穴、针法和循经感传等特点研制而成。随着针灸事业的发展以及各门学科向针灸领域的渗透,针灸仪器不断改进完善,应用日趋广泛,充分显示出其优越性,标志着针灸仪器的研制工作已趋向成熟,因而成为现代医疗器械学的重要组成部分。

针灸仪器的应用始于1934年,见于唐世丞发表的脉冲电针用于临床的论文,但真正在临床上普及推广则始于1958年。至今,电针仪已由感应式电针仪、电子管式电针仪发展为晶体管式电针仪,即第3代产品。1970年,在脉冲电针的基础上又研制出“经络导平治疗仪”,它利用低频率的高压电能代替针刺的机械能,补其不足,泻其有余,调整阴阳,疏导机体内的“生物电子”由不平衡转化为平衡,是一种有效治疗方法,它是针灸疗法的补充和发展。

1950年,德国伏尔(R. Voll)开始创用在穴位上进行无针电刺激的疗法,称为伏尔电针(EAV)。红外灸仪将红外线辐射于人体的经络血位上,使经穴产生温热效应,从而达到疏通经络、扶正祛邪的目的。红外灸仪辐射的红外线波长一般为近红外线(波长 $1.4\mu\text{m}$ 之内)和远红外线(波长 $1.5\mu\text{m}$ 以上)。近红外线透入组织最深,其穿透深度在 $10\text{mm}$ 之内,可直接作用于皮肤的血管、淋巴管、神经末梢及其皮下组织。远红外线穿透皮肤的深度仅达 $0.05\sim 2\text{mm}$ ,只能作用于皮肤的表层组织。

中国古代扁鹊曾作过磁石治病之尝试。西汉初期(约公元前200年),在《神农本草经》一书中记载过磁石的特性及其所治疗

的疾病。但当时是将磁石作为煎剂内服。磁疗研究于1965年开始,它将磁场和经络结合起来,应用于临床。1970~1973年,先后采用磁珠、稀土合金磁片用于临床。1974年,又将静磁场改为动磁场,研制成旋磁疗机。经大量临床实践,应用范围不断扩大,包括骨科、外科、内科、耳鼻喉科、皮肤科等多种疾病,对于一些常见病、多发病的有效率在80%以上。

除此之外,1959年研制出直流穴位离子透入仪,其后于1967年在全国范围开展了中草药透入疗法。1965年开始声电针的临床应用。1972年首次研制成微波针灸仪,收到较好的疗效。1973年又研制出电热针,它对探讨经络实质、研究经络理论、提高临床疗效有一定的价值。1974年激光穴位照射仪诞生并用于临床。

除了应用于针灸治疗的针灸仪器外,还有探测经络与穴位的针灸仪器,可以帮助诊断疾病。1950年,有人设计了测定皮肤电阻的测定仪,并发现一系列穴位的电阻均低于周围皮肤,这种现象特别出现在人体有疾病的状态下。日本中谷义雄把这些低阻点称为“良导点”。人为将良导点连接起来称为“良导络”,这些良导点和良导络与古代描述的穴位和经络基本相似。人们还发现在耳廓上同样存在很多低阻点,将它称为耳穴,可用其探测疾病。根据良导点思路,国内外研制出各种各样的经络测定仪和耳穴测定仪,以探测疾病和研究经络现象。

经穴测定仪和耳穴测定仪,都是对人体皮肤两点间电阻值直接的或间接的测量,以电阻值的变化来测定经穴系统功能状况,察知脏腑器官的病变。但皮肤是一个结构很复杂并具有多种生理功能的组织,皮肤电阻的各种电学参数之间表现出非线性、时变性的、频率性的3个特点。考虑到上述原因,有人提出经络电学网络可等效为一个电阻与一个电容并联后再与一个电阻串联的结构。这种结构提示人们,对于人体活组织电学特性来说,电阻与电容成份是两个同等重要的电学物理量,它们从不同方面反映活组织的微观结构和微观运动。

针灸仪器的不断丰富和日臻完善,推动了针灸学术的发展,有利于促进针灸医术的现代化。因此,针灸仪器的开发研究工作将有很大发展前景。无创伤针灸学即不造成创伤或痛苦的治疗方法,已成为中西医学嫁接点上萌发出来的一门交叉前沿学科,面针灸治疗仪器就是这个学科的一个活跃领域。对于针灸测定仪在探测中排除物理因素,提高诊断疾病正确性的研究也越来越多,这不仅对其本身有重大价值,而且对整个经络学的研究也会产生深远影响。

#### 参考文献

- 1 王志煜.上海针灸杂志,1982,2:41~44
- 2 佟玉杰.现代针灸电子仪器及其应用.哈尔滨:黑龙江科技出版社,1984.81~179
- 3 李志超,祝志攀.千古之迷经络物理研究.成都:四川教育出版社,1988.147~164
- 4 魏稼.江西中医药,1991,4:42
- 5 杨华元.中国针灸年鉴.上海:上海远东出版社,1992.111~116

(上海市针灸经络研究所杨华元副研究员撰)

### 针刺促排卵

研究中医经络学说提出月经失调、不孕与肾肝脾三经及任督脉功能失常相关。现代医学则认为排卵功能障碍是月经失调和不孕的一个主要因素。针刺促排卵研究,就是根据上述两种医学认识,对针刺方法、时间、对象和机制进行的研究工作。

历代针灸学家对针灸治月经病不孕均有记述。元代王国瑞云:“女子经候不匀调,中极气海与中髻”(《扁鹊神应针灸玉龙经》)。清代廖润鸿在《针灸集成》中云:“妇人绝嗣灸关元”。1960年,王世璠等总结了雌激素加针刺使月经不患者44例的排卵率达到54.4%。1961年,金同淇报道针刺可引起排卵、妊娠,并引起家兔卵巢卵泡膜细胞和间质细胞黄素化现象。此后,针刺促

排卵在临床上引起注意,列为综合性促排卵的施之一。

单独针刺能否促排卵?其机制是什么?和哪些临床因素相关?这些都是现阶段需要研究的课题。1981年,俞瑾等通过对各经络上穴位统计得出肾、肝、脾三经和任督脉确是调节生育穴位集中的经络,从而选出关元、中极、子宫、三阴交诸穴,在月经第14d估计体内雌激素有一定水平时刺激3d,在31例无排卵患者中,51.6%有促排卵作用,证实针刺本身确可促排卵,其成功因素和体内雌激素水平相关,针刺对此激素水平有双相调节作用,但如针刺后雌激素水平仍低者即无排卵。同时,用手部皮肤温度测定法发现针刺后交感神经系统受抑制的患者排卵易成功,说明针刺后周围血管能扩张,而血流畅通者效果好,这和经络学说中针刺促气流通的观点相符合。以上二者是否可成为预测针刺促排卵效果的指标?他们又在临床选择27例体内有一定雌激素水平和针刺后交感神经系统受抑制的患者进行针刺治疗,排卵率提高到80.1%。1984年,俞瑾等又发现患者经针刺后交感神经系统的抑制状态和血内 $\beta$ -内啡肽样免疫活性物质水平变化呈负相关。因血脑屏障,血内 $\beta$ -内啡肽主要来自垂体,说明针刺后交感神经系统不受抑制者,其垂体原来处于干扰状态的针刺后仍处于干扰状态,有较多的前阿黑皮激素(POMC)裂解,表明可能直接或间接影响到FSH、LH的分泌。在患者中观察到,针刺可通过加速和加大垂体FSH、LH分泌的脉冲频率及分泌量而促排卵,原来脉冲频率正常者,针刺后仍无排卵,说明针刺是通过调节中枢神经内分泌活动而促排卵,如患者卵巢反应差则无效。下丘脑弓状核内 $\beta$ -内啡肽对GnRH神经原的调控和雌激素水平相关,通过纳洛酮( $\beta$ -内啡肽受体阻断剂)试验,发现在多囊卵巢综合征患者体内有一定雌激素水平者纳洛酮试验中LH反应较好,针刺后也易排卵,而雌激素水平低者,纳洛酮试验中LH反应较差,针刺后无排卵,提示针刺有通过中枢 $\beta$ -内啡肽而调节GnRH脉冲分泌,影响垂体FSH、LH分泌的作用。故中枢 $\beta$ -内啡肽水平低时,针刺效果也差,这也提出针刺促排卵效果和体内雌激素水平中枢 $\beta$ -内啡肽水平相关。提示雌激素水平可以作为预测针刺促排卵效果的指标。在此同时,临床上开展了多项观察工作,1984年陈德水用三阴交埋线加月经中期注射HCG,在22例不孕者中有16例妊娠;1986年郑长庚报道针刺加中药人工周期疗法使排卵率提高到81.6%;1985年史常旭用针刺加中药治疗多囊卵巢综合征97例,其排卵率为92.78%,高于单用针刺组和中药组,并提出针刺子宫穴时针尖可刺达卵巢;1987年傅兴生以针刺为主治疗黄体不健17例,结果15例妊娠、分娩。国外相继也有报道,1984年Papivanov报道对多囊卵巢综合征8例,针刺风府穴,4例排卵。在动物实验方面,1985年周世璋发现正常月经中期LH峰出现时,人的三阴交、足三里、内关穴电阻值有增加现象,给雌激素后此现象即消失。1986年周楚华在家兔体上针刺相应穴位后可诱发卵泡发育、成熟和排卵。

排卵是个复杂的过程,有中枢神经和周围神经相互调控的因素,中枢作用涉及许多核团神经递质、神经肽和激素的作用,目前尚在研究中。针刺有调整中枢的作用,在促排卵方面的研究尚属开始。因此针刺促排卵的研究有着很大发展前景,不仅与针刺的调节机制有关,而且与神经生殖内分泌学的研究进展有密切关系,同时在针刺促排卵研究中对穴位的特异性、刺激参数的差异、与临床辨证关系及针药结合提高效果等,也是经络学说研究的重要方面。

#### 参考文献

- 1 金问祺,等.中华医学杂志,1961,47:27
- 2 陈德水,等.中西医结合杂志,1984,4:521
- 3 史常旭,等.多囊卵巢综合征的中医治疗,1985,20:144
- 4 俞瑾,等.针刺研究,1986,11:86
- 5 周楚华,等.中西医结合杂志,1986,6:746
- 6 俞瑾,等.中西医结合杂志,1989,9:199
- 7 杨秋英,等.生殖医学,1992,创刊号

(上海医科大学妇产科医院俞瑾教授撰)

**头针疗法的研究进展** 头针疗法又称头皮针疗法,是在传统医学针灸疗法的基础上结合现代医学大脑皮层功能定位原理,在头皮相关穴区进行针刺,用来防治疾病的一种方法。

取头穴治痼古已有之,但形成独特的头针疗法是1971年由山西焦顺发首先创立的,他以针灸学之经气横向联系的理论为依据,结合神经生理学知识,总结出在大脑皮层功能定位的对应头皮部位具有16个刺激区;在针刺手法上采用“进针快、捻转快、起针快”的三快针刺术,很快在国内外推广应用。1976年,陕西方云鹏提出伏像与伏脏学说,总结出7个穴区、21个可用于治疗疾病的大脑皮层功能定位在头皮表面的投影区,针刺手法以浅刺(直刺或斜刺)加捻转为主。之后,上海汤炳延根据中医脏腑经络等理论,在头皮上确立若干个点与线,并设立意象头针模式,主张浅刺(沿皮刺)加提插、久留针的针刺方法。为适应国际间学术交流,有利于临床、科研与教学工作的开展,1983年中国针灸学会委托陈克彦组织有关专家论证,集诸家之长,将刺激区与传统的经穴相结合,制定了《中国头皮针施术部位标准化方案》(即14条治疗线)。该方案于1984年被世界卫生组织西太地区穴名工作会议所采纳,定为《头皮针穴名国际标准化方案》。陈克彦并将徐疾补泻手法用于头针临床,取得较好的疗效。1989年,朱明清在此方案的基础上结合头部经穴循行交会与主治特点,总结归纳为8条治疗带,并提出抽气与进气等针刺方法,进一步丰富了头针疗法内容。目前临床上多采用头针刺激区,用捻转手法;也有许多医家按标准化方案采用抽气法(即小幅度提插法)或用徐疾补泻法,亦有人用电针刺刺激来代替手法捻转,以及对所选穴区进行按摩、埋针、梅花针叩刺、艾条温和灸与磁疗等,均能取得一定疗效。

头针临床研究进展迅速,最初以治疗脑源性疾病为主,逐步发展到治疗临床各科150多种疾病。对于内科疾病,特别是神经科疾病应用最广。头针治疗中风病,疗效好,报道多。1991年,焦顺发归纳整理国内外报道的466篇头针论文,其中治疗脑血管疾病的就有20923例,约占头针治病总例数的64.7%。其中基本治愈7636例,约占36.5%;显效7117例,约占34.1%;有效5196例,总有效率为95.34%。1991年,王端义等用头针,取顶颞前斜线、顶中线、额中线,采用抽气法、进气法,对238例中风患者进行短期(10d以内)治疗,基本治愈者占23.52%,显效者占54.62%,有效者占16.80%,总有效率为94.95%。治疗癫痫病,陈克彦、史马玉等于1981年、1986年分别取头针胸腔区、运动区等,显效率为46.8%~66.3%,总有效率为67.7%~89.8%。1987年张鸣九治疗296例精神病出现各种幻觉者,治愈率为70.6%,显效为18.9%,总有效率为95.9%。1988年,胡炜昌取额中线、顶中线治更年期忧郁症101例,总有效率88.11%。1990年翟绪璜取运动区、感觉区、胸腔区治疗脑外伤后遗症50例,上下肢肌力全部恢复到4级以上。1992年贾怀玉等用头针治疗帕金森病25例,基本治愈率为16%,显效48%,总有效率88%。治疗神经科其它疾病尚有美尼尔氏症72例,基本治愈75%,全部有效;急性感染性多发性神经炎10例,总有效率90%;雷诺氏病8例,全部有效。头针治疗心血管疾病疗效亦佳。1988年,方云鹏头针治疗高血压1292例,显效率为77.3%,总有效率为97.9%。1991年,方云鹏又用头针治疗冠心病100例,症状改善率为97.24%。头针治疗哮喘,特别是对哮喘急性发作者疗效较好。1988年,杜全枝取胸腔区治疗12例,有7例针刺后哮喘得到控制,两例呼吸困难及气短消失,有效率达93.3%。对消化系统疾病,1991年郭兆通取双侧胃区治疗胃下垂158例,治愈86.1%,总有效率96.8%。吴新伟取额旁2线治疗菌痢114例,治愈率为81.5%,总有效率为98.2%,治愈次数平均2.69次。

头针治疗急症、痛证效果显著。1987年,朱明清用头针治疗急性胆绞痛、胆囊症、瘧病急性发作、冠心病急性发作伴心绞痛、急性腹泻、急性荨麻疹等取得十分满意的疗效。取枕上正中、枕上旁线治疗急性腰痛75例,痊愈48例,显效22例,有效5例。

1988年,全国头皮痛证协作组用头针随证取线,治疗不同部位痛证513例,治愈197例,显效202例,有效106例,无效8例,总有效率为98.44%。1991年,王海江针刺额前区线为主治疗头痛322例,治愈145例,显效116例,有效54例,无效7例,总有效率为97.8%。1992年,贾怀玉等用头针治疗偏头痛139例,基本治愈98例,显效32例,有效6例,无效3例,总有效率为97.84%;治疗坐骨神经痛70例,治愈46例,显效18例,有效2例,总有效率为93.71%;在顶颞前斜线中2/5处行交叉刺治疗肩周炎210例,治愈152例,显效31例,好转24例,无效3例,总有效率为98.57%。

头针治疗某些妇儿科疾患取得满意效果。妇科病证一般取生殖区,有的配足运感区,治疗痛经、功能性子宫出血、经前紧张症、产后尿潴留等有效率在92.5%~100%。

1987年,林迎春等取双侧额旁2线治疗小儿腹泻140例,治愈率为90%,总有效率为95%。头针治疗夜尿症、小儿舞蹈病也取得显著疗效。

头针取视区治疗五官科病如近视、视神经萎缩、结膜炎、中心性视网膜炎、病毒性角膜炎、青光眼、角膜斑翳、眼球震颤、球后视神经炎都取得可喜的进展。头针麻醉已用于上千例手术,成功率92%~98%。自70年代头针传到国外后,已有日本、法国、美国、意大利等许多国家开始应用,并陆续有约20篇文章总结了他们的治疗经验,虽病例较国内为少,但已显示出头针的优越性。

对头针作用机理的研究,80年代以来做了一些工作,主要观察了头针治疗对脑血流量、血液流变学、心电图、微循环、脑电图、心电图、血压、血脂(胆固醇、甘油三酯)的影响,头针治疗后上述指标都有一定的改善,从而说明头针对心脑血管疾病有明显疗效的机理所在。

目前,治疗中疗效评定标准多不统一,大部分未设对照组,对头针治疗机理的研究还仅仅是开始。近几年改进操作手法,如用抽气法配合运动等使疗效进一步提高,引起人们的重视。预计在今后研究中可以从改进操作手法、增加新的治疗线(带)等方面进一步提高疗效;从统一疗效评定标准,设立对照组,设立客观指标等方面,加强头针治疗临床总结的科学性、可比性;结合头针治疗后神经递质、免疫、生化、血液流变等方面的变化,进一步探讨头针治疗疾病的机制。

#### 参考文献

- 1 于致顺,等.中国针灸,1985,(4):21~24
- 2 陈克彦.中国针灸,1986,(3):39
- 3 陈静操,等.泸州医学院学报,1987,(3):119
- 4 朱明清,等.上海针灸杂志,1987,(4):17~19
- 5 张鸣九.中医杂志,1987,(6):52
- 6 方云鹏,等.北京中医学院学报,1988,(4):21~23
- 7 王端义,等.全国头针学术经验交流会论文选编,1991
- 8 焦顺义.全国头针学术经验交流会论文选编,1991
- 9 贾怀玉,等.山东中医杂志,1992,(3):27~29

(山东东明县人民医院贾怀玉、北京针灸骨伤学院王端义撰)

**耳针疗法的研究进展** 耳针疗法是指通过针刺或其他方法刺激耳廓穴位防治疾病的一种方法。观察耳穴变化对疾病的诊断也具有一定的参考意义。因此,耳针疗法又称耳穴诊疗法。耳针治病范围广泛,操作方便,极少创痛,深受广大患者的欢迎。

成书于《内经》之前的《阴阳十一脉灸经》,就记载有与上肢、眼、颊、咽喉相联系的“耳脉”。《内经》对耳与经络脏腑及人体各部的生理、病理关系作了更为系统的论述。《灵枢·邪气脏腑病形篇》记有“十二经脉,三百六十五络,其血气皆上上面走空窍,……其别走于耳而为听”,说明经络与耳有着直接或间接的联系。《灵枢·卫气失常篇》提出,“耳轮焦枯,如受尘垢者,病在骨”。说明人体有病在耳廓上有所反应。《灵枢·厥病篇》又言,“厥头痛,头暴甚,耳前后脉痛有热,泻出其血,后取足少阳”。耳部放血疗病取效迅速,至今仍广为应用。以后,《针灸甲乙经》载:

“听官,在耳中,珠子大,明如赤小豆,手足少阳,手太阳之会,刺入三分,灸三壮”。《针灸大成》有“耳尖穴……治眼生翳膜”之述。散载于历代医学著作中和民间流传的经验也极为丰富,有文字记载的耳穴就有窗龙、耳中、耳尖、屏尖、郁中、三扁桃效、耳背等。历代耳针治疗病种已有头痛、眼病、气喘、面瘫、胃病等14种以上。

耳针疗法通过各种途径流传到国外,法国P. Nogier于1965年提出42个耳穴点和形如胚胎倒影的耳穴分布图,首先提出“耳针疗法”的名称。到目前为止,通过大量研究和实践,已用耳针治疗200多种疾病,其中对急性痛证、腮腺炎、支气管哮喘、胆石症、带状疱疹等几十种病证有显著疗效。60年代后期,开始将耳针运用到麻醉科,通过不断实践已取得较好成绩。80年代以后,又将其拓宽到美容、保健领域,如减肥、戒烟效果甚佳。在诊断方面,也从过去的简单触诊、视诊,发展到电子仪器探测、耳廓染色等多种方法,新增穴位或区域达500余个。为适应其发展,有关组织制订了《耳穴国际标准方案》。对耳穴机理的研究也在不断深入,已从生理、生化、组化、生物等多学科进行探讨。

耳穴诊断,国内目前多用耳穴信息法、压痛法、电子仪器测定法、染色法、日光反射耳穴法、耳穴穿刺细胞学法等,研究着重于疾病诊断的阳性符合率和耳穴诊断机制的探讨两个方面。关于阳率的报道,较多的为内科疾病,特别是消化系统和呼吸系统疾病,准确率多在85%以上。还有学者将其用于占位性病变的诊断,不论是恶性肿瘤还是非恶性肿瘤,阳性符合率均在80%以上。机理探讨,国内学者多从生理、生化方面入手,如管遵信用23只家兔作动物疾病模型,切片1000余张,结果表明,与患病脏腑相对应的耳穴过氧化酶活性有高度的特异性,从组化和酶的角度阐述了耳穴染色原理和耳穴诊治疾病的原理。国外的耳穴诊断法已有电测定法、压痛法、压痕法、视诊法和心耳反射法等。法、日等国多采用探测法或“阳性反应物”拍摄等研究耳穴与脏腑、疾病的相关性。P. Nogier认为,耳廓皮肤电阻的变化,可以反映内脏的病变,同时,他们采用不同颜色的光波或不同频率的闪光照射耳廓皮肤,引出耳鸣反射,对疾病的诊断做了进一步的研究。实践证明,耳穴诊断不仅能对人体各部位疾病作出定位诊断,而且在一定范围内能作出定性诊断和鉴别诊断,对某些疾病还有早期诊断和预后诊断的意义。目前,耳穴诊断已应用于百余种疾病的诊断或辅助诊断。

通过不断的临床实践,耳针治疗的病种已由历史记载的10余种扩大到目前的200余种,涉及内、外、妇、儿、五官、皮肤、麻醉等各科,内科常用耳针治疗的有慢性支气管炎、高血压、心律失常、神经衰弱、头痛、眩晕、便秘、胃炎、肝炎等炎性病变,功能紊乱病变及免疫缺陷等各种原因所致的疾病;外科多用于胆囊炎、胆石症、软组织损伤、泌尿系结石等。特别是对胆石症治疗成功,可使患者避免外科手术减轻负担,得到医学界的普遍重视和肯定,历年来临床均有报道,有效率达90%以上,取穴均以胆、肝、脾、胃、内分泌、三焦等为主或配以耳迷根、交感、皮质下等;所采用方法有压丸法、敷药法、旋磁珠法或针药并用等方法,各种方法疗效都很满意。儿科应用耳针的以小儿遗尿和哮喘为多,特别是前者的疗效甚佳。妇科一般将耳针用于月经不调、痛经等病。五官科多用于治疗近视。此外还有用于过敏性鼻炎、扁桃体炎等。在皮肤科方面,通过临床实践证明耳针对黄褐斑、蝴蝶斑等疗效显著,使耳针在美容领域显示了一定的潜能,近年来临床报道逐渐增多,取穴以皮质下、内分泌为主,配以其他穴位。在麻醉科,一般采用磁珠法或电针法,用于头、颈部局麻。此外,耳穴也可用于减肥、戒烟。戒烟一般取肺、内分泌,效果很好,临床报道有效率均在90%以上,其进一步的推广和使用将有重大意义。

耳针治病范围较广,取穴规律一般按耳穴脏腑相关取穴、辨证取穴、仪器探测的阳性反应点取穴及经验取穴。施术方法也从过去的针灸法、压丸法、按摩法发展到磁珠法、水针法、割治法、光针法等30余种,但对各种方法的适应范围、优劣对比及其意义研究较少。云南李惠芳曾做“耳穴贴压塑料珠与王不留行籽治疗

胆石症的疗效比较”研究,结果差异不显著,证明王不留行亦是通物理压迫而起作用。现同类研究报道寥寥无几,尚待进一步探讨。

关于耳穴机理研究,学者们看法各异,研究方法多从解剖、组织、生理、病理、生化、组化以及临床实验观察等几方面着眼,提出耳穴脏腑相关学说、神经体液学说、全息论、三位假说等各种理论和假说。国内学者一般侧重于动物实验观察及临床实验观察两方面,临床观察相对多一些,且均以耳穴脏腑相关及神经支配理论为指导。如蔡要平通过相应耳穴电兴奋观察其对Oddi氏括约肌压力的影响,结果表明,刺激胆囊穴可有明显的松弛Oddi氏括约肌的作用。还有学者通过刺激相应耳穴观察到对性功能、心脏放电、体温调节等多方面均有一定影响,从一个侧面解释了耳穴作用机理及耳穴诊治疾病的科学性。国外以法国、德国、日本、美国、韩国等国家为主,一般侧重于生物物理、生物化学、神经科学等实验研究。如美国国立麻醉研究所研究证实,电针耳穴能使大鼠实验性戒断症显著缓解;法国P. Nigier氏低电阻理论的研究也较有影响。

自50年代末中国开始大规模开展耳穴研究起,研究水平不断提高,60~70年代以来迅速发展,多学科研究不断尝试,80年代步入稳定发展阶段,全国性的耳穴协作组成立,耳穴研究项目愈来愈多,但需要解决的问题也还很多。如耳穴诊断缺乏统一的、固定的客观指标,使用仪器及方法手段也各异,在一定程度上影响了诊断的准确性。此外,耳穴治疗范围广泛,但临床研究报道颇为局限且多重复,是否有意义尚不可知,同时,科研病例报道中客观指标不统一,缺乏对照组。耳穴机制研究虽然已有多学科尝试,但缺乏系统的整体水平的研究,而多系统、整体水平的研究才能最终阐明耳穴机制,为耳穴疗法带来革命性进展。

#### 参考文献

- 1 黄炳山. 中医药信息, 1989, 2
- 2 王萍. 北京中医, 1989, 4
- 3 蔡要平. 中国针灸, 1989, 4
- 4 蒋建平. 中国针灸, 1989, 9
- 5 邓丹琪. 云南医药, 1990, 11
- 6 刘维洲. 针刺研究, 1990, 15
- 7 王可学. 新中医, 1990, 22
- 8 吴锡强. 上海针灸杂志, 1991, 10
- 9 王鹏辉. 上海针灸杂志, 1991, 1

(北京针灸骨伤学院蔡向红、陈利国撰)

### 眼针疗法研究进展

the research development of eye-acupuncture therapy 眼针疗法是中国彭静山在多年潜心研究《内经》有关眼与经络、脏腑关系的基础上,创造性地发展后汉华佗有关“看眼察病”的学术思想,结合自己50余年临床经验而创立的。眼针疗法属微针疗法之一,是通过诊察眼球结膜上血管形态、颜色的微妙变化来诊断疾病,并在眼眶周围8区13穴进行针刺以治疗全身性疾病的一种针刺疗法,其疗效显著,简便易行,具有广阔的发展前景。

眼针疗法源于《内经》。《灵枢》大惑论和邪气脏腑病篇记载了目是五脏六腑精气之所注,营卫气血、神魂魄之所藏,十二经脉表里络属,都与目有直接的或间接的联系。因此,眼与全身脏腑经络气血均密切相关。后汉名医华佗根据《内经》理论提出了“看眼察病”,按八卦划分眼区。明·王肯堂《证治准绳·目门》卷七引华佗云:“目形类丸,……内有六络,……中络八,……外有旁支细络,莫知其数,皆悬贯于脑,下连脏腑,通畅血气往来以滋于目。故凡病发,则有形色丝络显现,而可验内之何脏腑受病也……”。明·傅仁宇《审视瑶函》论述五轮八廓也沿用了这段引文。1970年,彭静山创造性地发展了华佗“看眼察病”的理论,总结出“观眼识病”的基本规律和方法,扩大了中医望诊的范围。1974年,彭氏创立了“眼针疗法”,将眼眶周围分为八区共十三穴;1987年,又根据经络学说理论研究发现,眼区的分布完全符

合经络循行左右对称和眼区解剖左右一致的规律;1989年,他提出眼区划分的新方案,即在左眼区原分布方案不变,以鼻柱为轴向右翻转即是右眼穴区分布;1990年,他撰写了《眼针疗法》一书,集眼针的理论基础、针刺方法、临床资料于一体,成为中国第一部眼针专著。至此,眼针疗法得到完善和推广。

眼针疗法在中风偏瘫治疗中的应用:(1)眼针治疗中风偏瘫的即刻效应观察。1983~1985年,彭静山等治疗242例本病患者,总有效率达97.52%;在此基础上又分别观察453例和189例患者,结果针刺1次,前者即刻行走的占22.5%;后者患肢抬高高度大于治疗前5cm以上占的85.6%,即刻行走的占21.8%。(2)眼针治疗中风偏瘫病程与疗效观察。1986~1987年,彭静山等观察治疗167例此类病人,赵立志治疗40例,赵治青治疗25例。结果表明,病程在3个月以内者疗效较高,1个月以内者更高,3个月上者较低,说明眼针治疗中风偏瘫病程越短,疗效越好。(3)眼针治疗中风偏瘫病因与疗效的观察。1987年,张法信治疗的200例本病患者中,脑血栓形成所致偏瘫165例,有效率89.69%;脑出血所致偏瘫103例,有效率为30%;总有效率为80%。由此看来,对脑血栓形成所致偏瘫的疗效最佳。(4)眼针治疗中风偏瘫分期与疗效的观察。1986年,孙红叶等治疗50例脑血栓形成所致偏瘫,总有效率为88.7%,急性期者基本治愈率为59.38%,后遗症期者无基本治愈例。说明眼针疗法在脑血栓形成的急性期及早治疗最为重要。

眼针对血压的影响:1985年,朱凤山测试103例患者眼针治疗前后的血压,结果表明,眼针对人体的异常血压尤其是收缩压,具有明显的良性双向调节作用。这种作用,1988年刘桂玲通过超声心动图、心机械图对I、II期高血压患者治疗前后血压测试的结果进一步得到证实。

眼针对疼痛性病症的疗效观察:1987年王济华等对122例胆石症伴胆绞痛病人观察治疗,结果显示,眼针疗法对于胆绞痛的止痛效果远较单纯使用西药者为快。1986~1992年,李云香报道治疗肩周炎110例,总有效率为96.3%;彭静山治疗痹证184例,有效率为93%,治头痛40例,有效率为90%。有人曾治疗6种常见疼痛性疾病422例,总有效率为94%。宋江等治疗各种疼痛性疾病,即刻总有效率为53%,一个疗程后总有效率为95%。韩育斌等治疗腰痛120例,总有效率达100%。王曼丽等治疗痛经30例,病程在3个月以内者多一次治愈,总有效率100%。朱凤山等治疗头痛100例,总有效率为96%。以上报道说明,眼针疗法治疗疼痛性疾病效果好,即刻效果更显著,从而为针灸治疗急症开辟了新途径。

眼针对其他疾病的疗效观察:1988~1989年,彭静山治疗多例自幼患顽固性遗传尿症的患儿,5~7次即可痊愈。李云香应用眼针治疗遗尿、淋证、癃闭、尿血、急性睾丸炎、链霉素中毒所致眩晕等病症,均获满意疗效。高亚伟应用眼针治疗面瘫100例,总有效率达100%。说明眼针疗法对其他疾病亦有很好的疗效。

眼针疗法的机理研究:(1)眼针疗法的经络基础。1990年,任宝琴较全面地论述眼与十二正经、奇经八脉、十二经别、十二经筋的密切联系。(2)针刺眼穴产生循经感传现象的观察。1987年,仲跻尚对3位智力正常的病人测试,发现眼区的每一个穴位与全身的联系不是单一的一经、一脏、一腑的联系,而是多经络、多脏腑的联系。针刺眼穴出现的左右交叉循经感传,和针刺一穴产生两侧同时感传现象,为进一步研究巨刺、缪刺的机理提供了有力的依据。这一研究资料不仅对阐明眼针疗法的作用机理有重要意义,也为进一步探索感传的机理和经络实质开辟了一条新的途径。(3)眼针穴位的探讨。1989年,许宏基等通过人的眼针穴区的解剖学研究和对家兔眼穴区注入辣根过氧化物酶追踪穴区的感觉神经向脑(中枢)的传递过程的研究,为眼区穴位按左右对称划分提供了可靠的依据。(4)眼针止痛的机理探讨。1989年,王济华等认为针刺眼周穴位能强有力地激发经气传导,起疏通经络、理气止痛的作用。其原理可能与针刺提高脑内壳一脑啡肽和甲硫一脑啡肽水平、提高痛阈有关。此外,1987年,极会贤观察眼针对

家兔胃电的影响,实验结果与国内文献报道的针刺体针穴位具有双向良性调节作用是一致的,从而为眼针的治疗提供了实验依据。

80年代以来,眼针疗法不仅被国内针灸学者广泛应用于临床,同时也被日本、美国及东南亚许多国家的医者所学习、运用。眼针疗法融诊断和治疗于一体,操作简便,易于接受,收效迅速,治疗范围日趋扩大,它将会广泛地应用于临床各科疾病的诊治。

彭静山运用“观眼识病”来辨证诊断疾病,准确率高,为中医望诊增添了新的内容。目前,眼穴诊断研究刚刚起步,尚需深入研究、探索和完善。“观眼识病”的诊断规律,将是今后的研究重点。有人提出针刺眼针穴区后,无论通过经络感传还是神经传导,都应有物质结构基础。从这一点出发,深入研究眼针穴位与脏腑经络联系的物质结构及其传导通路,揭示眼针疗法的治疗机理,将是今后的研究热点。

#### 参考文献

- 1 彭静山,等. 辽宁中医杂志,1983,11:30
- 2 朱凤山. 辽宁中医学院学报,1985,2(1):18
- 3 孙红叶,等. 辽宁中医杂志,1986,4:7
- 4 李云香. 中医函授通讯,1986,6:806
- 5 仲跻尚. 江苏中医杂志,1987,3:23~26
- 6 王济华,等. 中国针灸,1989,2:47~48
- 7 彭静山. 眼针疗法. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1990.11
- 8 许宏基,等. 辽宁中医杂志,1991,2:37

(北京针灸骨伤学院张彤教授撰)

**气功镇痛** 气功研究中一个新的领域。采用气功方法能治疗某些疼痛性疾病或缓解其疼痛的事实,是气功镇痛研究的基础。疼痛作为某些疾病的一个症状或一种独立的疾病,在所有病症中占有较大的比重。气功对各种性质的疼痛具有非特异性的缓解作用。根据气功不同的方法及其生理和心理学基础,临床适宜用气功作为缓解疼痛手段的范围较为广泛,大致包括:(1)神经系统:治疗各种头痛,特别是神经机能性头痛以及紧张性头痛、血管性头痛等,对牙痛、口舌痛、肋间神经痛、坐骨神经痛、带状疱疹引起的疼痛,也有一定程度的缓解作用。(2)循环系统:缓解各种心血管疾病引起的疼痛,包括冠心病心绞痛、神经循环衰弱症引起的心前区不定时隐痛、高血压伴焦虑紧张而引起的头痛等。(3)消化系统:缓解肝胆疾病引起的肝区和上腹部疼痛、神经官能症或胃肠功能紊乱引起的胃痛腹痛等。(4)泌尿生殖系统:治疗痛经、缓解泌尿系结石引起的疼痛等。(5)运动系统:治疗颈椎病、软组织损伤、背部和腰腿痛、风湿性关节炎等。(6)其他:克服手术时及手术后创伤性疼痛,如气功麻醉、临产时腹部阵痛、人工流产时伴有的疼痛等。对某些疼痛也具有一定的辅助镇痛作用。

关于气功疗法缓解疼痛的机理,有人认为除了气功能一定程度地提高痛阈以外,气功的入静、放松、调息以及气功外气、气功按摩、气功针灸等,可通过神经系统调整体内环境,纠正产生疼痛的病理机制而起到消除痛源的作用。但是,对人类来说,疼痛作为一种主观感受,它包含的心理色彩是不容忽视的因素,在解除痛源病理变化的同时,通过精神神经系统的调整作用,阻断形成痛觉的病理恶性循环,使机体对疼痛产生良性的承受能力,可能是临床上气功镇痛的依据之一。

自从1980年有人以气功“外气”行甲状腺“气麻”手术成功以后,引起人们对气功镇痛的兴趣,并因气功“外气”镇痛的应用使动物实验成为可能,从而推动这一领域的研究展开深入的工作,主要有以下两个方面:

**人体镇痛实验研究** 1983年,王极盛等用压力测痛器对29例被试者全身87个测痛点观察气功师发放“外气”后被试者痛阈的变化,结果能使痛阈提高44.13%,统计学上达到非常显著的差异,与针刺和激光束相比,达到相同的镇痛作用,并均有后效应及个体差异。1988年,王极盛又用模拟气功外气的ZY型气功红

外信息仪照射经穴,使被试者获得轻微的温热感,结果表明,被试者痛阈明显提高,并也存在后效应。但气功镇痛不仅仅局限在气功“外气”,传统的内功锻炼,如放松功和松静功,也有类似的镇痛效应。1988年,有人曾介绍美国爱·克劳姆在《疼痛》杂志上载文,用类似气功放松的松弛疗法训练,有较好的镇痛效果。国内王崇行等在1987年报道,在松静功锻炼过程中,血浆L-EK含量呈增高趋势,而该物质被公认为是有效的镇痛物质,提示与气功镇痛原理有关。1988年,林厚省报道在气功麻醉过程中患者血L-EK值平均可提高51.9%。

**气功外气镇痛的动物实验** 1989年,许红等用钾离子测痛法在整体水平观察到气功外气可提高大鼠和家兔的痛阈,如用剑指(食、中两指)对准动物测痛部位,则镇痛作用更为明显,并具有后效应。在中枢水平,外气镇痛的研究颇多,1988年杨孔森报道,电毁大鼠双侧导水管周围灰质以后,外气的镇痛效应即被取消,提示中枢神经系统参与镇痛机制。1989年,张金梅报道,气功外气可使C类纤维传入冲动所致之猫体感皮层诱发电位峰值明显下降,而C类纤维一般是传导痛冲动的,如预先在侧脑室注入吗啡类拮抗剂纳洛酮,则这种作用即减弱,提示内源性阿片物质参与气功镇痛机制。1989年刘诗祥报道,气功外气能显著抑制家兔弓状核区诱发电位之振幅,尤对与A $\delta$ 和C类纤维兴奋有关的晚成份P<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>抑制最为明显,并同样表现出明显的后效应。1991年,詹红生及翁恩淇等用微电极技术观察大鼠丘脑束旁核痛敏神经元的电活动,当用气功外气及模拟外气的气功红外信息仪照射动物大椎穴时,痛敏神经元的放电频率分别下降64.0%(P<0.001)和26.0%(P<0.05),显示镇痛作用的有效单位分别占88.2%(P<0.005)和78.7%(P<0.005),潜伏期分别延长58.4%和36.9%。上述结果表明,气功师发放外气和模拟仪的红外辐射均有明显的镇痛效应。

疼痛在临床上是一种常见的、多发的症状,对人类的身心健康有其不利的一面,因而通过气功镇痛的研究,探索一种实用新型的气功镇痛方法,具有一定的实用意义和社会价值,是完全不同于药物镇痛或针灸、按摩等物理镇痛的镇痛方式,是痛觉生理和心理科学密切结合的边缘科学,其研究的深入,对阐明痛觉的大脑生理心理过程也有一定价值。

#### 参考文献

- 1 储维忠,译. 气功,1983,4(5):231
- 2 王极盛. 自然杂志,1984,7(3):191~195
- 3 王崇行,等. 气功与科学,1987,7:17
- 4 上海市气麻协作组. 上海中医药杂志,1988,2:2
- 5 贺师海,等. 气功与科学,1989,2:5
- 6 许红,等. 中国医药学报,1989,4(6):10~11
- 7 刘思祥,等. 云南中医杂志,1989,10(4):33
- 8 王冰,等. 气功与科学,1989,12:20
- 9 王景才,等. 中国气功,1991,1:19
- 10 詹红生,等. 气功与科学,1991,(10):17

(上海市气功研究所储维忠教授撰;张文彬审)

**医案** case report and analysis 又称脉案、方案、诊籍,是中医临床实践的记录,即由医者将病人的症状、病因、脉象、舌象、病机、转归、治则、注意事项等作概括简要地记述与分析,同时录下方药物名称、剂量、炮制方法、服用方法等,从而形成文字资料。医案是医者临床思维活动过程、辨证论治过程的记录,也是中医理法方药综合应用的具体反映形式。作为一项中医学传统的学术研究课题,医案的整理和研究对于揣摩名医临床思维规律,训练辨证论治的技能,借鉴名家的学术思想与经验,均有重要的意义。

医案的书写与利用已有很长的历史。早在周代,宫廷医生就重视医案的记录,并且每年以此考核医疗水平。公元前167年,汉代淳于意回答汉文帝所询诊疗情况时,即以24则病案作答。这些病案称之为“诊籍”,载于《史记·扁鹊仓公列传》中。宋代的医



学教育,也利用医案对学生进行成绩的评定。宋代名医钱仲阳、许叔微等较早地在他们著作中附载经验方案,作为论说的佐证。明代以后,医案的数量及类型日益增多,内容愈趋完整及丰富,为后世医案的整理及研究提供了必要的前提。

1549年,由安徽江浦、江应宿父子相继编辑的《名医类案》问世,成为历史上第一部医案研究著作。该书共12卷,分205门,集明以前历代名医医案,按病证分类编集,涉及内、外、妇、儿诸科。对治疗方药独特者,编者尚加有按语。《名医类案》这种整理方法,有利于读者借鉴各家经验,研究各病症的诊疗规律,是中医医案整理的基本方法之一。1779年,杭州魏之秀编成《续名医类案》,补辑明清名医医案甚多,分345门,医案的选择以变症、变法为多,对后世影响颇大。1787年,浙江俞震编成《古今医案按》,选录60余家名医医案1060余案,按症列目,案下编者通过注按形式加以分析,对各家的学术思想及经验,褒贬分别,择善而从,并根据自己的临床经验分析案中辨证论治的依据所在。该书是清代医案研究的代表著作。近代的此类医案尚有何廉臣评选的《全国名医医案类编》(1927)等。

1776年,清代叶天士的医案经华岫云等收集整理,编成《临证指南医案》刊行。这部医案收集叶氏实录式医案3000余案,按病症分为89门,每门由整理者撰写总评,提示叶氏辨证治法之要点。这种整理方式对揣摩该名医临床思维规律及辨证用药系统颇有利。叶氏医案出版后,清代徐灵胎首先作了批注,其对叶氏学术思想、用药风格的评价为后人提供了重要的参考资料。1798年,吴鞠通著成《温病条辨》一书,这部温病学的重要著作的许多内容即取材于《临证指南医案》。如桑菊饮化裁于秦案风温方,连梅汤化裁于顾案暑病方等。清代何书田还将叶氏治疗杂病的治法方药编成歌诀,名《杂证要诀》。近现代叶案的研究依然活跃,专著有陆晋笙的《香岩经》、潘名熊的《叶案括要》、李林馥的《叶案疏证》等。有关的论文亦相当可观。《临证指南医案》式的个人医案是清代以来医案整理的重点。著名的有徐灵胎的《洄溪医案》、尤在泾的《静香楼医案》、王孟英的《王氏医案》、王旭高的《王旭高医案》、曹仁伯的《继志堂医案》、陈修园的《南雅堂医案》、吴鞠通的《吴鞠通医案》、赵海仙的《寿石轩医案》、张聿青的《张聿青医案》、丁甘仁的《丁甘仁医案》以及将数家名医医案合编的《宋元明清名医类案》、《柳选四家医案》、《清代名医医案精华》、《现代名医医案精华》等。

医案具有医疗档案与图书资料两种性质。作为医疗档案,医案可向研究者提供在疾病诊断、治疗、转归、预后、流行病学及医学史方面的资料,尤其是对研究各种方剂的应用规律、名医处方用药的规律等方面,医案能发挥较大的作用。例如姜良铎通过古今10009例次温病医案的统计分析,较全面系统地总结了古今700多位医家的临床经验,揭示了温病发病规律及温病临床诊断用药的规律。初杰、孙广全调查了前人大量医案,对《伤寒论》四逆散、吴茱萸汤的方证、加减法、剂量等作了研究,有较大的实用价值。刘源等对明清以来129家医案中传统中药配伍禁忌的“十八反”出现的情况作了统计,探讨了应用规律。曾大方对《临证指南医案》作了统计研究,提示了叶氏用药精、处方小的特点;痰饮门医案用药频度的统计,对痰饮病的临床有参考作用。中医医案的数量相当多。《全国中医图书联合目录》(1959)载有288种,若将以后陆续出版的医案及散在于民间的大量医案手抄本也计算在内的话,那可以说是一个巨大的档案库。建国以后,医案的整理工作有较大成果。一大批近现代名老中医的医案也经过整理出版,民间的散在的名医医案得到发掘和整理。近年国内比较有影响的是清代宫廷医案的整理研究。1980年,中国中医研究院西苑医院清宫医案研究室对我国第一历史档案馆珍藏的总数为3万~4万件的清代宫廷医案作了整理研究,发现其中内容对研究老年医学、长寿医学颇有参考价值,并能对清代历史研究提供重要的资料。目前已出版《清宫医案研究》与《慈禧光绪医案选议》两书。电子计算机也在逐步进入医案研究领域,利用医案而设计的专家系统已有较多成功的报告。

长期以来,名医医案是作为一种临床医者的主要读物存在着的。通过阅读医案,中医师进行辨证论治技能的自我训练、知常达变本领的自我培养以及从医案中吸收各家的经验特长。这种通过案例进行教学的方式,成为中医学传统的学习与研究方式之一。清代柳宝诒编的《柳选四家医案》、俞震的《古今医案按》就是指导医案阅读的传统教材。近代的中医教育中,医案的讲评也作为课程出现。上海中医专门学校、上海中国医学院、苏州国医社、华北国医学院、兰溪中医专门学校等均开设过医案课程或编集过医案讲议。建国后的高等中医院校,大多安排医案的讲评与《中医各家学说》同时进行。南京、北京等地的中医学院则编有专门的医案教材供学生使用。医案阅读的传统内容与形式如下:在读案的首眼点上,主要强调识证关键、特殊的治疗方法利处置、对古方适应症的把握与加减变化、处方转换的依据与缘由、按语中的经验之谈、药物剂量、剂型与服用方法,还有误治原因的分析等。读案的方法多采用以理测证,以药测证,以方测证、比较与分析以及推读、逆读、评读。读案的形式多采用评注、批注,医案读本的选择也很重要。一般以理法方药清楚,有变化而不离中医学的基本原则,能帮助读者思考以及训练辨证论治技能,按语明快为原则。由于医案数量不断增加,如何从浩如烟海的医案中选出那些适用于阅读的佳案,是今后一件重要而繁杂的工作。目前较多的是按专题选编,如《伤寒名案新注》、《医林误案》、《古今救误》、《中医奇证新编》等。比较系统地选编那些可读性强、实用性高,并能反映中医学各派用药风格医案的工作尚有待展开。

医案的收集与整理仍是今后医案研究工作者的任务。从发展趋势看,参照现代医学病症书写格式的现代医案的搜集整理将更加受到重视。在整理方式上,《临证指南医案》式的个人医案将减少,专题医案将增加。整理将突出疗效及有利于疾病防治规律的研究。医案的研究将主要利用电子计算机进行,方剂应用规律、专病专方专药的研究是最活跃的课题。医案的阅读作为传统的辨证论治能力自我训练的方法,在相当长的一段时间内还要在中医教育中发挥应有的作用。因此,希望有较多的高质量医案读本出现。

#### 参考文献

- 1 曾大方,山东中医学院学报,1985,1:13~15
- 2 姜良铎,董建华,中医杂志,1987,11:50~52
- 3 刘源,高晓山,中医杂志,1989,9:10~13
- 4 初杰,关庆增,中医杂志,1991,2:15~16
- 5 孙广全,周晓燕,等,中医杂志,1991,3:13~15

(南京中医学院黄煌撰)

**岭南温病学说** 岭南即五岭以南,包括现在的广东、广西和海南3个省和自治区。岭南地区所处的地理环境和气候条件的特殊性,饮食和生活习惯的差异性,人群体质对疾病的反应性,均与我国其他地区有所不同。因此,在温病的发病学、临床证型和防治方法有其特色和经历。岭南温病学说,是岭南医学的重要组成部分,是温病学学科深入发展的体现。总结和探究岭南温病学说,不但能有力地说明温病具有地域性特点,而且利于揭示温病的本质。岭南温病的防治措施,对该地区以及地理气候环境类同的国家和地区有普遍的指导意义。

对于岭南的地理、气候、人群体质、生活习惯与地域性疾病发生的关系,尤其是对温病的影响,从《黄帝内经》起,历代医家都有论述。《素问·异法方宜论》说:“南方者,天地之所长养,阳之所盛处也。其地下,水土弱,雾露之所聚,其民嗜酸而食脂,故其民皆致理而赤色,其病挛痹,其治宜微针”。古人很早就观察到不同的方域气候、人群的生活习惯及体质是与多发病有一定联系的。对岭南温病的认识亦有悠久的历史。晋代岭南医家葛洪的《肘后备急方》对广东的丹毒、恙虫病已有记载。隋朝巢元方的《诸病源候论》,提到岭南气候温暖,“杂毒因暖而生,故岭南从仲春迄仲夏,行青草瘴,季夏迄孟冬,行黄草瘴”,认识到因天暖而产生的“杂毒”,是岭南流行温病瘴气的原因。宋代陈昭遇等的

《太平圣惠方》：“岭南土地卑湿，气候不同，夏则炎毒郁蒸，冬则温暖无雪，风湿之气易伤人”。元代释继洪《岭南卫生方》：“岭南既号炎方，而又濒海，地卑而土薄。炎方土薄，故阳燥之气常泄，濒海地卑，故阴湿之气常盛”。均提出岭南地区多“炎毒”、“风湿”、“气”。清代岭南医家何梦瑶，在《医编》中针对当时景岳学说盛行，不少医家忽视岭南地区的实际而滥用温补之弊，强调南方“凡病多火”、“多湿”，运用脏腑经络学说对火热症进行辨证论治，主张合理运用理脾祛湿法，重视“逐邪”，对白虎、举斑、黄龙等方药有较深的研究，能因时、因地、因人制宜，故疗效显著，后人称他为“粤东医界古今第一国手”。广东番禺潘兰坪著《叶案活要》、《评琴医略》，把叶氏《临证指南医案》之理法方药灵活应用于岭南。潘氏认为温病不同于一般外感证，由于“热盛阴津伤”、“气阴两虚者”多见，故立“先养胃汁法”、“甘淡护津气法”、“益气保水法”，切中本地区温病病机，为后世所仿效。此外，尚有南海潘大纪著《南北喉症辨异》、南海李朝栋著《寒温条辨治疫汇编》、南海梁国珩著《救疫全生篇》、高鹤黎佩兰著《良方释疑》等关于瘟疫诊治方法的专著，为岭南温病学说形成奠定了基础。

自1912年以来至新中国成立后，形成岭南温病的医家众多。他们在继承古人对岭南温病认识的基础上，把叶、吴、薛、王诸家学术思想结合当地临床，对岭南温病发病因素、传变过程、证治特点等阐发得更为详尽和鲜明，对本学说的研究起到承前启后的作用。广东中医药专门学校1927年由南海陈任枚、刘赤选编《温病学讲义》，根据岭南气候和人群体质状况，提出“伏气者乃人身阳热之气”、“伏气未泄外时，不觉有病”；“一有所感，皆足以触发内伏之阳热，而感温病”。诊断着重舌诊、察咽喉、按胸腹。将温病分为温热、风湿、湿温三类，常挟痰水、食滞、气郁、血瘀四证。气分证分湿热与温热论治，“归纳为热耗津气、流注三焦及内结胸腹、胃肠证候”，立清气、祛湿和生津为治疗大法。血分证治又归纳为血分热毒炽盛和后期真阴亏损之虚实两端，补充了叶氏所讲热毒炽盛只用“凉血散血”的立法。此期间岭南医家研究小儿温病著作亦甚多，如大埔杨鹤龄的《儿科经验述要》、三水古绍尧的《痘疹学讲义》及高鹤吕楚白的《幼科学要旨》等，他们对温病理法方药不乏新的见解和独到经验。另外岭南草药的收集和整理也得到重视。如番禺何克谦的《生草药性备要》、新会赵思就的《岭南草药志》等都丰富了岭南温病学说的内容。

1978年以来，岭南温病学说的研究进入全面系统的阶段。以广州中医学院刘仁昌为首的导师组，确立“岭南温病的理论与临床研究”作为研究方向，先后招收20余名硕士、博士研究生，发表了30多篇论文。1988年广州中医学院搜集近600位岭南医家的生平和著作资料，包括从晋代葛洪到近代名中医，辑成《岭南医家计算机检索系统》，这对岭南温病学术资料的保存和检索，提供了现代化服务手段。1989年，由彭胜权、李惠德等主编的体现岭南温病学术思想的《温病学》已出版。1991年，彭胜权主持编写的《岭南温病研究与临床》一书，初步整理了80年代以来的研究成果。从1988年起在广州召开过3次岭南医学研讨会。《新中医》杂志自1981年起开辟了“岭南名医介绍”专栏。1989年，在海南省三亚市李国桥主持下建立了热带医学（温病学）研究所，初步形成了以广州为中心的岭南温病学说研究体系。

近代的研究，首先对岭南温病学的历代著作、医案医话、临床经验进行系统的资料整理，特别是对岭南温病学说特点，初步总结为：(1)风湿、暑湿、暑湿为岭南常见温病，其发病季节性不明显；(2)气候炎热湿度过大和阳热、气阴两虚体质，是岭南温病发生的重要内外病因；(3)注重舌诊、察咽喉、按胸腹是岭南对温病的常用诊法；(4)岭南温病主要治法有清热解毒法、活血祛瘀法、清热祛湿法、清暑益气法、保津养阴法、调理脾胃法；(5)岭南温病气分证候突出而复杂，证多兼湿又常挟痰水、食滞、气郁、闭血为患；(6)用药特点：善用轻清芳香的花叶类药物和喜用岭南丰富的草药资源。

应用地理、气象知识，对岭南地区“炎方”、“地卑”、“阴湿”、“气常盛”赋予科学的阐释。岭南地区位于我国最南方，其南临南

海，北有五岭山脉为屏障，北回归线贯穿大陆中间，大部分属亚热带季风气候，少部分属热带气候。日照长，全年平均气温高，以候（五天为一候）平均气温计，没有气候意义上的冬季，俗称“夏长冬短”。该地区又受海洋暖湿气流和台风来临的影响，因此雨量丰沛，雨季持续时间长，加之地势低平，河网众多，故外环境湿度大，热与湿易化，导致岭南温病常年可见，且多挟湿为患。

通过温病发病与人群体质、生活习惯的调查分析，受岭南炎热多湿气候影响，饮食上喜食生冷冻物，鱼虾海鲜等滋腻之品，致使脾胃运化功能失调。炎热气候又令人体出汗过多，阳气耗伤，阴液不足，故岭南人群体质多是阳热型的、脾湿型的和气阴两虚型的。

岭南温病的实验研究仍处于起步阶段。1989年，王新华在高温环境下给兔喂食甘腻食物，于耳静脉注射大肠杆菌，制成湿热证型发热的动物模型，基本符合中医温病湿热证表现，并测定兔血浆内毒素，初步研究资料表明，血浆内毒素定量升高与湿热程度多寡呈正相关。1986年，史志云测定临床阴虚病人唾液的H<sup>+</sup>浓度，观察到阴虚患者H<sup>+</sup>浓度多数高于10<sup>-7</sup>mol/L，绝大部分呈酸性，可作为观察阴虚证的一个指征。1991年，香港中医专家岑鹤龄等提出温病卫气营血辨证，作为传变途径和规律，令人难以信服。认为“营血之分，因其层次、深浅关系不明确，临床应用也无法断然分治营分药与治血分药，故营血之分实无必要”。据此，彭胜权提出温病的五个病证：(1)犯卫；(2)在气；(3)入血；(4)伤阴；(5)亡阳。这些独创的见解，对继承和发扬温病学说有启发意义。

今后的研究，有人提出还可以从免疫学、胃肠生物电、测定微量元素等方面深入。不少资料表明，南北两地居民之某些免疫指标、微量元素含量亦有差异，而免疫功能及机体微量元素含量的改变又是中医证型的物质基础之一，这些都从本质上阐明体质地域性差异。

#### 参考文献

- 1 史志云. 广州中医学院学报, 1986, 3: 4~9
- 2 刘小斌. 新中医, 1987, 19: 1~53
- 3 林培政. 广州中医学院学报, 1987, 4: 4~6
- 4 王新华. 新中医, 1988, 20: 3~51
- 5 彭胜权, 李惠德, 主编. 温病学. 广州: 广东高教出版社, 1990, 6: 105~116
- 6 王新华. 广州中医学院学报, 1990, 7(3): 182
- 7 岑鹤龄. 首届中国广州国际中医学学术会议论文摘要, 1991, 10: 4

(广州中医学院彭胜权教授撰)

#### 湿热病证的研究进展

湿热病，即广义的湿温病，是由湿热病邪所致的一类急性外感热病。湿热证则除湿温病过程中的各种证型外，也指各种内伤杂病中所出现的具有湿热性质的证型。湿热病具有以下特点：(1)一年四季均可发病，但好发于夏秋之交及多雨湿季节；(2)以脾胃病变为中心，可弥漫周身、阻滞气机和体液代谢；(3)临床症状多具矛盾性，如身热不扬、口渴不欲饮等；(4)病程较长，缠绵难愈；(5)苔腻，脉濡缓。湿热病在外感病中发生率较高，包括肠伤寒、副伤寒、急性慢性肝炎、肠炎、流感、疟疾、钩端螺旋体病、回归热、风湿热、流行性出血热、急性慢性肾炎、胆道感染、血吸虫病等疾病。杂病中的湿热证则更广泛地存在于各种慢性疾病过程中，故进行湿热病证的研究具有重大的临床意义和社会意义。

《内经》尚无明确的湿热病证概念，但已有“诸痿项强，皆属于湿”、“诸湿肿满，皆属于脾”等认识。湿温病名首见于《难经·五十八难》：“伤寒有五：有伤寒，有中风，有湿温，有热病，有温病”，将湿温病隶属于广义伤寒之中。晋·王叔和对湿温的病因、症状和治法曾有简要论述：“伤寒湿温，其人常伤于湿，因而中湿，湿热相搏，则发湿温。病苦两胫逆冷，腹满又胸，头目痛，苦妄言，治在足太阳，不可发汗”（《脉经·卷七》）。宋朝朱肱首创用白

虎加苍术汤治疗湿温，嗣后刘完素倡“治湿之法，不利小便，非其治也”，主张用天水散等治湿温。明·张景岳明确指出：“湿热之病宜清利”。清·喻昌认为温疫大率因温暑湿热之气交结互蒸而成，创议三焦论治：“上焦如雾，应升而逐之，兼以解毒；中焦如沤，应疏而逐之，兼以解毒；下焦如渎，应决而逐之，兼以解毒”。清·叶桂对湿热病证的病因、病机、治则、治法均有精辟论述，如“外邪入里，里湿为合。在阳旺之躯，胃湿恒多；在阴盛之体，脾湿亦不少，然其化热则一”。“法应清凉，然到十分之六七，即不可过于寒凉”。“面色苍者，须要顾其津液”等等。清·薛雪对湿热病证从病因病机到辨证论治作出了全面而系统的总结，撰成专著《湿热病篇》，其“太阴内伤，湿伏停聚，邪邪再至，内外相引”。“从表伤者，十之二；由口鼻入者，十之八九”。“邪由上受，直趋中道，故病多归膜原”。“中气实则病在阳明，中气虚则病在太阴”。“不独与伤寒不同，且与温病大异”及对湿热的各种本证、变证的病机分析和逐一例举治法药物等均具有重要学术价值和实用价值。清·吴瑭将湿温定义为“长夏初秋，湿中生热，即暑病之偏于湿者也”，而暑温是暑病之偏于热者，伏暑又是暑病过时而发者，三者“证本一源”，皆属于湿热范畴。他对湿热的辨证治法多有补充和发挥，分别湿热之偏和邪犯部位，治重调气而利三焦，采用芳香宣化，苦辛芳香、表里同治、升清降浊、清热利湿、淡渗利湿、通阳化湿等法，并确立众多有效的名方，提出湿温初起应禁汗、禁下、禁酒等，均使湿热的临床研究有了进一步发展。其后又经王孟英、章虚谷、雷少逸、何廉臣、丁甘仁、张聿青等的不断发挥和补充，使湿热病证的辨证论治内容更趋丰富，为现代研究奠定了坚实基础。

近年对湿热病证的诊治规律和实质有不少探讨，也出现不少分歧意见。潘澄溟认为，湿温病以现代医学“病”的概念衡量是多种急性传染病发生、发展过程中的一种证，伤寒、中毒型流感、疟疾、钩端螺旋体病、回归热、急性血吸虫病、破伤风、风湿热等均可能表现为湿温证，其辨证论治以叶天士的卫气营血辨证最为可法。在气分湿重于热者宜燥湿化浊佐以清热，热重于湿者宜清热通腑，至于营血症，一般以清热解毒配合生津养液法；血脱正虚者，用止血凉血兼益气敛阴。邓铁涛亦认为，湿温病应以卫气营血辨证。卫分证，若湿温在卫宜透湿清热，在肺治宜清热宣肺祛湿；气分证，湿热在气治者宜宣化湿浊、利水泄热，其中又有偏湿、偏热、湿热并重，郁湿发白痞之分；湿热蒙蔽心包治宜清热化湿、豁痰开窍，湿热郁阻三焦者治宜分利湿热、宣通气机；营血症，逆传心包者治宜清心开窍，湿热化燥、大便下血者治宜凉血止血。廖岳云则认为湿热病应运用三焦辨证，其治不外祛湿、清热、扶正三大法；祛湿有芳香化湿、理气行湿、淡渗利湿之分，清热有辛凉透泄、苦寒清热、清气凉血、清热解毒、辛苦苦降、下夺逐邪之别，扶正亦有甘寒润燥、养阴生津、健脾和胃等法。刘景源也主张以三焦辨证治湿温，上焦湿热宜辛温宣透、芳香化湿；中焦湿热且湿重于热者宜辛温开郁、苦温燥湿，热重于湿者宜清热兼以祛湿，湿热并重者宜燥湿清热并施；下焦湿热若膀胱湿热而湿重于热者用淡渗利湿，如上蒸蒙蔽心包者更配以苏合香丸，热重于湿者则淡渗利湿加苦寒清利，若大肠湿热而湿重于热用淡渗利湿配辛温宣化，热重于湿用清化湿热导滞通下。章真如却认为湿温病必须使用脏腑辨证、八纲辨证、六经辨证、三焦辨证等多种辨证综合分析，并主张将湿温证分内感、内伤论治。外感湿温，一般采取芳香化湿、甘淡清热治法；内伤湿温，在心经者必须清热化痰开窍，在肺经者宜清肺化痰，在脾胃应健脾化湿、和胃泄热，在肝胆或清热利湿、或疏肝利胆、或泻肝利湿，在肾与膀胱可统利下焦湿热。

不少学者通过具体病种对湿热证作了临床观察分析，还部分地就湿热的实质作出初步病理探索。张镜人通过对肾小球肾炎患者的观察，注意到该病的基本原因是湿热，至出现肾功能不全时则可分为湿热蕴阻、耗气伤阴及正气亏损、邪毒内盛两类。屠其宗对急性慢性肾炎亦均从湿热论治，急性肾炎治以清热利湿、解毒消肿，慢性肾炎治以补养脾胃、清热利湿，均取得较好效果，证实该病的基础是湿热。黄军饶对肾炎病人还作了血液粘滞度等观

察，发现属于湿热而湿邪较重的病人血液粘滞度较高，肾微循环血流缓慢，认为因此致使新陈代谢和排泄毒物的水平降低，进而造成局部炎症反复不愈、肾小球间质细胞和基质增生。并观察到清热化湿之品能降低血液粘滞度，使其病理状况得到改善。曹广顺观察肾科综合征 61 例，发现湿热是贯穿病程始终的病邪，而化湿清热法不仅能改善本病的征象，而且对其原来所导致的瘀血指征（即血液流变学指征）取得很大改善。黄维涵又发现小儿肾脏病患者尿中红细胞、白细胞、小管上皮细胞的形态与数量及管型的出现，以湿热型改变为明显。陈志伟等还发现慢性肾衰尿抗体包裹细菌试验以湿热型的阳性率最高。刘魁祖等通过检测补体旁路途径活性，发现 29 例肾炎湿热患者中有 21 例明显低于正常人，而通过清热化湿法治疗后基本恢复正常。顾连方等统计 72 例慢性肾盂肾炎，辨证为湿热证者占 66.6%，检测 50 例发现皆有免疫功能失调，体液免疫 IgA、IgM 水平明显高于正常人，而细胞免疫 E<sub>t</sub> 及淋转下降。刘仁义等对实验性家兔肾功能衰竭作了病理形态学研究，也注意到该病多为湿浊弥漫、湿多热少、蒙上流下，而采用化湿降浊法可使氮质血症减轻、肾血流量改善，使遭受破坏之内环境趋于平衡。

杨宇等分析 84 例流行性出血热，多为湿热、寒湿为患，其中并发 ARDS 者均为湿温型三焦闭阻证，而治以疏利三焦、条达气机、宣肺利湿等法均有较好疗效。卢慕舜等也发现不少危重型流行性出血热少尿期患者辨证属于湿温型，因此认为调畅三焦是该病重要治法之一。万兰清还观察了流行性出血热合并急性肾功能衰竭 65 例，也发现大多为寒湿证或热湿证，应用宣畅三焦法治疗，病程顺利，最终治愈，而未用此法者病程均逆，甚或死亡。

陈泽霖对 19 例肝炎后肝硬化者进行病理解剖发现，都不同程度存在湿热，湿热程度与肝内瘀阻现象、肝细胞变性坏死及炎症细胞浸润等具有明显的一致性，湿热愈重，肾曲管病变、管型形成等胆汁性肾病表现也愈加明显；并认识到湿的病理基础不是有效循环血量的增多，也不完全代表全身组织间液的增多。白玉良对 41 例各型肝炎患者活检发现，急性肝炎湿重于热和热重于湿的主要区别是：前者肝细胞瘀阻或胆色素颗粒沉着或兼小胆管扩张瘀阻，而后者则无。章冬瑛等报道 307 例甲型肝炎，都符合湿热证，而用清热化湿法治疗有效率达 97.17%。郭彤统计 40 例慢性活动性肝炎亦皆属湿热证范畴，采用利湿清热方药有效率为 76.7%，而西药常规治疗对照组有效率仅 30%。

钟嘉熙等对 28 例温疟进行分析，属湿热者 27 例，占 96% 强，用法湿清热法等综合治疗皆获痊愈。陈忠琳等认为乙型肝炎均可按湿温辨证，其 24 例按湿温治疗者治愈 22 例，显效 1 例，有效率为 95.83%。史兆岐对非特异性溃疡性结肠炎，以湿热病情轻重分为 3 型，发现血象变化与之相关；轻症型血象无明显改变，中等症型血沉加快、白细胞上升，重症型则更有血浆蛋白低。危北海在综述近年中西医结合诊治消化系统疾病资料中也指出，慢性结肠炎多属大肠湿热内蕴，用化湿清热法治疗，有效率可达 90%，中药有改善胃肠功能，促进营养吸收，调节免疫反应和修复病理损伤等作用；又指出慢性胃炎幽门弯曲杆菌的感染阳性率和程度与中医辨证分型有一定相关性，脾胃湿热型居各型之首位。张敏建观察到前列腺炎属湿热下注型者居多，用清热利湿法治疗湿热下注型前列腺炎，总有效率达 93.2%。

由于湿热病证涉及临床各科疾病，全面总结湿热病所属的各种感染性疾病，研究其各自的独特规律和某些共同的病理基础，仍将是今后的主要研究课题。各种杂病中的湿热证的辨治规律还需进行更广泛病种和更大数量病例的调研工作。用现代科学方法找出各种宏观的与微观的指标，以阐明湿热病证的共性，是研究工作的重大目标。至于湿热病证的治疗方法，除更全面地挖掘前人有关经验外，还需结合近代的各种研究成果，不断探索新途径，打破湿热病证难以速愈的局面，使疗效的提高获得较大的突破。

#### 参考文献

- 1 史兆岐. 肛肠杂志, 1981, 1: 23

- 2 陈泽霖. 中医杂志, 1981, 5: 54
- 3 张镜人. 上海中医药杂志, 1982, 2: 11
- 4 赵章忠. 中医年鉴. 北京: 人民卫生出版社, 1983. 63~64
- 5 屠其泉. 上海中医药杂志, 1983, 10: 19
- 6 黄军饶. 辽宁中医杂志, 1983, 9: 14
- 7 陈志伟, 等. 中西医结合杂志, 1988, 7: 395
- 8 邓铁涛. 新中医, 1989, 11: 45
- 9 危北海. 中西医结合杂志, 1990, 5: 263
- 10 杨宁, 等. 辽宁中医杂志, 1990, 9: 1
- 11 陈忠琳, 等. 新中医, 1991, 5: 25
- 12 曹广顺. 中西医学院学报, 1991, 3: 14
- 13 顾连方. 新中医, 1991, 7: 36
- 14 钟嘉熙. 新中医, 1992, 3: 25

(上海中医学院陆嘉瑜、赵章忠教授撰)

**温病卫气营血** *we-qi-ying-xue of seasonal febrile diseases* 温病卫气营血理论, 是清代以叶天士为代表的温病学家以临床实践为依据而创立的, 是用以阐明温病发生、发展过程中病理变化及证候类型的重要辨证纲领。它将温病病变过程分为深浅不同的四个阶段, 即把卫气营血所属脏腑组织的正常生理功能失调或实质性损害所表现出来的症状称为卫分证、气分证、营分证、血分证。温病整个病程的发展演变, 实是卫气营血病理变化相互影响、相互转化的具体反映, 是温病发展、转化、诊断、治疗中的认识论和方法论的重要内容。

卫气营血概念, 最早来源于《内经》, 主要指机体的生理功能及维持功能的营养物质。卫和气皆属阳, 在外; 营和血皆属阴, 在内。卫、气和营、血之间, 既是相互对立的, 又是相互依存的; 既是相互消长的, 又是相互转化的, 由此, 维持机体的生理动态平衡。一旦由于各种因素的影响造成外邪侵袭, 破坏这种平衡状态, 则会导致疾病发生。所以, 叶天士为代表的温病学家在《内经》理论基础上引伸其义, 用来阐明温邪侵犯机体后造成卫气营血生理功能的一系列失调, 导致温病发生, 从而扩大卫气营血概念, 增添了卫气营血的病理学内容。简单说来, 病在卫分, 相关的脏腑是肺, 主要病理为温邪初犯, 肺卫失宣; 基本特征是发热、微恶风寒、头痛、咳嗽、舌边尖红苔薄白、脉浮数, 表明病位最浅, 病情最轻, 可因各种因素导致顺传气分, 或逆传心包。病在气分, 相关的脏腑很多, 如肺胃、大小肠、胸膈、脾、胆、三焦、膀胱等, 其中以阳明热盛较为常见, 主要病理为正邪相争, 热盛津伤; 基本特征是壮热、口渴、舌红苔黄、脉数; 由于病邪性质不同, 所犯部位不一, 证候类型有异, 临证尚须细辨。邪在气分, 表明病位较卫分深, 病情较重, 病情深入可至营分、血分。邪在营分, 相关脏腑是心和心包。营分主要病理为热邪深入, 劫灼营阴, 扰乱心神, 基本特征是身热夜甚, 心烦谵语, 舌红绛。邪在营分, 表明病位较气分为深, 较血分为浅。血分主要病理为热甚动血, 热瘀交结, 基本特征是身热灼手, 神昏谵狂, 各种出血症, 舌深绛。邪入血分, 病位最深, 多见温病极期、后期。叶天士还制定了卫气营血的治疗法则, 他说“在卫汗之可也, 到气才可清气, 入营犹可透热转气, 入血就恐耗血动血, 直须凉血散血”。

随着各地对于急性感染性疾病及传染性疾病的不断认识, 借助现代科技手段, 已从不同侧面揭示了温病卫气营血证候的不同阶段机体的变化, 在理法方药均取得新的进展。在病理形态学研究方面: 1974年重庆医学院新医病理学小组等对流行性乙型脑炎、流行性脑脊髓膜炎、钩端螺旋体病和败血症等的卫气营血四个证候作了病理状态的观察分析, 结果认为卫分阶段主要为机体内部各种防御功能呈现代偿性活动, 以上呼吸道炎症及体表神经—血管反应为主, 局部病理主要为充血水肿; 气分阶段乃是机体对致病因子呈现亢进性反应, 机体代偿反应较旺盛, 其所属脏器以充血水肿、炎性病变为主, 这些病变往往是可逆的; 营分阶段除各种传染病的特殊病理变化进一步加重外, 还以显著的中枢神经系统变性、坏死、凝血功能紊乱, 以及血管壁的中毒性损害进

一步发展为特征; 血分阶段是多种重要脏器如中枢神经系统、心、肺、肾、肝等损害更为严重, 出现弥漫性血管内凝血, 或急性肾上腺皮质功能不全。广泛性出血倾向, 与此同时, 还伴有相应的机能紊乱和失调。营血分病变是不可逆的。在微循环与血液流变学研究方面, 1980年徐应抒等运用积分计算方法, 得出微循环诸指标改变的积分在卫气、卫营、卫血、气营、气血、营血之间的差异, 结果差别皆非常明显 ( $P < 0.01$ ), 表明卫气营血各阶段都有微循环形态改变和功能障碍并随卫气营血的不同病程发展而加重。1982年, 孙孝洪对卫气营血各阶段微循环特点进行了对比, 发现营血症时, 视野底色绛红, 毛细血管管祥不清, 有明显“毛边”, “渗血”, 管祥区显示不规则“云片”, 说明营血分的微循环瘀滞, 毛细血管脆性破坏更为严重。1986年, 徐应抒等还先后测定158例温病患者, 结果白细胞总数、中性粒细胞、全血粘度(高、低切速率)、全血还原粘度、红细胞电泳时间、白细胞电泳时间、纤维蛋白原、甘油三脂、胆固醇等, 在卫气营血各阶段均有显著的或非常显著的差异, 上述指标可作为卫气营血辨证分型的参考标准, 也说明卫气营血4个阶段的血液流变学改变属“高粘综合征”, 反映了温病过程中均有“瘀血”存在。这些都为临床诊断及治法确立提供了新的依据。在免疫学研究方面, 1980年孟宪益等对乙型脑炎患者作了LBT、IgG、IgA、IgM测定, 结果发现各型乙脑IgM增高, IgG变化不大, IgA均偏低。卫气型LBT增高, 气营型LBT则略低于正常, 反映邪陷营血、邪盛正虚与细胞免疫反应低下有关。而卫气型患者的细胞免疫功能亢进则是正盛邪实的表现。在生物化学研究方面, 何建村等在1980年最先报告23例营血症病例的血钠、钾、氯水平, 发现21例钠、氯降低, 提示高热失水伤阴; 血钾测定则相反, 仅2例降低, 21例均增高, 可能为高热尿少或酸中毒, 大量钾自细胞内移出所致, 此似可作为高热津伤的辨证参考。1987年, 钱士明等检测61例流行性出血热患者周围血中性粒细胞、NAP、 $PO_2$ 活力, 结果表明, 各型NAP阳性率、积分值有非常显著性差别 ( $P < 0.01$ ), NAP阳性率、积分值明显低于对照组, 两者有非常显著性差别 ( $P < 0.01$ ), NAP阳性率、积分与尿素氮、肌酐成正相关,  $PO_2$ 阳性率、积分与尿素氮、肌酐呈负相关,  $PO_2$ 积分与NAP积分呈负相关, NAP阳性率、积分与白细胞计数呈正相关, 说明中性粒细胞酶代谢参与出血热的卫气营血转变机制。此外, 1988年徐应抒等提出卫气营血阶段均有内毒素血症存在, 但无规律性变化。1983年, 查忠斌等采用遥控监测法, 对兔模型的皮层脑电图变化进行系统的观察分析, 说明卫气营血不同阶段, 神志变化的时相性具有脑电生理学变化基础, 提示深入研究脑电图的变化可用作监测温病病情变化、判断预后的重要指标之一。卫气营血的治法研究, 1978年姜春华提出“截断扭转”疗法辨治要点, 其一, 重用清热解毒; 其二, 早用苦寒攻下; 其三, 及时凉血化瘀。1982年, 张学文认为活血化瘀与清热解毒法是温病进入气分、热陷营血阶段的常规治法。另外, 1983年黄星垣等根据临床所见, 认为无论卫气营血任何阶段, 清热解毒与救阴增液联用是提高疗效的有效措施。

对温病卫气营血的研究虽然涉及方面较广, 但由于卫气营血症候是机体内多系统, 多器官病理改变的反应, 任何单一的指标都难以揭示其本质, 因此系统的、多指标的观察是今后的研究方向。如果联系具体病种, 注重卫气营血转变规律研究, 则可提高卫气营血症候的规范化。关于卫气营血症候的血浆内毒素研究, 将成为温病证候的又一病理基础, 有助于进一步揭示热、毒、瘀、厥的病理实质。同时, 加强温病动物实验的研究, 也有其广阔前景。在以上研究的基础上最终提高温病治疗的高效、速效、稳效, 补充治疗温病的新方法、新剂型以及有效方药的生物效应内容。

#### 参考文献

- 1 重庆医学院新医病理学小组, 新医学杂志, 1974, 6: 256
- 2 姜春华. 新医学杂志, 1978, 8: 8
- 3 匡调元. 新中医, 1981, 8: 11
- 4 朱广仁, 等. 新中医, 1983, 10: 44

- 5 董锡玑. 山东中医学院学报, 1984, 1: 56
- 6 董建华, 等. 中医杂志, 1985, 26(1): 62
- 7 孟澎江. 中医杂志, 1988, 29(1): 12
- 8 黄星垣, 郭铭信. 温热求新, 1989, 8~83
- 9 邓文龙. 国际传统医药大会论文集, 1991, 174

(北京中医药大学温病教研室谷晓红撰; 胡定邦教授审)

**消渴的研究进展** 消渴是指以多饮、多食、多尿和尿有甜味为特征的病证, 糖尿病多属于此范畴。消渴病的发生与社会环境、生活水平、七情(精神)内伤等因素有密切关系。因为消渴病病程长, 可发生波及全身各系统甚而威胁生命的并发症, 所以医者有“消渴未必可怕, 并发症实属可畏”之说。据文献记载秦始皇、刘邦都是因患消渴而亡。随着人类寿命的延长和生活水平的提高, 其发病率有逐渐增高的趋势。故防治消渴, 已成为中国医疗保健的重要课题之一。

消渴最早见于《黄帝内经》, 称其为“消瘴”, 对多饮、多食、多尿、消瘦等主症有明确记载。隋代甄立言《古今录验方》将本病定义为“渴而饮水多, 小便数……甜者, 皆消渴病也”。至张景岳分消渴为上、中、下三消: “上消者, 上焦病也, 大渴引饮, 随饮随渴, 乃上焦之津液枯竭, 古云其病在肺……。中消者, 中焦病也, 多食善饥, 不为肌肉, 而口加消瘦, 其病在脾胃, 又谓之中消也。下消者, 下焦病也, 小便黄赤, 为淋为浊, 如膏如脂, 面黑而焦, 日渐消瘦, 其病在肾, 故又名肾消也”。对于消渴的病因病机, 前人认为与饮食不节、情志刺激、久服丹石有关。如《素问·奇病论》谓: “此人必数食甘美而多肥也, 肥者令人内热, 甘者令人中满, 故其气上逆转为消渴。”孙思邈《千金方》云: “凡积久饮酒, 没有不成消渴者”。刘河间《三消论》指出: “消渴者, ……耗乱精神, 过违其度之所成也”。古代中国常有为养生延寿服食金石丸丹者, 久而中毒成为消渴, 如隋·巢元方提出消渴是因为“由少服五石诸丸散, 积经年岁”而成。古代医家对消渴的并发症也论述颇详, 指出消渴病人“目下有卧蚕(指水肿)”, “肌肉不仁, 发为肉痿”, “其病多发痲疽”等。《河间六书》还指明消渴多变盲目疾。关于消渴病的治疗, 前人强调精神、饮食、运动、药物疗法并举, 要节喜怒, 薄滋味, 戒嗜欲。巢元方在《诸病源候论》中提出消渴病人应“先行一百二十步, 多者千步, 而后食”。唐代孙思邈则是世界上最早提出消渴病人应注重饮食疗法的先驱。在药物治疗方面, 《千金方》记载治消渴方剂 52 首, 其中以花粉、麦冬、生地、黄连等清热生津之品居多。金代刘河间则以三消燥热说为依据, 补充发展了用寒凉药治疗消渴的经验。明代医家或重益气, 或重补脾, 或重固肾, 丰富了消渴病的治疗方法。清代医家吸取前人精华, 治肝、治脾独有所创。前贤论述为我们今天研究消渴病提供了宝贵的文献资料。

近代中医学研究消渴的病因病机可概括为五个方面: (1) 饮食不节, 积热伤津。(2) 情志失调, 化火伤阴。(3) 禀赋不足, 五脏柔弱。(4) 房劳过度, 肾精亏损。(5) 过服温燥药物, 耗伤阴津。消渴的病理主要是阴虚燥热, 阴虚为本, 燥热为标, 二者互为因果, 而阴虚则贯穿消渴病的始终。其病位虽与五脏有关, 但主要在肺、胃(脾)、肾三脏。临床所见, 虽肺燥、胃热、肾虚相兼出现, 但肾虚是消渴病发生发展的最重要因素。消渴的证治分型, 从症状之差异可分为上、中、下三消。上消以烦渴多饮为主症, 多由肺热津伤所致, 治宜清热生津, 选用白虎加人参汤; 中消以消谷善饥、大便干结为主症, 多由胃火炽盛所致, 治宜清胃泻火, 选用玉女煎加味; 下消以小便频多为主症, 常因肾阴亏虚所致, 治宜滋阴补肾, 选用六味地黄汤加味。根据其病因病机可分为 4 型: 肺胃燥热型者: 主症见烦渴引饮, 消谷善饥, 小便频数, 身体消瘦, 舌红少苔, 脉滑数, 治宜清热生津止渴, 方选白虎加人参汤加味。气阴两虚型者: 症见口干喜饮, 倦怠乏力, 自汗盗汗, 腰痠膝软, 小便频多, 舌红少苔, 脉细数, 治宜益气养阴, 方以生脉散加味。肝肾阴虚型者: 症见尿频量多, 混浊如膏, 头昏耳鸣, 多梦遗精, 皮肤干燥, 瘙痒, 舌红少苔, 脉细, 治宜补益肝肾, 方以六味地黄汤加味。

阴阳两虚型者: 症见小便频数, 甚则饮一溲一, 手足心热, 腰膝痠软, 四肢欠温, 舌淡苔白, 脉沉细, 治宜阴阳双补, 方选金匮肾气丸加味。消渴日久, 常兼挟血瘀、气滞、痰湿、湿热、热毒, 出现坏疽、雀目、耳聋、劳瘵、痲疽、泄泻、水肿、肢体麻木、虚脱等并发症, 治疗或活血化瘀, 或理气化痰, 或清热解毒, 选用相应的方药。

80 年代以来, 中医学者对消渴病的研究方兴未艾, 已故前辈施今墨的“降糖对药”临床屡验不爽, 以苍术配元参、黄芪配山药, 辨证与辨病结合疗效满意。祝湛予教授师承施今墨, 对消渴的治疗颇有造诣。祝氏在清热滋阴的同时强调治脾, 认为脾主饮食的消化吸收, 而血糖乃饮食水谷所化之精微, 若脾失健运, 血中之糖(水谷精微)不能输布脏腑, 营养四肢, 蓄积而从小便排出。祝氏认为治疗消渴病健脾补气实为关键, 其基本方为黄芪、山药、苍术、元参、生熟地、麦冬、党参、五味子、茯苓、五倍子、生龙牡。活血化瘀药在消渴病的治疗中日益受到重视, 在清热、益气、养阴的同时配伍活血化瘀之品, 不仅能减轻“三多”症状, 对于各系统并发症均有预防和治疗作用, 常用药物如丹参、红花、泽兰、三七、当归、赤芍、川芎等。结合消渴病的实验室研究, 近年来涌现出大量新药, 如消渴平片、滋肾溶糖丸、降糖丸、消渴 I 号、消渴 II 号、加味桃核承气汤等, 并通过现代药理研究筛选出既有显著降糖作用又能综合调整人体代谢的药物, 如人参、黄芪、云苓、花粉、知母、生地、黄连、芍药、麦冬等。

近年来对消渴病的研究从理论到临床, 从深度到广度都有很大的突破和进展, 但就现状来看, 尚有待深入。展望未来, 消渴病的研究立足于中西医结合, 师古而不泥古, 创新又遵经旨, 在中医基本理论指导下, 结合临床实际, 运用现代医学的理论和办法, 使消渴病研究走向客观化、规范化、标准化, 探索中医辨证论治规律, 制定全国统一的标准。在辨证论治的同时进行实验研究, 力求实验指标与辨证分型相统一。进一步加强复方和单味药的筛选以及药物有效成份的分离、提取、炮制, 并进行制剂药理的研究, 寻求防治消渴病及并发症的有效方剂, 改进剂型, 以便消渴病人长期服用。加强糖尿病并发症的防治, 目前这项工作已作为世界糖尿病研究的重点课题, 虽然我国学者采用活血化瘀方法防治消渴病并发症已取得较好的疗效, 但今后仍为中医药研究的主攻方向, 有待于进一步努力。

#### 参考文献

- 1 黄帝内经素问, 北京: 人民卫生出版社, 1978, 2
- 2 李育才, 等. 辽宁中医杂志, 1985, 12: 2~3
- 3 李育才. 辽宁中医杂志, 1985, 2: 14~16
- 4 方药中等实用中医内科学, 上海: 上海科技出版社, 1985, 2(1): 175~486
- 5 马坤范. 河南中医, 1990, 2: 27~28
- 6 刘冰. 全国第 2 届消渴病学术会议论文集, 1991, 1~3

(山东省德州地区人民医院蔡丽慧主治医师撰; 陈炳元审)

**中医治疗震颤麻痹的研究进展** 震颤麻痹又称帕金森氏病, 属中医颤证、震颤、颤振、振掉、症范范畴。西医认为其病变在黑质及黑质纹状体通路, 主要特征为震颤、肌肉强直、运动障碍。据 1986 年中国 29 个省、市 117 个点调查, 其患病率为 14.610 万人, 多为中老年人。随着中国人口增长, 患病人数将逐渐增多。西医对本病虽有疗效, 但不易巩固, 更不能控制病情的自然发展, 且常因药物副作用严重而被迫停药。运用中药药及针灸治疗本病取得较好疗效, 越来越受到人们的重视。

本病在《内经》中并无明确记载, 但《素问·至真要大论》所谓“诸风掉眩皆属于肝”的“掉”, 即与本病有关, 说明此类疾患多属于风象, 病机属肝, 并一直为后世医家所遵循。明代王肯堂《证治准绳·杂病》曰: “颤, 摇也; 振, 动也。筋脉约束不住而莫能任持”。其症“壮年少见, 中年之后始有之, 老年尤多”。清代张石顽《张氏医通》有颤振之名, 认为本病主要由风、火、痰为患, 并按脾胃虚弱、心气虚热、心虚酸痰、肾虚、实热积滞分别立法处方。

新中国成立后,中医工作者对本病的病因病机进行了探讨,许多学者认为本病系本虚标实,本虚为肝肾不足,气血亏虚;标实为风、痰、瘀、火。王永炎概括标实为内风、瘀血、痰热。辛春和根据本病主症是震颤和肌肉强直,认为证属肝风。肝之阴血不足,无以养筋;肝木克土,痰浊内生,脉络瘀阻;肾阴不足,肝阳上亢,肝风内动,均可导致本病。王端义认为本病初期往往因病机较单纯,或风,或痰,或瘀等标实为主,或肝肾阴虚,或气血两虚等本虚为主,治疗效果也较好。后期往往虚实寒热错杂,阴阳失调,且多久病入络兼有血瘀,治疗效果也较差;同时本病也伴有肝郁,值得注意。

中医药治疗,临床较多采用辨证分型方法,如王永炎等分为气血两虚、血瘀风动;肾阴不足、血瘀风动;痰热风动等3型。使用相应药物治疗35例,治愈1例,显效11例,进步15例,有效率77.2%。潘澄濂将本病分为水不涵木,肝风内动;风痰阻络,肢节颤痹;心神虚弱,意识迟钝3型。另有以一方为主,随证加减者。如任光星自拟熄风汤(天麻、钩藤、全蝎、洋金花、蜈蚣)加减治疗因应用精神药物引起的震颤麻痹综合征58例,治愈47例,有效9例。任氏还用上述中药治疗35例,并与服安坦的38例进行对照观察,结果中药组治愈29例,显效5例,无效1例;安坦组治愈12例,显效17例,好转3例,无效6例。李人范等用复方白芷注射液(白芷、藁本、四两麻),也取得显著效果。此外,因本病属疑难病,患病率相对较低,故长期以来个案报道颇多。从个案报道的资料中,亦反映出中医辨证论治的特点,大体可归纳为下列两类:(1)肝肾亏虚,虚风内动。从用中医药治疗的27篇个案报道来看,认为本病属肝肾阴虚者最多,约占一半以上;方用大定风珠加减或六味地黄加减,也有用地黄饮子加减或真武汤加减者。(2)气血亏虚、挟风挟痰。对气血俱虚者,用益气养血熄风法,或养血活血熄风法,还有用补阳还五汤加减者。亦有中西医并用施行治疗者,认为这不但可以减少西药用量,降低西药的副作用,而且能提高疗效。辛春和等用中西医结合治疗32例(其中3例单服中药),中医采用分型治疗,肝阳不足,虚风内动者用一贯煎合羚羊钩藤汤;肝气郁结,气滞血瘀者用通窍活血汤或逍遥散;气血两虚,脉络瘀阻者用归脾汤合补阳还五汤;肝肾不足,脾虚湿重者用杞菊地黄汤合香砂六君汤,均取得较好疗效。陈涓用腹蛇抗栓酶注射液,配合西药治疗,也取得较好的成绩。与此同时,对某些治疗本病有效的中药进行了一些药理研究。关于厚朴对本病的治疗作用,日本学者研究较多。小川钦一认为厚朴可缓解本病的肌强直症状。渡边等对含有厚朴的有效处方进行动物实验,证明具有中枢弛缓作用,还有中枢性多巴胺作用。刘德英指出,药物实践表明,当归中的正丁稀醇内脂有较强的抗乙酰胆碱作用,寄生中的广藜生武、白芍中的白芍武、钩藤中的钩藤碱等均对小鼠有明显的镇静作用。

针灸治疗本病同样有着较好疗效,且见效迅速,近年来报道逐渐增多。秦亮甫用体针治疗30例,取穴四神聪、风池、曲池、合谷、阳陵泉、太冲(均泻)、太溪(补),有效率80%。王学成用深刺哑门、风池、大椎为主,配身柱、筋缩、攒竹、百会、四神聪等穴。哑门针刺向下颌方向直刺不捻转,进针4~6cm;病人有触电感就出针,共62例,全部有效。用头针治疗本病,杨秋影取舞蹈震颤区为主,头部震颤重者加运动区下2/5,肢体震颤重者加运动区上1/5或2/5,捻转法,1日1次,治疗28例,有效率90.3%。中医研究院针灸所取运动区(顶颞前斜线)治疗本病23例,有效率82.6%。贾怀玉等用头针取顶颞斜线,上肢震颤或强直者用该线中2/5;下肢震颤或强直者用该线上1/5;头部震颤重者用该线下2/5,并可配合顶枕线上1/4;言语不清、流涎、吞咽困难者用该线下2/5和额中线。以上皆可配顶中线,用抽气法,行针时配合主动活动及被动活动,治疗25例,有效率88%。

中医治疗本病较单用西药有很多优点,但目前尚属摸索阶段,治愈率及显效率尚不甚理想,疗效评定标准很不统一,远期疗效未很好观察与解决,有待进一步临床研究。今后要建立统一的诊断标准和疗效评定标准,加强前瞻性研究的科研设计,设立对

照组和观察指标,在突出中医特色、提高疗效的基础上,使辨证论治规范化,研制出系列中成药和方便有效的针灸治疗方法。

#### 参考文献

- 1 史荫绵,等.上海中医药杂志,1979,(2):22
- 2 辛春和,等.上海中医杂志,1981,(5):16
- 3 王永炎,等.中医杂志,1986,(8):22
- 4 [日]代水岛宣昭.现代东洋医学(临时增刊号),1986,7(1):135
- 5 杨秋影.针灸学报,1988,(1):20
- 6 秦亮甫.上海针灸杂志,1989,(3):18
- 7 陶怀玉.中国针灸,1989,(5):17
- 8 任光星.山东中医杂志,1990,(2):21
- 9 王克勤.中医药研究,1991,9(2):35
- 10 贾怀玉,等.山东中医杂志,1992,(3):27

(北京针灸骨伤学院王端义教授、陈利国主治医师、山东东明县人民医院贾怀玉主治医师撰)

#### 风湿肺热病

以往无此病名,仅《内经》有肺热病,清代陈平伯归纳风湿病提纲,因二者内涵基本一致,故合称风湿肺热病。本病是由风热病邪引起的,以寒热、咳喘、咯痰为主要临床表现的急性外感热病,相当于西医学的多种病原微生物引起的肺部感染,为临床常见病、多发病。目前应用抗生素虽使多数细菌性肺炎得以治愈,但病毒及耐药菌株引起的肺炎仍然严重影响着人民的身体健康,革兰氏阴性杆菌引起肺部感染的病死率仍高达50%左右,因此对本病进一步研究非常必要。

《内经》曾对肺热病的临床表现作了较详细的描述:“肺热病者,先渐然厥,起毫毛,恶风寒,舌上黄,身热,热争则喘咳,痛走胸膈背,不得太息,头痛不堪……”。汉代张仲景《伤寒论》,创制麻杏石甘汤,为后世治疗本病的常用方剂。唐代孙思邈《千金方》对其病机及表现论述说“邪克于肺,则寒热上气喘汗出,咳动肩背,喉鸣,甚则唾血……”;“胸满气喘,痰盛稠粘,皆肺气热也”。宋代陈无择《三因极一病证方论》对“肺虚感热”治以扶正祛邪兼顾;陈直《养老寿亲书》提出诸多饮食疗法,对老年患者尤为适宜,反对用汗吐下峻攻之法。金元时期,张从正、刘河间等以“喘嗽”为各论。张从正认识到“热乘肺者,急喘而嗽,面赤潮热,手足寒”;“火乘肺者,咳喘上壅,涕唾出血”。刘河间认为“……外感风邪,皮毛属肺,风寒随元府而入,腠理开张,内外相合,先传肺而人,遂成咳嗽,乃肺热也……”。清代叶天士概括本病的病因及传变规律:“温邪上受,首先犯肺,逆传心包”,其治疗“首用辛凉清肃上焦”。陈平伯提出:“风湿为病,春月与冬季为多,或恶风或不恶风,必身热咳嗽、烦渴,此风湿证之提纲也”,并建立了关于本病较完整的辨证治疗体系。

1949年后,对本病的研究多结合现代医学的诊断。1979年,北京友谊医院采用通腑突击泄热的综合疗法治疗成人急性肺炎,体温、白细胞复常时间及肺部炎症吸收天数均较抗生素对照组为优。1980年,湖南医学院二附院用清肺解毒汤(柴胡、黄芩、瓜蒌、十大功劳、银花、法夏、桔梗、陈皮、甘草)加白花蛇舌草治疗大叶性肺炎,有效率为86.6%;实验证明本方药具有促进细胞免疫功能作用,但对肺炎双球菌体外抑菌试验阴性。1984~1986年,施欣红等用清热解毒的马英注射液(马鞭草、蒲公英、黄芩等,每10ml含生药12.5g),以静脉给药方式治疗大叶性肺炎,总有效率达95%。

1984~1986年,全国北方热病协作组按统一的科研协作方案,对风湿肺热病进行临床研究。首先依据证候学研究并结合实验室手段,制订了本病的诊断要点:(1)发病特点:起病急,传变快,病程较短,四季发病,冬春为多。(2)主症:发热、咳嗽、咯痰(痰白或黄或粘稠或带血)、口干渴、舌红苔白或黄、脉数。(3)兼症:恶寒或寒战,胸闷或胸痛,气急或气喘。(4)肺部体征:局部叩诊浊音,听诊有呼吸音低、气管呼吸音、湿罗音。胸部X线透视,肺部有炎性改变。(5)化验:末梢血象:白细胞总数或中性增高。

具备(2)、(4)项即可诊断,其他三项供参考。治疗运用系统辨治方案,初期(邪在肺卫)以辛凉解表为法,中期(邪入气分,或卫气同病,或气营两燔甚及营血)以清肺化痰、解毒祛瘀为主,恢复期以养阴清肺、益气和中善后。与抗生素联合用药组成的对照组相比,治愈率和症状改善情况均优于对照组,且无明显的毒副作用。

老年人风温肺热病(老年人肺炎)是风温肺热病的一个特殊类型。由于老年人的体质特点,不仅易患本病,并且临床表现与预后也不同。1983年,王佐等以清热解毒为主,选用抗炎Ⅰ针(蒲公英、白花蛇舌草)、透翘针(银花、连翘、大青叶、鱼腥草、蒲公英)、鹿蹄草素针,风热型的加服荆银合剂,热盛型的加麻杏白虎煎,营分证加醒脑针,总有效率为73.3%。1989~1991年,王成祥在杜怀棠指导下,对老年人风温肺热病进行研究,并与老年前期例、青年期例比较,发现老年风温肺热病以革兰氏阴性杆菌感染及耐药菌株感染为多;其病除发于卫分外,还有直接发于气分和营分者;有肺部宿疾及体质虚弱者易感;病变过程中易于传营,厥脱证出现率及病死率高,原因多与高龄、素体虚弱和邪热炽盛有关;临床表现部分不典型。采用中医辨证施治结合多途径用药治疗本病,病死率为10%,革兰氏阴性杆菌引起者病死率为19.61%;实验研究发现,老年人免疫功能降低及微量元素铜/锌比值降低,可能是老年人容易罹患风温肺热病和病后容易转变的微观机制之一。

对于小儿肺炎,1961~1962年张梓荆等对3、7型腺病毒婴幼儿肺炎200例进行中西医结合治疗,病死率为9.5%;1976~1978年对60例腺病毒肺炎,初用宣肺清热解毒,中期加用活血化瘀,极期扶正救逆,病死率为8.3%。1981~1986年,阎田玉等用活血化瘀法治疗小儿腺病毒肺炎及呼吸道合胞病毒肺炎疗效较好。1983年,舟方泊等用清营解毒法治疗25例腺病毒肺炎,死亡2例;温振英以益气养阴法治疗42例小儿腺病毒肺炎,无一例死亡。

估计今后对于本病的研究热点将是:(1)结合现代医学的诊断手段,探讨中医药治疗耐药菌株、病毒引起的肺部感染的方法及作用机理。(2)菌毒并治的问题。内毒素所引起的中毒性休克是肺部感染者死亡的主要原因,因此研究筛选具有拮抗与中和内毒素的药物,将会引起重视。(3)社会老龄化已成为国际的以及我国部分地区的突出问题,对老年人重要死亡原因之一的肺部感染的预防战略研究,必然会引起普遍重视。

#### 参考文献

- 1 王宝恩,等. 中医杂志,1980,4:35
- 2 湖南医学院二附院,中草药,1980,11(3):122
- 3 温振英. 浙江中医学院学报,1983,1:27
- 4 舟方泊. 吉林中医药,1983,6:19
- 5 王佐,等. 中医杂志,1983,5:10
- 6 阎田玉,等. 中医杂志,1987,11:32
- 7 杜怀棠,等. 北京中医学院东直门医院学术论文汇编,1988,56
- 8 施欣红,等. 中西医结合杂志,1989,9(9):554  
(北京中医学院东直门医院王成祥硕士撰;杜怀棠审)

**男性不育的辨证论治** section of treatment based on the differential diagnosis in male infertility 男性不育是很多疾病引起的一种后果,它本身并非是一种独立的疾病。中医采用微观和宏观相结合的辨证论治方法,使男性不育的治愈率达50%,总有效率可至97%。这在治疗男性生殖系统疾病和保护男性劳动能力方面起着极为重要的作用。

中医对男性不育的研究,以《难经》“损其肾者益其精”、“精不足者补之以味”为指导,在明代形成“肾学说”的理论框架。到了清代,中国现存以“男科”命名的第1部著作《傅青主男科》问世,所述亦不出肾水肾火之说。1983年,由林宏益、曲锡萍首先提出湿热蕴郁和气滞血瘀是导致男性不育的两个重要因素。1986年,洪广槐、董文媛也提出在男科疾病中运用痰瘀同治的法则。

1991年《中医男科临床治疗学》一书出版,对不育症的临床分证已列有肝郁血瘀证、肝经湿热证和痰湿内蕴证3个证型。这种以活血化瘀为主并现代血液流变学相呼应的治疗方法,发展和补充了传统补肾方法,从而大大提高了男性不育的治愈率。男性不育的临床研究集中在两个方面:

1. 继续应用传统的调补肾阴肾阳为主的方法。1984年,中国福利会国际和平妇幼保健院用中医药治疗男性不育33例,以服中药100剂为一疗程,其中无精虫者3例,不射精症11例,精液不正常者16例。这组病人临床表现有头昏、腰痠、遗精、阳痿、早泄、不射精、性欲淡漠、睾丸胀痛等。他们认为男性不育症通常由肾亏、精虚、气血两亏所造成,一般属于虚证,按辨证分型属寒者为阳虚,属热者为阴虚。33例患者中阴虚26例,阳虚7例。他们还认为在以往的治疗中对男性不育患有阳痿症状者,即不分阴虚阳虚,也不辨属寒属热,一概给予牛鞭子、狗肾粉、鹿茸,注射丙酸睾丸酮、绒毛膜上皮促性腺激素等,此法对阳虚型者尚可,对阴虚型属湿热过甚、伤阴劫精者,诚负薪救火,反致祸害。根据“虚者补之”的原则,以补肾填精、两益气血为主,再分辨其阴虚、阳虚和临床症状,随症加减。所用方剂为自拟五子地黄汤,其组成为:枸杞子9g,菟丝、覆盆子、淮山药各12g,车前子9g,五味子4.5g,泽泻、当归、茯苓、丹参、白芍、生地、党参各9g,甘草4.5g。方中的六味地黄汤为补肾主方,四物汤为补血主方,两方合用功在肾血双补,配党参以补气,佐甘草以和中,更加菟丝、枸杞、覆盆子补肾填精种子,车前一味益精而通尿窍,故孕育可望。本组33例中精液异常16例,孕育9例(55.20%);不射精14例,孕育10例(71.40%);无精虫3例,孕育1例(33%)。湖南医科大学附一院中医男科门诊用自拟天仙益精汤(由仙灵脾、黄芪、熟地、白术、龙骨各15g,小茴香6g,附子10g,桂枝6g组成)治疗男性不育87例,生育30例(34.50%),精液正常38例(43.70%),精液好转11例(12.60%),总有效率90.80%。

2. 男性不育研究的另一个重要方面,就是突破传统的男子不育以补肾为要的理论,进一步深入到活血化瘀的法则。例如现代医学对免疫性不育症的治疗尚无令人满意的治疗方法,应用免疫抑制剂、治疗生殖系感染,使用避孕套、宫内人工授精为常用的治疗措施。现代医学的免疫疗法多无特异性,除抑制异常的免疫反应外,也同时抑制正常的免疫反应,使整个免疫系统受到不同程度的抑制,且毒性较大,副作用较多,长期使用可出现严重的并发症。由于有些中药含有多种成分,各自发挥不同作用或作用于不同环节,复方中各药之间相互配合,又能消除副作用。故中医药治疗起着整体性调节作用,既可提高已被减弱的免疫稳定功能,又可消除有害的自身免疫反应。1988年,山东中医学院附院不育门诊和中心实验室根据大量的临床观察和实验资料证实,活血化瘀药物对体液免疫和细胞免疫有一定抑制作用,并对免疫性疾病有较好的疗效,如鸡血藤、红花、丹参等对已沉积的抗原抗体复合物有促进吸收和消除作用,坤草、山甲珠、水蛭、虻虫可抑制抗原体免疫反应所致的病理损害;丹参、三七、郁金能消除血液中的过剩抗原,防止免疫复合物的产生;川芎、赤芍、丹参能改善血液流变性;川芎、丹皮、赤芍、王不留行、芍药、桑枝等可提高人体淋巴细胞转化率,上述研究资料说明其能增强细胞免疫功能。活血化瘀法的祛瘀生新作用,颇似免疫反应的自身稳定作用,对免疫性疾病。特别是自身免疫性疾病具有普遍的治疗意义。他们用活血化瘀药物治疗免疫性男性不育闯出一条新路。活血化瘀法可以治疗造成男性不育的多种生殖系统疾病,河北省中医药研究所林宏益、曲锡萍治疗的540例男性不育中,103例是由于精索静脉曲张所致,占19.07%;不射精34例,占6.30%;前列腺炎27例,占5%;输精管阻塞5例,血精者5例,各占0.93%;精液凝集块不液化者59例,占10.93%;高精子密度(超过2亿/毫升)7例,占1.30%,总计240例,占540例的44.44%。这些患者的基本病理都属于中医的气滞血瘀,通过活血化瘀改善局部的气血运行,使之良性循环,用自拟方通育汤(路路通、海藻、昆布、龙胆草、鸡血藤、牛膝、地龙各30g,知母、黄柏各20g,三棱、莪术、桃

仁、红花、赤芍各 15g、广木香、甘草各 10g 组成), 治疗有效率达 87.41%。

男性不育的致病原因, 在发展中国家男子附属性腺的感染是主要病因, 而发达国家中常见的是精索静脉曲张。在中国某些地区精索静脉曲张发生率为 35.57%。对精索静脉曲张所致不育者多数主张采用手术疗法, 但也有人认为手术治疗不能改善不育患者的精液质量和妊娠率, 而且对大多数精索静脉曲张致不育的患者来说再无第 2 次手术治疗机会, 所以运用中医药活血化瘀方法改善精索静脉的血运状况, 进而改善导致睾丸损害的生理环境, 临床初步观察已收到明显的疗效, 其治疗的重复性是手术方法不可比拟的。如果将电子学、超声学、放射学等学科的成果引入精索静脉曲张致不育者的诊断和治疗, 其疗效将是可观的。

#### 参考文献

- 1 佟慕光. 不孕与不育, 1984, 438~439
- 2 林宏益, 曲锡萍. 上海中医药国际学术会议论文集, 1987, 108
- 3 曲锡萍, 林宏益. 河北中医, 1987, 9(5): 47~48
- 4 洪广槐, 董文媛. 河北中医, 1988, 10: 5~37
- 5 金维新. 河北中医, 1988, 10(6): 23~24
- 6 曹坚. 实用男性学, 1988, 62~65
- 7 汤清明, 陈国林. 河北中医, 1990, 12(3): 45~46
- 8 冷方南. 中医男科临床治疗学, 1991, 207~215

(河北省中医药研究所曲锡萍主任医师、林宏益主任医师撰)

**中医治疗艾滋病** 艾滋病(AIDS), 即获得性免疫缺陷综合征。此病在 20 世纪 70 年代前期就开始在世界上泛滥, 80 年代初被查明, 1981 年由美国首先报道。有人认为此病早已存在, 但由于科学和社会方面的因素, 只是到了 20 世纪 80 年代才被人们所了解。

本病是由一种叫作人类免疫缺陷病毒(简称 HIV)所引起的疾病, 主要通过性交、注射及母婴等途径传染, 其潜伏期为数月至半年, 最长可达数年之久。它攻击人体的免疫系统, 从而使机体的免疫功能遭到彻底的破坏, 失去对各种病毒、细菌、原虫及真菌等的抵抗和防卫能力, 极易发生机会性感染而致命。因此, 有人认为艾滋病即机会性感染。目前尚无特效疗法, 一旦得病则很少有幸免于死的可能。患者罹病后存活时间一般为 3 个月至 5 年, 平均存活时间仅 14 个月。

本病的诊断主要是依靠免疫学、血清学及微生物学检查结果, 但一般只要患者的血清检查 ELISA 为阳性时, 诊断即可确立。此外, 辅助性 T 细胞( $T_4$ ,  $T_H$ )与抑制性 T 细胞( $T_8$ ,  $T_S$ ), 即  $T_4/T_8$  淋巴细胞比例的下降及病史与症状, 也是重要的诊断依据。还需通过了解患者的生活方式, 尤其是性生活史, 有无麻醉药瘾, 是否被输过血及使用过血液制品, 有无外伤史及与传染源的接触以及临床表现等进行判断。对原来没有什么疾病, 也未用过免疫抑制剂, 无其他原因可解释, 而出现发热、全身乏力、盗汗、消瘦(体重减轻 10% 以上)、腹泻、咳嗽、全身皮疹痒痛、多发性持续性淋巴结肿大、鹅口疮或 60 岁以下患有卡波希氏肉瘤等症状与体征者, 均要考虑为本病的可能。

中医文献没有关于艾滋病的明确记载, 但其发生发展过程及其症状体征变化都可运用中医理论认识和探索防治方法。国内外应用中医药治疗艾滋病已逐步取得一些进展。

中医理论研究方面 根据本病所出现的症状及发病特点, 可从内伤杂病的“虚劳”、温病的“卫气营血”及伤寒的“三阴”等方面考虑证治。中国中医研究院赴国外试治艾滋病小组在临床实践中观察到, 本病患者始终有不同程度、不同类型的发热及某些出血征象, 对早、中期病人以温病卫气营血为主进行辨证论治, 对晚期患者主要按“虚劳”及伤寒的“三阴”证论治, 初步取得一些缓解症状、减轻痛苦、延长生命的效果。中国中医研究院西苑医院陈可冀研究员在美国治疗一例艾滋病患者, 采用“清热凉血”、“补元气益阴津”进行治疗, 缓解了症状, 改善了体质、延长了生命。美国洛杉矶市几名晚期艾滋病患者经“扶正固本”、“化瘀解

毒”方药治疗后, 症状明显减轻, 恢复正常生活。美国加利福尼亚州中医医疗所史密斯和克鲁斯传统医学研究所达曼南达联名发表论文, 认为根据艾滋病的临床表现, 从中医辨证施治角度入手, 主要涉及肺、脾、肾三脏, 辨型分证以脾虚血亏型、肺气阴两虚型、肾精不足型和肾阴不足型为多见, 并提出各型的治则和方药。他们认为, 在艾滋病前驱症期运用中药治疗, 可以控制、逆转艾滋病的进展。香港学者谢永光认为艾滋病纯属“虚证”范畴, 宜补而不宜泻, 中医防治本病应以提高免疫功能、加强患者防御能力为主要目标。正气受损, 应按《内经》“虚者补之”、“损者益之”的原则, 治疗应扶本益阴, 补其不足, 不可攻其有余。目前国内对艾滋病的辨证分型大致还有: 热陷营血、肺肾亏损、肾阴亏损、肺阴不足、热盛动血、正虚瘀结、热毒炽盛、气血亏损、气阴两伤、肝肾阴虚等; 治则有益气补肾、清热解毒、清热凉血、滋阴生津、活血解毒等。

中药方剂研究 (1) 复方: 日本东京医科大学讲师羽田雅夫等发表一篇试验报告认为, 人参汤、小柴胡汤可增加艾滋病病毒感染者的淋巴细胞数量, 特别是人参汤可使吞噬艾滋病病毒的自然杀伤细胞(NK)增加, 从而提高免疫力。羽田曾对 9 名感染艾滋病病毒的患者做过试验, 其中 4 人服人参汤, 5 人服小柴胡汤, 每日服用量为 7.5g, 其后发现, 服人参汤的患者中有 3 人 NK 细胞增多, 本来受艾滋病病毒影响而减少的 T 淋巴细胞增加 0.5~0.6 倍, 认为这项研究给预防艾滋病带来了希望。另有补中益气汤、当归补血汤、归脾汤、清营汤、犀角地黄汤、三黄解毒汤、三甲养阴汤、牛黄解毒丸、清宫汤、八味黄芪片、六味地黄丸、补阴汤、消痰解毒汤、龙胆泻肝汤、白虎人参汤、羚羊钩藤汤及“艾滋宁”、“爱滋可宁”、“艾滋一号方”等中成药, 其确切疗效尚有待于临床验证。(2) 单味中草药: 到目前为止, 国内有关单位对单味中草药防治艾滋病做了大量的筛选工作, 初步确定有效的为: 人参、党参、沙参、玄参、西洋参、太子参、黄芪、灵芝、阿胶、胎盘、鸡血藤、女贞子、山萸肉、补骨脂、刺五加、肉桂、白术、甘草、山药、香菇、菜豆、猪苓、当归、地黄、蜈蚣、淫羊藿、杜仲、云苓、苡仁、黄精、天门冬、何首乌、大枣、云芝、牛皮胶、附子、虫草、仙茅、菟丝子、鹿茸、赤芍、白芍、杞子、五味子、旱莲草、百合、桑椹、桑寄生、杜娟、丹参、黄连、黄柏、银花、大蒜、穿心莲、山豆根、连翘、鱼腥草、大青叶、靛玉红、白花蛇舌草、野菊花、知母、板蓝根、龙胆草、十大功劳叶、苦参、蒲公英、苦地丁、柴胡、麻黄、水牛角等。其中最常用、最主要的有甘草、人参、黄芪、党参、白术、茯苓、当归、大枣、杞子、杜仲、百合、天冬、熟地、五味子、菟丝子、生姜、山萸肉等。国外对甘草颇为重视, 日本学者后藤洋一等于 1987 年研究证明, 中药甘草所含的甘草甜素(GL)在试管内对艾滋病病毒有抑制繁殖及抑制细胞变性作用。为此, 他们对 11 名艾滋病病毒感染者投给甘草甜素进行临床试验。其结果表明, 有 6 名患者末梢血淋巴细胞的  $T_4/T_8$  比值上升, 4 名患者的  $T_4$  淋巴细胞数增多。日本 Ono 发现小柴胡汤对艾滋病病毒逆转录酶活性有强有力的抑制作用, 其中以黄芩作用最强, 并已分离出黄芩甙元及黄芩甙两种有效成分。但它对逆转录酶的抑制是高度特异性的, 而对细胞 DNA 多聚酶  $\alpha$  和  $\beta$  则无抑制作用。此结果支持小柴胡汤对宿主细胞无毒的事实。1986 年香港中文大学中药研究中心主任杨显荣博士领导该中心与美国加州大学合作, 进行一项中药治疗艾滋病的实验研究, 发现牛蒡子、紫花地丁、夏枯草、一见喜、黄连、穿心莲、千里光、紫草、金银花等中药有抑制艾滋病病毒生长的作用。美国学者发现, 中国黄瓜根萃取物——蛋白 GLQ223 具有杀死被艾滋病病毒感染的细胞而不损害健康细胞的功能。美国得克萨斯大学西南医疗研究中心学者发现, 蓖麻油中的蓖麻白蛋白是艾滋病病毒和癌细胞的克星, 并认为是对付艾滋病的“生物导弹”。

中医辨证用药研究 研究中国中医研究院赴国外试治艾滋病小组对 30 例艾滋病患者, 根据其症状表现分为脾胃阴虚、脾胃虚损、脾肾亏损、热盛痰蒙四型进行论治; 黑龙江中医学院黄炳山教授 1988 年在美国与当地医生合作, 将 19 例艾滋病患者辨证分为三组, 一为体虚外感, 主要按卫气营血辨证; 二为虚损之候, 病



在脾、肺、肾等脏腑之气血阴阳亏损,三为合并淋巴结肿大者是在脏腑气血亏损的基础上,功能进一步失调,产生痰浊、瘀血,以致形成痰核、瘰疬,积聚等而使病情加重,复兼外感则病情恶化,乃致阴阳离绝。凡用中医辨证治疗者,一般均取得较好的效果。

**针灸治疗** 研究国内外有关专家经实践证明,针灸疗法能促进人体T细胞数量的增加,从而激发人体免疫功能,增强机体抗病毒能力。美国史密斯教授从1982年12月至1987年底,采用针灸治疗150例艾滋病患者,其中许多属气虚型者,经治疗两周后,即出现良好效果;坚持治疗则乏力、盗汗、腹泻和体重降低等症继续得到控制,T细胞降低得到改善。墨西哥科伦坡医科大学是担任世界卫生组织预防艾滋病全球规划的治疗中心,至1988年9月,该中心研究人员已接治2000名艾滋病患者,应用针刺治疗,其效果表明比服任何药物都好,使患者延长了寿命。由此可见,针灸已成为国际防治艾滋病不可缺少的重要手段之一。

#### 参考文献

- 1 吴伯平. 瞭望周刊, 1986, 6(23): 23
- 2 黑龙江中医学中医基础理论研究所, 中医药信息, 1986, 3: 20~24
- 3 谢永光, 台湾自然疗法, 1987, 1: 24~25
- 4 后藤洋一等, 医学のあゆみ, 1987, 140(8): 619~620
- 5 羽田雅夫等, 第1回日中东西洋医学会议论文集, 1987, 9: 120
- 6 金赫炎, 中医药研究资料, 1999, 1: 21~23
- 7 苏诚炼, 中医杂志, 1990, 2: 26~29
- 8 苏诚炼, 中医杂志, 1990, 3: 27~30

(中国中医研究院苏诚炼主任医师撰)

**中医诊治冠心病的研究** 现代医学的冠状动脉粥样硬化性心脏病(简称冠心病),属于中医学胸痹心痛范畴。胸痹心痛轻者仅感胸闷如窒,呼吸欠畅;重者则有胸痛;严重者心痛彻背,背痛彻心。冠心病在西欧国家发病率和死亡率高,中国目前尚缺少确切的病死率数据,但呈现出增多趋势,其死亡率也升高1~3倍。病理解剖资料证明,中国冠心病患者的发病年龄较解放前提早5~10a。

胸痹心痛溯源于《灵枢·厥病篇》之厥心痛;发展于《金匮要略·胸痹心痛短气篇》,即“夫脉当取太过不及,阳微阴弦,即胸痹而痛;所以然者,责其极虚也。今阳虚知在上焦,所以胸痹心痛者,以其阴弦固也”。《杂病广要》所述较为精确:“胸痹心痛,其病如二而一,均是膈间疼痛之称。胸痹轻者,仅感胸中气塞,心痛重者为真心痛。”在治疗方面,《金匮要略》强调以宣痹通阳为主,其所载瓜蒌薤白白酒汤和瓜蒌薤白半夏汤等方剂,至今在临床上仍有指导意义。《世医得效方》用苏合香丸芳香温通以“治猝暴心痛”,《医林改错》用血府逐瘀汤治疗胸痹心痛。蒲辅周认为冠心病属虚者多,属实者少,也常表现为虚实互见、寒热错杂,治疗原则应为补虚泻实,调其不平,益气和血,顺气和血等,避免用破气破血药损伤元气。邓铁涛认为冠心病心绞痛患者“心阴心阳虚”为本,“痰与瘀痹阻”为标,提出以温胆汤加人参益气温通心阳,或以生脉散益气养阴作为基本治疗途径。

天津中医学院二附院田芬兰主持研究“真心平”、“冠心速效散”,临床观察近500例心肌梗塞患者,疗效达96%。“真心平”立法:急则疏通心络,升清降浊,使心阳复振,心血得通,痰浊得除,把治疗重点放在控制急性期病情。“冠心速效散”的立法是通行开络。两药合用共有宣痹通阳、活血止痛之功效,可缓解心肌梗塞急性期病情,预防、控制三大并发症的发生,降低死亡率。

本病与体质因素密切相关,心、脾、肝、肾诸脏亏虚,功能失调是本病发生的原始病因。心阳亏虚,心脉失于温煦;心阴亏虚,心脉失于濡养,均可发生胸痹心痛。脾胃亏虚,气血生化乏源,或运化失司,痰浊胸阻心脉,亦可发生胸痹心痛。肝血亏虚,母病及子,或肝气郁结,以致心血运行滞涩,亦可发生胸痹心痛。若肾阳亏虚,不能温煦心阳,以致心阳不振;若肾阴亏虚,不能上滋于

心,以致心阴亏虚,遂发为本病。所以中医古籍中常有“脾心病”、“胃心病”、“肝病”等记载。

感受寒邪,内伤七情,劳力过度,饮食过饱是诱发本病的常见诱因。此外,恣食肥甘,偏嗜咸食,安逸少劳,烟酒嗜好,亦可增加本病的易患性。痰浊内生,瘀血内停是本病继发的,内生的主要致病因素。二者均由脏腑功能失调,气血津液运行失常而成。痰浊或瘀血一旦形成,即可成为新的致病因素,上犯心胸,闭阻心脉而发本病。

通过深入的临床实践,多数学者同意本病的基本病机是本虚标实。本虚以脏气亏虚为主,标实则以血瘀痰阻多见。脏气亏虚,阳损及阴,兼血瘀、痰阻或寒凝、气滞。1990年10月中国中西医结合学会心血管学会修订了《冠心病中医辨证标准》。对本病舌脉变化的研究报道较多,从110例冠心病患者的舌象分析来看,舌紫暗或有瘀点瘀斑者88例,占80%,说明青紫舌是血瘀的一项非常重要的客观指征。舌淡红苔薄白者,表示病情多较稳定而轻,预后良好。舌绛紫或淡紫、苔厚腻者,提示病情严重,多有趋于恶化的可能,预后较差。急性心肌梗塞患者舌苔由薄→腻→黄→黑为逆,由黑→黄→腻→薄为顺。薄白苔多见于急性心肌梗塞早期或恢复期患者,病程中始终为薄白苔者,一般病情轻,合并症少,预后较好。如舌苔黄腻持续不退,病情多有恶化的可能,且发病第一天出现黄腻苔者应警惕严重心律失常的发生。如脉象突然变成沉细无力,应注意心源性休克的发生,出现结代脉要考虑有心律失常的表现。在临床上顺脉、虚数脉、结脉、代脉、迟脉和痰脉等可作为辨别急性心肌梗塞患者凶吉的客观依据。

从脂代谢角度研究:脂代谢障碍与冠心病的发生发展有着密切关系。胡志坚等检测57例冠心病及高血压病人的甘油三脂,结果表明,凡气滞血瘀者,血清甘油三脂均普遍增高。王秀支等对58例冠心病患者其检测血脂变化,其中属于高脂血症者44例,44例中属气滞血瘀者又占37例。因此,认为脂质代谢紊乱与冠心病气滞血瘀证关系密切。

从免疫功能角度研究:冠心病虚证患者的免疫功能多呈低下状态。因此,廖家桢等进行对照观察研究,从研究结果看出,冠心病虚证患者的细胞免疫功能均低下。可以认为,细胞免疫功能低下可能是虚证的一个共性表现。淋转、E-玫瑰花环及ANAE染色体等指标有助于虚证的辨证,但是尚不能明确是心气虚还是心阴虚,是脾气虚还是肾气虚,因而这些指标对虚证有定性意义,但不能定位。

此外,尚有从心电图、内分泌、血浆PGI<sub>2</sub>及TXA<sub>2</sub>测定角度来探讨冠心病中医辨证客观指标的研究,对于阐明冠心病的中医理论基础,提供中医诊断、治疗、研究冠心病的客观依据,逐步实现冠心病辨证论治的科学化、规范化有重要的理论意义和实践意义。

关于中医“天人相应”整体观的理论,田芬兰回顾了天津中医学院二附院20年中381例急性心肌梗塞住院患者发病的年、月、日、时,应用运气学说、子午流注学说理论,分析其发病规律,结果在逢太一天符等气候变化剧烈的年份,逢气温最低、最高,多变的月份,逢卯时大肠、辰时胃和戌时心包的时辰发病最多。

关于溶血栓疗法给药途径与剂量,溶血栓后的处理,溶血栓的近期和远期效果,以及组织型纤维蛋白的溶酶原激活剂与其它更令人满意的溶血栓剂的研制与应用等,是需要进一步研究探讨的课题。今后应从基础和临床两方面进行筛选,寻找对中医辨证切实可行的有指导意义和实用价值,不断充实中医急救内容的整体监测手段。改革中药剂型,研究创制精确有效的中药溶栓剂,直接注入冠状动脉闭塞处,或静脉滴入治疗,也是值得研究的课题。冠心病的传统康复医学研究是很有发展前途的领域。

#### 参考文献

- 1 中国中西医结合学会心血管学会, 中西医结合杂志, 1991, 11(5): 257
- 2 郑小伟, 浙江中医学院学报, 1991, 15: 20~21
- 3 陈可冀, 等, 辽宁中医杂志, 1982, 6: 15~18

- 4 周灼伯,等.辽宁中医杂志,1984,4(4):212~213
- 5 陈镜合.新中医,1985,3 6~9
- 6 廖家桢,等.上海中医药杂志,1987,11: 2~6
- 7 陈耀青,等.中西医结合杂志,1988,8:9 460
- 8 张健,等.中医药学报,1991,15(6):44~45

(天津中医学院田芬兰、米丽萍撰)

**中医药治疗心律失常的进展** 心律失常是见于多种心脏病或其他全身性疾病引起的心脏冲动和传导异常,主要表现为心脏节律及频率失常,且常常伴有心脏功能不全及其基础疾病的表现。中药治疗心律失常具有悠久的历史和丰富的经验,而且可通过多种途径发挥整体效应,标本兼治,更适应疾病变化的真实情况。

心律失常属中医心悸、怔忡、脉结代范畴。早在《内经》就有关于本病及脉象表现的记载,认为本病可因惊、虚、痰而作,其脉象为“参伍不调”或“乍疏乍数”。张仲景首先提出“脉结代,心动悸,炙甘草汤主之”等各种治疗心悸的方法。朱丹溪认为本病病因当“痰之虚与痰”。王清任则认为瘀血内阻是导致本病的主要原因。近代有人根据脉象变化将心律失常分成快速型心悸,如呈现数脉、疾脉、促脉、脱脉、浮气脉等;缓慢型心悸,如呈现缓脉、迟脉、损脉、败脉、夺精脉等;节律不整型心悸,如见涩脉、促脉、结脉、代脉、或脉象乍疏乍数、忽强忽弱等。治疗心律失常,虚证以补虚为主,补益气血、或调理阴阳,以求气血调畅,阴平阳秘,常用枣仁、柏子仁、远志、合欢皮、夜交藤等养心安神;实证当祛邪为主,常用化痰涤饮、活血化瘀等治法,配合用朱砂、磁石、石决明、珍珠母、牡蛎等重镇安神。

中医治疗心律失常主要采用辨证论治的方法。宋跃成认为心律失常的病机多为本虚标实。治疗本虚,阴虚者用六味地黄丸、生脉散、补心汤;阳虚者用温肾复脉汤(仙灵脾、补骨脂、当归、熟附子、桂枝、麦冬、黄芪、炙草)、人参真武汤、附子理中汤、桂附八味丸、附子注射液;气虚者用养心汤;气阴两虚者用炙甘草汤、归脾汤、生脉注射液;阴阳两虚者用金匱肾气丸或参附汤加味。治疗标实,痰浊者用加味温胆汤、栝楼薤白半夏汤;血瘀者用血府逐瘀汤、丹参饮加味、桃红四物汤、丹参注射液;气滞者用四逆散加味;寒凝者用麻黄附子细辛汤加味或栝楼薤白桂枝汤;火邪者用清心汤(生地、麦冬、黄连、栀子、苦参、莲子心)。魏氏将心律失常按心率快慢分为快速型的和慢速型的,前者辨证多属心气不足、血脉瘀阻、瘀久化热型,治用生芪、太子参、麦冬、五味子、丹参、川芎、丹皮、赤芍、香椽、佛手、香附。后者辨证属心脾气虚、湿阻心脉者,治用黄芪、太子参、白术、茯苓、羌活、独活、泽泻、陈皮、防风、升麻、葛根、柴胡、川芎;属阳气虚衰、阴寒凝滞者,用党参、生芪、当归、白芍、桂枝、肉桂、干姜、附片、鹿角、川芎等。

近年来,根据临床及实验研究的结果,采用辨病方法是中医治疗心律失常的重要发展。朱锡祺主张在辨证的基础上进行辨病治疗。对植物神经功能失调引起的心律失常,用生脉散合甘麦大枣汤,加百合、丹参、生龙牡、磁石为基础方;冠心病心律失常者,七分益气,三分活血,用党参、黄芪、丹参、益母草、麦冬为主;风心病心律失常者,以通为主,常用桂枝、赤芍、桃仁、川芎、益母草、丹参、红花、黄芪;病毒性心肌炎心律失常者,其基本方为生地、桂枝、麦冬、甘草、丹参、黄芪、大青叶、苦参、茶树根,急性发作期去桂枝、黄芪,加蒲公英、地丁草等。

王金荣以黄连生脉饮为基础方治疗早搏、心悸、失眠者加酸枣仁、夜交藤,胸闷、憋气者加栝楼皮、郁金,血瘀者加赤芍、丹参,头晕、高血压者加天麻、枸杞,早搏频发者加苦参。治疗本病还有抗早搏汤(常山、姜半夏、苦参、炙草)、整律合剂(党参、丹参、苦参、柏子仁、常山、炙甘草)、整律汤(丹参、阿胶、栝楼、桂枝、枣仁、茯苓、煅龙牡、炙黄芪、蛤蜊干、麝白、炙甘草)、脂泻通(补骨脂、泽泻、本通)等。

治疗房颤,王金荣用除颤汤(丹参、苦参、五味子、柏子仁、三

七、川芎);崔氏用转律汤(红参、丹参、苦参、酸枣仁、琥珀、车前子)合并小剂量奎尼丁,转律成功率高且可减免奎尼丁的毒副作用。

针对病态窦房结综合征的主要病机为阳虚,尤以心肾阳虚突出,临床采用附子1号注射液、健心片(党参、附子、桂枝、川芎、干姜、炙甘草)、麻黄附子细辛汤等单一温补的方法进行治疗。针对其基本病机为阳虚兼有气虚、阴虚、血瘀、痰浊等而采用温阳益气(活血法或温阳益气养阴活血法等综合治疗措施)。另外,临床还采用护心丹(麝香、人参、三七、麝酥)、心宝(洋金花、附子、官桂、人参、田七、麝香、鹿茸等)、山萸碱、活心丹等辨病治疗病态窦房结综合征。以上均取得较好的疗效。现代研究资料表明,党参、桂枝、附片、炙甘草、麦冬、丹参、麻黄、五味子、当归、黄芪、细辛、川芎、仙灵脾、子姜等药物为治疗病态窦房结综合征的常用药,其中尤以人参的增率作用最为显著。

治疗房室传导阻滞,张氏用通滞汤(石菖蒲、丹参、降香、栝楼、郁金、血竭粉、麝香粉、沉香粉)、参花三香汤(丹参、红花、云木香、檀香、降香);邓氏用升率汤(麻黄、附子、细辛、丹参、郁金、红参、当归、麦冬),其它如鹿茸注射液、通阳复脉汤、补骨脂片等均取得较好的效果。

为了提高中药抗心律失常的疗效,探讨其作用机理及作用途径,近年来国内对抗心律失常中药的药理进行了较为深入的研究。根据药理作用的机理,中药抗心律失常药物大致可分为以下几种类型:(1)阻滞心肌细胞膜钠通道类:苦参、缬草、当归、水菖蒲、山豆根、甘松、田七、延胡索、地龙、卫茅等,能对抗乌头碱引起的快速心律失常。(2)兴奋 $\beta$ 受体类:麻黄、附子、细辛、吴茱萸、蜀椒、丁香等,能对抗缓慢性心律失常。(3)抑制 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ -ATP酶类:捣寿草、万年青、罗布麻、夹竹桃、铃兰、蟾酥等,大多具有洋地黄样作用,可对抗室上性心动过速及控制快速房颤心室率。(4)阻滞 $\beta$ 受体类:佛手甾醇甙、淫羊藿、葛根等,能治疗快速型心律失常及降血压、缓解心绞痛。(5)主要阻滞钙通道类:粉防己碱、小檗碱等,可能有阻断组胺受体及扩张冠状动脉,拮抗噻巴因及氯化钙诱发的心律失常。(6)主要延长动作电位过程类:黄杨碱D、延胡索碱I、黄连素、木防己碱,通过延长动作电位过程,抑制异位节律点的自律性或消除折返而具抗心律失常作用。

中医药治疗心律失常具有肯定的疗效,而且是从整体调控入手,通过多种作用途径,治疗心律失常及与其同时存在的心功能减退或心肌缺血等病理变化,具有西药所无法替代的双向调节作用。在未来研究中要继续发掘中医药抗心律失常的宝贵经验,充分发挥中医药抗心律失常时整体调治、双向调节的优势,进一步筛选针对性强、疗效高的抗心律失常的方药;还必须进一步严格临床科研设计,深入开展抗心律失常中药的心脏电生理学研究和临床药理学研究;在临床研究中采用动态心电图进行周密观察,对药物的有效成分进行提取改造,以增效、减毒;研制服用方便、作用快捷的新剂型,从而更好地适应临床需要。

#### 参考文献

- 1 张伯臾,等.中医杂志,1985,7:9
- 2 黄春林.广东医学,1985,9:33
- 3 韩明向.中西医结合杂志,1986,6(6):376
- 4 王金荣.中医杂志,1988,29(12):37
- 5 魏执真.天津中医,1989,1:16
- 6 宋跃成,等.河南中医,1989,5:49

(安徽中医学院韩明向、李泽庚撰)

#### 中西医结合治疗病毒性心肌炎

20世纪70年代以来,病毒性心肌炎发病率逐年上升,受到国内外医学界的关注。国内发挥中西医结合的优势,在细胞和分子水平的研究取得一些突破性进展,临床采用抗病毒、调节机体免疫功能、保护心肌细胞等手段治疗病毒性心肌炎,尤其在救治突发衰竭或严重心律失常的重症心肌炎时,中西医结合治疗明显优于单纯的西医或中医治疗。

19世纪早期,人们认识到感染是病毒性心肌炎的病因。到20世纪50年代,Wilson等发现柯萨奇B<sub>3</sub>病毒并成功地建立了动物模型。对病毒性心肌炎的治疗方法一直有争论,经过应用利尿剂、洋地黄叶和大剂量柠檬汁、抗毒素和抗血清、抗生素和免疫抑制剂等阶段,最后都归结到“有价值的治疗仅仅是尽可能绝对卧床休息。”

中医古籍虽无本病名称,但18世纪温病学家叶天士提出“温邪上受,首先犯肺、逆传心包”的认识,可能包括本病在内。20世纪50年代以蒲辅周、姜春华等为代表的中医专家采用辨证施治原则治疗本病,取得明显的效果。此后,各地经过长期临床实践,总结出一些行之有效的方,如北京广安门中医院的养阴清心汤,上海曙光医院的清心莲子饮,北京中医学院的心肌炎合剂等,被广泛用于治疗心肌炎。尤其是中药针剂的出现,更为临床提供了方便,浙江省中医院以参麦注射液为主结合敏感的抗心律失常药治疗病毒性心肌炎100例,总有效率达89.5%。北京205医院朱世才等用洋地黄加维生素C治疗病毒性心肌炎36例,获得良好效果。山西太原市中医院研究所郭长亮等总结了中西医结合治疗病毒性心肌炎的一般规律。

当前,心肌炎的研究涉及到免疫学、分子生物学、分子病毒学、受体和遗传学等领域,已召开两届国际炎症性心脏病专题研讨会。中国于80年代初有九省市成立小儿心肌炎协作组;1987年6月中华内科杂志编委会召开心肌炎、心肌病诊治专题座谈会,制定了成人急性病毒性心肌炎诊断参考标准,从而推动全国诊疗工作的开展。“七五”和“八五”期间都将中西医结合治疗病毒性心肌炎列为重点科研课题。近年国内外学者通过大量的动物实验证实病毒本身及T细胞介导免疫是发病的重要因素,以此为主要线索,在临床和实验方面作了大量工作,分别于上海、北京和东北等地建立了柯萨奇B病毒病毒性心肌炎的动物模型和培养心肌细胞的细胞模型,并推广到全国进行中西医结合研究。上海中山医院杨英珍等通过实验和临床研究中药黄芪对病毒性心肌炎的治疗机理,揭示了一些重要治疗规律。陕西中医学院王朝宏教授等研制的心肌炎方康尔心I号具有抗病毒、诱生干扰素、保护心肌细胞等综合效应。天津中医学院等研制的中药复方康尔心I号对柯萨奇病毒感染心肌细胞有明显的保护作用,由此为临床治疗增添了新的防治手段。近年来临床进展主要表现在以下3方面:

1. 抗病毒和调节免疫功能。有些学者主张使用免疫抑制剂,如肾上腺皮质激素类能帮助重症心肌炎患者渡过难关,尤其是有泵衰或严重心律失常的患者要早期使用,上海中山医院和扬州医学院郭德祥等学者分别从动物实验和临床观察给予了证实。多数学者主张使用免疫促进剂,如上海第二医学院郑义、陈曙霞等分别报道,使用免疫核糖核酸和胸腺素治疗病毒性心肌炎使细胞免疫指标改善的同时,临床症状也明显改善。对于免疫调节剂的使用国内外学者尚有争议。

中医中药多具有一定综合效应,目前临床常用的黄芪类中药制剂既有抗病毒和调节免疫的功能,还有一定正性肌力作用。如杨英珍等用单味黄芪治疗病毒性心肌炎,王朝宏等用康尔心I号治疗病毒性心肌炎,临床观察到在改善细胞免疫、诱生干扰素、改善左心功能等方面均有明显的疗效。也有从热毒角度着眼的学者,选用清热解毒药在子扫除原发病灶,利于心肌功能的恢复,如上海中医学院子素霞等用补心解毒汤治疗本病。另外尚有用银花白虎汤、清胃解毒方等治疗的报道。关于治疗过程中邪正的辨证关系尚有不同意见。

2. 保护心肌细胞,改善心功能。研究发现,病毒性心肌炎患儿血浆过氧化脂质(LPO)较正常儿童高,而血细胞中超氧化物歧化酶(SOD)活性却低于正常,提示自由基参与损害心肌细胞。西安医科大学黄伟民等、哈尔滨医科大学姜岩等均作过临床研究,认为抗氧化剂能对抗自由基的产生,起到保护心肌细胞的作用,临床应用较广的辅酶Q<sub>10</sub>、生脉饮、复方丹参注射液均有抗氧化作用。随着中医辨证客观化标准化的研究进展,左心功能不全辨证为心气虚,尤其是PEP/LVET是中医心气虚指数。据观察,

病毒性心肌炎患者91.9%左室室壁活动减弱,85%PEP/LVET明显高于正常,所以遵循益心气养心阴原则能使左心功能明显改善,如临床广为使用参麦类制剂。实验证明,生脉针能促进损伤心肌细胞的修复,有抗损伤作用,尚能纠正心律失常。

3. 其他方面。纠正心律失常仍以药物治疗为主,近年主张急性期避免使用β受体阻滞剂。中医中药治疗虽没有速效,但由于副作用少,仍被临床广泛应用,常用的除参麦类制剂外,还有如炙甘草汤、清心莲子饮等收到一定的疗效。但对顽固性心律失常仍没有较好的方法。

少部分心肌炎迁延不愈或反复发作,甚至进一步发展为扩张型心肌病(DCM)。为此,有的学者主张长期小剂量使用免疫抑制剂如硫唑嘌呤等。中医多主张以活血化瘀为主,如姜春华曾主张用血府逐瘀汤合丹参饮加减治疗。

中西医结合研究的深入发展,有待于在基础理论上选择突破口,如关于中医邪正理论的进一步探讨等,不能单纯停留在临床总结。鉴于病毒性心肌炎是获得性免疫缺陷疾病中发病率高的病种,今后的研究热点仍在免疫学方面。现已进行单克隆抗体作用的研究,以及对白细胞介素2的进一步探讨。今后的研究工作,希望出现广谱抗病毒的或筛选出有综合效应的中西药物;研制早期防治重症心肌炎特别预防猝死的预防疫苗;研制疗效可靠而又安全的广谱抗心律失常的中西药物;进一步阐明病毒性心肌炎与DCM的关系。

#### 参考文献

- 1 杨英珍,等.中华心血管病杂志,1981,9(2):152
- 2 史载祥,上海中医药杂志,1983,(8):25
- 3 姜岩,等.临床儿科杂志,1988,6(6):354
- 4 森秀树,等.综合临床,1989,38(2):300
- 5 卢光增.临床荟萃,1989,4(12):552
- 6 陈国伟.新医学,1989,20(10):551
- 7 郭长亮.实用中西医结合杂志,1989,2(5):261
- 8 杨英珍.中华心血管病杂志,1991,19(1):61
- 9 阎会君,等.中西医结合杂志,1991,11(8):468
- 10 蒋金法,等.上海医学,1992,15(2):115

(云南中医学院阎会君硕士撰,王朝宏审)

**中西医结合治疗血栓闭塞性脉管炎** treatment of thromboangiitis obliterans with integrated medicine 血栓闭塞性脉管炎属于周围血管病,患者大多为嗜好吸烟的青壮年男子。病变呈全血管炎,血栓形成、管腔闭塞,可引起肢体缺血疼痛,最后导致肢端坏死脱落,从而引起患者严重的伤残,甚至导致截肢。在中国北方,本病发病率较高。古医籍所载发生在踝关节以下坏疽的典型描述,与Ⅱ期脉管炎患者的临床表现相似,有宝贵经验,但还存在一些疑难问题有待解决。因此,中国创立周围血管病学科,首先是从总结中医治疗血栓闭塞性脉管炎兴起的。

本病在中医学属于“脱疽”范畴。《内经·灵枢》痲疽篇中即已记载。汉代华佗《神医秘传》所用方:当归、玄参、银花、甘草被誉为“四妙勇安汤”流传至今。唐代孙思邈在《千金翼方》中还主张“毒在肉则割,毒在骨则切”的手术治疗。以后,历代医书均有不少阐述。在国外医学中,1879年Ven Winiwarter有一例初步描述本病的报告。1908年Leo Buerger对11例截肢肢体的动静脉进行病理研究,发现在发炎的血管中有血栓形成和机化,把本病正式定名为血栓闭塞性脉管炎,简称TAO,故后来又被称为Buerger氏病。

TAO的发生,认为可能是多种因素的综合作用所致。1933年,Mar Kary用烟草浸出液作皮内试验,发现87%的TAO病人为阳性。1941年,Thompson认为在脉管炎病人中霉菌感染率较高,皮肤毛菌素试验阳性率达80%。还有报道精神情志、寒冷外伤、性激素作用及遗传因素等与此病的发生也有一定的关系。中医认为脾肝肾亏损、脏腑功能失调是发病的内因,然后由寒湿之邪乘虚侵袭,滞滯脉络所致。据此结合临床实践,找寻更多的线

索进行病因研究。1953年, Richards 提出静脉血栓形成本病一个重要的病理部分, 游走性浅静脉炎是一个特征。1969年, 尚德俊认为本病早期或患者出现游走性血栓性静脉炎是具有诊断意义的临床特征。

有关 TAO 的发病机理, 有强调血管神经、激素调节障碍的, 而机体免疫调节障碍学说与血液高凝学说受到多数学者的重视。1962年 PoKorny 报道, 从 TAO 并发游走性浅静脉炎者血液中检出抗动物抗体。1976年郑萍首先在国内提出本病与免疫系统机能紊乱有关。1979年, Culati 报道患者的免疫指标异常。同年, Snolen 和 Adar 报告 TAO 对人类血管天然组分——I型和II型胶原有细胞敏感性。1983年, 郑萍在全国血管疾病会议上报道实验研究结果, 表明 TAO 是一种免疫性疾病。到目前为止, 该论点已基本得到公认。还有实验证明, TAO 病人血液处于高凝状态。

中医药治疗 TAO 各家证候分型不同, 采用的主治方药亦各有特点。崔公让将其分为四型: 虚寒型者用阳和汤或四逆汤; 气瘀滞型者用化瘀汤; 湿热型者用化湿祛瘀汤; 热毒型用四妙勇安汤; 同时配合外治法, 共治疗 413 例, 总有效率为 95%。许华封以自制疏通方(麝香、丹参、路路通、制乳香、制没药、制地龙、壁虎)为基础方, 随阴寒型、气滞血瘀型、湿热型、热毒型、气血两虚型之不同加减用药, 共治疗 214 例, 总有效率为 96.26%。开展中西医结合, 以辨证为依据, 努力寻找针对“病”的药物和方剂。江苏省中医研究所应用通脉片(1982年)和脉络宁(1985年), 吉林省中医药研究院应用瑞香素(1984年)治疗 TAO 等疾病均获得科研成果鉴定。还有应用大黄蛰虫丸、四虫片、通脉安片、白花丹参注射液、红花注射液、当归注射液、穿心莲注射液、清栓酶等治疗 TAO, 均取得较好效果。血瘀是本病的特征, 以中医理论而言应用活血化瘀为主。中西医结合, 开展对血瘀本质和活血化瘀疗效原理的实验研究较为活跃。顾亚夫等观察, 脉络宁有改变 TAO 患者甲皱微血管形态和血流速度, 改善病理性微循环障碍及降低血液粘滞度作用。辽宁中医学院附属医院用当归活血汤治疗 TAO, 通过动脉搏幅检查, 认为可以缓解血管痉挛, 促进侧枝血管的形成。中国医学科学院血液研究所用通脉灵, 证实有扩张血管的作用。李世英等实验证实, 川红花注射液对周围血管有明显的消除肾上腺素和去甲肾上腺素收缩血管的作用。裴玉昆等的实验资料表明, 通脉片除有改善 TAO 患者高凝低纤溶状态等作用外, 还可使多巴胺、去甲肾上腺素的含量降低。石晶华等报道, 脉通灵 I、I 号液对实验性血栓形成、血小板聚集有明显的抑制作用。血瘀与微循环、血液流变学功能紊乱、凝血机制异常有密切关系, 活血化瘀法对改变血液的浓、粘、凝、聚状态起重要作用。用现代医学科学的方法开展基础理论的研究尚待深入进行。李志海等报道, 通过全血超氧化物歧化酶(SOD)活性测定, 发现 TAO 患者 SOD 显著低于健康人。TAO 确切病因尚未获得证明, 但已提出的吸烟、寒冷、外伤、激素紊乱等原因都与组织缺氧有关。在缺氧情况下, 则产生大量  $O_2^-$ , 认为 TAO 可能与  $O_2^-$  大量增多和 SOD 活性低下有关。据报道, 用免疫学检查方法发现, TAO 病人免疫球蛋白 M(IgM)较正常人升高, T 细胞功能低下, 用益气活血法治疗可使之改善。通脉片(气血药)有提高免疫机能、抗变态反应等作用, 治疗总有效率为 97.7%, 高位截肢率为 0.75%。而脉络宁(养阴药为主)用于临床, 显效率达 92%。实验发现, 在免疫学方面, 治疗后 T 淋巴细胞显著高于治疗前。因此, 根据不同证型的发展变化进行动态辨证, 摸清中医治疗规律, 从而探索其理法方药最佳方案, 也是一个有意义的研究课题。目前从临床免疫学研究 TAO 的发病机制还处于初步的阶段。

应当深入广泛地开展血管炎流行病学调查, 以反映中国血管炎发病的实际情况, 并作为防治研究的依据。辨证施治是研究的热点, 也是中西医结合研究的重要内容和提高疗效的关键。努力寻找对本病更为有效的防治方法, 包括单味药及中药复方的研究, 估计能有新的突破。在中医药辨证施治的基础上, 恰当结合

有效的手术治疗以提高疗效, 也是值得研究的问题。

#### 参考文献

- 1 尚德俊, 中西医结合治疗血栓闭塞性脉管炎, 济南: 山东科技出版社, 1983, 20
- 2 郑萍, 上海免疫学杂志, 1985, 5(3): 146
- 3 石晶华, 等, 北京中医, 1991, 4: 54
- 4 李志海, 等, 中西医结合杂志, 1991, 11(4): 211

(上海中医药大学附属龙华医院陈荣荣副主任医师撰)

**中医治疗高脂血症研究进展** 研究资料表明, 血脂代谢异常与动脉粥样硬化的发生存在着密切关系。高脂血症常并发动脉粥样硬化, 而后者又是冠心病、脑血管病等多种心脑血管病的病理基础, 所以降脂治疗有着重要的现实意义。

中医虽无“高脂血症”的名称, 但在胸痹、胸痛、心痛、中风、眩晕等病证中有类似论述。根据临床表现, 认为多系嗜食肥甘厚腻, 伤食碍胃, 痰湿内生, 久则痰浊上犯心胸, 闭塞胸阳; 或久坐久卧, 体丰痰盛, 痰湿内结, 气机不畅, 运行受阻, 血瘀心脉; 或痰瘀互结, 上乘心脑; 或七情内伤, 肝气郁结, 日久气滞血瘀; 或蕴热伤阴, 久病及肾, 水不涵木, 肝火独亢, 上涌心胸头部而致病。

**辨证治疗** 周仲英等将高脂血症分为两个型: (1)痰瘀阻滞型用降脂 I 号方: 法半夏、瓜蒌皮、生山楂、丹参、生麦芽等; (2)肝肾不足型用降脂 II 号方: 制首乌、枸杞子、桑寄生、泽泻、决明子。两方药均制成浸膏片, 每服 6 片, 日 3 次, 疗程 3~6 个月。结果: 血脂胆固醇增高者 72 例中, 显效 51 例, 有效 12 例, 无效 9 例, 总有效率为 87.5%; 甘油三酯增高者 92 例中, 显效 67 例, 有效 8 例, 无效 17 例, 总有效率为 81.5%。孟庆霞分为 3 型: 痰湿型 10 例, 用二陈汤加味; 肝肾型 8 例, 用杞菊地黄汤或龙胆泻肝汤加味; 气滞型 13 例, 用桃红四物汤加味; 并加用菸酸肌醇脂。对照组单用菸酸肌醇脂, 两组剂量相同, 疗程 4~6 周。结果: 治疗组三项指标(胆固醇、 $\beta$ -脂蛋白、甘油三酯)与治疗前比较有显著性差异( $P < 0.01$ ); 对照组仅  $\beta$ -脂蛋白与甘油三酯有显著性差异( $P < 0.01$  及  $P < 0.05$ ), 认为治疗组优于对照组。戴西湖抓住本病虚(肺、脾、肾虚)、湿(水湿、痰浊)、血(血滞)三个病理环节, 通过补虚(益气养阴补肾)、治湿(利湿祛痰泄浊)、理血(活血化痰软坚), 收到良好的效果。包力伟等以甘草、枸杞子、柴胡、泽泻、山楂、丹参、红花为基础组成降脂方, 其中气虚血瘀型者加黄芪、生葛蒲; 肝肾阴虚型者加首乌、生地; 肝阳上亢型者加钩藤、草决明; 痰湿内阻型者加石菖蒲、茵陈; 气滞血瘀型者加川芎、姜黄。治疗 50 例高脂血症, 结果对高密度脂蛋白胆固醇及其亚组分呈显著性提高( $P < 0.001$ ), 未见任何副作用。刘春堂以三泽汤(泽漆、泽兰、泽泻、莱菔子、明矾)加味治疗本病, 阴虚型者加南沙参、生地、首乌、玄参; 气虚型者加党参、黄芪、黄精子、白术; 痰多者加白芥子、胆星; 瘀重者加丹参、桃仁、红花, 用药 4 周后复查, 三项指标均明显下降。

**专方治疗** 邵念方以降脂通脉饮(制首乌、金樱子、决明子、生薏苡、茵陈、泽泻、生山楂、柴胡、郁金、酒军)随证加减, 日一剂, 两周为一疗程。治疗本病 30 例, 经 1~3 个疗程后, 总有效率达 96.7%, 其中显效率 66.7%。胆固醇、甘油三酯、 $\beta$ -脂蛋白平均值均呈现较大的下降趋势。陈熊等用血脂宁胶囊(山药、山楂、首乌、决明子、陈皮、猪胆粉)治疗本病 76 例, 以安妥明作双盲对照 20 例, 结果显示两组疗效无显著性差异, 但血脂宁组的血液流变学指标有显著改善, 而对照组无明显改善。汕头二院以茵陈合剂(茵陈、泽泻、葛根)治疗本病 104 例。结果胆固醇和甘油三酯都有明显降低。湖南中医研究所用心舒 II 号(蒲黄、红花、姜黄、降香、党参)治疗 180 例冠心病, 其中 179 例高脂血症降脂有效率达 77%。杨登高以桑葛丹(桑寄生、葛根、丹参等)治疗本病 150 例, 治疗前后血脂三项指标差异显著。静文英等用降脂灵冲剂(茵陈、黑山栀、苍术、黄柏等)治疗本病 30 例, 并与菸酸肌醇脂组及脉通组各 30 例进行对照, 结果治疗组与两个对照组比较有显著差异( $P < 0.025$ )。杜雨茂以柔肝冲剂(淫羊藿、草决明、泽泻、生

山楂、川芎等)与安妥明相对照,结果两组均有良好的降脂作用。郑源庞以益寿茶(茶叶、丹参、山楂、决明子、杭菊花等)治疗本病,结果对心血管病患者的高纤维蛋白原含量的降低和缩短球蛋白溶解时间有明显功效,提示具有抗凝、增强纤溶活性的降血脂的作用。佟全名等以月见草胶囊治疗本病100例,与维生素E组(40例)作对照,分别于治疗前、治疗后15、45、90d及停药1个月测定血浆TC、TG、 $\beta$ -脂蛋白及HDL-C浓度。结果显示月见草胶囊有明显的降血脂作用,且无副作用,两组相比有显著差异。胡晓晨以降脂胶囊(桑寄生、仙灵脾、泽泻、玉竹、茺蔚子、山楂)治疗本病54例,近期总有效率为77.8%;在降低血脂的同时,还有明显改善血液流变学、血小板聚集和降压作用。林水森等以复方固本降脂丸(地黄、首乌、枸杞子、肉苁蓉、巴戟天)治疗本病60例,与西药非诺贝特组(36例)相对照,结果两组降脂效果相近,但中药组同时具有提高HDL-C/H-T-C比值,降低动脉硬化指数,提高细胞免疫功能和降低男性患者 $E_2/T$ 比值的作用,认为该药对机体的免疫和内分泌系统有调整作用,从而使脂代谢重新恢复平衡。方新生以单萜降脂散治疗本病60例,连服两个疗程(1个疗程30d),能显著降低胆固醇、甘油三酯和 $\beta$ -脂蛋白( $P < 0.001$ )。

**单味药治疗** 王侔用草决明糖浆治疗本病48例,治疗前后相比,对降低血清胆固醇及 $\beta$ -脂蛋白有非常显著的意义( $P < 0.001$ ),对降低甘油三酯有显著意义( $P < 0.01$ )。肖瑞崇用天然花粉4g/d分3次,治疗本病146例,结果表明具有降低胆固醇和提高高密度脂蛋白的作用。廖祖用泽泻治疗13例高胆固醇血症,平均下降44.8mg%,有效率88%;127例高甘油三酯血症,平均下降32.5mg%,有效率72%。刘超然进行实验,证明本品可明显抑制家兔主动脉粥样硬化斑块的形成和小鼠肠胆胆固醇的吸收。杨松年以茵陈水煎当茶治疗82例,胆固醇平均值由治前296.9mg%降至254.5mg%,具有统计学意义。有人以大蒜油胶丸治疗高脂血症274例,结果表明对胆固醇、甘油三酯、 $\beta$ -脂蛋白均有明显下降作用,尤其以降甘油三酯作用最优。邵耕等用人工虫草胶囊(含人工虫草0.33g)治疗223例,胆固醇平均下降17.5mg% ( $P < 0.001$ ),总有效率61.2%;甘油三酯平均下降9.93mg% ( $P < 0.005$ ),总有效率56.7%;高密度脂蛋白胆固醇上升27.19mg% ( $P < 0.05$ ),总有效率72.6%;未发现严重副作用。贺禄宜以姜黄糖衣片治疗90例,降低胆固醇及甘油三酯总有效率分别为98.5%及100%。通过实验证明,姜黄能促进胆汁分泌,其乙酰提取物有明显降低实验动物血清胆固醇含量作用,其挥发油和姜黄素具有降甘油三酯和 $\beta$ -脂蛋白的作用。金德山等以水蛭粉治疗150例,结果表明治疗后胆固醇和甘油三酯明显降低,而且水蛭粉能使血栓素降低,并使前列环素升高。洪允祥等以没药治疗本病52例,并以安慰剂作对照,结果表明,降低胆固醇的总有效率显著高于对照组,而降甘油三酯的作用难以肯定。没药还有降低纤维蛋白原和纤维蛋白裂解产物的作用。谭可安等以薤白治疗本病55例,结果表明该药除能降低总胆固醇和甘油三酯外,尚能降低过氧化脂质,降低血栓素和升高前列环素。

中医中药治疗高脂血症虽已积累了一定经验,但尚存在如下问题:(1)有些报道没能设立合理的对照组;(2)研究指标较为老化,对在脂质代谢中起很大作用的载脂蛋白缺乏观察;(3)病例数相对较少;(4)结合中医理论进行阐述有欠深入等。鉴于高脂血症的病理机制十分复杂,涉及面甚广,如何以中医理论为指导,在保持和发扬中医固有特色的同时,结合现代研究成果,以新的理论观点阐明其实质,则是较长时期的研究课题。

#### 参考文献

- 1 杨松年. 中医杂志, 1980, 1: 39
- 2 杨登高. 解放军医学杂志, 1985, 10(5): 369
- 3 陈熊, 等. 中医杂志, 1985, 26(5): 29
- 4 静文英, 等. 中西医结合杂志, 1986, 6(1): 21
- 5 孟庆霞. 西安医科大学学报, 1986, 7(3): 295
- 6 周仲瑛, 等. 南京中医学院学报, 1987, 3: 8

7 肖瑞崇. 湖南中医杂志, 1987, 8(5): 11

8 林水森, 等. 上海中医杂志, 1988, (7): 2

9 佟全名. 中西医结合杂志, 1988, 8(8): 269

10 包力伟, 等. 中医药学报, 1989, 2: 48

(安徽中医学院附属医院周宜轩副主任医师撰)

**中医治疗再生障碍性贫血 aplastic anemia** 简称再障或AA,由多种病因引起骨髓造血功能衰竭,以全血细胞减少为主要表现的一组综合病症,为一种严重的血液病。它分原发的和继发的两种。原发者病因不明,患者多为青壮年。继发者为化学、物理、生物等因素引起,随着工农业生产和科学技术的发展,人们与上述因素接触的机会增多,因此,继发性再障的发病率有增高的趋势,继发性再障约占所有病例的53.1%~75.4%。再障的研究引起了血液学工作者的重视。

中国应用中医方法和中西医结合方法治疗再障约从60年代开始。从发表的资料统计,治疗的病例数在1500例以上,取得了显著成绩。

中医认为再障属于血虚、血枯、血证、虚劳、虚损等范畴。血液的生成与心、肝、脾、肾有关,尤与肾的关系最为密切。再障的分型,60年代以前多按气血辨证,分为气虚、血虚、气血两虚三型。60年代后多按脏腑、阴阳辨证。80年代末,经过几次全国中西医结合血液病学术会议的讨论,将急性的和慢性再障分为急劳髓枯型、阴虚型、阳虚型及阴阳两虚型。1989年6月在大连召开的全国中西医结合血液病讨论会上,又将再障的分型与肾联系,分为肾阴虚型、肾阳虚型及肾阴阳两虚型。急性再障归纳在肾阴虚型内。对再障的治疗,60年代以前以补益心脾或补养气血为主。70年代在前法的基础上出现了补肾或补肝肾的治法。80年代以来,几乎均以补肾为主,或兼健脾,或兼活血,或兼补气血,或兼清热解毒。治疗以复方为主,多数按阴虚、阳虚、阴阳两虚辨证论治。具体方剂有大菟丝子饮、十四味建中汤、保元汤、生糖补血方1号及1号、左归饮、右归饮、活血益髓汤、归芍地黄汤、补中益气汤、当归补血汤、归脾汤、一甲复脉汤等加减。单方成药有生血丸、补血丸、血宝、髓灵素、乌鸡白凤丸、七宝美髯丹、仔猪圈丸、马钱子、七味汤、硝酸一叶菟碱等。对于急性再障的治疗,有的作者分为两型:急劳髓枯温热型者,宜凉血解毒,用凉血解毒汤,虚寒型者宜温补脾胃,填精益髓,用加味参芪仙补汤。

慢性再障的疗效,根据1980~1990年期间病例数在20例以上的19篇文章报道,共923例,有效率在54.55%~95.8%之间,平均为82.9%,这反映80年代中西医结合治疗慢性再障的水平。本病基本治愈率平均为23.3%,说明治愈的难度很大。远期疗效,一组慢性再障170例,远期总有效率为62.9%,1a、2a、5a、10a的生存率分别为90.30%、88.99%、88.01%、79.45%,有逐年递减趋势。存活最长者为23a以上,至今仍健在。急性再障的疗效,报道相差悬殊,一组32例,有效率为71%,其中治愈及缓解率为64.5%,病死率为16.1%。另有报道,13例中有效率为15.4%,病死率为53.3%,7例无效。一组5例,4例无效并恶化死亡。这几组急性再障病例均用西医常规疗法加中药,疗效相差如此之大,可能与对诊断标准的掌握有关。关于远期疗效,有报道随访急性再障患者出院时存活的12例,1年后有2例痊愈,5例进步,2例无效,3例死亡。

中国医学科学院血液学研究所提出治疗再障的5条原则,即:(1)早期诊断,早期治疗;(2)坚持治疗;(3)维持治疗;(4)联合治疗;(5)先治疗合并症,应用于临床可提高疗效。其中早期诊断、早期治疗尤为重要。病程在半年以内的慢性再障,治愈缓解率达90%。

实验表明,大菟丝子饮(1)能提高马利兰引起造血损伤小鼠CFU-S、CFU-D及CFU-E数量;(2)能提高小鼠腹腔巨噬细胞吞噬率及吞噬指数;(3)能提高小鼠耐缺氧能力,存活时间延长82.6%;(4)能提高小鼠小剂量金黄色葡萄球菌感染的存活率;(5)急性的或亚急性的毒性试验表明,该方药无毒。可长期服

用。十四味建中汤及保元汤均有促进造血干细胞增殖的作用。补肾方药能刺激小鼠骨髓 GM—CFU—D 生长,补肾阳法优于补肾阴法,而补肾阳法中灌胃给药途径优于注射。硝酸一叶萩碱治疗再障的原理是使植物神经兴奋,致骨髓血流加速,小血管扩张,毛细动脉血流增加,改善造血微环境,刺激造血干细胞增加。近年来,人参也常用于治疗再障。实验研究表明,不同浓度的人参液对 CFU—E 有不同影响,1/2000 人参液可显著促进 CFU—F 的生长,浓度过高时,反抑制 CFU—F 生长,故用人参治疗再障,应严格掌握用药剂量,以防发生副作用。还有人用叶绿素铜钠盐治疗慢性再障 60 例,有效率 80%。从中药蚕砂中提取的叶绿素,其基本结构与血红蛋白的结构极其相似,故能参与血红蛋白的合成,促进造血。小鼠实验证实,叶绿素铜钠盐对 CFU—S、骨髓 CFU—GM、CFU—E 及骨髓有核细胞的恢复有明显的促进作用,对骨髓基质细胞的修复也有一定调节作用。

近年来国外在再障研究方面取得了不少新进展,特别在造血生长因子、生物反应调节剂、免疫、病毒等对造血调控机制的影响,以及在本病发病机制的作用、造血活动中细胞与细胞之间的相互关系及其分子生物学基础等方面。一些造血生长因子,特别是某些细胞因子,集落刺激因子的临床应用,SAA 的治疗等方面不少经验值得借鉴。国内取得的主要成绩有:(1)摸清了中国再障的发病率为 0.74/10 万。(2)采用祖细胞培养 T 细胞亚群、造血因子、微量元素、雄激素药敏试验。再障的动物模型等方法研究再障的发病机制和分型,出现了可喜的苗头。(3)雄激素的疗效机制研究接近分子水平,胎肝输注的疗效得到进一步验证,运用早期诊断、早期治疗等 5 条原则指导临床治疗,提高了慢性再障的疗效。(4)ATG、CSA、HDMP 等免疫抑制剂的应用日渐增多,改善了 SAA 的预后。(5)中西医结合的研究也取得了进展。

对本病目前虽有较多治疗方法,但总的来说效果还不够满意。急性再障除骨髓移植可使患者缓解外,多数患者于半年至 1 年内死亡,有的甚至 2~3 月内死亡,死亡原因多为脑出血和败血症。慢性再障通过治疗约可使 1/3 患者治愈,少数患者死亡。死亡原因有的是因为急性变后死于脑出血和败血症,有的由于合并继发性血色病,死于肝功能衰竭、心力衰竭或糖尿病等。因此,如何提高再障特别是急、重型再障的疗效,探索更有效的治疗方法,缩短疗程、减少并发症等是今后的研究方向。在中西医结合研究方面,寻找适合中国国情的治疗方法等方面需要进一步加强、探索和深入。

#### 参考文献

- 1 叶耀光,等.现代实用血液病手册,1984
- 2 熬忠芳,等.血液病的现代治疗,1990
- 3 邓家栋.临床血液学,1986
- 4 第 3 届全国中西医结合血液学学术会议论文汇编,1991
- 5 储翰林.第 5 届全国再生障碍性贫血学术会议纪要.中华血液学杂志,1991;12(3):160

(中国中医研究院西苑医院杨留副研究员、  
王天恩主任医师撰)

**癌症血液高粘状态和活血化瘀研究** 癌症血液高粘学说是 20 世纪 70 年代创立的有关癌症发生、发展的新理论。1974 年 Oliffon 指出,晚期肺癌及卵巢癌等患者均易发生血栓性静脉炎。同年,Michaels 报道两组年龄相仿的心血管疾病病人,A 组长期服抗凝剂,B 组不服,两组癌症发病率相似,但 B 组死亡率为 A 组的 8 倍。之后,澳大利亚 L. J. Dintenfass 认为,血液粘滞因素为阐明恶性肿瘤的病因机理提供了重要资料,而这一点正是目前人们所普遍忽视的。癌症血液高粘学说已与癌症免疫学说成为当前癌症防治理论的两大支柱,引起医学界极大的关注。癌症血液理论以及活血化瘀疗法,在中国已有 2000 余年历史,在《黄帝内经》中已有肿瘤与血瘀密切有关的丰富论述,之后历代均有补充与发展。在不同年代、不同地点、不同条件下形成的癌症血液高粘学说和肿瘤瘀血理论之间,经中国中西医结合防

治癌症的实践,表明两者存在不少相似之处,特别是有许多结合点可供研究,开拓了防治癌症的新思路。

癌症病人血液极易呈现高粘状态,其原因为:(1)癌细胞能分泌癌凝血因子(CCF),促进血液粘、厚、稠;癌细胞越多,血液高粘程度越严重。(2)血中蛋白质数量增多,一为免疫球蛋白,属抗原的癌细胞越多,则作为抗体的免疫球蛋白亦相应增加;一为纤维蛋白,对血液中异物(包括癌细胞)趋之包围而发挥其防御功能,癌细胞越多,被动员的纤维蛋白就越多。大分子的蛋白质促使血液粘、厚、稠。(3)血液中血小板因癌细胞这一异物出现,与纤维蛋白一起包围之,血小板聚集性增高,不但可形成血栓,更形成血液粘、厚、稠。(4)血液中脂质包括胆固醇增多,促使血液粘、厚、稠。因此,利用检测血液流变性的各类仪器了解癌症病人血液高粘状态,已引起人们广泛重视。陈健民曾检测 586 例各类癌症病人的血液粘度,属正常值范围者仅 86 例,占 14.7%,总异常率高达 85.3%。既然血栓是在血液高粘状态中所形成,则它与心脑血管病中的血栓一样,成为癌症转移、复发的根本原因。特别是免疫球蛋白 G<sub>2</sub> 与癌细胞结合形成抗原抗体复合物,对癌细胞起到封闭作用,可免遭 T 淋巴细胞、巨噬细胞和化学药物的攻击而生存下来。而血栓在正常血流中犹如舟行急流奔腾的江河,无法向岸边靠拢,而在血液粘、厚、稠状态下,极易向远处血管壁靠拢,得到营养,不断增殖,最终穿透血管壁而形成远处转移灶。故血液高粘状态是癌症转移、复发的重要条件和因素之一。陈健民研究发现,早期癌症病人血液高粘状态轻,中、晚期则严重;肝、肺、胰腺等癌预后差,其血液高粘状态亦较严重。在 586 例癌症中,转移者 385 例,未转移者 201 例,其血液高粘度依正常、1~2 项异常、≥3 项异常等 3 组分别统计为 46、149、190 和 40、170、44 例,相比有非常显著差异( $P < 0.001$ )。另死亡者 91 例,存活者 280 例,上 3 组分别为 10、35、46 和 61、129、90 例,相比亦有非常显著差异( $P < 0.005$ )。说明癌症转移者和死亡者血液高粘状态要严重得多。因此,对癌症病人血液高粘状态必须加以控制和改善,否则其后果极其严重。

近年来有关抗凝和纤溶的药物约有 20 余种,可分为 4 大类:改变细胞电荷、降低粘着力,如肝素、芋丙酮香豆素等;激活纤维蛋白溶酶元的,如尿激酶、链激酶等;抑制血小板聚集的,如阿司匹林、消炎痛、神经氨酸酶等;直接作用于血管的,如 ICRF<sub>139</sub> 等。对 200 种中草药的抗凝和纤溶作用进行筛选,其中毛冬青、昆布具抗凝作用,丹参、虎杖、夜交藤、鸡血藤有抗凝和纤溶作用,并认为活血与抗凝相似,化痰与纤溶相似。目前,国内应用活血化瘀单味药和复方治疗癌症的渐多。莪术为姜科植物,有破血祛瘀、消积止痛作用,治疗 219 例宫颈癌,有效率达 59.6%;另对外阴癌、皮肤癌、唇癌、恶性淋巴瘤及原发性肝癌均有一定疗效。曾观察到复方莪术注射液可改善微循环。神节风为节骨粟兰科植物,有祛风通络、活血散瘀功能,对胰腺癌、胃癌、肠癌、肝癌等消化道肿瘤有一定疗效,单用治疗癌症 70 例,有效率为 70%,有缩小肿块、延长缓解期、改善自觉症状及减少癌症所引起的并发症的作用;试管内神节风对血小板聚集的抑制率达 80%以上。观察单纯放疗和放疗加活血化瘀药(按病期随机分组)共 220 例,1 年生存率分别为 86% 和 91%, $P > 0.05$ ,无差异;3 年生存率分别为 33% 和 67%, $P < 0.01$ ;5 年生存率分别为 24% 和 53%, $P < 0.05$ ,均有明显差异,说明活血化瘀药对放疗有增效作用。对 13 例恶性淋巴瘤随机分两组,一组按 COP 方案(CyT<sub>400</sub>mg,静脉注射,每周两次,VcR1mg,静脉注射,每周 1 次,强的松 5mg,每日 3 次,连用 1 周,休息一周再用 3 周)治疗,另一组按 COP 方案加丹参(每日静脉滴注丹参 20g,口服丹参酮 0.6g),结果发现后者对淋巴结肿大的回缩幅度显著, $P < 0.05$ ;疗效出现后平均缓解期亦长,两组分别为 106.4±11.7d 和 87.2±7.7d, $P < 0.01$ 。丹参抗肿瘤机制可能在子它能调节凝血功能紊乱,使过高的血浆纤维蛋白原正常化,对纤维蛋白溶酶活性可能有一定程度提高,并能抑制小鼠 S<sub>180</sub> 癌细胞的 RNA 合成,具细胞毒作用。陈健民自 1974 年起在众多的活血化瘀药物中选择川芎、地龙两味主药,再

配伍 3 味药物,组成芍龙汤,通过对 297 例癌症患者服药前后血液粘度变化的观察,其血液高粘状态改善率达 58.9%,且无任何副反应,经与养阴补气的地黄汤对比观察,地黄汤对纤维蛋白原量和红细胞沉降率不但无改善作用,反而加重,说明活血化瘀和扶正培本药物确有所不同;在夕细胞突变试验中,芍龙汤有中等度作用,而地黄汤却无,表明芍龙汤有一定程度防细胞癌变作用;分析芍龙汤和地黄汤各类药物中微量元素含量亦有明显差异。

总之,血液高粘和活血化瘀是癌症防治中中西医结合的热点,值得重视。

参考文献

- 1 傅乃武摘,医学参考资料,1975,5:212
- 2 徐君福摘,医学参考资料,1975,5:228
- 3 Dintenfass L 著,廖福龙,等译.血液流变学在诊断和预防医学中的应用.北京,科学出版社,1981
- 4 陈健民.中西医结合杂志,1985,2:89
- 5 陈健民.中国医药学报,1990,10:51

(上海医科大学附属华山医院陈健民教授撰)

中医治疗慢性支气管炎 chronic bronchitis treated by

tradition chinese medicine 据 1978 年统计,中国慢性支气管炎发病率为 4%,其中 50 岁以上的人群发病率高达 13%,说明发病率与年龄成正比。慢性支气管炎反复发作可演变为肺气肿,最后导致肺心病,严重影响老年人的健康。

中医古籍并无慢性支气管炎专论,而是以不同的见证分别在“咳嗽”、“痰饮”、“喘促”等证中论述。《金匱要略》首先确立了治疗原则,谓“病痰饮者,当以温药和之”。所制苓桂术甘汤、小青龙汤、苓甘五味姜辛汤等至今仍为临床所常用。金代刘河间提出:“咳嗽者,治痰为先;治痰者,下气为上。是以南星、半夏胜其痰而咳嗽自愈,枳壳、陈皮利其气而痰自下”,很有实用价值。《丹溪心法》结合一日中的时间变化、阴阳盛衰,对咳嗽进行辨证施治。如“上半日多嗽,属胃中有火,用贝母石膏;午后多嗽,属阴虚,用四物汤加炒黄柏知母,黄昏多嗽,是火气浮于肺,宜五味子五倍子敛而降之;五更嗽多,是火气流入肺,用知母地骨皮”。后世医家多予引用。《医贯》论述咳嗽与肺、脾、肾 3 脏的关系,并强调肾的重要性。《医学入门》指出咳嗽病情发展到肺胀时是痰与瘀血碍气,治疗用活血化瘀之品。《证治准绳》载:“肺出气也,肾纳气也,肺为气之主,肾为气之本”,阐发了肺肾对气的相互关系,为肾虚咳嗽的治疗提供了理论依据。《医门法律》创秋燥之说,制清燥救肺汤以治燥热伤肺之干咳嗽喘。《医学心悟》对咳嗽的治疗颇有新见,认为咳嗽病因属风寒的占十分之九,故初病治疗必须发散,但又不可过散,所制止嗽散每为后世医家应用。《杂病源流犀烛》指出:“肺不伤不咳,脾不伤不久咳,肾不伤火不炽,咳不甚”,说明咳嗽病情的轻重与受损脏腑肺脾肾有关,对指导治疗颇有价值。

自 1971 年以来,中国积极开展全国性的慢性支气管炎防治工作。很多单位运用中医治疗咳嗽的理法方药进行临床观察和实验研究,对咳嗽的认识和治疗方法有了进一步的丰富和发展,取得很大成绩。1981 年,北京朝阳医院呼吸病研究室曾撰专文《九年来我国慢性支气管炎防治研究的一些进展》,给予初步概括总结。福建老年慢性支气管炎防治组对痰作了细致观察,指出寒痰、湿痰、热痰、燥痰的色、质、量各有不同,在细胞学、细菌学、生化学、神经生理学、放射学等各方面均具有各自的特征性表现,为指导辨证治疗积累了新的资料。陕西中医研究所用桂附理中汤合三子养亲汤组成具有温补脾胃、助阳化湿、扶正固本作用的痰饮丸(苍术、白术、干姜、附片、肉桂、炙甘草、白芥子、苏子、莱菔子),配合外贴三健膏和针灸治疗痰饮咳嗽病 195 例,总有效率为 88%。西安医学院通过动物实验观察到痰饮丸对大鼠的垂体-肾上腺系统有兴奋作用,并认为其作用部位可能在脑干,即通过脑干而兴奋垂体-肾上腺系统。上海第一医学院脏象研究室以当年 9 月至次年 4 月为服药时间,以补肾固本中药为主治疗慢性

支气管炎,各型患者均服温阳片(附片、生地、熟地、山药、淫羊藿、补骨脂、菟丝子、陈皮),治疗中如出现阴虚内热者合用滋阴片(生地、熟地、天冬、山药、黄精、女贞子、陈皮)以调节阴阳;除遇急性感染或迁延期痰量增多以治标为主或标本兼治外,只要处于缓解期即连续服用温阳片。先后用此法治疗 522 例,疗效较好,其中 34 例连续防治 3 年,进行 5 年远期随访,结果 3 年临床治愈率为 28.1%,显效以上者为 62.5%。经内分泌及免疫功能检查,认为可能是药物作用于下丘脑-垂体及其靶腺,通过神经体液因素提高非特异性免疫功能而取得的效果。青海省中医院李树毅等应用健脾法治具脾虚证的慢性支气管炎有较好疗效。其中的固本丸 1 号(即四君子汤加黄芪、肉桂、仙灵脾、五味子、黄精、丹参、地龙、远志、桔梗)治疗 30 例,显效率为 66.7%,总有效率为 83.3%;应用健脾化痰汤(党参、白术、茯苓、半夏、艾叶、附片、川朴、甘草)治疗 44 例,显效率为 54.4%,总有效率为 97.7%。从两方治疗前后客观指标的变化来看,可使低下的肾上腺皮质功能趋于正常,减慢的微循环血流变速度恢复正常。上海第一医学院朱惠如等根据慢性支气管炎和肺气肿有气滞血瘀的临床表现及病理学改变,应用活血化瘀的治则,试用以赤芍、川芎活血加党参补气的组方,先后对 37 例和 26 例病员进行冬季 3 个月的治疗,临床有效率分别为 80.64% 和 79.31%。实验室检查结果表明,治疗后血液流变学指标中血细胞压积和纤维蛋白原含量明显降低(P<0.001);肺血流图测定肺部血循环有所改善。中医研究院广安门医院呼吸组采用《张氏医通》中治冷哮的消喘膏(白芥子、元胡、甘遂、细辛、麝香),在非发病季节给 71 例患者贴治,总结 5 年以上的疗效,近期(1 年)控制率为 21.1%,远期(5 年以上)控制率为 61.97%;有 67.4% 的患者感冒减少。实验资料表明该疗法可提高机体非特异性免疫力,降低过敏状态,改善丘脑-垂体-肾上腺皮质系统的功能。

此外,全国各地还研究了对慢性支气管炎有一定疗效的药物,如满山红、矮地茶、芸香草、暴马子、复方穿山龙、复方阴阳莲、杜鹊、杜荆、江剪刀、千日红、石茸、佛耳草、泽漆、白毛鹿茸草、椒目、商陆、绞股蓝等,及一些具有抗胆碱能作用的药物,如热参、洋金花,还有一些扶正固本药物,如灵芝、刺五加、黄芪等。

慢性支气管炎经积极防治,临床症状大多明显减轻,体征也略有改善,亦能延缓病变的演进,而在后期往往不能终止其病变的继续发展,因此预防慢性支气管炎的研究将有很大的发展前景。在中医学理论指导下,以现代科学技术为手段,应用内分泌学、免疫学、分子生物学等进一步深入探讨补肾法、健脾法及活血化瘀法的机制,并在此过程中研制更加有效的防治方药,仍是备受重视的课题。值得指出的是,在咳嗽转归问题上,除继续关注肺脾肾之外,还须考虑肺与心、肝的关系,这是有待开发的领域。

参考文献

- 1 中国医学科学院陕西分院中医研究所,中医杂志,1961,3:8~10
- 2 西安医学院防治慢性气管炎协作组药理研究组,新医药学杂志,1974,1:35~38
- 3 姜兴慧,沈自尹,等.中医杂志,1979,10:31~35
- 4 康良石,林求成.福建中医药,1981,1(1):13~18
- 5 翁心植,邱鹤庚.北京医学,1981,3(2):65~67
- 6 李树毅,郭永惠.福建中医药,1981,(5):7~11
- 7 姜春华.活血化瘀研究,上海:科学技术出版社,1981.41~48
- 8 杨润平,等.中医杂志,1981,22(7):35~37
- 9 沈自尹,等.中医杂志,1981,22(10):22~27

(安徽中医学院附院钱天雷副教授撰)

中医治疗胃下垂的研究进展

胃下垂是指在 X 线检查中发现胃的位置低于正常,胃小弯在膈穹窿线以下者。胃下垂常与胃下垂合并存在,亦可为内脏下垂的一部分。多见于形体瘦弱的病人或经过多次腹部手术者、经产妇、慢性消耗性疾病卧床少动者,因膈肌悬吊力不足,膈胃韧带、肝胃韧带松弛,腹内压下

降及腹肌松弛等因素致使胃的位置向下垂坠,严重者胃的下缘在站立时可达盆腔。

胃下垂在中医学称“胃缓”“胃下”。《灵枢·本藏》载:“脾应肉,肉脘坚大者,胃厚;肉脘小者,胃薄;肉脘小而么者,胃不坚;肉脘不称身者,胃下,胃下者,下管约不利。肉脘不坚者,胃缓……”说明胃缓、胃下多见于肌肉瘦薄与身形不相称之人。后世文献论述的“痰饮”、“癆瘵”、“胃脘痛”等病证亦可能包括本病。大多数医家认为体质虚弱、中气下陷是本病的关键所在。但临床不乏虚实夹杂之候。1985年,张桂明认为胃下垂为本虚标实之证,以阳气亏虚为本,痰饮停留、气滞血瘀为标,主张将本病分为脾胃阳虚、中气下陷、脾阳虚弱、瘀血阻滞四个证型。同年,黄柳华亦认为既往都将胃下垂按中虚下陷辨治,疗效有限,提出应按中医整体理论辨治。在辨证中一要审虚实,胃下垂患者常呈现脾虚不运与气机阻滞并见的虚实夹杂之候,治宜通补兼施,补气与行气并用。二要辨气血,胃下垂患者在不同程度上多有瘀血阻络的表现,但应辨是气滞致血瘀,还是气虚致血瘀。三要察润燥,胃下垂病人若见脉濡滑、苔厚腻、腹胀肠鸣漉漉有声,乃脾虚不运,津停为湿,治拟益气健脾、化痰利湿;若舌红少津,苔净或花剥,脉细数,呕逆烦心,口干便约,乃津亏内燥,胃阴受伤,胃失濡养,须养阴和胃,清滋柔润。四要衡升降,胃下垂病人多表现有脾胃升降失调,出现脾气下陷、胃失和降之脘痞腹满下坠及暖气不舒之症,治当升降并举,通补兼施,达到补而不滞,通无损伤。

中药治疗胃下垂大致有:(1)益气升阳法:适用于脾虚气弱、清阳不升之证。凡见纳差腹胀,肌肉瘦削,腹胀下坠,大便稀溏、滑脱,或有气虚脱肛者,应予健脾益气、升阳举陷之剂,以补中益气汤为代表方。1974年,邹志生报道用补中益气汤加山楂、郁金、枳壳、鸡内金煎服,治疗胃下垂共103例,痊愈54例(52.4%),显效25例(24.3%),有效22例(21.4%),无效2例(1.9%);随访21例,时间为2~4年,均未复发。1988年,许永顺等用调气益胃汤(柴胡、白术、白芍、茯苓、枳实、党参、山药、黄芪、生麦芽、炒葛根、桂枝、炙甘草)治疗50例,痊愈18例(36%),显效26例(52%),有效4例(8%),无效2例(4%),总有效率96%。1990年,陈文第用补气养胃汤(黄芪、党参、白术、升麻、甘草、黄精、首乌、当归、佛手、红木香)治疗34例,痊愈26例(76.5%),有效8例(20.5%),无效1例(3%),总有效率97%。(2)温中化饮法:适用于脾阳不足而痰饮内停者,症见神疲面黄,形寒肢冷,呕吐清水痰涎,脘腹痞胀而腹中漉漉有声,舌质淡白,苔白腻,脉沉迟等,可用苍术丸或苓桂术甘汤、温中化饮汤治疗。1990年,陈勇报道用温中化饮汤治疗脾胃阳虚、痰饮内盛之胃下垂30例,方由吴萸、姜萸、党参、大枣、桂枝、白术、茯苓、甘草、陈皮、制半夏、旋覆花组成,痊愈13例(43.3%),有效15例(50%),无效2例(6.7%),总有效率为93.3%。(3)活血行瘀法:适用于因脾胃气机升降失常,日久而致气机阻滞血行不畅者,或因气虚而血瘀,或因胃阴不足、胃络失于濡润,而致血行涩滞者。局部胀坠疼痛,或伴有舌质紫暗,为兼夹瘀血之特征,均可应用活血行瘀药物,并酌情配合健脾益气、理气止血及滋阴养血之品。史载祥及黄柳华等认为胃下垂是由于胃本身形态及位置的明显改变,牵引、扭曲及压迫血管,使胃壁静脉回流发生障碍,加之对周围脏器的机械性挤压而发生血液瘀滞(相对性缺血)。治疗时加入化瘀通络药,如莪术、川芎、红花、生山楂等,可以缩短疗程,提高疗效,并引张锡纯《衷中参西录》“莪术与参、术、芪诸药并用,大能开胃进食、调和气血”,“性非猛烈而建功甚速”作为依据。1979年,史载祥报道以单用补气升陷药组21例与补气升陷加化瘀通络组28例相比较,疗程1~2月,据治疗前后胃肠钡餐检查结果对照,加化瘀通络药组的疗效明显优于前组,经统计学处理有显著差异。1986年,刘福生报道用益气祛瘀法治疗气虚血瘀型胃下垂27例,方由黄芪、党参、白术、当归、莪术、桃仁、红花、升麻组成,结果痊愈12例(44.4%),显效8例(29.6%),有效4例(14.8%),无效3例(11.6%),总有效率为88.9%。1988年,陈勇报道用养阴活血汤治疗阴虚血瘀型胃下垂32例。该方由沙参、麦冬、生地黄、玉

竹、白芍、枳壳、党参、红花、桃仁、当归、炙甘草组成,结果痊愈14例(43.8%),有效16例(50%),无效2例(6.2%),总有效率为93.8%。

针灸、推拿、气功等对胃下垂亦有较好的治疗效果。1979年,邵经明等用针灸治疗胃下垂20例,结果痊愈7例,显效4例,好转7例,无效2例;选穴:中脘、足三里、胃上穴。1980年,殷晓明报道针刺建里穴(同时刺入双针)治疗胃下垂82例,结果痊愈41例,显效18例,有效20例,无效3例。1988年曾英书报道,穴位注射治疗胃下垂46例,结果显效38例,有效5例,无效3例;选穴:脾俞、肾俞、足三里、胃上、提托穴(上脘和中脘之间的中心点)、健胃穴(足三里下5分处)、肾俞及中脘穴,注射液用Vit B<sub>1</sub>100mg加10%葡萄糖水至8ml或胎盘组织注射液至9ml,每穴注射1ml,快速进针,得气后速推药,每日1次,10次为一疗程。1987年,罗志瑜等报道治疗胃下垂的推拿方法有:(1)患者仰卧,先用一指禅推法或揉法于鸠尾、中脘、天枢、气海穴操作15min左右,接着在腹部沿逆时针方向使用托法治疗,然后在中脘部用手掌振颤法按足三里穴。(2)患者取坐位,按揉脾俞、胃俞、大肠俞等穴。与此同时,每日可配合作胃下垂保健操以锻炼腹肌。本操共6节:仰卧,两下肢轮流直腿抬高;仰卧,收腹,两下肢一起直腿抬高;仰卧蹬腿;仰卧抱膝;仰卧起坐;仰卧屈膝抬臀。每节作10~15次。每日早晚各作操一次。1988年,赵宝峰报道治疗胃下垂的主要气功功法为内养功法,卧式为主,仰卧、侧卧也可。开始练功时可采用尾高式,即臀部垫高,或将床脚垫高5~10cm,有助于升高胃的位置,以加速取得疗效。症状减轻或消失后,可适当辅以坐式,每日练功4~6次,每次30~60min,坚持日常工作的患者,每日可练2~3次,每次30~40min,以3次饭后练功为宜,配合全套保健功,下功后可配合行步功、太极拳等。痊愈后每日应早上坚持练功一次。

#### 参考文献

- 1 邵经明,等.河南中医学院学报,1979,2:28
- 2 殷晓明.浙江中医杂志,1980,5:212
- 3 张桂明.浙江中医杂志,1985,4:151
- 4 黄柳华,等.上海中医药杂志,1985,4:13
- 5 刘福生.湖南中医杂志,1986,4:11
- 6 许永顺,等.山东中医杂志,1988,5:14
- 7 陈勇.广西中医药,1988,2:13
- 8 曾英书.湖北中医杂志,1988,1:48
- 9 陈勇.山西中医药,1990,3:21
- 10 陈文第.山西中医药,1990,3:29

(上海市第六人民医院杨炳初主任医师撰)

#### 中医治疗慢性胃炎的研究进展

慢性胃炎是消化系统的常见病、多发病,系指胃粘膜的慢性炎症性病变,临床主要有慢性浅表性胃炎(CSG)和慢性萎缩性胃炎(CAG)两类。慢性胃炎是西医病名,根据其临床表现,属于中医“胃脘痛”、“腹胀”、“痞满”、“嘈杂”等范畴。其发病率随着年龄的增长而递增,且CAG尤其是伴见中度的、重度的肠上皮化生、不典型增生者与胃癌的发生有着密切关系,对人体健康危害较大。西医对慢性胃炎尚缺乏特效治疗方法,而中医治疗本病往往能获得较好的疗效。

早在1976年,宋善安就报道了用清心火、养胃阴法治疗CAG100例的疗效观察,但限于胃镜应用不广、病理诊断技术水平较低等方面的原因,中医药治疗慢性胃炎的大量报道是在1981年以后才陆续出现的。这些报道已就慢性胃炎的中医理、法、方、药诸方面进行了较深入的探讨,临床疗效有了较大的提高,其中在慢性胃炎的病机治则、微观辨证、证型实质以及选方用药等方面都取得较大的成果,对幽门螺旋菌、胃癌前病变的治疗探讨也逐步展开。

中医认为慢性胃炎的病因主要是饮食不节、情志失调、脾胃素虚,病机为肝胃气滞、脾胃湿热、胃阴亏虚、脾胃虚弱(寒)、瘀血阻络等。早期的报道认为CAG的病机主要是胃阴亏虚,因而



治疗大多以滋养胃阴为主要治则,1981年以后这种看法逐渐得到纠正。杨庆云于1991年分析了1981年以后35个治疗CAG的专方,发现多数是运用健脾益气、活血化瘀、疏肝理气之法,只有少数运用滋养胃阴法,个别的运用清热解法。

中医治疗慢性胃炎多采用辨证论治的方法,由于胃镜技术的应用渐广,直接观察胃粘膜变化的机会增多,中医临证的范围也得到扩展,根据胃镜相变化分析病机的微观辨证逐渐受到重视。詹继烈于1989年初步建立了胃粘膜相微观辨证分型的标准,即根据镜下胃粘膜的色泽、性状、分泌物等方面的不同情况将慢性胃炎患者胃粘膜分为胃寒型的、胃热型的、胃络瘀滞型的及胃络灼伤型的四型。同年成立的中国中西医结合研究会消化系统疾病专业委员会在其制订的慢性胃炎中西医结合辨证标准中亦加入胃粘膜相的内容。证的研究是近些年来中医研究的一个热点,慢性胃炎中医证型的研究也十分活跃,有关报道对慢性胃炎分型差异较大,少的只有两型,多的在10型以上。中国中西医结合研究会消化系统疾病专业委员会1989年所制订的辨证标准是分为肝胃不和、脾胃虚弱(寒)、脾胃湿热、胃阴不足、胃络瘀血5个基本证型。至1991年止,有关慢性胃炎中医证型实质的研究所观察的指标已达40以上,涉及病理、免疫、内分泌、微生物、胃肠动力学、血液流变学等多个方面。如1988年周学文等对436例CAG分3型患者观察,发现虚寒型的胃粘膜萎缩程度、糜烂和炎性细胞浸润程度均明显低于郁热型的、和瘀血型的,伴肠上皮化生和不典型增生者也最少,而胃液量则最多;瘀血型的胃粘膜萎缩、炎性细胞浸润及伴见出血点均最高;郁热型的伴见粘膜糜烂、胆汁返流者最多。

中医治疗慢性胃炎大致有3种方式:(1)辨证分型治疗,即辨证分型后,针对不同证型采用相应治疗方法。如肝胃不和型的治以疏肝和胃、理气止痛之法,方用柴胡疏肝汤、逍遥散等加减;脾胃虚弱(寒)型的治以益气温中健脾之法,方用香砂六君子汤、黄芪建中汤等加减;脾胃湿热型的治以清热化湿之法,方用藿朴夏苓汤、三仁汤等加减;胃阴不足型的治以养胃之法,方用膈下逐瘀汤、失笑散、丹参饮等加减。(2)分型专方治疗,即辨证分型后,使用固定方药治疗。1982年徐州医学院附属医院即对CAG属肝气郁滞者用胃安I号(川楝子、元胡、山楂、佛手、砂仁、黄连),属胃阴不足者用胃安II号(白芍、甘草、石斛、北沙参、黄精、山楂、枳壳、黄连)治疗。1989年,贺红魁等治疗CAG分胃热型的、胃寒型的和寒热夹杂型的3型,分别用胃炎I号(石斛、南沙参、玉竹、丹参、白芨、香附、苦参、蒲公英、白芍、甘草)、胃炎II号(党参、白芨、附子、白芨、木香、苦参、蒲公英、白术、浙贝母、旱莲草、甘草)以及I、II号方合方治疗。周学文等于1991年报道用中药系列冲剂治疗CAG,分别用温中养胃冲剂(黄芪、桂枝、白芍、白术、元胡、枳壳、威灵仙、草澄茄、苦参、麦芽、香橼、甘草)治疗虚寒证、养阴清胃冲剂(黄连、柴胡、知母、石斛、焦山栀、白薇、蚕砂、枳壳、射干、苦参、生地榆、马齿苋、威灵仙)治疗郁热证。(3)固定单方治疗,即不进行辨证分型,只以一个固定方治之。这类固定单方主要有:1986年姚奇蔚等治疗CAG的胃炎流浸膏(北沙参、桑寄生、玉竹、玄参、淮山药、丹参、黄芪、白芍、生山楂、青黛、陈皮),1986年李世俊等治疗CAG的养胃冲剂(黄芪、党参、白芍、甘草、淮山药、陈皮、生香附、乌梅、食糖),1989年万连元治CAG的胃宁散(黄芪、党参、白芍、甘草、丹参、蒲公英、白术等),1990年高寿征等治CAG的胃宁冲剂(党参、白术、茯苓、赤芍、丹参、大黄、木香、川楝子、乌梅、青黛等),1990年许自诚等治CAG的胃康胶囊(白屈菜、大枣)等。

幽门螺旋菌(HP)是1983年发现的一种与慢性胃炎有密切关系的致病菌,中医治疗HP阳性胃炎的正日益受到重视。1991年吴岩等从药敏试验结果中筛选出对HP高度敏感的石榴皮、玫瑰花、地榆等组成胃炎清方(生黄芪、生白芍、石榴皮、玫瑰花、广木香、徐长卿、丹参、地榆等),用以治疗HP阳性胃炎。徐建国等则于同年以自拟清幽汤(半夏、川连、黄芩、吴萸、潞党参、白术、白芍、枳壳、当归、木香、砂仁、地锦草、炙甘草)治之。CAG伴中

度和重度的肠上皮化生、不典型增生者与胃癌的发生有密切关系,属于胃癌前期病变,是治疗慢性胃炎的难点。董建华等于1989年将CAG癌前病变(均有中度以上的萎缩和中度以上的不典型增生、肠上皮化生)分为气阴两虚者、虚火内灼者、脾胃虚弱者3型,分别采用甘草养胃方(太子参、炙百合、乌药、鸡内金、香橼皮等)、酸甘养胃方(沙参、麦冬、丹参、石斛、佛手、乌梅等)、甘温健胃方(党参、黄芪、茯苓、白术、木香、当归、三七粉等)治疗,结果癌前病变征象消失率达52.12%。1991年朱生梁等以平萎散(苏梗、藿梗、白术、枳壳、桂枝、川连、黄芩、川芎、莪术、白蔻、党参、黄芪、大枣、生姜、甘草、地榆)随症加减治疗CAG伴重度肠上皮化生、不典型增生者,临床有效率达90%。

慢性胃炎的中医治疗研究虽已取得一定的进展,但尚有许多问题需要解决。以往的研究因各自所采用的标准不同,其结果可比性较差。今后按照统一的诊断、辨证和疗效标准进行有关研究,将是十分重要的内容;同时,课题的设计也将更加科学、严密。慢性胃炎中医证型实质的研究是热门的课题,所观察的指标在以往研究的基础上不断增加,日渐趋向于亚细胞水平和分子水平并朝着特异、灵敏、综合性的方向发展,除了继续探讨胃粘膜炎症和腺体萎缩等一般病理的中医临床治疗外,幽门螺旋菌的清除及胃癌前病变的治疗探讨将是人们普遍关注的一个焦点。随着研究的不断深入以及相关科学的发展,未来10~20年在上述方面取得某种突破性进展是完全可能的。

#### 参考文献

- 1 徐州医学院附院,中医杂志,1982,23(2):30
- 2 周学文,等.中医杂志,1988,29(11):34
- 3 董建华,等.中国医药学报,1989,4(6):12
- 4 詹继烈,等.中医杂志,1989,30(4):37
- 5 周建忠,等.中西医结合杂志,1990,10(5):318
- 6 朱生梁,等.上海中医药杂志,1991,2:1
- 7 杨庆云.四川中医,1991,9(7):15

(上海中医学院蔡淦、程勇撰)

#### 中医治疗慢性前列腺炎的研究进展

慢性前列腺炎多发于20~40岁青壮年。本病发病缓慢,病因、病理复杂,症状繁多,体征也不典型,病程迁延,顽固难愈,并发症多且易复发,对患者的精神、体力、工作、学习、生活诸方面影响很大。西医学将本病分为细菌性慢性前列腺炎、无菌性慢性前列腺炎和前列腺痛,认为其病因与细菌、病毒、衣原体、支原体、滴虫、霉菌等感染和前列腺长期慢性充血、变态反应等有关。但临床治疗一直缺乏有效的药物和方法,应用抗生素、化学制剂疗效常不理想。中医典籍中虽无前列腺炎这一病名,但从本病的一系列临床表现分析,似与历代中医古籍中提到的“淋”(劳淋、膏淋)、“浊”(白浊、赤浊、精浊)、“肾虚腰痛”、“白淫”等病证相关。以其临床表现多样化,且并发症较多,因而中医学尚难以一种病证概括无余。近几年来各地采用辨证论治、专方专药以及激光、针灸和中西医结合综合疗法,多种多样,各具特色,疗效均称满意。

辨证论治是治疗慢性前列腺炎最常用的治疗方法。前列腺位于下焦,与肝、脾、肾、膀胱有密切关系,因而其辨证基础也以肝、脾、肾、膀胱的病理变化为主。具体分型及治法,虽然目前诸家意见尚不一致,而基本的趋势多分为湿热蕴阻、气滞血瘀、肾阴亏虚、脾肾阳虚等4种主要证型。湿热下注者,治以清热解湿、导湿渗法;气滞血瘀者,治宜活血化瘀、行气导滞;肾阴亏虚者,治当益肾填精、固摄下元;脾肾阳虚者,治从温阳益肾、补中健脾。但临床证候单独出现者少,各型之间也难以截然分开,往往以某一证型为主兼有它证;或虚实夹杂,各证互见;或互相影响或转化,因此论治也并非纯粹的一法一方,而常于一法之中兼有它法,主方药常作随证加减,灵活运用。统计1980~1991年中辨证分型治疗慢性前列腺炎686例,结果治愈或基本治愈419例,占61.1%;显效及有效227例,占33.1%;总有效率为94.2%。可见辨证论治治疗本病效果良好。

基于慢性前列腺炎的病理病机主要为湿热、瘀滞、肾亏及中虚 4 个方面,故不少单位及临床医家在辨证论治基础上,结合各自经验,研制出专方专药,并随症略作增减,在临床观察和提高疗效方面做了大量工作,取得较好的效果。刘猷枋从 1965 年起通过大量的临床实践,应用现代医学知识,结合中医药的传统理论探讨本病的实质,认为慢性前列腺炎在病理方面有其共同特点,即多种病理可导致前列腺腺管、腺泡、周围间质发生充血、水肿、腺管阻塞、腺泡内分泌液滞留、间质发生纤维化病变,出现前列腺硬结和硬化,腺实质及其周围间隙炎症。血瘀、气滞是本病症结所在,认为活血化瘀、软坚散结、理气导滞的治疗法则能使本病逆转,达到患者康复的关键。刘氏以活血化瘀导滞为主组成的“前列腺汤”治疗本病 285 例,结果治愈和基本治愈 207 例,占 72.6%;好转 75 例,占 26.3%;总有效率达 98.9%,显著地提高了治愈率。实验资料表明,前列腺汤有类似氢化考的松的作用,能帮助腺体纤维化病变吸收与好转,改善或恢复腺管及腺泡的引流,为治愈本病奠定良好的基础。张亚强等以消痔灵注射液制造大鼠前列腺纤维化增生性炎症病理模型,观察前列腺汤的治疗作用。实验结果表明,前列腺汤有减轻消痔灵注射液引起大鼠前列腺炎细胞浸润及纤维组织增生的作用,并可使病理模型动物的前列腺上皮细胞的分泌功能恢复,增加 Zn 含量,增强前列腺的抗炎及损伤组织修复的能力,本研究资料为前列腺汤的疗效机制提供了依据。朱永康认为本病多为湿热内蕴、败精熟腐阻滞、肾脏精气亏损为本,肾虚精关不固为发病之本,下焦湿熟蕴结为致病之标,虚实夹杂,互为因果,治宜固精导浊。他以自拟固精导浊汤治疗慢性前列腺炎 160 例,结果痊愈 108 例,占 67.5%;好转 43 例,占 26.9%;总有效率为 94.4%。朱氏通过临床观察及有关实验资料认为该方治疗作用的取得,与其改善全身的和局部的免疫功能、调节前列腺液 pH 值、抗菌、消炎及通畅前列腺局部引流有关。王少金等以复方地虎汤治疗慢性前列腺炎 232 例,结果治愈 128 例,占 55.2%;好转 62 例,占 26.7%;总有效率为 81.9%。除内服专方专药外,尚有肛门栓剂、贴脐疗法、药物薰洗、保留灌肠、穴位贴敷、前列腺局部涂药等法,疗效亦佳。据杨永元不完全统计,1980~1991 年以专方加减治疗本病 1172 例,治愈率为 46.9%,总有效率为 89.5%。大量临床资料表明,在辨证论治原则指导下,寻求治疗本病的专方专药,只要辨证正确,组方合理,标本兼顾,并随症略作增减,同样能取得良好疗效。专方专药治疗本病的成功,为研制新制剂、推进剂型改革展示了美好的前景。

本病患者由于长期存在炎症,炎细胞浸润、腺小管阻塞、腺体纤维组织增生和硬化,吸收药物能力差,全身用药时,进入前列腺的药物往往达不到有效的治疗浓度;局部途径给药,药物直接注入腺体,尽管局部炎症能暂时得以控制,但全身症状往往得不到改善,故许多学者采用中西医结合综合疗法。具体方法及所用药物虽略有不同,但一般都以中医辨证论治或基本方药内服,抗菌、消炎西药肌注或口服,局部封闭或腺体内注射,辅以理疗、超短波透热、中药煎剂薰洗或浓缩液保留灌肠、前列腺按摩、热水坐浴、体育疗法等多种措施。袁申用中医辨证论治与西药局部注射相结合的方法治疗慢性前列腺炎 860 例,他根据前列腺炎的病理分型,将局部注射液分成 5 组,以 1 号液为基础方根据不同情况灵活运用,属感染各型者局部注射 1 号液(醋酸强的松龙混悬液 50mg、维生素 B<sub>1</sub>400mg、维生素 B<sub>12</sub>200μg、卡那霉素 1g、庆大霉素 16 万单位,2%普鲁卡因注射液 3ml),感染较重者加盐酸黄连素注射液(即 2 号液);前列腺液检查白细胞较多者加糜蛋白酶 10g(即 3 号液),内服土茯苓、马齿苋、败酱草、露蜂房、乳香、没药、赤芍、当归、牛膝、甘草等;属萎缩型者局部注射 4 号液(即 1 号液加绒毛膜促性腺激素 1000 单位),合滋补肾精法,用仙灵脾、巴戟天、菟丝子、仙茅根、女贞子、黄芪、党参、当归、甘草;属结节、硬化、出血等诸型者,局部注射 5 号液(即 1 号液加透明质酸酶 3 000 单位),内治用三棱、莪术、桃仁、红花、丹参、路路通、木通、牛膝、黄芪、党参、甘草,或用桃仁、红花、丹参、赤芍、丹皮、黄柏、泽泻、知母、牛膝、甘草等;结果治愈 647 例,占 75.2%;好转

169 例,占 19.7%;总有效率达 94.9%。杨永元统计中西医结合治疗慢性前列腺炎 1 744 例,其中治愈和基本治愈 1 181 例,占 67.7%;好转 417 例,占 27.5%;总有效率为 95.2%。旨在提高疗效、缩短疗程、减少复发的中西医结合综合疗法,已在大量临床实践中积累了比较丰富的经验,辨证辨病相结合,中药西药并用,局部和全身用药并举,配合各种辅助治疗措施,是治疗慢性前列腺炎的一种有效途径。

除上述主要治法外,其他如针灸、激光(及激光针)、中药直流电导入等对慢性前列腺炎的治疗作用也越来越受到重视。陶正新认为肾阳亏损,命门火衰,不能蒸化,湿热流注下焦,精关不固是本病的主要原因,取穴关元、中极、太冲、太溪、会阴,均采用平补平泻法,得气后留针;关元、太溪各加灸 3 壮,中极使针感向下放射,会阴处点穴按摩并与艾灸交替进行 15~30min,隔日 1 次;治疗 44 例,结果治愈 37 例,好转 7 例,14 例随访 10 年,疗效巩固。韩宗华取前列腺“特定穴”(位于会阴穴至肛门连线的中点)针刺治疗本病 30 例,用 28 号 3~4 寸毫针直刺 4~6cm,得气后小幅度提插 2~3 次,间或捻转,留针 20min 出针,每日 1 次,10 次为 1 疗程,结果治愈 9 例,显效 15 例,好转 5 例,无效 1 例。崔玉仁以黄柏提取液(50%溶液),用直流电离子导入治疗慢性前列腺炎 115 例,并与 1%小檗碱作对照,结果治疗组第 1 疗程总有效率为 92.2%,对照组(31 例)为 35.5%;1~3 疗程后总有效率分别为 95.7%和 35.5%, $P < 0.001$ ,差别显著,说明此提取液对本病有较好疗效。尤士征以激光治疗慢性前列腺炎 119 例,其中激光针组 88 例,激光照射组 31 例,结果激光针组治愈 47 例,占 53.4%,总有效率为 98.9%;激光照射组治愈 7 例,好转 19 例,总有效率为 83.9%。尤氏认为激光治疗本病疗效良佳,且激光针的疗效更优于激光照射。此外,尚有以“电兴奋”、“超声针”、“仿灸仪”等疗法治疗本病的,也收效良好。据不完全统计,针灸治疗本病 359 例,治愈率为 46.8%,总有效率为 90%;激光照射或激光针治疗本病 282 例,总有效率为 95%;中药液直流电离子导入治疗本病 388 例,治愈率为 27.1%,总有效率为 92.5%。总之,针灸、激光、中药液直流电离子导入等对本病的治疗作用也不可低估。

慢性前列腺炎是一种顽固性疾病,缠绵难愈,反复发作,给患者带来很大痛苦。因其病因、病理、解剖、药理、免疫等方面的复杂性,以及尿路感染、前列腺结石等合并症,如单纯从抗病原体角度进行治疗难以取得满意效果。中医药治疗本病的方法灵活多样,均取得较好的临床效果。本文综述中医药各种治疗方法临床治愈率平均为 54.7%,总有效率平均为 92.9%,疗效确凿,是治疗本病的有效途径,值得进一步推广。

统观中医药治疗慢性前列腺炎的临床报道,对本病的诊断标准及疗效分级标准颇不一致,有些数据不够客观;除个别作者外,在痊愈病例中多数为近期疗效,缺少远期随访。因此,在今后的研究探索中应统一本病的诊断、疗效标准;基于本病易复发特点,应从远期疗效方面努力,在治愈病例中应作远期随访,使中医药对本病治疗能更加深入一步。

弄清中医药治疗慢性前列腺炎的作用原理是一项十分有意义的工作。在今后的研究中,要运用现代科学(包括现代医学)方法,通过实验研究,逐步阐明中医药对本病的作用部位、途径及原理等。中医药治疗慢性前列腺炎目前多数临床家仍以口服中药汤剂为主,既麻烦,又受煎药等条件限制,不易推广。因此,研制中药新制剂、给药新途径是目前对本病研究工作中一个亟待解决的课题。

#### 参考文献

- 1 刘猷枋,等.新医药杂志,1979,3:24~27
- 2 王少金,等.吉林中医药,1982,3:31~32
- 3 陶正新.中医杂志,1982,23(8):55
- 4 袁申.中西医结合杂志,1983,1:34~36
- 5 崔玉仁,等.上海医科大学学报,1987,14(3):217~219
- 6 韩宗华,等.浙江中医杂志,1988,23(6):280

7 尤士征,等.针刺研究,1988,13(3):184~188

8 张亚强,等.中西医结合杂志,1991,8:410

9 朱永康.上海中医药杂志,1991,4:19~22

(中国中医研究院广安门医院杨永元主任医师撰)

**中医治疗糖尿病的研究进展** 糖尿病与中医的消渴病基本类同,是指以烦渴引饮、消谷善饥、小便频数、如膏如脂、形体消瘦为特征的疾病。

早在《黄帝内经》中就有“消渴”之名,并指出“五脏皆柔弱者,善病消瘵”。东汉张仲景《金匮要略》立消渴专篇,并提出三消症状及治疗方药,所创立的白虎汤、白虎加入参汤、肾气丸等直到现在对治疗消渴病仍有很大的实用价值。隋代巢元方《诸病源候论》将消渴归纳为八候,并首次详尽地阐述了消渴病并发症的病因病机。消渴病的治疗,至唐、宋、金、元得到较大发展,从孙思邈的清热泻火,到刘完素的“三消”燥热之说,一直到朱丹溪的清热养阴,奠定了中医治疗消渴病的临床基础。明清两代,基本上形成了消渴病辨证施治体系。张介宾《景岳全书》论述了消渴阴阳虚实辨证,强调不能一概以火证而论,治疗上中二焦以清为主,下焦以补肾为本,提出温补助阳的治则。叶天士《临证指南》说:“三消一证,虽有上中下之分,其实不越阴亏阳亢,津涸热淫而已。”明确地提出阴虚燥热的观点。《古今图书集成·医部全录》载治消渴方共91首,其中天花粉35方、麦冬35方、地黄31方、山药11方、黄连19方、黄芪19方、葛根13方,与现代中医临床用药多选用养阴、益气、清热之品基本吻合。

新中国成立以来,临床常用的治疗大法可归纳为以下四种:

(1)清热润燥法。糖尿病早期患者表现为口干多饮,易饥易食,多尿,属中医肺胃燥热之证,治以清热润燥为主,主方有白虎汤、玉女煎、千金黄莲丸加味等。如田水淑用抑糖汤(熟地、生石膏、麦冬、花粉、山药、益智仁、五倍子、石斛、覆盆子、桑螵蛸、萆薢)治疗215例,有效率70%。(2)益气养阴法。近代名医施今墨主张用黄芪配山药以降血糖。祝谌予通过上千例糖尿病人的治疗,拟订出分型治疗方案:阴虚型者用北沙参、麦冬、杞子、当归、川楝子、丹参、生熟地滋阴生津,兼以活血;气阴两虚型者用生黄芪、玄参、丹参、生牡蛎、山药、党参、麦冬、五味子、苍术、生熟地、葛根、茯苓以益气养阴,兼以活血;气阴两虚火旺型者于上方加清热之品。中医研究院广安门医院在辨证的基础上采用益气养阴的降糖甲片(黄芪、天花粉、麦门冬、太子参等)治疗605例,总有效率为76.4%,其中气阴两虚型者达81%;并于治疗前后作胰岛素释放试验,观察结果提示降糖甲片能够促进β细胞分泌胰岛素,使血浆胰岛素浓度升高、血糖下降,治疗前后有显著差异( $P < 0.05$ )。(3)治肾为本。明·赵献可主张“治消之法,无分上、中、下,先以治肾为急”,“惟六味、八味随证而服,降其心火,资其肾水,则渴自止”,以六味丸为主治疗糖尿病仍沿用至今。有13个单位应用六味地黄丸加减治疗糖尿病,阴虚火旺者加黄柏、知母;阳虚火衰者加肉桂、附子,共治疗124例,获得满意疗效。北京协和医院用地黄合剂(人参、生地、天冬、枸杞、山萸肉)为基本方配合体育、气功、降糖西药治疗92例,表明可明显改善临床症状,有一定的降低血糖作用。(4)注重活血化痰。糖尿病及其并发症患者,多表现为舌质紫暗,或有瘀斑,或舌下静脉曲张,或心胸憋闷刺痛,肢体疼痛,或眼底见有血管瘤等,属中医血瘀症状。现代医学研究资料表明,糖尿病患者大多存在血脂和血液粘度增高,红细胞变形能力受损,血流缓慢,血液处于高粘滞状态。这与中医学“血不活,有瘀滞”的病理改变相似。因此,活血化瘀法治疗糖尿病及其并发症日益受到重视。

祝氏对糖尿病辨证为血瘀型者,用自拟降糖活血方(木香、当归、益母草、赤芍、川芎、丹参、葛根)、补阳还五汤、血府逐瘀汤、属下逐瘀汤、冠心1号方等取得一定疗效。程氏将糖尿病血瘀证分为四型,其中脾虚瘀滞型者用健脾逐瘀降糖汤(当归、丹参、山药、赤芍、川芎、泽兰、五倍子、生内金、苍术、莲子肉、红花、枳实)。陈氏治疗老年性糖尿病瘀热互结型者用自拟祛瘀化痰汤

(桔梗、牛蒡子、白芍、桃仁、皂荚、路路通、竹节三七、黄芪、白术、当归)。周氏对糖尿病阴虚与血瘀并见者,用六味地黄丸配桃仁、赤芍、丹皮、丹参、泽兰、鬼见羽等,取得较好的疗效。邵氏对糖尿病各种并发症,主张补肾活血并重。糖尿病合并视网膜病变者用杞菊地黄丸加槐花、参三七、丹参;合并肾病者以济生肾气丸加丹参、芫荽等;合并心病者以六味地黄丸加丹参、失笑散、天竺黄、瓜蒌等;合并神经病变见下肢麻木者用六味地黄丸加鸡血藤、忍冬藤、疼痛者加血竭、制乳没等,均取得较好的疗效。

从植物中寻求安全而有效的治疗糖尿病药物,鼓舞着不少临床工作者对单验方的研究。如解放军197医院用苦瓜制剂治疗糖尿病29例,有效率达79.3%。广西医学院用番石榴治疗糖尿病166例,有效率达80%。北京人民医院自1972年开始用单味中草药亚腰葫芦的煎剂、片剂、针剂,分别治疗26例原发性糖尿病,总有效率为80.2%,并观察到该药对改善患者症状比较显著。北京协和医院自1971年开始用民间古方玉锁丹(五倍子500g、龙骨62g、云苓124g,研末水丸,每次服3~6g,每日3次),治疗1型糖尿病50余例,对其中31例进行总结,有效率为87%。北京医院用桑白皮,无锡市人民医院用僵蚕治疗糖尿病,皆有一定疗效。另外,荔枝核、葛根都有降血糖作用。此外,临床运用针灸、推拿、按摩等,对糖尿病及其并发症亦有较好疗效。

当代中医治疗糖尿病继承前人成果并有较大发展。尽管目前单纯采用中医药对中型的、重型的糖尿病的降糖效果尚不令人满意,但中医药从调整阴阳气血入手,对消除或减轻症状,减轻或延缓并发症,以及与口服降糖药和胰岛素发挥协同作用而减少其用量等,有着肯定的作用,且无肝肾损害、低血糖和药物抵抗等方面的副作用。世界卫生组织所属糖尿病专家委员会1979年9月的会议上,美国、印度、埃及、墨西哥等都报告了本国医药界在植物中寻求降糖药物的研究成果,表明将来降糖药物的研究方向。中国是最早发现糖尿病而且有着丰富治疗经验的国家,要进一步提高中医药治疗糖尿病的临床疗效,研究其辨证施治的实质内涵,揭示“清热”、“益气”、“养阴”、“补肾”、“活血”等疗法对糖代谢、脂代谢和胰岛β细胞功能以及其它内分泌激素功能的作用机制,从而研制出疗效高、无毒副作用的植物降糖药物,为全人类服务。

#### 参考文献

- 1 胡世林.山东中医学院学报,1982,6:56
- 2 邵启惠.上海中医药杂志,1983,5:15
- 3 张洪恩,等.中医杂志,1986,4:34
- 4 林淇予,等.中医杂志,1986,6:410
- 5 李玲.中西药图书情报,1989,2:1
- 6 林兰,等.糖尿病的中西医结合论治.北京:北京科学技术出版社,1992

(中国中医研究院广安门医院林兰主任医师撰)

**中西医结合治疗内毒素血症** 内毒素(En)是革兰氏阴性细菌细胞壁外层的一种脂多糖成分,它具有十分广泛的生物活性。1890年,Pfeiffer首先提出内毒素血症(Endotoxaemia, ETM)。ETM可出现于多种疾病过程中,诸如大面积烧伤、急性梗阻性化脓性胆管炎、急性出血坏死性胰腺炎、化脓性脑膜炎、肠梗阻、梗阻性黄疸、肝硬化等,并常引起休克、弥漫性血管内凝血、成人呼吸窘迫综合征、多系统器官功能衰竭等一系列严重的病理变化,成为上述疾病恶化的因素。

随着研究的不断深入,肠源性内毒素的吸收途径愈来愈引起人们的重视。正常情况下,胃肠道细菌代谢所释放的内毒素可被肠壁吸收进入门静脉。1976年,Greene等证明家兔门静脉血中的内毒素通过肝脏后大部分被清除。肝脏是内毒素清除和解毒的主要部位,对内毒素的清除主要是通过贴附于肝窦的枯否细胞的吞噬作用而进行的。如果肝脏的网状内皮系统功能降低,或门静脉中内毒素的量超过肝脏的解毒能力,则门静脉血中的内毒素便通过肝脏进入体循环而产生ETM。

长期以来,人们一直致力于寻找一种治疗 ETM 的有效方法。开始时,人们把希望寄托于众多的抗生素上,但实验资料表明,目前几乎所有的抗生素非但没有抗内毒素作用,反而因杀灭大量革兰氏阴性菌致菌体破裂而产生更多的内毒素,引起更为严重的临床症状。目前采用的其它药物有乳果糖、多粘菌素 B、胆盐及抗内毒素抗体等。但这些药物因其作用有争议,或因其毒副作用较大,或因其生产工艺复杂、价格昂贵,而使在临床上普遍应用受到一定限制。近年来,国内在应用中药防治 ETM 的研究方面作了不少努力,并提出菌毒并治的原则,为防治 ETM 提供了新的有效方法。

大量的实验资料和临床观察已经证明,中医治疗 ETM 主要是应用清热解毒药、活血化瘀药、通里攻下药及补益药、凉血药等,通过拮抗、破坏、排除、抑菌、稳膜和防害的途径发挥作用。

拮抗,即扶正祛邪,增强机体免疫力,促进内毒素灭活。黄芪是一种调动机体免疫功能抗感染、抗肿瘤、抗自身免疫病的广谱免疫兴奋剂。它能扶正固本、促进吞噬细胞功能、促进淋巴细胞转化,促进免疫球蛋白合成和诱导干扰素产生,具有类肾上腺皮质激素样作用。穿心莲是清热解毒药,有增强机体非特异性免疫功能的作用,实验表明它对家兔的致死性内毒素过敏反应有明显的拮抗作用,并可使内脏损害程度减轻。1980年,竺耀能用由柴胡、黄芩等 10 味中药组成的清胆注射液对内毒素性休克进行研究,发现清胆注射液有促进特异性抗体形成、增强炎症细胞的吞噬功能、降低毛细血管通透性和抗炎作用。1988年,魏恩祥用参附注射液进行动物实验,认为该药能明显改善末梢循环,增强机体免疫力和网状内皮系统的吞噬能力。1986年王家泰证实,泻热汤(大黄、芒硝、元参、甘草)的抗内毒素、抗感染作用不在于直接抑菌,主要是增强中性粒细胞的比例和吞噬能力,提高血清总补体的水平。这些中药及复方通过提高网状内皮系统吞噬功能来加强该系统对内毒素的吞噬和消化能力,以清除“逃逸”到肝、脾、肺等脏器的内毒素。

中和(破坏),即与进入血液循环中的内毒素相互作用,破坏其结构,消除其毒性。1982年,王今达等对 24 种清热类中药进行抗内毒素的筛选实验,结果发现穿心莲、蒲公英、板蓝根和元参等四种中药在试管内对内毒素有明显的抑制作用。1989年,胡家石等以中药清解灵(大黄、蒲公英、败酱草、白头翁、元参、甘草)治疗急性重症胆管炎取得较好疗效,并经电镜研究发现,该药破坏内毒素结构。1986年,林菊生等研究发现,经中药制剂“热毒清”(金银花、大青叶、鱼腥草)处理的大肠杆菌内毒素,在电镜下大部分失去原来链状结构而被裂解成杆状、短片状或完全解聚,从而提示该药对内毒素有一定程度的直接降解作用;并且发现“热毒清”可增强肝脏枯否细胞的吞噬功能,从而拮抗内毒素 DIC 之生物效应。中医的清热解毒包含着解内毒素之毒的内容。

排除,即排除肠道内产生内毒素的细菌和已经产生的内毒素,减少内毒素的产生和吸收。通里攻下是中医八法之一,已在临床得到广泛应用。何时希认为“秽滞不除,热毒不解,如聚薪于灶,逼下秽滞,去其凭借,则移薪灭火之意”。用通里攻下法治疗 ETM,主要是排除胃肠积滞,使大量细菌和毒素随肠道内容物排至体外,减少大剂量抗生素的使用,避免细菌裂解而在肠道内产生高浓度的内毒素,减少内毒素的来源。王家泰的泻热汤中用大黄和芒硝,胡家石的清解灵中用大黄,都是取其通里攻下之功用。1991年,陈海龙应用复方大承气汤防治梗阻性黄疸时的内毒素血症取得较好的疗效。下法方剂中常用的大黄,除具有攻下作用外,还能促使肠管蠕动,降低毛细血管通透性,提高血浆渗透压,以达到扩容和改善微循环的作用,减少内毒素的吸收。

抑菌,即抑制细菌生长繁殖,降低内毒素的产量。内毒素系由革兰氏阴性细菌裂体产生,细菌繁殖快,数量多,则内毒素产量就大,病理危害就重。据研究资料提供的证据表明,抗生素可以增加内毒素的释放,在某些情况下会使菌血症患者增大休克的发生率。而中药不仅能抑菌,还具有抗内毒素作用,正好弥补抗生素的不足。大承气汤中大黄与厚朴有明显的抑制作用。大黄中的

大黄酸、大黄素及芦荟大黄素在 100 $\mu\text{g}/\text{ml}$  以下就能对 14 种细菌产生抑制作用。金银花、连翘、蒲公英、紫花地丁四种药物在 100% 浓度下对肠道菌群均有不同程度的抑制作用,若联合应用则其抑菌效果较单味药更强。荒川和男认为大黄对肠内厌氧菌有特异性抑制作用,而纠正异常定菌异常增殖所致的肠内菌丛的改善。

“异常”即稳定线粒体膜和溶酶体膜,保护细胞器。线粒体是“细胞动力厂”,溶酶体是“细胞内消化器”。当感染性休克 DIC 时,组织缺血缺氧,加以内毒素的直接攻击,膜的通透性发生改变,线粒体肿胀,结构破坏,功能降低,影响溶酶体膜的通透性;通透性发生改变,释放大量的溶酶体酶,导致细胞自毁,变性的线粒体亦被噬融,最后所有的细胞器都发生紊乱,细胞趋于死亡。如果机体重要器官的细胞严重损伤,则易发生多脏器功能衰竭(MOF)。因此,在治疗 ETM 时,注意保护细胞器是非常重要的。1989年李鸣真等研究发现,中药热毒清注射液能保护线粒体的结构、呼吸功能和活力。同时,体内实验也表明热毒清对内毒素所致溶酶体损伤有缓解作用。这是令人振奋的发现。

防害,即抗自由基,防止大量自由基对机体造成危害。研究发现,实验动物在注射内毒素后发生微循环紊乱和组织细胞缺血缺氧,使黄嘌呤氧化酶(XOD)和超氧化物歧化酶(SOD)受到抑制,导致电子传递系统解偶联,生成较多的自由基,而且内毒素刺激多形核白细胞和巨噬细胞,从而释放氧自由基。过多的氧化活性很强的氧自由基可迅速引起脂类过氧化,致使血浆和组织液中的过氧化脂质(LPO)增高。LPO 的积聚可使蛋白变性,生物膜巯基酶类失活,因而使膜结构和功能被破坏,最终细胞乃至器官功能衰竭。中药热毒清注射液能对抗内毒素所致脂质过氧化损害,这可能是其抗内毒素的机制之一。

实验资料和临床实践都表明,治疗 ETM,必须发挥中医学的优势,提倡中西医结合。近年来中西医结合的治疗方法按着扶正祛邪、菌毒并治、清下兼施、辨证论治的原则,为治疗 ETM 开创了新局面,有着十分广阔的前景。但中药对内源性 ETM 的作用机理尚未完全明了,有待于进一步阐明;在治疗 ETM 方面还有很多中药有待筛选;同时,在治疗时不应忽视与 ETM 有关证型的辨证施治,以提高疗效。ETM 的进一步解决有赖于对内毒素的产生、传输途径、内毒素对机体的损害和机体对内毒素的反应等规律更清楚的了解,以便在产生 ETM 之前进行有效的预防;产生 ETM 之后则及早予以有效的治疗;同时,还要很好消除 ETM 对机体产生的危害。

#### 参考文献

- 1 陈有为,等.中国急救医学,1989,9(2):41
- 2 陈海龙,周俊元.国外医学(外科分册),1990,17(6):342
- 3 陈海龙,周俊元.中西医结合杂志,1991,11(3):184

(大连医学院附属一院陈海龙撰)

### 中药治疗耐药金黄色葡萄球菌疾患

drug-resistant staphylococcus aureus-disease treated by Chinese herbs 由于抗生素的广泛应用以致“全球性药物滥用”,给抗感染治疗带来了许多新的难题。除有些毒副作用外,相当突出的是大量耐药菌株的产生。有的学者预测,在全部致病菌中,新的抗药菌株很快就要达到 80%~90%,并对人类健康构成严重威胁。中医学宝贵经验证明,精选组方的中药确有抑制并杀灭金黄色葡萄球菌(简称金葡菌)的效能。在这方面继续努力探讨,必将对解决目前严重威胁人类健康的耐药金葡菌问题有所贡献。

金葡菌是引起疔、痈、脓肿等外科化脓性疾病的主要致病菌,临床特点为出现红、肿、热、痛、脓汁黄稠等炎症表现,重则为败血症、脓毒血症。中医以“火(热)毒”来概括金葡菌致病的病理机制,将所致疾病称之为“疮疡”、“痈疽”、“疔毒”等,认为“疮疡之证,皆火毒也”(《外科秘录》)、“痈疽原是火毒生”(《医宗金鉴·外科心法要诀》),病理过程为五气内郁、蕴热化火,火热使气血壅聚成毒,气不行则肿,血不行则痛,“热盛则肉腐,肉腐则

为脓”(《灵枢·痈疽篇》)。若火毒蕴结,发于体表为疔疮痈疽;若毒邪炽盛,正不胜邪则为走黄内陷。总之,金葡菌感染疾患,以火(热)毒为主证,表现为热毒蕴结,不得宣泄。治疗以清热泻火解毒为其大法,使毒邪得泄,则肿消痛止,成脓外溃,瘀腐得祛。

20世纪20年代末期,前苏联学者首先开始进行植物药抗菌作用的实验研究。40年代中期,中国学者进行了植物药对金葡菌抗菌作用的研究。新中国建立后,中国进行了广范围的体外抗菌试验,对中草药抗菌作用、耐药性及其机制作了系统研究。

对金葡菌耐药性的体外实验资料表明,易使金葡菌产生耐药性的有蒲公英、茵陈、牛蒡子、升麻、千里光、紫苏、杭菊、夏枯草、皂角刺、丹参、红藤、地榆、丹皮、白芍、黄连等单味药和普济消毒饮等方剂。不易使其产生耐药性的有连翘、薄荷、黄芩、大青、黄柏、栀子、白头翁等单味药及黄连解毒汤等方剂。

金葡菌对中草药和抗生素多无交叉耐药性,耐青霉素的金葡菌对中草药的敏感性与非耐药菌株相同,说明这些中草药对细菌的作用方式不同于抗生素。一般来说,方剂较单味药不易使金葡菌产生耐药性,而单味药又较之单一成分如黄连较硫酸黄连(单味药也可说是一个复方)不易使金葡菌产生耐药性。可见,合理的配伍,既可增强抗菌作用,又可减弱耐药性的形成。

有人曾作试验,将金葡菌用小檗碱接触训练3代,形成耐药菌株,再接种于高抗菌单位的培养基中,金葡菌在高于原来浓度16倍的小檗碱环境中仍能生长。而将黄连配伍成复方——黄连解毒汤进行同样试验,则不形成耐药性。其原因与组成方剂的单味药的抗菌成分同时作用于细菌代谢的各个环节有关。其中,黄连能抑制金葡菌的呼吸及蛋白质、核酸的合成。黄柏对金葡菌呼吸和核糖核酸的合成有强烈的抑制作用,大黄对乳酸脱氢酶的抑制作用较强,甘草能显著地抑制脱氧核糖核酸的合成。所以,这个方剂对细菌的呼吸和蛋白质、核糖核酸及脱氧核糖核酸的合成等不同代谢环节都有抑制作用,使细菌不易产生耐药性。

S-102(黄连、黄芩、栀子等组成的复方)抗菌谱较广,抗菌活性较强,细胞对其耐药性较小,是预防和治疗创面感染较为理想的药物。为了能反映出S-102的抗菌范围和活性程度,曾实测细胞达571株,包括需氧(及兼厌氧)菌、厌氧菌和创面分离菌在内的临床分离菌。S-102对创面感染常见菌,如金葡菌、化脓性链球菌、绿脓杆菌等需氧(及兼厌氧)菌和部分厌氧菌有较好的抗菌活性,对G+球菌作用优于G-杆菌。4种临床分离菌中以金葡菌对S-102最敏感,MIC<sub>50</sub>(最低抑菌浓度)为每ml 1.56mg。虽然金黄散对金葡菌也有较好的抗菌作用,但都高于S-102的3倍(指稀释倍)以上,对G-杆菌作用也逊于S-102。金葡菌和绿脓杆菌这两种创面感染最难克制的细胞对S-102而言,MIC的变化最小,MIC<sub>50</sub>和MIC<sub>90</sub>只差一倍,而抗生素即便是对敏感菌种也都在3倍以上。耐药菌株如金葡菌<sub>15</sub>可耐受青霉素达敏感菌10倍以上。而对S-102仍同样敏感,表明S-102具有稳定的抗菌作用。

以透射电镜对S-102耐青霉素的金葡菌<sub>15</sub>的超微结构改变及抗菌机制进行研究,MIC时可见金葡菌中隔细胞壁连接不紧密,胞质电子密度颗粒轮廓不清;8MIC时,菌体畸形,中隔粗细不一,胞质电子密度如絮状或团块状,分布不均,拟核聚集,出现粗大的间体,有的细胞溶解,无正常分裂相,生长期及静止期均有不同程度的改变。

也有实验资料表明,大多数对敏感菌株有抑制作用的清热解毒中药,同时对耐药性菌株也有抑制作用。22种对葡萄球菌敏感菌株有作用的中药(黄连、黄芩、丹皮、金银花、大蒜、马齿苋、野菊花、桑皮、黄柏、野丹参、栽丹参、大青叶、板蓝根、连翘、地丁、虎杖、鱼腥草、败酱草、蒲公英、夏枯草、白头翁、大青)中,有16种对耐药性菌株有抑制作用,占对敏感株有抑菌作用中药的73.5%。这为临床治疗由耐药菌株引起的化脓性炎症或对抗生素应用有副作用的病例选用中药提供实验依据。

随着抗生素的广泛应用,许多耐药菌株的出现,以及抗生素毒副作用的迅速增多,使原来视抗生素为抗感染特效药的医家及

病家又开始注意使用安全的清热解毒中药及复方。剂型改革是进一步推广应用抗感染中药的前提条件。有效成分的提取及疗效的保持均是重要环节。近年来在国内外出现医用纤维素学,如何将有效中药与作为载体的医用纤维素相结合,将具有广阔前景的研究课题。

#### 参考文献

- 徐仲吕,等.四川医学院学报,1959,1,41
- 卢文筠,等.四川医学院学报,1960,2(1),3
- 刘寿山.中药研究文献(第1版).北京:科学出版社,1975.522
- 文传,等.北京市科学技术委员会鉴定,1988,12,27
- 吕恕.中国烧伤创疡杂志,1990,(2):46
- 黄文玉,等.山东中医杂志,1991,10(3):41

(中国中医研究院广安门医院文传、吕恕、钱允键撰)

**中医治疗尿石症的研究进展** 尿石症是全球性的常见病,在中国发病率也较高。由于病因和发病机理复杂,至今仍缺乏有效的防治措施。

西医学认为很小的肾结石可放置不管,横径>0.5cm的结石多因炎症和漏斗部狭窄很难移动,主张手术取石。尿路结石有一定的自然排出率。输尿管结石横径<0.5cm者,如表面光滑,停留时间不长则有相当自排率;结石横径>0.6cm时较难自排;横径>0.8cm者,一般主张手术取石。中医在尿石症防治方面积累了丰富的经验,其中有许多行之有效的方药。随着中医药防治尿石症临床及研究工作的深入,70年代以来,使较大结石的排石率有了显著提高,尤其对因结石嵌顿引起肾积水等具有手术指征者治疗成功率的提高,降低了手术率,使许多患者避免了手术;同时在溶解结石、预防结石发生和复发方面也出现可喜的苗头。

中医治疗尿石症历来以排石为主。传统认为西医之尿石症属于中医学“石淋”、“砂淋”范畴,病机多责之肾虚而膀胱积热。肾司二便,肾与膀胱互为表里,肾气虚则膀胱气化不利,湿热蕴结下焦,灼烁阴津,煎熬尿液,日久则尿中杂质结为砂石。古人基于上述认识,提出清热利湿、通淋排石为治疗石淋、砂淋之常法。50年代中医治疗尿石症均用此法,多以五淋散、八正散、导赤散、石苇散等化裁组方,随证加减,或在此基础上提出一些专方专药,近年来仍有沿用此法者。池业业以广东大叶金钱草30~60g,鸡内金9g,石苇、海金沙、冬葵子、车前子、瞿麦各15g,扁蓄、怀牛膝各12g,六一散20~30g加减,治愈石淋524例。广东尿石病协作组用五石汤(海浮石、滑石、穿破石、石苇、硝石)治疗尿石症262例,疗程90d,结果排石及结石阴影消失138例,占52.6%,总有效率为63.7%,疗效均较为满意。长期临床实践证明,凡辨证为砂淋、石淋而治以渗湿清利者,多数为伴有症状发作的输尿管下段或已移至膀胱、尿道的小结石,或为合并感染的上尿路结石。临床多见尿频、尿急、小便淋漓涩痛等下焦湿热证候。对此,按清热利湿、通淋排石的法治疗确有疗效,往往能起到控制感染,促进排石的作用,其排石率高于应用利尿、解痉止痛及多活动、多饮水的西医常见疗法。

随着上尿路结石发病率的不断上升,临床学家逐渐认识到中医古籍中的砂淋、石淋所述病证仅包括尿石症的一部分,而临床更多见的是久居于肾或输尿管中、上段结石,尤其是结石体积较大,长期停留不移动,或合并肾积水的上尿路结石,可无症状,或常以腰痠痛而胀、小腹膨胀酸痛,病程中可突作肾绞痛或部位固定不移的腰腹绞痛,痛引小腹,频频发作,或伴血尿为主要见症。对这类尿石患者,如继续沿用清利排石法,显然不能达到理想疗效。刘欬枋等应用金钱草、石苇、车前子、泽泻、厚朴、枳壳、滑石等清热利湿、行气排石方治疗尿石症37例,结果排石17例(45.9%),结石下降8例(21.6%),其中结石横径在0.8cm以上者6例,无1例排石。邓学稼等用金钱草、海金沙、冬葵子、瞿麦、车前子、泽泻、滑石、萹蓄、川牛膝等治疗结石嵌顿合并肾积水患者12例,结果仅1例排石,IVP、PSP、同位素肾图3项

检查中有两项恢复正常者仅两例,可见以清利法所排结石一般为排石难度不大的小结石,却难使较大结石移动、排出;加强利尿则又有加重肾积水、危害肾功能之虞。因此,70年代以来很多中西医学者根据结石滞留上尿路的临床表现及其造成的病理损害,提出结石阻滞、盘踞尿道、气机不利、血行受阻、气滞血瘀的病机,倡导用活血化瘀、软坚散结治法,或与清热利湿、理气行气药并用,或侧重于活血化瘀方药,用以治疗难度较大的结石。刘猷枋等首先以三棱、莪术、山甲、桃仁、赤芍、川牛膝、厚朴、枳壳、皂角刺、青皮等组成的化瘀尿石汤治疗具有手术指征的上尿路较大结石209例,结果排石140例(67%),结石下降38例(18.2%),总有效率为85.2%;原有肾积水者经治疗后均消失或改善,无一例加重或恶化。张学能等以二子化痰排石汤(急性子、王不留行、川牛膝、枳壳、生鸡内金、石苇、蒺藜等)为基本方辨证加味,治疗尿石患者95例,结果治愈66例(68.4%),有效19例(20%),总有效率为88.4%,排出结石最大的为2.0cm×1.0cm。活血化瘀、软坚散结法的应用,使中医药治疗尿石症取得突破性进展,提高了排石率,促进肾积水的缓解、消失,改善肾功能,扩大了中医药治疗尿石症的适应症。

尿石由肾虚湿蕴结所致,肾虚为本,膀胱湿热为标。对于病程缠绵,结石久踞,或过服清利寒凉,或攻伐太过等耗伤正气者,应从益气健脾、温肾利水着手。邓学霖等以扶正温肾法为主,用川断、桑寄生、女贞子、旱莲草、生地、菟丝子、补骨脂、仙灵脾、巴戟天、肉苁蓉、胡桃肉等治疗尿石症伴肾积水者,结果排石率为61.6%,多数患者IVP、PSP、同位素肾图3项检查有两项以上恢复正常,疗效明显优于用清热利湿法治疗的对照组。孙品英等应用由附片、桂枝、川断、仙灵脾、黄精、牛膝、川椒等药组成的温肾利水剂治疗100例输尿管结石嵌顿性肾积水症患者,平均经过60d的治疗,结果治愈71例,有效17例,总有效率为88%。扶正补肾法可以推动肾气,对许多久病不愈或清利、攻伐治疗无效的尿石症患者,取得较好的疗效。

中医药治疗尿石症除上述主要治法外,尚有调理脾胃、疏利气机、宣肺降气、提壶揭盖、养血柔肝、健脾利湿、温经散寒、化痰通络等法,在辨证论治原则下,根据不同证候灵活选用。还有专方专药、单方验方、针灸理疗、“总攻”排石和中西医结合综合疗法等多种途径,均有一定疗效。

“溶石”是治疗尿石症颇为理想的疗法,目前国内外都在研究。近年来在中医药治疗尿石症的大量临床实践中,许多人不断观察到结石有裂解溶碎、外观缩小、逐渐消失的病例,或结石排出时质地变得十分松软的现象。中国中医研究院广安门医院泌尿科抓住临床有启发性的病例和现象,逐步筛选出核桃仁、鳖甲、滑石、金钱草、黄牛角粉等药物,配合一些软坚散结和清利药如夏枯草、生苡仁、白芷、海金沙等组成基本方随证加减,观察到30例结石溶解或部分溶解的病例,结石化学成份分别为草酸钙结石17例,草酸钙、磷酸钙混合结石5例,磷酸镁铵结石5例,胱氨酸结石1例,尿酸盐1例,磷酸镁铵结石、磷酸钙结石、尿酸铵混合结石1例。其他许多中医药治疗尿石症的报道也观察到类似现象。

尿路结石无论排石或手术取石后均有较高的复发率,因此预防结石复发是一个亟待解决的问题。中国中医研究院广安门医院泌尿科报告259例经溶石、排石或手术取石治愈的尿石症患者,继续用益气、活血、清利之剂预防结石复发,经远期2~11年随访,复发率为1.9%。孙品英等报道,温肾利水药亦有预防成石作用,他报告的一组病例,经治疗后5年随访,结石复发率仅为2%,明显低于国内外文献报道。

关于排石原理的探讨:尿石的排出与尿路动力学因素有关,其中利尿、增加肾盂内压力及增加输尿管蠕动是有利于结石排出的主要因素,增加尿量是中药防治结石的重要功效之一。其结果是尿流直接冲击结石并间接增加输尿管蠕动,有利于尿路结石排出和预防结石形成。林茂樟等通过动物实验证实,清热利湿药金钱草、茯苓、泽泻、瞿麦、车前子等均具有明显的利尿作用,增加肾盂内压力及输尿管蠕动为中药防治结石的另一重要功效。薛彦

中等通过动物实验发现,活血化瘀药并无明显利尿作用,但可在不增加尿量的情况下使肾盂内压力明显增高,输尿管蠕动频率明显加快和幅度增大并出现新波。薛氏同时观察到活血化瘀药尚能改善微循环,降低毛细血管的通透性,因此能减轻输尿管因结石刺激所致的炎性反应,减少组织充血、水肿和炎性增生,有利于嵌顿时间较久及横径较大结石的排出和积水的消除。除活血化瘀药外,张建国观察到温肾利水药也能使实验性肾积水动物的肾盂内压力增高,输尿管蠕动加快,输尿管平滑肌松弛,同样能促进结石的下降和积水的排除。

关于溶石和防石原理探讨:北京医科大学泌尿外科研究所应用粒度测量技术及粒子表面Zeta电位测量技术,结合一个晶体生长和聚集的数学模型,检测和评价7种国产排石中成药对一水草酸钙晶体生长和聚集的抑制作用,发现各种排石中成药均能不同程度地减慢一水草酸钙晶体生长速率并降低晶体的聚集程度,从而为中药防治尿石症提供了现代科学的理论根据。他们进而对“结石通”的防治尿石作用进行体外、动物及人体内试验研究,结果表明结石通及其组分在体外具有抑制一水草酸钙晶体生长和聚集作用。动物实验发现,结石通能减少乙二醇诱发肾内晶体沉淀和结石形成,降低肾组织钙和草酸含量,增强尿液抑制活性。临床研究资料也表明,上尿路含钙结石患者服用结石通一周后,晨尿中大晶体比例数明显减少,24h尿的生长和聚集抑制活性明显升高,并有限地提高枸橼酸和镁的浓度。研究资料证明,结石通有预防草酸钙结石形成或复发的功效。广西医学院研究广金钱草提取物三萜醇配糖体和黄酮配糖体对用乙二醇和活性维生素D<sub>3</sub>制作的实验性草酸钙尿石模型的影响,对照组结石形成率为84.95%,观察组(喂服三萜醇配糖体和黄酮配糖体)的结石形成率均为28.5%,尿钙排泄明显减少,尿中柠檬酸增高;本实验也揭示广金钱草有预防草酸钙结石形成的效果。中国中医研究院广安门医院泌尿科应用偏光显微镜观察结石标本薄片,其中用该院化瘀尿石汤的排石标本薄片58块,与自排或手术取石组45块结石标本薄片相比,发现中药排石组结石薄片磷酸盐部分脱落,草酸晶体结构破碎,颗粒晶体变圆钝,表面生芽状态抑制等现象较自排的或手术取石的对照组结石标本有显著差异,充分说明中药对草酸钙结构确实起到某些作用。此现象与临床所见到的服中药后有些患者结石裂解或消失或结石质地变得松软颇为吻合。

西医疗尿石症历来以开放性手术为主,手术的大切口及术后复发均给病人带来一定的损害及痛苦。80年代以来,随着体外冲击波碎石术(ESWL)及腔内泌尿外科技术的进展,已从根本上改变了尿石症临床治疗的面貌,使90%以上的上尿路结石病人可以免去手术痛苦,但两者术后残石率仍高,极易复发,因此如何消除残余结石和预防复发将是临床防治尿石症所面临的两大课题。随着ESWL的普及与提高,今后治疗的上尿路结石病人中多发性的、复杂性的、鹿角状的结石将会增多;在ESWL治疗时所致肾、输尿管组织及功能损害,肾内、肾周围血肿、血尿;术后发热、感染、输尿管石街、梗阻等合并症,也将逐渐增多。因此,如何防治ESWL治疗的并发症,将是今后尿石症防治研究的又一课题。预期中医药能在这几方面发挥很大优势。

排石仍是今后中医药治疗尿石症最基本的也是最重要的方法。期望在辨证论治原则下,应用现代科学诊断技术,从结石部位、大小、形状、介在状态及尿路解剖、生理和病理变化,结合病人体质、饮食、代谢等各方面因素进行研究,在现有的基础上探索治疗方法和药物,积极改善肾功能,减轻肾积水,增加肾盂张力及输尿管蠕动,消除输尿管局部充血、水肿,控制感染,松懈尿石粘连,可望进一步扩大中药排石适应症并提高排石率。在ESWL治疗前后辨证应用中药治疗,对扩大碎石疗法适应症,减少副作用及并发症,预防结石复发,潜力很大。杨永元等以ESWL配合中药治疗上尿路结石151例,其中18例术前曾长期服用化瘀尿石汤,在碎石治疗中均1次粉碎,并于10d内排清结石;全部病例1月内排石率为98.6%,排净率为78.2%,碎石后血尿、发热、感

染、残石、输尿管结石、梗阻等合并症的发生率均低于国内外报道；两年后随访的36例，仅两例复发小结石。同时，他们还观察治疗本院及外院转来的碎石术后形成较大输尿管结石者29例，以中药治疗为主，少数配合简单的器械操作(输尿管扩张、输尿管口剪开等)，结果结石均于50d内全部排清。

减少或防止尿石形成是患者达到终身预防的关键。长期临床实践发现，某些中药方剂和中药具有预防结石的作用。实验资料业已证明，一些利尿通淋中药能有效地降低尿石盐的过饱和度，即减少尿石形成的化学驱动力；某些中药又能提高尿液拮抗结石盐生长和聚集的抑制活性，降低肾内钙和草酸含量，防止肾内微小结石的形成。此外，中医药治疗可有效地消除SW及腔内泌尿外科术后的残余结石，从而减少尿石的复发。

许多应用中草药治疗尿石症的报道均发现结石溶碎排出或阴影逐渐缩小而消失，显示中药在“溶石”方面的作用。但中药“溶石”方法，仅处在临床观察阶段，很不成熟，特别是对其原理尚不十分清楚。随着ESWL术的大量开展，给化学溶石疗法提出了新的要求；而腔内泌尿外科手术的开展，又为体内化学溶石创造了有利条件。期望应用现代科学技术，会发现有效的溶石中药，并从中提取低毒、无刺激、溶石快的新型药物。

#### 参考文献

- 1 广东省结石协作组, 新中医, 1980, 1: 24
- 2 杨立新, 等. 中医杂志, 1980, 3: 73
- 3 邓学稼, 等. 肾的研究. 上海: 上海科技出版社, 1981
- 4 刘猷枋, 等. 中西医结合杂志, 1981, 2: 72, 中华泌尿外科杂志, 1986, (7): 13
- 5 薛建中, 等. 中医杂志, 1982, 4: 33
- 6 孙品英, 等. 中医杂志, 1985, 26(5): 21
- 7 张建国, 等. 中医杂志, 1985, 26(5): 70
- 8 池绳业. 新中医, 1988, (6): 2
- 9 杨永元, 等. 第1届KDE型碎石机临床治疗报告会资料, 1988
- 10 曹履城, 等. 尿石症基础与临床研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1990

(中国中医研究院广安门医院杨永元主任医师撰)

### 中医治疗慢性肾功能衰竭的研究进展

慢性肾功能衰竭(CRF)是多种慢性肾脏疾病晚期的严重综合征候群, 治疗颇为棘手, 肾移植术和血液透析虽为有效的治疗手段, 但条件要求高, 经济负担大, 并有一定的毒副作用, 难以普及。中医中药治疗本病取得一定的临床疗效, 日益受到广泛的重视。CRF属中医虚、瘀、水、肿、虚劳等病范畴, 其病机为脾胃衰败、气化无力, 混浊壅滞三焦, 以正虚为本, 邪实为标, 临床表现出虚实夹杂、寒热并存之证。在临床实践中, 有的医家主张辨证分型处方用药, 如将CRF分为脾肾阳虚者、肝肾阴虚者、脾肾气阴两虚者、阴阳两虚者, 同时, 辨明邪实的性质, 如挟湿、瘀、痰、风的不同, 认为这样更符合CRF正虚邪实的病机特点。有的医家根据(或自创)一定治疗法则处方用药, 如“温阳泄浊”、“保肾气”、“活血化瘀”、“通腑泄浊”、“益气养阴和络渗湿”等; 有的医家则以固定成方(包括自拟)或单味药为主治疗, 其中较常用的方药为温脾汤、保肾甲丸、中药灌肠方、大黄附子汤、大黄、丹参等。应用以上治疗方法, 均能取得一定的疗效, 显示了以中医药治疗CRF具有广阔的前景, 也为进一步开展研究打下了基础。近年来, 由于引进大量的现代观察和实验手段, 使CRF的科研水平有了很大的提高。

辨证分型的微观化 探讨CRF中医辨证分型与内分泌、免疫、微量元素等现代观察指标间的内在联系, 对于发展中医理论、指导临床用药及判断疗效具有很高价值。刘猷祖等观察35例慢性肾衰患者血清微量元素含量, 表明血清Zn在慢性肾衰阳虚组显著低下( $P < 0.01$ ), 阴虚组与健康人组无显著性差异, Cu/Zn值在阳虚组较阴虚组及健康人组显著升高( $P < 0.05$ 和 $P < 0.$

01)。因此, 血清Zn值低下、Cu/Zn值升高可作为CRF阳虚辨证的客观指标之一。张庆怡等检测43例男性CRF患者的性激素, 发现患者睾酮(T)显著降低( $P < 0.05$ ); 雌二醇( $E_2$ )及 $E_2/T$ 值显著升高( $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ )。按中医辨证将43例患者分为肾阴虚者和肾阳虚者, 两组患者症状表现不同, 性激素改变也有差异。其中肾阳虚者T明显降低,  $E_2$ 不升高,  $E_2/T$ 值明显提高; 肾阴虚者 $E_2$ 和 $E_2/T$ 均显著升高。陈梅芳等观察CRF肾虚患者下丘脑—垂体—甲状腺轴、肾素—血管紧张素—醛固酮系统及免疫指标的变化,  $T_3$ 、 $T_4$ 、 $C_3$ 、 $CH_{50}$ 和甲状腺刺激素(TSH)均显著低于正常值( $P < 0.01$ ), 肾阴虚患者则表现为 $T_3$ 、TSH、IgG、E-RFC均显著低于正常值( $P < 0.01$ )。余青萍等测定CRF患者3种尿酶AKP、LDH和 $\gamma$ -GT的含量, 发现尿酶值的变化与中医辨证分型有相互依存的内在联系, 随着CRF逐渐加重, 血清肌酐逐渐上升, 尿酶活性则逐渐下降(以 $\gamma$ -GTF降为明显), 依照肾脾肺心肝的顺序, 五脏受累的数字逐渐增加, 故3种尿酶的测定值可作为五脏宏观辨证与微观辨证相结合的指标之一。陈志伟等对102例次CRF患者测定FDP、尿抗体包裹细菌试验(ACBF)、血及尿 $\beta_2$ -微球蛋白、尿血渗比、尿圆盘电泳, 观察中医辨证分型与上述指标的关系, 发现阳虚型者高分子蛋白尿比例最高, 尿血渗比多小于1, 阴虚型者尿血渗比小于1者最少; 气虚型者FDP阳性率明显低于阴虚、阳虚型者; 夹风型者混合性蛋白尿比例最高, 湿热型者ACBF阳性率最高, 而血瘀型者FDP阳性率无明显增高, 提示CRF的上述实验室检查与中医辨证分型间有内在联系。

有效方药的研究 近年来, 有许多关于治疗CRF有效方药的报道, 其中一些通过现代观察指标阐明了疗效机制, 有的在取得临床疗效的基础上进一步开展实验研究, 验证临床结论, 均显示了较高的研究水平。王钢等以益气养阴胶囊治疗慢性肾衰气阴两虚患者35例, 总有效率为85.7%, 明显优于肾炎四味片对照组的57.1%( $P < 0.01$ ); 男性患者用药后有降低 $E_2$ 含量、提高T含量、调整 $E_2/T$ 值的作用。邹燕勤等以保肾甲丸(党参、黄芪、巴戟天、鹿角片、杜仲、地黄、枸杞子、当归、桃仁、红花、丹参、六月雪等)治疗CRF 22例, 总有效率为68.8%, 动物实验证明该方药有提高存活率、增加体重、升高血浆蛋白、降低BuN、提高肾浓缩功能、抑制肾纤维组织增生和渗出的作用。陈奕庆等以中医灌肠方(生大黄、肉桂、槐花、龙骨、牡蛎、锡类散等)保留灌肠治疗CRF 25例, 总有效率为80%, 而西药对照组有效率为68%, 经该方药治疗的CRF大鼠摄食量及体重增加, BuN、Cr明显下降。熊宁宁等用肌酐的倒数(1/Scr)与病程时间的直线回归分析方法研究辨证施治对CRF病程的影响, 结果表明, 用“保肾气”为治则可明显延缓CRF的进程; 在此基础上, 实验资料证实维护肾元的中药保肾乙丸(黄芪、党参、太子参、山药、地黄、山萸肉、制首乌、枸杞子、桑寄生、杜仲、怀牛膝、桃仁、红花、泽泻)能够明显降低CRF的BuN、Cr, 提示维护肾元中药有降低氮质滞留的作用。卢君健等以活血化瘀药为主治疗慢性肾衰, 患者的血浆粘度和红细胞电泳时间明显降低, 肾功能显著提高, 可见中药通过改变慢性肾衰患者的血液流变学异常, 进而改善其血循环状况, 对增加肾血流量及恢复肾脏功能有很好的作用。郑平乐等观察温脾汤对CRF大鼠的治疗作用, 结果表明, 大鼠血中BuN、Cr显著降低, 高磷、高钾、低钙状况改善, 缬氨酸、亮氨酸、酪氨酸水平上升, 胍类化合物受到显著抑制, 大鼠寿命延长。大黄是治疗慢性肾衰的重要药物, 除了配合它药内服和灌肠外, 其单味药内服或以大黄注射液静滴, 均有一定效果。华增祺等对大黄灌肠治疗慢性肾衰进行氮平衡研究, 治疗后患者血尿素氮下降, 平均粪氮含量增加; 尿尿素氮下降, 氮平衡和分清校正氮平衡有所降低, 维持氮有所增加, 提示大黄灌肠有增加氮代谢产物排泄作用。黄少明等研究大黄对大部分肾切除大鼠肾功能的影响, 发现大黄可使大鼠肌酐升高减慢, 24h尿蛋白减少, 尿渗透压升高, 残余肾间质淋巴细胞浸润减轻。大黄治疗CRF的机制是多方面的, 其降低BuN, 除通腑泄浊解毒作用, 可能还有以下3个方面机理,

(1)通过神经体液免疫系统的调节改善肾功能,促使体内毒物排出或减少其毒害作用;(2)大黄的解毒与其降解血中分子含氮化合物的作用有关;(3)大黄中的活性成分丹宁具有促进蛋白合成的作用。慢性肾衰患者大多存在不同程度的高凝状态,用活血化瘀药丹参液治疗 CRF 取得很好的效果。董德长等以丹参液静滴治疗 CRF 伴高凝态患者,其高凝指标和肾功能均有所改善。但二者的变化无一致关系,认为其作用机制除了丹参具有抗凝和调整纤溶活力的作用外,还可能与其具有调节代谢、免疫和神经系统等多方面的功能有关。动物实验资料证实,丹参提取物在造型的第 6、12、18 天使造型大鼠肾小球滤过率明显增高,第 6、12 天使肾血流量明显增加,但在第 24 天和第 30 天对上述指标无明显作用,提示丹参提取物对轻度的、中度的肾脏损害肾衰的大鼠血管系统有一定的调整和逆转其病变的作用。

**动物模型的复制** 用家兔和大白鼠制作符合人类 CRF 动物模型开展实验研究,对于药物的筛选及疗效机制的阐明均有重要意义。在以上的动物实验研究中所涉及的造型方法,主要有以下几种:(1)腺嘌呤模型:异常高浓度的腺嘌呤通过黄嘌呤氧化酶的作用变为极难溶于水的 2,8-二羟基腺嘌呤,后者沉积于肾小管,并导致肾功能障碍。以含 0.75%腺嘌呤的饲料喂养大白鼠大约两周,大鼠表现为氮质血症,电解质紊乱,肾实质损伤以及内分泌紊乱,表现为脾肾阳虚型。该模型简便易行,对大鼠损伤较小,随着投腺嘌呤的日数延长,可以得到轻、中、重度的 CRF 模型。(2)肾大部切除模型:大白鼠经大部分肾切除后,残余存在的肾单位中有血液动力学改变(高灌注、高滤过),导致肾小球毛细血管进行性硬化,最终引起肾功能障碍。手术切除大白鼠全肾的 70%~75%肾组织后,约需 14~16 周,大鼠出现肾衰。该模型实验动物从外表现象及蛋白尿、BuN、Cr 和肾小球病理变化分析,属肾气虚衰而有瘀积的虚中挟实证候。(3)冷冻手术模型:用冷冻的方法致使家兔肾脏局部坏死,随着坏死组织引起的炎症反应,刺激纤维结缔组织增生,继续破坏残存的肾单位,最终导致肾功能衰竭,手术直接冷冻面积加上由于冷冻而累及周围组织的损伤面积共占兔肾总面积的 65.8%,从手术至出现 CRF 的过程需 6~8 周。该模型与肾大部切除模型在光镜、电镜上的结果一致,与人类局灶节段性肾小球硬化相似。

CRF 的中医药研究已有了很大的起色。在今后的研究中,首先必须建立统一的 CRF 中医诊断、分型、疗效标准,制定严密的科研计划,提高临床疗效的可能性和可重复性。从 CRF 现存的分型方法来看,认为以正虚分型较好,将实邪作为兼证来处理,这种分类方法能明确地反映虚实的兼挟转化,标本的主次缓急,既符合 CRF 本虚邪实的病机特点,临床又较为实用,值得进一步深入研究。引进现代的观察指标,阐明其与中医证型和症状之间的内在联系,对于中医辨证施治的微观化具有重要意义。就当前所引进的指标来看仍有一定的局限性,许多与 CRF 的发病及病程进展关系极为密切的指标,如甲状旁腺素、胃泌素、胰高血糖素等也应尽早引入中医的研究领域。此外,各项指标的观察多限于 CRF 的肾阴虚和肾阳虚,远不能全面反映 CRF 时虚实夹杂、寒热并存,多脏损、多器官相继受累的病变特点,故今后应全面地引入现代指标,系统地研究其与中医辨证施治的内在联系,使得中医理论的现代化进一步发展、完善。对有效方药的研究,应注意 CRF 不同阶段、不同证型的病理特点,选用适当的方剂,对专病专方(药)的研究,尤其应注意该方(药)的适应范围。开展动物实验研究,能进一步验证临床疗效及阐明疗效机制,研究结果更加客观、可信,但 CRF 的发病机制极为复杂,病因多种多样,必须进一步研究制作更为符合人类 CRF 病理特点的动物模型,如 CRF 最常见的原因是慢性肾小球肾炎,而现在尚无动物模型能够反映;当然还应加强符合中医特点的动物模型复制方法的探索,以便能更好地开展中医辨证施治及有效方药的研究。

#### 参考文献

- 1 陈梅芳,等. 中西医结合杂志,1983,3(6):328
- 2 卢君健,等. 中西医结合杂志,1985,5(5):274

- 3 刘慰祖,等. 上海中医药杂志,1986,4:3
- 4 邹燕勤,等. 江苏中医杂志,1986,9:9
- 5 陈奕庆,等. 江苏中医杂志,1986,6(2):77
- 6 余青萍,等. 武汉市医学科研,1986,2:8
- 7 陈志伟,等. 中西医结合杂志,1988,8(7):395
- 8 王钢,等. 南京中医学院学报,1988,30:7
- 9 张庆怡,等. 中医杂志,1989,5:287
- 10 熊宁宁. 中华肾脏病杂志,1989,5(3):187

(安徽中医学院陈奕庆、廖圣宝、张景湖、张俊撰)

### 中西医结合治疗肾小球疾患

肾小球疾患包括原发性肾小球病及继发性肾小球病,水肿、蛋白尿、血尿和不同程度的肾功能损害为其主症。中医认为急性起病者常属风水,治以祛风清热利水法为主。慢性肾炎以水肿为主要表现者,辨证属水湿滞留为多,多用温肾利水法;水肿消退后以治本为主,采用益气补肾、滋阴补肾、温补脾肾法及温肾泄浊法等。70年代随着中西医结合的发展,逐渐认识到部分慢性肾炎患者起病前常先有病毒或细菌感染,慢性肾炎免疫损害的持续与感染有一定的关系,提出湿热为慢性肾炎的病因,湿热内蕴是慢性肾炎病程迁延的重要影响因素,主张扶正时要注重清除湿热。80年代后,随着肾小球肾炎微血管病变和微血栓形成在肾炎发病机制中作用的认识,为活血化瘀法治疗肾炎提供了理论依据。将活血化瘀、清热化湿药加入至益气、温阳、滋阴、健脾、补肾药中来提高临床疗效,是近 10 余年来最重要的进展,亦是传统的中医辨证与西医辨病相结合的产物。

对肾小球疾患常用的基本治法及方药是:(1)益气健脾。脾主运化水湿,脾运失司是造成水肿的常见病机。慢性肾炎的普通型,中医辨证常属脾气虚弱和脾肾两虚,治用益气健脾法。益气健脾可增强消化功能,使脾实健运。肾病综合征时胃肠道粘膜水肿,影响食欲,还可有腹泻表现,进而加剧负氮平衡,益气健脾法有利于改善消化道症状,提高蛋白质的摄入量,促进病人康复。方如四君子汤、参苓白术散等。常用药有党参、黄芪、白术、山药、茯苓、薏苡根等。益气健脾法对人体的免疫功能亦有一定的调动作用,常用于预防慢性肾炎复发。如玉屏风丸(由黄芪、白术、防风组成)中的黄芪即有较强的预防呼吸道病毒感染的作用。研究资料表明,玉屏风丸对原有免疫功能低下的患者,大多数有显著改善免疫功能的作用;它还能促进健康人淋巴细胞的转化,诱生干扰素,提高易感者鼻分泌物中 IgA 与 IgG 的含量。玉屏风丸治疗实验性肾炎,治疗组的肾脏炎症改变较对照组为轻,对小鼠脾脏抗体形成细胞数有双向调节作用。(2)利水祛湿。水肿与脾、肾、三脏密切相关,利水法有宣肺利水、健脾利水、温肾利水等。宣肺利水常用紫苏、薄荷、生姜、茯苓、桔梗。健脾利水法常用白术、淮山药、生苡仁。温肾利水法常用茯苓、淮山药、仙茅、仙灵脾、巴戟肉、菟丝子、益智仁等。急性肾炎常用宣肺利水法,慢性肾炎常用健脾利水、温肾利水法。特别是温肾利水法,中医认为脾肾阳气虚衰,运化不利,水道闭塞而致水肿,故更为适用。温肾药能改善血液动力学改变,增加肾有效血流量,提高肾小球滤过率,使尿排出量增多。但单用温肾药利水作用不强,需配合利水药才能发挥较好的作用。利水药可能是作用于肾小管回吸收率,与温肾药相互协同作用。有人曾对利水药作过钾含量测定,有些含量较高,通过钾离子排出可能产生渗透性利尿作用。但利水药是否尚有其他利尿成分,有待于进一步研究。(3)清热利湿。对肾炎合并感染,中医辨证多属湿热,有湿热表现者病情者往往易反复、迁移,肾实质损害较重,急性肾小球肾炎和慢性肾小球肾炎急性发作,治疗应及时并施清热解毒法或清热利湿法。现已证实,这类药物多具抑菌作用,部分清热药尚可调整免疫功能。常用药物有白花蛇舌草、黄芩、六月雪、薏苡根等。(4)滋阴降火。阴虚型肾小球肾炎临床常表现为热象,血尿类型较多,在病理上以系膜增生性肾炎为主,中医辨证多属肝肾阴虚型,主张滋阴降火合活血化瘀或凉血止血法治疗。中医认为慢性肾炎为肾精亏虚,滋生



内热,并兼有湿瘀交阻,补肾填精、清除湿热,能促进及保存残余的肾单位之功能。对慢性肾炎高血压型常用滋阴降火法,可选用知柏地黄汤、大补阴丸等,药物有熟地、杜仲、丹皮、黄芩、玄参、泽泻、龟板等。(5)活血化瘀。血管内凝血在肾小球损伤的形成过程中是不可忽视的,活血化瘀能扩张肾血管,提高肾血流量,增加纤维蛋白溶解,减少血小板聚集等,常用方有益肾汤、益母草地黄汤、肾炎化瘀汤等,常用药物有当归、桃仁、红花、川芎、益母草、赤芍等。现代研究资料已证实,益肾汤有增加肾血流量和抗变态反应炎症作用。川芎可增加肾血流量及肾髓质前列腺素的含量,动物实验资料表明有预防实验性急性肾功能衰竭和保护肾组织结构完整及肾小管功能。许多活血化瘀药有一定免疫抑制作用,在实验性肾小球肾炎中已得到证实。活血化瘀法可治疗各种肾小球肾炎,特别是继发性肾小球肾炎,如狼疮性肾炎、紫癜性肾炎、雷公藤或雷公藤制剂及其提取物有较好效果,其免疫抑制作用及抗炎作用,可能是通过活血化瘀而去除肾小球基底膜的免疫复合物,改善肾小球的微循环,降低毛细血管通透性,减少尿蛋白的漏失而发挥。(6)通腑逐水。对于氮质血症者,主要采用通腑泄浊法,以大黄为主,口服透析对氮质血症的治疗有一定的临床价值。大黄能荡涤肠胃,其泻下有效成份主要是结合态蒽蒽衍生物。生大黄除可口服外,尚可以大黄为主的复方煎剂作灌肠用。大黄配红花等组成的中药结肠灌注液对实验性急性肾衰竭有显著的治疗作用,可增加肾血流量,改善肾微循环,减轻肾小管坏死程度,促进坏死肾小管上皮细胞的再生修复。亦可配温阳药附子、仙灵脾强化泄浊,以提高肾脏气化功能。

近年来治疗肾小球疾患现状是:急性肾小球肾炎,本病多属风水相搏或兼有湿热,治以宣肺解表、利水消肿为主,常用方剂有麻黄连翘赤小豆汤、越婢加术汤等,单味药有石苇、白茅根等。由于急性肾炎的发病除免疫机制参与外,还和肾小动脉及毛细血管痉挛、血液凝固机制紊乱有关,并以此作为应用活血化瘀法治疗急性肾炎的理论依据,常用药物如益母草等。慢性肾小球肾炎,慢性肾炎常分普通型、肾病型及高血压型。普通型常以蛋白尿、血尿为主;蛋白尿为主者常呈脾肾两虚型,治宜益气养阴止血或益气补肾湿精。慢性肾炎高血压型者宜以养阴清热、滋肾养肝为主。根据现代病理观察,肾炎常显示有补体系统的激活、中性粒细胞的浸润和毛细血管内凝血等,主张在辨证论治基础上,结合上述病理特点,加用桃仁、红花、川芎、泽兰、益母草等活血化瘀药,或六月雪、车前子等淡渗利湿药。肾病综合征:主张分阶段施行有机的中西医结合治疗。在应用肾上腺皮质激素的早期,激素剂量较大,宜加用滋阴泻火法(生地、知母、甘草)以减少激素所造成的“阴虚火旺”之症状;当激素递减到维持剂量时,加用益气补肾法,如黄芪、白术、生地、熟地、黄肉、菟丝子、山药等;在激素接近撤除及撤除后改用温补脾肾法,如附子、仙灵脾、黄芪、熟地、黄肉、巴戟肉等。中西医结合治疗肾病综合征可提高缓解率,减低复发率。

#### 参考文献

- 1 陈梅芳,等.上海中医杂志,1979,(6):16
  - 2 山西省中医研究所,新医药杂志,1975,(6):29
  - 3 骆继杰,中医杂志,1986,27(12):908
  - 4 施赛珠,中西医结合杂志,1989,9(9):571
  - 5 施赛珠,中医杂志,1991,4:34
- (上海医科大学附属华山医院施赛珠教授撰)

**肾移植中的中医药应用** 目前,世界上每年的器官移植总数已超过 25 000 例,并以每年 10% 的增长速度递增。据美国统计,肾移植占器官移植总数的 76%,等待肾移植的人数约为实际移植人数的 144.9%。中国的有关资料表明,到 1988 年底,中国肾移植总数已达 3 199 例,目前已超过 5 000 例。中国因肾脏疾病或其他疾病最终引发肾功能衰竭者,根据几个大城市的统计,发病率为 100/100 万,需进行肾器官移植的比例十分可观。为了有效地解决肾移植过程中的异体排斥反应,目前世界上一致

公认的应用药物为环孢素(CSA),它在肾移植过程中能有效地抑制辅助性 T 细胞产生和释放淋巴因子,但不会影响抑制性 T 细胞,从而使移植肾的存活率提高 10%~20%。这种强烈的免疫抑制剂对一年存活率的提高已起到明显的作用,但是对移植后较长时间发生的慢性异体排斥反应却无能为力。为提高移植肾的长期存活率,各国医学界提出和采用了多种方法,其中主要有:(1)HLA 配型。近年研究资料表明,HLA 相配的移植肾比 HLA 不相配的移植肾存活期长,其中存活 20 年的 50 个移植肾全部是 HLA 相配的。但 HLA 相配实际操作相当困难。这是因为 HLA 配型需要在移植前对供者和受者的抗原通过试验组对,而对 300 种已知抗原的不同血清进行鉴定,要达到完全配伍的概率相当少。(2)强烈抑制剂环孢素的理想运用。理想用药分 4 个阶段,目的是有效地减少急慢性排斥反应和肾中毒,并联合用药,减少远期并发症。(3)单克隆抗体的运用。在治疗和预防移植肾的急性排斥过程中与 CSA 同用或单独使用单克隆抗体均取得排斥逆转的效果。(4)中医中药的运用。由于免疫抑制剂在肾移植中是无选择地抑制,正常的细胞和机能也被破坏,出现较明显的副作用。在给予抑制剂同时采取中医中药治疗,既能极大发挥抑制剂的药理功效,又能减少抑制剂的毒副作用。在肾移植的过程中选择一种既有特异性抑制作用又无副作用的中药抑制剂,已成为中外医学界极为关注的课题。

肾移植后,患者在服用强烈免疫抑制剂的同时,服用中药进行预防和治疗排斥反应,调理阴阳,扶助正气,增强机体抗邪能力,近年来已积累了不少成功的经验。

1981 年,叶朗清将治疗肾移植过程中的排异现象视为孕妇因免疫原因引起的流产。中医学认为怀孕是“肾以系胞”,而“护胎者气也,养胎者血也”,说明胎儿是靠母体“肾”的功能和“气血”的营养方能在母体内生长发育而不致流产。如肾虚则胎元不固,气虚则不能护胎,血虚则不能养胎,从而导致流产。对于肾移植患者的临床辨证,一般都表现为肾亏阴损、气血两虚。所以,采用像保护胎儿避免流产的安胎方法应用于治疗肾移植的排异反应收到一定的疗效。补肾安胎基本方由川杜仲、川续断、金毛狗脊、桑寄生、苎麻根各 20g 组成。从统计资料看,术后 6 个月服用“安胎方”和对照组相比,两组发生排异次数分别为平均每人 1.5 次和 2.8 次。患者在服用中药前后进行免疫功能的检查(免疫功能变化见下表),提示安胎中药具有抑制细胞免疫功能,而且长期服用无任何副作用。1982 年谢桐对安胎药物的有效部分作了筛选。动物实验结果显示补肾安胎药(川杜仲、川续断、金毛狗脊、桑寄生、苎麻根)同强的松效果相仿,能明显延长魏氏大白鼠同种植皮片存活时间。可见“安胎法”在肾移植临床治疗中能起到缓解急慢性排异反应的作用。

表 1 患者服用中药前后的免疫功能状况

|       | 尿溶菌酶<br>μg/ml | 淋巴细胞<br>转化率% | 玫瑰花结<br>形成率% | 尿钠毫<br>g/L | 尿蛋白<br>mg% |
|-------|---------------|--------------|--------------|------------|------------|
| 服药前   | 47.46         | 52.30        | 38.92        | 58.61      | 95.7       |
| 服药后   | 0.54          | 23.84        | 21.30        | 115.70     | 17.7       |
| 统计学处理 | P<0.001       | P<0.001      | P<0.001      | P<0.001    | P<0.001    |

1983 年苏祥扶提出在肾移植后为患者服用免疫抑制剂的同时,加服养阴活血等中药,并认为补肾安胎与活血化瘀药联合应用,对肾移植的排异反应似有轻微减轻作用。从临床观察到的肾移植患者在排异反应激烈时,主要症状为移植肾胀痛、舌质紫暗、关节酸痛、头痛发热。在排异反应缓解时则舌质红、低热缠绵、心悸失眠等。中医辨证属气阴两伤、正虚邪实。养阴活血方主要是扶正祛邪,益气养阴,行气活血,调整阴阳。从统计资料可以看出,服养阴活血方药者与对照组相比,排异反应进程缩短一半,且使大剂量免疫抑制剂的副作用也较轻。养阴活血方药者主要由丹参、赤芍、红花、天冬、麦冬、生地、玄参组成。动物实验证明,该方药对溶血空斑形成有显著抑制作用。从肾移植的治疗过程看,

“养阴活血法”不失为一种有效的治疗方法。崔金才等在1983年、1985年提出,在肾移植后出现的移植肾肿大且有压痛、发热、少尿与烦躁等排异反应症状,均属中医的“瘀血”范畴,应从中西医结合方面探索治疗急性排异反应的有效方法。认为“活血化瘀法”既能直接或间接地改善移植肾的血循环和“血瘀肾”的微循环,又能提高移植肾组织血液的摄氧能力,从而加速其修复过程,促使肾功能得以改善。洪洪报道在肾移植患者中单用西药、加用活血化瘀中药两组病例中,中西医结合组的疗效优于单纯西药组,中药对逆转排异反应和移植肾的存活发挥了协同作用。实验资料证明,具有活血化瘀作用的丹皮、赤芍、当归、红花、延胡索、桃仁等药物有明显的抗炎作用和不同程度的抑菌功能。活血化瘀药物还具有抑制机体免疫功能的作用。实验资料显示,益母草、当归、赤芍、桃仁、红花、制大黄和甘草组成的方剂,有明显抑制抗体形成的细胞和血凝抗体的效能。活血化瘀药物可能通过加强抑制T细胞的作用,以改善移植肾的功能。

#### 参考文献

- 1 叶朗清,等.中医杂志,1981,3:182
- 2 谢桐,中华器官移植杂志,1982,3:108
- 3 朱洪荫,等.中医杂志,1983,12:65
- 4 苏祥扶,中医杂志,1983,3:65
- 5 苏祥扶,等.中西医结合杂志,1984,4:342
- 6 崔金才,新中医,1985,5:4
- 7 董明明,等.中华器官移植杂志,1986,2:83
- 8 谢桐,国外医学(泌尿学分册),1989,6:241
- 9 袁波,译.国外医学情报,1992,10
- 10 远博,译.国外医学情报,1990,8:12

(上海中医学院马慧药主治医师撰;张天审)

### 中医治疗烧伤 the treatment of TCM in burn

20世纪50年代以来,中西医结合抢救大面积重度烧伤病人的成功,体现了中医中药的巨大优势。中医药在控制烧伤后感染,减轻中毒症状,降低败血症发生率方面有积极作用;在维持有效血循环和微循环、改善与恢复心肾功能、增强机体抗病能力、提高免疫力、促进机体抗休克方面有重要的作用,使患者安全度过休克、败血症期而降低死亡率。烧伤恢复期患者应用益气健脾、扶正养胃中药,对促进体质复原,加速创面愈合,亦有重要的作用。治疗中小面积烧伤,国内各地运用许多不同组成、不同剂型的中草药,取得显著的疗效。中药外敷治疗烧伤创面的特点是湿润暴露疗法,不仅具有抗感染、减少渗出、消炎止痛的作用,而且由于外敷药形成屏障,有防止创面再感染的作用,更有促进创面愈合、促进上皮再生、减少疤痕的作用。烧伤的疤痕,应用中药内外治疗后,血运改善,凸出的疤痕可望逐渐软化与平复。

中医学文献称烧伤为“水火烫伤”、“火烧疮”。早在《五十二病方》就有用茺莠和猪油制成软膏敷治小腿部烧伤的记载。晋《葛洪肘后方》载有“烫火伤用年久石灰敷之,或加油调”和“用猪脂煎柳白皮成膏外敷”。此后,历代医书均有阐述,至明清时代记载甚详,如《外科正宗》“用芝麻油、石灰水搅和,外治杖疮、汤火伤”;《洞天奥旨》指出,汤烫伤“轻则害在皮肤,重则害在肌肉,尤其甚者害在脏腑”,对其治疗“必须内外兼治,则火毒易解也”。现代中医认为,烧伤是火热之邪损伤机体,其临床传变与温病相似,初起火热之邪稽留于气分为气热,扰营分为营热,入于血分为血热,进而可入舍脏腑。亦有医家认为烧伤后,皮肉经络受到损伤而出现气滞血瘀的证候,因此认为烧伤是伤血,不是热毒,故提出应用活血化瘀药治疗,可促进全身的和局部的气血流通,改善气滞血瘀状态,加速创面愈合。上海广慈医院烧伤研究组在抢救大面积严重烧伤病例中,认为主要死亡原因是正气衰竭,而不是邪盛。因此,指出大面积烧伤应用养阴生津中药固属必要,而扶正益气、大补元阳之剂显得更为重要。对老年患者常出现的阴损及阳、阳气衰微见证,中药补虚温阳亦为重要治法。

20世纪50年代以来,中医药治疗烧伤的工作取得很大成

绩,在救治大面积重度烧伤患者中,中医药的作用被认为是:(1)抗休克:早在1962年,胡家骅等以中药抗休克合剂(高丽参、五味子、枣仁、麦冬、生地、茯苓、泽泻、银花、黄连等)治疗14例严重烧伤,结果无一例因休克死亡者。1979年,安徽医学院应用复脉注射液(红参、附子、麦冬)防治烧伤休克病人183例,结果平稳渡过休克期者147例,不平稳者29例,死亡7例(3.82%)。吴德渊以抗休克合剂(生黄芪、山萸肉、当归、赤芍、麦冬、远志、淡竹叶)治疗烧伤120例,其中严重烧伤11例,特重烧伤16例,均安全渡过休克期。(2)控制感染:胡家骅等报告用中药治疗严重烧伤,败血症的发生率下降,仅为6.1%。北京积水潭医院曾治愈一例Ⅲ度烧伤面积94%的小儿,其烧伤总面积为98%,在多次败血症期间,均采用清热解毒、滋阴生津的中药而见效。从药物抑菌试验中可知,许多清热解毒方剂对烧伤常见感染菌有明显的抑制作用,而且局部应用中药抗感染合剂涂擦后,败血症发生率也较一般方法处理创面为低。多数医家指出,烧伤的抗感染治疗,用扶正祛邪、益气养阴中药,既能提高机体的抗病能力,又对控制败血症、减轻中毒症状有良好作用。(3)促进恢复:大面积烧伤患者经静脉补充营养,常难满足机体对蛋白质和多种营养的需要,且并发症多。经消化系统补充营养最为理想,但多数患者的胃肠功能低下。罗成群等采用补脾健胃中药(黄芪12g,人参10g,白术、山药、茯苓、麦冬各15g,陈皮9g,甘草6g),不仅减少静脉输入营养液量,且显示了中药在改善胃肠功能、满足患者热量和蛋白质的需要方面有不可低估的价值。国内医家的共识是:中药对烧伤后恢复期患者增强体质、加速创面愈合有积极意义。

治疗中小面积烧伤,中医药的作用被认为是:(1)控制创面感染:毛会亭等用中药烧伤膜治疗深Ⅱ度以上烧伤创面58例,创面均有以绿脓杆菌为主的化脓性感染,经清创切痂后将药膜贴敷创面,结果全部创面未经植皮,均以新生表皮愈合。毛会亭认为中药烧伤膜具有抗感染和促进创面生长愈合的作用。唐汉钧以清凉乳化油(含风化石灰水、麻油)合适量九一丹治疗中轻度烧伤132例,全部治愈,认为外搽中药制剂可促进创面脓痂早脱,感染被及早控制,从而加速创面愈合。(2)促进创面愈合:陈德才以中药煎剂(黄连、黄芩、生大黄、地榆、白芷、黄柏)向创面喷雾,可加速结痂,促进痂下创面愈合,共治41例Ⅱ度烧伤,4~18d治愈。宋红旗等以虎杖、黄柏、地榆、榆树皮内层制成煎剂喷雾,治疗烧伤120例,有效率达95.8%。该制剂可迅速使创面形成痂皮,促进创面愈合。徐荣祥提出,用中药湿润暴露法处理烧伤创面,可避免用刺激性消毒剂清创,共治120例,比干燥组病例愈合时间缩短。认为中药湿润暴露疗法有较理想的抗感染、减轻损伤、止痛、促进愈合、减少疤痕等作用。(3)防治疤痕增生:刘谋生以艾叶、威灵仙、老松皮、红花煎液浸敷创面,以艾叶、丁香、红花制成挥发油液涂擦疤痕,共治56例,其中创面修复后即用法防治者25例,出院后创面出现疤痕增生18例,疤痕增生形成后1年13例,结果治愈9例,显效25例,有效19例,无效3例。上海第九人民医院使用中药疤痕止痒软化膏(五倍子、威灵仙、丹皮、泽兰、薄荷、冰片、樟脑、冬青油、二甲基亚砷)治疗增殖性疤痕309例,319处疤痕,显效率达75.4%。房文彬以中药黑布膏治疗疤痕增生症30例,结果疤痕完全软化、变平。贾北平以补气、活血、通络中药内服和仙人掌外敷治疗烧伤后疤痕增生66例,治愈10例,有效50例,无效6例。

中医治疗烧伤采用湿润暴露疗法,打破了现代医学传统的保持创面干燥结痂的概念。湿润疗法,是根据中医“创伤、溃瘍”论治思想和现代烧伤局部微循环研究理论提出的,它是建立在传统的中医药外敷治疗烧伤大量实践经验基础上的。相信不久,湿润疗法的理论将更臻完善,随着这一理论的完善与实施,将为进一步发掘传统的中医药单方、验方、秘方开拓广阔的道路,烧伤后疤痕的防治亦将取得新的突破。

#### 参考文献

- 1 胡家骅,等.安徽医学院学报,1962,2:135
- 2 安徽医学院烧伤研究室,中华外科杂志,1978,2:83

- 3 陈国钧,等.安徽医学院学报,1982,4:147
- 4 贾北平.河南中医,1986,5:14
- 5 毛会亭.中西医结合杂志,1987,9:532
- 6 徐荣祥.中西医结合杂志,1988,4:204
- 7 国家中医药管理局.建国40年中医药科技成就.北京:中医古籍出版社,1989.287
- 8 罗成群,等.中西医结合杂志,1990,1:30
- 9 刘谋生.湖南中医杂志,1990,5:8
- 10 唐汉钧.山东中医学院学报,1991,3:37

(上海中医学院龙华医院博士生导师唐汉钧教授撰)

**中西医结合治疗毒蛇咬伤** 中国已知毒蛇约50种,危害较大的有10种。每年蛇伤发病率30~350人/10万,病死1.15~4.9/10万,致残1.15~4.6人/10万。毒蛇咬伤不仅是医疗上的严重问题,也是一个很大的社会问题。治疗蛇伤,抗蛇毒血清虽然效果显著,但需早期使用,如已出现中毒症状,或有器质性病变,则无治疗意义,且因保存需要一定的条件,目前农村尚难普及。中西医结合治疗毒蛇咬伤,方法灵活简便,药物使用携带方便,疗效满意。

毒蛇咬伤的治疗在《五十二病方》中即有记载,华佗已采用绑扎伤肢和用口吸吮毒液等急救方法。几千年来,单方秘药难以计数,其中较著名的有季得胜蛇药片等。1923年,中国在台湾开始研究抗蛇毒血清;1960年,广西医学院制备了供实验室用的抗银环蛇毒血清,蒋克贤于1969年研制出用于临床的抗蛇毒血清。安徽祁门蛇伤研究所创制的祁门蛇药曾获全国科技大会奖。刘启福于1966年最先发现局部注射胰蛋白酶能破坏蛇毒,后经各地验证治疗蛇伤有显著疗效,曾获国家发明奖。舒普荣研制的青龙蛇药于1983年通过鉴定,现已作为解放军空军飞行员“蛇伤自救盒”的救生装备之一。

毒蛇咬伤人体20min毒素即扩散到全身,在2h内可被人体转运吸收半量,残存的半量毒素在局部伤口组织中可维持数天甚至一周。因此,正确地处理局部是非常重要的。绑扎伤肢是传统的急救措施,应采用适当方法,在伤后20min内绑扎完毕。若超过12h或已经过排毒解毒处理,则无需再用。消毒、扩创、冲洗能及时有效地排出蛇毒,如伤口流血不止则不宜施行。负压吸毒在扩创后使用效果更好。必要时可直接用口吸吮。胰蛋白酶2000~4000单位,加0.5%普鲁卡因4~20ml,在伤口周围进行浸润注射,一般只注射1次,也可根据病情重复使用。或用1.1%依地酸二钠注射液10ml顺着伤口内冲洗,洗毕取该药20~40ml加等量0.5%普鲁卡因混合,以伤口为中心向周围注射;中毒严重者2h内可重复1次,其注射总量不宜超过75ml。也可取依地酸钙钠0.4g,加0.5%普鲁卡因60~120ml,同前法注射。此3种药物局部注射,均能破坏蛇毒,防止或减轻局部组织的坏死。1%高锰酸钾皮下注入,对治疗毒蛇咬伤有高效、速效、广谱等作用,是一种较为理想的破坏蛇毒的药物,但需使用新配制的药液。用半边莲、七叶一枝花等各30~60g煎水外洗患处,并用药液湿敷伤口,或用各种蛇药片研末调敷均有良效。

季得胜蛇药片又名南通蛇药片,其主要成分有七叶一枝花、过沟龙、鬼针草、腰黄、蕲蛇等。常规用量为每次10~20片,每日3~4次。中毒严重者每次服30~40片,每6h一次,用黄酒冲服效果最好,并可研末水调成糊状外敷肿胀处。曾用本药内服外敷治疗蜈蚣咬伤118例,治愈率为98.3%。安徽祁门蛇药由凌霄花根皮、香香兔耳风、半边莲、大蓟、青木香、射干组成。其片剂供口服,注射液供静脉注射、局封及套封用。局封或套封时,可加入等量的0.25%普鲁卡因。临床治疗毒蛇咬伤1543例,治愈率达98.96%。其中祁门蛇咬伤214例,治愈率92.2%;蜈蚣咬伤822例,治愈率99.8%;竹叶青蛇咬伤446例,银环蛇咬伤27例,眼镜蛇咬伤34例,治愈率均为100%。广东蛇药系民间治疗毒蛇咬伤的经验方,经大量动物试验筛选后,取其效果较好的草药组成。其组方为柚子叶、蛇王藤。药理试验表明,对眼镜蛇、银环蛇、蝮

蛇及海蛇的蛇毒均有明显的破坏作用,并经临床308例验证,治愈率99%。广西蛇药是在总结该地区民间治疗蛇伤药物基础上,经动物试验筛选出来的复方制剂,由藤桔、铁扫帚及七叶莲组成,按一定的比例制成浸膏片。药理试验表明,对蛇毒中毒小鼠的保护率:眼镜蛇毒为68%~90%,眼镜王蛇毒为78.6%,银环蛇毒为46.5%,其保护率随着给药时间的延误而明显下降,提示广西蛇药的疗效与给药时间密切相关。曾用其治疗毒蛇咬伤506例,治愈率98%。湖南A草蛇药片由A草的茎叶制成,治疗眼镜蛇、五步蛇、蝮蛇等8种毒蛇咬伤患者373例,并与用季得胜蛇药治疗的对照组103例比较,治愈率分别为99.20%和95.16%,且前者疗程短,临床治疗过程未发现任何毒副作用。实验表明,A草蛇药片对银环蛇毒、蜈蚣毒、眼镜蛇毒中毒小鼠的保护率分别为65.83%、89.18%和81.27%。青龙蛇药集各蛇药之长,在综合民间治疗毒蛇咬伤经验方剂的基础上反复筛选研制而成,由青木香、龙胆草、黄连、黄芩、黄柏、生大黄、白芷、一见喜、徐长卿组成,制成浸膏糖衣片。治疗各种毒蛇咬伤441例,治愈率达99.8%,无一例残疾,疗效显著。有人曾同时用青龙蛇药、季得胜蛇药、云南蛇药、梧州蛇药、何晓生蛇药等分别对眼镜蛇毒、五步蛇毒、银环蛇毒进行小白鼠抗中毒实验研究,结果青龙蛇药具有用量少、疗效高、广谱抗蛇毒较好而优于其他蛇药。

目前公认具有特效作用的药物是抗蛇毒血清,如能确定毒蛇的类别和毒素的性质,单价血清效果较好。中国已生产抗蜈蚣、五步蛇、银环蛇、眼镜蛇、蝮蛇等蛇毒血清,分别用于相应毒蛇造成的咬伤。抗金环蛇毒血清尚属试制和试用阶段。抗蜈蚣毒血清同时还可以对付竹叶青、烙铁头的咬伤。有人曾报道用抗银环蛇毒血清治金环蛇咬伤有良效。抗蛇毒血清使用愈早愈好,使用前应做过敏试验。一般只需注射一次,必要时可重复。毒蛇咬伤后数日内病情常较沉重,利尿排毒及全身支持疗法甚为重要。可用速尿、利尿酸钠、甘露醇等注射剂,促使血内蛇毒加速排泄,缓解中毒症状。应及时采用输液、输血等抗休克措施。用普鲁卡因在胃周围或肢体近侧套式封闭能减轻局部肿胀和疼痛;肾上腺皮质激素和抗组织胺药物对中和毒素和减轻毒性反应有一定的作用。还应给予抗化脓性感染治疗及注射抗破伤风血清。出现感染性休克和呼吸、循环衰竭及急性肾功能衰竭时,应积极予以相应的抢救措施。

中西医结合治疗毒蛇咬伤的方法及方药、治疗效果及实验研究的结果均已被肯定,但实验研究与临床治疗作用之间尚存在一定的差距,有些药物的药理作用还未完全阐明,一些治疗有效的方法及药物尚缺乏科学的依据。因此,进一步的工作将是运用现代科技方法,对临床行之有效的单方、复方,以其中所含各单味生药为主体,通过单用和合用多种组合形式,进行药理研究,观其药效变化,找出主药和产生协同作用的其他共有成分。以往的研究资料证明,中药中的有机酸为抗蛇毒的有效成分,但对其他组成也不可忽视。药物剂型、给药途径,药物的体积及用量必需研究;还需要分离、鉴定、提取抗蛇毒的有效成分,研制出高效、速效、低毒的蛇药。

#### 参考文献

- 1 安徽省祁门县蛇伤医疗所,中草药通讯,1977,8(11):24
- 2 荀建宁,等.蛇志,1989,1(3):13~15
- 3 刘法锦,等.中草药,1989,20(5):44~46
- 4 杨吕,蛇志,1989,1(4):16~17
- 5 周祖文,等.中医药信息,1991,8(6):26~29

(安徽中医学院附属医院王炜主治医师撰,周玉朱审)

**中西医结合治疗痔** 痔为一种多发病常见病,据国内1977年调查统计,患有各类肛肠疾病者占59.1%,其中痔占87.25%。痔非大病,治法却复杂繁多,但至今尚未有一种完美的治疗方法,现有的方法各有利弊,各有其适应症和禁忌症。

目前,治痔大致有内治、外治、手术等几类方法。

内治法 主要按中医风热燥湿四气和虚实辨证而治。元代

《丹溪心法》云：“痔疮当以凉血为主”。又曰：“治法总要大抵以解热、调血、顺气先之”，盖因“痔者，皆因脏腑本虚，外伤风湿，内蕴热毒，……以致气血下坠，结聚肛门，宿滞不散，而冲突为痔也”。明代《医学入门》云：“大要以槐花、槐角、生地凉血，芎归桃仁和血生血，枳壳行气宽肠，芩连山枝清热，黄柏、防己、泽泻行湿，麻仁、大黄润燥，荆芥、秦艽疏风。风邪陷下久者，防风、升麻提之，气弱者人参、黄芪补之。气不顺，木香、槟榔和之”。1990年，刘光基将古今治法归纳为消、托、补3大法则，在此基础上衍变为清热凉血、清热利湿、清热解毒、清热攻下、养阴润燥、滋阴清热、活血化瘀、补中益气、扶正补虚、温阳固涩10种治法。

外治法 有薰法、洗法、坐药、插药、枯痔等。

1. 薰法：有烟薰、气薰两种。宋代《三因方》：“薰法，谓皮方三指大坏，熏黄卷大研，熟艾鸡子大，右为末，用瓶器，以灰实一半，为烧薰法，安长桶内，坐其上薰之，烟从口出为佳，此为烟薰。元代《外科精义》：“薰痔散，威灵仙二两，右用水一斗半，煎至七八沸，去火，就盆上坐，令气熏之”。是为气薰。

2. 洗法，《三因方》用：“海桐皮、蛇床子各一两，香南藤、葱白各二两，右用水一斗，入药五两，煎减半，去滓，候温，着手轻轻洗，以绢拭干”。明代《外科正宗》有“洗痔枳壳汤，治痔疮肿痛，肛门下坠，毋论新久，洗之肿自消。枳壳二两，麻虾蟆炸（荔枝炸）二两，河水三瓢，用上二味，煎数滚，先熏后洗，良久汤留。再热熏之”。又“洗痔肿痛方，鱼腥炸、苦楝根、朴硝、马齿苋、瓦楞花各一两，水十碗，煎七八碗，先熏后洗，诸痔肿痛可消”。现今各家洗方颇多。1990年，刘光基将古今薰洗法归纳为四大法则：（1）疏通腠理，解毒消肿；（2）消毒杀菌，清洁伤口；（3）活血通络，行气止痛；（4）祛风燥湿，杀虫止痒。坐药法首见于汉代《伤寒论》蜜煎导方，这一古老剂型至今仍广泛应用。据刘光基氏收集国内外各种痔疮栓剂（塞药）达47种之多，大致分为非麻醉药品止痛栓、收敛止血药栓及抗感染药物栓剂3类。

3. 枯痔散疗法：宋代《魏氏家藏方》最早记述枯痔散（含生砒、白矾、朱砂三味）及其使用过程。1954年朱仁康、1955年李开太、1956年张树远等先后应用和报道，并在全国推广使用。所用枯痔散各家不同，1988年胡伯虎收集古今枯痔散方20余种，其中砒、矾为大多药方所必具，其次为雄黄、朱砂和轻粉。因枯痔散疗法有引起砒中毒、剧痛、继发感染、大出血等并发症，从而对枯痔散疗法提出改进。1956年李开太先用10%氯化钙溶液注射内痔，48h后，再涂枯痔散于注射的痔根部，经此改进，未发现砒中毒。1958年，陈济民改进枯痔散的药物组成，制成无砒枯痔散（花蕊石、明矾、胆矾、雄黄、雌黄、皮硝、鸡粪、麝香、梅片等）。经治病例，未发现疼痛、感染、中毒等不良现象。但无砒枯痔散渗透力弱，对大内痔不易达到痔中心部，干枯程度及疗效较差。

4. 枯痔钉疗法：是用枯痔散制成两头尖的药条，插入内痔的一种枯痔疗法。宋代《太平圣惠方》载：“以砒霜、黄蜡、搅成拌匀，捻成条子，治疗痔”。1954年左右，福建省人民医院、福建省中医研究所以及浙江医学院附属第二医院等有较深入的研究和改进，研制出各种无砒枯痔钉，避免砒中毒。1976年在福州市召开“全国枯痔钉疗法专题座谈会”，并制订了无砒枯痔钉的协定处方（黄柏、大黄各50g，白芨15g）称二黄枯痔钉。无砒枯痔钉所起的治疗作用主要是枯痔钉所引起的“异物刺激反应”，导致痔纤维化组织增生，收缩痔血管，使血栓形成，静脉闭塞，从而达到痔核萎缩痊愈的目的。枯痔钉又分密插、和稀插两种，密插可使枯痔坏死作用；稀插则产生痔硬化萎缩作用，医者可根据插药目的选用。

5. 痔注射疗法：1869年，英国Morgan用过硫酸铁溶液和1871年美国Mitchell氏用石炭酸和橄榄油（1、2）制剂注射治疗痔核以来，现已成为治疗的一种正规疗法。我国学者在中医枯痔疗法的基础上，发展具有中国特色的各种注射疗法。注射疗法所用的注射液对痔所起的治疗作用不同，可大致归纳为3类：（1）枯痔注射疗法。系用各种枯痔液（油）注射于内痔，使痔组织坏死（枯痔），然后坏死组织脱落，创面修复而愈。1955年，李开太等在改进枯痔疗法的基础上，用中药硼砂（药用氯化铵）150g，石灰

（精制氢氧化钙）100g，制成“新六号枯痔注射液”，注射内痔，取得与枯痔散或枯痔钉疗法的同样效果。1956~1977年，中国许多学者和单位相继发表各自的用于枯痔疗法的复方明矾注射液（油）治疗内痔的经验。据1986年贺执茂调查湖南省使用注射疗法的情况，治疗病人5000余例，所用枯痔坏死剂有12种之多。（2）硬化注射疗法。本法是在注射硬化剂后痔组织产生无菌性炎症，并逐渐纤维化增生，使痔血管发生栓塞萎缩，同时，使松弛的粘膜重新固定于直肠肌壁上，从而消除痔出血和脱出的症状。所用注射剂国内外部分学者多用5%酚甘油或酚植物油（杏仁油、橄榄油、花生油等）；5%奎宁一尿素溶液，5%鱼肝油酸钠，25%或50%葡萄糖液，75%~96%酒精液等也曾被应用。国内则应用以明矾为主的各种复方注射剂（明矾浓度较枯痔注射液为低）。1971年，山西伍全保研制出“母痔基底硬化注射疗法”，注射剂以明矾4g、黄连素0.05g、甘油26ml、普鲁卡因0.25g、苯甲醇2g，加蒸馏水至1000ml制成。其注射特点是通过肛缘皮肤进针，在外痔基底皮下向内痔核基底粘膜下层刺入，直达痔上端粘膜下痔动脉区，呈扇形注射药液1~2ml，旨在阻断痔血液的动脉来源，有利于痔血管萎缩。1980年，史兆岐发表“775”（即消痔灵）注射疗法。其制剂由明矾（硫酸钾铝）4g，五倍子（鞣酸）0.15g，配低分子右旋糖酐、枸橼酸钠、甘油等组成，用专门设计的“四步注射操作法”治疗各期内痔，主要是对二三期内痔有良效。主要注射特点是在粘膜内、粘膜下痔动脉区注射，使痔本体和齿线部洞状静脉区都受到药液的浸润，较全面地阻断痔血流，达到痔硬化萎缩的效果。1986年，贺执茂调查硬化注射法治疗的13792例患者，所用各种硬化剂有13种之多。以上多种药物治痔都能获得满意的疗效，但新的注射剂仍不断出现，目的在于探求疗效好，并发症少的理想注射剂。（3）以改善局部血循环为主的注射疗法（“603”消痔注射疗法）。1980年，朱秉宜、张仁福等根据中医认为痔系“血脉不行”，治宜“通利血脉”的研究构思，利用乌梅有治便血、脱肛之功，尚有“去痹利筋脉”之作用，故取其主要成分枸橼酸5g、普鲁卡因粉10g，水加至1000ml配制注射液，并用专门设计的“外肌注射法”和“粘膜下高低位注射法”治疗各期内痔、静脉曲张型混合痔、一二度肛裂获得成功，总有效率90%以上。经动物实验及临床病理检查证明，这种方法的治疗原理是通过抑制肠平滑肌、松弛括约肌痉挛、改善局部血循环等起作用，不同于硬化、枯痔（坏死）的注射疗法。

手术疗法 传统的痔结扎法或结扎切除法较常用。清代《医宗金鉴》：“凡遇痔疮瘰疬，顶大带小之证，用线一根，患大者用二根，双扣系患处，两头留线，日渐紧之，其患自然紫黑，冰冷不热，轻者七日，重者十五日后，必枯落”。西汉《五十二病方》：“牡痔，居旁旁，……絮以小绳，割以刀”。国外常用Milligan-Morgan（1937）手术，且有很多变法。以上手术适用于单个的或有分隔的多个内痔、混合痔。环状痔仍有人主张用软木塞法手术。1977年，陆琦创制带有发光装置的痔固定器代替软木塞，在术中止血效果良好。1968~1981年，丁泽民等用中西结合的分段齿形结扎法治疗痔，其结扎顶端不在一个平面上，以解决环状痔术后的肛门狭窄问题。同时，他们还还对痔结扎术肛管皮肤切除范围和肛管口径的变化进行了研究，结果发现，平均每切除1/12肛管皮肤，则肛管口径平均缩小 $0.13 \pm 0.04$ cm。对环状混合痔至少应分为3段，分段切除病变范围，在审慎设计下，可超过肛管全周的1/2，但不应超过3/5。在切除肛管皮肤范围相同而保留肛管皮桥数量越多，则对肛管口径影响越小。

新技术的应用 包括冷冻、激光、红外线、微波以及各种痔疮治疗机等。冷冻疗法于1969年为Fewis所首创。1976年陆琦等亦开始应用，由于设备装置及并发症等问题，未能广泛使用，但在国外仍作为一种可供选择的疗法。1986年，丁义山用冷冻技术与枯痔钉相结合的方法，创制成“冷针弹射法”，即将一种针（代枯痔钉）浸入液氮预先置冷，然后将针弹射入痔核内，造成针道冷冻坏死，其治疗范围及反应可相应得到控制，并达到痔纤维化萎缩之目的。激光治疗痔疮主要有3种方式，高功率的CO<sub>2</sub>激光器

或 Nd-YAG 激光器可切割痔疮代替手术刀;较低功率的激光辐射痔组织后,使之产生蛋白凝固变性,约 1 周后坏死组织脱落,创面修复;或使痔组织产生纤维化萎缩而愈。另有低功率的 He-Ne 激光器,利用其热效应对组织所产生的某些生物效应,改善局部血循环,达到消炎止痛、活血消肿的治疗效果;故多用于炎性外痔、血栓性外痔(急性期)、术后肛缘水肿等。痔疮治疗机,种类颇多,用途各异,可根据治疗目的加以选择。近有一种 Ultroid™ 痔疮治疗机(美国制造,同类产品国内现已有厂家生产)备受青睐,并于 1989 年 9 月在杭州召开 Ultroid™ 痔疮治疗机推广应用交流会。该机是通过一定微弱电流(最大 12~16mA)作用于内痔粘膜组织,使细胞电解、组织变性、轻度坏死、致粘膜下血管栓塞,最后痔萎缩纤维化修复而愈。

由于痔病因至今尚未完全清楚,因而对肛门的直肠的病理生理方面研究尚较局限,故以上诸多治疗方法大多将注意力集中于痔组织形体的摧毁,而合理有效的病因学方面的防治方法尚需进一步探求。1985 年,刘爱华关于痔的病因提出“肛门括约肌功能下降说”,1990 年,丁义山提出“痔静脉曲张功能下降”理论,对探求治疗痔的新方法或许有一定启发作用。

#### 参考文献

- 1 张庆荣. 肛门直肠结肠外科,北京:人民卫生出版社,1980
- 2 姚德荣. 摘. 国外医学(外科分册),1981,(1):252
- 3 史兆岐,等. 中国大肠肛门病学. 郑州:河南科技出版社,1985
- 4 胡伯虎. 实用痔病学. 北京:北京科技出版社,1988
- 5 刘爱华. 江苏省中医学学会肛肠学术交流会议资料,1988
- 6 李雨农. 中华肛肠病学. 重庆:重庆科技出版社,1990
- 7 刘克基. 肛肠病药物治疗法荟萃. 沈阳:辽宁科技出版社,1990
- 8 丁义山. 中国肛肠病杂志,1990,10(3):3
- 9 张仁福. 江苏中医,1991,12(6):32

(江苏省中医药研究所张仁福撰)

### 中医治疗肛瘻 the treatment of TCM in ard fistula

肛瘻是一种常见病、多发病,约占外科疾病的 3%~5%,占肛门病的 25%,发病率次于痔疮。可发生于任何年龄;以 30~40 岁的中年人为最多见。婴儿肛瘻主要见于男性,男女之比为 5:1。

中医药治疗肛瘻早在《五十二病方》中便有记述:“杀狗,取其脾,以穿箭,入肛中,吹之,引出,徐以刀割去其巢,治黄芩而屢傅之”,即把狗的膀胱套在竹管上,插入肛门吹胀,将直肠下端患部引出,然后以手术切除肛瘻,并用黄芩煎液敷治。挂线治疗肛瘻,始见于明代徐春甫《古今医统》:“用芫花煮线,挂破大肠,七十日获全功,……不拘数疮,上用草探一孔,引线至肠外,坠铅锤取速效,药线日下,肠肌随生,瓣处既补,水逐线流,疮口鹅管全消,七日内肤全如旧,……线既过肛,如锤脱落,以药生肌,百治百效”。清代除沿袭历代方法治疗痔瘻外,还发明了探肛筒、过肛针、弯刀等器械,对痔瘻的诊治有较大的推进作用。

治疗肛瘻以手术为主,其原则是:(1)准确找到和处理肛瘻内口,防止造成假道和人为内口;(2)高位肛瘻要妥善处理肛管直肠环之肌群,防止损伤肛门功能;(3)切开或行挂线术后,须保持疮面引流通畅,防止假性愈合。国内外治疗肛瘻的难点集中在高位复杂性肛瘻,由于对肛管直肠肌群处理的难度较大,且存在一定的并发症和复发率,所以至今尚未找到一种较理想的治疗方法,而瞩目于中医的挂线疗法。国内广泛采用的是低位切开、高位挂线的术式。这是 1956 年以来周济民、顾伯华等在继承中医传统的挂线术基础上吸取现代医学对肛瘻病因学和解剖学研究成果提出的,通过近 40 年国内广大医家的大量临床实践和研究,证明此种疗法的优点是,手术方法比较简单,疗效显著,治愈率高,复发率低,无肛门失禁等后遗症。周济民用此法治疗 94 例,1 次手术治愈 82 例,因病变复杂需分期手术的经两次以上手术治愈 12 例,随访病例均无明显后遗症。曹吉勋等治疗 194 例,1 次手术治愈 188 例,两次手术治愈 6 例。对高位复杂性肛瘻实行挂线治疗不致影响肛门的排便功能,周济民、林之夏、邓正明等对此进

行了有益的研究和探讨,他们认为挂线的异物刺激作用可引起括约肌断端周围轻度炎性反应,由于炎性纤维增生,可发生粘连固定作用。“挂线”慢性勒割造成的裂口修复,是在耻骨直肌肌、内外括约肌基本保持功能的情况下进行的,因此术后不会引起大便失禁。他们还指出,由于挂线所使用的橡皮环能保持“力”的均衡,被勒割组织的上缘曲率大于下缘,外侧的曲率大于内侧,致使橡皮环从偏向下缘和内侧的引流口附近排出,不致包埋于组织中。此外,在慢性勒割过程中,“异物炎症”作用与橡皮环紧箍力作用相辅相成,两者协同,促进组织坏死。由于机体组织的排他性和橡皮环的引流作用,使疮面坏死液及时排出,为瘻道底部组织的增生创造必要的条件。近年来有些医家采用切除缝合术,认为可缩短疗程、减少疤痕。刘生等对 372 例肛瘻手术进行分析比较,认为切除缝合术适于低位单纯瘻,治愈时间仅 9d。李尚忠等治疗 168 例,一期缝合治愈 164 例,延期治愈 4 例,亦认为此法仅适于低位肛瘻。刘占春等以弧形切开缝合术治疗高位肛瘻 252 例,一期治愈 236 例(93.6%),二期愈合 11 例,2 次手术治愈 5 例。金相国用保留肛门括约肌的高位肛瘻切除缝合术治疗 25 例,23 例术后一期愈合,两例术后并发感染而延期愈合,由于切除缝合术比较适宜于低位肛瘻,高位肛瘻二期愈合的病例占有一定数量,且个别病例出现厌氧菌感染等并发症,因此影响此种手术的推广应用。国外开展保存括约肌的手术疗法有所进展,日本医家高野正博、宇井来等对此术式进行了研究,国内医家亦有类似报道,由于手术较为复杂,而且亦有失败的病例,所以尚未被国内广泛接受。华钟采用切开内口、外端拖线疗法,可以减少复杂肛瘻由于多处切开形成的疤痕变形,治疗 105 例,均获治愈,平均治愈时间为 22d。

肛瘻的发病原因,绝大多数是肛管直肠周围脓肿的后遗症。治疗肛周脓肿的传统方法是先切开排脓,待急性炎症控制约 2~3 个月后再行手术治疗肛瘻。近年来,不少学者认为此法疗程较长,又容易加重肛隐窝感染而形成新的脓腔、支管,使肛瘻复杂化,故主张早期行一次性根治手术治疗。其方法是:在腰俞穴麻醉(低位骶麻)下,于脓肿波动明显处作放射切口排脓,并以银质软探针自切口探入,找到感染肛管内口,行切开术或挂线术。1982 年廖荫元用此法治疗 70 例,治愈 69 例,平均疗程 22.8d,随访 1 年,未见复发。张有生等治疗 290 例,一次手术治愈 285 例,再次手术治愈 5 例。王文科治疗 401 例,一次手术(含切开术、挂线术、开窗术)治愈率 96.8%。司水令等治疗 230 例,一次切开挂线治愈 228 例。也有学者认为,在急性肛周炎炎症期作较复杂的手术,有一定的局限性,容易损伤过多的肛周组织,对于高位感染灶容易形成假道。

对婴儿肛瘻既往多采取非手术的保守疗法,20 世纪 70 年代起,不少医家主张以积极的治疗方法对待婴儿肛瘻,即在肛周脓肿期采用一次性根治术,或切开排脓后 7~10d,待肛周红肿消退,炎症基本控制时,进行肛瘻切开术或挂线术。唐汉钧治疗婴儿肛瘻 104 例,全部治愈,患儿平均年龄为 5.1 个月,累计患有肛瘻 142 次,行切开手术 102 次,平均治愈时间为 17.2d;切开挂线手术 40 次,平均治愈时间 19.5d,随访 3~6 月,无一例复发,疤痕小,愈合良好,肛门排便功能正常。杜克义报告 48 例,全部治愈,认为手术治疗婴儿肛瘻,有疼痛轻、出血少、无尿滞留、无感染等优点。免疫学研究成果表明,婴儿期免疫功能低下,肛周容易发生感染,形成单发肛瘻或多发肛瘻,早期采用积极的疗法是可取的。

中医药治疗肛瘻取得的成绩令人瞩目,其中高位复杂性肛瘻的切开加挂线术疗法达到国际先进水平,解决了高位肛瘻临床治疗的难点。

#### 参考文献

- 1 张金哲. 中华外科杂志,1979,3:203
- 2 林之夏,等. 上海中医药杂志,1980,5:30
- 3 周济民,等. 中医杂志,1983,24(3):23
- 4 邓正明. 中国肛肠病杂志,1984,4(3):11

- 5 华钟, 辽宁中医杂志, 1986, 10(12): 28  
 6 李尚忠, 等. 中国肛肠病杂志, 1986, 6(4): 22  
 7 孙福庆, 等. 中国肛肠病杂志, 1987, 1: 35  
 8 王文科. 中国肛肠病杂志, 1989, 9(1): 15  
 9 唐汉钧, 等. 上海中医药杂志, 1991, 5: 44  
 10 金亮, 等. 中国肛肠病杂志, 1991, 11(3): 7

(上海中医院龙华医院博士生导师唐汉钧教授撰)

### 中医治疗放环后月经失调研究进展 宫内节育器

(IUD)是各类避孕措施中较安全、简便、有效、价廉和不影响性生活的避孕方法,是中国目前使用最广泛的避孕方法之一,占全部避孕措施的50%以上。由于IUD所引起的月经失调(包括月经过多、周期短和经期长等),在一定程度上限制了它的进一步推广和使用,因此研究IUD引起月经失调的机理和治疗方法是目前计划生育中的重大研究课题。

20世纪30年代,IUD由德国传入中国,直到70年代以后才大量推广使用。中医历代文献中确无类似IUD避孕工具的记载,由IUD引起月经失调的病因和防治资料更无处查考。近代医务人员根据IUD引起月经失调的临床症状和阴道出血情况,分别参考“崩漏”、“月经过多”和“月经淋漓不净”等病证进行研究和治疗。在病名方面,临床常冠以“环崩”、“环漏”或“环血”,以示区别于其他原因引起的月经失调。1990年,戴德英已将“放环后月经失调”作为一种妇科疾病收载于《中医妇科临床手册》(第2版)之内,启示该病已引起妇科临床医生的重视,并展开研究。

引起放环后月经失调的病因比较复杂。从1985年以后的报道资料来看,引起放环后出血的因素有以下几个:(1)放环前有贫血史、脏器功能损伤、妇科手术史或患子宫疤痕、息肉、子宫肌瘤的患者,放环后可引起月经失调。(2)IUD与子宫腔不相容,放环后往往出现环位下移或偏斜,导致月经失调。(3)IUD可影响子宫内膜,即由于IUD对子宫内膜的机械性压迫,使环所在的子宫内膜出现局部的水肿、充血、瘀血等情况而引起月经失调。(4)1985年白景文通过电镜观察子宫内膜,提示IUD引起子宫内膜出血的机制是一种慢性的消耗性的局部弥漫血管内凝血(局部DIC),导致了宫不规则出血。(5)近年来人们又提出IUD引起子宫出血机制可能与纤溶酶原激活活性增加有关。(6)1992年张金玉等认为,IUD引起月经过多与子宫内膜合成前列腺素增加有关,其途径有IUD作为异物刺激损伤内膜,增加前列腺素合成;或IUD引起内膜炎性反应,单核吞噬细胞释放前列腺素,同时单核吞噬细胞变性后释放溶酶体酶的磷脂酶A<sub>2</sub>,能促进前列腺素合成;或PGI<sub>2</sub>/TXA<sub>2</sub>比值增高。

中医参考现代医学研究资料,根据本病的临床表现进行观察和研究,较多学者认为“瘀”是本病的基本病因病机。1987年,金守强比较全面地叙述本病的病因,认为IUD放置在子宫腔内,可视为金刃异物损伤压迫子宫络脉,使子宫局部气血运行失调,久之气血瘀滞,不循常道,行于脉外而为离经之血,血不归经,导致月经失调。又因各人体质不同,临床有血热、气滞、宫寒等不同证型,涉及的脏腑主要是肝、脾、肾和女子胞。其后,1988年石则枪补充另一病因,认为术时消毒不严,导致湿邪毒侵犯胞宫而发病。1989年,刘正求认为对放置IUD有顾虑的妇女,在手术后容易产生忧郁恐惧或烦躁不安等情绪,导致肝气郁结、气血失于疏泄,促使气滞血瘀,血溢脉外而致月经失调。1991年,洪雁认为IUD置于子宫可致血瘀,引起月经失调,更主要的是长期出血,气血亏损,脏腑功能失常,引起一系列虚损症状,终致“虚”与“瘀”夹杂,给治疗带来一定的困难。

治疗放环后月经失调,在20世纪80年代以辨证论治为主,到90年代有人提出辨病和辨证结合的治疗方法。根据病因治疗、按中医药周期治疗已报道的资料中有关分型论治和辨证论治方法如下表所列:

表1 放环后月经失调的分型和辨证论治

|      | 类型   | 治法    | 主方        |           |
|------|------|-------|-----------|-----------|
| 分型论治 | 实证型  | 血热型   | 清热凉血,止血调经 | 清经散合四妙散   |
|      |      | 肝郁化火型 | 疏肝清热,凉血止血 | 丹栀逍遥散     |
|      |      | 气滞血瘀型 | 理气活血,化瘀止血 | 金铃子散合失笑散  |
|      |      | 宫寒挟瘀型 | 温经散寒,化瘀止血 | 温经汤       |
|      |      | 邪热蕴结型 | 清热解毒,行气活血 | 银翘红黄解毒汤   |
|      | 虚证型  | 阴虚内热型 | 养阴清热,凉血止血 | 两地汤       |
|      |      | 气阴两虚型 | 益气养阴,调经止血 | 生脉散合二至丸   |
|      |      | 气虚寒凝型 | 扶阳祛寒,补气活血 | 补中益气汤     |
|      |      | 脾肾两虚型 | 健脾益肾,固经止血 | 归肾丸       |
|      |      | 肝肾两亏型 | 滋肾养肝,调经止血 | 左归丸合二至丸   |
| 辨证论治 | 月经过多 | 气虚血热  | 益气凉血,止血调经 | 两地汤合生脉饮   |
|      |      | 气虚挟瘀  | 益气化瘀,止血调经 | 补中益气汤合失笑散 |
|      | 经期延长 | 气滞血瘀  | 理气活血,化瘀止血 | 八物汤合失笑散   |
|      |      | 阴虚内热  | 滋阴清热,安冲止血 | 安神汤       |
|      |      | 寒凝气滞  | 温经散寒,行气调经 | 乌药散合失笑散   |

辨病论治也就是在专病专方的基础上进行随症加减,已报道的有几十首专方。如1982年李志峰报道用加味生化汤(生化汤加益母草)随症加减治疗50例,有效率达96%。1987年吴丕中报导三地汤(生地、生地榆、地骨皮、黄芪、白芍、黄柏、黄芩、炒栀子、川断、杜仲)随症加减治疗30例,有效率为93%。1990年李丹报道用环漏汤(茵陈、荆芥穗、炒黄芩、制苍术、滑石、益母草、茜草、当归、地骨皮、地榆炭、川楝子)随症加减治疗52例,总有效率为94%。1990年崔文秀用仙鹤草牡蛎汤(仙鹤草、茜草、炒白芍、生地炭、牡蛎、山药、海螵蛸、远志、香附、甘草、升麻),1991年张民夷用安冲汤(炒白术、生芪、生龙骨、生牡蛎、大生地、茜草、生杭芍、海螵蛸、川断),及李惠群用固冲安宫汤(山萸、熟地、煅龙骨、煅牡蛎、黄芪、益母草、全当归、白芍、海螵蛸、茜草根、川断、阿胶、荆芥炭)随症加减治疗放环后月经失调的总有效率都达100%。提示中医对本病的防治已有进一步的认识,并已探索到治疗本病较有效的方药。

近代中医还有人提出根据病因治疗的方法,即从因论治。比较集中的有:(1)从瘀论治。认为本病的基本病因是“瘀”,由于IUD在子宫腔内机械性地刺激子宫内膜,促使环周内膜脱落加快,经血排出增多,另外此环又压迫损伤新生的子宫络脉,以致血流于脉外,成为离经之血,所以应采用化瘀止血的治法,常选用参三七、花蕊石、蒲黄、益母草等。(2)从肝论治。根据“妇女之生,有余于气,不足于血”和“女子以肝为先天”的理论,认为本病初期以肝郁失疏为主,治疗不可轻忽疏肝、平肝、养肝、镇肝等法,方药常用逍遥散、柴胡疏肝散、左金丸等。(3)从邪热论治。认为放置IUD的时间一般选择在经净后3~7d。人工流产手术同时,中期妊娠引产后或足月产后3个月等时间放IUD,因有人流手术出血、月经失血、产时失血以及哺乳等因素,使产妇有不同程度精血耗伤,胞宫虚弱,同时手术操作损伤胞宫或胞络,手术消毒不严,容易招致病邪入侵并留滞于胞中,郁久化热,冲任受损,出现月经失调并伴腹痛、低热等,故主张采用清热凉血、活血调经之法,可选五味消毒饮或大黄调经汤(地黄炭、生地、熟地、制香附、云苓、巴戟、炒地榆、当归、柴胡、蒲黄、炒阿胶(研吞)、元大、焦黄柏、炙芪、三七粉)治疗。

随着人们对月经生理周期性调节的深入认识和中医周期疗法的运用,有人也主张在治疗放环后月经失调时采用周期疗法。1988年,王恒等报道按月经周期的不同时期采用不同的治法,如在月经期用活血祛瘀调经法,以加速子宫内膜脱落,卵泡期用补气生血、调理冲任法,以促进卵泡生长。在排卵期用活血通络,促排卵法,促使卵泡排出;在黄体期用调补脏腑冲任法,促使黄体良好发育。1988年,吴喜荣观察到有些妇女的子宫与IUD不相容,子宫因环的刺激引起强烈收缩,促使环位异常而引起月经失调,主张对这类妇女可用安胎药治疗,稳定IUD在宫腔内的正常位置,并消除子宫对环的排异作用,因此安胎良方寿胎丸被用于治疗放环后月经失调而获较好效果。

## 参考文献

- 1 郭泉清. 生殖与避孕, 1981, 1: 3
- 2 李志峰. 浙江中医药杂志, 1982, 1: 32
- 3 白景文, 等. 计划生育六五科技攻关成果论文摘要汇编, 1985, 28
- 4 金守强. 新中医, 1987, 9: 15
- 5 石则艳. 陕西中医学院学报, 1988, 1: 33
- 6 洪雁. 浙江中医学院学报, 1991, 15(5): 20
- 7 刘正求. 中医杂志, 1991, 32(8): 30
- 8 张金玉, 等. 中华妇产科杂志, 1992, 27(3): 167

(上海曙光医院戴德英教授撰)

### 中西医结合治疗子宫肌瘤

子宫肌瘤系女性生殖器官中最常见的良性肿瘤, 多发生于 30~50 岁的中年妇女, 据尸解统计 35 岁以上的妇女约 20% 患此病。若防治不当, 可致大出血、感染、扭转等严重并发症, 其中 0.5% 可发生恶变。子宫肌瘤主要由于子宫平滑肌增生而形成的一种性激素依赖性的肿瘤, 根据其临床以月经过多、经期延长、带下多、腹内有肿块为主要表现之特点, 属于中医学“崩漏”、“带下”、“癥瘕”等范畴。

对于子宫肌瘤的研究, 最早可追溯到春秋战国时期, 如《灵枢·水胀》云: “石瘕(相当于子宫肌瘤)生于胞中, 寒气客于子门, 子门闭塞, 气不得通, 恶血当泻不泻, 衄以留止, 日以益大, 状如怀子, 月事不以时下, 皆生于女子, 可导而下”。所述石瘕的成因、生长的部位、主要症状及治疗原则等, 给人以启迪。东汉·张仲景《金匮要略》指出, 治疗本病“当下其瘀, 桂枝茯苓丸主之”。该方一直沿用至今。明代张介宾认为“瘀血留滞作癥, 惟妇人有之, 其证或由经期, 或由产后, 凡内伤生冷, 或外受风寒, 或恚怒伤肝, 气逆而血留, 或忧思伤脾, 气虚而血滞, 或积劳积弱, 气弱而不行, 总由血动之时余血未净, 而一有所逆, 则留滞日积而渐以成癥矣。然血必由气, 气行则血行, 故凡欲活血, 则或攻或补, 皆当以调气为先”, 指出治疗本病有攻和补两种法则。

70 年代以前, 西医多数认为子宫肌瘤的发生可能与雌激素的刺激有关, 因此治疗一般采用雌激素的拮抗剂—甲睾或丙睾保守治疗, 或手术切除。随着研究的逐渐深入, 认为子宫肌瘤的发生与雌激素增多有关外, 又先后提出自然杀伤细胞活性偏低(1988 年)、神经系统长期过度紧张及雌激素受体、孕激素受体高(1992 年)等学说。对于本病的组织发生, 到 1987 年为止, 已集中到 3 点: (1) 来源于肌层内未成熟的平滑肌细胞的增生; (2) 来源于子宫肌层内血管壁平滑肌细胞; (3) 来源于子宫肌层内平滑肌成分的单个肿瘤母细胞。关于治疗方法, 特别是非手术疗法, 无论中医或西医都总结出不少新药新方, 给药途径, 除口服外, 还采用灌肠、外敷、鼻喷、阴道给药、皮下植入及针刺等办法, 有的还进行了对照研究, 探讨作用机理。近几年, 由于证实肌瘤为性激素依赖性肿瘤后, 治疗观念发生了改变, 严格掌握手术指征, 结束了以往“一刀切”的方法, 不仅有些可免于手术, 还使原来不能进行保守治疗者变为可能, 取得可喜的成绩。

1979 年, 国内报道用醋酸棉酚治疗肌瘤 16 例, 有效率 93.7%, 肌瘤缩小 62.5%。1984 年, 又有报道用该药共治 46 例, 分两组观察 4 个月, 药量减少一半组与原量组疗效相似, 而减量组副作用轻, 停药后卵巢功能恢复快。该药作用于卵巢, 对内膜有特异萎缩作用, 对肌细胞产生退化作用, 造成假绝经及子宫萎缩, 使子宫内组织 E<sub>2</sub> 及 P 下降, 受体含量亦下降而发挥药效。1980 年报道用维生素(A、B<sub>1</sub>、E、C)综合治疗肌瘤 76 例, 随访两年, 有效率达 80% 以上。1988 年有人用此组药又治 67 例, 平均每例治 5.55 周期, 治愈 71.6%, 显效 26.8%, 1 例无效。此法适用于小型肌瘤, 且无副作用。通过降低子宫肌层对雌激素的敏感性, 对神经内分泌系统有调节作用, 使垂体激素代谢正常化, 促使肌瘤缩小。1987 年发现 R<sub>2323</sub>(具有抗雌激素与抗孕激素作用)这一很有希望的药物, 经用 5mg 隔日 1 次口服, 两个月后改 5mg, 每周两次, 14 个月复诊, 1 例 15cm 直径大的肌瘤结节已

缩小。1989 年有人用它治疗 100 例肌瘤, 分 3 组: A 组 41 例, 口服 2.5mg, 每周 3 次; B 组 31 例, 口服 5mg, 每周两次; C 组 28 例, 阴道给药 5mg, 每周 3 次。结果 C 组比前两组子宫肌瘤明显缩小, 副作用亦轻。其机制是通过抑制 FSH、LH 使体内 E 下降而使子宫肌层缩小。1992 年, 黄薇用 LHRH 增效剂治疗肌瘤, 无论注射、皮下植入或鼻喷均可产生显效, 肌瘤平均缩小 40%~80%。其中微囊肌肉植入法, 每月 1 次, 可保证每天释放 100~200μg, 应用方便, 疗效相似; 而经鼻吸入者仅 1%~5% 被吸收, 不如其他途径给药好。此药导致垂体“脱敏”和垂体受体的下降调节, 从而抑制促性腺激素和性激素的分泌, 产生一个短暂、安全、可逆的低促性腺激素、低性腺激素症而发挥作用, 一般开始 3 个月内肌瘤缩小明显, 继用肌瘤稳定不再缩小, 仅可作为辅助疗法。

中医方面, 1986 年王丽用针刺治疗本病 346 例, 肌瘤最小者如鸡卵大, 最大者近儿头, 结果 100% 有效。取穴子宫(双或单侧), 针刺 25~33mm; 曲骨、横骨, 直刺 20~25mm。针前排空小便。或配耳穴皮质腺穴, 或配腰部与下肢穴, 平补平泻法, 留针 5~20min。隔日 1 次, 10 次为一疗程。针刺 1~4 个疗程, 痊愈 288 例, 治愈率为 82.2%, 显效 39 例, 有效 19 例。

1987 年, 陈小峰以桔荔散结丸治肌瘤 30 例, 共 3 个月, 有效率为 86.6%, 随机复查 10 例, 在症状改善的同时, 自然杀伤细胞活性比治疗前升高(P<0.01)。1988 年, 张玉芬等用生化汤为主治疗, 子宫大、质硬者加三棱、莪术; 经量多、先期者加生地炭、丹皮; 气虚者加党参、黄芪; 腰困者加续断、桑寄生。治疗子宫在 9×7×6cm<sup>3</sup> 大小以下, 年轻未婚未育者, 或不宜手术, 或激素治疗无效者 110 例, 治愈 38 例, 显效 32 例, 有效 25 例, 总有效率为 86.4%。实验证明, 本方药可抗 E 过多引起的子宫变化, 使肌层的单纯性肥大渐趋消失, 有利于症状的改善及组织学上的好转, 也可加强子宫收缩, 加速子宫平滑肌的代谢, 改善营养状况, 使硬化的结缔组织变软。1991 年, 张杰等以中药灌肠为主治疗肌瘤 54 例, 用桃仁、川芎、三棱、莪术、穿山甲、木通、路路通、陈皮、昆布、牡蛎各 15g, 蜚虫 12g, 煎至 100ml, 灌肠保留两小时, 每日 1 次, 30d 为一疗程, 经多时停药。平均灌肠 78 次, 妇科及 B 超提示肌瘤消失 30 例, 缩小一半以上者 10 例, 有所缩小者 6 例, 无效者 8 例。1991 年, 张书林等用中药内服外敷法治疗肌瘤 81 例, 经 3 个疗程后痊愈 69 例, 好转 7 例, 总有效率 93.8%。内服: 天花粉 100g, 香附、赤芍、生芪、防风各 20g, 仙鹤草、生地榆、全瓜蒌、昆布各 30g, 当归、海藻、山甲、桔叶各 10g, 每日 1 次。粘膜下肌瘤加天冬、瓦楞子; 浆膜下肌瘤加血竭、鳖甲。外敷: 山甲 20g, 归尾、白芷、赤芍各 10g, 小茴、生艾叶各 30g, 为粗末, 入袋敷小腹, 上置暖水袋, 每晚 30min, 30 天一疗程。至于出血多时, 可对症处理, 尤其以用抗纤溶药物较好, 或辨证用中药塞流。

本课题主要难题在于西药多数副作用大, 如引起潮热、汗出、体重增加、痤疮, 甚至 GPT 升高或肾性排钾等; 有的药物又太贵(如丹那唑), 疗程长, 且复发率高(国内报道为 15%~30%, 国外为 20%)。中药在消除体征方面还有一定难度, 另外对其病因尚无足够资料作出结论, 特别是对于子宫肌瘤的组织发生尚存在不同的意见, 迄今为止, 病机尚不清楚, 有待于进一步研究。近 10~20 年本课题研究的热点在于致力寻求高效、低副作用、抗复发的有效药物及最佳给药途径, 并在病因方面继续探索。

## 参考文献

- 1 张介宾, 景岳全书·妇人规. 上海: 上海科技出版社, 1959. 39: 688
- 2 灵枢·水胀第五十七. 北京: 人民卫生出版社, 1963. 106
- 3 王丽. 中国针灸, 1986, 1: 77
- 4 张玉芬, 等. 山西中医, 1988, 1: 23
- 5 陈小峰. 中成药, 1988, 11: 21
- 6 黄薇. 实用妇产科杂志, 1992, 8(2): 75
- 7 张书桂, 等. 江苏中医, 1991, 12(5): 20
- 8 张杰, 等. 中医杂志, 1991, 32(10): 44

(中国中医研究院西苑医院王清华研究员撰;刘熙政审)

**中医药治疗子宫内膜异位症** 子宫内膜异位症(简称内异症),是指有活动功能的子宫内膜生长在子宫腔以外任何部位所引起的疾病。国内对本病的深入认识是在20世纪80年代以后,随着腹腔镜技术的普遍应用,本病的确诊率越来越高,现已成为妇科临床的常见病、多发病,发病年龄最幼6岁,最长71岁,以30~45岁为多见。

本症病因尚无定论,一般公认的有子宫内膜种植学说、体腔上皮化生学说和淋巴静脉播散学说。国内近代研究资料表明:(1)本症患者有不同程度的免疫功能异常,还在不孕患者中发现血清抗子宫内膜抗体水平高于正常妇女。(2)天津观察患者的子宫内膜超微结构发现有线粒体脊断裂扩张,抗染色体质趋变等变化。(3)天津还测检内异症病灶及内膜的ER含量明显低于子宫内膜,提示异位病灶中的内膜发育迟于子宫内。 (4)异位组织内的前列腺素含量增高是发生痛经的基本病因。

近代西医疗法采用Danazol等类药物作假绝经疗法,明显优于1980年以前的大量应用孕激素的假孕疗法,但是Danazol价格昂贵,副作用大,不利于推广。其他药物如三苯氧胺、LHRH-A、R<sub>2323</sub>等均有一定副作用而不宜长期使用。国外推行手术疗法,但保守性手术复发率高,根治性手术又不易为年轻妇女及要求生育的妇女接受。故中医中药或中西医结合疗法应是较佳的治疗方法。

中医研究本症起步较晚,最早描述中西医结合治疗内异症的是上海妇产科医院中西医结合小组于1975年所发表的研究文章。自1980年以后逐渐增多,1980~1984年共有11篇研究文章,1985~1989年共有21篇,1990~1992年8月共有14篇,共47篇。除这些文章除介绍临床经验之外,还有中药药理、实验室实验、动物实验和超微结构等研究成果。

中医古代文献无子宫内异位症的病名记载,但在“痛经”、“癥瘕”等病证中有类似论述。如《证治准绳》谓:“瘀血成块,坚而不移,名曰血瘕”。又说:“血瘕之聚,腰痛不可俯仰……,小腹里急苦痛,背脊痛,深达腰腹下穿”,并指出“此病令人无子”。所述与内异症的临床症状和体征极为相近。

中医对本病的病因病机认识是通过临床观察和实验室研究逐渐积累深化的。1975年,上海妇产科医院中西医结合小组认为是“气血受阻、气滞血瘀”。1982年,该院曹玲指出:本症若兼腹痛发热者为热郁瘀血,下腹冷痛者为寒凝血瘀。1986年,周映华提出血瘀兼肝肾阴虚或气血不调的看法。1985年、1988年,周映华、戴德英认为内异症伴不孕者,其病因病机应是肾虚血瘀。1992年,夏桂成指出本症血瘕之形成与阳气功能不足关系密切。综合各家观点:一是认为本症以“瘀”为主。由于在月经期前后、月经期或产后的特殊生理情况下易受七情六淫的影响,加上机体脏腑功能失调等各种因素的作用,使瘀血不能及时排出或消散而积聚于胞脉,导致痛经或血瘕。若瘀血阻滞冲任,可影响摄精成孕而致月经失调和不孕。二是认为本症以肾虚为主。因为肾在女性生理病理中占主导地位,内异症伴不孕患者,肾虚是本,血瘀是病理产物,但这种瘀血又可刺激疾病的发展。随着认识的深入,在治法上有辨证治疗、专病专方治疗、周期治疗及中西医结合治疗等;给药途径由口服发展到灌肠、静脉滴注、局部病灶注射等。

**辨证治疗:**此为最早的也是最广泛使用的方法。1975年,上海妇产科医院中西医结合小组将本症分为“气滞血瘀型”和“气虚血瘀型”两型,采用活血化瘀和益气化瘀的治法,个别病例加用性激素,共42例,有效率为78%。1980年,该院邵公权报道156例,除用上述方法外,部分患者加用静脉滴注丹参注射液,使有效率提高到82.05%。1985年,田碧映治疗本症伴不孕者以肾虚血瘀为主,采用补肾益气、活血化瘀法,药用巴戟、淫羊藿、川断、菟丝子、党参、黄芪、赤芍、香附、没药、蒲黄等,共42例,痊愈5例,显效23例,有效11例,有效率为92.9%。1986年,周映华报道

分三型,气血不调兼血瘀者,采用调补气血、活血化瘀法,药用黄芪、党参、白术、木香、香附、当归、赤芍、川芎、官桂、丹参、蒲黄、三棱等;肝肾阴虚兼血瘀者,采用补养肝肾、活血化瘀法,药用杞子、菟丝子、覆盆子、车前子、五味子、当归、赤芍、川芎、刘寄奴、血竭、乳香等;痰湿兼血瘀者,采用燥湿化痰、活血化瘀法,药用二陈汤加皂角刺、昆布、海藻、桂枝、苍术、丹参等。

**专方治疗:**在辨病与辨证结合的基础上制定治疗专方,并随症加减。1982年,许润三采用克痛汤(党参、赤芍、川芎、三七粉),经期加琥珀粉,经后加黄精,平时加莪术、三棱,治疗共11例,痊愈4例,显效6例,好转1例。同年蔡小苏以活血化瘀为前提,凡痛经者以痛经方(当归、丹参、牛膝、赤芍、香附、延胡、川芎、桂枝、血竭、没药、失笑散)加减;月经过多者以血崩方(炒当归、牛膝、香附、熟军炭、赤芍、生蒲、丹参、花蕊石、震灵丹、血竭)加减,治疗43例,总有效率为88.4%。1988年,徐志华自拟痛经散(当归、白芍、丹皮、红花、香附、郁金、川楝子、莪术、乌药、元胡、川芎)随症加减治疗30例,有效率为90%。1988年,吴兆洪用活血化瘀方(三棱、莪术、生蒲黄、五灵脂、桃仁),属肌膜瘤者加地鳖虫、天花粉,另用七厘散保留灌肠,治疗116例,止痛有效率为91%,妊娠率为35%。1990年,林君玉用失笑归竭汤(炒蒲黄、五灵脂、血竭、田七粉、当归),经量多者加阿胶、京墨,经量少者加益母草、青皮;发热者加银花、丹皮;体虚者加党参、白术、巴戟,共治30例,有效率为93%。1991年,郑坚梅等用补肾法方(仙灵脾、仙茅、熟地、山药、鸡血藤、丹参、香附、莪术、三棱等)随症加减治疗74例,有效率为96%。1992年,瞿结宗等以温化饮(紫丹参、山药、当归、元胡、续断、川芎、桃仁、红花、制附片、乌药、吴茱萸、小茴香)随症加减,配合王不留行敷贴耳穴(子宫、卵巢及交感等穴)进行治疗,有效率为94%。1992年王曼等报道,以活血化瘀药为主组成的妇康冲剂治疗100例,其中单纯中药组伴痛经的54例,有效率为96.30%;35例伴不孕者,治疗后12例妊娠,妊娠率为33%。

**周期治疗:**按月经周期不同时期进行辨证治疗,是中医妇科治法的一个新创举。刘德傅等将本症分为3期:经前期以祛瘀为主,药用生蒲黄、五灵脂、丹参、川牛膝、制没药、乳香、三棱、莪术、炒川芎、刘寄奴、三七片,服5~7剂;月经期以活血化瘀、理气止痛止血为主,药用蒲黄炭、炒五灵脂、炒黄柏、花蕊石、香附炭、炒乌药、川芎、大黄炭、炙黄芪、肉桂,服3~7剂;月经后期以活血化瘀、软坚温肾为主,用桃仁、桂枝、赤芍、丹皮、昆布、莪术、三棱、王不留行、逍遥丸、炙地鳖虫、茯苓、锁阳、仙灵脾,服5~7剂;共治60例,有效率为78.8%。1990年,金季玲等分二期治疗,非经期用三棱、莪术、川楝、桂枝、赤芍、茯苓、桃仁、丹皮、元胡、丹参、皂角刺、夏枯草;经期用茜草、五灵脂、蒲黄炭、川楝子、白芷、没药、刘寄奴、元胡、细辛、三七粉,治疗45例,有效率为84.45%。1990年,庄勃报道不同证型的周期治疗方法,阳虚瘀浊型的卵泡期用归芍地黄汤加温阳化瘀药,高温期用温阳药(杜仲、鹿角片、巴戟天、仙灵脾、紫石英等);阴虚瘀热型的卵泡期用滋水清肝饮加石见穿、莪术等,高温期用助阳药(川断、菟丝子、鹿角霜等);对阴阳错杂型的则在辨证基础上结合应用周期疗法治疗21例,有效率为90.4%。1991年,孙宝珍报道经期伴腹痛者用内异I号方药(赤芍、白芍、羌活、丹参、香附、刘寄奴、元胡、徐长卿、乌药、川芎、桂枝),经前3~7天始服至经净;月经过多伴腹痛者用I号方药(生蒲黄、玉米须、血见愁、丹皮、丹参、香附、赤芍、白芍、大黄炭、震灵丹、花蕊石、三七粉),服药时间同上;有肿块、结节者于经后用内异II号方药(赤芍、石见穿、丹参、皂角刺、地鳖虫、山甲、海藻、川芎、桃仁、没药);重度者加用孕激素周期疗法,共治本症不孕者46例,妊娠率为75%。

**专药治疗:**棉酚是从棉花籽中提取的含双醛的酚类化合物。1980年韩美玲、1983年周苏文及1989年徐乐凤等都报道了应用棉酚治疗内异症的临床疗效和研究情况,棉酚对痛经的疗效达100%,结节消退的效果达84.0%,长期服用可引起低钾,服药剂量是每日1次,每次20mg,连用两个月后改为每周两次,每次



20mg,总疗程为5~6个月,应同时服用氯化钾以防低钾发生。

中医综合治疗:1982年,戴德英报道采用口服痛经方药(红藤、败酱草、丹皮、丹参、桃仁、莪术、夏枯草、牡蛎等)配合中药灌肠或外敷治疗本症。1992年,北京中医院刘福英等采用:(1)经净后用川芎嗪针剂80~150mg溶于5%GS500ml静脉滴注,每日1次,连用10~15d,主要目的是扩张血管,改善血循环,加速供氧,改善血液粘度,抑制血栓形成,软化组织。(2)同时服用中药,主方为当归、赤芍、刘寄奴、苏木、血竭、香附、川楝、醋元胡、生蒲黄等。(3)中药离子透入疗法。中药组成为夏枯草、艾叶、小茴香、元胡、香附、桃仁等),取水煎液浸纱布垫,置于骶尾及下腹部,用ZQL-1型直流感应电疗机进行治疗。(4)保留灌肠。中药用川芎、丹参、赤芍、小茴香、王不留行水煎至200ml,低压保留灌肠,隔日1次。(5)中药局部注射。在阴道及腹壁肉眼可见之内异病灶处注入川芎嗪40mg及2%奴佛卡因2ml,每周两次。(6)中药宫腔注射。应用川芎嗪40mg加水20ml注入宫腔,经净后3d至排卵前,隔日1次,共治疗70例,总有效率为94.29%。

有关本症的实验研究,70年代浙江医科大学对内异症患者作血凝测定,发现凝血酶原时间缩短,血纤维蛋白原增高,血纤维蛋白原裂解产物增多,而以重度患者增高更为明显,提示内异症患者血液中存在血凝—纤溶亢进现象,呈高凝状态,为阐明本症的病因病机和使用活血化瘀药提供理论和实验依据。1980年邵公权和1983年刘德博等实验结果表明,活血化瘀药可减少患者甲板毛细血管祥原瘀血数和使黄体期孕激素低水平状态恢复至正常水平,这又表明孕激素水平与血液流变状态密切相关。活血化瘀药能调整雌孕激素比值,影响血液流变,改善微循环功能,促进血凝包块的吸收。1985年,林有高等报道温肾中药有类似内分泌激素作用,能调节性腺和肾上腺功能,为采用温肾法提供了实验依据。1988年,戴德英等通过小白鼠热板扭体等试验,表明痛经方有良好的镇痛作用。1990年,预秋善等报道活血化瘀药可使实验动物雌兔异位内膜萎缩,腺上皮由高柱状变为低立方状或扁平状,间质稀疏。1991年,王大增报道痛经的程度与PGE<sub>2</sub>有显著相关性,而由活血化瘀通腑药组成的内异I号丸能促进胶原蛋白代谢,有抗纤维化作用,有利于患者盆腔粘连的松解、消除。1992年,张福英等报道44例血液流变学检测结果,显示血液缓慢有瘀滞现象,符合中医血瘀证的诊断;在30例肾图检查中有7例肾功能受损,经活血化瘀治疗后,5例轻度损伤者恢复正常,中度受损的两例转为轻度。1982年,韩美玲报道从棉籽中提取的一种含双醛的酚类化合物,可使子宫内层和异位内膜萎缩,作用似丹哪唑,造成假绝经,停药后月经仍能恢复,副作用小。1989年,徐乐凤等观察35例内膜异位患者在接受棉酚治疗后,其孕酮与雌二醇水平明显下降,而垂体促性腺激素(FSH、LH)明显上升,提示棉酚对卵巢功能有直接抑制作用,对子宫内层细胞的增殖与DNA合成有抑制作用,对子宫内层细胞的雌二醇与孕激素受体也有直接抑制作用,具有类似丹哪唑的作用,是一种很有应用前途的中药。

#### 参考文献

- 1 邵公权. 上海中医药杂志, 1980, 3, 5
- 2 戴德英. 上海中医药杂志, 1982
- 3 相光. 中医杂志, 1984, 25(10): 45
- 4 田碧映. 中西医结合杂志, 1985, 5(1): 3
- 5 泽员民. 四川中医, 1985, 3(1): 24
- 6 周映华. 云南中医杂志, 1986, 7(6): 21
- 7 孙锡元. 江苏中医, 1987, 8(1): 33
- 8 林永华. 浙江中医杂志, 1989, 24(4): 159
- 9 庄勃. 陕西中医, 1990, 11(12): 537
- 10 洪文旭. 陕西中医, 1992, 13(5): 234

(上海曙光医院戴德英教授撰)

**崩漏** metrorrhagia and metrostaxis 经血非时暴下不止或淋漓不尽时,前者称崩中,后者称漏下,两者常互相转化,故统称

崩漏。崩漏一证包括现代医学的功能失调性子宫出血病(简称功血)及妇科肿瘤、炎症等引起的异常出血,但以前者研究较多。功血是指内分泌调节系统的功能失常所导致的月经紊乱和异常出血,是妇科的常见病,也是一种疑难病,临床可分为无排卵性功血及有排卵性功血两类。功血可导致不孕、不育,严重者可因大出血危及生命,故研究本病有重要的意义。

崩漏病因多端,传统的认识可归纳为虚、热、瘀。因虚者,有因脾肾之虚或气血两虚致冲任不能固摄;因热者,有因虚热或实热损伤冲任,迫血妄行;因瘀者,乃瘀滞冲任经脉,新血不得归经而成。多数医家认为崩漏虚多实少,其治疗以辨证论治为主,本着“急则治其标,缓则治其本”的原则,采用塞流、澄源、复旧3法。自1958年起,上海李超荆等对功血的病因病机不断进行探讨,提出功血的原始动因是由于肾的阴阳失调,根据“以肾为本”的理论,用调整肾阳肾阴的方法治疗无排卵功血,其疗效优于过去的补脾组,排卵率由原来的17%提高到72.8%,这是功血治疗史上的一个新进展。1963年,江西省莲花县又创立中药人工周期(以下简称ACC)治法,此后各地陆续借用并不断完善。ACC是以中医“生殖”有赖于肾气—天癸—冲任—胞宫之间的平衡为理论依据,以补肾为治疗的基本法则,概括为益肾—活血—益肾—活血调经的周期性选方用药,分别用于卵泡期—排卵期—黄体期—月经期。据国内用ACC治疗449例月经失调致不孕病例的统计,有效率为80%,妊娠率达66%。继而江苏、广州等地学者又运用阴阳学说的观点,分析了月经周期阴阳转化的规律,提出“分时分期调周法”,其原则是顺应体内阴阳消长变化的规律施治。经后期,血海空虚以滋肾阴为主;经间排卵期,在滋肾阴中佐以温肾活血之品;经前期以补阳疏肝为主;行经期以理气调血为主。不论是ACC抑或“分时分期调周法”,都体现了治疗功血不仅要止血,还应重视调整月经周期,促进排卵(更年期者除外)才能提高疗效,达到治愈目的。

80年代以来,中医在治疗功血方面所用的仍然是止血、调周期、促排卵,使更年期者逐步过渡到绝经。其方法有辨证论治、一方加减、辨证与辨病相结合等。据董克勤等报道,功血出血期属实热型者用止血丹(女贞子、旱莲草、当归、蒲黄炭、侧柏炭、丹参、香附炭、黄柏炭、丹皮、生地),虚寒型者用止血丸(女贞子、党参、白术、旱莲草、当归、蒲黄炭、侧柏炭、黄柏炭、丹参、香附炭);血止后属肾阳虚者用女宝丹(仙茅、仙灵脾、菟丝子、女贞子、旱莲草、枸杞子、阿胶);肾阴虚者用女宝丸(首乌、淫羊藿、生地、桑椹子、女贞子、旱莲草、阿胶)。治疗功血100例,单纯中药治疗60例,止血有效率为85%,功血治愈29例(48.3%);40例为中西医结合组,配合用克罗米芬或hCG,止血有效率与中药组无显著差异,治愈率高于中药组,治愈30例(75%)。郑惠芳等采用复旧固本法为主治疗功血205例,其中肾虚型者100例,肾阴虚者用六味地黄丸、二至丸、左归饮三方加味,流血多时加地榆、贯仲炭、仙鹤草、生地等;肾阳不足者加川断、菟丝子、淫羊藿、紫石英、仙茅,或用右归丸;脾虚型者83例,用归脾汤、举元煎二方合用。若病人大出血出现阳虚欲脱的危笃症状时,则当急予独参汤或人参粉9g,三七末3g,温水冲服,病情好转后继用上药方加减调补。治疗结果,肾虚、脾虚两型共183例,治愈109例(59.5%),显效以上135例(73.7%);其他血瘀型等22例,显效以上15例(68.18%)。刘平等用《金匱》当归芍药散研制成细末装入胶囊,每粒含药粉0.5g,每次服3g,每日两次,整个月经周期持续服用,3~6个月为一疗程,治疗功血83例,痊愈和基本痊愈32例,显效以上58例(69.98%)。蔡连香等用养血补肾法,以养血补肾汤为基本方(当归、丹参、熟地、菟丝子、鸡血藤、覆盆子、菟丝子、黄芪、紫河车、川芎、木香、甘草)治疗功能失调性月经病218例,其中无排卵功血79例,恢复排卵70例(88.6%)。张丽荣等用养血安胎胶囊(由地黄、山药、附子、黄芩、茯苓、五味子、海螵蛸、丹皮、三七、肉桂等研粉制成)治疗肾虚型功血335例,服法为每次6粒,每日3次,出血量多时可加倍药量,连续服药1个月为一疗程。结果痊愈率为10.1%,显效率为44.5%,有

效率为 95.6%，其中对青春期功血患者疗效最佳，达 98.2%。牟重临用固本止崩汤加减，以黄芪、党参、白芍、熟地、当归、白术、黄肉、菟丝子、肉苁蓉、陈皮、炙甘草为基本方药，结合辨证稍事加减，共治疗更年期功血 54 例，3 天内出血基本停止，经巩固疗效，随访半年未复发者 31 例(57.4%)。范华光等用乌茜汤(煅乌贼骨、茜草炭、地榆炭、桃木、蒲黄炭、槐米炭、荠菜、马齿苋、生甘草)治疗经子宫内脱活检的 140 例子宫出血，诊断功血者 115 例，器质性出血者 25 例，结合辨证属气虚者加党参、黄芪；血热者加生地炭；血瘀者加煅花蕊石，每日 1 剂，出血多时每日两剂，结果 115 例功血中显效 57 例(49.6%)，有效 44 例(38.2%)；25 例器质性病变出血者，显效 7 例(28%)，有效 9 例(36%)。本组资料表明，中药对功血的止血疗效显著优于器质性出血。姚石安对黄体不健者的病机归纳为肾虚肝郁，以阳虚为主，采用全当归、炒白芍、怀山药、菟丝子、大熟地、炒柴胡为基本方药，经后期加女贞子，接近排卵期加巴戟肉、制香附等；经前期偏阴虚者助阳药减至 3~5g，并加玄参；偏阳虚者助阳药用至 15~20g，一直服至月经来潮，经期停药，3 个月为一疗程，同时进行心理疏导；治疗 74 例，有效率为 82.4%，治疗 1 年内妊娠者 39 例(52.5%)。

中药人工周期(ACC)、补肾或补肾活血的治则在调周期、促排卵方面的疗效已被多数医家所承认。不少学者如俞瑾、廖玲、徐晋勋、余运初等对其有效方药的作用机理进行了探讨，认为补肾是诱发排卵的基础，在此基础上加活血药可提高疗效；而 ACC 的研究则提示其对体内环境起全面调节作用，对性腺轴各级功能改善都有影响。此外，针灸在功血的止血与促排卵方面均有一定的疗效，俞瑾等对 10 例确诊为无排卵的患者进行电针治疗，观察治疗前后血 FSH、LH 水平的变化，结果提示电针是通过中枢神经系统调节 FSH、LH 分泌起促排卵作用的。

功血是妇科疑难病。对大出血患者单纯用中药的疗效不够理想，往往需要配合辅助疗法，有的甚至要加用性激素止血。对功血的诊断，每因缺乏先进的检测手段，可能使部分器质性出血误诊为功血。疗效的判断，各文献资料的报道尚缺乏统一的标准。

目前治疗功血，各地仍以汤剂为主，确有疗效的中成药尚少，今后对研制高效、速效的止血药以及调周期、促排卵的中成药势在必行。在治疗方面应进一步加强辨证与辨病相结合，既保持中医的特色，同时采用现代科技的检测手段，提高功血的诊断与鉴别诊断的水平，并对中医中药治疗功血的作用机制与环节深入研究。

#### 参考文献

- 1 姜春华,等.肾的研究(第2版).上海:上海科学技术出版社,1981,35~37
- 2 范华光,等.中医杂志,1982,6:28
- 3 刘平,等.中医杂志,1983,6:25
- 4 董克勤,等.中西医结合杂志,1984,4:205
- 5 郑惠芳,等.山东中医学院学报,1985,3:36
- 6 张丽荣,等.北京中医,1986,5:38
- 7 蔡莲香,等.上海中医药杂志,1987,3:46
- 8 牟重临.辽宁中医杂志,1988,11:28
- 9 姚石安.江苏中医,1989,3:10
- 10 姚石安.江苏中医,1992,2:40

(中国中医研究院西苑医院蔡莲香研究员撰)

**中医治疗女性不孕症的研究进展** 女性不孕是指育龄夫妇婚后一直同居，性生活和男方生殖功能正常，未采用任何避孕措施，在一定年限内仍无妊娠者。从未怀孕者为原发不孕，曾有妊娠史而不孕者为继发不孕。中医称不孕为“无子”、“全不产”及“断绪”。不孕症是妇科常见病，也是一个世界性的问题，其发病率由于统计方法不一致，尚无准确的数字，国外一般为育龄夫妇的 10%~20%，中国约为 1%~10%。

中医中药治疗本病有悠久的历史和丰富的经验，辨证论治

和调经种子是历代医家常用的方法。辨证以肾阳虚、肾阴虚、肝郁、痰湿、血瘀五型为常见，可分别用毓麟珠或右归饮(丸)；养精种玉汤或左归饮(丸)；开郁种玉汤或逍遥散；启宫丸或苍附导痰丸；少腹逐瘀汤为主方，随证加减治疗。自 1963 年以来，各地陆续报道采用江西省莲花县创立的“中药人工周期”(以下简称 ACC)治疗不孕症。该疗法是从中医“生殖”有赖于肾气一天癸一冲任一胞宫之间的平衡为理论依据，以补肾治疗为基本法则，概括为补肾—活血化瘀—补肾—活血调经。结合现代医学性腺轴中卵泡发育的不同阶段，于月经来潮的第五天起，按顺序分别给予促卵泡汤(熟地、当归、首乌、菟丝子、肉苁蓉、肾阴虚者加女贞子、旱莲草；肾阳虚者加仙灵脾、仙茅)七剂，继用促排卵汤(当归、丹参、赤芍、泽兰、红花、香附、益母草)。肾阴虚者加女贞子、旱莲草；肾阳虚者加仙茅、仙灵脾)五剂，再用促黄体汤(熟地、制首乌、川断、肉苁蓉、巴戟天、当归、龟板)七剂，最后用活血调经汤(当归、川芎、赤芍、桃仁、红花、香附、益母草)五剂。该疗法适用于各种因性腺轴功能失调所致不孕，据 384 例资料统计，妊娠率达 60% 以上。

80 年代以来，国内运用中医药治疗女性不孕症的报道颇多，除沿用辨证论治和 ACC 外，采用辨证与辨病相结合的治法逐渐盛行，即根据中医的辨证结合西医辨病的诊断，明确不孕的原因，然后进行论治。如排卵功能障碍是导致不孕的主要原因之一，对无排卵性不孕症，中医辨证以肾虚多见，治疗以补肾为主，或补肾活血或用 ACC。对多囊卵巢综合征引起的不孕，孙月丽等采用补肾化痰法治疗，补肾方药是从右归丸衍化而来，化痰软坚药物有夏枯草、象贝、穿山甲、皂角刺、胆南星等，治疗 74 例不孕症，妊娠率为 48.64%。李国兰用补肾活血助孕汤(当归、肉苁蓉、蛇床子、益母草、山萸肉、补骨脂、桑寄生、泽泻、覆盆子、菟丝子、赤芍、泽兰、川芎、红花、丹参)为基本方药，结合辨证稍事加减，自月经第 1 天开始服药，18d 为一疗程，一般用药 2~3 疗程，共治疗排卵功能障碍性不孕症 642 例，受孕率为 49.22%。对黄体功能不健的不孕症临床常伴有肝郁症者，北京中医医院用清热疏肝理气通络的坤宝Ⅱ号(柴胡、白芍、郁金、橘叶、黄芩、炒栀子、丝瓜络等)治疗 30 例，妊娠率为 30%；对照组用每粒含孕激素 10mg 的阴道栓治疗，受孕率仅为 12.5%。杨燕生等用四物汤为基本方药，肾阳虚者酌加紫石英、仙灵脾、仙茅、菟丝子、覆盆子；肾阴虚者酌加女贞子、旱莲草、枸杞子、五味子、玄参、麦冬；酌加药每次只选其中 1~2 味；治疗 40 例，妊娠率为 70.4%。除传统中药汤剂外，已有中成药问世。刘琨等研制的“调经促孕丸”(由鹿茸、仙茅、仙灵脾、黄芪、茯苓、丹参、赤芍等 18 味药组成)治疗中医辨证属脾肾两虚、西医诊断为排卵障碍性不孕症 308 例，妊娠率为 35.06%，与克罗米芬对照组妊娠率 37.19% 相近似。输卵管阻塞亦是不孕的主要原因之一，中医辨证多见气滞血瘀、肝郁气滞或兼有肾虚，亦有表现为湿热带滞者，其治疗方法有：王忠民采用辨证分型结合月经周期用药，治疗 145 例，妊娠率为 53.1%；扶春秀用少腹逐瘀汤加减，治疗 50 例，两年内生育者 22 例；李祥云据辨证分气滞血瘀、痰湿瘀滞、气虚血瘀、热盛瘀阻五型，治以祛瘀为主，分别辅以行气活血、化痰祛湿、温经散寒、益气补血、清热凉血等法，以穿山甲、路路通为疏通梗阻之要药，除内服外，配合中药灌肠、中药离子透入、煎剂药渣热敷腹部患处等综合方法，治愈输卵管梗阻 87 例，妊娠 75 例，妊娠率为 86.20%；乐秀珍等对 100 例输卵管阻塞不孕者随机分为 3 组，分别用口服中药(川楝子、枳壳、青陈皮、徐长卿等)、口服中药加灌肠(固定灌肠药物有忍冬藤、马鞭草、皂角刺、生甘草)、口服中药加通液术(通液药物有西药链霉素 1g，氢化可的松 25mg)，其受孕率分别为 20.69%、55.26%、45.45%，以中药口服加灌肠组疗效最高。中医药治疗免疫性不孕症报道尚不多，上海医科大学妇产科医院李超群教授认为，应用活血化瘀或滋阴降火法有调节机体免疫反应的作用，根据实验资料，可观察到抗精子抗体与抗透明带抗体效价的明显下降直至消失。夏桂成对阴虚火旺证免疫性不孕者用当归、赤白芍、淮山药、山萸肉、甘草、丹皮、钩藤、地

黄为基本方药,结合兼证加减,治疗 50 例,妊娠 17 例。针灸或针药并用治疗不孕症亦有报道,如刘继章治疗卵巢功能失调性不孕症,于月经周期的 12~14d,每天依次选用以下 3 组穴位:关元、归来、二阴交,中极、气海、足三里,命门、承浆、血海,共治疗 34 例,妊娠率为 73.52%。舒沪英等对 27 例卵巢功能失调的不孕患者采用中药加针刺人工周期法,除按月经周期给药外,于月经周期第 12~15d 停用中药,用针刺疗法,选中极、三阴交;大赫、气海两组,每日一次交替使用,妊娠率为 59.25%。

中医药治疗不孕症的机理探讨在逐步深入,已从单纯的雌激素样作用,进入到性腺轴功能调节的研究。廖玢玲等对 31 例继发性闭经妇女分组用中西药人工周期疗法,于治疗前后做 LRH-A 垂体兴奋试验,结果提示:ACC 对下丘脑闭经妇女垂体 GnH 起正反馈兴奋作用,能明显增强垂体 GnH 对 LRH-A 刺激的敏感性,并增强 LH 贮备合成能力,进一步促进卵巢性激素的分泌功能,提高 E<sub>2</sub> 水平;8 例下丘脑性闭经患者治疗后,两例妊娠,1 例流产,对卵巢早衰妇女,ACC 不仅对 GnH 起负反馈抑制作用,还可能对卵巢抑制素样作用;对多囊卵巢综合征患者,ACC 对垂体 LH/FSH 比值起调整作用,FSH 基值及各反应时间 FSH 均值均比治疗前上升,LH 基值较治疗前显著下降,各反应时间 LH 均值亦较治疗前降低。说明 ACC 对机体内环境起全面调节作用,对性腺轴各级功能改善都有影响。朱文新以十味地黄汤(生地、当归、白芍、淮山药、五味子、茯苓、泽泻、丹皮、党参、甘草)加菟丝子、覆盆子为基本方药,结合辨证加味,并通过客观指标血 FSH、LH、亮氨酸脑啡肽(LEK)放射免疫法测定观察,推测该方药作用机制似在调节下丘脑部位功能,LEK 可能是有希望诱发排卵的另一类神经介质。

不孕症病因复杂,多种因素均可导致,要搞清病因,提高诊断水平,须运用现代科学技术,多种新的检测手段,目前一般医院尚不能完全达到,多数停留在有效方药的临床报道,缺乏作用机理的探讨。辨病与辨证相结合的治疗方法,仍是今后研究不孕症的一个方向,这种结合将进一步深化,尤其对治疗难度较大的不孕患者,中西医结合疗法将提高治愈率。对高泌乳血症、未破裂卵泡黄素化综合征、高促性腺素闭经等所致不孕症以及免疫性不孕症,已引起广泛重视,今后应当开发出较理想的中西医结合的方法和方药。

#### 参考文献

- 1 孙月丽,等.上海中医药杂志,1981,16,14
- 2 扶春秀.湖北医药杂志,1983,4,19
- 3 王忠民.中医杂志,1985,26(8),35
- 4 杨燕生,等.中医杂志,1986,10,34
- 5 刘琨,等.上海中医药杂志,1987,5,14
- 6 金赫炎.中医杂志,1987,10,62
- 7 李国兰.湖北中医杂志,1988,5,16
- 8 李祥云.中医杂志,1989,7,33
- 9 北京中医医院,北京中医,1990,4,51
- 10 乐秀珍,等.上海中医药杂志,1992,(3),19

(中国中医研究院西苑医院蔡莲香研究员撰)

**中医男科学** 用中医理论认识和研究男性生理、病理、养生、优生和防治男性特有疾病的一门临床学科,研究的对象是男性,研究的范围和内容应包括男性的生长与发育、生理病理、诊治规律、优生、男性特有疾病的诊疗、护理以及运用中医方法研究生育、节育与不育等,重点是男科疾病的诊治。中医男科学直接受中医理论的指导,并与内、外、泌尿等科以及社会学、心理学等密切联系。因此,研究中医男科学不仅要具备该学科的专门知识,还要学习和运用其他中医学科乃至现代科学尤其是现代男性学、社会学、心理学等学科的有关理论知识和技能。

中医男科学形成于 20 世纪 80 年代,而其历史渊源则要比现代男性学早两千多年。秦汉时期的《黄帝内经》从男性的性生理、性特征、性器官的结构与功能、男科疾病及其病因、治法和男性性

保健等方面作了一定论述。东汉《伤寒杂病论》则开创了男科疾病辨证论治之先河。继此以后,古代许多医家从不同侧面充实和发展了中医男科学。但由于历史的原因,中医男科一直没有形成理论体系,更无完善的专著问世。1985 年,王琦从临床实践和理论构建两方面开始创建中医男科学的工作。1986 年,秦国政提出应建立中医男科学体系。1988 年,王琦等主编的《中医男科学》的出版,构建了中医男科学体系,标志着这一学科的正式诞生。1990 年,王琦主编的《中华中医男科学丛书》的出版,则从深度、广度等方面进一步充实、完善了男科学内容。近年出版各种男科学著作达数十种,包括古代房中术的文化研究、临床、方剂、性学专著,反映了中医男科学的总体水平。

中医男科学虽形成较晚,但在理论研究、临床研究、实验研究等方面已取得可喜成绩。

理论研究丰富和发展了中医男科学学术内涵。近年来,男科理论研究主要从事九个方面的工作。一是挖掘整理古籍精华及医家经验。不少研究者阐述了《黄帝内经》等古籍对男科的认识和贡献,总结了金元明清一些医家男科诊治经验,对古代性医学、性药、节育中药、男科用药等理论问题作了探讨。二是阐释男性生理与解剖知识。一些学者对男性衰老生理特点、男子冲任督脉起源、男子血室与精室、睾丸具有脏与腑双重功能等的阐释,丰富了男科生理的研究内容。三是探索男科时间医学。王贵林等研究发现,血浆睾酮浓度至春始逐渐上升,至夏初最高,此后又逐渐下降,秋季最低,其季节性变化与人体阳气随四时变化而盛衰的消长规律十分相似。阳痿的发生也有一个年节律,秋季发病率最高,其次为冬季和夏季,春季最低。四是探索男性养生与优生方法。一些学者从不同角度对男性性保健与养生、优生等进行了探讨。秦国政明确指出优生非惟女方,男性亦至关重要,并将男子保精养生和优生的方法分别归纳为 10 项措施和 5 项原则。五是多角度探讨病因病机。近年依据新的临床实践,对男科病因病机从不同角度提出了新的观念。对男科精液、痰病、肾精液、痰证、郁证、精脱动风等的深入探讨,提高了病因病机研究的整体理论水平。实践证明,精血瘀滞、痰凝、湿阻、热毒、酒毒等实邪是构成男性病的主要病机,而非独肾虚。传统治疗阳痿,多补肾壮阳,但验之于临床,多无效者。1985 年王琦首次明确提出“阳痿从肝论治”的观点,突破了“补肾治痿”的定式。之后,从脾胃、从心、从肺、从脑与三焦、从经络、从宗筋等论治阳痿的探索相继报道。不育一病也已从单一的“肾虚精冷”扩展到“痰、湿、瘀、毒、热”等。六是拓宽中医诊治男科病种范围。《中医男科学》涉及病种 40 个,《中华中医男科学丛书》增加到 73 个。零星增治病种的报道也在不断增加。七是对疾病诊断的研究出现了新的模式。对古代某些比较笼统的病名多进入微观诊断,对比较含混的病名多不采用而代之以内涵外延明确的病名,对古代未作记载的现代病名直接吸收,并利用现代检测手段与中医辨证相结合方法制定了一些男科病诊断标准。八是辨证思路开阔,从单纯的辨证发展到辨证、辨病、辨证加辨病等多种方法。九是治则治法研究不断深入。其研究已经跳出男科治法重在补肾的框框,或补,或通,或通补结合。董其圣还认为,男性生理病理过程中都存在着动与静这一对矛盾,必须调其偏颇以达平衡。其他如专病专方专药的研究,中西医结合的治疗等,均为男科辨治增添了新的内容。

临床研究突破了原有单一的传统方法,采用现代研究方法与传统方法相结合,不断引进、移植、扩大、创新。主要有 5 个特点。一是大中样本的临床调研、研究增多,表明临床研究注意到科学方法。如侯果圣等用三育散治疗不育症 9 826 例的观察,王根基对 513 例阳痿分组治疗的研究、李彪对不育症治疗进展进行的归纳、分析、整理的研究等。二是临床研究与基础研究相结合。王琦对自拟王氏生精汤提高人精质量进行的电镜及光镜的观察研究,发现该药能使精子发生的病理状态转变为常态,在国内外首次报道了电镜下治疗前后精子形态结构的变化。刘秀德等对不育患者精子的观察研究发现,用中药治愈的患者,精子膜表面受体凝集素受体明显增多、功能增强,精子膜蛋白质大分子疏水区

大分子对荧光强度接近正常。三是治疗手段多样化。除中药内服外,还有针刺、艾灸、按摩、气功、电针、电针加灸、挑治、耳针、割治、药浴、中药注射、中药喷雾、肛门栓塞、热熨、薰洗、敷贴、脐疗、涂擦、打灯草等,运用中医理论指导研制的理疗仪器也正逐渐运用于男科临床。四是临床疗效不断提高。五是临床研究与电脑技术相结合,研制出了电子计算机诊治男性不育的专家系统。

实验研究,推动并指导临床研究的深入。马立正、赵伟康等分别研究了填精补肾药对动物性腺轴的作用,发现中药的作用既可在靶腺(睾丸)以上,又可在靶腺以下,并对中枢系统呈双向调节作用,其性激素和性激素样作用对前列腺、睾丸等均产生作用。王秀萍等对不育与发锌关系的研究,发现不育者的发锌明显低于正常人。郭连澍、肖永新分别对补肾壮阳药治疗不育的机理作了药理研究,发现该类药能明显提高精浆中锌水平、精子密度、精子成活率。内藤善文对肾气丸的研究发现,该药方能改善睾丸、附睾血液循环,能使前列腺的二氢睾酮感受器的结合部位增加,能收缩输精管,从而提高睾丸造精功能,促进精子的成熟与运输。郑东平等对肾虚睾丸损害进行了动物模型研究,发现中药可以扭转腺嘌呤导致的动物睾丸损害过程。实验研究还发现棉花子、雷公藤、七叶一枝花、蚯蚓、苦参、油茶籽、大蒜、土贝母、慈姑、猪胆汁等一些中草药具有杀精作用。

由于中医男科学具有辨证论治与辨病辨证相结合、整体调节与因人制宜以及治疗手段多样和有丰厚的医籍宝藏作为发展基础的优势和特色,因而随着研究的不断深入,必将进一步充实完善,并为防治男性疾病,保障男性身心健康以及家庭的和谐、社会的稳定作出进一步的贡献。

#### 参考文献

- 1 王琦. 天津中医, 1985, 5: 15
- 2 秦国政. 中医药信息报, 1986, 9(8)
- 3 王琦, 等主编. 中医男科学. 天津: 天津科技出版社, 1988
- 4 王琦, 主编. 中华中医男科学丛书. 华夏出版社, 1990
- 5 王琦, 等. 江西中医药, 1990, 2: 11
- 6 王贵林, 等. 中医杂志, 1990, 7: 48
- 7 秦国政. 新中医, 1990, 8: 1
- 8 刘秀德. 中西医结合杂志, 1990, 9: 19

(中国中医研究院王琦教授、云南省镇雄县中医院秦国政主治医师)

### 活血化瘀研究与儿科临床

study of promoting blood circulation to remove blood stasis and its clinical application in pediatrics 中医运用活血化瘀这一治疗原则已有很久的历史,《内经》就已记载的不少治疗血瘀证的材料。后历代医家的发展,活血化瘀法已有不少创新。以往对血瘀证研究多限于成年人,80年代以来的观察和研究表明,小儿时期血瘀证并非少见,应用活血化瘀法可取得明显疗效,尤其对一些严重感染性的及难治性的疾病已初步显示较其他方法更有效。

据上海医科大学情报研究室对国内近27年来发表的文献资料统计,刊登于300多种杂志及会议交流资料中,用活血化瘀法治疗儿科疾病多达17种。在呼吸系统疾病方面,北京友谊医院自1975年以活血化瘀、通里攻下为主治疗小儿腺病毒肺炎,使其病死率自60年代20%下降到5.60%,用外敷活血油膏的方法治疗肺炎可促使肺部罗音较快消失。新生儿疾病方面,各地用丹参静脉滴注加口服温阳活血益气药或外敷活血中药治疗硬肿症,其硬肿消退及体温回升时间均较单用西药者短。治疗新生儿肝炎综合症常用的方法是清热利湿,但对肝脾肿大明显、黄疸较深的重症肝炎,加用丹参、三七、当归等活血化瘀药能使病情明显改善。在消化系统疾病方面,婴幼儿腹泻时因脱水而血液粘滞性增高,可以致瘀,如给予活血化瘀药凌霄花可提高治愈率。小儿中毒性肠麻痹较常见,应用活血化瘀、理气活血药可以改善肠微循环,减少肠水肿,因而治疗效果良好。在泌尿系统疾病方面,由于发现急性肾炎有血瘀表现,舌血流量明显低于正常小儿,采用益母草、当

归、川芎等活血化瘀药取得好疗效。应用有活血化瘀作用的雷公藤治疗各型肾炎及肾病也取得很好效果。在神经系统疾病方面,应用当归、红花、川芎等穴位注射治疗脑性瘫痪及小儿麻痹后遗症效果明显,在国际学术交流中受到好评。

活血化瘀在儿科的应用和研究较多地集中于呼吸系统疾病。在活血化瘀治疗腺病毒肺炎取得疗效的基础上,已对其作用机理进行了研究。动物实验发现其主要作用有:(1)解除肺毛细血管的痉挛,改善肺毛细血管血流灌注,有利于减轻机体缺氧;(2)减轻肺毛细血管壁的水泡裂隙损伤,保护毛细血管壁的完整,从而有利于气体交换;(3)减轻红细胞瘀滞,防止血小板聚集,从而减少或防止肺微血管堵塞;(4)增强吞噬细胞功能,改善肺微循环。北京友谊医院应用复方莪术注射液治疗婴幼儿病毒性肺炎,并与抗生素组对照,结果在平均疗程、退热天数及罗音消失方面前者优于后者。病毒学实验表明,莪术注射液对呼吸道合胞病毒有直接灭活作用。上海医科大学儿科医院观察到迁延性肺炎有血液流变学指标异常,甲皱微循环有血液流变速度减慢等血瘀征象,于是改变以往用以扶正为主的治疗方法,应用丹参素静脉滴注,结果肺部罗音消失,部分病例治疗后血粘度及红细胞电泳有不同程度改善。1990~1991年各地报道加用活血化瘀药的中西医结合疗法治疗重症肺炎优于单纯用西药的治疗方法。如山西阳泉市第二人民医院加用桃红生脉饮口服及灌肠治疗具有多脏器功能衰竭的小儿重症肺炎,疗效优于西药对照组,死亡率明显降低,甲皱微循环观察有同步改善,认为该药的作用与改善肺微循环及降低血粘度从而缓解患儿严重缺氧有关。安徽省蚌埠市第一人民医院分析106例小儿肺炎并发多脏器功能衰竭,发现在急性期可出现高血粘滞综合征,强调加用丹参、当归、川芎、赤芍,可以提高疗效,降低死亡率,为中西医结合抢救重症肺炎患儿提供了更有效的方法。活血化瘀法防治哮喘已逐步受到重视,1989年徐钢运用活血化瘀法,在方剂中加川芎、红花等,治疗150例哮喘取得较好疗效。1991年,许德金用口服丹参防治小儿哮喘,结果总有效率达92.5%,不亚于酮替芬。实验资料显示它能降低血清IgE浓度,增强体液免疫功能,改善微循环。治疗后患者血清的IgE水平显著下降,IgG及补体C<sub>3</sub>均有一定程度增高。动物实验资料表明,丹参对豚鼠喘息有缓解作用,对小白鼠被动皮肤过敏和肥大细胞脱颗粒有显著抑制作用,为防治哮喘提供了新的途径。西医对治疗包裹性胸膜感棘手,每每经久不愈,蚌埠市人民医院用活血化瘀方药治疗本病,实证用桂枝茯苓汤,虚证用当归芍药汤,虚实之间两方合用,适当配用大小柴胡汤,结果在体温恢复正常及脓胸吸收方面均优于单用西医疗法者。认为活血化瘀药可减少血管通透性,促使炎症的渗出物吸收,减少瘢痕组织产生,并使已产生的瘢痕组织软化和消退。

在基础理论研究方面也取得初步成果。上海医科大学儿科医院应用丹参及三七注射液防治高分子右旋糖酐所致家兔肺出血模型,结果表明两药均有减轻出血的作用,病理检查出血对照组心肌坏死灶、肺组织血栓形成及出血程度均明显多于丹参及三七治疗组,为应用丹参及三七防治新生儿肺出血提供了实验依据。甘肃省中医院将水蛭粉制成肌肉注射剂,治疗Die(弥漫性血管内凝血)优于对照组,动物实验及基础研究资料表明,水蛭提取物可抑制ADP诱导的血小板聚集,扩张动物微血管,但不影响家兔凝血时间及凝血酶元时间。

近年儿科活血化瘀研究已从临床观察和有限化验检查发展至动物实验、体内与体外实验相结合及药理研究,一些较先进的检查方法如血小板聚集及释放测定、放射免疫法测定TXB<sub>2</sub>及β血小板球蛋白、舌血流量计测血流量等,使研究得以深入开展。但鉴于小儿服药困难这一特点,适合儿科应用的中药剂型甚少,目前亟待发展针剂、栓剂、灌肠剂、外敷剂等多种剂型,以解决活血化瘀法在儿科疾病中应用尚不广泛的难点。

应用活血化瘀法治疗小儿危重疾病将是今后的研究热点,例如重症肺炎、重症婴儿肝炎综合症、出血性小肠炎、新生儿硬肿症、呼吸窘迫综合症、肺出血等在临床的整个过程或某一个阶段

都具有瘀的特征,具有应用活血化瘀法的强烈指征。这些疾病用西药尚不够理想,为此活血化瘀法必将会对西医疗法起补充作用,应用中西医结合方式设计研究活血化瘀新方案抢救危重症患儿将是今后努力的方向。

#### 参考文献

- 1 时毓民, 中医杂志, 1982, 23(12): 27~28
- 2 阎田兵, 中西医结合杂志, 1984, 4(3): 139~142
- 3 李贵, 中西医结合杂志, 1984, 4(11): 669~671
- 4 张梓荆, 叶孝礼, 儿科疾病研究, 上海: 上海科学技术出版社, 1988, 59~72
- 5 时毓民, 上海中医学院, 上海中医药研究院学报, 1989, 3(1): 22~24
- 6 潘清超, 中西医结合杂志, 1990, 10(9): 566~567
- 7 姜春华, 活血化瘀研究新编, 上海: 上海医科大学出版社, 1990, 238~253
- 8 许德金, 中医杂志, 1991, 32(2): 41~42
- 9 时毓民, 上海医科大学学报, 1991, 18(4): 312~313
- 10 国家中医药管理局科学技术司, 国内外中医药科技进展, 上海: 上海科学技术文献出版社, 1992, 122~127

(上海医科大学儿科医院博士生导师时毓民教授撰)

### 中西结合对婴幼儿轮状病毒性肠炎的研究

the research of integrated traditional and western medicine on enteritis of HRV for infants 腹泻是小儿常见病,也是当今世界上婴幼儿死亡的主要原因之一。轮状病毒是引起婴幼儿流行性腹泻的主要病原,在夏季腹泻的0%~20%、秋冬季腹泻的70%~80%,是由该病毒引起。轮状病毒肠炎好发6个月至~2岁的婴幼儿,在秋冬季节多见,又称秋季腹泻。发病时大便呈水样,每日10~30次,并伴呕吐、发热等症。该病发病率高,传染性强,流行快,患者大多为婴幼儿,病情变化迅速,极易发生脱水酸中毒,甚至导致儿童死亡。

1973年澳大利亚 Bishop 首先用电镜方法从腹泻患儿十二指肠粘膜活检中发现轮状病毒颗粒,从此开始对本病进行了大量的研究,但其发病机理仍不完全清楚,主要是由于病毒颗粒吸附并感染小肠绒毛已分化的上皮细胞,发生不同程度的病理改变。轻度损害仅见肠绒毛上皮细胞炎症浸润,严重者可见带刷状缘上皮细胞破坏、脱落。绒毛上皮细胞损害影响正常吸收功能而发生腹泻。轮状病毒原发感染可以产生特异性血清 IgM,继而产生 IgG,但人体血清抗体升高不完全有保护作用,而肠道病毒感染产生的局部抗体是重要的免疫因素。迄今,西药无特异性抗人轮状病毒药物,抗生素对病毒作用差,临床主要是对症治疗及纠正脱水酸中毒。

1978年庞其方等首先在中国秋冬季节婴幼儿腹泻患者粪便中发现轮状病毒颗粒,证明中国也有轮状病毒腹泻流行。由于西药无法控制病毒感染,因而国内对本病的治疗主要应用中医药。

从发病季节、流行情况和证候特点来看轮状病毒肠炎与中医学泄泻中的水泻基本相似。元·曾世荣《活幼心书》中曾说:“水泻谓之洞泄,乃阴阳不顺,水谷不分,泻黄水而小便少,番次密而无度。是夏秋之季,昼则解衣取冷,夜则失盖感冷,冷热相激,清浊相混;或因母自热中来,遽以哺之,令儿脾胃不和水谷交杂而下”。可见水泻包括秋季腹泻的内容,也说明中医很早就对本病的病因病机有初步的认识。中医认为本病多由感受外邪,导致脾胃运化功能失常,水谷不分,清浊相混,下走大肠发为腹泻。其腹泻特征有二:一是大便如水样,二是泻下暴注急迫。根据《素问·至真要大论》病机十九条“诸病水液,澄彻清冷,皆属于寒”,“诸呕吐酸,暴注下迫,皆属于热”,故通常认为本病性质有寒、热两种。谢斌、冯瑞华等认为本病由外感寒邪所致。小儿形气未充,脏腑娇嫩,尤以脾胃运化功能尚未健全最为明显。秋冬季节,气候逐渐转冷,寒气偏盛,故稍有喂养不当、过食生冷,或衣

少受凉、腹部受寒,寒邪入侵客于肠胃,阳气受遏,脾胃不振,运化功能失常,致使水谷乳液不能腐熟,精微不能化生升清,清浊混杂而下,即为泄泻。治疗以健脾化湿、淡渗利湿为主。如阳气损伤、虚寒之象明显,可加温阳健脾药。张建明等用健脾利湿药怀山药、干白术、太子参、佩兰、滑石、车前子制成水泻停口服液,门诊留观 701 例患儿,在 72h 内有效率 100%。王志豪用加味春泽汤(白术、茯苓、猪苓、泽泻、肉桂粉、炮姜、红参)温阳化气利水诊治 120 例患儿,72h 内有效率 95%。

与外感寒邪相对,彭敏认为本病由长夏感受湿热之邪,湿遏热伏,秋冬复感外邪引发,湿蕴热蒸,清浊交混,而成湿热内阻,表里证同见之泄泻。治疗时宜清利和中,健脾除湿,达到宣透秽浊之气、清利湿热之邪的目的。彭氏用达原饮加味治疗 86 例患儿,72 小时有效率 95.3%。葛根苓连汤加味治疗湿热证也为常用之法。蒙旭荣用葛根苓连汤合五苓散诊治 60 例患儿,有效率 98.3%。孟爱媛用葛根苓连汤合七味白术散化裁而成的葛苓参苓汤(葛根、黄芩、党参、茯苓、扁豆、薏苡仁、芥菜花、车前子、山楂)诊治 46 例患儿,有效率 94%。

古人云:“无湿不成泻”,不少人认为本病在外感寒、热之邪的同时常兼湿邪为患。湿有外湿与内湿之分。李留振认为本病由外感寒湿、内伤脾胃所致。外感寒湿途径有两条:一则秋至天气渐冷,又多秋雨连绵;二则金秋瓜果成熟,生冷不节,嗜食失度。小儿脾胃幼稚,寒湿内犯,伤脾胃,脾失健运发为泄泻。李氏自拟方药(白术、山药、茯苓、莲子肉、薏苡仁、藿香、葛根、防风、车前子、神曲、甘草)健脾散寒化湿,诊治 100 例患儿,3 日有效率 96%。杨国政更注重内湿为患,脾胃素虚或喂养不当,调护不周,损伤脾胃,脾失健运,水湿内停,流注肠道发为水泻。治疗时宜重用山药、车前子。向世光则认为暑去秋冬之季,气温由热转凉,暑热之气虽去,而湿浊之邪尤存,此时一旦感受外邪,或受凉饮冷,或乳食不节,均可导致脾胃升降失调,水谷并走大肠而为泄泻。升阳除湿汤为首选方药。

脾为湿土之脏,喜燥而忌湿,得阳则运,遇湿则困,脾虚可以产生湿邪,湿邪又反过来困遏脾阳,二者互为因果,互相影响,在腹泻发病过程中占有很重要的地位。因此中医诊治腹泻总不离健脾利湿之法。健脾一般用芳香温燥之品,芳香之药可以醒脾化湿,温燥之药可以运脾燥湿。利湿一般用淡渗之剂,通利小便,引水旁流,以分消肠道水势,从而达到祛脾健的目的。临床常用药物有苍术、藿香、茯苓、泽泻、车前子等。倪珠英等曾对健脾利湿中药在秋季腹泻中的作用进行实验研究,证明中药可以抑制细菌生长,提高机体免疫功能,促进受病毒侵犯的小肠细胞修复,进而促进小肠绒毛细胞吸收功能的恢复。

此外还有研究用民间治疗腹泻的草药验方:如叶孝礼用失菟菜与黄连素制成克泻定胶囊、云南腹泻协作组用马蹄香、孙家琪用太白蓼、张继德用苦药治疗本病;以及高树迎的刺蒺藜煎汤外洗、薄震东的推拿疗法、孟玉蓉的穴位敷贴、赵学云的直肠给药等疗法均有较好的疗效。

黄钟玉先后用利湿和胃的胃苓汤、健脾助运的七味白术散、针刺足三里、吴茱萸敷脐及抗菌素对照诊治 804 例患儿。结果胃苓汤、七味白术散、抗菌素组全部治愈,吴茱萸敷脐 171 例中有 1 例无效,针刺疗法 266 例中 13 例为好转、2 例无效、1 例死亡。其中胃苓汤组平均两天内诸证全部消退,说明中药调理脾胃与淡渗利湿法合用为治疗本病较理想的方法。

轮状病毒肠炎是小儿常见病、多发病,流行快,传染性强,因此对本病的预防尤为重要。疫苗预防是降低发病率和死亡率的重要措施。由于人类对轮状病毒的免疫力主要取决于肠道局部抗体,因而最好探究一种口服疫苗,服用后可刺激肠道局部抗体的产生。骆成瑜等编著的《肠道感染》一书介绍正在研制的轮状病毒疫苗大致分两个途径,活的减毒人轮状病毒疫苗及多肽合成疫苗和基因工程疫苗,并且已取得初步进展,可望在不久的将来,产生轮状病毒疫苗并用于预防实践,届时婴幼儿轮状病毒肠炎的发病率和死亡率将显著下降。

## 参考文献

- 1 黄钟玉. 福建医药杂志, 1981, 3(4): 217~218
- 2 倪珠英. 中西医结合杂志, 1984, 9(3): 154~156
- 3 陈世德. 中华儿科杂志, 1985, 23(3): 129~130
- 4 王志豪. 中级医刊, 1986, 21(8): 499~450
- 5 李留振. 河北中医, 1989, 11(3): 21
- 6 向世光. 四川中医, 1989, 7(4): 14~15
- 7 谢斌. 广西中医药, 1989, 10(5): 20
- 8 冯瑞华. 江苏中医, 1990, 11(1): 12~13
- 9 张建明. 中医杂志, 1991, 32(8): 483~484
- 10 骆成榆. 肠道感染. 上海: 同济大学出版社, 1990, 213~221

(中国中医研究院广安门医院卢志主任医师、  
韩斐主治医师撰)

### 腰椎间盘突出症手法治疗机理的研究进展

随着人们对腰椎间盘突出症(以下简称腰突症)认识的逐步深入,“突出物压迫致痛”、“腰椎小关节错位”、“椎管内外软组织无菌性炎症”学说逐渐被接受而互相补充渐趋统一。在这些理论指导下,充分发扬中医学的传统优势,临床出现以非手术疗法为主治疗腰突症的新局面。特别是自1982年以来的实践证明,非手术疗法(包括手法、中药、针灸、理疗、练功等)疗效好,痛苦少,费用省,后遗症少,因而对手术疗法的选择已非常慎重。在非手术疗法中,手法治疗是主要手段,体现了中医治疗腰腿痛的传统特色。手法包括牵引和推、拿、按、摩、滚、揉、扳、抖、提、捏、拔、旋等手法的组合。统计迄今治腰突症所用手法,以牵引为主(包括机械牵引)的手法有卧姿牵、垂直牵、倒悬牵、持续牵、瞬时牵、一次牵、多次牵等10余种,组合手法已有30余种。大量的文献报告表明,不论用哪种手法,都可取得较满意的疗效,有效率在80%以上乃至99%。不同的手法都能取得好的治疗效果,其机理究竟何在?众多学者通过临床或实验研究得出了各自的结论,归纳起来主要有以下几个方面。

脊柱的纵向牵引辅以局部的按压、颤腰、晃动、摇摆,可使椎间隙增宽,椎间盘内压减低或产生负压,再加上后纵韧带被拉紧,对突出的髓核或纤维环有还纳作用,可使突出物完全还纳或部分还纳,解除其对神经根的压迫而取得疗效。1983年,吕裕生、贾庆祥等通过对部分腰突症患者牵引前后X线片进行测量,发现牵引可使椎间隙的宽度增加1.5~7mm,而且椎间隙的增加与牵引力有关,患者体重加10kg的牵引力椎间隙增宽的数值最大。1991年,路焕光观察到有病变而变窄的椎间隙,牵引时增宽的程度更明显。这就证实突出物还纳机制是可信的。那么,不加脊柱纵向牵引的一些推拿手法能否使突出物还纳呢?王正义认为旋、推、颤等手法同样可使椎间隙开大,促使突出的髓核还纳或解脱被卡压的神经根。还有人认为旋转斜扳等手法,使上下两个椎体扭转旋转,可将突出的髓核带回。为了验证突出物是否能够还纳,有不少学者做过对比观察。周吉祥等通过CT检查追踪,发现手法可以部分或完全还纳复位突出的间盘组织,复位程度的好坏与临床治疗效果有相关性,复位好疗效亦好。亦有人通过治疗前后碘油造影做对照,有60%的病人临床取得疗效而突出物所致的腰阻和压迫影象有消失或明显减轻或稍有变化。牵引手法使突出物还纳,全部或部分解除对神经根的压迫而获得疗效的机制,已被大量临床和实验资料所证实。

手法不能使突出物还纳,只是改变突出物与神经根的相对位置关系,解除对神经根的卡压或松解粘连,从而使临床症状缓解。“还纳理论”虽证实它的正确性而被人们所接受,但有不少学者同时亦观察到一部分患者经牵引、手法治疗临床获效,而突出物却没有还纳。尹海、张云、王福根等或通过造影或CT对照,都证实了这一点。章莹等施用具有代表性的旋转复位手法用新鲜尸体做了模拟试验,结果表明,手法过程不能使髓核内压呈负压改变,亦因此不能使突出的髓核还纳。认为由于脊柱的运动,会引起椎管内的神经产生相应运动,这就极有可能使突出的髓核与原

先受压的神经根发生位置改变。这一实验结论,对临床现象做了合理的解释,无疑对“还纳理论”是一个有益补充,也渐渐被人们所理解。

手法纠正“突出”后继发的椎间关节“错缝”,可解除肌肉的痉挛,恢复椎管内外力的平衡,消除椎管内外软组织的无菌性炎症,从而使临床症状缓解。从20世纪70年代初冯天有创用的“旋转复位法”及其理论被广泛采用,到80年代初直隶人倡导的“椎管内外软组织无菌性炎症”学说被普遍接受而在临床获得证实,都是以上机制的理论基础。目前采用既“整复”又“消炎”的治疗方法,在用手法治疗的同时,局部注射考的松类药物,同样取得好的疗效。如胡良臣、张儒明等的临床资料都支持以上的观点。

多种手法可使腰突症所致血浆中单胺类致痛物质含量降低,从而起到消除疼痛的作用。1985年,陆珍千、刘志诚等观察了腰突症患者推拿牵引前后血浆中单胺类物质的含量变化,结果表明,手法前血浆中单胺类物质含量高于正常人,手法后3d检查,均有不同程度的下降,去甲肾上腺素与多巴胺可降至正常人水平,5-羟色胺和它的前体色胺酸的下降程度与疗效有关。认为单胺类物质参与镇痛调节机制,其含量的下降使痛阈提高而起到镇痛作用。1986年,季季翔证实腰突症患者在接受手法治疗后尿中单胺类物质含量增高,且与疗效无关,认为推拿镇痛机理是促使患处的血液循环加快,将血循环中致痛物质带走,使其含量下降,并从尿中排出体外。这些研究结论有一定可信性,但临床实际情况是许多腰突症疼痛严重的病员,经一次牵引推拿后(如牵拉颤腰法),当即可使疼痛顿然消失,这就难以以血浆中致痛物质下降来解释,这显然是由于手法尽快解除了神经根受压或粘连,或兼以纠正了肌痉挛及椎管内外的平衡所产生的效果。

手法治疗腰突症取效的机理极为复杂,是以上各种机制的综合效果。随着临床实践经验的不断积累,人们逐渐认识到手法治疗腰突症获效的机理不是单一的,而是多种作用的综合,只是具体到不同患者而某一机制起主要作用罢了。在这种认识指导下,不少学者采取综合治疗措施,包括既牵引又用多种组合手法,再加用消炎药物及其他疗法等。对疗效的解释也包含有3种发病机制相结合的论点,既使突出物还纳或改变突出物与神经根的位置关系松解粘连,又纠正椎间关节的错位以恢复脊柱内外力的平衡,也起到促进血液循环、化瘀散结、消除无菌性炎症的作用。如姜元栋的“视病而治,因人而异”治疗原则,根据不同病情施用多种手法,一年内治疗1419例,治愈例率达85%,有效率97.2%。徐山等用牵引复位等多种手法治疗1568例,有效率95.3%。再如刘伯龄的“二步十法”,张儒明的手法加封闭疗法,路焕光采用的牵引推拿多种疗法,吕凤楼多功能牵引床的辨证应用等,都取得较好的疗效。

手法治疗腰突症,既发扬了中医学推拿按摩法法的精华,又与现代科学技术相结合,显示出巨大的优越性。迄今90%以上的腰突症可用手法治疗获愈。随着人们对腰突症的发病、诊断、疗效标准认识的深化,已经形成多种手法综合运用、不同证型辨证施用以及结合其他疗法的综合治疗的总趋势。在手法治疗中,麻醉下大推拿、超大重量牵引,因其使用不当可引起神经根或马尾的损伤等并发症,目前已较少施用。垂直牵引、倒悬牵引等可引起明显不适感甚至血压和心律的变化,也少有应用。反复多次的强力推拿或牵引,可产生继发损伤或延缓组织修复,亦不宜提倡。一次性牵引推拿法损伤小、效果好、操作简便、省时省力,如王广智、金望潮等介绍的经验,值得推广。应予指出的是,施行综合疗法需强调良好护理、充分休息、适当功能锻炼的重要性,李业甫、金望潮等都指出,经手法治疗后即时的残留症状,可以通过上述措施逐步好转,并可巩固疗效,降低复发率。

手法治疗腰突症仍有问题待研究,如不同类型腰突症的手法选择及其规律,手法与其他疗法配合应用的适应症及其选择,牵引装置的舒适化、轻便化及其“多功能”质量的提高,腰突症合并椎管狭窄、侧隐窝狭窄、骨质增生、腰椎滑脱的手法治疗等,都是有待深入研究解决的课题。

## 参考文献

- 1 吕裕生,等.中华骨科杂志,1983,3(5):268
- 2 陆珍千,等.光明中医骨科杂志,1985,1:4
- 3 刘志诚,等.中西医结合杂志,1985,5(10):615
- 4 荆海,等.中医骨科杂志,1986,2(1):33
- 5 王广智.山东中医杂志,1986,4:21
- 6 金望潮,等.中医骨科杂志,1987,3(2):16
- 7 王正义.中医骨科杂志,1987,3(4):22
- 8 王福根,等.中国中医骨科杂志,1988,4(3):34
- 9 胡良臣.中国骨伤,1989,6:21
- 10 张云,等.中华理疗杂志,1989,4:207
- 11 李业甫.中国中医骨科杂志,1989,5(6):28
- 12 张儒明.中国中医骨科杂志,1990,6(1):47
- 13 周吉祥,等.中国中医骨科杂志,1990,6(5):8
- 14 刘伯龄.中医正骨,1990,2(3):2
- 15 路焕光,等.中国中医骨科杂志,1991,7(4):35
- 16 吕凤楼,等.中国中医骨科杂志,1992,8(1):36
- 17 徐山,等.中国中医骨科杂志,1992,8(1):15
- 18 章莹,等.中国骨伤,1992,5(2):7

(山东济宁医学院王广智教授撰)

## 中医治疗髌骨软化症的进展

chondromalacia progress TCM treating 髌骨软化症又称髌骨软骨软化症或髌骨软骨病,是一种较常见的膝关节疾患,多发于运动员、体力劳动者。其主要特点是髌骨软骨面退行性改变。临床早期见有膝关节不适和柔软无力,继之出现疼痛,半蹲位和下楼梯症状加重,甚则跛行,严重影响病员的工作及日常生活。本病自1906年 Büngner 首次报告以来,国内外对其研究很多,看法不一,大致有外伤说、年龄说、营养不良说、软骨溶解说、解剖变异说、多种因素致病说等。目前一般认为髌骨软骨的长期慢性磨损和局部创伤是致病的主要因素。现代医学对本病多采用保守治疗法,亦可酌情给予手术处理,两者均可获得70%以上的有效率,但尚存在着治疗不够彻底及易于复发等缺陷。中医治疗本病,同样有着明显效果,并有其一定的优势,确系可供选择的较佳治法之一。

根据本病临床表现辨证分析,基本属于中医学“痹证”、“痿证”范畴。本病主要由劳伤逸失节或保护不当,局部在创伤及长期磨损等因素作用下,致使经络受损,气血不畅,湿热内萌,瘀滞阻闭,而见关节肿痛,活动受限,甚则跛行;在此基础上,阴血逐步亏耗,筋脉失于濡养,乃至肌肉萎缩无力,病情更趋严重。针对上述病理机制,吴林生将本病分为3个证型,主张以内服中药、外施手法进行辨证论治。若以疼痛为主,症见髌骨和其周围压痛者,为气滞血瘀型,内服四物汤加桃红、乳没,局部用松解法及铲筋、刮筋法为主;如见关节肿胀积液、关节活动不利或受限、浮髌试验或诱发试验阳性者,当属湿热酿积型,治以四妙丸加味内服,局部手法揉按膝眼及髌骨四周,按摩推捋股四头肌及腓绳肌,以促进积液吸收,改善关节活动;下蹲困难、膝无力或腿打软、上下楼梯症状加重、股四头肌萎缩者,乃属阴亏血虚型,治当芍药甘草汤加味,局部行理筋拔络法。周尊谦报告本病30例,均采用中药内服治疗,治愈12例,显效11例,好转6例,仅1例无效,其总有效率达96.6%,其药物组成为:土鳖虫、紫河车、骨碎补、白芨、丹参、血竭、没药、茯苓、牛膝;日服1剂,5剂为1疗程,本组最短1个疗程,最长4个疗程,平均3个疗程,疗效显著。李保泉等用接骨消瘀散(生乳香、生没药、生南星、五加皮、公丁香、白芷、冰片、花椒等研细末)加白糖或醋或蜂蜜调成软膏外敷,如不过敏,24~48h更换1次,8次为1疗程。1疗程后症状体征无缓解、功能无改善者为无效,停止用药。共治疗髌骨软化症25例,中23例有效,其有效率达92%。李梅君采用中药直流电导入治疗37人,50个软化髌骨,总有效率98%。其方法是:五加皮、威灵仙等量,用60%酒精浸泡一个月后滤出备用。将备用液10~20ml倒在电极上,采用双极同时导入,置于膝关节或髌骨周围,每次治疗30

~40min,每周3~6次,10次为一疗程;有滋补肝肾、祛风散寒、舒筋活络、行气散瘀之功,可缓解症状,消除积液。郭庆甫分型辨证用药乃遵中医之常规;周尊谦虽未辨证,而以辨病采用活血化瘀之品内服,治疗本病有效率达96.6%,疗效堪著;李保泉、李梅君对慢性积累性损伤在局部直接用药,使药力直达病所,改善局部循环、缓解疼痛等症状,似更合理,也确有高达92%~96%的疗效,只是前者用药有个别患者皮肤过敏,后者疗程长,病人难以坚持,且药物简单力弱,易于复发。

此外,运用伤科推拿手法及针刺拔火罐等治疗本病,亦取得较佳疗效,其中医特色更为突出。据蒋位庄介绍,常用手法有:(1)点穴法:患者取坐位或卧位,稍屈膝,医者一手扶膝上,一手点血海穴。继之,医者用双手拇指点患者双侧膝眼穴。(2)压推法:患者平卧屈膝,双手拇指交叉,压住膝下韧带,然后稳力向上推,反复数次。(3)推揉法:患膝伸直,双手拇指压住髌骨的下缘,向上推揉,然后再按住髌骨的上缘,向下推揉,反复数次。(4)扣提法:医者用单手扣住髌骨,稳力向上扣提髌骨,顺髌骨边缘反复扣提数次。(5)圈晃法:患者坐位,医者半蹲位,一手扶患膝,一手握踝部,顺逆时针方向或顺时针方向反复晃数次。其它尚有刮筋法、泻筋法、捶击法、镇定法和扳压法数种。上述所有手法结合运用,可起到疏通气血、活血通络、缓解疼痛之作用。郭庆甫等运用手法治疗132例、150个软化髌骨,运用摩髌、捋膝(捋、点、拿内外膝眼)、拿股(拇食指分别置血海、梁丘穴处用力抓提股四头肌)、弹筋(双拇指反复弹拨股二头肌及半膜肌肌腱)四步,以上手法每次10min,每周1次。经手法治疗后,1次症状消失者7例,两次消失者28例,3次消失者50例,4次症状消失者12例,随访97例,最长两年,最短5个月,优良率达97%。陈伟敬用按摩髌周及髌缘、搔刮粗糙软骨面、理顺放松髌周软组织等手法,间隔3d1次,3次为1疗程,治疗36例。1疗程后痊愈9例,显效24例,无效3例,总有效率91.7%。彭启琼用针刺加拔火罐治疗本病82例,取穴:内膝眼、外膝眼、鹤顶、阿是穴、犊鼻,针刺得气后,平补平泻,留针15~20min,拔针后用小口经火罐拔15min,15次为1疗程,有骨质增生者,配服抗骨质增生丸。结果为:痊愈26例,显效32例,好转21例,总有效率96%。上述治疗方法简便,费用低廉,疗效肯定,易于推广。

对本病无论使用上述哪种方法治疗皆可取得一定效果,但彻底治愈率仍然偏低,进一步提高疗效将是今后一段时期内的研究重点;同时,如何预防本病的发生亦是值得重视的研究重点。其基本发展趋势是,对本病展开中西医及其他相关学科(如生物力学、骨科营养学、骨科康复学、免疫学、生物工程学及电子工程学等)的多学科综合研究,改进包括膝关节镜在内的诊查技术,在明确病因病理和诊断的基础上,一是通过大量临床经验的总结和进行动物实验,筛选出更具有针对性的有效药物和其他治疗手段;二是为预防提供坚实的理论依据和切实可行的具体措施。虽然在相当长的时期内,本病仍以保守疗法为主要手段,但随着新型材料的研制成功,对本病晚期患者可采用人工髌骨置换术,预计在20世纪内即可实现。

## 参考文献

- 1 李梅君.中国运动医学杂志,1985,4(1):39
- 2 陈伟敬.按摩与导引,1986,1:16~17
- 3 彭启琼.中国针灸,1988,8(6):37
- 4 吴林生.中国中医骨科杂志,1989,5(4):23
- 5 郭庆甫,等.按摩与导引,1989,10:13
- 6 周尊谦.湖南中医杂志,1990,1:14
- 7 李保泉,等.中医正骨,1990,2(4):25
- 8 蒋位庄,等.中医骨病学.北京:人民卫生出版社,1990.5:231~232

(安徽中医学院附属医院李保泉副教授撰)

**中西医结合治疗职业性皮炎** 职业性皮炎,是指在劳动或作业环境中直接或间接接触具有刺激性的或致敏作用的

职业性有害因素引起的急慢性皮肤炎性改变,此病约占整个职业性皮肤病的80%~90%,是影响工人健康的重要职业危害之一。

我国对职业性皮肤病记载甚早,《素问·生气通天论》中有“劳汗当风,寒薄为皴,郁乃痱”的记载。晋朝《肘后备急方》记载,治疗漆疮的方法:汉椒汤洗之;汤溃芒硝浓涂之;羊乳傅之;莲叶干一斤,水一斗,煮取五升洗疮;韭菜研傅之等。隋·巢元方《诸病源候论》记载:“漆有毒,人有禀性畏漆,但见漆便中毒,喜面痒,然后胸壁脘膈皆悉痒,面为起肿,绕眼微赤,……若火烧漆,其毒气则厉,著人急重,亦有性自耐者,终日烧之,竟不为害也”。唐朝《千金要方》记载治疗漆疮方:“生柳叶三斤细切,以水一斗五升煮取七升,适寒温洗之,日三”,并记载柳叶杀毒虫,虫乃湿热所化,杀虫,则去湿之义。《外台秘要》记载:“煮香薷以渍洗之,造酒小曲捣末以粉之,干即以鸡子白和涂之”。明朝《证治准绳》记载:“漆疮用荷叶燥者一斤煮水洗之,以贯众未掺之,干则油和涂,黄护木煎汤频洗,莽草叶、无名异等末调敷”。《外科正宗》记载:“漆疮……俗称木生人感之非也,但漆乃辛热火象,有毒之物入之,皮毛腠理不密,故感其毒先发为痒,抓之渐似癩疹出现,皮传遍肢肢,皮破烂流沫作痛,甚者寒热交作,宜韭菜汁调三白散涂之,服化斑解毒汤。忌浴热水兼戒口味,不然变为顽风癩愈而又发者多矣”。清朝《外科全生集》治漆疮用杉木屑煎汤温洗,续以蟹黄、滑石二末,白蜜调敷。《串雅外编》记载:“人有见漆气上腾,著人而生漆疮者,川椒三四十粒,捣研涂口鼻中则不为漆所害”。

随工业发展,因接触化学毒物所致职业性皮炎多而面广。按病因和机理可分为职业性刺激性接触性皮炎与职业性过敏性(变应性)接触性皮炎。后者属于Ⅳ型迟发型接触性过敏反应。Ⅳ型变态反应的有无是区别变应性皮炎和刺激性皮炎的基本点,治疗亦有所不同。

内服 西药主要应用:(1)抗组胺类药物,如扑尔敏、酮替芬等。(2)维生素丙。(3)激素类药物,如强的松、地塞米松。中医主要依据辨证分型用药:(1)热毒炽盛者,治以清热解毒、凉血化斑,药用生地、赤芍、丹皮、紫草、茜草、白茅根、麦冬、石斛、竹叶、石膏、知母、玄参、黄连、黄芩、山栀、大黄、黄柏、银花、野菊花、蒲公英、连翘、板蓝根、白蚤休、紫地丁、蝉蜕、苦参、僵蚕、白鲜皮、刺藜、地肤子、薄荷、甘草等;方剂有:化斑解毒汤、朱氏皮炎汤、吴氏玉女煎、加味消风散等;成药有清解片、牛黄解毒丸、牛黄犀羚丸、栀子金花丸等。(2)湿热蕴结者治以清热凉血、利湿解毒,除上述药物外,可用龙胆草、茯苓(皮)、苍术、泽泻、车前草(子)、苡米仁、土茯苓、木通、滑石、萹蓄等。方药E 龙胆泻肝汤、泻青丸、当归龙荟丸等。(3)血燥生风者治以滋阴养血、清燥熄风,方药有胡麻仁、白蒺藜、生地黄、丹皮、赤芍、首乌、地肤子、蝉衣、蜂房、蒺藜草、荷叶,白糖为引。陈鸣皋等对演员化妆品皮炎采用改变化妆品原料的抗原性,并为患者配制油彩等系列化妆品,取得较好的效果。

外用 西药宜用炉甘石洗剂、3%硼酸液或1%雷佛奴尔液冷湿敷,可减轻渗出。尔后用激素类霜剂(强的松霜、地塞米松霜、丙酸倍氯美松霜、肤乐膏、乐肤液等)。皮肤粗糙肥厚者用激素类霜剂或肤疾宁胶布与激素类霜剂交替使用。中药洗剂有:红黄液(红花、大黄、黄柏、牡丹皮各100g煎水)、四黄三子汤(大黄、黄柏、黄芩、地肤子、蛇床子、苍耳子、土茯苓、白鲜皮、苦参、鱼腥草、防风各15g,黄连10g,白矾30g)、克痒敏液(山乌龟、山苦子、三桠子、七叶一枝花、毛麝香、两面针、苦参、黄柏、蛇床子等)、朴黄洗剂(生山楂、大黄、朴硝、千里光或蒲公英、明矾)、杷叶三黄汤(枇杷叶45~60g,黄芩、黄连、黄柏各60g)、黑了脱敏洗剂(黑面神60g,了哥王60g,蛇泡桐60g,地胆头60g,胆矾45g)。中药苦参30g,双花10g,枳壳10g,连翘10g,秦艽12g,蛇床子10g,荆芥6g,甘草6g,煎水外洗,或用银花、苍术、白鲜皮、地肤子、蛇床子、花椒、明矾、雄黄等煎水外洗。三石水、马齿苋、地榆煎水冷湿敷。中药散剂有:新三妙散(黄柏面30g,寒水石15g,青黛面3g,)、三白散(杭粉30g,石膏10g,轻粉16g,研末)、

收湿粉(甘石12g,滑石30g,陈小粉30g)、生肌散。中药膏剂有清凉膏(当归30g,紫草6g,大黄4.5g,香油500g,黄蜡120g)、谭立平用山余子0.2g,地肤子3.5g,冰片3g,枯矾3.8g,扑尔敏24mg,研末,氢考注射液150mg,雪花膏50g,拌糊状外涂;王桂珍用紫草25g,白芷25g,银花25g,冰片1.3g,花生油400g,蜂蜡6.2g,外涂;玉露膏、五石膏、四黄膏、金黄膏、生肌玉红膏等也可选用。

针刺疗法 穴位:百会、风池、大椎、胃俞曲池、承扶、委中等穴。伴胃肠症状者取中脘天枢、足三里等穴。伴便秘者取大肠俞、丰隆等。对于局限性病变,如面部皮炎取阳白、四白、印堂、太阳、瞳子髁等穴,并配用1~2个远隔穴。

ACD的发病机制:现已知道当抗原或半抗原经皮肤进入机体后,刺激T效应细胞( $T_E$ )的前体细胞,同时也刺激T抑制细胞( $T_S$ )的前体细胞。前者受刺激后形成 $T_E$ 细胞,导致ACD,而后者形成 $T_S$ 细胞,活化的 $T_S$ 细胞限制 $T_E$ 的产生,从而可减弱甚至抑制ACD。原发刺激性接触性皮炎和变应性接触性皮炎之间可相互影响,同一患者可并相发生两类型接触性皮炎相互影响。实验证明,患变应性接触性皮炎豚鼠的非炎症部位的皮肤对重铬酸钾刺激作用的敏感性升高,表现为刺激阈降低,刺激性皮炎的严重程度增高。同时实验还提示当原发刺激性接触性皮炎存在时,可使变应性接触性皮炎激发试验时所需最小激发浓度降低,即接触更少量致敏物也可诱发变应性接触性皮炎。有些变应性接触性皮炎患者可对与其变应原结构相似的化学物质过敏(交叉敏感)。亦有些患者反复接触后产生免疫耐受性而不再发病。接触性皮炎(职业性)患者血清免疫复合物(CIC)值升高同时, $C_3$ 值大多数降低。由于反复抗原刺激使 $C_3$ 合成增加而释放到血循环中 $C_3$ 增加,使CIC值升高。这对防治职业性接触性皮炎具有重要意义。蔡有龄等研究发现,中国漆的致敏原是其挥发性物质,暂定为漆酚内酯,而不是过去认为是漆酚。Gilcrest和John的实验证实,紫外线中波紫外线(UVB,280~320nm)和大剂量的长波紫外线(UVA,320~400nm)有脱敏作用。有人观察用二硝基氯苯引起豚鼠试验性接触性皮炎,其主要改变为 $PGD_2$ 合成受抑制,脂氧合酶活性受抑制,以及以产生 $PGD_2$ 为主变为以产生 $PGE_2$ 为主。四氢吡喃酮盐引起的刺激性皮炎中,虽真皮有刺激 $PGE_2$ 生成的因子存在,但表皮环氧合酶活性受抑制。有人报道,某些具有免疫毒性作用的化学物质可使机体免疫功能改变,亦有对巨噬细胞产生毒性作用等,治疗要考虑这些因素。

Silberg于70年代初开创对豚鼠实验性接触性皮炎中郎格罕氏细胞(LC)的研究,发现LC在接触性变态反应中起关键作用。Falok等用斑贴试验研究了人类接触性皮炎,发现LC起传递接触变应原的作用。王秉鹤观察LC的动态,显示LC在接触性变态反应的早期、极期以及恢复期均起重要作用。杨蓉娅等通过透射电镜观察,结果是示LC可能作为一种携带抗原及释放细胞,并充当致敏淋巴细胞的靶细胞在ACD免疫病理中起关键作用。既然LC起传递变应原的作用,那么将变应原涂布于人为功能性耗损的LC(如紫外线照射)部位或通过其它途径(绕过LC系统)给予变应原不会致敏,而是诱导产生特异性T抑制细胞,引起免疫耐受性,从而有希望克服和消除已有的过敏状态。最近研究证实,境界线(GR)能抑制ACD的发生,但这种作用3周后是可逆的,与表皮LC的恢复平行,提示LC是始动ACD所必需的,但其数量与ACD反应的强弱无关。有人报道接触性皮炎明显与肥大细胞及嗜碱性白细胞有关。它俩可释放多种介质,如组胺、5-羟色胺、白三烯。白三烯可通过数种途径介导接触性皮炎。近来又发现,存在着一个神经-内分泌-免疫细胞轴,它们在接触性皮炎中的最终作用还在研究中。有人研究发现, $a_1$ -AT(血清 $a_1$ 抗胰蛋白酶)是一种重要的血浆蛋白酶抑制剂,它是一种抗炎症蛋白质和免疫调节剂,能抑制淋巴细胞活化、抗体的产生。

目前已证实治疗Ⅳ型变态反应的中药水提取物有:朝鲜人参中国人参与中国厚朴、茯苓,具显著抑制作用,尤以中国厚朴的作用最为显著;小柴胡汤、半夏厚朴汤呈抑制倾向,柴朴汤呈显著



抑制作用。柴朴汤对迟发型变态反应的抑制作用在反应期较强；温清饮亦有抑制迟发型变态反应的作用，主要在诱导期出现抑制作用。陈华、孙秀珍先后报道青蒿琥酯、青蒿素及其衍生物对小鼠 ACD 具有明显抑制作用。其机理认为前者与限制  $T_E$  的产生，从而减弱甚至抑制 ACD 有关，且可提高  $a_1$ ~AT 活性；认为后者与抑制小鼠脾细胞产生 IL-2 有关。钱起丰报道雷公藤对豚鼠 ACD 有显著的抑制作用。

#### 参考文献

- 1 王秉鹤, 中华皮肤科杂志, 1985, 18(1): 13
  - 2 钱起丰, 中华皮肤科杂志, 1985, 18(1): 2
  - 3 王本娣, 等, 职业医学, 1986, 13(5): 19
  - 4 江田昭英, 国外医学(中医分册), 1986, 8(3): 167
  - 5 森泽成司, 等, 国外医学(中医分册), 1986, 8(6): 331
  - 6 陈华, 等, 中华皮肤科杂志, 1990, 23(4): 250
  - 7 孙秀珍, 等, 中西医结合杂志, 1991, 11(1): 37
- (安徽省职业病防治研究所戴行资撰)

**金针拨障术的研究进展** 在眼球的睫状体平部选择内眼手术切口, 是中医眼科界一长期沿用并坚持进行“金针拨障术”的切口部位。通过现代光电仪器的检查, 生理、病理学深入观察, 临床长期的随访, 证实选择该部位作内眼手术切口有较大的安全性、科学性和可行性, 已成为现代眼科学界近年来所积极推崇的手术切口部位之一。

有关金针拨白内障手术的记录, 应追溯到 1400 年以前的南北朝时期, 《梁书·鄱阳王恢传第十六》曾谓: “后又有目疾, 久废视瞻, 有北渡道人慧龙下针, 豁然开朗, 咸谓精诚所致”。唐代王焘所著《外台秘要》亦有“金篦刮目”之述, 但未详述施术过程。至元代倪维德《原机启微》则比较明确指出手术进针部位为距角膜如米粒大小。发展到清代中叶, 黄庭镜总结自己长期积累的经验, 在《目经大成》中确切指出手术切口部位是“针锋就金位, 去风轮与锐眦相半, 正巾插入, 毫发无偏”。西方医学界在中世纪也曾运用类似于“金针拨障术”的方法, 即用针将内障向玻璃体压陷(压后法), 或引起内障斜倒(压倒法), 使部分瞳孔恢复透明而取得部分视力。由于这种手术不仅引起严重的手术后组织炎症反应, 且存在着继发性青光眼、视网膜剥离、眼内出血以及玻璃体混浊等重大威胁。另外, 因睫状体区的穿通伤, 常有交感性眼炎发生的可能, 因此国际眼科界早已放弃不用。中国中医研究院广安门医院唐由之 1959 年从事睫状体平部手术切口的研究工作, 根据我国金针拨障术百余年的临床经验, 及《目经大成》的记载, 以现代眼科学的解剖标志定位, “金针拨障术”手术的部位是在眼外眦与外侧角膜缘连线之中点, 相当于眼球内面睫状体的平部白色正中线上附近, 设计了相应手术器械和手术程序, 应用于临床实践。1969 年又开始探索白内障针拨套出术, 使睫状体平部切口的研究更加向深度和广度发展。

在睫状体平部作切口的白内障针拨术、针拨套出术, 是将切口设计在眼球颞下方距角膜缘 5mm 处, 平行于角膜缘的切口。前者手术切口长约 3mm, 后者长约 6~8mm。作切口的要求是内口大于外口, 即睫状体平部切口大于巩膜切口。用裂隙灯三面镜及压陷装置检查, 观察到 85 上眼的睫状体平部切口, 其形态为切口两层均未接触愈合, 而是分别与其相邻的巩膜内面粘着中间暴露一个狭长的巩膜面, 瘢痕中有的可见毛细血管伸入, 有的可见色素颗粒, 内口睫状体组织缺如, 可见结缔组织, 残留色素颗粒及色素团块, 切口两侧睫状体组织分别愈着在巩膜内面。

选择睫状体平部的切口位置很重要, 一般要求切口选在睫状体的突起部后缘至平部白色正中线上之间的约 2mm 宽度的环状区内。若切口位置靠前, 切口将会在睫状体突起部, 此部位组织较厚, 血管和神经纤维丰富, 有虹膜血管大环在其前部, 还有许多环状肌纤维。在此作切口时, 有不易穿通的可能, 或者形成内口小”于外口的状况, 如不注意, 在进入手术器械时, 会造成对睫状突部的推顶、挫伤或撕裂, 可能引起术中出血或色素膜脱落, 术后

炎症也会较重。事实上在裂隙灯三面镜的检查中, 发现二眼切口在睫状突部, 外观与平部的切口相似, 同样可见到一个狭长的巩膜面瘢痕, 然而其表面有少量灰白色机化物覆盖, 说明术后局部反应较平部为重。如果切口位置偏后, 接近锯齿缘部, 因其血管较少, 组织相对较薄, 作切口时易于穿通, 出血机会少, 对睫状体和晶体悬韧带纤维等影响较小, 都是解剖学上的有利条件。但因锯齿缘部以囊样变性为主的退行性改变发生率较高, 老年人甚为常见, 如手术切口达到此部, 囊样变性区必将受到影响, 甚至促使破孔形成。如切口在锯齿缘的视网膜部, 则更易人为造成视网膜裂孔, 导致视网膜脱离。因此, 切口不宜在睫状体突起部, 也不宜在接近锯齿缘部, 更不应在锯齿缘后的视网膜部。在睫状体平部作切口, 睫状肌纤维沿子午线方向分别向两端收缩, 并附着于巩膜内壁, 不再衔接愈合, 切口两层中间暴露出一个小的狭长巩膜面, 所以不会嵌入巩膜切口外。另外, 由于切口断端收缩的肌纤维压迫切断的小血管, 可以起到止血作用。在手术过程中, 只要按操作要求进行, 不发生意外的睫状体组织挫伤或撕裂, 是不易引起出血的。

睫状体平部手术切口的优点是: 不影响角膜屈光面, 术后不易发生角膜散光, 一般均能保持原瞳孔, 保持正常瞳孔的辐辏反应和对光反应; 术后矫正视力较满意; 手术不会破坏具有重要生理意义的房角和滤帘, 避开手术眼正常的角膜缘球结膜组织, 给其他内眼手术保留条件; 手术对眼前节影响少, 术后反应轻, 不会发生前房迟恢复、虹膜脱出及瞳孔上移等并发症。当然, 也有一定的缺点, 如对前部玻璃体扰动和少量玻璃体的外溢。

通过大量的临床实验和长期随访, 以及术后眼球的病理组织学观察, 证明在睫状体平部作手术切口是安全可行的, 有其科学根据。在无菌操作下, 以锐利刀片快速切穿巩膜及睫状体平部, 是区别于眼角膜缘外睫状体区穿通伤容易出血并引起交感性眼炎的重要原因, 从而改变了睫状体部位是手术“危险区”的固有看法, 为在睫状体平部作切口广泛开展内眼手术打下了理论基础。中国河南医学院张效房教授首先采用睫状体平部切口作眼球内后部异物取出的手术, 大大简化了手术程序, 降低了难度, 提高了疗效。国内不少地区, 在针拨套出术切口的启发下, 充分发挥睫状体平部切口的优点, 适当扩大切口至 10~13mm, 再用内障匙将白内障托出球外; 也有少数病例在颞下方作手术切口有困难时, 改在颞侧, 颞上方或鼻上方的平部作切口。由此可见, 在睫状体平部作切口的位置, 在上、外、下 3 个方位上均已较多的临床实践。因白内障针拨套出术取得较好的疗效, 曾于 1985 年 10 月, 获得中国国家科学技术进步奖二等奖。

国外自 1974 年以来, Machermer 开始采用睫状体平部作切口进行玻璃体切割术, 现已为世界眼科界广为应用。至于切口的长度, 在开放性睫状体平部玻璃体切除术中占睫状体平部环状区周围的 170°~240°之间, 足以说明在睫状体平部作切口, 完全能满足眼科临床作眼球手术的需要。这是因为睫状体内的血管是网状分布, 一般不致引起前段的血运障碍。

由于睫状体平部切口在内眼手术中具有的科学性、安全性、效果好等优点, 为眼球内的中后部手术的发展, 如白内障超声震荡吸出术、玻璃体切割术、视网膜激光凝固术、球内异物摘出术, 乃至人工晶体植入术等新方法、新技术的应用, 开创了广阔的前景。

#### 参考文献

- 1 郭秉宽, 眼科学, 北京, 人民卫生出版社, 1965, 278, 356
- 2 张效房, 眼内异物的定位与摘出, 北京, 人民卫生出版社, 1976, 151~160
- 3 毕嘉琪, 等, 中华眼科杂志, 1984, 20(5), 271~273
- 4 黄庭镜, 目经大成, 北京, 人民卫生出版社, 1987, 146~156
- 5 唐由元, 等, 中国中医眼科杂志, 1991, 1(1): 8

(中国中医研究院广安门医院高健生主任医师撰)

**中医治疗牙周病** 牙周病是发生于牙齿周围组织的一种

慢性破坏性疾病,它和龋齿一样是危害人类健康的两大口腔疾患。世界卫生组织将龋病列为心血管病与癌症之后即第3位重点防治的疾病,而牙周病的发病率仅次于龋齿,且病程长,治愈率低,易复发。其临床特点是初起无自觉症状,一旦发生牙龈红肿、牙周袋溢脓、牙齿松动、疼痛时往往已趋晚期。若不及时作有效治疗,其牙齿丧失的数目不是单个的,而是多数甚至同时累及全口牙齿,造成缺牙,从而影响全身健康。口腔卫生不良、牙石刺激、食物嵌塞、细菌感染和菌斑形成是引起本病的局部原因。全身状况差、抵抗力降低以及患有慢性疾病如内分泌紊乱、代谢障碍、营养不良等是牙周病发生的全身因素。治疗需局部用药和全身用药同时进行,但疗效欠佳。手术治疗效果较好,但缺点是容易引起牙龈收缩,牙根暴露,牙周隙增宽,不但会产生冷热刺激症状,如果是门牙还会影响美观,不易被患者接受。中医药治疗牙周病则显示出一定的优越性。

中医无牙周病之称,历代文献资料对“齿齲”、“牙疳”、“齿漏”、“牙宣”等症状的描述与本病基本相同,认为本病的发生与肾虚、胃火、脾肾不足、气血两虚、风热上扰等有关,对其病因病机与治疗方法都作了概述。如《景岳全书》说:“肾衰则齿齲,精固则齿坚。……若肾阴本虚,胃火复盛,上实下虚而为热渴肿痛者,玉女煎为最妙”。《血证论》认为,“口乃胃之门户,牙床尤为胃经脉络所绕,故凡衄血,皆是胃火上炎,血随而动……”。《诸病源候论》说,“牙齿皆是骨之所结,髓之所养。……若血气充实,则髓强盛,其齿损落,犹能更生,若血气虚耗,……不能复生”。

现代中医治疗牙周病,主要是根据临床发病不同阶段的不同特点结合全身状况进行辨证论治,采用整体治疗和局部用药方法,其辨证分型是逐步发展、不断完善的。可以归纳为胃火炽盛、风热搏结、阳明湿热、肾虚胃热、肝肾阴虚、脾肾阳虚、气血不足等多种类型,由此而有清泻胃火、疏风清热、清热燥湿、补肾清热、滋补肝肾、温肾壮阳、气血双补等众多治法及与其相适应的方药。总的分实、虚两大类,治以清泻胃火及补肾固齿二法。清泻胃火常用药物有黄连、生石膏、丹皮、生地、紫草、大青叶、蒲公英、银花、野菊花、夏枯草、山栀、连翘、黄芩、大黄等。补肾固齿常用药物有黄芪、肉苁蓉、骨碎补、仙灵脾、枸杞子、女贞子、补骨脂、续断、桑寄生、熟地、鸡血藤、肉桂、附片等。有学者报道益肾固齿药物能促进牙槽骨再生,使牙齿趋于稳固,改善咀嚼功能。他们采用注射可的松造成动物牙周病的肾虚模型,然后喂食补肾固齿药物并设对照组,经一般观察和显微镜观察,发现给予补肾固齿药物后,出现牙槽骨重新沉积,成纤维母细胞的活性增强,并有调整内分泌作用,还可使低下的RNA、DNA合成率提高,使低下的免疫功能恢复到正常水平,能明显地改善可的松造成的肾虚牙周病,变。这一实验为中医治疗牙周病提供了动物模型和实验手段。

中医治疗牙周病在局部用药方面已从古老的传统型吹口剂发展成用冰硼散、锡类散、青黛散、珠珀散等局部涂搽,用各种中药制成的漱口剂作漱口用,做成牙粉型和牙膏型刷牙剂作刷牙用,做成牙龈粘膜注射剂作粘膜局封用,做成膜剂作牙周袋内药膜插入用,还有针灸及耳针等多种治疗方法。近几年来,牙周袋内局部用药已引起有关学者重视,特别是牙龈粘膜注射剂和牙周袋内膜剂的使用能使药物直接作用于患病的牙龈组织,达到治疗目的。如将当归、川芎、红花等活血化瘀中药制成注射剂,加上2%普鲁卡因,按3:1比例,在每一患病牙龈附近粘膜处作局部封闭,可促进牙周组织的血液循环,活跃新陈代谢,增强牙周组织的抗病能力。用清热解毒中药制成药膜,剪成细小药条插入牙周袋中,能缓慢释放药物,持续性抑制致病菌的繁殖和聚集。体外实验资料证明,这些药物可抑制螺旋体等多种杆菌,临床应用后,观察牙周袋内的菌丛组成发生变化,厌氧菌比例显著下降。

在临床报道的文献资料中,不论中药内服或局部用药均获得不同程度的疗效,若采用内外并治、中西医结合综合治疗,其疗效更佳。由此可见,中医药在牙周病中的应用已越来越广泛,并且显示了良好的发展前景。但是总体看来,目前尚未形成统一的

分类方法和辨证标准,缺乏具有说服力的客观指标和系统的对照观察研究资料,还只停留在以中药内服和局部用药为主的临床观察,存在着一定的主观性,没有明显的突破。随着人们对健康越来越重视,防治牙周病已成为口腔医务工作者的重要任务。西医对本病的发病原因尚未十分明确,治疗效果也不够理想。而中医或中西医结合治疗本病却大有发展前途。目前的状况是口腔医务工作者熟悉中医的人很少,又缺乏专门的机构来领导从事这一方面的研究工作,因此,发展中医口腔学科,建立中医口腔科,大力培养这方面的人才当务之急。一方面须从有关资料中发掘整理出系统的实用的文献,汇编成专著,另一方面在临床应广泛开展中医药防治牙周病的系统性研究,以使这一领域研究工作有新的突破。

#### 参考文献

- 1 徐渭桥,浙江中医杂志,1982,8:368
- 2 张学能,等,上海中医药杂志,1985,5:25
- 3 樊明文,等,中华口腔医学杂志,1988,23(6):324
- 4 赵瑞芬,等,中华口腔医学杂志,1988,23(6):368
- 5 雷焰中,湖北中医杂志,1989,1:19

(上海市中医门诊部曹翠娥主任医师撰)

#### 中药学

中药学是研究防治疾病和延年益寿物质(包括天然品和加工品)的一门实践性很强科学。20世纪以前,药理学本无中西之分,所有关于药品的知识、文献、著作大多以“本草”(欧洲公元1世纪的“Materia Medica”,19世纪开始代之以“Pharmacognosy”,都与药理学即本草同义)为名,因为“诸药中草类最多也”。它的奠基性成果是汉代的《神农本草经》(以下简称“本经”),以药品对人体的效应为依据,首创上、中、下三品分类法,对采制、产地、制剂、君臣佐使、药性的阴阳和四气五味、毒性和临床应用等汉以前的药理学理论进行了初步总结,按气味一主治的模式记载每味药物,至今还是中药学的基本内容。梁代陶弘景“区畛物类”,始分药品来源为动(虫兽)、植(草木)、矿(玉石)及食品;开药效分类之先河,表列病症用药名单;对“本经”建立的药理学理论多有发挥,尤其对炮制、制剂的论述更为精辟;第一个使用“药术”和“药理”名词,提出“畏恶七情表”、“合药分剂”、“解毒”的药名单、“服药食忌例”、“药对岁物药品”(物候表)等均属创造性的贡献。唐《新修本草》由政府编修,颁布,相当于现代的药典,是最早采用图文形式的药物法典,直到20世纪80年代末中国药典才恢复了传统。宋、元、明、清本草学家辈出,生药(相对于熟药即炮制品)和药材的名称见诸本草,尤以李时珍的《本草纲目》超前启后,其影响远播他邦且经久不衰,根本原因之一是继承性和批判性的完整结合,首倡“从微至巨”、“从贱至贵”的自然分类思想,把药物分为16纲、60目,目下“各以类从”,经常闪烁出物种亲缘归类的火花(如菊科属属、姜科姜黄属的多种药物排列在同一卷),大量深入调查所得的第一手资料、大量实用性很强的附方被保存下来,大量“考释性理”的真知灼见、发明正误和理论探讨(“格物之学”),为现代中药学的诞生奠定了坚实的基础。

20世纪以来,现代科学的加速度发展,使本草或药理学被迫冠以“中”字,便于与西方药理学相区别,出现了众多的基本同义的提法或倡议建立分支学科,说明现代中药学已经确立,而且正如现代药理学一样,它也是一个开放的学科系统,随着自然科学的进步,它也将包含很多的分支学科。1984年,高等医药院校的统编教材部给中药学下过定义(狭义):“专门研究中药基本理论和各种中药的来源、采制、性能功效及应用方法等知识的一门学科”。这一定义有利于学科的建设和发展。除此之外,中药学还应当是中国各民族药学的集合。

现代中药学的发展大致分为3个阶段:1956年5所中医院建立以前为初创时期,通常采用本草、生药、化学、剂型改进、药理研究等途径,主要对单味药进行实证性研究,是为第一阶段。80年代以前,各分支学科基本定型,并有全国统一的教材供中医

学院和高等院校教学之用(中药的分类不外乎笔画、生物科属系统、药性、药理作用、药用部位、化学成分等),是为第2阶段。此后为第3阶段:青蒿素、氟尿嘧啶等新药的研制成功,吸引更多的探索者努力发掘,复方及其制剂疗效得到进一步的肯定,但科研工作尚未取得突破性进展。80年代以来研究的热点有:(1)理论研究有病理生理条件下中药十八反的实验研究,药对和配伍与药效和成分变化的关系研究;(2)药材研究有紧缺贵重药材的栽培或养殖、环境和资源的保护、道地性研究,以及药材的炮制研究;(3)产品开发研究(治疗、保健和抗衰老);(4)标准化研究,包括药材、医院制剂、药厂产品,其基础是有效物质和安全性的确定,药典标准和中药标准的不断提高或完善,各级重点实验室将逐步达到GLP的要求。根据专家预测和论证,这些热点将会延续到20世纪末,并且希望中药注射剂的研究能取得实质性突破,以解决中医急症用药问题。

#### 参考文献

- 1 李时珍.本草纲目(校校本).北京:人民卫生出版社,1979.44~93
- 2 凌一揆,等.中药学.上海:上海科学技术出版社,1984.3~17
- 3 胡世林.中国医药学报,1986,1(2):15~17

(中国中医研究院中药研究所胡世林研究员撰;郑品清教授审)

### 中药复方的现代研究 modern research of chinese

herbs prescription 中药复方具有疗效高、毒副作用小的优点。据不完全统计,全国约有25个省、市、自治区及解放军的113个单位开展了中药复方的研究工作,并取得一定成果。人们在研究探索的过程中,越来越认识到中药复方研究的重要性,它有利于阐明药理,提高疗效,有利于充分利用药源,促进中西医结合。

**药理学方面的研究** 传统中药复方的药理研究首先是围绕着验证功效,为临床使用提供理论依据而进行的。许俊杰等将常用的清热及解表类方剂,如九味羌活汤、柴葛解肌汤、银翘散、桑菊饮、犀角地黄汤、黄连解毒汤等对五联疫苗造型家兔体温影响进行观察,结果表明,各复方均有显著的解热作用。茵陈蒿汤具有清热利湿退黄的功效,动物实验证明,此方药能明显地引起胆囊收缩,具有利胆作用,还可使血清胆汁酸胆固醇含量改变。小青龙汤的实验资料表明,这一复方组成既有抗过敏作用和抗胆碱能神经作用,又可直接松弛支气管平滑肌,从而为小青龙汤平喘止咳的功效提供实验证据。其次,药理研究证实了方剂配伍的合理性。四逆汤具有强心、升压、抗休克作用。药理实验表明,单味附子虽有一定强心效应,但不及四逆汤,且可导致异位性心律失常;单味甘草不能增大心脏收缩幅度,但有升压效应;单味干姜未显示任何有意义的生理效应。而二药组成的四逆汤,其强心升压效果均优于各单味药,且能减慢窦性心率,避免单味附子所产生的异位性心律失常,说明该复方组成的合理性。补中益气汤对子宫及其周围组织有选择性的兴奋作用,除去升麻、柴胡则作用减弱;若单用升麻、柴胡则无此作用,可见复方的药理作用绝不是复方中各单味药作用的简单相加。其它如生脉散抗心源性休克、失笑散治疗心绞痛实验、八珍汤和四物汤对血压及红细胞再生的影响,六味地黄丸对实验性肿瘤的影响等研究结果,都从不同角度对中医治病的机理和方剂的配伍原则提供了实验依据。

中药复方药理学研究,还有助于沟通中西医理论,促进中西医结合。如有人以大量皮质素造成的动物耗竭现象,颇似中医“阳虚”证,而助阳药(附子、肉桂、肉苁蓉、仙灵脾)可以对抗这种耗竭现象。另外,六味地黄汤只对肾性高血压模型有效,而附、桂二味药只对肾上腺性模型有效。这颇与中医学六味地黄汤补肾阴、附桂温肾阳的理论吻合,揭示中医肾虚似与西医的肾上腺皮质功能有密切联系。

**病理学方面的研究** 通过病理方面的研究,对中药复方治疗疾病的原理得到进一步的阐明。如大黄牡丹汤治疗阑尾炎,除了增强阑尾蠕动、促进血液循环外,还可以引起阑尾粘膜固有膜和

淋巴小结内的网状细胞活跃、增生和吞噬作用,促进脾脏网状内皮细胞的增生和吞噬功能,促进肝脏组织学改变,说明该方药可以显著地加强网状内皮系统的吞噬功能而起到消炎抗菌作用。复方丹参注射液在静脉滴注中,可见微血管内红细胞的流速和流态改善,血液粘滞度下降,手指与脑血流量增加。补阳还五汤亦有下降血液粘度作用,故对缺血性中风有效。血府逐瘀汤有抑制ADP诱导家兔血小板聚集的作用,复活肝脏的清除功能,促使凝血物质纤维蛋白降解产物等抗凝血物和纤维蛋白降解产物等抗凝血物质及时被清除,因而可用于治疗急性弥漫性血管内凝血。

**免疫学方面的研究** 辽宁中医学院、广州中医学院、军事医学科学院等单位分别对四君子汤进行研究,结果发现四君子汤及其成分党参、白术、茯苓均有明显提高小鼠腹腔巨噬细胞吞噬功能的作用,其中尤以党参最为显著。党参、白术、茯苓中二药或三药配伍均能提高巨噬细胞的吞噬功能,呈相加作用,而炙甘草却有抑制作用,且它的拮抗作用与复方中炙甘草的剂量有关。另外,四君子汤对营养不足所致的胸腺萎缩有恢复作用,而对正常小鼠重量、核酸含量、组织结构及外周T细胞百分比均无明显影响,这一结果为“正气与免疫功能有密切关系”一说提供了佐证。当归补血汤为补气生血的复方,药理实验证明有明显的促进小鼠腹腔巨噬细胞功能的作用。青春宝来源于中国明朝永乐太医院的宫廷用方,实验表明,该方药对巨噬细胞的吞噬功能有促进作用,对<sup>60</sup>Co的 $\gamma$ 射线照射后引起的免疫功能低下有回升和提高作用,从而可提高机体免疫功能。

对中医传统的四种补方:四君子汤(补气)、四物汤(补血)、六味地黄汤(补阴)及参附汤(补阳)的实验资料证明,均能不同程度地抑制白细胞游走及促进产生溶血空斑,表明它们不同程度地刺激细胞免疫及抗体生成反应。白虎汤的免疫学研究发现,该方药能增强腹腔巨噬细胞功能,提高血清溶菌酶的含量,明显提高再次免疫抗体滴度,显著减轻幼鼠脾脏的重量。

**微生物学方面的研究** 实验结果表明,白头翁汤、香连丸对各类痢疾杆菌均有较强的抑制作用;玉枢丹对流行性脑脊髓膜炎有一定的作用,通过试管测定,方药中某些成分对脑膜炎球菌的抗菌作用很强。普济消毒饮的药理实验结果证明,对甲型的和乙型的链球菌、肺炎双球菌、金黄色葡萄球菌、白色葡萄球菌等均有较好的抑制效果,对其它的细菌亦有不同程度的作用。养阴清肺汤对白喉杆菌有高抑制作用,对白喉毒素在体外有很高的“中和”能力。有人对加味泻心汤的抗菌作用进行研究,发现黄芩能抑制细胞的核糖核酸合成,从而抑制蛋白质合成;黄连抑制细胞呼吸,大黄抑制细菌乳酸脱氢酶;甘草抑制细菌脱氧核糖核酸的代谢。这些药物,都是通过抑制细菌不同代谢环节而发挥抗菌作用的,且复方中药抗菌的特点是不易产生抗药性。

**双向调节作用方面的研究** 中药复方的双向调节作用基本可分为古典的双向调节作用和现代双向调节作用,前者指的是古代医家在中医基础理论指导下创立的,诸如滋阴潜阳、寒热并用、辛苦甘降等。后者指的是经实验研究或临床研究发现的某些复方对某器官或客观指标所具有的双向调节作用,如四君子汤对因脾胃气虚而造成胃肠功能紊乱的患者,能通过拮抗乙酰胆碱而起治疗作用。对一部分慢性过敏性泄泻患者,又可通过拮抗组织胺而发挥疗效。任宏义等用电镜扫描观察脾胃气虚患者,治疗前T淋巴细胞数下降,B淋巴细胞数增高,经用香砂六君子汤治疗后这种比例失常现象得到纠正。这表明香砂六君子汤既能使降低的细胞免疫升高,又可使增高的体液免疫降至正常。有研究资料表明,玉屏风散及其主药黄芪对抗体形成细胞的溶血空斑试验有明显的双向调节作用,基数低者用药后提高,基数高者用药后降低。另如至宝二鞭丸,既有雄激素样作用,又有雌激素样作用;胆道排石汤对胆总管括约肌有松弛—收缩—松弛的作用。其它如参苓白术散、补中益气汤、生脉注射液、大承气汤、芍药甘草汤、黄连解毒汤等在临床上均表现双向调节作用。经实验研究,认为中药复方的双向调节作用可能:(1)与两种环核苷酸的动态平衡有关;(2)有赖于中枢神经系统参与;(3)与受体有关;(4)与对抗性

成分群体有关。

希药药源及创制新方方面的研究 中药复方研究有利于有效成分的分离和提取,为创立新方开辟新的途径。山西医学院对宫外孕方研究发现,乳香、没药有拮抗复方的舒血管作用,故将此二药除去,既节省药材,又保证疗效。又如苏合香丸原来含15味药,经过拆方研究取消9味可有可无的药物后仍保持原来的药效,改名为冠心苏合丸;再经研究,又去掉4味药,就成为目前的苏水冰滴丸,仅含两味药,省略13味药,大大地节约药源,降低成本。当归龙荟丸治疗慢性粒细胞白血病,确有效果,拆方研究表明,在该方11味中药中有抗白血病作用的为青黛,进一步自青黛分离到有效成分靛玉红,电镜观察可使白血病细胞粗型内质网明显减少。湖北中医学院在大活络丸原方基础上增减药味制成的参麝活络丸,临床对脑血管性偏瘫的疗效与大活络丸相似,而且药物总数较大活络丸少10味,用药剂量亦作了相应调整,具有一定经济价值。浙江省中医药研究所以灵猫香乙醇提取物代替天然麝香制成灵猫香六神丸,与含麝香的六神丸药理作用相似,且灵猫香有增强糖酥和牛黄的消炎作用。

目前很重视对传统复方进行整理、改革、提高等工作。如鱼鸭汤是在麻杏石甘汤治疗大叶性肺炎基础上摸索出来的,其抗菌消炎力较强;稳压汤系参照参附汤、独参汤抢救休克而设计的,对于轻型休克,效力不亚于参附汤,但价格低廉。固本丸是中国中医研究院用于老年慢性气管炎的新方药,由玉屏风散、六君子汤加补骨脂、紫河车组成,经治35例患者,有效率为61.2%。又如发掘中国早已失传的中药麻醉药物“麻沸汤”,经过大量实验研究,试制成一套麻醉、催醒和肌松的中成药,不仅可用于各种部位的外科手术麻醉,而且可用于难度较大的心脏体外循环直视手术麻醉。

目前所开展的中药复方研究特点为:(1)以中医基本理论为指导,开展中药复方药理研究;(2)应用现代科学的方法和手段研究中药复方;(3)单味药与复方中药研究相结合;(4)实验研究与中医临床相结合。今后的中药复方研究,将力求在中医中药理论指导下用现代科学技术阐明中医药理论的本质,主要揭示复方对机体的整体效应,再在这个基础上深入研究到细胞、亚细胞水平,然后逐步阐明中医中药理论的物质基础。

#### 参考文献

- 1 施志明. 中成药研究, 1981, (2): 6~9
- 2 邵以德. 中成药研究, 1985, (2): 1~2
- 3 孙国华. 中成药研究, 1986, (5): 22~23
- 4 姜延良, 等. 中西医结合杂志, 1986, 6(11): 698~702
- 5 李南华. 中成药研究, 1987, 5: 34~36
- 6 陈健民. 中成药研究, 1987, 11: 34~36
- 7 张富君. 中成药, 1988, 6: 45~46
- 8 曹伟春. 中成药, 1989, 5: 33~34

(上海中医药大学毛平副教授撰; 朱华德教授审)

**药用植物与生境** 药用植物在自然界生活,一刻也不能离开生长环境。药用植物在生长发育过程中需要日光、温度、水分、氧、二氧化碳、土壤中无机盐、腐殖质等建造自身;同时又不间断排出二氧化碳、水分、热量和有机物质与周围环境进行物质交换。药用植物的形态、有效成分与生境密切相关,随着环境改变而变化,随着生境消失而消逝。因此,研究药用植物与生境的关系,对于中草药资源开发利用、引种栽培、变野生为家植,显得格外重要。

药用植物与生境,在中国早就有过描述。《管子·地员篇》载有江淮平原上沼泽植物带状分布与水文土质的关系,谓“凡草上之道,各有谷造,或高或下,各有草土。叶(蓬)下于藜(菱)下于芡(水葱);芡下于蒲(香蒲);蒲下于苇(芦苇);苇下于藭(旱芦苇);藭下于菱(艾);菱下于(扫帚菜);下于萧(青香);萧下于藜(沙草);藜下于藿(益母草);藿下于茅(白茅);凡彼草物,有十二衰,各有所归”。这是一幅植物生态分布系列图(图略)。其中多种植

物为药用植物。我国历代本草学家也非常重视药用植物与生境的关系。陶弘景云:“诸药所生,皆有境界”,明确指出药用植物生长有一定的地区性或区域性,即所谓“境界”。李杲也记载了“凡诸草、木、昆虫,产之有地;根、叶、花、实,采之有时。失其地则性味少异,失其时则气味不全”,不仅指出药物生长有一定地区性和生境,同时还说明出生境改变可致药性的变化。寇宗奭记载的更为具体:“凡用药必择土地所宜者,则药力具,用之有据,如上党人参、川西当归、齐州半夏、华州细辛”,从实践中总结出药效与产地(生境)的关系,在适宜生境中的药用植物质量最佳,所谓“地道药材”。李时珍汇集前人经验,结合本人实践,提出“天造地化而草木生焉”的科学论断,“天造”系指阳光、温度、空气(氧、二氧化碳)、水分等诸生态因子;“地化”则指土壤、土壤结构、土壤质地、土壤中有有机及无机物、二氧化碳、水分、温度、微生物等生态因子;具备上述诸生态因子则“草木生焉”,药用植物才能生长发育和繁衍后代。

随着科学技术的发展,药用植物与生境的关系逐渐引起人们的重视,许多科技工作者运用生态学的观点、方法和手段,调查研究药用植物的资源分布、引种栽培、质量生境关系等,取得可喜的成绩。调查研究资料表明,防风生长在沙岗草原,根深而直,少侧根,皮色棕黄,具“菊花心”,含挥发油0.2%;生长在碱性土草甸的则根浅,侧根多,皮色灰黑,无“菊花心”,含挥发油0.1%。黄芪种植在棕色森林上中,主根发达而直,侧根少,形似鞭杆,俗称“鞭杆芪”;种植在白浆土中则主根不发达,侧根增多而明显,形似鸡爪,俗称“鸡爪芪”。甘草生长在沙质土壤,主根发达粗壮,皮色棕红,粉性大,质实,甜味厚,甘草酸含量为13.06%;而生长在黑碱土草甸则根系浅,根茎发达,皮色黑棕或灰黑棕色,质轻松,粉性小,味甚甜,具明显苦味,甘草酸含量为9.4%。土壤因子对根类药用植物不仅影响其根形,同时也影响有效成分含量。

除土壤主导因子外,光和温度对药用植物影响也很大。如常用中药枳壳为生长在淮河以北者,其味苦、酸,具破气散积消痞之功能,而在淮河以南却是香甜可口的蜜橘,其原因即在淮北低温干燥,生长期短;淮南高温多雨,生长期长,故谓“橘逾淮为枳”。又如人参适合在阴凉湿润条件下栽培,人工遮阴及光照条件的调节,是决定人参生长发育和产量的主要生态因子。穿心莲在北京全日照下,蕾期叶内总内酯含量较蔽阴下的高10%~20%。薄荷的挥发油在阴雨天其含量明显下降。刺五加生长在红松阔叶林下,郁闭度0.8~0.9时,植株矮小,叶片小而薄,开花结实少;在疏林或林缘,郁闭度小于0.5,光照好时,植株高大,叶大而厚,开花结实多。温度与光照等生态因子对药用植物的生长发育及有效成分均有影响。

中国幅原辽阔,药用植物的分布区域性很强,久而久之,则形成“地道药材”,如关防风、关龙胆、北五味、辽细辛、川贝母、川附子、浙贝母、杭白芍等等。药物的产地不同,成分也有差异。如满山红叶的挥发油及总黄酮的含量:大兴安岭(加格达奇)者分别为0.6%及2.78%;小兴安岭(伊春市)者为0.4%及3.0%;老谷岭(牡丹江)者为0.5%及1.44%。黄花蒿的黄蒿素含量:广西者为0.72%,湖南者为0.20%。一叶秋碱哈尔滨者为0.16%左旋,千山者为0.66%左旋,北京(顺义)者为0.66%右旋,南京者为0.2%左旋,含量和旋光度均有差别。临床上左旋者有疗效,右旋者则无疗效。地理分布不同,造成生态因子综合变化,结果使药用植物形态及有效成分都发生相应的改变。

药用植物在自然界中生长和传播受多方面因素影响。如鸟类可将人参和醋栗属的悬钩子属的植物种子从甲地带到乙地;苍耳子、蒺藜、鬼针草等种子具钩或刺,也能被动物从一地带至另一地。又如节松萝、长松萝为藻类和菌类共生,肉苁蓉却寄生在沙地琐琐的根上,天麻与密环菌结缘。野山参、东北龙胆,由于大量采挖及砍伐森林,开荒种地已濒临绝迹。人类的活动和干扰对于药用植物是关键的生态因素之一。人类对药用植物具有强大的破坏力,但同时又可以根据需要而大面积地引种栽培药用植物,如人参、黄芪、防风、龙胆、平贝、枸杞、地黄、桔梗、三七等百余种药

用植物,已大面积引种成功。

中国及世界许多国家都投入大量人力和物力,利用现代的科学技术和手段,探讨生态因子对药用植物的影响,尤其是生态因子对药用植物有效成分影响的研究,更为深入广泛。中国的野生药用植物资源日渐缩减,而随着医疗保健事业的发展,用药量却逐步增加,只靠野生药用植物资源已无法适合国内外需求,故而变野生为家植、引种、试种野生药用植物是当务之急势在必行。这首先必须掌握野生药用植物的生态习性、生长发育规律;其次要了解诸生态因子对药用植物的影响。只有按着药用植物适宜的生态因子及其生长发育规律进行引种、试种,才能成功和获取高产,保证质量及临床疗效,满足防病治病需要。为此,应加速建立中国的药用植物生态学,系统地研究药用植物与生境的关系,以发展中国中药事业。

#### 参考文献

- 1 乐天宇.植物生态型学.北京:科学出版社,1965.110~116
- 2 陈毓亨,宋万志.中草药通讯,1978,2:12~13
- 3 傅克治,等.东北林学院学报,1980,4:42~43
- 4 哈永年,等.黑龙江中医药,1989,2:25~27
- 5 李时珍.本草纲目(上册).北京:人民卫生出版社,1990.48:678
- 6 马树庆,梁洪海.自然资源学报,1991.6(1):63

(黑龙江省中医研究院中药所哈永年撰)

### 中药妊娠禁忌的现代研究 modern research on

Chinese traditional drugs contraindicated in pregnancy 中药妊娠禁忌是指妇女妊娠期间禁忌使用的药物。《神农本草经》中没有妊娠禁忌药的提法,但有堕胎药物的记载。以后《名医别录》续有增加,《本草经集注》开始汇编列入序例中。据考证,失传的隋代著作《产经》载有妊妇不可服药 82 种。《产经》虽著录于《隋书经籍志》,但约成书于公元 6 世纪左右,或即北魏人著作。就是说,大约 1300 年前,中医文献中可能已有妊娠禁忌药的记载。只是《产经》82 种妊娠禁忌药的具体内容已无从查考。现存最早汇集妊娠禁忌药的著作当推南宋朱端章《卫生家宝产科备要》(1184 年)。流传最广的妊娠禁忌药歌诀为《珍珠囊补遗药性赋》中的妊娠服药禁歌。历代文献中的妊娠禁忌药歌诀有多种,内容多少不一,统计 38 部载有妊娠禁忌药的文献,264 种中草药列作禁忌药,其中半数以上文献有记载的,只有 38 种,约占总数的 14%,可以看出各家认识并不一致。

随着历史发展,列作妊娠禁忌药的品种逐渐增加。李时珍《本草纲目》卷二妊娠禁忌药有 89 种,《全国中草药汇编》载 196 种,《中药大辞典》载 365 种。其禁忌程度虽然似有不同,却没有具体标准。

1956 年,秦伯未等首先提出整理意见,依据药物毒性及作用强弱将妊娠禁忌药区分为禁用药(包括剧毒药、峻泻药和子宫收缩药)、忌用药(包括一般祛瘀通经药和激惹药)、慎用药(包括一些辛温药、香窜药、消导药和利尿药)。《中国药典》分别标注,孕妇忌用、孕妇忌内服、孕妇慎用、孕妇内服宜慎,或孕妇忌服、孕妇慎服等,大约即循前述意见。1979 年,杨子谦更提出 3 类 4 等的分类意见:剧毒药:砒霜、野葛、天雄、水银、巴豆、芫花、大戟、硃砂、地胆,绝对禁忌;乌头、附子须经炮制,适当配伍;有毒药:水蛭、蜈蚣、雄黄、雌黄、牵牛子、干漆、蟹爪甲、麝香,宜慎用;无毒药:茅根、木通、瞿麦、通草、苡仁、赭石、芒硝、牙硝、桃仁、丹皮、三棱、牛膝、干姜、肉桂、半夏、皂角、南星、槐花、蝉蜕,除先兆流产、不全流产、跌扑内挫伤胎和禀赋虚弱者外,不绝对禁用,但不可超过规定的剂量;玄胡索、红花、生姜、车前子、伏龙肝、神曲、麦芽之类则可随症应用。

妊娠禁忌药的意义各家见解不同,高晓山概括前人意见,认为大致包括:(1)堕胎;(2)造成难产或滞产;(3)延长孕期;(4)造成畸胎或畸型;(5)伤害胎儿(烂胎、死胎、消胎);(6)影响胎儿发育;(7)影响生后体质、免疫能力;(8)影响母体健康。

中医临床历来对妊娠禁忌药有不同看法,虽然不乏小心谨慎的医者,但也有不少人依据《内经》所述“有故无殒,亦无殒也”,认为妊娠有病,只要掌握治疗分寸,适可而止,不会伤胎。现代临床也时有孕早期应用妊娠禁忌药无害的报道。

20 世纪 50 年代以来,陆续有个别妊娠禁忌药实验研究报告发表,冰片、穿心莲、丹皮酚、甘遂、贯众、姜黄、雷公藤、骆驼蓬、菝葜、麝香、水蛭、雪莲、寻骨风等药材或其提取物,都有终止实验动物妊娠的记录,其中不少是妊娠禁忌药。然而除少数例外,又多有临床用于妊娠而不致流产、堕胎的报告。不但实验与临床有矛盾,不同的实验结果也时有矛盾。以半夏为例,虽然宋代本草已有妊娠禁用、慎用半夏的记载,但至今不断有妊娠期应用半夏不堕胎的报告发表,甚至也有实验报告认为半夏对豚鼠、家兔的子宫或妊娠子宫没有不良影响。《中国药典》1963 年版载半夏慎服,1977 版、1985 年版则不再限制。然而进入 80 年代,先后有陶宗晋等报告:从半夏中分离出能终止小鼠早期妊娠的半夏蛋白;继有熊素芳等报告:法半夏、生半夏和姜半夏腹腔给药,对小鼠都有致畸胎作用;又有杨守业等系列报告:生半夏、制半夏经口给药,妊娠小鼠、大鼠、家兔均可见到吸收胎、死胎、阴道流血,并曾见畸胎。看来,半夏作为妊娠禁忌药还不能解除对它的限制。

不能排除在特定的病理状态下某些妊娠禁忌药恰是推动堕胎或使胎体受损因素的可能性。在这些方面还有许多内容有待深入研究。妊娠禁忌药理论的形成和发展,凝集着千百年来大量的临床经验,某些药物具有特殊的生物活性,有可能对妊娠产生不良影响,也有可能为治疗某些疾病所必需,事关计划生育和优生优育,不能不引起注意。

#### 参考文献

- 1 秦伯未,等.上海中医药杂志,1956,2:27
- 2 河南医学院药理教研组.河南医学院学报,1959,5:23
- 3 陶宗晋,等.生物化学与生物物理学报,1981,1:77
- 4 陶宗晋,等.生理学报,1983,1:107
- 5 夏林纳,等.上海第一医学院学报,1985,3:193
- 6 熊素芳,等.北京中医,1987,6:51
- 7 杨守业,等.中西医结合杂志,1989,8:481
- 8 杨守业,等.中国医药学报,1989,4(5)

(中国中医研究院中药研究所高晓山研究员撰)

**道地药材** 指中药学中控制药材质量的一项传统的综合判别标准。《神农本草经》名例就有“土地所出”的要求,不少药名带有浓厚的道地色彩,如巴豆、蜀椒、秦皮、吴茱萸、阿胶、代赭石等。公元 6 世纪陶弘景在《本草经集注》的序例中首次使用了“蜀药”和“北药”的区划概念。公元 7 世纪孔志约在《新修本草》的序言中提出“离其本土,则质同而效异”的结论。孙思邈和寇宗奭相继强调用药必依(择)州土;李杲进一步指出“失其地则性味少异”。可见讲究道地是保证药材质量和提高临床疗效的需要。16 世纪初,《本草品汇精要》专列“道地”一项记载药材质量,可视为“道地药材”专有名词的源头。20 世纪 30 年代,陈仁山著有《药物出产辨》;陈存仁在《中国药学大辞典》中要求“辨别道地真伪”,药材市场上基本形成了川、广、云、贵、南、北、浙、怀诸般道地药材产地和安国、樟树、百泉、禹县、亳州 5 大药市集散地的格局。由上可见,“道地论”是中药学的重要组成部分,对保证药材质量从而保证临床疗效一直起着重要的作用。

道地药材不仅是一个自然地理环境概念,而且也是一个技术进步的概念,临床药学概念。例如,泽泻、香附等几乎是全球性分布的药用植物,但只有生长在中国某些省区、在中医理论指导下应用(人种药理学)才具有道地药材的属性;又如四川江油的附子之所以成为驰名中外的道地药材,既有独特的自然环境因素,又有赖于传统的产地加工技术,更决定于回阳救逆的卓著功效,已有 1000 多年的栽培历史。因此,研究道地药材的成因和理论基础,显然涉及到天、地、生、数、理、化等多学科的内容,其难度可想而知。更多的研究停留在经验和技术的总结整理上,如四大怀

药、浙八味、川产药材等,均做过小规模的整理研究。

1989年10月在山东泰安召开了首届全国道地药材学术研讨会,同时举行有史以来第1部道地药材专著《中国道地药材》的首发仪式,兴起道地药材科学研究的热潮,已经和将要形成的研究热点或主要内容是:(1)古今道地或产地地名对照的计算机数据库正在筹建中,大约有20%的本草地名不见于史地工具书,需要考证,此项工作完成以后有利于继承古代经验,并可为建立道地药材基地和区划提供历史依据。(2)道地药材与环境的关系及对疗效的影响,包括对气候、土壤的依赖关系,但目前仅涉及道地药材的微量元素特征或特征谱的研究。(3)道地药材种质和栽培技术、加工方法(含炮制)的研究,例如常用川药川芎的种质资源已确认为一园艺种 *Ligusticum chuanxiong Hort.*,再早的例子有人参 *Panax ginseng C. A. Mey.* 也是根据汉语语音命名物种的,足见中国道地药材对现代分类学的影响。从某种意义上说,种以下单位对确认道地药材更具有现实意义,如怀庆地黄 *Rehmannia glutinosa f. huichingensis Hsiao* 就是一个典型的例子,专指产于河南古怀庆府(今沁阳、孟县等地)的栽培品种,其正种是野生地黄,根部细瘦,质量很差。(4)道地与非道地药材的品质比较研究,这不仅是一种来源不同产地样品的观察与分析,也包括亲缘相近的物种之间的比较,例如唐古特大黄一般来说总蒽醌的含量高于同属其它种,川黄柏的总生物碱含量高于关黄柏,表现在外观上前者黄色深于后者。(5)道地药材生产基地的研究,这主要是对大宗的、常用的、经济价值高的药材如三七、当归、人参、麝等,在已知最佳的传统产区扩大生产,或根据环境相似原则选择更佳地区,经试验成功后成为新的道地药材产区,这就需要环境科学、生物科学、农林学科的密切配合。

国际上近年才开始注意到中国道地药材是保证品质的有效途径。1990年,木岛正夫在《生药学杂志》上发表长篇文章,谈中国药材的地理特征。加拿大的 Awang 教授系世界卫生组织的传统医学和药用植物学顾问,1990年曾向世界卫生组织建议在世界上药材市场上推行“原产地证书”制,因为近年北美一些国家或地区从中国进口刺五加,引起多毛茛等副作用,怀疑药材的品质不正。事实上,国外对农、林、牧、副、渔天然产品,如保加利亚的玫瑰,牙买加的姜,巴西的咖啡等早已开始实行原产地证书的做法,对保证品质很有效果。近代生物学相应地在理论上提出了地理型、生态型、生境型、生态种、生物品系、化学宗等概念来约定天然产品的来源(产地)。但是尚未发现世界其他传统药理学体系如印度、希腊、埃及、美洲印地安人的玛雅——阿兹台卡体系有讲究道地药材的论述,国际药材市场目前也还没有对药材交易实行“原产地证书”制。如果加强中国道地名贵药材证书标准的研究和制订,无疑会取得良好的学术声誉和经济效益。

#### 参考文献

- 1 胡世林,等.中国道地药材,1989,3~38
- 2 Konoshima M S. Topographical view on Chinese crude drugs. *shoyakugaku*, 1990, 44(2): 67~87
- 3 Awang C V C. *Journal of the American Medical Association*, 1991: 265

(中国中医研究院中药研究所胡世林研究员撰;张世臣教授审)

### 中药大黄的现代研究

中药大黄按照《中国药典》的规定,指掌叶大黄、唐古特大黄(鸡爪大黄)和药用大黄(川大黄)。但据高作经等(1975)报告,中国大黄属植物中的18种、2变种有药用记载,包括其他文献所述,药用大黄属植物超过20种。其中如藏边大黄、天山大黄、华北大黄(波叶大黄)等也都有开发利用的前景。

大黄的现代植物学研究大致起源于18世纪初,到20世纪初叶告一段落,但并未结束。如最近胡世林等报告的圈场大黄,就是一个新的品种。还有许多方面有待深入研究。

大黄的功効首载于《神农本草经》,至《证类本草》而趋于完

全,基本可以概括后世中医临床用法:“主下瘀血、血闭、寒热,破癥瘕积聚,留饮、宿食,荡涤肠胃,推陈致新,通利水谷,调中化食,安和五脏,平胃下气,除痰实、肠间结热,心腹胀满,女子寒血闭胀,小腹痛,诸老血留结”。大约公元10世纪,中国大黄通过丝绸之路输往西亚、欧洲。在欧洲,大黄主要用于缓泻通便。因而大黄药效的现代研究也以致泻作用为起点。20世纪40年代以前,认为大黄的致泻成分主要是大黄素(国内文献称为大黄苷)和大黄酚(国内文献称为鞣质范酸)。Fairbairn(1947)、楼之岑(1951)先后证明大黄泻下成分为蒽醌甙类或结合蒽醌类,应是结合状态大黄酸和其类似物。1967年,宫木益雄等首次自大黄中分离出番泻甙A,并证明其具有泻下作用,开创了大黄研究的新局面。但据J. D. Harcastle等研究,即使将富含番泻叶甙的番泻叶浸膏注入人的结肠,也不能使肠运动亢进;如把浸膏与粪便或大肠杆菌一同孵育后再注入肠管,则肠管运动亢进;注入大黄酸蒽醌甙,也可使肠管运动亢进。难波恒雄、佐佐木和子等都认为,授予番泻甙后,在肠管内由于细菌作用生成的大黄酸蒽醌才是泻下的直接作用物质。服部征雄、难波恒雄等的实验资料证明,并不是所有肠内细菌对番泻甙都有同样作用,已知楔型梭状芽孢杆菌、酪酸梭状芽孢杆菌、幼分裂小杆菌都有类似作用。目前,也有人提出证据,对番泻甙的作用有疑议(津久井诚等,赤堀昭等)。然而中医从来不把大黄单纯作为通便致泻的药物,现代中医或中西医结合临床还认为大黄是重要的清热解毒、活血化瘀药,用于治疗高热感染如急性扁桃腺炎、急性肝炎、细菌性痢疾;出血性疾病如上消化道出血、脑出血、鼻出血;急腹症如急性阑尾炎,急性胰腺炎、胆系感染、肠梗阻;急重症如尿毒症、肝昏迷、烧烫伤等。

周晓明等(1988)报告,大黄的主要成分蒽醌衍生物对兔肾髓质的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ -ATP酶活性有抑制作用。张英华等(1990)报告,大黄制剂对小鼠红细胞膜的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ -ATP酶活性及氧化磷酸化均有显著抑制作用。袁振铎等也报告(1990),大黄浸液对正常人红细胞钠泵活性有抑制作用,从而抑制  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ -ATP酶的活性。郭昌燕等(1986,1988,1989)先后报告,大黄制剂能降低感染性发热家兔第3脑室中前列腺素E(PGE)和cAMP水平;影响兔肾髓质中花生四烯酸代谢,抑制前列腺素  $\text{A}_2$ 、 $\text{D}_2$ 、 $\text{E}_2$ 、 $\text{F}_2\alpha$ 、血栓素  $\text{B}_2$ ( $\text{TXB}_2$ )的生物合成。 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ -ATP酶活性、氧化磷酸化都与体内能量代谢直接有关;PGE则是中枢体温调节有关的介质。至此,大黄清热、解热的作用得到科学的解释。

陈琼华等(1962)报告,大黄中各种蒽醌衍生物对26种细菌都有不同程度的抵抗作用,以对各种葡萄球菌、甲型链球菌作用最强。王文凤等报告,试管法测定大黄和3种大黄蒽醌衍生物对脆弱类杆菌等厌氧的抑制浓度MIC,芦荟大黄素、大黄酸、大黄素等3种大黄蒽醌衍生物的抗厌氧菌MIC- $8\mu\text{g}/\text{ml}$ 与林可霉素、氯霉素、甲硝唑相近。芦荟大黄素更为接近。王淑如等(1977)报告,大黄素可与DNA结合,从而抑制DNA的生物合成,认为这可能是大黄素抗菌、抗癌作用的机制。R. Anton等(1980)认为,大黄酚、大黄素、大黄酸蒽醌甙都能与DNA紧密结合。陈琼华(1974)指出,大黄对流感病毒有较强的抑制作用。荆庆等(1975,1976)报告,大黄对乙型肝炎抗原HBsAg有相当强的抑制作用,主要由其所含鞣质所致。也有文献证明,大黄对多种致病真菌也有抑制作用。

陈琼华等(1966)报告,大黄酸和大黄素对多种移植性肿瘤都有抑制作用。王淑如等(1977)指出,大黄酸和大黄素对无细胞系统DNA生物合成的抑制作用,可能是其抗癌作用的机制。J. Fuska等也有报告,羟基蒽醌类能明显抑制艾氏腹水癌细胞的RNA合成。

对大黄的止血作用也有研究。柱上鉴等(1983)分离出d-儿茶素和没食子酸两个有效成分。也有报告指出,大黄素甲醚和大黄酚都有明显的促凝血作用。与活血化瘀相关的抗凝血作用虽然国内外都有论文报道,但尚未见有效成分的报道。

野中源一郎报告,大黄消炎作用的物质之一可能是莲花掌甙,此成分具有相当于阿司匹林或保泰松的消炎作用。

高晓山等(1981)报告:生大黄以及多种大黄炮制品对胰蛋白酶、胰脂肪酶、胰淀粉酶的活性具有明显的抑制作用。其对胰蛋白酶活性的抑制能力,每克生药相当抑肽酶 4798.5 单位,对 $\alpha$ -糜蛋白酶活性的抑制能力相当抑肽酶 5307.9~7398.9 单位。丁燕玲(1984)分离出大黄抑制胰蛋白酶活性的成分,分子量分别为 208 910 和 11 220 的两种糖蛋白;还有儿茶素、没食子酸等和一种称为 S<sub>1</sub> 的低聚糖等抑制胰淀粉酶活性的成分。大黄对急性胰腺炎的治疗作用也找到了物质基础。

大黄对尿毒症的治疗作用,1961 年国内即见报道。以大黄为主要药的多种方剂灌肠治疗尿毒症已有多篇报道,其中毕增祺等(1981)以大黄为主的复方保留灌肠治疗尿毒症的论文引起广泛注意。涩谷真也等报告,大黄中的 Rhatannin 具有降低 BUN 的作用。另据大浦彦吉等报告,对于慢性肾功能不全的大鼠,大黄水浸膏中改善尿毒症症状的成分主要是(一)-表儿茶素 3-O-没食子酸盐、表儿茶素 B-2,3'-2-O-没食子酸盐也有部分作用。大黄治疗尿毒症可能存在多种有效成分。

大黄苦寒攻逐,号称“将军”,虽然历代也有服用大黄养生的记载,但许多医家不敢轻用,畏其伤正败胃,损害机体。近年来的研究资料有助于澄清这一问题。许多学者注意到大黄多成分间的协同作用拮抗作用,或称“双向调节作用”。陈琼华(1990)指出,大黄游离蒽醌有抑制机体免疫功能,抑制核酸和蛋白质合成,降低白细胞数,致突变等作用,对肝脏有毒害;大黄多糖则完全相反,有促进机体免疫功能、核酸及蛋白质合成、抗白细胞降低、抗突变和保肝作用。张启元认为,大黄对机体的调节作用是一个复杂问题,其作用因机体状况及药量而异。过量的大黄会使机体正常微环境失去稳态而致虚,适量的大黄则使这种不利环境逆转而恢复正常,使机体得到稳态平衡。史录文等(1990)报告,测定大黄四类 15 种成分的 SOD 活性,以儿茶精类较强,尤其是表儿茶精的 SOD 活性最强,莲华掌甙、(一)儿茶精和(+)儿茶精其次,为大黄的抗衰老作用提供了科学根据。

Zwaenepoel 等(1971),Lemli 等(1977)的研究资料提示,番泻甙类可能具有导致退行性变化基因毒性作用。J. Lemlij 和 J. Cuveete(1973)报告,从新鲜大黄、商品大黄中检出 2 级致癌作用物质 1,8-二萘基-9-蒽醌(蒽林或蒽酚 Anthralin)。上述工作引起广泛注意。中国学者作了较深入的工作,罗文毓等(1990)以最小检出限量为 2ng 的反相高效液相色谱法分析中国道地鲜大黄、干大黄、熟大黄及非正品大黄 10 批,均未检出 Anthralin。李泽琳等(1990)研究青海大黄鲜品、生品及炮制品的水、乙醇、乙醚提取物,小鼠体内微核试验阴性,未发现致突变作用;以 Raji 细胞激活系统为检测手段,也没有发现这些样品有促癌活性。钱耀贤等观察精制大黄片对 ICR 小鼠胚胎肝细胞和骨髓细胞姐妹染色体互换(SCE),未见本品有诱变效应;对 Sprague Dawley 大鼠也未见致畸作用。到目前为止,有理由相信,中国产的大黄是安全的。

大黄的现代药理学研究资料证明,大黄是一种疗效准确,具有多种生物活性的重要药物。越来越多的研究资料显示,中医应用大黄的临床经验包含着多方面的科学价值,已经引起国内外学者的广泛兴趣。有人称之为“大黄热”,不无道理。1990 年在中国承德市召开的首届国际大黄学术讨论会,有 250 余人参加,收到论文 278 篇。D. E. Marshall 收集的截止 1988 年的世界范围各研究领域有关大黄和大黄属论著,共得 3385 条目。王翘楚等在《国内外大黄研究论文题录》(1990)记载大黄医药研究论文题录 1142 条,大黄现代研究的热潮方兴未艾。

#### 参考文献

- 1 陈琼华. 冶金医药情报, 1990, 7(3): 88
- 2 张启元. 冶金医药情报, 1990, 7(3): 103
- 3 史录文, 等. 冶金医药情报, 1990, 7(3): 94
- 4 罗文毓, 等. 冶金医药情报, 1990, 7(3): 86
- 5 李泽琳, 等. 冶金医药情报, 1990, 7(3): 105
- 6 钱耀贤, 等. 冶金医药情报, 1990, 7(3): 97

7 高晓山, 陈履馨. 中西医结合杂志, 1990; 12: 754

(中国中医研究院中药研究所高晓山研究员撰)

### 绞股蓝的研究与利用

绞股蓝为葫芦科绞股蓝属植物, 又称七叶胆, 约有 13 种, 广泛分布于东南亚。中国秦岭和长江以南 15 个省野生资源相当丰富。本品在明代《救荒本草》中即有记载。自 1972 年云南曲靖地区报道用绞股蓝治疗老年慢性支气管炎后, 国内外学者进行了大量的探讨, 新研制的绞股蓝产品已多达十几个。从 Nagai 等于 1976 年从该植物中分离到人参二醇与 2 $\alpha$ -羟基人参二醇以来, 已分离出近 60 种达玛烷型皂甙等一系列药用化学成份。临床实践也证明其有抗癌、抗衰老、抗疲劳、降血脂等一系列作用, 具有药理活性广泛、临床疗效确实、资源丰富、无毒副作用等特点, 开发前景极为广阔。

资源及植物分类研究: 全世界绞股蓝属植物有 13 个种, 4 个变种, 中国有 11 个种, 4 个变种, 其中 7 个种为中国独有, 并以长江南岸、神农架和星斗山的质量最好。目前福建等地已开始广为栽培, 湖北、浙江也大面积引种日本 201 甜味(甘型)绞股蓝。因其生态环境和植物形态易与葡萄科乌藟属的乌藟等 13 种植物相混, 经陈建国考证, 该品始载于《救荒本草》, 所附图形确为葫芦科绞股蓝。明代李时珍误将乌藟属植物图收入《本草纲目》。清代《植物名实图考》引用《救荒本草》原文, 并附植物图, 此图与原图有明显差异, 误为乌藟属植物。《江苏省药材志》亦把乌藟属植物用了绞股蓝的拉丁名称。《中药大辞典》亦把绞股蓝作为乌藟的异名。造成品种原料的混乱, 使药理实验、成份分析、临床验证等均受到一定程度的影响, 现已得以澄清。

药理和临床作用研究: (1) 对癌瘤的抑制作用: Shigren 等的实验资料表明, 灌服绞股蓝皂甙 50mg/(kg·d) × 7d, 对小鼠移植性肉瘤 S-180 细胞生长有明显抑制作用。如在鼠腹腔内移植 1 × 10<sup>6</sup> 个肉瘤 S-180 细胞, 给鼠连续投喂绞股蓝皂甙水溶液 10d, 剂量为 10mg/kg 和 50mg/kg 时, 平均存活天数为 16.5d 和 20d, 而对照鼠为 14.1d。王玉琴报道, 上述方法证实, 无论口服还是腹腔注射均有效, 以每天口服 30mg/kg 的抑癌作用最强, 剂量再增加, 作用反而减弱。日本报道, 绞股蓝皂甙 GS<sub>15-21</sub>, 27, 28, 38, LV 和人参二醇、原人参二醇均有抗肿瘤活性, 能有效地抑制肝、肾、肺、皮肤、子宫等多种器官中癌细胞的增殖, 并认为人参皂甙抗癌机制是改变癌细胞性质, 使其向正常细胞转化, 即“逆转变异”。绞股蓝抗肿瘤作用的机制至今尚未阐明。据构效关系, 其皂甙都具有达玛烷型基本结构, 凡在达玛烷型通式 20 位或 21 位碳原子连接有游离羟基的, 皆有抗肿瘤活性, 其中 20(s) 原人参二醇抗癌活性最高。绞股蓝皂甙在临床试验中对胃癌、直肠癌、子宫癌、口腔癌、食道癌及胆、胰、肾、肺、肝、舌、皮肤的癌、肉瘤等均有效。其安全性极高, 小鼠口服剂量达到 10g/kg 仍测不到 LD<sub>50</sub> 值, 腹腔注射 LD<sub>50</sub> 达 3.35g/kg, 临床未见有副作用的报道。(2) 对免疫功能的影响: 据李锐等报道, 该品 500mg/鼠/日能显著提高小鼠 T 淋巴细胞数; 也能增加小鼠尾血淋巴细胞 ANAE 的阳性百分数; 并且其清除小鼠血中胶体炭粒的速度, 检查吞噬指数, 绞股蓝组明显优于对照组 (P < 0.001)。钱伯初报道, 以其皂甙 400mg/kg 连续 ig12d, DBA/2 小鼠因荷 S-180 实体瘤所致的脾脏空斑形成细胞(PFC)、特异玫瑰花形成细胞(SRFC)、溶血素(QHS)减少, 均有保护作用, 而对正常动物的这些免疫学参数则无明显影响。提示该品对实验所致的免疫功能低下有良好保护作用, 而对正常动物的免疫功能影响报道不一, 有待进一步研究。(3) 对脂质代谢的影响: 以其皂甙灌胃能非常显著地降低血清胆固醇的含量, 以皂甙 200mg/kg 灌胃, 其作用与 750mg/kg 的安妥明相当。同时发现它不仅降低血清总胆固醇, 而且能升高高密度脂蛋白(HDL), 降低低密度脂蛋白(LDL)及极低密度脂蛋白(VLDL), 使得 HDL/LDL 比值增大, 表明它对脂质代谢失调有明显的改善和调整作用。临床上也有较多治疗高血脂症的报道, 证实服用绞股蓝后血清胆固醇和三酸甘油酯明显降低, 高密度脂蛋白的胆固醇有所提高, 并使 HDL/LDL 比值增大。其

机制可能为阻止糖和脂的吸收,抑制脂类合成的中间代谢环节,因而有可能成为新的脂类代谢调节药物。(4)对心脑血管系统的影响:其总甙对犬的血流动力学作用的效应与人参皂甙相类似,能降低血压、外周血管阻力、脑血管和冠脉阻力,降低心肌耗氧量,减慢心率,其作用比人参皂甙略强,并具有保护心肌、缩小心肌梗塞范围的作用。日本在临床上用它治疗肥胖、高血脂症、动脉硬化症,取得一定疗效,具有开发成为心脑血管系统新药的前景。(5)抗衰老作用:抗衰老实验表明,它可以延缓小鼠的衰老;其提取物能使果蝇从卵羽化为成虫的时间缩短,从而延长成虫期寿命;还能明显地提高超氧化物歧化酶活力,维持衰老期小鼠的存活率;对老年大鼠的心、肝、脑组织过氧化脂质均有明显降低作用。组织培养试验资料表明,添加绞股蓝皂甙能够延长细胞寿命,如从胎儿肺组织分离出的正常二倍体纤维细胞,在最低必需培养基中通常传代 51 代即死亡,而在繁殖期添加绞股蓝皂甙(浓度为 200ug/ml)则可以传至 59 代,使细胞寿命延长 15.7%。因此,它可以作为抗衰老剂和细胞活化剂使用。(6)抗应激和抗疲劳作用:据陈瑛等报道,本品可以延长小鼠游泳时间和爬杆时间,对小鼠外周白细胞下降有明显抑制作用,并可增强其耐缺氧能力。小鼠腹腔注射总皂甙 60mg/kg,在 50℃ 高温下死亡率低于对照组。一般认为,这方面作用可能是其皂甙中有与人参皂甙相同的成份。临床也有以绞股蓝茶作为抗疲劳饮料的报道。(7)防止糖皮质激素副作用:实验资料证明,其皂甙能防治糖皮质激素如地塞米松等引起的肾上腺皮质萎缩、胸腺萎缩、血浆皮质醇减少等副作用。临床对糖皮质激素停药困难的病症,结合使用绞股蓝,可帮助戒断。有报道表明,以其总甙片 4~5 片或绞股蓝茶 30g 泡茶内服,可减轻用药而致的柯兴氏综合症。(8)抗消化道溃疡作用:其总甙对大鼠压力性的和胃酸性胃溃疡有显著疗效。日本用于治疗消化道溃疡,药后 3 个月,经 X 线和内窥镜检查证实了这一点。(9)止咳祛痰作用:此亦为中国传统用法之一。其皂甙成份治疗对咳嗽、哮喘有效,并有镇静安神之功,尤对痰湿化热型者疗效佳。(10)其他作用:有报道它可以增加小白鼠睾丸、精囊、前列腺、子宫的重量,使果蝇的生活力提高;能降低小鼠皮肤脯氨酸含量、延缓组织的老化;可增强人的头发拉力,具有美容、护发功能;具有镇静、催眠、抗紧张作用,用治神经衰弱、精神紧张、失眠等症;治疗糖尿病,取其适应原样作用,对减轻临床症状、缓解病情有效。

目前研究绞股蓝,主流是其皂甙,对其他成份亦有进展。现有报道已测出其含 14 种氨基酸(6 种为人体必需氨基酸);10 种微量元素(5 种为人体必需微量元素),并且随着分析手段的进步,不断有新的发现,各地报道差异较大。绞股蓝多糖、黄酮甙、有机酸等成份亦被分离出来,但其药理作用、临床作用有待进一步研究。

剂型与开发利用:因为绞股蓝具有广泛的药理作用,对临床应用的各种剂型研究较快,目前主要有总甙片、冲剂、胶丸剂,用其提取物制备的糖浆剂、口服液、酒剂;用原植物制成的精制茶、烟剂、袋泡剂,剂型的质量控制也有进展。近几年又出现了以其为主要原料的保健滋补品,如“古蓝可乐”、“绞股蓝啤酒”、“绞股蓝运动饮料”、美容霜、护发剂等,正呈现出开发热潮。

对绞股蓝的研究工作还处在深入过程,估计今后对其有效成份和有效单体的提取分析、药理研究会成为热点,有希望在这一领域出现抗癌、抗衰老、抗心血管疾病的新药。

#### 参考文献

- 1 周寿然,等. 中成药研究,1988,3:25
- 2 戴汉云,等. 中草药,1989,20(4):28
- 3 周宏辉. 中成药,1989,5(11):29
- 4 李若存,等. 中国中药杂志,1989,1:41
- 5 郑源虎,等. 中药药理与临床,1990,6(4):43
- 6 陈立峰,等. 中国药理学与毒理学杂志,1990,4(1):17
- 7 熊维生,等. 中国药理学,1990,11(5):427
- 8 陈磊,等. 现代应用药学,1990,2:42

9 李锐,等. 新中医,1990,5:52

10 姚士硕,等. 皖南山区绞股蓝成分及抗疲劳机理,体育科学,1991,(1)5:56~59

(安徽中医学院万毅、池建淮撰)

**中药薤白新研究** 本薤白系百合科葱属植物小根蒜或长梗薤白(ANB)的鳞茎。多年生草本,地区分布较广,中国主产东北、河北、江苏、湖北等省。主要成分为甲基烯丙基三硫(MATS)、二甲基三硫、类前列腺素 A(PGA)等。本药早已被发现具有抗菌、抗癌、降脂、防治血栓病、冠心病等多种药理效能。近年来又发现薤白有解痉平喘及降低过氧化脂质(LPO)、提高前列环素(PGI<sub>2</sub>)、抑制血栓素 A<sub>2</sub>(TXA<sub>2</sub>)等作用。

薤白味辛、苦,性温,具有理气宽胸、通阳散结的功能,主治胸痹心痛、脘痞不舒、泻痢后重、疮疥等。最早发现薤白能救治喘脱、咳嗽、气喘的是东汉时期的张仲景,他在《金匱要略》中就有“薤白捣汁灌鼻中”救卒死的记载,可谓用于心肺复苏较早的药物。其复方如瓜蒌薤白白酒汤治“胸痹之病,喘息咳唾,胸背痛,短气”;瓜蒌薤白半夏汤治“胸痹不得卧”;枳实薤白桂枝汤治“胸痹,心中痞气,气结在胸,胸满”等,与现代医学的慢性支气管炎、支气管哮喘、阻塞性肺气肿等呼吸系疾病的临床表现相近。由此引起后世的兴趣和研究。《本草备要》指出薤白能“利窍,治肺气喘息”,其机理《长沙药解》认为“肺病则逆,浊气不降,故胸膈痹塞;薤白,辛温通肺,善散壅滞”,《本草求真》谓“薤,味辛则散,味苦则降,体滑则通,……喘息可止”。在 18 世纪,欧洲民间也常用薤白治疗肺炎。近代,日本矢数道明氏应用瓜蒌薤白汤治疗喘息性支气管炎、肺气肿也有个案报道。

1984 年,方蕴春等在中国首先对薤白单味药平喘作用进行临床研究,通过 20 例观察,结果发现支气管哮喘患者口服薤白煎剂后,止喘起效时间最短 5min,有效持续时间为 30~120min。随着喘息症状的改善,两肺哮鸣音程度亦减轻,即时平喘的有效率为 57%~78%,显效率达 21.4%~45%。用力肺活量(FVC)、第 1 秒用力呼气量(FEV<sub>1.0</sub>)、最大呼气中期流速(MMEF)及等容量(MMEF)四项通气绝对值都有不同程度的递增,说明薤白确有明显解痉平喘的作用。1990 年,奚肇庆等较系统地观察薤白复方(瓜蒌薤白半夏汤为主)对慢性阻塞性肺部疾病(COPD)患者的平喘作用。40 例急性发作期患者的治疗结果:总有效率为 87.5%,喘息症状与哮鸣音消失的有效率分别为 82.86%、85.7%;肺功能主要通气指标 FVC 1 秒率(FEV<sub>1.0</sub>/FVC)、MMEF、50%肺量位流速(V50)、25%肺量位流速(V25)等均有不同程度的好转(P<0.05~0.01)。奚氏又与同期麻杏石甘汤对照组比较,薤白复方治疗组大气道通气功能的 FVC、FEV<sub>1.0</sub>/FVC、最大通气量(MBC),与麻杏石甘汤对照则无显著性差别(P>0.05),但小气道通气功能 MMEF、V50、V25,治疗组则高于对照组(P<0.05),提示在改善小气道通气功能方面以薤白为主佐以清热化痰中药,优于以清热化痰为主的麻杏石甘汤。1989 年,谭可安等在 AMB 的临床应用中观察到患者服用薤白胶丸(主要成分为 MATS)后,血清总胆固醇、甘油三酯、LPO 均有不同程度下降,LPO 平均下降 1.45nmol/ml(P<0.01);血浆中 6-酮-PGF<sub>1α</sub> 平均增高 1.5 倍,服药后血栓素 B<sub>2</sub>(TXB<sub>2</sub>)抑制率平均达 52.26%,证实薤白对患者有降低过氧化脂质、提高前列环素含量、抑制血小板聚集等作用。

目前,对薤白解痉平喘机理的研究也取得一些进展和结果。有些研究人员对鼻腔给药进行观察,认为薤白煎剂对部分病例止喘起效甚快,可能与薤白挥发油遇热挥发后在口服时由鼻腔粘膜吸收有关,并通过鼻肺反射降低下呼吸道阻力。据有人报道,平喘中药鼻塞可于药后很短时间(1~2min)起效,亲脂性鼻腔给药的生物利用度显著高于口服法,提示薤白“灌鼻”、“利窍治肺气喘息”的科学性。

薤白水煎剂对痢疾杆菌、金葡菌等有抑制作用。300%水煎剂用试管稀释法,1:4 对金葡菌、肺炎球菌有抑制作用,1:16



对八叠球菌有抑制作用。奚肇庆用平板打孔法对5种致病菌进行药敏试验,结果金葡菌、变形杆菌中度敏感,绿脓杆菌、霉菌轻度敏感,大肠杆菌耐药。表明薤白有一定抗菌消炎作用,从而改善呼吸道的通气性。

1986年,赵静波等用ANB提取物对实验性动脉进行观察,结果治疗组颈总动脉内cAMP含量比对照组明显升高,差异极为显著( $P < 0.01$ ),血浆和动脉组织内cGMP含量比对照组明显降低,cAMP与cGMP比值治疗组比对照组明显升高(均 $P < 0.05$ )。还观察到治疗组血浆中6-酮-PGF<sub>1α</sub>水平明显升高,而对照组及肺动脉壁内6-酮-PGF<sub>1α</sub>均降低。1989年,陈滴等在AMB对家兔前列腺素E<sub>1</sub>(PGE<sub>1</sub>)研究中发现,用药一周后血浆中PGE<sub>1</sub>与对照组相比两组无差异;而于用药3周和5周后PGE<sub>1</sub>含量治疗组分别为387.5±95.7pg/ml,902.5±272.0pg/ml,均明显高于对照组( $P < 0.05 \sim 0.01$ )。业已证实,肺巨噬细胞能合成前列腺素E(PGE)等,PGE<sub>1</sub>能使细胞内腺苷酸环化酶活性增强,提高cAMP内源水平,从而使痉挛的支气管平滑肌松弛,肺的阻力减小。6-酮-PGF<sub>1α</sub>可反映PGI<sub>2</sub>的含量,而PGI<sub>2</sub>活性高于PGE<sub>1</sub>的30~40倍。以上结果说明,薤白能提高PGI<sub>2</sub>的含量,具有明显缓解支气管痉挛的作用。

迄今已知TXA<sub>2</sub>是最强的促血小板聚集物质,并具有强烈的支气管平滑肌收缩作用。与TXA<sub>2</sub>相反,PGI<sub>2</sub>是目前已知的最有效的抑制血小板聚集和支气管扩张物质,这样TXA<sub>2</sub>-PGI<sub>2</sub>在体内形成调节机制,对血小板聚集和支气管张力、血栓形成等起重要的调节作用。在病理状况下,如缺氧、组胺、慢反应物质可刺激肺脏生成TXA<sub>2</sub>,TXA<sub>2</sub>/PGI<sub>2</sub>比值升高。薤白有提高PGI<sub>2</sub>含量、明显对抗TXA<sub>2</sub>的作用。此外,1984年江漫涛等还发现ANB的主要成份MATS有直接抑制血小板聚集作用,说明薤白可在多环节上降低血小板聚集,减轻血液高凝状态。1990年,奚肇庆等观察到薤白复方可使COPD增高的红细胞压积及血沉降低,这更有利于COPD患者降低血液粘稠度、粘滞性,有助于改善微循环和低氧血症,使组织获得更多的氧,缓解喘息状态。

大量实验资料及临床观察表明,中性粒细胞被补体激活后,在肺微循环聚集释放氧自由基直接损伤细胞和间质,促使脂质过氧化反应,增高的LPO更会加重肺损伤。陈氏发现AMB对家兔血清LPO有降低作用,主要机理是薤白能抑制脂质氧化酶代谢产物羟基花生四烯酸(HETE)的生成,从而直接减少LPO的生成。此外,薤白是否同维生素E一样,也是一种抗氧化剂,能接受自由基,提高机体清除氧自由基的能力,这一机理有待于进一步研究。

近年来,世界上研究TXA<sub>2</sub>阻滞类的及促进PGI<sub>2</sub>生成的药物、抗物抗氧化剂的临床应用,成为治疗学的一个重要课题,对薤白的研究无疑将有很大的发展前景。

薤白能提高PGI<sub>2</sub>含量。PGI<sub>2</sub>除有舒张支气管平滑肌的作用外,还能使肺动脉高压患者的肺动脉压下降,有人报道薤白复方能改善心电图肺型P波的高度。所以,以薤白防治COPD延缓肺心病的发生和发展可能具有重要意义。薤白有抑制TXA<sub>2</sub>合成和血小板聚集,以及降低LPO,减轻肺损伤等作用,故亦可用于呼吸衰竭、肺性脑病的辅助治疗。对肺心病合并DIC、成人呼吸窘迫综合征(ARDS)等危重症,薤白也将是一片有待开发的领域。哮喘、肺气肿、肺心病LPO水平增高,在此情况下使用氨茶碱和舒喘灵,有可能使有低血钾、低氧血症患者发生心律失常,而薤白除降低LPO外,并可降低血脂,所以对COPD合并冠心病、高血压病、高血脂症和LPO升高患者,薤白将是一种安全有效的药物。

#### 参考文献

- 1 Dusting G J, et al. Prostaglandins and the cardiovascular system. New York: Raven Press, 1982, 59~105
- 2 东原英治,等. 日本老年医学会杂志, 1983, 20(5): 38
- 3 方蘊春,等. 南京中医学院学报, 1984, 2: 40
- 4 江漫涛,等. 白求恩医科大学学报, 1984, 10: 609

- 5 赵静波,等. 中华医学杂志, 1986, 66(3): 45
- 6 陈滴,等. 白求恩医科大学学报, 1989, 15(1): 91
- 7 谭可安,等. 白求恩医科大学学报, 1989, 15(2): 211
- 8 奚肇庆,等. 陕西中医, 1990, 11(3): 108
- 9 于成宝,等. 中国药理学杂志, 1990, 25(3): 131
- 10 奚肇庆. 中西医结合杂志, 1991, 11(9): 575

(南京中医学院奚肇庆撰)

**黄连** 又称王连,为常用中药之一,最早记载于《神农本草经》,《药性论》名支连。其药用原植物品种过去较为混乱,直至20世纪60年代中期才有较系统的鉴定报道。据近代文献资料记载,全世界黄连属植物约16种,多分布于亚洲东部,中国有6种,主要为毛茛科植物黄连(味连)、三角叶黄连(雅连)、峨眉野连(野黄连)、云南黄连(云连),分布在四川、云南、贵州、湖北、陕西、西藏等地,生于阴湿森林中。此外,尚有短萼黄连(土黄连)、五裂黄连亦可供药用。本品以立冬后(11月)采收为宜。

黄连性味苦寒,归心、肝、胃、大肠经;功能清热燥湿、泻火解毒;主治湿热泻痢腹痛、里急后重、热盛心烦、壮热神昏、烦躁不眠、痞满呕逆、血热吐衄、消渴、痈疽疮毒、耳目肿痛、咽喉肿痛、口疮、湿疹、水火烫伤等。张元素《珍珠囊》总结为:“其用有六:泻心火,一也;去中焦湿热,二也;诸疮必用,三也;去风湿,四也;治赤眼暴发,五也;止中部见血,六也”。以黄连作为主要药物的常用方剂也很多,如黄连安神丸(《仁斋直指方》),主治心烦懊恼、心乱怔忡、胸中痞闷;黄连阿胶汤(《伤寒论》),主治少阴病,心烦不得卧;黄连解毒汤(《外台秘要》),治热盛烦呕不得卧者;黄连汤(《伤寒论》),主治伤寒胸中有热,胃中有邪气,腹中痛,欲呕吐;左金丸(《丹溪心法》),主治吞酸呕吐;黄连煎(《僧深集方》),治眼赤痛,除热;泻心汤(《和剂局方》),主治心经实热;黄连丸(《兵部手集方》),主治下痢;蒜连丸(《本事方释义》),治脏毒。黄连的应用范围虽然很广泛,但在临床中对阴虚烦热、胃虚呕恶、脾虚泄泻、五更泄泻者均须慎用。本品内服煎汤1.5~3g,或入丸散;外用研末调敷,煎水洗或浸汁点眼等。黄连有生用、炒用之别。炒用时可加上不同的液体辅料,如姜汁、吴茱萸水、黄酒拌炒等。传统看法认为炒用可减弱黄连的苦寒之性,使之更适合病情的需要。但现代研究认为黄连炒后使其水煎液中总生物碱、小檗碱含量有所降低,抗菌力亦随之减弱。尤其是吴茱萸水拌炒可使总生物碱降低8.68%,小檗碱降低19.35%。由此可见,黄连炒用还有待于进一步研讨改进。

黄连的现代研究在40年代即有报道,其中主含小檗碱(7%~9%)、黄连碱、甲基黄连碱掌叶防己碱(巴马亭)、药根碱、非洲己碱等生物碱,此外尚含黄酮、黄柏内酯、荧光尿酸等。其主要药理作用为:(1)抗微生物及抗原虫作用;黄连素(小檗碱)是一种古老的广谱抗菌药,对溶血性链球菌、脑膜炎球菌、肺炎双球菌、霍乱弧菌、炭疽杆菌、金黄色葡萄球菌、痢疾杆菌、白喉杆菌、枯草杆菌、绿色链球菌均有较强抑制作用;对肺炎杆菌、百日咳杆菌、鼠疫杆菌、布氏杆菌、破伤风杆菌、产气膜杆菌、结核杆菌等亦有效;此外对螺旋型流感病毒、新城病毒均有一定的抑制作用;对多种常见致病性真菌有广泛而显著的抑制作用;对钩端螺旋体有较强的杀灭作用;黄连煎剂及硫酸小檗碱在体内外均有抗阿米巴原虫作用;尚有抗滴虫、抗黑热病原虫等作用。研究资料表明,黄连可增强机体内在的免疫功能,激活巨噬细胞,加强吞噬细菌的能力,从而发挥抗感染作用。它低浓度(约10mg/100ml)为抑菌,高浓度(约20mg/100ml)为杀菌。(2)对循环系统的作用;动物实验资料表明,静脉注射或口服小檗碱均可扩张外周血管及冠状动脉,引起血压下降。一般剂量时持续时间不长,重复给药无增强作用及耐受现象。(3)对乙酰胆碱等作用;小檗碱对乙酰胆碱具有双向作用,小剂量增强之,大剂量则对抗之。前者与抗胆碱酯酶有关,后者可能因其化学结构同属季铵化合物,其间发生竞争性拮抗所致。此外,小檗碱还有抗肾上腺素样作用。(4)对平滑肌的作用;小檗碱对血管平滑肌有松弛作用,对子宫、膀胱、支气

管、胃肠道等则呈兴奋作用。(5)对胆汁分泌及血液的影响:小檗碱有利胆作用,能增加胆汁形成,使胆汁变稀,口服或肌注可降低血清胆固醇。对慢性胆囊炎患者,口服亦有良好效果。此外,对血小板凝集有抑制作用,尚有抗贫血作用。(6)其他作用:本品有效成分具抗癌(尤其是鼻咽癌)、抗放射及细胞代谢作用。小剂量小檗碱能加强大脑皮层的兴奋过程,大剂量可削弱之;同时也能加强抑制过程。小檗碱还有解热、抗炎、抗利尿、局麻、镇静、镇痛等作用。

黄连在临床应用极为广泛,据报道主要有:(1)细菌性痢疾。疗效肯定,多在用药5~7d治愈。少数顽固性病例可另用2%~3%黄连溶液行保留灌肠。其近远期疗效均佳,如复发再服仍有效。对比资料表明,它不亚于磺胺类药物、链霉素、痢疾噬菌体等,且无副作用。(2)伤寒。用黄连粉装入胶囊口服,每次2g,每4h1次,或用香连丸(黄连、木香),平均5~6d即可退热,绝对疗效在98%以上。(3)肺结核。用黄连素每次300mg,每日3次口服,3个月为一疗程。可使咯血、发热、咳嗽等症状消失,排菌者的阴转率为83.3%,X线摄片病灶吸收好转。(4)大叶肺炎。用黄连粉口服,每次1g,每日4~6次,一般2~3d即可退热。(5)猩红热。用10%黄连糖浆内服,效果不亚于青霉素和青霉素加磺胺类药物。(6)百日咳。用10%黄连煎剂,疗效显著,用药愈早愈好。与链霉素、氯霉素相较并不逊色。(7)血小板凝集。黄连素有效率达95%,可与潘生丁合用阿斯匹林媲美。(8)白喉。用黄连粉内服,并配合10%黄连溶液漱口,一般13d内体温恢复正常,2~3d假膜消退。(9)本品外用还可治疗多种疾患。如用5%~10%黄连油或2%黄连水治疗I、II度新鲜烧伤,能使创面迅速干燥结痂,具有明显的控制感染、缩短疗程作用;以10%黄连软膏贴敷治疗体表化脓性感染,可使炎症消退,脓性分泌物减少,创面干净而愈;用10%黄连煎剂治疗肛裂,可止血、止痛、止痛;用20%黄连浸剂浸渍阴道用棉栓治疗滴虫性阴道炎,治愈率达95%以上。还可用于治疗眼科疾病、化脓性中耳炎、急性扁桃体炎、咽喉炎、萎缩性鼻炎、上颌窦炎等。此外,黄连对于肺脓肿、脓胸、溃疡性结肠炎、脑脊髓膜炎、高血压等病均有良好治疗效果。

黄连,如能正确使用,相当安全,副作用也很少。但美中不足的是小檗碱口服不易吸收,肠外给药则血浓度不易维持。人类口服0.4g盐酸小檗碱后30min血浓度为100 $\mu$ g(体外杀菌浓度大约为20mg%),随后逐渐减少,即使重复给药,每4h0.4g,血浓度亦不见增高。它在各组织中贮留时间也甚为短暂,24h后仅有微量。对金黄色葡萄球菌、溶血性链球菌与弗氏痢疾杆菌单用小檗碱易产生抗药性。对黄连抗菌力与抗药性的实验资料表明,单味黄连的抗药性远远高于复方,且其抗菌力也弱于复方。另有研究资料指出,黄连素对抗脑膜炎双球菌的作用是抑制细菌而非杀菌,认为黄连是通过脑膜血管到达脑膜控制炎症,而不是透过血脑屏障进入脑脊液,所以疗效不够理想,难以取代磺胺类药物。临床使用黄连虽然副作用很少,但也还应提及的是曾有过内服或注射黄连素引起过敏反应报道,需予重视。由于黄连素有舒张血管降低血压的作用,故在治疗急性感染性疾病合并有血压降低或休克时,使用大剂量必须慎重。

黄连的效果可靠,功用也广泛,近年来有关黄连的化学成分、药理作用、临床疗效方面的研究已取得令人瞩目的成绩。预计今后对其口服不易吸收、血浓度难以维持等不足之处,将会得到解决,从而更好地发挥其应有作用。由于单用黄连易产生抗药性,如何通过复方配伍加以改进,并提高其药理作用,同样是研究的重点,亦可能获得突破性进展。进一步分析其有效成分,拓展临床应用范围,阐明药理机制,相信会有新的成果出现。

#### 参考文献

- 1 李秀兰. 中西医结合杂志, 1986, 8: 486
- 2 李祥. 中成药研究, 1988, 2: 35~36
- 3 黄伟民. 中华血液学杂志, 1989, 5: 228~231
- 4 王浴铭. 中药饮注, 1990, 4: 31
- 5 田道法. 湖南中医药大学学报, 1990, 3: 152~153

6 黄伟民. 中华心血管病杂志, 1990, 4: 2312

7 张浩. 中国中药杂志, 1990, 6: 6

(安徽中医学院王纪常副教授撰, 李洪涛审)

**何首乌** Heshouwu 为常用中药。唐元和七年(公元812年),李翱作《何首乌录》首次记载了何首乌独特的功效:“长筋力,益精髓,壮气驻颜,黑发延年”。此药本名交藤,因何首乌采食有功而得名。宋代《开宝本草》云:“何首乌有赤、白两种,赤者雄,白者雌”,“春夏采其根,雌雄并用”。明代李时珍在《本草纲目》中指出:“何首乌白者入气分,赤者入血分。此物气温,味苦涩。苦补肾,温补肝,涩能收敛精气。所以能养血益肝,固精益肾,健筋骨,乌须发,为滋补良药”。自晚唐以来,何首乌作为著名的养生防老药已广泛应用于临床。仅古医籍所载,以赤白何首乌共为主药的保健延寿复方,如何首乌丸、神仙训老丸、延寿丹、七宝美髯丹等共20余种世代相传。

但自晚清以来,中医临床所用几乎仅为蓼科植物赤何首乌,传统中药白何首乌只在部分地区使用,几近湮灭。1921年,日本高木重周对中国、日本及朝鲜产的赤、黑、白何首乌进行了生药研究,结果证明各国产的赤、黑何首乌,其原植物均为蓼科何首乌。朝鲜产的白何首乌,其原植物为蓼科植物隔山牛皮消。1982年,龚树生等通过本草学考证和传统产区原植物品种调查,确认蓼科植物耳叶牛皮消、戟叶牛皮消及隔山牛皮消为我国白首乌的主要品种。

1922年,日本衣笠重报道了蓼科何首乌的化学成分:总氮1.05%、淀粉45.15%、粗脂肪3.14%、矿物质4.54%、卵磷脂及羟甲基萘醌衍生物1.78%等。1936年,中国林修源也报告了何首乌的成分:植物固醇0.024%、鞣质1.74%、脂肪酸0.44%及酒石酸、柠檬酸、琥珀酸、苹果酸、蚁酸、醋酸等。1954年,日本月田浩较详细地报告了何首乌的萘醌衍生物有大黄酚(chrysophanol)、大黄素(emodin)、大黄素甲醚(phycion)、大黄酸(rhein)、大黄酚蒽酮(chrysophanol anthrone)及其葡萄糖甙,且多以甙的形式存在。1966年,中国凌罗庆等研究不同炮制时间对何首乌中萘醌衍生物含量的影响,结果表明,生首乌经蒸制50h后,游离萘醌含量随蒸制时间的增加而增加,结合萘醌的含量随蒸制时间的增加而降低。1975年,日本秦清之从何首乌中分离出一新的化合物,其结构为2,3,5,4'-四羟基芪-2-O- $\beta$ -D葡萄糖甙,其含量达1.2%,为何首乌主要有效成分之一。

1966年,日本三桥博等从朝鲜白首乌隔山牛皮消中提出多羟基萜甙,鉴定3个已知甙元:内珊瑚甙元、去酰基萜甙元及林里奥甙;1975年又报告5个萜型甙元:开德甙元、告达廷、奔波甙元、二酯甙元D及二酯甙元E,后两个为新的天然产物。1985年,他们终于采用反相层析等方法分离纯化13个新的多羟基萜甙并测定它们的化学结构。1982年,龚树生等对中国产3个品种的白首乌进行化学成分的初步研究,从中提取分离出C<sub>21</sub>甙体酯甙及磷脂类,测定出不同产地、不同品种以及不同炮制品总磷脂的含量,鉴定磷脂的组成主要为卵磷脂、肌醇磷脂、乙醇胺磷脂及磷脂酸等;并用气相色谱法测定了磷脂分子中脂肪酸的排比,其中以亚油酸的含量最高。1988年,又从耳叶牛皮消根中分离出多羟基萜甙并鉴定了3个已知的甙元的结构,它们是:开德甙元、告达廷甙元及萜甙元,并从中得到一个新的天然产物白首乌二苯酮(Baishouwubenzop-

henone),其结构为2',5',2,6-四羟基,6'-甲基,3-乙酰基二苯酮。1990年,陈纪军等从耳叶牛皮消的根分离出7个C<sub>21</sub>甙体酯甙单体,并鉴定了它们的结构,其中有3个为新的化合物,分别命名为白首乌甙A、B、C。1988年,龚树生等测定耳叶牛皮消根的主要营养成分,其中含有9种不同的维生素,以B族含量较高;含有人体必需的全部氨基酸,氨基酸的总量和西洋参相近,尤以精氨酸含量最高,可达2.23%;测定了赤白何首乌中无机盐、人体必需的15种微量元素以及17种主要有毒金属的含量。赤白何首乌营养成分的含量测定及其生物活性成分结构的阐明,对研究

其独特的传统功效,从分子水平探讨其防治疾病作用机理奠定了科学基础。

1923年,袁淑范首次对何首乌浸膏进行药理研究,证明它有促进肠道蠕动的作用。1936年,林修源报告首乌萜醌衍生物能兼减神经时值,促使神经兴奋。1966年郭炳婉等报道,首乌延寿丹可降低家鸽血清胆固醇和减轻动脉粥样硬化病变。1980年,凌罗庆用家兔急性高血脂症模型实验表明,何首乌能使血中高胆固醇较快下降至正常水平,对动脉内膜斑块的形成及脂质的沉积有减轻作用。1984年,王巍用鹤鹑快速动脉粥样硬化模型证明制首乌能显著地抑制血浆中总胆固醇、甘油三酯、游离胆固醇和胆固醇酯的升高,升高血浆中高密度脂蛋白胆固醇和总胆固醇的比值,并可显著抑制鹤鹑动脉粥样硬化的形成和发展,降低发病率,减轻主动脉病变严重程度。1986年,卢泳才等用家兔实验性动脉粥样硬化模型证实,何首乌水煎剂可明显降低血脂及动脉壁过氧化脂质,降低冠状动脉病变的发生率和减轻病变的严重程度,缓解动脉粥样硬化病变的发生。何首乌尚可抑制由ADP诱导的高血脂动物的血小板聚集,具有纤溶活性,能促进纤维蛋白裂解,降低血液的高凝状态。何首乌降血脂、减轻动脉粥样硬化病变的机制,可能与药物抑制胆固醇在肠道的吸收,促进胆固醇代谢,减少胆固醇在肝内的沉积,阻止脂质在血流的滞留或渗透到动脉内膜,同时药物尚可能通过保护机体抗氧化酶活性,减少自由基对红细胞及动脉壁平滑肌细胞膜的损伤等多种因素有关。

1983年龚树生等报道,白首乌总磷脂灌胃可明显提高外周血酸性酯酶阳性淋巴细胞的比值和绝对数,并可预防和治疗因环磷酰胺造成的免疫抑制,使T淋巴细胞的比值保持在正常水平。1986年顾立刚等的实验表明,白首乌水浸膏及总甙对正常的及免疫受抑动物的细胞免疫及体液免疫均有增强作用。1987年王淑华等报告,白首乌可减轻吸入臭氧引起的胸腺萎缩和脾脏萎缩,并使胸腺和脾脏呈淋巴细胞增生。白首乌总甙可对抗乙酰苯胺造成的胸腺萎缩。1987年,顾立刚等首次报道腹腔注射白首乌总甙,可明显减轻皮下接种的艾氏腹水癌的瘤重,延长其存活期。1988年,赵瑾等报告白首乌总甙对Lewis肺癌小鼠能抑制实体瘤生长,加强环磷酰胺的抗癌疗效,尤其是对肺癌转移的预防作用更为明显,同时又可明显减轻环磷酰胺的毒副作用。1991年顾立刚等进一步实验表明,白首乌总甙对皮下接种的S<sub>180</sub>肉瘤的抑制作用最强,抑癌率达69.90%。白首乌总甙对体外培养的S<sub>180</sub>、EAC、H<sub>22</sub>、H<sub>7402</sub>及CNE<sub>2</sub>等瘤株均有明显的抑制作用,其中以H<sub>22</sub>最敏感。关于白首乌抑癌作用的机制,可能与药物对癌细胞的直接杀伤作用有关。经FCM快速测定细胞内DNA相对含量,结果表明,药物对癌细胞S期有阻滞作用。鉴于白首乌总甙分子中既有亲水性基团,又有亲脂性基核,提示其对癌细胞的杀伤作用可能与分子表面活性剂样作用有关。药物作用于细胞膜表面,可抑制Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>泵,竞争K<sup>+</sup>的结合部位,导致膜表面性质的改变。在电镜下可见有众多癌细胞膜破裂现象也支持这一见解。另外,药物可明显增强荷瘤动物的免疫功能,增加白细胞、单核细胞、酯酶阳性淋巴细胞及巨噬细胞的数量和功能。白首乌及其复方防治肿瘤的临床作用及其作用机理尚待进一步深入研究。

1984年,姚鸣春等报道何首乌可明显对抗氢化可的松所致血中SOD含量下降,并可使体内谷胱甘肽含量增加。1987年郭肇坤等实验资料表明,白首乌可明显减少血清、心、脑、肝、肺等组织中过氧化脂质的含量。赤白何首乌均富含磷脂类、维生素类、微量元素硒、铜及多羟基化合物,它们都是有效的抗氧化剂,提示服用何首乌制剂可增加体内抗氧化剂的含量或保护其活性,以加速体内O<sub>2</sub>自由基的清除。1986年,余敏等报告赤白何首乌水溶部分及其复方可明显抑制大鼠脑中MAO-β酶活性,抑制率可达80%以上。这些作用可能和何首乌防衰延寿作用有关。1986年邹亮报道,何首乌制剂可明显延长果蝇的平均寿命及最高寿命。也有实验资料表明,何首乌制剂能延长二倍体细胞的生长周期。

1983年日本Yoshiyuki Kimura等的实验资料证明,何首乌

所含的二苯乙烯甙对过氧化玉米油所导致的脂肪肝和肝功能损害、肝脏过氧化脂质含量升高、血清谷丙转氨酶及谷草转氨酶升高均有对抗作用,还可使血清游离脂肪酸及肝肺脂质过氧化物显著下降。1987年张颖等报道,白首乌总甙对乙酰苯胺造成的肝脏损伤组织有明显的保护作用,可使受损肝脏酶活性有不同程度的恢复,有的可恢复至正常水平。同时可见肝细胞内RNA及蛋白质合成增加,表明肝脏功能的恢复。1987年张晓荣等报告,白首乌总甙对乙醇诱导的以及乙酰苯胺造成的脂质过氧化反应有明显的抑制作用,提示何首乌保肝作用的机理可能是抑制过氧化脂质的产生及其对肝细胞的破坏。

1982年沈道修报道,何首乌可兴奋肾上腺皮质功能,对摘除双侧肾上腺的小鼠,制首乌能使肝糖元升高。1987年吴秉芹等报道,白何首乌磷脂涂沫于家兔耳廓内侧,可明显促进耳廓外侧耳毛生长速度,使毛纤维和毛孔直径明显增加。1989年郭炳根等用<sup>3</sup>H标记的方法研究白首乌总甙的吸收、分布和排泄,动态定量研究资料表明,示踪剂在肾上腺、肝、睾丸等组织含量较高,药物可透过血脑及血睾屏障,大部分经肾从尿排至体外。

1982年沈道修报道,何首乌的毒性与炮制关系密切,制首乌毒性甚小,生首乌则有一定的毒性。腹腔给药时生首乌的LD<sub>50</sub>为2.7g/kg,制首乌为169.4g/kg。1989年吴秉芹报道,白首乌饮片煎剂及原生药口服毒性较小,其主要有毒成分为C<sub>21</sub>甙甙,其口服LD<sub>50</sub>为4896.9mg/kg,其腹腔注射LD<sub>50</sub>为749.3mg/kg。

赤白何首乌和其他中药一样,本身就是一个含有多种成分的“小复方”,其补肝肾、益精血和延年益寿之功是各种成分在机体不同层次、不同环节上共同协调综合作用的结果。

赤白何首乌在化学、药理学及临床等领域的研究已取得令人瞩目的进展。何首乌及其复方在临床上已经广泛应用。赤白何首乌药材的年最高收购量曾达100多万千克。白首乌不仅是一味重要的中药,白首乌粉又是江苏省滨海地区的传统保健食品,在国内外享有盛名。白首乌鲜品的年最高产量曾达到1000多万千克。但白首乌的现代临床研究还刚刚起步,优化配伍,改革剂型以提高临床疗效,从分子水平探讨其防治作用机理以及综合开发利用等方面仍有许多课题有待深入研究。

何首乌是中医药学中具有显著特色的滋补药,被历代医家视为摄生防老的珍品。老年病中动脉粥样硬化、肿瘤、糖尿病、更年期综合症、慢性肝炎、神经衰弱等疾病都是何首乌及其复方的适应症。同时在健身、减肥以及美容等方面何首乌也有广阔的应用前景。随着老年人口比例的逐年增加,对防治老年病的药物及老年保健品的需求将日益增加。可以期待,2010年内,在何首乌的基础理论研究、临床应用研究以及综合开发研究3个方面将取得突破性进展。

#### 参考文献

- 1 高木重周. 药学杂志, 1921, 427: 487~498
  - 2 月田洁, 等. 药学杂志, 1954, 74(3): 203~231
  - 3 龚树生, 等. 北京中医学院学报, 1983, 6(1): 30~36
  - 4 王巍, 等. 中西医结合杂志, 1984, 4(12): 748~750
  - 5 Sachiko Tsukamoto, et al. Studies on the constituents of Asclepiadaceae plant—Lv11 Tetrahedron, 1985, 41(5): 927~934
  - 6 张颖, 等. 中国医药学报, 1987, 2(4): 25~28
  - 7 龚树生, 等. 药学学报, 1988, 23(4): 276~280
  - 8 郭炳根, 等. 中国医药学报, 1989, 4(5): 17~20
  - 9 顾立刚, 等. 北京中医学院学报, 1991, 14(4): 32~33
- (北京中医药大学龚树生研究员撰, 博士生导师傅聪远审)

**红毛五加** 来源于五加科五加属植物的红毛五加及其变种, 产于温带, 中国主产于四川, 西北和湖北、河南、河北等地也有分布。其地上茎表密生灰色的和茶褐色带微红色的毛刺。本植物的茎皮俗称红毛五加皮, 供药用, 可主治三方面的病症: 拘挛疼痛、痿痹、足膝无力, 皮肤风湿、阳萎、囊湿。据考证, 中国《神农本

草经》中记载的刺五加即现今的红毛五加。本品是具有人参作用特点的刺五加的近缘植物,为一类有广阔应用前景的药用植物。

1983年,沈映君等首先对红毛五加皮的药理作用作了研究,并与刺五加进行对比,发现红毛五加皮(乙醇浸膏)有类似刺五加的以下作用:(1)对于中枢神经系统:给药后使小鼠安静,自发活动明显减少;对小鼠戊巴妥钠睡眠时间有显著的协同作用,使动物睡眠时间显著延长;对安钠加所引起的小鼠中枢兴奋作用有明显的对抗作用。(2)抗炎作用:对大鼠蛋清性或琼脂性足跖肿胀以及小鼠因二甲苯或巴豆油所致的耳部炎症均有明显的抑制作用;后一作用,红毛五加较刺五加更为明显。(3)能明显降低大鼠肾上腺内维生素C的含量,表明它能促进动物肾上腺皮质的功能。(4)对幼年小鼠胸腺有明显的萎缩作用,使其重量明显减轻,但可使肾上腺的体积增大,重量增加,揭示对机体的免疫功能和内分泌功能有一定的影响(刺五加对幼年小鼠胸腺和肾上腺的重量均无明显的影响)。(5)对于离体肠肌或离体(未孕或妊娠)子宫均有相似的兴奋作用,可使肠肌或子宫的张力略升高,收缩幅度变大。同时还发现本品的水煎液具有突出的抗实验性动物缺氧的作用,给小鼠腹腔注射水煎液10g生药/kg体重,可:(1)明显延长正常小鼠及注射异丙基肾上腺素的小鼠在正常缺氧条件下的生存时间;(2)显著提高正常小鼠以及注射异丙基肾上腺素的小鼠在减压条件下的存活率;(3)明显降低小鼠因溺水缺氧所致的死亡率;(4)显著延长小鼠亚硝酸钠中毒性缺氧的生存时间;(5)明显延长小鼠缺血性缺氧的存活时间;(6)显著减少小鼠全身的耗氧量。这一结果对于探索本品用于治疗某些临床缺氧性疾病,如冠心病、肺心病、脑血管病等很有启发意义。又经试验,本品的乙醇浸膏或水煎液,毒性均极小,较大剂量或较长时间用药均安全。

在以上结果的启发下,为了寻找红毛五加与刺五加所含的相似的活性成分,为了探讨前者作为后者代用品的可能性,一些学者进行了进一步的药理和化学成分的研究。

对心血管系统的药理作用,经用红毛五加皮的水、丁醇和乙酸乙酯的提取物分别试验,发现水提取物和丁醇提取物均有增加离体豚鼠心脏冠状动脉血流量和小鼠耐缺氧作用,具有和刺五加相似的作用。进一步研究表明,本品经乙醇冷浸后的水煎液,可使豚鼠离体心脏冠状动脉的血流量增加(但量效关系不明显);对乌头碱所致的大白鼠实验性心律失常具有一定的保护作用,可明显延迟其潜伏期;对因氯化钡所致大白鼠实验性心律失常有对抗作用,但维持时间甚短;并可使因花背蜂螫毒性所致的豚鼠离体心脏及麻醉猫心律失常转为正常节律,从而提示这类活性成分可能是亲水性的。与此同时,也有报道本植物的多糖分有防辐射损伤的作用。1991年,李成林系统地比较了本品与刺五加的药理作用,除有以上活性外,还发现本品有抗疲劳作用,能促进小鼠大脑蛋白质合成,加强小鼠学习和记忆功能;增加肝脾的核酸代谢,预防急性肝损伤,还可提高肝脾单核巨噬细胞的吞噬功能和促进雌性未成熟大鼠卵巢发育。

关于红毛五加成分研究,自90年代以来始见有关的报道。赵余庆、孔德云、潘美德等人,几乎在同一时期内分别在各自的实验室内开展了对红毛五加成分的研究,分别由不同的溶剂提取物中得到相同或不相同的成分共数十种。综合他们的研究结果为:茎皮主要含有(1)非挥发性成分:二十二烷酸、 $\beta$ -谷甾醇、齐墩果酸、常春藤皂甙元、紫丁香树脂酚及6种甙类成分(胡萝卜甙、木通皂甙A、木通皂甙C、 $\alpha$ -常春藤皂甙、齐墩果酸-3-O- $\beta$ -D-吡喃葡萄糖基-(1 $\rightarrow$ 2)- $\alpha$ -L-吡喃阿拉伯糖甙及紫丁香树脂酚- $\beta$ -D-葡萄糖吡喃糖甙)和10种水溶性成分(胸腺嘧啶、尿嘧啶、黄嘌呤、腺嘌呤、次黄嘌呤、腺苷、丙三醇、尿囊素、D-甘露醇及liriodendrin)(2)挥发性成分:芹子烯、姜黄烯等48种非含氧倍半萜及烷基烃类化合物。根、茎经化学预试验,发现主要含有酚类、黄酮、糖类、甙类、油脂、甾萜成分。测定其所含有的总甙(I)、丁香甙(II)、总黄酮(III)及多糖(N)的含量(根、茎)分别为I:1.84%,

0.96%; II:0.04%,0.03%; III:0.49%,0.40%; IV:2.50%,3.22%。上述各成分,何种是有效成分并未明确。

由于红毛五加与刺五加的生物学活性相似,而红毛五加尚有一个优于刺五加的特点,即红毛五加药用部位是茎皮,每年采挖时只砍伐地上部分而保留根部,次年再生,资源永不枯竭;且因砍伐茎部还刺激了根部,使次年茎部生长更为旺盛。而刺五加是采用根部供药用,使植物不易恢复再生。因此,在今后一个时期内,红毛五加仍将是植物药研究的一个重点品种。其热点将集中在继续分析其所含的成分,同时配合生物活性试验以确定有效成分;进而配合毒理、药理、药剂、药物代谢和临床探讨作为治疗新药和保健制品开发的可行性以及有关该植物生态、栽培等的研究。

#### 参考文献

- 1 沈映君,等.成都中医学院学报,1983,4:43~48
- 2 黄国钧,等.成都中医学院学报,1984,1:53~56
- 3 卫平,等.西北药学杂志,1987,2(3):13~15
- 4 孔德云,等.中国医药工业杂志,1990,21(5):202~204
- 5 刘玉兰,等.中国中药杂志,1990,15(8):46~48
- 6 李成林.中药药理与临床,1991,7(2):29~31
- 7 赵余庆,等.中国中药杂志,1991,16(7):421~423
- 8 屠美德,等.中草药,1991,22(12):534~536
- 9 赵余庆,等.中草药,1992,23(4):216
- 10 赵余庆,等.中药材,1992,15(4):28~31

(华西医科大学杨培全副教授撰)

### 青蒿素及其衍生物治疗疟疾研究进展

treatment of malaria with artemisinin and its derivatives 疟疾是世界上分布最广、发病人数最多及危险很大的蚊媒传播的寄生虫病。全球每年发病人数约1.6亿,因患疟疾死亡人数达百余万人。自60年代初发现氟喹的抗性疟原虫以来,抗药性原虫株迅速蔓延,使原来有效的抗疟药如喹啉类、磺胺类化合物,在很多地区失去作用。对奎宁的也已产生抗药性,并从亚洲向非洲扩散。因此,寻找新型抗疟药已成为全球疟疾防治的重要任务。

中医药学对防治疟疾早有记载。青蒿治疗疟疾始见于东晋葛洪《肘后备急方》:“青蒿一握,以水二升渍,绞取汁,尽服之”。以后历代均有沿用。青蒿在广西、广东、云南、四川、山东均有大量野生种资源丰富。1971年,中国科学工作者在中药青蒿中找到对鼠疟、猴疟以及临床有显著疗效的抗疟有效部分,1972年分离出抗疟有效单体——青蒿素,并对青蒿素进行了化学结构测定、资源普查、生产工艺、含量测定、制剂、药理和临床等方面的系统研究,确定其为一种具有过氧基团的新型倍半萜内酯。青蒿琥酯和蒿甲醚是青蒿素水溶性的和油溶性的衍生物;与现有抗疟药比较,青蒿素性、青蒿琥酯、蒿甲醚具有高效、速效、低毒、与氯喹无交叉抗药性以及使用方便的特点。

1982年以来,在中国青蒿素及其衍生物开发指导委员会组织下,采用WHO提供的研究实验方案,开展了青蒿素性、注射用青蒿琥酯、蒿甲醚注射液I、II、III期临床研究。

I期临床研究:通过对61名健康志愿者进行药物耐受性试验,揭示了健康人对青蒿素性102mg/kg·3d,注射用青蒿琥酯15mg/kg·3d,蒿甲醚注射液12mg/kg·5d及以下剂量组耐受良好。其副作用为:(1)网织红细胞减少。青蒿琥酯16.88mg/kg·3d组在药后3~5d网织红细胞下降,7~14d恢复正常;15mg组和12mg组在药后3d轻度下降,第7d恢复正常;8mg组和4mg组(治疗量为4.8mg/kg·3d)未见异常改变。蒿甲醚16mg/kg·3d组和12mg/kg·3d组在药后3~7d网织红细胞下降,14d恢复正常;剂量较低时,如12mg、9.6mg和7.2mg/kg·5d,则部分志愿者在药后3~5d轻度下降,第7d恢复正常。青蒿素性各剂量组(56mg、84mg、102mg、112mg和120mg/kg·3d)均未未见网织红细胞下降。(2)GOT和GPT改变:青蒿琥酯各剂量组GOT和GPT均未出现异常改变。青蒿素性在最高剂量组(120mg/kg·3d)3例志愿者中有1例在药后3~21d出现GPT

升高,35d恢复正常。蒿甲醚两个较大剂量组(12mg和16mg/kg·3d),有部分志愿者GOT和GPT出现异常改变。(3)发热反应:蒿甲醚的较高剂量组,其发热反应出现率较高,如在4mg/kg·次以下,发热率为25%。青蒿素栓发热反应的出现率较低,青蒿琥酯各剂量组均未出现发热反应。由于蒿甲醚的治疗剂量在4mg/kg·d以下,又由于大多数疟疾病人都有高热,因而发热反应在疟疾病人治疗中不成问题。

Ⅰ期临床研究:通过对282例恶性疟疾病人设青蒿素栓、注射用青蒿琥酯和蒿甲醚注射液的不同给药剂量以及设二盐酸奎宁、磷酸哌喹、复方磷酸咯萘啶、法西密对照组进行杀虫速度、原虫转阴时间、退热时间、原虫复燃率及毒副反应的全面比较,探索出它们的适宜治疗量分别为:青蒿素栓56mg/kg·3d,注射用青蒿琥酯4.8mg/kg·3d,蒿甲醚注射液9.6mg/kg·5d;清除95%原虫所需的时间青蒿素栓(第1天成人量1200mg)为24h,注射用青蒿琥酯(第1天量2.4mg/kg)为16h,蒿甲醚注射液(第1天量3.2mg/kg)为20h,明显快于二盐酸奎宁(第1天量30mg/kg)的28h,磷酸哌喹口服(第1天成人量900mg)的28h;平均原虫转阴时间青蒿素栓为46.5h,注射用青蒿琥酯为58.8h,蒿甲醚注射液为75.9h,明显快于二盐酸奎宁(10mg/8h×3d,总量90mg/kg)78.8h(与蒿甲醚相近)、磷酸哌喹(成人首剂600mg、6h300mg、24h600mg,总量1500mg)的92.8h、复方磷酸咯萘啶(成人每次磷酸咯萘啶300mg、周效磺胺500mg和乙胺嘧啶25mg,于0、6、24h各服一次)的71.1h(与蒿甲醚相近)、法西密(每片含Mefloquine250mg、Sulfadoxine500mg、Pyrimethamine25mg,5~6岁1片,7~10岁1.5片,11~15岁2片)的90.7h。

Ⅱ期临床研究:采用它们的适宜剂量在海南、深圳、云南、湖南、越南等地共治疗恶性疟1005例,间日疟160例,均获临床治愈,其中退热时数:青蒿素栓15~39h,注射用青蒿琥酯16~25h,蒿甲醚注射液16~25h,原虫转阴时数:青蒿素栓36~53h,注射用青蒿琥酯34~56h,蒿甲醚注射液32~76h,救治脑型疟214例,治愈率90.36%;追踪观察28d,原虫复燃率青蒿素栓为45.8%,青蒿琥酯为49.5%,蒿甲醚为6.7%。毒副作用一般较轻,包括青蒿素栓欲排便感(5.9%)、腹痛(3.1%)和腹泻(0.8%);蒿甲醚网织红细胞下降(10.5%),治疗3~6d下降至0.5%以下,7~14d恢复正常;青蒿琥酯未发现任何不良反应。13例入院时已合并溶血,19例患者为孕妇,均未发生不良反应。

自青蒿素抗疟作用和化学结构被发现后,迄今已合成百余种衍生物,其中双氢青蒿素、蒿乙醚,也是由中国科学家首先制备的,抗疟效价比青蒿素本身高,目前国内外正组织开发。

为了降低青蒿素及其衍生物治疗疟疾后复燃率较高问题,近几年临床工作者通过适当延长疗程(3d延长为5d、7d)和增加总量,获得较好效果,使3d疗程28d复燃率50%下降为5d疗程10%以下,且未见对病人增加任何毒副作用。

目前,青蒿素及其衍生物在临床上多是使用单药,有一定复燃率,也不利于延缓疟原虫产生抗药性。因此,近几年临床进行了复方配伍试验,如蒿甲醚伍用周效磺胺、乙胺嘧啶、伯喹,青蒿素伍用磺胺多辛、乙胺嘧啶,这对进一步降低青蒿素及其衍生物的复燃率和延缓抗药性的产生将有较好的作用。

迄今全球正掀起“青蒿素热”,如何按WHO抗疟新药的研究标准完成研究工作,成功地打进国际市场,以获取更大的社会效益和经济效益将是研究的热点。此外,寻找抗疟效价高、毒副作用低的青蒿素衍生物、复方配伍,采用药代动力学新技术测定红细胞内的青蒿素及其衍生物的含量(目前只测定血清、血浆的含量,结果与临床用药方案不相符)将是有待开发的领域。

#### 参考文献

- 1 昆明医学院附属第一、第二医院疟疾防治组,新医药学杂志,1979,2:49~51
- 2 Li Guoqiao et al. J. Trad. Chin. Med., 1985, 5(3): 159~161

- 3 蔡贤铮,等. 寄生虫学与寄生虫病杂志,1985,3(2):81~84
- 4 符林春,等. 中医杂志,1988,7:32~33
- 5 宋振玉,等. 中国临床药理学杂志,1989,5(1):12~17
- 6 郭兴伯,等. 新药与临床,1989,8(4):148~250
- 7 郭兴伯,等. 中华医学杂志,1989,69(9):515~516
- 8 郭兴伯,等. 中药新药与临床药理,1991,2(2):29~31

(广州中医学院郭兴伯教授撰;李国桥审)

**中药实验** chinese hexbal medicinal experimentation 用实验研究方法对中药进行科学研究。研究范围有中药的来源、品种、加工炮制、药性理论、有效成分、药物作用及其原理等。最终目的是保证药物安全和有效。

追本溯源,原始的中药实验是在人体自身进行的。世传“神农尝百草,一日面遇七十毒”就是很好的说明。浩如烟海的中医药古代文献记载了数以万计的临应用药经验,为今日的临床药理学打下坚实的基础。《神农本草经》所记药物,其疗效大多朴实有验,如黄连治病,麻黄定喘,苦楝子驱虫,常山抗疟,乌头止痛,阿胶止血等,都沿用至今而不衰。药物“真、伪、优、劣”的鉴别,梁代陶弘景所著《本草经集注》就有这方面的论述。如,“硝石经火烧之,紫青烟起,是真硝石也;云母向日视之,色青白多黑者名云母,”这可谓是最早的火试、对光观察鉴别法。明代李时珍《本草纲目》人参条谓:“相传欲试上党参,但使二人同走,一含人参,一空口,度走三五里许,其不含人参者必大喘,含者气息自如,其人参乃真也”。这是迄今有文字记述的最早的抗疲劳药效学研究的典型案例。17世纪成书的《白猿经》记载了用新鲜乌头榨汁、日晒、烟薰,则“药面上结成冰”,这就是乌头碱结晶。比起欧洲人在19世纪初期从鸦片中提炼出号称世界第一生物碱的吗啡,要早得多。20世纪初期,曹炳章所著《增订伪药条辨》对110种中药的产地、形态、气味、主治等方面作了真伪对比;丁福保著《中药浅说》,从化学实验角度分析和解释中药,引进了化学实验鉴定方法。1935年已有关于中药的《药物化学研究报告》、《药理研究报告》及《本草化学》等问世。

新中国成立后,由于中医政策的认真贯彻执行,中药实验随之步入新的阶段,至1959年在成都中医学院开创中药系,已有《天然药物化学》、《中药鉴定学》、《中药炮制学》、《中药制剂学》等与中药实验密切相关的课程正式在高等医学院校开设,成为中药实验发展的转折性标志。

中药药理学与上述课程相比,开设较晚,但发展很快。动物实验为中药药理研究的基本形式,在初期的中药实验过程中,常常采用中药粗制剂,在离体实验时,其杂质和理化特性,如各种电解质、鞣质及药液的酸碱度等,由于直接接触离体器官、组织和细胞,对实验结果有较大影响。因此,离体实验虽有许多特长,如可按严格要求控制实验条件,重复性较好,用药量少,节省动物以及实验结果较易分析等,还必须根据中药所含成分十分复杂的特点,同时进行动物的整体实验。在30年代,国外已开始注意到这一点,如日本峰下铁雄用中药所进行的整体实验,以添加25%或50%鹿茸的饲料喂养小鼠,发现可使其体重的增加过程明显加快,这与中医传统以鹿茸治疗小儿发育不良、骨软行迟、囟门不合是一致的。

研究中药的药理作用,仅在整体正常动物身上进行实验,往往不够,特别需要制造各种病理模型,尤其是中医若干证的动物模型。这是因为有些中药的药理作用在正常动物身上无法体现,尽管是一些简单的作用,没有恰当的病理模型,都很难进行有效实验。病理模型模拟相关疾病,比正常动物更接近于病人的机能状态。例如80年代依据中医理论用小鼠所模拟的实热便秘、燥结便秘、寒积便秘及虚寒性便秘模型,在研究大黄、郁李仁、巴豆(攻下药、润下药、峻下逐水药)及温脾汤、三物备急汤对不同便秘的治疗效果时,发现只有在相对应的病理模型上其药效才能得到很好发挥。80年代,在中医“证”的研究基础上,中药药理研究已经建立了相当数量的动物病理模型,目前公认的已近40种。

中药药理实验指标的确立至关重要。首先必须注意几个基本原则,即选定的指标应能特异地反映所要说明的问题,但同时也应看到在确定特异性指标方面有时还相当困难,这是当前中药实验研究的热点之一。例如肉桂补肾助阳,引火归元;石决明平肝潜阳;牛膝引血下行等作用,应选择什么样的特异性指标,目前尚难确定。有人试图采取当一个指标不能说明问题时,用一组指标来弥补的办法,但确定和明确特异性不决定于指标的多少。因此,上述模拟中医“证”的病理模型的建立就显得格外重要。70~80年代,中药实验指标的客观性与可测量性进一步受到重视,它是中药实验研究的科学基础。理想的指标应该是客观的、可测量的。指标有量与质的区别,量反应指标可用数量表示,而质反应指标用数量表示则很难。为了使质反应指标数量化,一般多采用计分法,按阳性反应程度人为地区分为若干级。例如在研究安神药时,可利用 S. Irwin 介绍的行为观察法,把实验动物的行为分解为 40 多个指标,每个指标都区分为 8 级,以反映给药后实验动物行为变化的程度。

现代新技术新方法的应用,要求选用特异性强、敏感性高、重复性好、客观、定量反映药效的先进指标。例如心肌缺血试验的观测指标,电子显微镜下的定量组织观察(硝基四氮唑兰或双重染色显示梗塞区及缺血区等)。

中药化学研究在中药实验中占有相当重要的地位,这是因为只有在研究药物奏效的物质基础上中药实验才能进入较高的层次。如麻黄作为发汗药和止咳平喘药已有数千年历史,至今仍为常用中药,其有效成分的研究在 19 世纪末期就已进行。1892 年,日本长井长义由中国麻黄中提得一种生物碱,制成纯白色针状结晶的盐酸盐,这与 1921 年 Neuberg 等分离出的麻黄素单体是一致的。至今已从麻黄中分离出单体生物碱 6 种以上,并获得高沸点的挥发油成分。其中麻黄碱的平喘作用、伪麻黄碱的利尿作用以及麻黄挥发油的发汗作用,都为麻黄的药理学研究奠定了基础。其后,对山慈菇中的秋水仙碱,益母草中的益母草碱,麦芽中的大麦芽碱,半边莲中的半边莲碱以及黄连、黄柏、三颗针、十大功劳中的小檗碱、苦参中的苦参碱、氧化苦参碱等,都作了较详尽的研究,为国内外学者所重视。70 年代以前,对中药有效成分的研究着重在单体,在有效成分的提取、分离、鉴定方面做了大量工作。林启寿的《中草药成分化学》一书,为系统研究中药化学做出了十分有益的贡献。日本在有效单体方面的研究也比较突出。1934 年丹参中的有效成分丹参酮 I、丹参酮 II,首先由中尾万三等提取分离出来。入参有效成分的研究也以日本人最早。1905 年藤谷功彦由日本人参及朝鲜人参中提得人参二醇二葡萄糖甙(人参皂甙),为其后人参皂甙的系统研究打下基础。

自 80 年代初期至今,有学者倾向于侧重于对中药总成分的实验研究,比如人参总皂甙、苦参总碱、莪术挥发油等作用的研究,不少学者发现其实验结果比较接近中医临床实际,这值得注意。例如黄芪多糖抗衰老作用的研究,以及近年从麝香中分离出一个抗炎活性比氢化考的松强 40 倍的肽类也是总成分,现已进入临床试验。

充分利用各个学科的新成就,进行多学科多层次的研究,对于创立中药实验的新方法是十分有利的。例如各种波谱分析法,包括紫外光谱、红外光谱、核磁共振、质谱、旋光色散谱、圆二色谱以及 X 射线衍射法的应用,使得对微量或结构较复杂的化合物进行结构测定成为可能。如乌头、附子中的高效强心成分和乌胺,青蒿中的速效、低毒抗疟有效成分青蒿素,天麻中新型安眠镇静成分天麻甙等重要活性物质的发现,都是由于提取、分离、分析鉴定方法的精密、快速、微量,并与药理、临床紧密配合的结果,体现了 80 年代中药实验的水平。70~80 年代,中药实验研究进入旺盛时期,研究中药达 500 种以上。按传统中药分类或现代分类方法进行药理研究,取得了很大进展。王浴生主编的《中药药理与应用》是国内用现代医学观点系统总结中药药理和临床研究成果的第一部大型专著。在中草药化学研究方面,已从 250 余种中草药中分离出很多有效成分。其中活性较强、化学结构已清

楚的有:(1)生物碱:川芎嗪、氧化苦参碱、靛玉红、美登素、喜树碱、延胡索乙素、粉防己碱、钩藤碱等;(2)黄酮类:毛冬青甲素、水飞蓟素、黄芩甙、葛根素、杜鹃素、石吊兰素、山楂前花青素等;(3)有机酸类:原儿茶酸、阿魏酸、丹参素等;(4)甾类:青蒿素、穿心莲内酯等;(5)其他:丹皮酚、麝香酮、鹤草酚、斑蝥素等。另外还发现有较强生物活性的一些有效组分或混合成分,如川芎总碱、苦参总碱、罗芙木总碱、苦参总黄酮、黄芩花总黄酮、山楂黄酮、三七皂甙、人参总皂甙、红花黄色素及一些挥发性成分、微量元素等,都有较深入的研究。

总之,中药化学研究与中药药理研究已自成体系,在此基础上中药临床研究以及相关的中药加工炮制、中药质量鉴定等,都丰富了中药实验的内容。今后,充分利用多学科、多层次的优势,对中药进行更深层次的研究,使其不仅能验证以往中药的疗效,而且应该通过去粗取精、去伪存真开发中药的新功效、新用途,为创立有中国特色的新医药提供新的理论实验依据,使中医药得到更快的发展。

#### 参考文献

- 1 林启寿. 中草药成分化学. 北京: 科学出版社, 1977
- 2 徐叔云. 药理实验方法学. 北京: 人民卫生出版社, 1982
- 3 王浴生. 中药药理与应用. 北京: 人民卫生出版社, 1983
- 4 陈勤. 中医杂志, 1986, 10: 57
- 5 鄢顺琴. 中药通报, 1988, 8: 43
- 6 于东防. 中草药, 1992, 4: 171
- 7 吴志奎. 中医杂志, 1992, 7: 46
- 8 程军. 中草药, 1992, 9: 459

(安徽中医学院凤良元教授撰)

#### 药材微量元素

水土、生物和人体都离不开微量元素,或者说都存在着微量元素链的循环。药材微量元素来自环境,补充到人体以保持其正常的生命活动或防治某些疾病。微量元素是以含量在百万分之一左右而定义的,万分之一以上者称为宏量元素或常量元素。但在实际研究和应用中所说的微量元素并无严格的量的限制,只要是药材中固有的、处于有效态的元素,都在研究之列,故近来有学者建议用“活性元素”来代替“微量元素”的提法,正好与“活性成分”(指有机化合物)相对应,可全面解释中药的功效。同时,“活性元素”的活性主要与有机成分的络合有关,不同于土壤微量元素的“有效态”、“可给性”主要取决于土壤的 H<sup>+</sup> 浓度。

国内外对中药微量元素的分析研究始于 70 年代末期,比土壤的和作物的微量元素分析要晚。微量元素与人体健康和疾病的关系早为中医所认识,如汉代医家已知用含碘的海带、海藻治疗地方性甲状腺肿大(中医称瘰疬气),许多地方病与某些元素的缺乏或中毒有关。几千种动、植、矿物作为中药应用,人们自然联想到其中的微量元素无疑是有效的物质基础之一。80 年代以来,分析中药微量元素的研究报告累计超过 1000 篇,以中药微量元素为主题的全国性学术会议已开过 3 次,专业性很强的微量元素杂志已创刊;一批以中药微量元素为核心的研究课题已经完成或正在进行;一支跨系统、跨行业的中医药微量元素研究队伍已在全国范围内初步形成,所有这些均表明它是中药研究的又一个活跃的科技前沿领域。

80 年代以来,国内外学者在不同时空条件下,用不同的仪器和方法(如原子光谱法、X 射线荧光光谱法、X 射线能谱法、中子活化法、等离子电感耦合光谱法等),对中药样品进行大量的测定,从所报结果来看,有以下规律或现象:

**特异性** 即微量元素的存在在量和种类上千差万别,不同物种之间,同一物种的不同部位、不同产地、不同栽培条件(包括野生品种与栽培品种之间)、不同的生长年限和采收期、不同的商品规格和贮存时间之间,甚至在同一部位的不同结构区域之间,含量相差几倍、十几倍、几十倍,甚至差到两个数量级以上。这正是土壤和环境微量元素不均匀性的反映,生物圈中样品的元素分

布呈多因子现象,每一种元素的含量都表现为一种变异数列,因此要确认其特异性,必须做多样品、多次重复实验,并经过数理统计。例如为了鉴别地道药材的真伪优劣,选择适合的元素组合,计算标识参数值,可以从看似无规律可循的数据中找出地道药材与非地道药材之间的鉴别特征。至于富硒的黄芪、富锗的人参和灵芝等则较易与他种区别。

**趋同性** 即亲缘关系相近的物种具有相同的富集某种元素的能力,因而构成它们处于同一分类群的元素特征。例如已发现许多豆科植物具有富硒和钼的能力,且固氮作用又明显地与富钼与否相关。迄今为止的化学分类学还仅以有机成分为基础,故有学者建议将微量元素也作为化学分类特征来考虑。

**微量元素与功效相关性研究** 即对按照补肾药、温里药、活血化瘀药等传统归类来探讨其微量元素分布规律或与药性寒热的关系。例如随机测定 120 种植物性药材的微量元素后,将每一种元素离散度很大的数据分为 10 级,作为元素区间尺,然后求出每一种元素的平均值,发现热性药多高于平均值,寒性药多低于平均值。

药材微量元素研究的重点、难点和热点,经 1991 年第 3 届全国中医药微量元素学术会议专家论证,有如下 4 个方面:

病理生理条件下微量元素的正常值和临界值(头发、血清、指甲或尿)的制订,对微量元素缺乏或中毒程度的准确诊断有决定性意义;用以治疗的中药制剂需要标定,病人服用前和疗程结束后亦需测定治疗前后的微量元素水平,只有把“缺”和“治”紧密联系起来,中药微量元素的价值才能得到举世公认。

中药微量元素的存在状态和化学价与其疗效有密切关系,揭示其奥秘就有可能阐明为什么水和食物中并不缺乏的微量元素未能保持人体的健康;同样重要的是元素间相互影响犹如中药复方配伍一样不能低估。例如绿色植物“缺绿”有时是因单纯缺镁,有时是因缺铁或缺硫造成的;在人体,缺铁同样可以抑制对铁的吸收,铜、锌、铜比值下降会导致某些癌症的发生。因此,元素的吸收与活性的发挥往往不是孤立的,故微量元素谱的构成更具医疗保健价值。

微量元素有机化新药的研制。一种形式是在高微量元素的土壤(如高硒土)栽植富硒药用植物,以其传统的药用部位,分离提取处于有机状态的微量元素,用于治疗缺乏症;另一种形式则是提取中药有效成分再与微量元素结合,如黄芩贰锌、甘草甜素锌的抗炎活性均较单纯的贰或单纯的元素强。

加强中药材“本土”(即环境)微量元素的研究。从根本上说,中药的微量元素来源于水土和空气,背景(即环境)值的测定可以校核药材微量元素的测定结果,为培植高含量必需元素的药用植物提供依据。

#### 参考文献

- 中国科学院南京土壤研究所微量元素编写组. 土壤和植物中微量元素分析方法. 北京: 科学出版社, 1979. 7~185
- 张国珍, 等译. 土壤、植物和其它生物样品的光谱分析. 济南: 山东科技出版社, 1981. 235
- 秦俊法, 等. 国外医学(植物药分册), 1981, 2(3): 1~4
- 铃木章, 等. 生药杂志, 1982, 36(3): 190~195
- Shkolnik M Y. Trace Elements in Plants, 1984, 5~24
- 袁允桂, 等. 微量元素, 1989, (4): 44~45

(中国中医研究院中药研究所胡世林研究员撰; 池群研究员审)

**中药鉴定** identification of Chinese crude drugs 中药鉴定是指鉴定中药的品种和质量。它是在继承中医药学遗产和传统经验的基础上,运用现代自然科学理论知识和鉴定方法,研究和探讨中药的来源、性状、显微特征、理化鉴别以及寻找新药的理论和实践,藉以清除伪、劣品,确保中药的品质,开发疗效好、副作用小的新药,为人类健康长寿服务。

“中药鉴定”一词较早出现在 1958 年出版的《中药鉴定参考

资料》(第 1 集)中。20 世纪 60 年代初,在中医院校开设了《中药鉴定学》专业课。这里的中药概念狭义指中药材,广义还包括中成药,即凡在中医传统医药学理论指导下所使用的药物统称为中药。中药鉴定学类似于生药学,其主要不同点是:(1)不收藏西药原料药,如洋地黄、毒毛旋花子、水飞蓟等;(2)重视本草考证和原植物(动物)特征描述,而理化内容相对较少;(3)无药理作用或炮制项;(4)包括矿物药,这在生药学书中内容较少或缺如。现在国家教委已批准建立“中药鉴定专业”。

以往的重要研究,在本草方面,1988~1989 年间出版了两部有代表性专著,介绍历代主要本草 73 部,对 52 种中药进行了全面考证;品种方面的研究报道和著作较多,1964 年谢宗万对 100 种中药材按品种进行论述,结合本草,产地考证了正品、类似品和伪品。1977 年出版的《中药大辞典》收载中药达 5 767 种;1988 年出版的《新华本草纲要》,共收药用植物 6 000 种,载有历史、分布、成分和功效等。还有鉴别常用中药真伪的专著多部。对于中药性状和显微特征方面描述除许多大型专著外,还有专门的“组织粉末图解”(收中药材 249 种)和“粉末显微鉴定”(收中药材 380 种)类专著出版。关于应用理化方法鉴别中药材的专著和期刊报道的资料甚多。如对大黄的鉴定,既可用荧光分析、微量升华和化学反应来确定真伪,又可用不同抽取分离手段测定其主要有效成分游离蒽醌(抗菌作用)和结合蒽醌(泻下作用)的含量来确定其质量;对一种有效成分可以用多种方法来测定其含量,如测定金银花中的氯原酸,可用紫外分光光度法、容量法、比色法、极谱法、光密度计法、气相色谱法和高效液相色谱法等多种理化方法。

中药来自植物、动物和矿物,在我国的自然资源非常丰富,以高等植物而言,我国有种子植物 24 500 多种,仅次于马来西亚和巴西,居世界第 3 位。通过全国性多次药源普查,各省区、各民族发掘出大量的药用植物、动物和矿物。1991 年,徐国钧在第 5 届国际中草药研究讨论会上宣读论文提到我国中药总数约 1 万种。国家中医药管理局正在组织编写当代药学巨著《中华本草》,拟收中药 8 000 种。在这数以千计的中药品种中,研究较多的要算《中国药典》1990 年版收载的 509 种,鉴定内容包括每种中药的来源、性状、鉴别、检查和含量测定(含浸出物)等项。从下表可看出近年来中药材鉴别研究工作的进展情况。

表 1 《中国药典》1985 版与 1990 版收载  
中药鉴定主要项目比较

| 类别 | 项目   | 1985 版<br>(470) | 1990 版<br>(509) | 类别            | 项目             | 1985 版<br>(234) | 1990 版<br>(275) |
|----|------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 药材 | 横切面  | 114             | 136             | 制剂            | 显微鉴别           | 158             | 179             |
|    | 粉末   | 131             | 147             |               | 薄层鉴别           | 25              | 80              |
|    | 试管鉴别 | 149             | 177             |               | (43 项) (137 项) |                 |                 |
|    | 薄层鉴别 | 48              | 81              | 其他鉴别          | 122            | 140             |                 |
|    | 其他鉴别 | 62              | 70              | 删去 10 项<br>除外 |                |                 |                 |
|    | 膨胀度  | /               | 3               |               |                |                 |                 |
|    | 总灰分  | 31              | 47              |               |                |                 |                 |
|    | 浸出物  | 7               | 25              |               |                |                 |                 |
|    | 含量测定 | 60              | 82              | 含量测定          | 22             | 24              |                 |

注:以上数字的单位为“品种个数”。

从表中可见 5 年间中药鉴定工作发展很快,特别是现代技术的应用。如 1990 年版《药典》有两个品种首次采用“气相色谱法”,有 5 个品种首次采用“高效液相色谱法”。个别检测手段比英、美先进,如桉油精的测定。国家中医药管理局正在组织力量对常用中药材品种进行整理和质量研究,每个品种包括 10 个项目:(1)文献考查,(2)药源调查,(3)分类学鉴定,(4)性状鉴定,(5)显微鉴定,(6)商品鉴定,(7)理化分析,(8)采收加工,(9)药理活性,(10)结论与建议。已完成 100 余种中药材的考察,有的

地区和民族也在组织力量深入研究有自己优势的地道药材。中药鉴定工作除在品种数量上有突破性发展外, 研究报道较多的是鉴定中药的使用方法, 据 1991 年统计已达 60 余种。有的方法在应用方面也有发展, 如显微组织鉴定, 除大量用于较熟悉的药用植物外, 也用于动物的组织, 如蛇的骨骼、鳞片、犀角、羚羊角的磨片, 中成药的鉴别, 甚至测定中成药中某种中药的含量, 如测牛黄解毒丸中大黄、黄芩的含量等。一种药物或成份的测定可用多种方法, 如微量元素的测定, 可用中子激活分析、能量色散 X 射线分析、原子发射光谱、原子吸收光谱、等离子吸收法、等离子质谱分析、电耦合等离子体发射光谱、X 射线荧光光谱等。国外的现代技术也用于中药鉴定, 如用扫描电镜加 X 射线能谱分析法, 鉴别贝壳磨片中元素的种类和含量, 测定粉末中药中 Si 值, 测定麝香粉末的无机元素种类和含量等。过去鉴别动物药虎骨的碎片、阿胶及混淆品, 植物种子青箱子及混淆品鸡冠花子是十分困难的, 现在可用测定氨基酸的种类和含量、蛋白电泳的方法将它们区别开来。此法已广泛用于富含蛋白质氨基酸的动物药类、果实种子类药材。现用生物免疫化学法能准确地检定虎、豹的骨骼。上述方法多用于中药品种的真伪鉴定, 对中药真正质量的鉴定还是一个难题, 因为测一两有效成分的含量, 并不能代表中药的全部功效。如何测定中药质量, 存在几种看法: (1) 符合优质药材性状特征; (2) 有效成分含量测定 (含浸出物量); (3) 用药理手段进行品质评价; (4) 免疫活性的测定; (5) 临床实践。当然, 最理想的比较公认的方法是临床实践, 但难度很大。鉴定中药的另一个难题是中药的有效性和稳定性, 因为有效性和稳定性要受很多外界因素的影响, 如选种、施肥、产地、土壤、采收、加工、运输、贮藏条件和时间等等, 这方面的工作尚未引起应有的重视, 研究报道甚少。还有一个被忽视的问题, 研究中药组织、成分、药理的样品, 一般或是购于公司、市场, 或是自采 (常因采花果标本同时采药用部分, 不顾药材收购季节), 只要品种对, 不管产地、存放条件和时间, 结果不同样品实验数据不可能一致, 也无法比较与总结, 这是应该注意的问题。值得指出的是, 影响中药安全性的农药残留量和有害金属、污染物的检测在中药鉴定领域还是一个空白。

今后的 10~20 年内, 本领域的研究热点主要是继续进行常用中药材品种整理和质量研究, 这是单味药最全面系统的研究, 可反映中药鉴定的学术水平和成就; 应用现代技术对常用中成药进行显微、理化分析有大量工作要做, 特别是对动物药材的形态分类和组织粉末的理化分析, 有待认真进行研究, 寻找能确定中药质量的有效方法, 特别是中药成分与中药药理活性和免疫学关系的研究迅速发展; 中药鉴定的方法应该不断更新, 国外现在应用的串联质谱 (MS-MS) 法, 可直接对药材的粉末进行分析, 而不需要应用药材提取物; 放射免疫分析法可用于药用植物的品种筛选、资源调查、植物有效成分的形成和组织培养等, 应用这些先进技术将为我国广泛筛选寻找抗心血管病、癌症、艾滋病的药用资源植物做出贡献。

#### 参考文献

- 1 李卫民, 卜志勇. 中成药研究, 1987, 6: 7~8
- 2 田进国, 许欣荣. 中草药, 1989, 20(5): 29~32
- 3 Xu Guojun. The 5th International Symposium on Chinese Drug Abstract Papers. 1991, 6~8
- 4 陈建伟, 李祥, 李凡. 中国中药杂志, 1991, 16(8): 487~488
- 5 余伯阳, 徐国钧. 中国中药杂志, 1991, 16(10): 584~585
- 6 贾敏如, 李敏. 华西药理学杂志, 1993, 8(1): 1~4

(成都中医学院贾敏如教授撰)

**中药十八反现代研究** 中药十八反一般专指中药文献中十八反歌诀所述: “半萆贝藜戎攻乌, 藻戟遂芫俱成草, 诸参辛芍叛藜芦” 3 组 19 味药的配伍。所谓“相反者, 则彼我交讎, 必不宜合”; “草石相反, 使人迷乱, 力甚刀剑”, 向来认为属于绝对的配伍禁忌。但前人著作中又不乏应用十八反的例证。十八反实际是一个有争议的中药药性理论。

从 20 世纪 20~30 年代起, 就不断有人根据文献或亲自尝试, 对十八反持否定态度。至今亲自尝试的记录已超过 10 起, 其中没有一份毒性增强的报告。由于都是健康人试服, 脱离方剂辨证, 又没有详细周密的观察记录, 说服力不强, 没有重大影响, 并未动摇十八反作为配伍禁忌的地位。

50 年代起, 十八反动物实验报告陆续发表, 注意到并不是所有十八反组对都可发现毒性增强; 不同的给药途径、不同的实验动物, 其结果未必一致。1966 年崔珉等报告, 大戟、芫花、甘遂与甘草配伍, 确能使其对小白鼠的毒性增强, 其毒性增强程度与伍用的甘草剂量有密切关系, 甘草的相对剂量越大, 毒性越强; 制剂方法也是一个决定因素, 共浸组的毒性较分浸组显著增强。提出十八反配伍的毒性增强要求有特定的条件。

进入 70 年代, 中兽医界开展了十八反意义的讨论, 陆续有多篇实验报告发表。其中大多数没有发现配伍后毒性增强, 早期的结论主要倾向全面否定。黄铁宽的意见可作代表: “所谓‘十八反’的理论不符合客观实际, 没有科学根据, 因此, 没有实用价值和存在的意义。……应将千百年束縛医药工作者手足、禁锢人们思想的‘十八反’推翻, 使‘十八反’的药物从戒律里解放出来, 应用于临床上, 以发挥它们更大的医药作用”。大约与此同时, 也有多篇中医临床应用十八反有益无害的报告发表。

80 年代, 有更多的十八反实验研究报告发表, 其中以云南中医学院中药系和云南大学生物系于 1987 年完成的课题“‘中药十八反’动物实验研究——相反药物配伍后的部分药理实验研究”规模最大, 先后发表论文 15 篇。同期内, 成都中医学院、长春中医学院、四川农业大学、甘肃农业大学也都有系列研究报告发表。实验几乎包括“十八反”所有组对, 采取的研究手段、观察指标、科学水平都超过以前的工作。但实验研究的结果多有矛盾, 未能得出可以统一认识的结论。

80 年代初, 高晓山、陈徽馨根据文献研究资料提出下列观点: (1) 金、元以后, “十八反”的名称已失去原有的数量涵义, 成为药物相反的同义语。(2) 十八反各组对的药性不同, 没有任何一组相反配伍可以作为全部十八反作用机理和临床意义的代表。(3) 十八反或相反配伍并不是绝对的配伍禁忌, 相反并不意味着配伍后肯定会对人或动物的机体发生剧烈的毒害作用。(4) 运用适宜, 十八反有可能产生更理想的疗效。“反”意味着异乎寻常或反常。(5) 相反配伍对于机体某些特定的正邪盛衰可能呈现特殊的作用, 或者是不见于健康人, 或者反应不同。应该进一步研究, 阐明某些相反配伍对于哪些病理状况会发挥治疗作用, 对于哪些机体状况可能发生毒害。(6) 在进行全面系统的研究之前, 运用相反配伍还以严肃认真、谨慎小心为是。上述观点大部分为国内学者所接受。

上述观点从理论上支持利用十八反药物治疗险证、痼疾。林通国先后发表一系列的临床报告, 应用十八反十九畏组方治疗多种沉痾痼疾, 获得相当满意的疗效, 在此基础上, 提出“拮抗疗法”的治疗理论, 发表专著《中医拮抗疗法》。

在国家中医药管理局资助下, 组织了一个全国性协作课题“病理生理条件下中药十八反实验研究”, 先后有 10 个中医药科研、教学单位 40 余位知名学者合作, 参加工作人员超过 100 人, 历时 5 年, 发表论文集《中药十八反研究》, 载文 111 篇, 包括文献、调查、临床、实验各方面的工作。1990 年, 协作组成员四川农业大学兽医系还单独完成了“生理与病理条件下中药十八反的比较研究”课题鉴定, 论文汇编载文 15 篇。协作课题的主要特点是: 观察十八反各组对在特定的病理条件下药性或毒性的变化。课题以十八反歌的 19 种药物为主要工作对象, 并增加草乌、党参、蜜、酒各组。这项研究成果证明, 十八反不是绝对的配伍禁忌。只有个别十八反组对经口给药对健康动物和病理模型动物显示一定程度的毒性增强; 大多数十八反组对只在特定的病理条件下显示不同程度的毒性增强或不利于治疗的效应。除了个别十八反组对所观察的病理模型或指标较少, 没有观察到毒性增强或不良反应外, 大多数十八反组对在特定的病理生理条件下都可能发



生不利于治疗或恢复生理状态的各种效应,或者是并存于某些疗效的不良反应乃至病情加重。因此,十八反并不是绝对安全的配伍;有的十八反组对甚至在一定的病理生理状态时必须禁用。认为某些十八反组对特殊疗效经过实验或临床周密观察,应予肯定,但推广应用时必须严格规定其适应证,密切注意,周密观察,以及时发现毒副作用,保证患者的生命安全,减免不必要的机体伤害和痛苦。

十八反或相反配伍见于记载的超过 200 对,绝大多数组对还没有进行研究观察;中医临床传统用药主要是方剂,十八反组对在方剂中的作用和意义研究极少。关于十八反,许多方面尚待深入研究。

#### 参考文献

- 1 陶弘景.本草经集注(序例).群联出版社,1955
- 2 李东垣.珍珠囊补遗药性赋(卷 1;十八反歌).上海:上海卫生出版社,1956
- 3 黄铁宽.兽医科技资料,1976,1:71~82
- 4 高晓山,陈耀馨.中医杂志,1980,21(3):7~11
- 5 孙思邈.备急千金要方(卷 1;序例).北京:人民卫生出版社 1982
- 6 林通国.中医指抗疗法.长沙:湖南科学技术出版社,1987
- 7 刘源,高晓山.中药十八反研究.北京:中医古籍出版社,1991.27~46
- 8 高晓山,等.中药十八反研究.北京:中医古籍出版社,1991  
(中国中医研究院中药研究所高晓山研究员撰)

### 中药性味 nature and taste of chinese herbs

中药性味包括药性和药味两者。药性,或称中药的性质,一般分为寒、热、温、凉四性(气)。药味,或称中药的滋味(味道),主要有酸、苦、甘、辛、咸五味。它们是中药理论最基本的内容,对标志中药的功能、指导中药的临床应用、保持中药特色与绵延发展等方面有着极为重要的意义和作用。

性味之说历史悠久,早在《黄帝内经》里已载有“寒者热之,热者寒之”,“寒热温凉,衰之以属”;“辛散,酸收,甘缓,苦坚,咸软”(五味)及“淡味渗泄”诸说。《神农本草经》则从药理学角度记载了性味的内容,指出“药有酸、咸、甘、苦、辛五味,又有寒、热、温、凉四气”,并制定“疗寒以热药,疗热以寒药”的用药原则。12 世纪初寇宗奭《本草衍义》始称“气”为“性”。虽然一般多以此为是,但“四气”称谓仍长期沿用。药性,除寒、热、温、凉外,尚有平性及“大”、“微”等程度的划分。因此,药性寒热的功能相应也有强弱不同。药性的功能,现代可总结为:寒凉药性,有清热泻火、解毒等功能;温热药性,有温中祛寒,助阳等功能。平性因无寒热之性的特征,故无功能体现。“五味”之外,后世又增加涩味,但徐大椿(1693~1771)解释说,“涩则酸之变味,涩味收涩,亦与酸同”。至于早已出现的淡味,一般以“淡附于甘”来处理,故仍称五味。关于五味的功能,通过历代的丰富与发展,至 17 世纪末已完全确定下来(见汪昂《本草备要》),现代可总结为:酸味或酸涩味,有止汗、止泻、涩精等功能(能收、能涩);苦味,有清热泻火、泻下、泻肺降气、燥湿及泻火坚阴等功能(能泻、燥、坚);甘味,有补虚、缓急、止痛、和中等功能(能补、缓、和);辛味,有发散、行气、行血及润燥等功能(能散、横行、润);咸味,有软坚、散结、泻下的功能(能软坚、下);淡味,有渗湿、利尿的功能(渗、利)。严格地说,性不止四,味不止五,故现代也直呼性味。性味是现代研究、论述中药必不可少的内容。

关于性味的研究,中国从 20 世纪 50 年代开始做了大量的工作,其中主要是文献整理与理论探讨,专门的实验研究较少。通过文献理论研究,发现历史上对性味,尤其是对味的认识不完全一致,缺乏客观判断的标准,在不同时期,不同医药学家对同一药物常有不同或不完全相同的性味标注。虽然时有争议,但未引起普遍重视,以寻求解决问题的途径。关于药性则与中医理论相适应,根据药物功能疗效所作的理论概括,正是由于中医辨识疾病

证候性质有寒、热之分,所以中药药性才有寒、热区别。确定药性的原则虽是明确的,但药性具体反映在药物的功能上,除清热泻火和与此有关的几种功能可体现并可能找到客观标准外,许多药物的药性尚难在功能上体现或难于找到客观标准。药味的情况尤为复杂。首先,关于药味的确定,自古以来就有口尝和以功能(或主治)推断两种标准。这是研究药味最大的难题。其次,按药味是功能的标志,不同的药味有各自不同的功能来检验,有关中药学书籍所载,二者不相吻合的药物所占比例并不小。即以真实的味感来确定药味,也不是很容易的。药味会受到药物品种、产地、品质、炮制方法等的影响;药味是药物众多成分味的综合表现,口尝的味又不一定是发挥功能的某种成分的味(有效成分的味可能被“无效成分”的味所掩盖);味不止五六种,中药的功能又很多,用少数几种药味概括众多的功能,实际上已很受限。在这样的情况下,开展实验研究,深化性味的理论,虽然有许多困难,但 80 年代以来,中国药理学工作者仍然做了一些很有意义的研究工作。药性方面,梁月华等指出:寒凉药能使交感神经—肾上腺系统机能降低;又能使脑中 5-羟色胺含量增多,肾上腺素、去甲肾上腺素及多巴胺的排放均减少,认为寒凉药有促进 5-羟色胺合成、抑制交感神经介质合成与释放的作用。温热药能使交感神经—肾上腺系统机能活动增强,又能使脑中去甲肾上腺素、多巴胺含量增加,并维持较高水平;使 5-羟吲哚醋酸含量增多而 5-羟色胺含量变化不大,尿中肾上腺素和去甲肾上腺素排出量增加;认为温热药对 5-羟色胺合成与降解有促进作用。关于药性的物质基础(成分),冯玉明等根据多种中药的元素分析资料,认为药性的寒热可能与其所含微量元素铁、锰、钴的含量有关,如有明显壮阳作用的温热药中,这 3 种元素的含量均显著高于寒凉药。岳凤先等根据国外研究资料发现附子、乌头、细辛、吴茱萸、花椒等都含去甲乌药碱,认为这可能是温热药的成分之一。马泽洪结合多种类别中药的已知成分、药理加以分析、整理,认为温热性药物含有某些生物碱、挥发油、激素及其类似物、某些消化酶或营养物质等,可以兴奋神经中枢,促进呼吸、循环、代谢及内分泌系统功能,供给能量,从而显现其温热作用;寒凉性药物含某些挥发性成分、生物碱、某些卤素及其盐类、金属元素、萜类和其它致泻成分、抗菌消炎物质,大多数能抑制中枢神经的兴奋性,减弱呼吸、循环、代谢和肌肉活动功能,减弱机体对病原性刺激的反应能力,从而显现其寒凉作用。药味方面,专门的实验研究甚少。就味的性质而言,曾广植认为它是舌上的分子识别,把药味和药物的滋味看作是可以感知的同一事物。至于各种药味的具体物质(成分)及其药理作用(功能),根据不同药味有关各种药物的已知成分与药理作用加以分析整理,可以初步认为:酸味的或酸涩味的药物主要含有机酸、鞣质,故有止泻、止血等作用;苦味药主要含生物碱、甙类等,故有抗感染、泻下通便、祛痰止咳等作用;甘味或甘淡味的药物主要含糖类、蛋白质及氨基酸等,故有强壮、增强免疫功能、增进营养等作用;辛味药主要含挥发油或挥发性物质、甙类等,故有发汗、解热镇痛、健胃驱风等作用;咸味药主要含无机盐,故有增大肠内容积、促进排便等作用。至于性味之间的关系,经统计分析认为:辛味药多性温,以能散寒者为多;苦、咸味药多性寒,以能清热者为多。总的说来,现代有关性味的研究还远远不能解释中药性味的理论,揭示性味的本质。现有的研究资料也有不少值得商榷的地方。如已有的药性研究资料基本上是选择清热药、温里药作为研究对象,虽然较能说明问题,但没有普遍性,难于说明其它各类药物其寒热之性的表现(指标)。药味的研究由于药物药性的味和实际的味感不完全一致,一味中药的味通常是多种成分味的综合等原因,而使其现代研究很难开展。现有资料的整理分析片面性很大。

将来关于性味的研究,文献理论方面仍然很重要,它将针对性味理论本身存在的问题或缺陷,进行深入细致和具体的探索,以解决某些问题或提出相应的对策。在药性方面,首先可能从中药学的角度进一步指出确定各种药物寒热的依据(指标),对各种中药的寒热药性取得统一的认识。实验研究仍将以清热、温里药

等较典型的寒性药或热性药为主要对象进一步开展,并可能从药理作用及物质基础(成分)方面找到一定的规律而有较大的进展。药味的研究将首先就确定药味的标准认真开展讨论,主要倾向是以药物真实的味感确定药味,统一对药味的认识。实验研究可以从较多有典型药味的药物或成分着手,在不同药味的药理作用(功能)方面找到某种规律,与药物真实味感相关的药理作用和既定五味的功能(药理作用)必然有一些出入,不完全一致,由此有可能对原有药味的理论提出修正。

#### 参考文献

- 1 曾广植. 自然杂志, 1980, 3(1): 72
- 2 马泽洪. 药学通报, 1984, 19(10): 59
- 3 梁月华, 等. 中西医结合杂志, 1985, 5(2): 82
- 4 庞俊忠. 中药通报(中药理论增刊), 1986, 1: 8
- 5 岳凤仙, 等. 现代研究. 北京: 中医古籍出版社, 1987. 158
- 6 刘继林. 中医药信息报, 1988, 10(29)
- 7 骆和生, 等. 中药方剂的药理与临床研究进展. 广州: 华南理工大学出版社, 1991. 5

(成都中医药大学刘继林教授撰)

**中药归经** channel tropism of chinese herbs 中药学对药物作用部位的表示称为中药归经。“归”(古代也用“入”)指药物对作用部位的趋向与归属,“经”是脏腑经络。由于每一脏腑都有与之相联系的经络,故药物的归经常用脏腑的名称来表示,如归心经、归肝经等。对药物标明归某经,即表示药物作用部位主要在某一脏腑或其经络。药物作用部位较广者,可归几经,甚至归十二经。归经是中药药性理论的重要组成部分,它和中药的性味相结合,具体表达药物的功能所在。因为药物的寒热性能、五味的功能只有通过药物对不同脏腑经络的选择性作用才能具体体现。

《黄帝内经》关于“五味所入,酸入肝,辛入肺,苦入心,咸入肾,甘入脾”等论述即与归经有关。《神农本草经》则有了接近归经的叙述。如言大黄“荡涤肠胃”,沙参“补中益肺气”,地肤子“主膀胱热,利小便”等。公元8~11世纪有进一步发展,开始与经络理论相结合,如孟诜《食疗本草》谓“绿豆行十二经脉”;史堪《史载之方》称“以清凉之药解肺经”,都很接近后来归经的概念。12世纪以张元素为首的易水学派,开始将中药药性理论系统化、具体化,归经的内容是其中颇具特色的部分。同时还引出“引经报使”之说。16~17世纪间李时珍《本草纲目》、缪希雍《本草经疏》等,常将药物的归经与性味结合起来论述药物的功用,强化了归经理论。此后,归经即成为中药药性理论不可缺少的部分。19世纪,归经的研究由原来的归十二经扩大到奇经八脉。归经的理论虽然早已建立起来并用于各种药物,但“归经”一词出现较晚,始见于沈金鳌的《要药分剂》(刊于1773年)。

现代对于归经作了许多研究。1984年6月在湖南长沙专门召开归经学术会,对归经理论的现代化起到一定推动作用。文献理论研究认为,归经是以药物功能、主治为根据推论概括出来的。因为疾病通常发生于一定的脏腑经络,如果药物主治(治疗)某种病证,有相应的功能(如药物用于呕吐,有止呕的功能),就必然和药物作用于产生那种病症的脏腑经络有直接关系(呕吐产生于胃经),故药物的归经不难得出(归胃经)。正因为如此,药物的归经也必然会随人们对药物功能、主治认识的不同(亦即各自的临床经验、体会不同)而有出入。事实上各种中药书籍对药物归经的标注就不完全相同,这表明药物归经的确定尚缺乏较严密的理论根据和客观标准。同时,中药学对药物众多功用来讲,归经不过是举其要而已。此外,归经在表明药物作用部位上也有许多不足之处,如直接作用于皮肤及粘膜的一些药物、麻醉止痛药、驱虫药以及现代发现有升压、抗休克、免疫、抗肿瘤等新功能的药物,其作用部位都很难用归经来表示。另外,归经所指的部位脏腑经络与现代人体解剖学上的内脏器官有较大差异,在中药归经现代实验研究结果的表达上可能出现某种混乱。由于以上原因,归经

的研究有许多困难。尽管如此,中国学者从20世纪70年代开始进行了一些有意义的探索,提出不同的看法。如林元荃等曾进行某些中药成分在脏器中的富集情况的研究,以此作为归经的指征。陆光伟对23种中药有效成分在体内的分布比较,发现实验用药的归经所属脏腑与有效成分分布的脏器大多相符,认为归经与此有关。柴立通过对某些中药微量元素的研究,认为药物所含微量元素及其配位化合物对组织器官的亲亲和富集是归经的主要实质。而罗冬苏认为,以经络理论为基础的穴位半导体器件特征是归经现象的主要实质。严智强等通过口服生大黄家兔体表及器官多种物理信息规律和体表冷光测定的计算机分析,绘制出多种“地形图”来探索归经现象,证明药物的作用具有明显的区域性、选择性,但同脏腑经络的理论尚缺乏联系。此外,丁荣施提出归经与现代药理学受体的概念有许多相似之处,药物的归经要看其受体分布于哪些脏腑经络所相关的位置,及所能起到的作用。以上各项研究,都从现代科学的角度向揭示归经理论靠近,但至今还没有找到一种公认的、更合适的方法。

今后的归经研究,在文献理论方面将集中解决归经理论中更为具体的问题,如制定药物各种归经的客观标准,进一步统一各种药物的归经等。同时,要争取中医基本理论研究的配合,加强脏腑经络的现代研究,阐明脏腑经络的实质,从而为归经的现代研究创造有利条件。归经的现代科学研究,仍将采取多种方法。主要从药物的功能着手,继续采用同位素扫描、示踪原子标记并结合受体学说,对归经进行多方面分析,可能积累更多有益的资料。通过中药药理作用的研究来探讨中药的归经也是一种可行的方法,虽然它不能直接指出药物(成分)的实际作用部位,但从中可以看出药理作用与药物所治疾病在脏腑经络方面的联系,进而得出归经部位;中药的传统归经部位也是从所治疾病一一所属的脏腑经络得来的。重要的是,要找到现代科学关于“归经”研究所表达的内容和中药归经(脏腑经络)的联系或共同点。此类有关研究将为中药归经提供更多依据,为最终阐明归经理论奠定基础。至于中药的“引经报使”和不便归经的那些作用部位,某些新的药理作用(功能)的归经,将不是研究的重点。

#### 参考文献

- 1 刘继林. 中医杂志, 1981, 22(1): 63
- 2 林元荃, 等. 中药归经理论 1984 年学术会议论文
- 3 陆光伟. 中成药研究, 1984, 5: 38
- 4 柴立. 微量元素, 1984, 试刊号: 24
- 5 罗冬苏. 中药归经理论 1984 年学术会议论文
- 6 严智强, 等. 中药归经理论 1984 年学术会议论文
- 7 丁荣施. 中药归经理论 1984 年学术会议论文
- 8 严智强, 等. 中药通报, 1985, 10(4): 36
- 9 刘继林. 中医药信息报, 1988, 10(29)

(成都中医药大学刘继林教授撰)

### 中医方剂沿革及其现代化 the evolution of science of traditional chinese medicinal formulae and its modernization

中医方剂学是阐明与研究治法和方剂配伍规律及临床运用的一门学科,是中医理学、法、方、药理论体系中的重要组成部分,也是沟通基础理论和临床的桥梁学科。

通常认为方剂起源于夏商。70年代初,长沙马王堆汉墓发掘出土的帛书《五十二病方》是中国现存成书最早的一部方书,其中载方280余条。据考证,是西汉早期或战国时代之作。《黄帝内经》(公元前475~前221年)载方13首,剂型有汤、膏、丸、酒等,并提出治疗八法及方剂组成原则,如《素问·至真要大论》中说:“主病之谓君,佐君之谓臣,应臣之谓使”,为方剂学辨证、治法及配伍原则的发展奠定了理论基础。东汉张仲景的《伤寒论》载方113首,《金匮要略》为262方,其中使用药物达214种之多,剂型有汤剂、丸剂、散剂、洗剂、熏剂、滴耳剂、吸鼻剂、栓剂、灌肠剂等。从两晋南北朝到隋唐五代时期,各类医方书籍猛增。据《隋书·经籍志》记载,医方类书籍达3714卷,其中较重要的有葛洪的

《金匱要方》106卷和《肘后卒救方》6卷,陶弘景的《补肘后方》以及外科专书《刘涓子鬼遗方》,妇科专书《经效产宝》,伤科专书《理伤续断秘方》和儿科专书《颅囱经》,还有北齐《药对》用的“十剂”为方剂学的治法分类打下基础。这一时期,对后世影响深远的方书更有孙思邈的《千金要方》30卷和《千金翼方》30卷(公元652年),其中搜录了不少来自印度的医方和外来的医学知识。王焘所撰的《外台秘要》40卷(公元752年)载方6000余首,集唐以前诸方书之大成。唐代以后,医家辈出,医方编著更是盛极一时。这一时期由国家主持编撰的就有《神医普救方》1000卷(公元981~986年)、《太平圣惠方》100卷(公元982~992年)、《圣济总录》200卷(1118)。1064年将《太平圣惠方》改编为《圣惠选方》作为标准医方,1151年改名《太平惠民和剂局方》,由国家予以颁布,共载方788首,是我国第一部方典。此外,还有陈言的《三因方》,寇宗奭的《本草衍义》,严用和的《济生方》,许叔微的《普济本事方》,苏轼、沈括的《苏沈良方》,王硕的《易简方》及陈自明的《妇人大全良方》等,对方剂的研究都各有独到之处。金元时期,四派争鸣,分别从“寒凉”(刘完素)、“攻下”(张子和)、“补土”(李东垣)、“滋阴”(朱丹溪)方面创制了众多的方剂,丰富了方剂学内容。金·成无己首创方论,其著《伤寒明理论·药方论》,对《伤寒论》中方剂逐一加以解析,注明所用之药的君臣佐使,明确了君臣佐使的具体含意。明代有朱橚的《普济方》、王肯堂的《证治准绳类方》、胡淡的《卫生易简方》等,其中尤以《普济方》为最巨,集撰古今方剂426卷,载方61739首,是现存最大的一部方剂书。此外,明代的《本草纲目》载方1万多首,享誉中外。清代在温病学派的形成过程中,叶天士、薛生白、吴鞠通、王孟英等不仅对创建温病学有所贡献,而且使治疗温病的方剂也得到发展和充实。汪昂的《医方集解》、吴仪洛的《成方切用》和《医宗金鉴·删补名方论》是清代方书的代表著作。在清代还编撰了一些专科方书,如傅山的《傅青主女科》、王德德的《外科全生集》、王清任的《医林改错》等。此外,赵学敏的《串雅·内外篇》总结了民间医方,鲍相璈的《验方新编》、费伯雄的《医方论》、吴师机的《理喻辨文》等也为方剂学的发展做出一定贡献。至此,方剂学已成为一门具有完整理论体系的学科。

新中国成立后,除对古代方剂和民间“秘方”、“验方”进行了整理和研究外,还编写了《中医方剂学》等多种书籍。1956年开始方剂的实验性研究。据有关资料不完全统计,其研究涉及的方剂已逾760个,实验研究论文超过1400篇。特别是进入80年代后,方剂研究领域越来越广泛,在方剂组成及配伍、方剂药理学、方剂化学、方剂剂型现代化及方剂药动学方面都取得很大的进展。我国中医方剂的研究正在不断深入和向现代化方向发展。

1983年,津谷等用互变量分析法分析中医方剂结构,称多次元尺度解析法,并将其用于四物汤类的解析。四物汤含当归、川芎、芍药、地黄四味药。津谷等把凡含有此四味药者称四物汤类,用Kruskal氏的M-D-SCAL法和林知己夫氏法求出相似矩阵,并将其图像化,使方剂结构视觉化,从而揭示出古方结构的规律性和合理性,并能预示新组方结构的合理性。1986年,马强氏用模糊聚类最大树法,分析了梨贝合剂的组方,其结果经临床反馈检验,证明对方剂组方和处方分析都具有理论意义和实际意义。1988年,杨一凡将现代系统论学说应用于中医方剂组成分析,认为系统论的整体性、相关性、有序性和动态性等基本原则,不但都在方剂组成中体现出来,而且是方剂组成的普遍规律和基本原则,反映了方剂组成的科学性。姜春华提出“用中西双重理论构成双重理论相通的方剂”,即运用中医的基本理论和现代科学对中药药理的研究,结合西医辨病理论组成新的方剂,做到宏观与微观的辩证统一,使组成的方剂符合中西医结合两套理论。

中医方剂药理学研究,对于科学阐明中医理、法、方、药,揭示中医方剂的组成原则和配伍禁忌,最终实现方剂现代化具有重要意义。经方、古方最能体现中医方剂组成和配伍原则,历来受到中国中医界和日本汉医界、韩国韩医界的重视。后世的时方、今方,追根溯源都由经方、古方衍化而来。日本进行药理研究的

方剂主要出自张仲景的《伤寒论》和《金匱要略》;韩国除了《东医宝鉴》、《东医寿世保元》之外,也主要出自中国的《伤寒论》、《和剂局方》、《丹溪心法》、《备急千金要方》等。中国近年来经方和古方的药理研究从10%左右上升至40%。在药理研究内容上,主要是药效学的研究,其次是作用机理的研究,第三是方剂配伍的研究。中医方剂药理学研究方面,各国都致力于建立符合传统理论的动物实验模型,但目前仍是一个薄弱环节。在作用机理研究上,近年来应用其他学科的新进展、新技术和新方法,如放射性同位素、透射和扫描电镜、生化学和免疫学技术、组织和细胞培养技术等,使方剂药理学研究提高到细胞水平和分子水平。此外,近年来对20余个复方(其中70%是经方和古方)进行拆方和正交实验研究,探讨了方剂配伍作用,判明方剂中起主要作用的药物,精减药味,组成新方,提高疗效。如茵陈胆道汤的药物由八味减至四味;芦荟当归丸减至一味青黛等。

尽管随着现代科学技术的进步,特别是分离、分析技术的进步,使单味药化学成分的研究有了长足发展,但是方剂化学研究仍是方剂现代化研究中的最薄弱环节。1963年,翟云凤等对天麻钩藤饮的研究中,发现牛膝皂甙与桑寄生中的酚性物质发生反应,产生一种既不具皂甙溶血作用,也不与 $FeCl_3$ 呈现显色反应的新化合物。1975年,久保等发现黄连、大黄等组成的泻心汤的沉淀反应,使煎液失去苦味。1978年,野口氏发现黄连、甘草组合的泻心汤,黄连与甘草之比在1:3以上时煎液不具苦味;1:4以上时失去抗菌活性,其原因就是发生沉淀反应,降低煎液中小檗碱的含量。1985年,孙启明通过对大量经方、古方中沉淀性配伍反应的研究,归纳为以下几类沉淀性配伍反应:(1)含鞣质与甙类中药的配伍;(2)含甙类与生物碱中药的配伍;(3)含有机酸与生物碱中药的配伍;(4)含鞣质与蛋白质中药的配伍;(5)含鞣质与其他成分中药的配伍;(6)含其他成分中药的配伍。如石膏与甘草、黄芩与石膏的配伍等均会产生沉淀反应。这对制剂工艺、质量、疗效等均会发生重大影响。此外,在中药方剂配伍中还大量存在非沉淀性化学反应。1986年,朱永新等对生脉散的化学研究资料表明,三药共煎时,人参皂甙水解转化, $C_{20}$ 位上连有糖的皂甙转化变成 $C_2$ 位上不连有糖的皂甙。1990年,中国医科大学的研究资料进一步证实,生脉散煎煮过程中,人参皂甙发生水解转化成 $Rg_3$ 、 $Rh_1$ ,其煎液中的含量显著高于单味人参煎剂中的含量。

近年来,在传统剂型的基础上不断应用现代科学技术创制了许多新剂型。如冲剂、片剂、口服安瓿剂、膜剂、涂膜剂、海绵剂、滴丸剂、滴鼻剂、注射剂、片剂、气雾剂、微型胶囊、静脉乳剂、胶囊剂、栓剂、袋泡剂等。其制品如感冒冲剂、四逆汤口服安瓿剂、万年青甙膜剂、伤湿涂膜剂、苏冰滴丸、五味子滴丸、清开灵滴鼻液及注射液、鸭胆子油静脉乳、百里香栓剂等。目前,中医方剂剂型改进正向扩大给药途径、提高生物利用度、优选剂型、合理用药方面发展。但从总体上来讲,方剂的剂型研究还处在从经验开发向现代科学技术开发逐步过渡阶段,尤其剂型的基础研究相当薄弱,与国外相比还有一定距离。如国外西药阿斯匹林就有25种剂型可供临床选用。日本应用现代微孔滤膜、超滤及冻干技术创制了许多新的剂型,如黄连解毒汤粉针剂、葛根汤颗粒剂等,特别是在汉方制剂质量为中心的化学分析、药效药理、临床应用再评价等方面取得显著成效。

中医方剂药动学是研究中药在体内的定量变化规律的,它对中药药性理论、新药开发、质量控制、安全有效等问题均有重要意义。目前,中医方剂药动学研究可归纳为两大类型,即:有效成分明确且能用定量分析方法控制质量者,和有效成分不明确或缺乏含量测定方法控制质量者。前者研究方法与一般化学药品药动学研究方法相似。1975年,Smolen等提出一种以药理效应为指标测定药动学参数的方法,称药理效应法。某些药理指标能定量地、可逆地反映出药物在体内的动态变化,因此对成分不明或缺乏定量测定方法的中药复方可采用药理效应法进行体内药动学的研究。富抗育等用发汗、抗炎、退热等药效为指标,分别测定四

逆流的药动学半衰期。药物累积法也是目前国内常用于中药复方药动学研究的方法,它以毒性为指标测定表观药动学参数。用本法还对参茸白凤丸、双料喉风散、痰咳净、参附注射液、脑路通等20多种方药药动学进行了研究。此外,用微生物法研究具有抗病原微生物作用的方药及复方药动学,如黄连解毒汤、清瘟败毒饮、大黄牡丹皮汤、养阴清肺汤及仙方活命饮等。

综上所述,中医方剂研究是个系统工程,需要多种科学家的共同协作,在中医药理论指导下,密切结合临床研究,通过生物化学、免疫学、分子生物学、生物物理学、临床药理学、数学、控制论、系统论等新理论、新方法、新技术等的广泛运用,最终实现其现代化。

#### 参考文献

- 1 郭祥光. 国外科技, 1984, (7), 36(7), 40
- 2 王玉芝, 等. 中西医结合杂志, 1989, 9(12): 745
- 3 杨一凡. 北京中医学院学报, 1988, 11(5): 46
- 4 富抗育. 中国中药杂志, 1991, 16(2): 114
- 5 邓文龙. 中国中药杂志, 1991, 16(2): 118
- 6 李锐. 中药药理与临床, 1991, 7(1): 35
- 7 富抗育, 等. 中药药理与临床, 1991, 7(1): 41

(吉林省中医中药研究院李海日研究员撰)

**《金匱》方药研究进展** 《金匱要略》是东汉·张仲景所著的《伤寒杂病论》中的杂病部分,是中国最早论述内伤杂病的专著,其中理、法、方、药较为齐全。全书共25篇,包括内、外、妇科的40余种病证,共载205首方药(其中4首有名无药,疑是脱简所致),方药分汤、丸、酒、散、熏、洗、坐、敷8种剂型。

仲景药法不论对中医理论研究或临床实践均有极高的指导意义和实用价值,对后世医学发展也有极其深远的影响,历代医家无不以此为准绳规矩,并对《金匱》方药进行多方面研究,以图解开经方高效速效之谜。

历代传统经方研究方法主要通过文字训诂(包括实词、虚词、叠音词、古音通假等训释)先通晓原文的本义。因该书文字古朴素解,加上脱简、错简、传抄讹误、语法复杂多变、词义变迁、古今异语等,若不加以文字训释则难以理解其中的文义医理,给开展经方研究带来极大的困难。传统的经方研究多按中医脏腑经络、营卫、气血、津液、六经等理论进行八纲辨证,以汗、吐、下、温、清、消、补八法及扶正祛邪原则综合研究《金匱》方药的性味、功能、主治范围、炮制方法、配伍特点、剂量及煎服法等,加上病案举例以验证于临床。这不但为中国方剂学和临床医学的发展作出重大贡献,也为现代用中西医结合方法研究《金匱》方药奠定基础。

近代的经方研究已进入新的阶段,主要依靠现代医学手段,中西医结合,全方位对《金匱》方药(全方或部分药物)进行研究,通过动物实验,借助X线直接观察药物在人体内部反应情况,应用药理、药化分析方法测定其有效成分及作用机理,并在降脂减肥、延寿抗衰老及调整免疫机制和抗肿瘤方面取得突破性进展。

动物实验是最常用的研究方法。据《中医年鉴》(1983)记载,早在50年代南京第一医学院药理教研组就开始用小青龙汤作哮喘的动物实验,用10%的煎剂按1ml/kg剂量静脉注射,对麻醉猫的支气管痉挛有明显的解痉作用,同时还能解除豚鼠用新斯的明、氯化钡、组织胺所致的支气管痉挛性气喘。这与《金匱》用此治疗支饮“咳逆倚息不得卧”之病证相符。临床已广泛应用此方加减药味治疗支气管哮喘并获得良效。1965年,毛会亭等选用大承气汤对家兔实验性肠梗阻(肠套叠)的解除(套叠还纳)进行实验观察,结果表明大承气汤能促进肠运动和增加肠容积,从而促使套叠肠还纳。同年10月,于宋志等用小白鼠作实验,将大承气汤经灌胃投药(15g/kg鼠重)进行观察,发现有明显增加消化道推进性运动作用,尤其对肠的作用更为明显,这种作用在投药后10min出现。若从小白鼠尾部静注大承气汤后,碳末在胃肠道的推进距离未见有增强作用,由此推测其对消化道的作用以局部为主。同时又观察到投大承气汤后有明显增加肠容积的作用。

这与仲景用此方药攻下胃肠宿食燥屎,治阳明腑实证、潮热谵语、“腹满不减,减不足言”及实热下利、按之心下坚、谵语有燥屎等证相吻合。现已广泛应用于急性肠梗阻,腹部手术后胃肠道胀气、便秘,中毒性肠麻痹及慢性便秘等,均获显效。

也有人借助X线观察药物在人体消化系统的药理作用。1980年,黄贤权等用大承气汤口服后,通过X线快速肠道造影,观察药物对人体胃肠道的作用。分两次观察,第1次选用无器质性病变者60例,分不用胃肠促排药组(A)、口服更吐灵25mg组(B)及口服大承气汤组(C),共3组各20例。观察结果发现,A组患者钡剂前端到达盲肠的时间为3min,B组患者在60min后才分别到达,而C组患者仅在30min左右即分别到达。第二次观察,选择有器质性病变者80例,其结果与上述变化情况大致相同。这表明大承气汤对消化道内容物有明显推进作用。

1974年,陈琼华对大黄进行药理分析,发现其主要成分是蒽醌衍生物,总量约3%~5%,其中含大黄酸、大黄素、芦荟大黄素、大黄素甲醚及大黄酚等。其药理作用有:(1)增加肠张力,促进肠运动,并抑制 $\text{Na}^+$ 从肠腔转运至细胞(可能抑制 $\text{Na}^+-\text{K}^+-\text{ATP}$ 酶的活性),从而使水分滞留在肠腔内而促进排便。这种缓下作用并不妨碍小肠对营养的吸收,故优于其它泻下剂。临床常用它治疗慢性便秘。(2)消炎抗菌作用。对葡萄球菌、溶血性链球菌、白喉杆菌、淋病双球菌、伤寒杆菌、副伤寒杆菌、痢疾杆菌等均较敏感。其抑制作用主要通过抑制细菌的糖及糖代谢产物的氧化脱氢,并能抑制氮的同化和氨基酸的氧化脱氢、脱氨,从而抑制细菌蛋白质、核酸的合成。临床用于疖疔、腮腺炎、胆囊炎、胰腺炎、菌痢、尿路感染、口腔炎、牙龈脓肿、急性结膜炎、淋病等。(3)抗病毒及利胆退黄作用。与茵陈、山栀合用可治疗黄疸型肝炎。与板蓝根、大青叶合用能治腮腺炎、乙型脑炎等。(4)抗肿瘤作用。大黄能抑制癌细胞的氧化、脱氢及糖酵解,并抑制其蛋白质、核酸的合成。临床报道用于治疗白血病、胃癌、子宫癌等有效。(5)止血作用。大黄和土大黄对内外出血均有明显止血功效,可使血凝时间缩短,促进骨髓制造血小板,并使毛细血管壁致密,改善其脆性,因此有促血凝作用。止血成份可能是大黄酚及大黄所含的鞣质及钙离子等。临床常用于胃溃疡病并发上消化道出血、肺结核咯血、鼻衄、功能性子宫出血、外伤性出血及血液病(血小板减少性紫癜、再障贫血、白血病)引起的出血,止血效果较好。此外,还有降低血压和胆固醇的作用,可治高血压动脉硬化。

经方的药理、药化实验以白头翁汤居先。本方由白头翁、秦皮、黄连、黄柏四味药物组成。原治下利便脓血、腹痛里急后重的湿热痢。早在1858年,德国Er Mann氏率先从白头翁中提取出一种具有刺激性黄色油状液体,该氏将其命名为原白头翁素。此液体置空气中不久即变成另一种固体物质,命名为白头翁素。1892年,Beckurts确定白头翁素的分子是 $\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$ ,并说它是一个带有内酯或醛基的脱水物。唐德璋认为这两种有效成分对痢疾杆菌、伤寒杆菌、副伤寒杆菌、沙门氏菌及金黄色葡萄球菌、绿脓杆菌等均有明显的抵抗作用;还有明显的抗阿米巴原虫作用,并对阴道滴虫、皮肤真菌及流感病毒有不同程度的抑制作用。秦皮含秦皮素、秦皮甙、七叶树甙、秦皮乙素等,对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、痢疾杆菌均有抑制作用。黄连更有广谱抗菌作用,主要含小檗碱、甲基黄连碱、掌叶防己碱、非洲防己碱及药根碱等多种有效成分,对痢疾杆菌、伤寒杆菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、溶血性链球菌、肺炎双球菌、脑膜炎双球菌、白喉杆菌、百日咳杆菌等均有较强的抑制作用,也有抗阿米巴原虫作用。黄柏含黄柏碱(木兰花碱)、小檗碱、药根碱、掌叶防己碱等多种生物碱,对痢疾杆菌、伤寒杆菌、霍乱弧菌及金黄色葡萄球菌、肺炎双球菌、溶血性链球菌等均有抑制作用。以上四味药物合用有强力抗菌协同作用。仲景用此方治“热利下重”的机理已从上述药理、药化实验结果获得证实,现已广泛应用于急性慢性细菌性痢疾、阿米巴原虫性痢疾、急性胃肠炎等胃肠道感染性病变。

也有人进一步用免疫学方法进行研究。如黄芪是《金匱》方

中常用药物之一。著名方剂黄芪建中汤即以黄芪为君药,治“虚劳里急诸不足”。其主要成分有二羟甲基氧基异黄酮、熊竹素、胆硷、甜菜硷、多糖、粘液质、葡萄糖醛酸、多种氨基酸及微量叶酸等。1980年,严庆惠等通过免疫学方法发现它有明显促进细胞免疫作用。他选出慢性肝病10例(肝炎后肝硬化3例,慢性肝炎2例,乙型肝炎带毒者5例),以单味黄芪30g水煎两次,早晚服用,服药前及连续服药1个月后分别采用测植物血凝集素(PHA)诱发的淋巴细胞转化率(LT),另以用一般护肝西药的10例慢性肝病者为对照组。结果表明10例慢性肝病患者服药前LT为14%~30%,平均为 $27 \pm 3.8\%$ ,服药后为15%~63%,平均为 $50.6 \pm 17.3\%$ ,较服药前平均增加 $23.6 \pm 4.77\%$ ,经统计学处理有非常显著差异( $t=4.9, P<0.0001$ )。1984年,侯云德等也从黄芪中提取出多糖蛋白大分子酒精不溶部分,具有抗体形成作用。氨基酸生物硷部分及甙类部分具有抗病毒活性,增加抗体形成及促进免疫反应,延长细胞在体外存活时间等活性。同年10月,沈美玲等选用蒙古黄芪并从中提取多糖(简称APS),也证实有促进免疫功能、增强抗体、提高抵抗力的作用,可促进小鼠腹腔巨噬细胞的吞噬功能。APS还能促使脾脏增大,胸腺缩小,脾脏中Thy-1阳性细胞数显著降低等,提示APS有抑制T细胞功能,但能增强小鼠脾细胞对CPS的应答反应,可以认为APS有刺激B细胞功能的作用。从实验中还发现,APS也像其它免疫调节剂一样具有抗肝损害和抗感染及抗肿瘤作用。曾将APS试用于几个病例,显示它能解除抗癌药的副反应,纠正外周血细胞的抑制作用,保证化疗的正常进行。

经方抗肿瘤的实验研究及临床观察目前也取得初步进展。1984年,杨升之用桂枝茯苓丸加减治疗子宫肌瘤100例,结果有46例肌瘤完全消失,34例肌瘤缩小1/2以上,20例无效。这与仲景用此方治疗“妇人宿有癥病而得漏下不止”之证相吻合。单味药物除上述提到的大黄、黄芪有抗癌作用外,新近还从猪苓中提取出多糖成分进行抗癌实验研究,颇有进展。猪苓在《伤寒》、《金匱》两书中共出现15次,分布于猪苓汤、猪苓散、五苓散、茵陈五苓散4个方剂中,有利水化饮、祛湿退黄等作用。1984年,顾伯文用猪苓多糖胶丸及猪苓提取物(757)治疗肺癌的临床研究:用胶丸组30例,除化疗外,口服本品8丸(2g)/日3次,10d为1个疗程,疗程间隔3~5d,共3个疗程。757组30例,除化疗外,肌注本品40mg/d,连用两周,停药6周,再用4周,并以单用化疗组予COM方案作对照,结果表明前两组的临床症状改善,胸片块影缩小,无任何副作用,明显优于单用化疗组。故认为猪苓多糖及其提取物具有扶正培本抗癌作用,可作为肺癌化疗的辅助治疗药物,可减少化疗药物的毒副作用。

经方内分泌学的实验研究也取得初步进展。1984年,李炳如等将大鼠肾上腺、甲状腺切除造成卵巢重量减轻,卵巢绒毛膜促性腺激素/黄体生成素(HCG/LH)受体功能降低,然后给予《金匱》肾气丸中的主药附子与熟地,发现能使上述大鼠卵巢增生, HCG/LH受体功能提高。他认为可能是补肾中药提高卵巢对垂体促性腺激素的反应能力,从而使卵巢功能恢复。同年,许青媛用苓桂术甘汤去茯苓加干姜的醚提取液能使幼年小鼠胸腺萎缩,大鼠肾上腺的维生素C含量下降,这表明上方药对动物肾上腺皮质功能有一定的影响。据实验研究资料,从人参中提取的单体甙也有促性腺样作用,也能兴奋垂体分泌促性腺激素,加速大鼠性成熟过程。人参根和茎叶有利尿作用,此与促使肾上腺分泌盐皮质激素有关,利尿成分可能是人参皂甙(见《中药大辞典》)。

新近用经方降脂减肥及延寿抗衰老的实验研究也已迈出可喜的一步。肥胖常影响健康,诱发多种疾病如高血压、动脉硬化、冠心病、糖尿病等。江幼李提出导致肥胖的病机是痰、湿、水、瘀(脂)。相应的治法是化痰祛湿、温阳健脾、利水、通腑、消导、疏肝利胆等方法。他发现《金匱》方中的苓桂术甘汤、泽泻汤、防己黄芪汤、十枣汤、承气汤或单味大黄、五苓散等均有减肥作用。黄春林发现经方中常用的大黄、泽泻、柴胡、茵陈有降脂减肥作用。大黄所含蒽醌类及其衍生物可促进肠蠕动,抑制脂肪、胆固醇在肠

道的吸收,植物固醇可能与胆固醇竞争脂化酶而减少脂肪的合成和吸收。泽泻所含的三萜类化合物能促使脂肪的分解,并抑制乙酰辅酶A(合成胆固醇的原料)的合成。柴胡、茵陈可增加胆汁分泌而促使胆固醇的排泄。总之,通过影响血脂的转运、代谢、排泄,或能阻止胆固醇的脂化及在血管的沉积,促进脂肪的分解,抑制其合成即能降低血脂,防止动脉硬化。

应用经方延寿抗衰老的实验研究多选用益气补虚的药物。1985年,余敏发现黄芪和普鲁卡因联用对家蚕生存期限比对照组延长,生长及体重增加缓慢,食桑量也减少。这为人体抗衰老延寿的中医治疗提供重要线索。1983年,霍玉书等人用参果皂甙做抗衰老作用的临床研究,选>50岁保健对象,分成治疗组71例,服用人参果皂甙50mg/日3次,两个月为1疗程;对照组21例,服安慰剂,按双盲法观察。结果:治疗组衰老症状积分、抗疲劳作用、瞬时记忆力、复杂动作反应时间均较治疗前提高( $P<0.001$ ),血胆固醇明显下降,血浆皮质醇、睾酮显著升高;对照组抗衰老作用明显低于治疗组,且胆固醇、皮质醇、睾酮均无改善。选用10个单项指标输入电子计算机,采用回归运算测定函数年龄,结果治疗后( $59.55 \pm 3.5$ 岁)低于治疗前( $66.59 \pm 3.7$ 岁),也说明本品具有抗衰老作用。

孙晓波等人用参花饲养蜜蜂,可明显延长寿命10~15d;用人参皂甙治疗的老年患者并试以治疗前后的函数年龄变化判定效果,结果表明人参皂甙对以历年年龄为基础的与其他生理指标相关的函数年龄产生有利的影响( $P<0.001$ )。在对外人胚肺二倍体SL株成纤维细胞(25代)的抗衰老研究中,发现人参注射液15~60 $\mu$ g时,可明显促进二倍体细胞生长增殖能力和延长细胞寿命。实验资料还表明,人参皂甙对老年患者白细胞的存活率及中性粒细胞吞噬功能都有明显的提高作用。这些都是人参健身抗衰老作用的佐证。

综上所述,由于近代医学科学发展突飞猛进,仪器设备先进精确,实验方法不断更新,这为《金匱》方药新法研究提供了有利条件。当今研究方法以多学科、多领域对《金匱》方药或单味主药进行综合研究为主。通过药理药化法提取有效成分进行动物实验,临床观察探明其作用机制及对各脏器官、神经内分泌、免疫学等方面的影响,以扩大应用范围,提高疗效。近期在抗癌、降脂减肥健身、延寿抗衰老等方面也进行了初步探索,并取得可喜的进展。然到目前为止,所研究的方药仅占全书的一小部分,大部分方药的作用机理尚未探明,而且动物实验结果与临床应用之间还存在一定的差异。《金匱》中还有4首有方名而无药物的方剂至今尚未查明,也有待今后进一步考证。目前肿瘤发病率有上升趋势,高效低副作用的抗癌药物为数不多,化疗、放疗的毒性及副作用大,虽从经方中也发现大黄、黄芪、猪苓等有抗癌作用,但效果还不肯定,且只能作一般化疗的辅助治疗方法。展望今后,有可能进一步发掘出更多高效抗癌方药。其次,乙型肝炎患者及易感人群中的血液乙肝抗原及抗体阳性检出率甚高,而目前使其转阴的药物却极少,不久的将来,或许能从《金匱》方中发掘出更多高效抗乙肝病毒药物以防治乙型肝炎,减少肝硬化、肝癌并发症。当今爱滋病病毒在国外已迅速蔓延,国内爱滋病的发病率也开始上升,严重威胁人类的生命与健康,如能从经方和其他中草药中研究出抗爱滋病病毒的特效药物,将使《金匱》方药在新的医学领域发挥更大的作用。

#### 参考文献

- 1 王贵权,等.上海中医杂志,1980,4:34
- 2 严庆惠,等.浙江中医杂志,1980,10:464
- 3 侯云德,等.中西医结合杂志,1984,4(7):420
- 4 沈美玲,等.中西医结合杂志,1984,4(10):615
- 5 杨升之.浙江中医杂志,1984,19(4):180
- 6 顾伯文.白求恩医科大学学报,1984,10(1):43
- 7 李炳如,等.中西医结合杂志,1984,4(4):227
- 8 黄春林.广东医学,1984,5(1):21
- 9 许青媛.中草药,1984,15(1):24

10 江幼李,北京中医学院学报,1985,2:8

(上海中医学院何永樟副教授撰)

**中药抗衰老研究** 随着社会的发展,到2000年中国60岁以上老年人将达到1.3亿,占人口总数的10.5%,而进入“老年型”国家。中医药抗衰老有着几千年的临床实践,积累了丰富的经验,并具有整体观和辨证的思想。早在《内经》中就有诸如摄生、防病、抗老等记述。中药抗衰老始见于《神农本草经》,其中载有延年功效的药物共53种,具有不老之功效的药物共69种。《本草纲目》记载“耐老”、“增年”的药物达237种,所论“轻身”、“延年”的医理及附方390余条,长寿例条24则。说明抗衰老中药品种繁多,极其丰富。中药用于抗衰老和防治老年病,由于其效果确切,毒副作用小,又属天然药物,倍受国内外的重视。因此,开展中药抗衰老研究具有重大的现实意义。

近代国内不少学者对中药抗衰老进行研究。浙江中医学院林乾良等的《养生寿老集》,整理收录抗老方152个,防治老年病常用方剂129个,精选益寿方20个,单方11个,药酒方7个。上海中医学院江克明等的《抗衰老方剂词典》,收载延年益寿方1018个。80年代初,有人对清代宫廷医方发掘整理,对其中延缓衰老方剂进行较详细的研究。此后,对人参、黄芪、刺五加、五味子等一大批抗衰老中药从成分、药理、制剂、临床等诸方面进行了系统研究,取得丰硕成果。近年研制的抗衰老新剂型制剂,以及一些以古方为基础辅以其他抗衰老西药的新制剂有:青春宝(人参、天门冬、地黄等)、龟龄集(鹿茸、穿山甲、淫羊藿、菟丝子、枸杞子等)、清官寿桃丸(生地、益智仁、枸杞、胡桃肉、天冬、当归等)、益寿康(人参、维生素E等)、维尔康(人参、灵芝、黄芪、维生素E、维生素C等)、参茸白凤丸(高丽参、鹿茸、川芎、当归、党参等)、还精煎(地黄、潼蒺藜、锁阳、首乌、牛膝等)、至宝三鞭丸(人参、鹿茸、海马鞭、梅鹿鞭、广狗鞭等)、活力苏(首乌、黄芪、丹参等)、抗老灵(人参、枸杞子、玉竹等)、康宝液(蜂皇浆、刺五加、黄精、枸杞、黄芪等)、寿康胶囊(人参、鹿茸、首乌、枸杞、当归等)、琼玉膏(人参、茯苓、生地等)、清官八仙糕(薏苡米、茯苓、莲子、芡实、山药等)。在剂型方面,除丸、散、膏、丹、酒等传统剂型外,尚开发了口服液、冲剂、茶剂、片剂、注射剂等。近年挖掘开发的药枕,通过穴位、皮肤和呼吸道吸收其有效成分,达到抗衰老治病作用。基础研究中,动物寿命试验,是利用小鼠、果蝇、家蚕等观察中药对其寿命的影响,结果证明中药对延长动物寿命有不同程度的作用。70年代末报道黄芪对人胚肺二倍体细胞生长的影响;80年代又报告了何首乌对细胞寿命的作用。中药抗衰老的研究取得的主要成就有以下几个方面:

#### 主药研究

1. 单味药研究:人参能提高体力、智力,延缓精神老化,减轻老化症状,增强记忆力,提高免疫功能与性功能。刺五加与人参相似,可提高应激力、免疫力、吞噬力,调节免疫,诱生干扰素。绞股蓝有人参样增强免疫作用。黄芪在改善心脏功能、调整血压、促进免疫功能、调节环核苷酸代谢、增强肾上腺皮质功能等方面都具有良好的作用。何首乌能改善衰老症状,调节免疫功能,保护抗氧化酶,降低血脂,防治动脉硬化。大黄能调节免疫功能,降低胆固醇。经临床证实,较为肯定的抗衰老单味药还有当归、淫羊藿、冬虫夏草、灵芝、黄精、党参、红景天、穿山龙等。

2. 复方研究:清官寿桃丸一改善衰老症状优于维生素E,它可降低过氧化脂质,提高雌二醇及睾酮,改善记忆力,提高智力。还精煎能改善或稳定衰老指标,增加泌转,改善肺活量。至宝三鞭丸能显著改善图形记忆力及听、视、握力,增强免疫力和性功能。康宝液能改善老年前期及老年期的记忆力、注意力、性功能等。补肾益寿片能改善免疫功能及内分泌功能。活力苏能改善衰老症状,提高血SOD(超氧化物歧化酶)活性及细胞免疫功能;降低血清脂稠素。抗衰老灵能改善老化症状、血浆粘度及微循环寿康胶囊能改善老化症状及心功能,提高记忆力、运算力、握力、肺活量等。人参果皂甙能改善衰老症状,提高智力,提高性功能,增

强脑摄氧能力,抗动脉粥样硬化。清官八仙糕能改善脾虚及神经代谢低下等衰老症状。琼玉膏能增加老人外周T淋巴细胞、降IgA。衡法1号能改善衰老症状、血液流变性,提高免疫功能等。

#### 实验研究

1. 延长动物寿命:浓度适当的人参,可使培养基中的人胚肺二倍体细胞密度显著高于对照组。黄芪可延长细胞寿命1/3左右。灵芝、银耳、人参茎叶、党参、黄芪、玉竹、黄精、菟丝子、肉苁蓉、女贞子、补骨脂、珍珠等,能显著延长家蚕寿命,并以补骨脂最好,可延长6%。施今墨抗衰老方药平均延长果蝇寿命约21%。青春宝平均延长果蝇寿命10.8%,延长小鼠寿命18.3%。

2. 调整内分泌:(1)下丘脑-垂体-性腺轴:补肾益寿片、还精煎、寿康宝等可延缓动物睾丸、卵巢、子宫、前列腺等衰老性变化,甚至提高其重量,使睾酮或雌二醇上升。此外,人参果皂甙、淫羊藿、蛇床子、蛤蚧、鹿茸、胎盘、蜂王浆、刺五加等均含有性激素及性激素样作用。(2)下丘脑-垂体-肾上腺皮质轴:补肾阳复方(附子、鹿茸、仙灵脾、熟地、肉桂、党参)及补脾药刺五加、人参、党参、甘草均有兴奋肾上腺皮质作用。(3)下丘脑-垂体-甲状腺轴:龟龄集、右归丸可保护甲状腺功能及垂体的结构和功能;人参促促脑释放TSH,使甲状腺分泌物增加。(4)下丘脑-垂体-性腺-胸腺轴:还精煎能提高胸腺蛋白质RNA、DNA含量,延缓超微结构的衰老变化,保护细胞免疫功能。

3. 调节免疫功能:大黄可使体液免疫功能降低,细胞免疫功能增强。右归丸可提高动物淋巴细胞转化率。养命宝可使衰老动物胸腺萎缩程度减轻,脾脏增重。还精煎可使小鼠肺组织中cAMP/cGMP升高,并能促进机体能量代谢,抑制自身抗体的产生。白何首乌及漏芦可促使淋巴细胞转化,提高血脂酶标记阳性淋巴细胞数量。至宝三鞭丸对老年鼠有抗疲劳、促进免疫功能作用。

4. 清除自由基:(1)直接清除氧自由基的药物有:人参水提物、人参皂甙、黄芪、五味子、女贞子、绞股蓝、丹参、当归、川芎、清官寿桃丸等。(2)能提高内源性氧自由基清除酶活性的药物有:人参茎叶、党参、何首乌、刺五加、丹参、三七、黄精、罗布麻、肉苁蓉等。(3)抑制脂质过氧化物生成的药物有:人参果皂甙、三七皂甙、酸枣仁、当归、清官寿桃丸、柴胡桂枝汤等。

5. 调整中枢神经系统功能:可抑制MAO-B活性的药物有:何首乌、鹿茸、人参、山楂、黄精、酸枣仁、猕猴桃、龙眼肉、桑椹、大枣以及还精煎、右归丸。人参皂甙、青春宝、康宝、安神健脑液等还具有镇静及增智双向调节功能。

6. 补充微量元素:检测结果表明,补骨脂、肉苁蓉、菟丝子、仙茅、淫羊藿、杜仲、熟地、制首乌、女贞子、山萸肉等含较多的Zn、Mn;其中,补骨脂含Zn最高,淫羊藿含Mn最高,地黄九含有丰富的Zn、Mn、Cu、Fe,清官寿桃丸可使头发铜、钠值下降、Zn/Cu值升高,灵芝含铜高出人参4~6倍。

7. 促进物质代谢:(1)提高蛋白质及核酸的药物有:人参、淫羊藿、肉苁蓉、刺五加、灵芝、黄芪、三七、党参、附子、锁阳、菟丝子、生地、麦冬、丹参、龟版等,以及还精煎、龟龄集。(2)能量代谢:淫羊藿可促进 $Na^+-K^+$ -ATP酶合成,提高钠泵活性,利于产热,消除阳虚;灵芝可促进氧合Hb解离,利用组织获氧,增强体力。(3)脂质代谢:黄精、首乌、女贞子、灵芝及蒲黄、郁金能抗TCH血症及动脉粥样硬化症;大黄能降低CH及 $\beta$ -LP。(4)糖代谢:地黄、黄精、山药、天花粉、麦冬、枸杞、淫羊藿、知母及人参等均不同程度地调节糖代谢,降低血糖。

中药抗衰老研究今后将在以下几个方面取得进展:(1)在对益肾健脾等补益药物继续开展深入研究的基础上,将开拓对清热解毒、理气通腑、化痰降浊,尤其是活血祛瘀药物的研究,找出抗衰老新方药。(2)用现代科学技术对抗衰老中药进行多学科的研究,不断赋予抗衰老中药以新的内容。抗衰老中药将逐步进入国内外老年预防医学及临床领域,为延缓防病、治疗老年病作出贡献。

#### 参考文献

- 1 陈可冀,李春生. 中国医药学报,1987,2(5):37~39.
- 2 何熹延,方蕴春. 中医药信息,1987,2:21~27
- 3 李德英. 新中医,1987,11:47~50
- 4 李春生. 中医杂志,1988,29(1):59~61
- 5 周文泉,刘建华,周鸿. 中国医药学报,1991,6(4):43~49  
(安徽中医学院附属医院韩明向主任医师、张念志硕士撰)

## 基础医学

**健康风险评价** health risk assessment 风险指因接触有害因子而受其不良影响的可能性。风险的大小通常用不良影响发生的机率表示,即用在一定期间内有可能受有害因子影响的个体数与暴露于某有害因子的个体总数之预期比率来表示。有害因子危及的对象可以是人,也可是生态系的其他生物,故对风险的评价有健康风险评价与环境风险评价之分,有害因子的性质可以是化学的、物理的、生物的、社会的等等,因而上述两类风险评价又各衍生出针对各类有害因子的、目标不同的评价方法。目前最引人注意的是化学品的风险评价,一般情况下,健康风险评价即指有毒化学品的健康风险评价。

目前常用的化学物质约7万多种,每年产生的新化学物质约1000多种。显然,控制化学品的污染,保障人的健康是十分迫切、重大的问题。控制化学品的污染离不开健康风险评价。首先,化学品的数量如此浩大,不可能同时给以治理,需按危害大小区别对待,这就产生化学品污染控制的优先顺序问题。其次,为了有效地管理化学品,需选择既能维护健康又能为财力承受的污染控制措施,即解决损益分析的问题。此外,为了使化学品的各项控制措施能切实实现,必须由管理部门建立一系列法规,这就是提出掌握污染管理法规尺度的问题。这些问题的解决都需以化学品健康风险评价提供的科学依据为基础。健康风险评价是科学的环境管理所必需的技术基础。

风险评价首先是致癌物的评价开始的。在许多关于致癌物风险评价的研究基础上,1976年由美国国家环保局(EPA)首先公布了可疑致癌物的风险评价准则,提出了有毒化学品致癌物风险评价的方法。这个方法很快为许多环境立法机构接受,同时也引起学术界更广泛深入的研究、讨论。风险评价方法的使用日渐普遍,但由于没有规范化程序,不同研究室往往采用不同的评价方法。基于这种情况,美国国家科学院(NAS)于1983年编制了有关风险评价方法的研究报告,明确了风险评价的程序,对一些技术用语作出规定,这个报告得到普遍认可。在此基础上,美国EPA针对致畸物、生殖毒物、混合化学物质等有毒物质的风险评价准则相继问世。目前,风险评价方法已为美国以外的许多国家如法国、荷兰、日本、中国和一些国际组织如经济发展与合作组织(OECD)、欧洲经济共同体(EEC)所接受。

目前,风险评价的程序已趋于统一,基本采用NAS1983年报告中提出的4阶段法,即第1阶段,危害鉴定;第2阶段,剂量—反应评估;第3阶段,暴露评估;第4阶段,风险评定。对化学物质的风险评价应从其危害鉴定开始,即通过对该物质分子结构分析、体外生物学试验、动物实验及流行病学调查提供的基础数据,对化学物质的危害作出判断。第2阶段,研究化学物质毒性与剂量间的定量关系。显然直接从流行病学调查中获取的化学物质剂量—反应关系是最可靠的资料,但在多数情况下很难得到完整的与效应相对应的人群暴露资料,故动物实验成为剂量—反应关系评定的主要手段。在从动物实验中得到剂量—反应关系之后,利用一定的模式外推到人群,得出人群的剂量—反应关系。第3阶段,确定人的暴露水平。可以通过直接监测进行评定,多数情况下是根据排放量、污染物转移规律等方面的参数,采用一定模式进行估算。第4阶段,利用前3个阶段提供的数据估算不同暴露条件下某种健康效应的发生率。同时,对前3个阶段评定中存在

的不确定性进行分析。

因风险评价的不少环节难以用直接检测的方法获取数据,需要在一些测定数据的基础上,通过一定模式进行估算,间接获取数据,各种推算模式的研究是目前健康风险评价的研究热点之一。在剂量—反应关系评定中,目前已建立许多剂量—反应评估模式(BB-DR),如途径—途径推算模式,即从一种染毒途径获取的剂量—反应关系推算另一种染毒途径的有关数据;慢性—急性推算模式;高剂量—低剂量推算模式及种属—种属推算模式,即由动物染毒所得数据推算人的剂量—反应关系的模式,等等。关于暴露评定已建立的模式更多,如用个人在微小环境中暴露水平的测定数据估算人群暴露水平的模式;用来确定转送到靶器官中的外源化学物浓度的毒物代谢动力学模式(PB-PK)(用此浓度进行风险评价比使用外环境污染的暴露水平所得结果的可信度更高);计算人群暴露水平的人群活动模式;污染物在环境介质中的扩散、转化模式等。

风险评价过程使用大量模式,同时评价的各个环节都存在着一些产生误差的因素,这在一定程度上造成了评价结果的不确定性,也就是造成了风险评价本身的风险。为了提高评价结果的科学性,降低风险评价的风险,保证决策的正确性,对减少风险评价中不确定性方法的研究成为风险评价的又一研究热点。许多研究报告分析了不确定性的各种来源,提出不少减少不确定性的方法。管理部门在上述研究报告的基础上制定了一系列风险评价准则。美国EPA自1986年以来颁布了《致癌物风险评价准则》、《发育毒性风险评价准则》、《化学混合物评价准则》、《暴露评价准则》、《雌性生殖系统影响的风险评价准则》、《雄性生殖系统影响的风险评价准则》。这些准则对选用指标、观察终点等作了统一规定,给出了规范化的评价程序,这就在准则涉及范围内有效地减少了评价的不确定性。与此相配合,美国等国及OECD等国际组织还为各项健康影响测试方法制定了准则。中国国家环保局(NEPA)也于1990年颁布了《化学品测试准则》,这是中国第一部直接用于风险评价的标准化文件。

健康风险评价毕竟还是一个较新的技术领域,有许多问题有待解决。首先,这个领域中的专业术语极不统一,同一术语在不同文件中常出现不同的解释,估计不久会由专门机构给以统一。风险评价的基本程序已有公论,但每一阶段的方法尚不规范,故在对同种情况进行评价时会得出不尽相同的结果。今后若干年内,管理部门将会不断颁布针对不同目标的各种风险评价及风险评价各重要环节的风险评价准则,使评价方法统一化、规范化。评价中的模式是关键技术,研究人员会在实践中建立起更多的有效模式。此外,保证各个环节数据准确性的措施亦会更加完善,使评价的不确定性降得更低。

### 参考文献

- 1 Kaplan S, et al. Risk Analysis, 1981, 1(1): 11~26
- 2 NAS U.S. Risk Assessment in Federal Government: Managing the Process, Washington DC: National Academy Press, 1983, 18~28
- 3 Hallenbeck W H, et al. Quantitative Risk Assessment for Environmental and Occupational Health, Chelsea, Michigan: Lewis Publishers Inc, 1986, 9~76
- 4 Richardson M L. Risk Assessment of Chemicals in the Environment. London: Royal Society of Chemistry, 1988, 543~558
- 5 Paustenbach D I. A Textbook of Case Studies, New York: John Wiley and Sons, 1989, 27~125

(北京环境保护科学研究所汪晶副研究员撰)

**病例对照研究** case control study 分析流行病学研究方法中最基本、最重要的研究类型之一,是检验病因假说的重要工具。其基本原理是以现在确诊的患有某种特定疾病的病人作为病例,以不患有该病但具有可比性的个体作为对照,通过询问、实

验检查或复查病史,搜集既往各种可能的危险因素的暴露史,测量并比较病例与对照者中各因素的暴露比例,经统计学检验,若判断为有意义,则可认为因素与疾病间存在着统计上的关联。在评估各种偏性对研究结果的影响之后,再借助病因推断技术,推断出某个或某些暴露因素是疾病的危险因素,而达到探索和检验疾病病因假说的目的,这是一种回顾性因果研究的方法,是在疾病发生之后去追溯假定的病因因素。这种研究方法非常适合于罕见疾病和长潜伏期疾病的病因研究,能充分地利用资料信息,对研究对象无伤害,同时一次研究可探索多种病因假设。

最早的CCS见于1843年W A Guy向伦敦统计学会所做的报告,该报告分析了职业暴露和肺结核发生的关系。而CCS的概念最早见于PCA Louis的著作(1844),但是符合现代病例对照研究概念的研究首推J. E. Lane-Clayton报告的关于生殖因素与乳腺癌关系的研究结果。该研究资料首次提出选择配比的医院对照的方法;直到第二次世界大战后,病例对照方法的流行病学应用才大大增加。1947年, Schreck和Lenowitz报告了一项阴茎癌的病例对照研究资料,提出未做包皮环切和性卫生不良是阴茎癌的病因因素。1947年, Sartwell用病例对照研究证实了输血与肝炎的关系;1950年报告了3次阐明吸烟可能是肺癌的一个病因的病例对照研究资料。50年代应用病例对照研究方法研究了白血病、膀胱癌、乳腺癌、宫颈癌、喉癌、肺癌和胃癌等的病因。该设计方法还应用于急性病,如食物中毒的爆发调查。1951年, Cornfield以方法学证明可以根据病例对照研究资料估计相对危险度,即暴露者中发生疾病的频率与非暴露者中者发生疾病频率之比。1959年, Mantel和Haenszel将该方法进一步系统化,并且提出两种分析技术,即总的卡方检验和相对危险度的联合估计。此后,该方法被数以千计的流行病学研究者所选用,一些有代表性的研究课题包括药物不良反应、母亲吸烟与先天畸形的关联、小剂量放射线照射与白血病的关联、体力活动与冠心病死亡的关联、使用阴道塞与中毒性休克综合症的关联、高龄初产与乳腺癌的关联、酒精消耗量与食道癌的关联等病因研究,用其他流行病学方法难以行得通时,应用病例对照研究方法却取得很大成功。其中,1971年Herbst等应用病例对照研究方法只用8个病例就阐明已婚雌酚与年轻妇女阴道腺癌的关联。60年代以来,病例对照研究方法日臻完善,并且日益得到应用,目前不仅是流行病学工作者常用的研究工具之一,而且已成为临床医师完成临床流行病学研究课题的一种重要方法,这种方法的主要进展有:

对可能影响研究结果的各种偏倚有了较多的认识。常见偏倚近30种,对这些偏倚的估计和控制有了新的方法,如应用某些限制性方法、随机抽样和分层抽样的方法以防止选择偏倚和混杂偏倚;应用精心设计的调查技术和实验技术以减少暴露的错误分类;应用某些先进可靠的诊断方法以减少疾病的错误分类;暴露错分和疾病错分是病例对照研究中信息偏倚的主要成分。在分析阶段,虽不能控制和减少选择偏倚和信息偏倚,但对其导致研究结果的失真程度可以做出估计。此外,分析时还可以应用Mantel-Haenszel分层分析方法和Logistic回归模型分析方法,有效地控制混杂偏倚。

研究设计类型多样化。在病例对照研究基本原理指导下,不断发展了一些新型的设计和相应分析方法,例如序贯病例对照研究(Sequential CCS)。这种方法不是等提前决定的病例数齐备后再调查,而是连续收集资料。还有一种杂交设计,称双向性研究法,是病例对照研究与队列研究的结合,可以研究罕见暴露的健康效应。

单因素统计推断方法、传统的M-H分层分析方法得到广泛的应用和完善;成组资料多暴露水平的统计推断方法为分析剂量反应关系提供一个有力的分析手段;使某因素在病例组和对照组的分布相一致的频数匹配方法,以及根据每个病例匹配相应的对照的配对方法,一个病例匹配多个对照的1:M配比方法,均具备了完整的分析体系,它不但非常适用于罕见病的病因研究,而且在控制主要的混杂变量及提高分析效率方面有其独到之处。

由于实际工作的需要,不同对照数目的配比资料的统计推断方法也得到发展,CCS还应用于筛检后的研究,同时CCS还在实践中不断充实和发展,从研究罕见病扩大到研究常见病,如空气污染与肺癌的关系、宫外孕的危险因素、视网膜剥离的研究等等;近年来还较多地应用于对具有遗传素质疾病的环境影响进行研究以及家庭聚集性研究,甚至于效益分析的研究。

多因素统计推断方法的引入使CCS的功能得到最大程度的发挥。Logistic回归模型为最常用的方法。它在分析多个危险因素的联合效应、危险因素和混杂因素之间的交互作用与效应修饰作用,控制多个混杂因素所致的混杂效应方面,都具有独特的分析能力。它能为多个危险因素与疾病概率之间的相关关系提供一个平稳、易懂和定量的主要特征的描述;同时,它也能提供个体患病危险的概率预告值。

CCS是建立在暴露与疾病联系的测量基础上进行统计学推断和生物学推断的。统计学推断是检验暴露与疾病之间有无统计上的联系,并估计和分析选择偏倚、信息偏倚和混杂偏倚对研究结果的影响。生物学推断是用逻辑判断的方法审核暴露与疾病间的联系是否存在因果关系。其基本分析方法就是比较病例和对照中暴露的比例,计算暴露的优势比,用以估计患病优势比,在发病率低的情况下估计相对危险度。如果知道人群中暴露的比例和非暴露组的发病率,CCS的资料亦可计算归因危险和人群归因危险。

频数匹配资料分析的基本模式为:

|           | E     | $\bar{E}$ | 合计    |
|-----------|-------|-----------|-------|
| D         | a     | b         | $m_1$ |
| $\bar{D}$ | c     | d         | $m_0$ |
| 合计        | $n_1$ | $n_0$     | n     |

D、 $\bar{D}$ 分别为病例和对照,E、 $\bar{E}$ 分别为暴露和未暴露,暴露的优势比 $EOR=ad/bc$ ,该值是否显著地不同于1可用M-H卡方检验

$$\chi^2_{MI} = \frac{(ab-bc)^2(N-1)}{m_1 m_0 n_1 n_0}$$

1:1配对资料分析的基本形式为

|           | E | $\bar{E}$ |
|-----------|---|-----------|
| D         | a | b         |
| $\bar{D}$ | c | d         |

$$\hat{OR} = \frac{b}{c}$$

$$\chi^2_{MI} = \frac{(b-c)^2}{b+c}$$

归因危险度的测量为一旦确立了某个因素是疾病的主要危险因素,便可进一步查明所有新病例中由于该因素所致的比例。

病例对照研究中有4种要素,这就是人群、病例、对照、暴露。明确产生病例的人群和从这一人群中正确地挑选对照组,并正确地收集暴露资料,这是CCS的精髓。在设计阶段就应明确规定特指的人群,保证完全地收集该人群产生的病例,并正确地该人群中选择对照组,这就是以人群为基础的CCS首先规定病例的条件;将研究包括的病例看作是某理论人群产生的全部病例,根据病例的定义确定产生这些病例的人群,然后选择适当的对照组。此时病例常来自于医院,因此常称这类研究是以医院为基础的CCS。通过收集一定条件的病例,再根据病例的定义确定产生病例的人群和正确地选择对照组,如果不存在错误分类的话,这种研究的结果将能真实地反映暴露与疾病的联系。

在CCS中,对照即研究中包含的未患病研究疾病的个体,正确地选择对照组是CCS成功的关键。CCS中对照组的目的是用来估计产生病例的人群中暴露的分布情况,因此选择对照组要有代表性,即代表产生病例的人群,同时要有可比性,即病例组和对照组在某些混杂变量上相同或类似。

暴露指疾病的可能危险因素。暴露可能是指暴露于外源性



环境的污染物,如饮水中的镉、甲基汞、砷的污染,吸烟、饮酒或大气与工作环境中的各种污染等;暴露亦指内源性的因素,如基因型、血浆胆固醇水平、血中某些激素的水平以及心理压抑、精神创伤等。在评价暴露与疾病的联系时,暴露的工作定义将影响评价结果,因此每种暴露均需有严格的定义。

CCS 研究中控制各种偏倚以保证研究的真实性,以及选择恰当的对照组是两个难以处理的问题。近年来对 CCS 的功效越来越重视,所谓功效,即当无效假设( $H_0: OR=1$ )是错误的时候,人们的研究工作有多大的可能性拒绝无效假设。这些问题并不能影响 CCS 的价值,尤其值得注意的是,中国 80 年代以来临床医师开始将这种方法应用于临床研究。

#### 参考文献

- 1 Liang K Y, et al. *Am J Epidemiol.*, 1986, 124: 678~683
- 2 Rodrigues L, Kirkwood B R. *Int J Epidemiol.*, 1990, 119: 205~213
- 3 Yun T-K, Choi S Y. *Int J of Epidemiol.*, 1990, 19: 871~6
- 4 Austin, et al. *Int J Epidemiol.*, 1990, 119: 1045~1050
- 5 Kopec J A, Fdsdale J M. *J of Epidemiology and community Health*, 1990, 44(3): 179~186
- 6 Tennant A, Badley E M. *J of Epidemiology and Community Health*, 1991, 45: 247~250
- 7 Van duijn C M, et al. *Int J of Epidemiol.*, 1991, 20(2): s13~s20
- 8 Moulton L H, et al. *J. Clin. Epidemiol.*, 1991, 44(9): 915~923
- 9 Phillips P H, et al. *Am. J. Epidemiol.*, 1990, 133: 757~765

(天津医科大学王建华教授撰)

**随机对照临床试验(RCT)** randomized controlled clinical trial 这是一种设计良好的实验,它通过比较用试验治疗的病人组和接受对照治疗的病人组中观察到的结局,来评价某种治疗的效益。两组病人在同一个时间阶段进入治疗和随访。两组病人可通过随机的方法分配,结局的度量可以是死亡、非死亡临床事件或者某种实验室实验结果。观察的期间可长可短,根据观察的结局而定。

这种方法主要用于临床治疗性的和预防性的研究,借以探讨和比较某一种药物和新的治疗措施对疾病的治疗和预防效果,为正确的决策提供科学依据。至今,该方法已被公认为是研究和评价治疗性试验的金标准方法,即被公认是评价疗效的论证强度最强的研究方法之一。有些国家已明确规定,没有通过对照试验获得安全性和有效性支持证据的药物和医疗器械,均不能投放市场。

在特定条件下,RCT 亦可用于病因学研究。例如,1942 年 Terry 首次描述了在波士顿患晶状体后纤维增生症(RLF)的 6 名病例,以后在美国其他地方和一些西方国家陆续有 RLF 病例报道。本病多发生在出生后不久的早产儿,其主要病变是晶状体后发生纤维组织增生与粘连,导致儿童失明。经描述流行病学和分析流行病学研究发现,应用高浓度氧气治疗早产儿与 RLF 发病有关,于是一些学者应用临床试验的方法对此进行了研究。Patz 等在 1952 年报告了他们在华盛顿 3 年的研究结果,他们将出生体重在 1.59kg 以下的婴儿按入院顺序交替分为两组:第 1 组给 65%~70% 氧气 4~7 周,第 2 组只给 40% 氧气 1~2 周,其他治疗与护理完全相同,然后追踪观察其 RLF 发生的情况。结果第 1 组发生 RLF 显著多于第 2 组。1954 年, Kinsey 和 Hemphill 以及 Lanman 所做的实验研究报告均证明氧气治疗与 RLF 病因的关系。

RCT 是在长期临床研究中不断总结经验教训逐步发展和完善起来的。它的精髓在于尽可能地避免和消除一些人为的、已知的或未知的各类偏倚因素的影响,使研究结果符合客观实际,

获得的研究结论具有良好的真实性、有益的、可信的防治措施应用于临床实践,能真正为病人带来好处,而不致带来危害。

临床试验是个很古老的概念,可追溯至千年之前。但许多早期的观察均是偶然的、自然的结果,而不是一种有计划的试验。文艺复兴时期, Ambroise pare' 做了一项著名的观察,当时治疗战伤的常规方法是把煮沸的油浇在伤口上。当他把油用完以后,不得不换用由蛋黄、玫瑰油和松节油组成的一种助消化药。结果第 2 天他意外地发现用这种助消化药的伤员不感觉有什么疼痛,他们的伤口既不肿胀也不感染,并且伤员整夜睡眠很好;而用煮开油处理的伤员伤口烧灼、疼痛、肿胀。随后,他决定再也不用这种煮沸的油了。1600 年,东印度航海公司的 4 条远洋船有 1 条船上供应柠檬汁,该船上几乎所有船员未患坏血病,而另 3 条船上的大多数人均罹患该病,从而观察到柠檬汁对坏血病的有效预防作用。

第 1 次有计划的试验设有对照组。1721 年, Mary Wortely—Montague 和 Maitland 对 6 名假定以前从未接触过天花的犯人进行一项研究。在 Wortley—Montague 的强烈要求下,乔治一世国王宣布,如果这 6 名犯人同意接种就可以对他们减刑。他们将天花病人某种物质注射到犯人的两臂和右腿,结果他们始终未得天花,这被认为是接种有效的证据。

包含同步对照组试验的最早设计之一,是 1947 年 James Lind 和 Salisbung 在船上进行的坏血病的研究。当时对坏血病和维生素 C 均无足够认识。他将症状类似的 12 名坏血病病人分为 6 组,他们共同的膳食为早餐糖粥,午餐常为羊肉汤,有时有布丁和面包加糖,晚餐大米、大麦、果干和葡萄酒或类似食物。除常规的共同饮食外,两名 1 组共 6 组的特殊饮食分别为每人 1 夸脱苹果汁,每天 3 次,每次 25 滴炼金药(芳香硫酸盐配剂);每日 3 次,每次两汤匙醋;每日加服半品脱海水;每日加服两个柑子和 1 个柠檬,以及肉蔻合剂。结果是服用柑子和柠檬的一组收到最好的疗效,其中 1 名在第 6 天末已能值班了。这是一种分组设立对照,并给以多种干预措施的疗效考核试验。

1979 年 Haygarth 在研究 Perkin's 牵引器中首先认识到设立对照对于识别安慰剂效应的重要性。

1865 年 William gull 在与 H. Sutton 合作中证明估价病程的自然变异和自发治愈的可能性方面上安慰剂治疗的意义。

随机的概念,作为分配治疗组的一种手段是由 Fisher 引入的。1931 年 Amberson 等治疗肺结核的 Sanoerysin 的研究是首先在临床试验中应用随机分配治疗组的研究之一。

使用随机分配病人方法的后几年, Diehl 及其同事于 1938 年在一次双盲的安慰剂对照的治疗普通感冒的试验中描述了随机分配尼苏达学生志愿者的方法。

早在 1930 年,英国医学研究委员会就认识到对临床试验的需求。30 年代和 40 年代初期才出现不同地点的多个研究者按照一个共同的研究方案进行的临床试验,最早应用这种方法的试验之一是 1944 年发表的评价棒曲毒素(patulin)治疗普通感冒的试验。

1948 年医学研究委员会发表了使用链霉素治疗肺结核的多中心试验。美国评价同一药物的多种中心试验大约开始于同一时间,但其结果 1952 年才发表。

美国脊髓灰质炎疫苗试验开始于 1953 年秋,由国立小儿麻痹基金会资助,与公共卫生署及州卫生部合作。该试验值得一提的是其规模,它包含了数万名志愿者。

英国 Austin Bradford Hill 的著作《临床和预防医学中的统计方法》(1962)是临床试验领域的一个重要里程碑。

1973 年美国国立研究所建立,从此开始资助许多试验。美国的心肺血研究所进行了一些最大最复杂的多中心试验,如多危险因素干预试验(MRFIT)、高血压检出和随访规划(HDFP),都包含数以千计的病人并随访数年。其中最早的多中心试验之一是包含应用 ACTH、考的松和阿斯匹林治疗风心病的试验,该试验开始于 1951 年,是英国医学研究委员会、美国心脏协会和加拿大

节炎学会、风湿学会共同进行的。

治疗慢性非传染性疾病的多中心试验在1960年开始出现,首批例子之一是开始于1960年、完成于1974年的大学组糖尿病规划(UGDP)。

作为一种治疗评价工具的多中心临床试验的出现,需要多学科的合作,除了医学和生物统计学专家之外,一个典型的大范围的多中心试验需要多个学科的专家参与,这种多学科的方法刺激了学科间的交流。1979年成立临床试验学会和1980年初出版了对照的临床试验资料是这种进展的产物。

美国联邦调查局提出了作为食品药品监督管理局(FDA)的新药应用(NDA)过程的一部分试验的一般设计和执行标准;1976年的医疗器械修正案明确提出没有通过对照试验得到安全性和有效性支持证据的药物或医疗器械不能投放市场。

长期的多中心研究使RCT的理论和分析方法得到发展,一些国家产生了专门的特别行动小组和指导规模试验及负责资料评价分析的组织。Cornfield的哲学思想对于处理长期临床试验起了重要作用,他关于贝叶斯(Bayesian)分析和利用似然原理在评价RCT资料中发挥了很大作用。

RCT应遵循3条基本原则:随机分组,以保证“干预组”和“比较组”的均衡性;设置对照组,以排除疾病自然变化和非处理因素的干扰;盲法试验,特别是用“双盲法”以克服研究者和研究对象双方心理上和主观上的一些因素对试验结果产生干扰而影响结果的真实性。

RCT的主要困难在于:(1)需要较大量的人力、物力和较长的时间;(2)由于需要对研究对象的标准做出规定,因而其代表性往往有所局限;(3)RCT是在人体进行的试验,因而必然涉及到医德问题,进行科学研究,首先应保证患者得到合理的治疗,而且研究必须服从治疗需要。

中国在RCT的研究和应用上仍处于起步阶段,相信一定会逐步开展起来。

#### 参考文献

- 1 Chalmers T C, et al. *Engl J Med*, 1972, 287, 75~78
- 2 Multiple Risk Factor Intervention Trial Research Group *J Chronic Dis*, 1977, 30, 261~275
- 3 Hypertension Detection and Follow-up program Cooperative Group; *Prev Med*, 1979, 8, 2~13
- 4 Aspirin Myocardial Infarction study Research Group *JA-MA*, 1980, 243, 661~669
- 5 Fletcher R H, et al. *Clinical Epidemiology: The Essentials*, Williams and Wilkins, Baltimore, 1982
- 6 Coronary Artery Surgery study Research Group *Circulation*, 1983, 68, 939~950
- 7 Curtis L Meinert, *Clinical Trials—Design, conduct, and Analysis*. New York, Oxford, Oxford U. press, 1986
- 8 Tell G s, et al. *J Chin Epidemiol*, 1991, 4(10): 1097~1104.
- 9 Silagy C a, et al. *J Clin Epidemiol*, 1991, 44(10): 1105~1114.

(天津医科大学王建华教授撰)

### 临床科研设计、衡量与评价

design measurement and evaluation for clinical research D. M. E 是现代临床科研的方法学,是临床流行病学的核心内容。临床流行病学是临床医学和现代流行病学相结合的产物,国际上兴起于70年代,1980年引进中国。

现代医学模式,正从传统的生物医学模式转为社会—心理—生物医学模式。临床医学将以医院为基地,面向社会与人群,扩大服务对象和范围;对危害人类健康的疾病,逐步地从单纯的医院内诊治转向对人群中特定的患病群体的防治。同时,对疾病的病因、危险因素、诊断、防治以及疾病的预后等一系列问题进行综合性研究,达到全面深入地认识和掌握疾病的发生、发展和转

归的规律,从根本上改善人类健康状况。因此,临床科研质量对疾病的防治有着极重要的影响,确保临床科研结果的可靠性以及结论的准确性和科学性是相当重要的。临床科研在全部研究过程中都会不断受到多方面非处理因素的干扰,研究者必须充分认识和了解影响临床科研质量的诸多因素,并在研究的全过程,采取相应措施排除和控制各种干扰,尽量减少误差,并用科学的分析方法对结果进行分析与评价,这就是D. M. E 的研究内容。

在20世纪30年代, J. R. Paul 首先提出临床流行病学的概念,将临床概念引入流行病学领域,以打破传统的流行病学仅限于传染病的有限范围,使之扩大到研究疾病发生和发展的条件与环境。

1982年,在洛克菲勒基金会和世界卫生组织的支持下,建立了国际临床流行病学工作网(INCLEN)。该机构为发展中国家训练临床医生,每个训练期为12~18个月,主要课程有流行病学、生物统计学、临床经济学、社会科学和卫生经济学。该机构设有5个临床教育训练中心,其中两个在加拿大,两个在美国,一个在澳大利亚。受训者回国后均建立了临床流行病学单位(CEU),教育学生,训练医务人员,进行与社会有关的研究工作。16个国家的270多名临床医师接受并完成了这个训练。18个国家的医学教育机构加入INCLEN作为临床流行病学单位(CEU)。中国华西医科大学和上海医科大学均是该网成员。1989年建立了中国临床流行病学工作网。

自70年代以来,流行病学、临床医学和公共卫生中的生物伦理学问题成为越来越引人注目的问题。现代流行病学工作者的作用越来越广泛,他们不但应保证他们的研究工作在技术上和方法上是最好的,而且还应对他们的研究对象、同事、社会以及研究资助者有明确的伦理义务。1989年6月,在Alabama的Birmingham召开关于流行病学中道德问题的研讨会(IEF),在IEF会上散发了《流行病学工作者道德指南》的文件草稿,该文件于1991年正式发表。

临床流行病学的核心内容是D. M. E. 科研工作开始于完善周密的设计,根据研究的课题选择最佳设计方案。常用的临床科研设计方案有以下几类:(1)前瞻性的研究设计方案,包括随机同期对照试验、队列对照研究、前—后对照研究、交叉对照试验。(2)横断面调查设计,又称患病率调查或现患调查,可根据情况选择普查或抽样调查。常用于卫生防疫和预防医学研究。(3)回顾性研究设计:多指病例对照研究,是观察性研究中常用的一种设计方案,可以为病因学研究、防治研究和预后研究提供重要信息,但不能直接论证病因学联系。(4)叙述性研究:可以用来探讨病因,分析某种疾病的临床表现特征,评价某种治疗或预防措施的效果。但其科研论证力弱,前瞻性研究设计方案的科研论证力最强,如果条件允许,应尽量选用。

临床研究的对象是人,因此在设计时要根据研究的目的明确研究对象的选择标准和基本状态,对纳入标准和排除标准要有统一的详细明确的规定。

为了使研究结果真实和科学,在设计时应充分估计可能产生的偏倚,并采取相应的措施;遵照随机化的原则,抽取样本和分组;为保证科研的可比性,应设置合理的对照组,即设立条件相同及诊断一致的一组对象,接受某种与试验组不一样的措施,用来和试验组的结果进行比较。

为确保科研结果的可靠性,在设计阶段要正确估算样本含量。样本含量过大会造成浪费,样本含量太小所得指标不稳定,检验效能太低,结论缺乏充分依据。所以,应根据设计的要求、预期效果、容许的 $\alpha$ -错误和 $\beta$ -错误,对所需样本含量进行科学的估算。此外,还应制定措施提高临床依从性,降低临床诊断的不一致性。

在设计阶段还应根据研究目的选择适宜的观察指标,尽量选择客观性较强的指标和易于量化的指标,选用灵敏度、精确性较高的指标。

在严密认真的设计之后,临床科研开始按计划实施,执行的

过程即是对不同组别的受试对象分别给予不同的处理方法,然后在规定的时间内观察、测量并记录受试对象的反应,在这个阶段应随时设法尽量减少和控制测量偏倚。测量偏倚来自于观察者、受试者、仪器、试剂等等,克服的方法通常有:培训观察者,统一测量标准;采用双盲法,即观察者和受试者均不知道受试者所接受的处理方法;试验仪器的校正,试剂批号的一致,等等。

对于临床科研结果正确性和真实性有严格的评价标准。目前通用的标准主要有:评价因果关系的9条方法学标准;评价治疗性文献方法学标准;评价预后文献的方法学标准;阅读文献的4条重要规则;评价诊断性试验的方法学标准;评价卫生措施效果的6条方法学指南;多中心研究质量评价的标准。

临床科研设计、测量与评价的进展与国际流行病学网(INCLEN)的工作是密切相关的,建立在两个原则上,第一,需要考虑健康需求的准确信息和所服务的人群,在保健方面应采取的干预措施的效果和效益,以便指导医生的行为以及关于医疗保健的资源分配的政策决策。医生和所有负责医疗保健的计划供应人员和评价人员需要这种定量测量技能。第二,需要一个广泛的方法对医疗保健需求和供给进行评价,医学研究的目的是鼓励积极的态度改善人群的健康状况,而不只是治疗病人。

目前,已建立起 INCLEN 临床流行病学单位(CEU)成功的评价标准,以指导 INCLEN 的发展和监测 CEU 的进步。1990年,正式评价临床流行病学单位(CEU)的设计已经完成,该评价应用时间序列法追踪 CEU 成功的评价标准,这些标准包括 CEU 的基础结构,研究、教育及临床和医疗保健政策等4个方面,这也是每年进展报告的内容。

临床科研设计、衡量与评价是发展中的基础学科,正在不断丰富和完善。随着科技事业的发展,各相关学科的相互渗透、协作和促进,D. M. E 将在保障人类健康、防治疾病、促进社会经济发展中作出十分有益的贡献。

#### 参考文献

- 1 Sackett D C, et al. *Clinical Epidemiology—A Basic Science for Clinical Medicine*, Boston/Toronto: Little Brown and Company, 1985
- 2 Weiss N S. *Clinical Epidemiology: The Study of the Outcome of Illness*, New York, Oxford: Oxford University Press, 1986
- 3 王家良,主编. *临床流行病学*. 上海:上海科技出版社, 1990
- 4 Fayerweather W E, et al. *J. Clin. Epidemiol.*, 1991, 44(1): 5~6
- 5 Kunin V M. *J. Clin. Epidemiol.*, 1991; 44(11): 1~6

(天津中医学赵晓梅副教授)

**医学电子学** medical electronics 是医学与电子学等工程学科相互渗透后形成的一门边缘学科。它应用电子学、计算机、自动控制等工程技术的原理与方法来研究人体的结构、功能及其生命现象,并为防病、治病及人体功能辅助等研究开发各种装置及仪器。本学科领域中的研究成果将对提高医疗保健水平及改善人们的生活质量有重要意义。

早在20世纪初,人们就开始用仪器记录各种电生理信号。1903年W. Einthoven就研制成功第1台用于记录心脏电位的心电图机。而反映脑活动的电信号也在1929年由H. Berger首先观察到。然而,只是在进入50年代以后,由于各种先进的工程技术涌入医学研究领域及多学科的交叉才促使医学电子学的研究工作有了长足的进步。核医学与超声医学的发展是两个典型的例子。1950年,Cassens研制出第1台机械扫描式核子探测器,它可以在体外获得人体内放射性示踪物质的分布图。继而,在1956年美国的H. Anger发明了 $\gamma$ 照相机,这是核医学发展史上的一个重要里程碑。医学超声仪器也差不多是在同一年代发展起来的。1950年,Wildjy和Frenchla开始用A型超声诊断仪研究颅脑疾病。1954年Adler和Hertz研制成M型超声心动图仪,用心

脏瓣膜运动曲线来诊断心脏疾病。1972年N. Bom首先研制出电子线形扫描B型显像仪,开创了超声图象诊断的新阶段。

60年代起,电子计算机开始渗入医学领域,它使医学仪器的发展产生了飞跃。早在1895年德国科学家W. C. Roentgen就发现了X射线,但在其后的70多年中,虽然X线成像装置在技术上也有了许多进步,可是在成像方法上却一直采用传统的投影成像方法,结果是人体三维组织结构被投影到一个二维平面上,致使影像重叠,难以判读。1972年,英国Hounsfield发明了计算机断层摄影装置(Computed Tomography, CT),并首次用于人体头部的断层成像,所获得的图象是真正不受周围组织干扰的人体断面象。X-CT是电子技术、计算机技术与医学X线诊断学相结合的产物,它的出现对X线诊断设备乃至整个医学成像技术的发展都有极其深远的影响。此后,磁共振CT、发射型CT等新一代医学成像设备相继用于临床诊断,标志着医学电子学的发展进入了一个崭新的历史时期。

根据临床上不同的用途,医疗仪器可以分为诊断仪器(如心电图机、脑电图机、肌电图机、超声诊断仪、X线CT、磁共振CT等各种成像设备)、治疗仪器(如心脏起搏器、人工心脏、电疗机、放射治疗仪等)及监护仪器(如心电监护仪、血压监护仪、呼吸监护仪)等。但就医疗电子仪器所涉及的具有共性的技术难点或主要研究方面又可以粗略分为:信号提取、信号处理及信号的记录与显示。其中,微弱生理信号的提取一直是医学电子学研究的重点。它主要涉及各类传感器及信号放大与测量电路。医学电子学中的放大电路一般在增益、带宽、隔离、噪声等方面都有较高的要求。目前检测相对较强的生理信号(如心电图中的QRS波群)已没有困难。但检测相对较弱的生理信号(如心电信号中的心室晚电位)还有一定的困难。就信号处理(包括图象处理)而言,除了研究处理方法外,高性能的计算机与信号处理器是不可少的工具。信号的实时快速处理或二维、三维信号大数据量的处理,都要求计算机有很高的运算速度。各种计算机断层成像(如X线CT、磁共振CT等)取得了突破性进展,成像设备成为现代化医院的标志。但三维成像技术与三维图象显示技术方面还处于研究阶段。在信号的记录方面,生理信号的长时间全信息记录是一个基本的问题。目前,虽然已有心电信号24h磁带全信息记录装置,但是采用半导体存储器的固态全信息记录装置却一直由于存储器的容量与功耗等问题受到制约。此外,由于医疗电子仪器直接与人体发生关系,确保仪器本身的可靠性及安全性都是至关重要的,针对这一特殊问题因此医疗仪器的可靠性设计是很值得研究并认真解决的问题。

今后,由于电子技术在半导体器件、计算机、自动化等方面可预见到的进步,必将促使医学电子学进入一个飞速发展的时期。很显然,一旦有超大容量的半导体存储器问世,人们多年来渴望解决的生理信号长时间全信息记录的问题就会迎刃而解。而当计算机的运算速度与功能迈上一个新台阶后,三维医学成像技术也会有明显的突破,医生面对的将不是一系列费解的二维断面图象,取而代之的是反映人体内部组织、结构、功能的活灵活现的三维立体图象。未来这段时间里,医学电子学的研究成果将进一步揭示人体生命的奥秘,并明显提高对目前还严重威胁人类生命的心血管、脑血管疾病及癌症的诊治水平,人们的医疗健康水平与生活质量也将随之得到进一步提高。

#### 参考文献

- 1 Dubovy J. *Introduction to Biomedical Electronics*. McGraw-Hill Company, 1978
- 2 Potvin A R, et al. *Trans. on Biomedical Engineering*, 1986, 33: 1~48
- 3 Hohne K H, et al. *3D Imaging in Medicine*. New York Inc: Springer-Verlag, 1990
- 4 Peifer J W et al. *Trans. on Biomedical Engineering*, 1990, 37(8): 744
- 5 Preising B, et al. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*

- Magazine, 1991, 10(2); 13
- 6 Godik E E et al. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1991, 10(4); 21
- 7 Atkins, M S et al. Trans on Medical Imaging, 1991, 10(3)
- 8 Wood S L. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1992, 11(2); 72

(清华大学博士生导师高上凯教授撰)

**MUMPS 程序语言(M 语言)** MUMPS 是一种多途、多用户并能解释或编译执行的高级程序语言。它由美国麻省总医院首先设计并推出, 这种语言是医学领域针对医院环境特点而开发、发展起来的, 适合应用于交互式数据管理。已有迹象表明, MUMPS 将改名为 M 的语言而得到更广泛的重视。这种语言在医学领域开发医院管理系统(HIS)始终占主流地位。在用 MUMPS 作为软件开发平台实现的 HIS 中处于最成功的地位。由于 MUMPS 具开放性、标准化和一体化等优点, 体现了信息科学和计算机技术的发展趋势, 因而富有生命力, 必将在开发未来的各种信息系统中日益显示出其重要效益。

由于这种语言有很强的字符串处理功能和内含的数据库结构, 且易于学习掌握, 所以它一出现就引起各方面的浓厚兴趣, 并很快在 1977 年被定为美国国家标准第 1 种标准数据库管理系统第 3 种标准程序语言。1982 年、1984 年和 1990 年, 相继批准 MUMPS 的 3 个修改和增强的标准; 目前使用的是 1990 年 11 月 11 日批准的 X11.1/1990 新版本, 并将每隔 5 年由 MUMOS 开发委员会(MDC)继续推出新标准。MUMPS 语言在大型机、小型机、微型机上都可以使用, 现已在 200 多种不同的牌号机型计算机上使用, 可以运行在各种主要的操作系统上(例如 VAX-VMS, ULTRIX, XENIX, UNIX, IBM VM, Macintosh O/S, MS-DOS 等平台), 已被世界上上万个医学、商业、科研及教学单位所使用。由于 MUMPS 语言采用的是相同的命令、功能、操作符和数据结构, 因此用它编写的程序可以在运行标准 MUMPS 的不同计算机上转移应用, 当系统升级增大时, 它可以很容易转移到更大的机器上运行。

MUMPS 在 HIS 医院信息系统的应用是很广泛的。以美国为例, 最主要的首推在美国复员军人医疗系统(VA)中的广泛应用。该系统由美国国会拨款, 而由 VA 管理机构为其所属的 169 所医院统一购置计算机硬件, 其中包括 300 多台计算机, 12 000 台终端, 6 000 台打印机及 800 台通信连接设备。所用 HIS 软件, 则全都选用 MUMPS 语言。建立这些分布式医院计算机(DHCP)项目软件, 是以 FILEMAN 为基础的 KERNEL 软件为核心开发的, 并采取在美国东部和西部两个信息服务中心集中人员进行开发, 再下发给各医院安装使用的措施。这样, 既保证质量和统一, 又有效地集中利用宝贵的软件开发力量, 成为引人注目的成功范例。此后美国国防部、华盛顿州等所属医院也采用 MUMPS 语言建立医院信息系统, 同样获得成功。

另一个引人注目的例子, 是美国波士顿的 Brigham 和 Women's Hospital 计划把她成功运行多年的在 16 台小型机上采用 MIIS(MUMPS 语言的一种)的 HIS 系统(连接有 1 600 台终端), 改成由 4 000 台以 MUMPS 为基础的 PC 构成的网络。由于采用的是标准的硬件和软件, 因此很容易移植扩展到新环境下运转。该医院信息系统总共有 87 种应用项目, 包括有 20 000 个程序。目前已顺利完成财务出纳系统的移植工作。

与此同时, 美国 SAIC 公司计划将数以百计的 VA 各医院通过信息网络连接起来, 以使 VA 各医院的计算机化的信息集中起来, 并将这些数据在各医院中进行传送和利用。这是一个用 MUMPS 运行的新型综合医疗护理系统(CHCS), 在这个系统中将综合运用一些新技术, 如采用光笔、触摸屏显示、光学字符识别、手持式终端、语音识别、高分辨率显示器、机器人、专家系统及图像存档等。CHCS 项目将耗资 19 亿美元, 预计到 1997 年能完成 50% 安装工作量。

中国从 1980 年后即有意识开始跟踪 MUMPS 技术的发展, 并在微型机和小型机上安装和试用 MUMPS, 取得初步效果, 中国医学科学院等单位于 1987 年完成了 FileMan 软件的基本汉化工作, 随后, 北京市软件技术开发中心在第 11 届亚运会期间, 曾以汉化的 FiliMan 为基础, 成功地实现了一套亚运会医务部管理信息系统。北京地区的一些医院如中国医学科学院所属的协和医院、肿瘤医院和市人民医院, 在将 MUMPS 或 FiliMan 用于住院病房信息管理、住院病人信息统计等方面, 也取得了实用效益。

MUMPS 技术具有广阔的发展前景。MUMPS 开发委员会(MDC)正在使 MUMPS 适应新的技术方向, 使 MUMPS 继续保持其独特的性能和优点, 同时增加若干新的功能。其中包括: 建立开放系统的通讯环境, 使之能在不同系统环境下工作; 在网络环境下管理分布式数据库, 适合于在顾客站/服务器体系结构下运行; 利用 Open Mumps Interconnect(OMI)网络协议, 在不同硬件平台和操作系统间实现数据共享, 能和数据查询语言(例如 SOL)更好的结合使用; 具有良好的图形用户接口(GUI)和窗口功能、多媒体功能等用户友善界面; 发展和完善支持多国语言字符处理能力的功能等。总之, 通过进一步巩固和发展 MUMPS 特有的功能特性, 同时吸收其他程序语言的长处, 使 MUMPS 能具有更先进的程序控制结构, 更好的图形用户接口界面, 更强的面向对象的数据管理功能, 以及更通用的开簇性和网络通讯能力, 使之更好适应 Client/Server 分布数据库结构下的工作, 可以预期, MUMPS 必将会取得更可喜的进展。

#### 参考文献

- 1 王继中, 宋敬平. 国外产品与技术, 1983, 12; 70~75
- 2 王继中, 宋敬平. 小型、微型计算机系统, 1984, 1; 33~39
- 3 Uchida T Suzuki T, et al. Mug. Quarterly, 1986, 15(3)
- 4 Charles H Curtis. MUMPS Special Edition, 1990, 6; 16~19
- 5 1990 ANSI MUMPS language standard American National standard Institute, 1991
- 6 Daniel L Maloney, Ruth E. Multimedia Object File Design for Medical Images, 1991, 21(3); 57~60
- 7 Tami Winn, Marureen Hoye. Relational Features of VA File Man, 1991, 21(3); 46~51
- 8 Ruth E, Dayhoff M D. Experience with a MUMPS-Based Hospital Information System wity Images, 1991, 21(3); 53~56

(北京市计算中心王继中撰)

**医学图像** 医学图像的种类繁多, 有 X 线图像、显微图像、超声图像、核磁共振图像、放射性核素图像等。各种图像都有其特点和适用的领域, 不是其它成像技术所能代替的。由于医学图像含有极其丰富的病人信息, 因此在医生的诊断和治疗中已占有愈来愈重要的地位。医学图像技术又可分为两大部分: (1) 医学成像技术; (2) 医学图像处理技术。前者的主要任务是把人体中医生感兴趣的信息提取出来, 并以图像的形式表现出来。医生感兴趣的信息可以是形态的信息、功能的信息以及成分的信息等。图像的形式可以是二维的、三维的以及四维的。医学图像处理技术的主要任务是在获得医学图像以后对它进行分析、识别、分割、解释和分类, 以把某些部分增强或提取某些特征。有些场合中成像过程和处理过程也可能是结合成一体的。

早期的医学图像基本上是靠肉眼观察、照相所得到的一些表面的图像。在医学图像的历史上两个早期的重要发展是 X 线和显微镜。因为这两项技术的出现使得医生能观察到以往肉眼所无法观察到的活体的宏观结构和微观结构, 从而对放射医学和生理病理学的发展产生巨大的影响。但是, X 线直接成像所得到的图像实质上是三维结构在二维平面上的投影, 因此各种结构重叠在一起, 使得对图像的理解和分辨较为困难。

20 世纪 70 年代后期, X 线计算机断层成像技术(CT)的出现医学图像领域引起又一次革命, X 线计算机断层成像克服了

常规 X 线透视图片中结构重叠的问题,可以得到指定人体内部单一层面的结构形态的图像。

整个 80 年代是各种医学成像技术蓬勃发展的阶段,除了 X 线以外,超声、磁共振、正电子、单光子等的断层成像技术和设备大量出现,这些方法各有所长,互相补充,能为医生作出确切诊断提供愈来愈详细的和精确的信息。例如放射性核素成像,尽管它的图像分辨率低,但它是组织化学成像,特异性高,对早期诊断十分有用。显微图像是进行细胞水平研究最重要的方法。从成像技术的发展来讲,目前临床应用最为成熟和应用最广(医院中全部图像的 80% 为各种 X 线图像)并且有重要发展前途的技术主要为 3 大类: X 线成像技术、磁共振成像技术和超声成像技术。除此以外,新的成像理论和技术的研究亦将对医学图像的发展带来新的前景。下面分别加以概述。

目前医学成像技术研究中解决的最主要问题 目前医学成像研究工作主要是重建图像的精度、速度以及新的成像原理。

(1) 20 世纪 70 年代末到 80 年代初,有关 CT 图像重建的理论研究曾十分活跃。但随目前形式的(基于 Radon 变换—反变换的投影—卷积分—反投影法)CT 扫描的完善,图像重建理论的研究趋于低潮。但是,现在图像重建理论所得到的图像在质量上不能令人满意。图像重建的一种新的观点是,图像质量的一个重要指标是图像分辨率,重建图像的像素数(决定分辨率的)是重建过程中要确定的未知变量数。由扫描仪所获得的实测数据(称为投影数据)为求解重建图像的已知条件。图像重建基本上是根据投影数据求解像素的未知变量(灰度值)。用各种方法重建的图像一般都不是原图像的精确复原,而只有逼近原图像的好坏之分。最近几年的研究资料表明,采用图像质量的多个准则(如投影数据之间的最小二乘误差,全局平滑性和局部峰值性等)来重建图像,能使图像的质量有大幅度的提高,重建图像的投影数据与原数据之间的误差可以比投影—卷积分—反投影法小到 2 个数量级。目前进行的各种其它原理的图像重建研究也都存在这种情况。把多目标优化理论运用到图像重建上为高质量图像重建开辟了一条新的途径。

从少量投影数据中提取其隐含的图像信息具有特别的重要性。一方面因为在许多场合要得到充分的投影数据是不可能的或极其困难的,如只能从有限的角度探测对象物,或对象物是在迅速运动着的,如心脏。另一方面,如果能够用较少的投影重建出满意的图像,就能够发展低价的 X 线 CT 扫描仪。在投影数据少的场合可以有无数个重建的图像都能满足已知投影数据,所以必须增加其它的约束条件才能进一步区分重建图像的好坏。这种约束条件通常就是对重建对象的先验知识。因此,基于知识少,投影数据的图像重建是当前图像重建理论中的一个重要方向,双平面血管网的三维重建就是一个例子。

(2) 图像重建涉及到大量数据的运算,如果不能很快地得出结果(最好是实时),则其实用价值就不大。主要有两方面的研究工作,一是新的图像重建算法,多准则优化的图像重建算法已显示出有巨大的优越性;二是采用大量的并行运算机制,人工神经网络技术已显示出有取得突破的可能。

(3) 新参量成像理论的研究。受 X 线 CT 成像所取得的巨大成功的影响,各种新参量成像理论的研究蓬勃发展,其中包括微波成像、阻抗成像、电磁成像、超声中的声速、声衰减、散射系数等。与 X 线 CT 成像一样,在各种新参量成像理论的研究中除了要找出参量与检测数据(投影数据)之间的函数关系以外,还要考虑到有足够的投影数据、有合适的图像质量准则,才有可能获得一定质量的图像。

#### 医学图像处理的研究

(1) 图像处理技术:医学图像处理的目的是对医学图像进行分析、识别、分割、解释、分类、压缩等,以把医生感兴趣的部分提取出来。图像处理方法的种类繁多,但对于医学图像来讲,最重要的是研究、发展知识的图像处理技术。一般图像是以前所包含的信息丰富著称的,本来在进行机器识别时就已十分困难,而医

学图像因人体的差异性和模糊性而使问题进一步复杂化。在神经放射学诊断、放射治疗计划以及神经外科等临床学科中,以往的计算机视觉研究系统都因精确度、速度以及可靠性不够而失败。这在很大程度上是由于它们没有考虑到有关图像的特殊性质所致。

知识的图像处理有多种知识来源,如临床知识来源、解剖学知识来源、成像技术知识来源以及统计知识来源。

模糊处理技术在医学图像中由于噪声、部分容积效应、运动伪像等成像中的问题,以及分割算法不完善和知识模型的含糊性,使得作二值决策几乎是不可能的。因此,模糊的谓词、模糊的分割、模糊的匹配以及模糊集团的搜索等是医学图像处理中的重要技术。

人工神经网络技术。经过训练的神经网络本身就是一个具有某种知识的系统,它在模式识别上具有特别的优越性。因此,应用于识别医学图像中细小的病灶非常有吸引力。如肺癌的治愈取决于它的早期发现,那时肿瘤还是细小的和局部的。目前有人采用前馈多层感受元网络来寻找数字化胸片图像中圆柱状的结构,取得优于常规处理方法的效果。

(2) 三维图像显示技术:目前计算机断层成像的种类已经愈来愈多,从 X 线 CT、磁共振 CT(MRI)到正电子 CT,它们都产生二维的横截层面的序列。目前分析这些图像的方法主要是依次地观察各单独的二维层面而由观察者构想出三维的相互关系。这无疑是十分困难的任务,特别是当感兴趣的对象物具有复杂的立体形状时医生就更显得无能为力。

将 CT 扫描所获得的数据和信息用计算机重新形成解剖学的三维透视显示将彻底改变这种被动局面。这一技术在医学诊断、颅面外科、整形外科、关节修复、放射治疗计划等许多临床领域已经证明是极其有用的,而且在医学教学中亦有重要的作用。

不同的断层成像技术,如 X 线 CT、MRI、PET 等都各有特点,各带有不同的生理的、病理的、功能的或解剖学的信息。有不少场合希望能同时看到不同类型断层像的信息,这就需要把几种不同来源的三维容积图像进行配准。有时对不同时间、同一来源的图像要加以比较也有配准问题,例如对一个肿瘤在不同时间的容积和形态进行定量的比较。三维配准至今还没有自动的方法,甚至还没有半自动的方法,如不能找到高效的匹配算法,则单是所需的计算时间就会使其难以实现。目前基本上还是使用人工来规定相应图像中的界标,然后根据界标计算出配准的空间位置。而且配准处理还仅限于刚体,也就是只可能有线性失真(比例因子,平移和/或旋转)。这是今后需要进一步研究的问题。

如何显示一个物体的表面是三维显示技术中的一个基本问题。其中包括图像中感兴趣物体的确定和真实感的三维物体显示。已经发表大量各种离散数据三维成型的算法,如深度梯度明暗显示算法、灰度值梯度明暗显示算法、透明灰度值梯度明暗显示算法等,研究结果表明,对不同的器官,各种算法的视觉效果是不一样的。

(浙江大学吕维雪教授撰)

**超声医学** medicine of ultrasonography 它是声学、医学和工程技术相结合的学科。它包括超声诊断学、超声治疗学和生物医学超声工程学 3 个部分。凡研究高于人耳听阈声频率(20~20 000Hz)的声学技术在医学领域中应用的科学,统称超声医学。

超声诊断学在现代医学 4 大影像诊断(X 线 CT、同位素扫描、磁共振、超声诊断)中较为突出。它是研究和应用超声波的良好指向性、遇界面发生反射、在组织中吸收衰减以及遇运动界面产生多普勒效应等物理特性,诊断人体组织器官疾病的方法。通过不同类型的超声仪器,将超声波发射到人体内,超声波即在组织传播。当不同组织的声阻抗差  $> 0.1\%$  时,它们所构成的界面即可导致超声波束发生反射、折射和散射。将此反射信号接收并进行后处理,再将其显示于监视屏上。依据回声的共性、

特异性,结合人体生理、病理、解剖及临床资料进行综合分析研究,继而对人体组织结构、功能状态作出判断。由于其检测范围广泛,符合率高,对人体无损害,无痛苦,而且重复性好,已成为临床不可缺少的主要检查方法之一。

1942年,奥地利K. Dussik首先使用A型超声仪探测颅脑。其后,又有人使用A型超声仪对胆囊、乳腺、子宫和胎儿以及视网膜进行探查研究。1952年,美国Howry等开始研究B型超声显像法,成功地获得乳腺的二维超声回声图。1954年,瑞典EDler首先应用超声光点扫描法诊断心脏疾病,报告了二尖瓣狭窄的特异性回声图,谓之M型超声心动图。1956年,日本里村茂夫首先将多普勒(Doppler)效应原理应用于超声诊断,亦即连续波式多普勒D型超声诊断技术的开始。1969年,美国Boker研究出脉冲波式多普勒技术。1976年后,挪威Holen, Haltle及Angelsen先后将连续波式多普勒技术与流体力学理论应用于心脏狭窄瓣膜的跨瓣压力阶差和瓣口面积测量,开创了多普勒超声心动图定量诊断时代。1982年,日本Namekawa和美国Bommér等应用自相关和伪彩色编码技术,将多点选通式多普勒获取的血流信息以颜色显示出来,研制出彩色多普勒超声诊断技术,为心血管疾病的诊断开辟了新的途径。

超声诊断在中国起步较晚。1958年,上海第六人民医院首先使用脉冲式A型探伤仪,对肝、胃、乳腺等脏器进行超声探查。1962年,郭祥惠、郭万学、朱世亮等应用A型超声仪诊断肝硬化、肝脓肿及肝癌。1964年,周永昌、王新房报告用超声仪探查早期妊娠及胎心。1978年后,二维实时超声诊断技术开始应用。1985年,彩色多普勒技术在中国兴起,二维超声诊断趋于普及。

表1 超声诊断的种类

|              |                |
|--------------|----------------|
| 一、反射法        |                |
| (一)脉冲式发射反射法  |                |
| 1. 超声示波法(A型) | 3. 超声光点扫描法(M型) |
| (1)单项示波法     | (1)单通道法        |
| (2)双项示波法     | (2)双通道法        |
| 2. 超声显像法(B型) | 4. 超声频移法(D)型   |
| (1)慢速成像法     | (二)连续式发射反射法    |
| ①手控式         | (三)连续式超声频移诊断法  |
| ②机械式         | 二、透射法          |
| (2)快速成像法(实时) | (一)超声全息法       |
| ①机械式         | (二)超声摄像法       |
| 扇形扫描法        | (三)超声CT        |
| 方形扫描法        | (四)超声显微镜       |
| ②电子式         | (五)其他          |
| 线阵方形扫描法      |                |
| 相控阵扇形扫描法     |                |

超声诊断种类很多(见表)其中,最常用的按超声回声方式不同分:(1)超声示波法,即A型诊断法。此法将回声以波的形式显示于示波屏上,回声强则波幅高,回声弱则波幅低,称波幅调制型。横坐标代表回声的时间(距离),纵坐标代表回声的强弱。由于缺少直观性,使用渐少。(2)超声显像法,即B型诊断法。此法将回声信号以光点的形式显示于示波屏。回声强光点亮,回声弱则光点暗,光点随探头(换能器)的移动而变化,称辉度调制型。由于连续扫描,可将点、线扫描构成脏器的剖面图像,即二维空间显示,又称二维超声扫描法。根据成像速度和扫描方式不同,分为慢速成像、快速成像以及手控、机械和电子成像等。(3)超声光点扫描法,即M型诊断法。它是在辉度调制型中加入慢扫描锯齿波,使回声光点自左而右自行移动扫描,属B型的特殊显示方式。纵坐标代表超声传播时间,其回声代表距离,横坐标代表光点慢扫描时间。两坐标构成时间位置曲线图。常用于探查心脏,通称M型超声心动图法。(4)超声频移扫描法,即D型诊断法。此法应用多普勒效应原理,将探头与扫描物之间的相对运动产生的多普勒频移检出,获得多普勒信号音频和频谱,频移的程度与相对运动的速度成正比。用于探测血流方向、速度及性质,对心脏及血管的血流动力学提供定性、定量诊断。

超声医学的应用广泛。但1975年以前,由于仪器技术条件所限,应用范围和诊断水平受到一定限制。1978年前后,由于二维超声诊断技术不断引进,才得以迅速发展。以往临床难以发现和不能确诊的疾病,得到早期发现及确诊。其中,风心病、先天性心脏血管畸形、心脏粘液瘤、心脏瓣膜腱索断裂、肥厚性心肌病、二尖瓣脱垂、左室条束及心脏肿瘤等,超声检查均能提供特异性诊断。由于连续式的、脉冲式的和彩色的多普勒技术的应用,对分流性的、返流性的血管畸形和胎心的血流动力学变化,以及肝、脑、肾及浅表血管的血流探测,超声诊断都具有其独到之处,基本取代了心导管检查。超声检查亦可清晰显示胆囊、总胆管、肝管、肝内胆管、胰腺、肾上腺及前列腺等。对早期发现肝占位性病变的检出已达1~0.8cm水平。对体腔积液和囊肿的物理定性及其数量、体积、部位的确认较准确。对各种管腔内结石的检出率,均高于传统检查方法,而且检查迅速,重复性好。妇产科方面,它使以前难以明确的问题得以解决,如胎盘的定位及其成熟度、羊水测量、胎儿发育情况及有无畸形等,均能及早作出明确的诊断。眼科方面,在玻璃体混浊情况下,可显示视网膜及球后病变,眼内非金属异物的确认和定位,超声检查均可确认。由于介入性超声技术的发展,以及体腔探头如食道探头、胃及十二指肠探头、阴道探头、宫腔探头、直肠探头、尿道探头和术中探头的应用,更扩大了超声医学的诊断范围,诊断符合率亦相应提高。

超声治疗是应用超声波作用于机体达到治疗疾病目的的超声疗法。研究超声波对人体组织的作用机制、应用方法、作用强度、操作技术、适应症和禁忌症的科学,称之为超声治疗学。按照治疗剂量大小分为一般剂量疗法(3W/cm<sup>2</sup>以下),如连续式疗法或脉冲式疗法、超声-电疗法、超声药物透入、超声雾化吸入等。大剂量疗法如超声波体外碎石、超声加热治癌、超声手术刀等。

生物医学超声工程学包括医用超声仪器的研制和超声生物学基础研究两个方面。

超声医学发展的50年中,前20年发展缓慢,后20年则发展迅速。其趋势由静态图像向动态图像发展,由黑白图像向彩色图像发展,由二维图像向三维图像发展,由沿用多年的超声反射法向透射法发展。三维空间的立体超声已开始用于临床。如(1)全息超声。利用超声透射法原理,将两束频率相同、相干性能好的单频超声波,一束穿透被测器官后投射在油槽液面上,另一束直接投射到液面上。两条声束在液面上形成干涉条纹,用激光扫描液面,通过电视或摄像,显示三维动态图像。(2)F型超声。为曲面显示,由多个切面像构成一个曲面像,近似三维图像。(3)超声CT。利用透射原理,应用计算机技术的超声切面显像法。使超声波穿透组织器官后,在不同方位上作一系列切面投影,将组织器官对超声波的吸收系数通过数字处理,取得分布信息,重建声像图。也有应用反射法原理,将回声信号经过计算机处理后重建图像的。在超声仪器换能器技术方面,1988年美国ATL公司首先研制出数字声束形成器,取代了传统的模拟/数字(A/D)混合成像技术的模拟声束形成器,使声束的形成、信号的传播和图像的显示,全部用数字控制,其分辨力和精确度都显著提高。

超声仪器也具有难以克服的局限性。由于穿透力弱,对骨骼及含气脏器如肺等难以探查。对成人头颅的扫描也逊于X线CT或核磁共振。即便是全息超声,对深部脏器仍不能穿透。现今超声仪器的原理,仍主要为超声波在人体组织传播中遇界面产生反射的物理特性。而超声波在反射时往往发生多次重复反射,加之旁瓣干扰,常常导致伪反射现象,造成假阳性或假阴性,给诊断带来困难。因此,研究超声透射法及新的成像技术,仍是超声医学的重要课题与发展方向。

#### 参考文献

- 1 周永昌,郭万学. 超声医学. 北京:科学技术文献出版社, 1992. 1~8
- 2 Neil E. Brrrncfern, American Hearse Jowrnd, 1993, 126(1): 251~257

(安徽医科大学第一附属医院赵强教授撰)

**超声诊断仪技术及其临床应用** 现代超声医学诊断仪器以其临床特有的功效受到医学界的重视。全新的计算机处理软件、细腻的图像显示、数字式多普勒检测技术、全身彩色多普勒系统、先进的介入性超声装置,为临床诊断开辟了广阔的发展前景。

**超声三维显像技术** 超声三维显像技术已临床实用,使超声检查进入一个新阶段。

1. 彩色三维经颅多普勒血流检测技术。EME Train-scan 彩色三维 TCD 仪,采用独特的颅脑血管扫描技术,同步对颅内血管的 X、Y、Z 三维空间坐标参数进行检测并输入计算机,在计算机中重建颅内血管三维超声动脉分布图。并用彩色编码标明三维超声动脉图中每条血管的血流方向和血流速度,从而显示出 Willis 环及其分枝的完整脑动脉模拟图和相应的血流动力学参数;亦可在三维脑血管图上任意一点取样,进行 FFT 频谱分析,并对贮存的原始数据进行多种分析。探头的超声频率有 2MHz、4MHz 和 8MHz 几种。

TCD 技术是借助脉冲多普勒(Pw),经特定的头颅窗直接描记颅内血管的多普勒回声信号,以获取 Willis 环及其分枝和椎基底动脉系统血流动力学参数。进而对颈内动脉颅内段(ICA)、颈动脉虹吸部(CS)、大脑中动脉(MCA)、大脑前动脉(ACA)、大脑后动脉(PCA)、前交通动脉(ACoA)、后交通动脉(PCoA)、眼动脉(OA)、椎动脉(VA)、基底动脉(BA)等颅内血管的血流变化进行分析评价,为脑血管疾病提供诊断依据。

TCD 技术在神经内科,外科,心血管外科,矫形外科,重症监护、脑血管病流行病学研究有广泛的应用价值,受到超声医学界的重视。

2. 全自动三维超声扫描和三维图像存贮重构。具有三维空间超声技术的 Combison330 仪,可以显示普通声像技术无法显示的超声图像。3 个切面(纵切面、横切面、水平切面)的数据可同时测定,对空间(三维)所有平面(二维)的结构图像进行分析,使人体受检脏器的解剖学分析更加完善。

采用锥型三维空间扫描波来获得全方位信息。先用普通实时超声扫描方式对所需了解的解剖部位定位,探头定位后,将其位置固定并按一指令键,即可自动对这一空间进行扫描,同时将全部超声信息存入特殊的三维图像存贮器。(1)矢状面定位。扫描空间内矢状面,冠状面和横切面 3 幅图像可同时显示。(2)冠状面定位。应用 3 个位置控制旋钮可将三维空间中任一截面的图像移至所需观察的位置,当移动某一截面的图像时,其空间位置可由其他两个切面图像中的参考线加以显示。

#### 横切面定位

由于所有 3 个截面的图像均可分别定位并同时显示,因此可对所需观察的部位在 3 个互相垂直的切面上进行图像分析。可配多种探头,检查深度、帧速率和线密度能最佳化自动适应。

**体腔内探查技术** 近年发展起来的体腔内检查专用扫描探头,采用 5MHz、7.5MHz 的超声频率,取得了常规体外扫描所不能达到的效果。

1. 经食道 Bi-Plane(双平面)探头实时显像。近来不受肺组织和患者体格影响的一种新的检查方法——经食道扫描法,已在许多高档彩色超声显像仪中作为标准配套应用。它能够作出从体外扫描所无法作出的诊断。经食道扫描法的应用特点是:(1)能观察主动脉弓,适用于诊断动脉瘤。(2)能在诊断食道静脉曲张时发挥作用。(3)能在开胸手术中监控心脏。(4)显示三尖瓣狭窄更为鲜明。(5)采用很高的频率超声波扫描,图像极清晰。

一只(双平面)食道探头具备二维超声显像,高重复频率(HPRF)脉冲波多普勒、彩色多普勒的所有检查功能,其图像分辨率、清晰度、信噪比等都优于体外一般扫描检查。双平面检查可在同一屏上同时显示纵切面和横切面两幅实时图像,以利益观察比较。

2. 体腔内用双相探头以及可调扫面实时显像。一只直肠探

查的腔内探头,它不仅形体小,并能同时进行纵截面和横截面两个方向的线阵、凸形扫描实时观察,以观察前列腺和膀胱,并可对会阴部进行穿刺检查(加附件)。

还有一种双焦点多平面直肠探头(可旋转/摆动扫描)。它既可旋转 360°扫描,也能在扫描的任一位置定位,作横断面和纵断面 90°扫描。两片 7.5MHz 的探头晶片具有不同的聚焦深度。更适合摄取扫描平面的最佳图像。

**高精密度二维成像技术** 现代超声诊断仪致力于提高二维图像的信息密度、信息的瞬时特征、成像的高速率及血流动力学参数的完整性等,为临床提供丰富的超声信号数据,以便作出准确的诊断。

1. 高精密度探头。高精密度探头振子数目为以往的 2 倍。以凸阵探头为例,常用的凸阵探头振子数为 96 个,高精密度探头振子数达到 192 个,在相同尺度的晶片,振子数增加,其振子间隔便小,它可保持超声波射束间隔的致密,超声波束就增加,一幅图像的信息量更为丰富。射束间隔紧密,超声波无论在发射接收时,都能实现准确的聚焦状态。通过紧密振子间隔,还可按预定深度而取得适当的口径来进行波束聚焦,而对描绘出表浅部位的组织更为精密的图像。

2. 双密度扫描和双重接收(同时并列接收)技术。在电子扫描系统中,超声波束的发射接收通常方式是由电子开关控制换能器振子的组合依次按顺序发射/接收而组成图像。因此,发射扫描线的数目由换能器振子数目决定。现代超声诊断仪采用 1/2 节距接收克服了这一限制。由同一组合中的每个振子可通过控制接收回声的口径对同一振子组合而接收到 2 条回声信息波束。这种图像效果即在相同的发射振子时,扫描信息线密度增加了 1 倍。

在电子扇形扫描中,通常是发射 1 次可接收到 1 条反射回声信息线。由于完成 1 次发射/接收需要一定的时间(取决于扫描深度),所以成像速率受其限制。而采用双接收技术即同步并列接收方式,可在同一时间同时接收两条回声信息,在扫描深度相同、每帧线密度也相同时,完成 1 帧图像的时间便缩短了一半,即相当成像帧速率提高了 1 倍,有利于实时观察。

**多种图像显示技术** 多种图像显示新技术为临床提供更详细、多方位或特定时刻的诊断信息,便于分析对比,有利于提高诊断的准确性和全面性。

1. 两种不同扫描方式,同一脏器纵断面、横断面同步实时并列显示。现代超声诊断仪克服了常规检查中在同一时刻只能使用一个探头扫描一个二维图像的限制,可以同时采用两个探头(一个线阵或一个凸阵)同步实时扫描两幅二维图像并列显示出来。

两种不同频率的扇形(或凸形)探头对同一脏器可同时扫描纵断面和横断面的实时图像并列显示之,可从两个正交方位观察同一病变,为临床分析提供可靠的数据。

2. 实时全景/变焦和电影式回放显示。现代超声诊断仪可任意移动断层和彩色血流图像的显示位置或者将局部图像放大以利观察细节而不降低其实时性能,这就是实时全景/变焦距功能,对感兴趣的部位进行详细诊断的显示方式。电影式回放是采用大容量存贮器对回声数据连续存贮和动态图像的重复检索显示。根据诊断的需要通过检索功能,可以任何所希望的速度取出已存贮的图像或翻转图像或静止图像。对成人和婴幼儿患者心脏的快速运动进行慢速观察十分有用。回放图像最高可达 128 帧。对 M/D 型的回顾可达 40s,这种超长 M 图像记忆以及心电 R-R 波自动重演是分析超声数据的有力手段。

**全数字电脑应用技术** 电脑超声图像技术对超声束通常采用模拟或模拟/数字混合计算机控制,对提高超声图像质量起到重要作用,但模拟处理超声信息其精度仍受到一定限制。数码式电脑超声图像技术采用高速全数字式电脑,对声束的形成与处理可达到更精密。声束的形成和传播是由数字控制,声学透镜的尺寸和形状灵活可变,使声束的偏转和聚焦获得较高的精度,不会将噪声引入信号,在高动态范围中有更好的对比分辨率和多普勒

灵敏度。全数字式电脑超声系统更新性强,重编程序(更新软件)可增加新的功能。数字式电脑超声具备许多独特的性能,是现代超声诊断仪发展的重要途径。电脑在现代超声中的深入应用,为超声诊断的进一步提高提供了尖端的技术基础,若没有先进的电脑技术,就没有今天高档的超声仪器。今后超声诊断的发展在定量化方面将会是高级电脑化、自动识别组织特征的诊断设备。

**彩色血流显像多功能超声诊断系统** 多功能彩色血流显像(CFM)诊断仪可检查全身循环系统的血流动力学参数和脏器结构的清晰二维图像。声束与组织垂直调节,彩色血流与声束平行、多普勒采样线与血流速度夹角等可通过计算机软件来自动选择和测定。泰索尼 spectra 采用全频率数字化多普勒技术,具有16比特A/D转换器、连续可变壁滤波器、6个用户可控信号处理器等特点,能最大限度获取血流状态及管壁结构形信息,可准确测量最高峰值血流速度。最低血流速度测量方面已达到0.5cm/s,最小血流直径可测到0.5mm。对彩色流作定量化处理,为临床应用提供了可靠的数据,对提高诊断病变的准确率和判别病变的性质、鉴定特定组织的组织特征有重要意义。如检查肿瘤血流,可鉴定肿瘤的良好或恶性,以及肝功能诊断,对肾血流进行肾移植后的观察等。

**介入性超声系统** 介入性超声(IVUS)是一种新的、更具揭示能力的超声诊断仪,它采用导管式换能器,提供人体腔内360°扫描的极高分辨率实时图像。它是先进的计算机处理技术与高频超声技术相结合,能显示血管壁层及其损伤的细微结构,(这是X光检查或常规的超声检查无法达到的)对判断血管梗阻的性质和严重性以及选择合适的治疗方案时都有重要价值。在介入性治疗后显示血管壁的治疗效果,帮助辨认血管壁分离、碎片或瓣。介入性超声与介入性检查相结合,成为传统诊断和治疗过程中不可缺少的先进超声诊断设备。达到检查和治疗的一致。泰索尼IVUS是一种先进的介入性超声系统,具有优良的图像质量和最先进的导管系统。它的Sonicath专用影像导管特别为冠动脉、外周血管系统及泌尿系统而设计。IVUS是以多频图像为特征,对各种临床情况都可选择最佳的穿透力和分辨率,其临床应用有着广泛的前景。可对冠状动脉,外周血管及无血管区(如尿道,前列腺,膀胱和胃肠)等的介入性检查。

**管腔内超声技术** 管腔内或血管内超声技术是今天微型技术与高频超声换能器技术相结合而发展起来的一种新的诊断技术。对病人的处理增加了重要的临床信息,其特点是将换能器置于导管装置末端,发射并接收高频超声,高频超声的应用范围可宽达10~40MHz,形成有关组织和病变界面的360°横切面灰阶图,为医生提供诊断分析和指导治疗的依据。血管内图像可使医生对感兴趣的和有价值的病变区域进行评估,它包括(1)组织和斑块的形态,(2)血管尺寸、形状和厚度,(3)血管病变、溃疡、血管壁分离和瓣片情况,(4)心脏内结构,如瓣膜、瓣口,(5)外血管结构,如尿道、膀胱和胆道系统等,并可作为选择介入性装置的指导和介入性处理后疗效评价。

血管图像系统由(1)用于导管图像输入的换能器和(2)电子成像系统两个重要部分组成。目前有3种不同的结构和技术用于管腔内图像,它们是:(1)机械旋转式单晶片换能器,(2)机械旋转式单晶片带镜换能器,(3)电子旋转式多晶片阵列或换能器。导管选择尺寸范围从3.5French到9French(French—法兰西制,导管大小的一种单位,1mm 3French,即1F 0.33mm直径)。血管内超声技术优于血管造影术,它能提供高分辨率的有关血管壁和外周组织的实时切面图像的细节,其决定梗阻的性质和严重程度是很有价值的。目前介入性技术包括:(1)经皮穿刺血管成形术(PTA),(2)经皮穿刺冠状动脉成形术(PTCA),(3)动脉粥样硬化切除术,(4)激光治疗,(5)超声切除术,(6)保证血管开放的斯坦特固定模插入法。

血管内超声技术有着丰富的临床应用潜力,该技术能观察到血管的狭窄及其在血管内有关部位的情况,为医生提供选择治疗方案的指导和最终处理结果的评价,对介入性治疗方面,介入

性超声技术无疑是一种令人振奋的技术。

超声诊断的迅速发展给超声工程技术不断提出了新问题和新要求,而超声诊断仪器新技术的开发又促使超声临床诊断的向更深入、更客观、更科学化方向高速发展。现代超声诊断仪新技术以全数字化电脑技术在超声仪器中的深入应用为新的发展起点;以多功能彩色血流显像设备的综合高档机型为代表;以导管或血管内超声的介入性超声系统为微型、高频技术结合开拓新的应用范围;以组织定性鉴别,血流定量测定等定量化诊断为目标的先进超声设备正在为超声临床诊断提供广泛的应用并取得了积极的诊断成果,为世界超声医学的发展作出了重大的贡献。

(中国医学科学院基础医学研究所袁光华撰)

### 血液流变学的基本原理与休克

健康人从幼到老的生中,生化与血液流变学参数的变化是很小的,仅在发生病变时才出现明显的改变,通常在发生疾病可以用经典的方法鉴别之前,存在着一个孕育阶段,亦即从量变到质变的变化过程。疾病的历程始于孤立的症状与体征,随后在某些器官或特定的解剖部位出现一群症状与体征,此时仍不能按经典命名法给其以命名,最后则进入特定的疾病状态。血液粘滞诸因素的升高,则是很早出现的先兆,它的出现足以使医生采取进一步的诊断及/或预防的措施。

流变学是研究物质流动与变形的科学。专门涉及血液与血管的流变学分支则称为血液流变学。它又分为分子血液流变学和临床血液流变学。前者研究血液或血管中分子结构、胶体结构或细胞结构与变形之间的关系,后者主要涉及患者与疾病的流变学问题。

从整体水平或细胞水平来看,休克基本上是一种流变学变化现象。因感染、创伤或出血导致的红细胞聚集、淤血、血小板聚集、酸中毒、缺氧等,均能通过控制流变学诸因素而得到成功的治疗。血液流变学变化与休克的发生与发展具有密切的关系。

#### 有关血液流变学的几个基本概念

(1)片流或层流:实际液体能相对压缩并有内摩擦力,故实际液体是有粘性的。当液体在管内平行流动时,液流可以分为许多层,称为片流或层流,而紧靠管壁一层液体分子与管壁分子之间有吸着力,故流速为零,液层与液层之间产生一种相对运动,即流速小的一层给流速大的一层以阻力,流速大的一层给流速小的一层的以拉力,结果使各层流速不一致,其剖面呈抛物线。在流速快慢不同的两液层的接触面上出现的力叫内摩擦力。液体只有在克服了内摩擦力后才能流动,克服内摩擦的力称为切变应力。液体在这种大小相等、方向相反的平行力作用下所产生的形变叫切变。液体形变的速度称切变率,即指两液层间流动速度,变化的快慢又称速度梯度,单位为cm/s,cm。切变应力的大小取决于两液层接触面积的大小和液层间流速变化的快慢。牛顿粘度定律为:

$$F = \eta \Delta S \frac{\Delta V}{\Delta X}$$

$$F = \text{切变应力(即内摩擦力)} \Delta V \quad \text{为速度}$$

$\eta = \text{粘度系数}$   $\Delta X$  为两液之间的距离  $\Delta S$  为两液层接触的面积

(2)粘度,液体具有内摩擦力的这种性质,称为粘度或粘滞性,粘度的标准单位为0.1Pa·s,0.1Pa·s的粘度指:切变应力为0.1Pa时,引起切变率为1[秒]<sup>-1</sup>的粘度,单位为0.1Pa·s。临床测定液体的粘度,多采用测定与水的流速相对的粘度,就是与20℃水的粘度0.01泊相比,而不是其绝对粘度。血液内含有不对称高分子,其粘度随切变率的变化而变化,称为非牛顿液体。尽管毛细血管网是由小血管串联和并联组成,同时血管壁有弹性,血流有搏动,血管口径经常变化,血液处在复杂的生物学环境,但总体说来血流量与压力差呈正变关系,与粘度和长度呈反变关系,因而常用泊肃叶公式来说明机体控制毛细血管血流的诸因素。



(3)聚集:系指包含若干粒子的可逆性结构,如红细胞聚集。血小板聚集多为若干血小板构成的不可逆集合体。

(4)红细胞刚化:由于多种生物化学变化如渗透压改变、酸中毒、血钾过高及磷酸盐过多而引起红细胞的皱缩、肿胀、球形变而损害红细胞的流动性曰红细胞刚化。

**血流变学现象概述** 血液中的含铁大分子血红蛋白是携氧的载体,它增加了血液携氧能力,但对其流动有不利的影响。无核而又具有高度可变形的红细胞,既是氧运载体系统进化史上的最佳产物,又使血液流度的受损程度降到最低点。机体内的毛细血管总是环绕着红细胞生长的,由于红细胞良好的可变形性,人类的毛细血管细小得多。红细胞内高浓度的血红蛋白,纤细的毛细血管,以及密布的毛细血管网,使组织内的氧从毛细血管至需氧细胞的供应大大改善。纤细的毛细血管同时也给血管的阻塞带来了固有的危险性。当血流减慢,血管内皮肿胀或者红细胞刚化时,有可能导致血管的阻塞,最终有可能造成不可逆的血管完全阻塞。在大血管中,血流减慢可以明显降低血液原有的流度,红细胞可形成初级聚集,最后可生成三维网状聚集。

血液流变受血管平滑肌舒缩的控制,即使在没有神经的支配下,平滑肌仍可以处于一种收缩状态,钙离子可以激活平滑肌中的收缩装置,血管平滑肌的紧张度可以在力学激活(如血管内压力升高,平滑肌缩短)或化学失活(如乳酸、钾离子、磷酸根离子积累使血管平滑肌处于舒张状态)等多种状态下改变。这些改变受到局部的及机体的激素以至植物性神经的调节。此外,血细胞的流变性质,如白细胞对流动较大的障碍和带有危险的催化酶,使它在流变学中的作用大于红细胞。血管外机械因素的影响如器官实质肿胀或胞间隙水肿,心肌、骨骼肌收缩使毛细血管压缩导致灌注紊乱。

#### 影响血液流变学的因素

(1)红细胞压积(HCT):在影响血液粘度的众多因素中,红细胞压积是重要因素。其正常值为40%~50%。在40%以下对血液粘度影响不大。当大于50%同时出现切变率低时,血液粘度明显增加;当HCT达80%时,红细胞聚集,血液几乎完全丧失流动性。

(2)红细胞的变形性:红细胞呈双凹盘形,除与营养物质和气体弥散有关外,还使其具有表面积大和容量小的特点。表面积与容量比例大,则变形能力大。红细胞的变形与细胞膜的结构和细胞内能量代谢亦有关,这种膜的结构和功能维持需要ATP。ATP缺乏, $K^+-Na^+$ 泵失灵,钠与水进入细胞红细胞肿胀、变圆甚至破裂。ATP降低,也影响 $Ca^{++}Mg^{++}$ -ATP酶的作用,使 $Ca^{++}$ 在细胞内大量蓄积。 $Ca^{++}$ 促使膜蛋白溶胶变成凝胶,细胞膜增厚、变硬,红细胞变形能力降低。此外,红细胞的变形还与其内部的粘度有关,诸如血红蛋白的理化性质、温度、 $H^+$ 浓度及渗透压的改变,尤其是 $H^+$ 的改变,导致 $Cl^-$ 进入细胞,水也随之入内,使细胞肿胀变圆甚至破裂。更重要的是红细胞形变决定于血浆粘度与红细胞内部粘度之比。当 $H^+$ 浓度恒定时,红细胞的形变随血浆粘度增加而增加,血浆中加入右旋糖酐巨球蛋白或纤维蛋白原时,均可使红细胞变形能力加强。但如有 $H^+$ 浓度及渗透压改变时,则可通过红细胞内部粘度增加而使变形能力减弱。红细胞的不可变形性,对于细小的营养性毛细血管灌注是极其重要的。

(3)血浆粘度:血液粘度包括全血粘度和血浆粘度,是血液流变学的重要参数。近年来的研究资料表明,降低血液粘度或血浆粘度已成为改善和纠正微循环障碍和DIC的重要途径。

血浆粘度主要取决于某些高分子量的不对称蛋白质分子的含量,包括白蛋白、球蛋白、纤维蛋白原、 $\alpha_2$ -巨球蛋白、免疫球蛋白M及G。这些蛋白质的浓度往往随机体特定的免疫状态而有相当大的变化。血浆粘度在很大程度上取决于体内水的含量。当脱水症状发生时,血浆粘度可有大幅度升高。正常血浆于37℃时的粘度约为同样温度下水粘度的1.5~1.8倍,也可以说血浆的流度为水的55%~66%。由于血液是众多血细胞在血浆中的一种悬浮液,这些细胞对于层流具有干扰作用,因此血液粘度高

于血浆粘度。在大血管中,血细胞数或血细胞压积是血液粘度的最主要因素。

用国产SDZ-3自动电子计时粘度计或无创性AZN型血流循环功能检测仪,均可实时测得血液粘度,其正常值为:

$$\text{全血还原粘度}(\eta_b-1/H): 0.40 \pm 0.75$$

$$\text{全血比粘度}(\eta_b): 4.25 \pm 0.41$$

$$\text{血浆比粘度}(\eta_p): 1.65 \pm 0.09$$

(4)灌注区:在一定的灌注压范围内,血液为非牛顿液,也就是说其粘度随外加压力和速度的变化而异,压力降低时,粘度大,流量小。当压强逐渐增强时,血液粘度随压强增高而降低,因此血流增加。但当切变率高于20Pa·s时,血液粘度及流量不遵循上述规律。

(5)血管口径:按照泊肃叶公式,粘度与血管半径的四次方成反比,即管径愈大,粘度愈小;管径愈小,粘度愈大。但正常微循环的血液流变学中有两个特殊现象,即红细胞轴向集中和倒置现象。前者是指在一定范围内血液粘度随毛细血管口径变小而降低;后者是反映当毛细血管口径降低到一定程度时,血液粘度突然升高。泊肃叶公式为:
$$V = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P \cdot r^4 \cdot \pi}{\eta \cdot L \cdot 8}$$

V为流量; $dV/dt$ 为单位时间内流过的液体体积; $\Delta P$ 为血管内压力差; $\eta$ 为血液的粘度;L为血管的长度。

(6)红细胞与血浆蛋白之间的相互关系:血液粘度除与构成血液的各成分的粘度有关外,更重要的是取决于各成分之间的相互关系。在HCT正常时,红细胞与血浆蛋白之间的关系占有重要地位,如HCT超过90%,则红细胞之间的相互关系更为重要。一般认为血液呈非牛顿液与缢线形成有关,而缢线形成又与纤维蛋白原有关。除纤维蛋白原外,形成缢线状物的主要条件有三:①红细胞的变形性;②红细胞之间接触面积的大小;③促进红细胞聚合因素的存在。红细胞聚集及缢线状物形成,是休克重要的血液流变学变化,严重影响微循环灌注,可见于各种类型的休克。红细胞聚集首先发生在血流最慢、血压最低的器官如肝、肾、肺等。尸检死于严重烧伤或创伤患者时,发现其早期即可出现肝肾坏死。休克时血液浓缩、HCT及纤维蛋白原浓度增加,均可促使红细胞聚集及缢线状物形成。

血液流变学在休克发生发展中的意义 休克时微循环的变化不仅与灌流量急剧减少有关,且与血液流变学有关。微循环紊乱的特征是毛细血管血流减缓、血管壁发生改变以及流经毛细血管液体交换的升高或降低。休克时血液流变学的变化主要表现为:(1)休克时交感-肾上腺髓质系统兴奋,血中自由脂肪酸增多,后者使红细胞变形能力降低,从而血液粘度增加。(2)血管内皮细胞从基底膜上剥落并且肿胀,由于内皮上出现较大的间隙,低分子血浆蛋白透过血管壁,而高分子量的粘附性大分子如血纤维蛋白原、 $\alpha_2$ 巨球蛋白及免疫球蛋白IgM则留于血管腔内,使局部血粘度上升,红细胞粘附性增高,管腔内红细胞压积也升高,红细胞聚集出现,使血液粘度增加,血流阻力变大。(3)休克时缺氧、酸中毒及ATP产生减少。缺氧是因为缓慢流动的血液-进入营养毛细血管,就向外周的实质细胞供应了氧,这些缺氧的血液经过毛细血管,只能阻碍新鲜氧合血液的及早到来。由于代谢产物乳酸又从实质细胞向缓慢灌注的毛细血管纷纷扩散而来,继而引起红细胞刚化,使血液粘度增大。同时,在较小的血管内(5~7 $\mu m$ 以下),由于红细胞变形能力降低,出现血液粘度不是随管径变小而降低,而是升高的倒置现象。(4)血液在一定切变率范围内为非牛顿液,休克时血压低,切变率低,如果小血管血流速度降至0.1~0.2mm/s以下时(正常毛细血管平均血流速度为0.3~1.0mm/s)容易导致红细胞聚集、钱串状物形成,甚至发生红细胞不可逆的聚集和凝集的所谓泥化。(5)有人认为,休克时外周血管血流障碍的指标最好是以TPR/ $\eta_b$ 来表示(TPR为总外周阻力)。若TPR与 $\eta_b$ 均高则扩管、降粘可以改善血流状况;若TPR低,而 $\eta_b$ 高,则宜降粘以防血液淤滞;假如 $\eta_b$ 与TPR均低,则应适当缩管以保障合适的血流。

对于休克时的微循环功能障碍,治疗的根本措施是调节血流量的。而血流量的调节主要取决于推动血流的压力(和心输出量、血容量、平均动脉压成正比)血流前进的阻力(和血管阻力、血液粘度成正比)。在休克发生时,根据血液流变学和血液流变学变化,采取综合防治措施如正常容量血液稀释、去血纤蛋白原治疗,防治酸中毒等。近年来有人提出“低排高阻”型病人需提高其心输出量,降低外周血管阻力;“常排高阻”型病人宜维持其心输出量,维持外周阻力;而“高排低阻”型病人则应维持其心输出量,增加外周阻力,并开始试用高渗性的7.5%氯化钠溶液治疗失血性休克、严重低血容量休克、感染性休克、烧伤以及顽固性休克等获得良好效果,但高渗盐液的用量需予严格控制,以血清Na<sup>+</sup>不超过165mmol/L及血渗透压不大于340mmol/L为宜。

(安徽医科大学第一附属医院陈柏钧教授撰)

**生物信息的检测与诊断** detection and diagnosis of biomedical signals “生物信息”泛指反映生物体生理的或病理特征的信息。信号是信息的载体,反映生物信息的信号可能是生物体本身产生的所谓“主动信号”,如各种电生理信号(心电图、脑电图、肌电图等)和非电生理信号(如体温、血压、脉搏等),也可能是所谓“被动信号”,即外界施加于人体的、把人体视为信号的通道而对之进行探查的信号,如超声波、同位素、X射线等。后一情况下关于生理、病理状况的信息将通过被动信号的某些参数来携带。从观察得的各种生物信号中分析提取有关生理、病理信息是检测的任务;而根据检测结果对受试者的生理、病理情况进行评价,则是诊断的任务。

**检测** 检测时要解决的第一个问题是把待测信息转换成可以测量的信号,这就是传感器的任务。它们是以各种物理的、化学的、生物的现象为基础的。物理现象如光电、压电、压阻、磁敏、热敏、光学纤维等,化学现象如气敏、离子选择敏感、湿敏等。它们可以用于测量血压、心音、血流、呼吸、体温、运动信息以及各种电生理参数。

近年来,生物传感器是传感器的前沿研究方向,它与分子生物学的发展密切相关,建立在生物活性物质能选择地识别各种生物化学成分的基础上,形成并固定生物功能膜从而达到传感目的。酶传感器、免疫传感器以及进一步的细胞传感器、组织传感器等,将它们集成化后构成各种生物芯片。生物传感器的特点是选择性好、灵敏度低,但性能不够稳定。微型化的生物传感器可能实现各种深层次生理量的实时、在体检测。

检测的核心任务是从被噪声干扰的观察信号中将有关信息提取出来。由于生物信息随机性强,背景噪声也强,因此信息的检测、提取要建立在统计信号处理的基础上。匹配滤波用于检测淹没在强随机噪声中的确定性信号。50年代建立起来的维纳滤波理论和60年代建立起来的卡尔曼滤波理论都是在理想要求与实际处理结果的误差均方最小的意义下从噪声中提取随机信号的线性最优方法。后者是一种递归算法,更能适应信号的非平稳性。但是,不论维纳滤波或卡尔曼滤波都是以信号和噪声的一、二阶统计知识已知(或已作出估计)为前提。20世纪80年代以来,由于自适应处理技术可以在没有先验统计知识的前提下通过递归计算来逼近最优解,更能适应生物信号多为非平稳的实际情况,因而很受重视。从处理算法上看,可以分成随机梯度法与递归最小二乘法两大类。80年代后期以来发展起来的各种快速递归最小二乘法,由于比随机梯度法收敛速度快,数值性能好,因而在微型机上实时应用有良好前景。目前该适应方法已广泛应用于几乎所有生物信号和生理信号的分析研究中。

处理生物生理信号的另一重要途径是建立所谓“参数模型”,即把生物信号看成由白噪声激励某一线性(或非线性)系统所产生,设法由观察数据确定模型的结构和参数。参数模型既反映信号的随机性一面(激励白噪声各次取值是不可预测的),又反映信号在一定程度上的可预测性(模型的结构和参数是确定性的),它不但是检测生物信号的有效手段,而且为进一步提取特征以便

对信号分类作好准备。

近年来,生物信息检测的研究进展主要有以下几方面:

(1)强噪背景下微弱生理信号的动态提取:累加平均是检测微弱生理信号的常用方法。但是,累加平均所得结果只是若干次纪录的平均结果,不能用于研究生理信号的逐次(或逐心拍)的动态发展。因此,如何由单次记录中稳健可靠地提取生理信息成为一个研究前沿课题。

(2)多道生理信号的同步观察与检测:人体生理信号是分布在体内、表现在体表上的。因此,从体表多处同时取得多道信号,再经计算机处理得出综合信息,是从生物信号中提取有关信息的有效途径,如心电图的体表标记、脑电图的地形图映射以及有关的逆运算(由体表测量值反推生理电的电流偶极子源)等都是例子。在这方面要特别注意发展时间、空间、频率3域结合起来的检测方法和把时间、频率两者结合起来表示信号的方法。

(3)无创检测与插入式检测:从具体技术上看,无创检测和插入式检测是人们努力的两个目标。前者为在生物活体上实时检测创造条件;后者则将检测器件埋植于体内,通过电或光的遥测系统与体外联系,以供长期监测,诸如各种遥测胶囊、植入式人工器官、植入式药疗系统都是研究中的课题。传感器与检测器合一的集成微系统及材料的生物相容性则是发展中要解决的关键问题。

**诊断** 诊断的实质是进行模式分类。日常生活中医师从问诊、检查到作出疾病判断就是从特征提取到作出决策的模式识别过程。只是在这一过程中医师的经验起主导作用。随着计算机技术的发展,人们便把它引入诊断中来,从而把疾病的诊断在精确数量化的基础上实现自动化。

自动诊断在初期主要是应用贝叶斯定理、极大似然法及逻辑判断决策方法解决疾病的鉴别诊断问题。其后各种统计分析方法逐步引入,多元统计方法成为主要方法。诸如分枝理论判别分析、聚类分析、回归分析、相关分析、因子分析、主成分分析等都被引用来进行疾病的自动诊断。

结构(句法)模式识别与模糊模式识别是这一领域的进一步发展。前者的特点是从信息的上下文关系上进行识别,后者则能模仿人类认知活动的特点,对难以定量描述的特征有较强概括能力。

与人工智能特别是专家系统相结合是自动诊断的发展方向。由于生命过程的复杂性,只依靠以算法为基础的检测判决理论不能很好解决问题。其发展的总趋势是智能识别,即从局限于单纯工程算法实现走向综合感知机制的多级推理结构。最早的专家系统MYSIN正是用于传染及抗生素应用的医学专家系统。在国外,一些新建立的医学数据处理系统常把信号处理与专家系统结合起来,把知识用规则的或语义形式编码来解释和分析各种临床信息,既可以从生理信号多导记录的时间及空间关系上消除伪差,进行预处理,又可以建立一个解析的信号处理模块,在以规则为基础的系统内解释观测得到的信号。另一类应用是把支持医学决策的专家系统与临床数据库连接起来,从而为医生对患者的查询提供药物的和化验的信息,并支持医生作出关于判断和治疗方案的决断。

#### 参考文献

- 1 杨福生, 国外医学生物医学工程分册, 1992, 15(4): 203~212
- 2 Petvin A R. Report of IEEE Task Force—An IEEE Opinion on Research Needs for Biomedical Engineering System, IEEE Trans on BME, 1986, 33(1), 48~59
- 3 Cohen L. Biomedical Signal Processing, New York, CrC Press, 1986
- 4 Chiledr D G. Biomedical Signal Processing, In Haykined., Selected Topics in Signal Processing, Prentice Hall, 1989, 465~512
- 5 杨福生, 高上凯. 生物医学信号处理. 北京: 高等教育出版社, 1989

(清华大学杨福生教授撰)

**医用形状记忆合金** “形状记忆”合金,是指具有形状记忆效应的合金器件,在明显的塑性形变之后,经过适当处理,可以回复到它变形前的原始形状。这种形状的回复,是通过将器件加热到一定的温度来激发的。合金在回复过程中会产生相当大的力,可作不同程度的机械功。目前最常用的形状记忆合金是55-Nitinol合金,为镍含量在54~56wt%之间的镍钛金属化合物。是20世纪50年代末,美国海军武器研究所研究镍钛合金时,偶然发现的。镍钛合金的形状记忆过程简述如下:(1)镍钛合金的器件可以是不同尺寸的丝、棒、片、管的锻制件或铸件。(2)把上述器件加工形成所需的“记忆”形状。例如已经柳好的柳钉。(3)把这种所需“记忆”形状,紧固在定位装置中。(4)进行“记忆”热处理。(5)把经过“记忆”热处理的器件处于中间形状,例如把柳钉柳好的一端拉直,纳入到待柳的柳孔内。(6)加热(根据合金组成,可控制在-15~150℃之间)进行形状回复到所“记忆”的状态。例如被拉直的柳钉回复到已经柳好的原始形状,完成柳接工艺。上述记忆过程,根据需要,可以是可逆的,也可以是不可逆的。回复所记忆形状(即回复热处理)的温度为转变温度。转变温度范围主要取决于合金的化学组成。形状回复温度不仅取决于合金的化学成分,还和它的记忆热处理制度有关。此外记忆形状的应变程度也能影响合金的形状回复率,如应变不超过8%的限度,器件可以得到完全的回复,低于转变温度范围,这种合金则有高度的延性,可在700~1400kg/cm<sup>2</sup>应力下塑性形变。在转变温度范围以上的合金,则变得相当坚硬,不易屈服。镍钛记忆合金除了独特的形状记忆特性外,和医学有关的其他主要性能如下:

|                                        |                          |
|----------------------------------------|--------------------------|
| 1. 熔点(℃)                               | 1240~1310                |
| 2. 比重(g/cm <sup>3</sup> )              | 6.45                     |
| 3. 比电阻(μΩ-cm)25℃                       | 80                       |
|                                        | 900℃ 132                 |
| 4. 线膨胀系数24~900℃                        | 10.4×10 <sup>-6</sup> /℃ |
| 5. 导磁率                                 | <1.002                   |
| 6. 硬度                                  | RA65~68                  |
| 7. 抗拉强度极限(MPa)                         | 560~960                  |
| 8. 屈服强度(MPa)                           | 137~226                  |
| 9. 弹性模量(MPa)                           | 70000~81000              |
| 10. 伸长率(%)                             | 60                       |
| 11. 疲劳强度极限2.5×10 <sup>7</sup> Cy1(MPa) | 480                      |
| 12. 冲击强度(m-kg)24℃                      | 3.3                      |

由上述性能可见,该合金具有高于钴铬合金的强度。从屈服强度和弹性模量所反映的高回弹性,表明其具有在宽跨距间挠曲而不发生永久变形的性能。此外,在低、常温下化学稳定性好,具有较佳的抗腐蚀性。

国外医学方面的实验和应用,由于口腔医学的特殊临床条件,几乎与工业设计应用开始的同时,就把镍钛合金丝应用于口腔正畸。目前美国已有专门厂商生产多种类型的镍钛正畸弓系。骨科方面美国和日本先后在1976年和1981年报导了镍钛记忆合金在动物体内植入的实验。他们设计了骨折固定用的骨接合板、人工关节、脊柱校正棒、骨栓和髓内针等。美国在狗体内使用镍钛合金作腔静脉滤器获得成功。日本采用镍钛合金辅助夹,配合银夹扩大了脑动脉瘤夹,具有可局部加热而简便取出的优点。美国用镍钛线平行地横纵向排列,以结扎线连接,设计了在人工心脏样机用的收缩性人工肌肉,在狗和小牛身上实验。此外,还有设计用于人工肾用瓣,宫内避孕器和颌骨固定等。

中国医学方面的实验和应用:研究起步迟,但发展较快。1978年上海第二医学院(薛森等)向上海钢铁研究所(杨海波)提出共同协作进行镍钛记忆合金医学应用研究课题,进行了医用镍

钛合金锻制材料的研制,转变温度和热处理制度探索,材料加工,各项涉及安全性的医学基础实验,口腔各科,骨科,整复外科和妇产科有关记忆器件设计,模拟临床实验和临床研究等工作。模拟腐蚀试验表明这种合金为极强级,符合在口腔内和体内应用的要求(薛森等)。体外细胞在合金表面生长良好(张影霞)。在60只大白鼠皮下骨内植入10月表明,该合金在生物体内对局部组织无损害,植入体未见腐蚀,变色和细胞毒性迹象,局部未见肿瘤产生(薛森、潘家琛等)。合金埋入狗体内前后,皮毛微量镍元素未见增加(薛森、陈志祥、汪学明等)。在此基础上,上海第二医科大学及其附属机构,于1981年起,口腔矫形科(楼昭华),口腔颌面外科(洋家琛、洋可风),骨科(戴克戎、杨佩君),整复外科(王德昭),妇产科(薛培)等分别设计了正畸弓丝和卡环,加压骑缝钉,双杯型假体,压缩钢板螺丝钉,盲柳钉及颅骨板以及输卵管夹,分别应用于儿童牙矫正、颌骨肿瘤截除后移植骨内固定,下颌骨折固定、下颌前突畸形矫治、矢状缝开矫正,各种骨折固定,腕关节炎、石骨症、髓鞘形直、髌脱位等矫治,颅骨、颧骨缺损修复和女性绝育等,获得较满意的治疗效果。北京口腔医院(鲍燕治)和北京有色金属研究院在1983年报导了以镍钛记忆合金的正畸临床研究,经临床大量应用,效果满意,此外天津冶金材料研究所等单位也在进行镍钛记忆合金的医学应用研究。

国内外水平比较。(1)在材料本身的基础研究方面:W. J. Buehler发现镍钛合金的形状记忆效应后,国外对形状记忆合金的马氏体记忆的本质,开始了大量的基础研究工作。而中国则是先应用,取得一定效果后才开始做微观机理方面的研究工作。(2)材料加工方面:国外医用形状记忆合金的器件,已有专门厂商经营,产品水平较高,有的厂商还提供器件设计的咨询。而中国在这方面,和其他医用材料的情况类似,其加工的条件和水平都较差。研制材料部门本身缺乏加工能力。特别是这方面的医用器件,在形成生产能力方面与国外差距极大。(3)医学基础研究方面:国外镍钛记忆合金的医学基础研究的报导并不多,似乎只着重在动物内植入后的组织学观察。相比之下,中国虽在这方面迟了4~5a,但所进行的生物相容性等安全性研究工作都具有一定的水平,其中几项看来国外尚未做过。(4)临床研究和应用方面,国内外各有千秋。国外的凝血滤器、脑动脉瘤夹、人工肌肉等方面(多属临床前试验)中国尚未开展。但中国的加压骑缝钉、输卵管夹、双杯假体、颅骨修复等(都已临床应用)在国外迄今尚未见临床报导。国外的器件设计较我们复杂些;国外有的医用器件产品如正畸弓丝,已形成生产能力,而中国所有医用记忆器件都未超过中试水平。

#### 参考文献

- Buehler W J. US Patent, 3174851, 1965
- Buehler W J. Journal of Applied Physic., 1968, 34(5): 1475~1477
- Wayman C M. Journal of Metals, 1972, 6: 175~183
- Andreasen G F. American Journal of Orthodontics, 1978, 73(1): 142~151
- 清水谦一. 日本金属学会会报, 1978, 17(1): 5~9
- 薛森. 口腔医学, 1(1): 40~43
- 薛森. 中华医学杂志, 1982, 62(12): 758
- 薛森. 上海第二医学院学报, 1982, 2(2): 31~35
- 鲍燕治. 中华口腔科杂志, 1983, 18(1): 15~18

(上海生物材料研究中心薛森教授撰)

**创面覆盖物——壳聚糖** 大面积Ⅲ°烧伤LA<sub>50</sub>至今仍在50%左右,而且Ⅲ°烧伤面积超过70%的病人,死亡率更高。死亡原因除肠源性细菌感染外,绝大多数系来自创面的致病菌引起的感染和败血症。因此,寻找理想的创面覆盖物,尽早封闭创面,提高严重烧伤者的救治率,是广大医务人员共同关注的问题之一,现已取得相当进展。

在自体表皮移植方面,已从传统的邮票皮片移植、网状皮片

移植、小皮片移植、微粒皮片移植、皮浆混合移植,发展到自体异体表皮细胞培养皮片移植。中国宋儒耀用扩大中厚取皮术一次修复面部、四肢烧伤后畸形,简化手术过程,使外形显著改观,从而进一步发展了自体表皮移植的方法。

异体(种)皮在临床上已被广泛应用,可取材于猪、羊、鸡、牛、猴、胎儿表皮及成人皮肤等。应用的方法有异体皮与自体皮混合移植,切痂创面用异体(或异种)皮暂时保护,待体外自体表皮细胞培养后移植;自体表皮细胞接种到异体真皮上覆盖创面;异体表皮细胞培养等。

由生物材料或化学合成材料单独或两者复合制成的膜状或海绵状的薄片称之为人工合成皮。如 Hydrop 膜、丙烯腈膜、Opsite 膜、纤维/塑料层膜、胶原/己内酯膜、胶原/硅胶层膜、聚氨酯/塑料层膜、胶原/自体基底细胞/硅胶层膜、Biobrane、胶原膜、壳聚糖等。此外,尚有羊膜、海藻酸钠膜等。其中壳聚糖尤为引人注目。

壳聚糖(Chitosan)是从甲壳纲动物中提取的,有与葡萄糖氨基糖多聚糖相似的结构及功能,实验资料证明,其有与结缔组织修复相关的诱导和刺激活动。修复过程是一再现象,在这一现象中,细胞成分和非细胞基质蛋白相互作用建造修复损伤的组织。有人用壳聚糖作硬脑膜的代用品修复硬脑膜缺损。

K. NSall 等认为,壳聚糖是一种血管内皮细胞再生诱导剂,在用兔的实验中用它支撑角膜中心创伤, Tid×7d。在整个实验期间,发现壳聚糖在促进角膜增生、角膜创面抗张力方面优于药物治疗组。

Biagini 等,将 N-碳氧壳聚糖(一种修饰的壳聚糖)置入兔背侧皮膨胀里,用扫描电镜和透射电镜对囊腔形成进行研究,发现 N-碳氧壳聚糖在整个囊腔形成过程中有助于促进其正常生长、组织形成、血管再生,而不会有疤痕形成,且在一定程度上抑制纤维生成,故设想用壳聚糖治疗创伤和整形。

1991年,有人将壳聚糖冻干软垫用于整形病人以促进组织再生。与对照组相比,观察到该组病人有较好的组织结构和血管再生,在真皮水平缺乏炎症细胞浸润而无表皮层、生发层增生。因此,认为 N-碳氧壳聚糖倾向于有规律的皮下组织形成,减少畸形愈合。

口腔颌面外科方面,用 14 只新西兰白兔做双侧舌旁切口,测定出血时间。采用随机盲目实验设计,在每一个动物中,一侧切口用壳聚糖处理,另一切口用无壳聚糖的对照药物处理。在术前、术后测定出血时间,通过对照比较发现,实验组壳聚糖有利于止血,出血时间缩短 32%。为了观察由壳聚糖凝固层诱导的促进小口径聚四氟乙烯(PTFE)假体移植面的愈合作用,将 60μm 长的 PTFE 假体置入大鼠腹主动脉,假体中 30μm 长的纤维予浸透壳聚糖或酒精处理或机械处理,然后就凝固层是否存在和桥接口愈合的程度进行 1~42 周的观察;所有未经壳聚糖处理的 PTFE 假体,没有发现凝固层,显示极少新生上皮愈合,甚至在置入后 6 周也仅在吻合区附近见到内层上皮细胞。相反,所有经过壳聚糖处理的 PTFE 假体,全部覆盖有凝固层,显示 6 周后有完全的新生内皮细胞愈合。在这些假体中,内皮细胞存在于平滑肌细胞的基质上。这些结论证明,在 PTFE 假体表面覆有壳聚糖凝固层有诱导作用,能促进愈合。凝固层也许就像正常的动脉壁一样为动脉壁组织的再生作为暂时性的支架基质。

人工皮要求表皮和真皮相近自体皮片。为了给治疗严重烧伤病人提供适宜的覆盖物,有人设计制造了一个由两层组成的复合人造皮,(1)真皮等价物,由非细胞成分的真皮基底和皮肤成纤维细胞组成;(2)来自正常皮肤角质层的表皮。真皮基底含有 I 型胶原和 II 型胶原及由壳聚糖交联的葡萄糖氨基糖多聚糖。种植于真皮层上的成纤维细胞,为表皮细胞生长提供一个适合于生长的真皮。角质层细胞吸附很快,表现出有丝分裂活动,形成一个连续的、多层的表皮。经两周培养后,组织切片表明在真皮上有富含立方形细胞的基底层和数层基底上皮细胞,包括角质层。扫描电镜发现,在真皮连接处基底膜增强,这一段层的密度

是不连续的,并注意到棘细胞层有脂质体,颗粒细胞层有胶原颗粒。表皮分化到有数层角化上皮而结束。角化层中可见有横切微丝的角原。人造皮建造在壳聚糖交联胶原、葡萄糖氨基糖多聚糖基层上,形态与正常皮肤相同。

N-碳氧壳聚糖,还具有抗微生物属性,在对 298 种各样病原菌培养中显示了抑菌的、杀菌的和杀念珠菌的活动。电镜显示,接触于 N-碳氧壳聚糖的微生物产生明显的形态学改变。将 N-碳氧壳聚糖作为一种生物敷料有重要临床实用性。

综上所述,壳聚糖及其修饰物,有与结缔组织修复相关的诱导活动和刺激活动,也是血管内皮细胞再生诱导剂。它又能促进角膜增生,增强角膜创面的抗张力。N-碳氧壳聚糖有助于促进组织正常增生、组织形成、血管再生、抑制纤维生成。用于整形病人,其冻干软垫倾向于有规律的皮下组织形成,减少畸形愈合。在兔舌实验中其制品有利于止血,使创口出血时间缩短。在小口径聚四氟乙烯吻合方面,壳聚糖形成的凝固层有诱导作用,促进愈合。就像正常动脉壁一样为动脉组织的再生作为暂时性支架基质。把人造皮建造在壳聚糖交联胶原、葡萄糖氨基糖多聚糖基层上,其成品形态与正常皮肤形态相似并且有抗菌性。因此,设想壳聚糖及其修饰物在整形、角膜损伤的修复、微血管吻合、止血,尤其在烧伤创面作为覆盖物的研制和应用方面,有广阔的前景。

#### 参考文献

- 1 赵宇. 烧伤创面覆盖物研究进展. 实用烧伤整复外科杂志, 1990, 2(1): 49~53
- 2 蔡国武. 北京国际烧伤整形与康复研讨会纪要中华烧伤整形外科杂志, 1992, 8(1): 80
- 3 赵玉莲. 0.5% 硝酸银羊膜覆盖烧伤创面的疗效观察. 中华烧伤整形外科杂志, 1992, 8(2): 146
- 4 Muzzarelli R J, et al. 壳聚糖的微生物学活性: 超微结构研究. 生物材料, 1985, 9(3): 247
- 5 Sau KN, et al. 壳聚糖在角膜损伤修复中的影响眼科杂志, 1987, 19(1): 31
- 6 Biagini G, et al. 用外覆碳氧壳聚糖的组织扩张器而形成囊腔的形态学研究. 生物材料, 1991, 15(3): 287
- 7 Biagini G, et al. 用碳氧化壳聚糖处理创面. 生物材料, 1991; 15(3): 281
- 8 Klokkevold P R, et al. 壳聚胺在兔舌旁止血中的影响. 口腔颌面外科杂志, 1991, 49(8): 858
- 9 Stronel J W, et al. 由一凝固层诱导的促进聚四氟乙烯假体愈合. Int-angiolo. 1991, 10(4): 202
- 10 Shahbeddin L, et al. 由壳聚糖交联胶原、葡萄糖氨基糖多聚糖制造人工皮的特点. 皮片库存, 1990, 3(2): 107
- 11 Muzzarelli R, et al. N-碳氧壳聚糖抗微生物属性抗微生物药, 1990. 10

(安徽医科大学一附属医院陈柏钧教授撰; 陈国钧审)

**体外反搏** external counterpulsation 是一种无创性辅助循环方法,在心脏舒张期加压于人体下半身使其血液反流向主动脉,形成一系列比收缩压还高的舒张期搏动波,从而增加心肌、脑、肾、眼、耳及其他器官的供血,以促进缺血区的侧支循环,成为一种治疗缺血性疾病的有效方法。

美国邓尼斯氏(Dennis)等在 60 年代曾报告他们设计的体外反搏器,70 年代曾有商品 Cardiassist 上市,但因设计不合理,已被淘汰。1976 年中国研制成功四肢序贯式体外反搏装置,1984 年增加臀部加压能使舒张压显著高于收缩压的功能,命名为增强型体外反搏器,并用微处理机控制,反搏效果明显提高,在国内已逐渐推广。

体外反搏装置 主要由电子监控系统、气源系统及反搏囊套 3 部分组成。

(1)电子监控系统:由心电、脉搏讯号和心阻抗血流讯号放大电路、单片微机讯号采集放大电路、增益控制和充排气讯号接

口电路、PC/AT 微型计算机和电磁阀驱动电路、电源等组成。工作时从病人胸前检出心电图、阻抗讯号,从手指检出指脉搏波讯号,经单片机采样预处理,PC/AT 微型计算机处理,检测出心脏的收缩和舒张开始时间以及反搏引起主动脉血液反流的开始时间。计算求出反搏充气和排气的开始时间,经控制电路发现序贯时差为 50ms 的 3 级序贯充气指令,分别送至 3 个电磁阀,使之序贯地开放,向小腿、大腿和臀部的气囊一段接一段地充气,使下半身的血流驱反至主动脉,使主动脉在舒张期出现一个比收缩期波更大的反搏波;在心脏进入收缩期前,系统发出排气指令,使 3 个电磁阀进入排气状态,对肢体的压力迅速解除,下肢血管开放,容纳心脏收缩排出的血液,使主动脉收缩压得以降低。

(2)气源系统:由低压大流量空压机、贮气罐和配气箱组成。工作时空压机产生的压缩空气经安全阀控制送至贮气罐;贮气罐设有调压阀,保证其压力按治疗的需要(35.5~50.7kPa,即 0.35~0.5kg/cm<sup>2</sup>)送到配气箱。配气箱由 3 组电磁阀组成,分别按电子系统发来的指令向小腿、大腿及臀部气囊充气或排气。这种阀与一般三通阀不同,其特点在于设有气体短路设备。

(3)反搏囊套:它可由人造革或帆布制成,其夹层中有一气囊。囊套共 5 个,分别包裹小腿、大腿及臀部,其外加带紧固。所一代反搏器囊套用稍硬而坚韧的塑料制成,能有效地限制气囊的膨胀,故气囊压力可迅速达到高峰,驱动血液效果好,所产生的舒张期增压波高大,升枝陡峭,对病人震动小,且耗气少,新配用的空压机较小,可放在台车上送至病床旁进行治疗或抢救。

体外反搏的治疗机制 它比较复杂,目前所知除血流动力学作用外,还有血液流变学的变化,血中好几种生物活性物质的改变等:(1)体外反搏对人体下半身加压时,每搏约有 60~100ml 血液在舒张期反搏回主动脉,引起动脉系统在舒张期产生一系列强大的额外搏动,压力高达 18.6~22.7kPa,从而改善全身的微循环及心、脑、肾、眼、耳及其他器官的血液灌注,尤其是心肌,因为冠状动脉 75% 的血供来自舒张期。人体器官的缺血可能由粥样硬化斑块、血栓栓塞、局部疤痕、炎症或水肿等造成,其实质为局部微循环障碍,由于反搏能提高灌注压,迫使血液通过正常动脉的小分支、吻合支进入压力低的缺血区(由于此两处的压力差增大)。每天反搏 1~2h,在 24~36h 的治疗期将有约 15 万次的冲击血流通过吻合支挤进缺血区,遂形成侧支循环,使局部微循环障碍得以解除。(2)在心脏收缩期,下半身的加压迅速解除,其内血管张开,容纳血液,使主动脉压力下降,左室射血阻抗减低,心肌耗氧随之减少,心衰者心输出量因而增加,全身供血得到改善。(3)静脉系统受压,回心血量增加,可提高心输出量,这是有利的一面,但对左心衰竭患者来说,这种前负荷的增大可能导致心衰、肺水肿,因此对这类病人进行反搏,应在血流动力学或/及脉搏血氧计监测下施行。(4)回心血量增多,中心静脉压增高,使血中利钠素水平增高,加上肾血流灌注增加,利尿消肿作用非常明显,这也是体外反搏治疗机制的一个重要方面。(5)对下半身加压,使其中的血管内皮细胞分泌前列腺素大量增加,使前列腺素/血栓素 A<sub>2</sub> 的比值增高,这有利于逆转动脉粥样硬化斑块的发展。(6)由于灌注压的增高,切变力加大使血粘度下降(可能由于红细胞由聚集和成缟线状转向分散,及红血球变形性增强;血浆中纤维蛋白原等的分子桥联作用下裂解,使全血及血浆粘度下降)。(7)还有报告说体外反搏具有抗氧自由基损害的作用,表现为反搏后脂质过氧化物(LPO)明显下降,谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)与 LPO 的比值和超氧化物歧化酶(SOD)与 LPO 的比值均增高。

体外反搏的临床应用 体外反搏作为一种辅助循环方法,原来主要用于心源性的或其他低心输出量的休克(除出血性休克外),以增加心脏及各主要器官的供血,改善循环。中国增强型体外反搏着重提高舒张压,可明显增大各器官灌注压,促进侧支循环形成,缓解局部微循环障碍。因此,目前已广泛用于:(1)冠心病包括急性心肌梗塞(尤以发病后 6h 内效果最佳,有助于抢救垂死心肌,限制坏死区的扩展)、各类型心绞痛及无症状心肌缺血

等,以对劳累型心绞痛效果最明显;(2)动脉硬化、脑血栓形成、短暂性脑缺血及其他脑神经缺血性疾病;(3)缺血性视神经病变、视网膜动脉栓塞、中心性浆液性脉络膜、网膜病变、视神经萎缩、视神经乳头炎等与眼缺血有关的疾病;(4)突发性耳聋、美尼尔氏综合征、耳源性眩晕等及其他可能与耳的缺血有关的疾病;(5)肾缺血所致的高血压、肾炎、休克和其他肾缺血性疾病;(6)多发性大动脉炎及其他肢体缺血性疾病。禁忌症:(1)显著的主动脉瓣关闭不全;(2)全身性出血倾向或脑、胃肠等各器官的出血;(3)心瓣膜病、心肌病、先天性心脏病或其他心脏病伴有心功能不全、增加心脏前负荷时可致心力衰竭者;(4)肢体有感染性病灶或血栓性静脉炎之患肢不宜用于反搏;(5)血压高于 22.7/14.7kPa(170/110mmHg)、心率过快(>100 次/min)者,宜先用药控制后再行反搏。

#### 参考文献

- 1 郑振声,等.中国生物医学工程学校,1984,3(3),134~138
- 2 郑振声,等. *Artif. Organs*, 1984, 8(4):470~477
- 3 胡健吾,郑道声,黄定九,等.中国体外反搏,1988,1:4~5
- 4 吴树燕,许玉韵,汪丽惠,等.中国体外反搏,1989,2:2~7
- 5 高素荣,沈佩瑶,等.中国体外反搏,1989,2:16~18
- 6 吴祖舜.中国体外反搏,1990,3:15~18
- 7 沈耕荣,赵国明,周霞秋,等.中国体外反搏,1990,3:26~27
- 8 杜惠君,黄定九,郑道声,等.中国体外反搏,1992,4:1~4
- 9 W E Lawson, J C K Hui, H S Soroff, et al. *Amer. J. Cardiol.*, 1992, 70, 859~862
- 10 刘革乐,郑振声,张育君,等.现代医学仪器与应用,1992,2, 11~22

(中山医科大学郑振声教授撰)

**骨骼肌循环辅助** 骨骼肌循环辅助是利用自体骨骼肌在电刺激下的收缩特性来实现心肌的泵血功能或各种循环辅助功能。晚期心力衰竭有很高发病率,其死亡率居各类心脏病之首。只有应用心脏移植术和人工心脏等机械循环辅助装置,才能救治这类患者。然而,心脏移植有排异和供体来源困难等问题;机械的辅助装置又存在血栓形成和感染的潜在危险及材料、能源等技术困难,仅能作为过渡到心脏移植的桥梁而短期应用。骨骼肌循环辅助不仅能完全避免排异、凝血、感染等并发症,而且技术简单、安全、经济,利于推广应用,可望成为救治晚期心力衰竭患者的常规临床手段。

自 1933 年列奇(R. Leriche)等报道将骨骼肌移植用于心脏后,骨骼肌已广泛用于胸腔内外各种加固、成形手术。1959 年,康特洛维茨(A. Kantrowitz)等首次提出骨骼肌动态循环辅助的概念。他保留骨骼肌的神经血管供应,仅分离远端而成为连体骨骼肌瓣,然后分别包缠在心室或主动脉外壁,用标准心脏起搏器对肌瓣进行电刺激,使其分别在收缩期和舒张期发生收缩,成为骨骼肌循环辅助研究的开端。这次实验的直接结果是显示了主动脉舒张期反搏的重要血液动力学效果。但由于骨骼肌有易疲劳的固有特征,这一反搏效果仅维持了 15s 即告消失。使人们意识到骨骼肌辅助的主要障碍在于肌肉的易疲劳性,从而把骨骼肌疲劳特性的研究提上议事日程。

1981 年,塞蒙斯(S. Salmons)等通过对骨骼肌进行低频短阵电脉冲的长期刺激,成功地实现了骨骼肌肌纤维类型的转变,使骨骼肌具有和心肌一样的抗疲劳特性,可以长期持续工作而不发生疲劳。这一开创性的成果,重新点燃了人们对骨骼肌循环辅助研究的热情,将这一领域的工作推向新的高度。

生理、生化和组织化学的研究资料表明,哺乳类动物的横纹肌均由两类肌纤维组成:抗疲劳、慢收缩、需氧代谢的 I 型肌纤维和易疲劳、快收缩、糖酵解代谢的 II 型肌纤维。由于生理功能的差别,各组织内部肌纤维的组份不同,未训练的骨骼肌中 I、II 型肌纤维约各占一半。组织化学检测证实,经 6 周以上短阵电脉冲“训练”的骨骼肌中, I 型肌纤维占绝对优势,人们把这—

电刺激过程称为骨骼肌的心肌化训练。80年代以来,分子生物学的进展又从分子水平上揭示了在长期电刺激的生理条件下骨骼肌收缩蛋白构型和基因表达的转变,快慢型肌纤维在肌球蛋白重链构型上的差异,使其分解利用ATP和蛋白质合成的速率不同,因而其电刺激阈值、收缩速度和抗疲劳特性均不相同。超微结构的研究资料还表明,骨骼肌纤维类型的转变,伴随着毛细血管密度、需氧代谢酶和线粒体数量的增加。

心肌化的骨骼肌作为辅助循环的新一代自体动力源,在世界各国心脏外科和人工心脏研究中心得到了广泛的实验研究。早期对膈肌、腹直肌、臀肌、背阔肌等实验研究均有报导,证实背阔肌在解剖结构、位置、大小和收缩力等方面最适用于循环辅助。

骨骼肌循环辅助方法可分为两类,心肌增强和循环辅助。前者通过心肌成形术将骨骼肌瓣直接包裹在心室外壁,通过电刺激使骨骼肌与心脏同步收缩而起到直接辅助心脏的作用。1985年1月,法国卡潘梯尔(A. Carpentier)等成功地完成了首例骨骼肌心肌成形术。在切除双心室巨大纤维瘤后,保留心内膜,用左背阔肌瓣在心室后壁作心肌成形术。术后第5天开始同步电刺激的渐进训练,1个月后射血分数比无循环辅助时高23%,病人情况良好。同年9月,美国马戈文(G. J. Magovern)等为一弥漫性冠状动脉病及双心室前尖部巨大钙化动脉瘤的患者施行动脉瘤切除及左背阔肌成形术。术后第8天开始同步电刺激,28个月后随访时,患者在75W运动负荷下的射血分数,比无循环辅助时增加20%。截至1991年,全世界已完成骨骼肌心肌成形术150例。心肌成形术的主要适应症为冠状动脉手术无效者,或因冠状动脉和心肌损伤无法进行搭桥手术的缺血性心脏病患者,无瓣膜失效或严重心律不齐的扩张性心脏病,射血分数不低于20%的动脉瘤患者和由寄生虫病引起的心肌衰竭,如南美州的恰加斯氏病(Chagas)患者等。主要手术指征为心室壁运动机能减退或运动障碍,射血分数逐年递减率大于20%但仍在15%以上者,均可考虑心肌成形术。

早期实验发现,用作循环辅助的骨骼肌,在手术后或当刺激频率高时,往往发生缺血现象,说明骨骼肌和心肌一样,也有一个血液灌注和供氧的问题。为此,史蒂文森(L. W. Stephenson)等提出所谓“血管延迟期”的建议。即在手术后不立即开始刺激训练和循环辅助,等待两周左右,使骨骼肌被切断的毛细血管得以恢复和再生。为此,手术对象,要选取那些尚有一定心室功能的患者,以顺利度过术后的恢复期。

第2类循环辅助的方法包括左右心室辅助和反搏。这类循环辅助常需由骨骼肌瓣构成新的泵血腔,称为骨骼肌心室。骨骼肌心室实验研究中遇到的最大障碍,是内壁和血液接触表面的凝血问题。安德森(D. R. Anderson)等报道了用自体胸膜或心包作为新心室的内壁,在很大程度上解决了血栓形成的问题,使实验动物存活一年半以上。骨骼肌心室虽有泵血功能,但与自然心室相比,顺应性很差,需在较高的前负荷下才能产生必要的泵血功率。而过高的前负荷又不利于骨骼肌的血液灌注,因此,如何使骨骼肌心室与血液循环系统的实际生理条件相匹配,是骨骼肌循环辅助设计的关键环节。

体外模拟循环实验发现,骨骼肌心室的输出功率相当于自然心脏的右心室。为治疗与右心功能不全相联系的充血性心脏病的肥大性心脏病,舒姆威(W. E. Shumway)和史蒂文森(L. W. Stephenson)分别进行了右心室循环辅助的实验研究,他们的资料证实,骨骼肌心室能在接近于右心室生理充盈压的条件下完成右心室的泵血功能。

肌肉生理、生化研究资料均表明,肌纤维的静止伸展程度对肌肉收缩力有重要影响。从这个角度来看,反搏方式最有利于满足骨骼肌的生理和生化要求。在收缩期骨骼肌松弛,既有足够时间达到最大的静止伸展,又能在较高的收缩压下得到充分的充盈和血流灌注,舒张期循环压力相对降低,会减少骨骼肌泵血的后负荷。已有文献报道了一系列不同的骨骼肌反搏机构的实验研究资料,其中以史蒂文生组的应用骨骼肌心室反搏装置者存活期最

长。1988年,有人报道了一种设计巧妙的双腔反搏机构,利用液压传动实现主动脉外反搏,是手术范围小、血液流变学特性较好的反搏方案,可望在不久的将来应用于临床。

骨骼肌循环辅助是80年代后期发展起来的新技术,临床应用前景乐观,但还有许多问题有待进一步探讨,如肌肉训练中细胞内的代谢过程及蛋白质的合成机理;循环辅助方案的设计;刺激参数和外科手术技术的最佳化;临床数据的积累和长期效果的观察等。

#### 参考文献

- 1 Macovica K J A. J. Thorac. Cardiovasc. Surg., 1987, 93: 212~220
- 2 Chachques J C. Circulation, 1988, 78(1~3)
- 3 Kochamba G. Ann. Thorac. Surg., 1988, 45: 620~625
- 4 Pattison C W. Cardiovascular Research, 1989, 23: 593~600
- 5 Anderson D R. J. Thorac Cardiovasc. Surg., 1991, 101: 661~670

(中国医学科学院基础医学研究所  
黄文美副研究员撰;王天佑审)

#### 儿童解剖学

anatomy of the child 儿童解剖学是人体解剖学学生长(或年龄)解剖学的一个部分,专门研究儿童身体的形态结构特征、变化规律以及它们的功能意义和临床意义,是儿童生理学、儿童心理学、儿童病理学和儿科学的重要基础,也是从事儿童卫生保健和教育事业的人员必备的基础知识。新生儿的形态结构与较大婴儿或成年人都有较大区别,无论基础医学还是临床医学都把它作为一个特殊阶段进行研究,因此,新生儿解剖学是儿童解剖学中的重要内容。青春期是儿童发育最后的和变化较大的阶段,青春医学已成为一门受重视的医学,因此,青春期解剖学也是儿童解剖学的重要内容。

有关儿童解剖学的研究,在过去主要是在肉眼观察下进行整体水平的和器官水平的研究,即体格测量和体质调查。1938年,德国彼得(K. Peter)等首先出版该方面的详细专著,以后前苏联的瓦里克(Ф. И. Валюкер, 1959)和美国的克里林(E. S. Crelin, 1969和1973)也相继出版有代表性的专著。这些专著的出版,标志着在欧美一般的体格测量和体质调查研究已基本完成。在我国,1987年廖亚平综合国内外资料也出版了专著,据该书以及中国解剖学会在1986年和1990年出版的两本《中国人体质调查》所收集的资料来看,我国儿童解剖学在体格测量方面已有较多资料,而体质调查尚有相当多器官缺少完整的国人资料。在体格测量方面虽然资料较多,但由于我国幅员广大,人民生活水平提高较快,不同地区和一段时间以后的资料仍有待收集。

70年代以后,儿童解剖学的主要研究方向已转到为解决医学上的新要求和对研究儿童生长发育提供更多的资料。例如在应用解剖学方面,波士玛(J. F. Bosma)的《婴儿头部解剖学》是一本根据临床需要而写的详细的专著,有大量断面解剖学的照片,可惜这类书还不多见。何志谦用直接法测量和计算了30例中国5岁儿童体表面积与身长及体重的关系,为儿童营养需要量的计算提供了新数据,但中国这方面的资料目前仍十分缺乏。狄荣科和吴永沐按显微外科手术的要求,观察和测量了75例小儿的大脑大静脉,为小儿松果体手术提供了资料。奥肯诺和桑多(H. Okuno & I. Sando)用切片重建方法测量了53例成年人和婴儿颞骨中耳圆窗的形状、面积和角度,认为圆窗在生后不再发育,为临床诊断和治疗先天性圆窗异常提供了资料。小儿输尿管膀胱连接部的解剖学与尿液的病理性返流关系密切,虽然在60年代已经有该处的详细功能解剖学报告,但据之而设计的手术始终未能达到满意效果。韦斯(R. M. Weiss)在麻醉下用仪器对20例小儿输尿管进行测压,发现返流侧的输尿管蠕动明显减少,并且在膀胱充盈过程输尿管内的压力不能随膀胱内的压力增高而增高,因而出现返流。故提出输尿管本身的结构与功能失常也是尿液返流的重要因素,在手术时将病变的一小段输尿管同时切除,收到较

好的疗效。这是小儿功能解剖学研究成果在小儿外科学上应用的一个例子。在影像解剖学方面,费斯米亚等(F. M. Fesmire)通过X线照片对小儿颈椎的发育进行系统观察;麦克阿利斯特和西斯勒(W. H. McAlister & C. L. Sisler)对175例正常的和异常的婴儿和儿童的阴囊进行超声图像观察;博斯(C. F. A. Bos)等用核磁共振(MR)方法对正常的和异常的新生儿的髋关节进行观察,并将图像与冰冻切片对照。这些研究都为临床影像技术在儿科学上的应用提供了资料。此外,在小儿神经解剖学方面,主要是向发育神经生物学和临床神经解剖学方向发展,例如赫坦洛赫尔(P. R. Huttenlocher)对小儿各时期皮质的树突和突触进行形态学计量研究,表明婴幼儿的大脑皮质具有很大的可塑性。戴蒙德(A. Diamond)把小儿海马皮质的发育速度和小儿的识别记忆能力进行比较,认为海马皮质很早便发育成熟,但与该皮质功能密切相关的识别记忆能力却发育较慢,原因可能是受其他因素的影响。库尔切斯尼(E. Courchesne)对孤独癖(autism)小儿脑进行MR影像学的和病理解剖学的研究,发现主要病变是小脑浦肯野细胞减少,再将该疾病的患儿与因其他疾病而切去一半小脑的小儿相比较,发现他们都对迅速变化的环境缺乏迅速转移注意的能力,从而对正常小脑的功能提出了新的观点。

儿童解剖学的研究工作,可用肉眼观察研究的,除了一些技术难度较大的项目之外,余下的研究项目已不多,代之而起的是结合现代医学和现代生物学的更高水平的研究项目,如显微外科解剖学的研究、医学影像学的研究、临床功能解剖学的研究和神经生物学的研究等,其中尤以影像学和神经生物学的研究最有发展前景。解剖学的和功能的影像技术分辨率的提高,有助于更好地了解儿童脑的生长和发育情况。

#### 参考文献

- 1 Peter K, et al. Munich, 1938, 2
- 2 廖亚平. 儿童解剖学. 上海: 上海科技出版社, 1987
- 3 Bosma J F. Anatomy of the Infant Head, Press, Baltimore; Johns Hopkins Univ; 1986
- 4 何志谦. 营养学报, 1986, 8: 210~215
- 5 狄荣科, 吴永沐. 中国临床解剖学杂志, 1991, 9: 90~92
- 6 Okuno H, Sando I. Acta Otolaryngol (Stockh), 1988, 106: 55~63
- 7 Weiss R M, et al. J Urol, 1983, 129: 858~862
- 8 Fesmire F M, et al. J Emerg Med, 1989, 7: 133~142
- 9 McAlister W H, Sisler C L. Curr Probl Diagn Radiol, 1990, 19: 201~242
- 10 Bos C F A, et al. Surg Radiol Anat, 1990, 12: 43~51
- 11 Huttenlocher P R. Neuropsych, 1990, 28: 517~527
- 12 Diamond A. Ann N Y Acad Sci, 1990, 608(33): 394~426
- 13 Courchesne E. Pediatrics, 1991, 87: 781~790

(中山医科大学陈以慈撰)

### 儿童少年骨骼发育 the skeletal developmet of children

and adolescents 骨骼发育很能说明全身的发育情况,因为骨骼与儿童少年的形态发育、功能发育有密切关系。按骨骼发育水平和速度评价儿童发育,反映情况更本质、更确切。骨骼不仅支持器官,还与整个机体代谢相联系,它是钙、磷和镁离子的储存库。骨骼发育状况通常以骨骼年龄(骨龄)表示,它在很大程度上代表着生物学发育年龄,对探讨生长发育规律、判断发育障碍性疾病、预测女孩月经初潮、预测儿童成年身高等方面发挥着重要作用。

自20世纪30年代起,有关学者便涉足于骨发育的研究。早在1933年,美国儿童健康和保护的白宫会议,涉及生长发育评价时,已有关于影响儿童骨骼发育因素的分析。1943年,桑特格(L. W. Sontag)观察了疾病和其他因素对骨骼萌出类型的影响,指出慢性营养不良、慢性的或反复的严重感染及性腺功能低下均可引起骨发育延迟。甲状腺功能减退症是致使骨发育延迟的典型例子,子宫内感染尤其风疹和一些染色体异常往往同骨发育异常

相联系。1949年,克里斯蒂(A. Christie)报道了新生儿的骨化中心萌出情况,揭示所有新生儿均已存在跟骨骨化中心,并且体重在2000g以上的观察对象全部有距骨萌出,体重在3500g以上的均有股骨远端骨骺存在。在某些体重组的新生儿,一些骨化中心出现率黑人高于白人,女孩高于男孩。1955年,玛利什(M. M. Maresh)报道了从婴儿直到青春期四肢长骨长度的发育情况,并列上下肢6个长管状骨年龄别骨干长度均值。人们普遍认为,以手腕一腕骨判定骨骼成熟水平最方便和敏感,它对全身有良好的代表性。国际上通用的骨龄标准主要有3种:(1)1937年托德(Todd)首创的标准图谱法。后经格雷利克(W. W. Greulich)和派尔(S. I. Pyle)多次修改,于1959年制成手、腕部骨骼成熟系列性X线图谱。(2)重点标志观察法。1965年,威尔克斯(L. Wilkins)提出按儿童少年继续发生骨化中心出现数目的时间年龄判定骨龄。(3)评分的方法。1959年由坦诺(J. M. Tanner)等设计而成。根据手腕各骨成熟过程中的形态变化,人为地将其划分不同阶段,对X线片的详细特征给予相应记分,再综合各骨的分(完全成熟为1000分),即可换算出骨龄。中国李果珍于1979年创建的“百分计数法骨龄标准”原则同上,只是累计总分为100分;该方法成功地生物现象转化成以数字方式表示骨龄,使判定结果较为精确。一些研究者认为,对不同种族和地区的儿童评价骨骼发育应分别制订标准。

有关骨的发生,1968年帕特恩(B. M. Patten)在《人类胚胎学》中作出明确论述,即骨骼通常是由原先的缔结组织转化而形成的,一个是间充质,另一个是软骨;颅骨、面骨、肋骨和椎骨体是起源于间充质内成骨;四肢的骨骼则是软骨胶化骨的最好例子;肩带和上肢骨原发的间充质和软骨雏形早于骨盆带和下肢骨,于是胎儿随之发育成头尾模式;骨的钙化开始于第8至第9胎周,此时作为胚胎结束和胎后期开始的界限。学者们研究证实,出生时人体内骨化已沿着整个长骨干进行,因而它达到X线可见程度。人出生后许多骨骺按一定顺序形成并钙化,长骨生长的持续延伸是骺板内软骨细胞增殖所致,当骺板钙化、骨干骨骺完全融合时,则生长停止。这些变化对判断人体成熟程度提供了客观依据。

年代因素对骨骼发育有影响。据美国公共卫生署调查,当代儿童骨年龄平均值较半个世纪以前的儿童提前。刘宝林等通过对1980年和1990年哈尔滨市数百名7~12岁学龄儿童的手腕骨发育水平对比观察,提议骨龄标准的适用期为10a。骨发育存在性别差异,3岁以前,男女儿童发育水平基本接近,而3岁以后,身体各部分继发性骨化中心的出现和干骺融合女性约比男性早两年。

前苏联学者巴巴克(O. M. Бабак)及谢米诺娃(Л. К. Семенова)于1958年共观察210名莫斯科儿童上肢骨和下肢骨的发育情况,提出左右侧发育基本是对称的,仅少数表现某侧骨化好些;在各年龄组中,个体变异性幅度常超出性别差异程度。1979年,哈里森(H. E. Harrison)报道8个腕骨骨化中心萌出的年龄别百分率,头、钩骨在两岁全部萌出,其他的半数以上萌出年龄为三角骨女2岁、男3岁,月状骨女3岁、男4岁,舟状骨女5岁、男6岁,大多角骨女4岁、男6岁,小多角骨女5岁、男7岁,豌豆骨女9岁、男12岁。上述腕骨发育进程与中国一些学者近年报道的资料接近,只是中国儿童三角骨、月状骨、舟状骨和豌豆骨萌出的平均年龄约比前者晚1年,而小多角骨则早1年。

骨皮质发育对骨形态结构、功能状况均有重要影响。国际上通常测量第I掌骨骨干中点、胫骨干中点的皮质厚度,并依据Barnett提出的皮质指数概念计算骨皮质指数。1987年,刘宝林等报道哈尔滨市1320名6个月~17周岁儿童少年的I、I、II掌骨皮质厚度,发现第II掌骨皮质最厚,且男女发育曲线交叉年龄同身高发育曲线接近,骨皮质发育像其他形态指标一样,存在青春期突增现象。

骨发育同性发育有密切联系。坦诺曾指出,“初潮年龄和骨骼发育状况高度相关。如果女孩初潮发生较早,其骨龄必然是提

前的,如果初潮发生晚,骨龄也必然落后”。派尔于1959年、汉斯曼(C. F. Hansman)于1961年均报道骨龄与月经初潮之间比骨龄与时间年龄、身高、体重之间相关程度高。西蒙斯(K. Simmons)早在1943年对200名女孩进行长期追踪观察,他发现大多数女孩在骨龄(指Todd图谱骨龄)13.5~14.0岁时出现初潮;初潮时间年龄的变异范围是初潮骨龄的两倍。国内外均报道,多数女孩的月经初潮发生在骨龄13~14岁期间。刘宝林等经动态观察于1985年报道,85.7%的观察对象初潮骨龄为13.0~14.0岁。季成叶等(1982)观察到,11~14岁已来潮女孩的骨龄显著大于同龄未来潮者,而10岁初潮女孩和14岁初潮女孩的骨龄非常接近。拇指第1掌骨远端内侧种籽骨的出现与性发育有关联。格雷利克和派尔(1959)提出该籽骨出现两年左右即是女性月经初潮发生年龄。张国栋等(1982)报道指出,拇指内侧种籽骨出现与发生月经初潮平均相距10个月。刘宝林等(1985)报道此时间距离平均为18.4个月。

国外利用骨龄预测身高主要有3种方式,即B-P法、TWMC法、RWT法。其中,运用TWMC法预测成年身高时则应采用坦诺1975年制订的TW2方法判定骨龄,相继坦诺还制订了RUS骨龄标准,以此预测成年身高对学龄儿童比较适用。1988年,刘宝林等报道了据女孩月经初潮时I、II指末节指骨干骺融合程度预测未来身高的图表。

骨骼发育的研究成果,解答了许多人体的未知数,对儿童少年卫生学(尤其生长发育评价)、人类学、体育科学及有关临床学科受益很大。但涉及环境因素对骨骼发育的影响,如营养、疾病、环境污染、社会因素等尚待深入探讨,骨发育的年代变化及城乡对比观察还涉足不多。在运用已有的研究资料有效地进行骨龄应用方面,特别是预测儿童成年身高、疾病诊断等领域将有广阔的前景。当然,结合本国、本民族的特点,科学地制订或定期修订骨龄标准,将引起世界各国普遍的关注。

#### 参考文献

- 1 Simmons K, et al. J. Radiatr, 1943, 22: 517
- 2 Greulich W W, Pyle S I. Radiographic atlas of Skeletal Development of the Hand and Wrist. ed2, Stanford, 1959
- 3 Tanner J M, et al. growth Adolescence, ed2, CKwell Scientific Publication, Oxford, 1979
- 4 李国珍,等. 中华放射学杂志, 1979, 13: 19
- 5 张国栋,等. 中华预防医学杂志, 1982, 16: 65
- 6 Tanner J M, et al. Archives of Disease in Childhood, London, 1983
- 7 刘宝林,关诚,唐锡麟,中华预防医学杂志, 1985, 19(4): 195.
- 8 Lowrey G H. Eight Edition Chicago London, 1986, 297~322
- 9 刘宝林,唐锡麟,欧阳镇. 中华预防医学杂志, 1987, 21(1): 17.
- 10 刘宝林,等. 中华预防医学杂志, 1991, 25(6): 385  
(哈尔滨医科大学公共卫生学院刘宝林教授撰)

**骨盐含量** 又称骨矿物质含量。骨的力学强度75%~85%是由骨量来决定的,而骨盐含量是反映骨量主要指标,许多疾病和体内外因素,如老年性骨质疏松、小儿佝偻病、肾性骨病、骨发育障碍、地方性氟病、化学物质中毒、失重、长期卧床等,均可引起人体骨盐含量的改变,故测量人体骨盐含量除用于骨质疏松等疾病的诊断外,还广泛用于生理学、病理学、职业医学、环境医学、航天医学、运动医学等领域的研究。

影响骨盐含量因素很多。正常人30岁以前骨盐含量随增龄而增加,在儿童期增长较慢,而在青春期增长迅速,在30岁左右骨盐含量达到最高峰,一般男性骨盐含量稍高于女性,以后男女两性骨盐含量均随增龄而减少,但女性减少速度较快。绝经后将更快,到65岁以后,男女两性骨盐含量的减少速度基本相同。在人的的一生中,平均骨盐减少量将是其最大骨盐的30%~50%。性

激素分泌减少与骨盐减少有密切关系。1940年Albright等认为无论男、女性激素分泌不足均可引起骨质疏松,双侧卵巢切除的妇女、绝经年龄早的妇女,其骨盐含量减少较快。骨盐含量的减少速率(年减少率)因年龄、性别、体质、种族、遗传和地域等不同而有差异。降钙素能直接抑制骨吸收过程,使骨原始细胞变为破骨细胞减少,由破骨细胞变为成骨细胞增加,从而增加骨量,因此,降钙素分泌减少能导致骨盐含量丢失。有研究指出,生长激素、肾上腺皮质激素、甲状腺素、前列腺素对骨量有一定的影响,但详细机制尚不清楚。Nordin等由动物实验证实长期缺钙饲料可导致成熟期动物发生骨质疏松与继发性甲状旁腺增生,认为长期负钙平衡所引出的继发性PIH分泌亢进而导致骨盐减少。有研究表明,长期钙剂治疗能使骨盐含量明显增加。体力活动与骨盐含量密切相关,1982年Malter提出,完全卧床休息可导致骨盐含量急剧减少,Kolner氏和Toft氏发现卧床体息的椎间盘疾病的患者每周背椎骨盐含量平均减少0.9%,一旦恢复行走,骨盐含量的减少即可停止。有研究表明,肌肉体积与骨盐含量呈正相关。黑人的骨盐含量高于白人。有骨质疏松家族史和瘦长型或矮型体质者骨盐含量较低。流行病学调查表明,有烟酒嗜嗜嗜好者骨质疏松发病率较高,骨盐含量较低。

测量骨盐含量的方法有:

1. X线测量法。测量X线片中第1~5掌骨或其他管骨的骨皮质厚度,由此测量值计算骨皮质指数,该方法简便易行,结果准确,但不能测量骨皮质内的网状结构,只能提供骨体积相对指标,不能提供骨含量的绝对值。

2. 光密度分析法。测量与参比体同时拍摄的骨骼X片骨质吸收可见光的吸收率,能够间接反映底片中的骨骼的明暗程度,从而计算出该部位骨盐含量。

3. 单能光子吸收法。主要用于测量四肢骨(常为非优势侧桡骨)的骨盐含量,产生单能光子的放射源为<sup>120I</sup>,采用碘化钠闪烁计数器检测单能光子在骨骼和软组织内的吸收情况,从而计算扫描途径上的骨盐含量总和,测量值与组织透射率成反比。Cameron等(1963)首先用本方法测量桡骨骨盐含量。该方法不能测量脊柱骨骨盐含量。

4. 双能光子吸收法。放射性同位素发射两种不同能级的光子,可以不受扫描途径中软组织厚度必需相等的限制,还可测量单光子吸收法不能测量的部位,如脊柱骨的骨盐含量。

5. 计算机断层(CT扫描)。它以一种矿物质标准液(如 $K_2HPO_4$ )来校正,用机器眼定位,测量脊柱某一区域(通常为 $3\sim 4cm^2$ )的骨盐含量,将几次测量值平均参考校正值计算骨盐当量,单位为 $mg(K_2HPO_4)cm^2$ ,骨皮质和髓质以及整块骨密度都可以计算出来,CT扫描技术用于骨质疏松诊断时,假阳性率可达20%~30%,这是由于骨髓腔内脂肪组织量随增龄而增大所致,运用年龄分层的回归分析法可减少一部分误差。

6. 中子活性分析法。使用高能量的中子源来激活体内的<sup>48Ca</sup>跃迁为<sup>49Ca</sup>,<sup>49Ca</sup>的衰减可以用 $\gamma$ 射线来计数,测量骨组织和软组织的总体钙,由于体内98%以上的钙分布于骨骼中,这种方法可近似估计骨钙含量,也可评价局部组织钙贮存。

以上介绍的几种方法都是无创性的,此外还可以从骨骼骨髓用穿刺针取骨片进行组织学检查来确定骨盐含量,但该方法属创伤性检查,操作复杂,不易为人所接受。

目前测量骨质疏松的主要目的是筛选骨质疏松高危人群进行预防性治疗以减少骨折发生。研究表明,骨折的机率可以用骨盐含量的多少来估计,骨折危险性与骨盐含量呈反比。Smith等发现桡骨骨盐含量与继发性骨折的危险性呈明显负相关,骨盐每下降 $0.1g/cm^2$ ,桡骨骨折危险性增加1.5~2.2倍,股骨骨折危险性增加1.9倍,Cardsell等测量1076名妇女的桡骨骨盐含量并追踪11a后发现,骨盐含量最低1/10的妇女的骨折危险性是骨盐含量最高的1/10的妇女的4~7.5倍,Wassnich氏等研究表明,跟骨骨盐最低1/4者的骨折危险性是骨盐最高1/4者的8倍,椎体骨盐最低1/4者的总骨折危险性是最高1/4者的3倍,就椎体



骨折而言为14倍,75%的股骨骨折发生在骨盐最低的1/3的中老年人中。

如果测量骨盐后对骨盐最低的30%的中老年人进行预防性治疗,则骨质疏松所导致的骨折将减少40%,若不做筛选,随机对30%的中老年人进行治疗,则骨折仅减少10%,显然筛选后的效果比不筛选的效果要好得多,实际上并不是所有骨盐含量低的人都能接受治疗,现以测量股骨骨盐含量为例说明测量骨盐含量对预防骨折的实际效益,骨盐低于 $0.85\text{g}/\text{cm}^2$ 者(占8%)其骨折危险高达42%,约有80%的人能接受治疗;骨盐为 $0.85\sim 1.08\text{g}/\text{cm}^2$ 者(占22%)其骨折危险性为20%,因而有40%能接受治疗;骨盐高于 $1.08\text{g}/\text{cm}^2$ 者无需治疗,共有15%的人接受治疗,治疗后能减少50%的骨折,这样人群总骨折率将减少20%,若不做骨盐测量,随机对15%的中老年人进行预防性治疗,则人群骨折率仅减少3.5%,骨折减少10%则人群生活质量调整寿命将增加0.17a,通过测量骨盐含量对骨盐较低的骨折高危人群进行治疗将使人生活质量调整寿命增加0.34年。因此,测量骨盐含量来筛选骨折高危人群能有效地预防骨折,延长寿命。

骨盐含量除用于老年性骨质疏松的诊断和筛选外,还可用于以下几个方面:氟中毒、慢性镉中毒诊断;协助判断骨龄从而预测身高和发育趋势;评价失重后骨质疏松和指导特种部队训练等。

#### 参考文献

- 1 Heinz W, et al. Assessment of Bone Mineral. J Nucl Med 1984,25(10):1134~1141
- 2 Health and Public Policy Committee. American College of Physicians, Bone Mineral Densitometry. Ann Intern Med, 1987,107:932~936
- 3 Ross PD, et al. A Model for Estimating the Potential Costs and Savings of Osteoporosis Prevention strategies. Bone, 1988,9:337~347
- 4 Joseph Melton, et al. Screening for Osteoporosis, Ann Intern Med. 1990,112(7):516

(同济医科大学环境医学研究所徐顺清博士撰)

**肌肉收缩机制** mechanism of muscle contraction 包括骨骼肌、心肌和平滑肌的肌肉组织,分别是躯体运动和一些重要内脏器官活动的动力来源。因此,阐明肌肉的收缩机制,对理解和运用躯体及某些器官的活动规律,是十分重要的。肌肉区分为上述3类,是根据其结构和收缩特性,但它们收缩产生力的机制,尤其是从分子水平看,是非常相似的。

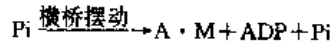
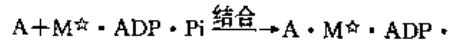
自1930年起,相继提出肌肉收缩的乳酸说、磷酸肌酸说,以及后来的ATP初浅理论。至1939年,则发现肌肉收缩中肌蛋白的作用,但直到二次世界大战结束时,才将肌蛋白分离出,并认为肌纤维蛋白与肌凝蛋白结合使ATP分解,并释放能量。当时的光学显微镜不能分辨其细微结构,直到20世纪50年代初期,应用电子显微镜观察到有两类相互重叠的肌丝,一类是肌凝蛋白组成的粗肌丝,一类是肌纤维蛋白组成的细肌丝。后来电镜进一步显示,肌肉收缩时,两类肌丝均不缩短,因此产生了肌丝滑行理论。肌纤维蛋白聚合成双螺旋状,成为细肌丝的主干。多个肌凝蛋白的尾部,组成粗肌丝的主干,其头部突出于粗肌丝的表面,称为横桥,它有与肌纤维蛋白结合的部位,还有与ATP结合的部位。滑行是横桥与肌纤维蛋白分子结合并摆动,牵拉细肌丝沿粗肌丝长轴方向滑动(故称横桥理论),滑行产生的张力与两类肌丝重叠的程度成正比。肌纤维蛋白与肌凝蛋白结合后,使后者被激活,作为ATP酶而分解ATP。当ATP分解产物被清除,横桥与新的ATP结合,使横桥与肌纤维蛋白的连接断开,并与下一个肌纤维蛋白结合,周而复始进行连接和脱开的循环,而产生滑动,使肌肉缩短。1957年赫克斯利(A. F. Huxley)对上述横桥理论的建立做出突出贡献,其后在20世纪60年代和70年代,尽管许多人提出各自的解释,但均未改变上述基本理论。

进一步研究指出,肌凝蛋白包括大分子量的重酶解肌凝蛋

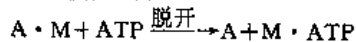
白(HMM)和小分子量的轻酶解肌凝蛋白(LMM),前者又可酶解为2类碎片,HMM-S-1和HMM-S-2。HMM-S-1组成横桥的双头结构,HMM-S-2和LMM组成肌凝蛋白的尾部。肌纤维蛋白中,G肌纤维蛋白为球形分子,F肌纤维蛋白是包含G肌纤维蛋白的纤维状结构,它组成了肌纤维蛋白的双螺旋结构。

上述肌肉收缩机制中,化学能转变为机械能,是分子水平研究中的最热烈的课题。这种能量的转变就是指ATP的作用模式,在1971年莱蒙(R. W. Lyman)和泰勒(E. W. Taylor)提出的ATP作用模式假设的基础上,1986年希波(M. G. Hibberd)等进一步补充与完善这个作用模式,指出肌凝蛋白分子上的ATP分解,实际是在肌凝蛋白横桥与肌纤维蛋白连接之前,ATP分解产生的ADP和无机磷(pi),仍束缚于肌凝蛋白上。而ATP分解释放的化学能,被转移至肌凝蛋白(M)上,产生高能形式的肌凝蛋白( $M^*$ )。  $M \cdot \text{ATP} \xrightarrow{\text{ATP分解}} M^* \cdot \text{ADP} \cdot \text{Pi}$

高能形式的肌凝蛋白继而与肌纤维蛋白(A)结合,触发贮在肌凝蛋白横桥中的能量释放,产生横桥摆动,同时ADP与Pi也从肌凝蛋白释放出来。



在肌肉收缩时,每个横桥要发生多次循环活动,即反复连接和脱开,每一循环伴随一分子ATP的分解。肌凝蛋白横桥与肌纤维蛋白的连接很牢固,必须由一个新的ATP分子结合至肌凝蛋白,才能使横桥脱开。



如此反复循环。

肌肉收缩的分子机制的研究过程,曾先是离体状态在溶液中的研究,分析了粗细肌丝的蛋白组成,以及ATP水解过程中,各种成分相互反应的步骤。从分子水平进行这样的研究,自然是非常重要的,但这只是从生物化学角度的阐述,探讨在肌肉纤维中的反应过程与在溶液中的结果的一致性,是多年来的研究方向。戈德曼(Y. E. Goldman)等1984年首先应用Caged ATP技术和 $^{18}\text{O}$ 交换技术,分析肌肉纤维生化反应,证明肌肉纤维内的反应特征,在许多方面相同于溶液中研究的结果。布伦纳(B. Brenner)应用高精度测量机械作用的技术,来研究横桥动力学变化,并应用X线衍射技术,来观察肌肉纤维横桥在不同功能状态下的结构变化。结果表明,在肌肉纤维松弛时,横桥具有类似于在溶液中称为弱结合状态时所显示的特征,即肌纤维蛋白与横桥亲和力和弱;这种结合不依赖于 $\text{Ca}^{2+}$ 的存在;二者连接和脱开迅速达到平衡。不同的是,在溶液中连接和脱开的速度是相同的,而在肌肉纤维中有一定变化范围。在肌肉松弛时仍然存在少量的横桥与肌纤维蛋白连接的事实,似乎与通常称肌肉收缩产生与否,是由于横桥连接的发生和阻断的理论有矛盾。当然对肌肉收缩的进一步的控制机制,目前尚有不同看法。在肌肉纤维活动时,横桥处于另一种状态,它具有类似于在溶液中称为强结合状态时所显示的特征,即肌纤维蛋白与横桥亲和力强; $\text{Ca}^{2+}$ 加速二者的结合;二者的连接和脱开达到平衡,而脱开比较慢。不同的是,在溶液中连接和脱开的速度相同,而在肌肉纤维中,脱开的速度也有一定变化范围。横桥的形态在弱结合时与强结合时也是不同的,这是因为横桥的构型不同,从弱结合到强结合构型的变化,是摆动和产生力量的关键。

为了在生理或接近生理状态下,观察肌肉纤维的横桥方位和摆动方式,1987年托马斯(D. D. Thomas)采用光谱探测技术。应用这种探测技术,可直接测出横桥在肌肉收缩时产生摆动,而且横桥的摆动有一定的变化范围,证实了肌丝滑行理论。自然,这些新技术所显示的结果,还存在难以解释的疑问。以往也有作者应用双折射方法,根据肌丝重叠程度影响折射强度的原理,探讨分析完整肌肉组织在收缩时,肌凝蛋白分子的方位。还曾有作者用荧光物质标记肌凝蛋白,镜下观察肌凝蛋白分子结构。

从20世纪50年代提出肌肉收缩机制的肌丝滑行理论后,许

多研究工作者进一步探讨了肌丝滑行的详细机制。在此过程中,他们应用现代科学技术,采用许多新的研究方法,力图从机械收缩、生化反应、形态结构甚至能量产生探讨其机制,取得很大进展。今后,从生理学、生化学、形态学和分子遗传学方面研究肌肉收缩机制,仍为其研究方向,尤其是分子遗传学的发展,并应用于肌肉收缩研究中,会给这个题目的研究带来冲击。随着许多边缘学科的发展,许多内容和方法必然渗透到肌肉收缩的研究当中,与许多学科的发展交织在一起,今后随着相关学科的发展,将会给肌肉收缩的研究带来新的活力。

(山东医科大学刘京璋教授撰)

**性别的决定与分化** 从胚胎到性成熟,性别发育可分遗传(染色体)性别、性腺性别与表型性别 3 个阶段。性别的“决定”与“分化”是发育过程中两个“不同”而又“连续”的概念,前者用于细胞的定向发育,后者乃发育的具体过程,从性别的表现范围,又有第 1 性征与第 2 性征之分。因此,性别分化应该说是多方面的综合性状。性别直接涉及生殖,关系到“遗传”与“演化”,为此探索性别之谜,历来是激动人心与耐人寻味的事。远在古代,就有以睾丸的位置、卵子的成熟程度、胚胎在子宫内位置等决定胎儿雌雄的说法。以后又有营养、温度、受精环境的 pH、双亲年龄与生活力的强弱、神经兴奋程度等影响后代性别之说。细胞学说建立以后,1892 年亨金(Henking)发现昆虫精子发生过程的特殊结构称之为 X 体。1902 年,麦克朗(Mc Coung)证实雌雄个体染色体数目是不同的,提出副染色体是性别决定因素,并提示受精时即决定了性别。1905 年,威尔森(Wilson)把“X”体称为“性染色体”,提出性别不同就在于性染色体的差别。1921 年,布里奇(C. B. Bridge)研究果蝇对发现雌性决定因子在 X 染色体上,雄性决定因子在常染色体(A)上。1923 年,佩因特(painter)证实了人类细胞 X 与 Y 染色体的存在,推测哺乳类动物的性别是由 X 染色体数目决定的。从此许多(不是全部)脊椎动物个体性别是以其染色体核型表示的,即 2A:XY 表示雄性,2A:XX 表示雌性。1959 年,乔科勃(Jocob)和斯特朗(Strong)从染色体异常病例和小鼠中发现,不管 X 染色体是两个或两个以上,只要有一个 Y 染色体(XXY,XXX),该个体即为男(雄)性,若少一个 Y 染色体(XO,XX),个体即为女(雌)性,说明 Y 染色体指令形成睾丸,否则将形成卵巢,有力地显示了 Y 染色体在性别决定中的重要作用。对于 46XX 男性、46XY 女性病例的出现,被肖(T. B. Show)于 1983 年解释为睾丸发育不一定需要整个 Y 染色体,或者 Y 染色体的大部分并不指令睾丸的形成。

历来关于性别分化曾有:(1)皮质、髓质诱导学说。1939 年,威丝希(Witsch)认为两栖类动物的性腺分化在于其皮质、髓质诱导者孰占优势,前者发育为卵巢,后者发育为睾丸。1963 年,约斯特(Jost)将此学说引用到哺乳类,提出有雄性诱导者存在,刺激未分化性腺形成睾丸,缺如,则形成卵巢。(2)激素学说。利利(Lillie)1917 年从异性孪生牛所形成的不孕雄性化雌犊(Free Martin)推论出雄性激素对性分化的作用,并在鱼类、两栖中得到证实。鸟类也有暂时诱导,但终究要反转。至于哺乳类则从未得到阳性结果。(3)组织相容性(H-Y)抗原学说:瓦泰尔(Wachtel)1975 年提出雄性细胞膜上的特异性 H-Y 抗原能诱导未分化性腺形成睾丸,雌性细胞则不然。奥诺(Ohno)于 1976 年将其称为睾丸器官诱导者(Testis Organizer)。特别是 H-Y 抗原假说,从 1975~1984 近 10 年内吸引众多遗传学家、免疫学家、发生学家进行研究,并发表研究报告 600 余篇,把性别分化研究推向分子水平。尽管后来对 H-Y 抗原阴性而具有睾丸的小鼠出现难以解释,但它仍不失为性别分化研究工作的一个里程碑。

性别决定基因(TDF)的局部定位成为 80 年代以来的研究热点。1984 年,古尔伦(Gullaen)等曾用 Y 染色体特异性 DNA 作为探针,发现 3 例 46XX 男性的 X 染色体上含有 Y 染色体 DNA 片段,47XX 男性的一条 X 染色体短臂携带有 Yp-DNA,提示在 X-Y 染色体间的不等交换,使 Y 染色体上特异性 DNA

移位到 Xp 上。1986 年,弗格来特(Vergnaud)以系列 Y-DNA 探针对 27 例性别异常病例进行检测,建立了一个 Y 染色体缺失图(分为 7 个区间),把睾丸决定子 TDF 基因定位于区间 I 内,即 Y 染色体短臂远端接近 PAR 区,该区的拟常染色体基因(M1C2)则成为 TDF 的侧翼标记(DXYS 为 TDF 最近侧翼标记)。因此,Y 染色体上决定性腺所需要的全部遗传信息即定位于 M1C2 与 DXY5 之间,大小约有几千个 Kb。1988 年艾伯特(Albert)、德拉(dela)、查普尔(Chapell)假说 Y 染色体上存在单位基因或多位基因,其产物直接或间接地决定性腺分化的双态性,该基因或基因团被称为睾丸决定子,简称 TDF 基因。染色体分带技术即使有很大提高,但凭在光镜下所得的异常核型与性别表型的相关性来判断,结果所得的基因定位有短臂的、着丝点区的,也有长臂的,难以统一。1983 年,库克(H. J. Cooke)结合用染色体序列克隆技术,情况则截然不同。1987 年,佩奇(Page)在 Y 染色体短臂上发现 140Kb 片段与人类 Y 染色体缺失、易位的性反转有关。其中,1.3Kb 片段克隆并制成特异性探针。发现所试过的有胎盘哺乳类动物的 X 染色体或 Y 染色体 DNA 均起交叉反应。佩奇的进一步工作表明,该 140Kb 片段中的 1 个 Y 染色体连锁基因的一个最靠 3' 末端外显子,还有 3 个外显子位于 140Kb 远端(近端点),最初命名为睾丸决定基因,后又改为锌指基因(Zinc finger gene),简称 ZFY,它出现于人类 XX 男性而不出现于 XX 女性;对小鼠的研究结果资料也支持这一点。1989 年,帕尔默(Palmer)等发现缺乏 ZFY 基因的 3 个 XX 男性对片段 1A1 都呈阳性。尽管他们的生殖系统不正常,表达还缺乏其他成熟基因,但毕竟都是男性,这不仅意味着 ZFY 基因不决定睾丸,而且暗示 TDF 也在 1A1 片段上。其实,1988 年辛克莱(Sinclair)在对袋鼠类的研究中就否定过 ZFY 即 TDF 的说法,并提出它对人类也不会是决定性别的原发信号,也就是说在 ZFY 之外还有其他性别决定基因。1990 年,辛克莱进一步在 ZFY 基因区的远侧,即 1A1 区又分离出另一个新基因 PY53 (3.1kb),并在成人睾丸组织上表达,被认为是 DAN 结合的转录子,称之为性别决定子基因(简称 SRY 基因)。1988 年,杰曼(German)提出性别的表达可用 ZFX 和 ZFY 的位点数目来决定,即所谓剂量效应;认为单剂量表达是女性,双剂量则发育为男性;ZXF 随 X 染色体的失活而失活,不管 X 染色体数目有多少,而每个细胞都只有一个 ZFX 位点表达,所以性别实质上取决于 ZFX 的表达;因此,临床上性别异常的阴差阳错都可归结于 X 染色体的失活不同。1989 年,谢勒(Scherer)以 Southern 印迹杂交技术对两例有正常 Y 染色体但其 Xp 重复 46XY 女性的 DNA 进行分析,认为 Xp 的重复即 ZFX 位点重复是性反转的原因,并支持佩奇的 ZFX 和 ZXF 在性别分化中是相互对抗的假说。1989 年,古德费洛(Goodfellow)和洛弗尔-巴奇(Lovell-Badge)同样分析了 XX 男性,却不含 AFY,而发现其相邻的 SRY 基因被包围于 35Kb 片段之中;与此同时,发现雄性小鼠也含有与人的 SRY 基因同源的 Sry 基因。邵桐苏进一步研究发现,XY 小鼠的 Sry 基因只有在受精 12 天前(即生殖嵴进行性分化时)的胚胎中有表达,因此 Sry 已代替 ZFY 被遴选为性别决定基因(TDF)的最佳候选基因。1991 年,该实验室库曼(Koopman)等已成功地将 Sry 基因的 14Kb 染色体片段用微量注射技术转移到 XX 雌性小鼠的受精卵,并得到了外观、体重甚至交配行为均正常的 XXSry 转基因小鼠,有力地证实了 Sry 基因是 TDF 基因,已成为性别研究的重大突破;但是该转基因动物的成功率不高,特别是睾丸体积较正常的要小,而且不能产生精子,是不育的,揭示了在 Y 染色体上、在 X 染色体上和常染色体上恐怕还有其相关基因,有待鉴定分析。

70 年代以来,在性别分化研究中一直在寻找睾丸决定基因(TDF),从 H-Y 抗原,ZFY 到 SFY 基因的确认。随着研究工作的开展与分子生物学技术的应用,研究者用各自的实验证据修正一个又一个假说。90 年代初,TDF 已不仅能分离、克隆,而且已成功得到 XXSry 转基因小鼠,不能不说是该研究领域的一个

突破。但性别决定与分化是非常复杂的,单就睾丸的发育来说,Sry 还不能像主导基因那样执行其功能。在 Y 染色体上、常染色体上还有多少连锁基因的相互作用,尚待一个个去鉴定。当今有了 Sry 基因,对于在分子水平上更加精确地鉴定性别,为探讨临床发现性别异常的发病机理提供了科学依据,而且为产前性别预测、保障优生优育开辟了应用前景。今后,人们对生物学的重大课题——性别调控进行深入的研究。

#### 参考文献

- 1 Sinclair A H, et al. Nature, 1988, 336: 780
- 2 Palmer M S. Sci. Prog., 1989, 73 (290pt): 245
- 3 Page D C, et al. Cell, 1989, 51: 109.
- 4 Sinclair A H, et al. Nature, 1990, 346: 240.
- 5 Koopman P, et al. Nature, 1990, 342: 940~944
- 6 邵桐荪. 百科知识, 1991, 3: 39~41
- 7 Bianchi Biol Reprod, 1991, 44: 393~7
- 8 Koopman P, et al. Nature, 1991, 351: 117~121.

(中国协和医科大学邵桐荪撰)

**计算神经科学** (computational neuroscience) 神经科学与计算机科学相互交叉而形成的一门边缘学科。其目标在于阐明神经计算的原理,探索神经结构完成何种功能,理解神经系统的状态所实现的信息表达的实质。所以,计算神经科学的唯一宗旨是研究脑如何工作。

计算神经科学的上述研究目标并不是新近才提出来的。它可以追溯到 20 世纪 40 年代初期的麦克卡洛克和匹茨(W. S. McCulloch, W. H. Pitts)的形式神经元假设,将神经元刻划为二值全或无单元,并表明由这种简单单元组成的网络能完成许多逻辑运算。1943 年,麦克卡洛克和匹茨发表了著名的《神经活动中所蕴含思想的逻辑运算》,一方面赋予神经元及由其组成的神经网络以符号逻辑描述,而对后来的形式神经网络的理论及应用研究产生持续的倾向性影响;另一方面,他们有关“通过神经联结和神经元适当的阈值,大脑内神经元的活动性可以表征关于外部世界的感官初始命题的一切有限逻辑组合”的科学思想,不仅成为以后脑理论发展的基础,而且也是 50 年代以来神经科学中主要实验路线的基础。他们的思想与图灵(A. M. Turing)等有关通用数字计算机、元胞自动机“控制论”,信息论等方面的思想一同形成计算神经科学的初步轮廓。

70 年代, Marr 提出视觉信息处理的计算理论。Marr 在思考神经结构所执行的计算与层次之间的关系时,从计算机科学中的层次概念出发,定义了视觉信息加工的 3 个层次:(1)计算层次(Computational level),将视觉计算任务分解为它的主要组成部分;(2)算法层次,确定操作形式,对于给定的输入能给出正确的输出;(3)计算的物理实现层次。Marr 强调算法层次的重要性和各层次之间的相对独立性。从事人工智能的学者将信息加工的观点带入神经科学和认知科学,但若以为这样就能解决认知问题那就是误会了。因为,如果不考虑神经生物学的约束,对认知过程的理论化即使不是不可能的,也是困难的。这两个原因:一是计算空间极为庞大,对于认知操作是怎样完成的有许多可取的解,而神经科学实验数据可以提供基本约束,缩小搜索空间;二是神经科学实验数据也会对在大脑中发生了什么,及如何演化的提供丰富的启示。同样,在另一方面只是了解了每个神经元及其发育,联结性响应特性如何仍然不能解决认知问题。这样,研究支配认知过程的网络与系统的集体计算特性就成为必然。就认识自然规律的过程而言,计算的各个层次之间的独立性是相对的。计算神经科学的一个重要工作假设,是高层次新显现的行为以一种系统的非线性的方式与低层次的行为相联系。因为与工程界在已知算法后可能有多种多样的实现不同,生物神经系统中从计算任务→算法→实现,只有一种选择,它受到物理的、生物化学的、遗传学的乃至进化的限制,认识这些限制的过程也就是认识大脑的神经计算原理的过程。这也正是新联结主义者和计算神经科学家

与 Marr 的计算理论之间的本质区别。

80 年代以来,由于神经科学的进展,使人们对大脑有了更多的了解;更有力量的计算装置的出现,对一些大规模神经网络简化模型的研究,使人们得到许多新的认识。人们正在把通过分子、细胞技术获得的微观水平的认识与通过行为研究和系统分析获得的系统水平的知识联系起来,以揭示神经系统在完成特定的计算任务时所采用的算法。

计算神经科学认为,检验功能性假设的一种方法是构造一个网络模型,其处理单元具有与神经系统相同的响应特性,然后表明网络能否完成所设定的计算任务。莱基(S. R. Leaky)和谢吉诺夫斯基(T. J. Sejnowski)采用这种方法构造了一种层状前馈网络。该模型能像视网膜和外侧膝状体那样对输入图像进行变换,并从图像的明暗阴影中计算出该图像表面的主曲率及其朝向。网络运用反向传播学习算法,最终能与照明方向无关地计算出表面曲率。虽然这种从阴影到形状感知的简化脑模型没有直接模拟皮层神经元间的具体联结,但它仍然对视皮层信息加工的机理提出一些非平凡的假设和预测。

弗里曼(W. J. Freeman)等关于嗅觉系统的模式生成与模式识别的神经生物学研究已成为自组织神经动力学与真实脑模型的一个范例。他们通过理论分析、计算机和硬件仿真及神经生物学实验证明,在嗅觉系统中,学习就是选择性地改变神经元之间的兴奋性联结的强度,并导致相应的神经细胞群建构的过程;而识别就是对由极限环吸引子表征的整体活动性模式的分歧过程。晚近的研究资料进一步证明,猴视皮层也是按照与嗅球相似的基本神经动力学原理组织起来的。看来,混沌吸引子是复杂性的不可避免的产物,它构成感知集体神经活动的基本形式,它作为一个可控噪声源,作为对已学感觉模式能连续存取的手段,作为学习新的感觉模式的手段,作为“I don't Know”状态或“值班”状态,不是大脑的一个偶然副产品,而很可能是大脑不同于现有人工感知系统的主要特性,这一点已经给神经网络数学物理理论中有关达到遍历性破缺的途径的研究,给有关高维混沌的数学物理理论研究提出明确的问题,带来新的启示。

赖夏特(W. Reichardt)等把精确的行为实验、神经电生理实验和系统分析相结合,研究蝇视觉指导与控制其飞行行为神经回路网络,并给出令人满意的简化脑模型,从而在计算的意义上阐明,在不断变化的环境中蝇以一种直觉上不明显的方式利用时变视觉信息,进而通过图形一背景分辨机制来控制自己的行为。在这项作为计算神经科学的研究范式中,脑模型的作用是在系统、网络、细胞和生物物理水平上提出合理的假设,并指导神经生物学和行为实验研究工作。

在经历了最初的停顿与徘徊之后,计算神经科学的数学模拟和计算仿真已开始相当贴近于生物学实验事实,而且已经构成对神经科学实验的有力指导。在计算神经科学进入 90 年代的时候,模型与实验之间的辩证关系已变得明显起来。计算模型在作出关于神经系统如何工作的预测上已变得较为成熟,这些预测单凭直觉是办不到的。而关于脑的生理学知识又反过来修正模型,使之与神经生物学真实更加一致。

计算神经科学的认识路线从麦克卡洛克一匹茨的形式神经元假设出发,历经感知机、并行分布处理网络、真实神经元模型,到神经系统自组织过程的定量预测,走的是一条循环上升的道路。计算神经科学的研究对于认识脑的微观组件及其联结的结构与功能变化,及其与宏观行为的变化之间的联系,已是不可缺少的研究领域。在未来计算神经科学的发展中,尚有一些重大问题需要回答:(1)简单神经系统的模型价值;(2)大脑的解剖结构及其中各功能集团的相对位置在神经计算中的作用;(3)神经科学中理论模型与生物实验的关系;(4)当试图对脑的神经计算建模时,空间尺度的选择;(5)当试图对脑的神经计算建模时,时间尺度的选择;(6)传统的计算机隐喻是否适合于入脑,等等。

计算神经科学的发展还处于初级阶段,充满不同观点的争论是必然的。随着当代计算机科学、神经科学、数理科学和认知

科学的汇集,关于脑与精神的一些主要奥妙的阐明,将不再是空想。

#### 参考文献

- 1 Marr D Vision, San Francisco, W F. Freeman and Company, 1982, 8~36
- 2 Schwarz (ed.) E L. Computational Neuroscience, London, The MIT Press, 1990, 46~55.
- 3 Churchland P S, Sejnowski T J. The Computational Brain, The MIT Press, 1991, 1~60
- 4 McCulloch, W S Pitts W H. Bull. Math. Biophys. 1943, 7: 89~93.
- 5 Reichardt W, Ai-ke Guo. Biol. Cybern. 1986, 53: 285~306.
- 6 Skarda, C A Freeman W J Behav. Brain Sci, 1987, 10: 161~195
- 7 Lehky, S R Sejnowski T J. Nature, 1988, 333: 452~454.

(中国科学院生物物理研究所郭爱克研究员撰)

### 神经元 *neurone* 神经元是神经系统的结构和功能单位。

它通过高度特异的突触与别的神元进行接触性联系,形成神经回路。一切神经活动包括脑的复杂功能(学习、记忆)都是通过特定的神经元及神经回路的活动而实现的。

神经元的形状、大小差异很大,但其基本结构是一个胞体及从胞体发出的轴突和多个树突。近年来,由于组织化学、免疫细胞化学以及放射自显影等新技术的应用,发现脑内存在许多特种神经元。它们的胞体合成特定的神经递质(乙酰胆碱、五羟色胺、多巴胺等)或神经活性物质,随着轴浆流送到轴突末梢释放。树突通常较短,重复分支。树突和胞体是神经元的感受和整合部位,接受传入的信息。经过整合的信息传导到轴突。轴突长短不一,短的几微米,长的可超过1m。在进程中常发出数个侧枝,轴突和侧枝最后终止时都分成繁复的末梢,其末梢部分膨大成球状的突触小结,与树突或胞体建立突触联系。一个神经元要形成几百至几千甚至更多的突触。据估计人类大脑皮质的神经元平均有30 000个突触。

最初认为神经系统是由连续的网络所组成,直至20世纪上半叶,用电子显微镜观察到突触间隙的存在,才证实神经元之间只有接触的关系,没有结构上的连续。突触由突触前膜的突触前膜、突触间隙和下一个神经元的突触后膜3部分构成。突触前膜和后膜较一般的神经元膜厚。突触间隙宽约(200~500) $\times 10^{-10}$ m,其间有由胶原蛋白和粘多糖构成的丝状物,其作用可能是使突触前膜和后膜保持相对的位置;丝状物上还存在一些能使神经递质降解的酶,突触小结内的突触小泡含有高浓度的神经递质,当神经冲动传来时,小泡内的递质释放,通过突触间隙作用于突触后膜,引起下一个神经元兴奋或抑制。因此,突触如同一个单向的阀门,只允许突触前神经元的冲动影响突触后神经元。突触是神经元信息传递的关键部位。近年来的研究得到许多很有意义的成果。关于突触的类型,除轴突-胞体型、轴突-树突型或轴突-轴突型外,神经元的任何部分都可以发出这种功能性的接触,例如树突-树突型、胞体-胞体型、树突-轴突型,甚至多个突触前神经元的末梢紧密地接触在同一个细胞上。因此,轴突不仅是传出信息,也可以接受信息;而树突和胞体不仅能接受信息,也可以传出信息。关于突触传递信息的形式,经过争论,已初步证实电性传递及化学传递这两种传递形式均存在。电突触的特点是没有或仅有特别窄的突触间隙(宽约 $20 \times 10^{-10}$ m),轴突末端的电流直接使突触后膜兴奋以传递信息。电突触主要存在于无脊椎动物的和脊椎动物的鱼类和两栖类。电突触有利于神经元群产生同步性放电。高等动物神经元之间的信息传递绝大部分是由化学性突触进行。这类突触的突触前膜有规律地局部增厚,向胞质侧伸出许多致密突,两突之间的突触前膜呈网格状,并与致密突共同构成引导突触小泡排布的突触囊泡栅栏,小泡式

的排布是神经递质呈量子式释放的形态基础。新近发现的突触素I,对神经递质的释放有调节作用。突触后膜的胞质侧常附着一层较厚的均质性的致密物质。后膜上存在着神经递质或其它信息物质的受体,当突触前纤维末梢释放的神经递质与后膜的相应受体结合后,改变后膜对 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 的通透性,使突触后膜去极化(或超极化),产生兴奋性(或抑制性)突触后电位。作为神经信息物质,除了神经递质外,已发现有百余种神经肽;免疫细胞化学技术显示出有一些神经肽与神经递质共存于一个神经元内,功能上相互协调。新近有学者提出一氧化氮(NO)可能是一种神经递质。此外,应用电镜技术观察到大颗粒小泡在非突触部位胞吐上的影像,表明神经信息除突触外,还可能存在非突触传质的机制。

在受体和离子通道的研究方面,乙酰胆碱受体蛋白和钠通道蛋白的一级结构被确定后,近年来又有一些受体和通道蛋白的氨基酸顺序相继被阐明,并发现有些受体和通道蛋白有很相似的结构。应用片膜技术已观察到多种受体和离子通道的功能特性。神经活性物质与细胞膜受体结合后,都通过第2信使激活相应的蛋白激酶(如蛋白激酶C),使蛋白质磷酸化,才产生或调节细胞的各种功能。在神经元中已发现的第2信使系统有环腺苷酸信使系统和肌醇脂信使系统。

神经系统具有可塑性,虽然是早就为人们所意识到的,但在过去相当长的时期中,对它的认识只是停留在表面现象和推测阶段。60年代后期以来,由于研究技术的进步,大量实验资料表明,神经元的形态结构、生化组分(包括蛋白质、核酸、酶类以及神经递质等)、电活动特性以及突触联系和神经回路等都具有可塑性。无论在外周或中枢,受损伤的神经元的轴突发芽,也可以诱导邻近的未受损伤的轴突发芽,去支配因受损伤而留下来的空白区;交感神经元的递质本应是去甲肾上腺素,但新生大鼠交感神经元离体培养中,在一定条件下可合成大量乙酰胆碱。最引人入胜的是移植的神经组织可在受体脑内生存、生长和分化,与受体脑组织形成传入和传出的突触联系,并具有功能活动。不同种属动物之间的脑组织移植已获得成功。冷冻保存脑组织移植后未发现有任何不良的影响,因而为临床应用提供了较充分的实验依据。

学习与记忆的机理也可能在于特定神经元的可塑性。早在一个世纪以前就有学者提出学习也许涉及神经元之间联系强度的变化。后来这一看法发展为记忆可能是由于突触传递效率的持续变化在脑内形成新神经回路所致。近年来发现不少突触传递效率变化的现象,用短串(10s),高频(15Hz)电刺激海马的兴奋性传入纤维,海马内的突触传递可在数秒钟内增强,其增强效果能持续数小时至数周,这种现象称为突触传递的长时程增强。又如,以刺激猫前肢皮肤引起前肢屈曲为非条件反射,电刺激大脑一红核纤维为条件刺激,经过一周时间结合后,可形成大脑一红核系统条件反射,其消失也较慢,很类似长期记忆。进一步的研究资料表明,其条件反射形成机制与大脑一红核纤维发芽并在红核细胞体上形成新的突触有关。还有资料证实,电刺激交感神经,可使酪氨酸羟化酶活力增强,至少可持续3天。酶活力增强是由于其mRNA的增加,表明调节发生在基因转录水平。毫秒级的信息交流(电刺激)可产生持续较长时间的神经元电活动或酶活性的变化,这就构成类似记忆的信息贮存,因而可能存在不同的刺激激活或抑制神经元内不同的基因群形成长期记忆的信息贮存。

人脑是自然界最复杂的系统,又被保护在骨性的颅腔内,因而对揭开它的奥秘,研究神经元在人脑功能活动中的作用,存在很大的困难。近年来发展起来的正电子发射断层摄影、神经磁成像和磁共振成像等新技术,有可能显示活体脑内神经细胞上的受体,完成学习任务过程中参与活动的脑区、药物作用的脑区及其局部浓度的测定。已观察到精神分裂症、孤独癖患儿及狂躁型抑郁症等患者的脑结构不正常。今后随着研究技术的进步,可以预期,以神经元的突触活动为中心,关于突触前神经细胞中神经活性物质的合成和释放及其调制,神经活性物质激活突触后神经元或其它靶细胞上的受体原理,受体被激活后神经元产生不同反

应的过程,以及神经信息储存与加工等方面的研究领域将会取得突破性进展,从而有助于了解神经系统以至人脑的工作原理,也有助于了解神经系统疾病的发病机制及寻找诊断和治疗方法。

#### 参考文献

- 1 许铁,江涛译,韩济生译.神经元100周年,生理科学进展,1992,23:96~97
- 2 Robertis EDP De, Robertis JR EMF De, Cellular and molecular neurobiology, in Cell and Molecular Biology, Eighth edition, Lea, Febiger, Philadelphia, PA, 1987, 660~711
- 3 Palay VC, Palay SL, Coexistence of neuroactive substances in neurons, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley, Sons, New York, Chichester Brisbane Toronto Singapore, 1984
- 4 Emson PC, Chemical Neuroanatomy, Raven Press, New York, 1983
- 5 Navone F, Greengard P, Camilli P DE, Synapsin I in nerve terminals: selective association with small synaptic vesicle, Science, 1984, 226: 1209~1211
- 6 Black IB, Adler JE, Dreyfus CF, Friedman WF, Lagamma FE, Rouch AH, Biochemistry of information storage in the nervous system, Science, 1987, 236: 1263~1268
- 7 Gash DM, Collier TJ, Sladek JR, Neural transplantation, A review of recent developments and potential applications to the aged Brain in Neurobiology of Aging, Ankh international Inc. printed in the U. S. A., 1985, 6: 131~150
- 8 National Institute of Mental Health, Prospects in clinical neuroscience: Potential for alleviating mental illnesses, in Approaching the 21st Century Opportunities for NINH Neuroscience Research, Rockville, Maryland, 1989, 15~27

(北京中日友好医院艾琳撰)

### 淋巴细胞亚群的分离及其功能测定

separation and determination of lymphocyte subsets 淋巴细胞是免疫系统最重要的细胞,是不均一的群体,各亚群具有不同的功能。随着科学技术的发展,利用淋巴细胞表面抗原的不同可以分离各种淋巴细胞亚群,从而进一步研究其功能及其相互调节作用,可分析各种疾病时何群细胞存在缺陷及免疫失调,为免疫生物学和医学的研究揭开新的一页。依靠T细胞表面标志分离高纯度的T细胞亚群,并由于杂交瘤技术的迅速发展导致越来越多的抗人白细胞分化抗原的单克隆抗体(McAb),这些抗体包括抗各亚群T淋巴细胞、B淋巴细胞、NK细胞、K细胞等McAb。

1982年11月巴黎会议上第1届白细胞分化抗原研究小组报告了对189种McAb的鉴定结果,分析各种McAb反应性间的差距,鉴别出对各种靶细胞抗原相似的或不同反应性的抗体群,属于十分相似的细胞反应和分子量的即归于同一分化群,并统一使用分化群作为抗原的命名。

人体周围血淋巴细胞主要含有T、B淋巴细胞。T淋巴细胞主要分成两大亚群,一类表现有CD4表面抗原,即T辅助细胞(Th)或诱导细胞亚群(Ti);另一类表现有CD8表面抗原,即T抑制细胞(Ts)或细胞毒性细胞(Tc),T细胞参与细胞免疫反应,B细胞参与体液免疫反应,二者相互联系和制约。

#### 分离淋巴细胞亚群的方法

(1)外周血单个核细胞制备,肝素抗凝静脉血加至淋巴细胞分离液上,离心2000rpm,20min,然后吸取两液交界面的白色细胞层即得。

(2)分离T、B淋巴细胞,2×10<sup>7</sup>淋巴细胞加1ml4%绵羊红细胞混匀,形成玫瑰花反应,T细胞比重大则下沉,上层液中为B淋巴细胞。用氯化胺缓冲液溶去T细胞外连的羊红细胞即为T淋巴细胞。

(3)花环法,T细胞用CD4McAb包被,然后和山羊抗鼠IgG包被牛红细胞形成玫瑰花,即为CD4细胞,非玫瑰花细胞即为

CD8细胞。相反,T细胞用CD8McAb包被,再和山羊抗鼠IgG包被牛红细胞,产生CD8细胞的玫瑰花结,非玫瑰花细胞即为CD4细胞。

(4)铺皿法(Panning):根据1988年杨(C. Young)报道的方法,将亲和纯化的羊抗鼠IgG加入到塑料平皿中,再加入5ml 0.05mol/L的Tris-HCl(H<sup>+</sup>浓度5×10<sup>-10</sup>mol/L)缓冲液混匀。4℃过夜,次日吸去上清液,用0.01mol/L的PBS(H<sup>+</sup>浓度6.31×10<sup>-8</sup>mol/L)洗3次,再用含1%小牛血清和0.01mol/L的PBS5ml室温下作用15min,然后再用0.01mol/L的PBS洗3次,备用。将10<sup>6</sup>个淋巴细胞加入100μl McAbCD4或McAbCD8,4℃作用30~45min,然后用Hanks'液洗3次,最后用培养基悬浮细胞,加入到上述的包被二抗的塑料平皿中,每皿加入总量3ml含细胞10<sup>7</sup>个,于室温中1h,15min轻摇1次,吸去非粘附细胞,粘附细胞加入Hanks'液用力吹打,洗脱下来的即为所需的CD4或CD8细胞,再用Hanks'液洗3次。

(5)亲和层析法:羊抗鼠IgG和溴化氰活化的Sephrose 4B结合后装柱,柱床体积为2.5ml,用0.01mol/L H<sup>+</sup>浓度6.31×10<sup>-8</sup>mol/L的PBS平衡柱体,继用0.1mol/L磷酸缓冲液和RPMI1640液(抗生素浓度加倍)进行柱无菌处理,再用RPMI1640液平衡柱体。将CD4、McAb标记好的淋巴细胞置层析柱上,待细胞悬液进入柱体后,再加0.2ml RPMI1640液,4℃孵育20min,用40ml 1640液冲洗柱体,收集洗脱液,离心沉淀得到去除了CD4亚群的淋巴细胞。随后柱顶加入1ml含100μg羊抗鼠IgG的PBS,4℃放置30min后再用40ml冷PBS含10μg/ml羊抗鼠IgG冲洗柱体,收集洗脱液,离心沉淀即可得到CD4细胞。若用CD8McAb标记淋巴细胞过柱,首先洗脱的为非CD8细胞,随后再用羊抗鼠IgG的PBS洗脱下来即为CD8细胞。

(6)补体介导杀伤技术(细胞溶解):T细胞首先培养于CD8McAb的培养液中100μl/10<sup>6</sup>细胞,37℃ 20min后,细胞离心300×g,吸去含游离抗体的上清液。淋巴细胞沉淀物复溶于10%兔补体的溶液中,37℃培养1h,离心300×g 10min,吸去上清液,沉淀复溶于新鲜兔补体同上,培养1h后吸去兔补体,留下的为CD4细胞,用25ml RPMI1640液洗4次。若用CD4McAb和兔补体溶解CD4细胞则可获得CD8细胞。

#### 常用的淋巴细胞亚群的功能测定方法

(1)镜检法,肝素抗凝血滴入培养液中,内含各种丝裂原PHA、ConA、PWM和LPS,分别激活不同的淋巴细胞群体,导致细胞转化,利用显微镜观察转化细胞及母细胞数占总淋巴细胞数的百分率。本法常用的仪器较简单,过去曾被广泛应用,但观察结果有主观误差,现已很少应用。

(2)放射性同位素标记化合物掺入法,肝素抗凝血0.2ml滴入RPMI1640培养液2ml中,每毫升分别含丝裂原PHA100μg/ml,ConA10~30μg/ml,PWM5~10μg/ml或LPS20μg/ml,37℃孵育56h后加入标记化合物<sup>3</sup>H-TdR 0.6-1μCi,<sup>14</sup>C-UR0.3μCi,<sup>3</sup>H-酪氨酸2μCi或<sup>14</sup>C-缬氨酸1μCi,以分别反映各群淋巴细胞转化过程中DNA、RNA或蛋白质合成能力。继续培养16h,培养结束时每个样品加入蒸馏水6ml,滴于具有抽滤装置的49型玻璃纤维膜上过滤,按序以生理盐水5ml洗涤,5%三氯醋酸5ml固定,无水乙醇3ml漂白,干燥。滤膜烘干,置二甲苯闪烁液(含PP0.4%,POPOP 0.04%)5ml中,用液体闪烁计数器测定每分放射性计数值(CPM),除按0.2ml血计算CPM外,还根据血样中淋巴细胞绝对值换算成每2×10<sup>6</sup>淋巴细胞的CPM。后者反映掺入更准确。每份标本同时设2~3个平行样品,数据取平均值。PHA·ConA·PWM激活淋巴细胞在国内外已被广泛应用。但是一般认为LPS只对动物(小鼠)脾脏的B淋巴细胞产生激活作用。1975年林(N·R·Ling)认为LPS对人血B淋巴细胞不起作用。苏燎原应用上述掺入法成功地用它激活人血B淋巴细胞,并测定了结核病、麻疹、肾炎、肿瘤等病人加以验证,能反映体液免疫的动态变化。用上述方法分离的淋巴细胞亚群均可

用单独或混合培养,接受各种丝裂原激活后掺入法可以反映各群细胞的功能及互相协同作用,体现免疫调节。

(3)细胞集落法:淋巴细胞分别用含丝裂原的培养液制成单细胞悬液,加至含0.3%琼脂适合人血淋巴细胞增殖的培养基中,每皿接种 $5 \times 10^4$ 个细胞/0.2ml,放入密封的含饱和湿度和一定浓度的CO<sub>2</sub>的容器中,37℃培养7d收获计数,生长的集落形态好,轮廓清楚,50个细胞以上计为1个集落。

(4)自然杀伤(NK)活性测定:分离的单个核细胞,应用<sup>3</sup>H-TdR标记人白血病K562细胞(或其他肿瘤细胞)作为靶细胞,以效应细胞与靶细胞等于30~50:1,作用46h,结束时用滤膜法收获细胞,液体闪烁计数器测量K562细胞经释放放射性后还存留在细胞内的放射性活度,以间接反映淋巴细胞杀伤肿瘤细胞的活性。也有人应用<sup>51</sup>Cr或<sup>125</sup>I-UdR释放试验。

(5)K细胞活性测定:用RPMI1640液配成 $2 \times 10^6$ 个/ml K562细胞悬液,注入兔静脉内连续5d,注入量分别为1、2、3、4、5ml,末次注射后1周抽血,用沉降环法确定抗血清效价为1:3200,然后抽兔血清分离血清,灭活后即作为抗K562细胞的血清。K562细胞经<sup>3</sup>H-TdR标记后作为靶细胞。外周血单个核细胞与K562细胞的比例为30~50:1,再加入抗K562细胞的血清。测定活性方法同(4)。也有人用Na<sup>51</sup>CrO<sub>4</sub>标记鸡红细胞作为靶细胞,加相应的抗鸡红细胞血清(用上述方法免疫制成)和待测淋巴细胞共同温育,根据<sup>51</sup>Cr释放量反映K细胞的活力。

淋巴细胞及其亚群的研究是基础免疫中的一个重要课题,它为肿瘤免疫的研究开拓了一条新的途径,把这些基础研究的结果运用到临床已经有了一些探索,需要进一步深入。利用T细胞的McAb分离T淋巴细胞亚群可测定其功能及各群的相互调节作用,还可对T淋巴细胞性白血病或淋巴瘤进一步分型,一些自家免疫性疾病及衰老过程中免疫系统的平衡状态是值得注意的问题。微观研究仍在不断深入,如CD4中有5个抗体,它们可能是识别同一大分子上的不同抗原决定簇的抗体,说明在CD4细胞中还存在着更小的亚群,有些抗体呈现交叉反应,以上问题有待探索。

#### 参考文献

- 1 汤美华,等.介绍人白细胞分化抗原的国际命名法,国外医学输血及血液学分册,1987,10(4),231~235
- 2 白炎,抗人T淋巴细胞表面分化抗原的单克隆抗体,中华病理学杂志,1983,12(4),305~308
- 3 洪锦心.人体淋巴细胞亚群研究进展.肿瘤,1984,4(1):31~34
- 4 徐映东,等.美洲商陆丝裂原(PWM)激活淋巴细胞及<sup>60</sup>Co $\gamma$ 线辐射效应的研究,辐射研究与辐射工艺学报,1990,8(1):16~21
- 5 许玉杰,等. ConA 诱导 CD4 和 CD8 细胞的调节功能和辐射效应研究.北京:中国核科技报告 CNIC-00485 原子能出版社,1991
- 6 Young C, et al. A comparative investigation of three methods of separation of CD4 and CD8 cells from human peripheral blood cells, J Immunol Methods, 1988, 107: 31~40
- 7 苏燎原,等. <sup>60</sup>Co $\gamma$ 线对肿瘤病人 T、B 淋巴细胞转化过程中 3 种大分子合成的效应,遗传学报,1985,12(4):309~314
- 8 Ling N R. Lymphocyte Stimulation, 1975P, 114, 241. North-Holland and Pub. Comp. Amsterdam
- 9 苏燎原,等.用同位素掺入法观察人血 B 细胞转化的初步研究,中华微生物学和免疫学杂志,1982,2(6):346~348
- 10 苏燎原,等. NK 细胞及 K 细胞的活性测定及其影响因素,中国免疫学杂志,1991,7:3

(苏州医学院博士生导师苏燎原教授撰)

**支持细胞在生精过程中的作用** 睾丸曲细精管支持细胞在精子发生过程中具有支持、营养生殖细胞的作用。80年代

以来,人们发现支持细胞具有促进生精过程的多项功能。它对构成血液——睾丸屏障以及它分泌雄激素结合蛋白和抑制素都具有重要作用。

**支持细胞及其功能** 支持细胞为高圆锥形细胞,自由细精管的基底部伸向管腔,丰富的胞浆突起包绕邻近的各级生殖细胞,支持精原细胞不断发育并逐级朝管腔移动。此外,血液内的各种物质是经支持细胞转运给生殖细胞的。另外,支持细胞产生液体,其分泌约为4~50 $\mu$ l/g睾丸/h,但有种属差异,是否受激素调节尚无定论。某些因素如睾丸局部受热、手术引致隐睾症以及切除垂体均可使液体分泌减少。睾丸内液体有利于精子从曲细精管经睾丸网转入附睾。液体成份与血液淋巴液的成份有别,其中葡萄糖和果糖的含量较少,而己糖醇和右旋-肌醇的含量相对较高。液体内有些蛋白显然是睾丸液体所特有的,如前蛋白等。有些酶的活性亦较高,而苹果酸脱氢酶的同功酶和天门冬氨酸转氨酶同功酶是睾丸液体特有的酶。睾丸液体蛋白激素的浓度与血内的浓度相当。此外,还含有各种类固醇激素,其中5 $\alpha$ -双氢睾酮和睾酮的浓度则相对较高。另外,支持细胞操纵晚期的精子细胞释入管腔。支持细胞具有微丝,内含肌动蛋白,具有收缩作用,从而促进各级生殖细胞向管腔移动及其后精子细胞成熟释放。Christensen 报告,剥离的曲细精管能从内源性的睾酮前体或从外源性的 21 碳水化合物生成雄激素。Dorrington 在未成熟大鼠的离体支持细胞培养中发现 3 $\beta$ -羟基类固醇脱氢酶和 5 $\alpha$ -还原酶的活性,而且有报告进一步证明支持细胞能把外源性的睾酮芳香化,转变成雌二醇,并认为这一转变受 FSH 调节。

支持细胞有很强的吞噬能力,它吞噬变性的生殖细胞和残留体以及细小的异物颗粒。Steinberger 在支持细胞培养中亦发现这些作用。此外,支持细胞还分泌纤维蛋白酶原激活因子、雄激素结合蛋白和抑制素等。

支持细胞间的紧密联接是血液-睾丸屏障的重要组成部分。血液内有许多物质不能随意进入曲细精管,而其内部液体又含较高浓度的雄激素,因此推测曲细精管可能存在特殊的屏障,以阻止某些物质进入。利用同位素标记和电镜的研究证明,标记物从曲细精管基底部朝管腔移动,但被阻止在相邻的支持细胞间的紧密联接处,从而确认支持细胞特殊化的联接复合体是血液-睾丸屏障(血-睾屏障)。虽然有些种属动物的曲细精管基底部固有膜上的类肌细胞具有一定的收缩功能,亦起部分屏障作用,但不论任何种属动物,支持细胞间的屏障作用都是最有效的。这一联接复合体的超微结构显示,联结在一起的两个相邻的细胞膜间有裂隙,每一侧都有成丛的微丝沿着细胞膜排列,其内侧紧接着一系列与细胞膜平行的内质网池。此外,冰冻-复型的研亦表明,支持细胞的紧密联接显示许多与膜的融合相对应的平行弯曲排列的颗粒。Anton 报告血-睾屏障具有相对稳定性。Camtin 对猴的支持细胞间联接的研究证明,紧密联接不断地出现分开、闭合、再分开、又闭合的现象,具有动力学变化。因此,在生殖细胞朝管腔移动时,原先存在的联接关闭很快打开,允许生殖细胞通过。有人认为这一过程可能是通过纤维蛋白酶原的激活所触发,而且是一瞬间的过程,并不引致血-睾屏障的破坏。血-睾屏障将曲细精管内的生殖细胞分成两个生理室,一个为基底室,位于相邻支持细胞间的联接与基底膜之间,内有精原细胞、前细线期精母细胞,另一个为近管腔室,位于联接与管腔之间,内有细线期精母细胞、粗线期精母细胞以及精子细胞。

精原细胞与体内其他干细胞一样,按有丝分裂方式产生二倍体细胞,而且是在一定长度的曲细精管内以同步方式进行。然而移向近管腔室的精母细胞则按减数分裂的方式产生单倍体细胞。现在认为血-睾屏障把两种不同分裂方式的生殖细胞绝然分开,可防止睾丸生殖细胞遭受免疫损害,以使生精过程顺利进行。

**雄激素结合蛋白的产生** 在精子发生过程中,精原细胞发育成粗线期精母细胞需要激素调节。另外,精母细胞的成熟减数核分裂依赖适量的睾酮水平才得以进行。如何在曲细精管内部至附睾液内保持足够浓度的雄激素,对生殖细胞的发育、成熟都很

重要。1971年, Rützen和Hansson首次分别在大鼠附睾液内证明雄激素结合蛋白(ABP)的存在。以后,其他学者在家兔、羊、牛、猪等动物和人的睾丸、睾网、附睾液内亦发现ABP,从而证实雄激素通过与ABP结合使曲细精管内部聚集更多的雄激素。为了查明ABP的来源,首先通过结扎睾丸输出管,表明ABP是睾丸本身产生的。通过机械分离曲细精管和间质组织并进行匀浆测定,证明ABP存在于曲细精管内部。经用一定剂量的赛普罗隆或放射线处理后,生殖细胞几乎完全丧失,而支持细胞基本不受损伤,此时测其ABP浓度不但未下降反而增高,表明支持细胞产生ABP。其后,Citro和Lipshutz报告离体培养的支持细胞分泌ABP,遂确证了ABP的来源。ABP对雄激素具有特殊的亲和力,它对二氢睾酮的结合力较对睾酮的结合力大2~3倍。Lipshutz通过离体细胞培养首次证实人体支持细胞分泌ABP,并认为ABP是支持细胞功能的重要标志之一。ABP由睾丸支持细胞产生后,经睾丸输出管到达附睾。对大鼠测定睾丸、睾丸输出管及附睾内的ABP水平,结果以睾丸输出管的浓度最高。这是由于曲细精管液体在到达睾网之前已被稀释,流经睾丸输出管和附睾时又重吸收大量的水分。此外,生殖活动有季节变化的动物,繁殖季节的ABP水平明显增高。

未成熟大鼠中,ABP的出现与促性腺激素开始分泌的时间一致,表明ABP受垂体调节。在切除垂体后3d,附睾头部ABP的浓度只有对照组动物的40%,10d后则完全消失。然后注射FSH和LH混合制剂,经5d后ABP的浓度急剧增加。另外,利用高纯度的人的FSH和LH制剂分别给未成熟的动物和切除垂体的成熟动物,结果进一步证实ABP受FSH的影响。ABP的水平随FSH的剂量增加呈线性上升,而LH的作用很小。此外,ABP对垂体的反馈抑制亦很敏感。当给予大剂量的睾丸酮时,大鼠睾丸和附睾的ABP随即下降。

ABP的生理功能已趋明确。在精子发生过程中,垂体促性腺激素起必要的作用。LH刺激睾酮产生,而FSH刺激支持细胞产生ABP,ABP与雄激素结合增加雄激素在靶细胞周围的积聚,当睾酮尚未达到成年动物的水平时,ABP的这种睾酮“放大”作用对青春前期启动精子发生尤其重要。ABP维持较高浓度的睾酮以利于生殖细胞内受体的摄取。

分泌抑制素 Inhibin 在牛的精浆内发现一种非类固醇性垂体抑制因子,证实了1932年McCullagh的推论。现已从家兔、羊、牛等动物的睾丸、睾网液、精浆和精子中提出抑制素。1985~1986年间抑制素的分离纯化工作获得进展,Linq和Vale等发现抑制素由两个亚单位( $\alpha$ 亚单位分子量为14000)组成,分子量为32000。在不同种属动物中可发现抑制素分子的多形性,其生理作用正在阐明。从牛精浆提取的抑制素可抑制hcg诱发小鼠子宫增重反应,并可抑制阉割大鼠FSH的升高。此外,把人的精浆抑制素抗体注入阉割的成熟雄性大鼠,可选择性地增高FSH水平。表明可中和内源性的抑制素。Steinberger报告,从离体大鼠支持细胞培养基分离的抑制素可抑制培养的垂体细胞分泌FSH。另外,Lumpkin亦证实抑制素对丘脑下部特定部位发生作用。从支持细胞释放的抑制素通过血流达到丘脑和垂体,并在那里对FSH的分泌起抑制作用,而且还可在曲细精管内由局部作用减少精原细胞的有丝分裂,说明支持细胞分泌抑制素参与神经内分泌的反馈调节。有人认为抑制素可使FSH和LH的分泌皆受抑制,但比较普遍的看法是,抑制素主要抑制FSH的分泌。而且已证明,成熟大鼠垂体细胞对抑制素的反应比未成熟大鼠更敏感。此外,Salram报告,如果要抑制LH的分泌,需增加10倍的抑制素。Grootenhuis报告,FSH也能诱发未成熟大鼠产生支持细胞免疫活性的抑制素,但没有生物活性。Tsatsoulis表明它是细胞损伤后的一个重要指标。从动物卵巢滤泡液分离出抑制素,而且对FSH具有抑制作用,表明抑制素不是男性生殖系统特有的物质。

支持细胞许多生理功能的发现,提供了男性生殖生理的新知识。支持细胞与间质细胞相配合调节精子发生过程并参与丘脑

下部—垂体—睾丸轴神经内分泌负反馈调节。

努力从干扰支持细胞生理功能着手达到干扰生育过程,开展高效安全的男性节育研究,也是一条可取的抗生育途径。此外,支持细胞间紧密联接的知识提示,干扰精子发生的节育药应考虑选择一种易于通过血睾屏障的化合物方能达到高效。

#### 参考文献

- 1 Grootenhuis A J, et al. *Mol - Cell - Endocrinol*, 1990, 74: 125~132
- 2 Tsatsoulis A, et al. *Horm - Res*, 1990, 34: 254~259  
(同济医科大学计划生育所余铭清撰)

**肥大细胞 mast cell MC** 机体内一种恒定的间叶组织成分,广泛存在于人体各种组织成分之中。MC参与机体速发型变态反应,并通过释放多种介质,参与各种炎性过程,在一些其它疾病和病变过程中也具有重要作用,如组织的纤维化乃至肿瘤等亦与MC有一定关系。因此,研究MC的病理意义颇为重要。

1987年Paul Ehrlich根据其胞浆颗粒的异染性而首次在人身体结缔组织中发现MC。次年他又观察到在某些肿瘤组织周围有MC数量的增多,因而提出MC与肿瘤之间存在一定关系的设想。

正常情况下,MC的数量在皮肤、肺、淋巴结、胃肠道以及乳腺和子宫等组织中甚为丰富;在疏松结缔组织中,多位于血管周围在腹腔中也较多。计算表明,在真皮,MC的密度在石蜡切片中为 $7225 \pm 2167/\text{mm}^2$ 在环氧树脂半薄切片中为 $12000 \pm 5100/\text{mm}^2$ MC在肺的密度为 $350/\text{mm}^2$ ;在另一些组织如肝、脾、肾、肾上腺及骨髓中,MC的数量却很少。

于1985年Hardy和Wesbrook首次证明,大鼠体内不同解剖部位MC的形态不同。1905年Macimow报道,可以根据组织染色特性,将大鼠小肠粘膜“不典型”MC与其他解剖部位的MC加以区别。60年代,Enerback发现采用不同固定剂和不同组织化学染色方法,可将大鼠小肠粘膜的“不典型”或“粘膜”肥大细胞(MMC)与出现在皮肤、腹腔和其它部位的结缔组织肥大细胞(CTMC)加以区别。以后又发现某些寄生虫感染的大鼠,其小肠MMC明显增加,这种寄生虫感染后的MC增多是T-细胞依赖性的,故此现象不出现于无胸腺裸鼠。相反,CTMC的增殖则不依赖T-细胞,在无胸腺裸鼠,CTMC数量与正常动物体内相似。以后的免疫组化研究发现,这两型MC的胞浆颗粒所含蛋白酶亦不相同;MMC含大鼠肥大细胞蛋白酶I(RMCP I),而在CTMC则含大鼠肥大细胞蛋白酶I(RMCP I)。

Craig和Irani等同时于1986年,Schwartzg于1989年,先后分别用免疫组化方法研究,发现在人体不同的MC亚型,其所含中性蛋白酶的组分不同,皮肤、腹腔的大部分MC含类胰蛋白酶和胃促胰酶,并称之为TCMC或MC<sup>TC</sup>,而在肺与小肠粘膜的大部分MC仅有类胰蛋白酶,称TMC或MC<sup>T</sup>。他们将此两型MC与大鼠的相比较。认为TCMC类似CTMC,TMC则类似MMC。但并非人体各部位的所有MC<sup>T</sup>和MC<sup>TC</sup>,其特性均与大鼠的相应MC完全一致。例如在对48/80或P物质的刺激反应时释放组织胺以及对色苷酸二钠(DSCG)抑制其活性的敏感性方面均表现出一定的差异。大鼠腹腔或皮肤中的CTMC对48/80或P物质的刺激以及对DSCG的抑制作用均很敏感。提纯的人体皮肤MC(85%MC<sup>TC</sup>)虽对P物质刺激非常敏感,但对DSCG的抑制作用则不敏感。相反,从人体结肠或肌肉中分离出来的MC(60%MC<sup>T</sup>)对P物质刺激不敏感,但对DSCG刺激抑制组织胺的释放却很敏感。因此,详细分析人体不同解剖位置中MC表型的各个特征,对阐明MC在健康与疾病包括肿瘤中的作用,是颇有意义的。

人体中MC亚型还可以从超微结构如核的形态,胞浆内颗粒的大小、数量以及其特异的亚微结构形态等方面加以鉴别。

关于上述MC异质性的问题,有多种可能的解释;它们分别属于两类不同细胞系列,即犹如3不同粒细胞一样,各自为一独

立的细胞群,并有各自的特异表型。但是这一观点并未能确立,后来有人证实,两种不同类型 MC 均来自骨髓,但有各自的发育道路,特别是机体内微环境对 MC 表型的发展起着十分重要的作用。许多动物实验证实,在一定条件下,MC 表型可以转换。例如来自骨髓的 MC 在有 IL-3 因子培养时,呈现出类 MMC 特征,但当这种 IL-3 依赖的 MC 转到先天性 MC 缺陷的 WBB6F<sub>1</sub>-W/W<sup>V</sup> 小鼠的腹腔以后,则在组织化学、超微结构、生化免疫等方面又获得类 CTMC 的特征。此种 CTMC 在粘膜表现为 MMC,在肌层则表现为 CTMC。

表 1 两型 MC 区别

|                                     | MMC               | CTMC              |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 体内主要位置                              | 肠及肺               | 普遍存在              |
| 存活时间                                | <40d              | >40d              |
| T 细胞依赖性                             | +                 | -                 |
| Fc <sub>ε</sub> 受体数                 | 2×10 <sup>5</sup> | 3×10 <sup>4</sup> |
| 组胺含量                                | +                 | ++                |
| 胞浆 IgF                              | +                 | -                 |
| LTC <sub>4</sub> , PGD <sub>2</sub> | 25:1              | 1:40              |
| 色苷酸二钠及茶碱对组织胺释放的影响                   | -                 | +                 |
| 重要糖蛋白                               | 硫酸软骨素             | 肝素                |
| 重要蛋白酶                               | RMCP I            | RMCP I            |

表 2 原合成介质

| 介质         | 分子量       | 作用                           |
|------------|-----------|------------------------------|
| 组胺         | 111       | 血管扩张,增高毛细血管通透性,促化作用,支气管收缩    |
| 肝素         | 60 000    | 抑制血凝                         |
| 酶:类胰蛋白酶    | 13 000    | 蛋白溶解,促 C3,产生 C3。过敏毒素,增加血管通透性 |
| β-乙酰葡萄糖胺酶  | 15 000    | 通过 C3 转化酶裂解氨基葡萄糖残基           |
| 趋化因子及激活因子: |           |                              |
| ECF-A      | 380/2 000 | 具嗜酸性粒细胞及中性粒细胞趋化性,活化血小板       |
| NCF        | >750 000  |                              |
| PAF        | 600       |                              |

表 3 新形成介质

| 介质                                            | 形成途径       | 作用                                     |
|-----------------------------------------------|------------|----------------------------------------|
| 花生四烯酸代谢产物(LTC <sub>4</sub> LTD <sub>4</sub> ) | 脂氧化酶代谢途径产物 | 血管活性,支气管收缩、造化和/或促化                     |
| 前列腺素(PGD <sub>2</sub> )                       | 环氧化酶代谢途径产物 | 支气管平滑肌收缩,血管通透性增加,血小板聚集,血管扩张,嗜酸性粒细胞趋化因子 |

MC 释放的介质达 40 余种,可概分为两大类,即细胞激活时原合成并贮存在颗粒中者及新合成者。

不同亚型 MC 所产生的介质不同,在疾病中所起作用各异。在消化道的变态反应性以及非特异性炎症中,主要 MMC 起作用,它们可诱导、维持和扩大胃肠道的炎症,还可参与其修复过程,所释放的介质能增高血管通透性,吸引炎性细胞,特别是嗜酸性粒细胞。在与嗜酸性粒细胞结合时具细胞毒性,可直接杀死血吸虫的童虫。MMC 还参与呼吸道变态反应,特别是在支气管哮喘的病

因发病学中,其所释放的炎症介质,引起哮喘反应,在患者肺组织可见在大量脱颗粒 MMC。过敏性鼻炎时,鼻粘膜细胞中亦见在 MMC 明显增多。CTMC 参与组织的纤维化过程,所产生的组胺能通过 H<sub>2</sub> 受体刺激纤维母细胞增殖,导致胶原合成和分泌增多,电子显微镜下可见纤维母细胞吞噬 MC 释放的颗粒,从而被激活,加速原胶原分子的合成与分泌。

MC 与肿瘤之间也存在一定的关系。在某些肿瘤组织周围,见有 MC 数量的明显增多。但关于其意义的深入研究结果,文献报道则互相矛盾:一些研究表明,MC 能促进肿瘤生长,并与肿瘤的浸润和转移有关,认为肿瘤间质的异染性(由于 MC 颗粒的释放)与肿瘤的浸润性生长区是一致的,可作为肿瘤浸润性生长的标志;MC 通过脱颗粒和释放溶蛋白酶,溶解和破坏肿瘤周围间质,有利于肿瘤的浸润和转移,MC 释放肝素刺激毛细血管内皮移动,释放潜在内皮细胞生长因子,介导肿瘤血管生成和肿瘤血管化,因而有利于肿瘤生长,等等。与上述相反的报道是,MC 能抑制肿瘤生长,因而对宿主起保护作用,并认为 MC 抑制肿瘤生长与 T 细胞介导的细胞毒性作用有关。Farran 和 Nelson 提出,5 羟色胺参与细胞毒性, Henderson 等则提出,卤化物依赖的过氧化酶介导的途径在细胞毒性作用方面很重要。根据蛋白酶分子排列顺序确定,克隆了的细胞毒性 T 淋巴细胞的细胞毒性部分——丝氨酸蛋白酶,与 RMCP I 相类同,提出 MC 蛋白酶是其细胞毒性活性部分。特别是对一些人体软组织肿瘤及胃癌患者的研究表明,肿瘤组织内或其周围 MC 的数量与患者生存期呈正相关关系。

由于 MC 在机体内分布十分广泛,而各种解剖学部位及各种不同病变中,MC 的数量、表型特征又常不相同,因此深入探讨 MC 异质性与机体微环境的关系、各种疾病与 MC 不同表型之间的关系,以及不同表型 MC 释放的介质分别在不同疾病和病变中的作用机理等问题,是相当复杂而又十分重要的。特别是 MC 与肿瘤之间的关系问题还远未查明,如能深入研究 MC 所释放介质对癌基因表达及对肿瘤发生、发展的影响,从分子水平阐明 MC 与肿瘤的关系,则不仅具有重要的理论意义,也将具有重大的实用价值。

参考文献

- 1 Irani AA, et al. Two human mast cell subsets with distinct neutral proteasitons. Proc Natl Acad Sci, USA 1986, 83: 4464
- 2 Otus K, et al. Phenotypic changes of bone marrow-derived mast cells after intraperitoneal transfer into ww mice that are genetically deficient in mast cells. J Exp Med., 1987, 165:615
- 3 Kanakura Y, et al. Multiple bidirectional alterations of phenotype and changes in proliferative potential during the in vitro and in vivo passage of clonal mast cell populations derzved from mouse peritoneal mast cells, Blood, 1988, 72: 877
- 4 Dutton ET, et al. 3T3 fibroblasts induce cloned interleudin 3-dipendint mouse mast cells to resemble connective tissue mast cells in granular consistency. Proc Natl Acad Sci USA. 1988, 85:569
- 5 Abe T, et al. Worm expulsion and mucosal mast cell response induced by repetitive IL-3 administration in Strongyloides rattiinfected nude mice. Immunology, 1988, 63:188
- 6 Broide DH, et al. Functional and biochemical characterization of rat bone marrow-derived mast cells. J Immunol, 1988, 141:4298
- 7 Burd PR, et al. IL-3 dependent and -independent mast cells stimulated with IgE and antigen copress multiple cytokines. J Exp Med, 1989, 143:135



- 8 Craig SS, et al. Ultrastructural analysis of maturing human T and TC mast cells in situ. *Lab Invest*, 1989, 60:147
- 9 Hültner L, et al. Thiol-sensitive mast cell lines derived from mouse bone marrow respond to a mast cell growth-enhancing activity different from both IL-3 and IL-4. *J Immunol*, 1989, 142:3440
- 10 Galli JS. Biology of Disease New Insights into "the riddle of the mast cell": Microenvironmental regulation of mast cell development and phenotypic heterogeneity. *Lab Invest*, 1990, 62(1):5

(武汉同济医科大学阮幼冰教授撰)

**间皮细胞** 起源于胚胎时期的中胚层脏层, 覆盖于身体的浆膜腔, 如心包腔、腹膜腔和胸膜腔等部位。1863年以雷克力豪森(von Recklinghause)为代表的学者, 把间皮细胞归属于内皮细胞。1875年诺伊曼(E. Neuman)等则把间皮细胞归类于上皮细胞。1890年迈诺特(C. S. Minot)和1891年马尔(F. P. Mall)认为, 间皮细胞在形态和功能上既不同于内皮细胞, 也有别于上皮细胞。于是他们称之为间皮细胞。在临床医学上, 作为生命支持疗法的腹膜透析广泛应用, 腹腔手术后腹膜粘连的发生和自体腹膜血管修复术的开展, 促使进一步研究间皮细胞的形态和功能。

间皮细胞游离面有许多微绒毛。1893年科洛索瓦(H. Kolosow)最早在实验动物的腹膜和心包膜间皮细胞表面观察到平均长度为 $2\mu\text{m}$ , 均匀而密集分布于整个细胞表面的微小胞质突起。他命名这种突起为“茸毛”。尼古拉斯(L. Nicolas)和穆斯卡特略(S. Muscatello)分别在大鼠小肠的浆膜也发现同样的“茸毛”。1936年克洛宾(G. Chlopin)的研究, 并未观察到“茸毛”。他指出, 这种“茸毛”可能是蛋白质在细胞表面凝固所形成。同年, 波斯卡·泰塞(L. Poska·Teiss)在大鼠心外膜间皮细胞的实验中, 也没有发现“茸毛”。马克西莫瓦(Z. Maximow)则提出了异议。1953年博里斯科(A. Borysko)等在研究鸡尿囊细胞的实验中, 发现细胞表面有许多类似小肠绒毛的突起, 但更为纤细。所以, 他们称这种微小突起为“微绒毛”。1954年奥杜(D. L. Odor)首先在电镜下证实了间皮细胞表面的微绒毛, 并对其内部结构作了初步的描述。微绒毛由中央的细丝区和周围的无丝区组成。细丝区的细丝从10~50根不等, 平均直径6nm, 无丝区宽20~30nm。在微绒毛横切面上, 细丝以正六边形排列。这种排列有着明显的几何学意义, 它使得相同成份的排列效率为最高。细丝与微绒毛纵轴相平行, 顶端附着于质膜内面, 下端插入间皮细胞终末网, 并与终末网内的细丝相交织。终末网为微绒毛提供了相当的牢固度, 并供给营养。

1973年安德鲁斯(P. D. Andrews)对大鼠腹腔脏器表面间皮进行扫描电镜观察, 并根据微绒毛的疏密, 分为3种类型: 膀胱和腹壁间皮细胞微绒毛最少, 肝、胃和肠间皮细胞微绒毛次之; 脾、心、肺和膈间皮细胞微绒毛最多。他还发现, 肺、脾间皮细胞表面的微绒毛分布均匀, 肝、胃和肠表面者则不均。1977年巴拉迪(A. F. Baradi)利用扫描电镜对小鼠膈腹膜、腹前壁腹膜和小肠浆膜的间皮细胞作了观察, 发现有些部位间皮细胞微绒毛形成网络或花环状。他认为微绒毛的这种多出现在活动度较大的器官。当器官活动度增大时, 微绒毛的疏网状结构变平坦、不明显; 反之, 可出现密集的网络。1990年戈戴奥(E. Gudio)等发现, 家兔腹膜最长的微绒毛分布在肝、肠系膜和大网膜, 最短的微绒毛位于膈和胃脾韧带。1991年李继承等的研究表明, 人体盆壁腹膜间皮细胞微绒毛最长, 呈弯曲状, 并与相邻微绒毛连接形成网络, 膈腹膜间皮细胞微绒毛长而密集, 形成丛状, 腹前壁腹膜间皮细胞微绒毛较短, 分布稀疏, 不形成网络。此外, 膈胸膜间皮细胞微绒毛类似膈腹膜, 但分布更为密集; 心包壁层底部间皮细胞的微绒毛最短, 呈逗点状。他们认为, 不同部位间皮细胞微绒毛的这种差异, 可能与相应部位间皮的活动程度有关, 即活动度大的间皮与相邻组织摩擦也大, 因而微绒毛长而密集, 形成网络。

李继承等在实验中还发现, 间皮细胞微绒毛有一些特殊形态: (1)数根状微绒毛; (2)分叉状微绒毛; (3)一根微绒毛主干上有多根次级微绒毛; (4)微绒毛内含吞饮小泡; (5)在微绒毛根部或其边缘有吞饮小泡的开口。由于微绒毛的这些特殊形态和分布, 以及微绒毛内和根部的吞饮小泡, 使间皮细胞表面积大为增加, 有利于腹膜内物质的交换, 并为病理情况下腹水的形成和吸收提供较大的面积。多尔顿(L. Dalton)发现在胃与附睾的分泌细胞存在着微绒毛。微绒毛的存在增加了分泌细胞的分泌面积。巴拉迪也观察到微绒毛末端膨大处表面凹陷, 并形成沟或窝。他们认为, 微绒毛表面的窝可能是分泌物排出的痕迹。李继承等在实验中也有类似发现, 但微绒毛是否有分泌功能, 各家说法不一, 尚待进一步探讨。

1954年奥杜(D. L. Odor)用电镜首先观察了覆盖小鼠卵巢的间皮细胞。他发现, 间皮细胞位于基底膜上, 呈扁平状, 其中有核部位较厚。细胞核多呈不规则的分叶状, 常有核仁。在细胞质内, 有许多胞质小泡, 线粒体和内质网。细胞连接发育良好, 近细胞游离面有紧密连接。1964年费多尔哥(M. E. Fedorko)等对家兔腹膜间皮细胞的研究表明, 间皮细胞的内质网较少, 多集中在细胞核附近, 且均为粗面内质网。发育差的粗面内质网揭示间皮细胞很少有合成蛋白质能力。间皮细胞的一个显著特征是含有丰富的小泡。奥杜发现, 间皮细胞小泡的边界是致密的, 中央区色浅, 小泡直径为14~90nm。克卢格(T. Kluge)认为, 这些小泡属于吞饮小泡, 可相互融合成大泡, 并与细胞游离面或细胞间隙交通。巴拉迪在实验中将小泡分为两组, A组小泡圆形、边界很薄, 中央区色深, 直径为45~90nm; B组小泡为圆形或椭圆形, 边界厚, 中央区清亮, 直径45~270nm。在外形上B组小泡较A组不规则。他认为, 间皮细胞小泡具有物质转运功能。1983年戈特洛伊布(L. Gotloib)等发现, 家兔肠系膜间皮细胞的小泡, 有时可排列成行, 相互融合, 形成横贯细胞的通道。他们认为, 间皮细胞小泡在一定大小的分子转运上发挥了重要作用, 是腹膜透析的重要形态学基础之一。随着间皮细胞形态和功能的不断发现, 1989年斯莱特(N. J. Slater)等和1991年李继承等进一步对人腹膜间皮作了研究。李继承等发现, 人体膈腹膜间皮细胞有许多小泡, 小泡可单个或成簇、成串存在, 并融合成大泡或细胞内通道, 以大泡或单一小泡开口于细胞游离面、基底面和细胞间隙。在盆壁腹膜间皮细胞, 则有较多的粗面内质网和高尔基复合体, 但小泡缺如。他们首次将腹膜间皮细胞分为两型, 即位于膈腹膜的小泡型间皮细胞和位于盆壁腹膜的内质网型间皮细胞。关于间皮细胞的分型, 早在1967年克卢格(T. Kluge)和霍维杰(T. Hovig)对大鼠心包间皮细胞研究中, 已有类似报导。然而, 内质网型细胞是否是真正的间皮细胞? 埃斯科兰(G. Eskeland)提出了鉴别间皮细胞的标准是很有意义的, 即(1)细胞游离面有微绒毛; (2)细胞位于基底膜上; (3)相邻细胞间有紧密连接; (4)胞质内有吞饮小泡。李继承的内质网型间皮细胞符合上述3条主要标准, 仅为胞质内缺少吞饮小泡, 而代之以丰富的内质网和高尔基复合体。尽管巨噬细胞偶可出现在间皮细胞之间, 但巨噬细胞从不位于基底膜上, 胞质内有大量的吞噬泡和线粒体, 游离面亦无微绒毛, 只是有许多不规则的伪足。所以, 巨噬细胞与内质网型间皮细胞有显著区别。小泡型和内质网型间皮细胞代表两类具有不同功能的间皮细胞。巴拉迪认为, 间皮细胞胞质内不同类型的小泡, 是处于不同阶段的胞饮。小泡开口于细胞游离面或基底面, 就是胞饮作用的开始或结束。间皮细胞的小泡参与腹膜腔内液体的转运已被许多学者所证实。内质网型间皮细胞拥有丰富的内质网和高尔基复合体, 提示这类细胞具有高度的蛋白合成功能。因此, 克卢格指出, 内质网型间皮细胞产生液体, 小泡型间皮细胞主司液体吸收。李继承等则更为明确地认为, 在人体腹膜腔内, 小泡型间皮细胞参与腹膜腔内液体转运; 内质网型间皮细胞可能与腹膜液产生有关。

在间皮细胞领域里, 对其形态和功能已做许多研究。但间皮细胞与临床医学有关的课题刚刚起步。如在外科手术中, 间皮细胞

胞损伤可释放凝血酶,促使纤维蛋白原转变为纤维蛋白,形成腹膜粘连。但是当存在于间皮细胞内的纤维蛋白溶酶原激活剂的活性增高时,则能使纤维蛋白溶酶原转变为纤维蛋白溶酶。纤维蛋白溶酶是一种纤维蛋白裂解酶,能在72~96h自动溶解纤维蛋白性粘连。因此,进一步深化这方面研究,对减少患者术后腹膜粘连有重要意义。此外,在间皮细胞相邻微绒毛之间有许多直径为15nm的微丝。微丝和微绒毛连接构成微绒毛网格,使间皮细胞表面的粘液不致流失,保持浆膜面滑润,减少磨擦及由此造成的损伤。安德鲁斯认为,由微绒毛、细胞衣和微绒毛网格内的浆液所形成的润滑垫,能保护间皮细胞免遭损伤。在长期的腹膜透析中,即使最轻微的浆膜损伤,就可使润滑垫丧失,间皮细胞受损,引起炎症,导致硬化性腹膜炎,对此尚无有效的预防措施。有学者试图应用粘多糖、高分子右旋糖酐等覆盖创面,保护微绒毛,刺激细胞衣形成、浆液分泌,以减少硬化性腹膜炎的发生。但这种方法的疗效如何,尚待进一步确定。在脉管外科领域里,有人应用自体腹膜作为修补血管的材料,并有成功的手术报导,也是一个有待进一步研究的课题。

#### 参考文献

- 1 Odor D. L. Observations of the rat mesothelium with the electron and phase microscope. *Am J Anat*, 1954, 95: 433~465
- 2 Gotloib L. Ultrastructure of normal rabbit mesentery. *Nephron*, 1983, 34: 23~255
- 3 李继承, 腹膜粘连形成及防治的新进. 国外医学(外科分册), 1988, 4: 210~213
- 4 李继承, 等. 间皮细胞微绒毛的超微结构和功能. 科技通报, 1989, 5(5): 44~48
- 5 Slater N. J. et al. The ultrastructure of human abdominal mesothelium. *J Anat*, 1989, 167: 47~56
- 6 Gaudio E. et al. A Scanning electron microscopy morphometric study of the rabbit peritoneal surface. *Anat Rec.*, 1990, 228: 145~150
- 7 李继承, 等. 人胎腹膜壁层间皮细胞的超微结构. 解剖学报, 1991, 22(3): 318~321
- 8 李继承, 等. 人体腹膜壁层间皮细胞微绒毛的超微结构. 解剖学杂志, 1991, 14(2): 131~133
- 9 李继承. 人胎腹膜间皮细胞的冷冻复型电镜观察. 中国医学科学院学报, 1991, 13(3): 189~194

(浙江医科大学李继承撰, 俞寿民审)

**腹膜孔** 位于腹膜立方细胞之间,是腹膜下毛细淋巴管在腹膜面上的开口。籍腹膜孔,腹膜腔与淋巴系沟通。所以,腹膜孔是腹膜腔内物质转归的最主要部位。在临床医学上,腹水的形成和转归,腹膜透析的纯超滤和失超滤;胎儿Rh溶血病的宫内输血疗法;腹膜腔内肿瘤细胞和感染性微生物的转移;长期接触石棉纤维后间皮瘤的发生;以及经腹膜腔吸收营养素均与腹膜孔有密切关系。

1863年雷克力豪森(Von Recklinghausen)在光学显微镜下发现,腹膜表面相邻细胞连接处有小孔。他首先命名这些小孔为腹膜孔,并认为腹膜孔是腹膜腔与腹膜下淋巴管之间的一个直接通道。冯·雷克力豪森提出的腹膜孔概念,引起许多学者的争论。1937年阿伦(L. Allen)应用硝酸银染色法也报导了腹膜孔。但仍有许多学者对腹膜孔提出异议,认为腹膜表面被一层紧密连接的细胞所衬里,是完全封闭的。腹膜孔乃是硝酸银与浆液反应的沉淀物所形成的假象。1963年深田博治(Hiroji Fukata)通过对大鼠腹膜超微结构的观察,指出腹膜细胞以桥粒相连接,细胞间无腹膜孔。1968年科特兰(R. S. Cotran)从生理学的观点出发,认为跨腹膜间皮的转运,是以孔系统的被动扩散来解释,但生理学上“孔”的概念,仅是功能上的含义,尚缺乏形态学的证据。1977年齐利巴里(E. C. Tshibary)等首先把电子显微镜技术应用

于腹膜孔研究,并在电子显微镜下证实了小鼠膈腹膜孔后,一些学者相继在不同动物观察到腹膜孔。1990年李继承等首次报导了人膈腹膜孔,并认为腹膜孔是一相对恒定的结构。

据扫描电镜观察,腹膜细胞有2种不同形态,即扁平形细胞和立方形细胞。立方形细胞发出许多指状的胞质突起,与相邻细胞的突起或细胞边缘相连接,构成腹膜孔。腹膜孔仅位于立方形细胞之间,其形态和大小不一,可呈圆形、椭圆形,甚至不规则形,并以簇状或带状分布。应用超薄切片技术,发现腹膜孔由2~3个立方形细胞围成,其深面无基底膜,面有许多呈扁平状膨大的毛细淋巴管盲端,即淋巴陷窝。在腹膜孔内,立方形细胞和淋巴陷窝内皮细胞相互靠拢,构成形状扭曲的腹膜下小管。腹膜下小管的立方形细胞和内皮细胞无真正的结构上连接,两者的基膜均缺如,但在胞质中含有丰富的微丝。这些结构上的高度复杂性被认为是维持腹膜孔和腹膜下小管结构稳定的基础。经腹膜下小管,腹膜孔与腹膜下淋巴陷窝相通,在两者之间隔有极薄的屏障,这层屏障亦即构成了腹膜孔的底和淋巴陷窝的顶。1983年齐利巴里的研究提出,从淋巴陷窝到腹膜孔有3层结构,即(1)淋巴陷窝内皮细胞;(2)一薄层结缔组织纤维;(3)腹膜孔的立方形细胞。齐利巴里认为,这3层结构与腹膜孔的淋巴吸收有密切关系,并称为淋巴引流单位(Lymphatic Drainage Unit, LDU)。1991年李继承等应用俄酸-二甲亚砷-俄酸冷冻断裂扫描电镜技术,观察了人淋巴引流单位的超微结构,并在动物实验中探讨了它的功能。他们认为,在淋巴引流单位的3种结构中,一薄层结缔组织纤维最为重要,它是由多束弹性纤维构成的结缔组织网。通过结缔组织网孔,腹膜孔与淋巴陷窝交通。同时,这层结缔组织网能保证淋巴引流单位结构的稳定,防止其突入腹膜腔。同时,在功能上,每一个淋巴引流单位都是一个微小的器官,它在腹水的形成和转归;腹膜透析和肿瘤细胞的转移中,有重要作用。

雷克力豪森最早在膈腹膜上发现腹膜孔。1977年齐利巴里等对小鼠膈腹膜的研究表明,腹膜孔仅位于膈腹膜的肌性部,在中心腱无腹膜孔。1989年日本福尾义文对此提出了异议。1990年李继承等对人和小鼠膈腹膜的研究结果否定了齐利巴里的结论。他们应用电镜和计算机图象处理系统,发现膈中心腱和肌性部均有腹膜孔,并注意到中心腱的腹膜孔较肌性部的小,前者孔面积为 $7.93 \pm 1.67 \mu\text{m}^2$ ,后者为 $10.43 \pm 1.61 \mu\text{m}^2$ 。腹膜孔除了分布在膈腹膜上,1979年米罗诺夫(V. A. Mironov)在大鼠的大网膜,1985年侯原治道在小鼠卵巢表面的脏层腹膜,1990年苔茜(C. Tesch)在人体肝镰状韧带,以及1991年李继承在人盆壁腹膜均发现有腹膜孔存在。

腹膜孔使腹膜腔与淋巴系沟通,为腹膜腔内物质的吸收提供了形态基础。1978年利克(L. V. Leak)把细菌和一些药物颗粒注入小鼠腹膜腔,发现这些颗粒迅速通过腹膜孔。1987年齐利巴里等将印度墨汁注入小鼠腹膜腔五分钟后腹膜下淋巴管就被染成黑色。1990年李继承等分别把台盼兰液和小鼠红细胞注入小鼠和家兔腹膜腔。在电子显微镜下,观察到台盼兰颗粒和红细胞被腹膜孔所吸收。他们指出,腹膜孔的存在,使腹膜腔内液体、颗粒物质和细胞的转归成为可能。

由于腹膜腔内物质绝大部分是通过腹膜孔进入淋巴管。因此,凡能影响腹膜孔开放的因素,均能影响腹膜孔的物质转归。许多生理研究已表明,腹膜腔内液体的吸收是随膈肌呼吸运动的加速而增加。1953年莫里斯(B. Morris)发现,在麻醉时,腹膜腔内蛋白吸收量仅为清醒时的20%。1978年贝滕多尔夫等在研究呼吸运动影响腹膜孔开放的实验中指出,呼气时,因膈肌伸展,腹膜孔受牵拉而被动开放;吸气时,由于膈肌收缩,腹膜孔被动关闭。1983年齐利巴里等在药物诱导膈肌舒缩,模拟膈肌呼吸运动的研究中,证实了贝滕多尔夫的结论。同时,他们的研究也表明,呼气使膈肌松弛,引起腹膜孔开放,导致腹膜下淋巴陷窝内皮细胞伸展,管腔被动扩张产生负压,引起腹膜孔的“吮吸作用”,促使物质快速吸入腹膜孔;而吸气则使膈肌收缩,挤压腹膜孔,促使腹膜腔内的物质,进入腹膜下淋巴管。除了呼吸运动影响腹膜孔

的转归外,腹内压的变化亦是一个重要因素。当用生理盐水腹腔内注射,造成实验性腹内压增高时,腹膜孔数量增多,液体吸收也加速;当腹内压降低时,腹膜孔的数量减少,腹膜腔内液体的吸收下降。此外,腹膜腔内炎症,也可引起腹膜孔的变化,但腹膜孔对不同病因引起的炎症反应是复杂的,需作进一步的探索。

在腹膜孔附近常有许多静止型巨噬细胞聚集,形成圆形或椭圆形的乳斑。乳斑的细胞可从淋巴管经腹膜孔游出,进入腹膜腔;亦可从腹膜腔经腹膜孔进入淋巴系。1990年李继承等在实验中,发现乳斑巨噬细胞经腹膜孔,进入淋巴管。他们进一步在家兔腹膜腔内注射小鼠红细胞,观察到许多巨噬细胞从腹膜孔游出,进入腹膜腔。由此,他们认为,腹膜孔是巨噬细胞向腹膜腔迁移的重要途径。1991年日本下间正隆等也在人体大网膜上证实了乳斑。他们的研究还表明,在乳斑的细胞中,巨噬细胞、B淋巴细胞、T淋巴细胞和肥大细胞分别占47.5%、29.1%、11.7%、6.1%。他们认为,乳斑是具有免疫功能的细胞聚集处,若机体免疫功能需要,则进入腹膜腔,发挥免疫作用。

腹膜孔的研究对治疗一些临床疾病,有重要意义。1968年卡尔尼吉(B. Karneki)报导,用新鲜血经母体子宫,注入患Rh溶血病胎儿的腹膜腔,可挽救70%患儿,但其机理尚不明了。1987年穆阿里(T. Moalli)发现,长石棉纤维注入腹膜腔,可发生间皮肿瘤,而短石棉纤维( $\leq 2\mu\text{m}$ )则不发生间皮肿瘤。1991年下间正隆试图应用免疫激活剂,促乳斑细胞活化,抑制腹膜腔内肿瘤细胞,经腹膜孔向远处转移。1991年李继承指出,在尿毒症时,应用腹膜透析可使血液里中分子有毒物质得以清除,但由于腹膜孔的吸收作用,使有毒物质重新回到血中,导致腹膜透析疗效降低。因此,腹膜孔的研究已引起广大学者的关注。在今后的研究中,应用药物调控腹膜孔,促腹水转归和提高腹膜透析的纯超滤是腹膜孔研究中的一个最活跃的课题,进一步深化这方面工作,将使应用药物治疗腹水和提高腹膜透析的疗效成为可能。在腹膜孔的研究中,免疫激活剂的腹膜腔应用,提高腹膜腔免疫水平,抑制肿瘤细胞和感染性微生物的扩散,也将是一个很有意义的课题。此外,经腹膜腔全身输送营养素的疗法,正在临床试用。

#### 参考文献

- 1 Tsilibary E. C, et al. Lymphatic absorption from the peritoneal stomata. *Microvasc Res.*, 1983, 25: 22~39
- 2 Shinohara H, et al. The presence of lymphatic stomata in the ovarian bursa of the golden hamster. *Anat Rec.*, 1985, 213: 44~52
- 3 Tsilibary E. C, et al. Light and electron microscope observation of the lymphatic drainage units of the peritoneal cavity of rodents. *Am J Anat.*, 1987, 180: 195~207
- 4 李继承,等. 腹膜孔,解剖学杂志, 1989, 12(1): 76~78
- 5 Fuduo Y, et al. The distribution of lymphatic stomata in the diaphragm of the golden hamster. *J Anat.*, 1990, 169: 13~21
- 6 李继承等,人胎腹膜孔超微结构的研究,解剖学报, 1990, 21(4): 359~361
- 7 Tesch C, et al. Offene lymphgefäße im Ligamentum falciforme hepatis des menschen Langenbecks. *Arch Chir.*, 1990, 375: 130~134
- 8 李继承等,人体腹膜腔间皮的扫描电镜观察,科技通报, 1990, 6(4): 237~240
- 9 Shimotsuna M, et al. Cellular subsets of the milky spots in the human greater omentum. *Cell Tissue Res.*, 1991, 264: 599~601
- 10 Li Jicheng, et al. Study on the ultrastructure of the peritoneal stomata in humans. *Acta Anat.*, 1991, 141: 26~30

(浙江医科大学李继承撰;  
俞寿民审)

## 消化管壁内神经丛及其神经元

The nerve plexus and in the wall of alimentary tract 肠神经系统(ENS)分来源组和内在组。前者包括交感神经(NA能)节后纤维、副交感神经(Ach能)节前纤维、“嘌呤能”神经“肽能”神经。后者系肠壁内神经丛,内含各种成分的神经元胞体和纤维。正常肠功能是由壁丛神经元调节。Ach能神经兴奋及NA能神经的抑制产生相关的肠平滑肌收缩与松弛。肠肽能神经是一种新发现的重要的肠功能调控系统。某些疾病的发病机制与胃肠神经元支配异常密切相关。

1898年朗克理(Langley)将胃肠道自主神经支配分为交感、副交感和壁内神经3个系统。20世纪30年代,受神经递质学说影响,将其分为NA能神经和Ach能神经。1972年彭斯托克(G. Burnstock)提出消化道的第3类纤维即嘌呤能神经。随着免疫细胞化学和生物化学新技术的发展应用,1978年布卢姆(W. Bloom)等一派学者确认这第3种神经成份释放的递质是多肽类物质,谓之肽能神经。在脑和肠内又发现双重分布的肽类,称脑-肠肽。1983年史密斯(I. J. L. Smith)提出“肠神经系统”的新概念。脑-肠肽在胃肠道为胃肠激素,或在神经系统为神经信息的传递物质。

消化管壁内神经构成丛状结构,于粘膜下层和肌层内分别有麦氏粘膜下丛和欧氏肠肌丛。在胃还常见浆膜下丛。壁丛中含神经节,节内含各种神经元,与外来进入壁内的神经纤维及其它壁丛内的节后纤维相互联系。Ach能节前神经元胞体位于延髓迷走神经运动核或脊髓2~4骶节内。迷走神经或骶-盆副交感神经节前纤维进入壁内,与丛内节后神经元形成突触联系,其节后纤维轴终末分布于效应组织(平滑肌纤维和腺细胞)。交感神经节或腹腔神经节内的节后神经元(中枢节前神经元位于脊髓侧角)发出交感神经节后纤维进入肠各层,其末梢直接终止于效应组织。

肠肌丛由丰富的神经纤维组成丛状结构,发出纤维终止于肌内的细胞。某些外来神经纤维进入壁丛后终止于神经节;其它的纤维可能穿经此节与丛内另外的神经节接触,或直接与粘膜下丛联系。粘膜下丛神经节细小,丛内也有细小的纤维束网状结构,此丛有的接近粘膜肌,有的位于粘膜下深层接近环行肌(称深肌丛)。外来神经的一些纤维和肠肌丛的小支终止于此丛神经节,或穿经此节延续到粘膜肌,或进入固有膜、肠腺、小肠绒毛、上皮细胞之间或上皮下神经丛。

消化管不同部分的壁丛,存在一些差异。人类肠肌丛,嘴侧界限在喉尾侧界下方3~4cm。食管粘膜下丛细小,神经节较少。胃、小肠及大肠肌丛及粘膜下丛结构大致相似。胃贲门区神经纤维及神经节相对较小而少,自胃体部向幽门移行,数量增多。小肠两丛发育最好,可作为标准构象。结肠肌丛神经节集于纵肌结肠带深侧,结肠带间区神经节较少。直肠肌丛富含神经纤维和神经节。直肠柱内神经丛丰富,其中体神经纤维占多数。支配肛内、外括约肌的神经组成一个共同的丛,丛内富含体神经。

消化管不同部位壁丛内神经节细胞(GC)的数量有梯度的变化。豚鼠食管中1/3至幽门,GC数目急剧增多;小肠嘴侧1/3以下显著减少;结肠嘴侧1/3至肛门括约肌,GC数目又逐渐增加。猫小肠肌丛GC数高达500万个,较粘膜下丛者多2~3倍。

肠壁内GC,主要为多极细胞,也有双极的或假单极的。GC大致分成两型:一种是短树突多角形细胞,其轴突可穿经邻近的节与其它节内第2型GC接触,可能具有联络功能。后者系长树轴多极细胞,其轴突进入肌层,与平滑肌细胞接触,可能是运动性神经元。壁内还有一种间质细胞,多见于肌层、粘膜下层及固有膜层内。细胞突起短,形成不规则的网架,胞浆内有细小颗粒,但无神经原纤维。这种细胞的性质尚未完全清楚。肠肌丛及粘膜下丛存在节内纤维网络,一部分是GC的突起(节后纤维),另一部分是外来神经末梢,还有邻近的壁丛GC轴突终末支参与形成。它们在细胞间丛内与GC发生突触联系。但是,交感神经的节后纤维经肠肌丛不参与构成细胞间丛,直接终止于壁内平滑肌和血管。

壁丛神经元,就消化管运动调节而言,含有以下5种成分。(1)ACh能神经元。壁丛内GC大多数出现乙酰胆碱酯酶(AchE)活性强阳性。1983年阿姆斯特朗(D. M. Armstrong)和豪塞(C. R. Houser)等,以胆碱乙酰化酶(ChAc)单克隆抗体的免疫细胞化学PAP法,在AChE强阳性的壁丛内副交感神经元中也见到ChAc反应产物,确证其ACh能性质,但目前尚缺少精确特定位和神经元成份比例的资料。(2)NA能纤维末梢。荧光组织化学方法显示,含NA黄绿色荧光末梢与肠肌丛、粘膜下丛内ACh能GC形成篮样丛结构,呈突触联系。采用铬合物或高锰酸钾固定制作电镜标本,显示出含颗粒囊泡的NA能末梢。其释放的递质NA可通过 $\alpha$ 、 $\beta$ -NA受体直接作用于肠壁平滑肌纤维,或通过轴-轴NA-Ach能抑制性突触节前抑制ACh的释放,松弛肠管。(3)嘌呤能神经元。彭氏提出,在脊椎动物肠肌丛中有一种抑制性神经元,其末梢轴突内含“大暗灰”颗粒囊泡,释放嘌呤核苷酸类活性物质,GC-ATP酶强阳性,被称作嘌呤能神经。它能对抗ACh能兴奋性神经,还可能涉及到肠蠕动的下行性抑制。(4)5-羟色胺(5-HT)能神经元。70年代末,应用5-HT或色氨酸羟化酶抗体和免疫组织化学和标记5-HT放射自显影等方法,观察到人和哺乳动物肠肌丛内含5-HT神经元,丛周有5-HT阳性纤维及围绕丛内个别GC形成篮样丛结构。1982年杰逊(M. D. Gershon)用双标术,在豚鼠肠道内发现轴-轴NA-5-HT能非对称性突触。交感节后末梢释放的NA可通过 $\beta$ 受体促进5-HT的释放5-HT能激活ACh能神经元,也能激活其它内在抑制性神经元,从而调节肠管收缩或舒张。但肠内是否存在内在成分的5-HT能神经元尚有争议。(5)肽能神经。1970年鲍姆加丁(H. G. Baumgarten)第1次报道ENS含有肽能轴突。应用特异抗体免疫组织化学方法,已经证实胃结肠壁内含下列肽能神经元:P物质(SP)、神经激肽A(NKA)、血管活性肠肽(VIP)、组胺肽(PHI)、脑啡肽(ENK)、内啡肽、胆囊收缩素(CCK)、胃泌素(G)、促胃泌素释放肽(GRP)、生长抑素(SOM)、蛙皮素(BOM)、神经降压肽(NT)、血管紧张素I(Ang I)、胃动素、降钙素基因相关肽(cGRP)、神经肽Y(NPY)、甘丙素和胰多肽等。有一些肽能神经元,如,SP、VIP、ENK、SOM等阳性纤维,有来自肠外神经,与椎前交感节或迷走神经有特殊联系。两种神经肽可共存于肠肌丛内同一神经元中,如:猫回肠的ENK/SP,小肠的PHI/NPY、VIP/NPY;豚鼠结肠的SOM/G/CCK;人结肠的VIP/PHI、NKA/SP等。含上述神经肽免疫反应纤维或末梢,分布于壁内各层,正常(或经秋水仙素处理)壁丛内含不同肽免疫反应性神经细胞体,及丰富的终末网,有的紧密围绕胞体,呈突触样接触。1989年特苏托(T. Tsuto)等,在免疫电镜下观察到人正常结肠肌丛内VIP神经元核周体和突起。VIP产物主要存在于胞浆内致密颗粒中的粗面内质膜上。构成突触或联接形式有:轴(未标记)→体(VIP)突触;轴(未标记)→体(VIP)非对称性突触,含致密中心终末前轴(未标记)→VIP轴末非对称性突触;含VTP的轴→体(或树突)联接。粘膜下丛内有:轴(未标记)→树(VIP)非对称性突触;终末前轴(VIP)→树(未标记)非对称性突触;轴(VIP)→体(未标记或含VIP)接触;轴(未标记)→体(VIP)接触;轴(VIP)→树(VIP)接触。

90年代,又发现一个新的胃肠道肠动力的强抑制性神经递质一氧化氮(NO)。内NO介导兴奋性氨基酸(谷氨酸)中引起神经元信号系统的改变。在植物性神经系统,NO是一种功能明确的抑制性递质,是非交感能非胆碱能神经元主要递质,胃肠道各段反应抑制均由NO介导,特别是能使括约肌的舒张。在肠内源性神经反射中,肠动力的抑制性神经分布和支配的重要性越来越引人重视,神经元的NADPH脱氢酶即是NO合成酶,可用作研究NO合成酶的分布状况并作为确定NO的合成部位的标志。免疫组织化学已确定鼠肠肌丛和十二指肠环肌层神经突触的细胞能合成NO。人结肠壁各层都有丰富的含NO纤维,小血管壁和内膜也呈阳性,多数肠肌丛和粘膜下丛神经元NADPH强活性。

先天性巨结肠病主要病理生理改变是远端结肠壁丛内GC先天性缺失,肠蠕动功能障碍,产生狭窄肠段及近端肠段扩张。无GC肠段,ENS各种成分均缺失阳性GC,各类纤维的支配发生紊乱。肠壁各层AChE阳性节前神经异常增生、增粗、酶活性增强,固有膜内出现酶阳性神经,具有特征性改变,与临床症状(痉挛梗阻程度)相关,可作诊断本症患者出现的重要依据。1968年麦尔·鲁季(W. Meir-Ruge)最先作了报道。艾民康(M. K. Ai)等于1976年率先引用,并在全国范围内推广了这一诊断技术,准确率达96%。壁内含NA荧光的交感节后纤维也同时增多、增粗,其特征是缺失正常的壁丛周围的篮样丛结构。本症肽能神经支配的广泛紊乱,肠壁各层VIP、SP、ENK和cGRP等诸纤维减少,在肠肌丛部位和固有膜内还出现明显增生增粗的含VIP或cGRP纤维束,SOM和NPY两种神经也出现显著的过感支配。特氏1989年报道,少神经节肠段只见少数含VIP突起,无突触结构;无GC肠段,很少见到含VIP突起。本病异常神经成分的分并不仅有量的变化,而且有质的改变,也含释放机制异常,产生分泌、感觉和运动功能障碍。这些可能是巨结肠的病理生理学的诸因素。

近年来,对NO调节胃肠道生理功能的研究又为热点课题。产生NO的神经密度的变化,NO产生的改变或平滑肌对内源性NO敏感性的改变可能在某些神经肌肉疾病起着某种作用。例如,神经产生NO减少可导致有持续或强烈的非蠕动性收缩的疾病。如,先天性巨结肠症或贾门失弛缓症。食管管返流性疾病可能与NO产生的增加或食管下端括约肌对NO敏感性增加有关。与肠NO体系紊乱有关的正常神经兴奋和抑制的失衡可引起有肠动力异常的疾病状态,如果慢性持续性假性肠梗阻或便秘。巨结肠病和慢性便秘结肠壁内含NO神经成份均出现异常改变。还有,NO具有舒张血管的作用,对维持粘膜血流与粘膜的完整起重要的作用,NO对胃肠粘膜有保护作用,如保护肠免遭内毒素的损伤。因此,研究NO在炎症状态下的作用可为特发性炎症肠病,传染性结肠炎,缺血性胃肠损害及胃肠恶性肿瘤等的发病机理提供重要的信息。

目前,对胃肠肽能神经的研究大多是应用免疫组织化学方法在光镜水平显示壁丛内含肽能神经元或胃肠内分泌细胞,对外来源支配的研究尚少。在免疫电镜水平研究肠肽能神经元的突触联系才刚开始。因此,探讨肠肽的功能作用是个难题,也是今后的研究热点:(1)神经肽在胃肠的内分泌、调制物或递质作用;(2)一种肽的主功能与其它肽或递质的调节作用,及不同功能状态下某些肽的抑制与兴奋的双重作用;(3)肠肽与其它肠神经的关系,肠肽的双重来源(内在的与外源的;内分泌细胞的与神经成分的);(4)神经肽与其它递质共存的功能作用;(5)神经肽在肠内释放机制、生理作用或刺激作用等的识别研究。

#### 参考文献

- 1 Burnstock G. Pharmacol Rev. 1972, 24; 509
- 2 Ai Minkang, et al. Chinese Medical Journal, 1979, 92(2); 93
- 3 林坤伟, 胃肠激素, 北京: 科学出版社, 1985, 76
- 4 Nada O. Toyohara T. Histochemistry, 1987, 86; 229
- 5 Tsuto T. et al. Histochemistry, 1989, 93; 1.
- 6 Wattohon D. A. et al. Pediatric Surgery Int, 1991, 6; 322.
- 7 林传友, 等. 中华小儿外科杂志, 1991, 12(6); 341
- 8 Stark M E, Szurzewski J H. Gastroenterology, 1992, 103; 1928~1949

(同济医科大学博士生导师茹立强教授撰)

#### 脑薄片技术

brain slice techniques 从动物脑或脊髓制备可离体存活、厚度为100~700 $\mu$ m的组织切片进行细胞电生理学研究的新技术。脑薄片取材于脑或脊髓的各个部位,除进行以微电极技术为核心的生物电记录和分析外,还用于神经科学各个领域研究。该技术具有标本易于处理、定位准确、记录稳定、条件易于控制、神经元间保存联系及可进行多学科综合研究等优点,

是从细胞乃至分子水平探索中枢神经系统奥秘的重要手段。

1924年,瓦尔堡(D. Warburg)在能量代谢研究中首次证实离体脑组织具有生物学活性后,1950年墨克伊魏因(H. McIlwain)开始将各种动物脑组织存于改正的 Krebs 液中进行多种物质代谢的生化研究,并应用电刺激和药物处理方法。1957年,李(C-L. Li)和墨克伊魏因首次在新皮质脑片进行神经元胞内记录,证明它具有类似于在体神经元的电生理、突触反应和自发放电,并进行神经递质及药物作用的研究。嗣后,安德森(P. Andersen)及坎德尔(E. R. Kandel)等实验室建立的海马脑片技术,并在以后的20年中成为重要的神经科学研究手段之一。随后,小脑(1973)、下丘脑(1975)、新纹状体(1979)及脑干(1982)等脑薄片技术也相继建立。中国80年代初主要用海马脑片进行场电位记录,80年代末中国科学院上海生理所、皖南医学院等单位则开展了胞内记录工作。

1978年高桥(T. Takahashi)用琼脂凝块包埋切片法制备了新生大鼠脊髓薄片(130~150 $\mu$ m),在相差显微镜直视下进行运动神经元(MN)胞内记录。随后仁司(S. Nishi, 1982)和诺思(R. A. North, 1983)实验室先后用成年猫和大鼠制备脊髓薄片,开展交感节前神经元(SPN)、背角胞内生物电记录和研究。目前最常用的400~500 $\mu$ m厚新生大鼠脊髓切片技术由朗迪奇(M. Randic)实验室率先使用,但局限于背角神经元的记录。1984年,邓(N. J. Dun)实验室开展了SPN及MN的研究。国内安徽医科大学(1988)和皖南医学院(1990)也分别开展了新生大鼠脊髓切片SPN和MN的胞内记录研究。

80年代中期以来,脑薄片技术得到了进一步发展。首先是震荡切片克服了中枢神经组织极软弱易挤压问题,使脑片工作几乎涉及脑和脊髓的各个部位。同时,脑片制备向特定解剖或功能部位或核团发展,如扣带回、视皮质、蓝斑等脑片。其次,制备保留传入传出联系的脑片,如脊髓的切片保留腹、背根,倾斜纹状体切片具有与大脑皮质和苍白球的联系通路。另外,联合脑片制备为研究不同部位间相互联系奠定了基础,海马结构中海马与齿状回联合脑片成为记忆生理、癫痫病理研究的重要手段。耶弗蒂尼亚(S. Jeftinij, 1988)制成的新生大鼠脊髓薄片—背根神经节联合标本,可进行背角和神经节细胞的同步记录。而新生大鼠脊髓—外周神经标本,海龟脑干—听觉传入通路标本也是一些成功的例子。

单电极电压钳首先由魏尔桑(W. A. Wilson)等(1975)应用于脑薄片研究,膜电流分析对一些电生理现象的离子机制阐明至关重要。汪(M. Y. Wang)等在MN证明5-HT通过增大或减小钾电导而诱发外向或内向的电流,引起超极或去极化反应。再则,王于(R. K. S. W, 1979)在海马神经元、林纳斯(R. Llinas, 1980)在小脑Purkinje细胞进行树突内电位记录,促进了树突电生理学的发展。王1984年在豚鼠海马脑片CA<sub>3</sub>区锥体细胞进行双细胞同步记录,证明突触前的单个细胞放电即可对相联系的细胞诱发单突触或双突触的抑制性突触后电位(IPSP),而负反馈性IPSP的存在证明回返性抑制。山本(1989)在齿状回颗粒细胞与CA<sub>3</sub>锥体细胞间、雷德曼(S. J. Redman, 1990)实验室在CA<sub>3</sub>与CA<sub>1</sub>细胞间的配对同步记录,均证明单个突触前细胞的激活可在联系的细胞产生单一性的兴奋性突触后电位(EPSP)。另外,邓实验室(1989)首先用海马脑片电生理方法证明甘氨酸对NMDA反应有易化作用,为修正“甘氨酸是抑制性氨基酸”的概念提供了更接近生理条件的证据;胡(G. Y. Hu, 1991)等通过对CA<sub>1</sub>神经元前电位的系统研究,对经典的峰电位触发模式提出了挑战。在新生大鼠脊髓切片,蒋(Z. G. Jiang, 1991)等证明刺激腹根可在MN诱导单突触的EPSP,首次从电生理学角度对头头是阐明腹根传入纤维的生理功能。同样,人们利用脑薄片可进行综合研究的特点而开展的电生理与药理、与组织形态等研究,已更全面地认识了细胞功能的内在规律,如沈(ES, 1990)用新生大鼠脊髓切片对SPN进行胞内电生理研究和胞内标记,不仅得到了功能性质与形态的关系分析资料,还发现存在染料耦联细

胞。

在1988年美国神经科学会上,萨克曼(B. Sakmann)等首次报道了脑薄片在位神经元全细胞或膜片钳记录技术。其关键是往复喷射灌流液机械性地暴露部分神经元胞体,在显微镜直视下进行记录。该技术为保存突触联系的神经元进行高信噪比的膜电流或单通道分析提供了可能,尤其是突触性膜电流分析已可深入到量子特性的定量分析;同时还可进行胞内标记。该方法适用于各种动物不同发育阶段的各种脑片,在多种脑片的研究表明,膜输入电阻及时间常数数值远高于普通胞内记录所测值,表明漏电阻阻较一般胞内记录更接近生理状态。1989年,布兰通(MG. Blanton)等将该技术简化为不需暴露和直视神经元,只在微电极刺入组织时加以电极内正压以防堵塞,即可在常用的400~500 $\mu$ m厚度的脑片,普通记录系统进行在位神经元全细胞记录,使之得以广泛应用。高桥(1990)在MN证明存在多种膜电流,还发现有内向整流电流存在,5-HT的兴奋作用与之增大有关;蒋志根等(1991)在倾斜纹状体脑片对主细胞和非主细胞的电生理性质、组织形态、突触联系、神经递质等给予系统的阐明。

在“脑的10年(1990~1999)”中,脑薄片技术将成为最活跃的研究领域之一,其研究热点有:(1)标本的生理化和多样化。即优化技术使标本更接近生理状态,或更适用于量子水平、分子水平的分析;标本多样化,按不同研究目的发展各种联合标本或脑薄片培养标本,在阐明脑髓脊各区域的信息处理与交流方面意义重大。除相关脑结构联合标本外,将有与外周传入传出相联系的标本,如视觉、听觉通道标本。(2)研究多元化,即多学科综合研究,是神经科学发展的潮流。尤其是脑薄片培养技术的成熟与推广,有可能与分子生物学技术相结合,甚至对特定脑细胞实施基因工程,产生突破性的理论或应用成果。(3)使用脑片全细胞记录技术,对胞内成分尤其是有关的第二信使物质以透析、置换,从而更深入地阐明神经递质、调质及一些药物作用的信息传递、膜通道机制。(4)脑片研究的新成果、新知识应用到医药实践,与其他新方法新技术杂交结合,尤其是与计算机技术相结合,使脑研究在理论上进入精密定量和数学模拟水平,在实用中发展出新的诊断方法和治疗药物。

#### 参考文献

- 1 Li C-L, et al. J Physiol., 1957, 139, 178~190
- 2 Langmoen I A, et al. Electrophysiology of isolated mammalian CNS preparations. NY: Academic Press. 1981, 51~105
- 3 Dingledine R, et al. Brain Slices. NY: Plenum Press. 1984. 375~437
- 4 Gahwiler B H. Slices cultures of cerebellar, hippocampal and hypothalamic tissue. Experientia, 1984, 40: 235~308
- 5 Edwards F A, et al. Pflugers Archh, 1989, 414: 600~612
- 6 Blanton M G, et al. J Neurosci Meth., 1989, 30, 203~210
- 7 Wang M Y, et al. J Physiol. 1990, 430: 87~103
- 8 Jiang Z G, et al. J Neurophysiol., 1991, 65: 57~66
- 9 Jiang Z G, et al. J Physiol., 1991, 443: 533~553
- 10 汪萌芽, 等. 皖南医学院学报, 1992, 11: 65~67

(皖南医学院汪萌芽撰; 蒋志根审)

**视觉** vision 是认识和判别外界环境、现象及表达的最重要的感觉功能。它具有多种性和极为丰富的内容。视觉主要包括光觉、色觉和形觉。

光觉 是最基本的视觉,早在19世纪对光觉的探索已经证实,眼的感光由视网膜的2种视细胞,即视杆细胞和视锥细胞开始。后来又进一步认识到在这2种视细胞的外段存在着感光色素即视色素,视色素在光照射后发生一系列的光化学变化,是光学形成的基础。到目前为止,在视色素中了解较多的是视杆细胞的视紫红质,并将其抽提出来,就其化学和物理性质进行了多种分析研究,证明光照射对视紫红质有漂白作用,而在暗处又呈现视紫红质还原,由此形成光化学的循环。视紫红质由维生素A醛

和1种特殊蛋白-视蛋白结合而成,光照时视紫红质褪色,分解为全反视黄醛及视蛋白,全反视黄醛在视黄醛还原酶和辅酶I的作用下,进一步还原成无活性的全反维生素A,通常这类维生素A可在血液中,也储存在肝脏,供应于眼部。眼部的维生素A经过视网膜色素上皮输送到视网膜外段为顺-维生素A,在视黄醛还原酶和辅酶I氧化下,成为有活性的顺-视黄醛,它与视蛋白再结合成视紫红质。视紫红质的代谢过程可受到维生素A、B或某些酶及微量元素等影响。在20世纪30~50年代间已经证实的视色素还有视紫质、视紫蓝质和视蓝质、视紫蓝质和视蓝质(Wald, 1955),它们分别为维生素A、与视锥细胞或视杆细胞的视蛋白结合而成。

当人由强光处进入暗处,起初一无所见,以后随着对光敏感性的增强,渐渐看清暗处的人物,这个过程与在暗处停留的时间成正比,这就是暗适应过程,也就是视紫红质的光化学过程。暗适应过程包括视锥细胞和视杆细胞这2种细胞的功能结合,呈曲线形进行,最初8min内曲线上升得很快,是视锥细胞适应段,在8~10min间出现转折,此位置为 $\alpha$ 点,亦称Kohlrusch曲,此后,曲线上升逐渐转到缓慢,到50min大致稳定,这是视杆细胞适应段(Duke~Elder, 1962)。因此暗适应的过程就是光觉形成中光敏感度不断提高的过程,也是光刺激阈不断降低的过程。光觉异常者表现为夜盲。大量临床观察表明:先天性夜盲多为遗传性疾病,如视锥细胞营养不良、视网膜色素变性等引起;而后天性夜盲常与维生素A缺乏、药物中毒、全身代谢异常和贫血等疾病有关。

**色觉** 眼对不同波长的感受产生色觉,如对可见光长波段650nm得到红色觉,而对短波段450nm为蓝色觉,由此,对不同波段光的感受,可产生红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等不同的彩色觉。色觉形成有几种理论:(1)3色觉论:Young(1807)和Helmholtz(1866)认为视网膜的视锥细胞具有感受3种基本颜色,红、绿、蓝的感色成分,每种感色成分只对1种基本颜色发生兴奋,而对其他色则只有有限程度的反应,色盲可能是某种相关的感色成分丧失的结果。(2)对立机制说:Hering(1876)认为红和绿、黄和蓝混合,得不出其他颜色,只能呈灰色和白色,提出红和绿感受器,黄和蓝感受器是2对起对立作用的器官,黑和白是第3对对立的感受器官,颜色的对立过程能更好地解释颜色的混合现象。(3)视网膜皮层学说:Land(1959)提出新的色觉形成理论,认为在颜色视觉中既有视网膜过程,也有大脑皮层的活动,每1个视网膜皮层系统都对视野中的各种颜色独立地起反应。对不同波长兴奋产生活动,由几种视网膜皮层图象的不同明度的相互比较决定了颜色感觉。这几种色觉理论都在一定范围内对解释颜色视觉作出其贡献,它们没有不可调和的矛盾,而可以相互补充。视网膜皮层理论则指出了明度关系在复杂景物颜色感觉中的重要作用,被认为是一个值得重视的新思想。

色觉与颜色现象有关。(1)刺激光的强度、波长和色纯。从心理物理和心理学的两方面,可以构成相应的3种特性,按心理物理学就是亮度,主波长和纯度。而在心理学上则为明度、色调和饱和度的主观感觉。颜色可以分为彩色和非彩色(黑、灰、白),如光刺激没有主波长,就是非彩色的白光,它没有纯度,但所有刺激,无论色彩与非色彩,都有亮度或明度,而表示色彩的是主波长和纯度,即色调和饱和度。(2)色的交互作用。在色觉形成中,不仅来自于物体表面的颜色,还与其周围的颜色有关。即同时交互作用或颜色对比,这能影响色调和明度。如红背景上的灰色被看成浅绿色,绿背景上灰色块看成浅红色,明度对比是白背景上灰色块呈浅黑色,黑背景上灰色块呈白色等,对比效应在视觉中有重要作用。此外如看久红色后,转到一个灰方面上,可见绿色像,黄色能引起蓝色像,黑色能引出白色像,这些印象即负后像,所诱导的对立色为补色。(3)色混合。在光谱上邻近的2种颜色,混合可以产生新的颜色,而在光谱上很远的颜色混合则可能成灰色或白色,即中性颜色,也就是互补色所致。

色觉异常可由遗传所致,也可继发于其他眼病。完全不能辨

色的为全色盲或单色觉;异常2色觉者,如红、绿色盲,蓝黄色盲;异常3色觉者,如红、绿、蓝黄色弱等。色觉异常因地区、国家、民族等有差异,男性多于女性,男性色觉异常者约占5%~8%,女性约为1%。由于遗传所致的色觉异常是通过性染色体的基因表达的。一些职业和工种要求有健全的色觉,否则会导致严重的影响。

**形觉** 包括视力、视野、对比敏感度等。

1. 视力。眼能分辨物体点间的距离,决定于视角的形成。视角就是物体的两端点通过交叉节点后在视网膜上所形成的夹角。视角的大小与物体的大小及远近有关,视力是视角的倒数,代表眼能分辨两点间距离的能力。所以视力测定也是一种形觉检测。最小视力的形成,必须在视网膜上兴奋2个视锥细胞,且要被1个视锥细胞所间隔,推算视角的象相当于 $4.96\mu\text{m}$ 。视力也是反映黄斑中心处对高对比度细小的目标的空间分辨力。视力包括远和近视力。影响视力的因素包括物体的距离、亮度、背景光和呈现时间等,同时也受年龄、精神状况等影响。与屈光状态关系密切。70年代通过激光干涉条纹检测视网膜分辨力,即视网膜视力,它不受屈光状态的影响,即使在屈光间质有一定混浊的情况下,由于激光能到达视网膜上兴奋视细胞,通过视力表达,由此可以测出视力。新近Westheimer(1987)再次证明通过分辨两相邻直线的最小距离所测得的高敏视力,有助于更好的形觉判断。

2. 视野 是在一定范围内所见到的空间范围。视野的确定有赖于一定可见范围内所给予的刺激,以及视网膜、视路及视皮层的结构和生理特征。正常视野包括周边视野及中心视野。周边视野:正常人若将头固定不动,眼固视正前方一点,以活动视标作测定,所见范围上方为 $60^\circ$ ,下方为 $75^\circ$ ,鼻侧为 $60^\circ$ ,颞侧为 $90^\circ$ ,但周边视野受眼眶的形态、眼睑的位置,特别是上睑位置、鼻梁高低、瞳孔大小及眼球在眼眶中的位置等影响。通过中心垂直注视线为准,垂直线外侧的为颞侧视野,内侧为鼻侧视野。水平线上方为上方视野,其下为下方视野。用不同颜色作视标所测出的视野不同。白色视标视野最宽,黄、蓝、红、绿各色视野依次缩小。但颜色的深浅,背景光的变动都可影响颜色视野。用双眼视时,鼻侧部、中间部双眼的视野可以重叠,仅留下颞侧约 $40^\circ$ 的月牙区,如有眼肌疾病可能有变动,也用作诈盲或某些神经系统疾病的鉴别。中心视野是围绕黄斑部的 $25^\circ\sim 30^\circ$ 区域范围的视野。在颞侧 $15^\circ\sim 20^\circ$ 间所见到的横径 $5.5^\circ$ ,垂直径 $7.5^\circ$ 的椭圆形的暗区为生理盲点。视野曾比喻为丘样小岛,其顶峰即注视点,1侧为很峻峭的悬崖如鼻侧视野,另1侧呈斜坡状如颞侧视野,在 $15^\circ\sim 20^\circ$ 范围内有个小井为生理盲点。如同地形学的小岛一样,可以构成视野的等视线圈。视野受到损害时,呈缩小、缺损或暗点,如位置上的中心暗点、旁中心暗点、生理盲点扩大。形状上的圆形、弧形、环形、象限形或偏盲等暗点以及浓度上的绝对或相对暗点等。

3. 对比敏感度。是70年代后期新兴的形觉功能的检查指标之一(Arden, 1978),近年来已日益受重视。人的视觉系统在辨认外界物体时所见物体表面的黑白反差,与对比度有关,因而对比敏感度也就是在一定对比度下对不同大小物体的分辨力。测定对比敏感度就是记录视觉系统感觉不同空间频率正弦光栅所需要的阈值,通常以对比敏感函数记录,即所需阈值的倒数。对经度随实际物体的空间频率而变化,对比敏感度也随视觉状态而变化,有一些眼病如青光眼或视神经疾病,早期可出现对比敏感度的异常。对比敏感度要以曲线图表示。其测定的仪器包括产生光栅等刺激的监视器和记录系统,通常配备微型计算机控制刺激条件。

(中山医科大学吴乐正教授撰)

**视信息的传递和视觉形成** transmission of visual information and vision 视觉是人类最重要的感觉。人体通过视、听、嗅、尝、触等感觉所接受到的外界信息中90%以上经视觉通道得到。光是传递视信息的重要媒质,由于光的强度、波长、传播及偏振等特性,使外界刺激具有方向、形状、明暗及颜色等感

觉。同时从眼到大脑视觉系统通过对视信息的能量转换、信息传递和分析处理,得出正确的感知。

投射光经过眼的精巧的光学系统,如屈光间质的调制,使外界巨大的物像聚焦到视网膜上。视网膜含有特殊的接受器,即光感受器。人眼视网膜约有650万视锥细胞和1亿视杆细胞,视杆细胞主要在视网膜 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 区域密度最高,到周边部仅有视杆细胞;而视锥细胞则主要在黄斑区,特别是中心凹仅有视锥细胞,中心凹外逐渐减少。在视网膜中央每 $\text{mm}^2$ 有 $14\sim 16$ 万个视锥细胞,其数决定了视觉的敏锐程度。视杆细胞及视锥细胞有感光功能,视杆细胞在甚暗的环境下,可对微弱的光产生感觉,即暗视觉。还负有对物体的运动觉。视锥细胞则在较亮的光线下,产生光觉,即明视觉及颜色感觉。

两种视细胞的外节有许多扁平的膜盘结构,储存着视色素,其不同之处在于视杆细胞的外段为圆柱形,膜盘与紫膜分离,膜盘内充满视紫红质和视紫质;而视锥细胞外段为圆锥形,其膜是与紫膜连续的,膜盘含有视紫蓝质和视紫质。

光子作用于光感受器内的视色素,产生视色素代谢的一系列光化学反应和热反应。自20世纪50年代以来,对视色素代谢过程所进行的研究取得很大进展。光能转变为化学能,进而转化为电能,成为神经冲动。神经冲动引起的两电极间的电位差即动作电位,可通过放大记录下来,在视觉过程中不同的视觉阶段可以记录到眼电图(EOG)、视网膜电图(ERG)和视诱发电位(VEP)等。

70年代以来对光感受的分子机制研究进展提供了对光电转换的最新认识。近年来片膜衍位新技术证明鸟苷酸(cGMP)是这个过程的内部信使,而非原来认为的钙离子。在黑暗处cGMP使光感受器膜钠离子通道保持开放,使膜去极化,当视紫红质分子吸收光后,激活鸟苷三磷酸(GTP)一结合蛋白,并使之激活磷酸二酯酶(PDE),PDE使cGMP水解,导致钠离子通道的关闭,膜超极化,从而引起突触末端神经递质释放。

截止日前认为具有神经递质功能的物质,都可在视网膜中发现。至少有50种物质被认为有神经递质功能。有些物质还具有修饰神经元内其他递质的作用,亦称为神经调质。主要神经递质有氨基酸类、儿茶酚胺类、多巴胺类、多肽类、腺苷、前列腺素和释放因子等。神经递质呈动态变化,对外界信息作不同反应,并把信号递送给其他神经元。

视觉信息在神经细胞或神经纤维中通过神经冲动的方式传递,神经冲动沿着神经细胞的外膜特别是轴突的膜壁传导,神经冲动引起神经内部一系列化学和物理变化,如氧气的消耗、二氧化碳的产生、热量的释放及电流活动等,用微电极可以记录到单个神经细胞的活动,当刺激强度有变化时表现出神经脉冲的频率有变化。

视通道是视觉形成的基本结构。视信息在视网膜内由视细胞至双极细胞,传到节细胞,从视网膜沿着视神经向上传导,经视神经传导到丘脑的外侧膝状体,再到大脑枕叶的视皮层。

现在所知,主要的视通道有:(1)视网膜—外侧膝状体背外侧核—视皮层。(2)视网膜—外侧膝状体内侧层间核—视皮层。(3)视网膜—顶盖前区—丘脑后结节—视皮层。(4)视网膜—上丘—丘脑后结节—视皮层。其中第1条通道是纹状视皮层通道,其余3条属外纹状视区通道。

视觉行为依赖于视觉系统的特化功能。视信息经历了4级水平处理。(1)视网膜水平的细胞组成及环路分析。(2)X、Y、W神经元参与抽提物象表面的对比、朝向、距离等机制。(3)不同神经元对不同空间频率,取向的物象反应起傅里叶转换算法效应。(4)视系统从视网膜象抽提出原始基元,包括点、亮度等,进行符号群运算,最后进入3维处理以识别物体。

因而人知觉外界事物,必须通过眼的调节、辐辏、眼球运动等搜集视信息后,经历几级水平分析加工,最后在大脑获得正确的识别,形成视觉。

(中山医科大学吴乐正教授撰)

## 视觉对比敏感度测量技术

传统的视功能检测用视力表法。这是一种以特定的信息来作特定的视功能检测的方法,它尚不能确切地全面地反映视功能。光学领域发展起来的调制传递函数MTF是评价光学镜头成像质量的科学方法,它可以应用于任何实质上属于信息传递的线性光学系统,将这一概念引入视觉系统,又被称为对比敏感度函数CSF。它丰富了人们对视功能的认识。测量技术的研究和发展不仅能对视功能作出科学的评价,而且使得以往未能解决的视功能分段检查成为现实。这对推进视觉科学的研究及眼科临床工作,有着深远的意义。

视觉系统的MTF,按测量范围可分为3类:(1)屈光系统的MTF,(2)视网膜到大脑系统的MTF,(3)全视系统的(MTF)。从测量技术上说,视网膜到大脑MTF难度较大,人们在这方面的研究较多。

早在1937年Le Grand就试图用杨氏干涉原理,直接在视网膜上形成干涉条纹,测量视网膜到大脑MTF。1960年Arunlf和Dupny以及Westheimer都进行过类似实验研究。然而,这类研究的成功依赖于高度相干且亮度很高的单色光源,正因为光源问题,致使当时的这些实验没有获得满意的结果。

1960年世界上第1台激光器问世后,光源的问题解决了。1966年Campbell和Greed研制了测量视网膜到大脑MTF的装置,它以氦氖激光为光源,半透半反射镜为分束器,偏振片控制调制的方案,成功地用MTF测量结果描述了视网膜到大脑的视觉特性,证明了瞳孔大小正常,聚焦很好的眼睛所形成的眼底象是十分完善的,并且在感知精细条纹时,反差的损失大部份是由视网膜和大脑或两者之一的性质造成的。尽管当时的装置比较简陋,却为测量视网膜到大脑MTF技术奠定了基础。他们以杨氏干涉原理产生正弦光栅,以偏振器改变光源调制度的基本方法,为后人所仿效。1977年河原哲夫等用双道威棱镜作分束器,设计了新型的更为实用的视网膜到大脑MTF检测仪,并使其商品化。1979年金成鹏等以类似的方案研制成功了视网膜到大脑MTF测定仪。1981年Dressler和Rassow以光学平行平板作为分束器,设计了小型测量仪,作为裂隙灯显微镜的配套仪器。这种仪器的分束器稳定、可靠,这一设计有创新。1982年金成鹏等又以平行板作为分光元件,研制成功了能单独使用的激光视网膜MTF测定仪,并且商品化。1983年董太和等采用菲涅耳双棱镜作为分束器,具有简单、性能稳定的优点。测量入眼MTF的激光干涉装置的性能是否稳定,与装置的分光束方法关系密切。在此特别值得一提的是Smith等于1979年研制的用全息相位光栅产生干涉条纹的激光测量视力装置,一改以往用杨氏干涉原理产生正弦光栅的办法,具有显著的稳定、简单的优点,是一种很有发展前途的技术。

屈光系统MTF测量,首先于1955年由Flamant用反射法测量来实现。后来Westheimer于1962年,Krauskopf于1962年,Campbell于1966年,Kohler于1969年分别改进了Flamant的装置。他们的基本原理是一致的:将发光的狭缝在被测眼视网膜上形成像,用光电倍增管测出狭缝眼底反射象光强分布函数,通过付里叶变换,求得屈光系统MTF。1979年Gorrand认为,上述方法没有测出准确的结果,还因为它未能真正分开屈光系统和视网膜各自对象质下降产生的作用。他以在视网膜上产生干涉条纹的方法,制作了一种能单纯测出屈光系统MTF的装置。1965年Campbell采取了分别测出全视系统MTF和视网膜到大脑MTF,然后推算出屈光系统MTF的方法。这是至今仍在普遍使用的方法。

全视系统MTF测量,在技术上最易于实现。这类装置是把正弦光栅显示在被检眼前的屏幕上,由屈光系统成象于视网膜上,再经神经系统传至视中枢而感知。产生光栅的方法很多,包括印刷图片,示波器,电视,光学投影等方法。最早用来测量全视系统MTF的仪器是1956年Schade采用的示波器。1964年木通渡清二等首先用电视系统显示正弦光栅测量全视系统MTF。最

简易的测量全视系统 MTF 的办法是 Arden 于 1978 年研制的正弦光栅印刷图片。近年来微处理器广泛使用,由于它能够容易地产生各种复杂的光栅,已成为实用的临床检查仪器。

视觉系统 MTF 测量技术的应用,已获得许多重要成果;视网膜到大脑 MTF 测量,可以不受眼屈光系统光学缺陷的影响,直接测得了视网膜到大脑的 MTF,从而使分段测量视觉系统成为现实;对很多眼病能测出确切的诊断信息,作为发现疾病的敏感指标,有利于早期诊断;一些视网膜疾病的异常表现虽无特异性,但可测知其严重性,并可估计发展变化及预后;预测白内障术后视力;眼病前后比较,有利全面评价;扩大临床诊断范围,如视力表视力正常,但主诉视力模糊者,亦可列为视功能异常;增加了人体健康状况的评价指标,以及新的视功能职业选择标准;能对某些眼病进行更合理的分类(如弱视);进行屈光不正矫正效果的评价。

视觉系统 MTF 的概念正在被人们所接受,测量技术的研究工作方兴未艾。在视觉生理学方面,应用它将对视觉机制进行更科学的解释。在此基础上,将把人工视觉,机器人视觉系统的研究工作推上一个新的水平。在眼科临床方面,实用的测量仪器将普及应用,视觉 MTF 的测量将会作为眼科的常规检查,视觉 MTF 同眼疾患的内在联系将步步深入地进行研究。随着科学技术整体的发展,对于一些重要职业,如航天飞行员、海军等的人员选择,将要求用 MTF 技术检查视功能。视觉系统 MTF 技术作为检查和评价视功能的新技术,将会不断发展完善。

(温州医学院金成鹏教授撰)

**对比敏感度的客观测定** objective measurement of contrast sensitivity 对比敏感度(CS)指视觉系统辨认某一空间频率的物体表面黑白反差(即对比度)的能力,其值取对比度的倒数。实际上视觉系统不限于辨认某一空间频率,而是对不同空间频率的辨认,对比敏感度函数(CSF)是描述视觉系统辨认各空间频率的对比度的能力,它代表了由眼球光学系统、视网膜、视神经至视皮层共同构成的全视觉系统的 CSF。CSF 不仅可以反映视觉系统对细小物体的分辨能力,也反映了对中等或粗大目标的辨认能力,而且还提供在对对比度变化情况下的识别能力,因而,CSF 是全面评价视觉功能的一种有效的方法。

正常人眼的 CSF 呈带通型,在低和高空间频率的 CS 下降,而在中空间频率的 CS 最高,这说明视觉系统观看粗条纹或细条纹轮廓较困难,需较高的对比度,而观看中等条纹(3~5 周/度左右)的轮廓则较容易,这种带通型的特征与视网膜的感受野的侧抑制、马赫(Mach)效应(轮廓强调现象)及视觉系统的多通道理论密切相关,也是视觉的图象信息处理的重要特性。

CSF 检查一般采用心理物理学方法,如方毕克斯法(Von Bekesy)、增加对比度法、调节法及强制选择迫迹法。这些检查都属主观方法,需要受试者配合。还要有一定的理解能力,对于不能主观配合的受试者,如老年人、婴幼儿、弱智者等,甚至用最简单的心理物理学方法所得出的结果可能也是极不可靠的,为此,必须建立一套客观的检查方法。1970 年坎贝尔(F. W. Campbell)等利用图形视诱发电位(PVEP)对 CSF 作客观测定的研究,他们发现在一定的对比度范围内,PVEP 振幅与对比度的对数值近似呈线性函数,把这条直线外推至零振幅处,即得到 CSF 的电生理阈值,这个值与心理物理学方法所得到的阈值极其相关,但测定时间冗长,不能在临床上广泛使用。1982 年拿加亚马(K. Nakayama)等把坎贝尔的方法应用到灵长类动物,观察到其 PVEP 振幅—对比度函数与人类相似。1986 年爱伦(D. Allen)和 1991 年陈师等报道了应用离散傅里叶变换(DFT)快速提取稳态 PVEP 二次谐波的扫描对比度法测量 CSF,并同时用增加对比度方法测量心理物理阈值,两者结果一致。近年来,随着锁相放大技术和傅里叶变换的引入,使 CSF 的客观测定进入临床成为可能。最近,也有学者应用模型网膜电图(PERG)测量 CSF。

用视觉电生理方法推测对比敏感度阈值的基本原理是,在

近阈值的一段对比度范围内记录 PVEP,并进行振幅分析,外推至振幅为零值时的对比度,定为阈值对比度,具体地说,对比度阈值推测可分为 3 部分:(1)检测 PVEP;最早使用的 VEP 检测技术是信号平均法,利用重复刺激、按照共同的时间参考点记录和叠加 PVEP,其特点是诱发反应是时间的函数,因此也称为时域分析技术,如果刺激频率较低,则可记录到反应时程比分析时间要短的复合波,称为“瞬态反应”,若刺激频率较高( $\geq 8 \sim 10\text{Hz}$ ),则可诱发出周期性复合正弦波,其主要成分与刺激频率相同,也称为“稳态反应”,这种方法的缺点是当噪音频率为刺激频率的整数倍,而且又在测量系统的宽频带范围之内时,叠加出的信号中会掺杂这些频率的噪音,信噪比将降低。近年来发展起来的频域分析的信号检测技术在 PVEP 记录中有其独到之处,如果 PVEP 是周期性的稳态反应,则可运用窄带滤波、同步解调和傅里叶分析来区别信号检测过程是否对反应相位敏感,如果正弦信号的相位是已知和恒定的,则最好的滤波方法是相位敏感检波器,在频带之外的频率或相位不能与参考相位相匹配的成分将作为噪音排除,锁相放大技术就是这种方法,如果正弦信号的相位是未知的或者随时间而改变,则最好的滤波的方法是积分检波器,即可以运用傅里叶分析来实现,实际上,在扫描对比度过程中,PVEP 的相位是变化的,选用积分检波法较为合适。当采样点数是 2 的幂级数,则可以用快速傅里叶变换(FFT),采样点数不是 2 的幂级数,则可用离散傅里叶变换(DFT),傅里叶分析法实际是一种数字滤波的过程,只有所需提取的谐波及其邻近的窄带信号可以通过。(2)对比度坐标:由于检测对象、刺激条件的不同,反映在 PVEP 振幅—对比度函数的曲线形态的变化,大致有几种情况,一种为非单调性直线,即在低、中、高不同对比度出现由两条不同斜率的直线构成 PVEP 振幅—对比度函数,另一种在低对比度时,PVEP 幅值与对比度对数成线性相关,但到中、高对比度时,曲线呈水平走向,即已达到幅值饱和的程度,再有一种当对比度升高时,PVEP 幅值反而降低,但随着对比度继续升高,则又有新的回升,这种现象称为过饱和。总括上述几种情况,至少在近阈值处,PVEP 幅值是对比度对数的线性函数。(3)PVEP 幅值推测阈值对比度的方法:不同的推测方法,将影响最终得到的阈值结果,比较常用的方法是外推法,简单的方法是坎贝尔等(1979)在半对数坐标纸上,把 PVEP 幅值的回归直线外推至零振幅处,与对比度坐标轴相交,交点处的对比度值即定义为客观测定的对比度阈值,这较适合于对瞬态 PVEP 的处理,对稳态 VEP,则通过傅里叶分析后,得到幅值和相位。为了保证用于回归的数据代表视诱发电活动,必须靠多方面的信息:振幅准则:通过 DFT 窄带滤波与 PVEP 频率不同的脑电图(EEG)噪音被滤去,但与 PVEP 频率相同的噪音却无法滤去(如 EEG 的  $\alpha$  节律波,8~13Hz),法格(JE. Fagan)提出通过测量信号频率邻近频率的噪音来间接估计与 PVEP 频率相同的噪音大小,将 PVEP 信号频率的振幅除以邻近频率的噪音振幅,得到信噪比。诺克拉(AM. Norcia)等报告如比值为 2:1,“假阳性”信号出现的几率为 4.5%,如比值为 3:1,假阳性率下降到 0.3%。相位稳定准则:稳态 PVEP 的相位应该是相对稳定的,而 EEG 的相位则是杂乱的,其次,当刺激对比度增加时,PVEP 的相位变化表现为超前,因此,在扫描对比度的过程中,若出现相位滞后现象,则表明记录到的是 EEG 噪音,必须选择合适的相位水平,以鉴别信号与噪音。局部伪迹剔除,应在 PVEP 采样程序中设有伪迹自动剔除,可以用削波的电位剔除法,但如果因受试者身体移动或肌肉放电引起电位抬高,而未达到削波,则可在 PVEP 振幅函数上出现一伪“峰”,这种伪迹频率带较宽,可同时引起信号频率和噪音频率振幅的增加。当噪音振幅超出信号振幅的 70%时,则这一点的反应也视为伪迹。合理选择回归线的起点与终点,陈师等设计了能自动选取起点和终点的一套计算机程序,计算机将从最低的对对比度反应开始,逐点检查每一点与其相邻点的相位关系以及是否有局部伪迹出现,振幅函数开始上升且信噪比大于 1.5:1 的那点即为回归的起点,起点以后的点如何确定?至少有两个点满足



以上条件,而其中至少有一个点的信噪比大于3:1,则这个点用于线性回归,如果起点前一点的相位不能满足相位稳定准则,那么起点不变;如果起点前一点相位稳定,那么把前一点作为起点,回归的终点定为振幅函数单调上升的最高点,而且信噪比要大于3:1。如果振幅函数包含多个支或峰,并且信噪比都大于3:1,则选择最低的对比如度区间作线性回归,若以上条件均不满足,则这些数据不能用以回归,也就得不到PVEP阈值。当单次测试的信噪比太小而不足以进行对比度阈值推测时,可采用“矢量平均”的技术,即在相同的刺激条件下,进行多次测量,然后把每次测量结果进行DFT计算后所得正弦系数和余弦系数进行平均,再算出DFT的振幅和相位,其优点是把DFT分析的有效频带变得更宽,提高了信噪比。

(中山医科大学中山眼科中心吴德正撰)

### 色觉的客观测定 objective measurement of color vision

颜色视觉(简称色觉)是视系统对物体光谱特性的感知能力。色觉检查已有100多年的历史,自1873年斯地林(J. Stilling)出版第1张同色图以来,至今已有多种种色觉检查法,如各种的同色图、色相子排列检查法、色觉镜及灯光试验,这些检查都属主观的检查法,需要受检者配合,并要有一定的理解能力及表达能力。从60年代开始,随着社会需要和科学技术的进步,色觉的客观检查逐渐形成和发展起来。

色觉的客观检查可通过行为试验、视诱发电位(VEP)、视网膜电图(ERG)和视动性眼球震颤(OKN)的方法来实现,目前较多研究后3种方法。应用视觉电生理方法作色觉的客观检查必须满足两个基本条件:(1)能产生各种颜色(即不同的波长)的光刺激器,(2)能将对颜色感觉的电反应从视觉电生理仪中记录下来,并可作进一步分析。

**视诱发电位(VEP)** 应用等亮度的不同波长的方格或光栅的刺激,从视皮层引出的电反应,称为色觉视诱发电位。阿明顿(J. C. Armington)于1966年用VEP测量人眼明视光谱敏感性,显示与CIE,(国际照明委员会)曲线有良好的吻合。1969年里格斯(L. A. Riggs)使用不同波长的方波条栅刺激,其光栅亮度相等,显示出随着相邻条栅之间波长差别的增加,VEP波幅可增加到一个饱和水平,这种方法表明眼对颜色的分辨力与VEP的波幅密切相关。里根(D. Regan)等对绿色盲者做VEP检查,他们用3种刺激光,第1种是在设有方格的红色视野上快速呈现红色棋盘模型,总亮度不变;第2种是在设有方格的绿色视野上快速呈现绿色棋盘方格,总亮度不变;第3种刺激是在设有方格的黄色视野上快速呈现红绿色棋盘方格,视野上任何点的总亮度(红+绿)保持不变,结果表明等亮度红绿棋盘方格在正常人可引出明显的反应,而在绿色盲者则无反应。兹莱拿(E. Zrenner)等1976年报告红色盲者的VEP测定结果与红色盲的光谱敏感曲线以及视锥细胞色素光密度测定的结果很相符。以上的作者使用条件均不相同,因而,影响色光VEP应用的主要困难在于刺激条件及记录分析的标准化的问题。

**视网膜电图(ERG)** 视网膜受光刺激后,从角膜接触镜电极记录到的视网膜总和反应称为视网膜电图。可采用多种方法来实现色觉测定:(1)单色光ERG,刺激系统的光源是氙弧光灯,由此光源引出2条通路,在第1条光通路上装有一系列无屈折力的彩色滤镜和半透镜,以获得单色光,并调节每一种单色光的能量相等,作单色光的刺激;第2条光通路是背景光,由反射镜和无屈折力的滤色镜从氙弧光灯引出,当选择白光适应( $0.74\text{W}/\text{m}^2$ ),此时抑制视杆系统,记录总的视锥细胞反应,选红光适应( $7.25\text{W}/\text{m}^2$ )时,则抑制红锥细胞,记录绿锥细胞的反应,选蓝光适应( $3.26\text{W}/\text{m}^2$ ),抑制蓝锥细胞,以记录红、绿锥细胞反应;两条光路通过反射镜照射于眼,严格调整刺激强度的快速扫描以获得光谱反应,画出每一波长的明视b波振幅值,作为光谱的反应曲线,应用此方法岳西达(T. Yoshida)发现正常人在白光适应下于560nm的波长光处反应最大,尤奇(Y. Uji)报告正常人、红色

觉异常者和绿色觉异常者分别在560、540和580nm处反应最大,这个方法对红、绿色盲的诊断较明确,但红色弱和绿色弱的检出仍较困难。(2)视网膜电图撤光反应(ERG),本测试是在通向全视野刺激的光路上设置关闭开关,以激发快速撤光反应,快速撤光反应由持续125ms的各种方波单色光刺激的停止所激发,通过改变各波长的颜色光刺激,测定产生一恒定的标准电位值所需的刺激强度,取其倒数确定各单色光的敏感性,岳西达报告正常人约在580nm处敏感性最大,红色觉异常者在570nm及更长波长区明显降低,绿色觉异常者在480~560nm处降低。(3)弦闪烁光红-绿刺激的ERG反应,1987年尤奇首次报道了这个方法,在一发光源前放置红、绿干涉滤片,红绿刺激光线的比例以旋钮的混合刻度读出,光源以产生正弦闪烁,记录在各种混合刻度时的反应幅值,然后进行光谱的分析,以混合刻度为横坐标,振幅为纵坐标,经傅里叶(Fourier)分析,画出资料图,结果表明正常人在520~560混合刻度为0点(即相对振幅最小),红色觉异常者在710~745混合刻度为0点,绿色异常者在460~510混合刻度为0点。(4)早期感受器电位(ERP),用较强的短时间的闪光可激发出ERP,光束通过光导纤维在另1个透镜上聚焦,调节各单色光为等能量,测量各单色光刺激引出ERP的 $R_2$ 的振幅。卡瓦萨克(K. Kawasaki)等报告正常人 $R_2$ 振幅高峰在520nm,红色觉异常者在560、580和600nm处反应较对照组低,绿色觉异常者在短波长460~520nm处振幅变小,而在长波端反而变大。

**视动性眼球震颤(OKN)** 通过颜色变化的重复性刺激,诱发出眼球震颤,经电生理仪记录下眼震图。1960年耶玛奇(R. Yamaji)利用色觉异常者的色混淆现象,制成左右摆动的表面色光栅,诱发眼球运动,1974年摩利兰(J. D. Moreland)利用由11个转鼓组成一套涂有紫和灰两种条纹的表面色转鼓来诱发眼的OKN,1984年卡文拿格(P. Cavanagh)利用LSI11/23计算机控制的彩色显示器产生运动的色光栅,以诱发出受检者的OKN,依据OKN方向的改变测出受检者的等亮度点,根据等亮度点的不同检出红色盲。1987年石和平等设计制作用数字逻辑电路控制的发光二极管刺激器,采用闪烁亮度技术,精确控制红、绿光的亮度,使红、绿光源的亮度比改变而亮度总和不变。当调到红、绿光亮度相等时,绿光亮度和红光亮度之比称为观察者的等亮度点比值。在等亮度点附近,正常人虽觉得亮度相同,但仍能分辨出运动的红、绿光栅,故仍能诱发出OKN,而对红、绿色盲患者,在其等亮度点附近,由于亮度一样,加上色混淆,无法分辨出红、绿光栅,故诱发出OKN,即记录不到OKN波形,又由于红、绿色盲的等亮度点的比值不同,故又能检出红、绿色盲。吴乐正等设计了微机化的实用型客观色觉检查仪,它包括刺激视屏和主机两部分,刺激视屏由数百个红、绿、黄发光二极管组成阵列,再配上反光板和毛玻璃形成视屏,阵列中的红、绿、黄发光二极管通过组合后与驱动电路相连,主机由硬件、软件、键盘和CRT显示器等构成,可实现对光栅运动速率、光栅总亮度、光栅红绿亮度比及变化速率控制,对OKN信号采样、处理贮存和打印。

总体看来,色觉客观检查法将会受到越来越多的眼科研究人员和临床医生的重视,同时随着检查方法的改良和简化,其临床应用的价值越来越高。

(中山医科大学中山眼科中心吴德正撰)

### 平稳跟踪运动的客观测定 objective measurement of smooth pursuit eye movement

平稳跟踪是眼球平稳地跟踪低速运动目标的一种眼球运动方式,它保持运动目标的像投射在视网膜的中心凹上。人们在日常生活中,尤其在一些特殊工作中,如航天、航空、军事和体育等,不仅需要有良好的视力,还需要有良好的跟踪能力。跟踪试验对于探讨眼球运动生理和辅助诊断肌、前庭系统和中枢神经系统的疾病有一定意义,也有助于选拔航天、航空及其他一些特殊专业人员。

跟踪试验的研究主要分成3个阶段,(1)早期工作,直接观察眼球跟随目标运动的状况;(2)60年代初至70年代中,记录

视跟踪运动的波形,定性分析记录的波形的形态特征;(3)70年代末至今,运用计算机技术定量分析视跟踪运动,并随着刺激、记录和分析技术的发展,视跟踪试验的敏感性和精确度均不断提高。

视跟踪目标或称视刺激目标是产生视跟踪运动的必要条件。常用跟踪视标是通过激光投射装置、显象管或单摆装置所产生的,视标一般固定在某一个方位(水平或垂直)并作以下某一种运动:正弦波(固定频率)、三角波(固定频率)、伪随机运动、单方向匀速直线运动和频率连续增加的正弦波,也有用作匀速圆周运动的视标诱导眼球同时作水平和垂直方向相位差为 $90^\circ$ 的正弦运动。平稳跟踪检查的视标角速度应在 $37.7\sim 75.3^\circ/s$ ,当其大于这一定值时,平稳跟踪运动就会被扫视运动取代。

视跟踪运动的记录技术有多种方法:(1)运动眼电图技术(M-EOG)。将记录电极放置在受检眼内外眦皮肤上,因眼球是一个电偶极子,眼球前后极(角膜-视网膜)之间存在着6mv的电位差(称之为眼静电位),眼球前极相对于后极为正,当眼球作水平运动时,在两个电极间有电位差的产生,这个电位差可通过电极引出,并用电生理仪记录下来,即为运动眼电图。这个技术的优点是在眼球水平运动 $\pm 35^\circ$ 范围内,眼球运动程度和电位差成线性关系,这样不妨碍受试者佩戴眼镜;另外测试方便,受检者无特殊不适感,适宜于儿童和合作欠佳者。但运动眼电图也存在一些问题,如静电位主要起源于视网膜色素上皮,视网膜照度的变化会引起眼静电位缓慢而持久的变化,因而,在作运动眼电图检查之前,必须进行预适应,在检查过程中要保持视网膜照度恒定。(2)红外线巩膜反射技术:该项技术是通过监测角膜缘的位置记录眼球运动。给受检者戴上装有小型红外线光源的眼镜架,红外线照射在眼球表面,用两个带聚焦透镜的红外线光电管接收眼球表面的红外线反射光,光电管上产生的电压与其所接收到的红外线反射光能量成正比。当记录眼球水平运动时,放置光电管使其接收反射光的范围在鼻侧和颞侧角膜缘。当眼球向一侧运动时,由于该侧红外线被虹膜吸收,该侧光电管接收到的红外线强度减弱,而另一侧光电管因巩膜反射红外线较强以致接收到红外线的强度增强。这样,在光电管上产生的电压就正比于眼球运动的角度,从而可以记录眼球运动的图形,这个方法的优点是属直流记录,能准确地记录到微小而缓慢的眼球运动,噪声很小,通过使用高频截止频率较高(100Hz)的滤波器,可减少信号的高频失真,受检者较舒适,但此方法记录的线性范围较小,水平方向运动的线性范围仅限于 $\pm 15^\circ$ 。(3)巩膜探索线圈技术,给受检者的眼戴上一片嵌有线圈的大直径环形软性接触镜,用一个线圈在眼球区域产生磁场,当处于磁场内的眼球及线圈运动时,在探索线圈上就会产生一个大小与眼球运动幅度成正比的电流,这样就能记录到眼球运动,这项技术的优点是精度高,噪声小,记录眼球运动的线性范围较大,约 $\pm 30^\circ\sim \pm 35^\circ$ ,其不足之处是眼球表面需要麻醉,有时受检者难以接受,并且设备成本高。

记录到的视跟踪运动波形的数据分析方法也是有很多种,最简单的是定性观察视跟踪波形或根据波形的平稳程度来进行分类。1980年翁米达(Y. Umeda)设计一种不需要使用计算机的视跟踪定量分析法,它是利用时间常数为0.03s的放大(滤波器)使视跟踪曲线的不规则部分在运动眼电图上描计成尖峰波,然后用尺测量尖峰的高度,计算9s内出现的光峰单位总数,数值越大表示视跟踪波形越不规则。近年来,趋向于利用电子计算机对视跟踪试验进行定量分析,测定视跟踪运动的3个指标:速度,位移和平衡程度。1976年鲍罗(R. W. Baloh)用EOG方法测定平稳跟踪运动,并通过计算机测试了眼球运动速度,以后发展多项测定,如计算增益(眼球速度/视标速度)、相位(眼球落后或超前视标的程度)、视网膜位置误差(视标位置减去眼球位置)、叠加在视跟踪波形上的扫描频率及幅度、视跟踪幅度等。1978年恩格肯(E. J. Engelken)等首次把谱分析技术用于视跟踪,这种分析技术是把时间信号转换成频信号,用多个周期性原始信号各采样点的值来计算有关参数,余敏忠等设计和装配了一套用计算机控制

的视跟踪试验系统,编制了控制刺激、数据自动采集和分析的软件,测出了中国正常人视跟踪系统的4个参数值:谱纯度(表示眼球跟踪运动接近正弦波的程度,也即记录曲线的光滑程度)、相位、增益和互协方差(表示眼球跟踪运动与视标运动的相关程度),具体值见下表。

表1 中国正常人视跟踪试验各参数正常参考值

| 刺激频率<br>Hz | 谱纯度  |      | 互协方差 |      | 增益   |      | 相位    |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
|            | 均值   | 标准差  | 均值   | 标准差  | 均值   | 标准差  | 均值    | 标准差  |
| 0.2        | 1.01 | 0.05 | 0.99 | 0.05 | 1.01 | 0.05 | -0.1  | 1.7  |
| 0.4        | 0.99 | 0.05 | 0.99 | 0.06 | 0.99 | 0.05 | -0.3  | 3.2  |
| 0.8        | 0.95 | 0.10 | 0.92 | 0.10 | 0.95 | 0.10 | -11.0 | 9.0  |
| 1.2        | 0.87 | 0.14 | 0.66 | 0.20 | 0.7  | 0.14 | -39.0 | 16.0 |
| 1.6        | 0.70 | 0.20 | 0.26 | 0.29 | 0.70 | 0.20 | -66.0 | 25.0 |

在眼肌麻痹、眼球震颤、小脑、脑干病变或其他病变引起眼球运动障碍时用平稳跟踪试验检测其病变程度及运动受损情况在眼科临床上有实际的指导意义,也是客观评定这些病变疗效的一种指标。但目前尚难以根据视跟踪试验的参数将引起眼球运动障碍的不同病变区分开来,另外,各类病变也时常会出现平稳跟踪系统和扫视系统同时受损情况,因此,如何区分这两种变化还需进一步研究。

(中山医科大学中山眼科中心吴德正撰)

**红细胞生长素 erythropoietin** 红细胞系的生成过程已经明确,可分为4个阶段:(1)多能干细胞期;(2)造血祖细胞或红系干细胞期;(3)幼稚红细胞期;(4)红细胞期。红细胞系的这种增殖与分化过程受到一系列的内源性因子的调控。20世纪初人们就认为存在着一种能促进红细胞生成的血循环物质,但直到50年代才被证实,这就是红细胞生成素(Epo)。

红细胞生成素主要作用于红细胞生成的第2阶段,此阶段的红细胞为Epo反应细胞(EFC),按分化先后可分为红细胞克隆群形成细胞(BFU-E)和红细胞克隆形成细胞(CFU-E)两个阶段,它们均为红细胞的定向干细胞。Epo通过控制这些红细胞干细胞的增殖、分化和成熟而表现出它的生物活性。近期发现Epo尚可对其他血系干细胞、乃至多能干细胞起作用。Epo的深入研究有着重大的医学意义,是血液分子生物学研究热点之一。

Epo是一个酸性的,热稳定性的单链糖蛋白,由166个氨基酸组成,但第166位的精氨酸经常缺失,因而没有166位精氨酸的Epo可能是此生成素的天然形式。肽链分子量约18398。对人Epo结构的了解是随着它从难治性贫血患者尿中得以纯化而深入的。纯化物的SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳显示为具有同种生物学效力的两条区带,反映了糖基成分的差异。含糖Epo分子量30400,糖占39%。Epo中有3个N-连接糖基化位点即24位、38位、83位的天冬酰胺(Asn),以及一个O-连接糖基化位点即126位的丝氨酸(Ser)。聚糖酶水解证实4个糖化位点均被糖基化。糖基化对Epo在体内的稳定是必要的。纯化的人Epo有两个二硫键,其对变性的Epo的活性构像的恢复是必须的。不同种属的哺乳动物如人,猴,鼠的Epo的氨基酸顺序显示出高度的同源性。有关Epo的活性位点尚无权威性报道,但已有证据证实N-末端的26个氨基酸残基的有无不影响其生物活性而99-118位氨基酸及111-129位氨基酸对Epo的生物活性是必要的。二硫键对活生亦然,如鼠Epo中第33位氨基酸为脯氨酸而非人Epo的半胱氨酸,活性则下降。

像别的蛋白质激素一样,Epo行使它的生物学活性是通过受体介导的机制。高亲和力及低亲和力的红细胞生成素受体(EpoR)均已被鉴定。在红系分化过程中,EpoR在BFU-E和CFU-E细胞中特异性表达从而对Epo发生应答,高亲和力受体是诱导红系分化所必须的,而低亲和力受体主要参与了Epo的细胞增殖作用。FVA细胞是Friend红白血病病毒贫血变异株转

染了的小鼠脾细胞,是对 Epo 敏感的细胞株,它有两种 Epo 受体,  $K_D$  值分别为 0.09nM 和 0.6nM,每个细胞上分别有 300 个和 500~700 个受体。这种 FVA 细胞显示,当 180 个左右的受体结合配基后有最大的生物学效应。Epo 结合细胞表面的 Epo 受体后,配基-受体复合物内在化。内在化对 Epo 的生物学作用是否必须或者 Epo 结合到其受体的细胞外区是否就足以引起靶细胞的生物学反应仍不清楚,但无疑受体所传导信号将激活一系列特殊的调控基因从而确定受体所在细胞的命运—是增殖还是终末分化。EpoR 基因表达的组织特异性和分化阶段特异性是由于此基因受特异的红细胞系转录激活因子 GATA-1 的影响。Epo 特异地结合到它的受体 EpoR 后受体介导的信号促进 CATA-1 基因在 BFU-E 和 CFU-E 细胞的转录,而 GATA-1 基因的产物最终将在相当成熟的红细胞中转录激活合成血红蛋白及珠蛋白有关的基因。

人 Epo 基因与任何已知的基因无同源性,位于第 7 号染色体长臂的 21 区,为单拷贝基因,全长约 4kb。当以 Epo 的 cDNA 探针杂交那些用 HindIII 或 HinfI 消化的不同人的基因文库 DNA 时可观察到限制性内切酶片段长度的多态性(RFLP)。Epo 基因有等位基因,家族性研究表明了 RFLP 的带型与孟德尔遗传规律相符。比较人、猴、鼠的 Epo 基因表明该基因的组成是保守的,有相同的内含子及外显数目,编码顺序的同源性人猴间为 94%,人鼠间为 79%。经测序人 Epo 基因的起始密码上游 600bp 范围并不含明确的启动子顺序,正常的聚 A 信号 AATAAA 也不存在,含 5 个外显子,转录出 1 个 1.8kb 的 mRNA,缺氧刺激促进基因表达时 mRNA 的产量增加。翻译的起始点为 mRNA 中的第 2 个 AUG,而非大多数 mRNA 翻译起始于第 1 个 AUG。人的 Epo 基因编码 1 个 27 个氨基酸的信号肽以及 1 个 166 个氨基酸的 Epo 成熟蛋白组成的 Epo 前体蛋白。

1957 年发现肾脏是成年动物 Epo 的主要来源,在鼠失血实验后 10h 将实验动物各器官组织的 mRNA 进行吸印转移和杂交,Epo 的 mRNA 可在鼠肾中发现。肾切片的原位杂交提示 Epo 是在肾皮质的周围小管细胞中产生,这种细胞既非血管小球性,也非肾小管性,而是毛细血管内皮细胞。在血球容积和 Epo 产生细胞间看来存在着密切的关系,这提示 Epo 合成的增加是由于这些细胞总数的增加或是由于单个细胞合成活力的增加。研究表明肾中 Epo 的 mRNA 在注射 3~6h 后才出现,因此不存在储备的 Epo 的释放,而 Epo 基因的表达调控是一个转录水平的调控。近期研究表明 Epo 基因也在骨髓的巨噬细胞中表达,这个发现与广泛被接受的概念——血生成的调控也应取决于骨髓微环境内的体液反应相符合。Epo 基因在转化细胞中的表达的研究取得了进展。IW32 和 NN10 细胞株都是病毒转染鼠脾细胞后能组成性分泌 Epo 的细胞。在这些细胞株里表达机制的研究有助于对 Epo 基因表达调控的理解。

Epo 的生物学作用即对骨髓靶细胞的作用曾用一系列方法进行广泛的研究。这一复杂的生物学事件导致了红细胞类型的表达,但机制尚不清楚。Epo 的作用是影响 BFU-E 和 CFU-E,此外尚能影响多能干细胞进入红细胞系统的分化和增殖,支持这一观点是由于观察到 Epo 在体外可与其他集落刺激因子竞争干细胞发育为各自的血系细胞。Epo 对干细胞的定型作用尚有争论,而其对红细胞的分化和增殖作用则已有定论。在靶细胞接触 Epo 后,首先是细胞质内钙离子的积聚,如 FVA 细胞 4℃ 培养时加入高浓度 Epo(20u/ml)后 1min 即可表现出钙离子的积聚,而集落明显增加的结果证实了 Epo 及钙离子在红细胞分化中的作用。钙离子可能在 Epo 与其受体结合时起作用,但不清楚是否涉及到钙调蛋白或蛋白激酶 C 的调控过程。有人认为 cAMP 可能有第 2 信使作用,cGMP 的作用尚未发现。骨髓干细胞接触 Epo 后 0.5~2h 内 RNA 聚合酶 II 的活性增加,而后 RNA 聚合酶 I 及非组蛋白增加,大量的 DNA 的合成出现在 48h 后。血红蛋白的合成受 Epo 作用的影响,对珠蛋白基因转录的作用先于对血红素合成的作用。有促进转铁蛋白受体增加的作用。

由于人的 Epo 基因已成功克隆和表达,因而重组的人 Epo(rHUEpo)已不仅用于生物学的观察,且用于临床。它可用于肾性贫血。通常这些患者需要不间断的输血以维持存活,近 300 例患者使用 Epo 后血红蛋白和红细胞比积增加,而不再依赖输血。剂量为血透后静脉注射 1.5~500IU/kg,每周 3 次。它可用于外科手术病人术前用药而后采血,供术时使用。它可用于有贫血的肿瘤患者,以校正红细胞的生成。它可用于骨髓发育不全性贫血。它可用于 AIDS 病治疗性贫血。由于 Epo 可刺激巨核细胞生成,可用于提高血中血小板数。由于 Epo 在成熟骨髓体内能刺激胎儿血红蛋白的出现,给镰刀状细胞贫血症的治疗提示了可行的方法。基因重组 Epo 体外表达的成功,为其临床应用开拓了广阔的前景。

#### 参考文献

- 1 Miyake T, Kung CKH. Purification of human erythropoietin. *J Biol Chem.*, 1977, 252: 5558
- 2 Lin FK. Cloning and expression of the human erythropoietin gene. *Proc Natl Acad Sci USA.*, 1985, 82: 7580
- 3 Graber SE, Krantz SB. Erythropoietin: Biology and clinical use. *Hematol Oncol Clin AM.*, 1989, 3: 369
- 4 Foa P. Erythropoietin: Clinical application. *Acta Haematol.*, 1991, 86: 162
- 5 Tomoki Chiba, et al. CATA-I transactivates erythropoietin receptor gene, and erythropoietin receptor-mediated signal enhance GATA-I gene expression. *Nucleic Acid Research.*, 1991, 19: 3843

(中国医学研究院基础研究所黄秉仁教授撰)

### 局部肾素—血管紧张素系统 renin-angiotensin system

局部肾素—血管紧张素系统(RAS)包括肾素、血管紧张素原、转换酶及血管紧张素 I 等组成成分,血管紧张素原经肾素(酶)的作用降解成血管紧张素 I (AI),在血管紧张素转换酶(ACE)的作用下 AI 转换成血管紧张素 II (AII),经氨基肽酶的作用 AII 可变成 AIII (血管紧张素 III)。根据其存在的部位将 RAS 分为两大类,即血浆 RAS 与局部 RAS。前者的组成成分存在于血浆内,后者的组成成分存在于好些局部组织内,不依赖于前者。早在 30 年代就发现了血浆 RAS,可是局部 RAS 发现得较迟。

1. 脑 RAS. 1971 年盖特(Ganten)等首先发现脑内具有生成肾素—血管紧张素的各种成分。在狗、鼠、人脑提取有类似肾素的活性物质,并检查出脑内肾素的活性约为肾脏皮质肾素活性的 1/1000,而高于血浆中肾素活性。后来在狗与兔脑中发现有血管紧张素原,在大鼠和人脑内有血管紧张素 I 转换酶存在。1985 年立得(Lind)等发现在中枢神经系统内广泛分布 AII 神经元纤维。用放射免疫测定法发现脑内很多区域含有 AII。当切除肾脏后脑内 AII 含量不受影响,说明脑内存在有独立的 RAS。1989 年杨焜与丁虎等在自发性高血压大鼠(SHR)和一肾 Grollman 高血压大鼠的脑内(延脑、脑桥、下丘脑及尾核)AII 含量显著增加,向侧脑室注射转换酶抑制剂 Captopril,上述脑区 AII 含量显著减少,同时动脉血压下降。

关于脑 RAS 对血压的调节作用,1961 年毕克尔顿和布克莱(Bickerton & Buckley)用狗孤离头交叉循环标本首次发现 AII 有中枢升压作用。向颈内动脉注射 AII 0.2~4.0μg/kg,血压升高 15%~50%。脑室注射 AII 0.1~10μg,血压升高 2~10kPa。1987 年杨焜和周期等向兔孤离核、延髓腹外侧面加压区及第 4 脑室给予 AII,引起动脉血压迅速而显著的升高;并证实此升压反应是通过肾上腺素能 α<sub>1</sub> 受体与精氨酸加压素(AVP,作为神递质起作用)介导的,因预先分别注射 α<sub>1</sub> 受体阻断剂哌唑嗪与 AVP-抗血清,该升压反应显著减弱。AII 引起中枢升压反应主要通过 3 条途径:(1)中枢性兴奋交感神经,因为向脑内注射 AII 引起交感神经放电频率增加及血浆去甲肾上腺素(NE)浓度升高。

(2)抑制迷走神经中枢,向脑室注射 A I 引起血压升高的同时,心率与心输出量也增加。当切断迷走神经后,心脏的反应则减弱。(3)促进加压素(VP)释放,向脑室注射 A I,引起血浆和脑脊液中 VP 浓度升高。但这种效应有种属差异;另外,麻醉可减弱此效应。

脑内 RAS 可促进下丘脑内 NE 的利用,抑制突触对 NE 的再摄取;增加下丘脑、脑桥、延髓内多巴胺含量。1989 年杨焜等在自发性高血压大鼠发现脑内 A I、NE 含量及血压的变化呈同向关系,因向侧脑室分别注射 Captopril 与 6-羟多巴胺(6-OHDA),均引起 A I、NE 含量及血压下降。6-OHDA 是损毁中枢儿茶酚胺神经元的药物,可是 A I 也减少;Captopril 是阻断 A I 的生成,可是 NE 也减少。上述两种情况均引起血压下降,可见 A I、NE 及血压三者之间存在同向关系,这对高血压的发生机理及其治疗可能有重要意义。

关于脑内 RAS 与心房肽(ANP)的关系,近来有些报导。1985 年 Hiroshi 等,发现在中枢 RAS 与 ANP 有相拮抗的作用。向脑室注射 A I 引起 AVP 释放,但将 A I 与 ANP 联合注射,则 AVP 的释放减弱。向脑室注射 ANP,可抑制由于注射 A I 引起的中枢升压反应与饮水效应。

2. 心脏 RAS。早在 1976 年 Ganten 等提出在哺乳动物心脏中有 RAS,可自行合成与释放 A I。1984 年 Nusserberg 等在太鼠左室细胞检出 A I;1985 年 Ludwig 等在心肌细胞中也找到 A I。1987 年 Dzu 等发现小鼠大鼠心肌细胞内含有肾素和 A I 和信使核糖核酸(mRNAs),后进一步发现整个心脏及离体心肌细胞存在肾素样活性。1985 年 Unger 等发现口服 Captopril 可降低心肌中 ACE 的活性。1983 年 Re 等证实心肌细胞中含有肾素。以上资料表明心脏内确有 RAS 存在。

关于心脏 RAS 在高血压中的作用,学者们进行过一些研究。1987 年 Manoel 等研究过 A I 在血压性心肌肥大中的作用,给予该动物 Captopril,可逆转这种心肌肥大,1980 年 Ding Hu 等,在 SHR 心脏组织(心房、心室)中发现 A I 含量显著增加,在从 16 周龄至 20 周龄的过程中 A I 几乎呈线性增加。但在同一 SHR 上血浆中 A I 水平却较稳定,在早期略有上升,而在后期略有下降,这表明心肌中 A I 不是来自血浆。向该动物侧脑室注射 Captopril,心肌中 A I 含量显著下降,动脉血压也下降。这提示心脏 RAS 活性增强与高血压的发生可能有关。

至于心脏 RAS 的生理作用还不很清楚,据目前所知有以下作用,(1)A I 引起冠状动脉收缩,使用转化酶抑制剂 Captopril,可增加缺血心肌的血流量。(2)正性肌力作用,这可能是通过心肌中 A I 促使心交感神经末梢释放 NE 的结果。(3)使心肌肥厚,A I 可能刺激蛋白质合成与细胞生长。(4)1987 年 Iwao 等报道,心肌 A I 可促使心脏细胞释放心房肽。

3. 血管 RAS。关于血管 RAS 的资料不很多,有作者报道,用灌流肠系膜动脉的方法发现流出液中含有 A I,在灌流液中加入 Captopril 后,则流出液中 A I 含量减少,因而认为血管组织能合成与释放 A I。1981 年 Mizuno 等发现血压可影响大鼠主动脉中 ACE 的活性。1984 年 Asaad 等报道血管内肾素活性与自发性高血压有关,给予 Captopril 有抗高血压的作用。1990 年丁虎与杨焜等报道,SHR 的主动脉中 A I 含量显著高于同龄对照 WKY,给该动物侧脑室注射 Captopril 后,主动脉内 A I 含量显著下降,动脉血压也下降。有趣的是在高血压的过程中,主动脉内 A I 含量呈线性增加,然血浆 A I 水平变化不大,先稍升高,后又下降。在一肾 Grollman 高血压大鼠上我们也发现类似现象,这提示主动脉 A I 含量增加与高血压的发生与维持有关。在临床对血浆肾素水平不高的患者给予转换酶抑制剂却有降压作用,这可能与降低血管组织内 A I 含量有关。至于血管组织释放 A I,1986 年 Nakamura 等提出可能是 NE 刺激肾上腺素能  $\beta$  受体而引起的。

4. 肾脏 RAS。1898 年 Tigerstedt 和 Bergman 首先报道了肾组织提取液含有强作用的加压物质(肾素)。1930 年

Goormaghtigh 根据肾近球小体的形态结构的观察,认为其中颗粒细胞可能释放某种缩血管因素以影响局部血管的张力,因而提出肾素的肾内作用的设想。1972 年 Thurau 根据自己的实验结果,支持 Goormaghtigh 的设想。他认为当流过致密斑的小管液的速率增加时,肾素与血管紧张素在其局部增加。其它一些作者在近球小体的上皮样细胞内发现血管紧张素 I、A I 及 ACE 的存在,并证实肾组织内 A I 的浓度为血浆中 A I 浓度的 10~20 倍,实验发现 A I 能增加肾髓质部血管的张力。通过控制肾髓质的血流从而确认在肾组织内存在一独立的 RAS。肾内 RAS 主要有以下生理功能:(1)影响肾小球血流动力学,通过 A I 作用于出球小动脉(对 A I 的敏感性大于入球小动脉),从而调节肾血流量(RBF)与肾小球滤过率(GFR)。(2)A I 可直接作用于肾小管促进钠与水的重吸收,从而影响血容量。Schuster 用 A I 灌流兔的近球端小管,灌流液含 A I 为  $10^{-11}$  与  $10^{-10}$  mol/L 时,使钠重吸收分别增加 16% 与 7.5%,但当 A I 浓度为  $10^{-7}$  mol/L 时反起抑制作用,使重吸收减少 24%。(3)影响肾髓质的血流量,从而可影响尿浓缩机制。

此外,在于宫与肾上腺中也存在有 RAS。至于在这些组织中 RAS 有何生理意义,还不很清楚。肾上腺中的 RAS 可能与肾上腺的分泌有关,A I 与 A II 均可刺激肾上腺皮质球状带分泌醛固酮。A I 可能促进肾上腺髓质分泌肾上腺素(E)与 NE,因为 A I 可使交感神经末梢释放 NE,而肾上腺髓质相当于交感神经节后纤维。杨焜等发现,在肾 Grollman 高血压大鼠的肾上腺中 A I 含量显著增加。

(同济医科大学杨焜教授撰)

## 肾素血管紧张素系统 . renin-angiotensin system

缩写 RAS 是肾脏分泌的一种循环激素,并在肾外组织,如脑、肾上腺和心血管系统也有一个局部的 RAS,它不依赖于肾脏,可以自身合成并释放肾素和血管紧张素,起着自分泌、旁分泌和胞内分泌的作用,调节局部的血流和血管紧张性,促进心肌和血管平滑肌的生长和代谢。RAS 在血液中产生一系列生化级联反应,即血管紧张素原在肾素的作用下生成血管紧张素 I (Angiotensin I),后者再在转换酶(ACE)的作用下生成血管紧张素 II (Angiotensin II),血管紧张素 II 一方面可以刺激肾上腺皮质细胞分泌醛固酮,另一方面在二肽羧基酶作用下,血管紧张素 II 变成血管紧张素 III,后者经氨基肽酶作用下,生成无活性小肽和氨基酸。RAS 对于调节机体血压、电解质及体液内环境稳定起着重要的作用,并在许多疾病发生过程中占有重要位置。

肾素前体原是具有重型分子量的蛋白质,在蛋白水解酶的作用下,变为肾素原,后者经过激活酶作用,切去 48 个氨基酸生成肾素。肾素是一种天冬氨酸基蛋白水解酶,它特异作用在血管紧张素原的 14 肽末端两个亮氨酸的连接肽键,使其生成血管紧张素 I。血液循环的肾素主要在肾脏入球小动脉近肾小球旁细胞(JG)合成、贮存和释放。而组织中的肾素则来源于不同组织。控制肾素释放因素有肾脏灌注压、远端肾小管的钠浓度、肾上腺素引起的儿茶酚胺释放、前列腺素和激肽系统、后叶加压素、心钠素、钾、钙及环一磷酸腺苷等。肾素以短反馈方式即血管紧张素 I 直接刺激 JG 细胞释放或者以长反馈方式即受钠滞留、细胞外液体积扩散及血浆醛固酮浓度升高刺激其释放。

血管紧张素原是由  $\alpha_2$  球蛋白合成的一种糖蛋白,属于丝氨酸蛋白水解酶抑制因子的基因家族,在第 2 个外显子由 859 个核苷酸组成,能转录为血管紧张素 I。血管紧张素原的氨基末端 14 个氨基酸残基是肾素作用的底物。通常在肝脏贮存很少,只有在适当刺激时血管紧张素原才迅速合成、释放,通过 RAS 的化合物反馈调节。其作用是血管紧张素 I 生成的限速因素。血管紧张素转换酶(ACE)它是一种糖蛋白含有两个锌的羧基肽酶。有两种同功酶,一种存在于睾丸中,另一种存在于体细胞内,两种 ACE 的基因是不相同的,其主要作用是水解血管紧张素 I 羧基端的两个氨基酸生成 8 肽血管紧张素 II。也能降解缓激肽,使血管紧张素

I 增加,影响血压的变化。

1. 血管紧张素 I (ATI): 是 10 肽化合物,来源于血管紧张素原经肾素水解生成的。本身无生理活性,其功能是 ACE 作用底物,在 ACE 作用下生成血管紧张素 II。

2. 血管紧张素 II (AT II): 是由 AT I 经 ACE 作用生成 8 肽化合物,它是 RAS 系统中具有生理活性的部分,血浆半衰期很短只有 30~60s,在二肽羧肽酶的作用下,AT II 降解为血管紧张素 III (AT III)。AT II 的作用遍及全身包括血管、内分泌、代谢和行为效应。所有效应都是通过靶细胞膜上的特异受体介异的。AT II 还能刺激肾上腺球状带分泌醛固酮,刺激髓质释放儿茶酚胺,刺激交感神经释放去甲肾上腺素,使血管收缩,产生升压效应。AT II 能与钠、水调节,维持机体内环境的平衡。

3. 血管紧张素 III (AT III): 血管紧张素 III 是由氨基肽酶将 AT II 的氨基端的冬氨酸切去,生成 7 肽,它再在多肽酶的作用下降解为无活性的血管紧张素小肽和氨基酸。AT III 能刺激肾上腺皮质分泌醛固酮的能力大于或等于 AT II,而升压效果只是 AT II 的 20%。

醛固酮是类固醇激素,由肾上腺皮质球状带分泌后,经肾上腺静脉进入大循环,分布全身发挥作用,再通过肝脏代谢廓清,以 8 酮化合物、四氢醛固酮葡萄糖醛酸酯等醛固酮的代谢产物,经肾脏排泄。醛固酮的生理功能是潴钠排钾,调节水盐代谢平衡的作用,并通过近肾小球旁细胞(JG)的化学感受器,调节 RAS 影响血压变化。醛固酮浓度变化受年龄、性别、体位、昼夜节律和中枢神经的影响。

循环的 RAS 和局部 RAS 区别在于来源、效应器官和作用的不同。循环的 RAS 中的肾来源于肾脏,ACE 来源于肺和其它组织,血管紧张素来源于肝脏。而组织 RAS 的有成分无来源于心、脑、血管等器官或组织本身。循环 RAS 作用于肾脏、肾上腺及血管,参加机体内环境稳定的调节,而组织 RAS 只作用局部器官及功能调节。

RAS 在许多疾病的发生中,起着重要的作用。如在原发性或继发性高血压病人,血浆的 RAS 有明显变化,经典的原发性高血压分类是以肾为标准的,分为高、中、低肾素型的高血压。根据高血压患者对潴钠和输注血管紧张素 I 是否呈现适当的调节反应又分为调节型和非调节型。一般认为在原发性高血压患者中有 40% 是非调节型,在正常肾素和高肾素的高血压患者中约 50% 为非调节型,这种类型高血压患者的组织中局部的血管紧张素 II 浓度过高,与循环中的血管紧张素 I 无关,另外由于钠和钾离子对向转运增加,细胞内钙离子升高,导致血管平滑肌张力增加,血压升高,这种类型高血压具有家族史,常呈家族聚集,有转换酶抑制剂的药物治疗有效。

转基因动物是研究高血压分子生物学的一个有力工具,通过制备转 Ren-1 和 Ren-2 基因动物,发现 Ren-1 基因动物的血压、血浆肾素、血管紧张素 I 的水平明显升高,它可能是高肾素型的高血压的基因。而 Ren-2 基因动物,血压升高,血浆肾素、血管紧张素 I 水平降低,肾素不能在肾脏表达,只能在肾上腺表达,醛固酮明显升高,这可能是低或正常肾素型的高血压的基因。动物实验表明单纯转肾素,或转血管紧张素基因动物,虽然血浆肾素和血管紧张素升高,但不产生高血压,只有同时转移两个基因才能产生高血压。B. Leakey 提出体内肾素、血管紧张素系统可能存在着 3 个分系:一是经典的 RAS 即循环中 RAS,作用于肾上腺、血管和交感神经引起高血压。二是肾上腺 RAS,它是由肾上腺产生肾素,作用局部的血管紧张素原通过旁分泌使血浆醛固酮水平升高,产生高血压。三是细胞内 RAS,其肾素和血管紧张素都来自心肌或平滑肌细胞本身,通过胞内分泌,作用于核上的受体,刺激癌基因的表达,使心肌或平滑肌细胞增生和肥厚。所以选用阻断 RAS 不同环节的药物,治疗高血压等疾病是行之有效的。如巯基丙酮酸和苯丁酮酸是 ACE 的抑制剂,肌钙蛋白拮抗剂是 AT II 受体拮抗剂,另外肾素抗体和抑肽素的研究及应用也正在兴起。

总之,RAS 是探索机体生理功能及疾病发生的关键环节,在循环系统的内分泌中占据重要地位。

#### 参考文献

- 1 Yamamoto K, et al. Advance in renin research Clin and Exper. Hyper—Theory and Practice 1988, A10(8):1127
- 2 Leckle B. Stress on the renin gene Nature 1990, 344:487
- 3 Mitchell K D, et al. Hypertensinogenic Mechanism Mediated by Renal Actions of Renin—Angiotensin System Supplement I Hypertension, 1992, 19(1):1~18

(北京协和医院孙梅励撰)

**肺表面活性物质** pulmonary surfactant, PS 指分布于肺泡内衬层具有降低表面张力的物质。PS 对于维持肺适当扩张状态、防止肺水肿的发生具有重要生理意义。PS 的异常在多种肺部疾病的发生发展过程中起重要作用。

1929 年,尼加德(Neergaard)发现,肺泡表面张力是构成肺回缩力的主要因素,并推测肺表面存在表面活性物质。1955 年佩特(R. E. Pattle)发现,由肺内液形成的液泡在空气中可稳定数小时,推断肺内液表面张力较低,为 PS 的存在提供了间接证据。1956 年克莱门茨(J. A. Clements)等测定肺组织提取液的表面张力,直接证明了 PS 的存在;尔后指出,二棕榈酰卵磷脂(DPPC)是 PS 的主要成分。1959 年艾夫莱(M. E. Avery)发现,新生儿呼吸窘迫综合征(IRDS)与 PS 的缺乏有关,从而激起人们对 PS 的成分、理化特性、生理功能、合成、贮存、分泌、清除等代谢过程及其调控进行广泛研究。于 70 年代初取得重要进展:发现糖皮质激素可促进动物胎肺 PS 的生成,成功地将糖皮质激素应用于孕妇以预防 IRDS,建立了根据羊水中 PS 的变化判断胎肺成熟度的方法;肺泡 I 型细胞分离培养技术为深入研究 PS 创造了条件。1980 年首次成功地应用牛 PS 治疗 IRDS,为 IRDS 的治疗开辟了新途径(T. Fujiwara)。

PS 为脂蛋白复合物,其中 80%~90% 为脂质,总脂中磷脂酰胆碱占 70%~80%,磷脂酰甘油占 5%~10%。并有少量磷脂酰乙醇胺、磷脂酰肌醇、鞘磷脂、磷脂酰丝氨酸。磷脂酰胆碱中双饱和磷脂酰胆碱约占 60%,其主要成分是 DPPC。DPPC 是 PS 降低表面张力的主要成分。1973 年金(R. J. King)发现 PS 上有特异性的表面活性物质相关蛋白(SP),约占 PS 重量的 5%~10%。现已发现有 4 种表面活性物质相关蛋白,按照 1988 年波斯迈耶(F. Possmayer)提出的命名原则,分别称为 SP-A、SP-B、SP-C 和 SP-D。SP-A 和 SP-D 为水溶性胶原样蛋白,SP-B 和 SP-C 为小分子疏水性蛋白(S. Hawgood, 1991)。SP-A、B、C 可促进液-气界面的磷脂单分子膜形成。在 PS 的脂质和蛋白上结合有糖基。I 型细胞是生成 PS 的主要部位。通过对离体培养的 I 型细胞的研究,已基本阐明 PS 脂质的合成途径。磷酸胆碱酯有转移酶可能是磷脂酰胆碱合成的限速酶,糖皮质激素、甲状腺激素、雌激素等可增强其活性(M. Lambert, 1988)。已确定编码人 SP-A、SP-B、SP-C 的基因分别位于第 10、2 号染色体上(G. Bruns, 1987; P. A. Emrie, 1988; S. W. Glasser, 1988)。至于脂质与相关蛋白组装成 PS 的方式和部位目前尚不清楚。

板层体是 PS 的细胞内贮存部位,通过出胞作用分泌到肺泡腔,此过程需有微管(L. C. Dobbs, 1978)和微丝(P. A. Marno, 1980)参与。PS 的脂质和相关蛋白是否同时分泌尚有争论。有人认为两者并不同时分泌(T. J. Delahunty, 1976);也有作者观察到 DPPC 和 SP-A 释放的时间过程相同。目前主要在离体肺、肺片及 I 型细胞培养等模型上采用形态计量、膜天平及化学测量等定量方法研究 PS 分泌及调控机制,发现刺激 PS 分泌的因素有:β 受体激动剂、嘌呤受体(A1 亚型除外)激动剂、血管加压素、前列腺素 E2、白三烯 E4、肺扩张、细胞内碱中毒、钙离子载体 A23187 等。M 受体激动剂可通过间接激活 β 受体而促进 PS 的释放。抑制 PS 分泌的因素有 SP-A、化合物 48/80、P 物质及嘌呤能 A1 受体的激活(A. Chander, 1990)。板层体分泌到肺泡腔后,

先转变成网格状的管髓体,然后再在液-气界面形成单分子膜。管髓体的形成需要钙、磷脂和 SP-A、SP-B 参加(Y. Suzuki, 1989)。成年家兔肺泡内磷脂酰胆碱的更新时间为 3~11h。1990 年赖特(J. R. Wright)指出 PS 可能有下列清除途径:被细胞摄取;经气道上移排出;被肺泡液中的酶降解;由血液和淋巴带走。I 型细胞重摄取 PS,是清除 PS 的主要途径。重摄取的 PS 脂质,一部分不被降解而再利用,再利用效率因年龄而异,新生儿磷脂酰胆碱的再利用效率达 90%,成年兔约 23%~40%(H. Jacobs, 1985)。1987 年赖特发现 SP-A 可减少磷脂酰胆碱的降解量,提示 SP-A 参与脂质再利用的调控。表面活性物质相关蛋白本身也可被再利用。肺泡巨噬细胞虽能吞噬 PS,但在 PS 的清除中不起主要作用(R. Desai, 1978)。PS 清除受多种因素的影响,PS 蛋白组分 SP-A、SP-B、SP-C 及磷脂酰甘油均可促进离体 I 型细胞重摄取脂质。SP-A 还可促进肺泡巨噬细胞吞噬脂质。许多促进 PS 分泌的因素,如异丙肾上腺素、ATP、肺通气增强,都可促进 PS 清除。

PS 的主要作用是降低并调节肺泡液表面张力,防止肺泡萎陷,减少呼吸功,减少肺间质和肺泡内液体蓄积,防止肺水肿。小气道中存在的 PS 可减少小气道回缩力,防止小气道闭合(V. Ranga, 1978)。PS 可参与调控肺的防御功能,具有保护作用。PS 可促进肺泡巨噬细胞的杀菌能力(F. M. Laforce, 1973),刺激血单核细胞和中性粒细胞的吞噬活性(C. Jarstrand, 1984),并抑制小气道淋巴细胞的反应性(M. J. Ansfield, 1980),避免过强的变态反应。PS 还可降低粘液的粘滞性(B. Lachmann, 1985),有利于肺从气道排除异物颗粒。PS 异常与 IRDS、成人呼吸窘迫综合症等疾病的发生有关。目前用于 PS 替代治疗的制剂有:天然 PS、改良的天然 PS、人工 PS 及重组 PS。人工合成的 PS 不含相关蛋白,疗效低于天然 PS(A. Greenough, 1984)。在磷脂中加入相关蛋白便得到重组 PS,其特性和功能类似天然 PS(S. D. Revak, 1988)。

胎肺 I 型细胞是逐渐发育成熟的,于妊娠 30 周左右开始分泌 PS,经呼吸道进入羊水。此后分泌量渐增,脂质成分发生变化。测定羊水中磷脂酰胆碱/鞘磷脂的比值可估测胎肺成熟度(J. Gluck, 1977)。若同时测定双饱和磷脂酰胆碱、磷脂酰甘油、磷脂酰肌醇则更为可靠(M. V. Kulovich, 1979)。β 受体激动剂、糖皮质激素、甲状腺激素、雌激素可促进胎肺成熟,胰岛素、雄激素则延缓胎肺成熟(Lambert, 1988)。对胎肺表面活性物质相关蛋白的基因表达及其调控的研究已取得了一些进展(C. R. Mendelson, 1991)。

目前对 PS 的生成、分泌、清除、再利用及其调控机制尚未完全阐明,仍有待继续探讨。全面掌握 PS 的代谢规律,有助于提高 PS 替代治疗的效果,及寻找刺激内源性 PS 分泌的有效途径,具有应用前景。表面活性物质相关蛋白不仅与降低表面张力有关,还参与对 PS 本身的代谢过程及肺内其它细胞的调控。对表面活性物质相关蛋白的作用和机制,以及 4 种相关蛋白之间的关系了解甚少。深入研究该相关蛋白的结构、代谢、功能及基因调控,将会对 PS 的生理作用及多种肺部疾病的病理生理过程产生全新的认识。利用分子生物学技术克隆其 cDNA 生产表面活性物质相关蛋白,重组近似天然的 PS,可克服天然 PS 来源不足的限制,是 PS 制剂的发展方向。

#### 参考文献

- 1 Clements JA. Function of the alveolar lining. *Am Rev Respir Dis.*, 1977, 115: 67~71
- 2 Larbert MG, et al. The pulmonary surfactant system: Biochemical aspects and functional significance. *Physiol Rev.*, 1988, 68(2): 374~455
- 3 Possmayer F. A proposed nomenclature for pulmonary surfactant-associated proteins. *Am Rev Respir Dis.*, 1988, 138: 990~998
- 4 Chander A, et al. Regulation of lung surfactant secretion. *Am. J Physiol.*, 1990, 258: L241~253

- 5 Wright JR. Clearance and recycling of pulmonary surfactant. *Am J Physiol.*, 1990, 259: L1~12
- 6 Haagsman HP, et al. Synthesis and assembly of lung surfactant. *Annu Rev Physiol.*, 1991, 53: 441~464
- 7 Mendelson CR, et al. Hormonal control of the surfactant system in fetal lung. *Annu Rev Physiol.*, 1991, 53: 415~440

(湖南医科大学罗自强副教授、孙秀泓教授撰)

#### 甲状旁腺生理学 parathyroid physiology

人的甲状旁腺为扁的卵圆形黄褐色小体,一般有四枚,埋于甲状腺背侧。甲状旁腺的实质由排列成束的腺上皮组成,其结缔组织间质含有丰富的毛细血管、神经纤维和网状纤维,腺体由主细胞和嗜酸性细胞组成,后者于青春期方开始出现,其功能尚不清楚,前者则分泌甲状旁腺素(PTH),其作用是促进骨溶解,促进肾小管排磷留钙,促进肠道对钙的吸收和转运,总的生物效应是使血钙升高。

1925 年 Collip 最早证实了 PTH 的内分泌本质,他用甲状旁腺提取物有效地防止了狗因切除甲状旁腺后发生的低血钙症以及痉挛和抽搐。后来他又进一步观察到将此提取物给予正常动物可引起高血钙症并使动物死亡。关于 PTH 升高血钙的机制曾存在争议。Collip (1942) 认为,PTH 对骨钙的动员最为重要,而 Albright (1948) 则认为,PTH 促进尿磷排出。其后证明 PTH 对骨骼和肾脏都具有重要调节作用。1948 年 Barnio 首先描述了 PTH 促进骨溶解,他将甲状旁腺移植到小鼠颅骨发现有溶骨作用,这是由于 PTH 促使溶酶体释放水解酶,这些酶在酸性条件下引起骨基质及骨盐溶化所致,而溶酶体的活性由骨细胞内 PTH 敏感的腺苷酸环化酶的活化而提高(Chase 等, 1969)。有研究表明,PTH 动员骨的钙磷释放入血的效应可分为快速反应和延缓效应两个时相。前者引起骨细胞和成骨细胞附近的骨盐溶解释放,后者则是通过激活骨细胞系统实现的,两个效应相互配合,使得对血钙的调节既灵敏又持久(R. Talmge, 1969)。但在骨强度减弱后也可转而继发刺激成骨细胞活动,只不过骨溶解大于骨沉积而已。PTH 对钙稳态进行精细调节的另一个重要靶器官是肾脏,1961 年 Kleeman 等证实了外源性 PTH 明显增加肾小管对  $Ca^{2+}$  的重吸收,此作用是通过存在于肾脏的 PTH 特异性受体及腺苷酸环化酶实现的,因此不论是内源性还是外源性 PTH 的肾作用均表现为腺苷酸环化酶的激活及 cAMP 增加。已证明肾源性 cAMP 的测定可用于原发性甲状旁腺机能亢进的诊断。PTH 升高血钙的另一重要途径是促进小肠对钙的吸收,然而体外实验却观察不到 PTH 的这一作用,且肠粘膜细胞并无 PTH 受体。后来的研究表明,PTH 对小肠的作用是间接通过刺激 1-羟化酶增加维生素 D 的合成,转而促进肠道对钙、磷的吸收,最终升高血钙的。

虽然对 PTH 的生理功能认识较早,但 PTH 的分子生物学阐述还是近年的成就。利用无细胞体系蛋白质合成和 DNA 重组技术已弄清了 PTH 的合成转运及修饰的全过程(Potts 等, 1982)。首先,在核糖体上合成的是前 PTH 原,有 115 个氨基酸。在最初阶段, N(氨基)-末端起始的 25 个氨基酸被蛋白水解酶切去,形成 PTH 原(90 肽),然后由内质网基质转移至高尔基体,再切去 N 端的 6 肽成为分泌形 PTH(84 肽)贮存于分泌颗粒(Habener, 1981)。PTH 的 N-端 1~34 肽段可表现全部的 PTH 生物活性, 1~2 为激活靶细胞所必需,破坏或去除则失效。3~34 是受体结合的关键结构,能占据受体但无生物活性,被认为是 PTH 专一性拮抗剂。近年研究出高活性的 PTH<sub>3~34</sub> 酰胺已成为药理学研究的工具。34~84 是无活性的 C(羧基)-末端,可能是决定种属特异性的部位。

PTH 的功能在于维持血钙水平于非常狭窄的范围,其分泌主要受细胞外液中钙浓度的控制。1966 年, Sherwood 等已证明,在体内血钙与具有免疫活性的 PTH 之间存在着一种倒数关系。即在正常血钙水平时 PTH 分泌恒定,而轻度低血钙可引起

PTH 急剧分泌,在 PTH 与血钙之间形成一个有效的反馈系统,使血钙波动范围极小。有人指出,低钙引起 PTH 分泌的机制可能与甲状旁腺组织中钙敏感的腺苷酸环化酶活性有关(Abe 等,1972)。此外发现,甲状旁腺细胞表面存在多种生物胺类的受体,肾上腺素、多巴胺、组胺、5-羟色胺均引起腺细胞内 cAMP 显著增高,PTH 分泌加速,并可被相应的受体拮抗剂对抗。乙酰胆碱则降低腺细胞 cAMP,使 PTH 分泌下降。随着 PTH 放免测定的广泛应用,近年来对影响 PTH 分泌的其它因素包括生理、病理、药物和某些内分泌腺功能改变等加深了认识。

在临床,原发性甲状旁腺机能亢进是一种常见的疾病,成年人中该发病率高达千分之一,以中年女性多见(Watson,1974)。该病的特征为分泌过量的 PTH 且不受正常情况下反馈系统的调控,严重时可能出现肾结石,纤维性骨炎或高血钙全身症状,如恶心,上腹部疼痛或神经病变等。甲状旁腺切除被认为是该病唯一的根治疗法。相反,甲状旁腺功能低下症比较罕见,常与其它内分泌异常共存或作为自身免疫病的一种表现,并曾被认为是甲状旁腺外科手术的一种潜在并发症(Wade,1960),其主要症状表现为低血钙引起的骨骼肌运动神经功能异常,肌肉痉挛及抽搐。此外,肾脏既是 PTH 作用的靶器官又是其代谢场所,肾功能异常可造成 PTH 含量过高使骨溶解加强,维生素 D 的缺乏使骨钙化不良造成骨软化,从而形成肾性骨病。尿毒症病人产生的神经系统并发症如脑病,神经传导异常及脑钙含量高均与 PTH 有直接关系。值得注意的是,PTH 含量随年龄增长而增高的现象近年引起普遍重视。正常人 C-PTH 水平 40 岁开始上升,50 岁后明显上升,男性在 50~59 岁,女性在 60~69 岁组有一高峰,至于上升的幅度各家报道相差较大,从升高 30% 到 9 倍不等。国内有人对 200 余名正常人不同年龄组所测结果也完全符合上述情况,并推测在 70 岁老人中,甲状旁腺功能亢进者占 6%,轻度亢进者超过 50%(米昭曾,1987)。PTH 随年龄增长而升高的原因尚未肯定,有人认为与肾脏“老化”有关,如内生肌酐清除率即随年龄增长而下降,血 N-PTH 与其呈负相关(R. Marcus,1984),实验还证实老龄小鼠肾脏生产 1,25(OH)D 比年轻鼠低得多,因而影响肠钙吸收,促使 PTH 代偿性增高(H. J. Armbrecht,1984)。此外,已测得衰老大鼠 PTH 结合点减少,对 PTH 敏感的  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  交换明显迟钝,而摘除甲状旁腺后上述改变消失(C. T. Liang,1990)。除肾脏老化原因外,尚有认为机体长期摄取钙不足造成的“负钙平衡”是导致甲状旁腺功能亢进的重要原因。1985 年日本内分泌专家 Fujita 指出,由缺钙引起的甲状旁腺功能亢进是人类多种疾患和走向衰老的一个特征。因 PTH 代偿性分泌增强,必然引起骨钙减少血钙增高,并迫使钙异常分布于软组织或进入细胞内,造成细胞功能紊乱,他指出补充具有生物活性的高效钙剂可有效地抑制 PTH 分泌,使一些细胞钙分布异常的疾患如高血压、糖尿病等的临床症状和化验指标明显改善(J. Fujita,1991)。可以预见,甲状旁腺功能亢进症的病因研究将是防治老年疾患的不可忽视的环节。此外,Pang P. K 等 1991 年报道了一种新的血浆高血压因子称为甲状旁腺高血压因子(PHF),从原发性高血压大鼠血浆中已纯化出这种因子,它来源于甲状旁腺,但正常大鼠或高钙食的高血压大鼠的甲状旁腺培养液中未测出 PHF。有人指出,假若 PHF 证实为引起某些形式的原发性高血压的因子,则有可能 35-40% 的高血压患者与其有关。

在基础研究方面,随着生物科学对钙的重要生理功能的认识越来越深刻,与钙调节有关的 PTH 也成为近年研究较多的激素之一。许多实验表明 PTH 可以具有调节血钙之外的其它生理作用。如在中枢神经系统,PTH 可促进培养的纹状体细胞对  $\text{Ca}^{2+}$  的摄取,抑制  $\text{Ca}^{2+}$  的释放,使胞内  $\text{Ca}^{2+}$  增加,而降钙素则呈完全相反的作用,提示这两种激素在中枢调节中前者促痛后者镇痛的不同离子基础(P. P. Zuo,1991)。此外,PTH 曾被认为是内源性血管活性肽之一,研究它对平滑肌细胞舒缩功能影响进行得比较深入。1951 年 Handler 等首先报告甲状旁腺提取物能够

扩张血管。在鱼类、两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类动物,均可得到与 PTH 剂量相关的降压反应。PTH 扩张血管的效应随组织器官不同而异,以冠脉最敏感(Crass,1980)。能够扩张在体或离体动物血管所需 PTH(1~34)的剂量比调节血钙深度所需量低。构效关系研究表明,PTH 的上述两种作用是可分的,如经氧化氮处理的 PTH 降压作用消失而血钙作用尚存,而降压活性部位仅为 24~28 肽段,因而有可能找到保留降压作用而去除对血钙影响的一类小分子肽(Pang P. K,1983)。至于 PTH 扩血管的机制及生理意义尚不肯定,有推测是通过 cAMP 的作用;也有认为是由于减少血管平滑肌  $\text{Ca}^{2+}$  所致,相反,有推测是促进  $\text{Ca}^{2+}$  内流而引起扩血管物质的合成;还有则认为 PTH 是一种钙通道拮抗物质。1991 年 Rampe 等报道 PTH(1~34)可增加心肌细胞的去极化引起的  $\text{Ca}^{2+}$  内流,而经霍乱毒素处理后无效,他们进一步使用全细胞膜片钳技术证实,PTH 是心肌 L 型钙通道的内源性调节物质,具有重要的生理意义。然而,从上述 PTH 的临床与基础研究观察中可以发现,其对血压的调节作用具有矛盾的两个方面,但机制尚不清楚,有待进一步阐明。

现在,已有人使用现代生物学方法着手探索 PTH 靶器官上其受体的分子结构,这将阐明其作用原理提供新线索,此外,鉴于  $\text{Ca}^{2+}$  的重要生理作用,寻找内源性钙通道调节物质已成为分子药理学研究的重要课题。继续深入探讨甲状旁腺的生理功能和 PTH 的作用机制,无论对临床还是基础研究都将具有深远意义。

#### 参考文献

- 1 米昭曾,等. 甲状旁腺素随年龄、性别变化的、观察,中华医学杂志,1987,67:8,444~447
- 2 Liang CT, et al. Regulation of renal sodium calcium exchange by PTH; alteration with age, Environ Health Perspect, 1990, Mar 84:137~140
- 3 Rampe D, et al. Parathyroid hormone; an endogenous modulator of cardiac calcium channels. Am J Physiol, 1991, Dec; H1945~1950
- 4 Fujita T, Calcium, Parathyroids and Aging, Contrib Nephrol 1991; 90, 206~221

(中国医学科学院左萍萍撰;郑永芳审)

#### 肝脏的解毒作用 liver detoxication function

研究药物、毒物、染料和致癌物进入人体以后的生物转化过程,对于搞清药物代谢及药物的药理作用、毒物代谢及致毒或解毒原理以及致癌物引起癌变的机制等都很重要。进一步研究可以找出防治中毒的有效方法,通过基因工程等手段开发解毒、治癌等新药,造福人类。

解毒 detoxication 是指使(进入)生物体内的有毒物质发生降解作用或其它变化,转变成毒性较低甚至完全没有毒性的物质的过程。早在 1842 年,塔勒(Keller)从服食苯甲酸后能分离出马尿酸的事实就认识到在机体的生化反应中存在一种结合作用,此作用是由一种外来有机化合物与一种正常代谢产物甘氨酸发生了结合。1893 年,人们通过爱克(H. B. Ekko)一巴甫洛夫(И. П. Павлов)实验证实了肝脏是人体的解毒器官。肝脏从门静脉血中接受了除大量脂类外的所有从肠道吸收的物质,包括毒物质。它们在肝内被吸收和代谢,或在肝内转化并返回血液。1958 年,Maritin Klingenberg 首先发现肝细胞微粒体中存在一种氧化酶,即 P-450。1965 年 David, Y. Cooper 等又证实了 P-450 是微粒体混和功能氧化酶系统的终末氧化酶。由此,早期人们认为,毒物在肝脏中是通过氧化和结合作用而进行解毒的。

近期和现代的研究表明,肝细胞中含有极其丰富的酶体系,各种解毒酶类在肝中的含量和活性都是最高的。在肝脏内有毒的代谢产物和外源性的有毒物质,在各种酶的催化下,通过第一相氧化、还原和水解作用,或/和第二相结合作用解除其毒性,同时这些反应产物或无毒结合物的水溶性(极性)极大地增强,易随尿或胆汁排出体外,从而达到解毒的目的。

在肝细胞中含有不同的氧化酶系,包括单加氧酶系(或称混合功能氧化酶系),胺氧化酶系和脱氢酶系。其中以微粒体中的单加氧酶系最为重要。脂肪族的有机酸类,醛类,醇类易被氧化,最后生成二氧化碳和水排出体外。胺类一部分经肾脏直接排出,大部分进入肝脏代谢,最终以二氧化碳,水和尿素的形式排出体外。芳香族化合物(如苯)先被氧化成酚类,再与其它极性物质结合而解除其毒性。

有些物质在肝中先被还原,然后再进行结合解毒。肝细胞中主要有偶氮(苯)还原酶和硝基(苯)还原酶两类。

在肝中酯类、酰胺类、糖苷类在相应的水解酶催化下水解而解毒。1964年A. Mazur,首次发现肝脏等组织中存在催化有机磷毒物水解的酶,1953年Aldrige根据酶与底物的关系,将此类水解酶称为A-酯酶。A-酯酶能将有机磷毒物水解成无毒的降解产物,同时,产物的极性增大,易随尿排出体外。

结合反应都是由相应基团的转移酶所催化的。(1)葡萄糖醛酸的结合:这是体内最重要的结合方式。在葡萄糖醛酸转移酶的催化下,底物(药物,毒物,代谢产物)分子中的羟基,氨基等基团与葡萄糖醛酸的一位碳原子上的半缩醛羟基结合而生成醚型或酯型 $\beta$ -葡萄糖醛酸苷。结合产物中因引入了极性糖分子,而且在生理条件下,糖上的羧基可以解离,故水溶性增强,易从尿和胆汁中排出体外,但是通过这种结合作用生成的葡萄糖醛酸苷在肠道中可被肠菌的 $\beta$ -葡萄糖醛酸苷酶所水解,部分毒物或药物又被肠道吸收形成肝肠循环。葡萄糖醛酸的供体是尿嘧啶核苷二磷酸葡萄糖醛酸(UOPGA),即活性葡萄糖醛酸。单纯的葡萄糖醛酸并不能参与结合反应。(2)乙酰基结合含有氨基、羟基、巯基的化合物在乙酰转移酶的催化下,易与乙酰辅酶A中的乙酰基结合生成极性更大的乙酰化产物而随尿排出体外。有些毒物通过乙酰化作用进行解毒,但有些会变得毒性更强。(3)硫酸结合:在硫酸转移酶的催化下,各种醇、酚及芳香胺类都能与硫酸结合形成硫酸酯而排出体外。硫酸根的供体是3'-磷酸腺苷-5'-磷酸硫酸(PAPS)即活性硫酸。(4)甘氨酸及谷氨酸结合:某些毒物,药物等的羟基与辅酶A结合而形成酰基辅酶A后可与甘氨酸、谷氨酸结合。结合产物易随尿排出体外。(5)甲基结合:催化药物或毒物甲基转移的酶有:苯酚O-甲基转移酶(COMT),组胺N-甲基转移酶(HMT)及吲哚乙胺N-甲基转移酶。含氮杂环化合物甲基化后失去活性。甲基的供体是S-腺苷蛋氨酸,即活性蛋氨酸。(6)谷胱甘肽结合哺乳动物的肝脏中含有大量的谷胱甘肽,它除了作为机体代谢中某些酶的辅酶,在氧化还原反应中起作用外,还对药物,毒物,重金属,一氧化碳等中毒都显示出解毒作用。药物或毒物代谢时,往往先经过活化,转变成生物活性较大的代谢物,这些活性代谢物与组织进行不可逆的共价结合,引起组织坏死。在肝脏中的谷胱甘肽-S-转移酶(GST)的催化下,谷胱甘肽作为活性代谢物产物的清除剂与代谢产物结合后排出体外。GST是机体内一种具有重要解毒作用的同工酶家族。是一组可溶性肝脏蛋白。它不但能催化机体内有毒的极性化合物与谷胱甘肽结合,还可以由非酶结合方式将体内多种具有潜在毒性的化合物从体内排出从而达到解毒的目的。

有些有毒物质只经过第1相反应即可大量排出体外,但大多数毒物经第1相反应后仍有毒性,还需经第2相反应,与体内极性更强的内源性结合剂相结合,从而掩盖了这些物质分子中的某些功能基团,使它们的生物活性,分子大小发生改变,进一步增强其水溶性,才能排出体外。结合反应在保护有机体不受外来异物毒害,维持内环境的相对稳定方面具有重要意义。需指出的是,肝脏的解毒能力是有一定限度的,如果毒物过多,超过了肝脏的解毒能力,仍会发生中毒现象。物质在肝脏中代谢后,多数毒性会被清除,但可能毒性增强,有些物质本无毒,经代谢后才表现出毒性。但物质在肝脏中的生物转化并不都是解毒过程。有些物质在用量大时才表现出毒性,同一物质对不同种属的生物来说,有毒与否也是不同的。近年来,从生物化学的角度研究肝脏的解毒作用,已经有了较大的进展。今后,探讨毒物,药物等的中毒机

理,建立各种有效的方法和手段对这类物质,进行应用、预防等都是研究热点。

#### 参考文献:

- 1 Mazurr A. An enzyme in animal tissues capable of hydrolyzing the phosphorus - fluorine bond of alkyl fluorophosphates. *J. Biol. chem.*, 1946, 164: 271
- 2 Aldrige W N. Serum esterase 2, an enzyme hydrolysing diethyl P-nitrophenyl phosphate (E600) and its identity with the A-esterase of mammalian sera. *Biochem. J.*, 1953, 53: 117
- 3 Martin Klingenberg. Pigments of rat liver microsomes. *Arch. Biochem. Biophys.*, 1958, 75: 376
- 4 David Y Cooper, et al. Photochemical action spectrum of the terminal oxidase of mixed function oxidase systems. *Science*, 1965, 147: 400
- 5 Sato, Kiyomi. Glutathione S-transferases and hepatocarcinogenesis. *Jpn. J. cancer. res.*, 1988, 79, 5: 556
- 6 Yamazoe Ysushi. Activation and inactivation of mutagens and/or carcinogens by conjugation. *Kankyo heniger Kenkyu*, 1990, 12(3): 283
- 7 张应玖,等. 猪肝中低分子量 $\beta$ -异丙基氨基磷酸酯水解酶的分选提纯及其某些性质的研究, *生物化学与生物物理学报*, 1991, 23(1): 20
- 8 麦美琦,等. 谷胱甘肽的作用和临床应用, *生化药物杂志*, 1991, 2: 1

(吉林大学张应玖撰)

### 促性腺素释放激素的抗衰老作用 anti-aging effect of GnRH

抗衰老,从根本上说,可采取两方面的措施:一是通过遗传工程的手段干预基因的结构与表达;二是调整激素的水平,设法保持生命的青春活力。大量的研究表明,衰老时神经内分泌系统出现显著的变化。生殖功能低下表现尤为突出。性腺在衰老的神经内分泌学说中占有重要地位,新近,促性腺素释放激素(GnRH)分离成功并人工合成为衰老的神经内分泌学说的研究开辟了广阔的前景。

1. 衰老机制的神经内分泌学说。早在19世纪末, Brown-Segard在他72岁高龄时报告,注射狗或豚鼠睾丸提取液将使他重返青春,引起了学者的极大关注。20世纪50年代G. Hartis出版了《垂体的神经控制》,开始引起人们考虑下丘脑在衰老过程的重要作用。

生殖功能低下是动物和人衰老的普遍现象,雌性大鼠随年龄的增长,规律的动情期变为不规律和延长。最后出现持续的无动情状态。老龄大鼠缺乏年轻大鼠排卵前期下丘脑GnRH的增加。衰老雄性大鼠睾丸体积显著减少,睾丸基膜增厚,小管系统纤维化,未分化的精子细胞数量增加,精子生成过程停滞在精子细胞阶段,血清睾酮水平增龄性明显降低,血清促性腺激素水平低于年轻对照组,说明垂体缺乏下丘脑的刺激。

老年男性生殖功能增龄性逐渐衰退,血清睾酮水平一般在50岁左右开始降低,80岁老人血清睾酮值仅为50岁以下男性的40%左右。老年人睾丸间质细胞分泌贮备能力增龄性降低,但促性腺激素分泌增多,血中浓度上升,这是由于睾酮分泌减少对下丘脑垂体负反馈抑制的减弱。老年垂体对GnRH的反应性降低。对于女性,在更年期中卵巢功能逐渐减退,生殖器官逐渐萎缩,大多数妇女绝经后一年左右出现雌激素缺乏。临床使用雌激素可使已经下降的生理功能重新提高,并对一些老年性疾病如高血压、糖尿病、骨质疏松症等均有一定疗效。如与少量雄激素并用还可使植物性神经功能紊乱得以改善。

性功能衰退与神经内分泌改变是一致的, Franks(1970)认为,下丘脑-垂体轴增龄性功能衰退可使其他内分泌腺功能都有所减退。Rodkstein(1974)指出,必须把衰老视为内分泌与其神经控制机理受损的结果。Everiff(1980)的研究表明,下丘脑是全身



植物性神经功能的枢纽,其功能的改变对机体的衰老有明显影响,因而提出“老化钟在下丘脑”的假说。

2. GnRH 调垂体抗衰老。有人从极度衰老的大鼠身上取出卵巢,移植到年轻大鼠身上,尽管老年大鼠的卵巢已经萎缩,但在年轻大鼠身上又恢复功能,开始排卵,说明大鼠卵巢的萎缩,不应归罪于卵巢的本身,而应想到是神经内分泌的衰老。卵巢受垂体黄体生成素(LH)和卵泡刺激素(FSH)的调节,垂体进而受下丘脑 GnRH 控制,因此,抗衰老应从 GnRH 调节垂体的功能入手。

GnRH 是继促甲状腺素释放激素(TRH)之后,分离与纯化成功的第 2 个下丘脑调节肽。静脉注射 GnRH 可引起人和动物排卵。实验发现,当 GnRH 在恒河猴垂体门脉血中浓度出现高峰后,才看到 LH 高峰,而 LH 高峰则是排卵的标志。这是 GnRH 神经元控制腺垂体的有力证据。现已查 GnRH 同样调节 FSH 的分泌。给大鼠注射 GnRH 还可激发性行为,引起交配。衰老时性功能减退可能涉及多种神经肽,但最有意义者是 GnRH,它对睾酮低下下的雄鼠性行为有易化作用。一般认为,生命的活力总是与性功能一致的,通过 GnRH 恢复青春的活力,就会对抗整个机体的衰老过程。

在电镜下发现,注射 GnRH 可使垂体促性腺激素细胞产生颗粒状物质。这种颗粒内含 GnRH 受体,可见 GnRH 不但能使垂体分泌细胞合成与释放 LH 与 FSH,同时还能刺激额外产生较多的受体以提高对 GnRH 的敏感性。

下丘脑—垂体所发生的改变是性腺功能丧失的基础。而下丘脑大部份神经元以单胺类为神经递质,儿茶酚胺类促进其分泌。随着机体的增龄,脑内单胺类递质日趋减少,使促垂体区细胞功能不足,因此,可理解为衰老的“始动器”。下丘脑—垂体的功能改变进而可追溯到“始动器”根源上。

应该看到,有人认为生殖功能低下是由于卵巢本身的衰老,卵巢对垂体促性腺激素的敏感性降低,引起雌激素分泌减少。雌激素对下丘脑—垂体的负反馈减弱,从而 GnRH 分泌增加,LH 与 FSH 也增加。即把下丘脑—垂体看成是正常的。最近发现,垂体促性腺激素并不是单一的,即具有不同免疫活性与生物活性的各种 LH 与 FSH。尽管绝经期后 LH 与 FSH 可高于正常 8~15 倍,但其生物活性可能较低,从而为 GnRH 通过调节垂体实现抗衰老提供了新的思路。

3. GnRH 垂体外抗衰老。GnRH 不仅存在于下丘脑,也存在于中枢神经系统许多部位,具有中枢神经肽的特征,兼有激素与递质双重性质,可见有极为广泛的生物学效应。

有人发现,去垂体又去卵巢而用雌激素处理的雌鼠,GnRH 可引起其交配行为;在雄鼠,GnRH 可促使去睾丸而给予睾酮处理的雄鼠的射精行为。近年来证实,在垂体外多种组织内存在着 GnRH 受体,从而提出 GnRH 有垂体外的直接作用。卵巢和睾丸均含有 GnRH 高亲和力受体,因此可直作用。

GnRH 与促甲状腺素释放激素以及生长抑素的结构具有相似之处,GnRH 的作用不仅限于促性腺激素的释放,可能具有部份地促甲状腺素释放激素与生长抑素的功能。在临床上席汉氏病在使用 GnRH 之后,性腺,甲状腺及肾上腺皮质功能减退的症状均有所缓解,甲状腺和肾上腺皮质功能不足直接关系到衰老过程。

现已查明,人的松果体、脑脊液、乳汁、胎盘、胰腺、肠、颈神经节以致人体肿瘤组织中均富含 GnRH,可见其分布甚广,说明其功能的重要性。

自 1977 年以来皖南医学院对 GnRH 进行了广泛的研究,在观察其抗生育作用的同时,注意到它的抗衰老作用。并作了初步的临床观察。以 30 例离退休老人为对象,通过鼻喷雾器吸入 GnRH,每日清晨一次,喷出量为 100 $\mu$ g,历时 6 个月,作自身对照。结果表明,老人的思维能力、记忆力、计算能力、注意力、体力、食欲、性欲、社交、情绪、嗜好以及睡眠等 11 项指标均有不同程度的改善( $P < 0.05$ )。肝、肾功能,血糖、血脂、血压、心功能、心电图、X 线摄片 8 项检查也有不同程度的好转。说明 GnRH 确有

一定抗衰老作用,并通过调垂体与垂体外两种途径实现的。

据报道,单独使用 GnRH,对触发动物的生殖周期,增强动物性活动的效果不够稳定,如对雌性动物使用了引动剂量的雌激素后再投入 GnRH 则十分有效,在给药后 3~4h 反应最佳。看来,GnRH 与其他激素合用会得到更为满意的效果。业已查明,神经垂体释放的升压素有增强记忆力的作用,如将升压素与 GnRH 联合使用,估计会有美好的前景。

#### 参考文献

- 1 陆仁康,等. 黄体生成素释放激素与衰老,国外医学(老年医学分册),1982,3:326
- 2 Meites J. Neuroendocrinology of Aging, Dlenum press. New York and london, 1983
- 3 汪桐. 促性腺素释放激素的抗衰老作用,老年学杂志,1986,4(1):47
- 4 Meites. Neuroendocrine Biomarkers of Aging in the Rat. Exp. Gerontol., 1988, 23: 349~358
- 5 汪桐,等. 促性腺素释放激素抗衰老作用的初步临床观察. 皖南医学院学报,1990,9(1):11

(皖南医学院汪桐教授撰)

### 兴奋性氨基酸的神经毒作用 neurotoxin effect of excitatory amino-acid

近年来发现,有些氨基酸是中枢神经递质。兴奋性氨基酸(EAA)如谷氨酸在生理条件下,引起兴奋性突触后电位,导致兴奋效应,但在大剂量时,则出现神经毒作用。早在 1957 年 lucas 首次报道,给小鼠注射大剂量谷氨酸可引起视网膜神经元变性。70 年代 Olney 发现,给未成年动物注射谷氨酸,所有不被血脑屏障保护的脑区内神经元均发生变性。给成年动物局部脑区注入谷氨酸同样引起类似的损害。EAA 的兴奋作用与神经毒作用明显相关,缺乏兴奋活性的 EAA 也缺乏神经毒作用,因此,神经毒又称兴奋毒。

EAA 神经毒作用的病理变化 各种不同的 EAA 几乎引起相同的病理改变。表现为突触后 EAA 受体所在部位的结构破坏。在离体新皮层细胞培养液中加入 100 $\mu$ m 的谷氨酸,5min 就可产生广泛的神经元损伤,其病理改变,首先是急性神经元突触后树突和胞体肿胀,随后是渐进性神经元变性。在海马细胞或小鸡视网膜细胞培养液中加入中毒剂量的谷氨酸类似物,30min 内神经元即发生变性。

80 年代以来,人们逐渐认识到 EAA 神经毒作用是 EAA 受体过度激活的结果,N-甲基-D 天冬氨酸(NMDA)受体尤为如此。哺乳类动物脑内存在着大量谷氨酸,并与受体有高度亲和力。为什么在生理情况下,不产生神经毒作用呢?这可能由于正常细胞机制能有效地防止谷氨酸浓度过高。

EAA 神经毒作用的机制 EAA 神经毒作用可能有两种机制:

(1)急性 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>依赖性机制。由于 EAA 过强地作用于突触后膜 Na<sup>+</sup>通道,引起 Na<sup>+</sup>与 Cl<sup>-</sup>过多的进入细胞内,以致大量水贮留于细胞内,进而出现细胞的肿胀与溶解。实验证明,如在海马细胞的培养液中除去 Na<sup>+</sup>与 Cl<sup>-</sup>,即可阻止这种急性的神经元变性。

(2)慢性 Ca<sup>2+</sup>依赖性机制。谷氨酸引起<sup>45</sup>Ca<sup>2+</sup>在皮质神经元内堆积与神经元变性高度相关。EAA 不仅能使突触后膜 Ca<sup>2+</sup>通道开放,而且可促发胞内贮存 Ca<sup>2+</sup>的释放。细胞内 Ca<sup>2+</sup>的浓度高到一定程度并维持一定时间,即可产生细胞损害。其可能的机制是:①细胞内高 Ca<sup>2+</sup>,能激活蛋白酶,降解神经元内几种主要的结构蛋白,如微管蛋白等,导致细胞的死亡;②激活磷脂酶,以分解细胞膜,释放花生四烯酸。后者在氧化酶作用下代谢为自由基,从而触发脂质膜的过氧化变性破坏;③激活黄嘌呤氧化酶和脱氢酶,产生过氧化自由基;④激活蛋白激酶 C,使膜 Ca<sup>2+</sup>通道进一步开放,增加 Ca<sup>2+</sup>内流。此外,胞内 Ca<sup>2+</sup>过高可以正反馈形式刺激谷氨酸的进一步释放。

EAA 神经毒作用和 NMDA 受体 至今已发现有 5 种 EAA 受体,用在培养液加入谷氨酸受体拮抗剂的研究表明, NMDA 受体起主要作用。NMDA 受体是一个复杂的复合体,其中有电压依赖性  $Mg^{2+}$  阻断的阳离子通道,有对土的宁不敏感的甘氨酸受体以及五氟酚受体。 $Zn^{2+}$  位于离子通道口,作为通道口抑制性调质,如 NMDA 复合体失衡,便失去功能。不同类型的 NMDA 受体拮抗剂,如作用于 EAA 识别部位的竞争性拮抗剂 D-AP5;作用于甘氨酸结合部位的拮抗剂 HA966;结合在离子通道口的 PCP 样物质 MK-801 等,都有抑制 NMDA 的神经毒作用。NMDA 毒性分即时与迟缓两种。

(1)即时毒性。包括上述  $Na^+Cl^-$  依赖性与  $Ca^{2+}$  依赖性两种机制。实验证明:①在小脑和海马薄片,事先除去培养液中的  $Ca^{2+}$ ,可消除 NMDA 的神经毒作用;②在 NMDA 产生神经毒作用过程中,胞内有大量  $Ca^{2+}$  积聚, $Ca^{2+}$  的积聚与细胞病理变化有平行关系。

(2)迟缓毒性。在活体条件下,注入 NMDA 于大鼠纹状体或海马后,可产生一种持续数小时的渐进性神经元变性。由于 NMDA 在体内浓度迅速降低,这种毒性作用似乎是多种因素相互增强结果,而不可能由单纯外源性 NMDA 引起。其可能的机制是:①由于即时毒性,使抑制性中间神经元功能丧失,进而兴奋阈值降低,增强了 NMDA 受体的激活水平;②大量  $Ca^{2+}$  进入胞内,使  $Ca^{2+}$  依赖性酶激活,进而导致谷氨酸释放增加,使线粒体产生不可逆的损伤。甚至在撤除刺激之后,有些酶(蛋白激酶 C 等)仍处于活动状态,形成一个长时程增强效应。就像在生理条件下, NMDA 受体激活,使长时程突触效应增强一样。用 NMDA 拮抗剂则可抑制已激活的 NMDA 受体,从而大大减少神经元的伤害与死亡。

#### EAA 与神经系统疾病

(1)癫痫。EAA 作为兴奋性递质,参与癫痫发作与传播是容易理解的。大剂量用药可使多种动物癫痫发作。对实验性局灶性癫痫组织薄片研究,提示组织能“渗漏”出谷氨酸。癫痫病人脑脊液中谷氨酸和天冬氨酸增加。大多数抗癫痫药能改变谷氨酸与天冬氨酸释放和摄入。在癫痫早期即有谷氨酸释放,其神经元的损害与 EAA 神经毒作用相似。用 NMDA 拮抗剂在多种动物模型上抑制癫痫发作,对神经元有保护作用。在部份癫痫患者脑内发现 NMDA 受体数量增加。现已查明, EAA 与抑制性递质 GABA 失衡可能是癫痫发作的病理原因。

(2)脑缺血。在缺氧条件下,可导致有自发突触活动的成熟的大鼠海马细胞死亡,如事先在培养液中加入较多的  $Mg^{2+}$ ,则不致发生明显的病理改变,  $Mg^{2+}$  能选择性阻断 NMDA 受体。看来,突触活动提高了细胞对缺氧的敏感性,加速了细胞的死亡。NMDA 受体阻断剂,对缺氧条件下的神经元起到了保护作用。可见, EAA 神经毒作用是缺氧时神经元损伤、死的主要原因。

(3)低血糖和机械损伤。低血糖引起的神经元丧失与 EAA 有关,低血糖能引起 NMDA 释放到细胞外,而 NMDA 拮抗剂则可减少低血糖引起的神经元损害。机械性创伤引起的神经元损害,有谷氨酸释放与渗漏,而 NMDA 拮抗剂也有一定的保护作用。

(4)Huntington 氏病。其病变主要影响纹状体内 GABA 能神经元,注射谷氨酸于大鼠纹状体内,可产生许多 Huntington 氏病的特征。据研究脑内有一种起神经毒作用的吡啶-2,3-羧酸,主要侵犯纹状体神经元。能引起 Huntington 氏病一致的病变。这种酸主要作用于 NMDA 受体。业已发现, Huntington 氏病患者纹状体内 NMDA 受体严重丧失。

(5)Alzheimer 氏病。其病变主要是前脑基底部投射到大脑皮质,海马和杏仁核的胆碱能神经元丧失。将 EAA 注射到前脑基底部胆碱能神经元起始部,可复制上述病理学特征。说明这些神经元具有 EAA 受体。Arendash 将 EAA 注入大鼠前脑基底部,可引起与 Alzheimer 极为相似的神经元变性。足以说明该病脑内神经元变性是神经毒作用的结果。

(6)外源性 EAA 引起的慢性神经变性综合症。①神经丝(Neurolathyrin)。又称豆中毒,为发生在东非和南亚的一种痉挛性神经功能紊乱。由于当地居民食用的鹰嘴豆内含有一种 BOAA( $\beta$ -N-oxalylamine-L-alanine),这是一种神经毒,它是 AMPA( $\alpha$ -氨基-3-羟基-5-甲基异噁唑-4-丙酸)受体激动剂,可产生与谷氨酸一样的兴奋脊髓神经元的作用。大量 BOAA 选择性地作用于 AMPA 受体,进而损害上、下运动神经元。②关岛病。太平洋关岛上有一种肌萎缩外周硬化症,其病理特征和 parkinson 氏病以及老年性痴呆症相似。由于当地居民食用的 cycas circinalis 种子里含 BMAA( $\beta$ -N-methyl-amino-L-alanine),在有重碳酸盐存在时,形成  $\alpha$ -甲基碳酸盐,而变成神经毒,据研究, BMAA 是通过 NMDA 受体起作用的。

过量的 EAA 能引起神经毒作用已是证据确凿,认识这一点,对深入探索新的有效药物,指导临床实践,提高急、慢性神经系统变性疾病的治疗水平,都具有重要意义。

#### 参考文献

- 1 Chan P H, Fishman R A. Transient formation of superoxide radicals in polyunsaturated fatty acid - induced brain swelling, *J. Neurochem.*, 1980, 35:1004~1007
- 2 Farber J L, et al. The pathogenesis of irreversible cell injury in ischemia, *Am. J. pathol.*, 1981, 102:271~281
- 3 Rothman S M. Synaptic activity mediates death of hypoxic neurons, *Science*, 1983, 220:536~537
- 4 Olney J W. The role of specific ions in glutamate neurotoxicity, *Neurosci lett.*, 1986, 65:65~71
- 5 Garthwaite G, Garthwaite J. Neurotoxicity of excitatory amino acid receptor agonists in rat cerebellar slices; dependence of calcium concentration, *Neurosci. lett.*, 1986, 66:193~198
- 6 Dykens J A, et al. Mechanism of kainate toxicity to cerebellar neurons in vitro is analogous to reperfusion tissue injury, *J. Neurochem.*, 1987, 49:1222~1228
- 7 Favaron M, et al. Gangliosides prevent glutamate and kainate neurotoxicity in primary neuronal cultures of neonatal rat cerebellum and cortex, *Proc. Natl. Acad. sci., USA*, 1988, 85:7351~7355
- 8 Monyer H, Choi D W. Morphins attenuate cortical neuronal injury induced by glucose deprivation in vitro, *Brain Res.*, 1988, 446:144~148
- 9 Young A B, et al. NMDA receptor loss in putamen from patients with Huntingtons Disease, *Science*, 1988, 241:981~983
- 10 Weiss J H, Choi D W. Beta-N-Methylamino-L-Alanine Neuro-toxicity, Requirement for bicarbonate as a cofactor, *Science*, 1988, 241:973~975

(陕西省中医药研究院沈行良副教授、  
皖南医学院汪柯教授撰)

#### 人类硒生物学 human selenium biology

1817 年瑞典 Berzelius 发现硒。长时期以来硒被认为是一种对人类和动物有毒的元素。1957 年 Schwarz, Flotz 用硒预防营养缺乏疾病,表明硒是动物体所必需,但此作用受维生素 E 和含硫氨基酸的影响。1973 年 Rotruck 等发现硒是破坏过氧化物的谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)活性位点重要成份。70 年代初,中国的克山病工作者发现克山病与人群缺硒有关及硒有预防作用。1979 年 VanRig 等报道长期肠胃道外营养病人的缺硒引起肌肉营养不良。此后在许多人群中认定边缘性或显著性贫硒状态。在人的多种慢性及/或退化性疾病的预防和治序中,硒已被确定有重要作用。

经过数十年的研究,在下列方面取得重大进展:

(1)硒的生物学作用。GSH-PX 由 4 个含 1 个原子硒形成硒

代半胱氨酸亚单位聚合而成。1987等Stadtman阐明此酶掺入特殊机制：一种特异激酶首先使丝氨酸-tRNA磷酸化，然后此磷酸部分自发地或通过酶催化与硒化物交换，产生硒代半胱氨酸-tRNA，后者异地掺入肽链骨干，形成GSH-P<sub>x</sub>。GSH-P<sub>x</sub>不是体内唯一的硒酶。已发现体内有多种硒蛋白，其中研究较为清楚的为硒蛋白P，磷酸过氧化氢谷胱甘肽过氧化物酶(PHGP<sub>x</sub>)和脱碘酶。

1982年Ursini等发现可直接与膜磷脂过氧化氢反应，从而保护生物膜的PHGP<sub>x</sub>。PHGP<sub>x</sub>在催化过程中起作用，活性中心是Se代半胱氨酸(Se-Cys)。PHGP<sub>x</sub>是组织中的一种不同于GSH-P<sub>x</sub>的酶，它与GSH-P<sub>x</sub>有着不同的底物选择性。在生物系统中，PHGP<sub>x</sub>处理亲脂性的处于水-脂界面的脂质过氧化物如磷脂、生物膜，而GSH-P<sub>x</sub>处理亲水性过氧化物及自由脂肪酸过氧化氢。

硒酶的代谢功能是细胞所必需的，因是引起氧化和解毒机理的一部份。机体在很多生理反应中应用活性氧，如脂肪酸和醇氧化、分子羟化作用、花生四烯酸代谢物的形成(血小板中12-HPETE转化成12-HEETE)、甲状腺素的生物合成和在吞噬作用中。活性氧的细胞内浓度必须控制，因除上述有益功效外，活性氧可能对细胞结构和重要组成有害，引起氧化损害，如脂质过氧化、酶失活、核酸变性。

有机体的体内平衡依靠金属酶(以及硒酶)和自由基清除剂的效能来维持。自由基清除剂有亲脂维生素E、小分子清除剂如维生素C和还原型谷胱甘肽。此系统的干扰，如缺硒所致GSH-P<sub>x</sub>活力失去，将引起生化紊乱；如其他防御机制不能补偿，将引起临床上“过氧化”、“氧化”或“自由基”疾病。

其他硒重要生化作用已确定有：若干外源性有机和无机化合物的代谢受硒状态的影响。缺硒时，若干外物如药物、杀虫剂或卤化烃的毒性通过毒性氧衍生物的产生而加重。补硒通过GSH-P<sub>x</sub>、肝脏外物代谢酶(特别含硫醇酶)更全面性作用和谷胱甘肽代谢的调节作用，减轻药物、抗菌素和实验致癌剂的毒性作用。Se能很有效地预防镉、汞、铅、铊或铊暴露所致毒性作用。

另硒一重要生化活性为动物和人炎症和免疫反应中的调节作用。吞噬细胞的趋化性、游走、摄入和杀真菌作用已清楚地证实依赖天噬细胞中硒水平。人中性粒细胞用硒培养刺激吞噬和杀菌作用，但大剂量硒起抑制作用。缺硒动物易感染，硒状态与抵抗力呈正相关。严重硒缺乏危及T-细胞依赖免疫功能。缺硒减少抗体反应。补硒增强脾脏NK细胞活力。硒在一定水平有抗肿瘤活性。此活性通过GSH-P<sub>x</sub>媒介，或由于维持细胞内还原谷胱甘肽库。

前已提及硒在各种不同水平与花生烯酸的代谢有关。在环加氧酶途径中，硒调节凝血口噁烷A2(前聚集和血管收缩代谢物)与前列腺素PGI<sub>2</sub>(抗聚集和血管扩张代谢物)间的平衡量，对血小板聚集有重要作用。1979年，VanRig等报道在人类肌肉中分子量为10kda的硒蛋白，与缺硒出现的肌肉营养不良有关。1984年Bleau等报道在人类精子中验明角蛋白类硒蛋白，有维持鞭毛的完整性的职责并已在缺硒引起不孕症的病例中证实。Shrauzer(1988,1984)和Vernie(1984)研究硒对肿瘤细胞的抗增殖作用；此作用部分由于当给硒超过营养(或药理)剂量时，形成一种蛋白质合成抑制性代谢物——硒代二谷胱甘肽。1987年于树玉等实验证明硒对肿瘤细胞的分化和增殖有调节剂作用：cGMP减少，cAMP增加。

甲状腺激素作用的第一步是前激素T<sub>4</sub>脱碘转变为具有生物活性的T<sub>3</sub>。I型甲状腺原氨酸脱碘酶在大鼠中催化供给主要大部的T<sub>3</sub>。1991年Berry等研究结果显示硒引起此含硒脱碘酶的生化作用。

硒蛋白P为肝脏分泌的一种糖蛋白。早在1977年Herrman怀疑其存在。直到1987Yang等才首先自大鼠血浆用免疫亲和层析分离。分子量为57000，脱糖基化后为43000。每分子含7.5±1.0硒半胱氨酸，此硒占全部硒蛋白P中的硒。RIA测定大鼠

血浆浓度为26μg/ml。1988年Behne等认定其生物作用为运输硒。

(2)医学中硒的重要性。真正或严重硒缺乏发生于严重缺硒地区(如中国和新西兰的若干地区)或硒摄入贫乏，如全胃肠道外营养病人或营养不良者，生化紊乱包括硒水平和GSH-P<sub>x</sub>活性低下及某些细胞不能代谢H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，巨细胞症，溶血，血清中反映肝脏和肌肉功能的酶(ASAT,ALAT,CK)增加。临床症状有骨骼肌肉营养不良、指甲异常、皮肤和毛发脱色，及最后心肌病，往往会导致死亡。除已确立的心肌病外，这些异常服各种形式的硒，在100~500μgSe/d，能恢复。预防硒缺乏在全胃肠道外营养病人或营养不良者中，可补硒50~100μgSe/d达到目的。

大骨节病也是一种缺硒地方病，严重影响居民的健康和儿童的正常生长。1984年李崇正等在第3届国际硒生物学和医学讨论会(北京)上报道口服亚硒酸钠和维生素E治疗3~10岁儿童大骨节病有显著疗效。早期儿童期预防，效果更佳。1984年杨福愉等在讨论会(北京)上报道口对大骨节病的生化考察发现红细胞膜含有结合硒，而且患儿红细胞膜结合硒含量明显低于对照，同时膜流动性、NaK-ATP酶活性低于对照组。1986年杨福愉等还发现，在离体情况下，亚硒酸钠有明显防止红细胞因老化而导致的溶血作用，它能稳定红细胞膜骨架，防止收缩蛋白(Spectin)从膜上解离下来。

1987年杨福愉、林治焯等发现潜伏期克山病病人红细胞骨架蛋白与膜结合程度明显低于对照。又对克山病患者心肌线粒体结构与功能测试了10项指标，结果表明心肌线粒体呈现明显的损伤与异常，提出克山病是一种心肌线粒体病。

边缘性硒缺乏状态较以前想像更为广泛。1987年Hotz提出的“过氧化”或“自由基疾病”，已经Neve(1987,1991)和许多学者研究发现硒较正常为低。已报道与硒缺乏有关的疾病有癌症、冠心病、非阻塞性心肌病、高血压病、脑血管疾病、肝病特别酒精性肝硬化、肌强直营养不良、Duncheune肌肉营养不良、新生儿和早产儿贫血、婴儿猝死、Glanzmann血小板机能不全、Batten病、Down综合征(21三体综合征)、衰老、痤疮、类风湿性关节炎、风湿性关节炎、神经元蜡样质脂褐质沉积病、艾滋病、白内障、急性胰腺炎、囊性纤维化、肾功能衰竭、男性不孕症等。

(3)人体硒状况及其测定。人体硒状况如用各种生化指标评定在世界各地变化甚大。此情境为硒摄入量不同之结果，硒摄入依赖于土壤中，然后食物中硒含量及生物利用度。此外，生理影响如年龄(20岁以下和60岁以上)，妊娠或授乳及许多病理情况也有影响硒指标的倾向。常用血清(或血浆)或全血硒的测定，也有测发或指甲硒。1988年Neve等观察补硒代甲硫氨酸前后血浆、红细胞和尿硒及血浆、红细胞和血小板中GSH-P<sub>x</sub>，结论血浆硒和尿硒为最敏感的指标。1991年Neve谓有缺硒国家(中国、新西兰)的某些缺硒地区血浆硒一般在20~30μgSe/L，而富硒国家如美国、加拿大、挪威、日本一般在100~200μgSe/L。世界各地硒摄入范围为25~150μgSe/d。

(4)人的硒需要量和最大安全摄入量。对于硒缺乏防治的补硒推荐应用量，已如前所述。人体需要量，国际上多采用美国国家科学委员会推荐量：50~20μg/d。1989年杨光圻研究结果：成人(男、女)膳食最低需要量为17μg/d，安全膳食最低需要量为22μg/d；成人(男)膳食生理需要量为40μg/d，安全膳食生理需要量为50μg/d。建议用50μg/d作为膳食供给量标准。人的最大安全摄入量，1989年杨光圻研究结果：中国高硒地区近550μg/d，而一般地区近400μg/d。据1983年Goodwin Jr口服摄硒超过0.1~0.2mg/kg·d始有中毒现象。所以较高量补硒应在医师的临督下进行。

#### 参考文献

- 1 杨福愉,等.克山病是一种心肌线粒体病,生物化学与生物物理进展,1987,(2):42
- 2 杨福愉,等. Abnormalities of erythrocyte membranes from Patients with Kaschin-Beck disease. in Comb GF, Jr. et al

- (editors): Selenium in biology and medicine; Third international symposium, Beijing, the People's Republic of China. Part B. Avi. 1987, 947-956
- 李崇正, 等. Sodium selenite as a preventive measure for Kaschhin-Beck Disease as evaluated in X-ray studies. *Ibid*, 1987, 934-937
  - 杨光圻(执笔). 人的硒需要量研究, 中国地方病学杂志, 1989, 8: 298
  - Dhur A, et al. Relationship between selenium, immunity and resistance against infection. *Comp Biochem Physiol.*, 1990, 96C: 271
  - Specificity of selenium uptake by selenoproteins. *Nutr Rev.*, 1991, 49: 62
  - Berry MJ. Selenocysteine confers the biochemical Properties Characteristic of the type I iodothyronine deiodinase. *J Biol Chem.*, 266, 14155
  - Burk RF. Molecular biology of selenium with implications for its metabolism. *FASEB J* 1991, 5: 2274
  - 孙恩杰, 等. 一种新的含硒酶——磷酸过氧化氢谷胱甘肽过氧化物酶, 生命的化学, 1991, 11(2): 1
  - Neve J. Physiological and nutritional importance of selenium. *Experientia*, 1991, 47: 187
- (安徽医科大学肿瘤研究所陈培恩副研究员撰)

### 线粒体质子漏 mitochondrial proton leak 1961年

Mitchell 创立了化学渗透学说, 认为电子经呼吸链传递的同时, 将质子从线粒体内膜的基质面泵到内膜外, 造成膜内外的电化学梯度。电化学梯度是电子传递时释出的能量的贮存, 质子顺此梯度经  $F_0F_1$  ATP<sub>ase</sub> 回流时, 可使 ADP 与 Pi 合成 ATP。Mitchell 的学说得到许多实验结果的支持, 已被普遍接受。

实际上, 哺乳类动物线粒体氧化磷酸化过程中底物的能量并未完全用于合成 ATP, 一部分以热的形式散失, 即不完全偶联。其原因之一为线粒体质子漏, 即一些质子顺电化学梯度但绕过  $F_0F_1$ -ATP<sub>ase</sub> 而回到基质, 不合成 ATP。

1967年, Mitchell 等首次提出测定线粒体内膜质子漏。他们在豚鼠肝线粒体排除电位梯度( $\Delta\psi$ )的影响, 在  $H^+$  浓度  $6.31 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$  左右, 用加入酸的方法测得跨内膜质子浓度梯度( $\delta pH$ )驱动的质子漏的有效质子电导( $L_H$ )为  $0.11 \text{ nmol } H^+ \cdot \text{min}^{-1} \cdot (\text{mg 线粒体蛋白})^{-1} \cdot \text{mV}^{-1}$ 。

1974年, Nicholls 第一个对线粒体内膜质子漏进行探讨。他发现呼吸率和跨膜质子驱动力( $\Delta P$ )只在一定的  $\Delta P$  时成线性关系, 超过一定的  $\Delta P$  则不成线性关系, 即一给定的呼吸率的增加引起的  $\Delta P$  的增加远小于其在较低的  $\Delta P$  情况下引起的增加, 提示高  $\Delta P$  时能量转化为  $\Delta P$  不完全。Nicholls 提出线粒体内膜在低  $\Delta P$  时质子电导是恒定的, 在高  $\Delta P$  时电导增加, 使多数被泵出的质子可经膜漏回, 所以高呼吸率不能建立相应高的  $\Delta P$ 。1984年, Krishnamoorthy 等测定了线粒体内膜  $L_H$ , 证实高  $\Delta\psi$  时  $L_H$  的确增加。他们将缬氨酸加入悬浮于低  $K^+$  介质的线粒体, 引起一个  $K^+$  扩散电位, 使线粒体摄取质子。由外部介质  $H^+$  浓度的改变可知摄取质子的多少, 而改变介质  $K^+$  的浓度可造成不同大小的  $K^+$  扩散电位。他们还在含线粒体脂质的囊泡测定  $\Delta H^+$  浓度与质子漏的关系, 将囊泡内  $H^+$  浓度固定于  $10^{-5} \text{ mol/L}$ , 改变外部介质  $H^+$  浓度由  $10^{-5} \text{ mol/L}$  到  $3.16 \times 10^{-10}$ , 发现  $\Delta H^+$  浓度与质子漏成线性关系。1984年, O'shea 等发现  $\Delta H^+$  浓度-质子漏和  $\Delta\psi$ -质子漏两图形重合到大约  $120 \text{ mV}/2H^+$  浓度单位, 在此值以上,  $\Delta\psi$  曲线从  $\Delta H^+$  浓度线分离而不再成线性关系。1988年, Murphy 等用一系列电子供体和受体重复实验, 在所有情况下  $\Delta\psi$  与质子漏图形都相似, 证明质子漏是膜特性决定的, 不依赖于所用的呼吸链。多数关于内膜电导测定的实验结果都证实高  $\Delta\psi$  时  $L_H$  增加。在  $\Delta\psi$  阈值时突然变为曲线, 此阈值(非线性电导的

开始)大约为  $100 \sim 120 \text{ mV}$ 。

低  $\Delta\psi$  时  $L_H$  几乎为常数, 它可由两种方法测定, 一是直接测定  $\Delta P$  时的质子漏, 二是将呼吸率- $\delta p$  转变为质子漏- $\Delta p$ 。稳态时, 质子外流率等于质子漏, 而质子外流率等于呼吸率乘以质子泵的化学计量, 后者在一定范围内是常数。Nicholls 曾提出由琥珀酸到氧的呼吸链质子泵的的化学计量为  $6H^+/O$ , 可用以将  $\delta p$ -呼吸率转化为  $\Delta p$ -质子漏, 由此他得到的  $L_H$  为  $0.7 \text{ nmol } H^+ \cdot (\text{mg 线粒体蛋白})^{-1} \cdot \text{mV}^{-1}$ 。由于测量技术、条件、温度和线粒体类型的不同, 在线性范围内  $L_H$  为  $0.05 \sim 0.7 \text{ nmol } H^+ \cdot \text{min}^{-1} (\text{mg 线粒体蛋白})^{-1} \cdot \text{mV}^{-1}$ 。

上述大部分实验  $\Delta p$  主要由  $\Delta\psi$  构成, 线粒体内膜质子漏虽也与  $\Delta H^+$  浓度相关, 但在体  $\delta pH$  不大, 主要是  $\Delta\psi$ , 因此研究的  $\Delta p$  主要成分为  $\Delta\psi$  较恰当。1986年, Brown 等研究了不同的  $\Delta\psi$  和  $\Delta H^+$  浓度对  $\Delta p$  及呼吸率的作用, 发现当  $\Delta H^+$  浓度和  $\Delta\psi$  两者之一固定而另一改变时,  $\Delta p$  与呼吸率之间关系相似, 提示  $\Delta H^+$  浓度与  $\Delta\psi$  对质子漏有相似的作用。

质子跨膜转运的机制不十分明确, 因此高  $\Delta\psi$  时膜电导改变的机制也尚不清楚。1980年 Nichols 等及 1983年 Nagle 等提出可能通过跨膜的结合氢的水链。虽然脂质双层中水很分散不可能形成长期存在的链, 但暂时性的跨膜氢结合水链可由较短的水链相连而成。此外, 膜蛋白可将水链固定于其表面和/或将氨基酸掺入水链而起作用。1984年, O'shea 等发现  $\Delta\psi$  增高时线粒体内膜微粘度不成线性地增高, 但  $\Delta H^+$  浓度增高时并不增高。这些微粘度  $\Delta\psi$  图形与呼吸率- $\Delta\psi$  很相似都在一个相近的  $\Delta\psi$  时由线性变为非线性, 提示膜结构的改变与电导改变相关。高  $\Delta\psi$  时线粒体内膜可能发生的改变之一是介电性的破坏。虽然跨线粒体内膜最大电位只有  $180 \sim 200 \text{ mV}$ , 但因膜宽为  $7 \sim 8 \text{ nm}$ , 跨膜的场力可达  $2 \sim 3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ , 这可引起膜介电性的破坏。对此过程尚不清楚, 已提出的解释为电压导致膜变窄; 磷脂极性头在电位作用下改变朝向; 形成亲水孔等。

除膜电导改变外, 其它离子和代谢物的运动也可能与质子漏有关。如渗透学说提出, 线粒体内膜有一系列代谢物和离子载体以连接线粒体基质和胞浆。线粒体经  $Ca^{2+}$  通道蓄积  $Ca^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  外流在肝脏由  $Ca^{2+}/nH^+$  交换, 在心脏由  $Ca^{2+}/nNa^+$  交换完成; 心脏的  $Ca^{2+}/nNa^+$  交换实际上是  $Ca^{2+}/nH^+$  交换, 因心脏具有快速的  $Na^+/H^+$  交换。  $Ca^{2+}$  出线粒体以换取  $H^+$ , 然后又被  $Ca^{2+}$  通道重摄取形成  $Ca^{2+}$  循环, 结果是线粒体基质和胞浆  $Ca^{2+}$  浓度的稳定和  $\Delta p$  的降低。线粒体内膜  $Na^+$ 、 $K^+$  通道都是电压门控性的, 出线粒体经  $Na^+/H^+$  及  $K^+/H^+$  交换, 如通道与交换同时开放,  $Na^+$ 、 $K^+$  循环的结果也可使  $\Delta p$  降低, 但尚无证据表明其在体时有意义。许多代谢物载体在转运代谢物时可转运质子, 然而此活性不引起质子的净运动, 因为与底物一同摄入的质子常同产物一起运出。谷氨酸/天门冬氨酸载体可能是一例外, 其开放可摄取一个质子。

另一个内源性的引起质子漏的原因是游离脂肪酸。在棕色脂肪组织, 其与质子漏的关系研究得较为清楚。棕色脂肪组织的生热作用对新生动物和冷适应哺乳类动物尤其重要。交感神经释放去甲肾上腺素作用于棕色脂肪组织细胞  $\beta$ -肾上腺素能受体, 经 cAMP 蛋白激酶-酯酶激活, 引起游离脂肪酸释放。游离脂肪酸除用作底物外还与一种称为生热素的蛋白质结合, 后者在一般情况下因结合胞浆嘌呤核苷面受抑制。游离脂肪酸与生热素结合使之成为一有效质子漏, 使脂肪酸氧化而形成的  $\delta p$  下降以热能形式释放。此生热素通道可能为  $OH^-$  通道, 但其净效果与质子通道是一样的。棕色脂肪组织的此种特异性漏受激素调控。但无论是生热素还是具类似功能的其它蛋白质都未在其他组织发现。

1991年 Brown 等发现, 高  $\Delta\psi$  时进入线粒体的小分子糖并无增加, 提示线粒体并无明显的介电性破坏; 牛血清白蛋白可使分离的线粒体质子漏减少  $15\% \sim 30\%$ , 此部分可能是游离脂肪酸所致;  $K^+$ 、 $Na^+$  或  $Cl^-$  循环几乎不引起质子漏; 由于在体胞浆游离钙浓度低, 所以  $Ca^{2+}$  循环在体时的作用也不明显; 磷酸盐或

二碳酸盐循环可能有一些作用;他们认为在体内游离脂肪酸是质子漏的一个原因,而大部分漏是由一些尚不清楚的蛋白质或/和磷脂双层及其中蛋白质所引起的。

膜脂或蛋白组分的改变也可影响质子漏。年龄、饮食和激素水平等因素均可影响线粒体膜脂组成和饱和度以及膜蛋白的量和类型。甲状腺激素和生长激素最受重视。1988年Hafner发现,在一给定的呼吸率,由低甲状腺素鼠到正常甲状腺素鼠 $\delta p$ 增高,提示低甲状腺素鼠线粒体质子漏。

不完全偶联的另一可能原因是质子泵滑脱,即呼吸链有时在催化电子传递时未能泵出质子,质子泵的量子化学量发生改变。一些实验资料提示,高 $\Delta p$ 可能有泵滑脱,而且发生在细胞色素氧化酶。但关于质子泵量子化学量改变的证据不及质子漏多。最近的实验资料(Hafner等,1991;Brown等,1991)表明,高 $\Delta p$ 时线粒体质子泵量子化学量无改变。

线粒体内膜质子漏及可能存在的泵滑脱影响氧化磷酸化效率,但其生理意义如何尚待研究,可能的两个作用是产热和对氧化磷酸化进行调节,使其处于最有效最经济的输出状态,还可能参与离子的分布,稳定细胞内环境等。总之,关于线粒体质子漏的机制,是否存在泵滑脱及其它导致不完全偶联的原因以及其对整个细胞代谢的意义都有待进一步研究。

#### 参考文献

- Nicholls DG. Eur J Biochem., 1974, 50(1): 305~315
- Tzagoloff A. Oxidative phosphorylation. in Mitochondria. 1982, 131~155, Plenum Press, New York
- Krishnamoorthy G. and Hinkle PC. et al. Biochemistry, 1984, 23: 1640~1645
- Murphy MP. Biochim Biophys Acta., 1989, 977: 123~141
- Wojtczak L. Biochim Biophys Acta., 1990, 1018: 177~181
- Brand MD. Biochim Biophys Acta., 1990, 1018: 128~133
- Brown GC, Brand MD. Biochim Biophys Acta., 1991, 1059: 55~62
- Hafner RP, Brand MD. Biochem J, 1991, 275, 72~80

(第三军医大学宋玲博士撰)

**热休克蛋白** heat shock proteins, (HSP) 生物体在各种应激条件下,如温度升高、机体损伤、缺氧、接触某些重金属离子和其他化学物质时,可引起热休克反应。在热休克反应过程中,热休克基因的转录激活,并诱导产生一组热休克蛋白。HSP具有重要的生理功能,在正常细胞中也有活性,故有“分子保姆”之称。

1962年,理托萨(F. Ritossa)在观察果蝇幼虫唾液腺染色体时发现,当环境温度高于正常生理温度4~6℃时,染色体上会出现特殊的膨胀。1974年,蒂西雷斯(A. Tissierres)等发现引起这一变化的主要原因与HSP的合成有关。1986年,施莱辛格(M. J. Schlesinger)将HSP定义为:(1)其合成主要是在环境因素刺激下,特别是当环境温度升高几度时产生的;(2)在其基因的5'端非编码区存在一段由14个碱基对组成的保守序列(即pelham box),该序列作为HSP mRNA转录的启动子。最初人们认为,HSP只在高温下才能保护蛋白质的折叠结构。后来发现,除热之外,还有许多其它的刺激也能诱导HSP的生成。于是便引入应激蛋白的概念。迄今已发现的HSP不下几十种,按其分子量大小及其同源程度,可将其分为若干个家族。同一家族的成员除大小相似外,还具有有一些共同特征。不同种属会有相似的HSP的家族。习惯上,有时也按分子量大小分为低分子量HSP(30 000以下),中分子量HSP(70 000左右),高分子量HSP(80 000以上)3个主要家族。

HSP一般分布于细胞质和细胞核组分内。在哺乳动物、昆虫和酵母等组织细胞中,大量的中、高分子量的HSP。其中,以70 000左右的HSP产生量最多,故有“主要HSP”之称。低分子量HSP在植物中大量存在,分子量范围一般为15 000~18 000,但

也有21 000,24 000和27 000。

HSP在进化上高度保守。在对大肠杆菌、酵母、果蝇、寄生虫和人的HSP70的氨基酸序列分析中发现,它们具有80%以上的相似性,故HSP具有重要的生理功能,在免疫应答中发挥特异作用。

表1 HSP族的生理功能及其免疫应答作用

| HSP族              | 主要成员                                                   | 重要生理功能和在免疫应答中的作用                               |
|-------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| HSP <sub>20</sub> | HSP <sub>90</sub> , HSP <sub>83</sub>                  | 阻止甾醇受体与DNA结合,酪氨酸激酶磷酸化,抗肿瘤,自身免疫                 |
| HSP <sub>70</sub> | HSP <sub>70</sub> , dnak, Bp, hsc <sub>70</sub> , gp78 | 蛋白质折叠与去折叠,蛋白质转位,多聚体组装,免疫球蛋白装配,类抗原加工,病原体抗原,自身免疫 |
| HSP <sub>60</sub> | HSP <sub>65</sub> , groEL                              | 多聚体组装,蛋白质折叠与去折叠,病原体抗原,自身免疫                     |
| 泛素                | 泛素                                                     | 蛋白质降解,类抗原加工,淋巴细胞再循环,自身免疫                       |

1984年,佩尔汉(H. R. Pelham)发现HSP<sub>70</sub>对热休克后细胞的复原是重要的,它可能与HSP<sub>27</sub>具有协同作用。1988年,何蒂恩(P. hretien)在热耐受的仓鼠细胞突变株的研究中发现,HSP<sub>27</sub>的含量与磷酸化的程度对热耐受的产生是必需的,不具有热耐受力的细胞突变株能合成其它种类HSP,但不能合成HSP<sub>27</sub>。在热耐受的突变株细胞中,非诱导的HSP<sub>27</sub>的含量为野生型的两倍。众多研究资料表明,无论是动物、植物或是一些低等生物,当预先经受过一次中等程度的热处理之后,就能耐受其后的一个强烈的热处理,甚至在致死温度的环境下也可生存。这种热耐受现象,与细胞预先接受中度的热处理有关。HSP能保护组织细胞免受骤起的热休克损伤,形成热耐受性,以防御随后发生的热休克或其它应激状态。

HSP是感染源(或许包括转化细胞)的重要抗原。已发现HSP<sub>90</sub>、HSP<sub>83</sub>可作为肿瘤特异性移植抗原在细胞表面表达,并诱导产生保护性免疫反应。在不同肿瘤细胞中,HSP<sub>100</sub>和HSP<sub>90</sub>个体特异性抗原可能并非肿瘤自身抗原,但可能参与加工及递呈其它来源的肿瘤特异性抗原决定基的过程。HSP<sub>70</sub>参与抗原递呈过程。72 000~74 000的HSP抗体可封闭T细胞色素C的识别。HSP<sub>70</sub>的作用可能是防止细胞浆内肽类的全部降解和携带肽分子至细胞表面共同装备组织相容性复合体I(MHC I)分子。

在多种自身免疫性疾病中,都观察到HSP同源抗体水平的提高。如类风湿性关节炎中抗HSP<sub>65</sub>和HSP<sub>90</sub>的抗体,强直性脊柱炎中抗HSP<sub>90</sub>抗体,系统性红斑狼疮中抗HSP<sub>70</sub>、HSP<sub>90</sub>和泛素的抗体,在蠕虫、原虫和细菌感染的疾病中,均可发现抗HSP<sub>70</sub>和HSP<sub>60</sub>家族的抗体,而且在疟疾、麻风和结核病患者的血液中可测到抗HSP<sub>65</sub>的T细胞。HSP在自身免疫上的作用是:(1)有些致敏T细胞和/或抗体是针对致病微生物共同抗原决定簇的,人HSP可避免免疫耐受的发生。(2)这些T细胞和/或抗体在感染时与致病微生物的HSP接触后活化。(3)HSP本身的抗原决定簇在某些应激条件下可单独或与MHC分子一起由宿主细胞表达。(4)T细胞和/或抗体特异性地识别这些应激细胞,从而导致自身免疫应答。HSP被认为是宿主-寄生虫关系中一个环节。恶性疟原虫和其他多种寄生虫的免疫优势抗原属于HSP,例如75 000胞浆抗原与黑腹果蝇的HSP<sub>70</sub>同源。宿主和病原体产生的HSP的量、类型和免疫识别程度之间的微妙平衡关系,导致HSP合成对宿主-寄生虫关系的净效应。在抗虫治疗中,寄生虫合成HSP也有类似情况。宿主的细胞必须保护自己免受入侵的微生物以及其自身防御机能的损伤,病毒感染可诱导HSP的合成,这提示细菌与寄生虫感染也可使宿主细胞产生同样的情况。大多数病原微生物的主要抗原是HSP,它们可刺激机体产生免疫作用。由于病原体与宿主的HSP间有共同抗原成分,因此也可引起自身免疫应答;有的能引起抗体应答,有的能引起T细胞应答,有

的两者都能引起;有的是对多种微生物的共同抗原产生免疫应答,有的仅限于对特异性抗原产生免疫应答。这种交叉免疫应答可作为宿主的第一防线,并唤起一种特异性免疫。HSP 具有的抗原性,对诊断有用,可用于疫苗的制备。

HSP 必然存在于临床发热病人、高温作业人员及用局部温热进行理疗肿瘤病人体内,它与胚胎发育和细胞分化、增殖、调控等都有关系。对许多胚胎肿瘤细胞和早期小鼠胚胎细胞在经受短期热处理后的 HSP 的产生,与细胞所处的分化阶段均密切相关。应用高温和放疗联合治疗肿瘤的过程中,肿瘤中的 HSP 水平增高,肿瘤细胞对热的作用产生暂时性抵抗能力。当 HSP 再减少时,抵抗作用消失。可以通过测定 HSP 的产量来确定下次高温治疗的最佳时间。在肿瘤组织缺乏营养和慢性缺氧时,伴有 HSP 的变化。因此,了解这一现象及其与肿瘤发生和治疗中的关系,具有重要意义。在心脏病发作或中风期间,因血管有短暂阻塞,可产生一种 HSP。通过对释放进血液的 HSP 进行测定,便可诊断出因局部缺血而造成的损伤程度。进一步的研究或许能表明与某一具体器官有特定相关的 HSP,从而确定损伤的部位。在局部缺血的情况下,对小鼠的心脏进行人工加热,要比没有加热的恢复得快。因此,人工加热使细胞产生 HSP,可能对局部缺血后的心脏有治疗和保护作用。

HSP 可用于增加 DNA 重组蛋白的产量。它的产生受一种强启动区调节,在某些条件下它的产生极其迅速。如果可以把这种启动区与所需 DNA 重组蛋白连接起来,那么,这种重组蛋白在哺乳动物细胞中的产生速率可比目前增长 100~1 000 倍。当温度增高时,细胞就会把它的能量全部用来表达与启动区连接的基因。从遗传方面培植的细菌以及在大发酵罐中培育的酵母,若有过分拥挤、过热和营养不良等因素,都会在酵母或细菌中造成一种热休克反应,从而降低产量。通过监测 HSP,可防止或及时纠正降低产量的不利因素。由于生物体产生何种 HSP 及产量多少与不利条件的类型和程度有关,因而可用于环境监测,如在怀疑有污染的地点安置一特定的测试生物体(如水蚤),据此定期作分析,由 HSP 的数量及种类,来获知污染的程度和性质。

近年来,对 HSP 的研究广泛展开,研究内容涉及 HSP 产生的条件、种类、分布、单克隆抗体以及合成中的基因表达、调控等方面,均有一定的深度。不过,对 HSP 生理功能的认识及其应用研究,尚有待深入。

#### 参考文献

- 1 Nikoliczagic J, et al. *Immunol Res.*, 1991, 10: 66~78
- 2 Kramer G, et al. *Toxicol Lett.*, 1991, 56: 241~242
- 3 Kochevar DT, et al. *Toxicol Lett.*, 1991, 56: 243~268
- 4 Vaneden W, et al. *Biochem Soc Trans.*, 1991, 19: 171~175
- 5 奇云. *量子电子学*, 1991, 8: 480
- 6 Editorial. *Lancet*, 1991, 337: 271~271

(安徽省淮南职业医学专科学校奇云副教授撰,姚士硕审)

**心钠素** cardionatrin 或称心房肽又称心房利钠因子或多肽(ANF 或 ANP)。1981年由加拿大 A. J. De Blod 发现的一类生物活性的多肽,是由心脏肌细胞分泌的一种循环激素,具有很强的利钠、利尿、舒张血管和抑制肾素、血管紧张素系统的作用。

ANP 是由心钠素的前体原(Prepro ANP)水解形成的。ANP 的前体原经酶切去羧基端的 2 个精氨酸和氨基端的信号肽,形成 ANP 的前体(Pro. ANP),进一步水解变为小分子的 ANP。由于制备方法不同,ANP 的分子长短不同,最小分子为 21 个氨基酸组成的心房肽 I(Atriopeptin I),最长的是由 35 个氨基酸组成心钠素。不管那种形式,心房肽 I 都是其基本结构,并由半胱氨酸的二硫键形成环状结构的多肽。人的 ANP 分为  $\alpha\beta\gamma$  3 种类型,结构不同,其生物活性也不同。ANP 分布在心、肺、肾、肾上腺、唾液腺、脑脊髓、神经节、垂体、消化道和泌尿、生殖系统。在人的血液、脑脊液、腹腔液和尿液中也存有心钠素样物质。ANP 在心脏分布是不均一的,心房含量最高,右心房含量高于左心房,

室间隔的含量最低。ANP 在心肌细胞的内质网内合成,通过高尔基体加工,形成分泌颗粒,再转运至细胞膜,通过胞裂外排,释放出来。心肌细胞释放 ANP 的方式可分为“调节式”和“基本式”两种方式。“调节式”是以脉冲方式释放 ANP,主要维持在紧急和额外刺激下的需要。“基本式”是心室肌细胞 ANP 释放方式,主要维持机体在正常情况下的基本需要。ANP 的释放与细胞内钙离子、环化核苷酸和磷酸肌醇系统有密切关系。ANP 的释放是受细胞外液容量、心房内压、钠浓度、渗透压及激素变化的影响并与中枢神经调节有关。ANP 在肝和肾脏降解最快;心、肺次之。血浆中 ANP 的生物半衰期仅有 2.5min。不同的 ANP 片段与 ANP 的受体结合能力不同,激活鸟苷酸环化酶(cGMP)的活性亦不同。ANP 具有两种受体亚型,ANP-R<sub>1</sub>; ANP-R<sub>2</sub>,前者称为 B 受体,它与鸟苷酸环化酶偶合在一起。具有分子量 130 000 的蛋白质,它与完整 ANP(99-126)有高亲和能力。ANP-R<sub>2</sub> 受体又称为 C 受体,它不与颗粒性鸟苷酸环化酶偶联,它是由 2 个分子量为 65 000 的亚单位经二硫键并联而成,能与心钠素的降解片段(ANP 103-123)有高度亲和力。两种受体效应不一样,ANP-R<sub>1</sub> 参与利钠、利尿、舒张血管的作用,并控制醛固酮分泌。ANP-R<sub>2</sub> 主要是调节 ANP 的代谢率,以 cGMP 作为第 2 信使,调节细胞内钙离子转移,实现其生物效应。

ANP 的生理功能有:(1)具有很强的利钠、利尿的作用并具有强、快、短的特点。增加肾脏的血流量,使肾内局部血流量重新分配,和降低入球小动脉的阻力,增加出球小动脉的阻力,提高肾小球的滤过压和肾单位的滤过率,能抑制肾小管钠的重吸收。(2)ANP 能抑制肾素、血管紧张素系统和醛固酮的合成与分泌。(3)在中枢 ANP 能抑制垂体后叶抗利尿激素的释放;而周围的 ANP 能抑制抗利尿激素对集合管和血管平滑肌的作用。ANP 还能抑制由血管紧张素、去甲肾上腺素和钾离子引起的血管收缩反应。(4)ANP 抑制交感神经的放电,通过降低多巴胺- $\beta$ -羟化酶的活性,使血浆去甲肾上腺素的水平降低。总之心钠素的主要功能是在体内容量和血压超负荷改变时,通过调节压力感受器,控制肾素、血管紧张素、醛固酮系统活性及维持钠的排泄,在中枢神经系统和靶器官的反馈调节作用下,达到体内心血管、肾脏和内分泌系统的平衡。

正常人的 ANP 水平随着年龄、体位、妊娠及水、热负荷的变化,其含量不同。早产婴儿的 ANP 含量明显高于足月婴儿。老年人(50 岁以上)的血浆 ANP 水平明显升高。血浆 ANP 的正常值由于测定步骤差异,数值差别很大。经过 Sep-Pak 微粒提取的血浆 ANP 水平比未经提取的血浆 ANP 水平低一个数量级。在不同疾病中血浆 ANP 含量变化很大。所以每个实验室必须有自己方法的正常值。一般在充血性心力衰竭、心房纤颤、心肌梗塞、肝硬化、慢性肾炎、肺癌、原发性醛固酮增多症,皮质醇增多症、慢性粘液性水肿等疾病 ANP 水平增高。而特发性水肿、尿崩症、艾狄森氏综合症等疾病的 ANP 水平是降低的。在原发性高血压患者血浆 ANP 的增加程度与血压呈正相关,而特别严重的高血压患者,由于心脏失代偿原因,血浆 ANP 水平反而降低。

ANP 的分子生物学发展;应用基因工程已经生产了 ANP,并且制备了 ANP 基因克隆。人的心钠素基因长约 2 5000,含有 3 个外显子和两个内含子,定位在 1 号染色体(1p36)。小鼠和大鼠 ANP 基因分别定位在 4 和 5 号染色体上。

新发现的几种 ANP,它们在结构上与心钠素相似或者是心钠素前体分子中的活性片段。主要有脑钠素(BNP)、N-心钠素(N-ANP)、异心钠素(Iso-ANP)、尿钠素和醛固酮分泌抑制因子(ASIR),它们都属于心钠素家族。ANP 的临床应用效果很好,但由于其半寿期太短,临床应用受到限制,为此进一步寻找高效的 ANP 剂型成为主要研究方向之一。总之 ANP 的发现与研究为医学、生物学和生理学的研究开辟了一个新的天地,并提高了某些疾病发病机理的研究水平。

#### 参考文献

- 1 De Bold A J et al. A rapid and potent natriuretic response to

intravenons injection of atrial myocardial extract in rats. Life Sci. 1981, 28:29

2 Cantin M et al. The heart and atrial matriuretic factor. *Endocrine Reviews* 1985, 6:107

3 Burnett J C. Tr; Atrial natriuretic factor is it physiologically important? *Circulation* 1990, 82:1525

4 汤,等. 心钠素,北京:北京医科大学、中国协和医科大学联合出版社,1989

5 汤健等,心肺内分泌学,北京:北京科学技术出版社,1991  
(北京协和医院孙梅勋撰)

**化学致癌** chemical carcinogenesis 它是研究接触化学因素而使致癌危险性增加的一门学科。化学因素包括化学物质、化学物基团、工业过程及职业接触和不良生活习惯。目前,认为人类癌症80%~90%与环境因素有关,最主要的是化学因素。人类环境中的化学物质数以百万计,新化学物质以每年30万种数量递增,虽对人致癌者甚少,在探索与鉴定人类癌症病因中,化学致癌研究极为重要。

迄今肯定对人致癌的化学因素中,大多是从职业癌得到线索的。继皮肤癌,膀胱癌后,证明多环芳烃、铬酸盐、砷、镍、芥子气、氯甲醚可致肺癌,石棉可致间皮瘤及肺癌,苯致白血病,氯乙烯致肝血管内皮肉瘤。此外,一些工业过程和职业与某些癌症的关系也被确认。由于密切接触高浓度化学致癌物而使癌症高发的

职业人群只是一小部分,因此对全部癌发病率的影响很小,但这一小部分癌的研究对探索人类癌症病因的价值甚大。

要确定一种化学因素对人是否致癌,必须进行大量流行病学调查、实验研究、临床观察以获充分证据,复杂而困难。世界卫生组织(WHO)所属国际癌症研究中心(IARC)从1971年开始,组织国际性的专家工作组,收集各国可资利用的资料,按统一标准审核,编辑出版《IARC关于化学物质致人癌危险性的评价专题论文集》丛刊,到1987年已出版42卷。专家们分别对有关人类和动物的致癌性证据进行估价,然后综合作出对人类致癌性的总评价。1987年对628种化学因素进行评价,并将其分为4大类。第1类:对人类致癌的50种,其中与职业有关的29种,包括11种工业过程或职业接触(表1);药物17种,抗癌药10种,激素类6种,止痛药1种;其余3种与不良生活习惯有关,1种为霉菌毒素(表2)。第2类:A组:对人类很可能有致癌性(证据较充分的)37种,其中与职业有关的22种,药物15种;B组:对人类可能有致癌性(证据尚有限)的159种。第3类:尚不能进行对人类致癌性评价的381种。第4类:对人类很可能不致癌的一种——巴内酰胺。在对人致癌的化学因素中,药物占1/3,抗癌药占1/5。对药物的致癌性检查不如对食品添加剂那样严格,特别是抗癌药,临床要求十分迫切,远期副作用常被忽略,但有的药物如激素类,除直接作用外还可通过孕妇影响胎儿,就必须进行致癌性检测并对其进行使用严加管理。

表1 IARC评定的29种对人致癌的职业性化学因素

| 化学物质或化学物基因(主要靶器官) | 工业过程或职业(主要靶器官)         |
|-------------------|------------------------|
| 1. 联苯胺            | 19. 铝生产(肺)             |
| 2. 2-萘胺           | 20. 金胺制造(膀胱)           |
| 3. 4-氨基联苯         | 21. 靴,鞋的生产和维修(鼻腔,肺,膀胱) |
| 4. 砷和砷化物          | 22. 煤的气化(肺)            |
| 5. 煤焦油沥青          | 23. 焦炭生产(肺)            |
| 6. 煤焦油类           | 24. 家具和家俱制造(鼻腔)        |
| 7. 未处理及轻度处理的矿物油类  | 25. 地下接触氨的赤铁矿开采(肺)     |
| 8. 页岩油            | 26. 铁和铜的熔铸(肺)          |
| 9. 煤烟             | 27. 异丙醇制造过程(肺、气管)      |
| 10. 石棉            | 28. 品红生产(膀胱)           |
|                   | 29. 橡胶工业(肺、膀胱)         |
| 11. 二(氯甲基)醚和氯甲基醚  |                        |
| 12. 铬化合物(六价)      |                        |
| 13. 毛沸石           |                        |
| 14. 芥子气           |                        |
| 15. 镍和镍化物         |                        |
| 16. 含石棉纤维的滑石      |                        |
| 17. 苯(造血系统)       |                        |
| 18. 氯乙烯(肝)        |                        |

表2 IARC评定的21种对人致癌的非职业性化学因素

| 抗癌药:                                    | 激素类药:         |
|-----------------------------------------|---------------|
| 硫脲嘌呤                                    | 乙烯雌酚          |
| N,N-双(2-氯乙基)-2-萘胺(氯萘吡啶)                 | 雌激素替代疗法       |
| 1,4-丁二醇硫酸地麦威(马利兰)                       | 非类固醇雌激素类      |
| 苯丁酸氮芥                                   | 类固醇雌激素类       |
| 1-(2-氯乙基)-3-(4-甲基环己基)-1-亚硝基脲(甲基-CCNU)   | 联合口服避孕药       |
| 环磷酰胺                                    | 连续口服避孕药       |
| 苯丙酸氮芥                                   | 止痛药:含非那西丁的止痛剂 |
| 8-甲氧基补骨脂素(甲氧咪豆素)加紫外线照射                  | 不良生活习惯:       |
| MOPP(氮芥,长春新碱,甲氧胂和泼尼松联合疗法)以及其他包括烷化剂的联合化疗 | 口嚼槟榔          |
| 苏消安                                     | 无烟烟草          |
|                                         | 吸烟            |
|                                         | 霉菌毒素:黄曲霉毒素类   |

化学致癌物视其是否需代谢活化才能发挥致癌效应而分为直接致癌物及间接致癌物。关于化学致癌的机制,早在1947年,伯勒恩布卢姆(Berenblum)根据小鼠皮肤癌实验提出癌变两阶段说,认为肿瘤的发展至少要经过启动及促进两阶段,与之有关的化学因子叫启动因子及促进因子。启动是指引起DNA损伤导致正常细胞变成潜在癌细胞的过程,需时短,不可逆;促进是指推动潜在肿瘤细胞异常增殖到癌变的过程,需长时间反复作用,是可逆的。后来有人补充提出多阶段说,本质上是一致的。事实上

并非所有接触致癌因子的个体都发生癌,个体遗传易感性在癌发生中可能起重要作用,多数人的癌症或许是遗传因子与环境因子互相作用造成的。研究结果表明,细胞基因是多阶段癌变的分子靶,70年代末人膀胱癌细胞系中癌基因的发现,第一次证明癌的发生是癌基因引起的,随即证明癌基因是正常细胞中的原癌基因活化而来,从而改变了对致癌机制的认识,看来化学致癌物的作用只是使原癌基因活化,为癌变创造了条件。致癌物在细胞启动阶段产生特异位点的突变是基于致癌物代谢对核苷的选择性,癌

基因从质的方面被激活或其表达在量的方面发生改变,就会造成恶性表现的发生。在促进阶段则主要是扰乱信号传导中的调节或正常基因的表达调节。

70年代兴起的用以筛选化学物质致癌性的致突变试验发展迅速,建立在遗传学基础上的这类短期测试系统对发现潜在致癌物是有用的。与此同时,用啮齿动物试验作为致癌性检测的经典方法正受到愈来愈多的质疑,但由于致突变性与致癌性的关系尚有许多未阐明的问题,也有人对用简单的短期测试预测复杂的致癌过程持保留态度。对这两类测试系统之间、两种性质终点之间关系的深入研究,也将有助于解决致癌性测试结果外推及人的难题。

癌基因的揭示和深入研究使人们对环境致癌会有更好的了解,综观职业癌研究历史,从病例报道到识别致癌因素的过程逐渐缩短,人类认识多环芳烃为140a,认识芳香胺为50a,认识氯甲甲醚只用了10a,而氯乙烯动物证实稍先于病例报道。检测手段的进步,预示对新化学致癌因素的确定将会更迅速。将新的分子技术应用于流行病学研究,有希望进一步了解遗传与环境因子的相互作用,提高传统流行病学方法的敏感性。通过变更有使癌发生倾向的遗传因子及通过调整诱发此过程的环境因子,有可能做到预防癌症。吸烟仍将作为最重要的致癌因素加以控制,从而使癌症减少1/3。食物营养结构的改变是控制另外1/3癌症的希望,从人们劳动环境中去除或控制已知致癌因素是预防职业癌的有效途径,但其效果需要若干年后才能显示出来。

#### 参考文献

- 1 Park F. J of Environ Pathe and Toxico, 1980, 3: 399~417
- 2 堀口博,著. 犹学筠,付慰祖译. 环境癌,化学癌,职业癌,上海:上海科学技术出版社,1982, 3~57
- 3 Sukumar S, et al. Science, 1984, 223: 1197~1199
- 4 Kier L E, et al. Mut Res., 1986, 168(2): 69~240
- 5 IARC. IARC Monographs on the Evolution of Carcinogenic Risks to Humans, 1987, 1(42): 21~573
- 6 Bishop J M. Science, 1987, 235: 305~311
- 7 Perera F J. Natl. Cancer Inst., 1987, 78: 887~897
- 8 Pitot H C. Fundamentals of Oncology, 3rd edn. New York: Marcel Dekker, 1986, 532

(上海市劳动卫生职业病防治研究所犹学筠撰)

**化学致癌作用** chemical carcinogenesis 据估计,在诱发人类肿瘤的原因中,内源性因素约占10%,环境因素约占90%。环境因素中物理性因素(放射线、紫外线)和生物性因素(病毒、寄生虫)约占10%~20%,化学性因素约占70%~80%。现在除某些职业外,人们在衣、食、住、行中都会接触化学物质,而且化学物质的种类和数量又在迅速增加。据报告(1985年),世界上已登记编号的化学物质已在500万种以上,并有6万多种在使用中,其中杀虫剂约1500种,药物约4000种,食品添加剂约5500种,其他4万多种为工业、化工原料、农用化学物和生活用化学物等,并且每年又约有200~1000种新的化学物质进入市场。可见化学致癌的重要性的复杂性和问题的复杂性。

中国明朝宋应星在《天工开物》(1637)一书中写道:“凡烧砒(As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)时,立者必于上风十数丈外,下风所近,草木皆死,烧砒之人,经两载即改徙,否则须发尽落”。这是描述化学致癌物对人类健康危害的最早文字记载。在西方,1761年英国John Hill观察到吸烟者易患鼻癌。1775年英国P. Port发现高发阴囊癌的青年,童年时常从事清扫烟筒的工作。1778年,丹麦清扫烟筒同业公会力诫其成员要每天洗澡。约100年后,英国Butlin指出北欧清扫烟筒者阴囊癌发生率低于英国清扫烟筒者,是由于他们较注重个人卫生和穿防护服的缘故,这为化学致癌可以预防提供了依据。1875年德国von Volkmann, 1876年苏格兰Bell观察到某些工人的皮肤癌是与皮肤接触沥青类物质有关。其后,德国及其他许多国家又报告了接触苯胺、β萘胺和联苯胺的工人容易发生膀胱

癌,这种因接触某些特殊化学物质而诱发罕见的肿瘤的事实,促使人们去进行用化学物诱发肿瘤的动物实验。1915年,日本山根和市川在家兔的耳朵上反复涂擦煤焦油成功地诱发了真正的肿瘤。1918年,简井又用煤焦油的乙醚抽提物诱发了小鼠皮肤癌,这又促使人们去研究化学物中有致癌作用的活性物质。其后,德国Bloch及Dreifuss等终于证明在煤焦油中有致癌作用的活性物质是多环芳烃。这些研究为肿瘤病因探讨开辟了新的领域。

目前世界各地已报道许多有可能致癌的化学物质,其中有有机化学物、无机化学物、天然存在的化学物以及人工合成化学物等。为了正确评价化学物的致癌危险性,1969年国际癌症研究署(IARC)成立了一个国际癌症专家工作组,对世界各地所发表的资料进行重新评审。采用流行病学和实验室研究相结合的方法,对化学物质、化学物基团、工业过程、职业接触以及生活习惯上的暴露因素,进行综合评价。1987年,专家组公布了对628种化学因素致癌性的总评结果,共分4类5级:第1类对人类肯定有致癌性的50种;第2类A组,对人类很可能有致癌性(资料较充分)的37种;第2类B组,对人类可能有致癌性(资料尚有限)的159种;第3类对人类致癌性尚未能进行分级评价的381种;第4类很可能无致癌性的1种。随着时间的推移,相信将会有更多的化学致癌物被发现和鉴定。

化学致癌物是指具以下3种作用之一的物质:(1)能诱发肿瘤;(2)能使自发性肿瘤的发生率增高;(3)能缩短肿瘤的潜伏期。这里包括许多不同的作用方式,例如,(1)根据致癌物是否需要代谢激活,分直接致癌物和间接致癌物。(2)根据致癌物对细胞遗传物质的作用,分遗传毒性致癌物和外遗传毒性致癌物,前者能与DNA共价键结合,后者则否(如激素、免疫抑制剂、促癌物和辅癌物等)。(3)根据致癌作用的阶段性分诱癌物(如BaP)和促癌物(如TPA),前者在肿瘤发生上起启动作用,它对DNA造成损伤,并使正常细胞转化成始变细胞;后者作用于始变细胞的细胞膜或细胞膜上的受体,引起细胞内生理、生化过程改变。(4)根据致癌物的致癌力,分为完全致癌物和不完全致癌物。直接致癌物属完全致癌物,诱癌物、促癌物和辅癌物属不完全致癌物。在诱癌与促癌的关系上,必须是先有诱癌物的作用,然后再受促癌物的作用。辅癌物则是指一类能影响致癌物的代谢,影响致癌物与DNA的相互作用,或者能改变致癌物在体内的吸收和分布的物质。上述化学致癌物的分类,大体上概括了化学致癌的作用机制。

虽然有些化学物(亚硝酰胺)无需宿主的代谢,本身即具致癌性,但大多数化学致癌物是前致癌物,需经代谢激活成具亲电子活性终致癌物,再与细胞大分子物质形成共价键结合,并促使正常细胞转化成恶性细胞。终致癌物可由微粒体酶直接激活氧合而成,也有先氧合而成近致癌物,再进一步氧合、酯化或1-电子氧化作用而成。代谢激活致癌物的酶在肝脏中最丰富,其他器官如肾、肺、小肠、皮肤、胎盘以及淋巴细胞中也有。这类酶的活性可被某些物质所诱导而增强,亦可为某些物质所抑制。某些致癌物的种属或器官特异性,可部分用不同细胞酶活性的遗传特定状态来解释。致癌物代谢后可有不同的结果,有的形成终致癌物,有些则生成无致癌性的产物。例如BaP代谢后,可形成有致癌性的二氢二醇环氧化物和无致癌性的苯酚、羧。事实上,化学物在体内代谢是机体的一种解毒过程,许多化学物在体内代谢后生成无毒的物质并自体内排出。由前致癌物代谢后所形成的终致癌物,具有以下共同特点:亲电子性,致诱变性,可诱发DNA修复,半寿期短,可在注射局部诱发肉瘤。

终致癌物与细胞大分子物质如核酸、蛋白质的共价键结合,在化学致癌过程中是极其重要的一环。致癌物致癌力的强弱,常与其共价键结合的程度有关。在代谢激活过程中,前致癌物因失去电子而形成正阳离子,因而容易与DNA碱基中的富含电子中心形成共价键结合。研究资料表明,DNA 4个碱基中至少有12个位点可为致癌物所攻击,但其中鸟嘌呤的N-7、O-6、N-2和C-8是较易受攻击的位点,特别是N-7,约占甲基化DNA总数的



70%~80%。然而也曾观察到某些非致癌物亦可与细胞大分子物质发生共价键结合,或者发生致癌物与DNA的共价键结合,但并没有发生肿瘤。此外,还有所谓非共价键结合的致癌作用,例如某些化学物质(如吡啶)能嵌入DNA链中,使之不能卷紧,影响基因表达的忠实性(移码突变),或者致癌物(如4NQO)黏附于DNA表面,与碱基形成异构体,造成碱基的配对错误,导致点突变。

化学致癌是多阶段性的,包括诱癌、促癌和成癌等过程,在这些过程中常受到许多因素的影响,例如:(1)致癌物的浓度、稳定性、接触时间以及被吸收的情况;(2)前致癌物的被代谢激活或被灭活,人体微粒体酶及谷胱甘肽的质与量;(3)终致癌物与DNA中富含电子中心和一定空间结构的特殊靶分子片段的可能反应性及其稳定性;(4)所形成的致癌物-DNA加合物的稳定性及受修复酶的影响(正确修复/错误修复),错误修复将导致子细胞的突变;(5)人体免疫监视系统对始变细胞的监视机能;(6)促癌物对始变细胞的细胞膜或细胞膜上受体的作用;(7)细胞的繁殖力是否失去正常控制而“疯长”;(8)肿瘤形成及是否发生转移。在上述过程中,自前致癌物的被代谢激活至细胞突变,所需要时间通常以秒或小时计,自细胞突变至肿瘤形成可长达数年以上。

1969年Huebner等提出肿瘤发生的癌基因学说,认为正常人细胞中存在有原癌基因,并可由亲代传给下一代。原癌基因通常处于静止状态,对个体无害,一旦为某种因素所激活成为癌基因时,就可使细胞发生恶性转化。目前已有证据证明,化学致癌物可以激活某些原癌基因,如ras、myc、mos等,特别是ras基因家族,使之发生点突变、扩增、重组、低甲基化和表达增强等。为化学致癌物所激活的癌基因,常具有致癌物的特异性,并发现有些原癌基因是在化学致癌作用的早期被激活,有些则在后期被激活。近来又发现肿瘤抑制基因。Stanbridge(1976)和Benedict等(1984)用人类肿瘤细胞与人成纤维细胞杂交,发现肿瘤表型细胞往往缺乏人类某些染色体,而此染色体上则携带有某种基因,其存在可抑制肿瘤的发生,一旦缺失则出现恶性表型。目前关于化学致癌物与肿瘤抑制基因关系的报道尚不多,但可以肯定化学致癌物如何作用于原癌基因、肿瘤抑制基因,将是可预见的研究热点。这种将环境因素与内源性因素结合起来的肿瘤病因研究方法,将会使人们更加深入地理解肿瘤的发生机制。

化学物致癌机制的研究,可为预防化学性肿瘤提供重要线索。例如,探讨化学诱癌物、促癌物和辅癌物的快速鉴定方法,以防止这些物质进入人类环境;探讨抑制代谢酶的活性,以防止终致癌物的形成;研究终致癌物的灭活和抑制终致癌物与DNA的共价键结合,以防止正常细胞转化成始变细胞;从致癌机制上探讨维生素A、C等的抗肿瘤作用,以达到化学防癌的目的,以及肿瘤抑制基因的研究,等等,都对化学性肿瘤的预防具有重要的意义。

#### 参考文献

- 1 宋应星. 天工开物, 明崇祯十年(1637年)初刻本. 广州: 广东人民出版社重印, 1976. 10: 302~303
- 2 Miller E C. Cancer Research, 1978, 38: 1479~1496
- 3 IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, World Health Organization, Lyon, France, 1987, 7: 17~74
- 4 IARC Biennial Report. World Health Organization, Lyon, France, 1986~1987, 93~98
- 5 Biswas D K. Biochemistry of chemical carcinogenesis, New York, Plenum Press, 1989. 125~134

(广州医学院社应秀教授、吴孟起教授撰)

**化学物质致突变作用** 化学物质致突变作用是指化学物质诱发遗传物质DNA损伤的效应。自1914年Boveri提出癌症是体细胞突变的结果以来,研究诱变性的方法应运而生。1927年

Muller首先发现电离辐射诱发基因突变,以后,Auerback报道化学物质也可引起基因突变。Cattanach报道化学物诱发小鼠的突变,人们越来越重视诱发突变的问题。突变发生在体细胞,可致肿瘤,某些疾病或与衰老有关;发生在生殖细胞可引起子代的遗传性疾病和出生缺陷。

早在60年代后期,由于具有诱变活性的环境化学物在人类生活中大量存在,人们就已意识到需要筛选出这些物质来评价它的危害。随之,在美国等相继成立专门组织来进行研究,一些检测化学物诱变活性的试验方法逐步建立和发展。70年代开始,发现化学物引起细菌Saimo-nell和E.Coli的点突变,Ames等经过10多年的努力,建立了一个以检测化学物致突变性为基础的。行之有效的沙门氏菌回复突变试验。此后已有上百种试验建立并采用。80年代,许多学者认为,突变可使DNA活性改变或生长控制基因表达改变,这是致癌作用的关键。癌基因(ras)的出现,更证实了突变与致癌作用的关键。癌基因活化可能只需要单个碱基的置换或染色体改变。DNA加成物的形成显然反映所接触的毒物具有遗传毒性。DNA加成物可用作监测职业人群接触诱变剂和/或致癌剂的有效指标,也可反映人体在代谢诱变剂。致癌剂与DNA结合及其修复能力方面的个体差异。

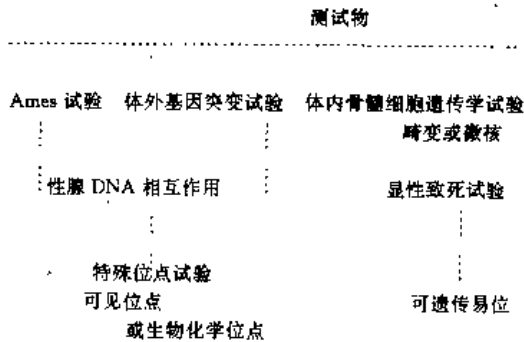
化学物诱发的突变分为两大类:基因突变和染色体畸变。基因突变是DNA分子水平上的改变,可分为碱基置换、移码、小缺失、插入和基因突变的表型效应。染色体畸变包括染色体结构异常和数目异常,这些异常可出现在两条染色单体同一部位或仅涉及染色单体。结构畸变最根本原因是DNA断裂,至于倒位、易位、插入、重复等是断裂后重接引起继发性修复结果。数目异常象整倍性畸变和非整倍性畸变,前者可出现单倍体、三倍体或四倍体。非整倍性畸变可出现缺体、单体、三体或四体。若染色体数目异常发生在生殖细胞或受精卵早期卵裂中,染色体复制或行动异常可出现不分叉,染色体遗失和核内复制。突变在体细胞和生殖细胞的效应不完全相同,在生殖细胞更为敏感。

化学物可直接与DNA作用,也可间接作用于象纺锤体,中心粒和其它细胞器,从而干扰有丝分裂。Ashby等报道了化学物的一些结构活性(亲电子性)从而揭开了研究化学物结构与诱变性关系的新课题。有些化合物结构与碱基相似如BrdU与胸腺嘧啶相似,这些碱基类似物在DNA合成期中存在,与DNA中碱基竞争并取代其位置,从而掺入DNA分子中。还有一些烷化剂,以烷化基团或整个烷化剂分子与DNA分子共价结合形成DNA加合物,或直接改变碱基结构,或以大分子结构嵌入DNA分子结构中,造成DNA链断裂或移码改变。Ashby等(1991)报导301种化合物结构与致癌性。诱变性关系中发现芳香氨基/硝基类含有一个氮原子连在芳香环上,这可能是DNA主要反应部位即活性中心,如-NH<sub>2</sub>、-NHAC、-N(OH)NO、-NO、-NHCH<sub>3</sub>、-NH-NH-、-NO<sub>2</sub>、-N-N-、-NHOH等。还一种亲电子性的活性卤元素存在,这类化合物对DNA反应不需要代谢活化,如-CH<sub>2</sub>Cl、-CH<sub>2</sub>Br、-NCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>Cl。环氧化物等。这两类化合物,诱变活性和致癌性高且对多种动物致癌。无活性中心结构,无活性卤元素,即使可使动物致癌但无诱变性,特别在Ames试验中呈阴性。不直接作用于DNA的化学物如秋水仙碱,中止有丝分裂,出现异常纺锤体形成,出现核内复制等;或使染色体不浓缩和粘着,染色体提前凝缩等,而间接诱发染色体畸变。化学物的分子结构特别是一些异构体存在,不仅改变生理状况和化学性质,而且也改变分子生物学反应,所以在测定诱变性时,要考虑化学物的分子结构。由于突变终点用来监测化学物的遗传毒性,但是有些物质并不是直接或间接造成DNA分子水平改变或损伤染色体,而是通过其它的毒性反应而致遗传毒性,如在细胞毒性剂量时,诱导细胞增殖、细胞复制、细胞转化或使组织中细胞死亡而产生一些酶改变或活性物质蓄积,如细胞毒性肝癌物与肝中有关酶释放有关。所以不能仅以对DNA损伤或染色体改变来观察。因此,确有一类称之为促诱变剂或促癌剂(统称促癌剂)的物质存在如糖精等,那些非遗传性的致癌物都可归属此类,主要是通过影响机体

的生物活性而起促进作用。有些物质本身并不致癌,但反复多次染毒,使特异组织诱发突变,它的作用是可逆的、渐进的,一些细胞毒性物质,激素和免疫抑制剂等,都不是直接影响细胞的遗传物质即基因本身并未发生变化,而是基因调控和表达发生改变,使细胞分化异常。

化学物致机体的突变,可发生在体细胞,也可发生在生殖细胞。发生在体细胞主要是致癌,也可致某些疾病象动脉硬化以及老化等。发生在生殖细胞,则遗传到下一代,可出现致死性和非致死性的改变。非致死性的突变,可出现显性或隐性的遗传性疾病,所以在确定化学物的诱变活性时应注意不同靶细胞突变效应。

检测化学物的诱变性是通过不同的试验来观察突变过程中的某些现象即遗传终点。ICPEMC1983年重新提出,致突变试验可反映的遗传学终点分为5类:(1)DNA完整性改变(出现加合物、断裂、交联)。(2)DNA重排。(3)DNA碱基序列的改变,(4)染色体完整性的改变,(5)染色体分离的改变。一个致突变试验只能反映1~2种遗传终点。因此,一种化学物用一种致突变试验来检测诱变性,特别是在结果为阴性的情况下并不可靠。所以,评价化学物的诱变性应选用一组不同遗传终点的短期试验。美国OTS(Office of Toxic Substances)推荐一组试验:



1. Ames 试验首选,用四个菌株 TA<sub>97</sub>、TA<sub>98</sub>、TA<sub>100</sub>、TA<sub>102</sub>但对含有组氨酸的体液或食品需经特殊处理才能检测。鼠伤寒沙门氏菌阿拉伯糖抗性(Ara<sup>r</sup>)1 菌株 SV<sub>50</sub>直接来检测醛类及氧化性诱变剂,所以也可作为初筛的首选方法。

2. 体外哺乳细胞基因突变(正向突变)试验:常采用的细胞有小鼠淋巴瘤细胞 L5178Y 株;CHO 细胞系、V 细胞系,可检出几十个基因位点象 HGPRT、TK、Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>ATP 酶和 CHO AS<sub>2</sub> 株的 XPRT 位点等。

3. 体内染色体反应试验,分析中期细胞染色体畸变和微核形成。可采用骨髓细胞或精细胞来进行观察,外周血淋巴细胞也可采用,但它是一个同步细胞群,且 T、B 淋巴细胞对诱变物反应强度不一,所以更适用于体外试验。目前有人将 SCE 试验与染色体畸变分析结合起来,大大减少观察误差。

4. 性腺 DNA 相互作用其它试验:睾丸细胞的 UDS(非程序外 DNA 修复合成)。CA(染色体畸变)。SCE(姐妹染色单体互换)。AET(碱基洗堤)等替代显性致死试验。其它致突变试验如小鼠可见特异位点。生物化学特殊位点,小鼠可遗传易位试验,DNA 修复等都可选用。值得注意的是,发现许多疾病。肿瘤与非整倍性有关,所以探索染色体非整倍性与肿瘤的发生和遗传疾病的关系日趋重要。

对一组试验如何判断它的结果,ICPEMC 提出:“在任一能检出遗传学终点的生物试验系统中获阳性结果”的物质,可确定它为具有诱变性,但对阴性结果特别是体外试验的评价则要慎重,应考虑试验是否包括最大耐受量,有无活化系统。设立对照(阳性、阴性)是不合适,相同结果能否被重复。如果在五类遗传终点的一系列试验中均为阴性,才可确定为非遗传毒物。同样,体外试验阳性结果在体内试验并非一定呈现同样结果,这可能由于体外缺乏解毒或排泄过程,体内试验不敏感,体外试验条件和体内条件不一致。如高渗透性、高细胞毒性、有遗传毒性的代谢活

化系统、非生理状况下 H<sup>+</sup>浓度等可出现体外突变试验“假阳性”结果。其次,体外试验阴性,而体内试验阳性,因某些化学物对某些组织产生作用。化学物诱发突变发生在生殖细胞,可传递给下一代,引起遗传性疾病增加,所以在进行遗传危险评价时,应在筛选出阳性后,通过标准试验来观察是否有遗传危害。美国 EPA1984 年提出小鼠特异位点试验和小鼠可遗传易位试验作为哺乳动物种系突变标准试验(MGst)。因为这两个试验都可反映可传递的基因突变和染色体损伤,都在子代中观察。如何确定化学物进行 MGst 试验,这以诱变试验阳性结果评分高低来进行,高分者优先进行 MGst, Russell 1984 年提出评分原则是:(1)试验生物进化程度:哺乳动物>其它高等真核生物>低等真核生物>原核生物,(2)染毒情况:体内>体外,(3)靶细胞:生殖细胞>体细胞,(4)观察终点:反映基因突变=反映染色体损伤的>遗传学意见不明的,由此生殖细胞突变更为引起人们的重视。

随着技术发展和生物短测试验不断改进,除用生物短期筛选试验和一些补充试验外,穿梭质粒(如 SV<sub>40</sub>)。聚合酶链反应技术(Polymerase Chain Reaction PCR)发展,可为诱变研究提供方便。利用穿梭质粒可方便地把一个特定基因引入到遗传学上相距较远的两种生物细胞系内,详细研究其复制、降解、修饰、转录、表达和诱变等,有人设想将穿梭质粒携带的靶基因引入生殖细胞进行体内的遗传分析,基因治疗和突变研究,所以它将成为测定突变类型的一项有用的新技术。

PCR 技术是 Kary Mullis 等建立的一种体外核酸扩增方法,利用 PCR 反应与限制性片段长度多态性(RELP)分析相结合来检测那些发生在酶切位点的点突变。对检测未知位点突变可直接用 PCR 技术直接测定核苷酸序列或将 PCR 产物进行克隆后测定。由于 PCR 技术的高特异性,高效率,高灵敏度的特点,为今后在分子水平上阐明突变的发生及其后果提供了有力的实验手段。

(安徽省职业病防治所叶林、施荣山撰)

### 苯并(a)芘致癌性 benzo(a) pyrene carcinogenicity

苯并(a)芘(3,4 苯并芘,简称 Bap)是极强的致癌物,是已被公认的致癌性多环芳烃(PAH)的代表,很多国家将 Bap 列为研究癌的标准致癌剂和环境污染防治项目之一。它主要来源于烃类化合物的不完全燃烧或高温处理,广泛存在于人类环境中,诸如空气、水、土壤和食物。Bap 主要通过呼吸道,其次是皮肤和消化道进入人体。

1932 年,英国化学家科克(J. W. Cook)等最早从煤焦油和温沥青中分离出强致癌性 PAH-Bap,从而引起人们研究 PAH 的热潮。大量的动物实验和人群流行病学调查证实,Bap 是导致肺癌、皮肤癌等多种癌症的主要因素,也是引起世界很多国家和地区的城市居民肺癌发病率急剧上升的重要因素。

人群流行病学调查揭示 Bap 与人类癌症关系密切。最早报道是 1938 年柯拉尔(E. Kalr),用 0.25% Bap 苯溶液涂抹小鼠进行诱发皮肤癌实验结束后 3 个月,发现自己左臂下方有一结节,18 个月后诊断为鳞状上皮癌,疑为 Bap 沾染所致。美国卡特瑞尼(G. Ctrini)等 1939 年报道,用 1% Bap 苯溶液涂抹 26 名“志愿者”的皮肤,每天 1 次,4 个月后在涂抹部位均发生退化性疣改变。一般研究资料认为人类肺癌、皮肤癌等癌症高发与接触含有 Bap 的煤焦油、沥青有关。据分析,煤焦油含 Bap 0.3~0.8%,沥青含 Bap 0.003%~0.044%。1947 年亨利(S. A. Henry)对 1920~1945 年经官方统计的 3753 例皮肤癌回顾调查发现 2229 例接触焦油和焦油沥青产品。1955 年杜尔(R. Doll)调查指出,焦油生产企业中的煤气蒸馏罐车间空气中 Bap 浓度平均为 140~480μg/100m<sup>3</sup>,该车间工人和煤气生产中沥青喷雾工人中肺癌死亡率很高。通常认为焦炉工患肺癌的危险性是较高的;与劳动场所 Bap 浓度有关。1971 年劳埃德(J. W. Lloyd)对美国利根尼地区的 7 个钢铁厂 58828 名焦炉工进行为期 9 年(1953~1961)的回顾队列研究,焦炉工的肺癌相对危险性(OR)为 2.67(P<0.01),炉顶工肺癌为 10.00(P<0.01)。1976 年列德蒙(C. K.

Redmond)等在劳埃德调查基础上作了匹兹堡焦炉工 1953~1966 年回顾调查发现,焦炉工的肺癌、气管癌、支气管癌等癌症高发,焦炉工与非焦炉工的肺癌 SMR 分别为 3.31,1.01,有明显差异( $P < 0.01$ )。结果还显示,焦炉厂 1852 人中,工龄在 5 年以上焦炉工人呼吸系统癌高发( $P < 0.01$ ),焦炉工死于呼吸系统癌的 OR 值约为预期的 3.5 倍,工龄 5 年以上的炉顶工肺癌的 OR 值比预值大 11 倍。1977 年桑伊加(J. Szyja)测定某炼焦厂焦炉、炉顶操作点 56 个空气样品中 Bap 浓度和 76 名炼焦工血、尿中 Bap 浓度,结果表明,炼焦工在生产中接触 Bap 浓度很高,炉顶空气平均为  $63\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,暴露 6h 尿中 Bap 含量为  $0.322\text{mg}/\text{L}$ ,血中 Bap 含量为  $0.94\text{mg}/\text{L}$ ,t 测验显示血与尿中 Bap 含量具有显著相关性。

世界各地近几十年来肺癌死亡率上升很快,有不少证据说明与 Bap 污染大气有关。1984 年,海金斯(I. T. T. Higgins)认为污染的空气含 Bap 是肺癌发生的重要因素。早在 1952 年,斯托克斯(P. Stocks)报道英国 26 个居民点大气中 Bap 浓度与当地居民肺癌 SMR 有明显的正相关。1964 年,海特切(H. Hettehe)根据德国资料指出,当大气中 Bap 浓度为  $10\sim 12.5\mu\text{g}/100\text{m}^3$ ,居民肺癌 SMR 为 25/10 万,Bap 浓度为  $17\sim 19\mu\text{g}/100\text{m}^3$  时,则肺癌 SMR 提高到  $35\sim 38/10$  万,两者相关系数为 0.97。1973 年,卡尔奴(B. W. Carnor)等对美国城乡肺癌流行病学调查结论是:大气中 Bap 浓度每增加  $0.1\mu\text{g}/100\text{m}^3$ ,则人群肺癌死亡率上升 5%。张允恩等(1984)和陈秉颜等(1990)报道,中国的大庆和郑州两市的大气中 Bap 日平均浓度与居民肺癌 SMR 呈正相关,相关系数为 0.70( $P < 0.05$ )和 0.97( $P < 0.01$ )。室内小环境受 Bap 污染将引起居民呼吸系统癌症的高发。1983 年,考德曼(A. M. Kodama)等认为室内烧火产生的 Bap 等致癌物,可能是发展中国家上呼吸道癌症(口腔、鼻、咽、喉等)的病因之一。据统计,上呼吸道癌占总癌的百分比,印度为 65.9,孟加拉为 49.3,斯里兰卡为 48.5,中国广东省为 34.8,印尼为 24.4,菲律宾为 11.2,而美国仅为 6.1。1990 年陈威等调查表明,中国宣威县肺癌高发主要危险因素是烧烟煤所致的室内空气中 Bap 污染,呈现明显的暴露-反应关系,相关系数为 0.78, ( $P < 0.01$ )。同年,何兴舟等对中国宣威县 60 万人口的 5 年(1983~1987 年)调查结果表明,宣威居室内空气 Bap 浓度与肺癌之间的定量关系符合下列方程式:  $\text{logit}p = -15.407 + 1.7\ln x$ 。吸烟是产生 Bap 的重要来源,已证实也是诱发人类肺癌的重要因素。最早记载是 1795 年苏罗明(Sommering)指出抽烟斗的人好发下唇癌。吸烟与肺癌死亡率关系调查首推杜尔等对 59 600 人函件填表调查,有效人数男性 34 494 人,女性 6 207 人,肺癌 SMR 男性 35 岁以上重度吸烟者(166/10 万)比不吸烟者(7/10 万)高 20 多倍( $P < 0.01$ )。1976 年,伊斯瑞尔(L. Israel)等发现 36 例肺癌患者中有 25 例是吸烟者。每日吸 25 支以上的重度吸烟者患肺癌危险性比不吸烟者大 20 倍。通过对 187 783 人调查显示,吸烟与肺癌死亡率有相关。他还指出,吸烟诱发肺癌的潜伏期约 30 年,25 岁开始吸烟者肺癌高发在 61~62 岁,25 岁以后开始吸烟者肺癌高发则推迟 6 年。1983 年,佩拉伊奥(C. Pelayo)等在美国路易斯安那州调查的 1 388 例原发性肺癌和随机选择配对 1 393 人,结果发现,父亲吸烟并不影响子女的肺癌发病情况,而母亲吸烟却有影响。动物实验表明,将烟草中 Bap 注入妊娠鼠,能引起其后代发生肺癌。吸烟可导致天然杀伤细胞(NK 细胞)活性降低,并且与吸烟程度有关,即使无肺癌的吸烟者其活性亦低,揭示 NK 活性降低可能先于癌的发生。据分析,烟草含 Bap 量为  $3\sim 6\mu\text{g}/\text{kg}$ ,吸烟过程中焦油生成量每支约  $20\sim 35\text{mg}$ ,烟草焦油每百支含 Bap 为  $3\sim 4\mu\text{g}$ (卷烟 0.9,雪茄烟 3.4,斗烟 8.5)。1979 年世界卫生组织报告,戒烟后支气管上皮恢复正常,10 年后肺癌危险性与不吸烟者相同。

有些国家和地区的居民爱吃烟熏食物,这些食物经烟火熏烤,油脂焦化产生大量的 Bap,烤肉铁夹上的焦屑 Bap 含量高达  $125\mu\text{g}/\text{kg}$ ,因而导致这些国家和地区消化系统癌高发。1973 年,

沙贝特(L. M. Shabad)对拉脱维亚的波罗的海沿岸居民调查表明,渔民经常食用大量烟熏食物,其消化系统癌发生率为 120/10 万,而农民仅有 38/10 万。1967 年唐格尔(N. Dungal)等报道,冰岛胃癌 SMR 居世界第 3 位,是胃癌高发国家,西北部农村胃癌 SMR 高达 125.5/10 万。作者认为冰岛居民几乎每餐食进  $0.5\sim 1\text{kg}$  含 Bap  $23\mu\text{g}/\text{kg}$  的烟熏羊肉,西北部农民常吃的大海鸟 Bap 含量则高达  $34\sim 99\mu\text{g}/\text{kg}$ 。但也有人认为烟熏火烤食物中不仅含 Bap,也有相当数量的其他致癌物,如亚硝酸胺等,所以上述国家和地区消化系统癌高发,不能完全归咎于 Bap 的作用。

国际癌症研究中心确认 Bap 是对实验动物有足够证据的高度致癌性的化学物质。使用不同种属动物,以不同途径给予 Bap,均能成功地诱发恶性肿瘤。

表 1 实验动物诱发肿瘤情况

| 剂量                         | 次数/时间     | 染毒动物及途径 | 肿瘤部位    |
|----------------------------|-----------|---------|---------|
| 0.48mg/kg                  | 1 次       | 小鼠经口    | 消化系统癌形成 |
| 80mg/kg                    | 妊娠 11~15d | 小鼠经腹膜   | 胎儿致癌    |
| 500mg/kg                   | 1 次       | 大鼠经口    | 生殖系统癌形成 |
| 1000mg/kg                  | 妊娠        | 大鼠经口    | 胎儿致畸    |
| $2\mu\text{g}/\text{m}^3$  | 20a       | 人吸入     | 多器官致癌   |
| $3\mu\text{g}/\text{m}^3$  | 5a        | 人吸入     | 呼吸系统致癌  |
| $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 1a        | 大鼠吸入    | 呼吸系统致癌  |

资料来源:潜在有毒化学品国际登记中心(IRPTC)出版物《选择和描述的 60 例化学品资料概要》,1979

对环境因素和 Bap 联合作用进行定量研究是重要的。1991 年斯坦霍夫(D. Steinhoff)等采用给大鼠气管注入钴(I)氧化物(总剂量为  $470\text{mg}/\text{kg}$ )和 Bap(总剂量为  $200\text{mg}/\text{kg}$ ),在 20 只大鼠中有 9 只诱发了肺癌,然而单独注入同量的钴(I)氧化物或 Bap,在 20 只大鼠中仅有 1 只诱发肺癌。对 Bap 有增强致癌性的物质包括臭氧、二氧化硫、铬、钼、锰、儿茶酚、甲醛、X 射线等,减弱 Bap 致癌性的物质有鞣花酸、五氧化二钒、维生素 A、E 等。少量的铜、镁、锌、酚可减弱 Bap 致癌性,随着量的增加也会增强 Bap 的致癌性。

用传统的流行病学方法难以对长期暴露低剂量致癌物(Bap)做精确估价。因此,建立一个微环境的灵敏、特异性标志的个体监测模型具有重要意义。生物标志的 3 个水平研究:体内剂量、生物学效应量和临床前期反应。DNA 加成物效应的定量分析是近年来化学致癌研究的最新技术,对研究暴露化学致癌物的监测及其剂量效应和致癌危险性评价都有重大科学价值,也为环境污染与健康效应开辟新领域,因而有着广阔的应用前景。

#### 参考文献

- 1 Doll R. Brit J. Indust Med., 1959, 16: 181~190
  - 2 Higgins L. Preventive Med., 1984, 13: 207~218
  - 3 Luog P J. Int J. Epiden, 1990, 19(3): 53~61
  - 4 陈秉颜,等.第 3 届全国环境卫生学学术会议论文选编, 1990, 305
  - 5 Steinhoff D, Mohr U. Exp Pathol., 1991, 41(4): 169~174
- (河南省职业病防治所陈秉颜副主任医师撰)

**药物等理化因素对人精子染色体的影响** effects of physical and chemical factors on human sperm chromosomes 随着遗传科学的进展,对体细胞遗传效应研究已建立了程序化和标准化的测试手段。由于对人类生殖细胞研究起步较迟,而且多数研究从动物试验推及人或从体细胞结果推及生殖细胞,因此存在着较大的局限性。

从 1976 年 Yanagimachi 等建立人精子穿透去透明带金黄色地鼠卵的实验系统以来, Rrdak(1978)成功地以体外异种受精、培

养,使人精子染色体 DNA 受地鼠卵激活进入复制周期,在第一次卵裂时使染色体停留于细胞分裂中期相染色体螺旋化、褶皱浓缩,观察精子受精染色体,从而建立了人精子染色体研究的新方法。以后,许多研究者几经改进、完善,在美国、加拿大、日本等几家实验室逐渐推广。中国 1987 年由黄天华等首次报道了此方法的制备技术。

1990 年 Evans 指出,人遗传的和后天的疾病所引起的染色体结构改变或者整染色体丢失或增加,能通过精子染色体分析检测人生殖细胞遗传损伤。

Wyrobek(1983)曾对 85 种职业、环境化合物和药物相关接触作了人生殖细胞损伤的研究,同时以精子染色体分析作为研究外源性因子与染色体不分离关系的研究,认为双 Y 染色体是由于减数分裂不分离所造成的。

于永强等(1992)曾对铅、汞等重金属对男性生殖功能影响进行研究,报道了对人精子活力及染色体畸变率的影响,结果提示重金属化合物直接作用于生殖细胞,使遗传物质受损而影响生殖功能。李双哲(1992)等作了镍对人精子染色体分析影响的系统研究,观察镍对生殖系统诱变作用以及对人精子和存活的影响,发现镍仅引起人精子遗传物质的损伤,而不影响精子的授精和生存能力。 $CS_2$  是一种影响多种系统的化合物,引起脂质过氧化而致心血管毒性。1972 年, Lanranjan 曾报道接触  $CS_2$  男性工人精子畸形率增高; Brandriff 曾以  $^{137}CS_2$  对离体人精子染色体畸变作过分析。化学物引起精子畸形,可能是与精子形成有关基因发生突变有关(黄幸纾等, 1985)。

1987 年,黄天华等报道抗肿瘤药物平阳霉素可诱导人精子染色体结构畸变,出现断片、微小体、缺失、环状、双着丝粒、单体交换等类型的畸变。

Jenderny 和 Rohrborn(1987)、Genesca(1990)发现肿瘤病人接受抗肿瘤药物 Bleomycin、vinblastin、methotrexate、Cisplatin 等治疗以后,出现生殖系统功能改变,治疗后 26 个月病人精子染色体畸变率可达 33.4%,单体型畸变为 6%~7%,染色体畸变为 20%,大大超过了正常人群的自发生率。

崔晓等(1991)对新一代用于生育的高分子聚合物水凝胶 HFMC 采用人精子体外异种授精后染毒方法进行染色体分析,结果提示 HFMC 用作人输精管粘堵材料不具潜在的遗传风险,为评价高分子聚合物对人精子的遗传提供了监测手段。

Martin 等(1986, 1989)报道 13 名肿瘤病人(多数为睾丸肿瘤)放疗前后精子染色体畸变比较,年龄在 19~47 岁,接受的总剂量为 30Gy,睾丸照射剂量为 0.4~5.0Gy,放疗后 1、3、14、24、36、48 及 60 个月分析原核染色体,12 个月后平均异常率为 13%,大多数为 21%,24 个月出现无精期。剂量和异常明显相关,结构畸变率和数目畸变率治疗后明显增高,主要为断裂和断片,而且持续时间很长。

Genesca 等(1990)从不同类型肿瘤病人放疗和/或化疗后发现精子染色体结构畸变率明显增高(39.3%),大部分为断裂,对照为 9.9%。同时报道长期接受放疗和化疗病人出现相似结果,认为抗肿瘤治疗主要影响精原细胞而产生异常精子。

Kamiguchi(1990)等以体外照射研究剂量反应关系,发现畸变率随剂量增加而增高,呈线性关系  $y = 0.08 + 34.52D$ ,即 X-ray 诱导染色体畸变精子率( $y$ )随剂量( $D$ )增加而增高,但仍保留授精能力,主要出现断裂和交换,断裂高于交换 9 倍,染色体型高于单体型 6 倍。Brandriff(1988)也证实剂量依从关系。

总之,人精子染色体分析是近年发展起来的新方法,难度较大,技术要求高,在研究者的努力下,已在方法学上有所进步,使可分析的核型已达 40%~70%,并建立了显带技术。但从细微结构分析染色体异常,对药物等理化因子对生殖细胞遗传损伤的评价,还仅是起步阶段,有待进一步探索。

(浙江省医学科学院伏晓敏、乐俊仪撰)

其宿主外的行为信息及对人类的危害,探讨通过现代技术建立病毒性疾病预防方法的一门学科。作为自然生态系统中的一个组成部分的环境病毒,不仅严重危害人类健康,而且影响农牧业的发展。为了人道主义和经济目的,需要控制病原,同时防止通过环境渠道的播散使病毒再循环。

1955 年底,印度新德里流行水源性病毒性肝炎,3 万人发病,其中 73 人死亡。1965 年,美国俄亥俄州对“水传播病毒”进行专题讨论,包括建立定量检测水中低浓度病毒的方法、再利用废水中病毒的持续存在、传染性肝炎的检测等内容。1974 年,在墨西哥城召开了水病毒的国际会议,提出制定饮用水和其它水中病毒含量标准的建议。1979 年,世界卫生组织(WHO)针对环境病毒发表一项声明,指出水、废水和土壤中的病毒对暴露人群的危害,就其在公共卫生中的重要性作出估价。此外,还提供在不同场合下判别疫区并做深入研究的病毒检测技术。1983 年,伯格(G. Berg)等系统地提出去除水中病毒的处理方法和应用消毒剂对水内病毒进行灭活。1987 年,瑟曼(R. B. Thurman)通过改良土壤提高病毒去除力,从而有效地防止地下水的病毒污染。

病毒从宿主排入自然环境,经空气、水、土壤和食品等天然媒介物广泛地传播着。由于工业发展和人口的骤增,水环境受到严重污染。污水中病毒的含量取决于人群的结构、社会经济条件、污水的处理程度、稀释水量的大小、排出病毒的数量和性质及季节的变化等因素。地表水的病毒污染程度主要与承受的污水量和接纳水体稀释能力有关。由于含有病毒污水和地表水的渗透,使地下水也受到污染,而且病毒可随水的流动在土壤中迁移。通常的自来水净化工艺对杀灭细菌是有效的,但对去除或灭活病毒效果不佳。病毒的稳定性对其在宿主间的转移是一个重要的参数。病毒能在聚集状态下进入天然水体,增强其在不利环境压力下的存活能力。在水环境中,病毒对悬浮固体物有亲和性,这些固体物可是泥砂、粘土、矿物、细胞碎片或有机颗粒物质。病毒与固体物的结合使病毒在天然水体中存活更长时间,还可沉降并在沉积物中积累。未经处理的人粪尿和其他废料施于土地或污水灌溉土地,在给土地提供有价值养料和水分的同时,也使土壤携带上病毒。病毒在土壤中的归宿取决于吸附病毒土壤的类型、湿度、孔隙饱和度、可溶性有机物、酸碱度和病毒类型。环境病毒进入动植物体内或吸附其表面,在食品加工过程中通过各种媒介污染食品,食品便为病毒存续提供一个良好的栖身所。水产养殖体系中使用处理不当的污水造成病毒从水转移到食品上。由于水生贝类的滤食特性,使病毒得到浓缩和积累。病毒还可通过食物链向更高级营养水平转移。在人类活动、废水流动和污水灌溉等过程中,病毒依附在飞沫和滴核的表面或存在于其中,形成病毒气溶胶,悬浮于空气中。气溶胶中的病毒含量比水环境中的高 100 倍以上,病毒的存活受温度、太阳辐射和相对湿度的影响。另外,风速控制着病毒气溶胶的转移。

污水处理有 3 个程序:过滤、除渣和初级沉降的一级物理处理;细菌、真菌、藻类、蠕虫和昆虫幼体的混合物对污水的二级生物处理。其中氧化塘法是利用温度、日光辐射等物理因素和能与病毒相互作用的藻类等生物因素协同作用使病毒灭活。活性污泥法是由微生物细胞、有机碎片和无机碎片构成活性污泥絮团吸附和包埋病毒的,这是减少病毒的有效生物方法,但不能将病毒灭活。三级理化处理是按水的使用目的采用一系列不同的步骤和方法,在水软化中,石灰—苏打粉工艺通过将病毒吸附在氢氧化镁絮团上将其去除;在饮用水澄清过程中,利用凝结核和助凝剂破坏水中胶体颗粒的稳定性,使其相互附聚而沉降,这种凝结核—沉降是去除病毒的有效方法。饮用水的消毒多用氯,然而现代监测技术发现,氯不能充分将水中的病毒灭活,故采用氯处理后再用强的杀病毒剂臭氧处理的工艺对水消毒。消除污泥中病毒的办法有:厌氧消化法,灭活病毒的数量依赖于温度、pH 和氨浓度等因素;石灰稳定化法,石灰可提高污泥的 pH 值,使肠道病毒易被灭活;污泥干燥法,由脱水引起病毒核酸的释放和灭活;污泥堆肥法,这是一个嗜热与好气的生物降解和稳定化的过程,可使病毒

有效地灭活。预防食品被病毒污染,可通过卫生管理机构采取适当措施、减轻水产养殖业的水污染和安全的食品加工方式和过程来实现。

环境病毒的检测程序一般经过采样、浓缩和鉴定 3 个步骤。达哈林(D. R. Dahling)研究环境病毒样品的加工和运输时发现,水样中加入  $MgCl_2$ ,通过病毒吸附过滤器时用牛肉汁洗提可获得较高的病毒回收率。在洗提过程中采用防沫措施可减少泡沫和提高病毒回收率。戈耶尔(S. M. Goyal)对从污泥中分离人肠道病毒的方法进行系统的研究,认为微孔膜过滤器吸附—洗脱病毒的方法适合浓缩大容量水中病毒;生物絮凝法、粘土和无机盐沉淀物吸附法以及脱水法适合小容量中病毒的浓缩,样品浓缩后需进行纯化,然后对环境中的病毒进行诊断和鉴定。食品中病毒的检测需要用低  $H^+$  浓度甘氨酸缓冲液漂洗、过滤,除去干扰病毒分析的食品中的固体物,澄清液经超滤或超离后,将浓缩液用于病毒学试验。

为了检测环境样品中的病毒,需要发展浓缩技术和快速试验程序。目前所使用的方法既复杂又耗时而且费用相当昂贵,因此,学者们寻找能够证明病毒存在的最有效的指示物,通过前瞻性流行病学的调查寻找指示物的水平与疾病之间的相互作用。但是,除了病毒本身外,尚没有理想的指示物。此外,还没有制定出适合应用于水、土壤、污泥和食品中的病毒标准,现仅有这方面的建议指标。要建立环境病毒标准就要发展环境样品中病毒的简易、有效、廉价和快速的检测技术。此外,抗病毒化学疗法研究领域在扩大,人们致力于寻找出高效、无毒性的化学药物以消除环境中传播的病毒,同时还从生物学方面控制环境病毒。

#### 参考文献

- 1 Gerba C P, et al. *Methods in Environmental Virology*, 1982, 1~9
- 2 Berg G, *Viral Pollution of the Environment*, 1983, 51~95
- 3 Dahling D R. *Appl & Environ Microbiol.*, 1984, 47: 1273~1276
- 4 Goyal S M. *Appl & Environ Microbiol.*, 1984, 48: 531~538
- 5 Thurman R B. *J Environ Sci Health A.*, 1987, 22: 369~388
- 6 Bitton G. *Introduction to Environmental Virology.*, 1980, 273~289
- 7 宋长征. *生物学通报*, 1991, 6: 14~15

(山东医学科学院宋长征助理研究员撰)

**艾滋病毒** human immunodeficiency virus, (HIV) 艾滋病毒是获得性免疫缺陷综合症的简称(AIDS),它的病原体是人免疫缺陷病毒,即艾滋病毒。该病的特点是传播迅速,发病缓慢,临床有明显的后天获得性免疫缺陷,表现为各种机会性感染及恶性肿瘤,死亡率极高。

艾滋病毒是一种逆转录病毒,属于慢病毒属,呈球形,直径 100~140nm,其浮密度为 1.16g/ml。病毒最外层为两层脂质组成的包膜蛋白包裹,由糖蛋白栓住。病毒体中层为 20 面体对称的核壳,最内层为螺旋对称的核蛋白复合体,逆转录酶包括在内,逆转录酶的分子量为 100 000,其活性依赖于  $t^2$  价镁离子。病毒核酸类型为 RNA,单股,全长约为 9 200bp。该病毒有 3 种结构基因,即编码核心和鞘膜蛋白的 gag 基因、编码蛋白酶、逆转录酶和内切酶的 pol 基因、编码包膜突起糖蛋白和跨膜糖蛋白的 env 基因。此外,还有冗长末端重复序列(LTR),LTR 位于原病毒基因组的两端,并不编码蛋白,其中包含启动子和增强子。编码该病毒非结构蛋白的基因似均为调节基因,共有 4 种,即 tat 基因(反式转录基因)、3'orf 基因、sor 基因和 art 基因。

该病毒对带有 OKT<sub>4</sub> 标志的淋巴细胞有特异的亲和力,如 T<sub>4</sub> 细胞经抗 T<sub>4</sub> 的单克隆抗体处理后,病毒就不能吸附和进入细胞。HIV 有高度的遗传变异性,主要是编码 gp120 的基因易于变异。不同地区可分离出不同的变异株,即使在受感染的病人中也会发生病毒的细胞嗜性、致病性和中和抗原性的改变。该病毒对

热敏感,将带有病毒的血液暴露于 56℃ 环境中 30min,其传染性将丧失 99%。病毒也易被乙醚、丙酮、酒精、次氯酸钠(0.2%)、乙型丙内脂(0.25%)、甲醛(5%)及戊二醛(1%~2%)灭活,但病毒对电离辐射和紫外线的抵抗力较强。该病毒在 20% 胎牛血清中置于 -70℃ 低温可较长期保存感染力(至少 3 个月以上),如不加胎牛血清,则很快灭活。在 50% 缓冲甘油液中置于 -20℃ 保存,该病毒的逆转录酶活性至少可维持两个月以上;如置于 37℃ 环境中,酶活性只能维持 10 天以上,冻融一次,酶活性丧失 20%,反复冻融,酶活性丧失很快。

最初发现该病毒时,曾分别被命名为 T 淋巴细胞白血病病毒 III 型(HTLV-III)和淋巴结合相关病毒(LAV),后证明二者相同,故统一命名为人免疫缺陷病毒(HIV)。根据血清学 HIV 分为 2 型,即 HIV-1 和 HIV-2。世界各地流行的病毒,以 HIV-1 为主。HIV-2 流行主要限于西非国家,包括加纳、象牙海岸、塞内加尔、几内亚、冈比亚、几内亚比绍等。HIV-2 的致病力较 HIV-1 为弱。

艾滋病患者和艾滋病病毒携带者是本病的传染源,主要传播途径是:(1)通过性接触传播。由于血液、精液、子宫阴道分泌物、唾液、泪水和乳汁等都含有艾滋病毒,所以性接触是主要的传播途径,约占 70%。海地及中非以异性性接触传播为主,男性肛交传播以美国为多见。直肠粘膜与阴道不同,为单层柱状上皮,易擦破及出血。精液中前列腺素 E<sub>2</sub> 特别多,这是一种免疫抑制剂,在阴道中不吸收,而在直肠中则易被吸收。此外,直肠细胞对 HIV 受体有亲和力。(2)通过血液和血液制品传播。(3)母婴传播。可通过胎盘、产道或哺乳传播给胎儿或婴儿。(4)其他。包括器官移植、人工授精、静脉药瘾者、医务人员和科研人员的职业性感染等。艾滋病易发生在对本病高发人群中,如男性同性恋、药瘾者、妓女、血友病患者及出生于艾滋病患者家庭的婴儿。虽然从出生到老年均可发病,但以 20~50 岁最多,估计占 90%。男女之间的发病率之比因地区而不同,在欧美因同性恋大多是男性,男女之比为 14:1;在非洲男女比例基本相等,女性发病率比男性略高。

HIV 进入人体后,其靶细胞主要是 T<sub>4</sub> 淋巴细胞和 MΦ。病毒进入细胞内,脱去蛋白外壳,基因整合到靶细胞的染色体上,成为人体细胞的遗传物质并进行增殖。美国的研究人员认为,在人体的口腔、生殖器官和排泄器官的粘膜里存在着一种树枝状细胞,这种细胞极易受到艾滋病毒的感染并可在该细胞中大量繁殖。繁殖出大量病毒之后,该细胞又可充当运载工具把艾滋病毒带到淋巴细胞中,从而引起人的感染。体外实验已证明,阴道、肛门和口腔粘膜表面的树枝状细胞对艾滋病毒极度敏感,即使用低浓度的艾滋病毒也会使这类细胞发生感染。

该病毒潜伏期较长,从数月数年,男性 5~6a,女性 8~9a。仅有 15%~20% 的感染者出现初期症状,主要是全身疲倦、肌痛、盗汗和多汗、低热、淋巴结肿大,偶有发现皮疹、头痛、关节痛者,个别人发生急性脑病。以上症状发生于接触病毒数周之后,症状持续 1 周左右而自愈,症状消退时出现血清抗体阳性。所有患者急性感染后,均经历数月或数年的无症状期,继之出现持续性对称性淋巴结肿大,肿大的程度一般能触及,不致大到肿块;有时能稍稍消退,继之又出现,反复消长,极为常见。还有一小部分患者可能出现血小板减少性紫癜。由于感染者体内的辅助性 T 细胞(即 T<sub>4</sub> 细胞)大量消耗,巨噬细胞和 NK 细胞功能下降,出现本病的最后一期即艾滋病期。其特征是严重的免疫缺陷,严重的机会感染(主要是卡氏肺孢子菌、隐孢子虫、弓形虫、白色念珠菌、新型隐球菌、沙门氏菌、各种疱疹病毒等)和恶性肿瘤(最常见的是 Kaposi 氏肉瘤、B 细胞淋巴瘤和皮肤粘膜鳞癌)。发病后第 1 年内病死率为 56%,第 2 年为 25%,4~5a 后 100% 死亡。Kaposi 氏肉瘤是病人死亡的重要原因。

HIV 感染的明确诊断有赖于实验室检查,较常用的方法主要包括从感染者的血液、精液、脑脊液、唾液等分离病毒或检测病毒抗原及其产物或检测病人的血清抗体。对艾滋病的治疗尚无理

想手段,主要包括4个方面,即特异机会感染的防治、一般的对症治疗和支疗法、抗HIV的药物疗法、免疫支持疗法。最重要的是对本病的预防,首先要管理好传染源,加强对艾滋病高危人群的监测,切断传播途径。这些人群主要是指性病患者、妓女、嗜毒者、同性恋者、使用过进口血液制品者、归国的海员、劳工、留学生和驻外人员、宾馆的服务员及国际旅行社导游人员、边境侨乡居民、艾滋病人及病毒感染者的密切接触者、艾滋病门诊的医务人员及实验室人员、外国留学生和长期驻华人员、献血员和献组织器官者等。HIV疫苗的研究已经取得较大进展,病毒包膜gp120和gp160是免疫原性基因,被公认为中和相关抗原,它能识别人T<sub>4</sub>细胞表面的T<sub>4</sub>受体分子,并能特异地吸附在上面。当今各种HIV疫苗均由gp120或gp160的完整多肽或片段组成,这些疫苗包括亚单位疫苗、灭活疫苗、基因重组疫苗、合成疫苗等,有的已用于人体,但效果尚不理想。

从HIV发现至今,为了治疗、预防和消灭艾滋病,人们付出了巨大的精力和财力。虽然取得一些成就,但人们对HIV的来源和病因以及防治方法尚未取得完全一致的认识和突破,而且缺乏理想的动物模型,没有特效的药物和疫苗,更谈不上消灭病毒,所有这些都必须进一步去研究。

#### 参考文献

- 1 Friedland G H. *New Engl J Med.*, 1987, 317: 1125~1133
- 2 Ho D D, et al. *New Engl J Med.*, 1987, 317: 276~286
- 3 Curran J W, et al. *Science*, 1988, 239: 610~616
- 4 Haseltine W A. *scientific American.*, 1988, 258: 52~89
- 5 Piot P, et al. *Science*, 1988, 239: 583~599
- 6 黄玉兰. *实用临床传染病学*. 北京:人民卫生出版社, 1990. 168~173
- 7 汪力亚. *艾滋病图解*. 北京:人民卫生出版社, 1991
- 8 杜平,等. *现代临床病毒学*. 北京:人民军医出版社, 1991. 587~605

(上海第二军医大学范中善教授、夏红彬,成都军区总医院马伟仁主管技师撰)

### 轮状病毒血清型 serotypes of rotaviruses

轮状病毒是引起婴幼儿和各种幼龄动物腹泻的一种主要病原。所有轮状病毒,根据组抗原及核酸11个片段排列的不同可以分成A~F6个组,其中B~F组统称非典型轮状病毒。由于各组非典型轮状病毒毒株发现的较少,且很难适应于细胞培养,有关其抗原性的研究报道甚少。A组轮状病毒又叫典型轮状病毒(其核酸片段呈典型的4:2:3:2排列)。不同宿主来源的A组轮状病毒之间,虽然拥有共同的组抗原,但同时存在中和血清型特异性抗原,进一步的研究资料证实由一种血清型轮状病毒感染不能或很少能诱导对其它血清型轮状病毒感染的抵抗。显而易见,为了研制有效的轮状病毒疫苗,对轮状病毒进行血清型分析十分重要。

1977年,桑莱斯(M. E. Thouless)首次报道人轮状病毒血清型。1983年,怀亚特(R. G. Eytatt)利用空斑减少试验(PRN)和/或转管中和试验将所有人轮状病毒分成1~4血清型。流行病学资料显示,1型人轮状病毒流行最广,3型其次,2、4型再次,但不同地区不同年份各血清型的分布差异明显。随后松野(1985)、克拉克(H. F. Clark, 1987)和谷口(1987)又相继报道了人轮状病毒第5型、第6型和第7型,但其流行面相对较窄。

1983年,伍德(G. N. Woode)报道在牛中至少有两个血清型轮状病毒存在。中和交叉保护试验明确了73株牛轮状病毒中的64株(89%)属于牛轮状病毒1型(即NCDV型),5株定为牛轮状病毒2型(以B223为代表株),另有4株未定型。斯劳德格拉斯(D. R. Snodgrass, 1990)亦证实日本牛轮状病毒1型和2型是牛的主要流行血清型,但同时存在第3血清型。

关于猪轮状病毒,1979年伯尔(E. H. Bohl)通过交叉保护试验区分出两个血清型。1984年,他们又发现猪轮状病毒1型和2型之间的生物学特性有着明显的差异。以OSU为代表株的猪血

清1型轮状病毒在MA-104细胞上生长良好,能产生致细胞病变作用(CPE)和空斑。猪血清2型轮状病毒(以G株为代表株)却较难适应于细胞,最初的分离培养中不产生CPE和空斑。1988年,罗斯(A. M. Ruis)又报道了猪轮状病毒第3血清型,代表株为YM株。同时,保罗(P. S. Paul, 1988)从4周龄的腹泻病猪粪样中分离到两株猪轮状病毒(ISU-64和ISU-65),经双向中和试验亦证实是两个新的猪轮状病毒血清型。

马轮状病毒除流行最广的轮状病毒3型外,还有5型、13型和14型3个血清型。禽轮状病毒有3个血清型,即Ty-1、Ty-2和Ch-1型。猴、兔、羊、狗、猫等也都有不同血清型轮状病毒感染的报道。

虽然人的和动物的A组轮状病毒都有各自的血清型,但令人感兴趣的是人的某些毒株与动物株之间可能存在共同血清型抗原,从而使得用动物病毒株免疫人或用人病毒株免疫动物成为可能。1984年,霍希罗(Y. Hoshino)应用空斑减少试验以同源和异源交叉中和滴度差超过20倍为标准,并按照人轮状病毒的4个血清型(1~4型)排列顺序,将禽的和6种哺乳动物的共16株轮状病毒分成7个血清型。两株具有明显特征的人轮状病毒分属1型(Wa)和2型(DS-1),它们仅来源于人。牛轮状病毒NCDV属6型。这三者显示与其它轮状病毒抗原性不同。3型则包括人Walk57/14、猴MMU18006、猴SA-11、狗CU-1、马H-2等,属于4型轮状病毒的除人ST-4株外,还有两株猪轮状病毒(G和SB-2)。猪OSU与马H-1抗原性相似,归属于5型。鸡Ch-2与火鸡Ty-1轮状病毒同属7型。其后沿用该系统又相继发现了轮状病毒8~14型,其中轮状病毒8型包括人第5型、牛第3型;9型为人第6型;10型为牛第2型;11型为猪第3型;12型为人第7型;13型、14型分别为马第3型和第4型。试验结果还表明人的7个血清型轮状病毒除第1型外,其它各型毒株与动物轮状病毒株之间以及不同宿主来源的动物轮状病毒株之间都不同程度地存在单向或双向中和抗原关系。

A组轮状病毒还可以根据亚组抗原特异性和核酸双股RNA电泳图谱的不同分成两个亚组和两个电泳型。病毒血清型与亚组及电泳型之间并无直接的关系,但亚组特异性与电泳型之间的关系除人第7型(电泳I型,第I亚组)外,在其它各血清型人轮状病毒株中得到证实,电泳I型(短型包括超短型)的毒株(人2.5血清型)都属于第I亚组;而电泳长型即电泳II型的毒株(包括人1、3、4、6血清型)都属于第II亚组。其它哺乳动物轮状病毒的核酸电泳型都表现为长型(电泳II),但与人相反,亚组抗原性属于第I亚组。例外的情形有马E1株(血清3型),猪SB-1A株、G株(4型)属于第I亚组,马H-2株(3型)表现为非I非II亚组。利用亚组特异性单克隆抗体测试证实,禽轮状病毒既不属于第I亚组也不属于第II亚组,有可能是独立存在的第III亚组。

1981年,卡里卡(A. R. Kalica)通过基因重组分析证实,由轮状病毒核酸的第7基因、第8基因或第9基因(不同的毒株有差异)编码的VP<sub>7</sub>糖蛋白(分子量34 000~37 000)是决定血清型和主要中和特异性的外衣壳蛋白,是产生中和抗体的主要抗原。氨基酸序列分析进一步明确VP<sub>7</sub>上共有9个血清型特异性的序列可变区,即VR<sub>1</sub>~VR<sub>9</sub>。这9个区在不同血清型的毒株之间变化明显,而同一血清型毒株之间则表现高度稳定。但据对用血清型特异性单克隆抗体筛选的中和抗性变异株的氨基酸序列分析证实,决定病毒中和血清型特异性抗原位点形成的只有VR<sub>5</sub>、VR<sub>7</sub>、VR<sub>8</sub>和VR<sub>9</sub>4个区,其中VR<sub>5</sub>、VR<sub>7</sub>和VR<sub>8</sub>分别对应于血清型特异性抗原决定位点A(氨基酸[AA]87~101)、B(AA141~152)和C(AA208~221)。VP<sub>7</sub>蛋白共由326个氨基酸组成,同血清型的不同毒株氨基酸同源序列可达85%~99%,其中来自同一宿主的同型毒株同源序列都在91%以上,而异种血清型的不同毒株同源序列多数只有71%~85%,仅少数毒株之间可达89%。

轮状病毒外衣壳上除VP<sub>7</sub>外,还有另外一种主要结构蛋白,

即由第 4 基因编码的 VP<sub>4</sub>(分子量 88 000)。VP<sub>4</sub> 主要为外衣壳血凝素抗原,具有感染性蛋白酶活性部分,决定病毒对感染宿主范围的限制。此外,VP<sub>4</sub> 蛋白对胰蛋白酶敏感,经处理可裂解为两个多肽(VP<sub>3</sub> 和 VP<sub>7</sub>)。从而增加病毒感染的活性。但越来越多的事实证明,VP<sub>4</sub> 除具有上述特性外,也可同时表现出高水平的中和活性,某些针对 VP<sub>4</sub> 的单克隆抗体既表现血凝抑制活性又有中和活性。据对分离自委内瑞拉 1 名新生儿的 M<sub>37</sub> 株轮状病毒(其抗血清可以中和分属血清 1 型和 4 型的人 Wa 和 ST-3 轮状病毒株)的研究,体外重组试验显示 M<sub>37</sub> 一方面与 ST-3 拥有共同的 VP<sub>7</sub>,另一方面又与 Wa 有共同的 VP<sub>7</sub>,从而证实它具有双重型特异性。因而,霍希罗认为有必要根据轮状病毒的 VP<sub>4</sub> 和 VP<sub>7</sub> 两种外衣壳结构蛋白抗原的不同对轮状病毒进行重新分类和命名,他建议建立一套类似 A 型流感病毒的二因素分类系统,由中和蛋白抗原 VP<sub>4</sub> 和 VP<sub>7</sub> 确定型别,如 Wa(1 型代表株)可以描述为 VP<sub>4</sub> 血清 1 型(VP<sub>4,1</sub>)、VP<sub>7</sub> 血清 1 型(VP<sub>7,1</sub>)、ST-3(4 型)描述为 VP<sub>4,4</sub>、VP<sub>7,4</sub>,而中间型 M<sub>37</sub> 描述为 VP<sub>4,4</sub>、VP<sub>7,1</sub> 等。

由于各血清型特异性单克隆抗体的成功制备以及聚合酶链反应(PCR)技术在轮状病毒血清分型上的成功应用,使得轮状病毒血清分型更为快速、方便和有效,尤其是对大量的样本和未能适应于细胞培养的毒株进行分型。但是,由于新的毒株不断地被发现,而某些人的和动物的毒株之间存在有一定的单向的或双向的交叉反应,又使得轮状病毒毒株间的抗原关系变得十分复杂。在人的和动物的轮状病毒的系统比较中发现部分毒株具有双重血清型特异性,这类情形的存在阻碍了轮状病毒的准确分型。已建立的根据轮状病毒外衣壳上主要结构糖蛋白 VP<sub>7</sub> 而分型的分类系统尚难将所有已知人的和动物的 A 组轮状病毒清楚地分成若干血清型。由霍希罗提出的根据 VP<sub>4</sub> 和 VP<sub>7</sub> 两种抗原对轮状病毒进行分型的新的分类方案引人注目,但尚需进一步研究和检验。

参考文献

- 1 Kalica A R, et al. *Virology*, 1981, 112, 385~390
- 2 Wyatt R G, et al. *J. Clin. Microbiol.*, 1983, 18, 310~317
- 3 Woode G N, et al. *J. Clin. Microbiol.*, 1983, 18, 358~364
- 4 Bohl E H, et al. *J. Clin. Microbiol.*, 1984, 19, 105~111
- 5 Hoshino Y, et al. *J. Infect. Dis.*, 1984, 149, 694~702
- 6 Hoshino Y, et al. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 1985, 82, 8701~8704
- 7 Dyall-Smith, et al. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 1986, 83, 3465~3468
- 8 Green K Y, et al. *Virology*, 1989, 168, 429~433
- 9 Browning G F, et al. *J. Clin. Microbiol.*, 1991, 29, 2043~2046

(江苏农业科学院畜牧兽医研究所何孔旺副研究员撰)

埃尔托型霍乱弧菌噬菌体一生物分型

*phage-biotyping of vibrio cholerae El. Tor* 1961 年埃尔托霍乱由印度尼西亚开始向外扩散,形成霍乱的第 7 次世界大流行。此后疫情不断扩大蔓延,至今已波及五大洲 140 多个国家和地区,尤其对亚洲、非洲和拉丁美洲发展中国家危害最为严重。这次大流行持续时间之长和波及范围之广是前六次世界大流行所未有的。这与本次大流行的病原菌—埃尔托型霍乱弧菌(EVC)不同于以往的古典型霍乱弧菌(CVC)密切相关。因此,国内外对 EVC 不同类型的区分和分型的研究极为重视。

利用噬菌体对细菌进行分型是区分同种细菌不同菌株的敏感方法。日本武谷等(1963)利用菌株溶原性的有无,将 EVC 区分为“西里伯斯”型和“古典—乌汶”型,1967 年他们进一步将西里伯斯型分为溶原株和复愈株,然而单靠溶原性并不能区分菌株的致病性。古典—乌汶型中也有少数为溶原株或复愈株,西里伯斯型中也有少数既非溶原又非复愈的菌株。印度巴苏等(S. Ba-

su, 1968)提出用 5 株噬菌体将 EVC 分出 6 型的修正方案。安萨里等(M. Q. Ansari, 1990)回顾印度 1969~1988 年用此法对 EVC 分型结果,指出多年来仅有两个最常见的噬菌体型(2 型和 4 型),而且不能分型的菌株在不断增加。他们认为需要增加更多新的噬菌体,以改进这种噬菌体分型方案。苏联德罗杰夫基纳等(M. S. Drozhevskina, 1979)用 7 株噬菌体将 EVC 分出 18 型,但 15% 的菌株不能分型。英国 Maidstone 公卫实验所(WHO, 1980)用 14 株噬菌体将 EVC 分出 25 型。经考核(WHO, 1985), 37 株菌中有 29 株分型结果不能重复。上述几种分型方案,有的分出的型别少,有的不够稳定或使用的分型噬菌体太多,难以在一般实验室应用,这些噬菌体分型法均没有区分 EVC 的流行株和非流行株两类菌株的作用。(见“埃尔托型霍乱弧菌的流行株与非流行株”条目)。WHO(1980)鼓励用噬菌体分型区分 O1 群和非典型 O1 群霍乱弧菌的研究,但至今尚未见这方面报道。

中国医学科学院流行病学微生物学研究所(简称流研所)于 1963 年从国内各地分离的 236 株弧菌噬菌体中,通过对 38 株具有代表性的埃尔托型,古典型和非 O1 群霍乱弧菌的交叉裂解试验,选出五株噬菌体(VP1~VP5)作为分型噬菌体(表 1)。再根据五株噬菌体的裂解模式不同对 EVC 进行分型。1966 年对 1961 年以来各地不同来源菌株分出 22 型,1975 年增至 27 型。1978 年将分型方案发展为噬菌体—生物分型,共分出 32 个噬菌体型(表 2)和 12 个生物型(表 3)。噬菌体分型与生物分型相结合,能更准确地区分流行株和非流行株两类菌株,并且增加了型别。两类菌株区分标准如图:

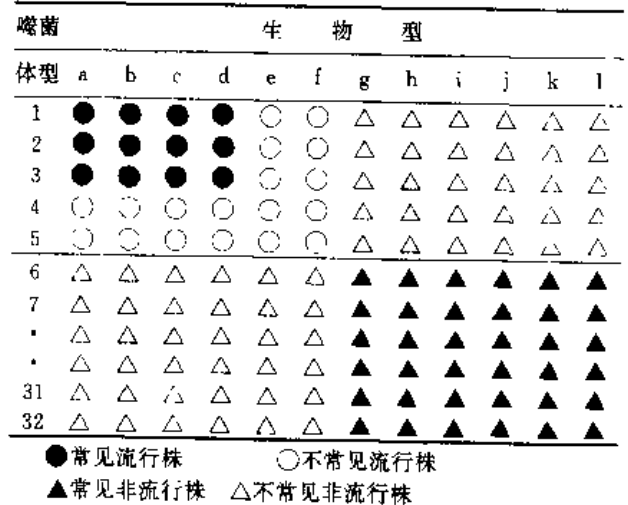


图 1 噬菌体—生物分型区分两类菌株的标准

分型噬菌体的特性研究(高守一等, 1984):五株分型噬菌体的噬斑形态、大小不等,各具特点。电子显微镜观察,VP1 为无尾噬菌体,其余为短尾,VP3、VP4 头部呈球形,其余呈六边形,仅 VP5 尾部末端有尾板。一级生长曲线试验表明,VP3 的潜伏期最短,VP2 最长,其他各噬体均在 38min 至 1h。裂解量 VP3 最少,其他均在 200~500 左右。热失活试验,VP5 对温度最敏感,50℃ 30min 明显失活,63℃ 全部失活,VP1~VP4 均在 70℃ 全部失活。抗噬菌体血清交叉中和试验证明,五株分型噬菌体在抗原性上均不相同,作为分型噬菌体具有良好的特异性。

表 1 分型噬菌体及其宿主菌

| 分型噬菌体 |        |      |    | 宿主菌 |       |            |
|-------|--------|------|----|-----|-------|------------|
| 名称    | 原号     | 年代   | 地点 | 来源  | 菌号    | 噬菌体-生物型    |
| VP1   | N68    | 1964 | 广东 | 井水  | N53   | 非 O1 群 26k |
| VP2   | Eφ3    | 1962 | 浙江 | 河水  | 16017 | 古典型 II     |
| VP3   | φ74    | 1962 | 福建 | 病人  | 2477  | 埃尔托型 Ir    |
| VP4   | 136    | 1962 | 广东 | 病人  | 919   | 埃尔托型 Ic    |
| VP5   | No. 63 | 1963 | 上海 | 江水  | 2477  | 埃尔托型 Ic    |

表2 埃尔托型霍乱弧菌噬菌体分型表 (流研所 1978)

| 噬菌体<br>类型 | 对分型噬菌体的敏感性 |     |     |     |     | 1966<br>分型表 | 1975<br>分型表 |
|-----------|------------|-----|-----|-----|-----|-------------|-------------|
|           | VP1        | VP2 | VP3 | VP4 | VP5 |             |             |
| 1         | +          | +   | +   | +   | +   | 1           | 1           |
| 2         | +          | +   | +   | -   | +   | 2           | 2           |
| 3         | +          | +   | -   | +   | +   | 3           | 3           |
| 4         | +          | -   | +   | +   | +   | 4           | 4           |
| 5         | -          | +   | +   | +   | +   | 5           | 5           |
| 6         | +          | +   | +   | +   | -   | 6           | 6           |
| 7         | -          | +   | +   | -   | +   | 7           | 7           |
| 8         | -          | -   | +   | +   | +   |             |             |
| 9         | -          | +   | -   | +   | +   | 9           | 9           |
| 10        | +          | -   | -   | +   | +   |             |             |
| 11        | +          | -   | +   | -   | +   |             |             |
| 12        | +          | +   | -   | -   | +   | 6           | 6           |
| 13        | -          | +   | +   | +   | -   |             |             |
| 14        | +          | -   | +   | +   | -   |             |             |
| 15        | +          | +   | -   | +   | -   | 10          | 10          |
| 16        | +          | +   | +   | -   | -   |             | 23          |
| 17        | -          | -   | -   | +   | +   | 11          | 11          |
| 18        | -          | -   | +   | -   | +   | 17          | 17          |
| 19        | -          | +   | -   | -   | +   | 12          | 12          |
| 20        | +          | -   | -   | -   | +   |             | 25          |
| 21        | -          | -   | +   | +   | -   | 13          | 13          |
| 22        | -          | +   | -   | +   | -   | 16          | 16          |
| 23        | +          | -   | -   | +   | -   | 15          | 15          |
| 24        | -          | +   | +   | -   | -   |             | 26          |
| 25        | +          | -   | +   | -   | -   |             | 24          |
| 26        | +          | +   | -   | -   | -   | 14          | 14          |
| 27        | -          | -   | -   | -   | +   | 18          | 18          |
| 28        | -          | -   | -   | +   | -   | 19          | 19          |
| 29        | -          | -   | +   | -   | -   |             | 27          |
| 30        | -          | +   | -   | -   | -   | 20          | 20          |
| 31        | +          | -   | -   | -   | -   | 21          | 21          |
| 32        | -          | -   | -   | -   | -   | 22          | 22          |

表3 埃尔托型霍乱弧菌生物分型表 (流研所 1978)

| 生物型 | 生物学性状 |            |       |      |
|-----|-------|------------|-------|------|
|     | 溶原性   | 对溶原噬菌体的敏感性 | 山梨醇试验 | 溶血试验 |
| a   | +     | -          | -     | +    |
| b   | +     | -          | -     | -    |
| c   | -     | +          | -     | +    |
| d   | -     | +          | -     | -    |
| e   | -     | -          | -     | +    |
| f   | -     | -          | -     | -    |
| g   | +     | -          | +     | +    |
| h   | +     | -          | +     | -    |
| i   | -     | +          | +     | +    |
| j   | -     | +          | +     | -    |
| k   | -     | -          | +     | +    |
| l   | -     | -          | +     | -    |

生物分型包括4项试验(流行所 1975): (1)溶原性和(2)对溶原噬菌体敏感性的检查,旨在区分溶原株、复愈株和非溶原株。EVC 两类菌株均含有这3种类型,只是流行株中溶原株和复愈株居多,而非流行株中非溶原株居多。(3)山梨醇试验是根据发酵快慢来区分两类菌株。流行株发酵慢,而非流行株发酵快。一般情况下,山梨醇试验与噬菌体分型区分两类菌株的结果一致,少数情况下,两者可起相互补充的作用。(4)溶血试验虽已失去鉴别古典型和埃尔托型的作用,但仍具有一定的流行病学意义。1961年第7次世界大流行开始阶段,EVC均为溶血株。国外自1962年、国内自1964直到现在,EVC流行株几乎全部为非溶血株,但非流行株中溶血株仍占多数或绝大多数。4项试验中山梨醇试验具有简易测毒作用,其余3项试验具有流行病学意义。

噬菌体—生物分型试验是在两枚双层琼脂平皿(噬菌体分型、溶原性检查)和两支试管(山梨醇发酵试验、溶血试验)中完成(《霍乱防治手册》1987)。

噬菌体—生物分型技术主要用于区分霍乱弧菌的两类菌株和作为流行病学工具查踪传染来源、分析传播途径和预测流行趋势。在病原学研究中,诸如对菌株的致病性、遗传变异、病原体的越冬机理和生态学研究以及菌苗研制等,只要涉及EVC都有两类菌株问题。在制定研究计划时就要事先明确以何种菌株为研究对象。

#### 参考文献

- 1 Takeya k, et al. "Prophage—typing" of El Tor vibrios. J Bacteriol, 1963, 85: 957~958
- 2 Ansari MQ, Pal SC. Phage typing of Vibrio cholerae O1 biotype EL Tor strains. Indian J Med Res [A], 1990, 91: 263~265
- 3 WHO Scientific Working Group, cholera and other vibrio—associated diarrhoeas. Bull WHO, 1980, 58: 353~374
- 4 WHO Scientific Working Group on Bacterial Enteric Infections. Recent advances in cholera research: Memorandum from al WHO Meeting. Bull WHO, 1985, 63: 841~849
- 5 卫生部卫生防疫司. 霍乱防治手册, 1987, 87~94
- 6 高守一. 埃尔托型霍乱弧菌流行株和非流行株两类菌株的研究及应用, 中华流行病学杂志, 1988, 9(特刊3号): 10~26.  
(中国预防医学科学院流行病学微生物学研究所高守一院士撰)

#### 埃尔托型霍乱弧菌的流行株与非流行株

epidemiogenic strain and non—epidemiogenic strain of vibrio cholerae El Tor 霍乱是由O1群霍乱弧菌(VC)引起的烈性传染病, 中国将其列为甲类传染病, 也是国际检疫传染病之一。O1群霍乱弧菌古典生物型(CVC)和埃尔托生物型(EVC)分别为古典霍乱(真性霍乱)和埃尔托霍乱(副霍乱)的病原菌。前者发源于印度, 历史上有过6次世界大流行。后者发源于印度尼西亚, 1961年开始向外扩散, 形成新的第7次世界大流行(高守一, 1986)。此后疫情不断扩大蔓延, 至今已波及五大洲140多个国家和地区, 尤以亚洲、非洲、拉丁美洲发展中国家受害最为严重。

EVC不同类型菌株早已存在。从戈茨利赫(K. Gorschlich, 1905)在埃尔托检疫站最初发现埃尔托弧菌(简称ETV, 现称EVC)这个溶血性VC开始, 到印度从自然水中以及中东从麦加Zam Zam圣井水中检出ETV, 都未因这种细菌引起霍乱问题。因此一直认为ETV不致病或仅引起轻度腹泻。然而1937~1958年印度尼西亚苏拉威西岛曾发生4次由ETV引起的副霍乱流行, 病死率虽高, 发病率低, 地区局限, 一般视为苏拉威西的地方病。其病原体ETV西里伯株斯与ETV埃及株和印度株是否相同存在怀疑, 然而对这些冠以地区名称的ETV不同菌株一直没有明确的区分方法。

埃尔托霍乱于1961年首次传入中国并引起流行。但在流行后, 人群中没有或很少有发病的情况下, 不断从外界水中查出



EVC。当时无法区分这些外环境中菌株与流行期间病人菌株是否相同,给防病工作造成极大困难。

中国医学科学院流行病学微生物学研究所于1966年选出中国分离的五株弧菌噬菌体,建立EVC噬菌体分型方案。对不同地区、不同时间、不同来源的EVC进行分型,发现一个重要规律,即来源不同的菌株,噬菌体型的组成显著不同。疫区省流行年的病人、带菌者菌株,约90%属于噬菌体1型,对五株噬菌体均表现敏感;而疫区省非流行年和非疫区的水中菌株,约90%属于噬菌体8~22型(按1966年分型表),对分型噬菌体表现不同程度的抗性。菌株的噬菌体型与本病流行之间存在密切关系,据此将EVC区分为“敏感株”与“抗性株”,这在流行病学意义上恰恰相当于“流行株”与“非流行株”两类菌株。EVC流行株与非流行株两类菌株论点的提出(高守一,1971),在霍乱防病工作中具有重要的实用价值和理论意义。1978年将分型方案发展为噬菌体~生物分型。噬菌体分型与生物分型相结合,区分两类菌株更为准确,并能分出更多型别。

两类菌株的致病性研究表明:流行株与非流行株在毒力(刘延清等,1983)、定居能力(董道玉等,1984),和产毒能力(祁国明等,1984)等均具有显著差异。以成免肠段结扎试验为模型,证明两类菌株的毒力强度分布不同。流行株、强毒和中等毒力的菌株占76.5%;非流行株、弱和无毒力菌株占93.7%,无强毒株。两类菌株粘附于小肠上皮细胞表面的能力差异显著,流行株粘附指数明显高于非流行株,两者在单位面积粘膜上粘附的活菌数平均相差100倍以上。扫描电镜观察,用流行株接种,在肠粘膜表面弧菌散在分布,在李氏隐窝附近密集分布,但用非流行株接种,在肠粘膜表面很难找到弧菌,在隐窝附近偶见极少弧菌。

分子遗传学研究证实,两类菌株DNA的G+C含量未见有何差异(徐兆焯等,1984)。但用Hind III等6种核酸限制性内切酶对两类菌株的染色体DNA进行酶谱分析,发现流行株均呈相同或极为相似的染色体酶谱,而非流行株酶谱类型繁多,但不具有与流行株一致的酶谱。证明两类菌株在基因组成上有显著不同(杨水民等,1986)。利用霍乱毒素(CT)基因探针进行DNA-DNA分子杂交证明,两类菌株存在有、无CT基因的根本区别。流行株除极少数菌株外,均具有编码CT的基因,而非流行株却不具有。同时发现,EVC流行株有两种类型的CT基因缺失株:CT结构基因缺失株和CT遗传单元缺失株。山东等地外环境中存在的无毒流行株即是CT结构基因缺失株(杨水民等,1988)。

噬菌体-生物分型,染色体酶谱分析和CT基因检测3项技术在区分两类菌株上结果相符,证明按噬菌体~生物型区分流行株与非流行株具有分子遗传学基础。

CVC的噬菌体~生物分型也属流行株,与EVC流行株的染色体DNA酶谱也极为相似。全染色体DNA探针同源杂交表明,CVC与EVC流行株近乎完全同源,而EVC非流行株则呈较低的同源性。从遗传学相似性出发,O1群霍乱弧菌古典型与埃尔托型流行株属于霍乱弧菌的流行株,埃尔托型非流行株与非O1群霍乱弧菌属于霍乱弧菌的非流行株(高守一,1988)。

用多位点酶电泳法对中国1961年以来不同地区EVC和某些CVC菌株进行分型,结果分出45个酶电泳型(ET)。流行株与非流行株分属不同的ET。经克隆系分析,绝大多数EVC流行株为一个克隆系,CVC为一个克隆系。EVC非流行株有12个克隆系(段广才等,1989)。

流行株与非流行株能否相互变异关系到两类菌株的遗传稳定性。流行株经<sup>60</sup>Co和噬菌体处理,所获得的基本与非流行株相似的突变型,其CT基因转印杂交带型虽有改变,但仍保留流行株的染色体酶谱。在强烈理化和生物因子作用下,流行株的染色体酶谱仍保持稳定,在自然情况下,染色体酶谱差异显著的两类菌株发生互变的可能性极小。

霍乱之所以被列为甲类传染病,不仅是其病死率可高达40%(及时治疗可降低病死率在1%以下),而且是这种病菌具有

引起流行、暴发、特别是大流行的能力。流行株即大流行株具有一定的噬菌体-生物型,一定的染色体酶谱和CT基因探针杂交带型。如1961年第7次世界大流行开始时印尼菌株和传入中国的菌株均为噬菌体-生物型1a,其后1b型成为优势株。1991年由秘鲁开始的拉丁美洲大流行,则为1d型。这种1d流行株已在亚、非一些国家流行多年。EVC非流行株中绝大多数为非产毒株或非致病株,某些非流行株也可产生CT、类似CT或其他致泻因子,引起散发腹泻,但不引起霍乱流行。

国外(日本、印度、苏联、英国)自60年代以来曾提出数种EVC噬菌体分型方案,但都没有区分两类菌株的作用。世界卫生组织(WHO,1980)鼓励研究用噬菌体分型方法区分O1群和非典型O1群霍乱弧菌(即产毒株与非产毒株),但至今未见报道。区分流行株和非流行株的论点,不仅符合霍乱流行病学特征,而且具有生物学和遗传学基础。因此比产毒株与非产毒株、致病株与非致病株的区分,在流行病学上更具有实际意义,在理论上的概念与含义也更为深化。

按两类菌株采取区别对待的防疫对策,集中力量加强对流行株的监测和控制,对非流行株则按一般感染性腹泻病菌处理,避免不必要的盲目性和扩大化,不仅可提高防疫效果,而且能节省大量人力、物力,取得显著的社会效益和经济效益。

(中国预防医学科学院流行病学微生物学研究所高守一院士撰)

## 流感嗜血杆菌及其菌苗研究的现状

current situation of haemophilus influenzae and its vaccine study 流感嗜血杆菌是1892年由Pfeiffer从流感患者的鼻咽分泌物中分离出来的,是G-短小杆菌,典型的流感嗜血杆菌具有荚膜,是一种可溶性的特异性多糖。Pittman根据荚膜多糖抗原的不同将其分为a、b、c、d、e、f等6个型,其中以b型的致病力最强,a和f次之。近年来又发现许多不可分型的菌株。本菌只有人类易感,主要通过呼吸道传播,一般冬春季发病较多,成人基本上不发病,主要在婴幼儿中引起脑膜炎、肺炎、中耳炎、会厌炎及关节炎等。在麻疹、百日咳等病后常可由它引起继发性感染,在慢性气管炎病人痰中经常发现此类细菌。

流行病学概况 1971年,Michaels报道从1945~1970年因流感嗜血杆菌(Hi)b型引起的脑膜炎患者中病人增加400%,而由脑膜炎双球菌引起的脑膜炎除在第二次世界大战后有两次小流行外,发病率一直较平稳,肺炎双球菌引起的脑膜炎发病率也一直不高。1972年Smith报道从1942~1968年在哥伦比亚儿童医院住院病人中Hib引起的脑膜炎增加399%,由于95%病人为5岁以下儿童,因此Smith称5岁以下儿童是这种疾病的“潜在的候选人”。1972年Parke报道在北卡罗来那州观察的结果,在Mecklenberg county发生的由Hib引起的86例脑膜炎中,最高发病年龄为3月到3岁,作者估计每年在美国至少大约发生1万例。Sproles报道由Hi引起的脑膜炎后遗症的发病率约为25%~50%,其病死率一直持续在5%~10%。

中国流行病学情况还不清楚,1989年北京首都儿科研究所曹玉璞大夫报告,从51例病人中用被动反向凝集及乳胶凝集试验检出10例阳性(19.6%)属b型,3例脑脊液培养阳性,均为b型菌株。

流感嗜血杆菌的诊断 流感嗜血杆菌的生长需要X、V因子,鉴定主要按世界卫生组织为西太巴印发的《急性呼吸道传染病实验室细菌检验手册》规定,有以下5点:(1)菌落特征,(2)菌体形态,(3)X、V因子生长试验,(4)与葡萄球菌同时生长,可见卫生现象,(5)血清学检验。

Dirks-go指出,细菌性脑膜炎的治疗需要快速的病原学诊断,G染色和培养是常规的方法,但是G染色不能证明准确的病原,而培养至少需要18h。Dochez指出所有方法都基于这样一个事实,就是特异的细菌抗原被释放在脑脊液中,肺炎双球菌、脑膜炎双球菌及流感嗜血杆菌在细胞的外层都有一层荚膜多糖,这是

一种可溶性物质,在有这些细菌感染时,人体内细菌达到一定浓度,检查方法恰当时,能够查出存在的抗原。根据文献报道,归纳有如下方法:对流免疫电泳、胶乳凝集试验、协同凝集试验、酶标及放免。胶乳和协同凝集试验在国外都有试剂盒出售,胶乳有英国 Wellcome 公司出的 Wellcogern、美国 Wampale 公司出的 Bactogen,协同凝集试验有瑞典 Pharmacia 出的 Phadeact 等,用这些试剂盒可以迅速检测标本(脑脊液、血清、尿)中的脑膜炎双球菌、肺炎双球菌以及流感嗜血杆菌的抗原,在几分钟之内可以得出结果。

**内毒素** 流感嗜血杆菌能产生内毒素。Hi 感染产生的许多疾病有不少症状是由它引起的。其内毒素在生物学活性方面与典型的沙门氏菌及大肠杆菌是相似的, Flesher, Inzana, Seitz, Zamze 等先后报道了 Hi 的 LPS 组成。Mjana 通过 Fast atom homotomdment-mass spectrometry 测定表明其低聚糖部分的分子量为 1768~1810, 这比沙门氏菌变异株 R345 核多糖部分还略小些。他还报道了 EagLOS 的抗体应答及 LFO 的抗体活性。Flesher 认为 LPS 能产生抗体,他用纯化了 LPS 与全菌免疫血清作琼脂扩散试验,结果发现在其相应部位有沉淀线出现,而不同型的菌株 LPS 只有微弱的沉淀线出现。Flesher 通过 HA 试验,提出至少有 3 种不同的抗原因子存在于 LPS 内,而与流感嗜血杆菌的血清型无关。Shenep 报道了 Hib 引起脑膜炎以后人的抗体应答情况。他发现在急性期时有近 1/2 病人有很高的 LPS 抗体但是居然发病,这一结果表明,这些 LPS 抗体没有保护作用,虽然 Flesher 报道, Hib 的 LPS 抗体是杀菌抗体,具有保护作用。Shenep 认为 LPS 是一个复杂的细菌抗原,有几个不同的抗原决定簇,仅仅其中某些可以刺激保护性抗体产生。关于 LPS 的免疫原性问题有待进一步研究。

**菌苗研究的进展** 对菌苗研究的情况大致可分两个阶段,1980 年以前基本上是关于 Hib 多糖菌苗的提取、鉴定及现场效果观察的报道,1980 年以后则主要是从事多糖抗原与载体蛋白结合的结合菌苗的研究,载体蛋白多用白喉类毒素、破伤风类毒素、流脑 B 群外膜蛋白等。目前正在进行着大规模人群效果观察。

1. 关于多糖菌苗的研究, Rodrigues 等系统报道了关于 Hib 荚膜多糖的提取及其物理化学、血清学特性。Zanenhof, Rosenberg 等人早就报道了 Hib 的型特异荚膜多糖的主要成分是磷酸核糖的聚合物。现场试验结果表明抗体活性与性别、民族或地区无关,与给予的抗原剂量也无关,无 Booster 效应,而与接种者的年龄有密切关系。2~6 月婴儿只有 7% 有显著抗体上升,7~12 月者有 17%, 2 岁者有 65%, 3 岁者有 83%, 1 岁以下婴儿对 Hib 多糖菌苗基本上无反应,而正是这个年龄组发病率较高。Parke 报道约有 60% 保护率,所以纯化了 Hib 多糖在预防婴幼儿由 Hib 引起的疾病方面不是理想的菌苗。Peltola 也有类似的报道,他用 Hib ps. 菌苗给近 5 万名 3 个月到 5 岁的婴儿免疫,以 M-A 作对照,注射后无论局部或全身反应均轻微,3~17 月年龄组免疫组与对照组之比为 0.36:0.34 $\mu\text{g}/\text{ml}$ ;在 18~23 个月年龄组则是 0.72:0.40 $\mu\text{g}/\text{ml}$ ;在 24~71 个月年龄组是 2.51:0.51 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 。作者指出接种不改变带菌率,现场观察两年,结果一致。

2. 关于结合菌苗的研究,1929 年 Gohtel Aveny 等制备了肺炎 III 型多糖与蛋白的结合菌苗,单纯的多糖对家兔是没有免疫原性的,而与蛋白结合以后则诱导了高水平的血清抗体,且能保护活菌的攻击。1974 年 Lindherg 等报道了沙门氏菌的双糖与蛋白结合物在小鼠中的免疫原性。1979 年 Svenson 报道了 O 抗原的 Oligosaccharid-P 结合物能保护沙门氏菌的感染,这些研究者都是应用的非共价结合物或者非共价复合物。

Schneerson (1980) 首先应用 ADH 作为 Spacer, 将多糖与蛋白共价结合起来,此结合物用琼脂扩散试验与分型血清能见单一的沉淀线,在小鼠中能诱导抗 b 型抗体的上升,有 Booster 效应,用 2.5 $\mu\text{g}$  剂量,其杀菌抗体滴度明显增高,从 1/20 到 1/525 与

对照组相比,有显著差异,而 PS 与 PS 结合物则无增加,这种合成的结合物能诱导保护性抗体的产生,不仅对 PS,而且对载体蛋白。作者认为已经提供了某些证据说明 Hib 多糖已从依赖胸腺转到依赖胸腺的免疫原。

到目前,至少已有 3 种制剂拿到人体观察许可证,现在仍在进行着大规模人群效果观察。PRP-D (1986) 在芬兰现场试验的结果表明其保护率可达 94%, 而同样制剂在 Alaska 其保护率只有 35%, 这可能因为在 Alaska 婴幼儿对疾病敏感程度不同及与 Hib 菌接触更频繁,该菌的毒力更强,该地的 Hib 引起的疾病的发病率比美国其他地方高 10 倍的原因。Hboc(al) 结合菌苗其保护率可达 100%, PMPC 结合菌苗可超过 90%。

**展望** 由流感嗜血杆菌引起疾病的发病率虽然不是很高,病死率为 5%~10%, 但由于中枢神经系统受到损伤所引起伤残的发病率仍高达 25%~50%, 这给社会、家庭带来的经济上、精神上的负担是很大的。在 1977 年, Robbins 曾经提出该病虽然未被列入常规的预防接种计划,但它的危害大大超过那些已列入计划免疫的疾病。在美国,由国家免疫实施咨询委员会建议,从 1985 年起已将 Hib 多糖菌苗列入常规的预防接种计划,对 2~6 岁儿童实施免疫接种,现场试验结果表明,该菌苗对 18~71 个月婴幼儿保护率可达 90%, 但由于菌苗是一种不依赖胸腺的免疫原,所以小于 18 个月的婴儿对它基本上无反应,而正是这个年龄组发病率较高,因此必须研制更有效的菌苗。从 1980 年以后,大多是进行多糖抗原与载体蛋白结合菌苗的研究。从现场试验的结果看,该菌苗是安全的和有效的,其抗体应答明显高于单纯的 PS 菌苗,而且比混合 (+DPT) 菌苗也好,在芬兰其保护率可达 93%, 对该菌苗目前正在进行大规模人群效果观察,有望成为正式产品,以代替目前使用的单纯的多糖菌苗。

近几年在对流感嗜血杆菌外膜蛋白的研究中, Murphy 发现 P6 存在于所有可分型的与不可分型的菌株中,其分子量为 16000d, 能产生杀菌抗体。中国对流感嗜血杆菌报道尚少,对其流行病学情况尚不完全了解,有待进行这方面的工作。

#### 参考文献

- 1 Richard H, Michaels, MD. The New England Journal of Medicine, 1977, 285, 666~667
- 2 Louis P, Rodrigues, Rachel Schneerson and John B. Robbins Journal Immun. 1971, 107, 1071~1080
- 3 Edward W P, Smith Jr. Md, Ralph E, Haynes, MD. Pediatrics, 1972, 50, 723~727
- 4 Parke J C Jr, R Schneerson, J B Robbins, et al. Journal Inf. Dis. 1977, 136(Suppl)S51~56
- 5 Alan R, Flesher, Richard A. Insel, The Journal of Inf. Dis. 1978, 138, 719~730
- 6 Rachel Schneerson, Osmar Barrera, Ann Sutton and John B. Robbins, The Journal of Exp. Med. 1980, 152, 361~376
- 7 Jerry L, Shenep, Robert S, Munson Jr, et al. Journal Inf. Dis. 1982, 145, 181~190
- 8 Ro A Clesson, MD, Birger Trollfors MD, ,teresa Lagergardph D, et al. The Journal of pediatrica, 1988, 112, 695~702
- 9 Eugene D, Shapiro, Lisa A, Capobianco, Anne T, Berg, et al. The Journal of Inf. Dis. 1989, 160, 1064~1067
- 10 吴丽华. 微生物学免疫学进展, 1990, 3, 79~85

(卫生部北京生物制品研究所吴丽华研究员撰)

#### 钩端螺旋体况况研究

study on the present situation of leptospira 钩端螺旋体简称钩体,根据生物学特点,系钩体属的“种”。目前公认钩体属只有 1 个种,又分两个复群,即问号状钩体,为致病性或寄生性钩体;双曲钩体,为非致病性的或腐生性的钩体。近年来,对部分来自猪尿及水体的钩体作了血清学分析,发现一种“中间型”钩体,它具有腐生性,在一定条件下又有

致病性,在今后分类学上似有增加一类的必要。

1800年Larrey在埃及发现黄疸出血型病人。1850年Hofer发现狗患有钩体病。1883年Landouzy明确认识了传染性黄疸的特殊性,并指出在污水沟工作的人易得此病。1886年威耳(Weil)对4例伴有黄疸的急性发热病人作了详细描述,其特点为发热,严重的神经症状,肌痛,黄疸,肝脾肿大、肾功能衰竭和出血倾向,故命名为威耳(Weil)病。1888年瓦西里耶夫等从临床表现上与其他黄疸型疾病分开。直至1907年Stimson从“黄热病”患者组织标本中证明有钩端螺旋体的存在,一直未获纯培养。1915年,日本福田、井户才分离出病原体。此后,证实日本的秋季热、七日热,德国的秋热症、泥热,俄罗斯的沼泽热、水热,意大利的田野热、收割热,这类疾病的病原体是一群致病性的钩端螺旋体。

云南省双江县,从1918年至1948年曾发生7次“黄皮病”流行,1948年的流行,其病死率约为10%~20%。1923~1934年间,河南开封、商丘等地有钩体病流行,开封有万余病人。1926年山西太原有此病记载。1933~1935年间,每年在沈阳有病例发生。1937年汤泽光报道了3例典型出血性黄疸型钩体病。1940年钟惠兰记载,在实验室内犬钩体使人感染。

解放后在病原学流行病学有长足的进展。世界上已知有20个血清群,167个血清型(1979年Tofen报道)。中国现已确定有16个群,56个型,为世界发现群型最多的国家。其中,蚤耗群是我国1964年在云南发现的新菌种。截止1977年3月,云南省发现13群,46型,是中国钩体血清型最复杂的省份之一。据Galton统计,大约有25个新的血清型是在澳、非、欧3洲以及马来亚和美国发现的。群型随着时间推移是变数。

表1 中国常见致病钩体菌株及代号

| 血清群  | 血清型  | 国内代号  | 血清群  | 血清型  | 国内代号  |
|------|------|-------|------|------|-------|
| 黄疸出血 | 黄疸出血 | 70124 | 波摩那  | 波摩那  | 56608 |
|      | 沃尔登  | 56601 | 流感伤寒 | 流感伤寒 | 56609 |
| 爪哇   | 爪哇   | 56602 | 七日热  | 七日热  | 56610 |
| 犬    | 犬    | 56603 | 七日热  | 中和   | 56611 |
| 拜伦   | 拜伦   | 56604 | 巴达维亚 | 巴叶赞  | 56612 |
| 致热   | 致热   | 56605 | 蚤    | 蚤    | 56613 |
| 秋季热  | 秋季热  | 56606 | 蚤耗   | 蚤耗   | 67003 |
| 澳洲   | 澳洲   | 56607 | 七日热群 | 委利斯  | 67028 |

钩体的基本结构系由圆柱形菌体、轴索及荚膜所组成,长短不等,平均为6~10μm(4~20μm),宽约0.3~0.5μm,有12~16个细密螺旋,因其一端或两端有小钩,故名钩端螺旋体。菌体无鞭毛,似细小串珠,呈“S”状或“3”状,主要长轴旋转,两端扭动或菌体伸缩匍匐前进,运动非常活泼。在电子显微镜观察下,其结构可分为螺旋形的原生质、中轴、鞘膜和尾球四个部分,又分为细胞壁、细胞膜、致密层与透明层,胞浆中DNA系遗传学密码。

钩体在暗视野显微镜下清晰可见。钩体革兰氏染色呈阴性反应,但因菌体纤细较难观察到,故一般用镀银染色法,此时钩体染成黑色或褐黑色。钩体含两种抗原,一为群特异性抗原,一为型特异性抗原。由于两种抗原搭配的质和量不同而形成许多血清型。

钩体在外环境中,对日光、干燥与一般消毒剂抵抗力弱,如加热50℃,5~15min死亡,加热60℃,10min可杀死。对冷抵抗力较强,于2℃冰箱中放置半个月仍生长良好。在潮湿的泥土中可存活相当长的时间,甚至可达3~6个月。若动物宿主之尿污染土壤后,可存活15d。当雨水冲洗土壤后,其在雨水中可存活24d。此外,将野生动物之含钩体尿液污染自然疫源地各种生境之土壤表面,发现在湿度为69%~70%的土壤中可以越冬,保持毒力达279d之久。对酸碱均敏感,1:2000来苏水、0.25%福尔马林和75%酒精,能迅速灭活,在胃酸中30min能被杀死,自来

水中含余氯0.3mg/L,3min可死亡。钩体在水中或潮湿土壤中生存时间视水温、酸碱度、化学成分及微生物等情况不同而异,一般为12h至9个月。

钩体在自然界动物中广泛存在。中国已发现6个纲的56种动物带菌。已知有哺乳纲、鸟纲、鱼纲、两栖纲、爬虫纲、昆虫纲的动物带菌。其中以鼠类和家畜的流行病学意义最大。现已证实有26种以上的鼠类和6种以上食种目动物分离到钩体。但因地理环境、气候条件有差异,各地动物带菌状况不尽相同,如黑线姬鼠是四川、贵州、陕西、浙江等省的主要带菌动物。四川调查黑线姬鼠带菌率为18%~60%,排菌时间长达1054d。福建证实罗赛鼠是当地优势带菌动物及人钩体病的主要传染源。常见带菌鼠还有黄胸鼠、褐家鼠等。鼠类带菌特点是菌群复杂,强毒株居多。一般多为黄疸出血群、澳洲群、犬群等。

猪可感染各型钩体。国外自猪分离10群以上,中国已超过14群,但绝大部分地区均以波摩那群为主。梁兆祥等(1973)在云南省泸西县首次从猪肾中分离出3株波摩那群钩体。

家畜中分离到钩体的还有马、牛、犬、猫、驯化鹿等,但作为传染源的意义不及猪;放养猪的带菌率可高达45.9%,排菌期限可达371d。猪的发病和死亡,往往成为人群钩体病流行的先兆。

犬在农村是钩体病的另一个主要带菌动物和传染源,犬群钩体对人有高度致病性。现已从犬分离到钩体8群,排菌期达700d。

在长鬣蜥、青蛙、蟾蜍、秧鸡、毒棘蜥等中分离到钩体,云南从牛、羊、野猪、野猫、狐、麝子、牛背鹭中分离到钩体。牛背鹭,在云南边疆分布甚广,从它的身上分离出一株牛型钩体,此乃国内首次从鸟类中分离出致病性钩体。

1980年,梁兆祥等在蚤耗从马铁菊头蝠中分离到1株流感伤寒群钩体;他们又在青蛇中分离出七日热型钩体。

世界各地钩体的自然宿主相当广泛,已有100余种。如阿根廷从猞猁中分出巴达维亚群钩体;阿塞拜疆地区的外高加索刺猬是钩体的储存宿主。

人对钩体普遍易感,凡是使动物致病的钩体都可使人类患病。钩体传播的途径是多种多样的,但经污水传播占首位,实验室感染、先天性感染已被证实,吸血昆虫传播有可能。本病潜伏期为1~40d,多在4~19d发病。

临床症状和体征 起病急,突然发热,畏寒或寒战,头痛与全身痛,乏力,眼结膜充血,腓肠肌压痛,淋巴结肿大及压痛。这些构成早期钩体病常见的“三症”(寒热、痠痛、全身乏力)和“三征”(眼红、腿痛、淋巴结大)。此外,还可能有咽充血,咳嗽,鼻衄,痰中带血,饮食减退,恶心、呕吐、腹痛、腹泻,对称性鼻、唇、腋部单纯性疱疹,部分病例可见肝脏轻度肿大等。

实验室检查 常规化验:(1)白细胞总数及中性粒细胞正常或轻度增加者多,总数高于20000/μl或低于4000/μl者少见。(2)血沉常持续增高。(3)早期尿中可查出蛋白、红细胞及管型,发生率高达70%~80%。特异性检验:(1)暗视野和镀银染色查病原体。(2)病原培养。(3)血清学检查,如凝溶试验、炭凝试验、乳凝抑制试验、荧光及酶联免疫吸附试验等。

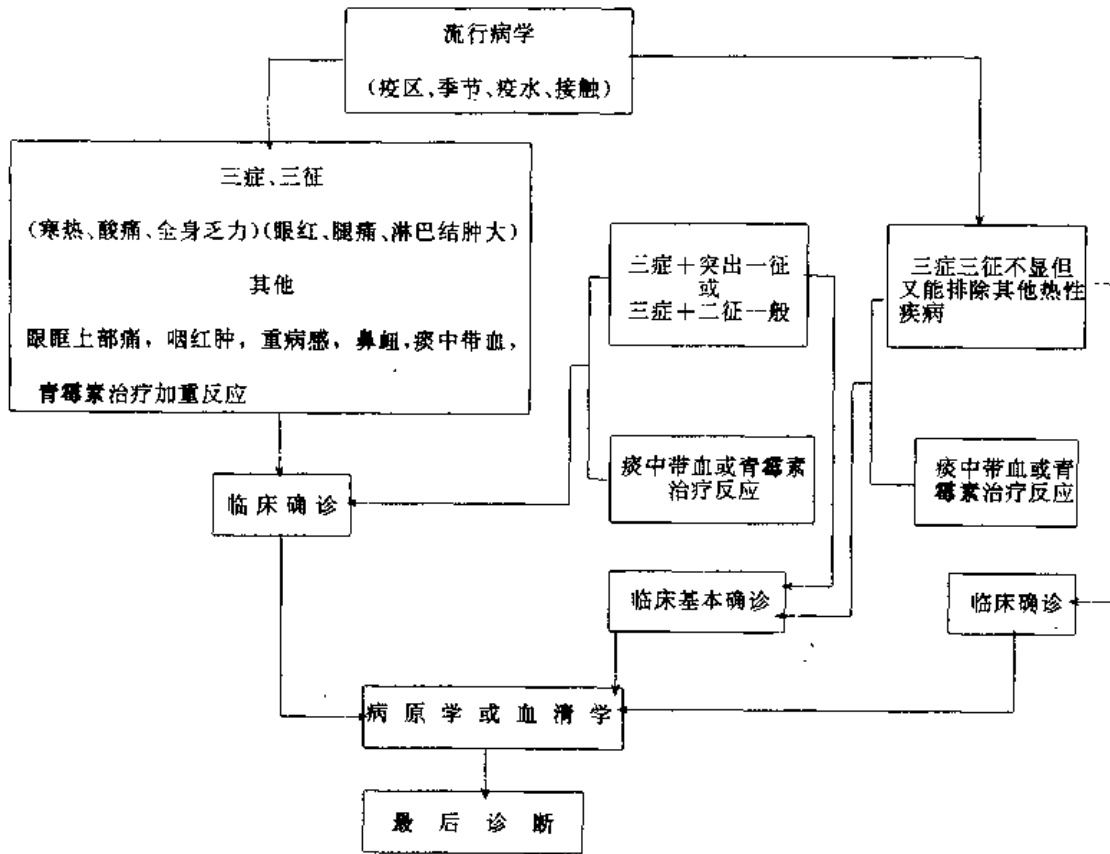
诊断 参见下图。鉴别诊断主要应与上感、伤寒、败血症、出血热、肺炎、肺结核等几种常见的发热性疾病相鉴别。

治疗 (1)抓好“三早一就”,即早发现、早诊断、早治疗和就地收治。(2)及时使用抗菌治疗和中西医结合治疗,抗生素首选青霉素,首剂40万单位肌注,每日160万单位;对青霉素过敏者可用庆大霉素,首剂8万单位,每日16万~24万单位或四环素每日2g,重者可先静滴1g,腹泻重者上述药物加氟喹诺酮。首剂用青霉素后可出现赫氏反应,30min~4h内出现体温再升高,症状体征加重甚至休克。为避免强烈的赫氏反应可减小首次使用剂量为20万单位。如出现较重反应则可迅速使用激素及镇静脱敏药物。

研究任务 (1)病原学研究,无钩钩体生物学特性实验研究,杨文映等(1984)自人分离到形态变异为两端无钩的钩体

Le205株,属波摩那群波摩那型,已感染地鼠浸染豚鼠,免疫免。  
 (2)流行病学研究:如疫源地结构的调查研究,钩体病流行菌群的更迭研究,钩体病疫情预测探讨,钩体病爆发的流行病学病原学特点,从土壤中分离致病性钩体,开展以实验诊断为依据的发

病率调查,钩体病地理流行病学等等。(3)临床学研究:钩体病与其他传染病寄生虫病混合感染的研究,药物消除带菌效果的观察,超滤浓缩钩体菌苗免疫效果观察。



钩端螺旋体病诊断标准图

参考文献

- 1 Ostertag H Z. Hyg. Infektr, 1950, 131: 482~500
- 2 Li H Y, et al. Am. J. Hyg., 1952, 56: 90~100
- 3 梁兆祥. 实用流行病学. 1980, 157
- 4 耿贯一. 流行病学. 北京: 人民卫生出版社, 1981, 4: 317
- 5 徐恩雪. 流行病工作手册. 北京: 人民卫生出版社, 1986, 1: 209

(云南省昆明市卫生防疫站梁兆祥副主任医师撰)

**鼠疟原虫** rodent malaria 鼠疟原虫的发现不仅丰富了疟原虫生物学知识,而且在疟疾的化疗、免疫和病理学等方面的知识也因而大大地扩展了。鼠疟原虫作为疟疾各方面研究的实验模型是最经济的和最容易获得的。

1948年文克和利普斯(L. H. Vincke & M. Lips)正式报告在非洲扎伊尔加丹地区发现伯氏疟原虫以后,引起了全世界疟疾学家群起研究此疟原虫,仅仅10年之间,有关这原虫的研究论文达500余篇。这个发现可以说是疟疾实验研究的里程碑。自此以后,比、法、英等国又发现了3种鼠疟原虫,即文氏疟原虫,夏氏疟原虫和约氏疟原虫。并且文氏疟原虫除指明亚种以外,尚有3种亚种,即 *P. v. lentum*, *P. v. petteri* 和 *P. v. brucehwatti*; 夏氏疟原虫,除指明亚种以外,尚有1种亚种,即 *P. c. adami*; 约氏疟原虫除指明亚种以外,即 *P. y. hilliki* 和 *P. y. nigeriensis*。所以到目前为止鼠疟原虫公认4种,共有10个亚种(包括指名亚种)。虽然鼠疟原虫的分类一向有争议,但自从卡特和沃林克(H. Carter &

W. walliker)运用电泳方法研究这些疟原虫红内期的同功酶以后,对于上述种和亚种的分类,大家的意见渐趋比较一致。

(1)伯氏疟原虫。1946年文克在扎伊尔加丹省高山森林里发现一树鼠寄生有一种疟原虫,经检查,文克和利普斯于1948年正式命名为 *P. berghei*。此种树鼠鉴定为 *Grammys surdaster*, 是一种丛林中树上生活的树鼠,体长约10cm,在离地2.5m的树穴中能找到,也常能在地上行走。 *Praomys jackson* 和 *Leggacela bel laye* 亦可为伯氏疟原虫所感染,但不普遍。约利(M. Yoeli 1965)初次用孢子试验,树鼠最为敏感,幼稚大鼠和仓鼠次之,小鼠最差。范登堡(J. P. Vanderber, 1968)等报道树鼠中有48%的子孢子发育为红前期,幼稚大鼠有15%的子孢子发育成红前期,而小鼠反有2%的子孢子发育成红前期,其红前期的大小、释放裂殖子的数量也不同,努圣兹维(R. Nussenzweig, 1966)等将感染有子孢子的斯氏按蚊研磨离心沉淀,在4℃条件下,腹腔接种250 000子孢子给树鼠、幼稚大鼠、仓鼠和小鼠,结果和约利所报道一致;树鼠最敏感,幼鼠大鼠和仓鼠次之,小鼠最差,动物感染率分别为100%, 98(80~100)%, 94(80~100)%和35(175)%。陈林等(1981)用伯氏疟原虫(ANKA株)感染c57BL, 615, ICB/JCI, SMMC/B, SMMC/C和昆明株等6株经尾静脉接种子孢子, c57BL, 615和 ICB/JCI 易感性在85%~93%之间, SMMC/C和 SMMC/B在45%~65%之间,昆明株仅26%。由此说明不仅各鼠种对伯氏疟原虫的子孢子敏感性不同,就是同一种小鼠,由于品系(株)不同敏感性也有差异。

不同品系的小鼠对输血感染伯氏疟原虫,其动物阳性率都为100%,但其疟原虫感染率和感染过程有所不同,例如格林伯

格和肯德里克(J. Greebergh NI & L. P. Kendrick, 1957)用6个近交小鼠经输血感染伯氏疟原虫,结果 Swiss 株第1周原虫血症达到高峰,c57BL 第1周原虫血症中等程度,但鼠存活时间最长,STR 株的原虫感染率最低。戴祖瑞等(1983)报告伯氏疟原虫(ANKA)输血感染c57BL,615,ICR/JCL 和 SMMC/C 株小鼠,阳性率也均为100%,感染6h后,即可出现原虫血症,原虫血症密度也基本相似,并都在18d内死于原虫血症。

罗马亚(M. L. Ramaya, 1988)应用不同动物的红细胞进行伯氏疟原虫体外培养,结果培养至96h各种动物红细胞原虫感染率(%),小鼠为53.47±0.64,田鼠为61.13±2.39,大鼠为15.67±4.32,天竺鼠为10.05±2.83,猴为止3.8±0.20,其它动物的红细胞原虫感染率仅为0.2~4.40;并且在田鼠、天竺鼠、猴、大鼠和马的红细胞中,可连续4周以上稳定性繁殖。

(2)约氏疟原虫。1965年兰多(L. Landau)等在中非,从野外扑到的另一类树鼠(*Thamnomys rutilans*)中找到这种疟原虫。约氏疟原虫经输血或子孢子途径均易感染所表现的差异性更明显。沃里(M. Wery, 1968)用2株小鼠进行比较观察,指出BALB/C株比Theiler's original株较敏感。金(M. E. King, 1972)等用Ha/ICB鼠株实验,动物阳性率为100%。芬克(E. Fink, 1974)用NMRI鼠株静脉接种约氏疟原虫(17X株),动物阳性率97.3%。黄家章(1983)用约氏疟原虫(BY265)子孢子腹腔感染9株纯系小鼠和1株远交小鼠,比较出SMMC/C纯株最为敏感,动物阳性率为100%,呈现前期(Perpatent Period)平均为4.22d,并且各鼠出现的时间比较一致;输血感染10株小鼠均为100%。高兴政等报道约氏疟原虫在裸鼠与ICR纯系小鼠体内发育不同,红细胞原虫感染率上升幅度小,死亡日期明显推迟,裂殖体率低,每个裂殖体数少,但多感染率和配子体率都高于纯系小鼠。

(3)文氏疟原虫。文氏疟原虫的指名亚种(*P. v. vinckei*)的自然宿主疑为*G. surdaster*,其它几个种亚种的自然宿主均可能为*T. rutilans*。文氏疟原虫输血和子孢子均易感染小鼠,但对大鼠、棉鼠和仓鼠不易感染。如巴福特(J. M. Bafort, 1971)用文氏疟原虫子孢子(*P. v. vinckei*)感染各种鼠后指出小林姬鼠(*Apodemus sylvaticus*),狩猎田鼠(*Microtus agerstics*)和小石鼠(*Chethronomys glareolus*)是敏感的;*Mastomys (Praomys) natalensis*, *Peromyscus maniculatus*, *Sigmodonhispidus* 和 *Acomys cahiriseus* 为中等度敏感,显示出了某种程度的抗性;而大白鼠,拟灰仓鼠(*Cricetus gririnus*),肖氏沙鼠(*Meriones shauj*),长爪沙鼠(*M. unguiculatus*),金塔沙鼠(*M. pyramidium*),兔尾鼠(*Lagurus lagrus*),似伏兔(*Lepus conicubus*)和豚鼠(*Cavia cavya*)是不敏感。

(4)夏氏疟原虫。夏氏疟原虫的自然宿主为*T. rutilans*,在森林中除自然宿主*T. rutilans*敏感外,还对*Mastomys coucha* 和 *Hybomys umivittatus* 敏感。大白鼠、仓鼠和豚鼠均不敏感,但小鼠不论输血和子孢子均易感染。

在自然界 *P. berghei* 的唯一蚊虫媒介是 *Anopheles durenii*, 同时也是 *P. v. vinckei* 的媒介;而其它鼠疟原虫尚未在自然界找到蚊媒。在实验室所有的鼠疟原虫均十分易感斯氏按蚊。另外 *P. berghei* 的实验媒介尚有 *A. I. atoparus* 和 *A. aztecus* 等;但 *A. albimanus*, *Aedes aegypti* 和 *Culex salinarius* 却不敏感。*P. yoelii* 的实验媒介尚有 *A. sudaicus* 而 *A. I. atoparus*, *A. b. balacensi* 和 *A. quadr imaculatus* 不敏感。

由于各种鼠疟原虫来自不同的自然环境和实验室宿主的不同易感性,在实验室培养驯化须适应各种非自然宿主,可在生理、毒力等方面产生变化。甚至在遗传上可产生基因突变,还有营养、宿主年龄等因素,因此要叙述一个标准(典型)的生活史过程比较困难。一般来说,子孢子进入宿主,红前期发育大概需2d左右,红细胞期裂殖增殖周期需24h左右红细胞感染后原虫密度急剧或逐步地上升,达到高峰后突然或徐步地下降,宿主死亡或转入隐性感染。蚊媒叮吮宿主,吸入配子母体在适宜温、湿度条件下,孢子增殖大约需10~14d左右。

(空军总医院黄家章副研究员撰)

### 鼠疫耶尔森氏菌的毒力决定基因 virulence determinant genes of yersinia pestis

鼠疫之所以能造成三次世界性大流行,是因为它的病原体鼠疫耶尔森氏菌具有异常强大的毒力。在 E. E. Baker, T. W. Burrows, K. Higuchi 和 R. Ben-Gurion 等工作基础上,世界卫生组织鼠疫专家委员会确认 FI 抗原、V 和 W 抗原,色素沉着能力和产生鼠疫菌素为鼠疫耶尔森氏菌的毒力决定因子。

现代生物学方法的引入,使阐明毒力决定因子的基因控制和它们的致病机理成为鼠疫耶尔森氏菌的毒力研究的重点。已有的资料表明,鼠疫耶尔森氏菌的毒力主要由以下几方面的因素构成:

对抗宿主吞噬细胞机制的能力;当鼠疫菌经蚤类的口器最初进入哺乳动物或人类的机体时,它们很容易遭到宿主吞噬细胞的吞噬,但能耐受吞噬细胞内的杀菌作用。以哺乳动物较高的体温和吞噬细胞内的低钙离子浓度环境为信号,鼠疫菌首先停止分裂繁殖,其意义在于使其能够耐受细胞内的杀菌机制,然后表达一些对吞噬细胞具有毒性作用的蛋白质 YOPs 帮助它们从吞噬细胞中逃逸出来。鼠疫菌的这一毒力机制是由存在于 45MD 质粒上的一组基因所决定的。这些基因构成多级操纵子系统,并表达多种蛋白质,其中包括作为这一系统标志的 V 抗原。这一质粒的缺失或损伤,将导致鼠疫菌对所有宿主的毒力丧失。鼠疫菌在宿主机体内生活一定时间之后,其表面将形成一层蛋白质构成的封套,大量激活并消耗补体,阻碍吞噬细胞的吞噬活动,从而使鼠疫菌不再被摄入细胞内进入停滞状态,而保障它们在体液环境中的高速繁殖。这种蛋白质即为 FI 抗原,现已确定其基因位于鼠疫菌最大的一个质粒之中,但因其两端的插入序列,该基因很容易整合到染色体中。FI 抗原缺失的菌株,只丧失对部分动物的毒力,对小鼠仍是强毒的。在褐家鼠中,也可能经过较长的潜伏期而发展成腺鼠疫。

在宿主机体内播散的能力;鼠疫菌还携带着一种 6MD 质粒。其上编码着 3 个基因,凝固酶和胞浆素元活化因子结构基因 *pla*、鼠疫菌素结构基因 *pst* 和鼠疫菌素耐受基因 *pim*。其中 *pla* 基因可以编码一种 38K 的蛋白质,经两次水解之后转化为活化的 *pla* 蛋白,它具有两种不同的酶活性,在 20℃ 时,它促使血浆凝固,这有利于鼠疫菌在蚤类前胃中形成菌性,促进鼠疫的传播;而在 37℃ 时,这同一种蛋白质又主要显示胞浆素元活化因子的活性,激活宿主的纤溶系统,溶解血块,有利于鼠疫菌播散。*Pla* 蛋白是一种丝氨酸蛋白酶,它还有一种独特的性质,即能够降解鼠疫菌 45MD 质粒所编码的蛋白质 YOPs。关于这种性质对毒力的影响有两种不同的见解,一种看法是, YOPs 的降解产物才是真正决定鼠疫菌毒力的成份;另一种观点则认为,鼠疫菌 YOPs 的降解只是一种实验室假象,由于宿主体内存在着大量的胞浆素元作为 *Pla* 蛋白的基质, YOPs 在宿主体内实际上并不遭到降解。另两种基因对鼠疫菌毒力的影响也尚无定论。6MD 质粒的缺失或损伤,造成鼠疫菌毒力一定程度的下降。当这种类型的鼠疫菌由皮下途径进入动物机体时,基本上没有致死能力;而腹腔注入时,具有中等程度的毒力;直接注入静脉,这种类型的鼠疫菌仍是强毒的。

由宿主机体摄取铁元素的能力;哺乳动物机体,存在着强有力的摄铁系统,以保证铁元素的有效利用。细菌摄取铁的能力是决定细菌能否在宿主的体液环境中迅速增殖最终形成败血症的最重要的因素之一。鼠疫菌具有两种相互关联的铁摄取机制。其一是同其它致病的耶尔森氏菌共有的,当它们在缺铁环境中生长时,可以表达两种高分子量的铁调节蛋白;这些铁调节蛋白可能是存在于外膜上的铁转运机制,它能够与宿主体内形成的高铁血红素结合,并从高铁血红素分子上将铁离子直接转运至细胞内。铁调节蛋白的基因是染色体基因,已经克隆了其中一条蛋白带的结构基因。另一种机制似乎为鼠疫菌所特有,它能从低浓度的含

铁血红素的环境中,将高铁血红素吸附在菌体表面。当鼠疫苗在含有氧化血红素的培养基上生长时,菌落变成黑色。这能力被称为色素沉着能力。也已识别了一条为色素沉着的鼠疫苗独有的外膜蛋白带,编码与高铁血红素结合的蛋白及铁转运蛋白的结构基因位于细菌染色体中的相互邻接的区域之中,也是由于这一区域的两端具有插入序列样的结构,使这组基因的表达特别容易缺失。单纯缺失色素沉着能力的鼠疫苗株仍保持一定程度的毒力,但它在宿主体内增殖的速度较慢,因而经皮下感染时,它不能使动物致死,但能在宿主体内增殖到一定的程度;而经静脉注入时,它仍为强毒。

毒素:与其它的革兰氏阴性菌一样,鼠疫苗的脂多糖成份也具有内毒素活性。它还有一种蛋白质毒素,由于鼠科动物对其特别敏感而称为鼠毒素。这两种毒素均为菌体结合毒素,只有当菌体大量破溃时才发挥作用。而在濒死动物中,每克脾脏含菌高达 $10^{10}$ 以上,因而细菌在宿主体内的增殖速度是决定鼠疫苗毒力的根本因素。

各国的鼠疫研究者正致力于克隆并阐明决定鼠疫菌毒力的一个又一个基因。而在中国,与鼠疫防治直接有关的基础理论问题更受重视。关于鼠疫耶尔森氏菌毒力已有的知识,尚不能完全解释在中国的鼠疫自然疫源地中所观察到的现象。例如,在中国内蒙存在着一种特殊的鼠疫耶尔森氏菌,它具有世界卫生组织所确认的全部四种毒力决定因子,能在它自己的宿主——布氏田鼠种群中引起猛烈的动物病,对其它一些鼠疫宿主动物,如长爪沙鼠和小家鼠,也有强大的毒力,然而对一些常见的鼠疫宿主,如达乌尔黄鼠和旱獭以及豚鼠和家兔等实验动物,它却完全没有毒力。研究结果已初步表明,这种类型的鼠疫耶尔森氏菌在摄取铁的能力方面较弱,在人类血清中的生长速度尤慢。此外,在这种类型的鼠疫自然疫源地也从来没有确诊过鼠疫病人。这样,它对人类是否无害?如确实无害,是否可以利用它去控制其它类型的鼠疫自然疫源地?这要求首先必须确定是哪一种毒力决定基因的缺失造成布氏田鼠中鼠疫耶尔森氏菌的这种独特的毒力特征,以及这种毒力决定因子是否由一种人们尚未认识的基因所控制。再如,中国的一些鼠疫自然疫源地在静息了20~30a之后又重新活动。在这静息期间,鼠疫耶尔森氏菌是否有可能以一种毒力缺陷的形式存在,在动物中引起一种以目前的监测手段不能检出的特殊形式的动物病?确定这种可能性,研究毒力缺陷的鼠疫耶尔森氏菌恢复其完整毒力的可能途径,将是影响鼠疫防治决策的重大课题。这些,将构成2010年内中国鼠疫耶尔森氏菌研究的主要方向。

#### 参考文献

- 1 任士明. 鼠疫研究进展. 北京:中国环境科学出版社,1988. 107~117
- 2 何永山,等. 中华流行病学杂志,1990,11(特1):77~88
- 3 俞东征. 医学分子微生物学进展. 北京:中国科学技术出版社,1991. 93~104

(中国预防医学科学院流行病学微生物学研究所俞东征副研究员撰)

**放射免疫分析** radioimmunoassay, RIA 由放射性核素示踪技术与免疫化学的有机结合而产生。这种技术具有专一性强、灵敏度和精确度高、样品用量少、易于标准化、系列化、商品化和自动化等基本特点。它在基础医学研究与临床疾病的诊疗等各个领域,都得到广泛应用,对提高医疗水平、造福人类具有重要的价值。

1955年,美国雅格和波尔森应用放射性 $^{125}\text{I}$ 标记胰岛素检测接受外源性胰岛素治疗的糖尿病患者血浆中胰岛素抗体,发现非标记胰岛素能竞争抑制标记胰岛素与抗体的结合,从而奠定了以竞争抑制结合为原理的定量分析基础,并于1959年创立了放射免疫分析法。1960年,伊金斯(R. P. Ekins)提出了以不同类型的结合蛋白作为结合剂,测定生物样品中的微量活性物质水平。

3年后,莫非(B. E. P. Murphy)等进一步完善了这一技术,定名为竞争性蛋白结合分析法。1968年,迈尔斯(L. E. N. Miles)等首先建立了免疫放射法,其特点是以放射性核素标记抗体,多采用非竞争性的固相法,操作简便。1970年,莱弗柯维奇(R. J. Lefkowitz)根据竞争抑制结合反应理论,利用激素受体与激素呈现特异结合的性质,以组织受体作为结合剂,建立了放射受体法。它能测定激素的生物活性水平,而免疫放射法测定的是物质的免疫活性。由于历史的原因及习惯,这里所说的放射免疫分析技术,是从广义上理解的,它包含上述的几种分支方法。中国自1962年开始引入这项技术,但直到1972年后才得以迅速发展。据1991年第四届全国放射免疫分析技术学术会统计,国内利用此项技术可测定的物质已达到110余种(国外已达到300~400种之多);放射免疫分析专用试剂盒的生产厂家已达26个,生产的品种70余个(国外已达到100余种),初步形成了对该技术的研究、开发、生产、应用及质控体系。

标记抗原是建立放射免疫分析方法的重要一环。目前,90%以上是选用 $^{125}\text{I}$ 进行标记,具体方法可分为两大类。肽类、蛋白质、酶可以直接进行碘化标记, $^{125}\text{I}$ 直接被引入分子中的酪氨酸残基的羟苯基上,使用的氧化剂有氨基T、Iodogen、乳过氧化物酶等。甾体类化合物、前列腺素、环核苷酸及某些药物等小分子化合物,因缺乏可供碘化标记的部位,多采用联接标记法。常用的联接剂有Bolton-Hunter 酰化试剂、Wood试剂等。

制备优质的抗血清,是保证放免技术质量的基本条件。考察抗血清质量的主要指标是特异性与亲和力。对于蛋白质等大分子化合物,因其化学结构较复杂,具有“构型依赖性决定簇”,很容易使免疫动物产生抗体。但对于一些小分子的半抗原,则因其结构简单,不能直接使免疫动物产生抗体。为改造半抗原分子,使其具有免疫原性,采用蛋白质偶联技术,制成大分子结合物,免疫动物获得成功。1975年,米尔斯坦(Milstein)和魏勒(Köhler)创建了杂交瘤技术,制造出单克隆抗体,使免疫学领域出现一场革命性转机。采用这种技术,可以生产出品种多、特异性强、质量稳定、数量充足的抗体,为放免技术的发展开辟了新的前景。

将抗原-抗体复合物(B相)与游离抗原(F相)分离的方法一直是放免技术发展中研究的重点,也是最活跃的领域。理想的分离技术应具备条件:(1)分离方法简便易行,应用范围广;(2)分离效果完全,快速,非特异性结合甚低;(3)试剂来源容易,价格低廉,稳定性好;(4)适合放免技术自动化;(5)分离效果不受外界因素的影响。常用的分离方法有:(1)吸附分离法;(2)沉淀剂分离法;(3)双抗体分离法;(4)双抗体+聚乙二醇(PEG)法;(5)固相分离法;(6)可磁化分离法;(7)微孔滤膜法;(8)A蛋白分离法;(9)屏蔽分离法等。这些方法虽各具特色,但相比之下第3、4、5类方法则更有潜力,目前应用面很宽。

近年来,围绕着上述3个基本环节,放免技术又取得一些新进展。一是1986年欧德尔(Odell)首次将生物素亲和系统(BAS)引入放免技术,建立了生物素亲和素免疫放射测量法,使检测的灵敏度又提高3~5倍,且碘化标记的亲合素可作为通用试剂,为生产与应用提供了方便。二是提出了获得高质量碘化标记物的方法,有利于提高检测方法的灵敏度。1990年,马里欧(Warion)等报告以Bolton-Hunter试剂标记九肽胸腺素,产物经Sephadex G25柱层析后,再经高压液相层析纯化,可将已被碘化与未被碘化标记的胸腺素分开,获得高纯度的标记物。三是建立了检测特异性免疫复合物的方法,这对提高检测自家免疫性疾病具有重要意义。四是提出固相材料活化的新技术,以适应迅速发展的固相放免技术的需要。其中有代表性的是1990年考斯(Causse)等介绍的一种用化学方法活化塑料的工艺,比较简便易行,适合于规模生产。

在临床应用方面,放免技术早已渗透到消化系统疾病、心血管系统疾病、呼吸系统疾病、肾脏疾病、血液系统疾病、内分泌疾病、代谢性疾病、维生素缺乏症、传染病、寄生虫病、生殖与计划生育、肿瘤疾病、药理学、测定细胞信使物质及临床免疫学中,且

已初步形成各自的体系。为适应上述临床诊疗的需要,放射免疫分析试剂盒的研制与生产也向着系列化发展。如按1989年海姆勒格(J. I. Hamburger,)提出的测定甲状腺功能新策略,不但要测定血清中总的甲状腺激素水平,还要求测定游离部分激素的含量,认为它更有意义。目前供检查甲状腺功能的试剂盒就有7~8种之多。再如检测病毒性乙型肝炎血清标志物的试剂盒亦有HBsAg、抗-HBs等8种,这对提高临床医疗水平,无疑地起了重要作用。

放射免疫分析技术从建立到现在已有30多年的历史,从技术发展来看,已日臻完善。尽管它正面临着酶免疫分析、发光免疫分析、时间分辨荧光免疫分析技术的挑战,但国内外的学者仍然继续在方法学上进行深入的研究,努力探索新材料、新方法、新技术、新工艺。在未来的一段时间里,放免技术的发展主要侧重于:一是探索新的更加敏感的放免技术,进一步提高检测的灵敏度,以适应临床检验和基础研究的需要。二是进一步发展<sup>125</sup>I标记技术,更多地取代<sup>3</sup>H及<sup>14</sup>C标记。三是探索新的固相材料活化方法实现标记抗体战略,建立精确定量的非竞争性免疫放射分析。四是利用生物工程技术制备出多种特异性的抗原及单克隆抗体,以解决某些传染病的诊断方法问题。五是大力发展放免分析试剂盒的生产,要开发新品种,搞好质量控制,并大力研制与推广自动化操作的仪器与程序。

(卫生部长春生物制品研究所马学严研究员撰)

**红细胞免疫系统** the red-cell immune system 红细胞有许多与免疫有关的物质(CR<sub>1</sub>、CR<sub>3</sub>、LFA-3、DAF、SOD酶等),数目众多,自成系统。红细胞有识别、粘附、浓缩、杀伤抗原、清除CIC的能力,参与机体免疫调控,并有完整的自我调控系统。许多疾病(如SLE)免疫发病机理中,红细胞免疫缺陷占有重要的地位,该研究对全面认识机体免疫系统和免疫网络具有重要意义。

1930年杜克(L. H. Duke)发现锥虫在抗血清及补体存在时可粘附到人类红细胞上,并发现不同人的红细胞对锥虫的粘附能力高低不同。1953年纳尔逊(R. A. Nelson)发现人类红细胞与特异调理过的梅毒螺旋体及肺炎双球菌结合,称此为免疫粘附。推测红细胞膜存在免疫粘附受体,免疫复合物同该受体结合可促进白细胞的吞噬作用,并认为是宿主防御机制的一部分。1963年尼雪俄考(K. Nishioka)证实这种免疫粘附现象是通过人红细胞膜C<sub>3</sub>受体(现称第一补体受体,CR<sub>1</sub>)而实现的,1980年弗尔龙(D. T. Fearon)详细研究CR<sub>1</sub>的性质,是分子量190 000~250 000的多态性膜糖蛋白。红细胞膜CR<sub>1</sub>密度为白细胞的 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{60}$ ,但血循环中红细胞数量却是白细胞的1 000多倍,故CR<sub>1</sub>总数85%以上在红细胞上。在同时期,加尔威(I. S. Garvey)发现新生兔红细胞有识别、储存牛血清白蛋白抗原的能力。1981年美国生殖免疫学家西格尔(I. Siegel)在前人研究的基础上发现红细胞有多种免疫功能,红细胞可粘附胸腺细胞,并发现血清中存在红细胞免疫粘附抑制因子,是一种不耐热的大分子的糖蛋白。在SLE患者中此因子增加,预见血清中存在红细胞免疫调节系统。红细胞膜过氧化物酶活性与CR<sub>1</sub>活性有关,红细胞有杀伤致病源的效应细胞样作用。推测红细胞在阻止肿瘤细胞血行转移中有作用。用系统综合看待以往对红细胞免疫的研究成果,提出了“红细胞免疫系统”的新概念,突破了传统上划分血细胞功能的“界限”,更新了人们对红细胞功能的认识。

1982年梅多夫(M. E. Medof)通过体外实验证明红细胞CR<sub>1</sub>和血浆中I因子共同作用将粘附的免疫复合物(IC)中的C<sub>3</sub>b降解为C<sub>3</sub>d<sub>g</sub>、C<sub>3</sub>d,而失去致炎性。1982年郭峰通过体外实验证明红细胞可粘附补体调理过的酵母菌,并证明SLE、肿瘤患者红细胞免疫粘附酵母菌的能力低下,该实验说明红细胞可直接粘附补体调理过的病原体。1983年科娜康夫(J. B. Cornacoff)在猴血循环内注入免疫复合物(IC),用同位素示踪,发现大多数IC

很快与红细胞结合,并迅速被运至肝、脾,在该特定环境下,巨噬细胞膜上FC段受体比红细胞膜上CR<sub>1</sub>活性强,使IC从红细胞膜上脱落而被吞噬降解。1986年郭峰通过体外对比实验证明红细胞可粘附补体调理过的各种肿瘤细胞,并证明肿瘤患者红细胞免疫粘附肿瘤细胞的能力下降,动物实验证明中药有效治疗后,红细胞免疫粘附肿瘤细胞能力增强。1988年威瑞拉(Virela)用单标记法证明红细胞膜有CR<sub>3</sub>。1990年派考德(J. P. Paccard)采用折痕一标记免疫电镜比较PMN和红细胞的CR<sub>1</sub>形态,发现红细胞上几乎50%的CR<sub>1</sub>量 $\geq 3$ 单位簇状分布,而这种簇状分布在PMN不到15%。CR<sub>1</sub>的这种簇状分布可使它与C<sub>3</sub>b包被的IC结合位点呈多价性,连接更为牢固。实验证明尽管单个白细胞表面CR<sub>1</sub>数(2 500~6 000/细胞)较红细胞(200~1 000/细胞)多,但在细胞浓度相同时,两种细胞的IC结合率相同。而在CR<sub>1</sub>浓度等同的情况下,PNM与IC的结合量总是低于红细胞。由于血液中红细胞数远远超过白细胞,因而几乎所有补体调理过的抗原和IC都是由红细胞结合运至肝脾降解的。红细胞免疫调控功能的研究报道有增多。1984年西格费索(A. Sigfuson)通过体外美洲商陆素刺激淋巴细胞转化实验发现加自身红细胞可增加淋巴细胞转化率和培养液中IgG、IgA量。1987年鲁杰利斯(M. T. Rugeles)发现自身红细胞加入人外周血单个核细胞培养管中可增强原发性和继发性特异抗体应答。1986年凯斯(L. Keyes)等发现人自身红细胞可增加T细胞产生 $\gamma$ -干扰素。非可液提取人外周血单个核细胞加适量PHA刺激诱导产生 $\gamma$ -干扰素。实验管加自身红细胞到淋巴细胞悬液中(10~50:1),发现加红细胞组 $\gamma$ -干扰素含量明显高于不加红细胞组,并且与加红细胞数有关,但与血型无关。用溶解的红细胞膜代替完整的红细胞仍观察到类似促进作用。抗CD<sub>2</sub>单抗可以抑制人红细胞和绵羊红细胞对T细胞产生 $\gamma$ -干扰素的促进作用。这种抗体可抑制淋巴细胞的增殖和红细胞与淋巴细胞之间的相互作用。用抗IL-2受体单抗研究发现红细胞可促进T细胞表达IL-2,增强T辅助细胞的免疫功能。1988年叶瑞拉(G. Yirella)通过体外抗淋巴细胞功能相关抗原3(LFA-3)单抗或抗CD<sub>2</sub>单抗处理和未处理的红细胞对促进B细胞增殖和免疫球蛋白的影响分析,认为红细胞的这种作用是同LFA-3与T细胞的CD<sub>2</sub>分子相互作用密切相关,推测是由于它促进T细胞IL-2受体表达和增强对外源性IL-2应答的敏感度所致,可能与增加B细胞生长因子或分化因子有关。表达LFA-3的红细胞有利于激活T辅助细胞。T辅助细胞除接受单一信号(加工后的抗原)刺激外,还接受第二信号——通过LFA-3/CD<sub>2</sub>相互作用。1988年莎厄(H. Shau)在红细胞促进NK活性的对比研究中发现,当靶细胞为80:1时,红细胞促NK细胞毒性最高,红细胞与效应细胞比例以5:1时最强。1988年万内利(J. R. Yannelli)在培养瓶内加红细胞可促进LAK细胞的产量和活性,红细胞数与淋巴细胞数比为100:1时IL-2激活的LAK细胞活力最大。通过单抗阻断实验,证明这种促进作用与红细胞膜上LFA-3与淋巴细胞膜CD<sub>2</sub>相互作用密切相关。1985年福斯里德(J. Forslid)在体外通过对比实验证明红细胞促吞噬作用与红细胞CR<sub>1</sub>和SOD酶活性有关。1987年郭峰通过体外对比实验证明血清中还存在一种加热(58℃30min)不灭活的红细胞免疫粘附2进因子。1989年郭峰发现在体外对比实验中,红细胞和淋巴细胞或粒细胞可共同围攻粘附各种肿瘤细胞。

从1930年发现锥虫在抗体及补体存在时粘附到人类红细胞上,到1981年提出“红细胞免疫系统”至今,研究发展迅速。回顾对淋巴细胞的认识,从认为是“终末细胞”到发现其有许多免疫功能,为现代免疫学奠定了基础。可以期望红细胞免疫系统的研究也将会有新的突破,将充实现代免疫学。红细胞免疫物质与遗传研究将会有新的进展,红细胞膜有 $\beta$ -内啡肽受体,神经内分泌与红细胞免疫关系已有初步报道,CR<sub>3</sub>与吞噬功能有关,红细胞膜上有CR<sub>3</sub>,是否说明红细胞对某些小抗原也有吞噬降解作用,现已知CR<sub>1</sub>为2个等位基因共同编码,利用CR<sub>1</sub>基因探针对有核红细胞CR<sub>1</sub>基因缺陷进行诊断,在临床与基础理论研究方

面将会有实用价值。红细胞免疫与白细胞免疫之间的关系研究,这是今后研究热点,红细胞可影响白细胞免疫功能,也有初步报道白细胞分泌的细胞因子(如 IL-2 干扰素)可促进红细胞免疫功能。但它们之间互相调控网络仍不清楚。红细胞免疫物质(如 SOD 酶)提纯应用于治疗,实现红细胞免疫功能测定方法多样化、实用化。将红免知识应用于临床诊治、中医药,以及其他生物学研究将有发展前景。

#### 参考文献

- 1 Siegel I, et al. The redcell immune system lancet, 1981, 2; 556
- 2 郭峰,等. 红细胞免疫功能初步研究. 中华医学杂志, 1983, 62 (2), 715
- 3 Cornacoff J B, et al. Primate erythrocyte-immune complex -Clearing mechanism, J Clin Invest, 1983, 71; 236
- 4 Medof ME. Complement-dependent maintenance of immune Complex solubility. In: Ratherk, Till Go, eds. The Complement system. New York; Springer-Verlag, 1988. 418
- 5 郭峰,等. 天花粉对小鼠艾氏腹水癌的疗效和对红细胞免疫功能的影响, 中西医结合杂志, 1989, 9(7), 418
- 6 Paccaud J P, et al. Difference in the clustering of complement receptor type I (CR<sub>1</sub>) on polymorphonuclear leukocytes and erythrocytes: effect on immune adherence Eur. J Immunol, 1990, 20; 283
- 7 郭峰,等. 红细胞免疫及其调节功能测定方法, 免疫学杂志, 1990, 6(1); 60
- 8 Hebert LA, et al. Biologic significance of the erythrocyte Complement receptor: A primate perquisite. J lab Clin Med, 1991, 118(4); 301
- 9 郭峰,等. 红细胞调控细胞免疫的事实与意义, 上海免疫学杂志, 1991, 11(1); 49
- 10 郭峰. 红细胞免疫系统研究展望, 中国免疫学杂志, 1991, 7 (增刊), 2

(第二军医大学附属长海医院免疫室郭峰研究员撰)

**人和猴 T 淋巴细胞的 TRBC 受体** 高等动物的免疫系统内,免疫细胞和抗原携带细胞的相互作用,不仅依赖于抗原专一性的受体(TCR/CD3, mlg/Igαβ),而且依赖于某些粘附受体(CD2, CD4, CD8 等),粘附受体在免疫系统中起着重要的作用,它与免疫系统的细胞活化、组织定位和细胞游走相关联,如 CD2 与 LFA-3 结合时, T 细胞能被激活, CD2R 单抗也能激活 T 细胞。

哺乳动物的淋巴细胞与异种动物的红细胞形成自然玫瑰花结,是相当普遍的细胞粘附现象。人类 T 淋巴细胞能与绵羊、犬、马、猴、鼠和狗的红细胞结合,但除绵羊红细胞(SRBC)以外,其他物种的红细胞与人 T 细胞结合力很弱,只有 SRBC 的结合力强,因此, SRBC 一直作为人 T 细胞标记的异种红细胞标记。人和许多灵长类动物 T 细胞都有 SRBC 受体(E 受体),这种 E 受体就是 CD2 和后来发现的 E2 分子。

1985 年, 贾昆龙等发现与灵长类动物关系密切的树鼯(*Tupaia belangeri*)的红细胞(TRBC)能够与人和猴 T 淋巴细胞形成亲和力很强的玫瑰花结,而且具有与 E 花结不同的显著特点。例如,经 45℃ 保温 30min 后, E 花结完全被破坏,而 TRBC 花结却很少被破坏; TRBC 花结率高于 E 花结率; TRBC 经神经氨酸酶处理后花结率不是升高而是明显降低。人和猴 T 淋巴细胞上参与这种玫瑰花结的分子可称为 TRBC 受体。

花结试验表明, TRBC 受体存在于外周血全 T 细胞和所有 T 细胞系,而不存在于外周血 B 细胞、粒细胞、绝大多数 B 细胞系以及红白血病 K562, B 细胞系 Nalm-6 和髓样细胞系 HL60 和 U937 只有少量细胞具有 TRBC 受体,以全 T 细胞分化抗原的单

克隆重抗体(mAb)调变或共调变人外周血淋巴细胞,证明 TRBC 受体与分布于全 T 细胞的 CD2、CD3、TCR、CD5 和 CD7 不同。以一系列 CD2 的 mAb 进行 E 花结的抑制试验、调变和共调变试验,表明 CD2 与 TRBC 受体的个别抗原决定簇高度同源,因为少数抗 CD2 的单克隆抗体(如 CLB-T11 1/1, CLB T112/1 和 X53 等)既能封闭或调变 TRBC 受体,又能封闭或调变 E 受体。多数抗 CD2 的 mAb(如 OKT11)只封闭或调变 E 受体。贾昆龙等还用抗 E2 分子的 mAb 进行阻断、调变或共调变试验,证明参与 E 花结的另一分子 E2 也不参与 TRBC 花结的形成。

此外,对 TRBC 受体的配体与 CD2 的配体进行的比较研究表明, TRBC 表面不存在 E 花结的 SRBC 配体 S42, S14 和 S110-220 以及人红细胞表面配体 LAF-3(CD58)。

综上所述, TRBC 受体可能是同 CD2 有一定同源性的新的细胞分化抗原。目前,则正对 TRBC 受体结构和功能进行深入的研究。

(中国科学院昆明动物研究所贾昆龙副研究员、张文发撰)

#### 肿瘤抗原 tumor antigen 肿瘤免疫研究大致分为 3 方面:

(1)研究肿瘤机体的免疫应答用于治疗与预防。(2)了解肿瘤机体免疫功能低下的机理,明确肿瘤具有抗原性,利用肿瘤标记物作为诊断之用。(3)发现特异性抗原用于预防。

关于肿瘤有无特异性抗原,曾对实验动物和人自然发生的肿瘤进行两方面研究,因为只有弄清肿瘤的抗原性才能进一步完成以上 3 方面的研究工作。

1940 年有人用肿瘤细胞来免疫实验动物,发现被免疫的动物可排斥同种肿瘤的生存,这一实验是用纯系动物做的,即用于免疫的肿瘤细胞来源的动物和用以免疫的动物均是同系。以后不仅用同系动物做肿瘤反应,并且也用切除了原发肿瘤的动物观察到排斥自身肿瘤的自家肿瘤实验系,确立了肿瘤特异性移植抗原(TSTA)的概念,并发现这种抗原在肿瘤细胞上存在,在正常细胞上不存在,假如身体对这种抗原进行免疫应答就形成肿瘤免疫的概念。

肿瘤特异性移植抗原 TSTA 仅存在于化学制癌剂、病毒等诱发的肿瘤,诱发剂使正常细胞由外因性遗传信息发生变化导致内因性遗传信息发生变化,致使安全性基因失控而造成细胞突变,出现新抗原,一般为肿瘤分化抗原或胎儿性抗原。机体对这种抗原具有一定的免疫性,而自然发生的肿瘤,机体对它的免疫抗性完全看不出来,或仅检测出极微的抗性。

人类尚未发现像实验动物那样的肿瘤抗原,虽然曾观察到人类肿瘤也能接受宿主自身的免疫抵抗,如病理组织标本中观察到肿瘤细胞周围被淋巴细胞、单核细胞浸润,某些肿瘤也可自然消退; BCG 等免疫疗法也可对有的病人有效,因此也曾用细胞免疫、血清学方法广泛分析过人肿瘤细胞的特异性抗原。单克隆抗体(McAb)方法问世以来,在制造对人肿瘤细胞反应的 T 细胞克隆及抗蛋白质的单克隆抗体上花了不少精力,逐渐对肿瘤相关抗原(TAA)的存在明确起来。这种抗原严格地说不能称为是“特异的”,但与正常细胞比无论是质和量均为有相当“特征”的抗原系,经用人癌细胞免疫制备的单克隆抗体调查,这种 TAA 是存在于细胞表面的糖链性表位(抗原决定簇),其成分为糖脂或糖蛋白,它不仅存在于细胞表面,也有报告说 TAA 存在于细胞内和核内,向细胞外释放,在癌细胞培养的上清液中和癌症患者的血清中也能检测出 TAA。因此,有关糖脂抗原、糖链构造的分析、相关糖转移酶的研究都成为重要的课题;加之对糖蛋白抗原的结构蛋白的基因分析,对理解 TAA 的本质也是不可缺少的,如对某种 TAA 的发现,应进行一系列的分析,(1)结构基因存在的形态及其调控。(2)遗传信息核糖核酸(mRNA)的转录。(3)蛋白质的翻译,进一步糖基化。对此可用各种印迹法(如 Southern, Northern, Western 等印迹法)对 DNA、RNA、蛋白质的质和量进行分析,对基因产物 TAA 糖蛋白常用 Western 印迹法进行检定。



关于 TAA 生化性状的分析,其顺序如下:(1)对 TAA 的单克隆抗体制备,用癌细胞(组织)或精制抗原(如具有癌特征的糖脂、糖蛋白)免疫动物,用实验室常规法制备抗 TAA 的单克隆抗体。(2)抗原分析:用各种培养细胞(尽量用有名的细胞系细胞)和几种正常的或癌组织与上述单克隆抗体反应,推断与已知 McAb-TAA 系的异同,进一步分析对 McAb 的抗原阴性细胞的位点抗原决定簇,如抗原阳性细胞用过碘酸处理后与 McAb 的反应性消失,其抗原决定簇为糖链,而用蛋白酶处理后失活,则其抗原决定簇为肽。其次,抗原阴性细胞中提取的糖脂与 MoAb 反应,如为阳性则进一步对糖脂质的糖链进行分析;如为阳性则为糖蛋白的可能性大,继续用免疫转印法证实。(3)分子量分析,McAb 所识别的 TAA 的分子量用 Western blotting 法分析。总括最近的报告已明确的有恶性黑色素瘤、神经母细胞瘤、肺癌、乳腺癌等。决定各种组织型由来的人 TAA 的分子量如下表。

表 1 用 Western blotting 法测定的 TAA 的分子量

| 抗体                 | 肿瘤     | 抗原材料       | 分子量                          |
|--------------------|--------|------------|------------------------------|
| FKH1               | 恶性黑色素瘤 | KHm-6      | 55 000~71 000                |
| ME491              | 恶性黑色素瘤 | A875       | 20~50 000                    |
|                    |        | 神经纤维瘤      | 30 000 左右                    |
|                    |        | 1MR32      | 190 000                      |
| CE7                | 神经母细胞瘤 | SK-N-MC    | 65 000                       |
| 5A7                | 神经母细胞瘤 | Calu-1     | 200 000 以上                   |
| W1                 | 肺癌     | 胸水         | 72 000~100 000               |
| anti-ACAA<br>(兔血清) | 肺癌     | 腹水         | 72 000~100 000               |
| C1Br7              | 乳腺癌    | PMC42      | 38 000                       |
| DF3                | 乳腺癌    | ZR-75-1    | 300 000~450 000(癌细胞及培养上清中检出) |
|                    |        | OV - A     | 300 000(癌细胞检出)               |
|                    |        | OV CAR - 3 | 450 000(癌细胞检出)               |
| DM-1               | 卵巢癌    | OV-D       | 170 000(癌细胞内)                |
|                    |        | Cole316    | 360 000(癌细胞及培养液上清中检出)        |
|                    |        | CaCo       | 190 000                      |
| 3/53               | 大肠癌    |            | 200 000 以上                   |
| Anti-CAA           | 大肠癌    | IS-174T    |                              |

此外,还有把克隆的癌基因 DNA 碱基对合成肽链,用对此肽链的单克隆抗体检查癌患者尿中的基因产物相关蛋白。益子高等还对膀胱癌的 McAb 的相应抗原用 Western blotting 法检查了手术标本中非癌部、癌部、尿样品,发现癌组织中分子量 56 000 和 100 000 两条带在邻近正常组织中没有,尿中有 78 000 的抗原存在。浸润型肾上皮移行癌、乳头状膀胱癌的 McAb 同样识别分子量在 100 000 以上正常组织中没有的癌抗原带。随着基因工程分子克隆方法的发展,对蛋白性 TAA 及糖脂性 TAA 的认识将会有更进一步的提高。提高肿瘤细胞的抗原性,将半抗原、病毒、结核菌素衍生产物等导入细胞表面,使肿瘤细胞异物化,刺激 T 辅助细胞生成、活化,活化的 T 辅助细胞诱导 T 杀伤细胞再作用于肿瘤细胞的良性循环正为人们所期待。利用明确了肿瘤抗原作为诊断开发的新品种也正日新月异。

1991 年生物技术信息报道,比利时布鲁塞尔 Ludwig 癌症研究所的 Boon 等已分离到黑色素细胞瘤细胞中的 3 种相关基因,不存在于正常细胞,其中一种基因的蛋白产物能诱导该种细胞毒性 T 细胞应答,这一发现将产生第一种真正只对癌细胞特异的抗原,该抗原的正常细胞向癌细胞转化的副产品,它有可能用作疫苗诱导免疫系统消灭肿瘤。

对肿瘤抗原进一步的深入了解、分析,有助于在肿瘤防治的重大问题上作出更为准确的决策。

参考文献

- 余贺,陈诗书,邵国英. 肿瘤与免疫,上海:上海科学技术出版社,1982. 20~46
- Hampson J, Reynolds K, Collins WP Br, J Hosp Med, 1992, 48(8):454~9
- Seleznick MJ. Prim Care, 1992, 19(4):715~26
- Hoffmann MK, Dannecker G, Mecheri S. Semin Immunol,

1992, 4(5):337~51  
 5 Ohkura H. Gan To Kagaku, 1993, 20(7):843~9  
 (卫生部武汉生物制品研究所全家斌研究员撰,江先觉审)

**P-糖蛋白和肿瘤多药拮抗性** 长期以来,肿瘤多药拮抗性(MDR)是肿瘤化疗中悬而未决的问题。肿瘤细胞一旦对一种药物产生耐受性,对其他结构和功能不同的一系列药物常产生交叉耐药性。体外 MDR 细胞株的建立(V. Ling 等, 1973; N. T. Beck-Hanson 等, 1976; S. Yanovich 等, 1989)及分子生物学和遗传工程技术的迅速发展促进了对 MDR 机理广泛深入的研究。MDR 细胞株突出的特点就是细胞内药物累积下降(M. Inaba 等, 1979; F. M. Siroolnak 等, 1986)、耐药基因扩增和糖蛋白 P (Pgp) 过度表达(C. R. Fairchild 等, 1987; K. K. Scotto 等; G. Capranico 等, 1989)。近年来 MDR 机理的研究取得重大进展,耐药基因产物 Pgp 的发现及其结构和功能的分析使 MDR 研究进入新的阶段。Pgp 的基因克隆及表达的研究促进了对其结构的深入了解。据 cDNA 序列分析推断, Pgp 为具有自身对称结构的大分子,人 Pgp 由 1 280 个氨基酸残基组成,小鼠 Pgp 包含 1 276 个氨基酸残基(W. F. Ng 等, 1988)。Pgp 分子量为 170 000,氨基酸主链占 140 000,糖基约为 30 000。Pgp 的 N 段和 C 段形成 Pgp 分子对称的两部分结构。每一部分各由一跨膜疏水基团和胞浆亲水基团构成,前者有 3 对跨膜 α-螺旋,后者包含 ATP 结合位点。Pgp 的糖基可能在 N 段第 1 对跨膜 α-螺旋的胞外结构上。

Pgp 的 N 段和 C 段不但结构高度对称,氨基酸序列也高度同源,序列分析表明其同源性的 43%,其中胞浆部分的同源性最高,ATP 结合位点附近序列的同源性为 77%。提示 Pgp 基因可能由于进化过程中的基因复制融合而成。

小鼠有 3 类 Pgp, I 类 Pgp, II 类 Pgp 和 III 类 Pgp 分别由耐药基因 *mdr3*, *mdr1* 和 *mdr2* 编码。在人类迄今仅发现 I 类 Pgp 及 II 类 Pgp, 编码基因分别为 *mdr1*, *mdr3* (或 *mdr2*) (J. DM. Groop 等, 1988)。I 类 Pgp 及 II 类 Pgp 高度表达与 MDR 有关, III 类 Pgp 表达水平和 MDR 无关,其功能尚不清楚。3 类 Pgp 的结构基本相似,但其功能可能不同。序列分析发现, Pgp 和细菌及其核细胞转运蛋白有高度同源性(M. Rothenluig 等, 1989; J. P. McGrath 等, 1989; S. J. Foote 等, 1989; J. B. Scriptwre 等, 1987)。人 Pgp 和小鼠 Pgp 的同源性为 80%。Pgp 的胞浆基因和细菌转运蛋白与 ATP 结构亚基同源(P. F. Juranka 等, 1989; J. P. Gros 等, 1986)。如细菌转运蛋白 *OPPD* · *malk* · *hisp* · *pstB* 和 Pgp 胞浆基因的同源性为 40%, 细菌转运蛋白不仅序列高度同源,且相似。二者序列的同源性约为 70%, 在结构上两者都由 α-螺旋构成, Pgp 可能是自身对称转运蛋白家族中的 HLYB 样转运蛋白(J. P. Gros 等, 1986; G. Higgins 等, 1986; H Gerlanh 等, 1986)。

序列分析提示, Pgp 上的 6 对跨膜结构域在膜形成一跨膜通道, 介导药物外逸。在 MDR 细胞株, Pgp 介导的药物外运是需能性的 (J. R. Riordan 等, 1985; H. Gerlach 等, 1986)。用 Pgp cDNA 转染药物敏感细胞, 子代转染细胞中药物的积累明显低于亲代细胞, 去除培养液及细胞内 ATP, 转染细胞内的药物积累又恢复至亲代敏感细胞水平 (J. R. Hammond 等, 1989), 提示 Pgp 介导的药物转运有 ATP 参与。用纯化 MDR 细胞株的膜成分进行药物累积试验进一步证明 Pgp 对 ATP 的依赖性, ATP 类似物 AMP-DNP 能竞争性抑制药物转运, ATPase 抑制剂 Vanadate 非竞争性抑制药物转运 (M. Horio 等, 1988; M. M. Cor. well 等, 1987), 纯化的 Pgp 具有 ATPase 活性 (N. Karther 等, 1985)。Pgp 上的两个 ATP 结合位点具有协同作用, ATP 结合位点和 ATP 结合是 Pgp 介导药物外运的必要条件。用 ATP 结合位点突变的 Pgp cDNA 克隆转染药物敏感细胞, 单位点和两位点突变均不能赋予敏感细胞 MOR 表型 (M. Rolhenburg 等, 1989)。

Pgp 介导的药物转运的详尽机理目前尚不清楚。从已获得的资料来看,转运的药物可能与 Pgp 分子上特定的位点直接结合。对秋水仙碱诱导的人 MDR KB 细胞突变株的序列分析,初步确定 Pgp 分子上的一个药物结合位点(K. Choi 等,1988)。野生型细胞及长春新碱(VCR)诱导的 MDR KB 细胞株的 Pgp 分子的 N 段第 185 位为甘氨酸,秋水仙碱诱导的突变株则为缬氨酸。用突变细胞的 Pgp cDNA 转染敏感细胞,转染细胞的交叉耐药表型发生变化,对秋水仙碱、VP16 及阿霉素抗药性增强,而对 VCR、长春花碱(VLB)及放线菌素 D 的耐药性下降。这一发现提示 PgpN 段第 185 位氨基酸残基可能参与药物结合位点的构成。对 MDR 细胞突变株的研究将有助于新药物结构位点的发现。

Pgp 分子还能与化疗药物的衍生物及 MDR 逆转剂结合。长春碱酰胺和 Pgp 的结合能被某些化疗药物及逆转剂如柔红霉素、VCR、异博停、利血平、奎宁丁等抑制(M. M. Gottesman 等,1988)。同样,某些化疗药物也能抑制异博停等逆转剂和 Pgp 的结合(S. M. Hsu 等,1989)。化疗药物和 MDR 逆转剂相互抑制与 Pgp 的结合的现象,提示它们可能竞争性地和 Pgp 上的同一位点结合。逆转剂和药物竞争 Pgp 上的结合位点,降低 MDR 细胞药物外逸的速度,增加细胞内药物的累积,可能使逆转剂恢复 MDR 细胞对药物的敏感性。

体外诱导的 MDR 细胞株的研究发现,用不同药物诱导同一亲代细胞所建立的 MDR 细胞株的交叉耐药表型不同(J. R. Riordan 等,1985),对诱导药物优先产生耐药性。MDR 细胞交叉耐药特征的多样性可能和以下因素有关:(1)药物对基因表达的诱导作用。人有一类 Pgp 基因与 MDR 有关,啮齿类动物有两类 Pgp 基因与 MDR 有关。每类 Pgp 基因又分若干亚类。不同药物可能诱导不同类的或亚类的 Pgp 基因表达,赋予细胞不同的交叉耐药表型(N. Karther 等,1985)。(2)Pgp 基因侧翼序列的扩增。MDR 细胞株的 Pgp 基因的扩增常有侧翼序列扩增(A. M. Van Der Bliek 等,1986;M. H. L. Debruijn 等,1986),不同细胞株侧翼序列长度不同。这些不同的侧翼,扩增序列也可能影响 MDR 细胞的耐药表型。(3)Pgp 翻译后修饰。用同一 Pgp cDNA 转染不同的药物敏感细胞株,所获得的 MDR 细胞株的交叉耐药性表型不同(B. Gild 等,1987;K. Ueda 等,1987),提示有其他蛋白质或 Pgp 翻译后修饰参与调节交叉耐药特性的表达。最近发现 Pgp 分子上的丝氨酸及苏氨酸残基有磷酸化现象(J. A. Endicott 等,1989)。推测 Pgp 的磷酸化程度可能和 MDR 细胞交叉耐药表型有关。但是,Pgp 分子的糖基化不影响 MDR 细胞表型的表达,MDR 细胞的糖基化缺失突变株与亲代糖基化细胞株的 MDR 表型无明显差异(V. Ling 等,1983)。

随着 Pgp 的细胞和分子生物学研究的进展,特异性抗体和核酸探针已用于 Pgp 基因在正常组织表达的研究。结果显示 Pgp 表达具有组织特异性,在肠、肝、肾、肾上腺皮质、孕子宫及某些骨骼肌中表达最强(F. Bass 等,1988;J. M. Groop 等,1989;A. T. Fojo 等,1987)。用免疫组织化学染色发现,Pgp 位于大小肠粘膜细胞、胆、胰管细胞和肾迂曲小管细胞的腔面以及肝细胞的胆管管面(F. P. Juranka 等,1987)。Pgp 在这些组织中的生理功能尚不清楚。其管腔面的分布特征提示 Pgp 可能参与这些组织的分泌和毒物排泄功能(P. F. Juranka 等,1989)。肾上腺皮质细胞的 Pgp 可能参与皮质类固醇的分泌转运(E. Georges 等,1990)。大鼠肝部分切除后残留的再生肝细胞,化学致癌剂诱导的大鼠肝的癌前结节及癌性结节中,其 Pgp 的水平升高,提示 Pgp 表达可能是机体细胞对毒物及代谢压力的特异性反应所致(E. Georges 等,1990;S. S. Thorgeirson 等,1987)。由此可见,在正常组织中 Pgp 可能作为一个广谱特异性转运分子,参与机体的内外分泌功能及内外源性毒性的清除(P. F. Juranka 等,1989),与在 MDR 细胞介导药物外逸功能一致。

用特异性基因探针分析不同类的 Pgp 在组织中的分布,每种组织常表达多种 Pgp。I 类 Pgp 在肠道表达水平最高,心、脑及肾脏次之;II 类 Pgp 在小鼠妊娠子宫及肾上腺水平最高,心、

肾脏次之,III 类 Pgp 在肝、肾上腺、脾、心及少许骨骼肌中等水平表达。用基因特异性单克隆抗体进行免疫组化定位观察到,I 类 Pgp 主要分布于大肠上皮细胞的腔面,II 类 Pgp 主要分布于肾上腺皮质细胞,少量骨骼肌细胞表达 III 类 Pgp(C. R. Fairchild 等,1987)。不同类 Pgp 的组织分布特异性的生理意义尚不清楚。

Pgp 的研究最初限于体外细胞系及动物组织和肿瘤,人类肿瘤与 Pgp 的关系。用 RNA 原位及斑点杂交,免疫组织化学及 PCR 技术研究 Pgp 在人类肿瘤中的表达证明,人类癌、肉瘤、淋巴瘤和白白血病等各种肿瘤的 Pgp 表达水平均升高(Z. J. Goldstein 等,1989)。在某些肿瘤化疗后其表达水平往往高于化疗前,提示肿瘤细胞在化疗过程中有可能获得 MDR 表型。有研究资料报道,肿瘤中 Pgp 的存在与否和肿瘤的化疗反应相关(H. S. L. Chan,1989),但肿瘤细胞 Pgp 过度表达的临床意义及其 Pgp 表达水平能否作为肿瘤对化疗反应性的指标,有待于进一步探讨。

某些 Pgp 表达水平较高的组织如肝、肾、肾上腺及肠来源的肿瘤,常对化疗药物表现出天然耐受性,其细胞表面的 Pgp 水平较高。未经药物诱导的肾癌细胞株具有 MDR 表型,并能被奎宁丁、异博停逆转。对某些药物抗药性的细胞,其 MDR 表型可能和细胞表面固有的较高水平的 Pgp 表达有关。

(山东省医学科学院基础医学研究所赵跃然撰)

### 精浆免疫抑制蛋白质的分离与功能研究

1975 年,斯蒂茨(Stites)等通过混合淋巴细胞试验和淋巴细胞转化试验发现,人类精子和精浆都能抑制 T 细胞转化。由此开始了对精浆免疫抑制功能的研究。精浆免疫抑制物质由多种成分组成,既有蛋白质等大分子物质,又有多胺、前列腺素等小分子物质。多胺具有毒性,可杀伤淋巴细胞,而精浆中蛋白质和多肽抑制物质并不呈现细胞毒性作用。在这些物质中,蛋白质成分在精浆免疫抑制中起着主导作用。因为具有免疫抑制活性的精浆组分经蛋白水解酶处理后,其抑制活性消失。

1977 年,洛德(Lord)等应用 Sephadex G-25 分离人精浆,并对各洗脱峰进行鉴定,第 1 峰(F1)包含几乎全部精浆蛋白质,并具有强烈的免疫抑制活性,后两个峰(F2,F3)未见可染色的蛋白质,且无免疫活性。马库斯(Marcus)用 Sephadex G-100 分离人精浆获得 5 个峰,F1、F3 能抑制有丝分裂原刺激的淋转,F2、F4 则可抑制自发性淋转。以后不少学者用亲和层析、凝胶层析、硫酸铵沉淀等方法分离人的及牛的精浆免疫抑制蛋白。1988 年,曹永江利用高速离心 Sephadex G-100 和快速蛋白质阳离子交换层析等方法从人精浆中纯化了具有免疫抑制活性的蛋白质,其分子量为 50 000,等电点约 4.9。同年,布维特(Bouvet)等利用凝胶层析及高效液相层析等电泳分离纯化了另一种人精浆免疫抑制蛋白,分子量 180 000,等电点在 5~6 之间。而里斯切(Ricerche)则从牛精浆中分离出一种抑制淋巴细胞转化的多肽,N-端含有焦谷氨酸,此多肽还含有丙氨酸、谷氨酸、谷氨酰胺、天冬氨酸、丝氨酸、甘氨酸和酪氨酸。该多肽对热、酸稳定,不被胰蛋白酶消化,但对链霉蛋白酶、植物凝集素氨基糖苷酶敏感。这些工作为进一步研究精浆免疫抑制作用提供了有利的条件。

沙伊特(Scheit)报道,牛精浆碱性蛋白抑制由各种有丝分裂原刺激的 T 淋巴细胞和 B 淋巴细胞的增殖反应,并呈剂量依赖性。高浓度的牛精浆碱性蛋白抑制已受有丝分裂原激活的淋巴细胞合成 DNA 和 RNA,低浓度时只抑制 DNA 合成,浓度达 113 $\mu$ g/ml 时才对 RNA 合成有明显的抑制作用。用 HPLC 和 FPLC 进一步分离这些碱性蛋白,只有其中的精浆 RNA 酶和精浆抗微生物蛋白有免疫活性。坦布里尼(Tamburini)等对牛精浆 RNA 酶抑制 T 细胞增殖的机理作了进一步的研究。精浆 RNA 酶对 T 细胞增殖的抑制作用只在细胞周期的早期,对预先已激活达 6h 以上的 T 淋巴细胞没有抑制作用,T 细胞的激活涉及到 T 细胞分泌白细胞介素-2(IL-2)、T 细胞膜上白细胞介素-2 受体的表达,产生 T 细胞在增殖时对 IR-2 的反应。精浆 RNA 酶不

抑制被 OKT3 单克隆抗体刺激的细胞分泌 IL-2 但对 IL-2 受体表达有明显的抑制作用。此抑制作用究竟是精浆 RNA 酶结合从而遮盖了 IL-2 受体,还是抑制 IL-2 受体的合成,有待进一步研究。布维特用透析法将精浆蛋白分为分子量大于及小于 12 000 两部分,大分子量的精浆蛋白质抑制土壤丝菌分裂原诱导的体外人 B 淋巴细胞增殖反应,而小分子量的精浆蛋白质抑制由植物凝集素(PHA)诱导的人 T 淋巴细胞增殖。用 Balb/c 小鼠做体内实验发现,小分子量蛋白质没有免疫抑制作用,而大分子量蛋白质则几乎完全抑制了不依赖 T 细胞的 1 型的与 2 型的免疫反应。精浆中有多种免疫抑制蛋白质,它们的作用不尽相同。萨哈(Saha)等报道人精液中的酸性磷酸酶抑制中性白细胞产生氧离子(O<sup>-</sup>),从而抑制中性白细胞的杀菌作用。该酶还抑制小白鼠 NK 细胞杀伤肿瘤细胞。曹永江分离的精浆免疫抑制蛋白质明显抑制淋巴细胞自发参与 H-TdR 及淋巴细胞转化。该蛋白质还与精子表面紧密结合。这种结合是否与遮盖精子表面原有的强抗原性物质、阻碍免疫活性细胞对精子的识别还不清楚。

精浆免疫抑制蛋白在男、女性生殖系统发挥重要的免疫调节作用。正是由于它们的免疫调节作用,才使精子免遭排斥,并得以发挥正常的生育功能。马库斯等测定 600~700 份正常人的和几名其妻子对精液过敏者的精液,发现其妻子对精浆过敏者的精液中免疫抑制蛋白质的含量比正常人低得多。他们还发现,精液中免疫抑制物质缺乏还可导致男性自身产生抗精子抗体,引起不育。最近,曹永江等也观察到某些临床不育(孕)证患者的精浆中缺乏曹永江等所纯化了的那种人精浆免疫抑制蛋白质,由此说明,缺乏精浆免疫抑制蛋白质可能是引起不育(孕)的一个重要原因。

随着对精浆免疫抑制蛋白质的了解,其免疫抑制作用与 AIDS 的密切关系引起人们的关注。同性恋者为 ADIS 的高危人群,其 ADIS 发病率高达 71%,而异性性交者仅为 1%。给纯种雄鼠直肠灌注同种小鼠精子、人精浆或其组分,对 NK 细胞活性都有明显抑制作用。直肠的单层柱状上皮,使得精浆免疫抑制很容易被吸收,而阴道为复层鳞状上皮,精浆免疫抑制物质不易被吸收,而在雌性生殖道局部发挥免疫调节作用;带 ADIS 病毒的同性恋者,不仅精浆中的病毒通过直肠上皮进入体内,还由于被吸收的精浆免疫蛋白质在体内抑制机体的免疫功能促进 AIDS 的发生。

精浆免疫抑制蛋白质是精浆中的重要物质,但过少将导致免疫性不育不孕,过多又将导致生殖道局部免疫功能下降,致使生殖道被病毒和细菌感染而产生各种急慢性炎症反应,长期过多地接触精浆免疫蛋白质,造成男女性局部及全身免疫功能的抑制,可促进前列腺癌和子宫颈癌的发生,也可促进 ADIS 病及其他性病的发生与传播。要弄清楚机体的这错综复杂而又相互协调的关系,精浆免疫抑制蛋白质的分离纯化是其根本的条件。继续深入地研究这项工作,彻底弄清精浆免疫抑制蛋白质所起的各种作用及其机理,无论对基础理论还是临床应用都将具有深远的意义。

#### 参考文献

- Marcus ZH, et al. Male Reproduction and Fertility (A Negro-Vilar ED) New York: Raven Press, 1983. 363
- Fahmi HA, et al. Individual variation in immunosuppressive activity of bovine seminal plasma on concanavalin A - stimulated bovine T lymphocytes in vitro J Dairy Sci, 1985, 68(9): 2322
- Bouvet JP, et al. Delineation between T- and B-suppressive molecules from human seminal plasma; I partial characterization of a 180 - KD protein inhibiting the B response to T - independent antigens, Am J Reprod Immunol Microbiol. 1988, 18(3): 87
- Ricerche CN, et al. Lowmolecularweight peptides derived from bovine seminal plasma with immune suppressant

properties Eur Pat Appl Ep, 1988, 30: 292, 818 (cl. A61K35/52)

- 朱炳法,等. 人类精浆及小鼠精子抑制 NK 细胞活性的研究 中国免疫学杂志, 1988, 4: 194
- Scheit KH. Inhibition of cell proliferation by basic proteins from bull seminal plasma Biol Chem Hoppe - Seyler. 1989, 370(4): 285
- Saha AK, et al. Inhibition of neutrophil and natural killer cell function by human seminal fluid acid phosphatase, Clin Chem Acta. 1989, 182(1): 34
- Tamburini M, et al. Immunosuppressive activity of bovine seminal RNase on T-cell proliferation Eur. J Biochem., 1990, 190(1): 145
- 曹永江,等. 人精浆锡疫抑制蛋白质的分离纯化鉴定及其功能研究生物化学杂志
- 许蓓,等. 人精浆蛋白质 P50 在人精子表面和精囊腺组织的免疫荧光定位研究及其机理的初步探讨. 生殖与避孕 (浙江医科大学计划生育基础理论研究室曹永江撰; 朱寿民审)

#### 梅毒诊断试剂 piagnostic reagent for syphilis

梅毒是由梅毒螺旋体感染引起的性病。病原体通过粘膜(如不洁性交)、破损的皮肤、输血以及胎传侵入人体,使宿主产生多种类型的血清抗体。梅毒血清学试验以所用的抗原为基础可分为两类:一类是螺旋体抗原,用于检测特异性抗体;另一类是非螺旋体抗原(即心磷脂抗原),用于检测非特异性抗脂质抗体,也称反应素。

1906 年,华氏(Wasserman)首先建立梅毒血清学试验。由于采用动物组织细胞做抗原,材料来源广泛,制作简便,随之出现了一系列诊断抗原,有补体结合反应的抗原(如华氏、Kolmer 氏抗原)和絮状反应的抗原(如康氏、克氏抗原)。但是这些抗原都是粗制品,含有许多杂质,容易出现假阳性,试验操作也较麻烦。1942 年, M. Pangborn 首次提纯抗原的有效成分心磷脂和卵磷脂。1946 年 Harris, A 等人用提纯的心磷脂、卵磷脂和胆固醇 3 种乙醇溶液按比例配成 VDRL 抗原,它能与病人血清中具有抗体特性的反应素起玻片絮状反应,1 滴抗原悬液检测 1 份标本,在显微镜下放大 100 倍观察结果,使用方便、快速、具有高度敏感性和特异性,在国外早已取代粗制品康氏抗原、华氏抗原。然而 VDRL 抗原需要在临用前配制抗原悬液,0.5ml 抗原配成抗原悬液后可检测 250~300 份标本,有效期只有 1d,标本少时造成浪费。血清标本需要 56℃ 灭活 30min。1961 年 J. Portnoy 等把 VDRL 抗原改进为 USR(Unheated Serum Reagin)试剂,由于在试剂中加入乙稀二胺四醋酸(EDTA),可保护抗原不致迅速变性,使抗原悬液有效期从 1d 延长至半年以上,试剂随时可用;又因试剂中含有氯化胆碱,使血清标本以化学方法灭活而不用加热灭活,使用更为方便。1963 年, J. Portnoy 等又在 USR 试剂基础上加入炭颗粒,在纸片上做试验,即 RPR 纸片法(Rapid Plasma Reagin Card Test);它除了具有 USR 试剂的优点之外,阳性反应时抗原颗粒与炭颗粒在纸片上起协同凝集反应,肉眼可见黑色块状凝集,不用借助显微镜即可观察结果,有效期在 1 年以上。随后发展起来的自动反应素试验(ART),把含有炭颗粒的抗原悬液通过自动分析器作自动分析,使反应后的溶液吸附于纸片上,可随时观察结果,且能长期保存;然而操作时强阳性血清可能污染阴性血清,造成假阳性结果而未被广泛采用。70 年代后,有人在 VDRL 抗原或 USR 试剂中加入脂溶性染料,把抗原颗粒染色,使之在纸片上做试验肉眼可见,例如加入苏丹黑即为反应素筛选试验(Reagin Screen Test, RST);加入甲苯胺红即为甲苯胺红不加热的血清试验(TRUST)。1980 年,卫生部武汉生物制品研究所试制成功 VDRL 抗原,并于 1985 年改进为 USR 试剂。1988 年制成 RPR 纸片法试剂,1991 年卫生部宣布废除康氏华氏抗原,规定使用 USR 和 RPR 试剂。这些非螺旋体抗原试验有较好的特异性,敏感性强,操作简便,费用低廉,常用于梅毒病的

普查、常规诊断和疗效观察。VDRL 玻片法试验还被推荐用于脊髓液的检测。然而这些试验结果可能出现一些假阳性反应,必要时需要用螺旋体抗原试验加以证实。

由于梅毒螺旋体不能人工培养,难于大量繁殖,因此螺旋体抗原试验发展缓慢。1949年 Nelson 和 Mayer 发表了梅毒螺旋体制动(TPI)现象。这是把梅毒螺旋体接种在家兔睾丸里繁殖,然后把发炎的睾丸取出,分离出活的梅毒螺旋体,它在特殊的培养基中活存数小时,当加入梅毒病人血清和补体后,能使梅毒螺旋体停止活动,非梅毒血清却不能制止其活动。TPI 试验虽然具有很高的特异性,但敏感性较差,已不被推荐使用。

应用死的梅毒螺旋体固定在玻片上,加上梅毒病人血清,使血清抗体附着在螺旋体上,再加上抗人 IgG 荧光结合物,使之与抗原抗体结合,在荧光显微镜下观察结果,可见有荧光的螺旋体,这就是荧光螺旋体抗体试验,由于正常人体内可能寄生过螺旋体,它与梅毒螺旋体之间有共同的群抗原,因此在待检血清中可能有“群”抗体而出现非特异性反应。Hunter 等(1964)应用人工培养繁殖的非致病性螺旋体 Reiter 菌株提取物作为吸收剂,吸收待检血清中可能存在的群抗体,再用吸收过的血清做试验,取得更为特异和更为敏感的效果,这就是荧光螺旋体抗体吸收试验(FTA-ABS),被认为是标准的螺旋体抗原试验。FTA-ABS 试验阴性时,常因看不到发出荧光的螺旋体而怀疑是否因玻片上没有螺旋体而产生假阴性反应,因此有人对 FTA-ABS 试验进行两次染色,在荧光显微镜上看到砖红色螺旋体为阳性反应,看到黄绿色(荧光素)螺旋体为阴性反应。

梅毒螺旋体经超声波破碎作为抗原致敏在经甲醛处理的绵羊红细胞上,用于检测梅毒病人血清中抗螺旋体抗体,即梅毒螺旋体血细胞凝集试验(TPHA)或梅毒螺旋体微量血凝试验(MHA-TP),用火鸡红细胞作抗原载体的叫 HATTS 试验。这些试验不需要荧光显微镜,操作比较简单,容易读取结果,其特异性与敏感性与 FTA-ABS 试验相似,已被广泛用于梅毒病的证实试验。近几年来卫生部兰州生物制品研究所和中国性病防治研究中心已有 TPHA 和 FTA-ABS 试剂盒供应。

近来研究人员对血清抗螺旋体 IgM 抗体的检测做了许多工作。由于 IgM 分子较大,五聚体不能通过胎盘和血脑屏障,而且人体受感染后首先出现的抗体是 IgM 类,用异硫氰酸荧光素(FITC)标化抗人 IgM 抗体代替抗人 IgG 抗体检测抗螺旋体抗体,可诊断胎传梅毒、一期梅毒早期、晚期神经性梅毒、重新感染,如 IgM-FTA-ABS 试验、19S-(IgM)FTA-ABS 试验,还有 IgM-TPHA 试验、IgM 固相血吸附试验(SPHA)、IgM 捕获酶免疫试验等。这些试验有的特异性较差或操作过于复杂,有的尚待进一步研究,因此不适于常规检查或不被推荐使用。今后可能采用先进技术,如应用基因重组技术或合成肽技术制备梅毒螺旋体抗原特异性片段作为检测抗原,应用 ELISA 等方法检测,可提高敏感性和特异性。

自从华氏建立血清学试验以来,试验种类已超过 200 种,但目前最常用者只有数种,如 VDRL、USR、RPR、FTA-ABS、MHA-TP(TPHA)等试验。世界卫生组织(WHO/VDT/89.443)对早期梅毒(1期、2期)血清学试验常规诊断作以下推荐:(1)用 RPR 试验检测(筛选)血清,阳性者再作定量试验。(2)用 MHA-TP 试验对阳性血清进一步证实,以排除假阳性。(3)对可疑反应,RPR 与 MHA-TP 试验结果不一致或与临床表现不符合者,应重新抽血复试,如仍不符合者应用 FTA-ABS 试验作最后判断。

#### 参考文献

- Harris A, et al. J. Vener Dis. Inform., 1946, 27: 169.
- Portony J, et al. Public Health Rep., 1961, 76: 93
- Hunter E F, et al. Public Health Rep., 1964, 79: 410
- John D Dyckman, et al. J. Clin. Microbiol., 1976, 4: 145
- Edwin H L, et al. Manual of clinical microbiology., 4th Ed. Washington, American Society for Microbiology, 1985, 916

6 全国性病研究协作组,中华微生物学和免疫学杂志,1989,9: 323

7 许旭初,朱华松,李琼芳,中国生物制品学杂志,1991,3 封 2  
(卫生部武汉生物制品研究所许旭初研究员撰)

**特异性 T 抑制(Ts)细胞与自身免疫病** specific suppressor T cell and autoimmune disease 对自身抗原的耐受不是由于缺乏免疫应答细胞,而是它们主要被 Ts 细胞所抑制。阐明特异性 Ts 细胞在自身免疫病发病中的作用,试图通过增强和诱导特异性 Ts 细胞防治自身免疫病是十分有意义的探索。

1971年, Gershon 和 Kondo 首先报告了功能上呈抑制性 T 淋巴细胞的存在,接着许多实验者用体内外多种方法证明确有抑制体液免疫(抗体生成)和细胞免疫[如迟发型超敏反应(DTH)、移植物抗宿主反应、混合淋巴细胞反应]的 Ts 细胞存在。

小鼠 Ts 细胞是异质性的,有 I-J<sup>+</sup>Ly-1 抑制诱导(Ts 1)、I-J<sup>+</sup>Ly-1、2 抑制诱导(Ts 2)和 I-J<sup>-</sup>Ly-2、3 抑制效应(Ts 3)3 种细胞。与其它 T 淋巴细胞亚群特性相比, Ts 细胞对组胺、茶硷、前列腺素 E<sub>2</sub>、刀豆素 A、丝裂霉素 C 以及 x 射线敏感。另外,细胞表面的 I-J 抗原和 IgG Fc 受体与细胞抑制功能有关。

体外试验证明,人外周血有 Ts 细胞存在,有 T4<sup>+</sup>2H4<sup>+</sup>的诱导细胞(T4<sup>+</sup>4B4<sup>+</sup>细胞是辅助诱导细胞)和 T8<sup>+</sup>的 Ts 效应细胞。人的 Ts 细胞除没有 I-J 抗原外,其余的特性类似小鼠 Ts 细胞。

临床至少报告有 13 种器官特异性的和非特异性的自身免疫病,在疾病活动期 Ts 细胞功能明显低下, T8 和 T4<sup>+</sup>2H4<sup>+</sup>细胞数相对地和绝对地减少,但也有不一致的报告。值得重视的是自身免疫病(如免疫性甲状腺病、I 型糖尿病、慢性活动性肝炎(非病毒性)的特异性 Ts 细胞,不仅在活动期,而且在自身抗体出现前和缓解期都持久低下。Leiboing 等发现,正常人淋巴细胞能诱导出 DNA 的特异性 Ts 细胞,而系统性红斑狼疮患者则不能,但能诱导对其它抗原的特异性 Ts 细胞。说明特异性 Ts 细胞缺陷才是自身免疫病发病机理的中心环节。

抗原刺激免疫应答细胞的同时,也激活 Ts 1 细胞使其分泌 Ts 因子(TsIF),后者作用于 Ts 2 细胞,再激活 Ts 3 细胞,分泌抑制因子(TsF),因子与有 TsF 受体的非特异性 T 细胞和巨噬细胞结合,抑制这些细胞功能,因而抑制 IV 型超敏反应。

1987年, Lynch 等研究 Ts 细胞对浆细胞瘤分泌免疫球蛋白(Ig)的影响,认为 Ts 细胞除通过 Th 细胞间接作用外,主要是直接抑制 B 细胞的抗体生成。Ts 细胞对 B 细胞膜上 Ig 的识别有四种类型:识别已与 Ig 结合的半抗原以及 Ig 本身的独特型(Id)的、同类型和同种异型的抗原决定簇。

Ts 细胞除直接作用免疫细胞外,还可通过抑制因子抑制应答细胞分泌淋巴因子,抑制增生反应和阻遏 B 细胞 Ig 重链基因的表达,抑制 Ig 的生成。

已分离出 TsIF 和 TsF 两种抑制因子。TsIF 是抑制诱导细胞分泌的,分子量为 68 000~72 000,它由两条分开的肽链,一条能结合抗原,另一条有 I-J 抗原及重链可变区的结构。TsF 是抑制效应细胞分泌的,由一条分子量为 68kd 的多肽组成, TsF 能结合抗原,没有 I-J 抗原,但有 I-A 抗原。

由于 Ts 细胞表面没有独特的标志,所以无法分离和纯化 Ts 细胞。但是在体外经抗原长期刺激,能诱导出特异性 Ts 细胞株。这对深入研究 Ts 种类、调节和作用机理都是十分重要的。已建立对乙酰胆碱受体(Ach R)特异的对鸟苷特异的小鼠 Ts 细胞株,对髓鞘碱性蛋白(MBP)特异的大鼠 Ts 细胞株以及对 DNA 特异的人 Ts 细胞株,从有限的 Ts 细胞株表型分析来看,多数是 T4 细胞,少数是 T8 细胞。

1989年, Cohen 提出有两类 Ts 细胞,一类是识别抗原的与 Th 细胞相对的 Ts 细胞,另一类是识别对抗原应答的免疫细胞(T<sub>H</sub>、T<sub>C</sub> 和 B)上的 Id,即抗 Id 的 Ts 细胞。前一类 Ts 细胞需用抗原诱导,后一类 Ts 细胞需用已致敏的淋巴细胞来诱导。

Ts 细胞有非特异性诱导和特异性诱导两种方法。前者常用小剂量刀豆素 A 诱导,后者用可溶性高剂量抗原或一定数量的致敏淋巴细胞来诱导。选择性免疫抑制剂,如环孢霉素 A、FK506 能激活 Ts 细胞,抑制其它淋巴细胞。因此,抗原与上述免疫抑制剂联合应用,能选择性诱导出特异性 Ts 细胞。

用 Ts 细胞防治动物自身免疫病已有一定效果。输注对 MBP 特异的 Ts 细胞株,能抑制和预防实验性变态反应性脑脊髓炎(EAEM)。用对 Ach R 特异的 Ts 细胞株能防止实验性重症肌无力的发生。注射亚致病剂量被 MBP 致敏的淋巴细胞,能诱导出抗 Id 的特异性 Ts 细胞,防止 EAEM 的发生。

虽然众多试验资料支持 Ts 细胞的存在以及它们在自身免疫病发病机理中所起的重要作用,但是也有不同的意见。今后研究的焦点是:(1)与其他 T 细胞亚群不同,Ts 细胞株不表达识别抗原的受体(TCR),因此它是如何识别抗原的?(2)I-J 抗原是小鼠 Ts 细胞重要成分,原认为 I-J 基因位于主要组织相容性复合体(MHC)中,但是用 DNA 杂交技术未发现 MHC 有 I-J 基因。因此,I-J 基因到底在何处?I-J 抗原分子结构是怎样的?在免疫反应中起何作用?(3)T 细胞抑制因子的分子结构和基因结构是怎样的?作用机理是什么?它是如何被调控的?用因子治疗免疫性疾病的疗效怎样?(4)诱导特异性 Ts 细胞株仍然是重要的工作,可阐明 Ts 种类、激活过程、与其它调节细胞(如 Th、抗抑制和反抑制细胞)是如何相互联系和制约的。总之,为阐明复杂的免疫调节网络以及为上述研究提供细胞学基础。(5)自身免疫病发病机理是多机制的,不同病人其机理不尽相同。因此,如何评定哪些患者是特异性 Ts 细胞功能缺陷者,如何提高和恢复特异性 Ts 细胞功能,以达到预防和治疗的目的是?

#### 参考文献

- Green D R, et al. *Ann Rev Immunol*, 1983, 1:439~463
- Drof M E, Benacerraf B. *An Rev Immunol*, 1984, 2:127~158
- Morimoto C, et al. *J Immunol*, 1985, 134:1508~1515
- Asherson G L, et al. *Ann Rev Immunol*, 1986, 4:37~68
- Lynch R G. *Adv in Immunology*, 1987, 40:135~151
- Liebling M R, et al. *Arthritis rheum*, 1987, 30:s88
- Liebling M R, et al. *J Clin Immunol*, 1988, 8:362~371
- Tomer Y, Shoenfeld Y. *J Autoimmunity*, 1989, 2:739~758
- Cohen T R, Atian H. *J Autoimmunity*, 1989, 2:613~625
- Kawashima H, et al. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1990, 31(12):2500

(上海医科大学吴厚生教授撰)

#### 抗核抗体

antinuclear antibody(ANA) 抗细胞核成分的抗体,也包括抗细胞浆的一些抗体,确切地说它是细胞内成分的抗体总称。ANA 常见于系统性风湿病,且至少有 33 种以上的抗体。

临床上 ANA 检测用于诊断系统性红斑狼疮(SLE)、药物诱发红斑狼疮(DILE)、系统性硬皮病(PSS)、干燥综合征(SS)、混合性结缔组织病(MCTD)、皮炎肌/多发性肌炎(DM/PM),且对疾病分型、病情评定、治疗和预后都有价值。从分子水平研究 ANA 的抗原分子结构和功能,不仅为阐明疾病病因和发病机理以及防治奠定基础,也为分子生物学提供多种探针。所以,ANA 的研究是临床生物学家和细胞、分子生物学家共同研究的热点。

1948 年, Hargraves 等首先发现 DLE 患者的 LE 细胞,50 年代末确定 LE 因子就是抗 DNA 抗体和抗组蛋白(H)的抗体,揭开了研究 ANA 的序幕。

60 年代,用间接免疫荧光法观察到至少有 4 种不同核型的 ANA。用免疫沉淀法, Tan 等从可溶性核抗原(ENA)中找到 SLE 标记性 Sm 抗原。70 年代,从 ENA 中找到核糖核蛋白(RNP)、Ro/SS-A 和 La/SS-B、Scl-70 以及增生细胞核抗原

(PCNA)等相应的 ANA,奠定了风湿病免疫诊断学基础。

80 年代是 ANA 大发展时代。发现了抗 Jo-1、着丝点、Th/To、核层素、PM-1、核体、热休克蛋白等 25 种新的 ANA;建立了酶联免疫印迹技术,一次能同时检测抗 Sm、RNP、SS-A、SS-B、Scl-70、Jo-1 及核糖体等 7 种自身抗体,且提高 ANA 检测的特异性和敏感性。ANA 与分子生物学方法相结合,纯化了自身抗原,确定了分子量,分析抗原表位及其生物学功能,将自身免疫病和细胞生物学的研究又推进一大步。

80 年代推广用 HEP-2 细胞(人喉癌上皮细胞)替代鼠肝或鼠肾作基质,提高了检测 ANA 的阳性率,发现其免疫荧光核染色有 6 种类型:(1)均质型。核呈均匀着色,系抗 H 抗体所致,常见 DILE 和 SLE。(2)周边型。核周边荧光强,中间暗,系抗双链(ds)DNA 抗体所致,与活动性 SLE 有关。(3)斑块(颗粒)型。荧光点分散在细胞核上,此型与抗 Sm、抗 RNP、抗 Scl-7、抗 SS-A、抗 SS-B、抗 PCNA、抗 Ku 等抗体有关,见于 MCTD、SLE、PSS、SS 等病。(4)着丝点型。有丝分裂的细胞可见 23~46 个荧光点,系抗着丝点抗体所致,见于 CREST(一种良性硬皮病)和雷诺氏综合征。(5)核仁型。仅核仁有荧光,与抗 U<sub>3</sub>-RNP、抗 DRNA 聚合酶、抗核仁核糖体等抗体有关,见于类风湿关节炎、PSS 和 SLE。(6)核被膜型。仅核膜染色,呈颗粒状周边型(而抗 ds-DNA 呈粗毛周边型),与抗核孔复合蛋白、抗核层素等抗体有关,见于 SLE、PSS、肝炎。

自身抗原成分非常复杂,从与 ANA 结合的抗原表位性质来看,有 DNA 和多肽两类。与 RNA 结合的蛋白称 RNP,位于胞浆的 RNP 称 ScRNP 或 Y<sub>1</sub>~Y<sub>6</sub>RNP,位于核质的称 nRNA 或 snRNP,位于核仁的称 noRNP;富于尿嘧啶的 RNP 称 U-RNP,它有 U<sub>1</sub>~U<sub>6</sub>RNP,除 U<sub>3</sub>-RNP 位于核仁外,其余位于核质。狭隘的抗 RNP 抗体是抗 U<sub>1</sub>-RNP。用 RNA 酶处理 RNP,能使 U<sub>1</sub>-RNP 和 SS-B 抗原性丧失(不影响其他 RNP 抗原性),提示 RNA 能使某些抗原表位外露。主要 ANA 与抗原表位和相应疾病的关系见表 1。

ANA 在体外能抑制 DNA、RNA 和蛋白质代谢,不同的抗体作用机理不同。Sm 和 U<sub>1</sub>-RNP 都能使前 mRNA 拼接,促进成熟;Scl-70 是 DNA 拓朴异构酶 I,参与 DNA 转录和复制;PCNA 是 DNA $\alpha$  聚合酶辅助蛋白,延长 DNA 复制相;聚 ANP 核糖聚合酶与 DNA 修复和细胞分化有关;RNA 聚合酶 I 有核糖体 DNA 转录作用;Jo-1、PL-7、PL-12 分别是组氨酸、苏氨酸、丙氨酸 tRNA 合成酶。上述表明自身抗原在细胞生命过程中参与复制、转录和翻译等重要过程。

抗核抗体的研究已取得瞩目成就,今后研究热点有下列诸方面:(1)自身抗原结构和功能的研究。这是自身免疫病和分子生物学的核心问题。用特异性 ANA 作探针,已成功地获得 Sm、U<sub>1</sub>-RNP、SS-B、PCNA 和着丝点等抗原的分子克隆(cDNA),为阐明自身抗原的结构、表位和功能奠定基础。有了人工合成的或基因工程生产的特异性抗原,必将提高 ANA 检测的特异性和敏感性。ANA 在体内能抑制细胞代谢,表明自身抗原的表位是蛋白质活性部位或酶活性中心,因而纯化自身抗原可作为研究分子生物学的试剂。(2)自身免疫病的病因学。迄今不明。有两条途径研究病因:一是从患病组织中直接分离病原体或基因片段,如从 SLE 细胞中找到 HIV(人免疫缺陷病毒)和人 T 细胞白血病病毒;二是从自身抗体的特异性提出可能的病因。由于不同的风湿病有各自标记抗体和不同抗体谱,推测病因模拟抗原表位结构,激发免疫应答。因此,怀疑与自身抗原交叉反应的病原体为病因是合理的。(3)自身免疫病的发病机理。除 IgG 类抗 ds-DNA 抗体之外,其余 ANA 的致病作用仍不详,抗体能否进入细胞与抗原结合,对细胞功能有无影响,这些都有待解决。(4)抗核抗体的调节。抗独特型(Id)抗体是免疫调节网络的一部分。有的抗 Id 抗体能抑制 ANA 的生成,有的则增强抗体生成,参与自身免疫病发病机理。因此,如何诱导前者抑制后者,则是努力方向。

表 1 抗核抗体与对应抗原的表位和相关疾病

| 抗核抗体                     | 对应抗原                                                                 | 抗原表位                        | 相关疾病                    |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| <b>抗 DNA</b>             |                                                                      |                             |                         |
| 1. 抗 ds-DNA<br>仅抗 ds-DNA | 天然 DNA                                                               | DNA 螺旋结构                    | SLE <sup>a</sup>        |
| 2. 抗 ss-DNA              | 变性 DNA                                                               | 核糖磷酸碱基                      | DILE, SLE               |
| <b>抗组蛋白</b>              |                                                                      |                             |                         |
|                          | H1, H2A, H2B, H3<br>H4 及 H2A-H2B                                     |                             | DILE, SLE               |
| <b>抗非组蛋白染色质蛋白</b>        |                                                                      |                             |                         |
| 1. 抗 Sc1-70              | 100 000 天然蛋白                                                         | 70 000 多肽                   | PSS <sup>a</sup>        |
| 2. 抗着丝点                  | 着丝板蛋白                                                                | 17 000, 80 000 和 140 000 多肽 | CREST <sup>a</sup>      |
| <b>抗核糖核蛋白</b>            |                                                                      |                             |                         |
| 1. 抗 U <sub>1</sub> -RNP | U <sub>1</sub> -RNP                                                  | 22 000, 32 000 和 68 000 多肽  | MCTD <sup>b</sup> , SLE |
| 2. 抗 Sm                  | U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub> , U <sub>4</sub> -U <sub>6</sub> RNP | 11 000, 13 000 和 28 000 多肽  | SLE <sup>a</sup>        |
| 3. 抗 Ro/SS-A             | ScRNP(Y <sub>1</sub> -Y <sub>5</sub> RNP)                            | 52T 60 000 多肽               | SS, SLE <sup>...</sup>  |
| 4. 抗 La/SS-B             | RNA 聚合酶 II 转录产物                                                      | 48 000 多肽                   | SS <sup>b</sup> , SLE   |
| 5. 抗 rRNP                | 核糖体磷蛋白                                                               | 15 000, 16 000 和 38 000 多肽  | SLE <sup>a</sup>        |
| 6. 抗 Jo-1                | 组氨酸 tRNA 合成酶                                                         | 50 000 多肽                   | PM <sup>a</sup>         |
| 7. 抗 PL-7                | 苏氨酸 tRNA 合成酶                                                         | 80 000 多肽                   | DM/PM <sup>a</sup>      |
| <b>抗核仁</b>               |                                                                      |                             |                         |
| 1. 抗 Fibrillarlin        | U <sub>3</sub> -RNP                                                  | 34 000 多肽                   | PSS <sup>a</sup>        |
| 2. 抗 RNA 聚合酶 I           |                                                                      | 11~210 多肽                   | PSS <sup>a</sup>        |

a: 标志抗体 b: 相对诊断意义

SLE: 系统性红斑狼疮; DILE: 药物诱导红斑狼疮; PSS: 系统性硬化症; CREST: 一种良性硬化病; DM/PM: 皮肌炎/多发性肌炎。

参考文献

- 1 Tan E M, Kunkel Kundel H G. J Immunol., 1966, 96: 464~471
- 2 Tam E M. J Lab Clin Med., 1967, 70: 800~812
- 3 Aspaugh M A, Tan E M. J Clin Invest., 1975, 55: 1067~1073
- 4 Douvas A S, et al. J Biol Chem., 1979, 254: 10514~10522
- 5 Tan E M. Adv Immunol., 1982, 33: 167~240
- 6 Habets W J, et al. Clin Expo Immunol., 1983, 54: 265~276
- 7 Tan E M. Adv Immunol., 1989, 44: 93~151
- 8 武建国, 主编. 实用临床免疫学检验, 南京: 江苏科学技术出版社, 1989. 269~273
- 9 许以华, 等. 中华内科杂志, 1990, 29: 472~475

(上海医科大学吴厚生教授撰)

**干扰素拮抗因子——组织凝集素** 近年来国内外对动物体内的凝集素——内源凝集素的生物学活性及功能给予极大的关注, 尤其是随着从鱼类、鸡肝、鼠肺及兔、牛的心、肺、脾和肌肉, 人肺、肝和胎盘组织中不断发现新的凝集素以后。1984年, 巴郎德斯(S. H. Barondes)指出凝集素可能以两种方式存在: 一种所谓“整体”形式, 它从细胞浆膜通过糖配基连到细胞表面, 该分子可能具有受体或输送的功能; 另一种为可溶性分子, 它可能在细胞外间质中形成大分子复合物并与糖结合后发挥作用。许多资料表明, 内源凝集素在动物体内能介导蛋白和糖的相互作用, 是细胞识别、粘附和分化过程中的重要因素。在胚胎形成和发展过程中, 内源凝集素对发育有调节作用。后又发现内源凝集素和细胞恶化、肿瘤恶性程度以及肿瘤的转移等有关。

自1957年艾萨克(A. Issac)等发现干扰素以来, 除对干扰素的理化特性、抗病毒活性等做过大量的研究外, 还发现干扰素能延缓细胞的增殖、影响细胞骨架的分布、改变细胞的游动性、增加某些表面抗原的表达以及对免疫系统有重要的调节作用。干扰素还具有抗肿瘤的活性; 降低或延缓某些自发的或实验诱导的肿瘤

发生与发展。早在70年代, 查奈(C. Chany)等认为干扰素抗病毒作用的调节机理位于组织, 并发现在胚胎组织如羊膜和绒毛膜, 肿瘤组织如人肉瘤和鼠肉瘤, 人和猩猩的脑组织以及正常肌肉组织中存在一种干扰素拮抗因子。1983年, 蒋盘宏和查奈等从地鼠肉瘤组织中分离纯化出一种内源凝集素, 并首次命名为“组织凝集素”。组织凝集素具有下述生物学活性: (1)它能凝集多种正常的和转化的细胞, 对正常的T、B淋巴细胞也有凝集作用。不同组织来源的凝集素, 其凝集细胞的活性可被特异性单糖所抑制。如来源于地鼠肉瘤组织的凝集素, 其凝集细胞的活性可被半乳糖醛酸所抑制, 而来源于人胎盘组织的凝集素则被乙酰神经氨酸所抑制。(2)组织凝集素能降解由干扰素诱导的抗病毒状态。干扰素具有抗病毒和抗肿瘤的作用, 业已证明干扰素诱导的抗病毒作用与干扰素诱导的两个继发蛋白质有关: 蛋白激酶和2-5A合成酶。细胞经干扰素诱导后, 上述两种酶的含量明显升高。1988年, 蒋盘宏等证明组织凝集素能抑制大约70%细胞内这两种酶蛋白的合成。进一步的研究资料表明, 组织凝集素可特异性抑制上述两种酶的合成, 它对细胞内其它的酶如碱性磷酸酶、肌酸肝激酶等没有影响。(3)组织凝集素有刺激细胞增殖的活性并在免疫调节机理中有重要的作用。1990年, 查奈-傅尼尔(F. Chany-Fournier)等证实组织凝集素能刺激包括正常淋巴细胞在内的多种细胞的生长, 并且它可与一些生长因子一起对细胞生长起到协同的作用。在用莫洛尼肉瘤病毒转化小鼠纤维细胞而变成肿瘤细胞的研究中发现, 转化的细胞携带着V-mos肿瘤基因。但该肿瘤细胞经小剂量干扰素长期处理后, 又逆转成非肿瘤细胞, 并恢复某些正常细胞的特性, 如部分恢复细胞的骨架, 恢复接触抑制等。把这种逆转细胞给小鼠注射不再产生肿瘤。肿瘤细胞和逆转细胞DNA限制性内切酶图谱揭示, 这两种细胞染色体DNA都含有V-mos基因, 但是在逆转细胞中发现含有β-干扰素, 而且在逆转细胞中发现组织凝集素的含量也有变化。这些结果指明组织凝集素和β-干扰素在肿瘤细胞逆转成非肿瘤细胞的过程中也起着重要的作用。

组织凝集素是从组织提取液中分离与纯化的, 它可采用胃蛋白酶消化、Sephacryl-s200柱层析、离子交换层析、Octyl-

agarose 琼水性层析,最后采用特异性单糖亲和层析或高压液相层析(HPLC)等获得在 SDS-PAGE 凝胶电泳上显示一条带的电泳纯产品。组织凝集素是一种糖蛋白,它被胰酶、蛋白酶破坏,对胃蛋白酶和核酸酶有耐性。组织凝集素能耐受不同温度和 H<sup>+</sup> 浓度,一些去垢剂如 SDS 也不能破坏其活性。在对组织凝集素理化特性研究的基础上,制备组织凝集素的抗体,采用免疫荧光和免疫电镜进行了研究。1987 年,蒋盘宏等对正常细胞和肿瘤细胞进行研究后指出:成熟的组织凝集素颗粒位于细胞表面,并显示出肿瘤细胞表面的含量远远超过正常细胞,这些与生物学试验证实的组织凝集素在肿瘤组织中含量高于正常组织的结果相吻合。

目前已有多种内源凝集素克隆到其基因。组织凝集素经过研究也已克隆到其基因片段。采用免疫抗体筛选,以噬菌体人 g11 作为载体,从人胎盘 cDNA 文库中的 50 万个克隆中筛选到 3 个阳性克隆。经多次亚克隆及反复验证后证明为特异性克隆,并对这些克隆进行了核苷酸序列分析。通过基因库查证明,组织凝集素基因是一个新的基因片段。但是到目前为止,大多数内源凝集素仍停留在氨基酸序列分析和其同源性比较的研究方面,像组织凝集素这种既了解其生物学功能又已知其基因片段的内源凝集素仍是少数。

当今国际上对内源凝集素的研究愈来愈受到人们的关注,有许多研究工作者在从事新的内源凝集素研究时并重视其生物学功能的研究。研究工作包括理化特性、生物学功能、组织免疫化学等方面,而且把研究工作推向分子水平;对内源凝集素氨基酸序列分析、克隆其基因以及对细胞膜上内源凝集素受体等方面正在做大量的工作。通过上述研究工作试图对不同种系及组织来源的凝集素基因进行同源性比较,以了解其生物进化过程中的功能关系。

此外,发现内源凝集素在胚胎发育过程中有很重要的作用。近年来对胚胎发育过程中的内源凝集素的研究也较多,有人从胚胎组织分离到凝集素,而且凝集素的单糖配基随胚胎发育过程的变化而改变,这对阐明胚胎生长发育的机理无异是有帮助的。

目前,对肿瘤发生的机理尚不清楚。近年来有人发现内源凝集素对细胞恶化、肿瘤恶性程度以及肿瘤的转移等有关。有关这方面的研究工作主要集中在下述两个方面:一方面研究内源凝集素在肿瘤发生与发展过程中的确切作用;利用凝集素能凝集细胞的功能及其单克隆抗体来阻断肿瘤细胞的转移是当今肿瘤治疗研究中的又一个重要方面。从无脊椎动物到高等脊椎动物都发现有凝集素,而且不同组织来源的凝集素其特异性抑制单糖也不相同,加上尚有许多凝集素有待发现,因此要真正弄清内源凝集素在生物进化过程中的作用以及其确切的生物学功能尚有待进行广泛深入的研究。

#### 参考文献

- 1 Barones S H. Science, 1984, 223: 1259
- 2 Jiang P H. European journal of cell Biology, 1987, 43: 384
- 3 Jiang P H. et al. J. Biol Chemm., 1988, 263: 19154
- 4 Chany-Fournier F. et al. Growth Journal of cellular physiology, 1990, 145: 173

(卫生部北京生物制品研究所蒋盘宏撰)

**抗 DNA 单克隆抗体** 在体外由杂交瘤细胞产生的一种免疫球蛋白,主要为 IgG 和 IgM 类。由于制备方法不同,其分子量及其特性亦不相同。抗 DNA 单克隆抗体与 DNA 有较强的反应特性,但因 DNA 结构的复杂性,它亦可与 RNA、心脂、核苷及某些蛋白发生交叉反应。抗 DNA 单克隆抗体已广泛地应用于医学、分子生物学、遗传学等诸多领域。

80 年代初,人们着重研究抗 DNA 单克隆抗体的制备方法及其特性。1980 年安德捷耶夫斯基(C. Andrzejewski)首次用 MRL/1 小鼠的脾细胞与 BALB/C 小鼠的骨髓瘤细胞融合制

备了抗 DNA 单克隆抗体,提供了制备抗 DNA 单克隆抗体的方法,并证明这种抗 DNA 单克隆抗体可以与 RNA 及某些核苷结合。1982 年肖恩菲尔德(Y. Shoenfeld)报道了用自身免疫病人外周血淋巴细胞与人骨髓瘤细胞(GM 4672)融合建立了抗 DNA 单克隆抗体的杂交瘤细胞株,证明自身免疫病人外周血 B 淋巴细胞具有较强的分泌抗 DNA 抗体的能力,为揭示抗 DNA 抗体的来源提供了实验依据。1984 年凯姆斯(E. Caims)首次证明了用正常人的扁桃腺淋巴细胞同样也可以产生抗 DNA 单克隆抗体,但有些抗 DNA 单克隆抗体却不能与双链 DNA 结合,说明由正常人淋巴细胞产生的抗体,在其反应特性上与那些来自自身免疫病人淋巴细胞所产生的抗 DNA 抗体不同。1984 年德莱奇(G. Delage)用联有甲基化的牛血清白蛋白的双链多聚核糖核苷免疫 BALB/c 小鼠,经杂交瘤技术制备了抗 DNA 单克隆抗体,且这种抗体具有较高的效价。

抗 DNA 单克隆抗体的反应特性较复杂,研究颇多。无论是用上述哪一种方法制备的抗体都能与许多其他物质结合。维伦森(G. Valesin)发现抗 DNA 单克隆抗体可以与心脂发生反应。佩斯特克(Y. A. Napaistek)的实验结果表明抗 DNA 单克隆抗体可与细菌的细胞壁结合。也有人发现抗 DNA 单克隆抗体可与 RNA 和多聚核苷酸结合。

1986 年波拉德(K. M. Pollard)认为 DNA、核苷和心脂具有共同的糖-磷酸骨架,代表了抗 DNA 单克隆抗体识别的决定簇,抗 DNA 单克隆抗体可能是识别这个共同决定簇的抗体。因此该抗体可以与具有上述结构的物质发生反应。然而,这种机制仍不清楚。

抗 DNA 单克隆抗体的制备开辟了用免疫学方法检测生物体液中 DNA 含量和研究基因结构用功能的新领域,1986 年特里(W. D. C. Terry)介绍了两种检测生物体液中微量 DNA 的方法,即酶联免疫吸附试验,一种是抗原捕捉法,该法将抗 DNA 单克隆抗体包被微量反应板,加入待测 DNA,再加入生物素标记的抗 DNA 单克隆抗体,利用生物素-亲和素酶底物系统显示结果。该法检测 DNA 敏感性可达 2ng/ml,但该方法只能检测 150 个碱基对以上的 DNA 片段。另一种是竞争法,该法是将热变性的 DNA 包被微量反应板,加抗 DNA 单克隆抗体与待测 DNA 混合。该法敏感性不及抗原捕捉法,检测的 DNA 最小含量为 150ng/ml,但该方法能检出小至 30 个碱基对的 DNA 片段。这两种方法可用于生物样品中低含量的 DNA 快速定量检测,尤其对检测小分子量 DNA 片段更为适宜,也适用于检测人血浆中 DNA 的含量。1987 年马姆奎斯特(M. Malmquist)应用抗 DNA 单克隆抗体来分析染色体及细胞核内基因的分布,免疫荧光试验显示染色体在核内呈斑点状分布,并且有个体差异。胶体金电镜表明,单克隆抗体优先结合细胞及染色体中的凝缩染色质,影响其功能,而不依赖于种类和细胞类型。另有人报道,抗胸腺嘧啶抗体能抑制癌细胞的生长。

抗 DNA 抗体较多见于系统性红斑狼疮病人血清中,可直接或间接造成严重的组织损伤,与病情密切相关。1987 年马迪奥(M. P. Mardiao)证明抗 DNA 单克隆抗体能与存在正常肾小球内的抗原结合,形成肾小球免疫沉积,并直接损伤肾小球。这对阐明狼疮肾的发病机制具有重要意义。1991 年小山应用抗 DNA 单克隆抗体包被微量反应板,用 ELISA 检测 DNA-抗 DNA 免疫复合物,结果表明此种免疫复合物沉积在肾小球基底膜上,在狼疮性肾炎病理中有重要意义。

抗 DNA 单克隆抗体具有广泛的应用前景。应用被修饰的核苷的单克隆抗体,可检测细胞周期中细胞核及染色体中被修饰的核苷,从而发现突变的基因,用于探讨癌基因的发生;应用抗 DNA 单克隆抗体可用于研究 DNA 的变性、复性和重复序列;应用免疫学方法显核酸分子杂交的结果正在研究之中,制备和应用抗 DNA 单克隆抗体是这一研究的方向;抗 DNA 单克隆抗体的问世,对于生物学基本理论的研究提供了一个新手段。应用抗 DNA 单克隆抗体还可能解决诸如控制衰老进程及防止癌基因表

达等一些重大人类福利问题;还可应用特制的抗体对人类遗传性疾病进行早期特异诊断,以确保优生,提高人口素质。

(吉林医学院免疫学教研室张兴民讲师撰;蒋明审)

**抗精子抗体** 能与精细胞抗原发生特异性相互作用的免疫球蛋白。在不孕症临床及避孕疫苗研究中具有重要意义。

20世纪初,梅契尼可夫(Mechnikoff)使用同种精子接种豚鼠获取了针对自身精子的抗体,从而证明了精细胞的自身免疫原性。20世纪中叶,茹姆凯(P. H. Rumke)、苏曼(S. Shulman)等先后证明抗精子抗体与人类不育间的相关。抗精子抗体检测遂成为不孕症病因诊断的一项内容。70年代,苏曼(S. Shulman)首先试用强的松龙治愈1例与抗精子抗体有关的不孕。1975年,在世界卫生组织的一次讨论会上,使用精子成份作为避孕疫苗的可能性开始受到重视。

精子的功能是把DNA传递给卵细胞。抗精子抗体并不能透过完整的细胞膜作用于精子的内部成分。在抗精子抗体的研究中,只有那些能够作用于精子表面抗原的精子抗体具有体内意义。精子表面抗原是精细胞膜的固成份。在精子表面无主要组织相容性抗原(MHC)表达。精浆成分对精子表面的附着构成了另一类精子表面抗原,称之为包被抗原。精子表面的ABO血型抗原即属于包被抗原。由于精子在获能过程中失去来自精浆的附加成分,精子包被抗原并不如固有抗原那么重要。通常所说的精子抗原仅指精细胞膜的固有抗原。处不同发育阶段的精子表面精子抗原的分布也会有不同。

精子抗原属于自身抗原。抗精子抗体属于自身抗体,其产生受机体的免疫遗传控制。在输卵管结扎术后,HLA B28阳性个体较易于产生高滴度的血清精子凝集抗体。精子抗原对免疫系统的刺激可以诱导抗精子抗体产生。然而无生殖道阻塞和异常的男性,甚至无异性性接触史的女性,同样也能产生抗精子自身抗体。1986年世界卫生组织对不同实验室所有的67株鼠抗人精子单克隆抗体进行分析,除了株之外,都可与生殖道之外的其它细胞发生反应。精子抗原的组织特异性实际上只是一种相对的概念。1988年,格莱肖(N. Gleicher)提出自身免疫不育综合症一词,认为自身识别异常,多克隆B细胞活化及自体排斥导致不育。

抗精子抗体对精子表面抗原的结合能够发生相应抗原在精子表面的帽化集聚,改变精子膜表面抗原的分布。IgG类精子抗体也可以活化补体使精子失活。宫颈粘液内的抗精子抗体可能在无补体参与的情况下使精子失活。魏特金(S. S. witkin)等证明在精子表面存在IgG的Fc受体。由抗精子抗体的桥接作用,可以解释与IgM无关的精子凝集。除凝集和制动外,抗精子抗体干扰生殖的机制还包括:(1)阻碍精子对宫颈粘液的穿透;(2)使精子易被吞噬细胞吞噬;(3)阻碍精子对透明带的穿透;(4)干扰精子膜与卵细胞膜的融合,导致多精子受精或阻碍受精;(5)干扰着床前胚胎的发育。抗精子抗体的生物学效应在很大程度上取决于相应精子表面抗原的生化功能。并非所有的抗精子抗体都能够干扰受精或着床。部分抗精子抗体阳性个体仍能维持正常的生育能力。

只有能够进入生殖道分泌液的抗精子抗体才能对精子发生作用。在生理状态下,只有极少量的抗体能够渗入生殖道。精浆和宫颈粘液中的抗精子抗体主要来自于局部合成,主要免疫球蛋白类型属于IgA。血清抗精子抗体的检出与生殖道分泌液内抗精子抗体的检出并先密切的相关关系。显然,可以应用于人体的抗精子避孕疫苗不仅应有对人体的免疫原性,还应能刺激生殖道局部的抗体合成。

几乎所有的抗体检测技术均已被试用于精子抗体的检测。使用活精子抗原的经典方法有精子凝集试验和精子体外制动试验。凝集试验技术包括对精子尾部凝集敏感的胶体凝集(GAT或kibrck法),对头对头凝集敏感的试管玻片凝集(TSAT)。2种不同的凝集试验技术通常要全并使用。血清 $\beta$ 脂蛋白成分可能导致非特异性凝集的发生。制动试验的方法有补体参与的制动试

验和无补体参与的制动试验。由于异种血清在无精子抗体存在的情况下也能使精子失活,无补体参与的精子制动机理不明,精子制动试验近年已很少被采用。

使用可溶性精子膜抗原制剂的方法,除传统的琼脂扩散试验外,还有:(1)间接血凝;(2)标记第2抗体ELISA;(3)标记可溶性精子抗原的反向ELISA;(4)吸印分析试验。由于现时尚无可靠技术分离纯化精细胞膜外层抗原,而精子本身又存在免疫球蛋白非抗原识别片段的受体,上述方法一概存在较高的背景噪音,使实验敏感度达不到预期的水平。

世界卫生组织近年推荐使用混合抗球蛋白反应试验(MARtest)和免疫胶珠试验(IBT)直接检测活动精子表面携带的抗精子抗体,使用精子宫颈粘液接触试验检测宫颈粘液中的抗精子抗体。MAR test的原理为经典的库姆柏斯(Coomos)试验,使用表面有抗D抗体的Rh阳性红血球与新鲜精子混合,再加入兔抗人(或羊抗人)免疫球蛋白,以活动精子表面附着红细胞为阳性。IBT用兔抗人免疫球蛋白重链特异性抗体共价交联聚丙烯酰胺胶珠与精子共育,以带有胶珠共同运动为阳性。由相应人免疫球蛋白的重链特异性可判断抗精子抗体的免疫球蛋白类型。使用IBT阻性供体精子抗体的免疫球蛋白类型。使用IBT阻性供体精子与血清、精浆或充分液化后的宫颈粘液共同培养,洗涤作用后的精子,再与免疫胶珠共育称间接IBT(IBT)。由于方法简单,具活精子表面特异性,干扰因素少,TBT是现时公认最好的精子抗体检测方法。精子-宫颈粘液接触试验机制不清,受宫颈粘液粘滞度及性激素的干扰,虽然简单,但并不可靠。近年改良的IBT已可用于宫颈粘液内的精子抗体检测。

用以检测抗精子抗体的其它方法还有:(1)使用全精子抗原包被,酶标记第2抗体的ELISA,(2)使用酶标记SPA代替标记第2抗体的ELISA,(3)放射碘标记第2抗体的抗球蛋白试验,(4)荧光标记单克隆抗精子抗体的抗原定位度量,(5)荧光标记第二抗体流体细胞计数,和6胶体全标记单克隆抗精子抗体或第2抗体等。使用死精子抗原的方法不排除精子内部成份的作用。标记抗体通过FC段与精子的结合可以产生背景读数。哈斯(Jr G. G. Hass, 1991)等近已证明放射标记第2抗体的方法及ELISA法并不如IBT敏感。

对精子抗体的研究加深了人们对免疫学不孕的认识,也加深了人们对精子结构的了解。使用人精子提取物接种动物,已能导致动物的不育。使用单克隆抗精子抗体作腹腔被动免疫,已可使小鼠生育力下降。然而,由于迄今尚未能分离到任何一种高精子特异性、并为精子功能必不可少的精子表面抗原成份,制备人用精子抗原避孕疫苗面临的难度还很高。

#### 参考文献

- 1 WHO. Development of vaccines for fertility regulation, Sc-riptor, Copenhagen, 1976, 17~80
- 2 Hill JA, Johnson PM. Clinical relevance of recent World Health Organization workshops on human sperm and trophoblast antigens. Fertil Steril, 1986, 46: 978
- 3 胡承阅. 着床及植入期免疫学研究进展. 生殖与避孕, 1990, 10(4): 3
- 4 Shulman S, Shulman JF. Immunologic factors as a cause of infertility, Infert Reprod Med N Clin Amer. 1991, 2: 351-369
- 5 Hass Jr GG, et al. Comparison of the indirect immunobead, and radiolabeled, and immunofluorescence assays for immunoglobulin G serum antibodies to human sperm, Fertil Steril, 1991, 377
- 6 Bandivdekar AH, et al. Antifertility effects of human sperm antigen in female rats, Contraception, 44: 559

(安徽计划生育研究所基础室胡承阅撰)

**抗精子免疫** 哺乳类动物和人类的精子在性成熟后才开



始产生,这一过程明显晚于免疫系统的发育。同时,由于血睾屏障的存在,精子在同免疫系统隔绝的精小管内发生。因此,精子的特有抗原不仅对同种雌性动物有免疫原性,而且对雄性动物也有免疫原性。所以,抗精子免疫的研究在免疫不育症的诊断和治疗方面以及免疫避孕方面都有十分重要的意义。

早在1899年,俄国梅契尼柯夫(Metchnikoff)和奥地利兰德斯坦纳分别发表了他们用精子抗原免疫动物后,产生免疫反应。50年代,法国活辛等进一步做了系统的研究,用豚鼠的睾丸组织加上某些免疫佐剂,注射给豚鼠后,产生实验性过敏性睾丸炎和附睾炎。实验性过敏性睾丸炎可以用免疫血清或免疫的T淋巴细胞进行被动转移。在国外,已有多篇介绍抗精子免疫的评论,如W. R. Jones(1982), P. E. Bigazzi(1987), S. Mathus and C. M. Fredericks(1988)。实验性睾丸炎小鼠的脾脏淋巴细胞具有明显的细胞介导的和补体介导的抗小鼠睾丸细胞的细胞毒作用(贾昆龙等,1986),表明体液介导的和细胞介导的免疫应答均同小鼠过敏性睾丸炎的发生有关。

抗精子免疫的研究同抗精子抗体的测定技术的发展分不开。经典的常用的测定方法包括多种精子凝集试验,精子制动试验和间接免疫荧光测定。后来发展起来的有放射免疫测定,酶联免疫吸附法(ELISA)和免疫微珠法。其中ELISA具有简易、可同时检测大量样品、无放射性污染等优点,所以广泛地用于临床和实验研究。免疫微珠法既可以测定结合在精子表面的抗体及其类别,也可以测定体液或分泌物内的抗体水平,类别以及在精子上的作用部位。这些技术的建立有力地推动了人类自发性抗精子免疫与不育症的关系的研究。大量研究表明,抗精子抗体可以在男女两性的血清、精浆、阴道分泌物、宫颈粘液和输卵管分泌物内检测到。在抗体类别方面,分泌物内以IgA为主,而血清内以IgG为主(贾昆龙,1991)。由于局部分泌性抗精子免疫在生殖过程中对精子有更加直接的作用,因此,局部分泌性的,结合在精子表面的抗体的测定有较高的临床意义。抗精子抗体与人类不育症之间的关系相当密切。在不育的夫妇当中,大约10%的男性和15%的女性有抗精子抗体。仅有1%具有正常生育能力的人产生抗精子抗体。人类的抗精子抗体可以引起精子凝集和制动,阻抑它穿过宫颈粘液。大约有50%以上的输精管结扎后的实验动物和人,血清内抗精子抗体阳性。动物实验表明,自输精管结扎后小鼠获得的单克隆抗体(单抗)能引起小鼠精子制动,明显降低小鼠体内和体外受精(贾昆龙,1988)。这些实验进一步证明,抗精子抗体的产生是某些患者输精管吻合术后仍不能生育的原因。

自发性的抗精子免疫能诱发免疫性不育,提示人们设法用精子疫苗来达到避孕的目的。未来的精子避孕疫苗可能有的优点包括:原则上可以用于两性,避孕持续时间长,有可逆性,无化学药物引起的毒副作用。但是,实用的这种疫苗必须有严格的精子专一性。为此,自1986年以来,世界卫生组织人类生殖处组织了全世界有关的实验室,用抗精子单抗为探针,寻找那些对精子功能和受精有明显阻抑作用,且专一地同精子发生反应的单抗。这些单抗的相应抗原作为精子避孕疫苗候选者。初步确定的单抗有S20(抗原是SP-10),S37和S61(安德森)。其中抗S20和S37的基因已经克隆,SP10的基因重组产物已经得到,用它作为免疫原,已在进行灵长目动物的避孕效果试验。此外,精子和睾丸细胞特有的乳酸脱氢酶-C4是研究得最早的精子避孕疫苗候选者。它的基因已经克隆,重组产物也正在用于避孕效果的研究。由于精子的成熟和运输,精子和卵子的相互作用,受精卵的运输,胚胎着床等等,均发生在生殖道,而生殖道是粘膜免疫系统的一部分。主要的抗体成分是IgA。因此,无论从抗精子免疫不育的诊断与治疗,还是从精子避孕疫苗的研制来说,研究抗精子IgA抗体的生物学作用都具有特别的意义(贾昆龙,1991)。

粘膜免疫系统的研究表明,欲刺激该系统产生足够强的免疫应答,应该通过局部粘膜的途径,特别是小肠的派伊尔氏小结。当以人精子抗原经小肠和派伊尔氏小结内注射给小鼠时,不仅可以在消化道局部产生免疫反应,而且子宫和附睾等生殖道组织也

有淋巴细胞分泌抗精子抗体(陈云亮等,1991)。用纯化的小鼠LDH-C4经消化道免疫小鼠,可得到抗LDH-C4的IgA单抗。为了模拟体内的状况,这些IgA单抗与纯化的小鼠分泌片在体外装配后,这些单抗对精子的功能和体外受精的作用并无明显变化。当以人精子用类似的方法免疫小鼠,制备抗人精子的IgA单抗,并与分泌片组装后,这些单抗也能影响人的精子功能和小鼠的受精率(贾昆龙等,曹筱梅等)。以上这些研究结果,表明粘膜途径免疫的重要性及抗精子IgA抗体确有影响生育力的功能。另一方面,由于首要的避孕对象是经济不发达的国家和地区,对子疫苗的大规模推广来说,口服免疫是最方便的途径。可是要研制出实用的口服精子避孕疫苗,任务还很艰巨。

#### 参考文献

- 1 Jones W R. Immunological fertility regulation. Blackwell Scientific Publication. Oxford. 1982, 90~146
- 2 Ben K, et al. in vitro cell-mediated and complement mediated cytotoxicity to murine testicular cells. Am. J. Reprod. Immunol., 1986, 12: 33~37
- 3 Bigazzi P E. (ed) Immunology of the male reproductive system. Marcel Dekker, inc., New York, 1987
- 4 Anderson D J, et al. Monoclonal antibodies to human trophoblast and sperm antigens; report of WHO-sponsored workshops. June 30, 1986. Toronto, Canada. J. Reprod. Immunol., 1987, 10: 231~257
- 5 Mathur S, Fredericks C M. (eds) Perspectives in immunoreproductive conception and contraception. Hemisphere Publishing Corporation, 1988
- 6 Ben K, et al. Vasectomy-induced autoimmunity; monoclonal antibodies affect sperm function and in vitro fertilization. J. Reprod. Immunol., 1988, 13: 73~84
- 7 Goldberg, E., LDH-C4 as the model sperm antigen for a contraceptive vaccine. In: Progress in vaccinology, Vol. 1, Contraception Research for today and the nineties. ed. by Talwar G. P. Springer-Verlag, New York, 1988
- 8 陈云亮,等. 以人精子抗原消化道免疫后的体液免疫反应, 实验生物学报, 1991, 24: 137~142, 1991
- 9 Ben K. Mucosal immune system and fertility regulation in mammal and human. Zool. Research, 1992, 12: 99~109, 1992

(中国科学院昆明动物研究所贾昆龙研究员撰)

**自由基与肿瘤** free radical and cancer 人们对肿瘤病因的认识长期无突破性进展。自从自由基化学揭露出自由基具有迅速增殖的链锁反应特征后,有人就把这一特征与肿瘤快速生长联系起来。1960年,圣乔其(Szent-Gyorgyi)最早从电子水平上来解释致癌机理,认为在体内蛋白质形成的电荷转移络合物是调节细胞分裂的关键。在形成电荷转移络合物时必然产生自由基中间体,细胞如果不能形成电荷转移络合物就会癌变。紫外线和电辐照等物理致癌因素,以及多种化学致癌物都能产生自由基,进一步支持癌变与自由基有某种联系的猜测。以前苏联艾曼努埃尔(Эмануэль)为首的学者们从20世纪50年代起就用顺磁共振仪测定多种癌组织自由基含量的动力学,并在1982年做了总结性的综述。他们发现自由基含量随癌变的发展而变化,初期含量渐增,晚期下降;而自由基的增加发生在任何症状出现之前,因此这一现象可作为癌症早期诊断手段。同时艾曼努埃尔还利用自由基清除剂来控制癌的生长,果然找到一批化疗药物。他们的结果未被欧美同行们证实。1977年,斯瓦茨(Swartz)指出癌组织的顺磁共振信号是由样品制备过程中产生的伪迹。现在人们重新认识到癌变与自由基的关系,并使自由基与癌变的研究进入一个新时期。

部分致癌剂只有经活化产生自由基才能引起细胞的癌变。

不管是天然的还是合成的间接致癌剂,在发生致癌作用前必须经过一个代谢活化阶段,即分子状态变成自由基,只有这些活化后的自由基才能与细胞中靶分子发生作用,直接损伤细胞组分,或间接干扰细胞的氧化还原状态,最终引起癌变。17种芳胺类化合物的致癌性与生成自由基能力的相关性表明:凡既能使细胞产生 $H_2O_2$ 和超氧阴离子( $O_2^{\cdot-}$ ),又能自身变成自由基的化合物,都有致癌性能;凡既不能使细胞产生 $H_2O_2$ 和 $O_2^{\cdot-}$ ,自身也不能变成自由基的,则无致癌性;介于中间的,即不能使细胞产生 $H_2O_2$ 和 $O_2^{\cdot-}$ ,但自身能变成自由基,则仍有中等程度致癌性。另一个重要例子是典型致癌物——苯并芘(a),它在体内能活化而产生多种自由基;它的同分异构体苯并芘(e)不能产生自由基,也不能致癌。

自由基能诱发和促进癌变;一个正常细胞发生癌变必须经历两个阶段,即诱发和促进,称两步致癌学说。这两个阶段都与自由基有关。癌变的物质基础是DNA或染色体的损伤,多种氧自由基以及由它们引发的脂类过氧化反应产物都能损伤DNA和染色体。1988年,郑荣梁等用物理的和化学的方法产生氧自由基,它们都能损伤DNA,凡是加强氧自由基的物质都能加剧损伤;凡是抑制氧自由基的物质都能减轻损伤。对脂类过氧化物的致癌作用虽已有肯定结论,但是也还存在不同的观点,例如圣乔其和斯莱特(Slater)等认为癌细胞所以快速生长正是由于缺少足够的过氧化物去抑制细胞分裂,并提出用脂类过氧化物抗癌的可能。1984年,康威尔(Cornwell)指出究竟起致癌还是抗癌作用完全取决于脂类过氧化物的浓度,从而沟通两种不同的观点。

促癌阶段也与自由基有关。在“自由基与促癌作用”的国际讨论会上,有文章指出:促癌剂作用的强弱与其产生自由基的能力相平行。能抑制促癌作用的物质,也能抑制自由基的产生。有实验资料证实,许多自由基清除剂确有抑制促癌的作用。

自由基致癌机理学说的提出,1977年,圣乔其根据只有高级需氧生物才患癌这一事实推测癌必与氧有某种关系。氧在体内代谢中首先通过单电子反应生成 $O_2^{\cdot-}$ ,它有毒性,超氧化物歧化酶(SOD)能催化 $O_2^{\cdot-}$ 的歧变而起保护机体的作用。大量资料证明,任何原因引起的各种各样癌变组织与相应的正常组织相比,其CuZn-SOD常低于正常,而Mn-SOD则几乎毫无例外地大大低于正常,所以可以把Mn-SOD活性的低下看作癌的特征。1980年,奥勃雷(Oberley)综合大量资料提出一个学说:细胞成熟过程中,由于某种特殊的局部环境使DNA发生突变,改变基因表达,使Mn-SOD不能随细胞的分化而渐增,而 $O_2^{\cdot-}$ 却仍像正常细胞那样逐步增加,于是 $O_2^{\cdot-}$ 本身或通过它产生的其它自由基,使关键性亚细胞结构损伤,发生癌变。癌变后的细胞对氧抑制细胞分裂和杀伤效应都不敏感,于是癌细胞保持着高度分裂的潜力。这一学说得到许多实验资料的支持。

在自由基致癌学说的指导下,提出许多抗癌新策略:(1)增加细胞氧自由基以杀伤细胞。氧自由基既有致癌作用,又对癌细胞有杀伤作用。许多抗生素类抗癌药,例如丝裂霉素、链霉素、阿霉素、柔霉素和博来霉素等都能产生氧自由基。(2)抑制SOD以增强癌细胞对氧自由基的敏感性。正常细胞含有CuZn-SOD和Mn-SOD,癌细胞的两种SOD都下降,尤其Mn-SOD下降得更多,如果把癌细胞中的CuZn-SOD也抑制住,则癌细胞的SOD总活性将极低,对氧自由基极敏感,而正常细胞的CuZn-SOD虽也受到抑制,但还保留着Mn-SOD,对氧自由基还有一定保护作用而不至于被杀死。二乙基二硫代氨基甲酸酯能专一地抑制CuZn-SOD而对Mn-SOD无效,它确实能有效地抑制癌细胞的生长。(3)给癌细胞外加SOD以破坏癌细胞的特征。已经发现SOD或拟SOD物质确有抗癌作用。(4)保护DNA免遭致癌自由基的攻击。普遍承认细胞DNA损伤是癌变的分子基础,致癌物(C)也能经活化产生自由基( $C^{\cdot}$ ),它能使DNA转变成DNA自由基,随后形成DNA-C加合物。1988年,戴兹达罗格鲁等(Dizdaroglu)把外来物质与DNA形成的加合物看作是包括癌症在内的许多疾病的“化学指纹”,可作为诊断新工具。1990

年,郑荣梁等设想如果利用某种非致癌物(N)与致癌物(C)竞争生成DNA-N加合物,以保护DNA免遭C攻击,可能阻止癌变,果然发现十种氮氧自由基对白血病细胞的生长和DNA的合成都有抑制作用,但把氮氧自由基还原变成分子后就失去抑制作用。已知氮氧自由基极易与其它自由基形成加合物,起着自由基清除作用,由此推测它们也能与DNA $\cdot$ 或 $C^{\cdot}$ 形成加合物,发挥抗癌作用。(5)用自由基清除剂或抗氧化剂以清除自由基或抑制脂类过氧化。值得重视的是许多抗癌中草药具有清除自由基和抗氧化作用。1990年,高尔德斯廷(Goldstein)等指出:尽管癌变的自由基学说已经积累了丰富的实验证据,但还有许多问题未彻底解决,许多学者认为自由基与癌的关系仍属生命科学中很主要的前沿学术领域。

#### 参考文献

- 1 Szent-Gyorgyi, A. Introduction to a Submolecular Biology. New York: Academic Press, 1960
- 2 Swartz HM, et al. Science, 1977, Vol 193, 198, 936~938
- 3 Oberley LW, et al. Med Hyp. 1980, 245~268.
- 4 Emanuel, NM, Floyd, RA., Free Radicals and Cancer. New York: marcel Dekker Inc. 1982. 245~319
- 5 Cornwell DG, et al. In: Pryor, WA. Free Radicals in Biology. Orlando: Academic Press, 1984. Vol 6, 96~148
- 6 Slater TF, et al. In: Thaler-Do, H, et al. Icosanoids and Cancer. New York: Raven Press, 1984. 21~29
- 7 郑荣梁,等. 生物化学与生物物理学报, 1987, (4): 317
- 8 郑荣梁,等. 中国科学(B), 1988, (4): 378
- 9 Goldstein BD, et al. Free Red Res Comms., 1990, 11(3): 3~10
- 10 郑荣梁,等. 中国科学(B), 1990, (6): 592

(兰州大学生物系博士生导师郑荣梁教授撰;方允中审)

#### 细胞因子

人和动物的淋巴细胞,单核-巨噬细胞以及一些其他细胞,受到刺激能产生一系列具有不同生物活性的因子。细胞因子特指其中与机体防御和免疫功能关系密切的蛋白因子。细胞因子调控血细胞和免疫细胞的分化、成熟和增殖,是各类免疫细胞相互联络的信号,是免疫系统联系神经、内分泌系统的化学介质。细胞因子的研究,对揭示正常的和病理情况下的免疫应答,对临床诊断和治疗均有重要意义。

1932年发现移动抑制因子(MIF),揭开了细胞因子研究的序幕。经过30多年停滞,1964年麦卡尼斯(G. B. Mackaness)等又发现了另一种因子——巨噬细胞活化因子(MAF),MAF能代替致敏的淋巴细胞激活巨噬细胞,赋予其杀菌活性,这对细胞免疫机理的探讨很有启发意义。60年代到70年代初,移动抑制因子(MIF)、单核细胞趋化因子(MCF)、巨噬细胞集落因子(MAggF)、淋巴细胞毒素(LT)、皮肤反应因子(SKF)、干扰素(IFN)、白细胞移动抑制因子(LIF)和淋巴细胞活化因子(LAF)等一系列来自淋巴细胞的和单核-巨噬细胞的细胞因子相继被发现。然而,限于当时的生物技术和细胞因子含量极微等原因,这些因子皆以生物活性命名,对其化学性质知之甚少,且当时注意的主要是效应因子。

1976年,摩根(D. A. Morgan)等发现T细胞生长因子(TCGF),免疫调节性细胞因子开始受到重视。1979年,国际会议提出白细胞介素(IL)的概念,将LAF命名为IL-1,TCGF命名为IL-2,多能集落刺激因子命名为IL-3。此后又相继发现IL-4, IL-5, IL-6, IL-7, ……和IL-15。基因克隆和重组技术的应用,推动了细胞因子的研究。1979年,谷口克(Taniguchi T)等首先克隆出IFN $\beta$ 的cDNA。继之IFN $\alpha$ (1980)、IFN $\gamma$ (1982)、IL-2(1983)、IL-1(1984)、CSF(1984~1986)、IL-3, 4, 5和6(1986)、TNF(1987)以及IL-2, IL-1等细胞因子的受体的基因克隆成功,迎来了细胞因子研究迅速发展的新时期,成为进展最快的免疫学领域之一。

DNA 重组细胞因子的出现,推动了细胞因子生物学、免疫化学和临床应用的研究。如今细胞因子是一大类主要的生物反应调节剂(BRM),其中 IFN $_{\alpha, \beta}$ , G-CSF, M-CSF, GM-CSF, EPO 和 IL-2 获准成为临床用药。研究生产细胞因子的 BRM 工程在国内外普遍兴起。

由于一种因子有多种活性,和多种因子有相同的生物活性,以活性命名造成过极大混乱, DNA 克隆技术的应用结束了这种局面。现在命名一种新因子,必须证明其有独特的 cDNA 结构。产生细胞因子的细胞是多种多样的,例如产生 IL-1 的细胞有单核-巨噬细胞、B 细胞、朗格罕细胞、角化细胞、HTLV-1 感染的 T 细胞和胶质细胞等,几乎包含一切有核细胞;产生 IL-6 的细胞有 T 细胞、心房粘液瘤细胞、纤维母细胞和星状胶质瘤细胞等。当然,不同的细胞所需要的刺激条件不尽相同。另外,同一种细胞依刺激条件可产生多种细胞因子,如辅助性 T 细胞中的 T $_{H1}$  产生 IL-2、IFN $_{\gamma}$  和 LT; T $_{H2}$  产生 IL-4、IL-5、IL-6、IL-9、IL-10 和 IL-13; T $_{H1}$  和 T $_{H2}$  均可产生 IL-3、G-CSF 和 M-CSF 等。目前虽然淋巴因子和单核因子的名字仍在沿用,但很显然以来源划分因子是欠妥当的,故趋向于通用细胞因子。细胞因子的作用是多种多样的,有些因子的功能以免疫效应为主;有些因子以调节造血和免疫细胞生成、抗体产生、主要组织相容性 I 类抗原表达和细胞间粘连分子(ICAM)及淋巴细胞功能相关抗原(LFA)表达为主,但多数因子兼有免疫效应和调节功能。

在免疫应答过程中,各种免疫细胞之间形成一个完整的统一的网络,细胞之间的信息传递和联络主要依靠细胞因子实现。一种细胞因子可诱导或者抑制其他因子的产生或发挥作用。如 IL-1 使 T 细胞产生 IL-2、IFN、CSF,使 T 细胞表达 IL-2 受体; IL-1 使纤维母细胞产生 IL-6。而 IL-2 又作用于 NK 细胞产生 IFN $_{\gamma}$ ; IL-2 作用于增殖的 T 细胞分泌 TGF $_{\beta}$ , TGF $_{\beta}$  抑制 T 细胞和 B 细胞增殖。在 IL-1 和 TNF 作用下,巨噬细胞和 NK 细胞分泌前列腺素 PGE $_2$ ,抑制免疫反应。神经免疫学是近年才出现的新学科,研究神经-内分泌-免疫系统网络如何共同维持机体内环境恒定。神经介质、激素和细胞因子是 3 大系统联结的纽带和桥梁。例如 IL-1 作用于下丘脑的体温中枢,是内源性热源,神经细胞也可以产生 IL-1。肾上腺激素、性激素和 PGE $_2$  通过抑制 IL-2 产生或 IL-2 受体影响免疫功能。生长激素 ACTH 和胰岛素也通过细胞因子作用于免疫系统。

一些肿瘤细胞能自发分泌某种细胞因子,并能自发接受这种因子的作用,自泌(autoocrine)性地恶性增殖。成年人淋巴瘤白血病(ATL)患者的淋巴细胞,自发分泌 IL-2 和自发表达 IL-2 受体;多发性骨髓瘤细胞自发分泌 IL-6 并表达 IL-6 受体,二者都能自泌性增殖。许多癌基因和细胞因子或者其受体的基因有同源性,如 sis 癌基因和血小板衍生生长因子- $\beta$ (PDGF $_{\beta}$ )的基因; erbB 癌基因和表皮生长因子(EGF)受体的基因; fms 癌基因和因子 CSF-1 的基因等。另外,肿瘤细胞能分泌一些生长因子,如 PDGF、TGF $_{\beta}$  和 IGF 等,故有些因子亦归为癌基因产物的范围。

随着 DNA 重组细胞因子的发现,各种因子的单克隆抗体相继发现,测定 IL-1、IL-2、IFN 和 TNF 等因子的 RIA 和 ELISA 试剂盒的灵敏度达到可用程度,不过迄今仍以生物活性测定法为主。在广泛测定病理情况下产生各种细胞因子及表达细胞因子受体表达能力的过程中,推动了对免疫缺陷病、自身免疫病、免疫增生性疾病、变态反应、感染、肿瘤、移植以及各种与免疫有关疾病发病机理的认识。在此基础上,一些细胞因子成为临床诊断指标,有些成为临床治疗措施。如红细胞生成素(EPO)治疗贫血; IL-3、G-CSF、M-CSF 和 GM-CSF 治疗单核细胞低下和中性粒细胞低下; IFN $_{\alpha}$  和 IFN $_{\beta}$  治疗病毒感染和白血病,尤其是毛白细胞白血病。罗森伯格(Rosenberg SA)小组开始将 IL-2 和免疫效应细胞并用,过继免疫治疗肿瘤,80 年代首先在美国,然后在越来越多国家进行临床追踪。当前所用的是淋巴因子激活的杀伤细胞(LAK)和肿瘤浸润淋巴细胞(TIL)。1988 年,罗氏报道用 IL-2+LAK 治肾癌、黑色素瘤、结肠癌和非何杰金淋巴瘤的有效率分别

为 17/54、6/34、3/27、3/4。其中,约 40% 的有效病例肿瘤完全消退。但对其他肿瘤的适应性尚难肯定,另有副反应性大等尚待评价。目前普遍认为这是肿瘤免疫治疗的突破性进展。用抗 IL-2 或抗 IL-2 受体单抗治疗肾移植急性排斥,不久可望用于临床。

分子克隆、细胞克隆技术和杂交瘤技术的推广应用,将继续推进细胞因子的深入研究,预计将会不断有新的因子发现,随着细胞因子受体研究的突破,必然深化和完善对免疫网络、神经-内分泌-免疫网络的认识。80 年代末出现的以基因扩增(PCR)技术测定细胞因子的方法,将会取代非特异的生物活性测定法;用转移细胞因子或其受体基因治疗有关免疫缺陷病的实验研究将进一步展开,以转移 EPO 基因治疗贫血症极有可能推向临床应用;目前出现的转基因和基因敲除鼠模型,作为研究细胞因子产生异常及自身免疫病的有力手段,将会推广应用。在临床上应用将更注重细胞因子的复合效应、细胞因子与神经介质和激素的联合效应。

#### 参考文献

- 1 Taniguchi T, et al. Nature, 1983, 302:305
- 2 Yokota T, et al. Immunol Rev, WTBZ J 1988, 102:137
- 3 Rosenberg S A. Immunol Today, 1988, 9:58
- 4 Suzu S, et al. Cancer Rev, 1989, 49:5913
- 5 Balkwill F R, Burke F. The cytokine network. Immunol Today, 1989, 10:299
- 6 矢岛治明, 濑川富朗, 著. 李惟, 等译. 生物体化学信息传递物质. 长春:吉林人民出版社, 1989. 410~452
- 7 Hudson L, Hay F C, et al. Practical Immunology. Oxford London: Blackwell scientific publications, 1989
- 8 Gilliland G, et al. Proc. Natl Acad Sci USA, 1990, 87:2725~2729
- 9 中野昌康, 日本临床(增刊号), 1991:252
- 10 Kishimoto T. Interleukins: Molecular Biology and Immunology. Basel, Karger, 1992

(北京中日友好医院赵武述撰)

#### 受精和着床中的血小板活化因子

血小板活化因子(PAF)是一类以丙三醇为核心, 磷酸胆碱为头部的中性类脂; 具极强的炎症及过敏介质活性。从排卵开始, 直到胚胎植入, 每一步都有 PAF 的参与。在不孕症治疗及局部的药物避孕方面, PAF 及其拮抗剂有着多种不同的应用前景。

1985 年翁奈尼(C. C. O'Neill)发现血小板计数下降是体内受精或体外胚胎置入后母体内最早出现的反应。这种血小板计数下降与 PAF 有关。体外胚胎能够释放 PAF, 即所谓胚源性 PAF(EDPAF)。1989 年阿比奈阿(A. C. Abisogun)等证明了哺乳动物的排卵也有 PAF 参与。1990 年库查(F. B. Kuzan)等发现精子获能后 PAF 的产量增加。以 PAF 增强精子活力, 提高受精率及体外受精胚胎置入成功率的尝试, 以及使用 PAF 拮抗剂干扰胚胎着床, 干扰受精的报导, 均已见于 1987 年后的文献。受精及着床期的 PAF 已成为近年来生殖生理研究中一个极为活跃折领域。

人精子有 PAF 活性。在精子获能的过程中, 随磷脂酶 A $_2$  活化, 伴 PAF 前体 lysoPAF 生成。后者在乙酰代酶的作用下, 转化为具有活性的 PAF。精子在获能过程中 PAF 含量迅速升高。获能精子的 PAF 含量比刚射出的精子高 50 倍左右。PAF 可以促进精子的高活动性运动。使用显微录相观察人精子的运动, 发现极低浓度的合成 PAF 便可明显增加精子活动度。在家兔精液中加入 PAF 受体拮抗剂, 见有与 PAF 拮抗剂有关的精子凝集和/或活动力下降。由于精子本身并不代谢花生四烯酸, PAF 及 PAF 拮抗剂对精子的作用应该与前列腺素类无关, 属于对精子细胞膜的直接作用。

排卵有 PAF 活性参与, 但卵细胞并无合成 PAF 的能力。胚源性 PAF 的合成显然与精子携入的酶活性及胚胎基因的活化有

关。体外受精人胚释放 PAF 已被不同学者证实,着床后人胚能否产生 PAF 尚无直接证据。但是海恩(T. R. Hearn,1987)等报导,非人灵长类胚泡在着床后仍能分泌 PAF。在孕酮的作用下,子宫内质细胞合成并释放 PAF。PAF 对内膜上皮细胞的作用改变内源性前列腺素的合成方式,增加  $PGF_{2\alpha}$  的合成。后者通过子宫卵巢循环参与维持黄体功能。安戈(M. J. Angle,1986)等对家兔子宫组织 PAF 的测定发现动情期家兔子宫内膜组织 PAF 含量开始升高,在受精后第 5 天升达顶峰,在胚胎植入后子宫内膜非胚泡附着部位 PAF 含量下降。另有报导,子宫肌层和膜上皮细胞不产生 PAF。

PAF 增加实验动物体内受精的成功率,PAF 拮抗剂抑制体内和体外受精。除增强精子的活动度外,PAF 还可参与精子对透明带的穿透。1990 年库查(F. B. Kuzan)等在小鼠卵细胞培养液中加入 PAF 受体拮抗剂 WEB208610<sup>-8</sup>M,去透明带鼠卵受精率不受影响,但保留透明带完整鼠卵细胞的体外受精率下降一倍,同时见透明带表面有过量的精子附着。用 PAF 体外处理精子作人工授精或体外人工受精均已见有报导。

受精后腹腔注射 PAF 拮抗剂,使小鼠早期胚胎着床率明显下降,同时注射 PAF 则可以拮抗这种下降。PAF 活性显然与着床过程的顺利进行有关。PAF 参与着床的可能机制有:促进早期胚胎的发育,参与胚泡对子宫壁的固定,参与着床早期滋养叶组织对子宫内壁的侵入性生长。

在体外受精人胚植入前的 24 小时于培养液内加入微量的 PAF 可以提高胚胎植入的成功率。翁奈尼(C. O'Neill)据此认为 PAF 是一种胚胎自身分泌的生长因子。已知胚胎发育需要外源性生长因子的刺激,胚源性 PAF 对母体组织的作用应能增加局部粘膜的渗出和生长因子的释放。现时已经证实着床前母体血清孕酮因子的出现与 PAF 对母体的作用有关。

PAF 可能参与胚泡对子宫壁的固定是基于下列推断。已知 PAF 具强有力的持续性平滑肌收缩活性和改粘膜肿胀活性,子宫内壁上皮和平滑肌细胞上有 PAF 受体。由于子宫内质细胞的 PAF 合成和释放应可通过子宫肌收缩及粘膜上皮肿胀缩小宫腔体积;在胚泡 EDPAF 的作用下使胚泡附着部位的局部粘膜肿胀进一步加剧。

PAF 可能参与着床早期胚泡对子宫内壁的侵入性生长。在胚泡附着部位下方的内膜上皮细胞同时接受来自胚泡的基底细胞的 PAF 的作用。高浓度的 PAF 可以损伤细胞膜,导致细胞内容物的释放。子宫内壁上皮细胞溶酶体含多种水解酶。子宫内壁上皮溶酶体酶的释放可以导致自身的消化及冗余透明带水解。体外培养胚泡透明带消失缓慢,多数认为与缺乏母体侧水解酶的作用有关。

调节精子,着床前胚胎和子宫内质细胞 PAF 合成的机制迄今仍不清楚。尤其是 PAF 和孕酮的关系仍有待于研究。亚历山大(N. J. Alexander)等发现微量的孕酮可以刺激精子活化。米列根(S. R. Milligan,1990)等对去卵巢小鼠延期着床所作的研究来发现 PAF 拮抗剂对外源性黄体酮所致延期着床的抑制作用,PAF 也未能诱导去卵巢小鼠子宫内壁的蜕膜化反应。也有报导认为与 PAF 有关的  $PGF_{2\alpha}$  释放参与着床阶段孕酮的合成调节。深入认识孕酮和 PAF 之间的相互调节的方式,将会使生殖内分泌研究进入到一个新的高度。

发现 PAF 在受精和着床中的作用,不仅为生殖生理研究开拓了一个新的研究领域,也为不孕症的治疗和计划生育科学研究提供了新的方向。PAF 已被试用于辅助生殖技术,如精子的体外处理和试管胚胎的培养。由 PAF 拮抗剂干扰受精、干扰着床的活性;在理论上,宫腔内使用 PAF 拮抗剂应能在多个环节上干扰早期生殖过程,而并不依赖于对子宫内壁的理化刺激,从而从根本上解决宫内节育器的副作用问题。现在已知的 PAF 拮抗剂有 CV3988,SR163-441,WEB2086,U66985 等。这些化合物与子宫内壁细胞有着不同的亲和力,但一般都有抗精子活性。在将 PAF 拮抗剂用于人类节育之前,首先要了解 PAF 拮抗剂对非孕期子

宫内膜的影响。

参考文献

- 1 Hearn TR, et al. Implantation in primates early embryonic secretion of chorionic gonatotropin and platelet-activating factor in vivo and in vitro, Hum Reprod, 1987, 2(32):71
- 2 Spinks NR, et al. Antagonists of embryo-derived Platelet-activating factor prevent implantation of mouse embryos, J Reprod Fertil, 1988, 84(1):89,
- 3 Angle MJ, et al. Platelet activating factor in the rabbit uterus during early pregnancy, J Reprod Fertil, 1988, 83(2):711
- 4 Abisogun AC, et al. The involvement of PAF in ovulation, Science, 1989, 243:381
- 5 Kuzan FB, et al. Role of spermatozoal platelet-activating Factor in fertilization, Prostaglandins, 1990, 39(1):61
- 6 Milligan SR, et al. Failure of platelet-activating factor PAF-acether to induce decidualization in mice and failure of antagonists of PAF to inhibit implantation, J Reprod Fertil, 1990, 88(1):105
- 7 胡秉阅, 血小板活化因子在受精着床中的意义, 生殖与避孕, 1991, 11(3):7

(安徽计划生育研究所基础室胡秉阅撰)

癌基因和抑癌基因 癌基因和抑癌基因是一组控制细胞增殖和分化的基因。环境和遗传改变能使癌基因激活、抑癌基因失活,于是它们之间的平衡被破坏,最终导致肿瘤发生。

1910 年,美国 P. Rous 用无细胞滤液使正常健康的鸡长出肉瘤,并由此推断存在一种能诱发鸡肉瘤的肿瘤病毒。直到 1950 年,由于纯化技术的发展和电镜的应用,这一发现才被证实。1963 年, M. Vogt 和 R. Dulbecco 利用多瘤病毒转化小鼠胚胎成纤维细胞获得成功,发现转化细胞能在幼年大鼠中形成肿瘤,表明极少量 DNA 就能在体外致癌。1969 年, S. Martin 利用大量的化学诱变剂使 Rous 肉瘤病毒中能引起细胞恶性转化的基因发生条件突变,首次证实了病毒癌基因的存在。1982 年, R. A. Weinberg, G. M. Cooper 和 M. Wigler 领导的 3 个小组,利用不同的方法分别克隆了肿瘤细胞中能使小鼠胚胎成纤维细胞恶性转化的“转化序列”,即细胞癌基因;以此为探针,在正常人基因组 DNA 中发现了大小相同、结构相似的同源基因,称为原癌基因。此后,科学家利用逆转录病毒传导、基因转移、逆转录病毒整合位点的克隆、扩增基因的克隆和染色体断裂(易位)点定位等手段,已发现近百种癌基因,根据其产物的功能可分为生长因子、生长因子受体、非受体蛋白激酶、G 蛋白和转录因子 5 类。

生长因子是一类通过与膜受体特异性结合而调控细胞增殖和分化的多肽分子,按其功能可分为启动因子和推进因子两类。前一类是静止期细胞进入细胞周期所必需的,它们往往能被癌基因所替代。与生长因子同源的癌基因见下表。

表 1

| 癌基因      | 同源的生长因子        |
|----------|----------------|
| sis      | 血小板来源生长因子 B 链  |
| int-2    | 成纤维细胞生长因子相关性因子 |
| hst(ks3) | 成纤维细胞生长因子相关性因子 |
| FGF-5    | 成纤维细胞生长因子相关性因子 |
| int-1    | 生长因子?          |

绝大多数生长因子的作用都通过具有酪氨酸蛋白激酶活性的受体。这些受体都由细胞外配体结合、穿膜和细胞内酪氨酸激酶 3 个结构域组成。很多癌基因编码这类受体(见下表)。

表 2

| 癌基因          | 同源的生长因子受体                     |
|--------------|-------------------------------|
| ros          | 膜相关受体样酪氨酸蛋白激酶                 |
| erbB         | 截短的(truncated)表皮生长因子受体蛋白酪氨酸激酶 |
| neu          | 受体样蛋白酪氨酸激酶                    |
| fms          | 突变的集落刺激因子-1 受体蛋白酪氨酸激酶         |
| met          | 可溶性截短的受体样蛋白酪氨酸激酶              |
| trk          | 可溶性截短的受体样蛋白酪氨酸激酶              |
| kif(W locus) | 截短的干细胞受体蛋白酪氨酸激酶               |
| sea          | 膜相关截短的受体样蛋白酪氨酸激酶              |
| ret          | 截短的受体样蛋白酪氨酸激酶                 |

此外,还一类胞质可溶性蛋白也具有激酶活性,它们有的具有酪氨酸蛋白激酶活性,有的具有丝氨酸蛋白激酶活性,和它们同源的细胞癌基因也多达 10 余种(见下表)。

表 3

| 癌基因         | 同源的蛋白激酶                 |
|-------------|-------------------------|
| src         | 膜相关非受体蛋白酪氨酸激酶           |
| yes         | 膜相关非受体蛋白酪氨酸激酶           |
| fgr         | 膜相关非受体蛋白酪氨酸激酶           |
| lck         | 膜相关非受体蛋白酪氨酸激酶           |
| fps/fes     | 非受体蛋白酪氨酸激酶              |
| abl/bcr-abl | 非受体蛋白酪氨酸激酶              |
| raf/mil     | 胞质蛋白丝氨酸激酶               |
| pim-1       | 胞质蛋白丝氨酸激酶               |
| mos         | 胞质蛋白丝氨酸激酶               |
| cor         | 胞质蛋白丝氨酸激酶               |
| erk         | 与含有磷酸酪氨酸的蛋白结合的 SH2/3 蛋白 |

蛋白磷酸化是调节真核细胞功能如细胞增殖和分化的重要机制。细胞内已发现大量的蛋白激酶参与信号传递、DNA 复制、基因转录等生长调控。信号传递开始于细胞膜上的受体,经过磷脂代谢等途径产生第 2 信使,或激活细胞内的一系列蛋白激酶,最终导致核内蛋白的磷酸化,使细胞进入细胞周期。按照底物的不同,激酶可分为酪氨酸蛋白激酶和丝氨酸蛋白激酶。此外,按作用机制的不同,又有细胞外信号调控激酶(ERK)、有丝分裂因子激活的蛋白激酶(MAP)、DNA 激活的蛋白激酶(DNA-PK)等族。

编码 GTP 结合蛋白的 ras 癌基因家族至少有 35 个成员,按氨基酸序列可分成 ras、rho 和 rab 3 个主要亚族。ras 蛋白与细胞生长和分化有关, rho 蛋白参与细胞骨架的组织, rab 与运输小泡有关。ras 蛋白通过与 GTP 结合或与 GDP 结合成为一种生物开关,它们控制的对象在不同种族的不同类型细胞中是不同的。此外,已发现不少 ras 相关的小分子三磷酸鸟苷酶参与细胞增殖和分化的调控(见下表)。

表 4

| 亚族  | 癌基因                                                                                                    | 功能               |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| ras | H-ras, K-ras, N-ras, TC21, R-ras, rap1A, rap1B, rap2A, rap2B, ralA, ralB, rhoA, rhoB, rhoC.            | ras 突变引起细胞转化     |
| rho | rac1, rac2, G25KA, G25KB, TC10                                                                         | 与肌动蛋白组织有关并控制细胞形状 |
| rab | rab1A, rab1B, rab2, rab3A, rab3B, rab3C, rab4A, rab4B, rab5, rab6, rab7, rab8, rab9, rab10, rab11, TC4 | 与小泡运输有关          |

很多癌基因编码序列特异性转录因子参与增殖和分化的调控,是细胞表面传入的有丝分裂信号的最终目标。按其结构特点,这类癌基因可分为 5 类(见下表)。

表 5

| 结构特点                                   | 癌基因                                        |
|----------------------------------------|--------------------------------------------|
| 含碱性 DNA 结合结构域的亮氨酸拉链(Luciferase zipper) | fos, jun                                   |
| 螺旋-环-螺旋族(helix-loop-helix)             | myc, N-myc, L-myc, lyl-1, tal, scl.        |
| 锌指(zinc finger)                        | myl/RAR $\alpha$ , erbA, evi-1, vav, gli-1 |
| 同源异构盒(Homeobox)                        | pbx, Hox-2.4, myb, rel, ets-1, ets-2       |
| 其它                                     | spi-1, ski                                 |

原癌基因的激活主要有突变、易位、逆转录病毒插入或扩增等多种手段,表现为氨基酸序列改变和表达水平增高两类。ras 基因第 12 位密码子的点突变使其产物从甘氨酸突变成缬氨酸是点突变激活癌基因的典型代表;c-myc 原癌基因从第 8 号染色体易位到第 14 号染色体而过分表达而被激活。此外,慢性粒细胞白血病由于 22 号染色体和 9 号染色体间易位而产生的费城染色体也是易位激活原癌基因的典型例子;基因扩增同样也能使原癌基因表达增高而被激活,使它们获得致病能力而使细胞癌变。

抑癌基因是与细胞增殖分化有关的另一类基因,当它们由于遗传损伤而失去功能时也能使细胞癌变。抑癌基因的发现来自 3 方面的研究结果。正常细胞和肿瘤细胞在体外融合能形成增殖性被抑制的杂种细胞,说明正常细胞中存在抑制肿瘤细胞恶性表现的遗传信息。对视网膜母细胞瘤遗传分析的结果使 A. G. Knudson 在 1971 年提出家族性肿瘤患者在出生前已有一个等位基因失活,只要再有一次遗传损伤使另一个等位基因失活就能使患者发病,而散在性的患者需经历两次遗传损伤。由此为抑癌基因的存在提供了第 2 方面的证据。第 3 方面的证据是肿瘤细胞失去杂合性,即大多数肿瘤中抑癌基因的失活表现为两个相同的突变等位基因。

到 1991 年底,至少已发现 6 种抑癌基因,由对结肠癌研究而发现的 DCC 基因定位于第 18 号染色体长臂,编码与细胞粘着有关的 190kd 穿膜磷蛋白,多发性神经纤维瘤抑制基因 NF-1,编码和参与信号传递的 GTPase 激活蛋白相似的蛋白,它定位于第 17 号染色体长臂,可能通过阻断 ras 蛋白介导的促有丝分裂信号而发挥抑癌作用,视网膜母细胞瘤中发现的 Rb 基因,定位于第 13 号染色体长臂,编码 180 000 蛋白,它像定位于第 17 号染色体短臂的抑癌基因 p<sup>53</sup>产物一样,能与转录因子相互作用而直接调控细胞周期,此外,从 Wilm 肾肿瘤中发现的 WT 基因(定位于第 11 号染色体短臂)和抑癌基因 erbA 都编码调控基因表达

的转录因子。

癌基因和抑癌基因在正常细胞中处于平衡状态,形成增殖和分化的调控网络。一旦这种平衡被破坏,细胞就会表现为失去控制的恶性生长。这可能由于癌基因的激活,也可能是抑癌基因失活的结果。由于肿瘤发生是一个经历致癌、促癌和恶变多阶段的复杂过程,受多种因素的影响。因此癌基因和抑癌基因的改变也一定是一种多阶段、多基因的异常复杂的变化。

#### 参考文献

- 1 Bishop J M. Cell, 1991, 64: 236~248
  - 2 Hunter T. Cell, 1991, 64: 249~270
  - 3 Cross M, Dexter T M. Cell, 1991, 64: 271~280
  - 4 Cantley L C, et al. Cell, 1991, 64: 281~302
  - 5 Lewin B. Cell, 1991, 64: 303~312
  - 6 Marshall C J. Cell, 1991, 64: 313~326
  - 7 Weinberg R A. Science, 1991, 254: 1138~1146
  - 8 Aaronson S A. Science, 1991, 254: 1146~1153
  - 9 Solomon E, et al. Science, 1991, 254: 1153~1160
  - 10 Vogelstein B, Kinzler K W. Cell, 1992, 70: 523~526
- (中国医学科学院基础医学研究所鲍家驹撰)

**细胞遗传学适应性反应** 低剂量电离辐射在某些条件下有增强机体某些防御适应功能的作用。这种增强效应可以发生在分子、细胞和整体水平。其中在细胞遗传学研究中证明:经低剂量照射过的细胞对相继较大剂量辐射诱发染色体损伤可产生明显的抗性。称该现象为“低剂量辐射诱导的细胞遗传学适应性反应”,简称“细胞遗传学适应性反应”或“适应性反应”。该现象的研究对放射学、辐射防护学及生物遗传学的发展将有深远的影响。

1982年广东高本底地区居民健康调查中发现,其外周血淋巴细胞转化度和非程序DNA合成(UDS)明显高于对照地区居民。动物实验也证明低剂量低LET辐射作用后可增强机体免疫功能。并刺激脾淋巴细胞的UDS,同时还伴有DNA聚合酶的活性增高。坡鲁淋(J. P. Ruling)报道了国际原子能机构(IAEA)的调查结果,低剂量辐射单次照射外周血淋巴细胞所致染色体畸变率不仅不成线性相关,而且在4mGy剂量时,各种类型染色体畸变率均低于正常值。高本底地区居民外周血淋巴细胞染色体畸变率也明显不呈线性相关,或出现坪值。这些结果提示,低剂量电离辐射可能激活机体某些修复酶系统,使损伤后的修复速率加快,致使染色体畸变率增加缓慢。可以推测被激活后的细胞应该能减少再次照射后染色体畸变的形成率。基于此想法,国内外学者进行了一系列实验,先给人外周血淋巴细胞低剂量的X射线或氡标胸腺嘧啶核苷(H-TdR)(简称D<sub>1</sub>)处理,经一定时间后再给相对较大剂量辐射(简称D<sub>2</sub>)照射,结果证明D<sub>1</sub>+D<sub>2</sub>组染色体畸变率明显低于单纯D<sub>2</sub>组,即D<sub>1</sub>辐射对D<sub>2</sub>辐射诱发染色体损伤效应有明显降低作用,证实了以上假设,从而提出了细胞遗传学适应性反应这一概念。现已证明该现象是生物体对环境有害因素的一种生理反应。

适应性反应广泛地存在于生物中。1984年,奥利维若(G. Olivieri)首先证明低浓度的H-TdR可以在人离体淋巴细胞中诱导细胞遗传学适应性反应。现已证明,无论是人淋巴细胞还是动、植物细胞,无论是离体还是整体,无论是体细胞,还是生殖细胞,受低剂量辐射作用后均可诱发细胞遗传学适应性反应,这种反应可表现在基因、DNA和染色体等不同的指标和水平上。

适应性反应的出现也受许多因素影响,对于D<sub>2</sub>的剂量来讲,一般是在小于200mGy以内的一次外照射均可诱导明显的适应性反应,其适应性反应的程度与D<sub>1</sub>剂量呈负相关,即D<sub>1</sub>剂量越小,其适应性反应越明显。当D<sub>1</sub>辐射的剂量率改变时,其有效的D<sub>1</sub>剂量也会发生改变。施爱德里(J. D. Shadley)等探讨了剂量率与适应性反应的关系,他们用0.2, 0.1, 0.05, 0.005Gy/min的剂量率照射0.01Gy;用0.2, 0.1, 0.05, 0.025, 0.01,

0.005Gy/min剂量率照射0.5Gy,两组均用1.5GyX射线做为D<sub>2</sub>照射。结果证明,D<sub>1</sub>为0.01Gy时,只有剂量率为0.2, 0.1, 0.05和0.005Gy/分时才出现适应性反应。而以0.5Gy作为D<sub>2</sub>辐射时,只有剂量率为0.05, 0.025和0.005Gy/min时才出现适应性反应。刘树铮等还证明当剂量率低至92.6μGy/min时,0.3~1.1Gy的慢性<sup>60</sup>Coγ射线均可诱导适应性反应。这些都说明高剂量的D<sub>1</sub>辐射必须采用较低的剂量率才能诱导适应性反应,而剂量率较高时D<sub>1</sub>必须很小,从而证明适应性反应的诱导不仅与辐射剂量有关,而且与辐射的剂量率也有关。

离体外周血淋巴细胞的适应性反应只能存在3个细胞周期,超过3个细胞周期后适应性反应消失,沃杰克(A. Wojcik)利用小鼠脾细胞的实验证明,照射后12d仍有明显的适应性反应。依库施姆(J. Kushima)用V<sub>19</sub>肿瘤细胞的实验证明,诱导的适应性反应只能持续一个细胞周期。说明,人淋巴细胞(植物血凝素刺激)及V<sub>19</sub>的细胞都是处于分裂增殖比较活跃状态,所以适应性反应持续的时间就较短,而处于相对静止状态的脾细胞,其适应性反应持续的时间较长。

低剂量辐射诱导的适应性与其它化学物质之间具有广泛的交叉耐受性,沃尔夫(S. Wolff)证明10mGyX射线上照射人淋巴细胞后不仅对1.5GyX射线照射诱发的染色体畸变有耐受性,而且还可产生对丝裂霉素(MMC),博来霉素(BLM)诱发染色体畸变的耐受性。他还证明,低剂量BLM,过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)的预先处理也可产生抗电离辐射诱发染色体畸变的耐受性。

低剂量辐射诱导细胞遗传学适应性反应的机制比较复杂,但主要有两个假说:(1)修复酶激活学说,维尼克(J. K. Wiencke)等认为低剂量辐射可能激活了细胞内某些修复酶,如多聚(ADP-核糖)转移酶,还有人证明低剂量辐射作用后DNA聚合酶,核糖核酸还原酶活性均有升高,并伴有UDS增加;(2)保护性蛋白质学说,有人认为低剂量辐射可能刺激细胞内产生某种保护物质,该物质可保护染色体免受相继较大剂量辐射所致的损伤。首先发现人外周血淋巴细胞经41℃处理后可产生明显抗辐射诱发染色体畸变的适应性反应,考虑可能与热诱导的热休克蛋白质(HSP)有关。雅布鲁姆(J. H. Youngblom)和蔡露(L. Cai)等分别用蛋白合成抑制剂—放线菌酮(CHM)处理经小剂量照射过的人淋巴细胞,发现不出现适应性反应,即适应性反应可被蛋白质合成抑制剂清除,可见低剂量辐射诱导的适应性反应底确与蛋白质的合成有关,沃尔夫进一步证明人离体血照射100mGy,24h后用双向电泳技术可检测到4种新蛋白质,而这4种新蛋白在正常细胞中是见不到的。

综上所述,适应性反应的产生不是一种孤立因素起作用,而是几种因素的协同作用,可能低剂量辐射激活了细胞内DNA修复酶的同时,也使某些特定的基因表达,复制出特定的mRNA,从而翻译出具有保护作用的蛋白质,使DNA损伤减轻,达到防御、适应性作用。但这种推测还未完全得到证实,尚需进一步研究。

今后对细胞遗传学适应性反应的研究重点是对其机理的探讨,特别是用分子生物学手段,阐明低剂量辐射作用细胞后会有哪些基因被诱导和启动,这些基因与保护性蛋白质的关系,它们的生物效应如何;同时对适应性反应如何应用于医疗实践中也是近年要解决的问题。如能把此理论运用于临床肿瘤的治疗中,将是对肿瘤治疗的一次革新,相信随着研究的深入,这些问题将会随之而解决的。

(白求恩医科大学预防医学院蔡露博士、王献理教授撰)

#### 微生物学研究进展

progress in research on micro-ecology 微观生态学是宏观生态学的微观层次。德国Herborn微生物学研究所的Volk Rusch于1977年首先提出微生物学这一名词,他在1985年给予定义为:“微生物学是细胞水平或分子水平的生态学”。向近敏(1988)则明确指出:“微生物学即是分子生态学”。微生物学的研究对象是正常微生物群与其宿主(人、动物

及植物)在共同历史进化过程中形成的生态系。正常微生物群包括微植物区系、微动物区系与病毒区系等的寄居在宿主体表和体内无害且有益的正常微生物。有关该微生物群落在宿主系统中的发生、演化、组成、结构、功能以及共生与拮抗,都是微生物生态学的研究范畴。该微生物群落能影响宿主的消化吸收、营养转化、生长发育、抵御疾病等,因此正常微生物群也是宿主生命系统的组成部分。微生态平衡产生生理效应,微生态失调则产生病理效应。利用生态制剂来调整生态平衡,是防治疾病促进健康的生态学重要内容。

目前微生物生态学在理论方面主要研究多维空间结构理论、微种群理论、微群落理论、微生态平衡理论、微生态失调理论、微生态防治理论及三流循环假说等方面。“空间结构”理论是指微生态系由宿主、微生物和环境彼此相互依赖和相互制约的统一整体,这个整体是由不同层次、不同环节相互联结成的立体交叉网络,这个网络就是微生态系的多维空间结构,“空间结构”理论是微生物生态学的基本理论。微生物生态学理论研究如同生物学其它分支一样,其精髓在于三流循环假说。该假说是指微生态系的立体交叉网络各条链、各个点的相互联系和相互作用通过三流运转来实现。“三流”是指微生态系中的能量流动、物质循环和基因传递。微生态系的原发能量来自宿主,能量在微生态系中的行为称为能流,没有能量的流动,就没有生物,也就没有微生态系。微生态圈包括宿主—微生物—微环境,微生态系中的物质交换也就在这一微小环境中进行。目前微生物生态学的研究较集中于物质流动是有益或有害于宿主,如肠道菌群参与性激素、胆汁代谢、合成维生素B<sub>2</sub>、B<sub>12</sub>、硫胺素、叶酸、泛酸、维生素K等物质可被宿主吸收和利用,另一方面也会形成组织胺、色胺、亚硝酸盐等对宿主有害的物质等。微生物生态学中基因流研究的主要对象是质粒、温和噬菌体和潜病毒等。质粒是指存在于某些菌的细胞质中双股环状DNA分子,又称染色体外基因,它们可参与蛋白质、有机酸等代谢,此外还有F因子、R因子。R因子又称耐药性质粒,它可以把耐药性在短至几小时内从一个细菌细胞传递到另一些种(或株)细菌个体中。温和噬菌体和潜病毒也如同质粒一样,是微生态系基因流中非常活跃的部分。

微生物生态学应用方面的研究主要包括微生态平衡、失调和微生态防治理论,尤其是医学微生态防治理论包括提倡顺应微生态系统存在的客观规律,因势利导来改善微生态环境、建立生物量更高的微生态平衡。它不同于单纯的抗生素等药物治疗法,它是综合中西医疗法的优点,并以生态制剂起到防治疾病促进保健的作用。它应用于动、植物就可达到增产丰收的效果。正常微生物群分为原籍菌(即常住菌)和外籍菌(即过客菌)。多种微生物共同生活在统一有机体内,既有菌群与宿主的关系,也有细菌种群之间的联系。微群落包含若干微种群(亚单位),它具有“三流”运转能力和生物拮抗作用,菌群个体之间和种群之间都存在着协同或拮抗作用。一个安定的处于生态平衡的正常微生物群,对外来菌具有明显的生物拮抗作用,已定植好的细菌群落具有抑制其它细菌重新定植的能力,称为定植抵抗力。如肠道内定植的优势菌为各种厌氧菌,它们占有绝对优势,是保证定植抵抗力的必要成员。该类菌能抑制需氧的革兰氏阴性菌类在肠道内定植,因而在肠道内需氧菌类只占肠道正常菌群的5%~10%。脱污染这一措施是防止、控制外科手术和烧伤后病人的细菌的定植,从而阻止发生肠源性感染,有意识地减少和消灭一些病人机体内的某些定植的有害细菌,如用复方新诺明抑制肠道内的需氧菌,即可扶植厌氧菌的定植抵抗力。Guot(1981)用简单的保护性隔离罩配合使用部分脱污染的方法,收效甚佳,单用隔离罩医院内感染率为82%,两法并用则下降到15%。正常菌群具有阻止或干扰外袭菌定植的能力,保护宿主免受感染。研究证实,健康者咽部正常菌群包括血液链球菌、缓症链球菌、米勒氏链球菌和唾液链球菌等对脑膜炎奈瑟氏菌A、B、C群具有抑制作用。在流脑流行区中健康人群咽部正常菌群仅8.5%具有抑菌作用,而非健康人群咽部正常菌群中有一些微生物在一定条件下也能使宿主引发感染,此

称为条件致病菌(或称“机会”致病菌),它们构成医院感染或内源性感染的重要因素,常见的条件致病菌有:念珠菌属、奴卡氏菌属、肠球菌属、沙雷氏杆菌、放线菌属、变形杆菌属、类杆菌属及巨细胞病毒、疱疹病毒。有人认为幽门螺杆菌也属此类细菌。

中国魏曦于1950年发现一例鼠咬热病人,经血培养证实是鼠型链丝杆菌引致感染,用青、链霉素治疗后一度缓解,但不久恶化,终因败血症而死亡,尸检未分离出链丝杆菌却分离出肺炎克雷伯氏菌,可见给患者投予抗生素虽把链丝杆菌杀死,却为能耐药的肺炎杆菌创造了繁殖条件,这是抗生素导致菌群失调的首例报道。人们滥用抗生素,其中尤其是广谱抗生素它们常引起菌群失调症。免疫抑制剂、化疗药物、激素、辐射、手术、创伤、疲劳、营养、受害等因素也常能影响机体抵抗力下降,从而致菌群发生变异,它们是菌群失调的诱因。菌群失调表现为:(1)数量比例失调;(2)易位;(3)自家感染。常见的菌群失调症有:(1)抗生素相关性结肠炎;(2)艰难梭菌假膜性肠炎;(3)念珠菌属感染;(4)变性杆菌感染;(5)绿脓杆菌性肠炎;(6)大肠杆菌性肺炎等。菌群失调症可通过微生物学手段及其制剂进行治疗:(1)营养调整;(2)抗菌调整;(3)菌群促进物质;(4)生理性活菌制剂。

根据源于自然、回归自然的原则,调整生物体内部环境的微生态平衡,利用正常微生物群成员及/或其代谢产物制成生态制剂—益生菌,就可阻止外袭菌的入侵和定植,达到防治疾病的目的,且能起到增强细胞活力发挥其保健的作用。益生菌具有抗感染、抗肿瘤及抗机体衰老的“三抗”作用,对防治某些感染症、传染病,特别对防治道感染或非感染性腹泻发挥重要作用。从治疗到预防医学发展到保健医学(又称生态医学),益生菌必将起到越来越重要的作用。益生菌的作用首先是在生物量上或种群比例上恢复机体原有的微生态平衡,使正常微生物群与机体的关系保持最佳状态,从而达到防治疾病的目的。属厌氧细菌的双歧杆菌属是应用较广的一类生理性活菌制剂。双歧杆菌为革兰氏阳性多形性的无芽孢菌,与人类关系密切的包括有婴儿双歧、青春双歧、分叉双歧、长双歧、短双歧等。该菌对人无毒有益,具有多种生理功能。它具有:(1)营养作用,(2)抗感染作用,(3)抗癌作用,(4)抗衰老作用以及促进肝功能、降低血液内毒素水平、抗辐射等作用。乳杆菌是应用最广的活菌制剂,用于制造益生菌的有嗜酸乳杆菌、乳酪乳杆菌、短乳杆菌、莱氏乳杆菌、植物乳杆菌及纤维二糖乳杆菌等。它在乳品发酵工业上应用很广,在食物中补充乳杆菌有助于扶植宿主肠道内的厌氧菌群,从而维持其在生态环境中的平衡作用。在兽医界也用于畜禽沙门氏菌感染的治疗。植物活菌制剂—增产菌,能使小麦、水稻等多种作物增产,获得了较大的经济效益。嗜酸乳杆菌与双歧杆菌都具有抑瘤变的作用。乳杆菌遗传背景比双歧杆菌的研究较多,有报道将若干种酶,包括能降低胆固醇的胆固醇氧化酶克隆到乳杆菌中。此外,还研究出粪链球菌、某些种(或株)的枯草杆菌、拟杆菌、腊样芽孢杆菌及地衣芽孢杆菌的活菌制剂。可见生态制剂将有着广阔的发展前景。

80年代以来由于悉生动物和现代厌氧培养技术的发展,分子生物学和分子遗传学技术的应用,有力地推动了微生物生态学学科的发展。悉生动物包括单菌、双菌、多菌及无特定病原体(SPF)等动物。用悉生动物研究微生物生态学,把该学科推向了一个新的发展阶段。国际上已召开了12届包含微生物生态学在内的悉生生物学学术会议。德国每年出版1册英文版《微生物生态学与治疗》专刊,中国也定期出版了《中国微生物生态学杂志》。中国有关科研、临床、教学及生产人员在微生物生态学基础理论指导下正在开展工作,对口腔、胃肠道、皮肤、呼吸及泌尿生殖道疾病进行了生态防治的研究并取得了一些效果。

预测本学科发展中可能出现新变化及可能有所突破的领域,随着研究手段不断完善,分子生物学和分子遗传学技术在微生物生态学领域中的应用,对某些关键性问题例如生物拮抗作用如何协助机体防御病原菌侵袭,定植抵抗力分子基础是什么等等,阐明上述一些基础性问题,将有助于防治某些疾病(包括传染病)。与机体共生的正常菌群中微群落、微种群的稳定机制,菌群成员

间相互作用的调节机制以及微生物粘附于消化道、呼吸道、泌尿生殖道上皮的机制等一系列问题,研究清楚这些生态医学的基础问题,就可能达到防病保健的目的。传染病中很大一部分与病毒有关,由于分子病毒学发展迅速,从分子生态学角度来分析和研究病毒感染与宿主细胞相互作用的分子机制,从而提出保持机体内分子生态平衡的有效措施,国内也有人运用现代分子病毒学的资料来阐述某些病毒病是由于分子生态失调引起的实例,有可能在此基础上制订出病毒分子生态学的今后发展方向。大肠杆菌、枯草杆菌、酵母菌作为基因工程的受体菌已被应用,但还存在不少待研究的问题。肠道正常菌群中占优势的双歧杆菌和乳杆菌等,它们既能长期定植,又对宿主有益,是制造益生菌的生理性细菌,对它们进行基因修饰,有可能构建成受体菌,把能引起肠道感染的病原体中编码保护性抗原的特异性基因片段进行分子克隆,从而有可能获得预防肠道传染病理想的价基因疫苗,开发新一代的生态制剂,势在必行,用生态学观点指导传染病的预防工作,必将使中国传染病的预防达到一个新的境界。

**前沿课题:**(1)分子生态平衡和失调与发病机理关系的研究;(2)消化道、呼吸道、泌尿生殖道及皮肤正常菌群正常值的系统研究;(3)微生物区系中微群落、微种群稳定机制和正常菌群成员间相互作用及其调节机制包括生物拮抗和共生的研究;(4)微生物粘附于消化道的分子基础研究;(5)内源性感染、体内条件致病菌引致医院感染等生态防治的研究;(6)病毒分子生态学研究。**定向课题:**(1)进一步发展微生物、厌氧培养技术应用于微生物学研究;(2)对某些益生菌进行基因修饰以扩大菌种功能的范围、提高代谢和益生活性及构建载体菌的研究;(3)益生菌生产工艺及其质量标准的研究;(4)中医药微生物学和老年微生物学研究;(5)抗感染及抗肿瘤的微生物学研究。

#### 参考文献

- 1 魏曦. 正常菌群与健康—人体微生物学. 上海:上海科技出版社,1985
- 2 范明远,刘乘阳. 微生物生态学方兴未艾,中国微生物学杂志,1989,1(1),6
- 3 光内知足. 肠内细菌学. 朝仓书店,1990
- 4 Mitsuoka T., G. Industrial Microbiology, 1990, 6: 263~268
- 5 Hughes D B, Hoover D G. Food Protection, 1991; 52: 500~502
- 6 Rickwoov D, Hames B D. Anaerobic Microbiology edited by Levett P N. Oxford University Press, New York, 1991
- 7 Alexander O, Samuilov V D. J. Basic Microbiol, 1992, 32(2): 129~144

(中国预防医学科学院流行病学微生物学研究所范明远研究员撰)

**人精子染色体** 精子是雄性生殖细胞系发育的终端产物,只有精子携带的遗传物质通过受精传递给子代,既有遗传物质损伤又有受精能力的精子形成异常个体的危险性更高;精子在形成变形过程中,伴有细胞质的脱逸,胞浆中的DNA修复酶丢失,DNA损伤与修复系统的机能丧失,使生精过程中无论哪个环节DNA受到损伤,都未加修复而蓄积于精子内。因此,人类男性配子遗传学分析最理想的研究方法是对人精子染色体的直接分析。

60~70年代对受精生理的研究表明,哺乳动物包括人的精子染色体分析只有在精子进入卵细胞内复制缩合形成原核染色体之后第一卵裂(有丝分裂)期才能进行。因为,经过两次减数分裂后,染色质浓缩因子的作用使精子染色质高度浓缩于头部,显示均匀一致的结构;只有进入卵内的精子核,在卵胞浆内“精子核染色质去浓缩因子”的诱导下,在卵胞浆环境中能重新激活——精子头肿胀、膨大,核膜破裂、消失,染色质去浓缩、解凝聚、散开,周围出现新的核膜,形成雄性原核;在开始进入第一次卵裂时染色质复制、缩合、DNA重新螺旋化、稠叠浓缩形成染色体。所

以,获得可供分析的人精子染色体必须是在卵细胞存在的系统中才有可能。然而,要获得大量的人卵细胞是极为困难的。1970~1976年一些科学家试图利用离体培养的体细胞与人精子通过自发、溶血卵磷脂、仙台病毒等进行细胞融合来激活精子核,诱导精子染色体形成,但均未成功。1976年亚纳吉马奇(R. Yanagimachi)发现去除透明带的卵细胞,其受精的种属特异性立即消失,表现对异种精子的接受能力,成功地建立了人精子与去透明带仓鼠卵异种体外受精的实验方法,证实了异种受精中进入仓鼠卵内的人精子所经历的变化,同于同种受精早期的变化过程。在此基础上,1978年鲁达克(E. Rudak)首先成功地人在精子与仓鼠卵受精后阻断核融合和纺锤丝形成,获得了清晰的、可在光镜下观察的人精子单倍体。

80年代初的研究主要集中于攻克方法学技术难关,直到马丁(R. H. Martin, 1982, 1983)才对方法学作了较详细的报导,布拉德里夫(B. F. Brandriff)和上口勇次郎在1984年也报导了经改良后的方法。其主要的改进有:(1)应用钙离子载体建立在短时间内获得可靠受精能力的精子充分获能系统;(2)采用F-10培养基和所用血清及白蛋白的浓度和质量建立可靠的培养系统;(3)使用鬼臼脂素和长春花碱及秋水仙胺建立核融合和纺锤丝形成的有丝分裂完全阻断系统;(4)采用分步固定温湿气干法建立防止卵膜破裂时染色体散失、断裂或微小断片丢失,得到核型分散良好的制片方法。通过技术改进,建立了稳定的实验程序和操作步骤,染色体分析的成功率和数目明显增高。

80年代中期以来,精子染色体分析与精液常规、精液中生殖细胞减数分裂染色体、授精能力、外周血淋巴细胞染色体、透射和扫描电镜等方法相结合共同分析,特别是应用Q、C、G显带质量的提高,取得了满意的分析结果。

人精子染色体自发的结构和数目畸变率均值在6%~16%和1%~4%,畸变率在不同个体间具有显著差异,结构异常明显高于数目异常,以断裂和断片为主(60%~80%)。断裂点能定位在各自的特定染色体上,并在24条染色体中非随机分布,个别染色体涉及大量不同的断裂点,9号染色体发生大量断裂,Y染色体未发现断裂,某些染色体近着丝粒的带内出现断裂。非整倍体在各组均可出现,各种重复出现的三体频率有很大不同,已观察到流产中未见过的额外1号染色体。不分离观察值与预期值相比,G组约高2倍,9号和性染色体超单倍体显著增加;亚单倍体在A、B、C组明显减少,E和G组明显增加,1、2、3、4、9号明显减少,18、21、22号明显增加,显示较小染色体更易丢失。表明所有染色体可产生不分离,大多数常染色体的不分离率是相同的。确定各号染色体不分离发生率,可帮助了解染色体异常胚胎的存活机理。

马丁(1986)首次通过在体实验对人精子染色体诱发畸变进行了观察,13例睾丸肿瘤病人放疗12、24、36个月,畸变率明显升高,提示放疗引起的染色体丢失比不分离更敏感,睾丸吸收剂量与畸变率呈明显正相关。吉纳斯卡(A. Genesca, 1987, 1990)对2~18a前接受过放疗和/或化疗患者的精子和淋巴细胞染色体分析显示:畸变率精子明显高于淋巴细胞,提示放疗和化疗对人精子有长期损害作用,并产生远期效应。

辐射和化学致畸剂损伤人精子染色体在离体实验中也得到了证实。对健康男性精子体外用X线照射,授精率未见改变,而精子染色体畸变率(%)明显升高,照射剂量与结构畸变率呈明显的线性关系,提示具有DNA损伤的精子不被淘汰,形成染色体异常胚胎的风险更大。用化学致畸剂平阳霉素在体外处理人精子,诱发的精子染色体畸变率明显升高,存在明显的剂量依赖关系。在电离辐射 $\beta$ -射线和甲基磺酸甲酯对人精子体外作用的研究中,也均得到染色体异常明显升高的结果。

保持在细胞内而与减数分裂过程中产生的继发畸变无关的染色体稳定畸变不随时间延长而消失,分析这些体细胞染色体具有稳定畸变的携带者精子染色体,使精子染色体研究工作提高到新的高度,已有倒位、额外标记染色体、脆性倒位、47, XYY、易位



的分析报告。易位分析可深入了解减数分裂的分离,在分析的所有易位中,分离的所有理论类型都已见到,即邻位1和2,3;1及4;0;邻位1分离占不平衡精子大多数,且在所有例子中均可见到;后3种分离所见甚少,且并非见于所有易位中;约50%的精子是平衡的,其中正常及平衡组份各占一半(1:1),不平衡在不同类型易位有所不同,其变动范围在19%~77%;显示减数分裂的分离并非随机,不同类型的易位产生不同频率的不平衡。罗伯逊易位中t(13;14)携带者,正常和平衡染色体组(占73%~92.3%)明显高于不平衡染色体组(占27%~7.7%),不平衡率低于相互易位携带者的不平衡率;发生稀少的t(13;15)不平衡率也低,为10.4%。47,XYY分析,性染色体未见异常,各染色体组均含有1个性染色体,表明47,XYY男性可形成正常的23,X和23,Y精子,不增加次级不分离和染色体间影响而造成的非整倍体后代风险。所有染色体脆性部位都被认为是遗传的,并对受害者子代产生影响的一个危险因素。脆性部位携带者的子代中常发现有非整倍体和原发性结构重排的改变,但这些重排中的断裂点与其父母表达的脆性部位并不一致,精子染色体损伤和脆性部位表达的符合率为83.3%,精子染色体表达的脆性部位中有86.7%在淋巴细胞中表达,13.3%在父母淋巴细胞中表达,6.7%只在母亲淋巴细胞中表达;精子脆性部位表达为83.3%,且是非随机发生的,高比例具有无着丝粒断片(在畸变中占50%以上)的精子将导致丢失或发生结构重排。癌细胞及涉及结构重排的染色体断裂点,与脆性部位之间有着重要联系,断裂点与脆性部位的一致率,在涉及结构倒位和易位中为35.3%~43.6%,在精子所表达的重排中为41.9%,脆性部位显带上断裂点预期值为27.9%~34.9%,57%~86%的脆性部位位于G阴性显带内;精子染色体中涉及结构重排是5,8,9号,其次是1,10,11,12,14号染色体;重排中34.6%与脆性部位显带相一致。

精子染色体分析可为人们关心的问题提供特资料,精子组成中X精子(52%~59.6%)多于Y精子(48%~40.4%),表明减数分裂产生X精子多或X精子更易发生异种受精;分析高、低活力精子的染色体异常频率无显著差异,表明高活力精子同样可携带异常染色体,且与正常精子受精机会相等;分析冷冻保存前后的人精子,其染色体畸变和X、Y精子比率均无显著差异,表明冷冻保存对精子染色体和性比无影响;生殖生物工程的迅猛发展,对认识染色体损伤和遗传物质改变的影响,提出了愈来愈紧迫的需要。

精子染色体分析方法建立以来,只有20~30个实验室公布了各自结果,从整体水平讲,发展较缓慢的,其主要问题在于建立异种体外受精系统涉及所需的动物、药品、仪器设备条件和培养、显微操作等方法学技术本身的难度和研究工作的深入需要受精生物学、发育生物学与配子遗传学、遗传毒理学相结合的实验室条件、人员力量和理论知识。

回答精子染色体的各种发生频率,必须建立在足够多的样本分析基础上,因此,首先应积累资料。在此基础上,进行精子染色体自然发生率与人种、家族、年龄、职业、地区、嗜好品、医药品、环境污染等因素之间的流行病学研究,物理和化学诱变原产生的诱发畸变和诱变能力的离体实验研究,对化疗、放疗、不育患者和各种治疗手段所产生的诱发畸变和诱变特性的在体临床研究,并由小剂量长期刺激取代急性大剂量研究,各种染色体异常携带者的深入研究,作用于生育环节的避孕和抗生育药物的安全性研究,认识精子染色体与自然流产、畸胎、死胎、出生缺陷、先天遗传受累等效应的关系及规律。这些研究工作有赖于常规显带和专门显带质量的提高,并应建立高分辨显带技术。此外,已取得成果只是染色体水平的工作,对于遗传物质损伤所产生的基因突变的研究尚未开展,因此,引入分子生物学研究手段必将使精子染色体研究提高到新水平。

#### 参考文献

1 Rudark E, et al. Direct analysis of the chromosome constitution of human spermatozoa. *Nature*, 1978, 274: 911

- 2 Martin RH, et al. The chromosome constitution of 1000h-utnan spermatozoa. *Hum Genet*, 1983, 63: 305
- 3 Brandriff BF, et al. Chromosomes of human sperm; variability among normal individuals. *Hum Genet*, 1985, 70(1): 18
- 4 Benet J, et al. G-banding of human sperm chromosomes. *Hum Genet*, 1986, 73(2): 181
- 5 Kamiguchi Y, et al. An improved, efficient method for analyzing human sperm chromosomes using zona-free hamster ova. *Am J Hum Genet*, 1986, 38(5): 724
- 6 Brandriff BF, et al. An analysis of structure aberrations in human sperm chromosomes. *Cytogenet Cell Genet*, 1988, 47: 29
- 7 Fuster C, et al. Fragile sites and breakpoints in constitutional rearrangements and in human sperm chromosomes. *Hum Genet*, 1989, 82(4): 330
- 8 Genesca A, et al. Human sperm chromosomes. Long-term effect of cancer treatment. *Cancer Genet cytogenet*, 1990, 46(2): 251
- 9 Kamiguchi Y, et al. Types of structural chromosome aberrations and their incidences in human spermatozoa X-irradiated in vitro. *Mutat Res*, 1990, 228(2): 133
- 10 Martin RH. Cytogenetic analysis of sperm from a man heterozygous for a pericentric inversion, inv(3)(P25 q21). *Am J Hum Genet*, 1991, 48(5): 856

(国家计划生育委员会科学技术研究所张树成研究员撰)

**血型** blood group 广义的血型包括红细胞、白细胞、血小板和血浆等血液成分的抗原差异。随着临床输血、组织和器官移植以及血液免疫学的发展,新的血型抗原不断发现。血型抗原和抗体的化学结构及其相互作用也逐渐有所了解。

1900年兰德斯泰纳(K. Landsteiner)首先发现了人类红细胞与血清之间的同族凝集反应。1901年他把人体血液分为A、B、C(后改称O)型。1902年德沙斯特罗(Decastello)和斯图里(Sturli)发现第4种血型,AB型。1921年国际卫生组织决定采用兰德斯泰纳的A、B、O及AB命名法为国际通用的血型命名法。兰德斯泰纳由于对人类血型分类的贡献以及对阵发性血红蛋白尿症机理的研究,荣获1930年诺贝尔生理学及医学奖金。ABO血型系统是人类最基本的血型系统。它是按红细胞含有凝集原(血型抗原)种类进行分型的。ABO血型系统的发现使人们认识到溶血性输血反应是由于血型不合引起的为了安全输血,必须进行血型鉴定(配型)。这是输血史上的一项重大突破。1938年列文(Levine)发现人类红细胞上含有Rh凝集原(Rh因子),它可分为C、c、D、d、E、e等抗原。因而组成一个Rh血型系统。在实际应用中,凡红细胞上含有D抗原者(D抗原性最强),称为Rh阳性;红细胞含其他抗原者如C、c、E、e都称为Rh阴性。中国汉族和其他大部分民族中,约99%的人为Rh阳性。但有些少数民族中阴性较多,如苗族为12.3%,布衣族8.7%,塔塔尔族15.8%,乌孜别克族8.7%。在临床上,给Rh阴性患者重复输血时,应重新作交叉配血试验,以避免可能由于Rh血型不合而引起意外;Rh阴性者还可能因妊娠而产生抗Rh凝集素,这有可能导致胎儿红细胞凝集反应而溶血。因此,Rh血型检查,特别在Rh阴性率较高的民族中,具有重要的临床意义。

1954年起,提出了免疫血液学新概念。随着现代免疫学理论和方法学的发展,促进了血型研究工作的迅速发展。60年代以前,着重于研究红细胞血型系统。进入60年代以后人们注意力集中到其他血液有形成分的型别。从而相继发现白细胞、血小板、血清和红细胞酶均有各自的型别。故血型的概念应指各种血液成分的遗传多态性。在人体红细胞上,含有400多个抗原,可分为20多个血型系统。除了ABO血型系统外,还有MNs、P、Rh、Lewis、Lutheran、Kell、Auburger、Bg、Cartwright、Chidc、

Colton, Diego, Domberock, Duffy, En, Gerbich, HD-Pr-SP, Li, Kidd, Langereis, Sciana, Sid, Vel, Wright, Xg, Cromer 等血型系统。此外,各血型系统还可含有各种亚型。与红细胞血型相比,人们对白细胞血型的认识较晚,人体白细胞第一个血型 Mac, 是 1958 年法国道塞(Dansan)发现的。白细胞除了含有红细胞相同的 A、B、M、N、I、i、T<sub>1</sub><sup>a</sup>、Le<sup>a</sup>、Le<sup>b</sup>、Jk<sup>a</sup>、Jk<sup>b</sup>、K、Kx、D<sup>a</sup> 等抗原外,最重要的抗原是人体白细胞抗原(HLA)。LHA 抗原性最强,是人体最复杂的遗传系统,受控于第 6 对染色体,表现型达上亿种,现已检出 120 余种。血小板除了具有红细胞上的 A、B、H、M、N、P、I、i 等抗原以及白细胞抗原(HLA)外,还有它独有的血型抗原,如 Zw(PL<sup>A</sup>)、Ko、PL<sup>F</sup>、Duzo、Bak 等 5 个系统。血清蛋白也已发现 20 多个血型系统,如 Gm、Am、Km、HP、 $\beta$ -脂蛋白、转铁蛋白(Tf)、Gc、运铜蛋白(CP)、碱性磷酸酶(AL-P)、 $\alpha_1$ -抗胰蛋白酶、 $\alpha$ -酸性糖蛋白、白蛋白、补体 C<sub>3</sub> 及其变异体等均有不同血型。也发现红细胞酶有多态性,如对腺苷激酶、葡萄糖-6-磷酸脱氢酶、葡萄糖磷酸变位酶、脂酶 D、腺苷脱氢酶、乙二醛酶等可区分出不同血型。各种成分血型极为错综复杂,理论上计算,这些系统的表现型可达 10<sup>17</sup> 种以上。除了同卵双生子外,每个人的血型都是独一无二的,因此有很大的生物学意义。

在临床实践中,红细胞血型的意义是众所周知的。自从 1964 年发现 HLA 与器官移植中的排斥反应有关后,对白细胞血型在生物学和医学界也引起高度重视。临床资料表明,在骨髓及肾脏等器官移植中,HLA 配型有重要作用。如同胞之间作肾移植,HLA 相同的 2 年存活率可达 90% 以上。临床上还发现某些疾病与 HLA 型有伴随关系,如含有 HLA-DR3 型的人,容易得糖尿病和慢性活动性肝炎;在强直性脊柱炎病人中 90% 有 HLA-B<sub>27</sub> 抗原,而在正常人中仅占 7% 左右,这在临床诊断中有实用价值。

1910 年邓根(E. Dungen)和海斯费尔德(Hirsfeld)首先提出血型与遗传的关系,1924 年伯恩斯坦(Bernstein)修正并最后确证了 ABO 血型系统是先天遗传的人类 ABO 血型是由染色体上 A、B 和 O 3 个等位基因来控制的。因而血型的遗传型有 6 种组合,AA、AO、BB、BO、AB 及 OO。A 及 B 属显性基因,O 属隐性基因。血型的表现型为 A 型、B 型、AB 型和 O 型。在法医实践中,通过红细胞血型的交叉反应可作为血缘鉴定的手段。白细胞血型(HLA)的发现,为法医鉴定血缘关系提供了更为有力的工具。此外,不同人种或民族中 HLA 型的分布不相同,如白种人中 A<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 型很多,而黄种人中很少。相反,Bw<sub>40</sub> 等主要存在黄种人中,故调查 HLA 的分布还有助于研究人类的起源和变迁。

随着生物化学技术的发展,对血型的分子基础研究也日益深入。已知构成血型的物质基础都是糖蛋白或糖脂。红细胞 ABH(O)血型抗原主要是红细胞膜上的糖鞘类脂,抗原决定簇为糖链部分。ABH(O)血型物质不仅存在于血细胞上,还出现在唾液、胃液、精液等分泌液中,中国 60% 汉族人唾液中有 ABO 血型物质。此外,在毛发上也有 ABO 血型物质存在。分泌液中以及毛发上的 ABH(o)血型物质主要是糖蛋白。凝集素用于鉴别血型是血型鉴定工作的一项新进展。已知利马豆、巢菜等凝集素可鉴别 A 型,西非单叶豆 IB<sub>4</sub> 可鉴别 B 型,荆豆凝集素可鉴别 O 型。如果凝集素在血型测定中推广应用将可节省大量的血清。

生物高技术的发展,将使血型的常规技术如凝集试验(血清学)、细胞培养和生物化学方法发生革命性变化。如今单克隆抗体和 DNA 重组技术的应用,使血型研究进入更深的层次。DNA 重组技术的应用有可能从基因水平研究血型,即将有可能根据血型基因的结构来阐明人类血型的多态性的本质和生物学功能,将可能用基因分型方法对血型重新定义。血型单克隆抗体的研究对进一步揭示 A、B 血型本质以及临床应用都有十分重要意义。红细胞抗原单克隆抗体已有报道。在法国,红细胞血型单克隆抗体已用于 ABO 分型的试验中,中国学者陈华堂研制的血型单克隆抗体,经临床 3 704 例血型诊断试验,符合率达 100%。预期血型单克隆抗体在临床推广后,将在血液分型中节约大量血清,并使血型诊断试剂标准化。在血型研究中的另一个有应用前景的课

题是血型的酶学转型。1975 年美国哈伯斯(N. Harpas)等用咖啡豆  $\alpha$ -半乳糖苷酶使 B 型红细胞转化为 O 型红细胞获得成功。80 年代初柯特斯坦(J. Goldstein)进一步把这一技术完善和应用于临床输血中并申请了欧洲专利。台湾学者 1989 年用半乳糖苷酶转化 B 型红细胞为 O 型也获得成功。这项研究工作离临床应用尚有距离。

#### 参考文献

- 1 施秉钧. 主要组织相容性抗原的结构,功能和遗传,国外医学(分子生物分册),1984,1:1
- 2 柏乃庆. 人体血型的由来和发展,生物学通报,1987,8:5
- 3 赵桐茂. 人类血型遗传学,北京:科学出版社,1987
- 4 孙册. 临床医学新工具——凝集素生命的化学,1991,11(3):34
- 5 Lenny L L. et al. Single-Unit Transfusions of RBC Enzymatically Converted From Group B to Group O to A and O Normal Volunteers. Blood, 1991, 77(6): 1383

(华东师范大学秦德安教授撰 柯家康审)

### 环境与遗传

environment & inheritance 随着人类社会的发展、病因学研究的深入,人类疾病病因的概念已经发生根本性改变,除了外伤、中毒等明显地由环境因素造成的疾病,以及少数由亲代传给子代的遗传因素决定的疾病外,绝大多数疾病都是环境与遗传相互作用的结果,有些严重危害人类健康的常见病已被证明不仅与环境因素而且与遗传因素有关,诸如肿瘤、糖尿病、动脉粥样硬化、冠心病、高血压病、精神分裂症等。因此,研究疾病发病的环境因素与遗传因素的相对重要性,是现代医学的重大课题之一。

一般来说,研究常见的非遗传性疾病(如传染病等)往往重视环境因素的作用而低估遗传因素,特别是遗传变异的作用;而经典的遗传学则主要研究孟德尔式即单基因遗传的性状和疾病,重视遗传因素和规律,但往往轻视或低估不同背景的环境因素的作用。实际是遗传基础作为内因,它同环境的区别只是相对的。从生物进化史来看,遗传物质(基因)的来源还是外环境,在物种发展的不同历史时期,可能已同内环境相互作用而成为内因。环境因素一旦影响到生殖细胞,变异的遗传物质就会遗传下去。人类的一切正常性状或疾病都是遗传与环境相互作用的结果,不能将两者的相互作用机械地分割成两个互不联系的独立因素。遗传与环境在疾病发生中的相互作用和相对关系呈一种连续的病因谱,但在不同的疾病中两者的作用程度不同。早在 50 年代,Neel 和 Schull 在研究中就注意到许多常见病的发病与遗传有关,于 1954 年首次提出“流行病的遗传学”名称。1967 年, Morton 等认为应充分估计到遗传因素和环境因素在疾病发病中的不同作用,以及两者互相作用的结果,并提出遗传流行病学,为研究环境与遗传对疾病发病的作用奠定了理论基础,为疾病病因研究开拓了一个新的途径。

许多疾病都属于多基因遗传病(或多因子遗传病),它们的发病受到环境和遗传的双重影响。1965 年, Falconer 发表了《从亲属发病率计算某些疾病的遗传易感性》一文,首次提出反映某病发病的内部遗传趋向和外部环境作用的变量—易感性(Liability),利用群体及患者亲属的发病率来计算疾病的遗传度(h<sup>2</sup>),从而把遗传度的计算推向一个新的发展阶段,为确定环境因素与遗传因素在疾病发生中的作用提供了依据。此后,对许多疾病进行研究,如室间隔缺损、唇裂与腭裂等出生缺陷,支气管哮喘,地方性克汀病等,计算了它们的遗传度;对人体的一些生理、生化指标也进行了研究,如血浆中免疫球蛋白水平,心电图的 P-R 间期等。唇裂和腭裂、精神分裂症、先天性幽门狭窄等,遗传度为 75%~80%,表明遗传因素对其发病有重要作用;消化性溃疡、各型先天性心脏病等,遗传度不到 40%,说明环境因素起的作用较大,而遗传因素的作用较小,现已确定它们都有多基因的遗传基础。

定量地研究环境因素与遗传因素对疾病发生的作用大小及相互关系,是多因子遗传病病因研究的难点。S. Wright 首先建立通径分析,通过分析变量间的相关结构来定量地研究和解释变量间的因果关系或相关关系,分析环境分量 and 遗传分量,从而定量地阐明遗传因素或环境因素对疾病的决定程度。随后, Morton、Rao、Tee 等发表了一系列有关通径分析的论文,从而使得通径分析方法在理论上有了一个阶段性飞跃,得到广泛的应用。尤其对一些有家族聚集倾向的原因未明疾病的病因研究有着重要意义。对冠心病及糖尿病的病因研究,阐明了环境因素和遗传因素作用的大小,得出有价值的结果。Darlu 等所进行的血浆镁和红细胞内镁离子浓度之间的相互关系,计算出红细胞内镁离子浓度和血浆镁离子浓度的遗传度各为 0.922 和 0.721,从而为进一步的复合分离分析打下基础;复合分离分析则可以揭示两种镁离子浓度的调节机制。复合分离分析弥补了通径分析的不足,并且有独到之处,它是分析手段的又一重大突破。1974 年, N. E. Moroton 和 C. J. Maclean 提出包括单基因遗传、多基因遗传和同胞环境的混合模型,将分离分析的应用范围扩大到连续的数量性状或三分性状。利用复合分离分析方法研究血压的影响因素,结果表明,血压主要由遗传决定,共同的生活环境的影响并不重要,血压是多基因决定的并不存在主基因效应。

一直认为完全是由遗传因素决定的疾病(如苯酮尿症等),或由环境因素决定的疾病(如肿瘤等),现在看来并非如此。在新生儿时期发现苯酮尿症,通过控制新生儿的营养,即可有效地防止病情的发展,并收到治疗效果。研究结果表明,肿瘤发病均与遗传基础有直接的或间接的关系,癌基因的发现进一步阐明了肿瘤发生中遗传因素的决定作用。在一些被认为环境引起的肿瘤中,尽管尚未发现特定的遗传因素,但绝不可因此而否定遗传基础的影响或作用。肺癌遗传因素研究的结果使有些肿瘤专家认为,肺癌的许多遗传性改变可能不完全由吸烟等环境因素所致,提出了肺癌可能由遗传所致的假设。

疾病的病因是医学领域研究的中心课题。重视环境(或遗传)病因的研究而忽视遗传(或环境)病因的研究,都将歪曲疾病的真正病因、低估疾病高危人群的存在,给疾病的预防与治疗带来困难。慢性疾病(如心脑血管病、肿瘤等)日益成为人体健康的主要威胁,其病因的研究自然是人们最为关注的问题。国内外的大量研究资料表明,慢性疾病是遗传性疾病,属于多基因遗传病。慢性疾病的产生不仅受环境因素的作用,而且已观测到遗传因素的种种作用,及两者的相互作用。随着遗传流行病学及细胞遗传学、分子遗传学的发展,电子计算机的应用及分析模型的不断完善,环境因素和遗传因素在疾病发生中的作用将得到进一步的研究,并将阐明两者间相互作用的机制。不久的将来,疾病(尤其是慢性疾病)的病因学研究将获得突破性进展,疾病的预防、诊断与治疗将进入一个全新的历史时期。

#### 参考文献

- 1 Falconer D S. *Ann Hum Genet*, 1965, 29: 51~76.
- 2 Melnick M, et al. *Am J Med Genet*, 1980, 6: 83~97.
- 3 Barbosa C A A, et al. *Hum Genet*, 1981, 59: 161~163.
- 4 Barbosa C A A, et al. *Hum Hered*, 1981, 31: 8~14.
- 5 Darlu P, et al. *Am J Hum Genet*, 1982, 34: 874~887.
- 6 Williams W R, et al. *Clin Genet*, 1983, 23: 287~293.
- 7 Lalouel J M, et al. *Am J Hum Genet*, 1983, 35: 938~950.
- 8 Minna J D. *Med Post*, 1989, 25: 12.
- 9 金永堂. 国外医学(卫生学分册), 1991, 18: 25~28.

(安徽医科大学金永堂硕士撰;  
何兴舟审)

## 临床医学

**发热** fever 临床各科最常见的症状。由于各种原因使人体

的体温超过正常范围,通常认为是口温高于 37.5℃、腋下温高于 37℃或 1 日体温变动超过 1.2℃为发热。在大多数情况下,发热是人体对致病因子的一种病理生理反应。

发热的病理生理:(1)体温的调节,正常健康人的体温比较恒定,一般保持在 37℃左右,不因地理区域或外界环境温度的改变而有所变异。个体间的体温虽可有一定的差异,但就每一人体而言,其体温的生理节奏性变化基本相同,这种体温的生理节奏是人们世代代的生活方式与习惯所形成的内部节律性。正常健康人所以有比较恒定的体温,是由于体温调节中枢通过神经、体液因素调节产热与散热两个过程,使其保持动态平衡的结果。产热的主要来源是身体的代谢活动。人体的能量来源于食物,因从食物中摄取的糖、脂肪和蛋白质分子的碳氢键中都蕴藏着能量,在其分解过程中,C 与 H 分别被氧化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,碳氢键断裂,同时释放能量。据估计约 50%的能量变为体热,以维持体温,另约半数的能量转移到 ATP 等物质的高能键中,供给人体各种生命活动对于能量的需求;这部分化学能被机体组织利用时,基本上并不转化为机械功,但利用的最终结果都转化为热能。机体安静时产热的主要场所是肝脏和骨骼肌,在运动或疾病伴有发热时,骨骼肌更是产热的重要场所。机体的散热主要以辐射、传导、对流、蒸发等方式进行,据估计约 90%的热量通过上述方式散失,人体主要的散热部位为皮肤。机体具有两种控制体温的系统,一是所谓行为调节,一是自身调节(反馈调节系统)。前者是有意识的活动;后者是通过神经体液的作用而实现,其调节机构包括温度感受器和体温调节中枢。温度感受器即温度感受神经元,按其功能可分为:温觉感受器,当其兴奋时,外周血管舒张,寒战受抑制,散热增加;冷觉感受器,其兴奋时,外周血管收缩,寒战、产热增加。体温调节中枢在下丘脑。以前认为下丘脑前部为散热中枢,后为产热中枢,但近年电生理实验证明,在下丘脑前部和视前区一带存在着密集的温觉感受器和少数冷觉感受器,并证明产热和散热的反应均可由刺激下丘脑前部所引起,倾向认为下丘脑前部并不是散热中枢,而是中枢性温度感受器存在的部位,后部可能是对体温“情报”加以整合处理的部位。下丘脑后部能将由中枢性温度感受器发放的冲动和从皮肤温度感受传入的神经冲动统一起来,并对体温进行整合调节。目前生理学上多采用调定点学说解释下丘脑的体温调节中枢对体温调节的功能活动。下丘脑的体温调节中枢存在着与恒温箱温度调节器相类似的调定点,此调定点的高低决定体温的水平。人体的发热就是由于调定点受到致热原作用后,对温热敏感性降低的结果;也就是说,这些温觉感受器对温热感受的阈值升高了,假定调定点由正常的 37℃升高到 38℃,当体温在 38℃以下时,不出现散热反应,而出现产热反应,直至体温达到 38℃以上时才出现散热反应。有实验证明,5-羟色胺灌流动物脑室或下丘脑前部时,可见体温上升,而去甲肾上腺素则使动物体温降低。不同动物对单胺递质的反应并不同。还有人认为 Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup>在下丘脑后部的比例决定着体温的调定点,0.9%氯化钠灌流脑室和下丘脑后部引起体温升高,而灌流液中加入 Ca<sup>2+</sup>,则氯化钠的升体温作用被抑制。(2)致热原与发热的机理:现有资料表明,除由甲亢(包括甲亢危象)、剧烈运动、惊厥或癫痫持续状态等情况导致的产热过多,或因广泛皮肤病变、充血性心力衰竭等所致的散热障碍造成的发热以及功能性低热外,其余原因所致的发热皆可能与致热原作用于体温调节中枢有关。致热原是一类能引起恒温动物体温异常升高的总称,微量物质即可引起发热。目前已知致热原为两类:外源性致热原,如病毒、衣原体、支原体、立克次体、螺旋体、细菌及其毒素、真菌、原虫、抗原抗体复合物、致热类固醇(如原胆甾醇,又名原胆甾醇)、炎症的某些内源性因子、尿酸结晶、博莱霉素等,多数外源性致热原分子量较大,难以作用于体温中枢,而是刺激白细胞和组织吞噬细胞释放内源性致热原引起发热。内源性致热原(EP),是从宿主细胞内衍生的致热物质,主要来自大单核细胞和巨噬细胞,是一种小分子的蛋白质,分子量为 13 000~15 000, H<sup>+</sup> 浓度 3.16×10<sup>-4</sup>mol/L 时仍能保持稳定, H<sup>+</sup> 浓度 1.26×

$10^{-9}$ mol/L 或 50℃时灭活。给家兔注射微量的 EP(25~50ng/kg)即可使其体温升高 1℃。近年研究资料表明,淋巴激活因子(LAF)、白细胞介素 1、干扰素、肿瘤坏死因子(TNF)以及其他的细胞激活素在本质上具有类似于内源性致热原的致热性。EP 作用于体温调节中枢引起发热的机理尚未完全清楚,近年研究资料认为 EP 作用于接近视前区/下丘脑前部神经元的丰富血管网,即所谓器官性的血管终板(OVLT),该部位血脑屏障功能很小。OVLT 的内皮细胞不阻止 EP 进入脑组织,或者当其接触来自循环的 EP 后,本身即可释放花生四烯酸类的代谢产物(包括前列腺素、前列环素、血栓素),进入视前区/下丘脑前部即可引起发热,尤以 PGE<sub>2</sub> 的作用最强。PGE<sub>2</sub> 可增加脑组织中环磷酸腺苷(cAMP),后者可作为一种神经传递介质,导致体温调节中枢调定点的升高,进而引起发热。(3)发热时人体功能的变化:高热对各器官组织能产生一定影响,神经组织损害尤为明显。体温超过 42.5℃时,由于蛋白质的变性和酶功能失常导致脑细胞不可逆的损害。人体在发热时可有如下功能变化:(1)神经系统:中枢神经系统的兴奋性增高,可有烦躁不安、头昏、头痛、失眠等症状,40℃~41℃时可出现幻觉、谵妄甚至昏迷和抽搐;幼儿中枢神经系统发育未成熟,表现更为明显。体弱或某些感染者可出现抑制状态,表现淡漠、嗜睡等。(2)心血管系统:一般体温升高 1℃,心率增加 20 次,儿童较成人明显。伴心肌炎者心率显著增快,伤寒等感染者心率相对缓慢。(3)呼吸系统:呼吸加快。(4)消化系统:消化液生成和分泌减少,胃肠蠕动减弱,可致食欲减退、恶心、呕吐、舌炎、鼓肠、便秘等。(5)泌尿系统:体内水分和钠盐潴留,肾小管再吸收增强,致尿少、尿比重增高,尿钠降低;感染发热者,肾实质细胞变性可出现蛋白和管型。(6)代谢变化:分解代谢增强,耗氧量增加。体温每上升 1℃,基础代谢可增加 13%。可出现血糖升高,甚至出现糖尿;血内乳酸增高,氮质、酮体等代谢产物积累和体重减轻,长期发热者易出现维生素(尤 B、C 族)缺乏。(7)防御功能:单核-吞噬细胞系统功能增强,白细胞增多,吞噬作用加强,细胞免疫功能提高,有利于机体抵抗感染,甚至杀灭病原体。

**临床诊断步骤:**发热病因极为复杂,但如能详细询问病史,进行详尽的体格检查以及必要的实验室检查和辅助检查,则大多数发热病因可以查明。(1)病史与体格检查在诊断中的重要性:①热型:稽留热见于伤寒、斑疹伤寒、大叶性肺炎等;弛张热见于风湿热、败血症、脓毒症、肝脓肿、严重肺脓肿等;间歇热见于疟疾、肾盂肾炎、回归热、淋巴菌、布氏杆菌病等;消耗热见于严重败血症、重症肺脓肿等;波状热见于布氏杆菌病、何杰金氏病等;双峰热见于黑热病、恶性疟、粟粒性肺结核、Q 热、大肠杆菌败血症、少年型类风湿性关节炎(still 氏病)及恶性肿瘤;不规则热见于流感、阿米巴肝脓肿、肺结核、癌性发热等;颠倒热见于丝虫性发热、疟疾、严重结核病。②热程:可分为急性发热、原因不明长期发热和持续性低热。热程在两周以内称急性发热,绝大多数为感染性发热,病毒是主要病原体,属非感染者仅占少数,如药物热、血清热、内分泌危象、溶血现象、血栓性栓塞病、痛风、急性白血病、高温中暑、脑溢血及少见的铸工热、恶性高热等。发热超过两周以上,体温多次 $\geq 38.5^{\circ}\text{C}$ ,病史询问、体检和常规实验室检查仍不能明确诊断者称原因不明长期发热(简称 FOU 或 FUO),经进一步检查和随访后大多也可确诊。持续性低热体温在 37.5℃~38.4℃,持续 4 周以上。③伴随发热的主要症状与体征:发热伴寒战、结膜充血、皮疹、呼吸道症状、神经系统症状、心血管系统症状、胃肠道症状、黄疸、肝脾和淋巴结肿大、出血现象等均有重要参考价值。可按照症状与体征的特点作出相应的诊断。(2)实验室检查在诊断中的意义:血、尿、粪 3 大常规是检查基础,如结果阳性常可提供重要诊断线索。病原学检查、血清学检查、酶试验、脑脊液常规检查、风湿类疾病有关检查(血沉、抗“O”、粘蛋白、类风湿因子、自身抗体全套、LE 细胞、肌电图等)、骨髓象、试验穿刺、X 线检查、B 型超声波、内窥镜、CT 及核磁共振、放射性核素、基础代谢率、活组织检查等可视病情需要进行。

原因不明长期发热及持续性低热患者,当缺少特异性临床症状及体征时,应作全面的实验室检查,一旦有异常发现再予追踪。(3)病因诊断的分析:急性发热热程短,发热多伴有明显的伴随症状,病因诊断一般不难。据国内外文献报告,原因不明长期发热病因多见:①感染(占 40%);伤寒、副伤寒、败血症、结核病、深部脓肿(肝、膈下…)、心内膜炎、急性肾盂炎(未加治疗的)、胆道感染、急性化脓性骨髓炎、急性血吸虫病、未治疗的疟疾、严重肝病合并内源性感染(腹膜炎、败血症、胆管炎…)、深部霉菌感染、某些局限性化脓性感染(盆腔炎…)、L 型细菌感染等。②肿瘤(占 20%);淋巴瘤、恶组和各种实体肿瘤(肝、胃、骨、肠、胆囊、肺、肾癌等);③血管-结缔组织病(占 20%);系统性红斑狼疮、类风湿性关节炎、皮炎、结节性多脉炎、风湿热、混合型结缔组织病及脂膜炎、白塞氏病等;④其他(占 10%);肉芽肿性疾病(肉芽肿性肝炎、结节病、局限性回肠炎、颞动脉炎等)、家族性地中海热、原胆烷醇酮热等;⑤始终原因不明(占 10%)。持续性低热病因多见:A. 感染性低热(占 40%);结核病、慢性肾盂肾炎、慢性胆道胆囊炎、慢性局灶性感染、慢性肝病(类固醇代谢障碍、肝细胞坏死)、巨细胞病毒感染等;B. 非感染性低热(占 57%);甲亢、嗜铬细胞瘤、脂膜炎、间脑病、恶性肿瘤(肝、肾、胰、肠癌等)、失代偿心瓣膜病、严重贫血、溃疡病、功能性低热(神经功能性低热、感染后低热、月经前及妊娠期低热、夏季热)等;C. 原因不明(占 3%)。

**治疗原则:**(1)病因治疗:对发热病人除特别危重者外,应按前述诊断方法与步骤进行详细的检查,以求明确诊断,然后针对病因作相应的处理和治理。如细菌感染用抗生素、疟疾用抗疟药、风湿病用强的松、肿瘤用化疗等。(2)降温治疗:一般不宜随意应用退热剂,以免改变热型,影响诊断与预后的判断,治疗效果的估价,只有对高热中暑、手术后高热、谵妄、婴幼儿高热等应采取紧急降温措施如冰袋降温、酒精擦浴、降低室温(使维持 27℃左右),必要时应用复方氨基比林、氢化考的松等药物降温。

发热是临床最常见的症状,急性发热诊断不难,但原因不明长期发热和持续性低热诊断比较困难,今后研究重点为:(1)进一步阐明正常体温调节详细过程;(2)特别是致热原与发热的详尽机理,如 EP 如何作用于体温调节中枢引起发热的机理等;(3)探索引起发热各种病因的特异性诊断方法与手段;(4)研究针对各种病因的特效治疗药物如抗生素、化学药物等。

#### 参考文献

- 1 Esdaile J M, et al. Am J. Med., 1980,68:825~830
- 2 陈钟英, 闵贤编, 著. 发热待查, 南京:江苏科学技术出版社, 1983. 1~101
- 3 戴自英, 徐肇明, 主编. 传染病学. 上海:上海医科大学出版社, 1991. 268~280
- 4 邓国华, 王受云. 中华内科杂志, 1991, 30(3):157~159  
(安徽医科大学第一附属医院余鑫之教授撰)

#### 多器官功能衰竭

**multiple organ failure** 多种器官功能衰竭简称 MOF, 是指肺、肾、肝、心、胃肠道、脑、代谢、凝血及免疫等多系统或两个以上重要脏器相继发生功能不全的新的临床综合征或疾病, 它的发现也是 70 年代外科发展的一个重要标志。其发生率因疾病不同各学者报道有差异, 一般为 1.2%~58.6%, 外科急诊手术后者为 7%~22%, 腹腔脓毒症者为 30%~50%, 肠梗阻患者为 3%, 多发性损伤患者为 7%, 肝胆感染患者为 4.1%, 肝脓肿及急性化脓性胆管炎患者为 24.3%。随着急救监护病房的建立和抢救、复苏技术的进展, 危重病患者的治愈率明显提高, 但多器官功能衰竭仍是目前危重病人死亡的主要原因, 其病死率一般为 30%~100%, 平均 70%左右, 并随器官受累数而增高病死率, 3 个器官以上者仍有 56.3%~100%, 这是当代医学科研的重要课题之一。

1973 年, 提尼(L. N. Tilneg)等首先将一种新的临床综合征命名为“系统相继衰竭”, 1975 年鲍埃(A. E. Baue)提出命名“多

发性、进行性或相继性系统衰竭”。1977年艾斯曼(B. Eisman)等及1979年冈田等提出名为“多器官功能衰竭”;1980年弗拉埃(D. E. Fry)称为“多系统器官功能衰竭”;1980年后阿部、望月与玉熊等相继作了临床研究的报道。中国于1983年起有何亮家、王德生等学者的报道。1987年11月,中华医学杂志编委会召开的术后感染专题讨论会上讨论了多器官功能衰竭。

诊断标准,在鲍埃及弗拉埃制定的标准基础上,参照国外学者的意见并结合临床实践,将其归纳如下:肺,呼吸急促,20~40次/min,呼吸困难,缺氧,动脉氧分压 $< 9.3\text{kPa}$ ,需要辅助呼吸。肾,尿量 $< 500\text{ml}/\text{日}$ ,尿素氮 $> 17.9\text{mmol}/\text{L}$ ,肌酐 $> 177\mu\text{mol}/\text{L}$ ,肝,黄疸,总胆红素 $> 34\mu\text{mol}/\text{L}$ ,血清谷草转氨酶、谷丙转氨酶及乳酸脱氢酶大于正常值2倍。心,血压 $< 12\text{kPa}$ ,中心静脉压 $> 1.96\text{kPa}$ ,心排出量下降,心房压上升,心脏指数 $< 1.5/\text{m}^2$ ,心律不齐,心跳骤停。胃肠道:出血需输血,内镜证实胃粘膜表浅溃疡伴出血。脑:嗜睡或昏迷,仅有疼痛反应。凝血,血小板 $< 80 \times 10^9/\text{L}$ ,纤维蛋白原 $< 1.5\text{g}/\text{L}$ ,纤维蛋白原降解产物 $> 20\text{mg}/\text{L}$ ,凝血酶原时间 $< 60\%$ 。1985年,美国感染学会召开多器官衰竭专题讨论会,卡利柯(J. C. Carrico)按其发展及器官功能受累情况分为4期。同年,斯卡奥(F. Skau)依上述7个主要器官功能制定了积分法,对多器官功能衰竭所处病期的了解和预后有一定的参考价值。

防治:多学科的综合措施,并要兼顾各脏器之间的关系和功能状态,警惕挽救一个器官而又引起另一器官的损害。(1)早期积极妥善彻底处理原发病灶,清除阻断导致多器官功能衰竭的各种有害介质或毒物等先驱因素。如控制内、外出血,清除坏死组织,引流,折骨固定等基本措施和张力性气胸或心包填塞等严重合并伤的处理;(2)充分重视消毒隔离,切断传播途径,合理、大剂量、早期应用有效抗生素控制需氧菌、厌氧菌及真菌等感染。也要注意其对肝、肾、骨髓等器官的毒性作用;(3)外伤复苏及抗休克措施要迅速,充足的扩充血容量但又不过度,纠正水与电解质的紊乱和酸中毒,并纠正缺氧状态;(4)对循环、呼吸、肾、水与电解质、酸碱平衡等进行监测,必要时应用人工器官(呼吸机,人工肾,人工肝)及血浆交换等措施对衰竭器官的支持,并应用血管扩张剂、利尿剂及肝素抗凝等治疗;(5)营养支持疗法,以静脉内高营养或采用肠道营养,并用50%葡萄糖100ml、胰岛素12~20 $\mu$ 、氯化钾1~3g、维生素C2.0g保护肝功能,以及用三磷酸腺苷一硫酸镁50 $\mu\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ,改善心肌细胞代谢,应用丙种球蛋白与冷凝集物制剂以增强抵抗力;(6)早期、大剂量、短突击应用激素,地塞米松5mg/kg,24h内用1~2次,不超过3d。(7)保持胃肠道的连续性,应用有效抗生素,调整肠道菌群,减少胃肠道菌群逆行入体内,并应用抗酸、抗胆碱、保护胃粘膜的药物如甲氧咪呱等和肌注维生素A10万U,防止应激性溃疡及出血发生。

病因及发病机制:比较复杂,有些尚不完全明了,临床上常因严重创伤,重度烧伤,大手术后,消化道大出血,严重感染,医源性因素及原有慢性脏器功能障碍如糖尿病、心脏病、肝硬化、晚期肿瘤等引起。人体受以上各种侵袭后发生休克(失血或中毒性),使血管强烈收缩,血容量减少,交感-肾上腺髓质系统兴奋,产生大量儿茶酚胺等血管活性物质,使冠状动脉血流量减少,发生缺血、缺氧,溶酶体破裂,大量溶酶体酶释至细胞外,从而引起自身细胞及组织的消化与破坏。并产生心肌抑制因子,使心肌收缩力下降,冠状动脉血流量减少,心肌缺血等致心力衰竭。在休克未纠正时毛细血管网大量开放而释放组织胺,使毛细血管通透性增高,微循环淤血,灌注减少,血小板和红细胞易于聚集成团形成微血栓,并激活内源性凝血系统而引起播散性血管内凝血。凝血时能量消耗增加,分解激素大量分泌,糖异生亢进,血糖、血脂增高而外周骨骼肌组织能量缺乏,线粒体内转移酶活性受抑,三磷酸腺苷减少,使蛋白合成发生障碍,能量代谢异常也可导致各器官功能障碍。内毒素能激活凝血因子VI而形成大量激肽,也能激活补体系统而使肥大细胞释放组胺,凝固-纤维,微血栓形成,加重微循环障碍。又因乏氧代谢,乳酸等代谢产物引起酸中

毒,使回心血量减少,心肌收缩力减弱,搏出量减少,更加重微循环障碍,也导致血液高凝。加上免疫功能降低,调理素下降,纤维连接素含量和活性下降,胃粘膜防御因子减弱,降低毒素的清除力,激发血管内凝血,更诱发和加重多器官衰竭。

最近,随着生化方法的改进,发现很多介质,如内毒素、组织胺、白细胞三烯、激肽、五羟色胺、补体激活、氧自由基、蛋白酶和前列腺素等,参与休克和多器官功能衰竭的发生和发展,这方面的研究获得了突出的发展,不少学者曾通过各种方法和途径对多器官功能衰竭的发病机制进行了深入的研究,试图找到这种因果联系的共同通道,以便能在临床上预防和改进多器官功能衰竭的治疗方法。1986年曼金斯(J. L. Meakins)研究的结果证明,胃肠道是导致多器官功能衰竭的摩托或始动器官,胃肠道内的细菌发生移位,经门静脉、肝、脾、肺甚至全身血流引起败血症和多器官功能衰竭。此种肠道细菌移位现象的发现为多器官功能衰竭的预防提供了新方法。1990年,苏巴(Souba)建议对危重病人静脉注射谷酰胺以预防因谷酰胺缺乏或代谢改变所引起的肠道粘膜细胞损害。同年,克莱兰(M. C. Clelland)在严重复合性急性肾功能衰竭及肺功能衰竭病人中采用选择性消化道去污染方案,降低感染率,提高成活率。针对氧自由基及白细胞三烯和蛋白酶等细胞毒物,临床上和实验中试用抗氧化剂(消炎痛,布洛芬等)、抗蛋白酶(抑肽酶等)、抗凝血酶III等取得了可喜的成绩。

近10年对免疫学研究的突飞猛进,证实休克时毒性介质、内毒素等均可激活补体,产生与酵母多糖相同的作用,并实验证实活化补体是各种因素引起多器官功能衰竭的启动机制和共同途径之一。1986年,肿瘤坏死因子的发现,证实它能激活多形核白细胞在脏器微循环内聚集并形成微血栓,使内皮细胞释放血小板激活因子等引起弥散性血管内凝血,并释出蛋白酶和氧自由基,直接损害细胞膜,对各种靶器官,如肺、肝、肾等造成损害,又能降低纤维连接素,使细胞连接松弛,可通过环氧酶及脂氧酶催化,使花生四烯酸产生前列腺素和白细胞三烯等,使血管扩张及通透性增高,引起组织水肿,从而导致多器官功能衰竭。这是外科感染研究中的重大突破,也给临床治疗开辟了新的途径和方法。测定血液中的肿瘤坏死因子的浓度作为早期诊断和判断感染程度的一个指标。1991年,美、英等国政府已批准在临床上试用肿瘤坏死因子抗血清或单克隆抗体,由于其能阻止其有害作用,称它为治疗感染的神奇抗体,它们能明显降低MOF患者的病死率,但交叉反应性抗核抗体的保护作用尚缺乏证据,其他学者的实验和临床研究显示有争议的结果,目前正在应用多克隆或单克隆内毒素抗核抗体的实验和临床研究,这将有助于阐明尚未解决的有关保护机制问题。

#### 参考文献

- 1 Baue A E. Arch Surg., 1975, 100: 779
- 2 阿部令彦, 临床外科, 1981, 36: 750
- 3 何亮家, 等. 中国急救医学, 1983, 3: 26
- 4 王德生. 医师进修杂志, 1985, 9: 5
- 5 Skau F, et al. Arch Surg., 1985, 120: 152
- 6 Carrico J C, et al. Arch Surg, 1986, 121: 196
- 7 Meakins J L. Arch Surg., 1986, 121: 197
- 8 中华医学杂志编委会, 中华医学杂志, 1988, 68(5): 247
- 9 Clelland M C. Critical Care Medicine, 1990, 18: 935
- 10 陆江阳, 等. 中华外科杂志, 1991, 29(11): 695

(安徽省立医院王德生教授撰)

#### 二维超声诊断技术的临床应用

technology of 2-D ultrasonography diagnosis in clinic. 1880年, Jacques和P. Curie发现晶体压电效应后, K. Dussik于1942年首次使用A型超声仪探查颅脑, 将超声技术引入医学领域。10年后美国H. Bliss研究出二维超声技术, 并开始用于人体脏器检查。中国在1975年之前, 以A型超声仪为主, 仅在少数大城市医院引进二维超声仪器。1978年后, 二维超声技术被大范围地引入中国。10

年后,中国研制出用于腹部检查的二维超声仪,近年已在县镇级医院普及。由于超声工程技术和电子计算机的广泛应用,超声检查已由原来的定性诊断提高到定量诊断水平。1992~1993年间,美国又先后推出超宽频带(HDI)和声学回波(ART)技术,给超声诊断提供了更多的信息量,增强了分辨力,拓宽了应用范围。此外,三维图像技术也已开始应用于临床,四维技术也在实验使用阶段,相信很快应用于临床。

**二维超声心动图的临床应用** 常用于检查左室长轴切面、左室短轴切面(包括二尖瓣、乳头肌及心尖3个横断面)、主动脉短轴切面、左心二腔切面、心尖四腔切面及胸骨上凹主动脉弓长轴切面等。

1. 狭窄性瓣膜病的二维超声心动图特征。(1)二尖瓣狭窄。二尖瓣由于纤维化、钙化及赘生物形成而增厚,其回声较正常瓣膜明显增粗增强,活动僵硬、受限。根部活动幅度小,瓣体及瓣尖因粘连牵拉,活动幅度亦明显小,前后叶呈同向运动,舒张期瓣口面积小于 $2\text{cm}^2$ ,且前叶呈“气球样”(或钩状)改变,瓣尖呈“火柴头”样改变。前叶气球样变是诊断二尖瓣狭窄的重要依据。若瓣膜增厚、瓣痕化或钙化严重时,气球样变可消失,此类病人多需进行瓣膜置换术治疗。左房由于血液淤滞而明显扩大,重症者左室扩大同时有肺动脉高压的表现。(2)主动脉瓣狭窄。主动脉瓣由于钙化、粘连、纤维化,其回声增粗增强变形,可单瓣、双瓣或三瓣受累。活动僵硬、受限,开放幅度小,主动脉瓣口变形,其面积一般小于 $1.6\text{cm}^2$ ,舒张期正常关闭之“Y”形态消失。早期左室后壁及室间隔增厚,后期左室腔扩大。

2. 返流性瓣膜病的二维超声心动图特征。(1)二尖瓣关闭不全。二尖瓣口对合不良,轻者仅是对合错位或裂隙,重者则见瓣口关闭不合拢或见漏口。风湿性病引起者,同时见瓣叶回声增粗增强;左房前后径扩大,收缩期有时可见左房后壁向后扩张,左室扩大伴容量性负荷过重。房间隔凸向右房侧,有时可探及肺静脉扩张。右室可扩大。瓣膜脱垂或腱索断裂引起者,同时见二尖瓣脱垂或腱索断裂之征象。(2)主动脉瓣关闭不全。舒张期可见主动脉瓣关闭不合拢、错位或裂隙。风湿性病引起者,可同时见瓣叶回声增粗增强。瓣膜脱垂者可见主动脉瓣向左室流出道突出且超越瓣环连线。此外,舒张期见二尖瓣前叶或室间隔的颤动运动,左室扩大伴主动脉根部增宽。

3. 冠心病的二维超声心动图表现。冠心病的超声心动图无显著特异性,但具有重要的参考价值。正常人室间隔与左室后壁呈逆向运动,即室间隔收缩期呈后向运动,舒张期呈前向运动,运动幅度 $3\sim 8\text{mm}$ 。左室后壁收缩期呈前向运动,舒张期呈后向运动,运动幅度 $8\sim 16\text{mm}$ ,整个室壁向心性活动均匀一致。节段性室壁运动异常往往是诊断冠心病的重要依据。冠心病人的室壁运动异常,表现节段性运动减低、节段性运动丧失和节段性矛盾运动。运动异常主要出现于受损心肌,未受损心肌运动正常,甚至增强。依据室壁节段性运动异常的部位,可估测冠状动脉供血不全的部位。尤其使用计算机心内膜标记法检测可靠性更强。Kemper等将造影剂经左心导管注入主动脉根部或冠状动脉,使心肌显影,回声增强。而冠状动脉阻塞时,其相应供血部位的心肌由于灌注受阻,显影不良或不显影,回声增强不明显或缺如检查。

二维超声心动图对急性心肌梗塞的诊断有时较心电图及酶学检查更早。二维超声心动图对心肌梗塞并发瓣膜的诊断亦具重要价值。

4. 心肌病的二维超声心动图表现。超声心动图对肥厚性心肌病有肯定的诊断价值;对扩张性的、限制性的心肌病可提供重要的诊断依据。对于肥厚性心肌病,主要检查左室长轴切面、二尖瓣水平、乳头肌水平及心尖水平之左室短轴切面和四腔心切面。这样对室间隔不同部位的肥厚一般都可检出,如心室下 $1/3$ 心室肌肥厚的心尖肥厚型心肌病。由于室间隔增厚二尖瓣前叶收缩期凸向左室流出道,可导致左室流出道的狭窄(正常为 $20\sim 35\text{mm}$ )。这种二尖瓣前叶收缩期的向上凸起,发生于心电图R波

之后,第1、2心音之间,且在期前收缩后第1次心跳或用亚硝酸异戊酯及异丙肾上腺素后更明显。此为肥厚性阻塞型心肌病的超声心动图重要表现,但无特异性。因为凡导致左室流出道射血速度过快者均可出现。

室间隔增厚是肥厚性心肌病的主要特征,其增厚多为非对称性的,且厚度一般均大于 $15\text{mm}$ 。左室后壁亦可增厚,室间隔与左室后壁厚度比值 $>1.5$ (正常 $1.03\pm 0.08$ ),增厚的心肌回声增强,呈毛玻璃样纹理改变,且活动减弱以至消失,收缩期增厚率下降或消失。正常心肌运动可如常或有代偿性增强,心室腔相对狭长变小。IHSS患者由于主动脉瓣下狭窄,收缩中期加重,阻滞血流,使流入主动脉之血液迅速减少。主动脉瓣口变小,致使主动脉瓣出现收缩中期关闭。非阻塞型心肌病虽然室间隔增厚,活动度减低,但左室流出道狭窄不明显,无收缩期二尖瓣前叶前凸现象,左室后壁一般不增厚。扩张性心肌病在左室长轴切面上,左室呈球形增大,室间隔上移,左室后壁呈弓背形下移,二尖瓣开放幅度小,室间隔与左室后壁活动幅度弥漫性减低,室间隔收缩期增厚率 $<30\%$ ,四腔心切面见各房室均有增大,主动脉内径偏小。限制性心肌病的超声心动图表现为室间隔与左室后壁呈对称性增厚,两者比值正常,但活动幅度和收缩期增厚率均减低。

5. 心包积液的二维超声心动图特征。二维超声心动图检查心包积液不仅诊断符合率高,而且能够估计积液量和引导穿刺。二维超声心动图检查可见右室前壁、心尖外周及左室后壁后方有一半环形液性暗区包绕。暗区因积液量不同而宽窄不一。大量积液时,可于左房后壁下方出现液性暗区,心腔可相对变小且心脏搏动频速。总之,二维超声心动图对X线检查提示的普大型心脏的鉴别诊断有其独特价值,但对狭窄性心包炎的诊断有一定困难。

6. 左房粘液瘤的二维超声心动图特征。粘液瘤占心脏肿瘤的 $30\%\sim 50\%$ ,其中 $75\%$ 发生于左房。在左室长轴和四腔心切面上,粘液瘤可清晰显示左房内,其蒂附着于房间隔上,随心动周期上下移动,甚至舒张期穿过二尖瓣口进入左室,呈圆形或椭圆形致密回声光团。中心坏死者,光团中央可出现液性暗区,房室腔一般正常。

7. 先天性心脏病的二维超声心动图特征。(1)房间隔缺损:一般以心尖4腔切面和剑下4腔心切面探查房间隔原发孔和继发孔缺损准确性较高,几乎没有假阳性或假阴性出现。此时见缺损之房间隔回声中断。断端回声略增粗。右房右室扩大,右室流出道及肺动脉增宽,由于右室呈容量性负荷过重,室间隔凸向左室侧,而且收缩期向前、舒张期向后运动,与左室后壁呈同向活动。左房可稍大,左室及主动脉一般不大。依据房间隔回声失落的部位与大小,可估测缺损类型及缺损口大小。经食道探查时,可提高房间隔缺损的诊断准确率。声学造影有助于缺损的确立和了解分流方向。(2)室间隔缺损:首先探及室间隔的回声失落区,心脏十字交叉以下室间隔与十字交叉连续中断。其次,由于左室容量性负荷过重,左室扩大,室壁活动增强。右室可增大,肺动脉及右室流出道亦可增宽,或伴肺动脉高压。左房、主动脉一般不扩大。依据室间隔缺损的大小、部位,可估测缺损的大小及类型。声学造影可提高室间隔缺损的诊断率。(3)法乐氏四联征:左室长轴切面见主动脉明显增宽,右室流出道变窄,右室扩大且前壁增厚,主动脉前壁与室间隔连续中断有一较大缺损区,且断端室间隔明显增厚,两断端不在同一水平,远侧断端位置下移并指向增宽的主动脉前后壁之间,构成主动脉骑跨征。肺动脉或肺动脉瓣狭窄,左房左室一般不大。(4)三尖瓣下移畸形:4腔心切面上见增大变形呈船帆样的三尖瓣前叶及粘连于右室壁和室间隔的后叶和隔叶。三尖瓣距心尖部距离变短,二尖瓣前叶至心尖部的距离是三尖瓣至心尖部距离的 $1.5$ 倍以上。畸形瓣上方的右室腔与右房连成一个大心腔,构成“房化右室”,且明显扩大。畸形瓣下方至心尖部为“功能右室”,明显变小。在主动脉短轴及二尖瓣口水平短轴切面,见三尖瓣由正常之9点位置下移至 $11\sim 12$ 点处。另外,本病常合并房间隔缺损畸形,探查时应注意扫查。

### 二维超声技术在腹部疾病诊断中的应用

1. 适应症。(1)实质性脏器的形态、大小、位置及其周围组织解剖关系。(2)腹腔内大血管解剖部位、走行关系,有无狭窄、扩张、栓塞及其血流动力学变化。(3)体腔内或脏器内的囊性的、实性的或混合性的占位病变的定性定位检查。(4)腹腔脏器或管腔内有无结石、寄生虫或异物。(5)妇科疾病和正常、异常产科检查。(6)炎症性病变。(7)超声引导下的穿刺、造影及活检。

2. 肝脏肿瘤声像图特征。(1)肝脏形态:①肝脏表面凸凹不平,尤其位于肝脏浅层的小型病灶,可使肝脏表面呈现数个细小结节状突起。②角征:正常肝脏边缘呈锐角,若右叶前缘变厚而钝圆,呈 $>45^\circ$ 或直角者,称角征改变。往往提示占位性变。③驼峰征:肝内深部肿瘤组织致使膈肌向外突出,呈驼峰状。常发生于右叶转移性肿瘤。(2)肝内血管征像:由于肿瘤占位致使肝内血管变细、减少、受压、弯曲而移位,有时在门静脉或肝静脉内探及癌栓回声。良性占位一般不会导致血管变化。(3)肿瘤组织声像:表现为强、弱及等回声3型。①强回声型:A. 光团,为密集明亮光点集合团。边界多清晰,大小、数量不等,大者中心可因坏死液化回声减弱,常见于原发性肝癌及转移癌。若光团聚集或融合成片称集合体征。2cm大小光团的内部结构回声无明显改变,若边缘清晰、整齐,有硬性感而又位于静脉末端者多为血管瘤。3cm以上的光团,随体积增大可有弱回声环和强回声环改变,前者在肿瘤回声周边出现回声的黑色线状边界,构成无回声环节。后者在肿瘤回声周边出现强回声白色灰阶环带状结构。其产生机理为肿瘤组织迅速膨胀性生长压缩肝组织构成伪性包膜,因其声阻抗相似而呈弱回声环,随病程进展,纤维组织进入周围组织形成包膜时,声阻抗差加大而呈强回声环。较大光团回声中可见数个回声强弱不一的圆形小灶声像或回声不一的线状结构。B. 靶团:为圆形暗区中心小而圆的光团,似靶心而称靶团。Meine认为系由于肿瘤组织出血坏死所致。C. 弥漫型:此型肝脏明显肿大,表现凸凹不平,结构回声紊乱,呈云雾斑片状,可见大小不一多个小球形病灶,有时融合成片。病变常波及左右两叶及胆囊,肝门内结构显示不清,门静脉内常见癌栓。②弱回声型:为实质性暗区,呈黑色灰阶,内有稀疏线状反射,边界尚清,但不整齐。见于原发性肝癌、平滑肌瘤、血管瘤等。③等回声型:回声与正常肝组织一致,肿瘤组织周边隐约可见纤细线状边界回声。病灶直径1~2cm不等,一般1~3个散发存在。扫描中易被漏诊。

原发性的或继发性的肝癌均可出现上述超声征象,超声征象的不同,缘于肿瘤组织的不同演变阶段以及肿瘤组织的血供声阻抗等因素。

肝脏良性肿瘤如血管瘤脂肪瘤等超声图象多为反射增强型,其边界清晰整齐,内部回声较一致,呈“硬结节灶”样,而且多无压迫征象及肝脏形态改变。

彩色多普勒技术亦已用于腹部脏器肿瘤检查。由于肿瘤病灶内血管丰富,血供异常增加,彩色多普勒(CFI)检查可探及高速彩色血流信号,流速均大于30cm/s,为诊断恶性肿瘤的重要指征。

3. 肝脓肿的超声征象。早期病变多呈密集点、线状伴有粗糙边界回声。随病程进展,脓肿组织溶解液化后,则为液性暗区回声,其内多无光点,暗区大小、数量不一,周边可见粗而厚且欠规则的囊壁回声。若脓肿位置表浅,加压后可变形。

4. 胆囊结石超声征象。胆囊结石的光团回声形态不一,大小不等,多位于胆囊底部,结石多伴声影(Acoustic Shadow),声影宽度与结石大小、数目有关。胆囊壁多数完整,亦可不光整或显示不清。萎缩性胆囊炎伴结石可不见胆囊回声,仅见其内的光团回声及声影。同时应注意鉴别由于体积效应所造成的假阳性回声,如囊壁结核结节有时易误诊为胆囊结石。

胆道结石可发生于胆道的任何部位,常见部位为左右肝管、总肝管、总胆管下段。胆道结石多为光斑强光点或光团回声伴声影,同时伴胆道扩张。左右肝管结石,于显示第1肝门时最清楚,

在左右肝内显示为水平走向串珠样光点或光团回声伴声影。多数情况下胆道只能探及总长度的1/2,约4cm左右,其余部分(特别是十二指肠后段)常因气体干扰显示不清。超声波对胆道结石的扫查,不仅能确定有无结石,还可通过横扫查与纵扫查相互印证,进行结石定位诊断。

5. 胰腺肿瘤的超声征象。胰腺癌为胰腺常见肿瘤,又以胰头癌多见。超声可见胰腺局限性肿大、变形、外形多不规则,可见伪足样突起,癌块边界尚清且多为低回声,少见斑点及雾状回声,亦可为均质回声。胰管呈管状或串珠样扩张。

6. 肾结石的超声征象。超声波表现为强光点或光团回声伴声影。但肾结石与肾盂肾盏白色灰阶反射相似,两者无明显反差衬托,易漏诊。结石过小,其直径小于超声波束直径时,结石可不显像,应予注意。

7. 前列腺超声征象。检查方式分为经腹检查和经直肠检查。(1)前列腺肥大超声征象:前列腺各径线增大,呈半圆或球形,包膜增厚,尤以向两侧对称性增大为多见,回声增强,呈强光点或斑点及斑片状及线样回声。(2)前列腺癌超声征象:形态不对称,内部结构回声杂乱不均,强弱不一,包膜连续性中断,甚而见单个的或多个光团或实质性暗区。侵犯膀胱或精囊壁时,可见其受损征象。有时应注意与钙化鉴别。

8. 子宫肌瘤超声征象。超声见子宫增大呈球形,可见局部隆起,宫壁增厚不均,内膜回声偏移。瘤体回声可表现为减弱型的、增强型的和混合型的3种。前者瘤体呈实质暗区,回声较宫体回声弱。增强型的呈光团状,回声较宫体强,周边可见“透声环”。后者回声强弱不等,瘤体界面模糊,多见于多发性子宫肌瘤。自1961年Berlyne报告超声引导下肾脏活检及1972年Goleberg使用超声穿刺探头后,介入性超声在临床上逐渐兴起,尤其近几年来,由于实时超声显像技术的广泛应用,介入性超声使用更加普及与广泛,为诊断治疗提供可靠而有效的手段。

介入性超声应用适应征主要为:各种软组织器官的实质性的、囊性的、占位性的病变的放液及注射用药,羊水穿刺、胎盘穿刺,心包及胸腔积液穿刺,超声引导下心导管检查和肝胆道造影等。超声引导下的穿刺诊疗方法准确简便,使用广泛而安全。

#### 参考文献

- 井上纯雄,等.最新医学,1982,37(7):126
- Talmon C A. Manual of Ultrasonography Churchill Livingstone, New York, 1982
- 真岛康雄,等.肝脏癌,肝胆腺,1984,8(6):756
- 杨浩.灰超诊断学.重庆:科技文献出版社,1987,30~115
- 周永昌,郭才学.超声医学.北京:科学技术文献出版社,1992.261~361
- Donald S, Gmerson, M D. Diagnostic Efficacy of Endoraginal Color Doppler Flow Imaging an Ectopic Pregnancy Screening Program, 413~417

(安徽医科大学第一附院赵强副教授)

### 核磁共振医学应用进展 advancing on magnetic resonance imaging in medica

核磁共振(简称MR)是1946年美国哈佛大学的Pucell和斯坦福大学的Bloch发现的一种物理现象。继之MR一直为物理、化学、生物等方面的分子结构研究的重要分析工具。直至1972年美国R. Damaclian提出肿瘤组织的纵向弛豫时间和横向弛豫时间比正常组织长,1973年Lauterbur提出核磁共振原理同空间编码技术结合起来的磁共振成像技术(简称MRI),于80年代初进入临床医学,并被称作为“比发现X线更伟大的划时代的医学史上的进步”。正是它具有优越性,使这项新的影像学技术越来越显示出强大的生命力和发挥重要作用,主要表现在以下几方面:

(1)扫描时间缩短。传统的SE脉冲序列,TR为1s量级,当N=256,扫描时间为4min;N=128,扫描时间为2min。为了缩短扫描时间,近来出现许多快速脉冲序列,如GE的GRASS、

SIEMENS 的 FLASH, 主要采用梯度反转、小倾角方法代替 180°RF 脉冲及 SH1MADZU 的 SMASH, 使扫描速度大大加快。从快速→超高速→MR 电影(实时扫描)。心脏 MR 电影可观察心肌、瓣膜、动态血流。<1s 获得 9 幅踝关节图, 可动态观察它的运动过程。

(2) 计算机和微电子技术发展。除了传统 2DF 之外的 3DF 技术使被检各部分形成三维图象, 并与其他技术结合, 更清晰地显示病变。

(3) 抑制运动伪影方法的发展。已广泛用于临床的心脏门控、周围血管门控的心脏扫描技术和呼吸门控肝扫描研究使信噪比大大提高。

(4) 血流成像的发展。血管中的血流 MR 信号取决于流速。血管中流动的血液和周围组织可达到高度的影象对比。这种现象可用于磁共振造影术(MRA), 特别是近年来 MRA 与上述的 3DF 重建、门控技术及快速扫描的结合, 给临床运用带来更广阔的前景, 使其不仅能观察心、血管形态, 并朝定量方向发展, 观察血液流速及血流特征, 例如: 显示头部大脑前中后动脉、威利氏环、缓慢流动的脑静脉等。从颈部可观察颈内动脉、颈外动脉、椎动脉等。是目前诊断颈动脉狭窄引起短暂缺血发作的最佳影像学检查方法。利用 JAS 技术可选择性观察盆腔动静脉。适用于诊断髂动脉狭窄、动脉硬化性血管炎及术后了解血管短路情况。采用 3DPS 方法可诊断下肢静脉曲张、静脉栓塞、阻塞性血管炎等。这种不用造影剂的非侵入性的 MRA 是一个具有很大潜力的技术, 可能取代数字减影术(DSA)。

(5) 图象空间分辨率、信噪比和图象质量提高。当用头线圈时, 对头部图象的分辨力为 1mm, 身体为 2mm。目前各种特制的表面线圈广泛使用, 如眼眶、关节、前列腺的表面线圈, 可缩小成像区域, 使局部组织器官的空间分辨力达到 0.1~0.2mm。同时成像矩阵由最早的 128×128 进展为 256×256, 512×512, 甚至达 1024×1024。目前薄层垂体扫描(层厚 1mm)适用于微腺瘤的诊断; 膝关节层厚 1.8mm 扫描, 很易显示半月板撕裂。随着 RF 线圈的改进, 加之表面线圈及门控技术的应用, 现在的 MRI 图象信噪比已明显提高, 丝毫不比 CT 逊色, 而对比度更好。

(6) 先进的心脏分析装置。它可以自动选择心脏短轴断面, 计算室壁厚度、心室容量、半径收缩率、射血分数, 并能绘出表格一目了然地显示心脏的功能状况, 为诊断心肌梗塞、心脏衰竭提供可靠依据。

(7) 新技术和新脉冲序列不断出现。弥散图象是工业上最热点的技术, 目前也用于医学领域。它反应了水分子在细胞内的弥散运动。运用这种新技术渴望诊断早期脑缺血, 鉴别肿瘤与水肿。弥散异向性图象可观察、分辨不同方向行走的神经纤维束, 如从左→右的肿胀体; 从前→后的视放射; 从上→下的锥体束。另有多层扫描功能, 如多角度扫描、双侧对称扫描、旋转扫描等, 非常有利于观察脊柱多个椎间盘、视神经、膝关节内弯曲、旋转的韧带及脑表面结构。另外, 全脊柱扫描一次成像也成为现实。

(8) 人体组织的波谱分析及对生理、生化信息、人体新陈代谢等方面的研究。近来的研究资料表明, <sup>31</sup>P 磁共振波谱分析(MRS)可以判定磷的代谢产物三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、磷酸肌苷(PCr)、无机磷的浓度。根据无机磷波谱的位置, 还可测定 H<sup>+</sup> 浓度。这些对研究生理功能和疾病诊断均有重要意义。临床已证实, 肿瘤组织与正常组织比较, PCr 信号强度明显低, 而无机磷浓度增大、H<sup>+</sup> 浓度低。<sup>31</sup>P 波谱分析已用于心肌缺血和心脏移植术后排斥反应的诊断。<sup>13</sup>C 的 MRS 对酶缺乏疾病有诊断价值。<sup>19</sup>FmRS 对 5-FU 治疗的代谢研究可有较大作用。

<sup>23</sup>Na 像于 1987 年由 GE 公司研制获得; 另据报道, 生长快的肿瘤内钠含量增高, 这可能与细胞核的有丝分裂以及肿瘤的发生有关。

(9) MRI 系统设备的改进。磁体重量减轻。FONARB-3000 永磁的体重大达 910 00kg, 目前一些厂家生产的磁体包括磁屏蔽

在内不足 2 724kg, 可装在一辆卡车上方便移动、使用。磁屏蔽改为活动式内屏蔽。此外, 运行费用不断降低, 操作简便、灵活, 便于安装、调式、维修。

MRI 技术虽然有很大进展, 但尚未达到成熟和的阶段有很大发展余地。据目前的分析, MRI 技术的上述发展趋势还将继续下去。

#### 参考文献

- 1 Stuart W Young. Nuclear Magnetic Resonance Imaging Principles, New York; Raven Press, 1984. 91~110
- 2 David Kean, et al. Magnetic Resonance Imaging Principles and Applications, Baltimore; Williams, Wilkins, 1986, 1~5
- 3 水井辉夫. MRI 诊断学基础与临床. 北京, 朝仓书店, 1988. 72~80
- 4 池平博夫. 影像医学, 1991, 4(1): 75~84
- 5 SIEMENS, Advancing the Clinical Routine—MAGNETOM Impact Germany; SIEMENS, 1992, 1~18
- 6 SH1mADZu. MAGNEX 50 high Performance, 1992, 1~27.
- 7 CHARLESB, et al. MAGNETIC Resonance Imaging of the Body New York; Raven Press. 1992. 175~196

(安徽医科大学第一附属医院  
孟晓梅副教授撰; 朱怀玺审)

#### 支气管肺泡灌洗 bronchoalveolar lavage, BAL

20 世纪 60 年代末伴随可曲性纤维支气管镜(简称纤支镜)的应用, 逐渐兴起支气管肺泡灌洗。1973 年, Cantrell 首次报告运用纤支镜进行 BAL 获取正常人肺泡巨噬细胞, 以检测溶酶体酶的含量。1974 年, Reynolds 和 Newbell 正式创立 BAL 术, 并首次运用 BAL 研究间质性肺病患者肺组织局部炎症损伤及免疫病理学改变。由于 BAL 能获取细支气管分泌物以及末端支气管和肺泡上皮内衬液(ELF)中的细胞和可溶性物质(如酶类、脂类、蛋白质类等), 被 Zavala 称为“液性活检”, 广泛应用于多种肺疾病的临床诊断、疗效观察和预后评估, 如结节病、肺感染、成人呼吸窘迫综合征、过敏性肺炎、肺癌、间质性肺疾病、尘肺、特发性肺纤维化、淋巴细胞浸润性疾病等。自 80 年代以来, 随着 BAL 方法的不断完善, 并与其他先进技术的结合, BAL 已成为研究呼吸病的重要手段, 并为某些肺疾病的治疗及疗效观察提供了新的途径。

BAL 是一种很安全的检查方法, 其副作用与普通纤支镜检查相似。据报告, 总的并发症发生率为 0%~3%, 常见的并发症有发热、支气管痉挛、喘息、肺功能暂时减低等。选用的纤支镜尖端直径应在 4~5.9mm 之间, 楔入 3~4 级支气管。弥漫性间质性肺疾病, 均在标准部位(中叶或舌叶)灌洗, 最好采取一个以上部位灌洗, 以减少标本误差。对于局限性病变, 应根据胸部 X 线片的表现选择 BAL 部位。目前许多学者报告的 BAL 研究结果差异较大, 其主要原因是灌洗液量不统一, 如 5×20ml, 总量 100ml; 3×50ml(150ml); 3×60(180ml); 3×100ml(300ml)等等。小量灌洗(100ml)的回收液量较少, 且变化大, 支气管污染相对较多, 同时回收细胞数及非细胞成分较少, 因而结果误差较大。大量灌洗(300ml)虽然能收集到较多的细胞和非细胞成分, 同时回收液量较稳定, 但因灌洗液在肺内滞留时间较长, 而且液量多, 所以副作用较多。有学者报告, 灌洗液量 100ml、200ml、300ml, 出现副作用的患者分别为 1 例、3 例、15 例。较为理想的灌洗液量应为: 一方面能收集到较多的细胞和非细胞成分, 另一方面副作用较少。一般认为回收量, 间质性肺部疾病应为 40%~60%, 慢性阻塞性肺疾病为 10%~40%, 影响灌洗液回收量的因素很多, 其他影响因素如年龄、灌洗部位、吸烟、种族以及 BAL 操作技术等。有学者发现, 回收液中红细胞数量与回收液量呈反比, 这可能与 BAL 操作困难、损伤增加、回收较少有关。

支气管肺泡灌洗液(Bronchoalveolar Lavage fluid, BALF)的细胞成分与非细胞成分。一般认为正常人 BALF 主要含巨噬



细胞,其次是淋巴细胞、中性白细胞和嗜酸性细胞。影响 BALF 中细胞数及分类计数的因素很多,但主要因素是吸烟。关于吸烟对 BALF 中的细胞总数及分类计数的影响各家报告不一。20 位 BAL 专家报告正常非吸烟人群 BALF 中细胞数及分类计数平均值范围为:细胞总数  $(5.8 \sim 26.9) \times 10^4/\text{ml}$ ,巨噬细胞占 70%~95%,淋巴细胞 4%~18%,中性白细胞 0%~12%,嗜酸细胞 0%~1%。13 位 BAL 专家报告,正常吸烟人群 BALF 中细胞总数平均值范围为  $(40.2 \sim 115.0) \times 10^4/\text{ml}$ ,巨噬细胞占 6%~96%,淋巴细胞占 3%~8%,中性白细胞占 0%~8%,嗜酸细胞占 0%~2%。由于 BALF 中的细胞主要来源于肺泡,因而在研究支气管疾病时,BAL 大大受到限制。因此,Rennard 运用连续性分段 BAL 方法,以分别获取支气管和肺泡成分。具体方法是在相邻的 3 个部位分别灌洗液体  $5 \times 20\text{ml}$ (100ml),3 个部位的第一份回收液混合成为支气管灌洗回收液,以后的 4 份再混合为肺泡灌洗回收液。这种简易的 BAL 方法为研究支气管疾病开辟了新途径。BALF 中的非细胞成分主要来自肺泡上皮内衬液(ELF),由于肺灌洗液对 ELF 的稀释作用以及肺灌洗液、ELF 与肺间质或肺循环之间存在液体和物质交换,很难确定 BALF 中 ELF 的含量比例。一些学者运用白蛋白、 $\text{K}^+$ 、尿素、美蓝等作为标准参照物,以排除稀释因素对灌洗回收液中非细胞成分的影响。但影响这些标准参照物本身的因素较多,临床运用误差较大。如各种肺部疾病均可改变上皮毛细血管通透性,从而影响白蛋白浓度;BAL 过程中各种细胞溶解释放  $\text{K}^+$ ,从而使  $\text{K}^+$  浓度不稳定;由于尿素膜弥散作用较强,因而灌洗液在肺内的滞留时间能明显影响尿素浓度;美蓝与各种肺细胞(尤其是巨噬细胞)结合也能影响美蓝浓度。因此,Peterson 后来用同位素  $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$  作为参照物以计算 ELF 含量,结果较稳定。

BAL 在肺部疾病诊断中的应用:(1)结节病。结节病发展到肺间质纤维化出现肺泡炎时,BALF 中 T 淋巴细胞增加,其中以辅助性 T 淋巴细胞(TH)为明显,T 淋巴细胞分泌白细胞介素-1(Interleukin-1,IL-2)增加,肺泡巨噬细胞活性增强,分泌 IL-2 和血管紧张素转化酶(ACE)增加。总之,BALF 分析能反映结节病的病理过程,有助于对结节病的鉴别诊断和预后判断。(2)过敏性肺炎。BALF 中的 T 淋巴细胞增加,以抑制性 T 淋巴细胞(TS)为明显,细胞毒细胞、杀伤细胞均增加,各种免疫球蛋白(IgG、IgA、IgM)增加。(3)特发性肺纤维化。BAL 对其无特异的诊断特征,但通过细胞分类计数可提供有用的资料。特发性肺纤维化患者 BALF 中的细胞类型主要是中性白细胞增多,其中 TH/TS 比例增大,激活的巨噬细胞产生各种细胞因子。BALF 中组织胺含量也增加,BALF 中的中性白细胞比例可作为病情随访指标。(4)细菌性肺炎。BAL 对细菌性肺炎的病原学诊断意义很大。如在患者的 BALF 中分离出军团菌,则可诊断为该细菌感染。为防止上呼吸道细菌污染灌洗液,一种方法是半定量培养,Thorpe 报告细菌生长  $\geq 1 \times 10^5$  菌落形成单位(cfu)/ml,提示培养阳性;另一种方法是采用顶端带气囊的防污染导管,以避免 BAL 被污染。(5)肺结核。De Gracia 等研究证实,在诊断结核病时,用 BALF 进行分枝杆菌培养的阳性率高于支气管洗液或经支气管镜获取的痰培养。在某些病例中,支气管洗液培养阴性,而同时作的 BALF 培养则是阳性。另外,Stover 等发现,在 5 例分支杆菌病患者中,有 4 例 BALF 培养阳性。(6)肺癌。运用 BALF 诊断肺部恶性肿瘤的方法主要有两种。一种为在 BALF 中进行肿瘤标记物检测;一种为在 BALF 中找恶性肿瘤细胞。前种方法的价值未肯定;后种方法对支气管肺癌诊断率较高,为 92%,其他如鳞癌为 27%,腺癌为 66%。

早在 1928 年,Vincent 首次报告用硬质气管镜清洗支气管扩张患者的支气管分泌物,以后越来越多的学者用硬质气管镜及纤支镜清洗治疗众多肺部疾病,如肺泡蛋白沉积症、肺泡微结石病、急性矽肺、意外吸入放射性微粒及慢性阻塞性肺疾病、支气管哮喘和囊性肺纤维化等。除肺泡蛋白沉积症是 BAL 的绝对适应征外,对于其他疾病的治疗,由于清洗范围、适应症、并发症等问

题,研究者的看法尚不一致。

BAL 的发展方向是:(1)随着 BAL 临床运用范围的扩大,需要一个统一的灌洗方法及一个较为稳定的标准化手段,这也是 BAL 临床运用的基础。今后应根据不同疾病、不同检查目的,选用不同的灌洗方法。如对支气管哮喘患者,采用支气管灌洗术;对间质性肺疾病患者,则采用肺泡灌洗术。又如需要大量肺泡巨噬细胞,可采用单一部位大量灌洗;如仅需支气管分泌液,则采用多部位少量灌洗。(2)BAL 应与免疫组织化学、流式细胞仪、电子显微镜及单克隆抗体等先进技术相结合,才能提高 BAL 临床运用价值。(3)扩大 BAL 的治疗作用。目前一些学者在灌洗液中加入抗生素、抗癌药物等等,局部灌注治疗各种肺炎、肺结核和肺癌取得了一定效果,但 BAL 给药改变了常规给药途径,这些药物对支气管及肺泡组织有无损伤、对局部支气管肺泡防御功能有无影响,以及药物代谢过程等,目前还缺乏了解,所有这些,有待于今后不断深入研究。

#### 参考文献

- 1 Cantrell E F, et al. J Clin Invest, 1973,52:1881~1884
- 2 Reynolds H Y, Newball H H. J Lab Clin Med., 1974,84:559~573
- 3 Davis G S, et al. Am Rev Respir Dis, 1986,133:181~183
- 4 Reynolds H Y. Am Rev Respir Dis, 1987,135:250~263
- 5 Thorpe J E, et al. J Infec Dis, 1987,155:855~861
- 6 Rennard S I, et al. Am Rev Respir Dis, 1990,141:206~217
- 7 The BAL Cooperative group steering committee, Am Rev Respir Dis, 1990,141(2)
- 8 Goldstein R A, et al. Am Rev Respir Dis, 1990,142:482~486

(安徽医科大学第一附属医院张安成教授撰)

**神经阻滞疗法** nerve block therapy 是用化学的或物理的方法暂时地或永久地阻断脊髓神经节、脊髓神经、交感神经节的传导功能,达到阻断疼痛传导通路,防止疼痛的恶性循环、改善局部血液供应,增强自身抗炎作用,改善病人心理状态等效应而治疗某些疼痛性的、麻痹性的、痉挛性的和其他一些疾病的方法,是介于药物疗法和手术疗法之间的一种疗法。

1936 年,美国麻醉学教授 E. A. Roventine 将神经阻滞法用于疼痛专科并称之为疼痛门诊(Pain Clinic)。1951 年,美国 Bonica 教授倡议治疗顽固性疼痛麻醉科应发挥作用,10 年后他与神经外科医师共同开设了疼痛临床中心。1962 年,山村秀夫在日本开展以神经阻滞法为主要手段的疼痛治疗。1975 年在意大利召开第 1 届国际疼痛学会(IASP)总会,并决定每 3 年召开 1 次学术会议。1980 年,日本《疼痛临床》杂志创刊。1985 年,在荷兰第 1 次召开规模较大的疼痛临床国际学术交流会,并决定由 VNU 科学出版社出版《Pain Clinic》杂志。中国自 70 年代起,一些医学院校的附属医院开设了以神经阻滞疗法为主的疼痛门诊;1988 年 9 月在承德召开了第 1 届全国疼痛治疗专题学术会议;1991 年 11 月在昆明召开了第 2 次会议;1993 年 6 月中国《疼痛学杂志》创刊,标志着以神经阻滞为主要方法的疼痛治疗学在中国的起步和发展。

神经阻滞疗法与 50 年代风行的封闭疗法在基本原理、注药方法、药物配方、注药部位、治疗范围和治疗效果等方面均有许多不同之处,故不能混为一谈。

神经阻滞按应用目的可分为:(1)诊断性阻滞(Diagnostic Blocks);如面部神经痛可通过分别阻滞不同的颅神经来鉴别是 V、Ⅱ还是Ⅲ对神经痛;对外周血管性疾病,可通过神经阻滞来判定病原学因素是功能性的血管痉挛还是器质性的血管阻塞。(2)判断预后性阻滞(Prognostic Blocks);可用于估计某些拟行神经外科手术患者的预后效果。如抽痛性三叉神经痛、灼痛、反射性交感神经萎缩症、外周血管性疾病、内脏痛、心绞痛、感觉异

常性肌痛、脊神经根炎等,并为手术选择合适的病人。(3)治疗性阻滞(Therapeutic Blocks);可为某些疾病提供肯定的治疗措施。有些疾病经诊断性阻滞或判断预后性阻滞将导致永久性疼痛减轻或消失,排除手术的必要性。

神经阻滞疗法的适应症包括某些疼痛性的、麻痹性的、痉挛性的和其他疾病四大类百余种疾病,其范围涉及各种临床科室。神经阻滞疗法的禁忌症有:不能配合治疗者,未经治疗的精神衰弱和精神病,出血性疾病,穿刺部位感染者。当然,缺乏这方面的知识、技能和缺乏恰当的诊断是最重要的禁忌。

神经阻滞种类繁多,主要的有50余种,操作者须接受相当的专业训练。日本在1988年制定了疼痛门诊认定医制度。有些操作有相当的技术难度和一定的危险性,如半月神经节阻滞、脑下垂体阻滞、腹腔神经丛阻滞等,操作时应特别小心,须备抢救器械和药品。

疼痛门诊中施行最多的是硬脊膜外腔阻滞(EPB)和星状神经节阻滞(SCB)。EPB在治疗诸如椎间盘突出症、坐骨神经痛、肠系膜性疼痛、颈椎病、胸腰部带状疱疹及带状疱疹后神经痛、胆道蛔虫症、输尿管结石、格林-巴利综合征、癌痛等疾病中发挥其独特作用。EPB所用药物甚多,主要有局麻药、类固醇类激素(地塞米松、强的松龙、甲基强的松龙、确实舒松A)、维生素类(B<sub>1</sub>、B<sub>6</sub>、B<sub>12</sub>、C)、麻醉性镇痛药(吗啡、哌替啶、芬太尼类、罂粟碱、曲吗多)、高渗(10%)冰盐水、氯胺酮、亚甲蓝、硫酸镁、氟哌啶、加兰他敏、干扰素、阿糖胞苷、丝裂霉素、能量合剂(CoA、ATP、细胞色素C、氨基酸)、透明质酸酶、r-糜蛋白酶、复方丹参注射液、654-2、东莨菪碱、高乌甲酸氢溴酸盐注射液、浓当归注射液、泰必治(Trabit)A、B注射液、康宁克通(Kenacort)A注射液、可乐定等,均有临床应用的报道。神经破坏药有乙醇、酚乙醇、酚甘油等。注射方法有单次置管间断给药及置管连续点滴。

SGB穿刺途径有后入路、前入路、侧入路和高位入路4种,以前入路最为常用,注入药物有利多巴因、布比卡因或加入地塞米松,神经破坏药有无酒精。SGB的适应症有群发性头痛,偏头痛,颜面、颈、上胸、上肢处带状疱疹,面神经麻痹(急性的或陈旧性的),头部外伤后遗症,颈椎头部震荡损伤[有巴刘氏综合征(Barré-Lieou's Sndrome)则是绝对适应症],上肢各种血行障碍综合征,上肢末梢多汗症,上肢幻肢痛,上肢反射性交感神经萎缩症。尚适用于脑血管障碍,脑血栓,脑栓塞,眼科的重症结膜炎,角膜溃疡,中心性视网膜炎,青光眼,视神经炎,网膜血管闭塞症,耳鼻喉科的突发性耳聋,萎缩性鼻炎,过敏性鼻炎,副鼻窦炎,扁桃腺炎及心绞痛,心肌梗塞,哮喘,肺栓塞,不定陈诉综合征(Unidentified Complaints Syndrome)等,在尚未开拓的领域内,也可能有各种适应症,有待进一步探索。

疼痛是医学的重大难题,是对人类的挑战。疼痛与损伤之间有一定的联系,但这种联系具有高度的可变性和不可预测性。疼痛的研究还没有进展到能够表达疼痛的确切定义的阶段,因此疼痛的治疗方法也是多种多样的,有药物治疗法、神经阻滞疗法、外科手术疗法、物理疗法、催眠术、心理疗法等,但尚无一种方法能完全消除各种疼痛,而多种方法的综合使用可使疗效相加,其中神经阻滞疗法具有疗效好、疗程短、适应症广、禁忌症少、副作用少等优点。充分利用、努力探索这一疗法,可望给疼痛及其他一些疾病提供一种新的治疗途径,给广大患者带来福音。

#### 参考文献

- 1 John J. Bonica M D. The Management of Pain, London: Henry kimpton, 1953. 173~180
- 2 严相默,主编.疼痛临床学.延吉:延边人民出版社,1988. 2~3;13~16
- 3 严相默.中华麻醉学杂志疼痛治疗专刊,1989,1~4
- 4 兵头正藏.日本医学介绍,王杨译,1990,11(4):147~149
- 5 梅尔扎克R,沃尔P D.著.疼痛的挑战.王兆麟,秦潮,何量译.西安,陕西科学技术出版社,1990. 2~12,41~47,299~376

(安徽医科大学第一附属医院陈家骅副教授撰)

**深低温疗法** deephypothermia 临床上将低温分为浅低温(33~35°C)、中度低温(26~32°C)和深低温(15~25°C)。由于低温能降低机体的代谢和氧耗量,特别是对大脑有保护作用,因此被广泛采用,尤其在婴幼儿先天性心脏病纠正术中深低温停循环技术应用更多。

1959年,Drew首先应用深低温体外循环自肺氧合进行心脏手术。1960年,Bjok报道应用深低温出现脑损害后,深低温方法引起人们的怀疑。1963年,日本Horiuchi应用体表降温循环阻断方法治疗室间隔缺损取得较好结果。1968年Belsey改进方法,采用转流降温和复温技术。1971年Barratt-Boyes提出开始体表降温,然后转流降温和复温方法,进一步推动了深低温在婴幼儿先天性心脏病手术中的应用;至80年代,体外循环转流降温和转流复温方法已被普遍采用。

心脏活动随着温度的降低而逐渐减弱,体温20°C时心率为正常的20%左右,体温为10~15°C时心脏完全停止跳动。低温时心肌的氧消耗量降低,从37°C降至10°C时代谢率可降低90%。冠状血管在低温下扩张,以提高冠状动脉血流,保证心肌的氧供应。心脏在18~20°C时易发生心律失常;心排量随温度的降低而减少,在20°C时为正常的10%~15%,心电图表现为P-R-QRS和Q-T间期延长,当温度为20°C时可看到T波双相或倒置。低温时外周血管收缩,血液粘度增大,使周围血管阻力增强,影响微循环,周围静脉张力降低,血液积贮在静脉和毛细血管内,有效血容量减少。低温引起血细胞压积增高,粘稠度增大,白细胞和血小板减少,血浆容量减少。

低温下代谢降低是最主要的生理基础,氧消耗量在28°C时为正常的40%,在20°C时为20%~25%,16°C时为12%,10°C时为6%。碳水化合物代谢在低温时降低。降温中出现的高血糖在复温后24h内恢复,这与低温时胰岛素活力受抑制有关。低温时血钾的减少与低温的深度成正比,钠和氯基本上没变化,钙可能轻度减少,镁在正常的低范围。乳酸和丙酮酸在降温过程中均增加,循环阻断后乳酸急剧升高,说明体内无氧代谢仍在进行;代谢性酸中毒较多见,主要是无氧代谢产物丙酮酸和乳酸的积累。

应用深低温疗法中,大脑是安全阻断循环的关键。由于大脑与内脏器官的血流灌注不同和血管阻力不同,大脑的温度与其他脏器的温差较大。大脑的氧耗量随着体温每降低1°C而减少6.7%,降温至25~27°C以下时氧消耗量明显降低;但在复温后,脑的氧消耗量增加15%,脑血管阻力增大8%,而脑血流减少18%,说明深低温停循环对大脑有轻度损伤。脑电图在低温初期表现为低电压和慢频率,术中出现间歇性S波,直至循环阻断前仍有一定程度活动。停循环后脑电图呈一直线,随着复温脑电图电压升高,频率增快,直到出现高电压。

呼吸随着温度下降而逐渐被抑制,呼吸频率和每分钟通气量都成比例减低,当温度低于20~30°C时呼吸明显受抑制,呼吸停止于16~20°C时。复温后呼吸恢复至正常生理范围。由于寒冷引起支气管扩张而肺泡死腔不变,25°C时肺的解剖死腔增大50%,生理死腔增大28%,肺的顺应性在10°C时才明显减低。

肝脏在低温下较能耐受循环阻断,但解毒和结合作用降低,这与低温下肝脏的血流减少和代谢降低有关。胆汁的分泌也随着降温而减少,在复温后恢复。肾脏的代谢在低温下改变较少,因为它有内环境稳定性自动调节能力,只有当温度在30~32°C以下时氧消耗量才明显减少。代谢减少主要是肾血流降低和肾血管阻力增高。低温下肾的滤过率和浓缩功能都降低,复温后24h内完全恢复正常。

深低温操作方法大致可分成4大类:(1)体表降温和复温;(2)体表降温加体外循环转流降温和转流复温;(3)体外循环转流降温和复温;(4)体表降温和体外循环转流复温。其基本技术主要为体表降温和体外循环转流降温两种。

转流降温使内脏器官降温迅速,降温时间短,但外周组织温度相对较高,温差大,停降温后易反跳。而体表降温的温差较小,内脏器官在降温时保持一定的功能,但降温时间长,当温度低于 $25^{\circ}\text{C}$ 时易发生室颤,不安全。目前临床普遍采用转流降温和转流复温方法,降温迅速,操作简单、安全。

深低温术后的主要并发症为脑损害,个别病人出现暂时性的癫痫样发作、舞蹈症等。虽然术后长期随访的智力测验和脑电图观察证实婴幼儿完全能耐受深低温手术,但深低温停循环对脑组织的损害已肯定。目前世界上各心血管中心开始选用深低温低流量灌注方法,体温降至 $18\sim 25^{\circ}\text{C}$ ,体外循环灌注流量为 $20\sim 50\text{ml}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ ,保证脑血流的灌注,可避免停循环所致的神经系统并发症。低流量灌注使心脏内回流血减少,同样具有深低温停循环的优点。但在低温下的安全流量标准尚需进一步研究,特别是深低温下脑代谢的持续观察方法有待探索,以利于监测深低温和低流量灌注的安全范围,避免脑组织损伤。

#### 参考文献

- 1 徐志伟,丁文祥,国外医学(心血管疾病分册),1979,2:117
- 2 Hickey P R, Andersin N P. J Cardiothoracic Anesth, 1987, 1:137
- 3 Brusino F G, Reves J G, Smith L R, et al. J Thorac Cardiovasc Surg., 1989, 97:541
- 4 Swain J A, McDonald T J, Griffith P K, et al. J Thorac Cardiovasc Surg., 1991, 102:76
- 5 Vender Linden J, Priddy R, Ekroth R, et al. J Thorac Cardiovasc Surg., 1991, 102:103

(上海第二医科大学附属新华医院  
徐志伟主任医师撰;聂云章审)

**冷冻疗法** cryotherapy 是指利用 $0^{\circ}\text{C}$ 以下的低温冷冻机体某部,借冷冻破坏组织的作用以达到治病目的的一种治疗方法。

**冷冻疗法简史** 医学上应用冷冻法治疗疾病开始于19世纪,冷冻疗法起源于外科手术,又称“冷冻外科”。日本田中氏指出:“冷冻技术是一种高能疗法”,是一门新兴医学和边缘学科。60年代是冷冻技术创造发明阶段;70年代是发展阶段;80年代是巩固、提高、研究和扩大成果阶段;其后则是理论研究与临床实践结合、推广应用,开拓和沟通信息阶段。中国冷冻疗法于60年代初期开始,在70年代中期开展起来。

公元前350年,埃及人就用冷冻法治疗疾病。1740年有人发现在冰中加入食盐可降温达 $-20^{\circ}\text{C}$ 。首次见于文献记载的是1851年英国的Arnott & Smith, Fay(1939)将盐和冰混合使之产生 $-20^{\circ}\text{C}$ 的低温作为致冷剂,以冷敷和冷冻法治疗肿瘤等病变;后来被广泛用于治疗各种非特异性疾病(如神经痛、头痛、瘙痒症、癌症等)。1883年,Openchowurski亦用冷盐水灌注阴道以治疗恶性疾病,并用热气蒸发乙醚作狗大脑皮质冷冻实验成功。

1883~1885年,许多物理学家用压缩的和经过预冷的空气绝热膨胀得到液氧、液空、液氮的蒸发温度达 $-195.8^{\circ}\text{C}$ ,并发现和利用低温从液空中蒸发分离出氧、氮。后由于液氧和液空价昂贵,又不易贮藏,所以未能得到推广;又因为液氮性能稳定,安全可靠,使用方便,所以广为人们喜用。

1930年意大利Deutschmann和Bietti以及1940年Hass, Taylor在动物实验中认为冷冻比外科手术好,出血少,化脓少,安全易行,作用快,同时还发表了冷冻治疗青光眼和视网膜剥离的报告。1949年,Polge等用甘油作防冻剂保护生物免受冷冻的损害,使蛙精子在 $-79^{\circ}\text{C}$ 下得到保存,复温后存活。1953年,Sherrhan和Bvrge用甘油防冻剂使人精子在干冰为冷媒的 $-70^{\circ}\text{C}$ 温度下冻结,并得到精子苏生率77%的结果。1957年, Baithazer将猫大脑皮质冷冻两个月后观察脑神经,无任何异常。1959年Bary报告称,冷冻不仅对肿瘤组织有麻醉、凝固及破坏的作用,而且复温后可产生免疫物质抑制肿瘤的生长。1960年,

Lemaricy, Muler和Krey beyg等应用液氮治疗小儿喉头乳头状瘤以及皮肤病等均获得成功。1961~1963年,美国Cooper成功地使用冷冻方法控制温度和治疗器进行帕金森氏病(Parkinson)的丘脑手术,治疗效果满意,从此以后冷冻治疗在临床专业上相继开展。1965年, Cahan将冷冻技术首先应用于耳鼻咽喉科专业范围;同年, Bluestone用于治疗鼻出血;Cutt用于动物迷路实验,发现迷路经冷冻处理后前庭功能被明显抑制;1966年, House用于治疗美尼尔氏病也取得成功,1967年, Holden用于治疗头痛及颈部恶性肿瘤,治疗后症状减轻,瘤体缩小。1969年, Rautenbach等又制成可以切开组织的冷刀。1973年, Neel用冷冻方法在动物身上进行气管、支气管的处理,为治疗气管癌瘤开辟了新的途径。1965年,上海新华医院首先用冷冻法摘出白内障;1972年上海报道氧气节流的冷冻疗法;1973年,各地液氮冷冻治疗相继开始,并取得良好疗效。目前已在普外科、泌尿科、骨科、脑外科、胸外科、眼耳鼻咽喉科、口腔科、肿瘤科、皮肤科、妇科等临床上广为应用。

**冷冻原理、特点** 冷冻对人体虽具有损害的一面,也还具有消灭病理组织,达到治疗病变的有利一面。在 $-196^{\circ}\text{C}$ 低温情况下,用电子显微镜观察到生物体内分子运动的速率减慢,病理细胞内外形成冰晶,使病理细胞受挤压而损伤,新陈代谢失去平衡,使细胞膜和细胞核小膜的脂蛋白的复合物,发生破裂、解体,进而引起病变细胞死亡。医学上低温冷冻的应用分两大类:一类用于保存人体或细胞、体液或器官等(如精子的储存,同种移植的角膜、皮肤、骨骼、神经等器官的冷藏);另一类用于对病理细胞或组织的选择性破坏,以达到治疗疾病或消灭肿瘤的目的。

冷冻疗法主要是利用制冷物质产生低温(如液态氮、高压氧、液态氧等冷源可将温度降到 $-30\sim -190^{\circ}\text{C}$ ),借以接触病理组织,使周围血管收缩,引起细胞脱水、酸碱性发生变化、电解质紊乱、血液郁滞、脂蛋白复合体变性等,致使病理组织细胞溶解破坏而死亡,最后自行脱落,从而达到治疗疾病的目的。

1. 低温生物学基础是局部组织的温度改变,其影响如下:  
(1)对局部组织的影响, $0^{\circ}\text{C}$ 以下明显,如皮肤 $-22^{\circ}\text{C}$ ,皮下 $-13^{\circ}\text{C}$ ,肌肉组织 $-10^{\circ}\text{C}$ 。(2)对神经系统的影响,如运动神经、感觉神经受到抑制或兴奋。(3)对血液循环的影响,如收缩、阻碍通透性、管内膜增生、管腔堵塞。(4)对代谢的影响,如减少氧耗量等。(5)对肌肉的影响,如化合物传递减慢、肌力萎缩、兴奋减弱。(6)对皮肤的影响,如过敏症状、色退、白癜风等。(7)对胃肠道的影 响,促进分泌、胃酸增加。

2. 破坏细胞的冷冻效应有赖于下列条件:(1)冷冻的速度:以 $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 中速降温最好;(2)冷冻程度:在 $-40\sim -60^{\circ}\text{C}$ 才能达到细胞坏死的临界度;(3)冻融速度:速冷(冷为存用)、慢融(为冻死用),速冷冻融时间之比为 $1:3$ 在 $0\sim -40^{\circ}\text{C}$ 最好;(4)冷冻以下的温度: $0^{\circ}\text{C}$ 以下和 $-200^{\circ}\text{C}$ 以上统称为冷冻或低温,一般不低于 $-100^{\circ}\text{C}$ ,称为冷冻或低温,若将温度降到 $-100\sim -210^{\circ}\text{C}$ 或更低称为深度冷冻或深度低温;(5)冻融时间和次数: $3\cdot 3\cdot 3$ 法最好(即冻3min,融3min,重复3次)。冷冻作用的时间,观察结果见到的是: $10\sim 30\text{s}80\%$ , $1\sim 3\text{min}100\%$ 。(6)冷冻范围:最好超过病灶边缘 $2\sim 5\text{mm}$ 。

总之,冷冻对细胞及组织破坏的机转是借助于脱水、温度休克、冰晶再冰晶使细胞膜破裂、类脂蛋白分子的变性及血流郁滞。目前多数人认为,冷冻致组织细胞损伤和死亡的主要机理是由各方面多种因素综合而成的,各因素又相辅相成、互相连贯的。

#### 冷冻治疗法的优缺点

1. 优点。(1)反应轻:冷冻引起组织反应很轻或仅有轻度水肿。(2)止血:冷冻有血管冻结作用,因而可用于止血,所以,冷冻对血管性肿瘤尤为适用。(3)镇痛:冷冻有麻醉镇痛作用,由于知觉神经末梢被破坏。(4)副作用少:冷冻安全性高,无严重副作用,对衰弱的病人也可应用。(5)有杀菌作用:冷冻具有良好的杀菌及能防止术后感染作用。(6)界限清楚:冷冻对病变组织和周围正常组织的作用,具有明显的局限性、区别性,因而对病变所起

的破坏作用也较大,某些组织对冷冻有抵抗力,如对骨组织的冷冻可破坏侵犯骨骼的瘤细胞,而骨组织的结构可不消失。(7)有再生作用:冷冻有适当的再生作用,冷冻可促进组织的再生。(8)可逆性:除非冷冻使得组织被破坏得已不可回复,一般冷冻组织俱能回复,因而能在生理抑制情况下观察它对任何部位的作用;特别对中枢神经外科方面的应用,更显可逆性。(9)能产生免疫力,冷冻可使组织产生抗原,而冷冻组织本身作为自家抗体产生免疫作用,增强对瘤细胞的破坏和吸收。

2. 缺点。(1)局部水肿:如鼻、口腔、咽喉部冷冻后可有吞咽困难及呼吸道梗阻,渗出时间较长等情况。(2)伤口愈合时间长,对远道就诊者不方便。(3)局限性:受冷冻病变有限,不广泛。(4)局部并发症:例如冷冻后局部有不同程度的灼辣痛或放散性钝痛;难免有短时期的皮损(如疤痕、萎缩、粘连等)、鼻中隔穿孔、鼓膜穿孔、迷路反应;冷冻扁桃腺手术可引起面瘫,或治疗咽及舌部病变时引起颈内动脉或舌动脉坏死性大出血、感染或神经损伤及吸入性肺炎等。(5)全身性反应:个别病人冷冻术后偶有体温升高,或植物神经极度兴奋所致即刻反应,如面色苍白、头晕、恶心、脉慢甚至死亡等。

冷冻疗法在临床应用范围 经实践证明,冷冻疗法在临床上用于消炎、止痛和治疗良性肿瘤低度恶性肿瘤,如某些癌病灶以及软组织病变、神经瘤、皮肤痣、疣、疤痕疙瘩等,均获得比较满意的疗效。其临床应用范围如下:

1. 普外科。继发性出血、血管瘤、内痔、混合痔、脱肛、肛裂、瘘管、直肠息肉、乳腺癌、结肠癌、肛门癌、食道癌及胃癌、脉管组织肿瘤、纤维瘤、脂肪瘤、滑膜肉瘤以及放疗、化疗、内分泌治疗无效的恶性肿瘤患者的姑息治疗、鸡眼、跖疣、潜毛病、腋臭。

2. 眼科。1期沙眼(即乳头型的和滤泡型的)、眼睑及结膜表浅血管瘤、乳头状瘤、黄色瘤、恶性黑色素瘤、春季卡他性结膜炎、病毒性疱疹性角膜炎、翼状胬肉、白内障、青光眼、母细胞瘤、基底细胞瘤。眼科临床应用的冷冻疗法有4类:(1)冷冻粘连用于白内障摘除手术。(2)冷冻炎变用于封闭网膜裂孔及撕裂。(3)冷冻治疗单疱病毒性角膜炎等。(4)冷冻坏死用于破坏肿瘤、治疗虹膜脱出及翼状胬肉等。

冷冻前可行表面麻醉。以接触法冷冻。保护正常组织。术后以眼垫保护患眼。反应大、肿胀明显者,可给 $\alpha$ -糜蛋白酶或皮质激素治疗。

3. 耳鼻咽喉科。耳廓浆液性软骨膜炎、外耳部乳头状瘤、黑色素痣、疣、肉芽、息肉、乳突手术后眩晕、美尼尔氏综合征、颈静脉球瘤;外鼻部疣、痣、鼻前庭炎、鼻瘤、过敏性鼻炎、慢性单纯性鼻炎、肥厚性鼻炎、鼻息肉、血管瘤、表浅乳头状瘤及癌;慢性咽炎、滤泡性咽炎、咽扁桃腺炎及其残余、增殖腺体炎、囊肿、血管瘤、纤维瘤、口咽溃疡、咽感异常、多发性乳头状瘤;喉部血管瘤、喉声带息肉、晚期喉癌的姑息治疗等。注意事项:(1)对耳廓病变冷冻前应常规消毒,术后用纱布覆盖,防止感染,必要时给予抗生素。(2)对复发性鼻出血可多次接触冷冻,尤其是遗传性出血性毛细血管扩张症。但必须避免深冻引起鼻中隔穿孔。每次冷冻后昂头休息片刻。若鼻前庭干燥、鼻中隔粘膜糜烂明显,可在冷冻后用盐水棉片涂以眼膏或用凡士林纱布片敷贴冻创面,24h后必须取出或更换。(3)鼻部冷冻时,个别患者可有短时剧烈头痛而发生晕厥,应立即解冻,头额向前低倾或无枕平卧休息。(4)喉部冷冻宜住院进行,必要时先行气管切开术再冷冻。

4. 口腔疾病。血管瘤、粘液囊肿、淋巴管瘤、慢性口唇炎、扁平苔藓、粘膜白斑、口腔溃疡、黑色素瘤、牙龈脓疡;唇、龈、颊、腭、口底、舌等部的及腮腺处的癌瘤和唾液腺肿瘤。注意事项:保护口腔正常组织,勿使冻伤。术后疼痛剧烈者可局部涂擦2%地卡因液。治疗舌根或软腭部病变时,须防止因水肿而造成呼吸道阻塞,或因伤及大血管引起出血。

5. 皮肤疾病。痣、疣、胎斑、老年角化症、白斑病、皮肤赘、结节性痒疹、局限性神经性皮炎、牛皮癣、局限性慢性湿疹、继发性疤痕疙瘩、皮角、脂溢性角化、腋臭、扁平苔藓、汗管角化、癌前病

变、化脓性肉芽肿、慢性溃疡、盘状红斑狼疮、血管瘤、软纤维瘤、毛囊肿瘤、恶性黑色素瘤、皮肤原位癌、基底细胞癌、鳞状上皮癌等。

6. 妇科疾病。外阴白斑、湿疣、黑色素瘤、阴道或宫颈部血管瘤、慢性宫颈炎、子宫颈不典型增生、宫颈间变;功能性子宫出血、子宫体肿瘤、子宫颈原位癌、子宫残端癌、卵巢癌、外阴癌、阴道癌、阴道转移性滋养细胞瘤。注意事项:(1)必要时作全身检查。冷冻宜在月经干净后3~7d内施行。(2)妊娠及有急性的、亚急性的盆腔炎患者忌施冷冻治疗。(3)常规消毒阴道、宫颈,冷冻时间一般为1~3min。(4)为防止伤及阴道,可用筒状阴道保护器。(5)冷冻时如有头晕、恶心或下腹隐痛,应停止治疗,休息片刻可好转。痛者给予止痛药。(6)治疗后两个月内忌坐浴、性交、阴道内塞药或冲洗阴道,并预约定期随访。

7. 其他科疾病。(1)神经外科:帕金森氏病、震颤麻痹、颅内肿瘤的摘除破坏、基底神经节及垂体切除、三叉神经痛、腮腺混合瘤切除、坐骨神经痛、神经纤维瘤、Nelson氏综合征。(2)骨科:骨巨细胞瘤、骨肉瘤及软骨肉瘤早期、骨瘤、软骨瘤、骨囊肿、慢性骨髓炎。(3)泌尿科:前列腺肥大、尿道狭窄、尿道口粘膜脱垂、前列腺癌、膀胱良性肿瘤及恶性肿瘤、精囊及阴囊肿瘤、性病湿疣、阴茎癌、肾癌、睾丸肿瘤。(4)肿瘤科:皮肤、四肢、肛管、直肠等部浅表的和易于接触的早期癌,如黑色素瘤、基底细胞癌和鳞状细胞癌。冷冻治疗效果比其他恶性肿瘤为好。注意事项:(1)瘤体较大或浸润较深的病例,可先用喷射、灌入、浸泡或冻切冻法。(2)冷冻范围须超越瘤体边缘2mm以下。(3)用热偶针插在基底部,测组织温度,须降温至 $-20\sim-40^{\circ}\text{C}$ 维持1~3min以上。(4)每次冻融间隔30min左右,必要时可重复冻融3次。如分泌物或坏死组织较多时,可常规换药保持局部清洁,干燥以防并发感染等。

8. 禁忌症。(1)有急性炎症者(如上感,严重咳嗽、疖、丹毒、蜂窝组织炎、扁桃腺炎等)。(2)对冷冻过度敏感者。(3)麻痹肢体以及有局部循环障碍、皮肤感觉障碍、经期、阴囊部位病变者慎用,防止感染。(4)高血压、冠心病、脑血管病以及高龄老年病人、妊娠、3个月以内婴儿或神经质病人。(5)出血病人(如再障、血友病等)禁止以后冷冻。注意事项:(1)随患者年龄增长而增大的血管瘤、冷冻易破裂形成溃疡或感染而引起损容,因此不宜冷冻。(2)血管瘤范围越大,治疗效果越差。(3)防止冻伤健康组织。(4)操作动作要轻柔。(5)向患者讲清楚冷冻治疗的优缺点,以便征得配合;防止动作粗暴,造成健康组织损伤或出血,尤其对过敏体质患者或小儿更要警惕。(6)对恶性肿瘤的患者,宜先行适当的化疗及放疗,然后再进行冷冻疗法。(7)冷冻口部、面部病变时,要熟悉面神经、三叉神经、眼神经、舌神经及舌下神经所在的解剖位置。其冷冻时间、速度、深浅度均需适宜,不宜时间过长,速度太快,浅深循序渐进,不可操之过急,防止产生上述部位的神经麻痹。(8)冷冻有时见有血管暴露者,应尽可能避免之,以避免血管破裂发生严重出血。

冷冻治疗实施方法 国内外不同地区和单位,治疗情况并非一致。有在门诊专设冷冻科室进行多种疾病冷冻治疗的,也有分科配备装置、特约时间专科治疗的,还有在手术室内设置性能较高的专用治疗机以配合手术冷冻治疗的。总之,冷冻方法有多种,但要因病制宜,选择使用。

1. 冷冻医疗物质条件和工艺特点。(1)冷冻仪整机,必须轻便,能控制冻融量,价廉物美。(2)冷冻仪探头应利于消毒和治疗操作。(3)冷冻探杆冻速与复温性能良好。(4)致冷剂应无毒、安全,不易自燃、爆炸。

2. 冷冻方法。(1)接触法。根据临床各种常见病损的形状、大小或治疗要求,以银的或铜的多种形式的冷冻头与患部密切接触,并酌加适当压力进行冷冻治疗。(2)喷射法。使致冷剂以一定压力和速度成雾状小滴,直接喷射到病损区域,冻融弥散一定时间即可;注意保护健康组织。(3)倾注法。将较纯净的致冷剂直接缓缓倾注到凹陷病损部冻结。(4)浸渍法。将致冷剂置于特制的

贮液槽中,令病人将患肢端病损部浸入致冷剂内进行冻结。(6)涂搽法。即用棉蘸蘸取适量致冷剂直接与病损部反复接触冷冻。(7)冷针灸法。选择适宜针头或针灸用针直接插入病痛区域或穴位,逐渐加致冷剂冷针冻结止痛、消炎等。(8)超低温综合治疗:冷冻+手术、冷冻+中医中药、冷冻+局部化疗、冷冻+免疫、冷冻+小剂量放射、冷冻+激光或血卟啉治疗等综合进行,适当并用,将会取得可喜疗效。

3. 冷冻术前准备。(1)掌握好冷冻治疗的适应征。(2)向患者宣讲冷冻前后反应和必然的过程,使病人有思想准备,以便配合治疗。(3)术前对病人重要脏器和健康情况,既往病史,要有所了解,如高血压、心脏病、出血史、过敏史,必要时进行体检。(4)做好冷冻部位的常规准备(如剃毛、清洁等),以预防术后感染。(5)术前的病理诊断或拍照。(6)对某些特殊冷冻治疗的术前准备,可参照各专科项目。(7)准备必要的常规抢救药品。

4. 冷冻手术后处理。冷冻术后除专科手术外,一般无需特殊处理。目前多采用下列方法:(1)按照各专科术后常规处理。(2)预防感染特别是内脏冷冻术后的无菌操作,表面局限病灶可涂以1%龙胆紫,保持冷冻局部的干燥,如已感染,则按化脓创口换药及抗感染处理。(3)术后反应性水泡或血疱,小面积者无需处理,可自行吸收消退,面积大的均需无菌穿刺处理。(4)注意创面坏死性出血,及时对症处理,如止血、止痛、消炎和抗感染处理等。(5)冷冻后皮肤缺损者,待肉芽面清洁后及时植皮。(6)神经麻痹者对症处理,一般在2~3个月后会自然恢复。

冷冻疗法分类、制冷剂及冷冻剂

表1 冷冻疗法分类和应用范围

| 类别     | -100℃以上低温                        | -100℃以下超低温                                        |
|--------|----------------------------------|---------------------------------------------------|
| 致冷剂    | 氟乙烷、冰-盐混合物、二氧化碳干冰、氟里昂、高压气体、温差电致冷 | 液空、液氮(液氧)、液氦、液氩                                   |
| 仪器原理   | 常气化、气体节流、半导体致冷                   | 相变原理或输液式(外压或内压)+自动化控制和监视系统                        |
| 治疗方法   | 常单纯冷冻(直接涂搽、接触法或喷雾法)              | 单纯冷冻(接触法、喷雾法、插入法、浸渍法或灌注法)或合并外科手术、化疗免疫及中西医药等冷冻综合治疗 |
| 对组织破坏力 | 较小                               | 大而强                                               |
| 临床应用范围 | 多用于病变较多的良性病变                     | 适宜较大病变或恶性肿瘤及某些较难治愈的良性病变                           |

注:本表系山东省医学科学研究所前军同志所列,特致谢。

1. 制冷剂与致冷度。现代冷冻医疗技术中产生低温的方法很多,最常用而有效的制冷剂是液体氮,它的沸点是-196℃。医用制冷剂致冷度如下:氟化亚氮:-40~-88℃,氟里昂12:-29.8℃,氟里昂13:-81.3℃,氟里昂22:-40.8℃,固体二氧化碳:-78.5℃,液体氧:-183℃,液体氮:-196℃。

2. 目前常用国产的几种冷冻仪器:(1)YD2-6型液氮低温冷冻仪(上海产);(2)YU-1型液氮低温冷冻治疗机(无锡产);(3)S107型手持式冷冻治疗机(杭州产);(4)BYD II、III型手持式低温冷冻治疗机(北京产);(5)YLZ-1型手持自压式冷冻治疗器和SDWQ75-1型深度低温治疗机(合肥产)。

未来展望

1. 中国自70年代以来,冷冻疗法在临床外科、眼科、耳鼻喉科、口腔科、皮肤科、妇科、肿瘤科等方面广泛开展,并摸索出许多好的方法,收到良好效果,尤其应用冷冻法治疗肿瘤、冷藏骨的移植等的价值肯定,填补和增加了冷冻疗法的新内容。据11个国家和地区及中国60多个单位冷冻治疗的不完全统计(1977~1991),4321篇论文报告的近百种疾病中,有效病种接近50种。

实践反复证明,这门学科是先进的,是有独到之处的。但是如何发展这门新兴边缘科学,还需要做更多的宣传普及工作。

2. 在基础理论研究方面,开展全面性低温医学研究是必要的。近几年来对冷冻杀伤机理、低温对正常细胞和肿瘤细胞的影响,低温免疫的实验,低温保存肢体、骨髓、血液及其有型成份和临床应用等方面的研究都有成功性突破。如低温免疫的研究已初露头角。国外的报道中已经肯定冷冻之后能产生TSTA(肿瘤特异性移植抗原)。目前在致免疫力适应免疫能方面有了新的进展。治疗前列腺癌、肺癌、结肠癌、肝癌等都有足够数据报道。其他不同性质的癌症的低温生物反应有待进一步探索和研究。

3. 在冷冻治疗器械方面,中国仍落后10~20年,当务之急是设计和研制形式多样的冷冻探头、低温保存仪、低温显微镜、低温内窥镜、低温生物降温仪等,以确保为冷冻治疗和生物学增加必备工具。

4. 渴望应用超声波辐射扫描、监测仪,发展电子计算机控制的冷冻技术,精确地控制冷冻时间、剂量和温度,准确地显示冷冻病灶。

5. 希望建立起实验性冷冻人库,使冻尸还魂。目前从事低温冷冻研究的科学工作者,已采用过快速冷冻大脑及其神经组织获得成效。

参考文献

- 1 蔡毓候,等. 冷冻外科与冷冻技术. 上海:上海科学技术出版社,1978.1~13.80~183
- 2 章崧英,等. 实用冷冻外科. 杭州:浙江省制冷学会、浙江省中医院出版,1980.1~5
- 3 亓前军,等. 冷冻外科研究进展. 山东省临沂冷冻治疗研究组和医科所低温医学研究室,1985.1~46.80~86
- 4 柯海龙. 冷冻医疗常规. 合肥:安徽医科大学第一附属医院,1988.755~762
- 5 郭玉德. 实用冷冻疗法. 北京:人民卫生出版社,1990.1~127 (安徽医科大学第一附属医院柯海龙副教授撰)

高压氧疗法

hyperbaric oxygen therapy 高压氧医学是随着潜水医学和军事航海医学发展起来的一门临床医学学科。高压氧疗法是现代医学的一个进展,它作为一种特殊的治疗手段在国内已被广泛应用,对某些疾病具有特别的疗效。其治疗范围已涉及到临床各科。现代生理学、生物化学等科学技术的突飞猛进,有力地促进了高压氧医学的迅速发展。高压氧医学已成为医学领域的重要组成部分。

高压氧(Hyperbaric Oxygen,简称HBO)是指超过一个大气压的氧。高压氧疗法(Hyperbaric Oxygen Therapy)是将患者置于高于0.1MPa的特殊的高压氧舱内进行加压,给氧,以达到治疗疾病的目的。高压氧医学(Hyperbaric Oxygenation Medicine)研究机体在高气压环境下吸氧时,组织、器官对高压氧产生的不同反应、反应的原因和条件以及对机体生理生化等机能产生的影响及病理改变,从而阐明高压氧治疗多种疾病的原理。

关于高压氧医学的记载始于1662年,英国韩绍 Henshaw 在临床上第1个应用高压舱进行高气压治疗疾病。由于当时对空气的成份、治疗疾病原理等认识不清,故未能持久和推广。1775年和1777年,Priestly 和 Lavosive 各自独立地发现了氧气,并成功地将氧气从空气中分离出来,从此氧在机体生命中的重要作用被认识,有力地促进了高压氧医学的发展。1830年,法国的容诺 Junod、泰柏理(Tabarle)及柏拉维(Praval)等建造了1座高压舱,用2~4ATA(绝对压)治疗病人。这种高压空气浴当年风行一时,一些美国病人远渡重洋,赴法求医。1860年,在加拿大建起北美洲第1座高压氧舱。同年,美国在纽约的罗彻斯特(Rochester)也相继建起了高压氧舱。1887年,Valenzuela 第1次成功地在2ATA(绝对压)下应用纯氧治疗疾病,为高压氧的临床应用奠定了基础。1891年,康宁(J. C. Lornlms)医生发表了应用高压空气治疗中枢神经系统疾病的文章;1921年,美国肯宁汉

(O. Cunnligham)提出高压氧治疗厌氧菌感染的想法,对以后的高压氧治疗有很大的启发:1927年,他在美国克利夫兰建起一座高达5层楼的高气压大厦。1950年,Haldane将高压氧治疗一氧化碳中毒动物的试验结果用于临床,证明可有效地治疗一氧化碳中毒患者。1955年,高压氧用于协助治疗恶性肿瘤获得疗效,特别是1956年荷兰的Boerema教授首次在3ATA(绝对压)的高压氧环境中成功地进行了心脏直视手术。1961年,荷兰的Brummalkamp首先用3ATA(绝对压)吸纯氧治疗厌氧菌感染性疾病(如气性坏疽等)取得明显疗效。Boerema教授于1962年3月在美国外科杂志上发表了《无血的生命》一文,受到世界各国医学界的普遍重视,为高压氧医学的发展起了积极的推动作用。

美国高压氧医学发展很快,于1976年,成立了水下医学会高压氧委员会,并设有资料中心,向医学界提供现代高压氧治疗法和正确使用等方面的资料。1975年,戴维新(J. C. DAVIS)及Hunt医生组织编著临床必备的经典书籍《高压氧治疗法》。1980年发行高压氧评论季刊。1984年水下医学会委托Shilling编著了《深潜医疗典范》。

日本高压氧医学也正在迅速发展,日本高压氧学会正与航空医学及宇宙医学等学会拟定联合组成“异常环境医学会”,并正在开展一些治疗新项目:面神经麻痹、晚期肝硬化、肝功能不全、术后肠梗阻、后纵韧带钙化症及脑干挫伤等疾病患者的高压氧治疗,并取得了一定疗效。自1963年9月以来,先后在荷兰、英国、美国、日本、加拿大、前苏联、澳大利亚等国开了10次国际性高压氧学术会议。并于1993年在中国召开第11次国际高压氧学术会议。中国早在1637年出版的《天工开物》中就有潜水医学情况的记载。1954年,中国人民解放军海军就建成了加压舱,在国内首先开展了高压氧对减压病、肺气肿及缺氧症的治疗。1958年,军事医学科学院由沈舜春领导的实验室最早设计并建造了中国第1台动物实验高压舱。1960年,北京又建成第1台2026kPa供人体试验及模拟深潜的大型高压舱。1964年4月,福建医学院附属协和医院在院长李温仁教授领导下,建成了中国第1座医用高压氧舱,成为当时世界第3大舱,并应用于临床治疗各种缺氧性疾病,抢救了不少重危患者;同时,在3ATA下进行颅内直视手术取得成功。1984年8月,李温仁代表中国出席了在美国洛杉矶召开的第8届国际高压氧学术会议,并在大会上报告了题为《在0.3MPa(3ATA)高压氧浅低温下阻断循环颅内直视手术30例》、《在0.3MPa(3ATA)高压氧下体外循环颅内直视手术48例》的两篇论文,博得了到会的30多个国家300多名教授、专家的好评和重视。另外,中国在高压氧激光血卟啉治癌实验研究及治疗一氧化碳中毒、多发性硬化症、突发性耳聋、支气管哮喘等方面取得惊人成绩,并居国际领先地位。中国高压氧医学已进入国际先进行列。

中国现有各种类型的高压氧舱约1000台,从事高压氧工作的专业技术人员达4000余人,形成了以大中城市为中心的高压氧治疗网,先后于杭州、广州、青岛、福州、郑州等地召开了6次全国高压氧医学学术会议,并于1992年在兰州召开了“中华医学会高压氧学会成立大会暨第7次全国学术交流会”。

近10年来,国内外对高压氧治疗机理进行了大量研究,并通过临床实践获得了丰富的经验。现认为高压氧治疗的基本原理是:(1)高压氧能提高血氧分压,增加血浆物理溶解氧量;(2)增加氧在组织中的弥散距离和弥散量;(3)增加组织的氧储量;(4)促进侧枝循环的建立;(5)对禁锢在体内的气泡有压缩作用;(6)抑制细菌尤其是厌氧菌的生长等。

目前国内外已将高压氧治疗广泛地应用于临床各科,主要用于治疗或辅助治疗的疾病近40余种,临床证明疗效显著的有10余种。在进行高压氧治疗时必须掌握禁忌症,尤其是有未经处理的主动性出血、气胸等绝对禁忌症的病人应禁止进舱。同时要避免气压伤、氧中毒和减压病等副作用的发生。

高压氧医学近些年来虽然在国内外发展得很快,但它还是一门新兴的学科,仍在不断地发展中,尚有不少课题需要研究、探

索。如高压氧治疗机理尚未完全阐明,高压氧对细胞的微小结构和酶的改变尚未揭示;治疗范围能否进一步扩大,实施方法能否再予改善等,均需通过实践不断总结,深入研究,逐步认识和解决。可以预料,高压氧将在严重威胁人类健康的脑血管疾病、心血管病的治疗及老年医学的研究等方面,发挥更重要的作用。

#### 参考文献

- 1 Cunnligham O J. Oxygen therapy by means of compressed ari anesthes, 1927, 6: 64
- 2 Behnke A R, et al. The use of oxygen in the treatment of compressed air illness. Nav. Med. Bull., 1937, 35: 1~12
- 3 Bert P. Barometric pressure, Translated by Hitchcock M A, Hitchcock F A Columbus Book Co., 1943
- 4 余仲颖, 第4届全国高压氧学术会议论文汇编, 1985, 4: 112~115
- 5 刘子藩, 等. 高压氧医学, 广州: 科学普及出版社广州分社, 1987
- 6 卢毅, 等. 高压氧治疗, 北京: 人民军医出版社, 1989
- 7 刘子藩, 等. 实用高压氧医学, 广州: 广东科技出版社, 1990
- 8 郝鸣政. 中华理疗杂志, 1990, 3: 177

(安徽皖南医学院弋矶山医院季一如副主任医师撰, 张绪中审)

#### 作业疗法

又称“工疗”或“职业训练”。指导患者参加选择性的活动,防止丧失劳动能力,并对有躯体或心理功能障碍的患者进行治疗或训练。美国Rusk称作业疗法“具有独特的治疗作用,有助于调动患者所有躯体和精神上的积极因素,从而恢复患者的独立生活和工作能力。”

康复医学的最终目的是尽一切努力,希望残疾者回归社会,回归工作。作业疗法是实践这种努力的一个重要的康复治疗方法。康复医学中的其他治疗方法,如物理疗法,语言疗法等的治疗效果都在作业疗法中继续发挥和协调运用。同时,作业治疗师又在作业疗法的运作过程中对患者进行全面系统地观察和最终评估,鉴定他将以什么方式走向生活和能从事什么样的工作。有学者称作业疗法是引导患者走向家庭和社会的桥梁。

作业疗法的内容非常广泛,方法多种多样。包括衣、食、住、行、学习、交际、文体活动、就业等一个正常人所必须的一切活动。有体力的,有精神心理方面的;有耐力训练,速度训练,也有手脑协调运作的技巧训练;有模仿,也有创造。作业治疗车间可以生产产品出售。内容和方法归纳为以下几种:

1. 日常生活训练:包括床上活动(起身、卧倒、移动、上下床等),穿脱衣物,个人卫生(梳洗、打扮、用厕等),进食(使用各种餐具),行走(室内行动、用拐杖、用轮椅,户外活动,远距离行走及乘车等)。以上活动是人最基本最必需的生活活动,要通过训练使患者最大限度地能自己完成,必要时使用支具、自助具,或改造居住环境及房屋结构,帮助患者克服困难。日常生活能自理以后,就训练操持家务活动及养育子女,恢复自己在家庭中的地位。

2. 工艺治疗:恢复体能训练的有轻工车间、重工车间。发展技巧的有工艺品制作,陶瓷、雕塑、美术等。与社会相适应的训练有木工、车工、钳工、铆工、焊工等工种。

3. 园艺活动:草花鱼虫,整修园林,有益于身心治疗。

4. 文娱体育活动:组织各种文艺活动,参加体育比赛,进行智力游戏等。

5. 教育及社交活动:开设文化课程,学习琴、棋、书、画,利用电讯,电脑与各地残疾人联络交往。

6. 假肢训练:截肢后的残端要早期进行耐受性锻炼,安装假肢后要适应进行适应性训练。在上述训练活动中,常为病人制作一些支具、矫形器和自助具,以求补偿或代替丧失的功能。对初装假肢的不适应地方要进行修整改造。因此,在作业治疗部常规配有康复工程技术人员。

7. 就业前训练和鉴定:模拟患者原来的或者即将从事的工

作岗位的微环境,让其做适应性操作,准备正式“上岗”。如让1名康复后的汽车司机在驾驶室的模型中训练驾驶操作。通过模拟训练,最后鉴定他的工作能力,出具诊断证明书。

以上作业疗法内容并不是每人都要全部进行的,在治疗前对患者进行检查和机能评估,针对机能不足,选择进行有目的的训练。

18和19世纪是作业疗法的萌芽阶段,西方各国散在小型庇护性作业工场。作业疗法成为一门专业技术,首先在美国。1917年,美国成立了全国作业疗法促进会。两次世界大战,特别是第二次世界大战,由于战地急救技术的进步,大批活下来的伤员需要康复医疗训练。在作业疗法机构内开设“模拟家庭活动室”、“模拟工作环境”和“在职训练场”等。战后,在此基础上逐渐开展对心脏病、脑血管疾病、脊髓灰质炎后遗症,先天性疾病等慢性病引起的躯体功能障碍的治疗训练,半个世纪以来,作业治疗得到长足发展。1947年美国成立了物理医学及康复学会;1958年香港复康会成立;1963年日本成立了康复医学会。1951年成立世界作业疗法士联盟,到1975年发展有23个成员国和2个准成员国,当时有130所培养作业治疗师的学校,其中美国有51所,1981年日本也发展到17所。

与整个康复事业的发展一样,作业治疗的开展至少还受5个方面的限制。1. 作业治疗师、特别是具大学水平的作业治疗师数量不足。2. 作业治疗的技术水平不高。3. 各国政府制度和行政上的限制。4. 残疾人就业难。虽然各国政府都颁布有《残疾人雇佣法》(美国)、《残疾人福利法》(日本)、《残疾人保障法》(中国)等,但对残疾人的接纳仍不满意。5. 作业疗法的普及问题。全世界约5000多万残疾人,仅10%需要住院治疗,因此,绝大部分残疾人要在家中或社区进行康复训练,基层工作人员更不足。

中国自20世纪50年代起,作业疗法的内容在一些慢性病的防治机构、疗养机构和抗美援朝战争中建立的康复医院得到运用。包括解放区留下来的“荣军疗养院”,1954年全国共有这类医院105所,病床38000张。作业治疗的方法主要是中国传统的推拿、针灸、导引等方法和从苏联学来的理疗、体疗等方法。1981年开始学习西方的治疗方法。1983年卫生部与世界卫生组织合作连续举办全国范围的康复治疗培训班,从此中西汇合的康复医学迅速发展。1983年“中国康复医学研究会”成立,1988年改为“中国康复医学会”。1984年卫生部要求全国高等医学院校开设康复医学课程。1987年民政部系统成立了“康复学会”。1988年“中国残疾人联合会”成立,世界卫生组织分别于1989年在武汉同济医科大学,1992年在合肥安徽医科大学建立了康复医学人员培训基地。目前,中国的康复医学事业已进入有领导、有计划的发展时期。虽然任务是艰巨的、长期的,但就作业治疗的方法而言,中国有传统的、丰富的治疗方法,再吸收先进的西方现代治疗方法,中西医结合,将会收到满意的治疗效果。

#### 参考文献

- 1 中国康复医学研究会, 康复医学. 北京: 人民卫生出版社, 1984
- 2 Rusk H A, 陈过泽. 康复医学. 浙江: 浙江科技出版社, 1984
- 3 上田敏. 辽宁省康复研究会译, 康复白皮书(增补修订版), 1986
- 4 陈仲武, 等. 中国医学百科全书——康复医学. 上海: 上海科技出版社, 1988
- 5 香港康复会年报, 1989~1990
- 6 祁信立, 赵朝, 学会杂志增刊(康复医学专版), 1993, 50~51  
(安徽医科大学第一附属医院祁信立副教授撰)

**言语治疗** 言语是人类特有的生理和心理功能,是人们日常生活和社会活动的重要交流工具。言语障碍是由于先天性或后天性因素所造成的言语交流方面的功能障碍,它是致残的重要原因之一。随着社会的发展和人们生活水平的提高,人们对于疾病

的要求,不仅是抢救生命,而且要最大限度地恢复其生活能力和社交能力。因此,言语功能障碍的诊断和治疗是现代康复医学和神经心理学研究的重点。

言语治疗自20世纪20~30年代。中国则从80年代开始引进现代康复医学,因而言语治疗作为康复综合治疗的一个组成部分,逐渐在一些康复机构中开展起来。

言语包括声的感知和产生。言语感知是一项复杂的功能,它与听力的中枢和周围神经有关,主要依赖语言的法则来接吸和分析处理一系列的声音。声音的基本物理属性可帮助分辨、描述和重复该声。耳廓和外耳道接收声音引起鼓膜振动,振动附沿听骨链引起内耳液体流动,导致耳蜗毛弯曲,这时机械活动转变为电化学作用,声音进一步传导到中枢听觉神经系统。两耳有定位和感觉声距的作用。来自耳蜗毛细胞的电信号沿第8对颈神经传到脑干延髓及其中的蜗核,信号经纤维传送到同侧和对侧核,以及上橄榄体。传入神经植入中膝状体,使丘脑与皮质产生信号联系,最后信号终止于颞皮质。听中枢对声音进行最后的分析、翻译,并进行有意义的联系。在上橄榄体以上等结构、大脑两半球均互有联系,尤其在胼胝体。若在辨别和处理声音的过程上出现问题,言语便产生障碍。说话是一种活动功能,涉及肺、喉和口部等发音器官。言语的产生包括呼吸、制声、共振、构音和韵律。中枢神经系统中的言语活动:(1)感觉信息在颌面部和声道产生,沿着第5、7、9、10、12对颅神经传入中枢。(2)丘脑是信息传入皮层言语中枢前的重要接收区。(3)皮层上,与言语及语言有关的中枢是Broca's区和Wernicke's区,两者均位于大脑左半球。(4)皮层的运动区负责控制与言语有关的随意运动。(5)锥体系和锥体外系对言语十分重要,其异常可导致言语障碍。(6)小脑对言语的运动控制很重要,其功能失常可致构音困难。(7)脑干的核团是信息离开皮层,进入有关颅神经前的一个“最终共同通路”。

言语障碍可出现在各种年龄,有中枢性的,也有周围性的;其病因很多,可以是神经肌肉问题,颌面部异常所引起,也可以是由听力障碍、发育迟缓造成。若得到适当的康复治疗,许多言语障碍均可以克服。儿童言语障碍的类型不同,严重程度也不一,原因可属中枢性或外周性;也可与发育、心理或恶习有关。评定方法包括4种主要的言语分析:(1)分析儿童与熟人之间自发性交谈,从中找出典型的错误例子。(2)采用确定的标准测试。(3)找出对治疗的反应性常有助于判断基线,适合治疗与否,预后及治疗途径。(4)深层分析为复合构音提供重要资料。儿童各期言语障碍可归纳为4种主要类型:(1)发音困难。(2)音位系统障碍。(3)构音障碍。(4)言语运用障碍。成人言语障碍通常与以下因素有关:(1)颌面部疾病。(2)听力障碍。(3)中风及所引起的构音障碍和运用障碍。(4)神经系统的渐进性疾病。(5)老化。

言语功能的评定应以语言的口头表现为基础,而不是简单个别的发音表现。首先是筛查,以确定是否需要再作详细检查,这包括:采集完整的病史,有关的发育情况,社交与心理因素的调查,听力与语言检测,以及颌面部检查。目前有关评测的常用方法有:Halstead-Wepman失语症筛选测验、标记测验,Spree-Benton失语症测验、Minnesota失语症测验、Boston诊断性失语症测验、筛治澄子失语症检查法、构音障碍评测法。但对汉语语言功能检查尚无统一的方法,有汉语失语症检查法、汉语语言功能检测法、改良波士顿诊断性失语症检查法等。

言语治疗在国外发展历史较长,虽无特效疗法,但治疗的早期介入,起到了积极的作用。据中国的临床报道,对脑血管病所致的言语障碍患者,在药物治疗的早期,同时进行有目的、有程序的言语功能训练,收到了良好的效果。国内外的研究表明,大脑损伤后的康复治疗效果受多种因素的影响,如:受伤者越年轻,恢复的可能性越大;脑损伤前病人智力和文化水平高者能获得较好的康复效果;病灶范围越大,预后越差;社会环境对患者的功能恢复影响很大;左利手者较右利手者恢复得好;治疗时间在病后6个月以内者优于6个月以上者。言语治疗是通过以下3点:(1)最

大限度地提高患者残余功能。(2)训练患者受损害的机能。(3)教授患者代偿的方法,达到增强病人言语交流的能力。

言语治疗的基本方法包括:(1)呼吸训练:鼻吸气,嘴呼气。呼气的适当控制,不但是正确发音的关键,而且也是语调、重音、节奏形成的先决条件。(2)发音器官训练:主要进行舌、唇、腭、声带的运动练习,使发音器官运动准确、灵活、协调,如:伸舌、缩舌、卷舌、舌尖触牙齿、舌向两侧运动和环转、张口、闭口、咬下唇、鼓腮、咳嗽等。(3)改善发音方法:当说话速度较快时,容易出现构音、韵律、词汇、语法方面的错误,可指导患者放慢速度;若语言流畅度、清晰度及准确性与呼吸运用不当有关,可辅导患者改进发音与呼吸的配合,恰当地利用呼气气流发音,并控制说话词语的长短,避免用气不当或气不足的现象。(4)言语刺激训练:采用听语指图、听语指字、命名、读字、读句、单字复述、句复述、短文复述等方法。(5)应用触觉刺激对伴有视觉障碍患者的言语治疗有很大的帮助。言语治疗时,应注意到循序渐进、有针对性、坚持学和练、与肢体功能训练相结合。

中国开展言语治疗的时间较短,有关言语语言病理学的基础研究还存在很多的空白,汉语语言功能标准检查方法尚待进一步的研究,发扬中国医学的传统,加强中医药治疗言语功能障碍的基础和临床研究,人才培养是发展中国言语治疗事业的重要环节。

(安徽医科大学第一附属医院康复运动医学科倪朝民撰)

### 血液透析疗法 hemodialysis treatment 血液净化疗法

之一,用于治疗急性肾衰、慢性肾衰、药物中毒等疾病患者。它主要是根据弥散原理,将体内的代谢废物(如 Bun、Cr 等)、毒物等经半透膜从血液侧弥散至透析液侧而被清除,通过超滤排除体内滞留水分,从而达到水电解质及酸碱平衡的治疗方法。由于透析是半透膜两侧溶质的被动弥散,因此半透膜的通透性、表面积以及膜两侧溶液(即血液和透析液)浓度梯度差、溶质(代谢废物、毒物等)的分子量、溶液的温度均影响弥散速度。

左右透析效率最主要的因素是膜的性能。治疗病人时使用的透析器的主要部分是透析膜,由于它能替代部分肾功能,因此也称人工肾。1943年,Kolff等首先用赛璐璐制成了第1台人工肾应用于临床。80年代再生纤维素的铜仿膜广为使用,60年代末期出现了法国 Rhone poulence 公司制造的聚丙烯腈膜,1973年出现了日本制造的聚丙烯腈甲酯膜、美国的醋酸纤维素膜、德国的聚砜膜等。透析膜按制物原料分为两大类“纤维素膜与非纤维素膜(聚合高分子膜)。膜的生物相容性的好坏与透析时的低氧血症和症状性低血压有关,非纤维素膜的生物相容性明显优于纤维素膜,透析中血小板和白细胞降低的幅度明显减小。膜的造型关系到膜的顺应性,这也影响透析效果。膜的顺应性越低越好,它不会因增加跨膜压而减少透析面积。膜的造型大致可分为平板型的、管型的、空心纤维型的3类。空心纤维型的顺应性比其它两种低因而好,因此现在中空纤维型人工肾已被广泛使用,前两类除小型积层平板型的以外,已被大多数国家淘汰。今后,非纤维素膜制成的空心纤维型透析器是发展方向。采用不同原料,按照透析面积大小及不同造型,目前国际上已拥有数百种不同的透析器,为选择不同的净化方式创造了条件,为不同情况的病人选择不同的透析器创造了条件。

透析时,血液隔着透析膜与透析液中的溶质进行交换,膜内外溶质的移动,除了与膜的特性有关以外,与透析液的性状更有密切关系。现有3种透析液,区别仅在于使用不同的碱化药物:醋酸钠、碳酸氢钠、乳酸钠。乳酸盐透析液,仅有个别报告。醋酸盐透析液,于1964年由 Mion 等制成35倍浓缩液,应用至今,但自1976年 Novello 报告血透病人发生“醋酸盐耐量减低”现象后,人们对醋酸盐的利弊进行了深入研究,并与碳酸氢盐透析液进行比较,认为血透时的低氧血症、症状性低血压、失衡综合症及其它透析后症状均与醋酸盐有关,改用碳酸氢盐透析液后,上述症状的发病率明显降低而且纠正酸中毒较快,因此临床上应用日益增

多,今后有替代醋酸盐透析的趋势,但目前因碳酸氢钠透析液需特殊设备,由于经济和技术上的原因,尚未被广泛使用。另外,透析液内钠离子浓度的高低仍是目前争论的问题。60年代初期使用  $\text{Na}^+140\text{mmol/L}$ ,但由于当时使用的透析膜厚,脱水效果差,常引起患者高血压,甚至水滞留而死亡。70年代将  $\text{Na}^+$  调整到  $132\sim 135\text{mmol/L}$ ,钠在此浓度可避免引起患者高血压和水滞留,但出现低血压和身体疲乏等。在70年代后半期,由于透析膜脱水效率提高及对钠的动力学等的研究,再次将钠浓度变成  $140\text{mmol/L}$ ,患者低血压等症均可消失,且脱水亦较易,目前多数学者主张透析液钠离子浓度与血钠浓度相仿。

常规血透需要消耗大量透析液,为了使透析机小型化,对透析液再生进行了研究,目前国外已采用某些吸附剂(sorbent)为基础的 TAKEDA、TM-101、REDY 型低容量透析液再循环系统。关于透析液中以 Ca 为中心长期存在的问题,还有铝和其它微量元素等问题有待进一步研究。

血液通路是进行血液净化的先决条件,也是慢性透析患者的生命线。血液透析疗法虽应用于临床已有50年历史,但最初20年由于缺乏恰当的血液通路而限制了它的临床应用;直到1960年 Quinton 等首先采用动静脉外瘘,使血透治疗进入一个新时代,特别是1966年 Brescia 等建立内瘘以来,到目前为止,已成为慢性透析患者最安全、维持时间最长的血液通路,但如何制作良好的内瘘并尽量延长其使用时间,已成为透析工作者日益关注的问题。对于需紧急血透患者自1961年 Shaldon 等首先采用股静脉插管法以来,已发展到目前的多种临时性血管通路的建立方法。

动静脉外瘘是一种人造瘘管,用外瘘管将动静脉连接起来,瘘管的一部分在体外。外瘘管材料1960年全采用聚四氟乙烯,1961年改进用硅胶-特夫隆瘘管,延长了外瘘管使用寿命5~10倍,中国制造的全采用硅胶材料,仅连接管用聚四氟乙烯。硅胶是一种生物相容性好的聚合物,柔韧而有弹性,较聚四氟乙烯对血管壁的损伤小。建立外瘘最常用的血管是前臂桡动脉和临近表浅静脉。由于外瘘要损伤一对动静脉,易感染,有形成血栓、导管滑脱大出血等危险,且病人生活不方便,使外瘘应用受到限制,目前已渐被内瘘所替代,但紧急透析时仍是一种不可缺少的手段之一。

动静脉内瘘是在任何一个肢体远端将邻近动脉和浅表静脉在皮下吻合起来所形成的瘘,这样浅表静脉渐进性增大和动脉化,在一定时间后,该静脉可做穿刺以供血透之用。吻合最多的是桡动脉和头静脉,目前永久性血液通路多采用此法,它具有病人生活方便、感染机会少、使用寿命长、无外瘘滑脱大出血危险、血栓形成的发生率较外瘘低等优点,但血管瘤发生率较高,这与单位面积内穿刺次数有关,为了防止这种并发症,近年来许多学者致力于改进内瘘穿刺方法。目前穿刺方法有3种:绳梯式穿刺、区域穿刺、纽扣眼穿刺。内瘘成熟后,应根据造瘘静脉动脉化程度采用不同的穿刺方法,穿刺得法可显著延长内瘘的寿命,对一些无法应用自体血管的患者,需要人工血管替代物。60年代末国外开始用人工血管代用品,在体内动静脉间搭桥形成内瘘,最早采用的材料是自体大隐静脉,但取材复杂,通畅率不高,现已很少使用。1974年 Hutchib 报道用牛颈动脉内瘘进行血透获得满意效果,但进行长期血透患者,瘘局部感染和假性动脉瘤形成的发病率很高;1976年以后采用非生物制品材料,以聚四氟乙烯人工血管最好,但易感染,一旦感染很难控制,且价格昂贵。中国北京血透中心1983年以后用人尸动脉建立血管通路,取得初步成效,并在部分医院得到推广。内瘘吻合法一般采用缝合法,以显微缝合最佳,也有不用缝合法而采用套管法进行动静脉吻合建立内瘘的,它具有手术简单、省时、成功率高等优点,但使用寿命不如显微缝合法,国外早在20多年前就已开始运用。中国于1985年开始用钛制轮钉作动静脉内瘘进行血透,并在国内得到推广。

临时性血管通路暂时建立起来,可立即使用,但使用期较短,拔除后原血管通畅性无损,且因手术简单、迅速、创伤小,对



于紧急情况需进行血液净化病人明显优于动静脉外瘘,抢救急性中毒或急性肾衰等患者最合适。常采用的方法有直接穿刺法、静脉切开插管法、中心静脉经皮插管法,由于颈内静脉经皮插管法有可留置重复使用、对患者活动限制少、感染机会较少且比较安全、并发症少、成功率高等优点,成为目前最常用的临时性血液通路。

高效短时透析即超短时加清洗中分子的透析,它比一般标准血透时间短而且能清除标准血透不能清除的中分子物质。由于能清除 $\beta_2$ -Mg、铝复合物,减少长期血透并发症,提高病人对于透析的耐受性;并有生物相容性较好的膜,有碳酸氢盐透析及超滤控制系统,成为五年内透析领域最重要的进步之一。本疗法适合于所有需透析的患者,但因对人工肾机器、透析器、透析液及透析用水质量要求较高,费用也昂贵,未能广泛开展。

#### 参考文献

- 1 太田和大. 血液净化法之概念上历史的展望,日本临床,1984,42(8):5
- 2 酒井和,等. 人工肾脏:最近の时步と今后の展望,日本临床,1984,42(8):110
- 3 平泽田平. 血液净化疗法的现状和进展,来华讲学稿,1984年4月
- 4 张训,等. 血液透析的某些进展,中华肾脏病杂志,1986,2(1):45
- 5 王笑云,等. 高效短时透析及其改良,中华器官移植杂志,1990,11(3):116
- 6 管德林. 颈内静脉插管——血液透析暂时性血管通路,中华器官移植杂志,1988,9(3):132
- 7 Hutochibp, et al. Bovine graft arteriovenous fistula for maintenance hemodialysis, *Sury Gynec obstet*, 1975, 141(2): 225
- 8 Tellisva, et al. Expanded Polytetrafluoroethylene graft fistula for chronic hemodialysis, *Ann Surg*, 1979, 189(1): 101
- 9 Barton Br, et al. Cardiothoracic emergencies associated with subclavian hemodialysis Catheters, *JAMM*, 1983, 250(19): 2660
- 10 Davis D, et al. Subclavian veous stenosis; a Complication of Subclavian dialysis. *JAMM*, 1984, 252(24): 3404

(安徽医科大学第一附属医院蔡嘉舜教授撰)

**成分输血** blood components therapy 将血液中有各种成分分离出来,分别制成高纯度制品和高浓度制品,然后根据病人的具体情况,给予需要成分的血输方法为成分输血。

血液是由血细胞和血浆两大部分组成。血细胞包括红细胞、白细胞和血小板。血浆含有白蛋白、免疫球蛋白、纤维蛋白原、各种凝血因子和补体等。各种成分又有其特殊功能,所以每一种血液制品都能针对性地治疗一种疾病。由于将血液中的有关成分通过进一步提纯得到高浓度、高纯度的血液制品,不仅临床疗效高和便于保存、运输,还能够减少由于输注全血而发生肝炎感染、过敏反应等的可能性。

成分输血是现代输血的方向,是输血现代化的标志之一。输全血从1818年开始已有170余年历史,但成分输血从20世纪60年代才开始逐渐推广。1959年, Gibson首先发表了成分输血的论文,主张输注红细胞。60年代后期到70年代初期,一些发达国家就开始实行成分输血。以后,血液成分输血逐年增多,全血输注相应减少。例如Caggiano于1980年报告,1975年全血与浓缩红细胞的输注比为2:1,而到1978年输注全血就下降到20%,红细胞输注则上升到75%。美国血库协会、美国红十字会和公共血液中心委员会1981年的综合资料表明,在1150万单位全血中,85.6%制成红细胞制品,67.95%制成1种以上成分,包括新鲜冰冻血浆、因子V111和浓缩血小板等。此外,德国、日本、加拿大等国血液成分输血均已达到70%~80%。

1960年以前,中国临床输血主要是输注全血,1976年后增

加了代血浆制品和洗涤红细胞,不少生物制品研究所和中心血站已能生产白蛋白、丙种球蛋白、纤维蛋白原和抗友病球蛋白等制品。目前,各综合医院已较大量应用浓缩红细胞和代浆血,白细胞和血小板也应用于临床,血浆中已分出品种繁多的血浆蛋白成分。

现代输血中,红细胞制品的应用占重要地位。红细胞的制品很多,因浓度和加工方法不同可分为浓缩红细胞(RCC)、高浓缩红细胞、复活红细胞、少白细胞红细胞、洗涤红细胞、冰冻融化和去甘油红细胞及照射的红细胞等,可以根据不同适应证选用。在美国,有的医院根据利用浓缩红细胞的程度来判定该医院的医疗水平。

RCC是临床使用最普遍的一种,取ACD保存液采集的新鲜全血400ml,离心(5000g力,7min)后分出大部分血浆,剩余的即RCC。RCC的红细胞比为65%~75%,含大部分白细胞及血小板,可以不加添加剂,在不破坏密封的情况下继续在4℃下贮存到规定期限。RCC具有和全血同样的携氧能力,而容量只有全血的一半,患者输注RCC24h后,Hb、RBC和Hct均明显增高,输后24h体内存活率和全血大致一样。比起全血来,输注RCC可以更迅速而有效地立即提高Hb水平。临床单纯输注红细胞渐趋广泛,凡血容量正常的贫血,药物治疗无效而需要输血者,原则上都应输RCC。对老年人、儿童、心功能不全患者输血,更宜用RCC。在手术中,65%需要输血的患者,是为了恢复其血液的携氧能力,因此应输RCC和晶体液。对于手术出血量过大、休克及大面积烧伤的患者,可适当输用全血。对于择期手术的贫血患者及术后血容量正常者,宜用RCC。与全血相比输红细胞血者较少发生非溶血性输血反应。输注RCC的疗程、数量、次数、间隔时间主要根据病人的病情来决定,包括输前以及输后24h的红细胞计数、血红蛋白及Hct检测。

少白细胞的红细胞即移除白细胞后的红细胞。根据AABB(美国输血协会)的标准,至少要有70%的白细胞被去掉,留下的红细胞要达到70%以上。白细胞抗体可致非溶血性发热反应,发热反应的发生率和严重程度与输入的白细胞数目成正比。输少白细胞的红细胞适应证为:(1)过去妊娠或输血发生同种免疫产生白细胞或血小板抗体的病人;(2)需要反复输血的病人;(3)将来有可能施行骨髓移植的病人;(4)免疫缺乏或免疫抑制的贫血患者。剂量与输注方法同RCC。固为此法仍有传播肝炎的危险,用开放方法制成的这种制品应于24h内输注。

洗涤的红细胞是一种用生理盐水洗涤以去除白细胞(95%)和血浆(>99.5%)的红细胞。在洗涤中同时去除了细胞碎屑、代谢产物、抗凝剂、乳酸盐、增塑剂、钾、氨和微聚物等。其适应症与少白细胞的红细胞相同外,还适用于:(1)自身免疫溶血性疾病,如先天性溶血性贫血和PNH等;(2)已产生IgA抗体的患者;(3)原因不明的过敏反应。应于24h内输注,洗涤不能防止肝炎的发生,也不能防止输血后GVHD的发生。

冰冻红细胞,即通过低温(-70℃~-85℃)或超低温冰冻保存的红细胞,其适应症除与少白细胞的红细胞和洗涤红细胞相同外,还特别适用于:(1)稀有血型的贮存;(2)自身红细胞的贮存;(3)战伤输血的补充。此种制品费时费事,费用又昂贵,难以推广,且必需24h内使用,也不能防止肝炎传播及输血后GVHD。

对于血小板减少的出血者,可以输注浓缩血小板(PC)。在60年代早期,美国死亡的白血病患者中,50%~60%主要原因是出血,以后使用PC输血,死亡率减低到25%。据美国血液委员会的调查,在1971年使用PC41万单位,到1980年就增加到286万单位,上升了7倍,而同一时期的红细胞输血只上升58%。制备PC应用二步离心法,先在室温中将全血用1000×g离心力和9min离心时间离心,取上层富含血小板的血浆(PRP),再用3000×g离心力和20min离心时间制备PC。PC制成后须在室温中静置1~2h,然后混匀,尽快输用。血小板输血的适应证:(1)血小板生成减少,如白血病、再生障碍性贫血、淋巴瘤、骨髓纤维

化等；(2)急性血小板减少，例如大量输血、体外循环和感染等；(3)血小板功能异常，例如血小板功能损害、血小板储存库缺陷、巨血小板综合征和巨球蛋白血症等。免疫性血小板减少性紫癜很少需要输注血小板，因为患者循环中的抗体可以在几分钟或几小时内破坏输入的血小板，即使输注大量血小板也无济于事，这种患者在脾切除前可以考虑输注血小板，但往往不需要。

白细胞输血于1934年首次用于治疗中性粒细胞减少并有感染的病人。Bodey等在1966年首先记述了急性白血病病人循环粒细胞水平和感染之间的关系：当粒细胞 $<0.5 \times 10^9/L$ 时，在全组病人中78%发生细菌性败血症，90%发生全身霉菌感染。粒细胞输血的适应症：(1)粒细胞计数减少到 $\leq 0.5 \times 10^9/L$ ；(2)存在已经证实的细菌性感染；(3)估计骨髓功能可以在1周以上恢复(2~3周内)；(4)败血症先经24~48h的抗生素及其它治疗无效后。白细胞采集方法可分为手工单采和机器单采两种，中国多采用手工单采法。粒细胞输血后常见的不良反应是荨麻疹、发热和寒战，严重的有高血压、肺毒性反应、HLA同种免疫反应、传染病感染以及移植体抗宿主病。

临床使用血浆已有60多年历史。自60年代以来，血液成分制备和供应逐渐发展，新鲜冰冻血浆(FFP)取代了其它血浆并且产量逐年增加。在国内，血浆用量仅次于全血，据1988年26个血液机构的不完全统计，共提供血浆167 102L，其中FFP占22 856L。血浆分治疗用血浆和原料血浆两种，前者用于临床，后者作为血浆蛋白的制品原料。治疗用血浆有：(1)新鲜液体血浆；(2)保存液体血浆；(3)FFP；(4)普通冰冻血浆；(5)冻干血浆；(6)去冷沉淀血浆。现代输血浆的主要目的是补充凝血因子，或同时补充凝血因子和血容量。以上制品中主要应用FFP。输血浆的剂量取决于适应症和病人的具体情况。对因子V缺乏者，可以每12h输注FFP10ml/kg。缺乏因子VIII者，可用冷沉淀或浓缩因子VIII，也可用FFP。对因子II、VI、IV、X缺乏者可用普通冰冻血浆。

现代技术能够分出的血液成分，无论是品种和数量，都还是有限的，随着科学技术的发展，新材料、新设备、新方法新技术的问世以及临床对血液的新要求，可以预见，老的制剂将得到改进，新的制剂将不断增加。

#### 参考文献

- 1 肖星甫. 成分输血, 输血杂志, 1988, 1(3): 140~142
- 2 Polesky HF. Blood Banking in the united states, 1981 Trans-tusion. 1985, 25: 304
- 3 汤浅哲治. 成分输血, 诊断与治疗, 1984, 72(8): 249
- 4 三之宫景光. 成分输血的实际——赤血球输血, 临床外科, 1979, 34: 325
- 5 大谷王良. 赤血球输血, 日本医学会杂志, 1980, 83: 295

(安徽医科大学第一附属医院吴基教授撰)

**自血光量子疗法** ultraviolet blood irradiation 又称紫外线照射自血回输疗法(UBT)。是取小剂量自血在体外经紫外线照射及充氧后再输回体内的方法。早在1925年Becher就提出了这种方法的有关理论。1928年Knott首先在临床应用，救治了1名产后败血症患者。第二次世界大战期间，由于抗菌素出现而取代了它，但对它的研究没有停止，且对其作用机理进行深入研究。1979年，前苏联又开始普遍应用。UBI这主要是由于抗生素虽然不断更新，然而却存在过敏问题及毒副作用，病原微生物也在不断地更新换代和出现耐药菌株。于是曾被人们冷漠一时的自血光量子疗法又重新得到重视和应用，而且其适应症愈趋广泛，包括各种原因引起的败血症、细菌和病毒感染、过敏性疾病和肌萎缩病、动脉粥样硬化、心肌梗塞、雷诺氏病、高血压病、多关节炎、脑血管意外、格林-巴利综合征、动脉供血障碍、贫血等。

紫外线照射血液的方式很多，或以紫外线灯置于特制石英玻璃管上方，使血液在管中缓缓流动途中接受照射；或将血液盛于石英容器中，在不断晃动下接受照射。中国多采用后者，采集者静脉血150~200ml置入含有ACD液的石英玻璃瓶中，然后

将石英玻璃瓶置于血液辐照治疗仪内，予以10个生物剂量的紫外线照射8~10min，并同时充氧。紫外线的波长为248~578nm，氧流量为5L/min。然后将处理过的血液回输给患者，隔日1次，每疗程5次。

UBI的主要适应症是：(1)各类急性缺血缺氧性脑病、脑血管病、散发性脑炎、急性感染性多发性神经根炎、CO中毒、肺心病以及脑外伤恢复期等。(2)外科感染。用于治疗脓毒症、腹膜炎、软组织化脓感染、手术后伤口感染和下肢营养性溃疡，特别对感染性休克有肯定疗效，据认为是UBI破坏了内毒素而发挥保护作用所致。急性坏死性胆囊炎、急性胰腺炎、弥漫性腹膜炎、阻塞性黄疸、急性肠梗阻和脓毒症时，血中分子肽含量高于正常值1~2倍，用UBI后中分子肽即降低，临床症状改善。(3)烧伤。UBI使血清的抗氧化活性明显增强，脂质过氧化的中间产物和终产物二烯酮化合物和丙二醛减少，而中分子肽增加。患者痛觉阈提高，体温下降，氧耗量增加，急性肺炎迅速好转，I度和II度烧伤创面逐渐好转。(4)对于早期四肢动脉供血不足(多为动脉粥样硬化性)患者效果更为明显。(5)溃疡病。可使胃粘膜微循环改善，胃分泌活动到调整，从而促进修复过程。(6)缺血性心脏病。UBI后疼痛消失或减轻，病变组织氧利用率增高，代谢过程改善。(7)妇产科疾患。堕胎引起的感染、晚期妊娠中毒症、胎盘早期剥离等应用UBI，可使患者死亡率下降，康复期缩短。(8)眼科疾患。UBI可治疗迁延复发性眼色素膜炎，对原发性青光眼亦有疗效。

UBI的作用机理尚未完全阐明，但其杀菌消炎、提高血氧饱和度和、增加组织供氧、改善微循环、调整凝血与止血机制以及提高机体免疫功能等作用已得到充分证实，目前正就其细胞分子水平的作用进行深入研究。经紫外线辐射的血液，其中许多成份会在光量子的作用下发生一系列的生物化学反应，首先是对血细胞的影响，使红细胞受到刺激，其携氧能力明显增强。照射后HbO<sub>2</sub>立即增加到192.1%，3~5min达最大值，Hb氧饱和度可达94%~98%，并能持续相当长时间。血PO<sub>2</sub>从40%~45%增至120%~140%，PCO<sub>2</sub>从45%~49%降至23%~33%。UBI后红细胞渗透压抵抗力增强，不易溶血。血液流变学性质和微循环显著改善，血液粘度减低。血中纤维蛋白原、胆固醇脂肪酸含量降低，蛋白水解和脂解作用增强，纤溶过程被激活，血管壁状态得以改善。同时，凝血活性受抑制，由于嗜碱性粒细胞增加，血中游离内生性肝素含量增加，有助于已栓塞的血管再通。UBI使脂质代谢恢复正常，并能清除血管内类脂质和纤维蛋白沉积物，从而阻止病情复发。

紫外线可以直接杀灭细菌。254~265nm的短波紫外线杀菌作用最强，因其易为核酸、蛋白质特别是DNA吸收，使细菌发生致命的突变，DNA分子丧失复制能力，转录过程发生障碍，是细菌死亡的主要原因。UBI还可以提高吞噬细胞的代谢能力，增加超氧化物阴离子的形成，从而加强其杀菌作用。

紫外线使组织发生光解，使蛋白质分解成较简单的结构直至氨基酸。血液经照射后数秒钟内即有血浆蛋白自由基形成，光解作用释放出组织胺、乙酰胆碱、组氨酸、生物胺和肝素等高活性物质，一些起重要作用的酶活性发生变化。受照射的血液量很少，产生的生物效应可以持续维持，因此，认为UBI可使血液中产生类似催化剂的物质。据Pischinger等分析，血细胞和血浆蛋白光致破坏时生成的脂质过氧化物或臭臭脂质过氧化物就是这种催化剂。它激活相应的原浆脂质(Plasmolipid)，后者借助HbO<sub>2</sub>的氧转变为稳定的“HOT(血氧疗法)脂质过氧化物”。细胞中的过氧化物酶由“HOT脂质过氧化物”分解出氧，可为细胞利用以获得能量。已分解的“HOT脂质过氧化物”由于催化性脂过氧化物的作用重新被激活，从而完成“自身催化循环”。

UBI后血中各项生化指标变化不大。淋巴细胞绝对数和相对数增加，T淋巴细胞增至204%，T活性细胞增至170%。白细胞吞噬活性增强50%，调理指数增加78%。白细胞的酶活性也增强，细胞内溶菌酶活性增高。B淋巴细胞达159%，血中IgM、IgG

和 IgA 皆明显增高。卟啉沉着症的色素代谢障碍为 UBI 的禁忌症。此外,有关于 UBI 使系统性红斑狼疮恶化的报道。

本疗法是比较安全的。偶有患者治疗后暂时发热、怕冷、口干舌燥、嗜睡及轻度头昏等的报道,但并无危险。实践证明,UBI 疗法是一种疗效肯定、操作简便、便于推广应用的好方法,尤其对神经系统的病毒感染和免疫性疾病以及对抗生素过敏或耐药菌株感染的病人或经久不愈的慢性感染灶,确实是极好的救治办法。随着临床上的广泛应用和有关方面的深入研究,其机理将会进一步阐明。

#### 参考文献

- 1 陈洪治,等.紫外线照射自血疗法的临床应用,中国输血杂志,1990,3(1):51~54
- 2 张晓声.自体血紫外线照射后再输入的发展,国外医学输血及血液学分册,1988,11(4):269
- 3 栗秀初.紫外线照射和充氧回输治疗4例脑病的初步体会,中国神经精神科疾病杂志,1988,14(2):68

(安徽医科大学第一附属医院吴基教授撰)

**血浆置换疗法** therapeutic plasma-pheresis 它是现代血液治疗学的新领域。利用血液分离技术,将从患者静脉采取的血液快速分离,弃去血浆,而将血细胞(红细胞、白细胞、血小板)和适当的替代液(胶体液和晶体液)输回患者体内。其目的是去除血循环中致病的抗原、抗体、免疫复合物或其他有害因子,以达到缓解病情或控制疾病发展的目的。

1914年 Abel 等报道,把切除双肾的狗的血液抽出并分离其血浆后,再用 Locke 液混悬红细胞输回该狗体内,成为首次血浆置换治疗的试验。1959年,Skog 等首次将此技术用于临床治疗巨球蛋白血症,此后有关报道不断增加,已用于治疗百余种疾病。中国主要用于系统性红斑狼疮、高粘滞综合症、Rh 免疫孕妇及神经疾病等。

血浆置换术有两种:(1)手工法。将患者的血液采集在1个含有血液保存液的袋内,置于低温大容量离心机中离心,分除血浆,再将剩余血液成分回输给患者。完成第1循环的手工置换之后,按上述步骤再作多次循环的置换。(2)自动机械法。使用自动化的血液成分分离机器,在密闭管道系统里完成采血、离心、成分分离和还输血液成分的置换治疗程序。这类分离机可分为连续流动离心式和间断流动离心式,美国 IBN, Tenwalcs 3 000 血细胞分离机就属于前者。血液从人的一侧肘部静脉流出,通过分离杯把需要除去的血液成分分离出来,其余成分从另一侧肘部静脉回输给患者,连续不断。美国 Haemonetics 系列分离机属于间断流动离心式,它能一次把所需的血量引进分离杯内离心分离,移出需要除去的血液成分,剩下的血液全部输还患者体内后再进行第2个循环的分离。

自动机械法作血浆置换较手工法安全、需时短、效果好,患者亦较易接受。但这类机器大多价格高、操作技术较复杂,对使用者要求高,一次性使用费用高。

血浆置换疗法机理是:(1)除去致病的抗原、抗体、抗原-抗体复合物,以及急性炎症反应中的活性物质或其他血循环中的毒性物质;(2)补充患者体内缺少的正常成分;(3)增强和改善体液介质的生理功能,如补体、凝血因子和调理素等的作用;(4)恢复和调整细胞免疫和单核巨噬系统的生理功能,清除封闭因子与淋巴因子的有害作用。其主要适应症为:(1)不透析性大分子病,如巨球蛋白血症、多发性骨髓瘤、高胆固醇血症和高脂血症等;(2)同种和自身抗体免疫性疾病,如新生儿溶血,同种免疫性血小板减少性疾病、肾移植排斥、ABO 血型不合的骨髓移植、含 V111 抗体的甲型血友病、ABO 血型不合的溶血性输血反应、自身免疫性溶血性贫血、特发性血小板减少性紫癜、重症肌无力等;(3)免疫复合物病,如系统性红斑狼疮、皮肌炎、类风湿性关节炎、多发性神经根炎、肾小球肾炎和多发性硬化症等;(4)其他疾病,如血性血小板减少性紫癜、癌、溶血-尿毒症综合症、高胆红素血症、急

性肝功能衰竭、甲状腺危象和药物中毒等。

血浆置换的置换剂:最重要的是及时恢复血容量和维持胶体渗透压的平衡,以免出现低血压、肺水肿等血管反应;其次才考虑蛋白质、凝血因子和免疫球蛋白的补充。常用的置换剂有:(1)正常人血清白蛋白或血浆蛋白液(PPE),其优点是无传染肝炎的危险,尤其是白蛋白液能减轻变态反应,但使用上述溶液时,必要时应补充钾离子、钙离子或凝血因子;(2)新鲜冰冻血浆(FFP),国外常用 FFP,FFP 不但能恢复血容量和渗透压,还可以补充凝血因子等成分,但是输用大量 FFP 可致枸橼酸反应发生,输血后肝炎及巨细胞病毒感染,还可发生过敏性反应;(3)晶体溶液,其优点是价廉,过敏反应少,但长期大量使用晶体液置换会出现白蛋白减少症。

由于各种疾病的性质不同,病情有轻有重,血浆中有害致病因子多少不一,换浆后致病物质的合成速率以及它在血管内外的分布情况不同,故每次应换出多少血浆,间隔多长时间交换1次,共换多少次,均应根据病人情况决定。对严重疾病如急进性肾炎、重症肌无力危象,一般采用强化方案,即每次置换血浆2~4L,每日或隔日1次,效果较好。而对于慢性疾病的维持治疗,每次换浆1~1.5L也有较好疗效。Jones 等指出,置换血浆2L(个别3L)会引起血管内物质减少50%左右。单采血浆后,大多数血浆成分会在48~72h内恢复至单采前的水平。

血浆置换疗法对某些疾病的疗效是明显的。据有关文献报道的有效率:巨球蛋白血症为100%;皮肤溃疡约为80%;重症肌无力和天疱疮各约70%;Rh 敏感的妊娠为87%;血性血小板减少性紫癜为84%;多发性骨髓瘤、类风湿性关节炎、高胆红素血症、肾炎和药物中毒各约为60%;系统性红斑狼疮和全身硬皮病各约为50%;重症肝炎约为32%;肝功能衰竭约为21%。对原发性巨球蛋白血症疗效较好,其原因在于该病的 IgM 几乎全部在血管内,而 IgM 的除去情况取决于单株蛋白的合成率与释放率,所以疗效显著。但不少疾病需要除去的免疫球蛋白是 IgG,其中约50%在血管外,因而在血浆置换过程中或置换以后,血管内外间隙间进行着新的平衡,所以有时这些物质的除去率不高,这也就是何以在作血浆置换疗法的同时还需要广泛应用免疫抑制剂的原因。

血浆置换疗法的不良反应和并发症:有些与血容量改变有关,有些与血浆正常成分的改变有关,有些则与替代液的性质有关。(1)心血管反应。抽吸速度过快或体外循环血量过大可发生低血压、晕厥或休克,相反,回输速度过快、补充液体过多,可致急性肺水肿和左心衰竭。(2)血浆过敏反应。尤其是 FFP,因含有异性蛋白,虽然预防性地给予抗组织胺药和激素,某些患者仍可能发生致命的过敏反应。(3)枸橼酸反应。由于含抗凝剂成分回输过快,或应用大量血浆作替代液,致使血钙减低,而表现为唇周麻木、畏寒、颤抖、抽搐等,可用葡萄糖酸钙预防和治疗。(4)出凝血异常。换浆常见凝血象改变,用缺少凝血因子的替代液,可有纤维蛋白原、抗凝血酶Ⅲ的减少,但临床上异常出血现象少见,发生率为2.2%。(5)感染。由于疾病本身的影响或因应用免疫抑制剂致免疫功能低下,加之频繁大量地换浆又降低免疫球蛋白的水平,这些都使病人对感染的易感性增加。此外,输用血浆有传播病毒性肝炎的危险。总之,血浆置换术已被证明是相当安全的,尽管如此,在操作前、操作期间和操作后均应谨慎小心,严防各类反应的发生。

血浆置换疗法在现代医疗领域中已取得巨大进展,许多以免疫学特性为主的疾病已用这种手段治疗,并取得极其引人注目的疗效。近年来中国在这方面也取得了不少成绩,不久的将来,随着国产血液成分分离机的推广应用,将会大大推动血浆置换疗法的实验研究和临床应用。

#### 参考文献

- 1 吴国光,等. HF 血液成分分离机的研制和应用,中华血液学杂志,1984,6:408
- 2 刘文勋,等. 血浆交换的临床应用,中级医刊,1989,24(2):9

~10

- 3 肖星甫,主编.输血技术手册.成都:四川科学技术出版社,1992,217~224
- 4 Beal RW, Isbister JP Blood Component therapy in clinical practice 1sted Melbourne, oxford, london: Blackwell scientific publications, 1985, 261~274
- 5 Hendrick Am Pisk, factors associated with thrombosis following plasma exchange ibid, 1986, 7: 213

(安徽医科大学第一附属医院吴基教授撰)

### 深静脉穿刺及置管技术 techniques of the deep

venous puncture and cannulation 深静脉具有管腔粗、血流丰富、不易塌陷等特点。1952年Anbanian报道使用锁骨下静脉输液,直至70年代,由于各种弹性好、对人体组织刺激性小、无毒性的塑料导管的问世,深静脉穿刺置管技术才得已普遍用于临床。

**深静脉穿刺置管技术应用范围** (1)休克、危重病员,四肢血管萎陷、脆弱易破和反复穿刺失败者,紧急抢救需两根输液通道,深静脉穿刺置管为第1输液途径,以保证抢救及时。(2)中心静脉压(C.V.P.)监测。在血管张力不变的情况下,可反映血容量和右心功能状况。0点定标,平腋中线,侧卧位者胸骨柄左缘旁开2cm,正常值0.49~0.98kPa(5~10cmH<sub>2</sub>O)柱。(3)静脉内高营养治疗。肠痿、胆痿等慢性消耗性疾病者。(4)长期注人对血管有刺激性之药物。如癌症病人的化疗。(5)放置心内起搏电极或置入气囊扩张导管行风心二尖瓣狭窄闭式扩张术。

**禁忌症** 穿刺部位感染和患有出血性疾病者为绝对禁忌症。

**穿刺前准备** (1)用具:①高压消毒静脉切开包1个。②导引钢丝,穿刺针置75%酒精浸泡1小时或福尔马林熏箱内置24小时。(2)临床:①了解病史及各项检查结果,无禁忌证才可进行操作。穿刺前常规体检。②查对普试阴性或用0.5%利多卡因作局麻。③病人平卧位床头低15°,穿刺部位垫薄枕,以龙胆紫、碘酒定位。

#### 穿刺点血管解剖、定位及进针方向、角度

**锁骨下静脉:** (1)解剖:①锁骨下静脉是腋静脉的延伸(第1肋外缘起始),经过前斜角肌的前侧,在胸锁关节后与颈内静脉会合成头臂静脉(即无名静脉),左(长6cm)、右(长2cm)头臂静脉汇合成上腔静脉(7~8cm)。②锁骨下静脉背面为前斜角肌和锁骨下动脉。动脉之后为臂丛神经。③胸导管从左无名静脉下方、颈内静脉背侧,左颈内静脉与左锁骨下静脉汇合角处进入血管。④胸膜顶位于锁骨下静脉与颈静脉角的后下方,静脉前方与锁骨之间无重要结构。(2)定位:①锁骨下入路:胸大肌锁骨部与锁骨交界处,锁骨下1cm之凹陷内。小儿锁骨中内1/3交界处稍外侧。进针方向为胸骨柄上2cm。如同时行两点穿刺插管,上述穿刺点外侧1~2cm为第2穿刺点。②锁骨上入路:胸锁乳突肌锁骨骨头外缘与锁骨夹角之平分线、锁骨上1cm。进针方向——胸锁关节。

**颈内静脉:** (1)解剖:颈内静脉在动脉背侧包于颈动脉鞘内,颈总脉于甲状软骨上缘处分为颈内动脉、颈外动脉。颈内静脉位于颈内动脉后侧,下行至颈总动脉外侧,与胸锁乳突肌锁骨头相重叠,与锁骨下静脉汇合。颈内静脉的管壁因与颈中筋膜及肩胛舌骨肌的中间腱愈着,内腔保持扩张状态,以利头部静脉回流,如遇外伤,颈内静脉亦不收缩闭锁,有发生空气栓塞的危险。在颈内静脉和锁骨下静脉结合部有一瓣膜,阻止血液逆流。穿刺时床头低15°,头偏对侧。(2)定位:前侧入路:胸锁乳突肌前缘中点,左手中指指及颈动脉搏动,将动脉推向内侧,在食、中指之间进针。中间入路:①胸锁乳突肌锁骨头内侧缘,锁骨上两横指,②颈动脉三角(胸锁乳突肌二头与锁骨所形成)顶点。以上两路进针方向为同侧乳头。后侧入路:胸锁乳突肌后缘中下1/3交界处。进针方向,胸骨切迹。锁骨内侧端上缘小切迹上方1cm处进针,进针方向与中线平行。穿刺时针尖不能越过锁骨。选右侧穿刺优于

左侧:①右侧胸膜顶低于左侧。②从右侧颈内静脉到右心房几成一直线。③不会损伤胸导管。

**股静脉:** (1)解剖:股静脉位于腹股沟韧带中内1/3处,股动脉内侧,据第一军医大学马富研究50例成尸报道,股动脉处,与股静脉间距有3种情况:重叠1~8mm;紧贴;相距1~5mm。二者深浅关系有下列5种形式:①股动脉内缘在股静脉外缘内前方占40%。②股动脉内缘在股静脉外缘内缘外侧者占34%。③股动脉内缘和股静脉外缘相贴者占19%。④近腹股沟韧带处的股动脉内缘在股静脉外缘外侧,下行中逐渐移至静脉前面者占6%。⑤股动脉内缘在股静脉内后方者占1%。股静脉的上端外缘至大隐静脉汇入处上缘间血管长度3~6cm。(2)定位:腹股沟韧带下方1cm,打得股动脉搏动内侧0.5cm。进针方向与股动脉平行或稍偏向股动脉。

**腋静脉:** (1)解剖:腋动脉、腋静脉、臂丛神经包裹在腋动脉鞘内进入腋窝,腋静脉位于动脉的前内侧,臂丛从外、后、内三面包围腋动脉。(2)定位:病人前臂外展行军礼状,腋窝剃毛、消毒。扣及腋动脉搏动最明显处向内侧开0.5cm,穿刺针与动脉走向平行,方向指向胸壁。各点穿刺与皮肤角度:20~45°,锁骨下静脉穿刺角度偏小,肥胖者角度偏大。

**穿刺入路的选择** 严重肺气肿、胸部畸形者可行股静脉穿刺,重度休克病人股动脉或腋动脉搏动难以打得者,穿刺难以成功。危重病员,由于床架妨碍,可行锁骨下静脉或股静脉穿刺。腹内高压者,宜选颈内静脉或锁骨下静脉穿刺。颈外静脉亦可为进入深静脉途径。

**操作** (1)术者戴手套,常规消毒铺巾,穿刺针、导引钢丝用75%酒精浸泡1h后取出,用盐水冲洗干净;检查导管、钢丝有无漏水及折痕。(2)局麻后先于穿刺点锥一洞眼,沿血管走向打一通道后退针,用盐水将针头内的皮肤、脂肪碎块推除后再进针,边进针边回抽,穿刺针进入静脉有脱空感,回抽有血并通畅,插入导引钢丝之软头端,退针,沿导引钢丝置入导管,回抽血流通畅接输液管,用消毒薄膜覆盖或用丝线缝合固定导管后盖以消毒纱布。导管针法:用带针心的导管针直接穿刺,进入血管后边退针心边进导管,回抽有血接输液管。一般置管12~15cm。(3)小儿不能合作者,穿刺前肌注氯胺酮3~5ml/kg+异丙嗪1~2mg/kg作基础麻醉。

**注意事项** (1)穿刺后病人感胸闷气急,听诊穿刺侧呼吸音明显降低,立即于第2肋间穿刺抽气,有条件时床边拍片以了解肺萎陷情况。(2)穿刺1次未成功,退针至皮下,调整进针方向或穿刺角度再进针。(3)长期输液者,每次输液完毕用肝素液1ml(盐水500+肝素100mg配成)冲洗导管后塞以肝素帽。(4)如输液不畅应检查导管是否扭曲或滑出血管外或被小凝血块堵塞。(5)每天用碘酒、酒精消毒穿刺部位与接合部,更换敷料,如患者有不明原因发热,应立即撤去导管,并将其尖端剪下作细菌培养和药敏试验。

**并发症** (1)气胸:国外报告并发率为2%~5%。以锁骨下静脉锁骨下入路法偏多,这是目前较少采用此种入路的主要原因。(2)误入动脉:为最多见之并发症,以误入颈总动脉为首。穿刺点定位偏高,误入颈动脉机会大。锁骨下动脉位于静脉下方,穿刺时用力过猛、进针过深,可穿过静脉、前斜角肌到动脉,锁骨下动脉一旦穿破,压迫止血较困难而致局部血肿。误入动脉应局部压迫10min,如局部有血肿,对侧颈内静脉不应穿刺,以防两侧均有血肿而影响呼吸。(3)导管折断、扭曲或导管位置过深或脱出血管致胸腔积液和纵膈、皮下水肿。(4)左锁骨下静脉穿刺误入胸导管引起淋巴溢漏。进针方向偏外对左下颌角可预防之。(5)静脉栓塞:深静脉内径粗,血流量大,不会因导管与输入液体刺激而引起栓塞是深静脉插管输液的优点。发现导管内有血应尽量抽除或拔除导管。(6)空气栓塞:在穿刺、置管、更换输液管道、穿刺针与输液管脱落时都有产生空气栓塞的危险。在低血容量、心悸、深吸气和坐位者,更易发生气栓。为小儿穿刺,应避免小儿啼哭以保安全。(7)臂丛神经损伤。(8)穿刺针局部感染,导管性心

内膜炎、败血症。由于无菌操作欠佳或机体其他部位有感染灶而引起,应以预防为主,病人一旦发热,立即拔管。

总之,深静脉穿刺置管,不论何种入路,正确定位,严格掌握操作规程,可避免和减少并发症的发生。由于操作简便,无须静脉切开,越来越受到临床医师和病人的欢迎。

#### 参考文献

- 1 张璠,人体解剖学.北京:人民卫生出版社,1960,346~353
- 2 王炎之,等.小儿锁骨下静脉学应用解剖,临床解剖学杂志,1987,5(1):30
- 3 马富,经皮穿刺股动脉和股静脉插管的应用解剖学研究,临床解剖学杂志,1987,5(1):33
- 4 McMinn RMH, et al. Color atlas of human anatomy Chicago 35E Wacker Drive, 1977,116~117

(安徽医科大学第一附属医院麻醉科吴蓉蓉教授撰)

### 肿瘤针吸细胞学 aspiration cytology of cancer

针吸细胞学又称细针吸取细胞学(简称FNAC),是诊断细胞学的一个分支。当前它已发展成为肿瘤诊断的必不可少的重要手段,在病理学中占有相当重要的位置。

早在30年代,已有使用针吸方法诊断恶性淋巴瘤的报告。但由于种种原因未能引起人们的重视。至50年代,以欧洲Karolinska研究所为首的肿瘤学家们总结大量针吸细胞学材料,从此突破了只有脱落细胞才能进行细胞学诊断的限制,为实质性脏器实质性肿瘤的细胞学诊断开辟了新的途径,其真正推广应用是在70年代才开始较为迅速的发展。当前欧美等许多较发达国家证实,针吸细胞学是一种非常具有实用价值的诊断方法。随着影像学技术的迅速发展,在X线、B超、CT等引导下,经皮、经胸、经腹膜腔对深部脏器肿物实行针吸已经成为可能。目前,此技术的应用范围已扩大到几乎包括人体的所有部位。1984年Weid和Koss专门为国际细胞学会主办的杂志《针吸细胞学》专辑作序,以鼓励和促进针吸细胞学发展。1987年,中华病理学杂志于郑州举办第1次全国针吸细胞学座谈会,并出版该刊专集刊登各种针吸细胞学资料。目前这一技术的应用在中国尚未普及。

近年,单克隆免疫技术的进展,使细胞学表面标志的特异性诊断成为可能。针吸细胞学的重要性随之增加,因为它能提供足够的细胞材料供肿瘤细胞免疫特异性研究。目前正在研究的领域包括确定肿瘤细胞的组织类型、来源,进行肿瘤学再分类,判断某些肿瘤的细胞分化程度及肿瘤细胞内抗原特性等。

免疫细胞化学的应用研究,除目前常用的5种中间微丝外,对多种标记物的研究都有报告。对鉴别良性恶性细胞具有特殊价值者,目前有两方面工作:(1)恶性淋巴瘤的诊断及再分类;(2)胸腹水中癌细胞与良性增生性间皮细胞的鉴别。Martine的研究工作较早,报告胸腹水中常规细胞学诊断的27例恶性淋巴瘤,经免疫细胞化学方法证实6例为良性反应性增生;而原来诊断为反应性增生的14例中有5例为恶性淋巴瘤。1990年,Sneige报告220例恶性淋巴瘤淋巴结针吸细胞学材料,结合免疫细胞化学方法,选用1组10种抗体进行标记(包括T-200,Leu-1,leu-2a,leu-3a+3b,leu-12,IgM,CALLA和TdT等),结果诊断为恶性淋巴瘤者占79%,可疑者占7%,良性者占10%,不满意者占4%,无假阳性诊断。结论认为:针吸细胞学结合免疫细胞化学方法对于确立恶性淋巴瘤诊断是一种可靠的手段。

胸腹水中癌细胞与异型间皮细胞的鉴别诊断是细胞学中的一大难题,这一研究工作已取得相当进展。据Tickman(1990)报告,对90例病人(包括各种癌细胞69例,恶性间皮瘤2例,间皮细胞增生19例)进行免疫细胞化学染色,应用抗体为EMA、CEA、Vimentin、Leu-M1及B72.3。结果认为,作为一套抗体结合应用,对区分胸腹水中癌细胞与增生的间皮细胞能提供较为明确的诊断。

1991年,Wolber等研究肝癌细胞癌时,使用癌胚抗原多克隆抗血清(pCEA)进行毛细胆管染色,22例肝癌细胞癌中18例阳性,

良性肝细胞11例全部阳性;而27例肝脏转移性肿瘤全部为阴性。这一结果证明pCEA对鉴别肝脏的原发癌与转移癌具有特殊价值,αFP(胎甲球蛋白)抗体对诊断原发性肝癌具有相当价值。

针吸细胞学研究的另一热点,在于应用影像诊断技术引导对机体深部内脏进行针吸细胞学检查。Tao(1980)报告胸腹腔肿物针吸2591例(包括肺肿瘤441例),阳性率由开始的82.8%上升到后来的93.4%。Christofferson报告119例胰腺肿物经皮针吸细胞学检查,68例恶性肿瘤,细胞阳性者66例,无假阳性。中国已开始这方面的探索。1984年,北京市肿瘤所报告肝胆胰等部位肿瘤在B超引导下经皮针吸,细胞学诊断准确率为87.2%,假阳性率约1%。阙秀等(1992)报告102例肝脏肿物针吸细胞学材料与针吸活体组织学对比,其细胞学诊断敏感性为93.1%,特异性为100%,无假阳性,其敏感性略高于活体组织学检查,认为二者有互补性,并指出本检查方法对B超发现占位性病变而αFP阴性的病例具有特殊意义。

乳腺肿物多见,位于体表,针吸细胞检查应用最为广泛;1970年,Zajicek报告4700例有组织学证实的2111例。中国阙秀等报告8129例乳腺针吸材料,有病理证实者1012例,其细胞学诊断敏感性为82.2%,特异性为98.8%。甲状腺、淋巴结均位于体表,针吸操作易于进行,都有较大量的病例数并有较仔细的研究报告。目前,人体各部位(包括肺、纵膈、腹膜后、脑等)的肿物均有针吸报告。将它与脱落细胞学检查方法相结合,已使人体无论是腔隙性脏器还是实质性脏器发生肿物时,均可利用细胞学检查方法得到较为肯定的诊断,把肿瘤诊断提高到一个新的水平。

针吸细胞学检查方法除临床应用外,由于吸出的细胞为新鲜的活细胞,具有特殊的优越性,它可以用于电镜检查细胞器的细微结构、染色体研究、DNA测定,可做细胞培养,建立细胞株或进行抗癌药物敏感性及对肿瘤生长因子感应性等研究;还可用于肿瘤免疫治疗中监视宿主对肿瘤的免疫反应研究等。

针吸细胞学应用于临床,其突出价值在于简便易行,安全可靠,费用少,无痛苦,诊断准确性高,因此,其应用越加广泛。为取得理想结果、保证质量,必须做到:(1)熟练和准确的针吸技术,诊断失败的重要原因之一是因为针吸不成功;(2)优秀的涂片及染色技术;(3)有经验的病理细胞学家结合临床资料对涂片进行正确的判断。

针吸细胞学已将细胞学技术推向临床诊断的前沿,具有很大的优越性和潜力。它的研究和应用将为肿瘤病人和社会带来巨大效益。

#### 参考文献

- 1 Martin H E, et al. Am surg, 1930, 92, 169
- 2 Tao L C, et al. Cancer, 1980, 45, 1480
- 3 Beazley R M, et al. Cancer, 1981, 47, 1685
- 4 Wied G L, Koss L G. Acta Cytologica, 1984, 28(30):169
- 5 Martin S E, et al. Am J Clin Path, 1984, 82(6):666
- 6 刘彤华. 中华病理学杂志, 1987, 16(3):161
- 7 Sneige N, et al. Acta Cytologica, 1990, 34(3):311
- 8 Tickman R J, et al. Acta Cytologica, 1990, 34(4):491
- 9 Wolber R A, et al. Acta Cytologica, 1991, 35(2):215
- 10 阙秀,等. 中国肿瘤临床, 1992, 19(4):21

(北京医科大学人民医院阙秀教授撰)

### 骨髓移植 bone marrow transplantation

骨髓移植简称为BMT,一般指异基因BMT和同基因BMT。异基因BMT是指将他人的骨髓(不包括同卵孪生者)移植到受者体内,使其生长繁殖的一种方法。同基因BMT指受者与供者基因完全相同的移植,只有同卵生子女之间的移植是同基因BMT。此外,尚有自体BMT(ABMT),是采取患者自己的骨髓进行移植。

ABMT的大致过程是:先抽取急性白血病缓解期患者或骨

髓未受侵犯的实体瘤患者的自体骨髓在体外冷冻,然后为患者进行化疗或放疗,再把冷藏的自体骨髓输回体内的一种治疗方法。70年代世界上作了首例 ABMT,后这项技术有了很大进展,现已推荐用于多种患者,迄今为止全世界的 ABMT 累计已达 8 000 多例。其主要适应症依次为:非霍奇金淋巴瘤(NHL)、霍奇金氏病(HD)、急性白血病(AL)和慢性粒细胞白血病(CML)。在 AL 的缓解期抽取骨髓,采用单克隆抗体等方法,体外除去残留的少量白血病的细胞,这种 ABMT 已成为治疗急性淋巴细胞白血病(ALL)的有效方法。最近也有用于治疗急性髓性白血病(AML)者,而且有报告说在 AML 稳定期抽取骨髓体外培养约 10 天后输回体内,可使病人骨髓组织恢复正常。

外周血干细胞移植(ABSCT)是最近用于临床的一种新型 ABMT。在生理条件下外周循环血中干细胞数量稀少,但化疗后外周循环血中干细胞数量增多,一般可增加 25 倍,化疗后刚缓解的患者外周血中正常干细胞占绝对优势,用细胞分离器分离收集外周血干细胞 3~4 次,可达到所需重建造血系统干细胞数为原来的 8~30 倍。ABSCT 抗肿瘤效果与 ABMT 相似。

同基因 MBT 在人类仅限于同卵孪生间的移植,因此,供者有限,进行这类移植机会很少,但无供者-受者免疫学方面障碍,不需要免疫抑制处理,也无排斥和移植抗宿主等合并症,因而临床效果较好。Seattle 和洛杉矶加州大学两个骨髓移植中心报告了 49 例急性白血病同基因 BMT 治疗结果,90% 的患者达到完全缓解。因此,有同卵兄弟(姊妹)为供者的再生障碍性贫血、白血病或其它实体瘤患者,应早期应用这一条件,争取治愈。

Allo-BMT,即同种异体骨髓移植,是指供者-受者间主要组织相容性复合物(MHC)配合的同种不同个体的骨髓移植。由于免疫学和遗传学方面的限制,迄今世界各中心所选的供者绝大多数是 HLA 相同的同胞兄弟姐妹。但近年来英、美、法、加等国已有若干全国性的或国际性的骨髓移植供者志愿队伍,无关供者异基因骨髓移植已取得初步成功,在中国独生子女较多的情况下,开展无关供者的 BMT 是可取的。

60 年代初期的骨髓移植仅用于短时间地替代无功能的骨髓,由于未使用必要的免疫抑制性措施,输入的骨髓显然不能在患者体内植活。70 年代以来,由于对 HLA 系统认识加深,组织抗原配型方法日益完善,同时使用合理的免疫抑制性措施,使同种骨髓移植获得了肯定的效果。

人类第 6 号染色体短臂上有 HLA 的-A、-C、-B 和 O/DR 诸位点,A、B、C 点可以用血清学方法来测定,而-O/DR 位点需要用混合淋巴细胞培养或 B 淋巴细胞的组织配型来测定,为选择 HLA 基因型相同的供者,应该检测患者及其双亲和兄弟姐妹的 HLA 型基因。由于 HLA 抗原的基因呈单倍型遗传,因此,同胞间 HLA 基因型相同的概率是 1/4。Seattle 骨髓移植队检查了 533 对同胞对子,检出 255 对(48%)HLA 一致。目前所进行的 Allo-BMT,绝大多数是由 HLA 相同的兄弟姐妹作供者。父母与子女只有一半的 HLA 相同,称单倍型相同,其免疫问题不容易克服,所以一般说是不合适的。无亲缘关系者,由于 HLA 的多态性,HLA 表现型相同的概率约为 1/8000。

Allo-BMT 的适应症主要有:(1)急性白血病。首先使病人接受超大剂量的化疗和放疗,被摧毁的造血系统和免疫系统可以通过 BMA 重建。此外,Allo-BMT 有一定的移植抗白血病作用,实际上是一种有效的过继性免疫治疗。Thomas 主张急性白血病患者 BMT 应在缓解期进行。据国内外报道,第 1 次完全缓解的急性非淋巴细胞白血病(AML)患者经 BMT 后 5 年存活率为 70%,5 年后复发机会很少,表明大部分已根治。据国际骨髓移植登记组(IBMTR)1989 年资料,急性淋巴细胞白血病(ALL)患者在接受 Allo-BMT 时的病情与复发率有极显著关系。第 1 次完全缓解接受 BMT 的复发率为 28±6%,而复发期移植者复发率为 68±7%;第 2 次完全缓解接受 BMT 的复发率为 50±6%,因此,应争取在第 1 次完全缓解后接受 BMT 治疗。(2)慢性粒细胞

白血病(CML)无法用化疗根治,而经 BMT 却可使约 80% 的 CML 长期缓解和根治,但急性变后再作 BMT 效果不好,据统计,CML 的慢性期病例作 Allo-BMT 的 5 年复发率为 25±6%,而急变期或急变前期则为 64±6%。(3)重症再生障碍性贫血(SAA)年龄较轻的 SAA 患者适宜作 BMT,年龄<19 岁者 5 年存活率高于 60%,20~29 岁略高于 50%。因此,有人认为年龄超过 20 岁后,应首先试用抗淋巴细胞球蛋白。SAA 的免疫功能并没有严重的缺陷,所以在 BMT 前需要用免疫抑制剂,以避免发生排斥反应。(4)其它恶性肿瘤、阵发性睡眠性血红蛋白尿、重症联合免疫缺陷病、某些部分免疫缺陷病、遗传性再生障碍性贫血、某些代谢性疾病等,都是 Allo-BMT 的适应症。

考虑到疗效及实际可能性,目前骨髓移植供者选择的次序应为:(1)HLA 完全相同的同卵双生同胞,(2)HLA 相合的同胞;(3)HLA 单倍体相同的家庭成员,(4)HLA 表型相合的非亲属供者。供受体的 ABO 血型以相同为好,但不同血型并不妨碍移植物的成活。对于血型不相合的 BMT,目前用得较多的方法是从供者骨髓和血液混合物中浓集干细胞输给患者。

BMT 排斥反应是 BMT 失败的主要原因之一。AL 患者由于曾经多次接受化疗而免疫功能低下,所以在经过免疫抑制治疗后,移植的骨髓较易成活,但对其它非恶性疾病如再生障碍等,所移植的骨髓容易被排斥,BMT 前用环联合庆用磷酸胺或环磷酸胺与其它免疫抑制剂,可使骨髓排斥率下降,西雅图有人报告对此类患者移植后加输供者白细胞也可降低排斥率。

植活的骨髓可引起移植抗宿主病(GVHD)。GVHD 是由于供者和受者的免疫遗传不完全相同引起的。GVHD 分急性的和慢性的两种,一般急性的 GVHD 在 3 个月内发生,慢性的 GVHD 在 3 个月以后发生。供受体间存在组织相容性差异,受体不能排斥移植物和移植物中有免疫活性细胞是发生 GVHD 的 3 个必要条件。用于预防 GVHD 的药物包括氮甲喋呤(MTX)、环磷酰胺(CTX)、环孢菌素 A(CSA),MTX 合并 CSA,抗胸腺细胞球蛋白(ATG)、皮质激素类药物胎球蛋白等。多数学者认为,需要体外清除供者骨髓两个对数级淋巴细胞,因此,只输入低于  $10^6/\text{kg}$  淋巴细胞一般即可避免配型相同的 Allo-BMT 的 GVHD。

化疗、放疗与 GVHD 所伴的组织损伤使感染容易发生,包括细菌感染和病毒感染。细菌感染以绿脓杆菌占首位,其次为大肠杆菌和克雷白菌,病毒感染主要是巨细胞病毒(CMV),其次为单纯疱疹病毒和水痘疱疹病毒。BMT 死亡率很高的间质性肺炎多由 CMV 引起。BMT 后因 CMV 或其它的病毒引起的急性肺炎亦日益受到关切。

BMT 目前已在世界上日益增多地开展起来,迄今已有 20 余种“不治之症”可借 BMT 根治,已挽救了很多重症免疫缺陷和血液病患者的生命,使疾病患者危险性日益下降,各种合并症亦逐步得到控制。此外,BMT 的进展可能为器官移植这一重点医学领域提供有共性的理论知识和实用技术。但是,无论 BMT 的基础理论研究还是临床实践,都有许多问题急待解决,主要集中在造血干细胞的分离和培养、特异性免疫低反应性的建立、HLA 和非 HLA 抗原的识别及应用 HLA 基因型不同的供者的可能性以及新的免疫手段和全身淋巴照射的应用等。目前,世界上对重症免疫缺陷症患者已成功地进行父母与子女间单倍型相同的 BMT。可望不久对其他疾病亦会成功地进行父母与子女间单倍型相同的 BMT。

#### 参考文献

- 1 邓家栋,主编.临床血液学.上海:上海科学技术出版社,1985.1223~1234
- 2 Thomas ED,Current status of Bone marrow transplantation Transplantation proceedings, 1985,17:428
- 3 Storb R,et al, Marrow transplantation in thirty "untransfused" patients with severe aplastic anemia Ann Intern Med 1980,92:30

- 4 严文伟,等.自身骨髓移植治疗白血病,中华血液学杂志,1988,9(10):578
- 5 N C Gorn.自身骨髓移植在恶性血液疾病中应用,中华血液学杂志,1991,12(4):169
- 6 Uingard JR, et al. Interstitial pneumonitis fol - Lwing autologous bone marrow transplantation, Transplantation 1988,46(1):61

(安徽医科大学第一附属医院吴基教授撰)

**康复医学** 康复用于现代医学领域,主要是指身心功能、职业能力和社会生活能力的恢复。世界卫生组织医疗康复专家委员会(1981年)对康复作了如下说明:“康复是指应用各种有用的措施以减轻残疾的影响和使残疾人重返社会。康复不仅指训练残疾人使其适应周围的环境,而且也指调整残疾人周围的环境和社会条件以利于他们重返社会。在拟订有关康复服务的实施计划时,应有残疾者本人,他们的家属以及他们所在的社区的参与。”由此可见,康复应包括“医学康复”(利用医疗手段促进康复)、“教育康复”(通过特殊教育和培训以促进康复)、“职业康复”(恢复就业能力、获得就业机会)、“社会康复”(在社会的层次采取与社会生活有关的措施,促使残疾人能重返社会)。实现以上4个领域的康复也就是“全面康复”。实现全面康复,着重在于提高生活素质,恢复独立生活、学习和工作的能力。

康复医学是一门有关促进残疾人及患者康复的医学学科。更具体地说,康复医学是为了康复的目的而应用有关功能障碍的预防、诊断和评估、治疗、训练和处理的一门医学学科。在现代医学体系中,康复医学与预防医学、临床医学相互联系组成一个统一体。

现代康复医学是20世纪的产物,但它的基本组成内容康复医疗,在古代已经萌芽。功能康复的概念远在2000多年前的中国医学中已开始出现,《内经·素问》中就有应用针灸、导引、按摩、熨等治疗痿痹、麻木、肌肉挛缩等病症的论述。古罗马和希腊也有文献记述了用体操、按摩、浴疗、散步、旅行、工作疗法、阅读疗法、文娱疗法等治疗躯体疾病和精神疾病,促进身心功能恢复。直至第2次世界大战期间,通过美国H. A. Rusk等的努力,康复的概念比较完整地形成,一系列现代的康复疗法得以发展。第2次世界大战后,美英都把战时取得的康复经验运用到和平时期中,建立了许多康复中心,康复的热潮逐渐波及亚欧和北欧,乃至整个世界。1969年成立了“国际康复医学会”。其后随着交通事故和其他意外损伤的增多,老年人比例的增加,以及慢性病患者相对的增多,社会上的残疾人口也相应增加。他们渴望改善生活素质,促进了康复医学有较大的发展。此外,基础医学及临床医学包括运动生理、神经生理、行为医学、生物医学工程等的发展及社会、经济的发展,也为康复医学的发展创造了条件。

中国现代康复医学事业在近10从80年代以来逐步发展,一方面,以中国传统的康复治疗理论和方法贡献于世,另一方面,又吸取西方现代康复医学先进的理论和方法,取长补短。目前,在中国有3大系统——卫生部门、民政部门和残疾人联合会及中国残疾人福利基金会各自支持着相应的康复事业。

现代康复医学具有以下特点:以残疾者、慢性病、老年病而有功能障碍者作为主要的康复对象;按照“功能训练、全面康复、重返社会”3项原则指导康复工作;大量使用功能方面的评估、训练、补偿、增强等技术和心理学—社会学的方法;采用科际间的康复协作组工作方法对患者进行康复。

康复医学的实际工作包括康复预防、康复诊断(评估)和康复治疗。

1. 康复预防:“预防为主”是康复工作的重要内容。康复医学工作者配合其他学科的工作人员,进行残疾流行病学研究,对残疾的原因、发生率、种类、残疾者的年龄、性别、职业、地区分布等进行统计分析,从而提出预防计划,从医疗卫生、安全防护、社会管理、宣传教育等方面提出综合性预防措施。残疾预防可分3

个层次进行:(1)一级预防:即预防能导致残疾的各种损伤、疾病、发育缺陷、精神创伤等的发生。(2)二级预防:即早期发现及早期恰当治疗已发生的损伤和疾病,从而防止遗留永久性的残疾。(3)三级预防:即在较轻度的缺陷或残疾发生后,积极进行矫治及其他康复处理,限制其发展,避免发生永久性的严重的残疾。

2. 康复诊断(评估):康复诊断是对功能障碍程度进行分级,包括肌肉、骨骼、神经的各种功能障碍,内脏脏器功能障碍,心理障碍和为测定障碍程度的各种机能评定的理论和技术。(1)运动学测定:如肌力测定,关节活动度测定、步态分析等。(2)电生理学测定:如肌电图检查、诱发电位测定、神经传导速度测定等。(3)心肺功能检查:包括心电图检查、运动试验、肺功能测定等。(4)代谢及有氧活动能力测定:如利用功率车或活动平板检查运动的作功量、能量消耗、最大吸氧量等。(5)医学心理学测定:如精神状态、心理和行为表现、智能等。(6)语言交流能力测定:特别对失语症的检查等。(7)日常生活能力和就业能力检查和鉴定。

3. 康复治疗 康复治疗是日常康复医学工作的基本内容,主要有:(1)运动疗法和理疗:包括各种主动的和被动的治疗方法,最常用的有各种体育运动方法、有氧训练、增强肌力的方法、牵引、电、光、磁、水疗等。在中国还广泛应用具有传统民族特色的气功、按摩、各种保健操和拳术等。(2)作业治疗:日常生活活动训练,目的在于改善独立生活能力;职业治疗也称劳动治疗,目的在于为重返工作岗位作准备。(3)语言治疗:对失语、口吃、聋哑及喉切除术后等患者进行语言训练,尽量改善听、讲能力。(4)心理治疗:包括对患者进行心理学检查及心理治疗,发现及纠正心理障碍。(5)康复工程:是生物医学工程的一部分。在截肢后或肢体运动功能损害恢复不佳时,常须依靠假肢或各种矫形器具的帮助,作为一种体外的代偿。有时须为病人提供不同性能的轮椅、特殊结构的生活用具或生活设施。(6)其他:包括康复营养、康复护理、文娱治疗等。目的在重建肢体功能的矫形手术也可视为康复医学的一种手段。

康复医学工作的开展要求建立一系列的康复机构,以满足不同残疾人的不同阶段的需要。在中国,目前主要有两种形式:一为综合医院中的康复医学科,二为疗养院性质的康复医院。在中国,目前主要有2种形式:一为综合医院中的康复医学科;二为疗养院性质的康复医院。在国外,比较有代表性的康复机构有康复中心、康复部(科)、退伍军人医院、老年病院、日间医院、养护院等。在中国可以利用健全的卫生医疗网和红十字会的各级组织来开展社区康复治疗(社区康复是指在社区的层次上采取的康复措施,这些措施利用和依靠本社区的人力资源进行,其中包括残疾者本身,他们的家属和社会)。社区康复是普及康复工作以实现“人人得到康复服务”的重要措施。

目前,中国的康复医学事业已从初创时期进入有计划、有领导的发展时期,从学科本身的发展来看,康复工作将向各个临床领域推广,同时,康复医学专业本身的专科建设也将不断加强;社区康复与初级卫生保健工作密切结合,将得到更广泛的发展,社区康复的制度将逐步完善;康复医疗将与康复工程密切结合,为补偿、增强和替代已经有缺陷的功能提供工程技术上的帮助;康复技术信息化和社会化过程将加速进行。

(安徽医科大学第一附属医院康复科王玉龙撰)

**颈椎病及其康复治疗** 1817年Parkinson报导了1例颈项不适2~3d后出现颈项刺痛,并向上臂、前臂内缘及手指扩散,因此影响睡眠的病人,即属于颈椎间盘突出症患者。1948年Braum和Bull首次将颈椎间盘退变、颈椎骨质增生及所引起的临床症状、体征称为颈椎病。颈椎病是中老年人的常见病、多发病。随着社会的发展,颈部劳损、外伤机遇增多,导致颈椎病的患病率升高。通过国内外流行病学调查的结果表明,颈椎病患病率约为10%~16%。

颈椎病的发病机制,国外学者一开始就集中于颈椎退变、劳

损和创伤因素的研究,绝大多数学者都认为颈椎病与颈椎间盘退变有关。近年来,中国从生物力学角度对此进行了广泛的研究,并从光镜、电镜水平证实了颈椎受力增加可导致上述变化,在一定程度上解决了上述改变的原因问题,当然尚不能排除其他因素的参与。

对颈椎病的诊断,必须根据病史、体征和X线片的改变来进行综合判断。有颈椎退变而无症状者,不应诊断为颈椎病。相反,临床症状、体征典型而X线无明显改变者则应考虑颈椎病。必要时,可通过CT扫描、核磁共振、数字减影、B型超声显像、肌电图、听性脑干诱发电位、脊髓造影和椎动脉造影来帮助诊断。

至于分型问题,在中国一般来说,神经根型、脊髓型、椎动脉型和交感型颈椎病已被大家普遍接受,此外,还有颈型和食管型则较为少见。

绝大多数颈椎病患者都可以通过非手术疗法得到康复,其中又以颈椎牵引和推拿疗法最为常用,且疗效显著。现将颈椎病的康复治疗方法介绍如下:(1)牵引:方法很多,有自动牵引,多向性牵引,大重量牵引,持续牵引和间歇性牵引等。常用枕颌套牵引,体位有卧位和坐位,通常用坐位。常用牵引角度为前倾5~25°,根据不同型和病人的感受可选用合适的牵引角度。牵引重量一般在5~15kg,根据病人体质及颈项肌发达与否可酌增增减,牵引时间,每日2次左右,每次20~30min。(2)推拿手法治疗:推拿部位以颈肩臂为主,一般采用揉、捏、推、滚、提、按等手法,各型不同手法各异。推拿用量,急性期以轻柔缓慢为主,慢性阶段可适当增加强度和次数,推拿时间为每日1次,每次10~20min。(3)物理治疗:常用醋、中药进行离子透入,音频,电兴奋,超短波等。每日1次,每次时间根据理疗方法不同而长短各异,一般是15~20min。(4)中医中药:颈椎病可内服中药外,临床上常用针刺、麝香灸,穴位注射,耳压疗法,药枕等。(5)医疗体操:对颈椎病不仅有治疗作用,更重要的是能巩固疗效,防止复发。编操原则是动作幅度要大,速度要慢,使颈部各个方向都得到锻炼,用静力性肌紧张和抗阻的方法,增强颈项肌的力量。(6)硬膜外腔注射低浓度的普鲁卡因及强的松龙等药物。(7)体外反搏治疗。(8)高压氧仓治疗。(9)颈托或颈围固定。(10)心理学治疗及护理:颈椎病的康复过程中,注意病人的心理状态,针对性地进行心理治疗及康复护理。

但对于不同类型的颈椎病则需要采用不同的康复治疗措施:(1)神经根型:急性期,以消炎解痉镇痛为主,激素如地塞米松或强的松,神经营养药物维生素B<sub>1</sub>、B<sub>12</sub>,中药天麻等。颈椎牵引角度前屈位,时间和次数可根据病人反应和需要适当增减。推拿手法宜轻柔,目的是解痉止痛。疼痛不能缓解可考虑硬膜外封闭。慢性期,以颈牵推拿为主,推拿中除做局部按摩,要用斜搬、旋转以松懈粘连,扩大椎间孔,纠正错位,恢复颈椎内在平衡。配合理疗,以陈醋、威灵仙离子导入及音频电疗,且有解痉镇痛松懈粘连的功效。内服外敷中药,药枕、针刺,耳压等疗法,以舒筋活血、疏通经络、调理阴阳,配合医疗体操以巩固疗效。(2)椎动脉型:静脉滴注低分子右旋糖酐或丹参,每日1次,14d为一疗程,同时可口服扩血管药物如脑益嗪、西比灵、抗栓丸等,以改善血液循环。必要时可采用高压氧仓或体外反搏治疗。(3)交感型:使用镇静和平衡神经功能的药物如谷维素、安定、维生素B<sub>6</sub>、天麻、脑复率、脑力静等。推拿面积较广,以头颈为主,椎动脉经及足少阳胆经,分印堂,揉太阳,取风池,提肩井,按内关等。颈椎牵引角度自选,以舒适为宜。重量不宜过重,时间不宜过长,如牵引后症状加重,则放弃颈椎牵引治疗。(4)脊髓型:脊髓型患者诊断和治疗越早越好。颈椎牵引取中立位,垂直牵引。牵引次数和重量可适当增加,时间可适当延长。中国有人主张大重量牵引。推拿除一般按摩手法外,可用拔伸手法(术者立于患者背后,用肘部分别托在患者下颌和枕部,用力上提,可维持数秒或几十秒,然后放下)。用药:除解痉止痛,营养神经药物外,还常规使用扩血管药物(见椎动脉型药物治疗),也可同时使用中药大活络丹。上述治疗1~3个月无效或晚期患者,考虑手术治疗,术后应积极进行康

复治疗,以促进瘫痪肢体恢复和身心健康。

随着科学的进展和研究的深入,已经有人试图通过免疫机制、自由基及其清除剂的研究以及神经免疫组化的研究,对其发病机制和非手术治疗的疗效评定进行探索。在颈椎病的病因方面,通过对不同职业、不同地区以及生活习惯,社会因素、心理状态、遗传因素等流行病学的调查结果,对颈椎病的发病原因将会有进一步的了解,为颈椎病的预防提供切实可行的预防措施。

(安徽医科大学第一附属医院康复运动医学科吴毅文教授撰)

## 脑血管意外(CVA)后运动障碍的康复治疗

1989年,WHO根据各国专家对脑血管意外的研究结果,发表了一篇关于预防、诊断和治疗的专题报告,报告中指出,尽管各国的经济类型不同,调查的地区不同,调查的对象不同,但CVA仍然是主要的死亡原因和致残原因。CVA可以影响各个年龄组,尤以老年人(60岁以上)更为常见。Goldstein(1990)报告美国每年有近40万人发生CVA,约15万人死亡。不论是哪一种类型的CVA(出血或缺血),运动障碍常是最早,也是最主要的临床表现,因此,如何促进或改善运动功能一直是CVA康复治疗的中心任务,也是今后研究的重要课题之一。

治疗模式:CVA后的运动障碍虽然有多种形式,但其实质属于运动控制障碍,表现为不协调、不灵活、非功能或刻板的运动模式。Duncan和Badre(1987)将其归纳为7种表现:(1)肌张力增高;(2)不能完成选择性运动;(3)缺乏自主运动;(4)肢体难以抗重力运动;(5)不能进行有意识的功能活动;(6)不能控制精细运动;(7)不能完成不同速度的运动。因此,运动障碍的康复治疗首先是要改善对运动的控制能力,并尽可能恢复正常运动和技巧运动。早期治疗,综合治疗,病人主动参与治疗以及各相关学科或部门的通力配合(包括物理治疗师、作业治疗师、语言治疗师、护士以及病人家属等),以达到最大限度地恢复病人的功能水平,这就是现代康复治疗运动障碍的基本模式。

治疗技术 临床上常用的治疗方法主要有运动疗法,作业疗法,神经肌电生物反馈和日常生活活动训练等,其中应用最广泛,最有代表性的要数神经发育促进技术,包括Bobath技术、Brunnstrom技术、Rood技术、Kabat-Knott-Voss技术以及近年来发展起来的Carr-Shepherd技术和Johnstone技术。

1. Bobath技术:又称神经发育治疗,简称NDT。由美国B. Bobath在40年代根据治疗脑瘫的临床经验总结出来,60年代后用于治疗CVA,目前仍广泛流行于欧洲各国。Bobath技术的基本观点是按照个体正常发育模式来促进中枢神经系统的运动发育,通过刺激姿势反应(如直立反应、平衡反应、保护性伸展反应等)和反射性抑制的方法(如保持良好的体位,控制关键点、躯干旋转、肢体负重等),使异常的肌张力趋于正常,同时强调先抑制异常的运动模式后再进行正常的运动训练。

2. Brunnstrom技术:又称运动治疗。由瑞典S. Brunnstrom在50~60年代发展起来,当时的基础医学特别是神经生理学的研究发展很快,对Brunnstrom技术的产生具有重要影响。Brunnstrom技术主张利用病人存在的协同运动,相关反应和原始姿势反射等异常的运动模式,通过牵张反射甚至阻力来诱发肌肉收缩(不论这种收缩是否正常),一旦产生运动后,再训练病人主动助力地完成已经诱发出来的运动,直至最终病人能完成单一的关节运动。在这一点上,Brunnstrom技术与Bobath技术明显对立。Bobath反对在治疗中应用异常的运动模式,而Brunnstrom则认为痉挛现象和协同反应是脑损伤自然恢复的必然过程,主张早期利用。但是,由于阻力可以刺激脊髓前角细胞,引起反射性肌张力增高,而相关反应、原始姿势反射也有使肌张力增高的趋势,因此,从临床治疗角度来看,Brunnstrom技术更适合于肌张力较低的病人,对肌张力较高的病人仍应慎重。

3. Kabat-Knott-Voss技术:又称神经肌肉本体促进技术,简称PNF,这一技术首先由美国H. Kabat在40年代根据治疗脊髓灰质炎和多发性硬化所致继发性瘫痪的经验而总结出来,后来,



Kabat 又和 M. Knott 及 D. Voss 进一步发展完善。60 年代后开始用于治疗 CVA, 并由早期的主要采用肢体运动模式转向与体位转移、步态及自我护理等功能性活动结合起来的综合模式。PNF 技术的基本观点是用对角线、抗阻力的运动模式, 通过作用于完成同一运动的不同功能肌肉, 增加其接受外界刺激的敏感性, 以此来影响同一模式中力量较弱的肌肉。PNF 技术主张把语言、视觉及手的接触等感觉刺激与运动模式结合起来, 强调训练与功能活动相关的肌群运动, 这与传统治疗方法中不加区别地训练包括与功能活动无关的肌群, 无疑具有更直接的效应。与 Brunstrom 技术相比, PNF 技术虽然也用阻力, 但由于运动模式不同, 一种模式的结束恰好是拮抗模式的开始。因此, 对肌张力增高的病人, 可以用与其相反的运动模式来降低痉挛, 例如: 上肢痉挛的病人可以用伸肌模式。除了对角线运动外, PNF 技术还用节律性开始, 节律性稳定, 缓慢逆转, 重复收缩, 收缩—放松, 保持—放松等具体操作手法。

4. Rood 技术: 产生于 40 年代, 其基本理论是肌肉的运动可以通过感觉系统来诱发、促进或抑制。Rood 认为中枢神经系统感觉和运动成分包括两个方面: (1) 运动: 其特征是对外界刺激迅速作出反应, 以保护机体; (2) 稳定: 其特征是增加对运动的控制, 避免过度反应。Rood 技术的一个非常重要内容是把有控制的感觉刺激与个体正常运动发育结合起来, 以达到有目的的运动。在具体应用时, Rood 提出了 4 个基本原则: (1) 紧张性颈反射或迷路反射可以增加或减弱感觉刺激的效应。(2) 不同频率的感觉刺激可以产生不同的运动反应, 例如: 快速短暂刺激产生较大反应, 缓慢、节律、重复刺激可以使机体松弛。(3) 运动时不同肌肉具有不同的功能, 或作为运动肌, 或作为稳定肌。(4) 治疗时先训练主要肌群, 后训练次要肌群。如治疗上肢运动障碍, 只有在先恢复肩, 肘肌群的功能后, 才有可能恢复手部肌群的功能。

5. Carr-Shepherd 技术: 又称运动重学习技术, 简称 MRP。由澳大利亚 J. Carr 和 R. Shepherd 根据多年的临床研究并与其他技术相比较而总结出来。80 年代主要在澳洲应用, 近年来开始受到其他国家康复治疗人员的重视。MRP 的基本观点认为 CVA 后病人丧失了发病前已经掌握并能熟练运用的日常生活活动的功能, 如起坐、行走等, 因此, 治疗的重点是尽可能早期开始训练病人重新学习这些运动并掌握其技巧。MRP 的基本内容包括 7 个方面的训练: 口面部功能, 上肢功能, 坐位和站立位完成的运动, 站起和坐下以及行走, 应用时这 7 个方面的训练常有有机结合起来。同时, MRP 强调病人的主动参与及反复训练, 要求治疗师必须具备生物力学、神经学、认知及心理等方面的知识。治疗时分为 4 个步骤, 首先观察并分析病人能够完成的运动, 找出功能障碍环节; 其次针对丧失的运动功能, 通过语言诱导, 视觉反馈和治疗师手的引导进行训练; 第三, 把所学的运动与正常的运动结合起来, 并随时纠正不正确的运动反应, 最后, 在实际环境中练习并运用已经掌握的功能。

6. Johnstone 技术: 又称感觉运动技术。由 M. Johnstone 经过数 10 年的临床经验总结出来。Johnstone 认为, 运动是建立在感觉输入的基础上, 反复的感觉刺激可以使运动不断完善。大脑损伤后, 这种感觉—运动和平衡紊乱, 出现异常的肌张力和姿势反射。因此, 治疗应以控制异常的肌张力和姿势反射为主, 使病人能从自然的神经恢复过程中得到最大的恢复。Johnstone 技术的基本原则是应用抑制优势反射, 促进正常反应, 增加感觉输入, 重建失去的反应, 改善姿势控制, 促进大脑皮层的控制和反馈能力。在具体应用时, Johnstone 技术的一个重要方法是使用吹气塑料压力夹板来抑制痉挛, 这种压力夹板由特殊的塑料制成双层, 形如桶状, 吹进空气后即膨胀, 可以套在上肢或下肢, 对抑制肢体痉挛, 增加感觉刺激具有特殊效果。其作用机制是通过刺激肌腱中 Golgi 感受器的持续牵张, 使肢体保持在一种良好的体位。压力夹板是 Johnstone 技术的核心, 由于其制作需要特殊技术, 因此, 在一定程度上限制了该技术的推广应用。

神经生理机制, 运动障碍的神经生理机制还不清楚, 其主要

原因是很难把治疗性恢复与自然恢复完全区分开来。WHO 在其专题报告中指出, 相当一部分病人在发病后数小时到数月内, 神经症状可以自发地部分、偶而可以完全恢复, 康复治疗的作用在于促进这种恢复过程。许多作者认为, 早期地恢复是由于局部因素的作用, 如脑水肿减轻, 损伤组织吸收以及局部血液循环改善。长期的恢复则与神经元之间的侧枝循环和突触之间敏感性的改变有关, 但对此尚缺乏令人信服的证据来支持。不论哪一种治疗技术, 都遵循下列的基本神经生理法则: (1) 中枢神经系统具有可塑性, 也即大脑在损伤后可以自行调整以代偿损伤的功能。PNF 技术将其称为“人体的潜能”, 康复治疗就是要调动这种潜能。(2) 运动可以由感觉来调整, 运动系统在相当程度上依赖感觉系统对外界的有效反应。通过控制感觉输入, 可以抑制或促进运动输出。此外, 在具体应用时, 各种技术都强调下列原则: (1) 按照个体正常发育顺序及头—脚, 近端—远端的顺序训练控制运动的能力。(2) 运用有目的的功能运动而不是单纯的肌肉作用方式, 把训练与功能水平既日常生活活动紧密结合起来。(3) 通过重复有目的的运动来强化和巩固对运动的控制能力。虽然没有哪一种技术承诺可以恢复正常运动, 但都试图把异常的运动模式(刻板的、不协调、不灵活、非功能)降低至最低限度, 而最大限度地恢复自主运动和技巧运动。

目前看来, CVA 后运动障碍的治疗主要还是局限在躯体功能的改善。近年来, 已经注意到其他因素对治疗运动障碍的影响, 如感知功能, 认知功能, 社会、心理因素, 家庭环境等。据 WHO 的专题报告介绍, 只有运动障碍的病人, 发病后 14 周有可能独立行走, 合并感觉障碍者, 发病后 18 周 35% 有可能独立行走, 如果在此期间不能恢复行走能力, 在 28 周内有可能借助助行器(如手杖、助行架)行走。Mayo 等(1991)报告了 393 例 CVA 病人运动障碍的康复治疗结果, 发现感知损伤影响坐位平衡和上楼梯, 认知和心理因素特别是理解, 抑郁, 影响行走能力。Finlayson 等(1985), Lincoln 等(1989)在调查了 CVA 病人认知功能后认为, 认知功能对运动障碍的康复治疗具有重要影响, 认知功能损伤越重, 预后越差。虽然这方面的研究尚处在起步阶段, 但已逐渐受到临床重视, 其研究结果又会促进运动障碍的康复治疗。

(安徽医科大学第一附属医院康复医学科  
燕铁斌撰)

## 内科学

### 呼吸道病毒感染的快速诊断 rapid diagnosis in respiratory virus infection

呼吸道感染是人类发病与死亡的主要原因之一, 估计每年约有 220 万人死于急性呼吸道疾病, 小儿占有很大比例, 尤其是 1 岁以下儿童。据统计, 小儿最重要的死因是下呼吸道感染, 而病毒感染在小儿下呼吸道感染中几乎占半数以上, 主要的病原为腺病毒(Adv)、合胞病毒(RSV)、流感病毒和副流感病毒。为了更好地防治呼吸道病毒感染, 国内外学者都十分重视快速诊断。所谓快速诊断, 就是在短期内能确定其病原。病毒快速诊断技术分两大类, 一类是检测标本中的病毒抗原、病毒颗粒或病毒的核酸(DNA 或 RNA), 另一类是检测感染者特异性抗体。检测标本中的病毒抗原或病毒颗粒包括直接电镜观察标本中的病毒颗粒和间接检测病毒抗原的存在。

免疫荧光技术 其原理是将免疫球蛋白与荧光素以化学的方法结合而不损害免疫球蛋白的免疫活性, 然后用此结合物染标本, 与标本中的抗原特异性结合, 荧光素在激光的作用下发生荧光, 通过荧光显微镜即可观察到, 使不可见的特异性抗原抗体反应变为可见, 显示抗原的存在。即: 未知抗原加荧光素标记的已知抗体→荧光素标记的抗原抗体复合物, 可见到荧光。根据荧光标记抗体的不同, 分为: (1) 直接免疫荧光法: 是将疑有病毒抗原的标本(鼻咽分泌物涂片、组织切片等)直接用荧光标记的特异性抗体染色。(2) 间接免疫荧光法: 是将荧光素标记在第 2 抗体

上,将标记标本加已知的特异性抗体后,再加入荧光素标记的第2抗体染色。(3)补体法:利用有些抗原抗体结合需补体参加的原理,将荧光素标记在抗补体抗体上,将已知抗体与待检抗原、补体一起孵育,然后加入荧光素标记的抗补体抗体。此法比间接法还敏感,但有一定程度的非特异性荧光,且较少应用。

标本一般采用鼻咽分泌物脱落细胞,AdV 荧光出现在胞核中,RSV、副流感病毒出现在胞浆中,流感病毒在胞核或胞浆内;呈弥漫染色。如发现5个以上有特异性荧光的细胞则判为阳性标本。

直接免疫荧光法特异、简便、快速,但检测多种病毒抗原时需制备多种荧光抗体。间接法敏感性比直接法高5~10倍,应用一种荧光抗体可检测多种抗原,但比直接法需时较长且易出现非特异性荧光。已较普遍地应用于呼吸道病毒快速诊断。中国学者在70年代用直接法检测AdV,与传统法(指病毒分离和血清学)的阳性符合率为85.7%,80年代用间接法检测AdV和RSV,与传统法阳性符合率分别为88.6%和95.1%。免疫荧光技术的缺点为需较昂贵的荧光显微镜,并要去除非特异性荧光。

**免疫酶技术** 是把抗原抗体的免疫反应和酶的高效催化反应有机地结合起来的一种技术。通过化学方法将酶与抗原或抗体结合起来形成酶标记物,或者通过免疫学方法将酶与抗酶抗体结合起来形成免疫复合物,仍保持其免疫活性和酶的活性。然后与相应的抗原或抗体起反应,形成酶标记的或含有酶的复合物。结合在免疫复合物上的酶遇到相应底物时,催化无色的底物或化合物生成可溶性的或不溶性的有色产物。如生成的产物为可溶性的,则用肉眼或分光光度计定性或定量测定结果;如生成的产物为不溶性的,同时又是电子致密物质,则可用光学显微镜或电子显微镜识别。因此,免疫酶技术是用酶作为标记物或指示剂进行抗原或抗体的追踪,是一项定位的和定量的综合性技术。常用的酶有过氧化物酶和碱性磷酸酶。

免疫酶技术可分为两大类。一类用于检测生物组织或细胞中的抗原或其他成分,称为免疫酶染色法(免疫酶组化法);另一类用于检测生物体液中的抗原、抗体或其他成分,称为免疫酶测定法。

**免疫酶组化法**。此法包括3类:使用酶标记抗体的,称为酶标记抗体的,较常用,分为直接法和间接法;使用抗酶抗体的称为抗酶抗体法;使用酶标记抗体和抗酶抗体的称为放大抗体法。

因为细胞存在内源性过氧化物酶,所以如果使用辣根过氧化物酶作为标记物时,需去除内源酶,使用碱性磷酸酶则无此必要。(1)直接法:是将辣根过氧化物酶直接标记在抗病毒抗体上,用此标记物染待检抗原片。底物用含有 $H_2O_2$ 的二氨基联苯胺(DAB),阳性细胞可见胞浆或胞核内有棕色的或棕褐色的颗粒,找到5个阳性细胞即可判为阳性标本。1978年,Gardner等报道过用此技术检测咽分泌物中的流感A抗原和抗原RSV抗原,因在处理内源性过氧化物酶时,也破坏了病毒的抗原性而没有取得满意的结果。1980年中国学者经过反复试验,以0.228%过碘酸和0.001%硼酸钠溶液浸泡咽脱落细胞各5分钟,即能消除内源酶的干扰又不影响病毒的抗原性。用本法检测AdV和RSV与传统法的总符合率分别为83.7%和87%,与传统法有明显的一致性。(2)间接法:将酶标记在第2抗体上,方法同间接免疫法。判定结果同前。用此法检测AdV、RSV、流感病毒和副流感病毒与传统法的阳性符合率分别为93.2%、87.2%、97.5%和97.7%,且与传统法有明显的一致性。直接法特异、快速,间接法敏感和无需标记多种抗体,两法各有特点,可根据需要选用。(3)酶标记葡萄球菌蛋白A(SPA)法:又称A蛋白酶法,该方法是将酶标记在SPA上,再利用SPA能与多种动物IgG的Fc段非特异结合的特性,完成抗原的示踪或抗体的检测,简单、稳定,且无需标记多种抗体,一般情况下非特异性染色较轻,敏感性不亚于普通酶标记抗体法。操作过程只要将间接法的酶标记抗体换成酶标记SPA即可。应用本法检测AdV和RSV,与传统法的总符合率分别为87.0%和87.4%,且与传统法有明显的一致性。(4)辣根

过氧化物—抗辣根过氧化物酶(PAP)法:本法的关键是制备PAP试剂,一般为兔抗酶抗体—酶复合物。加样顺序为兔抗病毒抗体加羊抗兔IgG加兔抗酶—酶复合物加底物。本法检测RSV与传统法比较,其敏感性、特异性和总符合率分别为88.4%、88.8%和88.7%。本法操作简便,特异性染色易于辨认。缺点是比间接法又多一道程序,费时长。(5)碱性磷酸酶抗碱性磷酸酶(APAAP)桥联酶法:此技术80年代开始应用,主要是制备APAAP复合物,以此复合物作为第3抗体。操作过程类似PAP法,底物为坚固红,并用甲基绿复染。检测RSV时阳性细胞胞浆呈鲜红色,胞核呈浅红色或无色,阴性标本细胞呈浅蓝色或无色,每份标本找到3个以上典型阳性细胞可判为阳性标本。该法检测RSV与免疫荧光检测的阳性符合率为97.2%。本法优点为可避免内源酶的干扰,因为碱性磷酸酶只存在于肠组织细胞内,2~3h即可出结果,阳性和阴性易于判断,缺点为此酶较昂贵,价格是过氧化物酶的10倍,且操作程序稍复杂。(6)生物素—抗生物素(ABC)法:酶标记物是生物素—抗生物素辣根过氧化物酶复合物(ABC),其操作步骤同间接法,把酶标记第2抗体换为ABC。本法敏感,已应用于检测RSV。

**酶联免疫吸附试验(ELISA)**:是用固相载体作为免疫吸附剂,仍保持其免疫活性,方法很多,最常用的是间接法和双抗体夹心法。

ELISA检测病毒抗原,并用辣根过氧化物酶标记抗体,底物一般用邻苯二胺。用抗病毒抗体包被,加待测标本,加抗病毒抗体,加酶标记第2抗体,加底物,最后加硫酸终止反应。显色程度用分光光度计测定,一般OD值大于或等于阴性对照平均值的2~3倍为阳性。国外自1986年起用此法检测RSV,其特异性和敏感性与病毒分离及免疫荧光相比均在90%以上。ELISA容易自动化,标本处理简单,已成为常用的快诊方法之一。

**放射免疫技术** 用同位素标记抗体,应用放射免疫测定法进行检测,具有敏感性高,判定结果客观的优点,国外有人用于鼻咽分泌物RSV的检测。但本法需特殊仪器,且同位素对人体有害,限制了该法的使用范围。

**单克隆抗体与免疫学技术相结合** 中国学者采用免疫荧光、免疫酶技术在80年代获得的阳性检出率处于世界先进行列,但是由于使用常规抗体,不能做病毒型的诊断。单克隆抗体(McAb)较常规抗体更为特异,具有型特异性。现已制备出AdV、RSV、流感病毒和副流感病毒的McAb,取代上述方法中的常规抗体,用于可检测标本中的病毒抗原,可代替中和试验鉴定AdV的型别。

**应用电子显微镜直接观察病毒颗粒** 有人用电镜成功地找到鼻咽分泌物的黏粘病毒颗粒,达到快诊目的,但比较困难,有发展前途的是用免疫电镜检查病毒。目前只有少数单位具备开展此项技术的条件。

**检测病毒的核酸**:(1)核酸分子杂交技术是分子生物学的一项新技术,根据待测病原体某一DNA片段的序列制备一条寡核苷酸链做为探针,用同位素标记,在一定条件下与待检标本中相应病原体中的核酸单链据碱基互补原则杂交,经放射自显影而检出特异性核酸序列而明确诊断。此技术较特异和敏感,但因使用同位素,应用受限。目前正在研究非同位素标记物。(2)多聚酶链反应(PCR)技术是近年发展起来的快速体外基因扩增技术。自1985年Saiki首先描述PCR以来,已在很短时间迅速进入医学各个领域,在检测病毒DNA或RNA方面其敏感性高于探针分子杂交。其基本原理为根据待检病毒的DNA序列,合成一对寡核苷酸引物,提取标本中待检病毒的DNA做为模板,高温变性,成为单链,低温退火与引物特异性相结合,在DNA多聚酶和四种碱基存在及中温条件下,以引物为起点,按碱基互补原则沿5'~3'方向延伸扩增出新的DNA拷贝,这样经变性、退火、延伸的循环,可将标本中极微量的病毒DNA扩增数百万倍,PCR产物可经凝胶电泳而检出。其特异性由引物的序列决定。

中国学者应用AdVDNA早期蛋白基因(E1)区域的引物检

测了引起肺炎的 AdV<sub>1</sub>E<sub>1</sub> 基因,在几乎所有血清型的 AdV 都比较稳定,并且 DNA 序列基本一致,扩增的 S<sub>co</sub>bp PCR 产物在 2% 的琼脂糖凝胶电泳上可显示出一条非常清楚的 DNA 带,在 85 份标本中有 31 份 PCR 阳性(36.5%),有 52 份标本同时分离出病毒,并分离出 20 株 AdV(38.5%),而这 52 份标本中有 24 份 PCR 阳性(46.2%)。PCR 比病毒分离敏感快速,只要标本中有 AdV,不论其有无感染性,均可用 PCR 检测到,而病毒分离只能检测到活病毒,PCR 还特别适用于检测一些难培养的缺损病毒,如肠道 AdV。

检测病毒抗体主要是测定血清中特异性 IgM,因为 IgM 抗体的出现较早,消失较快,若 IgM 阳性可说明是新近感染。(1)应用已知抗原涂片+待检血清+荧光素标记抗人 IgM(M 链特异性)NIgG,此法需要去除过量的特异性 IgG 和类风湿因子。(2)直接 ELISA-IgM 法:抗人 IgM 的 IgG 包被+待检血清+酶标记抗原+底物。(3)IgG 抗体捕获法:抗人 IgM 的 IgM 包被+待测血清+已知抗原+酶标记抗病毒抗体+底物。本法操作简单、快速、敏感性高,有利于早期诊断。有研究资料表明,RSV 特异性 IgM 在病后第 1 天即可测出,阳性反应全部出现在病后 10 天以内,与中和试验符合率达 88.5%。

其他快速诊断方法有气相色谱技术,是使样品的气流通过一固定相,从而使其中各种不同组分得以分离的一种技术,然后用全相色谱检测仪检测。已有人应用裂解全相色谱法(PGC)诊断流感病毒,该法快速灵敏,可自动化。

参考文献

- 1 付文永,等.免疫荧光技术在呼吸道合胞病毒性肺炎的快速诊断上的应用,中华微生物学与免疫学杂志,1982,2(4):256
- 2 付文永,等.免疫酶标抗体法检测肺炎患儿咽分泌物病毒抗原的研究,中华医学杂志,1982,62(9):524
- 3 陈远耀,等.分泌抗 3,7 型腺病毒单克隆抗体杂交瘤建立,兼论免疫酶组织化学筛选的应用,中国免疫学杂志,1985,1(4):10
- 4 Fu Wenyong, et al. Monoclonal Antibody Technique in Detecting Adenovirus Antigen of Virus Pneumonia in Children Chinese Medical J, 1987, 100(5):384
- 5 Krasinski, et al. Screening for respiratory Syncytial Virus and assignment to a cohort at admission to reduce nosocomial transmission J Pediatr, 1990, 116(6):894~898
- 6 郑永晨,等.聚合酶链反应检测婴幼儿肺炎和腹泻标本中的腺病毒 DNA,中华儿科杂志,1992,30(2):105

(白求恩医科大学一院儿科傅文永教授撰)

**病毒性肝炎 viral hepatitis** 是由肝炎病毒引起的传染病,分甲、乙、丙、丁、戊 5 型。以纳少、恶心、乏力、肝肿大及肝功损害为特征,部分患者出现黄疸。大多在 6 个月内恢复健康;少数乙、丙、丁型肝炎演变成慢性,部分发展为肝硬化,与原发肝癌的发生密切相关;极少数呈重症经过。传染性强,流行面广,危害性大。

两千多年~密切关系,以后将其定名为 HDV(丁型肝炎病毒),其所致发的肝炎称为丁型肝炎。1974 年,Prince 等首次报道非甲非乙型肝炎病例之后,丙型肝炎引起了世界的注目。1989 年,美国 Chiron 公司首先成功地从受感染的黑猩猩的血液标本中克隆了丙型肝炎病毒(HCV)cDNA;同年,Kuo 等人应用重组酵母合成的 HCV 抗原,建立了抗-HCV 放免试验和酶免疫试验,为丙肝的研究开辟了全新的领域。1983 年,Balayan 等首先用免疫电镜(IEM)从 1 名实验感染戊肝病病毒(HEV)的志愿者粪便中发现 27~30nm 病毒样颗粒,并实验感染食蟹猴成功。1989 年,Reyes 等应用分子克隆技术,获得戊肝病病毒的基因克隆。在 1989 年 9 月日本东京国际非甲非乙型肝炎学术会议上已分别被命名为丙型肝炎和戊型肝炎。现今病毒性肝炎分类已分为 A、B、C、D、E5 种,见下表。

表 1 病毒性肝炎的演变及其病毒

| 旧病名   | 至今病名         | 今后病名   | 病毒  |
|-------|--------------|--------|-----|
| 传染性肝炎 | A 型肝炎→       | A 型肝炎→ | HAV |
|       | 非 A 非 B 型肝炎→ | E 型肝炎→ | HEV |
| 血清型肝炎 | B 型肝炎→       | B 型肝炎→ | HBV |
|       | 非 A 非 B 型肝炎→ | C 型肝炎→ | HCV |
|       | δ 肝炎→        | D 型肝炎→ | HDV |

病原学:(1)甲型肝炎病毒(HAV)是微小核糖核酸(RNA)病毒,已被命名为肠道病毒 72 型,直径 27nm,由 32 个壳粒组成 20 面体对称核衣壳,无包膜,内含单股 RNA,由 7 500 个核苷酸组成,煮沸 5min,置 1mg/L 的氯中 30min,紫外线照射 1h,1:4 000 福尔马林 37℃ 72h 可灭活。抗-HAVIgM 仅存在于起病后 12 周内,是近期或现症感染指标;抗-HAV IgG 出现迟,提示以往感染,大多数成人均阳性,可保持多年。(2)乙型肝炎病毒(HBV)为嗜肝脱氧核糖核酸(DNA)病毒,又称 Dane 氏颗粒,直径 42nm,分外壳和核心两部分。外壳含表面抗原,本身并无传染性;核心部分含有核心抗原(HBcAg),e 抗原(HBeAg)、DNA 多聚酶(DNA-P)、环状双股 DNA,是病毒复制的主体。HBV 基因组又称 HBV-DNA,含 3 200 个碱基对,分为正(S)、负(L)两链。有 3 个抗原抗体系统,①HBsAg 及抗-HBs:HBsAg 存在于 Dane 氏颗粒表面及小球、管状颗粒中,免疫或感染机体后可产生相应的抗-HBs。HBV 感染后 3 周血中开始出现 HBsAg,急性病人至少持续 5 周,最长可达 5 个月,慢性肝病(慢肝、肝硬化、肝癌等)和无症状携带者可持续多年,无传染性,有抗原性,是 HBV 存在的间接指标;除血液外,还存在于各种体液和分泌物如唾液、尿液、精液之中。抗-HBs 见于 HBV 感染恢复期(HBsAg 消失数周后),是一种保护性抗体,可保持多年。②HBcAg 及抗-HBc:HBcAg 只存在于乙型肝炎的核心部分和受染的肝细胞核内,不游离地存在于血液中,刺激机体能产生抗-HBc,具有感染性,也有抗原性,是病毒存在和复制的直接指标;出现于乙肝潜伏期末、急性早期和有病毒复制的慢性乙肝及乙型肝炎携带者体内。抗-HBc 无保护作用,不表示有免疫力,可保存多年。抗-HBcIgM 阳性表示有病毒复制,是现症感染的标志;抗-HBcIgG 阳性提示以往感染。③HBeAg 及抗-HBe:HBeAg 一般仅见于 HBsAg 阳性血清中,出现稍后于 HBsAg 而消失则较早,它与 DNA P、HBV-DNA 密切相关,是病毒复制和传染性的重要指标。抗-HBe 紧接着 HBeAg 的消失而出现在血液中,是感染进入后期,复制减少与传染性降低的标志。(3)丙型肝炎病毒(HCV),即经体液传播的非甲非乙型肝炎病毒,直径 50~60nm,含有类脂外膜,对氯仿敏感,属于黄病毒类,基因组含有 9 416 个(10kb)核苷酸的单链 RNA。有大约 9 033 个核苷酸构成的开放阅读框架(ORF),能编码一个长约 3 034~3 010 个氨基酸,核苷酸分析显示,5'端为结构基因组,3'端为非结构基因组。主要经血液和血制品传播。丙肝特异诊断方法包括 EIA、RIA 检测抗-HCV,PCR 检测 HCV-RNA,免疫印迹试验分析 HCV 抗体和免疫组化技术检测肝组织中 HCV 抗原等。目前检测抗-HCV 的 ELISA 试剂盒所用的抗原分别来自重组基因多肽片段或人工合成肽片段,均不能代表 HCV 抗原的全部免疫学特征,有不同程度假阳性或假阴性,需要通过 HCV 酶免疫(EIA)确认试验盒进行确认试验予以确认。可以检出血清中的抗-HCV。急性自限性 HCV 感染者,抗 HCV 阳性率较低,病程中效价逐步下降,康复后阴性,一般无传染性;慢性 HCV 感染者具有持续高效价抗-HCV 阳性,提示病毒复制与传染性强。抗-HCV 不代表过去感染或免疫能力的建立。(4)丁型肝炎病毒(HDV)又名 delta 病毒,为一种缺陷 RNA 病毒,内含 1680 个核苷酸,直径 35~37nm,依赖 HBsAg 作为衣壳才能复制,故与 HBV 同时或重叠感染。标志物有 HDAg、抗-HD、抗-HDIgM、HDV-RNA,仅在 HBV 感染者肝细胞、血液及体液中检

出。(5)戊型肝炎病毒(HEV)即经粪-口途径传播的流行性非甲非乙型肝炎病毒,无包膜,直径32~34nm,基因组大小为7.6kb,是具有多聚腺苷酸的单链RNA,沉降系数为138s,对氯化铯敏感,属杯状病毒科。急性期血清抗HEVIgM阳性,恢复期抗HEV阳转。

流行病学:(1)传染源:是病人和病毒携带者。其中甲、戊型肝炎是急性病人和亚临床感染者,自潜伏期末至发病后10天传染性较大,很少引起慢性携带状态。急慢性病人和无症状携带者是乙、丙、丁型肝炎的传染源,其中以慢性病人和慢性带毒者为最重要。中国乙肝病毒慢性携带者占人群的10%~15%,丙型肝炎较乙型肝炎更易转慢性(约50%),抗-HCV人群携带率可达3%~7%。1989年全世界约有1亿丙型肝炎病毒的慢性携带者,美国和西欧每年增加的新病例数约超过17.5万例,日本每年新发病例约35万例,中国和中东地区携带者则更多。(2)传播途径:甲、戊型肝炎主要经粪-口途径传播(水或食物型)。如1988年春上海市民因食不洁毛蚶引起甲型肝炎暴发流行,发病达32万人之多;1986年9月至1988年9月新疆南部地区因水源污染暴发国内罕见的戊型肝炎流行,截至1988年3月累计发病12.2万多例。乙、丙、丁型肝炎主要经血液途径传播(经皮接种、输血及血制品等),其次经口感染(日常生活接触经唾液→口、血→口、尿→口传播)、母婴传播、性接触传播等。国外资料表明,当前输血后肝炎90%为丙型肝炎,10%为乙型肝炎。中国因单采浆还输血细胞过程中血液交叉污染和输入美国进口的第Ⅳ因子引起两次丙型肝炎暴发流行;在供血员筛选检测中报告不一,上海市为0.2%,北京地区为2.1%,个别地区可高达30%甚至70%以上。(3)易感者:普遍易感,青少年多;病后产生免疫力,但各型无交叉免疫;隐性感染不少,成人大多数甲型肝炎抗体阳性。(4)流行特征:我国和东南亚、非洲各国是病毒性肝炎的高发区域。甲型肝炎儿童及青年多见,好发于秋冬,水或食物型流行暴发,黄疸型多。戊型肝炎类似甲肝,多见于亚、非洲发展中国家,青壮年多见,90%以上发生于雨后或洪水后水污染时暴发流行,10%散发,孕妇发病率高、症状重、病死率高是其特点,多数地区发病率为1%~3%。乙型肝炎发病集中于儿童及青少年,无季节性,多为散发,常呈家庭聚集现象。丙、丁型肝炎基本同乙型肝炎,但丙型肝炎多见于发达国家。90%以上的输血后肝炎及30%的与血制品有关的散发性肝炎由HCV引起;丁型肝炎感染率以意大利南部最高,达59%,日本为10%,Farci报告小儿乙肝的HDV感染率为12.5%。国内HDV感染率为1.85%~12.66%之间,西南地区较高。

发病原理:极为复杂,尚未十分明了,可能与下列因素有关:(1)病毒直接伤害。甲、丁及非甲非乙型肝炎病毒具有溶肝细胞作用,肝细胞的病变是这些病毒在肝细胞内大量复制的直接后果。(2)免疫反应。乙型肝炎病毒属非溶肝细胞病毒,其发病与免疫反应有关,目前证实乙肝有特异性及非特异性细胞免疫反应和细胞毒T细胞(Tc)对感染细胞的杀伤作用。免疫反应强烈可能发生重型肝炎,乙肝患者的肝外表现与相应的循环免疫复合物(CIC)有密切关系。(3)微循环障碍:免疫复合物激发的Arthus反应可引起微循环障碍,内毒素血症又加重障碍,肝细胞发生缺血性坏死。肝炎的基本病理变化是肝实质细胞的水肿、坏死和炎细胞浸润等,各型肝炎各有其相应特征,如急重肝之大块坏死。

诊断依据:(1)流行病学特点:①有肝炎密切接触史或输血、血制品或有消毒不严的药物注射、接种、针刺史;②水或食物型流行暴发;③儿童及青少年多见。(2)临床特点:潜伏期:甲型肝炎2~6周,乙型肝炎6周~6月,丙型肝炎2~26周,戊型肝炎15~75d,平均36d。(3)区别要点:甲型肝炎起病较急,黄疸型多,不转慢性,预后较好,无症状感染常见;乙型肝炎隐匿起病,无黄疸多,易转慢性,预后较差,临床表现多样化(慢活肝、肝硬化),有慢性携带状态;丙、丁型肝炎似乙型肝炎,戊型肝炎类似甲型肝炎。(4)临床类型:①急性黄疸型肝炎:病程2~4月,可分3期:黄疸前期(1周左右)有畏寒发热、少数高热起病,明显乏力、纳

少、恶心、厌油甚至呕吐,ALT已开始上升;黄疸期(2~6周)热退见黄疸(眼、皮、尿黄),黄疸出现后乏力、纳少迅速改善,肝肿大压痛、叩击痛、脾轻大,SB升高、ALT升高;恢复期(2周~4月,平均1月)上述症状、体征逐渐消失,肝功能恢复正常,但常伴持续较长时间的肝区隐痛。②急性无黄疸型肝炎:最常见,较轻,与黄疸型之黄疸前期表现相似;肝肿大压痛,少数伴脾轻大;ALT升高。③慢性迁延型肝炎:有确诊或可疑肝炎病史,病程半年以上未愈,病情较轻,不够诊断慢活肝者。④慢性活动型肝炎:既往有肝病史,目前有较明显的肝炎症状,肝肿大,质中偏硬,伴有面色灰黑、肝掌、蜘蛛痣、脾肿大或伴黄疸等慢性肝病表现;肝功持续异常,部分IgG,自身抗体持续升高;肝外损害表现如关节炎、肾炎、脉管炎、皮疹、干燥综合征等。⑤急性重型肝炎:急黄肝起病10d内患者出现肝昏迷、肝缩小、出血倾向、肝肾综合征、肝臭、鼓肠、腹水者;酶-胆分离,PT显著延长;多于2周内死于肝衰竭。⑥亚急性重型肝炎:急黄肝起病10d以上而出现上述表现,但肝昏迷多见于后期;多在数周或数月内死亡或发展为坏死后肝硬化。⑦慢性重型肝炎:表现同亚重肝,但有慢活肝或肝硬化的病史、体征及严重肝功损害。⑧郁胆型肝炎:主要表现为较长期(2~4月或更长)肝内梗阻性黄疸,如皮肤瘙痒、大便颜色变淡、明显肝肿大及梗阻黄疸化验结果,自觉症状较轻。⑨肝炎后肝硬化。(5)病原诊断:①甲型肝炎:血清抗-HAVIgM阳性或血清抗-HAV滴度有4倍增长或大便中检出或分离出HAV者,可确诊为急性甲型肝炎。②乙型肝炎:血清HBsAg、HBeAg、HBcAg、DNA~P、HBV~DNA、抗-HBc IgM中有1项阳性或抗-HBc滴度超过1:80或抗-HBs阳转或滴度有4倍增长者可诊断现症HBV感染。仅抗-HBs、抗-HBe或低滴度抗-HBc阳性者,可诊断为过去HBV感染或感染后期。③其他:丙肝血清抗-HCV阳性者;丁肝血清抗-HDIgM阳性或抗-HD阳性或HDAg阳性或抗HDV-RNA阳性者;戊肝血清抗-HEVIgM阳性或抗-HEV恢复期阳转或大便检出HEV者为现症感染。

预后:(1)急性肝炎患者尤其甲、戊型肝炎患者大多在3~6月内恢复,很少发展为慢性;乙、丙、丁型肝炎易转慢性,慢活肝较慢迁肝预后差,是肝硬化和肝癌的主要原因。急性丙型肝炎约50%转为慢性,其中20%~30%发展为肝硬化,肝癌患者HCV的阳性率为65%~70%,HBV为45.65%。日本报道,肝硬化患者抗-HCV阳性率为66.7%,肝癌为76.2%。国内外学者都认为有HDV者大多为慢活肝,部分为肝硬化或肝癌患者。(2)急性肝炎病程中过劳、饮酒、应用损肝药物、妊娠后期妇女及HBV与HDV、HBV与HEV同时或重叠感染易转为重型肝炎;重型肝炎预后尤差,病死率在70%以上,幸存者也常发展为坏死后肝硬化;感染HEV的孕妇病死率高达20%。

治疗要点:目前无特效治疗办法,治疗原则为:(1)急性肝炎:①以休息、营养为主;②辅以适当药物;③避免饮酒、过劳和使用损肝药物,各临床类型重点有所不同。(2)急性肝炎:①隔离休息,给易消化、多维生素的清淡饮食,明显纳少伴呕吐者给10%葡萄糖及维生素C静滴;肝功正常后仍应休息1~3个月,再随访巩固1年。②护肝药物,包括维生素C、B、E和益肝灵、垂盆草糖浆或冲剂、护肝片、齐墩果酸、肝炎春冲剂、复方益肝灵等2~3种联合应用,必要时用联苯双酯滴丸口服降酶有效;当归丸、乌鸡白凤丸、蚕蛹粉等口服降酶油;门冬酸钾镁20~40ml加在10%葡萄糖250~500ml每日静滴退黄,鲁米那或强的松用于郁胆型肝炎。(3)慢性肝炎:①适当休息,给高蛋白饮食,护肝药物同急性肝炎,好转后注意动静结合,恢复期逐渐增加活动,但要避免过劳。②免疫调节治疗:免疫增强剂适用于免疫缺乏或细胞免疫低下的慢活肝,常用胸腺肽(素)、转移因子、免疫核糖核酸、辅酶Q<sub>10</sub>、白细胞介素I、黄芪等;免疫抑制剂适用于HBsAg阴性及(或)有自身免疫现象的慢活肝,常用强的松(30mg/d)+硫唑嘌呤(50~100mg/d)口服,黄疸下降、症状好转后逐渐减至前者(5~10mg/d)+后者(25~50mg/d)维持3~6个月或更久。③抗病毒治疗:适用于HBsAg、HBeAg、抗-HBc持续阳性的慢性乙

型肝炎、丙型肝炎及丁型肝炎。常用 $\alpha$ 干扰素或重组干扰素( $1\sim 3$ ) $\times 10^6$ U/d,肌注,45~90d为1疗程,近期HBsAg转阴率达40%~50%,远期仅25%左右,HBsAg阴转在10%以内,病毒已经与宿主细胞整合者无效;第7次国际病毒性肝炎会议推荐治疗丙肝,开始 $5\times 10^6$ U每周3次,以后减至 $3\times 10^6$ U每周3次,肌注,疗程6~12月,停药后复发率高。单磷酸阿糖腺苷( $10\sim 15$ mg/(kg·d)静滴,疗程30d,与干扰素联用可增强抗病毒作用)、无环鸟苷( $10\sim 15$ mg/(kg·d)静滴,疗程1~2月或口服阿昔洛韦片0.2,5次/d,疗程2月有一定效果)等。有资料表明,上述抗病毒药物与免疫增强剂如胸腺肽合用,较为理想。(4)重型肝炎:①监护及支持疗法:严格卧床,专人护理及监护,给高糖、低脂、低蛋白饮食,适量补充10%葡萄糖、维生素B族、维生素C、维生素E、维生素K等,热量每日5020~6694kJ及时纠正常有的低钾、低钠、低血糖及水代谢障碍,每日液量在1500ml左右。②免疫调节治疗:胸腺肽每日8~20mg加入10%葡萄糖中静滴,改善T细胞功能,提高疗效;急重肝黄疸急剧加深者可早期、小量、短疗程的使用强的松30mg,早8h1次服或地塞米松5~10mg/d静滴。③防止肝细胞坏死,促进肝细胞再生:早期、多次输新鲜血浆(每次100~200ml)、人体白蛋白(每次50~100g/L);早期应用胰高糖素1mg、胰岛素5~10u加于10%葡萄糖250ml静滴,每天1次,疗程10~20d;前列腺素E<sub>1</sub>(PGE<sub>1</sub>),有报告每日50~150ug加入10%葡萄糖100~200ml静滴,疗程2周,治疗重肝20余例,存活率60%以上;人胎肝细胞(FLC)疗法,据报道经病理证实为重症肝炎20例,存活12例(60%);最近有用肝细胞生长因子(HGF)20mg,肌注,2次/d,疗程20~30d或20~120mg/d加入10%葡萄糖内静滴,共2周,病情稳定后减半量,总疗程1个月,获得良好结果。④改善微循环,可用654-2,小剂量莨菪(每日25mg)加入10%葡萄糖250ml中静滴;早期、小剂量肝素0.5~1.0mg/kg·次加10%葡萄糖内静滴,每日1~2次防治DIC有效。⑤抗病毒治疗:国内外报道用干扰素( $1\sim 5\times 10^6$ U/d肌注,2~4周)、磷甲酸钠(国外Price先后报告9例暴发型乙肝,其中5例合并丁肝,治疗后6例存活,剂量1.7mg/(kg·d)静滴,疗程2~10d)有一定疗效。⑥解除肝昏迷:支链氨基酸或肝安注射液250ml静滴,每日1~2次;降血氨用谷氨酸钠40~80ml、乙酰谷酰胺200~1000mg加入10%葡萄糖250~500ml静滴,每天1次;脑水肿、脑疝用20%甘露醇125~250ml静注,亦可加用速尿。⑦制止出血:输新鲜血、血浆,维生素K<sub>1</sub>20~30mg/d静滴,凝血酶原复合物400U/d加10%葡萄糖200ml静滴,消化道出血服凝血酶2000U,4~6次/d、雷尼替丁150~300mg/d及甲氧咪呱0.4/d静滴效果好。⑧消除腹水:补充白蛋白同时,给双克、安体舒通,必要时加速尿为好。⑨控制感染,细菌未明确时,自发性腹膜炎首选氧哌嗪青霉素+新青I+0.2%灭滴灵静滴,肺炎用氧哌嗪青霉素+磷霉素钠+丁胺卡那或新青I,败血症用新青I+氧哌嗪青霉素+磷霉素钠,特别危重者酌用第3代头孢菌素(先锋必、菌必治、复达欣)+万古霉素。⑩肝肾综合征,可给多巴胺扩张肾动脉,必要时用速尿。⑪人工肝:肝衰竭时,对体内累积的有害物质可用聚丙烯腈(PAM)膜行血液透析,“人工细胞膜”包裹活性炭灌流、树脂灌流及全血浆交换等方法去除,此法可提高肝昏迷苏醒率,但存活率不满意。近年研制出生物学人工肝,用同种全肝灌流的存活率有所提高。但取材困难,应用有限。新鲜肝组织片、冰冻组织小块灌流,肝细胞悬液作血灌流或透析,以及对分离肝细胞、肝微粒体、多酶复合体作人工细胞膜包裹等研究均在进行中,尚未应用于临床。⑫肝移植:近年国外应用肝移植手术治疗重肝,取得较好疗效。治疗成功病例,意识1周内恢复,黄疸渐消,转氨酶渐下降,病情好转后1个月左右可出院,继续在家休息及作免疫治疗,远期疗效在观察中。

预防,应采取以切断传播途径为重点的综合性预防措施;保护易感人群用甲肝疫苗(灭活、基因工程、减毒活疫苗3种)、乙肝疫苗(血源、基因工程的重组HBV~DNA、酵母菌提取的重组乙

肝疫苗3种)注射预防甲、乙型肝炎,阻止母婴传播对新生儿用乙肝免疫球蛋白(HBIG200IU/次,皮下注射,出生当时和生后两周共两次)+乙肝疫苗(间隔半个月以20 $\mu$ g/次0.1、6、方案皮下注射)保护效果好,3~4年后加强。

病毒性肝炎波及全球,对人类危害极大,控制其蔓延的根本出路在于研制各型肝炎疫苗。由于甲、乙型肝炎疫苗的开发和临床试用,使这两种病毒感染的预防将获得有力的手段,丙型肝炎及丙型肝炎后的肝硬化与肝癌已成为特别是突出的问题,对供血员筛选,排除ALT升高及抗-HCV阳性供血员,制备高效价的HCIG和HCV疫苗已刻不容缓。对各类肝炎特别是重型肝炎发病机理的基础研究,汇总全部信息设计消灭嗜肝DNA病毒、丙型肝炎病毒及丁型肝炎病毒慢性感染的策略,提高重型肝炎患者的存活率,继续人工肝和肝移植的研究都将是今后的主要工作。预计不久将会取得突破性进展。

#### 参考文献

- 1 沈耕荣,等.中华传染病杂志,1988,6(2):81~84
- 2 Hoofnagle JH. JAMA,1989,261:1321~1325.
- 3 彭文伟,主编.传染病学(第3版).北京:人民卫生出版社,1990.15~32
- 4 Choo QL, et al. Br Med Bull,1990,46:423~441.
- 5 Rloando N, et al. Hepatology,1990,11(10):49~53.
- 6 余鑫之,等.安徽医科大学学报,1991,26(3):188~189
- 7 庄辉.国外医学流行病学(传染病学分册),1991,18(6):241~247
- 8 Anna S F Lok, et al. Hepatology,1991,14:756~762.
- 9 Patrick Marcellin, et al. Hepatology,1991,13:393~397.

(安徽医科大学第一附属医院余鑫之教授撰)

**输血后肝炎** 接受含肝炎病毒的人血液及其制品后发生的肝炎。70年代以来,输血后非甲非乙型肝炎发生率为8%~17%,其中输血后乙型肝炎约20%,输血后非甲非乙型肝炎约80%。自1989年发现丙型肝炎病毒(HCV)后,美国等国家相继报告有丙型肝炎流行。

采用丙型肝炎病毒抗原(CI00~3)检测相应抗体(抗HCV抗体)的结果,证实原来诊断为输血后非甲非乙型肝炎中至少半数以上实为丙型肝炎病毒感染。从此,由HCV引起的输血后肝炎已成为全球最热点的研究项目之一,这对肝炎发生率偏高的亚非地区尤其具有重要意义。

1989年以前,由于对非甲非乙型肝炎缺少特异的血清学诊断方法,几乎把输血后乙型肝炎以外的肝炎都归入输血后非甲非乙型肝炎。1982年阿尔特(H. J. Alter)报道,在美国输血后非甲非乙型肝炎占总输血后肝炎的比例变动于87%与94%之间,其发生率介于6.6%与15.8%之间。1983年中国朱晓枫等随访观察563例内,外科经输血治疗的住院病人,发现确诊及疑似的输血非甲非乙型肝炎发生率为6.0%。

输血后非甲非乙型肝炎发生率强度与供血者血清ALT值和血清抗-HBc阳性关系密切。1982年霍林格(F. B. Hollinger)等指出,输进的血液中所含ALT值愈高,输血后非甲非乙型肝炎的发生率愈高。1981年史蒂文斯(C. Stevens)用RIA法测定4721年供血者的抗-HBc标志,抗-HBc阴性血中8.2%发生输血后非甲非乙型肝炎,抗-HBc阳性血中却发生26.5%,后者3倍高于前者。如果同供血者ALT值联系分析,ALT值低于45IU/L的抗-HBc阴性血中有6.3%,阳性血中有17.4%;ALT高于45IU/L的抗-HBc阴性血中有27.1%,阳性血中有61.5%发生输血后非甲非乙型肝炎。此外,受血者的输血后肝炎发生率也与受血量相关。根据前瞻性观察,接受1~3单位血液的受血者,其输血后肝炎发生率为5.0%,接受10单位以上者为27%( $P<0.05$ )。

表1 不同研究者报告的输血后非甲非乙型肝炎(美国)

| 研究者        | 受血者   |           | 输血后      |      | 输血后非甲非乙型肝炎 |          |
|------------|-------|-----------|----------|------|------------|----------|
|            | 人数    | 肝炎数(%)    | 乙型肝炎数    | 肝炎%  | 乙型肝炎发生率%   | 乙型肝炎发生率% |
| Knodell    | 279   | 47(16.8)  | 44       | 93.6 | 15.8       |          |
| Aach 自愿供血者 | 385   | 29(7.5)   | 26       | 89.7 | 6.6        |          |
|            | 所有供血者 | 595       | 75(12.6) | 65   | 86.7       | 10.9     |
| seelf      | 539   | 38(7.0)   | 36       | 94.7 | 6.7        |          |
| 植田         | 1082  | 119(11.0) | 111      | 93.3 | 10.3       |          |
| Alter      | 728   | 58(8.0)   | 54       | 93.1 | 7.4        |          |
| Hollinger  | 1533  | 171(11.2) | 156      | 91.2 | 10.2       |          |

自1989年以来丙型肝炎(CH)的研究进展迅速。许多国家相继采用C100~3酶联免疫试剂盒筛选抗-HCV抗体,对输血后非甲非乙型肝炎的病因、流行病学、治疗和预后等提供了大量科学依据。现已知欧美国家供血员的抗-HCV阳性率均不超过1%,美国筛检15871名供血员,阳性率为0.4%,法国筛检25137名供血员为0.68%,日本筛检5422635名供血员为1.15%。至于正常人群抗-HCV阳性率,各国情况不一,法国各地介于0.52%~0.81%之间,日本为1.41%,中国东北三省为1.3%。丙型肝炎是目前波及全球的传染病,约80%~90%的输血后非甲非乙型肝炎系由HCV所引起,美国、西班牙、荷兰的输血后非甲非乙型肝炎中抗-HCV阳性率为44%~100%,德国、意大利的输血后慢性肝炎中抗-HCV阳性率为62%~100%,中国湖北报告输血后非甲非乙型肝炎的抗-HCV阳性率为71.4%。1989年矢野等报道,日本95%以上的非甲非乙型肝炎系由HCV所致,有输血史者占82.2%,无输血史者仅占5.8%。同作者在研究关于慢性肝病抗-HCV阳性率与HBsAg和输血史之间的关系中指出,HBsAg阴性者中有和无输血史者之间的抗-HCV阳性率差异不明显(78.4%对76.6%),而HBsAg阳性者中有输血史者的抗-HCV阳性率显著高于无输血史者(62.5%对5.8%),表明日本的大部分输血后非甲非乙型肝炎为输血后丙型肝炎。1990年西冈等证实,在抗-HCV抗体阳性的慢性肝炎、肝硬化和原发性肝癌病人中各有48.8%、40.3%和39.6%于患病前的数年或数十年前接受过输血。1989年范登堡(Van der poel)等根据配对对照研究指出,输血后非甲非乙型肝炎病人的供血4.6%为抗-HCV阳性,对照者供血全部阴性,上述资料都确切证明抗-HCV阳性血明显与发生输血后丙型肝炎有关。输血后的乙型肝炎与丙型肝炎在年龄分布及预后方面有着很大差异。1989年井上等就173名输血后慢性乙型肝炎和124名输血后慢性丙型肝炎病人确诊时的年龄与长期预后情况进行观察,乙型肝炎的确诊始于20岁以下者25例,25~30岁者最多,丙型肝炎无一例小于20岁,以40岁以上者最多,而且年愈越大,预后愈差,转成肝硬化者亦愈多。

输血后乙型、丙型肝炎均以血液为媒介传播,不仅可引起急性肝炎,且常常成为慢性肝炎或病毒携带者,同时也是演变肝硬化和原发性肝癌的重要原因。因此输血后丙型肝炎与肝癌的关系受到特别重视。在输血后或散发的抗-HCV阳性急性肝炎中80%表现为慢性化经过。同时检查HBsAg阳性的慢性肝炎262例,肝硬化159例和肝癌105例,其抗-HCV抗体阳性率分别为76%、67%和76%提示丙型肝炎病毒感染与慢性肝炎、肝硬化和肝癌有着极密切的联系。此外,供血员抗HCV抗体阳性与ALT和抗-HBc的关系也引人注目,1990年摩根(C. Morgan)等认为ALT值升高的供血员,尤其ALT值高于100IU/L者,其抗-HCV抗体阳性率为24%,如果抗-HBc抗体阳性同时并有ALT值升高,其抗-HCV抗体阳性率可达44%。丙型肝炎起病较隐蔽,患病后抗-HCV抗体出现时间较慢。1990年八桥等连续观察61例输血后丙型肝炎病人的抗-HCV抗体出现时间,抗-HCV抗体累积出现率在发病1个月时为36.1%,3个月时为70.5%,6个月时为85.2%,到12

个月时才达100%,因此,用酶联免疫试剂盒检测早期急性肝炎病人时,即使抗-HCV抗体阴性也不可急于否定,如欲否定丙型肝炎感染,至少要经过6~12个月的定期检测方可。

输血后肝炎的治疗目标在于防止急性病例慢性化和慢性病例继续演变为肝硬化和肝癌。1990年小候等用干扰素-β治疗11例急性输血后丙型肝炎,30天内静脉投与52Megaunits(MV),12个月后治疗组的4例,未治疗对照的14例病人全部仍肝功能异常,治疗组中3例抗-HCV抗体阴转并肝功能正常,对照组却无一例抗-HCV阴转。将抗-HCV抗体检测列为供血者血液常规筛选是预防输血后丙型肝炎和防止演变为肝癌的最基本对策。目前美国、日本、英国和比利时等已将抗-HCV的检测作为供血员筛选常规,并正在评价其可行性与经济效益。法国从1989年起不仅对输用血液作抗-HCV检测,并扩大到分级分离的血浆。由于抗-HCV抗体出现较晚,现用的C100~3抗原试剂盒不能早期发现病人,而且一次检测阴性也不能完全否定是HCV诊断。新近推出的聚合酶链式反应(PCR)技术,由于其敏感性可达到10fg水平,故能直接测出早于抗-HCV抗体的HCV RNA,有利于早期诊断,但此法操作复杂,且价昂,暂难推广。如前述,供血者ALT值和抗-HBc阳性增高,其抗-HCV阳性率也随之升高,因此,目前认为以ALT、抗-HBc和抗-HCV3项作为筛选供血者的指标,可望使输血后丙型肝炎减少至80%~90%。

1989年以来,输血后肝炎的研究虽已取得了突破性进展,但仍有一片亟待深探或开发的领域。现已发现1/3的输血后非甲非乙型肝炎不与HCV发生反应,提示是否可能有其他型肝炎病毒存在。全世界目前都致力于通过生物基因工程技术提高现行的酶联免疫试剂盒的敏感性和特异性;积极寻求防止慢性化和发展为肝癌的治疗药物;努力筹划健全供血者的系列管理对策,深入研究HCV结构以及研制开发丙型肝炎疫苗等研究,这些对今后预防或降低输血后丙型肝炎发生率无疑均有其深远意义。

(哈尔滨医科大学公共卫生学院尹德铭撰)

**病毒性心脏病的分子生物学研究** 病毒性心脏病(VHD)包括病毒性心肌炎(VMC)及VMC转化而致的扩张型的心肌病(DCM)。肠道病毒(EVs)与VHD关系密切,其中又以柯萨奇B组病毒(CVBs)及埃可病毒组最为明显。VHD临床诊断极难确定,其发病机制及治疗的研究因此难以深入。

心肌膜心肌活检(EMB)虽可证实VHD的病理改变,但因罕能分离到相关病毒,无法与其他心肌疾病鉴别。1985年德克(G. W. Dec)等证明在VHD流行性发病时,检测血清抗EVs抗体有助于病因学诊断。但多数情况下此类血清学方法交不即证实或排除心肌病毒感染研究。1984年特普西(S. Ttacy)及海皮埃(T. Hyypiä)同时尝试将分子遗传学技术用于EVs研究,以核酸杂交方法检测EVsRNA。后者科学家首次证明了诸多CVBs间上遗传学同源性。1988年沃纳(S. Werner)等以含CVB3基因组高保守区质粒转染细菌,合成CVB3蛋白,再用合成产物免疫动物,获得抗血清。结果发现此种抗血清对各种EVs的交叉反应谱远广于以EVs直接免疫动物所获得的抗血清,为以分子免疫学技术研究VHD打下基础。

多数EVs间RNA序列的同源性高达70%~80%,1990年克拉姆(W. Klump)等将CVB3RNA与已知的CVB1及CVB4RNA比较后,发现三者间核苷酸序列同源率为80%,而氨基酸序列同源性竟达90%。这种高度的遗传学同源性以某一EVs基因组的cDNA片断作为探针检测多种EVsRNA提供了理论依据。检测EVsRNA的分子遗传学方法包括敏感性不低,可测出 $3 \times 10^7 \sim 1 \times 10^6$ 个病毒RNA拷贝(相当于10pg)。1986年鲍尔斯(N. E. Bowles)等首先将打出点杂交方法用于临床VHD的诊断。他们后又证明经病理确诊的心肌炎及OCM患者中心肌日/SRNA检出率达35%~55%,而其他特异性心肌疾

病 EMB 标本杂交结果均为阴性。原位杂交可在原来细胞、组织环境中识别及鉴定病毒基因组,获得精确的组织细胞均为阴性。原位杂交可在原来的细胞、组织环境中识别及鉴别病毒基因组,获得精确的组织细胞学定位。1987 年坎朵夫(R. Kandolf)等在培养细胞中建立了 EVsRNA 原位杂交方法,交在小鼠 VMC 模型是证明其敏感性甚高,可测出 20 拷贝的 EVsRNA。到 1989 年,他们在 24.7%(23/93 例) VMC 及 16.7% DCA 患者 EMB 标本检出 EVsRNA,而 53 例其他心肌疾病患者 EMB 标本均未获阳性交信号。1991 年休林(U. Shönian)等以巨细胞病毒(CMV) cDNA 探针检测 VMC 及 DCM 患者 EMB 标本,发现部分患者心肌中存在 CMV 基本组,证实除 EVs 外其他病毒亦可引起 VHD。PCR 技术可大量扩增 DNA,扩增产物可直接测出。检测 RNA 时则需先以拟检测 RNAs 部分为模板合成 cDNA,再进入 PCR 循环。VHD 时心肌中病毒拷贝数往往很小,PCR 特异性扩增 EVsRNA,可能会提高检测敏感性及特异性。1990 年金(O. Jin)等以 PCR 方法检测 48 例拟诊 VMC 及 DCM 患者 EMB 标本,结果 5 例(10.4%)检出 EVsRNA。分子遗传学方法优点虽多,但仍未能在临床上取代免疫学方法。这主要是由于取材困难、操作复杂及多数临床实验室不具备条件。

将病毒蛋白通过分子克隆方法在细菌中表达,再用表达产物免疫动物,可获得抗病毒蛋白——特异性抗血清。1989 年沃纳等以该技术制备出两种抗 CVBs 结构蛋白为主的融合蛋白抗血清,并经免疫吸印证明这种抗血清可作用检测 EVs 的广谱试剂。1990 年福里斯(A. K. Foulis)等证实重组 CVBs 结构蛋白 VP1 抗血清原位免疫组化技术可检出实验中用到的所有 9 种 EVs。他们检测了 20 例尸解心肌标本(均疑死于 VMC),12 例获得阳性结果。

分子生物学研究提供了病毒直接伤心肌的证据。1987 年坎朵夫等以核酸杂交,显示 CVB3 性心肌炎小鼠模型中 CVB3RNA 明确定位于心肌细胞内。他们还观察到受感染细胞由心肌纤维化区域向未受感染区扩展,认为这是细胞—细胞间播散的结果。以抗重组 CVB3 结构蛋白 VP1 抗血清作免疫组化检测,亦发现含 VP1 心肌多伴有坏死。动物实验及临床资料提示心肌 EVsRNA 存在与否及受感染细胞量与心肌炎症轻重在相关性。

慢性 VMC 及 DCM 患者心肌中有持续性病毒感染:(1) 10%~50% DCM 患者心肌中检出 EVsRNA;(2) 对由心肌炎向 DCM 转化的患者进行的连续性检测,证实心肌中有 EVsRNA 持续存在;(3) 心肌 EVsRNA 阳性的患者既往多有符合 VMC 的病史。EVsRNA 如何在免疫正常的宿主中持续存在,意见尚不统一。但多数作者认为可能与控制 EVsRNA 复制的基因突变有关。1991 年霍亨纳德尔(C. Hohenadl)等以股特异性原位杂交,发现急性 CVB3 性心肌炎动物模型心肌中正股病毒 RNA 含量远大于负股含量。而 1990 年坎宁安(L. Cunningham)等在慢性疲劳综合征(一种慢性 CVBs 感染性疾病)患者肌内活检标本中发现正负两股 EVsRNA 含量几乎相等。他们认为病毒 RNA 两种互补股的等分子量合成可能抑制病毒—特异性产物的翻译,并提出这可能就是不装配感染性子代病毒及不引起炎症性反应的原因。VHD 对 EVsRNA 持续存在机制是否亦如此尚无定论。心肌中的 EVsRNA 持续存在的意义也不甚明了。但 DCM 患者心肌中能检出 EVsRNA,至少提示伴此种状态的 VMC 患者易于发展为 DCM。

自身免疫机制的 VHD 发病过程中的作用已基本肯定,分子免疫学技术则进一步拓宽了研究进路。1985 年以来,舒尔塞斯(H-P. Schultheiss)等致力研究抗 ADP/ATP 载体抗体与 VHD 的关系,认为该抗体在 VHD 发病机理中具有重要作用:(1) 60%~90% VHD 患者血清中可检出该抗体;(2) 60% 该抗体阳性的 DCM 患者血清中可抑制线粒体—细胞质 ADP/ATP 转运;(3) 经 ADP/ATP 载体免疫的动物离体心功能明显减弱;

(4) 该抗体与细胞膜表面的抗原决定簇有交叉反应。风湿热时 A 组链球菌 M 蛋白变异体 M5 含与心脏肌凝蛋白重链相似的抗原决定簇。1991 年纽曼(D. A. Neumann)等在研究可中和 CVB4 的单克隆抗体(McAb)时,发现该 McAb 可与心脏肌凝蛋白重链发生交叉反应,提示 VMC 病程中有与风湿热相似的自身免疫机制。以心脏肌凝蛋白重链免疫同种动物可诱发与 CVB3 性心肌炎相同的心肌病变。1989 年白塞尔(K. W. Baisel)等研究了可与肌凝蛋白重链反应的 McAb356-1 与 CVB4 的关系,发现 356-1 能与现 CVB4 结构蛋白 VP1 结合,认为分子似机制参与 VMC 发病过程。

VHD 至今尚无特效疗法。1989 年,岸下(C. Kishimoto)等研究了以基因工程方法生产的重组人白细胞干扰素至少 aA/D 对小鼠 VCM 模型的防治效果。发现在接种病毒前给药可有效抑制心肌中病毒复制,减轻心肌炎症反应。他们认为药在 EVs 感染流行时可能有益于预防 VMC 发病。1991 年施姆贝克(P. L. Schwimmbeck)等以人工合成肌凝蛋白重链或 ADP/ATP 载体的部分多肽吸附 VMC 或 DCM 患者血清,结果去除了 95% 以上的自身抗。

分子生物学技术为 VHD 的研究带来新的希望,若能用作常规诊疗方法可能会有利于改变 VHD 临床工作的紊乱状况,但其实用价值尚待实践证明。在 VHD 发病机制研究中若能同时使用股特异性原位杂交及原位分子免疫技术定量检测 EVsRNA 及结构蛋白,则会有助于阐明病毒持续存在的原因及其意义。以分子生物学技术监测心肌病毒基因组,指导 VMC 治疗,可能筛选出有效的抗病毒药,且可以剔除可能促进病毒复制的药。若以有将近的抗病毒药治疗心肌持续性病毒感染的患者,可能减轻慢性 VMC 患者病情,甚至减少 DCM 发病率。

#### 参考文献

- 1 Bowles N E, et al. Detection of coxsackie-B-virus-specific RNA sequences in myocardial biopsy samples from patients with myocarditis and dilated cardiomyopathy. *Lancet*, 1986, 1; 1120
- 2 Werner S, et al. Expression of coxsackievirus B3 capsid proteins in Escherichia coli and generation of virus-specific antisera. *DNA*, 1988, 7; 307
- 3 Schultheiss H-P, The significance of autoantibodies against the ADP/ATP carrier for the pathogenesis of myocarditis and dilated cardiomyopathy - clinical and experimental data. *Springer Semi Immunopathol*, 1989, 11; 15
- 4 Schulze K, et al. Antibodies to ADP-ATP carrier an autoantigen in myocarditis and dilated cardiomyopathy - impair cardiac function. *Circulation*, 1990, 81; 959
- 5 Cunningham L, et al. Persistence of enteroviral RNA in chronic fatigue syndrome is associated with the abnormal production of equal amounts of positive and negative strands of enteroviral RNA. *J Gen Virol*, 1990, 71; 1399
- 6 Tracy S, et al. Molecular approaches to enteroviral diagnosis in idiopathic cardiomyopathy and myocarditis. *J Am Coll Cardiol*, 1990, 15; 1688
- 7 Jin O, et al. Detection of enterovirus RNA in myocardial biopsies from patients with myocarditis and cardiomyopathy using egne amplification by polymerase chain reaction. *Circulation*, 1990, 82; 8
- 8 Hohenadl C, et al. Strand-specific detection of enteroviral RNA in myocardial tissue by in situ hybridization. *Mol Cell Probes*, 1991, 5; 11
- 9 徐岩、杨英珍. 病毒性心脏病的分子水平研究, 国外医学心血管病分册, 1991, 18; 341
- 10 Kandolf R, et al. Molecular studies on enteroviral heart

disrase; patterns of acute and persistent infections. *Eur Heart J*, 1991,12(suppl D):49

- 11 Archard L C, et al. Molecular probes for detection of persisting enterovirus infection of human heart and their prognostic value. *Eur Heart J*, 1991,12(suppl D):56
- 12 Beisel K W, et al. Molecular cloning of a heart antigen that cross-reacts with a neutralizing antibody to coxsackievirus B4. *Eur Heart J*, 1991,12(suppl D):60.
- 13 Schwimmbeck P L et al. The possible value of synthetic peptides in the diagnosis and therapy of myocarditis and dilated cardiomyopathy. *Eur Heart J*, 1991,12(suppl D):76

(上海市心血管病研究所杨英珍研究员、徐岩博士撰)

## 艾滋病 acquired immunodeficiency syndrome 艾滋病

AIDS 由免疫缺陷病毒(HIV)感染导致人体防御机能缺陷(尤其是细胞介导的免疫机能缺陷),而使人体易于发生机会性感染和肿瘤的临床综合征。自1981年首例报告获得性免疫缺陷综合征至今,全世界报告的病例已达40多万。本病呈全球流行趋势,疫情仍在发展,估计全世界已有800万~1000万人及100万儿童感染HIV,到21世纪本病仍是一个主要的公共卫生问题。由于感染HIV后可持续终生,感染后10年内约半数患者发展为AIDS,且病人一旦确诊,平均存活期约1年,80%以上病人于3年内死亡,因而引起医学界的普遍关注。

1978年发现1种或1组疾病,患者表现为卡波济氏肉瘤、卡氏肺囊虫肺炎及其他条件致病菌感染,与特异性细胞免疫缺陷有关,被称之为AIDS。1983年法国巴斯德研究所Montagnier报道,从1名AIDS患者的淋巴结活检培养中分离到1株C型RNA病毒,命名为LAV。1984年Gallo等从AIDS患者体内分离到人类T细胞淋巴瘤白血病病毒-Ⅲ(HTLV-Ⅲ),经病毒学与血清学证明与LAV为同一病毒,血清学检测显示88%的AIDS患者血清中存在抗HTLV-Ⅲ抗体。1986年7月由WHO正式命名为HIV-1。这一研究结果为AIDS的病因、诊断、治疗及预后研究提供了实验依据。1984年Popovic等从西非患者体内分离到能引起AIDS的第2种逆转录病毒,其后由WHO命名为HIV-2。80年代末期,从1对患AIDS的喀麦隆夫妇体内又分离出HIV的新亚型,其许多生物学特征不同于HIV-1和HIV-2。现已知,HIV感染后有各种临床表现,可从无症状感染到威胁生命的肿瘤和机会性感染。感染HIV不久,CD<sub>4</sub><sup>+</sup>辅助T细胞就可以从原来的正常值约1000/mm<sup>3</sup>按每年减少40~80/mm<sup>3</sup>的速度递减,进行性的免疫系统破坏可导致全身淋巴结肿大、腹泻、体重减轻和口腔念珠菌病以及其他机会性感染。

HIV是一种逆转录病毒,分核心和外壳两部分,核心中含RNA和逆转录酶。该病毒的主要基因有gag基因(核心基因)、pol基因(逆转录基因)和env基因(外壳基因)。其多种蛋白成分已被识别,如gp120是病毒的主要外壳糖蛋白,与HIV感染形成有关;碱性P15蛋白(核酸结合蛋白)位于HIV的壳核,P24蛋白(主要核心蛋白)代表HIV的核心外壳成分,P17/P19蛋白覆盖于病毒外壳的内表面。gp41为病毒外壳的跨膜糖蛋白,这些蛋白质作为抗原可使机体产生相应的抗体,其中以P24和gp41最有诊断意义。

HIV感染的基本特征是CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞亚群的耗竭。已知CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞表面的CD<sub>4</sub>分子与HIV外壳糖蛋白gp120有高度亲和力,两者结合使CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞发生吞噬作用,HIV进入细胞内发生感染。HIV感染后其RNA经逆转录成DNA,并整合到感染细胞的染色体中,因此体内很少发现游离病毒。受感染的细胞可逃避体内的免疫监视,成为HIV良好的储存场所。病毒于细胞内经过一段长潜伏期后才发生表达,随着HIV的复制,CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞被杀伤,由于CD<sub>4</sub><sup>+</sup>淋巴细胞处于免疫应答的核心地位,即使

细胞群选择性耗竭也可导致严重的免疫缺陷,但HIV的细胞致病作用机理尚不清楚。

HIV主要通过3种途径传播;性接触为主要传播方式,美国AIDS患者中,男性同性恋占79%,一些第三世界国家,异性间性接触是传播的主要方式;血液传播是本病的另一种主要传播方式,静脉药瘾者共用针头在传播本病中起主要作用,美国静脉药瘾患者占总病人的25%,有17%患者静脉用药为唯一危险因素,受血者发病率并不太高,约每10万受血者有1人发病;母婴传播是婴幼儿感染的主要途径,血清AIDS抗体阳性的母亲,其子女中有30%~60%受感染。

目前诊断HIV感染最常用的方法是检测HIV感染者通过体液免疫反应产生的对HIV特异性抗体,不仅能检测整个HIV抗体和进一步识别为何种抗体应答,还能分别检测HIV-1和HIV-2抗体,检测方法也逐步做到快速、简便、精确。推荐用于诊断HIV感染的方法主要为ELISA和Western印迹法(WB)两者结合;ELISA是用于筛选HIV感染患者的标准诊断试验,如得到阳性结果,必须重复试验。两次结果阳性再用特异性更高的WB作确认试验。近年来,利用细菌和哺乳动物体系已合成重组的病毒蛋白,并用于HIV抗体检测,其检测早期感染较ELISA更为敏感,且比WB在诊断HIV-1的早期感染有较高的敏感性。从患者的体液或组织中分离出HIV是确定HIV的直接证据,可从多种临床标本中分离出HIV,但由于技术上的困难且目前所使用的标本尚不统一,难以用于实验室诊断。用同位素标记的HIV RNA探针,通过杂交技术可检测外周血白细胞中HIV核酸,但此法尚不够敏感。另外,用双抗原夹心ELISA检测血清或其他体液中HIV抗原可作为感染的早期诊断及药物疗效的考核依据。对ELISA结果阳性但WB未确定的患者还可采用聚合酶链反应技术(PCR)检测出极微量的HIV DNA。

HIV感染目前尚无特效的治疗药物。临床抗HIV药物大体上可分为3类:(1)抗转录病毒的药物即AZT及其同类药物(核苷药物)最有希望,现已有60多种,这类药物通过与逆转录酶结合或者作逆转录酶的替代作用物发挥抑制病毒复制的作用。近年来对双脱氧胞苷(ddc)和双脱氧肌苷(ddI)的临床应用研究表明,它们能抑制病毒的P24抗原,并使CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞绝对计数增加。除AZT和IFN-2联合应用外,AZT与ddc或ddI联合治疗正在研究中,预期ddc或ddI与IFN-2联合应用也较有前途。(2)抑制HIV与宿主细胞结合及穿入的药物。已证明可溶性游离CD<sub>4</sub>能有效阻止CD<sub>4</sub><sup>+</sup>细胞与HIV结合,但其分子量较大,在体内易裂解失活。N-甲氧甲酰-多苯丙氨酸甲酯具有CD<sub>4</sub>同样的生物活性,其分子量小,制备简单,不易被裂解,有希望应用于临床。另外,用基因工程方法制备的重组可溶性CD<sub>4</sub>也可降低HIV感染者的血清P24蛋白,但CD<sub>4</sub>是一种多肽,机体可产生抗外源性CD<sub>4</sub>的抗体,引起交叉抗体免疫反应,限制了本类药物的应用。(3)抑制HIV调节基因的药物治疗刚刚起步,许多细节问题尚待解决。

由于AIDS的治疗存在不少困难,预防HIV感染特别重要。目前本病的预防工作主要限于加强疾病的监测和做好卫生宣教工作,疫苗的研究发展缓慢。HIV灭活疫苗和减毒活疫苗的安全性尚不能肯定,较少有临床应用价值。HIV包膜糖蛋白疫苗能刺激机体产生中和抗体,且能活化机体的细胞毒性T细胞,较有发展前景。MicroGenesys等采用重组体的方法研制gp160疫苗,已被批准进行人体试验;另外不少学者也正在探讨重组gp120,这类疫苗的研制可望有所突破。

HIV的细胞致病作用机理,HIV感染发病与否的真正原因以及对于疾病进展可能具有的辅助作用的某些因素仍在探讨中;现在还不能肯定抗病毒药物能否预防或减少无症状HIV感染者的发病。另外,具有不同程度的选择性、适宜导向不同药物的生物靶向法已试用于治疗HIV感染者,预期在不久的将来会达到高效的治疗目的。相信随着分子生物学及免疫学的不断进



步, HIV 疫苗将问世, 人类终将战胜 HIV 感染。

#### 参考文献

- 1 Friedland G H, et al. N Engl J Med, 1987, 317(18): 1125
- 2 Wilber J C. Clinics in Lab Med, 1987, 7: 777
- 3 Seale J R. Pathogenesis and transmission of AIDS Vec Rec, 1987, 120(9): 454
- 4 Gelderblom H R, et al. J Gen Viro, 1988, 69: 2455.
- 5 Siliciano R F, et al. Cell, 1988, 54(4): 561.
- 6 Richman D D. Znfec Dis Clin North Am, 1988, 2(2): 397
- 7 Knobler R M. Dermatol Clin, 1989; 7(2): 369.
- 8 Freedman D, et al. Acquired immunodeficiency Syndrome I Med. J, 1989, 82(3): 481.
- 9 Groopman J E. Rew Znfec Dis. 1990, 12(5): 908.
- 10 Koff W E. The Prospects for AZDS Vaccines Hoap Pract. 1991, 256(4): 99

(安徽医科大学第一附属医院李旭副教授、余鑫之教授撰)

**艾滋病及其口腔表现** 获得性免疫缺陷综合征简称艾滋病(AIDS)。美国疾病控制中心(CDC)规定限于细胞免疫缺陷潜在可能的某些疾病的患者。如卡波济肉瘤(KS), 卡氏肺囊虫肺炎(PCP)或其他机会致病菌的感染性疾病。现在规定, 凡已表现出一种或多种上述并发症者为“症状完全型艾滋病”; 对生活在艾滋病好发人群中且仅表现出全身淋巴结肿大、不明原因进行性消瘦、发热、慢性腹泻、嗜睡、淋巴细胞指数降低, 其他白细胞指数降低、贫血、不明原因的血小板减少及口腔白念菌感染症状者则命名为“相关症状型艾滋病”。

从患者即症状完全型艾滋病及相关症状型艾滋病的个体中可找到病原体, 如淋巴结相关病毒(LAV), 人类嗜 T 淋巴细胞逆转录病毒 I (HTL- I), AIDS 相关逆转录病毒(ARV)。目前发现 T 淋巴细胞 T<sub>4</sub> 表面分子可能即为 LHAV 病毒受体。病毒侵犯 T<sub>4</sub> 细胞淋巴后, 在淋巴细胞内发生逆转录活动, 引起宿主细胞结构及其数量的改变, 最终导致淋巴细胞对可溶性抗原的免疫反应功能降低, 随即发生一系列的艾滋病状。

**一般临床症状** 艾滋病的临床表现可分 4 个阶段: (1) 无症状时的实验室检查为细胞免疫功能低下; (2) 出现持续性数周至数月的一系列先兆病状, 主要为不明原因的发热、慢性腹泻、全身不适, 口腔白色念珠菌感染以及口腔或肛周的疮疹性损害; (3) 全身淋巴结肿大, 特别是颈部, 腋下与腹股沟; (4) 致死性机会致病菌感染及恶性肿瘤。

**口腔表现** 不同类型口腔损害主要为感染与肿瘤。

1. 感染性损害: (1) 口腔白色念珠菌感染, 常为艾滋病先兆症状, 在 AIDS 好发人群的随访中发现 50% 患者被确认为白色念珠菌感染后 3 个月内即出现严重的致死性机会致病菌感染或 KS。此类患者的 T<sub>4</sub>/T<sub>8</sub> 比常值极低 (C ≤ 0.51), 预后极差, 也有部分白色念珠菌可在疾病中期出现。白念菌损害最常见唇部。(2) 口腔毛状白斑: 毛状白斑(HL)是与艾滋病有密切关系的一种白色损害, 根据临床组织学特征, 特命名为“毛状白斑”。HL 多见于舌侧缘, 偶见于颊粘膜。损害范围可大至 3.5cm × 2cm, 微隆, 界限较清楚, 表面呈皱纹纸状或毛状。损害不能擦去, 偶有不适或疼痛感。在 HL 阶段, 通常尚未出现可赖以作出诊断艾滋病所必需的其他症状。HL 的镜下所见, 呈毛状纤维角化突起, 伴不同程度的不全角化及棘层增厚, 气球样变性, 核收缩, 核周出现环形空隙, 少量或无炎症的细胞浸润。60% 以上的标本可见白念菌菌系, 故易与一般性白色念珠菌感染混淆。HL 可能因感染乳头状瘤病毒(PV)所致。通过抗 PV 病毒核抗原血清标记的组织化学研究, 发现 80% 患者的气球样棘细胞及其他棘细胞核呈阳性反应, 而对对照组中均无此反应。近来许多学者在电镜下观察, 大多数标本不可仅找到 PV, 还意外地发现了大量的非洲淋巴细胞瘤病毒(EB)。观察结果表明, 20% 的 HL 患者可发生艾滋病, 且主要为不同程度的 PCP。(3) 其他, 其他感

染损害有: 口腔单纯疱疹与主要由肠道感染引起类似多形渗出性红斑的口腔损害。

2. 口腔肿瘤: (1) KS, 其为艾滋病最主要的口腔肿瘤, 伴有 KS 的艾滋病患者中 50% 可出现口腔损害, 约 90% 可同时发生。KS 好发于硬、软腭部, 次为咽部, 早期损害平伏而呈红色或紫色, 晚期大部分为隆起的肿块, 但常无触痛。57% 的口腔 KS 可同时出现斑块样白念菌感染。其病理改变基本上局限于固有层, 梭形细胞及非典型性血管样腔隙形成, 红细胞渗出, 含铁血黄素沉积, 有嗜酸性小体以及后期出现有丝分裂像。非典型性血管样腔隙可被增殖的梭形细胞挤压而消失或仅出现在损害的边缘部位。炎症细胞中主要为浆细胞, PTAH 或 PAS 可将嗜酸性小体染色, 具有明确的诊断价值。口腔 KS 应与良性血管瘤及脓性肉芽肿相鉴别, 后两种无非典型性血管样腔隙, 梭形细胞增生及嗜酸性小体。(2) 其他: 已有报道艾滋病患者可出现鳞状细胞癌及 Burkitt 氏淋巴瘤。

#### 有关治疗研究

艾滋病确诊后, 其预后是不好的, 但随着对艾滋病的免疫病理变化的不断深入了解, 已在实验中用各种方法纠正免疫缺陷状况; 如以 IL<sub>2</sub> (Interleukin-2) 提高淋巴细胞的细胞毒作用; 以干扰素-β 提高单核细胞及巨噬细胞的细胞毒性; 也有采用淋巴细胞或骨髓移植以重建免疫功能等。体外研究发现, 本病的病原体能被某些化学物质如苏拉明等抑制; 目前国外学者正在研制抗艾滋病毒疫苗。

(安徽省合肥市口腔医院耿正瑞主任医师撰)

#### 鼠疫与蚤类 plague and fleas

鼠疫是由鼠疫杆菌引起的危害人类健康最严重的烈性传染病。在人类历史上, 据记载有 3 次世界性鼠疫大流行, 首次发生于 6 世纪, 起源于埃及的西奈半岛, 经巴勒斯坦几乎遍及欧洲所有国家, 医学史上称“游西第安娜瘟疫”, 死亡近 1 亿人; 第 2 次发生于 14 世纪, 起源于美索布达米亚, 因十字军远征, 波及整个欧亚两洲及非洲的北海岸, 仅欧洲就死亡 2 500 万人, 占当时欧洲人口的 1/4, 医学上称为“黑死病”; 第 3 次发生于 19 世纪末至 20 世纪初, 波及 32 个国家, 死亡 1 200 多万人。鼠疫虽是一种古老的疾病, 但科学阐明鼠疫的存在还始于 19 世纪 30 年代末, 由俄国巴甫洛夫斯基提出自然疫源性学说, 并且明确鼠疫是自然疫源性疾病, 因此鼠疫在地球上不但早已形成而且分布很广。鼠疫虽然长期严重危害人类, 但真正分离出鼠疫病原体和揭示传播途径, 还属第 3 次大流行初期, 日本人北里和法国人耶尔森 (E. J. Yersin) 于 1894 年相继在台湾、香港从鼠疫病人及家鼠尸体中发现鼠疫杆菌。1937 年, 中国伍连德曾对以上两位学者的工作作如下确切结论: “鼠疫菌的首次记述归于北里, 而最初较详细而又准确地说明的则是耶尔森”。随后于 1897 年绪方 (Ogata) 又从跳蚤体内分离出鼠疫杆菌, 从而初步弄清鼠疫的传染源和传播途径, 使人类和鼠疫的斗争进入了科学阶段。

鼠疫是一种烈性传染病, 跳蚤为媒介, 因此一些战争中曾把它作为一种生物武器。新中国高度重视对鼠疫的研究和防治。在有关的省、区相继开展鼠疫自然疫源性疾病调查, 经过 30 多年的工作, 疫源地陆续被发现。目前, 中国 11 个省(自治区) 129 个县、旗、市有鼠疫自然疫源地, 面积达 43.7 万多平方公里。根据疫源地区的地理位置、景观特征、主要宿主、主要媒介和病原性状, 将其划分为 8 个, 即: (1) 松辽平原达乌尔黄鼠疫源地; (2) 内蒙古高原长爪沙鼠疫源地; (3) 锡林郭勒高原布氏田鼠疫源地; (4) 天山山地灰旱獭疫源地; (5) 帕米尔高原长尾旱獭疫源地; (6) 甘宁黄土高原阿拉善黄鼠疫源地; (7) 青藏高原喜马拉雅旱獭疫源地; (8) 滇西北山地大绒鼠疫源地。在疫源地及其邻近地区, 共发现啮齿动物 131 种, 自然感染的脊椎动物 54 种, 确定 9 种啮齿动物为鼠疫的主要宿主, 基本掌握了它们的个体的及种群的生态学规律。在疫源地及可疑地共发现蚤类 306 种, 自然感染的节肢动物 41 种, 确定鼠疫主要媒

介10种。其中97种蚤是中国鼠防专业人员发现的新种(亚种),共分离出鼠疫菌8767株。将疫源地内菌株首次以生态学理论用9项指标分成16个生态型,该生态型也可以作为特定生态系的指示物。不同生态型菌株对人的侵袭力、致病性不同。在此调查研究的基础上相继出版了由中国纪树立主编的《鼠疫》和方喜业主编的《中国鼠疫自然疫源地》及由柳支英主编的《中国蚤目志》。后者记述了中国已发现的蚤类452种(亚种),并对蚤类的地理分布、生物学、蚤类与疾病的关系和防治等方面做了详尽的叙述。近20年中国集中研究鼠疫活菌苗,并首先在这方面已获得突破性进展,筛选出弱毒活菌苗,其次研究鼠疫菌生化分型,为从地理生态学方面对疫源地分型提供依据;其三是对鼠疫自然疫源地空间结构的研究,即进一步揭示构成鼠疫自然疫源地诸因素的内在关系及流行规律。

1897年,绪方已提到蚤类传播鼠疫的可能性,但直到1905年之后经过英国派往印度的鼠疫委员会经过一系列调查研究之后才确认蚤类在传播人类腺鼠疫过程中的重要作用,后由英国Baot和Martin(1914)在孟买研究蚤类传播鼠疫的机理作出重大贡献,至今仍为鼠疫流行病学的理论基础。

鼠疫虽然危害人类几个世纪,但随着对鼠疫研究的深入开展,加之特效药链霉素的应用,就世界范围而言已基本控制了鼠疫的爆发流行。中国在防治鼠疫方面所取得的成绩尤为突出,现不但基本上控制了鼠疫的发生,并且在疫源地开展大面积灭蚤灭鼠,有效控制了鼠间鼠疫的流行。

#### 参考文献

- 1 柳支英,主编.中国动物志昆虫纲蚤目.北京:科学出版社,1986,2~7
- 2 纪树立,主编.鼠疫.北京:人民卫生出版社,1988.207~208
- 3 方喜业,主编.中国鼠疫自然疫源地.北京:人民卫生出版社,1990
- 4 Jishuli, et al. The discover and research of plague natural foci in China. 中华流行病学杂志(中国鼠疫防治研究论文英文摘要选编),1991,12(8),1~12

(甘肃省地方病防治研究所丁学良主任技师撰;王定国审)

### 青藏高原鼠疫自然疫源地研究进展

developments in the study of plague natural foci in qinghai tibetan plateau 青藏高原鼠疫自然疫源地(简称疫源地),是世界海拔最高、中国面积最大而发生人类鼠疫较频繁的地区之一。鉴于该疫源地发现较晚,可供借鉴的历史资料缺乏,而鼠疫动物病的流行又较猛烈,为此对其进行深入研究,不仅对揭示鼠疫菌、宿主和媒介三者一定生态地理环境中的生物学变化及相互依赖关系,鼠疫动物病的流行范围和年际与季节变化规律颇有裨益,无疑也将有助于阐明该疫源地性质、结构乃至保存规律的认识,从而为控制、监测和消灭鼠疫提供科学依据。

该区位于欧亚大陆东南部,介于东经 $79^{\circ}51'$ ~ $103^{\circ}20'$ ,和北纬 $30^{\circ}40'$ ~ $39^{\circ}21'$ 之间。北起祁连山,南止喜马拉雅山,东临甘南草原,西与克什米尔相望。地势西高东低,境内气候干寒多风,温湿度和降水量由于各地水热状况不同差异很大。植被自东南向西北由半湿润的高山草甸草原过渡到高山寒漠或半干旱高山草原。此地区啮齿动物具有种类较少而数量较多的特点,并以高原特有种占优势。其中,喜马拉雅旱獭(简称旱獭)、多种鼠兔、高原麝鼠等分布广而数量多。

自1954年首次在青海省贵南县上网察(今贵德)与河南蒙旗克萨木地区分别自旱獭和达乌尔鼠兔分离出鼠疫菌后,相继于1959、1973、1976年发现甘肃、新疆和西藏旱獭疫源地。近40年来,在该疫源地分离鼠疫菌近2000千株,判定疫源县(镇)40余个,疫源面积20余万平方公里。证实啮齿动物旱獭、达乌尔鼠兔、五趾跳鼠、灰仓鼠、根田鼠、小家鼠和食肉兽艾鼬、狗獾、兔獭、猫、猞猁、沙狐、赤狐、牧犬,以及有蹄类绵羊、藏原羚与猛禽胡兀鹫等17种动物自然感染鼠疫(兔獭、沙狐、胡兀鹫以血

清学判定);斧形盖蚤、谢氏山蚤、腹囊纤蚤深广亚种、红羊新蚤、人蚤、具钩靴片蚤、圆指额蚤上位亚种、草原硬蜱、血红扇头蜱和旱獭虱等10种吸血节肢动物自然携带鼠疫菌。其中,旱獭为主要宿主,斧形盖蚤和谢氏山蚤为主要媒介。旱獭系青藏高原特有种和优势种,分布广,几与该区高山草甸草原和高原相一致,并具有连续分布特征。垂直分布在海拔3900(循化孟达)~5450m(冈底斯山)之间,其中以2800~3600m低中山下部或丘陵平原、河谷阶地数量较多,调查资料表明,每公顷两只以上的土地面积占总面积的2%,1~2只的占15%,不足1只的占83%。但据1989、1990年青海、甘肃、西藏调查发现,每公顷仅为0.22~0.50只,显著低于60~70年代水平。

旱獭为草食性动物,以禾本科的、莎草科的和豆科的植物叶、茎为食,在田边亦嗜食庄稼,有时也吃甲虫。在饲养条件下,除配方饲料外,还吃白菜、甘蓝和胡萝卜等。为穴居冬眠动物,每年10月初入穴,4月初出穴。3龄性成熟后每年繁殖一次,约50%~70%的雌獭参加繁殖;胎仔数2~6只。旱獭以家族洞系为中心,活动半径一般不超过200m,当有强烈干扰时可做2100~5120m较远距离迁移。旱獭洞分居住洞和非居住洞两类。居住洞又分永久居住洞(冬眠洞)和季节居住洞(夏洞)两种;非居住洞又分取食避难洞和废弃洞两种。永久居住洞巢室在0.08~0.23m<sup>3</sup>之间。冬眠时旱獭体温维持在5~7℃(室内1~2℃),略高于环境温度2~3℃(室内0~-2℃)。旱獭呈吻尾相对球形。其呼吸、心跳分别为18次/min和28次/min;取出洞外5min分别增至22~28次和52~64次,20~30s后剪趾始见血液渗出。

据青海、甘肃、西藏1982~1991年统计,旱獭自然检菌率波动在0.22%~0.39%之间,占总检菌数的98.08%。实验感染表明,初次感染10亿菌可全部死亡,再感染700亿菌尚有存活个体,可见再感染旱獭对鼠疫菌有较高耐受性(武文莲,1982)。用捕自疫区的和非疫区的旱獭实验,发现两区旱獭死亡率无显著差异( $t=0.82 P \geq 0.05$ ),但疫区旱獭完全致死量为50亿菌,非疫区旱獭50亿、5亿、50万均可完全致死。前者死亡时间集中在感染后的3~8d,后者在9d内。表明两区旱獭对鼠疫菌均具较高感受性和敏感性,但前者个体差异大,有一定抗性,感染后可呈迁延带菌过程;后者则较差(朱锦沁,1983)。旱獭血凝阳性检出率为8.47%,感染后旱獭血清都具有相当保护力(MPI<10)。其抗体在感染后5d出现,15~30d滴度最高,两个月后可见转阴个体,冬眠时滴度下降,13个月后滴度基本消失。

自本区发现蚤类160余种,斧形盖蚤和谢氏山蚤为旱獭鼠疫主要媒介,占獭体蚤90%~100%。但随气候和植被变化,高山草甸草原以斧形盖蚤为主,有向高山寒漠草原或半干旱高山草原以谢氏山蚤为主过渡趋势。旱獭染蚤率在42%~72%之间,蚤指数为1.17~4.87,每年5、9月各有1个数量高峰,前者以斧形盖蚤为主,后者以谢氏山蚤为主。研究发现,两蚤均为1年1个世代,分4个龄期。斧形盖蚤♀:♂1:0.56,春末为吸血、产卵和数量盛期;谢氏山蚤♀:♂1:0.49,秋季为吸血、产卵和数量盛期。并发现,吸过血的蚤受精囊内基本都充满精子;新羽化的斧形盖蚤(未吸血)可忍饥180余天。据青海1982~1991年统计,斧形盖蚤和谢氏山蚤自然检菌率分别为0.11%~0.36%和0.07%~0.21%,前者占昆虫总检菌数的44.68%,后者占42.55%。媒介效能研究正在进行中。

经对阿胶糖、鼠李糖、麦芽糖、密二糖、甘油和脱氮等生化试验,可将该区鼠疫菌分为青藏高原型的,型连山型的,阿尔金山型的,昆仑山A、B型的和冈底斯山型6个生物型。其毒力因子均具有F1<sup>+</sup>、Psl<sup>+</sup>和约98%及86%左右为VW<sup>+</sup>、Pgm<sup>+</sup>菌株,对小白鼠最低致死量在10~10000个菌。Pgm<sup>+</sup>突变Pgm<sup>-</sup>速率高于85%。自该区鼠疫菌检测到6、7、13、23、27、30、45、52、62、65和90MD11种质粒。其中大质粒分布区,52MD主要见于祁连山及青海湖周围,且为青藏高原所特有;65MD主要见于阿尔金山及青南高原;90MD主要见于西茂安多、那曲和青海

小唐古拉山地区。在免疫学研究中,已选育出 FI<sup>+</sup>、VW<sup>+</sup>、Pgm<sup>-</sup>和 Psti+0614F 为新菌株。ELISA 抑制法检测血清抗体,具有用一种酶标记物检测不同种属动物的可能性。经化学试剂诱导,本区已建立 FI<sup>-</sup>、Pgm<sup>-</sup>、VW<sup>-</sup>、FI<sup>-</sup>、Pgm<sup>-</sup>和 FI<sup>-</sup>、VW<sup>-</sup>、Pgm<sup>-</sup>和 5 种毒力缺失型菌株,为进一步研究疫源地提供了基础资料。

青藏高原为以旱獭为主的单宿主疫源地。动物病多发生在山麓或冲积平原凸丘阳坡或半阳坡;疫源性活跃而牢固,动物病频发,多呈散在流行;以 6~8 月为季节流行高峰,新的疫源地和染疫动物不断被发现。根据该区鼠疫菌生化特性(方喜业,1980)和自然屏障(王振华等,1990)各分 10 个生物型和独立疫源地。鉴于该区人、鼠间鼠疫流行态势,现已实施的省、州、县三级监测网仍是今后控制鼠疫的主要技术措施。

鼠疫菌保存机理是当今世界性研究课题,现仍限于各种假说而无定论。本区根据旱獭巢微小生物群落中的线虫与旱獭蚤的寄生关系,提出鼠疫菌在该环境中可能存在线虫与蚤二宿主双向循环关系(詹心如,1989)。而更多的人则依据宿主(媒介)对鼠疫菌具有一定选择作用和鼠疫菌在通过不同环境时具有菌株变异特性而进行的一系列研究。如鼠疫菌质粒种类的研究和建立毒力缺失型菌株等,都将为揭开鼠疫长存之谜创造条件。鼠疫监测也是现今控制鼠疫的主要手段和研究内容。青藏区实施的政府与专业组织相结合的二级监测网是行之有效的,但间接监测和以微机管理取代直接监测将为期不远。

#### 参考文献

- 1 武文莲,等.中华流行病学杂志(鼠疫论文专辑),1985,30
- 2 纪树立,鼠疫.北京:人民卫生出版社,1988,44~316
- 3 王淑纯,等.鼠疫研究进展.北京:中国环境出版社,1988,1~305
- 4 朱锦沁,等.鼠疫研究进展.北京:中国环境科学出版社,1988,369~374
- 5 詹心如,等.鼠疫研究进展.北京:中国环境科学出版社,1988,280~287
- 6 王文华,等.鼠疫研究进展.北京:中国环境科学出版社,1988,346~350
- 7 王振华,等.鼠疫研究进展.北京:中国环境科学出版社,1988,207~217
- 8 纪树立,等.中华流行病学杂志,1990,(特刊):29~32
- 9 方喜业.中国鼠疫自然疫源地.北京:人民卫生出版社,1990,34~71
- 10 李少春等,中国地方病防治杂志,1990,5(增刊):107~109  
(青海省地方病防治研究所李少春副主任医师撰)

**登革热** dengue fever 由登革病毒经伊蚊叮咬而传播的一种急性传染病。自然界动物也有感染,故也列入人兽共患病,它基本上是一种热带、亚热带疾病。曾在非洲、美洲、澳洲、西南太平洋、亚洲等 60 多个国家和地区流行,使 15 亿人口受威胁,尤其在东南亚一些国家和地区常呈地方性或超地方性流行,严重危害健康。登革热传播迅速,使一个城市或地区在短期内出现数十万或百万以上病人,暂时丧失劳动力,除流感外没有任何疾病能与之相比,它发病率虽高,但症状多自限,病死率较低,常在 0.03% 以下,称之为经典登革热(CDF)。自 1953 年以来在菲律宾等东南亚地方性疫区出现一种症状严重的登革出血热(Dengue Hemorrhagic Fever—DHF)和登革休克综合征(DSS),病死率高达 10%~15%,DHF/DSS 已和登革休克综合征(DSS),病死率高达 10%~15%,DHF/DSS 已成为东南亚国家儿童的 10 个主要疾病之一,可引起重大经济损失,已日益成为各国普遍关注的一个世界性公共卫生问题,登革热曾多次传入并流行于中国南方沿海地区,1989 年中国已正式将本病列为乙类传染病进行管理。

认识并记载登革热历史至今有 210 多年,1779 年贝伦

(Beylon)在印尼雅加达首先记述了本病,称之为关节热,同年达贝尔蒂(Daberti)在埃及开罗亦描述了此病,称之为膝病,1780 年拉什(Rush)在美国费城报告了本病,称之为断骨热,此外尚有七日热,花公子热,斑疹关节热等称呼,1869 年英国皇家医学会命名为登革热,一直沿用至今,Dengue 一词源于西班牙语,意即因肌肉关节疼痛而呈蹒跚工装腔作势样步态。登革热曾在世界热带、亚热带地区爆发,有时也波及温带国家,特别在战争或人口流动条件下常有发生,1880 年开罗 80% 居民患病,1897 年昆士兰,澳大利亚流行,1922 年美国南方流行,估计有 100 万到 200 万病人,1927~1928 年希腊出现 100 多万病人,1942~1945 年第二次世界大战期间日本每年约有 100 万到 200 万病人,1960 年越南南方约有 200 万病人,1963 年印度加尔各答发病 100 多万,DHF 自 1953 年发现后一直限于东南亚及太平洋地区,但也出现在美洲等其他地区,例如 1981 年古巴报告登革热 344203 例,死亡 159 例,估计有 DHF 24000 例,1956~1978 年东南亚 8 个国家至少已有 25 万 DHF 患者住院,1.2 万人死亡,西太平洋有 23 个国家和地区报告 CDF/DHF,1987 年美洲有 19 个国家报告登革热 128450 例,实际发生数高于报告数,例如 1986~1987 年巴西卫生当局估计病例数超过 100 万,目前美洲 DHF 仍为散发,与 60 年代东南亚流行模式类似。1906 年班克罗夫特(Bancroft)证实埃及伊蚊,1916 年科依祖米(Koizumi)证实白纹伊蚊(*A. albopictus*)是登革热的传播媒介,1946 年及 1954 年分别由其他研究者证实盾纹伊蚊及波里尼西亚伊蚊也能传播登革热,但局限于一定地理范围,1907 年艾什白恩(Ashburn)等把通过细菌滤器的病人血浆接种志愿者而证实本病是病毒所致,1950 年萨宾(Sabin)等分离出登革病毒 1、2 型,1960 年哈蒙(Hammon)等分离出 3、4 型病毒,至今登革病毒仍只有 1、2、3、4 型。

中国古籍中无本病记载,1673 年蒙森(Monson)报告厦门发生登革热,1901~1902 年香港亦发生流行,1914 年史密斯(Smith)报告香港登革热 6 例,1917 年本病在中国一些地区流行,中医称之为红痧,1928~1929 年登革热又在广东、厦门、上海、杭州等地流行,例如 1928 年巴德(Buddle)报告广东三角洲登革热严重流行,次年福斯特(Faust)报告香港严重流行,广大居民暂时丧失劳动力。1928 年南克(Nanck)报告宁波、杭州流行登革热,次年梅克斯韦尔(Mexwell)称杭州居民 90% 患病,1928 年图尼耶(Tournier)报告上海警备部队 2 月 4 日至 29 日发生登革热 14 例,1940 年江苏、上海、南通一带流行登革热,称之为上海病,沈公健记载:“西籍原名 Dengue 热,译音通称登革热,今秋本埠甚为流行,初起发热,骨楚头痛,胸肋作恶,脉数增进,病后 2~3 日,四肢发现鲜红色之疹点,疹点透发,则体温渐降,各症亦减退。”缪译铭报告:“今之登革热流行亦沿门闾境,老幼相似,然死亡甚少,是以潮汕一带称为太平病。”1944 年春福州流行,1945 年 9 月美军 46 人到汉口机场接收日军投降,有 45 人染上登革热,估计当时汉口居民 30% 患病,登革热在中国消失 40 年后,1978 年广东等地又出现流行,建国前在中国厦门、上海、香港、雷州半岛及海南岛等沿海地区曾查到埃及伊蚊,白纹伊蚊在中国南方广泛存在,1978~1991 年在中国广东、广西、海南 3 省的一些地区报告登革热 602749 例,实际发生数可能高于此数,同时也散发 DHF,从病人及蚊体均分离出登革病毒,1~4 型均有发现,报告死亡病例 358,特别 2 型病毒流行时病死率较高。

登革病毒属黄病毒属,不但型间存在交叉免疫,而且与乙脑、17D 黄病毒也有交叉免疫反应,病毒感染后可获得对同型病毒的长期免疫和对异型病毒的 1~6 个月短期免疫,根据患者对黄病毒有无免疫而出现的第 1 次感染与第 2 次感染的血清免疫学反应有明显不同,后者抗体上升快,滴度高,现代确诊靠病毒分离或血清学技术,目前已广泛采用敏感的白纹伊蚊传代细胞系 C6/36 组织培养法代替其他组织培养细胞或乳鼠脑内接种分离技术,实验室血清学诊断采用血凝抑制试验(HI),

间接荧光技术 (IFA) 及 IgM 抗体捕捉 ELISA (MAC-ELISA), DHF 是现代登革热研究的重点, DHF 按临床严重程度分为 I、II、III、IV 级, 其中 II、IV 级即 DSS, DHF/DSS 的发病机制至今尚不清楚, 病理解剖按出血程度依次为皮肤、皮下组织、胃肠道粘膜、心脏、肝脏, 尤其肝细胞损害严重, 而蛛网膜下腔或脑出血则很少见, 血管渗透性增加, 血小板减少, C<sub>3</sub>、C<sub>5</sub> 水平下降, 血液浓缩, 血凝异常, 出现 DIC, DHF 与病毒型别, 病毒毒力变异, 异常免疫, 疫苗研制, DHF/DSS 治疗及消除埃及伊蚊等问题是现代研究的热点, 在泰国、古巴的研究提示 DSS 与 2 型登革病毒高度相关, 后在印尼、马来西亚的 DHF 病人中也常分离出 3 型病毒, 1984~1990 年美洲流行的型别是 1、2、4 型, 也可出现 DHF, 有人认为毒力增强的病毒可引起 DHF 或认为病人被原病毒感染呈致敏状况又被另一型病毒感染而呈异常免疫反应所致, DSS 常发生在以往有登革感染史的儿童或所带母亲登革抗体下降的婴儿, 登革 4 个型的联合疫苗正在实验研究阶段, 及时输液, 纠正电解质及代谢紊乱, 给氧等综合治疗可降低病死率, 1947 年起美洲国家执行消灭埃及伊蚊运动在墨西哥等 10 多个国家曾取得一些引人注目的成功, 但现在除百慕大外又都重新出现埃及伊蚊, 此外白纹伊蚊还出现在美国 16 个州和巴西 3 个州, 说明消除一种蚊种并非易事, 登革热监测除临床病例报告、血清学确诊及病毒分离外, 就是媒介的监测, 常用诱卵器指数、容器指数、房屋指数及布雷图 (Breteau) 指数等指标评价灭蚊效果, 在控制媒介方面采用化学灭虫剂超低容量空间喷雾消灭成虫, 双硫磷砂粒缓释剂或室内缸水内养鱼等生物学技术消灭幼虫, 使预防工作不断取得进展和取得控制流行的作用。

今后的研究方向主要在 DHF 临床, 灭蚊及疫苗预防, 随着分子生物学技术, 体外基因扩增 (PCR), 单克隆抗体及抗原分析的进展, 对 DHF/DSS 发病机制, 免疫学研究水平的提高, 将建立更为特异、简便、快速、准确的登革热实验诊断方法, 中药治疗登革热及中西医结合治疗 DHF/DSS 研究前景广阔, 更有效的治疗药物及技术可能会出现, 利用生物学或生物工程技术进行灭蚊的研究颇有前途, 在疫苗研制方面将有可能采用基因工程技术从黄病毒属的广谱抗原及多效能考虑解决包括登革病毒在内的广谱疫苗问题。

参考文献

- 1 耿贯一, 主编. 登革热和登革出血热, 流行病学, 下册, 1980, 94~101
- 2 黄健人. 广西防城县企沙镇清除埃及伊蚊的经验, 中国公共卫生, 1992, 8(1): 35
- 3 WHO, Dengne haemorrhagic fever, 1986, 1~42
- 4 Schlesinger RW, Dengne Viruses, Wien New York, 1977, 5~22
- 5 Peni Jun Zhao, Dengne fever in China. Abstracts of the second international meeting on tropical medicine and parasitology. Hainan, China, 1991, 75~77
- 6 Rita MR. Dengne in Rio De Janeiro, Brazil, 1990~91, DSS/SJL. Dengne Surveillance Summary, San Juan Laboratories, 1990, 63, 7.

(广西壮族自治区卫生防疫站崔君兆撰)

森林脑炎

taiga encephalitis 又称俄国春夏脑炎, 分为远东脑炎和中欧脑炎两型。森林脑炎病毒属于蜱媒病毒。在中国东北的长白山和小兴安岭散在本病的自然疫源地, 大兴安岭仅发生极少数病人, 新疆天山山脉也有自然疫源地, 均属远东脑炎型。此外在云南西部发现有抗原性甚近的病毒, 但在临床上引起脑膜炎症状。在国外由抗原近似的病毒所引起的疾病尚有加拿大的波瓦生脑炎, 欧洲的中欧脑炎, 苏格兰脑炎 (羊跳跃病) 和印度的科萨努尔森林病。此外还有一些抗原虽然近似, 但对人是否有危害尚属不明的蜱媒病毒。所以它是仅次于蚊媒病毒

的一个大家族, 无疑其中最重要的应属远东型森林脑炎。因为它的为害面积最宽, 人感染后的症状最重, 近 1/3 的病人有严重的后遗症, 病死率最高, 恢复者中有少数人经几年或十几年后出现再发, 称为慢性型, 其预后不良。

既往的研究对本病的传染过程及临床表现已有相当认识, 但这尚无理想的特效疗法, 病死率及后遗症率仍较高, 且对慢性型的发生机理尚不清楚。尽管应用免疫荧光技术已能进行早期诊断, 但仅限于大医院才能使用, 距用于现场尚有距离。在流行过程方面对传染源, 媒介蜱的习性及其在蜱体的垂直传播作用已有一定了解, 且已选出几种可用的杀蜱剂, 已制成有一定效果的灭活疫苗, 形成一系列预防措施体系, 但对本病毒在自然界中的循环方式仍有许多不明之处。例如尽管病毒在蜱体垂直传播, 而蜱的自然带毒率一般均仍不超过 5%、最高不超过 10%、冬季动物之间似仍有传播过程, 其传播媒介是什么? 目前使用的杀蜱方法和人用疫苗尚不够理想, 病人中有相当部分是疫苗接种者 (原因中包括疫苗运送、保管及使用不当等因素)。

当前研究的热点之一是疫苗问题: 1986 年 M. Grevsikvoa 等报告用由田鼠分离的病毒 (Skalica 株) 作原代鸡胚细胞传代, 以二乙基醚或福马林灭活后对小白鼠产生较强的保护作用, 此疫苗在聚丙烯酰胺凝胶电泳上呈不同的表面糖蛋白分子带。1990 年 L. B. Elbert 等报告用 DNA 酶和硫酸鱼精蛋白能降低森林脑炎病毒细胞培养混悬物中的细胞 DNA 浓度以使病毒纯化而制造森林脑炎疫苗的可行性。另一研究热点是森林脑炎病毒分子结构的分析, 其目的在于改进病毒分类、提高本病诊断和防治措施奠定基础。第 3 个热点是抗病毒剂的探讨, 1987 年 T. I. Dzhiyanyan 报告 Tunicamycin 浓度在 0.5~1.0 μg/ml 时能阻止培养中的森林脑炎病毒蛋白的糖基化。1989 年 V. V. Pogodina 等报告来自骨髓的髓肽对恒河猴感染森林脑炎病毒有保护作用。刘瑞璋等报告甲氧咪唑有抗森林脑炎作用。此外当前还热中于阐明森林脑炎病毒的一些生态学问题。使森林脑炎的研究进入了一个新的阶段。

根据迄今的研究在 10~20 年内可以期望: (1) 有更快、特异而简便的诊断方法问世; (2) 将出现副反应小而免疫效果更高的亚单位疫苗, 凡进入自然疫源地人员均能受到高效疫苗的保护; (3) 高效抗森林脑炎病毒的化学药物的研究将取得进展, 得以杜绝后遗症并降低病死率; (4) 出现新一代的杀蜱药物和防蜱服装, 使人在林区的活动安全化; (5) 阐明临床慢性型的原因, 杜绝其发生的可能性; (6) 各主要类缘病毒抗原之间的差异明朗化。关于自然疫源地的详细问题尚等继续研究。

(哈尔滨医科大学公共卫生学院刘瑞璋教授撰)

立克次体与立克次体病 rickettsiae and rickettsial diseases

立克次体属于原核细胞型的微生物, 是细菌学中的独立部分。形态主要为杆状、球状, 两端浓染是繁殖过程中的基本形态。革兰氏染色阴性, Giemsa 或 Gimenez 染色分别呈紫红色或红色, 在光镜下可看到。超薄切片电镜观察可见微荚膜、细胞壁、胞浆膜、核糖体、DNA 丝及核质等结构, 西伯利亚立克次体中分离株外周具有特征性肥厚亚晶格的粘液层。立克次体酶系统不完整, 但能进行三羧酸循环的部分代谢活动, 其生命活动仍需依赖活细胞, 为专性细胞内寄生, 但战壕热的罗沙利马体或称五日热立克次体可在人工培养基上生长繁殖。立克次体有 DNA 和 RNA 两种核酸, 呈二分分裂增殖, 综合其形态、结构、化学组成及增殖方式等特征类似革兰氏阴性菌, 故立克次体在分类学上属于细菌学范畴。

1984 年版 Bergey《系统细菌学手册》第 1 卷第 9 部分并列立克次体目和衣原体目。立克次体目下分 3 个科, 立克次体科包括 3 个族, 立克次体族分为 3 个属, 即立克次体属、柯克斯体属和罗沙利马属, 立克次体属又分为斑疹伤寒群、斑点热群及恙虫病群立克次体 3 个生物群。在自然界大多数立克次体对人

类不致病,病原性立克次体约 10 多种,全都是寄生或共生于节肢动物—虱、蚤、蜱、螨(恙螨和革螨)和哺乳动物,保持在自然界的生态循环,人类只是偶然地接触到这个自然环节,即含有病原性立克次体的节肢动物,才发生感染或患病。范明远等用分子流行病学方法研究中国斑点热,曾在自然界从草原革螨卵直接分离出西伯利亚立克次体表明该立克次体可经卵传递,在蜱中独立地保持该种群的连续性,亦可不借助于寄主动物,具有重要生态学意义。虱、蚤粪中的立克次体通过皮肤微小伤口进入人体,而蜱、螨则通过叮咬途径感染人。传播媒介是立克次体病流行病学中的重要环节。当立克次体侵入人体后,多在小血管内皮细胞及网状内皮细胞系统中增殖,引起局灶性血管炎和血管周围炎。临床上可观察到 Q 热性心内膜炎和 Q 热性肝炎的病例。机体非特异性免疫因素对立克次体有一定影响,特异性体液与细胞免疫无疑都参与对立克次体感染的免疫应答,并受遗传基因调控和环境因子影响。对立克次体病防治措施中可用四环素族、强力霉素等抗生素治疗,消除传染源和传播媒介均有助于阻断立克次体病的流行,基因疫苗的研究和应用可能是未来立克次体病预防的一种重要手段。

早在公元 313 年中国葛洪在《肘后方》一书中记述的沙虱毒(现称恙虫病)病例,并认为沙虱(即恙螨)为其病媒,这是关于立克次体病的最早记载,早年葛洪的历史功绩已被日、俄、美等国家当代学者在文献中确认。1909 年美国立克次氏首次观察到立克次体,他的发现为揭示这一类既有别于普通细菌又不同于病毒的病原微生物奠定科学基础,人们为了纪念他在立克次体事业中所作出的贡献和不幸牺牲,就将这一类微生物定名为立克次体。法国尼科尔在突尼斯巴斯德研究所工作期间,对该国发生的斑疹伤寒爆发流行进行了调查,发现虱是该病的传播媒介,通过灭虱措施在短期内便控制了该病的流行,从而获得了 1928 年度诺贝尔医学生理学奖。中国魏曦于 1937~1939 年在美国哈佛大学医学院任研究员期间与 H. Zinsser 共同研究琼脂斜面组织培养法培养斑疹伤寒普氏立克次体以解决该立克次体在实验动物中增殖的困难,魏曦在培养基中加进双料 Tyrode 氏液解决了该培养法的关键问题,从而使立克次体大量增殖,为生产疫苗打下了基础。第二次世界大战期间,在印、缅甸军中爆发了恙虫病流行,影响了战斗力,为此美国组织了以哈佛大学人员为主的斑疹伤寒考察团,1944 年特邀魏曦参加,以解决病原体分离问题,魏曦在缅甸 Myitkyina 流行现场的草丛中改笼养为笼养实验动物方法,终于一举分离出恙虫病立克次体,从而明确了诊断,根据恙螨生态学特点,进行除草灭虫措施切断传播途径,有效地控制了恙虫病,为此,该团授予魏曦一枚学术性战时功绩荣誉勋章。提高斑疹伤寒疫苗质量研究方面,供斑苗生产用的普氏立克次体菌种,须通过虱、鼠交替传代才能保持其高毒力、高免疫原性。过去国内、外均在志愿者身上饲喂繁殖用虱,因人的体虱是单嗜性昆虫吸食动物血不能存活,在人体上大量喂养即痛苦又危险,为此魏曦与范明远合作研究人、兔血交替喂虱法,最终摆脱了人血代以兔血,于 1956 年驯化成功一株兔化人虱,培养普氏立克次体效果与人虱无异,1959 年卫生部批准该虱种在全国有关生物制品研究所斑苗生产中推广使用。魏曦在立克次体基础研究和立克次体病防治方面作出了杰出贡献。

立克次体属于人兽共患的自然疫源性疾病。在历史上曾严重威胁人类的健康,该病当前主要发生在发展中国家,而发达国家已取得了有效控制。后者为吸取第一次世界大战期间欧洲发生大规模斑疹伤寒流行致使数百万人死亡的惨痛教训以及在第二次世界大战中巴尔干半岛发生 Q 热、东南亚发生恙虫病肆虐的教训,这些国家始终没有放松对立克次体病的科学研究。如美国每两年召开 1 次全美立克次体学与立克次体病学术年会,每 4 年在斯洛伐克召开 1 次国际立克次体学术会议;在国际上有关立克次体的研究重点主要放在基础研究和应用基础研究上,涉及 3 个方面,(1)不断发现和证实新的立克次体病

的出现,美国近年已证实犬埃里克次体不仅感染狗也感染人,在美国掀起了研究该病的热潮;日本人从四国岛红斑热病人中分离出斑点热群立克次体,经我留美学人于学杰鉴定属斑点热群立克次体新种,定名为日本立克次体(*Rickettsia japonica*);最近在澳大利亚弗林德斯岛病人中也发现了一种新的斑点热。(2)对立克次体生长繁殖、代谢及其对宿主细胞感染机制以及对立克次体酶、表面抗原决定簇,特别是立克次体基因组序列等进行了研究。(3)对流行性与地方性斑疹伤寒分型诊断,已从核酸和蛋白方面开展了研究,用多聚酶链反应(PCR)基因扩增法研究了病人早期血液中微量病原体 DNA 的检出,可望用于临床诊断和流行病学调查。创建和应用分子立克次体学方法对斑点热群中国分离株在种的水平上鉴定获得成功。近年虽对立克次体抗原结构、遗传学及酶的研究都取得了进展,对立克次体毒力研究却进展缓慢,至今对毒力的决定因子所知甚少。

从病原学上证实中国有 5 种立克次体病存在。即普氏立克次体引起的流行性或称虱传斑疹伤寒、莫氏立克次体引起的地方性或称蚤传斑疹伤寒、恙虫病立克次体引起的恙虫病或称丛林斑疹伤寒、西伯利亚立克次体引起的北亚蜱传斑点热或称北亚热以及柯克斯体属贝纳氏柯克斯体引起的 Q 热,并作了详尽的流行病学和生态学调查,掌握其流行规律和特征。流行性与地方性斑疹伤寒已列入《中华人民共和国传染病防治法》中 2 种乙类传染病。斑疹伤寒的大规模爆发流行往往与战争和灾荒连在一起,因此该 2 种病在中国仍是潜在的危险。恙虫病原先以为仅分布在中国长江以南八省区,近年已在江苏、山东、东北三省及山西从病原学上发现有该病的证据,此外还在天津及新疆地区人群血清学上证实也有该病存在。近年已从新疆、内蒙等地斑点热病人中分离出多株立克次体,并从上述两地草原革螨和蜱卵、黑龙江省的嗜群血蜱、森林革螨、福建的越原血蜱及北京的中华革螨中也分离出该种立克次体,用分子立克次体学方法(包括单克隆抗体、蛋白免疫印迹、脂肪酸气谱质谱联用、核酸同源性杂交、染色体酶切图谱、PCR/RFLP、测序及免疫电泳等)在种的水平上鉴定并确定其分类学地位,证实为西伯利亚立克次体,从而在中国新发现了 1 个病种——北亚热。为了交流防治经验和科研成就,中国每 5 年召开 1 次全国立克次体学术讨论会。

预测未来本学科发展中可能出现的新变化及可能有所突破的领域,DNA 探针技术正在建立,在 20 世纪 90 年代新建立的诊断方法将会大大减少立克次体病的误诊、漏诊。立克次体细胞免疫很重要,目前已积累了淋巴细胞及其防御功能、作用产物的认识,但专性细胞内寄生的立克次体如何逃脱宿主防御系统的破坏作用尚未澄清,对特异性防御机制和白细胞三烯、前列腺素及白细胞介素等内源性介质了解还不多。通过分析立克次体的全部基因组序列,才能解释立克次体在其特定环境中生长繁殖的复杂机制。对产生保护性免疫应答而又极少发生遗传变异的抗原决定簇取得较多的了解。在适宜的大肠杆菌载体中装入立克次体基因组并研究其产物,可望通过基因工程技术来生产立克次体疫苗,而高效的疫苗可能需要精确的靶传递系统来激活相应的人体防御机制。由于微机革命对生命学科的巨大影响,由初级序列到生产出三维结构的崭新的方法,将可能成为探索抗原—抗体和受体—配体的相互作用、构型变化及预测其对抗生素是否敏感的工具。

20 世纪内在本领域中的定向课题及应采取的措施:(1)普氏、莫氏立克次体特异性抗原性多肽及保护性抗原的基因组构建和编码保护性抗原基因的核苷酸序列分析;(2)生物杀虱剂及昆虫绝育剂的研究;(3)对中国边疆资源开发重点地区和某些战略要地开展斑疹伤寒研究。(4)目前国际上尚未知的新立克次体病在中国的发现和确证。本学科发展前沿或分子立克次体学的活跃领域:(1)立克次体感染宿主细胞的机制;(2)立克次体代谢特别是某些人兽共患立克次体它们必须依赖宿主细胞方能生活繁殖的生理、病理机制;(3)立克次体 DNA 结构

及编码蛋白的分析；(4)立克次体粘液层的性质与功能。同时应对某些发展中国家的虱传斑疹伤寒平时发生的局限性及灾害、战时可能发生的爆发流行性进行研究，当前，有效控制或消灭虱传斑疹伤寒已成为实际可行，应采取的措施包括：(1)研究斑疹伤寒分型问题，明确分型才能采取有针对性的防控措施；(2)研究试制基因疫苗，对边远地区人口及特殊职业人群进行疫苗接种，并提高广大人群卫生水平，阻断疾病的发生和流行；(3)研究不产生耐药性的杀虱剂——生物杀虱剂，昆虫绝育剂，在卫生条件差的农村地区实施有效人群灭虱措施，以遏制媒介昆虫传播斑疹伤寒。

(中国预防医学科学院流行病学微生物学研究所范明远研究员撰)

**结核杆菌的基因诊断技术** gene diagnostic technique of TB 结核杆菌的检出和鉴定始终是结核病防治工作中最紧迫的课题，长期以来缺乏一种简便、快速、敏感性高、特异性强的理想方法。随着分子生物学和基因工程技术的发展而研究开发的核酸分析基因诊断技术，以分析病原菌的遗传物质——核酸而达到快速、敏感和特异的检出和鉴定目的，为结核病和其它分支杆菌病的快速诊断和分支杆菌的分类、鉴定提供了更先进的手段，在分子和基因水平上弥补了细菌学传统诊断方法的不足。现用于结核杆菌检出和鉴定的基因诊断技术有核酸探针、染色体指纹和聚合酶链反应(体外 DNA 扩增)等技术。

**核酸探针**：它是能识别特异性核苷酸序列的带标记的一小段单链分子。其制作方法是，将已知标准菌的脱氧核糖核酸(DNA)或其片段标记后与待检菌的靶 DNA 行复性杂交，组成探针 DNA/靶 DNA 双链。标记的参比菌核酸称为核酸探针，与探针菌同源性高的待检菌则可判定为与探针菌同种。迄今为止，在结核杆菌诊断中应用的探针有 c-DNA 探针、全染色体 DNA 探针和克隆 DNA 探针。

**c-DNA 探针**是以分支杆菌核糖体核糖核酸(rRNA)为模板，通过反转录合成而后标记成的探针，与 rRNA 的基因互补。结核分支杆菌的 c-DNA 探针是群特异性探针，杂交百分率高于 10% 者为探针阳性。Musial 等(1988)检测 102 株结核分支杆菌分离株，阳性分离率为 99%，特异性为 99.2%。由于被检菌中常存在一些中间型，因此，Sherman 等(1989)将阳性切值重新划为杂交百分率大于 15% 者为探针阳性，低于 5% 为阴性；294 株结核杆菌分离株，其敏感性、特异性均达 100%。c-DNA 探针的敏感度为  $3 \times 10^4$  结核杆菌，一般用于分离菌株的鉴定。Ehner 等(1988)曾尝试在临床标本的直接检测中将 BACTEC 技术和探针技术相结合，缩短了报告时间，176 株结核杆菌分离株，2/3 可在 2 周内检出和鉴定，4 周内全部检出，与此相比，罗氏培养基和 TH11 琼脂平板培养的两周报告率分别为 5% 和 50%，最后报告时间为 8 周。美国加利福尼亚圣地亚哥基因探针公司生产的鸟复合分支杆菌快速诊断试剂盒和结核复合分支杆菌快速诊断试剂盒已在海外普遍使用。斋藤等(1988)的实验证明，这两个试剂盒具有高度的敏感性和特异性，主要用于液相杂交，测定过程只需两小时，其局限性在于检测菌种类有限，只能用于检测从培养菌中提取的 rRNA，不能直接检查临床标本中的细菌，从而限制了 c-DNA 探针的进一步开发研究和推广应用。

**全染色体 DNA 探针**是将探针菌的整个染色体核酸剪切并标记制备而成的核酸探针。结核杆菌的染色体核酸是一个分子量为  $3.0 \times 10^9$  道尔顿的大分子，存在种、群、属多种特异性核苷序列。结核杆菌群内的各种染色体同源序列高达 77.6%~95%，而鸟型的、细胞内的和堪萨斯分支杆菌同源性分别仅为 8.0%、26.0% 和 23.5%，其他分支杆菌低于 5%，因此，用结核杆菌全染色体 DNA 探针具有很好的群特异性和很高的敏感性，可检测 0.1ng 的人型结核杆菌 NDA 即灵敏度  $10^{-4}$

mgDNA，相当于 20 000 个细菌。Shoemaker(1985)利用斑点杂交加以证明，切点为 0.1 $\mu$ gDNA 可鉴别结核杆菌和鸟-细胞内分支杆菌群。Roberts 等(1987)制备了结核杆菌等 3 种全染色体 DNA 探针，均显示良好的群特异性，DNA 检测灵敏度可达 10~100pg(相当于  $10^4$ ~ $10^5$  菌体细胞的 DNA)。利用菌液杂交，61 株临床分离株鉴定率为 93%。中国吴雪琼等(1990)报告所制备的人型结核杆菌全染色体 DNA 探针也显示相似的群特异性和敏感性。全染色体 DNA 探针制备较简单，有较好的群特异性，其主要缺点是难于鉴别少数同源性高的分支杆菌，有待进一步研究。

克隆的 DNA 探针即全染色体 DNA 经限制性内切酶消化后，利用基因工程技术进行重组、克隆、筛选出特异性 NDA 片段标记形成的 NDA 探针。Chia 等(1988)制备的人型结核杆菌克隆 DNA 探针可检测 0.05ng 的结核杆菌 DNA，相当于 10 000 个细菌，与前两种探针具有同样的敏感性。Patel 等(1989)报告了两株群特异性克隆 DAN PMTb4 和 PMTb5 探针，可用于鉴别结核复合分支杆菌和鸟复合分支杆菌，迄今，克隆的 DNA 探针的研制未取得突破性进展，主要原因在子分支杆菌的基因遗传背景不甚清楚，对其基因克隆带有很大的盲目性和机遇性。只有对分支杆菌的基因图谱以及它们在发病机理中所起的作用有清楚的了解，才有可能有目的地扩增克隆基因片段，分支杆菌分子生物学才可能有突飞猛进的发展。今后的努力方向是：改进直接检测未培养的临床标本中分支杆菌 DNA 的方法，如通过聚合酶链式反应扩增标本中特异 DNA 片段，使敏感性、特异性大大提高，达到快速诊断的目的；探索非同位素标记方法，分析几种主要的致病性分支杆菌的染色体基因序列，并克隆其特异性 DNA 片段作为探针，从实验室研究过渡到临床应用。

**染色体核酸指纹技术**：核酸探针不能鉴别结核杆菌种下单位——型和株，而种下单位的鉴别在结核病流行病学和防治工作中有重要的意义。染色体核酸指纹技术是一种高灵敏度的株和型的鉴定手段。利用染色体经限制性内切酶酶切后，在电泳中呈现数目众多的带谱，经转印后杂交出现不同的杂交带谱表型而达到种和株的鉴别。Collins 等(1984)研究了结核杆菌群 17 种限制性内切酶裂片电泳带谱，发现 BSTEII 酶切图有最明显的差异。除种间差异外，对两株牛型结核杆菌参比株、结核杆菌 H<sub>37</sub>Rv 和 H<sub>37</sub>Ra 之间的微小基因变异，是缓慢生长分支杆菌种、型和株鉴别中最有前景的方法。

**聚合酶链反应(PCR)**：又称体外 DNA 扩增技术或体外核酸克隆技术，是近几年分子生物学技术最重要的发展。PCR 技术融合了快速、高敏感、高特异性、操作方便和无需培养可直接检测临床标本等优点，特别适用于难以培养和生长缓慢的病原微生物的诊断。因此，PCR 技术就成为结核病细菌诊断学最令人鼓舞的研究课题。1985 年 PCR 技术用于结核杆菌的诊断，立足于对结核杆菌特异性抗原编码基因和特异性核酸片断的核苷序列分析的基础上。PCR 扩增 DNA 的原理是，用 DNA 聚合酶引发模板 DNA，在所设计的一对引物之间序列特异性合成。经过模板 DNA 变性，引物与模板 DNA 结合，聚合酶自动延长引物而合成新的互补单链。此反应在 1~2h 自动循环 20~30 次，模板 DNA 可人工扩增  $10^5$ ~ $10^6$  倍。扩增后的 DNA 可电泳检出或以寡核苷酸探针检出，整个鉴定过程可在 24h 内完成。Hance 等(1989)报告 PCR 检测分支杆菌的敏感性，将结核杆菌 65KD 抗原编码基因序列的两个引物 TB-1、TB-2 扩增到 383 碱基序列，电泳检出敏感度为 50 毫微克 DNA，相当于 600 菌体 DNA，TB-3 寡核苷酸探针检测灵敏度可提高 10~100 倍。Pater 等(1989)扩增了群特异性克隆片断 PMTb4 的部分核苷序列，溴化乙锭电泳检测灵敏度可达 1ngDNA，相当于 1 个结核杆菌 DNA。Hermans 等(1990)也扩增了克隆核酸片断 PH7311 中 158 碱基序列，寡核苷酸探针可检测到 100ng，相当于 20 个结

核杆菌的DNA。PCR灵敏度高,又可从不同来源的临床标本中检测出分支杆菌DNA序列,在分支杆菌病早期诊断和鉴别上有很高的实用价值,亦不失为在大批人群中进行结核病及其他分支杆菌病流行病学调查和随访的有效手段。

总之,基因诊断技术的建立,是结核病细胞学诊断领域中最重大的突破,具有简便、快速、高敏感、高特异性、无培养依赖性等优点,将会为结核病的病因、诊断、治疗、预后、复发和流行病学的研究带来深远的影响。

#### 参考文献

- 1 Shoemaker S A, et al. *Am Rev Respir Dis*, 1985, 131, 760
- 2 Musial C E, et al. *J Clin Microbiol*, 1988, 26, 2120
- 3 斋藤,等. *结核*, 1988, 63, 41
- 4 Chia C P, et al. *Tubercle*, 1988, 69, 27
- 5 潘毓宣. *中国防痨杂志*, 1991, 13, 91
- 6 吴雪琼,等. *中国防痨杂志*, 1992, 14, 42

(安徽医科大学第一附属医院张安成教授撰)

### 结核菌素试验 tuberculin test 结核菌素(简称结素)

有旧结素(OT)和纯结素(PPD)两种。OT最先由Robert Koch在1890年创制,是将结核菌液体培养基滤液加热浓缩而得,用于预防和治疗结核病未获成功。1891年,这种结核菌滤液被正式命名为结核菌素。1907年, von Pirquet开始用这种结素作皮肤试验检查结核菌感染,并称结素注射局部的反应为变态反应。OT成分复杂,主要成分为菌体蛋白质,是结素特异性反应的活性物质;还有菌体自溶成分、结核菌代谢产物和培养基成分等非活性物质,是导致非特异性反应的原因。1934年以后, Seibert等人研制成功纯结素PPD,含结核蛋白80%,较OT更纯、特异性更好,逐渐取代OT。PPD也并非理想纯制品,在免疫反应中可出现30条沉淀线,仍可发生交叉反应。Kuwabara进一步纯化PPD,初步揭示结核蛋白活性肽链的分子结构,将来如能人工合成特异性更高的结素活性肽和各种分支杆菌素活性肽,对分支杆菌感染的鉴别诊断会有极大帮助。Hewitt等提出用单克隆抗体技术, Deniel等提出用免疫电泳法提取纯化抗原。日后若纯化结素研制成功,将极大提高结素试验的特异性 and 诊断的准确性。

初次感染结核菌或接种卡介苗4~8周后,人体逐渐建立特异性免疫(细胞免疫为主),同时形成迟发型变态反应,后者表现为结素试验阳性。给结核感染者或结核病人皮内注射结素,在注射部位发生淋巴细胞和巨噬细胞积聚、浸润、充血、水肿甚至坏死。这种迟发型变态反应(实质是细胞免疫反应)在注射后48~72h最明显,为试验阳性。

由于结核感染、免疫和变态反应三者同时并存,故结素试验可用于:(1)结核病流行病学调查,通过测定结核自然感染率和年感染率,监测结核病流行情况。(2)选择卡介苗接种对象、考核卡介苗接种质量。主要接种对象是新生儿和婴幼儿,结素试验阴性的青少年也可接种。接种3个月后结素试验阳性,表明接种成功;试验阴性表明接种未成功,需复种。(3)辅助结核病的诊断和鉴别诊断。(4)检测结核免疫(细胞免疫)。

试验方法和阳性标准,国外常用PPD,国内多用OT。OT纯度虽不及PPD,但反应强度与PPD大致相同,足够临床满意使用。皮下法和皮上法已弃用。皮内法较精确,被全世界广泛采用。皮内法宜选前臂掌侧健康皮肤。注射后48~72h观察结果、测量硬结,取竖径和横径的均值(mm)。各国规定的阳性标准不尽相同。美国规定5个结素单位(5TU)的PPD皮内试验,硬结 $\geq 5\text{mm}$ 和 $\geq 10\text{mm}$ 两个阳性标准,在结核高感染地区取 $\geq 5\text{mm}$ 为阳性,在非典型分支杆菌高感染地区取 $\geq 10\text{mm}$ 为阳性,这样可将误诊减至最低限度。美国胸科协会研究5TU的PPD皮内试验结果表明,活动性结核病人的结素反应以16~17mm为中心呈正态分布,各国活动性结核病人的结素反应曲线相当一致。结核感染者的结素反应曲线与结核病人的相似。中国规定

5TU的OT皮内试验,硬结 $\geq 5\text{mm}$ 为阳性, $< 5\text{mm}$ 为非特异性反应,是否由非典型分支杆菌感染引起,或因地区不同及结核感染程度的不同,有待进一步研究;6~11mm为可疑结核感染, $\geq 12\text{mm}$ 为结核感染。2TU的PPD-RT<sub>23</sub>皮内试验,硬结 $\geq 6\text{mm}$ 为阳性,6~9mm为可疑结核感染, $\geq 10\text{mm}$ 为结核感染。为避免首次剂量过大引起严重反应,既往常作分级试验:先用1TU,如为阴性,后用5TU或10TU,如仍为阴性,再用100TU或250TU,但一些研究资料指出,5TU为最适剂量,特异性和灵敏度高,假阳性和假阴性少;1TU的阳性率低,漏诊多;250TU的特异性差,假阳性率高,阳性不能确诊结核感染,但阴性常可排除结核感染。

对结素试验结果的判断须综合考虑结素本身、操作技术、受试者状况及其它因素的影响,方能得出正确结论。试验阴性的意义:真阴性是指没有任何分支杆菌(包括结核菌)感染,或在结核感染早期(初次感染4~8周)变态反应尚未建立。假阴性是指结核感染者或结核病人由于种种原因造成结素试验阴性,如疑为假阴性,应在去除造成假阴性的因素之后重作皮试。造成假阴性的因素有:(1)结素过期失效,或因光照、受热、稀释液放置太久、注射器玻璃吸附使效价降低;(2)剂量不足或注射过深、反应测量误差;(3)急性血行播散型结核、结核性脑膜炎等重症结核;(4)合并病毒、细菌等急性感染性疾病、恶性肿瘤、结节病等;(5)使用免疫抑制剂、抗肿瘤药物;(6)注射疫苗一个月内;(7)年老、体弱、营养不良;(8)血中存在抑制因子;(9)既往结素反应消弱。试验阳性的意义:表示存在结核菌感染,或已接种卡介苗,或为原已消弱的结素反应复强,或以上几种情况合并存在。

人工感染(卡介苗接种)者结素反应很少超过15mm,超过15mm提示自然感染。有结核病接触史者反应直径 $\geq 5\text{mm}$ ;无接触史者反应直径从 $< 10\text{mm}$ 增至 $\geq 10\text{mm}$ ,直径增加至少 $> 6\text{mm}$ ;无接触史但居住地区非典型分支杆菌感染流行,应将阳性标准提高至 $\geq 15\text{mm}$ ,且直径增加至少 $> 6\text{mm}$ ;符合上述几种情况可视为新近结核感染。OT中的杂质、结素剂量过大可引起假阳性反应。非典型分支杆菌感染也可引起假阳性反应,与结核感染很难准确区分,双前臂同时用结素和非典型分支杆菌素作比较试验有助于鉴别诊断,反应强度前者明显大于后者为结核感染,后者明显大于前者为非典型分支杆菌感染。

在除外非典型分支杆菌感染和上述假阴性假阳性的前提下,结素试验阳性对结核感染有肯定的诊断价值;对活动性结核病的诊断有重要辅助价值,但不是确诊依据,结核感染的健康人与活动性结核病人的结素反应强度比较接近,两者间并无明确界限。结素试验阳性并不能肯定肺部或肺外的病变就是结核病,须结合其它临床资料综合判断,最好获得细菌学的或病理学的证据,方能确诊。成人结核自然感染率高,一般阳性对结核病诊断意义不大,强阳性提示体内隐伏的结核菌正在繁殖,易患结核病,或体内可能存在活动性结核病灶。3岁以下婴幼儿(未接种卡介苗)结素试验阳性,总是意味着新近发生的原发性结核感染或原发性结核病,无病灶者应给异烟肼进行预防性治疗,有病灶者应于抗结核治疗。在结核低感染地区,结素试验对结核病的诊断价值大,是发现病人的重要工具;在结核高感染地区,对结核感染的诊断价值大,对结核病诊断价值小。随结核的诊断强调以痰中找到结核菌为确诊依据。但由于种种原因,痰菌阴性病例并不少见,1979年全国结核病流行病学调查发现,约3/4活动性肺结核患者其痰涂片结核菌检查阴性,对这类病例结素试验具有重要诊断意义。临床表现和胸片显示肺部病灶符合结核病特征,结素试验阳性,尤其是强阳性者,即使痰结核菌阴性,在除外其它肺部疾病的情况下,可以诊断为肺结核,抗结核治疗效佳可验证诊断。少数活动性结核病人结素试验可呈阴性反应,如5TU的OT或PPD的阴性反应率为1.5%~9%,有报道高达25%。因此,不能仅凭结素试验阴性轻易否定结核病的诊断。临床疑为结核病,而结素试验阴性,又无导致

假阴性的因素存在,则结核病可能性小。结素试验阴性的鉴别价值大,常可排除结核病,有助于非结核性疾病的诊断。

#### 参考文献

- 1 American Lung Association, Amer Rev Respir Dis., 1981, 124(3): 356~363
- 2 Snider D E. Amer Rev Respir Dis., 1982, 125(3): 108~118
- 3 Mitchison D A. Bull Int Union Tuberc. 1983, 58(1): 36~38  
(重庆医科大学附属医院第一医院肺科王永艾教授撰)

**中国黑热病的地理流行病学** the geographical epidemiology of kala azar in China 黑热病是一种有明显地域性的寄生虫病,其分布很广,波及亚、非、欧、美四洲的40余个国家和地区。在中国曾流行于黄河流域的17个省、市、区。经过大规模的调查和积极防治,在大部分疫区此病已得到控制,有些地区多年已无新病例发生;但在甘肃、新疆、四川、陕西等地的少数县市,近10多年来不仅发病数增加,疫区有扩大趋势,甚至在已多年无病例发生的地区又出现了新病例或新疫区。这与当时未考虑到各地黑热病的地理流行病学的异同,在措施上缺乏针对性不无关系。

由于地貌的不同,各地的传染源和媒介白蛉的生态习性等各有特征,以致同一方法的防治效果也不一样。王捷等(1976)根据地貌把中国的黑热病流行区分为平原型的、山丘型的和荒漠型的3种类型。管立人等(1985, 1986)提出土壤是影响蛉种组成和分布的主要因素。但是,就目前所知,亚力山大白蛉不仅是吐鲁番棕色荒漠土山麓的优种,也是河西走廊中部灰棕荒漠土山麓的唯一蛉种。这表明除了土壤可影响蛉种组成和分布外,可能还有诸如气候、天然植被、腐殖质等自然地理因素。为此,在以往按地貌类型分类的基础上,对气候、土壤、天然植被、动物等也应加以分析。

**不同地貌地区的自然地理特征** 平原区多处于暖温带半湿润地区,包括海河和黄淮间的平原及关中平原。地势广阔平坦,间有小片丘陵。土壤为褐色土、黑垆土,在中间亦有草甸土,土壤内有大量的腐殖质。天然植被原以落叶阔叶林为主,因久经开垦和耕种,已成为大面积耕地,村落密集,人口众多,中大型野生动物已极少。属于平原的有冀南、山东、苏北、皖北、豫东、陕西的关中、湖北东北部以及新疆喀什附近的老居民点,均为主要的农业种植区。

山丘黄土塬区属温暖带半干旱地区,东起辽东半岛至山西中部山岭和山间盆地,陇南的部分山丘及陕甘宁黄土高原地区。地面组成物质大都为黄土,天然植被为干草原、森林草甸与草甸草原交错的复合型。土壤为黑垆土,有大量腐殖质,但盐渍化普遍。山丘的特点是山峦连绵,峡谷相间,山间有小型平坝,黄土高原则沟壑陡峭,但塬顶平缓,梁峁分布于塬的边缘,除塬顶外,耕地面积小而分散,地面大多未曾垦种,居民傍山而居,村落小且散在。豺狼狐等中小型野生动物极常见。有河西走廊以东的甘肃、宁夏、川北、陕北、豫西、山西、冀北、北京北郊、辽宁等地。

荒漠区为温带和暖温带干旱地区,前者有内蒙古的西部及河西走廊,土壤属灰棕荒漠土,暖温带干旱地区有甘肃的最西端,新疆天山南路的塔里木盆地和吐鲁番盆地的荒漠地带,土壤为棕色荒漠土。两种地带盐渍均普遍,植被稀疏,为旱生灌木和半灌木,腐殖质很低,但在河流两岸及湖泊附近有芦苇、柽柳或胡杨生长的地方,则为灰甸土土壤,腐殖质丰富。有一定量的野生动物。内蒙古的额济纳旗和新疆的塔里木盆地以及吐鲁番均属此类。

#### 不同地貌地区黑热病流行病学的特点

1. 流行情况 平原区曾是中国黑热病的主要流行区,流行率颇高,最高的为44.0‰,流行极为严重,常有大流行,几乎村村都有病人,常常一家数口同时或先后发病,严重的村庄发病率高达20%,病人以大龄儿童和青年为主,婴幼儿的发病率很

低,<5岁为8.3%~50.4%,<10岁为33.9%~76.3%。在山丘黄土塬区,发病率很低,在甘肃和青海的流行率分别为16.0‰和11.5‰。病人极为散在,甚至一个乡或几个乡才有一个病人,病人间无明显的传播联系,患者以婴幼儿为主,<5岁占71.5%~86.5%,<10岁为81.0%~95.4%。荒漠区的病人更加散在,病人仅见于白蛉季节后,次年早春后即告绝迹。病人为婴幼儿,<2岁的占91.2%,<3岁的占95.9%,成年病人极少。

2. 传染源 基于生物演化系从低等到高等,杜氏利什曼原虫和其他利什曼原虫一样,在人类出现前就已存在于野生动物中,可能主要是犬科动物。由于世代繁衍和生活上的需要,人类进入有此病存在的万古荒原地区,与人为伴但活动广泛的家犬可能首先从野生动物得到感染,尔后通过犬再传给人类。从进化和发展来看,自然地理环境不同,传播环节也迥异,传染源可分为野生动物源性、动物人源性及人源性。发现自然感染的动物,除家犬外,狼、豺、狐、貉、豪猪、藏獭、小斑獾及鼠等。在平原区,内脏利什曼病犬比较少见,多数地区均无病犬,有病犬的村落黑热病不一定严重,甚或无病人发生,表明此病主要是人的病,犬仅偶有感染。在检查的93 626只犬中,感染者152只,平均感染率为0.16%,病人和病犬的关系并不密切,为人源性。在山丘黄土塬区,犬内脏利什曼病极为常见,感染率很高,为0.11%~7.32%,有的高出人感染率的几倍。在该区共检查28 428只家犬,平均感染率为0.81%(230只)。在病犬户及附近常出现病人。在过去防治黑热病时,曾普遍进行灭犬,以致家犬绝迹,人发病率亦因之下降,以后养犬重新兴起,病犬又再出现;进山较久的家犬和在山上的护羊犬均有感染的事实,说明病犬仅是续发传染源,原发传染源是包括豺在内的野生动物,家犬仅是串通宿主。这些事实说明感染的野生动物、病犬和病人都是传染源,其中病犬是主要的,为动物人源性。在荒漠区,野生白蛉的前鞭毛体自然感染率很高:塔里木的吴氏白蛉为6.0%,吐鲁番的亚历山大白蛉为2.0%,病人都发生在白蛉季节后,白蛉季节前和季节中查不到病人,家犬数量很少且从无病犬发现,说明传染源存在于野生动物,为野生动物源性。但系何种野生动物仍不明确。

#### 媒介白蛉及其生态习性

在河西走廊以东的流行区,中华白蛉是人黑热病和犬内脏利什曼病的唯一媒介。平原区的白蛉为家栖,其孳生、活动、栖息均限于居民点内,以人、牛为主要吸血源,活动范围比较局限。在山丘黄土塬区的白蛉则为野栖,以山洞、岩缝等为栖息地,其数量为村内的几倍,并以血消化后期、卵巢即届成熟或产过卵的雌蛉为多,在村内主要在畜圈栖息,住屋内极少,并以饱食鲜血、卵巢发育早期的为主,说明白蛉来自野外。新疆喀什一带的媒介为中华白蛉长管亚种,亦在住屋、家畜圈内栖息,为家栖蛉种,但亦有一定的野栖习性。在新疆塔里木和内蒙古额济纳旗则以吴氏白蛉为媒介,在吐鲁番可能还有河西走廊部分近山麓的荒漠地区以亚历山大白蛉为媒介。这两种白蛉在野外的分布极为广泛,荒漠中的各种生境都有大量白蛉,黄昏后飞入居民点活动和吸血,午夜后又飞返野外,均为典型的野栖蛉种。

在中国,黑热病主要流行于综合自然区划的温带和暖温带地区,说明上述地带具有适宜于媒介白蛉孳生和生存的基本条件。自然地理环境的因素很多,为气候、地貌、土壤、植被、动物、水文等的有机组合的统一体。人为的变化对各个地理因素的影响很大,一个因素的地域变化也往往影响其他因素的变化。又如一般棕色荒漠土的特征,由于地方性条件的不同,在不同地点,土壤性质也不完全一样。因此,研究这些因素对黑热病的流行以及媒介白蛉的孳生和生存很有意义。在荒漠区的传染源至今不明,经过垦种等人为改变,对此病的流行和媒介白蛉有哪些影响,应探索其防制的可能性。在山丘黄土塬区,除豺外,还有哪些自然感染的野生动物。中国幅员广大,各地的动物种类并不相同,野生动物宿主可能因地而异。对野栖蛉种尚无有效



的防制方法。在河西走廊中部的荒漠中有无黑热病的动物源存在? 由于黑热病一般均无再感染发生, 免疫诊断应采用检测抗原或抗体, 何者更为简便、经济、适用且有效? 这些问题均有待于加以研究。

参考文献

- 1 中国科学院自然区划工作委员会, 中国综合自然区划, 北京: 科学出版社, 1959, 4~205
- 2 Garnham P C C. Progress in parasitology. Lond on: Univ-ersity of London, The Athlone Press. 1971, 14~25
- 3 管立人, 王捷. 流行病学防治研究, 1976, (3): 225~232
- 4 管立人, 许永湘. 寄生虫学与寄生虫病杂志, 1985, 3(1): 1~4
- 5 管立人, 许永湘. 寄生虫学与寄生虫病杂志, 1986, 4(3): 169
- 6 王捷. 中国人兽共患病学. 福州: 福建科学技术出版社, 1988. 853~875
- 7 王捷. 寄生虫病学. 北京: 中国科学技术出版社, 1991. 28~40

(中国预防医学科学院寄生虫病研究所王捷教授撰)

消灭淋巴丝虫病传染源防治方案的研究 study

on control programmes of eliminating lymphatic filariasis infectious sources Hewitt (1947)、陈子达 (1954) 和 Kessel (1957) 等证明, 海群生能安全有效地清除血液内班氏丝虫微丝蚴和马来丝虫微丝蚴, 同时对成虫有良好的杀灭作用。几十年来, 海群生一直是治疗淋巴丝虫病的首选药物。

Hawking 概括了 1955~1962 年世界各地防治丝虫病情况, 认为全民普查检出的微丝蚴血症者, 给予选择性(对象)治疗, 每例 3 000~4 200mg(成人), 5~7d 为 1 疗程, 转阴率可达 70.0%~74.1%。山东省寄生虫病防治研究所(1983)对几十种对象治疗方案, 广泛系统地综合分析了班氏丝虫病的防治研究结果, 证明短疗程大剂量效果不佳, 且副反应严重; 每千克体重低于 6mg, 则效果不稳定, 且花费时间长。提倡 200mg, 日服 3 次, 连服 7 天的疗法, 微丝蚴转阴率为 62.6%~84.35%。但不论哪一种对象治疗, 1 个疗程都不能使所有的微丝蚴血症者转阴, 只有每个微丝蚴血症者都能服药全程足量 3~6 个疗程(成人每例总量 9 000~18 000mg), 才可全部治愈。

仲崇枯等报道(1989), 全民(集体)间歇服海群生(片剂)消灭班氏丝虫病, 成人每次口服 300mg, 间隔半个月 1 次, 每年服 12 次为 1 个疗程, 总剂量为 3600mg, 连续服 3 年 3 个疗程。每个疗程率, 微丝蚴转阴率分别为 66.7%(64/94)、97.8%(89/91)和 100%(83/83), 微丝蚴率从 14.3% 分别降至 3.8%、0.4% 和零; 微丝蚴密度从平均 30.8 条/60μl, 分别下降至 4.8 条、0.6 条和零条/60μl 淡色库蚊自然感染率由疗前 0.74%(14/1873)降至 0.52%(10/1906)。此法扩大应用到 8 个县、市, 均达到基本消灭(Control, 以行政村为单位, 微丝蚴率分别降到 1% 以下)。

Hawking (1967) 首先在巴西应用海群生掺拌食盐(药盐), 其浓度(海群生/食盐)为 0.1%~0.3%, 疗程 6 个月至 1 年, 不仅无不良反应发生, 且疗效极为明显, 易为接受者所采用。山东省寄生虫病防治研究所丝虫病科报告(1989), 在 3 次全民普查对象治疗基础上, 即把班氏丝虫病微丝蚴率由 19.23% 降至 8.75%, 以后用 0.24%~0.3% 药盐全民普服 6 个月, 疗后达到基本消灭。用此法在山东全省 3000 余万人普服药盐, 都达到基本消灭丝虫病。建议在班氏丝虫病高度流行区, 经过 2~3 次全民普查和对象治疗后, 微丝蚴率仍徘徊于 5%~8% 者, 再进行药盐防治, 可迅速达到基本消灭。但是, 每 2 年要进行 1 次(或在 10 年中进行 2~3 次重点监测或轮番考核)血检, 并对发现的微丝蚴血症者再给予对象治疗。潘士贤等(1989)分析药盐对马来丝虫病防治效果, 0.3% 药盐疗程 8 个月, 人均服海群生 10.8g, 疗前微丝蚴率 17.0%(298/1753)、微丝蚴密度 43.2 条/

60μl, 疗毕转阴率为 77.3%(204/264), 1 年后为 91.4%(222/243)。其中疗前微丝蚴密度 1~9 条/60μl 的观察组, 治疗 6 个月和疗后 1 年, 转阴率分别为 98.9%、100%; 100 条以上/60μl 观察组, 分别为 51.5%、71.0%。0.2% 药盐全民普服 8 个月, 人均海群生总剂量 7.2g, 疗前微丝蚴率为 14%(166/1178), 微丝蚴密度为 53.5 条/60μl, 疗毕和停药 1 年后, 转阴率分别为 66.0%(99/150)和 74.8%(95/127)。其中, 疗前微丝蚴密度 1~9 条/60μl 观察组, 治疗 6 个月和 1 年后转阴率分别为 95.0%、96.6%; 100 条以上/60μl 观察组转阴率分别为 14.3% 和 30%。潘氏认为, 在人群微丝蚴率为 14%~17% 的马来丝虫病流行区, 采用 0.3% 和 0.2% 药盐全民普服 8 个月, 微丝蚴率均未降到 1% 以下。因此, 普服药盐后应再用海群生(片剂)对原微丝蚴血症进行 1~2 个疗程的对症治疗。

段续辉等(1989)分析在不同微丝蚴率的班氏丝虫病流行区, 单纯用 0.5%、0.3%、0.2% 药盐全民普服 6 个月, 疗毕, 微丝蚴率由疗前的 1.88%~11.23% 降至 0%~0.12%, 转阴率为 99.37%~100%。停药 15 个月后, 微丝蚴率继续下降至 0%~0.04%。单纯用 0.3% 药盐全民普服(观察组)与 0.3% 药盐全民普服加对象治疗(对照组)相比, 疗毕和疗后 15 个月的效果均无显著差异。表明丝虫病流行区只需全民普服药盐, 不必加对象治疗。施用药盐浓度与人均剂量可视微丝蚴率而定; 微丝蚴率为 10%~15% 的流行区单纯用 0.5% 药盐全民普服 6 个月; 5%~9.9% 流行区单纯用 0.3% 药盐全民普服 6 个月; 5% 以下流行区单纯用 0.2% 药盐全民普服 6 个月比较适宜。单纯用药盐防治方案, 不仅优于反复全民普查普治方案, 也优于在反复全民普查普治基础上加用全民普服药盐方案。段氏同时指出, 国内一般主张在中、高度流行区采用反复全民普查普治加用药盐方案, 在低度流行区采用反复全民普查普治措施。实践证明, 低度流行区单纯用反复全民普查普治方案, 和中度、高度流行区在反复普查普治基础上加用药盐全民普服方案, 二者共同的缺点是所需时间较长和人们难以接受, 而且耗费大量的人力、物力和财力。

表 1 微丝蚴率分级与对应药盐含海群生剂量

| 每个乡最高抽查点<br>微丝蚴率(%)分级 | <0.5 | 0.5~1 | 1~3 | 3~5 | 5~10 | 10~15 | 15~20 |
|-----------------------|------|-------|-----|-----|------|-------|-------|
| 人均海群生总剂量(g)           | 2    | 3     | 4.5 | 6   | 9    | 13.5  | 18    |
| 疗程(月数)                | 2    | 2     | 3   | 4   | 6    | 9     | 12    |
| 人均 0.3% 药盐总量(kg)      | 1    | 1     | 1.5 | 2   | 3    | 4.5   | 6     |
| 乡(镇)数                 | 51   | 63    | 181 | 148 | 98   | 24    | 8     |

注: 表各抽查点微丝蚴率分别小于 0.5% 的乡, 用单纯对象治疗方案

安徽省卫生防疫站疟疾丝虫病防治科报道(1991), 用划层选点一两阶段整群—配合机械性抽样调查方法, 以乡(镇)为单位作流行区人群疗前调查, 每个乡(镇)抽查点数占该乡行政村总数 1/3~2/3, 每个抽查点血检 300~400 人, 血检总人数占该乡总人口 10%~15%。班氏丝虫病流行的 4 个县(市)、马来丝虫病流行的 12 个县(市)和班氏丝虫病与马来丝虫病混合流行的 19 个县(市), 共 35 个县(市), 平均微丝蚴率为 2.13%。其中平均微丝蚴率最高县为 10.59%, 最高乡为 21.08%, 最高抽查点为 23.42%, 最高自然村庄为 38.10%。35 个县(市)总人口 3 119.5 万, 1 312 个乡(镇)。其中 573 个乡(镇), 983 万人口, 用分乡定量送药盐到户防治方案, 即每个乡以抽查最高的微丝蚴率和微丝蚴密度作为该乡人均海群生总剂量的指标, 分别计算出各乡人均海群生总剂量与总疗程, 由县(市)政府和行政村用行政措施, 把各乡的人均定量药盐(表 1)同时分送到每家每户居民服食。待疗程最长(12 个月)的乡普服药盐完毕后, 用抽查方法作防治效果考核, 其结果转阴率为 96.18%~100%, 573 个乡、893 万人, 人均服食

0.3%药盐 2.13kg,内含海群生 6.4g,全部达到基本消灭。

张绍清等综合(1990)10个省市自治区丝虫病传播阈值研究资料观察点 21 个,其中观察开始微丝蚴率分别小于 1%的 4 个点,停止防治措施 5 年后,血检 7 243 人未检出微丝蚴血症者,蚊媒解剖未检出阳性蚊;观察开始微丝蚴率在 1%~5.26%的 17

个观察点,停止防治措施 5~9a,微丝蚴率从 0.01%~7.53%,阳性蚊数占总解剖蚊数的 0%~3.44%。

李肖彭等报告(1991)四川、广西、海南和贵州等省达到基本消灭丝虫病后的重点监测情况(表 2)。

表 2

四川、湖南、广西和贵州重点监测结果

| 县 市 | 虫 体 | 监测 时间     | 病原学 |       |               | 解剖媒蚊     |       |     | 人群抗体水平 |      |      |               |
|-----|-----|-----------|-----|-------|---------------|----------|-------|-----|--------|------|------|---------------|
|     |     |           | 村 数 | 血检 人数 | 血检人数 占流行区 人口% | 微丝 蚴血症 者 | 总只 数  | 蚊 种 | 阳性 蚊数  | 人 数  | 方 法  | 与非流行 区抗体 水平比较 |
| 南文  | 班氏  | 1982~1990 | 13  | 5491  | 4.48          | 0        | 2051  | 致倦  | 0      | 1472 | IFAT | 接近            |
| 荔波  | 马来  | 1983~1990 | 33  | 21037 | 12.11         | 1        | 3902  |     | 0      | 517  | IFAT | 接近            |
| 乐山  | 马来  | 1986~1990 | 68  | 22562 | 8.51          | 0        | —     | —   | —      | —    | —    | —             |
| 北海  | 班氏  | 1982~1990 | 5   | 35256 | 20.78         | 0        | 10918 | 致倦  | 0      | 3458 | IFAT | 接近            |

认为经过防治达到基本消灭后,随着人民物质文化水平的不断提高,人群淋巴丝虫病传染源是可以逐渐清除的。

中国丝虫病防治科研技术指导组会议(1991)提出消灭丝虫病 4 项指标,即达到基本消灭后 5~10 年内:(1)以县(市)为单位,累计血检人数占人口总数 5%以上,没有检获微丝蚴血症者;(2)蚊媒解剖 5 000~10 000 只没有检出幼丝虫;(3)抗体水平降至非流行区水平;(4)随机抽查防治前微丝蚴率高、中、低 3 个行政村,体格检查与询问病史,没有出现新的晚期病人。

#### 参考文献

- 1 仲崇祐,等. 山东丝虫病防治与研究,1983,160~230
- 2 世界卫生组织,刘翠珍,等译. 淋巴丝虫病. 北京:人民卫生出版社,1986,46~56
- 3 WHO. A manual for health personnet,1987,27~28
- 4 仲崇祐,等. 中国丝虫病防治科研论文集. 福州:福建科学技术出版社,1990.260~291
- 5 郑贤球. 寄生虫病防治与研究,1991,20(3):135~139

(安徽省卫生防疫站郑贤球主任医师撰)

**绦虫病与人体囊虫病** 绦虫又称带虫,属扁形动物门绦虫纲,营寄生生活。背腹扁平,左右对称,体长,分节或不分节。绦虫中的带绦虫和入蛔虫、人蛲虫在中国古代统称为三虫,是最早记载的一些人体寄生虫。由于在带绦虫患者大便中时常发现脱落的节片,故被称为“寸白虫”。带绦虫在中国主要有牛带绦虫(1782),又称肥胖带绦虫、牛肉绦虫、无钩绦虫。由 Goeze 于 1782 年鉴定为独立种。猪带绦虫(1758)又称链状带绦虫、猪肉绦虫、有钩绦虫。二者在形态和生活史上都很相似,但牛带绦虫的中间宿主是牛,而猪带绦虫则是猪,它也可成为中间宿主而导致猪囊虫病,又称猪囊尾蚴病。

牛带绦虫和猪带绦虫均呈世界性分布,在多吃牛肉,尤其是在养有吃生或不熟牛肉习惯的地区或民族中可成为流行,而在一般地区则仅有个别、偶然的感染。在养猪的国家几乎都有猪带绦虫的报告,但以卫生条件较差的国家较多见,在中国以东北、华北、西北和西南一些省份多见。已知该病在中国吉林、黑龙江、辽宁、内蒙、云南、广西、河南、山东、河北、山西、甘肃、青海、宁夏、陕西、新疆、贵州、安徽、四川、福建、湖北、北京、天津、上海、江苏等 25 个省、市、自治区有发生或流行。该病在人和畜间患病率悬殊很大,重点调查,有的地区牛肉绦虫患病率在 5.1%~70.7%,猪肉绦虫患病率在 0.65%~6.0%;囊虫猪检出率高达 10%~30%,囊虫牛检出率高达 35%~40%。人体囊虫病患病率约在

0.03~0.05%。

绦虫感染者多无症状,或有轻度腹痛、腹泻或便秘、腹部不适,以大便中带有绦虫节片为常见临床表现。牛带绦虫患者更常自肛门逸出绦虫节片,5%~46%可显示中等程度嗜酸性粒细胞增多症,但嗜酸性细胞也偶有达 20%~30%者。猪带绦虫病人的后患是常(42.7%~62.89%)并发囊虫病。人体囊虫病患者造成感染的原因有 3 点:(1)内源性自身感染;(2)外源性自身感染;(3)异体感染。牛、猪体内的囊虫感染与人群中的绦虫病及囊虫病呈正相关。囊虫可寄生于人体四肢躯干肌肉、心肌、膈肌、脑、眼等组织器官,造成多种损害。临床资料表明,巨囊虫感染可引起囊虫性假性肥大型肌炎,患者呈超力体型,走动无力。囊虫可寄生颅内任何部位,造成严重危害,临床表现极为复杂多变。依据囊虫寄生颅内的部位、数量、时间的不同,1985 年 11 月郑州全国 14 省区囊虫病防治研究讨论会,将脑囊虫病分为 7 型:(1)癫痫型 以癫痫为其突出症状,发作形式可为大发作、小发作、精神运动性发作或局限性发作,一个病人可以有两种以上的发作形式。(2)高颅压型 患者以头痛、呕吐、视力障碍、眼底视乳突水肿、脑脊液压力增高等为突出症状。如囊虫寄生在 3、4 脑区,患者还表现为强迫头位,布鲁氏(Brudzinski)征阳性,脑室造影可显示有囊虫寄生。另一部分病人气脑造影可发现颅底蛛网膜粘连,造成脑积水。(3)癫痫合并高颅压型 患者既往有癫痫发作又合并颅压增高症状。(4)精神障碍型 患者以精神错乱、幻听、幻视、语言障碍等为突出症状,严重者可产生痴呆。(5)癫痫合并高颅压及精神障碍型 患者癫痫发作、高颅压、精神障碍 3 种症状均有之。(6)脑炎脑膜炎类型 患者以急性或亚急性起病,表现有头痛、呕吐、脑膜刺激征阳性,脑脊液有炎性改变。(7)神经衰弱型 表现有轻微头昏、头晕、失眠、多梦、记忆力减退症状、客观检查脑部有囊虫寄生者。血或脑脊液免疫学检查阳性。

囊虫可寄生于人体眼睛的眼底、玻璃体、结膜下等部位,以眼底、玻璃体内囊虫危害最大,可使人失明。心肌囊虫可引起心电图改变。

马云祥(1992)实验研究表明,猪体一次大量或重复感染绦虫卵后,幼虫在宿主体内出现发育不齐,有滞育现象,一旦宿主内环境发生改变可使滞育的幼虫又得到发育成为囊尾蚴。囊尾蚴在猪体发育成熟的时间应为 60~70d。这正是临床上所见到一些囊虫病患者,以吡喹酮治疗后隔一段时间又有新的囊结出现的原因。亦正是临床上为什么要间歇以吡喹酮进行多疗程治疗的科学依据。

绦虫病的临床诊断,多年来以大便中发现绦虫节片为依据。

近年来在免疫学诊断研究方面,国内外学者应用间接血凝(IHA)、ELISA 试验、圆斑 ELISA 试验检查血清循环抗原法取得一定效果,可作为流行病学调查过筛或临床诊断的重要参考依据。符合率在 90% 以上。间接血凝试验敏感性和特异性低于 ELISA 试验,但后者存在假阳性和假阴性,并与包虫病有交叉反应。北京热带医学研究所研究的免疫印迹法有较好效果,26KD 且带有较高的特异性和敏感性。西安医大报道斑点免疫结合试验(DIA)的敏感性与特异性都稍高于 ELISA 法,且操作简便快速。首都医学院(1990)报道采用抗原圆斑 ELISA 试验,囊壁抗原交叉反应率最低,而囊液抗原的敏感性优于头节与囊壁。南京军事医学研究所(1990)报道的抗囊虫循环抗原(CA)单克隆抗体酶联免疫吸附试验,发现血清用胰酶消化后阳性率可提高 15%。另外,还对囊虫病特异诊断提出了新的方法。在解决交叉反应方面有所突破。哈尔滨医大(1990)首次用高压液相色谱分析制备猪囊虫抗原的研究,选择出 CF<sub>2</sub>Ag 和 CS<sub>4</sub>Ag 两组很有诊断价值的抗原成分。免疫学对诊断脑囊虫病有一定价值,但不能对囊虫病的病程进行肯定的分期诊断,其敏感性与特异性还有待于继续研究和提高。

在 70 年代 CT 未问世前,脑囊虫病诊断多靠临床表现及 X 线检查,诊断准确率很低,CT 在临床上的应用是一大进展,对脑囊虫病的诊断起到较大的帮助作用,不仅对囊虫在脑组织的部位和数量作出诊断,又可对药物疗效作考核。CT 可确诊大部分活动期和非活动期囊虫,也能诊断混杂期。马云祥(1981)报道诊断符合率在 80% 以上,在诊断钙化型方面优于核磁共振(MRI)。MRI 分辨力明显优于 CT, MRI 可将脑囊虫明确分为:活动期、退变死亡期、非活动期、混杂期。CT 和 MRI 的问世使脑囊虫病诊断的准确率大大提高。

在虫苗研究方面,甘肃省张掖市(1982)猪囊虫病免疫小组,应用全囊虫匀浆为免疫原的 Q<sub>83</sub> 虫苗对猪进行免疫接种,经小规模试验观察显示出可喜苗头,完全保护率可达 91.39%。可惜未能继续进行下去。

在治疗研究方面,绦虫病的治疗应用槟榔、南瓜子、杀绦灵(仙鹤草根芽浸膏)取得相当满意效果,治疗率可达 95% 以上。囊虫病治疗既往缺乏有效治疗药物,原西德拜耳药厂(1975)合成吡喹酮之后,使得囊虫病治疗取得突破性进展,河南省卫生防疫站马云祥等(1984)在国内首次应用吡喹酮每公斤体重 180 毫克,连用 9d 为一疗程,治疗脑囊虫病 450 例获得成功,治疗率为 65%,国内其他学者也取得同样满意效果。嗣后;又有丙硫咪唑治疗效果亦相当好,且副反应轻。两药可使虫体液化吸收,但在治疗中约有 5%~10% 的患者颅内可出现钙化点,成为患者脑内残存的癫痫源,原因尚不清楚。

预防本病需实施“驱缘灭囊”并重的方针,采取驱除人体绦虫,消灭传染源,切断传播途径的“驱、检、管、治”的综合性预防措施,可取得防治绦虫病与囊虫病的良好效果。

(河南省卫生防疫站马云祥撰)

**囊虫病血清学诊断** serological diagnosis of human cysticercosis 囊虫病又称囊尾蚴病,是人体感染猪带绦虫之幼虫——囊尾蚴而引起。常见于亚洲、非洲和拉丁美洲的发展中国家。感染后囊尾蚴多寄生于皮下、肌肉、脑、眼等组织,造成相应的损害,特别是脑囊虫病可致严重的后果。由于本病的临床表现复杂,诊断比较困难,因而血清学试验具有重要意义,其不仅能辅助确诊,还可作为疗效考核的可靠依据,同时也是进行流行病学调查不可缺少的手段。

补体结合试验(CFT)是最早应用于囊虫病诊断的血清学方法,温伯格(G. Weinberg, 1909)首先以 CFT 检测脑囊虫病患者脑脊液中的抗体。以后发展起间接红细胞凝集试验(IHA),主要用于过筛病人。随着囊虫病作为严重的经济和公共卫生问题日益受到人们的重视,科学工作者对多种血清学方法进行了尝试。

表 1 囊虫病血清学试验方法的应用情况

| 方法              | 阳性率(%)范围 |       |
|-----------------|----------|-------|
|                 | 确诊病人     | 健康人对照 |
| 补体结合试验(CFT)     | 31~80    | 0~8   |
| 免疫电泳(IEP)       | 44~87    | 0~13  |
| 双向免疫扩散(DID)     | 15~85    | 0~5   |
| 间接红细胞凝集试验(IHA)  | 10~93    | 0~20  |
| 间接乳胶凝集试验(ILA)   | 61~81    | 0~3   |
| 间接免疫荧光抗体试验(IFA) | 80~94    | 0~4   |
| 放射免疫试验(RIA)     | 10~98    | 0~0   |
| 酶联免疫吸附试验(ELISA) | 60~96    | 0~5   |

上述方法均曾试用于囊虫病的诊断、检测病人血清或脑脊液中的抗体,但它们的敏感性和特异性尚存在一些问题,常常有假阴性的或假阳性的出现,有时几种方法检测同一份标本结果不一致,其原因可能如下:(1)试验操作者的熟练程度不一;(2)方法本身的敏感性、特异性低;(3)抗原成分复杂,不同实验室应用诊断抗原浓度变化大;(4)囊尾蚴诱导或宿主的原因(如服用类皮质激素药物等)致使免疫应答多抑制,抗体水平低下;(5)宿主蛋白混入诊断抗原而产生假阳性结果;(6)囊尾蚴种间和种内可能存在不同的血清型。高新技术的发展和运用,解决了抗原分离、纯化、检测方法的准确性不高等问题,从而提高了血清学试验的敏感性、特异性和诊断效果。

检测抗体:自 1978 年阿拉姆布洛(P. V. Arambulo)首先将酶联免疫吸附试验(ELISA)应用于囊虫病诊断以来,此方法已作为常规试验方法被广泛采用,且试验抗原不断更新,大大提高了其敏感性和特异性。贝利(G. G. Beily, 1988)对猪囊尾蚴头节、囊液和囊壁抗原制剂进行比较,发现囊液抗原最敏感,应用该抗原进行 ELISA,所有活动性脑囊虫病患者都得到阳性结果。南希门图(E. Nascimento, 1987)等以囊尾蚴头节蛋白为诊断抗原检测 22 例确诊脑囊虫病人血清,阳性率为 90.9%,同时检测绦虫病及其它寄生虫病患者血清,均未见交叉反应出现,认为头节蛋白抗原可提高特异性、减少交叉反应。由于猪囊尾蚴抗原成分复杂,人们试图用纯化的抗原来提高诊断效果。帕梅特(D. Pammenter 1987)等用等电位聚焦法对猪囊尾蚴成分进行分离,发现 H<sup>+</sup> 浓度 10<sup>-10</sup>~1.59×10<sup>-8</sup> mol/L 的带作抗原用于 ELISA 最敏感,检测活动性囊虫病的敏感性为 80%,特异性为 99.5%;南希门图(1987)等用单克隆抗体纯化的头节蛋白抗原做 ELISA,具有 100% 的敏感性和特异性。另外,有人研制出简便、快速的 ELISA 薄膜斑点试验,又称 Dot-ELISA,认为该法敏感、特异,且不需特殊仪器,适于现场应用。特桑(V. Tsang, 1989)等报道,用植物凝集素亲和层析纯化的囊尾蚴糖蛋白作抗原,以酶联免疫印迹技术(EITB)对 145 例确诊囊虫病患者的血清和脑脊液进行检测,98% 为阳性;而正常人及其它寄生虫病患者的血清共 430 份均呈阴性,表明此法的敏感性及其特异性都甚满意。费尔得曼(M. Feldman, 1990)等应用 EITB 检测囊虫病人血清和唾液中的抗体,并与 ELISA 进行比较,结果 EITB 检测血清的敏感性为 100%,唾液为 70.4%;而 ELISA 检测血清和唾液的敏感性分别为 74.1% 和 82.1%。

检测抗原:要确立诊断,在宿主体内检出抗原比检测到抗体更有说服力。检出抗原提示体内有囊尾蚴寄生,而非既往感染。另外,在化疗后,病人体内抗原短期内转阴,因而检测抗原还可作为疗效考核的依据。检测抗原的血清学试验发展较晚。埃斯特拉德(J. J. Estrada, 1985)曾用免疫电泳法检测脑囊虫病患者脑脊液中的抗原,绝大多数未能检出。1989 年他对脑脊液标本进行免

疫电泳和免疫印渍分析,然后用兔抗囊尾蚴抗血清检测,18例神经囊虫病者中,14例检测到分子量为19 000和230 000的抗原,而未检出抗原的4例病人,CT扫描显示两例为脊髓囊虫病,另外两例脑部囊尾蚴全部钙化。说明在所有的活动性脑囊虫病者脑脊液中全都能检出抗原。特勒斯-基隆(E. Tellez-Giron, 1987)报道,用兔抗囊尾蚴抗血清检测17例脑囊虫病病人脑脊液中的抗原,用常规ELISA检出13例(77%)阳性,用斑点ELISA检出10例(59%)阳性,而这两种方法检测其它中枢神经系统疾病患者全部为阴性。陈捷平(1991)等用特异单克隆抗体抑制性ELISA法测定循环抗原,83例患者的血清抗原阳性率为71%;对41例脑囊虫病患者的血清和脑脊液检测,阳性率分别为78%和68.3%,单项或两项阳性的总阳性率为90.2%。而正常人和其他寄生虫病患者的血清和脑脊液全部阴性。此外,有23例患者治疗半年到1年后,21例抗原完全消失,提示检测抗原不仅可确定活动性感染,而且可考核疗效。乔罗曼斯基(L. Choromanski 1990)用高效液相色谱(HPLC)对脑脊液进行分离,然后用兔抗血清对每个峰值标本检测,结果在79例疑似脑囊虫病者中,44例检测到抗原,显示出良好的前景。

血清学试验在囊虫病诊断中极为有用,但试验方法的敏感性和特异性有待提高。急需解决的问题有:分离并去除与其它寄生虫产生交叉反应的抗原成分;确定具有最大检出效能的最小抗原组分;辨别抗原变异或血清型。这些问题的解决将有利于抗原的纯化和检测方法的标准化,从而促进试验敏感性和特异性的提高。生物学技术的发展,为囊虫病血清学诊断开辟了新的途径。杂交瘤技术制备单克隆抗体,可望广泛用于循环抗原测定、考核疗效,并可用于纯化、制备高效的诊断抗原;重组DNA技术制备核酸探针,有望能用作高效、准确的囊虫病血清学诊断方法;重组DNA技术还可用于制备融合蛋白作为经济、理想、可靠的诊断抗原替代物。

参考文献

- 1 Nascimento E, et al. J Clin Microbil, 1987, 25(7): 1181~1185
- 2 Beily G G, et al. Trans R Soc Trop Med, 1988, 82(2): 295~299
- 3 Estrada J J, et al. Am J Trop Med Hyg, 1989, 41(1): 50~55
- 4 Tsang V, et al. J Inf Dis, 1989, 159(1): 50~59
- 5 Choromanski L, et al. J Parasitol, 1990, 76(1): 69~73

(山东省寄生虫病防治研究所曹青春助理研究员;王家英审)

**隐孢子虫病 cryptosporidiosis** 由隐孢子虫(CS)引起的一种人兽共患病。1912年E. E. Tyzzer首先从鼠体发现微小隐孢子虫,分类上属原生动物门,孢子虫纲,真球虫目,艾美尔亚目,隐孢子虫科,隐孢子虫属。自1976年尼姆(F. A. Nime)首次报告人体病例后,六大洲报告病例日益增多,哺乳类、鸟类、鱼类和两栖类等近40余种动物均可感染。1986年中国陈义民等也发现牛体感染。1987年自韩范等首先报道国内人体病例以来,全国已有10余省市报道了近400例病例。CS现被列为AIDS的常规检验项目。

CS主要寄生于小肠上皮细胞的刷状缘,由宿主细胞形成的寄生空泡内。宿主吞食卵囊后,子孢子在消化液作用下从囊内逸出,附着于肠上皮细胞,发育为滋养体→I型裂殖体→第一代裂殖子→I型裂殖体→第二代裂殖子→雌、雄配子体→雌、雄配子→合子→卵囊。卵囊有薄壁和厚壁两种,薄壁卵囊的子孢子逸出再侵入肠上皮细胞,使自身体内重复感染,厚壁卵囊孢子化后排出体外,具感染性。其生活史约需5~11d。用人源卵囊感染BALB/C小鼠或接种到人胚肺细胞和猪肾细胞中培养,也可完成生活史。

CS卵囊呈圆形或椭圆形,大小为3~5μm。囊内含4个月芽状子孢子,大小为1.5×0.75μm,核1个,位于虫体后部。残余体

1个,由颗粒状物和1个空泡组成。人对CS普遍易感,2岁或5岁以下婴幼儿及免疫损害者更易感。1986年阿尔珀特(G. Alpert)等报告美国费城某日托中心的一次腹泻暴发,CS感染率达65%。1987年雅诺弗(L. B. Janoff)等报道美国同性恋AIDS患者中,CS腹感染率为28%,海地AIDS患者约半数受染。腹泻患者感染率腹患者CS感染率在发展中国家为3%~13%,发达国家为0.6%~7.3%。国内腹泻患儿中CS感染率为1.36%~13.3%。一般认为CS病在男女间无明显差异,温暖潮湿季节多见,农村比城市多,沿海港口城市比内地城市多,卫生状况差及畜牧区多见。CS病人粪便和呕吐物中含卵囊,这是主要的传染源。带虫者排出卵囊,亦是重要传染源。哺乳类动物卵囊可感染人,但动物间不交叉感染。日托中心和家庭内可聚集发病,接触病人、病畜后的人群及医护人员感染率较高,提示人际间接触是重要传播途径。1987年美国佐治亚西部发生肠炎流行,自来水中找到卵囊。1987年奥格思(J. E. Ongerth)在美国华盛顿州和加州主要河流均发现卵囊。迄今已有多起水传暴发CS腹泻的报告。经卵囊污染的食物传播虽有可能,但尚未得到证实。经空气和胃肠镜传播的可能性亦有报道。

CS的致病机理很可能是多因素的。感染CS后,大都发生水样便,无炎性细胞与血液,提示腹泻属于分泌性或毒素性,但未检出毒素。CS寄生的肠粘膜表面可出现凹陷,或呈火山口状,肠绒毛萎缩,变短变粗,或融合、移位和脱落,上皮细胞出现老化和脱落速度加快现象。导致肠粘膜表面积的缩小,多种粘膜酶的减少,而影响消化吸收都可能是腹泻的重要因素CS病的临床症状和严重程度取决于宿主的免疫功能与营养状况。免疫正常者感染后,主要表现为急性水样腹泻,多呈自限性过程。腹痛、腹胀、恶心、呕吐、食欲减退或厌食、口渴和发热亦较常见。免疫受损者感染后,通常症状多,病情重,持续性霍乱样水泻最为常见。

对本病的保护性免疫机制,尚不完全清楚。多数认为以细胞免疫为主。凡细胞免疫正常者均表现为急性自限性腹泻,病程短暂,粪中卵囊较少,排出时间亦短。而细胞免疫缺陷者则为慢性持续性腹泻,病程长,排出大量卵囊。1984年海因(J. Heine)等报道,摘除胸腺而缺乏T淋巴细胞小鼠,不能清除感染虫体,而胸腺正常鼠则表现为一次性感染。姚福宝等1989年测试约25例感染者,显示细胞免疫功能低下,体液免疫功能基本正常。已报告的有免疫活性感染者均能自发清除感染,而免疫抑制剂治疗者则表现为持续感染状态。1990年拉克塞(M. A. Iaxer)用ELISA显示,21份儿童血清中抗卵囊特异性IgA、IgG和IgM水平均显著高于对照。IFA显示抗体的结合位点在卵囊壁或子孢子内。作者用迟发型皮肤过敏反应(DTH)试验检测,发现实验组特异性抗体反应均高于对照组,而6周内DTH均低于对照,认为该免疫反应可能是一种抗体依赖的细胞介导的细胞毒反应。低丙种球蛋白血症病人易患本病,说明体液免疫也起一定保护作用。

1976年尼姆最早采用肠组织活检虫体。1978年波伦茨(J. Pohlenz)等首先在牛粪中发现卵囊。1980年齐波里(S. Tzipori)以吉氏液染色法从人粪中检出卵囊,从而建立了无创伤性诊断法。但此法不能区分卵囊和酵母。1983年后发展的全胺-酚染色法,改良抗酸染色法和沙黄-美兰染色法,这3种方法是公认的较好的方法,但存在非特异颗粒应注意鉴别。1990年韩范等将以上方法加以改进,提出金胺-酚染色-改良抗酸复染法,敏感可靠,为国内大多单位所采用。对与病人病畜接触者,复查治疗后患者等,采用浓集法如蔗糖漂浮法、甲醛-乙醚沉淀法可提高检出率。

国外已有IFA、ELISA和单克隆抗体等免疫方法用于诊断。其中单克隆荧光抗体法较敏感特异,在荧光镜下卵囊发出黄绿色荧光。1987年加西亚(L. S. Garcia)报道单克隆荧光抗体法的敏感性和特异性均为100%,可检出只有几个卵囊的标本,敏感性至少比普通抗酸法高10倍,且观察快速。作者1988年以卵囊单克隆抗体为第一抗体的间接免疫荧光法检测卵囊,其效果比所报道的任何方法均敏感、特异。但这些方法所用试剂昂贵,限制了

广泛应用。用 IFA 和 ELISA 等已在有免疫力和 AIDS 患者中检出 CS 的特异性 IgG、IgM 和 IgA 抗体,其滴度在感染后 6~8 年内升高,次年下降,这对流行病学调查有意义。1988 年米德(J. R. Mead)等用蛋白印迹法发现 CS 感染牛、马及人恢复期血清能识别一种 20KDa 子孢子抗原,且人血清识别能力一年后仍很强。提示 20KDa 抗原的血清反应可作为是否感染 CS 的标志。

至今尚无治疗 CS 病特效药物。国外已筛选 60 余种抗生素、抗原虫药,大多无效或疗效有限。1979 年魏斯伯格(W. R. Weisburger)等证实螺旋霉素有治疗效果,被推为临床治疗的首选药,但后来报道疗效并不一致。1985 年索阿韦(R. Soave)等在少数 AIDS 和 CS 患者中证实  $\alpha$ -二氟甲基鸟氨酸有减轻腹泻效果,但毒性太大。基姆(C. M. Kim)1987 年用 6-氨基-9-(2-氟-6-氟苯基)嘌呤治疗实验鼠,有显效。1987 年韩范等首次国内试用大蒜素,治愈率达 85%~100%,无明显副作用。1991 年雷格(J. E. Rehg)等筛选 23 种磺胺,仅磺胺二甲嘧啶和磺胺二甲氧嘧啶对免疫抑制鼠有治疗兼预防效果。对免疫缺陷者一般需要包括全肠胃外营养在内的强有力的支持疗法。正在使用免疫抑制剂者,应尽快停药。1987 年佩普(J. W. Pape)等报道母乳育儿的 CS 发病率明显低。高效免疫的牛初乳、牛乳球蛋白及牛转移因子亦在临床试用,可减轻 CS 患者临床症状。1990 年蒂利(M. Tilley)等虽用蛋白印迹法证实牛初乳纯化免疫球蛋白 IgA、IgM、IgG<sub>1</sub> 及 IgG<sub>2</sub> 可识别卵囊和子孢子抗原,但动物试验保护效果往往不明显。1989 年阿罗伍德(M. J. Arrowood)等制备 3 株 CS 单克隆抗体,其中 2 株能识别 20KDa 表面抗原,另 1 株能识别多种表面抗原。用新生鼠做保护试验,只有混合使用才能明显降低 CS 密度。加强人、畜粪便管理,防止卵囊污染环境。对病人应隔离并全面护理,污染器械应高压消毒。65~70℃加热 30min,冰冻、10%甲醛、5%氨水或漂白剂均可杀灭卵囊。

人们研究 CS 病已获较大进展,今后扩充研究 CS 病流行病学,掌握其流行特征和规律,揭示其主要传播途径;建立简易的体外连续培养技术或实验动物模型,积极阐明 CS 致病机制,深入探讨免疫机理,以及研制和寻找特效药及疫苗的开发,这些仍将是尚待开垦的领域。

(福州梅峰南京军区医校黄国城撰;韩范审)

**动态心电图** dynamic electrocardiography DCG 动态心电图又称活动心电图(Ambulatory electrocardiography, ACG),系美国 N. J. Holter 发明,故又称 Holter 心电图。DCG 能长时间连续记录病人在各种状态下的心脏电活动,从而捕获大量心电图信息,为临床提供大量有用的资料,应用日益广泛,已成为现代医疗实践中最重要、最流行的无创性心脏病诊断方法之一,成为临床心电图学不可缺少的组成部分。

1949 年 Holter 首创了连续记录生物电的技术,1957 年他又首先发明了小型磁带式心电图记录仪,经不断改进,于 1961 年由 Gilson 首次应用于临床,60 年代末已广泛用于心律失常和冠心病的诊断。随着电子工业技术的发展,70 年代末动态心电图仪逐步采用集成电路、微处理机、多通道同步记录、大屏幕显示、静止显示实时心电图,并用视听叠加心电图、栅状图和 ST 段、心率趋势图进行综合分析,使诊断的准确率大大提高,临床上确认其评价 ST 段变化和抗心律失常药物疗效等方面的价值,并逐步应用到冠心病诊治、心肌梗塞治疗及康复指导、起搏器的应用及医学科学研究等方面。近年来出现了小型固态的微机存贮及分析的智能型心电图仪,体积小,重量轻,操作简便,在美国等地已作为保健用品进入家庭。

目前, Holter 技术不仅用于心电图监测,并已用于动态血压监测、动态心缩间期监测、动态呼吸、动态脑电监测等多项生理指标的监测。现已有集多种功能为一体的多功能动态仪问世。目前所用动态心电图系统主要有两种:

**磁带式动态心电图仪** 主要由心电图记录器和分析系统两大部分组成。

心电图记录器,小型心电图磁带记录装置,特制 90m 长的磁带,同步记录 1~3 道心电图及记录日期、时间。记录时间一般为 24h,也可长达 48h、72h、3d 甚至 1 周以上。导联系统多采用双极胸导联,模拟 V1(Cm1)和 V5(Cm5)。Cm1 的正极在胸骨右缘 IV 肋间,负极位于胸骨柄左侧,Cm5 的正极在左腋前线 V 肋间,负极位于胸骨柄右侧。Cm1 联 P 波清楚,利于对心律失常的分析,Cm5 联多用于观察 ST-T 变化和 QRS 波变化。

心电图分析系统:为动态心电图仪的主机,可将磁带记录的信息全部还原扫描,自动分析、处理、编辑资料、打印报告。具人机对话、医生参与功能,结果可信度高。

**智能型心电图监测仪** 集心电图记录功能和分析功能为一体,微机控制、数据存贮、自动分析、接电脑或打印机或心电图机,部分或全部回放所记录的心电信息,编辑打印报告。

动态心电图实质上是长时间的日常活动状态下的体表心电图。因记录时间长,信息容量大,可弥补常规体表心电图、床边心电图监护、运动负荷心电图等检查的不足,具独到的优越性。但因有一定的限制,也有其不足之处。

DCG 的主要特点有:(1)长时连续记录心电信息,可捕获 10 万次以上的心搏,异常心电图检出率高;(2)在常态下进行病人活动不受限,可观察心电图异常与日常生活状态的关系,了解症状与心电的关系;(3)适用于年老体弱、病重、行动不便者,部分替代正规运动试验的作用;(4)电脑自动分析、打印报告,省时省力;(5)无创、安全,可反复进行。

DCG 的不足之处有:(1)导联应用受限,不能按需要加做导联,从而使 QRS 波形的改变、ST-T 变化等显示不全,限制了对心肌梗塞、心肌缺血、室内阻滞等异常的识别及定位;(2)只能在记录后回放时分析心电,而不能实时分析,影响对危急心电改变的及时诊断及治疗;(3)计算机分析尚不能完全识别误差,时有误诊,尤其是完全自动分析的智能型心电图监测仪;(4)体位、深呼吸、大便等生理情况以及电学、机械学、微机处理技术等方面的误差也可产生类似心肌缺血的 ST-T 改变,有时二者很难区别;(5)设备复杂,价格昂贵,检查费用高。

DCG 的临床应用及评价:(1)鉴别诊断一些短暂的、一过性的、模糊的、可能为心原性的症状,如心悸、胸闷、胸痛、气急、晕厥、头昏、黑朦等,了解症状发作时有无相关心电改变。(2)定性、定量诊断各种心律失常,推测预后。因记录时间长,可以捕获各种心律失常,如持续的或短阵的、快速的或缓慢的、有症状的或无症状的等等,可以判断心律失常的有无,并提供其类型、频度、起止及持续时间、轻重程度、变化规律、与日常生活、工作及昼夜间的关系等资料,判断心律失常的恶性程度,推测预后,尤其是患者猝死的可能性。DCG 发现在记录过程中发生猝死的绝大多数病人有高危性室早(Lown I<sup>+</sup>以上)。(3)定性和定量分析诊断一过性心肌缺血,协助诊断冠心病。DCG 可以发现 ST-T 有无改变,了解其形态、程度、频度分布、起止及持续时间,与日常生活、工作、运动和昼夜间的关系,心绞痛的类型(劳力型或自发型、稳定性或不稳定性、典型或变异型、有或无症状性等),为冠心病诊断提供有价值的资料,可作为早期诊断冠心病的方法,诊断率与选择性冠脉造影之间有很好的相关性,越来越受到重视,尤其对无症状性心肌缺血的诊治更有意义。DCG 诊断心肌缺血的标准:ST 段呈水平型或下垂型压低  $\geq 0.1mV$ (持续 0.08s),持续  $\geq 1min$ ,每阵间隔  $> 1min$ ;或 ST 段弓背抬高  $\geq 0.2mV$ (持续 0.08s),持续  $\geq 1min$ 。(4)指导心肌梗塞病人的治疗和康复。根据 DCG 提供的日常生活与心率、心律及 ST-T 变化之间的关系,可制定心梗者出院后的活动量和注意事项,并可定期监测,调整康复治疗方案。(5)选择安装心脏起搏器的适应症,评定起搏器功能,观察起搏器致心律失常的情况。一些动态心电图仪配有专用的起搏器分析仪。目前在心脏起搏器的应用中,DCG 是必不可少的检查手段之一。(6)药物疗效及毒性的观察。这是近年来研究的重点之一,主要用于研究抗心律失常药和抗心绞痛药物。DCG 观察发现室性早搏有自然消长的特征,一般在不同的 24h

室内早消长可达 50%~85%，用药后室早减少必须达 85%~90%，复杂性室早消失即达治疗效果。抗心律失常药物的致心律失常作用已日益受到重视，可根据 DCG 监测发现治疗后室性心律失常的恶化或新的观察，则根据 DCG 改变药物的毒性作用。抗心绞痛的药物疗效的观察，则根据 DCG 改变的改善与否来判断。目前也有报道用 DCG 观察抗心力衰竭药物的疗效及毒性的。(7)判定心脏贮备力。根据患者运动时心率、心律及 ST-T 改变情况判断心功能状态。(8)医学科研方面的应用。研究正常人及各种环境下作业的人员心血管系统生理变化、心律失常、心绞痛和发生的机制、心血管病的生物节律等。

动态心电图有长时、常态下记录心电图的特点，应用将越来越广，越来越普及。随着微电脑技术的发展，动态心电图仪将更进一步小型化、智能化，功能更多，操作更简便，价格也相应降低。适应临床需要的 DCG 应增加监测导联面不增加联线，具有实时全信息记录、实时分析、自动报警等功能。

参考文献

- 1 Holter N J. Science, 1961, 134:1214
- 2 Sami M, et al. Circulation, 1980, 62:1172
- 3 谢松诚. 医疗器械, 1982; 2:21
- 4 Boudoutas H J. Ectrocardiology, 1983, 16(1):91
- 5 Szatmary L. Cardiology 1983, 70(3):18
- 6 Hammill S C. J. Electrocardiology, 1987, 20(10):12
- 7 谢白艳. 心血管病学进展, 1988, 9(3):18
- 8 吴晔良. 心电图杂志, 1988, 7(2):77
- 9 Deedwania P C. Am J Cardiol. 1990, 65:1090
- 10 Pablo Denes MD, Am J Cardiol. 1991, 68(9):887
- 11 Dirk Hausmann, Am J Cardiol. 1991, 67(6):465

(安徽医科大学第一附属医院韩卫星、朱怀玺教授撰)

多普勒超声心动图的诊断原理与临床应用

奥地利 C. J. Doppler 发现星球间相向运动时，光波频率增高，光谱向紫色端位移，背向运动时，光波频率降低，光谱向红色端位移。这种由于光源和接收器之间相对运动引起的频率变化，称为多普勒效应。它与相对运动的速度成正比。这种物理学效应被称为多普勒效应。依据此效应，Baysballo 进行了声学研究，发现此效应同样适用于声波频率的变化。1956年，日本 Yoshida 和 Satomua 首先根据这一原理应用连续波式多普勒技术，探查心脏瓣膜的运动及其时间变化。1969年瑞典 Elder 等创举性地使用多普勒超声技术成功地探查了二尖瓣血流频谱。同年，美国 Boker 研究出脉冲式多普勒技术。1976年，挪威 Hølen, Heler 和 Angelsen 先后将连续波式多普勒技术与流体学理论，应用于心脏狭窄瓣膜的跨瓣压差及瓣口面积测量。1982年，日本 Namekawa 和美国 Bommer 等应用自相关技术和伪彩色编码，研究出彩色多普勒技术。1992年，美国 Acuson 公司的技术人员研制出多普勒组织成像技术(DTI)，拓宽了以往多普勒技术只用于探测血流信息的范畴，应用到器官组织结构运动信息的探查，这是多普勒技术在超声医学应用中具有划时代性的创举。

多普勒超声技术的种类：(1)连续波式多普勒。双晶片探头，一个连续发射脉冲，另一个连续接收反射回来的声波。(2)脉冲波式多普勒。发射一组脉冲波后，经过一个时间延迟后再接收反射回来的声波。时间延迟可人为地改变，可得到不同深度的反射回波，有利于病变的定位诊断。但检测血流速度时，受其重复频率限制。(3)高脉冲重复频率多普勒(略)。(4)多点选通式多普勒。在脉冲式多普勒基础上，应用多个不同的时间延迟，沿声束不同深度取样，提供多处不同深度的血流信息、对多部位异常血流具有独到诊断能力。(5)彩色多普勒血流显像。将获得的回声信号，经过相敏器、转换器、滤波器、自相关器处理后，再经伪彩色编码转换为彩色信号显示出来。它能较全面地显示心脏或血管内瞬时血流分布。

多普勒超声诊断原理：基于多普勒效应原理，将超声波发射

到人体，与声靶相互作用，产生一系列物理学效应。对于影像超声，声靶是具有不同声阻抗的组织结构界面；对于多普勒超声，声靶则是血流中的血细胞或/和运动的组织心脏组织结构。(后者的探查需具 DTI 技术)将不同状态下声靶对超声波的不同回波信号，以各自不同的时相、速度、方向、彩色等参数显示出来，结合影像超声和临床资料进行判断。正常血流的频谱形态为层流，异常血流的频谱为湍流。

正常多普勒频谱分析：多普勒频移值一般在 1~10MHz，恰在人的听力范围。正常血流(层流)的音频性质如哨笛样乐音，异常血流(层流)的音频为粗糙的噪音。频谱分析主要根据频谱的时相、方向、形态和幅值、宽度及灰阶度，判定其性质及程度。迎向探头的血流，其频谱位于零位线的上方为正向，背向探头的血流其频谱位于零位线下方为负向。层流频谱清晰，其内不充填；层流频谱边缘粗糙且充填。彩色多普勒血流显像特征依据仪器规定的显示方法而定。一般将迎向探头的血流以红色表示，背向探头的血流以蓝色显示，其亮度代表速度值。层流为五色镶嵌的喷射状血流束，流速过高时发生彩色反转。未显色的区域表示其流速过慢，低于检测阈值。

多普勒超声心动图的临床应用主要为瓣膜性心脏病、先天性心脏病及血管畸形、心肌病、冠心病以及心脏功能测定等。

1. 狭窄性瓣膜病：二尖瓣狭窄，频谱形态及彩色多普勒的血流显像特征：二尖瓣狭窄时，舒张期左房向左室排血受阻，左房压力升高，取样容积置于左室流入道，可探入舒张期流速快，斜率慢的紊乱血流频谱现象，此时可见舒张期增宽充填，幅度大且双峰消失的正向频谱。彩色多普勒血流显像可见占据全舒张期，超始于狭窄瓣口向左室腔延延的五色镶嵌的窄带状血流束。在瓣口短轴切面上，血流束显色范围大致反映瓣口面积。定量分析指标：(1)二尖瓣跨瓣压差。常用简化伯努利方程  $\Delta = 4V^2$  计算。式中 V 为通过狭窄瓣口射流的最大流速。(2)二尖瓣口面积测量。有两种方法：一是压差半降时间法，依据 Hatle 经验公式  $MVA = \frac{220}{PHT}$  计算。式中 PHT 为压差半降时间，220 为常数。二是连续性方程法，用公式  $MVA = \frac{Ac \cdot A_2 \cdot SV1}{DV1}$  计算。式中  $A_2$  二尖瓣主动脉瓣面积，SV1 二收缩期流速积分，DV1 二舒张期流速积分。三尖瓣狭窄：类似二尖瓣狭窄。主动脉瓣狭窄：频谱形态及彩色多普勒血流显像特征：主动脉瓣狭窄时，左室收缩期射血受阻，左室压力升高，瓣口血流呈高速喷射状，取样容积置于主动脉瓣口远侧端，可探及收缩期高幅宽充填负向单峰层流频谱，上升缓慢，峰值后移，射血时间延长。瓣口流速明显增快，一般为 3.5~4m/s。(成人正常为 1.35m/s)。彩色多普勒血流为始于狭窄瓣口指向主动脉的五色镶嵌喷射状明亮血流束。由于流速高于极限频率，多出现彩色反转，表现为蓝色血流束中心套以红色斑点。同理，在主动脉瓣口短轴切面上的血流束可大致反映瓣口面积。定量分析指标：①主动脉瓣均值压差。山东张运研究发现最大瞬时压差与收缩晚期压差的均值，可准确地预测峰间压差。以公式  $\Delta PA = 2(V_1^2 + V_2^2)$  计算，式中  $V_1$  二收缩期最大流速， $V_2$  二收缩晚期 1/3 总所测最大流速。②主动脉瓣口面积测量。测量方法较多，其中 Skjaerpe 法测量的主动脉瓣口面积不受任何瓣膜口回流的影响。以公式  $AVA = \frac{AoA \cdot SV1'}{SV1}$  计算。式中  $SV1'$  二主动脉瓣环处收缩期流速积分， $SV1$  二主动脉瓣口处收缩期流速积分。③ AoA 二主动脉瓣环面积。④肺动脉瓣狭窄：类似主动脉瓣狭窄。

2. 返流性瓣膜病：(1)二尖瓣关闭不全，频谱形态及彩色多普勒血流显像特征：二尖瓣关闭不全，左室收缩时，除将大部分血液射入主动脉外，还有部分血液经二尖瓣口返流入左房，致使左房充盈增加。将取样容积置于瓣口左房侧，可记录到全收缩期带充填负向单峰频谱，上升与下降支均陡直且峰顶圆钝。取样容积置于瓣口处可记录至双向高幅频谱。彩色多普勒血流显像为全收缩期自瓣口返入左房的蓝色为主的血流束。利用返流束与左房面

积之比,可进行定量性分析。(2)三尖瓣关闭不全(类似二尖瓣关闭不全)。(3)主动脉瓣关闭不全:频谱形态及彩色多普勒血流显像特征,主动脉瓣关闭不全时,舒张期左室不仅接受正常由左房流入的血液,还要接受主动脉返流之血液,致使左室舒张期充盈增加。将取样容积置于左室流出道内,可探及舒张期宽带充填的正向单峰频谱,(在胸骨上凹处探测为负向)且上升支陡直。彩色多普勒血流显像为全舒张期自主动脉瓣口延伸至左室流出道以红色为主的血流束,中心常套以蓝色斑点回声。定量分析指标中,以返流分数测定较为准确,张运提出如下计算公式: $RF=1-\frac{MF}{SV}$ ,式中 $RF$ =主动脉瓣返流分数, $MF$ =二尖瓣血流量, $SV$ =左室全部心搏量。(4)肺动脉瓣关闭不全类似主动脉瓣关闭不全。但部分正常人的右室流出道内可探及局限的舒张期层流或高速逆向血流束,历时短暂,血流束一般小于1cm。

3. 先天性心脏病:房间隔缺损,由于左心房压力高于右心房,因此房间隔缺损时的心内分流多为房水平的左向右分流。当出现肺动脉高压、右心衰时,右心房压力可高于左心房,此时可发生房水平的右向左分流。频谱特征及彩色多普勒血流显像特征:取样容积置于房间隔缺损处右房侧,可探及始于收缩末期和舒张早期,终止于舒张末期的增宽充填三峰或双峰频谱,左向右分流时为正向,反之则为负向,亦可为双向。彩色血流显像为舒张早期或收缩中晚期,彩色血流束穿过房间隔进入右房,且指向三尖瓣口。左向右分流时血流束朝向探头,为红色,反之则为蓝色。根据分流血流束穿隔部位,有助于判断房间隔缺损类型。定量分析指标:多用肺/体循环血流量的比值 $Qp/Qs$ 来定量分流程度。

室间隔缺损:由于左心室压力常高于右心室,因此,室间隔缺损时的心内分流多为室水平的左向右分流,发生肺动脉高压或合并肺动脉瓣狭窄时,可出现双向或右向左分流。频谱形态及彩色多普勒血流显像特征:取样容积置于室间隔缺损处右室侧,可探及增宽充填的单峰频谱。起始时相可变,多数分流始于R波后的收缩期,亦有延续至舒张早、中期者,大部分占据全收缩期。由于分流速度大,频谱上升支陡直,峰顶圆钝,轮廓曲线近于对称,且多为正向,两心室压力相近时为双向。彩色多普勒血流显像多为收缩期自左心室穿隔进入右心室的红色血流束,出现双向分流时,可见红、蓝两条血流束先后穿梭于室间隔缺损处。依据异常血流束的穿隔部位,有助于判断室间隔缺损类型。定量分析指标亦多用肺/体循环血流量的比值 $Qp/Qs$ 来定量分流程度。

动脉导管未闭:没有并发症的病人,由于主动脉压力高于肺动脉,因此,不论在收缩期或舒张期,均为左向右分流,即由主动脉流向肺动脉。此时,肺动脉接受来自右心室和主动脉两处的血流,肺循环血流量增加,分流的血液回流至左心室,致左心室负荷加重,导致左心室扩大。合并肺动脉高压时,可引起右心室扩大,发生右向左分流。频谱形态及彩色多普勒:血流像特征:取样容积置于肺动脉分叉与降主动脉间可疑异常通道的近端,亦可将取样容积置于肺动脉内进行多点探查。探及分流信号后,多需改用连续波式多普勒,测定最大血流速度。其频谱为起始于舒张早期的增宽充填高幅单峰形态,湍流频谱可占全舒张期。肺动脉高压时,频谱可只占舒张期的一部分。由于主动脉压力高于肺动脉,无论是收缩期,还是舒张期,均表现为左向右分流。但收缩期由主动脉流入的血流只能干扰肺动脉血流,不能改变肺动脉本身的血流方向和性质,因此,收缩期的血流频谱不能作为动脉导管未闭的特征性频谱,只有舒张期肺动脉瓣关闭探及的层流频谱,才是动脉导管未闭特异性诊断指标。彩色多普勒血流显像为收缩期和舒张期,尤以舒张期的红色血流束由降主动脉穿过未闭导管进入肺动脉。由于分流速度快,常常在红色血流束,中套以红、蓝、绿镶嵌的斑点,分流的异常血流多沿肺动脉外侧走行,其内侧可出现有相反方向的蓝色血束。肺动脉压高于主动脉时,亦可出现以蓝色为主的血流束,自肺动脉经未闭导管进入降主动脉。

(安徽医科大学第一附属医院赵强副教授撰)

## 超声心动图心功能测定 echocardiographic

determination of heart function 它是超声心动图技术中的一个进展,是心功能测定方法中较为正确的方法之一。对了解心脏功能、观察药物疗效及判断预后均有十分重要的意义。它不仅可以对定性分析心功能状态,在某些方面还可以定量计算其损伤程度。对病人无创伤,操作简便,用费较少,并可反复检查和动态观察。

1967年Feigenbaum氏首先用超声心动图测定心搏出量。70年代以后,此项检查获得迅速发展,且将所测得的各项指标与心导管对比,经统计学处理,证实二者有良好的相关性。中国于1975年建立超声诊断心血管病技术,至今建立包括M型超声心动图(ME)、二维超声心动图(2DE)、超声造影、彩色多普勒血流显象(CDFI)、脉冲多普勒(PDE)及连续波多普勒超声心动图(CWDE)等经胸心脏系列超声检查技术,并能以单项的或多项的综合技术应用于心功能测定。

### 左室功能的测定

ME可以从左室后壁和室间隔运动幅度、收缩速度、收缩期增厚率,左室短轴缩短率( $\Delta D\%$ ),平均周径缩短速率(mVCF),左室内径变化平均速度( $Dv$ ),二尖瓣E点至室间隔收缩期的距离(EPSS),二尖瓣前叶幅度与左室舒张期内径比( $CE/Dd$ ),主动脉搏动幅度(AOE)及主动脉后壁收缩速度(AWV)、收缩时间间期(STI)和等容收缩时间(ICT)等取得最直观而简便的参数。计算时可用光笔顺序触动各标数处,计算机则自动运算,并显示出各项指标的数据。亦可将各项算式编成程序储存于计算机内,再将测得数据输入计算机即可得出相应的各项结果。首钢医院王虹霞等用dBASE-III语言编制了超声心动图左室功能的计算机程序,一次可输出356项心功能指标。2DE借助专用计算机对其录相记录可进行连续追踪分析处理,更可全面地反映各个断面各方向心肌运动状态、收缩性、协调性、局部壁运动异常及其程度。Doppler主动脉的血流频谱分析亦可表现左室心肌特性状态。阜外医院发现PDE测量的主动脉血流速度在正常人和扩张型心肌病组间无显著性差异,因而该指标并非是定量评价左室收缩功能的可靠指标。山东医大测量正常人、冠心病人和CCM左室内5个水平的流速、加速度和压差,发现左室中部的上述指标对于评价左室收缩功能较主动脉血流参数更为可靠。

左室输出量的测定亦是衡量左室收缩期功能的重要指标。

1. 容量算法。先分别计算舒张期左室容量( $Vd$ )和收缩期左室容量( $Vs$ ),再计算每搏量( $SV$ )、每分钟输出量( $CO$ )、心输出指数( $CI$ )及射血分数( $EF$ )。具体算式有:(1)椭圆体法(Pumbo氏法)。(2)立方体法。(3)Teichholz校正公式。(4)Fortuin方程。(5)Meyer方程(用于15岁以下儿童)和(6)Givson回归方程。上述6种,以Teichholz校正公式具有较高的准确性,但在明显节段性室壁运动异常的患者,这一方法有较大的误差。

2. 二尖瓣流量算法。有房室环幅度算法、Rasmussen方程和Kavey方程等。条件应是二尖瓣血流量与主动脉瓣血流量相等。

3. 主动脉血流量算法。有(1)主动脉根运动简易算法: $SV=6.4 \times AA(mm)$ , ( $AA$ 为主动脉根部运动幅度)。(2)主动脉瓣开放幅度与根部运动综合判断法: $SV=(AVO \times ET) \times 100 - AA$  ( $AVO$ 为主动脉瓣开放幅度, $ET$ 为射血时间)。(3)根据主动脉瓣开放面积计算, $SV=$ 开放瓣口面积 $cm^2 \times s \times 180cm^2/s - 18cm^3$ 。所述主动脉血流量算法,条件是主动脉无反流。

4. Corya方程和Lalani方程是根据主动脉瓣及二尖瓣血流的综合因素计算。LVEF受心脏负荷的影响较小,是目前评价左室收缩功能的常用指标。M型超声技术测算简便,为测量LVEF的常用方法。但在节段性室壁运动异常的患者,则应采用2DE技术。因为M型技术只提供前后方向的左室短轴直径,其余的数据需根据假设计算。当心脏过大、过小或有畸形时,计算结果与实际数值有明显差异。用2DE方法时,至少可提供心室长轴、短轴两个径实测值,减少假设的误差,结果接近实际数值。但计算与

(安徽省医学科学研究所王荣仁研究员撰)

测量均较复杂,需依靠微机处理系统。具体方法有单平面法、双平面法和三平面法(圆柱-截头圆锥-圆锥体法)及 Simpson 氏方程。与 M 型超声技术相比,2DE 对于左室容量的测量具有较高的准确性。在诸种数学模式中,Simpson 公式的准确性最高,但计算较繁且成功率较低,双平面的或单平面的长椭圆公式准确性稍逊,但因其成功率较高,因而获得较广泛的应用。PDE 记录的主动脉血流频谱积分并乘以 2DE 测量的主动脉瓣环面积亦可得出心搏量。目前这一方法已被公认为无创性测量心搏量的较为准确的技术。ME 可从 MVEF、二尖瓣关闭速度(MVAC)、左房与主动脉前后径比值(LAD/AOD)、左室后壁快充盈率(PWV<sub>R</sub>)、左室后壁慢充盈率(PWV<sub>S</sub>)、左室后壁运动快充盈分数(RFFpw)和慢充盈分数(SFFpw)以及左室后壁运动心房收缩期充盈分数(AFFpw)等指标进行测定。亦可用 M 型的或 2DE 进行快充盈期左室充盈分数(RFFLv)和慢充盈期左室充盈分数(SFFLv)、心房收缩期左室充盈分数(AFFLv)及 RFR/SV(RFR 为快充盈期平均充盈率)进行测定。上述容量指标均能反映左室心肌舒张特性。Doppler 测定左室舒张功能时,主要是分析二尖瓣血流频谱,可从时间、速度指标、充盈分数(快速充盈分数,1/3 时间充盈分数)等进行测定。近年研究发现,PDE 测量的二尖瓣血流 E/A 比值并非定量评价左室松弛功能的可靠指标。中国上海瑞金医院等发现血管紧张素转换酶抑制剂和钙离子拮抗剂可逆转心肌肥厚并改善左室舒张功能。山东医大、湖北梨园医院等报告,PDE 测量左室舒张功能的参数受左室前后负荷、心率和年龄的显著影响,应用这些参数评价左室舒张功能时必须持审慎态度。

#### 右室功能的测定

ME 可由右室前壁运动幅度、增厚率及室间隔运动方向进行观测。右室射血前时间(RPEP)、右室射血时间(RVET)及 RPEP/RVET 指标亦能较敏感地反映右室心肌的收缩。2DE 对心尖部四腔心的右室壁可进行心内膜追踪及分区幅度分析。PDE 可测量肺动脉收缩期血流最大速度、平均血流加速度及血流加速时间(RACT)。由于右室探查切面有限和右室形态的复杂性,目前尚无测量右室容量的公认方法。在不同的疾病状态下,2DE 测量右室容量、SV 和 EF 的可靠性尚须进一步研究。利用 PDE 可以测量出肺动脉的每搏量,但成功率和准确性均低于主动脉血流的测量。

M 型超声技术可从三尖瓣 EF 值、三尖瓣关闭速度等指标检测。Doppler 可从(1)E 峰时间指标(1/2E 峰加速及减速时间)、(2)速度指标(E、A 峰速度,A/E 比值,E 峰平均速度=E 峰速度积分/E 峰时间)、(3)充盈分数(快速充盈分数,1/3 充盈分数)等进行测定。右室舒张功能亦常受心率、年龄、取样部位和右室前后负荷的明显影响,评价时应慎重。

应用超声技术测量心血管压力的研究已进一步深化。山东医大利用连续多普勒超声和心导管技术同步测量 PDA 患者的肺动脉收缩压、舒张压和平均压,获得了高度相关关系。山东医大附院张运等报道用二尖瓣和三尖瓣返流压差法无创性估测左右室压力最大上升速率(dp/dt max)及左右室心肌松弛时间常数的新方法,这些方法与同步心导管技术测值高度相关,值得进一步深入研究。

#### 参考文献

- 1 Ginzton L E, et al. J Am Coll Cardiol., 1984, 4(3): 509~16
- 2 周水昌,等主编. 声医学. 北京:科学技术文献出版社, 1989, 522
- 3 吴林根,等. 中国超声医学杂志, 1991, 7(4): 246
- 4 Marino P, et al. Am Heart J., 1991, 122(pt1): 132~141.
- 5 Naumann D. Z. Gesamte Inn Med., 1991, 46(8): 283~289
- 6 Miskiewicz Z, et al. Kardiologia Pol., 1991, 35(10): 211~216
- 7 Nadatani T, et al. ASAIO Trans., 1991, 37(3): 420~421
- 8 Am J Cardiol. 1991, 68(17): 1692~1697
- 9 张运. 中国超声医学杂志, 1992, 8(20): 140

**慢性心力衰竭** chronic heart failure 早在 12 世纪拜占庭帝国时期,已有人描述典型充血性心力衰竭(简称心衰)的症状和体征。18 世纪,Withering 提出“心力衰竭”这一名称及洋地黄治疗方法。由于心衰是包括许多临床综合症的总名称,所以临床上应用的名词有前向性心衰和后向性心衰,左心衰和右心衰,高排出量心衰和低排出量心衰,收缩期心衰和舒张期心衰,以及急性心衰和慢性心衰。本文主要涉及与慢性心衰有关的问题,特别是近几年在基础和临床两方面的主要进展。

近年来强调,心衰定义要符合临床实用,提出心衰是心功能不全伴运动耐受减弱的综合症,或心功能不全伴运动耐受减弱、频发的室性心律不齐和预期生命缩短,或者是由心功能不全并引起肾、神经、和激素血液动力学反应为特征的临床综合症。

许多减弱心肌收缩力的疾病均可引起心衰。在不同的国家和地区,引起心衰综合症病因的主次关系可能不同。在美国,近年来依次为冠状脉病(60%)、特发性心肌病(30%~40%),高血压病和瓣膜性心脏病。在中国,50 岁以下心衰病人主要为冠心病者,50 岁以上主要为冠心病和高血压者。

目前心衰仍然是发病率和死亡率很高的疾病。美国心衰病人约 400 万人,每年死亡约 40 万人。由于心血管疾病的不断增加,心衰也成为住院的最常见原因。引起慢性心衰心肌异常的原因仍不甚清楚,但由于心肌细胞长期超负荷导致细胞肥大、死亡,直至被纤维组织取代。在心肌超负荷的代偿过程中,能量供给不足及心脏肥厚在发病机制中起重要作用。心脏肥厚是因心肌细胞体积增大、肌节数增多,以减少每一肌节的负荷。慢性心衰病人的心肌细胞内肌原纤维增加,线粒体减少,因此高能磷酸复合物不足。肥大的心脏结构亦发生变化,其中包括每平方毫米毛细血管数量减少,毛细血管间距增大,因此氧向基质弥散的距离增大,特别是冠状动脉血液流经肥厚的心室壁的途径变长,使得低灌注的心内膜下区供能更加不足。

心功能减弱启动一些神经内分泌机制以维持循环内环境恒定,但此机制又促使心衰发展。近来的临床研究资料指出,神经内分泌激活是在左室功能不全时发生的,当明显心衰和利尿剂治疗时,神经内分泌激活进一步增强。心衰神经循环反射功能变化是因心房和动脉压力感受器功能受损引起的。受损的机制至今未肯定,可能是压力感受器结构本身的改变,而且实验证明,中度的或严重的心衰病人有明显的压力反射损害。由于心衰病人血流随器官而不同,在静止或运动时骨骼肌血流减少,冠状动脉无变化。心功能 II 级病人同位素肾造影术证明,运动时肾动脉收缩,肾血流明显减少。放射性示踪动力技术表明,心衰病人儿茶酚胺溢出量有器官特异性,在心和肾不断增加,在肺增加不明显。神经内分泌的相互作用在心、肺、肾和骨骼肌各器官间存在重要的差异。肾上腺素能神经-肾素-血管紧张素-醛固酮之间有重要的相互作用。交感神经活动使肾脏释放肾素,血管紧张素 I 经突触前膜血管紧张素 I 受体促使交感神经末梢释放去甲肾上腺素,突触后膜  $\alpha$  肾上腺素受体由于血管紧张素 I 受体激活而变得敏感。血管紧张素 I 也可能直接减弱压力感受器的敏感性。在慢性心衰患者体液和自主神经的调节最终产生肥厚和纤维化的结构变化及肥厚与扩张的临床表现。心室肌原纤维伸张有增强心收缩力的 Frank-Starling 机制,但心房也产生代偿作用。心房受迷走神经支配。运动开始增强心率主要是消除迷走神经的影响。在心衰时交感神经系和肾素-血管紧张素系统激活产生反射性的静脉收缩和水潴留,增加前负荷和后负荷,导致心功能进一步恶化。心房释放心房利钠肽。后者具有轻度利尿效果,改变静脉收缩状态。为心衰病人灌注心房利钠肽,肺楔形压明显改变,平均动脉压略减,从而增加心排出量,故心房利钠肽有阻断心衰恶性循环的作用。

除乙酰胆碱神经递质外,影响心功能的激素还有前列腺素、5 羟色胺、组胺、缓激肽和  $\alpha$  肾上腺素能协同剂等。儿茶酚胺作用



于 $\alpha$ 肾上腺素受体、激活磷脂酶c,将2-磷酸磷脂酰肌醇转变成肌醇,引起细胞内钙释放,增强肌收缩力。组胺在人仅有H<sub>2</sub>受体,可导致细胞内摄取钙而增强肌收缩力。嘌呤能受体分P<sub>1</sub>和P<sub>2</sub>两亚型。P<sub>1</sub>有正性影响肌收缩力和影响心肌收缩速率的作用;P<sub>2</sub>在腺苷协同作用下可减弱肌收缩力和窦房结活动,引起肾动脉收缩,冠状动脉扩张。心前列腺素(PG)的作用取决于前列腺素的类型。PGE<sub>1</sub>和PGE<sub>2</sub>可增强肌收缩力,导致心动过速,PGF<sub>2</sub>对收缩力无影响。但在体内及体外的研究中,内源性前列腺素对心功能的调节作用仍不肯定。内源性儿茶酚胺由于同特异性膜受体( $\alpha$ 肾上腺素能受体或 $\beta$ 肾上腺素能受体)结合而调节细胞的生理过程。由于 $\beta$ 肾上腺素能受体存在于所有细胞,受体与腺苷酸环化酶的偶联及偶联机制也可详细研究;另外,内源性儿茶酚胺或治疗性药物对 $\beta$ 受体的激活或抑制同充血性心衰、缺血性心脏病和高血压有重要关系,所以跨膜信息系统受到普遍注意。近来有人提出受体中介的跨膜信息模型。

在心脏腺苷酸环化酶系统中,cAMP的量与GS和Gi活性、腺苷酸环化酶催化单位的量和功能以及分解CAMP的特异性磷酸二酯酶的活性等因素有关。近来证明,充血性心衰与 $\beta$ 肾上腺素能受体数量减少和抑制性G蛋白量增加有关。因此,理解跨膜信息系统对合理的治疗有益。目前已知,交感神经系的活动主要由 $\beta_1$ 肾上腺素受体中介,但心脏内也发现 $\beta_2$ 受体和 $\alpha$ 受体。心肌 $\alpha_1$ 受体中介正性影响肌收缩力的作用,突触前膜的 $\alpha_2$ 受体中介抑制交感神经释放去甲肾上腺素。心 $\beta_2$ 肾上腺素受体不受神经支配,只对循环的肾上腺素和外源性刺激产生的激素起反应。

一般认为,充血性心衰的主要问题是心脏收缩功能减弱。65年前,Henderson已叙述舒张期心衰。舒张期心衰特别发生在小室腔和快心率的心肌肥大的情况下,如肥厚型心肌病、高血压心脏病、主动脉瓣手术后和冠状动脉心脏病。原因是心脏主动地和被动弛张变慢,以致在舒张期末左室终末舒张压增大,心室充盈不全。舒张期心衰存在于静止时射血分数正常的病人及心室充盈迅速减少的病人。射血分数宽达35%以上,在运动期间低氧耗。冠状动脉心脏病引起的心衰有一亚群,左室射血分数正常,主要是左室舒张功能不全。放射核素造影或多普勒超声心动图检查左室充盈情况以及病人临床情况可作出正确诊断和合理治疗。临床处理应避免使用影响肌收缩力的药物和减少负荷的药物,应审慎利尿,尽量完善抗心肌缺血方法,及使用改善左室舒张功能的药物,目前主要应用 $\beta$ 受体阻滞剂。舒张功能不全的治疗方法目前仍不理想,今后需要更多的研究。

慢性心衰由于不断损害心肌,是一种进展性疾病,预后不良。患者5年死亡率约50%。Parameshwar等研究指出,射血分数、峰形氧耗、血浆钠和血浆去甲肾上腺素浓度可作预后的预测因素。峰形氧耗可以反映心肌损害程度。峰形充盈时间缩短或速率增高与存活减少有关,情况相反表示预后良好。放射核素心室造影测定充盈的不同对预示左室收缩功能减弱的病人存活可能有价值。

治疗心衰的目的在于缓解症状,改善生活质量和延长寿命。处理心衰病人要分析综合征的严重性(通常采用纽约心脏协会的心功能IV级分法)、治疗目的及病理生理的紊乱情况,采用适当措施。最近有的学者提出下述意见:

心衰的药物治法:(1)心功能IV级者:洋地黄+利尿剂+血管紧张素转化酶抑制剂(必需时作为附加治疗);(2)心功能III级者:洋地黄+利尿剂+血管紧张素转化酶抑制剂(当必需时作为附加治疗);(3)心功能II级者:洋地黄+利尿剂、如果症状、体征得不到控制,再加用血管紧张素转化酶抑制剂;(4)心功能I级者:无特殊治疗方法。

近30年来,心衰的治疗方法取得很大进展。60年代用强效利尿剂治疗水肿病人;70年代静脉应用血管扩张剂;80年代口服转化酶抑制剂,以减轻症状,延长寿命。心脏移植也取得很大进展。现在接受心脏移植者两年以上存活率达95%,而且生活质量改善。心脏移植已成为处理心衰病人的方法之一。尽管心衰治

疗方法已取得很大进展,但目前正性影响肌收缩力的药物、血管扩张剂、抗心率失常的治疗措施和抗凝剂、转化酶抑制剂的临床应用仍存在争论;磷酸二酯酶抑制剂、肾素抑制剂也在探索中。总之,今后主要解决心衰领域内的重大问题,包括临床实践的变化和心衰病人心肌生物学、细胞学和分子生物学等基础研究。

#### 参考文献

- 1 Cohn J N. Circulation, 1988, 78: 1099~1107
- 2 Lutz J E. Am J Cardiol, 1989, 61(6): 494~495
- 3 Poole-Wilson P A. Am J Cardiol, 1990, 66: 462~467
- 4 Katz A M. Am J Cardiol, 1990, 66: 468~471
- 5 Swedberg K, et al. Circulation, 1990, 82: 1730~1736
- 6 Forfar J C. Am J Cardiol, 1991, 69: 3C~5C
- 7 Maisch B. Am J Cardiol, 1991, 67: 6C~10C
- 8 Stiles G L. Am J Cardiol, 1991, 67: 13C~17C
- 9 Ferguson D W. Am J Cardiol, 1992, 69: 523~531
- 10 Parameshwar J, et al. Am Heart J, 1992, 123(2): 421~426  
(安徽医科大学附属医院心内科程时媛副教授撰)

#### 快速室性心动过速诊治进展 advance in diagnosis

and treatment of rapid ventricular tachycardia 快速室性心动过速(VT)是一种常见的严重的心律失常,可在短时间内危及患者生命,亦是导致心源性猝死的主要原因之一。因此,了解VT的诊断和治疗概况具有十分重要的临床意义。随着临床和实验室生理检查方法的不断改进和深入研究,提高和丰富了对VT发生机理的认识,在临床心电图生理的基础上指导应用抗心律失常药物则更具有针对性,疗效大大提高,非药物治疗VT方面的进展更是发展迅速,令人耳目一新。

发病原因和机理 VT多发生于冠心病、心肌病及心脏瓣膜病变等心脏病患者中,但临床工作者近来注意到无明显心脏病依据的人亦可出现VT。1922年,Gallavardin首次描述了这类VT,以后学者们称之为“良性室速”,一般认为预后良好,也有少数猝死或发展为器质性心脏病者。近年Gallastegui等通过应用心肌活检、心血管造影等方法研究发现多患者患者可能有亚临床病变,如心脏微小血管病变等形态变化,少数为致心律失常性右室发育不良。室速可能为心肌病变早期或首发的临床表现。

在对VT发生机制的研究中,有学者最近从组织学上发现患者心肌细胞间存在许多缔结组织,因而易出现折返、传导延迟和局部兴奋灶,为解释发生机制中的电生理现象提供了解剖形态基础。还有人注意到,心脏交感神经分布于心外膜面,透壁性急性心肌梗塞可使交感神经的传出冲动阻滞,这时心脏处于去交感神经状态,对交感神经递质去甲肾上腺素极为敏感,易于发生VT。持续性VT1的特性可由电生理检查技术确定,而非持续性VT的研究较为困难,性质较难解释。目前主要是探讨持续性VT机理。研究方法主要依靠程序刺激法(PES)和心脏标测法。药物方法相对逊色,但在抗心律失常方面仍有独到之处。大量实验证明,能由PES诱发的VT多为折返性室速,而自主节律性VT常不能诱发。目前存在的问题是,不同的实验室使用的PES方法不同,因而在研究VT时得出的结果不一。多数实验室证实,附加起搏心脏的刺激越多,如3个或4个额外刺激,越易得到几乎不变的多形态VT,甚至室颤,甚至对无心脏病史的正常人亦可诱发VT,目前尚无令人满意的PES方案,一般认为:(1)3个附加刺激对诱发单形性VT是必要的。(2)用不同频率刺激及刺激不同部位,可使PES诱发VT,因而敏感性增加到90%,但增加刺激易诱发非特异性VT而降低特异性VT。(3)如仍未诱发出VT,可加用异丙肾上腺素等药物辅助。触发性VT可被超速起搏诱发,但少于50%,运动相关室速和正常人室速偶也可被此法诱发。

VT分型和心电图特点 公认持续性VT为持续30s以上或必须用起搏器或电复律终止。非持续性VT为连续3个以上室性搏动或在30s内自行终止。由于在正常人亦可用电生理方法诱

发出3~4个连续室早,以及为区别普通心电图连续3个室早为短阵室速的心电图术语,临床电生理工作者现提出以至少连续6个以上室性搏动为可诱发的非持续性VT标准。VT为一组心律失常,不同学者根据VT发作持续时间、QRS形态和发生机理而提出不同分类方法。下面介绍根据发生机理结合心电图(ECG)特征分类的方法,其优点是便于临床治疗。

1. 折返性VT:(1)早搏型VT:为最常见的类型,一般均见于器质性心脏病,伴血液动力学障碍,可持续反复发作,甚至发展为室颤。ECG中常以一室早搏开始,发作和终止均突然。心率在130~180次/min左右。(2)尖端扭转型VT为恶性VT之一。凡引起心肌复极差异增大的因素均可引起发作,如低血钾、某些药物、心动过缓、先天性Q-T延长综合征等。系由于心室复极离散度增大引起多环折返或折返环不规则所致。ECG中QRS波极性及其振幅呈时相性变化,Q-T间期延长,T/u波增宽,长联律室早伴RonT等,室率均>180次/min。(3)短阵发作性VT较少见,病因不明,可伴有或不伴有心脏病,ECG中呈短阵反复发作,每阵由3~6室早组成,间隔少数窦性心动。

2. 自律性VT:(1)并行性VT多数呈良性过程,短阵间歇发作,室率相对较慢,ECG示并行心律特征,一般室率>70次/min。(2)自主性VT临床过程相对良性,很少引起循环障碍或室颤,偶尔见于正常人。多见于急性下壁心肌梗塞、心肌炎、高血钾等患者。通常短阵发作,不超过连续30个心动,频率55~110次/min。(3)分支性VT患者多年青,无器质性心脏病依据,亦多数呈良性过程。ECG中可呈右束支阻滞伴电轴左偏或右偏;或呈左束支阻滞图形,QRS时限<0.12s,心动过速终止后,下壁和前壁导联T波出现暂时性倒置。

3. 发作性VT:(1)多形性室速伴短阵联律间距,系由触发活动的早期后除极引起,患者多无器质性心脏病依据,ECG中呈多形性室速,室率≥300/min,Q-T间期、T/u波正常,室早联律间距短,形成特殊的短联律,正常Q-T间期的RonT现象。(2)特发性良性VT患者一般年青,无明显器质性心脏病,预后良好。VT发作时,ECG为右束支阻滞伴电轴左偏,窦性心律时ECG正常。(3)洋地黄中毒性VT与洋地黄中毒使细胞内钙离子超负荷导致延迟后除极有关,ECG包括单形性或双向性室速。此外,尚发现运动诱发的VT、急性心肌梗塞后再灌注性VT等可能与触发机理有关。

也有人赞成简单分型,如David在最新第3版《心律失常》一书中仅分为单形性VT、加速性自主VT和多形性VT共3类。

VT的治疗有药物治疗和非药物治疗。在VT伴血液动力学障碍时,临床应用已久的直流同步电转复仍不失为有效的首选方法。近年来,虽开展了各种非药物治疗方法,但药物治疗仍是主要方法。目前由于临床电生理检查未广泛开展,对大多数VT的治疗仍为经验性的。因VT多见于老年人和有心脏病者,其机理可能是折返、触发和自律性增高,因而治疗目标分散。用PES方法选择抗心律失常药物治疗VT疗效肯定,有报道用PES选择用药治疗VT的复发率两年内仅20%,而对照组为60%~80%。但PES方案和评价疗效标准尚有待研究,加之有些患者不易诱发VT和PES为创伤性检查,有一定危险性,临床尚未广泛开展。近10年发展的埋藏式自动复律一去颤器和心内膜VT病灶电灼术虽临床应用例数不多,但结果令人鼓舞。在VT的治疗中仍必须强调对原发病的治疗以及纠正电解质紊乱、酸中毒、缺氧、心衰等诱发因素。

1. 抗心律失常药物的应用。抗心律失常药Ia、Ib、Ic和Ⅲ类均有效,有些钙通道阻滞剂亦有效。临床应用已久的利多卡因仍为一首选药物,慢心律和氟卡胺亦被列为一线药物,但有人发现氟卡胺有负性肌力作用,不宜用于心衰和心脏扩大者。胺碘酮无明显负性肌力作用,疗效肯定,常作为二线药物,用于其他抗心律失常药物无效时。其缺点是起效慢,不适合用于有明显血液动力学障碍者。近年提倡几种药物联合应用,特别是在对单一某种药物产生耐药性后,以不同抗心律失常机理联合的联合用

药,如慢心律+胺碘酮、慢心律+奎尼丁等,常可奏效。(1)持续性VT:有血流动力学障碍时立即电复律。无复律条件时,可选用利多卡因,按1mg/kg稀释静注,10min后无效可重复,1h内不超过200~250mg,室速终止后以1~4mg/min静滴维持。亦可选用慢心律、心律平、普鲁卡因酰胺等药。(2)尖端扭转型VT:凡引起心肌复极差异增大的条件均可引起发作,如低血钾、某些药物等,因此不可忽视对诱因的治疗,同时可(1)提高基本心率。心室率至少达100次/min以上,缩小心肌复极的差异,终止折返。首选心房或心室电刺激起搏。经食管心房起搏不失为简便、实用的方法。药物可选异丙肾肾上腺素静滴。若患者有高血压病和心肌缺血,可改用阿托品。(2)静注硫酸镁。镁不缩短Q-T间期,但可使复极趋于一致,对高血压、心室激惹等不宜用异丙肾肾上腺素而又心脏起搏者尤为适应。硫酸镁可静注,故较静脉补钾更利于紧急治疗,可用2.5g稀释后缓慢静注,然后1mg/min静滴。此类室速禁用Ia、Ic及Ⅲ类抗心律失常药,可试用Ib及I类药物治疗。(3)室性并行性VT首选I类药,其次Ⅲ类药,一般疗效差,窦性心律增快时心律失常可消失。而自主性VT临床过程相对良性,通常不宜用抑制性抗心律失常药物。(4)多形性VT伴短联律间距,一般I~Ⅲ类抗心律失常药物无效。由于心室除极系内向钙离子流使膜电位震荡所致,故异搏定极有效。另异丙肾肾上腺素促进钙离子内流,可使发作延续、加重。(5)特发性良性VT,其机制可能为触发活动,亦有少数人认为与钙离子内流、折返有关。I~Ⅲ类药物无效,而异搏定有效。运动诱发VT、急性心肌梗塞后再灌注性VT异搏定亦有效。(6)洋地黄中毒性VT,停用洋地黄,静脉补钾、利多卡因、苯妥英钠治疗。

2. 非药物治疗。除传统的直流电复律外,随着临床心脏电生理技术不断完善,近10年相继开展的有导管电灼术、各种抗心律失常起搏器和外科手术。中国南京、上海、苏州各地学者于80年代中期也先后开展了此项工作,并取得可喜成绩。非药物治疗方法一般仅用于VT伴严重血液动力学障碍、药物难以防治、反复发作失去劳动和生活能力者。另外还取决于医院的条件和经治医生的经验。(1)人工心脏起搏器应用:有许多VT不被药物终止,但可被程控扫描或超速起搏终止,尤其对折返型VT更有效。不足之处为有加速VT、诱发室颤的危险。(2)植入性心脏复律除颤器(AICD):1980年Mirowski成功地应用AICD治疗反复发作VT患者,目前国内也有报道。AICD具有心搏监视和直流电复律两部分功能,能正确识别窦性心律和室颤,并自动直流电复律。尤其适用于曾有室颤所致的心脏停搏者和反复发作的持续性VT者。但发作极为频繁者不宜植入,因短期反复复律使能源很快耗竭。对已植入单极起搏器者,如再植入AICD则可将单极起搏信号误为心搏而判为VT放电。AICD价格昂贵,体积较大亦限制其广泛应用。(3)心室电消融术:自1984年Hartzler开展导管法心室VT起源灶电消融术以来,至今正式登记的病例数已近200例,成功率达75%,疗效如何,评论不一,但最初的结果是令人鼓舞的。令人欣喜的是90年代初中国学者远绳亦成功地应用该技术治疗VT患者。由于心内膜标测确定室速异位起搏点技术难度大,而且不易十分准确,消融深度仅限于心内膜下而不能涉及心肌深层和心外膜异位灶,并有心肌穿孔、心肌损伤造成附壁血栓、栓塞之虑,故仅限于VT危及生命而又无其他适合方法者。(4)VT的外科手术治疗:外科手术方法较多,主要为直视手术下切断折返环路和切除VT异位灶。手术成功与否为取决于定位的准确性和心肌病变是否进行性重建新的折返环路和异位灶。

近年来抗心律失常药物疗效的评定引起人们关注。寻求较为客观、易行的方法来正确评定疗效,便于各种治疗方法的对比。普通ECG是评定临床常用方法,是评定药物净效应简单而实用的指标。但由于心律失常有自发减少或增大的自然变异范围,ECG作为定量指标尚不完善,动态心电图(DCG)用于评价疗效引起人们的注意。PES可重复诱发的VT,用药后如同样条件不能诱发可据此判断有效。一般认为PES较DCG阳性率和准确性

高,但存在判断标准不一和对某些 VT 不能诱发的问题。

在应用抗心律失常药物治疗 VT 时,还必须警惕其致心律失常的副作用。用药后出现新的更为严重的心律失常或原有心律失常加重,应考虑为抗心律失常药物所致的心律失常,其发生机理目前尚不清楚,有待进一步研究。

#### 参考文献

- 1 Wellens H J J. Circulation, 1978, 57: 845
- 2 Josephson M E, et al. Circulation, 1979, 60: 143
- 3 Bergdahl D M, et al. Circulation, 1980, 62: 879
- 4 Mirowski M, et al. N Eng J Med, 1980, 303: 322
- 5 Roy D, et al. Am Heart J, 1983, 105: 1
- 6 Brugada P, et al. Circulation, 1984, 69: 87
- 7 黄元铸,等. 模拟中国循环, 1986, 1: 65
- 8 Gallastegui J, et al. Am J Cardiol, 1986, 57: 174
- 9 David H B. Cardiac Arrhythmias preclinical notes on interpretation and treatment London: WRLGHT, 1987, 3: 30~31
- 10 Mark E. Circulation, 1987, 75(3): 41

(安徽医科大学第一附属医院唐海沁副教授撰,朱怀玺审)

**房室传导阻滞** atrio ventricular Block 房室间传导障碍统称房室传导阻滞(A-VB)。房室传导过程(即心房内、房室结、房室束以及束支—浦肯野系统传导)中,任何部位的传导阻滞都能引起房室传导阻滞。从解剖生理的角度看,房室结、房室束与束支的近端为传导阻滞的好发部位。

**分类** A-VB 可分为生理性的与病理性的两大类。生理性传导阻滞,房室传导系统各部位的不应期并无异常,而因自心房下传的激动发生过早或频率过快,当它到达房室交界区时,后者尚处于生理性不应期,从而产生传导延缓或传导中断。病理性传导阻滞:是由于房室传导系统的应激性病态降低、不应期病态延长所致的传导阻滞,可由传导系统的器质性的或功能性的改变引起。

按阻滞部位常分为房室束分支以上的与分支以下的阻滞两类。还可按病程分为急性的和慢性的 A-VB;慢性的还可分为间断发作型与持续发作型。也可按病因分为先天性的与后天性的房室传导阻滞;或按阻滞程度分为 I 度、II 度、III 度;I 度 A-VB 传导时间延长,但每个来自心房的激动都下传至心室。I 度有部分冲动传导中断,通常又进一步分为莫氏(Mobitz) I 型和莫氏 II 型。莫氏 I 型也称为文氏(Wenckebach)现象型。II 度房室阻滞也常称为不完全性房室阻滞。III 度 A-VB 则全部冲动传导中断,也称完全性 A-VB。从临床角度看,按阻滞部位和阻滞程度分类不但有利于估计阻滞的病因、病变范围和发展规律,还能指导治疗,因而比较切合临床实际。

**病因** 引起房室传导阻滞的病因很多,常见的有心肌炎、心肌病、缺血性心脏病和特发性传导阻滞。既往因风湿热所致的 A-VB 并不少见。近年来由病毒性心肌炎引起者则日见增多,所致 II 度 A-VB 多见于青壮年,且 90% 左右可在住院 1 周内消失,常见的为房室结水平阻滞,极少转为慢性 III 度 A-VB。根据病毒史、转归良好和排除风湿活动便可诊断。在心肌病中,以扩张型心肌病所致 II 度 A-VB 多见,此类患者有心脏扩大、心功能下降,诊断并不困难。缺血性心脏病所致 II 度 A-VB 与特发性传导阻滞最难区别。既往对中老年 A-VB 的病因考虑冠心病的居多,然冠状动脉造影并未发现异常,从而表明臆测性诊断往往不可靠。这种原因不明的 A-VB 可能为特发性传导系统退行性变所致,急性下壁或前壁心肌梗塞,心脏手术引起的传导系统损伤也可引起 A-VB。先天性心脏传导系统缺损少见。另缺氧、电解质紊乱、药物作用(如洋地黄、异搏停等)、甲亢和迷走神经功能亢进等可引起传导系统功能改变。

**临床表现** I 度 A-VB 者常无症状,听诊时心尖部第一心音减弱,是由于 P-R 间期延长,心室收缩开始时房室瓣叶接近关闭所致。II 度 A-VB 患者可有心脏停跳或心悸感,听诊可发现心

音脱漏,脉搏也相应停搏。心室率缓慢时可有头昏、乏力、活动后气促甚至短暂昏厥。III 度 A-VB 者,除上述症状外,还可能进一步出现心、脑供血不足的表现,如智力减退、心衰等,特别严重的是当心室率过慢、心室起搏点不稳定(往往是房室束分支以下阻滞)或心室停搏(超过 15s 时)可出现昏厥、抽搐和青紫,即所谓阿-斯综合征发作;如能迅速恢复心室自主心律,发作可立即中止,神志恢复,否则可导致死亡。听诊时心室率慢而规则(30~50 次/min),第一心音强弱不等,由于房室收缩不协调,可闻及“大炮音”及心房音。如有房收缩与三尖瓣关闭同时进行,则颈静脉搏动出现巨大 A 波。心室率缓慢常引起收缩压升高和脉压增宽,每搏量增大可产生肺动脉瓣区收缩期喷射性杂音和心尖区第 3 心音。

房室束分支以上阻滞,大多表现为 I 度或 II 度 I 型 A-VB,病程一般短暂,少数持续。阻滞的发展与恢复呈逐步演变过程,突发者少见。发展成 III 度时,心室起搏点多在房室束分支以上(QRS 形态不变),这些起搏点频率较高,为 35~50 次/min(先天性房室传导阻滞时可达 60 次/min),且较稳定可靠,因而患者症状较轻,阿-斯综合征发作少见,死亡率低,预后良好。

房室束分支以下阻滞(三分支阻滞),大多先表现为单支的或双束支的传导阻滞,而房室传导正常。发展为不完全性三分支阻滞时,少数人仅有交替出现的左束支传导阻滞或右束支传导阻滞而仍然保持正常房室传导,多数则有 I 度、II 度(II 型)、高度或 III 度 A-VB,下传的心搏仍保持束支传导阻滞的特征。早期 A-VB 可间断发生,但阻滞程度的改变大多突然。转为 III 度 A-VB 时,心室起搏点在阻滞部位以下(QRS 畸形),频率慢,25~40 次/min,且不稳定,症状严重,容易发生心室停搏,阿-斯综合征发作常见,预后差,死亡率高。

1. I 度 A-VB: (1) 每个 P 波后均有 QRS 波群。(2) P-R 间期延长(成人 > 0.20s, 老年人 > 0.21s, 儿童 > 0.18s) 或超过相应心率时 P-R 间期的正常上限值。此外,同一个人在不同时候描记的心电图上,如果心率没有改变而 P-R 间期增加 0.04s 以上,亦应考虑 I 度 A-VB 的可能。当心率增快时, P-R 间期不缩短,反而比原来延长 0.04s 以上,也应考虑 I 度 A-VB。有时 P-R 间期明显延长, QRS 波群发生较晚, P 波可能埋伏于前 1 个心搏的 T 波内;偶尔因 P-R 间期过长,大于 P-P 的间距,于是在 1 个 QRS 波之前有两个 P 波,第 1 个是下传 P 波,引起 QRS 波群,第 2 个 P 波虽然在 QRS 波群之前,但并不下传,这第 1 个下传 P 波称为“跳跃或越过程 P 波”,常见于同时有 II 度房室传导阻滞时,阵发性室上性心动过速伴有房室传导障碍时。当显著窦性心律不齐伴 I 度 A-VB 时, P-R 间期可随其前的 R-P 间期的长短而相应地缩短或延长。

2. II 度 A-VB: 部分心房激动不能传至心室,一些 P 波后没有 QRS 波群。(1) 莫氏 I 型 A-VB: 有文氏现象: ① P-R 间期逐渐延长,直到 P 波受阻,发生 1 次心搏脱落(P 波后无 QRS 波群)。② R-R 间期逐渐缩短,直到 P 波受阻。③ 包含受阻 P 波的 R-R 间期比两个 P-P 间期之和为短。临床上不典型者文氏现象却远较典型为多见,特别见于文氏周期过长(例如房室传导 > 6:5)者。通常认为凡有 P-R 间期长短变化和间歇性心室漏搏而又不完全符合典型文氏现象基本规律者属之,其诊断要点: ① P-R 间期不是进行性延长,表现有几个 P-R 间期长短相等或者有波动,以及 P-R 间期出现意外地延长或缩短; ② P-R 间期的增量不是进行性减少,而是反而增多,或无增量甚至减量; ③ R-R 间歇不是进行性缩短,由于 P-R 增量无一定规律性,或窦性心律不齐,致 R-R 间歇长短不一; ④ 以反复心搏告终的文氏周期; ⑤ 由于隐匿性传导或连接处性逸搏致文氏周期结尾的长间歇异乎寻常地延长; ⑥ 由于房室传导时间长于心房激动周期,出现被跳跃的 P 波; ⑦ 交替性文氏周期。(2) 莫氏 II 型 A-VB: ① P-R 间期保持恒定, P-R 间期可为正常或延长。② 有间歇受阻的 P 波,其后无 QRS 波群。

Marriot 等(1984, 1986 年)基于目前对 I 型的和 II 型的阻

滞特点的了解,提出了 I 型和 II 型阻滞的鉴别方法(见表)。另外,还可借助颈动脉窦按摩及(或)阿托品试验,可作出较可靠的诊断。

|     | I 型                                       | II 型                             |
|-----|-------------------------------------------|----------------------------------|
| 临床  | 常是急性的                                     | 常是慢性的                            |
|     | 下壁心肌梗塞时多见                                 | 前侧壁心肌梗塞时多见                       |
|     | 风湿热                                       | Lenegre's 病                      |
|     | 洋地黄中毒                                     | Lev's 病                          |
|     | 心得安等药物作用                                  | 心脏病                              |
| 解剖  | 常是房室结,有时为希氏束水平的阻滞                         | 总是下结下阻滞,常为束支阻滞                   |
| 电生理 | 主要是相对不应期延长递减传导                            | 主要是绝对不应期延长,很少或无相对不应期,呈全或无传导      |
| 心电图 | R-P/P-R 成反比关系<br>P-R 间期逐渐延长<br>正常的 QRS 波群 | 固定的 P-R 间期<br>P-R 间期正常<br>束支阻滞形态 |

高度 A-VB: 3:1 或更高层次的 II 度 A-VB(如 4:1, 5:1, 6:1 等)也可称为高度 A-VB。绝大部分 P 波被阻而仅个别或极少数 P 波能下传心室的 I 度 A-VB, 称为几乎完全性 A-VB。高度 A-VB, 是代表偶发的或交替脱落的心房激动和完全性阻滞之间的一个中间阶段。在诊断时有两种情况应该注意: 首先, 如在房扑时房率可高达 300 次/min, 此时如有 4:1 阻滞, 则心室率为 75 次/min, 正是所期望的正常的生理要求, 而绝非病理改变。所以只有在房率  $\leq 135$  次/min 时这个定义才适用。其次, 交界性或室性异位心率的频率过快, 亦可导致房性激动不能下传, 这种房室干扰极易被误诊为高度 A-VB。只有当交界性或室性逸搏心率  $< 45$  次/min 时, 有合适下传的条件而房性激动连续未能下传才能认为是高度 A-VB。高度 A-VB 可以是莫氏 I 型的或 II 型的阻滞, 其 R-R 间歇几乎总是不规则的, 因为除了个别下传搏动外, 常发生交界性逸搏或室性逸搏。当有隐匿性传导及/或意外传导(空隙现象、魏登斯基现象和超常传导)参与时, R-R 间隔可意外地不规则。

3. III 度 A-VB(完全性 A-VB): (1) 全部 P 波不能下传, P 波与 QRS 波群无固定关系。(2) 心房率快于心室率, 心房心律可以是窦性的或起源于异位。(3) 心室律缓慢而匀齐, 心室心律由交界区或心室自主起搏点维持。III 度 A-VB 时, 心室率和 QRS 形态取决于阻滞部位。若在希氏束分支以上, 其频率为 35~50 次/min, QRS 形态正常; 如在希氏束分支以下, 其频率大多为 25~40 次/min, QRS 波形宽大畸形。应当指出, 如果完全性房室结或希氏束内阻滞与一侧束支阻滞或室内阻滞并存时, 则虽然是交界性逸搏心律, 其 QRS 波群必然是宽而畸形的。

阿托品和迷走神经兴奋措施对 A-VB 的诊断意义 诚房室结有丰富的副交感神经(主要由左侧迷走神经支配), 其兴奋使其不应期延长, 传导性减慢。而自希氏束上部起, 越往下副交感神经支配力越薄弱。因此迷走神经通常仅影响房室结传导, 对希-浦传导系统一般无影响。在房室传导阻滞时, 如小心地采用兴奋迷走神经的措施, 如按压颈动脉窦等, 可用于对阻滞部位的诊断。迷走神经兴奋使传导阻滞加重, 提示为房室结部位的阻滞; 如阻滞程度减轻, 则提示为希氏束或双侧束支的阻滞。此时因迷走神经兴奋使进入异常的希-浦传导系统的冲动数减少而改善房室传导。阿托品则因增加心房频率和改善房室传导而使希-浦系的传导抑制。所以使用阿托品有助于鉴别 I 度 A-VB 的 I 型和 II 型阻滞及 I 度 A-VB 的阻滞部位。对完全性房室传导阻滞, 用阿托品后逸搏心律增加显著的( $\geq 72$  次/min), 提示阻滞在房室结部

位, 而希-浦系的逸搏心律则仅有轻度增加, 且可出现 QRS 波群增宽。

兴奋迷走神经的措施和阿托品对确定房室传导阻滞的部位及预后是有重要临床意义的, 如再结合其他心电图表现, 则可对绝大部分房室传导阻滞的部位作出临床诊断。

对房室传导阻滞的重新分类 房室传导阻滞的传统分度是有缺陷的。因为它的分度仅根据房室传导比率一项, 而忽视了具体的心房率和心室率, 并不能反映传导障碍的严重性。房室阻滞的预后和治疗, 不仅取决于阻滞程度, 更重要的是发生阻滞的部位, 而“度”不能反映阻滞的部位, 这正是传统的划分“度”这一概念的不足之处。为了改善目前 A-VB 分类的缺点, 近年来国外一些作者提出了 A-VB 分类的新方法。这些分类虽各有其优点, 亦有其电生理学的基础, 但尚不够成熟并有待于被进一步认可。现介绍其分类法如下:

1. 由 Fox 等在 1982 年提出的 A-VB 分类法: (1) 房室结阻滞; 简单的阻滞或单部位阻滞: ① I 度 A-VB(P~R 为 0.21~0.60s), ② I 度 A-VB(文氏型传导或 I 型阻滞), ③ 严重的(包括完全性的)A-VB; 复杂的或两个水平的阻滞: ① 窦性心动过速或房速伴结上部文氏型传导和结下部 2:1 传导(交替性 B 型文氏传导); ② 房扑伴 a, 3:1 传导(结上部的 3:2 文氏传导和结下部的 2:1 传导), b, 交替性 2:1/4:1 传导(结上部的 2:1 和结内的 3:2 文氏传导); ③ 窦律或各种房律(房颤、房速等)伴结内的折返性心动过速, 引起完全性房室分离。(2) 结下(希氏束或双束支)阻滞: I 度(延迟 0.05s 或更少); II 度 I 型阻滞(窦律时), 单侧束支的文氏传导; 严重的(包括完全的)A-VB。(3) 房室结和结下联合阻滞: I 度房室结和 I 度 II 型或严重的结下阻滞; I 度房室结和结下的 2:1 阻滞(A 型交替性文氏传导); II 度房室结和 I 度结下阻滞(加速性交界区心律伴 H-V 文氏周期)。

2. Marriot 等在 1983 年和 1986 年提出的新的 A-VB 分类法:

(1) 房室传导延迟(P~R 间期  $> 0.02s$ )。 (2) 房室阻滞/加速性交界区或室性心律伴房室分离。(3) 偶发的漏搏: I 型(文氏传导); II 型阻滞。(4) 2:1 房室传导阻滞; I 型阻滞; II 型阻滞。(5) 高度房室传导阻滞(或严重的 A-VB); I 型阻滞; II 型阻滞。(6) 完全性 A-VB; 伴交界区逸搏心律; 伴室性逸搏心律。(7) 短暂的室性静止, 自发的; 4 相性; 迷走性。这两种分类法的提出, 仅是对房室传导阻滞重新分类的一种探讨, 以期能对目前的传统分类法的不足引起更多的注意。

希氏束电图(H-BE)分类 体表心电图由于不能记录希氏束兴奋的动作电位, 在房室传导阻滞的定位上其特异性较差。希氏束电图是以多极心导管同时记录希氏束、右房下部和右室心腔内的电图, 可更准确地估计房室传导阻滞的部位。希氏束电图可将心电图上的 P-R 间期分为 3 段, 即 P-A(房内)、A-H(房室结)及 H-V(希氏-浦野系统)。正常值: P-A25~45ms, A-V60~130ms, H-V35~55ms, BH 波时限 10~25ms。根据阻滞部位希氏束电图可将不同程度的房室传导阻滞分为房内阻滞、房室结阻滞、希氏束主干阻滞、希氏-浦野系统阻滞及混合部位阻滞等 5 类。希氏束电图的表现:

1. I 度 A-VB: (1) 心房内: P-A 延长而 A-H、BH、H-V 正常, 此类极少见。(2) 房室结内: A-H 延长而 P-A、BH、H-V 正常, 此类最常见。(3) 希氏束主干内: BH 延长或 BH 分裂和 H-V 延长(V 形态正常)而 P-A、A-H 正常。(4) 3 分支阻滞: H-V 延长(V 形态异常)而 P-A、BH、A-H 正常。

2. II 度 A-B: (1) I 型最常见于房室结内阻滞表现为 A-H 逐次延长, 直至 A 后无 BH 而 H-V 正常; 其次为希氏束主干阻滞, 表现为 BH 至 BH' 逐次延长, 直至 BH 后无 BH', 而 AH 正常; 较少见于希氏-浦野系统阻滞, 表现为 H-V 逐次延长, 直至 BH 后无 V 而 A-H 正常。(2) II 型最常见于希氏-浦野系统阻滞, 表现为 A-H 固定, 部分 BH 后无 V 波; 希氏束主干阻滞表现为部分 BH 后无 BH', 而 A-H 与 H-V 均固定, 房室结内阻滞表

现为部分 A 后无 BH, H-V 固定。

3. I 度 A-VB; (1) 希氏束分支前阻滞, A 后无 BH; 心室起搏点在希氏束时, BH 后有 V, H-V 正常, 但 A 与 BH 无固定关系。(2) 希氏束分支下阻滞, A-H 关系正常, BH 后无 V, 心室起搏点在束支或浦顷野系统有畸形 V 波, BH 与 V 无固定关系。

治疗 对房室束分支以上阻滞形成后的 I 度至 I 度 A-VB, 并不影响血液动力状态者, 主要针对病因治疗。房室束分支以下阻滞者, 必须结合临床表现和阻滞的发展情况, 考虑应用药物及起搏器治疗。

1. 病因治疗, 如解除迷走神经过高张力、停用有关药物、纠正电介质失调等。各种急性心肌炎、心脏直视手术损伤或急性心肌梗塞引起的房室传导阻滞, 可试用肾上腺皮质激素治疗。

2. 药物治疗, 药物治疗的主要作用为加速房室传导, 建立频率较快的心室起搏点, 以及消除抑制房室传导的因素。药物作用大多短暂, 很少能使完全性房室传导阻滞消失。常用药物有, (1) 阿托品; 适用于房室束分支以上的阻滞, 尤其是迷走神经张力过高所致的阻滞, 每 4h 口服 0.3mg, 必要时用 0.5~1.0mg 肌内注射或静脉注射, 每 4~6h 1 次。(2) 拟交感神经药物; 常用异丙肾上腺素每 4h 舌下含 5~10mg, 或麻黄素 0.03g 口服, 每日 3~4 次。预防或治疗房室传导阻滞引起的阿-斯综合征发作, 宜用 0.5mg 异丙肾上腺素溶液连续静脉滴注, 控制滴数使心率维持在 60~70 次/min; 过量不仅可明显增快心率而使传导阻滞程度加重, 而且还能导致严重室性异位心律。(3) 碱性药物(碳酸氢钠或乳酸钠); 有改善心肌细胞应激性, 促进传导系统心肌细胞对拟交感神经药物反应的作用, 尤其适用于高血压或伴酸中毒时。

3. 人工心脏起搏器治疗; A 临时性起搏治疗的指征: (1) A-VB 有阿-斯综合征发作; (2) 急性下壁心肌梗塞中出现的完全性 A-VB; (3) 急性前壁心肌梗塞出现的 I、II 度 A-VB 或双束支阻滞; (4) 急性心肌梗塞出现的 I-III 度希氏束-浦顷野纤维系统阻滞; (5) 心脏直视手术中或术后, 心导管术及心血管造影中出现的快速心律失常和严重传导障碍; (6) 严重 A-VB 的患者在安装永久起搏器之前; (7) 洋地黄、β 阻滞剂等抗心律失常药物引起严重 A-VB。以上情况均可考虑安装临时性人工心脏起搏, 一般由经皮穿刺股静脉插入临时双极起搏导管至右心尖心内膜起搏, 当阿-斯综合征发作时需紧急临时起搏, 可采用经胸壁心内膜紧急起搏的方法, 这是一种最迅速而且效果最可靠的方法。

永久性起搏治疗指征: (1) 慢性完全性(或高度) A-VB。(2) I 度 I 型 A-VB 有症状, 而药物治疗无效, 或 I 度 I 型 A-VB 有或无明显症状。(3) 不完全性或间歇性双侧束支或三分支传导障碍。(4) 潜在性 A-VB 和 I 度 A-VB 有昏厥发作, 希氏束电图示 H-V 间期 > 70~75ms 或心房调搏出现 H-V 阻滞时。(5) 急性心肌梗塞、急性心肌炎、心脏直视手术后, A-VB 经临时起搏治疗未恢复者。(6) 先天性 A-VB 出现阿-斯综合征、心衰或心率 < 50 次/min。国外已有许多新型起搏器, 目前中国的起搏器也由 VVI 型逐渐过渡到 DDD 型, 由单项程控发展到多项程控, 因而更符合生理状态。

#### 参考文献

- 1 周景春. 心脏血管疾病诊治的进展. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1985. 176~181
- 2 溥寿月, 等. 实用内科学(上册, 第 8 版). 北京: 人民卫生出版社, 1986. 1029~1036
- 3 吴印生, 罗雄. 现代诊断与治疗学杂志, 1987, 3: 68
- 4 蒋文平. 起搏与心脏, 1988, 3: 159
- 5 杨钧国. 心律失常的近代概念. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. 124~138
- 6 陈新. 临床心电图学(第 4 版). 北京: 人民卫生出版社, 1991. 393~421

(安徽医科大学第一附属医院  
陈曙光讲稿, 朱怀玺审)

## 心房颤动研究进展 progression of research in atrial

fibrillation. 心房颤动又称心房纤颤, 简称房颤, 是一种常见的心律失常, 几乎能在各种心脏病病人中出现。在美国 60 岁以上的人中约有 10% 的人患有房颤。

病因 很多疾病均可引起房颤, 最常见的病因是风湿性心脏病、二尖瓣病变。由于风湿性心脏病发病率下降, 故高血压病将成为房颤发生的主要因素和危险因素。其它因素包括冠心病、肺心病、心肌病、慢性缩窄性心包炎、预激综合症; 先天性心脏病中, 房间隔缺损较多见。房颤也可能是甲亢者的首发症状。其次如低血钾、低血糖、情过量服用兴奋剂及情绪紧张均可产生房颤。

分类 除病因分类外, 还可有以下分类: (1) 阵发性的和持续性的房颤; 目前两者没有明确标准, 一般认为发作达到或超过 6 周为持续性的。(2) 粗颤、细颤和 f 波不易发现的直线型房颤。Haim 分类标准是 f 波高于 0.1mV 为大 f 波, 低于 0.1mV 为小 f 波。

发病机理 1912~1914 年, Mine 在切割乌龟心房和心室环的研究中首次叙述心律失常发生与心肌组织的解剖生理密切相关, 与心脏的起搏传导系统关系尤为密切。50 年代末, Hoffman 和 Granfield 运用微电极技术研究心肌细胞的电生理, 并取得足够的电生理学数据, 建立起细胞膜内外离子转运学说。1964 年, Hoffman 等提出异常冲动形成、传导异常或两者共同引起的心律失常机制。异常冲动形成包括异位自律性增高和触发活动。传导异常是冲动传导迟缓或阻滞, 包括单向阻滞和折返。

心房颤动的发生常用异位起搏点自律性增高和折返两种机理来解释。

(1) 自律性增高。正常心脏中仅窦房结和其他特殊传导系统有自律性, 心肌细胞无起搏点活动。在缺血缺氧时心肌潜在起搏点的自律性增高或由于静息膜的部分除极化, 可引起异常自律性的发生。

(2) 折返。房颤的发生与折返有关, James 等人对动物和人进行了房颤的计算机辅助标测的电生理学研究, 发现折返活动有稳定的可辨别的通道, 心房的折返是房颤的原因。折返的发生是在环形通道上冲动沿两条不同的路径传导。一侧通道发生单向传导阻滞, 冲动在另一侧通道传导而速度减慢。当沿环形通道逆传到单向阻滞区时, 该区已脱离不应期, 而得以通过, 形成折返。

心肌缺血, 细胞内 K<sup>+</sup> 丢失, 细胞外 K<sup>+</sup> 增多, 使静息膜电位降低, 从而降低心肌细胞膜的反应能力, 使冲动传导受阻, 发生单向阻滞。同时, Na<sup>+</sup> 内流受抑制, Ca<sup>2+</sup> 通道激活, 快反应细胞传导缓慢, 易于产生折返。心房的折返使冲动在心房内无规律地传导, 引起心房肌的不协调颤动。

治疗 (1) 一般疗法在于积极地治疗基本疾病。如二尖瓣狭窄, 可予以二尖瓣换瓣术、扩张术、房间隔缺损修补术等。对急性心肌梗塞和心绞痛进行治疗, 消除一些重要的诱发因素如低血钾、酸中毒、缺氧等, 停用确定或疑为诱发因素的药物。(2) 终止发作。阵发性房颤无严重心血管疾病者, 可给洋地黄、钙通道阻滞剂或 β 受体阻滞剂, 通过延长房室结不应期, 减慢房室传导, 减慢心室率。再用奎尼丁或 Ia 类药物予以复律。对于病情危重者, 可以考虑首选电复律。

慢性房颤者要根据病程长短, 左房内径大小, 有无心血管损害及损害程度来权衡利弊而决定是否予以药物或电复律。对于病程长达 1 年以上, 左房内径明显增大伴二尖瓣病变, 左心衰, 心率缓慢的房颤者, 因其转复后复发率高, 一般不予复律治疗而予控制心室率和抗凝治疗。不论是电复律还是药物复律, 术前、术后均要进行抗凝治疗以防止栓塞。转复后要予药物维持窦性心律。具体的治疗方法有以下几种:

1. 药物治疗。常用的抗心律失常药物按 Vaughan williams 分类。它不包括洋地黄类。

I 类膜稳定剂可抑制 Na<sup>+</sup> 内流, 减慢动作电位零位相上升速度, 产生双向阻滞以中断折返, 为经典抗心律失常药物。I 类膜稳定剂又可分为 3 个亚类:

I a 类延长动作电位时间和有效不应期。以奎尼丁为代表。从金鸡纳树皮中提出奎尼丁生物碱,用于疟疾的治疗已达几个世纪之久,在使用过程中发现它具有转复房颤为窦性心律的作用。由于奎尼丁有很强的抗心律失常疗效,至今奎尼丁仍为房颤转复和维持的首选药物。除奎尼丁外,还有普鲁卡因酰胺、N-乙酰普鲁卡因酰胺、丙吡胺吡啶醇,安他唑啉、常咯啉阿吗灵等。

I b 类可缩短动作电位时间,对传导和复极几乎无影响。它包括利多卡因、室安卡因、美西律、妥卡胺、苯妥因钠、乙吗噻啉。

I c 类不影响动作电位时程和 QT 间期,对传导有显著作用。它包括英卡胺、氟卡胺、普罗帕酮、安博律定。新的制剂还有莫地卡胺、瑞卡南等。

II 类为  $\beta$  受体阻滞剂能缩短动作电位时程,抑制传导和心肌收缩力,消除前向阻滞。房颤时常予  $\beta$  受体阻滞剂,减慢房室传导,以减慢心室率。II 类包括普萘洛尔,新的长效制剂还有阿替洛尔、倍他洛尔和短效制剂艾司洛尔、氟司洛尔。

III 类能抑制钾外流。延长动作电位时程和有效不应期,不减慢传导。包括胺碘酮、溴苄胺、索他洛尔。Robert 报道了胺碘酮治疗顽固性房颤不受年龄、病因、性别、左房内径的影响。可能与它明显延长心房的不应期、消除折返及延长房室结的有效不应期、减慢心室率有关。其疗效优于奎尼丁。

IV 类为钙通道阻滞剂。它能阻滞细胞膜的钙通道,抑制慢反应,消除折返和自律性引起的心律失常。通过延长房室结的有效不应期来延长房室结传导时间。对心肌除窦房结和房室结外的纤维不产生明显的抑制传导作用。IV 类包括维拉帕米、地尔硫草、尼索地平、尼莫地平、尼卡地平、尼群地平。

Fleckenstein 研究发现,维拉帕米通过对房室结传导的抑制,有助于控制静息和运动时心室率。个别阵发性房颤可以转为

窦性心律。单独用洋地黄不能充分控制心室率。用维拉帕米或地尔硫草通常能有效地控制房颤的心室率。

洋地黄类通过对心肌细胞膜上钠-钾-ATP 酶的抑制作用,使钙内流增多而引起正性肌力作用。同时直接地或通过兴奋迷走神经间接地降低窦房结的自律性,减慢窦性心率,抑制房室结传导和延长房室结有效不应期。房颤时用洋地黄并通过其对房室结的作用使冲动传导减慢,控制心室率,对于伴有快速室率房颤的心力衰竭者效果特别显著。对于预激综合症伴房颤者禁用洋地黄。

2. 电复律。是短时间内经胸壁或直接向心脏通以高压强电流,使心肌大块除极。还能通过使细胞内钾释出而暂时性增加钾,使膜除极。抑制传导速度而消除房颤,恢复窦房结的起搏作用。1947 年,Beck 在手术中对暴露的心脏施行体内除颤成功。1956 年,Zoll 首次在体外用交流电除颤成功。60 年代后 Lown 等发现直流电击比交流电击效果好,使直流电击除颤成为安全转复房颤的选择性治疗方法。Lown 最早报道了 50 例病人中 65 次房颤的电复律效果,89% 的房颤发作被转复。对于房颤复律来说均为同步电复律。复律前 1d 停用洋地黄。予奎尼丁 0.8~1.2g/d,用电量为 150~200J,术后予奎尼丁 0.2g,q6~8h 或同类及 I c 类药物维持。

3. 外科治疗。80 年代初,房颤的外科治疗在于减轻房颤所产生的后果而不能消除房颤。如左心房隔离术、心导管电极释放电休克法、闭胸去除希氏束、房颤的走廊术等。1991 年,James 等报道治疗房颤的迷宫术,用切断房颤的折返环而终止房颤的发生,成功率达 100%。对于 5 种以上药物治疗无效和慢性房颤合并心脏器质性病变、心脏明显增大者,手术治疗显示出良好的效果。

常用抗房性心律失常药的剂量和副作用

| 类别   | 药名         | 适应症<br>房室 | 治疗量                                                                        | 维持量<br>(口服)        | 副作用                                    |
|------|------------|-----------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|
| I a  | 奎尼丁        | ++ ++     | 口服 0.2~0.4g,q2h×5 次/d,复律(逐日增量)。                                            | 0.2~0.3<br>Tid~Qid | 低血压,抑制心肌收缩,室内传导阻滞,严重室性心律失常,胃肠道反应       |
|      | 普鲁卡因<br>酰胺 | ++ ++     | 每次静滴 100mg,共 1.0~1.2g,每分钟 0.5%,5~10mg 共 1.0~1.2g,口服 0.5~1.0g,5 次/d。        | 0.25~0.5g<br>q4~6h | 低血压,室内传导阻滞室性心律失常,长期服用发生红斑狼疮样或类风湿样表现    |
|      | 丙吡胺        | ++ ++     | 静注,开始 5~15min 内 100mg,以后 20~30mg/h。口服 100~200mg Qid                        | 100~200mg<br>q6~8h | 抑制心脏传导和心肌收缩,胃肠道反应,口干,尿酸留               |
| I c  | 英卡胺        | ++ ++     | 静注 1~2mg/kg,15min 以上注完<br>口服 25mg 渐增至 50mg Tid~Qid                         | 25mg<br>Tid~Qid    | 头晕,胃肠道反应,皮疹                            |
|      | 氟卡胺        | ++ ++     | 静注 1~2mg/kg,10min 以上注完<br>口服 50~100mg 渐增至 200mg Bid                        | 50~100mg<br>Bid    | 头晕,头痛,恶心、乏力,神经过敏,感觉异常                  |
|      | 普罗帕酮       | ++ ++     | 静注 70mg 一次,3~5min 以内注完<br>口服 150~300mg Tid~Qid                             | 300~600mg/d        | 头痛,恶心,呕吐,晕眩,立位低血压房室传导阻滞                |
| II   | 普萘洛尔       | ++ +      | 静注 1~2mg,5~10min 以内注完<br>口服 20mg Tid~Qid                                   | 10~20mg<br>Tid~Qid | 本类药物均导致有心动过缓,低血压,                      |
|      | 阿替洛尔       | ++ +      | 口服 50~100mg Bid                                                            | 50~100mg Bid       | 心力衰竭,哮喘的作用                             |
|      | 倍他洛尔       | ++ +      | 口服 10~20mg Qid                                                             | 10~20mg Qid        |                                        |
| III  | 胺碘酮        | ++ ++     | 静注 250~500mg 口服 200mg Tid~Qid                                              | 100mg<br>Tid~Qid   | 心动过缓,皮肤变色,角膜瓣沉淀,甲状腺功能失调,严重心律失常,肺纤维化    |
|      | 维拉帕米       | ++ /      | 静注 5~10mg,5~10min 内注完<br>口服 80mg,Tid~Qid                                   | 40~80mg<br>Tid~Qid | 心力衰竭,心动过缓,低血压                          |
| 洋地黄类 | 地高辛        | ++ +      | 静注 0.25~0.5mg,4~6h 后再注<br>0.25mg,口服 0.5~0.75mg,每 3~6h 再予 0.25mg,一日内 1.5mg。 | 0.25~0.5mg<br>Qid  | 本类药物均有室性心律失常,房性或房室交界性心动过速,房室传导阻滞,胃肠道反应 |
|      | 毛花<br>甙丙   | ++ +      | 静注 0.6~0.8mg,2h 后再注 0.2~0.4mg。                                             | 静注 0.4mg Qid       |                                        |

注:本表不包括 I b 类药物,因此类药物对房颤无作用或作用弱。

## 参考文献

- Hoffman B F, et al. Am Heartl, 1974, 88(4): 515, 88(5): 664, 88(6): 198, 1975; 89(1): 115, 89(2): 253
- Desilva R A, et al. Am Heartl. 1980, 100(6): 881
- Lee B Y, et al. Electrocardiology, 1986, 19: 41
- Robert L D. Am J Cardiol, 1986, 57(11): 624
- Roth A, et al. Circulation, 1986, 73: 316
- Waldo A L. Circulation, 1987, 75: 3
- 陈源珠. 国外医学(内科分册), 1989, 16(11): 481
- James L. JAMA, 1992, 11(2): 67~71

(安徽医科大学第一附属医院  
徐迎春讲师撰; 朱怀玺审)

**冠心病合并心肌梗塞的麻醉处理** 心肌梗塞是冠心病严重的并发症之一, 老年人尤为多见。这类患者因心脏本身和非心脏疾病的双重因素, 手术刺激和创伤、麻醉药物及术中管理不当等均可加重病情发展, 危及病人生命。近年来, 虽然麻醉新药物不断涌现, 方法及监测技术不断提高, 麻醉处理仍极为困难, 危险性极大。

**术前病情估计和手术时机的选择** 术前应详细了解心脏和非心脏疾病给病人循环功能造成的影响。由于长期冠心病的病理改变, 可使冠状血管粥样化, 管腔狭窄变细, 血管阻力增加, 冠状血流减少, 心肌自身调节机制发生障碍, 心肌缺血缺氧, 造成心肌需氧和供氧失衡。因此, 手术时机的选择与梗塞时间及病变程度密切相关。择期手术应尽量在梗塞后 6 个月进行。若梗塞 3 个月内手术, 再梗塞发生率为 27%~37%。若在心肌梗塞后 15 天内作急诊手术, 因心肌坏死缺血仍在活动期, 又并发外科疾病, 可使心肌梗塞进一步恶化, 随时有发生猝死的可能, 是麻醉和手术最危险的时间。另一方面, 麻醉医生应特别了解梗塞范围大小, 侧支循环产生情况以及治疗是否及时, 以估计其危险性。一般认为, 左冠状前降支闭塞, 可引起广泛的前壁及下侧壁心肌梗塞, 易发生室性心律失常、左心衰和心源性休克; 右冠状动脉闭塞, 可引起左室下壁、右心室梗塞, 并常累及窦房结和房室结; 单纯下壁梗塞, 若治疗及时, 预后较好; 若合并右室梗塞及房室传导阻滞, 危险性增大, 死亡率增高; 无右室梗塞的下壁心肌梗塞, 房室传导阻滞对生命影响不大。总之, 术前应全面分析心肌梗塞病人的病情变化过程, 以利术前作出较正确的判断, 减少和预防因麻醉处理不当而发生死亡。

**麻醉处理原则和方法** 心肌梗塞病人循环功能极不稳定, 对麻醉的耐受力极差, 麻醉关键在于降低心肌耗氧量, 维持心肌氧供耗平衡和循环功能稳定。根据手术范围及部位, 尽量选用简单熟悉的麻醉方法, 如局麻+神经安定镇痛术、神经阻滞麻醉, 连续硬膜外麻醉等。使用局麻药应以最小有效剂量, 最低有效浓度达到满意的麻醉效果为原则, 同时辅助适量的镇痛、镇静剂, 使病人术中保持安静。

全麻对心肌梗塞病人有一定的优越性。首先能保持呼吸道通畅, 供氧充分。麻醉时, 一是要合理选择麻醉药物的配伍, 以调节病人的循环功能; 二是麻醉诱导和维持力求平顺, 严防在气管插管时发生呛咳等兴奋现象。根据手术不同步骤维持合适的麻醉深度, 而不致在切皮、探查时因麻醉过浅, 血压升高, 心率增快, 加速心肌耗氧量, 还要防止因麻醉过深而抑制心肌收缩力, 使静脉回心血量减少, 血压下降, 冠状血流亦下降, 心肌进一步缺血、缺氧, 加重心肌梗塞发展。

目前常选用的吸入麻醉剂有安氟醚、异氟醚, 吸入浓度掌握恰当对心血管影响轻微。静脉麻醉剂中, 硫苯妥钠对循环有明显抑制, 对循环代偿能力差的心肌梗塞病人, 则不宜使用。r-羟基丁酸钠对心搏无影响, 并能提高心肌对缺氧的耐受力, 有窦缓、传导阻滞、低钾者慎用。乙醚可使冠脉阻力下降, 血流增加, 不增加心肌耗氧, 最适用于心功能差的病人作麻醉诱导, 氯胺酮对心肌无抑制作用, 但能兴奋交感神经, 使心率增快, 血压升高, 心肌耗

氧增加, 冠心病心肌梗塞病人应避免使用。镇痛药以芬太尼最常用, 对心缩力、血压无影响, 能使心率减慢, 特别适用于冠心病病人。肌松剂中司可林、潘沙朗宁、阿曲可宁均可选择应用。目前尚无一种药物完全合乎要求。总之, 应选用对心血管抑制轻微的静脉麻醉药, 根据药物的相互作用扬长避短, 合理用药。麻醉方法常选用安定或咪唑安定 0.1~0.2mg/kg, 乙醚 0.3mg/kg, 芬太尼 2~4 $\mu$ g/kg, 司可林 1~1.5mg/kg 作麻醉诱导, 气管内插管, 继以 1% 普鲁卡因 + 0.1% 司可林 (或选用潘沙朗宁、阿曲可宁分次给药), 静脉点滴吸入少量安氟醚维持麻醉。我们体会这种方法简单, 对心血管功能抑制轻微, 能保证术中病人记忆缺失, 镇痛完善, 肌松良好, 对循环扰乱少, 术后苏醒快等。

**术中监测与管理** 心肌梗塞病人术中循环功能监测非常重要, 随着先进电子仪器的发展, 监测项目不断增多, 用生命监测仪进行生命体征的监测。血压升高或下降都对病人心功不利。若收缩压下降 30% 时, 再梗塞发生率可由 3% 升至 15% 左右。发生低血压时, 可应用正性肌力药物, 如多巴胺、多巴酚丁胺、阿拉明、肾上腺素等。多巴胺点滴速度一般为 6~10 $\mu$ g/kg·分左右, 根据血压调整滴速, 以维持血压平稳, 保证各重要脏器有足够的血供, 减少术后并发症。术中常规 ECG 示波监测心率和心律的变化。若发生室性心律失常, 首选利多卡因 1~2 mg/kg 静脉推注或 1~4mg/min 点滴维持。若出现 ST 段抬高, 提示心肌有损伤, 可适当选用扩管药减低左心前负荷, 改善冠脉血流。术中测定静脉压和肺动脉嵌顿压, 以指导输血、输液, 及时调整血容量, 防止肺水肿发生。在循环功能监测的同时, 还应进行呼吸功能监测。心肌梗塞时常合并左心衰, 故要严密观察呼吸音的变化。若闻及细湿罗音或水泡音, 除控制液量外, 可选用适量的利尿剂和强心药。另外, 注意观察因麻醉药、肌松剂、手术刺激体位变换、酸中毒等直接或间接影响呼吸。麻醉全过程应确保呼吸道通畅, 进行有效的辅助呼吸, 保持良好的氧供, 严防低氧血症和二氧化碳的积蓄。对心肌梗塞患者的麻醉从诱导至拔管后, 持续进行无创氧饱和度 (SPO<sub>2</sub>) 的动态监测。若 SPO<sub>2</sub> < 92%, 是低氧表现; 若 SPO<sub>2</sub> < 90%~85% 为严重低氧, 为麻醉期间安危提供了迅速可靠的信息, 针对原因进行处理。另外术中应根据血气分析、生化检查及时调节酸碱和水电解质平衡。由于监测技术的不断进展, 提高了手术安全性, 减少了死亡率。

**术后处理** 手术结束后心肌梗塞病人的循环和呼吸功能尚不稳定, 任何原因的缺氧都可使心肌梗塞病人病情加重和恶化。所以术后仍应密切监测血压和心电图的变化, 维持良好的氧供, 防止肺部并发症和感染。控制入量, 保持水、电解质和酸碱恒定。若合并呼吸功能不全和器官功能障碍应送到 ICU 病房强化监测和治疗。

## 参考文献

- 现代麻醉学. 北京: 人民卫生出版社, 1989. 840
- 内科学. 第 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 1990. 248
- 王德文. 国外医学 心血管分册, 1991, 18(1): 47~48

(安徽医科大学第一附属医院戴秀萍教授撰)

**麻醉期间心跳骤停的原因** the reason for cardiac arrest during anesthesis 麻醉期间发生心跳骤停者有很多原因, 既可能单独归因于麻醉方面, 也可能归因于手术和疾病多种综合因素。

70 年代 Baraka 分析了 31 例麻醉中循环骤停者的原因后指出, 虽有多种因素引起循环骤停, 但麻醉处理错误是一个常见而且可以预防的原因。就麻醉本身而言, 使用各种麻醉药物、各种操作方法和麻醉器械, 任何一个环节的疏忽和失误均可导致心跳骤停。为此, 麻醉医师的基础知识、操作技术、临床经验和责任心是十分重要的。当然, 手术和疾病的因素也不可忽视, 多数情况下是由综合因素所致。

中国孙大金指出, Stephenson 报道围术期心跳骤停的发生率为 1: 750~30 000; 许国忠等及徐惠芳等分别报道为 1:

1 584和1:1 940;而孙氏本人的统计是80年代后半期围术期心跳骤停的发生率为1:3 000~4 000。显然,随着麻醉学的发展、技术的提高、监测技术的应用,能及时发现问题,并采取有效预防措施,使心跳骤停的发生率明显下降。

#### (1)麻醉方法不当:

严重休克、血容量不足、严重高血压、过度肥胖、呼吸及循环功能不全等患者,在行椎管内麻醉时,常因呼吸及循环的抑制而出现缺氧、血压骤降,造成心跳骤停。当患者病情危重、手术复杂、手术体位等影响到呼吸和循环生理功能时,若错误地选择脊麻或用硫苯妥钠等可抑制呼吸、循环的麻醉方法及药物时,易致心跳骤停。

#### (2)麻醉用药不当或错误:

吸入或静脉全麻时,麻醉过量、麻醉过深,如乙醚开放点滴麻醉,氟烷、安氟醚吸入麻醉,普罗卡因静脉复合麻醉,冬眠合剂静脉复合麻醉,硫苯妥钠麻醉等,可因盲目给药,用量过大、速度过快、浓度过高、麻醉过深直接导致呼吸抑制或循环抑制,常因缺氧而致患者心跳停止。破伤风、脊髓截瘫、大面积挤压伤、尿毒症、神经-肌肉疾患、严重感染及高血钾等患者,麻醉诱导时选择去极化肌松药琥珀胆碱有引起血钾急剧升高的危险,重者可致心跳骤停。静脉内误注氯化钾、椎管内误注枸橼酸钠或青霉素引起心跳骤停者也有发生。

#### (3)麻醉操作失误:

气管插管误入食道又延迟发现可致严重缺氧;气管内吸引为时过久可造成缺氧;气管插管困难反复进行插管可致急性缺氧;全麻术后拔管过早可因舌根后坠、呼吸道梗阻、通气量不足等发生缺氧均可引起心跳停止。硬膜外麻醉或颈丛阻滞麻醉药误注入蛛网膜下腔发生全脊麻及局麻药误入血管内可引起心跳骤停。麻醉期间使用较大剂量的镇静药、镇痛药、肌松药可引起反流误吸造成缺氧,脊麻平面过高加重呼吸、循环抑制也是导致心跳骤停的原因。

#### (4)麻醉管理不善:

气管内麻醉导管插入过浅或固定不牢,尤其是更换体位时发生导管脱出,呕吐物误吸、分泌物堵塞呼吸道未能及时清除,全麻时对呼吸管理不善,麻醉机呼吸活瓣失灵、螺纹管扭曲、机械故障、钠石灰失效、呼吸机接头脱落及麻醉中任何环节的失检,均可造成缺氧及二氧化碳蓄积致心跳骤停。麻醉与手术期间使用各种交流电器,若发生漏电、短路,可因电击导致心跳骤停。

**手术因素** 在麻醉和手术过程中,由于麻醉过浅,手术的机械刺激和牵拉胸腔的、腹腔的、盆腔的脏器,刺激肺门、气管隆突、胸膜、胆道周围组织可引起心动过缓及心跳骤停。特别是感染性胆道手术,常发生迷走-迷走神经反射。在高碳酸血症患者,缺氧或原有心脏病变的情况下,迷走反射更易被激惹。心脏手术如心房粘液瘤或心瓣膜病、心房附壁血栓等手术探查、机械牵拉或体位变动时可发生瓣口堵塞,导致心跳停止。手术中挤压颈动脉窦、主动脉体等化学感受器,是引发心跳骤停的原因。1908年Ashrer及Dagnini同时发现眼心反射(OCR)当压迫眼球、牵拉眼外肌、球内注射等,或刺激三叉神经末梢支均可导致OCR,特别在行斜视手术时,OCR是引起心动过缓、心律失常、心跳停止的重要原因。浅麻醉时,肛门直肠手术的牵拉反射也能引起心脏停搏。

术中误伤重要脏器,大血管破裂造成大出血,或冠状动脉损伤,或大量输血引起血流动力学的急剧改变,也是发生心跳骤停的原因。

椎管、支气管、脑血管的碘油造影检查,心导管插管,心脏起搏器的安装等,常可引起心脏停搏;某些手术操作与疾病因素综合,如颅内高压手术探查,甲状腺功能亢进,肾上腺皮质功能不全等患者手术,若术前准备不足,麻醉与手术期间易发生危象,造成心跳停止。

心内直视手术时深低温诱发室颤,体外循环时主动脉及心内插管损伤,也可发生心跳骤停。

**基础疾病因素** 文献报道,麻醉与手术期间心跳骤停的发生原因有意见分歧,Marx认为83%归咎于病人原有疾病,仅4%因麻醉所致;但Lunn却认为90%是由于麻醉失误造成,这可能因实际情况和背景不同而结论各异。

麻醉期间心跳骤停易发生于小儿及老年患者。小儿器官功能发育不全,机体生理改变极为迅速,对麻醉的代偿能力有限,高烧或呼吸道疾病易发生缺氧,影响循环及内稳态平衡。在麻醉及手术的刺激下可引起心动过缓及心肌抑制,导致心搏停止。老年患者多合并有呼吸系统及循环系统的疾病,如高血压、冠心病、肺心病、肝肾功能衰退和水电解质紊乱及酸碱失衡,晚期肿瘤等的疾病,对麻醉及手术的耐受性极低,存在着呼吸循环衰竭的潜在危险,麻醉中稍有不慎,即可发生心跳停止。对其他患有心肌炎、缺血性心脏病、心肌梗塞、心脏器质性病变之功能低下者,外伤性颅内高压、出血性休克、低氧血症、酸碱平衡失调、电解质紊乱(尤其是低钾、高钾、低钙血症)、术前存在心律失常、洋地黄中毒和肿瘤化疗、放疗后恶异质,以及内分泌系统疾病术前没有得到内科治疗或药物控制者,麻醉及手术刺激发生各种危象时易发生心跳停止。

探讨麻醉期间发生心跳骤停的原因繁多,有的学者从导致心跳骤停的机理进行分析,又可归结为以下4个作用于心脏的基本因素:(1)心肌收缩功能减低;(2)冠状动脉灌注减少;(3)血流动力学的剧烈变化;(4)心律失常。每个因素既可直接导致心跳停止,又可互为因果,相辅为患。心跳停止为多种因素综合所致。

#### 参考文献

- 1 Baraka A. Anesthesiology, 1980, 52: 283
- 2 Bass E. Complications Ann Inten Med, 1985, 103: 920~927
- 3 谭冠先,等. 中华麻醉杂志, 1986, 6(1): 33
- 4 张慈忱. 国外医学(麻醉学与复苏分册), 1987, 5: 287
- 5 刘俊杰、赵俊等. 现代麻醉学. 北京: 人民卫生出版社, 1987. 379~381, 1101~1167
- 6 曲成业,等. 国外医学(麻醉与复苏分册), 1987, 5: 295
- 7 Robert D. Dripps. M. D., The Principles of safe practice W. B. Saunders Company, 1988, 339: 423
- 8 龙泽玺,等. 全国麻醉并发症及意外研讨会论文集, 1989, 71
- 9 孙大金. 全国麻醉并发症及意外研讨会论文集, 1989, 6
- 10 刘世民. 安徽医学, 1991, 12(5): 1

(蚌埠医学院附属医院刘世民教授、万志强副教授撰)

**导管消融治疗心律失常的进展** 导管消融是一组新的治疗快速性心律失常的方法。1976年和1981年,Beazell和Gonzalez等先后报告用直流电消融阻断了狗的房室结。1982年,Sheinman等用此法阻断了人的房室结;1983年消融了房室旁道。不少国家开展了此项技术,治疗一些顽固的快速性心律失常者,迄今已达几千例,中国上海、北京、南京及广州都已用于临床,取得较好的效果。

#### 导管消融(CA)的能量发放系统

(1)直流电消融。利用普通的直流电除颤器发放电能,把插入心腔的导管电极与除颤器的阴极相接,左前胸胛骨处放一直径为16cm的阳极。输出电流多数用衰减的正弦波。在生理盐水或血液的实验中,当400J电能通过6F导管电极放电时,以每秒4 000帧进行极快速的摄影记录,并测定压力、V特和电流等数据。在放电的最初15s内,可看到在电极头端有闪光及哨音。随后迅速在5s内形成白炽的蒸气团集合而形成气泡,气泡扩张而达最大直径,随后消失,电压和电流分别高达3 000V和50A,电极头端液体阻抗增加而产生5 000℃高温,气泡表面张力达701b/m<sup>2</sup>。电极接触处的组织有坏死及出血灶。细胞特异质消失,在损伤及周围组织内有出血、水肿及炎症细胞浸润。慢性改变有纤维化及脂肪浸润。组织损伤的程度与所用电能有关,当电能为250J时,左室损伤范围为1.3~1.5cm<sup>3</sup>,而且常是透壁性的,损伤常为斑片形,其边缘为炎症浸润,四周则可见异物反应。



局部心肌细胞电生理静息膜电位梯度减低,动作电位时间及动作电位上升速度减慢,电灼狗的左心室,室性心动过速(VT)和心室颤动,在早期较明显,7d后发作频数减少和持续时间缩短。所以产生这些损伤与电流强度、光、热和压力有关。

(2)射频能量消融(RFA)。RFA是用低能量、高频的交流电消融。由于所用能量小,常为20~30W,通过300~750kHz放电,仅产生<100℃的热量。当≥100℃时,电极头端即有血凝块,使阻抗增大,RF发放仅能自动断电。通常组织细胞在50.8℃时即坏死,但无血凝块,到100℃时血液才产生凝块;<100℃亦不会像高能直流电灼那样引起电极处发出白炽弧光,产生气体,形成压力而使组织的损伤范围扩大及穿孔。一般每次损伤面积<0.5cm<sup>2</sup>,深度<3mm,呈均质性组织干化或凝固性坏死。因此,RFA损伤小且并发症少,较安全。RFA不刺激肌肉或神经,亦不需要全身麻醉;由于没有气压伤,可以用于薄壁区而不致穿孔。因为受损伤处为均质性干化,心律失常并发症少见。RFA的另一个优点是可以逐级发放能量到更多的病灶区,消除多个病灶而不伤及深部。对狗的实验证明,冠状窦、心房、房室结和心室的RFA是有效和安全的,没有破裂现象发生。在心房、三类瓣环及左室,很少发生心律失常。

(3)激光。激光是通过光来产生热量以消融心肌内膜产生均匀的纤维区。激光引起的组织损伤根据光束的强度和光被组织吸收的强度而定。激光的波长不同,组织对其吸收、消散和渗透的深度亦异,所产生的效果就不同。钕激光等的波长为1060nm,渗透组织极深而可产生与直流电灼一样大的损伤;紫外线波长308nm,渗透组织较深;而氩激光波长为500nm,仅使心内膜产生局限性损伤。已有报告在外科手术中用激光消融VT成功者,但因存在技术上的困难,故迄今仍无闭胸导管消融的临床报告。但在动物实验中已有用激光导管消融狗的希氏束而获得成功者,镜检在三尖瓣环处可见直径为2~3mm的损伤区,阻断了希氏束。

#### 导管消融的方法

(1)希氏束消融。早期电灼的目的是产生三度房室传导阻滞(AVB)而治疗顽固性室上速。方法是先从股静脉插入6F的4极电极到右室心尖,以作临时起搏用;再插入6F的4极电极记录希氏束。当用电极记录到最大希氏束电图后,将此电极连接到电击器的阴极输出端,阳极用直径为16cm的粘附电极贴在左侧背部,在全麻下作电击,早期电击的电能量偏大,常为200~300J,获得三度AVB后,常需再作一次以确保疗效。术后观察,如三度AVB持续24h,则安置永久性起搏器。作RFA时方法基本上同,但消融的电极改用TF、带手柄操作的、头端可弯曲的电极。无须全麻,常用参数为20~30W,40~50V,350~500mA,阻抗<120Ω,时间60~100s,可连续多次,直到成功。

(2)房室结功能的改造。目的是减弱房室结的传导功能,而不造成三度AVB。方法是在希氏束近端消融,即在测得最大的希氏束电图后,将电极后撤少许,直到A/V最大,仍有最小的希氏束波,作低能(20~50J)的多次电消融。

(3)旁道的消融。目前做得最多的是左室游离壁的电消融,方法是在右室尖、右房上、希氏束及冠状窦内各插入1电极,先作旁道的标测和定位,然后从股动脉插入消融电极到左心室,电极到位后作电消融。目前已多数采用RFA,仍有人用低能直流电消融者。

(4)房室结双通道的电消融。它是临床应用得较多的一种。目的是选择性地阻断房室结的快速通道或慢通道,以治疗房室结内折返性心动过速;方法是先插电极分别到右室心尖、右房上、冠状窦和希氏束,然后插入消融电极到冠状窦口附近或希氏束附近,根据标测,可分别消融慢通道和快速通道,达到治愈房室结内折返性心动过速的目的。

(5)VT的电消融。多数VT是由折返引起,其起源灶在慢传导的离散区,VT发作时此处除极最早,术前需作电生理标测,测出除极最早处。另一种病灶定位的方法,是在电生理检查时用心室起搏复制出与原VT12导联体表心电图至少有10个导联形态

相同的VT,该起搏点即为原VT的起源灶。消融时先从股静脉插入电极到右室尖、流出道、冠状窦以标测,随后从股动脉插入电极到左室作电消融。

导管电消融的效果和并发症 早期电消融的效果较差,并发病多。由于技术改进,1991年在华盛顿召开的第6次世界导管消融会议上报道的效果良好,并发症较少。

(1)房室结功能改造。Inerian等报道多中心研究的一组顽固性室上速患者49例,其中房颤31例、房扑10例、房室结折返7例,作低能(25~30J)电灼。术后18例为希氏束下阻滞,18例为束上阻滞,10例未能明确阻滞的水平,2例无阻滞。结论认为低能直流电消融是成功的,70%以上的顽固性房颤与房扑和结内折返性心动过速治疗成功。Goyal等用RFA治疗结内折返性心动过速85例,结果100%产生暂时性AVB,其中仅7例为永久性。所有病例均有稳定的结性逸搏(约60次/分)而无晕厥,既达到房室结功能改造的目的,又免除安装心脏起搏器之苦。

(2)旁道消融。Lesh等报导49例患者50条旁道,RFA结果显示44/50旁道(88%)治疗成功。并发症为心包填塞1例、腹股沟血肿1例、周围栓塞1例。可认为RFA对旁道消融安全有效。

此外,在治疗普通的VT、右束支折返性VT、右室发育不全所致的顽固性VT等方面都取得一定的效果。

导管消融的指征,可用于药物治疗无效、或不能忍受的快速性心律失常者。(1)房室结内折返性过速;(2)快速房颤或房扑;(3)旁道所致心动过速;(4)因阵发性或持续性室上速而继发的心脏扩大或心衰者,终止心动过速后常可使心脏恢复;(5)理想的VT指征为易于诱发、发作时血流动力学能耐受的单灶性VT,但对多形性VT亦有效。VT易致室颤者宜用埋藏式自动除颤器。有左室附壁血栓者是导管消融的相对禁忌症。

#### 参考文献

- 1 Beazell J, et al. Clin Res., 1976, 24: 137
- 2 Scheinman MM, et al. JAMA., 1982, 248: 851
- 3 Royd EGCA, et al. PACE., 1985, 8: 815
- 4 Haines DE, et al. Circulation, 1987, 76, 218
- 5 张旭明, 朱纯石, 等. 中华心血管杂志, 1992, 19(6): 391
- 6 Inerian Jr A, et al. PACE, 1991, 14(4; Part II): 706
- 7 Goyal R, et al. PACE, 1991, 14(4; Part I): 658
- 8 Twidale N, et al. PACE., 1991, 14(4; Part I): 669
- 9 Lesh MD, et al. PACE., 1991, 14(4; Part I): 670
- 10 Lemery R, et al. PACE, 1991, 14(4; Part I): 670

(广州中山医科大学孙逸仙纪念医院朱纯石教授撰)

#### 预激综合征 pzeexcitation syndrome Wolff, parkinson

和 White 于 1930 年首先报道。1941 年, Lerne 等将其命名为“Wolff-parkinson-White's Syndrome”, 亦即“吾-巴-怀综合征”, 简称 W-P-W 综合征。后来发现本综合征的发生原因是部分心肌提前激动, 即心脏电子泵激动顺序异常, 故现今称为预激综合征。

心脏传导系统的冲动从窦房结发出, 首先激动心房, 其次是房室结、希氏束、浦肯野氏纤维, 最后激动心室肌肉。若心房与心室之间存在着附加旁道时, 心房激动后其冲动经过附加旁道提前传到心室肌, 而较正常传导系统提前激动心室, 这就是所谓预激。

附加旁道具有顺向传导和逆向传导性能, 旁道能逆向传导时, 正常传导系统的冲动传到心室, 激动其肌肉, 再通过旁道逆传入心房, 形成环形运动的一条回路, 引起折返性心律失常, 亦即加速型心律失常; 如旁道能顺向传导时, 激动心房的冲动则通过附加旁道迅速传到心室, 可由正常的传导途径逆传回心房, 形成环形运动, 亦即为加速型心律失常。前者为旁道逆传回心房, 可直接打击和干扰窦性激动, 引起 RonP, 亦可以导致患者猝死; 后者为旁道顺传, 可以直接打击心室易损期, 造成 RonT 以致患者猝死。

目前已打破预激综合征为“良性综合征”的观点, 它可以引起各种心律失常, 危及患者的生命。

## 旁道分类

(1)副房室束(肯特氏束, Kent's Bundle); Kent's 于 1893 年提出,副房室束是连接心房、心室之间的特殊肌纤维束,此束具有传导性能,可以单条或多条存在,位于左心房室环附近部位,亦可居于右心房室内,亦可左右心同时存在多条附加传导途径。Kent's 束一般长 1~5mm,直径 0.5~0.1mm,呈束样结构,传导特性类似浦肯野氏纤维,激动传导迅速,每秒 2 000~4 000mm。

(2)曼氏纤维;(1)结室纤维,即房室结与心室之间有附加旁道。房室结激动可以顺此旁道直接下传心室肌,使该肌肉提前收缩。(2)束支纤维,即希氏束或左束支和右束支与心室之间存在附加传导径路,激动可以从希氏束或束支顺此旁道迅速下传心室肌,使该肌提前收缩。

(3)杰姆氏纤维(James's Fibers);即心房与希氏束之间附加旁道,此纤维是由心房后结间束延伸,绕行房室结体部,终止于房室结下缘或希氏束。

以上几种附加旁道可以单独存在,亦可以同时存在,如肯特氏束单独存在,它可以表现为典型预激综合征的心电图图形,如杰姆氏纤维与曼氏纤维同时存在亦似典型预激综合征的心电图图形,如肯特氏束与杰姆氏纤维并存,为短 P-R 综合征,即 L-G-L 综合征,如肯特氏束与曼氏纤维并存时, Mahaim 氏纤维预激可被隐匿。Kent's 束存在时希氏束心电图示 H-V 间期异常短,甚为零或负值。James 束,在希氏束心电图示 A-H 间期短, H-V 间期正常。Mahaim 氏纤维要希氏束、心电图示 A-H 间期正常, H-V 间期缩短, V 波增宽。

## 心电图特点和分类

1. 典型预激综合征心电图(单独 Kente 氏型或 James 和 Mahaim 氏型)(1)P-R 间期缩短( $<0.12s$ )。(2)R 波上升支起始部粗钝,为预激(Delta)波( $\delta$ 波)。(3)QRS 波群时间延长( $>0.12s$ ),但是 P-J 时间正常( $<0.27s$ )。(4)有继发性 ST-T 改变。(5)分型:1945 年, Rosenbaum's 将预激综合征的心电图简单地分为 A、B 两型,后由日本上田英雄又分出 C 型。A 型又称一型,为最常见的类型(占 54%),全部常规胸前导联 QRS 波群主波均向上。B 型又称二型,为较常见的类型(占 31%)。右胸前导联 QRS 波群主波向下,左胸前导联 QRS 波群主波向上。C 型又称中间型,为最少见的类型(占 15%)。右胸前导联全部 QRS 波群主波向上;左胸前导联 QRS 波群主波向下。

2. 变异型预激综合征心电图:(1)Jaques 型,即 L-G-L 综合征,短 P-R 正常 QRS 综合征,即 1952 年 Lown、Ganong、Levine 三氏评述、明确其特征和发病机理,称之为 James 束,希氏束心电图 A-H 明显缩短( $<60ms$ ),心电图特点:P-R 间期缩短( $<0.12s$ );QRS 波群正常,无预激波和继发性 ST-T 改变。(2)Mahaim 氏型心电图特点:P-R 间期正常(或 P-R 间期延长);R 波的上升支有预激波;QRS 波群间期延长( $>0.12s$ );有继发性 ST-T 改变。

3. 隐性预激综合征:心电图正常,是旁道伴单向传导阻滞之故,但保留逆向传导性能,容易发生狭窄型室上性心动过速,只有进行心脏电生理检测,方能证实本征。

## 预激综合征心电图鉴别诊断

1. ST-T 改变;预激综合征的 ST-T 改变是继发性的,是心室内除极顺序异常所致。

2. A 型与右心室肥厚;除 P-R 间期、QRS 波群时间、 $\delta$ 波外,还有明显电轴右偏,  $V_5 \sim V_6$  S 波加深。

3. 束支传导阻滞束 B 型的心电图常误诊为左束支传导阻滞。

4. 心肌梗塞;B 型心电图在  $V_1 \sim V_3$  呈 QS 型似前间壁心肌梗塞的波形。C 型心电图在  $V_5 \sim V_6$  呈 Q 波似侧壁心肌梗塞。

## 心电图向量改变

1. 各面(主要在横面)QRS 环起始向量的光点密集,即预激向量。

2. QRS 环时间延长( $>0.10 \sim 1.2s$ )。

3. 出现继发性 ST 向量及 T 环改变, T 环与 QRS 环最大向量方向相反。

4. 根据横面 QRS 环起始部分的预激向量方位,分为 3 型: A 型:预激向量指向前左(I 象限),  $30^\circ \sim 90^\circ$  间( $0^\circ \sim 120^\circ$  内)。B 型:预激向量指向左后(IV 象限),  $30^\circ \sim -60^\circ$  (多在  $25^\circ$  之后)。C 型:预激向量指向右前(I 象限),  $90^\circ \sim 180^\circ$  间。

预激综合征的超声心动图表现 超声心动图可显示心室预激先激动的现象,比心电图更直接地显示异常旁道的位置。A 型预激综合征超声心动图显示与心电图上  $\delta$  波出现的同时,左心室后壁心内膜呈异常过早地向前运动,而室间隔收缩正常;B 型预激综合征,超声心动图显示在  $\delta$  波出现的同时,室间隔出现异常地向后移位,紧接出现收缩中期向后移位,最后便是收缩末期的向左移位,这种运动与左束支阻滞患者在超声心动图下显相甚似。

## 预激综合征心电生理检查的适应症

1. 体表心电图在 P-R 间期在希氏束心电图分 3 期, P-A 间期 30ms ( $25 \sim 45ms$ ), A-H 间期 100ms ( $60 \sim 140ms$ ), H-V 间期 40ms ( $35 \sim 45ms$ ), 注意: P-A 间期代表心房内传导时间, A-H 时期代表激动经房室结的传导时间, H-V 间期代表希氏束-浦肯野氏系统的传导时间。

2. 预激综合征心电生理检查的适应症:(1)预激波不明显的病人为了明确诊断。(2)房室旁道定位。(3)房室旁道和其他类型旁道鉴别。(4)预激综合征所致阵发性室上性心动过速的发生和终止的机理。(5)测定旁道不应期。(6)为安装人工心脏起搏器治疗准备条件。(7)评价药物治疗的效果。(8)评价外科手术治疗的确切效果。

临床表现 预激综合征本身不会引起症状,只有并发阵发性室上性心动过速、阵发性快速房颤、房扑、室颤时的心律失常者才会出现休克、心衰、猝死的有关症状和体征。因为快速型的心律失常能使心室率快到 220~360 次/min,从而引起血液动力学严重变化,回心血量和心排量显著减少,组织灌注量极差。本综合征患者有 1/3 可与先天性心脏病和后天性心脏病同时存在,如埃勃斯坦氏畸形,风湿性心脏病,冠状动脉性心脏病,原发性心肌病;还有 2/3 的患者无器质性心脏病。

## 治疗的进展

1. 单纯预激综合征者不需要治疗。2. 预激综合征有并发症者需要治疗。(1)阵发性室上性心动过速。发作期:刺激迷走神经方法、药物治疗方法、人工起搏方法、电击复律和外科手术根治方法。预防发作治疗:药物可用胺碘酮、英卡胺、奎尼丁类。也可行导管消融治疗,它有两种方法一是 80 年代初期即开展的经导管高能直流电消融术,二是 1987 年由 Lavergne 等首先应用于临床,1991 年中国开始应用于临床的低能量射频电流经导管消融术。目前认为,射频消融优于直流电消融,它没有直流电热损伤,病人不需要全身麻醉,多次多部位发放射频电流消融而无感觉和痛苦,并发症少,因此,射频电流消融术已替代直流电导管消融术。心脏左侧游离壁旁道比较容易定位,消融最安全,成功率高,而右侧游离壁和后间隔旁道定位比较困难,射频消融成功率低。(2)阵发性房颤。①发作时治疗:无血液动力学严重障碍时,可静脉注射普鲁卡因酰胺、纈脉灵、达舒平等。有血液动力学严重障碍时应立即进行电击复律,疗效最佳。②预防复发:口服胺碘酮、英卡胺、奎尼丁、达舒平。如药物治疗无效,争取导管消融治疗或外科手术根治。所谓手术根治即外科开胸手术,切断引起阵发性室上性心动、快速性房颤房扑和早搏的旁道,但是手术创伤大,有一定危险性,难以在临床上广泛应用。

## 参考文献

- 1 张永增. 内科综合征. 沈阳, 辽宁人民出版社, 1980. 120~122
- 2 杨鼎颐, 等. 人工心脏起搏和临床心脏电生理学. 西安: 西安大学出版社, 1985. 156~169
- 3 彭维, 等. 预激综合征. 北京: 人民卫生出版社, 1989. 620~630
- 4 陈普照. 内科学. 北京: 人民卫生出版社出版, 1990. 166~170

5 顾复生. 中华心血管病杂志, 1992, 20(4): 203

(安徽医科大学第一附属医院朱怀玺教授撰)

**急性心肌梗塞溶栓治疗进展** advance in therapy of dissolve thrombus for acute myocardial infarction 1959年 Fletcher 就将溶栓疗法用于急性心肌梗塞(AMI)。1979年, Rentrop 开始对 AMI 患者进行冠状动脉内溶栓治疗。过去 10 年的病理和临床观察都支持动脉粥样硬化斑块破裂和血栓形成是急性心肌梗塞主要的急性病理机制。一般认为, 在其它缺血性综合征, 如不稳定型心绞痛和猝死中, 该机制也起着作用。因此, 在 AMI 早期, 即起病 3~6h 内, 应用溶栓疗法及时溶解冠状动脉内血栓, 使心肌得到再灌注, 从而挽救濒死的心肌或缩小心肌梗死范围, 是治疗心肌梗塞的一大进展, 因而使 AMI 病人的急性期病死率明显下降。

**溶栓疗法的病例选择** 溶栓治疗对有缺血性疼痛或其它 AMI 症状, 且发作时间短(少于 6h)的 AMI 病人有效, 即适用于: (1)临床症状典型, 胸痛持续时间长( $\geq 30$ min), 舌下含硝酸甘油不能缓解者。(2)心电图两个或多个导联有进行性损伤电流(ST 段抬高 $\geq 0.2$ mV)者。(3)发病虽已超过 6h, 仍有胸痛, 心电图有 ST 段抬高, 提示梗塞仍在扩大者。(4)继发性胸性休克, PTCA 无法进行或不能立即进行者。(5)疑有 AMI, 但无 ST 段升高的典型心电图表现者。如不稳定型心绞痛, ST 段下降或 T 波倒置。(6)冠脉搭桥术后 7~10d 有血管急闭者。(7)年龄在 70 岁以下者。

**溶栓疗法的药物与方法** 链激酶(SK)是从 C 组  $\beta$  溶血性链球菌培养过程中提取的蛋白质, 通过形成链激酶-纤维蛋白溶酶原复合物, 使纤维蛋白溶酶原转化为纤维蛋白溶酶, 从而溶解血栓。由于 SK 同时使血浆内和血栓内的纤维蛋白溶酶原被激活, 所以在溶栓的同时可引起短暂的高纤维蛋白溶酶血症, 在此期间病人可能有出血的危险。曾感染过链球菌的病人, 血液中可有抗链激酶抗体, 影响链激酶疗效。SK 有抗原性, 可导致寒颤发热反应。应用 SK 前要做过敏试验, 如阴性方可使用。

SK 是最早最广泛应用的第 1 代溶栓剂, 用于临床已有 30 多年历史, 价格便宜。1982 年批准为可冠脉内给药, 1987 年批准可静脉内给药。首先行冠脉造影确定受累的动脉, 然后经心导管注入 SK 2 000~4 000U/min, 持续至少 1h, 血栓溶解后静脉滴注抗凝剂肝素 800~1200U/h, 维持 2~7d。由于冠脉内注射药物步骤复杂而费时, 需要训练有素的人员通力合作, 还要有昂贵的设备, 因而不易推广。静脉滴注 SK 简单易行, 更能争取早期应用, 近 10 年来多提倡“早用、大量、短期”, 即在 1h 内静脉滴注 SK 1 000 000~1 500 000U, 效果较好。静脉内 SK 溶栓疗法的冠状动脉再通率为 46%~60%, 而冠脉内给药再通率达 75%, 但由于静脉内给药有许多优点, 近年来使用者越来越多。应用链激酶前必须静脉注射氢化考的松 100(mg), 以防寒颤发热反应。

尿激酶(UK)是肾脏分泌的活性蛋白酶, 从人尿中提取, 能直接激活纤维蛋白溶酶原转变为纤维蛋白溶酶。它对血栓内纤维蛋白溶酶原的作用大于血浆中者。理论上其临床效果应比链激酶好, 但实际经验揭示两者作用相仿。本药无抗原性, 不引起过敏反应, 也不产生抗体。不同病人对 UK 的灭活和清除率不同。但 UK 的价格远较 SK 高。美国学者主要采用冠脉内注射, 而且剂量较大。《中华心血管杂志》1991 年建议静脉滴注 500 000~1 000 000U, 于 30~60min 内滴完, 或冠脉内先注入 40 000U, 继而 6 000~24 000U/min, 总剂量 500000U, 早期再通率为 60%~70%。

组织型纤维蛋白溶酶原激活剂(tissue-type plasminogen activator, tPA)是存在于血管内皮和组织的丝氨酸蛋白酶, 为天然的血栓选择性纤维蛋白溶酶原激活剂。tPA 对纤维蛋白溶酶原的亲合力低, 而对纤维蛋白的亲合力较高, 故能选择性地与血栓表面的纤维蛋白结合, 在局部使纤维蛋白溶酶原转变为纤维蛋白溶酶, 从而使血栓溶解。鉴于上述情况, tPA 注入血流后, 几

乎不影响循环血液中的纤维蛋白溶解系统, 不产生全身纤维蛋白溶解状态, 不会造成全身性溶血反应; 与自然产生的 tPA 完全相同, 不会产生过敏反应; 不会有抗原抗体反应, 可以重复使用。

tPA 于 1981 年由 Weinar 等首先应用于临床, 所用的制剂为 mtPA(1981rh Collen 从 Bowes 人黑色素瘤株提取), 1984 年起有应用 rtPA(重组 tPA)的报告。冠脉内滴注 rtPA 0.375mg/kg, 持续 45min, 冠脉再通率为 70%。静脉内滴注主张在 3h 内每小时先后用 60mg、20mg 和 20mg; 或用 100mg 在 90min 内滴完。冠脉再通率为 65%~83%。临床资料表明, 静脉给药可取得与冠状动脉内给药相同的效果。tPA 溶栓效果是 SK 的两倍。

单链尿激酶型纤维蛋白溶酶原激活剂(SCUPA)是一种单链糖蛋白, 通过限制性纤维蛋白溶酶水解而转化为双链分子 UK, 属血栓选择性溶解剂, 用基因重组技术生产。1986 年 van-de Werf 等报告临床应用效果满意。静脉滴注 40~70mg, 1h 内滴完, 部分病人随后再由冠脉内注入 20mg, 30min 内注完。

甲氧苯基化纤维蛋白溶酶原链激酶激活剂复合物(APSAC), 是 SK 分子与纤维蛋白溶酶原分子结合后再经甲氧苯基化物覆盖的复合物, 静脉一次推注 30mg, 半衰期 40min, 溶栓作用维持数小时, 无需滴注维持。冠脉再通率 87%。SK 和 APSAC 具有抗原性; tPA 和 UK 则无抗原性。

近年来溶栓药物种类较多, 其临床疗效仍在摸索中。如 tPA 和 SCUPA 嵌合体、SCUPA 突变体、tPA 突变体等。用抗纤维蛋白抗体与溶栓剂结合制成复合物如抗纤维蛋白-UK 复合物、抗纤维蛋白-tPA 复合物等。溶栓剂与抗血小板表面蛋白抗体结合制成复合物如抗血小板表面蛋白-tPA 等, 可使溶栓剂特异性地在血栓中起作用。近年国内对地龙纤溶酶和来源于不同种类毒蛇的蛇毒溶栓剂(抗栓酶, 去纤酶和消栓酶等), 进行了研究。

#### 血栓酶溶栓疗法的注意事项

1. 由于溶栓疗法的最常见的并发症是出血, 所以在进行治疗前后必须监测与血凝有关的指标, 如凝血时间、出血时间、凝血酶原时间等。有急性内脏出血、脑血管意外或中风病史, 近期(两个月内)中枢神经系统手术、年龄 75 岁以上、心肺复苏后以及未控制的高血压(大于 24/14.7kPa)和严重肝肾功能不全患者不能进行溶栓治疗。

2. 正确掌握注射药物速度与剂量。

3. 用链激酶时要注意过敏反应, 尤其是致热反应, 宜先用氢化考的松。

4. 应密切观察血管再通的表现, 包括: (1)冠脉造影梗塞有改善; (2)胸痛完全消失; (3)抬高的 ST 段迅速达到稳态水平; (4)血清 CK-MB 峰值明显提前; (5)左室室壁异常活动改善, 局部喷血分数(EF)正常化; (6)<sup>201</sup>Tl 心肌扫描显示充盈缺损消失。

5. 治疗开始后 2~4h 内应复查有关指标, 纤维蛋白原水平应降低一半以上, 凝血酶原时间应延长一倍以上。如未能达到上述指标, 说明药物未能发挥作用, 常见原因如下: (1)症状发生到溶栓开始的时间过长, 超过 24h 效果不明显, 3~6h 疗效最佳。(2)药物剂量未用足。(3)阻塞远端端有血栓形成。(4)用 SK 疗效不满意应查 SK 抗体, 可以更换药物。

6. 治疗后长期应用抑制血小板的药物如阿司匹林、潘生丁等, 以巩固疗效。

7. 应防止冠脉再度闭塞, 具体表现是: (1)再度发生胸痛, 持续 30min 以上, 含硝酸甘油不能缓解。(2)ST 段再度抬高  $> 0.2$ mV, 持续 30min 以上。(3)血清 CK-MB 水平再度升高。以上 3 项中具备两项者考虑冠脉再闭塞。

#### 参考文献

- 1 高润霖, 等. 中华心血管病杂志, 1991, 19(4): 228~230
- 2 陈灏珠. 国外医学(内科学分册), 1991, 18(2): 51~54
- 3 Anderson TL. 周智益节译. 国外医学内科学分册, 1991, 18(8): 365~368
- 4 陈灏珠. 国外医学(内科学分册), 1993, 20(1): 11~12

(安徽医科大学第一附属医院李结华讲师、朱怀玺教授撰)

**缺氧性肺动脉高压发生机制** 急性肺泡性缺氧可引起缺氧性肺动脉增压反应(HPPR),缺氧停止后消退。慢性缺氧可致肺血管持久收缩,引起肺动脉高压(PH),后者可致右心室肥大,严重者发展为右心衰竭。慢性阻塞性肺疾患伴有的缺氧性肺动脉高压,是发展为肺心病必经的环节。高原居民持续缺氧,其肺血管阻力和肺动脉压持续增高,形成的肺动脉高压是高原心脏病发病的中心环节。研究缺氧性肺动脉高压的发生机制,将为防治上述疾病提供理论基础。

缺氧性肺动脉高压的形成,主要取决于两个因素,即缺氧性肺血管收缩(HPV)和肺血管壁的结构改建。HPC导致肺动脉高压。持续的HPC可引起肺血管壁的结构改建,肺血管壁增厚,弹性丧失和管腔缩小,从而加重PH。

1946年由范·尤勒和里斯传(von Euler & Liljestrand)发现HPV现象。后来在研究中,对其发生机制的理解不断加深,从而改进了其防治措施。在70年代很多人对HPV的部位予以关注。多数人认为肺泡气氧分压下降时,主要引起肺动脉分枝发生收缩。在肺动脉压升高的同时,左心房压和肺动脉楔压并无明显改变,从而排除了肺静脉收缩的可能性。

在HPV的发生机制方面,进行过大量研究工作。最初有人认为植物神经可能参与,但在70年代,用组织学方法没有发现肺的阻力血管壁有神经纤维。很多实验结果否定了植物神经参与调节肺血管阻力的可能。范·尤勒等发现猫的HPPR不因切除迷走神经或星状节而受影响。广泛切除交感神经的病人,仍可发生HPV。类似的实验很多,大都不支持植物神经参与的观点。

劳埃德(Lloyd)本来认为HPV中有神经反射参与,但他在1966年表明改变了看法,认为神经反射在其中没有作用。1968年他进一步指出:周围附有肺组织的离体肺动脉,在缺氧时才能收缩。他提出缺氧使肺组织释放某种活性物质从而引起肺血管收缩的看法。

很早就有人设想缺氧有可能影响肺组织对儿茶酚胺的合成、贮存和释放,从而导致肺血管收缩。应用 $\alpha$ -肾上腺素能受体阻断剂,试图防止HPV的实验,未取得一致的结果。80年代国外有人注意到缺氧可致大鼠右心室收缩压增高, $\beta$ -肾上腺素能受体增加。用 $\beta$ -受体激动剂,不能减轻HPV。谢剑鸣等在80年代末发现缺氧动物肺血管的 $\beta$ 受体减少, $\alpha$ 受体增多。

组胺与HPV的关系,很早就引人注意。1972年哈斯(Hass)和伯格夫斯基(Bergofsky)以及塔克(Tucker)在1977年都指出大鼠和豚鼠肺血管周围的肥大细胞增生,可能释放组胺引起HPV。1968年郝济(Hauge)发现有6种抗组胺药可以抑制大鼠的HPPR。1974年萨斯曼诺(Susmano)应用扑尔敏于人,HPPR受到抑制。很多人用扑尔敏或色甘酸二钠,都取得明显抑制HPPR的效果。后来,对组胺受体有了了解,组胺在HPV中的作用,得以深入研究。当刺激 $H_1$ 受体时(同时阻断 $H_2$ 受体),则肺血管的阻力增加, $H_2$ 受体刺激时则不。1984年姜和及孙秉庸的实验结果表明 $H_1$ 受体阻断剂(扑尔敏)不仅可防止HPPR,而且还可防止慢性缺氧引起的PH和右心肥大。 $H_2$ 受体阻断剂甲腈咪呱则可加强急性缺氧引起的HPPR。

70年代中期,有些人对前列腺素( $PG_2$ )在HPV中的作用持否定态度。如1975年魏格(Veage)用前列腺素“抑制剂”消炎痛等于大鼠的离体灌注肺,未见HPV减轻,临床应用于缺氧性肺动脉高压病人,也未获阳性结果。进入80年代以后, $PG_2$ 在HPV中的作用日益受到重视。这是因为肺组织含有较多的 $PG_2$ ,而且肺是 $PG_2$ 合成的主要场所,肺组织含有丰富的 $PG_2$ 合成酶。已知 $PGE_2$ 和 $PGI_2$ 都可以减轻HPPR。白三烯( $LT_2$ )在HPV中的作用,虽经研究,但尚无定论。王迪得等的实验结果表明LTS有一定作用。1988~1989年间,来自国外4个实验室的报告,均不支持LT<sub>2</sub>介导HPV的观点。

慢性缺氧可显著抑制血管紧张素I(AT-I)向血管紧张素I

(AT-I)转化。凯(Kay)等的实验表明这可能与血管紧张素转换酶(ACE)活性降低有关。1992年王培勇和孙秉庸发现,在体外培养小牛肺动脉内皮细胞在缺氧早期ACE活性升高,以后降低。1988年罗宾诺维奇(Robinoritch)等报道,大鼠在缺氧过程中输入AT-I,可消除PH。这可能是由于在AT-I引起肺血管收缩的同时,继发地引起 $PGI_2$ 释放而导致肺血管舒张。

急性和慢性缺氧都可刺激心钠素(ANF)释放。ANF可使HPPR的程度降低。这方面的报道,最近有增加趋势。

$Ca^{2+}$ 和钙调蛋白(CaM)在HPV中的作用,是当前研究热点之一。继麦克莫垂之后,孙秉庸等于1982年进一步证明钙离子通道阻断剂可减轻猪的HPPR。1986年王肇文和孙秉庸等证明硝苯吡啶(钙离子通道阻断剂)既可降低HPPR,也可减轻慢性缺氧所致的PH和右心肥大。1986年陶林(Tolins)等证明钙离子通道增强剂可加强大鼠HPPR。1989年喀季(Guazzi)等报道高血压患者的HPPR增强,并可为钙离子通道阻断剂所消除。类似的实验虽多。但都只间接说明 $Ca^{2+}$ 在HPV中的作用。1989年高钰琪等证实大鼠的HPPR伴有 $^{45}Ca^{2+}$ 跨膜流入肺血管平滑肌细胞增多。

CaM是细胞内的钙离子受体。1987年蔡英年等发现缺氧大鼠肺组织的CaM活性量降低。1987年陈江帆和孙秉庸等首先证明缺氧10~11d家兔肺小动脉壁的CaM无明显改变。1989年喻明英和孙秉庸等进一步证实缺氧幼猪肺小动脉壁CaM活性量无明显改变。表明缺氧导致肺血管平滑肌内 $[Ca^{2+}]$ 增高,可充分激活细胞内原有的CaM,从而启动和维持血管收缩。

肺血管内皮细胞具有复杂的代谢和功能。1980年佛奇高(Furchgott)等发现内皮细胞舒张因子(EDRF)以来,很多研究者如布来协(Bra-Shers,1988)等、劳德曼(Rodman,1990)等都证明缺氧可导致EDRF的作用减弱或释放减少。因而在HPV中有一定作用。

肺血管内皮细胞还可产生内皮细胞收缩因子(EDCF<sub>1</sub>)。1988年Yanagisawa等提纯的内皮素(ET)就是一个EDCF。现在已知ET有3种同形体,在肺、肾和脑内形成。血管平滑肌、肾和中枢神经组织都具有ET受体。受体与磷脂酶C相连,可催化4,5-二磷脂酰肌醇( $PI_2$ )水解生成三磷酸肌醇( $IP_3$ )和甘油二酯,启动细胞内钙的动员,最终导致血管平滑肌收缩。

1988年Yanagisawa即提出ET可能参与HPV。现在已有不少证据支持这一观点。例如1990年海德(Heida)报道培养的牛血管内皮细胞缺氧24h,即有内皮素释放增加。1991年曼(Mann)等报道合成的ET-1于离体灌流的兔肺,可致肺动脉压升高达1h以上。ET通过增加钙离子向平滑肌细胞内流,激活蛋白激酶C而引起肺血管收缩。蛋白激酶C的抑制剂可显著降低血管对ET-1的反应。1991年有人发现先天性心脏病伴有肺动脉高压的病人,其肺静脉血浆中ET水平增高。

肺血管内皮细胞在HPV发生中的作用,是当前研究的热点。可以推断HPV可因缺氧导致EDRF减少或其作用减弱而发生,也可因ET及其他EDCF<sub>1</sub>生成增多而发生。

关于HPV和肺血管结构改建的细胞内信息传递和细胞内分子调节除 $Ca^{2+}$ -CaM和cAMP-cGMP外,则是报道不多。而 $IP_3$ 和甘油二酯作为细胞内第2信使,和多胺作为细胞内调节分子,具有更重要的意义。1992年王培勇和孙秉庸等的实验证明缺氧可使培养的小牛肺动脉内皮细胞和血管平滑肌细胞胞浆 $[Ca^{2+}]$ 和细胞内cAMP含量升高。1991年关战军和孙秉庸等报道,缺氧大鼠右心室收缩压升高,肺动脉中层厚度(MT%)和肺内动脉密度增加,这些改变在时间上与肺组织多胺(腐胺、精胺和精胍)含量增加一致。1991年杜军英和孙秉庸等进一步证实缺氧幼猪肺动脉壁的多胺含量增加,其离体肺动脉在缺氧和组胺同时刺激下, $[^3H]$ - $IP_3$ 积累显著增加。

缺氧性肺动脉高压的研究工作,正逐步深入到细胞和分子水平,最终将能针对其关键环节,提出更有效的防治措施。

(第三军医大学孙秉庸教授撰)

**克山病** keshan disease 克山病是一种原因尚未清楚的地方性心脏病,最先发生于黑龙江省克山县,因此就地命名为克山病。据最近流行病学资料,此病发生在中国 15 个省和自治区的广大农村。克山病对病区人民的生命危害极重。历史上暴发年高发季节最多可使全村人的半数死于此病,幸存者也背井离乡抛家弃命,使许多村屯人绝地荒。1960 年,中共中央成立了地方病领导小组,由中央书记处书记直接领导克山病的防治领导小组,在全国也成立了许多专业防治研究机构,每到发病季节便派出医疗队深入农村病区防治克山病。80 年代以来克山病的发病已明显减少,但克山病的病因研究和防治工作仍在继续进行。

1935 年冬,黑龙江省克山县光荣村(202 号)村民突然因心难受、恶心呕吐,几小时内便导致病人死亡。就在这个冬季的两个月内,全村 1/5 的人因此病而死亡。当时正处日伪统治时期,日本医生原亨等到病区调查认为是一种心脏病,但原因不清,故就地命名为克山病。

克山病发病特点和病因,在新中国成立经 40 多年的流行病学调查研究,其发病规律基本清楚。(1)地区性:因克山病发生于一定的地区而其它地区不发生所以称其为地方病。发生在黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、山东、山西、陕西、贵州、河南、河北、云南、四川、湖北、甘肃、陕西、新疆等 15 个省和自治区。每个病区从大到小发生在上述省分中的一些县,县中的一些乡,乡中的一些村屯。这些地区有一个共同的特点,都是食用自产粮的农村,按其病情又可分为轻、中、重病区。(2)人群性:发生在病区中的食用自产粮的农业人口。据哈尔滨医科大学克山病研究所 1974 年调查资料,尚志县一个病村 1 326 人,食用当地自产粮的农业人口 592 人,检出克山病患者 36 人,检出率为 6.1%;食用供应粮的非农业人口 734 人,无一例克山病人检出。主要发生在农业人口中 18~45 岁的生育期妇女和 2~7 岁的成长期儿童。(3)时间性:克山病存在多发年的现象,但是多发年的间隔没有规律。北方病区的急型克山病 90% 以上的病人集中在冬季 12 月到翌年的 2 月份之间,而亚急型克山病多发生在冬末春初(2~3 月份)。南方病区,云南、四川省急型克山病少见,主要是儿童的亚急型克山病为主。发病的时间与北方也有明显不同,多发生在夏季 6~9 月。慢型克山病发生在一年之中的任何季节,常随多发年和多发季节之后而明显增多。克山病的病因至今尚不清楚,主要有 3 种学说:一是传染学说,认为是由于病毒、细菌、真菌、原虫等病原体的感染,病原微生物毒素直接引起心肌损害。二是中毒学说,有害气体一氧化碳、有机毒物亚硝酸盐、真菌毒素、无机毒素钡(Ba)、锰(Mn)等物质的中毒。三是营养性生物地球化学说,在病区条件下,地球化学成分通过饮食链作用于机体,造成心肌所必需的某种或某几种化学物质的缺乏或失衡而使机体患病。近年来中国医学科学院劳动卫生所等单位经大量的现场调查和实验室研究工作证明,病区的水土、粮食及病区人的血和头发硒的含量明显低于非病区。用低硒饮食饲养动物能得到类似克山病样的病理改变,病区人群口服亚硝酸钠可以预防克山病的发生。因此缺硒与克山病的发生有密切关系的认识已趋于统一,但是尚存一些问题有待进一步解决。

病理变化主要是心肌实质的改变,心脏有不同程度的增大,心腔扩张,心室壁心肌面可见散在点状病灶,心室病变重于心房,室间隔和左室重于右室。光学显微镜下可见心肌细胞实质性损害。心肌细胞的变性、坏死、纤维瘢痕化。粟粒样病灶沿心肌中冠状血管走行分布呈葡萄串样。新旧病变并存无相互蔓延关系。心肌损害严重者坏死病变可连片,形成片状瘢痕。常可见到传导系统的损害。电子显微镜下可见心肌细胞膜系统的损害。横管及肌浆网扩张,线粒体增生肿胀,嵴减少消失,空泡变,成层变,钙化,肌纤维过度收缩形成巨大收缩带,微血管内皮增生阻塞。

临床上根据心脏功能代偿状态和发病经过把克山病分为 4 个临床型。急型克山病,发病急剧,可以明确说出几个小时前发病,伴有频繁而顽固的恶心呕吐,呕吐物为带有胆汁的黄色液体,

心难受,烦躁不安,四肢厥冷,血压降低,以急性心源性休克、急性心力衰竭和各种严重心律失常表现为主,心电图改变可见 ST-T 改变和各种心律失常,血清酶含量明显增高。此型克山病患者死亡率很高。治疗,首先用吗啡、安定等镇静药使病人安静,12.5%VC5~10g 加葡萄糖静脉注射,病情不见好转可重复注射,24h 可用到 30g,同时注意对休克、心力衰竭和严重心律失常的治疗。急型克山病主要发生在北方病区,近年已很少见到此型病人发生。慢型克山病,起病缓慢,常因心悸气短、肝大浮肿等心力衰竭出现而被发现,不能说出发病的准确日期。这型病人可从急型、亚急型以及潜在型克山病转变而来,亦可没有克山病的既往史,后者称之为自然慢型克山病。慢型克山病的临床及器械检查改变,主要是心脏增大以心腔扩张为主,肝大浮肿充血性心力衰竭、心律失常等扩张型心肌病的表现。其治疗也主要是减轻心脏的负荷,以治疗充血性心力衰竭为主。亚急型克山病:发生在 2~6 岁的儿童。云南和四川病区以此型病人多见。发病较急型病情缓和,一般在 2~7d 左右。患儿常以精神不振、食欲减退、哭闹不安、腹胀腹泻为主。临床检查,面色灰暗,心脏扩大,肝脏肿大,颜面、四肢浮肿等也以充血性心力衰竭表现为主,有时可能将其误认为是肾炎,但尿无明显改变。治疗也主要以治疗心力衰竭为主,可酌情伍以维生素 C 和葡萄糖静脉注射,有利于受损心肌的康复。此型病人常可见到心脏附壁血栓脱落所致脑栓塞而造成的偏瘫。潜在型克山病:无明显症状,心功代偿良好,临床或 X 线检查心脏可能轻度扩大,心电图检查可见到完全性右束支传导阻滞、ST-T 改变、多发室性期前收缩、心房颤动等心律失常。由急型、亚急型、慢型转变来的潜在型克山病或者器械检查有早期心脏功能不全者,称之为不稳定性潜在型克山病,它可能转变为慢型克山病,可采取减少体力负荷、长期服用洋地黄和钙拮抗剂治疗。无上述情况者称之为稳定性潜在型克山病,只需作定期复查,不需特殊治疗。

因为克山病的病因尚不清楚,所以预防克山病至今还没有特效。硒缺乏与克山病的关系已被多数人重视,所以目前在病区开展以补硒为主的综合预防措施是行之有效的。亚硝酸钠口服剂量 5 岁以下 0.5mg,5~10 岁 1.0mg,10 岁以上同成人 2.0mg,每周 1 次。也可食用加硒食盐、加硒粮或施加硒肥料于农田,从根本上改变缺硒的地球化学环境。此外还应改善膳食质量,合理搭配,避免膳食单一,创造良好的卫生环境,减少病原微生物的感染机会。保管好粮食和水源,减少有毒物质进入人体等都是不可忽视的措施。克山病将随这些病区经济的发展,人民生活水平的提高使之得到而抵消致病因素,使之得长期控制并最后消灭。

#### 参考文献

- 1 于维汉,等.中国地方病学杂志,1982,1:2,77
- 2 苏引,于维汉.中华医学杂志,1979,59:8,461
- 3 杨光祈.营养学报,1982,4:3,191
- 4 王凡,等.营养学报,1982,4:3,271
- 5 谷伯起,等.中国地方病学杂志,1984,3:3,153
- 6 夏德义,关振中.地方病通讯,1986,1:3,10

(哈尔滨医科大学博士生导师关振中教授撰;夏德义审)

#### 克山病病因研究 study on keshan disease etiology

克山病是一种以多发性灶状心肌坏死为主要病变的地方性心脏病。在中国从东北到西南的 15 个省和自治区的农村里流行。最早暴发的报告是 1935 年黑龙江省克山县,因原因不明而以县命名为克山病。暴发流行时,其发病率和死亡率极高,景象十分凄惨。有资料记载的北方 11 省,在高发的 1959 年发病率和死亡率分别为 6.02/万和 1.996/万。为了挽救和保护广大病区人民的生命和健康,迫切地需要找到确切的克山病病因,寻求有效的预防和治疗办法,以期控制克山病的猖獗流行。

新中国成立以来,克山病防治工作有两大突破性进展。一是 1961 年西安医学院王世臣等创立的大剂量 Vc 静脉注射疗法抢救了无数急型的和亚急型的克山病人,使病死率由 80% 降到

20%以下。二是中国医学科学院克山病防治科研小分队和西安医学院克山病研究室,受畜牧兽医界防治动物白肌病的启发,先后在四川和陕西进行的大规模试验中,肯定了口服亚硒酸钠预防克山病的效果。1977年向全国推广后,使克山病发病率明显下降,北方11省统计数字表明,1984年发病率仅为0.17/万。之后,中国未见暴发流行。迄今,虽然克山病病因还没有完全清楚,但由于有了有效的防治措施,已在中国控制了克山病,这是中国科学工作者对预防医学的重大贡献。

关于克山病病因的假说很多,概括起来可分为生物的和非生物的病因两大类。经过长期的防治实践和实验研究,有些学说在不断地修改完善;有些学说已趋于否定,如生物病因中的自然疫源性传染说、肉孢子虫感染说、甲型链球菌变态反应说等和非生物病因中的一氧化碳中毒说和钒中毒说;有些病因观点提出后也进行了一些实验研究,但未得到结论性的答案,处于暂缓或断续研究状态,如铜、镁缺乏说、病毒感染和真菌毒素中毒说。现将较为肯定和正在进行的若干病因研究概述如下。

**非生物病因学说:**即水土病因说或生物地球化学病因说。认为病区自然环境中存在某种缺陷(如缺乏或过多),通过水和食物传递而致人体发病。

**硒缺乏学说:**其基本内容是低硒是克山病发病的基本因素,但不是唯一因素,还需要有与低硒有关的复合因素参与发病。此学说已为多数学者所接受。其依据是:(1)克山病区内外部环境无一例外地处于低硒状态。1972年和1975年中国医科院克山病小分队在国内首先建立了生物样品中微量硒的荧光测定法和血中谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px,一种含硒酶,是体内主要抗氧化酶系之一)活力的测定方法。对病区和非病区进行了大量调查,证明病区居民血发硒和主粮硒均处于低硒状态,机体GSH-Px活力也处于低下状态。中国科学院地理研究所等单位从全国27个省采集了上万分人发、粮、土等样品,也证实克山病区确实处于低硒环境。他们划分的克山病区硒含量范围列于表中。(2)补硒可有效地预防克山病。如上所述,预防克山病的补硒措施推广以后,克山病得以控制。补硒后,人体血硒可达0.05mg/L以上,GSH-Px也达正常水平。(3)发病机理的研究支持硒缺乏学说。在全国7省16个科研单位293名科技工作者参加的云南楚雄克山病综合考察中,生化研究结果表明,克山病人和病区人群存在以低硒为中心的代谢改变。如血和心肌中GSH-Px活力低下,处于低抗氧化功能状态;红细胞和心肌自由基和脂质过氧化物升高;红细胞膜和心肌线粒体膜受损等。(4)低硒不是克山病发病的唯一因素。因为低硒地区并非均有克山病流行;克山病有季节高发和年度波动性,但内外环境硒水平并不随之变动;克山病区内病人与非病人机体硒和GSH-Px活力水平无显著差异。因此认为,除低硒以外还有复合因素参与发病,此复合因素只有在低硒时才起作用。探寻可能的复合因素研究正在国家“八五”攻关课题中进行。

|        | 硒含量范围划分            |      | ng/g |
|--------|--------------------|------|------|
|        | 克山病区与非病区交叉         | 数据来源 |      |
| 全血硒    | <0.020 0.020—0.050 | [4]  |      |
| 发硒     | <0.120 0.120—0.200 | [4]  |      |
| 主粮硒    | <0.010 0.010—0.020 | [4]  |      |
| 表土总硒   | <0.125 0.125—0.175 | [8]  |      |
| 表土水溶性硒 | <0.003 0.003—0.006 | [8]  |      |

与硒有关的复合因素研究:(1)硒和维生素E联合缺乏可能是引起克山病的基本原因。其依据是VE和硒都具有清除自由基保护细胞膜作用,且两者有互补作用;病区人群血浆VE水平低于非病区。动物实验证明,病区粮中的致病因素可损伤心肌线粒体而导致心肌坏死,硒和VE联合补充可起保护和预防作用。但

目前支持此观点的资料还不充分,更详尽的实验研究正在国家“八五”攻关课题中进行。(2)膳食中硒和蛋氨酸缺乏可能与克山病发病有关。有人提出,某些氨基酸缺乏或失衡可能引起心肌损伤而致克山病;在硒的动物实验中又发现补充蛋氨酸可提高硒的利用率,低硒低蛋氨酸合成饲料可引起大鼠心肌坏死。因此认为它们有可能与克山病发病有关。但目前支持此观点的数据还太少。为了判别蛋氨酸是否与克山病发病有关,还需进行较多的实验研究,特别是必须有对人体实验和病区人群调查的资料。(3)膳食中低硒高锰可能与克山病发病有关。锰可使血和心肌硒含量以及含硒酶活力显著降低;过量的锰可引起心肌损伤,其主要部位是心肌线粒体。但在流行病和生态环境调查中未能看到各病区环境都有低硒高锰的一致规律。因此锰是否确实与克山病发病有关还有待探讨。

**生物病因中毒学说** 主要是真菌毒素中毒学说,最初由中国医科院郭可大在1961年提出,但多年来没有令人兴奋的进展。1983年,北京农业大学李季伦等从陕西克山病区粮食中分离出串珠镰刀菌胶孢变种,它分泌的串珠镰刀菌毒素可致动物心肌坏死。1989年,中国医科院药物研究所梁晓天等采用化学方法合成了串珠镰刀菌毒素,毒理实验看到给毒1h即可见心肌线粒体损伤。1990年3月20日梁晓天在《中国科技报》上发表了“真菌毒素是导致克山病的元凶——缺硒学说渐被否定”,引起克山病病因学界的争鸣,目前持不同观点的学者正在对真菌毒素进行细致的实验研究和病区非病区的对比调查,以期在短期内明确回答串珠镰刀菌毒素是否可能是克山病病因。

上述几方面的病因研究仍在进行,克山病发病机理的研究和硒生物学功能的深入研究将有助于克山病病因的确定。1985年,意大利F. Ursini发现的谷胱甘肽磷脂酰过氧化物酶是定位于膜上的含硒酶,能较好地解释硒节约VE和保护生物膜作用。1990年英国J.R. Arthur和德国D. Behne分别鉴别出的碘化甲腺原氨酸5'脱碘酶是又一含硒酶,它为硒预防克山病提供了“非抗氧化”机理,更恰当地解释了克山病人血清中T4升高和甲状腺肿有80%检出率的现象。这两个新的含硒酶将是今后克山病病因研究中的热点之一。克山病病因研究的最大难点可能是至今没有恰当的克山病动物模型;克山病病因最后确立的难点可能在于中国已基本消灭了克山病,无法找到克山病人来最终验证。这虽然不利于研究工作,但它毕竟已造福了人类,给全体研究者以宽慰。

#### 参考文献

- 1 西安医学克山病研究室,中华内科杂志,1961,6:346~350
- 2 Keshan Disease Research Group of the Chinese Academy of Medical Sciences, Chinese Medical J. 1979,92:471~476
- 3 西安医学院克山病研究室,中华医学杂志,1979,59(8):457~459
- 4 杨光圻,等.营养学报,1982,4(3):191~200
- 5 朱莲珍,等.营养学报,1982,4(3):229~233
- 6 孙建纯.中国克山病及其防治研究.北京:中国环境科学出版社,1987.1~24
- 7 生化专题组,楚雄克山病综合性科学考察文集.北京:人民卫生出版社,1988.178~184
- 8 谭见安,侯少范.环境硒与健康.北京:人民卫生出版社,1989.219~241
- 9 王凡,等.中国地方病防治杂志,1991,6(5):306~307
- 10 曾宪惠.中国地方病防治杂志,1991,6(5):308

(中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所夏奕明研究员撰)

**弥散性血管内凝血** disseminated intraculdr coagulation 弥散性血管内凝血(DIC)是一种在多种疾病基础上的临床综合症,是一系列复杂病理变化过程的重要中间环节。其主要特征是在各种病因作用下,人体凝血与抗凝血的平衡失

调,使弥散性小血管内特别是毛细血管内纤维蛋白及血小板血栓形成,导致消耗性凝血因子及血小板减少,微循环障碍及组织缺血,并引起继发性纤维蛋白溶解亢进等病理变化。

DIC的概念形成及其实验研究的发展,可以追溯到前100年。1952年, Schwartzman首先给家兔注射致死量的内毒素,成功地制造了DIC动物模型的雏形。1955年, Cittle最先肯定肝素对DIC的疗效。1970年, Colman首先提出DIC的诊断标准。1979年,中国同济大学附属协和医院血液病研究室在国内首次用大肠杆菌内毒素制造出DIC动物模型。1986年,中国第1届血栓与止血会议修改了DIC的诊断标准。

临床各科许多疾病患者均可以发生DIC,其发病率在1%以下。各种感染为导致DIC的最常见病因之一。1955年, Conley首次报告1例大肠杆菌败血症并发DIC。中国资料统计感染引起的DIC约占其发病总数的31%~43%。其次为肿瘤,诱发者占24%以上,易于发生DIC的肿瘤有前列腺癌、肺癌、消化道各种粘液腺癌、各种急性白血病、恶性淋巴瘤、恶性组织细胞增生症、绒毛膜上皮癌等。产科疾病也是最易引起DIC的一组疾病,约占4.7%~12.3%,此类疾病患者中DIC发生率最高者为羊水栓塞、感染性流产、子宫卒中及子痫等患者。另外,外科大手术、严重创伤、药物、血管性疾病,某些全身性疾病均可引DIC。

DIC的发病机理十分复杂,往往因病因不同而异,归纳起来,种种病因主要通过下列途径导致DIC的发生:(1)血管内皮细胞损伤。感染、小血管炎、长时间休克、酸中毒、中暑等均可造成血管内皮广泛损伤。胶原暴露而激活因子X启动内源凝血系统,同时使血小板聚集、粘附变形及释放其内容物,并在受损的血管壁上形成白色血栓。目前许多学者发现,血管内皮对凝血过程有双重作用,即血管内皮的抗凝作用及内皮下组织的促抗凝作用。此外,正常血管内皮细胞还可以使血小板分泌的前列腺素内过氧化物转变为前列环素,内皮细胞损伤时其转变过程受抑制,这可能是内皮细胞广泛性损伤时前列腺素水平减低的又一原因。(2)白细胞、红细胞及血小板损伤,各种病原体毒素及其代谢产物、药物及其它化学物质、抗原抗体反应,各种原因引起的溶血、低血氧症、代谢性酸中毒及外来物质如蛇毒等的作用,可致白细胞、红细胞及血小板破坏,此时含于白细胞内的丰富组织因子,含于红细胞内的磷脂类物质及血小板因子大量释放于血循环中,激活凝血反应。(3)组织损伤。当含有大量组织因子的各种组织受损伤时,即可使组织因子进入血流,激活外在系统凝血反应导致DIC发生。(4)外来促凝物质进入人体,可直接作用于X,激活内在系统凝血反应导致DIC。(5)各种DIC诱因可通过不同途径促进DIC发生。

凝血机理异常是DIC最常见的病理生理变化,其演变过程大致可分为3期:(1)初发性高凝期,临床以微循环衰竭及血栓形成为主要表现,如休克、急性肾功能衰竭、指趾端发绀等。(2)消耗性低凝期,临床以微循环衰竭与出血倾向并存为特点。(3)继发性纤溶亢进期,临床以广泛出血及脏器功能衰竭为主要表现。

DIC临床最常见的4大症状为出血倾向、休克、栓塞及微血管病性溶血。DIC出血发生率在80%~95.4%之间,出血多突然发生且部位广泛。Colman早期统计,皮肤出血者占62%,胃肠道出血者占50%,伤口及穿刺部位出血者占44%,血尿者占31%,血肿者占27%,咯血者占14%,休克发生率约在30%~80%之间。1972年Matsuda统计的136例DIC患者中,33%为休克,其特点是突然发生,多属难治性休克,常规治疗效果不好,抗凝等综合治疗有时可获较好效果。栓塞多属微循环栓塞,分布广泛而弥漫,通常很难出现血栓形成及栓塞的局部定位症状和体征,因此不能以传统的观念和方法寻找DIC栓塞的临床及实验室证据,因多以皮肤、粘膜坏死及脏器功能不全等间接证据为主要表现;溶血反应约占DIC的25%,主要原因是微血管病变,它所引起的血细胞破坏在DIC诊断上具有极重要价值。慢性DIC患者常见延续性出血及弥漫性血栓形成,而不像急性DIC者以致命暴发性出血为主要特征,绝大部分凝血试验指标接近正常或正常。然

而慢性DIC者几乎均有FDP显著升高,从而损害纤维蛋白单体的聚合,并因其包被于血小板膜表面而损害血小板功能。

1971年, Colman提出主要诊断指标为血小板减少、凝血酶原时间延长、纤维蛋白原含量减低;辅助诊断指标为凝血酶凝固时间延长、血FDP含量增高或3P试验阳性、优球蛋白溶解时间缩短等。由于诊断指标简单、明确,易于掌握,在临床应用上至今仍有较大价值。目前国内外所订的诊断标准,也是依据Colman指标修改和补充的。中国于1986年在全国血栓与止血会议上制订的DIC诊断标准:(1)存在易于引起DIC的基础疾病。(2)有下列两项以上临床表现:多发性出血倾向;不易用原发病解释的微循环衰竭和休克;多发性微血管栓塞的症状和体征;抗凝治疗有效。(3)实验室检查有3项以上异常:血小板低于 $100 \times 10^9/L$ ,或呈进行性下降(肝病DIC低于 $50 \times 10^9/L$ );纤维蛋白原低于 $1500mg/L$ 或进行性下降,或高于 $4000mg/L$ (肝病DIC低于 $1000mg/L$ );C3P试验阳性或FDP高于 $20g/L$ (肝病DIC高于 $60g/L$ );凝血酶原时间缩短或延长3秒以上或呈动态性变化,或激活的部分凝血活酶时间缩短或延长10秒以上;优球蛋白溶解时间缩短或纤溶酶原减低。

DIC若不治疗往往导致患者死亡,大多数不会自行缓解。1982年Feinstein报道死亡率为50%~85%。治疗原则:(1)积极地抗休克,补充血容量,纠正酸中毒,维持电解质平衡,处理呼吸衰竭,防治肾功能不全。(2)去除引起DIC的某些基础疾病及诱因。(3)终止DIC病理过程发展。(4)重建人体凝血与抗凝的正常平衡。DIC是一个急骤动态变化着的病理过程,临床医师要随时观察和分析每个时期患者病理变化的主要矛盾,及时给予解决。如高凝期重点是抗凝和用血小板抑制剂,低凝期在抗凝后补充凝血因子;纤溶期再加上抗纤溶药物等。慢性DIC的治疗与急性的明显不同,最重要的治疗是对基础疾病过程的治疗,抗凝治疗不需十分强烈。

#### 参考文献

- 1 沈迪,主编.临床血液学.北京:人民卫生出版社,1989,793~814
- 2 沈迪,朱善俊.弥漫性血管内凝血.上海:上海科学技术出版社,1984
- 3 磯貝行秀,池本卓.血流上の閃連,日本临床,1986,44:1063
- 4 Coleman M, et al. Fibrinogen Survival in Cirrhosis Ann Intern Med, 1975, 83: 79
- 5 Feinstein Di Diagnosis and managment of DIC, The role of heparin therapy bolld, 1982, 60: 284

(安徽医科大学第一附属医院吴基教授撰)

#### 肺动脉高压的诊断 diagnosis of plmonary hypertension

肺动脉高压(PAH)是临床常见病症。在美国,34岁以上者有PAH者为13.4%,64岁以上男性为28.2%;PAH占234例连续心导管检查术的45%,占瓣膜病的69%,占冠心病的44%,占心内分流先天性心脏病的74%;几乎全部重症慢性肺疾病患者均有PAH。中国肺心病患病率远高于西方,血吸虫病疫情尚未完全控制,瓣膜病等心脏病还广泛存在,因此中国PAH的患病率也不会低。由于PAH是肺心病发生发展的病理基础,肺动脉压(PAP)高低是影响其预后的重要因素,而PAP和心排量又与患者的生活质量密切相关,因此把PAH的防治作为重点课题研究,对提高人群的健康水平尤为重要。

长期以来临床依赖右心导管术检测PAP。因有创伤,难于普及和进行动态监测,故而限制了PAH的防治和研究。PAH的无创性诊断已是国内外重点研究课题之一,已涉及的无创术包括X线胸片、心电图及心电图向量图;肺功能包括通气功能和血气分析、肺阻抗血流图及心尖搏动图和颈静脉搏动图等体表描记图;核素检查法包括铊<sup>201</sup>心肌闪烁图及首次通过法或门电路控制的血池扫描检查以及超声心动图,包括M型的、B型的和多普勒超声心动图。至今临床开展的PAP无创性检测术研究,多是通过有创术

与无创术的同步或同期对照检测,探索有关参数的变化与 PAP 的相关性,通过回归分析建立该种无创术预测 PAP 的数学表达式。由于每种无创术仅能从某 1~2 个侧面重点反映 PAP 患者右心和/或肺循环的机能或形态学变化,而这些 PAH 的因或果的变化往往是并存的,相互影响但又不是完全平行的,加上患者个体间的差异及观测上有时不能完全控制或消除的人为误差,因此这些无创术与 PAP 的单项相关系数均不够满意;即使应用几种技术、方法联合诊断,与 PAP 的复相关系数也很少大于 0.8,多项回归方程最多只能解释 PAP 变异的 60%,故而任何一种无创术都还不可能对每一个患者的 PAP 作出足够精确的推算,而只能对群体 PAP 均值作出近似估算,或通过动态观测反映个体 PAP 的变化及趋势。

目前多数学者认为,超声心动图是一种最有前途的检测 PAP 的技术。M/B 型 echo 既能观测到心脏及大血管的形态变化,又能检测心脏的时相变化,而多普勒技术(包括脉冲和连续多普勒及彩色多普勒 echo)可能是估测 PAP 最有希望的方法,有些指标与 PAP 的相关系数可达 0.90 以上,但对慢性阻塞性肺病患者的检出率不够高。

通过对 45 例慢性阻塞性肺病患者 PAP 直接测定和经 B 型校正的 M 型 echo 资料的研究,筛选出 5 项诊断 PAP 的 echo 指标,即右室流出道(RVOT)≥30mm,右室舒张期内径(RVDd)≥20mm,RVDd/LVDd≥0.4,右室前壁厚度(RVAWT)≥5mm 和室间厚度(IVST)≥12mm,若两项及两项以上指标阳性作为诊断标准,则诊断效率为 78.05%,敏感度为 71.43%,特异性为 85.00%。

应用 76 例次与心电图、心音图同步的二尖瓣超声心动图(TV-echo)无创检测右心时相(RVTI),进而预测 PAP 的回归方程式为:(1) $PAMP(kPa) = 2.298765 \times RIRT^{0.8407848}$ 和(2) $PAMP(kPa) = [10.9277 + 107.2888 \times (RIRT/RDTI - RIRT) - 69.5902 \times (RIRT/RDTI - RIRT)^2] \times 0.133322$ 。经组外 42 例次扩大验证式(2)对 PAP 的诊断正确率为 76.92%,假阳性和阴性率分别为 29.41%和 18.18%;个体推算值与实测值之差≤±0.666kPa 者占 64.10%;群体 PAMP 推算均值与实测值比较, $P > 0.05$ 。

近年来有关多普勒 echo 对 PAH 的诊断价值的研究显示,多普勒 echo 是一种准确度较高、较为实用的无创性检测术,通常于胸骨左缘 2~3 肋间取主动脉短轴切面,脉冲多普勒束平行于肺总动脉长轴,用彩色多普勒显示取样容积为最高流速,测量以下参数(1)右室射血前期(RVPEP),心电图 Q 波起始处至肺动脉收缩期血流频谱起点的时间;(2)右室射血期(RVET),肺动脉收缩期血流频谱起点至终点时间;(3)肺动脉血流加速时间(PAT),肺动脉收缩期血流频谱起点至流速峰值的时间;④收缩期右室-右房压力阶差( $\Delta P$ ),于胸骨左缘 3~4 肋间或心尖处找出典型心脏四腔图,置取样容积于三尖瓣口的右房侧,观测彩色多普勒图像,判断有无三尖瓣返流,然后用方向性连续多普勒检测由彩色多普勒提示的经三尖瓣口返流最强处,根据简化 Bernoulli 方程式计算右室-右房压力阶差( $\Delta P$ ),即 $\Delta P = \text{右室收缩压} - \text{右房压} = 4V_{\max}^2$ ( $V_{\max}$  为返流最高流速)。

Isobe M 等于 1986 年对 77 名受检者(对照组 32 例;心脏病者 45 例,其中二尖瓣病 17 例,主动脉瓣病 8 例,联合瓣膜病 7 例,原发性 PAH 4 例,房间隔缺损 9 例)的有创与无创资料进行了相关性及回归分析,建立了 3 个回归方程式:(1) $PAMP = 33.5 \times RPEP/AT - 10.3$ (mmHg);(2) $PASP = 51.0 \times RPEP/AT - 14.3$ (mmHg);(3) $PADP = 24.7 \times RPEP/AT - 9.0$ (mmHg)。作者报告称:用  $RPEP/AT$  比值预测 PAMP 的特异性和敏感性分别为 93%和 97%,且同样适用于心排量正常和低排量患者,认为  $RPEP/AT$  是定量预测无肺动脉瓣狭窄的成人 PAP 的最好指标。

Marchandise B 等 1987 年报告的资料表明,PAT 与 PASP 和 PAMP 均呈明显负相关,其相关性明显高于 PEP、ET 及

PEP/ET。PAT 越短提示 PAP 越高;对于大多数慢性阻塞性肺病患者,多普勒 echo 较之 M 和 B 型 echo 更加易于实施,因而对诊断慢阻肺 PAH 不失为一种较实用的无创性检测方法。

吕春增等 1990 年报告,运用连续波多普勒压差法与心导管术对 75 例(85 例次先天性心脏病,其中包括原发性 PAH、风心病及主动脉瓣瘤破入右室各 1 例)患者的 PASP 进行同步测量,结果显示 30 例三尖瓣返流最大压差(TRPG)的多普勒测值与心导管测得的 PASP 呈高度相关( $r = 0.99$ );Cuff 血压计测量的肱动脉收缩压(BASP)减去跨未闭动脉导管最大压差(PDAPG, 20 例)以及减去跨室间隔缺损处最大压差(VSDPG, 35 例)的多普勒 PASP 预测值与心导管实测值呈高度相关( $r$  分别为 0.95 和 0.97)。作者证实连续波多普勒压差法在估测 TR、VSD 患者的 PASP 中具有高度准确性和临床实用价值。

刘志等 1991 年报道,对 18 例慢阻肺 PAH 患者在进行右房压、右室压及 PAP 的 Swan-Ganz 右心导管检测前 48h 内进行多普勒 echo 检测,从肺动脉血流频谱测得的 RPEP、ET 以及 RPEP/ET 与 PAP 的相关性均不够理想。以此 3 项作自变量推导 PAP 的多元回归方程式  $PAMP = 76.4560 + 0.1655PEP - 0.2226ET + 12.0530PEP/ET$ ,  $r = 0.652$  ( $P < 0.05$ )有一定实用价值。PAT 与 PASP 和 PAMP 均呈明显负相关, $r$  值分别为 -0.89 ( $P < 0.001$ )和 -0.84 ( $P < 0.001$ ),可较准确地评价 PAH 程度,适用于无或无明显三尖瓣返流的慢阻肺患者 PAP 检测,其回归方程式为  $PAMP = -0.53PAT + 81.60$  ( $r = -0.84$ ,  $P < 0.001$ )。PAT 在 PAH 患者缩短的主要原因为:(1)右心室压力负荷增加,使心室压力上升速率(dp/dt)增大,导致肺动脉血流加速度增大;(2)由于慢阻肺患者肺血管缺氧性收缩及血管肌化,慢性炎症所致血管狭窄,使肺血管阻力增大,顺应性下降,引起肺血流提前减速。连续多普勒 echo 测得的收缩期右室-右房压力阶差( $\Delta P$ )与 PASP 和 PAMP 呈明显正相关, $r$  分别为 0.897 ( $P < 0.001$ )和 0.92 ( $P < 0.001$ ),可较准确估测伴三尖瓣返流的慢阻肺患者的 PAP,其回归方程为  $PAMP = 0.697\Delta P + 6.395$ 。

迄今的研究工作表明,应用多普勒 echo 对慢阻肺之外的高动力型 PAH 和毛细血管后性 PAH(主要见于二尖瓣狭窄和左心衰)进行较为准确的个体化、动态无创性监测已成为可能,但对慢性阻塞性肺病导致的毛细血管前性 PAH 进行诊断,还需要对更大样本的病例进行有创术与无创术同步检测、分析研究,并进一步提高检出率。

预计在今后一个时期内,有关 PAH 无创性诊断技术的研究仍将成为国内外研究的重点课题之一。其热点是应用多普勒 echo 对慢阻肺 PAH 诊断技术的研究。随着检出率的提高,检测方法及程序的规范化、特别是与电子计算机软件开发相结合,将会提高该技术的准确度和实用价值;对于经济欠发达地区或广大基层开展 PAH 的流行病学调查、诊断和防治,进一步积累、总结应用肺功能(包括血气)、TV-echo RVTI 和 B 型 echo 检测以及肺阻抗血流图的经验仍有实用价值。

#### 参考文献

- 1 DenoLin H. Herz, 1986, 11: 142~146
- 2 Isobe M, et al. Am J Cardiol, 1986, 57: 316~318
- 3 Marchandise B, et al. Chest, 1987, 91: 361~363
- 4 汤泰秦,周惠香,刘青.起搏与心脏, 1988, 2(3): 131~134
- 5 吕增春,徐庆来,胡燕燕,中华内科杂志, 1990, 29(5): 290~292
- 6 蔡后荣,牛汝楫.中华结核和呼吸杂志, 1990, 13(5): 264~267
- 7 汤泰秦,邵企红,朱建宏.中华内科杂志, 1990, 29(5): 304~305
- 8 程显声.中华结核和呼吸杂志, 1990, 13(5): 259~260
- 9 汤泰秦,邵企红,朱建宏.中华结核和呼吸杂志, 1991, 14(2): 86~89
- 10 刘志,子润江.中华结核和呼吸杂志, 1991, 14(2): 83~85



(暨南大学医学院附属医院汤秦秦教授撰)

**胃静脉曲张** gastric varices 20世纪80年代以来,国外已广泛使用硬化剂注射,并作为食道静脉曲张出血最初选择的治疗手段,90%~95%的出血病人,出血可以得到控制,但对胃部静脉曲张引起的出血治疗效果不佳。胃静脉曲张与食道静脉曲张在发病机制上并不完全一致,笼统的“胃静脉曲张与食道静脉曲张这一概念显然是不确切的。胃静脉曲张已作为一独立的概念提出来。

一般认为,胃静脉曲张并不常见,发病率为6%~36%,但Mathur对108例病人进行内窥镜和经脾门静脉造影检查发现,分别为78%和74%。Watanabe、Paquet和Clark分别报道为57%、60%~70%和100%。导致上述差异的主要原因是胃静脉曲张的诊断较困难:(1)胃静脉曲张位于粘膜下,在内窥镜下难与粘膜皱裂、胃炎、胃粘膜血管扩张病相鉴别。(2)钡餐摄片示胃部静脉曲张,但在内窥镜下难以鉴别是肿瘤还是静脉曲张。(3)经脾门静脉造影提示胃区域大的静脉丛,但不能确定胃静脉曲张和胃粘膜的关系。Okuda报导,46例经血管造影示胃静脉曲张者,而在内窥镜下只有4例显示有胃静脉曲张。血管造影在急性出血情况下不宜使用,并为凝血机制异常的禁忌。

胃静脉曲张出血率较食道静脉曲张低,约为3%~30%。Mathur报道,胃底部较小弯侧出血率高,原发的胃静脉曲张与继发于食道静脉曲张经硬化剂注射治疗后出现的胃静脉曲张在出血率上无明显差异。

胃静脉曲张分为原发性的和继发性的。前者因一般的门脉高压症和区域性门脉高压症所致,后者则为食道静脉曲张经硬化剂治疗后出现的胃静脉曲张。Greig将胃静脉曲张分为4型:(1)合并食道静脉曲张,(2)食道静脉曲张栓塞后出现者,(3)合并有脾静脉曲张,(4)孤立的胃静脉曲张。

胃静脉曲张的发病机制尚不清楚。McCormack用Doppler超声和血管造影发现,食道静脉曲张并非总是头向血流,常有向胃部血流。且在胃食道交界处存在连接食道与食道周围静脉曲张的穿静脉,Terblanche发现,大的食道静脉曲张丛来自食道深层静脉丛,并与胃静脉相连。Grobe报道,食道静脉曲张经硬化剂治疗后,有14%的病人硬化剂通过食道静脉进入胃静脉。Sarin通过内窥镜观察发现,食道静脉曲张愈严重,胃静脉曲张发生率愈高。Hosking对208例食道静脉曲张病人进行硬化剂治疗,随访发现,有21例出现胃静脉曲张。Mathour发现,有57%的病人经食道静脉曲张硬化剂治疗后出现胃静脉曲张。相反,Sarin和Terblanche分别报道,食道静脉曲张硬化剂治疗后胃静脉曲张消失。Mathour通过脾门静脉造影发现,伴有食道静脉曲张的胃静脉曲张主要来自胃左静脉分支,且多位于小弯侧。Takashi用胃左静脉造影证明,胃食道静脉曲张与胃左静脉关系密切。Karr和Wohl也证明,胃静脉曲张较少涉及胃短静脉。Watanabe通过内窥镜与静脉造影检查发现,孤立的胃静脉曲张或少数伴有轻度食道静脉曲张的胃静脉曲张主要来自胃短静脉和胃后静脉,且多位于胃底部,而多数合并食道静脉曲张的胃静脉曲张来自胃左静脉分支,多位于小弯侧。Madson认为,孤立的胃静脉曲张主要由于脾静脉曲张导致经胃短静脉进入胃底及贲门粘膜下的逆向血流所致。综合上述,(1)小胃静脉曲张主要分布于贲门小弯侧和胃底两区域。(2)贲门小弯侧静脉曲张多合并食道静脉曲张,主要来自胃左静脉分支,胃底部的静脉曲张多为孤立的,很少涉及食道静脉曲张,主要来自胃短和胃后静脉。(3)前者可能由胃左静脉通过胃食道交界处的穿静脉至食道深层静脉丛逆向血流入胃而导致静脉曲张,后者多因胃短静脉、胃后静脉逆向血流入胃所致。

目前对胃静脉曲张的治疗尚有争论。Hosking对20例食道静脉曲张通过鳞状一粘膜上皮交界处向下延伸的胃静脉曲张的患者,用食道静脉曲张硬化剂治疗后,在交界处曲张静脉内注射硬化剂,观察到所有病人的出血均得到控制或胃静脉曲张消失。而关于胃底部静脉曲张用硬化剂治疗有如下报道:Trudeau;再

出血率为75%;Yassin;静脉曲张消失率只有17%,再出血率为38%;Sarin;38%的患者出现难以控制的出血性深部溃疡。Watanabe通过对胃静脉曲张的血液动力学研究发现,孤立的胃静脉曲张大多有胃肾分流,提示硬化剂治疗可能导致异位栓塞和门静脉栓塞。Madson和Sutton报导,对于因脾静脉曲张引起的孤立的胃静脉曲张,单独通过脾切除或直接进行曲张静脉结扎,治愈率达90%,且复发率低。Mathur根据静脉曲张出血部位不同提出:(1)小弯侧出血可用硬化剂治疗;(2)胃底部出血需手术治疗;(3)两者均存在,根据出血部位决定治疗措施。手术方式包括曲张静脉结扎+2/3胃切除术,胃食道切除+脾切除术,单独脾切除术,近端胃切除术,选择性的脾静脉、胃左静脉、胃网膜左静脉、肠系膜下静脉分流。综合上述:(1)位于贲门小弯侧或表现为食道静脉曲张通过鳞状一粘膜上皮交界处向下延伸的胃静脉曲张可采用硬化剂治疗。(2)因脾静脉曲张而致的孤立的胃静脉曲张可采用脾切除术或直接进行曲张静脉结扎术。(3)对于非脾静脉曲张所致的孤立的胃静脉曲张或合并有食道静脉曲张的胃底部的静脉曲张,可采用上述的手术方式。(4)对于两个部位均存在的胃静脉曲张,可根据出血的部位,确定采取治疗的方法。

目前尚无对胃静脉曲张进行预防性治疗的报道。

#### 参考文献

- 1 McCormack T T, et al. Gut, 1985, 26: 1226~1232
- 2 Hosking S W, et al. Br J Surg, 1988, 75: 195~196
- 3 Sarin S K, et al. Br. J Surg, 1988, 75: 745~750
- 4 Watanabe, et al. Gastroenterology, 1988, 95: 434~440
- 5 Greig Q J, et al. Br. J. Surg, 1990, 70(3): 297~299

(安徽医科大学第一附属医院普外科于东风硕士撰)

### 高血压病的遗传性升压易感性 inherited

hypertensire susceptibility of essential hypertension 高血压病(原发性高血压, EHT)系遗传基因与环境因素的结合作用产物。单纯外因(如应激、高盐摄入等)难以解释在相同环境下对升压存在易感的差别,外因的升压作用只在遗传性易感背景基础上才得以显示,即所谓“遗传性升压易感性”。

神经应激能使有高血压家族史者和自发性高血压大鼠(SHR)、盐敏感Dahl高血压大鼠(DS)易于升压,表现出升压机中明显的环境-基因关系;赵光胜从流行病学调查中也证实遗传背景能放大诸升压因子的效应。由于在中枢和周围存在遗传性肾上腺素能活性的亢进,使它作为重要升压性始动机制的介入更见肯定。也可能因易感者的神经细胞钠(Na)泵受抑和其他Na转运代谢异常而致神经递质释放、摄取改变,从而增高交感神经活性。

肾脏是调节细胞外液量、电解质和血压的关键器官。无论动物实验还是临床资料均揭示EHT的发生与肾的重要保护机制之一——排Na的遗传性缺陷有关。平时以升高肾小球滤过率(GFR)为代价以维持肾小球、肾小管间的平衡,当由于某种原因而失衡后,致肾潴Na而升压,早期肾功能轻度异常(GFR降低、肾血流量代偿性升高)可能是一项遗传性预测标记。

血小板细胞内微粒体和肾小腺素能性储存囊泡,均有能与生物原性胺(如去甲肾上腺素, NE)和Na<sup>+</sup>结合的粘多糖-蛋白质复合物,二者相互竞争性干扰,可作为临床研究交感神经原的模式。研究发现,不但EHT患者,且其“正常”子女的血小板解介质内Na<sup>+</sup>增加后,NE流出率增高;血小板在ADP、胶原激发下释放较多的血清素、ATP和聚集增加等,揭示其遗传性缺陷也参与本病及其血栓性并发症的发生、维持。

高盐摄入是中国人营养结构的重要特征之一。无论在人和动物都存在盐升压易感性,对其机制和检出法的研究对本病的分型、防治很有必要。据赵光胜研究,盐敏感机制与细胞离子转运功能、结构改变、理盐激素的相互平衡失调有关。不但在EHT患者且在其“正常”子女体内发现能抑制细胞Na泵的内源性羊地黄样物质(EDLS)血浆水平升高,表明在EHT发生中有遗传性

EDLS 释放和 Na 泵受抑机制。在 EHT 患者体内,可能红细胞  $\text{Na}^+\text{K}^+$  逆向协同转运趋低,细胞内  $\text{Na}^+$  增高肾小管吸收水、Na 的增加,对利尿剂速尿敏感者 EDLS 趋高,红细胞  $\text{Na}^+-\text{Li}^+$  逆向转运趋高。细胞内  $\text{Na}^+$  增高促使电压依赖性钙( $\text{Ca}^{2+}$ )通道开入,儿茶酚胺分泌及受体活性依赖  $\text{Ca}^{2+}$  增加,最终结果使总周围阻力和对缩血管刺激(物质)的升压反应性增强。细胞浆膜内外 Na 差距减低可增加 Ca 依赖的血管平滑肌张力和肌浆膜的 Ca 储存。但细胞 Ca 和 Na、钾(K)等在浆膜运转中的关系目前仍不太明了。赵光胜确在 EHT 患者和 SHR 体内证实存在 Ca 细胞流入率增高、红细胞 Ca 结合力降低和 Ca 泵活性受抑等促使胞浆  $\text{Ca}^{2+}$  增加和 Ca 代谢异常,但它究系本病的因抑果仍使人困惑。在负荷盐后,盐敏感患者中枢多巴胺能活性显示低下;盐的调控物质如肾素-血管紧张素-醛固酮、NE 的水平均示遗传倾向;对盐负荷排 Na 不良与肾血流、醛固酮或其他理盐激素、神经调节和释放的缺陷有关;高血糖胰岛素血症、肾性保护物质(如胰舒血管素、多巴胺)释放不足也参与肾排 Na 机制。在肾脏多巴胺能活性降低时,可通过直接作用于肾或间接促醛固酮释放增加而潴 Na。低肾素性高血压对低盐降压敏感。在 EHT 存在部分摄入盐后肾血管与肾上腺对血管紧张素敏感性异常,即“Na 摄入不再调节对血管紧张素 II 反应”的、对限盐降压敏感的患者亚型。盐敏感的还可能伴有前肾血管阻力增加及微循环减少、某些局部(如肾、内脏区等)的选择性交感活性过亢、代谢性酸中毒等。低肾素亚型往往有遗传倾向,具上述某些潴 Na 机制,对低盐降压敏感。盐敏感机制可因个体而异,缺乏均匀一致性。遗传性盐升压敏感性是“高血压的遗传性升压易感性”中的重要典型实例。EHT 患者子女存在遗传性心血管细胞肥大、增生,可由于交感-肾素系功能过亢(包括作为旁激素、自激素在局部作用)、遗传性细胞易于增生,并存在平滑肌细胞信息传递、受体(如胰岛素受体-1)活性、癌基因和原癌基因异常等。随年龄增长和累积性环境因素作用,加速周围阻力和血压的升高。故早期左心肥大可能作为在儿童及少年中检出高血压易患者的一项有用指标。

近年来的新兴学科分子生物学和分子遗传学已迈进高血压病研究的领域,为从分子水平揭示引起疾病的元凶和揭开环境和遗传影响、疾病因果的关系网带来新希望。分子生物学技术能测定神经、内分泌性控制、膜受体、离子通道及泵活性的遗传表达。血压调节是高级生物最复杂的综合功能之一,只有既有细胞、分子水平的微观世界又在综合协调层次的宏观世界共同结合去探索,才能窥其奥秘于一斑。

#### 参考文献

- 1 Zhao G S Li D Y, et al. *Annals of Clinical Research*, 1984, 16(43): 53~61
- 2 赵光胜,李迪元,孔德汶,等. *中国病理生理杂志*, 1990, 6: 502~504
- 3 赵光胜. *高血压病发病机理与防治*. 上海:上海科学技术文献出版社, 1991. 47~56
- 4 Williams R R, Hasstedt S J, et al. *Hypertension*, 1991, 17(1): 169~173
- 5 Williams R R, Hunt S C, et al. *Hypertension*, 1991; 18: 29~37

(上海第二医科大学上海市高血压研究所  
博士生导师赵光胜研究员撰)

### 高血压病因流行病学 etiological epidemiology of hypertension

心血管病在死因构成中,从过去的第 3~7 位上升到第 1~2 位。其中,高血压病作为脑卒中、冠心病的危险因素,对人体危害极大。因此,要大力开展高血压病因学研究,以便采取一级预防措施,控制和降低高血压患病率。

国内外学者经过反复深入的研究,提出不少论点,概括如下:

(1)年龄。横断面的调查表明,高血压的患病率随年龄的增

加而增长,40 岁后人群比 15~39 岁的患病率高 3~4 倍,特别是小儿高血压的轨迹现象(Tracking Phenomenon)说明高血压病人的升压趋势始于幼年,而幼年时基础血压水平的高低和以后随年龄升压幅度之间存在正相关关系。所以,预防高血压病应从幼儿时期开始。

(2)性别。一般男性高血压患病率高于女性;但 70 岁以后男性患病率下降而女性患病率仍上升,45 岁后增加的幅度大于男性,55 岁后血压水平绝对数超过男性,其原因还不明确。

(3)城乡差别。很多研究资料证明,高血压患病率城市居民高于农村居民。这可能是城市存在着较多的和较重的升压性外因。如噪音、紧张性脑力劳动和其他因素。因此,采取消除这些因素的措能降低城市居民的高血压患病率。

(4)身高、体重与血压的关系。大量的横断面观察研究资料说明,高血压与体重呈高度相关,尤其是年轻者比年长者此关系更加密切,肥胖者发生高血压的机会比瘦人高 3~4 倍,但迄今为止无足够证据说明肥胖是高血压的必然病因,因为许多胖人无高血压。

(5)食盐摄入量。1904 年,Ambar 和 Beaujard 首先报道食盐摄入量与高血压的关系,此后很多病因流行病学研究资料表明,摄盐过量者高血压和脑卒中发生率高。而摄盐量低者高血压患病率低,同时,不出现高血压患病率随年龄增加而升高的现象。如阿拉斯加爱斯基摩人,每日盐摄入量不到 4g,其高血压患病率几乎为零,日本北部居民和韩国居民日盐摄入量为 18~20g,40 岁以上者高血压患病率高达 20% 以上。近年来对轻症高血压和有高血压家族史人群的限盐措施,取得一定的成果,至少能增强降压药的疗效,但也有否定此观点的报告。

(6)饮酒。饮酒与高血压的关系尚未确定,很多学者认为少量饮酒对身体无害,但长期大量饮酒是有害的。饮酒者高血压患病率高于不饮酒者,有的学者提出酒中的酒精成分能进入血管壁内皮细胞的脂质二重层,而影响血管壁的弹性而导致高血压的发生;戒酒能使部分轻症高血压病人血压恢复正常。

(7)吸烟与高血压的关系。吸烟与高血压发病的关系,迄今为止认识尚不一致,但不少研究说明吸烟者高血压患病率高于不吸烟者,吸烟后测量血压,收缩压、舒张压都有一定程度的升高。高血压患病率与吸烟量及吸烟年限呈正相关关系,虽然它与慢性高血压形成中的病因学关系尚未确定,但作为高血压易患因素,能恶化高血压的预后。调查资料表明,戒烟年限越长,高血压患病率越有下降的趋势。

(8)遗传与高血压的关系。高血压病呈现家族聚集性,这里当然既涉及到相同的基因特性,也有共同的环境特征。但对双胞胎的血压研究发现,单合子孪生双胞胎的血压值比双合子者有更强的相关性。动物实验资料也说明了这一点,但是遗传及环境因素在高血压的形成中所占的比重以及它们之间的关系了解得还十分不够。

(9)微量元素、水质硬度与高血压的关系。不少学者研究发现,高血压的发病与很多微量元素有关系,能溶解于软水而且能使鼠发生高血压的有铜。在人群调查中有人报告高血压组的铜和锌均高于正常血压组,还提出 Se、Cu、Cr、Ag、Mg 与高血压的发生有一定的关系。

统计资料表明,水质越软的地区心血管病患者死亡率高。决定水质硬度的主要成分是钙和镁,维持血管平滑肌的正常功能需要钙和镁的参与。在高血压时,血管平滑肌中钙流入多,这正是近年来采用钙拮抗剂和镁制剂治疗高血压的基础。但是否硬水中存在大剂量具有保护性作用的微量元素或软水中存在致高血压的物质的问题尚待确定。

(10)精神因素与高血压。从事脑力劳动较紧张的职业,高血压的患病率高于相应年龄组的体力劳动者。使脑力劳动紧张度增高的加压试验(如心理情绪、激惹等)对患者的反应性明显高于正常者,还有视觉或听觉形成慢性刺激者,均能使血压升高。性格对血压的影响,学者的观点是不一致的。

(11)物理因素对血压的影响。寒冷对血压有一定的影响,不少高血压患者在冬季血压上升。长期暴露在低温、野外作业者高血压及脑卒中发病率高。噪音对血压有一定的影响,如动物实验用声源性冲击4周后大白鼠可发生高血压,噪音引起听力障碍者较正常听力者高血压患病率高,有的研究资料证明噪音能引起慢性高血压。

上述这些致病因素中,还有很多问题不清楚。

有关流行病学、动物实验、临床观察中的限制食盐措施,对预防和治疗高血压起一定的作用。但是,病因流行病学角度和个体敏感性差异很大以及其他环境因素的干扰等原因考虑,盐的病因学联系至今仍未确定。

原发性高血压系多基因遗传性疾病,但并不排除社会心理因素在高血压发生和发展中的作用。在社会因素应急下可产生焦虑、愤怒或悲伤等各种形式的情绪反应,常伴随着相应的内分泌功能的改变。合理膳食结构,注重改善和提高生活及环境质量,科学地生活,才能促进健康,预防和减少原发性高血压。

有关饮酒、吸烟因素,虽然倾向性地认为是致高血压的危险因素,但究竟该因素对人体血管结构及机能有何影响,在高血压的发生和发展上起着什么作用,还需要病因流行病学和实验病因学进一步结合起来,要进一步探讨这些因素与高血压的关系。

微量元素与疾病的关系,目前研究得比较多,但明确的结论尚需要弄清楚缺乏哪些微量元素与高血压的发病有联系,其作用如何;应该将动物实验模型和人群现场调查结合起来,以得出可靠的结论。

总之,高血压的致病因素相当复杂。环境和遗传对其来说是笼统的两大因素,它们之间相互影响,以及原发性高血压中遗传、环境因素的范围、性质、相互作用等问题迄今仍不清楚。特别是对高血压对一个病人来说,发病机制往往不限于单一的因素,是多因素多机制的综合表现。所以,既要研究单一因素与高血压的关系,也要综合性地对多因素进行研究,并且把病因流行病学和实验防治流行病学结合起来,以便进一步探索和阐明病因,从而达到有效地防治原发性高血压的目的。

#### 参考文献

- 1 Miller A, et al. Amer J Med, 1974, 56: 144
- 2 Oliver W J, et al. Circulation, 1975, 52: 146~151
- 3 鸭谷亮一. 他临床与研究, 1979, 56(2): 45
- 4 耿贯一. 流行病学进展. 北京: 人民卫生出版社, 1981. 1: 238~249
- 5 八杉忠南. 临床成人病, 1982, 12(20): 255
- 6 李志烈, 金昌吉. 中华流行病学杂志, 1984, 5(5): 276~278
- 7 Brotons C, et al. Intern J Epidemiol., 1989, 18: 824
- 8 蒋豫图. 中华流行病学杂志, 1991, 12(3): 166~176
- 9 Nicholas N, Gondn N. Intern J Epidemiol, 1992, 21: 246

(延边医学院金昌吉教授撰)

### 骨髓增生异常综合征 myelodysplastic syndrome.

MDS 骨髓增生异常综合征是一种白血病前骨髓造血细胞增生异常导致骨髓细胞增生亢进或成熟不足而引起的血细胞不同组合及不同程度减少、血细胞形态异常、细胞器结构及功能异常的疾病。这种疾病常常进展为急性白血病,故通常认为即白血病前期。但由于部分病人因感染、出血或其他原因死亡之前始终未出现白血病的表现,故不能肯定所有的白血病前期都会转变为白血病。

早在20世纪40年代,就有人在文献中描写了白血病前期患者的临床表现。1949年,Hamilton等提出白血病前期贫血的名称。1953年Block等称之为白血病前期急性白血病,他认为某些白血病患者在明确其为白血病病象以前,先有一段不能确定性质的血液学异常时期,往往经过数月或数年之后发展为急性白血病。在白血病之前的这个时期,称为“白血病前期”。因而,这是一个回顾性诊断。1974年10月在巴黎召开的国际白血病前期讨论

会认为,白血病前期这一名称不够确切,建议称为造血组织增生异常综合症;1976年法、英、美(FAB)协作组称为MDS,这是一组前恶性称呼,某些患者表现为长期良性过程,另一些则很快变成急性白血病。

1982年,FAB协作组对MDS的诊断标准提出了明确建议,认为MDS应分为5型,共同特点均是骨髓中病态造血。这5型是:(1)难治性贫血(RA)。外周血中红细胞及粒细胞有病态造血现象,原始细胞无或 $<10\%$ ,骨髓中红系增生并有病态造血现象,少有粒系及巨核系病态造血现象。原始细胞 $<5\%$ 。(2)环形铁粒幼细胞性难治性贫血(RAS)。骨髓中环状铁粒幼细胞数为骨髓有核细胞的15%以上,其他同RA。(3)难治性贫血伴原始细胞增多(RAEB)。外周血中见粒系病态造血现象,原始细胞 $<5\%$ 。骨髓中粒系及红系都增生,3系都有病态造血现象。原始细胞I型+II型为5%~20%。(4)慢性粒细胞性、单核细胞性白血病(CMML)。外周血单核细胞绝对值 $>1 \times 10^9/L$ 。粒细胞也增加并有颗粒减少或Pelger-Huet异常。原始细胞 $<5\%$ 。骨髓同RAEB。(5)转变中的RAEB(RAEB-T)。血象和骨髓象似RAEB,但具有下述情况的任何一种:血中原始细胞 $>5\%$ ;骨髓中原始细胞20%~30%;幼稚细胞中有Auer小体。

中国以FAB协作组分型为基础,有关学者经过数次讨论,于1986年初步拟订了有关MDS的诊断标准,概述如下:(1)临床以贫血为主要症状,兼有发热或出血;(2)血象,全血细胞减少,或任1、2系血细胞减少,偶可见白细胞增多,可见有核细胞或巨大红细胞或其他病态造血现象;(3)除外其他引起病态造血的疾病,如红白血病、急性非淋巴细胞白血病(M<sub>2b</sub>型)、骨髓纤维化、慢性粒细胞白血病、ITP、巨幼细胞贫血等。

诊断为MDS后再按骨髓及外周血中原早的百分比(按FAB标准中的I型和II型原始细胞计算)的多少进一步分为RA、RAS、RAEB和RAEB-T。至于FAB协作组所说的CMML,国内多认为已经是白血病,不再列入MDS,可注明为RA或RAEB伴单核细胞增多(外周血单核细胞 $>1 \times 10^9/L$ )。也有人认为RAEB-T已是白血病的早期,可以不包括在MDS内。

病态造血(MD)是诊断MDS的主要条件。骨髓细胞形态学检查对判定MD是一种简便实用的方法,但MD的细胞形态表现多种多样,近年来一些研究资料表明,中性粒细胞的Pelger-Huet畸形、无颗粒中性粒细胞增多、微小的巨核细胞存在及找到气球状血小板等对MDS诊断有重要意义。另外,血液涂片上找到原始细胞对MDS疑难病例的诊断也有价值。

MD虽然是诊断MDS的主要条件,但不具有特异性,它也可出现于白血病、淋巴瘤、骨髓瘤、营养不良性贫血、实体瘤、风湿病等患者,区别较困难,临床上相互误诊者不少见,每一病例都必须进行细致的追踪观察和综合分析,不应轻易诊断。凡疑诊Ph<sup>(-)</sup>CML者,应注意为MDS的可能。Pugh等对25例曾诊断为Ph<sup>(-)</sup>CML病例重新评价,结果17例为MDS而非CML。与急性白血病的分界:当骨髓中原始细胞 $>30\%$ 时即为急性粒细胞白血病。

MDS的主要发病机理是骨髓造血干细胞呈肿瘤克隆,导致血细胞无效造血、祖细胞成熟缺陷、骨髓细胞明显增生、成熟细胞积聚障碍、细胞寿命缩短、无效造血,因而血细胞减少,临床出现感染、贫血和出血。

MDS属于多能干细胞水平恶性变,多认为原发性者。继发性者为多能干细胞或造血干细胞池受损害,导致异常克隆的缓慢增殖和分化障碍,可分为继发性者和原发性者。继发性者主要是应用化学药物所致,例如马法兰、马利兰、环磷酰胺、苯乙酸氮芥、卡氮芥等,亦有报告苯及氯霉素、保泰松等非化疗药物引起者。原发性者病因不明,可能与RNA病毒有关,RNA病毒可引起多种动物的白血病,也同样可引起MDS。近年来在成人T细胞白血病者的体内已找到RNA病毒。

临床观察MDS演变为何种白血病,推测其病变来源于干细

胞还是祖细胞,中国医学科学院血液研究所对54例患者追踪观察,20例转为白血病,其中19例转为急非淋,1例转为急淋。Berneman等也报告1例转为急淋,这说明病变起源于髓系和淋巴系的共同干细胞,即多能干细胞。另外,将染色体变化与祖干细胞培养结合起来观察,分析这些培养的细胞有和原来骨髓细胞同样的异常核型,可推知病变发生在哪个水平的干细胞。据文献报告,有的病变发生在髓系干细胞,有的病变发生于能分化为髓系各种细胞及B淋巴细胞的干细胞。

MDS主要是老年性疾病,中位年龄超过70岁,我国报告的年龄较小,50岁以下的不少见,以男性稍多,其发病率各家报告不一,国内资料报告MDS占急性白血病的2.9%~6.8%,Francis收集715例,各亚型的发生率依次为RA(42.2%)、RAEB(22.9%)、RAS(17.6%)、CMML(11.6%)、RAEB-T(5.7%)。

MDS一般起病缓慢,有的患者可无症状,临床以贫血、发热及出血为主,大多以贫血为首起症状,少数以粒细胞减少或血小板减少致感染或出血而就诊。发热而无明显感染者占10%~50%,热型以不规则低热为主,也有少数高热者。出血症状不多见,程度也较轻。少数患者可有胸骨压痛,有或无肝、脾、淋巴结肿大。

在细胞形态方面,除Widen等发现一种显示巨核细胞造血异常的气球状血小板外,近年来研究进展不大。受到人们关注的主要是血细胞功能异常。例如红细胞铁利用率降低,糖酵解途径各种酶活性增强或减弱,红细胞表面血型抗原减弱或消失,珠蛋白肽链发生改变等。另外,粒细胞吞噬功能多项参数减低及血小板粘附及聚集功能低下。

一向认为MDS的预后与FAB分型有密切关系,目前采用血红蛋白量、白细胞、血小板或原始细胞数来预测MDS预后是最常用的方法。Wufri等以上述4项参数计算积分,根据积分来预测MDS的预后更为确切。除进行骨髓移植外,尚未见有通过治疗使血液学异常得到完全恢复正常的报告。30%~63%的患者由于血细胞减少导致感染出血而死亡。MDS的转白率高低不一,为8%~60%。Koeffler认为各型MDS转白率明显不同,RA、RAS、RAEB、RAEB-T、CMML的转白率分别依次为15%、10%、40%、60%、30%,以RA、RAS最低,RAEB和RAEB-T最高。

仅单系血细胞减少而无临床症状的MDS患者可以不治疗。有贫血者可输红细胞悬液,若有感染则应积极用抗生素控制感染。不同的类型治疗原则不同。RA及RAS主要用各种支持疗法;RAEB和RAEB-T用小剂量化疗;原则上不用强烈化疗,有人报告用抗胸腺细胞球蛋白治疗MDS,治疗后白细胞与血小板恢复正常。最近Applbaum和Tricot等采用骨髓移植治疗本病,部分患者完全缓解,从而认为骨髓移植治疗本病是延长生存期最好的办法之一。

#### 参考文献

- 1 沈迪,主编.临床血液学.北京:人民卫生出版社,1989.555~568
- 2 杨崇礼,等.白血病前期骨髓象血象改变.中华血液学杂志,1986,7:515
- 3 Bennett JM, et al. Proposals for the classification of the myelodysplastic syndromes Brit J Haematol, 1982, 51: 189
- 4 Tricot G, et al. Treatment of patients with Myelodysplastic syndrome: A review Scand J Hematol, 1986, 45(Supl): 121
- 5 Knottenbeil E, et al. G 8:21 translocation in myelodysplasia secondary to essential thrombo-cythemias Am J Hematol 1989, 30(4): 233
- 6 Mufti GJ, et al. myelodysplastic syndromes a scoring system with prognostic significance. Br J Hematol, 1985, 59: 425

(安徽医科大学第一附属医院吴基教授撰)

**再生障碍性贫血** aplastic anemia 再生障碍性贫血简称再障,是一种由化学的、物理的、生物的及不明原因引起骨髓干细胞及造血微环境损伤,以致骨髓被脂肪髓代替、血中全血细胞减少的疾病。

1888年Ehrlich首先报告,一青年女性患者有严重贫血、发热、齿龈溃疡和月经过多,尸检发现大部分骨髓为黄色脂肪髓。1904年,Chauffard提出再障的名称,此后文献屡有报道。1934年才认识到此病是一种独立疾病。1959年Wintrobe提出再障仅限于骨髓极度增生不良所致的全血细胞减少。中国于1958年开始对再障进行较多的研究,1962年,中国医学科学院血液学研究所总结大量病例的基础上认识到再障的主要病理变化为骨髓的脂肪化,并划清了急性型和慢性型的区别。再障又名不增生性贫血、低增生性贫血及全身骨髓病等,在中国并不少见。1975年,平顶山市血液病协作组调查该市37万人口,再障发病率为1.87/10万;殷德厚等调查牡丹江地区100万人口年发病率为2.1/10万,该发病率与日本报道的1.5~2.4万相似,较以色列的0.8/10万、瑞典的1.3/10万稍高。

由于造血干细胞和祖细胞培养技术的发展,现在许多学者都同意再障的发病机理至少有3种:(1)造血干细胞衰竭;(2)造血微环境异常;(3)由于免疫功能异常而引起。临床资料已说明有一部分再障病人使用ATG治疗有效。利用混合培养技术,许多学者报告部分再障患者的骨髓细胞或血清含有抑制正常人骨髓粒单系祖细胞(CFU-GM)的因子。而有些学者在体外用ATG处理再障患者骨髓,少数患者的CFU-GM在处理后可明显增高或恢复到正常水平,说明这些病人存在着免疫功能异常。目前对再障免疫机理的研究已成“热点”。国内外再障T淋巴细胞测定表明,再障的TS细胞明显高于TH,故TH/TS比值低于正常,血象中淋巴细胞计数则低于正常。TS细胞的增高能损害造血干细胞,已有事实证明。在体外干细胞培养中,TS能抑制细胞集落的形成,这表明再障TS对造血干细胞有影响。但是致病因子如何损伤造血细胞,是直接作用抑是间接作用,有待进一步探明,有可能是由于多种因素作用于多能干细胞,使各系列包括淋巴细胞在内的各系祖细胞受损,使淋巴细胞绝对数减低,细胞分化有缺陷,导致T细胞转向TS分化增加所致。

近年来,临床和实验血液学家都发现,由于干细胞衰竭而引起的再障用骨髓移植治疗法非常有效,而由免疫功能异常导致的再障使用免疫抑制剂能使病情缓解。如果能在治疗前确定该患者的发病诱因,就可确定适当的治疗手段。

再障患者的主要临床表现是贫血、出血、发热和感染。由于这些症状发生的快慢、严重性以及病变的广泛程度不同,临床表现亦各有异。再障可分为急性型和慢性型的两种,二者区别如下表:

1987年中国第4届全国再生障碍性贫血学术会议修订的诊断标准是:(1)全血细胞减少,网织红细胞绝对值减少(2)一般无脾肿大;(3)骨髓至少一个部位增生减低(如增生活跃,须有巨核细胞明显减少,骨髓小粒非造血细胞增多);(4)能除外引起全血细胞减少的其它疾病,如阵发性睡眠性血红蛋白尿、骨髓增生异常综合症中的难治性贫血、急性造血功能停滞、骨髓纤维化、急慢性白血病、恶性组织细胞病等;(5)一般抗贫血药物治疗无效。国外常用的是1976年Camitta提出的标准,一直沿用至今。Camitta将再障分为重型再障和轻型再障。重型再障的诊断标准:(1)骨髓细胞增生程度<正常的25%,如<正常的50%,则造血细胞<30%;(2)血象须具备下列3项中的两项:粒细胞<0.5×10<sup>9</sup>/L;网织红细胞<1%;血小板<20×10<sup>9</sup>/L。轻型再障的诊断标准:(1)骨髓增生减少;(2)全血细胞减少。

对本病长期以来缺乏有效的治疗方法。60年代起开始广泛应用雄激素,目前雄激素的衍生物已多达几十种。据研究,雄激素在体内可以还原成5α-双氢睾酮和5β-双氢睾酮两种异构体,前者能促进肾脏释放红细胞生成素,后者则激发休止期髓祖

细胞转入红细胞生成素反应期,从而导致造血细胞分化增殖,恢复骨髓造血功能。国内报告有效率一般为 34.9%~80%,缓解率为 19%~54%。但雄激素对急性的或重型者疗效差。

表 1

急性型再障和慢性型再障的鉴别

| 主要区别 | 急性型再障             | 慢性型再障                                |
|------|-------------------|--------------------------------------|
| 起病   | 多急骤               | 多缓慢                                  |
| 出血症状 | 部位多,程度重,内脏出血多见    | 部位少,程度轻,多限于体表                        |
| 感染   | 多见,较严重,常合并败血症     | 少见,较轻                                |
| 血象   | 全血细胞减少严重,网织红细胞<1% | 全血细胞减少轻,网织红细胞>1%                     |
| 骨髓象  | 多部位增生减低,非造血细胞增加   | 有的部位增生活跃,有的部位增生减低,非造血细胞不增加           |
| 预后   | 病程短,多于半年内死亡       | 病程长,经治疗约 33%治愈或缓解,33%进步,33%迁延不愈,少数死亡 |

骨髓移植(BMT)是治疗再障尤其是急性再障或重型再障的最佳方法之一。由于移植前预处理方案的改进,移植抗宿主病(GVHD)的有力预防及移植经验的不断积累,BMT的疗效逐年提高,最近欧洲骨髓移植协作组(EGBMT)分别统计 1970~1975、1976~1980、1981~1983 年期间接受 BMT 的 397 例重型再障,年生存率分别是 30%、41%和 63%,长期生存率最高已达 70%。一旦确诊,应尽快找出合适供体,尽早施行移植术,确诊至移植的间隔时间以不超过 3 周为宜。年龄小于 21 岁者移植效果最佳;Storb 认为小于 40 岁的患者应首选 BTM,40~45 岁者首选 ATG 治疗。

移植排斥(GR)、GVHD 和在此基础上发展的各种感染是骨髓移植治疗本病的主要并发症,死亡率很高,目前对付 GR 和 GVHD 的治疗方法少而缺乏特异性,因此关键是预防。

免疫抑制疗法(IS)适用于年龄大于 40 岁或无合适供体的重型再障患者。最常用的是抗胸腺细胞球蛋白(ATG),其次是环孢菌素 A(CSA)、抗 T 淋巴细胞单克隆抗体(McAb-T)和 6-甲基强的松龙(HDMP)。ATG 分为单用和联合用药两类,联合用药一般是 ATG+雄激素或骨髓输注(BMI),或者 ATG+另一种免疫抑制剂如 HDMP 或 CSA 或强的松。目前 ATG 治疗重型再障有效率平均为 50%~58%,最高可达 80%~90%。其确切的作用机制尚不清楚,目前有 3 种说法:(1)免疫抑制作用。ATG 通过其淋巴细胞毒作用去除抑制性 T 淋巴细胞对骨髓造血的抑制效应;(2)免疫一刺激作用。ATG 能诱发 T 淋巴细胞增殖,刺激产生较多的白细胞介素 2 和其他造血因子,促进休止期造血干细胞进入增殖周期;(3)免疫抑制、刺激联合作用。

以神经刺激剂或血管扩张药治疗再障为中国所创。这类药包括士的宁、一叶秋碱和莨菪类药物,其共同作用原理可能是通过兴奋骨髓神经、扩张骨髓血管,通畅血流来改善骨髓造血微循环,继而刺激和滋养残存造血组织重新增殖。另外,最近亦有报道用无环鸟苷、大剂量丙种球蛋白、本胆烷醇酮和白细胞介素-3 治疗再障者。

#### 参考文献

- 1 沈迪,主编.临床血液学.北京:北京人民卫生出版社,1989
- 2 李树沈.再生障碍性贫血的免疫抑制发病机理的研究,中华血液学杂志,1987,8(4):209
- 3 中华血液学会第 4 届全国再障学术会议纪要,再障的诊断与疗效标准,中华血液学杂志,1987,8(8):封四和 463
- 4 Camitti BM, et al. A prospective study of the effect of early marrow transplantation on acute mortality Blood, 1976,48:63
- 5 Loubos N, et al. Analysis of lymphocyte subsets in patient with aplastic anemia Br J Haematol, 1984,58:95

(安徽医科大学第一附属医院吴基教授撰)

**血友病** hemophilia 一组遗传性凝血功能障碍的出血性疾病,属于 X 染色体性连锁隐性遗传。其共同特征为活性凝血活

酶生成障碍,凝血时间延长。通常情况下,血友病患者终身都处在当具有轻微创伤时,就有发生出血的倾向。

血友病在临床上分为血友病甲型、血友病乙型、血友病丙型。血友病甲型即因子 X<sub>2</sub>C 缺乏症;血友病乙型即因子 IX 缺乏症;血友病丙型即因子 XI 缺乏症。3 种血友病的发病率以血友病甲型最多,乙型次之,丙型则最少。本病在欧美国家发病人数较多。患病率问题:美国 10/10<sup>5</sup>,英国 6/10<sup>5</sup>,瑞典 6.6/10<sup>5</sup>,法国 6.6/10<sup>5</sup>。近年,中国各地相继报道,但是,患病率低于欧美,黑龙江省宾县为 3.42/10<sup>5</sup>、南京市鼓楼区为 2.3/10<sup>5</sup>。中国也有血友病成人病例 VIII 因子与 IX 因子合并缺乏者报告,但实属罕见。由于血友病发病时出血不止,必需住院输入健康人新鲜血液。该病目前已引起国内外学者们的关注。

血友病是否属于遗传性疾病,长期以来是不清楚的。由于本病常造成严重出血不止,造成严重后果,故早年人们常常怀有神秘之感。尤其过去 100 年中,此病曾出现在欧洲若干皇族的许多成员之中。

在公元 2 世纪的犹太教法典中有过血友病的记载,在手术后曾发生由于过渡出血而引起死亡,所以对其家庭中男孩环切术做了具体规定。不仅规定一个由于出血已经失去了两个孩子的妻子,她以后所生的儿子不应进行环切,而且连她姊妹的儿子也免除这种仪式。但是,在另一种情况下,由同一父亲和一位异母亲所生的男孩死去后,其异母兄弟则按正常人处理。这些条件的规定是说明当时已暗示犹太人已经知道这种出血倾向是从母亲那儿遗传的。如果已经知道一位母亲是携带者,那么她的姊妹就有可能携带者,它说明在她们的儿子中发生这种病是与其父亲没有关系的。

一直到 1920 年时, Ness 提出了关于这个性状遗传的一条更明确的规定:若一位妇女的父亲是出血者,即使这位妇女和正常男子结婚,也会把这个性状传递给他们的孩子。这些妇女本身中,或一般说来,在所有的妇女中这个性状都决不会表现出来。一直到 20 世纪发现染色体,这时才认识于它们是性连锁基因载体的问题,并明确提出血友病传递的定论。

血友病近期研究进展状况:对于血友病的病因学、发病机理以及临床表现、实验室检查方法等都有了明确的认识。

病因与发病机理,血友病甲和血友病乙均属于 X 染色体伴性隐性遗传。据目前研究进展所知,因子 VIII 可分为因子 VIII 相关抗原(VIII<sub>R</sub>;Ag)和因子 VIII 凝血活性(VIII<sub>C</sub>)两个重要组成部分。对于血友病患者来说, VIII<sub>R</sub>;Ag 的含量是正常的,而 VIII<sub>C</sub> 则表现为减少或缺乏。

因子 VIII<sub>C</sub> 合成的基因位于 X 染色体,以 X<sup>h</sup> 表示,对 VIII<sub>C</sub> 可以起多聚与调节的作用。但是因子 VIII<sub>R</sub>;Ag 则为常染色体遗传。血友病男性基因患者的基因型为 X<sup>h</sup>y,所以表现为血友病。但是女性却为杂合子,它们为血友病甲、乙的基因携带者(H<sup>h</sup>X)。其作用是传递疾病,而本身表现型正常。一个携带者血友病甲或血友病乙基因的女性与正常男性结婚时,其女儿表现型全都正常,不过,其中有 50% 的机会为血友病携带者。男孩中正常或得病的机会则各占 50%。本病遗传系是由于母系传递而来,不可能

由男性传给男性。如果男性是患者与正常女性结婚时,其子女情况如何呢?所生男孩均属正常,而女儿均为携带者。

由此不能不涉及到血友病的家系系谱问题。根据调查资料:约有1/3无家族史。(1)如家族中男性少,相近亲代中没有出现病例,此病可能又隔代遗传,家族中的女性们也不知道本人是携带者或可能携带者,此时,家系中出现男性病例,就说不清家族史。(2)也有者可能是染色体血友病基因的自发性突变者。(3)在调查中也发现有的病例或家庭担心子女婚姻恋爱问题会遇到困难,不愿意叙出家庭史。近年中国报道血友病病例很少,据目前了解它属于常染色体显性或不完全遗传。

血友病的主要临床症状:自发或轻微创伤就会出现口、鼻、皮下、肌肉、关节、内脏、(胸腔、腹腔),有的泌尿道、消化道,甚至颅内出血,拔牙术后出血,出血程度不完全一样,主要由于血液中凝血因子活性高低不同而不同。有的重症病例,Ⅷ因子在1%以下,时常在2岁以下就发现出血不止,甚至有的在出生时结扎脐带时就出血不止。中等出血时,血液中Ⅷ因子在1%~5%之间,从童年开始出血,外伤后可严重出血,但可以活到成年。病型轻微时,ⅧC为6%~10%,多数在运动时,拔牙时出血,一般能工作,如南京市1988年报道,Ⅷ:C,10%者汤某年龄65岁。一般出血年龄出现早,则出血程度严重,一般随年龄增长,出血症状可减轻,但是,是能经常发作的,终生存在,出血除和轻微创伤有关,和季节也有关系,春秋易发作,感染、精神创伤也可能是诱发因素。

因子Ⅷ、Ⅸ、Ⅺ如此重要,是因为它们是形成凝血活酶所必需的条件,缺乏这些因子,凝血活酶形成减少,使得内源性凝血系统发生障碍,从而引起出血。因子Ⅷ:C是存在于正常人的新鲜血浆中和存在孔氏血浆分离法的血浆蛋白内,是一种水溶性的球蛋白,主要在肝脏内进行合成。不过也有20%在肝外如脾、骨及单核-巨噬细胞内合成。Ⅷ:C的性质不稳定,当储存于37℃情况下,经24h后,活性丧失50%。因子Ⅸ与Ⅺ在合成时有维生素K参加。

本病多由于外伤后严重出血,死亡率较高,但是在骨髓或椎管内出血罕见。用粗针进行肌肉注射处,引起的出血难以止血。但是静脉穿刺采血后加压一定时间,则不致发生出血。血友病在关节部位出血常常造成不良后果。一方面因发生广泛,踝、膝关节多见,肘、肩、指关节也发生。另一方面出血关节受累,活动受限制,如血液被吸收后,关节完全可以恢复正常。但是,反复出血,多部份血液不能被吸收,刺激关节发生慢性炎症,骨髓增厚后,关节囊纤维增生肥厚,关节腔变窄,出血能够流入软骨,可使软骨变性坏死,疼痛活动受限制便形成血友病性关节炎,可以生关节僵硬,畸形及萎缩。附着的肌肉都随之萎缩,而使关节功能丧失。

为诊断血友病实验室检查非常重要。中国有关出血性疾病的诊断标准(修定案)有统一规定,如血友病甲:(1)凝血时间(试管法)延长,轻微亚临床型者正常。(2)APTT延长,亚临床型者正常或稍延长。(3)血小板计数、出血时间、血块收缩和凝血酶原时间正常。(4)简易凝血活酶生成(SJGT),Biggs凝血活酶生成试验(TGT)示缺乏因子Ⅷ或因子Ⅷ促凝活性(Ⅷ:C)减低或缺乏。(5)VWF:Ag(即ⅧR:Ag)正常或增高。(6)应排除继发性Ⅷ:C减低,此外,也有轻重分型标准。血友病乙也同样有规定,鉴别诊断:应注意与血管性假血友病鉴别。后者属常染色体显性遗传,家谱调查也有助区别,尤其出血时间,血小板粘附及瑞斯托毒素血小板聚集功能均不正常。

血友病治疗,一般止血治疗,局部压迫止血;替代疗法,为迅速提高凝血因子的浓度达到止血目的,输入新鲜血浆或应用因子Ⅷ、Ⅸ冻干制品的浓缩剂,近年单克隆抗体、免疫层析及基因工程等技术发展,有利于对本病的防治工作。但在应用替代疗法时,除注意输液反应外,还应注意病毒性肝炎和AIDS病的预防。

近年,由于分子生物学的发展,对血友病甲型基因连锁分析及DNA多态性研究,DNA重组技术在血友病研究中的应用以

及血友病的流行病学家系调查研究,携带者或可能携带者调查登记,这样可以对甲型血友病家系中携带者进行探测和做产前基因诊断。据目前情况了解,产前诊断多数采用基因诊断方法,危险性小,正确率高。由于当代高科技的进展已了解到血友病甲,因子Ⅷ的基因位于X染色体上,全长186000个核苷酸,有26个外显子,又由于研究因子Ⅷ基因多态性的内切酶也具备,并多达37种,所以因子Ⅷ基因探针已有很多种。对产前早期诊断工作开展建立了良好基础,因此既有利于优生工作,又可降低血友病患者率。

参考文献

- 1 南京医学院一附属医院血液科,南京市鼓楼区血友病患者率初步调查,中华血液学杂志,1985,6(10):617~618
- 2 魏启珍,等.血友病流行病学调查研究.哈尔滨医科大学学报,1991,25(3):215~210
- 3 斯特恩C,著.人类遗传学原理,性连锁.北京:科学出版社,1979
- 4 王夕林,等.成人第Ⅷ因子合并第Ⅸ因子缺乏血友病一例报告.江苏医药,1981,(10)总572:50
- 5 魏启珍.血友病的医学社会学问题,待发表
- 6 陈上心,等.南京市70万人血友病患者率初步调查.南京医学院学报,1986,8(2):164
- 7 吴庆宇,等.因子Ⅷ的分子生物学研究.中会血流学杂志,1988,9(9):564~567
- 8 沈岩,等.DNA重组技术在血友病研究中的应用.国外医学分子生物学分册,1987,9(3):114~117
- 9 王孟学.血友病临床研究现状.临床血液学杂志,1988,1(3):29~31

(哈尔滨医科大学公共卫生学院魏启珍撰)

应用PCR技术检测急性淋巴细胞白血病患者体内的微小残留病 use of polymerase chain reaction (PCR) to monitor minimal residual disease in childhood acute lymphoblastic leukemia

小儿急性淋巴细胞白血病(急淋, ALL)应用联合化疗获得完全缓解后,体内仍残存着10<sup>6</sup>~10<sup>8</sup>个白血病细胞。此时应用常规诊断学方法常不能检出任何异常,但却是造成白血病复发的根源。这些残存在体内的微量白血病细胞,称为微小残留病(MRD)。对MRD的检测,有助于对治疗方案的评估、对患者疗效的监察和及早检出复发的可能性;另外在白血病患者作自身骨髓移植时,尚可用来定量检测骨髓中残存的白血病细胞。

在既往的研究中,对MRD的检测曾采用以下技术:(1)细胞形态学方法;定期作骨髓穿刺,进行细胞形态学检查。(2)细胞遗传学检查;进行骨髓细胞染色体核型分析或早期染色体凝缩检查。(3)细胞培养法;在体外进行骨髓细胞培养,观察克隆的形成数;亦有在实验动物体内进行培养的实验性研究。(4)免疫学检查;由于白血病细胞不存在特异性抗原,因此只能以单抗检测在正常祖细胞缺乏或极少表达的抗原,研究中常联合使用多种单抗进行检测。(5)Southern印迹分析;检查骨髓细胞基因组DNA,看有无初诊时存在的克隆性Ig基因和T细胞受体(TCR)基因的重排。(6)核磁共振成像(MRI);正常骨髓、白血病骨髓和肿瘤局灶浸润性骨髓在MRI上存在着差别,可用于诊断,但其在检测MRD方面的作用尚有待进一步研究。以上所述方法,不是特异性不强就是灵敏度不高,在检测的细胞群中若白血病细胞<10<sup>3</sup>个则难以检出。(7)流式细胞仪检测;该仪器能自动、快速地对分析混悬液中单个细胞的细胞周期、DNA含量及免疫表型,每秒可分析10<sup>3</sup>个细胞。但由于缺乏白血病特异性单抗,不能以直接的或间接的免疫荧光法特异性地标记白血病细胞,致使以流式细胞仪检测MRD受到限制。新近有报道,以双染色流式细胞仪技术进行检测,在某些情况下对恶性细胞的检出灵敏度可达10<sup>-4</sup>;

即使如此,对检测 MRD 来说灵敏度仍嫌不足。

PCR 技术具有极高的灵敏度和特异性,可用于 MRD 的检测。在理论上,样品中只要存在单个拷贝的靶 DNA 即可检出。但欲检出恶性细胞,在这些细胞中应具有正常细胞不存在的特异性分子标志。易位染色体提供了这样的标志。但由于存在以下问题,使易位染色体在恶性血液淋巴疾病中作为分子标志的作用受到限制:(1)在不同类型的恶性淋巴疾病中存在不同的易位染色体,因此要检出恶性细胞,在检测前必须确知或高度拟诊为某一特殊类型的肿瘤,方好选用适合该易位相应的引物,否则不能有效地扩增靶 DNA。(2)即使在特定类型的肿瘤,也不是所有病例都存在某一特定的易位染色体。(3)即使同一种易位,其断裂点在分子水平上,不同病例亦可各不相同,用同一对引物常无法扩增所有病例横跨断裂点的 DNA。(4)虽然各种不同易位断裂点处 DNA 测序资料不断增加,但对许多重要易位的断裂点尚未进行分析,因此尚无法设计出能有效扩增这些易位靶 DNA 顺序的引物。

应用 PCR 检测恶性淋巴性疾患(包括 ALL)的另一有效途径,是检测淋巴细胞 Ig 基因或 TCR 基因重排的构型。在造血干细胞向 T 细胞或 B 细胞分化的过程中,存在着 TCR 基因或 Ig 基因的重排。该重排在分子水平使相应基因的可变区(V)与多变区(D)、结合区(J)的不同片段连接,每一白血病性 T 系或 B 系的细胞克隆,在 V(D)J 连接片段都含有独特的顺序。这不仅是由于在重排中使用了相应基因中 V、(D)、J 区不同的片段,也因连接的机动性造成非编码的 N 区(核苷酸随机插入和/或缺失区)。所以该部位的顺序对每一 T 和 B 系细胞克隆似独特的指纹,具有高度的特异性。T 系和 B 系的白血病通常为单克隆性,所以来自同一克隆的白血病细胞在 1 个或多个等位基因上具有相同的和独特的 V(D)J 连接顺序。

为了检出 MRD,现研究使用的大多数方法需首先明了在白血病细胞中上述 IgH 或 TCR 基因内重排基因片段的连接顺序,方能合成互补性寡核苷酸充作引物或探针。因此,对每一病例来说,常需于初诊时应用 Southern 印迹分析得知患者的基因重排类型,方能应用适合的引物扩增出含有白血病细胞特异性的 V(D)J 连接顺序,继之应用直接测序法(不适于含有多个白血病克隆和含白血病细胞较少材料的测序)或应用测序载体克隆 PCR 产物后进行顺序分析,制备出该患者白血病细胞的克隆特异性探针,方能有效地用于该患者 MRD 的检测。

有人采用扩增 IgH 高度变异区——CDR III(第 3 互补决定区)顺序的策略来检测 B 系 ALL 的 MRD。采用的引物分别与特异连接顺序两侧 V<sub>H</sub> 和 J<sub>H</sub> 片段的保守顺序同源,在 V<sub>H</sub> 端与有义股一致,在 J<sub>H</sub> 端与反义股相同。应用 CDR III-PCR 法检出 B 系急淋 MRD 的灵敏度达 10<sup>-5</sup>,未发现假阳性。在 Yamada 应用的一对引物含有 Sal I 和 Pst I 的酶切位点,使 PCR 产物能与 Bluescript 载体重组进行克隆,因此也能定量检测残留白血病细胞在骨髓细胞中的百分率。该研究方法提示,欲治愈白血病,需达到白血病细胞在体内完全消失或在该法检出阈值以下的水平,其结果并显示,治疗期连续定量检测骨髓中的 MRD 可早期检出疾病的复发。

Nizet 应用上述类似引物扩增 IgH 的 VDJ 连接区,无须测序,以 Sau 96 I 消化去除扩增产物中紧靠 J<sub>H</sub> 引物的顺序,用与 V<sub>H</sub> 引物 3'端互补的 6 聚寡核苷酸作引物来标记制备克隆特异性探针。该方法检出 MRD 的灵敏度稍逊于上述测序法,检出限度为 10<sup>-4</sup>~10<sup>-5</sup>。

Yokota 应用检测 TCR $\delta$  基因重排的策略检测急淋的 MRD。因为 T-ALL 基因重排主要为 V $\delta_1$ DJ $\delta_1$ ,而非 T-ALL 基因重排主要为 V $\delta_2$ D $\delta_3$  研究者根据文献中相应基因片段的碱基顺序对两种重排分别各设计出两对相套的引物,应用两次 PCR 技术制备出克隆特异性探针来检测 T 系和 B 系急淋 MRD,灵敏度达 10<sup>-4</sup>~10<sup>-6</sup>。该法亦无需测序。

D'Auriol 利用 TCR $\alpha$  基因重排来检测 MRD,两例有该基因

重排的患者获得成功。新近 Veelken 等报道一种新颖的方法-PCR-RNA 酶保护测定法,对有 TCR $\alpha$  基因重排的急淋细胞系和患者的骨髓细胞 DNA,应用 V $\alpha$  片段保守顺序引物和 J $\alpha$  片段保守顺序引物(附有 T7RNA 聚合酶的启动子)来扩增克隆性重排顺序。该 PCR 产物被转录成放射性标记的 RNA 探针,缓解期患者骨髓细胞的基因组 DNA,用类似方法由 DNA 的对应股转录出试验性 RNA。试验性 RNA 与探针 RNA 杂交,在杂交中不匹配的核苷酸顺序被 RNA 酶 A 所消化,若能检出完整被保护的探针,则说明标本中存在白血病细胞。该法在细胞系 DNA 的稀释试验和患者的实际检测中,显示灵敏度达 10<sup>-3</sup>。应用该方法,即使用同一患者初诊时有多个白血病克隆或标本中含白血病细胞较少,亦不影响 RNA 探针的制备。在理论上,该策略可用于大多数抗原受体基因。该法不像上述类似方法,既不需测序,又不需合成白血病细胞特异性探针或引物。

在 PCR 检测 MRD 的研究中,出现的一个新问题是疾病过程中有约 18% 的患者发生克隆演变,出现不同于初诊时新的白血病细胞克隆,因而给这部分患者应用 PCR 技术检出 MRD 带来了难题。

淋巴细胞分化过程中,IgH 基因重排仅见于 B 系急淋,TCR $\alpha$  和  $\delta$  基因重排虽见于绝大多数 T-ALL 和大部分的前 B-ALL,但重排所用的 V(D)J 片段则不同(虽存在倾向性),因此现有的每一种方法只能适用于具有相应基因重排的患者,而缺乏普遍的适用性。发展一个普遍适用的技术,是今后研究的热点。策略之一是设计出多对针对不同受体基因重排的引物,在同一体系中进行 PCR 反应,总能扩增出某一存在的特异性连接顺序,可再以 PCR-RNase 保护测定法检出 MRD。

#### 参考文献

- 1 D'Auriol L, et al. *Leukemia*, 1989, 3: 155~158
- 2 Yamada M, et al. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1989, 86: 5123~5127
- 3 Hansen-Hagge TE, et al. *Blood*, 1989, 74: 1762~1767
- 4 Campana D, et al. *Blood*, 1990, 76: 163~171
- 5 Yamada M, et al. *N Engl J Med*, 1990, 323: 448~455
- 6 Yokota S, et al. *Blood*, 1991, 77: 331~339
- 7 Nizet Y, et al. *Br J Haematol*, 1991, 79: 205~210
- 8 Veelken H, et al. *Blood*, 1991, 78: 1318~1326

(同济医科大学刘树茂教授撰;费洪宝审)

#### 胸膜疾病的 CT 诊断 CT diagnosis of Pleural disease

检查胸膜的和胸壁的病变应用常规 X 线检查方法有一定的局限性,而 CT 由于是横断层投影,可使四周高密度的胸壁和低密度的肺实质形成鲜明对比。通过 CT 扫描可以鉴别肺实质病变是否累及胸膜,诊断胸膜原发性病变或胸膜外胸壁本身病变,也有助于对肿瘤作鉴别诊断和判定手术切除的可能性。CT 扫描对胸膜的研究和观察日益得到重视。

应用 CT 检查胸膜疾病、胸壁疾病的优点 CT 横断层面可提供各部胸膜和胸壁的改变,特别是前后胸膜面,而 X 线平片仅能提供与 X 线成切线位的胸膜面。此外,CT 还能敏感地发现隐匿的液体、胸膜增厚等。

由于高密度分辨率,CT 易于分辨钙化灶、胸膜与肺交界面,对软组织的分辨尤为突出,故对胸壁的结构能加以判别。

由于动态扫描范围较广,可在同一曝光条件下看出肺实质、软组织等结构的各个细节。CT 能较好地发现和区分同时累及近胸膜区域的肺、纵膈和胸壁的疾病。在诊断胸膜疾病时,还可采用改变体位扫描的方式来显示被液体所遮盖的胸膜表面情况及其隐匿的病变。

胸膜疾病的主要表现 为胸膜腔内液体或气体积聚和包块。胸膜是一潜在的腔隙,它由脏层与壁层组成。两层间由一疏松结缔组织分开,表层为间皮细胞,深层为松散的结缔组织。壁层由系统血管供血,脏层则由肺和支气管脉供血。壁层淋巴和肋

间、胸骨旁及纵隔淋巴结相通,引流到肺门。正常时腔内有少量液体以利于肺的活动,病理状态下气体或液体积累,引起胸膜腔扩大。

**胸膜疾病的CT表现** 在判断胸膜疾病时,应注意观察:(1)胸膜的密度(如软组织、钙化灶、液体或空气等);(2)病变的形状如卵圆形或新月状;(3)肺与胸膜病变交界面是否规则,及胸壁或胸膜外组织有无消失或破坏;(4)病变与邻近胸膜交接处形成的角度大小,如锐角或钝角等。几种常见的胸膜疾病的CT表现如下:

**胸腔积液:**胸腔积液是最常见的胸膜异常,它可以由各种病因引起,如损伤、炎症、心血管疾病、自身免疫疾病、代谢疾病和肿瘤等。CT表现为肺野后部或肺外周与胸壁平行的弓形带状、新月状或半月形的均匀致密影,变换体位扫描可见其有移动性,呈液体密度,其性质常可参照CT值来区别,如乳糜液CT值最低;漏出液近于水,约±10HU;脓液为30HU;积血可达60~80HU。但根据经验,除积血外,其他密度不足为据。

大量胸腔积液紧邻肝右叶后缘,CT扫描显示肝右叶后缘模糊,分不清界线,这是因为胸腔内液体位于膈上,而膈同肝、脾接触面是与扫描层面成倾斜相交,由于部分容积效应界面显示不清,而腹水同肝、脾的交界面与扫描平面近于垂直相交,因而有清楚锐利的界面,Teplick称之为模糊的“交界面征”。

少量胸腔积液位于下部时易与腹水相混淆,“膈角移位征”有助于鉴别。“膈角移位征”是当膈角与脊柱的胸膜腔隐窝内有积液时,由于液体的张力作用,造成膈角的前外侧移位,而腹水则膈角不发生移位。

“膈角移位征”和“模糊界面征”是胸腔积液的特征性改变。

**脓胸与支气管胸膜瘘:**脓胸的CT表现为密度均匀、周围有包膜形成的脓腔,可见胸膜分隔(脏壁层与胸膜分开,增强扫描后更明显,可能和炎症胸膜充血有关),邻近组织受压和胸壁相交呈钝角;脓胸影呈新月状或双凸形。CT可较早发现支气管胸膜瘘,其特点为胸膜腔内同时存在气体和液体。

位于肺周边的肺脓肿同为支气管瘘的脓胸,X线征很难鉴别。由于治疗方法不同,鉴别是重要的。CT能准确作出鉴别。位于肺周边的肺脓肿,空腔呈不规则形,主腔与子腔相连,腔内壁呈不规则波浪状,病变与胸壁相交成锐角,由于周围肺组织有炎性浸润而使空腔外壁显示不清,变换体位时空腔不变形;而有支气管瘘的脓胸,腔呈卵圆形,内缘光滑,外壁清楚,且壁的厚度一致,病变与胸壁相交成钝角,变换体位时,由于脓腔壁薄,易发生形态改变。增强扫描胸壁有明显强化。

**胸膜增厚和钙化:**单纯胸膜增厚的CT表现为后胸壁和/或侧胸壁处带状软组织影,与肺有清楚、锐利的界面,并可显示同侧胸腔变小,纵隔向内侧移位等改变。纵隔胸膜增厚表现为心缘牵直,并出现胸膜尾,但肺胸膜增厚由于部分容积效应常显示不清。

**胸膜斑**是石棉肺早期的和常见的表现。CT显示胸膜斑优于常规X线检查。早期,表现为胸膜不连续增厚呈边缘锐利的软组织影,厚度大约1~5mm,常位于脊柱旁区胸膜。而常规X线检查很难鉴别这种早期胸膜增厚与伴随阴影。如增厚胸膜钙化,可见带状软组织的内缘为连续的或分散的致密钙化影。

**胸膜肿瘤:**胸膜肿瘤可分原发性的与转移性的两类。胸膜原发性肿瘤又可分为良性肿瘤和恶性肿瘤。胸膜原发良性肿瘤极为少见,多起源于胸膜下的结缔组织,如脂肪瘤、纤维瘤、横纹肌瘤、神经纤维瘤、软骨瘤、血管瘤等。

**胸膜间皮瘤**为胸膜真正的原发性肿瘤,来源于脏层、壁层、纵隔或横膈四部分的胸膜间皮瘤,一般可分为局限性的和弥漫性的两种。

局限性胸膜间皮瘤一般多无症状,肿瘤范围局限多为良性,但具有潜在恶性且可复发转移。CT表现为一边缘光滑锐利、密度均匀、无钙化的软组织肿块影,与正常胸膜相交成锐角,邻近肺实质常有移位或不张,有时可见胸膜渗出液及胸膜斑。局限性胸膜间皮瘤好发于胸廓周围或叶间裂内。

弥漫性恶性间皮瘤(DMPM)较良性多见,胸腔积液粘稠,易出现胸膜增厚、肺胸腔容积缩小。CT上弥漫性间皮瘤通常表现为弥散性新月形软组织块影;围绕肺组织伸入间隙,引起胸廓容积缩小,胸膜块影和邻近肺组织界面不规则,肿瘤易下直接侵入心包、纵隔侧胸壁或对侧胸腔,也可波及腹腔、后腹膜。CT较常规胸片能正确反映疾病涉及的范围及对治疗的反应。

**胸膜转移瘤:**影响胸膜的肿瘤多数是转移性的。据统计,胸膜肿瘤85%为转移性的,40%来自于肺,20%来自于乳房,25%来自于其他部位,10%来自淋巴瘤。CT表现为胸腔积液或孤立性胸膜块影。后者常为胸膜多发的,分散的软组织肿块,呈双凸形或新月状,与胸壁相交呈钝角,内缘常较光滑。转移瘤累及范围较大,且表现不规则时可类似恶性胸膜间皮瘤。后者多位于胸腔下半部,易侵犯膈胸膜,很少累及胸骨,胸壁和邻近肺组织。而且同侧胸腔变小。而转移瘤分散在整个胸腔,常有肺内转移结节、肋骨破坏和胸壁转移。

**胸膜淋巴瘤:**Shuman将胸膜淋巴瘤的CT表现分两型:斑块型,呈局限性宽基底的胸膜下斑块,沿脏层胸膜蔓延而侵犯不深,与胸膜面相交呈钝角。结节型,一般不累及脏层胸膜,侵犯较深,可有胸腔积液。判断胸膜下淋巴瘤存在与否有助于分期和治疗。单纯前纵隔淋巴结受累为I期,可单独放疗,而CT发现纵隔胸膜侵犯则为II期,此时只能化疗。

全肺切除后的胸腔改变:全肺切除术后的胸腔在胸片上表现为普遍致密影不能分辨内在结构。CT扫描能够显示膈和肺门的旋转移位,对侧肺代偿性气肿。大多数都可看到残留的积液;CT还能显示肺门或纵隔的肿瘤复发。

**CT在胸膜病变中的鉴别诊断价值** 在胸腔积液与肺叶实变的鉴别中,CT观察比较详细,典型的积液呈半月形于胸腔后部基底,变换体位扫描液体移位,CT值较均匀,最重要的为胸膜分离和肺压迫征。肺叶实变无此征象,且其CT可因残余含气肺而不均匀,可见含气支气管影。

后脊柱旁胸腔积液与肺不张需要鉴别。CT主要是根据有无胸膜分离和支气管及叶裂的位置变化,周围的纹理分布是稀疏还是聚集。邻近肺野CT值较正常区是增高还是减低来鉴别。

在胸腔积液和膈下积液的鉴别中,Wegener等强调应注意以下方面:胸腔积液愈近足侧愈窄,末端止于后胸壁中部,液体位于膈线之处多呈卵圆绕圆形于肺周围,模糊的界面征和膈角移位征是其鉴别的关键点。

在肺脓肿和脓胸的鉴别中,Stark等研究认为最可靠的CT征象是洞壁特点,胸膜分离征和肺压迫征。后两者是脓胸的特征。肺脓肿几乎不见此征。脓胸的壁薄且厚薄均匀,而典型肺脓肿空洞则相对病灶较小洞壁厚薄不均且不规则。

在胸膜间皮瘤与其他胸膜病变鉴别研究中,Salonen发现在间皮瘤、转移瘤、感染性胸膜增厚三者之间,增强效果都相似,均呈明显增强,平均CT值增高33HU,无明显差异。而良性非感染性胸膜增厚平均仅增强3HU,与三者可资鉴别。另一值得注意的鉴别点是,间皮瘤和转移瘤都有浸润征象,而感染性或非感染性胸膜增厚,都不会浸润征象。

综上所述,CT对胸膜病变,不仅能判断其起源部位,且有可能指明其性质。CT还能准确显示胸膜病变的范围,为早期采取有效治疗提供可靠依据。

(安徽省立医院吴国忠主任医师撰)

**气道高反应性** bronchial hyperresponsiveness BHR 气道高反应性是支气管哮喘重要而关键的特征,随着对支气管哮喘发病机理的深入研究,BHR的研究也极为活跃。有关BHR机理的研究又为支气管哮喘的诊断和治疗开辟了广阔的前景,更有可能为哮喘的防治带来新的突破。

BHR是指气管、支气管树的异常敏感状态,即对于多种物理的、化学的和药物的刺激产生的超常的非特异性支气管收缩反应。这些刺激还包括过敏原、环境刺激、病毒呼吸道感染、冷空气



或运动等。自从19世纪40年代有人证实组织胺和胆碱药物对哮喘患者的支气管产生的收缩作用大于健康人以来,对BHR的机理、诊断和应用的研究都有了很大进展。

BHR由许多不同的复杂机制引起。炎症被普遍认为是导致BHR最重要的机理之一,尤以病毒性呼吸道感染最受重视。很多病理生理学方面的研究资料显示,增加气道炎症的刺激通常能增加气道反应性,吸入皮质醇激素对气道炎症的抑制可降低由于炎症而引起的气道反应性增高。对在正常人和哮喘患者进行气道激发试验前后所作的支气管肺泡灌洗检查术中,发现哮喘患者的灌洗液中嗜酸粒细胞、肥大细胞轻度增加,而细胞总数和相对比例同正常人十分相似。夜间哮喘患者凌晨4时的支气管肺泡灌洗液中的中性白细胞和嗜酸粒细胞增加,而病人的气道反应性亦从下午4时到凌晨4时逐渐增高。抗原致敏的迟发相哮喘反应者的呼吸功能与嗜酸性细胞或嗜碱性细胞、中性粒细胞增加有联系。Chung等发现,抗原激发后6h的BHR与支气管肺泡灌洗液中的中性粒细胞增加相关。动物模型也有确切的证据表明,炎症反应能启动和维持气道高反应性。Hutson用豚鼠模型发现抗原激发2h产生最大的即发相反应,其后在17h和72h有两个迟发相反应高峰,其支气管肺泡灌洗液中的中性粒细胞在激发后6h和17h显著增加,嗜酸粒细胞在17h和72h显著增加。应用体内外技术研究发现,高度纯化的活化中性粒细胞释放的产物不导致急性气道收缩,但可引起气道对组织胺反应性的增强,而吸入从相对纯的活化嗜酸粒细胞群得到的上清液导致急性气道阻塞,却不改变气道对组织胺的反应性。虽然大量的证据断定气道炎症和BHR之间有关系,但BHR也可以发生在无显著气道炎症者,Cibuals等报告,甲苯二异氰酸酯引起的豚鼠BHR在粒细胞缺乏时也可出现,Evcens等发现臭氧引起的鼠BHR与中性粒细胞不存在联系。

炎症反应过程的介质参与了BHR的形成。在臭氧所致的BHR中,受刺激的上皮细胞释放 $LTB_4$ ;可趋化巨噬细胞、中性粒细胞和血小板自血管内游出,产生更多的炎症介质,如中性粒细胞趋化因子、嗜酸粒细胞趋化因子、血栓素 $A_2$ 、前列腺素和白3烯类及血小板激活因子等;这些化学介质的释放可引起支气管的收缩、粘膜水肿及微血管的漏出等。Meade等认为,血小板激活因子是气道高反应最重要的介质之一,能提高与高反应性有关的其它介质的水平,启动介质链,引起哮喘的病理生理和组织病理改变,类似那些死于哮喘持续状态病人的肺部所见。

BHR的神经因素。气道的自主神经包括胆碱能神经和肾上腺素能神经以及非肾上腺素能非胆碱能神经系统(NANC)。BHR不仅与胆碱能神经张力过高和肾上腺素能受体功能低下有关,NANC功能失调可能也起重要作用。NANC的神经递质目前还不十分明确,最大可能为血管活性肠肽(VIP)、组氨酸蛋氨酸、P物质和其它快速激肽。VIP为存在于人肺中高浓度的多肽,存在于传出神经内,其神经纤维与气道平滑肌、粘液腺、气道血管和副交感神经节相联系。在体外,VIP是最强的支气管舒张剂,并有抑制炎症细胞的功能,可对抗炎症介质的作用。NANC神经系统通过上述的神经递质控制支气管的舒缩、血管的阻力和血流、微血管的漏出和粘液腺体的分泌,但确切的控制途径不清楚。

气道上皮在BHR的产生中也起重要作用。气道上皮中的15-脂氧酶受刺激激活后导致花生四烯酸代谢产物释放,主要为 $LTB_4$ 和12-HETE或15-HETE。HETE为中性粒细胞的有力趋化剂,还能使中性粒细胞脱颗粒,产生超氧基,收缩支气管及激活蛋白激酶C,并涉及到气道上皮通道的调节,这些作用均可引起BHR。另外,上皮的损害会引起其所含的中性内源性多肽酶的丧失,使神经激肽分解减弱,引起持续的收缩。上皮的脱落还会导致神经末梢的暴露和某些受体(如刺激性受体)的致敏,通过神经轴突反射引起支气管收缩。鉴于以上理由,有人将哮喘称为上皮细胞病。

BHR的实验室检测方法,根据激发方法的不同分为特异性的和非特异性的激发试验。特异性激发试验用过敏原做刺激物,

能为寻找致敏原提供依据。非特异性激发试验最常用的仍为传统的组织胺或乙酰甲胆碱试验。为了进一步研究BHR的发病机理和诊断上的需要,人们一直在寻找更为特异、敏感、有价值的方法。

早在1960年代后期,麻醉学注意到雾化气雾吸入能引起支气管的收缩,从而引起对渗透压改变导致的气道痉挛机理的研究。非等渗液体雾化吸入造成气道粘膜渗透压改变,这种改变能提供细胞激活的充分刺激,致使各种化学介质释放。非等渗液体激发试验估测BHR最常用的为蒸馏水和高渗盐水等。二氧化碳过度通气试验是基于运动性哮喘发病机理而提出的。过度通气所造成的水分丢失使气道粘膜成为高渗环境。由于呼吸道的渗透压改变是哮喘患者最常遇到的刺激,它引起的气道狭窄机制与其他自然刺激激发的哮喘机制相似,故对渗透性激发试验的研究十分活跃。其他使用的激发物还有腺苷、心得安及某些化学炎症介质类物质。但各种BHR检测法以何种最好及其间的相互关系如何还存在争论。Lemire等比较超声雾化蒸馏水吸入和冷空气高通气激发试验,发现在哮喘病人中两者相关性较小,从而推断其激发的作用机制不同。Tessier等的研究资料表明,哮喘和正常人中的乙酰甲胆碱和冷空气激发试验的结果均有很好的相关性。

关于BHR和哮喘的关系亦存在争论。多数学者认为BHR是哮喘的典型特点。BHR的水平通常同哮喘者的临床严重性和需要的药物有关系,但BHR不等于哮喘,许多其他肺病都有BHR的存在。Filuk等认为乙酰甲胆碱和冷空气激发试验都不能作为哮喘诊断的特异性指标。但Mann等用腺苷激发试验发现,在非哮喘对象中不引起支气管收缩,但对哮喘患者可产生明显的剂量依赖气道收缩。

治疗BHR用短期降低和长期降低支气管高反应性的两类药物。短期降低BHR的药物有 $\beta$ -肾上腺素激动剂、色甘酸二钠、皮质激素及速尿、组织胺拮抗剂等;长期降低BHR的药物主要是皮质类固醇类药物。其他非药物措施有催眠疗法、避免接触过敏原等。血小板激活因子拮抗剂做为一类新的治疗BHR的药物已试用于临床,初步显示了良好的效果,是最有希望治疗BHR的药物之一。

BHR未来的研究方向为:BHR是先天的还是后天获得的?BHR的病理生理学是否有最后统一的定论;无症状的BHR是否就是哮喘的前期表现?以及更特异性的BHR诊断方法以及BHR治疗药物,特别是某些介质拮抗剂的研究等。

#### 参考文献

- 1 Mann J S, et al. *J Appl Physiol*, 1986, 61, 1667~1676
- 2 Rimmer J, et al. *Clin Allergy*, 1986, 16, 221
- 3 Cockcroft D W, *Ann Allergy*, 1987, 59, 405~414
- 4 Tessier P, et al. *Am Rev Respir Dis*, 1987, 136, 1418
- 5 Silber G, et al. *Am Rev Respir Dis*, 1988, 137, 606
- 6 Filuk R B, et al. *Chest*, 1989, 95, 948~952
- 7 Lemire T S, et al. *Chest*, 1989, 95, 958
- 8 Lai C K. *J Appl Physiol*, 1990, 68, 916
- 9 Phillips G P, et al. *Am Rev Respir Dis*, 1990, 141, 9~13
- 10 Quachenboss J J, et al. *Am Rev Respir Dis*, 1991, 143, 323~330

(安徽医科大学第一附属医院张安成教授撰)

#### 成人呼吸窘迫综合征研究进展 recent advances in

adult respiratory distress syndrome 成人呼吸窘迫综合征(ARDS)是一种死亡率很高的急性缺氧性呼吸衰竭,可由多种原因引起,其主要临床表现为呼吸窘迫、顽固性缺氧血症、肺顺应性下降及X光胸片示两肺弥漫性浸润性改变。

第二次世界大战期间,人们注意到一种特殊的“急性肺水肿”,伤员若在12h内死亡,其尸检肺部基本正常,而15h后死亡,其尸检85%合并出血性肺水肿。该现象当时未曾引起医学界的足够重视,至60年代越南战争期间,该种“肺水肿”才再度引起

医学界的重视,美国和世界各地相继出现大量的有关报道。因导致本疾患的原因不同,故出现了各种不同的命名,如休克肺、湿肺、灌注肺、创伤后呼吸衰竭、非心源性肺水肿、出血性肺水肿、成人透明膜肺等。1967年, Ashbaugh 和 Petty 在“Lancet”杂志上首次提出 ARDS 这一名称。该名称的提出同新生儿特别是早产儿的一种急性呼吸衰竭(RDS)有关;RDS 病因系肺组织发育不健全,肺Ⅱ型细胞不能产生足够数量和质量的表面活性物质,造成肺泡膨胀不全或萎陷、缺氧血症、呼吸衰竭。虽然 ARDS 与 RDS 在病因方面有本质的不同,但其临床表现却很相似;因此,目前 ARDS 这一名称已被普遍接受。1973年,谢荣在“休克”专集上首次在国内报道了这一综合症。

ARDS 的病因 第一,经呼吸道或直接损伤肺组织,如误吸胃内容物,吸入热蒸气、毒气、氧中毒、溺水(海水、淡水),外伤造成的肺挫伤、肺放射烧伤。第二,经肺循环系统致 ARDS,如各种原因的休克及其所产生的组织灌注不足;肺部感染或全身性感染,尤其 G-杆菌性败血症;创伤,如多发性骨折、大面积软组织挫伤、烧伤、大手术、颅脑外伤等;体外循环及大量输血;中枢性原因,如脑缺氧、高原反应、海洛因中毒;其它如尿毒症、出血性坏死性胰腺炎(约 2%~18%)、羊水栓塞及脂肪栓等。

ARDS 的发生机制及病理生理变化比较复杂,大致可归纳为漏出性肺水肿与肺容量及肺机械功能的改变两方面,且二者相互联系并彼此影响。第一,漏出性肺水肿由以下诸因素造成肺毛细血管内皮细胞损伤:(1)感染。病原体(细菌、病毒、霉菌等)及其产生的内外毒素本身并不直接损伤血管内皮与组织细胞,而是作为炎性刺激物激活体内的补体系统、炎症细胞(巨噬细胞、多形核白细胞)、血小板等并形成血管内微血栓,同时产生一系列传递质,致血管壁通透性增加,造成组织水肿。这些传递质主要包括肿瘤坏死因子(TNF)、溶蛋白酶、自由基( $O_2^-$ 、 $H_2O_2$ 、 $OH^-$ )、花生四烯酸及其产物,如  $TXA_2$ 、 $PGI_2$ ,还有 Leukotrienes 与凝血因子等。炎症是机体的正常免疫反应,机体通过炎症反应将入侵的炎性刺激物(病原体及其毒素、异物、肿瘤细胞等)局限并将其消灭或中和。机体免疫力低下时(如饥饿、疲劳、创伤、化疗或用大剂量皮质激素等)以及入侵的病原体量过大或毒性过强,机体不能将炎症局限,发生全身性弥漫性血管内炎症反应,导致微循环衰竭,血管调节功能失常,血流分布不均,组织内分流量,氧供-氧耗( $DO_2 \sim VO_2$ )关系失常,各器官组织灌注不足,严重时发展成一个或多个器官功能衰竭(MSOF)。肺脏是炎症的靶器官之一,发生漏出性肺水肿并成为 MSOF 中最早表现出来的一个脏器。(2)长骨折所释放的脂肪酸、坏死性胰腺炎所释出的各种有害酶、羊水栓栓塞、大量输入陈旧血及体外循环时的各种碎屑在肺血管内形成的微血栓,均可直接损害肺毛细血管壁,造成漏出性肺水肿。此外,休克时组织灌注不足致肠壁屏障作用受损,肠道内细菌及其毒素可漏到腹腔或经门静脉进入肝脏及至腔静脉入肺循环并发生炎性反应,肺脏首先受害,这可能是 MSOF 时呼吸衰竭最早发生的原因之一。(3)肺泡-毛细血管膜直接受到化学性的(误吸高酸度胃内容物以及氧中毒、毒气、溺水)或物理性(肺组织挫伤、烧伤)的损伤,造成漏出性肺水肿。在受到上述诸因素作用时,肺脏自身的防御机制也在发生作用。首先是淋巴系统,当肺间质内液体增加、压力升高时,其回吸速度加快,有时可达正常速度的 5~7 倍。只有当漏出速度超过淋巴回吸的能力,肺脏第二防御机制-肺间质才开始起作用。肺间质如同海绵一样能容纳 8 倍于正常的血管外肺水。间质性肺水肿形成后,气体交换尚可维持,但因间质内静水压升高刺激肺内“J”感受器,病人反射性过度通气。当漏出液体超过机体代偿能力,液体由间质进入肺泡,形成透明蛋白膜,肺水肿即由间质期进入肺泡期。第二,肺容量及肺机械功能的改变。肺间质水肿,压力升高达一定程度,首先压迫终末小气道,使气道阻力升高,肺泡内气体减少,肺功能残气量(FRC)和肺的顺应性下降。病肺的通气有赖于增加跨肺压(即气道压与胸膜腔内压之差)因需要增加吸气压力,故病人吸气困难。肺泡毛细血管膜受损害,肺Ⅱ型细胞产生表面活性物质能

力下降或消失,肺泡表面张力升高,肺泡缩小或萎陷,使肺 FRC 与肺顺应性进一步下降,加重呼吸困难。因肺泡含气量减少或部分肺泡萎陷,使肺内通气/灌注比例(V/Q)失调及病理性肺内分流增加,造成或加重缺氧血症。

ARDS 患者临床表现 ARDS 的临床过程包括受伤期(外伤、休克、感染等)、相对稳定期(受伤后 12~24h)、呼吸衰竭期与终末期四期。其中呼吸衰竭期病人有呼吸困难,两肺可听到干鸣音或捻发音,湿罗音不多,动脉血气示  $PaO_2$  与  $P_{CO_2}$  皆下降,提高吸入氧浓度( $FiO_2$ ) $P_{aO_2}$  升高也不明显。在终末期,病人进行性呼吸困难、缺氧血症进一步恶化;肺组织弥漫性损害,纤维组织增生,通气单位减少, $P_{CO_2}$  升高;此期必须用机械通气才能维持病人的气体交换。多器官衰竭是这一期的合并症,病人常因此而死亡。肺部 X 光片的表现常落后于临床症状,早期表现为两肺含气量减少,呈“毛玻璃”样改变,后期则表现为肺弥漫性浸润性改变,呈外周性分布。因化学性的或物理性的直接损害所致的 ARDS,一般受伤后即出现呼吸衰竭表现,分期不明显。ARDS 血流动力学改变特点为:肺动脉压升高或正常;肺血管阻力升高;心排量及肺毛细血管嵌压压在正常范围内;其他指标亦无特殊改变。

ARDS 的诊断与鉴别 ARDS 的诊断依据包括病史(外伤、感染、休克、无心跳及肺部情况等);临床表现为呼吸窘迫;动脉血气结果为顽固性缺氧血症(吸 100% $O_2$  时,  $A-aDO_2 > 46kPa$ );X 线表现为双肺弥漫性浸润;肺顺应性下降(总顺应性  $< 50ml/98Pa$ ); $Q_p/Q_T > 10\%$ 。如病人死亡,其尸检示两肺肿胀、实变(重量  $> 1000g$ )、淤血性肺不张、透明蛋白膜形成及纤维增生。应将 ARDS 与心源性肺水肿相区别,心源性肺水肿除呼吸窘迫外,主要有心脏病史、心界扩大、奔马律、EKG 异常、颈静脉怒张、双肺满布湿性罗音,多伴粉红色泡沫痰,X 光胸片示肺门周围淤血、肺毛细血管嵌压  $> 2.3kPa$ ,肺水含蛋白量低;而 ARDS 病人则无心脏病史,EKG 正常,无须颈静脉怒张,两肺多为干性罗音,PCWP  $< 2.3kPa$ , $Q_p/Q_T$  升高显著,X 光胸片示双肺呈弥漫性、外周性浸润改变,其肺水含蛋白的量高。

ARDS 的治疗 对 ARDS 目前尚无特效方法,尽管在机械通气、胸部物理治疗及循环支持方面有迅速发展与进步,但 ARDS 死亡率仍高于 50%。循环支持近年来倾向于 ARDS 早期积极输液而非限制入量,目的在于增加心排量以提升氧供与氧耗,改善肺部组织的灌注状况,保护尚未受损的肺组织并为已受损组织提供修复条件。当然,在 ARDS 晚期肺泡-毛细血管膜广泛漏出期也应限制入量并适当使用利尿剂。在 ARDS 不同时期内应视不同循环监测结果进行适当处理,如抗心律失常药及血管活性药的应用。呼吸支持在 ARDS 治疗中极为重要,对 ARDS 病人生命威胁最大的是缺氧血症,纠正缺氧血症的方法以气管内插管、机械通气加用呼气末正压(PEEP)最有效。PEEP 可使膨胀不全或萎陷的肺泡张开,增加 FRC,改善肺的顺应性,改善分流及通气灌注比例,纠正缺氧血症,并可避免长期吸入高浓度氧,减少氧中毒。ARDS 呼吸治疗中应用 PEEP 是 25 年来 ARDS 研究的一个重大进展。但由于 ARDS 病人肺顺应性低,加上应用较高水平的 PEEP 机械通气时气道压峰值(PIP)可达较高压力,若  $PIP > 4.9kPa$ ,各种气压伤如气胸、纵膈气肿等并发症增加,并对循环也有明显干扰。近年来对机械通气的看法及通气方式有所改变,人们认识到压力通气较容量通气更重要及辅助通气较控制通气更优越。可用于 ARDS 呼吸治疗的较新的通气方式有吸呼反比通气(IRV)、吸气压力支持通气(IPS)、压力调节容量控制(PRVC)与容量支持(VS)等。有研究资料显示 ARDS 病肺损伤呈不均匀性改变,肺内仍有部分正常组织。因此,常规机械通气可使正常肺组织受损伤,故有人提出使用正压 3.43~3.92kPa 低频(3~5次/min)通气并行体外循环排出  $CO_2$ 。对 ARDS 原发病的治疗,控制感染,引流脓腔,切除坏死组织,固定折骨,纠正各种原因的休克等。值得一提的是对 G-杆菌性败血症,目前较

有希望的治疗方法是免疫学治疗,采用人体单克隆抗体对抗内毒素,以及基因工程合成 TNF 抗体以预防和治疗感染性休克;有人还主张对败血症及外科危重病人用 Polymyxin, Tobramycin, Amphotericin 等常规处理胃肠道以阻断炎性刺激物的来源。70 年代兴起的膜肺治疗 ARDS 已不用于成人,仅用于新生儿 RDS,皮质激素的治疗也趋于否定,不再主张常规应用。

由于呼吸支持治疗日趋完善,ARDS 病人一般非死于呼吸衰竭而死于 MSOF。感染所致的 ARDS 病死率最高,达 90%;误吸、体外循环后的 ARDS 预后较好。成活病人的肺功能在 4~6 个月内恢复,纤维化的改变可部分吸收;1/3 病人肺功能不能完全恢复;少数病人因肺纤维化而终生致残;肺纤维化的程度与机械通气的时间、吸入氧浓度有关,FiO<sub>2</sub> 越高、机械通气时间越长,其纤维化程度越严重。

#### 参考文献

- 1 Ashbaugh G G, et al. Lancet, 1967, 2: 319~323
- 2 谢荣. 休克专著. 解放军总后勤部, 1973
- 3 Arnold Sladen. Comprehensive Therapy, 1981, 9
- 4 Gattinoni L, et al. JAMA, 1986, 256: 881~886
- 5 Simmons R S, et al. Am Rev of Respir Dis., 1987, 135: 924~929
- 6 Am Rev of Respir Dis, 1987, 4: 135
- 7 Dorinsky P M, et al. Chest, 1989, 96: 885~892
- 8 Shoemaker W C. The Textbook of Critical Care Medicine. 1989, 2
- 9 Ziegler E J, et al. N Engl J Med, 1991, 324: 429~436

(北京医科大学一院外科重症监护室刘秀文教授撰)

### 成人呼吸窘迫综合征 adult respiratory distress

syndrome ARDS 成人呼吸窘迫综合征是一种继发于多种原发疾病而发生的急性进行性缺氧性呼吸衰竭。根据发生的原因和临床状况有很多不同的名称,如由休克引起者叫休克肺;由创伤引起者叫创伤后湿肺;体外循环时灌注引起者称灌注后肺等,还有命名为成人肺透明膜病和僵硬肺综合征等,但本征的肺透明膜形成是继发的,与婴儿原发性肺表面活性物质缺损所形成的肺透明膜病不同,故称之为成人呼吸窘迫综合征以与婴儿呼吸窘迫综合征相区别。本征的特征是弥漫性肺泡毛细血管膜损伤、肺水肿、微小肺不张、肺顺应性降低、通气与血流比例失调,引起进行性低氧血症和极度呼吸困难,用一般给氧方法难以纠正。由于 ARDS 发病率有逐渐上升的趋势和高达 50%~60% 的死亡率,因此是临床研究的热点之一。

1914 年, Pasteur 首先报告了在创伤性休克患者伴发的这种类型的呼吸衰竭,当时称之为“广泛性肺萎缩”,第二次世界大战期间, Burford 等(1945)所描写的严重胸外伤后所发生的肺水肿称之为“休克性湿肺”;其后陆续报告由非胸部创伤所引起的以及各种不同病因所致的休克,如大量输液以及 1957~1958 年流行性感胃大流行所引发的呼吸衰竭等,这些病人的病理发现均与新生儿特发性呼吸窘迫综合征的很为相似,因此, Rshbough(1967)首先提出 ARDS 这一名称。1982 年中华医学会在北京召开的成人呼吸综合征专题讨论会上正式定名为 ARDS。

ARDS 的发病机制和病理生理仍未完全明确,给本征的诊断及治疗带来困难。因此,对 ARDS 病理生理方面的探讨是最活跃的课题之一。很多学者把注意力集中在中性粒细胞介导的肺泡壁损伤即感染、脂肪栓塞、烧伤、创伤等多种刺激,这些均能引起补体激活,随之中性粒细胞从肺毛细血管游离,分泌蛋白水解酶和氧化剂等可直接引起肺损伤。动物模型显示, ARDS 起始阶段是一暂时的肺动脉高压伴有肺毛细血管漏出的增加,导致间质水肿,在上述的各种刺激下均可出现此种情况。对人类的研究资料显示,中性粒细胞和血小板计数均下降,过氧化氢在呼出气中增加,血浆补体(C5a)增加,中性粒细胞、髓过氧化物酶和弹性蛋白酶在支气管肺泡灌洗液(BALF)中增加,中性粒细胞趋化因子增

加。Weiland 等(1986)的研究资料表明,在 ARDS 发生早期,大量的中性粒细胞在 BALF 中聚集,白细胞数与气体交换异常的严重性及 BALF 中总蛋白浓度有中度相关性。Fowler 等也发现 ARDS 的中性粒细胞的趋化性增高,并且在前期、中期、后期逐渐下降,在病情恢复后降至正常。Robbins 等(1990)的研究资料显示, ARDS 病人的趋化因子灭活功能丧失,从而导致 C<sub>5</sub>a 吸引中性粒细胞能力的增强。Baldwin 等(1986)的研究资料表明, ARDS 病人呼出气中的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 浓度明显高于正常人,提示了氧自由基的损伤作用。所有这些发现都指出了补体、中性粒细胞、血小板和它们的产物介导的肺损伤的重要性。然而,不得不承认,本病也发生于严重白细胞减少的病人,因而断定这些细胞在 ARDS 中不是必需的。

在 ARDS 的病理生理中起重要作用的另一类物质是花生四烯酸的代谢产物及其它某些化学介质,如前列腺素、血栓素类物质等,它们在肺泡损伤中起重要作用,并可导致或抑制血小板的聚集。有证据显示, ARDS 发生时肺循环中的白细胞三烯浓度和某些前列腺素浓度都有增高,并且这种增高和病情严重程度有一定的联系。其他化学介质的异常亦十分多见。Hyers 等发现, ARDS 及 ARDS 前期病人 BALF 中的肿瘤坏死因子显著高于正常人。Webster 等(1989)在对具有发生 ARDS 的高危病人的研究中发现,其 BALF 中的白细胞介素 1 异常增高。亦有人发现 ARDS 病人静脉血中 5-羟色胺及异丙肾上腺素类异常。

ARDS 的另一发病机制是肺表面活性物质(PS)的减少。Ⅱ型肺泡上皮细胞的损伤、肺水肿、肺泡多种血浆蛋白的渗漏和炎症细胞的抑制、破坏作用,都可使 PS 减少,且使 PS 的吸附、扩展能力及膜的稳定性均有异常,因而加重 ARDS 的进程并使肺泡萎陷。在动物实验模型中,预先给予外源性的 PS 可预防吸纯氧时发生 ARDS。临床试用外源性的 PS 可改善 ARDS 病人的肺功能和顺应性,提高其 PaO<sub>2</sub>,减轻上皮损伤、肺泡渗出,获得一定的疗效。

ARDS 的基础疾病多种多样,且它们的发病机制亦是多种多样,因此难以用单一的机制解释本综合征的发生,而应该将其看成是多种因素综合作用的结果。

ARDS 的基本病理变化为肺水肿和肺不张,是非特异性的。肺脏外观呈暗红色,表面有淤斑。因肺含水量增多,肺重量显著增加,可达正常的 3~4 倍。光镜下可见广泛的肺充血、间质和肺泡水肿,伴有肺泡内壁透明膜形成,还可见灶性的或大片的肺泡萎陷、间质性肺炎、毛细血管内微血栓形成、肺间质及肺泡出血。电镜下可见内皮细胞及肺泡上皮细胞变性,基底膜肿胀增宽,肺间质水肿,有时可见肺泡上皮Ⅱ型细胞板层小体排空和空泡变性以及毛细血管内血细胞和血小板聚集。晚期病例可见肺泡上皮及间质细胞增生,甚至可见肺间质、肺泡、肺泡管和呼吸性细支气管纤维化。

ARDS 的诊断仍然停留在病史和临床表现的水平上。主要诊断依据为:(1)具有可引起 ARDS 的原发疾病;(2)呼吸系统症状:呼吸频数(>35 次/min)或/和呼吸窘迫;(3)低氧血症;(4)胸部 x 线片表现肺纹理增多,斑片状影或大片状阴影等间质性的或肺泡性的病变;(5)排除慢性肺疾患和左心衰竭。为了降低本综合征患者的死亡率,应注重预防和早期诊断,但其诊断指标尚处于研究阶段。Langlois 等认为,血浆终末补体复合物(SC<sub>5-9</sub>)能用来预测 ARDS 的发生与否。肺循环血中 5-羟色胺、异丙肾上腺素、细胞成分的检查以及 BALF 的细胞成分及介质的检测均系侵入性操作技术而难以应用于临床。ARDS 肺水肿的检测方法除依据胸片估计外,还有双指示剂稀释法、可溶性气体法、CT、体外放射测定法等,但均对早期诊断价值不大。

治疗 ARDS 尚无特效方法,首选大剂量皮质激素,高浓度氧疗辅以呼气末正压人工呼吸(PEEP)。PEEP 是治疗本病的主要措施,其作用是:(1)增加功能肺泡的数量,使功能残气量增大,稳定肺泡氧分压,促进气体交换;(2)增加肺容量,提高肺的顺应性,改善肺泡通气状况;(3)恢复通气血流正常比例,减少肺分

流,提高动脉血氧分压;(4)在不影响心排血量的情况下,使动脉血氧含量增加,组织供氧改善;(5)将供氧浓度控制在50%以下,避免氧中毒。随着对ARDS发病机制认识的深入,各种环氧化酶抑制剂、氧自由基清除剂或白三烯类拮抗剂等相继用于临床,但疗效难以肯定。肺表面活性物质替代物的使用在动物试验中有良好的效果,但尚未用于临床。

未来研究ARDS的热点课题仍然是对其发病机理的进一步探讨,特别是各种细胞、介质和受体的确切作用需要肯定;随着对其病理生理的深入研究,将会发现早期特异的诊断方法或预测ARDS发生的指标,并为其治疗提供新的方法。

#### 参考文献

- 1 Fowler A A, et al. Am J Pathol, 1984, 116: 427
- 2 Morel D R, et al. Am Rev Respir Dis, 1985, 132: 479
- 3 Weiland J E, et al. Am Rev Respir Dis, 1986, 133: 218
- 4 Webster K O, et al. Exp Lung Res, 1989, 144: 268
- 5 Yong J S, et al. Circ Shock, 1990, 32: 243
- 6 Bernard G R, et al. Am Rev Respir Dis, 1991, 144: 263
- 7 Richard Robbins, et al. Am Rev Respir Dis, 1990, 141: 1163
- 8 Thomas M Hyers, et al. Am Rev Respir Dis, 1991, 144: 268
- 9 Thomas R Martin, et al. Am Rev Respir Dis, 1991, 144: 254

(安徽医科大学第一附属医院张安成教授撰)

### 纵隔病变的CT诊断 CT diagnosis of mediastinal

CT检测纵隔增宽是一种既敏感又可靠的方法。因为普通X线胸片只能显示突出纵隔之外的与肺或交界面的病变,而具有较高密度分辨率的CT能分辨出纵隔内肿块是实性的还是囊性的、是脂肪的还是钙化的。CT横断面象又无影像重叠,可以充分显示纵隔内解剖状况和病灶,甚至还能显示普通X线检查难以显示(所谓“盲区”)的胸腔入口、心包和血管以及膈角等。

发现纵隔增宽时首先应区别是病理性的还是解剖变异或是生理性的脂肪沉积。在解剖变异中,老年性的胸主动脉、无名动脉可以弯曲而突向右侧肺野,使纵隔增宽;生理性脂肪沉积使纵隔外缘呈轻微波浪状,纵隔内为脂肪密度的低密度区,气管、食管可无移位,但血管可被牵拉伸长,脂肪密度具有特征性的CT值:70~130HU,极易诊断。

CT检查纵隔肿块时,必须先定位后定性,并要以测定CT值来明确肿块是囊性的、实性的还是脂肪。一般纵隔囊肿的CT为5~15HU,易于诊断。有时囊性肿块由于其内含蛋白成分较多,其CT值可达到20~50HU,类似实性密度,故常易与实性肿块混淆;多方位检查其形态可变是其鉴别要点,肿块越大变化也就越明显;若肿块形态规则,与周围结构分界清楚,有一透亮的间隔带,良性病变的可能性大;若肿块较大,形态不规则,分界不清楚,周围结构有被包绕、浸润,如已出现心包、胸膜浸润,则恶性病变无疑。但应指出病变大小与肿瘤良、恶性间无必然关系,CT对良性病变检出率为96%,对恶性病变为61%,可以认为CT对良性病变有肯定诊断价值而对早期恶性病变或良性伴侵袭性病变更进一步定性尚有一定困难。

当CT平扫片上的纵隔增宽与增粗的血管或动脉瘤鉴别有困难时,可在静脉内注入造影剂作Bolus氏1期的增强扫描来明确是否为血管性的或与血管有无粘连,矢状面重建还可获得与主动脉造影相似的形象。对纵隔内假性升降主动脉瘤采用Blous氏1期的增强扫描,还可以明确瘤内有无附壁血栓以及动脉瘤壁厚度和有无破裂可能。

纵隔内一些常见病变的CT表现及其鉴别要点如下:

(1)胸骨后甲状腺。是颈部甲状腺向下伸延进入纵隔而形成的。在病理上,它可为单纯性甲状腺肿、甲状腺囊肿、甲状腺腺瘤或甲状腺腺癌。常位于纵隔上部、气管前间隙。其突出的特点是肿块与颈部甲状腺相连续,并挤压气管腔,轮廓清晰,密度较周围软组织的密度略高,但可不均匀或有钙化及囊性变。其位置若不典型(如肿块全在胸腔内)或气管受压,常易误诊。

(2)胸腺肿瘤。据Schnyder等报道,80%~90%胸腺瘤、胸腺囊肿、胸腺增生发生在前上纵隔的血管前间隙内,只有10%~20%胸腺瘤、胸腺囊肿、胸腺增生可发生在胸腔入口区。肿块常是卵圆形的,多数外缘有包膜,其轮廓较光整,有时有浅分叶,密度一般较均匀,但若含有脂肪组织时,密度也可不均匀。CT值多为30~50HU,有时也可发生出血、坏死、囊性变和钙化。若为胸腺囊肿则应与发生在前纵隔的囊性畸胎瘤相鉴别,前者常见不到囊壁,而后者多为厚壁并非常钙化。

CT对隐匿性胸腺瘤的存在也是具有肯定诊断价值的。因为极小的胸腺瘤或胸腺增生,无论是胸片还是分层摄影一般是难以发现的,CT可以检出直径1cm大小的肿瘤结节和腺体增生。因此,凡临床有重症肌无力的患者胸片阴性时,CT应作为必不可少的检查方法。

(3)淋巴瘤。纵隔恶性淋巴瘤多为双侧性,一般位于血管前和气管旁,可显示多组淋巴结增大,主要为两侧气管旁和肺门淋巴结肿大,并以气管旁淋巴结肿大为主。常融合呈凹凸不平的多块状轮廓,并挤压气管和大血管。必要时作增强扫描与大血管作鉴别。早单发肿块位于血管前时与胸腺瘤鉴别有困难,增强扫描有助于恶性淋巴瘤的定性诊断。增强后CT值均增加30HU以上。

(4)结节病。为原因不明的非干酪性肉芽肿,可为肺门及纵隔内多组淋巴结肿大,外缘光整,呈土豆状,质较柔软,常双侧对称,很少有融合趋向。腹膜后淋巴结常同时增大,因此CT检查应包括胸部与腹部两个部位。

(5)畸胎样肿瘤。绝大多数位于后纵隔,特别是心脏与大血管交界处(前中纵隔)或左心缘旁,也可位于后纵隔。肿块常向一侧或两侧突出,左侧较右侧为多。肿块呈圆形或卵圆形,大小不等,最大者可占据整个一侧胸腔。良性的边缘呈轻度分叶状,恶性者分叶多较明显。肿块内若有脂肪、软组织和发生、钙化、骨化时,诊断即可确立。

(6)神经源性肿瘤。位于后纵隔,呈椭圆形,边缘清晰光整,CT值为30HU左右。CT可清晰显示肿瘤、脊柱和肋骨之间的相互关系,特别是当肿瘤位于后纵隔下部心影之后时,可以发现扩大的椎间孔以明确诊断。

(7)神经母细胞瘤。为小儿常见的后纵隔肿瘤,其轮廓凹凸不平,体积较大,密度不均可有钙化,且极易侵犯相邻的肋骨、脊柱等结构表现为恶性征象。

(8)支气管囊肿。从气道长出,最常见在气管隆突水平,突入后纵隔。发现时囊肿常已经很大,囊肿突然增大有要考考虑有出血。支气管囊肿的CT表现为密度均匀,CT值在0~100HU,囊壁薄而内缘光整,可以造成邻近解剖结构的压迫移位。诊断支气管囊肿要特别注意肿物的部位和邻近支气管,CT测量值一般偏高,在30~50HU,有时因过分重视CT值而误诊为实性肿瘤。

(9)淋巴管囊肿。也称淋巴管瘤或淋巴水瘤。一般为良性,恶性甚少。常位于前纵隔上中部右侧气管旁,也可位于前纵隔的下部,呈圆形、椭圆形或不规则形态的肿块,边缘清楚,密度均匀,没有钙化阴影。CT值为10HU左右,增强扫描后不强化或轻微强化。

(10)心包囊肿。三分之二位于右心膈角,为先天性囊肿,多为圆形或卵圆形,与心包相连。其余位于左心缘旁或前上纵隔,在心后方的非常罕见,囊壁厚薄,外缘光整,密度均匀,CT值为0~20HU,改变体位扫描,囊肿可变形。增强扫描多不强化。

(11)脂肪性肿物。(1)心包脂肪垫,常位于左心膈角区,呈椭圆形,CT值为100HU左右,增强时无强化。(2)脂肪疝:腹腔脂肪可以疝入胸腔。大网膜脂肪经过莫氏孔疝入胸腔,在右心膈角出现肿块,CT扫描见脂肪密度肿块内有细线影,为大网膜血管,有助于鉴别脂肪疝与脂肪瘤。左侧以博氏孔的胸腔脂肪疝也有同样CT表现。(3)脂肪瘤:纵隔脂肪瘤少见,肿瘤以脂肪组织为主,质软,一般没有压迫症状,较大的脂肪瘤可以压迫周围解剖结构。CT表现为边缘光整,密度均匀,CT值偏低的肿块;如果密

度不均匀,CT值偏高,边缘不整齐并向周围侵犯,就应考虑为脂肪肉瘤或脂肪母细胞瘤。

综上所述,CT检查对纵隔病变的定位诊断比较准确,而在定性方面不能仅仅根据纵隔的部位,也不能仅仅根据CT值来确定,而要全面地观察其外形、结构及与周围的关系,并密切结合临床资料,只有这样才能更有效地发挥CT在纵隔病变诊断上的作用。

#### 参考文献

- 1 李果珍,等.临床体部CT诊断学,1986,33
- 2 Schnyder P, Candardjis G. Eur J Radiol., 1987,7:107
- 3 高培毅,摘译.国外医学(临放手册),1988,3:153
- 4 王绵良,等摘译.国外医学(临放手册),1988,4:241
- 5 郭绍伦,等.中华放射学杂志,1990,24(1):40
- 6 严洪形,等.中华放射学杂志,1990,24(4):203
- 7 白振明,摘译.国外医学(临放手册),1990,3:168
- 8 朱雨娟,摘译.国外医学(临放手册),1990,6:334
- 9 李铁一,等.中华放射学杂志,1990,24(1):14
- 10 颜嫣惠,等.全国第5届CT理论与应用学术会议论文集,1991,2~48

(安徽省立医院吴国忠主任医师撰)

**膈肌疲劳和治疗** 膈肌是最重要的吸气肌,是机体重要的通气泵。由于疾病等原因使能量消耗增加或供应不足而导致膈肌疲劳,膈肌疲劳轻者可使肺通气动力作用明显降低,重者造成呼吸衰竭。寻找实用的治疗药物和处理办法,已引起人们广泛关注。

1880年Bernard就开始研究药物对膈肌的影响。1946年Bulbring采用膈肌-膈神经标本较系统的分析肾上腺素等药物对膈肌收缩力的影响及作用机理。1977年Boussos开始对人膈肌功能及其病理生理意义进行了较系统的研究,并首次提出吸气肌疲劳可能是高碳酸血症性呼吸衰竭的主要原因之一。1984年Kim等人指出膈肌是机体的通气泵,和循环泵心脏一样,一生中都不停顿地运动。1988年9月在美国举行专题研讨会,回顾呼吸肌的研究情况,提出进一步研究的范围。

**膈肌的解剖生理** 膈肌是主要的吸气肌,其功能约占吸气肌的75%以上。膈肌从胚胎学、形态学和功能上看属于骨骼肌,但又不同于其它骨骼肌,收缩时对细胞外 $Ca^{2+}$ 内流有很强的依赖性,这点又与心肌类似。膈肌纤维的组成主要有3种:I型即慢速氧化型肌纤维,约占50%,含有丰富毛细血管,不易疲劳;IIA型即快速氧化糖酵解型,约占25%,含线粒体较高,能量供应充足,不易疲劳;IIB型即快速糖酵解型,约占25%,主要决定膈肌的收缩力,但易疲劳。膈神经支配着膈肌运动,它发自第3~5颈神经,经前斜角肌外下部(胸锁乳突肌下1/3处有膈神经活动点,为体外膈肌起搏器刺激点)往胸内下达左右侧膈肌,当吸气中枢兴奋时通过膈神经冲动传至膈肌,引起膈肌收缩,从而扩大胸廓上下径,胸内负压加大,克服呼吸系统的弹性阻力和非弹性阻力,致肺扩张而产生吸气运动。膈肌收缩所增加的通气量约占平静呼吸时通气量的3/4~4/5。

**膈肌疲劳的原因及后果** 一般认为膈肌疲劳可能由于中枢神经性、神经-肌肉传导性障碍或肌肉本身化学变化等原因,使能量消耗增加或供应不足而导致膈肌疲劳。如哮喘等急、慢性呼吸道疾病所致的气道阻力增加,或通气过度使膈肌收缩处于张力-长度曲线的低效部分,能量消耗增加;贫血或血氧饱和度下降、心输出量减少,或营养不良、消耗性疾病等致使能量供给不足。膈肌疲劳时轻者可使通气动力作用明显降低,严重者可能造成呼吸衰竭。膈肌疲劳是呼吸衰竭发生、发展的重要病理生理机制之一, Roussos指出,在慢阻肺中,呼吸肌疲劳和胸肺运动机械负荷过重是致呼吸动力泵衰竭的主要原因,过去常以肺部或气道疾病来解释呼吸衰竭的发病机理,只注意到通气换气以及呼吸控制和通气调节等因素的作用,而作为通气动力源泉膈肌的功能从1977

年后,尤其是80年代后期才引起人们的重视。

**膈肌疲劳的药物治疗** 膈肌疲劳的处理一般采用体育锻炼、呼吸操、气功、游泳、自行车等进行呼吸肌锻炼以及注意休息和营养等。80年代后期中国兴起的“体外膈肌起搏器”治疗也有一定的效果。而有效的治疗药物却不多,主要包括:

(1)茶碱类 Aubier等人指出茶碱类药改善膈肌收缩力作用可能比舒张支气管的作用意义更为重大,因为有时其舒张支气管平滑肌效应不明显,但哮喘病人的症状却明显改善。以增加吸气阻力诱发膈肌疲劳,给氨茶碱后使降低的跨膈压(Pdi)恢复,说明氨茶碱能增强膈肌收缩力,纠正膈肌疲劳。茶碱能改善膈肌收缩力,预防膈肌疲劳,是治疗慢阻肺有用的药物。Muriano等对慢阻肺患者用茶碱后,肺活量( $V_c$ )、第1秒用力呼气量(FEV<sub>1.0</sub>)均增加30%,认为是增强膈肌收缩力所致,给狗注射氨茶碱后,Pdi、每分钟通气量均增加,而未见膈神经的中枢冲动传出增加,说明其作用主要是直接增强膈肌收缩力所致。可见茶碱类药物可改善慢阻肺患者的膈肌收缩性能,预防和治疗膈肌疲劳,减轻呼吸困难,增加运动耐力,改善缺氧和CO<sub>2</sub>潴留等均有重要的临床价值。其机理尚未完全明确,Aubier指出氨茶碱作用于骨骼肌细胞,抑制磷酸二酯酶,从而改变C-AMP的代谢作用;或直接作用于骨骼肌,增加 $Ca^{2+}$ 内流;或可能间接的抑制肾上腺素受体而发挥作用。

(2)咖啡因 Supinski报道,正常受试者口服600mg咖啡因后,Pdi增加50%,而口服相当剂量的茶碱,pdi仅增加16%,作者认为咖啡因增强膈肌收缩力的作用优于茶碱,适宜慢阻肺病人长期服用。Aubier亦指出咖啡因可增加呼吸肌耐力,延缓呼吸疲劳的发生。若同时给钙阻滞剂,并不能降低或取消咖啡因增强膈肌收缩力的作用,咖啡因这一作用可能通过增加肌浆网的 $Ca^{2+}$ 释放而实现。

(3)肾上腺素 $\beta$ 受体激动剂疗效仍有争论。Suzuki报道酚丙喘宁能改善由吸气阻力增加所致的膈肌疲劳时Pdi的下降,这可能通过 $Ca^{2+}$ 内流增加,加强膈肌收缩有关。Vecchio报道慢阻肺者应用酚丙喘宁,能改善膈肌的收缩强度和增加膈肌的力量储备。Aubier报道间羟舒喘灵对正常狗膈肌收缩力无影响,但可显著提高疲劳膈肌的Pdi。Howell研究表明异丙肾上腺素并不增加狗的Pdi,但使膈肌峰颤搐张力(PTT)显著升高,而松弛一半时间(1/2RT)则明显缩短,这与其增加C-AMP浓度导致肌细胞内 $Ca^{2+}$ 转运增加、肌浆网对 $Ca^{2+}$ 的再摄取增加有关。

(4)去甲肾上腺素 Suoinski报道,去甲肾上腺素能增加膈肌血流量和增加疲劳膈肌的收缩力;并指出其部分抗膈肌疲劳作用是继发于膈肌血流量增加的结果。

(5)乙酰半胱氨酸 为粘液溶解剂。先给兔子静脉注射后,电刺激膈肌,结果引起膈肌疲劳的速度明显地比对照组慢,其肌张力的降低亦比对照组明显地少,说明痰易净有预防膈肌疲劳的作用。

(6)洋地黄类 洋地黄加强心肌收缩力是细胞外大量 $Ca^{2+}$ 进入细胞内所致,而骨骼肌收缩时其 $Ca^{2+}$ 主要来自细胞内肌浆网 $Ca^{2+}$ 的释放,而膈肌又不同于其它骨骼肌,收缩时对细胞外 $Ca^{2+}$ 内流有很强的依赖性,这点与心肌收缩相似,这一发现为洋地黄类药物治疗膈肌疲劳提供了理论基础,Aubier报道地高辛可直接增强膈肌的收缩力,与其心输出量和膈肌血流的影响无关。KiKuchi研究电刺激膈神经引起狗膈肌疲劳,给哇巴因和毛花强心丙均能改善膈肌收缩力,防止疲劳,但是呼吸衰竭病人应用洋地黄类药物有相当的危险性,因此对其可行性和安全性有待进一步研究。

(7)新斯的明 Howell报道新斯的明可使膈肌PIT明显升高,Pdi显著增加,改善疲劳膈肌的收缩力。其机理可能是作用于神经-肌肉接头,通过抑制胆碱酯酶,延长乙酰胆碱的作用时间,并直接与乙酰胆碱受体结合,促进肌肉细胞的极化,增加 $Ca^{2+}$ 的释放,从而增强膈肌的收缩力。

今后的研究重点是:(1)进一步阐明膈肌的基本特性及膈肌

疲劳时的变化；(2)建立膈肌疲劳可靠的诊断指标；(3)在阐明膈肌疲劳与呼吸系统疾病关系的基础上，寻找膈肌疲劳有效的治疗措施，特别是发掘有效的治疗药物。

(浙江医科大学杨秋火教授、方理本副教授撰)

**食管粘膜剥脱症** exfoliation of the cesophageal mucosa

又称表层脱落性食管炎、创伤性食管炎、蜂窝组织性食管炎，是一比较少见的食管病，其病理特征是食管粘膜上皮呈管状脱落。此病自1941年在中国初次报告以后，引起临床医师的普遍注意，因而以后陆续见诸报道。1981年《中华耳鼻咽喉科》杂志1次报道了15家医院35例此病人的综合统计分析资料，周君琪亦遇到2例此病人。

食管粘膜剥脱症的发病原因尚未完全清楚，目前多认为与外伤有关，勿促进食、强咽干硬食物、酗酒、进食过冷过热及刺激性食物都是此病的诱发因素。饮食不当，先因机械作用牵动食管粘膜表层，使之与其下疏松结合的固有层分离，引起两层间丰富的血管断裂，使粘膜表层下发生血肿，继而因张力作用使更多周围血管断裂，出血更多，血肿不断扩大，最后使整个粘膜与固有层分离。同时，因食管蠕动和血肿重量，血液下坠，使食道下端承受重大张力，更加血肿压迫，刺激食管内神经末梢，引起频频恶心呕吐，最终导致表层破裂，吐出带血的残渣和鲜血，呕吐又将已断裂的食管粘膜表层向上翻转，并随吐出物向上剥离而吐出口外，但其上端仍与固有层粘着，因而仍呈条状连接。以往认为患者先由慢性食管炎引起，但从临床观察绝大多数患者否认有关病史，多诉说病变是骤然发生。有人统计，剥脱的管状粘膜长度有超过30cm者，认为此长度超过正常食管的平均长度(男性为21~30cm，女性为20~27cm)，因此提出食管的长度较长者可能容易发生此病，因食管较长者其上下端粘膜易生皱褶，在反复吞咽运动中食管肌层收缩和松弛，常致皱褶的粘膜与粘膜下组织分离，引起组织间血管破裂出血，因血肿而导致此病。

有人统计，35例此病患者中有3例发生于妊娠期间，因此认为妊娠期内分泌改变可能是发病的原因之一。

吐出的管状物病理切片观察为复层鳞状上皮，与正常食管粘膜上皮相同，剥脱的深度在棘细胞层与基底细胞层之间，部分病例可见纤维与白细胞浸润。

食管粘膜剥脱症多发生于进食不久，患者先有咽痛或咽喉部异物不适感，继而感胸前区发胀阻塞，咽食时胸部疼痛，并反复恶心、呕吐，吐出物初为进食的饭菜，然后为带血的食物残渣或新鲜血液，反复呕吐的结果会吐出白色半透明管状膜样组织，或悬于口腔或咽喉部，此时患者常惊慌失措，甚至将吐出物硬向外拉，造成食管更大损伤。患者一般体温正常，呼吸略速，神态不安。

对食管粘膜剥脱症的诊断，首先要问清病史，患者常主动告诉发病前进食情况，诸如饭菜粗硬、吞咽匆促或冷热酸辣刺激，也有主诉有异物梗阻等等。结合胸前区闷胀、钝痛、呕吐、吐血等症状，诊断不难；检查口腔、咽喉时应清除呕吐物及分泌物，必要时先喷雾3次1%丁卡因，发现灰白色条索状膜样物时多可确诊。食管X线检查诊断意义不大，纤维食管镜检查可排除异物可能，并可观察食管粘膜上皮剥脱情况。如发现剥脱的粘膜尚有部分粘连，不应粗暴撕拉，可用剪刀在粘连处剪断取出，这样可以减少因刺激引起的恶心呕吐。

食管粘膜剥脱症主要是以粘膜上皮下水肿开始，故仅为粘膜上皮的剥脱，不但肌肉并未损伤，即使粘膜的固有层亦存在，而粘膜上皮会很快生长愈合，愈后并无疤痕形成，也不致发生食管疤痕性狭窄。

治疗食管剥脱症的原则是保护创面，减少刺激，防止感染。因而认为发病后应予禁食，并输液2~3d，以后进流质饮食。为了保护创面食管粘膜，每次进食前口服次碳酸铋0.5g，或加等量碘胺粉和乳酸钙，或吞无菌液体石蜡以减轻疼痛，并防止食管粘膜粘连和摩擦，对情绪紧张者给适量镇静剂，有感染发热时注射抗生索。

**参考文献**

- 1 徐荫祥. 中国医学百科全书耳鼻咽喉科学. 上海:上海科技出版社,1930.226
- 2 程祖龙. 耳鼻咽喉科病案100例. 北京:北京人民卫生出版社,1983.151~153
- 3 徐荫祥. 耳鼻咽喉科全书气管食管学. 上海:上海科技出版社,1984.181
- 4 蒋耀光. 食管疾病. 重庆:重庆出版社,1988.89~91

(上海市中西医结合医院周君琪主任医师撰)

**食管憩室** oesophageal cliverticulum 部分咽食管壁向外

凸出形成疝气状盲袋，称谓食管憩室，典型发生的位置有3处：位于食管上端与咽喉连接处的称咽—食管憩室，又称Zenker氏憩室；位于食管中段的称胸部食管憩室；在食管下段相当横膈上面的称膈上食管憩室。

引起食管憩室的原因甚多，并多数由几种因素复合而成。

(1)解剖上薄弱点：在食管上端，咽喉部没壁，相当于环状软骨下缘水平，有一先天解剖薄弱部位，称Kilian氏三角，此角系由下咽缩肌的上斜肌和环咽肌交叉形成，此处食管纵行肌肉在其外侧经过，因此该三角内缺乏肌肉组织，故有粘膜层遮盖，是咽食管憩室最好发之处。(2)肌肉行动失调：食道括约肌过于紧张、痉挛、不及时开放使吞咽时受到较强压力，从而形成憩室。Dohlman等认为随年龄增长环咽肌与椎前肌膜的固定松弛，导致该肌不能放松。(3)神经支配失调：认为下咽缩肌和环咽肌受不同的神经支配，因此易发生肌肉运动的不相协调。(4)管腔阻塞狭窄：食管某段若有品质性阻塞、狭窄，食物不易通过，因此狭窄上部必然内压增高，日久形成憩室。(5)管腔内压增加：不论何种原因导致管腔内压增加，必然引起解剖薄弱部位产生憩室。Cross等认为食管下段痉挛可造成中段功能性阻塞，上段食管蠕动增强，导致憩室发生。(6)食管动力学异常：胸部食管憩室患者，食管动力学检查常可发现上段或下段食管收缩期延长，振幅增大等变化，其原因尚不清楚。(7)食管周围组织病变：例如纵膈淋巴结疤痕收缩和牵引形成憩室，此外心包炎或脊椎结核，波及食管也是引起牵引性憩室的原因。(8)其他：进食太快、咀嚼不足或下咽部炎症等均可成为致病因素。Spark曾报告一家数口发生憩室，认为遗传因素也不可忽视。

食管憩室的症状随发生的部位而有所不同。(1)咽食管憩室。

咽—食管憩室多发生于成年人，老年人更常见，3/4为男性病例，憩室多发生于咽喉部没壁的Kilian反薄弱三角处，是内压性憩室。咽—食管憩室由复层鳞状上皮和粘膜下层纤维组织组成，抵在憩室颈部有部分肌纤维。憩室均为单发性，呈袋状，大小不一，室内因食物滞留而并发感染，引起炎症或溃疡。咽食管憩室发展很慢，早期仅有咽喉部不适感和咽分泌物增多。较大憩室饮食时有物进入感，常反吐食物。吞咽时有气过水声，平卧时常吐出粘液或未消化食物，大憩室充满食物时可压迫食管和气管，出现吞咽困难或呼吸困难。(2)胸部食管憩室。胸部食管憩室由于病因不同而表现为3种形式：①先天性憩室。较为少见，发生于食管的中部或下部，此种病例常并无食管功能异常。Beleey认为事实上是与食管腔相通的胃肠源性牵缩或重复性原肠。有人报导2例在隆突水平下憩室，有纤维带与气管相连，认为此种纤维带附着的憩室可能是先天性的，由于胚胎发育期中分离不完全造成。②牵引性憩室。胸部食管憩室多数为牵引性的，其发生机理仍不完全清楚，一般认为多因气管、支气管或支气管旁淋巴结急性或慢性炎症之后，特别是淋巴结结核，由于炎症粘连的疤痕收缩将食管壁牵出形成，但在尸解中少数病例并未发现食管腔内或食管周围有粘连性病变，因此认为食管动力学紊乱在牵引性憩室发病中可能是有关的。③内压性憩室。由于食管某处阻塞性狭窄，在其上部内压增强，以致形成憩室。胸部食管憩室多数为牵引性，憩室都在肺门支气管分叉部，大多为单发性，也可有多发性，憩室一般较小，呈漏斗状，不超过2cm，向食管左侧或前面膨出。

它具有完全的肌层,口大底小,故一般均无食物贮留,因此很少有症状,或仅有消化不良和胸内胀满感。憩室较大者可以压迫周围组织,出现胸骨后疼痛或吞咽困难。(3)膈上食管憩室。膈上食管憩室较为少见,患者均伴裂孔疝及食管返流。食管返流造成食管肌肉痉挛、运动功能失调,使腔内压力增高引起,故多为内压性憩室。憩室多位于食管末端,膈肌上方,呈囊状,不含肌层,开口在食管的后侧壁,右侧多于左侧。憩室内可长期贮留食物,由此引起室内炎症、溃疡。憩室小者,症状不明显或仅有闷胀感,较大憩室可引起压迫性症状,可有胸骨下、上腹部疼痛,吞咽困难,反胃、呕吐,有时有慢性咳嗽或伴有口臭,夜间平卧时有大量内容物流至口内,是此病的特征。

对食管憩室的可疑患者,应详细询问下列症状,诸如左侧下颈进食饱胀隆起,吞咽时有气过水声及食物进入卡内感,食后胸内闷胀,甚至吞咽困难,经常反吐出未经消化的或有气味的食物,夜间平卧时不断吐出涎液等等。

诊断食管憩室最简单的方法是吞钡 X 线检查,钡剂进入憩室后立即显示囊腔,可明确其大小、位置、形态,既方便,也安全。食管镜检查对诊断意义不大,且有一定危险。尤其是硬质食管镜尖端进入憩室,可能导致穿孔。除非疑有其他病变时小心使用导光纤食管镜检查,如果发现开口隐蔽的憩室,同时可看清憩室内有否炎症、溃疡或癌变等情况。食管运动功能检查对诊断憩室并不重要,但可测定括约肌压力及协调功能。

小的食管憩室症状轻微,可采取姑息治疗,每次进食后根据憩室的位置采取相应卧位,使室内物自然流出,或嘱饮用碳酸氢钠液冲洗,以减轻症状。对大的食管憩室,症状明显,病人身体情况良好者,应进行手术治疗。

手术治疗以往采用憩室翻入缝埋法,分期手术法等,由于目前应用抗生素配合手术治疗,术后感染可能性大大减少,故多主张一期手术切除,将憩室切除,缝合修补缺损食管壁。术后注射抗生素,术后并发症、死亡率极低。单纯切除憩室的复发率甚高,咽一食管憩室者应同时作环咽肌切开手术,以纠正食管动力障碍,同样理由对膈上憩室切除应对裂孔疝同时进行修补手术,以控制食管返流,抑制肌肉痉挛,改善运动功能,防止再发。

#### 参考文献

- 1 徐荫祥. 中国医学百科全书耳鼻喉科学. 食管憩室. 上海: 上海科技出版社, 1980
- 2 徐荫祥. 气管食管学. 食管憩室. 上海: 上海科技出版社, 1984
- 3 蒋耀光. 食管疾病. 食管憩室. 重庆: 重庆出版社, 1988
- 4 蔡文瀚译. 食管外科. 食管憩室. 北京: 人民军医出版社, 1989  
(上海市虹口区中心医院周君琪撰)

**消化道内镜** 内镜已有 100 多年的历史。随着光源、导光材料、照相技术的进步以及电子工业的发展,使内镜的发展速度加快。内镜的发展大致可分为 4 个时期,即古老的硬式胃镜、半可曲式胃镜、纤维光导胃镜、电子和超声胃镜。

1868 年,德国 Kussmaul 创制了第 1 台硬式食管胃镜。1932 年, Wolf 和 Schindler 在前人不断改进的胃镜的基础上共同研制成一种半可曲式胃镜,它由近端的硬性部件和远端的软管部件组成。1940 年, Kenamov 在半可曲式胃镜表面贴附管道以进行活组织钳取。10 年后,日本在此基础上制作了胃内可摄像的胃镜,从此胃镜具备了多种功能。1975 年, Hirschowitz 利用玻璃纤维导光进入纤维光学新时期。随着科学的发展,纤维内镜也在不断改进和发展,并日趋完善。尤其 70 年代以来,在品种和质量方面取得更大发展。如品种方面,有观察整个上消化道的全能胃镜,还有食道镜、十二指肠镜、子母镜、小肠镜、结肠镜、乙结肠镜、双孔手术镜等;在质量上均能达到广角视野及大弯曲度,基本上消灭了观察盲区,而且在送水、送气、吸引、摄像方面实现了自动化,为适应治疗需要,还配备了各种手术器械;在光学方面主要减少了单位纤维的直径,增加了单位面积的信息量,提高了解像能力,达到插入部的管径“细径化”,操作部“轻量化”,为满足治疗

和机能检查的需要,内镜管道由单孔到双孔,孔径由小到大。

随着科技发展进入电子信息年代,系列电视图像显示仪、电子内镜、超声内镜相继应运而生,尤其是电子内镜的问世,取消了纤维光导传像,代之以 CCD 光敏感集成电路摄像系统,完全改变了内镜的本质。此型内镜影像质量好、图像清晰、光亮度强、能动态录像。超声内镜是 80 年代初发展起来的一种新技术,是以微型超声探头安装在内镜顶端的一种新型内镜,它既可以观察消化道粘膜病变,又可通过超声扫描了解各层胃壁改变、病变深度、与周围脏器的关系以及淋巴结探测;对胰腺、总胆管末端、胆囊病变探查,比体表超声扫描更为清晰,解决了目前临床上尚无其他方法能解决的深部探查问题。目前使用的超声内镜有线性阵式的和扇形扫描的两种类型,各具特点。然而,它也存在有待改进和完善的地方,如视野小、镜身粗、探头活动范围小等。系列图像显示仪是在纤维内镜镜头上安装电视录像系统,它既可目视,又可在荧光屏上观察。电子胃镜、超声胃镜及系列图像显示仪彻底改变了内镜只能供一人观察、用目视的传统“内窥镜”模式,更适应教学科研的需要。

中国在 1966 年开始研制纤维内镜,1973 年生产第一代国产纤维胃镜。此后,相继生产出专用食管镜、胃镜、结肠镜、双孔道内镜及彩色电视传像系统等多种规格内镜,国产内镜尤其是胃镜已普及到县、区级医院,甚至乡一级医院。

展望未来,超声内镜、电子内镜将有更大的发展和普及应用价值,最终将超过普通纤维胃镜的应用。期待不久的将来国产电子内镜、超声内镜的诞生。

对于以往使用“内窥镜”、“内视镜”、“内腔镜”等名称,很不统一,随着新型内镜不断开发,已生产不用“窥”的电子、超声等内镜,从单纯的“窥”发展到治疗、功能检查。因此,中华医学会消化学会、中华消化杂志编委会建议一律使用“内镜”一词。

上消化道内镜在临床上主要用于诊断、治疗和功能检查 3 个方面。

诊断方面,通过胃镜观察空腹胃的粘膜变化及各种病变;或者用美蓝、刚果红等使粘膜进行着色,然后根据粘膜着色程度的不同,取异常着色粘膜进行组织检查,提高粘膜不同病变的诊断率,其中尤其是胃的小癌、早癌的诊断率得到了大幅度提高,并解决了临床上用 X 线检查难以发现的病变的诊断问题,如出血性胃炎、食道贲门撕裂症、胆汁反流性胃炎、幽门螺旋菌的检测等,只有通过胃镜检查才能得以确诊。对于胃癌的诊断,主要是要研究通过胃镜检查如何提高对小胃癌、早癌、微小胃癌、一点癌的检测率。超声胃镜的应用更提高了对胃癌与周围组织脏器关系的识别,增进了对周围淋巴结肿大情况的了解,为胃癌、食管癌的手术切除可能性提供依据,对胆囊隆起病变具有鉴别诊断的可靠性。胃镜随访是防癌的一项重要检查手段,慢性萎缩性胃炎、胃溃疡、胃息肉、残胃炎以及胃粘膜重度不典型增生等与胃癌的发生有一定关系,对这类病例可结合免疫组化,通过胃镜检查作长期随访。

治疗方面,通过内镜进行各种治疗,使患者免于剖腹痛苦,是当前内镜工作的主要任务之一,也是今后研究和开发新疗法的主要方向。上消化道出血内镜用高频电凝、激光、微波、局部喷洒中西药液以及局部注射无水乙醇、肾上腺素、高渗盐水混合液(L-HS-E)等治疗方法已普遍开展,并取得明显效果。治疗食道静脉曲张硬化止血是当前较理想的非手术治疗方法,而且可重复进行。硬化剂除常用的 5% 鱼肝油酸钠外,中国有报道用改良的中药硬化剂“消痔灵”治疗食道静脉曲张取得一定疗效。内镜下息肉摘除已基本代替了手术治疗,目前应用的主要有高频电凝电切、微波、激光、无水酒精注射等。治疗各种原因引起的食道贲门狭窄的,国内外均已开展,通过高频气化、激光气化和 HPD 光敏、气囊扩张等方法使狭窄部位取得再通效果。摘除胃内异物国内已普遍推广应用,并创制了多种小巧器械,提高了异物摘除的成功率。值得重视的是对不宜手术的中晚期胃癌者,经内镜注射抗癌药物取得了近期疗效,为治疗中晚期胃癌开辟了新的途径。良性肿瘤经内镜摘除国内已有成功报道,如平滑肌瘤、纤维瘤、脂

脂肪等。

功能检查:胃肠道功能障碍性疾病国内并不少见,且呈上升趋势,近年来通过内镜作胃功能检查,明确了一些因胃功能异常而导致的疾病,如提出了非溃疡性消化不良的临床概念,给临床诊断、治疗开创了新局面。经内镜穿刺电极描记胃基本电节律改变,认为胃电异常是一种与粘膜病变有区别的特定病变,称“胃电异常综合征”,其他如内镜下胃肌电图描记,食管内压测定、幽门前区测压等均有一定的诊断价值。

应用于上消化道检查的内镜还有胆道镜、十二指肠镜和腹腔镜,临床应用于胆胰系统检查。硬质胆道镜由于质硬,操作不方便,且只能用于手术中,因而将被淘汰,为纤维胆道镜所取代。胆道镜的最大优点就是能直视病变、鉴别病变。十二指肠镜主要应用于逆行胰胆管造影(ERCP)、乳头切开取石、内镜下Oddi括约肌压力测定。胆道镜与十二指肠镜的应用无疑能使胆道、胰腺的诊断率得到大幅度提高,是其他影像学检查,如CT、B超、X线胆道造影等不能与之相比的。Oddi括约肌压力测定结果表明,胆系结石和胆囊切除术后患者均有Oddi括约肌功能紊乱。胆囊压力测定结果提示,当胆道压力超过2.4kPa时,胆汁细菌将胆道逆流到血液,造成菌血症。这些研究结果为胆石形成、胆囊切除后右上腹痛以及胆道感染并发败血症等疾病提供了理论基础。胆道镜在外科治疗方面已取得重大进展,开创了胆道外科新局面。

腹腔镜过去主要用于诊断,自从光导纤维腹腔镜问世以来,其应用已不再限于诊断,更多的是应用于治疗。如腹腔镜下胆囊切除术,是80年代末兴起的一项新疗法,曾风靡欧美,被誉为是腹部外科发展史上的一个新的里程碑。近年来,中国已有云南等地相继应用,并取得了成功,它具有切口创伤小、痛苦轻、术后并发症少、住院时间短、恢复快等优点。腹腔镜胆囊切除术的成功,将带动一大批腹部手术的改进。超声波与腹腔镜的结合,将给腹部疾病的诊断、治疗带来无限广阔的前景。

下消化道内镜有小肠镜、结肠镜(电子、纤维)等。目前中国仅有少数医院拥有小肠镜,且使用率极低,这可能与小肠部位疾病发病率低、纤维操作技术要求高掌握较难有关。临床普遍使用的结肠镜为最简便的硬式Hirschmann内镜。光导纤维在硬管式乙状结肠镜的应用,代替了普通光源,使内镜亮度及清晰度明显提高。虽然该镜的观察深度仅限于结肠、乙结肠,但它能观察到结肠病易发肠段,故仍受临床医师的欢迎。纤维结肠镜有短、中、长等不同规格,除短型的不能达到回盲部外,其余均能达到回盲部,甚至进入末端回肠,具有与纤维胃镜同样的功能,即治疗、诊断的功能。

从内镜单纯用于诊断到向多功能转变和发展,在临床上虽已取得显著效果,尤其在治疗及功能测定方面,但仍然有许多项目尚待开发和改进。总之,内镜的发展前景宽广。

#### 参考文献

- 1 周岱云,等.上消化道纤维内镜临床应用.上海:上海科技出版社,1982.1
- 2 周岱云.中华消化杂志,1988,8(2):63
- 3 周殿元.中华消化杂志,1988,8(2):64
- 4 张齐联,等.中华消化杂志,1989,9(2):214
- 5 曹忠铭,等.中华消化杂志,1989,9(4):204
- 6 莫剑忠,等.中华消化杂志,1990,10(2):90
- 7 于皆云,等.中华消化杂志,1990,10(2):106
- 8 吉本英夫,等.中华外科杂志,1991,29(4):217
- 9 王秋生,等.中华外科杂志,1992,30(2):71

(安徽医科大学附属一院陈慎实教授撰)

**消化性溃疡治疗的进展** the advance in futment of peptic ulcer 消化性溃疡为人类常见病、多发病,分布于全世界。据统计,人口中约10%患过消化性溃疡。从发现消化性溃疡到现在已近200年,其病因、发病机理较为复杂,多年来虽作了大量研究工作,但未能完全阐明。近年来的共同认识,消化性溃疡的

直接发病机理是粘膜局部损害与粘膜保护因素之间不平衡所致。粘膜损害因素主要包括胃酸、胃蛋白酶的消化作用、某些药物和酒精的作用以及幽门螺旋杆菌的破坏等。保护因素主要是粘膜屏障、粘膜血流、前列腺素、碳酸氢盐分泌等。目前对消化性溃疡的治疗都着眼于减少粘膜局部损害或加强粘膜的保护因素,而粘膜局部损害研究较多的是抑制胃酸的分泌。60年代壁细胞上皮H<sub>2</sub>受体的发现以及70年代组织胺H<sub>2</sub>受体拮抗剂的问世,使消化性溃疡的治疗学发生了一次飞跃。拮抗剂的临床使用,明显地降低了消化性溃疡并发症的发生率及外科手术应用率,继甲氧咪呱之后,又有抑酸力更强的第2代雷尼替丁。新合成的第3代法莫替丁,作用更强而持久,每日服40mg可获得疗效。H<sub>2</sub>受体拮抗剂对24h胃酸分泌的抑制率还不很高,要延长H<sub>2</sub>受体拮抗剂的疗程才能提高溃疡的愈合率。不久将来H<sub>3</sub>受体拮抗剂的出现可能使疗效得到提高。80年代胃酸泵抑制剂奥美拉唑(omeprazole,商品名洛赛克 Losec)问世。临床用于治疗十二指肠球部溃疡,它选择性地抑制壁细胞膜中H<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶,阻断酸分泌最终步骤,产生显著的抑酸分泌作用。口服OME后一般在1~3h达到血浆峰浓度,在血浆中清除半衰期一般在1h内,OME主要在肝脏代谢,当肝功能受损害时,OME的血浆清除半衰期延长。OME为弱碱,口服20mg,24h后仅1/3H<sup>+</sup>K<sup>+</sup>-ATP酶在壁细胞内再合成而恢复其分泌功能,故OME抑制酸分泌作用持久。常用的H<sub>2</sub>受体拮抗剂西咪替丁、雷尼替丁有强人的抑制胃酸分泌作用,但抑酸过程中同时降低胃粘膜血流量GMBF,OME在治疗过程中使胃腔内酸度降低,刺激胃窦G细胞释放大量胃泌素,故服OME的患者血清胃泌素均有升高,血清胃泌素升高可增加胃粘膜血流量GMBF。一些对H<sub>2</sub>受体拮抗剂有耐药性的患者,应用OME后有好的抗溃疡作用可能与此有关。在动物试验中长期用药后引起高胃泌素血症,使胃的嗜铬细胞增生和类癌形成。Brunner等报告339例长期用Losec每日40mg维持治疗1~4年未见副作用。大部分报道用Losec无副作用。洛赛克临床治疗协作组报道不良反应发生率为5.5%且均轻微。

上海、北京等地17家医院按统一方案,用洛赛克每日口服20mg治疗消化性溃疡924例,十二指肠溃疡4周愈合率为97.8%,胃溃疡8周愈合率为97.7%,结果基本上可反映洛赛克对我国消化性溃疡患者的疗效,较过去用的H<sub>2</sub>受体拮抗剂西咪替丁、雷尼替丁、法莫替丁(4~6周愈合率平均未超过85%)的疗效为高,愈合率不受吸烟、饮酒及溃疡大小的影响。

1982年,Warrn和Marshall首先报道在慢性活动性胃炎患者的胃窦粘膜活检标本中分离培养出幽门螺旋菌(Helicobacter Pylori HP),引起国外学者的关注。1985年,中国开始这方面的研究资料,越来越多的研究证明,幽门螺旋菌是慢性胃炎尤其是活动性慢性胃炎常见的致病菌,也是胃和十二指肠溃疡的致病因素,此菌在胃内的检出率达80%以上,因为HP可依靠鞭毛与胃粘膜表面的不溶性粘液层发生亲和性吸附作用,并依靠其菌体表面毛样网状结构与胃粘膜上皮细胞表面紧密相连,比较稳定地固定在粘膜上皮的局部,因此,HP与胃粘膜之间有特殊的粘附现象。HP随食物进入胃以后,首先利用其特征性的菌体如鞭毛结构穿过胃粘膜层,依靠其菌体表面毛样网状结构稳定地定居于胃粘液下和胃粘膜表面上皮之间,HP在胃粘膜定居后呈克隆生长,产生脂多糖、细胞毒素和多种酶类物质,导致炎性细胞浸润、细胞变性坏死等胃粘膜炎性改变和胃溃疡。胃粘膜的损伤主要是由炎症反应造成,经抗菌治疗如给予铋剂等,HP感染被清除,炎症反应消失,粘膜结构可恢复正常。胶态次枸橼酸铋CBS商品名DeNol,已有近20年的使用历史,最近几年受到临床界重视。CBS不仅具有与H<sub>2</sub>受体拮抗剂相仿的近期愈合率,而且近期复发率比后者为低,CBS治疗的远期复发率较低与其对HP的杀灭作用有关。在众多胃药中,CBS是唯一能杀灭这种细菌的药物,杀菌机理还不清楚,经CBS治疗者溃疡复发率低可能与铋剂蓄积有关,在停药后一段时间体内仍有铋剂残留。新的观点认为,溃疡的复发率与HP有关。单用CBS治疗,尚不能完全根除



HP,停药后,HP往往再次出现。与抗生素合用可提高根除率,主张与四环素、甲硝咪唑3种药物联合应用。有效的抗菌治疗可能改变溃疡病的自然病程,根除HP是防止溃疡复发的主要措施,HP根除后十二指肠溃疡复发率为23%,而HP残留者复发率高达73%。CBS的治疗剂量一般为120mg,每日4次,餐后半小时服,晚餐后加服1次;或剂量为240mg,每日2次,早餐和晚餐前半小时服,4~8周为一疗程。第9届胃肠病大会工作组推荐两三联疗法:CBS120mg,每日4次,甲硝咪唑400mg,每日3次,盐酸四环素500mg,每日4次,但副作用大,部分菌株对甲硝咪唑耐药。CBS常规剂量是安全的,但严重肾功能损害者禁用,不提倡孕妇使用该药;少数病人有一过性便秘,SGPT增高,不影响治疗。

保护胃粘膜的药除粘膜覆盖剂外,其他如前列腺素,在消化性溃疡的治疗中仍占重要地位。前列腺素E(PGE<sub>2</sub>)及其衍生物恩前列腺素(Cenprostil)具有明显的抑制胃酸分泌和保护粘膜作用,用于治疗十二指肠溃疡、胃溃疡和减轻胃十二指肠损伤因子的作用显著,副作用少。

呋喃唑酮(Furazolidine F<sub>2</sub>)是一种具有广谱抗菌效能的抗生素,主要治疗革兰氏阳性杆菌感染。F<sub>2</sub>治疗溃疡病始见于《山东医药》(1972;5:68),后《天津医药》(1976;4:44)及《中华内科杂志》(1977;2:380)均有报道。经临床和实验发现,F<sub>2</sub>不但具有良好的近期溃疡愈合作用,而且还有较好的远期疗效,呋喃唑酮是疗效短、复发率低、价廉的国产药物,但必需严格掌握疗程和剂量。0.2g每日3次,不宜超过2周。0.1g每日3次,不宜超过3周。有报道说,F<sub>2</sub>每日0.3g服用1个月(总剂量9g)发生周围神经炎者达5%以上,老年人对F<sub>2</sub>耐受性差,要慎重使用。

目前治疗消化性溃疡,无论采用减少损伤因子或加强保护因子药物,近期都可取得满意疗效。但对于减少复发或防止复发仍是重要研究课题,为防止复发,有不少报道说采用H<sub>2</sub>受体拮抗剂进行长期维持治疗,用药期间可使大部分患者溃疡病不复发,但一旦停药仍不免复发。英国MecloyR提出,如消化性溃疡者一年发作3次以上可考虑采用长期维持治疗。但究竟哪些只需间断治疗,哪些需服抗生素,还需要进一步探索。

#### 参考文献

- 1 郑芝田,等.中华消化杂志,1982,2:131
- 2 Zeng Z T, et al. Double-blind Short-term trial of furazolidone in peptic ulcer Lancet, 1985, 1:1048
- 3 Brunner G, et al. Digestion, 1988, 3:80
- 4 Gavey C J, et al. Gut, 1988, 29, A 1495
- 5 Oleb I, et al. Scand J Gastroenterol. 1989, 166:27
- 6 Wallmarh B. Scand J Gastroenterol. 1989, 24(166):12
- 7 Sachs G, et al. Oxford Clinical Communication, 1990, 31
- 8 洛塞克. 临床治疗协作组, 中华消化杂志, 1991, 11:252
- 9 段芳龄. 中华消化杂志, 1991, 11:65
- 10 江绍基. 中华消化杂志, 1991, 11:249

(安徽医科大学第一附属医院浦琪教授、吴庆彬讲师撰)

**慢性胃炎** 临床最常见的胃部疾病,症状顽固,反复迁延,复发率高,其中慢性浅表性胃炎的胃镜检出率高达68.35%,慢性萎缩性胃炎达21.2%。对如此高发率的常见病,如何明确病因、进行正确的分类、了解其临床转归,尤其是癌变问题及进行有效治疗和预防等一系列问题,一直是消化专业的中心课题,也是医学领域各相关学科研究的热点。

由于多年来在认识上一直存在着分歧,因而目前对胃炎的分类比较紊乱。如:(1)根据病因分类,分为“药物性胃炎”、“酒精性胃炎”等。(2)根据胃酸分泌状况分类,分为高酸性胃炎或低酸性胃炎。(3)根据部位分类,分为“胃窦胃炎”、“胃体胃炎”等。(4)根据形态学变化分类,分为“浅表性胃炎”、“萎缩性胃炎”等。由于这些分类方法都仅从某一个侧面理解本病,未能从形态、功能、部位、病因等方面综合反应本病病变,对指导临床治疗和预防

意义较小,因而相继演变出下列形态学分类:(1)Schindler分类法将原发性胃炎(特发性)分为浅表性的、萎缩性的、增生性的、肥厚性的;将继发性胃炎分为:肿瘤、溃疡病、胆道感染、手术后胃炎等。因其分类简单明了,曾受到广泛承认,为中国教科书采用。但这种分类与手术后病理切片或粘膜活检结果不尽符合。继纤维内镜问世、直视下活检等检查手段的开展,以及对胃炎进行更仔细深入研究,从而产生新的认识,将胃炎分为“慢性浅表性胃炎”、“慢性萎缩性胃炎”、“慢性肥厚性胃炎”。对于后者是否存在?或由于活组织钳大小不能发现,目前还存在分歧意见。(2)Whitehead新分类法,于1972年提出按综合病变部位、病变程度、肠化状况等进行分类,即部位:幽门部、胃体部、贲门部、交界处、未定部;程度:浅表性、萎缩性,并以静止或急性活动、慢性活动表示,同时把萎缩性胃炎分为轻、中、重3种,并表示出化生类型和程度。(3)Strickland分类法,结合免疫状态和病变在胃内分布将萎缩性胃炎分为“A”型胃体胃炎和“B”型胃窦胃炎。前者与自身免疫有关,壁细胞抗体阳性,胃体部呈弥漫性分布,可发生恶性贫血。后者为一种单纯性萎缩性胃炎,发生在胃窦部,呈灶性分布,与免疫无关。

1978年,中国纤维内镜检查交流会制订的试行方案分为:(1)慢性浅表性胃炎,包括单纯型的、糜烂型的、出血型的。(2)慢性萎缩性胃炎,有轻、中、重度之分。(3)慢性浅表-萎缩性胃炎和萎缩-浅表性胃炎,前者以浅表为主,后者以萎缩为主。(4)肥厚性胃炎,近年多数学者未予认可。

“胆汁反流性胃炎”或“碱性胃炎”系一临床名词。近年来,胆汁反流作为致病因素,颇受学者们重视,大量研究资料表明,胃液中有反流的十二指肠液反流存在,一般并不引起炎症,当含有过多胆汁酸及游离胆酸时,即发生胆汁反流性胃炎。悉尼新分类确认内镜下胆汁反流性胃炎的存在。

1990年第9届世界胃肠病学大会讨论提出新分类法。胃炎新分类由组织学和内镜两部分组成,组织学以病变部位为核心,确定了3种基本诊断:(1)急性胃炎;(2)慢性胃炎;(3)特殊类型胃炎。加上前缀病因学诊断和后缀状态学描述,并对肠化、炎症、萎缩、活动性和幽门螺旋菌(*Helicobacter pylori*, HP)感染,分别给以程度分级。内镜下胃炎诊断:(1)红斑渗出性胃炎;(2)平坦糜烂性胃炎;(3)隆起糜烂性胃炎;(4)萎缩性胃炎;(5)出血性胃炎;(6)反流性胃炎;(7)皱裂增生性胃炎。新分类法的特点是把胃炎病因或相关性病原归纳入诊断,加上病变部位、组织学变化和胃镜所见,使诊断更为全面,摒弃了浅表性胃炎和萎缩性胃炎术语,把腺体萎缩只看作慢性胃炎的一种病理形态表现,加上新的研究成果HP感染导致胃炎。悉尼新分类法是否会给中国当前所应用的胃炎分类与习惯用法带来混乱,应予以考虑。

胃炎的病因,一直无明确定论,认为与多种因素有关。如急性胃炎演变、慢性酒精中毒、菸草素、慢性咽喉感染性、免疫因素……等10多种因素。自从Marshall于1982年从胃炎患者胃粘膜中分离出幽门螺旋菌HP以来,现已基本肯定它与慢性胃炎发病有关,中国属于HP感染率较高的国家,因此HP是造成慢性胃炎高发的重要原因。HP感染的致病机制:HP进入胃内即向粘液层附着,从而吸收养料和破坏胃粘膜,并分泌酶类和毒素,而损害上皮细胞。它产生的酶有尿素酶、过氧化氢酶、脂肪酶、磷脂酶、蛋白水解酶,毒素有细胞空泡毒素、壁细胞毒素等,均可损伤胃上皮细胞。尿素酶产生氨,阻断细胞ATP,使壁细胞失效,胃酸分泌减少。HP抗原能激发免疫反应,局部细胞免疫应答,造成免疫性组织损伤,终于导致胃粘膜炎症改变。检查HP目前有很多方法,有细菌培养、活检标本切片染色、尿素酶和C<sub>14</sub>呼吸试验等。活检组织切片和尿素酶试验是简单和准确性较高的方法,易于推广。在研究幽门螺旋菌的同时发现胃内存在与HP不同的另一种病原菌,并认为可能是引起慢性活动性胃炎的另一种病原菌。

由于其发病因素不完全清楚,因此,治疗也仅是对症为主,采取去除已明确的病因、促使胃排空、保护胃粘膜、纠正植物神经

紊乱等措施。自从发现胃粘膜 HP 感染,抗感染便成为治疗胃炎的必需手段。目前清除 HP 比较理想的药物首推胶性铋(CBS)和次水杨酸铋(BSS),其他抗菌药物其清除效果各家报道不一致,如痢特灵、甲硝唑、四环素、强力霉素、庆大霉素等。国外有人主张 2~3 种抗菌药联合应用以提高清除 HP 效率。以铋为基础加用抗生素、甲硝唑三联疗法,服药 2~4 周疗效提高到 80%,但副作用大。由于 HP 附着粘液层,药物不易渗透,使各种抗菌药物疗效不够理想,根除 HP 甚为困难,停药后易于复发。

慢性胃炎预后及转归一直是各有关学科研究的重要课题。萎缩性胃炎存在可逆性已有报道。但是慢性胃炎癌变问题是当今胃粘膜临床与病理学研究的热点。一般认为慢性胃炎伴有异型增生或肠上皮化生被视为癌前病变,尤其是萎缩性胃炎,使人们对萎缩性胃炎存在一种恐惧感,其实许多学者通过回顾性研究和前瞻性研究认为胃粘膜上皮细胞癌变并非是由正常细胞一跃而变为癌细胞的,往往有相当长的演变过程。发展为恶性肿瘤之前,经常历经多年持续的癌前变化,即胃粘膜肠上皮化生(肠化)和异型增生,尤其是异型增生是重要的癌前病变,比胃粘膜肠化更具有癌前意义。新近研究资料表明,异型腺体囊性扩张亦具有癌前病变性质。胃粘膜上皮型增生分 3 级,其中以重度异型增生有较高癌变率,然而有资料表明不存在异型增生的胃粘膜仍然有发生癌变的,因此提示有其他与癌变有关的病变存在。胃粘膜肠上皮化生,采用粘液组化、酶组织化学和电镜技术,可将肠化分为完全的和不完全型的,小肠型的和结肠型的。含有大量硫酸粘液的完全型肠化(亦称 III 型, I b 型或结肠型)与胃癌关系密切。然而癌前病变的癌变率仍然很低,况且癌前疾病并非一跃而变为癌,只要对这类高危病例进行追踪、定期检查,使早期发现胃癌完全有可能,大可不必将萎缩性胃炎与胃癌联系在一起,给患者带来不必要的精神负担和恐惧。癌前病变的化学干预治疗、食物补钙等作为预防胃癌的措施已取得成效。

#### 参考文献

- 1 张朝坤,等. 协科讲座. 北京:人民卫生出版社,1981. 111~118
- 2 邹忠寿,等. 中华消化杂志,1989,(4):244
- 3 杨海涛,等. 中华消化杂志,1990,10(5):302
- 4 郑芝田. 实用内科杂志,1991,11(1):2
- 5 萧树东,等. 中华消化杂志,1991,1(1):227
- 6 萧树东,等. 中华消化杂志,1991,11(3):160
- 7 刘为政. 中华消化杂志,1992,12(1):20

(安徽医科大学附属医院陈诚实教授撰)

**上消化道出血的诊断** diagnosis of bleeding from upper gastrointestinal tract. 人体的消化道可大体分为上消化道和下消化道,上消化道包括食管、胃和十二指肠及其消化腺,这些部位的出血称为上消化道出血。出血的类型分为隐匿型的、柏油便型的和呕血型的。由于科学技术的进步,普及了纤维内镜技术、介入放射学、激光医学、核医学等新技术,可以在直视下观察上消化道出血的出血病灶及认定出血状态,病因诊断方面的准确性也是从前无法比拟的。甚至可开展紧急病因诊断,为选择最佳止血手术方法提供依据,使手术死亡率和非手术死亡率逐年明显下降。近 10 年诊断率的提高使治愈率发生了根本的变化。为此必须先了解上消化道出血的原因和再进一步了解诊断方法的进展。有关上消化道出血原因详见表 1。

由于内窥镜等检查新技术的广泛应用,上消化道出血的发病比例亦在不断发生变化,目前发病率的顺序为十二指肠球部溃疡、胃溃疡、胃炎、胃癌、门静脉高压症。世界不同地区以及检查手段的进步程度不同,发病率的病例次序也有所不同。

上消化道出血,尤其是大出血,患者发病率及死亡率均较高。即使隐匿性出血亦希望能尽快作出出血原因与部位的明确诊断。诊断方法概述如下:

表 1 上消化道出血的原因

|           |                     |
|-----------|---------------------|
| 炎症病变      | 消化性溃疡病,应激性溃疡        |
|           | 胰源性溃疡               |
|           | 食管炎                 |
|           | 胃炎                  |
|           | 胰腺炎                 |
|           | 急性出血、水肿性            |
|           | 外伤性                 |
|           | 慢性(包括有囊肿形成)         |
|           | 憩室炎                 |
| 机械性病变     | 食管裂孔疝               |
|           | 吞食异物                |
|           | 贲门粘膜撕裂综合征           |
|           | 胃粘膜脱垂               |
|           | 吻合口肠套叠              |
|           | 胆道出血                |
|           | 胃重复畸形               |
|           | 脾功能亢进               |
| 血管病变      | 食管静脉曲张              |
|           | 动脉瘤—主动脉瘤或脾动脉瘤       |
|           | 胃壁内小动脉瘤             |
|           | 血管瘤                 |
|           | 遗传性出血性毛细血管扩张症       |
|           | 动脉粥样斑引起的栓塞          |
|           | 动静脉畸形               |
| 全身性或系统性疾病 | 血质不调                |
|           | 胶原疾病                |
|           | 动脉周围炎               |
|           | 硬皮病                 |
|           | 淀粉样变性               |
|           | 结节病                 |
| 新生物       | 癌—食管,胃,胰,肝胆系统,十二指肠  |
|           | 息肉—单个,多个            |
|           | 皮肤粘膜色素沉着—胃肠道多发息肉综合征 |
|           | 平滑肌瘤及平滑肌肉瘤          |
|           | 类癌                  |
|           | 白血病                 |
|           | 肉瘤                  |

1. 既往出血原因的诊断。主要依靠询问病史、体征。例如:(1)消化道溃疡出血病人大部分有溃疡病史,出血前溃疡病症状加重,或右上腹有局限性压痛。(2)食道静脉曲张破裂出血的病人大多数有肝炎病史和肝脾肿大。出血后脾脏往往明显缩小。(3)出血性胃炎病人常有服用某些药物,如水杨酸类、皮质激素以及利血平、氯噻嗪和抗凝剂等病史;也有的发生于暴食、大量饮酒之后。(4)在大手术损伤、烧伤、严重感染等情况下发生的消化道出血多为应激性溃疡所致。(5)右上腹绞痛、发热和出现黄疸的上消化道出血者应考虑胆道出血的可能。(6)剧烈呕吐伴吐血病人可能是贲门粘膜撕裂综合征(Mallory—weiss 综合症)。(7)40 岁以上既往无胃病史的人逐渐或突然发生柏油便和吐血,早期不一定能触及上腹部有肿块,应想到胃癌的可能性大。特别是在消化道肿瘤高发区。(8)全身无局灶病变及体征时还应进一步检查有无血液系统疾病而引起上消化道出血。

2. 传统出血病灶的定位诊断。方法是吞白线方法。即吞下一条 150~200cm 长的白线,根据距口腔距离及染上血迹或伴黄疸加血迹来判断部位,但判定出血灶的性质与状态较困难。

3. X 线胃肠钡剂检查方法。此方法因阳性率不高,亦影响内镜检查和手术检查而近年来较少使用。

4. 急诊内镜检查。在作为手术前准备的条件下,此检查可能在内镜室进行,亦可在手术台上进行。上消化道出血后任何时间均可进行,并认为在有条件进行急诊手术的情况下越早则阳性率越高,越能提供精确的病因诊断,为及时制定确定的治疗方案提供可靠的依据。临床据此可以确定采取手术疗法或非手术疗法。目前内镜诊断符合率已达 80%~94%。如用全视型内镜或紫外

光线纤维内镜和红外光线纤维内镜检查,更能清晰显示局部病灶。因此,临床普及急诊内镜检查使上消化道出血原因及定位有明显提高,原因不明的出血比例则明显下降。临床医师认为急诊内镜检查,在纠正血容量不足及休克的情况下,对老年人和多脏器功能不全者,只要有代偿功能,一般也较安全,很少出现并发症。关键是通过急诊内镜检查及时找出原因,制定合理措施。特别是对已明确动脉正在出血的病人,确定部位,及时行急诊手术,效果很满意。亦可应用急诊内镜对上消化道出血的部分病人在检查的同时行局部止血治疗。因此,内镜检查对上消化道出血的诊断及治疗作出了划时代的贡献。

5. 血管造影。当胃肠道出血速度为0.5ml/min以上时,选择性血管造影是目前临床直接确定出血部位的方法之一。据吴恩惠报告,23例胃肠出血病人应用此法13例显示了出血部位和原因,阳性率大约60%左右。此法也适用于内镜和核医学检查不能确定出血部位者,可作为术前定位诊断检查方法。

6. 核医学检查。在胃肠出血速度大于0.5ml/min时,亦可应用核医学技术诊断上消化道出血,常用方法是 $^{99m}\text{Tc}$ -胶体或 $^{99m}\text{Tc}$ -红细胞作为示踪剂,可确定出血部位。

7. B超检查。对上消化道出血病人,只对拟诊为肝、胰、胆囊等脏器肿瘤病人采用,因其病灶约在2cm以上才易被发现,故目前世界上对消化道出血的诊断较少采用此法。只是对中晚期恶性肿瘤病人才行B超检查,以作为非手术疗法的依据和探查原发病灶大小、周围脏器及淋巴结转移情况,而后采取综合治疗措施。

8. CT及核磁共振(NMR)检查。在B超不能确定拟诊为肝、胰、胆囊等脏器肿瘤而引起的上消化道出血的病人才采用CT及NMR的其中一种方法或两种方法均用。而此两种方法对空腔脏器而非占位性病变更引起的消化道出血的原因诊断价值不大。

#### 参考文献

- 1 中华外科杂志,1979,17(4):298
- 2 过晋源,等. 胃肠病学,上海:科技出版社,1981. 97
- 3 考楠海. 实用外科杂志,1985. 5(3):162
- 4 仲剑平,等. 外科基础. 上海:科技出版社,1985. 225~228
- 5 刘浩,等. 核医学教程. 长春:吉林科技出版社,1987. 222
- 6 周形海,等. 消化系内镜治疗术. 北京:人民军医出版社,1989. 64~94
- 7 吴文静,等. 普外临床,1990,5(3):131
- 8 吴恩惠,等. 普外临床,1990,5(3):134
- 9 孟宪民,等. 实用外科杂志,1991,11(8~9):450~451

(安徽巢湖地区医院倪悦松主任医师撰)

### 上消化道出血治疗现状

bleeding of upper digestive and its present treatment condition 上消化道出血指的是Treitz韧带以上部位的消化道出血,包括间接来自肝、胆、胰的出血。它是临床常见的病症之一,患者有很高的病死率。传统的治疗方法是止血、抗休克、补充血容量及手术治疗。新近随着内镜、选择性血管造影术等新诊断技术的发展,不仅可直接诊断上消化道出血,而且在内镜下可作电凝、激光、硬化剂止血术;血管造影的同时可经导管注射血管收缩剂或栓塞剂,或气囊压迫止血,从而对上消化道出血又开辟了一条治疗新途径。

出血的原因与出血量的估计 引起上消化道出血的原因甚多,较常见的有胃溃疡、十二指肠溃疡、胃恶性肿瘤、胃炎、食管胃底曲张静脉破裂、胆道出血以及较少的Mallory-Weiss综合征等。溃疡病出血占上消化道出血病因的50%~60%,其中十二指肠溃疡占75%。其次是门脉高压症食管胃底曲张静脉破裂出血,约占20%;再次为出血性胃炎,占10%左右。目前临床发现胃癌出血并不少见,约4%。胆道出血报告不一,占1.8%~13%。肝内局限性感染、肝癌、肝血管瘤、肝外伤等均可导致肝内胆道出血。

及时、精确地作出出血量的估计,是决定治疗方案和选择治疗

措施的重要依据。按出血程度有隐性出血、显性出血及急性大出血之分。隐性出血表现为大便匿血反应阳性;显性出血常是慢性的、持续性的或反复出血,一般不引起血流动力学改变。急性大出血通常指的是一次失血量超过500ml或 $>1000\text{ml}/24\text{h}$ ,患者有面色苍白、口渴、尿少等症状。若血压下降,平卧时收缩压 $<12.0\text{kPa}$ 或较基础血压低25%,脉率 $>120$ 次/min,表示血容量至少丢失20%,约800~1000ml。有休克者,则血容量至少丢失1500ml。血红蛋白在出血早期可有浓缩现象,经输血纠正后与出血前比较,血红蛋白每下降10g/L约等于失血400ml。临床观察呕血还是便血取决于出血量和速度,出血部位的高低是次要的,呕血者较单纯便血者出血量大,黑便次数多且稀薄者,较便血次数少而大便成形者出血量大。门脉高压症曲张静脉破裂者以呕血为主,出血急,来势猛,出血量大,一次出血达500~1000ml,可致休克。胆道出血量较小,一次200~300ml,以便血为主,患者很少发生休克。溃疡病、胃癌等出血处于上述两者之间,一次量不超过500ml,可以呕血或便血,并发休克者较少。当大致明确出血原因和部位后,需有针对性地进一步检查,及时作出正确的诊断,有目的地采取有效的治疗措施。

当前的治疗现状 一般治疗:不论呕血还是便血,患者必须卧床休息,镇静;监测脉搏、血压、血红蛋白、血球压积、尿量以及出血等情况;建立输液通道抗休克,必要时作中心静脉压测定。若收缩压 $<12.0\text{kPa}$ ,脉率 $>120$ 次/min,血红蛋白 $<80\text{g/L}$ 应考虑输血,使血压能维持在13.3kPa,脉率 $<100$ 次/min。及时应用止血药物,局部可用冰盐水或去甲肾上腺素胃内灌注。对消化性溃疡还可用甲氧咪呱、生长抑制激素因子。食管胃底曲张静脉破裂出血者用垂体后叶素、心得安、三腔管气囊压迫止血。

经内镜治疗:(1)电凝止血,有单极、双极及多极电凝。1974年Blackwood首先研究了经纤维内镜电凝止血。其后,Papp直接将单极电极压在人体出血部位上,通过高频电流产生的热量使组织蛋白凝固而止血。Moore认为电凝止血的关键在于所用的能量、压力和持续时间。止血效果单极电凝较好,而双极电凝引起的组织损伤较少。电凝止血法对出血性胃炎、十二指肠溃疡出血、Mallory-Weiss综合征和吻合口溃疡出血均可止血,对较大血管的出血效果不够满意。(2)微波止血。微波具有致热效应,使血管和周围组织凝固。通过使组织坏死、小血管痉挛、管壁肿胀、管壁变狭、内皮细胞破坏导致凝固血栓形成达到止血目的。(3)电灼止血。Dennis于1979年作动物实验,Papp用于临床。应用单极电极靠近而不接触出血组织,通过放电电离空气发出电火花,使蛋白质受热凝固止血。此法较电凝止血更为表浅,更适用于粘膜出血,止血率为95%,无并发症。(4)激光止血。1974年美国首次在临床上应用激光止血获得成功。1975年Fruhorgen用氩激光止血,Rutgees用钕-钇铝石榴石(Nd:YAG)激光止血。当激光照射出血部位后,光子被组织吸收转为热能,局部温度升高,蛋白质凝固,血管收缩闭塞,使出血停止。对消化性溃疡出血的止血率为83%。出血血管直径 $>1\text{mm}$ 时不易止血。(5)硬化剂注射止血。用5%鱼肝油酸钠、5%乙醇胺、四溴酸钠等硬化剂,经内镜注射治疗食管曲张静脉破裂出血。这是一种安全有效、简便易行的止血方法,为进一步作门奇断流或分流手术创造条件。(6)铁磁合剂。1980年Smith等介绍了铁磁合剂在强大磁场下止血的治疗方法。用细筛选出铁粉后,置于加有外用凝血酶的水悬浮介质中组成铁磁合剂,经内镜导管注射止血,无毒性作用。(7)喷洒药物止血。有人用10% Monsell液喷洒在出血灶表面,使组织强烈收缩,有促进血栓形成和红细胞聚集作用,遇血即凝固止血。有用纤维蛋白酶生理盐水喷洒在出血灶上,可助血栓形成。也有用羧基氧化丙稀脂、聚氨酯、环氧酯等粘合剂用喷雾法涂于病灶止血者。

治疗性血管造影:(1)血管注射内血管加压素。对上消化道出血者,应用腹腔动脉造影的同时,持续滴入血管加压素止血。成功与否的重要因素决定于出血部位、程度和原因。当出血量为0.5~2.0ml/s或200ml/h时,可见造影剂从血管外溢,滴入

垂体后叶素、血管紧张素、去甲肾上腺素或麻黄素等,可使小动脉和毛细血管收缩,出血停止。对出血性胃炎、应激性溃疡、Mallory-Weiss 综合征,止血率达 77%~82%,对消化性溃疡的止血率仅 30%。(2)动脉栓塞止血。1972 年 Rösch 首先介绍选择性动脉栓塞技术,它既能暂时止血,使病人得以择期手术,也能永久性止血。常用的栓塞物有明胶海绵、氨基内稀酸丁脂、不锈钢丸、氧化纤维素等,适用于注入血管加压素失败、溃疡病或上消化道恶性肿瘤大出血、出血原因不明且不能立即手术治疗者。(3)经导管气囊止血。1977 年 Pevsner 报告了超选择性血管造影时,将小气囊推入出血的腹腔动脉分支,立即阻塞比较大的动脉,止血效果好。但随着侧支循环的建立,出血常可复发。(4)经皮肝穿冠状静脉栓塞止血。经皮肝穿导管插入冠状静脉,局部注入 2~5mm 大小明胶海绵小块使血管栓塞,对食管胃底静脉曲张出血,行一般治疗方法无效而又不能紧急外科手术的患者更为适用。

手术治疗:出血量过大或反复出血或癌性病灶出血等患者,不能以上述各种方法控制出血,应即时中转手术治疗。其治疗原则近几年来尚没有很大的变化。手术方法尚因术者的经验与习惯,以及疾病性质的不同而有所选择。(1)胃溃疡、十二指肠溃疡出血。指征:诊断明确,以往有出血史,近期内又反复出血者;住院系统治疗期间大出血者;非手术治疗出血停止后短期内再出血者;短期内出现休克者;年龄 50 岁以上者;合并急性穿孔及幽门梗阻者。手术方式:胃大部切除治疗溃疡病已有 50 余年的历史,国内仍以此法为主要术式。近几年来欧美多采用迷走神经切断加幽门成形及溃疡基底出血点缝扎术,且认为较胃大部切除术为优。后壁溃疡出血,常因溃疡穿透至胰腺,手术切除溃疡较困难,多采用缝合溃疡出血点加幽门旷置。胃癌出血按癌肿位置作根治性全胃切除或大部切除,或姑息性切除。(2)门脉高压症引起食管胃底曲张静脉破裂出血。应视肝功能及全身情况决定术式。常用的手术方法可归为 3 大类:全门体静脉分流术,包括门腔分流术、脾肾分流术、肠腔分流术;选择性区域性分流术,如远端脾肾静脉分流、井口括冠腔分流、脾肺固定术(特殊型门腔分流);门奇静脉断流术如单一断流术、联合断流术以及吻合器行断流术。国内外文献及经验表明,行各种分流术如能掌握适应症和有熟练操作技巧,都可取得一定的疗效。但近几年来断流术已有占优势的趋势。尤其在急性人出血的情况下,作门奇断流手术操作简便,即时止血较确切,对肝脏创伤小,不易导致脑病。从全面估计,断流术的暂时性疗效还是满意的,符合实际,能广泛开展,尤其基层医疗单位更为适合。(3)胆道出血。一般出血量不大,经抗感染和止血药物的治疗多能自止,如反复大量出血,最好在出血期进行手术,便于确定出血病灶的部位和性质。结扎出血侧肝动脉分支或肝固有动脉,或施行肝叶切除术。

参考文献

- 1 田中平,国外医学(消化系疾病分册),1983,1:77
- 2 Hunt P S. World J Surg., 1987,1:289
- 3 吴文静,等.普外临床,1990,3:131

(安徽医科大学第一附属医院王光升教授撰)

下消化道出血诊断及处理的新进展

the new progress of diagnosis and treatment of bleeding from lower gastrointestinal tract. 随着对下消化道出血性疾病病因认识的深入和一些检查方法的改进,在诊断和治疗方面进展迅速,使过去一些认识不清的病因得以明确。由于现在检查手段的进步,如纤维结肠镜、选择性血管造影、放射性核素的广泛应用,使得下消化道出血性疾病的诊断率不断提高,为出血病因诊断和病灶定位解决许多难题,从而为本病的治疗提供了直接有效的依据,因而提高疗效。

下消化道出血指 Treitz 氏韧带以下 50cm 肠管内的出血(内痔、肛裂除外),其解剖部位为小肠(空肠和回肠)、结肠与直肠。

出血分型:(1)隐匿性出血:大便隐血试验阳性,贫血,一般

无明显临床表现。(2)显性出血:指排出鲜血或暗红色血液,出血量一般较少。(3)急性大出血:指失血量 100ml/h 以上,如不及时控制,可致失血性休克。

病因:引起下消化道出血的病因很多,如表 1 所示。目前临床上认为肠道恶性肿瘤、息肉及炎症性病变引起者为最常见。

表 1 下消化道出血的病因

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| (一)肠道恶性肿瘤        | (六)全身性疾病          |
| 直肠癌              | 1. 感染性疾病          |
| 结肠癌              | 败血症               |
| 肠道恶性淋巴瘤、肉瘤       | 流行性出血热            |
| 小肠腺癌             | 伤寒                |
| 肠道转移性癌           | 钩端螺旋体病            |
| (二)息肉病变          | 2. 血液系统疾病         |
| 结肠、直肠息肉          | 过敏性紫癜             |
| 小肠息肉             | 血小板减少性紫癜          |
| 家族性结肠息肉病         | 再生障碍性贫血           |
| Peutz-Jegher 综合征 | 白血病               |
| (三)炎症性肠病         | 血友病               |
| 慢性溃疡性结肠炎         | 恶性网状细胞增多症         |
| 克隆病              | 3. 寄生虫病           |
| 放射性肠炎            | 钩虫病               |
| 肠结核              | 血吸虫病              |
| 急性坏死性小肠炎         | 4. 维生素 C、维生素 K 缺乏 |
| 非特异性结肠炎          | 5. 中毒             |
| 肠阿米巴             | 食物中毒              |
| 药物性肠炎            | 有毒植物中毒            |
| (四)血管性疾病         | 药物中毒              |
| 肠系膜动脉栓塞          | (七)医源性出血          |
| 肠系膜血管血栓形成        | (八)其他             |
| 肠血管畸形            | 肠气囊肿              |
| 先天性毛细血管扩张症       | 子宫内膜异位症           |
| 结肠静脉曲张           | 空肠异位憩室            |
| 小肠海绵状血管瘤、        | 肠套叠               |
| 毛细血管瘤            | 肠扭转               |
| (五)憩室病变          | 腹内疝               |
| 麦克尔憩室            | 大肠缺血性疾病           |
| 肠道憩室病            | 腹外疝               |
| 小肠、结肠憩室          |                   |

下消化道出血的病因,Leicester 等曾按年龄(1)儿童和青年,(2)中年和 60 岁以上者常患的各种疾病分类。Timofhy 则分为小肠病变和大肠病变两大类。虽各种病因均可引起下消化道出血,但发病率差异很大,中国上海华东医院刘魁统计该院通过纤维结肠镜检查 507 例下消化道急性或显性出血或显性出血发病率,见表 2。

表 2 下消化道急性或显性出血发病率

| 疾病名称   | 发病率(%) | 疾病名称     | 发病率(%) |
|--------|--------|----------|--------|
| 结肠炎    | 35.9   | 孤立性溃疡    | 0.6    |
| 息肉     | 32.1   | Crohn 氏病 | 0.6    |
| 溃疡性结肠炎 | 7.9    | 缺血性结肠炎   | 0.4    |
| 癌      | 4.9    | 静脉曲张     | 0.4    |
| 炎性息肉   | 1.6    | 憩室病      | 0.2    |
| 吻合口病变  | 0.9    | 小肠恶性淋巴瘤  | 0.2    |
| 血管发育不良 | 0.8    | 未见异常     | 13.4   |

在西方国家的下消化道出血病例中,有 10% 的 40 岁以上和 35% 的 60 岁以上的病人是患憩室和憩室病,约 15% 并发出血,

大出血<5%。20%恶性肿瘤病人可发生严重出血。

诊断

1. 病史和体检:询问病程长短、便血和大便的关系,有无既往类似发作史,过去有无自发出血倾向,嗜酒史、慢性肝病史、放疗史和化疗史等。体检,应注意有无肝脾肿大,腹部可否触及肿块与压痛。应注意有无粘膜或皮肤色素异常沉着(Peutz-Jeghres综合征)。有无表皮囊肿或骨瘤(Gardner氏综合征)。

2. 直肠指检:80%以上的直肠癌被查出,应作为常规检查方法。不作此项检查是直肠癌被漏诊的关键原因。

3. 直肠、乙状结肠镜检查:对诊断下消化道出血阳性率较高,并可诊断及排除直肠、乙状结肠其他病变出血,而又因检查系非损伤性检查,应作为常选用检查项目之一。大约70%的结肠癌可被查出。

4. X线检查:是目前患者痛苦较少的辅助检查方法。钡灌肠和结肠对比造影,在闭路电视下让病人多次翻动,采取不同的体位摄片,可以显示病变的大体轮廓,但定位较困难。微小病灶则

无法发现,但可以观察到结肠功能的改变,可弥补内窥镜的不足。

5. 纤维结肠镜检查:对拟为结肠、直肠之下消化道出血病人应为首选检查项目,因为它可以定位、活切定性,亦可作排除结肠、直肠出血疾病的鉴别诊断,而再采取其它措施检查小肠的出血疾病。因下消化道出血多见于上述部位,部分病例可以应用纤维结肠镜进行治疗。

6. 选择性肠系膜、腹腔动脉造影:此项检查只适用于出血量0.5ml/min者。除作为诊断方法外,还可通过导管滴注血管加压素或进行栓塞治疗。注入美兰可显示肠管切除范围。

7. 放射性核素检查:当出血量>0.5ml/min时可用<sup>99m</sup>Tc标记的红细胞显示出血部位。

8. B超及CT检查:其作用在于明确病变侵犯小肠、结肠的深度,向肠壁外蔓延的范围和远处转移的部位,从而进行肿瘤分期,并为是否选用手术治疗提供依据。

下消化道出血的诊断方法随医学的发展而逐渐增多,现介绍急性下消化道出血的诊断步骤,如图1。

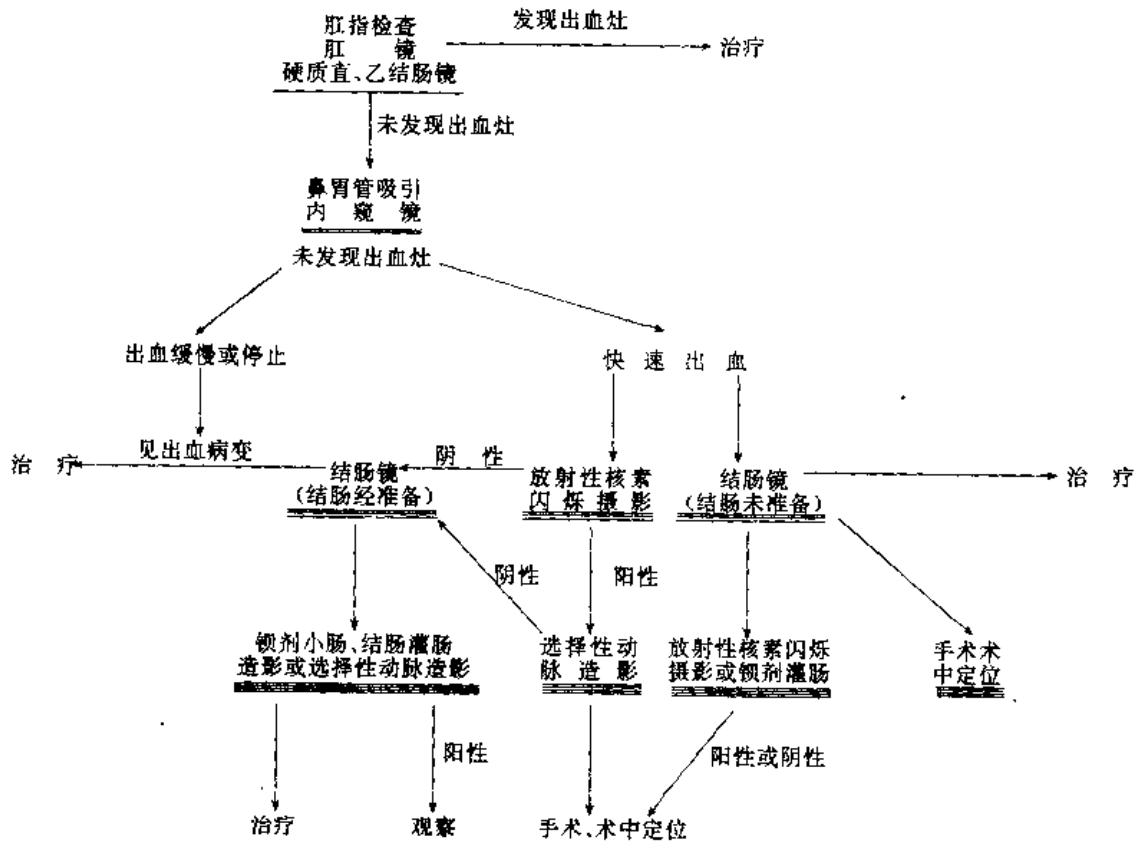


图1 急性下消化道出血的诊断步骤

处理 10余年来已有纤维内镜、核素扫描、选择性腹腔动脉造影、超选择性经动脉导管注入血管收缩剂或栓塞剂、高频电灼、激光和微波等先进技术应用于临床,既往认为是常规方法的急诊剖腹探查术和盲目结肠次全切除术已不采用,而代之以术前明确诊断以择期手术,减少了手术的盲目性,提高治愈率和降低手术死亡率。处理原则如下:

1. 急性出血病人的一般治疗:(1)纠正血容量、输血、输液、防止出血性休克。(2)适当的必要检查以排除上消化道疾病引起的出血。(3)血液的实验室检查以鉴别血液系统疾病。(4)做好术前的常规准备

2. 诊断明确的下消化道出血,对反复出血者或40岁以上者可根据诊断是恶性肿瘤还是良性疾病采用急诊手术、限期手术或择期手术而达到根治或切除病灶止血的目的。

3. 非手术疗法:根据病变性质不需切除病灶,局部止血方法有:(1)局部喷洒药物:对溃疡出血或粘膜渗血可经纤维结肠镜插入导管,对准出血病灶喷洒止血药物。常用药物有8mmol/L去甲肾上腺素生理盐水溶液,一般疗效佳;5%~10%孟氏液,具有较强烈的收敛、闭塞血管及凝固血液作用。还有聚氰脞、环氧脞等组织粘合剂,亦有止血作用。(2)局部注射疗法:溃疡等患者出血时,可经内镜插入粘膜内针局部注射药物,亦可达到控制出血的目的。常用1:1000肾上腺素5ml注入出血灶血管周围粘膜下。亦可注射纯酒精,一般剂量不超过0.6ml,不宜注射过深。(3)高频电凝止血:对微小出血灶效果满意,需经内镜进行。有肠道穿孔及再出血等并发症。(4)内镜下圈套或高频电凝切除息肉,以息肉蒂直径细长者效最佳。(5)激光止血法:本法止血优于高频电凝止血效果,功率过大可能发生肠穿孔,若同时注射二氧

化碳可减少并发症。(6)经动脉导管治疗:①灌注药物:动脉造影显示出血部位后,经导管灌注药物,常用药物首选脑垂体后叶素,亦可用肾上腺素、去甲肾上腺素、麻黄素、Vasopressin等,止血总有效率达80%~90%,此法对炎症性肠病及凝血机能障碍疾病较差。另外对侧支循环血供好的部位病变,止血可能无效。②选择性动脉栓塞术:只有在下消化道出血、手术相对禁忌、药物止血无效的情况下才选择此法,目的是有可能挽救病人的生命。本法可因血栓阻塞血管而形成血栓而致肠坏死。临床一般情况下较少采用。

4. 急诊剖腹手术探查治疗:经各种非手术治疗仍未达到止血效果,约有10%~25%患者需急诊手术治疗。掌握手术时机至关重要,否则预后很差。盲目剖腹探查下消化道出血的失败率可达60%~70%,应严格掌握指征。

(1)手术指征:①短期内出血较多,很快出现休克或24h内输血总量超过1000ml,血液动力学仍难维持稳定者。②大出血不止或止血后再出血者。③大出血后合并肠梗阻或肠穿孔者。④出血原因不明并伴有严重全身性疾病者,如晚期肝硬化、严重心肺肾功能不全者,更应掌握手术时机。

(2)手术方法:①肠切除、肠吻合术。切除出血病灶,行肠吻合术,为治疗下消化道出血的首选措施。②血管结扎术,对结肠、直肠病变引起不易控制的大出血而又不能耐受大手术的病人,可行肠系膜下动脉、髂内动脉或直肠上动脉等结扎术以达到控制出血目的。术后一般可有侧支血循环供血,较少发生肠管坏死。

(3)术中注意事项:①术中探查如同时发现两种可能造成出血的病变,而又不能明确哪一种病变为出血原因,手术时应兼顾。②不能确定出血原因时,不宜采用盲目肠切除术。此手术患者病死率高达20%,再出血率达28%。③术中不能只满足发现一处出血,应进行肠道的全面检查,特别是肿瘤病人,多源性大肠癌患者出血发病率已达2%~6%,应引起警惕。

#### 参考文献

- 1 刘绍魁. 普外临床, 1988, 3(5): 283~284
- 2 王钦尧. 实用外科杂志, 1990, 10(11): 564~565
- 3 尹伯钧, 等. 实用外科杂志, 1990, 10(11): 570~572
- 4 石美鑫, 等. 实用外科学. 北京: 人民卫生出版社, 1992, 843~846

(安徽巢湖地区医院倪爱松主任医师撰)

**感染性腹泻** infectious diarrhea 据1977年的一项估计,全世界每年感染性腹泻的发病率约为30亿~50亿人次,成为严重威胁着人类健康、阻碍经济发展的重要因素之一。

感染性腹泻是由细菌、病毒、真菌和寄生虫等感染因子引起的以腹泻为主要表现的疾病。早在1875年Lösch就发现阿米巴原虫与痢疾有关。1883年, Koch在死于霍乱的患者肠内发现霍乱病原体,随后Shiga又确定了痢疾杆菌为痢疾样腹泻的主要致病菌。然而,直至20世纪60年代,对腹泻病的研究多限于上述3种病原体感染,大部分腹泻病因不明,发病机制也了解甚少。1960年, De首先发现霍乱肠毒素, 1967年Smith又发现大肠杆菌不耐热肠毒素。此后肠毒素致病机制逐步被明确。自1960年Foramli等发现痢疾杆菌的侵袭力与致病的关系后,有关侵袭致病机理研究较多,至80年代后由于分子遗传学技术的应用,才得以进一步阐明。近20年来病毒性腹泻才受到重视,继1972年发现诺瓦克病毒后, 1973年Bishop R. F发现轮状病毒非细菌性腹泻的最主要病因。70年代后陆续被证实或新发现的感染性腹泻病原体达数十种。腹泻患者病原检出率由20世纪70年代初的20%增至70%~80%。病原的确定促进了流行病学、致病机理、合理治疗和预防措施的深入研究。

流行病学调查表明,全世界每年至少20万人死于霍乱。1991年霍乱疫情更严峻,主要在非洲、拉丁美洲流行,发病数为1961年以来的最高值。痢疾杆菌腹泻仍在发展中国家不断流行,每年引起50万人死亡;发达国家虽不常见,亦有周期性流行,据

Lee LA分析, 1988年美国宋内氏菌痢疾流行高峰可能与免疫水平改变、监测完善或广泛媒介污染、强感染性菌株出现有关。沙门氏菌属不论在发达国家还是发展中国家均是胃肠炎型食物中毒的主要致病菌之一。尤其是鼠伤寒沙门氏菌,常在新生儿室、儿科病房和幼托机构引起暴发流行。空肠弯曲菌自1973年Butzler从腹泻病人粪便分离成功后,世界各地有培养条件的地区均证实该菌为重要的腹泻致病菌,在发达国家痢疾样腹泻中占首位;中国上海1981年首次报告本病后,病例报告数不断增多。研究资料表明,致泻性大肠杆菌分为5类,其中产肠毒素性大肠杆菌(ETEC)和致病性大肠杆菌(EPEC)是发展中国家儿童腹泻的主要致病菌。旅游者腹泻50%~70%由ETEC引起。由ETEC引起的腹泻每年达10亿人以上,造成100万儿童死亡。此外,气单胞菌、耶氏菌、类志贺吡单胞菌、非霍乱弧菌类、出血性大肠杆菌(EHEC)、侵袭性大肠杆菌(EIEC)、难辨梭状芽胞杆菌等引起的散发的或流行性的腹泻也日益受到重视。轮状病毒分布广,是婴幼儿腹泻的主要病原体。1984年洪涛等阐明中国成人流行性腹泻由新轮状病毒引起。1990年美国疾病控制中心估计轮状病毒每年在全球引起1.4亿人发病,10万儿童死亡。诺瓦克病毒主要侵犯成人和年长儿,常有水源型的及食物型的暴发流行。星状病毒、尊状病毒、腺病毒、肠道病毒等引起的腹泻发病率尚不清楚。阿米巴原虫、贾第鞭毛虫引起的腹泻仍存在地区性流行。

病毒性腹泻感染部位在小肠,病毒引起上皮绒毛病变,致使吸收功能障碍,出现水样大便,常伴呕吐。细菌性腹泻根据发病原理分为3类。第1类是肠毒素性腹泻,以霍乱弧菌和ETEC为代表。霍乱肠毒素被发现后, Finkelstein等进行了一系列研究,于1966年明确了其致病作用。1979年J. D. Clements等又证实大肠杆菌的不耐热肠毒素亚单位结构与霍乱肠毒素相似。类似毒素也曾其他细菌中发现。细菌产生的肠毒素作用于小肠上皮细胞中的腺苷酸环化酶,通过一系列生化机制刺激水、电解质分泌,导致大量吐泻,可能有其他因素参与致病。此类腹泻大便呈水样,镜检无或少有白细胞,因泻吐量大易出现脱水,重者可因脱水而死亡。第2类为侵袭性腹泻,以痢疾杆菌为代表,也可由沙门氏菌、EIEC、EHEC、弯曲菌、耶氏菌及副溶血弧菌引起。痢疾杆菌侵袭力受质粒与染色体多基因控制,已知1种120~140 Mdal大质粒是毒性质粒,其编码的几种外膜蛋白在侵袭致病中起关键作用。典型表现为频繁排出脓血便,量少,有明显腹痛及里急后重,粪检有红细胞及大量白细胞。第3类是肠毒素-细胞毒素性腹泻,以难辨梭状芽胞杆菌为代表,典型者结肠可见伪膜样病变,与应用抗生素应用相关,致病机理尚有争议。1991年M. R. Clausen等研究结果不支持伪膜性肠炎与难辨梭状芽胞杆菌有关。

感染性腹泻的病因诊断有粪涂片找病原体、各种肠致病菌培养、细菌毒素和毒力测定、特异性抗原测定等。病毒性腹泻可通过电镜和免疫电镜直接观察病毒形态及特异性抗原颗粒。血清学诊断技术的广泛使用,使一些难以检出病原体的感染性腹泻的诊断率大大提高。分子生物学技术越来越多地用于腹泻病的诊断、病原组分及毒素的鉴定和分型。然而,大多数发展中国家缺乏足够的先进技术设备,全面推广存在困难,探索简便价廉的特异性诊断方法引起众多学者的兴趣,例如1991年M. J. Albert等创立了ELISA鉴定EPEC,认为此方法有利于发展中国家大面积推广应用。

感染性腹泻的治疗主要为补液和抗病原两方面。虽然早在1832年J. A. Latta就应用静脉输液治疗霍乱,但口服补液治疗(ORT)仅开始于60年代末。肠毒素引起分泌型腹泻机理阐明后, 1968年N. Hirschhorn等根据葡萄糖的吸收促使钠、氯离子被动吸收的原理,采用口服补液盐(ORS)治疗霍乱取得疗效。随后的一系列研究资料肯定了ORT的作用。1976年WHO推荐的ORS配方为1000ml水中含葡萄糖20g、氯化钠3.5g、碳酸氢钠2.5g及氯化钾1.5g。10多年间全球推广应用使很多患者免于死亡。许多研究资料表明米粉ORS纠正脱水效果显著,最近D. Rizarróo等随机双盲对照研究证明米粉ORS在减少粪便

量方面优于葡萄糖 ORS。病毒性腹泻多自限,主要危险是脱水和电解质紊乱,婴幼儿轮状病毒胃肠炎患者最易脱水,必须尽早给予 ORT,多数患儿可照常哺乳,严重脱水者可静脉补液。细菌性腹泻患者除补液外,常需病因治疗。1991 年 Ashkenazis 的综述文献指出,是否应用抗生素要根据所估计的特定病原而定,并常随个体而异。肠毒性腹泻补液是治疗的关键。霍乱患者经积极正确地应用 ORT 和静脉补液病死率可降低到 1% 以下,同时用抗生素可缩短病程、减少粪量、消除粪菌,一般首选四环素。S. K. Bhattacharya 认为氟哌酸可作为耐药株的替换药。痢疾杆菌和 EIEC 腹泻则以抗生素治疗为主,目的是改善临床症状和阻断一人一传播,有待解答的问题是病原治疗的时机及药物选择。各地区痢疾杆菌耐药谱及耐药率差异很大,新耐药株不断出现。1990 年 M. L. Bennish 等和梅芹等的研究资料均表明对常用药物如 SMZ-TMP、痢特灵、氨基青霉素和氨基糖甙类耐药时,成人用新喹酮类疗效良好。沙门氏菌尤其鼠伤寒沙门氏菌耐药极为严重。1954 年 W. B. Macdonald, 发现氨基青霉素治疗小儿沙门氏菌胃肠炎无效。1969 年 B. Aserkoff 等则发现用氨基青霉素等治疗后使排菌时间延长,且导致细菌对所用药产生耐药性。现已清楚耐药性可通过 R 因子在同种菌或其他肠杆菌间传递,发展迅速,往往呈多重耐药。1990 年 A. A. Farhoudi-Moghaddam 等报告多重耐药株占 89.6%。1991 年吴仕孝和唐毅报告 1 组鼠伤寒杆菌对常用药耐药率为 100%。因此,一般沙门氏菌腹泻不用抗生素,只给予补液对症治疗。新生儿易发展为败血症,主张用第 3 代头孢菌素治疗。已并发败血症、脑膜炎或免疫功能低下者需用敏感抗生素,成人新喹酮类为最佳选择,此类药物因对骨板软骨有损害,不主张用于儿童。有人认为此类药有重要治疗价值,对其副作用应予重新评价。弯曲菌、EPEC、ETEC 及难辨梭状芽胞杆菌腹泻以补液为主,抗生素只选择性用于严重患者。EHEC、气单胞菌、类志贺邻单胞菌、耶氏菌和非霍乱菌类等引起的腹泻轻者无需治疗或只需补液处理,抗生素疗效待评。

感染性腹泻发病率高,对人类健康危害大,促使人们致力于预防措施的研究。肠外途径接种疫苗已证实效果差,但基础研究和生物技术已开始应用于肠道感染疫苗的研制。第 25 届美国-日本“霍乱及相关性腹泻”年会上肯定了口服霍乱疫苗(B-WC)的保护效果,剂型的改良与免疫程序的改进工作正在进行。由于交叉免疫性,该疫苗同时也减少 70% ETEC 腹泻的发生。从分子生物学机制上对 ETEC 肠毒素的研究正试图从致病机理上探索高效疫苗。痢疾杆菌减毒疫苗依链株有一定副作用,安全性也不能肯定,新的疫苗候选株正处于实验阶段。轮状病毒疫苗保护率尚不稳定(0%~78%)。1991 年 Ruuska 等报告,用轮状病毒 RIT4237 株免疫新生儿,在 2~3 岁内发病数未下降,但临床过程减轻,流行季节前接种较好。K. Midthum 等研究了自然减毒株 M37 疫苗,认为耐受性好,在小于 6 月婴儿中出现中等度免疫。尽管疫苗预防有着广阔的前景,尚不能全面推广,有些病原体还无有效疫苗问世。因此,一般预防措施如卫生设施、个人卫生和卫生宣教在防止腹泻传播方面仍很重要。1990 年姜红等报告,某农村经饮水改良和粪无害化处理腹泻病发病率明显下降,由于节约了医疗费用,增加了劳动日,也获得明显的经济效益,卫生设施投资可在两年内自身偿还。个人卫生提倡肥皂和流水冲洗双手,不饮生水,不用河水洗抹餐具瓜果等。卫生教育还包括家庭中对腹泻的正确处理。

人类对太空或海底的探索,生活方式的改变,密切的国际间交往,可能导致腹泻病原体种类及分布特点的不断变动。免疫抑制剂的广泛应用及 AIDS 病人的不断增多,现有耐药菌的耐药性变迁及新的耐药菌株的出现将给腹泻病的治疗带来很多困难,这是当今全球共同关注和担忧的问题。控制感染性腹泻发病率必须靠全人类互相协作共同努力,当务之急是研制并验证切实有效的防治肠道感染的疫苗。

#### 参考文献

1 Takeda Y, Miwatani T. Bacterial Diarrheal Diseases, Bos-

ton, Mirtinus Nijhoff, 1985. 1~10

- 2 Farhoudi - Moghaddam A A, et al. Scand J. Infect Dis, 1990, 22(2): 197~203
- 3 Spriggs D R, Sack RB, J. Infect Dis, 1990, 162, 584~590
- 4 肖东楼, 中华流行病学杂志, 1991, 12(3): 189~190
- 5 Midthum K, et al. J. Infect Dis, 1991, 164(4): 792~796
- 6 Rizarro D, et al. N. Engl J Med., 1991, 324(8): 517~521
- 7 胡善联, 国外医学流行病学(传染病分册), 1992, 19(1): 4

(安徽医科大学第一附属医院江晓平讲师撰; 余鑫之审)

**慢性腹泻** chronic diarrhea 排便次数增加, 粪便的质和量发生改变, 病程超过 2 个月者(也有人定为 2 周以上)或症状反复发作者为慢性腹泻。为最常见的消化系统疾病。病因复杂, 引起腹泻的疾病也很多, 目前对发病机理的认识又尚未统一, 故临床治疗有时较困难。临床上很多疾病可引起腹泻, 但以肠易激综合征最多见, 其次是慢性痢疾、炎症性肠病、肠结核、肠道菌群失调及吸收不良综合征等。

**肠道易激综合征(IBS)** 肠道易激综合征 1929 年就被认识, 曾被称为刺激性结肠、结肠过敏、痉挛性结肠、粘液性结肠、功能性结肠、激惹性结肠、结肠性神经官能症等, 现普遍认为称肠道易激综合征(IBS)较合适。

IBS 是慢性腹泻最常见的原因之一, 占有消化道症状患者的 50%~70%, 约占消化道门诊病人的 1/3; 半数以上在 35 岁以下, 男女之比为 1:2。其发病机制, 目前尚未完全阐明, 也无统一认识, 但大部分学者认为是神经、体液因素致结肠运动、分泌功能失调。现也有学者认为它不是精神性的, 也不是器质性的疾病, 而可能是一种多因素决定的症候群。主要表现为腹痛、腹胀、排便异常, 常伴有全身植物神经功能紊乱, 而系统检查不能发现器质性病变。最近有学者发现结肠两种动作电位, 纵行肌产生一种长的尖波爆发, 环形肌产生一种短的尖波爆发, 两波与本病的腹痛有相应关系, 腹痛型伴便秘者短的尖波爆发增加, 无痛性腹泻者则减少。

临床常分为腹泻型、腹泻便秘型、便秘型及粘液型。也有学者分为: 痉挛性结肠(又称假性腹泻)、无痛性腹泻、胃-结肠反射敏感性腹泻和粘液性结肠炎 4 型。

IBS 的诊断, 国际上也无统一标准, 有参考意义的是 Manning 提出的 4 项症状: (1)便后腹痛缓解; (2)腹痛开始时肠蠕动明显增加; (3)便前有腹痛; (4)具客观依据的腹胀。

Fielding 提出的四项体征: (1)可触及结肠尤其乙状结肠, 并有压痛; (2)左髂窝部有嘈杂音; (3)肛门检查感到括约肌张力增加及患者痛觉过敏; (4)指套上带有单纯粘液或触到球形粪块。

1986 年 11 月, 中国慢性腹泻学术讨论会制订了中国临床诊断参考标准: (1)以腹痛、腹胀、腹泻及便秘等为主, 伴有全身性神经官能症状; (2)一般情况良好, 无消瘦及发热, 系统体检仅有腹部压痛; (3)多次粪常规检查及培养(至少 3 次)细菌均阴性, 潜血试验阴性; (4)X 线钡剂灌肠无阳性发现, 或结肠有激惹现象; (5)纤维结肠镜示部分患者结肠运动亢进, 无明显粘膜异常, 组织学检查基本正常; (6)血、尿常规正常, 血沉正常; (7)无痢疾、血吸虫等寄生虫病史, 试验性治疗无效。

由于 IBS 属肠道功能性疾病, 故应强调综合治疗, 包括解除患者思想顾虑和选择适当的对症治疗药物, 不主张经常用泻药治疗便秘。近年来有学者认为体内微量元素含量变化与 IBS 有关, 如众知的镉含量增加、锌含量减少, 可引起腹泻, 故建议服少量锌治腹泻。

**炎症性肠病** 炎症性肠病(IBD)包括非特异性结肠炎(UC)和克隆氏病(CD)。但严格讲, IBD 这一概念应包括各种侵犯肠道的炎症性肠病。IBD 的病因至今不明。虽积累了很多发病与免疫紊乱有关的资料, 但仍无系统完整的理论依据。近几年来国内外学者对 IBD 发病机理进行了大量研究, 认为: (1)溃疡性结肠炎是自身免疫性疾病, 有皮肤、关节、眼等肠外表现, 也可有胸腺增

生和肿大,胸腺有淋巴滤泡及上皮细胞旁B细胞聚集。日本学者认为这是血-胸腺屏障受破坏,同时 $T_4$ 细胞减少比 $T_4$ 细胞减少为甚之故。(2)淋巴细胞呈增生反应。(3)局部免疫反应的参与。(4)有免疫复合物的沉积( $C_3$ 等的沉积)。(5)肠单核细胞缺少产生白细胞介素 $\gamma$ 的能力,并受抑制性巨噬细胞的影响。(6)肠粘膜内NK细胞的比例和活力均低于外周血的NK细胞。(7)变态反应的参与。(8)前列腺素的作用。(9)克隆氏病被认为有细胞 $T_4$ 、 $T_8$ 的免疫缺陷。

1990年8月第9届世界胃肠病学大会讨论了炎症性肠病的发病机理。80年代初,曾认为是某一种或几种外原性微生物感染引起的炎症性肠病,此观点现已抛弃。现有些学者认为是由于内源性细菌-肠道共栖菌群的某些产物(脂多糖、肽聚糖、低分子物质,如甲基蛋氨酸等)易导致IBD。这些毒素不易透过正常人的肠粘膜屏障,当屏障受损后,激起一系列的炎症反应。IBD患者中,周圈血和门静脉的脂质A、胞壁酰胺和甲基蛋氨酸肽高达正常人的10~20倍之多。由于IBD的病因尚未阐明,故难以进行正确的分类。1984年在美国AGA会议上,Haggitt将IBD分6大类:(1)特发性炎症性肠病(IIBD),包括溃疡性结肠炎、克隆氏病和未确定型结肠炎。(2)感染性因素引起的炎症:病毒(细胞巨病毒)、衣原体(砂眼衣原体)、细菌(痢疾杆菌、结核杆菌、空肠弯曲杆菌、沙门氏菌、难变梭状杆菌等及耶尔森小肠结肠炎杆菌)、霉菌(隐球菌)、寄生虫(贾兰氏鞭毛虫、阿米巴原虫等)引起。(3)继发性血管灌注不足的炎症:缺血性结肠炎、结肠梗阻性结肠炎等。(4)与运动障碍有关的炎症:憩室炎、孤立性直肠溃疡综合征。(5)治疗措施引起的炎症:灌肠、泻剂、抗菌药物、射线、GVH反应、小肠捷径术所致的结肠炎。(6)其他原因引起的肠道炎症:胶原性结肠炎、癌坏疽性小肠结肠炎、嗜酸细胞性及变态反应性结肠炎及非特异性结肠炎等。近年来较多文献采用这一分类。

非特异性溃疡性结肠炎(UC,下简称溃结),它是结肠粘膜慢性非特异性炎症,病因不明,或是多因性疾病。近年来大量资料分析认为溃结发病既有免疫因素又有遗传因素存,而精神因素和微生物感染只是诱因。日本近年对溃结的病因、病理进行了大量研究,细田四郎、下山孝氏和中谷村太郎等认为,从溃结患者肠内粘膜、粪便的变化及动物实验都发现病情加重与粪杆菌和梭状芽胞杆菌关系密切,病变活动期此二菌群明显增多,并与病情发展成正比关系。高俊俗氏发现溃结患者血清中存在一种粘蛋白抗体。坂铁钝夫等发现病变组织中存在抗大肠抗体。相矶贞和等通过实验发现患者血清中有一种胸腺增生因子存在。千叶满郎报道姐妹两人患溃结为HLA同一类型。以上研究资料认为溃结是一种自身免疫性疾病,并与遗传有关。铃木亮一等报道,溃结患者的出血机制亢进,并与精神紧张和过度疲劳有关。龟山仁一等研究发现溃结患者的肠粘膜细胞的ATP和能量低下,PYY(肽YY)含量明显高于正常人,大越裕章等研究发现溃结患者直肠粘膜中PYY含量明显低于正常人。还有人研究发现溃结活动期大肠粘膜CEA增高。

溃结患者的病理组织学特征为:病变一般局限于粘膜层,很少侵入粘膜下层;局部充血水肿,病变连续;可有散在溃疡,溃疡间粘膜相对凸起称假性息肉,凸起相互粘连形成粘膜桥。活动期局部粘膜以淋巴细胞、粒细胞为主的弥漫性炎症,细胞浸润,后者为溃结活动期特征性改变。

溃结有3种分型法:(1)按病情分轻、中、重型。(2)按临床过程分初发型、慢性复发型、慢性持续型和急性爆发型。(3)按病变范围分为盲肠炎、直肠乙状结肠炎、左半结肠炎、右半结肠炎和全结肠炎。

目前经常用的是根据病情分型。国内以轻型多见,肠外并发症少见。

溃结的诊断:1987年全国中医药治疗慢性非特异性溃疡性结肠炎学术研讨会参照1987年全国消化疾病会议标准制订本病诊断标准:(1)临床方面,具慢性腹泻、粘液血便、腹痛,呈慢性反

复发作或持续性,伴有不同程度的全身症状。少数患者仅有便秘或血便也应重视。既往史及体检要注意关节、口腔、眼、皮肤、肝脾等肠外表现。(2)乙结肠镜及纤维结肠镜检查:①受累结肠粘膜呈多发性浅表溃疡伴充血、水肿,病变呈弥漫性分布。②肠粘膜外观粗糙不平,呈细颗粒状,组织脆弱易出血,或覆盖有脓性分泌物,似一层薄苔。③结肠变平或变钝以至消失,有时可见大小不等的假性息肉。肠粘膜活检病理呈炎性反应,常有粘膜糜烂,隐窝脓肿,结肠腺体排列异常及上皮改变。(3)钡剂灌肠:①结肠肠管缩短,结肠袋消失或结肠呈管状;②多发性溃疡或多发性假性息肉表现;③结肠粘膜粗糙、紊乱,或可见细颗粒状变化

根据(1)和(2)项中的其中1条及/或粘膜活检可以确诊。根据(1)和(3)项中的其中1条可以确诊。临床表现不典型,但有典型的肠镜表现所见,或钡剂灌肠典型改变者可诊断为溃结。临床有典型症状或有典型既往史,而乙结肠镜、纤维结肠镜检查或钡剂灌肠无典型变化者,应列为疑诊。

北京医学院报道,以高铁...胺-阿辛兰粘蛋白染色,发现溃结粘膜内粘蛋白总量减少,唾液酸粘蛋白增加,硫酸粘蛋白减少,并与病理形态变化一致。因此认为粘蛋白变化可用以估计疾病进展和治疗效果,并与Crohn病相鉴别。另有人报道,体外被动致敏实验可作为本病辅助诊断。此法比补体结合试验更加特异。

溃结与肠癌的关系:有些学者研究认为,有长期病史患者的溃结有癌变倾向,但机制尚不清楚。比较有密切关系的是杯状细胞粘液性改变,细胞内DNA、RNA代谢异常。小森宗治报告,大肠癌和溃结病变部位组织的核糖核酸酶活性均明显降低。还有些学者研究认为溃结病变广泛,病程长于10年,肠粘膜有异型增生,这是癌前期状态。高度异型增生伴肿块病变者,有转癌的高危险性,有时高度异型增生也与结肠癌并存。低度异型增生也有与肠癌并存者,可考虑手术治疗或短期复查。

国外溃结伴癌率比克隆氏病(下述)高10~20倍。中国溃结与克隆氏病伴癌率低,约0.8%~1.5%,但缺少大量资料证实。

武藤徽一郎用PKP染色法可早期发现癌前期病变。

目前迫切需要解决的问题是溃结的癌变,这是今后重点研究的课题。溃结的治疗,目前国内外尚无特效药物,大量资料证明,长期随访发现很少有临床与病理完全缓解者。常用药物选用激素、SASP、5-ASA、6-MP、灭滴灵、黄连素、锡类散等,可获近期疗效。全结肠炎或广泛性结肠炎可作全结肠切除术。

克隆氏病(CD):1932年由Crohn首次报道,但病因至今还不清楚。目前认为可能是多因素的综合作用,其中与感染、自身免疫、遗传等因素密切相关。CD可累及消化道任何部位,但以小肠最多见,约占70%,其中65%可累及回肠末端10cm~20cm。临床有慢性腹泻、右下腹及脐周痛,常有肠梗阻、肛周瘘管、发热和关节痛等全身症状。但很少有脓血便或血便等。

CD有以下类型:(1)急性阑尾型(2)慢性肠炎型(3)梗阻型(4)腹块型(5)腹膜炎型(6)出血型(少见)

CD的诊断:根据世界卫生组织专家小组提出的临床病理概念,CD的特征:(1)病变呈非连续性(跳跃性和区域性)分布。(2)全壁性炎性病变更,以致病变肠段增厚变硬,甚至狭窄。(3)深入肠壁的纵行溃疡(裂沟)相互交错,加之愈合后的疤痕收缩,使其间粘膜呈铺路卵石状。(4)60%~70%的病例于病变处见非干酪性肉芽肿。(5)肛门病变更多见,如肛周炎、肛裂、肛瘘、肛周脓肿或溃疡。(6)约20%有内瘘,13%有外瘘。据此,日本消化病学会拟定本病诊断标准:具上述(1)、(2)、(3)项者为疑诊;加上(4)、(5)、(6)项之一者可确诊。具第(4)项,再加(1)、(2)、(3)项任何两项也可确诊。以上诊断标准,还必须排除UC和缺血性肠炎等。有些学者研究发现,CD患者活动期粪内 $a_1$ -AT增高,量 $\geq 20\text{mg/g}$ 。

CD的治疗:内科治疗原则及用药与溃结大致相同。除有严重并发症者需手术外,一般均采用非手术治疗。

吸收不良综合征 它是各种疾病引起的小肠对营养吸收不足而造成的临床综合征。由于本病可涉及到腔内原因消化不良,



或粘膜异常吸收不良,或运输障碍淋巴或血液循环受阻,因此许多学者认为,以名为消化吸收不良综合征为妥。

本病检查方法较多,近几年来,中国已陆续见有氢呼气试验、小肠粘膜刷状缘双糖酶及各类肠肽测定的报导,标志着中国已着手开始对小肠领域的研究。

目前世界上很多人存有不同程度的乳糖吸收不良或乳糖不耐受。据统计:白种人约5%~20%,黑种人70%~80%,东方人达85%。其原因不明,许多学者研究认为与世代形成的饮食习惯不同所造成的遗传基因突变有关。

90年代研究发现,中国汉人乳糖酶缺乏发生率为75%~92.3%,但因平时不出现症状,其病理或生理性改变至今尚未定论,故不能称作病乳糖酶缺乏症。

假膜性肠炎:假膜性肠炎主要累及结肠,以乙状结肠(占86%~100%)的急性纤维素渗出性炎症最常见。少数可累及小肠。自70年代从患者粪便中分离出难辨梭状芽胞杆菌后,现不少学者认为本病不一定限于用过抗生素者,并建议将本病命名为“梭状芽胞杆菌性肠炎”。最近日本从D~I毒素的抗毒血清中分离出IgG,制成乳胶试剂,特异性高,可定量检出15mg/ml左右的毒素。

治疗:首选万古霉素,其次是灭滴灵、褐霉素及杆菌肽等。不少学者认为,及时纠正滥用抗生素现象已刻不容缓。

正常肠道常住菌:大肠杆菌、肠球菌共占90%,芽胞杆菌、酵母菌等共占10%以下。

过路菌:类大肠杆菌、产气荚膜杆菌、变形杆菌、产碱杆菌、绿脓杆菌等,总数<10%。

若常住菌和过路菌因某种因素比例失调,则可导致肠道菌群失调而引起腹泻等一系列临床症状。

导致菌群失调的诱因有:长期服广谱抗生素、皮质激素、抗代谢药物等,高龄和慢性消耗性疾病患者更易发生。

治疗:首先必须立即停用一切抗生素和皮质激素等。一般患者可口服乳糖、麦芽糖、蜂蜜、VitC、乳糖生等以扶植大肠杆菌。口服叶酸、复合维生素B可扶植肠球菌。国外认为口服Biolaoty或Bictysubtil(含乳酸酵母、枯草杆菌等)专治肠道菌群失调。

#### 参考文献

- 1 江绍荃,等.中华消化杂志,1987,7(3):125~126
- 2 巫协宁.中华消化杂志,1987,7(3):163~165
- 3 郑芝田,等.中华消化杂志,1988,8(1):42~44
- 4 张锦坤.中华消化杂志,1988,8(1):45~46
- 5 巫协宁.中华消化杂志,1990,10(2):63~64
- 6 薛子萌,等.中国肛肠病杂志,1991,11(1):35
- 7 陈振依.实用内科杂志,1991,11(1):10~12

(皖南医学院附属弋矶山医院季一如副主任医师撰;

左志诚审)

## 肝功能衰竭

liver failure 简称肝衰竭,由病毒、药物及其他原因引起肝脏广泛坏死或严重肝功能损害而出现进行性黄疸、肝性脑病、肝性出血、肝肾综合征、继发性感染和物质代谢障碍(如低蛋白血症、低血糖、水电解质与酸碱平衡紊乱)等症候群的一种严重的临床综合征。可分急性的和慢性的两种。急性肝衰竭(或称暴发性肝衰竭)最常见于重型病毒性肝炎(急性、亚急性、慢性重型肝炎)患者,慢性肝衰竭(亦称门-体循环性脑病)主要见于肝硬化患者和肝癌患者。无论是急性的还是慢性的肝衰竭患者,肝性脑病是共同的最后结局。急性肝衰竭死亡率高达70%~90%。

1842年,罗基塔斯基(C. Rokitsky)首先提出“急性黄色肝萎缩”概念,认为是一个独立并且病因未明的疾病。1888年包特金(C. Пётркин)证明急性黄色肝萎缩与卡他性黄疸有联系,并肯定卡他性黄疸是一种传染病,主要损害肝脏,认为急性黄色肝萎缩是这个病“发展变化的最高阶段”。1944年,卢克(B. Lucke)和

马罗礼(T. Mallory)首先采用“暴发性”命名,指出闪电型“流行性”肝炎患者发病10d以内死亡。60年代中期,布卢姆伯格(Blumberg)发现澳大利亚抗原,为确定肝硬化、肝癌与乙型肝炎的关系奠定了基础。日益增多的临床与流行病学观察结果说明,肝衰竭病程是按乙型肝炎→慢性活动性肝炎→肝硬化→肝癌次序发展的。谢洛克(Sherlock)分析1970~1972年收治的69例暴发性肝衰竭(FHF)患者的病因:病毒性肝炎占34例,氟烷中毒14例,扑热息痛中毒6例,抗癆药中毒5例,单胺氧化酶抑制剂中毒1例,妊娠脂肪肝6例,四氯化碳1例,手术后2例;存活率39%,3级昏迷28%,4级昏迷15%。FHF的形态学研究发现,由于病因不同,主要有3种不同的组织学表现:急性肝细胞大片坏死(病毒性肝炎或中毒性肝炎)和亚大块坏死,急性脂肪性变(妊娠急性脂肪肝、Reye's综合征)以及脂肪性变坏死(如酒精性肝炎)。有关FHF的发病机理,1971年比戴里德(Bedaide)证实肝脏病变的程度与抗原抗体复合物在肝细胞膜上积聚的多少有直接关系。1986年,莫里(Mori)对微循环障碍与FHF的发病机理进行了比较深入的研究后指出:自然杀伤细胞(NK)的杀伤作用和内毒素等诱发的施瓦茨曼反应(shwartzman's reaction)与FHF发病有关。慢性肝脏疾病亦可因感染、出血等因素介导FHF的发生,1981年Sherlock称之为慢性急性发作(acute on chronic),即慢性肝病急性衰竭(Aoef)。中国分型的慢性重型肝炎属此范畴,从而使FHF的涵义有所变化。无论是免疫机制或Shwartzman氏反应机制,迄今尚不能完整地解释临床与病理全貌,确切机制仍有待进一步探讨。

近期研究阐明急性肝衰竭(AHF)是多病源性临床综合征,以急性起病为特征,黄疸急剧加深,肝脏迅速缩小、肝臭、出血、肝性脑病、脑水肿、脑疝、肝肾综合征、凝血酶原时间延长及胆酶分离等,患者病死率高达70%~90%。国外最常见病因是扑热息痛中毒,其他依次为肝炎病毒感染所致急性的和亚急性的重型肝炎、氟烷中毒及特异体质性药物反应等。中国首推肝炎病毒感染,乙型肝炎占80%~90%,次为丙肝、戊肝,甲肝少见。上海报道300000多例,约22例为FHF,两种或两种以上同时或重叠感染如HBV+HDV,HBV+HAV,HBV+HCV等已引人注目;其次是药物中毒(抗癆药、四环素等)、毒物中毒(毒蕈、鱼胆、臭米面等)、酒精性肝炎、缺氧性肝坏死(急性循环衰竭、肺动脉结扎或堵塞等)、妊娠急性脂肪肝和Reye氏综合征等。慢性肝衰竭(CHF)亦称门-体循环性脑病,为肝性脑病并发于慢性肝病,因肝功能受损及门-体分流,体内代谢产物不能经肝脏解毒而直接进入体循环所致。起始隐匿,病情大多稳定,病程较长,往往在某些诱因作用下病情突然加重,进而发生昏迷,昏迷可能完全解除,但易复发。病因主要是肝硬化和肝癌。酒精中毒在欧洲(42%)、美洲(66%)是肝硬化的主因,亚洲仅占11%。中国肝硬化患者的主因是病毒性肝炎,南方血吸虫肝病肝硬化发病率已下降。国内资料大体表现为,在肝硬化患者中,病毒性肝炎作为病因约占68%(上海),肝细胞以依红染色HBSAg阳性者占40.2%,伴肝癌者阳性率为85.7%(北京)、71.8%(广西)、85.5%(上海)。这说明乙肝在肝硬化及肝癌发病中的地位。肝衰竭患者的临床表现:(1)肝细胞性黄疸。急性肝衰竭均伴深度黄疸,以重型肝炎患者为例,总胆红素一般高于170μmol/L;唯有部分急性重型肝炎患者因病情进展迅速,在黄疸未表现明显时即告死亡。伯格斯特朗(Bergstrom)报告7例黄色肝萎缩病人均无黄疸。肝硬化患者有不同程度黄疸,肝癌患者约1/3有或多或少的黄疸,初期轻,以后进行性加深。(2)肝性脑病(肝昏迷)。是由于血脑屏障的结构与功能发生改变,以氨为主的多种毒物在血内沉积,氨基酸失去平衡,假性神经递质及γ-氨基丁酸受体兴奋而引起的一系列精神神经症状,最后进入昏迷。Parsons-Smith将肝性脑病患者分为5级。1级有轻度性格和行为改变;2级性格改变较明显,并有扑翼样震颤等异常;3级有明显精神错乱和定向力障碍;4级昏迷但能唤醒,对刺激尚有反应;5级昏迷,反射及对强刺激反应都逐渐消失。急性肝衰竭患者,发病急骤,经短期兴奋、躁动后迅速陷

入昏迷,常在数日内死亡。FHF 病人脑水肿的发现是近代对肝昏迷研究的一大进展,国内外 FHF 尸体解剖证明脑水肿为 40%~81%,20% 并有脑疝,这是 FHF 患者早期最主要的死亡原因。有人报告 100 例 FHF 在进入昏迷后平均 4d 发生肺水肿者 37 例,其中 27 例直接死于肺水肿。慢性肝衰竭患者则常因摄入蛋白质过多、上消化道出血、感染等诱发脑病,血氨多升高,去除这些因素,脑病常能改善;表现间歇发生的波动性意识与运动障碍,病程可达数月甚至数年,多首先表现为定向力障碍,进而发生昏迷。(3)肝性出血。因凝血因子合成减少、弥漫性血管内凝血(DIC)和门脉循环障碍引起。表现的皮肤、粘膜及内脏广泛出血(衄血、牙龈出血、呕血、便血),针刺后出血不止。血小板进行性减少,一般在 5 万~7 万以下,有的仅 1.5 万;凝血酶原时间在正常值的 1 倍以上,或 >25 秒,活动度 ≤40%,DIC 者 3P 试验可阳性。(4)肝性腹水。主要为低蛋白血症、急性门静脉高压、淋巴回流障碍,继发醛固酮增多,抗利尿激素灭活减少等多种因素引起。急性重型肝炎患者少见,而多见于亚急性的或慢性的重型肝炎患者,特别是肝硬化发展的慢性肝衰竭患者。(5)肝肾综合征。它是在肝衰竭基础上由于内毒素血症、肾血管收缩、肾缺血、有效血容量下降等因素导致肾小球滤过率和肾血浆流量降低而引起的急性肾功能衰竭;肾损害多是功能性的,但亦可发展为急性肾小管坏死。常在过度利尿、大量放腹水和消化道大出血后发生,表现少尿、氮质血症、酸中毒、高钾血症、低钠和尿常规轻度改变。(6)并发感染。肝衰竭病人机体防御机能已全面下降(包括单核巨噬细胞、补体系统、调理系统和干扰素系统),加上应用激素、反复穿刺和导尿,更易促进感染的发生。最常见的是腹膜炎(3%~24.7%)、肺炎(7.4%)、败血症(4.77%)、胆道感染、肠道感染、泌尿道感染、霉菌感染等。病原菌常为革兰氏阴性杆菌、大肠杆菌、葡萄球菌、厌氧菌及霉菌。(7)代谢障碍。尚可出现低血糖、低血钾、低血钠。

肝衰竭的治疗原则包括:阻止肝坏死;促进肝细胞再生;支持疗法和各种并发症的处理;人工肝脏清除血中有毒物质。急性肝衰竭早期诊断早期治疗具有重要意义,慢性肝衰竭重点是预防和清除肝性脑病的诱发因素。近期无突破性进展,可能的改进有:(1)监护及支持疗法:严格卧床,专人护理观察,给高糖、低脂、低蛋白、少盐饮食,输入 10% 葡萄糖、维生素 C、K1 及氯化钾等,以保证每天热量在 5 020~6 694kJ(1 200~1 600kcal)。(2)病因疗法:对 HBV、HCV、HDV 感染所致急性肝衰竭可用干扰素抗病毒治疗,3~5Mu(百万单位)/日,肌注,疗程 7~10d 或酌情延长,立即停用有关致病的药物、毒物、酒精等;妊娠急性脂肪肝者应在充分准备的前提下尽早中止妊娠,因肝缺血、缺 O<sub>2</sub> 所致者应积极抢救休克,改善心功能等。(3)补给新鲜血浆(血液)、白蛋白:早期、多次输新鲜血浆能补充凝血因子、补体、白蛋白、调理素等,可促进肝细胞再生,防治出血、腹水、脑水肿等,亦可增强机体的免疫能力,防治继发感染,是抢救肝衰竭患者的主要基础措施之一。同时可适当补充白蛋白;贫血、血小板减少、黄疸不太深者输新鲜血更合乎要求,每次 200ml,每周 2~3 次,不要等大出血时才输。(4)防止肝坏死、促进肝细胞再生:早期应用胰高糖素 1mg、胰岛素 5~10<sup>U</sup> 加于 10% 葡萄糖水 250 毫升静脉滴注,每天 1 次,疗程 10~20d;急重肝黄疸急剧加深、肝性脑病早期、未并发感染出血者可早期、小量、短疗程地使用强的松龙 30mg,早 8h 1 次服或地塞米松 5~10mg/d,静脉滴注;前列腺素 E<sub>1</sub>(PGE<sub>1</sub>)有保护肝细胞、调节免疫功能、利胆利尿、防止胃肠出血等多项功能,有报告用此治疗者,国外 8 例 FHF 患者无死亡(30μg/h,静滴,4 周),中国重肝患者 20 余例(50~200μg/d,10~20d)存活率 60% 以上;人胎肝细胞(FLC)疗法可促进肝细胞再生,加强枯否氏细胞功能,据报道经病理证实为重症肝炎患者 20 例,治疗存活 12 例(60%);最近有用肝细胞生长因子(HGF)20mg 肌注,2 次/d,疗程 20~30d 治疗重型肝炎的报道,在 115 例重型肝炎者分组治疗中观察到,HGF 组 30 例存活 22 例(73.3%),人胎肝细胞(FLC)组 45 例存活 28 例(62.5%),对

照组 40 例存活 16 例(40%),前两组均明显优于对照组(P<0.01,P<0.05),获得良好结果。(5)解除肝昏迷:口服新霉素或卡那霉素;乳果糖口服或灌肠;支链氨基酸或肝安注射液 250~500ml 日静脉滴注对慢性肝衰竭较为有效,对肝硬化意识障碍者有效率达 80%;血氨高者酌用谷氨酸钠 40~80ml、乙酰谷酰胺 200~1000mg 加在 10% 葡萄糖中静脉滴注降氨有效;脑水肿者给 20% 甘露醇 125~250ml 静脉推注,4~6d 后可重复使用,必要时用速尿。(6)制止出血:针对性补充凝血因子、凝血酶原复合物、新鲜血液、血小板;甲氧咪胍、雷尼替丁口服或注射,对抗 H<sub>2</sub> 受体,防止胃出血;凝血酶口服治疗胃出血效果良好;胃肠、子宫大出血,应及时输入大量的新鲜血液、血浆等。(7)控制感染:细菌未明确时,如腹膜炎首选氧哌嗪青霉素+新青 II+0.2% 灭滴灵 250~500ml/d 静脉滴注,肺炎用氧哌嗪青霉素+磷霉素钠+庆大或丁胺卡那或新青 I,败血症用新青 I+氧哌嗪青霉素+磷霉素钠,特别危重者酌用第 3 代头孢霉素(先锋必、菌必治、复达欣)+万古霉素。(8)清除腹水:补充白蛋白同时,口服安体舒通+双克,必要时用多巴胺+速尿腹腔内注射利尿,非感染性顽固性腹水可考虑腹水回输或大量放腹水同时补充白蛋白 200~400g/L,可加速腹水的消退。(9)保护肾功能:避免过度利尿、大量放腹水、消化道出血及损肾药物,少尿酌用白蛋白、血浆扩容+多巴胺 20~80mg/d 静滴,以扩张肾血管增加肾血流量,必要时用速尿。正常肝功能为肾脏继续生存的重要先决条件,抢救肝衰竭患者是根本的治疗方针。(10)体外肝灌注:是把病人与一个离体的有功能动物(猪、牛、猴、猴)肝脏相连,以渡过危险期。安博娜(Abouna)在美国对 1 例亚急性肝坏死而出现肝昏迷的 23 岁男性患者做了 16 次灌注,维持生命两个半月,经找到适合的肝脏供应者而行肝移植术。(11)血浆置换术:治疗 FHF 国外已有报道,近年国内研究表明,小剂量采病人血浆 800ml,并补充等量同型新鲜冰冻血浆,平均置换 6.5 次,每次间隔 3~4d,能除去血中毒性物质,补充白蛋白、凝血因子等,提高存活率。(12)人工肝血液透析:包括活性炭血液灌注、离子树脂血液灌注、聚丙烯腈膜血液透析等清除血中有毒物质,曾血透 37 例 FHF 患者,清醒 16 例(43.5%),存活 8 例(21.5%)。如果能找到更合适的吸附剂,血透能为肝细胞再生和肝移植争得时间。(13)肝移植:国外应用治疗急性肝衰竭已有成功报道,法国有一组 40 例患者肝移植治疗存活率为 55%,另 1 组 23 例,生存者 17 例。中国上海、广东曾为肝癌病人进行 10 余例人体原位肝移植术,效果不理想,需进一步深入研究。

肝衰竭的发病机理尚不十分明确,目前仍无特效治疗方法。预计今后将进一步深入研究发病机理;继续寻找阻止肝坏死、促进肝细胞再生的有效药物和疗法;寻找更合适的人肝吸附剂,继续生物学人工肝研制;进一步开展肝移植的研究等,以求得对肝衰竭治疗有突破性进展。

#### 参考文献

- 1 余鑫之,等. 安徽医科大学学报,1988,(2394):304~306
- 2 O'Grady J G, Williams R. Clin Gastroenterol., 1989,3:75~89
- 3 Rolando N, et al. Hepatology, 1990,1(10):49~53
- 4 沈耕荣,等. 重症肝炎. 天津:天津科学技术出版社,1990. 204~209
- 5 许家璋,等. 江苏医药,1991,17(4):178~180
- 6 余鑫之,等. 安徽医学,1991,12(传染病增刊):60~62

(安徽医科大学第一附属医院余鑫之教授撰)

**化脓性肝脓肿的治疗进展** advance in the treatment of pyogenic liver abscesses 化脓性肝脓肿是外科常见病,70 年代以来,由于 B 型超声和 CT 在临床上的应用,为肝脓肿的诊断提供了准确的无损伤的检查方法。CT 因费用昂贵,目前尚不能普遍开展。B 型超声检查比 CT 等检查设备简单,尤其是 80 年代以后,B 型超声已成为中国大多数医院普遍应用的临床检查仪

器。B超能显示肝内病变,影象清晰,界限及定位更为明确,能分辨肝内2cm病灶及脓肿液化程度。B超检查肝脓肿阳性率达96%以上。在有条件的医院,B型超声检查与肝的核素扫描、动脉造影、CT配合应用,相辅相成,有助于肝脓肿或不典型病例的早期诊断和鉴别诊断。

化脓性肝脓肿有单发的和多发的。肝脓肿患者的预后也决定于是单发性的还是多发性的。临床上多发性化脓性肝脓肿患者的发病率有逐渐增高的趋势。多发性肝脓肿多起源于胆道感染,它常可导致许多严重的合并症,如败血症、中毒性休克、DIC、肾功能衰竭等,因此,多发性肝脓肿患者预后差,病死率在20%~100%。

化脓性肝脓肿是一种严重的消耗性疾病,其治疗方法因病因、类型、位置和并发症的不同而异。急性期肝脓肿患者常伴有严重中毒、低蛋白血症、贫血、腹水及电解质紊乱。因此,必须积极给以纠正等支持治疗。

选择合适的抗生素是治疗肝脓肿的重要方法。化脓性肝脓肿的致病菌近年也发生变化,在抗生素应用前主要致病菌是大肠杆菌。近年由于厌氧菌培养技术的进步,发现主要致病菌是厌氧菌,其次是大肠杆菌、金黄色葡萄球菌,常常是厌氧菌和需氧菌的混合感染。以往细菌培养阴性、无菌生长率约50%,现知其中大部分是厌氧菌感染。对化脓性肝脓肿应用抗生素,常根据临床常见的致病菌选用抗生素。在细菌培养报告出来之前宜选用广谱抗生素,如氯霉素、丁胺卡那霉素、头孢霉素等,并加用对厌氧菌感染有效的甲硝唑;数日后,根据细菌培养结果选择敏感的抗生素。对于诊断明确、脓肿小、症状轻或早期肝脓肿患者,可以采用抗生素及支持疗法为主的非手术治疗,可使其中部分病例获得痊愈,尤其是散在多发小脓肿或未液化的脓肿者。

已经确诊的肝脓肿患者,一般都需要引流治疗。引流包括手术引流、经皮穿刺置管引流。

手术引流:它是治疗肝脓肿的传统方法。手术的适应症有:(1)B型超声显示脓腔直径大于30mm已液化的脓肿者。(2)脓肿已破溃并发腹膜炎、膈下脓肿、脓胸、化脓性胸膜炎者。(3)有胆道手术适应证的胆源性肝脓肿者。(4)慢性厚壁脓肿者。(5)较长时间非手术治疗无效者。(6)经皮穿刺及置管引流失败者。其手术方法最常用的是经腹一期引流。经腹引流可以全面了解肝脏情况,防止遗漏病灶,选用右肋弓下斜切口最为适宜。肝脏与腹膜已有粘连者可行腹膜外引流。对高位靠近膈的巨大脓肿可采用截肋经膈膜外引流,这种引流方法直接通畅,疗效满意。确定脓肿位于肝右后叶者,可由侧后方经膈膜外途径,即切除十二肋避开胸膜,由肝裸区进入。

对于慢性厚壁脓肿、巨大肝囊肿继发化脓性感染、肝脓肿慢性穿透并发支气管瘘或形成胆管支气管瘘,如患者情况良好,手术条件许可,可行肝叶或肝区段切除术。

手术处理单发性化脓性肝脓肿时,用带蒂大网膜填塞于脓肿内加胶管引流,有报告疗效满意。

经皮穿刺置管引流:位于肝实质较深部位的脓肿,术中定位困难,手术对肝的创伤大,手术引流常不满意。肝脓肿手术引流患者的并发症多,手术死亡率从6.6%到26%甚至更高。1953年,Seldinger介绍血管经皮穿刺插管法,不必切开血管,应用穿刺针及导丝,能将导管插入动脉或静脉,此后这种经皮穿刺插管技术又被用于胆道、肾盂及人体其他腔隙,成为阻塞性黄疸、肾盂积水、胸腔脓肿等的一种非手术治疗方法。对肝脓肿患者可在X线电视、B超及CT下定位,运用Seldinger技术行经皮置管引流。Gerzof报告,运用该技术经皮置管引流治疗肝脓肿治愈率达89%。

肝脓肿的经皮穿刺及置管引流在B型超声引导下进行最为方便。B超可临床提供穿刺部位、方向及深度,成功率达85%,复发或中转手术为0%~15%,病死率为2.6%~3.9%。国外和国内部分学者对肝脓肿经皮置管引流常用Seldinger三步法,该法较置管方法较复杂,所置导管内径较细,难以引出稠厚脓液,引

流时间较长。为此,王永征等自行设计和制作了“塑料套管穿刺针”(导管内径3.5mm,外径4mm),从1985年1月至1987年2月,对34例年龄在5~60岁的肝脓肿患者,在B型超声引导下经皮肝穿刺置管引流,34例均治愈,其中有1例因穿刺位置高而致合并气胸,1例多发性脓肿引流不畅中转手术,无复发,无死亡。王永征等所用的自制塑料套管针经皮置管,为进一步法经皮置管引流,在B型超声引导下进行,置管方法操作简单、准确可靠。因所置导管内径粗,较稠厚脓液也易引流出。王永征对1985年1月至1987年12月118例肝脓肿病例进行分析,其中经皮穿刺置管引流54例,手术引流34例,非手术治疗30例。将经皮引流和手术引流两种方法作对比,结果是:3年内肝脓肿患者的治疗已由第1年以手术引流为主,到以后2年以经皮穿刺置管引流为主。近几年王永征等已将经皮穿刺置管引流作为治疗肝脓肿首选治疗方法,并基本代替剖腹手术引流。经皮穿刺置管引流的患者比手术引流的平均少住院7.2天,平均医疗费用只有手术引流的40%,经皮引流只需在局麻下进行(小儿加基础麻醉),对病人损伤小,并发症和死亡率明显低于手术引流。

肝脓肿是否采用经皮穿刺置管引流应根据以下原则:(1)脓肿的大小及性质。经B超检查肝内大于40mm已液化的脓肿适合经皮置管引流,小于40mm已液化的脓肿可经皮穿刺吸引;尚未局限的弥漫性炎症,或虽已局限但脓肿未液化,或为多房性脓肿,不适合经皮置管引流。(2)脓肿的形态和数目。具有完整壁的单腔脓肿最适合于经皮置管引流,一个大的脓肿可经皮置两根导管,以便有效的冲洗。不同部位同时有两个以上的脓肿,大于40mm的脓肿行经皮置管引流,小于40mm的脓肿行经皮穿刺吸引。对位于第1肝门或第2肝门附近的脓肿为防止经皮置管时刺破大的血管和胆管,宜经皮穿刺吸引。(3)病人的一般情况。经皮穿刺置管引流是一种非手术引流方法,对病人没有太大的干扰,在短时间内即可完成,因此对全身情况差、年老衰弱不能耐受手术的病人,经皮穿刺置管引流是一个最方便安全的引流方法。

经皮穿刺置管引流的注意事项:(1)应在B超引导下进行。穿刺置管行径方向应避开胸腔、大血管、胆管,以防止气胸、胆瘘及出血。(2)置管成功后应立即在B超监测下抽空脓液,以防脓腔因压力高、脓液沿导管外壁流入腹腔。(3)导管与皮肤应妥为固定,防止滑脱。(4)继续抗感染和支持治疗。(5)如置管引流不畅,可在B超下调整导管位置或更换导管,如仍然引流不畅,中毒症状不能改善,应及时中转手术引流。

#### 参考文献

- 1 李宝华,实用外科杂志,1985,10:506~507
- 2 黄自平,中西医结合杂志,1985,5(9):534
- 3 徐乃元,实用外科杂志,1985,10:511
- 4 李文信,陕西新医药,1985,14(9):23
- 5 Gerzo F S G, Johuson W C, Robbins A H, et al. Am J Surg., 1985,149(4)
- 6 王永征,王德生,常德厚,等.安徽医科大学学报,1988,1:30~32

(安徽省立医院王永征主任医师撰)

**体外冲击波碎石治疗胆石症** fragmentation of bile stones by extracorporeal shock waves 近年来非手术治疗胆石症发展迅速。口服溶石药、内镜激光碎石和机械碎石、经皮经肝胆囊置管溶石等方法均成功地用于临床。体外冲击波碎石(简称ESWL)是治疗胆石症的又一种新方法。它与CT和核磁共振一样,是现代高新技术的产物。德国首先研制出碎石机并用于临床。慕尼黑大学Sauerbruch教授于1986年首次报告ESWL治疗胆石症的经验。因此,ESWL治疗胆石症在该国的发展和运用也远较其它国家广泛而迅速。现已有München, Mainz和Wuppertal等治疗中心采用ESWL治疗千余例胆石症病人,取得令人鼓舞的疗效。

1980年,ESWL首次用于治疗肾结石。随后,Brendel等报

告ESWL治疗胆石症的动物实验结果:(1)冲击波可在体外粉碎胆石。(2)如碎石块<2mm,多可自动排入十二指肠。(3)冲击波脉冲总数≤1500时,对组织损伤很小。(4)较大的碎石难以自动排出。在此基础上,1985年首次应用ESWL治疗胆石症并获成功。随着碎石机的更新换代和治疗技术的提高,目前对选择性胆囊结石病人,碎石成功率高于95%,治疗后1年内结石排净率为80%~90%。胆管结石碎石成功率为91%~98%,碎石排净率96%~96%。严重并发症发生率<5%。

适应性

1. 胆囊结石:(1)症状性胆囊结石。(2)大小为10~30mm的孤立结石。(3)总数不超过3枚的多发结石,其总体积不大于30mm<sup>3</sup>的结石。(4)胆囊收缩功能良好。(5)超声检查胆囊壁正常。(6)结石无钙化。反之,无症状结石、结石过大过多、钙化结石、胆囊功能异常、伴有急性胆囊炎者,均视为禁忌症。

2. 胆管结石(1)因结石过大、嵌顿或合并胆管狭窄。内窥镜和手术难以治疗的肝内外胆管结石。(2)体弱、高龄及有严重合并症的手术高危病人。因碎石后多需用窥镜取出碎石,故钙化结石或色素结石并非禁忌,但凝血障碍者不宜采用ESWL治疗。

治疗原理及方法 目前碎石机主要由德国的Dornier、Siemens和Wolf等公司生产。Dornier碎石机采用水下火花放电技术。Siemens采用高压电磁技术。Wolf采用压电晶体技术。其中,Dornier碎石机冲击波能量高,焦点中心压强达10kPa。冲击波频率在1~2.5Hz,分级可调。第2代碎石机均无水槽并配有精确的超声定位装置。治疗前为胆囊结石病人安置心电图和血压监测。治疗时病人俯卧,右上腹与冲击波介质水囊袋良好接触,在超声监视下将冲击波焦点集中于结石。治疗多采用频率4级、强度3级,脉冲总数不宜>1800。治疗时可通过超声观察结石被粉碎的情况和聚焦是否准确,如超声显示结石被粉碎或脉冲总数已≥3000时应停止治疗。如第1次治疗后碎石块≥5mm,则需再次甚至多次治疗。München的经验是,首次治疗常规至脉冲总数1600为止。治疗后服溶石药,3个月后再根据残留碎石的大小再决定是否需再次碎石治疗。通常治疗时间为20~40min,治疗时多不需麻醉。

治疗前,经内窥镜为胆管结石病人置一鼻胆导管,经此导管行胆道造影;少数病人需行PTC或ERCP。在造影同时行双维X线结石定位和冲击波聚焦。治疗强度、频率和脉冲总数与胆囊结石相同。目前多采用第1代碎石机治疗胆管结石,因该机有X线定位系统。治疗时病人需半坡位卧于水槽中。碎石后用内窥镜切开十二指肠乳头并取出碎石块或经鼻胆导管注入溶石药治疗。过大的碎石块需再次或多次进行碎石治疗。

辅助检查和辅助治疗 ESWL治疗前应做以下检查:胸部和胆囊区摄片,肝胆超声、心电图和常规实验室检查。必要时行肝胆CT和核磁共振检查,以了解结石密度。现有的碎石机还不能把结石粉碎至小到可自然排出的程度,故胆囊结石病人碎石后还需服溶石药。因此,钙化结石和色素型结石不宜采用ESWL治疗。常用的溶石药是鹅去氧胆酸和熊去氧胆酸,每日总量各为500mg或按7.5mg/kg计算,总量睡前1次顿服,通常在ESWL治疗前2周开始服用,至碎石完全排出后2~3个月停药。少数学者在胆管结石ESWL治疗后经鼻胆导管给患者注入溶石剂,以促进碎石的排出。值得注意的是这种局部溶石可能诱发胆管炎。

结果 由于病例的选择、治疗条件和技术及随访时间的不同,各治疗中心的治疗结果差距较大。München中心治疗600余例胆囊结石患者,其中单发结石在ESWL治疗后1年内碎石排净率达80%~90%,多发结石治疗后半年内碎石排净率为30%~50%;严重并发症发生率<5%。Sackmann报告97例胆囊结石患者,除1例外均碎石成功,单发结石碎石后第1、3、6个月的碎石排净率分别为30%、56%和75%,6例多发结石中4例在碎石后半年内排净碎石。Wappertal治疗中心早期报告157例胆囊结石患者,碎石成功率为94.3%,平均8.5周的短期随访结果:碎石排净率为19.7%,但61.8%的病人ESWL治疗后结石明显

减少,作者预计长期随访碎石排净率可达70%~85%。

目前在德国,ESWL已用于治疗胆管结石,大约200例肝内外胆管结石病人接受了治疗,结果良好。Sauerbruch认为80%以上的胆管结石经内窥镜治疗有效。80%内窥镜及手术难以治疗的病人用ESWL治疗有效。München中心报告113例因结石过大、嵌顿或伴有胆道狭窄致使内窥镜治疗失败的胆管结石患者,平均年龄72岁,30%的病人合并胆管炎,结果碎石成功率达86%,其中23例自动排石,71例经内镜十二指肠乳头切开后取净碎石,3例采用局部溶石成功。虽然目前ESWL治疗胆管结石的病例尚不多,但结果表明,ESWL对内窥镜和手术难以治疗的胆管结石病人,尤其对高龄高危病人是安全而有效的,其并发症和死亡率均低于手术组。

目前认为影响ESWL治疗效果的主要因素有:(1)聚焦的准确性。如果焦点与结石偏差大于1cm,碎石难以成功。(2)结石的性状。大而规则的结石难以粉碎,其碎石块也较大;高密度非固醇类结石碎石后溶石困难,疗效不佳。

并发症与副作用 胰腺炎发生率为2%~3%,多为碎石块梗阻引起的胆源性胰腺炎,保守治疗多可缓解,少数病人需行内镜下乳头切开取出碎石,解除梗阻。胆囊炎多为碎石阻塞胆囊管所致,抗生素治疗有效,少数病人需中转手术治疗。胆绞痛最多见,约30%的病人碎石后有不同程度的胆绞痛,这可能是排石所致,一般口服解痉剂即可缓解。另有一些病人治疗后出现镜下血尿或肉眼血尿,但均为一过性,无临床意义。肝脏局部小血肿极少见,病人多无症状;部分病人出现AKP、SGOT、SGPT及淀粉酶升高,但几乎都在1~2d内恢复正常。

参考文献

- 1 Brendel W, et al. Lancet, 1983, 1: 1054
- 2 Sauerbruch T, et al. New Eng J Med, 1986, 314: 818
- 3 Staritz M, et al. Gastroenterology, 1987, 92: 1632
- 4 Sackmann M, et al. Gastroenterology, 1988, 318: 393
- 5 Staritz M, et al. khnikarzt, 1988, 17: 210
- 6 Sackmann M, et al. New Engl J Med, 1988, 318: 393
- 7 Ell Ch, et al. Gastroenterology, 1988, 94: 537
- 8 Sauerbruch T, et al. Gastroenterology, 1989, 96: 116

(安徽医科大学第一附属医院耿小平副教授撰)

胆囊息肉样病变 polypoid lesion of gallbladder SPLG

它是多种不同病理类型的胆囊病变的总称。随着B型超声显象技术的广泛应用,SPLG的临床发现日趋增多。过去由于没有一个比较明确的概念,因此使用的名称也很不统一。由于SPLG在胆囊壁上形成一个局部的肿块,从病理角度看,它包括胆囊的良性肿瘤(腺瘤、腺肌瘤、囊腺瘤、腺纤维瘤等)和胆囊癌在内,所以有的学者认为是胆囊肿瘤。有人根据某些特点将其称为粘膜内憩室。也有人认为它是一种由于先天性缺陷而造成的畸形,但是在病理上它并不符合发育异常的特征。1960年,Jutras认为是由于胆囊壁部分组织发生慢性过度增生的结果,它既不同于因炎症引起的疤痕组织增生的病变,也不具有肿瘤那样破坏性与恶变的趋势,因此把它称为胆囊增生性病变。后来有人从形态学角度提出将向胆囊腔内突出的局限性隆起形病变,包括肿瘤性的或非肿瘤性的、良性的或恶性的病变,称为胆囊隆起性病变。白井曾把它的定义定为:直径1mm以上,从胆囊粘膜明显向上突起的病变,称之为胆囊隆起性病变。而Jones等称它为SPLG。由于病变的本身有类似息肉样的变化,如胆固醇性息肉、炎性息肉等;同时包括胆囊隆起性病变和胆囊肿瘤,但就其各自的鉴别诊断和在外科临床及影像学检查方面,术前一般很难判定,因此把它统称为SPLG已为国内多数学者承认。

胆囊胆固醇沉着症,亦称胆固醇性息肉,是SPLG中最为常见的一种,是胆固醇代谢障碍所致。病理改变主要是在上皮细胞的基底膜内有胆固醇沉积,由于组织细胞过度膨胀(在病理学上称为泡沫细胞),逐渐形成黄色的小结节向粘膜表面突出。它的

分布有两种类型：一种是弥散型的，为多数黄色的小结节广泛地分布在胆囊粘膜表面，因此有人把它称为“草莓”状胆囊。另一种呈孤立型的结节，有类似息肉样的改变，数目较弥散型的少些，体积大小不甚均匀。有作者报告这类患者胆汁中胆固醇含量较正常人高出8倍，胆石症合并率约占10%。本病与胆囊结石的形成有着密切的关系，但其产生的原因和机理目前尚不清楚。

**胆囊腺肌瘤病**：为粘膜上皮与肌纤维增生所致。正常的粘膜由上皮组织下陷而成罗-阿氏窝，一般不到达肌层。在有腺肌增生病时，可见粘膜肥厚增生，罗-阿氏窝数目增多，扩大成串状，并穿至肌层深部，窝与胆囊腔之间有管道相连，形成假性憩室，故有“粘膜内憩室”之称。肌层亦呈明显的增生，使胆囊壁显著增厚。根据病变的分布情况可分为弥漫型的、节段型的和局限型的。它的发病与胆囊内压上升及慢性炎症刺激有关，为非肿瘤性病变，不发生恶变，也不合并胆石。

**胆囊腺瘤**：为真性息肉，可分为乳头状的和非乳头状的或管状的腺瘤。一般有短而粗的蒂，圆形，表面光滑或呈分叶状，腺瘤多为单发，发生部位不定，胆石合并率小于50%，直径平均5~10mm者多见。腺瘤来源于上皮成分的增殖，其内常伴有异型细胞，其中高度组织异型者与癌鉴别困难。Koga指出，病变的大小对鉴别良恶性有重要的价值，他发现94%的良性肿瘤直径在1cm之内，88%的恶性肿瘤直径大于1cm。

SPLG与胆囊炎及胆囊结石的症状很相似。主要表现为患者上腹部及右季肋部疼痛，有的伴有背疼、发热、黄疸、呕吐、腹泻、便秘、腹部胀满、食欲不振、全身乏力及出冷汗等，造成上述症状的机制不清。有时症状极不典型或几乎无明显症状出现，则更不易诊断；在合并胆囊结石的情况下也容易将此病漏诊。SPLG主要依靠影像学检查及病理学诊断，Albert(1979)曾用胆囊造影的方法获得成功。胆囊造影的特点是胆囊有功能亢进的现象。由于上皮组织增生，胆囊粘膜功能增进后，胆囊显影的浓度良好，有时较正常胆囊的显影还要浓些，在进脂肪餐5分钟内即可看到胆囊开始收缩的高度敏感现象，由于肌肉组织增生，胆囊的收缩能力增强，使胆囊的排空既迅速又完全，过去常有人把胆囊这种显影与排空良好现象认为是正常情况，以致忽略作进一步检查而延误诊断。由于病变。阳性征象为的形态和显示的程度与胆囊的各种位置及其充盈状态有密切的关系，所以在胆囊造影时应在各种不同的位置和时间多次投照，最好在透视下进行点状摄片，以便发现一些细小的病变，可见数个不规则形状的充盈缺损，有时应与乳头状瘤、乳头状腺瘤、肉芽肿等区别，但它们大多呈单发的，如果是多发的，同时又有胆囊功能亢进的表现，即可作出诊断。发现阳性征象后，不应满足于这些发现，还应继续注意胆囊功能变化情况，脂肪餐后应观察1~1.5h，如果发现一些形态上的典型改变，再结合胆囊功能亢进的表现，诊断大多可确立。

B型超声显象是目前诊断SPLG的最好方法，主要发现为胆囊壁上恒定的单个的或多个强光团或稀光团，无声影，不随体位改变而移动。少数情况下还可清楚显示它是否有蒂，胆固醇性息肉常为多发，直径小于1cm，炎性息肉与胆固醇性息肉在声象上无法区别，腺瘤样息肉常为单发，直径大于1cm，B超诊断尚可定位。CT检查则因息肉较小，容易遗漏病灶而造成漏诊，故不作常规应用。

值得注意的是，在手术探查时往往只注意胆囊中有无结石，以致忽略了是否有SPLG存在，有时在胆囊内没有结石的情况下，有SPLG也不能用手触摸清楚，因此在切除胆囊的操作中，用血管钳钳夹胆囊底部，而将病变损坏，使息肉样组织脱落、破碎，影响正确的诊断，故应保护好切下的胆囊标本，完整无缺地送交病检，以防止造成病理上的误诊或漏诊。

SPLG系胆囊良性病变，治疗方法主要根据症状的严重程度决定。症状明显的行胆囊切除术，术后可解除多数病人的症状。症状不明显的则行非手术治疗。对无症状或症状轻微者可定期随访观察，3~6月用B超进行随访检查，一旦病变增大或临床症状明显加重时再择期手术。但有作者认为，早期原发胆囊癌的声音

图表现可酷似SPLG，鉴别其良性与恶性却很困难，有鉴于此，认为对SPLG，无论患者有无症状，皆为手术指征，对于单发性的、体积较大的病变尤其如此。目前，大多数学者则认为SPLG的手术指征是息肉大于1cm的、胆绞痛症状较重者、胆囊息肉伴发胆囊结石者、胆囊颈部息肉影响胆囊排空者、腺瘤样息肉被认为是癌前病变者。

#### 参考文献

- 1 Schoenfield L J. Disease of gallbladder and biliary tract, Canada; Wiley Medical publication, 1977, 320~321
- 2 邓绍庆,等. 实用外科杂志, 1986, 6(10): 527
- 3 白井良夫. 临床外科, 1986, 41: 17
- 4 邓绍庆,等. 实用外科杂志, 1987, 7(9): 459
- 5 余云,等. 实用外科杂志, 1987, 7(9): 461
- 6 毛伟征,等. 普外临床, 1987, 2(6): 363
- 7 马桂美,等. 实用外科杂志, 1988, 8(4): 189
- 8 张陪明,等. 临床外科, 1990, 5(3): 187

(安徽医科大学附一院王蔚菡教授撰)

#### 莨菪类药物治疗急性出血坏死型胰腺炎

急性出血坏死型胰腺炎系急性重症胰腺炎，患者病情急，预后凶险，病死率高达50%以上。其治疗成功与否与及时作出重型的估计和准确的手术决策有关，及早行内科综合治疗，可有效地阻断急性出血坏死型胰腺炎病情的发展与恶化，已成为降低病死率的重要环节。80年代初期，开始用莨菪类药物抢救治疗急性重症胰腺炎患者，取得明显疗效，降低了病死率，减少了并发症，为重症胰腺炎治疗提供了有效的方法，也扩大了莨菪类药的应用范围。

早在1959年钱潮教授首先在中毒型菌痢和感染性休克患儿身上使用大剂量阿托品作为抢救药物，取得较好效果。1965年4月，中国科学院药物研究所等单位协作合成了另一种莨菪类药物山莨菪碱(Anisodamine, 代号654-2)。临床试用和实验研究认为654-2对中毒性痢疾和暴发性流行性脑膜炎伴感染性休克者有显效，使病死率大幅度降低。1982年，高从光等发表了山莨菪碱治疗急性胰腺炎的文章。1983年在昆明召开的第4次中国微循环与莨菪类药物学术会议上，潘秀珍等报告用莨菪类药物治疗急性出血坏死型胰腺炎的经验，受到重视。文章刊出和英文摘要刊于中国医学文摘(内科分册)后，典型病例被收入宋心华主编的《起死回生一百例——危重急症抢救经验集》一书中。在此基础上，他们又前瞻性研究了大剂量654-2治疗急性出血坏死型胰腺炎。对确诊为重症胰腺炎的住院病人，不论伴或不伴休克，在其他内科疗法的基础上，依病情给予10~20mg 654-2，每10~20min静脉推注1次，直至病情好而减量，疗程7~10d，平均用量555mg，最大剂量2690mg，结果取得满意的疗效，使患者病死率降至17.4%。上述文章分别于1987年在北京召开的国际城市急诊医学学术会议和1990年美国明尼苏达州急诊医学年会上宣读。此后，654-2在急性出血坏死型胰腺炎的综合治疗中受到重视，已较多用于临床。到70年代末以前，研究者认为654-2有直接扩张小血管、改善微循环和阻断 $\alpha$ -交感受体的作用。急性胰腺炎患者发作的早期就有胰血流量下降，654-2的治疗在于对抗微血管痉挛、抑制血小板凝血素的合成并进而抑制粒细胞和血小板聚集；抑制胰液分泌，降低胰酶原活化；对抗儿茶酚胺引起的血管痉挛和乙酰胆碱分泌亢进所造成的血管扩张，有双向作用。

近几年的研究重点在于扩大临床验证和作用机理的深入探讨。随着急性出血坏死型胰腺炎发病机制和莨菪类药物作用机理研究的深入，进一步探讨了该药对急性出血坏死型胰腺炎的治疗原理。

80年代初期，苏静怡等对654-2抗休克机理的研究中发现该药并非阻断 $\alpha$ -交感受体，故无明显和持久的扩张血管作用，而是对细胞有直接保护作用。归纳其作用，一是改善微循环：①调节微血管管径，解除微血管痉挛外，还能使降低了阻力的血管保持一定的张力，显示其有双向调节作用；②减轻血管内皮细胞

损伤,减少渗出;(3)改善血液流变学状况,降低全血比粘度,使团聚的或附壁的血细胞解聚,增加红细胞变形性;(4)增加微血管的自律运动。二是山莨菪碱的细胞保护作用:(1)有稳定溶酶体和线粒体的作用,在细胞水平上提高细胞对缺血、缺氧的耐受性,称之为稳膜剂;(2)离体实验证明,有明显抑制胰腺组织匀浆蛋白水解作用,使毒性多肽的产生减少,这可能是抑制 MDF(心肌抑制因子)产生的机制之一;(3)有钙拮抗作用,阻滞钙离子从细胞外进入细胞内聚集,起细胞保护作用;(4)抑制脂质过氧化作用,磷脂是细胞膜的主要成分,内毒素有刺激脂质过氧化作用,从而损伤细胞,654-2 有抑制内毒素脂质过氧化作用。

急性胰腺炎发病机理的研究:自从 1901 年奥派(Opie)提出共同通道学说,70 年代可斯塔(TM. Acosta)和肯尼(TR. Kelly)提出游走学说后,已被广泛用于临床。后里伯(HA. Reber)等对猫的胰管通透性进行大量深入的研究,于 1979 年提出“胰管粘膜屏障”(PDMB)的概念,指出胰腺之所以不被活性胰酶自家消化,是因为胰管粘膜具有“屏障”功能,当某些物质(如胆盐等)损伤胰管粘膜的完整性后,胰管通透性增强,活性胰酶则可返流到胰间质造成急性胰腺炎。其次是“细胞内激活”的新概念,按照派拉德(Palade)的经典模型,胰酶于粗面内质网合成,运送到高尔基氏器储存,然后移至密集空泡,进而分离成溶酶体及酶原颗粒,分别储存蛋白水解酶和消化酶,消化酶通过胞吐作用从酶原颗粒排入胰管系统。近年提出均衡模型,认为有许多细胞外因素可影响酶的平衡及酶与消化酶的混合、激活及自身消化。斯蒂尔(M. L. Steer)称之为“细胞内激活”假说。第三是血管因素、微循环障碍。胰腺是一个对缺血很敏感的脏器,其局部微循环在急性胰腺炎发病机理中占重要位置。萨罗(Thal)用胆汁逆行灌注犬胰管,诱发急性胰腺炎炎症出现后 5min 胰腺即出现毛细血管血流聚集,供应小叶的动静脉显示区域性的、片断性的痉挛,有极度扩张的静脉区域,20min 后血管壁破裂,红细胞漏出管外形成胰腺出血。此外,通过同位素扫描、胰十二指肠静脉血流量直接测定及电磁血流计测量动脉血流等检查,得出的结论是急性出血坏死型胰腺炎时胰血流量下降是胰腺局部病变造成的,也是由于微循环障碍所致。因而认为微循环障碍在急性出血坏死型胰腺炎发病机理中是一个重要环节。近年,卡姆朗(Cameron)等的研究资料表明,急性胰腺炎时由于糜蛋白酶激活,使嘌呤去氢酶转化为黄嘌呤氧化酶的过程加速,进而催化次黄嘌呤向黄嘌呤转化,在此过程中产生大量活性氧(超氧阴离子自由基、过氧化氢自由基、单线态氧等),正常细胞产生的少量活性氧可被细胞内消除剂如过氧化酶、过氧化氢酶等解毒,病态下活性氧大大超过消除能力而造成组织损伤及毛细血管通透性增强,致微循环障碍。严律南等对急性出血坏死型胰腺炎实验犬进行血液流变学的动态观察,发现血细胞表面电荷密度进行性下降,血粘度进行性上升,后者造成微循环中血液阻力上升,微血流密滞及血液灌注下降,因此胰腺炎时胰腺产生的某些毒性物质入血,导致微循环血液粘度增大,也导致微循环障碍。

沈骥等研究了 654-2 对急性胰腺炎作用的机理,结果表明,654-2 能维持急性胰腺炎大鼠胰腺血流量及组织灌注量的相对稳定,提高急性胰腺炎大鼠的生存率和延长其生存时间。光谱见 654-2 使急性出血坏死型胰腺炎变轻或慢性转化。电镜示 654-2 减少胰腺细胞溶酶体的破坏和减轻其他超微变化。654-2 对胰腺炎太鼠的作用,可能是明显降低胰组织细胞溶酶体和线粒体的破坏,提高细胞对缺血、缺氧的耐受性,从而阻断胰酶激活的途径,防止胰腺细胞自身消化,有效地阻止水肿型胰腺炎发展成急性出血坏死型胰腺炎和防止后者的恶化。

近几年急性重型胰腺炎也像其他微循环障碍性疾病一样,早期用 654-2 治疗已逐渐推广。临床理想用药的经验是:(1)早期给药,以解除微循环障碍,抑制胰酶分泌,抢救成功率高,并发症少;(2)654-2 应短期内加至最高维持量,重症病例对 654-2 耐受性强,副作用不明显,开始时较大剂量给药并很快增加到最高量,使病情较快好转,尤其对伴有休克病人;(3)逐渐减量,缓

慢停药,以防病情反复,先静脉推注,病情好转后改为静滴,然后肌注或口服过渡至停药,效果比较满意。

急性出血坏死型胰腺炎的发病病因和机理都很复杂。莨菪类药物治疗虽有改善微循环和减轻血液流变学障碍以及对细胞的保护作用,恢复血管通透性,对阻断病情发展起积极作用,但去除病因,修复胰管粘膜屏障,阻止细胞内激活等环节也十分重要。因此,今后研究的重点将在如何更好地发挥莨菪类药物治疗本病的作用,进一步降低病死率,这样就要及早做出重型胰腺炎的判断,迅速采取禁食、胃肠减压、抗感染和支持疗法等在内的综合内科疗法;早期使用大剂量 654-2;对少数严重的重型病例应密切观察,做出及时手术治疗的决策。再者,对莨菪类药物治疗胰腺炎的机理还要进行动物试验和总结临床经验,以探讨最佳给药方案。预计莨菪类药物将进一步广泛用于急性出血坏死型胰腺炎的治疗,并获得理想效果。

(福建省立医院潘秀珍教授撰)

**内镜逆行胰胆管造影** 胰腺、胆道疾病发病率高,诊断方法尚不完善。内镜逆行胰胆管造影(ERCP),是 70 年代以来发展起来的,可以较好地显示肝内外胆管、胰管,是胆道疾病的重要影像学诊断方法;是唯一直接显示胰管的检查手段,对胆胰疾病和部分肝脏疾病的诊断具有重要价值。1973 年 ERCP 研制成功,并推广应用于临床。中国于 1976 年引进设备,开展 ERCP 检查,目前已广泛应用。

ERCP 的适应症 (1)黄疸原因待查;①肝外胆管梗阻,如胆管结石、胆道肿瘤、各种原因的胆管狭窄,特发性硬化性胆管炎、缩窄性十二指肠炎、胰头占位性病变等。②肝内胆管梗阻,如药物性胆汁淤积、肝硬化、肝肿瘤、肝内胆管结石、毛细胆管性肝炎等。(2)胰腺疾病:①胰腺炎症,如急性胰腺炎恢复期(4 周以后)、慢性胰腺炎、胰腺结石、假性胰腺囊肿。②胰腺肿瘤,如胰腺良性肿瘤(胰腺外分泌肿瘤、胰腺内分泌肿瘤、胰腺囊肿)、胰腺恶性肿瘤(胰腺癌、胰腺恶性内分泌瘤、胰腺囊性癌)。(3)原因不明的上腹痛,可疑有肝、胆、胰腺疾病者,同时可以诊断胃、十二指肠疾病。(4)胆道术后早期并发症确定及术后黄疸原因、早期诊断胆管损伤;确定术后胆道出血的原因,同时鉴别胃、十二指肠出血;确定术后胆漏(瘘)部位;早期诊断和处理术后胆道残余结石。

ERCP 禁忌症 (1)全身衰竭或重要器官(心、肺、脑等)功能不全。(2)急性传染病。(3)碘剂过敏者(其发生率约 0.34%,且较轻,不是绝对禁忌症)。(4)急性胆管炎(忌单作 ERCP,可同时作 ENBD)。(5)急性胰腺炎(忌单作 ERCP,可同时作 ENPD)。(6)B<sub>1</sub> 式胃切除术后,ERCP 成功率低,为相对禁忌症。

检查方法 (1)禁食 6h,咽部局麻,肌注解痉镇痛剂。纤维十二指肠镜经口、咽、食管、胃到达十二指肠降部,寻找十二指肠乳头,对正乳头开口插入造影导管。X 线透视下注入造影剂(15~25%泛影葡胺),观察胆、胰管至取得满意图象时多方位(前后位、右斜位、左斜位、头低足高位)摄片。退镜,边退边观察胃、十二指肠及食管。(2)X 线阅片,注意胆胰管管径、行走方向、内膜破坏、腔内梗阻、狭窄与扩张、分支分布等,结合透视所见,作出诊断。(3)术后禁食 2h,观察有无并发症发生。

ERCP 并发症及防治 国外报告 ERCP 并发症发生率为 2.3%~3.0%,其中致死性并发症 0.15%。国内报告并发症为 1.19%~3.9%,至死性 0.19%。主要并发症及防治:(1)注入性胰腺炎。ERCP 后患者出现剧腹痛、血淀粉酶及尿淀粉酶升高,应按急性胰腺炎处理。其中少数病例可发展为急性出血坏死型胰腺炎,是致死性并发症之一。控制注入造影剂的速度和压力,或者 ERCP 发现胰管梗阻即同时加作 ENPD,可防止和减少本症发生。(2)化学性胆管炎。ERCP 后患者右上腹疼痛,畏寒,发热,黄疸加深。应解痉止痛,用抗生素及激素治疗。控制造影剂注入量,或 ERCP 时发现胆管梗阻而加作 ENBD,可降低本症发生率。(3)败血症。较少见,对胰腺假性囊肿患者进行 ERCP 要特别注

意本并发症的防治。(4)器械损伤。如消化道穿孔、胆道出血等。

**ERCP对胰腺疾病的诊断价值** (1)胰腺癌:ERCP可见胰管狭窄、梗阻、中断、移位、胰管分支稀疏、缺损、造影剂聚集池及主胰管和胆总管截断的“双管征”,诊断正确率86.6%。对不能确诊的患者可同时进行胰实质造影(ERPP),即在ERCP造影剂中加入“表面活性物”,使胰腺实质显影;也可同时抽取胰管内胰液进行生化测定和脱落细胞学检查;还可以同时行内镜下针吸细胞学检查。(2)急性胰腺炎:多视为ERCP之忌,但对诊断困难的急性出血坏死型胰腺炎,可作ERCP帮助确诊,并同时行ENPD作辅助治疗。(3)慢性胰腺炎:ERCP是诊断慢性胰腺炎的主要手段,可确切了解胰腺炎症程度、范围、有无结石形成及恶变,对临床治疗具有指导意义。(4)胰腺囊肿:可确定囊肿位置、大小、与主胰管关系、有无破裂及内瘘。

**ERCP对胆道系统疾病的诊断价值** (1)胆石症:可确切了解胆道结石的大小、数量、分布情况及其并发胆管狭窄的部位。(2)胆管及壶腹周围癌:ERCP可见胆管和胰管破坏、受压、梗阻、狭窄、扩张。部分晚期患者肿瘤致胆管完全梗阻,ERCP只能显示梗阻以下的“正常”胆管,需与PTC联合应用,方能了解胆管全貌。(3)黄疸的鉴别诊断:国内外报告ERCP对黄疸的诊断与手术、病理对照符合率为85.6%~96.4%。(4)肝内胆管疾病:如结石、囊状扩张、狭窄及癌变,ERCP有一定诊断价值。(5)功能性胆道疾病的诊断:可利用ERCP导管行胆道测压,Oddi括约肌测压,寻找诊断依据。(6)特发性硬化性胆管炎:ERCP是本病确诊的最好方法,且可留置ENBD导管进行冲洗、灌注(激素)及扩张治疗。

**由ERCP发展的介入治疗** (1)内镜鼻胆管引流术(CNBD):用于治疗梗阻性黄疸(减黄)、急性梗阻性化脓性胆管炎(减压)。(2)内镜鼻胰管引流术(ENPD):主要用于急性出血坏死型胰腺炎的辅助治疗,也可用于慢性胰腺炎的治疗。(3)内镜十二指肠乳头括约肌切开术(EST):治疗缩窄性十二指肠乳头炎、胆管下端狭窄、结石嵌顿及取石治疗,也可用于恶性梗阻的姑息性治疗。(4)内镜胆道取虫术:经纤维十二指肠镜将套圈器插入胆管内,套取虫体。(5)内镜置管溶石术:方法同ENBD,经导管注入局部溶石剂。(6)内镜直视下碎石术:需作EST,应用母子胆道镜,直视下碎石(器械碎石、震波碎石、超声碎石、激光碎石、等离子碎石等),冲洗、取石。(7)内镜气囊导管扩张术:治疗胆管、胰管良性狭窄,需在X线监视下进行。

#### 参考文献

- 1 Bilbao M K. Complication of endoscopic retrograd cholangiopancreatography study of 10000 cases gastroenterology 70:314,1976
- 2 Blackstone MO. Cytology collection during ERCP The American Society for Gastrointestinal Endoscopy 1981 National Postgraduate Course, 1981 New York
- 3 Cotton P B. Large common bile stones; Endoscopic thechigaes to enhance removal, The American Society for Gastrointestinal Endoscopy 1982 National Postgraduate Course 1982 chicago
- 4 Cotton P B. 逆行胰胆管造影及其有关治疗措施进展临床肝胆病杂志,1986,2(3):161
- 5 王成友,金艺琴,余宏铸. 内镜逆行胰胆管造影阴性病例分析,临床误诊误治;1990,3(3):8
- 6 李智华,周永碧,王卫,等. 内镜逆行胰胆管造影 1530 例分析,实用外科杂志,1991,11(11):583
- 7 鲁焕章,范君度,高德宝,等. 内镜治疗胆胰病 762 例分析,实用外科杂志,1991,11(11):569
- 8 田伏洲. 乳头括约肌功能与内镜测压,见巢振南主编腹部内镜外科,第一版. 成都,四川科学技术出版社,1990. 122

(安徽医科大学第一附属医院王成友教授撰)

## 术中内分泌疾病危象及处理 treatment of

endocrine disease crisis during operation 麻醉和手术常可引起一系列内分泌变化,而内分泌疾病也会影响麻醉和手术的进程。临床常有内分泌功能失常需施行麻醉和手术者,麻醉时应首先考虑拟手术腺体的功能状态,手术时可能发生生理功能突变所招致危象的发生和其治疗措施。

**垂体前叶功能减退症** 炎症、增生、肿瘤、创伤、缺血等引起垂体前叶病变,导致垂体功能减退。性腺、甲状腺、肾上腺皮质功能不足,当受到手术、创伤、失血等应激时或切除垂体后,术中和术后早期可出现垂体前叶功能减退性危象。患者临床表现精神失常、谵妄、软弱、嗜睡或昏迷、脱水、尿少、高热或低体温、低血糖、心动过速、血压下降、体位性低血压甚至发生休克,EKG可出现T波低平。

术前对垂体功能减退病人应进行详细检查,针对内分泌腺体功能减退,分别给予相应激素如肾上腺皮质激素、甲状腺激素治疗,同时维持水和电解质平衡。垂体功能减退病人的代偿功能很差,对麻醉性药物很敏感,吗啡、巴比妥类、吩噻嗪类药物可导致昏迷,宜慎用或不用。该类病人心排量减少,全麻宜采用浅麻醉,防止缺O<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>积蓄及心功能不全或肺水肿发生。对疑及肾上腺皮质激素不足者应立即取血进行血糖、血钾、钠和皮质醇测定。由于病情危急,应及时处理。

肾上腺皮质激素可增强病人对手术与麻醉的抵抗力,改善脑部微循环,减轻下丘脑损害,防治脑水肿并防止危象的发生。对危急病人立即给氢化考的松100mg于1~4h静脉滴入,24h可用500mg,后视病情好转酌减量。为了防止静脉滴注中断时皮质激素出现不足,可同时肌肉注射醋酸皮质素50mg,6h后再给1次,病情好转即改为肌注或口服,每6h1次。此后可改为25mg肌注或口服每8h1次。对脱水缺钠较明显者,应补充5%葡萄糖盐水,并纠正高钾血症维持酸碱平衡。发生休克者,应采取综合治疗。

**甲状腺机能亢进症** 甲亢是多种病因引起甲状腺分泌过多的甲状腺素,使体内的分解和合成代谢失却平衡。病理生理变化是BMR增高,耗氧量增高,产热量增多,蛋白质分解显著,体重明显下降。由于甲状腺素过多,ATP及磷酸肌酸形成减少,肌酸代谢呈负平衡,骨骼肌、眼肌、心肌的磷酸肌酸储量减少,引起肌肉软弱无力、心律失常等。由于兴奋交感肾上腺系统引起心动过速、心律失常、心排量增加,引起临床一系列症状。甲亢手术最大危险是甲状腺危象。术前应尽最大努力以药物控制甲状腺功能使之接近正常。如手术前:(1)BMR下降并稳定在±20%;(2)临床症状明显改善或消失;(3)体重稳定,脉压缩小;(4)心收缩期杂音减轻,心率在静止时<85次/min,或静注阿托品0.6mg5min心率在120次/min以下,提示甲状腺功能已得到控制。如未达以上要求,仍需继续准备,否则可发生术后甲状腺危象,其发生率占甲亢患者的1%或2%~8%不等。危象患者的临床表现为术中或术后突然高热,体温高达41~42℃,呼吸深而快,窦性心动过速可高达190~200次/min,血压升高,脉压增宽。亦可出现室性早搏、心房纤颤等心律失常,患者烦躁不安,淡漠甚至昏迷,全麻患者表现为苏醒异常缓慢。

为防危象发生,必要时术中可用复方碘溶液2~4ml加入5%或10%葡萄糖500ml由静脉缓慢持续点滴。病情需要时,术后可继续酌情同用或改用口服复方碘溶液,适当用止痛剂、镇静剂使患者获充分安静和休息,必要时给予冬眠药物辅以物理降温。加强术前准备,保持甲状腺功能正常,是预防危象的根本措施。

甲状腺危象紧急治疗措施是:(1)物理降温,用冰袋或冰帽行体表降温。(2)增加氧吸入。(3)冬眠1号加入5%~10%葡萄糖溶液内持续静脉点滴以配合物理降温。(4)应用肾上腺素能阻滞剂或降压药如利血平1~2mg肌注,每4~6h1次,或用苄胺唑啉、三甲噻酚等降压,减慢心率,减轻心脏负荷。(5)对严重心动过速及心衰患者,可用西地兰静脉滴注。(6)氢化考的松300~

500mg 溶于 10% 葡萄糖溶液内静脉滴注,病情好转后减量。(7) 胃管内注入稀碘溶液,或静脉滴注碘化钾 1g。(8) 严重者,为迅速降低血中甲状腺素含量,可用血浆除去法或腹膜透析法。

肾上腺皮质功能减退症(阿狄森氏病) 因两侧肾上腺结核、肿瘤等病变引起;或自身免疫引起特发性肾上腺皮质萎缩、感染、出血、血栓等导致肾上腺皮质破坏。肾上腺和垂体病变施行肾上腺切除术的患者。长期应用大剂量肾上腺皮质激素突然停药等,均可引起肾上腺分泌不足或缺乏,造成不同程度的代谢紊乱和各系统和脏器的功能失调。这类病人对手术和麻醉耐受性很差,在麻醉、中毒、手术、创伤、出血等应激下,可诱发急性肾上腺皮质功能不全危象、循环衰竭。如不及时抢救可导致死亡。临床主要表现为恶心呕吐、腹痛腹泻、脱水少尿、高热或低体温、嗜睡昏迷、口唇指甲紫绀、血压下降、循环虚脱甚至休克。手术麻醉过程中,凡遇有原因不明低血压、休克、无明显失血失液而持续性低血压、紫绀、高热、腹痛、昏迷时应考虑危象发生。

术前疑及肾上腺皮质功能减退的病人,如阿狄森氏病或最近接受皮质激素治疗达 1 年以上者,或最近半年内接受皮质激素治疗达 1 个月以上以及近期内连续应用激素超过 1 周时间者,拟作肾上腺或垂体切除者,应进行必要的实验室检查包括皮质功能测试。阳性者应进行术前皮质激素治疗。这类病人对麻醉、手术、疼痛等耐受性差,麻醉药物稍过量易引起中毒反应或低血压,麻醉前用药为杜兰丁,不用或少用吗啡。硫苯妥钠、安定、芬太尼等对皮质分泌有抑制作用,应尽量避免使用;高钾患者应避免用琥珀酰胆碱。

术中突然出现低血压、休克、神智模糊继而昏迷、无明显失血失液、经输血补液后低血压不能纠正且对升压药不敏感者,应立即用氢化考的松 100mg 静脉推注,继而以 200~300mg 加入 10% 葡萄糖溶液内静脉滴注,充分补液、输血以纠正循环血量。如用上述药物后血压仍较低者可加用醋酸去氧皮质(DOCA)10~20mg 分次肌注,亦可用 9-氟皮质醇。对两侧肾上腺切除者,有时需用较大剂量去甲肾上腺素静注,低血压得到纠正后按血压变化调节滴速。

术后第 1 天以氢化考的松 100mg 肌注,术后 2~4d 以 50mg 肌注,每天 4 次;术后 5~6d 氢化考的松 50mg 肌注,每天 3 次;术后第 7 天改 50mg 肌注,每日 2 次;术后 8~10d 地塞米松口服 0.5mg,每日 4 次;术后 11~13d,地塞米松 0.5mg,每日 3 次;术后第 14 天地塞米松改为 0.5mg,每日 2 次;以维持机体的激素平衡,防止肾上腺皮质危险的再发生。其他采取以抗生素预防感染、继续维持水电解质平衡等综合措施。

嗜铬细胞瘤手术 嗜铬细胞瘤是机体嗜铬性组织内生长出来的一种分泌大量儿茶酚胺的肿瘤,因分泌大量儿茶酚胺作用于肾上腺素能受体,出现以高血压及心律失常、代谢紊乱为主的综合症候群、高血压为主要临床表现。肿瘤如分泌去甲肾上腺素为主,1/3 患者出现阵发性高血压,2/3 患者出现持续性高血压。如肿瘤分泌肾上腺素为主,则高血压较轻而代谢紊乱较显著。前一种类型患者常可因精神刺激、身体活动、肿瘤挤压而发生血压骤升,高达 26.7~40.0kPa,心悸、头晕头痛、面色苍白并伴有气促、呼吸困难、恶心呕吐、晕厥及抽搐症,严重时可并发肺水肿;后一种类型患者表现心动过速、心律失常、BMR 增高、糖尿等。嗜铬细胞瘤病人在麻醉和手术中极易诱发高血压危象、左心衰竭和心律失常。肿瘤切除后可引起低血压和休克。

术前应作好充分准备,包括肾上腺素能阻滞剂如苯苄胺、哌唑嗪(突触后  $\alpha$  阻滞剂)或柳胺苄心定等药物准备;输血液液扩容等。可不用杜兰丁、吗啡。阿托品使心率加快可改用东莨菪碱。麻醉应以不增加交感肾上腺系统兴奋性、对代谢影响小、有利于术中控制血压为原则。

Desmonts 认为收缩压高于 33.3kPa(250mmHg)持续 1min 以上即称高血压危象。常发生于全麻诱导插管、咳嗽、腹压增高、体位改变、肿瘤挤压、手术探查、缺  $O_2$  和  $CO_2$  蓄积等患者,当血压超过原来水平 1/3 或收缩压超过 26.7kPa 时,用酚妥拉明 1.

25~2.5mg 立即静注,或 10mg/100ml 静滴。亦可用硝普钠 0.5~1.5 $\mu$ g/kg.min 静滴以调节降压。最近有改用 0.01% 硝酸甘油静滴,调节方便,作用不全时再用酚妥拉明。PGE<sub>1</sub> 能直接扩张血管降低外周阻力,对心脏有保护作用,作用时间短,易调节,对缺血性心脏病、原发性高血压和嗜铬细胞瘤等患者降压效果好,是日常常用药物。柳胺苄心定 1~2mg/kg 静注并辅以氟烷或安氟醚吸入,可迅速控制高血压,被认为最适用于高血压危象的急救处理。心律失常发生于血流动力学剧变时,应尽快纠正血流动力学变化,必要时用心得安 1~3mg 和利多卡因 1~2mg/kg 静注,加强呼吸管理以抗心律失常。肿瘤切除后引起严重低血压者,在补充血容量基础上用去甲肾上腺素 1mg 加入 5% 葡萄糖 250ml 内静滴以维持血压。心功能好者,可适量输血液液,比手术失血量多 500~1000ml,可减少升压药用量。

#### 参考文献

- 1 Stehling L C. Anesthesiology, 1974, 41: 585~595
- 2 Desmonts J M. et al. Br J Anesthesia, 1977, 47: 991
- 3 Friesen S R, et al. Surgical Endocrinology Clinical Syndromes, Lippincott Philadelphia, 1978
- 4 Beousn B R. Jr. Contemporary Anesthesia Practice F. A. Davis Co. Chapter. 1980, 29~38
- 5 赵俊,等. 中华麻醉学杂志, 1981, 1: 113
- 6 赵俊(整理). 中华麻醉学杂志, 1982, 2(2): 121
- 7 刘华,等. 临床麻醉学杂志, 1987, 3(4): 238

(皖南医学院弋矶山医院蒋昭祥教授撰)

### 甲状腺疾病治疗研究

treatment and research of thyroid diseases 甲状腺是人体最大的内分泌腺,它的功能是制造和分泌三碘甲状腺原氨酸( $T_3$ )和甲状腺素( $T_4$ )。它是促进人体正常生长发育和维持人体能量代谢不可缺少的物质。当人体自身免疫功能下降或发生障碍,就可能发生甲状腺免疫性疾病,导致甲状腺机能亢进(简称甲亢)或甲状腺机能减低(简称甲减);下视丘、脑垂体出现机能障碍;人体遗传基因或组织相容抗原(简称 HLA)异常;某些脱碘酶、结合酶、 $T_3$  受体有缺陷等。使  $T_3$ 、 $T_4$  的合成或代谢发生障碍,或  $T_3$ 、 $T_4$  不能发挥正常生理功能,则会发生各种甲状腺疾病。

甲状腺疾病治疗研究主要有以下几方面:

单纯性甲状腺肿 又称散发性甲状腺肿。由于甲状腺对碘的摄取或有机结合障碍和  $T_4$  代谢有先天缺陷,导致  $T_3$ 、 $T_4$  减少而发生甲状腺肿大。治疗常用甲状腺片 60~180mg/d。只有当巨大结节影响呼吸和吞咽时,才考虑手术治疗。在摄碘及脱碘有缺陷时,每天可给复方碘化钾溶液,可增加碘的摄取和利用。

甲状腺机能亢进症 简称甲亢,是由于甲状腺激素( $T_3$ 、 $T_4$ )分泌过多所致。它是一种常见内分泌疾病。据中国 4 省 10 个医院统计,甲亢患者占住院总病人的 0.34%,男女之比为 1:5.27,各年龄组均可发生。包括毒性弥漫性甲状腺肿,英美等称 Graves 病,德国称 Basedow 氏病,也有人称 porry 氏病;常伴有突眼,本病占甲亢的 80%;Eguchi K 等认为 Graves 病是一种常见的自身免疫性甲状腺疾病,其甲状腺免疫球蛋白(TSI)阳性率可达 90%。多结节毒性甲状腺肿,病因不明,常见于患甲状腺结节多年后发生甲亢者,多见中老年。

自主高功能性甲状腺瘤 又称 Plummer 氏病,单结节高功能甲状腺瘤、毒性单结节甲状腺瘤、腺瘤甲状腺肿甲亢等。病因不明,甲状腺扫描呈热结节(结节处  $^{131}I$  浓集),结节周围甲状腺组织摄碘减少。多见于 40~60 岁女性。起病慢,无突眼,以  $T_3$  甲亢较多。

碘甲亢 甲状腺有结节,为长期摄入大量碘所致。

甲状腺炎性甲亢 如桥本氏病早期甲亢称桥本甲亢。亚急性甲状腺炎初期因甲状腺滤液破坏, $T_3$ 、 $T_4$  溢入血液可有短暂甲亢。甲亢治疗原则:首先解除精神紧张,避免情绪波动,供给充足营养以及 B 族维生素等。属于结节性的或癌肿性甲亢,一般应行



甲状腺次全切除术或全切除术,也有主张用<sup>131</sup>I治疗。碘甲亢减少碘摄入即可痊愈。Graves用抗甲状腺药(ATD)抑制甲状腺内H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>酶的活性,使T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>合成减少而得到治愈,常用他巴唑(MMI)和丙基硫氧嘧啶(PTU)。据黄国良等、张雯等、刘文淑报告,用高效液相色谱仪对46例手术治疗的突眼Graves病患者甲状腺内MMI浓度测定,术前2~26h内服5~40mg/d,分4次服用,MMI剂量从5~15mg/d时,甲状腺内MMI含量随剂量增加而增加,但15mg/d以上时,甲状腺内MMI含量无显著增加,即为所需要的剂量,并只需顿服一次。孕妇服用PTU较好,从乳中排泄只占1%,对胎儿无大影响。shiroozu A等和Oamura K等6年前就报告了此观点,可减少给药次数,既节省药物,又减少副作用,其维持量只用5mg/d或更少,疗程以1.5~2年为宜,远比旧法大剂量ATD优越得多。为了迅速控制症状,在应用ATD治疗头1~2个月内,可联合使用儿茶酚胺耗竭剂如利血平0.25mg或胍乙啶10~20mg,或B-阻滞剂心得安10~20mg,均1日3次,但是心得安不适用于甲亢危象和紧急甲状腺手术或<sup>128</sup>I治疗前的快速准备,但对急性甲亢肌病有效。ATD治疗期间如突眼加重,甲状腺继续增大,可加服小剂量甲状腺片30~60mg/d或T<sub>4</sub>50~100μg/d。服用ATD期间,患者白细胞少于4×10<sup>9</sup>/L(4000/mm<sup>3</sup>)时,可加服强的松、鲨肝醇、B<sub>6</sub>、利血生等。若Graves病患者对ATD不敏感,无效或复发时,在做好术前准备的前提下,做甲状腺次全切除术。F. Harder认为手术比<sup>131</sup>I治疗和服用ATD效果好。也有人认为外科手术有损伤神经血管和出血等弊病。切除甲状腺过多或不足,可引起甲亢或不痊愈。当有甲亢性心脏病和术后甲亢复发,是<sup>131</sup>I治疗适应症。以<sup>131</sup>I 6~10mci,分2~3次服用效果好,副作用小,甲亢发生率低。Graves病是一种自身免疫性疾病,应用免疫调节剂胸腺素和免疫抑制剂如环磷酰胺、硫唑嘌呤、环孢霉素、氮甲蝶呤等有好的辅助治疗作用。

**克汀病** 又称呆小病。因外环境缺碘或甲状腺先天异常,导致T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>合成障碍或代谢障碍,引起婴幼儿体格生长发育障碍和智力低下,形成呆、小、聋、哑、瘫等表现。可分为:(1)地方性克汀病(Endemic cretinism)。(2)散发性克汀病(sporadic cretinism),它又分为甲状腺缺如,无T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>(Thyropivic)及促甲状腺激素缺乏(Thyro-trophopivic)两大类。治疗愈早,疗效愈好。通过婴幼儿足跟血或脐带血纸片法,用免疫放射法测定TSH可早期做出诊断,有效治疗是甲状腺片替代疗法,剂量依年龄而定,每日用量:4月龄以下4~8mg;4~8月12~30mg;8~12月30~60mg;1~2岁45~90mg;2~4岁60~120mg;4~12岁90~180mg。开始用足量的1/3,每1~2周增加15mg左右,直至症状显著改善后用维持量。同时采用智力教育、体格锻炼和社会劳动生产训练,增加营养和心理生理缺陷方面的针对性治疗,1~2年可使患儿生活上能自理,能从事一般性生产劳动,成为自食其力的人。克汀病入可有激素性的、亚临床性严重甲低,甚至出现粘肿性昏迷,危及生命。(3)老年甲低较常见,新西兰80岁老人甲低为0.9%,英国老人为1.7%,美国每年服甲状腺制剂者达1000万人以上。常规治疗粘肿性昏迷病人有保温输氧、补液和考的松等。T<sub>3</sub>50μg,静脉注射,每8h1次,24h可用到100~200μg,或T<sub>4</sub>200μg静脉注射;也可T<sub>3</sub>20μg肌肉注射,1d两次,同时口服T<sub>4</sub>50μg,病情好转,改服甲状腺片。心包积液可用小剂量洋地黄、心包穿刺抽液和利尿等。老年甲低用T<sub>4</sub>2.1~2.4μg/kg体重,避免用过量的L-T<sub>4</sub>,一般用L-T<sub>4</sub>110±8μg/kg体重,已足量。对长期老年甲低伴有心包积液及冠状动脉疾病时,可给L-T<sub>4</sub>25μg/日(或甲状腺片40mg),几个月就可见效。

**甲状腺炎** 包括细菌、病毒感染所致或原因不明的炎症。可分(1)急性甲状腺炎(Acute thyroiditis),多由全身血行或邻近器官感染扩散到甲状腺所引起的化脓性细菌所致。治疗用抗生素、穿刺抽脓液或切开引流等。(2)亚急性甲状腺炎(Subacute thyroiditis),又称De Quervain甲状腺炎。可能是病毒感染所致。治疗用强的松10mg,每日3~4次,7~10d症状体征显著好转,

每周递减5mg/d,全程1~2月可愈。停药复发者再用强的松,有甲减时每天用甲状腺片60~120mg,阿司匹林和消炎痛也有效。(3)慢性淋巴细胞性甲状腺炎(Chronic Lymphocytic thyroiditis),又称桥本氏甲状腺炎(Hashimoto thyroiditis),是一种常见的自体免疫性疾病,多为中年妇女,也是儿童散发性甲状腺肿的常见原因,起病缓慢,甲状腺增大2~3倍,呈对称性。初起病可伴有桥本氏甲状腺炎甲亢(Hashitoxicosis),甲状腺微粒体抗体(MCA)阳性率在90%以上,出现甲低时可用甲状腺片60~180mg/d,亦可用L-T<sub>4</sub>25~150μg/d长期或终身服用。刘子太等曾观察到一女性患者,误做甲状腺次全切除术出现甲减,未坚持服甲状腺片或T<sub>4</sub>片,8年后胆固醇高,出现心脏供血不足,可见坚持服药的必要性。

**甲状腺肿瘤** 包括良性肿瘤和恶性肿瘤。良性有腺瘤、Plummer腺瘤等。手术切除效果好。囊肿可用注射器吸净腔内的液体,注入盐酸四环素100mg/0.9生理盐水1ml。如抽吸液超过15ml则注入2ml,本法安全有效。复发后可再抽吸。恶性肿瘤有滤泡细胞癌,又称乳头状癌,常见,占甲状腺癌的50%,多见儿童和40岁以下女性。滤泡旁细胞癌,又称甲状腺髓样癌,常见50岁以上女性,本病恶性程度高,易侵蚀淋巴管、淋巴结或血行扩散至远处,应尽早手术治疗。乳头状腺癌用<sup>131</sup>I 150mc以上和甲状腺片抑制治疗,预后较好。

#### 参考文献

- 1 邝安堃,等. 临床内分泌学. 上海:上海科技出版社,1979,10(1):225~317
- 2 汤特. 国外医学(内分泌学分册),1982,4:179
- 3 Toubance J E, et al. Hormone Res., 1985,16(22):110
- 4 Shiroozu A, et al. J. Clin. Endocrinol. Metab., 1986,6:125
- 5 Okamura K, et al. J. Clin. Endocrinol. Metab., 1987,65:719
- 6 Edmonds C T. Br. Med. J., 1987,295(6597):529
- 7 Kemoall-Taylor P. Clin. Endocrinol., 1989,31:747
- 8 黄国良,等. 中华医学杂志,1991,71(6):301
- 9 张雯,等. 中华内分泌与代谢杂志,1991,7(3):176
- 10 刘文淑,等. 中华内分泌与代谢杂志,1991,7(3):176

(河南省卫生防疫站刘子太主任医师撰;高玉真审)

### 甲状腺结节的诊断与治疗 the thyroid wodule diagnosis and treatment

甲状腺结节是指甲状腺组织内的局限性增生,为单发或多发结节样肿块,可以是囊肿或肿瘤。在不能明确团块的性质时,则泛用“结节”作形态上的描述。甲状腺结节不是一个独立的疾病,除毒性弥漫性甲状腺肿、原发性甲亢和原发性甲低外,几乎所有的甲状腺疾病均可出现结节样改变。常见的有结节性甲状腺肿、继发性甲亢、各种甲状腺炎、良性的或恶性的甲状腺肿瘤(原发性的或继发性的)等。一般发病率约为3%~4%,是最常见的内分泌病。女性多于男性,以多发结节多见。

各种结节中以腺瘤和囊肿最多见,甲状腺癌为第3位。多发结节为单个结节的3倍,真正单发结节很少。无论单发或多发,均可有4%~20%的癌性结节。判断一个结节是多发还是单发,是良性还是恶性,是否伴有内分泌功能的异常等生物学属性,主要通过病史、体检和有关辅助检查等。

#### 病史特点

女性发病率高于男性结节,而男性结节恶性率是女性的2.6倍。Hattman认为,年龄<20岁,单发结节,尤以非囊性者,癌性可能性大。Lahey医疗中心将分化良好的甲状腺癌分为:男<40岁,女<50岁的为低危险组;大于该年龄的滤泡状癌为高危险组;乳头状的和混合型的,男>40岁,女>50岁的为中危险组。从而提出性别、年龄与预后有关。

甲状腺结节患者常以颈前肿块首诊,一般认为单发结节增长较快,伴声嘶、呼吸困难等压迫症状者,未分化癌可能性大。但有报道,其病程,良性者最长可达35年,而恶性者也可长达12年。恶性结节伴声嘶者5.3%,而良性者声嘶为0.5%。wright报

告,4%~33%单发结节为癌性,而多发结节癌性者占5%。故不能单以病程长短、单发或多发及声嘶与否等来判别良性结节或恶性结节。

有报道认为,婴幼儿时期有头颈部、纵膈放疗史者,其甲状腺结节有35%~50%可能为恶性。有甲状腺癌家族史伴腹泻者,可能为甲状腺髓样癌。甲状腺结节伴脉速、亢者则甲亢可能性较大。亦有报道,自主功能性结节通常缓慢发生,甚至在周围组织活性已被抑制时,也不一定导致临床和化验上的甲状腺毒症。

治疗情况:是否曾经药物(抑制或抗甲)治疗和手术治疗,其疗效如何。

#### 体检要点

正常甲状腺一般看不见,摸不到。由于甲状腺位置表浅,若腺体肿大或腺体内含有结节,则虽小到0.5~10cm,有时也可触及,触诊阳性率约75%左右。

甲状腺结节,不论单发或多发(一侧或双侧),其结节均随吞咽运动上下移动(部分炎性的或癌性的可例外),有别于颈部其它肿块。

结节质地、触痛等亦有意义。一般认为,凡结节坚硬、不规则或伴颈淋巴结肿大,甚至出现声嘶、呼吸困难、Horner氏征阳性(瞳孔缩小、眼睑下垂)等,则甲状腺癌可能性大。

双侧多发结节伴脉率增快,脉压差大,听诊甲状腺两叶上极有血管杂音者,有甲亢可能。

#### 辅助检查

B超检查:根据结节的形态、边缘及内部回声等,可鉴别囊性的、实性的及混合性的结节,分辨率>90%。结合同位素扫描鉴别良恶性结节有参考价值。

同位素扫描目的:(1)了解甲状腺位置(异位或胸骨后);(2)了解术后腺体残留或再生情况;(3)扫描显示的热的、温的、冷的结节,可说明甲状腺功能状况,但不能确定结节性质,至多只能说明甲状腺吸碘功能增加、甲状腺癌发生率低。

甲状腺淋巴造影:本法可发现0.5~0.8cm直径的病灶,确诊率为90%。不足之处是造影剂在腺体内残留时间长,可影响其功能并有使其潜在癌变的危险,对不拟手术者,不宜列为常规检查方法。

细胞学检查:凡甲状腺结节均可作此项检查,是较理想的检查方法之一,确诊率达96.7%。迄今,尚未见有关并发症及针道转移的报道。

X线摄片:可了解气管轮廓有无移位和变窄、肿块钙化形态等。气管严重受压时,可作米-瓦氏试验,能提示患者有无术后窒息的可能性。

实验室检查:血T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>及TSH、TGA、MCA、血Ca<sup>2+</sup>、P<sup>3-</sup>及TCT(正常值380~510ng/ml,甲状腺髓样癌患者血浆降钙素可高至1000ng/ml)有助于诊断。

病理检查:术前一般不主张作甲状腺结节活检,目前已为大多细胞学检查所替代。临床对良性的、恶性的结节确诊有困难,或B超为实性,扫描为“冷结节”者,应术中冰切。但因有些类型甲状腺癌为多中心病灶,或结节性甲状腺腺瘤恶变时,应于多处取材。有报道,冰切误诊率也有3.1%。

#### 非手术治疗

甲状腺制剂:甲状腺是人体内最大的内分泌腺体。大多数甲状腺病变生长依赖促甲状腺激素(TSH),若病变组织(腺瘤、腺癌等)具有TSH受体,TSH能促使其生长。甲状腺制剂治疗即是通过抑制TSH的分泌以阻止甲状腺结节(不论良恶性)生长及诱导病变退化。有人主张,任何甲状腺结节(腺瘤、腺癌、甲状腺炎等),经有关检查,均可试用甲状腺干制剂。其剂量,依TSH水平决定,一般20~30mg,1日3次,直至轻度甲亢。若心率增快明显,可合用心得安。治疗3~6月,疗效不显著,则应考虑手术。对于分化良好的甲状腺癌,术后均可服用甲状腺制剂,对减少转移、复发和调节功能均有意义。

<sup>131</sup>I治疗:任何滤泡状甲状腺癌及其复发或转移者,均应首

选此法。但宜先行甲状腺全切或将残留腺体切除,增加转移灶吸碘能力,提高疗效。

外放疗或化疗:对未分化单纯癌,术后残留癌或转移复发不能手术者,均有一定疗效。常用化疗药有阿霉素、环磷酰胺等。

#### 手术治疗及术式选择

单发结节(腺瘤、结节性甲状腺腺瘤性变),宜行患侧次全切除术或腺叶切除术。因单发结节恶变率高,为5%~35%,复发率约16.7%。姚榛祥等认为,对冰切诊断为“腺瘤”而行患侧腺叶切除术,术后即使病理证实为癌,若无颈淋巴结转移,大多不需再次手术。

术前诊断为单发结节,术中见一侧或二侧多发结节(腺瘤或腺癌),以行一侧或两侧腺体次全切除术为宜。Gemsenzagan等认为,结节性甲状腺腺瘤,约43%存在自主功能性结节,只要残存,即可复发,主张逐个切除代替腺体次全切除术。

术中见结节质硬、粘连、冰切提示为慢性甲状腺炎者,应将腺体部分切除,以解除压迫症状为主。避免切除腺体组织过多,造成术后甲亢。

甲亢并甲癌多为隐性癌,凡确诊者,一次行双侧腺体次全切除术即可。若为术后发现癌灶者,一般不必再次手术根治,术后服用甲状腺制剂。若有颈淋巴结转移者,宜于术后2~3周行二期颈清术。

术前病检或术中冰切,结合有关检查,确诊甲状腺癌者,应根据其病理类型和临床分期(TNM)选择手术方案如下:

按生物学行为分:甲状腺癌分为高分化、低分化和未分化3类。(1)高分化或低恶性的,其中混合型癌与单纯乳头状癌以局部淋巴结转移为主,而单纯滤泡状癌,以血型转移为主。I期癌(隐匿型的或包膜内型的):术前大多无法确诊而按腺瘤行患侧腺体次全切除术。若术后病理诊断为乳头状癌,必要时再行患侧腺叶和峡部切除术,一般不作预防性颈清术,以免破坏防止癌肿扩散的第1道防线。术后发现淋巴结肿大者,再行手术并不影响疗效。

II期癌(包膜外型的):宜行患侧腺叶全切除或近全切除+峡部切除+对侧叶次全切除术。术前或术中发现颈淋巴结肿大者,应同时作功能性颈清术(保留胸锁乳突肌、副神经及颈内静脉)。

III期癌(原发灶或颈淋巴结粘连):应行患侧腺叶全切+峡部切除+对侧腺体次全切除术,再加病侧古典式颈清术和对侧功能性颈清术。有报道,III期甲状腺癌经上述处理,约70%~80%患者仍可存活10年以上。外科学家不应轻易放弃积极有效的外科处理。

IV期癌(已有远隔转移):除甲状腺近全切除和双颈淋巴结清扫术,对肺和骨等的单发转移者可作局部切除(肺叶切除、截肢)。多发性的转移灶可予<sup>131</sup>I和激素治疗。滤泡状癌,一般不主张行颈清术,因其早期即有血行转移,仅在术中或术后作局部淋巴结摘除术,即所谓“摘葡萄术”(berry picking)。

(2)髓样癌,低分化或中度恶性。此癌据证实是由甲状腺胚胎的鳃后体转变而来,故癌灶多位于甲状腺的上极。临床上分2型:散发型的一般癌灶仅累及1叶;而家族型的常累及双叶,并伴嗜铬细胞瘤和(或)甲状旁腺瘤等。髓样癌不能合成甲状腺素,而能分泌降钙素;此外,还分泌前列腺素(致肠平滑肌痉挛)、血清素(致腹泻)、5-羟色胺和组织胺,引起皮肤潮红等类癌综合征。检测降钙素(TCT)有助于诊断及了解术后癌残留、复发情况。散发型者仅可行患侧腺叶切除+功能性颈清术。家族型的或累及双侧者,应行重侧腺叶切除+对侧保留下极大部分切除术+双侧功能性颈清术。若伴嗜铬细胞瘤或旁腺瘤,应在甲状腺手术前先行切除,以免儿茶酚胺分泌过多引起致死性高血压,影响甲状腺手术的正常进行。

(3)未分化单纯癌,高度恶性,预后极差,患者多于1年内死亡。可分为巨细胞癌和小圆细胞癌两类,后者可能即为淋巴瘤。一旦确诊,最好先行放疗,等待癌灶缩小,然后作患侧甲状腺全切除+同侧颈清术,再作术后放疗和化疗(阿霉素、环磷酰胺及氮甲嘌呤等)。有研究资料指出,未分化癌以浸润早而广泛为特点,强调局部切除彻底,术后辅以放疗。另有人认为,单纯手术切除难以根治,甚至有促成扩散的危险,若患者已有严重呼吸困难,仅作

气管切开术, 尽早予以放疗、化疗和长期试用甲状腺制剂, 抑制 TSH 分泌, 减少对瘤灶的刺激。最近 Werner 等报道, 手术前后放疗 + 化疗治疗巨细胞未分化癌, 使病人寿命有所延长, 其中 1 例生存长达 16 年。

#### 参考文献

- 1 Wright H R. Surg clin North Amer., 1974, 54: 277
- 2 Löwhagen T, et al. World J. Surg., 1981, 5: 61~62
- 3 Richas A, et al. Ann Surg., 1983, 198: 70~71
- 4 林言斌, 等. 实用外科杂志, 1986, 6(5): 261~262
- 5 刘承训. 实用外科杂志, 1986, 6(5): 267~268
- 6 何名森, 等. 医师进修杂志, 1990, 13(10): 22~23
- 7 吴树强, 等. 上海医学, 1990, 13(12): 695~696
- 8 曹金辉. 北京医学, 1991, 5: 300~301
- 9 马祖华. 四川医学, 1991, 12(1): 38~39
- 10 吴兆敏. 医师进修杂志, 1991, 8: 13

(安徽医科大学第一附属医院俞士炳教授撰)

### 弥漫性甲状腺肿伴机能亢进症研究进展

弥漫性甲状腺肿伴机能亢进症是甲状腺机能亢进症(甲亢)中最常见的一种, 又称 Graves 病, 约占甲亢的 70% 左右, 多发生在 20~40 岁的女性, 男女之比约为 1:4~6, 是最常见的内分泌疾病。本病的病因未完全阐明, 病程迁延, 药物治疗复发率高, 故近年来对其研究得较多。

关于病因及发病机制的研究, 以往认为 Graves 病病因是大脑皮层-下丘脑 TRH 分泌过多致垂体 TSH 产生过多所致。但垂体机能低下者可发生甲亢, 解剖甲亢患者死后尸体发现, 垂体分泌 TSH 细胞不是增生分泌相, 而是受抑制萎缩。特别是放射免疫技术的应用与进展, 可直接测定患者血中 TSH, 发现 TSH 不是增高而是偏低或测不出, 从而否定了 Graves 病 TSH 增高的学说。

1956 年 Adams 和 Purves 研究发现, 甲亢患者血清中有一种刺激甲状腺物质, 因作用时间较 TSH 持久, 故定名为长效甲状腺刺激物(LATS)。继之, 又发现长效甲状腺刺激物的保护物(LATS-P), 并认为他们都是 G 类免疫球蛋白(IgG)。此外, 还有抗甲状腺球蛋白抗体(TGAb)和抗微粒体抗体(MCAB)等自身抗体, 从而认为 Graves 病是自身免疫性疾病。然而并非所有甲亢患者 LATS 等都是阳性, 亦有 20%~60% 为阴性的, 并且甲亢病情严重程度与 LATS 浓度亦不成比例, 推测还有其他发病机理参与的可能性。

目前认为 Graves 病并非由单一因素所致, 而是由内因和外因多种因素共同作用的结果。主要因素如下: (1) 甲状腺自身抗原的研究已明确, 兴奋性 TSH 受体抗体(TRAb)是引起 Graves 病甲亢的主要原因。(2) 感染因素。Graves 病患者结肠炎耶尔森氏菌感染率较高, 血清中存在阳性率较高的抗该菌的抗体。Wenzel 等报道, 在 Graves 病患者中细菌质蛋白 IgG 抗体检出率达 80%, 临床观察表明这种质蛋白抗体与 Graves 病发病有关。(3) 遗传因素。在 Graves 病甲亢病因中, 遗传因素是不容忽视的, 临床观察发现同一家族中常常有多人发病, 这与自身免疫系统紊乱有关, 其表现为一是 HLA-DR 抗原的异常表达。一般认为 HLA-DR 抗原的表达仅限于 B 细胞、活性 T 细胞、单核细胞和巨噬细胞等, Hamafusa 等发现, Graves 病甲状腺上皮细胞有 DR 抗原的异常表达。二是 T 细胞功能紊乱: Graves 病患者外周组织和甲状腺组织中抗原非特异性 TS 细胞数量和功能低下, 使 Th 细胞和 B 细胞功能相对亢进, 导致甲状腺自身免疫的发生, 在其发病机制中具有重要作用。

综上所述, Graves 病是由于病体 Ts 细胞的免疫监护和调节功能有遗传性缺陷, 当遇到精神刺激、感染等应激时, 体内免疫稳定性被破坏, 结果引起 TRAb(TSI)分泌增多而致病。

诊断方法的进展: 甲状腺功能检查方法有多种, 自 1960 年 Yalow 和 Berson 发明放射免疫分析法以来, 人体许多激素都可

测定法, 大大推动了临床内分泌学的发展。直接测定血中  $T_3$  (三碘甲状腺原氨酸) 和  $T_4$  (四碘甲状腺原氨酸) 浓度在甲亢诊断上明显优越于受多种因素影响的 BMR 测定法, 优于受含碘物质影响的 PBI 测定法; 但  $T_3$  (TT<sub>3</sub>) 和  $T_4$  (TT<sub>4</sub>) 尚受 TBG 含量影响。

一般甲亢病人首先是  $T_4$ 、FT<sub>4</sub> 水平升高, 或有同等价值的 FT<sub>4</sub>I 升高和 TSH 抑制。个别病例  $T_3$ 、FT<sub>3</sub> 增高, 可确定为  $T_3$  型甲亢, 此多见于 Graves 病早期或停药后不久复发。80 年代初建立 TSH 免疫放射分析法(TSH-IRMA), 新的 TSH-IRMA 的灵敏度较 TSH-RIA 提高 10~100 倍。以 TSH-IRMA 测定基础 TSH 水平能有效地把 Graves 病甲亢与甲状腺功能正常者区分开来。目前认为 TSH-IRMA 是甲状腺功能检查的首选指标(尚未普及)。TSH 低于正常或不可测得常与 TSH 对 TRH 兴奋的无反应或低反应相一致, 为不明确或亚临床甲亢的早期诊断提供了简便而灵敏的手段。FT<sub>3</sub> 和 FT<sub>4</sub> 是直接反映测定时甲状腺功能状态和程度的有效指标(不受 TBG 影响), 为甲亢检查的次选手段。FT<sub>4</sub> 升高和 TSH-IRMA 低于正常对甲亢的诊断准确率可达到 100%。依据上述检查甲亢状态可分为 5 级, 即甲亢、亚临床甲亢、正常甲亢、亚临床甲亢、甲减。

1975 年由 Kohler 和 Milstein 创建的单克隆抗体技术是免疫学的重大进步, 测定甲状腺自身抗体有助于病因诊断, 一般认为 TGAb 和 MCAB 阳性支持 Graves 病诊断(桥本氏病抗体滴度更高)。TRAb 测定有助于甲状腺功能正常的 Graves 病突眼的鉴别诊断, 有助于 ATD 治疗后甲亢缓解或复发的预测。

治疗方法的研究及进展: 治疗 Graves 病的主要方法仍是抗甲状腺药物(ATD)、甲状腺次全切除术、放射性碘治疗 3 种, 各有其利弊。几乎所有病人用 ATD 治疗都能控制甲亢, 但停药后复发率高。放射性碘治疗国内尚不够普及, 且近期甲减发生率高。外科手术治疗作用好, 效果肯定, 但常不能被患者接受。可见 3 种方法各有其优缺点, 故对选择治疗方法意见不一。

临床经验证明, 治疗方法的选择应依据病情严重程度、患者年龄、合并症并发症、是否妊娠或有无怀孕愿望以及其他临床情况, 甚至连地区条件也应综合考虑。有资料报道在美国大多数病人采用放射性碘治疗, 而在欧洲则常常以药物治疗为首选。有调查资料表明, 同一 Graves 病人在如何选择治疗方法上, 69% 的美国医师选择放射性碘治疗, 欧洲为 22%, 日本仅 11%; 而 ATD 治疗在美国仅占 31%, 欧洲为 77%, 日本为 88%。优先考虑手术者各国均占少数。

总之, ATD 目前仍是治疗 Graves 病的主要方法, ATD 不仅有抑制甲状腺素合成的作用, 而且越来越多的证据表明, ATD 对 Graves 病患者免疫功能有抑制作用或调节作用, 其中丙基硫氧嘧啶(PTU)还有抑制  $T_4$  向  $T_3$  转化的作用。抑制甲状腺机能 50% 血浓度, 需 PTU 3μg/ml, 他巴唑(MMI) 0.2μg/ml 以下, 可见 MMI 是 PTU 的 15 倍, 如果每日用(他巴唑) 30mg 可控制甲亢病情, PTU 则需要 450mg。

Graves 病的病因性质和临床研究结果证明, 用 ATD 小剂量、短疗程是不适宜的。目前较多学者认为治疗 Graves 病仍应采取长疗程, 提出疗程应超过 4 年。由于 ATD 维持剂量很小, 长期治疗后小剂量 ATD 维持几乎无副作用, 患者多能接受, 故有人主张无限期服用小剂量 ATD, 以期获得持续缓解。

最近, Hashizume 等提出给 Graves 病人加用甲状腺素治疗方法, 开始作为他巴唑的辅助治疗方法, 以后停用他巴唑而继续应用甲状腺素, 这种方法不仅可使甲功稳定, 防止 ATD 所致甲减, 而且可使病人 TRAb 水平减低, 甲亢复发率显著降低。此法值得进一步临床观察总结和推广。

正确判断停药后 Graves 病的缓解或复发对临床治疗有重要指导意义。停药时甲状腺大小、突眼、AITD 家庭史、循环免疫复合物、高滴度 TGAb 活性, HLAB<sub>8</sub>、DR<sub>3</sub>、DQAIU 等抗原表达,  $T_3$ / $T_4$  比值以及  $T_3$  抑制或 TRH 兴奋试验等, 对甲亢缓解或复发有一定预测价值。近年来 TRAb 作为 Graves 病甲亢预后判断的指标受到人们重视。TRAb 阴性提示 Graves 病可能缓解,

TRAb 阳性预示着停药后甲亢的复发。

Graves 病的病因和发病机理尚未完全阐明,但认为是自身免疫性疾病,既有体液免疫又有细胞免疫参与。其主要发病因素可能为遗传因素、精神因素及甲状腺激素受体抗体等。如何进一步搞清病因及发病机理,为更好地防治提供理论依据是今后研究的重点。

诊断方面将进一步开展灵敏度高、特异性强的免疫放射分析法,如用 TSH-IRMA 及 FT<sub>4</sub>、FT<sub>3</sub> 等测定法来准确反映患者体内甲状腺激素水平和甲功状态,以利于早期明确诊断。

对 Graves 病的药物治疗剂量、疗程仍有不同见解,尚待更多临床实践和长期观察总结来定论。放射性碘治疗甲亢适应证、手术治疗甲亢等方法,近年来有许多更新,但都是尽可能针对病因和机制来选择适当的病例,这些方法需进一步改进以减少副作用,降低复发率,提高疗效。

#### 参考文献

- 1 白耀. 中华内科杂志, 1982, 21(1): 118~120
- 2 Allamie H. et al. J Clin Endocrinol Med, 1990, 70(3): 675~679
- 3 McDougall I K. Med Clin North America, 1991, 75: 79~92
- 4 Ladenson P W. New Engl J Med, 1991, 324(14): 989~990
- 5 吴晓彤. 摘译. 国外医学(内分泌分册), 1991, 4: 214
- 6 Hashizume K. New Engl J Med, 1991, 324(14): 947~953  
(安徽医科大学第一附属医院杨明功教授撰)

**低 T<sub>3</sub> 综合征** low T<sub>3</sub> syndrome 某些非甲状腺疾病 (NTI) 患者在甲状腺激素的测定中表现有异常改变。这种异常最早是由 Reichlin 和 Sullivan 发现的。其后较多的研究进一步证实, 很多 NTI 患者在病变早期即有这些改变。本文就低 T<sub>3</sub> 综合征, 特别癌肿病人 T<sub>3</sub> 的改变和变化机制作一概述。

低 T<sub>3</sub> 综合征是在全身性疾病及各种应激状态下甲状腺激素代谢紊乱的一种状态, 表现为血中 T<sub>3</sub> 水平降低, rT<sub>3</sub> 水平升高等甲状腺激素水平异常而临床无甲状腺病症。亦有人称为“甲状腺功能正常甲状腺激素紊乱综合征”。它可见于肝脏疾病、各种发热性疾病、肿瘤、肾衰、充血性心衰、烧伤等的患者, 还可见于热卡缺乏、外科大手术后和应用某些药物(如地塞米松、大剂量心得安等)等的患者, 也可见于正常胎儿和出生几小时的新生儿。

除 T<sub>3</sub> 降低, rT<sub>3</sub> 升高外, 实验室检查还可见 FT<sub>4</sub> 正常或升高, FT<sub>3</sub> 低于正常或明显降低。TSH 大多数在正常范围内, 少数患者有中等程度升高。TSH 对 TRH 反应大多正常, 一些人中度抑制反应。

当伴有血 T<sub>4</sub> 水平降低时则称为“低 T<sub>3</sub>、低 T<sub>4</sub> 综合征”。这种低 T<sub>3</sub>、低 T<sub>4</sub> 综合征见于严重疾病患者, 是预后不良的表现。McLarty 等发现较早 NTI 患者中, 血清总 T<sub>4</sub> 水平的低下与预后不良有关。Slag 观察 T<sub>4</sub> 水平与死亡率关系时发现, T<sub>4</sub> < 38.7 nmol/L 者死亡率为 84%, T<sub>4</sub> 在 38.7~64.5 nmol/L 之间者, 死亡率为 50%, T<sub>4</sub> > 64.5 nmol/L 者, 死亡率为 15%。总 T<sub>4</sub> 降低程度与死亡率密切相关, 在 70% 的被研究病人能正确地预示临床结果。

自 1896 年 Beaton 成功地用卵巢切除术结合甲状腺制剂治疗转移性乳腺癌以来, 一直推测甲状腺功能和乳腺癌发生间的关系, 相当多的间接证据提示恶性肿瘤特别是乳腺癌和甲状腺功能之间存在相互作用。就乳腺癌而论, 流行病学研究提示乳腺癌患者的死亡率和地方性甲状腺肿患者分布存在普遍一致性。在美国高乳腺癌患者死亡率的区域分布与地方性甲状腺肿地带分布一致。在乳腺癌发生率低的日本, 有桥本氏甲状腺炎病史妇女比普通人群患乳腺癌机会多。但也有一些研究未能证实这种关系。因此引起了人们广泛的兴趣。

在以后众多研究中证实癌肿如肺癌、结直肠癌、胃癌等的患者均有甲状腺激素的变化, 即低 T<sub>3</sub> 综合征, 并认为这种改变的类型与其它 NTI 相似, 并非癌肿病人所特有。

Ratcliffe 报道 204 例肺癌, 33% 有甲状腺功能异常, 最普遍的异常是低 T<sub>3</sub>, 其中 23% 的病人以 T<sub>3</sub> 低下为唯一异常。T<sub>4</sub>、rT<sub>3</sub> 和 FTI 均值略升高, 但无统计学意义; 然而低 T<sub>3</sub> 病人组与正常 T<sub>3</sub> 病人组相比, T<sub>4</sub>、FTI 明显降低。近期预后低 T<sub>3</sub> 者明显差于正常 T<sub>3</sub> 者, 前者 6 个月内死亡者占 49% (22/45), 后者仅占 27% (12/45)。肺外转移与甲状腺激素变化无关。

Rose 等报道血 T<sub>3</sub> 水平变化, 在早期乳腺癌患者有 56% (31/55), 进展期乳腺癌患者有 45% (17/38), 低于对照组。rT<sub>3</sub> 在早期乳腺癌患者正常, 24% (9/38) 进展期乳腺癌患者增加。T<sub>4</sub> 水平正常。Rose 另外报道进展期乳腺癌 TSH 明显高于其它器管肿瘤患者和正常人, 早期乳腺癌患者中 17% (5/29) 有 TSH 对 TRH 的过度反应。这些变化的临床意义尚不清楚。

在结肠癌, 有全身转移者 59% (10/17) 血 T<sub>3</sub> 低下, 24% rT<sub>3</sub> 升高, rT<sub>3</sub>、T<sub>3</sub> 比率升高, T<sub>4</sub> 水平正常。无转移的结肠癌患者 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、rT<sub>3</sub> 变化无统计学意义。李氏报告直肠癌病人血 T<sub>3</sub> 明显降低, 且非根治组比根治组低, 直肠癌分期愈晚, 下降越明显。T<sub>4</sub> 无显著变化。提出血 T<sub>3</sub> 水平有助于分期和对预后估计的判断。

张氏报道胃癌患者病人低血 T<sub>3</sub>、FT<sub>3</sub>、T<sub>3</sub>/rT<sub>3</sub> 比值的发生率为 72.5%、40%、40%, 血 TSH 均值高于对照组。临床 I、II 期者 T<sub>3</sub>、FT<sub>3</sub>、T<sub>3</sub>/r 比值明显低于临床 III、IV 期患者, 胃外转移组低于未转移组。如以 T<sub>3</sub> 和 rT<sub>3</sub> 比值低下来判断根治术的可能性, T<sub>3</sub> 正常者 72.7% 可行根治术, T<sub>3</sub> 降低者仅 31.03% 能行根治术; T<sub>3</sub>/rT<sub>3</sub> 比值正常者 58.3% 可行根治术, 降低者仅 18.7% 能行根治术。也有人报道胃癌患者血 rT<sub>3</sub>、FT<sub>4</sub> 均值升高, T<sub>3</sub>、rT<sub>3</sub> 比值明显降低, T<sub>4</sub> 升高, TSH、FT<sub>3</sub> 无差别, 并指出当 T<sub>3</sub>/rT<sub>3</sub> 比值 < 1 时, 胃癌多已广泛转移。

甲状腺激素的生化成分是碘化甲状腺原氨酸。正常情况下, TRH 和外周甲状腺激素调节 TSH 的分泌和生物活性, 而 TSH 和多种其它因素又调节 T<sub>4</sub>、T<sub>3</sub> 的合成、分泌并调节 T<sub>4</sub>/T<sub>3</sub> 分泌比率。碘化甲状腺原氨酸在外周组织代谢, 脱碘是最主要降解途径。在 5' 脱碘酶作用下使 T<sub>4</sub> 脱碘(外环) 5'-脱单碘可形成 T<sub>3</sub>, 在 5-脱碘酶作用下使 T<sub>4</sub> 酪氨酸环(内环) 脱单碘则形成无生物活性的 rT<sub>3</sub>。80% 的 T<sub>3</sub> 是 T<sub>4</sub> 在外周 5' 脱碘形成, 95% 的 rT<sub>3</sub> 是 T<sub>4</sub> 在外周 5-脱碘形成。任何影响上述调节、分泌和代谢的环节都会影响外周甲状腺激素的变化。

癌症病人低 T<sub>3</sub> 综合征(包括低 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 综合征)发生的确切机制还不很清楚, 不少研究者推测为多种因素参与其形成。

1. T<sub>4</sub> 脱碘生成 T<sub>3</sub> 的减少。(1) 癌肿病人由于热量摄入不足, 使得 5'-脱碘酶的辅因子谷胱甘肽可利用性降低; 由于能量消耗长期增加, 导致营养不良、恶液质, 进一步维持低 T<sub>3</sub> 状态。(2) 5'-脱碘酶功能受到损害, 对疾病的反应产生皮质类固醇激素, 某些低分化肿瘤产生异位激素或皮质类固醇激素抑制 5'-脱碘酶或合并 5'-脱碘酶的合成降低。(3) NTI 时产生的甲状腺激素结合抑制物 (THBI) 抑制 T<sub>4</sub> 转化为 T<sub>3</sub>。

2. 甲状腺激素的合成和分泌减少。(1) 严重疾病耗竭甲状腺基质因而降低甲状腺激素的分泌。(2) 降低 TSH 在其受体上的作用或降低 TSH 受体的数目。(3) 在某些代谢紊乱的情况下, TSH 对甲状腺分泌的刺激也可能被抑制。(4) 有人在动物试验中得出结论, 降低甲状腺 T<sub>4</sub> 的分泌和外周组织 T<sub>4</sub> 转化为 T<sub>3</sub> 减少同样在 NTI 甲状腺激素变化中发挥重要作用。

3. THBI 主要降低 T<sub>4</sub> 和 3 种血清蛋白结合亲和性, 使可测得 T<sub>4</sub> 降低。THBI 降低结合 T<sub>4</sub> 而加速 T<sub>4</sub> 降解, T<sub>4</sub> 代谢清除率增高, T<sub>4</sub> 降低。

上述诸因素在不同疾病或不同机体发生作用的比例不同, 可能是造成不同癌肿患者甲状腺激素变化表现不一的原因之一。

癌肿病人低 T<sub>3</sub> 综合征可能是机体对严重的全身性疾病的调节。Warnold 发现癌肿病人静息代谢率和每日能量消耗增加, 甲状腺激素的降低可能代表一种防御机制, 使器管降低代谢率以保护组织免于疾病的过分刺激。Kumar 发现甲状腺激素能加强肿瘤生长和转移, 诱导甲状腺激素低显示出相反的作用, 在癌肿病

人甲状腺激素降低可能是机体抑制肿瘤生长、转移的另一种保护机制。但近来有人认为,低 $T_3$ 综合征可能并非机体保护性适应机制,而是危重疾病的损伤性后果。核 $T_3$ 受体的升高调节才是细胞水平对循环浓度降低的代偿机制。

有关低 $T_3$ 综合征的确切机制和病理生理学意义是今后继续研究的方向。

#### 参考文献

- 1 Ratcliffe J G, et al. Brit Med J, 1978, 28(1): 210
- 2 Rose D P, et al. Arch Intern Med, 1981, 141(8): 1161
- 3 Chopra I J, et al. Ann Intern Med, 1983, 98(6): 946
- 4 Laurberg P. Metabolism, 1984, 33(4): 379
- 5 Persson H, et al. Ann Surg, 1985, 201(1): 45
- 6 王信, 李健群. 生理科学进展, 1986, 17(2): 139
- 7 Chopra I J, et al. Metabolism, 1986, 35(2): 152
- 8 Jolin T. Endocrinol, 1987, 120(5): 2144
- 9 陈家伦. 中华内科杂志, 1987, 26(8): 499
- 10 李嘉枝, 等. 实用外科杂志, 1987, 7(1): 649
- 11 张长乐, 等. 实用癌症杂志, 1992, 7(3): 147

(安徽医科大学第一附属医院张长乐副教授撰; 胡家骅 审)

### 糖尿病研究进展 diabetes mellitus

糖尿病是全球性常见疾病,据报告全世界糖尿病患者已达 6 000 万人,连同无症状未被发现的估计约有 12 000 万人。世界各地、各国和各民族的患病率从 0.1% 到 40%,大多数在 1%~5% 范围内,美国比马印第安族发病率高达 40%。中国 1980 年调查 14 省、市 30 万人口,平均发病率为 6.09%,而主要大城市发病率超过 10%。随着年龄的增长和生活条件的提高,糖尿病发病率日益增高。由于糖尿病与冠心病、肿瘤已成为威胁人类健康的 3 大疾病而日益得到重视,因此对糖尿病及其并发症防治的研究已成为当前重要研究课题。

人类对糖尿病的认识已有悠久的历史,早在两千年前,中国古代医学文献《内经》就记载了“消渴”的症状,中医“消渴病”多指糖尿病而言,在病因上认为与多食肥甘有关。

糖尿病的发生与胰腺内分泌功能的关系是从 1889 年 Minkowsky 和 Von-mering 将狗的胰腺全部切除造成糖尿病以后才开始明了的。1908 年, Zuelzer 用胰腺的酒精提取液给动物注射,引起动物低血糖休克。1909 年, de meyer 给这种引起动物低血糖休克的胰岛细胞激素命名为胰岛素(Insulin)。1921 年, F. G. Banting 和 C. H. Best 首次从胰腺中分离出胰岛素,经提纯后次年用于临床治疗糖尿病,使千百万糖尿病人获得了新生。1926 年, Abel 获得了胰岛素的结晶; 1955 年, F. Sanger 搞清了胰岛素结构是由 A、B 两个肽链、51 个氨基酸组成。1960 年, Yalow 和 Berson 发明放射免疫分析方法并用于测定血浆胰岛素。1965 年, 中国上海生化所研究人员成功地人工合成了结晶胰岛素这一有生物活性的蛋白质分子。1971 年, Oyer 和 Steimer 阐明了胰岛素前身胰岛素原的结构,发现它是由 86 个氨基酸组成的肽链,包含胰岛素和连接肽(C 肽)。胰岛分泌胰岛素释放入血时,必定同时释放 C 肽,由于 C 肽释放量与胰岛的分泌量是一致的、成比例的,因此临床上可以通过放免法测定血清或尿中 C 肽来判定胰岛 B 细胞分泌功能。这为进一步研究糖尿病的临床分型及选择治疗方案奠定了基础。

近年来糖尿病的研究重点 病因及发病机制的研究,调查发现,糖尿病患者的一级亲属中糖尿病发病率显著高于非糖尿病患者的一级亲属,提示遗传易感性在病因学中起了重要作用。许多学者在分子水平上对糖尿病进行研究,为胰岛素依赖型糖尿病(IDDM, I 型 DM)病因遗传标志提供分子遗传学的证据。在 IDDM 患者体内可检查出多种自身抗体,如 IgG、IcA、CF-ICA、ICSA 等,从而建立了 IDDM 发病机制的自身免疫学说,即环境因素(病毒感染或化学毒素)作用于 IDDM 遗传易感者,HLA-

DR 抗原→T 细胞的自身激活→产生大量干扰素→激活 T、B 细胞→诱发 B 细胞自身免疫炎症,发生了 IDDM。对非胰岛素依赖型糖尿病(NIDDM, II 型 DM)的多基因-多因子遗传学说也提供了分子学的基础,发现胰岛素受体基因、载脂蛋白 B 基因及 AI 基因与 NIDDM 相关。近年来还发现胰岛淀粉样多肽(IAPP)参与 NIDDM 的发病过程,可能与抑制胰岛素(In)分泌、抗 In 作用等有关,但确切的机制尚待研究。

糖尿病并发症研究,DM 是高血糖综合征,随着患者寿命的延长,合并症常见,而且心脑血管合并症是导致死亡的主要原因。

DM 的心血管并发症的研究,提示 DM 患者动脉硬化发生主要的原因是高血压、高血脂、肥胖、高胰岛素血症、血小板高聚集性、动脉管壁的 PGI<sub>2</sub> 生成减少、血管内因子释放增加、动脉组织蛋白 VLDL 糖化血管壁多元醇途径激活以及 DM 自主神经病变。DM 者高脂蛋白血症发生率明显增高,血清 HDL-C 降低是发生冠心病的危险因素之一。

DM 肾病的临床研究,此项研究相当活跃,其关键问题是早期诊断和正确积极的治疗。24h 尿蛋白定量测定,血、尿 B<sub>2</sub> 微球蛋白及尿蛋白放免测定,尿蛋白排出率与糖化血红蛋白比值等,已作为早期发现 DM 肾病的敏感指标。

较为广泛开展的神经电生理检查,如肌电图、体感及脑干诱发电位的检查为早期诊断 DM 神经病变创造了条件。大鼠坐骨神经中 ATP 酶活性及 cAMP 含量的研究发现, PGE<sub>1</sub> 类似物可改善鼠神经中 Na/KATP 酶活性,并依赖于神经中 M-肌醇含量的变化,从而为 DM 神经病变的病因学和治疗提供了理论依据。

#### 糖尿病治疗研究进展

1. 饮食疗法是基本原则。应根据不同临床类型、体重控制总热量和用副食品进行调节,有助于获得理想体重。研究资料表明,高蛋白饮食加重肾工作负荷,使肾组织中核酸及 RNA/DNA 比率升高,低蛋白饮食能改善肾功能,延缓肾病进展。DM 患者微量元素紊乱(高血铜、低镁、低锌、低铁等)与慢性并发症发生有关。而钙、磷、氮、镁负平衡与骨质疏松有关,故饮食疗法应重视微量元素的补充。

2. DM 的血管并发症(病变)的治疗。许多研究者认为,DM 血管病变与高血糖引起蛋白过度非酶糖化有关,而改善血液流变学状况有利于降低血小板粘附性与聚集活性,对延缓血管并发症有作用。654-2、P. S. S. 阿斯匹林、丹参、蛇抗栓酶等都可选用,但有待进一步观察积累经验。

3. 口服降糖药应用的进展。目前应用较为广泛的是磺脲类降糖药(Su)。1972 年后相继应用于临床的第 2 代降糖药是优降糖、达美康、美吡达、克糖利、糖肾平(糠适平)等。这些药物的主要作用是刺激胰岛 B 细胞释放胰岛素,其胰腺外的降糖作用逐渐被越来越多的研究资料证明。上述 SU 除糖肾平 95% 由胆道经肠随粪排出外,其余均从肾脏排泄。第 2 代 Su 降糖药各具特色,达美康能够降低血小板的过高粘附性和聚集性,美吡达作用迅速,可以降低胆固醇、甘油三脂,提高高密度脂蛋白,增加纤维蛋白溶解活性。这些对减轻或阻止 DM 血管并发症的发生起到有益作用。克糖利有独立对抗脂肪分解作用,对减轻脂代谢紊乱有利。糖肾平的特点是不受肾功能影响,不从肾脏排泄,可用于肾功能差的 DM 患者。

Su 口服降糖药均有继发性失效(失败)的可能,其发生机理一般认为与 In 分泌不足和外周 In 抵抗有关,但确切机理尚待进一步研究。

近年来研究发现, NIDDM 患者在 Su 治疗失败时,在改用 In 治疗的基础上加用 Su 后,可以减少 In 用量,血糖控制能得到改善,降低低血糖发生率,因而形成 In/Su 联合治疗 NIDDM 的新疗法。

双胍类降糖药在美国、日本已禁用,英法等欧洲国家只作为辅助用药。中国尚有少数单独使用者,这适用于肥胖明显、食欲旺盛、肝肾功能无损害者,未见明显副作用。

目前,国外对 NIDDM 治疗侧重于开发 α-葡萄糖苷酶抑制

剂和脂肪酸氧化抑制剂等新药。

4. 胰岛素应用及进展。目前,胰岛素不仅品种繁多,而且剂型不断革新。不仅从猪牛胰腺中提纯胰岛素,而且国外已采用基因工程生产高纯度单组分胰岛素,合成人胰岛素,人工胰岛素抗原性弱,不致发生胰岛素耐药现象,提高了疗效。随着人们的不断研制。胰岛素剂型将由单一注射液而出现,栓剂、滴鼻剂、气雾剂,甚至口服剂亦在试制中。

人工胰岛装置(CSI)的应用及胰岛素强化疗法对IDDM、DKA治疗取得好的疗效,人工胰的研制正向着微型、自动、可调、方便、安全的方向发展。

5. 胰腺移植胰岛移植治疗IDDM的进展。国内外均已广泛开展此项工作。1966年12月至1988年7月世界上已有1549例DM作了胰腺移植。中国胰岛移植治疗DM在世界处于领先地位,自1981年以来全国已进行800余例,取得较好的效果。但如何减少移植后排异反应,提高移植后远期疗效,是有待进行的基础研究。

糖尿病发病的真正原因有待进一步阐明,现在多数认为I型DM是一种自身免疫性疾病,与病毒感染有关,体液免疫细胞免疫均参与发病环节。故有采用免疫抑制剂,如环孢霉素A治疗I型DM成功的报道,但尚需要更多资料证实和进一步观察。I型DM的发病机理更为复杂,遗传易感性受到研究者重视,体型过胖是重要的激发因素。近年来在临床类型中增加了营养不良相关糖尿病,又称II型DM、热带DM、幼年型抗酮症DM,确切病因未明,但可能与以木薯为主食、氨基酸作用及营养不良、中毒感染等损伤胰腺有关。有作者鉴定出易得DM的DQ分子结构,发现易感性通常是由DQB链第57位氨基酸决定的,认为缺少天冬氨酸而导致DM。为了有效防治DM,弄清DM发病原理仍是研究重点。

当前心血管并发症是威胁DM患者健康和导致死亡的主要原因,因此对慢性并发症的早期诊断和治疗,特别是对肾脏并发症乃至多脏器功能衰竭的防治是研究的重点和难点。胰腺、胰岛、肾脏等脏器移植,在进行深入的基础研究后将会更为广泛地开展。人工胰岛装置、人工肾以及高纯度胰岛素、人工合成人胰岛素应用于临床将给DM患者带来福音。

#### 参考文献

- 1 Bachmann W, et al. Karger Base, 1988, 1~154
- 2 Lebovitz H E, Pasmantier K. Diabetes care, 1990, 13(6): 667~75
- 3 Bailey T S, Mezitis N H. Diabetes care, 1990, 13(6): 687~95
- 4 Palmer J P, McCulloch D K. Diabetes, 1991, 40: 943~947
- 5 Kenneth H J, et al. Diabetes, 1991, 40(3): 310~313
- 6 第3届中日友好糖尿病学术交流会, 中华内分泌代谢杂志, 1992, 8(2): 121~122
- 7 Blooth SK, 著. 周肃节译. 国外医学(内分泌分册), 1992, 12(1): 20~22

(安徽医科大学第一附属医院杨明功教授撰)

### 血液中碳氧血红蛋白(HbCO)的分析方法

一氧化碳中毒是一种常见的中毒性疾病,而碳氧血红蛋白含量测定在临床上诊断急、慢性CO中毒具有重要的参考意义,可作为CO作业者的一项生物监测指标。血液HbCO的分析方法很多,并不断更新。老的方法如Vanslyke及空针-毛细管(isyringe-lapillary)气量法由于用量多,费时、准确度低,已被淘汰,代之以用量少,灵敏度高,使用方便的仪器分析,得到了较满意的结果。从所获资料来看,国外血中HbCO分析主要用在人群调查,分析手段主要是分光光度计、气相色谱仪及其他专用仪器。而国内除作人群调查外,临床中毒病人的分析占有较大的比重。气相色谱法国内还较少使用。许多医院临床分析中还在用经典的化学定性、半定量法。因此准确度较差,只能辅助诊断严重的CO中

毒,而仪器分析在灵敏度、准确度都大大提高,只需微量血即可满足临床快速分析及人群调查。血液HbCO分析,使用者可依据分析原理及技术条件,而采用适当的方法。血液的处理都基本相同,取耳垂、静脉或指尖血,尸体可取胸腔血。加适量的抗凝剂。

下面对各类方法的原理、分析条件及其他有关指标作一比较。

1. 经典的化学定性半定量。此类方法多为临床在不具备优良仪器的条件下,作为应急定性分析时采用。主要有简易加热、氢氧化钠、漂白粉、分光镜、沉淀分离比色等方。这类分析方法简便、快速,但准确度、灵敏度都很差。

2. 分光光度法。分光光度法是目前国内外检验血中HbCO采用较多一种方法。所需分光光度计(72.721、751型)多数实验室都具备,只在波长及实验条件方面可有多种不同的选择。其用血量、操作简繁,分析结果的准确度,依所选方式不同而有一定的差异。但基本原理大致相同。都是利用HbCO、HbO<sub>2</sub>、Hb及HbMet在特定波长下的吸光度差别,经测定后将结果作简单数字处理得到HbCO的含量。(1)双波长555/568nm。本法在日本奥园、玉川、眼部及松原代所著方法的基础上改为超微量法。原理是在血液中加入连二亚硫酸钠后,HbO<sub>2</sub>及MHb立刻变成Hb,而HbCO不变,血中只含Hb与HbCO二元组分,其光谱555、568nm波长处可体现较大的吸光度差异,在此波长下比色便可测出HbCO的含量。该法计算公式为:

$$Q = \frac{S \epsilon(\text{HbCO})_{568} + (100 - S) \cdot \epsilon(\text{Hb})_{568}}{S \epsilon(\text{HbCO})_{555} + (100 - S) \epsilon(\text{Hb})_{555}}$$

S为Hb和HbCO饱和率, Q为E<sub>568</sub>/E<sub>555</sub>

ε为Hb和HbCO在555、568nm下的摩尔吸光度。以上式计算

算S制成工作曲线(或表)更为方便。工作曲线略成下凹形。本法用血量0.02ml测定的精确度1.2%,最低标出限为0.3%(HbCO)。测定结果:非吸烟正常人(女中学生)20例,其S范围在0~2.4%,平均S为0.525%。与日本相应测定的结果0~2.4%,平均S为0.515%的值差异很小。同时对不同人群职员、农民、吸烟者、工人)上班前20min与工作后5h及对长期接触高浓度CO98例分别进行了测定,其结果基本上能反映出不同人群,班前与班后及工作环境的不同的差异。同时对急性中毒20例患者进行了测定,其结果符合临床症状和体征,并于CO定性实验平行。在操作方面同捷克J. Teisinger等人及日本奥园等人的2种方法作了对比,认为比二法各方面均优越。(2)双波长530.6/583.0nm。在HbO<sub>2</sub>和HbCO吸收谱中,二者互相交叉,不可能分开测量,但可找到λ<sub>1</sub>和λ<sub>2</sub>一对波长,使其中HbO<sub>2</sub>吸光值ΔA<sub>HbO<sub>2</sub></sub> = A<sub>λ<sub>1</sub></sub> - A<sub>λ<sub>2</sub></sub> = 0,而HbCO不为零,可反映出HbCO的浓度。本法需双波长分光光度计,测量灵敏度HbCO0.7%,可测出HbCO低于10%的血样,用血量为0.02ml。该法对47名吸烟者,50名非吸烟者进行了测定,能反应出不同的差异。(3)双波长432/420nm。HbCO最大吸收在420nm, Hb为432nm,测出血样的二波长吸光值,代入公式,求得HbCO含量。计算公式为:

$$\text{HbCO}\% = \frac{A_{432} \cdot \alpha_{420}^{\text{Hb}} - A_{420} \cdot \alpha_{432}^{\text{Hb}}}{A_{420}(\alpha_{432}^{\text{HbCO}} - \alpha_{432}^{\text{Hb}}) - A_{432}(\alpha_{420}^{\text{HbCO}} - \alpha_{420}^{\text{Hb}})}$$

A为测定值,α为摩尔吸光度。需先测得HbCO和Hb在选用二波长下的摩尔吸光度作为常数,可长期使用。但需保证仪器使用条件不变。波长稳定。本法用耳血0.005~0.01ml,与气相色谱测定法作了比较。相关系数γ=0.992,只在HbCO低于2%时,分光光度法准确度下降。(4)三波长法。法L. Arthur.等采用三波长法,通过3个联立方程,同时求出Hb, HbCO和HbO<sub>2</sub>3种成分的浓度。用血量0.4ml。精度Hb为0.1gm/dl, HbO<sub>2</sub>, HbCO为(饱和度)0.2%。(5)四波长法。本法取稀释血样测定392、413、421、431共4个波长的吸光值,然后联立解3个方程,同时可求得血中HbCO、HbO<sub>2</sub>、HbMet3个浓度值。方程中3种成分摩尔吸光值需事先测定。作为常数。该法用血量0.1ml,同气相色谱法作了比较, HbCO为10%以上时,两种方法相关性很好。(6)B. T. Commins的五波长法。本法是将稀释血样分成两部分,一部分

用  $O_2$  处理软化为  $HbO_2$ ，将此试样置入分光光度计参考光路，未用  $O_2$  处理的样品置于测定光路中。在 420.2nm 下测定。记录值是 2 种样品吸收之差确定 HbCO 浓度。为便于测定高峰，也可在 414 和 426nm 波长测定。Hb 总量可测定完全氧化的样品在 575、559nm 波长的吸光值之差求得。用量 0.01ml。

3. 气相色谱法。气相色谱法用在 HbCO 测定上可获得很高的灵敏度与准确度，优于分光光度计，但需要较高的仪器条件及较好的操作培训。气相色谱仪的前处理不同而采用特定的检测体系。(1) 火焰离子检测器。Guiloe 等人采用的方法是在铁氰化钾的存在下，加热待测血样，使 CO 释放出来。用分子筛将 CO 与其他气体分离。然后在 400℃ 下，使 CO 通过含有 Ni 催化剂的柱子与氢气仅应生成甲烷，甲烷经火焰离子检测器检测。本法及分光光度法同时测定了 275 个样品，HbCO 低于 2% 时，二法相关系数  $\gamma=0.885$ ，高于此数时  $\gamma=0.953$ 。用量 1ml。(2) 热导检测器。L. D. Hobbs 用  $H_2SO_4$  将稀释血样中的 CO 释放出来，经热导检测器所测。 $O_2N_2$  和 CO 同时出峰。记录 CO 峰高可得 CO 含量，将同一血样软化成 HbCO 后，再经同样方法得到的 CO 总结含量，计算后得到 HbCO 百分含量。用量 2ml。

以上是近年来国内外用的较多的几种 HbCO 分析方法。在中国目前基层医院尚未推广气相色谱法，以分光光度法分析 HbCO 含量比较适用。通过仔细选择分析条件，可提高准确度。用于临床及人群调查，同样可取得较满意的结果。

#### 参考文献

- 1 van Slyke D D, et al. The determination of carbon monoxide in blood. *J. Biol. Chem.* 1919, 40:103
- 2 Roughton P J w et al. The estimation of small amounts of carbon monoxide in blood. *J. Biol. Chem.* 1945, 147: 123
- 3 周恒铎主编. 职业中毒检验. 北京: 人民卫生出版社, 1976. 491
- 4 大连化工厂医院工业卫生科. 关于用超微量法测定碳氧血红蛋白的商讨. 1977
- 5 Alfred Ramiedi, Jr, Peter Jatlow, et al. New method for rapid determination of carboxyhemoglobin by use of double wavelength spectrophotometry. *Clin Chem.* 20/2 278 1974.
- 6 Rodkey Flee Thomas Hill A et al. Spectrophotometric measurement of carboxyhemoglobin and methemoglobin in blood. *Clin. Chem.* 1979, 25/8, 1388 1979
- 7 海军总医院中心实验室. 血液碳氧血红蛋白(HbCo)分光光度测定法及临床应用(未发表) 1984
- 8 Arthur L. Malenfant, et al. Spectrophotometric determination of hemoglobin concentration and per cent oxyhemoglobin and carboxyhemoglobin saturation *Clin. Chem* 1968, 14: 789
- 9 Kenneth A S, et al. A rapid method for simultaneous measurement of carboxy and methemoglobin in blood. *J. Appl. Physic.* 1971, J31(1): 154
- 10 Commins B T, et al. A sensitive method for the determination of carboxyhemoglobin in a finger prick sample of blood. *Brit. J. Industr. Med.* 1965, 22: 139

(大连化学工业公司工业卫生科李美兰撰)

#### 微量元素与生殖

trace elements and reproduction

人体几乎含有周期表中以及自然界存在的所有元素。微量元素在体内含量极微，在不同器官和组织中的含量有很大的差别，按生物学作用可分为两大类：一类是已被确认为维持机体正常生命活动不可缺少的必需微量元素；另一类的生理作用尚不清楚。必需微量元素在各种酶系统中起催化作用，为激素和维生素必需成分或辅助因子，因而与性功能、性激素的分泌和生殖系统疾病密切相关，某些微量元素代谢的紊乱可导致不育。

1850 年德卡特勒法吉(M. A. Quatrefages)报告重金属离子具有杀精子作用。1 个多世纪以后，怀特(L. G. White)在研究水的重金属污染时，分析了铜、锌等 7 种离子对人的、公羊的、牛的和狗的精子活动力的影响。自 1869 年劳林(J. Raulin)发现锌与生物生长发育有关，提出微量元素“必需性”概念以后，对人和高等哺乳动物必需微量元素的发现逐渐增多。进入 20 世纪 30 年代，世界各地发生一系列原因不明的人与家畜的地方病，在寻找病因中都发现与微量元素有关。在锌对人和高等哺乳动物体内功能作用的研究中，注意到锌对男性生殖系统功能的影响。近年研究资料表明，锌主要影响睾丸间质细胞功能，同时伴有铜、锰、镁和硒的含量异常，从而影响酶系统使睾酮的合成降低。自 50 年代开始，由于对环境污染及其测试技术的发展和运用，如原子吸收分光光度计、中子活化探针及电子探针等的应用，明显提高测试的灵敏度和精确度，可以直接测定体液、组织、细胞和亚细胞内的元素浓度及分布，为深入研究元素的生物学作用提供了重要条件。自 70 年代以来认识到，动物和人类的生殖过程及其功能除受神经内分泌的调节外，微量元素在生殖过程的各种功能的维持和调节中也起着重要的作用。目前研究较多的微量元素是锌、铜、锰、硒、铁等。中国从 80 年代对微量元素与男性生殖功能进行较多的研究，且着重于男性不育症与微量元素关系和女性应用宫内节育器的铜环中铜对杀精子作用的研究。

由于现代测试技术的发展，目前已知人体含有的元素超过 105 种，按含量可分为常量元素和微量元素两大类。常量元素包括氧、碳、氢、氮等 11 种，占人体元素构成总量的 99.95%。微量元素在正常人体内均不足人体总重量的万分之一，均在低浓度情况下具有生物学的作用，它的需要量均以毫克或微克计。微量元素在体内的分布呈极不均匀性，不同元素含量差别可达数个数量级，同一元素在不同组织和器官中的含量也有很大的差别。现已确定锌、铜、硒、铁、锰等都是特殊金属酶的必需成分，是生殖内分泌的各种激素的合成和释放的必需成分或辅助因子，又是精液中的重要生化成分，对维持精子生存环境的稳定有重要的意义。微量元素直接参与精子的构成，对精子的成熟、运动、获能及顶体反应等一系列生理功能产生影响。

锌主要与蛋白质结合，参与多种酶的合成，是多种脱氢酶的活性成分。锌与 DNA 的复制、RNA 的转录和前列腺素的合成有关。缺锌时，锌金属酶活性降低，促性腺激素释放和睾酮合成减少，甚至影响丘脑—垂体—性腺轴功能活动的协调，使男性性腺和副性腺功能紊乱，进而使性腺蛋白质合成和生长受影响而致生殖器官发育不良、性功能紊乱、第 2 性征发育不良。对锌代谢、锌与前列腺功能及生殖系统功能关系的研究发现，锌直接参与精子的生成、成熟、激活和获能过程，锌能延缓精子细胞膜的脂质氧化，维持细胞膜结构的稳定性和生理通透性，使精子有良好的活动力。锌及其氧化物能有效抑制精子酵解和氧化过程，使精子活动减缓，精子在射精过程中吸收精液中的锌(主要来自前列腺液)与胞核染色质的巯基结合，使染色质免于过早解聚，而有利于精卵结合。同样的，女性缺锌会影响卵巢的功能和卵母细胞成熟，影响 FSH/LH 的合成和分泌。在妊娠期，胎儿生长发育需要锌，缺锌可使胎儿出生缺陷，易使致畸物质发挥作用。锌与乳腺的乳汁生物合成有关。

铜是细胞色素氧化酶等特殊金属氧化酶的主要成分，参与体内多种生化代谢过程。铜可直接作用于垂体，使其释放促甲状腺激素、促黄体激素、生长激素和促肾上腺皮质激素。铜存在于男性生殖系统的不同组织及其分泌物中。铜可抑制精子的氧化酵解过程，影响精子的存活率、活动度和穿透宫颈粘液的能力，高浓度的铜离子可导致精子制动和死亡。1968 年，季珀(J. A. Zipper)首先制出铜宫内节育器取得良好的避孕效果。1973 年兰迪斯(L. Randic)报告，在妇女月经周期中宫颈粘液中的铜的含量，以排卵期含量最低(3.20 $\mu$ g/100mg)，有利于精子穿透宫颈粘液进入子宫，而排卵前期，和后期铜含量都高于排卵期分别为 7.03 和 19.35 $\mu$ g/100mg。由铜宫内节育器释放的铜离子可提高宫颈粘液的

浓度和和子宫内粘液的浓度,使精子穿透宫颈粘液时受阻,甚至杀死精子而达到避孕目的。铜与胎盘的功能有关,低水平铜与铜蓝蛋白使胎盘功能不足,使胎儿在宫内死亡或先兆流产;相反,在妊娠毒血症时出现血铜升高。

铁是细胞色素酶、过氧化氢酶等的必需成分,具有重要生理功能。铁与锌互有颞颥作用,铁可维持人体生殖内分泌功能,影响脑垂体促性腺激素的释放,精浆中铁的含量与精子密度呈正相关,但铁过多,可导致睾丸曲细精管的固有膜中出现大量铁粒沉积,阻碍睾丸的生精功能。

锰是丙酮酸脱羧酶、精氨酸酶和脯氨酸酶的活性基因或辅助因子,参与氧化还原、磷酸化过程和维生素的合成。锰缺乏可直接影响鼠和兔精子的成熟,曲细精管出现退行性病变,引起精子数量减少,输精管退化,副性器官萎缩,性欲低下,使动物不育。

硒是组成各种谷胱甘肽过氧化物酶的重要元素,可阻止不饱和脂肪酸的氧化。精浆中的硒主要来自前列腺,可消除过氧化物对精子活动力的影响。硒是多种对精子有毒元素如镉、铅、铜的颞颥剂,可防止它们对生殖系统的毒害作用,精液中硒浓度与精子密度呈正相关。硒过多或不足均对生育功能不利;硒过多使雌性动物生育能力明显受损;慢性硒不足,可致动物精子尾部发生缺陷,精子活动力下降,明显影响生殖功能。

微量元素不仅具有重要的生理功能,而且和生殖有密切的关系,它们在人体的代谢过程和相互作用中,各自以独特的方式参与生理生化过程,彼此间有协同、颞颥和置换等极复杂的作用。某些元素的减少或增加都可导致不育,这些复杂的关系,给研究工作带来困难,但也是人们进行探索的新领域。对于人和动物的正常者和不育者的血浆及精液中元素值的测定和比较,由于近年来测试技术的飞速发展,采用较灵敏的分析技术,很大程度上消除了分析中的污染来源,使元素的正常值有所降低,甚至下降几个数量级,因此,必须做些修正工作。微量元素对生殖系统的作用机理还不完全清楚,也有待今后进一步的探索,为抗生育的研究及不育的诊断和治疗开辟新的途径。

#### 参考文献

- 1 Randic L, Musacchio J, Epstein J. *Biol Reprod.*, 1973, 8(4): 95~98.
- 2 Pleban P A, Meid, Wortham J W E. *Clin Chem.*, 1982, 28(12): 1593~1598.
- 3 Stanwell-Smith R. *Fertil Steril.*, 1983, 40(5): 670~677
- 4 吴小侯. 国外医学(泌尿系统分册), 1986, 6(1): 11~14
- 5 张秀成, 贾丽莉. 国外医学(计划生育分册), 1990, 9(3): 143~146
- 6 Bedwal R S, Nair N, Malhur R S. *Trace Elem Med.*, 1991, 8(2): 89~100

(中国计划生育委员会科学技术研究所  
翁礼桐副研究员撰)

**硒缺乏与癌症** 硒是人体必需的微量元素之一。人类癌症及其他多种疾患与硒缺乏有关。早在1912年达伯特(Dalbert)和1915年沃克(Walker)及克莱因(Klein)就报道应用硒为治癌药物。1956年韦斯伯格(Weisberger)和苏兰德(Surhland)报道应用硒代胱氨酸治疗急性白血病有效。1976年布罗格哈默(Brogamer)等研究110例各种类型癌症患者的血硒浓度与肿瘤生物学行为模式的关系。大多数病人血硒较正常人低。低血硒者的肿瘤远处转移、原发肿瘤多发和复发的频率较高,生存期短。硒浓度接近或超过所有病人的平均值者,其肿瘤局限于原始区域,发生远处转移者较少,原发新生物较少,复发率较低。许多报道表明,硒(亚硒酸钠 $1\mu\text{g/g}$  宿主动物体重)能抑制实验移植肿瘤的生长。阿卜杜拉耶夫(Abdullaev, 1973)等和米尔纳(Milner)及徐(Hsu, 1981)报道,在动物实验中,硒与X线或化疗合用能增强对肿瘤的抑制作用。

1990年帕里泽克(Parizek)论及硒与癌的关系时指出,动物实验表明:(1)在大部分研究资料中,1~6mg/kg食物(或1L水)的硒能预防化学剂的致癌,此药理剂量远超过营养所需。(2)某些硒化合物有致癌作用,如大鼠管饲硫化硒悬液3mg/kg或15mg/kg体重、每周5d,2年后高剂量组的原发性肝癌发生率增高。(3)高膳食硒(如2.5mgSe/kg膳食)较对照0.1mgSe/kg在仓鼠中能增强双(2-氧丙基)-亚硝胺的致胰腺癌作用。

1991年多根(Dorgan)和沙茨金(Schatzkin)综述预防癌的抗氧化微量营养素时,论及硒。动物研究资料显示硒对若干种癌,包括自发的、病毒和化学剂所致的乳腺癌有保护作用。但雷迪(Reddy)和田中(Tanaka, 1986)报道硒缺乏对大鼠化学剂所致大肠肿瘤有保护作用。在人体中,从硒膳食和血硒水平与癌发生率的环境学研究资料,显示硒保护癌。但克罗姆豪特(Kromhout, 1987)随访15年,发现所有部位癌患者总死亡率与硒摄入无关。丰塔姆(Fontham, 1988)等对6个人群进行研究,发现低血硒与所有部位的癌总危险率增高有关。林斯塔(Ringstad, 1988)等报道低血清硒与致死性癌的危险率显著有关。海尔兹尔索尔(Helzlsouer, 1989)等报道血清硒与膀胱癌呈显著负相关。但克奈克特(Knekt, 1990)等报道未能检测出其相关关系。伯尼(Burney, 1990)等和克奈克特等(1990)观察到男性胰腺癌和胃癌危险率与血清硒呈负相关。诺穆拉(Nomura)等(1987)和肖伯(Schobers, 1986)等报道大肠癌病人血清硒较低。克奈克特等(1990)认为大肠直肠癌危险率与血清硒无关,而男性肺癌呈显著负相关。相反,门克斯(Menkes, 1986)等报道血清硒与肺癌危险率呈边缘性显著正相关。此外,林斯塔(Ringstad, 1988)等报道发生乳房癌妇女血清硒边缘性显著较高。对其他3个人群的研究资料表明,血清硒与乳房癌无关。

中国薛凤霞(1991)、李秀钧(1986)、杨玉学(1986)、张万东(1985)和陈培恩(1987, 1991)综述均提到缺硒与患癌的危险性有关,患者血硒浓度降低。但李文杰等(1991)作了硒和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)在食管癌高发区(河南省鹤壁市郊)和 low 发区(郑州市郊)不同人群红细胞中水平的研究资料显示,红细胞中硒和GSH-Px降低可能是患病的结果,低硒不一定是肿瘤发生的原因。于树玉等(1991)报道江苏省启东县原发性肝癌(PLC)高发区居民的3个干扰试验,资料的结论是补硒显著降低PLC发生率,并报道高发地区玉米的硒含量较低发地区的明显偏低,发病率与血硒呈负相关。每亩地农作物施亚硒酸钠1g,可使籽粒硒含量提高6倍,提出采用叶面施硒肥,每年只喷硒一次即可。无机硒通过作物吸收转化为有机硒,提高硒的利用率,降低硒的毒性。

硒的抑癌机理,陈培恩(1987, 1991)已有综述。薛凤霞(1991)综述有4点:抑制癌细胞生长及DNA、RNA和蛋白质的合成;干扰致癌物的代谢;抗氧化作用(GSH-Px等);对免疫系统的影响。顾公望(1990)综述更认为硒对癌基因谱的影响。硒与微量元素之间协同和拮抗作用值得进一步探索。内夫(Neve, 1991)引施茨茨(Shraucer, 1988)的观点,认为药理剂量硒可形成硒代二谷胱甘肽,对肿瘤细胞起抗增殖作用。

人体硒状况的估计:常用血清(或血浆)或全血硒测定,也可测发硒或指甲硒。内夫等(1988)观察补硒代甲硫氨酸前后血浆、红细胞和尿硒及血浆、红细胞和血小板中GSH-Px,结论是血浆硒和尿硒为最敏感的指标。方明、谭力(1990)报道,南京地区血清硒正常值为 $0.85\sim 0.97\mu\text{mol/L}$ 。黄碧霞等(1988)测定合肥69例健康人发硒 $X\pm 0.72\pm 0.32\mu\text{g/g}$ 。

人的硒需要量和最大安全摄入量:人体需要量在国际上多采用美国国家科学委员会的推荐量,为 $50\sim 200\mu\text{g/d}$ 。杨光圻(1989)研究结果:成人(男、女)膳食最低需要量为 $17\mu\text{g/d}$ ,安全膳食最低需要量为 $22\mu\text{g/d}$ ;成人(男)膳食生理需要量为 $40\mu\text{g/d}$ ,安全膳食生理需要量为 $50\mu\text{g/d}$ 。建议用 $50\mu\text{g/d}$ 作为膳食供给量标准。至于人的最大安全摄入量,杨光圻(1989)研究结果是:中国高硒地区近 $550\mu\text{g/d}$ ,而一般地区近 $400\mu\text{g/d}$ 。据小古德温



(Goodwin Jr)等(1983)观察摄入超过 0.1~0.2mg/(kg·d)始有中毒现象。

北京市卫生防疫站《食物营养成分表(北京地区)》(1990)报道 600 余种食物的硒含量(ug/100g),例如苋菜(紫)为 436.20,鲢鱼(干)为 229.40,海参(墨参)为 206.80,菠菜为 166.90,虾米为 82.30,带鱼为 52.40,猪肾为 44.10,小麦粉(精白粉)为 29.20,小麦粉(富强粉)为 17.40,鸡蛋(家养)为 9.00,稻米(梗,标二)为 6.42,牛肉(前腱)为 6.26,猪肝为 6.20,稻米(梗,标三)为 5.40,花生(鲜)为 4.50。由于土壤中硒水平差异甚大,食物硒的区域性变异亦相当大。杜尔(Dhur,1990)等研究资料显示,人的硒可获得性依化学形式而异,蛋白硒可吸收 80%,而矿物硒只吸收 30%。

汪淑哲等(1985)报道硒含量(mg/g)党参为 0.52,黄芪为 0.080,人参为 0.150,刺五加为 0.175。倪璇等(1990)报道 27 种常见中草药硒含量(ug/g),较高的有丹参为 0.9535,红参为 0.6691,生地为 0.4730,熟地为 0.4551,玄参为 0.4445,龙骨为 0.2438,地骨皮为 0.2125,麦门冬为 0.1820,山药为 0.1739。

药物补硒及应注意的问题。硒不仅可能防癌,张万东(1985)谓也能作为化疗辅助药。薛凤霞(1991)认为低硒患者在化疗过程中应用硒对患者更有利。此类药物 Ebselen[2-苯基-1,2-苯并异噻唑-3(2H)],硒酵母,硒代甲硫氨酸、亚硒酸钠和二氧化硒。硫代胱氨酸胃肠反应较大。短期全肠胃外营养的病人血清硒显著降低,长期者更缺硒,应静脉输入硒代甲硫氨酸,可补 50~100ugSe/d。过量摄入硒能产生毛发、皮肤、精神方面的毒性反应及贫血。所以补硒要注意剂量,并应监视血清或血浆硒。

总之,许多报告表示硒能抑制实验性肿瘤的生长;硒与 X 线或化疗合用,能增强抑制作用。多根和沙茨金(1991)综述:环境学研究已显示硒与很多部位的癌呈负相关,但观察研究并不能有力支持硒对任何部位癌有保护作用。中国多认为与硒缺乏癌症有关。值得考虑研究各地区人群血清和头发、指甲及食物、水和土壤的硒含量。缺硒地区应考虑采用于树玉等(1986)提出的农作物叶面喷施硒肥和张万东(1987)提出的食盐或饮水中补硒以防癌。缺硒的人应补充富硒自然食物,如用药物补硒要注意剂量及监视血清硒水平。

#### 参考文献

- 1 Milner J A, Fico M E. Third international symposium, 1987, B:1034~1043
- 2 陈培恩. 安徽医科大学学报, 1987, 22: 330
- 3 杨光圻. 中国地方病学杂志, 1989, 8: 298
- 4 倪璇, 等. 微量元素, 1990, 2: 46
- 5 顾公银. 医学研究通讯, 1990, 19(3): 12
- 6 北京市卫生防疫站等. 食物营养成分表(北京地区), 北京: 轻工业出版社, 1990, 2~99, 155~160
- 7 Parizek J. Food Chem Toxic, 1990, 28: 763
- 8 Dorgan J F, Schatzkin A. Oncol Clin North Am, 1991, 5: 43
- 9 薛凤霞. 国外医学(妇产科学分册), 1991, 18: 15
- 10 陈培恩. 生命的化学, 1991, 11(2): 25

(安徽医科大学肿瘤研究所陈培恩副研究员撰;梅蔚德审)

### 老年营养代谢 senile nutrition and metabolism

营养不良是老年人的常见病,也是各种慢性疾患进展的后期表现。资料表明:在老年病房,4.5%男性和 5.2%的女性营养不良,除去恶性肿瘤和消化系统疾病外,65 岁以上老人 11.2%营养不良;严重消耗性营养不良者,男性占 4%,女性占 8.4%。营养不良会削弱免疫功能和机体的适应机能,引致小病酿大。同时,老年病人常合并多种疾病,若伴有营养不良,势必造成恶性循环,增高发病率和死亡率。因此,了解老年人的营养代谢,重视老年人的营养状况,对老年人的生存和老年病的防治,有极其重要意义。

老年人营养不良的原因有:生理机能减退,营养摄取不足,药物引起的营养缺乏,社会经济水平低下,心理状态以及各种医

疗问题的相互影响。

蛋白质氨基酸代谢:老年人血清总蛋白和白蛋白均低于壮年人。当非脂肪体积自 100%降至 70%所谓“氮死亡”的过程时,肌肉体积和内脏蛋白减少,免疫反应受损害,易发生感染,伤口愈合延迟,器官功能障碍以至适应能力丧失等等。

低蛋白血症是老年人的特点。由于蛋白质吸收过程中酶的作用减弱以及小肠功能减退,吸收的蛋白分解不充分,故造成机体内不全分解产物肽增多,而血清中多种游离氨基酸的正常值均低于壮年人,特别是苏氨酸、丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸等降低尤为明显。甘氨酸、蛋氨酸、赖氨酸、组氨酸等则无任何改变,唯有精氨酸明显升高。

老年人酸性氨基酸、中性氨基酸及碱性氨基酸之和也低于正常范围,特别是中性氨基酸减少。由于肾功能减退,氨基酸再吸收减少,肝功能降低或老年并发的细胞功能降低,使得肽类利用减少,代之以必需氨基酸消耗增加,故非必需氨基酸与必需氨基酸之比值升高。若有某种疾患,使其比值进一步升高,则提示预后不良。

随着年龄增长,老年人蛋白合成率比年轻人低 1/3,若以身体细胞体积或基础代谢率计算,这种蛋白合成率降低或许比实际更明显。同时蛋白质合成速度的极限也较年轻人低。故要维持正常氮平衡,老年人每天需摄入蛋白质约 0.8g/kg,达到总热量的 12%~14%。

脂肪代谢:脂肪占总热能的 15%~20%,由于脂肪可以在体内储存,故老年人很少见到因脂肪缺乏而引起的病变。然而,脂质代谢的紊乱可使老年人产生一系列疾病。老年人胆汁酸减少,脂酶活性降低,故消化脂肪的机能低下。又因消化吸收机能减退,单酸甘油酯酰基转移酶活性降低,使得肠粘膜再合成三酸甘油酯减少,同时胆固醇的吸收也减少。由于 80%胆固醇转化为胆汁酸,当年龄增加时,其转化速度降低,进入肝脏的胆固醇以及胆固醇的合成均减少。此外,脂肪组织分解能力下降,其释放的游离脂肪酸也减少。

经肠道吸收、合成或肝脏合成的胆固醇、乳糜微粒(CM)、极低密度脂蛋白(VLDL),大部分释放入血,在血中受脂蛋白脂酶(LPL)和卵磷脂-胆固醇脂酰转移酶(LCAT)作用。甘油三酯(TG)则以 CM 及 VLDL 形式出现于血中。老年人因 LCAT、LPL 活性降低,故细胞内代谢能力下降,有利于未梢胆固醇贮存以及 TG 的增加。据文献报道,胆固醇和 TG 随年龄增加而逐渐增加,男性 40~50 岁达高峰以后下降;女性推迟 10~15 年。50 岁以后游离脂肪酸增加,40~50 岁脂蛋白 VLDL 和 LPL 达高峰以后降低,高密度脂蛋白(HDL)几乎不受年龄的影响。由于老年人体内脂肪合成、分解、排泄能力均降低,脂肪在血和组织中堆积,故老年人易肥胖。一般老年男性脂肪的摄入量每日约 30~50g,女性为 30g 左右。多不饱和脂肪酸最好应占脂肪总量的 1/3,这有利于预防动脉粥样硬化。每日进食的胆固醇量以不超过 300mg 为宜。

糖的代谢:老年人葡萄糖耐量减退并且糖尿病的发病率随年龄增加而增高,其病理生理机制至今尚未完全明了。有资料表明,老年人的胰岛释放模式为低反应性,其原因为胰岛 β 细胞对葡萄糖的感受性降低。同时,因胰岛素结合部位的数目减少,未梢组织对胰岛素反应性低下,而结合部位对胰岛素的亲和力则无改变。Chen 实验指出,老年糖耐量减退原因是 β 细胞缺陷和胰岛素耐受兼有之。

老年人对碳水化合物的摄入,问题较少,但是当摄入并吸收过多的碳水化合物时,会造成蛋白质缺乏,产生蛋白质热能(PCM)不足。慢性酒精中毒者,常靠大量饮酒产生足够的热能,但缺乏蛋白质成份。老年黑人和东方人,因碳水化合物吸收不良,常发生乳糖耐量降低,易发生老年代谢性骨病。老年人食谱中,约有 60%~70%的热能来自碳水化合物。由于简单碳水化合物(如蔗糖、果糖等)在体内可转化为甘油三酯,故老人不宜吃太多的简单碳水化合物食品,特别对伴有高甘油三酯血症者更应忌

食甜食,但对复杂碳水化合物食品如粗粮,一般可不必限制。

水与无机盐:由于各种内脏器官的自然衰老,老年人对水与电解质失衡的耐受性及代偿能力常较年轻人差。身体总水量,在60岁以上者,男性为51.5%~52%,女性为42%~45%,而且细胞外液比年轻人多,故老年人对大量补液的耐受性降低。总钾量减少,在老年人与青壮年间有明显差别,年龄愈大,总钾量愈低。通常细胞合成需要钾,1g 氮:3mmol 钾,热量与钾的关系是4184kJ:50mmol 钾。因此,老年人每日钾的需要量约为50mmol,身体的总钠量老年人与青年人相似或稍增加。由于钠量变化不大,而钾量降低,故可交换Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>比率有所增加,这种情况与细胞外水分增加共同造成老年人易发生浮肿的条件。一般老年人食盐量为3g/d。过多吃盐会使水的贮留量增加,加重心脏负荷。随着年龄增长,由于钙的摄入不足,肠吸收减少,钙磷比例不适,使骨密度减低。故60~90岁老人30%有骨质疏松。同时也与VitD及其代谢产物缺乏、接触阳光少等有关。故要维持钙平衡,每日需钙量应为520~600mg。磷在能量利用时需要量增加,正常量为4184KJ:20mgEg 磷。老年人体内的磷需要量与青壮年相似或稍增加。当摄入磷过多时,会影响对钙的吸收。镁是许多酶的激活剂,在代谢过程中起重要作用。老年人血清中蛋白结合镁呈下降倾向。故老人每天镁的基本需要量为0.04mg/kg。锌对正常免疫反应和组织再生极为重要,是许多酶和高分子的组成部分。严重缺锌可引起生长迟缓,伤口愈合缓慢,秃发和皮炎,影响RNA、DNA合成。每日2.2mg 锌,可以维持其平衡状态。铜是酶的组成成分,与抗体生成有关,可影响铁的代谢。老年人血清中的铜和血浆铜蓝蛋白呈增加趋势。恶性肿瘤患者血清铜也增加。硒有抗氧化、抗癌作用,缺硒可致克山病,老年人硒呈下降状态。在糖脂肪代谢中,铬有着很重要作用,老年人缺铬,可致糖耐量降低。对于长期TPN者,更应注意微量元素的补充。

维生素:由于人体无法合成维生素,水溶性维生素又几无贮备,故常会出现缺乏症。老年人咀嚼能力差,唾液分泌减少,胃粘膜萎缩,小肠蠕动低下,吸收功能减退,故易产生脂溶性维生素摄取减少。此外,老年人胰酶活性降低,胆酸盐减少,影响对脂溶性维生素的吸收,不易形成微胶粒,使之成为水溶性的而通过粘膜细胞。VitA在老年人并不低下,增多和缺乏对血清VitE浓度无明显影响。VitD的活性型尤其是1,25(OH)<sub>2</sub>D<sub>3</sub>在老年人表现为减少,故骨质疏松症在老年人极为常见。老年人常发生感染,而予以抗生素治疗,结果肠道细菌显著减少而产生VitK<sub>2</sub>量明显降低,容易造成VitK缺乏。美国曾对65岁以上健康老人的营养进行调查,结果表明,维生素B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>、B<sub>6</sub>、B<sub>12</sub>、C、D、叶酸等的生化指标低下。因此,老年人应注意维生素的供给(见表)。

表1 老年人每日维生素供给量

| 维生素            | 供给量    | 维生素             | 供给量   |
|----------------|--------|-----------------|-------|
| A              | 2000IU | B <sub>2</sub>  | 1.2mg |
| D              | 10μg   | B <sub>6</sub>  | 3mg   |
| E              | 30mg   | B <sub>12</sub> | 2μg   |
| C              | 70mg   | 叶酸              | 400μg |
| B <sub>1</sub> | 1.2mg  | 尼克酸             | 12mg  |

参考文献

- 1 橘井田郎,手术,1979,33(4):385~390
- 2 野间昭夫,日本临床,1981,39(3):62~68
- 3 Steffee W P. Bull New York Acad Med,1980,56(6):569~573
- 4 Chen M,et al. J Clin Endocrinolmetab,1985,60(1):13
- 5 Wagner P A, Geriatrics, 1985,40(3):111
- 6 Gupta K, et al. Geriatrics, 1988,43(2):87
- 7 Lehmann A B. Age and Ageing, 1989,18(5):339~343

8 山田贤次,最新医学,1990,45(4):753~755

(安徽医科大学第一附属医院外科雷勇  
主治医师,汪恭恕教授撰)

自身免疫病及其治疗 Current of autoimmune diseases and its immuno therapy

自身免疫病为一类病因不清的,严重危害人类健康的常见病。按其病理损伤可分为器官特异性(如重症肌无力、Graves 甲状腺炎、多发性硬化症和I型糖尿病)的和器官非特异性(如类风湿性关节炎和系统性红斑狼疮)的。上述疾病有一个共同特点,即机体内的自身反应性T细胞和B细胞攻击自身组织抗原而引起免疫损伤。

自身免疫病发病的关键因素是机体对自身组织抗原的免疫耐受被打破。现代免疫学认为,正常人体内存在自身反应性T细胞和B细胞,他们以相同的方式识别抗原提呈细胞上的自身抗原和外来抗原。机体是怎样只允许对外来抗原起反应,而对自身抗原无反应,即自身耐受的调节机制,是当代免疫学研究的热点。1989年,在德国柏林召开的第7届国际免疫学大会提出自身免疫是免疫学中有待攀登的最后一个高峰。

人们对自身耐受的认知,主要经历了两个阶段。1959年,伯内特(Burnet)提出了克隆清除学说,认为机体的淋巴细胞在发育成熟过程中在胸腺要经历阴性选择过程。凡与自身组织抗原反应的淋巴细胞一律被清除。在正常情况下,机体无自身免疫反应,故该克隆清除学说一直用来解释自身耐受现象。然而在以后的研究中人们发现,在正常机体,存在有多种自身抗体及自身反应性T细胞和B细胞。为此有人提出克隆无能学说,它强调自身免疫反应存在于正常人体,机体存在自稳调节系统,使得自身反应性T细胞和B细胞无活性或活性较低,不足以引起自身免疫病。

正常机体存在自身免疫反应这一观点已被大家所接受。然而在自身免疫病中自身耐受如何被打破,自身免疫反应如何失去控制而引起自身组织的免疫损伤,最终引起自身免疫病的机制是不清楚的。人们已观察到,有多种因素可触发自身免疫病,比如遗传、感染、激素、MHC-I类抗原的异常表达以及应激等。故目前人们把自身免疫病看成是上述诸多因素综合作用的结果。

某些自身免疫病,当病人的HLA抗原具有特殊的表型时(如B<sub>8</sub>.B<sub>27</sub>,DR<sub>3</sub>和DQw<sub>2</sub>),或雌激素维持在较高水平的生育期妇女,或上皮细胞异常表达MHC II类抗原时,发病率明显升高。这些现象虽然对解释自身免疫病的病因有一定帮助,但只能说明部分病因。在人们试图寻找自身免疫病的机制时,感染和应激倍受关注。大量的临床报道表明,革兰氏阳性菌和阴性菌、分枝杆菌以及寄生虫感染均能导致自身抗体产生。像反应性关节炎、Reiter's综合症和格林巴利综合症等疾病,常在病人患感染性疾病后出现。亦有资料表明,多发性硬化症与病毒感染关系密切,人类病毒性心肌炎与柯萨基B组病毒感染有关。上述结果均提示感染与自身免疫病关系密切。为此有人提出,当感染病原体与人体组织具有交叉抗原时,可通过分子模拟作用诱导自身免疫病。

Holoshitz从佐剂性关节炎的大鼠体内分离到1株T克隆细胞A<sub>2</sub>b,将其过继给正常鼠能引起严重的佐剂性关节炎。A<sub>2</sub>b能识别结核杆菌的1个蛋白分子,又能识别关节滑膜组织中的1个糖蛋白分子,用基因工程分离上述两分子的表位,证明两者9个氨基酸的多肽中有4个氨基酸是相同的。孙兵认为,结核杆菌的蛋白分子与关节滑膜组织中糖蛋白分子结构的相似性是佐剂性关节炎的主要病因。这一看法在类风湿性关节炎病人身上得到证实,从而第1次在动物实验研究和临床观察中提出细菌感染可通过分子模拟作用诱导自身免疫病的观点。

机体在应激状态下,即受到各种生理的或非生理的刺激时,宿主细胞和病原体均能产生热休克蛋白(HSP)。1979年,Henderix首次从大肠杆菌中分离到HSP,命名为GroEL。以后的研究资料表明,HSP广泛存在于细菌体内。近来发现,热休克蛋白与自身免疫病关系密切。HSP即细菌的免疫优势抗原,在感染

过程中除细菌本身产生外,感染的宿主细胞亦能产生。由HSP引起的免疫反应有两种:一是保护作用,即有助于机体清除病原微生物;二是引起自身免疫反应,即针对HSP的免疫活性细胞和效应物质,亦能通过分子模拟作用,与HSP有交叉抗原的自身组织抗原结合,引起免疫损伤。在佐剂性关节炎大鼠体内已发现1个分子量为65 000的HSP分子,在关节滑膜细胞中能高度表达,且HSP<sub>65</sub>浓度的升高与关节损伤成正比。最受人们关注的是60 000的HSP。发现HSP<sub>60</sub>蛋白结构有50%与哺乳类动物具有同源性。在人类的类风湿性关节炎病人的血清和关节腔滑液中发现HSP<sub>60</sub>浓度明显升高,其升高的程度与病情严重程度成正比。进一步研究表明,不仅是感染,温度和紧张等因素亦能诱导HSP。有人提出热休克蛋白在组织细胞中的高度表达可能是自身免疫病的共同机制。

综上所述,自身免疫病的病因有多种,目前对其发病机制不是很清楚,故对自身免疫病始终无有效的治疗手段。以往使用糖皮质激素和环磷酰胺等非特异性免疫抑制剂治疗自身免疫病,虽能缓解症状,但不能根治,且副作用大,不能广泛使用。选择性抑制T细胞功能的免疫抑制剂环孢素A,能抑制淋巴因子释放,可迅速控制自身免疫病的病症,在临床上治疗重症肌无力和类风湿性关节炎有显著疗效,但仍不能根治。在动物实验中,对多种抗原诱导的自身免疫病,环孢素A显示出有效的预防作用和治疗作用。为了从根本上治疗自身免疫病,人们把注意力集中到自身免疫病效应机制中占据中心环节的自身反应性T细胞上。1991年9月,在英国牛津举行的国际免疫学大会上,有关T细胞激活的免疫治疗受到高度重视。为此有人提出,这种免疫治疗方法用于治疗自身免疫病,将是一个划时代的革命。T细胞免疫治疗的靶点是由T细胞受体与抗原提呈细胞上的抗原和MHC分子组成的3分子复合物。故这种治疗包括针对抗原、T细胞受体和MHC分子3个方面。

人们已观察到,一些抗原经肠道进入机体,可在肠道粘膜局部引起B细胞反应,但在全身可诱导机体对该抗原的免疫耐受。这种抑制作用是由CD<sub>8</sub><sup>+</sup>细胞介导的。Brod等报道,用髓鞘磷脂蛋白给大鼠口服,可完全抑制实验性脑脊髓炎(EAE)的复发。这种抗原经肠道诱导的全身性免疫耐受,尽管机理不是十分清楚,但它为防治致病性抗原上清楚的自身免疫病提供了可能性。目前正应用髓鞘磷脂蛋白的各种口服制剂治疗多发性硬化症。

T细胞通过其受体与特异性抗原结合而引起免疫反应。Hafler用抗CD<sub>4</sub>和CD<sub>2</sub>单克隆抗体治疗多发性硬化症有一定的疗效。这一治疗方法旨在清除体内致病性T克隆细胞。亦有人应用T细胞受体的合成多肽免疫大鼠,防止EAE的出现。

1981年,Cohen等在EAE大鼠体内首次分离到1株T克隆细胞,经放射处理后,预先免疫大鼠,可完全防止EAE的出现。1988年,Cohen和Van Eden又在佐剂性关节炎大鼠体内分离到两株T克隆细胞,1株为A<sub>2b</sub>,可把疾病传递给正常鼠;另一株为A<sub>2c</sub>,预先免疫大鼠可防止佐剂性关节炎的出现。为此,这种调节自身免疫反应的T细胞疫苗,用于治疗自身免疫病很受重视。

在T细胞识别抗原的过程中,MHC-I类抗原必须同抗原一起提呈给T细胞,才能激活T细胞。Wraith用MHC的阻断多肽治疗EAE有显著疗效。Boitard用抗I-A单克隆抗体治疗糖尿病小鼠,能阻断疾病的发生。虽然MHC抗原分子的阻断肽和抗MHC单克隆抗体治疗自身免疫病有一定疗效,但对于不同的个体,MHC分子不同,这种个体差异使其推广应用受到限制。

针对T细胞激活的免疫治疗,为人类最终攻克自身免疫病带来了希望。它使得人们从经典的化学药物治疗的,只注重缓解症状,转移到寻求自身免疫病的病因和重建自身耐受为主的免疫治疗。

随着细胞克隆技术和基因工程等分子生物学技术的发展,人类对自身免疫病的认识会逐渐深入。最近,Cohen和Douglas提出免疫休儒学说,认为机体存在有淋巴细胞网状系统调节自身免疫反应,加强自身免疫效应细胞和调节细胞间的联系,重建自

身耐受,是治疗自身免疫病的关键所在。应用T细胞疫苗刺激和增强体内自身免疫的调节机制以及对抗HSP的致病性,而保留其免疫保护作用的研究有着深远的意义。

#### 参考文献

- 1 Mowat A M. Immunol Today, 1987, 93~98
- 2 Cohen I R. Sci. Am., 1988, 258; 34~42
- 3 Borel J F A. Clin Immunol Immunopathol., 1989, 53; S7~S16
- 4 Kieszoging R. Immunological Rev., 1989, 4193; 318~339
- 5 Schwartz R H. Science, 1990, 243; 1349~1357
- 6 Wonfield J B. Curr Top Microbiol Immunol., 1991, 163; 161~189
- 7 Van Eden W. Immunol Rew., 1991, 121, 1~28
- 8 Brod S A, Sabbagh A. Ann Neurol, 1991, 29, 615~622
- 9 Müller A Hafler D A. FASEB J, 1991, 5, 2560~2566
- 10 Cohen I R, Young D B. Immunol Today, 1991, 12(4); 105~110

(上海医科大学药学院药理教研室  
孙兵撰; 李晓玉审)

**遗传代谢病** inherited metabolic disorders 由于医疗卫生事业的发展, 传染病和感染性疾病的发病率逐年降低, 而遗传代谢病的比例却日益增高。随着遗传学研究的进展, 特别是DNA探针技术的问世, 发现遗传疾病已达4000多种, 其中遗传代谢病2000多种, 大多数目前尚无特效疗法, 且部分存活率很低。因此, 遗传代谢病是近年来医学遗传研究中最为活跃的领域。

遗传代谢病又称先天性代谢异常症和遗传性分子病。1909年由Garrod首先报道, 他认为黑尿酸症、成糖尿症和白化症等是由于蛋白质、糖和脂质代谢过程特定部位缺陷而引起的遗传性疾病, 并确立了现代认识的基本概念。1945年, Beadle和Tatum提出了一个基因一个酶的学说。1952年首次证明了I型糖原累积病(Von Gerbe型)是由于肝葡萄糖-6-磷酸酶的缺陷引起。1953年Watson和Crick发现了DNA结构, 为遗传代谢病的病因诊断作出了贡献。同年德国Bickel用低苯丙氨酸饮食治疗苯丙酮尿症(PKU)获得成功。1956年C. Wall在加利福尼亚州用10%三氯化铁湿尿布试验对PKU进行了成功的筛查。1970年Pardue等应用染色体原位杂交法进行了首次基因定位。为遗传代谢病的产前诊断和基因治疗奠定了基础, 促进了70年代以后遗传代谢病研究的突破性进展。

**遗传代谢病的基因诊断** 1974年Evans等将染色体显带技术应用到染色体原位杂交, 提高了基因定位的准确性和精确性。1981年Harper等成功地将单拷贝的DNA序列定位到G显带标本上。该方法应用放射性标记探针能将克隆基因或某一特异的DNA序列直接精确地定位染色体相应区域及亚带上, 也广泛用于组织细胞中mRNA、病毒DNA和RNA的检测, 以及正常基因、肿瘤基因的转录和表达。但由于整个过程复杂、耗时较长, 且需制备大量的靶DNA样品, Mullis首先提出聚合酶链反应(PCR)技术。1985年Saiki首先用PCR技术结合液相杂交技术快速诊断镰状细胞贫血。1988年Dilella应用PCR结合Aso探针杂交技术成功地进行了PKU的诊断, 并可大面积普查。PCR技术使基因诊断进入了一个新阶段。它简化了操作程序, 不需进行探针标记、Southern转印及同位素自显影等。加靶序列扩增新技术, 表现出敏感、准确、快速及安全的共同优点。最近出现的双标记定量技术、用DNA自动测序仪定量诊断点突变、反向杂交技术等更具有应用潜力。目前已能对PKU、血友病、地中海贫血、Duchenne型肌营养不良(DMD)和囊性纤维病等几百种遗传疾病作基因诊断。

**产前诊断** 自60年代开始检查羊水细胞甲胎蛋白(AFP)诊断脊椎裂和无脑儿等先天性畸形以来, 继而是70年代羊水细胞脆性X小体检查判断性别和伴性遗传病, 以及羊水细胞染色

体核型分析诊断染色体畸变,酶学及代谢产物的测定等诊断先天性代谢性疾病。近年来,用PCR技术及斑点印变法作羊水细胞基因分析来诊断遗传代谢病,大大地缩短了产前诊断的时间。如用荧光DNA探针原位杂交法对Down's综合征的快速诊断只需1d时间。绒毛细胞基因分析的发展,可使孕8周内就能诊断的遗传代谢病增加到200余种,如抗 $\alpha$ 胰蛋白酶缺乏症、Hunter综合征、缺铜卷发综合征(menkes病)、Huntington舞蹈病、囊性纤维病和肝豆状核变性(Wilson病)等。为将来实现胎儿期的治疗奠定了基础。

**线粒体病的分子遗传学** 线粒体被称为人类第25个“名谱染色体”,现已知全部系列有16569个碱基对。线粒体脑肌病是最早发现的人线粒体病,根据临床表现和线粒体酶学分析分别命名为Kearns-Sayre综合征、亚急性坏死性脑病(leigh病)、Menkes病、婴儿进行性脑白质营养不良性综合征(Alpers病)和脑肝综合征等。主要临床表现为脑-神经-骨骼肌方面的异常,包括痴呆、智力低下、小脑共济失调、癫痫、全身性或局部性痉挛发作等。常伴有内分泌和心血管系统的异常。本病系X连锁显性遗传。Holt和Zeviani于1988年先后在线粒体脑肌病患者的肌肉组织中发现mtDNA缺失2-7个kb左右,且大多位于mtDNA的D-Loop区,此后,Wallace又在Leber代遗传性视网膜炎患者中找到了mtDNA编码NADH脱氢酶的某个基因的点突变。此外有人还认为老年性痴呆、老年性精神病和衰老呆能与突变的mtDNA积累有关。还有溶酶体酶和过氧化物酶体的研究也取得了较大的进展。

#### 遗传代谢病的治疗

1. 饮食和药物治疗:食疗有效的主要是PKU、半乳糖血症和高血脂等单个氨基酸、糖和脂类代谢性疾病。药疗最有效的是散发型呆小病。而这两种治疗法对粘多糖病和高雪(Gaucher)氏病等大多数遗传代谢性疾病无效。食疗和药疗要越早越好,若在新生儿期即予治疗,可使智体发育正常,若延治则造成脑和其他脏器受损。

2. 酶疗法:(1)酶诱导:鲁米那、尼可利米可诱导葡萄糖醛酰转移酶活性,对治疗克-纳氏(Crigler-Najjar)综合征和吉尔勃氏(Gilber)病的黄疸有效;(2)酶补充:60年代开始从黑曲霉菌中提取 $\alpha$ -葡萄糖苷酶治疗糖原累积病I型。继而用从尿、牛脾、胎盘和血液中提取的相应酶来治疗高雪氏病、粘多糖病和糖脂类脂综合征(Fabry病)等均有一定的疗效。但酶的半衰期只有10~20min,且提取费用昂贵。故很难用于临床。

3. 脏器和细胞移植:肾移植治疗胱氨酸尿症、肾性尿崩和Fabry病等。肝移植治疗肝豆状核变性。胰移植治疗幼年性糖尿病。脾移植治疗高雪氏病等。骨髓移植治疗高雪氏病和尼慢匹克氏病等。现多采用胎儿肝、胰等细胞移植。另有报道羊膜细胞腹直肌内包埋治疗全身性糖原累积病(Pompe氏病)和高雪氏病有效。

4. 外科治疗:下腔静脉-门静脉吻合术改善肝循环治疗糖原累积病I型。空肠-回肠吻合术可减少脂肪的吸收对治疗高血脂症有效。

5. 基因治疗:1977年,美国分子遗传学家Boyer领导的1个小组应用重组DNA的方法,完成了第1次具有实用价值的遗传工程。他们把编码人体胰岛素的基因转移到大肠杆菌细胞内,并且成功地表达,使细菌合成了人的胰岛素,为基因治疗遗传代谢病奠定了基础。1980年Gordon等首次用于小鼠受精卵的核内显微基因注射,获得了哺乳类基因治疗的成功,从而打开了人类体细胞基因治疗的禁区。1980年加州大学洛杉矶分校的M.Chine给2名 $\beta$ -地中海贫血妇女进行了第1次基因治疗试验。结果以失败告终。原因是当时条件不成熟,第1个人类被克隆的 $\beta$ -珠蛋白基因从未在培养细胞中表达。但随着动物模型基因导入和基因表达研究的进展,基因治疗已从幻想逐渐走向现实。目前可能进行基因治疗的候选病种大约有十几种,它们的基因已经得到克隆。国际上正在开展基因治疗研究的遗传代谢病主要有:地中海贫血

病、腺苷脱氨酶(ADA)缺乏的免疫缺陷综合征、血友病、自毁容貌(Lesch-Nyhan)综合征、 $\alpha$ -抗胰蛋白酶缺乏症、高雪氏病和瓜氨酸血症等。基因治疗前景令人振奋,实施还相当困难。主要存在运载、表达和安全3大难题,也是近阶段基因治疗研究的方向。

由于遗传代谢病现在还缺乏特效疗法,所以超早孕和无创伤性的宫内诊断技术、基因诊断、基因治疗、酶治疗和药物治疗等,以及基因突变的机理探讨、快速简便的杂合子和纯合子的检出是近阶段研究的主要方向。

(安徽医科大学第一附属医院唐久来、杨正修撰;宋子扬审)

**溶酶体病** lysosomal storage disease 溶酶体是细胞中富含多种酸性水解酶的泡状细胞器,主要负责细胞内各种物质的分解和消化。溶酶体病是指因溶酶体功能异常所引起的各种疾病,常特指先天性溶酶体病,即因基因突变而先天缺乏某种溶酶体酶所导致的一类代谢性遗传病。患者因酶缺失或酶结构缺陷,细胞中相应的底物无法水解,便被贮存、堆积在溶酶体中,故又称溶酶体贮积病。由于这类疾病常广泛损害神经和运动系统以及肝脾心肾等重要器官并呈进行性加重,而至今仍无有效的治疗办法,患者均难免死亡,因此自60年代以来,人们对这类疾病已表现出极大的关注。

第1个溶酶体贮积病例是赫斯(H. G. Hers)于1963年首次发现的。他发现所谓庞珀(Pompe)氏病即全身性糖原贮积病是患者溶酶体缺乏 $\alpha$ -葡萄糖苷酶而不能使糖原水解所致。后来,溶酶体中其他水解酶缺乏所引起的贮积病也相继发现。至90年代初,已查明的溶酶体病有近40种。根据贮积物的性质,可分为粘多糖贮积病、糖脂贮积病、粘脂贮积病和糖蛋白代谢障碍等几大类(见附表1)。

粘多糖贮积病这个概念是布朗特(Brante)根据组化分析结果首次提出的。这是一组进行性粘多糖代谢障碍遗传病。其特征是粘多糖即糖氨基多糖(GAG)在各组织沉积,造成面容粗犷、智力障碍、多发性骨发育不良,心、肝、脾受损,尿中GAG排出量增加。1965年,麦寇西克(V. A. McKusick)根据临床表现,遗传方式及尿中粘多糖成份,将其分为6型。但70年代初才弄清这类疾病是一类溶酶体贮积病。1975年,纽菲尔德(E. F. Neufeld)曾较系统地对各种溶酶体病的分类进行了综合和修正。1978年,麦寇西克再结合临床表现,对粘多糖病的分类进一步作了调整,并增加了亚型(见表)。随着研究的深入,80年代初人们已从分子生物学的角度推断某些粘多糖症所应有而尚无报道的亚型,如山菲里普(Sanfilippo)综合征,可据其硫酸乙酰肝素酶降解需要4种不同的酶作用不同的键而推断除已有的A、B、C3型外,还应有D型,后果具如此。可见分子生物学的发展对溶酶体病的研究具有重要的指导意义。

另一类溶酶体病是糖脂贮积病。其特点是溶酶体因缺乏某种糖脂水解酶而导致该糖脂在各种细胞,尤其是神经细胞中堆积,造成神经系统及肝脾等的严重损害。例如泰萨(Tay-Sachs)2氏病主要症状是进行性痴呆、失明和瘫痪。对其病理发生的理解是在克伦克(Klenk)对从病人脑中分离到被他称之为神经脑苷脂的糖脂进行研究之后。这种病人脑中沉积的是GM<sub>2</sub>神经脑苷脂。其末端含 $\beta$ GalNAc链,此链正常情况下由溶酶体 $\beta$ -氨基己糖苷酶降解。这些酶是由 $\alpha$ -和 $\beta$ -亚基组成的2聚体。 $\alpha$ - $\alpha$ 、 $\beta$ - $\beta$ 和 $\alpha$ - $\beta$ 3种成份中任何1种有缺陷均会引起此病。80年代末分子生物学研究表明,各种各样的突变发生在酶的亚基和激活剂蛋白的基因中。这种病实际上是编码溶酶体酶氨基己糖苷酶 $\alpha$ 链的位点突变导致同功酶A缺陷所致。

值得一提的还有一类所谓粘脂贮积病。其症状与上述粘多糖症和糖脂症极相似,但缺乏和缺陷的酶不是1种,而是多种,造成粘多糖和糖脂同时沉积在溶酶体中,故称粘脂症。例如1967年利诺伊(J. G. Leror)首次报告的1细胞病,溶酶体几乎缺乏所有的酶,以致粘多糖和糖脂同时被堆积。80年代末分子生物学研究证明,此病是患者细胞中缺乏磷酸转移酶,无法使内质网合成的

溶酶体酶寡糖链上的甘露糖形成甘露-6-磷酸残基供受体识别, 乏所有溶酶体酶的原因。致使溶酶体酶无法进入溶酶体内, 这就是 I 细胞病为什么几乎缺

表 1 溶酶体贮积病

| 病名及分型                                             | 所缺乏酶                                                           | 胞内贮积物                                        |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>△粘多糖症 (mucopolysaccharidosis, MPS)</b>         |                                                                |                                              |
| I 型 Hurler 综合症<br>Scheie 综合症<br>H/S 复合型           | $\alpha$ -L-艾杜糖醛酸酶<br>$\alpha$ -L-艾杜糖醛酸酶<br>$\alpha$ -L-艾杜糖醛酸酶 | 硫酸皮肤素、硫酸乙酰肝素<br>硫酸皮肤素、硫酸乙酰肝素<br>硫酸皮肤素、硫酸乙酰肝素 |
| II 型 Hunter 综合症 (A, B)                            | 艾杜糖醛酸硫酸酯酶                                                      | 硫酸皮肤素、硫酸乙酰肝素                                 |
| III 型 Sanfilippo 综合症 A                            | 乙酰肝素硫酸酯酶                                                       | 硫酸乙酰肝素                                       |
| B N-乙酰- $\alpha$ -氨基葡萄糖苷酶                         | 乙酰- $\alpha$ -氨基葡                                              | 硫酸乙酰肝素                                       |
| C 乙酰 (A, 氨基葡萄糖 N-乙酰转移酶                            | D N-乙酰氨基葡萄糖-6-硫酸酯酶                                             | 硫酸乙酰肝素                                       |
| N 型 Morquio 综合症 A                                 | 氨基己糖硫酸酯酶                                                       | 硫酸角质素                                        |
| B                                                 | $\beta$ -半乳糖苷酶                                                 | 硫酸角质素                                        |
| VI 型 Maroteaux-Lamy 综合症 (重、中、轻三型)                 | 芳香基硫酸酯酶 B                                                      | 硫酸皮肤素                                        |
| VI 型 $\beta$ 葡萄糖苷酸酶缺乏症                            | $\beta$ -葡萄糖苷酸酶                                                | 硫酸皮肤素和硫酸乙酰肝素                                 |
| <b>△糖脂症 (glycolipidosis, GL)</b>                  |                                                                |                                              |
| GM <sub>1</sub> 神经节苷脂贮积病                          | $\beta$ -半乳糖苷酶                                                 | GM <sub>1</sub> 神经节苷脂                        |
| Krabbe 病                                          | $\beta$ -半乳糖苷酶                                                 | 半乳糖脑苷脂                                       |
| 乳糖脑苷脂过多症                                          | $\beta$ -半乳糖苷酶                                                 | 乳糖脑苷脂                                        |
| Fabry 病                                           | $\alpha$ -半乳糖苷酶                                                | 三己糖脑苷脂                                       |
| Tay-Sachs 病                                       | 氨基己糖苷酶 A                                                       | GM <sub>1</sub> 神经节苷脂                        |
| Sandhoff 病                                        | 氨基己糖苷酶 A                                                       | GM <sub>2</sub> 神经节苷脂                        |
| Gaucher 病                                         | 氨基己糖苷酶 B                                                       | 红细胞糖苷脂                                       |
| 传染性脑白质变性                                          | $\beta$ -葡萄糖苷酶                                                 | 葡萄糖脑苷脂                                       |
| Niemann-Pick 病                                    | 芳香基酯酶 A                                                        | 硫酸脑苷脂                                        |
| Farber 病                                          | 神经鞘磷脂酶                                                         | 神经鞘磷脂                                        |
| Farber 病                                          | 神经酰胺酶                                                          | 神经酰胺                                         |
| <b>△粘脂症 (mucopolipidosis, ML)</b>                 |                                                                |                                              |
| I-细胞病                                             | 几乎所有的溶酶体酶                                                      | 各种粘多糖、糖脂                                     |
| <b>△糖蛋白代谢障碍 (glycoprotein metabolic disorder)</b> |                                                                |                                              |
| 岩藻糖苷贮积病                                           | $\alpha$ -L-岩藻糖苷酶                                              | 糖蛋白部分水解物                                     |
| 甘露糖苷贮积病                                           | $\alpha$ -D-甘露糖苷酶 A, B                                         | 糖蛋白部分水解物                                     |
| 木糖苷贮积病                                            | $\beta$ -D-木糖苷酶                                                | 糖蛋白部分水解物                                     |
| 天冬酰胺葡萄糖胺尿症                                        | $\beta$ -N-天冬酰胺糖苷酶                                             | 天冬酰胺葡萄糖胺                                     |
| △其它单一酶缺乏症                                         |                                                                |                                              |
| Pompe 病                                           | $\alpha$ -1,4-葡萄糖苷酶                                            | 糖原                                           |
| Wolman 病                                          |                                                                |                                              |
| 酸性磷酸酯酶缺乏症                                         | 酸性脂肪酶                                                          | 胆碱酯酶, 甘油三酯                                   |
| △多种酶缺乏症                                           | 酸性磷酸酯酶                                                         | 磷酸酯                                          |
| 多种硫酸酯酶缺乏症                                         | 7 种硫酸酯酶                                                        | 硫酸酯、硫酸类固醇、粘多糖                                |

糖蛋白代谢障碍则是溶酶体缺乏某种糖苷酶而使糖蛋白部分水解产物大量堆积溶酶体内所致。

关于溶酶体病的诊断, 60 年代赫斯曾提出过电镜组化和临床表现方面的几条标准。但确诊还必须依靠生化检测。现主要借助于对羊水、血浆、尿液以及白细胞和成纤维细胞培养物等进行酶学分析予以确诊。产前诊断除用羊水细胞外, 80 年代已采用绒毛膜绒毛进行酶活性测定, 使诊断更为可靠和完全。

关于溶酶体病的治疗, 1964 年以来一直采用酶补充疗法, 即给患者静脉注射所需的酶。但由于酶在血液中易失活, 并可引起免疫反应, 故临床应用进展缓慢。1971 年, 格雷戈里亚迪斯 (G. Gregoriadis) 利用人造脂质体作为载体, 将葡萄糖胺酶封入以治疗糖原贮积病, 解决了酶在血液中易被破坏的难题, 被认为是一大突破。但抗原性问题仍未解决。1973 年, 艾勒 (G. M. Thler) 等用红细胞膜代替脂质体, 将  $\beta$ -葡萄糖脑苷脂酶封入治疗高歇氏病, 其抗原性倒有所减少。然而这两种载体主要被运到肝脾而不易到达其他器官, 尤其是不能通过血脑屏障到达脑内, 故对神经

组织疗效很差。尽管后有研究证明, 缩小载体体积可减少肝脾干扰, 并能延长载体在血液中的时间; 用抗体 IgG 修饰脂质体表面可促使其向靶细胞移动并易为靶细胞所摄取, 但这些研究还有待深入。因此, 如何使酶通过血脑屏障仍是今后研究的首要课题。此外, 如何进一步降低载体毒性和酶的抗原性以及制备新载体等, 也将是人们研究的热点。相信随着分子生物学的发展, 溶酶体病在治疗、诊断及发病机理等方面的研究也将取得新的进展。

#### 参考文献

- Neufeld E F, et al. Annu. Rev. Biochem. 1975, 44: 357~376
- Marx J L. Science, 1978, 199(4335): 1056
- 吴桂英. 国外医学 (分子生物学分册), 1983, 5(6): 338~339
- 杨群英, 译. 生物膜与疾病. 北京: 人民卫生出版社, 1985
- 鲁彤华, 译. 国外医学 (遗传学分册), 1987, 10: 227
- 史文艳, 译. 国外医学 (遗传学分册), 1988, 11(3): 140~143
- 施惠平, 等. 中华儿科杂志, 1989, 27(4): 239~240
- 林邦和. 生物学通报, 1989, 8, 3~6

- 9 Suzuki A, et al. Gangliosids. Encyclopedia of Human Biology, Academic press, San Diego, California 1991
- 10 林邦和,朱舜丽. 安徽中医学院学报, 1993, 12(2): 61~64  
(安徽中医学院林邦和副教授、朱舜丽副研究员撰)

**染色体畸变和先天性畸形** chromosomal anomalies and congenital malformation 染色体数目或结构异常所致的疾病称为染色体病。由于它涉及到数十、百、千、甚至上万个基因的增减,故常引起严重多发的先天性异常或畸形。到目前为止,已发现染色体病 3000 余种,染色体病综合征 200 余种。它们的共同特点是几乎所有患者都智力低下、生长发育迟缓和先天性畸形,而且是引起流产的主要原因(50%)。染色体畸变和先天性代谢异常所组成的人类遗传性疾病,在当今世界的发病率和死亡率所占的比例日益突出,对人类的危害也更为明显。因此,染色体畸变的研究已成为医学界极其重要的课题,也是遗传学中较为活跃的研究领域之一。

染色体是组成细胞核的基本物质,是基因的载体。人类细胞遗传学研究的主要对象是染色体。1956 年,美籍华人蒋有兴等证明,人类染色体数目为 46 条。但由于方法学上的局限性,10 多年间,世界上仅记载了 10 余条染色体异常。1970 年 Casperson 等发表第 1 张人类染色体显带照片以及 1971 年巴黎国际命名会议以来,现已发现人类染色体数目异常和结构畸变 3000 余种。并按染色体畸变的特点分为单体综合征、三体综合征、部分单体综合征和部分三体综合征 4 大类。到 70 年代末,通过羊水穿刺获取胎儿落细胞,进行胎儿染色体分析的宫内诊断技术得以迅速发展。现已成为防止染色体病的重要措施。1981 年,人类细胞遗传学国际命名委员会发表的人类染色体辨 550~850 条带的模式图即“ISCN(1981)”标志着人类染色体病的研究进入第 3 个发展阶段。特别是与现代生物学技术相结合的染色体高分辨(HRC)显带技术以及显微切割和微克隆技术的发展,使人们认识到以前认为的某些单基因病是由于染色体某些微小改变所引起。因此,应用细胞遗传技术与分子生物学技术相结合,填补了细胞遗传学与分子遗传学之间的鸿沟,形成了一门分支学科——微细胞遗传学。使得一些过去未知原因的临床疾病在染色体上找到答案,而且预计,在人类中已确认的数千种单基因病中的一部分将在染色体上明确病因。现研究较多的是:

1. 微缺失综合征和邻接基因综合征。1980 年以来,临床遗传学研究进入到第 3 阶段,即利用早中期分裂相染色体高分辨显带技术以及细胞遗传学与分子生物学结合方法来识别染色体的微缺失,并进行基因制图。微缺失综合征的特征是:在未知综合征病因学(或可能的病因学)之前,已识别其综合片的临床模式。(1)在染色体上有一个明显的而单独的缺失;(2)其中有些是从不常见的病例中,用细胞遗传学方法首次检测出的具有更复杂重排,而不是单纯的缺失综合征。某些病例的复杂畸变总是发生在同一条染色体的相山区段上,该片段的单纯缺失是产生病人的临床模式的原因。Ledbetter 和 Büller 等研究证明:Prader willi 综合征(PWS)多为 15q11/12 微缺失,Miller-Dieker 综合征(MDS)是 17P 末端微缺失;Giedion langer 综合征(GLS)是 8q23.2~24.1 缺失,Angelman(Happy puppet)综合征(AS)为 XP21 缺失。Sohinel 把上述这 1 组疾病称为微缺失综合征。本组疾病的共同特点是智力低下伴有多发小畸形。但由于本病便中有少数人未发现染色体微缺失,所以 Schmitel 又将这 1 组综合片称为邻接基因综合征,并提出邻接基因综合征可分为 2 类,即 1 类有可见的染色体缺失,1 类无可见的染色体缺失,后者可能是亚微结构损伤所致,这种损伤包括邻接基因的丢失。

2. 脆性 X 染色体综合征。是一种性连锁遗传性疾病。Lubs 于 1969 年在 1 个家系中发现智力低下的 X 染色体长臂末端有脆性断裂现象,1977 年 Sutherland 在缺乏叶酸细胞培养基中作细胞培养时,发现在染色体的特定部位,即 XQ28 有切断和断裂现象。1983 年第 1 次有关脆性 X 综合征和 X 连锁智力低下国际这

术讨论会确定人类染色体上有 17 个脆性位点,至 1987 年增加到 21 个。患病率 0.73%~0.92%,占重度智力低下的 9%,占轻度智力低下的 4.5%。孤独症中检出率为 16%。主要临床表现是中重度智力低下,行为孤僻,言语发育迟缓,特殊面容及大睾丸和大生殖器等。叶酸治疗可改善患者的行为,甚至智力,尤其在青春前期。其治疗作用与患者病情轻重、叶酸剂量及疗程长短等因素有关。1988 年 Heilung 等开始研究脆性位点连锁的标记探针,已取得一些进展,现已能应用 DNA 探针进行产前诊断和携带者的检测。

3. 环状染色体综合征。Gote 等于 1981 年首先报道。Rosztolanyi G 于 1987 重新报道此综合征 207 例。其主要临床特征为严重的生长障碍,部分伴有轻微畸形和轻中度智力低下。并证明在环状染色体综合征中,受累染色体越大(大染色体:1~12 号,小染色体:13~22 号),其临床特表现就越明显。鉴于造成上述表型的环状染色体是由一种非 DNA 突变(结构突变)形成,即没有基因的丢失和获得。环状染色体形成假说是端一端融合或是位于染色体端的回文 DNA 的端一端融合。被认为是人类独特的遗传异常。

4. 与染色体有关的基因病。随着细胞遗传学与分子遗传学研究方法的进展,越来越多的基因、基因簇、疾病位点被定位了某条染色体。现研究较多的染色体是 X 染色体上含有 250 种性连锁遗传病的基因,16 号染色体上涉及成年人多囊肾以及重金属解毒和基因自身修复基因,19 号染色体涉及早期心脏病发作的基因以及抗辐射诱发的 DNA 修复酶基因。16、19 号染色体的基因分析已近于完成。1989 年第 19 届国际人类基因定位工作会议(HGM10)上仅定位于 7 号分配色体的基因就达 94 个,脆性部位 10 个,克隆出 410 个 DNA 片段,与之有关的疾病 15 种(截止 1989 年 6 月 17 日),如精氨酸琥珀酸尿、粘多糖累积症 7 型、胰蛋白酶原缺乏症、成骨不全、Zellweger 肝脑综合征、囊性纤维化、以及 7P 单体综合征、7P 部分三体综合征和 7 号五染色体综合征等。定位于 21 号染色体的疾病除 Down's 综合征外,还与早发性痴呆(AD)有关。此外,还有一些肿瘤基因和癫痫基因都已明确定位于某条染色体上。这些基因定位对遗传病的产前诊断和预防、携带者的检出,以及将来的基因治疗奠定了基础。

综上所述,研究染色体疾病和先天性畸形的细胞遗传学,今后的研究方向主要是人类染色体图谱、微细胞遗传学、染色体病及某些肿瘤的宫内逆向诊断和染色体上的疾病基因定位研究。

(安徽医科大学第一附属医院唐久来、杨正修撰;朱子杨审)

**先天愚型** 21 三体综合征, Down's Lyndrome (DS), 一种常见染色体病,占智力低下患儿的 10%~15%。1946 年塞奎蒙(Sequim)首次临床记载,1866 年唐(Down)再次报道。1959 年勒琼(Lejeune)发现患儿体细胞有 47 条染色体,即多一条额外 G 组染色体。多数作者认为是 21 号染色体,故称本病为 21 三体综合征。1965 年尤尼斯(Yunis)等用放射自显影方法证明是 G 组 22 号染色体,但由于 21 三体沿用已久,1971 年巴黎会议决定将 21 号染色体与 22 号染色体对换,仍称为 21 三体综合征。

1982 年上海新生儿筛查 DS 发病率为 0.56%,1988 年广东西部 14 岁以下儿童 DS 群体发生率为 0.68%。

细胞遗传学 根据染色体异常,DS 可分 3 种类型:(1)21 三体型,占本征的 88%,核型为 47,XX(XY),+21。(2)嵌合型,占 9%,核型 46,XX(XY),/47,XX(XY)+21。(3)易位型,占 3%,为 D/G 易位或 G/G 易位(常为 14/21 或 21/21 易位),其核型为 46,XX(XY),-D+t(Dq21q),或 46,XX(XY),-21+t(21q)。

21 三体型的发生,是由亲代生殖细胞在减数分裂中不分离,多了一条额外 21 号染色体,打破基因的平衡状态,导致胎儿畸形,双亲染色体多无异常。1989 年高尔特(Galt)应用限制性片段长度多态性(RFLP)探针,对患儿父母生殖细胞减数分裂染色体不分离起源进行分析,结果染色体不分离 75%来源于母亲,25%来源于父亲。同年中国用荧光 Q 显带多态性进行研究,76%的

病例判定了起源,结果父源 35%,母源 65%,母亲的生殖细胞减数分裂的第 1 次成熟分裂不分离为 98%,父亲为 100%。不分离的机理可能与同源染色体交叉失败、随体联合频率增加、或延迟受精有关。

随着 21 号染色体连锁图谱的建立,利用细胞遗传学与原位杂交技术,已知与 DS 有关的基因,定位在 21 号染色体上 21q22.2 处(即在 21 号染色体的长臂 2 区 2 带 2 亚带上)。人类约有 50 000~100 000 个结构基因,从而推测 21 号染色体大约含 1 000~2 000 个基因。基因定位后,与 DS 有关的基因范围就缩小至 100 个。这些发现均有利于 DS 患儿的基因诊断与基因治疗研究。

DS 发病原因,除与病毒感染、放射线、化学物质、药物、及口服避孕药等有关外,还与母亲生育年龄有关。DS 患儿可出生于各个年龄,但随孕母年龄增大而出生率增高。平均年龄 40 岁的母亲生出 DS 患儿的机率,比年轻母亲增加 4 倍。免疫性疾病如甲状腺病或糖尿病的母亲生出 DS 患儿有较高的机率。1970 年非尔克(fialkow)等调查 483 个 DS 患儿家庭,发现先证者及其母的甲状腺抗体明显高于对照组。

嵌合型是因受精卵在卵裂初期发生染色体不分离,导致以后个体的有些细胞正常,有些细胞出现 21 三体。双亲之一为嵌合型者,子女的发病机会增多。有报道皮肤成纤维细胞的 21 三体细胞数比周围血淋巴细胞高约 20%。因此在疑为先天愚型而未稍淋巴细胞培养结果不明确者,可作皮肤成纤维细胞培养。

易位型最常见的是罗伯逊易位。大多数罗伯逊易位是易位中两个着丝粒合而为一,少数易位后仍保留两个着丝粒,但只有一个有活性。易位型多发生于 30 岁以下妇女,D/G 易位多为家族性,遗传多来自母方;G/G 易位多为散发。D/G 易位携带者的核型为 45,XX-D-21+t(Dq21q),新的(Dq21q)基本保留了 14 与 21 号染色体的绝大部分遗传物质,这种易位称为平衡易位。携带者的表型与智力正常,但常有流产史。母亲为 D/G 易位携带者时,子女患本病的可能性为 10%~15%;父亲为携带者时,则子女的患病率低于 2.5%。G/G 易位是 G 组两个 21 号染色体发生着丝点融合,形成等臂染色体。21/22 易位携带者的子代发病情况与 D/G 易位相似,如母亲 21/21 易位携带者,则子代的发病率为 100%。

1. 临床特征:主要为智力发育障碍,体格生长迟滞,韧带松弛,肌张力低。患儿具有特殊面容,如头小、枕骨扁平、眼距增宽、眼裂外眦上斜、鼻梁低平、口半张、舌外伸、小耳垂或伴耳廓畸形。婴幼儿舌表面光滑,年长儿舌乳头肥大、裂纹明显,牙齿萌出晚不整齐,骨龄落后,小指末端内弯,草鞋脚。

2. 智力低下:患儿大脑和小脑发育异常,脑回宽,脑沟浅,皮层薄。智能落后主要表现为记忆、思维、观察与常识能力差。智商为 50 以下,年长儿生活可自理。

3. 多发畸形:病例中伴有 1 种畸形者占 39%,2 种者占 20%,联合 3 种者达 8%。常见有先天性心脏病、眼球震颤、小阴茎、隐睾、多指(趾)、并指(趾)、胃肠道畸形等。

DS 患儿发生白血病有 2 个年龄高峰,第 1 个在新生儿期,死亡率高,部分病例能自动缓解,为白血病样反应。第 2 高峰在 3~6 岁。同源癌基因-2(ETS2)暂定位于 21q22.3,故认为与 DS 患儿易感白血病有密切关系。

4. 皮肤纹理:其中指箕形纹频率 72%,掌褶纹呈通贯 41%,atd 角 62.64°,第 5 指单褶线 26%,拇趾球部胫侧弓形纹 93%。

生物化学 1. 酶含量异常:(1)超氧化物歧化酶(SOD-1)含量增高。由于 SOD-1 定位于 21q22.1,DS 多一条额外 21 号染色体,故其 RBC SOD-1 含量较正常儿童增高 50%。嵌合型的 SOD-1 含量与三体细胞之间有显著的正相关关系,与患儿智商有极显著的负相关关系。易位型的 SOD-1 含量增高与三体型一致,这反映了 DS 的基因剂量效能,有利于其诊断。至于 SOD-1 的含量增高对 DS 的临床表型、脑的发育及智力低下的影响尚有待研究。(2)嗜中性白细胞碱性磷酸酶(NAP)活性增高,DS 的

NAP 阳性率及积分明显增高。半乳糖 1-磷酸尿苷酰转移酶及葡萄糖-6-磷酸脱氢酶活性增强,这些酶基因均不定位在 21 号染色体上。抗病毒蛋白质(IFNAR)及甘氨酸核苷酸合成酶(PRGS)的结构基因位于 21 号染色体上,但这些酶的活性在 DS 患者中均未发现有异常效应,而 NAP 活性增高亦见于 13 三体及 18 三体。人们认为这是由于蛋白质合成调节过程紊乱所致。

2. 氨基酸代谢障碍:患儿血清游离氨基酸含量减少。色氨酸主要代谢产物为菸酰胺,其旁路代谢生成的 5 羟色胺是神经递质。智力障碍儿中有 5%与色氨酸代谢异常有关。杰拉尔德(Gerald)等认为 DS 患儿肌张力降低和舌外伸与 5 羟色胺有关。舌肥大、有裂纹及皮肤粗糙疑为菸酰胺不足所致。

3. 甲状腺功能紊乱:成人 DS 伴随甲状腺功能低下,认为是继发于自身免疫性甲状腺炎。DS 患儿的 TSH 水平显著增高,且随年龄增长而渐增。T4 则随年龄增长而显著降低。TSH 与抗微粒体抗体(AMA)正相关,T4 与 AMA 负相关。如能早期发现甲状腺功能低下,及时给予相应治疗,有助于患儿体格及智力发育。

产前诊断的目的是防止 DS 患儿的出生。

1. 染色体检查:夫妇一方为平衡易位携带者或嵌合者,或分娩过 DS 患儿的母亲再次妊娠时,宜进行产前诊断。于妊娠第 6 周抽取少量绒毛,或于妊娠第 14~20 周抽取少量羊水或羊水细胞进行检测。发现染色体异常,即中止妊娠。1986 年国外利用 DNA 探针的特异性,以荧光 DNA 探针原位杂交法改进经典核分裂法对 DS 进行快速产前诊断。

2. 血清学测定:(1)甲胎蛋白(AFP)减少。DS 胎儿母亲羊水及血清 AFP 减少,脐带血 AFP 含量低于对照组。DS 患儿血清白蛋白减少,AFP 的减少与 DS 胎儿肝脏蛋白产生量不足有关。(2) $\beta$ -糖蛋白(SP-1)增多,DS 胎儿母亲于妊娠中期(16~17 周),SP-1 增高。

综合分析孕妇的年龄,血清低 AFP,高 SP-1 是预测母亲生出 DS 患儿风险的一项有价值的检查,但要注意孕期及 SP-1 的假阳性。AFP 减少是非特异性的,亦可见于其他染色体异常综合征。

(广东医学院梁晏清撰)

## 外科学

### 外科学的发展与现状 development and present states

in surgery 外科学是临床医学的一个重要组成部分,它的范畴在整个医学的历史发展中形成,并且不断地更新变化。在古代,中国外科学的范围曾仅限于身体外表疾病和外伤;在国外,外科学也仅仅是用单纯的手术治疗一些常见的疾病。现代医学的外科“Surgery”一词源于希腊文的“cheiregon”,“cheir”的译意是“手”,“ergn”的译意是“工作”,说明外科医师治疗疾病是靠手操作进行的。但是,随着医学科学的不断发展,对人体各系统、各器官的疾病在病因和病理方面获得比较明确的认识,以及诊断方法和手术技术不断地改进,现代外科学的范畴已包括许多体表的和内部的疾病,而且有了丰富的技术和理论作为指导。按病因分类,外科疾病大致可分 5 类:(1)畸形。先天性畸形,如多指(趾)、唇腭裂、先天性心脏病、肛管直肠闭锁等,均需施行手术治疗。后天性畸形,如烧伤后疤痕挛缩等,也多需手术整复,以恢复功能和改善外观。(2)损伤。由暴力或其他致伤因子引起人体组织的破坏,如挫伤、切割伤、骨折、内脏破裂、烧伤、战伤等,多需手术或外科处理,以修复组织和恢复功能。(3)感染。致病的微生物或寄生虫侵袭人体,导致组织或器官的损害、破坏、坏死和脓肿,这种局限的感染病灶适宜手术治疗,例如坏疽性阑尾的切除,体表脓肿的切开引流等。(4)肿瘤。如脂肪瘤、纤维瘤、乳房癌、胃癌等,绝大多数的肿瘤需要手术处理。良性肿瘤切除有良好的疗效;对恶性

肿瘤,手术能达到根治延长患者生存时间或缓解症状的目的。(5)其他性质的疾病。常见的有器官梗阻,如肠梗阻、尿路梗阻等;血液循环障碍,如下肢静脉曲张、门静脉高压症等;结石形成,如胆石病、尿路结石;内分泌功能失常,如甲状腺功能亢进症等,常需外科手术予以纠正。

现代外科学,不但包括上述疾病的诊断、治疗及预防的知识和技能,而且还要研究疾病的发生和发展规律。为此,现代外科学必需涉及实验外科及自然科学基础。

外科疾病一般是以手术或手法处理为主要手段进行治疗,然而也不是所有的外科疾病都需要手术治疗,而往往是某一疾病在一定的阶段才需要手术治疗,如最常见的化脓性感染,早期以药物治疗为主,当它发展成脓肿时,才需要切开引流。

外科学与内科学的范畴是相对的,临床上有许多疾病常需两科或多科共同配合进行治疗。如胃十二指肠溃疡病、肝硬化、甲状腺功能亢进症等,一般采用内科药物治疗为主,若治疗无效或出现有严重并发症时,乃需外科手术处理。

由于医学科学的进步与发展,有的原来认为应当手术治疗的疾病,现在可以改用非手术方法治疗,如胆石病体外冲击波碎石,部分甲状腺功能亢进病人应用放射性碘治疗等,可以不行手术。有的原来不能施行手术的疾病,现在却创造了有效的手术疗法,如先天性心脏病,采用体外循环和低温麻醉,用手术治疗纠正。所以,随着医学科学的发展和治疗方法的改进,外科学的范围将会不断地更新变化。

现代外科学奠基于19世纪40年代,先后解决了手术疼痛、伤口感染和止血、输血等问题,为外科手术奠定了良好的基础。

麻醉和手术镇痛对外科手术发展至关重要。1846年,美国Morton首先采用乙醚作为全身麻醉剂,并协助Warren用乙醚麻醉施行了很多大手术。1892年,德国Schleich首先倡用可卡因作局部浸润麻醉,不久由普鲁卡因所代替,由于麻醉技术不断发展,药物日趋完善,为确保手术病人无痛与安全创造了良好条件。

切口感染曾是20世纪以前外科手术面临的最大难题。当时截肢手术后患者的死亡率竟高达40%~50%。1846年,匈牙利Semmelweis首先提出用漂白粉水洗手,使产妇产后死亡率降低(由10%降至1%),这是最早的抗菌技术的开端。1867年,英国Lister采用石炭酸溶液冲洗手术器械和用石炭酸溶液浸湿的纱布覆盖伤口。1877年,德国Bergmann采用蒸气为敷料,手术器械灭菌的措施。1889年,德国Fürbringer提出手臂消毒法。1890年,美国Halsted倡议用外科医学行手术时戴橡皮手套,从而使无菌术由建立到臻于完善。

手术出血是妨碍外科发展的一个重要因素。1872年,英国Wells介绍止血钳;1873年,德国Esmarch在截肢时倡用止血带,他们是解决手术出血问题的创始者。1901年,美国Landsteiner发现血型,从此可用输血来补偿手术时的失血,以后又有血库的建立,才使输血简便易行。

1929年,英国Fleming发现了青霉素;1935年,德国Domagk倡用磺胺类药物;以后各国相继研制出一系列抗菌药物,为外科学的发展开辟了一个新时代。

外科学与其他学科特别是与基础学科的结合是20世纪外科学发展的一个重要特征之一。近年来,基础医学的进展有力地推动了临床医学的前进。微循环学说加强了人们对休克的发生和发展的认识;对多器官功能不全和衰竭进行的实验研究,为休克的治疗指出正确的途径,对减少患者死亡起到积极作用。免疫学的研究成果,对脾切除术提出新的评价,改变了其适应证的范围。为控制器官移植后的排斥反应而使用免疫抑制药物,就是在免疫学发展的基础上提出的。

随着现代外科学在广度和深度方面的迅速发展,现在已将外科分为许多专科,如脑神经外科、胸心外科、腹部外科、骨科、泌尿外科、整形外科、烧伤科及小儿外科等。

中国的外科学在建国前100多年的时间内,受历史条件的限制而发展缓慢。外科各专科很少建立,一些疑难病症只能在大

城市的少数医院里治疗,即使是腹部手术,也没有完全得到开展。建国后,随着教育和卫生事业的发展,外科有了迅速的进展。各省、市、自治区相继建立高等医药院校,培养了大批的外科工作者,医疗质量普遍提高。省、市、县医院的外科大多实行专业分科。

中国在1954年开展了心脏二尖瓣手术,1955年肝切除术已在临床应用。1958年上海成功地抢救1例烧伤面积达89%的病人,以后又有许多Ⅲ度烧伤面积超过90%以上病人获得治愈的报道。1963年断肢再植首次成功,曾引起国际外科学界的重视。中国显微外科已广泛应用于空肠代食管、颅脑血管吻合、大网膜带血管蒂游离移植、腓骨带血管蒂游离移植治疗胫骨缺损。关于肿瘤防治方面,中国已对食管癌、肺癌、鼻咽癌、胃癌、乳腺癌、肝癌等开展大量的普查工作,获得了极为丰富的资料。在器官移植方面,心脏移植已经开始,肝移植、肾移植已进行过相当多的例数,取得一定的成果和经验。近年来,开展了心脏生物瓣和机械瓣的研制及血液流变学、胆道动力学、组织结构力学等多方面的研究,硅胶等高分子材料的临床应用渐趋广泛;人工皮、人工骨、人工脑膜、人工关节、人工血液、人工血管、人工肾、人工肝等人工脏器正在研制中。

现代工业产品在外科手术的应用是现代外科发展的另一特征。中国外科医疗器械的发展也具有一定规模,除常用电子仪器等已自给外,激光、超声、核素、微波、光纤纤维等新技术仪器的试制试用进展较快。如电刀、激光刀的应用可有效地切开组织和止血,机械缝合吻合器可代替手工操作,无创止血钳和缝针及人工血管的应用推动了血管外科的发展,人工心肺机的研制使医生能在直视下进行心脏手术,选择性动脉造影、扫描仪、栅控脉冲X线立体显影机、B型超声控制诊断仪等,对体内深部病变的定位诊断很有帮助,但特别高精仪器目前还需从国外引进。

中国外科工作者继承和发扬祖国医学遗产,在针刺麻醉和中药麻醉方面取得了丰富的临床资料,针刺麻醉用于甲状腺手术已普遍开展。中西医结合治疗急腹症,如胃十二指肠溃疡穿孔、急性胰腺炎和粘连性肠梗阻的治疗,已获得较好的疗效。用动静结合的小夹板固定治疗管状骨折,已经取得独创的成绩。

中国外科学取得了巨大的成绩,如肝胆管结石的诊治经验、显微外科的成就等;烧伤、断肢再植、小肝癌的普查和治疗、食管癌的早期诊断和治疗效果,均已进入世界先进行列。但是,在外科领域中仍有不少项目远远落后于其他国家,应争取在较短的时间内赶超世界先进水平。

#### 参考文献

- 1 Davis L. Textbook of surgery, 1960. 7
- 2 沈克非,主编. 外科学. 北京:人民卫生出版社,1964. 1
- 3 黄家驷,主编. 外科学各论. 北京:人民卫生出版社,1979. 1
- 4 四川医学院,主编. 中国现代理学. 北京:人民卫生出版社,1985. 1
- 5 裘法祖,等主编. 中国医学百科全书. 上海:上海科技出版社,1987. 1
- 6 裘法祖,等主编. 外科学(第3版). 北京:北京人民卫生出版社,1988. 1
- 7 夏德生,等. 中华外科杂志,1894,27(5):258~263
- 8 曾宪九. 中国医学百科全书(普通外科学),上海:上海科技出版社,1989. 1

(安徽医科大学附属一院王蔚萱教授撰)

**显微外科的发展与现状** the development and present situation of microsurgery 显微外科(技术),是指一种在放大镜或显微镜的辅助下对细小的组织进行的精细手术,适用于细微组织需作轻巧剥离和准确对合的手术,如吻合2mm以下的小血管,进行神经束膜与束膜间的缝合等等。这是近30年来发展起来的一种外科新技术。

早在20年代,最简单的显微外科手术就在耳鼻喉科和眼科



开始了。在外科领域,则是60年代初,詹考伯森(J. H. Jacobson)等在动物实验中吻合直径1.6~3.2mm小血管成功后才开始的。1964年,崔之义等系统地报告应用显微外科技术缝合小血管的研究工作,为临床应用提供了理论根据和经验,1966年在上海取得断指再植的成功。此后,显微外科技术相继应用于游离足趾移植再造拇指,吻合血管的皮瓣、肌肉、腓骨、网膜等组织移植和神经束膜缝合等。

中国的显微外科发展较早,也较迅速,不少项目都处于国际领先地位。近30年来,中国的显微外科发展大致可分为3个阶段:第1阶段从1964年到1970年,是萌芽阶段,显微外科从无到有,从小血管吻合手术发展到“五小”手术:显微血管手术、显微神经手术、显微淋巴管淋巴手术、显微小管道手术和显微小器官移植手术。第2阶段从1980年到1986年,为大发展阶段,全国各地大中城市医院、厂矿医院以及部队医院均大量开展显微外科手术,同时以短训班形式大量培训技术骨干,在医学教育中开始招收研究生,还在医学本科生中开展显微外科教学,将它纳入外科总论的课程中,成为训练外科医生的一门基本技术。与此同时,也出现了指征不强、滥用显微外科手术的倾向。以后全国成立了显微外科学组,1986年召开了第一届全国显微外科学术会议和专题讨论会,认真总结经验,提出显微外科的手术指征,使全国显微外科进入巩固提高、稳步发展的第3阶段。

显微外科的优点是在显微镜下能够清楚地观察和辨认细微组织,操作精细,使组织的损伤反应极少,能有效地保证移植组织的成活,因此,可以说它为外科医生治疗许多疾病开辟了一条新的途径,与传统的治疗方法比较,具有手术次数少、痛苦轻、疗程短、疗效好的优点。所以,它的手术内容日益丰富,手术技术日益成熟,应用范围日益扩大,从骨科扩展到整形外科、手外科、颌面外科、神经外科、泌尿外科,小儿外科和妇产科等等。由于显微外科技术极大地提高了外科手术的精确性和安全性,使许多过去不能进行的手术成为可能,使许多过去已定型的手术显著地提高了疗效,如断肢(指)再植、游离足趾移植再造拇指、前臂皮瓣或腹壁股肌皮瓣一次完成阴茎再造、带血管骨移植修复长段骨髓缺损、淋巴静脉吻合治疗四肢淋巴水肿等等,都取得了极大的成功。上述优点是其积极的一面。但在另一方面,与其他学科相比,显微外科技术的发展还处于初期阶段,有些技术还不够成熟,手术难度较大,如掌握不好,会造成失败,而一旦失败,将给病人造成损害,甚至引起危及生命的并发症。同时,手术过程比较复杂,人力物力消耗较常规手术为大。因此,在选择手术适应证时应十分慎重,应避免从兴趣出发,要权衡利弊,综合考虑,能用简单的方法达到同样的目的时,就不用复杂的手术方法。但是,这并不意味着显微外科今后的发展将会受到影响。据认为,随着与显微外科有关学科的基础理论研究的深入,随着各种高科技的发展和运用,显微外科将进一步向广度和深度发展。可以设想,经过15年或20年的发展,显微外科技术将成为外科的常规手段和外科医生的基本技术,各个外科分支都将普遍应用显微外科技术。显微外科技术将向更高更深层次发展,从现在放大40倍的水平逐步进入到微细组织甚至细胞水平。据预测,今后的主要发展趋势为:(1)肢体修复从晚期提到早期和急诊修复,其中包括各种断肢(指)再植和移位再植,各种组织的移植和修复;(2)小血管、淋巴管和神经的缝合与移植技术上,将进一步开展套接法、纤维蛋白粘连法、激光焊接法等;(3)肌肉移植和修复技术将主要解决肌肉的缺血耐受与再灌注损伤、神经的再支配及肌肉移植及移位后的功能协调等问题;(4)器官移植方面,显微外科将广泛应用于各种小器官的移植和心血管、泌尿、呼吸等系统的大器官的移植,甚至有可能进行脊髓和脑组织的移植等等;(5)高科技技术如电子计算机技术、激光技术和生物工程技术等将更密切地与显微外科技术相结合,产生各种新的仪器设备,广泛应用于显微手术、术后预测、监护和自动化操作等方面,将大大提高手术效果并减少劳动强度;(6)随着显微外科技术的日益发展,与之相适应的多学科的显微外科中心将会在国内外一些大城市出现,成为发展显

微外科理论和技术以及培养专业人才的基地。

#### 参考文献

- 1 宋家恺,主编.显微外科进展.合肥:安徽科技出版社,1989.1~2
- 2 王成琪.显微外科进展.合肥:安徽科学技术出版社,1989.162~171
- 3 廖有谋.中华显微外科杂志,1991,14(1):19~20
- 4 王成琪,陈中伟,朱盛修,主编.实用显微外科学.北京:人民军医出版社,1992.760~764

(中山医科大学朱家恺教授、张自杰讲师撰)

### 麻醉期间高血压及高血压反应 hypertension and

hypertension reaction during the anesthesia 麻醉期间血压升高超过麻醉前20%或超过21.3/12.7kPa(160/95mmHg)称为麻醉期间高血压。其主要原因有以下几个:(1)原有高血压病、动脉硬化、冠心病或肾脏、血管、内分泌系统疾病,由于麻醉操作、手术创伤等因素,可发生严重高血压,甚至高血压危象。(2)交感神经活动亢进所致的高血压反应,最为突出的是全麻诱导喉镜窥视声门、气管插管时的心血管反应,收缩压平均升高6.00kPa(45mmHg);其次是麻醉过浅,镇痛不全。血压升高常合并心率增快,这是体内对疼痛刺激的一种应激反应,是由下丘脑和交感神经系统、内分泌系统两个传出系统介导的一种生理反应。(3)轻度的或中度的低氧血症或/和高碳酸血症;升压药物使用不当,局部麻醉药的心血管反应也是其常见原因。

麻醉期间高血压是麻醉期间循环系统的并发症,它对机体的影响和危害主要取决于血压升高的程度及原有高血压、心脑合并症对心脏、脑、肾等重要器官的损害程度。由于血压的升高,为克服周围阻力,心肌做功和耗氧增加,对缺血性心脏病可诱发心肌梗塞;由于血压升高,心室射血阻力增大,心脏后负荷加重,可导致急性左心衰竭和肺水肿,并由此可诱发右心衰以致最终发展为全心衰竭;原有高血压、动脉硬化或颅内动脉瘤者,可因血压急剧升高导致脑血管破裂出血等神经系统并发症;此外,血压持续高于正常,还可增加手术出血量等。

麻醉期间的循环监测:在麻醉状态下,尤其是全麻过程中,患者意识不复存在,无法表达因血压升高而致的各种临床症状,如脑血管意外。为了及时发现麻醉期间高血压征象,建立循环系统生理学指标的观察与监测是必要的。主要的循环监测指标有:(1)动脉血压。连续监测麻醉期间动脉血压可了解其动态变化,是一项基本的监测内容。一般手术采取间接测压法,对嗜铬细胞瘤患者手术,其血压的急剧变化往往是瞬间发生的,若行直接动脉测压,反映更为及时与准确。(2)中心静脉压。临床常根据中心静脉压的变化估计病人的血流动力学状态,作为反映心功能的间接指标,连续测定其动态变化比单次测定更具有指导意义。(3)肺动脉压或肺毛细血管楔压。当患者以左心功能不全为主时,中心静脉压不反映左心室功能,应行肺动脉压或肺毛细血管楔压测定。(4)心电图。对高血压合并缺血性心脏病患者,连续心电监测不仅可以了解心率、心律的变化,还可以了解心肌供血情况。(5)血液气体分析。无论椎管内麻醉还是全麻状况下,及时了解 $P_{aO_2}$ 、 $P_{aCO_2}$ 、PH、BE等项目以便排除低氧血症或/和高碳酸血症、酸碱失衡对循环动力学的干扰。(6)对有心脏病合并症的高血压患者,连续测定脉搏一氧饱和度则更为实用、方便、及时。

预防与处理:对术前合并高血压及心脑合并症的患者,麻醉前应全面了解高血压的病期、进展情况、高血压的程度、脏器受累情况及高血压的治疗情况;积极治疗各种合并症,使心脑等重要脏器处于最佳功能状态。麻醉前应坚持抗高血压药物治疗,否则可造成血压严重升高以致引起心肌损害、心力衰竭、脑血管意外等潜在危险。在麻醉方法的选择和实施中,应保证麻醉效果确切和对机体生理干扰小,包括镇痛完全、肌松满意、抑制内源性牵拉反应,消除各种因素所致的交感活动亢进性高血压反应。在麻醉的管理上,首先应加强麻醉期间的循环监测,维持有效循环血量,合

理使用血管活性药物,同时还要重视呼吸管理,防止各种因素所致的呼吸抑制,保证呼吸道通畅及足够的肺泡通气量,排除对肺弥散功能造成障碍的因素。对麻醉期间高血压的处理,首先应分析原因,排除各种麻醉操作与管理的失误如镇痛不全、麻醉过浅、呼吸抑制等,并予以相应处理。若高血压仍不能有效控制,应积极给予降压药物治疗,避免血压继续升高而发生各种意外和并发症。主要的抗高血压药物有利尿剂、 $\beta$ -受体阻滞剂、扩血管药物、作用于中枢的降压药及交感神经抑制剂。在麻醉期间应选择作用迅速的降压药并以静脉给药途径为首选。常用药物有:(1)乙酰普吗嗪 0.1mg/kg 或氯丙嗪 0.2mg/kg 静注。(2)胍苯哒嗪 2.5~5mg 静注,10~15min 可重复注射,但总量不宜超过 20mg。(3)氨甲苯嗪 200~300mg 静注。(4)酚妥拉明 1~2mg 静注或 0.01% 浓度静滴。(5)血管扩张药硝普钠  $1\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{min}$  静滴和/或心得安控制窦速(在心电监护下 0.01mg/kg 起用)。(6)2.5% 硫酸镁 50mg/kg 静注或/和 2.5% 静滴维持。对于窥喉、气管插管时的高血压反应可采取下列措施:(1)充分的咽喉、气管内表面麻醉,双侧喉上神经阻滞,对于清醒插管者保留呼吸插管尤为重要。(2)气管插管前,利多卡因 1~1.5mg/kg 静注,可减少插管时的呛咳。(3)全麻诱导时应适当增加以芬太尼为主的麻醉性镇痛药的剂量,芬太尼 6~8.  $\mu\text{g}/\text{kg}$  可达到减轻心血管反应的效果,但要注意此剂量所造成的呼吸抑制。

总之,麻醉期间高血压及高血压反应是一个比较复杂的病理生理征候群,如何预防与减少其发生,仍然是临床麻醉学的一个重要研究课题。

#### 参考文献

- 1 Besson McDermott Wyngaarden 著,王贤才译,希氏内科学(第2版),呼和浩特:内蒙古人民出版社,1985.5:181~205
- 2 刘俊杰,赵俊,主编.现代麻醉学.北京:人民卫生出版社,1987.61~64;509~513

(安徽医科大学第一附属医院张健副教授撰)

### 嗜铬细胞瘤术中高血压的控制 control of

hypertension in the pheochromocytoma operation 麻醉学在中国是一门新兴的学科,在其发展提高的过程中,对特殊病例麻醉处理的研究受到重视,也取得很大的成绩,丰富了麻醉学的内容。嗜铬细胞瘤(Ph)患者术中的麻醉就是其中的一个内容。Ph 是较罕见的疾病,因临床主要症状为高血压,占高血压病人的 0.4%~2%。早期多误诊为原发性高血压病。随着医学、科学技术的迅速发展,超声、CT 的出现,生化检验技术的不断完善,提高了 Ph 的诊断率,为手术治疗提供了有力的依据。手术是治疗 Ph 唯一有效的方法,但危险性较大。文献报道术前已确诊的病人手术死亡率高达 25%,术前未确诊的病人手术死亡率上升到 50%。因其病理生理特点是血流动力学的异常改变,手术易激发高血压危象,因此,如何有效地控制血流动力学的波动成为 Ph 手术麻醉的特殊问题,是手术治疗成败的关键。

**Ph 的病理生理特点** 据报告,Ph90%发生在肾上腺髓质,其余发生在肾上腺以外的任何嗜铬组织。由于瘤体释放出大量儿茶酚胺(CA),机体长期处于血浆高浓度 CA 环境中,全身末梢血管高度收缩,血容量明显减少。临床表现出一系列与之有关的病理生理症状,如持续性或/和阵发性高血压,心率增快,常合并心脏病、充血性心衰、心律失常等。在麻醉等应激反应和术中挤压肿瘤时增加 CA 的释放,诱发血压骤升以至高血压危象。

#### 手术治疗措施

1. 术前准备:术前准备的目的在于把长期持续高血压或阵发性高血压控制在正常或接近正常水平,纠正心律失常和给予适当扩容,避免在麻醉诱导或手术刺激时血流动力学的急剧大幅度波动和肿瘤切除后低血压休克的发生。随着对 Ph 疾病的逐步认识,临床经验教训的积累,70年代后强调术前应用  $\alpha$ -受体阻滞剂,以缓解外周血管痉挛,使血压下降以利术前扩容。刘振国 1955~1977 年报道 31 例 Ph 手术治疗情况,术中死亡 3 例,其中

2 例未给  $\alpha$ -受体阻滞剂,1 例死于麻醉诱导期高血压危象,另 1 例死于低血容量休克。1973 年后,术前给予  $\alpha$ -受体阻滞剂的病例,手术死亡率明显降低,说明术前充分准备与手术成功率的提高密切相关。

术前准备方法是:术前两周开始给  $\alpha$ -受体阻滞剂,口服酚妥拉明 10mg,每日 3 次;或哌唑嗪初量 3mg/d,以后新增 8~12mg/d。近来有人报道用钙通道阻滞剂做术前准备,口服硝苯吡啶 20mg,每 8h 1 次。术前 2~3d 静滴 0.01% 酚妥拉明,使血压接近正常。在用药的同时每天补液 200~400ml。术前 1 天输全血 400ml。对术前有持续性心动过速或心律失常的病人,若无心衰、哮喘等禁忌症,在用  $\alpha$ -受体阻滞剂的同时给  $\beta$ -受体阻滞剂心得安 30~60mg/d。1987 年,有人在围术期使用 Esmolol,对预防和治疗不良刺激引起的心动过速和高血压都有效,其超短效作用和选择性  $\beta_1$  阻滞作用更适合用于有心脏损害和哮喘病人。

2. 麻醉处理:Ph 手术麻醉处理的关键在于有效地控制病人血流动力学的急剧波动,消除心血管功能的严重紊乱,安全地完成手术治疗。(1)麻醉方法的选择:多数主张气管内全麻,以消除病人的紧张焦虑情绪。气管插管便于术中呼吸管理。对肿瘤部位不十分明确或多发性肿瘤术中需广泛探查或开胸手术的病人更为适宜。麻醉剂的选择应注意不致抑制心功能,不增加心肌对 CA 的敏感性,不促使 CA 的释放而有利于术中对血压的控制。由于麻醉药物的迅速更新换代,给 Ph 麻醉用药的选择提供了良好条件。氟烷麻醉效力较强,有阻滞交感神经节、不诱发交感-肾上腺效应的作用,但会增强心肌对 CA 的敏感性,易发生心律失常,尤其在手术中挤压肿瘤时更加危险。氮氟醚、异氟醚不释放 CA,对心肌的激惹小,不诱发心律失常,异氟醚不抑制心肌,但二者麻醉效能均较弱,配合应用芬太尼等麻醉性镇痛药行静吸互补麻醉,效果较好。对定位明确的腹部手术,可考虑选用硬膜外麻醉,因它诱发危象的机会大为减少,但必须阻滞完善,辅用镇静药以消除病人紧张、恐惧和内脏牵拉痛,防止应激反应。硬膜外麻醉能阻滞血管扩张,有利于控制血压,但有可能加重肿瘤摘除后血中 CA 浓度骤降所导致的低血压,给抢救增加困难。硬膜外麻醉并不抑制 CA 与  $\alpha$ -受体结合,只起到稳定心血管功能的作用。(2)Ph 麻醉和手术中患者血流动力学常在瞬息间出现巨大变化,术中必须严密监测循环系统各项生理指标,为及时、准确处理提供依据。测定 CVP、MAP(动脉直接测压)、PCWP 以及连续心电监测都是非常必要的。(3)麻醉和术中血压的控制:全麻时麻醉诱导插管是第一个难关,其次是手术探查。分离肿瘤时患者常出现血压大幅度升高或/和严重的心律紊乱。因为任何一种吸入性麻醉药都不能阻断手术刺激 Ph 时血 CA 浓度升高,所以合理使用  $\alpha$ - $\beta$  阻滞剂很有必要。最早报道术中采用酚妥拉明作控制性降压,至今仍在沿用。但实践证明,单纯应用此药时常不能达到满意的效果,仍难以避免心血管功能的严重紊乱。因此,不少学者都在探讨如何有效地控制 Ph 术中血流动力学的紊乱,寻求更有效控制高血压的方法。

1985 年、1988 年 James 两次报道 3 例应用硫酸镁控制 Ph 手术病人高血压,认为硫酸镁在 Ph 手术中有理想的降压作用。苏榆自 1989 年始在 Ph 手术中应用硫酸镁或复合酚妥拉明控制患者血压,到 1992 年 5 月共进行 26 例,均安全地完成肿瘤摘除手术,无一例并发高血压危象或意外被迫停止手术。与单纯应用酚妥拉明降压组对照,血压波动幅度显著缩小,心率、心律更较稳定。硫酸镁的降压作用是直接阻滞 CA 受体,抑制肾上腺髓质及周围肾上腺素能神经释放 CA,降低外周血管阻力、减轻血管痉挛的双重作用,认为在 Ph 手术中应用硫酸镁或复合酚妥拉明是较为理想的降压方法。

1985 年,有人提出应用钙通道阻滞剂控制 Ph 病人高血压反应。因 CA 的释放取决于钙离子进入 Ph,若用钙通道阻滞剂钙离子进入,则能抑制 CA 的释放,从而减轻病人的症状。常用药有硝苯吡啶、异搏定、硝苯苄胺。如单独应用心痛定效果欠佳时可加用硫氮草酮,常能有效地控制血压。

Ph病人在高CA和低血容量的刺激下可产生高肾素血症,这将促使血管紧张素Ⅱ的生成增加,所以高血压非 $\alpha$ -受体阻滞剂,能产生降压效应。因此,遇有应用 $\alpha$ 阻滞剂后仍不能达到降压效果时,可考虑用血管紧张素转化酶抑制剂,常能有良好的效应。如疏甲丙脯或苯丁肼脯酸可使血压下降及避免阵发性高血压发作。

另外,也有用硝普钠做Ph控制性降压的报道。但该药本身没有拮抗和抑制肿瘤释放CA的作用,适用于Ph危象或术中高血压而 $\alpha$ 、 $\beta$ 受体阻滞无明显效果的病人。对氟哌啶的应用意见不一致,多数认为它可诱发严重高血压反应,因它占领Ph细胞的突触前膜多巴胺受体,影响对CA的正常抑制作用,故应慎用。

#### 参考文献

- 1 刘国振. 中华泌尿外科杂志, 1980, 1(1): 10
- 2 赵俊, 等. 中华麻醉学杂志, 1981, (2): 14
- 3 James M F. Anesthesiology 1985, 62(2): 188
- 4 James M F. 国外医学(麻醉与复苏分册), 1989, 10(3): 193
- 5 邓硕曾, 等. 中华麻醉学杂志, 1989, 6(5): 280
- 6 鲍镇美. 中华泌尿外科杂志, 1990, 11: 288
- 7 盛卓人, 等. 国外医学(麻醉与复苏分册), 1990, 11(2): 108
- 8 苏榆, 等. 安徽医科大学学报, 1992, 27(2): 149
- 9 胡利发, 等. 临床泌尿外科杂志, 1992, 7(2): 101

(安徽医科大学第一附属医院苏榆主任医师撰)

**器官移植** organ transplantation 用手术的方法将整个保持有活力的器官移植到自己的或通常是另一个个体内的某一位位叫作器官移植。在临床上作为一种医疗手术用于治疗一些已不能用其他疗法治愈该器官的致命性疾病的病人。

同种异体器官移植的实验研究初发于19世纪。20世纪初血管吻合技术创立后,实验动物的器官移植始获成功。1902年, Ulman 首用套接血管法施行自体同种移植肾和异种肾移植; Caviel 用直接血管吻合法来试行动物肾移植,被称为现代器官移植外科技术的奠基人。临床上异体器官移植始于30年代,在50年代以肾移植成功为标志而进入应用阶段。60年代的第1代免疫抑制药物(硫唑嘌呤、强的松和抗淋巴细胞血清)的问世,使器官移植获得稳步发展,到70年代已取得很大成绩。肾、肝、心、骨髓等移植已被公认为是一种有效的治疗手段。胰腺与胰岛、脾脏、甲状腺和甲状旁腺、心肺联合移植等已在临床试用而获得初步疗效。各种脏器移植的基础理论研究已深入到遗传免疫学的领域,器官移植作为一种综合性的现代医学,已形成一门新兴的学科。

器官移植本身具有以下特点:(1)移植器官在移植手术过程中必须始终保持活力;(2)器官移植属活体移植和吻合移植,通过手术立即进行血管吻合,重新建立血液循环;(3)如果是同种异体移植,术后不可避免地有排斥反应出现。目前,同种间器官移植已成为医学上有实用价值的医疗方法。同胞间、异卵双生子之间、父代与子代间、亲属间及非亲属之间的移植都属于同种异体移植,移植的器官可来自活体或尸体。成双的器官可来自自愿献出一个健康的脏器者,而单一器官如肝、心,则唯一的来源是尸体。

现代器官移植能取得较大进展的主要原因:(1)血管吻合技术的进展与发展;(2)短期低温保存供移植用器官方法的成功,能安全保存供体24~72h,甚至5d以上,使离体供移植用器官从切下到移植手术成功,始终能保持着活力。(3)移植遗传免疫学的发展;器官移植的成败与受体间的白细胞抗原(HLA)配型有密切的关系,免疫监测的研究对器官移植后出现的排斥反应作出早期诊断和预后判断是器官移植中的一个重要问题。在免疫学上单克隆抗体技术的建立,对器官移植的发展起到一定的推动作用。(4)应用免疫抑制药物控制排斥反应;近年来由于环孢素(Cy-A)的应用,对各个脏器的移植的存活率均有明显提高,最近更新一代免疫抑制剂EK506已问世,其疗效更加优越。(5)术前

多次输血能改善移植预后,提高病人存活率。(6)“脑死亡”概念为越来越多的国家所接受,提高了供体的质量。(7)国内外移植中心的建立,供受体登记、配合、远距离运送协作网已逐渐形成。

**肾移植** 在许多国家已成为一种常规的治疗方法,它是各类器官移植中疗效最稳定和最显著的。1954年,美国Murray首次施行同卵双生姐妹间的肾移植获得成功;1955年Murray和法国Hamburger各自第1次为异卵双生同胞施行肾移植获得成功;1962年Murray第1次用尸体肾施行人的同种移植获得成功。这3次不同类型的肾移植的相继成功,标志着现代器官移植临床应用阶段的开始。1975年以来,肾移植手术长期效果有了稳步提高。亲属供肾移植疗效较好,而近年来尸体肾移植疗效也有提高。由于HLA配型的进展,对选择供受体的应用日益发挥着指导作用,加之术前输血和免疫抑制剂的应用,使尸体肾移植者1年存活率已达80%~93%。到1983年全球已施行15万次,现在每年约做1万~2万次。中国肾移植始于60年代初,到1987年达2435例和2707次,移植肾的1年人/肾存活率为93.7%和78.78%,最长存活力超过10年。在尸肾保存方法、肾移植血管外科、肾移植研究模型的制备、抗排斥治疗等方面的实验研究和临床应用均有较大进展。

凡是慢性肾功能衰竭已发展到终末阶段,经一般治疗无效,如尿素氮持续在35.7mmol/L以上,肌酐 $707\sim 884\mu\text{mol/L}$ 以上,肌酐清除率低于 $5\sim 10\text{mg/min}$ ,都是肾移植的适应证。原发疾病常见的为慢性肾小球肾炎、慢性肾盂肾炎、多囊肾以及肾硬化、糖尿病性肾小球硬化和因外伤或疾病以致丧失孤立肾或双肾等疾病。但对有淀粉样变化、结节性动脉周围炎和弥漫性血管炎等患者禁忌作肾移植。活动性感染、心肺肝等重要器官有明显损害和全身情况不能耐受移植者也属禁忌。

在中国,感染和排斥反应仍为影响移植肾存活的主要因素。为了进一步提高同种肾移植的效果,必须在移植免疫方面,包括组织配型,进一步开展和探索理想的免疫抑制剂以及预防感染,减少外科并发症等方面作出努力和研究。

**肝移植** 1959年Moore首次施行狗的同种原位肝移植;1963年stairl首次为一先天性胆道闭锁患儿作了原位肝移植获得成功。到1986年,国外施行肝移植已近5000例,6年存活率在70%,最长存活并有良好功能者已达20年,手术死亡率低于10%。中国1977年施行首批肝移植,到1988年共做58例。适应证为:一切肝病用所有疗法不能治愈,而预计在短期内无法避免死亡者均可作肝移植,如先天性胆道闭锁、某些先天性肝代谢异常(肝豆状核变性、 $\alpha$ 1-抗胰蛋白酶缺乏、高酪氨酸血症等)、终末期肝硬化、慢性活动性肝炎、累及两侧的原发性肝细胞性肝癌等。移植后早期患者死亡多由于技术并发症,手术的关键在于建立和保持良好的通畅胆道。晚期患者死亡多由于胆道并发症、全身感染、复发、排斥反应等。中国肝移植与国外先进国家相比,存在较大差距,不仅手术例数少,存活期短,至今尚无存活1年者。目前,肝移植的实用临床意义已为全球所公认,它是肝脏终末疾病的一个有效的治疗方法,应予推广。在临床大脏器移植中,其地位仅次于肾移植,前景十分广阔。

**心移植** 心脏移植已成为治疗某些终末性心脏病的有效方法。1905年Cavie和Guthrie首先进行了犬异位心脏移植的尝试,被移植犬的心脏跳动了2h;1935年Neprune成功地进行了深低温下犬原位心脏移植,心脏跳动了6个多小时;1964年Hardy给患者进行了异种心脏原位移植,被移植的心脏复跳了,但在撤除外循环后1h心跳停止;1967年Bainard首次成功地给1例患者进行同种异体心脏原位移植,病人存活了18天。到1987年国外施行心移植术已超过4000例,存活最长者为17年。施行最多的美国斯坦福大学患者,1年存活率为85%,5年存活率为78%。中国心移植始于1978年,迄今已施行5例。其适应证是晚期心脏不治之症,估计存活期在半年以内者,原发病为冠状动脉疾患、自发性心肌病变、多瓣膜病变合并心肌病等。但受者有严重的对血管扩张剂无反应时肺性高血压(肺动脉压高于 $8\text{kPa}$ 和

肝血管阻力超过8woodu)、活动性感染、新近有心肌梗塞、严重糖尿病、严重脑或周围血管疾病和精神状态不稳定者均属禁忌证。近年来严格控制适应证,应用兔抗人胸腺细胞球蛋白作免疫抑制剂,用T-淋巴细胞监测或经静脉作右室心内膜活检来诊断早期排斥反应和及时的心再次移植,故使心移植获得较好的进展。

**胰脏移植** 1966年Kelly等施行首例临床胰脏移植,到1990年统计国外已施行各种术式的胰脏移植达2639例,1年有功能存活率达56%,最长者存活10年以上。1982年中国首次施行临床胰脏移植,迄今共施行9例次,有1例功能超过1年,术式主要用胰节段移植,胰管采用开放式的或以化学栓塞剂予以阻塞,术后应用Cy-A作免疫抑制治疗,其主要适应证是胰岛素依赖性糖尿病,移植成功后可不再注射胰岛素,完全摆脱外源胰岛素而维持正常血糖,且能预防甚至使糖尿病并发症减轻,糖尿病已并发肾血管病者可同时作胰肾联合移植。

总之,中国器官移植工作开始较晚,20世纪50~60年代才开始起步,虽然进展较快,但总体来看,中国器官移植的疗效与长期存活率尚较差,某些国际上研究较多的移植如胰岛细胞、肝细胞移植才刚刚开始,“脑死亡”概念未为社会上多数人所理解,法律上尚未被接受,供体来源困难,而遗传、免疫学及药理学等基础学科理论研究尚较薄弱,故只有加强和重视基础学科的研究,临床器官移植工作才会实现更新、更快、更大的发展与突破。

#### 参考文献

- 1 夏穗生,等.中华器官移植杂志,1982,3:2
- 2 谢桐,等.中华器官移植杂志,1986,7(2):64
- 3 夏穗生.外科学(第3版).北京,人民卫生出版社,1988,12
- 4 Starzl T E. JAMA.,1990,263:2686
- 5 裘法祖,普外临床,1991,(6)3:129
- 6 夏穗生,普外临床,1991,(6)3:129
- 7 张本国,普外临床,1991,(6)3:141
- 8 陈实,普外临床,1991,3(6):147

(安徽医科大学第一附属医院王蔚萱教授撰)

**颅面外科学** craniofacial surgery 颅面外科是外科医学领域中最新发展起来的学科之一,它是从整复外科(整形外科)中衍化出的一门新学科。颅面外科的前身是颌面部创伤畸形和缺损的修复。它发展于第一次世界大战期间。这是由于战争期间受枪炮伤而造成的颌面部骨创伤、软组织创伤而形成畸形和残缺的大量伤员亟需进一步修复治疗,故而得到促进和发展。在第二次世界大战中,由于出现了杀伤力更大的武器,许多伤员面部和双手受严重烧伤而造成颌面部更严重复杂的残缺畸形。同时,工业革命给人们带来了快速转动的机器、现代化高速交通工具、机器交通等事故愈见频繁,严重颅颌面部创伤不断发生。对这些创伤早期的和晚期的整复治疗经验的累积,就为颅面外科的诞生和发展奠定了基础。

20世纪50年代初,还开展了上面部先天性畸形的整复治疗手术。英国H.Gillies早在1942年就施行了Le-FortⅢ型截骨手术,将面部骨骼在眼眶平面截断后移位和重新向前固定,以矫正面部严重凹陷畸形病人,获得成功。法国Tessier受他的启发,开始构思如何应用骨块移植法,将骨块嵌植在前移的骨骼缝隙间以防止复发。60年代,他更成功地进行了颅面外科手术,把连同颅骨在内的颅颌面畸形进行截断和重新排列,以矫正畸形,得到满意的效果。1974年他又第一次进行开颅手术,为1名眶距增宽症病人进行矫治获得成功。这就奠定了颅面外科的基础,Tessier遂成为这门新学科的创始人。

Tessier的成功经验证实了3项重要的外科理论:(1)颌面部骨骼可以游离地、大块地被截断,重新组合排列和固定,而不致发生坏死;(2)眼眶和它周围的骨架可以在较大范围向上、左右方向移动,而不致影响眼球视力;(3)颅内及颅外可以同时进行

手术,而不致引起并发症感染。这3项原则奠定了颅面外科的理论基础,从而使它成为现代外科医学的重大发展之一。20余年来,颅面外科已在法国、美国、澳大利亚、墨西哥、日本、韩国等相继开展,并获得很大成绩。中国则于1977年在上海第二医科大学附属九院整复外科首次施行了第1例眶距增宽症手术获得成功,为在中国开展颅面外科揭开了序幕。

颅面外科是一门技术较复杂、具有一定手术危险性的外科医学,它涉及到不少有关医学专业,故在开展手术时,必须有较多专业的医师通力合作。除以整复外科为主外,还要得到神经外科和麻醉科的密切配合。此外,儿科、眼科、耳鼻喉科、放射科、口腔正畸科等医师均需参加协作和咨询,并组成一个颅面外科小组。国外较完善的小组还邀请遗传学家、心理学家、社会服务工作者、语言矫治者、听力学家共同参加,甚至人类学家亦参与研究工作。

颅面外科手术有一定危险性,患者手术死亡率现为2%左右。手术也可能导致较严重的并发症,如脑部感染、颅脑损伤、视力障碍,甚至失明等。故此,开展颅面外科时必须具备较好的设备和技术条件,组织严谨和训练有素的护理人员队伍(包括术中及术后),方能取得成绩。

颅面畸形由于发病机制尚未明了,故还缺乏明确清晰的分类法。一般可分为先天性的和后天性的两大类。颅面先天性畸形者呈现多种形态,各国学者都提出许多分类方法,企图将所涉及的畸形都包括在一种分类法中,但事实上很难做到。许多畸形者仅有头颅骨畸形,而有些则既有颅骨异常,又有面部畸形,甚至合并四肢骨骼畸形,其中都可找到某种内在性联系,但又缺乏联系各畸形间的纽带。1976年Tessier曾提出以颅面裂隙为基础的分类原则,把颅面裂分为0~14型,但这仍不能把所有畸形都包括在内。现略介绍一般性分类如下。

颅骨部畸形最常见的发病因素是颅缝早闭。颅缝早闭可阻碍颅骨正常发育而致其变形,并由此而致脑组织发育障碍及神经系统病变。早闭可以发生在某一颅骨缝,或多条颅骨缝,包括颅穹窿、颅面及颅底骨缝;可以发生在单侧,或双侧同时出现。实际发病原因不明了,与遗传有一定关系,但并非绝对。其发病率约在1:10000左右,男性多于女性。患儿有时还伴有其他骨骼发育异常,如矢状缝早闭,可使婴儿头颅呈舟状头畸形,冠状缝早闭则呈尖头畸形,侧冠状缝和入字缝早闭则呈斜头畸形,双侧冠状缝伴额蝶缝、额筛缝早闭则呈短头畸形。如全部颅缝早闭则成为小头畸形。下表可见各种颅缝早闭的类型及其相伴的神经系统改变情况。

颅面畸形另一大类是眼眶及其周围组织的畸形,或称颅面裂。1976年提出的0~14型分类法中,3~14型均与眼眶有关;临床可表现为眶距增宽症或过狭症,单侧性眼眶增宽症、眶上缘或下缘缺损或裂隙、小眼眶伴有眼球发育不良、睑缺损、脑膜膨出及脑膨出等。其中以眶距增宽症最为典型和严重,属0~14全型裂。一般的面斜裂属4~5型裂,面横裂属7型裂。正常人两眼眼眶间距一般男性为28mm,女性为25mm,而张涤生等所见到的1例6岁女孩眼眶距达65mm。

颅面部发育不全是一类颅面畸形。实质上它也只是—个通称,可以包括所有的颅狭症和其他面部畸形在内,特别包括许多综合症群,如常见的Crouzon综合症。Crouzon综合症患者主要表现为颅底狭窄、颧骨及上颌骨发育不良以及中颅凹突入眼眶所造成的代偿性膨出,使眼眶极度发育不良,形成很浅的眼眶,以致眼球突出、悬压在下睑缘上方,有时竟脱出于下睑缘外,致角膜长期暴露而失明;鼻形短而小,呈鹦鹉样嘴。另一种Apert's综合症患者则除上述症状外,还同时伴有手足指(趾)畸形。Treacher-Collins综合症患者的主要症状是在眼眶区域有明显面裂,下睑缺损,睫毛1/3缺失,颧颊部塌陷,颧弓小或缺失,外眦角下斜,耳廓畸形,以及有一个短小向下的下颌骨。此类综合症错综复杂,迄今文献上已有各家学者报道的20余种颅面部综合症群。

表 1

颅缝早闭症的颅型及神经系统变化

| 受累颅缝          | 颅型                  | 颅外型二维分析                    |         |        | 颅压增高 | 神经发育迟缓情况 |       |
|---------------|---------------------|----------------------------|---------|--------|------|----------|-------|
|               |                     | 长度(矢状面)                    | 高度(冠状面) | 宽度(轴面) |      |          |       |
| 矢状缝           | 舟状头(Scaphocephaly)  | 增加                         | 正常或增加   | 减少     | 无    | 轻度       |       |
| 额缝            | 三角头(Trigonocephaly) | 正常或增加                      | 正常      | 增加     | 无    | 轻度、中度    |       |
| 单侧冠状缝<br>或人字缝 | 斜头(Plagiocephaly)   | 减少或正常                      | 正常或增加   | 增加     | 少    | 轻度、中度    |       |
| 双侧冠状缝         | 短头(Brachycephaly)   | 减少                         | 增加      | 增加     | 少    | 轻度、中度    |       |
| 多颅缝           | 双侧冠状<br>缝为主         | 尖头(Acrocephaly)<br>(后面观)   | 减少      | 增加     | 增加   | 少        | 轻度、中度 |
|               | 双侧冠状<br>缝为主         | 塔头(Turriccephaly)<br>(前面观) | 减少      | 增加     | 增加   | 少        | 轻度、中度 |
|               | 矢状缝<br>+冠状缝         | 尖头(Oxycephaly)<br>(后面观)    | 减少      | 增加     | 增加   | 有        | 重度    |
|               | 双冠状缝<br>人字缝<br>额鳞缝  | 三叶头(Kleeblattsgadel)       | 减少      | 增加     | 增加   |          |       |

除上述几种典型的颅面畸形外,还可包括颅骨生长发育性异常,如脑组织发育不良而致的小头症,新生儿脑积水而造成的巨颅症,以及颅骨肿瘤(如颅骨纤维瘤)等所造成的畸形。

此外,近代颅面外科技术给人类带来的另一项重大贡献,是对颅面部严重创伤所造成的各种复杂畸形的矫治。过去,颅面部创伤着重在早期急诊处理,以抢救病人生命为主,对所遗留的严重畸形,在晚期却显得束手无策。小修小补实际上无助于畸形的矫正和功能的恢复。颅面外科的发展促使对这类创伤性畸形进行彻底的或较彻底的矫治。目前,结合开颅手术,Le-Fort III型手术可以安全地、熟练地施行。植骨和微型钛合金钢板固定又为修复骨缺损提供了有效的修复再造的组织和设备,显微外科技术所进行的大块软组织移植又可使手术一期成功。

在治疗方面,颅面畸形者如出现颅缝早闭所引起的颅内压增高时,目前趋向于早期手术,可在婴儿出生后2~3月内施行,以及早解除颅内压增高,有利于大脑的正常发育,防止发生各种严重并发症。过去所沿用的颅缝浅线切开手术形成人工颅缝,由于术后极易复发,不应采用。Marchac(1978)指出,浮动额骨瓣手术不但可以防止复发,而且还有利于颅额及眶部的继续向前方发育而形成正常面貌形态,对其他各种颅面畸形则不受年龄限制而随时可以施行手术修复。

#### 参考文献

- Munro I R. Orbito-cranio-facial Surgery: The Team Approach. Plast. Reconstr. Surg., 1975, 55: 2
- Tessier P. Plastic Surgery in the Orbital Region. St. Louis: Mosby 1976, 255~267
- Tessier P, et al. Plastic Surgery of the Orbit and Eyelids. New York: Masson, 1981
- Marchac D, Renier D. Cranio Surgery for Craniosynostosis. Boston: Little, Brown, Co. 1982
- Jackson I, et al. Atlas of Craniofacial Surgery. St. Louis: Mosby, 1982
- 张益生. 中华外科杂志, 1983, 21: 32
- Marchac D. First International Congress of the International Society of Craniofacial Surgery, Berlin: Springer-Verlag, 1987

(中国工程院院士上海第二医科大学张益生教授撰)

#### 眼部整形

eye plastic 对眼部残缺的修复,以重建器官功

能和外形,或是在正常范围内及正常基础上进行美的加工。如矫正眼部缺陷对青年人可改善他们的精神面貌和心理状态。对中年人眼部皮肤松弛和畸形的修整,可恢复青春容颜,增加活力。美、日等国家,硅胶制品已广泛应用于整容外科。中国近十年来整容外科也在迅速发展,如眼、耳、口唇、颌面、乳房、腹壁等整形已广泛开展,有一批专家正在设计具有中国民族特色的东方式美容外科。

**重睑成形术** 关于上睑皱襞的宽度,随种族不同而异。如高加索民族睑板宽达10~12mm。东方民族睑板宽度,男7~9mm,女6~8mm,所以重睑的高度要根据各个人眉睑距离而定。手术方法:(1)埋线法。先划缝线标志,局部浸润麻醉,穹窿放护板,通过睑板面和皮下做3针缝线,调整后打结,线头埋于皮下。(2)缝线法。划缝线标志,局部浸润麻醉,自穹窿向外缝5针,皮肤面缝线间压1根4号丝线,6d拆线。(3)切开法。适合任何类型的单重睑,划切口标志,局麻下切开皮肤,多余的皮肤切除1条,修剪皮下组织和轮匝肌,距睑缘6~8mm高间断缝5针,每针横扣于睑板面上,6d拆线,其方法稳定可靠。

**睑内翻矫正** (1)先天性睑内翻或下睑赘皮,对严重患者保守治疗无效,可手术治疗。距下睑下2~3mm,皮肤做半月形切除,修剪一条轮匝肌,间断缝合皮肤,6d拆线。另外可采用近下睑倒睫部位,缝2~3针,线间压1根4号丝线,如矫正不理想可加灰线切开。(2)老年性睑内翻矫正:轮匝肌缩短,自下睑下3mm做切口,向下分8mm,分出1条6mm宽的轮匝肌,缝缩短线,固定于睑板中央,间断缝合皮肤,6d拆线。将下睑皮肤及轮匝肌切除1条,间断缝合皮肤,6d拆线。(3)疤痕性睑内翻矫正,5针1线法,适用轻度内翻者。睑板切除(Hotz氏)法,做睑板楔形切除1条,然后间断缝合皮肤和睑板,以达到充分矫正内翻,其法效果可靠。

**睑外翻矫正** (1)疤痕性睑外翻矫正,手术方法是松解和切除疤痕组织,根据皮肤缺损多少,用转移皮瓣修复,或用游离皮瓣移植。(2)老年性睑外翻,主要是由于下睑皮肤松弛所致。手术方法是下睑外2/3灰线切开,向外延长15mm,再向下垂直切口15mm,向下分离暴露睑板,近外眦1/3处施行睑板及结膜“V”形切除,将睑板及结膜吻合,多余的皮肤切除1条,间断缝皮肤,6天拆线。(3)面瘫下睑外翻矫正,其方法是采用兜带牵引使下睑复位,可取3~4mm宽的自体巩膜,也可用自体的或异体的阔筋膜,于局麻下在下睑内外眦部做两个纵行切口,用长穿针通过睑板面的隧道,将两端穿出内外眦皮外,内侧端固定于内侧骨膜上,

外侧端固定于耳屏前骨膜上,用强的拉力使下睑复位,可达到良好的效果。

**上睑下垂矫正** 上睑下垂的测量,(1)测量原位时睑裂的高度(适用于单侧性上睑下垂),两眼之差为下垂量。(2)正常人原位注视时,上睑缘位于瞳孔上缘1~2mm,如低于此位置谓之下垂。测量方法是令病人尽量向下看,用拇指按住眉部额肌,再令病人极度向上看,用标尺测出上睑活动度的数据为提上睑肌力。上睑下垂分3度:轻度,上睑下移1~2mm;中度,上睑下移3mm;重度,上睑下移4mm以上。上睑下垂矫正的方法如下:

1. 利用额肌的悬吊方法,本法早被广泛采用。取自体的或异体的阔筋膜,异体的巩膜、真皮、硅胶等,选用两根悬吊物2mm×70mm,自中间折成两条,排成“W”形,缝线固定于睑板内中1/3处,距睑缘4mm。然后用长穿针把两端通过隧道穿到眉上内、中、外3个切口处,调整悬吊物将上睑缘抬高到瞳孔上缘上1~2mm处,缝线固定于骨膜上。本法优点为适用于各种类型的上睑下垂,手术简便易掌握,缺点是远期效果不能令人满意。

2. 睑板-结膜切除法:用于提上睑肌力8mm以上患者。睑板切除量为下垂量加1~2mm。(1)经皮肤切口,修剪1条皮肤、皮下组织及轮匝肌,睑板楔形切除1条,间断缝合皮肤睑板。(2)经结膜方法,局麻下翻转眼睑,用蚊氏钳夹住部分睑板和结膜并切断。采取连续缝合伤口。加压包扎48h,6~8d拆线,本方法操作简单,缺点是上睑仅仅是机械性截短,上睑并不能自然抬起。

3. 提上睑肌缩短术,本法是在传统方法的基础上加以改进的符合生理要求,对轻度的、中度的、重度的、先天性的、后天性的、老年性的、外伤性的、麻痹性等的上睑下垂均适用。按常规估计下垂1mm,提上睑肌缩短4~5mm,但每个人的眉睑距离和提上睑肌力强弱各异,所以尚需根据临床经验和术中观察而定。手术方法是采用内外结合,距睑缘上方6~8mm划切口标志,局麻,于上睑缘缝两根牵引线,翻转眼睑,穹窿结膜行薄层麻醉,使结膜和Müller氏肌分离,内侧穹窿做纵行切口4mm长,钝性分离至外侧,然后置入一橡皮片,再将眼睑复位做皮肤切口,结膜囊放护板,于外侧睑板上做纵行切口,用弯的蚊氏钳自外向内钳住提上睑肌,切断肌腱,再切断内外毗限制韧带,继续从前面和结膜面向上分离提上睑肌,不打开眶隔膜,将上睑轮匝肌和皮肤拉向眶缘,根据估计量再作比试,然后做3针缩短缝线,缝线穿过眶隔膜,固定于睑板中央,收紧缝线,调整高度和弧度,用重睑缝线方法,间断缝皮肤。可能出现的并发症及处理:(1)穹窿结膜脱垂。从穹窿向外缝两针皮肤面打结,3~4d拆线。(2)暂时性兔眼。无需处理,如3个月症状仍明显者,嘱病人按摩眼睑,经常向下扒,症状可改善。(3)眼睑高度、弧度不理想,着重于术中调整,必要时重新打开伤口调整缝线。

4. 额肌筋膜瓣悬吊术:本方法已被广泛采用,是在眉区设计一个以上方为蒂部的额肌筋膜瓣,距睑缘6~8mm做皮肤切口,修剪皮下组织和部分轮匝肌,然后将皮肤和轮匝肌分离至上眶缘,在额肌和轮匝肌交界处横行切开额肌纤维,沿皮下和骨膜面向上分离,范围达眉上10mm,使眉部额肌在骨膜上可推动。然后沿眶上孔向上作垂直线,外侧经颞颥线前缘作垂直线,两垂直线间纵行向上剪开达眉上10mm,再将组织瓣下端向下拉,做3针双套圈缝线,下端缝线固定睑板中央,调整高度和弧度,上睑缘达瞳孔上缘上1~2mm即可。本手术优点是操作简便,易掌握;缺点是上睑有些臃肿,与健眼不对称;另外眼睑有迟滞现象,当眼球下转时眼睑不能随同运动。

**睑成形术** 本方法适用于先天性眼睑缺损畸形者、创伤性眼睑缺损者、眼睑肿瘤切除后修复者,常采用如下手术方式:(1)旋转带蒂皮瓣修复。根据病变部位和大小,可以眼部内下、内上、外下、外上方4个方位取皮瓣,皮瓣宽与长之比为1:4,不能超过1:5,旋转角度90°为宜,如睑板大部分缺损或全部缺损,可采用自体巩膜、阔筋膜和耳软骨衬填在皮肤和结膜之间,避免绒毛刺激角膜。(2)取游离皮瓣修复。皮瓣要比创面大2~3mm。下睑修复要取全厚皮瓣,上睑要取薄层瓣。上睑大部分缺损也可旋

转下睑二期修复。

**上睑退缩整复术** 上睑退缩表现为正常平视时,上睑缘的位置高于原位眼。通常单眼患者往往原因不明,T<sub>3</sub>T<sub>4</sub>检查为阴性,可采用手术方法整复。手术方法:(1)经穹窿结膜单纯切除Müller氏肌。(2)从皮肤切口,于睑板上缘移植1条20mm长、宽等于退缩量+2mm的阔筋膜或自体巩膜后一种方法效果较好。

**下睑退缩整复** 下睑退缩是由于眶骨发育不良,或疤痕牵引所致。手术方法是:取髂骨或肋软骨充填眶缘并用钢丝固定,使下眶高起,下睑缘自然抬起。(2)自睑板下缘切断肌肉在二者间移植1条20×4mm的自体巩膜或自体阔筋膜,进行加宽吻合,连续缝合球结膜。

**上睑凹陷矫正** 上睑凹陷是由于外伤或眶脂萎缩所致。手术方法是在局麻下做重睑切口,将皮肤向上拉暴露眶凹陷区,将取下的皮肤修去表皮,将2~3层真皮铺成穹窿形固定于凹陷区,按重睑方法缝皮肤,近期效果很满意,远期可能有部分真皮被吸收。

**眉缺失修复术** 先理短头发,观察额上方头发和眉毛生长相一致的区域,在移植区和发区均划好标志,取发区带颞浅A的皮瓣,间断缝合固定。加压包扎48h,6~7d拆线,移植的眉和头发同样增长,每次理发要修眉。

**结膜囊成形术** (1)下穹窿加深术。手术方法是先做穹窿疤痕松解,自下穹窿向眶缘缝2~3针,穿出皮外,在线间压一粗线打结,同时缝3针闭睑线,加压包扎48h,6~7d拆线,然后放塑料眼模加压包扎两个半月,调换义眼。(2)取口腔粘膜移植矫正部分结膜囊狭窄。放塑料眼模加压,包扎两个半月,调换义眼。(3)全结膜囊成形术。充分修整眼窝疤痕后,另取4cm×6cm的薄层皮瓣,衬补眼窝内,缝闭睑线,6~7d拆线,然后置入眼模加压包扎两个半月,调换义眼。

**活动眼座植入术** 当眼球摘除后安装义眼时,为了使义眼能随眼珠转动而活动,在眼眶置入一活动眼座。曾试用塑料、硅胶、碳纤维等材料制作的眼座,都因排异或感染而告失败,唯有取自体的髂骨或肋软骨充填眼窝反应小,不排异。

#### 参考文献

- 1 Stallards M J. Eye Surgery sixth editor Bristol Western pr Series. 1980. 256~264
- 2 郭秉宽,主编. 中国医学百科全书眼科学. 上海:上海科技出版社,1983. 33~36
- 3 徐乃江,主编. 实用眼成形手术学. 杭州:浙江科技出版社,1987. 99~102
- 4 宋儒耀,主编. 美容整形外科学. 北京:北京出版社,1989. 189~201
- 5 张涤生,主编. 实用美容外科学. 上海:上海科技出版社,1990. 545~550
- 6 董昌林,方彩林,主编. 美容整形外科彩色图谱. 北京:北京出版社,1992. 89~100

(安徽医科大第一附属医院眼科吴邦安教授撰)

#### 感染性休克

septiskock 临床危重病症。患者病理生理改变,特别是重要器官的损害和代谢紊乱极其复杂。数10年来,国内外医学专家对感染性休克进行了大量研究,对其发病机理和治疗方面的认识已从微循环水平发展到细胞、亚细胞、分子水平。尽管应用抗生素和支持心血管功能治疗方法,感染性休克患者死亡率仍然很高。

对休克的认识大体上经历了3个不同阶段,即从开始的表征水平发展到循环水平再至微循环水平。60年代认识到休克的本质是生命重要器官的毛细血管灌注量的危急性锐减所引起的代谢与细胞受损的病理过程。根据病因休克可分为多种类型,微生物及其毒素引起的休克称为感染性休克,参与其发生发展的因素很多,主要有以下几方面:

1. 神经因素。休克早期患者在应激状态下交感神经-肾上腺

髓质系统兴奋性增高,引起血管收缩,微循环灌注不足,组织缺血缺氧,微循环发生障碍。

2. 体液因素。休克发生时,一些体液因子水平明显增高,在休克的发生发展中起重要作用。如儿茶酚胺的过量释放可引起微血管痉挛,组织损伤,最终导致DIC。组织胺具有舒张血管和使血管通透性增高的作用,还可以选择性地收缩小静脉及微静脉。休克时,组织胺的合成与释放均增加。5-羟色胺可使肺血管发生强烈收缩,也可选择性地引起微静脉与小静脉的收缩。感染性休克时内毒素对宿主细胞系统的作用,使肥大细胞释放5-羟色胺。内毒素激活的凝血因子Ⅰ可使激肽生成量增大,激肽具有扩张血管和增强毛细血管通透性的作用。另外认为血管紧张素Ⅰ、前列腺素物质等亦参与感染性休克的发生。

3. 毒性因素。内毒素是G-菌细胞膜的脂多糖(LPS),它在感染性休克发病中的作用已被公认,其机理极其复杂。内毒素通过激活补体系统、凝血系统、激肽系统、纤溶系统等引起一系列病理生理改变,导致组织灌注不足,细胞损伤,甚至器官功能衰竭。内毒素还能促进血小板聚集,与凝血因子Ⅰ、补体系统共同作用诱发DIC。可见感染性休克的严重后果与内毒素密切相关。某些G<sup>+</sup>菌产生的外毒素可强烈地刺激5-羟色胺与组织胺的释放,还可以引起血小板聚集与溶血,因而也能诱发DIC。此外,休克时溶酶体酶的释放引起组织损伤,心肌抑制因子对心肌收缩力的抑制,在休克的发生中都有一定意义。

对血液流变学研究发现,感染性休克有两种类型,常见的一种是低排高阻型休克(主要有 $\alpha$ 受体兴奋所致),其典型改变为心输出量减少,周围血管阻力增高,组织灌注量不足。另一种是高排低阻型休克( $\beta$ 受体兴奋所致),周围血管阻力偏低,心排量正常或高于正常。

现代感染性休克的概念认为感染性休克是由微生物及其毒素作为动因,引起急性微循环灌注低下,导致组织缺氧、代谢障碍、细胞损伤,甚至器官功能衰竭等的危重综合征。病原体以G-菌为主,如大肠杆菌、肺炎杆菌、肠杆菌、绿脓杆菌、变形杆菌、脑膜炎球菌等;G<sup>+</sup>菌,如金黄色葡萄球菌、链球菌、肺炎球菌等;真菌、病毒(流行性出血热病毒)以及寄生虫(弓形体)等也能引起休克。患者临床表现为面色苍白、四肢湿冷、脉搏细速、血压下降、尿量减少、神志改变等。病情严重者可发生DIC及/或多脏器功能衰竭。

对感染性休克的研究进入细胞、亚细胞、分子水平,新的休克概念已和过去有许多不同。过去以为感染性休克是细菌毒素及广泛组织损伤的直接结果,近年来的一项重要发现是,内毒素的许多毒性反应是通过一系列内毒素诱导介质(Endotoxin-Induced Factor)表现出来的,而非内毒素本身的效应。参与休克发生的体液因子、介质及代谢产物除儿茶酚胺、组织胺、激肽等之外,认为主要还有以下几种:

(1)过敏性毒素。内毒素可以通过经典途径或旁途径激活补体,补体活化过程中酶解C<sub>3</sub>、C<sub>5</sub>时产生小分子多肽C<sub>3a</sub>、C<sub>5a</sub>,后两者均具有过敏性毒素作用,使肥大细胞或嗜碱细胞释放组织胺,引起血管扩张、毛细血管通透性增强,并引起平滑肌收缩和支气管痉挛。经研究证明,感染性休克的严重并发症ARDS的发展,是C<sub>5a</sub>介导白细胞趋化、聚集、释放活性物质,继发肺内皮损伤的结果。

(2)前列腺素与白三烯。花生四烯酸(AA)是人体不饱和脂肪酸,为前列腺素(PGS)、血栓素(TXA<sub>2</sub>)和白三烯(LTs)的前身。AA经环氧化酶代谢合成前列腺素(PGI<sub>2</sub>)和TXA<sub>2</sub>。这两个因子是强烈的内源性血管活性物质。PGI<sub>2</sub>主要产生在血管内皮细胞,是强烈的血管舒张剂且能抗血小板聚集。相反,TXA<sub>2</sub>主要由血小板产生,是已知最强的血小板聚集剂和极强的血管收缩剂。通常这两个因子在体内处于动态平衡状态,维持着血管张力、血小板功能和其他许多稳定细胞内环境的功能。感染性休克时介导了前列腺素水平的变化,引起PGI<sub>2</sub>的合成抑制,而TXA<sub>2</sub>的产物增加,导致心血管调节功能的紊乱,感染性休克对血液流

变学的变化与之关系密切。在败血症家兔模型中,发病开始的30min内持续性低血压与早期血中6-酮-PGF<sub>1 $\alpha$</sub> 和TXB<sub>2</sub>水平增高有关,AA经脂氧化酶代谢转变为LTB<sub>4</sub>,其增强血管通透性的作用比组织胺强1000倍,且能强烈地趋化粒细胞并使之聚集释放溶酶体酶。

(3)血小板活性因子(PAF)。PAF被公认为是内毒素血症的介质。它主要由受刺激的白细胞、血小板、肺、肾和内皮细胞释放,能激活血小板和白细胞使之聚集、活化,能使肺循环阻力增大,体循环阻力下降;能致血浆渗出。在动物模型中观察到应用PAF可增加TXA<sub>2</sub>、6-酮-PGF<sub>1 $\alpha$</sub> 以及LTB<sub>4</sub>合成。给小鼠应用PAF受体拮抗剂BN<sub>52021</sub>对抗内毒素,能提高存活率,减少TXA<sub>2</sub>和PGE<sub>2</sub>的释放,成功地抑制内毒素血症的低血压。

(4)氧自由基(OFR)。体内代谢过程中能产生自由基,其中OFR毒性很强。体内也存在清除自由基机制,正常情况下生成与清除平衡。如果OFR过量产生,局部或全身内源性防卫OFR机制减弱,因环境因素使OFR产物不能正常形成以致防卫系统不能施行有效作用,则OFR起病理生理作用。已经明确的OFR两个来源是:(1)活性白细胞释放;(2)组织缺血介导ATP分解,黄嘌呤氧化酶反应的产物。组织缺血和炎症是感染性休克两个重要组成部分,前者在OFR产生中尤为重要。休克时产生的过量OFR攻击细胞及亚细胞器的膜磷脂中的多元不饱和脂肪酸,引起脂质过氧化反应,使细胞及亚细胞器结构及功能损害。

(5)内啡肽。休克时脑垂体-肾上腺髓质释放大量内源性阿片肽,以内啡肽为主。 $\beta$ -内啡肽直接或间接引起血管通透性改变,抑制交感神经活动,使心率、血压下降。

(6)肿瘤坏死因子(TNF)。目前发现与TNF关系最密切的临床疾病是细菌感染。给哺乳动物注入内毒素后,TNF迅速达到血浆高峰水平。重症G-细菌败血症或感染性休克时,病人血清中TNF水平增高。TNF是由内毒素激活的单核巨噬细胞产生的一种多肽,参与介导感染、凝血、发热、休克、多脏器功能衰竭和恶液质等多种病理过程。给家兔注入重组人TNF后几分钟即可发生严重的低血压、代谢性酸中毒和致死性休克。用TNF抗血清被动免疫小鼠可保护它们免受内毒素所致的死亡。TNF还介导其他重要炎症介质如白细胞介素-1(IL-1)、PAF的释放。

(7)白细胞介素。急性炎症时受刺激的单核细胞产生IL-1,它能介导心动过速和低血压,致机体发热,促进肝细胞合成急性期蛋白淀粉样蛋白A和C反应蛋白。与TNF一起可激活中性粒细胞和内皮细胞,提高粒细胞的趋化性和对内皮细胞的粘附性,加重病理损害,释放酶类并产生OFR,导致组织损伤。用IL-1受体拮抗剂可减少内毒素介导的休克兔的死亡。IL-1也是重要调节因子,与TNF结合诱发IL-6,IL-6又称肝细胞刺激因子,急性炎症时IL-6通过增强淀粉样蛋白A与C反应蛋白合成而参与炎症反应。

(8)纤维连接蛋白(Fn)。Fn是一种冷凝集糖蛋白,具有多种生物学活性。细胞表面的Fn在细胞与细胞之间、细胞与基质之间起粘连作用。血浆中Fn作为调理素,主要在清除颗粒碎片和微生物中起吞噬调理作用。Boaghton等用放射免疫分析法测定病人血浆Fn,发现感染者Fn水平下降,感染越严重,Fn水平下降越明显。Mosher等研究指出,低水平Fn患者的死亡可能性比正常水平Fn者要大得多。休克时Fn消耗增加,生成减少,导致网状内皮系统吞噬功能抑制,且微血管完整性与通透性改变,结果引起器官功能衰竭。

(9)ATP。ATP为细胞能源,休克缺氧时ATP生成减少而致细胞损伤。ATP不足又可影响钠/钾泵的功能而致高钾低钠血症。

关于感染性休克的治疗,目前研究的焦点是直接作用于内毒素本身的和内毒素诱导介质的抗体,其中抗内毒素核心抗体和抗TNF抗体最受重视。国外学者报告应用大肠杆菌J5抗体治疗外科感染性休克高危病人,可预防休克发生,降低死亡率。中国有用大肠杆菌J5抗体与中药联合治疗感染性休克患者取得疗效

的报告。目前已克隆出人类单克隆抗体 HA-IA,这是一种 IgM 抗体,能与内毒素的脂质 A 特异性结合,阻断血循环中内毒素的毒性效应,包括休克时诱导和释放介质以及组织损伤的毒性作用。临床初步试验结果显示,对 G 菌败血症患者应用 HA-IA 能明显降低死亡率,还可以防止感染性多系统脏器衰竭的发生和发展。国外学者将抗重组人 TNF 的新型小鼠单克隆抗体用于临床试验,发现对进展性休克病人采用 TNF 治疗是安全的。不仅抗体能阻断内毒素及内毒素介质的毒性作用,其他潜在的有用物质也在研究中,包括可溶性 TNF 受体,在体内能结合细胞因子使 TNF 失去活性。另外一种 IL-1 受体拮抗剂已被克隆,在动物体内及大肠杆菌介导的休克家兔体内显示出能抑制 IL-1 的某些生物活性,更重要的是能够预防内毒素的毒性效应。其他的体液介质拮抗剂有内啡肽拮抗剂纳洛酮,通过结合中枢神经内的内啡肽受体发挥其抗休克作用。促甲状腺素释放激素(TRH)有抑制β-内啡肽释放的作用,拮抗内啡肽的生理功能,起抗休克效果。自由基清除剂超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)等能阻止自由基反应。天然抗氧化剂有 VITA、C、E、辅酶 Q<sub>10</sub>、谷胱甘肽等,均有清除氧自由基的作用。PGI<sub>2</sub> 能改善微循环,减轻休克症状。环氧化酶抑制剂消炎痛、异丁苯丙酸、血栓素合成抑制剂等,能选择性地阻断细胞因子的不良作用,并且不影响机体必需的免疫防御能力。布洛芬可对抗感染性休克动物的低血压,增加心脏指数、预防酸中毒,提高存活率。输给新鲜冷冻血浆或含 Fv 的冷沉淀素可提高 Fv 水平,改善单核巨噬细胞系统的吞噬功能。

感染性休克的治疗原则是综合处理,除上述者外,抗生素、抗休克治疗是重要环节。抗生素的应用应遵循选用敏感杀菌剂,大剂量联合用药的原则。宜静脉给药。抗休克治疗包括扩容、纠酸、血管活性药物应用及维持生命器官的功能。扩容剂有 5% 碳酸氢钠、低分子右旋糖酐(每日用量 < 1 000ml)生理盐水、葡萄糖生理盐水、白蛋白、血浆、代血浆。输液时应作中心静脉压监测。纠酸首选 5% 碳酸氢钠,根据 CO<sub>2</sub>-CP 或血气分析的结果调整用量。需限钠盐者,可选用三羟甲基氨基甲烷(THAM)。血容量补足后病情仍未改善时可选用血管活性药物,如β受体兴奋为主的多巴胺,或兼用间羟胺,可迅速升高血压。α受体阻滞剂苄胺唑啉可解除微血管痉挛和微循环淤滞,宜早用。抗胆碱药东莨菪碱、山莨菪碱兼有呼吸兴奋作用。增强心功能给强心药、血管活性药、能量合剂、大剂量激素对抗内毒素稳定溶酶体膜。维护呼吸功能宜给氧,保持呼吸道通畅,防止感染。血管解痉剂、白蛋白、速尿能减轻肺水肿。如发生 ARDS 可用大剂量激素、天然肺表面活性物质。维护肾功能要解除肾血管痉挛,保持肾血流量。防治脑水肿可用地塞米松、20%甘露醇。DIC 治疗用肝素 0.5~1mg/kg,4~6h1 次,静脉给药,重复应用时需测定凝血时间。继发纤溶时应用抗纤维溶解剂。

尽管免疫领域研究工作为感染性休克治疗展示了广阔前景,但是免疫制剂的应用还存在许多问题需要探讨,大多数研究还处在动物实验阶段,临床意义如何,是否干扰机体正常防御机制等,有待于继续研究和临床试验。抗生素问世前用免疫方法治疗感染性休克,后又重提免疫治疗,反映了感染性休克的机制十分复杂,同时也说明人们对它的认识逐步深入。有关感染性休克的基础理论以及临床研究仍是当今医学上的重要课题之一。今后治疗的方向是杀灭致病菌的同时,从不同环节阻断细胞因子及体液介质对宿主细胞的损害及毒性作用,维持重要器官功能,保护机体免疫反应机制,最终对细菌致死的根本机制加以干预还是寄希望于免疫研究的发展。

参考文献

- 1 贺石林. 休克(第 1 版),广州:中山医学院《新医学》编辑出版组,1975,20~26
- 2 Boaghton. The Lancet,1983,1(8316):106~107
- 3 Carmona R H. Arch Surg,1984,119(2):189~192
- 4 Tracey K J. Infect Dis ,1985,157(3):413420

- 5 徐肇明. 传染病学(第 3 版).北京:人民卫出版社,1990,174~181
- 6 Haglund V. Circ Shock,1991,34(4):405~411.
- 7 Moore J M. Circ Shock,1991,35(1):53~59.
- 8 Ohlsson K. Excer Med Sur ,1991,64~(74):158
- 9 Zigier E J. New Engl J Med.1991,324(7):429~436
- 10 杨尚印. 中国急救医学,1991,3(2):103~106  
(安徽医科大学第一附属医院苏菲副教授、余鑫之教授撰)

褥疮防治装置 anti-bedsore instruments

根据褥疮发生的机理研制的防止褥疮发生的医疗器械。褥疮是一种临床常见并发症,是由于患者长期卧床机体受到持久性压力引起局部血液循环障碍而导致组织坏死感染所形成的疮面。多见于昏迷、颅脑疾病、截瘫、脊柱骨折、多发性骨折等病人。褥疮是临床难以防治的并发症。因此,从临床防治需要,采用各种技术手段,研制防治褥疮发生的器械,即是“褥疮防治装置”研究的主要任务,它具有“未病先防,已病早治”的积极意义。

褥疮虽然是一种古老而又常见的并发症,但其发病机理的揭示时间并不长。“褥疮”一词,中医原意是患者长期卧床而发生的皮肤溃疡。英文称“Pressure”,其意是由于压力所引起的溃疡。近代病理生理学研究阐明,其发病机理不仅以压力因素为主,而且还与摩擦力、剪切力以及潮湿因素有关。现代从微循环研究发现,皮肤毛细血管的压力为 2.67kPa。当作用于皮肤的外部压力超过这一数值,时间超过 2h 便可发生不可逆转的组织损害,如体液溢出、水肿、组织坏死,以致发生褥疮。如果压力达到 32kPa,作用呈间歇性,持续时间短,组织发生的变化却很少,则不发生褥疮,这说明持久性压力是发生褥疮的主要因素。若机体再受到局部的摩擦力、剪切力及潮湿因素的综合作用,致皮肤受损,细菌增殖,则更易发生褥疮。

国内外历代医家为了防治褥疮做了大量的探讨,如给予药物,加强局部护理,手法按摩,定时翻身等以改善患者血液循环、防治褥疮的发生。19 世纪以来应用海绵软垫、气圈也取得了一定的效果。近年来随着科学技术的发展,褥疮防治装置应运而生,品种甚多,主要采用气、水、泥、条板研制各种褥疮防治装置。如英、日的“悬浮床”、“气垫床”;美国加利福尼亚大学的“充气床”;日、英、德的“泥床”、“翻身床”等;此类装置价格昂贵,难以推广。国内近年来发展亦很快,如天津“三折侧翻身床和程序控制康复床”、上海“三马喷气褥疮防治器”、山西“全自动褥疮防治装置”、北京“电动夹紧翻身床”、广西“多用护理病床”、山东“自动防褥疮床”等。上述产品各有优缺点,可根据病情择用。

褥疮防治装置分类:有充气床、充水床、充泥床、条板床、翻身床、折叠床等。操作有手工操作、自动操作、定时操作 3 种。

1. 充气床特点是柔软、缓解持久性压力效果显著。又可分悬空的、不悬空的两种。悬空床能最大限度地缓解机体大面积持久性压力,散发潮湿,保护皮肤干燥。日本 1983 年的“悬浮床”属此类。其原理是以强大的气流将整个床槽内的玻璃微粒粒起,以使卧于床上的病人悬浮起来,最大限度地减少对机体的持久性压力、摩擦力、剪切力和潮湿因素,以改善血液循环,有效地防治褥疮。显而易见,这种装置可以全面减少四种褥疮发病因素,效果突出,是最理想的装置。但是强大的气流易于带走体表的大量水分而影响体内水电解质平衡,同时其技术要求高,造价昂贵,不利推广。英国的“气垫床”与“悬浮床”基本相似,所不同的只是在气垫内喷出一股经过消毒的无菌高压气流,使患者悬空,强有力地抑制细菌感染,效果甚佳。中国上海 1988 年产“三马”喷气褥疮防治器属于不悬浮类型,它吸取英日喷气床的优点加以改进。构造简单,在充气垫上设有许多小孔不停地喷出洁净的空气,以减少机体受湿度和细菌侵袭。同时,气垫呈条状排列,有利缓解持久性压力。其优点是散放机体潮湿作用强,缺点是缓解持久性压力不足,但是造价低,有利推广。山西医疗器械研究所 1988 年研制的“褥疮防治装置”技术设计有所改进,采用交替变化气垫的压



力的方法,使机体受压部分交替地得到缓解,有利减少持久性压力和湿度,缺点是气垫呈横向排列,不利人体纵向较大血管的血液运行。

2. 充水床由于患者着床面积大、支持力大,而且床垫柔软,故解除久卧患者的持久性压力较好。近年美国加利福尼亚大学推出“充水床垫”,床垫内充满了有一定压力的水。使床垫具有较大的支撑力。充水床非常柔软,故能减轻长期卧病人的痛苦,并能使病人迅速恢复体力,同时垫内的水的温度可以调节,以保证冬暖夏凉。其缺点是由于床垫充水,故不易散失潮湿度。目前国内尚无此类产品报道,今后有必要加以研制。

3. 充泥床中国民间早有泥床的雏形。选用细砂置锅中热炒或置太阳下曝晒,以达消毒目的。将柔软的细砂垫于患者的身体下面可以有效地缓解对患者局部的持久性压力。其优点是经济实用,缺点是不够卫生。近年来英、日、德研制有充泥床,但是国内尚无报道。

4. 条板床此类产品丰富多彩。条板可选用木材、钢板或塑料板等。启动有人工操作、机电自动控制、电脑程控等多种。床面的条板呈横向排列或纵向排列。条板可以一条接一条地上下运动或奇数偶数交替上下运动,从而使患者身体的各个部位都有一段悬空,从而缓解局部的持久性压力并减少潮湿因素,可有效地防止褥疮的发生。该类产品结构简单、取材容易,效果可靠,造价低廉,有广泛的发展前途。近年来国内不断推出新产品。

1983年沈阳空军医院生产出“手摇式防褥疮床”,主要类型有:采用床板交替接触病人受压部位的方法,改善患者局部受压部位的血液循环,以防褥疮发生。启动由护士按时操纵手柄即可。该床虽然设计简单,但却开创了条板床的先例,具有重要意义。其缺点是仍由手工操作。

1988年广州生产的“可调式多浪康复床”属于机电型自动控制床。床板呈横向排列,床下有纵轴、偏心轮、导杆、调速电动装置等,启动时条板从床尾向前逐条上下移动,形成起伏的波浪,与生理曲线相吻合,使患者受压部位不断变换,大大减轻体重对局部的压力和湿度,从而防止褥疮的发生。

1989年南通研制的“高智能防褥疮床”床面设有24块横板,首用电脑程控,每10min落下1块板,使病人局部肢体轮流与床板形成间隔,解决了血液循环受阻的难点,以防止发生褥疮。其缺点改善受压部位的面积太小,只占1/24;每10min落下1块,需4h落完,已超过持续性压力2h易于发生组织损害的界线,不利于防治褥疮的发生。

1992年山东聊城研究“自动防褥疮床”已获国家专利,它是一种用于预防瘫痪病人长期卧床并发褥疮的自动防褥疮床。床头装上纵向排列的固定床排和活动床排,在床排的下部装有电机、蜗杆、蜗轮、凸轮轴、凸轮、链轮等,在电机上装有延时器,以电为动力。借助蜗轮、延时控制器等自动控制活动床排上下反复运动,使病人1/2着床部位交替悬空,大大减轻机体局部持久性压力和潮湿因素,从而防止并发褥疮。该床设计简单、性能稳定,经济实用,是高危褥疮病人不可多得的褥疮防治装置。

其他如按摩床、折叠床、翻身床,对褥疮病人虽有一定作用,但是按摩、翻身不慎易于损伤皮肤,折叠床易于产生剪切力,不适宜防治褥疮。

综上所述,褥疮防治装置的研制工作近代已有了很大发展,由简单机械到精密装置,由手工操作到自动化,为高危褥疮病人带来了福音。今后研究重点应是在吸收国内外先进经验的基础上,一是适用于广大人民。沿条板方向发展,设计简单、效果理想、经济实用、便于推广的新装置;二是吸取电脑程控技术,采用新材料、新方法,研制高效定时自动化控制的褥疮防治装置,适于经济富裕的病人;三是增设辅助设置,如大小便容器、痰盂、餐盘等。

#### 参考文献

- 1 许焕章,等. 医疗器械,1983,7:44
- 2 黄济宁. 国外医学(护理分册),1986,2:69

3 王维平,司徒尚泽,中国医药器械杂志,1988,4:350

4 蒋利康. 医学科普,1988,2:42

5 韦建华. 中国卫生信息报,1989,5:24

6 崔章信,刘征,盖玉荣. 实用新型专利公报,

92-CN2096986U

(山东聊城地区中医医院崔章信主任医师、盖玉荣高级工程师、崔复医师撰)

**创伤性休克研究进展** the advance of research in traumatic shock 创伤性休克是临床发现最早和研究观察较多的一种类型的休克,早在1743年法文版Henri Francois Le Dran's《来自枪伤经验的思考》的英译本即已采用“休克”这一专用名词,并认为“休克”是创伤后的进行性恶化,这表明早年对休克的认识是和创伤联系在一起的。其后,不少学者对创伤性休克进行了有关的研究,并就可能的发病机理在系统组织的水平上作了各种阐述。1899年,Crile首次描述了休克的实验研究,介绍了应用压力计和记纹鼓等生理仪器测量创伤反应的结果,认为静脉压的变化是决定性因素。1917年,Henderson进一步强调静脉回流的重要性,提出“静脉压是血液循环的支柱。外科医生所谓的休克,即由于这一支柱失效的缘故”。同年,Cannon说明创伤性休克起因于血量和血管容积之间的不协调,是循环血量的丢失和继发静脉回流衰竭,并称之为血液耗损。1930年,Bialock和Phemister根据各自的实验研究结果,排除了组织胺等毒性物质的主导作用而提出创伤性休克是由于大量血浆成分的丢失造成低血容量的观点,从而为临床应用静脉补液扩容防治创伤性休克提供了理论依据。18世纪以来,尽管对创伤性休克的研究不断深入,治疗方法不断改进,疗效逐步提高,但其确切的发病机理和其他类型休克一样,仍然没有完全阐明,患者病死率亦尚在10%以上。1970年以来,随着医学科学的飞速发展和研究手段的改进,国内外医务工作者对创伤性休克的发病机理和新的防治措施从亚细胞结构、分子水平方面进行了深入的研究探讨,发现了一些新的线索,取得了一些令人振奋的结果。这些研究涉及以下几个方面。

**休克因子对创伤性休克的影响和稳膜剂的作用** 1970年,Glenn与Lefler证实失血性休克患者的体液中存在一种抑制心肌作用的物质,称之为心肌抑制因子(MDF)。其后,陆续有资料报导MDF在创伤性休克等其他类型休克患者体液中亦同样存在,且除了MDF外,尚有心脏抑制物质、网状内皮抑制物质(RDS)、肿瘤坏死因子(TNF)和肠因子等多种休克因子,这些因子大多来源于组织蛋白的分解,这种分解,除了损伤区的组织细胞直接受损破碎外,尚与休克时溶酶体膜的稳定性降低、溶酶大量地进入细胞质引起细胞自溶有关。这些因子可促进创伤性休克的发生与发展。为减少休克因子的产生,一些稳膜剂的应用引起临床医生的重视,特别是糖皮质激素和抑肽酶及别嘌呤醇(aprotinin)等蛋白酶抑制剂在一些难治性创伤性休克的治疗中取得良好的效果。由于稳膜剂具有保护溶酶体膜和抑制蛋白分解的作用,所以在创伤性休克的治疗中已被一些学者推荐。

**前列腺素与创伤性休克** 1980年,Lefler等报道,在创伤性休克早期,血浆TXB<sub>2</sub>(凝血恶烷TXA<sub>2</sub>的代谢产物)增加,且其程度与休克严重程度相平行,应用消炎痛抑制前列腺素的生成或用人工合成的TXA<sub>2</sub>拮抗剂——PTA<sub>2</sub>可明显提高创伤性休克动物的生存率。所以,有人试用消炎痛、布洛芬、苯磺舒酮等药物防治创伤性休克,但其效果究属如何,尚待深入观察总结。TXA<sub>2</sub>的反作用物PGI<sub>2</sub>(前列环素)具有扩张血管和抑制血小板聚集的作用,此物已能人工合成,用于实验性创伤性休克和中毒性休克有明显的效果,但其半衰期较短,且价格昂贵,难以广泛使用。为此,一些学者已另觅新的药物来替代PGI<sub>2</sub>,其中较有前途的是6-酮-PGE<sub>1</sub>及PGI<sub>2</sub>合成促进剂(硝酸甘油和维生素E等)。

**自由基与自由基清除剂在创伤性休克中的意义** 在机体物质代谢过程中可以产生很多未配对价电子的自由基,诸如H<sup>•</sup>、OH<sup>•</sup>、ROO<sup>•</sup>及O<sub>2</sub><sup>-</sup>等,这些自由基,尤其是超氧阴离子自由基

O<sub>2</sub>·和OH<sup>-</sup>可使脂质过氧化而损害细胞膜、线粒体及DNA等细胞结构,造成极大的危害。1983年以来,有关自由基在损伤和休克发病过程中作用的研究报道日见增多,认为自由基是造成细胞损害的重要因素,因而提出应用超氧离子歧化酶(SOD)、维生素E、还原型谷胱甘肽(GSH)和别嘌呤醇、甘露醇等自由基清除剂和抗氧化剂来防治包括创伤性休克在内的各种休克,但其价值究竟如何,尚需进一步深入探讨。

**钙离子通道阻滞剂的抗休克作用** 当细胞或细胞膜受损时,钙泵作用障碍,Ca<sup>++</sup>即可从细胞外流入细胞内,一旦大量Ca<sup>++</sup>在细胞内积聚细胞即死亡。Bossou等人的实验研究表明,钙离子通道阻滞剂异搏定和硝苯吡啶、尼莫地平对缺血缺氧的组织细胞具有保护作用,对休克的实验治疗亦能提高患者生存率,其原因在于阻止钙内流,避免线粒体内Ca<sup>++</sup>的过度积聚,从而保护线粒体和细胞的功能。钙离子通道阻滞剂的临床实用价值和防治作用值得进一步研究。

**胰岛素抵抗和物质代谢紊乱** 胰岛素抵抗是严重创伤和创伤性休克代谢改变的重要征象,其确切的发病机理尚不十分清楚。由于胰岛素抵抗及肝脏氧化代谢氨基酸(AA)障碍,促使唯一能在肝外代谢的支链氨基酸(BCAA)大量消耗,造成血AA模式紊乱,蛋白合成减少,并使创伤性休克病人的糖和其他物质代谢均发生明显紊乱,从而导致能量供应不足,细胞发生能源危机,以致最后造成脏器功能衰竭。所以,解决胰岛素抵抗和纠正物质代谢紊乱已是迫切需要研究的重要课题。有资料报道应用复方乳酸钠山梨醇液作为创伤的扩容液体可避免血糖升高,其原因在于山梨醇可以不依赖胰岛素进入细胞,在脱氢酶作用下变成果糖,并在果糖或己糖激酶的作用下进入糖酵解途径供能。亦有人介绍应用ATP-MgCl<sub>2</sub>液静脉滴注,以及应用FDP(1,6-二磷酸果糖)与二氯醋酸,以启动细胞内能量代谢使物质代谢状况改善,网状内皮功能增强,对创伤性休克和脏器功能衰竭的治疗具有良好的效果。亦有人强调应用BCAA可改善蛋白质合成代谢,对阻止创伤性休克的发展和MOF(多器官功能衰竭)的发生具有一定的作用。

**654-52抗创伤性休克作用机理的研究** 中国学者在临床广泛应用654-2(山莨菪碱)的基础上,对其抗休克机理进行了深入的研究,大量的实验资料证实,654-2不仅对败血症休克有效,而且对致死性创伤性休克等其他各种类型休克亦同样有效。其抗休克作用不是单纯通过扩张血管,改善循环,而主要是在于稳定溶酶体膜,减少溶酶体释放和阻断M-胆碱能受体以及抑制TXA<sub>2</sub>生成,抑制血小板和白细胞聚集,从而直接保护缺血、缺氧细胞。因此,值得临床进一步探索应用。

**ICU(外科加强单元)的建立和临床监测** 为了提高严重创伤、休克等外科急救的成功率,国内外一些有条件的医疗单位均已先后建立ICU,在此种抢救中心,不仅可以及时而有效的救治患者,而且可以进行系统的监测观察,从而减少患者伤亡。ICU中的监测系统已包括血流动力学、血液流变学、体液代谢生化以及呼吸功能等各个方面,且这些监测可以在微电脑控制下连续进行。这些,无疑对提高诊疗水平起到促进作用。

创伤性休克的研究亦和其他类型休克的一样,同样经历了大体认识、系统定向和组织细胞水平等阶段而深入到亚细胞结构,并向分子水平发展,但尚处于广泛探讨的阶段,离完全阐明和根本解决尚有一定的距离。从发展的趋向看,通过分子化学途径阻断休克因子的活性介导以降低血管通透性,减少体液丢失和纠正细胞能源危机,恢复细胞动力学将是研究的重点。1983年,Ledingham欧洲休克学会年会曾提出3点结论性意见:一是休克的预防比治疗更重要;二是耽误时间将使病人丧生;三是不存在单一的灵丹妙药。成功的措施在于医务人员同心协力,坚持抢救。

**参考文献**

- 1 Glewn T M, Lefer A M. Am. J. physiol. 1970, 219: 1305
- 2 Sabiston D C. Davis-christopher Text Book of Surgery, Sa-

- unders W. B. Co. 1977, 11: 60
- 3 Lefer A M, et al. Pro. Natl. Acad. Sci. 1980, 77: 1706
- 4 Loegering D J. Pro. soc. Exp. Biol. Med. 1981, 166: 515
- 5 苏静怡. 国内外医学科学进展, 1985, 5: 46
- 6 Bossou S, et al. Circ. Shock. 1985, 16: 307
- 7 汪昌. 中级医刊, 1987, 22(2): 21
- 8 韩铁然. 中国急救医学, 1987, 7(2): 19
- 9 陆付耳. 中国急救医学, 1987, 7(6): 29
- 10 韩保民. 中级医刊, 1988, 23(4): 39

(安徽医科大学第一附属医院 陈国均 教授撰)

**烧伤救治与研究进展** the advance of treatment in

burns 近几年来,中国烧伤救治,研究工作发展迅速,取得不少新的成果。在临床救治水平方面仍处于国际领先地位,在基础理论研究方面亦大大缩短了与世界先进国家之间的距离,某些研究已赶上和接近国际先进水平,但就总体研究工作而言,尚有差距,仍需加紧努力。现就近几年来烧伤救治、研究发展情况作简要介绍。

**治愈率** 据1987年第1次中国烧伤外科学术会议总结,中国各地烧伤治愈率在82.81%~96.5%之间,平均在93%上下。1991年,解放军205医院报道对12606例烧伤病人统计分析,总治愈率达98.8%,但其中烧伤面积大于70%者258例、三度面积超过50%者339例的治愈率仍在50%~60%之间,若按LA<sub>50</sub>计算为92.68%,二度烧伤的LA<sub>50</sub>为79.12%,较既往有所提高。北京积水潭医院总结1957~1989年间收治的6549例新鲜烧伤病人,以烧伤指数计算LA<sub>50</sub>为68.18%,其中13岁以下儿童为65.79%、14~39岁为72.62%、40~59岁为59.57%,而60岁以上则降至19.55%。1991年304医院报道3765例烧伤,病死率为3.2%、LA<sub>50</sub>为84.7%,而国外报道病死率为16%、LA<sub>50</sub>为59%。另据洛阳医专附属医院报道,1981~1990年收治的4416例烧伤病人,共死亡224例,病死率为5.07%。虽然各家统计数字不一,但就总体而言,近年来中国烧伤病人的总治愈率已由既往的93%左右提高到96%上下,其中较为突出的是三度烧伤的LA<sub>50</sub>已从50%提高到接近70%,这反映了中国救治方法和救治水平的明显提高。但亦需清醒地看到,特大面积深度烧伤病人的治愈率仍然不高,同时,老年人烧伤的死亡率依然惊人,主要是感染问题尚未完全解决,以及对吸入性损伤和MOF仍无特效的治疗方法。上述大组病例的统计结果亦表明,主要死亡原因中感染、败血症仍占首位(40%~60%),其次是吸入性损伤(占25.3%)和MOF(约17%)。

**伤情判断** 多数仍采用中国通用的轻、中、重、特重4级分类标准,部分单位已应用烧伤指数分类,但均存在一定的缺陷。近年来,第一军医大学提出采用新烧伤指数(NBI)的分类方法,即: NBI = I度 × 0.1 + 浅II度 × 0.5 + 深II度 × 1.0 + III度 × 1.5,其总和即为NBI值,然后按10、20、50、70分级,但其临床应用价值究竟如何,尚待各家进一步分析验证。

**烧伤休克的防治** 既往认为通过静脉补液扩容已得到基本解决,但从大组病例的统计分析表明,烧伤休克病人的死亡率仍为10%~20%(较高者达18.26%和19.6%)。除感染外,烧伤休克与吸入性损伤同为烧伤病人死亡的第2原因。因此,近年来中国又开始着重于对烧伤休克的病理生理机理和防治方法进行进一步的研究,这些研究大致涉及3个方面:

1. 复苏方案的重新估价。烧伤休克病人复苏治疗,既往均根据Even's和Block以及parkland公式以静脉补液为主,但究竟孰优孰劣,意见并不统一。近年来,中国有一些新的认识,在补液量方面,广州第一军医大学提出按NBI × kg(体重) × 1.4 + 40 × kg(体重)的补液公式计算,这样,使成人尿量维持在30ml + NBI × kg(体重) × 0.01左右,可使病人平稳渡过休克期;中山医科大学通过26例烧伤面积70%~90%病人的回顾性分析,认为特大

面积烧伤的补液,应使尿量维持在80%~100%ml/h,病人才能不烦躁、不口渴;第二军医大学提出,伴有吸入性损伤的烧伤病人补液量需增加总量的13.5%,且在第1个8h内输完2/3;但不少单位通过实验研究和临床应用,认为采用高渗液复苏既可扩容、消肿,又可改善心脏舒张功能,使心脏收缩环和舒张环保持正常状态,因而主张推广应用;然而,第三军医大学的实验研究发现,高渗液复苏可促进血细胞在微循环中的凝集,不利于微循环的灌注,由此可见高渗液复苏仍然存在不可忽视的问题,必须引起注意。为此,第二军医大学在实验研究的基础上提出应用LSS(复方乳酸钠山梨醇液)、HAS-1[高张醋酸盐2号液(4.46±1.0ml/kg(体重)×1%BSA)]和中分子右旋糖酐合并高张盐液进行复苏,特别后者不仅疗效较好,而且“中右”可清除氧自由基H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>。综合上述资料,目前复苏补液的方案已趋向于采用胶体加高渗晶体的复合方案;在补液速度方面,多数主张在第1个8h内先补总量的2/3,且在第1个2h可快速补充到总量的1/2,其结果不仅病人复苏快而好,而且内脏功能障碍的发生率明显降低。这表明“先快后慢”的补液原则已进一步发展到“先快后慢,越早越快”。

2. 烧伤休克机理研究的新认识,有关烧伤休克病理生理变化的研究,涉及面广,并且在原有的基础上又有了新的发展,取得了一些新的认识。

(1)凝血机制及神经体液因子改变:①实验研究表明,BI>40者,凝血功能明显下降,其原因在于血小板和凝血物质包括凝血因子的减少。②中等度烧伤后,血小板数量和粘附性即显示下降,其原因可能与FDP(纤维蛋白降解物)有关。但TXA<sub>2</sub>却升高,而PGI<sub>2</sub>(6-酮PGF<sub>1a</sub>)则降低,两者比例失衡,这可能是造成微血管收缩、通透性增强和诱发血栓形成的重要因素。③内源性啡肽(包括内啡肽和强啡肽A等)及精氨酸AVP(抗利尿激素)伤后开始增高,到48h后下降至正常。当刺激内源性啡肽大量释放时,心血管功能受抑,死亡率明显增高;若抑制其释放,则死亡率降低,从而提示内源性啡肽对调控心血管反应具有重要作用。④皮质醇及皮质醇受体的变化:烧伤后应激,通常皮质醇分泌均增高,但皮质醇受体(GCR)则明显降低,两者的变化呈负相关。一旦皮质醇突然降低到正常水平以下,常提示病情凶险。⑤TNF(肿瘤坏死因子)的变化:烧伤后TNF即刻升高,此因子对微血管堵塞具有重要影响,若同时伴有LDH(乳酸脱氢酶)和BUN(血尿素氮)的增高,则揭示预后不良。⑥心钠素(ANF)变化:小面积烧伤,ANF无变化,但大面积烧伤则于24h后明显升高,且与尿量同步增长,唯肾小球和近曲小管的ANF受体在肾衰时可呈现不能与ANF结合,因而利尿、利钠效应下降,故肾衰时ANF的增高是受体障碍的结果。⑦尿检NE(去甲肾上腺素)/E(肾上腺素),发现两者比值的变化与病情密切相关,比值大则病情恶化。正常比值在1.212左右。⑧脂蛋白a(Lpa)及载脂蛋白AI、B(apoAI与apoB)于烧伤后均升高,第3天达高峰,且可持续数周。其升高与肝脏代谢功能有关。此类物质对心血管、脑血管变化和创伤及炎症的发展具有重要作用,是一种危险因子,可作为观察预后的敏感指标。⑨白细胞毒素(LX)具有细胞毒性,可造成肺泡上皮细胞和毛细血管内皮损害,是引起急性肺水肿的重要因素。严重烧伤后LX形成和释放增多,⑩氧自由基损害:多数报道测定SOD(歧化酶)和MDA(丙二醛)以间接了解体内自由基的变化,检测结果提示烧伤休克的发展过程中氧自由基和Lpo(脂质过氧化物)明显增高,从而导致细胞损伤而发生MOF。近年来亦有少数单位开始直接测定细胞内的自由基,可直接了解自由基与烧伤休克的关系。

(2)心肌酶谱和心功能变化,近年来,心肌酶谱及心功能变化与烧伤休克的关系已受到重视和进行了较为深入的研究。研究结果证实,严重烧伤后,EKB<sub>2</sub>(磷酸激酶及同工酶)、CK(磷酸肌酸激酶)、LDH及SGOT活性均明显升高,且LDH<sub>1</sub>/LDH<sub>2</sub>比值升高大于70%,EKB<sub>2</sub>/CK比值亦同样升高,至伤后7d以后才渐降低至正常;同时,心室收缩环和舒张环检测,显示舒张环缩

小。这些均表明,由于心肌缺氧和氧自由基等损伤因素造成心肌发生某些器质性损害、功能受损而导致血流动力学改变。无创检测PAWP和PVP等亦显示烧伤后明显增高而呈现肺血管阻力增大和左心顺应性降低、功能受损的情况。无创检测PAWP、PVP、PAR为监测烧伤病人心功能变化提供了新的简便的监护手段。

(3)改善烧伤休克患者微循环功能的研究:从实验研究中发现VIP(血管活性多肽)具有保护血管内皮细胞的作用;DMSO(二甲基亚砜)可降低微血管中的白细胞粘附性;中药粉防己碱可抑制LTB<sub>4</sub>(白三烯B<sub>4</sub>)的合成、释放,可阻断钙通道,降低细胞内钙水平,从而对防止细胞损伤和降低血管通透性具有明显疗效。另如中药川芎嗪对改善微循环亦有良好的作用。这些研究资料说明中草药在防治烧伤休克方面具有不可估量的发展前景,值得进一步探索研究。

烧伤感染与免疫功能变化 感染依然是当前烧伤病人死亡的主要原因,有些资料报道,败血症病人和创面脓毒症病人占总死亡病人的74.6%。因此,国内对烧伤感染的防治一直作为主要研究突破的方向,尽管迄今尚未完全突破,但从研究的结果看,焦点已逐渐集中到机体免疫功能这一基本环节。当前这方面的研究涉及到以下几个方面。

1. 研究致病菌的变化概况:(1)由于临床各种抗菌药物的广泛应用,通过抗菌药物自然筛选,使绿脓杆菌感染趋于下降,而肠球菌、真菌及机会菌(不动杆菌、变形杆菌、阴沟杆菌及沙雷氏杆菌等)的感染明显增多,需予注意。(2)临床耐药菌明显增多,其中MRSA(耐药金葡萄)达89.1%。耐药菌中有核遗传(DNA遗传)和分子R质粒传递(核外传递)两个途径,前者占28%,后者占72%。近年来,对R质粒的研究有很大进展,耐药质粒位于核外胞浆内,具有菌间传递性,临床可藉以判断同源性传染问题和研究解决R质粒的传递作用,以减少耐药菌。(3)医疗用品是交叉感染的主要途径,应引起临床重视。(4)咽部菌群检测可反映体内菌群变化和全身感染的进退。(5)痂下组织细菌定量时加作冰冻切片可防真菌感染之漏诊。(6)内源性感染是加重病情和致命的重要环节,其中下消化道是烧伤损害造成内源性感染的主要部位。在病态下,肠道犹如一个巨大的设有引流的脓肿。

2. 抗菌药物和治疗概念的研究:(1)抗生素在烧伤病人体内的药代动力学研究是近年来烧伤研究的重大进展,据第三军医大学等单位的研究结果,发现复达欣、先锋必素等抗生素在烧伤病人体内的半衰期明显延长,而不是缩短,因此,临床用药间隔时间必需重新考虑,不能再沿用既往的成规,以免造成药物蓄积中毒。(2)生态制剂如IBS(经诱导的枯草杆菌)用于创面治疗,取得良好的效果,这表明生态疗法在国内已经起步。(3)菌、毒并重、并治的观点已被肯定,这对整个感染防治概念将产生更新的作用。为解决ETM(内毒素血症),已研究CGL(内毒素核心单抗)和中药连翘素等的的作用,并将在临床逐步推广应用。

3. 烧伤后免疫功能变化的研究,烧伤后机体易感性增高,归根到底的根本原因是免疫抑制。有关这方面的研究已不断深入。(1)烧伤病人免疫功能障碍的原因有5个:①肠源性毒素的影响;②超高代谢使细胞物质代谢动力学异常,免疫功能难以恢复;③补体降解产物C<sub>3</sub>b、C<sub>3</sub>c、C<sub>3</sub>d使免疫抑制;④创面组织分解产生免疫抑制物;⑤PMN(白细胞)产生氧自由基及M/∅系统产生抑制介质,从而面使TS/TH(抑制T细胞/辅助T细胞)比值升高、淋巴因子(IL-2即白介素2等)产生减少。(2)调节改善免疫功能的研究:这方面研究包括两种途径,即①调节主动免疫功能:a. 高蛋白营养治疗可使治疗组100%成活,而仅给一般营养则只有56%存活。说明高蛋白营养治疗的作用。b. 精氨酸虽属半必需氨基酸,若应用过多,可抑制免疫功能,而支链氨基酸(BCAA)和谷氨酰胺则对改善蛋白质代谢、调控免疫功能具有重要作用。c. 不饱和脂肪酸(包括脂油酸、油酸、亚油酸和亚麻酸)是必需脂肪酸,其中亚油酸/亚麻酸需保持一定的比例(5~6:1),若亚油酸增多、比值增大则可发生免疫抑制,反之则免疫功

能增强,因此,增加亚麻酸营养可提高免疫功能。d. 中药虎杖、蒲公英、野菊花、生地、白花蛇舌草等具有明显改善免疫功能的作用,特别是复方配伍更为有效。②被动免疫制剂:主要是免疫血浆及单克隆抗体,包括抗内毒素血浆与抗类脂质 A 单克隆抗体的制备和应用有了新的进展,但使用要早,用量要大。其次是胸腺素等亦有应用报道

**创面处理** 一直是大家瞩目的重点,除了异体皮的灭活处理、微粒皮的应用和体外上皮细胞培养等研究仍在深入进行外,近年来,以下几个方面有了一些新的发展。

1. 创面外用中药又开始被注意,特别是中药抗菌消炎、活血生肌、止痛收敛等独特的综合作用,具有不可比拟的优点。

2. 异体皮的保存,除了玻璃化速冻外,已发现应用小红参醌和 4℃ 保存液可在 4℃ 温度下较长期保存皮肤的活力。应用雷公藤处理异体皮可延长成活时间,减弱排异反应。另有报道 DCs 单抗(树突状细胞单抗)浸泡异体皮亦可抗排斥作用。

3. 将断层自体皮分为 2 层,并将其真皮层剪成微粒,可无方向性,在异体皮的保护下成活良好,因而可扩大皮源,加快消灭创面的速度,对节省皮源,增加自体皮供应具有重要价值。

#### 烧伤营养

1. 烧伤超高代谢的产生与体液介质(激素、儿茶酚胺、细胞因子-IL<sub>1</sub>、IL<sub>6</sub> 和 TNF、 $\gamma$ -干扰素以及脂类物质 PAF-血小板活化因子、PGE<sub>2</sub> 和 LT B<sub>2</sub> 等)有关,为此,除阻断上述这些介质的产生和作用外,据研究,TBA(甲磺丁脲)有改善超高代谢和胰岛素拮抗以及降低胰高糖素的作用。同时,应用高文链氨基酸和谷氨酰胺可减轻氮平衡。

2. 维生素 A、维生素 E、维生素 D 以及微量元素对烧伤病人的作用亦已引起重视。目前已有水溶性的和脂溶性的维生素制剂(水乐维他和维他利匹特)以及微量元素复合剂(安达美)的商品供应,提供静脉营养应用。

3. 在营养补充标准方面有报道认为同时输糖与氨基酸(AA)的节氮效果最好,其比例可高达 12.56~1.465:1。通常宜脂肪占总热量的 15%~25%、蛋白质占 20%~25%、其余为碳水化合物。但亦有介绍应用 0.13~0.2 $\mu$ m 颗粒的脂肪乳剂达总能量的 50% 未见肝脂肪变性的;相反,单纯应用葡萄糖和蛋白质者却出现肝脏脂肪变性,因而主张大量增加脂肪乳剂和减少糖的用量。至于热量的计算,多数仍按 Corrieri 公式,但部分报道认为此公式估计过高,因此,第三军医大学提出按照总热量=1000 $\times$ 体表面积(m<sup>2</sup>)+25 $\times$ THSA 的计算方法,认为此式对改善烧伤病人营养较为合适。

**呼吸道吸入性损伤** 它也是烧伤病人致死的重要原因,当前尚无特效救治方法。据近年来一些研究报道,在以下几方面有了一些新的认识。(1)统一命名为吸入性损伤,而不再称呼吸道烧伤。(2)分类标准不再按解剖部位区分,而以纤维支气管镜镜检所见分为 I、II、III 度。(3)早作预防性气管切开,并采用纤维支气管镜作肺段灌洗以保证气道通畅。(4)吸入性损伤后,抗休克补液总量需增加 13%,而不是减少。(5)第三军医大报道,中药粉防己碱具有明显治疗吸入性损伤损害的作用。

**磷烧伤解毒的研究** 近年来有资料报道,10%葡萄糖钙静脉注射可形成磷酸钙而拮抗磷的毒性,起到解毒作用。至于磷烧伤创面处理,仍然以早期切削痂为救治的主要方法。国内最大的磷烧伤救治成功面积为 60/80%。

#### 参考文献

- 1 史济湘. 国内外医学科学进展, 1981, 1: 156
- 2 郭振荣. 实用外科杂志, 1991, 11(7): 349
- 3 中华烧伤外科学会, 中国第 3 届烧伤外科学术交流会议论文集, 1991, 1~209
- 4 路卫, 等. 实用烧伤、整复外科杂志, 1993, 5(3): 1

(安徽医科大学第一附属医院烧伤外科 陈国钧 教授撰)

**烧伤后的多系统器官衰竭** multiple system organ failure(MSOF) 当前,在导致大面积严重烧伤病人死亡原因中,多系统器官衰竭(MSOF)已较突出,其发病率约为 2.8%,而病死率则高达 50%~100%。

MSOF 的出现有其历史条件。过去复苏质量不高,多数严重烧伤伤员伤后早期即死于休克、肾衰或呼吸衰竭等,主要是单器官衰竭。但随着复苏技术的进步,使许多重伤员的生命得以延长,因而有较多的机会在稍晚阶段表现出 MSOF。因此,MSOF 是当今创伤外科面临的新课题,故也被称为 70 年代综合征。

MSOF 成因十分复杂,目前倾向于接受“免疫-炎症反应”学说。近年的研究资料证明,许多炎症反应的产物,如氧自由基、白介素、肿瘤坏死因子、血小板活化因子、 $\gamma$ 干扰素、血栓素等均是参与 MSOF 形成的重要介质。鉴于体液介质的重要性,故又有人称 MSOF 为“介质病”。

既然 MSOF 的发生是以免疫炎症反应为基础,必然会具有许多不同于其它器官衰竭的临床特征,突出的表现是高动力型循环和高代谢。由于不同原因所致的器官衰竭在器官表现上并无特异之处,因此,仅以器官衰竭标准诊断 MSOF 是不充分的,而必须同时获得全身炎症反应即高代谢、高动力循环的证据。由直接创伤造成的器官损害或伤员进入临终时的衰竭表现,均不应是定义中的 MSOF。

烧伤后诱发“免疫-炎症反应”有两个主要环节,一是创伤应激和休克,二是严重感染。既往过于强调致病因子和种类,但后来已确认机体的反应更重要。创伤和感染虽是两类不同的致病因素,但机体对二者的反应却本质相似,均可产生全身性的剧烈的免疫炎症反应。

由于烧伤休克和感染在诱发 MSOF 的突出作用,使复苏和控制感染成为预防 MSOF 的关键。休克、补体-吞噬细胞激活,炎性介质释放、缺血-再灌注等一系列烧伤后的病理变化可在数小时内便造成组织细胞损伤。但这时并无临床可检测到的器官损害证明它为“休克器官”。此后,器官衰竭出现与否将取决于烧伤程度、机体反应程度和复苏是否得力。及时和满意的复苏可以降低器官衰竭的风险,否则 3~4d 内将导致“早发型 MSOF”。较新的复苏理论强调从细胞水平衡量复苏效果,成功的复苏应能保证足够的氧输送(DO<sub>2</sub>),并使外周有效地利用氧。除了补充有效循环血量之外,可能还需要某些药物治疗,例如抗氧化剂,使抗休克治疗更臻完善。

伤后 1 周左右,感染即成为主要威胁,与伤后早期的“单相打击”不同,感染造成细菌和细菌毒素对机体的持续侵袭,是为“多相”或连续打击。因此,感染较烧伤具有发生 MSOF 的更大风险。伤面是主要的感染源。因此必须及早切(削)除烧伤坏死组织,有效地覆盖伤面,并采取保护措施使残余的伤面不发生感染。烧伤后肠道粘膜屏障极易损伤,使肠道成为重要的内源性感染源,甚至有学者认为胃肠是 MSOF 的“始动器官”。目前十分强调烧伤后对胃肠道及其粘膜屏障的保护,包括争取尽可能早期经胃肠道摄食,在静脉营养液或口服营养液中注意添加粘膜上皮细胞所需营养物质,如谷氨酰胺等。但酮体和短链脂肪酸为结肠上皮细胞所必需,而且只能直接从肠腔中摄取利用,因此静脉营养液无法完全取代经胃肠道摄食。防止肠细菌移位的另一措施是注意维持肠道菌群的微生态平衡,避免菌群紊乱和某些致病菌的优势生长。为此,应慎用口服的或主要经肠道排泄的广谱的或有抗厌氧菌活性的抗生素。

器官支持是目前救治 MSOF 病人的主要方法,其中最重要的是循环支持、呼吸支持和代谢支持。循环支持的原则和方法与复苏是一样的,即确保足够的氧输送和外周有效的氧利用,循环治疗的所有设计都应围绕这个目的进行。为维持较高的心排血量和外周氧耗,有时需要使用正性肌力活性药物和血管活性药物。但首先要保证足够的液体容量,而临床上对危重病员的容量需要往往估计偏低。由于炎症反应,使大量液体向细胞内和组织间隙转移。此外,由于交感张力增加使心血管顺应性下降,因此,中心

静脉压(CVP)、肺动脉嵌顿压(PAWP)等所谓左心、右心的前负荷指标在这种情况下变得相当不可靠,即数值可能正常甚至偏高而实际容量不足。如果运用这些指标指导输液,其作用应当是衡量心脏接受容量负荷的潜力,例如快速输入一定量的液体的同时,测CVP的变化并且需要动态地比较和观察,孤立的数据的意义相当有限。

MSOF病人最早的临床表现通常为呼吸衰竭,因此对MSOF病人几乎毫无例外地需要给予呼吸支持。机械通气是呼吸支持强有力的工具,但同时必须十分注意呼吸道的管理,有时呼吸道感染会成为伤员致死性的威胁。使用呼气终末正压呼吸(PEEP)应注意其对循环的负性影响,一般不应超过0.98kPa。应该十分明确,呼吸支持的目的是不是追求最高血氧分压(PaO<sub>2</sub>),而是获取最恰当的氧输送。为此,要全面顾及正压通气和PEEP对血气和心排血量的影响,不能让血气改善带来的好处被心排血量下降所抵消。

对MSOF的代谢支持要注意这种病员的两个代谢特点:一是强制性的代谢,并不能由减少活动而降低;二是耗能途径异常,对糖利用降低,而对蛋白质的消耗增加,此与单纯的饥饿状态根本不同。因此,标准的高营养液不适用于MSOF,不但总的能量要增加,而且能源基质也要调整,即降低蔗糖的含量,增加氮源含量,使非蛋白热量与氮之比降低至100:1。

虽然近年来各种支持手段已经相当完善,但MSOF病员的预后并未取得实质性改善。因为支持治疗在本质上只是减轻MSOF损害的生理影响,延长病员的生命,但不能有效地遏制MSOF的形成和发展。支持治疗的意义在于为治疗基础疾病(修复烧伤、控制感染)赢得时间,后者是决定预后的主要因素。基于对MSOF的理解,联合采用抗炎治疗有可能取得较单纯的支持治疗更满意的效果。对此,迄今已有抗氧化剂、环氧化酶抑制剂、脂氧化酶抑制剂、TXA<sub>2</sub>合成酶抑制剂、血小板活化因子拮抗剂、肿瘤坏死因子单克隆抗体等一系列抗炎症药物的使用研究报告,并取得一些令人瞩目的进展。但目前抗炎治疗还不成熟,在其成为可供临床常规推荐的方法前,一些问题还有待解决。如在运用这些药物阻断炎症介质有害反应的同时,也可能削弱有益的免疫功能。此外,仅就目前所知,参与MSOF的体液介质至少数十种,而新的介质还可能继续发现,面对数目如此庞大的介质使用高度特异的拮抗剂,意味着伤员可能同时需要数十种治疗,这是难以想象的。可见,欲取得治疗MSOF突破性的进展还需要做很多研究工作。

#### 参考文献

- 1 刘世恒,盛志勇,等.中华医学杂志,1983,63(8):518
- 2 Sheng Z Y, Dong Y L, Wang X H, J. Trauma, 1992, 32(2): 92
- 3 Michie H R, Wilmore D W. Arch Surg, 1990, 125: 531
- 4 Deitch E A. Ann A Surg, 1992, 216: 117
- 5 Ghosh S. Crit Care Med, 1993, 21: 519

(解放军三〇四医院创伤中心林洪远硕士、盛志勇教授撰)

### 神经外科学 neurology surgery

以外科手术为主要方式来诊断、治疗与研究中枢神经系统脑和脊髓、植物神经系统和周围神经疾病的一门临床医学专科。在外科学领域中神经外科是一门较年轻的分支,但颅脑手术的开展却可以追溯到希腊希波克拉底(Hippocrates)时代。当时关于颅骨钻孔技术已有详细介绍。近代神经外科是19世纪在麻醉、无菌和抗菌技术及脑功能定位学说(Fritsch & Hitzig, 1870)出现后才得以发展。1897年,Oppenheim首先应用X线摄片诊断垂体肿瘤,随后一些国家的外科医师如Horsley等先后从事一些神经系统疾病的手术治疗(如肿瘤、癫痫、三叉神经痛等),为神经外科的发展奠定了基础。20世纪后,Cushing、Dandy、Olivecrona等先后对开展神经外科手术和建立专科作出了贡献。前苏联在1926年首先在上世界上创立第1个外科神经病理研究所,以后各国也有相应的研究机构构

立,为神经外科的发展开创更有利的条件。在中国,于1932年在北京协和医院一度开展过。神经外科1949年新中国成立后才真正在天津、上海、北京及沈阳等地先后开展起神经外科工作。1960年在北京建立起中国第1所神经外科研究所,目前已迁址天坛医院,床位、设备仪器的配备、分科与研究室的齐全均属国际第一流。此外,天津、上海及合肥等地也相继成立研究所,在为全国培训专科医生与科研工作方面均作出卓越的成绩。

神经外科的发展依赖于工业技术的发展。近20余年来由于电子计算机技术、光学仪器、塑料制品的不断改进,超声、CT、MRI及激光等诊治设备的引入,为神经外科在诊断与治疗方面开创了一个崭新的前景。

#### 诊断方面

1. 脑室和气脑造影术:1918年、1919年,Dandy先后发明了脑室和气脑造影术。该技术系经脑室穿刺或腰椎穿刺将气体注入脑室或经脊髓蛛网膜下腔注入气体而使其上升进入脑室、髓池及脑蛛网膜下腔,经X线摄片显影,现在已由碘油进而由水溶性碘剂及非离子化碘水等阳性造影剂替代气体,显影对比度更清楚,副作用更少,利于定位诊断。

2. 脑血管造影术:1927年Moniz首先创用,系将造影剂直接注入颈动脉,同时摄X线片,可以获得颅内血管行走与分布图象,根据血管形态、位置有无改变、分布有无异常等得以对脑部病变作出定位的及可能的定性诊断,尤其对于血管丰富的肿瘤及脑血管疾病(如颅内动脉瘤、动静脉畸形等)更具价值。其方法已从直接切开、直接穿刺颈动脉,进而发展到经腋动脉等穿刺或插管作全脑血管或半脑血管造影。1951年,Bierman首先介绍经股动脉插导管作脑血管系选择性血管造影,现在已发展到数字减影血管造影(DSA),这是一种常规血管造影结合电子计算机处理的新检查方法。X线资料被输入计算机转换成数字形式,再经强化与减影等处理后再成像,可以清晰地显示单纯的血管系统影象。

3. 脑生物电检查:1929年Berger首先创用脑电图(记录脑皮层生物电活动),迄今它仍为神经科重要的脑功能检查项目。随着电子计算机的发展,现已能对脑电信号作各种2次分析处理而推出具有广泛领域的定量脑电图(QEEG),如脑电频率分析、脑电地形图(CET)、压缩阵谱及统计差异图等。目前CET已广泛应用于大脑疾患的早期诊断。其原理是将脑电信号输入计算机的模/数转换器中,转换成一种以不同颜色化或数值化表示出灰度等级的图象,具定量和定位地显示类似二维平面CT图象,使功能与形态变化有机地结合起来,能直观地对大脑机能进行评价。脑电图是记录大脑皮层自觉的电位活动。Dawson(1947)首先介绍的诱发电位(EP)是中枢神经系统感受外来的或内生的刺激过程中产生的生物电活动。这种电位活动经过电子计算机处理,可以从背景脑波中抽取出来加以分析计算并以波型表示,现已发展有体感、视觉和听觉脑干诱发电位,诱发电位能较客观地检出感觉系统的功能异常。

4. 颅脑超声检查:1956年,Leksell首先发现颅外超声探测可以无创地确定中线回声波有无偏移以诊断一侧大脑半球有无占位病变这一方法,被称为A型超声检查。1963年,Vleiger首先用B超经婴儿前囟作颅内病变检查。80年代初,Shkolink等以高分辨能力的实时扇形超声扫描仪通过骨窗在手术中作病变定位检查并予以治疗。B超扫描在术中可指导手术定位及治疗方式和用于术后复查,对婴儿可无创地经前囟探测颅内病变。其不足之处是显影不如CT清楚。经颅超声多普勒(TCD),系1982年Aaslid首先创用,它可无创地通过头颅自然孔或颅骨鳞部相对薄的部位,检查整个脑基底主要动脉的血流,从而可以诊断有无血管狭窄、闭塞或动静脉畸形等;还可为颅内动脉瘤患者选择治疗方法和术中监测,并有可能作测量局部脑血流(CBF)之用。

5. X线CT:它是1969年Hounsfield首先设计,经Ambrose应用于临床的。CT是用高度准直的X线束围绕身体某一部分作断面扫描,同时由高灵敏探测器记录各种组织吸收(或衰减)系数的大量信息,通过电子计算机模/数转换、矩阵排列,再数/模转

换还原成灰梯度不同的图象,显示出横断面解剖结构,得以无创地作出诊断。

6. PET 和 SPECT: 正电子发射扫描(PET)由 Sokoloff 首先应用于动物实验。其原理是给病人注入一种标记某种正电子发射体制剂,正电子被细胞吸收、积聚,其与细胞内电子相撞产生能发射 $\gamma$ 射线的光子,经计数机检测 $\gamma$ 射线,并累积经计算机处理重建放射剂分布图象,能客观显示脑结构与功能图象。单光子发射计算机断层扫描(SPECT)是以断层方法探测注入人体放射性核素浓度变化,即正常与病变脑组织吸收或浓集的差异,能反映脑组织形态变化与脑功能改变的图象重建,可显示三维断面。SPECT 优于 CT,能及早发现脑循环障碍。

7. 磁共振成像(MRI): 系 1946 年 Bloch 和 Purcell 发明,80 年代始应用于临床,其原理与 X-CT 不同,系测定组织中经外磁场作用特定频率射频脉冲激发过程中运动质子的密度差而成像。它可三维成像,反映组织结构和生化变化,且骨伪迹少,因此对中线、后颅凹、脊髓的病变显示较 X-CT 为清楚。

#### 治疗方面

1. 显微神经外科手术: 1962 年 Kurze 和 Doyle 首先应用,随着颅内显微解剖技术的深入研究,手术显微镜及显微手术器械的不断改进及双极电凝的应用,尚可结合超声吸引器及激光手术刀的应用,使显微神经外科手术得以迅速发展,对手术难度大的病变能以在保留神经功能良好和周围损伤轻微的情况下使病变部位得到全切或处理,提高了疗效,降低了死亡率或致残率。

2. 立体定向放射外科技术: 60 年代 Leksell 应用于临床。其原理是利用立体定向方法,选定靶点,通过特制的具有 201 孔道的防护头盔,将窄束电离射线( $\gamma$ -射线)通过这些孔道精确聚焦于靶点,大剂量地产生局灶性破坏而达到治疗目的。其不足之处为破坏有效直径仅 20~30mm,且价格昂贵。

3. 介入性放射学或血管内神经外科技术: 系利用导管经血管向病变部注入栓塞物、溶栓剂,插入可扩张的或可脱离的球囊导管,注入肿瘤化疗药物等方法治疗相应的各种疾病,如动静脉畸形、动脉瘤、脑膜瘤术前栓塞、动脉狭窄或痉挛、胶质瘤化疗等。

为了进一步发展神经外科的工作,需要不断深入与扩大其领域,亦即应有新的分支或分科不断形成与发展,如下述分科应有远见地研究开发: (1) 立体定向和功能神经外科技术: 随着立体定向技术的发展,目前在颅内选择任何靶点均可准确定位而中的,对许多功能性的及器质性的疾病均可利用其原理制造毁损灶,进行慢性刺激、胎脑组织移植、活检、内外放疗,处理血管病变,应用内窥镜作深部手术及尽可能地在手术同时进行脑功能研究等等。(2) 血管神经外科技术: 包括用显微手术方法治疗某些脑血管疾病及开展血管内神经外科研究工作,以介入法插导管经血管进行各种治疗。(3) 实验性神经外科技术。(4) 显微神经外科技术。

#### 参考文献

- 1 Dandy W E. W. F. Prior Comp Inc, 1969, 12: 6~15
- 2 史玉泉, 中国医学百科全书(神经外科), 上海: 上海科学技术出版社, 1984, 1~7
- 3 赵雅度, 中华神经外科杂志, 1986, 2(3): 193~195
- 4 王宜崇, 等, 中华神经外科杂志, 1987, 3(3): 141~143
- 5 孙波, 等, 中华神经外科杂志, 1987, 3(4): 207~210
- 6 潘映福, 临床诱发电位学, 北京: 人民卫生出版社, 1988, 1~9
- 7 凌锋, 等, 中华神经外科杂志, 1988, 4(1): 4~7
- 8 陈江, 国外医学(神经病学、神经外科学分册), 1989, 16(3): 126~128
- 9 凌锋, 介入性神经放射学, 北京: 人民卫生出版社, 1991, 1~45
- 10 许荣家, 刘寿之, 国外医学(神经病学、神经外科学分册), 1991, 17(2): 60~630

(安徽医科大学第一附属医院杨次文撰)

## 显微神经外科现状 present situation of the

micro-neurosurgery 显微神经外科是神经外科的重大发展。由于手术显微镜的立体放大和良好照明、灵活的头架、双极电凝器等显微外科器械的应用,使神经外科手术疗效大为提高,而且开展了过去所不能做的一些手术。自 60 年代以来,神经外科显微手术已在神经外科各个方面广泛应用,而且神经解剖、实验性神经外科也广泛应用显微外科技术。

#### 脑血管疾病

1. 动脉瘤。显微外科技术改善了对病变区的显露,只需做小骨瓣就能进行动脉瘤手术,在显微镜下可清晰显示组织、动脉瘤及其周围的重要结构,能在直视下锐性分离动脉瘤和切割周围的蛛网膜及粘连,准确地夹闭动脉瘤颈,避免肉眼手术时的盲目钝性分离,从而减少动脉瘤破裂、载瘤动脉发生狭窄和痉挛,提高手术疗效。Yasargil 报告 373 例,手术死亡率为 1.9%,病残率也明显下降。

2. 动静脉畸形。应用显微技术切除动静脉畸形,可准确辨认、游离和控制畸形血管的输入动脉和输出动脉,能正确区别病变组织与正常组织,而且适用于深部的或重要结构部位的动静脉畸形的切除。近年来激光显微手术装置又应用于动静脉畸形切除,大大提高了疗效。

3. 缺血性脑血管病。自 1967 年 Yasargil 及 Donaphy 先后报道应用颞浅动脉-大脑中动脉吻合术治疗缺血性脑血管病后,已广泛应用搭桥手术治疗缺血性血管病变。

4. 高血压脑出血。对壳核出血者,有人主张超早期手术,用显微手术从侧裂进入清除血肿,取得良好效果,病死率也降低。

#### 颅内肿瘤

1. 鞍区肿瘤。目前多采用额下入路,显微镜下先行囊内切除,然后游离囊壁或切除肿瘤,而且全切除率高,病人死亡率下降。朱贤立等报告显微手术全切除颅咽管瘤 28 例,手术死亡率为 4%。限于鞍内的垂体腺瘤,取经蝶入路,在 X 线电视监视下进行手术;对蝶窦气化不良者用磨钻协助也可经蝶入路。日前对较大的垂体瘤,也经蝶入路以显微手术切除肿瘤。

2. 听神经瘤。手术入路较多,但显微手术切除听神经瘤不仅可全切除,而且有保留面神经、减少对小脑、脑干的损伤等优点;若面神经断裂,还可进行吻合,已显示出其优点。

3. 脑室内(包括第 3 脑室)肿瘤。在应用显微手术时,可减少在分离肿瘤时损伤周围组织,还能行全切除。治疗第 3 脑室后部肿瘤,也有同上优点。

4. 其他肿瘤。脑膜瘤的显微手术,疗效提高,病人死亡率降低。对功能区及深部肿瘤者在显微镜下手术,由于减少周围组织的损伤,生存质量明显提高。美国 Kelly 把 CO<sub>2</sub> 激光、手术显微镜、CT 或 MRI 立体定向及计算机连为一体,成功地用于脑瘤的立体定向汽化切除,取得较好效果。

脊髓疾病 脊髓肿瘤(脊髓瘤、神经纤维瘤)、髓内肿瘤及血管畸形,均可用显微技术切除,而且不损伤或很少损伤正常组织。

颅神经及周围神经痛 如三叉神经痛、舌咽神经痛,面肌抽搐均为血管压迫引起,1977 年, Jannetta 首先报告显微血管减压治疗面肌痉挛、三叉神经痛获得成功,现已广泛应用该法,并取得良好效果,对顽固性耳鸣、美尼尔氏病患者,在显微镜下选择性切断耳蜗神经或前庭神经,或解除血管对神经的压迫而治愈,周围神经吻合、移植,均可在显微镜下手术,获得较好效果。

先天性疾病及其他: 先天性小脑扁髓体下疝畸形、脊髓空洞症、脊髓膨出、脊柱裂等均可采用显微外科手术治疗。

近年来又出现激光手术刀、CusA 与显微镜配合甚至与 MRI 或 CT 立体定向及计算机联为一体应用于神经外科各个方面,并取得较好疗效。

#### 参考文献

- 1 Jannetta P J, et al. J Neurosurg., 1977, 47: 321
- 2 周良辅, 国外医学(神经病学、神经外科学分册), 1980, 7(3):

134

- 3 Alksne J F. Am. J. Surg, 1980, 140: 156
- 4 Taarshoj P. J Neurosurg, 1982, 57: 14
- 5 陈明振. 中华神经外科杂志, 1988, 4(4): 219
- 6 陈伯卿. 国外医学(神经病学、神经外科学分册), 1989, 16(2): 79
- 7 朱贤立, 等. 中华神经外科杂志, 1992, 8(1): 11

(安徽医科大学第一附属医院神经外科李汉杰教授撰)

**脊髓损伤的实验研究** experimental study of spinal cord injuries 脊髓损伤是一种比较常见的严重创伤,常导致终生瘫痪并引起各种并发症甚至死亡。主要发生于跳水、体操、技巧等项目。尽管早在几千年前就有关于脊髓损伤的记载,但迄今为止人类对其常常处于束手无策的境地。

1911年,阿伦(Allen)设计了重量打击伤模型并将其用于脊髓损伤的实验研究,即从一定高度下落已知重量的重物对暴露的脊髓施行打击,并采用重量与高度的乘积——克厘米力(gcf)对损伤程度定量,重量与高度的不同组合可造成不同程度的实验性脊髓损伤。此后,又相继有人设计了其他几种模型,如挤压伤、挫伤、切割横断伤、化学伤模型等,但目前应用最为广泛的仍为打击伤模型。在实验模型方面所存在的问题是现有模型尚无法准确地控制脊髓损伤的范围和程度,而临床上大多数脊髓损伤均由脊柱的骨折脱位所致,不仅脊髓组织发生机械变形,而且脊髓前后动脉也受到损伤,因此模型与临床情形实际上并不完全相符。

尽管各家所采用的动物模型多不相同,所观察到的组织病理学改变却较为一致。最早的病理改变发生在中央灰质周围,包括局灶性出血和低灌注,并逐渐向四周发展。受严重打击伤后的前5min,镜下观并无明显的一致异常改变。15min后可见到中央灰质的小血管出现微小破裂,电解质漏入血管周围间隙。30min内中央灰质内出血逐渐明显,神经元成分也有明显改变。由伤后30min至2h,神经元和胶质细胞发生早期坏死。与此形成鲜明对照的是白质在受伤后早期常无明显异常改变,其血流可持续1~2h。伤后4~6h几乎所有灰质及附近的白质都出现坏死,1~2d内这些病理改变逐渐扩大到大部分白质。1个月后,脊髓中央部有炎细胞和巨噬细胞浸润,并发生囊性改变,白质中则有胶质细胞增生和轴突末端球形团的形成。4个月时,脊髓中央可见非常明显的空腔,硬膜和蛛网膜均发生纤维化并常与脊髓粘连,多数白质已为胶质瘢痕所替代。如损伤不严重,白质的改变则将比较局限。

大量事实证明,外伤性脊髓损伤后除在早期因机械暴力而产生形态学改变外,还会引起一系列的继发病理过程而导致不可逆损害。关于继发性损伤的概念最早由阿伦(Allen)于1911年提出,主要指脊髓遭受原发损伤后数分钟至数月内的一系列病理变化。他认为,原发性脊髓损伤可产生具有破坏作用的生物化学因子,这些因子的释放或激活将导致脊髓的进一步损害。这一理论目前已为许多研究所证实,而对脊髓继发性病理损伤的机理亦有多种学说。

脊髓损伤后仅5min,灰质细胞外 $Ca^{2+}$ 浓度即迅速下降,3~4h白质损伤区 $Ca^{2+}$ 可稍有回升,而在损伤区的邻近节段可恢复正常。一些学者认为, $Ca^{2+}$ 由细胞外向细胞内流动是引起细胞死亡及继发性损伤的重要原因。其理由是:(1)细胞膜损伤后如有 $Ca^{2+}$ 存在细胞将迅速死亡,反之则无;(2)脊髓损伤后组织 $Ca^{2+}$ 总量急剧增加;(3)脊髓损伤后30min内轴突内可发现 $Ca^{2+}$ 结晶,即所谓轴突内钙化;(4) $Ca^{2+}$ 浓度增加可使脊髓组织产生类似脊髓损伤的病理变化;(5)对脊髓损伤治疗有效与细胞外 $Ca^{2+}$ 浓度有显著恢复有关;(6)钙通道阻滞剂治疗脊髓损伤有效。

脊髓损伤急性期产生的自由基被认为是引起继发性损伤的又一重要因素。由于自由基的大量产生可导致脊髓组织发生脂质过氧化,而脊髓脂类含量又极为丰富,对脂质过氧化反应极为敏感,很容易产生形态与功能方面的明显改变。其主要证据有:(1)

多价不饱和脂肪酸过氧化产物增加;(2)胆固醇减少与胆固醇过氧化产物出现;(3)鸟氨酸环化酶的激活与环鸟氨酸增加;(4)组织中抗氧化剂水平降低;(5)磷脂膜上重要酶系统的抑制。有研究发现 $Ca^{2+}$ 能使脂质过氧化反应引起的细胞膜结构与功能损害进一步加重,而脂质过氧化反应也可使细胞膜对 $Ca^{2+}$ 的通透性增加, $Ca^{2+}$ 由细胞外迅速内流,由此产生恶性循环使继发性损害加剧。

一般认为,脊髓损伤后的血流改变是引起脊髓坏死和神经功能丧失的重要原因,灰质与白质中的血管反应又有所不同。不论创伤程度如何,脊髓损伤灰质在伤后1~2h迅速出现缺血和梗死,而白质缺血常出现较迟,然而神经损伤的严重程度却主要取决于白质缺血的严重程度。脊髓血管的开放与否处于血管内皮细胞产生的前列环素和血栓素 $A_2$ 的共同调节之下,前者抑制血小板的聚集,具有强烈血管扩张作用;而后者对血小板聚集起促进作用,是一种强血管收缩剂。影响脊髓血流因素很多, $Ca^{2+}$ 的异常内流和自由基介导的脂质过氧化反应等均可抑制前列环素合成,使血栓素 $A_2$ 过剩。

此外,关于脊髓的继发性损伤机理尚有内源性阿片物质学说、兴奋性毒素学说、酸中毒学说、游离脂肪酸学说、高能磷酸盐丢失学说等,但总的来看,这些学说所作的解释均不够圆满,上述因素在不可逆损害发生发展过程中的作用与重要性大多属推测性质。

脊髓损伤实验研究多年来的重点之一在于寻找有效方法来延缓、阻止或逆转继发性损伤。目前研究最多的是皮质类固醇激素,不少实验表明其促进神经功能恢复的效果较为理想,其主要机理可能是:(1)提高神经兴奋性;(2)改善脊髓血流量;(3)防止乳酸堆积和丙酮酸的抑制作用;(4)促进细胞外 $Ca^{2+}$ 浓度恢复正常;(5)保持正常的诱发电位;(6)减少自由基脂质过氧化作用。在临床应用中一些学者倾向于大剂量使用甲基强的松龙15~30mg/kg和地塞米松3~6mg/kg。此外对非皮质类固醇、纳洛酮等药物亦有不少研究。

一些研究发现,哺乳类动物的中枢神经系统具有再生功能,而且其出生后突触间连接的数量随着神经发育也可发生变化,这都提示脑与脊髓组织具有明显的可塑性。将动物脊髓横断后植入自体坐骨神经,结果神经内可见轴突长入,这说明外周神经的植入建立了轴突通过损伤区域的通路。采用辣根过氧化酶等示踪物质可清楚地显示这一过程。而根据中枢神经组织的移植研究结果似乎可得出下列印象:(1)胚胎供体组织较成熟组织更容易适应受体环境而成活;(2)神经组织植入后与宿主组织间发生突触连接意味着二者的相容;(3)植入的神经易长入无神经的支配区域;(4)特定的细胞群植入受体动物后仍表现出同样活性。将胚胎脊髓组织植入急性或慢性损伤的脊髓中,存活率可达到80%~90%,脊髓功能也有不同程度的恢复。

综上所述,脊髓损伤实验研究的大部分成果与实际应用尚有一定距离,但已给临床治疗脊髓损伤带来了一线希望。今后的研究一方面应着重于病理过程的研究,寻找更有效的方法以延缓、阻止或逆转继发性损伤,另一方面则寄希望于损伤后脊髓的再生,或通过神经组织的移植重建脊髓功能。

#### 参考文献

- 1 戴力扬. 中华神经外科杂志, 1988, 4(2): 116~118
- 2 戴力扬. 国外医学(创伤与外科基本问题分册), 1989, 10(3): 160~162
- 3 Tator C H, Fehlings M G. J Neurosurg, 1991, 75(1): 15~26
- 4 Simpson R K, Hsu C Y, Dimitrijevic M R. Paraplegia, 1991, 29(6): 364~372
- 5 Tessler A. Ann Neurol, 1991, 29(2): 115~123

(第二军医大学附属长征医院戴力扬博士撰)

**颅脑损伤研究进展** development of craniocerebral injury 颅脑损伤是创伤患者中常见的,其发生率占全身损伤的

10%~15%。随着社会的现代化,由车辆所致的交通事故、高层建筑施工中的坠落以及其他原因引起的颅脑损伤患者正趋增加,其伤残亦不断增加。

近30~40年来,不少学者对闭合性颅脑损伤的机制进行了系统的研究。他们采用最新的物理学的、生物学的和病理学的方法在动物或尸体上制作了各种颅脑损伤模型,探索颅骨与颅腔内容物对外力作用的反应,以阐明闭合性颅脑损伤的机理,从而加深对其临床现象的理解,提高诊断治疗水平。

在外力打击时,被覆颅骨的头皮富有弹性,可以缓冲外力冲击,并延长其作用时间,对颅骨有明显的保护作用。着力部位的颅骨内外板向内弯曲变形,外力作用停止后又恢复原状,因而没有颅骨骨折亦可发生其下面脑膜与脑的损伤。较大外力引起的颅骨变形超过其弹性限度,则该处可发生呈线形、凹陷或粉碎骨折。有时颅骨变形可波及到整个颅骨,即着力部位的颅骨向内弯曲,冲击点对侧(对冲侧)的颅骨向外凸出,发生整个颅骨变形,外伤时的颅骨变形常可使颅腔发生容积与压力的改变。

外力冲击所致脑损伤的病理改变主要为(1)脑震荡,过去认为这是一种脑功能性障碍,但近年来许多学者通过临床和实验研究发现,暴力作用可使脑在颅腔内运动,造成冲击部位、对冲部位、延髓和上部颈髓均可产生组织学的改变。有人提出,头部外伤中的脑震荡现象并不是脑干网状激活系统的功能障碍,而是头部损伤时由于惯性负载所引起的大脑表面广泛病变所致。病变大多属于细胞水平的变化,其中有可逆的,也有不可逆的。脑震荡中表现最突出的两个症状即意识障碍(实际上是一种感觉运动障碍)及伤后遗忘,都是由于脑表面广泛损害所引起的,随着外力作用的大小,这两个症状持续的时间及可逆程度各不相同,严重的甚至可使伤者立即死亡。脑震荡已不是一种单纯的可逆性脑功能障碍,而是一种有轻重不等的阶梯性脑功能及结构上的可逆性的及不可逆性的损伤综合征。(2)着力与对冲部位的脑损伤:一般认为着力处的损伤机理较明确。对冲伤形成的机理一般解释颇多,有负压形成、汽涡或剪力发生、相对移位等数种。但根据Ommaya统计,枕部受击时83%的脑损伤位于额部,而枕部只占约17%。额部受击时,79%的脑损伤位于额部,而枕部只占21%。二者着力与对冲损伤的发生恰恰相反。此外,侧方受击时50%的脑损伤位于着力侧,40%位于对冲侧,10%同时位于双侧。因此,必须结合脑与颅骨的解剖生理特点考虑。前颅窝、中颅窝,骨面粗糙,锐利的蝶骨脊向上突出,当脑组织在其上面前后滑动时,很易引起颞叶、颞叶底部挫伤。枕叶紧贴于小脑幕上,表面光滑且富有弹性,脑组织沿之滑过不易受损伤。顶部的颅骨内板光滑,一般较难造成脑损伤,仅有时其表面桥静脉易被撕裂发生出血。受击时如外力未通过头部重心,则可使其发生旋转运动。由于颅骨与脑的旋转惯性不同,可造成脑与颅骨在旋转时相对移位。这时高低不平及边缘锐利的前颅窝、中颅、蝶骨嵴、大脑镰及小脑幕游离缘等处可损伤临近的脑组织与血管,有时颅神经亦可牵扯受伤。此外,受伤时头部位置是否固定与脑挫伤的发生也有关系,头部固定者颅内结构的相对移位小,对冲伤轻;而头部位置不固定者受击后头部移位大,对冲伤重。总之,颅脑损伤的机理甚为复杂,有些方面还有待研究。

颅脑损伤的诊断方法中,CT扫描是简便、安全、准确的方法。可以明确地诊断脑挫裂伤、蛛网膜下腔出血和脑室内出血,还能诊断出临床难以诊断的弥漫性脑肿胀。CT扫描无具体损伤灶可见,仅有脑体积的普遍增大——脑室和脑池受压或消失。Zimmerman等将之视为一类特殊的损害,并认为与创伤、高碳酸血症和/或低血压所致的脑血管阻力改变、脑血流量增加有关。

对颅内血肿,CT扫描不仅显示其部位、大小、类型以及有无中脑受压移位和变形、中线结构移位程度或脑疝程度,多次连续CT扫描还可以进一步证实严重头部外伤后颅内形态的动态变化。有些新的病灶不是在首次而是在其后的CT扫描才显示出来,像迟发性外伤性颅内血肿。迟发性颅内血肿的发生机理,尚无统一意见。Brown等认为,可能与控制换气所致的脑静脉压升

高,以及脱水治疗降低对抗小静脉渗血的颅内压有关。Macpherson强调局部脑缺血与迟发性颅内血肿的关系。Evans指出,迟发性脑出血的原因可能有二:(1)创伤局部CO<sub>2</sub>积聚和酸性pH引起血管麻痹、血管渗血;(2)血管痉挛引起局部缺血坏死,导致血管破裂。日前,多数学者认为与外伤直接造成的血管壁薄弱有关。颅脑损伤后的多次连续CT扫描时间,一般为病人入院时及伤后1、3、7、14和30d。Hirakawa推荐,如果患者伤后立即扫描,则第2次扫描应在伤后6~7h。

关于颅脑损伤的分类,Teasdale和Jennett(1974~1979)提出格拉斯哥昏迷分级计分法(Glasgow coma scale score GCSS)引起世界各国的重视,并已在临床中广泛应用。重型颅脑损伤的确定标准是伤后昏迷时间至少6h以上或再次昏迷者,排除因醉酒、服大量镇静剂或癫痫发作后所致的昏迷,不包括火器性颅脑损伤。目前,许多国家的神经外科单位以格拉斯哥昏迷分级检查后计分来确定颅脑损伤的程度。以13~15min昏迷20min内为轻型颅脑损伤,9~12min昏迷20min~6h为中型颅脑损伤,3~8min昏迷6d以上或有天幕切迹疝者为重型颅脑损伤。在治疗和观察颅脑损伤者的疗效和预后过程中,许多学者根据脑干反射和脑中轴损害平面而予以测定。脑中轴损害功能障碍平面纵向自上而下可分为6个等级,它们是:I、皮质—皮质下平面,II、间脑平面,III、间脑—中脑平面,IV、中脑平面,V、桥脑平面,VI、延髓平面。一般认为,间脑中脑平面是脑中轴功能障碍的临界点。凡功能障碍未逾此平面时,约半数病人可望好转,其中3/4恢复满意;反之,如损害逾此平面达中脑平面甚至达下脑干平面,则预后不良,恢复者锐减一半,死亡率倍增。所以,通过脑干反射的观测分析,及时掌握脑中轴损害的动态变化,采取一切必要措施防止损害逾越间脑—中脑平面,乃是提高疗效、降低死亡率的关键。

在治疗结果的评定方面,大多应用Jennett和Bond(1975年)提出的格拉斯哥治疗结果分级(Glasgow outcome scale)的5级划分:(1)良好,表示成年人能恢复工作,儿童、青年能就学。(2)中残,表示可以自理生活。(3)重残,需他人帮助照顾生活。(4)植物生存。(5)死亡。评定时间为伤后3个月到1年,最近多主张伤后1年为评定时限。

加强监护病室(intensive care unit, ICU)的设立,严密观察和处理伤后的和手术后的病人,应用颅内压监护仪或多项的监护仪(包括监测心率、呼吸、血压、脑电图和颅内压),以便及时了解病情的变化,及时进行处理。

在严重颅脑损伤的治疗方法中,仍然包括需手术清除颅内血肿和非手术综合治疗。由于CT扫描明确显示颅内血肿给手术前诊断和手术部位提供确切位置,使手术方便。但对于有天幕切迹疝或上脑干功能障碍的病人,在CT扫描前行诊断性钻孔探查,清除血肿,快速脑减压,可使脑移位和升高的颅内压所造成的损害减少到最小程度。近年来,国内外许多医院报告重型颅脑损伤患者的死亡率下降到30%左右,同时病人的生存质量亦有提高。

颅脑损伤非手术治疗,多年来国内外进行了大量基础研究,探讨颅脑损伤后脑血管功能变化、脑水肿、颅内压增高等机理,并企图采用各种治疗措施,诸如冬眠低温、过度换气、高压氧和巴比妥类药物用以减少脑血流量。高渗性脱水剂、浓缩人血清白蛋白和利尿剂联合运用可缩小脑体积。持续脑脊液外引流和碳酸酐酶抑制剂应用可减少脑脊液量。同时,在生物化学领域对颅脑损伤后自由基的变化,多种酶量生成、代谢及活性改变等进行研究,以达到临床改善颅脑损伤的治疗效果。

总之,对颅脑损伤尚有许多问题需要不断研究,临床预后亦是多种因素决定的,需要在实践中不断提高其疗效,减低伤者死亡率并提高其生存质量。

#### 参考文献

- 1 Brown F D, et al. J Neurosurg, 1978, 48: 1019
- 2 张天锡. 国外医学(外科学分册), 1981, 8(5): 262~266



- 3 薛庆澄. 神经外科学. 天津: 天津科技出版社, 1990. 133~139  
(安徽医科大学第一附属医院李长元副教授撰; 杨次文审)

**立体定向及功能性神经外科学** 应用立体定向仪进行的神经外科手术称为立体定向神经外科手术, 又称定向术。研究治疗立体定向神经外科疾病的学科称为立体定向神经外科学。立体定向仪是根据一定的空间坐标原理设计的, 其固定部分能与头颅固定, 并与颅脑建立起有一定规律的三维空间关系; 其导向部分能将手术器械导入颅内任何一处预定的颅内靶点, 进行刺激、毁损、检查、植入以治疗脑深部疾病和对脑功能进行探索研究。这种技术除能治疗脑肿瘤、血肿、脓肿、血管病等非功能性疾病外, 还能通过对神经系统某些结构或通路进行破坏、刺激或重建来改变不正常的神经功能以恢复生理功能的平衡状态, 达到改善和治疗神经精神和内分泌系统的功能失调性疾病的目。这种治疗功能性疾病的神经外科学又称为功能性神经外科学, 这一词是 Wertheimer 1956 年按照 Leriche 1949 年首先提出的“功能外科”的含义在其《功能神经外科》专著中提出的。如用这种手术方法治疗精神病患者时又称为精神外科学。

1906~1908 年, Clark 和 Harsley 将立体定向技术用于动物实验。1947 年, Spiegel 及 Wycis 自行设计了较精确的定向仪, 并采用脑室造影来确定颅内靶点, 开始用于临床治疗人脑疾患, 特别是用于治疗帕金森氏综合征。由于损伤小、安全, 器械可以精确达到传统神经外科手术无法进入的大脑深部等明显优点, 所以引起人们的广泛重视。Riechardt, Leksell, Talairach, 杉田, Spiegel, Wycis, Schaltenbrand, Hassler 等为定向术的发展做出了贡献。至 1989 年 10 月, 已开过 10 届立体定向及功能性神经外科的国际学术会议, 成立了国际性学会, 主办了专业杂志。中国在 60 年代初由许建平、蒋大介首先报告了立体定向手术治疗运动障碍性疾病, 至今已 30 多年。自 80 年代起, 有了全国性专业协会和《立体定向及功能性神经外科杂志》, 研究所、培训基地、专著后, 结合 CT 用定向仪、立体定向图谱、射频仪、计算机辅助定向装置、电生理靶点定位, 临床应用的范围和普及程度等都全面进入了飞速发展的新阶段, 大大缩小了中国和世界先进国家的差距。临床应用范围的扩展更为神速, 使不少过去被判为“不治之症”的脑深部疾病有了研究和治疗的可能, 其治疗范围包括下述内容:

1. 癫痫。癫痫的发病率近 1%, 其中 1/3 患者难被药物控制而致残。故对电生理等检查确诊后行系统抗癫痫药物治疗 2 年而仍有 2 次/月发作者应及时进行外科治疗。手术方法: 消除抽搐性癫痫灶, 阻断携带发生癫痫的冲动或直接刺激小脑等癫痫抑制结构。临床有效率为 70%~80%。

2. 运动障碍。运动障碍是以各种不自主运动为特点的临床症状和征候群。大多病因不明, 并缺乏有效的药物治疗, 而需立体定向神经外科手术治疗。它有两个类型: 一是不自主运动功能障碍, 主要包括各种锥体外系统疾病, 如帕金森氏综合征、Wilson 氏病、舞蹈症、扭转痉挛(又称变形性肌张力障碍)、痉挛性斜颈、肌痉挛、手足徐动症、震颤等。二是自主运动功能障碍, 主要包括由脑或脊髓创伤、脑血管病引起的肢体偏瘫。常用靶点为丘脑腹外侧核及其邻近靶区, 立体定向毁损术的目的是阻断苍白球输出系统通路来恢复  $\alpha$  和  $r$  运动系统的平衡。故对解除肌强直( $r$ -运动系统抑制)和震颤( $\alpha$  运动系统亢进)非常有效。也可以用脊髓刺激和脑深部及小脑刺激(Hosbuchi, 1977)来治疗脑瘫和运动障碍性疾病。

3. 疼痛。疼痛是临床最常见之症状, 是入体内外遭受损害性刺激的一种惊觉信号, 常引起患者机体功能和情绪紊乱, 并导致患者生活和工作能力丧失。因此, 慢性疼痛和剧烈疼痛且药物已不能奏效甚至成瘾的恶痛患者(其常见的原因是晚期癌症), 乃是立体定向及功能性神经外科手术治疗的主要对象之一, 疗效约为 50%~75%。手术方法可分为两大类: 一为破坏性手术, 即根据解剖学上痛觉传导途径, 在丘脑丘系的各个不同平面上选择性地

阻断痛觉传导系统或阻断疼痛的情感促进系统。如周围神经切断术、脊髓后根切断术、脊髓前外侧束切断术、脊髓正中纵切术、延髓或中脑脊丘束切断术、丘脑内板切开术、丘脑下部后内侧核切开术、枕核破坏术、小型额叶(额叶扣带回)破坏术等。二为刺激性手术, 是根据痛觉中枢快传导系统的冲动能够抑制慢传导无髓 C 纤维的传导的闸门控制学说, 在中枢某些能抑制调整痛觉的结构内(如脊髓背柱、尾核头部、导水管周围灰质、中脑内侧丘系、腹内外侧核、室旁核、束旁核、中央中核)放置电极, 给以刺激而达到治疗疼痛的目的。

4. 精神病。精神外科学又称精神病外科学, 用手术破坏脑的某些联系纤维或在脑内特定部位制造局限病变, 以改变脑的功能, 达到清除或减轻精神病人的症状的目的。本学科是由葡萄牙 Egas Moniz 及 Almeida Lima 于 1936 年首创, 于 1949 年获得诺贝尔医学奖。然而由于用该手术在取得疗效的同时, 部分患者遗留有无可挽回的器质性精神障碍, 如记忆智能和人格缺陷等, 以及 60 年代新合成的有效抗精神病药物的临床应用和社会上的非议, 使精神外科转入低潮, 标准额叶切断术已在许多国家被废弃。随着边缘系统、前脑对调节情绪和记忆行为活动等解剖生理功能研究的进展, 为寻求精神外科的理论依据开辟了新的前景。对有各种阳性靶症状的精神病人选择性地定向破坏特定区域, 其疗效已得到历届精神病学会的肯定, 故 70 年代来精神外科再次得到复兴。

中国自 1988 年 11 月全国首届精神外科学研讨会拟定了手术适应症、疗效评定标准、手术前后必须检查的各种量度, 几年来精神外科得到了健康的发展, 至今全国报道定向手术治疗的精神病患者已达 1 000 余例, 常用的手术治疗靶点有扣带回、尾核下神经束、杏仁核、内囊前肢、下丘脑下部、丘脑背内侧核等, 疗效一般在 60%~80% 不等, 特别对情感障碍的精神病人, 如焦虑症、紧张、忧郁、兴奋、狂躁、冲动、攻击行为、强迫症、幻觉等阳性靶症状者疗效最好。

5. 其他功能性神经外科疾病。(1) 垂体功能性切除术治疗乳腺癌、前列腺癌、转移引起的疼痛、肢端肥大症、糖尿病并发视网膜膜炎等。(2) 植入电刺激技术治疗神经功能缺陷, 如治疗肢体瘫痪、癫痫、神经原性膀胱功能障碍、视觉皮层刺激重建人工视觉、电极刺激重建人工听觉、膈肌起搏术等。(3) 植物神经系统疾病、肥胖病, 如颈动脉窦综合征、雷诺氏病、Buerger 病、肢端红痛症、进行性颜面偏侧萎缩症、特发性原发性直立性低血压、家族性植物神经失调症、多汗症及肥胖病等, 当应用传统常规药物、封闭等治疗无效时可考虑行立体定向苍白球毁损术。

6. 颅神经显微血管减压术。颅神经显微血管减压术属功能重建术, 如三叉神经显微血管减压术治疗三叉神经痛、面神经显微血管减压术治疗面肌抽搐、迷走神经显微血管减压术治疗高血压、哮喘、舌咽神经显微血管减压术治疗舌咽神经痛等。

7. 非功能性神经外科疾病。立体定向神经外科学与功能性神经外科学关系十分密切, 但随着 CT、MRI 影象诊断技术、开放性显微外科技术、人工智能、 $\gamma$ -刀、激光等现代科学技术与立体定向技术的结合和发展, 立体定向术已从开始用于功能性神经外科疾病扩展到许多非功能性神经外科疾病, 如脑外伤后的脑性偏瘫、颅内金属异物、迁延性昏迷等。其他有颅内肿瘤, 如脑活检及深部脑肿瘤切除、肿瘤内放疗及射频热疗、垂体切除、颅咽管瘤的定向手术; 脑血管病, 如动静脉血管畸形的切除及栓塞、动脉瘤的烧灼及夹闭、脑内血肿的定向排空; 脑感染的局部活检、培养、治疗、深部脓肿的定向引流; 脑积水的分流术和导水管的重建术等。新近由瑞典 Leksell 发展起来的立体定向放射神经外科(又称  $\gamma$ -刀), 利用立体定向方法确定颅内靶点, 然后将多束放射线汇聚于靶点而达到治疗目的, 又进一步扩大了立体定向神经外科的治疗范围。以往听神经瘤、三脑室后部肿瘤手术难度较大, 现用  $\gamma$ -刀放射线刀放疗在门诊即可完成, 全世界 Gamma 刀治疗病人数已超过 5 000 余例, 其中脑血管病者 2 409 例, 有效率达 79%~95%, 5 年内复发出血者仅 2.3%~3.6%, 无 1 例死亡或严重并

发病。治疗听神经瘤已达 500 余例,随访 1~4 年,肿瘤缩小者占 42.6%~58%,停止生长者占 42%~54.4%,较前增大者仅 2.8%~1.4%,无死亡,且第 5、7、8 对颅神经保留情况远胜于显微手术者。

现代科学技术水平的发展,为立体定向及功能性神经外科的诊断、治疗及研究提供了良好手段。目前已发展到内容十分广泛、水平很高的阶段,并且分为 3 类:(1)立体定向神经外科手术;(2)立体定向放射外科手术;(3)立体定向显微外科手术(或称立体定向直视下神经外科手术)。要是对人脑结构的机能、人脑机能的模拟、脑组织移植等前沿课题的研究有所突破,将会使立体定向及功能性神经外科跨入一个新天地。从发展的前景来看尤其是脑组织移植、人工器官重建及显微血管减压术等重建性手术将代表功能性神经外科的主要方向。尤其在 CT、MR、PET、脑磁图、显微手术、电生理技术、人工智能技术等指导下的现代立体定向手术及放射外科,已开始进入传统需要开颅手术的神外科各个领域及其禁区,以其无创性、精确性及有效性等优势,甚至有取代传统开颅手术的趋势,并将真正成为调整和研究、揭示人脑功能的一门外科学。

(安徽医科大学许建平教授撰)

**心肌保护** myocardial protection 体外循环下心脏直视手术不仅需要“安静”的心脏和无血的“干净”的手术野,还须有良好的心肌保护才能获得成功。不良的心肌保护直接影响术后患者的心功能恢复。据报道,儿童心脏手术后早期死亡原因中 50% 为心肌保护失当所致。故心肌保护成为现代心脏外科的重要研究课题之一。

1950 年,比奇洛(Bigelow)以 25℃ 低温、阻断血流进行动物心脏手术试验,并提出低温能降低心肌代谢的概念。1953 年,刘易斯(Lewis)和托菲克(Taufic)在 28℃ 低温下阻断循环 5min30s 为一病儿成功地进行了房间隔缺损修补术。1954 年,体外循环机问世,心脏外科得以迅速发展。1955 年,梅尔罗斯(McLrose)从主动脉根部注入含高钾冷溶液诱发动物心脏停跳,开始了心脏停搏的研究。1957 年,克罗斯(Cross)等介绍了心脏局部降温方法。此时,冠状动脉冷灌注、冠状静脉窦逆行灌注、冷盐水或冰屑浸泡心脏等保护心肌的方法相继问世。通过对心肌加以保护能提高心脏手术效果的认识,产生了心肌保护的概念。70 年代,低钾心脏停跳液的发明为心肌保护找到了较为满意的方法。布雷特施奈德(Bretschneider)等人研究了各种晶体心脏冷停跳液以期提高心肌保护的效果,临床心肌保护液遂从单纯低温的变为低温加冷钾的停跳液。1986 年,前苏联丽达索娃(Morasa)报告,不用体外循环以 26~25℃ 低温停循环的方法成功地进行了复杂的心脏手术。1991 年,加拿大学者黎雪顿斯汀(Lichtenstein)提出 37℃ 温血停跳液持续灌注保护心肌的方法,获得了好的心肌保护效果。

临床上,绝大多数心脏手术是在阻断主动脉暂时停止冠状动脉血流的条件下进行的。心肌为严格要求需氧代谢、耗氧量最多的器官之一。冠状动脉血流停止后,心脏除部分地依靠非冠状血流提供少量氧进行有氧代谢外,主要依靠无氧酵解,从而使心肌能量产生不足,发生心肌缺血病理改变。心肌缺血早期,心肌细胞线粒体呼吸抑制,导致代谢失调、细胞内酸中毒、细胞膜通透性破坏、钙离子进入细胞内,使心肌细胞纤维产生挛缩。缺血的最初 10~12min,心肌细胞超微结构变化不显著。细胞膜、细胞核、染色质、线粒体、心肌纤维等的变化为可逆性。持续缺氧 20~40min 上述改变加重并呈不可逆性。此时,给心肌细胞供氧,则伴有钙离子大量进入心肌细胞线粒体内,产生“钙反常”现象,反而加重缺血心肌的不可逆性损伤,引起心肌细胞坏死,此即为“再灌注损伤”。

对心肌保护的重要性的认识大大促进了心肌保护方法的研究。学者们在总结大量动物试验和临床实践经验的基础上提出,心肌保护是在整个心肌缺血期间有效地保护心肌细胞的生存能力和心脏的全部功能。因而,心肌保护的原则为:(1)降低心肌的

能量需要;(2)减轻心肌缺血性损伤;(3)提供必要的能量物质;(4)减少心肌再灌注损伤。

标准的心肌保护包括全身中等低温、心脏局部深低温、灌注心脏冷停跳液,以使心脏血流阻断 120~210min 完成复杂的心脏手术。

1963 年,赫利(Hurley)等首次将心脏局部深低温用于临床以来,心脏局部深低温成为心内直视手术中最重要的心肌保护方法。它以降低心肌代谢率、降低心率、降低心肌纤维的频率和纤维心脏的室壁张力,减少细胞内钙离子超负荷使缺血心肌得到有效的保护。该方法是通过在心包腔内注入 0~4℃ 的生理盐水、冰屑或冰袋使心外膜温度降至 10~15℃。为避免温度上升,可采用不断更换冷溶液或用闭式降温系统使溶液在心包内循环。有作者报告,冰屑有引起“冰冻心脏”和膈神经冻伤的危險。后者不多见,术中操作轻柔,心脏表面敷以保护膜可减少发生。低温可能损害心脏,使之在舒张期松弛,造成术后心肌收缩力减弱,应予以注意,通常将心脏局部深低温与全身降温及灌注心脏停跳液联合应用,以提高其保护心肌的效果。

含钾心脏冷停跳液的发明及临床应用是心脏外科的革命,它有晶体的和血液的两种。一般钾离子含量为 20~40mmol/L,总渗透压为 340~400ml·sm/L, H<sup>+</sup> 浓度 6.31×10<sup>-8</sup>mol/L 左右。许多学者对停跳液的配方及灌注技术(单次、多次,搏动非搏动等)进行了深入的研究。理论上,在含氧量、缓冲系统、胶体渗透压等方面,氧合血停跳液比晶体停跳液具有更多的优点。但在低温时,血红蛋白氧离解曲线左移,有碍于氧的释放。此外,由于低温,红细胞聚集,阻塞心肌血液循环而对心肌保护不利。1991 年,黎雪顿斯汀(Lichtenstein)提出以温血停跳液灌注及再灌注保护心肌的方法使心脏有氧停跳,改变心肌高能磷酸盐的储备,认为具有好的心肌保护效果。对此尚待进一步观察总结,以臻完善。

不少学者研究在心脏停跳液中加入代谢性的或非代谢性的生物活性物质(如谷氨酸、天门冬氨酸、甘露醇、氧自由基清除剂、钙通道阻滞剂等)以提高心肌保护的效果。

灌注心脏冷停跳液的方法包括“正灌”和“逆灌”两种。“正灌”是以穿刺的方法,通常用挤压塑料袋中的停跳液使其从主动脉根部或直接经冠状动脉口注入。灌入压力控制在 1.1~13.3 kPa,以免压力过大引起心肌水肿和冠状动脉内膜损伤。压力过低则不能保证停跳液的有效输送。“逆灌”多用于缺血性心脏病。由于这些病人的冠状动脉完全或不完全阻塞,“正灌”常无效。因此,将停跳液经冠状静脉窦或右房逆向输入。该方法 1956 年由巴兰科(Balanco)等提出,但直到 70 年代大量开展冠状动脉搭桥手术时,才开始在临床应用。在行冠状静脉窦逆灌时使用一种特殊的灌注装置使冠状静脉窦密闭,灌注压力控制在 2~5.3 kPa。“逆灌”是有效的灌注停跳液的技术,其不足之处为停跳液分布不一致,右心室中后部、室间隔、房间隔、右心房分布较差;难以控制灌注压力,插管动作粗暴及灌注压力过高时有发生冠状血管损伤的危險,造成晚期冠状动脉狭窄;心脏电-机械活动的停止较“正灌”所需的时间长及右心保护欠佳等。后二者在结合“正灌”和心脏局部深低温时可加以消除。

测量心肌不同部位的温度可判断心肌保护实施效果。通常维持 7~15℃ 的心肌温度能保证最适的心肌保护。再灌注后心脏复跳时的心电图表现(是否存在室颤、缺血改变,是否有心律失常),从冠状静脉窦抽出的血中测定 H<sup>+</sup> 浓度及其它酸性指标、乳酸及转氨酶,确定心肌缺血的程度都是评价心肌保护效果的指标;测定心肌细胞内高能磷酸化化合物的含量亦可以判定缺血期间心肌保护的程,测定心肌细胞内 H<sup>+</sup> 浓度可判定不同心肌保护方法中酸中毒程度。在手术的不同阶段以电子显微镜观察各部心肌的形态结构,研究细胞内示踪原子渗透的程度,可估计超微结构和心肌细胞膜的状态及破坏程度。近年使用电顺磁共振和核磁共振的方法研究经膜过程的功能状态以评价心肌保护的效果。

心肌保护的方法多种多样,心脏冷停跳液的成分彼此各不

相同,但尚无一种方法完全令人满意。有关心肌保护的许多理论和实践问题如长时间缺血心肌的保护、未成熟儿的心肌保护及心脏停跳时心肌的活力等均有待于深入研究解决。为了最大限度保护心肌,临床上“心肌保护”已扩大为术前、术中、术后广义的心肌保护的概念。

#### 参考文献

- 1 张铁山. 深低温并停循环, 国外医学外科学分册, 1989, 4: 204
- 2 张铁山. 心内直视手术中心脏局部深低温对心肌的保护作用, 中国循环杂志, 1991, 6(下): 654
- 3 Kempsford RD, Hearse DJ. Protection of the immature heart, *J Thorac Cardiovasc Surg*, 1990, 99: 269
- 4 Lichtenstein SV, A she KA, Dalati HE, et al. warm Heart Surgery I, *J horac Cardiovasc Surg*, 1991, 101: 269
- 5 Ferrari R, Raddino R, Ceconic c et al. .Effects of temperature on myocardial calcium nomeostasis and mitochondrial function during ischemia and reperfusion, *J Thorac Cardiovasc Surg*, 1990, 99: 919
- 6 Robicsek F, Duncan GD, Hawes AC, et al. Biological thresholds of cold - induced phrenic nerve injury, *J Thorac Cardiovasc Surg*, 1990, 99: 167
- 7 Nakamura y, Fukamachik, Masuda metal. A New method of retrograde cardioplegic administration, *J Thorac Cardiovasc Surg*, .1990, 99: 335

(安徽医科大学第一附属医院胸心外科 张铁山 副教授撰)

**血管内窥镜** vascular endoscopy 又称血管镜早期的血管镜为硬管,应用十分有限。1913年 Rhea 等首先在犬开胸术中向心脏插入一根硬性导管以窥视内部情况,第1次尝试使用血管镜。1922年,Allen 等设计了一个配有透镜的心脏镜,增加了视野的清晰度。之后的几十年中,使用的各种改进的血管镜都是以硬管光学系统为基础的。随着可曲性光纤纤维的发展,逐渐结束了硬管镜的时代,各种纤维内窥镜日臻完善和推广使用,在医学领域的许多学科都产生了巨大的推动作用。由于心血管系统的解剖特点和生理特点,对血管镜的技术、性能和工艺要求远较其它内窥镜更为精密、复杂。这就是血管镜未能更多应用于临床的一个重要原因。1966年,Greenstone 等用一根可弯曲的纤维光学镜观察主动脉、腔静脉、左右心的结构变化,但由于未能阻断高压血流,因而不可能获得清楚的影像,限制了血管镜的使用。进入80年代后,血管镜的制造有了长足的进步,其中最主要的成就之一就是装配了可以阻断血流的气囊,使视野更加清晰。1982年,See 等发明了用于临床治疗心血管疾病的激光镜。1983年,Speers 等报道了可在人体冠状动脉内使用的超细纤维光导血管镜。实践证明,血管镜在外科领域里正发挥着愈来愈重要的作用,它在许多方面明显优于其它诊断方法。它不仅以诊断血管内疾病的性质、范围、程度,而且借助于介入导管技术和激光技术可进行一些血管内手术,如取栓术、激光成形术和动脉粥样硬化斑块切除术等。

血管镜主要由光学成像装置、光源照明系统及液体输注装置组成,并配有气囊导管和照相、电视转换等装置。光学成像是通过一根光学纤维束,其末端连有目镜,在电视转换设备帮助下,使血管镜内的情况清晰地显示到电视屏上。光学照明系统通常采用冷光源,如卤素、氙等。在使用血管镜的同时,为了保持血管腔内清晰可见度就需要一个液体输注系统,通过它定量地输入生理盐水等,有时为了治疗需要可由此输入溶栓药物溶解血栓,或导入激光光纤纤维、切割动脉粥样斑块的削刀以及其它相关器械进行血管内手术。为了阻断血流、维持视野清晰,使用了气囊导管,一种是在血管镜前端直接附有气囊;一种是在导引导管的前端附有气囊,而将血管镜置于导管内前进,充气后的气囊最大径13mm。血管镜镜头直径1.5mm(4.5F)至2.7mm(8.1F)。

过去使用的操作方法是先暴露股动脉,切一小口,插入血管镜,同时给以肝素,在电视屏观察下插到预定部位。近年来由于细径血管镜的产生,已可采用 Seldinger 股动脉穿刺技术,通过扩张导管插入血管镜。在一些实例中,血管镜在股动脉内是沿血流方向行进,亦可逆流向上通过髂动脉和主动脉弓进入颈动脉和锁骨下动脉。还可切开股静脉,进行股静脉、髂静脉、下腔静脉和肺动脉插管。如果在术中用以观察血管重建手术的效果,可在观察部位的远心端的或近心端的动脉切开插入血管镜,应用血管镜的主要困难在于观察时需要有一个短暂的无血区(期)。如果检查腹主动脉或髂动脉,需要从对侧股动脉先插入一个相应的球囊导管(如 Fogarty 导管),以阻断从近心端来的血流,然后再用血管镜上的球囊以阻断远端动脉血的逆流,创造无血区。但由于侧支循环存在,常不易达到完全无血,可在检查中同时注入生理盐水或肝素盐水,冲洗血液增加可见度。

血管镜作为一种新型的诊断手段,可直接观察血管腔内的病理变化,准确地诊断血管系统的解剖异常和阻塞性疾病。在治疗方面,血管镜提供了进行各种血管腔内操作的可能性。其主要用途:

**动脉系统** (1)动脉粥样硬化斑块切除术:1986年, Simpson 首先报道这一新技术。在插入动脉的导管上安装一个电动切割器,内含切割刀片。在动脉造影或血管镜下确定斑块位置,将切割器直接插到或通过血管镜插到病变位置,把病变切下。此术又称为经皮腔内动脉粥样斑块切除术,目前仅应用于1.5cm以内短小的偏心性狭窄或向心性狭窄,而经皮腔内球囊血管成形术是把粥样斑块压缩,主要适用于向心性狭窄。另外,还有 Auth 旋转式动脉粥样斑块切割器,这是一种带有旋转式研磨头的单腔导管,其旋转速度达15万 r/min,柔软有弹性的组织被旋转的磨锥挤压在一旁,而硬性钙化的粥样斑块则被磨成渣粒。另有一些粥样斑块清除导管,如 Kensey 导管和 Ultramed 导管等也已开始用于临床,效果显著。这种技术安全、有效,将会得到推广。(2)动脉栓子切除术和溶栓术:适用于动脉节段性阻塞。通常在血管镜直视下使用 Fogarty 气囊导管或金属环形剥脱器去除栓子。但常由于剥脱面不光滑、血栓内膜残留而使手术失败,影响了推广使用。溶栓剂链激酶(SK)和尿激酶(UK)有较好的溶解血栓的作用,一些学者曾用局部动脉注射的方法来加强其溶栓效果,但由于注入的溶栓药多经侧支动脉流失,或仅停留在血栓的硬性表面,而难以充分渗入血栓内部促使纤维溶酶原变成纤维溶酶,所以局部注药的溶栓效果并没有显著提高。在血管镜的直视下,可将导管插到血栓处,利用注射压力和导丝或导管来破坏血栓,就会使注入80万单位的UK的溶栓效果明显提高。(3)血管镜下植入动脉扩张器:这是一项近几年开展的治疗血管病的新技术。应用镍钛合金,在650°C高温下缠成长1.7~5cm,内径5~13mm的弹簧圈,然后用冷却的生理盐水使之缩小。根据病变动脉的内径和所需长度选择相应的弹簧圈,置于带球囊的导管上,在血管镜监视下插到球囊扩张后的动脉病变部位,使球囊扩张、充盈,再从导管侧孔迅速注入50°C的生理盐水,加热使金属圈恢复到原来的直径和长度,并自行固定在动脉壁上,以防止动脉再狭窄。(4)在血管手术中应用血管镜:血管镜用于血管重建手术中观察手术的质量。通过血管镜可获取满意视野,看清远端吻合和整段移植物的血管内情况。任何技术上的差错,如吻合口闭塞、卷曲及移植血管本身的扭转或忽略的远端动脉阻塞,都能在手术台上及时发现,加以修复。术中应用血管镜可以发现动脉造影和 Doppler 血管超声不易发现的血管和手术异常变化,降低了手术的失败率和截肢率。

**估价自身静脉瓣膜的功能、切除病变瓣膜** 70年代以来通过临床使用证明,原位大隐静脉移植术改善肢体血液循环的手术简单。只暴露静脉的远近端,不全部游离静脉,保留了静脉本身的血管供应,与动脉吻合后符合血液动力学的要求,因而手术效果比较满意。原位大隐静脉移植需要将阻碍动脉血流的静脉瓣膜破坏,既往常用水囊导管、微囊球形金属剥脱器等来破坏瓣膜,这

些方法可靠性差,易损伤静脉内膜。Hall 应用瓣膜切除术,就是用手术方法切除瓣膜,这种方法不易学习掌握,多有一定的盲目性和损伤静脉的缺点,并有增加血栓形成的可能。这些年来,随着血管镜的临床使用,为直视下施行静脉瓣膜切除术提供了新的方法,临床应用效果满意。

血管镜作为一项新技术,伴有的并发症包括血管痉挛、内膜损伤、穿孔和血栓形成等。在静脉内有时输液速度高达 200ml/min,才能使血管镜获得清晰的视野,有可能出现超负荷输液综合征。

为了使血管镜能够在扭曲的血管中行进,尚需寻找一种更为理想的材料,制作新型的血管镜和导管。将血管镜和激光能传递系统偶联,可使激光成形术在直视监测下进行,更为安全、可靠。现在已经有了用激光纤维代替照明纤维的血管镜。

血管镜具有简单、方便、省时的优点,并具有高度敏感的显象功能。它在血管外科领域里发挥的作用是不可低估的。

**参考文献**

- 1 Cragy A H, et al. Radiology, 1984, 150: 45
- 2 官泳松, 国外医学(临床放射学分册), 1987, 10: 270
- 3 Sanborn T, et al. Radiology, 1988, 168: 121
- 4 Newman G E, et al. Radiology, 1988, 169: 677
- 5 Grundfest W S, et al. Circulation, 1988, 78: 113
- 6 Becr A, et al. 德国医学, 1989, 6: 73
- 7 郭志勇, 等. 国外医学与外科基本问题分册, 1990, 11: 14
- 8 王嘉楫. 普外临床, 1991, 6: 65

(安徽医科大学附属医院普外科孟翔凌主治医师撰)

**主动脉成形术 aortoplasty 经皮穿腔主动脉成形术**

(PTAA), 系指在 X 线电视导向下采用带囊导管使狭窄的主动脉得以扩张的新技术。血管成形术的应用已有 10 余年历史, 但有关主动脉成形术的报道不多, 全世界至今仅有 100 余例, 远较其它部位的 PTAT 为少。

1980 年, Velasques 首先应用双胶囊导管(囊径各为 9mm)扩张下部腹主动脉狭窄获得成功。随后, Grollman, Tegtmeier, Kumpe 等人分别报道了用单胶囊、双胶囊及 3 根胶囊导管扩张下部腹主动脉狭窄的经验。Tegtmeier 指出, 在扩张腹主动脉分叉部狭窄时, 使用吻部导管技术(双根胶囊导管并置于分叉部)可防止扩张时狭窄侧动脉粥样斑块移动, 闭塞对侧肾动脉。1981 年, Kumpe 提出用 3 根胶囊导管技术扩张主动脉狭窄, 更适应于主动脉的圆形轮廓, 残剩狭窄较少。但大多数学者用单胶囊的或双胶囊的导管技术扩张主动脉狭窄。

目前, PTAA 操作技术主要有两种: (1) 经皮穿刺股动脉, 置入 8.5F 或 9F 导入器, 送入单胶囊导管(囊径 8~12mm)或穿刺双侧股动脉, 分别送入两根胶囊导管(囊径总和小于正常主动脉径 1~2mm)并置于狭窄部进行扩张。(2) 切开皮肤, 暴露股动脉直接穿刺, 置放导入器或切开股动脉, 送入单根大胶囊导管(囊径为 8mm~12mm)行 PTAA。以第 1 种方法最常用。

PTAA 技术成功标准: 1986 年, Charlebois 提出通过原狭窄部的压力阶差 < 50%; 1991 年, 王建华、林贵提出扩张后原主动脉狭窄部残剩狭窄 < 50%。两者都比较实用。

主动脉狭窄的病因, 在国外多以动脉粥样硬化为主, 在中国则以大动脉炎多见, 好发于年青女性, 狭窄段范围较长, 常侵及肾动脉上下位腹主动脉, 病理上大动脉炎性主动脉狭窄部管壁较坚硬, 扩张较难。1986 年, 林贵教授首次报道用带囊导管扩张 2 例多发性大动脉炎所致长段腹主动脉狭窄伴双肾动脉狭窄的成功经验。1991 年, 王建华、林贵又报道了 17 例大动脉炎主动脉狭窄行 PTAA 的经验, 多采用双胶囊导管技术。国外报道主动脉成形术多系处理肾动脉水平以下腹主动脉狭窄或分叉部狭窄, 而国内林贵、王建华的报道多系处理肾动脉上位的或肾动脉水平腹主动脉狭窄, PTAA 操作技术难度大。林贵等人采用细导管及小囊径胶囊导管预扩, 再用双根胶囊导管并置于主动脉狭窄部同时充盈

扩张等技术, 获得满意效果, 技术成功率为 94%。国外 PTAA 技术成功率为 90%~100%。

血管成形术的扩张机制, 目前公认为是“控制性损伤”理论。但对于成形术后修复机理, 有不同见解。1980 年, Castaneda, Zuniga 及 Block 等人认为是断裂的动脉壁各层纤维化愈合, 裸露的内膜表面则完全由新生内皮细胞覆盖。1992 年, 王建华、林贵报道了犬的血管成形术实验研究结果, 发现平滑肌细胞作为一种主要的组织细胞, 参与修复成形术后损伤的血管内膜表面, 与新生内皮共同覆盖腔面, 从理论上阐述了 PTAA 前后使用抗凝药物可抑制平滑肌细胞过度增生, 以减少或避免成形术后血管再狭窄。

PTAA 后主动脉近期通畅率, 令人可喜。1985 年, Tegtmeier 对 30 例病人随访 1~53 个月(平均 14 个月), 通畅率为 90%。1989 年, Odurny 报道长期随访 17 例病人, PTAA 后 5 年通畅率为 70%(平均随访 38 个月)。1991 年, 王建华报道 17 例主动脉成形术中随访 11 例, 8~38 个月(平均 15 个月), 血管通畅率为 100%。总之, 由于主动脉口径大、血流快, PTAA 后血管再狭窄发生率很低。

主动脉狭窄常致狭窄部下方内脏器官及下肢缺血、功能减退, 给病人带来严重痛苦。过去仅靠外科行主动脉内膜剥脱术及旁路移植术, 重建血流, 但手术复杂, 危险性大, 住院时间长, 花费昂贵。PTAA 则简单、安全, 住院时间短, 花费少, 疗效好, 可作为治疗主动脉狭窄的首选方法。

**参考文献**

- 1 Velasquez G, et al. Radiology, 1980; 134: 359~360
- 2 Grollman JH, et al. AJR, 1980; 134: 1053~1054
- 3 Tegtmeier CJ, et al. Radiology, 1980; 135: 589~599
- 4 Castaneda-Zuniga WR, et al. Radiology, 1980; 135: 565~571
- 5 Kumpe DA, et al. Radiology, 1981; 141: 536~538
- 6 Tegtmeier CJ, et al. Radiology, 1985; 157: 661~665
- 7 林贵、顾正明, 上海医学, 1986, 9(3): 132
- 8 Odurny A, et al. Cardiovasc Intervent Radiol., 1989; 12: 1~6
- 9 王建华、林贵, 中华心血管杂志, 1991, 5: 129
- 10 王建华、林贵, 中华放射学杂志, 1992, 26(5): 294

(上海医科大学王建华副教授撰)

**荧光引导的激光血管成形术**

20 世纪 60 年代以来, 治疗堵塞性动脉硬化病的可能性不断增大, 药物治疗和外科治疗水平都有很大提高。60 年代初, 当球囊血管成形术问世时, 激光技术正在兴起。激光的方向性好、能量密度高的优点, 有利于动脉硬化斑块的消融和汽化。目前, 利用激光的血管成形术已成为球囊血管成形术的重要辅助方法之一。激光血管成形术是一种利用高能量的激光把动脉硬化斑块汽化, 使堵塞的动脉再导通的技术。如果把激光血管成形术与球囊血管成形术结合起来就构成激光——球囊血管成形术, 它先用激光在堵塞的动脉通路上打一个“导洞”, 再通过球囊对动脉施行血管扩张术。激光血管成形术的基础实验研究开始于 80 年代初, 外周血管成形术的临床应用始于 1984 年, 冠状激光血管成形术的临床应用始于 1986 年。在激光血管成形术中, 常用的激光器件有 CO<sub>2</sub>、Nd: YAG、Ar-和染料激光器等, 它们工作在连续或脉冲状态下。这些激光器同属“热效应激光”, 它们照射组织时, 使组织的温度升高。当温度足够高时, 使动脉硬化斑块汽化, 达到消融动脉粥样硬化斑的目的。

1982 年, Srinivasan 利用高功率的紫外光在有机物质上诱导产生凹坑, 当能量密度超过特征阈值时, 在受照射的物质上就产生凹坑, 它的深度与材料的吸收深度属同一量级。这样激光在边界上引起的温度上升有限, 产生的气泡和冒出的气体很少。在正常情况下, 所产生的专用波激励不强, 组织位移不大。因此, 当把准分子激光器用于血管成形术时, 它只消融动脉硬化斑块, 对周

围组织不会造成损伤。人们通常把准分子激光叫作“冷效应”激光,把它的消融机理叫做“消融性光分解”。

钹激光或铊激光的波长分别为2.0nm和2.9nm,它们与水的两个吸收线共振。其吸收深度分别为65nm和2nm。它可以与紫外光的吸收深度相比拟,降低消融的阈值和所需要的能量,可以汽化动脉粥样硬化斑块的各种成分,包括钙化物质,对周围组织的热损伤和声波激励损伤非常小。

光纤是传输激光的重要元件,光损耗很小。它的端部应加工成特殊的形状,使之对动脉的损伤为最小。1984年, Lee 等人在光纤的末端增加利用激光加热的金属帽。后来,各种金属探头、蓝宝石光纤头、瓷头和球形头相继问世,在一定程度上减少了激光引起的动脉穿孔的危险。

外周激光血管成形术和冠脉激光血管成形术产生的并发症同为动脉壁穿孔、血管夹层动脉瘤和痉挛等。但是,与外周血管不同的是,冠脉穿孔可导致心包堵塞、心肌梗塞甚至死亡,引起人们足够的重视。为了避免动脉穿孔,人们试图用激光诱导荧光的方式,给动脉粥样硬化斑块定位,做到有选择地消融动脉粥样硬化斑块,尽量减少动脉壁穿孔的危险。

总的说来,动脉粥样硬化斑块可分为两大类:(1)非钙化性的,包括纤维型的(白色斑块)、脂肪型的(黄色斑块)和混合型的(纤维和脂肪)3种;(2)钙化性的,是由钙的沉积物形成的。激励激光波长的选择直接影响到荧光发射的波长范围和荧光光谱的形状。激光诱导荧光实验装置由激光器、光纤、光谱仪、计算机数据采集和处理系统组成。通过对动脉组织的自体荧光的分析,发现各类动脉粥样硬化斑块的光谱特点,建立光谱识别算法模型,确定动脉粥样硬化斑块的识别判据。

1985年, Kittrell 等人用氩离子激光器作光源研究纤维类动脉粥样硬化斑块的荧光光谱,激励波长为480nm,荧光波长为500~700nm。正常动脉的荧光光谱是一个双峰结构,波长分别为550nm和600nm,其强度基本相同。有病组织的荧光光谱也有两个峰,但波长为600nm的荧光强度比550nm的低。经过分析,用一个对比度函数作为动脉粥样硬化斑块的识别判据。对比度函数等于波长为600nm的峰的相对荧光强度与波长为580nm的谷的相对强度之比,它是一个无量纲的量,数学表达式为  $R = I(600)/I(580)$ 。1990年, Chang 等用波长为476nm的 Ar<sup>+</sup>激光研究癌组织、动脉粥样硬化斑块组织、人和动物正常的动脉组织的荧光光谱。结果发现,正常组织的荧光光谱在540nm和570nm处有明显的强度调制,而有病组织的荧光光谱在540nm和570nm处的强度调制很弱,甚至无强度调制。鼠动脉的荧光光谱和人血样品吸收的研究说明有病组织的光谱形状起源于组织中血红蛋白的减少。

1988年, Svanberg 等人用波长为337.1nm的氮分子激光器研究了动脉粥样硬化斑块的光谱识别和定位问题,荧光范围为350~700nm,当时选用的对比度函数为  $R_1 = I(390)/I(480)$ ,  $R_2 = I(415)/I(480)$ ,  $R_3 = I(580)/I(600)$ ,  $R_4 = I(390)/I(600)$ 。1990年,他们又增加两个对比度函数  $R_5 = I(380)/I(437)$ ,  $R_6 = I(390)/I(431)$ 。他们将测试样品从组织病理上分成5组, O 代表正常动脉, I 代表病情很轻的动脉, II、III、IV 代表病情逐渐加重的动脉, IV 的病情最为严重。通过作图可以看出:  $R_5$  和  $R_6$  是比较好的判据,在判据图中 O 和 I 几乎无区别, II、III 和 IV 有明显区别,几乎不受血的含量的影响,因之可将它们叫作与血无关的判据,它的误差也最小。

1989年, O'Brien 等利用波长为325nm的 He-Cd 激光器研究用于荧光引导的激光血管成形术的光谱分类算法,对这些算法的应用前景作了一定的评价。他们提出的动脉组织的光谱分类算法是:多变量线性回归,阶跃多变量线性回归,主分量分析,判据平面分析, Bayes 判据理论,主峰比以及光谱宽度等。他们利用实验组和对照组的光谱数据,对每种算法的分类能力作了评价。这些算法鉴别正常动脉和动脉粥样硬化斑块的精度大于80%(它的范围为82%~96%)。因此,将光谱分类算法与激光血管成形术结合起来,能够对动脉粥样硬化斑块进行选择性的消融。同年, Svanberg

等人用波长为308nm的 XeCl 准分子激光器研究钙化的动脉粥样硬化斑块的等离子光谱。1988年, Laufer 等人用波长为248nm的 KrF 准分子激光器对正常动脉和动脉粥样硬化斑块组织进行同时消融和识别研究,正常动脉组织的荧光光谱是一个宽的连续光谱,波长为370nm和460nm的两个荧光峰,强度几乎相同,对比度函数  $R = I(370)/I(460) = 1.004 \pm 0.087$ ;非钙化性的动脉粥样硬化斑块的两个荧光峰的波长仍为370nm和460nm,但是波长为460nm的荧光峰的强度明显减小,对比度函数  $R = 1.765 \pm 0.263 (P < 0.001)$ 。与宽的连续荧光光谱相比,钙化斑块给出了多线发射光谱。几个明显的谱峰位置在397、442、450、461、528和558nm处。他们也得到了随消融深度变化的三维光谱图。根据这些光谱可以识别动脉粥样硬化斑块,并且判断出动脉粥样硬化斑块的消融程度。用光学显微镜观察激光消融产生的“弹坑”,它的刻痕明显,界线清楚。

当用低强度的激光照射人体组织时,就激励组织中的有关色素。当色素失去它们的激励态时,就发射荧光。组织的自体荧光可以用光纤收集,从光谱方面进行分析。由于正常的动脉组织和各种动脉粥样硬化斑块组织的光谱有明显的区别,就可以用它来引导激光血管成形术。

在离体研究中,用波长为325nm的 He-Cd 激光照射动脉组织发出的光谱能够可靠地从动脉壁和血管中层中识别出动脉粥样硬化斑块,即使用脉冲染料激光消融斑块后也能做到这一点。结果,激光诱导的自体荧光能够识别出需要进行消融的斑块,在遇到正常动脉壁和血管中层时,关闭激光。按照这一原理,人们设计出1台荧光引导的计算机——双激光血管成形术系统,它由诊断激光和治疗激光组成。诊断激光用来探测和识别斑块,进行“瞄准”。利用正常组织和动脉粥样硬化斑块在激光照射时产生不同荧光的原理,采用光谱分析技术以及计算机识别来控制治疗激光的汽化过程。当发现动脉粥样硬化斑块的光谱时,治疗激光自动开启进行照射。当汽化深度到达血管中层时,斑块光谱消失,出现正常组织的光谱,激光照射便自动停止。它可避免盲目的激光照射损伤正常的血管壁,避免激光汽化过深引起的动脉壁穿孔。

用脉冲染料激光器或 Ho:YAG 激光器构成的荧光引导的计算机——双激光血管成形术系统已用于治疗冠脉血管疾病,其成功率为11/12。然而,由于冲击波和消融能力不是十分强等原因,会产生一些并发症。

目前,荧光引导的激光血管成形术,仍然有几个问题需要解决。第一,与离体研究相比,对活体中的动脉粥样硬化斑块的探测尚有一定的困难。第二,激光激励组织荧光的深度应当与治疗激光的消融深度相同。第三,在冠脉中,血管中层的平均厚度大约是200nm,血管中层是荧光引导的激光血管成形术的基本界标,在病情严重的动脉中,血管中层的厚度常常小于100nm,它会影响到对血管中层的识别。

80年代以来,动脉粥样硬化斑块的荧光识别研究和激光血管成形术的临床应用研究已取得很大的进展,已经用于治疗外周血管病和冠脉疾病,取得较好的远期疗效。激光血管成形术可以治疗球囊血管成形术不能治疗的疾病。据目前的情况看,它治疗非钙化性动脉粥样硬化病的成功率高于治疗钙化性动脉粥样硬化病,激光血管成形术在心血管领域已成为一种新的有效的治疗手段。

(中国科学院安徽光学机械所王振亚、叶能昶、宁峰撰)

**经皮穿腔肾动脉成形术** percutaneous transluminal renal angioplasty 经皮穿腔肾动脉成形术(简称 PTR)系指在 X 线电视引导下,用经皮穿刺股动脉(或腋动脉)的方法,把胶囊导管送至肾动脉狭窄部,囊内充盈造影剂,使狭窄部扩开的新技术。它属于经皮腔内血管成形术的一项重要内容。

1964年,美国学者 Dotter 用同轴导管技术成功地扩张了下肢动脉粥样硬化性狭窄,发明了经皮腔内血管成形术(简称 PTA)。1974年瑞士学者 Gruntzig 发明了双腔带囊导管,使 PTA 在全世界风行起来。1978年, Gruntzig 用带囊导管扩张了第1例

左肾动脉狭窄获得成功, 现正在成为治疗肾血管性高血压的首选方法。

关于血管成形术的治疗机制, 1964年Dotter推测是胶囊导管的扩张压力使动脉粥样硬化斑块受压变扁, 沿着动脉壁纵向重新分布, 狭窄管腔因之扩大或再通。1978年, Gruntzig接受了Dotter的观点。1980年, 美国学者C. Zuniga通过实验研究和病理研究证实, 动脉粥样硬化斑块是固体的或半固体的, 不可能被压缩。他提出PTA后管腔增大是由于内膜与中膜的分离和断裂, 粥样斑块断裂及血管壁内膜、中膜、外膜的过度延伸达一定程度并且不可逆, 而致管腔增大。以后许多学者通过实验研究证实和支持C. Zuniga的观点, 提出“控制性损伤”是血管成形术的治疗机制。至于纤维肌发育不良, 多发性大动脉炎以及手术后狭窄成形术后管腔增大, 主要是由于内膜断裂、病变区伸展和纤维带断裂。肾动脉成形术后, 由于正常血压和血流对血管腔的扩撑作用, 维持肾动脉通畅, 肾脏血流量增加, 肾素分泌减少, 血压下降。

PTRA操作技术主要有两种, 即Gruntzig导向共轴胶囊导管系统和Gruntzig胶囊导管系统(包括股动脉穿刺法、肺动脉穿刺法及吻邻导管技术)。目前最常用的方法是经皮穿刺股动脉, 将Gruntzig胶囊导管系统送入肾动脉狭窄处进行扩张。一般先作腹主动脉-肾动脉造影, 然后把导管选择性插入肾动脉开口, 注入妥拉苏林25mg、利多卡因40mg。一旦导管通过狭窄部, 则经导管注入2000~5000单位肝素溶液。把带移动蕊的“丁”形导丝或Rosen导丝, 留置于肾动脉大分支内。更换胶囊导管于肾动脉狭窄部, 用30%~38%泛影葡胺或非离子型造影剂(如优维显或欧乃派克)充盈胶囊3~5次, 使狭窄的肾动脉得以扩张。术后使用抗凝药物。

PTRA的疗效, 初期技术成功率为79%~94%, 一般为87%, 临床治愈改善率为83%。就不同病因而言, 以对纤维肌发育不良疗效最佳, 技术成功率可达94%, 治疗改善率为92%。而动脉粥样硬化和大动脉炎的技术成功率则分别为82%和71%, 高血压的治愈改善率为87%和82%。PTRA后肾血管3~5年的通畅率为81%~90%, 肾动脉狭窄的复发率为10%~15%。为降低复发率, 近年来多以血管腔残余狭窄≤30%为技术成功指标。

肾静脉肾素活性比值(RVRR)曾被作为预言PTRA疗效的主要指标, 认为RVRR≥1.5, 疗效满意, 预测成功率为100%, 反之则差。近年来不少学者对此提出异议。美国学者Kuhlmann于1985年通过对60例肾动脉狭窄行PTRA的疗效观察及长期随访, 发现通过测定肾素水平预言PTRA疗效是没有价值的, 主张摒弃这种创伤性的PTRA术前检查。

PTRA与外科手术疗效比较, 两者基本相似。但PTRA比外科手术简单、安全、并发症少, 并发症仅为6%, 至今无死亡病例报道。外科手术并发症为11%, 死亡率为5.9%。故目前多数学者主张将PTRA作为肾动脉狭窄性高血压的首选治疗方法, 不成功者再考虑外科手术。

经皮穿腔血管成形术经过20多年的发展已趋向成熟, 被认为是治疗心血管疾病的一项重要手段, 但是球囊血管成形术的再狭窄率比较高。为了克服这个缺点, 80年代相继出现血管内支撑器、动脉粥样硬化物质切除和激光血管成形术等新技术。就目前临床应用来说, 动脉粥样硬化物质切除术多用于周围血管, 而激光血管成形术虽已用于周围血管和冠状动脉, 但由于有并发症, 长期随访报告资料少及加用激光与不用激光辅助的球囊血管成形术结果相似, 故对激光血管成形术存在着较大的争论。仅血管内支撑器已用于肾动脉狭窄的扩张, 多系PTRA失败或PTRA不满意的病人。经皮植入血管内支撑器是一项很有前景的治疗技术, 但是它不会取代球囊血管成形术, 只是弥补PTA的不足, 以进一步提高疗效。

参考文献

1 Dotter Cj, et al. Transluminal treatment of arteriosclerotic

obstruction description of a new technic and preliminary report of its application. Circulation. 1964, 30(11): 654

- 2 Gruntzig A, et al. Treatment of renovascular hypertension with percutaneous transluminal dilatation of a renal artery stenosis. Lancet, 1978, 8068(4): 801
- 3 Castaneda-Zuniga WR, et al. The mechanism of balloon angioplasty. Radiology, 1980, 135, 565
- 4 Sos TA, et al. The mechanism of balloon angioplasty. Radiology, 1980, 135, 565
- 5 Lohr E, et al. Renal angioplasty; Experiences with 94 patients urologic. Radiology, 1982, 4: 211
- 6 Sos TA, et al. Percutaneous transluminal renal angioplasty in renovascular hypertension due to atheroma or fibromuscular dysplasia. New Engl. J. Med. 1983, 309: 274
- 7 Tegtmeier CJ, et al. Renal angioplasty; Current status. AJR, 1984, 142: 17
- 8 Kuhlmann U, et al. Long-term experience in percutaneous transluminal dilatation of renal artery stenosis. Am J Med. 1985, 79(12): 692
- 9 Tegtmeier CJ, et al. Techniques of renal angioplasty. Radiology, 1986, 161: 577
- 10 Klinge J, et al. Percutaneous transluminal renal angioplasty; initial and Long-term results. Radiology, 1989, 171: 501

(上海医科大学王建华副教授撰)

下肢深静脉功能不全的观念更新

The renewal of concept on incompetence of deep vein in lower extremity 下肢深静脉功能不全是由于深静脉病变致使患者下肢出现瘀血性水肿、继发性浅静脉曲张、小腿瘀滞性皮炎、皮肤色素沉着和静脉性溃疡等临床表现。患病率随地区、性别和年龄不同而异, 其发病数为下肢动脉疾病的10倍, 是外科常见病之一。

长期以来, 下肢深静脉功能不全一直被认为是下肢深静脉血栓形成后遗症的同义词。传统观点认为, 下肢深静脉受筋膜和肌肉的支持, 静脉瓣的单向开放、小腿肌肉的收缩和胸腔负压足以阻止血液的倒流; 并认为深静脉功能不全是由于静脉血栓形成后血液回流障碍或血栓再通时深静脉瓣膜被破坏所致。直到1980年, Kistner经过长期研究提出原发性深静脉瓣膜功能不全的新观念, 确认这是和深静脉血栓形成后继发性深静脉瓣膜功能不全截然不同的病变范畴。深静脉瓣膜本身发育不良同样可使深静脉血液倒流, 导致下肢深静脉功能不全。

下肢浅静脉曲张是下肢深静脉功能不全患者最主要的临床表现之一。传统观念认为原发性(单纯性)浅静脉曲张多是由于先天性静脉壁薄弱、浅静脉瓣膜(即隐股静脉瓣及交通支静脉瓣)功能被破坏和静脉内高压所致; 而因深静脉继发性瓣膜功能不全、血管外压迫及动静脉瘘所致的继发性浅静脉曲张较为少见。然而张培华等对2835例下肢静脉曲张患者的3038条下肢作深静脉造影检查, 发现原发性深静脉瓣膜功能不全者占53.5%, 血栓形成后遗症占24.9%, 而单纯性大隐静脉曲张者仅占17.64%。可见, 原发性深静脉瓣膜功能不全引起浅静脉曲张者占有相当高的比例, 而单纯性大隐静脉曲张则为数甚少。

屈氏(Trendelenburg)试验和潘氏(Perthes)试验是对下肢静脉曲张病人传统的检查方法。前者用来检查隐股静脉和交通静脉瓣膜功能, 但不能判断其是否继发于深静脉病变及鉴别深静脉功能不全的类型。潘氏试验是检查病人下肢深静脉是否通畅, 以决定能否进行大隐静脉剥脱手术。但原发性深静脉瓣膜功能不全和深静脉血栓形成后完全再通者本试验均为阴性, 这类病人如仅施行大隐静脉剥脱术并不能解除深静脉血液倒流、静脉高压和下肢瘀血, 临床症状不能得到改善。因此, 除进行常规体检外, 还应进行必要的辅助检查。

下肢静脉压测定和一些无损伤检查(如多普勒超声、阻抗容积描记仪及光电容积描记仪等)虽有助于下肢深静脉疾病的诊断,但下肢深静脉造影仍是最可靠的诊断方法,可为选择适当的治疗方法提供确切的依据。下肢深静脉造影包括逆行造影和顺行造影两部分。前者可观察深静脉的形态和通畅情况、交通支有无逆流及浅静脉曲张范围;后者可检测下肢深静脉瓣膜的形态和功能,首先检测股浅静脉第1对瓣膜,若第1对瓣膜关闭不全,才能观察到远端其它瓣膜的功能。孙建民等倡用的经皮股静脉插管造影可逐一检测股静脉中每一瓣膜功能。根据造影剂逆流程度,将深静脉瓣膜功能分为5级:0级:无明显逆流,深静脉瓣膜功能正常;I级:造影剂逆流至大腿上段(上1/3);II级:造影剂逆流至大腿下段(膝上水平);III级:造影剂逆流至小腿上段(膝下水平);IV级:造影剂逆流至小腿下段(踝关节水平)。I、II级者为轻度深静脉瓣膜功能不全;III、IV级者分别为中度的和重度的深静脉瓣膜功能不全,应选择静脉瓣膜再建手术治疗。

按照血液动力学改变,目前将下肢深静脉功能不全分为回流障碍型的和血液倒流型的两种。回流障碍型的主要包括血栓形成后血管完全闭塞或部分再通的病人,临床采用阻塞段旁路手术以增进静脉血回流。经典的手术方式有:(1)大隐静脉交叉转流术用于治疗髂股静脉闭塞;(2)大隐静脉原位转流术用于治疗股总静脉开口远侧的股静脉阻塞。上述方法均有许多取得满意疗效的报道。

血液倒流型的病变则包括原发性深静脉瓣膜功能不全、继发性深静脉瓣膜功能不全(即血栓形成后血管完全再通者)以及单纯性大隐静脉曲张(隐股静脉瓣关闭不全)等,占下肢静脉疾病的70%以上。近年来,众多学者对这类疾病的治疗进行了广泛深入的研究,采用了许多阻止血液倒流的深静脉瓣再建手术。主要手术方法有:(1)肌瓣膜替代术:1964年Psathakis倡用肌瓣代瓣膜手术,利用股薄肌与二头肌腱形成的肌瓣,置于股静脉之间,使之在患者行走时与腓肠肌交替收缩,在小腿放松时压迫股静脉以阻止深静脉瓣膜功能不全而出现的血液倒流。此后,有学者改用半腓肌作肌瓣以延长肌瓣长度;有用硅膜代替肌腱以减少术后粘连者,都取得满意的效果。本手术只有在逆行造影中造影剂逆流至膝下者才宜实施。由于手术不侵及血管本身,术后很少发生静脉内血栓形成,可用于治疗各种病因引起的深静脉血液倒流性病变。(2)股浅静脉瓣修复术和股浅静脉壁环缝术或带戒术:1975年,Kistner认为股浅静脉最高一对瓣膜对控制深静脉血回流起着关键性作用,采取切开静脉壁直接修复股浅静脉瓣膜来治疗原发性深静脉瓣膜功能不全,这是一种难度较高的新手术。以后在此基础上,有学者用丝线或静脉片,在血管外将扩张的静脉壁环缝缩窄约1/3周径,使静脉管径处于血管痉挛状态,使功能不全的瓣膜恢复其正常功能。手术简便,近期效果较好。(3)自体带瓣静脉段股浅静脉移植术:1981年,Seshadzi用一段带正常瓣膜的腋静脉移植于股浅静脉上段;1982年Tahezi等多次报道取瓣膜正常的臂静脉移植,还有人取颈外静脉或侧腓股浅静脉进行移植,治疗深静脉瓣膜功能不全的患者,均取得满意的疗效。

Linton所采用的大隐静脉高位结扎剥脱和筋膜下交通静脉结扎术是外科沿用已久的经典手术,但确有部分病人术后病情复发,甚至加重。Trigaux综合文献报道,术后症状复发率高达40%。由于原发性深静脉瓣膜功能不全这一新概念的产生,现已明确,Linton氏手术主要用于治疗单纯性大隐静脉曲张。然而Kistner等认为,在施行各种静脉瓣再建手术的同时,辅用Linton氏手术,剥除已有病变的浅静脉,将有助于提高手术疗效,是静脉再建手术中不容忽视的一个组成部分。

由于对下肢深静脉功能不全的认识发生了观念性的变更,对本病的诊断和治疗也发生了巨大的变化。国内外学者对此进行了广泛深入的探索,创造了许多新的治疗方法。对各种新手术的优劣、利弊及远期疗效尚有待于临床进一步观察。

#### 参考文献

- 1 Dale W A, et al. Ann Surg., 1968, 168: 319
  - 2 Husni E A. S. G. O., 1970, 130: 279
  - 3 Rabinov K, et al. Arch surg., 1972, 104: 143
  - 4 Kistner R L. Am J Surg., 1980, 140: 218
  - 5 Herman R J, et al. Diag Radiol., 1980, 137: 63
  - 6 孙建民, 张培华. 中华外科杂志, 1989, 27: 623
  - 7 Trigaux J F P, et al. Cardio Intervent Radio, 1989, 12: 103
  - 8 张培华. 实用外科杂志, 1990, 10: 491
  - 9 李金泉, 刘贵启. 普外临床, 1991, 6: 76
  - 10 蒋称, 张培华. 实用外科杂志, 1991, 11: 478
- (安徽医科大学附一院普外科宋海屏副教授)

### 淋巴管—静脉吻合术 lymphatico-venous anastomosis

它是采用显微外科技术将细小的淋巴管与其邻近的小静脉吻合,以解除梗阻、重建淋巴回流通路的手术方法。目前主要用于治疗四肢淋巴水肿和乳糜尿,胸导管颈内静脉吻合可治疗顽固性腹水。

尽管在詹考伯森(J. H. Jacobson)1962年已经提出淋巴静脉吻合手术,但因当时技术和设备条件所限,尤其是缺乏微血管缝合针线,临床上只能用较粗的淋巴干和静脉吻合术来治疗乳糜尿。直到1969年,奥伯莱恩(B. M. O'Brien)才在淋巴管静脉吻合的动物实验中取得了74%的近期(1周内)通畅率和6~12周后66%的通畅率,并总结出一套淋巴管静脉吻合方法,为临床开展这种手术提供了科学依据。1977年和1979年他先后报告45例病人,术后有2/3好转。1979年,考慈恩(M. I. Kouzin)报告81例,手术后随访1年,69%的病例好转。中国朱家恺等于1979年开展此项手术,此后上海、蚌埠等地也先后开展了此项手术,取得良好的近期效果。但远期疗效仍不能令人满意。如朱家恺等自1979年到1987年共为76例四肢淋巴水肿病人做了淋巴管静脉吻合术,近期优良率为92.1%,但远期优良率仅为62.1%。由于远期疗效欠佳,加上一些学者认为术后淋巴管虽能通畅一段时间,以后必然会阻塞,因而此手术于80年代中期转入低潮。但朱家恺等发现,临床上确有些事实证明吻合口是可以长期通畅的:(1)用正常动物进行淋巴管静脉吻合实验,远期通畅率并不低,表明正常状态下淋巴管的流量和压力可以保持吻合口永久开放。(2)生理条件下淋巴管与静脉有交通支存在,实验证明,淋巴管静脉吻合后第4周,吻合口已被一层扁平内皮细胞所覆盖,说明吻合后的通道有可能成为永久性通道。(3)淋巴管静脉治疗乳糜尿的远期优良率达80%以上,说明吻合口是可以永久通畅的。(4)临床上确有部分病人经淋巴管静脉吻合术后存活多年,水肿消退,炎症控制,间接说明永久通畅是可能的。(5)有人在淋巴管移植术后3年,用淋巴管闪烁扫描发现,硬化的淋巴管仍保持通畅,表明硬化的淋巴管能自行调整并再形成通道。(6)各家测定的淋巴管压力数值出入较大,影响实验结果的因素较多,不宜轻信某一实验结果而否定另一实验结果。因此,对本手术方法不宜持否定态度,宜在总结经验的基础上深入研究,以期找出其规律性。

在疗效评价上,由于复查标准不一,难以进行比较,因此,有作者提出对淋巴水肿肢体应进行两方面的评价:(1)比较手术前后肢体周径,评定水肿消退率;(2)比较手术前后主观症状的减轻程度。但目前仍无统一的标准。

淋巴管静脉吻合的方法有端端吻合法、端侧吻合法、套入缝合法、插入缝合法、淋巴管远端与静脉近端吻合法和淋巴管移植术等。在上述方法中,目前鲍梅斯特(R. G. Baumeister)较推崇淋巴管移植术,该手术系指取一段正常淋巴管移植到淋巴受阻部位,与阻塞段远端通畅的淋巴管吻合,以达到恢复淋巴回流的目的。这是继淋巴管吻合术之后提出的治疗淋巴水肿的一种新方法。对下肢淋巴水肿的,还可将健侧淋巴管游离适当长度,切断远端,近端带蒂,经耻骨联合上方的皮下隧道转移到患侧,与患侧股部病变淋巴管的远端吻合。对乳腺癌根治术后的上肢淋巴水

肿,可用淋巴管移植桥接于上肢的升淋巴管和颈部的降淋巴管治疗。1990年,鲍梅斯特(R. G. Baumeister)和苏达(S. Siuda)报告55例淋巴水肿病人用淋巴管移植治疗,术后随访3年,用患肢体体积测量和淋巴管闪烁扫描进行观察,结果表明移植段淋巴管可获得持久性通畅,淋巴运输指数改善,患肢变细,水肿减少达30%。伯格(A. Berger)也认为,淋巴管移植术虽不能完全治愈该病,但却能使病人的症状减到最轻,从而减少病人的负担。

朱家恺于1988年对正常人肢体淋巴管标本进行观察表明,淋巴管中膜较厚,由3~10层密集成束的平滑肌构成,肌纤维交错斜行或纵行走向,部分肌束带着表面的内膜向管腔内突起形成肉柱,使管腔面呈波浪状起伏状。这种以形成肉柱及环形平滑肌束为特征的淋巴管结构是其自发性节律性收缩的物质基础。此外,他们还对淋巴水肿肢体的淋巴管标本进行观察,发现淋巴管管壁的病理变化主要表现为平滑肌的肥厚增生和透明样物质沉积,分别代表早期的和晚期的典型病变。建议临床宜早期在淋巴管尚有收缩功能时进行淋巴管静脉吻合术,以利淋巴的流动及吻合口的长期通畅。一旦发生淋巴管透明样变、管壁硬化、收缩功能丧失,即使引流手术近期疗效尚好,亦难确保远期疗效。

张涤生等在作小淋巴管移植实验中发现,对侧供区肢体由于切取淋巴管后面诱发淋巴水肿。1983年,朱家恺等报道用静脉移植桥接淋巴管的动物实验,认为静脉桥接淋巴管的手术是可行的,并提示移植的静脉段有淋巴化的倾向。总的来说,开展显微淋巴外科手术的时间不长,目前提出的各种显微淋巴手术对治疗淋巴水肿的远期效果也不一致,这主要是由于目前对淋巴管在水肿形成过程中的一系列病理生理过程、可逆程度、淋巴压的产生和变化的了解还不十分清楚,尚待继续深入研究,积累更多的经验,并制定统一的复查标准。改进操作技术、吻合方式,寻找可靠的方法保持吻合口持久通畅等等,都是今后应该继续努力研究的课题。

#### 参考文献

- 1 朱家恺,等. 显微外科, 1979, 2: 80
- 2 汤海云,等. 中华显微外科杂志, 1985, 8: 111
- 3 张涤生,主编. 显微修复外科学. 北京: 人民卫生出版社, 1985. 331~366
- 4 黄恭康. 中华显微外科杂志, 1987, 10: 179~180
- 5 O'Brien B M, Morrison W A. *Reconstructive Microsurgery* Edinburgh: Churchill Livingstone, 1987
- 6 朱家恺,主编. 显微外科进展. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1989, 1~10
- 7 Baumeister R G, Siuda S. *Plast Reconstr Surg*. 1990, 85(1): 64~74
- 8 Berger A. *Reconstr Surg*, 1990, 85(1): 75~76

(中山医科大学朱家恺教授、张自杰博士撰)

### 食管癌的外科治疗

**surgical treatment of the esophageal carcinoma** 食管癌是人类常见的恶性肿瘤之一,全世界每年大约有20万人死于食管癌。中国是食管癌高发区,每年死亡病人占恶性肿瘤死亡总数的21.8%。在现行的各种治疗方法中,与化疗、放疗和激光治疗相比,手术治疗患者的生存率最高。多数学者认为,手术是食管癌患者的首选疗法,食管中下1/3的癌肿更适于手术。中国从60年代初开展的大规模地区性普查工作,由于广泛应用了脱落细胞检查方法,使大量早期食管癌病人如原位癌或早期浸润癌得以发现,手术切除后的5年生存率达到90%以上,为食管癌的外科治疗展示了美好的前景。

外科治疗食管癌及贲门癌始于1877年, Czerny 1次报道切除1例颈段食管癌获得成功。1885年, Symonds 采用食管腔内置管方法来解决食管癌患者经口进食的问题。1911年, Lane 和 Kelling 分别报道了用皮瓣和结肠重建食管通道的方法。经胸手术的开创者是 Torek, 他于1913年经左胸切除中段食管癌成功,但代替食管的是连接颈部和胃两瘻口的胶皮管。至1938年,

Marshall 和 Adams 分别报告了经左胸切除食管癌,在胸内行食管-胃吻合的方法,其优越性很快为各国学者所公认。1933年, Turner 创造了不开胸的隧道手术法,在此基础上, Ong, Lee 和 Orringer 等人分别开展了不经胸经膈肌裂孔钝性食管剥脱术和食管内翻剥脱术。1958年, Seidenberg 等人用游离空肠移植重建食管成功。1959年前苏联的巴布金等人制成食管-胃吻合器。1976年后, Mckeown 的经右胸、颈、腹三切口食管切除术也逐渐得到推广应用。

中国第1例食管癌切除由吴英恺于1940年完成。1966年,邵令方等创用食管-胃吻合包裹缝缩术及胃腔内食管-胃吻合法,1972年又研制成功中国独特的食管-胃吻合器。

100多年来,食管癌外科手术已全面普及。根据 Müller 等人对1980年至1988年全世界报道的76911例手术的统计,总的手术切除率为56±21%,手术死亡率为13±8%,术后1年生存率为56±13%,2年生存率为34±2%,3年生存率为25±12%,4年生存率为21±11%,5年生存率20±11%。颈段食管癌多行咽食管切除术。在经胸手术中,中国医生比较喜欢经左胸手术,国外则多经右胸手术,只有对贲门癌患者才经左胸手术。对呼吸功能差的病人,不经胸经膈肌裂孔食管剥脱术应用越来越多。一半作者主张手术中同时分组清扫胸内淋巴结,但也有人认为这将使术后肺部并发症明显增多。

食管癌的病因是复杂的和多方面的,统计资料表明,患者中有阳性家族史者占23.95%~61.4%。Gasson 等人发现在食管癌细胞中有P<sup>53</sup>肿瘤抑制基因的突变,正常P<sup>53</sup>顺序为CGT,在鳞癌细胞中变异为CTT,在腺癌细胞中变异为CAT,在Barretts,食管上皮中也存在着这种变异,说明食管癌与遗传因素有关。

如何早期诊断食管癌是延长术后患者生存时间的关键。根据X线检查、常规内窥镜检查及活检的对比发现,X线检查最小可发现7mm×4mm的肿瘤,广视野内窥镜最小可发现2~3mm直径的肿瘤。在内窥镜下用Lugol氏溶液染色对早期食管粘膜层癌肿的诊断有很大帮助。正常组织染色后呈棕褐色,而肿瘤组织呈红色或不着色,这对确定肿瘤浸润的范围亦有很大作用。

食管癌的治疗方法因人而异。对术前放疗的价值有不同的看法,放疗可以缩小肿瘤病灶,使肿瘤周围组织中的癌巢灭活,减少癌细胞在手术中扩散的可能性,但它也会增高手术并发症的发生率,吻合口瘘比对照组多3倍,使术后患者死亡率显著增高,而术后生存率并无明显改善。Hilgenberg 等设计了术前用5-Fu和顺铂化疗,然后手术,术后选择性放疗或化疗的方法,3年半生存率达54±10%;但也有些问题未能解决,如化疗药物的毒性反应往往使病人到手术时身体条件变差,诊断和手术之间耽误时间太长,手术死亡率增高。

如何提高手术切除率和术后生存率,重要的一条是选择好手术适应证。Lefor 等人认为,肿瘤的部位、性质、组织学分化程度、局部病变的浸润和侵犯血管与否、淋巴结转移、嗜酸细胞减少以及术前是否化疗等对预后的估计均没有价值,而肿瘤在纵隔内浸润的宽度对术后患者生存时间有很大影响,他们发现胸部CT显示肿瘤宽度3cm是个界限,小于3cm者术后1年和3年生存率比大于3cm者高3倍。也有些学者作类似的研究发现,肿瘤宽度在2.8~3.7cm均对预后积极意义。另外,Tabubo 等研究食管癌在食管壁内转移对预后的价值。凡在食管和胃壁上发现来自原发食管癌的转移病灶,两病灶之间的距离在5mm以上即为壁内转移。这种转移情况通过X线钡剂或食管镜检查大多可以确诊,其发生率约占食管癌的7.0%~14.3%。随访比较证明,无壁内转移者术后3年生存率比有壁内转移者高3倍,5年生存率高2倍。

食管癌的手术方式多种多样。颈部食管癌切除后重建食管通道有几种方法,如皮瓣成形、游离空肠移植、胃上拉、结肠间置等。所有研究资料均表明,空腔脏器成形比皮瓣成形好,胃上拉比游离空肠移植效果好。在经胸手术中,经左胸比经右胸或胸腹



联合切口有更多的优点,它能切除食管各段的肿瘤,术后死亡率和并发症发生率均比较低。与经胸手术相比,经膈肌裂孔食管剥脱术可以降低肺部并发症的发生率,但因钝性游离时可能造成纵隔内大出血、肿瘤破裂及喉返神经损伤,其危险性并不比经胸手术的低,术后生存率也不高。为了避免这种手术的缺点,Saidi设计了一种不经胸的食管内拉出术,开腹游离胃后,将膈肌脚切开,贲门套带向下牵引,距肿瘤上缘3~5cm呈环形切开食管肌层,直至粘膜层,手指尖插入肌层和粘膜层之间,不断向上钝性分离,超过主动脉弓和隆突的水平,颈部作左胸锁乳突肌前缘切口,分离出颈段食管,向上牵引,环形切开肌层,同法向下用手指分离,直至上下贯通,然后切断颈部食管,将完整的食管粘膜套带向下从腹部拉出,再将胃或结肠从食管肌鞘内拉至颈部作吻合。这种手术不损伤纵隔结构,术中术后出血均很少。主要的并发症是颈部吻合口瘘,大多能自行愈合。这种方法对食管下段癌和贲门癌又有肺功能损害的病人较为适宜,其远期疗效尚待观察。为了解决术后返流性食管炎的问题,保留贲门的术式亦已在临床应用,选择肿瘤下界距贲门大于5cm的病例,术中距贲门上1.5~4cm切断食管,切除肿瘤后,行主动脉弓上或弓下食管端-端-层吻合,折叠胃底包埋吻合口,术后进行食道测压检查,证明该术式保留了食管下括约肌的功能,使食管下括约肌压力值高于胃内压 $1.09 \pm 0.16 \text{ kPa}$ ,说明这种术式有很好的抗返流性。1981年,张毓德等创用食管胃腔内弹力环扎吻合术,利用弹力乳胶环将胃和食管壁结扎于食管腔内的支撑管上,造成局部缺血后的环形切割。此法操作简便,改变了吻合口缝合的传统做法,其缺点是有极罕见的致命并发症——吻合口主动脉瘘。翁品光等人进一步研究认为,乳胶环的弹性压力必须适当,太大或太小都会失败,而预防吻合口主动脉瘘的关键是用带蒂大网膜悬吊缝合包裹在环扎口外,此法尚在试验中。对于已有淋巴结转移或已侵犯周围脏器的晚期食管癌者,是否手术也有争议,对比研究表明,晚期肿瘤切除后的患者生存时间平均为10个月,只比完全不治疗的病人稍长一些,而且短路手术也不能延长生存时间;但也有报道能完整切除肿瘤并作淋巴结清扫者,术后1、2、5a生存率可分别达到56%、33%和16%。蒋耀光等认为,对无手术指征而有严重梗阻的晚期食管癌病人,食管腔内置管术仍有应用价值,他们采用的拉管法,在食管镜下将探针送入胃内,再经腹从胃内将丝线扎于探针头部带入口腔,最后用该丝线将喇叭管向下拉至肿瘤部位来置管,具有操作简单、创口小、置管位置准确的优点。

除食管鳞癌和腺癌以外,一些少见的恶性肿瘤亦屡见报道。小细胞癌患者占食管癌患者的0.05%~7.6%,对化疗较敏感,常用长春新碱、环磷酰胺、阿霉素、顺铂和VP-16(麦鬼白毒)治疗。单纯化疗生存期为7.8个月,单纯放疗者生存期4.1个月,而手术切除平均生存期8个月,少数可达2年以上。恶性黑色素瘤发病率为0.3%,手术切除后患者最长生存期为36个月,而单用放疗者生存期可达51个月。食管肉瘤有平滑肌肉瘤、纤维肉瘤、横纹肌肉瘤、滑膜肉瘤、脂肪肉瘤、骨肉瘤和软骨肉瘤,发生率约为0.5%,放疗对缓解吞咽困难很有效,手术切除后患者的5a生存率可达26%。

#### 参考文献

- 1 河南医学院主编,食管癌.北京:人民卫生出版社,1983.192~193
- 2 Hilgenberg A D, et al. Ann Thorac Surg. 1988, 45(4): 357~362
- 3 Saidi F. Ann Surg. 1988, 207(4): 446~455
- 4 Lefor A T, et al. Cancer. 1988, 62(10): 1287~1292
- 5 Abe S, et al. Surg Gynecol Obstet. 1989, 168(2): 115~120
- 6 Müller J M, et al. Br J Surg. 1990, 77(8): 845~857
- 7 蒋耀光,等.中华胸心血管外科杂志,1991,7(3):163~165
- 8 Gasson A G, et al. J Thorac Cardiovasc Surg. 1991, 102(5): 707~714
- 9 翁品光,等.中华胸心血管外科杂志,1992,8(1):37~42

(安徽医科大学第一附属医院于在诚  
主治医师撰;周久华审)

**腹部闭合性损伤诊断的进展** diagnostic progress of colse abdominal injury 随着工农业生产和交通事业的日益发展,暴力致腹部闭合性损伤(BAT)者明显增加,且并发症多,死亡率高。但由于现代外科学技术、麻醉、复苏以及监护措施的很大进步,BAT者的死亡率在单发性器官损伤时已有所降低,但严重的多发性损伤者的死亡率仍然很高,其主要原因是延误诊断。

BAT常因伤情复杂给早期诊断带来困难。传统的诊断方法是靠采集病史、临床检查、实验室及一般X线检查等,这些虽有助于初步确定腹内脏器损伤的性质和部位,然而仍有相当多的病人未能获得确切的诊断。1926年,Neuhof及Cohn成功地利用腹腔穿刺诊断疑难的急腹症以后,腹腔穿刺已广泛应用于BAT者,并经实践证明是一种很有价值的诊断方法,但诊断性腹腔穿刺的假阴性率高达17%~36%。Giacobine观察发现,穿刺误伤腹腔脏器的机会达39%,有时反而给临床诊断带来混乱和困难。近几年来,由于相关学科的发展,许多特殊检查新技术进展迅速,为早期诊断BAT提供了不少新的辅助检查方法,其手段有诊断性腹腔灌洗、B型超声波、电子计算机控X线断层扫描、核素扫描、腹腔镜、选择性动脉造影等综合性影像诊断。这些新的精确的诊断手段的应用,大大提高了BAT的诊断正确率。

**诊断性腹腔穿刺和灌洗(DPP、DPL)** 诊断性腹腔穿刺(DPP)方法简单易行,安全可靠,阳性率高,其准确率达80%以上,仍为现今早期诊断BAT的好办法,适合于难以明确诊断BAT及伤后难以解释的休克病人。穿刺点可因损伤部位的不同而作选择,最常用的为两下腹部。穿刺收集标本作细胞计数、细菌涂片和培养、蛋白测定,必要时作淀粉酶测定。若一无所得可改变针头方向、角度和深度,亦可注入20~30ml生理盐水,停留片刻再抽吸,重复检查,以增加阳性机会。

1965年Root等采用小切口进行诊断性腹腔置管灌洗,证明是一种既简单、敏感又安全、可靠的方法。对损伤后严重休克、昏迷、合并颅脑损伤、脊髓损伤、截瘫、小儿等患者以及某些具有潜在性危险的BAT者,有其独特的诊断价值。灌洗方法分为开放式、半开放式和闭合式3类。多数采用闭合式穿刺的方法。穿刺点大多在脐下正中线上,亦可在可疑伤部附近,或远离伤部的其他部位。应避开腹直肌、腹壁水肿以及实质脏器的浊音区。局麻下直接用套管针穿刺进腹,插入多孔塑料管或腹膜透析管至腹腔内20~30cm,注入生理盐水1000ml(即10~20ml/kg体重),放低导管并接消毒瓶,借助虹吸作用,慢慢地再回收灌洗液。若腹腔内有25ml血液,即可染红1000ml灌洗液,每毫升灌洗回收液中红细胞超过10万或红细胞压积>2%,可确诊为腹腔内出血。白细胞计数> $0.5 \times 10^9/L$ ,有80%~90%的可能为腹腔空腔脏器穿孔。有胆汁或淀粉酶高于正常值是胰腺或十二指肠损伤的可靠依据。确诊率高达98%以上,假阳性率和假阴性率分别为1.4%和1.3%,并发症发生率低于1%。

**B型超声波检查(B-USE)** B-US对仍危重的BAT病人是一种迅速、简单的非侵入性检查方法,成为临床最受欢迎和被广泛应用而列入常规检查的方法之一,对腹腔内出血的诊断尤为可靠。目前主要用于肝、脾、胰、肾等实质性脏器损伤的诊断。国外大宗病例检查结果,其诊断符合率高达95%~99%。Hauenstein对779例BAT者作了B-US检查,误诊率仅1%。B-US对于鉴别腹腔游离液体的敏感度很高,可以发现300ml以下的腹腔内少量出血,其图象或回声图上可探及液平段或液性暗区等。液平段的长度可代表液层厚度,液平段每1cm,平均腹腔积液约500~600ml,能确诊有无血肿、积液,若有,并可对其定位。但对气体的穿透力差,可影响检查结果。

**电子计算机控X线断层扫描(CT)** CT扫描是一种非损伤性检查方法,灵敏度高,可靠性强,能提供解剖细节,不受肠内气体影响,不像核素扫描那样有器官特异性,对实质性脏器破裂或

血肿,能比较准确地迅速地确定其损伤的部位、范围及其和周围器官的关系,能显示一般X线检查所不能显示的改变。如腹腔内出血,能较为精确地估计其出血量。目前主要用于实质性脏器损伤的诊断,准确率达90%以上。为进一步提高确诊率,可同时静脉注射口服造影剂,以增强病变的对比度。CT虽有其独特的优点,但尚未完全普及,检查费用较昂贵,目前还不能完全替代其他各项检查。

腹腔镜检查(PS) 具有直接了解腹内脏器损伤的确切部位、程度和判断出血来源等优点。国外报道,综合性腹腔镜检查的正确诊断率达98.5%~100%。Cortesi认为BAT是PS的主要适应症。尤其对多发性损伤伴休克或昏迷或查体有阳性发现,而一般化验和X线检查阴性,不能排除腹内脏器损伤,难以决定手术探查与否者更为适应。通常只要腹腔内积血50ml,即可直接看到出血点并可紧急处理。PS一般是安全的,但亦可造成患者1.6%的并发症和0.2%的死亡率。对以往有多次腹部手术史,估计腹内有广泛粘连者、有腹腔严重感染史者、妊娠中后期者、心肺功能不全者,应慎重或列为禁忌。

放射性核素扫描(PNS) 它是利用各种脏器对标记化合物选择性吸收的特点,而显示出不同放射性图形。常用示踪剂有胶体金(<sup>198</sup>Au)、锝(<sup>99m</sup>Tc)及碘(<sup>131</sup>I)等。Armas用<sup>99m</sup>Tc标记胶体红细胞的方法,能在30min内选择性地显示出脾脏外形。Cheatham报告,肝脏闪烁扫描可发现1~2cm的微小损伤。当肝、肾、脾破裂时可表现体积增大,形态失常,局部放射性稀疏或缺损区等图形。其分辨率虽不及CT检查,但能够直接观察器质变化,也可了解功能情况,且可重复多次检查,方法简便、安全,诊断正确率较高。对实质性脏器的损伤有重要的诊断价值。

选择性动脉造影(SAA) 能准确地确定损伤脏器的部位、程度及类型,对实质性脏器的钝性损伤的诊断价值较大。通常经右股动脉穿刺插入导管注入造影剂,连续摄片,可发现动脉相的造影剂外漏、实质相的血管缺如以及静脉相早期充盈,其中有一项阳性即可明确诊断。对外伤所致上消化道动脉出血,当不能明确其出血部位和出血无法控制时,行SAA可以迅速确定出血部位,然后行超选择动脉插管栓塞术,能快速止血,可达到诊断和治疗均满意的双重效果。此法是一种创伤性检查,操作复杂,需一定的技术和条件,且有患者一定的并发症和死亡率,一般不能作为首选或常规检查方法,必须严格掌握指征,在基层医院目前尚难开展。

磁共振成像(MRI) 近年来中国应用MRI日益增多,但在腹部扫描方面尚无统一的技术规范,图像质量差别也大。通常以横断面加冠状面切层,必要时辅以矢状面切层,以获得更多的空间定位信息。对腹部损伤,尤其是实质性脏器的损伤有显著作用和效果。检查中无放射损伤,不需要造影剂。由于运动伪影的干扰和扫描参数选择上的不统一,图像质量常不稳定而限制了它的广泛应用,如外伤性休克者、人工呼吸者、心脏起搏器携带者都可影响图像质量,实质性脏器与空腔脏器互相重叠缺乏显著对比,亦影响其结果。

参考文献

- 1 Powell D C. SGO, 1982, 135:257
- 2 Thomas K J. SGO, 1983, 157:389
- 3 龚松南,等.实用外科杂志,1985,11:600
- 4 胡志生.腹部外科,1990,1:46

(安徽医科大学附属医院普外科王光升教授撰)

壶腹部肿瘤影像学诊断的进展 the adrancement of

the image in the diagnosis of perampullary carcinoma 壶腹部肿瘤系指胆总管口壶腹或十二指肠乳头粘膜上皮发生的肿瘤,当胆总管进入十二指肠前,多数与主胰管汇合,构成一共同通路并开口,经十二指肠乳头与肠腔相通,此胆总管下端扩大部分称为Vater壶腹(简称壶腹)。壶腹部肿瘤良性极为罕见,多为乳头状瘤;恶性肿瘤绝大多数为腺癌,其次为乳头状癌、粘液癌等,发病

率约为胰腺癌的1/3,多见于40~70岁男性为女性的2倍,其临床表现颇似胰头癌,然而手术切除率和5年生存率却高于胰头癌,主要原因是本病发展较胰腺癌慢,转移时间晚,而胆总管下端梗阻症状和体征出现较早,使病人较早就医,术后5年生存率约为35%。近10多年来B超、CT等影像学检查的应用与普及,对本病的定位、定性和早期诊断有重要作用。

肿瘤生长在十二指肠乳头或胆总管壶腹部,呈硬结状、息肉状、溃疡或浸润性肿块,瘤体较小,平均为2.5~3.5cm,有报道最大者达15cm。壶腹部癌很容易阻塞胆总管和主胰管,使胆汁和胰液引流不畅,甚至不通而发生黄疸,癌肿组织浸润肠壁可发生坏死,加以易受消化液和食物机械作用的损伤,故易发生溃疡、出血和十二指肠梗阻。

临床表现:(1)黄疸,有人统计,壶腹部癌肿100%发生黄疸,常较早出现,呈进行性加重趋势,有的因癌肿部分溃烂坏死脱落,黄疸可能暂时减轻,但以后又重新加深,此种黄疸变化不应误认为胆石症表现,伴随黄疸出现的同时有胆囊肿大、肝肿大,粪便呈陶土色改变等。(2)腹痛,约占40%~50%,早期因癌肿压迫胆道,使胆囊及胆总管扩张,胰胆管梗阻,压力增高而发生右上腹钝痛或闷胀疼,进食后明显,后期因癌肿浸润范围增大或并发症出现,使疼痛加重,并可出现背痛,但有40%病人临床为无痛性黄疸。(3)发热,因胆道出血、梗阻、感染或邻近部位炎症所致,表现为突然高热、寒战,间断和反复出现,也可为持续性低热。(4)消化道症状,胃肠道出血为另一个重要症状,还伴有食欲不振、饱胀、消化不良、腹泻等。这与胆汁、胰液不能正常参与消化过程有关。(5)上腹部肿块,十二指肠乳头部肿瘤,如乳头状腺癌、淋巴瘤等生长较快,仔细进行腹部扪诊时,上腹部可触及肿块。胆囊肿大者可先于黄疸出现,约有70%~80%的病人临床触及肿大的胆囊,而超声波检查和手术探查,证明壶腹癌病人胆囊肿大者可达90%以上。因此,临床上将阻塞性黄疸、胆囊肿大和胃肠道出血称之为Vater壶腹肿瘤的“三联征”。(6)贫血和消瘦,贫血为壶腹部癌肿部分坏死慢性出血所致,有的可发生黑便,多数有大便潜血试验阳性。消瘦是营养不足的结果。

诊断:本病若出现黄疸、胆囊肿大及肝肿大,下列检查有肯定的诊断参考价值。(1)影像学诊断:①B型超声检查,可显示肿瘤部位、胰腺轮廓、胰管胆管及胆囊的改变,可提高黄疸的诊断能力,判断梗阻的所在部位,区别梗阻的原因是结石还是肿瘤,能测出胆总管口径和确定胆囊大小,发现胆囊肿大及胆总管胆管扩张,甚至有胆总管下端肿瘤的身影。对于无黄疸的早期病人,可提供进一步检查诊断的线索,但B超检查受腹内气体、肥胖等因素的干扰,对较小的肿瘤显示不清,假阳性率达28%。②十二指肠肠内窥镜检查(ERCP),有重要诊断意义,肉眼可见到癌变的部位,直接观察十二指肠乳头的改变,还可采取活检组织标本和作胰胆管造影,显示胆管狭窄和扩张、胰管的狭窄及中断等,或有胆管与胰管相关位置失常,确诊率高达90%以上,但此项检查需一定的技术,如胰腺癌不侵犯主胰管也常不能发现,对合并梗阻性黄疸者还可经ERCP作鼻胆管引流,为根治性手术术前准备。此外,还可取胰液或穿刺胰腺作细胞学检查。③经皮肝胆管穿刺造影(PTC),适用于壶腹部癌肿引起胆管扩张伴黄疸者,对确定胆道梗阻部位和性质有较高价值,可显示肝内外胆管扩张、狭窄、充盈缺损、中断、移位、管壁僵硬等。PTC和ERCP联合应用,更能明确病变部位和范围。但较难鉴别壶腹部癌、胆管下端癌和胰头癌。穿刺后置管(PTCD)引流胆汁可缓解梗阻性黄疸,改善肝肾功能 and 全身状况,为手术作好准备,但处理不当可引起腹腔内出血和胆汁性腹膜炎等并发症,应注意避免。④电子计算机X线体层扫描(CT),是显示胰腺最好的检查方法,对判定胰腺组织有无异常有高度可靠性。Fitzgerald等报道,CT诊断胰腺癌的阳性率为94%,发现最小肿瘤直径为1.0cm。影象表现为胰腺增大,轮廓不规则伴有缺损,病变区呈现高密度或圆形,在胰头部癌者能发现胰管、胆管扩张、胆囊肿大;胰体部癌肿远端水肿而使密度下降,并均匀一致;胰尾部癌者往往有脾大,并向大血管浸

润扩散,除胰腺本身改变以外,还可见胰周围的淋巴结、肝及大血管转移等。CT对识别肿块性质有中度特异性,不易与慢性胰腺炎鉴别。Dickey等提出在CT引导下经皮穿刺胰腺活检诊断胰腺癌,该法能准确抽吸标本,且可重复取标本,未发生任何并发症。

③X线钡餐十二指肠低张造影,除可见扩张的胆囊和胆总管对肠壁的压迫,癌体较大时有充盈缺损,还可显示肠乳头肿物、粘膜和肠腔的变形等,但小的癌肿却不能显示。有时可见到十二指肠内侧壁粘膜呈反“3”字征。这一检查方法对壶腹癌诊断的准确率为90%。

④胰腺同位素扫描。胰腺可利用进入体内的氨基酸合成消化酶,注入静脉血中的75 硒-蛋氨酸能很快进入胰腺,参加消化酶的生物合成,因而可扫描出胰腺的轮廓。胰腺癌者可显示充盈缺损或放射线吸收减低区,但与慢性胰腺炎的鉴别困难。显示正常的扫描图形基本上可排除胰腺疾病。Fitzgerald等报道胰腺癌同位素扫描的阳性率为31%。

⑤血管造影。应用血管造影诊断胰腺肿瘤国外已有30多年历史,血管造影技术也从选择性血管造影发展为超选择性血管造影、药理学性血管造影,特别在日本,应用血管造影诊断胰腺癌已被作为常规方法。国外文献对血管造影的确诊率报道不一,大致在60%~90%之间。动脉造影可显示胰腺及壶腹部癌肿所造成的血管改变,诊断出直径小于2cm的小胰癌。通过血管造影可以判定肿瘤的大小、浸润的范围,有无肝转移等,从而决定手术适应证和手术方式,并对手术切除的可能性及预后作出估计。血管造影在胰腺癌的诊断中最主要的是动脉相、静脉相和毛细血管相具有辅助性诊断意义。动脉相胰腺癌局限于胰腺内者表现为动脉断裂、锯齿状改变、狭窄、压迫移位、异常屈曲、牵直、不规则扩张、变细等。癌肿突破胰腺被膜向周围浸润后周围血管有变化,如肠系膜上动脉、胃十二指肠动脉、肝总动脉、脾动脉等出现不规则狭窄闭塞、血管边缘不整、受压移位等改变。毛细血管其变化,胰腺癌是缺血性肿瘤,在肿瘤占据部位出现无血管区,其范围和癌肿大小基本一致。

(2)实验室诊断:①癌胚抗原(CEA),对胰腺癌有一定诊断价值,胰腺癌血清CEA可明显增高,阳性率达45%~80%;CEA水平的测定有助于对癌肿大小和有否转移作出估计,还可用来监测手术的疗效。但约有20%的非肿瘤病人,包括胰腺炎、胆道梗阻、溃疡病等也可明显增高。②胰腺癌胚抗原(POA),存在于胚胎胰腺和胰腺癌组织中,约50%~80%的胰腺癌病人血清POA增高,特异性高达90%,但有一定的假阳性。③CA19-9,一种与消化道癌相关的抗原,由单克隆抗体所鉴定。目前认为是胰腺癌的重要标记物之一,其浓度的高低与肿瘤大小有关,肿瘤大于3cm者明显增高。裴东坡等报告,胰腺癌病人CA19-9阳性率为86.67%,血清CA19-9的阳性率在胰腺癌与良性胰腺疾病、慢性胰腺炎间,有显著差异,故CA19-9对良恶性胰腺疾病鉴别诊断有一定意义。④胰癌相关抗原(PCA),血清的敏感性为78.2%,特异性为94.6%,血清PCA $\geq$ 300u对胰腺癌有诊断价值。⑤胰腺特异抗原(PaA),血清的敏感性为80.65%,特异性为95.23%。⑥其他,血红蛋白降低,尿胆原试验阴性。粪便多次隐血试验阳性,可有较多的脂肪滴;黄疸指数增高,转氨酶、转氨酶和碱性磷酸酶增高,少数病人血淀粉酶高于正常值。十二指肠引流液有多量红细胞,并可能找到癌细胞。(3)剖腹检查:当术中未发现胆总管下端无结石时,应细致探查壶腹部或十二指肠乳头处,必要时应切开十二指肠探查,并取组织作冰冻切片检查以明确诊断。众所周知,胰腺及壶腹部周围癌病理诊断困难,常用的活检方法,术中切取活组织因切取过浅,未达到癌肿所在部位,易得出假阴性结果;如果切取过深易损伤胰管及胆管,引起胰瘘和胆瘘。Dekker等统计壶腹部周围癌冰冻切片的假阴性率为15%~45%。此外,还可能出血、胰瘘和急性胰腺炎等严重并发症产生,近年来采用术中直视下细针穿刺活检可在较小的范围内对胰头、壶腹区肿瘤多次穿刺,并可进行多方向穿刺,恶性肿瘤的阳性检出率达87%~100%,并发症发生率很低,也无穿刺道癌种植的危险,是明确胰头、壶腹部癌肿的安全可靠、简单有效的检查方法,可常规应用,并可代替活检术,从而避免因活检引起出血、胰瘘、急性胰腺

炎等并发症发生。

治疗,以手术为主。有切除术和支持性手术两类,并可用抗癌药物等辅助治疗。(1)胰头十二指肠切除术:此种手术侵袭性很大,术前应有充分准备。病人有严重黄疸、全身状态欠佳,可用经皮肝穿刺置管的方法引流胆汁,改善术前病人的情况,创造条件后再手术。(2)支持性手术:壶腹癌侵及肠系膜上血管、门静脉或有肝转移等,均不宜作广泛性切除术,为了解除黄疸,可施行胆总管(或胆囊)与空肠(或十二指肠)的吻合,以引流胆汁,保护肝功能;发生十二指肠狭窄者,可施行胃空肠吻合术,以改善病人全身营养情况。(3)化学药物治疗:常用5-Fu、丝裂霉素C等,或与卡氮芥、长春新碱等联合应用,一般切除术和支持性手术以后用药。(4)用中药、生血药、维生素、胰酶制剂,有继发性糖尿病者需用胰岛素。

#### 参考文献

- 1 Del rillano B C, et al. clin chem, 1983, 29: 549
- 2 滕仁智, 等. 中华外科杂志, 1984, 22: 19
- 3 何三光, 实用外科杂志, 1987, 7: 393
- 4 孟承伟, 等. 实用外科杂志, 1988, 8(8): 431
- 5 安子元, 等. 实用内科杂志, 1990, 10(5): 244
- 6 裴东坡, 等. 中华外科杂志, 1990, 28: 625
- 7 田雨霖. 实用外科杂志, 1991, 11(8~9): 470

(安徽医科大学第一附属医院王蔚董副教授撰)

### 超声导向经皮穿刺无水酒精治疗肝囊肿

the injection of pure alcohol through percutaneous transhepatic aspiration under the ultrasonic guidance treats the hepatic cyst

非寄生虫性肝囊肿(即单纯性肝囊肿,简称肝囊肿)在过去比较少见。随着超声和CT的广泛应用,本病患者不断增加,已成为最常见的肝良性占位病变。B型超声对囊性病变的诊断极为敏感,确诊率可达98.3%。超声导向为准确达到靶物提供有效方法。肝囊肿在病理上可分血肿后性囊肿和退行性囊肿、内皮细胞囊肿和胆阻塞所致的滞留囊肿等。除多囊肝外,常见的肝单发性囊肿和多发性囊肿一般被认为是小胆管阻塞造成的滞留囊肿,但临床手术末从未证实过胆管阻塞的存在,有人认为是胚胎发育异常所致。肝囊肿生长缓慢,早期患者无明显症状,可被超声、CT和在剖腹手术时发现。出现症状时年龄偏大,且女性病人占多数。临床表现为腹部胀痛、肿块、肝脾肿大,巨大肝囊肿可有肾功能损害,附近器官被推移压迫,门静脉回流受阻,门脉高压,出现食管下端和胃底静脉曲张,下肢浮肿,腹围增大,有的影响正常生活。有人主张对出现症状的肝囊肿患者应行手术治疗。然而外科治疗的适应证和术式仍有争议。1981年以前,国内外对症状明显的肝囊肿患者行手术治疗,术式为切除囊壁、缝合关闭创面或做囊肿空肠吻合术(Roux-Y吻合)或囊壁与腹部切口袋形缝合术等,希望囊肿消失。因手术并发症多,复发率高,效果不理想,故很早就有人试图寻找有效的非手术治疗法。1977年, Saini采用经皮穿刺抽液治疗肝囊肿,随访发现两年内全部病例均复发。1976年, Goldslein等首次采用抽吸囊液后向囊内注入碘油使整壁变性坏死的方法。治疗肝、肾囊肿。1981年, Bean报道应用酒精治疗肾囊肿。1985年, Bean和 Trinkl等从肾囊肿无水酒精治疗法得到启示,应用到肝囊肿获得满意效果。日本东京大学H. Kogure等治疗24例肝囊肿,以手术为主。北京友谊医院于中麟等5年内用超声导向穿刺硬化剂治疗肝囊肿13例。安徽医科大学附院陈立武1987~1993年用超声导向注入无水酒精治疗32例肝囊肿。超声导向经皮穿刺无水酒精治疗肝囊肿的主要方法如下:

**病例选择** 在超声或CT检查后确诊,有症状的单发囊肿居多。治疗的肝囊肿大小均在4cm直径以上,也有大到20~30cm的巨大囊肿,对较大的多发囊肿可分别多次穿刺或置管引流,定期注无水酒精。认为有明显出血倾向的肝包虫囊肿,囊肿与胆道或腹腔相通及多囊肝均不宜采用此方法,或慎用。

**方法及步骤** 术前常规做肝肾功能检查及出凝血时间检查,在B超或CT引导下进行。穿刺点为距囊肿最近部位,常规消毒铺巾及局麻。采用18号带芯穿刺针,长15~20cm,内径0.6~0.8cm,刺破皮肤、肝脏及囊壁,抽出积液,按抽出液的25/100量注入99.5%的无水酒精,囊液为无色透明水样液,少数为草绿色,如囊液并发感染,中有混浊的絮状物。囊液在300ml以下注入无水酒精比例为20%~25%,囊液500ml以上每次注入无水酒精也不超过120ml。尽量抽尽囊液。固定针位置,按比例注入99.5%的无水酒精,等待10~15min,在保持针不移位的情况下改变体位,让酒精与囊壁充分接触,再尽量抽出注入的无水酒精,一般抽出量较注入量为少,剩余的酒精无中毒反应。有的学者为防止巨大囊肿一次快速抽液,可能产生并发症,实行24h间断抽吸。有的研究者认为短时间抽出巨大囊肿的全部囊液不会产生不良影响。囊内有小部分囊液残留可稀释无水酒精,减弱其治疗作用。在注酒精前2min可注入2%利多卡因10ml以防疼痛。Trinkl等认为一般注入囊内10ml无水酒精就已足够;Bean和Rodan主张以囊液总量的25%为宜;J. Willam.认为超过囊液总量的12%可破坏囊壁组织,使囊肿不再复发,低于12%则易于复发。多个囊肿者可先抽治1个,再抽治第2个、第3个,每次可穿刺3~5个囊肿。

**无水酒精治疗机理** 无水酒精注入疗法,最初应用于治疗肾囊肿和肿瘤。1985年,Bean等报告将95%~99.5%的无水酒精注入肝囊肿内,能使周围囊壁脱水固定,囊壁细胞蛋白质凝固变性坏死,局部血管壁变性,内皮细胞破坏形成血栓,切断血供,致纤维化,从而使囊肿缩小,停止囊液分泌。注入无水酒精后进行病理学检查,发现注入区周围有1~2cm范围组织坏死,有中性白细胞、淋巴细胞浸润和纤维细胞生存。

**并发症** 向肝囊肿注入无水酒精,是一种安全可靠的治疗方法,很少发生严重的并发症。约50%的病人在注酒精时,可放射到肩部用一般止痛剂可止痛。穿注后极少数病人不能忍受疼痛,须用吗啡、杜冷丁等止痛;可能因酒精沿针道流入腹腔刺激膜引起,也可能因酒精损害肝内毛细血管网引起。有的注后出现饮酒后样症状,颈后有灼热感,系酒精进入正常肝组织内大小血管引起,因此在注入前应回抽,看有无回血,防止酒精注入血管内。发热可出现在术后5~7d,不须处理,但很少出现。囊肿内出血可能由于刺破正常肝脏的较大血管所致,经保守治疗可以止血。无水酒精也有止血作用。所有接受过治疗的病人,均无严重出血等并发症。治疗后未发现肝功能受损害;而原有肝肾功能受损害的,经治疗后明显好转。

**结果** Bean和Rodan治疗肝囊肿患者6例,其中单发3例,多发3例,囊肿直径6~20cm,囊液量90~4500ml。一例治疗后囊内出血,随访6~18个月全部囊肿愈合。Andersson等治疗9例,平均62岁,3例单发,6例多发,囊肿直径5~20cm,囊液量50~3100ml,随访8~54个月,8例囊肿完全或基本消失,6例临床症状消失,2例减轻,1例无变化。

于中麟等治疗26例,孤立囊肿16例,多发弥漫性者1例,多发和并发多囊肾5例;45岁以上占90.9%;囊肿直径20cm以上的,囊液超过2000ml;直径10cm以上的,囊液大于1000ml;直径5cm的,囊液100ml以上。囊液无色透明者居多,亦有呈粉红色的。总有效率86.7%,囊肿基本消失者占73.4%。陈立武1987~1993年治疗32例肝囊肿,患者男14例,女18例,最大77岁,最小24岁,平均45岁以上。大部分病人有腹胀、隐痛、肝大。体感染者有发热、白细胞增高。30例用B超诊断,2例用CT诊断。单发囊肿28例,多发4例,合并肾囊肿3例。囊肿直径5~10cm26例,11~23cm3例。住院治疗7例,门诊治疗25例。抽液1次13例,2次8例,3次5例,4次6例,置管引流2例。一次最多抽囊液2200ml,一例积累抽液5500ml,最少抽液30ml,平均每例抽液172.9ml。注入无水酒精比例平均为18.6%,随访痊愈者28例,明显好转者4例。

**经验和存在的问题** 超声导向穿刺抽吸注入无水酒精治疗

肝囊肿是近几年国内外采用的新方法。它改变了传统的手术疗法,简便,创伤小,大部分病人不须住院治疗,较手术疗法为优。费用低,痛苦小,治愈率高。在有B超的医院均可开展此项工作。陈立武治疗的肝囊肿患者每例穿刺治疗次数多,注入腔内无水酒精量充足(18.6%),随访时间长。注入方法合理是治愈率高的关键。治疗一周后B超复查,囊肿消失或在2.5cm以下者不再穿刺,一月后复查,2.5cm以上的囊肿仍继续治疗。多囊肝的治疗方法还待改造。对超过5cm的多个囊肿,可一针多点、多方向、多个囊肿抽吸注入治疗。对多而小的囊肿掌握注入酒精量困难,且费时,病人和医务人员耐心不够,不能坚持治疗。如耐心治疗,仍可明显地减轻症状。

#### 参考文献

- 1 Tones WL, et al. Br. J. Surg, 1974, 6: 118
- 2 Bean W, et al. Radiology, 1981, 138: 329
- 3 Bean W J, et al. AJk, 1981, 144: 237
- 4 Bean W, et al. Am J. Gastroenterol, 1985, 80: 907
- 5 于中麟, 等. 中华消化杂志, 1987, 7(4): 241
- 6 周末工, 译. 普外临床, 1987, 2(2)
- 7 Andersson R, et al. Br. J Surg, 1989, 76: 254
- 8 刘庆伟, 等. 国外医学临床(放射医学分册), 1991, 1(3): 140
- 9 杨甲梅, 等. 普外临床, 1992, 7(4): 212

(安徽医科大学第一附属医院陈立武副教授撰)

**布-加综合症的当代治疗** the current treatment of Budd chiari syndrome 布-加综合症(B-CS)是指肝静脉开口以上的上段下腔静脉或/和肝静脉回流障碍所引起的症状群。它包括肝静脉回流受阻而产生的肝脾肿大、腹水和食管静脉曲张等门脉高压征象及下腔静脉阻塞而出现的双下肢水肿、下肢和胸腹部浅静脉曲张。

早在1845年, Budd首先描述了原发性肝静脉阻塞综合症。1899年, Chiarzi认为这是肝静脉内膜炎引起的血管阻塞。后来研究者发现患者的下腔静脉也可出现与肝静脉相同的病理改变,从而给B-CS提出了更为广泛的含义,即应包括肝静脉或/和下腔静脉阻塞所产生的综合症。欧美有人称单纯肝静脉阻塞为布-加氏病,而伴有下腔静脉阻塞者则称为B-CS。本病临床并非罕见,东方民族发病率高于西方。中国自60年代后期起,报道逐渐增多,越来越引起人们的关注。

B-CS的病因目前仍不十分明确。有认为是由于先天性血管发育异常形成下腔静脉内纤维隔膜而致梗阻。也有人发现,真性红细胞增多症,原发性血小板增多、阵发性夜间血红蛋白尿以及长期口服女性避孕药等可致血液高凝状态,使肝静脉或/及下腔静脉内血栓形成。此外,肝肿瘤压迫、肝寄生虫及肝外伤也可诱发病。

B超检查是本病初筛诊断常用的检查方法,可大致了解病变血管阻塞部位、程度和范围。而下腔静脉双向造影和测压是诊断本病最主要的方法。造影经皮股静脉穿刺插管至梗阻部位测压,正常下腔静脉压力为0.93kPa,有阻塞时压力可达2.94~4.41kPa;若为完全阻塞,则另从前臂插管,经上腔静脉到达下腔静脉梗阻近心端进行双向造影和测压,以准确了解病变情况及阻塞两侧的压力差。下腔静脉梗阻时,管腔内可见充盈缺损或/和腔内血栓影,若隔膜中央有开口则阻塞部呈壶嘴状影。梗阻附近可出现许多侧枝通路,如膈静脉、肝包膜静脉、脊柱前静脉、奇静脉等。有时还可通过肝静脉造影以确定肝静脉有无阻塞存在。

B-CS偶可自行缓解,多数病人最终因肝功能进行性衰竭而死亡;外科治疗效果明显优于内科治疗。手术前,应全面检查心、肺、肝、肾等脏器的功能状态,以了解其贮备功能。多数患者肝功能正常或轻度损害, A/G正常。只有晚期病人才出现明显肝功能损害或胆红素升高,这也正是与肝炎后肝硬化门脉高压症病人的不同之处。给予保肝和支持治疗,可为手术创造良好的条件。此外,有学者提出术前行肝穿刺活检以了解肝脏病理改变,窥管造

影了解有无食道静脉曲张,为外科治疗方法的确定提供参考依据。

B-CS的分型方法甚多,手术治疗大体上分为3类:一类是通过手术直接解除梗阻原因,主要方法有:(1)球囊导管扩张术:Yamada于1978年创用,以导管夹或导线穿透膈膜再行扩张,此法对有孔的膜状梗阻最为适合。(2)经右房手指破膜术:Kimura于1963年首先应用,它适用于不伴狭窄的膈膜较薄的患者,其近期疗效良好,但局部有膈膜碎片的残留,术后可再度出现狭窄或血栓形成。偶因膈膜较厚使破膜困难,甚至血管破裂大出血;也可因伴有血栓使破膜失败或导致肺梗塞。因此,有人在球囊扩张或手指破膜后在下腔静脉内安置内支撑管,以防上述情况发生。(3)根治性膈膜切除术:许培钦等提出,对膜状阻塞、球囊扩张或手指破膜失败或术后复发者以及病变范围小于2cm的节段性下腔静脉阻塞者采取根治性膈膜切除术。他们采用经胸使用气囊导管控制肝静脉和腔静脉血流,无须阻断肝蒂,也无须使用体外循环,从而减少对全身循环及肝功能的影响。对有以下腔静脉狭窄者可进行成形术,对继发性血栓者可同时手术切除。这是一种值得推荐的优良术式。还有人对于下腔静脉继发性狭窄者采取腔内进行扩张和腔外进行松解的方法达到根治目的。第2类手术是经各种途径的门(静脉)、(右心)房转流术或(下)腔房转流术。当无条件施行上述直接术式时,应用大管径人造血管进行旁路转流以缓解门静脉高压或腔静脉高压。对只有肝静脉闭塞而下腔静脉完全通畅者可行门腔静脉侧侧分流术;对下腔静脉厚膜或长段完全性闭塞而肝静脉通畅者,首选下腔静脉-右心房转流术,它可同时缓解下腔静脉高压及肝静脉高压。当下腔静脉或(和)肝静长段闭塞无法解除者可选用肠(系膜上静脉)房转流术,它可直接降低门静脉高压,并可间接缓解下腔静脉高压,对有食道静脉曲张及其出血和有顽固性腹水者更为适宜。此外,还有采用脾静脉(或门静脉)右心房转流术者,但后者易使患者发生肝性脑病。第3类是增加门静脉回流的手术,主要方法有脾(或肝)肺固定、大网膜包肺或大网膜胸骨固定等,手术通过术后建立更多的门体侧支循环来缓解门脉高压症状;但这类手术既不产生即时减压效应,也难达到理想的减压效果,临床应用日渐减少。此外,还有人用胸导管-颈内静脉吻合术以扩大胸导管开口,增加淋巴回流,但此术疗效有限。

目前,对B-CS的研究仍在不断深入,外科治疗的5年生存率达59%以上,明显优于内科治疗。有人将肝移植手术推荐为B-CS的定型手术,报告3年生存率达54%,对Laennec's或坏死后肝硬化者最适用该手术治疗。Jenning、RH提出因下腔静脉阻塞所致的B-CS2期手术法:第1期为肠系膜上静脉-右心房转流,3~6月后行第2期门腔侧侧分流术,同时在腹腔内阻断肠房分流,2期手术可使腹膜后侧支循环逐渐形成,肝功能受到保护,肝脏淤血得以改善。

#### 参考文献

1. Jenning R H. SGO, 1989, 169(6): 501~505
2. 方驰华,等. 实用外科杂志, 1990, 10(4): 219
3. 穆庆岭, 吴太璞. 普外临床, 1990, 5(1): 4
4. 汪忠镐. 实用外科杂志, 1990, 10(9): 498
5. Klein A S. Ann Surg, 1990, 212(2): 144~491
6. 许培钦等. 普外临床, 1992, 7(1): 37

(安徽医科大学第一附院普外科宋海屏副教授撰)

### 门脉高压症现代治疗进展

current treatment progress of portal hypertension 外科治疗门脉高压症(HP)的目的主要是治疗它所引起的食管静脉曲张破裂出血和脾肿大引起的脾功能亢进。HP的治疗方法有多种,至今尚无一种方法是绝对好的,各有其优缺点,从远期生存率来看,多种不同类型的手术之间并无明显的差别。随着对HP的研究,人们不断地进行再认识,认识到HP患者的预后并不取决于其治疗方法,而主要取决于肝脏的病理程度和过程。目前HP的治疗已经进入一个新的时期,

一个对PH进行早期治疗、持续治疗和终身治疗的时期,一个内外科联合治疗的时期。

理论研究 自1894年意大利病理学家Banti提出此病原发于脾脏,并命名为Banti氏综合症以来,人们对HP的发病机理进行了深入的研究,现已形成“肝脏结构紊乱学说”、“内脏循环高动力学说”、“递质代谢障碍学说”3种主要的理论体系,它们是不同的治疗方法的理论基础。

1. 肝脏结构紊乱说。主要认为门静脉不存在静脉瓣,当肝脏内病变导致门静脉回流受阻时,则门静脉压力相应的增高,从而导致门脉系统的侧支循环的开放,该学说是门体分流术的理论基础。

2. 内脏循环高动力学说。根据Ohm定律,  $\Delta P = Q \times R$ , 即门静脉压力取决于门静脉的阻力和门静脉的血流量,内脏动脉系统的高动力灌注会增加门静脉的血流量,加之肝内外大量动静脉短路形成,致使门脉系统的容量剧增而导致HP。该学说是脾动脉结扎术和脾切除术疗HP的理论基础。

3. 递质代谢障碍说。由于肝硬变时肝功能受损以及其它原因引起体内的神经介质、激素等递质物质(如血管紧张素、胰高血糖素、胃泌素、雌激素等)代谢障碍,从而使全身的和内脏的血液循环紊乱,造成门静脉血流量和阻力增高,形成HP。该学说是当前药物治疗HP的理论依据。

非手术治疗 此领域的研究工作近年来发展很快,由于基础理论的研究成果、新的药物及新的仪器应用于实践,已经取得可喜的结果。

1. 药物治疗。自80年代初Lebrec首创全球药物降压以来,不断地有新的药物研制出来并应用于临床。目前用于降低门脉压的药物主要有两大类:一是缩血管药物,用以减少内脏血流量,它们是血管加压素及其衍生物、生长抑制素和 $\beta$ 受体阻断剂。前两者主要用于出血期,而 $\beta$ 受体阻断剂主要用于预防出血,应用经验较为成熟的是非选择性 $\beta$ 受体阻断剂心得安。二是扩血管药物,以降低门脉系统的血管阻力,主要是硝酸甘油、消心痛、 $\alpha$ 受体阻断剂等。这两类药物常联合应用,对肝功能Child A、B级,总的有效率为50%~70%,只有在内科治疗无效时才考虑手术治疗。

2. 气囊压迫法。由Westphal于1930年首创,迄今仍在广泛应用,是对曲张静脉破裂止血效果最确切的一种方法,止血率70%,但拔管以后24~48h内再出血率约60%。

3. 介入栓塞疗法。它不能降低门静脉的压力,而是针对由PH引起的食管静脉曲张破裂出血,急诊的止血率为85%,包括(1)经内窥镜食管静脉曲张硬化剂注射疗法(EIS);由Cragoood于1939年首创,主要作为大多数病例的初步治疗,远期再出血率75%,近期再出血率30%,不主张行预防性EIS,凡EIS治疗失败者,应改行手术治疗。(2)经皮经肝门脉穿刺食管静脉曲张栓塞疗法(PTO);Lunderquist于1974年行PTO成功,止血率为71%~94%,但远期再出血率为13%~86%。(3)脾栓塞术:是一种内科性的脾切除术, Maddison、Trojanouski分别于1973、1980年报道用于治疗上消化道出血,现主要用PTO+脾栓塞术治疗消化道出血。(4)经脐静脉途径栓塞术治疗食管静脉曲张破裂出血。

手术治疗 随着病情的进展,HP患者常最终出现食管下端静脉曲张、破裂出血和脾肿大,并出现内科治疗难以抑制的脾亢,被迫采取外科手术治疗,但迄今为止,尚无一种公认为理想、合理、远期效果满意、从根本上解决问题的方法。理想的PH手术应该具备以下标准:(1)生存质量提高;(2)再出血率低;(3)远期存活率提高。目前PH手术方式分成两大类,即分流术和断流术,这两类手术各有其优缺点,许多外科学家将其两者结合,即分流+断流的联合性手术。这两大类手术间从远期生存率来看并无明显的差别。全肝移植术的成功,不仅治疗PH,还可治疗原有的肝脏疾病,是近年来PH外科治疗领域的重大进展,成为治愈肝硬变的最终方法。

1. 分流术的地位及评价。分流术是一种选择通路的办法,将

门静脉血流在入肝前引流到体静脉,从而达到减低门脉压目的。它又分成传统的门体分流术和选择性分流术。(1)传统的门体分流术(PSS),是指门静脉主干或其属支与体循环腔静脉直接吻合或间接吻合的分流术,包括门腔静脉吻合、脾肾静脉吻合、肠系膜上下腔静脉吻合。目前这种传统的门体分流术有减少施行的趋势,这是因为通过实践发现 PSS 肝性脑病和肝衰发生率高,从对 PH 血液动力学观察人们认识到两个基本问题:①肝硬变时,门脉压升高应被视为机体一种代偿功能的表现,用以维持门脉血向肝灌注即向肝血流量,因而门体分流术势必导致向肝血流量的减少,加重原有的肝脏损害,同时门静脉血不经肝脏处理而直接进入体循环,出现分流后患者发生肝性脑病和肝衰。②门脉循环系在功能上分为两个区,即脾胃区和肠系膜区。脾胃区的冠状静脉压力高于肠系膜区,因而脾胃区的压力升高是形成食管胃底静脉曲张的主要原因。鉴于上述两个原因,现倡导限制性门体分流术(即吻合口限制在 8~12mm,以期达到既有部分向肝血流的存在,不致因为向肝血流量减少过多而导致分流术后肝性脑病)和针对脾胃区高压的选择性的或区域性的分流手术。(2)选择性的分流手术,远期脑病发生率低,生存率较高,尤其在非酒精性肝硬化的病例,有以下两种代表性术式:①远端脾肾分流术(DSRs),又称 Warren 手术,即保留脾脏的远端脾静脉与肾静脉侧侧吻合。DSRS 通过胃短静脉、脾静脉、分流吻合口和肾静脉使食管曲张静脉血流减压,其优点:a. 选择性地降低脾胃区的压力,可以使 PH 的食管下端静脉曲张破裂出血的机会显著下降;b. 肠系膜上下静脉血分流甚少,因此肝性脑病的发生率低;c. 保留脾脏免疫器官;d. 术后肝功能维持较好,有较高的生存率。但经 20 余年的实践认识到,采用该术式:a. 脾亢依然存在;b. 和传统的 PSS 相比,近期的死亡率、脑病率和存活率并无显著差别,但栓塞率较高;c. 手术复杂,不适应急诊手术。②胃左腔静脉分流术(LGCS):由日本 Inokuchi 设计,采用自体大隐静脉架桥,一端与胃左静脉端端吻合,另一端与下腔静脉吻合,同时切除脾脏并离断胃大弯及胃后壁的血管。从理论上说是一种最合理的术式,对胃底和食道下端静脉曲张直接进行降压,不对门静脉灌注构成影响,但 LGCS 手术难度大,结果很难重复而报告不多。

2. 断流术的地位和评价。基于对 HP 血液动力学的认识,要求手术既要保证肝脏的门脉血供,又要控制曲张静脉破裂出血,门奇断流术(PAD)的合理性在于:(1)术后门脉压力不是减低,而是增高,保证入肝血流的增加,从而有利于肝细胞功能的改善。(2)是针对脾胃区高压的手术,针对性强,止血作用即刻发生。PAD 大致可以分成:①贲门周围血管离断术(Hassab);②贲门周围血管离断加食管下端横断术(Sugiura);③食管下端胃底切除术(Hunt);④胃底横断术(裘法祖);⑤食管下端吻合器横断术(EST)或称钉合横断术;⑥栓塞性断流术,即切除脾脏,以栓塞剂完全阻断门静脉间的反常血流,在已经起到断流作用的基础上又栓塞贲门内外的曲张静脉,包括高位食管支,断流彻底性可以和贲门周围血管离断近似,但有发生异位栓塞之虑。PAD 的手术操作简单,但术后复发率、再出血率较高,可能的原因有:a. 断流不彻底,高位食管支未处理;b. 贲门周围血管断流后,粘膜下血管仍有扩张,存在着反常血流;c. 其他异常反流支或代偿反流支未行处理。

**预防性手术研究** 预防性手术是指 PH 病人从未产生食管下端静脉曲张破裂出血即进行手术,旨在预防出血的发生。对预防性手术历来就有争论,一般说因病人未出过血,手术条件好,术后并发症少,而得到一些学者的推崇,在日本的研究资料表明,预防性手术患者出血率为不作预防性手术的 1/6,5 年生存率高出 34.29%,所以主张行预防性手术,基本上行预防性的 PAD。但多数西方国家学者普遍不赞成作预防性手术,原因是并非所有 PH 患者都出现食管静脉曲张,即便出现食管静脉曲张也并非都出现出血,大约各占 50%左右,而且目前尚无科学依据预测某一个体发生出血的危险系数有多大。

**肝移植在治疗 PH 中的地位** 目前所有治疗肝硬变门脉高

压的方法均是姑息性措施。肝移植不仅治疗肝脏疾病,也同时治疗 HP,可从根本上解除 PH 的病因,这是近年来的重大发展。正位肝移植(OLT)患者的生存率逐年改善,报道 2 年生存率为 76%,4 年生存率 73%,而分流术和硬化剂治疗的 4 年生存率仅为 31%和 59%,这些统计资料表明,肝功能 Child C 级肝硬变病例,如硬化剂注射未能控制食管曲张静脉出血,只要不存在禁忌,应考虑行 OLT,对已施行门体分流而失败的病例,亦可以行 OLT。

现阶段的供肝保存、手术技术已渐成熟,特别是抗排斥反应的环孢霉素的应用,使肝移植已被视为较安全的手术。英国剑桥医院至今已行 OLT 700 多例,在适应征中肝硬变占第 1 位,而肝癌降为第 2 位,且患者 5 年生存率已达 50%以上,说明已具有很好的临床应用价值。

OLT 为彻底治愈 HP 开辟了广阔的前景,成为适用性手术。但由于供体的来源困难,所需的技术条件、设备条件高,OLT 尚不能在全世界范围普遍开展。

#### 参考文献

- 1 Inokuchi K. World J Surg, 1984, 8: 716
- 2 Adson M A. Arch Surg, 1984, 119: 609
- 3 Burroughs A K, et al. Hepatology, 1986, 6: 1409
- 4 Anonymous. Lancet, 1988, 1: 1369
- 5 Groszmann R J, et al. Hepatology, 1988, 83: 708
- 6 Jesop M, et al. Gastroenterology, 1988, 95: 725
- 7 Terblanche J, et al. Ann Surg, 1988, 209: 381
- 8 Iwatsukis S, et al. Surgery, 1988, 104: 697
- 9 张近龄. 国外医学(外科学分册), 1990, 6: 332
- 10 房献平, 等. 普外临床, 1992, 7(1): 1~2

(安徽医科大学第一附属医院刘弋副教授撰)

#### 胆道内窥镜

choledochoscope 自 20 世纪 50 年代以来,各种内窥镜的研制、发展较快,现已发展到视野大、图象清、亮度高的第 3 代产品,是由单纯的诊断内窥镜发展为可行多种治疗的内窥镜。如电子内镜,于镜端装有类似微型摄像机的装置,可于电视屏上显示图像;超声内镜,缩短了探头与目标的距离,降低高穿透的要求,图像更清晰,早期诊断腺癌有更高价值。用 ND、YAG 激光的激光内镜,可于胃肠腔内治疗疾病。将微波发生器探头随内镜送入腔道,可应用于诊断与治疗。目前,国内外已开展利用腹腔镜行腹腔内手术。

1923 年, Bakes 设计类似喉镜样的装置,可间接窥视胆总管腔。1930 年 Bartlet, 1937 年 Babork, 用膀胱内镜窥视胆囊,从而 Hollenber 采用胆囊镜一词。1941 年, Mdver 研制“L”形的硬管胆道镜。1941~1952 年间,很少有人从事这项研究工作。1953 年, Wildegan 试制成具三棱镜和透镜的硬管胆道镜,为近代胆道镜的发展打下了良好基础。1963 年 Shore 与 Lippman 报道胆道镜治疗胆石症的实用价值。1965 年 Shore 研制软管胆道镜,并于 1970 年发表对 100 例患者应用纤维胆道镜的论文。1971 年, George 与 Beric 合作采用美国生物学家 Hopkins 的导光系统,研制新的硬管胆道镜,又称 Stoz 胆道镜,这种镜呈 90 度直角,附有取石、活切功能,光导纤维导光,是近代硬管胆道镜的先行者。

近代胆道镜的研究与发展很快,尤其是软管镜的发展更快,如在防水、视角、末端外径、前端弯曲度、清晰度、亮度及治疗用附件等方面均有提高与改进;又研制出经口胆道镜、经皮经肝胆道镜等。

胆道镜可直视检查肝内外胆道,以硬管胆道镜较灵便,操作简单,易被临床医师掌握,对防结石残留与病灶遗留有价值。

术后胆道镜的应用,可通过“T”管瘘道放置纤维胆道镜。

胆道镜所见胆道图象,肝内胆管的粘膜,正常者呈青灰色或淡粉红色,粘膜下血管纹理清晰;胆总管粘膜色泽由近向远逐渐变红,血管纹理不太清晰。胆总管十二指肠段的粘膜呈纵而细的皱褶;接近乳头部变光滑。胆道感染时,粘膜充血,红白相间,

有白色絮状物或黑褐色碎屑漂浮,易出血。

一般内窥镜的清洗与消毒,均不宜高温,以免脱胶而损坏防水设置。常用消毒方法有:(1)40%甲醛(福尔马林)熏蒸。(2)10%甲醛溶液浸泡1h,使用前冲洗以免消毒液进入胆道。用后应刷洗清洁,腔道内液体用橡皮球吸干,用擦镜纸清洁镜面,凉干后收藏以防镜片霉变。

胆道内窥镜的临床应用价值:(1)降低胆道残余结石的发生率。(2)可直观检肝内外胆道病变,能及时纠正探查中的误诊与漏诊。(3)避免用器械盲目探查造成胆道损伤。(4)可术中术后处理病变。(5)术中胆道镜检查虽稍延长手术时间,但意义大,对病人有利。

#### 参考文献

- 1 Yamakaw T, et al. World J Surg., 1987, 2: 279
- 2 山川太郎. 胆道镜, 东京, 1979
- 3 傅培林. 中华外科杂志, 1982, 20: 303
- 4 张宝善. 中华外科杂志, 1982, 20: 352
- 5 Akiyamah, et al. SGO, 1985, 161: 73
- 6 王震宗. 全国纤维胆道镜临床应用专题讲座资料汇编, 1986, 6
- 7 林庚金, 等. 内镜临床应用进展, 上海: 上海科技出版社, 1991  
(安徽医科大学第一附属医院王震宗教授撰)

### 经腹腔镜胆囊切除术 laparoscopic cholecystectomy

(LC) 胆囊结石已成为外科最常见的疾病之一。自 1889 年 Lagenburch 在柏林经腹腔镜首次成功地施行胆囊切除术以来, 该方法一直成为治疗胆囊疾患最有效的方法。虽然近十年来各种胆囊结石的非手术方法, 如药物溶石、体外震波碎石应用于临床, 然而其效果均不理想, 结石的复发率高达 61%, 且病变的胆囊未能处理。

随着科技及内窥镜技术在医学领域的发展, 产生了腹腔镜胆囊切除术(LC), 1985~1987年, LC处于动物实验与临床探索阶段; 1988年法国Dubois首例LC获得成功; 这种现代最小侵入性胆囊切除术迅速在欧美国家展开, 中国亦于1991年成功进行LC并予以报道。现在中国许多医院广泛推广应用, LC同传统的胆囊切除术比较, LC创伤小、痛苦轻、恢复快、对内脏干扰小, 对年轻人尚有瘢痕小不影响美观的特点, 现已成为治疗胆囊病变一种安全有效的新技术。

仪器设备、器械组成:(1)CO<sub>2</sub>人工气腹机, 自动维持腹腔内压力和气体的补充。(2)冲洗系统: 兼有冲洗和吸引功能, 以保持术野的清晰。(3)光源及腹腔镜系统: 与电视相连, 根据电视屏幕图像进行手术操作。(4)电视监视系统: 可录像。由腹腔镜连接摄像头及电视显示系统, 一切操作均显示在屏幕上。(5)电刀、内凝器激光系统: 用以做组织切割分离与凝血。(6)手术器械: 穿刺套管、气腹针、注射针、抽吸针、抓持钳、剪切器械、活检器械、持针器及内缝合针、内结扎器、剥离钩、钛金属夹、胆道造影用具等。

LC的适应证与禁忌证, 尚无统一的标准, 随着操作经验的积累和仪器设备的改进, 其适应证将会扩大。(1)适合症: ①慢性结石性胆囊炎者; ②伴有糖尿病无症状胆囊结石者; ③胆囊息肉者。(2)禁忌症: ①急性胆囊炎者; ②合并有胆管结石的胆囊结石者; ③胆囊癌者; ④有出血倾向或凝血障碍性疾病者; ⑤梗阻性黄疸者; ⑥妊娠者; ⑦既往有上腹部较大手术史者; ⑧全身状况差难以耐受麻醉的高危病人。

术前准备: 与一般胆囊切除术相同, 进行心、肝、肺、肾与凝血功能检查、胆道B超检查、静脉胆道造影检查, 术前充分了解胆囊与胆道之间的关系, 做到心中有数。确定肝下缘的位置, 预定鞘管穿刺点。留置胃管。与家属谈话时要说明有转为开腹手术的可能性。

操作技术:(1)麻醉: 气管插管全麻, 对不能耐受全麻的亦有采用局麻。必要时监测动脉血气与心电图。(2)病人体位与医护位置: 主要有两种, 一为平卧位, 术者与第1助手站在患者左右两

侧, 护士站在第1助手的右侧。二是截石位, 术者位于患者两腿之间, 第1助手站在患者右侧, 护士立于患者右腿外侧。(3)建立气腹: 于脐下缘插入气腹针, 证实气腹针位于腹腔后, 将针与气腹机导管相连, 即可自动向腹腔内注入CO<sub>2</sub>气体, 并将其压力维持在1.6~1.8kPa, 见腹部对称膨隆, 叩呈鼓音, 肝浊音界消失, 拔除气腹针。(4)放置套管: 经脐放入10mm Trocar, 旋转进入腹腔(SU), 并经此套管置入腹腔镜, 连接摄像头及电视监视系统。套管侧孔通过CO<sub>2</sub>输气管和气腹机相连, 自动维持腹腔内CO<sub>2</sub>压力。在腹腔镜引导下, 于右腋前线(AA)、右锁骨中线(MC)置5mm穿刺套管, 正中剑突下置10mm穿刺套管。经AA套管插入冲洗/吸引器, 同时兼插牵开器; 经MC套管插入把持钳, 用以牵引胆囊, 经SX套管插入剪刀、分离钳、剥离钩、钛夹钳、电凝等器械。(5)切除胆囊: 解剖和切断胆囊管及胆囊动脉, 用钳子夹住胆囊颈部并拉向右侧, 用电凝钩或分离钳分离胆囊周围的粘连, 解剖Calot三角, 显露胆囊动脉、胆囊管、胆总管3者结构, 并充分游离胆囊动脉、胆囊管。周围组织以电凝止血。于胆囊管近端上远端各上一钛(银)夹, 于两夹间切断胆囊动脉。于胆囊管近端上两个钛(银)夹, 远端上1个钛(银)夹, 于二者间切断胆囊管。若需进行胆道造影可经胆囊管插入造影管, 造影完毕后再于胆囊近端上双重钛夹。亦有学者于胆囊底部行穿刺胆道造影, 分离胆囊床, 用钳夹住已离断的胆囊管, 并使胆囊浆膜处于紧张状态, 于肝胆囊间隙无血管平面, 用电凝钩等顺行剥离胆囊。小的出血点可以电凝止血, 较大的则上钛夹或套扎止血。当Calot三角解剖不清时, 多逆行分离胆囊。已被切除的胆囊暂置于右肝旁。冲洗术野, 仔细检查有无出血及胆汁溢出, 如有则以电凝、钛夹或套扎之。吸除肝下间隙的残留液体。必要时可在胆囊床及肝下间隙放置引流管。取出胆囊: 从剑下或脐下套管拉出胆囊, 一般多从脐下套管拉出。如因胆囊内结石较大或胆汁过多而无法取出, 可采用以下方法: 延长皮肤切口, 用血管钳撑大切口全层扩大取出道, 用扩张器将10mm切口扩大至20mm; 从已拉出的胆囊颈口放出钳子夹碎结石后取出; 经胆囊腔内超声碎石; 对较大估计难以取出的结石在术前先行体外震波碎石。(6)解除气腹, 关闭切口: 经检查确信无出血、胆漏, 拔除腹腔镜, 经鞘管排除腹内CO<sub>2</sub>气体, 尔后拔除鞘管, 缝合或以皮夹关闭戳创口。

LC的并发症: 与传统的胆囊切除术类似, 主要有(1)出血: 术中撕裂胆囊动脉、肝动脉或其分支所致。小的出血可以电凝、钛夹或在内镜下结扎出血点, 如出血仍不能控制则应转为开腹手术。(2)胆漏: 胆道损伤, 胆囊床迷走胆管未夹闭或术中未发现致胆漏。总胆管或副肝管被当作胆囊管而切断。当疑有胆管损伤时应转为开腹手术。(3)腹腔感染: 少见, 如有则多见于套管针附近, 可以切开引流。(4)套管针插入时腹壁血肿, 小肠管损伤。

LC转为开腹手术指征: 主要是无法控制大出血; 胆管或其它脏器的损伤; 腹腔广泛严重粘连, 解剖关系不清。就目前的技术水平, 在术中造影发现总胆管结石, 可以在术后行经十二指肠乳头切开取石或开腹进行总胆管探查术。

LC术后处理: 一般无需注射镇痛药物, 仅给予口服镇痛剂。肠功能可在24h内恢复。不放置引流管者可在48h后出院。欧美一些医院在门诊进行LC, 手术当日患者即可出院。

LC几个问题:(1)现在中国主要在高等医学院校附属医院及省地县级医院开展此手术, LC是否适应在县一级以下基层医院安全开展;(2)国内手术一般采用连续硬膜外麻醉, 对全麻不能普遍开展的医院将增加手术的难度。LC能否象全麻一样安全地在连续硬膜外麻醉下开展;(3)对需择期行胆囊切除术的高危病人, LC是否可以降低并发症及死亡率;(4)术中胆管造影是作为一种常规步骤还是选择性检查, 发现胆总管结石是中转开腹手术还是术后经括约肌切开排石, 当结石多而大时采取前者或后者, 这些问题尚有待于进一步的临床实践后解决。

LC作为现代科技与医学科学相互结合的高技术虽然出现不久, 适应证范围不断扩大, 现已有学者将这一技术应用于急性胆囊炎的切除, 并对胆总管结石进行初步的探索, 还在腹腔镜下

进行胃穿孔修补术、疝修补术、阑尾切除术及妇科手术,腹腔镜下手术作为一个新兴的学科,具有光明的应用前景和广阔的研究领域。

### 参考文献

- 1 Reddick E J. Am J Surg, 1990, 160(11): 485~489
- 2 Cooperman A M. J. Laparoendoscop Surg, 1990, 1(1): 37~40
- 3 Phillips E. J. Laparoendoscop Surg, 1990, 1(1) 3~15
- 4 DuBois F. Ann Surg, 1990, 211(1): 60~62
- 5 Peters J H. Ann Surg, 1991, 213(1): 3~12

(安徽医科大学刘弋副教授, 胡家骅 审)

## 性激素与胆囊结石的关系 relation between the sex

hormone and gallstone 胆囊结石是外科常见病, 多发病。统计资料表明, 胆囊结石占胆石病的 52.8%, 女性胆囊结石明显高于男性 ( $P < 0.005$ )。国外女性胆固醇结石发病率是男性的 4 倍。Wales 南部工业区流行病学调查表明, 40~69 岁女性胆囊结石发病率为 12.2%, 同龄男性胆囊结石发病率为 6.2%。G. Misciagna 发现, 子宫平滑肌瘤病人胆囊胆汁胆固醇饱和度指数高于对照组 ( $P < 0.01$ ), 与女性胆囊结石病人相似, 提出这两种病可能有一个相同的病因。可见胆囊结石的发病有明显的性别差异, 这些差异是否与性激素有关呢? 现就有关资料作一综述。

**雌性激素与胆囊结石的关系** 育龄女性胆囊结石发病随血清促卵泡激素 (FSH) 及雌二醇 (ES<sub>2</sub>) 含量增加而增加, 绝经后女性胆囊结石发病随血清 E<sub>2</sub> 含量增加而增加。T. Jorgensen 发现, 口服避孕药与胆囊结石单因素分析明显相关 ( $P < 0.05$ )。也有报告口服避孕药与胆囊结石无关而妊娠和其有关。Henrickson 发现, 睾丸癌行睾丸切除术病人组与睾丸癌行雌激素治疗组病人比较, 后者胆囊结石发病率明显高于前者。雌性激素动物胆囊结石模型揭示, 雌性激素和高胆固醇饮食均可引起动物胆囊结石。熊奇如等选用雄性家兔加用苯甲酸雌二醇腹腔内给药, 用药 6 周后用药组胆囊成石率明显高于对照组 ( $P < 0.01$ ), 进一步证实雌性激素与胆囊结石形成有关。外源性雌激素不但与胆囊结石形成有关, 而且可使原有胆囊结石扩大。雌性激素引起胆囊结石的机制可能有如下几方面:

1. 雌性激素增加胆汁胆固醇饱和度, 胆囊结石大多是以胆固醇为主的混合性结石, 胆汁胆固醇过饱和是先决条件。雌性激素有升高血中高密度脂蛋白胆固醇 (HCL-C)、降低低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C) 的作用。HCL-C 具有胆固醇转运功能, 可以将组织中血中的胆固醇转移到肝脏, 使肝胆固醇分泌增加; 而 LDL-C 作用相反, 因而 E<sub>2</sub> 对脂蛋白的作用可能是 E<sub>2</sub> 使胆汁胆固醇浓度增大的一个方面。人们发现, 正常健康女性在体内雌激素高峰期胆汁中总胆固醇增加。Kern 发现, 口服避孕药可增加胆汁胆固醇分泌, 减少胆汁酸分泌。雌性激素动物胆囊结石模型证实, E<sub>2</sub> 可使胆囊胆汁胆固醇浓度增加, 这与熊奇如等的实验结果一致。雌性激素可能通过增加游离胆固醇进入代谢池和抑制肝脏脂肪酰辅酶 A、胆固醇脂肪酰转移酶 (A-CTA) 的活性来影响胆汁胆固醇分泌。但是, 正常人也有相当一部分胆汁是过饱和状态而并不发生胆囊结石, 胆囊结石病人肝胆胆汁胆固醇饱和度大于胆囊胆汁, 但胆固醇结石大多发生在胆囊, 由此可见胆囊自身结构和功能变化在胆固醇结石形成中起着桥梁作用。

2. 雌性激素使胆囊粘液分泌增加, 促进胆石核心形成: 动物实验发现, 胆囊粘膜粘液分泌增加, 并在胆固醇结晶形成前出现分泌型上皮变化, 这提示胆囊分泌的某种物质在胆囊结石形成中起重要作用。进一步实验证实, E<sub>2</sub> 增加胆囊粘膜粘液分泌。熊奇如等的研究资料表明, 外源性 E<sub>2</sub> 可使胆囊汁总蛋白含量增加, 与对照组有明显差异 ( $P < 0.05$ ); E<sub>2</sub> 可使胆囊分泌蛋白增加, 胆汁蛋白中抗成核蛋白与促成核蛋白动态平衡被破坏, 进而促进胆固醇结晶的出现、沉积, 最终形成结石。

3. 雌激素使胆囊郁滞、排空不全: Meyer 在动物胆囊结石的研究中发现, 胆囊瘀滞与胆囊结石形成有关, 而胆囊收缩素促进胆囊排空, 有预防胆囊结石的作用。Braverman 和 Everson 都发现, 妊娠时禁食, 胆囊容积和收缩后容积在增大, 胆囊排空不全。胆囊排空不全为胆囊结石形成提供条件。国内临床和动物实验有同样的发现。Zhu 实验发现雌激素抑制胆囊收缩, 妊娠使胆囊对胆囊收缩素的敏感性降低、抑制胆囊收缩。熊奇如等在雌性激素与胆囊结石关系实验研究中发现, 胆囊管结扎后, 尽管施用 E<sub>2</sub>, 但胆囊成石率与对照组无明显差异 ( $P > 0.05$ ), 说明胆囊管完全梗阻后, 尽管胆囊瘀滞, 但缺乏成核促进因子和成石物质, 仍不能成石, 胆囊瘀滞只是成石的环境条件。

**雄激素与胆囊结石的关系** 目前有关雄激素与胆囊结石关系的研究不多, 临床资料显示, 女性胆囊结石发病随血清 E<sub>2</sub> 含量的增加而增加, 随血清 (T) 睾酮水平的增高而减少, 这提示雄激素可能有拮抗雌激素的作用, 从而使胆囊结石发病率减低, 这与临床胆囊结石多见于女性相符合。

在胆囊结石形成方面雄激素起什么作用, 其作用机制是什么, 仍不清楚。雄激素可降低血 HDL, 在胆固醇转运水平上有对抗雌激素的作用。口服避孕药使促性腺激素和雌激素水平降低, 性激素结合球蛋白 (SHBG) 增加。由于 SHBG 增加, 使游离的有活性的雄激素降低。可见雌激素可以通过垂体性腺的抑制作用和调节 SHBG 的合成来对抗雄激素作用。

动物实验表明, 阉割的雄兔与正常雄兔比较, 胆囊对胆囊收缩素的反应被抑制。提高雄激素对维持正常胆囊排空有重要作用, 而雌激素可使胆囊郁滞、排空不全。

综上所述, 胆囊结石有明显的性别差异。这种性别差异与性激素平衡有关。雌激素在胆囊结石形成方面的作用是多方面的, 雌激素的作用, 因而男性胆囊结石率低于女性。雄激素在胆固醇转运和胆囊排空方面可拮抗雌激素在胆囊结石形成中的作用机制仍有待进一步探讨。

### 参考文献

- 1 Masarei J R L. Lancet, 1977, 2: 827~828
- 2 Zhu X G. Gastroenterology, 1982, 82: 1218
- 3 Kern F Jr, et al. J Labo Clin Med, 1982, 99(6): 798~805
- 4 顾倬云, 黄志强. 中华外科杂志, 1987, 6: 321
- 5 Falsatti L, et al. Contraception, 1987, 36(5): 489~498
- 6 Misciagna G, et al. Satg Gynecol Obstet 1987, 165: 429
- 7 Henrickson P, et al. J Clin Invest, 1989, 84: 811
- 8 薛唤洲. 中华外科杂志, 1989, 27(11): 686~688
- 9 赵浩亮. 中华外科杂志, 1990, 28(1): 33~36
- 10 Sweeting J. Gastroenterology, 1990, (5): 98(3): 800

(安徽医科大学第一附属医院熊奇如主治医师撰; 张宗耀、李祖荫 审)

## 胰腺的外科疾病

**环状胰** 是较罕见的先天性发育畸形。形成带状胰组织, 环绕十二指肠, 造成部分性的或完全性的肠腔狭窄。形成之环状胰腺宽度约 1.0cm, 包绕十二指肠周径的 4/3~4/5, 有间隙区, 内含胰岛和导管系统。其临床表现为十二指肠的急性的或慢性的不完全性的或完全性的梗阻。新生儿型: 出生 1 周后发病, 2 周以上发病者少; 频繁呕吐, 含或不含胆汁; 不全梗阻, 症状反复发作。成人型: 多于 20~40 岁发病, 延迟出现症状原因不详, 表现为反复上腹痛、呕吐, 常并发急性胰腺炎。X 线表现为双气泡症, 十二指肠降段呈现边缘整齐的狭窄。治疗常用十二指肠空肠吻合术。切除或切断胰环是不明智的。

**异位胰腺** 又称迷走胰腺。1872 年 Jean-Schultz 首先报道本病。异位部位为十二指肠、胃、空肠、美克氏憩室和回肠。可并发溃疡、出血、梗阻等症状。异位胰组织埋藏在组织中, 无包膜, 不易剥离, 呈淡黄色或淡灰红色单个叶状小结节。往往于术后才能经确诊。



**胰腺癌** 胰腺肿瘤分为上皮性的和非上皮性的两大类,均可分良性与恶性。上皮性恶性肿瘤以胰腺癌多见。非上皮性肿瘤罕见。它又可以胰腺的两个组织分类,分为外分泌性的和内分泌性的两大类。胰腺癌系老年人疾病,71~80岁发病率最高,2/3在60岁以上。随着人的寿命延长,发病率亦上升。1888年Bard与Pic报告本病。1898年Cadvilla行胰十二指肠大部切除手术。1935年,美国著名外科学家Whipple对壶腹癌病人行胰十二指肠切除术成功;从而提高了切除率,并发症与死亡率亦有所下降,但其早期诊断及疗效仍不满意。发病原因未清楚。发病率国外有逐年上升趋势,我国低于国外,总发病率据统计占全身肿瘤的1%~4%。胰腺癌的临床表现:早期症状不典型,可有上腹胀,隐痛,纳差,乏力与消瘦;以上症状出现可持续3~6个月,平均4个月。这些表现常出现于胰体尾部癌肿者,胰体头部癌肿者往往出现黄疸。典型症状出现时病程已很大。(1)腹痛,是初期的多见症状,约87%胰腺癌患者有疼痛并放射到背部;呈隐痛,阵发性剧痛或绞痛,进食时可加重,坐、立及前倾可减轻症状,由于坐位可减轻肿块压迫腹腔神经丛和脊旁神经,故而减轻疼痛。晚期疼痛剧烈。(2)黄疸,系胰头癌患者的早期表现,但亦有10%~20%的患者无黄疸出现,常称为进行性无痛性黄疸;大部分病人均有上腹胀痛不适,真正无痛者少见,但需与胆结石患者相鉴别。(3)体重减轻,为较常见症状,多为快速体重减轻。胰腺癌的诊断:早期诊断需要靠临床医师对本病的高度警惕,可因进行长时期的对症治疗或检查而延误病情。超声扫描为首选,CT检查可早期诊断,还可提示有无手术切除的可能性。如患者已表现黄疸、消瘦和疼痛三联证时,应及时考虑为胰腺癌。传统观念认为,黄疸伴胆囊肿大(Courvosier定律)考虑胰腺癌,因有许多例外病例,所以它的临床用途有限。胰腺癌的治疗:因胰腺的解剖部位因素,发生肿瘤后往往与其后面紧邻大血管粘连而影响切除率。尤其晚期病人的切除率仅约10%左右。因肿瘤发生的部位不同,手术有胰头十二指肠切除、胰体尾部切除、全胰切除;手术尚为唯一有效的疗法。姑息性手术有胆囊或胆总管空肠吻合,解除胆道梗阻;胃肠吻合可预防或解除十二指肠梗阻。

**急性胰腺炎** 它是较常见的急腹症。病因未明了,较多病人发病原因不明,可能与某些胆道病变及高脂餐有关,国外报道为因过量饮酒引起。轻的急性胰腺炎病理改变为水肿,重症可形成出血与坏死,患者伴有内外分泌功能减退。1971年Ranson研究了早期手术治疗胰腺炎。现较多学者认为手术有较好疗效。我国近20年来对早期轻症急性胰腺炎患者行中西结合治疗,取得较好效果。关于急性胰腺炎的病因,说法众多,未能统一;不能用单一因素解释。目前认为其病因:(1)胰管梗阻,伴或不伴十二指肠、胆道内容返流;(2)胰液血运障碍。但据尸体解剖仅发现有少数病例有胰管梗阻。另经实验研究,结扎胰管亦不引发胰腺炎。如胰腺外分泌受强烈刺激导致分泌增加,再伴有胰管梗阻,可导急性胰腺炎。用胆管、胰管共同通道解释胆汁返流,但解剖上仅2/3存在这共同通道;在正常情况下,亦观察到胆汁流入胰管、胰液亦流入胆道的双向返流;一般情况下胰管内压力高于胆道内压力。胰腺的血运障碍,可见于动脉粥样硬化病变的小动脉梗阻,或炎症血栓形成,造成胰腺灌注量降低,从而加重胰腺出血坏死。在炎症后胰组织中有活化的蛋白分解酶、弹力纤维酶、磷脂酶A及血管舒缓素,造成胰组织的出血与坏死。酒精有直接使胰腺腺泡中毒作用,可刺激其产生高度碱性液体,使胰原膜不稳定,亦可使狄氏括约肌痉挛。

急性胰腺炎患者的临床表现:(1)腹痛。发病突然,剧烈腹痛,来势凶,进展快,因胰腺受侵害部位不同,腹痛部分可偏左、偏右;腹内受炎性渗出物刺激可呈全腹痛,严重病人可短期内死亡。(2)恶心呕吐。早期出现而频繁。腹痛、恶心、呕吐为3大主症。(3)腹胀、消化道出血、黄疸,休克多见于重症并伴大块胰腺坏死。(4)少见症状。皮肤瘀斑,手足抽搐。

急性胰腺炎的临床分类:(1)1963年于法国马赛举行的国际胰腺会议分类为急性胰腺炎、复发性急性胰腺炎、前两种经治疗

复发性慢性胰腺炎、慢性胰腺炎,胰腺可恢复正常,后2类患者经治疗胰腺组织有病变残留。(2)1984年于马赛举行的国际会议上修订的分类法将急性胰腺炎又分为轻、重2型,慢性胰腺炎的特点为反复发作,持续腹痛,伴功能不全。(3)1988年在北京召开的中日国际会议讨论了难治性胰腺炎,将其分为轻、中、重3型。(4)临床常用分类分为水肿型急性胰腺炎、出血性胰腺炎、坏死性胰腺炎。这种分类法概括了急性胰腺炎的不同病理变化。

近年来由于酶的检测方法的进展(如放射免疫法RIA),对急性胰腺炎的诊断水平及对病理变化、病情发展、并发症的有无的认识均有提高。检测项目有:(1)淀粉酶同2酶(PIA,SIAS);对淀粉酶不升高的急性胰腺炎有诊断价值,较敏感。(2)弹力蛋白酶I(HE<sub>2</sub>);对水肿型的与重症的胰腺炎鉴别有意义。(3)免疫活性胰蛋白酶(IRT);对早期诊断、鉴别轻重、观察病情有实用价值。(4)磷脂酶A<sub>2</sub>(PLA<sub>2</sub>);可诊断早期坏死性胰腺炎。(5)胰分泌性胰蛋白酶抑制剂(PSTI);能鉴别水肿型的、坏死型的胰腺炎,可作动态观察,可判断预后。(6)血清脂肪酶;为首选项目。(7)碱性磷酸酶特异核糖核酶;此酶在发病前几天即升高,同临床过程呈平行趋势,可作胰腺坏死初期并发症的鉴别指标。

对急性胰腺炎患者的高血糖、低血钙变化,目前的认识是:高血糖由于胰高血糖素升高所致,而非胰岛不足;对低血钙的认识强调“钙流”,认为是由于钙转移到肌肉、肝、胰腺所致。CT:有诊断价值。

急性胰腺炎的外科治疗,1894年Korte首先提出用手术治疗。1963年Watte成功地应用胰腺切除术治疗出血性的及坏死性的胰腺炎。1938年Nordmann提出手术效果不好,提倡用内科方法治疗,但疗效仍不理想。1984年Paxton报道手术死亡率达45%,非手术死亡率为28%。但对重症急性胰腺炎患者,非手术治疗令人失望。

目前对(1)手术时机的选择;(2)腹腔灌洗;(3)胰腺切除,包括坏死组织切除、胰腺部分切除,全胰十二指肠切除等问题,尚无统一论。

#### 参考文献

- 1 江绍基. 临床胃肠病学, 1981, 12
- 2 Allen Saxon, et al. Ann Surg, 1981, 194: 545
- 3 World J Surg, 1981, 5(3): 393
- 4 Walshbo D B, et al. Adenocarcinoma of ampulla of vaer diagnosis and treatment Annsurg, 1982, 195(2): 152
- 5 梁竞新, 许桂香. 胰腺外科, 1985, 11

(安徽医科大学第一附属医院王震宗主任医师撰)

**急性坏死性胰腺炎外科治疗的进展** 急性坏死性胰腺炎为急性胰腺炎的一种严重类型,约占胰腺炎的6%~19.7%。近年来它在中国的发病率有上升趋势,它具有发病急、进展快、病情重、并发症多、死亡率高的特点,病死率高达30%~100%,绝大多数患者死于感染及中毒性休克、肺炎、呼吸衰竭或多脏器功能障碍。急性期过后的主要并发症为胰腺脓肿、腹腔脓肿、严重全身感染、消化道出血、腹腔内出血、胰瘘、假性囊肿等;恢复后主要的后遗症为糖尿病及慢性胰腺炎。处理本病极为棘手,尤其在手术指征的决定、手术时机和手术方法的选择以及预后迄今尚无一致的观点。近年来随着现代诊断技术的发展,可在疾病早期就诊断出局灶性胰腺坏死,治疗方法也由主要采用非手术疗法发展到手术疗法和近来倡议采用的选择性手术疗法。在胰腺炎的治疗方面,特别重视对胰管高压的解除,包括解除胰管梗阻和抑制外分泌的功能,鼻胃管减压、抑胆药、碳酸酐酶抑制剂、生长抑制素的应用等,都是用于减轻胆道内的压力。经内科治疗无效的患者,应断然采取剖腹探查,手术目的是稀释和排出有害的酶性液体和清除胰内外坏死的和感染的病灶,并防止和减少并发症的发生。由于早期诊断及合理处理,近年来本病患者死亡率显著下降。

**腹腔灌洗** 急性坏死性胰腺炎患者,因吸收有毒物质而造

成多器官功能衰竭。因渗出液中含有丰富的血管活性物质,有的腹腔渗液可多达2 000~3 000ml,利用腹腔灌洗法可迅速地、有效地清除毒性腹水。主要通过三腔管滴注灌洗,使有害的酶性液体得到稀释,并和坏死组织脱落的小碎片一起被加速排出,从而达到治疗的目的。灌洗液一般采用含电解质液体,如林格氏液1L内加50%GS、30ml、肝素2mg、氨苄青霉素0.5g。每次灌入1L,30~60min滴完。Kanson竭力提倡对坏死性胰腺炎采取灌洗法治疗,获得较好的疗效。Kivilaakso将35例急性严重型胰腺炎患者分为两组,甲组进行胰体尾部切除,乙组进行腹腔灌洗,术后两组处理基本一致,治疗结果:胰腺切除组优于灌洗组。因此,腹腔灌洗法对轻型胰腺炎是可行的,而对严重的坏死性胰腺炎是不足的,但它作为术前准备和手术后对胰床及胰外侵犯区进行灌洗仍是可取的。在连续灌洗2~4d后难免不出现引流不畅、继发感染,应注意加以防范。

**引流术** 1968年Waterman提出早期引流术,效果更佳,很受临床医师的重视。为了保证胃肠引流,减低肠道内压力,同时也为了在急性期后灌注要素饮食,有作者提出用三管引流术,采用闭式吸引,以引流胰腺附近的小腹腔,用胆囊造瘘术或T管引流胆总管;胃造瘘或空肠造瘘。其目的是解除胆道压力,清除胰床渗液,引流上消化道胃液,减少胰腺分泌。该法对胆总管下端梗阻所致的急性胰腺炎是可行的,但对有胰管阻塞的患者并不能从根本上解除胰管压力。为减低胰管压力,有作者选择胰腺组织较健康的部位切断胰管,引流胰液,减低胰腺的张力,从而使胰腺变软、体积缩小、血运改善,促使炎症逐渐消退。在切断胰管的下方置一多孔乳胶管,引出皮外作固定,并接引流瓶,这种胰管切断外引流术效果较满意。

**坏死胰腺组织清除术** 出血坏死性胰腺炎不仅局限在胰腺实质,而且波及到小网膜腔、腹膜后、肠系膜血管根部、左右结肠后壁,因而不仅要尽可能地清除胰腺坏死组织,而且强调清除胰外侵犯区域的重要性,应切开十二指肠外侧腹膜,翻转十二指肠外侧,显露胰头部,尽力清除坏死组织,清除后的胰床应做充分引流,左右下腹部也应置引流管,或做负压吸引。

**胰腺切除术** 仅仅清除胰腺坏死组织,很难保证残留胰腺组织不继续化脓坏死,并可导致术后病情恶化和诸多并发症的产生。因此,针对一些胰腺实质坏死范围较大又较集中的病变,主张根据病变范围的不同,选择性采用胰左半部分切除术、次全切除术或全胰十二指肠切除术,究竟要切多少胰腺,因早期手术胰腺坏死部分还没有和有生机的胰腺有明确的界限,结果不是切得过多,就是切得太少。如切除70%以上胰腺就可能造成终生糖尿病,尽管有作者认为术后糖尿病并不难控制,但大多数作者对此手术仍持慎重态度。若切除太少,同样难于避免发生继发性感染,以致需再次或多次手术。但从近年来的趋势看,做规则性切除术的报告愈来愈多,做次全切除术的比做左半胰腺切除术的也有所增多。至于胰腺全切除,虽然少数学者有较好疗效的报告,但多数人认为对如此危重患者施全胰腺切除术应权衡利弊,以策安全,需严加控制,必要时可分期手术。

中国对坏死性胰腺炎的治疗近几年已有很大的发展。在20世纪50年代,对坏死性胰腺炎基本上还是以非手术治疗为主,而现在采用外科手术已成为主流,在手术方式上,主张做单纯引流术者已日渐减少,大多数学者都主张做坏死组织清除术,并已开展了规则性胰腺切除术,其中包括左半胰腺切除术及次全切除术等。手术时机的选择已由拘泥于传统的发病后3~8d改变为早期手术。除对胰腺本身的手术外,还主张同时做“造瘘”的附加措施,即胃造瘘、空肠造瘘及胆道造瘘。胰外侵犯的扩张引流已得到重视,抢救存活率约在60%~70%。迄今,中国外科手术治疗坏死性胰腺炎的状况与国外较先进国家的趋向大致相符合,疗效也基本相仿。但是,目前对坏死性胰腺炎的治疗措施太复杂,手术方法很多,至今尚没有一种定型的、可靠的方法。对本病的发病原因和坏死转归的认识尚不深入和不完全清楚,因此在治疗观点和预后判断等问题上尚存在着争论与分歧,以致在疗效方

面还不能令人满意。今后应对急性坏死性胰腺炎的病理机制进行深入研究,为进一步临床治疗本病提供有利的条件及基础。

(侯玉华副主任医师撰;王蔚董审)

**脾破裂外科治疗观念的更新** spleen breaks renew of viewpoint in surgery treatment 19世纪以前,因不了解脾脏在机体中的作用,外科医师对脾破裂病人不敢贸然手术。虽有个别病人经保守治疗而获痊愈,但大多数均因脾破裂出血、失血性休克而死亡,死亡率竟高达90%~100%。1892年,Riegne首次提出脾切除后对机体没有危害。从此,外科同道几乎一致认为脾切除术是处理脾外伤的首选方法,成为脾破裂的经典和理想手术。其理由是:已损伤的脾组织难以自行愈合,应用脾切除术抢救外伤性脾破裂出血病人手术简单、止血可靠、并发症少;包膜下脾破裂者、延迟性脾破裂者,有再出血的可能,部分脾切除或脾破裂的裂口修补者,因脾组织很脆弱,止血手术可靠性差,也有再出血的危险。但大多数脾切除手术顺利,病人迅速恢复健康,从而提示脾脏并非生命所必需的脏器。

尽管1787年Dorsch成功地施行脾大部切除术,1867年Pean作脾部分切除术也获成功以后,并有不少保留性脾手术成功的报告,但由于对脾功能重要性认识不足,使这种手术难以得到推广和应用。直到1952年King和Schumacke发现全身性凶险性感染(OPSI),首先提出脾切除后可导致严重的全身性感染,即脾切除术后凶险感染,保留性脾手术在外科才得到应有的重视。过去认为脾没有功能,随着现代医学的进展而逐渐显示出这种观点的错误。迄今业已证明脾脏有很多功能,它作为人体最大的周围淋巴器官,有着极其重要的免疫功能,脾脏切除以后,首先是人体抗感染能力的减弱,容易发生一种剧烈的全身性凶险性感染,发生率高出有脾的正常人50~200倍,死亡率为50%~55%,OPSI平均发生在全脾切除后5年,起病突然,主要表现为恶心、呕吐、头痛而迅速昏迷。因病人多求诊于内科,很少联系到为时已久的脾切除手术,故不易引起外科医师的注意。而今对脾功能理论的认识逐步提高,近年来中国有关OPSI的报道日渐增多,发生率达3.5%。脾切除后,机体易感性增强、术后长期发热、切口愈合不良及感染、腹腔内或膈下脓肿以及术后长期容易发生上呼吸道感染等。此外,脾脏还有抗癌肿和抗放射损伤等功能。当今研究脾脏的功能及脾切除后对机体的影响已成为热门课题,向传统的脾切除术指征提出了挑战,使脾脏外科的经典手术概念发生了根本性的改变,在临床上各种保脾手术也应运而生,形成一种新的脾脏外科学。外伤性脾破裂保留脾脏的治疗方法很多,简述如下:

**非手术治疗** 近年来非手术治疗脾破裂之所以能够成功,是由于先进的诊断技术不仅能明确诊断,而且能判断其伤情、伤型和伤部,还可以动态监测病情发展,随时调整治疗方案,以保证非手术治疗的可靠性和安全性。近来脾损伤非手术治疗成功率在30%~85%,儿童的成功率有报告可达100%。总的来说,儿童成功率高于成人,成年人年龄越小成功率越高。但有人认为对非手术治疗脾外伤应持审慎态度,因为它有以下缺点:(1)非手术疗法使患者失去剖腹探查机会,一旦合并其他脏器损伤,未特别是空腔脏器损伤,未得到及时处理,可酿成难以设想的严重后果。(2)大量输血带来的危害。无论是非手术治疗或非手术治疗失败被迫改行手术治疗,都必须大量输血或增加输血量,大量输血的主要弊端是浪费血源,经济费用增多,并可能使患者染上肝炎、艾滋病等疾患。(3)并发迟发性出血,约占15%,可发生在伤后数日之内或数周之后,死亡率可达10%,这远较脾破裂立即诊断和立即手术治疗1%的死亡率为高,故非手术治疗潜伏着更大的危险性。

**手术治疗** 对发生严重休克或难以纠正的失血性休克及不能排除严重腹内合并伤的病人,经积极扩容等抗休克治疗后应迅速果断手术探查。对危及生命的合并伤应首先处理,在处理脾破裂时应根据伤情,在抢救病人生命第一的原则下尽量选用原位的

保脾方法,通过外科手术措施,使脾脏及其功能得到全部或部分的保留。无论采取何种保脾术式,术中都应保留无病理变化的副脾。常用的保脾方法有:(1)脾破裂局部粘合剂的应用。通过各种化学制剂达到使伤口粘合止血的目的。(2)脾破裂局部凝固止血术。采用激光、红外线、高热空气、透热法等,以造成外伤表面凝固坏死来止血。(3)脾动脉栓塞和结扎术。自脾动脉注入栓塞剂或作脾动脉结扎术,可以迅速控制脾外伤出血,也能保留脾脏的正常免疫功能,效果满意,但注意不要造成脾脏缺血。(4)脾破裂缝合术或修补术。对脾脏小而浅的裂口,采用此手术技术简单,可保留一个结构与外形完整的脾脏。(5)部分脾切除术或节段性脾切除术。包括规则性部分脾切除术和非规则性部分脾切除术,应根据损伤的实际情况进行选择,后者更为常用。(6)脾网罩保护术。用可被吸收的网罩包裹损伤脾脏,运用于大面积撕裂或实质损伤较深的破裂伤,是一种安全有效的方法。(7)全脾切除术与脾移植术。当无法保留脾脏时,可选用全脾切除加自体脾组织异位移植术。1920年,Maune和Manley首先将兔自身脾组织碎片植入皮下获得生长。近年中国许多学者在脾移植的实验和临床研究方面都取得成功。移植的最佳部位依次为网膜、脾床或腹膜皱褶处,被移植的脾组织易于成活。

夏穗生提出脾外伤治疗原则应是:抢救生命第一,保留脾脏第二。保脾需具备以下条件 and 原则:首先在确保完成抢救生命前提下才能施行,手术者应有熟练的技术才可胜任留脾手术,所在医疗单位要具备必要的设施和技术力量。还应强调指出,并非所有的脾外伤患者均可进行脾保留手术,Livinston认为约有50%~60%的病人应尽快行全脾切除术方能保证其生命安全。如脾蒂断裂、脾动脉主干破裂、严重广泛撕裂伤、脾门撕脱伤、合并门脉高压症等引起大出血者,必须立刻切除止血,才能保住病人生命。如果一味机械地强调保脾,而忽视首要的是保全生命,是十分危险的。

近年来人们对脾脏这个人体内最大的淋巴器官开展了从基础到临床较全面的深入研究,诸如脾脏的外科解剖超微结构和微循环,各种不同的生理功能等,已经认识到它不仅是造血、储血、毁血和清理血液中某些有害颗粒物质的器官,而且具有多种功能,包括颇为重要的免疫功能。必须改变过去认为脾脏是可有可无的器官的观点,而应从利用和调节脾脏功能的角度来考虑如何保护外伤性脾脏,以便发挥它的特殊功能。1979年,美国第39届创伤外科年会评价是:它是现代脾脏外科发展史上的里程碑。但从客观上来说,目前国内外仍有不少学者对保脾手术具有的风险性存在疑虑,对该手术的评价及其实用性还有分歧,尚有待今后在临床与实践中的进一步的探索与研究。

#### 参考文献

- 1 King M. Ann. Surg., 1952,136:239
- 2 刘恭植.实用外科杂志,1986,6:437
- 3 全国第2次脾脏功能研究与脾外科专题讨论纪要,中华医学杂志,1988,68:605
- 4 夏穗生.普外临床,1989,4:265
- 5 夏穗生.现代脾脏外科学.南京:江苏科技出版社,1990.112
- 6 姚樟祥,等.实用外科杂志,1991,11:385
- 7 史海安.实用外科杂志,1991,11:385
- 8 高根五,等.腹部外科学进展.成都:四川科技出版社,1992.283

(安徽省嘉山县人民医院戴传金副主任医师撰;王蔚董审)

**断肢(指)再植** replantation of limb and finger 将已经离断的肢体或手指用手术方法重新接回原位称断肢(或断指)再植。将离断的肢体再植于另一部位称断肢(指)移位再植。例如多个手指离断时,如果离断的拇指失去再植条件,可将同时离断的食指或中指,按断指再植法再植于拇指的位置上,以恢复手的部分功能。在少有的情况下,当双下肢严重损伤时,如果一侧损伤非常严重,但足部尚属完整,而另一侧损伤虽然严重,但仅限于足

部,这就可以做足的移位再植,以保留一侧下肢的功能。

1903年,郝朴夫奈(Hopfner)对3条完全离断的狗腿进行再植,但未得到预期的效果。1906年,卡尔(Carrel)等首次成功地进行了1只狗后腿再植。1953年,屠开元等也成功地进行了狗腿再植的实验,用11只犬,5只成功。1962年,苏坡特(Soupoult)曾报道2例不完全的上肢再植,其中1例失败,1例功能恢复欠佳。1963年,陈中伟等首先报道1例前臂完全离断的病例,经再植成活并恢复良好的功能。1964年,麦耳塔(R. A. Malt)报告1例他在1962年再植成功的12岁男孩肘上完全离断的病例。此后,国内外对断肢(指)再植的报道日渐增多。迄今为止,中国报道的病例数最多,如1984年之前,全国断指再植2604例,成活1933例,总成活率为76.5%;此后5年间共再植断指2673例,4192指,成活3614指,总成活率为86.9%,有明显提高,并在用多接静脉来减轻肢体肿胀,早期修复神经促使功能尽早恢复、用冷藏和高压氧治疗来延长肢体耐受缺血时限、小儿断肢(指)再植、末节断指再植等方面积累了丰富的经验。

一般认为,断肢(指)再植的适应症应具备下列基本条件:(1)病人全身情况许可,能耐受再植手术。(2)断离肢(指)体应有一定的完整性。(3)再植有一定的时限,一般在6h内,冬季或经冷藏之肢体和手指可适当延长。(4)再植肢(指)体有恢复一定功能的可能。如果手术适应症选择不当,再植术后很难有好的疗效。目前认为,若从术后功能恢复的角度考虑,多指离断、拇指离断、远节指间关节水平的离断,是再植的相对适应症。

断肢(指)再植手术操作包括:(1)仔细的伤口清创,这是再植手术成功的关键因素之一。(2)骨折端或离断关节的整复及内固定。(3)主要血管的吻合。(4)肌肉与肌腱的修复。(5)神经的修复。(6)皮肤的修复等。术后应注意观察患者全身的和局部的血液循环情况,适当应用抗凝药物和抗凝药物,预防和治疗再植肢(指)的肿胀和术后感染等都至关重要。

目前,中国在断肢(指)再植方面的主要进展有:(1)小儿断指,年龄最小的仅10个月,其中末节再植亦有数十个。(2)末节再植,可将再植平面推进到指甲近1/2平面。(3)撕脱性和脱套性离断肢(指)的再植。(4)多指离断能全植全活,如1986年解放军第四军医大学成功完成1例双手十指全植全活的病例,创世界再植史最高纪录。(5)在拇指再造、肢(指)移位再植方面也都积累了不少经验,有些项目在国际上处于领先地位。(6)在断肢(指)再植的基础理论、微血管吻合方法、重建血液循环方法等方面的研究也都有长足的发展。

虽然由于显微外科技术的提高,在一段时间内断肢(指)再植的手术适应症较前有所扩大,过去认为不适应再植的严重挫灭性断指,或不可成活者的撕脱性断指,再植后成活者日益增多,但这并不等于目前对其适应症的掌握就不认真考虑。与此相反,在今后10~20年内,再植适应症应首先基于再植后的功能恢复,如果再植后没有功能,这对病人毫无裨益。此外,如何才能有效延迟肢(指)离断后发生的组织缺血性坏死,使离断时间较长的肢(指)再植后仍能存活并获得功能,如何防止和弥补周围神经过长缺损修复后在再生神经长入末梢器官之前,感觉小体和运动终板的退变和萎缩消失,如何提高断肢(指)再植术后的功能恢复,都将是今后一段时间内继续努力解决的问题。

#### 参考文献

- 1 朱家恺主编,显微外科进展.合肥:安徽科学技术出版社,1989,153~193
- 2 潘达德.中华显微外科杂志,1991,14(1):9~12
- 3 Feller A M, et al. World J. Surg., 1991,15(4):377~485
- 4 Engel J, et al. World J. Surg., 1991,15(4):466~472

(中山医科大学朱家恺教授、张自杰博士撰)

**大骨节病研究** kashim-beck disease 大骨节病是一种原因不明的地方性、多发性、变形性骨关节病。本病于1849年由俄国 И. М. Юренский 在远东贝加尔地区 Уроб 河流域首次发现。

随后于1861年哥萨克 И. П. Каццин 对本病做了进一步研究, 1901~1902年哥萨克 Е. П. Бек 和他的妻子 А. Н. Бек 比较详细地研究了大骨节病。为纪念最早发现和研究的 Каццин 和 Бек 夫妇, 故大骨节病又称为 Каццин-Бек 氏病; 又由于大骨节病最早在俄国远东 Уроб 河流域发现, 故也称 уроб 病。

在中国, 最早报告大骨节病的是张凤书。1934年秋, 他在沈吉铁路和长图铁路沿线发现了大骨节病。大骨节病在中国分布在黑龙江、吉林、辽宁、河北、河南、内蒙古、山东、山西、陕西、甘肃、四川、青海、西藏和台湾等14个省、区; 在国外, 俄罗斯的西伯利亚和朝鲜北部山区也有本病发生。

大骨节病的基本病变是透明软骨的变性和坏死, 主要发生于儿童和少年, 成年人中新发病例很少。大骨节病临床表现主要是四肢关节对称性疼痛、变形、增粗, 屈伸受限和肌肉萎缩, 而以远端关节最为明显。幼年患病, 骨骼发育有严重障碍者, 肢体短小, 关节活动困难, 近似残废。在骨骼发育停止的成人中, 新发病例的临床表现为肘关节弯曲和指关节增粗。临床上通常将大骨节病分为早期、I度、II度、III度。

大骨节病基本X线征是钙化带模糊、变薄、中断、消失、硬化, 先期钙化带不整, 临时钙化带再现, 断线早期闭合, 干骺端边角刺样骨突, 凹陷、缺损, 骨端骨刺, 骨性关节面毛糙呈“烟头征”, 囊样变和髓核变形。四肢关节X线病变检出率最高部位是手指骨。根据手指骨X线片的病变部位, 可分4型: (1)干骺型的, (2)干骺骨骺型的, (3)骨端型的, (4)骨关节型的; 也可按手指骨X线片的病变部位改变来记述为干骺端改变、骨端改变、腕骨改变和骨骺改变。

大骨节病病区多为山区、半山区。西北黄土高原沟壑地带发病较重, 源面较轻; 东北病区多为低山与丘陵地带, 平原较少。根据病区出现新病例多少, 可将病区分为活跃、相对静止和静止3种类型。

大骨节病致病因子、传播途径, 不同病因学观点有不同的看法

大骨节病人血浆成分分析

| 项目   | 单位    | 兰田     | 乾县     | 患者健康组  | X线无改变  | 干骺端(+) | 典型X线改变 |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ALP  | IU/L  | 157.9  | 184.8  | 157.3  | 188.8  | 187.7  | 226.0  |
| GOT  | IU/L  | 18.1   | 37.4   | 39.3   | 50.0   | 52.0   | 46.7   |
| GPT  | IU/L  | 17.49  | 20.81  | 19.79  | 23.22  | 22.93  | 20.83  |
| LDH  | IU/L  | 96.08  | 78.87  | 107.42 | 119.20 | 119.9  | 128.6  |
| CK   | IU/L  | 47.12  | 74.06  | 65.92  | 68.96  | 82.49  | 69.10  |
| HBDH | IU/L  | 212.4  | 233.2  | 267.8  | 265.8  | 267.6  | 250.9  |
| 尿酸   | mg/dl | 6.413  | 6.674  | 8.094  | 6.69   | 7.284  | 7.04   |
| 尿素氮  | mg/dl | 14.52  | 15.56  | 15.67  | 12.73  | 13.74  | 13.32  |
| 肌酐   | mg/dl | 0.6575 | 0.7410 | 0.5944 | 0.6333 | 0.5969 | 0.5647 |
| γGT  | IU/L  | 2.950  | 8.103  | 9.389  | 9.497  | 12.40  | 14.34  |
| 胆固醇  | mg/dl | —      | 103.9  | 126.0  | 112.1  | 136.1  | 139.9  |

中国大骨节病研究已取得突破性进展, 其主要成就:

首先在大骨节病流行病学研究方面取得一些新认识。对大骨节病病区类型认识有发展。在大骨节病研究史上, 曾有不同的病区划分方法, 初期按临床检出情况将病区划分为轻、中、重3类; 70年代按X线诊断数据划分病区类型; 80年代初步形成依据血清生化指标划分病区类型新方法。但目前通常还是按X线诊断数据划分病区。临床水平划分病区是判定病区的根本, 不存在没有典型临床病人的大骨节病区; X线水平划分病区, 可以以年为单位观察病情变化趋势, 因为大骨节病儿童手骨X线改变以干骺端变化最为活跃, 可在1a左右时间发生、加剧、好转或消失; 生化水平划分病区, 使观察病情动态所需时间进一步缩短。这种方法划分病区提出时间尚短, 还有待充实。

在大骨节病病因流行病学研究中, 发现了亚临床类型病例,

法。(1)水传: 致病因子通过饮水进入机体。据调查, 不同水源人群病情不同, 改水后病情明显变化。(2)粮传: 致病因子通过粮食进入机体。根据流行病学调查, 病区人群口粮种类不同, 人群病情不同, 人群主食大米或国家供应粮不患病或少患病, 主食病区玉米或小麦人群病情重。小麦和玉米传病, 大米不传病。

大骨节病病因目前尚无定论, 主要病因学说有三: (1)生物地球化学学说: 认为由于一种或几种元素含量显著过低或过剩引起。近年来发现病区多位于贫硒地带, 病区玉米中硒含量明显低于非病区(病区为3~6mg/kg, 非病区为5~7mg/kg), 病区儿童头发硒含量明显低于非病区(病区为40~90mg/kg, 非病区为120~200mg/kg)。(2)饮水中有机物中毒学说: 认为由于病区饮水被腐殖酸污染所致。70年代以来, 中国医学和地学工作者协作对病区环境作了综合性考查, 初步把我国病区环境分为4个类型: 表生天然腐殖环境病区; 湖沼相沉积环境病区; 黄土高原残原山丘沟壑窄水病区; 半沙漠与草炭沉积环境病区。病区共同特点是环境处于还原性, 有机物大部呈半分解状态, 极易受厌氧性细菌的作用分解产生腐殖酸类物质, 因此水、土中腐殖酸的含量高于非病区。目前在这方面进行病因研究者正在从事病区饮水中有机物的分析、提取, 复制大骨节病动物模型和改水防病等工作。(3)食物真菌中毒学说: 认为是粮食中含有真菌毒素而致病。1943~1945年间前苏联 Ф. П. Сергеевский 认为病因与病区出产的粮食有关。1965年, 中国大骨节病研究者注意到由于病区主食来源或品种不同, 大骨节病患病率截然不同。主食玉米和小麦的人群病情重, 主食国家供应粮或大米的人群基本不发病。对病区粮食作真菌检查得到的结果是: 从病区的和非病区的玉米中检出最多的真菌是镰刀菌, 大米中极少检出; 病区的和非病区玉米中检出镰刀菌菌种明显不同, 病区玉米中检出最多的是尖孢镰刀菌, 占镰刀菌总数的33%~55%, 在非病区玉米中检出极少, 仅占总数的0%~1%。

这有很重要的理论意义和实用价值。大骨节病早期阶段, 用临床方法是不能诊断的, 一些病例看不到典型体征, 但X线改变可能已经相当明显。一些没有X线改变的儿童, 可能已经发生典型的大骨节病样软骨组织坏死。这种没有临床改变也无X线改变的病例, 应看成是大骨节病的亚临床病例。应用血液和尿液生化指标是发现亚临床病例的唯一方法。

在X线诊断水平上, 对大骨节病病区病情活跃程度的认识有了很大进步。评定病区活跃程度的根据是儿童手部X线检查结果。干骺端病变是最活跃的, 骨端病变的是稳定的, 出现晚, 但一旦出现不容易变动。骨骺病变的活跃程度介于前两者之间。病人仅有干骺端改变, 可看作是新病例; 病人仅有骨端改变或还有骨骺改变, 但不伴有干骺端改变, 则为旧病例; 如有几个部位同时有改变, 可认为是新旧病变叠加的陈旧病例。对个别病例的评价

是流行病学工作者划分病区类型的前提,这是对大骨节病认识的一个重要进步。

其次大骨节病生化研究有了长足进步。生化研究始于永寿大骨节病考察,利用自动分析技术同步测定6项血浆酶学指标,即ALP、GOT、GPT、LDH、 $\gamma$ -GT和 $\alpha$ -HBDH。这些指标都不是特异性的,不能根据某一指标的高低对大骨节病病情做出判断,而是综合同步的动态,可将大骨节病病区儿童区分为正常、早期、进展和恢复等四种类型。

正常型:非病区对照点为其代表,非病区对照点正常型占92%~100%。

早期型:主要是病区中无X线改变或仅有轻微X线改变的一种生物化学类型。

进展型:活跃重病区的一种生化类型。

恢复型:有关生化指标与正常相同,但是在有病生化指标发生变化后又恢复正常的一种类型。

各种生化酶类对于生化类型的形成、作用、贡献不等。起主要作用的是LDH、GOT和ALP等5项。早期型主要是LDH增加,辅以ALP轻度减少;进展型主要是LDH与GOT明显增加,恢复型主要是LDH和GOT的明显减少以及ALP的适中化。

大骨节病6种血浆酶病区和非病区有明显差别。

大骨节病酶谱特点是:LDH、GOT、ALP和 $\alpha$ -HBDH活性显著增高。病区没有X线改变的儿童中GOT活性也增高,并随病程进展而显著升高; $\alpha$ -HBDH活性与GOT同样改变。没有X线改变而出现生化酶类改变者,此时已发生组织细胞功能代谢紊乱,可为亚临床病例。

ALP与LDH活性结果表明,非病区儿童与出现大骨节病X线各种改变的病人有非常明显差异,病区没有X线改变的儿童该酶活性无明显改变,说明ALP和LDH的改变晚于GOT和 $\alpha$ -HBDH。ALP和LDH随着病情发展而逐步升高。出现X线典型改变者,该酶活性最高,表明ALP和LDH与病情有明显相关。

自80年代初开始,进行了大骨节病尿液生化指标研究,检测尿液中肌酐、羟脯氨酸、粘多糖和肌酸,确认大骨节病尿液生化指标是有变化的。

表2 不同地区儿童尿液6项生化指标

|      | 活跃重病区  | 轻病区与稳定病区 | 病区中非病点 | 差异显著程度 |
|------|--------|----------|--------|--------|
| 肌酐   | 0.557  | 0.500    | 0.473  | *      |
| 肌酸   | 0.083  | 0.006    | 0.002  | **     |
| 粘多糖  | 2.444  | 1.907    | 2.012  | **     |
| 羟脯氨酸 | 72.574 | 58.689   | 62.192 | *      |
| 总硫   | 0.672  | 0.493    | 0.348  | **     |
| 粪卟啉  | 23.751 | 23.054   | 21.045 | —      |

\* p<0.05

\*\* p<0.01

根据尿液生化指标的改变,可划分两种类型,即有病类型和正常范围。

表3 按尿肌酸等3项指标划分的有病类型和正常范围

|     | 正常范围        |             | 有病类型          |             |
|-----|-------------|-------------|---------------|-------------|
|     | (均数±标准误)    | I           | I             | II          |
| 肌酸  | 0.146±0.013 | 0.000±0.20  | 0.007±0.003   | 0.011±0.004 |
| 粘多糖 | 2.220±0.034 | 2.141±1.026 | 0.9401±0.0171 | 1.597±0.055 |
| 总硫  | 0.777±0.040 | 0.704±0.016 | 0.683±0.015   | 0.477±0.003 |

\*表中数值为实测值的变换值

第3软骨细胞化学成分研究有了进展。对新鲜尸体软骨进行分层取材的生化分析中,初步看到病儿软骨在分子水平上的某些早期变化及其相互关系,病儿骨骺软骨和关节软骨代表细胞数的DNA量明显低于对照的非病区非骨病死亡儿童,同时在关节软

骨的表层即可见DNA量低。这一点在另一个反映细胞数量的指标磷脂的分析中亦得到证实。作为软骨细胞功能的主要产物,可见各层的胶原量高于对照,硫酸软骨素/胶原比值降低,以及多糖的低硫酸化等属于“老年性”改变。

第4低硒条件与大骨节病关系研究取得较大进展。大量的病区外环境调查证明,大骨节病人生活处于低硒地带,病人因环境有低硒代谢特点,硒预防大骨节病有一定效果。因此研究硒在大骨节病病因、发病机理及防治中的作用是有意义的。以人工半合成低硒饲料喂养大鼠时,和补硒组相比,髌板软骨变薄、细胞数减少、发育不良,说明对软骨细胞发育是必要的。低硒加桂皮酸和补硒组相比,大鼠髌板软骨呈明显的营养不良性改变,比单纯低硒者为重,说明复合因素的作用。

低硒或低硒加羟基桂皮酸等进行的动物实验结果,没有发现近似人类大骨节病早期病变——软骨深层带状坏死,因而硒在大骨节病病因及发病机理上的作用,可能是条件因素不一是大骨节病的病因,硒可能保护软骨细胞膜不受由于低硒所致的过氧化损伤,以致对大骨节病早期有预防作用。

第5防治方法研究上取得进展。1980年以来,全国各地大骨节病区对亚硒酸钠防治大骨节病的效果做过反复的实验,多数实验效果是明显的。亚硒酸钠对大骨节病干骺端改变有促进修复、防止恶化的较好效果。

大骨节病区产的玉米、小麦传播大骨节病致病因子,大米不传病。采用换粮,即不吃病区产的玉米和小麦,吃非病区粮或商品粮,改旱田为水田,吃大米可以控制大骨节病。

当前及未来很长一段时间里,大骨节病研究主要还是病因研究,病因不清很难实现完全控制大骨节病目标。有两方面工作,一是加速致病因子分离、提取工作。目前已做了大量工作,获得一批成果,在现在基础上,对基本上确定的大骨节病致病因子载体,如病区产的玉米和小麦以及饮水中分离、提取致病因子,最后确定致病因子;另一是重视大骨节病病因环境的研究工作,其中包括软骨成骨过程及其影响因素研究。内环境未来研究几个关键问题是:

1. 软骨细胞反分化 大骨节病致病因子如黄腐酸和真菌毒素等能引起软骨细胞反分化,而硒和锌则能控制。大骨节病反分化是自由基作用于软骨细胞造成的,反分化是从细胞异常到基质异常硫化异常关键环节。反分化做为细胞异常与细胞和细胞外基质的直接损伤同时存在。后者影响细胞合成基质能力,使基质分子降解,而最终影响软骨内骨化。两效应结合构成大骨节病整个病理过程。

2. 细胞骨架变化 大骨节病软骨细胞的骨架变化肯定是非常重要的,它不仅与软骨细胞死亡与软骨坏死有直接关系,而且在软骨细胞反分化时,骨架网络会发生显著变化。需进一步探明软骨细胞骨架变化的特点和由此产生的特殊结果。

3. 细胞内游离钙浓度 一致公认细胞内游离钙离子浓度增加是最终干造成细胞死亡和组织坏死的中心环节,而且,也是一系列细胞过程的启动因子。虽然,早已注意到它在大骨节病病理过程中的重要地位,但其增高机制尚不清楚,以及其增高在大骨节病的各种病理表现中所起的作用。

(哈尔滨医科大学卢明俊教授撰)

**关节软骨损伤** injury of articular cartilage 关节软骨受到1次性暴力或逐渐磨损所致的伤病。它是关节损伤中的多发伤病,治疗困难。多数难以完全恢复组织学结构,往往影响关节功能及劳动力。

关节软骨是覆盖骨端关节面的组织。正常者为半透明乳白色,表面光滑,硬韧,富有弹性,具有减震缓冲压力的作用以及滑利关节的功能。软骨的厚薄不一致。凡负重较大的关节,其软骨较厚。关节负重区部分的软骨比非负重区的厚。组织学上软骨分为4层,即I层(表层)、II层(平行层)、III层(放射层)、IV层(钙化软骨层)。III、IV层之间有一嗜碱性较强的“潮线”。软骨组

组织的营养不同于其它组织。I~III层自关节滑液摄取营养。IV层软骨的营养由骨髓血管渗透而来,借助软骨本身的弹性受挤压发生的唧筒作用摄取营养(Fcend, 1939; Hissch, 1944)。因此,长期制动或持久的压力将影响软骨吸收营养。关节软骨是无血管神经组织。单纯软骨损伤后虽有软骨细胞的反应性增殖,但不能自身修复。当软骨损伤至骨或者与周围组织相连时,由骨或周围带有血管的组织生长纤维结缔组织再化生软骨而修复,而且在修复过程中需要有适当的生理性压力及机械性刺激因素。此外,某些药物可以影响软骨的修复过程。例如关节内过多地注射强的松龙类药物可抑制关节软骨的修复,并能促使正常关节软骨的退行性变。

关节软骨的损伤原因机转及病理改变:关节软骨损伤以负重较大的关节发病为多,如膝、踝、肘为多见。关节软骨可因急性外力或慢性劳损致伤。急性损伤可发生于捻挫应力,以致软骨剥脱、软骨骨折;切线性损伤,如膝关节髌骨脱位、半脱位或复位时,以致切线软骨骨折。踝关节脱位或半脱位时,踝穴致距骨上关节面边缘切线应力,也可引起距骨关节面的切线软骨骨折。撞击性损伤致软骨压缩性损伤,软骨的胶原纤维破坏,细胞死亡。

慢性软骨损伤:一部分是因急性损伤未治愈而来。动物实验及临床研究证实,更多的是因关节超量负荷,逐渐劳损、磨损、捻挫、经常小创伤积累的微细损伤所致。这类损伤是运动损伤以及重体力劳动者关节软骨损伤的重要原因机转。此外,关节滑膜反复出血,血中的血浆素有溶解软骨的作用(LACK, 1995)。外伤也可致滑膜及软骨中的溶酶体膜破坏,释放出的组织蛋白酶可破坏软骨的基质。对软骨施以长时间持续的压力或压力不足时影响软骨唧筒作用的营养机制也是引起软骨损伤的因素。关节畸形如膝内外翻、骨折畸形致使关节受力失衡都是造成软骨损伤的潜在因素。软骨损伤后,基质中的胶原纤维被破坏。正常胶原纤维形成的“网状拱形结构”及软骨面的“薄壳结构”被破坏,正常弹性减低,所受压力不能分散传递,局部受到超常压力。正常的唧筒营养作用也被破坏,引起软骨加重损伤。局部骨质也受超常压力,引起骨病变,损伤软骨脱落的细胞形成抗原,刺激滑膜反应性炎症及周围软组织病变,从而引起关节一系列的病理变化。

急性软骨损伤病理可见软骨骨折剥脱、裂纹,胶原纤维损伤,软骨细胞坏死。软骨剥脱后即成关节鼠。急性损伤的后期或者慢性软骨损伤,肉眼可见软骨面失泽,呈黄色或灰白色,进而软化、不平、纤维化、龟裂,以致剥脱缺损形成关节鼠、骨外露。软骨下骨面骨质增生。除软骨本身外,可波及软骨附近其它组织。(1)软骨本身:细胞减少、坏死、排列不规则、聚集。基质红染,血管侵入,胶原纤维破坏,纤维结缔组织增生侵入软骨,软骨纤维化、玻璃样变,周围滑膜爬入软骨面。(2)软骨下骨:髓腔纤维化、囊性变,出现软骨岛。新生骨增多,骨小梁增生变粗。骨组织侵入软骨层。关节缘骨赘增生。(3)关节滑膜组织:可见增生肥厚、纤维化。滑膜绒毛增生。血管增多,管壁肥厚,管腔狭窄。出现慢性滑膜炎。(4)周围筋膜,腱止装置:呈现慢性炎症。变性、增生,表现为末端病病变。另外,关节周围的滑囊等也可表现为慢性炎症。最后骨质增生发展成骨关节炎。

此外,少年儿童由于关节软骨下骨的坚韧性比软骨要小,损伤病理与成年人不同,往往表现为骨软骨损伤,如急性的骨软骨骨折、慢性的剥脱性骨软骨炎等。

症状及诊断:软骨是无神经的组织,单纯软骨损伤往往无明显疼痛。急性单纯软骨损伤者,当时可有酸痛不适。约2周后才逐渐出现症状。症状与骨、滑膜、周围腱、筋膜等组织的病理改变的严重程度有密切关系。因此,有时症状与软骨本身损伤的严重程度并非正相关。

急性软骨损伤者往往1~2周后才出现关节疼痛、失力、肿胀。如有剥脱可出现交锁症状。若为骨软骨骨折,关节可肿胀、积液。抽出关节液为血性,平置后肉眼可见较大的油滴漂浮。

典型的关节软骨损伤症状为损伤部位持重发疼。如髌骨软骨软化症者半蹲发力痛、肘关节支撑疼等。如伴有慢性滑膜炎症状,则肿胀积液。如有关节鼠则有交锁症状。体征:长期患

者患肢肌肉萎缩,可有积液,关节滑膜压疼、肥厚。如发生在肘踝则易出现活动范围逐渐受限。膝髌骨软骨病可有髌骨压疼、抗阻伸膝疼等。

X线检查:早期可为阴性。阳性征象可见软骨下骨脱钙、囊性变、硬化、骨密度增高,最后周围骨质增生。或可见关节鼠。

关节软骨损伤的治疗原则:关节软骨损伤后,软骨自身不能修复,动物实验表明自体骨软骨移植可以修补,但临床应用取材有困难。动物实验同种异体骨软骨移植可能成活,至今临床尚未能应用。至于软骨细胞培养移植方法只处于实验研究阶段。目前仍未找到理想的治疗手段完全修复软骨。治疗急性软骨损伤,如单纯撞击挤压伤,因患者没有典型症状,往往需要观察一定时间。软骨骨折剥脱时宜早期手术摘除软骨片或同时骨床钻孔达骨小梁,以期由骨生长纤维结缔组织化生软骨修复。骨软骨骨折时,若为小块或非负重区骨折,摘除骨软骨块即可,可由骨床生长纤维结缔组织化生软骨组织,有大的骨软骨块宜复位固定。慢性软骨损伤者以保守治疗为主,适当安排活动,控制引起疼痛的动作。如运动员宜调整训练,避免或减少发病机制的动作。同时加强关节周围肌力的练习,以稳固关节减少不合槽的关节活动,提高痛阈,改善软骨营养。如膝骨软骨软化症者做静力半蹲练习,踝提踵走练习等。常采用的保守治疗以消除无菌性炎症和止痛手段为主,如理疗,以超短波疗效较好,按摩、外敷中药等也有较好的效果。对关节周围软组织的继发病变部位有时可注射肾上腺皮质激素类药物。如髌骨周围腱止末端痛时可局部注射上药,有一定疗效。当非手术治疗无效且严重影响肢体功能时可考虑手术治疗。常采用软骨软化灶清除术、骨髓减压术或软化灶骨床钻孔术。如有骨质增生、关节活动受限可切除周缘骨赘(肘、踝骨关节炎)。过度肥厚的滑膜应切除。改变力线的手术如髌骨软骨软化症的髌骨外侧筋膜松解术、胫骨平台加高术等。也可用人工代用品填充骨软骨缺损(如硅橡胶充填)。

关节软骨损伤的预防至关重要。避免关节不合槽运动及防止关节超负荷运动是主要手段。

#### 参考文献

- 1 Maekjenue Grooks ML. Chondromalacia of patella. J. Bone and Joint Surg. 1967, 49-B(3):495
- 2 曲绵域,等. 关于软骨磨损之研究. 中华外科, 1963, 5:11
- 3 曲绵域,等. 关节软骨修复与再生问题之实验病理学研究. 天津骨科附刊, 1964, 8(1):5
- 4 曲绵域,等. 运动员踝关节骨关节炎. 1965年运动医学论文集. 北医三院北京运动医学研究所, 1965, 31~41
- 5 冯翰琼,等. 家兔关节软骨损伤愈合过程中组织学和组织化学变化及几种药物的作用, 1972年, 运动医学论文集, 北医三院北京运动医学研究所, 1973, 1~24
- 6 曲绵域,等. 机械因素对关节软骨修复与再生影响实验病理学观察. 1972年运动医学论文集. 1973, 25~35
- 7 田科祥,等. 家兔关节软骨异体移植的实验研究(幼年兔-成年兔), 1974年运动医学资料汇编, 北医三院北京运动医学研究所, 1973, 11~26
- 8 曲绵域,等. 硅橡胶修补关节软骨缺损的实验研究, 体育科学, 1981, 1:57~64
- 9 Milgram JW. Morphologic alterations of the subchondral bone in advanced degenerative arthritis. In: Clinical orthopaedics and Related Research, 293~312
- 10 Tian Dexiang, et al. Clinical and pathological study on patellectomy in treatment of chondromalacia of patella In: Sport, Medicine and Health-The Asian Perspective, editor: K. M chan, Printed by daniel Printing, Hong Kong, 1992. 70~83

(北京医科大学运动医学研究所博士生导师田得祥撰)

骨膜再生关节软骨的研究 关节的退行性变、创伤、炎

症和先天性疾病常引起关节软骨的缺损和破坏,由于关节软骨自身缺乏再生能力,目前修复关节软骨缺损尚无有效的方法,故由此引起的各种关节畸形和功能障碍非常多见。80年代以来,对于自体游离骨膜移植修补关节面软骨缺损和关节骨软骨缺损进行了一系列动物实验和临床研究,并取得一定疗效。

骨膜的生发层细胞属一种未分化的间充质细胞,具有潜在分化能力,这种分化作用具有一种双向性,即在不同的环境条件下,有可能分化成骨母细胞或软骨母细胞,氧分压与这种分化有关,氧分压低时以软骨母细胞生成为主。Poussa(1981)将兔自体胫前内侧游离骨膜植入膝关节腔,结果发现大量软骨样细胞增殖。O'Driscoll和Salter则发现游离骨膜植入膝关节腔内术后持续的被动运动膝关节,植入骨膜的软骨生成作用明显增加,4周后其新生的软骨达83%,超过了Engkvist79年报告的游离骨膜移植产生57%的新生软骨,且新生的软骨组织用藏红O染色表明有酸性粘多糖物质生成,类似透明软骨。为了证实自体游离骨膜能够修复关节软骨缺损,1982年Rubak用60只兔的132个膝关节进行实验,其中12只兔作为对照。方法是在兔膝关节的股骨髁滑车部凿出7mm×14mm大小的软骨缺损。以渗血为指征,深达软骨下骨,然后取同侧肢体胫骨前内侧全层骨膜,骨膜生发层朝向软骨下骨盖成缺损,用6~0丝线固定在滑膜上,术后即予正常活动,而对对照组造成缺损后不予任何材料修补。分别于术后4、7、14、21、28、84、180和360d取材作肉眼观察及光镜下组织学检查,结果发现4~7d移植区内间充质细胞大量增殖。14d后大量纤维母细胞增殖并可出现类似软骨母细胞样细胞,28d整个结构近似幼稚软骨,但细胞密度仍较正常软骨高,84~360d其结构更加类似邻近的透明软骨,细胞密度减少,与正常软骨的交界消失,且表面光滑,很少退行性改变。对照组42d后软骨缺损内只有部分纤维组织,且很少将缺损完全填平。以往对于软骨缺损修复的研究表明,深达软骨下骨的缺损可通过外源性组织修复。为了证实新生的软骨组织来自移植的骨膜而非软骨下骨的外源性组织,Rubak等又在软骨缺损区游离骨膜移植块和软骨下骨之间用一层微孔滤网隔开,细胞和血管组织无法由此通过。结果发现,3周前不断增殖的成纤维细胞和软骨母细胞均位于微孔滤网的骨膜移植块一侧,4周后由于软骨下骨一侧的成骨活跃,滤网逐渐破裂。自体游离骨膜移植生成软骨的调节因素尚不完全清楚,正常的关节软骨生长有赖于关节滑液的营养,各种化学性刺激作用及关节的功能状态。对于骨膜移植再生关节软骨,Rubak认为除了骨膜的生物学特性外,亦主要与这3点有关,Rubak等观察了自体游离骨膜移植修补关节软骨缺损术后膝关节制动及重新恢复活动后的软骨生成情况。制动组的移植骨膜主要生成结缔组织和纤维软骨,制动后重新活动组生成的新生软骨亦较正常活动的新生软骨为差,前者表面均出现原纤维性变,说明制动严重影响这种新生软骨的生成,且这种改变在一定程度上是不可逆的。O'Driscoll和Salter则发现游离骨膜移植修补膝关节骨软骨缺损术后持续被动运动组较自由活动组及制动组的新生软骨的生成量,关节表面的完整性以及与周围软骨组织的连接均好,持续被动运动四周组在大体形态、组织学检查及组织化学特点更近似于完整的透明关节软骨,其总的己胺糖含量、硫酸软骨素和硫酸角质素水平,单乳糖胺与葡萄糖胺比例都更接近正常关节软骨,I型胶原占整个胶原的比例达93%,说明关节被动运动在调节骨膜移植生成软骨是个较为重要的因素。关于移植骨膜的方向,即:移植骨膜生发层朝向关节腔还是朝向软骨下骨,O'Driscoll等通过实验提出与Rubak不同的观点,其认为新生软骨由生发层产生,生发层必须朝向关节腔,以便物质的交换和活动的刺激。实验结果表明生发层朝向软骨下骨组生成的软骨量及形态均较朝向关节腔组差。但O'Driscoll的移植方法与Rubak所采用的有一定差异,故尚难定论。Jaroma等则比较了骨膜生发层不同朝向对自体骨膜游离移植重建膝关节面的影响,发现生发层朝向关节腔组早期软骨较薄,但其同时又认为这种差别意义不大。

自体游离骨膜修复关节软骨缺损已开始向临床应用过渡。1980年和1981年Ritsild等分别报告了用自体游离骨膜移植重建膝关节面、股骨髁及跖趾关节,关节镜随访访问关节面均有改善,其中3例活检,组织学证实为透明软骨。1985年Niedermann等报告了5例自体游离骨膜移植修补膝关节骨软骨缺损,其中4例为股骨内髁剥脱性骨软骨炎,1例为激素引起的股骨外髁骨坏死。其手术方法为先在缺损部位钻孔至松质骨,然后取同侧肢体胫骨前内侧骨膜用纤维蛋白原粘合剂(Fibrinkleber)将游离的骨膜固定在钻过的骨面上,术后加强股四头肌锻炼及膝关节负重练习。分别于术后3、6和12个月摄X光片和关节镜随访。3个月时关节镜可见缺损由灰色膜状物填满,6个月缺损由一厚层软骨复盖,但表面尚不平,质地柔软,12个月则新生软骨和周围软骨的边界在关节镜下已难以分辨,其质地和周围软骨同样坚硬。X光片显示12个月时骨缺损部分完全由骨质修复。所有病人活动范围正常,除一例有少许隐痛外,其余均无疼痛。Hoikka(1990)报告13例,其中6例用纤维蛋白原粘合的方法,其余用吸收线缝合,最长随访9年,平均3.8年,结果优8例,良4例,差1例,其中差1例的为老年男性患者,提示在选择适应症时,对老年入要慎重。

综上所述,自体游离骨膜移植修补关节软骨缺损能生成透明软骨,且在负重关节不易发生退行性变。目前在处理关节面软骨严重破坏的病例中,尤其是年轻患者或运动员,尚未找到一种理想的关节形的生物材料。因此,对自体游离骨膜移植修复关节面的具体方法以及所生成的新生软骨进行深入的组织化学及生物学特性研究,对于临床应用修补关节软骨以及关节手术具有重要意义。

#### 参考文献

- 1 Rubak J M. Acta Orthop Scand, 1982, 53: 175
- 2 Rubak J. Acta Orthop Scand, 1982, 53: 181
- 3 O'Driscoll S W, et al. J Bone Joint Surg, 1984, 66A: 1248
- 4 Niedermann B, et al. Acta Orthop Scand, 1985, 56: 457
- 5 Zarnett R, et al. Clin Orthop, 1987, 222: 267
- 6 Jaroma H J, et al. Scand J. Plast Reconstr Surg, 1987, 21: 175
- 7 O'Driscoll S W, et al. J Bone Joint Surg, 1988, 70A: 595
- 8 Hoikka V E, et al. Acta Orthop Scand, 1990, 61: 36

(第一军医大学珠江医院骨科  
李奇主治医师撰,韩天英审)

#### 科雷氏骨折整复固定方法临床研究

科雷氏骨折是指桡骨远端2~3cm以内的伸直型骨折,好发于中老年人,临床极为多见,约占全身骨折的6%,占腕部骨折的50%。如治疗不当,常遗留腕、指功能障碍或影响前臂的旋转活动,严重者可能造成残废。该骨折的基本病理改变是桡骨远端断裂,远端向背侧或兼外侧移位,桡腕关节面正常的掌倾角及尺偏角变小或呈负角,骨折断端嵌插或重叠,下尺桡关节脱位(前后、上下、内外方向),三角纤维软骨撕裂或尺骨茎突骨折,腕的伸屈肌腱移位,局部血管损伤出血、淤积、肿胀、腕管内压力增大,或伴有正中神经损伤。治疗的目标是骨折及合并伤得到完好的复位,达到“骨正筋柔”,并在良好的固定下维持这种状态直到骨折愈合、功能恢复。要达到这一目标,整复与固定是治疗过程中的两个主要环节。临床家都注意了整复与固定方法的经验积累与应用研究,正在进行不懈的探索,但迄今学者们的观点与做法尚不完全一致,有待统一认识,逐步完善整复与固定方法。

整复方法。(1)按中医传统辨证施治。苏宝铭根据骨折移位的长短高低变化,施用牵拉、推按等不同手法,恢复腕部体表位置的正常关系。经X线证实,这种整复方法可以达到恢复局部正常解剖学形态的目的。作者报告200例,复位良好率94.5%。(2)中立位整复法。王广智等结合现代解剖和X线分析,根据骨折移位情况,先“顺势牵引”,然后改为前臂中立位、腕中立位,大力牵

引,在拉开断端嵌插重叠后,施用推按、扳提、扣挤等手法,使骨折及合并伤复位。复位过程中,对单纯伸直型配合施用过性掌屈手法,伸直兼外展型配合过性掌屈尺偏,伸直内收型配合快速外展卡顶手法;对粉碎骨折施用“双掌抱骨扣挤法”;对骨折线波及桡腕关节面而骨块移位者,施用牵引下腕中立位为中心小范围环转手法以“模拟”关节面。最后以“摩捋”法理顺肌腱以达“骨正筋柔”目的。这种整复法借助中立位下内外力的平衡,使大多数骨折及合并伤得到满意的复位。(3)掌屈尺偏整复法。这是20世纪60年代初开展中西医结合治疗骨折总结出来的整复法。其方法是“用两手拇指捏住骨折部,迫使骨折近段尺偏掌屈”(方先之等,1966)。对粉碎骨折也采用了“使腕掌屈尺偏以纠正侧方移位”(1985)。其基本手法是在牵引下用推按端提或猛抖,使腕掌屈尺偏获得复位。因该法早已被写进高等中医院校教材,影响深远。但因施用不当可造成不良后果,故一些学者提出异议。张会来等分析认为,该法可因断端嵌插未解脱而强行掌屈按压,可产生医源性损伤。李尔年等结合自己的经验对其缺点做了细致的分析,认为利用屈腕不能纠正骨折远端的前后移位;过早的屈腕必然造成骨折远端掌侧缘的嵌插;用尺偏纠正侧偏,必受尺骨远端的阻挡;掌屈尺偏复位法对斜面骨折更为不利,可使骨折移位更加复杂化;桡骨远端干骺端骨折后期产生畸形的原因,多是由于不正确的暴力掌屈造成了断端的损伤所致。临床实践证明,掌屈尺偏复位法应用不当确实存在上述弊端,应引起重视。必须在断端嵌插充分牵开的前提下施用掌屈尺偏手法,以减少不良效果的发生。(4)针对骨折移位分步整复法。李尔年等在分析了“掌屈尺偏整复法”的不合理之后,提出了分步整复法,即:“牵引—纠正侧移位—纠正掌背侧移位—纠正掌成角—叩挤下尺桡关节—理筋”6个步骤。认为粉碎骨折应辨证施法,只要桡腕关节面平整,掌斜角好,即可看作是满意的复位。这种分步稳妥的整复方法有其优点,值得仿效。(5)折顶整复法。一些学者把整复长骨于骨折的“折顶”手法用于整复科雷氏骨折,即在牵引下,加大掌侧成角,然后迅速反折并掌屈尺偏。这一方法用于该骨折有其明显的危险性,故有的学者告诫,折角不得太大,以免损伤动脉。显然,折角过大,还必然损伤腕掌侧的肌腱等。(6)其他整复法。有人采用大力牵引下加旋转的手法,认为该手法在纠正重叠和背侧侧移位的同时,纠正远断端的旋转移位。这一方法对远端旋转移位大的骨折,无疑是合理、有效的,但还必须与推按等手法结合,才能获得更好的效果。最近有人对整复不满意的骨折,采用小针刀撬拨的方法纠正断端的移位,这一方法是侵入性的,有额外损伤及感染之虞,只在特殊情况下施用。最近有人用上肢骨折整复器治疗,但功能尚不齐全,仍需手法配合。

固定方法。(1)掌屈尺偏固定法。这种固定法目前采用者众多。即用塑形夹板或石膏将腕关节固定在掌屈尺偏位,前臂中立位或旋前或旋后位,意图在于借固定力控制断端移位并维持桡腕关节面的掌倾尺偏角。许多学者已注意到了这种固定方法的不合理性,刘润田早在1965年就指出:精确复位后,不必过度屈腕及使腕部倾向尺侧,因复位后即不易再移位。苏宝铭深入分析了掌屈尺偏固定的缺点,认为掌屈尺偏固定,腕关节的伸屈肌力失去了平衡,由于背侧肌肉过紧,便可造成桡骨远端掌倾角反而变小,甚至变为负角。还能引起骨折的两端互相嵌插,因桡骨远端缩短而影响下尺桡关节的正常关系。还分析了该法固定不能保持尺偏角的理由。叶根茂、刘献祥曾先后报导了科雷氏骨折并发急性腕管综合症的病例,认为发病原因与掌屈尺偏固定有直接关系,及时改为中立位固定后症状即可消失。刘氏指出:只要复位理想,手腕可置中立位,无需将腕置掌屈尺偏位。牛洪涛等则认为:固定腕关节的掌倾角度 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 较为合理,屈曲度越大,腕管间隙内液压压力越大,压力达 $6.7\text{kPa}$ 汞柱时,手的感觉和运动可完全丧失。腕关节屈曲 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围是关键性极限;腕关节过度掌屈,改变了伸肌腱的张力,严重影响术后功能锻炼,给愈合带来诸多麻烦,手指麻木、感觉和运动障碍,肿胀多日不消,末梢循环欠佳。这些论断,都是经验和教训的总结。(2)直夹板半超关节固

定。不少学者用4块直夹板固定,桡、背侧板超腕关节,掌、尺侧板不超腕,夹板下加垫,控制骨折移位倾向。这种固定法简单易行,较掌屈尺偏固定为优,腕有一定范围的掌屈尺偏运动,有利于维持掌倾尺偏角。但愈合后往往产生腕背伸功能受限,造成功能恢复期的延长。(3)中立位不超腕固定。“前臂中立位,腕中立位,不固定腕关节,骨折端移位倾向由夹板下平方压垫控制”,这是王广智等采取的固定原则。他们用4块小夹板(竹板),按腕中立位形态将夹板远端塑成一定曲度使之“合体”,放置时不超腕关节。认为这样的固定既可保持骨折端的稳定,又可保持腕关节在中立位状态下有一定的活动度,但不至于重复受伤机制,基本上保持了腕及前臂的内在动力平衡。实践证明,这样的固定断端稳定、感觉舒适,骨折愈合与功能恢复齐头并进,并发症与后遗症少。(4)其他固定法。孙叙理用背侧单夹板超腕关节固定,徐国洪用1块夹板置于掌侧固定腕关节掌屈尺偏位,均认为单夹板优于4块夹板固定。彭连钢用一块硬纸板塑成“船头形”置腕背侧固定腕屈曲 $45^{\circ}$ 位。西医传统的石膏固定腕掌屈尺偏位的方法,目前仍有人采用。

综上所述,科雷氏骨折的整复固定,迄今学者们在认识与做法上极不一致。今后的发展,整复方面,一是“欲合先离”的整复总原则会倍受重视,将充分注意整复手法中“拔伸牵引”的有效性,只要断端的嵌插重叠被拉开,就为骨折复位扫清了障碍,给其他整复手法奠定了基础。已施用的“顺势牵引”、“旋转牵引”、“摇摆牵引”会被广泛采用。断端嵌插拉不开而强行掌屈尺偏推按整复法的弊端,在实践中会逐渐被深入认识。二是使骨折复位的其他手法,将随着经验的积累而逐步增多,在仔细分析病情基础上的“辨证施法”、中立位“推按扳提”、“合掌扣挤”、“捋骨顺筋”等有效的手法将继续发挥其作用。此外,许多新的方法特别是中西医结合的方法会在实践中出现,功能较齐全的整复器械将会问世。固定方面,学者们已普遍认识到,只要复位好,断端不易再移位,因此,腕中立位塑形小夹板不超腕关节固定、直夹板半超腕关节固定、腕中立位硬纸板固定的方法,将仍作为主要的固定方法继续应用(固定松紧度必须恰当!)。单用一块夹板固定,应持慎重态度,特别是原移位大、合并伤多的骨折,其固定力有不足之嫌。显然,塑形夹板或石膏将腕固定在极度掌屈尺偏位的方法,随着人们对其弊端的深入认识而应用者将渐少,但要纠正多年形成的“习惯性”,还需要时间。传统使用的固定材料,如竹板、木板、杉树皮、硬纸板等,因其具有取材方便、可塑性好、价格便宜等优点,将被继续应用。随着工业、科技的发展,合乎要求的新型固定材料将会生产出来。

#### 参考文献

- 1 杨明.折顶端提法整复桡骨远端伸直型骨折,全国中医骨伤科学术讨论会论文汇编,1983,12:185
- 2 苏宝铭.桡骨远端骨折的辨证论治(附200例疗效报告),中医骨伤科杂志,1987,3(3):13
- 3 何丰良,等.中西医结合治疗桡骨远端骨折173例观察,中国骨伤,1989,3:31
- 4 李尔年,等.科雷氏骨折治疗及意外情况处理,中国中医骨伤科杂志,1989,5(4):43
- 5 牛洪涛,等.桡骨 Colles 骨折的生物力学改变及徒手整复外固定治疗方法之我见,中国骨伤,1989,4:29
- 6 王广智.谈谈骨折整复中拔伸手法的作用及操作技巧,中国骨伤,1990,2:14
- 7 张会来,等.谈科雷氏骨折手法复位中易出现的问题,中国中医骨伤科杂志,1991,7(5):25
- 8 王广智,等.409例桡骨远端骨折X线分析及对整复与固定的指导意义,济宁医学院学报,1991,14(3):24
- 9 刘献祥,等. Colles 骨折并急性腕管综合征临床诊治,中医正骨,1991,3(2):10
- 10 段西峰,等.上肢骨折整复器治疗 Colles 骨折102例疗效观察,中医正骨,1992,4(1):27



(山东济宁医学院骨伤科王广智教授撰)

## 尿路结石的成因与诊断

**cause and diagnosis of renal calculus** 尿路结石是泌尿系的常见病,是肾结石、输尿管结石和膀胱等结石的统称。其中肾结石和输尿管结石称为上尿路结石,膀胱结石和尿道结石称为下尿路结石。泌尿系任何部位结石都可始发于肾脏。输尿管结石几乎全部来自肾脏。肾脏结石患者男性比女性多3~9倍,男女之比为4.8:1。北京医科大学1985年统计为5.27:1,患者多为青壮年,21~50岁者占83%。左右侧肾脏发病率相似,双侧肾结石约占10%。

尿路结石由尿内多种晶体物质和非晶体物质沉积聚集而成。世界上有许多膀胱结石多发区,即“结石多发区”,如泰国、埃及、印度、智利、巴西等。中国尿路结石发病率较高区有云南、广东、贵州等地。由于结石的病因尚未明确,故防治方法也不满意。当结石引起尿路梗阻时,尿液不能通畅排出,受梗阻的近侧端产生积水,致严重的输尿管积水和肾积水,可因肾实质损害而导致肾功能衰竭、尿毒症。若为孤立肾结石或双侧结石嵌顿于连接部,可发生急性无尿症。

### 泌尿系结石形成的局部因素

(1)尿滞留:尿路梗阻,尿滞留导致尿中晶体或其他颗粒滞留而形成结石和继发感染,形成所谓“感染石”,结石出现加重梗阻,造成恶性循环。肾盂输尿管畸形和狭窄及多囊肾、海绵肾等有梗阻者,容易发生肾结石,并且肾内型肾盂患者多于肾外型肾盂患者。(2)感染有些细菌可分解尿素产生氨,使尿碱碱性化,促进磷酸盐析出,形成磷酸铵镁结石。感染时细菌、坏死组织和脓块等成为结石的核心。结石易引发感染,感染又使结石迅速增大或形成多发性结石。(3)异物:尿路手术时误用丝线缝合、穿透粘膜层或引流管长期留置不能更换和残留碎片等,皆可成为核心形成结石。

### 全身性代谢因素

1. 高尿钙症:(1)甲状旁腺机能亢进(简称甲状旁腺亢)。高血钙可引起高尿钙形成含钙的结石,约占全部尿结石的90%;甲状旁腺可因增生或肿瘤而使甲状旁腺素分泌增加,导致高血钙和高尿钙。甲状旁腺素既作用于骨骼系统促进脱钙,致使血钙增加,从而使尿钙升高,又能刺激肾小管合成1,25-双羟骨化醇而促进肠道对钙的吸收,形成高血钙和高尿钙;它还作用于肾脏小管降低磷酸盐的再吸收,增加尿内磷酸盐排出,因此血磷降低。1977年BONE指出,甲状旁腺亢进患者中50%~70%确能发生肾结石,肾结石病人中约有2%~5%由此病引起。其他尚有高血钙、高尿钙症和乳碱综合症、维生素D中毒、恶性肿瘤、皮质醇症以及原发性高尿酸症等,均可引起结石。(2)吸收性高尿钙症。肠道吸收钙离子过多,致使血钙升高,肾小球滤过钙增加,肾小管重吸收减少,尿钙升高,其原因有:原发性肠道上皮缺陷,致使钙吸收增加;肾产生1,25-双羟骨化醇增多,SHEN及GRAY(1977)认为是肾漏磷形成低血磷所致,但1982年COE及1984年BROADUS则反对这种因果关系统观点;肾性高尿钙,肾小管重吸收钙的功能不全,血钙降低刺激甲状旁腺功能继发甲状旁腺功能亢进,高血钙及低血钙刺激1,25-双羟骨化醇增加,促进肠道对钙的吸收;其他还有一些疾病可引起高血钙和高尿钙症,如特发性高尿钙症、结节病、多发性骨髓瘤、甲状旁腺机能亢进、白血病、淋巴瘤、乳碱综合症、转移瘤、粘液性水肿、肾上腺机能低下及特发性婴儿型高血钙症,特别是维生素D中毒、制动综合症及肾小管性酸中毒。

2. 高草酸尿症:ROBERTSON1978年认为对草酸钙沉淀来说,尿中草酸含量更具有重要性。草酸比尿中钙和磷含量高近10倍,尿中草酸一旦和钙结合,形成高浓度的复合物,便可变为不可溶性草酸钙结晶沉淀。(1)原发性高草酸尿,系先天性疾病,有此症者患尿结石常发生在儿童期,常有广泛的肾钙化及肾功能衰竭,大多数在30岁以前死亡。(2)获得性高草酸尿,常合并肠道疾病,如局限性肠炎、结肠炎及最近报道的肠道旁路手术后等患

者,常有高草酸尿症。这些病人不仅容易发生草酸钙结石,而且由于慢性腹泻脱水产生酸性尿,易发尿酸结石。(3)特发性高草酸尿而形成结石。高尿酸尿症:高尿酸尿对草酸钙结石的形成有一定的重要性。尿酸常是结石的核心。痛风患者约有10%~30%发生尿酸结石,患草酸钙结石病人中约32%有高尿酸尿,8.7%有代谢紊乱。

3. 其他因素:营养、饮食因素。上尿路结石常因营养过剩引起,约有20%肾结石病因可以明确,而80%属于特发性结石。上尿路结石发病的特点:(1)男多于女;(2)好发于青壮年;(3)结石复发率高;(4)结石成分多为草酸钙和磷酸钙。当食物中动物蛋白少时,膀胱结石发病率高;如婴儿过早用粮食喂养、乳品不足、营养不良而多发结石。当食物蛋白过高时,上尿路结石的发病率增高。肉类和糖能促进肠道对钙的吸收。尤其是动物内脏含嘌呤较多,可增加尿酸浓度,降低pH值,容易形成尿酸结石。故食品粗糙,含纤维量愈多,吸收、排泄愈缓慢,形成结石的机会愈少。药物因素:维生素D中毒、大量服用维生素C、磺胺、乙酰唑胺、皮质激素等均可发生尿结石。长期服用三磷酸盐者可发生磷酸盐结石。溃疡病者大量饮牛奶和碱性药,可发生乳碱综合症,长期服用阿斯匹林使尿中草酸含量增加,也可引起结石。

病理改变 肾结石引起的主要病理生理改变有:(1)对肾脏直接损伤,粘膜充血水肿,甚至溃疡出血。(2)尿流梗阻。(3)继发感染。其中对肾脏损害最大者,莫过于尿流梗阻。尿流梗阻程度不完全取决于结石大小,主要是结石所在的部位,如结石不大,而嵌顿于肾盂输尿管连接处,可以造成明显的肾积水及肾功能严重损害,甚至可使肾脏成为水囊肿,若继发感染,可加速肾脏损害,造成黄色素肉芽肿、肾脓肿,严重损害肾功能,若炎症扩散,可致肾周炎或脓肿。若肾小管性酸中毒及原发性甲状旁腺机能亢进,可发生肾钙化症。经研究证明,梗阻引起的尿路变化,可分为急性梗阻期、代偿期和失代偿期3个阶段。慢性不全梗阻者没有明显急性期的表现。双侧同时发生上尿路结石完全梗阻,完全无尿者较少见。上尿路急性梗阻患者,梗阻的位置愈高,愈易发生积水。由于近端管腔扩张,压力增高,蠕动增强,甚至引起平滑肌和血管的痉挛而产生绞痛。代偿期的主要变化为平滑肌增生、管壁增厚和蠕动增强,如代偿期功能不能克服阻力,即进入失代偿期。在此阶段,由于管腔继续扩张、压迫和牵拉血管,在肾脏首先影响弓状血管,血液循环障碍,促使组织萎缩。肾盂、肾盏变钝,造影显象饱满。梗阻解除后,这些变化也难以恢复。梗阻严重时,影响肾实质,对肾功能单位有一定的影响。正常肾小球滤过有赖于一定的肾小球滤过压。肾小球滤过压=肾小球毛细血管压-血液胶体渗透压-肾小管阻力。即 $10 - (3.3 + 1.3) = 5.4$  kPa。肾小球毛细血管内血压估计为血压的60%,约10kPa。当尿路梗阻时,肾囊内压力超过此数值,则滤过即完全停止。然而实际上即使在完全梗阻时,滤过仍存在,因尿可经多种渠道被重新吸收而使压力有所降低。但通过重新吸收并不能使压力恢复正常。肾盂压逐渐增高,可压迫肾小动脉,减少肾血流量,导致肾实质萎缩。

梗阻对肾小管功能的影响,表现为急性梗阻早期小管内尿流量减少,近曲管对钠和水的重吸收功能尚好,但这种情况维持不久,尿浓缩能力在短期内即减退,小管的分泌功能还保持一定程度。以后梗阻使肾小管扩张,肾小管内压力增高,压迫管壁细胞及四周的血管。由于近端小管对缺血较敏感,早期即出现萎缩。输尿管完全梗阻后,肾内压力增高到一定程度又可以下降。这主要通过下列几种回流途径完成:(1)肾盂静脉回流:肾盂压力急剧增高可造成肾盂穿膈部破裂,尿直接流入该处的静脉丛,形成肾盂静脉通道。以后不需很高的压力,尿即可以从此通过,直至通道修复而闭塞。(2)肾盂淋巴回流和肾盂周围外渗:淋巴回流是尿流再吸收的主要途径,尿也可以经过穿膈部薄弱的上皮以及其他部位外渗到肾间质和肾囊,再经淋巴管吸收。(3)肾小管回流:当肾盂压力增高时,乳头管可以闭合防止尿返流,当乳头

管属于凹陷型或乳头管口呈漏斗状时,就可发生返流。(4)当肾盂压力增高时,小管内的尿液即可直接回流进入静脉或淋巴管系统而不排入肾盂。回流只能起到暂时缓冲的作用。梗阻后肾盂压力增高,压迫血管及肾小管,终将使肾实质萎缩,肾功能衰退。

**主要症状和检查** 肾结石患者的常见症状为腰痛和血尿。少数长期可无症状,偶于体检时发现。多数有钝痛感,劳动后加重。肾盂和肾盏的较小结石可引起肾绞痛,痛自患侧向下腹部放射至会阴部。血尿常随腰痛出现,可为镜检血尿,也可为肉眼血尿。偶有无痛性血尿,活动后加重,偶有砂石排出史。患者常因尿路感染就医,孤立肾结石或双肾结石梗阻可发生急性尿潴留或肾积水。还有甲状旁腺功能亢进或痛风等引起的结石,常伴随显示原发病的症状。体检可无异常或肾区轻度叩击痛或深压痛。积水或脓肾可触及包块。

**X线检查有助于诊断。**泌尿系平片检查肾结石时,需与腹腔内钙化淋巴结、肠腔内容物、胆结石、结核性脓肿、肾结核钙化、肿瘤钙化等相鉴别。侧位片上肾结石阴影与腰椎体重叠或在椎体前2cm以内,静脉尿路造影可了解双肾功能和形态及畸形、积水情况。对碘过敏和阴性结石病人,可用逆行造影、重叠造影或B超检查。CT和断层X线片尿石显影更清晰,诊断并不困难。

#### 参考文献

- 1 俞天麟,主编.现代泌尿外科,兰州:甘肃科学技术出版社,1989.12
- 2 曹履诚,主编.尿石症基础与临床研究,济南:山东科学技术出版社,1990.10

(安徽省巢湖地区医院陈梓林副主任医师撰)

## 胆道结石的外科治疗 surgical treatment of biliary tract stone

胆道系统起于肝内毛细胆管,向下多与胰管汇合而止于乏特(Vater)壶腹。胆道系统分为肝内外两部分,肝内包括左胆管、右胆管、肝叶胆管、肝段胆管及区域胆管,称为一、二、三级等胆管。肝外为肝总管、胆囊管和胆囊、胆总管及壶腹部。

胆道结石是指结石居于胆道某一部分或多处兼有,由其引起的疾病称为胆石症,常分为胆囊结石和胆管结石,后者可位于肝内外任何胆管内。胆石症在腹部外科,其发病率仅次于急性阑尾炎,其患者死亡率居胆道良性疾病的首位。近几年来,肝内胆管结石的发病率有相对下降的趋势,但在中国,发病率仍较高,其治疗方法是现代外科尚未完全解决的课题。Graham和Cole于1924年奠定了胆囊造影的基础;其后,经皮肝穿胆道造影术、经十二指肠逆行插管造影术相继应用于临床,尤以现代超声显像术和术中应用纤维胆道镜,以及术中应用“B”超和直接穿刺胆道造影,对肝内胆管、胆石的定位和胆道病理形态改变有了进一步的了解,在诊疗上提供了最佳选择方案,使胆道结石的外科治疗有了长足发展。

Langenbach(1882)首次进行胆囊切除术,该术现已成为腹部手术最安全的手术方法之一,手术患者死亡率约为0.5%,但单纯性胆囊切除术导致胆总管损伤的病例并非罕见。排石、溶石、体外震波碎石虽取得一定的疗效,但胆囊切除术仍不失为最可靠的治疗胆囊结石的首选方式。单纯性的、选择性的胆囊切除,腹腔不放置引流物已为较多外科医生所接受。Lewis亦持相同观点。

O. Dwyer经肋缘下5cm小切口行胆囊切除术是创伤较小的径路。腹腔镜胆囊切除术是近3年来处理有症状胆囊结石者的一个显著改变;对伴有胆总管结石者,虽可以在腹腔镜下使用内窥镜经胆总管或切开胆总管取石,但其疗效仍待评估,技术上亦属早期开展阶段。另外,可于术后早期使用内窥镜切开括约肌取石。由于某些胆总管结石可以进入十二指肠,对无症状的胆总管结石患者和无症状的胆囊结石者一样,无需处理。1991年中国开始应用腹腔镜切除胆囊,确认此法损伤小、疼痛轻、恢复快,随着有关设备的推广应用,该手术应有所普及。

中国胆总管结石的发病率远较外国为高,约占胆石症的

50%左右。胆总管切开探查与引流是治疗胆总管结石的基本术式,但术前与术中必需注意肝内胆管有无结石以及隐蔽或嵌顿在胆总管下端的结石;多数因残石导致再次手术者,多系忽略了上述部位结石的存在。单纯性胆总管结石行胆总管切开取石、“T”管外引流仍系有效可靠的术式;若仅由于结石引起的Oddis括约肌炎性狭窄,胆总管近端胆管无病变,胆总管直径 $>2\text{cm}$ 者,可行十二指肠后的胆总管十二指肠吻合术,尤其对年老、体衰者为首选术式。

肝内胆管结石是指位于左肝管与右肝管汇合部以上的结石,在中国其发生率可高达胆石症病人总数的30%~47%,以其高并发症发生率、高残石率、高复发率和高再次手术率而成为外科的一大难题。肝内胆管结石合并胆管狭窄的发生率平均为24.28%,最高地区平均达41.94%,在第2次手术的病例中40%以上合并有胆管狭窄,与再手术次数成正比。

中国肝内结石发生率较外国高,该病的诊疗技术经过10多年的实践有了较大发展。外科治疗原则概括为:(1)显露肝内胆管,直视下取石;(2)矫正伴有狭窄的胆管;(3)切除肝内病灶;(4)重建胆道通道,形成宽大通畅的引流通道,对不同患者施行多方面和多术式的联合手术。施行这一复杂手术,在术前除对患者进行肝、肾、心、肺和凝血机制、血生化作全面检查外,还应有选择地进行各种特殊检查,如超声显像、ERCP、PTC、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$  IDA(亚胺基二乙酸) $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DIIIDA(二异丙基亚胺基二乙酸)、CT检查、静脉注射胆影葡胺加强对比等,务求术前能对结石位置、肝内病变有所了解。术中应用“B”超、胆道造影、胆道镜对肝进行外观的观察,应用肝脏双合诊以及用手指或借助器械引导,逐步切开肝内胆管,直视下辨认显露的近端肝内胆管流出的胆汁性状,窥见的结石和肝组织及胆管病理形态的改变,必要时行快速切片检查,这些更是选择术式的重要手段。

肝内病变较重的区域伴肝实质纤维化、萎缩以及门静脉血循环障碍,该部分肝功能处于废弃状态者,仅清除结石和建立引流是无效的,应以不同形式的肝切除术为主。显露肝内胆管取石,肝右后叶上段支结石残留机会最多,当右肝管及其2级分支有狭窄时加上右肝管种解剖学上的变异,行肝右叶切除术或部分切除,是解决右侧复杂的肝内胆管结石的有效方法。

夏亮芳报道,原发性胆管结石合并胆管狭窄者191例,共具狭窄304处,其中右前叶上段2处,右前叶下段15处,右后叶上段3处,右后叶下段4处,即右肝2级分支以上胆管狭窄占总狭窄处数的7.8%。残留结石机会多而又处理困难的肝右后叶上段狭窄,在304处中仅有3处。可见肝胆管结石不伴有该处肝组织功能废弃,或对难以取出的结石可以不首选肝切除术。对肝胆管结石行肝切除术,主要是切除狭窄、扩张和充满结石的损伤严重的肝组织,达到去除肝内主要病灶为目的,尽可能保留有功能的肝组织,通过肝断面胆管取出残余结石和通畅肝管引流装置,无需行规则的半肝切除术或肝叶切除术,亦可视为进入肝内的一种径路。肝切除术治疗肝胆管结石多用于左肝,尤以行左肝外叶切除术,远比广泛切开左肝1、2、3级胆管的成形与空肠吻合的手术简易些,且疗效较佳。

一般情况良好、体瘦、躯干修长、肋缘夹角大于 $60^\circ$ 、肝外观正常,肝脏双合诊有“结石感”、肝外胆管扩张伴有结石、肝内胆管呈藕节样扩张并环状狭窄且无明显炎症水肿者,最宜行切开肝外胆管、显露肝内1、2、3级胆管直视下取石矫正胆管狭窄、拼凑成“肝胆管盆”(Hepatobiliary“basin”)与空肠作大口吻合的联合手术。手术治疗左右肝内胆管“弥漫性”结石,行肝切除术还是显露肝胆管取石,或两者联合施行,均难以满足“切除病灶、取尽结石、解除梗阻”的要求,很显然,对这一良性疾病患者过多切除肝组织是得不偿失的;一些再次手术者,肝门的正常结构改变,受慢性炎症的影响,肝的叶、间、段解剖学标志不清,肝组织发生炎症、萎缩而可能与下腔静脉紧密粘连,致使行肝切除术十分困难,且有一定的危险性。

肝内高位胆管狭窄的切开和成形,尤以对管状狭窄的切开

和成形非常困难,有时甚至难以完成手术。有时虽显露了有病变的肝内1、2、3级胆管,亦难取净结石,很显然,那些隐匿于1、2、3级胆管以上肝内胆管的小结石仍是不可见亦不可及的,所谓“取尽结石”仅是相对取尽而已。

无论是以肝切除术为主还是显露1、2、3级肝内胆管为主,均有不同程度的残石率;肝内胆管众多,尤以结石、梗阻、炎症造成的病理形态学改变的肝内胆管,不可能完全切除。患者的成石因素未能消除,栖息场所依然存在,结石的再生是难以避免的。故在相对地取尽结石、解除梗阻、切除病灶的基础上,重建胆道通道,形成宽大通畅的内引流通道是必要的,以避免胆汁淤积、细菌感染和结石再生。如有再生结石,亦可使其在胆管内铸型之前顺流而下排入肠道。

100多年来,诸多外科专家设计了各种不同的胆肠内引流形式,为了减少逆行感染又附加了抗逆流装置,在胆道外科取得了很大的成就;通过长时期的临床实践逐渐认识到,若肝内病灶未能去除,狭窄和病变的胆管亦然存在,任何形式的内引流都难以收到预期的效果,并给再次手术带来更多的困难。如切除肝内病灶,通畅肝内胆管后,针对不同情况,选用某一术式的内引流,大多有一个较好的预后。因而在复杂的肝胆管结石病例中,肝内手术进行到何种程度无统一模式,采用不同术式的内引流所取得的结果亦难以确切评价何优何劣,但在原则上应力求达到符合胆流生理,吻合口应宽大无张力,术后狭窄发生率低,操作简单、安全可靠、并发症少的目的。

随着围手术期处理方法的不断完善,不同形式的肝切除术和显露肝内1、2、3级胆管的入肝路径,能被越来越多的外科医生所掌握,则肝内胆管结石患者的再手术率和死亡率亦应同步下降。

#### 参考文献

- 1 冉瑞图,等. 沈阳:胆道手术学,辽宁科学技术出版社,1987. 90
- 2 Lewis R T, et al. Am. J. Surg., 1990, 154(2): 241
- 3 O Dwyer. P J, et al. Brit J. Surg., 1990, 77(10): 1189
- 4 Mcintee G. Brit J. Surg., 1991, 78(4): 385
- 5 刘衍民,等. 实用外科杂志, 1991, 11(12): 663
- 6 黄志强. 实用外科杂志, 1991, 11(4): 170

(安徽省合肥市第三人民医院张振先主任医师、钱泽金副主任医师撰)

**尿道下裂** hypospadias 最常见的男性尿道先天畸形。主要表现为尿道开口位置异常,可位于阴茎腹侧从阴茎头至会阴部的任何部位。多数病例伴有阴茎腹侧弯曲畸形,背侧包皮过多,腹侧皮肤短缺,症状轻重与尿道口位置及弯曲畸形的严重程度有关。对于不能正常站立排尿及有性生活障碍的病人,均需手术治疗。

#### 尿道下裂的病理及临床表现

1. 尿道发育不全, 外口位置异常, 有时伴有尿道口狭窄。霍尔顿(Hortou, 1990)根据尿道口部位不同将尿道下裂分为6类: 阴茎头型、阴茎远段型、阴茎型、阴茎阴囊型、阴囊型、会阴型、前两型, 约占总数的90%。斯坦道利(Standoli, 1988)所作的外科分类是: (1)近段尿道下裂, 尿道口位于会阴部至阴茎体近段1/3处, (2)远段尿道下裂, 尿道口位于阴茎远段1/3至冠状沟, (3)顶端型尿道下裂, 尿道口位于阴茎头腹侧距顶端4~5mm。

2. 阴茎形态异常。大多数病例由于腹侧纤维索挛缩, 阴茎向腹侧弯曲畸形, 勃起时尤为明显, 并可伴有疼痛, 俗称阴茎痛性勃起阴茎头扁平及其他畸形。

3. 阴囊畸形: 在阴囊型、会阴型的尿道下裂可有阴囊分裂或发育不全。会阴型尿道下裂伴小阴茎、隐睾时, 阴囊酷似大隐唇, 表现为男性假两性畸形, 此时需与其他两性畸形鉴别。

4. 其他畸形: 隐睾、疝, 其他泌尿系统畸形。

**尿道下裂的手术修复** 手术修复尿道下裂有100余年历史, 方法繁多。霍尔顿(1988)报道多达250种以上, 吉尔伯特(Gilbert, 1986)称多达300种。就其方法演变可分为3个阶段:

(1)在60年代以前, 修复下裂尿道为多期手术, 即1期手术矫正阴茎弯曲畸形, 2期手术修复尿道。(2)60年代初起, 应用阴茎任意皮瓣1次手术修复下裂尿道获得成功。(3)80年代初起, 采用带血管蒂的阴茎包皮瓣及阴囊隔皮瓣1次修复下裂尿道, 效果满意。此外, 80年代中期, 吉尔伯特首先应用显微外科技术修复尿道下裂, 效果良好。由于这些新方法和新技术的应用, 显著提高了手术成功率, 大大减少了并发症, 使尿道下裂的治疗水平大为提高, 进入了新阶段。

吉尔伯特(1986)和塞道夫(Sadove, 1988)提出, 修复手术的目的是: (1)彻底松解纤维索, 完全矫正阴茎腹侧弯曲畸形; (2)形成一个尿流畅通的尿道, 开口于阴茎顶端, 能站立排尿; (3)重新整复阴茎皮肤, 形成外观良好的阴茎。塞道夫等认为, 任何修复方法的成功率应在90%以上, 若达不到这个结果, 则应放弃使用。

1. 阴茎腹侧弯曲畸形矫正, 不论是一期修复手术还是二期修复手术, 必须首先矫正阴茎弯曲畸形, 手术要点是彻底切除纤维索, 转移背侧过多的包皮, 修复阴茎腹侧皮肤短缺, 完全伸直阴茎。

2. 尿道下裂修复术: 分期修复手术, 霍尔顿将繁多的分期手术归纳为4类最常用的方法: (1)阴茎腹侧皮管尿道成形术, 即蒂尔希-杜茨法; (2)阴茎腹侧皮条包埋法尿道成形术, 即丹尼斯布朗法; (3)塞西尔-克勒卜法尿道成形术, 成形尿道方法与皮管法相同, 阴茎创面用阴囊切口创面覆盖, 3个月分离阴囊阴囊完成修复手术; (4)游离植皮法成形尿道。上述方法均有共同的问题: 手术次数多, 尿道口达不到阴茎头顶端, 容易发生尿道瘘、尿道及尿道口狭窄。一期修复手术: 塞道夫等(1988)将一期修复手术分为4类: (1)尿道口前移及阴茎头成形法; (2)阴茎翻转皮瓣(Flip-Flap)法; (3)全厚包皮移植尿道成形法; (4)带血管蒂包皮岛状皮瓣法。有代表性的(1)前尿道延伸法及尿道口前移及阴茎头成形法: 张涤生(1983)认为尿道海绵体具有弹性和伸展性, 是前尿道延伸手术的基础, 并应用此法修复尿道下裂, 效果满意, 经临床实践与解剖研究证实, 成人前尿道可延伸5cm, 儿童可延伸2.7~2.8cm。本法适用于冠状沟及阴茎体尿道下裂。塞道夫(1988)应用尿道口前移及阴茎头成形法修复无腹侧弯曲畸形的阴茎头型尿道下裂, 并认为是一种理想方法。(2)任意皮瓣一期尿道修复法: 布罗德班特(Broadbent, 1961)应用阴茎背侧皮管法一期修复阴茎及阴茎阴囊型尿道下裂, 同期手术矫正阴茎弯曲畸形, 成形尿道, 取得成功。(3)轴型血管蒂皮瓣修复下裂尿道: 这是80年代以来尿道下裂修复手术的新进展。由于再造尿道的皮瓣血供充沛, 因此手术成功率高, 并发症明显减少。根据文献报道, 主要方法有两种: ①包皮及阴茎皮肤血管蒂皮瓣尿道成形法: 斯坦道利(1982, 1988)报道此法, 它是以对阴茎皮肤尤其是包皮的血管解剖为基础的。皮瓣的血管神经蒂位于阴茎背筋膜层, 恒定存在, 起源于阴部外上下动脉的分支和阴茎背浅动脉。他设计的手术方法有: a. 整个包皮岛状瓣(包括内、外板)转移, 适用于阴茎腹侧有明显皮肤短缺的病例; b. 包皮条岛状瓣转移, 适用于远段型尿道下裂; c. 阴茎皮肤与包皮岛状瓣转移, 当只用包皮不够再造尿道长度时采用此法, 用于两种情况: 重度阴茎阴囊型尿道下裂; 2期修复尿道下裂, 此时包皮可能不存在或不敷再造尿道用, 可利用阴茎背浅血管为蒂的阴茎无毛皮瓣成形尿道, 供区行游离植皮或阴囊岛状皮瓣修复。斯坦道利报道, 自1975~1988年共治疗5000例尿道下裂者, 应用上述方法修复尿道的2000例, 其中包皮外板法1350例, 全包皮瓣150例, 包皮条岛状瓣500例, 阴茎皮肤及包皮瓣治疗重度阴囊型尿道下裂2期手术者80例, 二期修复尿道下裂120例。他认为对94%~96%的病例可采用此法治疗, 尿道瘘的发生率仅达1%~2%。本法主要问题是新尿道吻合口狭窄, 常为暂时性的, 术后需作3~4次扩张。②阴囊隔血管蒂皮瓣修复尿道下裂: 李式瀛(1984,

1986)应用此法治疗各类尿道下裂 63 例,效果满意,并认为本法可适用于 90% 的病例。皮瓣的解剖学研究证明,阴囊隔前部 1/5 ~ 2/5 为阴部外动脉的阴囊前动脉供应,后 3/5 ~ 4/5 由阴部内动脉的阴囊后动脉供应,阴囊前动脉的行径、分布恒定,阴囊后动脉与前动脉有吻合。在阴囊发育正常时,可采用一侧阴囊上极的阴囊前动脉内侧支岛状皮瓣再造尿道,对阴囊隔区毛多的病例不宜采用此法。显微外科技术在尿道下裂修复手术中的应用,吉尔伯特(1986)应用显微外科技术修复尿道下裂 62 例,术后发生并发症需要再次手术的 4 例,占 6.5%,而对照组非显微外科修复的 50 例,发生术后并发症需要再次手术者为 12 例,占 24%。

**尿道下裂修复手术并发症的防治** 霍尔顿(1988)指出,现代外科修复尿道下裂的手术并发症发生率应在 10% 以下,任何一种方法若达不到这个结果,就应放弃使用。另外,也没有任何一种手术方法能适用于所有的尿道下裂修复。尿道下裂手术后并发症可分为近期并发症及后期并发症两类。根据霍尔顿(1988)、吉尔伯特(1986)报道,最常见的后期并发症有尿道瘘、尿道狭窄、尿道口狭窄、尿道憩室、尿道口后移、尿道内有毛、残留阴茎弯曲畸形、阴茎瘢痕、全尿道裂开等。若同时有 4 项或 4 项以上上述并发症者称“Hypospadias Cripple”。

关于后期并发症的处理:(1)尿道瘘:多发生在尿道口近侧,常合并尿道口狭窄。对单纯尿道瘘小于 2mm 者可切除缝合,而大的瘘的切除缝合可能引起狭窄,应转移皮瓣修复。(2)尿道憩室:常见原因为设计的皮瓣过宽或远端有梗阻,排尿时膨胀。一部分病例与阴毛有关,毛多时须予切除,重做尿道成形手术。(3)尿道狭窄:原因有设计不当,皮瓣或皮片不够宽;血肿;感染;皮瓣坏死;吻合口处理不当等。防治方法是术前准确设计,术中仔细止血防止血肿和感染,吻合口作大的斜切口缝合。已形成狭窄者,可行尿道镜及造影检查,了解狭窄程度。小的狭窄可行扩张治疗,大的狭窄应手术治疗。(4)尿道口狭窄。原因有三:再造尿道口不够大;再造尿道通过的阴茎头隧道不够大;缝合口直线瘢痕挛缩。防治方法:霍尔顿等认为,用阴茎头三角瓣插入法是防止尿道口狭窄的有效方法,同时也可对原已存在的尿道口狭窄予以改形开大,或对已形成狭窄者先行扩张,无效者行手术切开,一般切开腹侧形成阴茎头型尿道下裂。对于“Hypospadias Cripple”则应根据具体情况予以治疗。

#### 参考文献

- 1 Sadove RC, Horton CE, Mc Roberts JW. The new era of hypospadias surgery. Clin Plast Surg, 1988, 15: 341
- 2 Broadbent TR, Woolf RM, Tokwu E. Hypospadias; One - stage repair. Plast Reconstr Surg, 1961, 27: 154
- 3 张涤生. 前尿道延伸术 1 期修复尿道下裂, 中华外科杂志, 1983, 21: 362
- 4 Standoli L. Vascularized urethroplasty flaps, The use of vascularized flaps of preputial and penopreputial skin for urethral reconstruction in hypospadias. Clin Plast Surg, 1988, 15: 355
- 5 Li Shiyang, et al. A new method for repairing hypospadias and a study on regional anatomy Proceedings of the CAMS and PUMC. 1986, 1: 65
- 6 Gilbert DA Devine CJ, Jr, Wislow BH, et al. Microsurgical hypospadias repair. Plast Reconstr Surg, 1986, 77: 460
- 7 Horton CE, Horton EH. Complication of hypospadias Surgery. Clin Plast Surg, 1988, 15: 371

(中国医学科学院整形外科医院博士生导师孙广慈撰)

#### 抗利尿激素不适当分泌综合征 syndrome of

inappropriate secretion of antidiuretic hormone, SIADH 抗利尿激素不适当分泌综合征是多种病理因素引起体内抗利尿激素 (ADH) 不受低渗透压等反馈抑制而持续异常分泌增多, 以致水潴留、血钠及血渗透压降低、尿渗透压增高而出现相应症状的一

种病态。本症患者主要表现为真性低钠血症, 可造成急性脑水肿, 若诊断不及时, 处理不当可危及生命, 故对其发病机理、诊断及治疗的研究有重要的临床意义。

1957 年, Schwartz 首先描述了两例支气管肺癌 ADH 分泌异常所致的临床表现, 并命名为 SIADH, 其后国外陆续有报告, 至 1980 年, Zerbe 将伴有 SIADH 的疾病归纳为 8 类近 50 种, 目前远远超过这个范围, 并在发病机理、诊断手段和治疗上均有进展。中国对 SIADH 实质性的认识逐渐深入, 1975 ~ 1977 年间舒氏共发现 5 例, 1979 年报告资料完整的 2 例; 1981 年张氏报告 2 例, 并提出 8 项诊断指标; 1983 年陶氏结合临床分析了肺心病合并 SIADH 的特点; 1986 年胡氏讨论了肺病合并低钠综合征系缺氧使 ADH 分泌增加引起, 同年蔡氏结合 1 例肺癌合并 SIADH 作了综述。1989 年白求恩医科大学胡氏等系统地报告了 10 例小儿重症肺炎合并 SIADH, 并研究了心钠素在小儿重症肺炎及 SIADH 中的作用机理, 使中国对 SIADH 的认识深入一步。

ADH (在人类为精氨酸加压素, AVP) 系九肽物质, 在生理状态下受下丘脑-神经垂体轴控制, 受血渗透压、容量等调节, 由感受器传递信息, 其中血浆渗透压是最重要的因素。1966 年, Roth 首先制备了抗 AVP 血清; 1970 年, Robertson 建立了 AVP 放射免疫测定法 (RIA); 1976 年, Mendoza 指出血浆 AVP 值符合下列公式:  $AVP (pg/ml) = 0.38 \times (\text{血渗值} - 280)$ ; 1979 年, Fridman 亦证实正常的血浆渗透压轻微变化 1% ~ 2% 即能导致 ADH 增高或降低 1 ~ 2pg/ml。SIADH 不受渗透压的抑制, 其发病机理较为复杂, 国内外对其研究较多, 但尚未完善。除原发性者外, 病因大致归为 5 个方面: (1) 异位分泌: 恶性肿瘤尤为异位激素分泌肿瘤, 早在 1961 年, Lee, 1966 年, Fichman 就先后指出肿瘤细胞可以合成 ADH 或 ADH 样多肽。1978 年 Morton 发现小细胞未分化肺癌 (SCLC) 生长旺盛部位 ADH 含量最高, 细胞培养后可提取 ADH 活性物质, 且可见类垂体后叶神经囊泡结构, 肺癌组织片与苯丙氨酸-<sup>3</sup>H 培育后可合成有放射活性的 AVP, 肿瘤患者血和尿中 ADH 异常增加。1989 年 Tatemo 将鼻腺癌组织培养后证实肿瘤细胞可产生 ADH, 分泌自主性。1989 年, Bouvier 首次发现肺外小细胞癌合并 SIADH, 新的异位激素分泌肿瘤不断被揭示。1976 年, Bartter 等发现肺结核组织中有 ADH 样物质合成; 1977 年, Paxson 等提出感染的肺组织可能产生 ADH; 1980 年, Vorherr 证实这一观点, 测得肺结核组织 ADH 为  $22 \pm 8 \mu U/mg$  组织粉末, 而正常肺组织未测出 ADH。1989 年, Clark 报告了麻疹, Agarwal 报告了 AIDS 急性感染后, 1990 年 Sato 报告了胸壁带状疱疹, 1991 年 Motiwala 报告了结核性睾丸副睾炎均可合并 SIADH, 推测其它组织也可产生 ADH 或 ADH 样多肽, 尚需要进一步证实。(2) 内源性 ADH 分泌亢进: 一些中枢神经系统疾患、创伤、疼痛、情绪、疲劳、高热等可直接刺激神经元分泌 ADH, 某些药物也可刺激中枢而使 ADH 分泌增加; 1979 年, 邱氏提示有些细胞毒类药物还和神经细胞毒性损害有关。(3) 抑制 ADH 分泌途径障碍: 如渗透压感受器损害后, 血渗降低不能反馈到中枢而抑制 ADH 分泌, 其它感受器损害也是如此。1989 年, Magovern 报告 1 例颈动脉内膜切除术产生 SIADH。(4) 肾小管细胞对 ADH 反应增强: 已知有些药物不但刺激中枢促使 ADH 分泌, 而且增强肾小管对 ADH 的敏感性。消炎痛等可增强 cAMP 活力而加强 ADH 的作用。(5) 体液因子: 如儿茶酚胺、多巴胺、前列腺素、肾排钠因子 (第 3 因子)、心尿钠肽 (ANP)、内源性类洋地黄原钠因子 (EDNP) 等均与 ADH 的分泌异常有关。1991 年, Shimizu 首次在 SCLC 中发现并证实异位 ANP 与异位 ADH 高水平同时存在, 并分泌入血导致 SIADH。

另外, 1990 年 Levoir 报告肿瘤切除后采用激光治疗而发生 SIADH, 应引起人们对物理因素和放射治疗的高度警惕。

由于 SIADH 的发病机理渐被阐明, 为临床的诊治提供了依据。SIADH 有特发性的和继发性的、急性的和慢性的之分, 其临床表现主要是由低钠血症所引起的, 严重程度与低血钠、低血渗的水平及发生速度有关。血渗维持在  $240 \text{mmol/kg}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  以上通

常无症状或有亚临床症状,血钠低于 120mmol/L 时呈现临床症状,低于 110mmol/L 或继续下降,如治疗不当,可造成死亡。有些病人血钠大于 120mmol/L 就表现出明显的临床症状,而有些病人血钠低于 105mmol/L,却仅有轻度的嗜睡,这主要取决于低血钠发生的速度。1981 年,Goldgerm 指出血钠于 12h 内急剧下降并低于 128mmol/L 时,则出现急性水中毒,病死率可高达 50%。

1977 年, Coscia 发现 SIADH 者可有多样异位激素分泌,如异位 ACTH- $\beta$ -MSH( $\beta$  黑色素刺激素);1990 年, Bruzese 发现高胰岛素血症所致的低血糖危象;1991 年, Ariylshi 发现甲状旁腺相关肽(PTH rp)所致的高钙血症等,这些临床表现均应引起注意。

诊断标准:1967 年 Bartter 提出 5 项指标,1974 年 Fichman 提出 10 项,1981 年张氏提出 8 项。综上,SIADH 确诊指标有 6 项:(1)低血钠 < 120mmol/L,伴低血渗 < 270mmol/kg, H<sub>2</sub>O;(2)在低血钠情况下肾脏持续排钠,尿钠 > 80mmol/24h;(3)尿渗透压高于血渗透压;(4)血浆 AVP 不被低血渗抑制;(5)心、肝、肾、肾上腺皮质、甲状腺、垂体功能正常,排除稀释性低钠血症和肾上腺皮质、垂体机能减退、啤酒狂症所致的真性低钠血症;(6)严格限制水摄入或输入高渗盐水后症状迅速好转。辅助诊断指标 5 项,如遇不典型病例或条件具备时可作如下检测,以作为参考:(1)临床无血容量耗损情况、无水肿;(2)水负荷试验异常;(3)血 ADH 升高且不被水负荷抑制;(4)后叶激素运载蛋白 hNPI、hNPII 增加(Legros, 1990);(5)醛固酮降低,血尿酸降低,心钠肽增加。

SIADH 的治疗原则为治疗原发病,消除触发因素,限水、补水、补钠,抢救生命。1980 年, Decaux 发现尿素静滴效果良好,并已用于临床。1984 年, Sawyer 研制出一些 VP 类似物,对肾小管上皮细胞 V<sub>2</sub> 型受体具有选择性拮抗作用,如能用于临床最为理想。同时,加强护理不可忽视,只有早期发现,早期诊断方能得到及时治疗。治疗过程中应注意 SIADH 的再度出现,如肿瘤切除后肿瘤复发或转移可再度引起 SIADH;同时对判断肿瘤治疗效果亦有一定的价值。1989 年, Silverman 提出肿瘤早期有效治疗后产生的肿瘤溶解综合征可致高血压、低血钠、低血糖等内稳态改变。

SIADH 是一种认识较晚且病理过程又十分复杂的综合征,还有许多未知领域需要揭示。1986 年赵氏在国内首次建立了高特异性 PAVP 的 RIA,也引起临床医师的重视,为深入研究和全面了解带来了希望,但免疫活性不同或无免疫活性的类 ADH 的测定则需另辟新路;尿 AVP 的测定无创伤、易接受,但中国尚未见有报告。对多样性异位激素分泌与醛固酮系统、前列腺系统、尿钠因子及临床内分泌系统疾病的相互关系尚需深入探讨,对创伤后出现的呼吸窘迫综合征及在对一些急重症中作用还没有涉及,受体研究及拮抗受体药物的研制等颇有医学价值。

1980 年, Zerbe 测定 43 例 SIADH 者的 PAVP,结论有 4 种情况,其中之一是 PAVP 释放无异常,故建议该综合征采用“不适当抗利尿综合征(SIAD)”命名为宜,有待再议。

#### 参考文献

- Schwartz WE, et al. A syndrome of renal sodium loss and hyponatremia probably resulting from inappropriate secretion of antidiuretic hormone. *Am J Med.*, 1957, 23: 529
- Beardwell CG, et al. Radioimmunoassay of plasma vasopressin in physiological and pathological states in man. *J Endocr.* 1975, 67: 189
- Mendoza SA, et al. Syndrome of inappropriate antidiuretic hormone secretion (SIADH). *Pediatr Clin North Amer.*, 1976, 23: 681
- Morton JJ, et al. Antidiuretic hormone in bronchogenic carcinoma. *Clin Endocr.*, 1978, 9: 357
- Zerbe R, et al. Vasopressin function in the syndrome of

- inappropriate antidiuresis. *Ann Rev Med.*, 1980, 31: 315
- Silverman P, et al. Metabolic emergencies in clinical oncology. *Semin-oncol.* 1989, 16(6): 504
- Magovern JA, et al. The syndrome of inappropriate secretion of antidiuretic hormone following carotid endarterectomy. A case report and review of the literature. *J Cardiovasc-Surg-Torino.* 1989, 30(4): 544
- Gross P, et al. Natriuretic factors and lithium clearance in patients with the syndrome of inappropriate antidiuretic hormone. *Eur-J-Clin-Invest.* 1989, 19(1): 11
- Legros JJ, et al. Neurophysins as markers of vasopressin and oxytocin release. A study in carcinoma of the lung. *Horm-Res.* 1990, 34(3-4): 151
- Shimizu K, et al. Ectopic atrial natriuretic peptide production in small cell lung cancer with the syndrome of inappropriate hormone secretion. *Cancer.* 1992, Nov 15; 68(10): 2284

(白求恩医科大学胡克恒教授、王德林副教授撰)

**血尿 hematuria** 正常人尿液在离心尿沉渣中镜检每高倍视野红细胞不超过 2 个,即每日红细胞不超过  $1 \times 10^6$  个。如离心尿沉渣中镜检每高倍视野红细胞超过 2 个,每日红细胞超过  $1 \times 10^6$  个,即为血尿。血尿是一个重要的症状和严重的警报,患者必须立即进行检查才能避免由于延误诊断和治疗而招致不可逆病变。由于引起血尿的病变可能是多发性的,所以检查必须完全彻底,包括整个泌尿道的检查和全身检查。除非血尿原因已清楚地查明,患者必须定期复查,因为血尿可能是一种临床疾患的最早的症状,仅在晚期由于病变进一步恶化才将其本质暴露。一个不明原因的持续性血尿的患者,应怀疑有尿路肿瘤的可能。

绝大多数患者(95%)发生血尿的原因在尿路和男性生殖系统,但首先应考虑两个重要的泌尿系统之外的血尿来源:其一为全身性疾病或内科性疾病诸如血液病和血凝因紊乱疾患,维生素 C 和维生素 K 缺乏症,心脏病继发肾脏的动脉血栓形成和梗死,药物反应,抗凝剂的应用及肾中毒药物的应用如磺胺或庆大霉素等。其二为尿路附近器官的疾患,由于与膀胱或输尿管接近或直接有粘连而发生血尿,如结肠癌,输卵管炎或结肠憩室炎等。

血尿的主要原因有:(1)尿路感染:①非特异性感染。②特异性感染(结核、伤寒、放线菌、钩端螺旋体病)。③病毒性感染。(2)肿瘤:①尿路肿瘤。②白血病。(3)创伤:①直接创伤。②尿路结石。③尿路异物。④阴茎或尿道口表皮剥脱。(4)免疫性损害:①急性肾小球肾炎。②过敏性紫癜。③结缔组织病(播散性红斑狼疮、结节性动脉炎、硬皮病、皮炎)。④肺-肾综合征。⑤鼻咽-肺-肾综合征。⑥细菌性心内膜炎。⑦疟疾性肾炎。(5)遗传性疾病:①多囊肾。②良性家族性血尿。③慢性遗传性肾炎。④慢性肾小管性酸中毒。(6)先天性尿路异常:马蹄肾。(7)过敏反应:肾紫癜和过敏性肾炎。(8)血液疾病:①凝血异常。②溶血性-尿毒症综合征。③镰状红细胞病,镰状细胞性贫血。④血红蛋白病,冷后血红蛋白尿。(9)血管性疾病:①肾静脉血栓。②血管瘤。③肾动静脉瘘。④胡桃壳现象(Nutcracker 现象)。⑤遗传性出血性毛细血管扩张症。⑥肾盂、输尿管、膀胱、尿道静脉曲张。(10)药物或化学物引起的血尿:①美蓝。②水杨酸钠。③酚。④松节油。⑤磺胺。⑥重金属中毒。⑦抗凝血药应用。(11)其他:①运动。②肾下垂。③尿路寄生虫病(丝虫病、滴虫病、包囊虫病及血吸虫病)。④败血症。⑤放射性肾炎、膀胱炎。⑥传染病(猩红热、麻疹、水痘、天花、扁桃腺炎、腮腺炎、流行性出血热)。

上述的血尿原因还未包括所有血尿原因,如何在浩瀚的血尿原因中找到一个患者的血尿原因,必须有一套诊断方法和思路。详细的病史可提供很有用的线索,如患者有肉眼血尿应询问血尿与排尿的关系,初血尿即在排尿开始时尿液带血,以后尿液清晰,出血部位可能来自前尿道(阴茎部或球部),可能的病变是

异物、严重炎症、癌肿、息肉、肉阜、结石、狭窄等。终末血尿是指排尿完全终止后有血液从尿道口滴出,这种出血一般由于膀胱颈和后尿道在排尿完毕后的收缩所致,可源自后尿道急性炎症,具有长蒂膀胱癌突入后尿道,尿道内前列腺肥大、膀胱三角后尿道炎及膀胱颈息肉与肿瘤。全程血尿是在整个排尿过程中尿中有血,出血的部位一般应高于膀胱颈部才能使血液与尿液在排尿前均匀地混合,如膀胱癌肿、输尿管癌肿、肾脏癌肿、肾结石、输尿管结石、膀胱结石及肾结核、肾炎等。在继续询问病史的过程中必须详细了解血尿时有无疼痛以及疼痛的部位、性质等。如有水肿、高血压和红细胞管型时必须先进行内科的一系列检查,不要贸然进行泌尿外科检查如膀胱镜等。

体格检查是诊断血尿原因的一个重要步骤。体检时必须追查下列体征:腰部与盆腔的块质,皮肤有无创伤、紫癜、水肿、血管瘤、毛细血管扩张等,腰部、肋脊角、输尿管行径和耻骨上膀胱区有无疼痛,有无高血压、心律不齐及肾区血管性杂音等体征。

详细的病史与仔细的体检能提供许多有用的诊断线索,但仍有相当比例的患者不能明确血尿的原因,此时应借助于各种辅助检查。对血尿患者首先应进行尿液沉渣分析。检查的尿液必须是新鲜的。血尿的时间愈长,其血色愈浅。出血部位愈高血液与尿液混合愈均匀。酸性血尿呈棕色而碱性血尿是鲜红的,如有脓液合并的血尿呈深棕色或黑色。棕色尿提示血量少,常为从肾脏而来的酸性尿,一般与尿液混合较好。鲜红色尿常有动脉出血的可能,可在尿路任何部位出现。与尿液混合不良的血尿常见于膀胱疾患或前列腺疾患。上尿路出血的特点为暗棕色,虫样血块伴有蛋白尿与大量管型。下尿路出血特点为鲜红色尿伴有不定形的血块。持续性蛋白尿及异常数量的管型提示肾实质疾患。红细胞管型常见于急性肾小球肾炎,白细胞管型常见于急性肾盂肾炎,偶见于急性肾小球肾炎。显著细菌尿(>10/高倍镜视野)为尿路感染的证据。胱氨酸结晶提示胱氨酸结石,其它结晶由于在正常尿内可找到,因此无诊断意义。乳糜试验阳性首先考虑丝虫病。当患者血尿未停止时应先作膀胱镜检查,因为这可能是唯一能找到出血来源的方法,此后的X线检查可能无阳性发现,特别是一个肾内微小的病变,一旦获知血尿来自何处后可作为进一步检查的方向。如血尿已停止,应先行静脉肾盂造影检查。逆行肾盂造影对于肾盂、肾盏的小的肿瘤检查特别有用,应在血尿停止、血块排出后进行。经过上述各项检查后,约有75%病例的诊断已明确,余下25%不明原因的血尿患者可进行下列检查:尿中脱落细胞检查,尿像分析(应用相位差显微镜观察尿沉渣中红细胞形态),血细胞、血小板计数,出凝血时间检查,超声检查,CT检查,肾动脉造影检查,肾图检查,肾脏活检,可曲性内窥镜检查(包括输尿管肾盂镜),核磁共振检查(MRI),数字减影血管造影检查(DSA),流式细胞学检查(FCM)等。虽然血尿不能无原因而出现,可是经过反复检查仍有5%~10%的血尿病例不能确定其诊断,但只有在排除肿瘤后,方可定期随访复查。

对血尿患者应全力以赴地作出诊断,查明出血原因再予以相应治疗,坚决反对盲目止血治疗。

参考文献

- 1 马永江. 血尿, 国外医学泌尿系统分册, 1981, 1(2): 1~6
- 2 Bartlow B, C Microhematuria. Postgraduate Medicine, 1990, 88(4): 51~61
- 3 Finney J, Baum N. Evaluation of hematuria. Postgraduate Medicine, 1989, 85(8): 44~53
- 4 Corwin HL, Silverstein MD. The diagnosis of neoplasia in patients with asymptomatic microscopic hematuria; a decision analysis. J Urol, 1988, 139(5): 1002~1006
- 5 Thompson IM. The evaluation of microscopic hematuria, a population-based study. J Urol, 1987, 138, 5, 1189~1190
- 6 Shichiri M, Hosoda K, Nishio Y, et al. Red cell - volume distribution curves in diagnosis of glomerular and non-glomerular hematuria. Lancet, 1988, 1(8591): 908~911

- 7 吴斌. 对血尿的一些认识, 中华泌尿外科杂志, 1991, 12: 2, 159~160
- 8 钱柯荪. 未明原因血尿的诊断问题, 新医学, 1989, 20: 9, 456~457
- 9 陈冬心. 蔡贤芝. 药源性血尿, 医师进修杂志, 1990, 3: 34~35 (第二军医大学王辉林医师撰; 马永江审)

**性功能障碍** sexual dysfunction 性功能障碍是人类特有的一种机能障碍。发病率尚无精确统计, 有关学者普遍认为很高。因该病比其他疾病更多地涉及到复杂的社会心理问题, 故开展性功能障碍研究对个人与家庭幸福、社会稳定均具有重要意义。

分类研究至今尚不完善。1970年马斯特斯(Masters)和约翰逊(Johnson)指出分类法中应注重障碍发生的时期和产生的环境两个因素。1977年, 卡普兰(Kaplan)提出按性要求、性冲动和性高潮3阶段模型分类。吴阶平提出将男性性功能障碍分为功能性的和器质性的两大类, 此种分类法临床较实用。按病因学分类是比较合理的疾病分类方法。目前, 性功能障碍的分类尚不能达到这种要求。

性功能障碍的病因大致分为3类, 即生物因素、精神因素和文化因素。一般认为, 大多数病例为精神源性。但有相当数量的病例可能会存在发病的生理学基础。性功能障碍可由急性的或慢性的、全身的或局部的疾病引起。如消耗性疾病、退行性疾病、重症感染及机体各脏器功能紊乱等。性功能极易遭受循环系统、神经系统和内分泌系统功能的影响, 尤以影响男性勃起功能最多。1983年, Jacobs报道106例阳痿者中血管性占21%。1987年Wespes报道50例阳痿者中血管性占46%。1989年卫焘等统计, 国人阳痿患者中静脉漏性者约占22.43%, 动脉供血不足者约占6.6%。神经系统功能紊乱如大脑额叶和颞叶疾病, 脊髓病, 内分泌紊乱性疾病包括甲状腺机能减退、垂体机能下降、性腺发育不良、糖尿病, 及某些肝脏疾病如肝炎、肝硬化等都可影响性功能。高催乳素血症引起男性性功能障碍为近年所重视。

药物和酒精也是导致性功能障碍的重要因素。一些抗胆碱脂剂、抗高血压剂、利尿剂、激素、安眠药和强镇静剂治疗用药可引起性功能障碍, 但目前对这些药物的性功能副作用机制了解很少, 尚需进一步探讨。一些非治疗用药如大麻、海洛因等对性功能的影响更为严重。男性由于服用鸦片而产生的性要求低下、射精阻滞和勃起障碍以及女性的性要求低下均已报道。酒精对性唤起和性能力存在生理性衰减作用。詹森(Jensen)发现有性功能障碍的人在年轻的男性酗酒者中所占的比例为63%, 其中最普遍的是性要求低下(36%), 还有勃起障碍(28%)、射精阻滞(16%)和早泄(8%)等。目前还不清楚吸烟是否也对性功能有影响, 但吸烟和动脉硬化以及已知的动脉硬化对勃起障碍的影响之间的联系表明, 性功能障碍与长期大量吸烟有关。这个问题值得进一步研究。

影响性功能的精神因素很多, 并较难识别与分类。恐惧性生活失败的性忧虑可能为最常见的原因。其他如不适当的性信息、性经历的创伤、人际关系不协调、配偶间缺乏交流、不实际的期望对器官因素的反应、配偶的性障碍、生育、年龄变化等也是重要的精神因素。霍顿(Hawton)将这些因素分为潜在因素、突然因素和持续因素3类。马斯特斯和约翰逊的研究资料表明, 95%或95%以上的妇女性高潮障碍属于精神源性。另外, 宗教意识及性价值观等文化因素对性功能也有一定的影响。

性功能障碍的诊断与鉴别诊断过去多以病史、查体和实验室检查为依据。近年来因一些相关学科尖端技术的运用而有了很大发展。可分为无创性检查和创伤性检查两大类。无创性检查如夜间阴茎勃起试验(NPT)被认为是诊断阳痿最有前途的技术之一。目前, NPT已从早先的阴茎根部周径观察发展为根部及冠状沟同步周径测量, 并开始和微机等技术联合运用。如近年设计的带个人微机处理的Rigi Scan装置, 可以同步测定夜间阴

茎的膨胀和硬度。NPT 因较复杂且设备昂贵,在我国尚未普遍采用。一些无创性血管检查尚有一定不足,如阴茎血压仅能测其总值和近端部份;阴茎脉搏强度和血流的检测中则发现阴茎表浅血管因传感器按压挤压而影响结果;有作者采用尿道探头与阴茎外多普勒探头作对照,发现二者所指的血管有差异。故以上检查仅能反映阴茎内动脉静止状态。Porst 采用罂粟碱诱发勃起和多普勒超声血流测定技术与阴茎血管造影对照,二者符合率阴茎背动脉为 96.1%,深动脉为 92.3%,认为本法可免除创伤性检查。神经测试技术近年来主要应用的有神经反射延长反应或神经诱发电位测试。上海静安区中心医院采用国产 JD-3 型肌电图仪测得正常人阴茎背神经传导速度(m/s)为  $20.05 \pm 1.99$ ,与 Gersfenberg 报道的 23.8 基本相仿。

创伤性检查如阴茎海绵体造影,目前已由简单的海绵体造影经动力性海绵体造影而发展到药物动力性海绵体造影,即联合进行药物海绵体测压(PCM)和药物海绵体造影(PCG)。罂粟碱试验临床运用较多,但因方法不同,结果亦有差异,有待统一。

治疗性功能障碍主要有精神疗法、药物疗法及手术疗法。在国外,现代治疗方法的重点已从心理分析或身体治疗的极端转向更简单、更直接的治疗。1958年,沃尔普(Wolpe)提出行为治疗的方法。1956年,西曼斯(Semans)最早提出主要用于治疗早泄的“停顿技巧”。60年代初期,英国米歇尔,巴林特(Michael Balint)提出一种心理疗法与早期行为疗法相结合的方法,并取得一定的进展。1970年,马斯特和约翰逊出版《人类性障碍》一书。这部书标志着早期疗法与当今疗法的分界。该书史无前例地把行为治疗、心理治疗和教育因素结合起来,提出较系统的“性治疗”方案,他们公布用该法对 500 多对患者的治疗结果,总失败率为 18.9%,并指出对原发性性功能障碍的疗效不如继发性者高。继他们之后,许多人投入到“性治疗”探索之中,并修改补充了原始治疗程序,疗效一般都较好。但也有报道远期疗效很不稳定者。

治疗性功能障碍尚没有满意的药物。作为催欲剂,育享宾近 1 个世纪来受到青睐,但最近才有较深入的研究。育享宾为  $\alpha$ -肾上腺素受体阻滞剂,已证明它对改善性功能有客观效果。1982年 Margolis 等报道,用育享宾治疗器质性阳痿总有效率达 43%。1987年 Reid 等用它治疗心理性阳痿,有效率达 62%。这些结果显示,寻找新的  $\alpha$ -肾上腺素能阻滞剂有一定前景。

平滑肌松弛剂硝酸甘油在实验室条件下证明能使海绵体动脉扩张,并使血流量增加,预料对血管性阳痿有效,临床研究也发现多巴胺受体激动剂阿朴吗啡有治疗勃起障碍的作用。激素类药物 HCG 或睾酮对内分泌因素引起的性功能障碍有一定疗效,但长期使用副作用尚无法克服。对高催乳素血症,溴隐停仍为首选药物。从 1982 年以来,相继有许多应用罂粟碱及罂粟碱加酚妥拉明作阴茎海绵体局部注射治疗的报道。1987年 Sidi 报道治疗神经性阳痿有效率达 100%,治血管性阳痿有效率达 60%~70%,但存在阴茎异常勃起、海绵体纤维化等并发症。1990年,Steckl 等报道用前列腺素  $E_1$ (PGE<sub>1</sub>)作替代药物可避免上述并发症。认为 PGE<sub>1</sub> 应成为治疗阳痿的首选药物。

手术疗法主要用于器质性病变,近几年国内外报道较多。Lewis 认为背深静脉切除术,尤其适用于丧失勃起功能的静脉性阳痿者,有效率约 70%。1990年董伯良等报道,手术治疗静脉漏性阳痿 32 例,治愈率达 87.5%。1991年 Muller S C 采用经皮阴茎穿刺及逆行静脉栓塞治疗静脉漏性阳痿 17 例,总成功率为 65%,认为本法可在部分或短期成功的病例重复进行,但尚不能断定此法是否优于手术结扎。阴茎假体治疗方法十余年来进展较大,疗效已达 95%。假体的设计和制作仍在不断完善和更新。1984年起中国上海开始研制硅银假体,1986年始用于临床,1990年报道治疗 50 例,总有效率达 95.94%。

中医药对治疗性功能障碍有丰富的经验,运用许多中药或方剂收到满意效果,针灸疗法更具独特性,尤其对治疗阳痿、不射精等已取得可喜的成果。有关报道很多,有的并作了分组与对照

研究,如尹兴中将阳痿分型论治,辨证取穴,针刺治疗 120 例,治愈 110 例,总有效率达 97.5%;水厚地按解痉法理论指导,采用针灸点穴,中药解痉及逆反心理疏导等治疗 324 例阳痿,总有效率 95.49%,独具特色;他采用针灸等综合治疗不射精 60 例,治愈率达 91.6%,显著优于西医对照组。临床研究表明,心理与药物等综合治疗一般优于单一性治疗。

对性功能障碍的研究,实验室研究属薄弱环节,故其仍具广阔前景。流行病学调查是研究性功能障碍的重要手段,此项工作在中国开展较晚,有待进一步深入。对女性性功能障碍的研究将会成为 20 世纪内的活跃领域。因有效西药较少,中药与针灸显示出一定的优越性,但其作用机理尚待进一步研究。寻找新的诊疗药物和诊疗手段,尤其是探索现代相关学科技术在诊疗中的应用,也仍将具有重要意义。

#### 参考文献

- 1 吴阶平,等.性医学,1982,334~364
- 2 Keith Hawton,章锦南,等.性治疗指南,1990,5~224
- 3 刘金刚.性医学与性传播疾病研究进展,1990,59~111
- 4 水厚地.中国针灸,1990,4:17~18
- 5 徐家泉.国外医学,1991,11(1):24~26
- 6 Muller S C.杨为民,国外医学,1991,11(5):192
- 7 Weiske W H.李金华,国外医学,1991,11(6):224~226

(安徽省计划生育研究所水厚地副主任医师、杨绪斌医师撰)

#### 男子性功能障碍 male sexual dysfunction

男子性功能障碍是指性生活各有关环节的功能发生改变,从而影响正常性生活的总称。它实际上是属于一种临床症候群,包括性欲改变、阳痿、遗精、射精障碍等几个方面,其中阳痿和射精障碍尤为多见。

阳痿是勃起障碍的同义词,通常是指阴茎不能勃起或虽然能勃起但勃起不坚以致不能插入阴道进行性交。

阴茎血管内的特殊结构:阴茎海绵体内的动脉及静脉之间,广泛存在一种动静脉交通支,为适应勃起,其内膜有特殊形态结构,即交通支内膜有占位不规则的凸出垫,这个结构是 Ebner 在 1900 年发现的,故称 Ebner 氏垫。当阴茎呈松弛状态时, Ebner 氏垫的纵纤维呈平坦状态,血能顺利经过交通支进入静脉流去;勃起时,该垫的纵纤维紧张而突出,关闭了交通支,使动脉血不能回流至静脉血管腔容量递增,使供应海绵体的血流量增加。中老年后动脉内膜与 Ebner 氏垫会起纤维化变化,或有钙化和血栓形成,从而造成管壁失去弹性,因此勃起缺乏扩张和伸长的能力,影响在勃起时对海绵体的血供,这是中老年后勃起能力逐渐变弱的一个血管性因素。在勃起时,海绵体内的血液循环在某种程度上几乎与体循环是隔绝的,前者暂呈封闭状态,用特殊设计的器械测定海绵体的内压,发现它为体循环收缩压的 10 倍,为这一观点提供了依据。

总之,人体在性兴奋的刺激下,经过一系列神经生理反射,使阴茎海绵体内入窦动静脉交通支 Ebner 氏垫紧张突起,动静脉分流阻塞,静脉窦开放,致使入窦血量增加、出窦血量减少,海绵体膨大加上海绵体外包有坚强的筋膜,使阴茎粗硬而勃起。当性兴奋消退后,反射性地入窦动静脉交通支 Ebner 氏垫松弛,动静脉分流完全开放,静脉窦关闭,入窦血量减少,因而阴茎逐渐松弛复原。

阳痿的病因:现已证明阳痿与以下几方面有关其一是非器质性病变,即大脑皮层对性兴奋的抑制作用加强和脊髓勃起中枢兴奋性减退,也就是所谓功能性原因。其二是器质性原因:因年老、各器官系统病变、药物影响、手术等所致的阳痿。这类病人表现为在强力地性刺激下阴茎都不能勃起,约占 60%。归纳起来器质性阳痿的原因有:(1)神经障碍;(2)血运不足;(3)内分泌障碍;(4)其它器质性疾病,包括药物影响,例如氟乙啶、利血平、甲基多巴、安宫黄体酮、抗胆碱能药物、雌激素等。

阳痿的治疗:一是精神及心理治疗;二是内分泌治疗;(1)性

激素及促性腺激素；(2)肾上腺皮质激素及甲状腺素；(3)多巴胺增效剂或拟多巴胺类；(4)纠正代谢紊乱；(5)内分泌腺手术。三是药物治疗：常用植物碱育亨宾，由非洲树皮中提出，其效果并不肯定。最近经神经生理研究，它是属肾上腺 $\alpha$ 受体的抑制剂，与雄激素、番木鳖制成合剂后治疗其症，据报导有一定效果。Margolis曾将番木鳖碱、甲基睾丸酮、盐酸育亨宾各5mg制成合剂，让6134例阳痿患者试验服用，3周后有效率达83.9%。四是外科治疗：(1)血管再通手术，针对因内阴动脉狭窄引起的阳痿；(2)阴茎假体支撑疗法，对血管源性阳痿、神经性阳痿，甚至功能性阳痿都可以作支撑疗法。

射精障碍不仅会影响整个男子性活动的完成，而且会造成男子不育。其有关的解剖与生理：正常的射精活动包括3个生理过程：泄精，即将前列腺液、精液和精子排入后尿道；射精，后尿道的精液达一定量后，经尿道口射出体外；尿道内口闭合，射精的同时膀胱内括约肌关闭，尿道外括约肌放松，以防精液逆流至膀胱。射精生理是一个十分复杂的反射活动，由中枢神经、外周神经、交感神经和副交感神经、性腺内分泌、内外生殖器、膀胱颈和盆底肌肉等各系统协调行动。循环于血液中的性腺内分泌激素（雄激素），是引起性兴奋的动力，在此基础上，通过外界各种刺激诱发兴奋，表现为阴茎勃起和性行为要求，如果此时有性交行为，阴茎和阴道壁的摩擦润滑使阴茎头上的神经感受器兴奋，不断把这种冲动经阴部神经传入中枢，引起大脑前视丘区域、下丘脑前部特别是内侧视前区等高级射精中枢兴奋，待兴奋积累加强到一定程度时，冲动回传至脊髓射精中枢（确切路线和具体部位还不十分明了）。

射精障碍分为早泄、逆行射精和不射精3类。早泄是最常见的射精障碍之一，指性交时过早发生射精的情况，目前临床上还没有满意的确切定义，典型的和严重的表现为阴茎插入阴道之前就射精。逆行射精是指患者能正常勃起，性交时有情欲高潮和射精动作出现，但无精液，或只有极少精液从尿道口射出。射精后尿液检查可见大量精子和果糖。不能射精包括不泄精和射精衰竭，不泄精指阴茎能勃起，能维持一定时间，有情欲高潮和射精动作出现，但无精液射出，尿检查无精子和果糖可见。射精衰竭指阴茎能勃起且能维持一定时间，但无情欲高潮和射精动作。

射精障碍的病因十分复杂，大致可以分为精神原性、器质性、药物性和先天性4大类。

射精障碍的诊断和治疗：(1)早泄。早泄是在阴茎插入阴道前或后，立即或在30~60s内达到性高潮、有射精的现象。但这一定义并不能概括一切，因为从没有性交过的青年人在最初几次的性交中往往呈早泄状态。Masters和Johnson的观点认为：性交时男方不能在控制足够长的时间以后射精，致使性功能正常的女性至少在50%的正常性交中得不到满足即为早泄。Kaplan认为应以能否满意控制射精为标准。Lopiccolo认为有能力在插入后维持5min以上，或夫妇双方都同意他们的性交快感不因延缓射精的努力而有所影响，就属正常。但有人报告说75%的男子，在插入2min之内就会发生射精或更短时间内射精仍属正常，阴茎勃起未进入阴道即发生排精应为早泄。早泄的发生与精神因素密切相关。如性交时焦虑、恐惧和紧张等可以说是发生早泄的主要原因，至于尿道炎和前列腺炎可引起早泄的说法，早已被否定。多年来，早泄一直被认为是无法医治的。70年代起人们开始使用精神分析法、性感集中疗法、阴茎挤压法、药物和其它方法综合治疗。(2)逆行射精。这种射精障碍是性交时能出现性欲高潮，有正常的泄精过程，但因膀胱内括约肌关闭不全，精液被逆行射入膀胱。确实依据是，射精后的尿液中含有大量精子和果糖。对病史中有性欲高潮而无射精或仅有少量精液排出者，要怀疑逆行性射精。治疗逆行性射精的方法很多，如麻黄素对腹膜后淋巴结切除和交感神经切断手术引起的逆行射精者，具有良好的疗效。顺丁烯二酸溴苯吡胺具有抗组织胺和抗胆碱能特性，可治疗糖尿病神经病变引起的逆行射精，溴苯吡胺也可用于治疗糖尿病引起的逆行射精。(3)不能射精。性交时没有精液自尿道外口射出，性交

后的尿液检查也没有精子和果糖。采用心理分析和性感集中的综合治疗，重点解决夫妇关系的问题，往往可以收到较好的效果。个别系因过度紧张引起的不能射精症，可通过使用电震器帮助患者射精，辅以放松训练，也可迅速恢复正常射精功能。

#### 参考文献

- 1 Masters W H, Johnson V E. Human Sexual Inadquacy Boston: Little, Brown and company, 1979
- 2 Montague D K. UCNA, 1981, 8: 103
- 3 Newman H F et al. An overview urology, 1981, 17: 399  
(上海第二医科大学附属仁济医院泌尿外科江鱼教授撰)

### 男性不育症流行病学研究

男性不育症的临床治疗工作已经有了长足的发展，但对其流行病学的工作做得甚少，国内更缺乏这方面的完整资料，无疑制约着对男性不育的进一步研究，所以进行具有中国人口素质特点和自然环境的抽样调查是十分重要的。

不育症的发生率约为10%~15%，在不育夫妇中因女方原因引起的约占2/3，由男方原因引起的约占1/3。欧美国家的统计，不育夫妇占已婚育龄夫妇的15%，其中男性不育至少占50%。对男性不育流行病学调查都局限于单一的环境或条件下，如某一城市或某一个或几个工厂，对调查的结果也集中在患者本身病因的分析。如Dubin和Amelar对1294例男子不育的病因分析，其中精索静脉曲张占39%，精量问题占11.30%，睾丸衰竭占14%，其他占35.3%。上海第二医科大学仁济医院男子计划生育研究室在1979~1985年期间统计的2087例男性不育的病因，其中少精、无精、精子活动率低占34.87%，不射精症占32.39%，精索静脉曲张仅占6%，性功能问题占5.31%，其他占21.25%。文献资料的巨大差异要求进行一次较大规模的、科学的抽样调查。

从1985年5月~1990年7月，由河北省中医药研究所林宏益、曲锡萍主持研究的“河北省男性不育抽样调查”，在河北省十个地区的29个市、县的23个工厂、两个矿区、25个镇、118个乡的196个自然村进行调查，其人口复查达97万，涉及到河北省的沿海、平原、高原、湖淀、山区、丘陵等不同的自然地理环境和气候条件及人们不同的生活习惯。调查以城市、郊区、农村的自然分布为调查单元，对39476对汉族育龄夫妇(20~40岁)进行抽样调查，城镇13100对、郊区13076对、农村13306对，发现不育夫妇1530对，患病率为11.47%，其中男性不育患者为1502例，占不育夫妇的33.15%。调查采用分区、不等比例、分阶段、随机抽样的原则进行。调查时间集中在每年5、6、9、10四个月。男性不育诊断标准以国内外公认的男性不育分类诊断标准为依据。

调查结果中的几个关系及病因分析 (1)城乡关系。男性不育占不育夫妇的比例是城区为27.22%，郊区为32.78%，农村为37.75%。(2)年龄关系。男性不育高发年龄是26~30岁，患病率为13.75%，依次为20~25岁(10.80%)、36~40岁(9.06%)、31~35岁(8.78%)。(3)文化素质及职业与男性不育关系。文化素质与男性不育关系不大( $P < 0.05$ )。按职业分农民患病率为14.56%，工人为10.25%，干部为8.5%，显示职业与男性不育患病率有极明显差异( $X^2 = 109.42, P < 0.01$ )。(4)结婚年限关系。婚后2~5年不育者1147例(41.11%)，6~10年不育者230例(24.73%)，11~15年不育者111例(21.64%)，16~20年不育者14例(4.71%)，显示出男性不育患者患病年限有极明显差异( $X^2 = 248.56, P < 0.01$ )。(5)环境关系。在已调查的29个县市中，不育症比例最高的4个县(市)依次是元氏县(39.13%)、辛集市(38.10%)、藁城县(38.03%)、无极县(37.14%)，均属石家庄产棉区，该区棉花种植面积占全省1/4，居民普遍食用棉花籽油，有不少地方至今对棉籽油的加工提炼较为粗糙。据3个自然村的统计，每人食油量1年不少于3kg，油内棉酚含量0.38%~1.82%，服用的棉酚量是临床抗生育剂量的



两倍。不育症比例仅次于石家庄产棉区的是地处白洋淀区域的安新县和任丘市,分别是37.02%和37.71%。根据《白洋淀水源保护研究图集》有关资料,白洋淀全流域有大小企业近1000个,排放污水的企业达500余个,日排百吨污水以上的主要企业109个,在这些企业对白洋淀水体污染影响最大的主要是造纸、纺织、食品等轻工业和化纤、胶片、石油化工等化学工业,日排废水量36.56万t,年排放量10963万t。有关部门根据污染源特点和当时的具体条件测定了酚、氨、砷、六价铬、铅、硫化物及石油7种有毒物质,日排放量为0.4t,年排放量120t,这些有毒物质对白洋淀地区人体健康危害极大,其中砷、铅、酚是造成男性不育的有害物质。不育症比例居第3位的是张家口地区的张北县(36.02%),地处内蒙古高原,俗称“坝上”,冬季漫长寒冷,极端最低气温可达-34℃,饮酒驱寒习以为常,在58例患者中均有饮酒嗜好,酒精可经多种途径对生殖腺的功能造成损害,长期大量饮酒可使肝脏5- $\alpha$ -睾酮还原酶活性增强,使大量睾酮降解,导致血中睾酮水平降低,而造成不育。患病率最低的是昌黎县和秦皇岛市,分别为20.40%和22.50%。这两个县市气候湿润温和,位于海滨,又盛产鱼虾水果,饮食营养丰富、结构合理,人们处于良好的生态环境中,因而男性不育患病率在29个县市中最低,显示男性不育患者受环境影响有显著性差异( $X^2=10.89, P<0.05$ )。(6)病因分析。1502例男性不育者中生殖器官异常因素556例,其中隐睾57例,睾丸大小异常28例,输精管道缺如、阻塞26例,精索静脉曲张368例,阴茎弯曲、短小、硬结26例,包皮嵌顿17例。性功能障碍因素207例,其中不射精102例,逆行射精7例,阳痿98例。生殖器官炎症166例,其中睾丸炎62例,精囊炎23例,前列腺炎81例。精液因素的实际受检者1311例,精液异常者为1301例,其中死精症91例,无精症102例,高精子密度43例,血精症37例,精液不液化或凝集者398例,精液其他不正常者(精量过多或过少、计数低、畸形、活动力低下、H<sup>+</sup>浓度过高或过低,存活率低)822例,不明原因10例(精液质量正常)。

调查结果的讨论(1)患病率33.15%低于国内外统计水平。(2)工业化污染成为男性不育新的重要致病因素(如地处白洋淀中心区域的安新县患病率高达37.02%,而地理自然条件、饮食结构较好的海滨昌黎县患病率仅20.40%)。(3)在病因中位居第一的是精索静脉曲张,占24.50%,说明对精索静脉曲张的治疗是男性不育防治工作的重要方面。(4)生殖器官炎症(睾丸炎、精囊炎、前列腺炎)占男性不育的11.05%,是引起男性继发不育的重要原因。(5)不射精占男性不育的6.80%,是男性性功能障碍所导致不育的主要原因。(6)隐睾、阴茎短小、小睾丸、包皮嵌顿120例,占男性不育的8%,多数在儿童时期已经发生或潜在构成疾病,如不早期治疗,成年之后将难以康复。

《河北省男性不育抽样调查》论文参加了1991年6月在荷兰阿姆斯特丹举行的第10届世界性学大会学术交流,受到广泛重视,说明男性不育研究工作在向深层次推进时,必须建立在更广泛、更深入、更科学的调查基础上,这样的抽样调查从范围上不仅是一个省,可以几个省(如华北地区、华东地区、西南地区等),调查中的检测手段可以运用最新科技成果(如液晶式彩色多普勒),不仅指标量化,而且误差甚微,对调查结果用电脑进行系统化、标准化的科学处理,进行更大范围的抽样调查无疑为男性不育和男性学的深入研究开辟了道路。

(河北省中医研究所林宏益、曲锡萍撰)

**泌尿外科学的进展** the progress of urology 1876年, Max Nitze 将铂丝小电灯泡装在膀胱镜前端,成功地解决了腔内照明问题。以后几经改进终于制造出沿用多年的内光源膀胱尿道镜,为泌尿外科学提供了一种准确诊断的手段,因此导致泌尿外科学较早地形成独具特色的专业外科学分支。

泌尿外科学诊治的范围主要是泌尿系统疾病患者和男生殖系统疾病患者。其后,为了诊治上的需要又有相应地扩大。其传统的诊断方法除了病史、症状、体征、化验等一般临床医疗常规检

查外,必要时需作膀胱尿道镜检查,直接观察腔内病变并可借助各种附件,进行切取活组织、去除异物、电凝、电切、碎石等手术,并可作输尿管插管术分别收集左右肾盂尿液作必要的检验,作插尿管尿路平片及逆行尿路造影等放射线检查,临床上已沿用多年,目前仍是基本诊治手段。

20世纪50年代以来,科技突飞猛进,基础理论研究不断获得新的突破,高精尖的诊治仪器和方法大量推向临床医学。诊治手段不断创新,从而提高了临床各专业的诊治水平,致令泌尿外科学存在较长时间的术前确诊率较高的优势已不再专美于前。当然,泌尿外科学的基础理论和诊治方法也同样取得更重大的进展。

纤维导光技术应用于内窥镜照明,将光源从腔内移于体外,取代了沿用多年的腔内电灯泡光源,不但可避免灯泡发热的影响,也可避免因灯泡损坏而不得不取出镜鞘更换灯泡的麻烦。纤维导像技术使研制各种可弯性内窥镜成为现实,使创伤更轻微、操作更方便,大大减少受检者的不适。1983年,更研制出先进的电子内窥镜,取消了光纤导像代之以光敏集成电路摄像系统CCD,从而改变了内窥镜的本质,置入腔内的图像传感器将图像信号传至体外的图像处理器,图像即清晰显现在监视屏上,图像放大,画面清晰,分辨率高,可同时多人观察会诊讨论,检查者也免除了从窥镜中直接观察的劳累。

随着内窥镜制造技术的不断进步,各种不同类型多功能内窥镜不断出现,由诊断为主发展成兼有多种手术治疗功能,促成腔道泌尿外科的迅速发展。50年代初期已有膀胱尿道电切镜问世,其后国际上不断有经尿道前列腺切除术的报道,其后电切镜又应用于切除膀胱肿瘤,切开或切除尿道内疤痕以治疗尿道狭窄或尿道闭锁。1955年,Goodwin 提出经皮穿刺肾造口方法进一步推进经皮肾镜 Percutaneous Nephroscopy 的技术。1976年, Fernstrom 应用经皮肾镜取石获得成功,从而开辟了肾结石治疗的新途径。1978年 Lyon、1980年 Perezcastro 均曾报道应用硬式输尿管肾盂镜诊治输尿管及肾盂内疾病的经验。北京医大泌尿外科研究所,1984年开始应用此种硬式镜于腔内手术。其后又研制出纤维可弯性胆管肾镜及输尿管肾镜,较硬式镜又进一步,中国于1982年已有应用经验报道。经皮血管腔内诊治技术,是从 Seldinger 血管穿刺插管技术发展而来,从造影诊断发展成治疗手段。1970年,Wholey 等成功地应用肾动脉栓塞术控制了肾大出血;其后又应用于手术前患侧肾动脉栓塞术,令患肾缺血萎缩肿瘤缩小,使手术切除较易成功,又可用于抗癌药物局部灌注治疗。1974年,Gruntzig 成功地应用气囊导管作血管狭窄扩张术获得良好效果,目前是肾动脉狭窄性高血压患者的首选治疗手段,近期疗效达80%。

各种影像诊断技术的确诊率很高,又无创伤,是诊断技术划时代的进步。70年代中期,B型超声扫描仪(Doppler)开始应用于临床,具有造价低、体积小、运输安装方便、操作容易等优点,因而迅速获得临床上广泛应用,甚至作为体检的手段。过去临床上无法获得早期诊断的较小肾囊肿、肾囊肿、肾上腺肿瘤等,往往可为B超探查所发现,虽然直径小于1.5cm的肿瘤仍不易发现,目前临床上多作为首选的检查方法。CT(Computed Tomography)由于英国的 AtleisoMortey 医院于1972年首先应用于临床;1972年美国 Mayo Clinic 应用于腹部,可提供病变部位及邻近器官较完整的立体形态概念,一般扫描间距为1cm,必要时可调整到3~5mm间距快速扫描,可发现直径5mm左右的新生物,图像清晰,分辨率高,如欲显示尿路图像则需加强(注射静脉尿路造影剂)。1973年 Qantebur 首先报道发自磁共振的空间信号可以成像,随着成像技术的不断完善,80年代末期磁共振成像(MRI)技术开始应用于临床,分辨率很高,组织对比性强,如作肾脏扫描,可明显区分肾皮质与髓质,肾内细微结构清晰可辨,可观察血管血运,尿路内尿流情况而不需造影剂,病人不需接触放射线,由于各种影像诊断技术的进展,过去临床上常用的创伤性的和有一定危险性的检查手段如后腹膜充气造影、血管穿刺

插管造影等等,目前已弃置不用或较少应用。

体外振波碎石术:于1980年5月首先由德国慕尼黑 Choussy 等人用于临床。1983年 Dornier 公司相继制造多种类型的碎石机推向世界各国,使用效果满意。1985年以后,很多国家争相研制出更多类型的体外碎石机,广泛用于治疗上尿路结石症,被誉为“尿石症治疗上的革命”。中国国产碎石机亦有多种问世,目前已普及至中等城市。振波对肾组织损伤情况、碎石术后引起肾性高血压情况均需继续作长期随访和分析研究。碎石后引起的输尿管结石梗阻,应即时处理。学者们一致认为体外振波碎石术应与腔道泌尿外科手术相互配合,提高尿路结石患者非开放手术的治愈率,特别是针对有复杂情况的结石症患者尤为必要,如能相互配合恰当,一般认为90%以上的尿路结石患者可免于开放手术。

1949年, Kolff 等首次应用转鼓式人工肾治疗急性肾衰。1960年, Quintan 和 Scribner 成功地应用动静脉外瘘作血流通道使慢性肾衰长期维持性透析成为现实。1964年, Stewart 制成空心纤维透析器,效率高,使用方便,是目前使用最广泛的透析器。80年代以来,先后开展了序贯透析、血液滤过、血流灌注、血浆置换等血液净化技术,抢救了不少危重而过去认为无能为力抢救的病例,并为同种异体肾移植患者提供必需的术前术后治疗,从而提高了肾移植成功率。

1956年第1例同卵孪生之间的肾移植成功后,同种异体肾移植成为挽救晚期肾衰患者的最有效的手段,近来国际资料报道的肾移植已超过15万例次,并以每年1~2万例次的速度进展。1978年临床上开始应用环孢素A(CS-A)作为主要免疫抑制剂后,使术后肾存活率分别提高20%~30%,目前文献报道1年肾存活率已达90%以上。免疫抑制剂不断创新,如抗淋巴细胞球蛋白(AIG)、抗人肠腺球蛋白(AHIG)、FK500等,毒性均小于CS-A,抗人淋巴细胞单克隆抗体急性排斥逆转率达90%以上。中国近10年来已报道的同种异体肾移植约2000多例次,人肾1年存活率有报道达93.7%者。

随着有关基础学科的飞速发展,国际上从70年代开始男科学的研究,并有很大进展,揭示了人类男性生殖系统的生理机制。男性生殖过程是在中枢神经系统、下丘脑-垂体-睾丸轴的协同调控下,通过精子的发生、成熟、运输和获能等一系列生理活动所完成,其中各个环节的生物化学机理,各种因素的作用和调节,运用现代分子生物学的观点来探讨,已逐渐有了较为深入的了解,对男性不育症、性功能障碍在病因分类、诊断方法、治疗手段等等有了更充实的内容,男性生育、调节方面也有了突破性发展,但男科学涉及许多新兴的和边缘的学科领域,需要多学科的合作努力。

#### 参考文献

- 1 Partoin C L, et al. Radiology, 1980, 136: 767
- 2 周永昌, 等. 中华泌尿外科杂志, 1982, 3(1): 57
- 3 Choussy G, et al. J. Urology, 1982, 127: 417
- 4 Gonzalez R, et al. J. Urol., 1983, 130: 785
- 5 黄克权, 等. 中华泌尿外科杂志, 1983, 4(1): 38
- 6 Segura J W, et al. J. Urol., 1985, 134: 1077
- 7 黄德乔, 等. 中华泌尿外科杂志, 1988, 9(6): 324
- 8 张树云, 等. 中华泌尿外科杂志, 1990, 11(5): 301
- 9 吴阶平, 马永江, 等. 实用泌尿外科学. 北京: 人民军医出版社, 1991, 11: 414~440, 215~226
- 10 王益鑫. 男性学杂志, 1992, 6(1): 60

(安徽医科大学第一附属医院田有年教授撰)

### 肾移植后免疫抑制药物的应用 use the drugs of

immunosuppression after renal transplantation 同种肾移植术后如未使用免疫抑制药物,来自异体的供肾一般于术后10余天发生排斥反应而丧失功能。20世纪初期因对移植免疫学缺乏认识,对肾移植虽有不少尝试,但均遭失败。1951~1953年赫曼

(D. M. Hume)、梅里尔(J. Merrill)等报告9例肾移植后使用可的松,有4例移植肾的功能保持长达数月。1960年卡伦(R. Y. Calne)在发现6-巯基嘌呤(6-MP)可使实验动物移植的皮肤延迟发生排斥反应的基础上,将与6-MP有类似作用的硫唑嘌呤用于狗的肾移植实验,证明可延长移植肾的存活,且药物毒性较小。1966年斯塔茨(T. E. Starzl)首先将抗淋巴细胞球蛋白与强的松、硫唑嘌呤联合应用,表明可显著延长移植肾的存活期。在此后的10余年内,皮质类固醇和硫唑嘌呤被临床广泛采用,作为肾移植术后的常规免疫抑制药物,由于并发症很多,尸体移植肾的1年存活率仅50%。1978年卡伦报告7例尸体肾移植单独应用环孢素预防排斥反应,随后环孢素在临床推广,由于使用环孢素时皮质类固醇和硫唑嘌呤的剂量减少,术后并发症亦随之降低,尸体移植肾的1年存活率提高至80%~90%。近几年随着杂交瘤技术的建立,单克隆抗体被应用于器官移植领域。

皮质类固醇,均含有环戊烷多氢菲母核,其结构特征为含有不饱和的A环,C<sub>3</sub>位有酮基,C<sub>11</sub>有酮或羟基,C<sub>20</sub>和C<sub>21</sub>分别有一个具有酮基和羟基的功能基团。皮质类固醇能抑制激活巨噬细胞,减少T细胞刺激因子的相互作用,稳定靶细胞表面膜及阻止免疫趋化等。一般术中用甲基强的松龙250~500mg静脉滴注,随后口服强的松(Pred)自100mg/d起,逐日减量,至术后7d30~50mg/d,3~6月逐渐减至维持量7.5~15mg/d。急性排斥反应时用甲基强的松龙500~1000mg静滴冲击治疗,排斥反应严重者需酌情连续用药数天。皮质类固醇可使感染的发生率增高,大剂量用药病人可出现柯兴氏综合征、高血压、类固醇性糖尿病、胃肠道出血和穿孔、白内障、股骨头无菌性坏死等。

硫唑嘌呤(Aza),是甲硝咪唑取代6-巯基嘌呤的氢而形成的巯基嘌呤衍生物,其作用机制是竞争性反馈抑制嘌呤合成酶,尤其是阻止次黄嘌呤核苷酸转变为AMP和GMP。Aza的口服剂量1~2mg/kg。其毒性作用主要是骨髓抑制引起白细胞和血小板减少;肝功能损害。

抗淋巴细胞球蛋白(ALG),是将人的淋巴细胞注射给动物,再收集和分离提取免疫球蛋白部分成为生物制品。应用ALG后由于其原浆细胞毒作用,可使淋巴细胞溶解而减少;此外封闭抗原识别部位和抗原竞争也可能是免疫作用的机理。1986年,中国报告应用抗人胸腺淋巴细胞球蛋白(AHTG)25例尸体肾移植病人有功能肾存活1a以上者14例,占56.0%,而对照组(未用AHTG者)为46.4%。AHTG的用量为20mg/kg,加氯化可的松琥珀酸钠50mg或地塞米松7.5mg/kg稀释于250~500ml生理盐水中静脉滴注,总量在1~2h内输完,两次用药间隔2~3d。常见的副作用为发热、畏寒、过敏反应。

环孢素A(CsA),是目前用于尸体肾移植中最强有力的免疫抑制剂,它是带有一个乙炔链的11肽。CsA在实验研究中显示有选择性抑制增殖早期的T细胞,可促T细胞池中特异性清除对移植抗原起反应的淋巴细胞株,目前认为主要通过抑制TH细胞、增强TS细胞而起作用。CsA用量为8~12mg/kg口服或3~4mg/kg静脉滴注(尽可能不用静脉制剂),以后减至2~6mg/kg口服。治疗过程应监测CsA的血药浓度,常用测定方法有放射免疫分析法(RIA)和高压液相色谱法(HPLC),根据血药浓度适当调整用药剂量。CsA对肾脏有毒性作用,使肾小球滤过率减低,药物结合于肾小管刷状缘膜,抑制线粒体代谢造成肾小管损害,可引起尿尿或少尿,停药或减量后尿量增加。对肝功能损害也较常见,表现为血胆红素升高,碱性磷酸酶和转氨酶升高。

单克隆抗体(OKT<sub>3</sub>),通过用人T细胞免疫的鼠脾细胞与不产生抗体的鼠浆细胞瘤融合获得杂交瘤,在鼠腹腔克隆后,自腹水中提取和纯化制成单克隆抗体。其免疫抑制作用有:(1)覆盖或封闭OKT<sub>3</sub>受体,防止淋巴细胞接受或传递抗原刺激;(2)在血循环中结合非特异性活性T细胞。目前OKT<sub>3</sub>被用于肾移植术后有早期的或严重的急性排斥反应时,以及应用甲基强的松龙冲击治疗无效时,静脉滴注OKT<sub>3</sub>使部分病人的排斥反应逆转。在使用OKT<sub>3</sub>时应监测外周血T细胞亚群,观察OKT<sub>3</sub>、OKT<sub>4</sub>

及  $OKT_8$  数值的动态变化, 用药期间血中  $OKT_3$  和  $OKT_4$  值明显下降,  $OKT_4/OKT_8$  比值亦降低。其毒副作用有发冷、高热和肌痛, 有水分潴留的病例易发生肺水肿。

近年来对免疫抑制药物的联合应用日益受到重视, 过去的二联用药 (Pred + Aza) 已改为三联用药 (Pred + Aza + CsA), 也有将 AHTG 或  $OKT_3$  与上述药物先后或同时使用的四联用药方案。几种药物同时应用可使各种药物的剂量降低, 减低药物的毒副作用。肾移植术后早期将 AHTG 或  $OKT_3$  代替 CsA, 可避免肾缺血引起的肾小管坏死与 CsA 的肾毒性不易鉴别的困难。

新免疫抑制药物的不断出现, 给继续提高肾移植的疗效、减少术后并发症开拓了广阔前景。目前已开展基础研究或临床试用的新免疫抑制剂有: (1) FK506, 是从土壤中分离出的筑波链霉菌的发酵产物, 化合物属大环内酯结构。FK506 可阻止抗原性的或有丝分裂性的刺激应答中 T 细胞的活化。1990 年凯依 (J. E. Kay) 指出, FK506 对 T 细胞增殖的抑制作用较 CsA 强 100 倍。日本 14 个大学附属医院或研究所组成 FK506 临床研究协作组, 于 1990 年 7~10 月对 37 例肾移植后应用 FK506 的病人进行临床观察, 开始用量为 0.1mg/kg·d 静脉滴注, 第 4 天起改为 0.15mg/kg, 每天口服 2 次, FK506 与小剂量皮质类固醇合用, 急性排斥反应时加大剂量。FK506 的副反应包括肾脏损害、心脏症状、高钾和高血糖。用药期间进行血液浓度监测, 血药浓度在 15~20ng/ml 间一般不会发生副反应和急性排斥反应。1990~1991 年斯塔茨和夏匹罗 (R. Shapiro) 也分别报告了美国匹茨堡将 FK506 使用于各种器官移植的情况, 包括肝移植 140 例, 肾移植 36 例及心移植、肺移植 14 例。(2) 雷泊霉素 (RPM), 亦属于大环内酯药物, 由海格鲁考比库斯 (hygroscopicus) 链霉菌产生。实验资料表明, RPM 有广泛抑制 T 细胞和 B 细胞的活化通路作用, 且能抑制淋巴因子合成和白细胞介素-2 的产生。RPM 与 CsA 有协同作用, 如两者合用可大大减少 CsA 的用药量, 降低 CsA 的肾中毒发生率。RPM 的免疫抑制作用与 FK506 相当, RPM 与 FK506 低剂量联合应用可产生各自免疫作用, 对小鼠移植心脏有协同免疫作用。RPM 现尚未进入临床应用阶段, 其毒副作用和安全剂量尚待研究。(3) RS-61443, 含有霉酚酸, 是嘌呤再合成的特异性抑制剂。抗原激活 B 细胞和 T 细胞依靠嘌呤的合成, 因而 RS-61443 对控制细胞的和抗体介导的排斥反应均有效。动物实验证明可明显延长移植存活期, 主要副作用是胃肠道反应, 当剂量减至 20mg/kg 时症状明显减轻。1991 年 5 月全美移植学会报道, RS-61443 试用于肾移植病人 48 例, 移植肾丧失功能仅 1 例, 其余的除有轻度碱性磷酸酶升高外, 无任何肝、肾毒副作用。

#### 参考文献

- 1 章咏裳. 中华器官移植杂志, 1982, 3(2): 57~59
- 2 章咏裳. 中华器官移植杂志, 1987, 8(3): 112~113
- 3 谢桐. 肾脏移植, 1991, 155~188
- 4 章咏裳. 中华器官移植杂志, 1992, 13(2): 93~94

(同济医科大学附属同济医院章咏裳教授撰)

**阴茎再造** reconstruction of the penis 是应用自体组织移植为主的外科手术方法, 重建一个大小、外形类似于正常的阴茎体, 其内包含一个新尿道及有足够硬度的支撑物, 以能使患者达到站立排尿、具有性交功能为目标的治疗过程。阴茎再造手术的对象包括: (1) 因创伤、烧伤、阴茎癌根治切除手术等原因所致的阴茎缺损者; (2) 先天性无阴茎及小阴茎畸形者; (3) 两性畸形及女变男的易性手术者。

阴茎再造手术的历史回顾 阴茎再造手术有半个多世纪的历史, 方法颇多。根据其方法的演变, 可分为 3 个阶段。

1. 传统皮管转移法, 多期手术完成阴茎再造。1936 年, 鲍格拉斯 (Borgoras) 首先创用腹部皮管转移再造阴茎取得成功。随后, 弗伦金 (Frumkin, 1944)、马尔兹 (Maltz, 1946)、吉列斯 (Gillies, 1948)、麦金朵 (Mcindoe, 1948) 相继应用腹部皮管再造

阴茎。其中, 吉列斯为再造阴茎和尿道所设计的“管内有管”的原则, 一直被广泛接受和采用。戈德温 (Goodwin, 1952)、斯科特 (Scott, 1952)、塔古奇 (Taguchi, 1960) 报道了阴囊皮瓣法再造阴茎, 但因组织量不足, 再造阴茎形态不佳, 现已很少采用。宋儒耀 (1956)、莫拉莱斯 (Morales, 1956)、卡普兰 (Kaplan, 1971) 应用大腿皮管再造阴茎, 被认为同样是一个比较好的方法。奥蒂柯奇亚 (Orticochea, 1972) 报道了股薄肌皮瓣转移再造阴茎。珀切特 (Puchett, 1978)、珀肖夫 (Persoff, 1981) 应用腹股沟皮瓣法再造阴茎。此期内再造手术的特点是手术次数多 (4~5 次), 治疗时间长 (半年至 1 年), 尿道瘘及尿道狭窄并发症较多。

2. 轴型血管蒂皮瓣、肌皮瓣转移法, 1 次手术完成阴茎再造。自 70 年代末起, 一些整形外科学者先后报道了多种一期手术完成阴茎再造方法。其中有霍尔顿 (Horton, 1977)、赫斯特 (Hester, 1978) 报道的股薄肌皮瓣法, 宋儒耀 (1979) 报道的下腹正中皮瓣法, 孙广慈 (1984) 报道的髂嵴腹股沟外侧复合皮瓣法, 何清廉 (1986) 报道的腹壁双血管筋膜皮瓣法, 吉尔伯特 (Gilbert, 1987) 报道的腹直肌皮瓣法, 林子豪 (1989) 报道的脐旁轴型皮瓣法。此期内再造手术特点是直接转移轴型皮瓣或肌皮瓣再造阴茎, 形态功能好, 但感觉还不够理想。

3. 应用显微外科技术行感觉皮瓣移植法, 1 次手术完成阴茎再造。张涤生 (1984)、高学书 (1984) 分别报道了前臂桡动脉皮瓣移植再造阴茎的方法, 效果良好。张涤生报道的 7 个病例中有 2 例作了前臂内侧皮神经与受区感觉神经吻合重建感觉功能。他们的开创性工作为一期手术再造具有良好感觉的阴茎开拓了一个新途径。此后, 梅耶 (Mayer, 1986)、吉尔伯特 (1987, 1988)、贝默 (Biemer, 1988)、马提 (Matti, 1988)、原科 (Harashina, 1990)、桑珀尔 (Sample, 1991) 等先后引用前臂桡动脉皮瓣 (又称中国皮瓣) 再造阴茎, 并认为是最好的方法。此外, 已经应用的其他感觉皮瓣有足背皮瓣、上臂皮瓣、三角肌皮瓣、髂部皮瓣、前臂尺动脉皮瓣等。此期内再造手术特点是应用感觉皮瓣移植, 再造阴茎具有感觉好和形态、功能佳的优点。

阴茎再造手术的要求与发展趋势 随着显微外科技术和阴茎再造手术的进步, 吉尔伯特 (1987) 提出, 一个理想的阴茎再造手术应具备以下要求: (1) 能应用显微外科技术 1 次完成再造手术; (2) 再造一个新尿道, 能站立排尿; (3) 再造阴茎有感觉功能, 包括触觉和性欲感觉; (4) 再造阴茎大小合适, 其内可植入有足够硬度的支撑物, 有性交功能; (5) 再造阴茎外形好, 能为病人接受。其他学者提出, 还应考虑供区无功能损害, 瘢痕最小。

阴茎再造手术包括重建阴茎体、成形新尿道、植入支撑物、塑形阴茎头、再造阴囊等内容, 应根据具体情况全面考虑。

1. 阴茎体再造与皮瓣选择, 吉尔伯特 (1987) 提出, 再造阴茎的皮瓣应具备以下条件: 皮瓣薄、无毛、质地好, 面积大小合适; 有恒定可靠的血管供应和神经支配, 能形成感觉皮瓣; 蒂长, 便于显微外科手术。迄今为止, 应用最多的是前臂桡动脉皮瓣。对于没有适当感觉皮瓣供区或不宜做显微外科手术的病例, 下腹部、腹股沟外侧区、大腿区的轴型皮瓣、肌皮瓣仍是阴茎再造的良好供区和材料, 可以选用。

皮瓣设计的原则与方法: 选用的皮瓣必须足够大, 厚薄适当, 既能包含新尿道和支撑物, 又能形成大小适宜的阴茎。目前应用皮瓣的方式有两种: (1) 用同一皮瓣形成“管内有管”的“双”皮管再造阴茎和尿道。此时, 皮瓣长 10~14cm, 宽 12~15cm (一侧宽 3~4cm 作尿道, 另一侧宽 9~11cm 作阴茎体, 中间区 1cm 宽去表皮以便缝成“双”皮管)。(2) 皮瓣只用来做茎体, 此时皮瓣长 10~12cm, 宽 10cm 即可。组织移植方法, 可以应用显微外科技术游离移植, 此时需要注意供区、受区吻合血管、神经的搭配。也可应用轴型皮瓣或肌皮瓣转移, 此时须注意勿损伤轴型血管, 避免蒂部受压。

2. 尿道再造: 对新尿道的要求是无毛, 不收缩狭窄, 能站立畅通排尿。由于皮瓣成形尿道无明显收缩狭窄, 故为目前最常采用的方法。其中有 (1) “管内有管”的尿道再造法。高学书 (1984)

指出,为预防再造尿道收缩狭窄,皮瓣宽度不可小于4cm。(2)轴型皮瓣及肌皮瓣法,如阴囊隔皮瓣、腹部或腹股沟皮瓣、腹直肌皮瓣、股薄肌皮瓣等。(3)游离皮片移植法。(4)全层膀胱壁组织瓣及腹壁皮瓣法。吉尔顿(Egerton,1984)二期手术完成阴茎再造,排尿畅通。因为游离皮片及膀胱粘膜移植后尿道瘘及狭窄发生率较高,故采用者为少数。在女变男的易性手术中,汤普森(Thompson,1971)应用阴道壁组织瓣成形后部尿道。

3. 支撑物的应用:由于阴茎勃起组织结构独特,目前还没有满意的代替物。一般主张植入有足够硬度的支撑物,以起到部分代替勃起的作用。多数学者认为自体肋软骨移植有效可靠,用者最多。张深生(1984)提出为了防止软骨变形弯曲,可在软骨内插入克氏针。部分学者采用骨移植作支撑物,如孙广慈(1984)应用髂嵴腹股沟外侧复合皮瓣,贝默(1988)应用桡骨条前臂复合皮瓣移植再造阴茎,除个别病例有部分骨吸收外,效果良好。有些学者设计应用人工假体植入物,但植入后可因排斥穿破而失败。还有一部分学者认为,阴茎再造手术后的纤维化足以形成一定的硬度,因此不作任何支撑物植入(麦金朵,1948;霍尔顿,1977;马提,1988)。

4. 阴茎头塑型:再造阴茎外形优劣对病人会产生重要的心理影响,故阴茎头塑型也被看作是再造手术的一部分。吉尔伯特(1988)应用冠状沟区全厚植皮的方法,柏奇特(1978)在冠状沟部位作多个梭形皮肤切除缝合方法塑形再造的阴茎头,效果良好。

5. 关于阴囊再造:在阴茎缺损伴有阴囊睾丸缺损的男性及女变男的易性手术中,阴茎再造后还需要考虑阴囊再造,方法有:(1)大腿或腹部、腹股沟区皮瓣或肌皮瓣转移;(2)阴唇瓣加睾丸假体植入,米拉德(Millard,1966)在易性手术中应用此法;(3)皮肤软组织扩张法加睾丸假体植入,里德(Reid,1985)、贝克(Berker,1989)分别用于男性病人及女变男易性手术;(4)局部推进皮瓣加硅胶假体植入,(5)雷诺(Rheiner,1983)报道应用游离足背皮瓣移加假体植入。

阴茎再造手术的发展趋势:(1)为了提高再造阴茎的感觉功能,应用显微外科技术行感觉皮瓣移植可被列为首选方法,并需要合理搭配供区、受区吻接的血管和神经。(2)轴型皮瓣、肌皮瓣操作简单,供区隐蔽,可直接转移一次完成再造手术,也属优先选用之列,在改善感觉方面有待研究改进。(3)尿道成形是阴茎再造手术中既重要又困难的问题,从效果考虑,轴型皮瓣再造尿道应是首选方法。在两性畸形及女变男易性手术,成形尿道比较复杂,问题较多,应予以重视。(4)阴茎勃起功能重建仍是一个难题,有待研究改进。目前,自体肋软骨移植可作首选方法,含骨的复合皮瓣移植也可选用。人工假体代用品有待深入研究。

#### 参考文献

- Gillies HD, Harrison RJ. Congenital absence of the penis, Br J Plast Surg., 1948, 1: 8
- Boxer J, Reconstruction of the male external genitalia, Surg Gynecol Obstet, 1975, 141: 939
- Hester TR, Hill HL, Jurkiewicz MJ. One-stage phalloplasty Br J Plast Surg, 1978, 31: 270
- Sun GC, Huang JJ. One-stage reconstruction of the penis with composite iliac crest and lateral groin skin flap, Ann Plast Surg, 1985, 15: 519
- Chang TS, Hwang WY. Forearm flap in One-stage reconstruction of the penis, Plast Reconstr Surg, 1984, 74: 251
- 高学书, 高建华, 刘琪, 等. 应用前臂游离皮瓣一次完成阴茎再造(附5例报告). 中华医学杂志, 1984, 64: 470
- Gilbert DA, Horton CE, Rerzis JK, et al. New concepts in phellic reconstrucion, Ann Plast Surg., 1987, 18: 128

(中国医学科学院整形外科医院博士生导师孙广慈教授撰)

## 妇产科学与儿科学

**妇产科学** 临床学科中的一门专科,专门研究妇女特有的解剖、生理和病理。一般可分2个学科,即妇科学与产科学。

产科学研究妇女在妊娠、分娩及产褥期机体内所发生的一切变化,以及预防病理状况的发生与合理治疗它们的方法,并研究新生儿的特点。产科学是广义的妇科学的一部分。

GYNECology(妇科学)是从希腊学演变来的,意思是一门妇女的科学,内容是研究女性机体不同于男性机体的一切特点。

在13世纪初叶,才有妇产科方面的记载,其内容是建立在偏见与迷信之上的,如接生由教堂修女担任,接生婆把产妇放在浴室进行接生,并进行蒸浴,分娩迟缓时,就应用悬挂身体、揉搓腹部及一系列的不科学的方法,遇到难产时就束手无策,只能求助于神,当时产妇与婴儿死亡率很高,以产后发热为例,常视为不治之症,症状严重一些,即要送入死亡室等死。到18世纪中叶才有产科医生这一名称,并有助产术书籍问世,改变了不学无术的接生婆的工作方法,逐步走向科学,第1次应用产钳术也就在这个时期。西方妇产科书籍与技术进入中国只有近百年的历史。

中国传统医学在妇产科学的成就是很早的,早在春秋战国时代,如“山海经”内载有治不孕症的方剂,当时扁鹊就是专门的妇产科医生。汉代张仲景的“金匮要略”中即有很多妇产科疾病方面的记载,如妊娠呕吐、带下、闭经等。隋代巢元方所著“诸病源候论”中有妇人杂病、难产、产后病等内容,记载较为丰富。唐代孙思邈著有“千金要方”,将妇人胎产列于卷首。元代杨子建著有“十产论”,对各种异常胎位作了叙述。到明、清2代更有更多的妇产科方面书籍问世。如明代李梴(1)对怀孕的日期作出了决定,据记载,他以三九二十七作为1个月计算,十月怀胎应是270d,胎儿发育成熟,即将临产,这个论点比现在从末次月经计算为280d,更为精确,符合真正受孕到分娩的实际时期。在中国传统医学中最有价值的2000多年前“黄帝内经素问”提到的“(2)女子七岁肾气盛,齿更发长。二七天癸至,任脉通,太冲脉盛,月事以时下,故有子。三七肾气平均,故真牙生而长极。四七筋骨坚,发长极,身体盛壮。五七阳明脉衰,面始焦,发始白。六七三阳脉衰于上,面皆焦,始发白。七七任脉虚,太冲脉衰少,天癸竭,地道不通,故形坏而无子也。”从这段话可以看出,在纪元以前中国祖先对女子的生理月经、生育各方面的认识都非常科学,符合实际情况。根据以上一些简单史料,即可看出中国传统医学在妇产科方面知识是很丰富、宝贵的。从当今现实情况来看,西医方面对很多疑难疾病,感到束手无策时,往往求助于我国医学,通过中西医结合后,而解决问题。

1949年建国前,由于受封建制度约束和政府不关心人民的健康,妇产科领域内问题很严重,如绝大部分接生工作在农村与部分城市都由民间妇女来担任,因而每年孕产妇死亡率高达13%,婴儿死亡率竟达200%左右。产妇死亡原因是产后出血与产褥感染,婴儿则常死于破伤风。

建国后由于党和政府的关怀,妇女保健事业有了飞速的发展,全国各地众多保健院建立,从1957年起开始建立农村产院,并大力培养妇产科专业人员(妇产科医生、助产士、助产员),因为有了这些条件,保证了新法接生的普遍推广,产妇与新生儿死亡率逐步降低。以1958年北京市调查统计,孕产妇死亡率0.1%,婴儿死亡率为37.9%。

近20年来妇产科范畴内发展起一门新兴专门学科,即围产医学,它对降低母儿的死亡率和障碍儿的发生率,保证母婴健康,具有非常重要的意义。围产医学的特点是:(1)孕产妇和胎婴儿是一整体,他们通过胎盘绒毛和血液循环互相影响。它改变了以往在妊娠和分娩过程中以产妇为中心和重点的观念,成为母子为一个主体的围产医疗体系。(2)妊娠过程是一个综合性的生理变化过程,它既包括基础医学理论,又有临床实践,强调了基础医学

对围产保健工作的重要性,特别是胚胎学、生理学、免疫学、遗传学、药理学、超声波学等学科,只有掌握与熟悉有关基础学科的理论知识,方能提高围产医学的质量。(3)孕妇和胎孕的医疗保健工作,不仅包括整个妊娠和分娩期,还应提早到包括怀孕以前的时期,因为在未孕时期的健康状态对孕产妇与胎孕儿的健康有很大关系。如肾脏病尚未治愈而受孕,其胎孕儿常会发育迟缓、畸形或死亡。

围产医学中强调了保健制度,要求地区性建立3级保健医疗机构,每级都有各自的工作范围和职责分工,并有密切的上下级联系和转诊制度。对高危妊娠的识别也是围产保健工作的重点内容;它指妊娠期和分娩期,母儿已有明显的不良因素存在,或预测到有潜在的危及母儿健康的因素将要发生,这类孕妇为高危妊娠,必须及早进行诊断和治疗。

在妇科领域中,近年来也有较大的进展:(1)宫颈癌是妇科恶性肿瘤中最常见的1种,历来威胁着妇女健康,由于普查普治工作的普遍开展,如细胞学的检查,癌前期病变各种有效的治疗,使宫颈癌的发生率显著下降,由原来是妇科恶性肿瘤死亡的第1位,下降到第3位。(2)绒癌是一种高度恶性肿瘤,在60年代以前死亡率在90%以上,近20余年来中国在化学治疗方面作了新的尝试,如药物的剂量、选择、配伍以及给药途径、速度等方面,绒癌死亡率下降到20%以下,使绒癌的预后有明显的改观。(3)内窥镜:近20年来妇科中广泛应用内窥镜检查技术,如腹腔镜、宫腔镜等,对盆腔内、宫腔内病灶可直视下进行诊断,故使诊断正确率显著提高,由于代替了一部分妇科病以前必需作的剖腹探查,因此大大减轻了妇科痛苦。

妇产科工作是整个医药卫生工作中的一个重要组成部分,它关联到广大妇女和下一代的健康和安全,因此应不断吸取世界先进知识与优秀成就,结合中国实际情况,提高业务水平,更好地为广大妇女与下一代健康服务。

(安徽医科大学第一附属医院妇产科张缔华教授撰)

**闭经** 妇科常见症状之一,在过去系指曾有月经复又停止 $\geq 3$ 月者。而国外一向以停经超过6个月者谓之。故目前中国一些教科书亦采用国际标准。但临床上对月经停止3月以上者应予以重视和处理。

闭经的诊断容易,但要寻找闭经的病因和部位则非易事,其病因涉及内分泌、肿瘤、炎症、先天性畸形和遗传性疾病等,随着医学科学技术的不断完善,目前已可作出部位性诊断,而且在治疗上已取得突破性进展,从而提高了闭经病人的生活质量和增加生育机会。

分类:目的是有利于病情判断和指导治疗。分类有:

1. 生理性和病理性闭经:生理性闭经系指青春前期、妊娠期、哺乳期和绝经期的闭经。而病理性闭经是由某些疾病导致闭经。

2. 原发和继发闭经:前者系指年满18岁或第2性征发育2年以上仍无月经来潮者,继发闭经定义如上述。

3. I度或II度闭经:I度闭经系指用孕激素试验后产生撤药性子宫出血者,而后者是指用孕激素试验并不产生子宫出血,只有用雌激素试验后引起子宫出血者。

4. 真性或假性闭经:假性闭经指由于下生殖道缺陷——无孔处女膜、阴道或宫颈缺失,使子宫形成的经血不能外流,故亦称隐经。而前者指其它原因所致闭经。

5. 有或无卵泡性闭经:依据卵巢中有无卵泡的分类,有助于生育能力的判断,无卵泡性闭经者常缺失生育能力。

6. 按病变部位而分成I~IV区,在揭示病因,便于诊断的指导下治疗上较为有用。

(1)第1区(生殖道)闭经:①子宫阴道发育不全,常表现为先天性无阴道无子宫(Rokitansky综合症)。②子宫性闭经:可因子宫内粘连破坏、子宫腔粘连(Asherman综合症)或放射治疗后。③睾丸女性化(Testicular feminization)或称雄激素不敏

感综合症(Androgen Insensitivity Syndrome)。④子宫切除术后。

(2)第2区(卵巢性)闭经:①性腺发育不全(Turner综合症)伴矮小身材、染色体核形为45XO或嵌合型45XO/46XX。②单纯性性腺发育不全不伴矮身材。a. XY单纯性性腺发育不全,如swyer综合症。胚胎期基因突变,睾丸未发育,女性生殖道。b. XX单纯性性腺发育不全。发育和染色体正常,女性生殖道。c. 先天性肾上腺皮质增生(CAH)亦称肾上腺性腺综合症。d. 卵巢早衰(POF):指40岁前女性的卵巢功能衰退和闭经。e. 多囊性卵巢(PCO):肥胖、多毛、闭经和不孕。f. 卵巢男性化肿瘤。

(3)第3区(脑垂体)闭经:①脑垂体促性腺激素低卵巢功能不良性闭经(Hypogonadotropic Hypogonadism Amenorrhea),FSH LH值低下( $< 5^{mIU/ml}$ )可见于sheehan综合症,脑垂体肿瘤放射治疗后,或原因不明。②高催乳素血症(Hyperprolactinemia)可见于功能性高催乳素血症,脑垂体催乳素肿瘤或空蝶鞍综合症。亦见于某些药物,如冬眠灵,泰尔登西米替丁等。

(4)第4区(下丘脑)闭经:由于精神因素环境改变,精神性厌食营养不良和其它内分泌功能异常等。

详细了解病史,注意生长发育、营养、身高、体重,第二性征(Tanner)分类,有无生殖道畸形,治疗史等,可初步判知病变部位。但为确诊,可作诊断性治疗试验,如孕激素试验(黄体酮10mg,1日1次肌注,连用5d),如无撤药性子宫出血,则示雌激素水平低下、子宫内膜破坏或妊娠。除外妊娠后可进一步作雌激素试验。如有撤药物子宫出血,称I度闭经。雌激素试验(乙炔雌二醇0.05mg 1日1次,连服20d),如停药1周内未产生撤药性子宫出血,示子宫性闭经。如有子宫出血,示雌激素水平低下,此可为II~IV性闭经,宜测定血清PSH、LH、PRL和E<sub>2</sub>。如PRL值正常,则可依促性腺激素值分成高、中和低3类。表1对判断病因和指导治疗十分有用。

低促性腺激素性闭经可源于脑垂体或下丘,可作促黄体素释放激素试验(LRH test),以资鉴别。可见目前条件可作出部位性诊断。

针对不同的病因作相应治疗,概可分手术和药物2类:

1. 手术治疗:①先天性无阴道无子宫者,可在婚前半年作人工阴道。②多囊性卵巢:经药物治疗无效者,可作卵巢楔形切除术。③脑垂体肿瘤,尤其巨腺瘤可行经蝶窦显微手术。切除肿瘤。④鉴于染色体核型XY者的性腺易发生恶性肿瘤,宜作性腺切除术。

表1 按Gn值的闭经分类

| Gn值和临床表现                     | FSH (LH)          | LH (IU <sub>L</sub> ) |
|------------------------------|-------------------|-----------------------|
| ①低Gn值<br>发育前,丘脑下部或垂体功能低下     | 5                 | 5                     |
| ②正常Gn值                       | 5~30<br>(排卵时升高1倍) | 5~20<br>(排卵时升高2倍)     |
| ③高Gn值<br>绝经后,卵巢早衰,卵巢对Gn惰性综合症 | 40                | 30                    |

2. 药物治疗:对闭经病人的药物治疗的目的主要有二:一是改善生活质量,二是争取妊娠机会。前者是选用合适的周期疗法,后者应用诱发排卵剂。

(1)性激素周期疗法:常用方法有:雌一孕激素周期疗法:其目的是:①增强第2性征。②改善性功能,改善性交痛。③诱发人工月经,心理上得到安慰。④发育子宫,增加受孕能力。亦为将来借卵子或借胚胎妊娠作准备。故适用于希望月经来潮的闭经患者。过去常用雌激素为乙炔雌0.5mg或乙炔雌二醇0.05mg 1日1次,连用20d,于服用上药第16天起用黄体酮1.0mg 1日1次

肌注,连用5d,或用甲地孕酮(妇宁片)5mg/d,连服5d。现在我们改用尼尔雌醇(Nylestrol)2~4mg,14d后重复1次,于第1次服药后第21天起用妇宁片5mg/d,连用5d。此种新型的周期疗法具有服药次数少,胃肠反应小和不产生致癌性等优点,值得荐用。对于多囊性卵巢者,由于体内有一定量雌激素,故可于后期加用孕激素即可诱发月经来潮。

(2)诱发排卵:人类的诱发排卵一直是医学生殖内分泌学科中最显要的课题。近20年来,在这方面取得颇大进展。人群中不孕者占10%。其中排卵障碍者占3.1%,医学上重视诱发排卵治疗的理由不仅解决生育,亦可减少长期无排卵,意味着单一雌激素作用导致靶器官——子宫内层和乳房的恶性肿瘤。因而诱发排卵已成为医学史辉煌的一页。诱发排卵的药物很多,近年来常用的药物有:克罗米酚,溴隐亭,促性腺激素——人绝经尿促性腺激素,人绒毛膜促性腺激素,促进腺激素释放激素,现分述如下。①克罗米酚,亦称氯米酚胺(Clomiphene Citrate 简称C.C,商品名Clomid)。一般认为其作用机制主要在下丘脑和脑垂体。它和张力中心雌激素受体相结合,使雌激素低水平,反应性地导致GURH(或LHRH)释放和PSH、LH分泌,引起卵巢中卵泡发育成熟和排卵。同时克罗米酚尚有增强卵巢对促性腺激素的敏感作用,沿用至今已有1000余篇文献,普遍认为此药对多囊性卵巢、闭经和黄体不健等疗效良好。用法:于月经周期第5天每天口服50mg,连用5d,若无效可将剂量增加到100mg。Merrel报道342例,其排卵率为79%,妊娠率29%。其中75%在第1疗程中获得妊娠。②溴隐亭(Bromocriptine,商品名Parlodel 简称CB154)。译名“排卵得”,它是治疗高催乳素血症引起排卵障碍的唯一有效药物,由瑞士Sanduz等厂生产,亦可用于治疗脑垂体肿瘤。用法:1.25mg每日2次,口服,共7d,若无不良反应,可增加至2.5mg,每日2次,连续使用,直至月经恢复、排卵和妊娠。一般用药2~4d周后泌乳停止,4~6周后月经恢复。1989年3月在广州举行第1届全国溴隐亭研讨会。总结了国内近50个单位2205例女性催乳素血症,分析表明,PRL<100ng/ml的育龄妇女并不闭经,但出现无排卵月经,月经稀多,常伴溢乳,多无脑垂体瘤证据,但若PRL>100μg/ml,常表现为闭经—溢乳综合征,常伴脑垂体瘤。用药后月经恢复率为95%(72%~100%),恢复排卵率为73%(60%~100%),妊娠率平均为70%(32%~100%),并不增加流产率,畸胎率。③绒毛膜促性腺激素(hCG):作用和LH相似,主要用于某些卵泡发育良好而无自发排卵能力者,即起扳机作用(trigger action)。④人绝经后促性腺激素(hMG亦名Pergonal Humegon, Menotropin)。1962年Lunenfeld从绝经后妇女尿中提取出来,其中每针含FSH、LH各75IU,可代替FSH促使卵泡发育成熟,再用hCG替代LH促使排卵和妊娠,故应称hMG—hCG疗法。用法:于月经净后起,每天肌注1针,连用1周。若无反应,1周后改为每天2针,若仍无反应第3周起加大到每天3针,直至卵泡发育成熟—卵泡直径18~31mm和宫颈粘液评分(CMS)≥8分,则改用hCG 10,000IU;肌注,第2天用5000IU,以诱发排卵。若用到hMG42针时仍无卵巢反应,则停药催经后再用,并找寻原因。国内自1983年起始用于临床,1984年12月上海市第一妇婴保健院首例国产hMG—hCG成功病例分娩。该院在1986年9月最早报道国产hMG文章。1990年11月~1992年3月期间,上海市卫生局组织上海市第一妇婴保健院、上海医科大学附属妇产科医院和中山医院、国际和平妇幼保健院应用上海生物化学制药研制的hMG治疗低促性腺激素性闭经和无排卵者共110例。结果病例排卵率100%,妊娠率50%,而国外Lunenfeld报道1976例,妊娠率为42.9%。日本Kurach,报道2166例治疗结果:病例排卵率为73.2%,病例妊娠率23%。可见我国在hMG—hCG治疗效果方面已跻身于世界先进。hMG—hCG治疗可产生2大并发症—卵巢过度刺激综合征和多胎妊娠。前者如处理不当,可能致命,因此必须要在有条件的医院内进行。⑤LHRH(GNRH):系由下丘脑分泌,呈脉冲式(每隔90~120min分泌1次)。可促使脑垂体

分泌PSH和LH。继而诱发卵泡成熟和排卵。通常应用电子计算机注射泵进行脉冲式分泌,国内外均已应用。适用于下丘脑性闭经。

#### 参考文献

- 1 邵敬于,等.一种新型的尼尔雌醇-甲地孕酮周期疗法,生殖与避孕(待发表1992)
- 2 邵敬于.人类的诱发排卵,自然杂志,1987,10(1):43
- 3 長田尚夫,他不孕症(1)産科婦人科,1991,58(4):549
- 4 Lunenfeld B, et al. Ovulation induction Curr probl in Obstet Gynecol. 1982, 5(7):1~68
- 5 邵敬于,等.人绝经期促性腺激素的临床应用,上海医学,1986,9(8):454
- 6 梁红妹,等.应用国产人绝经后促性腺激素诱发排卵23例临床分析,上海医科大学学报,1986,13(6):451
- 7 邵敬于,等.人绝经期促性腺激素治疗原发性闭经6例报告,中华妇产科杂志,1989,24(3):176
- 8 Kurachi K, et al. Results of HMG(Humegon)-hCG therapy in 6096 treatment cycle of 21~66 Japanese women with anovulatory infertility. Eur. J Obstet Gynecol reprod Biol, 1985, 19(1):43
- 9 Insler V, et al. The Cervical score a simple semiquantitative method for monitoring the menstrual cycle. Int. J Gynecol Obstet. 1972, 10:233
- 10 William, et al. Ultrasound in the evaluation of normal and induced ovulation
- 11 邵敬于.诱发排卵的多胎妊娠,国外医学妇产科分册,1982, 11(5):272
- 12 邵敬于.诱发排卵的并发症,国外医学计划生育分册,1986, 5(2):79

(邵敬于撰)

#### 绝经后出血 postmenopausal bleeding PMB 指的是绝

经1年以上的阴道流血,是老年妇女常见症状之一,其病因复杂,严重威胁老年妇女健康。妇女一生中的1/3时间要在绝经后渡过,由于逐渐衰老,又是各种疾病(心血管、代谢性疾病、肿瘤等)发病和死亡最高阶段,因此,如何改善老年妇女生活质量已引起重视。

PMB的病因复杂多样,如根据女性生殖系统解剖部位,PMB可分为外阴、阴道、子宫颈、子宫体、输卵管和卵巢等不同部位的出血。按致病因素可分为炎症性、肿瘤性、内分泌性、全身性及其他(外伤、异物)等。根据疾病的性质,又可分为良性、恶性和非器质性疾病。一般认为PMB是癌瘤的征兆,但近年发现因恶性病变致PMB的病例逐年减少至11%~17%,中国为42%~45%,1991年常才等调查了85例PMB妇女,恶性肿瘤占18.8%,这种比例的下降,可能与妇科普查的开展,人们对癌瘤的警惕性提高,以及诊断及及时有关。

良性病变:以老年性阴道炎,宫颈息肉,宫颈糜烂及子宫内膜炎为多见。Dewhurst统计249例良性疾病所致的PMB,老年性阴道炎占51.8%,其次为宫颈息肉。其他为卵巢良性肿瘤、子宫内膜息肉或粘膜下肌瘤,严重的输卵管炎或结核也可引起PMB。

恶性病变:以子宫内膜癌为最常见,其次为宫颈癌,再次为外阴癌、阴道癌、卵巢颗粒细胞瘤、恶性卵巢上皮肿瘤、输卵管癌和子宫肉瘤等。消化道、乳房等恶性肿瘤转移至卵巢或子宫时,有时也可出现PMB。

非器质性疾病:近年由于绝经后妇女使用外源性雌激素替代治疗日益增多,由药物引起内分泌性PMB比例不断上升,抗衰老治疗药物如混合维生素及含激素类的滋补药物等均可导致PMB。此外,绝经后妇女患有高血压、糖尿病、动脉粥样硬化等内科疾病和久置不取IUD等亦可引起PMB。

任何一种症状表现,均有一定的病理基础,PMB病因极其复杂,引起出血的病理生理亦截然不同,且出血的类型与疾病的性质无相关性。一般认为出血距绝经时间愈久,恶性肿瘤的可能性愈高。

1. 阴道、外阴和子宫恶性肿瘤细胞浸润局部、脉管或晚期恶性肿瘤直接侵犯子宫时常致PMB。绝经后卵巢功能衰退,阴道粘膜萎缩,上皮细胞内糖原含量减少,阴道内H<sup>+</sup>浓度下降,阴道革兰氏阳性杆菌逐渐消失,保护阴道粘膜自然防御机能微弱,易受细菌入侵,引起阴道炎、宫颈炎、内膜炎而致出血。

2. 绝经后久置未取的IUD,由于子宫萎缩宫腔狭小,置环部位常有明显压痕和瘀斑,致内膜受损,引起非特异性子宫内膜炎或萎缩的官内膜易受感染,引起出血。

3. 绝经后子宫粘膜下肌瘤,虽可萎缩或缩小,但由于子宫进行性萎缩,内膜菲薄,致使肌瘤愈向宫腔发展,瘤组织表面有较粗的扩张的血管,若上皮脱落,易形成溃疡,引起子宫出血。

4. 卵巢肿瘤常为PMB的原因,有些原发性及转移性卵巢肿瘤具有内分泌功能,如性索间质瘤,能分泌雌激素,作用于子宫内膜而致出血。布伦纳瘤的肿瘤组织可合成雌激素或使雄烯二酮转化为雌酮及雌二醇,致子宫出血。卵巢Krukenberg氏瘤,能分泌甾体激素,致PMB,已引起学术界重视。一些生殖细胞来源肿瘤,虽不具有内分泌作用,但有时具有类似性激素作用,刺激卵巢组织,使之产生雌激素。Amiman研究证实,大多数非功能卵巢肿瘤的卵巢静脉血雄烯二酮和17 $\beta$ -E<sub>2</sub>显著比外周血高,分别是正常绝经者5.6倍和4.3倍。一些卵巢输卵管的良、恶性肿瘤的上皮细胞能刺激邻近的间质细胞增生或黄素化,产生大量的雄烯二酮,在周围组织中转化为雌酮,引起PMB。Gambrell认为约37%的原发性卵巢肿瘤中有酶活性间质细胞,这种细胞在老年妇女多见,所以老年妇女的卵巢肿瘤经常引起PMB。

5. 萎缩性子宫内膜引起PMB,近年来研究较为深入,在非器质性病因中占59%~85%,对其出血机理大致有以下几种学说:绝经后雌激素水平低下,内膜变薄,易受细菌感染,毛细血管损伤,形成浅表性溃疡,或内膜发生非特异性慢性炎症,局部组织坏死致出血;萎缩性子宫内膜功能层菲薄,血管更趋于表面,若在合并内科疾病(秘血管,糖尿病)时,血管壁硬化退变,当血压波动时,血管易破裂出血;还有学者认为,官内膜萎缩,致腺体的腺管变细,管口易堵塞,形成腺囊肿,如囊肿破裂,可致小静脉阻滞或破裂出血。

6. 在PMB妇女中还有一部分为增殖期(包括增生性和分泌期)子宫内膜,属非器质性内分泌因素引起的,其病理以增生性为主要表现,出血机理是:绝经1~2年内,卵巢仍能分泌少量雌激素,可能出现1~2次出血;低量雌激素可使子宫内膜增生,增生过长,当达到一定程度时,则不规则脱落引起出血;绝经后卵巢内卵泡虽萎缩,如在过高FSH影响下卵巢皮质中间质细胞增生,分泌雌激素作用于子宫内膜,绝经后雌激素主要来源于肾上腺皮质的雄激素,在外周脂肪组织中转变成雌酮,当激素波动时,可发生出血;绝经最初几年,少数可偶发排卵,使子宫内膜呈不良的分泌反应。

对不同疾病机理的研究,有助于认识疾病的本质,为及时准确的诊治提供理论依据。

PMB的诊断,有赖于对疾病本质的寻求,详细询问病史和仔细妇科检查,是获得第一手资料的最基本最重要的诊断方法。根据具体情况恰当地选择有关辅助检查,如细胞学、组织学、分段刮宫、B型超声、胃肠钡餐造影、阴道镜、宫腔镜、腹腔镜、内分泌测定为常用的诊断方法。条件允许,可选用CT或MRI检查。

外阴、阴道、宫颈出血,可在直视下窥检或活检。采用阴道镜与宫颈活切并用,能大大提高早期宫颈癌的诊断率。盆腔检查常能发现附件肿瘤,如绝经多年子宫未萎缩或增大者要高度警惕肿瘤存在,或卵巢较绝经年龄大,应考虑卵巢可扪及综合症。对原因不明的PMB,如E<sub>2</sub>高于正常水平者,要注意卵巢内产生性激素肿瘤或卵巢内产生激素的间质细胞增生,除外卵巢微小肿瘤的

存在,作阴道超声检测卵巢大小及形态,是筛查早期卵巢癌重要方法之一,怀疑时应作腹腔镜或剖腹探查,不应长期观察。

在PMB中以子宫出血为最常见,且疾病机制复杂,诊断难度较大,对此诊断技术近年来发展较快,特别是20世纪70年代后腹腔镜研制成功,并随着新型宫腔镜的问世,膨宫介质的改进及临床诊断技术不断提高,使不明原因的子宫出血的诊断准确性大为提高。宫腔镜的主要优点在于能在直视下观察宫腔内病变部位、大小、数目、范围及初步性质,并能在直视下切取可疑组织。诊刮虽是诊断子宫内膜癌较可靠的方法,但PMB单凭刮宫有36%不能诊断出血原因,而宫腔镜能发现良性、高危或恶性病变,尤其对PMB高危妇女(高血压、糖尿病、肥胖),应常规采用宫腔镜检查。为提高宫腔镜的诊断符合率,目前Loffer等采用多项技术联合应用,宫腔镜+活检,使诊断的灵敏度高达98%。

细胞学检查是诊断PMB不可缺少的方法,阴道涂片有雌激素影响,须进一步作血清E<sub>2</sub>测定。宫颈细胞学检查,已作为普查和筛选癌瘤的重要措施,其诊断正确率为84.3%~93.4%。后穹窿穿刺及抽取腹水找癌细胞,可用于诊断卵巢恶性肿瘤。对子宫内膜细胞获取的方法有:宫腔吸片,宫腔拉网,宫腔扫查器法,宫腔负压灌洗吸引,Novak刮匙和海刷刮等方法。PMB妇女有不少因内膜、颈管萎缩,诊刮困难,往往刮不出组织,应用上述中某一方法进行细胞学检查,是了解子宫内膜情况的简便、快速且患者易接受的方法,可以减少许多不必要的诊刮。

总之,PMB应视为严重的危险信号,务必及时寻求病因,切忌不作进一步检查,任意下结论,面贻误病情。对其病因的诊断,近年来正向组织学细胞学微量技术方向发展。

老年妇女是各种疾病发病最高阶段,尤其是恶性肿瘤随年龄的增长而增加,因此老年妇女更需加强自我保健意识,保持良好的精神状态,培养多种兴趣爱好,参加有益于健康的运动和预防医疗活动。在目前对恶性肿瘤的发病原因尚不十分清楚,缺少直接的预防措施的情况下,定期普查和妇科检查是发现肿瘤的重要手段,做到早期发现、早期诊断、及早治疗。

PMB的治疗方法,应根据不同病因、病变范围、年龄及全身情况制定治疗方案。非器质性病因一般治疗包括停用含激素药物、外伤缝合,异物或IUD取出,抗炎,治疗内科疾患,适当补充雌激素及刮宫等措施。对肿瘤性出血,则根据病人全身情况、病变性质、范围决定手术和/或放疗、化疗或其他药物如孕酮、抗雌激素制剂等治疗。老年虽不是手术禁忌症,但老年妇女内外科合并症多,占45.7%。术前必须注意和改善机体一般情况,诊治内外科疾患,术中电监护、细致操作、术后加强观察及护理,以减少并发症发生。对不明原因的反复出血,要重复检查,短期内严密随访,若随访不便,应作预防性手术为宜,据Macdonald对86例临产和诊刮检查未明确诊断的PMB进行随访,其中36例在随访6年内证实为卵巢恶性肿瘤。

综上所述,PMB是老年妇女常见症状,其病因复杂多样,疾病性质难定,在PMB中,以子宫出血为多见,虽非器质性病因居多,但肿瘤所致出血仍占一定比例。诊断以组织学细胞学为主要方法,宫腔镜是诊断子宫出血最简便可靠的手段。治疗原则视不同病因、病变性质及全身情况而定。

(安徽省立医院孙敏文主任医师撰)

**绝经后阴道流血** 一种临床症状。绝经是妇女卵巢功能衰退、月经停止的一种正常生理现象。妇女绝经约在50岁左右。在绝经以前数年或近10年的时间里卵巢功能开始衰退,垂体所分泌的促性腺激素和卵巢所分泌的雌激素之间的平衡失调,月经周期发生紊乱,2~3个月或半年来次月经即称绝经期月经不凋。当卵巢内分泌功能进一步衰退,月经即停止。妇女绝经一年以后又出现流血,即称之为绝经后流血。

绝经后出血是指外阴、阴道、子宫、卵巢、输卵管的良性和恶性疾患(及器质性原因)导致的出血。文献早期报道恶性占53%~90%,50~60年代很少高于50%,近代文献很少高于

30% (见附表), 而良性病变逐渐升高, 恶性发病率逐渐减少。近年研究表明非器质性原因引起的绝经后流血(PMB)亦在增加。这可能与医务人员对绝经后出血病人的警惕性提高, 经常检查; 另外, 人们生活水平及文化程度提高等因素有关。

PMB 病因错综复杂, 在分析时首先要排除泌尿道及下消化道出血。然后根据解剖部位, 良、恶性及是否为器质性疾病加以考虑。

1. 恶性疾病: 子宫内腺癌、子宫肉瘤(内膜间质肉瘤)及转移性癌, 子宫颈癌(腺癌或鳞癌), 卵巢恶性肿瘤(包括卵巢粘液腺癌及浆液性囊腺癌、颗粒细胞癌), 输卵管癌、外阴癌、阴道癌、Paget 病等。

2. 良性疾病: 慢性子宫内膜炎, 内膜结核、息肉, 子宫内腺不典型增生, 宫腔积液, 子宫腺肌瘤, 粘膜下子宫肌瘤, 子宫脱垂并宫颈溃疡, 宫颈息肉, 宫颈糜烂, 子宫颈结核、疣, 老年性阴道炎, 滴虫性阴道炎, 阴道溃疡, 阴道子宫内腺异位, 卵巢卵泡膜细胞瘤, 上皮性卵巢瘤, 勃伦纳氏病, 卵巢纤维瘤及输卵管炎, 输卵管结核及乳头状瘤, 外阴湿疹, 外阴溃疡, 垂体肿瘤。

3. 非器质性病变: 外阴及阴道损伤, 阴道内药物腐蚀如洗必泰, 萎缩性或增生性子宫内腺, 宫内节育器, 应用雌激素后药物撤退性子宫出血及全身出血性疾病等。

在恶性疾病中以子宫内腺癌及子宫颈癌为最多。良性疾病以老年性阴道炎最多见。近年来由于绝经后妇女使用雌激素替代治疗, 加上含花粉和含激素的滋补药物应用, 因药物影响引起 PMB 的比例日益上升。我国妇女使用宫内节育器避孕较为广泛, 绝经后宫内节育器久置不取亦为 PMB 原因之一。虽然近年来 PMB 的良性疾患及非器质性病变所占的比例在增加, 但恶性病变仍占有一定的比例, 因此 PMB 病人不论出血多少均应仔细寻找原因, 决不可疏忽大意而延误病情。

PMB 虽然临床上的表现均为流血, 但其流血发生的机理各异:

1. 老年性阴道炎: 绝经后阴道粘膜萎缩, 阴道上皮内糖原含量下降, 阴道内革兰氏(+)杆菌减少, H<sup>+</sup>浓度升高, 阴道内自净作用减弱而产生老年性阴道炎, 毛细血管扩张充血、出血。

2. 卵巢良、恶性肿瘤引起的阴道流血: 一般认为卵巢功能性肿瘤, 由于分泌雌激素作用于子宫内腺, 使子宫内腺生长脱卸出血。在实际工作中发现很多非功能性肿瘤也引起 PMB, 如卵巢上皮性肿瘤(粘液性囊腺瘤及浆液性囊腺瘤), 卵巢纤维瘤、畸胎瘤、胃肠道转移瘤等。根据文献报导认为这些肿瘤引 PMB 的雌激素来源于肿瘤的间质细胞。肿瘤刺激周围间质细胞增生及黄素化而生雌激素或产生大量雄烯二酮, 转化为雌酮而引起 PMB。

3. 内膜萎缩、内膜增生、内膜囊性增生、内膜增殖: 任何年龄妇女的子宫内腺对雌激素仍有反应。绝经后体内雌激素由肾上腺和卵巢产生, 虽量很少, 但持续产生对子宫内腺的积累作用, 可使子宫内腺出现增生、囊性增生及增殖。体内雌激素稍有波动, 可引起出血。加上因雌激素水平低下, 内膜局部抵抗力下降易受细菌感染而致非特异性子宫内腺炎, 少数可形成浅表溃疡。菲薄的内膜血管趋于表面, 一旦血压波动, 血管极易破裂出血。

4. 宫内节育器造成 PMB, 主要是由于子宫萎缩且合并有内腺炎症或钙化。子宫萎缩后 IVD 发生错位, 子宫内腺受损或并发非特异性炎症而致出血。

5. 垂体肿瘤: 由于垂体分泌卵泡素(FSH)及促黄体素(LH)使卵巢分泌雌激素, 而致子宫内腺反应而出血。

根据文献报导, 临床表现与良恶性关系有一定规律。

1. 发病年龄与良恶性关系: 发病年龄越大, 恶性发生率越高。据 1 作者报导 160 例 PMB 其恶性发生率为, 45~54 岁, 14.3%; 55~64 岁, 23.5%; 65~74 岁, 27.0%; >75 岁, 35.7%。另 1 作者报导, 非器质性疾病平均年龄 51 岁, 良性疾病 58 岁, 恶性肿瘤 60 岁。

2. 绝经期限与良恶性关系: 绝经期限(绝经至出血的时间)

愈长, 恶性发生率愈高。有作者发现恶性病变 2/3 是绝经 11a 之后或更长时间。绝经 20 年以后恶性疾患明显增加。另有 485 例分析报道, 初次出血至绝经年龄平均: 恶性组 11.8a; 良性组 7.4a; 非器质性组 4.3a。

3. 出血性质与良恶性关系: 出血性质分点滴少量, 明显多量及接触性出血。一般良性者, 大多数出血少, 恶性者大多数出血明显多量。有作者分析 160 例报道, 明显出血恶性发生率 27.1%, 点滴出血恶性发生率 19.1%, 接触性出血恶性发生率 20.8%。

4. 病程长短与良恶性关系: 流血时间长, 恶性率增加。

绝经后流血的诊断要点和步骤:

1. 详细询问病史及全身体格检查: 包括发病年龄, 绝经期限, 流血性质和时间。注意有无外源性雌激素或可导致出血的药物, 如血管扩张药或活血药的应用史。有无高血压, 糖尿病, 过去疾患如胃肠道、乳腺等疾患。检查身体其它部位有否出血表现。

2. 盆腔检查: 由外生殖器至内生殖器的详细检查。尿道口有无病变, 外阴有无溃疡、肿瘤及炎症, 阴道有无肿物及溃疡, 阴道粘膜情况, 白带性质, 宫颈有无炎症及息肉, 子宫大小, 有无子宫脱垂及合并宫颈溃疡, 盆腔有无肿块。老年绝经后妇女内外生殖器萎缩, 双合诊检查时如子宫饱满增大、柔软、宫颈充血、肥大和能扪及卵巢等均属异常, 表明有病变存在, 必要时应在麻醉下作检查。警惕癌瘤, 特别是早期卵巢癌。

3. B 型超声波检查: 了解子宫大小及附件有无肿块, 尤其用于肥胖妇女或腹部不放松、检查不满意的患者, 可及早发现卵巢肿瘤, 是一种较安全并且无痛苦的方法, 但诊断的可靠性取决于诊断者的技术水平。宫腔内小的内腺息肉有时被忽略。

4. 细胞学检查: 测定雌激素水平、宫颈刮片和颈管涂片细胞学检查, 已成为普查宫颈癌和筛选可疑病例的重要措施。巴氏染色细胞五级分类法已广泛使用。日本松状用宫腔吸片细胞学诊断子宫内腺癌, 阳性率高达 96%。获得子宫内腺细胞的方法有子宫内腺刷, 宫腔负压灌洗吸引, 宫腔拉网, Novak 刮匙和海绵刷等方法。剖腹探查, 腹腔控液细胞学检查。卵巢瘤印片检查, 可应用于判断卵巢瘤的性质。

5. 分段刮宫: 对曾有 PMB 的患者, 应劝告其接受医生的刮宫措施, 切勿盲目地服用止血药。分段刮宫是分别依次刮取宫颈管组织, 子宫腔顶部及子宫 4 壁的内膜, 将所取组织分别放在不同容器内并标记。如流血时间较长(>7d), 术前应先用抗生素及消炎药控制感染后再刮宫。就诊时流血已止者, 为了排除恶性病变, 在近期内行分段刮宫。

6. 宫腔镜检查: 可了解宫腔病变, 并能在直视下观察宫腔病变范围, 初步确定病变类型, 还能看到活动性出血点, 并在直视下获取活组织作病检, 诊断灵敏度可高达 98%。

7. 腹腔镜检查: 直接观察卵巢的大小、形态, 并可以采取标本化验。对疑有早期恶性卵巢肿瘤病人, 年龄 60 岁左右, 健康状况尚佳或发现盆腔肿块, 性质不清楚者可选用, 协助诊断。

组织学检查对于诊断 PMB 具有决定性意义。外阴、阴道出血可直接行活检。宫颈出血可在阴道镜指导下作活检。总之, 在 PMB 出血原因查找中, 近年正向组织学加细胞学微量技术方向发展。

8. 其他血清学检查: E<sub>2</sub>, FSH, LH3 解体内激素水平变化与流血之间的联系。

绝经后流血的治疗 应根据不同病因, 病变范围, 病人年龄及全身情况综合制订治疗方案。一般措施是: 缝合外伤, 药物引起者停药, 取出宫内节育器。老年性阴道炎可适当补充雌激素。内分泌原因者可刮宫。炎症者则积极抗炎。对肿瘤性出血者, 可采用手术、放疗或化疗等。

值得注意的是, 有些 PMB 的原因需经过仔细反复检查才能获得。因此对原因不明的病例要观察随访。对有些良性疾患, 也不能放松或麻痹, 也可能有潜在的恶性病变未查出, 或目前不是恶性将来有恶化发生。对反复出血者可考虑预防性子宫及附件切除术。



表1 PMB的恶性率

| 引证               | 年代   | 出血例  | 恶性率   | 地点    |
|------------------|------|------|-------|-------|
| Zweifel          | 1930 | 351  | 76.0  | 慕尼黑   |
| Fahng            | 1933 | 937  | 43.1  | 爱丁堡   |
| Taylor&Miller    | 1938 | 406  | 63.3  | 纽约    |
| Telinder         | 1940 | 333  | 53.3  | 巴尔的摩  |
| Schwartz         | 1943 | 114  | 36.8  | 纽约    |
| Cheek&Davis      | 1946 | 514  | 36.1  | 巴尔的摩  |
| Brewer&Miller    | 1954 | 211  | 26.6  | 芝加哥   |
| Cope             | 1956 | 522  | 34.5  | 悉尼    |
| Payneetal.       | 1959 | 698  | 30.0  | 宾西法尼亚 |
| Benzi            | 1960 | 210  | 22.8  | 意大利   |
| Latrem&Pellstier | 1961 | 2000 | 23.1  | 加拿大   |
| Pecheco&Kempers  | 1968 | 401  | 177.7 | 美国    |
| 范华光              | 1974 | 540  | 16.5  | 浙江    |
| 杨汉英              | 1979 | 112  | 25.8  | 北京    |
| A. Lindoretal.   | 1986 | 226  | 7.0   | 以色列   |
| 郑英               | 1986 | 450  | 24.9  | 河南    |
| Loffer           | 1989 | 187  | 6.0   |       |
| 常才               | 1991 | 85   | 18.8  | 上海    |
| 徐廷香              | 1990 |      | 37.06 |       |
| 黄荷凤              | 1992 | 485  | 22.7  | 浙江    |

(安徽医科大学第一附属医院妇产科樊毓方撰)

### 妇科宫腔镜检查 and 手术

为能直接窥视和揭晓人类子宫腔的奥秘,各国医学工程和妇产科先驱者曾付出大量、艰巨的劳动。早在1869年巴塔奥尼(Pantaleoni)曾用原始“宫腔镜”借助蜡光或煤油灯,经凹面反射镜检查1例异常子宫出血的老年妇女。1877年巴克斯,尼茨(Nax Nitze)将膀胱镜装上了光学镜片。1914年戴维(Savid)在其物镜端安置“微型灯泡”以供照明。1914年海涅堡(Heineberg)增设了喷洗镜头装置。1925年罗宾(Rubin)用CO<sub>2</sub>气体进行膨宫作宫腔镜检查的尝试。由于子宫腔仅是前后壁附着的三角形裂隙,宫壁为强韧肥厚、不易扩张的肌肉组织,于宫内膜脆弱稍触即出血,且易分泌粘液和剥脱成碎片,造成窥视困难,以致近百年来宫腔镜的发展始终停滞不前,直到本世纪70年代初,随着优质内窥镜器械和冷光源系统的问世,特别是各种有效的膨宫方法的相继建立,例如1970年瑞典的埃特斯顿(Edstrom)和弗恩斯特朗(Fernstrom)成功地使用32%右旋糖酐-70作为膨宫介质,1971年联邦德国林德曼(hyndemann)介绍采用宫颈负压吸杯和自动控压调速灌注器的CO<sub>2</sub>膨宫方法,1972年墨西哥的奎诺纳斯(Quinones)推荐以5%葡萄糖液膨宫腔等,才发展成功实用的现代型宫腔镜。在日本,杉本修(1970)陆续报道他们的宫腔镜在临床应用中的经验,膨宫选用生理盐水,大川公康(1978)介绍了临床试用接触明显微宫腔镜的初步结果。中国研究概况:1975年9月沈阳医用光学仪器厂根据沈阳202医院提出的要求,开始了宫腔镜的研究和设计,经不断改进,1977年6月制成硬性套管型前视式XG-3型纤维光学子宫内窥镜,并经沈阳202医院临床应用验证,性能良好。冯继冲从1969年起陆续试用多种内窥镜观察离体子宫腔,并将旧镜管进行反复改进,且逐步建立了以5%葡萄糖液作为膨宫介质的持续加压-控压膨宫检查方法,于1976年3月正式用于临床;1978年起试用多种微型手术器械开展——宫腔镜治疗性操作;

1985年与沈阳大学内窥镜研究所协作研制成具有特色的XG-5型宫腔镜。

迄今国内外使用的各类宫腔镜,基本可分成:硬管型和软管型镜,以前者应用广泛。硬管型直管镜系国外最常用的宫腔镜类型,而硬管型李管镜(即国产的XG-5型宫腔镜)则国内较普遍使用;两者性能各有利弊。此外,尚有设计特殊用途的宫腔镜,例如绒毛活检镜、接触性显微宫腔镜、电切割宫腔手术镜、输卵管镜等。

适当的膨宫方法是宫腔镜检查成功的关键之一,目前用于宫腔镜的膨宫介质主要有3种:32%右旋糖酐-70液、5%葡萄糖液和CO<sub>2</sub>气体,3者各有优缺点。一般认为CO<sub>2</sub>膨宫较适用于宫腔镜检查,而宫腔镜手术则宜采用5%葡萄糖液作为膨宫介质。禁忌症计有:(1)体温到达或超过37.5℃时,暂缓手术;(2)活动性子宫出血(少量出血者例外);(3)急性或亚急性生殖道炎症;(4)近期有子宫穿孔或子宫修补史;(5)宫颈恶性肿瘤,对疑有子宫内腺癌者也宜慎重;(6)生殖道结核未经适当抗痨治疗者;(7)子宫腔或颈管过度狭窄难以扩张者,此类情况随着经验积累和技术熟练而减少;(8)严重心、肺、肝、肾病变,难以适应于宫内手术者。

副反应和并发症少见。操作时损伤与一般宫腔内手术相同,若掌握适应症,操作仔细认真是可避免的。宫腔镜检后可有少量出血,多在1周内净;感染也极罕见,严格掌握指征和禁忌证,术时注意无菌操作,术后的情况以抗生素,感染是能预防的。其它,如违反常规地大量快速灌注CO<sub>2</sub>入宫腔可能导致严重后果(CO<sub>2</sub>酸中毒);由于扩张宫颈和膨胀宫腔可激发类人流综合征;宫腔镜电外科手术不慎有可能造成严重并发症,例电灼子宫穿孔,膨灼伤和腹膜炎等。个别病人对右旋糖酐液过敏,引起皮疹、哮喘等症状。必需强调尽管5%葡萄糖液膨宫方法比较安全,但在膨宫过程中须严格杜绝空气逸入宫腔,当子宫腔内出血,有破裂血管存在时,若有大量、快速空气被压入宫腔进入血液循环,将有发生致命性空气栓塞的危险。至今仍无增加于宫内膜异位症发生率的证据;关于于宫内膜播散的可能危险尚存争议。

宫腔镜检查时间,一般以月经净后5d内为宜,出血期一般不作检查。术时可不需麻醉,必要时可于宫颈旁神经阻滞麻醉或依托咪酯静脉麻醉。适应扩张宫颈管后,检查全套器械及其功能应正常,包括:宫腔镜、导光缆、冷光源、加压-控压膨宫装置(CO<sub>2</sub>或者5%葡萄糖液等)、所需微型手术器械以及备用药品。将宫腔镜顺宫腔方向插入到宫颈内口稍下方,在10.67~26.66kPa范围的压力下注入5%葡萄糖以膨宫。待镜体排水孔流出的液体清亮后,即边注液边检视。直视下将镜体朝子宫腔内推进,待子宫腔充分扩展后即可进行观察。按顺序检视子宫后、前、侧壁和宫底、子宫角以及输卵管口各部分,注意宫腔形态,有无子宫内异常或病变。必要时可经宫腔镜操作孔道插入各种微型手术器械,例活检钳、异物钳、剪刀、导管、电切割器或激光束导等,在直视下进行相应的宫腔内治疗性手术。

宫腔镜能直接检视子宫内生理与病理变化,依凭观察到的病灶表面、色泽、形状、血管分布以及覆盖内膜与其周围正常结构的差异,并综合病史、体检和其它相关的辅助检查,对大多数子宫内疾病可作出精确和迅速的诊断,其中不少病人经宫腔镜发现的异常,应用其它传统方法却无法诊断。可检出子宫内息肉、肌瘤、子宫内恶性肿瘤、子宫内粘连、畸形、异物、炎症以及探查病理性妊娠出血的原因。应用显微宫腔镜检查的子宫颈管和子宫内黏膜需活体染色,可放大150倍作细胞水平的评估,尤对于及时检出绝经后宫颈管内早期癌变有价值。通过宫腔镜且可在直视下进行子宫内治疗性手术,更新和发展了某些传统治疗观念和方法,如分离子宫内粘连、切除子宫纵膈、取出子宫内各种异物,包括常规难以取出的宫内节育器以其碎片,切除子宫息肉或黏膜下小肌瘤以及输卵管插管注药疏通治疗某些输卵管性不孕症等。宫腔镜在计划生育临床和科研中也获得应用,例宫内节育器及其异常的定位,诊断和取出以及研究其副反应和观察新型节育器在子

宫内状况,某些困难的人工流产及其并发症的处理,胎儿声片子宫内残留的诊治,宫腔镜输卵管绝育术,包括:输卵管内注射粘堵绝育药物、放置输卵管内硅胶栓绝育等。

近年来随着器械的创新、新技术的介入以及知识经验的累积,除设计了不需“膨宫”但视野有限的接触性宫腔镜、直视下采取绒毛组织供产前诊断用的绒毛活检镜或窥视孕囊的胚胎镜外,经宫腔镜直视下导入电切割或激光技术剥取粘膜下子宫肌瘤或切除子宫内膜以保守治疗良性子宫异常出血症;输卵管插管术不仅可用于研究输卵管运动和分泌功能,更能“非侵袭性”疏通治疗某些输卵管不通的不孕症,采用特制的导管行输卵管间质部疏通扩张术治疗宫角闭塞的不孕妇女,辅助完成输卵管内人工授精或配子输送等操作;1990年报道的纤细可屈曲输卵管镜(外径:0.5mm),可经宫腔镜直视引导下插入并通过整条输卵管腔径,得以观察和检查输卵管各部内膜结构和病变,如息肉、粘连、疤痕等,并藉此辅以治疗性疏通和扩张。此外,宫腔镜也能在研究和发​​展经宫颈途径的可逆性输卵管节育方法中发挥作用,国外的输卵管尼龙节育栓(法国)和含亲水性膨胀胶成分的输卵管闭塞栓(瑞典)等尚在研究阶段。

总之,只要使用合理,宫腔镜是一项比较简单、安全、具有临床实用价值的诊疗技术,易为广大妇产科工作者所接受,其适应证和应用范围将随着经验积累、认识深化以及器械技术的改进和更新而日益扩大。有时出于临床需要,也允许对同一病人反复作多次宫腔镜检查,直到诊断明确、达到治疗目的或有效随访为止。

(上海市第一妇婴保健院冯铸冲撰)

**子宫颈肌瘤的诊断和治疗** 子宫肌瘤是女性生殖器官中最常见的一种良性肿瘤,90%以上生长在子宫体部,发生于子宫颈部者不到10%。虽然子宫颈肌瘤比较少见,但一旦发现可达儿头大小的巨大宫颈肌瘤而嵌顿在盆腔内,或巨大宫颈粘膜下肌瘤嵌顿在阴道内,给诊断和治疗带来困难,甚至误诊误治,术中失血过多招致休克,同时由于解剖关系复杂又造成膀胱或输尿管损伤。

子宫颈肌瘤常生长于宫颈后壁,其次侧壁及前壁,肌瘤常为单发性。肌瘤生长在子宫颈阴道上部为子宫颈峡部肌瘤,生长在子宫颈阴道部为子宫颈肌瘤。根据肌瘤生长方向,可有筋膜下肌瘤,进一步发展成阔韧带肌瘤或宫颈壁间肌瘤及宫颈粘膜下肌瘤,可逐渐形成有蒂肌瘤而脱出阴道内或进一步脱出阴道口外。子宫颈肌瘤不论向何处发展,由于它位于骨盆内,长大后必然嵌顿于骨盆腔内,出现逐渐加重的压迫症状,并可能使盆腔内发生解剖上的变移,给手术带来困难,本文就其诊断和治疗方法及术式选择加以讨论:

**诊断** 主要根据患者临床症状及体征可作出诊断,辅助及B超检查有参考价值。

1. 早期宫颈肌瘤可无任何症状和不适,而肌瘤已达到一定大小,往往因其他情况行妇科检查或偶而自行腹部能摸时才发现包块,可有阴道及肛门坠胀感。

2. 子宫颈肌瘤增大时往往出现压迫症状,但一般并不造成严重问题,只当肌瘤生长于宫颈或子宫颈峡部前壁的巨大肌瘤,由于占据膀胱正常位置,影响膀胱的充盈而发生尿频及尿急,如果肿瘤增长到相当大时,充满骨盆前部紧紧压迫尿道及膀胱,且有时使膀胱三角升高,膀胱向上移位,尿道被拉长而发生排尿困难导致尿潴留及充盈性尿失禁。于宫颈肌瘤生长在宫颈或宫颈峡部的后壁可以压迫直肠引起便秘,甚至排便困难。肌瘤如生长在宫颈或宫颈峡部的侧壁所致的阔韧带的瘤可压迫静脉引起下肢水肿或压迫输尿管,输尿管移位而造成输尿管及肾盂积水。

3. 宫颈肌瘤较小时宫颈局部有增大突出肌瘤结节,当肌瘤增大时使子宫颈外形发生改变,肌瘤所在一侧扩大,而对侧被压变薄,宫外口伸张变平呈新月形。宫颈肌瘤增到足够大时,宫颈肌瘤瘤体下极向阴道直肠隔中生长,并可充填整个骨盆腔,嵌顿而不活动,阴道内可及肌瘤包块,宫颈另一唇变薄上升至耻骨下

方而不可及,给检查带来困难,其宫体可被推向腹腔,似如一浆膜下肌瘤结节。宫颈峡部肌瘤,宫颈可保留正常形态宫颈甚短,而宫颈上部具有巨大肿瘤占据穹窿顶部,嵌顿在盆腔内,其宫体座落在巨大峡部肌瘤之上,也被推广向腹腔,居正中或稍偏,似如肌瘤结节但比肌瘤软,似子宫体硬度。宫颈粘膜下肌瘤可与宫腔内脱出之粘膜下肌瘤相似,仅有根带附着于宫颈管内而粘膜下肌瘤嵌顿在阴道内,甚至外阴口内可见肿瘤下界。

4. 子宫肌瘤B型超声显像的特点:子宫体积增大不显,子宫颈部分清楚见到突出的结节,肌瘤所在区显示较强的回声,出现团状或点状回声,对诊断有参考价值。

**治疗** 手术是治疗子宫颈肌瘤的主要措施,能迅速地消除盆腔内的压迫症状,达到治愈目的,手术适应症与术式选择如下,

1. 阴式子宫颈肌瘤切除术:肌瘤摘除术;用于宫颈粘膜下肌瘤突出于阴道且瘤蒂不粗者,先以有齿血管钳夹住肌瘤蒂部,切断取出肌瘤,可用0号肠线缝合扎瘤蒂。亦可用有齿血管钳夹住瘤蒂,保留48h取下血管钳,待肌瘤自行脱落。宫颈肌瘤切除术:对生长在宫颈阴道部低位肌瘤,基底部未超过穹窿者,可自阴道行肌瘤切除术,先切开宫颈肌层和肌瘤的假膜,剥除肌瘤核,将膀胱底用0号线间断缝合。

2. 腹式子宫颈和峡部肌瘤切除术:子宫颈肌瘤发生阴道上部,位于盆腔深部宫颈巨大肌瘤者嵌顿在骨盆腔中,使周围器官解剖关系发生改变,输尿管和血管位置变移,增加手术难度,容易发生副损伤和猛烈出血。所以此种肌瘤必须由腹部施行手术,并做好术前充分准备,术中对手术步骤要进行灵活的相应改变,而且无论保留子宫与否,均应首先剥除肌瘤核,再作子宫重建的整形缝合术或子宫切除术,才能使难变易安全的完成手术全过程。子宫颈肌瘤切除术:开腹后,辨清肌瘤部位与子宫颈关系,位于子宫颈前壁肌瘤,应找到膀胱腹膜反折剪开,将膀胱与肌瘤分离,下推膀胱,作横切口(位于子宫颈或峡部后壁肌瘤。选择纵形切口),切开肌层直达肌瘤“假包膜”,用手指或刀柄伸入包膜内,钝性剥离剥除肌瘤。如需切除子宫可在剥除肌瘤后用粗丝线暂时将切口缝合再依次作子宫切除。若保留子宫者用0号肠线由瘤腔底部行间断缝合两层,关闭瘤腔。用4号丝线连续缝合膀胱腹膜反折,关腹。阔韧带肌瘤切除术:子宫颈或峡部侧壁生长的肌瘤,能将子宫挤向对侧,肌瘤侧的血管和输尿管可随之移位,有时输尿管被推向肿瘤前方和被拉长变扁而不易辨认,开腹后要辨明圆韧带和输尿管位置,切断缝扎肌瘤侧阔韧带,并剪开阔韧带前叶,钝性分离,对任何索状物,管状增粗组织,应考虑为输尿管,应注意辨认,必要时沿行程追索,决不能轻易钳夹或切断。在肌瘤突出部用缝线牵引,可从盆侧壁向子宫方向钝性剥离,直达肌瘤与宫颈交界处将肌瘤从假膜内剥除,用0号肠线由瘤腔底作间断缝合,关闭瘤腔。圆韧带缝合固定于子宫角部,关腹。如不需保留子宫时,剥除肌瘤后,检查输尿管位置,按子宫切除手术步骤切除子宫。

3. 阴、腹联合子宫颈粘膜下肌瘤切除术:

巨大宫颈粘膜下肌瘤嵌顿在阴道内,经阴道手术困难。或行腹膜外与阴式联合手术除肿瘤,开腹分离膀胱与腹膜间隙,在峡部前面行横切口,找到瘤蒂切断缝扎,切口肠线缝合关腹。经阴道于肌瘤最低点缝线牵引,用刀将肌瘤行螺旋式切开使之变形缩小而从阴道把肌瘤取出。

(大连医科大学附属二院常德安撰)

**女性生殖道畸形** 女性生殖道畸形是在胚胎期发育形成过程中,如受到某些内在或外在因素干扰,均可导致发育异常,出现在生殖道畸形,包括处女膜闭锁,先天性无阴道,阴道横膈,阴道纵膈,宫颈闭锁。女性生殖道畸形很少在青春期前发现,患者常因原发性闭经、腹痛、甚至已结婚性生活异常而就医给患者和家庭带很多精神负担,以下根据解剖部位依次介绍诊断及治疗。

无孔处女膜(imperforate hymen)又称为处女膜闭锁,临床

上较为常见,为泌尿生殖道上皮未能向前庭部贯穿所致。由于处女膜闭锁青春期开始,经血无法排出,最初阴道积血,逐渐发展至子宫积血,输卵管积血,甚至腹腔内积血,因此易并发子宫内膜异位症。处女膜闭锁的女婴在刚出生时,阴道分泌物无法排出,故新生儿外阴道部洁净,无分泌物为其特征,但因很少注意,故未能在当时加以确诊。偶而因幼女阴道内过量的粘液潴留,以致处女膜向外凸出而被发现。但绝大多数患者都是青春期开始,无月经来潮,同时出现逐渐加重的周期性下腹痛而就医,经多次发作后,常在下腹正中扪及增大的包块,严重者伴便秘,肛坠胀,尿频或尿潴留,检查可见处女膜向外膨隆,无开口,表面呈紫蓝色。用食指放肛门即能扪及从阴道向直肠凸出的卵圆形囊性阴道积血包块,肛腹联合检查时,可在耻骨联合上扪及椭圆形子宫腔积血块,而附件位可扪及腊肠形输卵管积血块,如发展为子宫内膜异位症时,可扪及圆形卵巢巧克力囊肿积血块。如上所述可诊断为处女膜闭锁及等一系列诊断。

先天性无阴道(Congenital absence of vagina)为双侧副中肾管会合后未能向尾端伸展形成管道所致,先天性无阴道常合并无子宫或仅有痕迹子宫,但卵巢一般均正常,患者多系青春期后一直无月经来潮,或新婚后天性交困难而就诊,检查可见外阴和第二性征发育正常,但见不到阴道口或仅在阴道外口处见一浅凹窝,有时见到由泌尿生殖窦所形成的短浅阴道盲端。根据以上情况可诊断先天性无阴道。

阴道闭锁(transverse vaginal septum)为两侧副中肾管会合后的尾端与泌尿生殖窦相接处未贯通所致。闭锁多位于阴道下段,其上为正常阴道。症状与处女膜闭锁相似,但检查时处女膜除无孔外,色泽正常,并不向外膨出,肛查扪及向直肠凸出的阴道积血块物,其位置较处女膜闭锁时为高,可诊断为阴道闭锁。

阴道横膈(transverse vaginal septum)为两侧副中肾管会合后的尾端与泌尿生殖窦相接处未贯通或部分贯通所致。横膈可位于阴道内任何段,但以上中段交界处为多见,其厚度在1~1.5cm不等。完全性横膈较为少见,多数是隔中央或侧方有一小孔,月经血自小孔排出。横膈位于上段者不影响性生活,常系偶然或因不育检查时发现,位置较低者少见,多因性生活不满意而在婚后就医。或根据上述诊断为阴道横膈。

阴道纵膈(longitudinal vaginal septum)为双侧副中肾管会合后,基中隔未消失,或未完全消失所致。有完全纵膈和不完全纵膈两种。完全纵膈形成双阴道,常合并双宫颈双子宫。有时纵膈偏向一侧以致该侧阴道闭锁而有经血潴留。绝大多数阴道纵膈无症状,有些是婚后性交困难才被发觉,另一些可能晚至分娩时产程进展缓慢才确诊。

先天性宫颈闭锁(congenital atresia of cervix)临床上罕见。如患者子宫内膜功能良好时,青春后期可因宫腔积血而出现周期性腹痛,经血还可经输卵管逆流入腹腔引起盆腔子宫内膜异位症,个别病人又可合并先天性无阴道,结合B型超声波辅助诊断先天性宫颈闭锁。

无孔处女膜的治疗,诊断明确应立即在麻醉下,先用针刺处女膜正中隆起部,抽出褐色积血后,即行“X”形切开处女膜,边引流积血,边切除多余的处女膜瓣,使切口呈圆形,再用“000”肠线缝合切口边缘粘膜以保持引流通畅和防止创缘粘连。积血大部排除后,应常规检查宫颈是否正常,术后给予抗感染药物,并要放保留尿管1~2d,外阴道置消毒会阴垫,每日擦洗外阴1~2次直至积血排净为止。

先天性无阴道治疗有非手术和手术两种方法,多种多样,应根据各人的临床表现以及外阴发育状态选用如下方法:

1. 顶压法。1938年Frank提出采用阴道扩张器对阴道口部位进行顶压形成一管道,这种方法需要较长时间和极大的耐心和合作,可以起到很好的效果,但也有由于性生活也可形成6cm以上深度的人工阴道满足性功能的要求。

2. 游离皮瓣移植法。1930年Kirschner, cvagner首创,于1938年广泛应用临床。即大腿取中厚皮片制备皮筒,移植到人工

阴道穴内,阴道成形术优点是方法简单效果好,病人容易接受,婚后性生活尚满意,但也有缺点不如粘膜柔软,润滑,弹性较差,且干涩,不太符合生理情况,术后需长期放置阴道模型。

3. 羊膜移植法。1935年Brindean提出采用新鲜羊膜,复盖人工阴道腔穴,阴道成形术,此种方法,方便、容易,无需损伤病人任何器官和组织,手术简单易行,形成阴道有一定弹性而较润滑,似合乎生理要求,缺点是术后阴道全部被上皮复盖时间较长,易招致感染和疤痕收缩,且需长期换药和放置阴道模型,甚至部分病人使手术失败,极少数病人由于模型压迫发生尿瘘。

4. 乙状结肠移植法。1914年Ruge报告乙状结肠法人工阴道成形术成功后,许多国家采用这种手术方法。由于手术较复杂,且有死亡病例,因而未能推广,随着现代外科技术和麻醉等医疗手段的提高,手术安全性相应增加,近年来采用这种手术的医院不断增加。取膀胱截石位,先开腹切取乙状结肠段19cm,两端暂缝合闭锁,乙状结肠断端吻合,从阴腹两个方向进行人工阴道造穴,移植乙状结肠段至人工阴道穴腔,打开闭锁肠端与穴口边缘对齐间断缝合,线头保留,待肠腔冲洗填塞纱布后,打结完毕,此术式最大优点,人工阴道的深度和宽度充裕,组织润滑,柔软,弹性好,具有分泌功能,术后不必旋转阴道模型。缺点:先天性无阴道病人,本应是个小手术,仍需开腹、阴腹、联合术式,动用结肠段,也有移植肠段坏死脱落,或肠段脱垂增加二次手术机会。

5. 回肠移植法。1907年Baldwin提出这种手术方法行回肠阴道成形术,优点回肠有足够的长度,血运丰富,吻合口易愈合,形成人工阴道长度和宽度充裕,术后不必旋转阴道模型,较乙状结肠阴道成形术操作简便。移植肠段15cm为宜,缺点仍需开腹,要做肠切除和吻合,也存在手术复杂性,又要警惕回肠移植后肠坏死问题。

6. 腹膜移植法。1933年Ksiao提出腹膜代阴道成形术收到较好效果,形成的新阴道宽敞,光滑、湿润,性生活满意,符合生理要求,但术后需要放置阴道模型,给病人增加麻烦和不便,腹膜移植阴道成形术实制裁上利用腹膜为暂时性复盖物和纤维支架结构,然后通过前庭粘膜的再生作用而形成人工阴道壁的永久性复盖物。缺点:仍需开腹手术,有时粘膜再生不好,易使成形后的阴道短缩。

7. 外阴阴道成形术。1964年Williams提出,利用病人双侧大阴唇,通过切开缝合,于外阴部形成一个袋状管腔,是种最简单,最安全的手术方法,成功率高,无痛苦,费用低廉,易在基层医院开展,但其效果不如其他方法理想和满意。

8. 大连医学院1990年提出小阴唇皮瓣和中厚植皮阴道成形术,利用小阴唇在阴蒂稍下方向内横行切断小阴唇直达舟状窝部,将阴唇剖开展平,经整形后,可形成代蒂皮瓣长6~7cm,宽4~6cm再通过模型移植到阴道穴后壁其前壁和顶端用中厚皮片充填,阴道成形术,优点小阴唇皮瓣代蒂移植有血运供应和N支配,保留良好感觉机能,触觉和痛觉正常,但术后保证了人工阴道的深度和宽度,因小阴唇粘膜具有组织润滑,柔软,弹性较好,结婚后不必代置阴道模型,又不需开腹,手术简单易行,患者愿接受。

9. 国内不少医院采用胎儿皮肤移植法。人工阴道成形术,收到良好效果。

阴道闭锁治疗:治疗应尽早手术。单阴道闭锁时,可切开闭锁段阴道,排净积血后,阴道创创面利用阴道粘膜或外阴皮瓣覆盖,术后还应定期扩张切开的阴道部分以防挛缩,以满足性生活需要。当双阴道一侧闭锁时,往往在闭锁上段而成阴道积血,子宫积血甚至输卵管积血形成较大包块,此时可将闭锁侧阴道做圆形切开切开缘做间断缝合,排净积血,控制感染保证切口通畅,使每月的经血排出。

阴道横膈治疗:一般应将横膈切开并切除其多余部分,切缘面行上下粘膜间断缝合,术后旋转模型以防粘连,如系分娩时发现横膈阻碍先露下降,横膈薄者,当先露下降将膈撑得更薄时,切

开后胎儿即经阴道娩出,再检查出血情况给缝合;横膈厚者应行剖宫产,待产后3个月,再决定是否切开。

阴道纵膈治疗:如纵膈妨碍经血排出,影响性交或阻碍分娩时,可在非孕时将纵膈切除创面缝合,以防粘连,如已临产,纵膈阻碍先露下降时,可沿膈的中央部切断,分娩后缝合切缘止血。

子宫颈闭锁治疗:可采用手术穿通宫颈,建立人工子宫阴道瘘,即在宫颈闭锁合并先天性无阴道。宫腔积血时,可行小阴唇皮瓣移植加中厚皮片,宫颈造口,阴道成形术,先行阴道穴形成,上端直达闭锁宫颈,剪开宫颈盲端,排出宫腔积血,再将小阴唇皮瓣及皮片形成皮筒,移植阴道穴内上端与宫颈造口处吻合及阴道成形术,则成为子宫颈阴道瘘,故使月经血排除通畅,又可妊娠,分娩时,要行剖宫产术。

#### 参考文献

- 1 Pratt J H, Smith G R. Vaginal reconstruction with a sigmoid loop, *Am J Obstet Gynecol*, 1966, 96: 31
- 2 王明乾. 乙状结肠法人工阴道成形术的术式研究, *中华妇产科杂志*, 1988, 23(2): 153
- 3 常德安. 小阴唇皮瓣和中厚皮片植皮阴道成形术, *中华妇产科杂志*, 1990, 25(2): 110
- 4 常德安. 先天性生殖道畸形阴道成形术, *实用妇产科杂志*, 1991, 7(2): 69

(大连医学院附属第二医院常德安撰)

### 阴道再造术

先天性无阴道为女性生殖器官发育畸形,据 Conerse 报道,其发生率为 1:4000,其临床特点除阴道为实体组织所替代外,子宫常发育不全,多数为实心原基,卵巢虽可能有位置变异,但功能正常,染色体型为 46XX,故皆具有明确的女性第 2 性征和性心理,会阴结构如阴毛的分布,阴蒂,大、小阴唇都是正常的,体型和乳房发育都具备女性特征,这些患者在社会上受歧视,精神十分痛苦,她们既有结婚要求,又对自己的婚姻前途抱悲观情绪,成年后都有行阴道再造以满足性生活和组织家庭的迫切要求。

早在 1817 年 Dupuytrein 就采用单纯的会阴造穴法首次进行了阴道再造术,但造穴后没有采用任何组织覆盖腔壁,其结果终因腔壁收缩,组织靠拢愈合,形成瘢痕,手术失败。

Whartom 于 1938 年提出会阴造穴后,在腔穴内放一模型以保持腔大小,然后依靠前庭粘膜向内生长,覆盖腔壁形成阴道,看来此法并非可靠,不仅因宽大的阴道腔壁上皮化需要很长时间,而且造穴腔内持续置入模型,局部感染不可避免,而感染创面又阻碍上皮细胞移行生长。

1940 年 Frank 报道,在相当于阴道口处用特制的模型向深部进行多次扩张,以借助压力逐渐形成一空腔。此方法不仅病人痛苦大,费时长,而且组织伸展性必竟有限,最终也不能造就一个符合生理的阴道。

Dupuytrlin 和 Whartom 的再造阴道手术没有一次性解决造穴腔壁的组织覆盖问题。后来,国内外不少学者对造穴腔壁创面的修复进行了探讨和研究。随着覆盖腔壁所采用的组织种类不同,先后有数十种阴道再造手术方法问世。国内外文献,归结起来,阴道再造手术大致有以下几类:

利用羊膜修复造穴腔壁是自 Dupuytrein, Whartom 2 氏阴道再造法之后的一个重要进展。Apuct 于 1965 年首先报道了羊膜移植人工阴道成形术,并取得 12 例再造阴道良好效果。同年一位苏联医师 Цирульникова 进行了同样的手术。1959 年,中国胡信德;1960 年,Seidder 等相继以类似的方法处理尿道腔壁,并各自介绍了 2~4 例的治疗经验,中国连利娟(北京协和医院妇产科医院)报道,自 1958 年 11 月~1963 年 6 月,以羊膜移植人工阴道成形术治疗先天性无阴道共 23 例,详细介绍了羊膜移植法再造阴道的技术操作,术后护理及手术并发症。并对其中的 16 例进行了系统地随访。而且通过不同时期的阴道分泌物细胞学检查和阴道壁组织切片检查,分析了临床治疗效果和羊膜移植后阴道壁形

成机理。

羊膜移植阴道成形的根本方法是取新鲜正常分娩之胎膜,洗净后将绒毛膜与羊膜分开,将羊膜经含青霉素溶液浸泡 2h 后应用,把羊膜片(20cm×28cm)包裹于阴道窥具上,塞入造穴腔内,取出窥具,在贴附有羊膜组织阴道腔内填入宫纱,再将阴道外口与羊膜外缘作间断缝合,7~10d 拆线,23 例中有 2 例分别在术中发生膀胱和直肠损伤并发症。16 例在术后 1 个月随访发现,正常的阴道粘膜系来自阴道口前庭上皮。术后第 1 个月,6 个月和 1 年定期肉眼观察,阴道壁细胞涂片和活组织检查,都证实前庭粘膜上皮细胞由外向内生长,逐渐替代了羊膜组织,作者称这种替代作用为阴道壁表皮化过程。阴道壁全部表皮化时间各不相同,多数需 2~9 个月,时间最长的达 1 年 10 个月。

综合上述资料和经验,羊膜移植法阴道再造术所用的羊膜只是起一个生物敷料作用,逐渐被阴道前庭上皮细胞所取代,这就是移植学上所说的爬行替代机理。Seidder(1960)曾做了动物实验研究,发现羊膜移植术后几小时就开始溶解,通过一种酶的活动,再机化成一种支架性组织,上皮细胞由支架组织移流过去。本实验证明移植后的羊膜并非直接成活,而是阴道前庭上皮细胞逐渐移行生长取代了羊膜形成正常阴道壁粘膜。

据文献报道,Kirschner 和 Wagner 首先采用游离植皮覆盖腔壁的方法进行阴道再造。他们把皮片缝成筒状,套在定型的橡皮海绵上,然后放入造穴腔内完成阴道再造。后来,MeIndoe(1938),Counseller(1944)和 Miller(1945)等也都先后采用模型游离植皮法做了同样的手术并取得成熟的临床经验。但是,国内葛秦生,林世祁自 1952 年至 1955 年,用玻璃模型、丙稀酸脂或印模制成模型作包模植皮术再造阴道 4 例,结果均不太满意。故葛、桂 2 氏提出闭合式的 2 期人工阴道成形术。第 1 期手术,采用纱布布进行包膜植皮,并将造穴切口原位缝合,使其完全愈合。第 1 期手术后 12~14d,在阴道口粘膜处另作一横切口,一直切通至皮片内,取出纱布卷,将移植皮片切口与阴道切口粘膜作间断缝合形成阴道外口。葛、桂 2 氏用此法治疗先天性无阴道 7 例,已婚 4 例性生活完全满意,未婚 2 例随访检查,阴道的宽深度也符合生理,仅 1 例手术失败。作者通过临床实践,分析了 6 例成功的原因主要是在贯彻植皮的基本原则时注意了阴道部位的特殊性,解决了压力,固定,无菌和止血的问题。人工阴道的周围组织比较松软,并有重要器官,植皮后必须用适当而均匀的压力保持皮片与周围组织紧密接触,植皮方能成功。压力过大可引起皮片和周围重要器官的压迫发生坏死和损伤。压力不足皮片不能生长。用纱布卷代替以往惯用的定型硬模进行包膜植皮,不仅纱布取材方便,易于消毒,而且具有一定的弹性和硬度,填塞松紧适度,可以在任何形状的腔内保持各部位的均匀压力,不致发生压迫性组织坏死。

张涤生(1979)对游离植皮法阴道再造术作了详尽的论述,在手术细则上作了改进:(1)用柱形纱布袋内装碘仿纱条进行包膜植皮。(2)将葛、桂的 2 期手术改为 1 期,包膜植皮放入造穴腔内后,将两侧大阴唇作 2~3 针暂时性缝合,这样既固定了包膜,防止脱垂,又避免了逆行性污染,而且一期手术成功,住院期短,节省了治疗经费。

自 1982 年起,我们应用游离植皮法再造阴道 14 例,对包膜植皮技术作点滴改进,14 例手术全部成功,远、近期效果都较满意。

朱志洁,王振海等引用 Rothran 的腹膜代阴道技术,自 1976 年至 1978 年治疗先天性无阴道畸形 11 例,取得满意效果。他们所有术后病人进行了 3 个月~2 年期的随访,见新阴道宽敞,阴道壁粉红色,湿润,光滑,与正常阴道相似。已婚者性生活双方都较满意,并对 3 例作阴道涂片观察,雌激素中度影响,细胞角化指数达 23% 以上。

1984 年刘小春报道 28 例腹膜移植人工阴道术,将腹会阴联合术式改进为仅经阴道穴途径的术式。即在人工阴道穴腔形成之后,继续在穴顶部分离腹膜皱襞成为游离腹膜以供覆盖穴壁之

用,作者认为,此术形成的人工阴道不仅深,宽度较满意,外观形态、生理功能,组织学形态,生化特点都接近正常发育的阴道,而且无须切开腹壁经腹腔操作,使步骤大为简化,为一较理想的人工阴道术式。

人工阴道羊膜移植术,游离皮片移植阴道再造术和腹膜代阴道成形术的倡导者虽都各自强调自己手术的优点,但术后患者都必须较长时间使用硬质阴道模具,连利娟强调术后佩带模具时间取决于人工阴道粘膜生长情况。而且有的病例阴道完全表皮化所需要的时间长达1年或1年以上,她认为未婚或虽已婚但与爱人长期分居者,则不论手术后多长时间,仍须定期佩带模具或以模具扩张,否则若久无性生活或不扩张,仍有可能收缩致阴道腔变小。采用游离植皮,提倡闭合式的人工阴道成形术的葛秦生和桂世祜也强调术后患者佩带模具的重要性。他们认为,一般至少需佩带模型3个月以上,术后佩带模型一般为患者难以接受,不仅有碍工作和生活,且可能产生并发症。如尿道阴道瘘,直肠阴道瘘或模型穿入腹腔等。

Sneguireff(1904), Baldwin(1904), Popow(1910), Snubert(1914), Conway and Stark(1950)等先后应用肠段再造阴道,国内刘新民报道采用乙状结肠代阴道14例,并强调将乙状结肠粘膜与阴道口皮肤直接缝合,一般不会使阴道口狭窄,阴道长宽度充裕,阴道壁柔软,滑润,合乎生理要求,不必长期放置阴道模型,患者乐意接受,也减少了带模具所致排尿困难及尿路感染的发生等都是这一术式的优点。但是,很多学者报道,应用肠段再造阴道不仅有肠腺大量分泌物的异味,而且手术复杂,需截除肠段和吻合肠管,手术并发症多, Baldwin曾报道,采用小肠再造阴道,手术死亡率高达17%, Snubert用直肠代阴道,其手术死亡率也有3.2%。

Frank和Geist(1927)等曾应用皮管转移再造阴道,但有手术次数多及血运障碍之虑,故未被临床医师重视和广泛应用。

Irooes, Frank和Geist等曾应用外阴部或大腿部带蒂皮瓣转移再造阴道。这类手术的作者报告皮瓣常有坏死的可能,手术不易成功,一旦皮瓣坏死,再次手术就难于在局部取得足够的皮瓣因为这种皮瓣仍属任意皮瓣。其血运难得可靠。

早在1928年Davis就报道,利用横行单蒂小阴唇皮瓣再造阴道。以后,宋儒耀,张锡元(1963)又提出以游离植皮与阴唇瓣转移相结合的阴道再造术。

为了寻求理想的代阴道组织,1984年孙博等对15具30例女尸进行了阴唇瓣应用解剖学研究。他们的资料表明,大、小阴唇的动脉,主要来自阴部外浅动脉和阴唇后动脉100%,两者吻合成动脉弓,静脉与之伴行。阴唇后动脉发自阴部内动脉的会阴动脉。小阴唇内有阴唇后神经分支进入。自小阴唇内侧剖开小阴唇,使其形成包含有血管和神经蒂小阴唇轴型皮瓣,为阴道再造提供了既有良好血供,又具有感觉神经的组织。应用这种皮瓣行阴道再造是以往皮管及邻近任意皮瓣(大腿和外阴部皮瓣)法不可比拟的。诚然,其组织成活率大为提高。而且,再造阴道具有敏锐的感觉,更符合性生理的要求。但小阴唇发育较小者不宜采用。

自1981~1984年间,王显伦等报道,采用单纯阴唇皮瓣再造阴道8例,阴唇瓣加游离植皮再造33例,无一例失败。作者强调皮瓣血供可靠,成功率高,再造阴道感觉良好是该术式的主要优点。缺点是难免要破坏外阴形态,给患者增添心理负担。

采用皮瓣作为阴道壁衬里组织是阴道再造术又一次重要进展。这是以血管化组织(皮管,皮瓣均有血供)替代了羊膜,皮片和腹膜等游离组织,从而提高了手术成功率。

应用大腿,外阴部和阴唇皮瓣行阴道再造,尽管移植的组织具有一定的血供,除阴唇瓣外,其血供并非十分可靠, Irooes等报道,皮瓣常有坏死可能,手术仍不易成功。近年来,随着显微外科和显微解剖学的发展,不断发现具有知名血管的轴型皮瓣和岛状皮瓣,为阴道再造提供了新的途径。

陈宗基等于1986年报告一种新的阴道再造术,其法系应用

含有腹壁浅血管(以腹壁浅血管,也包含部分旋髂浅和阴部外浅血管的血供)及其分支的左腹壁皮下蒂皮瓣。经耻骨弓内侧壁隧道,转移至膀胱直肠间隙的人造腔穴,作为阴道壁的衬里,从而完成阴道再造。其法与以往手术比较,有独自的优点:(1)左腹壁皮下蒂皮瓣系包含有腹壁浅血管及其分支的轴型皮瓣,血供较可靠,皮瓣易成活,并发症少,术后医疗护理简单,住院时间短。(2)再造阴道柔软,洁净(肠段代阴道则有异味分泌物),有弹性,不致发生狭窄(游离植皮法则不然),外阴形态正常(阴唇瓣法难免要破坏外阴形态)。(3)不需带用阴道模具,避免由此所可能引起的并发症(羊膜移植,游离植皮法和腹膜代阴道术均需要长时间佩带阴道模具)。(4)腹壁供瓣区多可拉拢缝合,不需另行植皮。作者手术10例,皮瓣均100%成活,已婚者性生活双方都满意。

腹壁下动静脉蒂上腹部岛状皮瓣阴道再造术,系我们自1987年起,在腹壁应用解剖学研究的基础上设计以腹壁下动静脉为蒂,切取上腹部岛状皮瓣,于耻骨联合后转移至膀胱与直肠之间的人造腔穴内完成阴道再造。本法与陈宗基等提出的腹壁轴型皮下蒂皮瓣法比较,我们选择了血管十分恒定,口径粗(起始部血管外径为1.38mm),蒂长(蒂长约110.5mm)的腹壁下动脉为皮瓣的血供来源,皮瓣成活更为可靠,转移较方便(而杨东岳和Taylor报道腹壁浅和旋髂浅动脉经常缺如)。另外,在皮瓣切取方面,设计的皮瓣上缘另包含两个边长2~2.5cm的等边三角形皮瓣,皮瓣转移后,三角皮瓣插入阴道前庭部人字形切口内,使阴道外口环状直线缝合为曲线缝合,能够防止再造阴道外口环状狭窄。到目前为止,我们已应用本法再造阴道8例,效果良好,也同有再造阴道壁柔软,富有弹性,外阴形态正常,不需带用阴道模具以及供瓣区能够直接缝合等优点。

(蚌埠医学院附属医院整形外科熊世文撰)

### 不孕症与人工生殖

不孕症是指男女双方婚后或生育后,暴露在生育可能的情况下,2年或2年以上未妊娠者。生育可能的情况即同居,未避孕,未哺乳有正常性生活,没有任何损害生育能力的治疗和手术。不孕症的发生率世界各国、中国各地区有很大差别,一般认为1%~20%。这与不同地区、民族、种族的经济、文化、教育、卫生习惯等有关,同时也存在流行病学调查标准和方法问题。中国1990年统计的不孕症发生率的平均值为5%。

根据曾否有过受孕将不孕症分为原发不孕症,即从未受孕者,以及继发不孕,即既往曾有过妊娠(包括足月分娩、早产、流产和其他异常妊娠)继后2年或2年以上未再受孕者。此外,按不孕症能否纠正将其分为绝对不孕和相对不孕,前者指男女一方或双方有先天性缺陷或后天疾病所致的解剖生理异常且无法矫正者;后者指一方或双方因某种因素妨碍受孕,影响生育,但经过治疗可能改变者。

人类的受孕是一个极其复杂的生理过程,要完成这一过程需具备如下条件:(1)男方具有足够数量与活动力正常的成熟精子,并能到达女性的宫颈口处且通过宫颈上行至宫腔进入输卵管。(2)女方产生正常成熟卵子,自卵泡内排出,移入输卵管,与精子相遇结合成受精卵,受精卵顺利发育下行进入子宫腔,在适当的内膜条件下着床。上述的一种或几种因素的异常都将造成不孕。不孕症的夫妇中,由男方或女方的因素而导致不孕的发生率各占50%。

男性不孕的病因有:一般因素如过度劳累、吸烟、酗酒、中毒、过度肥胖、营养不良;精神因素造成的阳痿、早泄;内分泌因素包括垂体、甲状腺功能不全;先天畸形如隐睾、尿道下裂、输精管、副睾畸形;生殖器官后天疾患:前列腺炎、精索静脉曲张、精子透明质酸酶缺乏。总之男性不孕的病因无非是精子产生异常、精子输送通道阻塞或精子不能正常排入女性生殖道内。

女性不孕的病因有:一般因素如年龄过大、肥胖、营养不良、维生素缺乏、精神焦虑紧张、吸烟、酗酒、吸毒等;内分泌功能异常是女性不孕的重要原因之一,由于下丘脑-垂体-卵巢轴功能的失调导致无排卵或排卵后黄体功能不正常。此外肾上腺皮

质、甲状腺和胰腺的功能失调也可造成排卵障碍。发育异常包括先天性生殖系统发育不全、畸形、性染色体异常如 45, XO、Turner 氏综合症, 举女性化。在生殖器炎症中输卵管炎症引起的输卵管堵塞是不孕症的最重要的病因。此外, 生殖器肿瘤、子宫内膜异位症, 外伤疤痕, 刮宫过重均为不孕症的原因。

免疫不孕是涉及到男女双方的问题。正常情况下精子受血-屏障的保护而没有抗原性, 但这一屏障一经破坏精子即可成为抗原在男方激起自身免疫反应, 也可在女方激起同种异体免疫反应, 从而导致不孕。

不孕症的诊断和检查包括男女双方全面的系统的检查步骤。男性方面除病史、体检外, 重点是精液的分析 and 性功能的检查。精液检查内容有精液量、酸碱度、精子数、精子活动力、精子形态等。女性方面包括病史、体检、盆腔检查、基础体温测量、子宫内膜活检、输卵管通畅检查(通液、B 超-双氧水通液、造影)、内窥镜检查(宫腔镜、腹腔镜)、内分泌方面的检查、免疫学检查(精子抗体检查、性交试验、精子穿透力试验及宫颈粘液检查)、染色体检查。

不孕症的治疗原则是针对男女双方的病因进行的。内容有进行性知识的教育, 改善不良的卫生、生活习惯, 适当安排性生活, 加强营养纠正营养不良等。内分泌治疗促排卵, 生殖器疾病治疗, 发育异常的手术治疗。近年来, 用于不孕症的还有不断兴起且发展迅速的诸多助孕技术, 如人工授精, 体外授精-胚胎移植, 配子输卵管内、宫腔内移植等。

人工授精(AIH): AIH 是将经过处理的精液或原液以人工的方法注入女性阴道、宫颈管内或宫腔内的技术。是治疗不孕症的重要方法之一。适应症有精液异常(少精、弱精、精液容量过少及精液不液化), 男性功能障碍(阳痿、早泄)及性器官器质性病变(精道阻塞、尿道下裂、逆行射精)。对于女性宫颈解剖异常, 宫颈粘液异常及不明原因的不孕症也有治疗价值。在人工授精之前要预测排卵日期, 根据基础体温、超声检查、宫颈粘液检查了解卵泡发育情况和排卵时机。采用新鲜精液的病例, 于授精当日用按摩法采集精液, 精液液化后行常规检查备用。国内外多采用经处理的提纯精子悬液, 以获得数量充足、活动力强、正常形态的精子, 比用原精液更接近生理状况。亦有冷冻精子者。授精时要对受者的外阴、阴道、宫颈进行消毒, 然后将精子注入阴道、宫内或宫腔内。术后臀部抬高静卧 20~30min, 以后要自由活动。一般每个病人每月授精 3 次, 时间分别为排卵前 72h、24h 和排卵后的 24h。

体外授精-胚胎移植(IVF-ET) 1978 年 7 月 25 日人类第 1 个“试管婴儿”Louise Brown 在英国剑桥诞生, 这是 Ednards 等潜心研究近 20 年的结果。澳大利亚墨尔本 Monash, 美国的 Norfolk 等在这一研究中也居领先地位。中国台湾省 1985 年首例“试管婴儿”获得成功, 国内这项工作是国家“七五”计划的攻关项目, 北京医科大学生殖工程组于 1984 年末进行此项研究, 1988 年 3 月 10 日国内第 1 个试管婴儿诞生。

IVF-ET 的适应症: 输卵管病变、子宫内膜异位症(经药物或手术治疗后仍不能受孕或病灶严重者)、男性少精、精子无活动力、免疫不孕、不明原因的不孕症、遗传缺陷(采用正常人提供的卵子或精子)。

“试管婴儿”的成功培育有以下 5 个步骤: (1) 成熟卵子的获取。目前多数 IVF 中心采用 FSH、CC、HCG、HMG 等激素联合使用诱导超排卵的方法获得成熟卵子, 但也有个别中心选择性采用自然排卵的卵子。对于月经周期中的卵子发育情况监测主要是以激素测定和超声检查两种方法进行。取卵的方法有剖腹取卵、腹腔镜下取卵, 以及在超声指导下经腹、膀胱穿刺, 经尿道膀胱穿刺或经阴道穿刺取卵, 后者是目前被广泛采用的方法。(2) 精子体外获能。新鲜精液或冷冻精子液化后, 取经“上游”法或“洗涤”法处理后的悬液在人工培养液中培养, 在模拟的体内环境中获能。(3) 卵子的孵化和体外授精。取出的卵细胞立即观察其成熟情况, 根据其成熟度决定孵化的时间, 成熟卵经培养 2~8 小时受

精效果最佳。然后以经获能处理的精子按  $0.5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$  与一个卵细胞的比例进行体外授精, 现期较常采用的是 Earle 氏和 Hams-F10 培养基。(4) 受精后的观察和胚胎移植。第 1 次观察是在受精卵培养后的 12~16h, 主要了解原核形成和第 2 极体排出, 因为多精子的受精可在此时发现, 而多精子受精卵是不宜做移植的。第 2 次观察在第 3 天, 以判断分裂情况和决定移植胚胎。早期人们在 8~16 细胞期时进行移植, 但由于胚胎在体外条件下生长分裂速度较体内慢, 培养时间越长, 与子宫内膜不同步的状况就越明显, 同时受外环境的不利影响也愈大。因而目前专家们主张 2~4 细胞期即行胚胎的移植, 这样可避免上述问题, 提高妊娠率。一般认为移植至子宫腔内的胚胎愈多, 妊娠率也愈高, 但多胎发生率也增加, 现今人们一次植入的胚胎数大多为 1~3 个。(5) 胚胎移植后的观察和处理。胚胎移植后的受者要绝对卧床数小时, 然后控制活动 1~2d, 自移植日起补充孕酮或 hCG, 术后第 10 天开始测 hCG 水平, 以早期确定是否妊娠, 继后以超声观察胚囊的形成, 胚胎的生长及胎心搏动, 是否多胎妊娠等。

经典的 IVF-ET 只能被看作是“第 1 代试管婴儿”, 第 2 代将是更为优生的, 先是用显微外科的注射技术将精子注入卵细胞内, 然后把受精卵或早期的胚胎移入子宫腔内。当然真正的“试管婴儿”应当设计出一个完全可以替代子宫的人工容器, 使受精与胚胎发育均在人工的环境中进行, 但目前世界上的研究距此还有很大的差距。

配子输卵管内移植(GIFT): GIFT 是由 IVF 方法派生出来的另一个新的生殖生物学的课题。它是将加工处理后的精子、卵子直接输入正常的受精部位-输卵管壶腹部的一种技术。这一方法的优点在于精子和卵子可以按正常的生殖生理过程在输卵管壶腹部相遇受精而后运行到宫腔着床, 受孕率大大高于 IVF。这一方法对于精子和卵子的前期处理也较 IVF 简单, 采卵和移植可一次完成, 患者痛苦小。1984 年 Asch 等首次报告 GIFT 技术的成功, 中国张丽珠 1988 年报告 GIFT 妊娠成功。GIFT 的适应症有: 精子异常、逆行射精、子宫内膜异位症、排卵障碍、未破裂卵泡黄素化综合症、输卵管显微外科术后, 免疫不孕及不明原因的不孕。GIFT 的内容包括促卵子成熟及采集, 精液的制备(同 IVF)和精子、卵子输卵管内移植。移植和采卵手术可剖腹进行或在腹腔镜下进行, 然后自输卵管隙间插管, 将成熟卵子 1~3 个和精子缓慢注入输卵管壶腹部内, 确认无逆流后拔管。术后与 IVF 同样需应用孕酮或 hCG, 以 hCG 和超声进行是否受孕的监测。GIFT 虽然被认为是治疗不孕症的“一大飞跃”, 但还存在着尚需解决的很多问题, 如多胎妊娠, 适当时机采卵, 减少异位妊娠等。

为了使 IVF 衍生技术向临床实用型发展, 学者们又提出了配子宫腔内移植技术。1992 年苏应亮已报告此技术临床应用成功。与 GIFT 相比它不需复杂的腹腔镜技术, 不只限于输卵管通畅的患者; 与 IVF 相比它则免除了精致、繁琐的体外培养技术。这一技术的成功表明, 宫腔亦是卵子成熟受精及早期胚胎发展的良好场所, 这一过程不是人类输卵管受孕的生理过程的模拟, 从这个意义上来说配子宫腔内移植是对人类生殖奥秘和生殖途径的进一步认识和探索。

(安徽医科大学第一附属医院丛林撰)

**围产医学** perinatal medicine 又称围生期医学。一般是指孕满 28 周产后不满 7d 的, 这个阶段的孕妇保健、胎儿生长发育、分娩及新生儿的喂养护理医学。主要由产科医学和儿科医学中的一个分支——新生儿学两者相结合而成, 也涉及很多相关专业。人类生命统计分析表明, 婴儿期死亡占人口死亡的首位, 新生儿期死亡又占婴儿期死亡的 60%~70%, 生后 1 周内死亡又占新生儿死亡的一半以上, 宫内胎儿死亡及产时死胎又是 1 周内新生儿死亡的 2 倍。所以人口死亡大部分是集中在围产胎儿及围产新生儿。因此要降低人口死亡率, 提高人口素质必须抓住这生命开始的阶段, 同时围生期死亡率可反映一个国家的经济文化、医药卫生水平。

在世界范围内,围产医学的进展异常迅速,20世纪30~40年代,新生儿才由产科及儿科医疗护理,应用早产儿暖箱及专门照顾;50年代,新生儿学从儿科中专门独立出来;60年代,是胎儿医学建立和发展的年代,建立了一系列宫内诊断方法,胎儿疾病的诊治有了很大发展;70年代,是围产医学建立及发展的年代,在发达国家相继建立了新生儿监护中心及转运系统,使孕产妇保健、胎儿保健及新生儿保健达到一个新的水平。

围产医学在我国起步较迟,但发展很快。1977年在中国上海、北京成立了新生儿协作组,1979年10月在南京召开第1次全国围产新生儿学术会议,成立23个省市区协作网,各地进行了大量工作,其中开展围产胎几方面的保健及研究较多,并引进国外先进技术及仪器。1983年10月在北京召开了欧洲—中国围产监测商讨论会,上海、苏州、北京(顺义)都介绍围产保健工作的组织及经验。目前中国围产儿的死亡率居世界中等水平,1980年19个省市统计为20.49%,在世界范围内为12.4%~30.0%。

围产医学大体上可分为两大部分,一是围产产科学(围产胎几),从受精后一直到整个妊娠及分娩,重点是胎儿保健及分娩过程保健,建立了以母子共同为主体的围产保健体系;二是围产新生儿,即新生儿早期,从出生至生后不满7d。从胎儿到新生儿出现环境巨变,能否适应,还取决于孕龄,未成熟者要求条件高,尽管设备能满足或接近宫内生活条件,但总不如宫内的自然调节;出生过晚或过熟儿有多种功能不全,亦要求高于足月儿的护理保健。因此努力提高高危妊娠及高危儿的医疗保健是围产医学的重点之一。

孕产妇的保健重点在于高危妊娠的识别及管理。通过生化、放射免疫、超声、电子仪器等先进技术对胎盘功能,胎儿胎盘功能,胎儿宫内发育及宫内储备力的监测,对胎儿疾病的宫内诊断及治疗,都取得了可喜的成就。1821年J. Alexandre首次描述用听诊方法可以听到胎心以后,第1次使产科医师与胎儿发生了联系,到1850年听诊胎心法广泛应用于产科;1906年Grana第1次从母腹部取得胎儿心电图;1958年Hon设计了电子胎心监护仪,并可记录胎心;1972年Freeman将电子胎心监护仪广泛地应用于产科临床,对胎心图形做了大量的分析研究工作,提高了对胎儿宫内缺氧的诊断能力,并广泛用于高危孕产妇的监测。1958年Donald将超声波引进产科,随着超声技术的发展,实时显相扇扫等超声仪不仅可以清楚地看到宫内胎儿、胎盘、羊水、脐带等图象,还可观察动态变化,并可录像。不仅可以应用于胎儿宫内发育、宫内缺氧、先天性畸形诊断,还可作羊水穿刺、宫内输血等宫内操作技术,到1980年止,超声波不能诊断的先天畸形只占7%。羊水诊断技术,绒毛活检、胎儿镜检查,胎儿生死的监测——头皮血气分析,孕妇血清酶、激素及尿中激素测定,都广泛地应用于临床,对胎儿的先天性缺陷及胎儿疾病的宫内治疗,有可能均变成了现实。

围产保健的另一面是围产保健的产科协作网的建立,一般分为3级保健网:1级为基层医疗机构,能处理正常的妊娠及分娩,能识别高危产妇,及时会诊并及时转往上一级医院;2级医疗机构,相当于区县医院,能处理正常分娩及大部分并发症,有必要的监护设备及人员,向3级机构转送自己无法处理的病人;3级医疗机构,相当于省市级医院或围产中心,有完整的高危孕产妇及胎婴儿的重点监护设备和人力,能解决疑难病例医护及会诊,并负责培养1、2级医疗机构人员。建立孕产妇管理卡,又作为3级保健联系卡。建立健全有效的转运系统,要保证在15~30min内病人能到达转运目的地,并提倡宫内转运,对降低围产儿死亡率更为有效。

围产新生儿,是儿科领域中独特的阶段,在此时期,无论是生理、病理、疾病的表现,还是疾病的诊断及防治均明显不同于其他年龄段,是死亡率最高的阶段。50年代新生儿感染性疾病发生率很高,对母婴血型不合溶血症也缺乏预防措施;60年代后,感染性疾病逐渐减少,西方国家建立起新生儿急救中心,进行心肺监测;在70年代母婴血型不合溶血症得到预防,对呼吸窘迫综合

证(RDS)进行了呼吸管理,开发微量血化检和先天性代谢性疾病筛查,如甲状腺功能低下,苯丙酮酸尿症,半乳糖血症以及先天性髓异常,等等。并建立起遗传咨询;80年代发达国家普遍建立起新生儿急救中心和转运系统,监测系统日趋完善。在整个环节中,特别重视早产儿的护理与治疗,重视危重新生儿监护,不仅大大降低了死亡率,又减少了存活低体重儿的神经系统后遗症。

中国从1978年以来,各地相继开办了新生儿学习班,培养了大批专业人员,建立起专业队伍,同产科一起相继开展了各种监测,如胎盘功能、胎儿成熟度及储备力、先天异常的宫内诊断、新生儿遗传代谢病筛查,引进各种监护设备,建立新生儿监护中心,围产医学专著不断发行,大大提高了中国围产医学的发展速度,降低了围产儿死亡率。

围产医学是新发展起来的新学科,尽管取得了很大成就,但很多研究还处在初级阶段,有些问题还在讨论之中。在中国要深入研究产前胎儿发育,宫内感染,早产儿智力发育,新生儿呼吸及休克的诊治,降低围产死亡率,重点应放在哪一组新生儿——低出生体重儿还是正常体重儿,如何做好产科及新生儿科或新生儿组的密切协作问题。积极宣传及普及3级保健网,做到新法接生,母乳喂养,做到人口低出生、低死亡、低增长,优生优育。在发达国家,对广泛应用胎心监护,是否增加了许多不必要的剖腹产?对于救治成功的低出生体重儿智力发育估测,尽可能减少智残发生。

(安徽医科大学附院儿科杨正修教授撰;朱子杨审)

### 早孕因子研究进展

早孕因子(EPF)是孕卵着床前到妊娠中期存在于孕母及胎生动物血清中的具有免疫调节活性的多肽,是卵受精后最早出现的与妊娠有关的物质。检测血清中的EPF可作为着床前超早孕诊断的独特指标,并可区分不育原因是由于胚胎植入障碍还是卵子根本未能受精,判断体外受精的胚胎移植成活率,预测死胎及先兆流产,进而为抗早孕避孕药的使用提供最早期的检测诊断指标等。EPF研究对计划生育临床、优生优育、试管婴儿、产科病理以及珍稀动物繁殖和选种等领域有重大意义。

EPF一词最早出现于70年代中期文献中,而最先对其进行全面研究的是澳大利亚昆士兰大学摩顿(H. Morton)。1974年,摩顿等为寻找天然的移植免疫模型,在抗淋巴细胞血清的玫瑰花结抑制实验(Ea-RIT)中发现早孕小鼠血清中存在一种能增强ALS花结抑制活性的因子,即EPF,进一步研究后发现,EPF存在于人和多种胎生动物早孕期血清中,小鼠交配后6h、兔交配后16h,大鼠、绵羊、牛、猪交配后24h,人受精后48h即可测出EPF,远早于HCG的测出时间。妊娠母体和动物体内EPF持续存在的时间虽不相同,但分娩或人工流产后及难产流产前孕妇血清中EPF迅速下降或消失,并且在滋养细胞肿瘤和睾丸生殖细胞肿瘤病人血清中亦可测出EPF样活性。由此在世界范围内引起许多学者的极大兴趣,澳大利亚、日本、美国、德国、印度和中国等国的学者曾发表了许多关于EPF的生化、免疫特性的报道,但将EPF制成单克隆抗体的只有澳大利亚和中国。摩顿于1986年获EPF单克隆抗体研究专利,继之于1988年获使用EPF单抗终止动物妊娠实验专利,1990年摩顿报道肿瘤细胞及传代细胞的分裂增殖有赖于EPF,抗EPF单克隆抗体可干扰和杀伤肿瘤细胞。国内对EPF的研究始于1986年。1987年,郑振群首先在国外报道了国人孕妇血清中存在EPF。苏宝田等于1986年起对EPF的生化免疫学特性等进行了一系列研究,从早孕妇女血清中提取并纯化了EPF,制备了兔和鼠抗人EPF抗血清,于1991年制备成功4株抗EPF单克隆抗体杂交瘤细胞株。

EPF可耐受56℃的温度,72℃时则失活,无动物种属和品系特异性,但人和各种动物的EPF分子量不同,小鼠的EPF为21 000,PI=6.83;孕猪的EPF有450 000、250 000、90 000、45 000、20 000等多种;孕牛的EPF有70 000和80 000两种;孕3~8周的母羊血清中可区分出分子量为20 000和67 000两种

多肽;人的EPF分子量因标本来源不同及所用的提取步骤和仪器不同而各异,因而所报道的分子量也稍有差异。不同学者报道的人EPF分子量有21 500,PI=6.5;19 000,3 800,57 500,PI=6.45及8.2;21 000,24 000等,其氨基酸序列与胰蛋白酶抑制剂近似。1991年,K.F. Tonissen等应用基因组克隆分析法,发现妊娠血清中EPF活性的主要成分是硫氧还蛋白(Trx);人的Trx基因为13Kb,含有5个外显子编码顺序组成的蛋白质,分子量为12 000,表明对EPF生化特性的研究已深入至分子水平。

EPF在体内的来源迄今仍未能完全阐明,目前的研究认为主要有3方面:母源性的(m-EPF)、胎源性的(f-EPF)及肿瘤源性的(t-EPF)。m-EPF在植入前期及围植入期(peri-implantation)时产生,由EPF-A和EPF-B两种成分组成;EPF-A是雌激素依赖性的,由输卵管产生,在人和多种动物排卵期中可发现其前体,它的存在与受精和妊娠无关,EPF-B则是妊娠依赖性的,是妊娠开始时卵巢受到卵因子(EPF-B释放因子)的刺激而产生,卵细胞从被精子穿透开始释放卵因子并持续到囊胚形成。1991年,A.C. Cavanagh等发现卵巢是唯一产生活性EPF的器官,但卵巢的活性受输卵管产生的抑制物质的调控;m-EPF的两种组成成分实际上是EPF和一个或数个抑制剂综合而成;抑制成分受激素调节,可能是一个重要的EPF生物调节剂;随着妊娠时间的延长,m-EPF发生变化,但起变化的不是活性成分而是抑制成分。f-EPF产生于植入期并持续到妊娠中期,仅有一个活性成分。1986年,C. Orozco等给未孕成年雌鼠注射合成的血小板活化因子(PAF),1h后从小鼠血中测出EPF活性;应用PAF拮抗剂则此作用消失。1990年,王家骥等发现在孕妇血清和受精卵培养液中引起EPF活性表达的物质不是同类物质,氯仿能去除小鼠受精卵培养上清液中的EPF活性,但不能消除孕妇血清中的EPF活性。提示着床前胚胎释放的胎源性血小板活化因子(EDPAF)等脂类物质可能是引发生血清EPF的动因。1987年和1989年,F.M. Clarke和胡承阅等从羊胎盘组织浸出液及早孕妇女绒毛组织体外培养上清液中测出EPF活性,说明着床后血清中EPF来自绒毛组织。但至今对EDPAF与EPF之间的内在联系以及确切的作用环节尚不清楚。t-EPF存在于滋养细胞和睾丸生殖细胞等肿瘤病人血清中。1986年,H. Morton等从人绒毛癌细胞株Bewo培养上清液中提取t-EPF,并以此为抗原制备了抗人EPF单克隆抗体。1987年和1990年,A.R. Mehta和苏宝田等从绒毛患者血清中分离提取了t-EPF。其他学者陆续在非生殖细胞起源的肿瘤病人(乳腺癌、黑色素瘤等)血清中,在人膀胱癌、人T淋巴细胞白血病细胞株、牛肾细胞株等条件培养上清液中均测出EPF样活性。K.A. Quinn等认为t-EPF是调节培养的肿瘤细胞和传代细胞株生长分化的产物,体外肿瘤细胞及传代细胞株的持续生长有赖于EPF的存在。研究发现,无论何种来源的EPF都具有类似的分子构型和相似的玫瑰花结抑制活性及免疫交叉反应,但它们在某些生化特性方面则存在差异,如f-EPF和t-EPF虽有m-EPF相应的组分,但不能像m-EPF一样被40%的氯化胺分离沉淀,m-EPF可与大分子载体蛋白质结合存在于循环血液中,而f-EPF和t-EPF则不能和蛋白质载体结合。

EPF在妊娠过程中的作用主要表现在以下两方面:第一,表现在调节胎母免疫反应和保护胎儿不被免疫排斥中起重要作用。1975年,H. Morton等首先发现EPF在体外具有增强ALS抑制玫瑰花结形成的能力;但EPF本身并不能直接影响玫瑰花结的形成,而是先与某些淋巴细胞结合产生抑制因子,协同ALS的花结发挥抑制效应。1988年,B.E. Rolfe等证实EPF可引起淋巴细胞产生抑制因子,后者可预防母体对发育中的胚胎起免疫排斥作用。1986年,R. Roy等发现EPF能抑制混合淋巴细胞反应(MLR)的识别相。1987年,张丽凤等进一步证明EPF的花结效应有赖于CD<sub>4</sub>阳性细胞。1991年,邓松华和王敏华等分别证明EPF及t-EPF能抑制Con A诱导的脾淋巴细胞增殖反应。1990年,王敏华等以MTT比色法证明t-EPF在体外能抑制小鼠T<sub>H</sub>

淋巴细胞合成和分泌IL<sub>2</sub>。已知IL<sub>2</sub>可导致小鼠流产,因而推测早期妊娠母体通过EPF抑制IL<sub>2</sub>的合成与分泌及蜕膜组织合成分泌的PGE<sub>2</sub>协同作用于孕母体内的局部免疫调节机制。EPF的第2个表现是作为“生长因子”发挥作用。1990年,K.A. Quinn等证实植入期的胚胎细胞、肿瘤细胞、转化细胞均可产生EPF。胚胎、肿瘤的生长、存活均需要EPF。1989年,S. Athanasas-Polatsis等分别在小鼠性交后第32、36h应用抗EPF单克隆IgG被动免疫小鼠,或分别在性交后第8、16、32、46h用抗EPF多克隆抗体免疫小鼠,发现胚胎发育终止。1991年,他进一步证实给怀孕第3d的小鼠以抗EPF IgG及IgM,两组小鼠分别有54%和25%的二细胞期胚胎不能发育成四细胞期,并且证实这一作用是间接的。

已知药物等有害物质导致胎儿致畸的敏感期大多在受孕后12~56d,因此,超早孕诊断具有重要意义;而目前临床应用的hCG早早孕诊断下等最早需在月经过期后7~15d才能作出诊断,因此EPF的着床前超早孕诊断为孕妇优生提供了可能。EPF的检测亦可用于观察避孕药的早期疗效。1991年,Straub W.给42名妇女使用RU486,7d后全部妇女血清EPF阴性,而此时孕妇血中β-hCG和孕酮却未见突然下降。进一步研究证实,EPF诊断流产早于hCG孕酮,甚至早于超声波的诊断。在检测体外受精试管婴儿成活率方面:1988年,F. Nahhas检测体外受精怀孕妇女后发现胚胎转输第6天妇女血清即可测出EPF活性;中村幸雄等认为,将体外受精卵植入母体后,若迟迟不能测出EPF,则说明植入的胚胎已流产。在鉴别诊断恶性肿瘤方面:1989年,A.R. Mehta和王敏华等分别提出EPF的测定可作为葡萄胎、恶葡及绒癌的鉴别诊断指标。1990年,王敏华等检测葡萄胎、恶葡及绒癌患者治疗前后血清EPF的变化,发现葡萄胎患者治疗前后EPF均为阴性,而后两种患者治疗前EPF阳性,治疗后开始转阴。EPF的研究成果还为寻找干扰肿瘤生长及抗着床避孕的研究工作开辟了新的途径。1991年,K.A. Quinn等将抗人EPF单克隆抗体加入培养有鼠黑色素瘤及鼠纤维肌瘤的培养液中,发现随着抗EPF抗体浓度的递增,细胞分裂抑制率提高细胞死亡数增加;将抗EPF单克隆抗体注入受精后着床前的孕鼠腹腔,可使胚胎着床数及产仔数明显下降。

近年来国内外对EPT的研究进展虽然较快,但在理论上如EPF的产生来源及部位、化学结构式、EPF的免疫调节机理及其进一步的临床应用均有待深入研究;目前的EPF检测方法仍大多采用花结抑制试验,操作繁琐,试验流程较长,条件不易控制,难以广泛应用于临床,因而设计更为简便的检测方法是当前急需解决的课题。EPF的检测应用于畜牧业(如奶牛等)及珍稀动物(如熊猫等)的繁殖育种等领域已引起国内外的关注,但有待于进一步开发与研究。

#### 参考文献

- 1 Morton H. et al. Lancet, 1977, 1, 394~397
- 2 Orozco C. et al. Platelet-activating factor induces the expression of early pregnancy factor activity in female mice.
- 3 Mehta A R. et al. AJRIM, 1987, 14, 67~69
- 4 苏宝田,等. 免疫学杂志, 1988, 4, 262~264
- 5 Rolfe B E. et al. Clin Exp Immunol., 1988, 73, 219~225
- 6 Mehta A R. et al. J Biol Chem., 1989, 264, 2266~2271
- 7 Quinn K A. et al. Clin Exp Immunol., 1990, 80, 100~108
- 8 Athanasas-Platsis S, et al. J Reprod Fert., 1991, 92, 443~451
- 9 Tonissen K F. Gene., 1991, 102, 221~228
- 10 Cavanagh A C. et al. J Reprod Fert., 199, 91, 239~248

(安徽医科大学王家骥副教授撰,苏宝田审)

**妊娠高血压综合征** pregnancy induced hypertension  
指在妊娠20周后、产程中或产后48h内出现的高血压、蛋白尿、浮肿症候群。当高血压与蛋白尿共存时为先兆子痫,发生抽搐则



为子痫。它是引起孕产妇死亡的四大原因之一,约有15%~40%的孕产妇死亡直接与妊娠高血压有关;它也是引起胎儿围产期死亡率高的原因之一,约30%的胎儿因母亲患子痫而死亡。世界卫生组织已确认它是世界性的重要疾病,需积极地预防、治疗。

早在19世纪末德国学者就对子痫做了记载。1939年Barnhart的记载中提到,在古代中国、埃及、希腊及印度的医学文献中均有关于子痫的描述。上述事实表明,人们对本病已有长久的认识。随着医学的发展,又在很大程度上降低孕产妇死亡率及病率。过去很长时期内本病被称“妊娠中毒症”,但由于始终未能证实在这类孕妇的血中有“毒素”存在,因此现称为“妊娠高血压综合征”。对于它的发病原因虽然在子宫缺血、免疫、前列腺素及弥漫性血管内凝血等方面都作了大量的研究,但至今未能明确真正的发生原因。多年来在对其病理生理、临床诊断及治疗、孕产期及分娩的正确处理等方面的研究都取得了很大的进展。

妊娠高血压综合征的孕妇,早期可出现水肿,体重迅速增加,随着疾病的进展可出现高血压及蛋白尿,甚至有头痛、上腹痛、视力障碍、呕吐等症状及反射亢进的体征。当有以下任何一项或几项存在时,表明疾病已发展为严重的先兆子痫:(1)收缩压 $\geq 21.3$ kPa,(2)舒张压 $\geq 14.7$ kPa,(3)肝酶水平升高/或黄疸,(4)血小板 $< 10^{11}/L$ ,(5)尿量 $< 400$ ml/24h,(6)尿蛋白总量 $> 3$ g/L或随机标本检查++++,(7)上腹疼痛,(8)严重头痛及视力障碍,(9)视网膜出血,(10)肺水肿,(11)昏迷。

本病的分类一直未有统一标准。1989年世界卫生组织的合作研究中提出以下的分类标准:(1)妊娠高血压:间隔4h以上,连续2次舒张压 $\geq 12$ kPa,但无明显的蛋白尿( $< 0.3$ g/L);(2)未分类的妊娠期高血压:在妊娠期首次发生高血压,这些患者中可能有肾病或慢性高血压,若产后血压恢复正常,则为妊娠高血压;(3)妊娠期蛋白尿:尿蛋白 $> 0.3$ g/L;(4)先兆子痫:高血压及明显的蛋白尿;(5)子痫:发生抽搐;(6)潜在性高血压或肾病;(7)原有明确的高血压或肾病(8)在原有高血压或肾病的基础上附加妊娠高血压综合征。

本病的发生率在世界各地有所不同,以医院为基础的研究中约在0.51%~38.4%之间。以地理人口为基础的研究中,以舒张压 $\geq 12$ kPa计,在古巴为21.5%(1973),在英国为28.8%(1958)及27.2%(1970)。1987年世界卫生组织报告,在中国、泰国、缅甸、越南,其高血压、先兆子痫及子痫的发生率分别为4.7%~33.3%、0.4%~49%及0.4%~7.1%。

本病易发生于年青的及年龄较大的初产妇,有家族发生的倾向,与隐性基因遗传有关,也与种族有关,如在中国、印度相对发病率较高,有多胎、葡萄胎、胎儿水肿等胎盘过度增生的情况下,发生率均较高。饮食、体力活动、环境因素、社会经济因素不直接与发病有关,但在一定程度上可影响病患的严重程度。

本病可引起全身病理生理改变,常伴有血容量减少,循环外周阻力增大,使各器官供血减少,尤其是胎盘及肾脏血流减少更明显,从而影响胎儿生长及肾脏功能,同时肝脏、血液系统等都可有异常表现。

当间隔4h以上连续2次血压升高 $\geq 18/12$ kPa时,或血压较原基础血压升高 $\geq 4/2$ kPa时,则可诊断为妊娠高血压;若同时伴有尿蛋白(+)或定量 $> 0.3$ g/L时,则可诊断为先兆子痫,常伴有体重增加过速( $> 0.5$ kg/周)。由于本病病因尚不清,因此预防有困难,但早期诊断及治疗可减轻疾病的严重性。翻转试验可用于预测妊娠高血压综合征的发生。当孕妇在安静状态下从侧卧改为平卧后,若舒张压上升 $\geq 2.6$ kPa为试验阳性,700多例的研究资料表明,试验阳性的孕妇中,今后可发生妊娠高血压综合征者占76%,本而试验阴性者以后的血压在正常范围者占92%。此外,血管紧张素I(AT I)试验亦可预告本病的发生,若静脉输入AT I $\leq 8$ ng/kg后,舒张压上升 $\geq 2.6$ kPa者为试验阳性。试验阴性者中,95%的孕妇以后血压均正常。对上述试验阳性者应密切随诊。对已有妊娠高血压综合征的孕妇,要定期监测血压、眼底、肾、肝功能、血球比积、血小板计数,定期进行尿蛋白定性及

定时分析,并注意尿量以估计疾病的严重性,并密切注意并发症的发生。严重威胁母儿健康的并发症有子痫、胎盘早期剥离、心力衰竭、肺水肿、肾功能衰竭、肝功能衰竭。一种罕见的HELLP综合症,即有溶血性贫血、肝酶升高及血小板减少等情况,也可发生于严重的妊娠高血压综合症的孕妇身上。由于本病可引起胎盘灌注血流减少,引起胎儿宫内缺氧,造成胎儿宫内生长迟缓甚至死亡,因此加强对胎儿监测也十分重要,需定期检查孕妇的体重、宫高、腹围的增长、胎动计数,定期进行B超声检查,了解胎儿的生长及活动情况,做胎心监护等。

重症妊娠高血压综合征的治疗主要按以下三大原则:解痉预防或控制抽搐;降压防止血压过高引起的并发症,如脑出血等;终止妊娠是根治本病的方法。在解痉治疗方面目前主要用硫酸镁。由于镁离子作用于神经-肌肉接头部位,抑制乙酰胆碱释放而预防或控制抽搐。首次剂量是4g硫酸镁加10%葡萄糖20ml稀释后缓慢静脉推注,使体内的血镁浓度迅速提高达到治疗水平,接着需要给维持剂量的硫酸镁,通常以每小时1g的量维持,或从静脉点滴或肌肉注射给药,取决于病人的血球比积及浮肿情况。该药90%以上均由尿排出,用药时需注意尿量的多少。当药物过量时可引起镁中毒,首先表现为镁离子对腱反射的抑制,严重时即可抑制呼吸,因此有以下情况需停药:(1)腱反射消失;(2)24h尿量 $< 600$ ml,或每小时尿量 $< 25$ ml;(3)呼吸 $\leq 16$ 次/min。硫酸镁过量时可用10%葡萄糖酸钙10ml静脉推注,时间不得少于10min。一般情况下,首次24h内用量可达28g。用药期间能监测血镁浓度更为安全,该药对胎儿无明显毒副作用,用药时病人清醒,是应用较多的解痉药物,安定是常用的镇静药物,它作用快,效果也很好,亦广泛用于预防及控制抽搐,可以用安定10mg静脉推注,在2min内完成。安定可通过胎盘对新生儿呼吸及肌张力有一定的抑制作用,需要注意。此外,冬眠合剂也是常用于解痉的药物,常用冬眠I号(杜冷丁100mg、非那更50mg、氯丙嗪50mg合剂)1/3~1/2剂量,静脉推注或肌肉注射,每4~6h1次。用药时需注意血压、呼吸及意识状态。在降压药的选择方面以解舒张压为主,而对收缩压影响较小的药物较为适用。最常用的肼苯达嗪,此药主要是通过解除小动脉平滑肌的痉挛达到降压的作用,能很好地降低舒张压。适用于妊高征的患者。舒张压 $\geq 14.7$ kPa的可静脉用药。静脉注射时首次剂量用5mg,以生理盐水20ml稀释后缓慢静脉推注,用药后每5min测量1次血压,若用药后20min血压仍不降,患者无明显不适,再次用量可用10mg,当舒张压降至12kPa时,则停止静脉用药。其它常用的降压药还有甲基多巴、口服肼苯达嗪、心痛定、前列腺素等。妊娠高血压综合征的根治方法是终止妊娠。终止妊娠的时间、方式取决于孕妇的孕周、宫颈条件、胎儿的大小及在宫内的状况。分娩时除要积极防止抽搐外,对新生儿要做好一切复苏的准备。产后24h仍可能发生子痫,需密切注意。此外,在本病的治疗中,对全身浮肿重、血球比积较低的患者,还可用利尿药物,但要注意利尿后血容量减少对胎儿的影响,并需注意防止电解质紊乱。对有血浓缩的患者,还可扩容治疗。

今后在妊娠高血压综合征的研究中,尚需积极探索其发病因素,以从根本上预防、治疗本病。在孕期连续服用小剂量阿司匹林,可以改变前列环素/血栓素A<sub>2</sub>的比值,这对妊娠高血压综合征引起的小血管痉挛,可起到一定的作用,是针对本病与前列腺素关系方面的探索。在免疫方面,关于胎盘抗原、组织相容性抗体、母儿血型的相容性、胎盘部位产生的阻断抗体等的研究,都将为发现妊娠高血压综合征的病因提供一定的依据。

#### 参考文献

- 1 世界卫生组织. 妊娠高血压. 北京:人民卫生出版社,1989,10:1~88
- 2 郑怀美,主编. 妇产科学(第3版). 北京:人民卫生出版社,1991,110~120
- 3 Baha M. Sibai, Management of Preeclampsia Clinics in Perinatology, 1991,18(4):793~809

(北京协和医院妇产科盖铭英教授撰)

**产前宫内诊断** 据某地区调查结果推测,估计中国有200多万例程度轻重不同的精神分裂症,约有100万以上先天缺陷(包括色盲、聋哑、先天性心脏病、唇腭裂等),150万不同程度的先天愚型患者,另外还有重、中度智能低下者400~500万左右。这个庞大数字给国家、社会和家庭造成的经济损失和精神、道义负担,加上患者本人生理、心理上所受的痛苦对人口素质及社会文明发展所构成的压力和副作用难以估价,说明产前宫内诊断的重要性及其深远的意义。

产前宫内诊断是近代医学的一项进展,也是围产医学中的一项重要内容。早在1882年德国有人考虑用羊膜穿刺来了解胎儿情况,并对羊水过多的孕妇放羊水。1919年第1次操作为羊水过多病人进行治疗性放羊水。1932年应用羊膜腔造影使胎儿表面描绘出来。1949年开始羊水染色体检查,诊断胎儿性别。1955年正式开始应用,以后测胆红素诊断母儿血型不合。1966年羊水细胞培养成功。1967年诊断胎儿D/D易位。1978年诊断第1例21-三体,并证明诊断准确。羊水内有酶,另外还可以从羊水检测出一些代谢性疾病。1971年美国成立了10个产前诊断中心,以后又发现羊水中有甲胎蛋白(AFP),可以帮助诊断神经管畸形。1954年首次用胎儿镜宫内诊断应用于临床。1970年首次用胎儿镜采取胎儿血和皮肤活检。1972年应用超声波发现无脑儿。1974~1979年发现很多疾病均可用超声波诊断,如软组织畸形等。与此同时临床应用线型导光镜。1979年应用绒毛作产前诊断。随着分子学技术的发展,对一些常见的代谢性遗传病可用杂交技术证实。

1. 产前诊断方法:目前有3种手段:(1)细胞遗传学手段:细胞,生化,分子杂交技术等;(2)生物化学手段:特殊蛋白质,代谢产物,酶活性等;(3)物理学诊断:超声显象,胎儿镜,X线,电子监护等。

2. 产前诊断的适应症:(1)可能出生染色体异常儿的孕妇,均应做产前诊断。①35岁以上的孕妇;②生过染色体异常儿的孕妇;③夫妇一方为染色体平衡易位或倒位携带者;④脆性X标记染色体携带者;⑤有不明原因的流产,死胎,死产和多发畸形儿史的孕妇;⑥妊娠早期接触明显致畸因素者。(2)生过开放性神经管缺陷儿的孕妇。可测定羊水AFP,胆碱脂酶,检查快速贴壁细胞。配合超声波、X线等进行诊断。(3)生过能进行产前诊断的先天性代谢病儿的孕妇。可测定羊水和羊水细胞生化成分,用基因连锁分析体细胞杂交及重组DNA技术等的前诊断。对不能进行产前诊断的性连锁遗传病,则需进行胎儿性别预测。(4)夫妇均为地中海贫血杂合子,或生过地中海贫血儿的孕妇。可取胎儿血,用珠蛋白合成分析法进行产前诊断,或取羊水绒毛细胞用重组DNA技术进行基因诊断。

3. 羊膜腔穿刺术:产前诊断的迅速发展与羊膜腔穿刺技术的应用密切相关。胎儿生活在羊水中,羊水内有胎儿的脱落细胞和代谢产物。培养羊水细胞进行染色体核型分析,可以了解胎儿有无染色体异常。测定羊水和羊水细胞的酶及其它生化成份,可以了解胎儿有无先天性代谢紊乱。还可通过测定胎儿性别,间接诊断性遗传性疾病,是产前诊断的重要方法,可于孕16~20周进行。用1根20~21号带蕊长针在无菌条件下经腹穿刺,抽出羊水。此时已有足够量的羊水(约200~400ml),胎儿相对较小,周围有较宽的羊水带不易伤及胎儿,且此时羊水中活细胞比例较多,易于培养。如发现胎儿有异常,终止妊娠也容易。

4. 绒毛组织活检产前诊断:绒毛滋养层细胞是受精卵有丝分裂的衍生物,能准确反应胎儿的遗传特性。妊娠6~8周取绒毛进行产前诊断,较检查羊水细胞有早期、简便、快速、准确等优点。尤其近年来已能用绒毛细胞直接制备染色体,是产前诊断技术的一大突破。目前不仅能用绒毛进行胎儿性别预测和染色体核型分析,而且也用于测定细胞内酶,进行代谢病产前诊断和提取DNA作血红蛋白分子病产前诊断。安全、准确的获取绒毛组织,

是诊断顺利的关键。目前倾向于在超声显像指引下用金属管或塑料管吸取绒毛。绒毛活检产前诊断,受到国内外普遍重视,正逐渐推广运用于临床。

5. 甲胎蛋白(X-Fetoprotein, AFP)测定:1972年Brock发现胎儿有开放性神经管缺陷时,羊水中AFP值明显升高,可达正常10倍以上。AFP是一种胎儿特有的球蛋白,妊娠29d开始出现,10~23孕周达高峰。以后渐减,32周后下降很快。羊水中AFP来自胎儿尿、羊膜和胃肠道。胎儿血中AFP浓度为羊水的150~200倍。胎儿血中AFP可以通过羊水进入母血。当胎儿有开放性神经管缺陷,先天性肾病,45XO,消化道闭锁,骶尾部畸胎瘤等,均可引起羊水及母血AFP升高。

6. 超声波诊断:是一种无创伤而简便的产前诊断技术。特别是超声显像诊断更为准确。在产前诊断中主要用于测胎龄,羊水量,胎儿宫内发育情况及胎儿畸形(如小头畸形及其它骨骼、肌肉疾病),胎盘定位及其成熟度,指示羊水穿刺及绒毛活检等,可诊断无脑儿,脑积水,脊柱裂,胎儿水肿,内脏畸形,多囊肾,内脏外翻。还能用胎儿回声心动描记法来检查有无先天性心脏病。

7. X线诊断:用于孕20周以后胎儿骨骼畸形、双胎诊断。羊膜腔造影及胎儿造影。分别用水溶性及脂溶性造影剂注入羊膜腔。主要显示羊水量异常,胎盘位置异常胎儿软组织轮廓,以及胎儿吞咽后胃肠道情况,以便更清楚勾划出胎儿体表。目前超声波诊断技术已日益进步,可提供可靠资料,故有人认为不必使用可能有有害的X线与化学物质作为检查诊断的方法。

8. 羊膜腔镜或胎儿镜:目前有数种胎儿镜,最小一种为针镜,直径仅1.7mm,导管末端装有超声探头,可以观察子宫壁、胎盘。在孕17~20周进行,可达到3个目的:(1)采取标本做切片检查;(2)采取胎儿血用于诊断镰状细胞贫血与有核红细胞贫血;(3)观察胎儿有无畸形,如先天性多数关节弯曲肢指畸形等。

9. 羊膜镜:1962年Saling首先提出并报道。晚期妊娠用羊膜镜作产前诊断。胎膜未破而宫口已容受时,用羊膜镜观察羊水颜色,主要用于诊断胎盘功能不良,过期妊娠、母儿血型不合等。Taylor报道日本学者Mohri曾在晚期孕妇作子宫内电影摄影。带有光纤的镜头通过宫颈口安置在子宫内腔之间,羊水颜色、胎儿活动及胎儿胸部的呼吸动作都能被记录下来。

10. 应用重组DNA技术产前诊断:近年来,重组DNA技术用于临床,使遗传病产前诊断取得很大进展。取羊水或绒毛细胞提取DNA,用限制性内切酶和DNA杂交的方法,通过基因分析,直接检出突变基因,或通过限制性片段连锁分析鉴定突变基因,可对遗传性分子病进行产前诊断。这种方法对那些在胚胎期尚未表达的遗传病更有意义。目前能进行产前诊断的有多种血红蛋白病,苯丙酮尿症, $\alpha$ -抗胰蛋白酶缺乏症,黑朦性痴呆, $\alpha$ 、 $\beta$ 地中海贫血等。目前遗传病的产前诊断,已进入分子诊断的新时期。

(安徽医科大学第一附属医院妇产科樊毓方撰)

### 宫外孕诊断和治疗的新进展

孕卵着床于子宫体腔内膜以外称为异位妊娠,其中以输卵管妊娠最常见约占95%。临床表现为两大类,一类为常见的急性宫外孕,主要是种植部的突然破裂引起腹腔内出血,表现为突然的下腹剧痛伴不同程度的休克。下腹部轻度抵抗和移动性浊音。发作时阴道检查有明显的宫颈举痛,但不一定触及盆腔包块,后穹窿穿刺和腹腔穿刺阳性率高达85%~90%,另一类为陈旧性宫外孕,是异位妊娠流产或急性破裂后病情又逐渐稳定,胚胎死亡,绒毛退变继之形成盆腔肿块,症状多变,以往急性宫外孕较易诊断,而慢性宫外孕依靠妊娠试验及后穹窿穿刺阳性率低。因此常延误诊断,特别对未破裂的宫外孕不能及早作出诊断和处理。

近年来研究认为,长期阴道流血,下腹疼痛,附件包块(三联征),伴有低热,即可考虑宫外孕可能。 $\beta$ -ACG测定,"B"超,腹腔镜检查,这3项辅助检查可对宫外孕及早作出诊断。

近年来测定血中绒毛膜促性腺激素技术有了更迅速的改

进,应用 HCG- $\beta$  亚单位放射免疫法,能更为正确地测定早期妊娠,是诊断宫外孕较好的方法。绒毛中的合体细胞分泌绒毛膜促性腺激素,半衰期为 24h, $\beta$ -HCG 放射法可测出第 9d 的孕卵存在与否。在正常早期妊娠,每 1.4-2.2d $\beta$ -HCG 量增加 1 倍,而异位妊娠,流产,并非如此,输卵管妊娠时,由于局部供血不足,绒毛发育不良, $\beta$ -HCG 的水平比同期宫内妊娠低,与流产者同期 $\beta$ -HCG 水平相近,因此认为间隔 48h 测定 2 次 $\beta$ -HCG 观察动态变化,可以诊断宫外孕。

B 超检查对早期宫外孕的诊断价值不如 $\beta$ -HCG。B 超一般在排卵后 28d,即停经 42d 时可见到明显胚囊,此时血 $\beta$ -HCG 应大于 1000ng/ml。但如果停经 42d 以上,有宫外孕症状,B 超示未见宫内妊娠囊,再配合 $\beta$ -HCG 测定,即可诊断宫外孕。

腹腔镜检查也是辅助诊断输卵管妊娠的有效方法之一,目前被较多用来诊断早期未破裂的异位妊娠,尤其是在症状不典型,体征不明显的病例,可通过腹腔镜检查,直接观察内生殖器,看到增粗的紫蓝色的输卵管,或看到盆腔有积血,有时还可看到胚胎组织堵塞输卵管伞端,或看到输卵管上的破口,血腔形成,可迅速明确诊断及部位大小,及时处理。

目前诊断宫外孕常几种方法联合应用,更为准确。过去常用后穹窿穿刺诊断宫外孕,阳性率 80% 以上,在一般设备的医院均可进行,结果迅速,仍为常用的方法,但近年来因上面 3 种方法普遍应用,故后穹窿穿刺用得较少。

宫外孕的治疗目前仍以手术为主,对要求保持生育功能的初孕妇及已切除一侧输卵管者,可采取保守性手术或根据具体情况亦可用药物行保守治疗。

#### 手术治疗

1. 输卵管切除术。急性宫外孕内出血,并发休克的患者,在纠正休克的同时,进行手术治疗,行输卵管切除术。一般在进腹后,术者将手伸入盆腔及宫底,然后将子宫轻轻提起,此时输卵管常可暴露于视野中,在找到出血之后,即以弯血管钳止血。如破裂时间短,腹腔内的血液新鲜,凝血块少,可用纱布滤过后重新回输,回输的血每 100ml 加 2.5% 枸橼酸钠 10ml 以抗凝。一般均做全输卵管切除术。即将输卵管全部切除,以免残存部分发生结节、性输卵管炎或局部再次发生输卵管妊娠。如有绝育要求可同时对结扎对侧输卵管。对于病侧卵巢,如外观正常可以保留,但也有学者认为,病侧输卵管的卵巢以去除为好,因为双侧卵巢均存在时,排卵要由两个卵巢轮流进行,反而减少日后受孕机会,而且可因卵子外游造成再次宫外孕。在异位妊娠手术中,保留输卵管的保守性手术已有多年历史,由于 $\beta$ -HCG 放射免疫测定,实时超声显象,腹腔镜检查的应用,异位妊娠做到早期诊断的病例日趋增多,对于有生育要求,特别是对切除输卵管将导致无可挽回绝育患者,就有更大的意义。约有 50% 的异位妊娠患者,其对侧的输卵管是不正常的。其中 10%~15% 一侧输卵管切除后,对侧输卵管再次妊娠。60%~70% 的异位妊娠发生在上端的 1/3 (囊腹部),其中可以安全去除妊娠物而无需作输卵管切除术的,手术应根据病员的具体情况,输卵管的条件以及孕囊的部位,决定是否和如何做保留输卵管的保守性手术。

2. 输卵管切开术。由于未破裂的输卵管妊娠中约 90% 发生在囊腹部,可以用输卵管切开术治疗。本法的原则是用损伤最小的方法切开输卵管,取出妊娠物,以反应最小的缝线进行缝合。一般在输卵管系膜对侧用锐刀或电刀切开输卵管凸出部,再以指压法或钝性刮匙轻轻将妊娠物取出或吸出。妊娠物附着处的出血,可用刺激最小的尼龙缝线缝合止血,亦可用针尖电灼器电灼止血。切开的部位可以缝合,以防止出血,输卵管内不必留置支架,手术完毕,用乳酸林格氏液冲洗腹腔。对侧输卵管如粘连,伞端封闭可根据当时情况同时处理。术后可静脉内用皮质激素及抗生素以消除局部水肿及感染。亦可在术后用氢化考的松溶液作输卵管灌液,以保持输卵管通畅和预防附件周围的粘连,术后 3~6 个月做输卵管碘油造影,75% 的输卵管可以通畅。

3. 清除孕囊妊娠物。用指压吸引或钝性刮匙刮除输卵管伞

端的妊娠物是比较容易施行的一种保守性手术方法,但其效果都不理想。因为绝大多数妊娠物总是在输卵管内膜至浆膜层之间生长,从组织学来说,它破坏了输卵管的正常结构,并易发生粘连。手术时如伞部发生出血可以局部压迫或用点状电灼止血。

4. 输卵管节段切除吻合。对输卵管中段的异位妊娠,可以在证实输卵管远端是通畅的以后,切除包含有异位妊娠的一段,再与远端的输卵管作端端吻合。吻合时用 8~0 号尼龙线穿过粘膜层缝 4 针,第 1 针开始在位于系膜部位的 6 点处;然后在 0 点 3 点 9 点处各缝 1 针。检查无出血后再缝合浆膜层及系膜。皆用 8~0 号尼龙线间断缝合。输卵管炎是输卵管妊娠十分重要的病因,病因常累及两侧输卵管的多个部位,因此,仅靠切除输卵管妊娠部这一个部位的病变,并不一定能改变其预后,所以本法仍有一定的局限性。

#### 化疗药物治疗

受治疗滋养细胞疾病的启迪,而用于治疗异位妊娠。由于 B 超的问世及 HCG 放射测定法的普遍应用,输卵管妊娠未破裂型诊断的准确率已可达 100%,因此未破裂型,又需保留生育功能的妇女,可采取化疗药物杀胚胎,而增加保守治疗成功率。

首选药物为氨甲蝶呤(MTX),目前国外关于异位妊娠的报道,多数是选用 MTX,而中国也有报导应用 5~氟尿嘧啶(5~FU)治疗异位妊娠。

1. MTX 法。0.4mg/kg/d 肌注,5d 为 1 疗程,间隔 1 周可开始第 2 疗程。

2. 5~FU 法。10mg/kg/d+5% 或 10% 葡萄糖水 500ml 内静滴,4~6h 滴完,1 疗程 6~8d。

在治疗过程中,应密切观察病情变化,一旦发现内出血征象,应根据病人的一般状况,内出血量的多少,决定是否要立即手术,以免贻误病情。

化疗药物保守治疗,其优点既可杀胚胎组织,又不破坏输卵管组织,可保持输卵管的通畅,因此特别适合于迫切要求保留生育功能的年轻患者,或合并其他疾病不宜手术治疗者。

(安徽医科大学第一附属医院妇产科汪喜峰撰)

#### 胎儿窘迫的监测 fetal distress monitoring

胎儿窘迫是胎儿在宫内缺氧及酸中毒引起的一系列病理状态,约有 20%~50% 的围产儿死亡与胎儿窘迫或胎儿窘迫合并其他因素有关。产前和产时对胎儿监护,及时发现和处理胎儿慢性或急性窘迫是围产医学的重点。随着围产医学的迅速发展,新的电子仪器和生化监测方法日益完善,采用综合方法加强高危妊娠的医疗监护,必须结合中国实际情况,因地制宜地寻找简便易行的方法。现就国内外各种监护方法介绍如下:

1. 妊娠期胎动监护。胎动是胎儿生命的客观象征之一,胎动不仅是妊娠的诊断依据,而且可作为胎儿是否存活的良好指标。胎动减少提示胎儿缺氧,胎动突然加速或增强亦提示胎儿缺氧,因此胎动计数反映胎儿健康情况,为产前首先自我监测的方法之一。

正常妊娠 18~20 周,孕妇可感到胎动,起初胎动间断、微弱,不易同肠蠕动区别,孕 20 周后随孕周延长,胎动渐增,很容易和肠蠕动区别。胎动次数在妊娠 29~38 周达高峰,分娩前 2 周胎动稍有减少,可能由于羊水此时较少和/或胎头入盆,胎儿活动空间较少之故。胎动是一种主观感觉,受孕母敏感度、腹壁厚度,羊水量等多种因素的影响。24h 胎动活动规律有“生物钟”表现,有自己醒—睡规律,上午 8~12 时,胎动均匀,以后逐渐减少,下午 2~3 时减至最少,晚上 6~10 时又增至最多,晚间胎动增加与孕妇休息、全身肌肉放松及注意力集中有关。

2. 胎动记录方法。28 周每周记录 1 次,32~36 周每周记录 2 次,36 周后每天记录,可在每日早、中、晚相同条件,譬如:卧位、坐位、饭前、饭后各数 1h,3h 胎动总数乘 4 为 12h 胎动总数,作为每日胎动基础数,评定按周美蓉报告的规定,胎动下降 10 次/12h,反映胎儿宫内缺氧且严重,胎动消失至胎儿死亡约 12~

48h,若抓住这一警报信号,在胎儿尚好时,终止妊娠则可得到活婴。计数胎动应注意:(1)每日胎动总数,并与前几天胎动总数比较,平均减少 $>50\%$ ,不能恢复者应重视。(2)胎动强度。临床上胎动分类很多,我们认为胎动分为弱胎动和强胎动(整个肢体运动)比较实用。总之,胎动计数无需设备,简单可行,行之有效,凡 $>28$ 孕周,产前检查时,即教会孕妇自数胎动进行自我监护,如减少或消失,胎动突然加速或增强即来院进一步进行监护。

3. 羊水监测。胎儿浸泡于羊水中,羊水为胎儿良好的培养液,因其有抑菌作用,又供新陈代谢、水分与溶质的交换。羊水的质和量可因胎儿发育不健全,毛细血管通透性受阻以及先天性畸形或疾患而有所改变,为此羊水监测有其临床指导意义。正常胎儿在宫内不会有胎粪排出,头位胎儿出现羊水粪染往往认为是胎儿宫内缺氧,酸中毒引起迷走神经兴奋,肠蠕动亢进,肛门括约肌松弛,促使胎粪排出。羊水中胎粪量和排出时间的长短与胎儿颈后有密切关系,因此在胎膜早破和人工破膜时,应仔细地观察羊水的色泽和内容,正常羊水无色清亮,内有胎脂。羊水粪染程度临床上分为Ⅲ度:Ⅰ度,羊水浅染呈浅绿色且稀薄,示胎儿轻度缺氧,仍有代偿功能,如产程进展快,粪染不加重,可待其自然分娩。Ⅱ度,羊水呈深绿色、较稠,往往还可见到一些粪块,胎膜、脐带和皮肤绿染,说明胎粪排出量较多,示胎儿急性缺氧。Ⅲ度,呈黄褐色,羊水粘厚量少,羊水中混有胆红素分解的黄色胎粪,胎膜、脐带、皮肤、指甲均被覆粘稠的黄褐色羊水,示胎粪排出量多,时间至少有6h以上,胎儿宫内缺氧已达6h以上,胎儿危急,预后不佳。

胎膜未破时,宫口开大1cm以上,以羊膜镜观察羊水性状,只要正确使用,专人操作,羊膜镜监测也是妊娠末期及临产时及早发现胎儿窘迫,降低新生儿窒息发生率的一种有效方法。

羊水过少系慢性胎儿窘迫的敏感指标,羊水过少时胎儿窘迫和新生儿窒息的发生率为正常的10倍。羊水量预测,目前国内均辅以超声波检查,诊断羊水过少其标准和方法均不相同,中国很多医院以羊水平段 $\leq 2\text{cm}$ 为羊水过少,2.1~3.0cm羊水偏少, $>3\text{cm}$ 为正常, $>7\text{cm}$ 羊水过多。近年采用羊水指数测定法,测羊水量以脐和腹白线为标志点,将腹部分4个象限,测量各象限羊水池最大垂直深度相加之和为羊水指数(AFI)值,其标准: $\leq 5.0\text{cm}$ 为羊水过少,5.1~8.0cm为羊水偏少,8.0~18.0cm为羊水正常, $>18.0\text{cm}$ 为羊水过多。B超示羊水过少时,首先必须排除胎儿先天性畸形所致的AFI低值,方可诊断胎儿窘迫。羊水指数标准的敏感性和精确性明显优于羊水平段标准。

4. 胎心率监护。胎心率听诊法,胎心率改变是胎儿窘迫最明显的临床症状,也是临床上诊断的依据,正常为120~160次/min,绝大多数130~150次/min,心音强而规则,胎心 $>160$ 次/min并非都是宫内窘迫,如母亲发热,用阿托品、舒喘灵、受声刺激等可使胎心加快,只有母亲伴有妊高症、慢性肾炎、慢性高血压、心脏病、重度贫血、羊水过少、IUGR等,胎心 $>160$ 次/min且持续存在时,可考虑胎儿有早期缺氧。胎心 $<120$ 次/min,应排除胎儿有迷走神经兴奋、先天性房室传导阻滞、母亲用镇静剂等。对高危孕妇产时监护,应紧接每次宫缩,最好在宫缩结束30s内听胎心,第1产程每15min1次,第2产程每5min1次,听诊时每次至少1~10min,必要时包括1~2个宫缩周期,听诊时除注意心率、节律外,还应注意心音强弱,因此只要认真地听诊,同样可起到与现代化监护仪相同的效果。

有下列情况出现提示胎儿宫内窘迫:(1)头先露抵达盆底以前胎心率 $>160$ 次/min或 $<120$ 次/min。(2)头先露达盆底后胎心率 $>160$ 次/min或 $<100$ 次/min。(3)持续胎心率增快 $>160$ ~180次/min为胎儿中度缺氧, $>180$ 次/min为胎儿重度缺氧。(4)胎心率不规则(心率不齐)。(5)阵缩后超过10~15s胎心尚未恢复正常者。(6)胎动后胎心率不增快或增快在 $<10$ 次/min者。胎心听诊方法虽简便,但有其局限性,近20年随着电子医疗仪器的迅速发展,胎心率监护仪在妊娠处理中,克服了听诊器的缺点,能连续性监护胎心率,并了解其与胎动、宫缩关系,亦

可发现一瞬间胎心率的改变,已成为判断胎儿宫内情况和决定处理方案的主要依据和手段。

5. 胎儿监护仪的应用。(1)指征:用于高危妊娠、高危胎儿,如妊高症、过期妊娠、IUGR、胎膜早破、胆道症、母儿血型不合,妊娠合并内科疾患,不良产史, $E_3$ 低值、胎动减少等的产前监护。产时监护除上述指征外,还有产程延长、胎心听诊异常、羊水粪染及催产素引产或催产等。(2)监护途径:外监护(间接法),将胎心超声换能器、宫缩压力换能器置于孕妇腹壁,记录胎心率和子宫收缩压力。方法简便,不存在引起母婴感染的问题,为产前和临产早期宫口开张前的唯一监护方法,也是测定胎动的一种方法。缺点是不能测定宫内实际压力,图型可受孕腹壁厚度或母体翻动的影响。内监护(直接法):用于胎膜早破或宫口已开放,使用胎头皮电极安装在胎头皮上,记录胎心率和经宫颈插入宫内导管测定宫内压力。优点是直接测羊膜腔压力,图型清晰,不受孕妇干扰、肥胖的影响,正确观察宫缩对胎儿循环系统的影响,能一直监护到分娩结束,缺点是需一定仪器及专人操作,存在宫内感染的可能。

使用方法:

(1)无负荷试验(无应激试验)。监测时间不少于20min,观察胎心基线率,胎心基线变异、胎动、胎动时胎心率增速反应,了解子宫~胎盘胎儿的储备功能,方法简单,安全,可在门诊进行,作为妊娠32周后的高危孕妇初测方法。NST有反应(阳性)指基线率为120~160bpm(每分钟心跳数)且平稳,20分钟内有2次以上胎动,胎动后胎心率比基线率增速 $\geq 15\text{bpm}$ ,持续 $\geq 15\text{s}$ 。反应型示胎儿储备功能良好。一般如无高危因素,无其他意外,在1周内分娩,胎儿多能耐受分娩的负担。对1周尚未临产者,需每周重复1次。无反应(阴性)指胎动 $<2$ 次,胎动后胎心基线率无明显变动,示胎儿储备力不良。NST监护同时进行Krebs评分法增加NST监护可靠性,减少假阴性和假阳性的发生。(2)声振动刺激试验(VAS-T)。用电子喉紧贴胎儿头所在的孕妇腹壁,施以110dB频率10~10000Hz连续5s的振动声音刺激,观察20min描记图形,此种方法国内外均有报道,试验原理为,胎儿通过感觉末梢器和耳蜗接受振动声刺激,在大脑皮层产生特殊信号。引起胎儿体内儿茶酚胺的释放及某些中枢神经递质的变化,通过神经反射,改变胎儿的行为状态。声刺激后20min内出现1次或更多胎心率加速,幅度 $\geq 15\text{bpm}$ ,持续 $\geq 15\text{s}$ 为VAS-T(+).未达上述标准为VAS-T(-)。VAS-T(+)示胎儿情况好,但不能预测某些产时因素对胎儿的不良影响,这就需要应用其他监护手段综合评定。反之经其他监护手段示有慢性缺氧,妊娠不宜继续者,只要VAS-T(+),预示胎儿尚无酸中毒,及时终止妊娠,胎儿一般预后良好。文献报道VAS-T(+)高度预示(98%~100%)胎儿头皮血H<sup>+</sup>浓度 $\geq 63\text{nmol/L}$ ,总之VAS-T是临床价值较高、安全、省时的产前监护试验,与NST比较提高了阳性结果的预测价值,大大缩短了试验时间。阿托品试验:静脉注射阿托品1mg,胎盘功能正常,通透性强,胎心率在用药后15min比基线率增速20~30bpm,为阿托品试验有反应,否则为无反应,对不宜作催产素激惹试验者可选用,但对心脏病,心动过速,发热或原来胎心率已快者不适用。(3)宫缩应激试验(OCT)。此方法为用催产素诱发宫缩,将胎儿暴露于缺氧的条件下,观察胎心率的变化,从而了解胎儿胎盘的储备功能。试验前必先进行NST20min,用0.5%催产素静滴,每分钟1~2毫单位,如无宫缩,每10min增加1倍滴数,直至每10min内3次宫缩,每次宫缩持续40s左右,观察至30min或10min内出现3次典型晚期减速为止。OCT指征:NST无反应,高危妊娠及其他检查示胎盘功能不良者。禁忌症:疑胎儿已严重缺氧者,宫缩功能不良者及有早产史、有阴道流血史、疤痕子宫、胎位异常者,此法有一定禁忌症,也有一定危险性,需有经验的医师进行,另外孕妇对催产素反应存在个体差异,试验化费时间长,有人主张废弃。(4)乳头刺激试验(CST-NS-CST)。试验原理:通过外界机械刺激乳头及乳晕的感觉神经后经脊传至视上核及室旁核,使垂体、后叶释放内源性激素,作用靶器官引起

宫缩,此方法为刺激一侧乳头 15min,如没有宫缩,再刺激双侧乳头 15min,直至 10min 内出现 3 次宫缩,每次宫缩 40s,停止刺激乳头后观察 20min 胎心率~宫缩图(CTG)宫缩应激试验评定:阳性:宫缩时反复出现晚期减速(LD),亦即>30%的宫缩,出现 LD 或重度变异减速(VD)。阴性:宫缩时无 LD 或宫缩时胎心率加速。可疑:宫缩时虽有 LD 但<30%宫缩或出现不典型 VD。CST 阴性代表胎儿储备功能好,胎儿 1 周内生存率为 99%。CST 阳性时,胎盘储备功能低下。在处理高危妊娠时,应结合临床终止妊娠或结束分娩。

胎心率图中出现下列情况提示有胎儿窘迫:(1)早期减速(ED),胎心率的下降低于 100bpm。(2)晚减(LD)频发出现(>宫缩的 20%)。(3)变异减速(VD)脐带受压所致,但持续出现,频发、超过宫缩的 30%或其减速最低达到 60bpm 或合并 LD 或出现不典型的重度 VD。(4)胎心率基线波动降低持续<5bpm,表示胎儿危险,如合并 LD,对胎儿窘迫的诊断有主要的价值,立即分娩。(5)持续胎心率增速示胎儿窘迫,胎心率>180bpm 示有严重窒息,如并发 LD 或胎心率基线波动下降显示胎儿危险,但应排除母心率增快或母体高热等影响。(6)胎动后胎心率增加<10bpm 显示胎儿窘迫。

6. 胎儿生物监测。胎儿生物物理监测(BPS)是综合胎儿电子监护仪及 B 超所示某些生物活动来判断胎儿有无急、慢性缺氧的一种产前监护。1980 年 Manning 首次报道,随后国内外学者相继报道了这方面的研究结果,设计了生物物理评分方案,以寻找胎儿在宫内安危范围,为围产监护提供有效的具体方案,提高围产保健的质量。BPS 项目:NST、胎儿呼吸运动(FBM)、胎动(FM)、胎儿肌张力(FT)及羊水量(AFV)。因胎儿的生物活动受中枢神经系统调控,各项调控中心发育成熟不同,如 FT 约在孕 7.5~8.5 周出现,FM 约第 9 周,有横纹肌收缩规则的 FBM 出现于 20~21 周,NST 最晚约 24 周后,故于孕 28 周后可开始 BPS 监测,每次常规测定时间:NST 20min, B 超除 AFV 外以 30min 为准,凡正常者 β 超检查可于 10min 内完成,异常时至少应观察 30min,必要时延长监测时间至 120min,以区别胎儿是真缺氧,还是处于休眠期,避免宫内死亡。

BPS 监测评分法有 Manning 评分法、Vinfzilcos 评分、刘文翰等评分法,不管采用那种评分,在分析监护结果时除考虑总分外,还应特别注意其单项指标,以减少假阴性、假阳性率。终止妊娠周数,要结合本单位对早产儿宫外存活的具体条件,采用得力治疗措施。对高危妊娠 BPS 监测结果正常,可间隔 3~4 天再重点监护,此方法对胎儿安全,孕妇能接受。

7. 胎儿头皮血 H<sup>+</sup>浓度测定。胎儿血液 H<sup>+</sup>浓度测定是判断胎儿宫内状态的重要生化指标之一。因此在临床过程中胎心率一宫缩图出现可疑或异常时,如出现 LD、频发 VD、重度 VD+LD、基线率平坦等应采胎儿头皮血测 H<sup>+</sup>浓度,H<sup>+</sup>浓度>7.08×10<sup>-8</sup>mol/L 应结束分娩,H<sup>+</sup>浓度>5.62×10<sup>-8</sup>~7.08×10<sup>-8</sup>mol/L 之间为可疑胎儿低氧酸中毒,应间隔一段时间进行重复测定。为了提高胎儿 H<sup>+</sup>浓度测定诊断胎儿缺氧的符合率,排除母体因素的干扰,同时测母体血 H<sup>+</sup>浓度,母胎 H<sup>+</sup>浓度差值(ΔH<sup>+</sup>)>2.3n mol/L,表示胎儿明显存在酸中毒,ΔH<sup>+</sup><1.7n mol/L 胎儿供氧充足,但为母体酸中毒的反映,ΔH<sup>+</sup>在 1.7~2.3n mol/L 之间可能提示胎儿处于酸中毒前期或轻度酸中毒,需继续观察。近年来进一步应用胎儿皮下组织 H<sup>+</sup>浓度连续测定法(tH<sup>+</sup>浓度)、氧分压连续测定法(tePO<sub>2</sub>)、二氧化碳分压经皮测定法(tcPCO<sub>2</sub>)等,连续动态地观察胎儿组织的酸碱和气体变化,对围产监护将发挥更大作用。

但是胎血 H<sup>+</sup>浓度测定毕竟是损伤性检查,在人员和设备上要求较高,Clark 认为随着胎心率监护的深入研究,提出胎头皮刺激试验可以部分取代胎儿头皮血 H<sup>+</sup>浓度测定。

8. 脐动脉血流速度的监测。脐动脉血流状况与胎儿宫内缺氧及预后密切相关,目前采用超声多普勒血流仪(脉冲式)测脐动脉血流速,检测迅速、正确,常用的血流指标有 A/B 比值(频谱上收

缩期血流速度峰值与舒张期峰值之比)。值正常情况下自妊娠 15 周至足月 A/B 值逐渐下降,表示胎盘血流阻力随孕周增加而逐渐减少,妊娠 30 周以前 A/B 值在 3cm 以上,30 周以后 A/B<3,35 周为 2.5,40 周为 2 左右,如妊娠 30 周以后 A/B>3 表示胎盘阻力异常,A/B 值异常时胎盘绒毛毛细血管已有 50%以上发生闭塞,A/B>6 或 0(舒张末期无血流)表示血流速度极度异常,胎儿垂危,预后不良,舒张末期无血流比胎心率异常出现早,是胎儿垂危的最早、最敏感的指标,凡在临床表现正常的孕妇于妊娠晚期有脐血流 A/B 比值异常者,应考虑到胎儿宫内缺氧或 IUGR 的可能。

9. 胎儿心电图的检测。胎儿心电图检测是一种非侵入性的诊断手段,胎儿心电图提供的胎儿心脏活动的客观指标,能区分胎儿心电图变化的微细差别,可及早诊断妊娠期和分娩期的胎儿宫内缺氧及先天性心脏病,是围产期胎儿监护的一种有效手段。胎儿宫内缺氧时,胎儿心电图发生变化,P-R 间期缩短或增长,ST 段偏离,T 波振幅增大,迷走神经兴奋时,P-R 间期延长,胎心减慢,交感神经兴奋时 P-R 间期缩短,胎心加速,缺氧严重时,发生酸中毒,则 ST 段及 T 波改变,临产后,如胎儿心电图表示异常,应警惕脐带异常,因脐带异常可影响胎儿血供而诱发胎儿宫内缺氧,正确地使用胎儿心电图,寻找其规律性变化,能减少产时不必要的人为干预,对降低围产儿发生率和死亡率均有重要的参考价值。

10. 胎儿一胎盘功能的生化监护。胎儿生化方面的监护主要是检查胎儿、胎盘单位功能,临床上常测定血或尿中的雌三醇(E<sub>3</sub>),尿中雌激素/肌酐比值(E/C),血中胎盘生乳素(hpl),妊娠特异性 β<sub>2</sub> 糖蛋白(SP)等,协助预测胎儿的安危,成为对高危妊娠的一项重要监测措施。近年来采用新研制的 E<sub>3</sub>-放射免疫药盒,测定孕妇的唾液游离 E<sub>3</sub>(SE<sub>3</sub>),SE<sub>3</sub> 测定其标本收集简便,价廉,可多次收集,无创伤刺激,孕妇容易接受且可以很好地反映出血 E<sub>3</sub>的水平,有利于产前连续动态监护,SE<sub>3</sub> 在产前监护正确率(97.40%)与血 E<sub>3</sub>(95.60%)相似,较尿 E/C(84%)明显增高,显然 SE<sub>3</sub> 是一项新的较实用可靠的产前监护措施。

#### 参考文献

- 1 Manning F A, et al. Am. J. Obstet Gynecol., 1980, 136, 787
- 2 周美蓉. 中华妇产科杂志, 1981, 1: 69
- 3 Krebs H B, et al. Am. J. Obstet Gynecol., 1983, 145: 297
- 4 田雪萍, 等. 高危妊娠的处理. 上海: 上海科学技术出版社, 1986
- 5 刘文翰, 等. 中华妇产科杂志, 1987, 4: 193
- 6 陈波洁. 国外医学(妇产科分册), 1992, 1: 19
- 7 赵右更, 等. 中华妇产科杂志, 1992, 2: 67
- 8 吴乾渝, 等. 中华妇产科杂志, 1992, 5: 286

(安徽医科大学第一附属医院夏兢莲副教授撰)

#### 新生儿学

neonatology 新生儿期是指婴儿从出生到满 28 天的一段时间,此期间的婴儿称为新生儿。新生儿学是研究这个时期的小儿保健、疾病防治和提高人口素质的一门学科。新生儿期是小儿的特殊生活阶段,小儿刚从母体娩出,各器官系统功能发育不够成熟,要独立生活,要适应多变的环境,容易患各种疾病,加上先天性原因及分娩时的不良因素,此期是小儿死亡率最高的时期(不包括围产期)。1982 年,中国婴儿死亡率为 34.68%,上海市新生儿死亡率 14.7%,1986 年,上海市新生儿死亡率下降到 8.8%。因此,加强新生儿保健、疾病防治,是提高人口素质和降低死亡率的关键时期。近 20 年来,从产科同新生儿科分支出一门新型边缘学科——围产医学,它是从母子两方面来研究影响胎儿及新生儿健康的一门学科,它的出现将大大地促进新生儿学的发展。

远在 1 个世纪以前,法国 Budin 写成世界上第 1 部新生儿专著《The Nursing》。1912 年 Ylappa 指出肝功能不足是新生儿黄疸的主要原因。1914 年, Hess 在芝加哥创办了第 1 所早产儿治

疗中心。1924年, Peiper发表了早产儿中神经系统发育的研究报告;以后,早产儿治疗中心在各大医院纷纷成立。40年代初期, Diamond首次用换血疗法治疗母婴血型不合的溶血症获得成功;抗生素、早产儿培育箱及监护设备应用于临床。50年代, 新生儿科从儿科中独立出来, 并得到迅速发展; 发现某些抗菌药物的毒副作用、氧中毒, 利用蓝光照射治疗新生儿黄疸, apgar对新生儿的评分方法建立。60年代, 各国相继成立早产儿中心, 重视消毒隔离, 感染性疾病逐渐减少。70~80年代, 各国先后建立新生儿急救中心和转运系统; 开发微量血检验, 经皮测氧和二氧化碳; 开展气道正压呼吸、静脉高营养疗法; 进入80年代, 广泛采用现代电子设备, 各种监护、检验及治疗仪、头颅超声波CT扫描, 核磁共振亦广泛应用于新生儿疾病诊断。

中国新生儿学起于50年代后期, 70年代得到发展, 上海的金汉珍教授率先组织新生儿医护学习班, 建立新生儿病房。80年代, 中华儿科学会成立新生儿学组; 1986年创办了新生儿科杂志, 并在全国开展了不同胎龄新生儿体格发育测量研究工作, 共有15个省市参加, 1987年已完成2万余例数据收集; 有的地区建立了新生儿急救中心, 开展了新生儿监护工作, 同时建立并充实了各级妇幼保健组织。

新生儿期按日龄可分3期: (1) 新生儿早期, 为从出生至生后不满7d。又把出生后不满24h称为初生儿期, 生后1d或出生至生后7d称围产新生儿期。此期小儿常出现呼吸功能紊乱、新生儿溶血病、出血症、肺透明膜病、低血糖、低血钙等。(2) 新生儿中期, 指生后7d至生后不满14d。此时新生儿机体逐渐适应外环境, 系统器官渐趋向内在基本平衡, 易患感染性疾病。(3) 新生儿晚期, 指生后14d至不满28d, 此时小儿内在平衡基本趋向成熟。新生儿死亡同日龄显著相关。秦振庭报告, 生后24h内死亡者占32.26%, 生后7d内死亡者占74.19%, 出生7d后至28d死亡者占26.81%。

新生儿保健必须与产科密切配合。围产期胎儿主要由产科负责, 但新生儿科医师可到高危产室查房, 参加分娩时新生儿的抢救, 及时处理窒息复苏, 参与对难产并发症的早期诊断, 估计预后和预防伤残。为了减少小儿死亡, 以前认为应该抓好早产儿、过期产儿及巨大儿的护理治疗工作; 80年代从流行病学观点分析认为, 重视为数众多的足月正常体重新生儿的保健, 避免其死亡, 从整体上更能降低小儿死亡率。

减少感染。新法接生可以减少产时感染。强调接生要无菌操作, 改进断脐方法。当今发达国家用无菌剪刀断脐之后, 用灭菌的脐带夹夹紧残端, 不包扎。新生儿室实行无菌制度、严格管理及精心护理可以减少产后感染。近年来国内外推荐实行正常母婴同室, 这样可减少医院内感染, 又利于母乳喂养。在新生儿科要特别警惕院内交叉感染。目前感染性疾病在发达国家已明显减少, 在中国也已大幅度降低。

出生缺陷儿受到重视。1960年, 西欧一些国家因使用“反应停”作为孕早期镇静止吐剂, 继而发生大量“海豹畸形儿”的事件, 引起各国对出生缺陷儿的高度重视。1963年起, 许多国家先后制定了先天畸形监测提纲, 如英格兰、以色列、挪威以及瑞典等10余个国家开始监测工作; 1972年世界卫生组织提出成立先天性畸形监测的联合报告系统; 1975年首选12种先天畸形作为国际常规资料交换的病种, 它们是: 无脑儿、脊柱裂、脑积水、腭裂、全部唇裂、食管闭锁和狭窄、直肠和肛门闭锁、尿道下裂、肢端短畸——上肢及下肢、先天性髋脱位、Down氏综合症等。1980年, 中国华西医科大学和北京医科大学率先组织出生缺陷监测; 1985年四川省被接纳为“国际出生缺陷监测交换所”成员。1986年10月1日至1987年9月30日的1年间, 全国29个省、市、区945所医院监测了124万多例围产儿, 其出生缺陷总发生率为13.07%, 最高省份为20.5%, 最低者为8.8%, 男性高于女性。

先天性代谢缺陷病, 多为常染色体隐性遗传病, 少数为X染色体连锁隐性遗传病, 可涉及碳水化合物、脂类、氨基酸、粘多糖等代谢异常, 多数为酶缺陷导致代谢紊乱。目前大多能作出产前诊

断。出生后进行血液筛查, 如甲状腺功能低下、苯丙酮酸尿症、半乳糖血症、枫糖尿症等, 可及早发现及早处理。

危重新生儿监护及其转运。20世纪60年代建立起新生儿重症监护室(NICU)。NICU设在围产中心之内或与其密切联系。主要监护救治急性呼吸衰竭、休克、重度窒息、极低出生体重等患儿及多器官功能衰竭儿外科大手术前后患儿。应有健全快速的转运系统, 同时应具备转运过程中的监护和急救措施, 及时安全转运。

1960年Wolff以及Fantz等对新生进行详细观察发现: 出生数分钟的新生儿就会睁开眼睛看母亲; 胎儿在宫内就能听到母体各种声音, 说话声和外面的音乐, 生后仍保持记忆; 新生儿模仿能力令人吃惊, 可随一个熟悉的面孔做张口、噘嘴、吐舌等各种表情动作, 对于熟悉的语言可有节奏地按音节曲伸四肢。1961年, Brazelton首先提出“新生儿行为评分法”(NBAS), 认为新生儿是主动参加者, 和检查者互相配合做出精彩的表演, 然后对其表现和他们反应时状态的加以评分。这是一种比一般神经检查更高水平更灵敏的神经功能估价。在中国, 1984年鲍秀兰用NBAS测试中国新生儿行为表现, 结果与布雷登登所测美国新生儿的结果相近。上海、齐齐哈尔等地也开展了新生儿行为方面的研究。

病种、胎龄与死亡。秦振庭报告北医一院儿科住院新生儿病种与死亡率是: 1951~1977年, 呼吸系统疾病占32.33%, 消化系统疾病占18.86%, 其他感染占13.75%; 病死率: 神经系统疾病占47.74%, 新生儿硬肿症占32.19%, 呼吸系统疾病占32%, 消化系统疾病占4.56%; 1978~1980年呼吸系统疾病占34.96%, 感染性疾病占31.85%, 消化系统病占7.13%; 体重<2500g的病死率为25%, >2500g的病死率为3.45%; 死亡率最高的是先天性心脏病, 其次是颅内出血; 胎龄<38周的死亡率为21.47%, 38~42周的死亡率为3.46%, >42周死亡率为12.12%。说明出生低体重、早产儿及过期产儿死亡率明显增高。

中国新生儿学起步较迟, 但发展很快。目前新生儿学研究的重点是: 缺氧缺血性脑病、先天性代谢疾患、出生缺陷及感染性疾病的防治; 努力做好人才培养工作, 建立医术精湛的新生儿医护专业队伍, 完善和增加新生儿急救中心及转运系统, 提高救护质量, 进一步降低新生儿死亡率, 提高人口素质。

#### 参考文献

- 1 黄在枢. 围产期新生儿学. 昆明: 云南人民出版社, 1983
- 2 Lindstron D. et al. Clin perinatal. , 1983, 10(1): 95
- 3 Sdeuet. F. J et al. Lehrbuch der Kinderheilkunde 25rd ed. Gustear Fischer Vedag. Stuttgart, 1985, 173~220
- 4 Behrman. et al. Nelson Textbook of pediatrics 13th ed. philadelphia, 1987, 358~34
- 5 郭迪, 等. 儿科基础与临床. 上海: 上海科技出版社, 1988. 1~9
- 6 秦振庭, 等. 围产新生儿医学. 北京: 能源出版社, 1989
- 7 金汉珍, 等. 实用新生儿学. 北京: 人民卫生出版社, 1990

(安徽医科大学第一附属医院儿科  
杨正修教授撰; 朱子杨审)

**儿科学** pediatrics 一门研究小儿时期生长发育、促健和疾病防治的医学科学。其服务对象是身心均处于不断生长发育过程的儿童, 此时期内遗传性、先天性疾病常见, 感染性疾病亦易于发生, 环境对机体的影响明显, 发病率和死亡率都明显高于成人。1987年全世界约死亡1400万儿童, 其中1000万死于常见病。儿科学的主要任务就是要在不断探索有关理论和总结实践经验的基础上, 提高儿童保健和疾病防治水平, 减少发病率、降低死亡率。联合国儿童基金会提倡的GOBI(儿童生长监测、口服补液、母乳喂养和计划免疫)再辅以生育间隔、辅助食品等措施每年可拯救800~1000万儿童的生命。

18世纪初, 在一般观念中, 儿童只是成人缩影, 他们所接受的营养和医疗同成人一样, 只是量不同。这段时期内只有一些关

于儿童疾病治疗的零星记录出现在荷兰、法兰西和日尔曼刊物上。18世纪中叶,Coram建立了第1家儿童医院,伦敦成立了弃婴医院,儿科医师及其治疗方法开始出现(如Cadogan的哺育论)。及至19世纪,婴儿死亡率依然惊人,导致死亡的原因以营养障碍、腹泻和传染病为主。19世纪中叶,Biedert首先对婴儿胃肠疾病进行分类,并借用含有乳糖、水和糖的代乳方。Camerer于20世纪初详细研究婴儿的代谢,提出儿童营养需要量不论年龄大小均应按体重计算(Camerer定律)。小儿传染病的研究在19世纪亦有较大发展,Brotonneall首先发表了关于白喉和伤寒的专著,Behring试用白喉类毒素防治白喉并导致以后破伤风及蛇毒抗血清的临床应用。19世纪儿科医师对疾病的描述多注重于临床表现,常以描述者的名字命名。如Barlows病(坏血病)、Bitots斑、Stills病、Fallots Tetrad(法乐四联症)等。和其它学科一样,儿科学在20世纪得到了空前发展。Rose对蛋白质和必需氨基酸的阐述、多种维生素的发现使得一些营养缺乏病得到有效防治,X线(Rontgen,1929)、脑电图(Forssmann,1929)相继问世使小儿疾病的诊疗水平有了突破性进展。实验免疫学的发展(如卡介苗、霍乱、麻疹疫苗的使用)和抗生素的应用使小儿感染性疾病的患病率和病死率明显降低。1949,Pauling发现镰状红细胞贫血是一种Hb异常的分子病,科里夫人1952年证实肝糖原累积症是缺乏6-磷酸葡萄糖脱氢酶所致,1960年Riss通过羊水检查诊断出胎儿血友病。细胞遗传学和分子疾病的诊断水平在60年代亦有长足进步,Steele和Nadler首先成功地进行了染色体疾病和遗传代谢病的产前诊断,地中海贫血、肝豆状核变性,先天性无丙种球蛋白血症等疾病的发病机理基本明确。60年代兴起、70年代发展的围产医学使婴儿死亡率大幅度下降,据WHO对38个国家的统计报导,1960~1974年间发达国家婴儿死亡率每年递减0.27%。

小儿外科作为独立学科在20世纪初形成并逐渐发展。自Fredet和Rammstedt(1908,1911)先后采用幽门环状肌切开术治疗先天性肥厚性幽门狭窄后,医学界对小儿外科专业的思想才形成。近20年来,欧美、日、澳等地的小儿外科中心对新生儿消化道畸形的治愈率达80%以上,静脉高营养的应用可维持婴儿几个月不进食而生长发育良好。体外深低温循环的应用,使小儿先心手术成功率大大提高。目前大型室缺和法乐四联症根治术的死亡率仅5%左右。

1980年,全球消灭天花,标志着儿童保健和计划免疫达到新的水平。目前发达国家儿童免疫接种覆盖率达95%以上,中国为80%左右,大多数贫穷国家均在70%以下,1990年世界儿童问题首脑会议发表了《关于促进儿童生存和发展的宣言》,并提出了90年代努力方向和具体措施,力争“2000年人人享有保健。”

遗传病的基因诊断在80年代取得了辉煌成就,快速DNA点杂交法、限制性内切酶谱分析法、DNA限制性片断长度分析法、寡核苷酸探针杂交等新方法的应用使基因诊断成为一种简便、快速、灵敏的方法。目前已能分析诊断 $\alpha$ -地中海贫血、苯丙酮尿症、血友病、Duchenne肌营养不良等多种疾病的遗传基因型。

由于新生儿监护单位(NICU)的普及和先进监护设备的应用,使得未成熟儿成活率大幅度上升。从人羊水或动物肺中提取的肺泡表面活性物质治疗新生儿呼吸窘迫综合征(NRDS)已被证实有效。CT和颅脑超声的发展提高了新生儿缺血缺氧性脑病和颅内出血的诊断准确率。医学界对生物模式的转变也反映在新生儿领域,如新生儿行为测定、母婴同室制度、高危新生儿的早期干预等。

由于实验诊断技术的发展,如荧光抗体检查、酶联吸附试验、RNA和DNA核酸基因电泳等新技术在病毒感染快速诊断方面的应用,对于防治小儿呼吸道感染、控制病毒感染的大面积流行有着重要意义。人工呼吸器的改进和应用,血气分析的运用使得呼吸衰竭的治愈率明显提高。

先天性心脏病的诊断手段在80年代突飞猛进,心导管的改进如漂浮导管、光纤纤维导管等可直接显示各部位血氧浓度,二

维切面超声心动图和彩色多普勒相结合可无创性了解心脏的空间结构及血流动力学变化。球囊房隔造口术、弹簧折伞关闭房缺、气囊导管扩张狭窄的肺动脉、泡沫塑料塞子关闭动脉导管等新技术为先心的非开胸治疗开辟了新途径。

肾小球疾病的免疫发病机理已逐渐明确,以体液免疫为主,亦有细胞介导的免疫反应参与,发病类型除免疫复合型和抗体膜型以外,单纯补体沉积型亦占13%左右。透析疗法、抗凝疗法、肾脏移植及扩血管药物的应用,使急、慢性肾功能衰竭及其合并症的治愈率得以提高。慢性肾衰的5年存活率达70%~94%。

腹泻的病原学研究提示:除轮状病毒外,小圆病毒、冠状病毒与婴儿腹泻亦有相关。另外,空肠弯曲菌、鼠伤寒沙门氏菌、隐孢子虫感染逐渐增多。在传统ORS配方的基础上,以枸橼酸二钠代替碳酸氢钠可提高疗效,近年来有人提倡以天然食物为基础(如面粉、小米、玉米)代替原配方中的葡萄糖则更易促进腹泻恢复。

小儿铁缺乏症的大面积普查和实验检测手段的更新(如SF、FEP)使得小儿缺铁性贫血的诊断水平达到新的高度。小儿白血病的分型愈加复杂和标准化,1984年4月FAB协作会重新修订了FAB分型法,近年又提出MIC分型,被认为更有助于选择治疗和判断预后。骨髓移植、成份输血、联合化疗及免疫治疗等进展使得白血病5年生存率大大提高。

随着医学的发展,儿科学内容愈加广泛、专业越分越细,同时和其它学科的关联日渐密切。以WHO和联合国儿童基金会为主导的各国间的互相联系日益显得重要。目前,发达国家中,重度营养不良、严重传染病和结核病已罕见而变态反应性疾病、先天畸形、肿瘤、遗传代谢性疾病相对突出。但一定时期内,推广母乳喂养、QRS疗法,扩大计划免疫复盖率仍是广大第三世界国家儿科工作者的中心任务。

(安徽医科大学第一附属医院邵鹏飞  
副教授;杨正修审)

**小儿液体疗法** therapy of liquid 临床使用溶液对患者进行治疗,补充其体液之不足,调整体液中电解质,维持内环境稳定。很多疾病患者可发生不同程度的体液变化而影响各脏器的正常功能,同时又可导致原来疾病的病情恶化,加重机体病理变化甚至危及生命。所以正确掌握小儿液体疗法,能及时地促进病情好转。

小儿体液特点:第1特点是年龄越小,体液总量占体重的比例越高,新生儿占80%,婴儿占70%,儿童占65%,成人占60%。体液分布在3个区:(1)细胞内区,除新生儿占35%以外,其余各年龄组约占40%;(2)血浆区,各年龄组均为5%;(3)间质区,则年龄越小占体重的百分比越高,新生儿为40%,婴儿占25%,儿童为20%,成人为15%。间质液最不稳定,不含蛋白质,所含电解质浓度易改变,渗透压容易发生变化,可通过毛细血管膜(半透膜)与血浆区、通过细胞膜(透析膜)与细胞内区的进行物质交换,维持其血浆与细胞内区稳定性,故间质区被称为“保险水库”。第2特点是水代谢旺盛,婴幼儿每日需水量为每kg体重100~155ml,3~7岁为90~110ml,学龄儿童为60~85ml,成人为40~60ml;小儿体表面积大,不显性失水多,肾脏浓缩功能差,婴儿每日水交换占体液的25%,成人为6%。所以在疾病及某些因素影响下小儿更容易失代偿而引起水电解质代谢紊乱。

液体疗法起源于对霍乱、糖尿病酸中毒和婴儿腹泻等患儿的研究与治疗。1667年,Denys第1次将动物血液通过静脉输给1名男性患者,其后果虽然不佳,但却开创了静脉输液法。1831年,英国W. B. O'shaughnessy分析了霍乱患者的血液,描述了霍乱患者血液中水、碱及盐的缺乏。1882年,Sydney Ringer发现平衡盐溶液是补充组织液缺乏的最好液体。1883年,Stadelman用碳酸盐溶液治疗糖尿病酸中毒。1892年,Cantan用大量碳酸盐溶液治疗霍乱及有体液丢失的患者。1924年,Rudolph Matas实现了静脉滴注输液法。1932年,圣路易的儿科医师Alexis

Hartman 认识到患有严重腹泻的婴儿需要持续地大量输入液体,输入液体的钠含量应多于氯含量,产生了乳酸林格氏(Hartman's)溶液。1935年,Darrow和Yannet报道了细胞内液与细胞外液的交换。1949年,Darrow用钾盐溶液治疗婴儿腹泻,并在耶鲁大学医学院专门从事婴儿水和电介质平衡的研究。中国静脉液体疗法始于50年代,当时学习西方国家小儿静脉输液技术,并很快应用到各级儿科医疗单位。60~70年代出现了不少小儿液体疗法学派,中国医学科学院李家宜(北京)的4:3:2法,应用的基本溶液为4:3:2液(生理盐水:5%G,S:M/6乳酸钠);北京市儿童医院邓金漆的2:1和改良达罗氏法;天津市儿童医院范权氏的5:6:7法;上海第一医学院的3:2:1法,等等。

液体疗法的进展在于生化检测技术的提高,正确、及时判断电解质紊乱及酸碱平衡。60~70年代,主要是检测血清中电解质及二氧化碳结合力;70~80年代开始血H<sup>+</sup>浓度及血气分析,特别是开展微量血检测,简单、快速、准确。正常情况下血液H<sup>+</sup>浓度值在5.43~5.56×10<sup>-8</sup>mol/L之间,当各种原因引起H<sup>+</sup>浓度值偏离正常范围时就会导致酸碱平衡紊乱。血清中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>降低或升高超出正常范围而引起H<sup>+</sup>浓度异常,称为代谢性酸中毒或代谢性碱中毒;动脉血二氧化碳分压(PO<sub>2</sub>)升高或降低引起的H<sup>+</sup>浓度失常,称为呼吸性酸中毒或呼吸性碱中毒。血气分析还有助于对混合性酸碱紊乱的鉴别。近年来,阴离子间隙(AG)被广泛应用于酸碱平衡紊乱的诊断。血浆区阳离子与阴离子总是平衡的,主要阳离子为钠(Na<sup>+</sup>)、钾(K<sup>+</sup>)、钙(Ca<sup>2+</sup>)、镁(Mg<sup>2+</sup>),阴离子为氯(Cl<sup>-</sup>)、碳酸氢根(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、蛋白质及有机酸,血钠减去血氯及碳酸氢根之差称为AG,正常为10~12mmol/L,<10mmol/L一般不可能发生酸碱紊乱,大于15mmol/L表示血中有机酸或无机酸增多,称为高AG性代谢性酸中毒;由于低钠高氯引起的AG不增加酸中毒称为正常AG性代谢性酸中毒。AG值是混合性酸碱平衡紊乱及内环境离子分布异常的重要指标。在诊断酸碱失衡时还要根据电解质、肝肾功能、血清乳酸值、酮体等的测定值,结合病因病情综合分析。

液体疗法常用的液体有3类:一为胶体溶液,全血、血浆、白蛋白及大分子右旋糖酐等,用于扩充血容量,治疗休克、失血及肺水肿等病人;二为葡萄糖溶液,供给水份、热量,输入药物及纠正体液高渗状态,常用的有5%、10%、25%、50%4种浓度,5%浓度接近等渗,20%以上浓度张力很高,能引起渗透性利尿,脱水降颅压;三为电解质溶液,补充体液,纠正水、电解质失衡和酸碱失衡,常用的有生理盐水、复方氯化钠溶液、平衡液。碱性溶液有11.2%乳酸钠,1.87%为等渗溶液;5%碳酸氢钠,1.4%为等渗溶液;不含钠的碱性溶液为三羟甲基氨基甲烷(THAM),3.64%为等渗溶液,利用上述液体可配制各种张力的混合溶液。

世界卫生组织1971年推荐的口服补液盐(ORS)成份为:氯化钠3.5g,碳酸氢钠2.5g,氯化钾1.5g,葡萄糖20g,加水1000ml,其张力为331mmol/L,即等渗液;葡萄糖在体内氧化后成为2/3张液体;以后把碳酸氢钠改为枸橼酸钠2.94g,葡萄糖改为蔗糖40g,称为新ORS。应用时对高渗性脱水及排便量多的患儿应再适当稀释。1981年下半年在我国普遍推广口服补液盐治疗急性小儿腹泻脱水,纠正脱水平均成功率达96.9%。近几年“新型口服补液盐”已发展到20多种,其中谷物口服补液盐应用较多。

婴儿腹泻患者的体液特点,多为等渗性脱水,酸中毒同脱水程度平行,中重度脱水者多伴有不同程度缺钾,常有钙镁缺乏。治疗则尽量应用口服ORS溶液,轻度脱水用60~80ml/kg·d,中度脱水而不呕吐患儿用80~100ml/kg·d,少量多次口服,8~12h内服完,可以继续喂哺母乳,人工喂养者应减少含脂类饮食,牛奶应适当稀释。腹泻脱水小兒,如有腹胀、呕吐或重度脱水,应静脉补液。重度脱水者补液150~180ml/kg·d,中度脱水者补液120~150ml/kg·d,轻度脱水者补液90~120ml/kg·d。血钠在130~150mmol/L之间为等渗性脱水,应补1/2张液。

液。如病儿脱水严重,出现末梢循环不良,有条件时先给血浆或5%人体白蛋白10~20ml/kg,于10~30min输入,继给2:1等张含钠液(2份生理盐水,1份1.4%碳酸氢钠或1.87%乳酸钠溶液)20~30ml/kg,于60min内快速静脉滴入,然后给2/3张、1/2张、1/4张溶液,即按先浓后淡原则;液体总量的一半应于8h内补充,主要是补充累积丢失液扩充循环血容量,余下1/2应于16h内均匀补充。酸中毒患儿,应首选5%碳酸氢钠,计算方法为血检二氧化碳结合力按体积计算者,(40-X)×kg体重×0.5=5%碳酸氢钠ml数;有血气分析结果者,(BE-3)×kg体重×0.3=碱性溶液mmol数;11.2%乳酸钠1ml提高1mmol,5%碳酸氢钠1.7ml可提高1mmol。先给计算剂量的一半,6h后如酸中毒仍未纠正,再给半量。对高AG代谢性酸中毒者及呼吸性酸中毒者治疗应以改善通气、给氧、改善微循环为主。代谢性碱中毒者的治疗,应查找病因,如有低血钾、低血氯,一般给生理盐水,重症者给2%氯化铵。血钾测定和心电图检查可以确定患儿低血钾情况。钾补充要慢,3d补足为宜,饮食中含钾多,口服热量已达总热量一半时,不必再补钾。一般补钾浓度为0.3%,在特别低钾情况下,亦可用0.5%~1%氯化钾溶液静滴,但速度要慢,并要有心电图监护。补液中应观察病情,随时调整计划,如尿量增加,脱水没有纠正,说明补液张力低;如尿量不多,已出现浮肿,表示补液张力过高;补液中患者出现咳嗽气促、吐粉红色泡沫痰、心率快、肺部出现罗音,可能为补液速度太快,出现心力衰竭;出现腹胀多表明低钾,出现抽搐考虑为低钙、低镁。

小儿肺炎液体疗法:混合性酸中毒多见,常有体内钠水潴留趋势,高钾多于低钾。目前多主张供给足够水分,有利于基础代谢及减轻呼吸道分泌物粘稠度。一般补液60~90ml/kg·d,给1/4~1/5张液体。如伴有脱水,可给同等脱水的2/3量,速度宜慢。纠酸宜用5%碳酸氢钠,每次3~5ml/kg,同时可以扩张肺部毛细血管,改善肺部血流灌注。

新生儿体液特点是血氯、血钾偏高,糖无氧酵解多,易有代谢性酸中毒,肾脏排酸排钠功能差,多出现高渗性脱水。液体疗法主要用于腹泻、呕吐及感染等原因引起的脱水、酸中毒患儿。补液量大于婴幼儿的,第一天补液量,轻度脱水者120~150ml/kg,中度脱水者150~200ml/kg,重度脱水者200~250ml/kg;常应用2:3:1(2份生理盐水,3份5%葡萄糖糖水,1份碱性溶液)1/2张溶液,重度脱水者应用2:1等张含钠液20ml/kg静脉缓慢注射扩容,有条件时输血浆10ml/kg。应用5%碳酸氢钠纠酸要稀释成等渗液使用,静脉补液宜用5%葡萄糖,新生儿葡萄糖用量每小时不宜超过0.4~0.5g/kg,否则会引起高血糖、渗透性利尿及糖尿。

随着现代检测技术的进步,对每一类疾病病理生理的充分认识,液体疗法在各类疾病治疗中发挥着越来越大的作用。动脉血血气分析、细胞膜功能、血容量检测,静脉高营养疗法,微量输液泵应用,溶血症、败血症病人换血治疗等,大大提高液体疗法水平。因为机体有一个强大而完整的自身调节系统,目前液体疗法仍趋向于简单方便,能口服的尽量用口服补液。在中国积极宣传推广口服补液,简化补液手续,对广大农村及山区仍是重要的任务。

#### 参考文献

- 1 Santosham M, et al. *New Eng J. Med.*, 1982, 306: 1070
- 2 刘喜贵. 小儿液体疗法. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1984
- 3 Schuet F J, et al. *Lehrbuch der Kinderheilkunde* 25rd ed. Gustav Fischer Verlag Stuttgart, 1985, 117~134, 328~329
- 4 Behrman, et al. *Nelson Textbook of Pediatrics* 13th ed. Philadelphia, 1987, 165, 182~188, 191~200
- 5 郭迪, 等. 儿科基础与临床. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 412~415, 748~752
- 6 邵肖梅, 等. 中华儿科杂志, 1990, 28(1): 32
- 7 宋广林. 实用小儿液体疗法. 北京: 海洋出版社, 1990



8 马沛然,等.小儿腹泻.北京,人民卫生出版社,1991.227~245

(安徽医科大学第一附属医院儿科杨正修教授撰,朱子杨审)

**小儿佝偻病 rickets** 佝偻病是由于钙磷代谢障碍导致的,以生长发育迟缓、骨骼畸形为主要表现的一组症候群,临床上至少十几种疾病可引起佝偻病。其中维生素 D(V<sub>D</sub>)缺乏性佝偻病占 95% 以上。由于 VD 和 VD 强化食物的推广以及生活水平的提高,本症在一些发达国家已基本消失,但在大多数发展中国家,其患病率仍居高不下。中国 80 年代的大面积调查资料证实,3 岁以下小儿总患病率为 40.7%,北方由于寒冷季节长,日照时间短,患病率多在 50% 以上,河北省达 61.75%,而南方为 13.7%~16.2%。80 年代后期,各国经济发展增长,高大建筑、工业废气、煤烟灰尘亦相应增多,使小儿接触阳光中紫外线的机会和强度明显减少,致使本来一些阳光充足的国家如以色列、意大利、泰国等发病率又呈上升趋势。

18 世纪中叶,英国的工业革命使得大城市中 80% 的婴幼儿出现发育迟缓、反应淡漠、下肢软弱、后期出现多种骨骼畸形等一系列病态,由于病因不清,命名为“英国病”,又称为“烟瘴病”。100 多年后,人们发现多晒太阳可减少本症的发生。Trousseau 观察到服用鱼肝油是治疗本症的有效手段,并认为骨软化症就是成人的佝偻病,确定了佝偻病是营养性疾病的观点。1918 年 Edward 用缺乏某些脂肪内所含的一种因子来哺育幼犬,而诱导出实验性佝偻病狗,1925 年,这种抗佝偻病因子被 Mcellum 和他的同事们命名为 VD。近 20 年来,人们对 VD 的代谢、生理、生化有了较详尽的了解,VD 进入人体后,贮存于血浆、肌肉、脂肪组织和肝内,在肝细胞内质网和微粒体的 25-羟化酶系统作用下变为 25-OHD,后者在肾近球小管上皮细胞内经 1-羟化酶作用变成 1,25(OH)<sub>2</sub>D,此即 VD 在体内的活性形式,较 25-OHD 生理活性强 100~200 倍。VD 和它的羟化物通过特异性 α<sub>2</sub>-球蛋白运转到靶细胞。

佝偻病分类尚未统一。一般将其分为 2 类:伴低钙血症者称钙源性佝偻病,伴低血磷者称磷源性佝偻病。晚近有人根据 VD 代谢和靶器官反应将其分为 2 组:(1)VD 活性代谢物缺乏性佝偻病。因 VD 代谢中某些障碍导致 1,25(OH)<sub>2</sub>D 减少引起,如 VD 缺乏症、肠、肝、肾疾病引起 VD 吸收、羟化障碍,VD 依赖性、抗癫痫药引起的佝偻病等;(2)效应细胞异常性佝偻病:由于肾小管回收磷缺陷引起肾性低磷血症,常无低血钙和继发甲状旁腺功能亢进,如范可尼综合征、肾小管酸中毒、遗传性原发性磷血症、非内分泌性肿瘤伴低磷血症性佝偻病等。Fraser 根据病程将本症分为 3 期,轻症佝偻病变化及低血钙期、血钙正常而血磷下降期、血钙和血磷均下降期。1986 年 5 月,中国卫生部颁发了《小儿四病防治方案》,提出了本症的诊断和分期标准,初期以神经、精神症状为主,骨骼改变、血生化检查及 X 线检查有轻度异常,激期除精神、神经症状外,有明显的骨骼改变体征、显著的 X 线异常和血生化异常,恢复期,临床症状渐消失,骨骼 X 线片和血生化指标先后恢复正常,后遗症期多见于 3 岁以后,仅遗有骨骼畸形。

除直接影响运动系统发育外,佝偻病所引起的其它脏器功能异常日益受到人们重视。有人观察到不同阶段的佝偻病免疫功能有不同程度下降,PHA:OT 反应, E 花结率显著减低,血 IgA 和血浆纤维结合素(Fn)水平亦低于正常,提示细胞免疫和体液免疫功能受损,易致反复感染和使其他疾病的病程延长。引起免疫功能低下的原因可能和钙磷代谢障碍、继发缺锌有关。有人通过病解发现:本症病儿脑组织肿大、苍白、变软变脆、脑脊液压力增高。Jong 亦曾记录佝偻病患儿有良性高血压表现,VD 治疗后好转。作者认为此类症状由钙磷代谢紊乱、影响细胞内能量利用、细胞膜结构及细胞内离子浓度,从而引起脑水肿和假性脑瘤表现。Khajavi 等还观察了 30 例住院的严重佝偻病病儿,发现全部病例均合并有肺部异常,多为弥漫性间质肺炎样改变,少数可

有肺不张。笔者将这种佝偻病所致的肺部改变称之为“佝偻病肺”。俄国学者还发现本症可影响甲状腺功能,T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub> 浓度在活动期减低,恢复期渐升高,TSH 正常,说明影响的部位在甲状腺组织本身而非脑垂体。

骨骼 X 线摄片仍是佝偻病的重要检查手段,甚至有人认为无肯定的骨骼变化就不能诊断为佝偻病,但其在早期的诊断价值有限。血钙、磷、AKP 检查亦是传统的实验室指标,但因为易受多种因素影响而缺乏特异性和敏感性。目前公认,体内 VD 缺乏的最好客观指标是血 25(OH)D 和 1,25(OH)<sub>2</sub>D 水平测定,前者正常浓度为 15~35ng/ml,后者约 30~60pg/ml。血中 VD 代谢产物的水平直接反映了 VD 及钙、磷的代谢情况,国内外报导日光浴和 VD 的补给可提高体内 25(OH)D 浓度。两者呈直接正相关。近年来还有人发现 VD 可影响肾小管对氨基酸的重吸收,因此尿中氨基酸浓度亦是评价 VD 营养状况的敏感指标,当 VD 缺乏时尿中氨基酸浓度升高。

本症的治疗主要是补充 VD,但给予 VD 的剂量颇不统一。传统突击疗法:活动期肌注 VD120~180 万 U,苏联教科书中建议中、重度佝偻病每天服用 1~1.6 万 U,总量 60~80 万 U 若出现手足搐搦症,可一次性予 VD<sub>3</sub>4~6 万 U。1986 年中国卫生部推荐的剂量为 VD<sub>3</sub>30 万 U,肌注 2~3 次,每次间隔 1 个月。近期有学者建议:(1)最好用一般剂量口服;(2)用大剂量 VD 应有严格适应证,注射 30 万 U/次比 60 万 U/次更安全;(3)注射 1/次大剂量后应待 1 个月经 X 线和血生化检查判断疗效,效果不佳者应与非 VD 缺乏性佝偻病相区别;(4)第 2 次和第 3 次大剂量注射最好不用。

近年来有人试用 25(OH)D 和 1,25(OH)<sub>2</sub>D 治疗佝偻病,但报导不多,不少学者认为 V<sub>D</sub> 治疗本症有确切效果,25OHD 和 1,25(OH)<sub>2</sub>D,并无实用价值。佝偻病骨骼变化的直接原因是缺钙,而中国人群钙摄入量常低于营养标准,因此在补充 VD 的同时,每日补充 200~500mg 钙有利于骨的钙化。但补钙过多可影响铁、锌的吸收。除补充钙以外,还有人认为补入适量的维生素 A、B、C 有利于改善症状,促进骨骼的发育。

预防本症应以日光浴为主。Specker 用紫外线光度计准确记录照射时间,结果发现儿童夏季每周户外光照 469min 只能使 25OHD 提高到 23ng/ml,中国陈氏给母乳喂养儿日光浴 63min/d 达 2 个月,血浆 25OHD 渐下降,而实验组日光浴 116min/d,2 个月后 25OHD 上升至 38ng/ml,除日光浴外,母乳 25OHD 水平和婴儿血 25OHD 相关,乳母每日服 VD2000U,可使婴儿血 25OHD 上升,其效果与婴儿自服 VD400U 和相仿。Ala-Houha 认为:每日给婴儿 800UVD 可使 25OHD 和血钙、磷水平维持在正常水平。未成熟儿由于消化道受体对活性 VD 感受性低下和羟化酶活性不足,因此佝偻病患病率较高,1985 年, American Academy of Pediatrics (AAP)认为早产儿最低 VD 摄入量不应少于 500U,而 1987 年 European Society of Pediatric Gastroenterology and Nutrition(ESPGAN)认为应 800~1000U 方可达到预防目的。

佝偻病是儿科常见病,大多数发展中国家中仍有较高患病率,因此在一定时期内大面积的预防、降低本症发病率仍是这些国家儿科医师的首要任务。目前,治疗剂量尚未标准化,主要原因是缺乏治疗后血 25OHD 的动态变化资料,因此,长期、系统地观察肌注 VD 后血中 25OHD、钙、磷的变化已成为当务之急。此外,对低磷佝偻病、佝偻病和遗传的关系、佝偻病对全身多功能的影响等均有待于进一步深入研究。

(安徽医科大学第一附属医院都鹏飞副教授、杨正修教授撰,朱子杨审)

**小儿腺病毒感染** 腺病毒是 1953 年 Rowe 等从健康儿童腺体里分离出来的,1954 年 Hilleman 等又从急性呼吸道疾病患者的咽喉洗液液中分离到同样的病毒,1956 年 Euders 等建议将这类病毒称为腺病毒(以下简称 Adv),并为国际病毒委员会

接受。Adv 在病毒学中重要性有以下几个方面:第1,这种病毒分布广泛,其引起疾病的流行是世界性的,引起人类(主要是婴幼儿)的感染性疾病包括流感样疾病、急性咽炎、婴幼儿致死性肺炎、咽结合膜热、角膜结合膜炎、膀胱炎、严重肠炎及中枢神经系统感染等。这些感染有的呈流行倾向,起病急,病情重,有一定的病死率;第2,它可发生人类腺样体和其他淋巴组织急性持续性感染;第3,研究发现 Adv 可使鼠细胞发生转化,有些型别可致癌变;第4,Adv 易于培养、纯化是研究真核细胞基因表达良好模型。30年来一些学者对 Adv 进行了较深入广泛的研究,中国从1958年以来,对 Adv 感染(尤其是肺炎)的病原学、流行病学、病理、临床症候学、快速诊断及治疗等方面进行了系统性研究。

与人类致病相关的 Adv 已发现42个血清型,瑞典 Wadell 根据毒粒结构、生物学、生化及免疫学特性,将 Adv 42个血清型分为7个亚属(A、B、C、D、E、F、G),各种型别在世界范围流行不一,所致疾病亦有差异。主要有如下情况:

1. 地方性 Adv 感染。主要代表型别是 Ad<sub>1</sub>、Ad<sub>2</sub>、Ad<sub>6</sub>。在美国的纽约、西雅图及欧洲的瑞典斯德哥尔摩等地区,这3个型别具有地方集中感染的特点,其感染对象多见1岁左右婴幼儿,表现以咽部感染的热性发疾病。

2. 地理分布。在世界各地凡调查疑似 Adv 感染的地方,都发现 Adv 大多数型别,特别是沙特拉伯和非洲大部分国家,更易分离出高数码 Adv 毒株。

3. 时间分布。与 Adv 感染有关的呼吸道疾病,多发生在冬末及春季,而与游泳有关的咽结合膜热多在夏季。

4. 年龄分布。Adv 感染多见于15岁以下儿童,5岁以下更易患呼吸道感染,特别是以肺炎为主要病变的,在婴幼儿占比例更多。肠道感染以婴幼儿多见。Adv 其他感染无明显年龄区分。

5. Adv 各亚属与人类疾病关系(见下表)。目前,Adv 对动物有肯定致癌作用的研究报道很多,尚未发现 Adv 感染对人类的致癌作用。

表1 Adv 亚属与人类疾病关系

| 亚属 | 所属血清型                     | 引起人类疾病                      |
|----|---------------------------|-----------------------------|
| A  | 1,2,18,31                 | 隐性肠道感染                      |
| B  | 3,7,11,14,21,34,35        | 呼吸道疾病,肾脏持续感染出血性膀胱炎,中枢神经系统感染 |
| C  | 1,2,5,6,7,8,9,10,13,15,17 | 呼吸道疾病,淋巴样组织持续感染             |
| D  | 19,20,22,23,24,25         | 角膜结合膜炎                      |
| E  | 4                         | 结合膜炎,呼吸道疾病                  |
| F  | 40,42                     | 婴儿腹泻                        |
| G  | 41                        | 肠炎                          |

随着分子生物学发展,Adv 研究工作推动了有关 Adv 分子流行病学研究工作的发展。不同时间、不同地区分离的 Adv,即使是同一血清型,其基因组内部也可能有变异。这可以从限制性内切酶谱上加以区分,将其划分为基因组型。比较不同地理环境、不同时间及空间病毒株的毒力和致病性,同一血清型的不同基因组型均有差异。在一定的时间内有优势基因组型流行,优势基因组型存在转移现象。

Wadell 等及 Li 等的研究表明,自1954~1984年从亚洲、欧洲、北美、南美和澳大利亚分离的40株 Ad<sub>7</sub>病毒,用 BamHI 等12种限制性内切酶进行分析,结果40株 Ad<sub>7</sub>可以分为15个基因组型。后者大致可分3个组:第1组 Ad<sub>7a</sub>和 Ad<sub>7b1</sub>;第2组为 A<sub>7b</sub>;第3组为其他12个基因组型。Ad<sub>7a</sub>、Ad<sub>7b</sub>均在中国流行过。

1953~1985年间从亚洲、非洲、澳大利亚、欧洲、北美和南美分离的61株 Ad<sub>3</sub>病毒,用多种限制酶分析,结果可分为17个基因组型,后者分为3个组,第1组 Ad<sub>3p</sub>、Ad<sub>3P1</sub>、Ad<sub>3p2</sub>和 Ad<sub>3b</sub>~Ad<sub>3b16</sub>,第2组只有 Ad<sub>3c</sub>,第3组包括 Ad<sub>3a1</sub>~Ad<sub>3a8</sub>,Ad<sub>3c</sub>、Ad<sub>3d</sub>、Ad<sub>3d1</sub>~Ad<sub>3d7</sub>。其中 Ad<sub>3a2</sub>主要流行于中国,长达24年之

久(1962~1985),同时50株 Ad<sub>4</sub>用16种酶分析,可以分为8个基因组型,21株 Ad<sub>11</sub>可以分为12个基因组型。

自从50年代人们发现 Adv 与人类疾病有关以来,中国就开始了小儿腺病毒感染的工作,获得较大的成绩。

1. Adv 是引起中国婴幼儿咽结合膜热及婴幼儿肺炎的重要致病原。1958年6月首先发现咽结合膜热在中国长春流行,长春市3个机关托儿所内有32例咽结合膜热病儿,证明 Ad<sub>3</sub>是此次流行的致病原,以后陆续证明其在婴幼儿中发病率高,病情也较重,常呈局部流行或小流行。在个别儿童机构有时呈暴发传染,并阐明了咽结合膜热是以发热、咽炎、结膜炎等3个主要表现的临床症状为特征。

自50年代以来,国外报道了 Adv 引起肺炎的病例,其主要血清型是 Ad<sub>7</sub>、Ad<sub>4</sub>、Ad<sub>3</sub>、Ad<sub>21</sub>,以散发或暴发形式流行。中国北方地区(长春、北京等地)于1958年发生大流行,发病率高,流行范围较广。病死率高达21.9%~32.2%,主要发生于婴幼儿,其特征是感染性强,发病时病情重。在典型的379例临床病例中,死亡83例,病死率为21.9%,细菌学检查均为阴性。从患儿咽拭子及死亡病例肺组织中分离出腺病毒,其血清型以7型为主,3型次之。从而首次证明了3、7型 Adv 是引起中国婴幼儿肺炎的重要致病原。

2. Adv 在脏器中的分布,引起的病毒血症和病理特点。60年代我科对双婴幼儿肺炎死亡患儿各脏器进行病毒分离,证实腺病毒在脏器中广泛分布,还存在病毒血症。在21例患儿肺组织及其他脏器分离出 Adv<sub>3</sub>型及7型。病毒在脏器分布较国外报道的广泛。以肺与扁桃腺分离率最高,脑肝肾次之,从胸水、脑脊液及血液中也分离出 Adv,在同一患儿各脏器所得的病毒皆为同一型。故推测 Adv 感染可能从上呼吸道波及下呼吸道引起肺炎,然后入血循环形成病毒血症。Adv 肺炎的病理所见是两肺病变范围广,各叶均被累及,重症病例病灶融合形成大片实变区,触之坚硬,切面呈均匀一致的暗红色。以支气管为中心形成粟粒大小的灰黄色病灶,肺上叶及前缘有肺气肿或肺不张。支气管粘膜充血,管腔内有多量分泌物。镜下可见病变轻重不一,主要以支气管为中心呈小叶分布并互相融合,其基本形态为单核细胞渗出性的坏死性支气管炎及支气管周围肺炎,支气管粘膜多坏死脱落,管腔内被坏死物堵塞,其周围间质明显水肿,单核细胞及淋巴细胞浸润,细支气管完全毁形或仅有少量平滑肌存在。病变的显著特征是组织坏死灶周边部或新鲜死灶内的肺泡上皮以及细胞内形态学改变与核内包涵体形成。

3. 7型腺病毒肺炎流行的周期性。50年代后期开始至80年代末期,对小儿3、7型 Adv 肺炎病原学研究发现,3型 Adv 和7型 Adv 的型别之间有周期性交叉流行趋势,即每年以一种型别流行为主,这一特点分别从各年代病毒分离结果所显示的流行规律及各年代血清学调查结果得以证实。(1)各年代病毒分离结果所显示的流行规律,1958~1990年从3345份咽拭子中分离出 Adv 969株,阳性率为29.0%,从而证实 Adv 是小儿肺炎最常见的病毒病原之一。969株中3型491株(50.7%)、7型374株(38.6%)、11型26株(2.7%)、21型10株(1.0%)、1型5株(0.5%)、2型6株(0.6%)、14型3株(0.3%)、5、6型各2株(各0.2%)、未定型50株(5.2%)。从整体上看,Adv 肺炎以3、7型为最多,每个年度亦均以3、7型为主,但各个年度3型和7型有显著波动,每年以1个型别占优势,两型的分布呈周期性交叉消长趋势,研究结果表明,Adv 肺炎大约2~3a有一次规模大小不等的流行。上述结果也表明,1、2、5、6、11、14、21型 Adv 也可引起小儿肺炎,与国外相类似。(2)各年度血清学结果:809份血清抗体检测结果与病毒分离的阳性符合率为71.4%,阳性符合率为88.1%,总符合率为80.3%(656/809),证实了病毒分离的可靠性,说明分离出的 Adv 确是引起肺炎流行的病原,将各年度3或7型 Adv 分离和血清学结果做比较,两型的病毒分离和血清学流行的周期性是相符的。(3)血清流行病学的调查结果表明,1097份健康儿血清中,新生儿 Adv 抗体阳性率和抗体水平较

高。6个月至2岁抗体水平较低,2岁以上阳性率显著提高,抗体水平随着年龄增长而增高。以上结果可以解释为何Adv肺炎以6个月至2岁患病率最高。同时也证实,如果某年Adv肺炎抗体水平显著降低,则次年发生该型Adv肺炎流行,且与型别抗体水平密切相关,说明通过抗体调查可预测第2年Adv肺炎流行的型别。

4. Adv肺炎的临床特征:中国学者总结了Adv肺炎的临床特征,为在无实验室条件下诊断Adv肺炎提供了重要依据。诊断参考条件是:(1)患儿高热不退,表现嗜睡或面色苍白或灰白;(2)在发生肺炎后仍有症状性眼睑浮肿及咽炎,或曾为百日咳、麻疹的早期又被否定者;(3)早期肺部体征不明显;(4)网状内皮系统反应较强,易发生肝脾肿大;(5)白细胞正常或减少;(6)胸部X线改变早于肺部体征出现;(7)抗菌素治疗无效。上述临床特征再结合现病史、既往史,对Adv肺炎可作出初步临床诊断。总结了800例,其临床类型可分为轻型、重型、毛细支气管炎型。7型Adv肺炎较3型肺炎表现重一些。在628例Adv肺炎中,有168例并发多种器官衰竭,器官衰竭依次是心衰、呼衰、脑衰、肝衰及肾衰。Adv肺炎合并症中,有明确心肌炎者148例,明确肺炎、脑膜炎者78例。

Adv直接引起中枢神经系统感染,临床表现为3个型:脑炎型、局灶脑炎型及脑膜脑炎型;亦有一些引起小脑共济失调的病例。

5. Adv肺炎感染的治疗:70年代采用抗Adv马血清治疗,治愈率高达96.3%,由于马血清有一定不良反应,如血清病等,使治疗受到限制。婴幼儿患Adv肺炎时免疫功能不足,故在治疗上应调节免疫功能,加强免疫疗法。如应用血浆、胸腺肽、干扰素及中西医结合方法等,病死率已下降到5%~8%左右。有关治疗问题需进一步探讨。

6. 80年代末,我科与国内5个单位(沈阳、北京、南京、上海)对13年间246株3、7型Adv用限制性内切酶BamHI、BglI、SnaI、HindIII、EcoRI、XbaI 7种酶进行核酶图谱分析,其中Ad<sub>3</sub>141株、Ad<sub>7</sub>195株。中国5个地区141株Ad<sub>3</sub>核酸图谱分析表明,近10余年Ad<sub>3</sub>有3个基因组型,Ad<sub>3</sub>I占97.1%(137/141),分布于各地区及年间,它是流行的优势基因组型。Ad<sub>3</sub>I、Ad<sub>3</sub>II两者只占2.8%(4/14),仅在长春地区散在出现。说明中国流行的Ad<sub>3</sub>变异度小。4个地区105株Ad<sub>7</sub>中,长春地区1976~1982年分离的33株均为Ad<sub>7b</sub>,1982年出现Ad<sub>7d</sub>、Ad<sub>7c</sub>与Ad<sub>7d</sub>共同感染流行于1982~1986年4个年度。1987年以后,再未发现Ad<sub>7b</sub>,全部为Ad<sub>7d</sub>,表明7d是Ad<sub>7</sub>流行的唯一基因组型。说明中国部分地区1976~1981年Ad<sub>7b</sub>是流行的优势基因组型,而1987年以后,Ad<sub>7d</sub>取代了Ad<sub>7b</sub>,即优势基因组型由Ad<sub>7b</sub>转移到Ad<sub>7d</sub>,这个结果提示,Ad<sub>7d</sub>的遗传性持续、稳定遍布于世界流行30年后,在中国出现了相对不稳定,由Ad<sub>7b</sub>变异为Ad<sub>7d</sub>,这种变异导致致病基因片段毒力和致病性发生改变,Ad<sub>7d</sub>的毒力减弱。

比较Ad<sub>3b</sub>、Ad<sub>7b</sub>、Ad<sub>7d</sub>与临床致病的关系,它们均是肺炎的致病原,Ad<sub>7b</sub>感染多以重症肺炎出现。Ad<sub>7b</sub>、Ad<sub>3</sub>I的感染多以相对轻症肺炎居多。Ad<sub>7b</sub>仅以肺炎出现,而Ad<sub>7d</sub>、Ad<sub>3b</sub>除是肺炎致病原外,还可引起急性结膜炎、咽结膜热。在中国Ad<sub>7b</sub>毒力强,而Ad<sub>7d</sub>、Ad<sub>3b</sub>毒力相对弱,但致病范围广。由于1982年后Ad<sub>7d</sub>出现,且逐年增多,可能是近年中国重症Adv肺炎减少的原因,推测随着Ad<sub>7d</sub>在今后流行中占主导地位、急性结膜炎、咽结膜热等临床症状轻,预后好的病例可能会增多。

Adv感染引起人类疾病中最突出的是婴幼儿肺炎,控制本病对整个儿童呼吸道疾病的防治具有重要意义。Adv的毒粒结构、基因组结构,基因组的转录及分子流行病学的研究,均取得了很大进展,研究的最终目的是控制Adv感染分子的蔓延发生,控制Adv感染仍需对病毒感染分子病理,疫苗制备,先进技术检测及较大范围分子流行病学调查等方面进行深入研究。

Adv肺炎死亡患儿脏器病毒分离,病毒血症及病理变化的研究,奠定了深入研究的基础。因此,深入研究Adv与机体靶细胞的相互作用以求进一步阐明Adv发病与免疫的分子机制,其

主要内容应包括Adv蛋白与靶细胞受体相互关系,Adv的持续性感染问题,Adv基因和细胞组的相互作用,Adv感染与免疫等。

针对致病性强,危害性大的某些Adv型别,如Ad<sub>7</sub>是引起婴幼儿重症肺炎的重要致病原,制备安全有效的疫苗是具有战略意义的课题,Adv基因结构的了解,使基因工程疫苗的研制成为可能。有关Adv与癌症的关系亦应深入研究。随着基因工程干扰素的制备成功,Adv感染的治疗将会有新的突破。采用新技术诊断Adv,如多聚酶链锁反应(RCR),将在检测Adv的研究工作受到重视。

(白求恩医科大学一院儿科博文永撰)

### 小儿先天性心脏病 congenital heart disease (CHD)

小儿时期最常见的先天异常,约占30%。国内报告患病率为0.03%~0.09%。中国上海第一医学院统计48267例入院患儿,有CHD者1076例,占入院患儿的2.23%。随着现代医学的发展,有些对儿童生命和健康威胁较大的传染病和细菌感染性疾病的发病率和病死率已大大减少,而CHD同遗传代谢性疾病相对增加。如何增强对CHD的预防、诊断和治疗的认识,是儿童保健工作的重要任务。

据资料统计有8种CHD最常见,共占CHD的85%左右,它们是:室间隔缺损(VSD),动脉导管未闭(PDA),房间隔缺损(ASD),肺动脉狭窄(PS),主动脉狭窄(AS),主动脉缩窄(Coarctation of the aorta),法乐氏四联症(F4),主动脉转位(TGA)。一般来说,CHD没有性别差异,但有些多见于男性:如AS、TGA、F4以及主动脉缩窄;有些多见于女性:如PDA、ASD。大约13%的CHD患儿有1种以上畸形,10%~15%患儿有心外畸形。年龄越小CHD发病率越高,因为严重复杂的心血管畸形,多于生后数日或数月内死亡,约1/3的CHD患儿死于围产期,60%在婴儿期内死亡,故新生儿期和儿童期先心病类别不同。多伦多儿童医院统计儿童CHD:VSD占28%,ASD10%,PDA10%,PS10%,F410%,AS7%,主动脉缩窄5%,TGA5%,其它15%;该医院统计了1966~1975年1558例新生儿CHD,PDA占18%,VSD14%,完全性TGA13%,复杂心脏畸形10%,左心发育不良9%,主动脉缩窄综合症8%,F47%,右心发育不良5%,PS4%,心内膜垫缺损3%,心肌疾患2%,肺静脉异位引流及永存动脉干各2%,AS1%,其它2%。

CHD病因仍然不清楚,但目前比较公认的是胎儿周围环境与遗传因素相互作用的结果。遗传因素中,有多基因突变,常引起单一的心脏畸形,单基因突变,包括常染色体显性、隐性遗传,X—连锁遗传,常引起除心脏外的多发性畸形,如手畸形综合症,软骨外胚层发育不全综合症等;染色体畸形常引起包括心脏在内的多发性畸形,如猫叫综合症21-三体综合症,吐纳氏综合症,18-三体综合症等,以上综合症的患儿,有25%~90%合并CHD。外因主要受生物及理化因素的影响,最多见的为风疹病毒,其次是Coxsackie B组病毒等,可致心脏畸形,X线照射;能通过胎盘的某些药物,如反应停,四环素,奎林,抗代谢药物等;孕妇糖尿病,高钙血症,40岁以上高龄产妇,高原地区缺氧,均易发生小儿CHD。据研究,在CHD病因中,外环境因素占2%,遗传因素8%,其中单基因突变3%,染色体畸变5%,遗传—环境因素相互作用占90%。

CHD的诊断:文献报告,通过临床检查,心电图及胸部X线资料,能使大约75%~80%的CHD在生后第1年得到明确诊断。病史中应注意母孕史,小儿年龄及生长发育情况;检查有否并存畸形,心脏杂音特点,心底部第2音性质,有否周围血管体征;正位及左侧位胸片,观察心脏及大血管形态和搏动情况,肺血多少,食道吞钡能确定房室大小程度;心电图检查能了解心脏位置、心室负荷及房室肥厚。

心导管及心血管造影是确诊CHD畸形类型和手术前的必要检查。根据需要可以做右心及左心导管检查,必要时进行选择

性心血管造影。中国医科院心血管研究所报告小于1岁的小儿及病情严重的复杂畸形使用非离子型造影剂能减少副反应。

超声技术是一项新的无创性的CHD检测手段。70年代中期M型超声心动图问世,特别是二维超声心动图及多普勒的应用,使超声诊断CHD成为临床可靠的无创性诊断方法之一,对最不典型的新生儿期先心病诊断是一个突出的贡献。80年代多普勒彩色血流显象是心脏超声诊断领域中一大进展,能清楚显示复杂性CHD中畸形分流、梗阻、返流情况,并能作出定量诊断。介入性超声在CHD诊治方面已逐步得到开展,如今可在二维超声心动图监视下行漂浮导管气囊定位,确定分流部位,施行治疗,如球囊房间隔撕裂术,PS的球囊扩张成形术等。晚近食道超声心动图已被用于术中麻醉患儿,显像更清晰,尤其能清楚显示后部心内结构。应用多普勒超声心动图显示胎儿的心脏结构及血流方向,部分先天性心血管畸形能早在胎龄4~6月时得到正确诊断。

数字减影血管造影(DSA)是常规血管造影与电子计算机相结合的一种检查方法,将X线探测到的信息输入计算机,经数字化,各种减影处理及再成像,能清楚显示心脏血管系统,直径1mm的小血管也能清楚地显示。DSA不仅显像清晰,而且造影剂用量小,X线辐射量低,配电视录像装置,可反复观察心血管结构。

放射性核素心血管造影采用Technetium-99mTc—过得酸盐快速静脉注射,以0.5s的间隔连续摄影,观察放射性物质通过上腔静脉、右心房、右心室、肺动脉和左房、左室的动态变化,可了解血流异常途径,并可计算分流流量,测定心功能。此法不要做心导管,也不要特殊准备,既安全又可重复检查。

CHD的治疗:以前内科治疗主要是预防及治疗并发症,增强体质,择期手术。应用消炎镇痛治疗早产儿动脉导管未闭有效率15%~85%。对胎龄36周以上的婴儿、体重低于1200g的早产儿效果较差。前列腺素E为有效的动脉导管扩张剂,右心发育不良,右室流出道梗阻病人可以应用,以延缓动脉导管关闭。导管法治疗CHD也越来越多地被采用。上海市儿童医院经皮插心导管堵闭PDA62例,随访6月至8年无不良反应或再通;山东医科大学附院经皮腔内瓣膜成形术治疗21例PS,经随访效果满意;上海新华医院报告完全性TGA球囊房隔造口术(BAS)32例,70%活到婴儿,并有8例进行了根治手术。

CHD的手术治疗已取得了很大成就。根据先心病类型及畸形程度,分为心外手术,如PDA,PS,主动脉缩窄等的手术和心内手术(指阻断循环、进行心内缺损的修补,肥厚肌肉的切除,瓣膜的成形等),如VSD,F4,TGA等的手术。阻断血循环可以通过人工心肺机,在低温下施行手术;也可以在深低温下进行心内直视手术,不要体外循环。从治疗达到的目的着眼有姑息手术,如球囊房隔撕裂术或称Rafshkind氏手术,体肺循环分流术,如锁骨下动脉与肺动脉吻合手术,肺动脉环扎术,以上仅用于没有条件或可能进行一次手术者;根治手术:症状不重的PDA以及ASD,学龄前手术为宜。VSD直径小于主动脉瓣环一半,肺循环/体循环血流为1.5/1,很少引起肺动脉高压和心脏扩大,且有自行关闭可能,不宜早手术,大型VSD合并肺动脉高压,宜在2岁内行根治术;F4及TGA可以先姑息,择期根治或一次根治;PS一般主张右室腔收缩压 $>6.65\sim 8kPa$ ,应该手术治疗。

CHD目前研究的重点:(1)进一步明确病因,进行着有效的预防;(2)无创性检查及非手术治;(3)使进一步提高手术的成功率,包括人工心肺机在术中的有效灌注。现代科技的综合发展,将CHD的诊治水平更上一个台阶。

(安徽医科大学第一附属医院儿科杨正修教授撰)

**小儿支气管哮喘** asthma of children 哮喘系儿科多发病。近年的研究提示不同地区哮喘发病率、严重性和死亡率有所不同。Kull调查结果说明,哮喘发病率以及皮试阳性率以高海拔山城为低。Ret报告:新西兰、欧洲和太平洋岛屿哮喘发病率分别为10.8%、13.5%和65%,但死亡率则新西兰比欧洲高5.5倍,

太平洋岛屿比欧洲高2.8倍。Willian报导澳洲有25%的儿童受影响,反复发作者占2.5%。自1977年以来美国、英国等统计资料表明,哮喘发病率和死亡率都在上升。如伯明翰1957年发病率1.8%,1975年增加到6.3%,巴布亚新几内亚1972年0.15%,1980年增到7.3%。15年来英格兰和威尔士儿童哮喘住院人数增加6.6倍,新西兰增加10倍。中国资料提示小儿哮喘占同期住院总人数的4.8%,死亡者占同期住院小儿的0.031%,呼吸衰竭和肺气漏是主要死因。

病因和发病机理 病因尚未明了,认为和以下因素有关:(1)过敏因素。感染的病原体及其毒素,吸入的花粉、霉菌、螨以及食入的某些异体蛋白均是常见的过敏原;(2)遗传因素:早在1650年,Sennetus报导1家3代连续出现哮喘,1932年Schwartz指出哮喘患儿中有家族史的占48%。目前多认为:哮喘是一种多基因遗传病,各致病基因间无连锁,在多种基因和环境因素共作用下发病,其中遗传因素占80%,环境因素占20%;(3)自主神经系统功能失调: Davis报告哮喘患者对 $\alpha$ -肾上腺能介质及胆碱能介质敏感性升高,且与气道反应相关。Palmer等认为感觉性神经肽在调节气道反应性方面起重要作用,其中以P物质最重要。此外,近年对肾上腺能 $\beta$ 受体研究颇多,研究表明:异丙肾上腺能能抑制胆碱诱发的支气管收缩;(4)其他如运动性哮喘、阿斯匹林类药物引起的哮喘以及血清铜蓝蛋白在哮喘发病中的作用尚不清楚。

哮喘的发病机理复杂,主要和变态反应、支气管的炎症反应以及气道的高反应性有关。1966年Lshizka首先证实了大部分哮喘病人体内IgE增高,推测本病和I型变态反应有关,1967年Pepys又提出免疫复合物在迟发性哮喘发病中有重要作用。近年来对IgE合成的调控机制障碍颇为重视。Hsieh认为IgE合成失调的原因和细胞免疫功能紊乱,尤其是T细胞亚群的失调有关。T辅助细胞/T抑制细胞比值升高,促成B淋巴细胞大量合成IgE形成高IgE。众所周知,组胺在哮喘发病机理中不占重要地位。最近对下列介质研究较多:(1)花生四烯酸代谢产物;(2)血小板激活因子(PAF)及血栓素 $A_2(TXA_2)$ ,MOLEY最近指出:PAF使支气管痉挛的能力比甲基胆碱大37倍,其致痉挛作用与 $TXA_2$ 有关,用选择性血栓素合成酶抑制剂FCE<sub>22173</sub>可明显抑制该作用;(3)趋化因子:包括嗜酸性粒细胞趋化因子(ECF-A)、高分子量的嗜中性粒细胞趋化因子(HMW-NCF)等。传统认为炎症介质均源于肥大细胞,目前已认识到:肺泡吞噬细胞、血管上皮细胞、平滑肌细胞及纤维母细胞均参与变态反应过程。1975年Purish发现,IgG<sub>2</sub>和速发变态反应亦有关,但在发病中不占主要地位。

气道炎症被认为与哮喘发病有关,通过纤维支气管镜和支气管肺泡灌洗技术,发现气道组织表现出不同程度的炎性变化,包括纤毛结构破坏、上皮基膜增厚、炎症细胞浸润和炎症介质的存在等。目前认为:慢性炎症对不断恶化的慢性哮喘是一个十分重要的成分。Wilson证明:用氮芥去除中性粒细胞后,过敏原激发的迟发反应和气道高反应性可消失。若再输入自身白细胞,则可重建过敏原激发的迟发反应。Naciel也证实:炎症可直接刺激气道上皮细胞使其释放强力嗜中性细胞趋化因子(LTB<sub>4</sub>),使嗜中性粒细胞在此处聚集。此外,受刺激的上皮g细胞可产生、释放环氧酶、脂氧酶面引发哮喘。

哮喘和气道高反应性的关系日益受到关注。导致气道反应性增高的原因与慢性过敏原刺激、理化因素及植物神经功能失调有关。Rando证实,过敏原自动免疫产生的气道反应性增高与特异性IgE无关,提示免疫过程本身的及通过非肺的抗原暴露途径均可使气道反应性增高。这种气道的高反应性可有即刻反应(I型变态反应,开始于过敏接触后10min内,10~30min达高峰,1~3h清除),也有持续反应(气道炎症反应,开始于刺激后3h,24h清除)。气道反应性测定在哮喘研究方面有重要意义。二氧化碳过度通气试验(IHV)即为简单易行的方法之一。Scharf等认为:哮喘病人IHV的阳性率在73%~100%,而正常人一般不出

现阳性反应,因此它具有特异、灵敏、安全、重复性好等优点。

**诊断和分型** 对小儿哮喘的分型仍有争议。一般分为外源性、内源性及混合性3种,而前者又可分为即刻反应型、迟发反应型、即刻迟发混合型。1987年成都会议上根据发病年龄和特点将小儿哮喘分3型:儿童哮喘、婴幼儿喘息和过敏性咳嗽,目前中国多沿用此种分型,有关“喘息性支气管炎”的命名尚有争议,欧美、日本等国学者认为喘息即是哮喘,中国则认为此病在发病年龄、临床表现及治疗方面都有其特点,因此1991年全国小儿呼吸道疾病防治会议上仍确定了这一疾病的存在。

1987年中国小儿呼吸道疾病防治座谈会上制定的小儿哮喘诊断标准已广泛用于临床,促进了本病诊断的标准化,但在诊断中应注意综合分析,详细询问发病情况、家族史、既往史,注意肺部的喘鸣音和全身缺氧情况,选择适当的特殊检查。肺功能测定对于确定病情、判断预后具有重要价值。目前多测定肺容量改变(FEV<sub>1</sub> FEV<sub>1</sub>~%、PEF、MMEF)及静态肺容量改变(TLC、FRC、RV、VC)。支气管激发试验、血清IgE测定(尤为特异性IgE测定)、嗜酸性粒细胞脱颗粒试验等为本病的病因、病情分析提供了新的手段。

**治疗** 黄嘌呤和β受体兴奋剂仍为首选。急性发作期可选用茶碱类、拟肾上腺素药和肾上腺皮质激素,以迅速解除支气管痉挛,减轻粘膜水肿和改善通气条件。可通过喷吸、雾化吸入、皮下或肌肉注射。传统观点认为茶碱的平喘作用在于抑制磷酸二酯酶的活性。Gushley发现治疗量的茶碱浓度很难起到此作用,其平喘的机理在于竞争腺苷受体,降低支气管反应性。近年来中国不少学者主张于负荷量或超负荷量的茶碱静脉滴入可增强平喘效果,但因易于出现毒副作用而未能普及。Richard等认为吸入β肾上腺能药物和感糖皮质激素不但可增加疗效,尚可减轻毒副作用。当出现哮喘持续状态时,首选大剂量的皮质激素和氨茶碱静滴,无效者可用酚妥拉明和阿拉明静滴,亦可选用舒喘灵和异丙肾上腺素联合静滴。皮质激素宜早用、大量、短期,3~5d后改为丙酸倍氯松或强的松龙喷吸。当出现严重缺氧或呼吸衰竭时,应尽早给予人工机械通气。

本病缓解期的治疗可选择:(1)脱敏治疗;(2)预防性服药,以色苷酸钠和酮替酚为常用;(3)免疫治疗,常用胸腺肽,转移因子、卡介苗、气管炎疫苗等;(4)中医治疗。

由于本病发病率高,对小儿健康危害极大,世界各国都投入大量人力、物力进行研究,但目前尚缺乏更大规模的流行病学资料,哮喘和感染、哮喘和遗传的关系亦尚未完全明了,世界范围内的标准化诊断和治疗等问题尚待进一步解决。免疫治疗虽然日益受重视,但尚无确切有效的方法预防复发。这些都将成为今后本病的研究方向。

(安徽医科大学第一附属医院郝鹏飞副教授、杨正修教授撰;朱子扬审)

**小儿腹泻** 腹泻是一种综合症,凡小儿大便次数增加达每天3次以上,并有性状及组成改变者即为腹泻。腹泻是小儿常见病,多见于婴幼儿,据世界卫生组织统计,世界上每年有10亿5岁以下小儿患腹泻,平均每年每人发生腹泻1.6次,导致500万小儿死亡,是第三世界国家小儿死亡的第1位原因。在中国,腹泻在小儿多发病中居第2位,农村5岁以下小儿腹泻发病率为201%,年死亡率为0.51%,某城市小儿腹泻年发病率为45%。

50年代后期到70年代,小儿腹泻命名为消化不良,70年代后期一般对年长儿腹泻称为肠炎,婴幼儿腹泻能明确病原的称肠炎,如轮状病毒性肠炎;致病性大肠杆菌肠炎等,病原不明的称为婴儿腹泻。80年代随着检测技术的改进,感染病原阳性检出率高达80%以上,世界卫生组织规定对小儿腹泻已有习惯性命名的(如霍乱、细菌性痢疾等)仍按原名;对无习惯性命名又确定为非感染性病因的,按其病因命名,如乳糖不耐受性腹泻;对无习惯性命名,又不能确定其病因的一律诊断为肠炎。

腹泻病因可分为两大类。其一为非感染性腹泻,主要见于气

候因素、饮食因素等所致单纯性腹泻,少见的病因有牛奶蛋白过敏及耐受不良、乳糖吸收不良、内分泌障碍等。其二为感染性腹泻,最常见的为肠道内感染,病毒性腹泻在2岁以下小儿约占感染性腹泻的50%以上,最多见的是轮状病毒,其次为坏疽病毒、星状病毒、腺病毒、小圆病毒、冠状病毒、肠道病毒等;细菌性腹泻,常见的有细菌性痢疾,大肠杆菌肠炎,沙门氏菌肠炎,空肠弯曲菌肠炎;其他有阿米巴痢疾,蓝氏贾第鞭毛虫肠炎,近年来隐孢子虫病及结肠小袋虫病报告越来越多。在发达国家一般细菌性腹泻显著减少,而非伤寒沙门氏菌腹泻逐渐增多,志贺氏菌感染在增加。中国鼠伤寒感染由北到南扩展到大多数省份,特别是在产院及新生儿病房流行;条件致病菌如变形杆菌性肠炎在增多,隐孢子虫感染已成为迁延性腹泻的主要病原之一。北京及上海检出气单孢菌致泻,徐州、上海、福建、新疆发现河弧菌引起腹泻暴发流行。中国7省市腹泻协作组流行病学调查结果表明,腹泻仍以细菌为主,某市为57.6%,示范县农村为64.9%。

感染性腹泻大便中水分增多,主要是通过:(1)刺激分泌细胞(小肠隐窝细胞)分泌过多的钠与水到小肠肠腔,(2)抑制吸收细胞(小肠绒毛柱状上皮细胞),减少肠腔内钠、水吸收,(3)肠粘膜坏死液体渗出到肠腔,(4)以上因素的综合作用。引起肠道功能紊乱的机理有:(1)毒素型:某些细菌产生毒素,刺激肠上皮细胞受体增加肠液分泌,减少水分吸收,如霍乱、产毒性大肠杆菌,金黄色葡萄球菌及梭状芽孢杆菌。(2)浅表侵入型:细菌侵入肠上皮细胞引起炎症和溃疡,肠细胞坏死,肠道水分吸收减少,如志贺氏痢疾杆菌、沙门氏杆菌、侵袭性大肠杆菌等。轮状病毒肠炎,除部分上皮细胞破坏外,还有柱状上皮细胞减少,绒毛萎缩,分泌增加,吸收减少,肠道消化酶减少,增加肠腔渗透压,产生渗透性腹泻。(3)深部侵入型:细菌侵入肠粘膜下层引起炎症,肠液分泌增加,水、电解质吸收减少,如某些沙门氏菌。(4)混合型:既侵入肠粘膜,又产生毒素,如空肠弯曲菌,耶尔森氏菌、某些痢疾杆菌。(5)其它型:细菌附于肠细胞表面,损坏微绒毛,不侵入肠上皮细胞,亦不产生毒素,如致病性大肠杆菌。

小儿腹泻的病原学诊断目前有了突破性进展,感染性腹泻中有80%以上可明确病原。肠道细菌培养,特殊培养基的应用,部分腹泻病入血培养、尿培养可获阳性结果。粪便H<sup>+</sup>浓度、葡萄糖、氯化物的测定有助于感染性腹泻同非感染性腹泻的鉴别。近年来免疫技术在腹泻快速诊断中得到了广泛应用;酶联免疫试验(ELISA)可用来直接检测粪便中的轮状病毒和大肠杆菌L,T肠毒素;免疫荧光技术,利用荧光素标记抗体,将粪便标本直接涂在载片上,经荧光抗体染色后,在荧光显微镜下观察,能快速检测志贺氏菌、沙门氏菌及霍乱弧菌等;SPA协同凝集试验,可检测志贺氏菌、沙门氏菌及霍乱弧菌等各种病原因子;平板免疫溶血试验,是一种中介免疫反应,用来检测产毒性大肠杆菌L,T肠毒素,空肠弯曲菌肠毒素。基因探针杂交技术也越来越多地应用于临床,目前用来诊断腹泻的核酸探针有:产毒大肠杆菌LT-DNA,志贺氏sh-DNA,沙门氏菌Sal-DNA,轮状病毒RV-DNA等。核酸电泳(聚丙烯酰胺凝胶电泳PAGE)快速检测病毒抗原,如轮状病毒、腺病毒、呼肠孤病毒等。透照电镜,免疫电镜常用于病毒性腹泻诊断。

小儿糖原性腹泻目前研究较多,国外Halliday报导168例肠炎后腹泻,31.5%继发乳糖不耐受;Walker报导110例3个月以下婴儿腹泻,65%继发乳糖不耐受。徐州医学院姚福宝报导381例婴儿腹泻,49.6%有乳糖不耐受。Clinitest试剂测定粪便中还原糖是诊断糖吸收不良最常用的初筛试验。国内姚氏报告酶解加氢氧化铵检测粪便乳糖,方法简易、快速。

小儿腹泻内窥镜检查技术正在发展,经口作小肠粘膜活检,并收集十二指肠液检查是了解慢性腹泻病理生理的最好诊断方法之一;乙状结肠镜及纤维结肠镜,对不能解释的慢性腹泻、炎症性肠病、恶变确诊及监视均有很高的价值。

饮食治疗。习惯认为急性腹泻,胃肠道功能紊乱,肠蠕动快,应限制饮食或禁食4~6h,然后用稀释奶,1~2d恢复全奶,禁食

期间可喂水或米汁。但国际上许多对比研究表明。腹泻患儿继续喂养病情恢复明显优于禁食病例；世界卫生组织在小儿腹泻治案中，也首先强调继续喂养，特别是母乳喂养儿。对食物源性腹泻，如奶蛋白过敏、乳糖不耐受等，应及时调换饮食；慢性腹泻患儿，肠粘膜广泛损害，消化酶缺乏，可给以“要素饮食”，其中含已消化的氨基酸、葡萄糖和脂肪，推荐的有 Vivonex、Pregestimie 和鸡-米饮食等，国内姜天安等亦报告了要素饮食配方。

腹泻患儿容易造成水、电解质丢失，内环境紊乱。世界卫生组织推广口服补液多年，已获得巨大成效，国内已普及。口服补液液(ORS)新配方为：氯化钠 3.5g、枸橼酸钠 2.9g、氯化钾 1.5g、葡萄糖 20g 或蔗糖 40g、加水 1000ml。首都儿科研究所推出“米汤加盐口服液”，米汤 500ml，氯化钠 1.75g，口感好，小儿爱喝。中、重度脱水争取静脉补液。

合理使用抗菌素是腹泻治疗中的重要问题，目前存在严重滥用现象。一般说，非感染性腹泻不用，病毒性肠炎应用抗菌素有害无益，产毒大肠杆菌肠炎也可不用。据流行病学调查城乡腹泻患儿需用抗菌素者只占 36.6%~37.27%，世界卫生组织认为只有 10% 的腹泻小儿要用抗菌素，主要用于病程在 2 周内脓血便患者。

抗腹泻药在急性期最好不用。氯丙嗪同异丙嗪可抑制 CAMP 和 CGMP 增加引起的分泌性腹泻；口服双歧杆菌有助于恢复肠道正常菌群；复方苯乙哌啶有收敛及抗蠕动作用，用于急性慢性功能性腹泻；易蒙停有抑制肠蠕动，抑制前列腺素 E<sub>1</sub>、E<sub>2</sub>，有抗分泌作用，多用于迁延性腹泻。

腹泻的预防重点是卫生宣教，改变人群的不良卫生习惯，清除腹泻病危险因素，杜绝医源性原因。免疫预防已进入新的阶段，伤寒、副伤寒、霍乱等疫苗已广泛应用；细菌性痢疾的口服减毒活疫苗也取得了进展；活的减毒人轮状病毒疫苗，减毒重组体疫苗，多肽合成疫苗，基因工程亚单位疫苗，动物轮状病毒减活疫苗，都不同程度获得进展及成功地应用于临床。

腹泻病当前研究的重点是如何提高致病因子的阳性检出率及快速诊断，监测病原体变迁，研制疫苗预防，合理应用抗菌素。(安徽医科大学第一附属医院杨正修教授撰)

**小儿惊厥** convulsions in the children 惊厥是由于中枢神经系统功能紊乱引起的脑细胞异常放电，从而导致全身性或局限性、强直性或阵挛性抽搐，发作次数和持续时间不等，严重者可呈持续状态，是儿科常见危急症之一。患病率可达 4.7%，新生儿，特别是早产儿可高达 25%。且病因与发病机理复杂，临床症状险恶，如不及时抢救易致死亡或留有严重后遗症。

**发病机理** 经多学科协作研究和 DNA 重组、神经免疫、组织化学、活体影像断层扫描以及神经电生理检查等，对惊厥机理已有较深入的研究。(1)通过对遗传性惊厥与 DNA 的多态性作间接的遗传连锁分析，发现特定的 DNA 点突变可表现为特定类型的惊厥发作。另一方面可直接对单基因遗传的癫痫进行基因定位并阐明其基因型。研究发现前阿促皮质素原(POMC)的基因定位于第 2 号染色体短臂，在此基因的产物中，既有抗惊厥作用的内啡肽，又有致惊厥作用的脑啡肽，目前，POMC 基因被作为研究惊厥发病的基因表达调节模型。(2)惊厥发作的神经介质变化：除乙酰胆碱和单胺类介质外，惊厥发作患儿均有脑髓质中 GABA/安定/巴比妥受体——离子通道复合蛋白分子缺陷。进一步研究证实脑髓质中 GABA 抑制系统的下行结构对惊厥行为有重要抑制作用。同时还发现，神经肽注射于脑的不同部位或使用不同剂量可产生致惊厥和抗惊厥的相反效果。此外，脑胶质细胞，β-内啡肽、腺苷和次黄嘌呤等均为内源性抗惊厥物质，它们可使大脑皮层神经元超极化，且在惊厥时释放增加，使惊厥发作终止。

**惊厥病因** 分感染性与非感染性疾病两类，分别有颅内与颅外原因。高热惊厥是小儿最常见的惊厥，占惊厥 30% 以上，部分资料报告患病率约 5%~6%。1983 年中国小儿神经病专题讨

论会拟订了高热惊厥的诊断标准，并沿用至今。最低标准是：首次发病年龄 4 月至 3 岁，最后复发年龄 ≤ 6 岁，发热 > 38.5℃、惊厥多发生在发热后 24h 内。呈全身性抽搐、意识丧失，持续数分钟清醒，无中枢神经系统感染及其它脑损伤，惊厥发作两周后脑电图正常。癫痫(EP)是儿童时期非染因素所致惊厥的最常见原因。国外报道小儿时期患病率为 5%~7%，中国资料为 7.8%~17.5%，除各种症状性癫痫外，特发性癫痫与遗传有关，近年来研究发现：患儿血中丙二醛(MDA)升高，超氧自由基及过氧化脂质生成增多，但后者亦被认为系 EP 发作的结果。1983 年中国修订了 EP 的分类和诊断指标，1985 年国际抗 EP 学会又提出“EP 和 EP 综合症”的国际分类法。小儿时期常见的 EP 类型有：全身大发作、良性部分性癫痫(BECT)、肌阵挛癫痫综合症、小运动型发作等。1841 年 West 首次报告了 32 例特殊类型的惊厥，1952 年 Gibbs 亦有类似报告，并使名为“婴儿痉挛症”，1970 年和 1985 年国际 EP 专题会议将作为 1 种单独类型列入全身性癫痫。惊厥的诊断首先要确定是否为惊厥发作。对于任何突发的抽搐，伴或不伴有意识障碍者均应视为惊厥。惊厥发作时脑电图(EEG)可记录到癫痫样放电。须与惊厥相鉴别的现象有屏气发作、体位性晕厥、交叉擦腿动作、舞蹈病、手足徐动症和癔病等。新生儿惊厥常不典型，可表现为凝视、面肌小抽动，应和激惹相区别。其次要追究惊厥病因。详细的病史询问(包括年龄、发作类型、反复发作史和家族史等)和全面的体格检查是病因诊断的基础，适当的辅助检查对确诊有决定意义。EEG 是简单而重要的检查手段之一，尤对 EP 的诊断有确诊意义。有关神经系统的辅助检查手段有：电子计算机断层扫描(CT)、脑地形图、脑干诱发电位等。Gastast 认为：原发性 EP 很少有 CT 异常，90% 为正常图象，但某些类型的 EP，CT 亦可发现一些有意义的异常，国人报告一组原发性 EP 患儿的 CT 检查，23.9% 有明显异常，以脑实质萎缩为主。1951 年，Walter 等人首次将脑电活动以地形图的方式表达，经过 Gotaman (1975)、Harner (1978)、Dubinsky (1980)、Nagata (1982) 等的改进，已成功地发展为脑电功率谱及地形图(BEAM)并广泛用于临床，可较早地、客观地反映脑损伤程度，在脑干诱发电位的基础上，近来发明的躯体感觉诱发电位也逐渐用于临床，为小儿惊厥的病因诊断提供了一个新的手段。

**惊厥引起的脑损伤和后遗症** 1951 年 Scholz 首次提出“惊厥性脑损伤”概念，经多年观察现已公认：惊厥所造成的脑损伤类似于脑震荡，发作时间长，可遗留智力衰退、癫痫、局限性脑功能障碍等。其原因和惊厥发作时高能磷酸化合物生成减少，脑耗氧增加，细胞内 pH 值降低和环磷酸腺苷增加等有关。有学者认为：脑惊厥性电活动本身就是脑损伤的重要原因。高热惊厥的预后与其类型有关，单纯性 FC 预后多较好，复杂型约有 10% 转变为 EP，因此，Herranz 等认为可用苯巴比妥、扑痫酮或丙戊酸钠预防性服药。中国 1983 年的自责会议指出如果 FC 1 年内反复发作 5 次以上或 FC 呈持续状态、或发作后 2 周 EEG 仍有特异性痫性电波者，都应长期服用抗癫痫药。研究指出：巴比妥类药物副作用大，其预防作用已被丙戊酸钠取代。后者为长程连续预防的首选药物，短程间歇治疗的首选药物为安定。新生儿惊厥尤为早产儿惊厥多有脑器质性损伤，预后不良，约 50%~60% 患儿死亡或留有后遗症。应引起临床工作者的重视。

**惊厥的治疗原则** 本症的治疗原则是控制惊厥、治疗原发病因、合并症以及防止惊厥的复发。抗惊厥药物大多数作用于神经介质、重复的神经激发机制、神经网络结构、神经离子转运而取得抗惊厥效果。FC 时首选安定静脉注射，次选鲁米那、副醛，同时积极降低体温，发作时间长有合并症者应吸入氧气。静脉注入葡萄糖溶液以对抗低血糖，应用甘露醇治疗脑水肿。EP 的治疗颇复杂，不同类型 EP 用药不同，除苯妥因钠、鲁米那、安定、乙琥胺等传统药物以外，近年来推荐长马西平、丙戊酸钠、抗痫灵等作为第 1 线抗痫药物。不少人认为极大部分患儿不要联合用药，单一用药为 EP 的基本治疗原则。1958 年 Sorel 报告用 ACTH 治疗婴儿痉挛症，至今已积累了大量经验，60 年代用硝基安定、

70年代用氯硝安定、1982年Bachman用丙戊酸钠等治疗婴儿痉挛症均取得一定效果,但目前ACTH和糖皮质激素仍作为该病的首选药物。

小儿惊厥以及惊厥性疾病是小儿神经系统的主要疾病。从分子学水平对惊厥的遗传基因定位、神经生化改变、早产儿、新生儿惊厥的远期预后和预防性服药的利弊关系,EP和抗EP药物对儿童智能的影响等均有待于进一步研究,同时,努力发掘新的检查手段和新的治疗药物,做好常用药物浓度的监测等亦有待深入。目前,核磁共振成像(MRI)已广泛运用,正电子发射断层扫描(PET)、单光子电子计算机断层扫描、颅脑超声成像等技术日趋完善。神经系统的移植包括脑移植的研究尚限于动物实验,但已引起广大医师的高度重视,给一些神经系统的遗传性、先天性疾病的治疗带来希望。小儿神经病学与围生学、心理学、遗传学等密切相关,因此跨学科研究很有必要。病毒学、药理学和其他基础领域的进展为本症的研究提供了新的信息工具。

(安徽医科大学第一附属医院都鹏飞副教授、  
杨正修教授撰;朱子扬审)

**先天性巨结肠** 常见的消化道发育畸形之一,主要表现为功能性肠梗阻。1886年首先由赫希施普龙描述,因而又称赫希施普龙氏病,近年有人提出命名为“结肠无神经节细胞症”。发病率为3000~5000个出生婴儿中1例,男性较女性为多,约为4~10倍。有家族性发病倾向。近年由于对其病理生理和诊断方法作了深入研究,使术前诊断率明显提高,并对类巨结肠病或同源病作出了鉴别,手术方法上也有较多的改进,是小儿外科中较重要的常见疾病和研究课题之一。

**病因** 肠壁神经节细胞缺如,肌层间胆碱能神经纤维增生,病变肠管丧失蠕动而呈持续痉挛状态,使近端结肠代偿性扩张及肥厚成巨结肠。

**病理分型** 根据其无神经节肠的长度可分为超短型、普通型(短段型及长段型)及全结肠型。

**临床症状和诊断** 出生后无胎粪排出或仅排出少量,2~3d后出现腹胀和呕吐,表现为急性低位不完全性或完全性肠梗阻症状,经直肠指诊或应用塞肛栓可排出大量胎粪及气体,腹胀多能暂时缓解,但数日后重复出现顽固性便秘、腹胀、非经灌肠不能缓解,病儿发育、营养不良,面色苍白、消瘦、伴脱水貌,腹部膨隆,腹壁皮肤紧张发亮,皮下静脉网显露,脐孔外翻,可见肠蠕动波,肠鸣音亢进,左下腹可触及粪石。少数伴发小肠结肠炎,经常性便秘突然转为腹泻,排出大量奇臭的水样便,伴腹胀,呕吐,高热,严重脱水和电解质紊乱,低蛋白血症,中毒症状严重,呼吸窘迫,全身青紫,休克,全身情况急剧恶化的巨结肠危象而致死亡。也有并发肠穿孔或弥漫性腹膜炎者。

**诊断方法较多**,钡剂灌肠摄片仍是临床常用的诊断方法,诊断率达70%~80%,但在新生儿时期超短型,全结肠型,已造瘘者等不易诊断。直肠肛管测压时可见内括约肌不松弛,且明显收缩而压力不变(正常反射消失或阴性反射)或压力增高(异常反射)。为不规则或无蠕动波。日本于1977年第4次直肠肛管内压研究会上提出重要1条是需测3次以上才可作出诊断,其诊断率达96.4%~98.4%(Holschneider,1976),但在早产儿,新生儿,直肠内粪便充盈,气囊充气不足,小儿哭闹,腹压增加等可出现误诊。肌电图检查1976年由马林(Marin)首先用于临床,巨结肠时显示峰波消失或呈慢波,诊断率为79.2%~84%。直肠粘膜用乙酰胆碱酯酶染色,进行组织化学及免疫组织化学检查,诊断率可达96%~99.27%,但取材太低或不良(水肿)、标本固定时间过长、天气太热等可出现假阴性。1978年勃洛姆(Bloom SR)等研究,发现“肽能神经”对胃肠运动的调节起着极其重要的作用,先天性巨结肠病变肠段P物质、血管活性肠肽神经成份大量减少。红细胞乙酰胆碱酯酶活力增高,有助于诊断巨结肠。本病诊断决不能单一地依靠临床,必须采用临床、钡灌及测压或临床、钡灌及直肠粘膜活检等组合诊断法。但全结肠型的诊断尚困难,因

症状轻重不一,排便和便秘及腹泻交替,并呈间歇性腹胀,钡灌摄片无典型巨结肠征,直肠粘膜活检亦难作出诊断,仅在术中病检才能确诊。

**治疗** 新生儿可用耳针及肾俞和大肠俞穴注射人参液,并内服中药的中西医结合方法治疗,有效率为75.6%。对全结肠型可采用直肠后回肠拉出,回肠结肠侧侧吻合术(Martin术,1972),木村健(1983)等对该法作了改进。普通型可采用拖出型直肠乙状结肠切除肛门外吻合术(Swenson法,1948及1964),有效率达80%,王果等对此法进行了改进,取得较好效果;结肠切除直肠后结肠拉出吻合术(Duhamel法,1956及1964),有效率达65.2%~93.3%,张金哲(1978),日本池田惠一(1966)等对此法进行了改进,取得了满意的效果;直肠粘膜切除,直肠肌鞘内拉出术(Soave法,1964),国内外常应用于婴幼儿,骏河敬次郎(1966)及里村纪作(1971)等进行了改进,此法有效率达91%;经腹结肠切除,结肠直肠吻合术(Rehbein法,1959),西德小儿外科多用此法,术后应常规进行扩肛术,13.6%附加内括约肌切断术,余亚雄等推荐此法,王德生等进行了改进取得较好效果。总之,各种方法各有其优缺点,治愈率80%~85%,病死率1.6%~5.7%,其术后仍有污粪,腹泻,便秘,失禁等并发症,远期疗效尚不理想,仍为小儿外科研究的临床课题,尚待进一步研究和改进。

(安徽省立医院王德生撰)

**先天性肥厚性幽门狭窄** 幽门的环形肌肥厚、增生、使幽门孔道狭窄而引起的不完全梗阻性疾病。为新生儿时期常见的消化道畸形之一,发病率为3000个出生婴儿中1例,男婴与女婴之比为3.6~7:1。半数以上发生于第1胎,并有家族史倾向。

**病因** 有很多学说,至今尚无定论,有人认为系原发性幽门肌肥厚所致,或神经节细胞发育不全或退化性变引起幽门痉挛,进一步肌层肥厚、增生而发生狭窄,近年认为与促胃泌素有关,并成功地做出幽门肌肥厚的动物模型,又测得病儿血清中胃泌素水平增高及胃液中前列腺素E<sub>2</sub>和F<sub>2</sub>增高,又有人发现幽门环肌中脑啡肽和血管活性肠肽的神经纤维及P物质含量明显减少。

**病理** 幽门环肌及全层肌肉肥厚,增生,约达4~7mm,形似橄榄状,坚硬如软骨或富于弹性,逐渐向正常胃壁移行,在十二指肠侧肥厚部突然终止,形如子宫颈口。胃内有滞留物并伴粘膜炎症、糜烂和溃疡。显微镜下可见以环肌为主的幽门壁各层组织均肥厚增生,肌间神经丛或神经节细胞全部缺如或减少,细胞核变形,边界不清,浓缩和形成空泡。但神经纤维肥大,许旺氏细胞核相对增多。

**临床症状和诊断** 出生后3周左右,出现有规律的进行性和喷射性呕吐,呕吐物为粘液、乳汁或乳凝块,不含胆汁,少数伴血液,呕吐后有饥饿索食表现,急于吮乳,因进食减少,尿量减少,粪便减少或呈棕绿色粪便即饥饿性粪便及便秘。由于营养不良,出现脱水、消瘦、体重下降、皮肤弹性消失,额部有明显的皱纹,两眼内陷,囟门下陷及面容痛苦而呈饥饿瘦削的老年貌,少数伴有黄疸,后期出现低氯低钾性碱中毒,呼吸变浅而慢,并有痉挛及手足抽搐等症状。上腹部见到胃逆蠕动波,右上腹可触及橄榄样大小的肿块,质硬而带韧性,能移动。X线钡餐检查可见胃潴留,幽门管狭细增长呈浅弧线状或鸟喙状。B超可见幽门管长度增长,肌层增厚及幽门管内径缩小。

本病应与幽门痉挛、先天性十二指肠狭窄或闭锁,先天性肠旋转不全等进行鉴别。

**治疗** 自1907年费莱台脱(Fredet)及1912年雷姆斯台脱(Ramstedt)用幽门环状肌切开术治疗本病以来,已获得了显著疗效,死亡率由10%降至1%以下,但仍有十二指肠损伤及幽门环肌切开不充分而再次手术的报道。王德生等提出在本法手术中粘膜下注射生理盐水,使粘膜与肌层分离,可避免粘膜损伤。张罗亮等采用倒“Y”字形幽门切开术,亦避免了粘膜损伤,取得了良好的疗效。达莱斯基等主张用附近浆肌层转移瓣法作粘膜破裂后的修补,也有人用细丝线间断缝合修补粘膜。近年国内外学者

对本病病理生理机制正在进一步深入研究,希望早期减轻幽门肌肥厚的发展,同时缓解幽门痉挛,并在治疗本病的方法上求得新进展。

参考文献

- 1 Далецкий,И.И. Хирургия новорожденных. Москва; мед.гиз. 1976. 184
- 2 Spicer R. D. Br. J. Surg. 1982, 69: 128
- 3 王德生,等.中华小儿外科杂志,1983,4(3):180
- 4 Tunell W P, et al. J. Pediatr Surg., 1984, 19(6): 795
- 5 李正,等.中华小儿外科杂志,1984,5(4):193
- 6 孙莉莉,等.中华小儿外科杂志,1989,10(3):147
- 7 沈振新,等.中华小儿外科杂志,1989,10(6):344
- 8 张梦亮,等.中华小儿外科杂志,1990,11(3):151

(安徽省立医院王德生撰)

**先天性胆管扩张症** 肝内外胆管的任何部位发生的单发或多发梭形及囊状扩张等先天性畸形称为先天性胆管扩张症。过去称为先天性胆总管囊肿,原发性或特发性胆管扩张症,巨大胆总管症等。肝内胆管扩张又称为卡罗里(Caroli)氏病;其合并门静脉周围纤维化,肝硬化及门脉高压症者称格鲁巴赫-波利翁-奥倍尔(Grumbach-BynnoH-Osep)病;其合并肾多发性囊性变者称卡奇-里雪(Cacchi-Ricci)病。在黄疸的鉴别诊断中有一定的地位。近年由于诊断方法的改进,术前诊断正确率更高,手术方法上也有较大突破。是小儿外科和肝胆外科中较重要的疾病和研究课题之一。

1723年法特(Vater)首先报道,1852年杜格拉斯(Douglas)对其症状学和病理特征作了详细描述,1918年威廉斯(Williams)及1929年史密斯维克(Smithwich)先后报告治疗成功的病例。1个多世纪以来,随着对该病认识的深入,报道病例日益增多。1975年费拉尼根(Flanagan D P)及1979年范奈正等统计,世界文献报道的病例已超过千例。中国黄自强在1950年首先报道该病,1951年邱公道及1952年何尚志报道手术成功的病例。其发病率欧美较低,美国、澳大利亚和苏联15 000~30 000个新生儿中1例,亚洲东方民族发病率较高,日本报道的病例数曾占世界文献中的1/3,1985年罗正益对文献进行统计,至1983年中国已报道了1 109例,超过日本报道例数,约占世界文献报道例数的40%左右。本病肝外型以女性为多,与男性之比为3:1,好发于10岁以内的小儿,约占45%~74%,1岁以内的约占18%~25%。肝内型则以男性为多,好发于儿童或青年。

**病因** 学说众多,尚未定论,大多数认为是先天性的,也有人认为后天性因素参与形成。主要病因学说归纳如下:(1)先天性发育异常:1936年荣土野纳基(Yotuyanagi S)首先提出原始胆管部分上皮过度增殖,在空泡化再贯通时出现扩张。也有人认为胆总管壁局部薄弱,末端狭窄,瓣膜形成,走向异常。或与神经肌肉调节系统失调等有关。1977年斯佩茨(Spitz L)等以羊羔做实验,证明并支持先天性发育异常和梗阻因素为该病病因。(2)胰胆管合流异常:1916年基咪米(Kizumi)首先提出,相继有巴比脱(Babbitt DP, 1969年),池田,古味(1975年)及宫野(1985年)等在动物实验和临床上获证:胰管压力高于胆道压力,胰液可返流入胆管,造成反复发作的胆管炎、胆管壁的纤维变性,致囊性扩张。(3)病毒感染:1974年兰特(Landing)提出本病与胆道闭锁是同一病因,病毒性感染致管壁变薄而扩张。(4)遗传因素:1958年卡洛里首先描述先天性肝内胆管扩张,近年认为系一常染色体隐性遗传性疾病。

**病理** 胆管囊性或纺锤状扩张,可发生在肝内、肝外的任何部位。常见是胆总管远侧有不同程度的狭窄或开口于胰管,近侧扩张呈囊肿或纺锤状。容量自数十至数千ml,囊壁增厚,有纤维化炎症组织增生,平滑肌稀少,有少量或没有上皮内衬复盖,少数囊壁有癌变或炎症引起穿孔。囊液有胆色素沉着或结石形成。晚期伴门脉系统炎性细胞浸润,胆汁郁积和纤维化(胆汁性肝硬化)

化),并可继发脾肿大和腹水(门脉高压症)。

**分类** 方法较多,在1959年阿龙颂-莱杰(Alonso-Lej F)的3型分类法的基础上结合国外学者各种分类法,可分为肝内、肝外及混合型3大类型。

1. 肝内型:又分局限性及多发性囊肿,称为卡罗里氏病。
2. 肝外型:分(1)胆总管囊肿;按其形态又分普通型、局限型及纺锤状型。(2)先天性憩室;按其部位又分胆总管、肝管及胆囊憩室。(3)胆总管囊肿脱垂;按其部位又分胆总管下囊性脱垂及乳头旁囊性脱垂。
3. 混合型:肝内外胆管单发或多发囊状及广泛性梭形扩张。

**临床症状与诊断** 临床症状以黄疸,右上腹肿块及腹痛三联征为主,但同时出现者仅有19.8%~38%,1岁以内的病例无1例有三联征,多数仅有1种或2种症状。据各学者报道,肿块触及率为70%~90%,黄疸为60%~80%,腹痛为40%~60%。近年多数学者认为发热也是重要症状之一,并发胆管炎,胰腺炎,肝脓肿及败血症的即有发热,伴有穿孔时除发热外尚有腹膜炎体征,晚期可发生肝硬化,脾肿大,腹水等门脉高压症,可导致消化道大出血,肝性昏迷或少数癌变而死亡。临床上易误诊为肝炎,胆道闭锁,肝肿瘤,腹部肿瘤及肾肿瘤等。发病时总胆红素,5-核苷酸酶,碱性磷酸酶,转氨酶,淀粉酶等上升,白细胞增高,血沉加快等有助于诊断。但在1960年前诊断率较低,仅有13%~35%。1980年前由于超声波检查,胆道同位素扫描及经皮肝穿刺胆管造影术等方法的发展,诊断率明显提高到72%~87%。1980年后随着B型超声断层扫描机的改进和X线电子计算机扫描(CT)的不断更新,并有单光子发射计算机辅助断层(SPECT)新方法,加上逆行胰胆管造影及术中胆道造影等的临床应用,可显示肝内、外胆管系统和胰管的全部图像,了解肝内、外胆管扩张部位、范围大小及胰管与胆道的逆流情况,有助于制订治疗方案或手术术式的选择。诊断率现已提高到94%~100%,特别是B型超声断层扫描摄影精密度的提高和围产期的重视,在产前已能对本病作出诊断。

**治疗** (1)外引流术:历史上曾用囊肿造瘘术抢救病例获得成功,此法可引起低张性脱水及酸中毒,近代已少用,而仅作为体弱,高热及感染中毒严重者的一种抢救措施。1980年以后,此法已被经皮经肝囊肿置管引流术替代,短期待情况改善后择期行根治术。(2)内引流术:1907年贝克斯(Bakes)首先应用囊肿十二指肠吻合术,1958年格鲁斯(Gross RE)及1980年王修忠等均主张作此法,但手术死亡率为14.3%~69%,因其术后胆管炎发生率约15%~40%。1948年凯莱(Keeley)首先采用囊肿空肠 Roux-en-Y 式吻合术,丰卡尔斯洛特(Fonkalsrud)等多数国内外学者在1970年前也主张用此法,获得了一定的疗效,死亡率仅有6.7%~30%。1970年以后很多学者发现内引流术后仍有30%的患者有症状,因囊肿挛缩致原吻合口扭曲成角,排胆汁不畅,继发感染,且易结石形成。尚有3%可发生残囊癌变。随着麻醉技术的进步和术中和术后管理水平的提高,1970年后石田、葛西及琼斯(Jones PG)等,1980年后我国张金哲、何应龙等先后均主张作囊肿切除及胆道重建术,手术死亡率约在10%以下。以上手术后仍有10%的患者发生上行性胆管炎。近年我国曾宪九、张金哲等提出了各种抗反流预防措施,取得了一定的成绩。对肝内型中病变局限于一叶者可行肝部分切除术。近年有人报道胆肠 Roux-en-Y 吻合,术后约1.7%~22%可并发胃溃疡。金百祥等主张用空肠间置术。国内外学者对上述各种手术方法和抗逆流预防措施,均持有不同的见解,正在进一步深入研究和探索。

(安徽省立医院王德生撰)

**儿童生长性颅骨骨折** growing fracture 儿童生长性颅骨骨折是指婴幼儿顶盖部分的颅脑损伤造成的颅骨(顶骨、颞骨为主)骨折,呈进行性扩展,同时合并局部脑伤后并发脑膨出或脑室脑膨出。损伤部位继发产生脑脊液囊肿、脑膨出或脑室脑膨出等后遗症,造成脑功能缺失、智能低下或癫痫等严重后果。原



发损伤部位的颅骨骨折间隙呈进行性扩展,故称之为生长性骨折或扩张性骨折。此病多发于3岁以内的婴幼儿,以产伤、摔伤或交通事故等引起者多见。临床所见者,多为生长性骨折发生后的继发性损害,即脑膨出或脑室脑膨出、蛛网膜囊肿造成的偏瘫、脑积水、智能低下、癫痫等并发症,严重影响婴幼儿的正常发育,即使通过治疗使病情终止发展,但脑的实质性损害已难逆转,最终导致智力发育不全、语言障碍、肢体活动受限等终身残疾。

儿童生长性颅骨骨折的发生,主要是暴力直接作用于婴幼儿的颅盖及大脑凸面所引起的闭合性颅脑损伤。伤后常有局部头皮血肿,X光平片可见局部有线形骨折,但骨折线宽度(骨折间隙)常在2mm以上。局部帽状腱膜下血肿数日后不见消退,且有增大趋势,并可扪及搏动,此时作局部包块穿刺,常可发现其内容为脑脊液或脑组织。若未作特殊处理,则局部搏动性包块逐渐增大,颅骨平片发现骨折间隙更趋加宽,并出现相应部位的脑功能损害体征(如偏瘫、失语等)。以后局部搏动性包块、颅骨缺损范围及神经功能障碍等与日俱增。

对于本病发生机制的研究,最先由Taveras及Ranshoff等1953年提出,60年代Goldstein(1963)经过动物实验并结合临床

表1

| 年代   | 作者                | 内容              | 出版物                       |
|------|-------------------|-----------------|---------------------------|
| 1953 | J. Taveras 等      | 脑伤后颅骨侵蚀并发软脑膜囊肿  | J Neurosurg 1953, 10; 233 |
| 1959 | E. B. Keener      | 硬脑膜损伤或缺失的实验研究   | J Neurosurg 1959; 16; 424 |
| 1961 | R. A. Lende 等     | 儿童生长性颅骨骨折       | J Neurosurg 1961, 18; 479 |
| 1965 | 藏人和等              | 儿童生长性颅骨骨折       | 中华外科杂志 1965, 13; 797      |
| 1967 | F. P. Goldstein 等 | 扩张性骨折的实验研究      | J Neurosurg 1967, 27; 541 |
| 1970 | F. P. Goldstein   | 各种不同的儿童生长性颅骨骨折  | J Neurosurg 1970, 33; 25  |
| 1984 | 李顺业等              | 儿童生长性颅骨骨折3例报告   | 中国神经精神疾病杂志 1984, 10; 167  |
| 1987 | 杨维等               | 儿童颅骨生长性骨折的预防和处理 | 中国神经精神疾病杂志 1987, 13; 15   |

临床表现,婴幼儿颅盖骨(特别是顶骨、颞骨、额骨)骨折后,局部头皮肿胀经久不消,且逐渐扩大并出现搏动,即应疑及此病。此时骨折间隙已有脑脊液囊肿形成或脑膨出、脑室脑膨出已经发生,若局部穿刺,可发现该搏动性包块之内容为脑脊液或脑组织。X光颅骨平片见原有骨折线已扩大为不同程度的骨折间隙或骨性缺损,原有骨折缘呈唇样外翻,如“火山口样”隆起。因骨折深面损伤的脑组织斑痕愈合或蛛网膜粘连,形成局灶性的脑实质损害,可发生损伤性癫痫,同时根据脑或脑室脑膨出的部位及程度,偏瘫呈进行性加重,且可伴有语言障碍及脑积水等,患儿智力发育随之受限,明显低于同龄儿童。

儿童生长性颅骨骨折的治疗:根据对本病发病机制的认识,目前各家意见已趋于一致,即硬脑膜撕裂,脑脊液囊肿或脑组织疝入骨折间隙,脑组织的持续搏动,加之婴幼儿脑发育迅速,使这种进行性损害绝无逆转可能。因此一旦诊断确立,手术切除局部的斑痕组织、脑脊液囊肿,还纳脑组织,修复硬脑膜及骨质缺损,已成为治疗本病的唯一选择。缺损之颅骨可同期或分期修复,视具体情况而定。个别颅骨缺损范围特大,脑室脑膨出严重,且伴有脑积水者,可先行脑室引流,再手术修复硬脑膜及缺损颅骨。癫痫及脑积水等可酌情用药物治疗。手术治疗只能改善症状,终止病情的发展,脑组织的实质性损害及脑功能发育障碍等则无法补救。因此,预防生长性颅骨骨折的发生和早期发现,意义极为重大。

儿童生长性颅骨骨折的预防:凡婴幼儿(3岁以内)闭合性颅脑损伤,X光片发现有颅盖骨折(线形或粉碎性)、局部帽状腱膜下有血肿存在,数日后血肿不消退,且有增大趋势,并可扪及搏动,此时宜复摄X光片。若发现原有骨折间隙加宽,再穿刺局部肿块,若内容为脑脊液或脑组织,则证实骨折下之硬脑膜及蛛网膜已同时撕裂,颅内内容物已开始突入骨折间隙,则本病之诊

观察证实 Taveras 等的理论,即凸面的颅骨骨折同时伴有局部的硬脑膜破裂、蛛网膜撕裂或脑伤,致使脑组织或脑脊液通过破裂的硬脑膜直接突入骨折间隙,这样不但影响骨折愈合,而且随着脑组织的搏动使骨折缘遭受侵蚀(erosion),骨折缘逐渐加宽,脑组织或脑脊液形成的囊肿更形疝入骨折裂隙,最后骨折间隙逐渐加宽为骨质缺损,脑组织甚至脑室更形突出,相应部位的脑功能损害也更形加重。Goldstein 根据疝入骨折间隙的内容将其分为 I、II、III 型。I 型疝入组织为脑组织表面之脑脊液囊肿; II 型为脑脊液囊肿及部分硬脑膜或骨外膜; III 型疝入内容为脑组织或相应部位的脑室,故亦称“外伤性脑室脑膨出”,此时撕裂之硬脑膜则更加回缩,使硬脑膜及骨性缺损有增无减。由此可见,发生生长性骨折,致使脑脊液呈囊性膨出或脑组织膨出的基本因素是:

(1) 颅盖骨折的存在, (2) 硬脑膜和蛛网膜的撕裂, (3) 婴幼儿脑发育特快、持续不断的脑搏动对骨折间隙的侵蚀。3种因素缺一不可。以上观点,目前已成为国内外学者所公认。

50年代以来国内外对儿童生长性颅骨骨折的研究及临床报道情况如下:

断肯定,应尽早手术修复撕裂或缺损之硬脑膜,避免局部形成脑脊液囊肿,避免骨性缺损进行性扩大。对婴幼儿顶盖部的开放性颅脑损伤有人只作单纯的头皮清创缝合,未修复撕裂之硬脑膜及清除局部挫裂伤之脑组织,也有发生生长性骨折的可能。特别是非专科的医疗部门,在处理婴幼儿颅脑损伤时,应予警惕。

#### 参考文献

- 1 Taveras J, Ranshoff J. Leptomeningeal cysts of the brain following trauma with erosion of skull; a study of seven cases treated by surgery. J Neurosurg, 1953, 10; 233
- 2 Goldstein FP, et al. Varieties of growing skull fractures in childhood. J Neurosurg, 1970, 33; 25
- 3 藏人和, 史玉泉. 儿童生长性颅骨骨折, 中华外科杂志, 1965, 13; 797
- 4 王忠诚. 神经外科学(1). 北京: 人民卫生出版社, 1974, 183
- 5 杨维, 朱楨卿. 儿童颅骨生长性骨折的预防和处理, 中国神经精神疾病杂志, 1987, 13; 15

(重庆医科大学神经病学研究所杨维教授撰)

**小儿抽动综合征** tourette syndrome(TS) 小儿抽动综合征有不同的名称,如慢性多发性抽动综合征、抽动-秽语综合征(Gilles de al Tourette Syndrome)、进行性抽动等,临床特征为慢性的、波动性的、多发性的运动肌抽动并伴有不自主发声和语言障碍等锥体外系症状,多在儿童时期发病,男多于女,男女之比为3~4:1,发病年龄2~13岁,以6~9岁最多,个别为15岁。

1825年Itard首先描述TS,1884年Gilles详述其临床表现。1885年法国George报告8例;1885~1889年多数学者认为是与心理因素有关的神经症;1954~1965年对它曾有流行病学

研究;1961年以后临床应用氟哌啶醇治疗;1970年以后做了有关本病生物学的研究。其病因至今不明,根据脑电图(EEG)和神经精神检查的异常发现,多数学者认为本病为一种原发性中枢神经系统功能性疾病,但特异性损害尚不明确。50%~60%病人有非特异性 EEG 异常及神经系统体征,轮替实验异常、肌张力和深反射改变等,病人可有轻微脑功能障碍,心理实验异常和阳性家族史。有人认为是常染色体显性遗传,可伴有基因突变,但不除外多基因遗传,男性患者 45.9%、女性患者 62.2%有阳性家族史。以往认为本病多发生于犹太人和东欧人的后代,目前世界各国均有报导。

#### 发病机理的研究

1. 病理生理方面:电刺激扣带回前部可诱发抽动,电刺激人 brodmann24 区可引起难以控制的复杂协调动作,刺激动物(猴)扣带回皮层可诱发动物出声,在对黑猩猩、猫、狗的实验中证实刺激中央灰质可引起出声。脑干的蓝斑核、中脑腹侧被盖区以及中缝核均有纤维投向杏仁核、隔核、扣带回皮层。隔核、扣带回有大量乙酰胆碱(Ach)及 $\gamma$ -氨基丁酸(GABA)中间神经递质。近来发现扣带回、杏仁核以及边缘系统结构均有直接走向纹状体的纤维,但纹状体直接返回上述结构的纤维尚未发现。

2. 生化方面:(1)多巴胺(DA):有人提出体内儿茶酚胺代谢障碍是本病的病理基础,其证据为氟哌啶醇阻断突触后儿茶酚胺受体,从而减轻本病患者的症状,氟哌啶醇治疗中出现锥体外系反应,用左旋多巴后可使症状缓解。Jankovic 应用四苯唑治疗 TS 患者,抽动次数和不自主动作明显减少,该药有阻断突触后多巴胺的作用。Devinsky 认为 TS 患者可能不存在中枢神经系统多巴胺活动过度而系突触后超敏,虽然递质释放量正常,由于超敏感的受体引起效应细胞反应过度,病人脑脊液(CSF)中多巴胺代谢产物高香草酸(HVA)水平下降,接受氟哌啶醇治疗后 CSF 中 HVA 水平升高,上升持续时间远远超过氟哌啶醇的作用时间,长期用 DA 受体拮抗剂突然停药可诱发 TS,而实验已证实 DA 受体长期阻断将出现超敏现象。氟哌啶醇治疗 TS 有效血浓度很低,小剂量效果更好。阿扑吗啡所诱发的定型动作及苯丙胺所诱发的定型动作均公认是 DA 突触后受体兴奋的结果,在对比各种精神安定剂对 TS 的疗效高低时发现,与这些药物逆转阿扑吗啡及苯丙胺诱发的上述行为的能力有关,在实验中亦证明疗效的高低还与这些精神安定剂置换氟哌啶醇结合部位的能力大小、与抑制电刺激引起 DA 释放的强弱相关,但与环磷酸腺苷无关,中枢兴奋剂利他林、苯丙胺可使本病症状恶化。以上实验资料说明 TS 的发病可能是 DA 系统高机能状态,而精神安定剂对 TS 的疗效取决于它们阻断 DA 受体的潜力。多巴胺受体有 3 个亚型:D1 与腺苷酸环化酶 AC 相关联,主要分布于纹状体内神经元及与纹状体-黑质通路神经末梢上。D2 与 AC 无关联,主要分布于皮质-纹状体神经元的末梢及黑质纹状体神经元的胞体和末梢上。D3 是突触前受体。氟哌啶醇、匹莫齐特、Butyrophenons 对 D2 受体有显著的阻滞效应,而吩噻嗪主要阻断 D1 受体,在临床上前者控制 TS 症状的作用明显强于后者,因此认为 D2 受体超敏可能是 TS 的生化基础。(2)去甲肾上腺素(NE):Cohen 测定了 TS 患者 CTF 中 3-甲氧基-4-羟基苯乙醇 MHPG(NE 代谢产物)的水平,部分病例增高;推测 TS 患者可能存在中枢 NE 活性的增高,这样的病人用盐酸可乐宁(Chonidinehydrochloride)治疗症状得到改善,盐酸可乐宁是一种肾上腺素能神经 $\alpha$ 受体兴奋剂,小剂量可乐宁有刺激突触前 $\alpha_2$ 受体的作用,从而反馈性抑制中枢(特别是蓝斑)NE 的合成和释放。Svensson 认为盐酸可乐宁除这种肾上腺素能作用外,它还抑制中缝核中 5-HT 的活性。(3)5-羟色胺(5-HT):在生理情况下 5-HT 由氧化脱氨基 MAO 代谢成酸性产物 5-HIAA(5-羟吲哚醋酸)。丙磺舒可以阻断 5-HIAA 的转运,增加 CSF 中 5-HIAA 含量。Cohen 观察到 TS 患者经丙磺舒负荷实验后,CSF 中 5-HIAA 的水平较正常对照组低,是由于 5-HT 受体超敏导致反馈抑制或 5-HT 神经元本身脱失引起。L-5 羟色胺酸(5-羟色胺前身)可使 TS 患者症状改善。动

物实验证明,氟内咪唑可增高脑内 5-HT 的水平;Yaryura-Tobias 用该药物治疗 1 例伴有强迫症状的 TS 病人,取得满意的效果;但另 1 组报告未发现对该病有效,认为 5-HT 在 TS 病人中的病因学作用尚难定论。(4)乙酰胆碱(Ach):毒扁豆碱能通过血脑屏障,减少 Ach 的降解。Stahl 用毒扁豆碱(抗胆碱酯酶药物)静脉滴注治疗 6 例 TS 患者,半小时后抽动次数明显减少,停止滴注后 2~6h 抽动又恢复到原状,提示脑内 Ach 活性或含量减低,与 TS 症状有关;而苯托品(抗胆碱能药物)可使 TS 症状恶化。Hanin 测定了 20 例患者红细胞的胆碱活性,观察到 TS 患者红细胞胆碱水平较正常对照组明显下降;但 Tanner 却观察到相反的结果。有人对 10 例 TS 病人给予抗胆碱药东莨菪碱治疗患者运动性抽动,得到好转效果,这种东莨菪碱的效应能被毒扁豆碱所逆转。在研究中对比各种精神安定剂产生锥体外系副作用与它们对 TS 疗效高低之间的相关性时,发现最易产生锥体外系副作用者对 TS 疗效最好,反之则疗效较差,前者如氟哌啶醇,后者如氯氮平。Singer 曾测定过 7 例 TS 患者 CSF 中 AchE(乙酰胆碱酯酶)活性,旨在了解中枢神经胆碱能系统的功能,并未发现 TS 和胆碱能系统间可能存在的病理生理学联系。(5) $\gamma$ -氨基丁酸(GABA):GABA 是中枢神经系统中主要的抑制性神经递质。Messiha 发现 TS 与其他舞蹈样运动性疾病一样,如 Huntington 舞蹈病患者,睡眠时血浆 GABA 水平呈现生理性增加,此时抽动次数较通常减少或消失,而 Abuzzabab 报告 TS 患者应用 $\beta$ -氨基苯基酸、 $\gamma$ -氨基丁酸(Beta chlorphenyl GABA)有效。推测 TS 系由于脑内 GABA 的抑制功能降低而导致抽动发作。总之,关于 TS 病理生理机制目前比较倾向于主要是多巴胺受体超敏的观点,病变部位可能是中脑中央灰质、腹侧被盖区及黑质网状部,或与之相联系的边缘叶皮层;有人认为垂体可能存在一种使多巴胺受体超敏的因子,这因子可能是泌乳激素或其他肽类物质,因此 TS 病将被认为是一种递质-神经激素失调的疾病。

临床表现 患儿表现全身多组肌群的不自主动作,呈爆发性,动作多首先从面部开始,如挤眼、斜眼、皱眉、张口、缩鼻、伸舌或其他怪相,亦可表现为点头、耸肩,同时还常伴不自主动作,如哼哼、啊啊,甚至狂吠声或出粗鲁语言,肢体可以出现不自主动作,如手足、伸臂、跳跃、胸腹抽动等。这些动作可出意志控制几分钟到几小时,情绪紧张时加重。病情进展缓慢,不同肌群症状可以交替出现,症状可持续数年,到青春期症状多数减轻,少数病人不自主动作可持续至成年。由于冲动性行为、秽语及出声影响学习及人际交往。也有轻度运动失调、肢体笨拙、肌张力改变、学习困难、注意力涣散、脾气急躁、感情冲动等。病儿难以管教,重者还可出现遗尿、强迫症状。脑电图大多正常或轻度异常。

诊断 主要依据病史、症状及体征。国内外多数学者基本采用 Shapiro 的修正标准:(1)发病年龄 2~15 岁。(2)有多发性不自主动作和声带抽动。(3)症状呈波动性。(4)症状呈慢性过程,但有波动,亦可有周期性改变,或由新的症状代替旧的症状,或增加新的症状。

治疗 (1)氟哌啶醇被认为是目前最有效的药物,从小剂量 0.25mg/d 开始,可以逐渐增加到 2~5mg/d,如出现锥体外系副作用,可加等量安坦,亦可减量、停药。(2)泰必利,剂量 50mg/次,每日 3 次开始,逐渐加到 300~450mg/d,此药副作用少。(3)可乐宁,剂量 0.05mg/d 开始,逐渐加量,治疗剂量为 0.5~2mg/d。(4)咪唑清、五氟利多、肌苷片、左旋千金藤立定均可选用。Brill 对一些轻型面部抽动病儿试用 11 香糖嚼嚼配合心理治疗收到良效。

#### 参考文献

- 1 Svensson T J, et al. Brain Res., 1975, 92(2): 291
- 2 Hanin I, et al. New Engl J Med., 1979, 301(12): 661
- 3 Cohen D J, et al. J Am Acad Child Psychiat., 1979, 18(4): 320
- 4 Yaryura Tobias J A. Acta Psychiat Scand, 1979, 59(1): 9
- 5 Stahl S M, et al. New Engl J Med., 1980, 302(5): 298

- 6 Shapiro A K, et al. A Pediatrician's Guide, Bay Side New York, 1980, 1~20
- 7 Messiha F S, et al. Brain Research Bulletin, 1983, 11(2): 195
- 8 Devinsky O, Arch Neurol. 1983, 40(8): 508
- 9 Singer H S, et al. Arch Neurol. 1984, 41(7): 756
- 10 Jankovic J, et al. Neurology, 1984, 34(5): 688

(天津市儿童医院刘芬副主任医师撰)

**儿童保健** health protection of children 对儿童整体、全面、连续的健康管理,以保护和促进儿童身心健康成长。儿童保健水平是衡量一个国家社会经济发展和文明程度的标准之一。1990年召开的世界儿童问题首脑会议通过了《儿童生存、保护和世界宣言》及其执行计划,为提高全球的儿童健康水平,降低婴儿死亡率和控制一些疾病的流行,发展开拓了新的纪元。

18世纪以前,人们认为儿童只是成人的缩影,其营养需要和药物治疗只是量和成人不同。Heubner 是小儿能量计算的创始者。Camerer 首倡按 kg 体重计算小儿能量和药物需要量(Camerer 定律)。19世纪,人们注意到非母乳喂养儿死亡率较母乳喂养儿高3倍,因此在提倡母乳喂养的同时,积极研究代乳品,Chapin 和 Holt 提倡用全脂牛乳喂养婴儿,并主张采用巴氏牛乳消毒法。Rotch 是美国最早研究婴儿营养者,建立了第1个牛乳实验室,并介绍了按需要分配3种营养素的喂养法。1796年5月14日,英国琴纳首次在小儿身上接种牛痘成功地预防了天花传染,继之德国 Behring 研究成功白喉抗毒素并运用于临床。20世纪,儿童保健水平得到大大提高。1902年成立了国际卫生署后改名为泛美卫生组织,它和1919年成立的国际联盟都是旨在促进全球的卫生保健;1946年6月,第1届国际卫生大会通过了《世界卫生组织法》,1948年4月,WHO 正式宣告成立。

80年代末兴起的围生期保健在80年代得到了长足发展。围生期保健机构的建立、新生儿监护病房(NICU)的普及、人工呼吸机、全能静脉营养、电子计算机、脉冲血氧连续测定仪等新技术、新疗法的推广运用使得一些地区围生儿死亡率明显下降。美国1985年750~1000g 新生儿存活率达80%,700~750g 为50%,亚利桑那10年间新生儿死亡率由17.3%下降为11.5%。加拿大多伦多在NICU 发展以来,新生儿死亡率降低了一半。80年代中、后期,不少学者提出了围产期高危儿的“早期干预”,其方法可通过促进母婴的相互关系,同时通过面授、录音、录像对小儿进行动作功能、认知水平、语言、生活自理等方面的训练。80年代后期,有人报道在NICU 早期进行新生儿水浴疗法、加强视听触觉刺激,可显著改善预后,目前,围生期医学正方兴未艾,产科、儿科医师的进一步合作、极低体重出生儿的监护、先天性代谢性疾病的普查和早期诊治等一系列问题的研究正在深入开展。

儿童出生、生长监测是联合国儿童基金会推荐的一种儿保技术,其特点是通过监测,早期发现小儿生长发育的异常,监测重点在于先天性遗传性和代谢性疾病的早期诊断、治疗。日本已有98.1%的新生儿接受先天性代谢异常的普查。包括苯丙酮尿症、先天性甲状腺功能低下、半乳糖血症、枫糖尿症、同型胱氨酸尿症、组氨酸血症、血红蛋白病、Tay-sachs 病等。日本目前查6种疾病,美国查7种。中国自1980年以来在部分地区开展新生儿苯丙酮尿症和甲低的筛查工作,资料显示前者患病率1:15000,后者1:4000~6000。

母乳是婴儿最好的、不可替代的天然食品,其丰富的营养价值不仅可避免婴儿期的营养不良,且可提高小儿抵抗力。但近年来母乳喂养率逐渐下降,已引起有关方面的高度重视。资料表明,全世界非母乳喂养儿因营养不良和腹泻死亡者达4.5万/年;1983年WHO 提出到1985年80%婴儿有4个月的完全母乳喂养,1989年联合国儿童基金会为此向全世界呼吁保护和支持母乳喂养,并提出了10项具体措施。1990年中国儿童保健研究会上,有关专家亦呼吁应广泛宣传母乳喂养优点、推行母婴同室、提

倡早抱奶,并规定每年5月10日为中国母乳喂养宣传日。

儿童精神、神经保健是80年代提出的新问题,WHO 成立了儿童精神保健处,不少国家也相应成立了有关机构和组织。遗传、智力、心理卫生、性格发育、语言思维等诸多方面都是精神保健的重要内容。由于西方国家低出生体重儿的出生率和成活率增加,使得后期的精神、神经保健问题更加突出,据报告存活的早产儿和低体重儿易有脑损伤、颅内出血并留下后遗症。近年来健康小儿的心理卫生、智力开发等问题日渐受到关注。WHO 报告:发达国家中5%~15%儿童有不同程度的心理卫生异常。中国一些统计资料显示6%~45.6%的儿童有各自不同类型的心理卫生障碍。因此,各种精神、智测等保健咨询门诊亦相应普及、增多。但目前多注重儿童的智力测定而忽视了心理卫生指导,故1990年全国小儿保健工作会议上,专家们强调应将保健的重点放在保护和促进儿童正常的心理社会发展方面,加强心理、精神保健规划,对智测中出现的问题要综合分析,防止给家长和儿童带来思想负担而出现适得其反的结果。

扩大免疫规划(EPI)是公共卫生事业的一大成就,在发展中国家,每年可减少200万儿童因患脊髓灰质炎而瘫痪,可防止3100万儿童死于麻疹、破伤风和百日咳。发达国家如美国EPI 复盖率已达80%~90%,中国目前亦达85%左右,其它一些非发达国家至多达70%左右。目前大规模使用的菌苗、疫苗有卡介苗、百白破三联苗、脊髓灰质炎、麻疹、流脑、乙脑疫苗等。70年代后期,新的生物制品不断涌现,如腮腺炎、风疹、水痘、巨细胞病毒、多价肺炎疫苗和乙型肝炎疫苗等。80年代又研究出嗜血杆菌疫苗、乙型链球菌、流感病毒疫苗等。1980年5月,第33届世界卫生大会宣布全球消灭了天花以来,WHO 已建立了使世界永远免遭此病的综合性监测系统。1984年,所有国家都停止了开花接种。

目前,不同国家和地区儿保工作水平差异甚大。日本婴儿死亡率为6.2%,瑞典6.9%,而印度达51.9%,委内瑞拉68.4%,中国目前为51.5%。腹泻脱水、脓胸、结核等感染性疾病、营养性疾病在发达国家已不再是首要问题,但仍然是发展中国家小儿死亡的主要原因。统计资料表明,由维生素A缺乏导致的失明在非洲、中美和南美广泛存在,这些国家每年有5亿小儿患腹泻和呼吸道感染,腹泻和营养不良互为因果,使全世界每年至少有1500万儿童夭折。中国目前小儿营养不良发生率约21%,边远山区可达40%以上。为解决这些问题,WHO 1983年提出“到1991年全球儿童都得到保健”的口号,强调应做好推广母乳喂养、普及疫苗接种、提倡口服补液和使用生长表格进行监测等4项工作。1990年召开的世界儿童问题首脑会议更具体地提出了保护儿童生存、发展的措施和目标。WHO 有关官员认为,90年代所面临的主要任务是:(1)充分利用现有疫苗;联合国儿童基金会是各种疫苗和其他物质(包括冷链设备)的主要提供者,在今后10年内将继续努力,确保在21世纪前所有儿童都得到EPI 好处;(2)控制传染病的大面积流行,1986年5月,第41届世界卫生大会提出到2000年全球消灭脊髓灰质炎,1995年全球消灭破伤风,同时使麻疹发病率降到40/10万以下;(3)研究新的疫苗和对原有疫苗进行改进;(4)促进初级卫生保健工作,改善妇幼营养状况,控制腹泻,补充维生素A和碘。中国预计在90年代使婴儿死亡率下降1/3,5岁以下儿童营养不良患病率降低一半。儿童保健覆盖率在1995年达85%,城乡儿童免疫接种率达80%,2000年达90%,腹泻患病率在2000年以前减少25%,呼吸道感染患病率减少1/3。

(安徽医科大学附属一院都鹏飞、杨正修撰;朱子扬审)

## 肿瘤科学

**肿瘤病学** 肿瘤是常见病,它可发生于人体的任何组织。根据肿瘤对机体的影响,一般分为良性的及恶性的两大类。恶性肿

瘤泛称癌症,包括 200 余种类型,依其组织发生的进一步分为癌及肉瘤。癌系从上皮组织起源;肉瘤则来自间叶组织,如结缔组织、肌肉等。癌的主要生物生理学特性是生长的自主性与细胞的间变性,本质上具有破坏性,并迅速向周围组织扩散及远处转移,常导致宿主死亡。良性肿瘤一般生长缓慢,与周围组织界限清楚,不发生转移,对患者的影响和危害一般相对较小,是局限性的,通常不危及病人的生命。但有些良性肿瘤由于生长部位的关系,亦可造成严重威胁,若良性瘤阻塞管腔,如支气管,可引起呼吸困难;压迫附近神经引起疼痛;颅内者可导致颅内压增高等。

目前对肿瘤发生的确切原因尚不明确,根据流行病学与病因学等方面研究资料表明,正常细胞转变为癌细胞而形成癌肿被认为是多种因素协同作用的结果,包括外因与内因两个方面。外因是指来自周围环境致癌因素,癌症的病因 80%~90% 与环境因素有关。环境因素又分为两类:一类是与人的生活方式密切相关的社会因素和行为,如吸烟、酗酒、不合理的饮食;不良的生活方式,性生活紊乱等;另一类是环境中有害物质因素,如空气、水源和土壤的化学污染,其中 3,4-苯并芘、亚硝酸胺、黄曲霉素 B<sub>1</sub> 是已知的 3 大致癌物。内因是使外因发挥作用的机体内在的致病因素,包括劣性的心理刺激,精神因素,性格沉默、内向、不开朗或性格扭曲,遗传因素,免疫功能和内分泌失调,以及癌基因与抑癌基因等因素。

随着医学科学的发展及人类生命的延长,疾病死亡率顺序正在发生变化,癌症患者死亡率将上升到第 1 位。根据卫生部统计信息中心所公布的资料,1991 年我国大中小城市恶性肿瘤患者死亡率均占各种疾病的首位,在农村仅次于呼吸系统疾病而占第 2 位,城市地区恶性肿瘤患者死亡率为 123.92/10 万,其中:男性为 151.08/10 万,女性为 95.12/10 万。农村地区恶性肿瘤患者死亡率为 101.39/10 万,其中男性为 125.79/10 万,女性为 75.85/10 万。中国每年患癌症者约有 160 万人。每年因癌症死亡有 100 多万人,并呈现 10 年翻一番的趋势。可见癌症已成为当今世界严重危害人类健康的疾病之一。近年来肿瘤科研所取得的成就值得一提的有:(1)成功地建立了 Elisa 法测定 IgA/EA 抗体,并在国际范围首次用于临床和基地现场,使鼻咽癌早期检出率由 60% 提高到 97%。(2)在国际上首次证明原发性肝癌中存在癌基因及其属性,为阐明癌变原理和乙型肝炎病毒协同化学致癌物作用的致病原理打下了基础。(3)食管癌亚硝酸胺病因研究方面,已从单纯研究病因因素与转向机体内发病因素与机理研究。发现食管癌高发区人体内能合成亚硝酸胺,并检测出食管癌旁上皮 DNA 受亚硝酸胺作用的部位,还证明维生素 C 可阻断人体亚硝酸胺的合成,这项成就已在试验基地进行大规模(5 万人群)的干预试验。(4)激光结合血卟啉是新兴的光动力学诊治手段,中国进展迅速,已接近国际先进水平。(5)胃癌、肺癌、肝癌是中国发生最多的癌瘤,各地进行了大量的研究工作,获得不少进展,例如培养出自己的癌细胞株,制出质量较高的单克隆抗体。(6)在癌转移机制研究领域,中国首次用裸鼠建立了人癌高转移率模型,为研究癌的浸润、转移提供了试验方法。从 1986 年开始的国家肿瘤科研攻关工作,以食管癌、胃癌、肝癌、肺癌、宫颈癌、乳腺癌、鼻咽癌、白血病等 9 种肿瘤为重点,研究发病机制、预防措施和诊治方法。(7)在癌化学预防方面获得一定的成效,如对肝癌高发区现场的有效干预及其作用机制的研究;在食管癌高发区大规模试用国产甲维类、增生平,使食管癌发病率下降 50% 左右;用维胺酸治疗口腔白斑、外阴白色病变、胃和宫颈不典型增生、砷角化症等癌前病变效果肯定。化学预防是近期降低高危人群癌症发病率的重要手段,是人类控制癌症的干预战略。

癌症的早期预防,首先要针对性地预防或降低各种致癌因素,即破坏或干预癌症高危因素赖以存在的条件,是为一级预防,如防治乙型肝炎,可以降低原发性肝癌的发病率。癌症预防的中心方向,应着重于流行病学、卫生教育和推广癌症预防信息,降低或消除疾病的危险因素,降低发病率及促进癌症的早期发现,提高治疗效果。

在癌症防治方面,3 个 1/3 的提法已获得国际公认,即通过预防减少 1/3 的发病;通过早期治疗,使 1/3 病人获得治愈;利用各种治疗法使 1/3 的中晚期病人延长生命。癌症的传统疗法是手术、放疗和化疗。近年来肿瘤生物疗法即反应调节剂的应用如干扰素、肿瘤坏死因子、白细胞介素 2 及 LAK 细胞等发展迅速,其中继发性细胞免疫疗法作为肿瘤生物疗法的主要手段之一,是直接向肿瘤患者转移具有抗肿瘤活性的免疫细胞以补偿患者细胞免疫功能的低下,同时在体内发挥抗肿瘤作用,以此达到治疗肿瘤的目的。肿瘤生物疗法今后定会得到不断丰富和发展,有成为第 4 种治疗模式的趋势。80 年代以来,肿瘤介入疗法对不能手术的肺、肝、肾、胃肿瘤患者的栓塞疗效较好,副作用少,能明显减轻患者痛苦,延长生命。需要不断探索的新疗法有高温、冷冻、激光及中西医结合疗法等。癌症基因疗法在体外实验已获得一些令人鼓舞的成果,表明癌症基因治疗是可能的。现代肿瘤治疗的总趋势是综合治疗,世界上最好的总治愈率已达到 50%。

#### 参考文献

- 1 Overgaard J. Varian's Fourth European Csinac Users Meeting, Malta, 1984, 104
- 2 张天泽,等.中华医学会第 20 届全国会员代表大会医学进展汇编,1989,2:40~43
- 3 Sikora K. European J. Cancer, 1991, 271(9):1069
- 4 董海东综述,国外医学(肿瘤学分册),1991,5:265
- 5 健康报,1992,4(21)

(安徽省立医院肿瘤科程广源主任医师撰)

**肿瘤登记** cancer registry 肿瘤登记报告是一项按一定的组织系统经常性地收集、贮存、整理、分析和评价恶性肿瘤发病和患者、死亡、生存资料的统计制度。它分为以医院为基础的肿瘤登记报告和以人群为基础的肿瘤登记报告两类。前者收集和保存医疗单位诊治肿瘤病例的有关资料,目的是评价和改进对肿瘤病人的诊治工作。后者收集某一地区全部人口中肿瘤病例的有关资料,以此阐述整个人群中的肿瘤发生状况。它是肿瘤控制活动中的一个重要组成部分。肿瘤登记报告的资料可用于:(1)为制订卫生工作规划和肿瘤防治计划提供依据。(2)为肿瘤病因学研究提供基础资料和线索。(3)计划和评价肿瘤预防和治疗的措施。(4)为教学、科研和防癌宣传提供有价值的资料。

国际上为流行病学目的而建立的现代肿瘤登记处开始于第二次世界大战期间。1941 年美国康涅狄格州、1942 年丹麦全国首先实行癌症登记。1946 年 9 月在丹麦哥本哈根举行的 1 次肿瘤控制专家会议上强调需要有统一的国际间可比较的肿瘤统计资料,建议在世界范围内建立肿瘤登记制度。以后,世界卫生组织(WHO)在卫生统计专家委员会内建立了肿瘤病例登记及统计组,于 1959 年开始广泛的肿瘤登记工作。大部分肿瘤登记机构在 1960 年建立,到 1975 年世界上已有近 100 个肿瘤登记处,1989 年达 200 个。1966 年成立国际癌症登记协会(IACR),其任务是统一肿瘤病例资料收集的内容和方法,组织发表肿瘤发病率资料。国际癌症登记协会和国际癌症研究中心(IARC)共同为发展、促进世界肿瘤登记制度做了大量的工作,由他们主持定期出版的“五大洲恶性肿瘤发病率”汇编已成为国际上进行肿瘤流行病学研究的重要参考文献。

中国的一些城市(上海、北京等)于 60 年代初开始建立肿瘤登记报告制度,60 年代未曾一度中断。70 年代后期,随着肿瘤防治特别是高发现场和肿瘤流行病学工作的开展,一些地区——京、津、沪、辽宁省部分城市及一些肿瘤高发县又恢复和建立了全人群的肿瘤登记报告制度。1990 年 6 月在全国肿瘤防治研究办公室直接领导下,在上海成立了中国肿瘤登记协作组,首批组员有 17 个肿瘤登记处,组长单位为上海市肿瘤登记处,为中国肿瘤登记工作的发展奠定了基础。

肿瘤登记包括恶性肿瘤新病例和死亡病例资料的收集、编码、整理,恶性肿瘤发病率、死亡率、生存率的统计分析和报告。

新病例来源于经各医疗机构——各级的和各种类型的医院、独立的或附属的医院内的病理诊断和其他有关检查(CT、超声波……)部门,独立的放射治疗和化学治疗中心等诊断和治疗的全部恶性肿瘤患者。病例资料的收集方法有两种:(1)由肿瘤登记机构派人去各医疗单位收集和摘录肿瘤患者的病史,填写为统一的肿瘤报告卡(或表)。(2)由各医疗单位中诊治肿瘤患者的医生填写肿瘤报告卡,经医院集中统一寄送肿瘤登记机构。国外多用前者,国内则用后者。肿瘤报告的内容,国际和国内有统一的规定,以保证资料的使用和比较。项目内容主要由病人身份和所患肿瘤两部分组成。由于肿瘤患者常常同时到几个医院就诊和在发生转移、复发等情况时多次就诊,造成同一病例重复报告的情况,在整理资料时需将重复报告卡剔除。这常是肿瘤登记处花费较多人力的一项工作。为取得肿瘤患者生存情况的资料,需要对其进行长期随访,可分为主动随访和被动随访。前者由登记机构每年主动对患者进行访视,了解其存活情况;后者则是通过肿瘤死亡病例资料与肿瘤新病例报告卡逐张核对明确死亡与否和死亡时间。

肿瘤死亡病例资料一般通过该地区人口死因登记机构获得,国内外多采用两机构密切合作,由死因登记机构定期提供详细的肿瘤患者死亡资料的办法。

肿瘤分类编码采用世界卫生组织编制的国际疾病分类(ICD-9)中肿瘤部分或国际肿瘤分类(ICD-O)系统编码。国内现用前者,国外多用后者。1993年国际始用第10次修订的国际疾病分类(ICD-10)和第2次修订的国际肿瘤分类(ICD-O<sub>2</sub>)。

分析资料常用的统计指标有恶性肿瘤患者发病率、恶性肿瘤患者死亡率、年龄调整发病(死亡)率(或称标化率)。使用这一指标是为了消除年龄构成不同对粗发病(死亡)率产生的影响,使不同人群的发病(死亡)率得以合理地比较。一般用“世界人口”作为标准人口,用直接法计算标化率。肿瘤登记机构常用寿命表法计算生存率,其中若不管病例是否直接死于肿瘤均按死于肿瘤处理,所得生存率称为观察生存率;若将非直接死于肿瘤的病例按期失访者处理,称为调整生存率。此外,为合理评价不同年代、不同人群的恶性肿瘤患者的生存率,需要计算相对生存率。

70年代开始,计算机技术被逐步应用于肿瘤登记资料的管理、贮存、统计分析。至90年代,绝大部分的肿瘤登记处都已计算机化,编制了相当好的计算机程序,大大提高工作效率,节省大量人力,保证了登记资料质量的不断提高。肿瘤登记计算机化的全面普及和软件的发展,将促进世界肿瘤登记工作的发展以及资料的广泛交流和充分利用。

#### 参考文献

- 1 International classification of diseases for oncology, Geneva, WHO, 1976
- 2 International Classification of diseases (1975 Revision) Geneva, WHO, 1977
- 3 Peroy, C. van Holten, V, Muir, C., International classification of diseases for oncology (ICD-O) (Second Edition) Geneva, WHO, 1990
- 4 Jensen O M, Parkin D. M. Cancer registration principles and methods IARC Sci Pube 1991, 95

(上海市肿瘤研究所金凡教授撰)

**肿瘤温热化学疗法** thermo chemotherapy 早在19世纪就有人作过温热治疗肿瘤的尝试,1983年Coley用发热治疗38名肿瘤患者,其中12人病情缓解,19人症状得到改善。近年来温热疗法有了较大发展,在临床应用已显示出其优点,如温热能选择地杀伤肿瘤和肿瘤细胞,不用手术也可取得明显疗效;可用于全身肿瘤转移患者等。温热与化疗药物合并使用可明显提高治疗效果,由此发展形成了温热化学疗法。此种疗法已作为肿瘤治疗的方法之一,目前仍不断有新的进展,是寄予较大希望的一种疗法。

温热疗法的生物学基础 经研究已明确了下列的一些现象的机理:

1. 肿瘤致死温度。多数肿瘤细胞致死温度的临界点在42.5~43℃,在此温度以下延长加热时间,可加重肿瘤细胞的损伤和抑制增生。到达临界温度以后,随加热时间延长对肿瘤细胞的致死效果明显提高。

2. 细胞的耐热性。产生原因有每次加热间隔在6~24h左右或持续在42.5℃以下的加热作用后再升温,以及长时间的低热加热等都可使细胞产生耐热性,其产生机理主要与细胞内高温休克蛋白(HSPs)合成能力的消长有关。

3. 温热无致癌作用。

4. 肿瘤组织对温热敏感。正常组织血液供应比较丰富,随温度升降血流调节作用明显,因而局部血流冷却效果好,而肿瘤组织大多血供较差,即使血管丰富的肿瘤也因是新生血管。血流调节作用弱,局部冷却效果差,因此同样温热条件下肿瘤部位温度较高,易受热的损伤。此外由于肿瘤的血流供应较差,局部组织内存在低营养和供氧不足的状态,糖无氧解作用增强,产生乳酸较多,所以导致肿瘤局部高H<sup>+</sup>浓度环境,使肿瘤组织对温热更为敏感。不同细胞分裂周期对温热的敏感不一,以DNA合成期(S期)对温热敏感性较高。S期细胞对放射线有一定的抵抗力,这也为温热合并放射治疗提供了理论依据。

5. 温热致死效果的定量分析。以往对温热的细胞致死效果较难进行量化评定,近年来将分子热动力学的理论运用到温热治疗的定量分析,取得了较好的效果。实验证明,温热时间的延长与生存率的下降呈指数关系;致死效果与作用温度呈反应速度论关系。在 $K=Ae^{-H/RT}$ 式中,K为反应常数,A是常数,H是活化能,R是气体常数(1.987kcal/mol·k),T是绝对温度。从生存率曲线中可求出使细胞生存率降至1/e(=0.37)的温度致死平均时间 $t_0$ (又称平均致死处理时间),用平均致死处理时间的倒数 $1/t_0$ 可表示一定温度致死效果的大小,它与K相对应。可在Arrhenus曲线连线中将 $1/t_0$ 和 $1/T$ 的关系加以表示。横轴上显示 $1/T$ 及相对应的摄氏温度,从测定值的连线斜率求出活化能H。连线中出现的折点即活化能的折点温度。由于各种物质各有其相对应的活化能,因此可从活化能中推测出温热或温热化疗的主要作用机理。如有的细胞在42.5℃以上的活化能是582kJ/mol,膜蛋白活化能是在460~829kJ/mol的范围内,因而推测其温热致死原因可能和膜蛋白能量代谢及膜结构改变有关。

6. 温热对细胞的损伤机制。温热可使细胞质膜的液晶相发生改变,引起膜的流动性和通透性改变,同时还可能导致附着在膜上的蛋白,特别是酶系统活性降低,失活或膜蛋白脱落异位。肿瘤细胞膜的胆固醇含量较正常细胞低,膜流动性较强,因而更易受到温热的影响。当温热至43℃以上时更可导致细胞内的蛋白质(包括膜蛋白)变性。蛋白质中的2级结构主要依靠氢键的连接构成 $\alpha$ 或 $\beta$ 螺旋,但氢键的热稳定性较差,在8.4~12.6kJ热能作用下易被切断而变为无规则卷曲结构,由于立体构型的变化导致酶的失活。由于上述多种原因可导致细胞代谢紊乱,严重时可使细胞逐渐死亡,故有人认为细胞膜是温热引起细胞损伤主要的靶。有人认为肿瘤细胞膜的液晶相比较正常细胞更趋真液态,因而对温热更敏感。在观察温热细胞生物学效应时也可见到DNA、RNA的损伤。但一般认为这些不可逆损伤是继发性改变。

温热化学疗法的机理及常用药物分类 1960年Woodhall用42℃的抗癌药的灌注,治疗头颈部肿瘤,1973年Tohnson报导用噻替派合并温热作用于中国地鼠细胞,其杀伤效果明显增强,引起了临床和基础研究者的广泛注意。以后不断有报导表明温热可使药物作用增强3~10倍,大量实验结果提示其增强疗效的机理有:(1)相互抑制了由于温热和药物引起的肿瘤细胞损伤的修复。如温热能抑制药物引起的DNA损伤的修复和DNA的合成;(2)温热增强细胞膜通透性,促进抗肿瘤药物的细胞吸收;(3)相互加强作用效果,如温热使肿瘤细胞缺氧、H<sup>+</sup>浓度升高从而增强了某些药物在高H<sup>+</sup>浓度环境下的活性。

现已明确与温热合并能增强抗肿瘤作用的药物,主要有抗癌剂和非抗癌剂两大类。

1. 抗癌剂: Hahn 把有协同作用的抗癌剂分为 4 组: (1) 烷化剂: 合并温热可增强抗肿瘤作用的烷化剂有氮芥、苯丙氨酸氮芥、噻替派、环磷酰胺、BCNU、和 ACNU。氮芥是烷化剂的代表药物, 这类药物分子中都有 2 个以上的氯化基。这种基团在细胞内成为活性的乙撑亚胺, 与细胞核内 DNA 分子中的鸟嘌呤碱基反应, 形成 DNA 链间的交联, 使细胞复制机能障碍而致死。实验证明这类药物杀伤肿瘤细胞的效应在 37°C 以上随浓度增高而增强, 对培养细胞可出现相乘的杀伤效应, H<sup>+</sup> 浓度降低时杀伤效应增大, 这种协同作用是因为温热促进了烷化的反应。(2) 抗肿瘤抗生素: 这类药物有博来霉素、阿霉素、丝裂霉素 C 等。博来霉素分子中的氧可以配位状态与细胞的 DHA 结合, 由于铁的氧化产生活性氧使 DNA 链切断, 杀伤肿瘤细胞。它的温热效果与烷化剂不同, 41°C 以下增强效果不明显, 43°C 才开始明显起来。同位素标记证明即使达到 43°C, 细胞对博来霉素的吸收并不增强, 其协同机理可能是由于温热阻碍了药物损伤后的修复。以阿霉素为代表的萘环型抗生素, 是接入细胞内 DNA 碱基对间, 以损伤 DNA 机能来杀伤肿瘤细胞的药物。这类药物在 39~41°C 时可显示出增强抗癌效应, 但当达到 42~43°C 时对细胞的杀伤效应比 37°C 还低。这种现象有时可随细胞种类不同而各异, 其增强效应是由于温度升高, 细胞通透性增大所致。在 42~43°C 时细胞膜对阿霉素的通透性有一过性的降低。有人认为丝裂霉素具有顺铂相似的协同性能。(3) 顺铂, 是一种铂的络合物, 对多种肿瘤有疗效, 此药也是由于能嵌入细胞的 DNA 分子间与鸟嘌呤反应形成 DNA 分子内的交联, 阻碍 DNA 复制, 而导致肿瘤细胞死亡。顺铂的温热合并效应和烷化剂性能相似, 在 39~41°C 就有一定的增强作用, 至 43°C 时作用更明显, 此药协同机制尚不清楚。(4) 代谢拮抗类药: 温热对一般代谢拮抗类药无明显增强作用, 但 5FU 例外。此药对胸苷酸合成酶起抑制作用, 从而显示其细胞毒性, 是时间依存性药物。在体外实验中并不出现温热增强作用, 但在患瘤小鼠实验治疗时, 有增强杀伤肿瘤作用, 这种效应可能是温热引起肿瘤组织内血流、H<sup>+</sup> 浓度、缺氧等整体变化所致。

2. 非抗癌剂: 近年来在非抗癌剂合并温热的研究方面取得了一定的进展, 这些药物大多以细胞膜为作用部位。酒精及局部麻醉剂(普鲁卡因、利多卡因等)是以影响膜磷脂来影响膜机能的药物。二性霉素 B 能结合到细胞膜脂质的胆固醇中而改变膜的机能。这些膜作用药物和温热合并可明显增强杀伤肿瘤细胞效应。苯甲醛 37°C 时是几乎无毒性的弱抗肿瘤物质, 它能和细胞膜蛋白的氨基酸或硫醇基进行可逆性反应, 因而在 42°C 或 43°C 温热合并时可增大温热效应, 这些药物的协同机理可能与肿瘤细胞无氧解能力旺盛、乳酸产生较多有关, 由于这些药物可阻碍膜的活动和乳酸的通透性。使细胞内 H<sup>+</sup> 浓度上升, 当和温热合并时可增强温热对肿瘤细胞的杀伤作用。

药物和温热合并虽然在实验或临床上取得了不少的成绩, 但现有的抗癌剂对肿瘤的选择性有一定的局限性, 同时还存在对正常脏器有某些损害等副作用以及温热疗效方面的许多问题。因此人们正在探索新的理想的温热化学疗法药物, 它应是在 37°C 常温下几乎无毒性, 而在 41~42°C 温热下发挥其最大抗癌性的药物, 目前正等待这类药物的开发和利用。

吐温 80 的生物学特性与抑制肿瘤生长效应 吐温 80 是聚氧乙烯(20)脱水山梨醇酐单油酸酯, 是山梨醇的一次和二次脱水产物; 由于分子中有亲水性聚氧乙烯基 H(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>n</sub>O<sup>-</sup> 大大增加了亲水性, 因而非离子型水溶性表面活性剂。被列为无公害或低公害附加剂。近年来广泛应用于医学、日化和食品工业, 医药中作为注射剂及其它剂型中的增溶、乳化剂。这类表面活性剂口服相对无毒性, 每天口服 6g 连续 24d、有的服用达 4 年之久都没有任何不良反应。其半数致死量口服可达 25g/kg、静脉给药为 5800mg/kg。注射后的溶血作用小于其它助溶剂, 0.1% 的浓度无论在体内或体外试验均不引起溶血, 文献报道上海大众制药厂

的产品在浓度为 0.2% 时也不产生溶血, 肌肉注射产生溶血作用的最大剂量比静脉注射剂量大 10 倍, 因而是一种安全、常用的药物。吐温 80 的脂肪酸链能和细胞质膜系统的脂质膜结合, 使膜的组分发生改变, 由于它含有一个不饱和的烯键同时又是聚不饱和脂肪酸, 因而能使膜的流动性增加, 导致与膜结合的酶活化能的折点温度降低, 这些变化和吐温 80 引起的膜相变有关。吐温 80 对红细胞作用影响的研究表明: 它的主要作用环节可能也在细胞膜, 在低浓度或较高浓度短时间作用下能增加细胞表面的通透性, 随浓度的增加或作用时间延长, 逐渐加重细胞膜的损伤, 直至发生不可逆的变化。因此吐温 80 对细胞作用的靶也可能和温热相似, 在细胞质膜系统上。有人交吐温 80 配成乳化剂作用于接种艾氏腹水癌细胞的小鼠, 实验结果证明吐温 80 能抑制肿瘤细胞的生长并有较大的生物活性。说明吐温 80 有一定的抑制肿瘤生长效应。目前虽未见国内、外有吐温 80 和温热合并的生物学效应的报道, 但其可能为有成为开发前途的温热化疗药物之一。

#### 参考文献

- 1 Hahn G M. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1975, 72: 937~940
- 2 Ingolia T D, Craig E A. Nucleic Acid. Res. 1981, 9: 1627~1642
- 3 Coley W B. Am. J. Med. Sci., 1983, 105: 487
- 4 松田忠义. 医学のあゆみ, 1985, 136: 858~859
- 5 加纳水一ら, 最新医学, 1985, 40: 2477~2482
- 6 赵前. 中药通报, 1986, 11: 502~503
- 7 任振学. 中国医院药学杂志, 1987, 2: 427
- 8 陈兆聪. 医学分子生物学. 武汉: 武汉大学出版社, 1988
- 9 水野左敏. 医学のあゆみ, 1989, 148: 3~7
- 10 杨虎川. 肿瘤, 1991, 11(6): 258~260

(上海铁道医学院杨虎川、杨耀琴撰)

### 肿瘤放射治疗学 radiation oncology 治疗癌症的手段

在不断改进, 但仍以手术、放射治疗和药物治疗 3 种传统模式为主。经过发展, 现代放射治疗日趋重要, 约有 70% 的恶性肿瘤患者需用放射治疗, 约 40% 的患者需放射线根治。放疗肿瘤已成为一个专门的学科, 称为放射肿瘤学, 它包括放射临床、放射生物及放射物理学。放射治疗主要以远距离外照射为主, 即放射源置于人体外部, 射线需经过健康组织才能达到肿瘤部位。另一种治疗方式是短距离照射, 即将放射源连同施源器置于人体腔中, 或植入病体内, 控制照射时间达到预定剂量。各种肿瘤治疗手段都有其优点及限度, 现代放疗提倡体外远距离照射与体内近距离照射结合, 二者互补长短, 是不能互相取代的整体。

体外远距离照射的发展大体上分 3 个阶段: (1) 自 1895 年伦琴(Roentgen)发现 X 线至 20 世纪 50 年代, 对癌的射线治疗是采用低能的 X 线。由于 X 线穿透力很差, 对深部肿瘤治疗效果不好, 同时造成较高的皮肤损伤和骨骼吸收, 因此使用受到很大的限制, 现仅用于体表肿瘤的治疗。(2) 20 世纪 60 年代, 由于原子反应堆技术的发展, 出现了较高强度的人工放射性同位素<sup>60</sup>钴。<sup>60</sup>钴射线是由非放射性同位素<sup>59</sup>钴, 经过原子反应堆中的慢中子轰击, 原子俘获中子后原子量增加一个单位变成放射性同位素<sup>60</sup>钴:  $^{59}_{27}\text{Co} + \text{N}^1 \rightarrow ^{60}_{27}\text{Co} + \text{Y} + \text{Y} + \beta^- \rightarrow ^{28}\text{Ni}^{60}$ 。这种新的同位素<sup>60</sup>钴的核是不稳定的, 它在衰变过程中放出粒子(能量 0.3Mev)和两种不同能量的 γ 射线(1.17 和 1.33Mev, 平均能量 1.25Mev), 最后衰变成同位素镍(<sup>28</sup>Ni<sup>60</sup>, <sup>60</sup>Co 的半衰期是 5.3 年, 所以它是 1 种长半衰期的人工放射性同位素。<sup>60</sup>钴产生的 γ 射线能量高, 穿透力强, 因此深度剂量大, 剂量分布均匀, 皮肤反应小, 适用于体外照射深部肿瘤的治疗, 是中国目前放射治疗的常规设备。(3) 然而, <sup>60</sup>钴所产生的 γ 射线的能量仍嫌低, 且射线能量不能按需要而调节。这些缺点限制了它自身的发展, 从而受到更为优越的电子直线加速器的挑战。电子直线加速器是通过电磁场作用加速电子, 被加速电子由电子枪注入, 加速至高能后从加速管引出, 照射到病人身上进行电子束治疗, 适于治疗表

浅部位肿瘤。若在电子束引出口加上重金属靶阻挡电子线,则电子线转换成X线,高能X线(即光子射线)适于治疗深部肿瘤的。医用直线加速器既能产生电子线,又可产生高能X线,临床上根据不同的肿瘤类型及不同部位加以选用,有时两种射线配合使用,效果更好。

电子束的特点:(1)电子束自皮肤达到预定的深度后剂量骤然下降,具有“锐截止”的特点。由于电子射程与能量成正比,能量可以调节,治疗深度就可以根据病灶的部位而确定,因此可以保护比肿瘤更深部的正常组织。(2)骨和软组织吸收的差别不大,无骨屏障作用。(3)从表面到一定的深度,剂量分布均匀,等剂量曲线平坦,供给一个满意的均匀的照射野。(4)皮肤反应比一般X线轻,但比<sup>60</sup>钴略重一点。加速器所产生的高能X线,其物理特点和<sup>60</sup>钴γ线相似,但比<sup>60</sup>钴更加优越,即深度剂量高,皮肤反应小,半影小,照射边缘锐利,骨吸收少等。上述的放射线治疗并不能使所有肿瘤得到控制,原因是现在使用的光子射线对一部分抗放射线肿瘤的杀伤力不足。70年代以来,国外较普遍研究应用质子直线加速器快中子射线治疗恶性肿瘤。中国自行研制的第一台快中子治疗装置于1991年11月在中国医学科学院肿瘤医院进行了临床治疗实验,对某些类型肿瘤疗效显著,因中子射线具有生物效应,比光子射线高3倍,对缺氧细胞有较大的杀伤作用,一次剂量,打击杀死癌细胞较多,癌细胞积累能力及修复亚致死损伤能力小,对大多数抗辐射类型肿瘤有效等优点。快中子治癌研究的临床应用为放射治疗增添了一种新的手段。

近距离腔内放疗技术称为 Remote controlled after-loading Brachytherapy。1897年居里夫人发现天然放射性元素镭,3年后,镭便开始用于癌症治疗。腔内近距离后装机的的发展始于1964年,美国D. R. Henshke研制出遥控后装操作的腔内照射法,其后各种后装机应运而生,也进行了各种使用技术及剂量系统方面的研究。80年代中期,正式推出计算机控制的微型高剂量率后装机,并达到成熟的阶段,成为治疗肿瘤不可能少的工具。70年代以来这类治疗方法有3方面的突破:(1)早期<sup>226</sup>镭源为更容易防护的<sup>192</sup>铱源所取代;(2)计算机治疗计划系统问世,保证了最佳治疗方案的选择;(3)微电子技术和传动技术的最新成果皆融于后装技术,治疗范围从传统的妇癌领域扩散到鼻咽癌、支气管癌、食管癌、直肠癌、膀胱癌、前列腺癌、乳腺癌、脑瘤等多种癌症的治疗,并可在术中进行放疗。远近照射,内外照射相互配合治疗,使肿瘤放疗方法日臻完善。

#### 参考文献

- 1 Fletcher G H. Textbook of Radiotherapy Lea Febiger, Philadelphia, 1980, 3: 103
- 2 谷铎之,等. 肿瘤放射治疗学,北京:人民卫生出版社,1983, 30
- 3 雷逢春. 北美短距离放疗工作会议,美国,1985,5
- 4 雷逢春. 北美短距离放疗工作会议,美国,1985,5
- 5 Perez C A, et al. Principles and practice of Radiation Oncology J. B. Lippincott company Philadelphia, 1987, 179~289

(安徽省立医院肿瘤科程广源主任医师撰)

### 恶性肿瘤的综合治疗 combined treatment in cancer

肿瘤的发病原因及机理仍未被完全揭露,给治疗带来诸多困难。另外,肿瘤是一全身性疾病的概念已为世人所公认,不但如滋养叶细胞恶性肿瘤、骨肉瘤等易发生全身转移,即使像I期乳腺癌这样以局部病变为主的肿瘤也常有10%~15%的病人因远处转移而治疗失败。因此,癌症的治疗决非单一疗法所能奏效的,多数肿瘤在进行局部治疗时必须同时考虑全身性综合治疗。不但要考虑能杀灭癌细胞的药物和手术、放疗等方法,也应考虑通过调节机体自身的生物学反应来提高肿瘤患者自身防御能力的生物治疗。

综合治疗应注意以下几点:(1)综合治疗是多学科、多方法的有机协作,各种治疗措施应是有计划的组合,并不是治疗方法

愈多愈好,更不是几种治疗措施简单、盲目、机械的拼凑。(2)综合治疗的最终目的是提高总的疗效,有利于缩小手术范围,保全组织和器官的功能,减少并发症、后遗症的发生。(3)治疗肿瘤极其复杂,且具长期性、多变性、反复性等特点,不可以一般疾病对待,首次治疗必须恰当,充分,不能满足近期疗效。应制订出随访、复查、巩固治疗和康复治疗计划。

临床实践证明,综合治疗已成为多种恶性肿瘤有效的和最基本的治疗方案。大多数情况下,采用综合治疗较单一治疗效果。以Wilms瘤患者的5年生存率为例,单纯外科治疗为20%,外科加放疗提高到40%,若加上化疗可提高到80%以上。对上颌窦癌过去常作破坏性较大的上颌骨广泛切除术,术后造成严重的缺损,若术前加用动脉插管化疗和放射治疗,在一些病例可缩小手术范围,避免作上颌窦切除术所造成的毁容后遗症。综合治疗的方式很多,一般有手术与放疗、手术与化疗、放疗与药物治疗、放疗与化疗与热疗以及生物治疗与各种治疗方法的综合。

手术与放疗的综合疗法,常有术前放疗、术中放疗和术后放疗3种方式。

术前放疗可使肿瘤体积缩小,便于手术切除,或使原来不能切除的肿瘤缩小为可以切除,从而提高手术切除率。另外,还可以减少手术时肿瘤细胞局部种植复发和远处转移,提高治疗好转率。术前放疗常用于头颈部中晚期癌。Whitair报告258例舌癌患者的治疗结果,其中Ⅲ、Ⅳ期病例放疗加手术5年生存率为33%;单一放疗者5年生存率为16%。术前放疗对胃癌、食道癌、较晚期乳腺癌患者可以提高治愈率。

术中放疗如用加速器产生的电子束照射,避开肿瘤附近的组织,手术过程中一次大剂量照射,对较少的残留肿瘤或转移有一定疗效。对无法切除的原发灶,也可作术中姑息放疗,可使症状缓解。术中放疗可提高I期及Ⅱ期胃癌患者的生存率。1组140例随机分组研究中,Ⅱ期胃癌患者术中放疗组术后1、2、3年的生存率分别为86.1%、65.2%、50.0%;而对照组的1、2年生存率为72.7%和37.5%。

术后放疗可杀灭手术切缘残余病灶,有利于杀灭术中局部种植的癌细胞,减少局部复发和远处转移,术后明确肿瘤的浸润范围,便于合理设计放射野。Fletcher报道1组乳腺癌患者术后放疗的疗效,证实腋淋巴结转移超过4个时,单纯手术组无10年生生存者,根治加术后放疗组10年生生存率为36.0%。近10多年来西方国家乳腺癌手术范围越来越小。意大利米兰国家癌中心(1973~1980)将701例I期乳腺癌患者随机分两组进行治疗。1组349例作根治术,另1组352例行1/4乳腺切除加腋淋巴结清除及乳腺区照射。术后平均随访7年以上,结果根治组的局部复发例数、5年无瘤总生存率及生存率分别为3例、83.0%和90.0%,而1/4乳房切除组分别为1例、84.0%和89.0%。结果表明I期乳腺癌1/4乳腺切除加术后放疗效果与根治组相似,却保留了乳腺的外形。术后放疗对有腋门淋巴结转移的肺癌、胰腺癌、肾母细胞瘤、睾丸精原细胞瘤、头颈部肿瘤等皆能使疗效提高。

放疗合并化疗可以提高肿瘤对放射线的敏感性。胃癌除未分化癌外,其它各型对放射线均不敏感,可借化疗药物提高其对放射线敏感性。给羟基脲药后4h,可使DNA的损伤达最高峰,这时给予放射治疗比较敏感。反之,照射太迟疗效减低。另外,化疗合并放射治疗可使肿瘤缩小,以利放射,控制血行转移及放射野以外的转移灶。

高温对肿瘤细胞有直接杀伤作用。加热与放疗后并可增强肿瘤对放射线的敏感性。临床和实验显示,放射后3~6h给予热疗,肿瘤可获得选择性增敏效果。一般各种晚期癌或复发癌热疗合并放射,其总缓解率为50%~60%,其中完全缓解率为10%~15%。Kai等观察不能切除的食道癌21例,用射频电容或电极腔内加温合并放疗,有效率达76%;对照组79例,疗效仅39%。

化疗与手术综合,化疗常用于术前或术后。用于术后者称辅助化疗。可单一用药,也可联合用药,可全身用药,亦可作肿瘤供

应区血管灌注。术前化疗对于某些增长迅速易发生转移的病例可减低术后播散机会；肿块较大或有压迫症状的患者先给化疗常能使肿瘤缩小，为手术创造有利条件；或可缩小手术范围，保留正常功能。骨肉瘤患者的预后劣，生活质量差，截肢手术治疗仅20%活逾5年，绝大多数患者于术后半年内复发、转移而告失败。70年代以后，化疗成为重要辅助治疗手段，使肢体恶性骨肿瘤的截肢疗效提高到50%以上。有报道术前采用联合化疗加局部切除可避免截肢。

肝癌患者约80%就诊已属晚期，不宜手术切除。术前肝动脉化疗加栓塞可使肿瘤缩小，症状改善，AFP下降。一般报道TAE后缓解率可达60%~70%，1年生生存率50%~60%，使原来一部分不能手术的病人能接受手术。

对转移性肝癌，采用FAM方案(5FU、ADM、MMC)行肝动脉灌注治疗。结肠癌肝转移者有效率65%，胃癌和乳腺癌肝转移的缓解率均为75%，使部分患者肝转移瘤能被切除。

术后辅助化疗是指“微小残余癌灶的手术后治疗”。实验表明，肿瘤治愈的可能性与化疗开始时瘤细胞的数量成反比。因此，对根治术后患者施行辅助化疗，比企图用化疗治疗已有广泛转移的晚期病例要现实得多。辅助化疗受到各科医师的重视。对头颈肿瘤、乳腺癌、软组织肉瘤和膀胱癌等应用辅助化疗效果尤为突出。近年来辅助化疗在肺癌和胃肠道恶性肿瘤的治疗中也渐占重要地位。以乳腺癌为例，近10年来进行乳腺癌辅助化疗的研究已有100多家，其中最著名的是美国的NSABP协作组与意大利米兰国家癌症研究所，均为前瞻性随机研究。前者的方案是L-PAM；后者是CMF。结果表明：(1)辅助化疗对50岁以下女性比年老者疗效显著；(2)辅助化疗对腋淋巴结转移3个以上者效果不显；(3)延长辅助化疗的用药时间也不能改善生存率，米兰国家癌症研究所观察CMF12轮与6轮的疗效无区别；(4)三苯氧胺作为辅助治疗对50岁以上的女性ER(+)组有效，50岁以下患者尚无结论。

生物治疗与手术、化疗、放疗的综合：生物治疗在抗癌的作用中已受到人们的普遍关注。80年代初，美国首先提出肿瘤治疗新概念生物反应调整(BRM)，成为肿瘤第四治疗模式。BRM理论的确立，使肿瘤生物治疗具备了理论基础，而生物工程技术的开发利用，使生物治疗肿瘤的临床应用成为可能，细胞工程技术使大量培养和获取各类抗癌细胞(LAK, ETL, TIL, NK, MΦ)及分泌单克隆抗体的杂交瘤细胞成为常规方法；基因工程技术使各类BRM细胞因子(白细胞介素、干扰素、肿瘤坏死因子、克隆刺激因子等)能大量生产，从而可以满足临床治疗的需要。生物治疗既可以独立治疗癌症，亦可与另外3种治疗模式配合应用。朝鲜学者比较330例胃癌患者术后进行免疫化疗、化疗及单纯手术的疗效，5年生生存率分别为45.3%、9.8%和24.4%。术后免疫学指标也显示应用免疫化疗组明显较其他两组为佳。

肿瘤的切除，大大减轻患者的负荷，但术后残留的亚临床灶和微小转移在所难免。生物治疗可以提高患者的防御能力，从而抑制或排除肿瘤的生长，提高手术的疗效。此外，肿瘤切除后，改变了机体与肿瘤间的比势，解除了免疫麻痹状态，增强了免疫淋巴细胞和巨噬细胞活性，亦有助于进一步提高手术疗效。

化疗可以许多方式增强生物调节剂的疗效。化疗通过细胞诱导作用减轻肿瘤的负荷，使生物调节剂处于最佳状态；同时，化疗还起着生物调节剂的作用，能抑制T细胞或巨噬细胞的封闭因子。低剂量的环磷酰胺具有增强免疫力作用，其他如顺铂、阿霉素、博来霉素亦可提高免疫力。另外，生物调节剂能增强免疫介导抗肿瘤作用，或提高对化疗毒副作用的耐受性，增强宿主的免疫力，并有直接抗肿瘤的作用。干扰素能提高5Fu的活性。Wadler的体外试验表明， $\alpha$ 、 $\beta$ -干扰素使5Fu的毒作用提高100倍， $\gamma$ -干扰素也有类似作用。

单克隆抗体与放射性同位素和化学药物交联作肿瘤的导向治疗并提供示踪物质；近10年取得长足的发展，各国研究者对其抱有巨大希望。Order等采用抗铁蛋白多克隆抗体与<sup>131</sup>I或

<sup>90</sup>-Y交联用于治疗肝癌及何述杰金氏病患者143例，约7%完全缓解，40%部分缓解。利用抗肿瘤MaAb携带药物可提高杀伤效应的选择性。Takahashi等采用MoAb-s丝裂霉素的交联物治疗转移结肠癌10例，3例经CT证实肿瘤缩小，3例疼痛消失。

单克隆抗体及其交联物的研究给恶性肿瘤治疗带来新的希望，但至今用于临床并能达到一定疗效的生物治疗方法，以过继免疫治疗引人注目。其中以对LAK细胞、特别是肿瘤浸润淋巴细胞(TIL)杀伤效应的研究为多，为恶性肿瘤的综合治疗提供一新的途径。1990年，美国NCI报道LAK细胞加IL-2治疗晚期恶性黑色素瘤、胃癌、结肠癌等178例，其缓解率为25%~35%。1986年，Rosenberg SA等探索了TIL新的免疫疗法。现已证实，TIL抗肿瘤活性高于LAK细胞50~100倍，TIL体内抗肿瘤作用具有一定靶细胞异性；与小剂量的化疗药如CTX、ADM、5FU等联用，可以提高疗效。至今已报道TIL治疗恶性黑色素瘤、胃癌晚期患者近100例，有效率为18%~50%。

在肿瘤的转基因治疗中，由于TIL在体外IL-2刺激下能大量扩增；体内存活时间较长(>100d)，回输体内后能集中在肿瘤发生部位发挥较强的杀伤效应，是目的基因的理想运载细胞，把TIL抗癌作用提高到一新的水平。1990年，美国正式批准NIC应用逆转录病毒介导人TNF- $\alpha$ 基因转移TIL治疗50例晚期恶性黑色素瘤患者，使转基因治疗肿瘤第1次应用到人体。

#### 参考文献

- 1 Veronesi U, et al. *New Engl J Med.*, 1981, 305: 6
- 2 Bonadonna G, et al. *Breast Cancer Res Treat.* 1985, 5: 95
- 3 Fisher B, et al. *J Clin Oncol.*, 1986, 4: 929
- 4 Rosenberg S A, et al. *Science*, 1986, 223: 1318
- 5 徐光炜. 胃癌. 北京: 人民卫生出版社, 1987. 247
- 6 Rosenbergt S A, et al. *New Engl J Med*, 1990, 323: 570

(北京市肿瘤防治研究所林本耀主任医师撰；黄信孚审)

**白血病 leukemia** 造血系统的恶性肿瘤。其特征是骨髓、淋巴结等造血系统中的一种或多种血细胞成分及其前身细胞发生恶性增殖，并浸润体内各脏器、组织，导致正常造血细胞受抑制的全身性恶性疾患。白血病是中国人10个高发恶性肿瘤之一，居肿瘤发病率的第6~7位，约为3~4/10万人。中国白血病的发病率低于欧美一些国家，与亚洲地区国家如日本、新加坡相似。近年来日本、瑞典、荷兰、德国等国一些资料指出，白血病的发病率有逐年增高的趋向，中国资料也表明白血病的发病率随年代推移而增高，这和中国的白血病诊断技术提高或工业迅速发展、人群接触电离辐射及化学物质机会增多可能有关。若按3/10万人口计算，每年患病人数竟达30万人之多，而且多数为青壮年，在各年龄组各种恶性肿瘤构成比中，白血病在儿童和青年的恶性肿瘤中列居首位。因此积极开展白血病防治研究是十分紧迫的任务。

白血病发现至今已有一百年的历史。1827年，Vaipean和Barln及Donne(1939年)曾描述过本病患者表现，并在尸解中发现。1845年，Craig、Bennett及Virchow将其命名为白血病。以后，Virchow又鉴定出慢性粒细胞白血病及淋巴细胞白血病两个型别。Friedreich在1857年描述急性白血病。Reschad和Schilling-Torgan在1913年描述单核细胞白血病。中医虽无白血病这一病名，但有关白血病的临床表现在历代医书中(早自公元前2世纪~公元后2世纪的《内经》、《金匱要略》)都有记载，散见于“急劳”、“热劳”、“虚劳”、“温病”、“血证”、“症积”、“痰核”等范畴。

白血病的病因目前尚未完全阐明，但近年世界各国对白血病病因的探讨作了大量工作，取得很大进展。认为白血病与病毒、化学、放射、遗传等因素有关。动物实验证实，许多动物如鸡、小鼠、猫、牛、羊及多种灵长类动物的造血系统肿瘤与C型ANNA病毒有关，从易感白血病纯种小鼠体内分离出的病毒能引起白血病。但是非单纯病毒感染所致，而与基因因素、免疫因素的变化、



自身稳定功能失常有一定关系。只有在特异性的病毒基因体掺入易感细胞的基因结构时,才能使正常细胞变成白血病细胞。目前人体肿瘤大约80%以上与环境因素有关,其中以化学因素为主。每年都有大量可疑的致癌物进入人类生存环境,如碳氢化合物、苯、抗肿瘤药物、氯霉素等都有诱发白血病的报道,但其致白血病作用机理尚未完全阐明。动物实验证明,电离辐射可以损伤胸腺和骨髓,抑制免疫机能,促使潜在病毒活化或释放,使动物发生白血病。电离辐射对人类白血病的发生机理尚未阐明,但大量实践资料已证实其重要的作用。日本广岛、长崎原子弹爆炸3年后,白血病发病率持续上升,6~7年达高峰,14年后该地发病率仍高于其他地方,在距离爆炸中心1km内幸存的人群中,白血病发病率高出其他地区100倍。人类白血病的发病与遗传有关。如Down综合症及其他染色体异常、免疫缺陷等先天疾病的患者中,白血病的发病率高于一般人群。但白血病不是遗传性疾病,而是某些环境因素和内在因素共同作用所发生的疾病。G显带法试验显示,在急性白血病中约50%的病人可见染色体异常,例如90%以上的CML中可找到Pb<sup>1</sup>染色体。近年来肿瘤研究的重大突破是细胞癌基因结构与功能的发现,目前至少在脊椎动物中确定了32种与逆转录酶病毒癌基因同源的细胞癌基因,已有20种在入基因组中定位,认为是一种受多种物质控制的可调节的基因,可能是肿瘤基因失调而发生白血病。

急性白血病是一组在形态学方面极多样化的疾病。传统上按细胞形态来分类,但由于缺乏一致的命名和分类标准,文献报道颇为混乱。1976年,法、美、英(FAB协作组)在国际上提出一个简化的命名方案,考虑两方面因素:一是说明肿瘤性增生的细胞属于何种细胞系列,二是表明这个异常增殖的细胞系列在细胞分化过程中阻断在何水平。经1981、1982、1984及1985年修订,目前在多数国家已被广泛采用。FAB分型诊断至今仍是急性白血病诊断的基本手段,将急性白血病划分为急性淋巴细胞白血病(ALL)和急性髓系白血病(AML)。依据细胞形态学辅之以细胞化学方法,进一步将ALL分为L<sub>1</sub>~L<sub>3</sub>、AML分为M<sub>1</sub>~M<sub>7</sub>亚型。然而由于基于细胞水平的直观判断,往往掺杂着主观性因素,其诊断符合率约60%~70%。另外,它与白血病高变性的血液学特征、临床表现、治疗反应以及预后、转归等亦无相关性。80年代以来,急性白血病的免疫分型发展起来,这种客观的、可重复性的、精确的诊断方法,不仅能明确地辨析各类白血病的细胞源性、分化阶段及克隆性征,而且可用于指导治疗和判断预后。深入探讨白血病细胞表型特征与正常血细胞分化发育的关系,将对阐明白血病发生学的生物学性质具有十分重要的意义。

McAb免疫分型诊断是针对细胞表面标志,在分子水平上进行各亚群、亚类的识别,因而提供了客观而精确的判断标准,并能进一步定量分析以及计算机化,弥补了FAB分型因直观检测所掺杂的主观性、重复性差等缺点,使诊断准确率提高到90%~99%。

McAb能了解各种造血系统细胞起源、个体发育过程,依据细胞各个分化阶段的特征性标志研究其与细胞恶性增殖的关系,并可探讨各种造血细胞生物功能的分子基础以及细胞激活过程中膜抗原结构与信号系统之间的联系,为白血病发病机理和细胞识别系统的研究提供手段。免疫分型与临床表现、缓解率、生存期、治疗反应等密切相关,这一诊断方法可以判断预后,指导治疗。但是免疫分型本身不是疾病的诊断,如起病缓急、白血病或淋巴瘤的鉴别、细胞学指征和血液学指征等等,尚需综合临床资料分析判断。由此可见,完全摒弃FAB分型是不可行的。另外,免疫分型尚无法分析基因、染色体水平的变异与白血病的关系。对于从本质上认识白血病亦有其不尽完美之处,为此1986年在比利时召开了国际会议,提出白血病的MIC分类诊断,即形态学(M)、免疫学(I)、细胞遗传学(C)相结合,后者包括基因重排和染色体分析,此代表了当今白血病诊断的最新趋势。

随着对白血病性质的了解,许多学者早已开始探索有效的治疗药物,并进行临床试用。1865年首先用砷剂治疗慢粒获得暂

时效果。1878年开始以砷化钾治疗慢粒,取得了一定疗效。1902以后,X线脾区照射也取得一定疗效,成为慢粒的常规治疗方法达50年。以后在临床上曾发现使用叶酸治疗会使某些急性白血病患者的病情恶化。1947年有人使用抗叶酸制剂氨基嘌呤治疗急性淋巴细胞白血病,使病情获得缓解,为白血病的化学药物治疗开辟了新的途径。1953年,Galton应用马利兰治疗慢粒亦获得较为显著的效果,在国内至今仍为治疗慢粒的主要手段。不久又陆续发现了许多有效的抗白血病药物。进入70年代以来,由于细胞动力学的深入研究,联合化疗治疗方案的建立,以及支持疗法的进展等,使白血病的缓解率有了明显的提高。

解放前,中国有关白血病的文献多为个别的或少数病例报道,仅49例,包括较少的慢粒合并淋巴肉瘤及嗜酸粒细胞白血病各1例。解放后,1964年曾召开全国血液学会。1973年召开中国白血病座谈会之后,各地区协作会议相继召开。1978年在全国肿瘤防治研究办公室下建立了全国白血病协作组,各地展开了白血病普查或死亡调查和中草药、植物药及中西医结合治疗白血病的研究。目前除了已能制造国外发明的新药(如阿糖胞苷、L-门冬酰胺酶,相当于柔红霉素的正定霉素、丙亚胺、5-氮杂胞嘧啶)外,全国还研制了一些新药(如溶癌呤、啉啉苯芥),并在中医中药、植物药方面也发掘出一些成分(如从青黛分出的靛玉红、从三尖杉属植物分出的脂碱)。实验室研究包括组织化学、生物化学、染色体、实验白血病模型、白细胞系的培养、细胞动力学和超微结构等也都有进展。

近年来白血病的治疗进展很大,强烈的联合化疗、中枢神经系统并发症的防治以及抗感染、支持疗法等,使疗效大为提高,50%~60%儿童ALL经过现代化疗,可获得长期无病生存和根治,成人白血病患者的生存期也较前有所延长,有10%~15%的患者生存期达5年以上。因此,急性白血病的治疗目的已由单纯延长寿命、改善一般情况转为争取长期生存与根治。但是儿童ANLL和成人白血病的预后并不满意,平均生存期仅1年左右。为寻找根治白血病的方法,国内外都在积极开展研究工作,其中骨髓移植已取得很大成绩,极有可能发展成为根治白血病的主要手段。目前用于临床的骨髓移植分两大类,第1类为同种异基因骨髓移植,第2类为自体骨髓移植。异基因骨髓移植的研究工作进行得比较广泛,并取得了很大成功。HLA完全相配合的同胞兄弟姐妹的骨髓移植,可使大约60%的患者得以长期生存,达到根治。但是异基因骨髓移植对供者有严格的要求,故常有很大的局限性。如同胞兄弟姐妹HLA完全配合机率为25%,即4个中可有1个合用,而且同卵孪生的人非常少,父母子女之间单倍体相配合的移植或无关供者间的移植会出现很多合并症,目前尚不宜选用。再加上本病可缓解等因素,故真正能用骨髓移植治疗的病人只占10%左右,而且在手术过程中仍然面临着移植植物抗宿主病、同质性肺炎、白血病复发等有待解决的问题。

自体骨髓移植是近几年来逐渐广泛应用于临床的一种方法。其优点是:(1)无需供者,这在提倡1对夫妇1个子女的中国具有特殊的意义。在欧美各国目前家庭成员亦在缩小,1个家庭平均两个子女,约1/3需做骨髓移植的病人找不到合适的HLA相合的供者,故自体骨髓移植在实体瘤及白血病治疗方面均可推广采用。(2)无移植植物抗宿主病或移植排斥反应等问题。(3)技术较简单易行,花费较小,易于推广。但缺点是不能妥善清除自体骨髓中残留的白血病细胞,可致复发。根据几个中心的治疗报道,生存期在3年以上的可达40%左右,已经显露出令人鼓舞的效果。失败的原因多由于病情复发。研究资料表明,慢粒慢性期患者移植后病愈生存率达60%,移植效果最佳;急淋患者移植后病愈生存率为50%,移植效果次之;急粒患者移植后病愈生存率只有40%,移植效果最差。

中西医结合治疗急性白血病的研究也在广泛开展,辨证分型加西药化疗配合进行治疗,根据病例数在25例以上的9篇文章统计,共640例,完全缓解率为20%~55.5%,平均为39.7%,总缓解率为46.6%~92%,平均为77.62%。有作者报道中

中西医结合组 90 例,总缓解率为 78.9%,而西药组 58 例,总缓解率 50%。中西医结合组生存期在 1 年以上的占 37.8%,最长 1 例达 16 年,而西药组生存期满 1 年以上者仅 3.4%,最长 1 例是 21 个月。有作者主张辨证分型与辨病分期相结合进行治疗,初期以邪实为主,治以清热泻火解毒为主,加入有抗癌作用的中草药。后期以本虚为主,治以扶正培本法,以益气养阴为主。化疗期有胃肠道反应者,治以芳香化浊、和胃降逆法。有骨髓抑制者,用补肾养血法。

成方单药,以癌灵 1 号注射液(含砒石、轻粉)治疗急性白血病的例数较多。其他如青黄散(由青黛、雄黄以 9:1 或 8:2 组成)、抗白丹(由雄黄、巴豆、生川乌、乳香、郁金、槟榔、朱砂、大枣组成)、六神丸等,均有用它们治疗急白的报道。

慢性粒细胞白血用当归芦荟丸治疗有效的基础上,用从青黛中分离出的靛玉红治疗慢粒 314 例,完全及部分缓解率 59.55%,有效率 87.36%,但 2/3 患者有不同程度的消化道副作用。以后又合成靛玉红的类似物异靛甲,治疗 134 例慢粒,完全及部分缓解率 80.6%,有效率 94.03%,疗效高于靛玉红,消化道副作用少而轻。青黄散治疗慢粒 54 例,完全及部分缓解率为 98%,无效 2%但有胃肠道反应、色素沉着等副作用。另外,尚有六神丸、牛黄解毒片、梅花点舌丹、大黄蛰虫丸等。

靛玉红的作用原理:该药分子进入细胞膜后,对 DNA 聚合酶 A 活性产生抑制作用,使患者骨髓细胞<sup>3</sup>H-TDR 标记指数降低,使 DNA 合成受到抑制,使白血病细胞发生形态改变,出现核溶而产生疗效。青黄散对 L<sup>615</sup>、S<sup>180</sup>细胞的 DNA、RNA 合成有明显的抑制作用,对正常小鼠血象、骨髓 CFU-S、CFU-D、CFU-E 骨髓有核细胞计数及 H-TDR 掺入无明显不良影响。而马利兰则有明显抑制作用。可见它比马利兰安全。六神丸、紫金锭、犀黄丸的实验研究表明,这些中药有明显杀伤 L<sup>1210</sup>小鼠白血病细胞的作用,主要作用于 S 期,并具有缓解白血病细胞对脾脏浸润的作用。梅花点舌丹能明显抑制白血病细胞,提高 L<sup>1210</sup>白血病小鼠抑制率等。

目前,白血病仍为难治性疾病,其病因尚未阐明,治疗方法虽不少,但疗效尚不够满意。目前研究的热点为骨髓移植方法治疗白血病,但因骨髓来源及并发症等问题尚未得到满意解决,故还有很多难点,有待今后进一步研究解决。

#### 参考文献

- 1 邓家栋. 临床血液学. 上海:上海科技出版社,1985
- 2 武汉医学院第一附属医院血液病研究室 白血病(第 1 版). 武汉:湖北人民出版社,1979
- 3 叶耀光,等. 现代实用血液病手册,1984
- 4 申明燕,等. 国外医学输血及血液学分册,1991,14(3):130
- 5 许国璋. 内科讲座(6). 北京:人民卫生出版社,1982. 255
- 6 方圻. 内科临床与进展. 北京:中国医药科技出版社,1989. 266

(中国中医研究院西苑医院王天恩主任医师、杨留副研究员撰)

**食管癌** esophageal carcinoma 人类常见的恶性肿瘤之一,分布遍及世界各地,但极不平衡。中国是世界上食管癌死亡率最高的国家之一,据 1974~1976 年全国恶性肿瘤死亡回顾调查,中国食管癌粗死亡率为 16.70/10 万(中国人口调整死亡率为 14.59/10 万,世界人口调整死亡率为 23.40/10 万),食管癌高发区有:(1)豫冀晋三省交界的太行山;(2)陕豫鄂三省交界的秦岭东部;(3)鄂豫皖交界的大别山;(4)江苏里下河区域的苏北;(5)广东东部和福建西部组成的闽粤;此外如新疆托里县食管癌死亡也较高。中国食管癌的平均死亡年龄为 63.49 岁,性别比例一般男>女,如华北太行山高发区为 1.6:1。

中国对食管癌的病因研究,1959 年以前仅有零星报道,1959 年起中国医科院肿瘤所、河南医学院等单位的研究人员到食管癌高发区林县等地进行食管癌发病因素调查,先后提出食管与食物粗糙、饮食过快、熟食、吃酸菜、饮酒、吸烟、精神作用、遗传及食

管炎等因素有关。1972 年中国首次报告应用亚硝酸胺诱发大鼠食管癌获得成功,1980 年杨简等已注意到酸菜中白地霉污染问题。同时国外对食管癌也进行了病因研究,1966 年伯乐尔(F. J. W. Brrrell)认为南非的特兰斯凯食管癌高发可能是土壤中缺乏微量元素而导致植物中亚硝酸胺的富集。1969 年布拉德肖(E. Bradshaw)等认为南非的非洲人常用催吐药,容易引起食管上皮慢性营养不良而导致食管癌的发生。国际癌症研究中心(IARC)对伊朗里海沿岸居民的食物摄入量、吸烟、饮酒种类、个人嗜好、职业、经济和农业实践以及食物的储存、制作方法等进行高低发区对比调查,结果二地相比无明显差异。而西方学者多认为吸烟和饮酒是食管癌的主要致病因素。中国学者根据流行病学调查资料,对亚硝酸胺类化合物与霉菌病因进行多方面研究。

亚硝酸胺类化合物 现已证明在 200 多种亚硝酸胺类化合物中,约 85% 对动物有致癌性,某些不对称的亚硝酸胺能诱发动物食管癌。1975 年华北地区食管癌病因研究协作组用薄层色谱(TLC)对 124 份食品样品进行亚硝酸胺类化合物的初筛,结果林县有 23.3% 样品为 TLC 阳性,而低发区范县仅为 1.2%,这说明林县食品中可能存在亚硝酸胺类化合物。1981 年季川等用 GC/TEA 分析酸菜和玉米面,证明林县食品中可能存在亚硝酸胺类化合物。1983 年季川等用 GC/TEA 对林县和辉县的 231 份食物样品进行挥发性亚硝酸胺分析,结果从玉米面、小米、萝卜条和酸菜中检出 7 种挥发性亚硝酸胺(NDMA、NDEA、NDPA、NMAMPA、NMAMBA、NMB<sub>2</sub>A、NPYR),阳性率最高的为 NDMA(64%),其次为 NDPA(30%)与 NDEA(24%);NDMA 的最高含量为 15.5μg/Kg,一般亚硝酸胺含量均少于 1ppb,在存放较久而发霉的食物中普遍含有痕量亚硝酸胺。1985 年沈忠英等从广东南澳岛的咸菜、萝卜干和自制的鱼露中也检出亚硝酸胺类化合物(NDMA、NDEA、NBMA、NPYR 及一些未知亚硝酸胺),其中以咸菜中含量最高。1991 年李国玉等对林县的玉米、小米、萝卜条作挥发性亚硝酸胺分析,结果在上述食物中含有不挥发性肌氨酸亚硝酸胺(NSAR)、脯氨酸亚硝酸胺(NPRO)和未知的亚硝基化合物。1963 年德鲁克兰(H. Druckrey),1967 年桑德(J. Sander)先后提出亚硝基化合物可在胃内合适的 H<sup>+</sup> 浓度条件下由二级胺和亚硝酸盐合成。1987 年李铭新等经动物实验证实动物胃内可以合成亚硝酸胺,1988 年陆士新等在林县人群胃液中发现几种亚硝酸胺,其中有能引起动物食管癌的 NMB<sub>2</sub>A、NPYR、NSAR、NPIP,而胃中亚硝酸胺的含量又和食管上皮的病变程度呈正比。1985 年陆士新等以检测尿中 NPRO 和为体内合成亚硝酸胺或亚硝酸胺受阻的指标,结果在江苏扬中县、四川盐亭县和河南林县人群尿中均发现有 NSAR、NPRO 及一些未知的亚硝基化合物。给人群服脯氨酸后,尿中 NPRO 含量明显增加,这表明人服用脯氨酸后在体内合成了 NPRO;同时服脯氨酸与维生素 C 或锌。则尿中 NPRO 含量比单服脯氨酸明显降低,这表明维生素 C 或锌能阻断脯氨酸与体内亚硝酸盐和硝酸盐合成 NPRO,因此作者认为监测尿中 NPRO 可作为估计人体内亚硝基化合物合成的方法。中国有人利用 NPRO 的体内合成,进行食管癌高低发区人群代谢亚硝酸胺能力的比较,结果显示高发区人群合成亚硝酸胺的能力较强。此外有人用单克隆抗体的放射免疫法检测林县居民食管上皮的 O<sup>6</sup>-MedG(O<sup>6</sup>-甲基脱氧鸟嘌呤核苷),结果显示食管癌旁上皮及贲门癌旁上皮的 DNA 有 O<sup>6</sup>-MedG 存在,其含量明显高于对照组,这提示亚硝酸胺可能是食管癌的病因之一。

酸菜 1959 年河南医学院在林县进行食管癌流行病学调查中发现酸菜和食管癌有相关性。1965 年杨简等检查林县 60 户居民的酸菜,结果发现 47 户酸菜中有霉菌生长,并获得白地霉(地丝菌)纯培养,认为吃酸菜可能是某些地区食管癌高发因素之一。1974 年食管癌病因综合考察队调查晋、豫、冀及川等省食管癌高发区,发现食用酸菜的人数愈多,时间愈长则食管癌死亡率愈高。1975 年中国医科院肿瘤所检测林县酸菜 24 份,其中 20 份有白地霉生长。1977 年肿瘤所化学病因室用林县酸菜提取液和酸菜汤浓缩液喂大鼠,经过两年实验,肿瘤总发生率分别为 19% 及

11.1%。1978年中国医科院林县食管癌研究队用 TLC 测定 69 个酸菜样品,其中 24 个样品有可疑亚硝胺物质—Roussin 红甲酯,经证实是一种二甲硫基四亚硝基二铁化合物,它可与二级胺在试管内或大鼠胃内合成亚硝胺。1981 年李铭新等从林县酸菜提取物中测出苯并芘(Bap)及其它多环芳香烃化合物,酸菜中 Bap 含量较新鲜蔬菜明显增高。1985 年季川等从林县酸菜中分离出 6 种挥发性亚硝胺(NDMA、NDEA、NMBA、NMAMBA、NPYR 和 NDPA),至于酸菜中其它致癌物有待于研究。

**霉菌。**1974 年舍恩坦尔(R. Schoental)等报道梨孢镰刀菌和拟分枝孢镰刀菌粗提物能引起动物食管上皮增生。1975 年刘桂亭以发霉玉米面喂大鼠,结果大鼠发生食管鳞状癌。从发霉玉米面中曾分离出镰刀菌、芽枝霉、根霉、青霉、烟曲霉、毛霉、黄曲霉及棕曲霉。1982 年李铭新等对大鼠长期喂饲培养有串珠镰刀菌的玉米面,结果诱发出前胃鳞癌。1985 年蒋原宙在林县串珠镰刀菌的玉米培养物中分离到镰刀菌素 C,其物理化学分析数据与美国韦勒(L. A. Weibe)比尔德尼斯(L. F. Bjeldenes)和南非的格尔德布洛姆(W. C. A. Gelderblom)等的结果一致。该毒素对细菌和哺乳动物细胞有致突变作用。1992 年李铭新等长期给予镰刀菌素 C 能诱发小鼠和大鼠食管癌和前胃癌,说明它有致癌作用,但南非学者用串珠镰刀菌培养物喂大鼠,认为镰刀菌素 C 可能不是镰刀菌的致癌物,这个问题尚待研究。

1987 年高岩等对镰刀菌中产生的镰刀菌毒素 T-2,采用人体细胞外培养染色体分析的方法,首次证明该毒素能导致染色体畸变。1988 年李铭新等证实 T-2 毒素具有较弱的致癌作用,但无明显的器官特异性。1988 年夏求洁等从林县玉米内分离鉴定出一组真菌毒素,包括雪腐镰刀菌烯醇、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、3-乙酰雪腐镰刀菌烯醇、15-乙酰-雪腐镰刀菌烯醇、T-2 毒素及玉米赤霉烯酮,此 6 种毒素均由镰刀菌产生,这些毒素是持续并广泛存在林县主食玉米内,并证明雪腐镰刀菌烯醇、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、3-乙酰雪腐镰刀菌烯醇及 T-2 毒素均能在低剂量时引动物染色体畸变,表明林县玉米内存在的以上毒素具有致癌潜力。

1978 年徐友梅等自林县粮食中分离的一株互隔交链孢霉的乙醚提取物进行细菌回复突变试验,结果对 E. ColiND-160 菌株有诱发回复突变作用。1980 年又对 90 株互隔交链孢霉的乙醚提取物检测,对 E. ColiND-160 菌株的致突变阳性率为 73.3%。1985 年董子明等研究该提取物对 V<sub>79</sub>细胞的致突变作用。同年陈勇夫等将该提取物用人静脉血淋巴细胞 SCE 法检测,均证实该提取物有致突变作用,说明其含有致突变物。1990 年毕宝光等用互隔交链孢霉 B<sub>2-a<sub>6</sub></sub> 株乙醚提取物,分别用人胚肺成纤维细胞和人淋巴细胞检测证明该提取物有致突变性。上述诸多真菌毒素在食管癌发生中的作用有待研究。

(河南医科大学周元方教授撰)

**胃癌腹膜播散与腹腔游离癌细胞的研究** Studies on the peritoneal dissemination and intraperitoneal free cancer cells in the gastric cancer 胃癌的腹膜播散和术后腹膜复发严重影响进展期胃癌病人的预后,是胃癌防治研究中的重要课题。近年来采用的广泛淋巴结清除和联合脏器切除术,虽使进展期胃癌患者的根治切除率和 5 年生存率有所提高,但术后易复发者,尤其是常见的腹膜复发者(约占 50%),预后极差,目前尚无满意的治疗措施。胃癌腹膜播散与腹腔游离癌细胞的研究现状如下:

**胃癌腹膜播散的研究** 腹膜播散是癌细胞在腹膜壁层或腹膜脏层浆膜面形成的种植性转移,既是胃癌自然扩散方式,也是术后最常见的复发形式,其发生率中国统计为 28.6%,国外据文献报告为 30.5%~40%。

一般认为胃癌浸出浆膜或浸润至相连的腹膜时,随着胃肠蠕动与其他脏器的互相摩擦,使癌细胞脱落形成腹腔游离癌细胞。也可因含癌细胞的淋巴管、淋巴结或小血管遭受破坏后,含癌细胞的淋巴液或血液流入腹腔形成。此后游离癌细胞随腹腔液体流动,在合适的腹膜表面停留、着床、增殖成为种植性转移灶,

并可以由此引起“连锁反应”式的不断播散,造成腹腔内广泛的癌结节,形成临床上所谓的“癌性腹膜炎”。

以往认为癌细胞很容易在胸腹膜等内皮细胞层上种植,但近年来的研究资料证实,癌细胞对腹膜的受损部位有较强的亲和力。如在小鼠腹腔内注射硅藻土,造成腹膜损伤,3d 后再注射癌细胞,大多数动物(7/9)腹腔内出现种植性转移,而仅注射癌细胞的对照组仅个别动物(1/8)发生转移。1981 年 Kiyasu 等也发现,在癌细胞和腹膜粘连之前,间皮细胞变成半球形,从腹膜表面脱落,癌细胞即粘附于裸露的间皮下结缔组织上,增殖形成转移癌。此外,腹膜播散的形成亦受游离癌细胞存活力和宿主抵抗力的影响。

胃癌的腹膜播散多出现在病灶邻近的浆膜和 Douglas 窝,大网膜、肠系膜小肠附着缘以及腹膜的任何自然皱折或隐窝也是好发部位。Meyers 研究了 35 例腹腔造影和 34 例腹膜种植性转移者的转移部位,结果观察到在造影组盆腔(尤其是 Douglas 窝)、右下腹小肠系膜止点、乙状结肠系膜和右侧结肠旁沟等 4 处有造影剂滞留,腹膜种植性转移组, Douglas 窝占 56%、右下腹占 41%、乙状结肠系膜占 21%、右侧结肠旁沟占 18%,其他部位种植仅出现 6 次,且多处种植转移比单处种植转移多见。故推测腹膜种植转移的分布与腹腔液体的流向有关。

腹膜播散的形态多为浆膜面小点状癌结节,直径 1mm 或更小,广泛密布在腹膜表面,呈粟粒状;也可形成斑块或团块状转移灶,但一般直径多小于 1cm。

腹膜播散根据其发生的急缓、浆膜下小静脉或淋巴管是否被大量癌细胞堵塞等可推测是否引起腹腔渗液或粘连。1987 年 Maruyama 等报告,有腹膜转移的胃癌组病人治疗后 5 年存活率为 5.1%,而无腹膜转移组可达 67.1%。

晚期胃癌或胃癌术后腹膜播散,目前尚无确实有效的治疗方法。近 10 年来逐渐兴起腹腔内免疫治疗或化学治疗,期望提高腹腔内免疫力或直接提供高浓度的抗癌药物,达到提高疗效、降低或避免全身毒副作用的目的。

腹腔内免疫治疗,常用 OK-432 和厌氧短棒杆菌等免疫增强剂注入腹腔,可以促进腹腔内多形核中性白细胞和淋巴细胞渗出增多,腹水中癌细胞变性坏死,腹水减少,其副作用是发热和腹痛,但短棒杆菌制剂较轻。1988 年 Blanchard 等报告,体外癌性胸腹水中的淋巴细胞,在加入白细胞介素-2 后,可以溶解异体的或自体的肿瘤细胞,推测大剂量白细胞介素-2 胸腹腔内注入是治疗癌性胸腹水的一种有潜力的方法。

腹腔内化疗,用 5-Fu、MMC 等药物的水溶液注入腹腔可以治疗胃癌的腹膜播散和预防术后腹膜癌复发,但发现这些药物的水溶液很容易通过毛细血管被吸收入血循环,不能在腹腔内维持有效浓度,疗效尚不尽如人意。腹腔内应用吸附丝裂霉素 C 的活性炭(MMC-CH)克服了吸收药物过快的缺点,且还有药物在腹膜和网膜表面上停留和通过局部淋巴系统吸收两大优点而受到重视。1988 年 Hagiwara 等报告,腹腔内应用 MMC-CH 治疗 8 例胃癌腹膜播散的病人,获得较好的治疗效果。

随着对温热抗癌作用的认识,腹腔内连续高热灌注化学药物防治胃癌腹膜播散的研究受到重视。1988 年 Fujimoto 等报告,应用扩大手术加腹腔内连续高热灌注化学药物治疗 15 例有腹膜播散和癌性腹水的晚期胃癌病人,9 例腹水消失,且治疗后所有病例经反复多次 Douglas 窝灌洗细胞学检查,均未发现癌细胞存在,随访结果亦令人满意。

现代癌细胞群增殖动力学认为,癌灶的细胞数愈少,对抗癌药物愈敏感。因而可以认为向腹腔内灌注化学药物对腹膜表面的微小转移灶和游离的癌细胞将有更明显的作用,同时,向腹腔内连续高热灌注药物还可以将腹腔内游离的癌细胞进一步冲刷出来,提高疗效。

**胃癌病人腹腔游离癌细胞的研究** 自 1867 年 Lucke 和 Klebs 首先发表卵巢恶性肿瘤病人腹水观察报告以来的 100 多年中,浆膜腔脱落细胞学检查一直被用于癌性胸腹水的诊断。20

世纪 70 年代后期起,日本学者进行了胃癌病人腹腔冲洗液游离癌细胞(缩写 FCC)检查和影响因素的研究,探索了胃癌病人微小腹膜转移的诊断和防治方法。张国华等 1988 年首先报告了胃癌病人 FCC 检查及其随访结果。

癌细胞从胃癌原发灶或转移灶脱落形成 FCC 的机制目前尚未完全明了。一般认为与下列因素有关:(1)癌细胞接触抑制丧失,过度增殖造成肿瘤组织内压力增高;(2)癌细胞的运动能力;(3)癌细胞间粘着力较低;(4)癌细胞产生的多种酶和代谢产物对周围组织的影响;(5)胃肠蠕动、手术操作等外因的影响也会促进侵至浆膜的癌细胞脱落。FCC 的命运取决于癌细胞的数量和存活力、宿主抵抗力及临床治疗的影响,其中大多数 FCC 将会死亡,仅部分 FCC 持续在腹腔液体中存活,并在合适的腹膜表面着床、增殖形成腹膜播散。故许多学者认为 FCC 的存在是胃癌腹膜播散的亚临床表现形式。

FCC 检查是预测进展期胃癌病人预后的重要指标。在胃癌根治术后 5 年存活率与 FCC 关系的研究中,Nakajima 等报告为:(1)无浆膜受侵和 FCC 阴性者,5 年存活率为 86%;(2)有浆膜受侵而 FCC 阴性者,5 年存活率为 52%;(3)两者均阳性者,5 年存活率为 0%。Koga 等的报告与此类似,依次为 85%、40%、13%。张国华等研究结果为不论浆膜是否受侵犯,FCC 阳性者无 1 例生存 3 年以上。

FCC 阳性率与胃癌病期、大体类型、浸润程度、分化程度、生长方式等有一定关系。浆膜受侵者 FCC 阳性率达 20%~54%,且随浆膜受侵面积增加而升高,有报告浆膜受侵超过 15~20cm<sup>2</sup> 的病人,几乎全部查出 FCC。Moore 等比较了胃癌病人手术开始和结束时 FCC 检出率,认为手术操作增加了癌细胞进入腹腔的可能性。Iitsuka、Tanida 等则有腹腔内注入 MMC10mg、30min 即可明显抑制 FCC 的存活率的报告。因此,目前多数人主张胃癌手术中应采取覆盖受侵浆膜面,轻柔操作、蒸馏水冲洗腹腔及腹腔内化疗等措施,以减少或杀死残留的 FCC,降低术后腹膜复发的潜在危险,提高胃癌病人术后生存率。

在 FCC 与腹膜复发的研究中,Koga 等报告浆膜受侵、腹腔 FCC 阳性组腹膜复发率为 88%,且多在 3 年内复发;面浆膜受侵、FCC 阴性组最常见的复发为血源性播散,故可以认为 FCC 的存在是腹膜播散的早期表现。此后,Koga 等又采用腹腔连续高热灌注化学药物预防胃癌病人腹膜播散,在有肉眼浆膜受侵而无肉眼腹膜播散的病人中,生存率及腹膜复发率均较历史对照组为好,而随机对照研究的结果尚待进一步观察。

在胃癌 TNM 分期中,张国华等报告 I、II、III、IV 期病人 FCC 的阳性率分别为 80%、36%、42.6%、66.2%。Nakajima 及 Miwa 也分别发现浆膜完整的胃癌病人腹腔中发现有 FCC 的存在。可以看出胃癌病人腹腔有 FCC 的存在与否并不完全取决于现行 TNM 分期的早晚,结合腹腔 FCC 在估计患者预后中的价值,可以认为现行 TNM 分期的不足在于未包含对腹腔 FCC 这种亚临床期腹膜播散的认识。

目前一般在开腹后切除肿瘤前,用温热(37℃)生理盐水冲洗盆腔、上腹部或全腹腔,收集冲洗液进行细胞学检查。若有腹水存在则可直接吸取进行检查。利用活性染料、酶学染色、<sup>3</sup>H-TdR 掺入放射自显影术等研究腹腔 FCC 的活力及影响失活的因素。此外,也有学者进行了单克隆抗体免疫组化染色在鉴定腹水癌细胞上的研究。然而,现代腹腔 FCC 的研究结果差异较大,有许多技术和临床问题还有待于解决。

综上所述可以看出,腹腔 FCC 的存在是胃癌腹膜播散的早期表现形式,提高对胃癌病人腹腔 FCC 的认识,改进腹膜播散的防治措施,是改善进展期胃癌病人预后的关键之一。

参考文献

- 1 张国华,陈及发.解放军医学杂志,1988,13(5):343~344
- 2 田文谋,于德昌主编.腹膜炎.北京:人民卫生出版社,1988,255~261
- 3 Koga,s. Hamazoe,R. Maeta M. et al. Cancer,1988, 61:232

~237

- 4 Fujimoto,S. Shrestha,R. D. Kokubun,M. et al. Ann. Surg., 1988,208(1):36~41
- 5 Hagiwara, A. Takahashi, T. Ueda, T., Surgery, 1988, 104(5):874~881
- 6 Blanchard D K, Kavanagh J J, Sinkovios, J G, et al. Cancer Res., 1988,48(22):6321~6327

(安徽医科大学附属一院朱化刚主治医师撰)

胃癌与性激素关系研究现状 research present

conditions of relationship between gastric cancer and sex hormones 胃癌患者发病率及死亡率在中国的恶性肿瘤患者中占第 1 位,胃癌患者的发病原因及影响手术根治、预后等的因素仍未完全明了。近年来,对宿主内在体质因素的研究日益得到基础医学研究者及临床学者的重视。

神经内分泌系统的调节,对维持机体内环境的稳定性起着极其重要的作用,但对内分泌因素特别是性激素对胃癌发生作用的研究鲜有报道,国内仅见 1 篇《胃癌性激素受体的研究》。国外有为数不多的有关胃癌雌激素受体的研究,且多见于动物实验,胃癌与睾酮关系的研究也少有报道。未见有胃癌患者雌激素测定方面的文献,胃癌与性激素关系的研究有待于进一步深入,渴望给临床工作带来新的进展。

胃癌与性激素关系的研究主要有以下几个方面:

对胃癌患者的发病率及死亡率性别比的研究 胃癌患者的发病率及死亡率男性显著高于女性,中国的男女性别比为 2.06。胃癌患者的发病率接近于死亡率。根据 WHO 国际癌症研究中心(IARC)和国际癌症登记协会(IACR)的资料,世界部分国家 1960 年和 1970 年胃癌患者的调整死亡率(1/10 万),胃癌患者的年龄标化发病率及累积发病率均为男性高于女性,基本上高出近 1 倍左右,提示胃癌患者的发病及预后与性激素有一定的关系。

对胃癌患者的发病率、死亡率与年龄特点、病理、流行病学方面的研究 胃癌可以发生于任何年龄的人,胃癌患者的发病率及死亡率均随年龄的增长而上升。胃癌的高发地区日本,年龄发病率较一般国家前移,有报告在不同的年龄组中男、女发病数的比例不同,如在日本,40 岁以前女性患者多于男性患者,而 40 岁以后男性患者多于女性患者。GrittithWG 等亦有同样的结论,在青年人中,胃癌的发病率及死亡率女性高于男性,这些现象提示性激素在胃癌的发病中起一定的作用。

Herms 研究了 7 个国家(英格兰、威尔士、苏格兰、美国白人、加拿大、荷兰、德国)的男性的和女性的胃癌患者死亡率的年龄分布,发现男性死亡率大致成一条直线;而女性成两条直线,一条是 10~50 岁,另一条是在 50 岁以后,后一条直线和男性相平行,都是在 50 岁左右发生转移,死亡率明显增高。Herms 认为,这种死亡率的变化和女性机体的感受性改变有关,即和更年期绝经有关,推测绝经时可以使许多生理机能发生改变,包括降低胃粘膜的保护机制,而使得胃粘膜量受致癌因子的作用,故应对年青女性胃癌患者测定性激素的改变,如和绝经妇女的相同,则绝经使胃癌感受性增加的假说得以证实。

Lauren 对胃癌的大体特征和镜下特征进行分型,分成肠型的和弥漫性的两种。二者种有着不同的临床流行病学特征,肠型胃癌多见于男性和老年人,而弥漫性多见于年青人特别是女性患者,提示肠型的和弥漫型的在年龄和性别上的分布差异可能和性激素或免疫学变化有关。女性激素可能和弥漫型胃癌有关。

胃癌与性激素关系的实验研究 Martin,Chagki 等的结论是一致的,即在大多数品系的大鼠中,胃癌的诱发率为雌性高于雌性。日本大阪成人病研究所研究了性激素对实验性胃癌的影响。把鼠分成 4 个处理组,用亚硝基胍(MNNG)50μg/ml,4 个月,于终止诱癌以后 8 个月杀鼠,发现未去势雄鼠诱癌率最高,为 31%,去势雄鼠为 29%,去势雌鼠为 5%,未去势雌鼠为 0%,推

论雌激素对胃癌的发生有抑制作用,在雌激素水平高时,胃粘膜的异型化和癌变受到抑制,而雄性激素则对胃癌的发生有促进作用。

**胃癌与性激素关系的临床研究** 胃癌和雌激素受体的研究未见报道。Shunzo, Kobayashi 等人曾对 14 例肺癌病人进行雌激素受体、孕酮受体以及雄激素受体的测定,结果 1 例雄激素受体阳性,而雌激素、孕酮受体均为阴性,他们认为可能是肺癌的组织学类型及生物学特性不同所致。胃癌多见于男性,雄激素受体分布如何是待于研究的课题。

Wakizaka 和 Kakizoc 的研究发现胃癌和秃头症有一定关系,雄性激素与秃头症有一定的关系,提示胃癌和雄激素间有关联。

Sadamitsu, Inutsuka 等对 84 例男性胃癌及 32 例女性胃癌病人进行手术前和术后的血清睾丸酮(STL)水平测定,同时以良性疾病作为对照,结果胃癌组的 STL 显著低于对照组的,手术后成活的病例 STL 再度升高,在胃癌复发后患者死亡前 STL 水平又降低。他们认为这种变化源于肿瘤存在本身,在复发以后的 STL 再度降低是晚期肿瘤激素产生受到抑制的结果,而提出假说:睾丸酮可能在癌组织或癌细胞之中被吸收或被破坏,也许睾丸酮分泌进入消化道内,对癌组织内或胃液进行睾丸酮的测定有助于对 STL 降低机制的探讨。

从生理角度上讲,雄激素和雌激素是在同一水平进行调节的,即下丘脑—垂体—睾丸/卵巢控制系统,垂体前叶产生 3 种促性腺激素直接影响性腺的功能。它们是卵泡刺激素(FSH)、黄体生成素(LH)和生乳素(PRL)。目前一般公认,促性腺激素在与适当的膜受体结合以后,激活位于细胞膜内表面的腺苷酸环化酶系统,形成 cAMP,主要经过蛋白激酶系统引起特有的靶细胞反应。雄激素的产生,是由卵泡被膜细胞所产生的雄激素通过芳香化转变而成。雄激素和雌激素是相互拮抗的激素,有假说认为雄激素的降低是由于雌激素升高的结果,亦有认为体内分泌一种抑制素而使得雄激素降低。从对乳腺癌的研究中,雄激素和雌激素并不是相互拮抗的,有些特性是互补的,一些是拮抗的,还有些特性则是平行的,细胞内雄激素和雌激素受体竞争的部位仍不明了。对乳腺癌的临床观察进一步证明雄激素可以抑制乳腺癌的生长,而雌激素促进其增长,从已有资料可看出,胃亦属于性激素作用的器官,雄激素和雌激素与胃癌相关关系如何,在胃癌生物学行为中的地位尚未见有报道,有可能和乳腺癌是相反的情况,尚待进一步研究。

**胃癌和雌激素关系的研究** 文献记载主要是对胃癌患者进行雌激素受体(ER)及孕酮受体(PgR)的测定。机体内的激素环境影响某些肿瘤的自然病程已为基础医学和临床工作者所公认,除去性激素靶器官肿瘤如乳腺癌、前列腺癌,在某些非性激素靶器官的肿瘤如肉瘤、黑色素瘤、肾癌、结直肠癌、脑膜瘤、胰腺癌、肝癌、何杰金氏病、头颈部肿瘤等病人中可以部分地测到雌激素受体,亦有内用内分泌治疗收到良好效果的报道。

近期内有为数不多的文章报道在胃癌的组织中可以测得 ER 和 PgR。Sata, Hori, Tokunaga, Sica 以及张克勤等人的结论基本一致,ER 的阳性率约在 38% 左右,但在有的研究资料中女性病人激素受体的阳性率高于男性,有的则报道男性高于女性。ER 阳性多见于低分化腺癌者,此点也和乳腺癌 ER 阳性多见于高分化者的结论相反。张克勤等人还同时测定了 3 个月胎儿的胃 ER,并发现为阳性,对低分化腺癌似乎可以说明其机制,支持非靶器官肿瘤存在 ER 是胎儿时期产生激素基因的推论。

Aiford, Herrmann, Howell 等人研究结果表明,乳腺癌和胃肠道肿瘤有关联。Schoenberg 等报道,当原发肿瘤是乳腺癌时,50% 以上的病人伴有消化系统的或生殖器官的肿瘤,ER 和 PgR 的存在,说明在胃肠道恶性肿瘤的发生中性激素起一定的作用,它影响着肿瘤的生长。

非靶器官中存在性激素受体,其机制仍未得到确切的解释,是否有治疗上的指导意义尚待进一步的研究及临床随访观察,最

近有人对因硬化型胃癌行全胃切除的女性病人用 Tamoxifen 进行内分泌治疗(作为一种术后的辅助治疗),效果良好,若设想胃癌中 ER、PgR 和乳癌的的意义相同或相反,采用对乳癌的或相反的观点对待胃癌,或许在胃癌的治疗上有突破性的进展。

**性激素影响胃癌发生机制的探讨** 有许多非性激素靶器官肿瘤的发生均受到性激素的影响, Ashley 研究不同部位肿瘤发病率的性差异,除肺癌、生殖系统肿瘤、肺癌外,大多数肿瘤患者的性别比均为男性大于女性,其机理仍不清楚,一些研究者从以下几个方面予以探讨:

1. 遗传学角度。一般认为 X 性染色体在女性表现为纯合子,在男性表现为半合子,在 X 性染色体上携带有调节机体免疫监视功能的基因,故女性整个机体免疫能力比男性强,除此之外,产生调控、激活或灭活化学致癌物的酶的基因亦位于 X 性染色体上,由于这些原因使机体可以及早地识别和消灭癌前基因及异常的细胞,均使女性对肿瘤的防御能力较男性为强,表现在肿瘤患者的发病率上女性低于男性。

2. 生化、免疫学角度。有人认为雄激素及其衍生物可能诱导肝微粒体上混合功能氧化酶(MFO)活性,而 MFO 可以增加化学物质的致癌作用,而雌激素则可以抑制 MFO 对某些药物的作用。此外,雌激素可以刺激网状内皮系统的吞噬作用,而卵巢去势则可以减弱此作用,性激素作用的特点也许是造成肿瘤发病率性别比差别的原因。

3. 性激素对胃分泌及胃粘膜屏障功能的影响。性激素和胃分泌之间有相关关系,在卵泡期、经期、妊娠期及哺乳期,都可以见胃酸度的波动,女性胃酸分泌在生理条件下比男性少。动物实验资料表明,给组织胺时,雄性豚鼠胃酸的分泌明显多于雌性,但胃粘液的分泌与胃酸及胃蛋白酶分泌呈相反的关系,在大鼠给注入睾丸酮以后,其胃的粘多糖分泌减少。Maitrya 等研究性激素对兔的胃分泌的影响,发现雌激素可以抑制胃酸及胃蛋白酶的分泌,使胃粘液分泌增加,表现为胃液中已糖胺和岩藻糖含量增加,在相同条件下雄激素则产生相反的结果。粘液是胃屏障的主要部分,可以保护胃粘膜不受有害刺激及致癌物的直接损害,当胃粘液分泌减少时,即有利于致癌物质直接和胃粘膜作用而促进胃癌的发生。

Amure 等发现去势雄鼠对 Carbachol 的反应性胃酸分泌明显降低,但对组织胺的反应性胃酸分泌不降低,给予去势雌鼠  $17\beta-E_2$  以后,其对所有胃酸刺激物引起的胃酸分泌皆下降,故认为血中的雌激素升高可以抑制胃酸的分泌,但亦有同上相反的观点。Bolarinwa 实验性结论:雌激素可以提高胃酸的分泌,亦有人发现雌激素可以刺激胃底干细胞而产生壁细胞。Bruce 研究报道,雌激素在体外可以使结肠、食管、胃窦组织的收缩活动增强,因而推论雌激素有增加胃肠道活动的作用。胃在高酸及排空加快的环境下不利于 N-亚硝基致癌物在胃内的合成或发生作用,故作为女性胃癌发病率较男性低的一种解释。

一项最新的研究结果表明:(1)性激素与胃癌的发生及其生物学行为间存在相关关系,胃癌患者的血清雄激素及雌激素水平显著低于正常对照组。测定性激素对诊断胃癌、判断胃癌有无肝转移、帮助了解胃癌的生物学行为有一定的价值。(2)雄激素和雌激素对胃癌的作用是互相补充、互相平行的,提示性激素通过其受体对胃癌的病因、生长和控制过程中起某种作用,对胃癌的生物行为如预后产生一定的影响。(3)胃癌组织中存在性激素受体,胃癌组织中的雌激素受体所代表的生物学特征和乳腺癌相反,它提示胃癌生物学行为的不良倾向。

测定胃癌病人的性激素水平及其受体,对选择内分泌治疗有很大益处,故将有助于胃癌的综合治疗。

#### 参考文献

- 1 Herrmann J B. Am J Surg., 1972, 124: 620~628
- 2 Hiroshi F, et al. Digestion., 1982, 23: 151
- 3 Chgaki H, et al. Cancer Res., 1983, 43: 3663
- 4 Tokunaga A, et al. Eur J Cancer Clin Oncol., 1983, 19: 687

- 5 Saro Y, et al. J Jap Soc Cancer Ther., 1983, 19: 27
- 6 Inutsuka, et al. Cancer, 1986, 58(12): 2675~2676
- 7 徐光炜. 胃癌. 北京: 人民卫生出版社, 1987, 27
- 8 刘弋, 胡家骅. 中华医学杂志, 1992, 72(3)

(安徽医科大学第一附属医院刘弋副教授撰; 胡家骅 审)

**胃泌素瘤** 又称 Zollinger-Ellison 综合征。1955 年, Zollinger 和 Ellison 首先报告两例有高胃酸分泌、严重上消化道溃疡合并有胰腺非β细胞肿瘤的患者, 因而称 Zollinger-Ellison 综合征。他们发现这两名病人都有一个胰腺非β细胞瘤(一例死后尸检时发现, 另一例在剖腹术中发现, 且这种胰腺瘤含有与胰岛高血糖素相似的能升高血糖的异常蛋白。Zollinger 和 Ellison 认为, 胃的腺体受到一种激素性的或化学性的刺激。他们提出, 凡控制不良的或不典型的原发性消化性溃疡病人均应检查胰腺, 甚至该类病人在行全胃切除术前, 可考虑切除胰体或胰尾。之后, Gregory 和胃泌素 Tracy 从猪的窦粘膜中识别了两种 70 个肽的胃泌素 I 和 II, 并从本病患者的瘤组织中分离出大量胃泌素, 故现又称为胃泌素瘤。

胃泌素瘤并不罕见。它可以散在发生, 也可以与其他内分泌肿瘤并存且具有家族性, 后者被称为多发性内分泌瘤综合征 I 型 (MEN-1)。MEN-1 约占胃泌素瘤的 1/4, 是一个常染色体显性遗传性疾病, 有内分泌腺的增生、腺瘤或癌肿, 顺序发生于甲状旁腺、胰岛和垂体。胃泌素瘤最常原发于胰腺, 大多在胰头和胰尾。半数以上呈多发性, 约 2/3 为恶性, 亦可原发于十二指肠肠壁、胃窦、脾门等处。

**诊断及定位:** 存在下列情况应考虑胃泌素瘤的可能性: (1) 上消化道的多发性溃疡; (2) 不典型部位的溃疡, 如食管下端、空肠、十二指肠 2、3 段; (3) 一般胃手术后溃疡迅速复发, 常伴出血或穿孔, 是胃泌素瘤的特点; (4) 对常用的溃疡病治疗方案无效者; (5) 溃疡伴突出的胃酸分泌或/和高胃泌素血症。确定诊断时可作胃液分析及血清胃泌素测定, 胃泌素瘤者的血清胃泌素大多超过 300pg/ml, 最高可达 450 000pg/ml。

一旦确立诊断, 即应进行术前肿瘤定位。胃泌素瘤的精确定位对评价随后采取的治疗方法尤为重要: (1) 胃泌素瘤常为多发性的或位于胰腺之外; (2) 有报导在 50% 以上无转移的 Z-E 综合征患者, 甚至有经验的外科医师在手术中也难以发现肿瘤灶; (3) 50% 以上患者手术时发现转移 (通常转移到肝), 若术前通过影像学检查确定有转移灶, 则可避免不必要的剖腹术; (4) 最近报道, 通过仔细的印象学检查确定有肝转移的胃泌素瘤患者中, 其肿瘤仍可切除者占 15%; (5) 仔细的印象学检查可确定伴有 MEN-1 和 Z-E 综合征的患者, 后组病例适宜手术。

术前的定位技术包括腹部超声、CT 扫描、选择性血管造影、门静脉分支选择性抽血样测定胃泌素、动脉注射胰泌素后静脉抽血样测定胃泌素、磁共振、术中超声显影和术中内镜肠壁透照术等。

术前超声敏感性低, 但偶尔也有检出其他方法不能发现的后腹膜肿块或胃泌素瘤。术中超声检查对定位有一定帮助, 但经验有限。有报道指出本方法改变了 10% 的触不到肿瘤也无法定性的 Z-E 综合征患者的手术处理方法。其对胰腺内肿瘤比胰腺外肿瘤有更高的敏感性。CT 扫描对原发性肿瘤和肝转移瘤的检测能力取决于肿瘤的大小, 小于 1cm 的肿瘤难以发现, 而大于 3cm 瘤灶均可检出, 还取决于瘤的部位, 原发于胰内的胃泌素瘤 80% 可被 CT 测出, 而胰外的仅有 35% 的检出率。对胰外肿瘤较低的敏感性具有一定的意义, 因为原发于胰外的肿瘤可能更宜用手术治疗。选择性血管造影对原发性的和转移性的胃泌素瘤的优点是高敏感性和高特异性, 缺点是需一定的技术, 接触放射线量大、为侵入性检查方法, 并有一定的并发症如出血或栓塞。由于原发性胃泌素瘤和其转移灶通常是多血管的, 常可通过选择性血管造影作出诊断。对上述印象学检查的对比研究指出, 增强后

的 CT 扫描应作为首选方法, 因为它应用较普遍, 且有一定的敏感性和特异性, 如胃泌素瘤的定位和范围仍有疑问, 则再作选择性血管造影。

选择性门静脉分支抽血样检测胃泌素曾被认为是各种胰腺内分泌瘤定位的可靠方法。但最近的研究资料表明, 本方法与影像学检查联合进行胃泌素瘤测定, 仅比单独应用影像学检查略好一些。另外, 本法检测胃泌素瘤的价值不如其它胰腺内分泌瘤 (如胰岛细胞瘤), 因此不宜常规使用。50% 以上的胃泌素瘤在胰腺外, 而其它胰内分泌肿瘤几乎都在胰腺内或其邻近, 因此本方法对胃泌素瘤的诊断帮助不大。选择性动脉内胰泌素注射静脉抽血样技术, 由于经验少, 难以评价。磁共振敏感性同超声检查, 但不如 CT 和选择性血管造影, 有资料表明, 如用对比剂钆可显著增加磁共振的敏感性。

**胃泌素瘤的治疗:** 胃泌素瘤患者 5 年生存率为 62%~75%, 10 年生存率为 47%~53%。许多因素影响生存率: (1) 肿瘤的自然病史及其大小、范围和恶性程度都是重要因素。肿瘤可切除和不可切除者 5 年生存率分别为 90% 和 43%。(2) 有无 MEN-1 也是影响存活的因素。MEN-1 比不伴有者 5 年生存率高。但也有不同的结论。由于胃泌素瘤一旦能切除就有可能治愈, 故对无转移证据的患者, 只要无手术禁忌症均应剖腹探查。

**手术治疗:** 确诊后应以药物适当控制高胃酸分泌, 同时作定位检查, 以确定是否适宜手术切除。为此需确定其为单发性的 (胃泌素瘤不伴 MEN-1) 还是家族性的 (伴 MEN-1) 以及有无转移。因为两组的根治效果不同, 如系前者而无转移灶, 则针对胃泌素瘤采取选择性手术, 尽可能切除肿瘤。这类肿瘤多见于胰外, 根治可能性大。如在胰腺, 则 65% 以上在胰头区域, 发现后将其剝去。如在胰体、胰尾也应切除。如手术发现不能切除或有肝转移, 则需给予大剂量抗分泌药物 (西咪替丁或雷尼替丁)。有作者指出, 术前定位检查阴性, 尚有 1/3 患者在手术时可发现肿瘤。因此, 不论术前定位检查结果如何, 均应作广泛探查, 包括胰、胃、肠或胰周可疑淋巴结, 并作病理检查。家族性伴 MEN-1 的患者由于几乎总是小而多发性的, 故治疗的可能性低 (<1%)。对转移性胃泌素瘤的治疗, 目前提倡化疗、肝动脉栓塞, 对可切除的肿瘤有计划地手术切除, 应用长效生长抑素类似物—SMS201-995、激素以及干扰素等。

**化疗:** 有报道用链脲菌素或加 5-Fu 等, 对 20%~63% 的胰岛细胞瘤能有效地缩小肿瘤体积。何时开始化疗尚无定论。有学者提出, 对转移性胃泌素瘤患者仅当出现症状时才用化疗。另有学者建议在诊断明确 3~6 个月内, 若肝脏转移灶增大就应予以化学治疗。

**肝动脉栓塞:** 对胰岛细胞瘤肝转移者推荐肝动脉栓塞或与化疗联合应用, 并认为对胃泌素瘤有价值, 但应用的病例太少, 难以确定最终效果。由于肝脏感染和脓肿等并发症, 因技术不佳而使患者死亡率较高。另外尚发现胃泌素瘤肝转移者, 12% 有胃转移, 因此, 肝动脉栓塞对有广泛转移者的价值有限。

**参考文献**

- 1 胡义结. 现代诊断与治疗学杂志, 1989, 2: 75~78
- 2 吴志勇. 上海第二医科大学学报, 1989, 4: 340~344
- 3 金仲品. 临床医学杂志, 1989, 6: 291~293
- 4 Farndon J R., Br. J Surg., 1990, 77: 1~2
- 5 Vinayek R, et al. G Gastroenterol Clin North Am., 1990, 9: 197~204

(安徽医科大学第一附院普外科孟翔凌副教授撰)

**大肠癌** large bowel cancer 大肠癌是中国十大常见恶性肿瘤之一。60 年代, 上海市大肠癌患者的发病率居恶性肿瘤患者第 6 位, 80 年代初则上升至第 4 位, 按此速度推测, 到 20 世纪末, 将上升为第 3 位 (肺癌、胃癌、大肠癌)。随着生活改善, 膳食中肉类、脂肪比例上升, 其发病率正在不断地增高, 将成为威胁人群健康的一种主要癌肿。根治术后结肠癌患者 5 年生存率已达到

70%~80%，直肠癌5年生存率仍徘徊在35%~50%，术中和术后并发症较多。

大肠癌包括结肠癌和直肠癌。右半结肠癌略多于左半结肠癌。结肠癌的早期临床表现往往不被病人重视，待病人发现首发症时多数已进展到相当程度。因此，及时发现对诊断实属重要。多数病人的首发症为腹痛、肿块、全身状态不良(右半结肠癌多见)、粘液脓血便(左半结肠癌)、便秘、便稀、消化系统症状、肠梗阻等。直肠癌也是一种发展较缓慢的恶性肿瘤，早期患者常无症状，又无特异性，常不引起重视，常误为肠炎、痢疾、痔和肛裂。因此，病人和医师对排便不适、便血和慢性肠梗阻症状应予以重视。对大肠癌的早期发现和诊断乃是治疗成功的关键。

体检大肠癌的方法，常用的有直肠指检，90%的直肠癌都可通过指检发现，即一指得确诊。此外还有粪便隐血试验、乙状结肠镜或纤维乙状结肠镜检查、纤维结肠镜检、钡灌肠或气钡双重造影等。对直肠癌患者主要以前3种检查为主。粪便隐血试验是一种最为简便和实用的方法，但在已证实的大肠癌病例中仅40%~67%呈阳性。在诊断大肠癌时不能满足发现一个原发灶，必须全面检查以除外同时存在的多原发癌和重复癌。纤维结肠镜检查对结肠癌的诊断准确性比X线检查高，可直接观察病变的大小、形态、有无溃疡及其边缘情况。同时可作活检，为治疗提供可靠依据，对判断预后亦有益处。腹部B型超声检查对判定病变累及肠管的范围、肠壁浸润深度以及邻近器官有无转移有价值，同时对肠系膜有无淋巴结和肝转移的检查也有一定的价值。直肠腔内超声检查对了解肿瘤浸润深度亦有一定重要意义，对Miles术后复发肿瘤更有特殊价值。

近年来对大肠癌的研究不断应用免疫酶测定法、免疫化学法、单克隆技术和Hemoguant试验方法来提高检测的敏感性和特异性，后者可定性和定量测定，有助于判断病变部位，用于初筛检测，为早期发现大肠癌提供了有效的工具。由于分子生物学、细胞生物学、分子遗传学等学科的飞速发展，特别是基因工程和单克隆抗体技术的突破性进展，使对大肠癌的研究进入了揭示癌细胞本质以及用生物学、分子生物学手段控制癌生长的新阶段。“癌基因”及“抗癌基因”的研究也正在开展，已有大量资料报道了这方面的成果。吴秉铨等报告他们建立的人肠粘液腺癌裸鼠移植瘤株，历时1年，传代18代，为研究中国肠癌患者的病因、诊断和治疗开辟了新途径。富志民报告大肠癌组织培养2例成功，传代77代；张宗显等体外培养建成盲肠未分化腺癌细胞系HCC-8693，已传代12代，经多次冻存于液氮后取出复苏培养均能生长增殖。孙去病等报道了人类结肠癌单克隆抗体的研究资料；抗人结肠癌单克隆细胞株的建立及其免疫组织化学研究也广泛开展。周锡庚研究了人体局部防御反应(癌周淋巴滤泡浸润、癌旁淋巴滤泡增生和癌内组织细胞增多)与预后的关系，并认为癌的发展和扩散不仅取决于癌肿本身，也受机体防御免疫反应的影响，反应强者预后较好。应用流式细胞仪对大肠癌细胞的DNA取出复苏培养，DNA均能生长增殖。唐尧等对大肠癌旁粘液中粘蛋白的组织化学情况进行研究，发现95%癌旁粘液中粘蛋白都发生明显改变，其特点有硫酸粘蛋白的含量明显减少，甚至完全消失，而唾液酸粘蛋白的含量却大量增加，甚至占据整个腺体，这种具有独特的形态学和组织化学特征的粘蛋白，即1969年英国Filipe首先以组织化学方法发现在大肠腺癌上皮与正常肠粘膜之间存在着一段过渡性粘蛋白组织，这种粘蛋白主要的组织化学特性表现为上述变化，而肉眼或者组织学检查其结构正常，称这种在大肠癌旁发生区域性变化的粘蛋白为移行粘蛋白(TM)。研究资料表明，癌旁移行粘蛋白是一种在许多方面具有肿瘤细胞特征的癌前期变化，是在致癌因素作用下所出现的原发性病变，与大肠癌根治术后癌肿的复发有关，这将使传统的大肠癌根治术肠管切除范围概念受到冲击。多年来行大肠癌根治术时，近、远端肠管切缘多距肿瘤2~5cm。Dvawon等指出，现有根治术没有足够地清除处于癌前变化的移行区粘蛋白，很可能是大肠癌根治术后吻合口复发率高的原因之一。近年来的一些回顾性资料表明，癌

旁移行粘蛋白完全清除，术后吻合口癌复发率明显降低。近年来有人应用快速组织化学方法或免疫组织化学方法，在术中快速鉴别出移行粘蛋白区以指导大肠癌根治术肠管切除范围，它将为根治术中肠管切除范围提供一种客观指标。鉴于青老年人大肠癌发病率正在增加，合并症和并发症多，治疗效果差，所以近几年在这方面研究也较多。同时，大肠癌并存胆囊结石或胆囊切除后胆管结石者多有报道。

人们在寻找新的早期发现和早期诊断的方法，并对肿瘤标记进行研究。CEA的测定对动态观察术后疗效、判断早期复发和预后判断有一定价值。单抗CA-50放射免疫测定对大肠癌的阳性诊断率较CEA为高，对除外结肠炎、胰腺炎、胆囊炎、肺炎有诊断意义。

80年代以来，对结肠癌侵及邻近器官，或合并肝转移，只要病人情况允许又有可能根治切除时可做联合脏器切除术，同时作部分肝切除术，可有20%左右的长期生存率。直肠癌外科治疗最大进展就是保留肛门括约肌功能手术的广泛采用，使患者生存质量显著改善。McDermott报道，50年代保肛手术(SSR)仅占直肠癌切除术的26%，80年代上升至93%。Goligher根据英国St. Mark医院资料，指出在直肠癌患者中约75%的直肠癌切除属保肛手术。Mark医院报告，A.P切除患者的5年生存率为56.6%，SSR的5年生存率为72.8%。Williams认为，凡肿瘤下缘距肛缘75mm者，均可选保肛手术。当代国外比较流行的一种保肛手术，即parks手术(直肠经腹肛切除结肠与肛管吻合术)。Miles术腹膜外左下腹壁结肠造口优点多。各种原位肛门成形术，远期控制排便效果尚可，但尚需改进，积累经验。

#### 参考文献

- 1 Parks A G, et al. Br J Surg., 1982, 69: 301
- 2 Parks A G. World J Surg., 1982, 6: 351
- 3 丁立. 普外临床, 1988, 3(5): 257
- 4 郁宝铭. 普外临床, 1988, 3(5): 260
- 5 崔凤东, 等. 实用肿瘤病学杂志, 1988, 2(3): 81
- 6 江积瑞, 等. 中国肛肠病杂志, 1988, 8(1): 22
- 7 王强, 等. 国外医学(外科分册), 1989, 1: 13~15
- 8 邹一夫, 等. 腹外科学, 1989, 3(2): 113
- 9 刘世信. 中国肛肠病杂志, 1992, 12(2): 38
- 10 江积瑞. 安徽医科大学学报, 1991, 26(2): 112~113

(安徽医科大学第一附属医院江积瑞教授撰)

#### 肾上腺外嗜铬细胞瘤 extra-adrenal pheochromocytoma

高血压伴随高肾上腺素能的症状，可能是副神经节系统的肿瘤(下称副节瘤)，通常称为嗜铬细胞瘤。肿瘤散发在躯干正中旁和鳃弓周围副节处，胚胎期却同源于神经脊。副神经节系统包括肾上腺髓质、化学感受器(颈动脉体和主动脉体)、迷走体和颈、胸、腹交感神经节相关的一组细胞。发生在肾上腺髓质外的功能性副节瘤，称为肾上腺外嗜铬细胞瘤。以前统计占总的嗜铬细胞瘤的10%，中国和外国各有数百例报告，且逐年增加，诊断、定位和处理有其特殊性。

区别副节瘤有无功能曾依据肿瘤嗜铬染色是否阳性而定，后来发现一些功能性肿瘤染色呈阴性，而无功能性肿瘤染色也可呈阳性，因此不能准确反映功能状态，最可靠的依据是从血和尿液中测出肿瘤分泌的致高血压的物质及相应的临床症状。Glennner(1974)按解剖将副节瘤分成4类：(1)鳃弓区：常见的颈动脉瘤和颈血管球瘤，其次是伴行于头颈区动脉和颅神经的副节瘤，还包括位于颈内动脉、锁骨下动脉、咽喉、冠状动脉和肺的副节瘤。(2)迷走神经区：肿瘤位置大致与鳃弓相同，神经从颅骨颈静脉孔穿出较常见。(3)主动脉-交感神经区：位于主动脉之间和髂动脉分叉周围，包括主动脉旁体。(4)内脏-自主神经副节瘤：肿瘤来自主动脉-交感神经和内脏自主神经的副节，如膀胱嗜铬细胞瘤。(1)、(2)类绝大多数为无功能性肿瘤。

15%的功能性嗜铬细胞瘤患者的肿瘤位于肾上腺外，其中

85%位于膈下,女性稍多于男性,常见于20~30岁者,多发性肿瘤占17%~24%,同时存在功能肿瘤和无功能肿瘤者罕见。肿瘤位于主动脉上区(膈下至肾下极)的占46%,下区(肾下极至髂动脉分叉)的占29%,膀胱的占10%,胸腔椎肋旁的占10%,其他可位于输尿管下段、前列腺、精索、骶尾部、阴道壁、肛管、肾包膜、肾内、子宫宽韧带、卵巢。膈上区肿瘤常为功能性的。头颈区副节瘤具有功能的占1%以下,心包和心内副节瘤也见有报道。

肾上腺外的恶性嗜铬细胞瘤比肾上腺区的多见,占29%~40%,腹膜后无功能性恶性率为28%~29%,头、颈和胸肿瘤恶性率低于10%。不过,诊断恶性嗜铬细胞瘤不能靠病理组织学所见,必须通过追踪或见其转移至非嗜铬组织(淋巴结、骨、肝、肺)才能肯定。儿童期肾上腺外嗜铬细胞瘤占29%~31%,约一半为多发性,常见于肾上腺附近、交感神经链的神经丛处,恶性的仅占2%。

临床表现:嗜铬细胞瘤患者临床症状变化无常,肾上腺髓质和主动脉旁体肿瘤以分泌肾上腺素为主,因其内存在转甲基酶,使正肾上腺素转化成肾上腺素,后者除升高血压外,还能引起代谢紊乱,如基础代谢升高、高血糖、发热等,主要表现为心悸、心动过速、低血容量,个别可有低血压。肾上腺外嗜铬细胞瘤以分泌正肾上腺素为主,表现:(1)阵发性症状(头痛、心悸、出汗、苍白);(2)高血压(阵发性的或持久性的,用 $\alpha$ 受体阻滞剂有效);(3)腹上方或正中旁可触及包块。膀胱嗜铬细胞瘤患者于排大小便、性交或触下腹部可诱发发作症状,表现为头痛、心悸、晕厥、视力模糊、出汗或高血压,有无痛性血尿者占50%~65%,有时直肠指检可触及肿瘤,嗜铬细胞瘤伴肾动脉狭窄,其中75%因肾上腺外肿瘤直接压迫或附近肿瘤分泌升压物质使肾动脉痉挛所致。少数具有遗传性,表现孤立性常染色体显性遗传,也可发生于其他家族性综合征,如多发性神经纤维肉瘤、视网膜血管瘤病等。有报告同时发生平滑肌瘤或肺软骨瘤的。对功能性嗜铬细胞瘤患者血压正常的几种解释,认为是与肿瘤分泌肾上腺素为主、分泌多巴和多巴胺拮抗去甲肾上腺素、加压物质代谢慢或肿瘤内出血形成假性囊肿有关。无功能性肿瘤患者主要表现为局部体征和压迫的症状。

诊断:临床怀疑存在肾上腺外嗜铬细胞瘤者,发作时测尿液儿茶酚胺(肾上腺素和正肾上腺素,或其代谢产物变肾上腺素和香草扁桃酸)是一种可靠的筛选方法,准确率达88%~98%。测血浆儿茶酚胺浓度比不上测尿液敏感。对不典型者,可采用胰高糖素、组织胺、灭吐灵或纳洛酮激发实验,因有危险性,现已极少应用。临床初步确立诊断后,术前定位有利于手术时直接到达肿瘤区,缩短手术时间。CT诊断因对比剂增强的敏感度低,准确率为82%(肾上腺嗜铬细胞瘤为94%)。间位碘代苯胺( $^{131}\text{I}$ -MIBG)扫描准确率为86%~99%。MIBG是由苄胺的苯基和胍乙烷的胍基组成的化合物,其结构类似去甲肾上腺素,能被肾上腺髓质和嗜铬细胞瘤摄取,有其特异性,0.4cm<sup>2</sup>的肿瘤仍能检出;由于它可应用于全身检查,对肾上腺素或多发性、转移性嗜铬细胞的定位比CT优越,具有安全、特异和确诊率高的优点。核磁共振(MRI)检查图像更清晰,妊娠期也可采用。上述定位诊断无法检出时,可作动脉数字减影,或腔静脉插管分段取血测儿茶酚胺定位,此两项检查前后必须使用 $\alpha$ -受体阻滞剂,以防出现高血压危象。膀胱嗜铬细胞瘤80%可于膀胱镜检查时发现,多数位于膀胱颈部或三角区,肿瘤多数位于黏膜下肌层内,黏膜正常,尽量避免活检,检查前后也要用 $\alpha$ -受体阻滞剂。

术前准备:术前给予高盐饮食,使用 $\alpha$ -受体阻滞剂苯苄胺20~400mg/d,剂量逐渐增加,以对抗儿茶酚胺收缩血管的作用并扩充血容量。当体重增加、鼻塞、色素下降,有时出现体位性低血压或腹泻时,表示准备良好。心率快或儿茶酚胺致心律失常者,在用苯苄胺的基础上,再加用 $\beta$ -受体阻滞剂心得安。血压正常1~2周便可施行手术,大多数采用硬脊膜外麻醉,少数用气管内全麻。术中动脉测压,心电图监测心脏功能和血流动力学变化情况,高血压时使用硝普钠或苯胺唑啉降压。

手术:肾上腺外嗜铬细胞瘤的手术宜选用腹部正中纵切口,便于全腹探查。切除肿瘤前尽量先结扎肿瘤静脉和动脉,以防出现高血压危象。肿瘤切除后,特别是出现低血压者,应快速补充血容量。通常除补充出血量外,还要多输血600~900ml。切除肿瘤后血压仍高,应怀疑还有其他肿瘤存在,得详细探查。遇恶性转移者,必须尽量清除干净,减少术后用药量。主动脉旁体肿瘤,均有多条来自主动脉的血管供应肿瘤,经相应静脉回流至下腔静脉,须分别结扎并切除肿瘤。巨大且固定的肿瘤常紧贴大血管,满扎血管回缩可致大出血。膀胱嗜铬细胞瘤宜作肿瘤区膀胱部分切除,恶性转移者施行淋巴清扫,个别需作根治性全膀胱切除。肾上腺外嗜铬细胞瘤患者的手术死亡率为1%~3%。

肾上腺外嗜铬细胞瘤术后易复发或转移,需重复多次手术,无法切除或有手术禁忌者,须长期使用 $\alpha$ 受体阻滞剂、 $\beta$ 受体阻滞剂,包括其他药物如哌唑嗪、长压定、心痛定或克甫定。甲基酪氨酸能抑制儿茶酚胺酶的合成,但难使血压降至正常,有副作用,肿瘤转移无法手术者采用动脉栓塞法可减少儿茶酚胺的分泌。局部复发转移者使用放射治疗,剂量为40 000mGy,骨痛减轻可达数月。淋巴转移对放射治疗也敏感。化疗通常采用环磷酰胺、长春新碱、甲氧咪胺,有效率为57%,疗程平均21个月。其他如亚硝基、链脲霉素、阿霉素也有效。 $^{131}\text{I}$ -MIBG能在嗜铬细胞瘤内浓集,Hoefnagel发现该药能选择性地用于照射后的恶性肿瘤的治疗,取得明显疗效。肾上腺外嗜铬细胞瘤术后局部复发率0%~7%,恶性肿瘤比率较肾上腺区者高。组织学所见和肿瘤大小无法鉴别肿瘤是良性的还是恶性的。最近的研究资料支持去氧核糖核酸(DNA)倍性分析对预测肿瘤生物特征有一定价值的观点。Hosaka报告,62例嗜铬细胞瘤中,18例正常组织图经追踪证实为良性,44例表现非整倍体或四倍体及多倍体,分别占39%和31%,后证实为恶性,说明有反常DNA组织图,必须严格追踪。肺转移者预后较差,仅生存1~2a,超微结构和免疫组织化学方法证实良性肿瘤常存在支持细胞,恶性者少见,甚至缺如。此外,每个良性肿瘤平均有5条神经肽,恶性者仅有2条。

术后监测肿瘤复发和转移意义重大,出现复发的临床症状前尿儿茶酚胺及其代谢产物已升高,此类检查有实用价值,术后1~2周常规进行测定,阳性者多数是遗漏了多发性肿瘤或存在转移性病变。切除肿瘤后仍持久高血压者为25%,若尿液测儿茶酚胺正常,说明高血压为其他原因所致。长期追踪发现尿液儿茶酚胺升高,如果是在手术区瘢痕内复发者功能性检查比定位检测敏感,新的原发肿瘤或转移肿瘤可通过 $^{131}\text{I}$ -MIBG素描检出,然后采用CT或MRI准确定位,有些转移癌可通过骨扫描显示。

#### 参考文献

- 1 Leestma J E, et al. Paraganglioma of the urinary bladder. *Cancer*, 1971, 28: 1063
- 2 Shapiro B, et al. Iodine - 131 metaiodobenzylguanidine for the locating of suspected pheochromocytoma: Experience in 400 case. *J. Nucl. Med.*, 1985, 26: 576
- 3 Hoefnagel C A, et al. Radionuclide diagnosis and therapy of neuralcrest tumors using Iodine - 131 metaiodobenzylguanidine. *J. Nucl. Med.*, 1987, 28: 308
- 4 Hosaka Y, et al. Pheochromocytoma: Nuclear deoxyribonucleic acid patterns studied by flow cytometry. *Surgery*, 1986, 100: 1003

(中山医科大学附属第一医院泌尿外科郑克立教授撰)

#### 胰岛素瘤

insulinoma 它是较常见的一种胰腺内分泌肿瘤,主要由分泌胰岛素的 $\beta$ 细胞组成。又称功能性胰岛 $\beta$ 细胞瘤、低血糖综合征、自主性分泌高胰岛素血症。本病起源于胰岛 $\beta$ 细胞,可分泌高胰岛素、前胰岛素和C肽。胰岛素瘤不受机体正常的调节而分泌大量胰岛素等物质进入血流,因而患者出现阵发性低血糖,低血糖程度不一,且与肿瘤大小不成比例,而低血糖抑制胰岛素释放的正常生理作用却不存在,致使血糖至极低水平而出



现症状,称为低血糖综合征或自主性分泌高胰岛素血症。1924年,Harris曾观察到3例低血糖病人进餐后症状消失,于是提出自发性胰岛素增多症的可能。中国刘士豪、张孝寿在1925年亦报告1例在禁食劳累情况下发生低血糖休克的病人,并指出此例病人临床表现与注射胰岛素过量相似。1927年,Wilder报道1例胰岛细胞癌合并低血糖昏迷者。1929年Graham首次成功地切除胰岛肿瘤治愈1例低血糖病人。中国手术成功的第1例系在1935年。1974年Stefanini分析国外文献,经手术证实的病人共1067例,1981年,中国曾宪九分析文献资料报道501例,说明胰岛素瘤并非罕见,而且近年来有日渐增多的趋势。

胰岛素瘤患者男性居多,年龄大多在20~50岁。肿瘤分布在胰头颈部,体部和尾部大致相等,各占 $\frac{1}{3}$ ,约1%~2%位于胰腺以外;肿瘤直径在0.2~10cm,80%在2cm以下,但大的肿瘤可重达500g。多呈圆形,质稍坚实,表面常为褐色或暗红色,瘤体大多有完整包膜,与周围界线分明,一般不难与正常胰腺组织区别。以单发多见,约5%~10%为多发,报道中最多有24个,偶见弥漫性微腺瘤。患者中约10%为弥漫性胰岛增生,表现为胰岛素数量增多和体积增大。大多数胰岛素瘤为良性,但镜下发现恶性组织学改变不能作为瘤的诊断依据,惟有发现肝脏转移或局部淋巴结组织转移才能诊断为恶性。中国恶性胰岛素瘤发病率为5%~10%,国外报道为10%。镜下瘤细胞与正常胰岛细胞相似,多呈花带状、菊形团样、腺泡样、乳头状或弥漫成片,间质很少,伴有不同程度的纤维性玻璃样变或淀粉样变;瘤细胞浆内有时可见成团淀粉包涵体,间质内偶见钙盐沉着;电镜下瘤细胞可见 $\beta$ 细胞分泌颗粒。

临床表现:胰岛素瘤分泌亢进引起发作性低血糖症状是本病患者各种临床表现的基本原因。一般在久未进食或因体力活动血糖消耗过多情况下,可使血糖降至很低水平,引起交感神经兴奋和儿茶酚胺释放而出现症状;若血糖降低较快,则反应性肾上腺素分泌增多,症状比较明显,如出冷汗、面色苍白、心悸、两手颤动、乏力等;若血糖下降较慢,则主要因大脑细胞缺少营养引起脑细胞能量不足,发生退行性改变而出现神经精神症状,如意识障碍、不同程度的精神异常或颞叶癫痫,因此,胰岛素瘤常被误诊为神经精神病。由于多次进食或口服糖类预防低血糖的发作,常使病人体重增加而肥胖。所以,有人提出凡空腹或劳累后出现上述症状者,均应考虑本病的可能而需作进一步检查。

诊断:过去的临床报告指出,本病的大多数病人均未及时诊断,主要原因是仅仅考虑为低血糖或神经精神症状的其他疾病,而未注意到本病。为了及早发现和诊断,首先应判定症状是否由低血糖引起。胰岛素瘤病人空腹血糖一般偏低,需多次测定才能发现。在发作时测定血糖尤为重要,但取血必须及时,否则结果不可靠。在无自发性症状发作时,为明确诊断,可采用激发试验,最常用的试验方法是连续禁食24~72h,在禁食期间密切观察,待症状出现后立即测定血糖,并静注葡萄糖液中止试验,如血糖在2.2~2.75mmol/L以下,即可证明症状由低血糖引起。证明低血糖与血中胰岛素增高有关,应排除引起低血糖的其他原因,方法为测定血糖(G)同时作血中胰岛素放射免疫测定(IRI),如血糖低而胰岛素高于正常,则说明低血糖与血中胰岛素异常增高有关。但有时血中胰岛素可无明显增高,此时可根据血中胰岛素与血糖比值(IRI/G)作出诊断,胰岛素与葡萄糖的比例 $>0.25$ 时,提示有胰岛素瘤存在。近年来有人认为,本病患者脾脏静脉胰岛素水平显著增高,而肿瘤附近的更高,且呈峰值,术前进行此种检查对肿瘤有定位作用。过去曾用口服(或注射)促胰岛素释放药物(如甲碘丁脲、左旋亮氨酸等)或抑胰岛素释放药物(如氟苯甲噻二噻)的方法以观察IRI/G比值变化,并推测有无本病存在,但这些方法现已不常用。证明胰腺存在肿瘤,绝大多数胰岛素瘤体积较小,临床上和一般影像学诊断,如B型超声、电子计算机断层扫描等皆不易查出,选择性腹腔动脉造影可发现70%病人有肿瘤,其余30%尚待手术探查证实。

Whipple(1952年)指出,由胰岛素瘤所致的血糖过低,必须

符合下列4个条件者始有手术指征:(1)症状发作是在空腹、饥饿或剧烈劳动后;(2)发作时血糖含量在2.5mmol/L以下,禁食24h亦然;(3)口服糖类或静注葡萄糖后症状可立即消失;(4)葡萄糖耐量试验,血糖最高不超过5.6mmol/L,2h内即重新进入低水平,且在以后3~6h内始终维持在低水平状态。符合上述条件者,手术探查时至少75%可发现胰岛素瘤。Whipple报告的39例中有34例在手术时发现胰岛素瘤存在,必须指出,手术探查未发现肿瘤,不能绝对排除胰岛素瘤的存在,更不能排除胰岛增生的可能性。

治疗:本病一旦明确诊断,有效的治疗方法是及早施行手术,彻底切除肿瘤,以免长期低血糖发作导致中枢神经永久性损害,肿瘤也有恶变的危险,其他器官也将因身体过于肥胖而发生退化性改变。若肿瘤已发生远处转移,即使切除原发肿瘤,低血糖症状仍将继续出现。手术治疗成功的关键在于术中能找到并切除肿瘤。因此,必须充分显露胰腺,并对胰腺及其邻近组织进行彻底探查,表浅胰岛素瘤颜色较深,常可肉眼见到,而深部肿瘤扪诊时较周围组织稍硬,并可在指间滑动,有疑诊可进行结节穿刺涂片检查。对单个的或少数散在的较小肿瘤可予以切除,多发的并较集中的或较大体尾部肿瘤,则作胰腺远侧部分切除术,有时甚至需将脾脏同时切除。恶性肿瘤如无远处转移,应作根治性切除术。切除前未经细胞学检查证实,应对所有切除“肿瘤”立即作冰冻切片检查以便确诊。术中监测血糖是防止遗漏多发性肿瘤的有效措施,对判断肿瘤是否切除尽的准确率为75%以上。如正确应用此方法,肿瘤组织完全切除后10min血糖即明显上升,约在60~90min后达正常值。准确可靠的方法是术中取门脾静脉血进行快速IRI监测,肿瘤切除完全,IRI迅速下降至正常;术中监测IRI优于血糖监测,如有IRI快速测定的技术和设备,可以代替血糖的监测;如监测结果提示肿瘤组织尚未完全切尽,应继续寻找残留肿瘤。如术中经彻底探查仍未发现肿瘤,须考虑几种原因:可能未找到隐匿的肿瘤;低血糖综合征的原因是由胰岛细胞增生所致;诊断不正确,低血糖不是胰腺疾病所致。多数学者主张在血糖监测下,从左向右分段切除胰腺,直至找到肿瘤或血糖明显上升时为止,一般不主张全胰切除或胰十二指肠切除术。在找不到腺瘤的情况下采用胰腺大部分切除(包括胰尾、胰体及颈部在内),这种手术有30%的机会可盲目切除隐匿性肿瘤,或能切除足够的增生胰岛,使症状得到控制,但其疗效一般不如能发现肿瘤而予以切除者佳。另一观点主张中止手术,术后用多餐和氟苯甲噻二噻治疗,抑制胰岛素的释放,以减轻症状,等待肿瘤增大后再行手术。术前可作选择性腹腔动脉造影或门脾静脉分段取血行IRI测定,以确定肿瘤位置。胰岛素瘤完全切除后疗效很好,低血糖症状消失,但应长期随访,因为可能复发,甚至需要再次手术切除新出现的肿瘤。对于不能切除和已有转移的恶性胰岛素瘤,可采用非手术疗法,包括多餐、夜间进食、应用氟苯甲噻二噻、链脲佐胰岛素、肾上腺皮质激素、生长抑制素等药物,约60%的病人可延长2年生存期,但由于上述药物毒性较大,且有一定的副作用,故不宜作为手术疗法中常规辅助药物和长期使用。

#### 参考文献

- 1 Rich K H, et al. Surgery, 1980, 84: 519
- 2 曾宪九. 中华外科杂志, 1983, 10: 600
- 3 曾宪九, 等. 中华外科杂志, 1985, 12: 732
- 4 王蔚宣, 等. 安徽医科大学学报, 1986, (21)4: 260
- 5 朱预. 实用外科杂志, 1988, 8(3): 139
- 6 朱预. 普外临床, 1989, 4: 15
- 7 钟守先, 等. 普外临床, 1989, 6: 337

(安徽医科大学附属一院王蔚宣教授撰)

**肾肿瘤的影像学诊断** imaging diagnosis of renal tumors 肾脏恶性肿瘤中肾癌发病率最高,占肾肿瘤的90%。多数患者常无症状,因作其它病患检查始被发现。排泄性尿路造影、超声波、肾动脉造影、CT及MRI各有其诊断价值。

**排泄性尿路造影(IVP)** IVP对发现肾肿瘤是有价值的,它可显示肾外形、肿块大小、肿瘤对肾盂肾盏压迫移位及破坏等改变。尤其对肾盂癌变的显示,如造影剂充盈良好,空间分辨率高于CT和US。此外,它还能反映肾脏的排泄及浓缩功能,但对占位性病变的性质尚难以确定,有时假肿瘤如胚胎性分叶、代偿性小叶肥大及Bertin肾柱增大常被误诊为肿瘤。肾癌与肾盂癌之间有两种情况鉴别较困难:一是主要向肾盂方向发展的肾癌,在IVP上形成酷似肾盂肿瘤的充盈缺损,但周边有造影剂包绕,较光滑。如为肾盂癌则是实体浸润性,其周边造影剂包绕不完整,或为有蒂乳头状肿瘤,其充盈缺损应为泡沫状;另一种是实体型的或弥漫浸润型的肾盂癌,向肾实质浸润,肾盂癌IVP充盈缺损边缘多呈泡沫样、结节状改变,肾癌虽不规则尚较光滑。肾盂癌可同时合并肾盂积水、肾盏积水,肾癌则较少见。由于局限于被膜内的小肾癌肾轮廓可无变化,尤其对小肾癌的检出率低,约为52%~67%,主要因为肿瘤小且发生在肾盂边缘,较少侵犯肾盂肾盏,虽然采用加体层造影方法,但检出率仍低。IVP因对肾周围组织的浸润、肾门淋巴结肿大不易显示,而在肾肿瘤分期的价值中不如US和CT。因此,IVP对肾肿瘤的诊断是有限性的。

**超声检查(US)** US诊断正确率达90%以上。它对肾肿瘤的定位具有较高的正确性,对肿瘤大小测量也较正确,对无症状的早期肾癌有较高的发现率,对肾静脉、下腔静脉内的癌栓及肾门部淋巴结肿大也能作出诊断。除确定诊断外,对肿瘤与周围脏器的关系,可作多方面的探测,对于肾癌可进行临床分期,进而制定手术方案,乃至疗效的评价。US对肾癌的分期准确率达77.6%。肾癌各期超声像图的相应改变如下:Ⅰ期——肾被膜光滑,边缘回声清楚;Ⅱ期——肾被膜欠光滑,边缘欠清楚;Ⅲ期——肾静脉或下腔静脉扩张,扩张的静脉腔内见低回声不光滑的肿瘤阴影或/及肾门淋巴结肿大;Ⅳ期——肿瘤与邻近器官界限不清,后壁回声衰减。根据US对肾肿瘤的不同声像图特点来鉴别良性的和恶性的肿瘤,良性肿瘤多数回声均匀,形状规则,界限清楚,包膜完整,后壁回声不衰减;恶性肿瘤则多数边缘模糊,形状不规则,内部回声不均匀,后壁回声衰减。US对肾癌与肾错构瘤的鉴别诊断也有良好的作用,肾错构瘤的特殊组织结构使其在US和CT扫描中独具特点,瘤中所含的脂肪组织与非脂肪组织间声阻差很大,声束在声阻差大的物质界面产生强回声反射,肿瘤区域不均质,常呈大小不等的强回声光团。肾癌不含脂肪组织,多呈低回声反射,据此可对两者作出鉴别。由于以往术前很难与肾癌鉴别,因此,对属良性病变的肾错构瘤者多行肾切除术。

US诊断肾肿瘤方法简便、易行,无损伤性,可反复检查,又能在动态下观察肿瘤的大小、形态、位置、内部结构及与周围组织关系,并可获得各种方向的切面图像,无疑优于其它检查方法。因此,US诊断应做为肾肿瘤性病变的首选检查手段,为临床提供较可靠的诊断依据。但对诊断价值也有一定局限性,原因为:(1)超声诊断仪分辨率低,图像清晰度不佳,易酿成误诊。(2)肾上极癌肿与肾上腺肿瘤之间的鉴别较困难。(3)肿瘤位于右肾上极,挤压肝脏时,极易误诊为肝右后叶占位性病变。(4)肿瘤内组织缺血、坏死时,可形成大的钙化斑,易误诊为畸胎瘤或结核。(5)肾盂内的炎性肿块与肿瘤不易鉴别。

**CT扫描** 由于CT具有高度空间及密度分辨率,尤其对病变内脂肪、钙化灶及水成分显示具有特异性,多个横断面扫描及增强扫描使整个肾脏结构、肾内病变及与周围器官的关系显示得十分清楚,对肾肿瘤的诊断正确率达95%。对US不能诊断的小肾癌也能作出诊断,平扫加增强扫描是目前公认检查诊断小肾癌的最佳方法。薄层CT扫描有助于观察小肿瘤的内部结构和鉴别诊断。正常肾实质密度均匀,CT值30~70Hu。平扫肾癌时其密度略低于肾实质,但很接近,因此,平扫易遗漏较小的病灶。对比增强后,其密度轻度增强,而肾实质明显增强,形成对比,得以显示。肾癌由于癌灶中心易出现坏死、出血、囊变,甚至钙化,故CT平扫及增强后扫描均显示密度不均匀。极少数肾癌边缘有不完整的钙化环。CT对肾静脉内的及下腔静脉内的低密度癌栓和邻近

组织浸润、所属淋巴结及远处转移也可观察,因此,CT对肾癌的临床分期非常有价值,正确诊断率可达91%,可为癌肿的治疗及判断预后提供重要的客观依据。对肾癌临床分期的CT标准如下:Ⅰ期:肿瘤不影响肾脏轮廓或由肾表面突起的肿物,边缘光滑;Ⅱ期:肿瘤轮廓不清,肾周围脂肪组织模糊或消失;ⅢA期:肾静脉和下腔静脉扩张;ⅢB期:淋巴结肿大;ⅢC期:可见ⅢA期和ⅢB期两种表现;Ⅳ期:肿瘤和邻近器官界限不清,邻近器官内有和肿瘤相同密度的组织结构。由于CT对脂肪成分诊断最为敏感,肾错构瘤中因含有脂肪,可以与肾癌相鉴别。CT对较小的高密度肾囊肿诊断价值很高,可避免不必要的手术。肾囊肿合并肾实质性肿瘤或肾实质性肿瘤合并囊变时,用一般影像学检查方法常易误诊,而CT能通过增强前后扫描对病变的密度进行精确的测量与对比,并依据病变是否强化及其强化的程度来鉴别病变为囊性的、实性的还是囊实性的。囊性肾癌的CT表现为囊壁不规则和厚度不均,伴囊壁结节并有增强效应。但3cm以下的囊性肾癌与不典型的肾囊性病变术前很难鉴别,应密切观察或行穿刺细胞学检查。

CT对肾肿瘤虽能正确定位、定性,确诊率高,但也有棘手的问题,即CT无法鉴别靠近肾门外肾静脉侵犯是压迫性的还是肿瘤浸润所致;CT亦无法显示静脉壁轻微浸润。另外,CT也有一定的局限性,如CT值可受多因素影响,以其作为诊断的唯一依据,则可能产生误差。

**肾动脉造影** 在血管造影中,肾癌的表现主要有3个方面:(1)肾主动脉增宽,直径一般>7.5mm,这提示该肾有要求较高血供的占位病变存在。(2)动脉期中的肿瘤血管呈血窦状,丰富而凌乱。(3)在肾实质期中的肿瘤部位不同程度染色及静脉早现,这是由于肿瘤液化或存在动静脉瘘所致。肾动脉造影是一种侵入性的检查方法,其适应症有逐渐减少倾向,一般在下列情况下:CT与US对此占位性病变尚有疑问;肾肿瘤性病变鉴别诊断有困难;确诊小肾癌;肾上极肿瘤与肾上腺肿瘤不易鉴别;肿瘤较大或手术切除把握不大,在作造影时加作动脉栓塞。有的学者认为动态CT与血管造影同样可靠,因此血管造影便可弃用。

**磁共振成像(MRI)** 由于同时可拍摄冠状面的、横断面的和矢状面的图像,因而对肾肿瘤的诊断及分期可提供更多的信息。肾癌在MRI图像中一般均可出现外形的变化,肿块边缘不规则,肾门结构受压移位及转移征象。依其强度不同,表现为高信号的与低信号的强度指标,肾肿瘤组织的T<sub>1</sub>加强图像中呈低信号强度,T<sub>2</sub>加强图像中呈高信号强度。如伴有瘤内出血、坏死则可见到内部不均匀区,一般呈高信号强度影。MRI可清晰显示肾静脉、下腔静脉及其癌栓,并进行临床分期。对肿瘤的淋巴结转移,MRI显示优于CT。MRI不足之处为对实质性占位病变定性诊断和小于1cm肿瘤的诊断尚有一定困难。

通过以上各种检查方法优缺点的比较分析可知,肾肿瘤的影像诊断以US为首选,US诊断有困难时,加作CT,可提高诊断率。目前血管造影可被CT代替,只在术前为明确肿瘤血供情况及术前栓塞时才作。MRI诊断价值与CT大致相仿,只在肿瘤淋巴结转移诊断价值上略优于CT,但其价格昂贵。

#### 参考文献

- 1 Richie J P, et al. J Urol, 1983, 129(6): 1114~1116
- 2 Forbmuller H G W, et al. J Urol, 1987, 138(3): 482~484
- 3 Johnson C D, et al. A. J. R., 1987, 148(1): 59~63
- 4 Amendola M A, et al. Radiology, 1988, 166(3): 637~641
- 5 Warshauer D M, et al. Radiology, 1988, 169(2): 363~365
- 6 卢光明,等.中华泌尿外科杂志, 1992, 13(3): 191~193

(安徽医科大学第一附属医院蒋云仙教授撰)

**卡介苗防治表浅膀胱癌** bacillus calmette-guérin in the treatment of superficial bladder transitional cell carcinoma 膀胱移行细胞癌75%~85%最初表现为表浅癌。如何处理原位癌及TUR后残存的表浅膀胱癌,如何有效地降低肿

瘤的复发率及防止表浅癌转变为浸润性癌,已成为临床医生面临的实际问题。表浅膀胱癌 TUR 后肿瘤复发率高达 40%~70%,防止肿瘤复发已成为表浅膀胱癌防治中的最主要问题。目前解决上述问题的主要方法是膀胱内灌注卡介苗(BCG),并被认为是目前防治表浅肿瘤最为有效的方法,治疗后肿瘤复发率,中国为 15%~20%,国外为 8%~37%。

BCG 膀胱内灌注方法:BCG150mg 溶于 4℃生理盐水 60ml 中,经导尿管注入膀胱,保留 2h 后排出。每周 1 次×6;半月 1 次×6;每月 1 次×24。灌注前后定期摄胸片和测定 WBC、RBC、BPC、BUN、Cr、AKP、SGOT 以观察 BCG 治疗的副作用。1 年内,每 3 个月行尿细胞学、膀胱镜检和可疑部位活体组织检查或流式细胞计检查,第 2 年每半年进行 1 次,第 3 年起每年 1 次。如尿细胞学、膀胱镜检、活体组织检查和流式细胞计检查有阳性发现,则定为肿瘤复发。

BCG 治疗表浅膀胱癌有 5 个给药途径:经皮肤给药、病灶内给药、口服、腔内灌注加皮内接种及单纯腔内灌注给药。前两个途径现已摒弃。1976 年,摩勒尔斯(A. Morales)首先应用 120mg BCG 从膀胱内灌注加皮内接种防治膀胱肿瘤获得满意疗效后,国内外学者相继证实这一有效的防治方法,并已广泛用于临床治疗原位癌、表浅癌、残留癌、复发癌和预防癌复发。由于皮内接种可引起溃疡及脓肿,并有人认为是皮内接种加膀胱内灌注途径与单纯膀胱内灌注途径的疗效相似,使皮内接种逐渐被摒弃。现在单纯腔内给药已被广泛认为是最佳途径。此外,BCG 口服治疗膀胱肿瘤,于 1984 年纳艾脱(N. R. Netto)和 1989 年蒋云仙等报道亦取得良好效果。1991 年德克纳(C. A. L. Dancona)报告,当病人不愿接受 BCG 膀胱内灌注或引起强烈的局部副反应时可采用 BCG 口服。给药剂量:灌注剂量还有不同看法,药量以每次 120~150mg 者为多,但也有 1 次给药 0.5mg 取得与多给药效果相似并少有合并症者。BCG 口服剂量,根据结核菌素皮肤试验阳性、可疑和阴性分别给药 200mg、400mg 和 800mg,每周 3 次,时间不限。关于疗效,1985 年凯莱(D. R. Kelley)综合评价了 Morales、Lamm、Brosman、Herr 和 Camacho 等有影响的 BCG 疗法结果,其预防性治疗、残余癌治疗和原位癌治疗的无病率分别为 81.4%(92 例/113 例)、67.9%(38/56)和 70.9%(39/55);在比较性研究的国内报告中,卫焜等的肿瘤复发率 BCG 组为 15.0%(3/20),噻替啶组为 41.0%(7/17),对照组为 63.6%(14/22);孟荃等的肿瘤复发率 BCG 组为 15.78%(3/19),噻替啶组为 37.03%(10/27),对照组为 36.36%(8/22)。关于疗程, Morales 原始方案是每周连续灌注 6 次。1982 年勃洛曼(S. A. Brosman)则提倡在 6 周后逐步延长给药间隔时间至每月 1 次,连续用药 2 年。近年发现短程治疗后复发的病人不断增加,多数学者都同意疗程一般为 2 年。1990 年梅骅等提出对多发性肿瘤、复发性肿瘤、T<sub>2</sub> 期肿瘤或疗程中仍复发者,预防性灌注宜延长至 3~5a,次数可酌减,但毒性反应与并发症随着疗程的延长和药量的加大而增加。BCG 膀胱内灌注的副反应一般可以耐受。1986 年莱姆(D. L. Lamm)总结了 1 278 例 BCG 治疗膀胱癌的副作用和并发症,90%以上病人有膀胱炎症状,常在灌注 2~3 次后出现,持续约 2d。近 1/2 患者有轻度血尿,1/4 出现低热、全身不适等症状。并发症主要包括高热(3.9%)、肉芽肿性前列腺炎(1.3%)、BCG 肺炎或肝炎(0.9%)、关节炎或关节痛(0.5%)等。1990 年诺尔(W. H. Rawls)报告 5 例 BCG 脓毒症患者。如有严重膀胱刺激症状及发热、寒战、不适,BCG 剂量应减半,并服用异烟肼 300mg/d,灌注当天开始连服 3d。如出现严重全身副作用,则停止 BCG 治疗,并给了三联抗结核药。如病情重可加用环丝氨酸 500mg,每日 2 次,作用快且有救急之效。动物实验表明,抗结核药并不影响 BCG 的抗肿瘤效果,但有作者指出异烟肼是否会削弱 BCG 的抗肿瘤效果还不能肯定。有人认为刚切除过肿瘤部位的粘膜下层及肌层可形成血管丰富的肉芽组织,是 BCG 进入血流的门户。因此,手术后时间短,局部炎症反应明显,容易使 BCG 吸收入血流,认为在有严重的膀胱炎、尿道扩张、插

尿管有明显的创伤时,不应该给予 BCG 治疗。一般于术后 2~3 周行膀胱内灌注较为适宜,必须经细导尿管将药液灌入膀胱,接着将少量生理盐水经导尿管注入,以使导尿管中无药液残存,这样严格遵循正规操作,可减少或防止并发症的发生。口服 BCG 几无副反应和并发症,偶有一过性皮肤潮红、痒、皮疹和恶心、胃部不适、厌食和排尿犹豫等。

BCG 膀胱内灌注抗肿瘤的作用机制至今尚不完全清楚,多数人认为是:(1)激发膀胱粘膜非特异性炎症反应,被 BCG 激活的巨噬细胞浸润到膀胱壁内,形成肉芽肿,从而影响肿瘤细胞的生长;(2)提高宿主免疫功能,非特异性增强宿主的抗肿瘤免疫反应;(3)BCG 在肿瘤局部有抑制(或杀伤)肿瘤生长作用;(4)激活的巨噬细胞及致敏淋巴细胞分泌细胞因子(如干扰素、白细胞介素-2、肿瘤坏死因子等),发挥其抗肿瘤作用。至于何种因素起主要作用,还是发挥协同作用,有待进一步探讨。BCG 膀胱灌注后有 T 细胞亚群水平的变化。近来用单克隆抗体技术测定 BCG 灌注后 T 辅助细胞(TH)与抑制细胞(Ts)水平和比值的变化及 NK 细胞活性的变化。

关于 BCG 剂量、疗程及 TUR-BT 后开始灌注的时间还有不同的看法。因此,如果希望 BCG 灌注疗法的疗效更为提高,合并症更为减少,药物使用更趋合理,只有加强它的作用机理研究,阐明其作用的实质。1987 年墨杰瑞(P. A. Merguerian)报告 1 组 13 例膀胱肿瘤患者术后使用 BCG(常规剂量之半)与 IL-2(白细胞介素-2)联合膀胱内灌注取得良好效果,且副作用小。1991 年柯凯脱(A. T. K. Cockett)报告 22 例表浅膀胱癌患者术后使用 BCG 半量(60Mg)加 IL-2 膀胱内灌注,肿瘤缓解率为 88%,22 例单独用 BCG 灌注者,缓解率为 59%。提示 BCG 与 IL-2 联合膀胱内灌注其疗效优于单独 BCG 灌注,且副作用小。

#### 参考文献

- Morales A, et al. J Urol., 1976, 116(2):180~183
  - Brosman S A, et al. J Urol., 1982, 128(1):27~30
  - Netto N R, et al. J Urol., 1984, 132(4):675~677
  - Kelley D R, et al. J Urol., 1985, 134(1):48~53
  - Lamm D L, et al. J Urol., 1986, 135(2):272~274
  - Merguerian P A, et al. J Urol., 1987, 137(2):210~219
  - 蒋云仙,等.中国肿瘤临床,1990,11(6):340~342
  - 梅骅,等.中华泌尿外科杂志,1990,11(6):340~342
  - Rawls W H, et al. J Urol., 1990, 144(6):1328~1330
  - Dancona C A, L, et al. J Urol., 1991, 145(3):498~501
- (安徽医科大学第一附属医院蒋云仙教授撰)

#### 胶质瘤的综合治疗 synthetic treatment of the glioma

胶质瘤是神经胶质瘤(也称胶质细胞瘤)的简称,它是发生于神经外胚层(或神经上皮)的肿瘤,故也称神经外胚层肿瘤或神经上皮肿瘤。它是最常见的一种中枢神经系统肿瘤,约占 44.6%。

胶质瘤细胞分为增殖群和非增殖群,前者按一定周期分裂,处于循环状态,约占 30%;后者又可分为暂不增殖细胞和不再增殖细胞,约占 70%,但具有增殖力,在一定条件下即可转入增殖群,细胞周期时间约 2~3d。胶质瘤呈浸润性生长,肿瘤中心为坏死区,周围为细胞静止区,外周为细胞增殖区,再外围为水肿区。肿瘤边缘常是正常细胞和肿瘤细胞交织存在,并且存在血脑屏障,致使许多化疗药物不能到达该处。肿瘤细胞对放射线具有一定的耐受力,因之常为肿瘤复发的基地,许多文献报告均已证实,单一疗法已达不到治疗目的,采用综合治疗效果较佳。

手术治疗 根据星野的脑胶质瘤细胞动力学理论,若切除 99%的肿瘤,则 8 周后肿瘤细胞就恢复到原来的数目。因此多数人都主张广泛切除肿瘤是最有效的方法。铃木提出对位于额叶、颞叶、顶叶的肿瘤者,开颅前 30min 静滴甘露醇 500ml,开颅后分离供血的主干动脉,上临时动脉瘤夹,暂时阻断血流,而后将肿瘤及其所在的脑叶一并切除,这样不仅很少出血,还能防止肿瘤细胞播散。Pia 运用手术显微镜、激光、超声吸引器进行胶质瘤的

显微手术,并可进行脑重要功能区附近的、中央部位的肿瘤切除,以最大限度地切除肿瘤,而最小限度地造成脑损伤,提高病人术后生存质量和延长存活时间。

**放射治疗** 胶质瘤术后主要的治疗手段。手术后伤口愈合或2周开始放疗,成人剂量以50 000~60 000mGy,儿童介于45 000~50 000mGy为宜,每周照射5次,目前均采用病灶区照射,根据肿瘤播散情况有全脑照射或脊髓预防性照射。也可术前放疗(以加速器为宜)和术中病灶放疗,手术后再进行放疗,有人报告在外照射基础上,在脑内植入<sup>137</sup>Cs,或用立体定向照射,均可提高疗效,还有应用放疗增敏剂以增强放疗效果的。目前常用有深度X线、<sup>60</sup>Co、直线加速器产生高能X线进行外照射,其它还有高LET射线治疗机、快中子治疗机、负π介子治疗机及质子源等。近年来对深部的或脑下部位的胶质瘤,也有采用r-刀进行治疗的。

**化学治疗** 主张术后或放疗后进行。应选用脂溶性的、分子量小的药物,使药物更易通过水肿组织和血脑屏障;选用一些能作用于细胞分期或整个细胞周期及毒性较小的药物。60年代应用脂溶性亚硝胺类衍生物如BCNU和CCNU,具有一定疗效,但因有延迟性骨髓抑制作用和蓄积毒性,故应用受到一定限制。70年代VM<sub>26</sub>(替尼泊甙)问世,经10余年来的研究,表明它对胶质瘤治疗有效,渐被推广。目前认为综合使用化学药物比单独使用收效更佳,但前提是两种药物之间必须无交叉毒性,而且具有协同作用。据文献报告,综合疗法有ADM-VM<sub>26</sub>-CCNU(阿霉素、替尼泊甙、环己亚硝胺)VM<sub>26</sub>-CCNU、VM<sub>26</sub>-CCNU-PCZ(甲基苯胂)、VCR(长春新碱)-VM<sub>26</sub>-CCNU等,认为以VM-CCNU效果最著,其方法为第1、2天VM<sub>26</sub> 60mg/m<sup>2</sup>静脉滴注,第3、4天口服CCNU 60mg/m<sup>2</sup>,然后每隔6周重复1次。

近年来有人报道将化疗药物置于瘤床残腔内行局部化疗,它可避开血脑屏障,还可通过手术和立体定向手术取得标本进行肿瘤培养和药物敏感试验,来选用对该肿瘤最敏感而又刺激性小的药物进行化疗,对病人更为有利。

正常细胞生长绝大部分是靠体液中的多肽激素和多肽样的生长因子控制调节的,可是已经转化了的细胞或恶性肿瘤细胞的生长依赖这种正常因子的程度甚微。Sporn认为肿瘤细胞本身可以产生这种调节生长的多肽,并且具有功能受体,现已有证据支持这种假说,并称这种多肽为“转化生长因子”(TGF,S)。TGF,S已被分离出来,它具有低分子性及二硫键,正如TGF,S能于分离鉴别一样,可能通过合成这种多肽的拮抗物或合成缺乏二硫键无活性的TGF,S来阻止其作用,这对治疗胶质瘤具有重要意义,同时今后也还会有新的更为有效的无毒性的药物治疗胶质瘤。

**免疫治疗** 进行免疫治疗之前必须依靠常规治疗方法,最大限度地减少残留肿瘤细胞数量,因为在实验中发现,只有残留肿瘤细胞不超过10<sup>5</sup>时,免疫治疗才能发挥其最大作用,因此一般在手术、放疗、化疗之后或在化疗期间进行免疫治疗。目前以非特异性免疫治疗为主。70年代常用卡介苗、左旋咪唑、云芝多糖-K、干扰素、转移因子、神经胶质瘤细胞免疫核糖核酸等,各家报告均有一定效果。1975年,Köhlen等制造了一种可以产生特异抗原的单克隆抗体,具有良好的专一性和特异性,作为最好的载体之一,可把抗肿瘤药物、毒素或放射性同位素运送到靶部位(肿瘤),从而提高肿瘤内的药物浓度。单克隆抗体具有识别肿瘤细胞作用,选择性地破坏肿瘤细胞,从而可直接杀伤肿瘤细胞,因此今后在治疗胶质瘤中单克隆抗体将发挥重大作用。

1980年从带瘤小鼠分离出具有抗肿瘤反应的淋巴样细胞,这种活化的淋巴细胞能溶解新鲜的、自体的、同系异体的或同种异体的细胞,该细胞又称淋巴因子活化杀伤细胞(LAK)。现已有人用培养诱导方法从瘤体内浸润的淋巴细胞中产生大量能识别肿瘤的特异性LAK细胞。白细胞介素-2(IL-2),是由单核细胞和淋巴细胞产生的一种生物反应调节因子,可调节淋巴细胞、单核

细胞的分化和功能,并能激活NK细胞,更重要的是LAK细胞在加入IL-2后其活性更加增大,已有证明用LAK细胞加用IL-2或单独用IL-2治疗病人有明显的抗肿瘤效应。

**其他** (1)高温疗法:1971年Sutten等开始应用脑胶质瘤的高温疗法,简称热疗。近年来,由于微波、射频、超声波、激光、电磁波等技术的发展和磁性材料的应用,使脑肿瘤的热疗有了明显进步,微波热疗、射频热疗、铁磁体植入加热法、激光和高频电流系统加热已应用于临床,据报道有一定疗效。(2)光动力学治疗:注射卟啉衍生物,然后用光照射,根据报道可延长患者生长期。

胶质瘤的综合治疗已取得初步效果,随着科学技术的发展,将会有新的治疗方法问世。

#### 参考文献

- 1 张天锡. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1981, 8(3): 113~115
- 2 黄强. 中华神经外科杂志, 1986, 2(3): 183~187
- 3 Pua H. Acta Neurochirurgica, 1986, 80(1~2): 1~11
- 4 朱树十, 等. 中华神经外科杂志, 1990, 6(4): 248
- 5 夏昌兴. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1991, 18(4): 169
- 6 陈劲草, 等. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1991, 18(1): 4~6
- 7 詹仁雅. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1991, 18(1): 1
- 8 张庆俊. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1992, 19(3): 115

(安徽医科大学第一附属医院李汉杰教授撰)

**椎管内肿瘤** intraspinal tumors 椎管内肿瘤包括由脊髓、脊神经根、硬脊膜、脂肪组织、血管、先天性残留组织等长出的肿瘤,它为脊髓压迫症的常见原因。其发病率为每10万人中0.9~2.5人之间,远较脑瘤为低,不同病理类型脊髓瘤的发病率不一样,其中以神经鞘瘤最常见,脊膜瘤次之,胶质瘤又次之;室管膜瘤和星形细胞瘤是最常见的胶质瘤,髓外硬膜下是肿瘤生长多见部位,硬膜外次之,髓内又次之。不同节段脊髓肿瘤的发病率也不同,胸段发病率最高,颈段次之,腰段又次之。不同病理类型肿瘤的好发部位不同,胶质瘤多位于髓内,室管膜瘤可由终丝长出而位于马尾髓外,神经鞘瘤和脊膜瘤最常位于硬脊膜内髓外,硬脊膜外次之,硬膜外转移瘤多见。

**临床表现:** 脊髓肿瘤患者的病程较长,病情进展较慢,临床症状的产生,是由于肿瘤进行性压迫脊髓及其神经根所致。按疾病的进程可分为3个阶段。(1)初期阶段:脊神经根受肿瘤的压迫与刺激,引起患者根性疼痛或感觉异常(蚁走感、刺痛、麻痛等),称根痛期。根痛范围位于邻接肿瘤的脊神经后根的支配区,检查时患者局部有感觉过敏,随神经根受压的加重,过敏被感觉减退取代,继而丧失感觉,但疼痛依然存在。(2)第2阶段脊髓受压期:这时肿瘤体积较大,将脊髓推移与挤压造成脊髓功能的部分丧失,若肿瘤位于脊髓的一侧,该半脊髓受压失去功能,造成脊髓半切综合征,患者表现为患侧肌力减弱,对侧痛觉、温觉减退,两侧触觉有不同程度保留。(3)第3阶段脊髓麻痹期:由脊髓半切综合征或不全性截瘫继续发展,患者最终出现完全性截瘫,在肿瘤平面以下深浅感觉丧失,肢体完全瘫痪,伴有伸肌痉挛或屈肌痉挛,以及出现大小便障碍。不同横向位置的肿瘤,虽然最终都引起病变节段以下截瘫,但神经症状的进程不同,硬膜外肿瘤患者早期多有根痛,硬脊膜下髓外肿瘤患者的根痛多位于一侧,而两者的瘫痪发展都呈向心性,髓内肿瘤患者根痛较少,感觉障碍发展呈离心性,括约肌功能障碍出现较早。

**诊断:** 椎管内肿瘤患者的早期诊断极为重要,必须重视询问病史并作详细的全身及神经系统检查。脊髓病灶的定位诊断主要应包括:脊髓节段高低的纵向定位诊断和脊髓内外的横向定位诊

断。(1)X线脊柱平片:常规拍摄脊柱正侧位片及斜位片,约30%~40%的患者可有骨质改变,这些改变常见有椎管扩大,椎弓根内缘吸收,椎间距增宽,椎间孔扩大,椎体边缘受压吸收等。(2)腰椎穿刺与脑脊液检查:肿瘤产生蛛网膜下腔梗阻时,脑脊液中的蛋白量增加,细胞数不增加,称Froim征,肿瘤位置愈低,蛋白量增加愈明显,脑脊液常呈淡黄色。同时行脑脊液动力学测定(压迫颈静脉的Quackenstedt test及压腹试验stookeys test),椎管腔内呈完全性的或部分性的梗阻表现。(3)脊髓造影:脊髓造影对诊断椎管内占位性病变仍为重要步骤之一。造影剂:碘油(Myodil),系非水溶性造影剂,不能与脑脊液混合,可在X线透视下反复观察其动态变化。由于吸收缓慢,长期滞留于椎管内,易造成刺激以至使患者继发蛛网膜下腔粘连。碘水(Conray, Amipaque, Ominpaque),系水溶性造影剂,能与脑脊液充分混合,因此可使脊神经根以及某些狭窄间隙显影,能迅速被吸收而排出体外同时显影清晰。造影方法:根据病变的位置不同可采用上行性造影(从腰椎穿刺向蛛网膜下腔注入碘油或碘水——只适应下胸段的检查)或下行性造影。目前下行性造影采用枕大池穿刺,病人位置不适,危险性大,造影剂易于进入脑室,目前已逐渐被颈<sub>1-2</sub>侧方入路穿刺造影替代。颈<sub>1-2</sub>侧方穿刺,病人俯卧位(也可仰卧位),在乳突下1cm,向内1cm交界处进针,有脑脊液滴出,注入碘油或碘水后将病人头抬高约15°造影。(4)CT扫描:能显示椎体和椎管的断面结构,但它需在明确病变部位节段基础上才能准确扫描,在某些时候,仍无造影来得准确。(5)MRI检查:由于MRI对脊髓可作矢状面的检查,因此对脊柱、脊髓、椎间盘等解剖结构的了解及其病变的诊断有较高的实用价值,并可区分脊髓的内外病变,甚至髓内的囊性病变。

鉴别诊断:(1)脊髓蛛网膜炎:病人发病前常有感染或外伤史。病程中症状有缓解或加重,呈波动表现,脊髓症状多缘化,侵犯范围较广泛,脑脊液蛋白含量增高,与椎管内阻塞程度及病变节段高低不一定一致,奎根试验有时通畅有时阻塞,椎管造影阻塞端形态不规则或不整齐,有时呈斑点状分布。(2)脊髓空洞症:发病徐缓,常在20~30岁间发病,好发于颈下段及胸上段,一侧或双侧的多数节段有感觉分离现象及下运动神经元瘫痪,长束损害较少见,多无蛛网膜下腔梗阻,与髓内肿瘤鉴别困难,需要MRI检查的协助。(3)脊柱结核:多见于幼儿及青年,多有结核病接触史及身体其他部位原发结核灶。一般症状有发热、消瘦、盗汗及血沉增快等,多见于胸椎,临床表现为急性的或慢性的脊髓横贯损害症状,脊柱可有后突畸形,X线片有椎体或椎间盘破坏并有椎旁脓肿可能。(4)腰椎间盘突出症:椎间盘突出多发生于20~40岁之间,男性居多,多有腰部扭伤及腰痛史,症状表现为一侧下肢坐骨神经痛,可反复发作,脊柱有侧弯,腰椎前屈消失。椎间盘突出位置不同患者临床表现各异,X线脊柱平片可见椎间隙狭窄,脊髓造影表现为硬脊膜外充盈缺损。(5)颈椎病:颈椎病患者常有由于颈椎发生退行性变并失去弹性的椎间盘突向椎管内压迫脊髓或由于椎体后方的骨刺、小关节增生、黄韧带肥厚或钙化甚至椎板增厚压迫脊髓,以及其他种种原因引起血运障碍而起病,初起时为功能性改变,最后脊髓发生变性成为不可逆病变。临床上,凡中年以上有肢体或躯干麻木、无力或上运动神经元损害体征,其症状时好时坏,呈波动性或进行性加重者,即应怀疑为本病。

治疗:脊髓肿瘤的有效疗法是手术切除肿瘤。髓外良性肿瘤能全部切除,患者功能恢复常较满意,肿瘤复发少(但哑铃型肿瘤切除不尽易于恢复)。脊髓肿瘤患者的预后取决于手术前脊髓受压程度和时间以及肿瘤的性质。

#### 参考文献

- 1 尹昭炎,中华外科杂志,1962,10(6):368~373
- 2 William W, et al. Radiology, 1983, 401~408
- 3 薛庆澄,神经外科学,天津:天津科技出版社,1990, 626~644  
(安徽医科大学第一附属医院王远兴副教授撰)

## 眼眶肿瘤的诊断 diagnosis of orbital tumor

眼眶肿瘤是比较少见,但又相当复杂的一种眼病。绝大部分原发于眼眶组织本身;也可由邻近组织的肿瘤蔓延而来,如从鼻窦、颅内甚至眼睑、结膜和眼球等部位的肿瘤蔓延过来;或由身体其他部分肿瘤转移而来,如神经母细胞瘤、乳房癌、肺癌等;或为全身病的眶部表现,如绿色瘤、淋巴瘤、何杰金氏病等。根据 Reese 统计,355例眶内肿瘤患者,其发病情况如下:原发性者占70.7%,继发性者占22.5%,转移性者占4%,全身性者占2.8%。

由于眼眶是一无伸缩性的骨性锥体,眶内发生肿瘤必将引起眼球突出和伴随体征。在诊断肿瘤性眼球突出时,必须排除由内分泌、炎症、血管性(搏动性、间歇性)、外伤以及单侧高度近视等引起的非肿瘤性眼球突出。

眼球突出是眼眶肿瘤患者的主要症状和体征,其突出的方向主要取决于肿瘤在眼眶内的部位,肿瘤所在的位置可分为3个间隙:(1)骨膜下间隙:是介于眶骨壁和骨膜之间的潜在间隙。此间隙内的肿瘤有骨肉瘤和巨细胞瘤,有来自鼻窦的上颌窦癌和筛窦、额窦的粘液囊肿。其临床特点是使眼球朝向肿瘤所在的对侧移位或突出。(2)骨膜直肌间隙:外界为骨膜,内界为四直肌及其间膜所构成的肌锥,前界为眶隔和眼外肌的扩展部。此间隙内的肿瘤有来自肌肉的横纹肌瘤和横纹肌肉瘤,来自腱膜的滑膜瘤和滑膜肉瘤,来自泪腺的混合瘤和腺癌等。其临床共同特点是:①眼球向某一方向呈偏斜性突出。②早期可出现复视。③眼球运动受累较早。④早期少有产生视力障碍和眼睑结膜水肿者。(3)肌锥内间隙:位于眼球后四条直肌及其肌间膜所围成的肌锥内,其中有神经、血管和脂肪组织等。此间隙内的肿瘤,有来自视神经的视神经胶质瘤,来自视神经鞘的脑膜瘤,来自睫状神经的神经鞘瘤和神经纤维瘤,来自血管的血管瘤以及原因不明、波散较广、临床并不少见的眼眶假瘤等。此间隙内的临床共同特点是:①眼球向正前方呈轴状突出。②视力可早期受累,但血管瘤和假瘤者并不一定。③眼睑和结膜常有水肿。④因球后受压可出现视乳头水肿,视网膜静脉扩张和出血、后极部出现放射状条纹等眼底改变。⑤眼球运动障碍轻,但眼眶假瘤者则不一定。

由于眼眶肿瘤有真性的、假性的、原发的、继发的、及良性的、恶性的区分,患者临床表现错综复杂,既有共同的体征,也有特有的表现。一般良性肿瘤多呈类圆形,表面光滑,境界清楚,可推动,无压痛,病程发展缓慢,多以年计,患者视力可缓慢下降,晚期可出现眼球运动障碍。恶性肿瘤的境界不清,多有粘连和压痛,病程短且发展迅速,多以月计,患者视力可明显下降或失明,伴眼痛及头痛,眼睑及球结膜水肿,早期患者可出现复视及眼外肌麻痹。假瘤起病迅速,可有外伤复发史,多见于中年,早期就出现疼痛、复视、眼睑和球结膜水肿。

发病年龄对眼眶肿瘤诊断也有较大的参考价值。毛细血管瘤、静脉性血管瘤、畸胎瘤、视神经胶质瘤、神经纤维瘤、眶浅层皮样囊肿、小眼球合并眶内囊肿、横纹肌肉瘤、绿色瘤、转移性神经母细胞瘤等均多见于儿童。皮样囊肿发生于童年,位于眶深部,至成年才出现症状。海绵状血管瘤、炎性假瘤、脑膜瘤、神经鞘瘤和泪腺混合瘤等良性肿瘤多见于成年人。老年人多患炎性假瘤、泪腺恶性肿瘤和鼻窦癌眶内蔓延。

眼眶肿瘤的种类繁多,起源各异,临床表现错综复杂,常易混淆,要取得比较准确的诊断,首先要详细询问病史,了解发病年龄、眼球突出发生时间、及其发展和病程,了解有无疼痛、复视、视力下降以及全身症状。接着进行眼部的和全身的检查,眼眶肿瘤常需作如下检查:

1. 眼部检查。(1)视力下降程度、屈光情况变化等。(2)眼球突出的程度和方向。(3)眶区扪诊。浅部眼眶肿瘤可在眶缘触及肿块,注意肿块的位置、大小、形状、边界、软硬度、表面是否光滑、可否推动及有无压痛。(4)眼睑及结膜有无充血、水肿及血管扩张。(5)眼球运动试验。了解眼球运动神经及眼外肌是否已受眼眶肿瘤的影响,如脑膜瘤早期影响眼运动,而血管瘤一般对眼球运动没有影响,所以眼球运动有无障碍对肿瘤定位及定性都有

一定参考价值。(6)眼底检查。视乳头有无充血、水肿和萎缩,视网膜有无水肿、出血及脱离,后极部有无放射状的或平行的压迫条纹等。

2. 全身检查。全身系统检查的重点是鼻窦、鼻腔、鼻咽腔及颈部、神经系统等。对儿童患者还要注意血液和网状内皮系统。必要时请有关科室会诊。

3. 眼眶的影像检查 眼眶肿瘤多数在眼眶深部,早期除眼球突出外,缺乏其他体征,X线平片检查分辨力低,不能显示眶内软组织病变,只有肿瘤发生引起骨骼改变才有诊断意义。眼眶造影和眶血管造影,虽可以作些弥补,但均属有痛、有害的检查方法。自70年代应用超声显像(A型、B型)和CT扫描检查以来,在眼眶肿瘤的诊断方面不但揭示率大为提高,而且是无痛、无害的检查方法。中国眼科临床近10年来较广泛应用超声显象及CT扫描两种检查技术。宋国祥等曾对102例单侧眼球突出患者进行以上两种检查,前者阳性率为88.2%,后者阳性率为91.25%,而超声波B扫描和CT两种检查方法联合应用,对眼眶肿瘤的诊断不但揭示率大为提高,而且定位正确率达100%,对某些肿瘤如血管瘤等还可作定性诊断,在多数情况下可以分辨出良性或恶性。磁共振成像(MRI)亦为无痛、无害的检查方法,对眶内肿瘤大小、形态、位置以及与邻近组织的关系显象更清晰,分辨能力优于CT扫描,但对骨质破坏性病灶、钙化病灶均不如CT清晰,其价格昂贵,在中国目前尚未普遍用于眼科临床。

当眼部检查触及肿物或超声、CT扫描等检查显示占位病变而不能明确性质和影响治疗时,可行开眶探查手术或活体组织检查,以明确诊断。

#### 参考文献

- 1 宋国祥,等. 102例单侧眼球突出患者超声显象和电算体层检查,中华眼科杂志,1982,18(4):193
- 2 寇荣金,等. CT对眶内占位病变诊断简介中华眼科杂志,1982,18(1):43
- 3 太根节直. 眼科画像诊断,日本金原出版株式会社,1982,7~83
- 4 宋田祥. 眼眶肿瘤超声显像,中华眼科杂志,1983,19(1):39
- 5 施殿雄,等. 眼科检查与诊断,上海:上海科学技术出版社,1983,345
- 6 朱晓,等. 磁共振成像(MRI)在眼眶占位病变诊断中的应用,眼科新进展,1989,9(1):15

(安徽中医学院附属医院陈爱全副主任医师撰;蔡人杰审)

### 乳腺癌治疗的进展 advances in the treatment of carcinoma of the breast

乳腺癌是妇女最常见的癌瘤之一。据统计,乳腺癌占美国妇女恶性肿瘤发病率首位,每年大约有12万人发病,发病率为72.2/10万,相当于每13人中有1人患乳腺癌,每年死于乳腺癌的人数约33000人(1976年)。据最近文献报道,在中国亦如欧美一样,乳腺癌亦居妇女恶性肿瘤发病率之首,且就诊年龄提前,30岁左右发病者也常见到。其危害大,范围广,严重地威胁着妇女的健康以至生命。早在1977年第4届中国肿瘤防治研究工作会议上,就决定把乳腺癌列为9种重点的研究癌症之一。最近,由于对乳腺癌自然病史的探索和早期诊断技术的改进,国内外学者一致认为,乳腺癌是一种全身性疾病的局部表现,即开始发病就可能隐藏着微小远处转移灶。所以,即使临床诊断为早期者,而病理检查可能已属晚期。因此,在查明乳腺癌真正病因之前,为了提高疗效、改善预后,必须采取唯一有效的措施,归纳有2点:

早期诊断 曾有人建议,将微小癌(直径 $\leq 1.0\text{cm}$ )和 $T_0$ 期(临床触不到肿块)列为早期乳腺癌,其术后患者10年生存率可达90%以上。为此,目前十分强调普查、自查和临床检查。通过体检及各种影像学、细胞学及病理学等联合诊断,使早期诊断率不断提高。应将下列人群作为重点普查对象:(1)有乳腺癌家族史者;(2)年龄 $> 35$ 岁未育或初产者;(3)行经期 $> 35$ 年或初潮年龄 $<$

12岁者;(4)乳头血性溢液者;(5)乳腺局限性增厚者;(6)乳腺癌术后者。随着乳腺癌知识的普及和诊断技术的不断提高,微小癌(包括小叶癌、导管内癌)的比例日益增高,有报告说占新发现乳腺癌的40%。

综合性治疗 乳腺癌的治疗方法很多,但存在很多争议,孰优孰劣,尚无定论,可以说是各种恶性肿瘤中在治疗上争议最多的。常用的治疗方法有手术、放疗、化疗及内分泌治疗等。有关乳腺癌细胞动力学研究显示,从乳腺单个上皮细胞突变为癌细胞至临床能检出肿块(直径 $1.0\text{cm}$ ),约需30次倍增,其生长期至少已逾3年,可能已出现血行转移。因此,当临床表现为明显肿块时,其主要问题在全身性病灶,单用局部治疗方法往往不能奏效,必须加用全身性治疗,有时后者起主要作用,而前者仅为辅助性的。

1. 全身治疗:(1)化学药物治疗。在乳腺癌治疗中,化疗已占有重要的地位,因为乳腺癌是所有实体瘤中化疗效果最好的肿瘤之一。目前一般主张联合化疗,以CMF方案及CAF方案为常用,对晚期乳腺癌的有效率达50%~60%。因原发灶存在时,转移灶生长受到抑制,当原发灶切除后,转移灶增长倍速,故术后应及早化疗,以术后7~14d为好,不宜超过术后1月,一般用药6~8月即可。Spipper认为乳腺癌化疗最大杀伤力在6个疗程内。1985年美国国家卫生研究所(NIH)乳腺癌化疗学术进展讨论会上,对乳腺癌保乳化疗提出统一建议:①绝经前,腋淋巴结阳性,不拘雌激素受体(ER)结果,标准对策应予联合化疗;②绝经前,腋淋巴结阴性,一般可不予化疗,但具某些险恶因素者例外;③绝经后,腋淋巴结阳性,ER阳性时,TAM最适;④绝经后,腋淋巴结阳性,ER阴性,可酌情化疗,但不作为常规方法;⑤绝经后,腋淋巴结阴性,不拘ER水平高低,无需常规化疗,但具某些险恶因素者亦例外。

(2)内分泌治疗。乳腺是受内分泌影响的器官。1896年Bentson观察到卵巢切除引起进展期乳腺癌消退,从而首先认识到激素与乳腺癌有关。Pearson报道卵巢被切除的妇女在服用雌激素后乳腺癌可能被激活,确定这是雌激素作用的结果。因而外科通过切除卵巢、肾上腺或垂体治疗复发的或进展期的乳腺癌,而内科根据月经情况采用雌激素或雄激素治疗乳腺癌。自从Jensen(1968)发现人类乳腺癌可能含有ER后,内分泌治疗就变得有的放矢了。ER阳性者,内分泌治疗有效率可达60%。近年来出现新的内分泌药物,常见的有①抗雌激素药物如他莫西芬,它能结合雌激素受体,形成的复合物并无生物学效应,目前已确定为腋淋巴结阳性、ER阳性的绝经后患者的标准治疗方法。②氨基导眠酮,用以抑制肾上腺素类固醇合成;地塞米松抑制促肾上腺皮质激素分泌。两者合用组成“内科性肾上腺切除术”治疗老年人乳腺癌。目前内分泌药物有替代外科切除内分泌器官的趋势。

2. 局部治疗:(1)手术治疗。它是治愈乳腺癌的主要治疗方法,但因种种因素,对手术方式的选择目前仍存在较多争论。由于乳腺癌曾一直被认为是一种局部病变,导致产生仅以切除肿块、继后不断扩大局部切除范围,企图达到治愈目的的观点。直至1894年运用Halsted根治术,其疗效较前明显提高,故而才成为近百年世界治疗乳腺癌的经典术式,近30年曾发展为扩大甚至超根治术,但后者不久即因手术患者死亡率高、合并症多、生存率降低而被弃用。由于对乳腺癌自然病史和全身治疗重要性的新认识,促使人们重新考虑局部治疗的目的。乳腺癌局部治疗也是很重要的,有相当一部分乳腺癌呈局限性,尤其对大多数已确定为侵袭性癌的病人,彻底的局部治疗可防止残留肿瘤复发和转移而治愈病人。因此,Halsted根治术现仍在使用,病灶位于中央及内侧者,也可考虑扩大根治范围。随着乳腺癌诊疗技术的提高,早期病例的增加,人们提出了全身治疗和局部治疗同样重要的观点,缩小手术范围,避免影响患者精神和身体致残的治疗已渐为多数学者所接受。近20年,对早期乳腺癌开展改良根治术(或仿根治术),采用保留胸大肌、胸小肌的Anchin~closs法和保留胸大肌、切除胸小肌的Patey法,并要求保留胸前神经。保留胸肌,使术后患者外形完美,且便于乳房成形。近10年来,保留乳房手术加放射(BCS-R)治疗选择性应用于临床I、II期乳腺癌患者已由临床试验日趋

发展。新近由 ronesi, NSABP 及 NCI 进行的 3 项对照研究证实, 对于临床 I、II 期乳腺癌局部切除+根治性放疗是安全的和充分的局部治疗方法。在中国, 目前大多仍采用传统的根治术, 但应用改良根治术的报道日益增多。不论改良根治术一式或二式, 均要求完全切除乳腺组织, 清除腋淋巴结。由于改良根治术保留了胸肌, 是否影响手术的彻底性及淋巴结清除范围, 是否能与根治术相仿, 正在全国进行大样本临床随机分组试验, 其结果尚有待观察。一般主张改良根治术适于临床 I、II 期患者, 但亦有报道用于临床 III 期者。对于临床有明显淋巴结转移者, 为了彻底清除淋巴结, 仍以传统根治术为宜。临床 I、II 期病灶位于中央及内侧者, 用沈镇宙等提出的改良扩大根治术, 包括改良根治术一式或二式, 同时清除内乳淋巴结及应用胸肌修补内乳部的缺损, 常保持较好的外形及功能。小于全乳切除的区域性手术或局限性手术大多认为适于临床 I 期者, 以及淋巴结无明显转移者。BCSR 治疗, 目前只可在少数技术与设备比较优越的研究单位有计划地进行。(2) 放射治疗。放疗应用于治疗乳腺癌已有较长的历史, 近年来由于放疗技术设备的日益改进, 它已成为乳腺癌局部治疗的主要方法之一。但在中国, 由于早期病例较少, 大多患者希望手术根治肿瘤, 对保留乳房不迫切, 故此法暂难以推广。目前一般认为, 对 III 期晚癌或炎性乳腺癌患者术前放疗, 可提高手术切除率, 减少术中血行扩散, 放疗后 1~2 周可手术。对 II、III 期术后患者放疗, 可降低局部及区域淋巴结复发, 但不能提高生存率。此类病人治疗失败的主要原因是血行转移, 因而应先化疗, 对高危复发者再予以放疗。(3) 心理治疗。据 MC Guire 报告, 乳房切除后, 1/3 以上的妇女有中度的或重度的焦虑、抑郁和性功能障碍等问题, 需要精神病学医生诊治。另有 22%~60.8% 的妇女术后出现乳房幻觉, 其中至少有 8%~10% 的患者最终寻求乳房重建术。精神并发症通过医护人员的开导和乳房重建可获缓解, 确属当代乳腺癌治疗中的新进展。安徽医科大学附属医院乳腺癌协作组, 曾为 5 例早期乳腺癌的年轻女性施行保留胸肌的功能性根治术中行 I 期全乳再造, 术后均辅以综合治疗, 随访 2 年余, 健康状况和一般精神面貌犹如常人, 并能从事一般的日常工作。积极的心理治疗, 可解除精神压抑, 帮助患者增强战胜疾病及生活困难的信心, 并能降低乳腺癌术后复发率。

参考文献

- 1 李树玲. 国外医学(肿瘤学分册), 1982, 5: 208~209
- 2 Me Gibbon B M. Atlas of Breast reconstruction following mastectomy. Baltimos: universty park press, 1984, 1
- 3 NIH. JAMA. 1985, 253: 3461~3462
- 4 Forrest APM. S. G. O., 1986, 163(1): 89~91
- 5 Blamey R W. Bailliese Tindall, 1986, 104~105
- 6 Lippman M E. cancer. 1987, 60(8): 2050~2052
- 7 Ponten J. Acta on col., 1990, 29: 325~327
- 8 口外医学(肿瘤分册), 1990, 2: 199
- 9 沈镇宙. 实用外科杂志, 1991, 11(8~9): 417~418
- 10 曹月敏, 等. 乳腺外科学. 石家庄: 河北科技出版社, 1991, 169~196

(安徽医科大学第一附属医院俞士炳教授撰)

卵巢癌的腹腔化疗 intraperitoneal chemotherapy on ovarian carcinoma

针对腹腔腔内的腹膜表面出现种植性转移灶或手术时可能存在的遗漏的癌细胞, 向腹腔灌注抗癌性药液, 以求达到治疗和预防复发的一种方法。

腹腔内给药, 始于 20 世纪 50 年代末和 60 年代初, 在动物中(狗、鼠)已广泛进行各种药物动力学的研究。60 年代中期应用于人体。

卵巢癌, 尤以上皮性的卵巢癌, 嗜腹腔腔内播散性种植转移。腹腔内灌注抗癌药液, 可使腹腔中的药浓度较血浆中的药浓度高几倍乃至几百倍(表)。腹腔化疗所致的全身性毒性, 也较全身给药(肌注、静注)为低。因此, 对卵巢癌腹腔内给抗癌药液具

有生物学和药理学上的合理性。长期以来, 由于灌注技术的不佳, 治疗中常并发腹腔脏器的粘连、包裹, 导致抗癌药液不能均匀分布于腹腔, 疗效不佳; 同时, 肠道广泛粘连, 引起肠梗阻, 为卵巢癌致死的原因之一。故此项疗法仅作为一辅助手段局限应用于治疗卵巢癌合并腹水者。

自 1978 年以后, 由于抗癌药物的发展, 腹腔灌注抗癌药动力学的研究和灌注工具的改进, 使卵巢癌的腹腔化疗有可能成为一种有效的治疗方法。研究表明, 抗癌药物要在腹腔内均匀分布, 必需有足够的液体注入腹腔才能达到目的。通常要达到横膈水平的液体量约需 2L 左右。同时, 业已证明, 大分子量和低脂溶性的抗癌药, 在腹腔内的廓清率较全身慢。这就为腹腔化疗时选择能使腹腔内保持较长期高浓度的抗癌药, 提供了理论根据。70 年代中后期, 改进了腹腔灌注输送工具, 使卵巢癌的腹腔化疗有了进一步发展。如应用 Tenckhoff 透析导管, 可保证药液的灌注通畅, 具有防腹腔液的渗漏、导管脱出和可作腹腔液内癌细胞的动态观察等优点。但仍存在管端外露、感染等弊端。应用 Port-A 管能将管端埋于皮下, 灌注时可经皮肤穿刺将药物注入自动关闭的隔囊, 再经导管进入腹腔。此管可较长期埋植, 感染较少, 深受欢迎。但在化疗结束时, 需施手术才能将导管取出。

表 1 卵巢癌腹腔化疗时腹腔内和血浆中的药物浓度

| 药 物    | 腹腔浓度      | 血浆中浓度 |
|--------|-----------|-------|
| 氮甲嘌呤   | 7~303     | 1     |
| 5-氟尿嘧啶 | 111~7 852 | 1     |
| 阿霉素    | 474       | 1     |
| 苯丙氨酸氮芥 | 63~93     | 1     |
| 顺氯氨铂   | 21~100    | 1     |
| 阿糖胞苷   | 300~1 000 | 1     |

目前, 由于所有的抗癌药物对腹腔内卵巢癌灶的渗透深度均不足, 据研究, 阿霉素的渗透深度约为癌灶表面的 4~6 层细胞, 氮甲嘌呤仅能渗透 4~5 层, 渗透力最强的顺氯氨铂其渗透深度也仅达 50 层细胞(约 3mm 厚)。因此, 腹腔化疗仅能控制小癌灶。凡中晚期患者经细胞减灭术后, 残存极小癌灶, 或早期患者术中囊壁穿破, 囊液外溢, 有可能造成术后种植复发的高危患者, 采用腹腔化疗可达到延长生存期或防止复发的效果。但对较大的腹盆腔癌灶, 仍未有足够的资料证实有效。

今后卵巢癌腹腔灌注药物的研究方向为: (1) 寻找抗癌药联合用药的优化方案, 以提高疗效。(2) 在应用高分子量和低脂溶性的抗癌药物治疗时, 加用能增加抗癌药渗透力的药物, 如麦酰胺酶(Glutaminase), 增加抗癌药物的渗透深度, 以治疗较大的腹腔内癌灶。(3) 应用生物活性物质进行腹腔灌注治疗, 如应用白介素-2(IL-2),  $\alpha$ -干扰素和 LAK 细胞做腹腔腔内灌注, 可能成为卵巢癌治疗的有效方法。

此外, 还有利用腹腔灌注温热抗癌药液(43.3±0.3℃), 以加强杀灭腹腔内的癌细胞的作用。

(中山医科大学肿瘤医院妇科李孟达教授撰)

神经病学与精神病学

脑电图 electroencephalography, EEG 凡是有生命的组织都有生物电。脑波是中枢神经系统神经元群的动作电位综合, 其电流极其微弱(约 1/100 万 V)。若将该电流通过头皮电极引出, 经过脑电图机放大 100 万倍后记录下的自发性节律性活动就是脑电图(EEG)。EEG 的研究工作自 1924 年德国 H. Berger 首先描记出人的 EEG 开始。1934 年 Davis, 等继续进行脑电活动的

记录和实验研究。Gibbs发现癫痫小发作典型的3c/s特殊综合波。1936年Walter记录了颅内肿瘤患者的脑电图,作出相当准确的慢波定位。1947年举行了第1次国际临床脑电图学会会议。1950年以后,中国陆续开展了EEG检查工作,目前已普及到县级医院;1960年进行Brager功率谱分析;1986年Duffy开始应用彩色显像管技术。

脑电是通过头皮电极记录下来的脑细胞群电活动。将其电活动的电位作纵轴,时间作横轴,这样把电位与时间的相互关系记录下来便是EEG。EEG的周期、振幅、位相这3种基本特征决定了EEG的节律性和波形。影响脑电图频率(周期)的主要因素有神经元回路的物理性、神经元的不应期、神经元物质代谢速度等。影响波幅的因素有皮层神经元数目及大小、皮层神经元放电同步和去同步化的程度、神经元排列是否一致性、神经元的兴奋性。位相又称时相。在研究EEG时,主要的是观察同一半球不同部位和两侧半球对称部位以同一速度所记录的脑波在同一瞬间的时间关系。影响脑电变化的因素有年龄、精神活动、意识变化、外界刺激、体内生化改变及脑部本身病变等。

异常脑波继发于脑器质性疾病或全身性疾病,特别是中毒、代谢疾病、感染等导致大脑皮质神经元的形态或机能改变,所记录的EEG有波率、波幅、波形、位相及出现形式、反应性的异常而出现各种异常脑波。

1. 癫痫病人的EEG。H. Jackson(1890)首先提出癫痫发作是由于大脑灰质过度的重复放电。因此,EEG不仅对癫痫具有特殊的诊断、鉴别诊断价值,而且对癫痫的治疗、预后的判断均有十分重要的意义。EEG上癫痫放电波形具有特殊的诊断意义,表现有棘波、尖波、棘慢综合波或尖慢综合波,多棘波群、高度失律波及发作性节律波。据统计,75%左右的癫痫病人在发作间歇期EEG都有不同程度的异常,若合并使用一定的诱发试验方法(戊四氮或美解眠的药物诱发、闪光刺激、睡眠诱发等),其阳性率可提高到90%~95%。尤其是对临床诊断困难的非典型癫痫的发作或异型癫痫的诊断,EEG检查起着决定性作用。其次,EEG对癫痫发作分类、癫痫灶定位及与其他发作性疾病的鉴别有相当重要的价值。EEG对不同类型的癫痫的选择药物也有一定的指导作用,如药物的选择、剂量的调整及停药必须在EEG监测下进行。再次,EEG检查对癫痫病人预后估计也有一定帮助。

2. 脑瘤病人的EEG。脑瘤组织本身无明显的电活动,因此在脑瘤组织之上记录下来的是平坦波形,脑瘤周围组织由于肿瘤组织浸润、水肿,EEG记录为各种类型的慢波、慢波等。异常波的出现是(1)脑瘤直接影响周围脑组织;(2)脑瘤间接引起皮层下整合系统的机能障碍、脑脊液循环障碍等的结果。绝大多数大脑半球肿瘤病人都可有不同程度的脑电变化,异常率可高达90%。EEG对大脑半球肿瘤定位准确率可达80%~90%。大脑深部肿瘤、后颅凹肿瘤、中线结构肿瘤等的EEG改变一般为弥漫性的,没有定位价值,还有一部分病人EEG正常。目前脑瘤诊断主要依靠头颅CT及MRI。但EEG检查安全,无痛苦,能反复进行,在门诊对脑瘤病例筛选及脑瘤术后病情动态观察颇有价值。

3. 脑外伤患者的EEG。脑外伤常可引起一过性的或较长时间的EEG改变。其异常程度一般和损伤程度有关。脑外伤时受伤部位、外力种类、方向和强度、脑组织损伤程度、意识障碍有无等均可影响EEG。脑外伤时,EEG有助于(1)脑震荡和脑挫伤的鉴别;(2)闭合性颅脑损伤、脑损伤部位的定位;(3)鉴别是器质性的还是功能性的;(4)外伤性癫痫的癫痫灶的确定;(5)颅内血肿诊断。目前对脑外伤病人的判断与确诊仍以头颅CT及MRI为主。脑电图对脑功能改变、外伤性癫痫的诊断仍有一定独特之处。

4. 脑血管疾病患者的EEG。脑血管疾病患者的EEG一般无特殊性改变,但急性期的和经过两周以上的慢性期病人的EEG有显著性差异;另外,脑出血和脑梗塞患者的EEG有一定区别。通过随访观察,EEG在脑血管疾病的诊断、预后判断,特别是对TIA发作、脑梗塞发病24h内EEG阳性改变及与脑瘤等有

关疾病的鉴别方面仍有一定临床意义。脑血管疾病的定位诊断仍靠头颅CT及MRI。

5. 其他。中枢神经系统感染、脑变性疾病、各种原因引起的脑病等病人的EEG都可有不同程度的改变,但缺乏特异性,对病因鉴别无明显临床价值。但是,结合病史和相关检查,均能反映出病因对脑机能影响的程度,及脑部病情的演变和转归。因此也可作为观察疗效、判断预后的指标之一。

脑电图近年来的发展有:(1)皮层电图:在开颅手术中把电极置于大脑皮层表面所引导出来的电活动。常用于癫痫病灶的外科手术治疗等。(2)深部电图:在开颅手术中把针电极直接插入皮层下或深部结构所记录到的电活动。常用于癫痫、脑瘤、锥体外系手术。近年来由于计算机的发展,从头颅全部记录的电极中提取一定时间内的脑电位信号,利用计算机分析及成像技术画出相等值的分布图,称脑电位分布图(BEAM)。BEAM应用于癫痫、脑瘤、脑外伤、脑占位、痴呆等病变的诊断。其优点为直观性强、敏感性高,通过FFT作频谱分析,按频率重新组合,尤其对散在低波幅慢波的发现优于目测。对某些CT、MRI不能明确的疾病(如脑血管病、脑外伤等)病人,BEAM可以发现异常及定侧、定位。另外还有可作定量分析,可进一步作统计学处理等优点,但目前尚有一些不完善之处,如不能识别棘波、尖波;腔隙性梗塞无异常改变,不能定性及不能识别正常变异,有待进一步研究。(3)动态脑电图监测系统的临床应用:自1973年对第1例癫痫病人连续24h应用动态EEG监测以来,经过10年多的迅速发展,临床动态EEG监测系统技术更加完善。一系列文献报道证实,长时间连续动态脑电监测系统,对癫痫的普查研究、临床分类及鉴别诊断是一种理想的检查手段。由于动态EEG的应用,对癫痫发作和睡眠障碍病人能及时做出明确诊断,为这类疾病的有效治疗提供可靠的客观依据。(4)动态EEG对新生儿癫痫发作的研究:目前认为,对新生儿癫痫及时做出诊断是非常重要的。新生儿癫痫性脑电图具有两种基本形式,一种是突然开始的节律性棘慢波,另一种是表现为发作性 $\alpha$ 频率和 $\theta$ 频率的节律性活动波。近来大量文献报道,新生儿由于窒息所造成的癫痫发作及亚临床型癫痫发作在临床上十分常见。大多临床发作为非典型的或似是而非的,其临床体征和脑电图记录波型活动都不同于一般儿童及成年人,给新生儿癫痫临床诊断带来很大困难。所以依靠动态EEG连续记录电生理活动,对于及时做出临床诊断显得非常重要。(5)动态EEG用于癫痫儿童智力和行为的研究:在主诉有呆厥、眩晕、头昏的病人中,发现EEG有痫性放电而支持癫痫诊断并不多见,从各种文献报道仅为1%~5%。因此,通过连续动态脑电及心电的联合监测,可以帮助及早做出临床诊断和指导治疗。

随着动态EEG在临床的常规应用,为临床医生对早期癫痫病人做出诊断提供了信息和方便,也使癫痫疾病的临床分类更加准确,从而得到有效的药物以治疗和控制在癫痫的临床发作及亚临床型发作。同时在新生儿早期应用动态EEG监测亚临床型发作,对提高人口素质、贯彻计划生育的基本国策具有实际的社会效益和经济效益。

#### 参考文献

- 1 冯应琨编. 临床脑电图学. 北京:人民卫生出版社,1979,8
- 2 黄远桂,吴声伶编著. 临床脑电图学. 西安:陕西科技出版社,1982
- 3 Ableitung and Beschreibung des Kindlichen EEG W Zackschaerdt verlag München, Bern Wien San Francisco  
(安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

**脑诱发电位** evoked potential EP 人脑的电活动分为自发性脑电和诱发性脑电两部分。脑电图所记录的是脑的自发节律性活动,而脑诱发电位(BEP)是机体在特定刺激条件下所引起的脑电活动,它与刺激信号有严格的时间关系。脑诱发电位的波幅很低(0.5~1 $\mu$ V),因此全部波淹没在自发性脑电活动之中(一般



脑电电位为50~100 $\mu$ V)。1875年,Caton首先从兔脑皮层上记录到由兴奋刺激引起的诱发电活动。1947年,O'anson把诱发电应用于人。60年代起利用计算机的叠加技术把诱发电作为信息从脑的高波幅脑电活动(作为噪音)中抽取出来加以分析和研究。BEP是继脑电图和肌电图之后临床神经电生理的第3大进展。某些疾病如病史和体征不能确定诊断时,BEP能检出感觉系统的功能异常;在怀疑有脱髓鞘疾病时,BEP能检出多发灶和有助于病变的定位(如脊髓、脑干和视觉通路上病变的定位)及重症病人的监护及脑死亡判断等。

诱发电位(EP)和事件相关电位(ERP)目前尚无公认统一的分类及命名。临床常用的只限于躯体感觉诱发电位(SEP)、听觉诱发电位(AEP)、视觉诱发电位(VEP)。另外,SEP中的三叉神经EP(SEP)多分开对待。近来有按刺激后诱发电位的潜伏期进行分类的。SEP中各种成分都有不同潜伏期,按潜伏期的长短不同可分为短潜伏期EP(AEP<10ms;SEP上肢刺激正中神经<25ms,下肢刺激腓后神经<45ms)、中潜伏期EP(AEP1~50ms,SEP一般为25~120ms)和长潜伏期EP(AEP50ms以上;SEP为120~500ms)。短潜伏期EP多属于皮层下起源,长潜伏期EP多起源于大脑皮质。EP每个波幅的潜伏期代表神经冲动从刺激部位至该波峰发生源处所需的传递时间,因此潜伏期长短主要取决于感觉通路的长短及突触数目的多少和神经传导速度。

1. 短潜伏期躯体感觉诱发电位(SLSEP)。SLSEP在临床应用中具有3个特征。首先是反应的形式恒定,其次反应有一定的空间分布范围(必须在躯体感觉系统的通路上才能记录到),第三是刺激有明显的锁时关系(time-locked),即SLSEP各波有相对固定的潜伏期。

SLSEP目前在临床上得到广泛应用,(1)对周围神经病变有很重要的诊断价值。如多发性神经炎、嵌压综合征、周围神经损伤及再生、臂丛及颈神经根外伤性病变、颈椎病(神经根或伴脊髓病损)。目前开展的有脊髓诱发电位(SCEP)。(2)中枢神经系统局灶性病变:脊髓病损(脊髓空洞症与髓内肿瘤)、脊髓外伤、脑干或丘脑病变。(3)大脑半球病变时,SEP检测以耳垂为参考,对中央沟前后部病损定位有一定价值(Mauguiere, et al, 1983; Desmet & Bourguet, 1985)。(4)神经系统弥散性疾病:如Charcot-Marie-Tooth disease及Friedreich共济失调、橄榄-桥-小脑共济失调(OPCA)。多发性硬化(ms)时SLSEP异常率较高,能发现临床不确切的病灶和发现亚临床病灶。配合MEP和CSF头颅CT及MRI检查,可以提高阳性诊断率及准确性,但必须结合临床。另外对MS治疗疗效判断及预后均有一定意义。(5)对术中监护、昏迷预后判断及脑死亡诊断也有十分重要价值。

2. 脑干听觉诱发电位(BAEP)。在短声刺激后10ms内,在颅顶电极和给声刺激耳乳突电极之间能记录一系列恒定的反应波(Jewett & Williston, 1971),这些波分别为:I波与听神经颅外段电活动有关(动作电位);II波,为听神经颅内段的电活动及耳蜗神经核神经元树突突触后电位;III波,与内上橄榄核或耳蜗核电活动有关;IV波和V波,与外侧丘系神经核群的电活动有关,V波可能尚与下丘的中央核团电活动有关。BAEP目前应用于听神经瘤和其他小脑桥脑角肿瘤诊断,MS诊断及协助临床做出鉴别诊断,AEP是不可缺少的手段;其次,对脑干病变、脑变性、代谢性疾病、小儿智力发育状况、OPCA诊断及临床和术中监护、昏迷预后判断、脑死亡诊断也有一定价值。近来对中潜伏期慢反应、迟反应的发生源及实际意义进行探索。

3. 视觉诱发电位。枕叶皮层对视觉刺激产生的电活动可以用头皮电极检出,称视觉诱发电位(VEP)。正常人从O<sub>2</sub>和枕外粗隆记录出的典型的视觉诱发电位(PRVEP)是由三相复合波所组成。被命名为NPN的复合波,其中间的阳性波峰最明显最稳定,P波是NPN的代表波成份(各波潜伏期:N<sub>75</sub>、P<sub>100</sub>、N<sub>145</sub>)又称P<sub>100</sub>。VEP临床应用:于视神经炎和球后视神经炎的诊断、MS诊断(意义同SEP和AEP)、弥散性神经系统病变诊断、脊髓疾病及视路病变、癫痫的诊断和鉴别诊断,在眼科常用于视功能的

客观测定、Leber氏视神经萎缩等诊断。目前VEP开展半视野和1/4视野检查及P<sub>300</sub>测定相关电位、期待波等检查,都有一定前景。

#### 参考文献

- 1 Stockard J E, et al. Normal variation as a function of stimulus and Subject Characteristics Arch
- 2 Baumgartner J, Epstein cm Vfloantay alteraion of visual evoked potentials. Ann Nerol, 1982
- 3 Francisco G S, et al. Epidemiology, In: McDonald wl, silberg pH eds. Multiple sclerosis London Butternorths, 1956
- 4 潘映福,主编.临床诱发电位学.北京:卫生出版社,1988.8  
(安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

#### 脑电图的进展与睡眠疾患 advance of EEG and diseases about sleeping

人类的大脑发出的生物电流是十分微弱的,用真空管放大100万倍,才能从阴极示波器上窥见,再通过电磁感应作用使直流电改变为交流电,再通过多级放大,把电能变为机械能,才能描绘在记录纸上,做为永久性记录,这就是脑电图。脑电图供临床医生分析研究,对脑的疾患能提供诊断依据,尤其是对癫痫患者的诊断、疗效评价及预后有独到的功效。

1975年Caton首先以电流计从兔及猴的大脑皮层描记出直流电位和记录到动物在睡眠时及死亡前脑电活动的改变。1924年Berger首创通过在完整的头皮上安放电极描记出人类的脑电活动,他发现这些电活动来源于大脑皮层神经元,而与血管和结缔组织无关,但与年龄、感觉性刺激和身体生理生化改变有关,而表现出差异。1936年以后脑电图学在全世界范围大有发展,开始为医学临床和科研服务。1947年成立了国际脑电图和临床神经生理学会,1949年出版了专科杂志。新中国成立后,在南京精神病防治院首先设立脑电图实验室;其后北京协和医院于1955年成立脑电图实验室,并于1957年由冯应珉教授受卫生部委托开办了主治医师以上脑电图训练班,到1991年止,共培养400多名学员,成为全国各地脑电图专业的骨干。由于上海医疗器械厂自50年代开始生产脑电图仪,继之河北邯郸市也生产脑电图仪器,河南郑州还研制成手提式脑电图仪,现在,脑电图技术为临床服务已普及到各省市县医院及职工医院。为了培养脑电图专业人员,1980年冯应珉教授编写出版了《临床脑电图学》。在中华医学会大力支持下通过广大脑电图专业人员的共同努力,1983年成立了北京脑电图学组,于1986年成立了以冯应珉、周孝达2教授为首的全国脑电图学组,每两年组织学术交流会1次,已先后在青岛(1987年9月)、南京(1989年10月)、成都(1991年8月)开会,到会均300多人,发表论文近百篇。

脑电图的临床应用 人自出生到19岁,脑波的波率按年龄的增长而增高,波幅则相应降低,它与神经髓鞘形成和大脑发育重量增加而生理功能逐渐复杂有关;到50岁以后则波率又变慢, $\alpha$ 活动减少, $\beta$ 与 $\delta$ 活动回升。早在1929年,Berger就发现人的脑波有8~13波/s的 $\alpha$ 波及13~30波/s的 $\beta$ 波。1936年Walter发现0.5~3波/s的 $\delta$ 波;Walter和Doyey于1944年又发现3~7波/s的 $\theta$ 波。80%的健康成年人的脑波是以 $\alpha$ 节律为主的,只有6%的人以 $\beta$ 节律为主,低波幅脑电图只见于10%的成年人。

1. 正常值每个实验室都应有自己规定的正常值。北京脑电图学组1983年成立后由33个单位协作,主要有协和医院徐敬琴、解放军总医院曹起龙、神经外科研究所谭郁玲、北医大一附院吴逊、北京军区总医院李济德,在冯应珉教授指导下经两年的努力,由电子计算机分析统计,共完成2357例健康人各年龄组脑电图的测量,是当前国内外观测例数项目最多的一组资料,结束了中国脑电图工作者只能依靠1939年LindsDey300例儿童脑电图正常值和1943年Gibbs1000例成人脑电图正常值做标准的历史,也为国际同行提供了一组数字较大(45万多数据)的参考资料。该资料发现儿童青少年脑波发育有3个加速期:6~7岁,

11~12岁,15~16岁(1961年上海刘世楹提出有两个加速期:6~7岁及12~13岁);此3个年龄组的人 $\alpha$ 波率增高快,慢波减少快,此3个加速期均为学习强度大的阶段,说明脑子越用发育越好,故提出加强幼儿教师培养是智力开发努力的方向。同时发现女孩脑波发育在双极导联表现早于男孩子1~2岁(女10~11岁,男12~13岁达10Hz为其主要脑波频率);但女性脑波衰老也早于男性,如女50岁、男60岁有2.5%的人降至8Hz,并为其脑波主要频率。而20~45岁脑波最好,男女无差别。该组资料还与国外有关资料作了对比,已作为中国青海精神病院及北京空军医院论文的对比资料。

2. 为运动医学服务。如《中国女排运动员不同负荷自行车运动时脑电图研究》,《心理调节放慢呼吸脑电图功率谱能量变化》以及《竞赛运动员不同负荷EEG与PWC<sub>170</sub>机能试验》等均为中国运动员的挑选、训练强度及医务监督等提供了客观的指标依据。

3. 脑电图的诱发试验。(1)睁闭眼试验:早在1930年Berger即发现受试者在暗室睁眼时可使 $\alpha$ 波消失,且在顶枕部出现 $\beta$ 波,故睁闭眼试验能显示出功能正常与否。(2)过度换气:当描记脑电图过程中令患者每分钟深呼吸20~30次共3min,儿童可出现高波幅的 $\theta$ 波及 $\delta$ 波,谓之 $\delta$ 反应属正常现象,10%的成人有之,称为脑电不稳;癫痫病人则可出现棘波尖波及棘慢波综合波。(3)间歇性节律性闪光刺激:1934年汪敬熙以重复闪光刺激猫的视网膜使猫产生与闪光刺激频率相同的动作电流。Adrian和Matthews(1934)首先发现用每秒10~20次的闪光刺激频率可使人的枕部 $\alpha$ 波节律同化,或为闪光刺激频率的一半或一倍等。从此间歇性节律性闪光刺激被运用于临床作为活化试验之一。观察其能否出现节律同化,是否对称,癫痫病人则可出现肌阵挛或抽搐发作。(4)睡眠诱发:早在1947年Gibbs就强调睡眠可诱发癫痫放电。有少数癫痫病人(约10%~20%)于抽搐发作的间歇期脑电图正常,但夜间睡眠中尤其在轻睡I、II期睡眠中可出现高波幅的尖波、棘波及棘慢综合波,尤其多见于夜间犯病的病人。Gibbs曾报道他们的研究资料,发现500名癫痫病人中在清醒时癫痫放电只见于36%的病例,而在睡眠时脑电图的阳性率可提高到82%。

4. 1964年冯应珉等首创改进的蝶骨电极。以针灸用2寸针代替涂漆的腰穿针行蝶骨电极穿刺,操作简便、安全可靠,能将颞叶癫痫的脑电图阳性率由16.13%提高到30.33%,且能鉴别其是原发性的还是继发性的。

睡眠疾患 近10多年来,国外对睡眠疾患研究较多,北京协和医院从1982年开始研究睡眠呼吸暂停综合征,利用脑电图监测发作性睡眠病则始于1986年。

1. 睡眠呼吸暂停综合征。近10多年来随着睡眠与呼吸生理及脑电生理研究的进展,使人们逐渐认识到睡眠呼吸暂停过长、频繁发生,可导致低氧血症和高碳酸血症,轻者晨起头痛头晕、嗜睡、记忆力下降;重者则昏睡、意识不清,甚至呼吸衰竭而死亡;婴儿可致猝死。北京协和医院从1982年开始利用脑电图仪进行多导监测夜间睡眠(测眼动图、脑电图、颞肌电图、鼻式呼吸、胸腹式呼吸、胫前肌电图、心电图及同步监测血氧饱和度)以诊断有无夜间睡眠呼吸暂停综合征及其分型。诊断标准:Guilleminault等1978年的诊断标准:(1)呼吸暂停10s以上为呼吸暂停;(2)在夜间7h的睡眠中(包括快速眼球转动期及非快速眼球转动期即REM及NREM)至少有30次以上的发作。分型:(1)阻塞性睡眠呼吸暂停为鼻及口腔气流停止,胸腹式呼吸存在。此型占绝大多数。(2)中枢性睡眠呼吸暂停为鼻及口腔气流及胸腹式呼吸同时停止。(3)混合性睡眠呼吸暂停为开始出现中枢性的,随后又出现阻塞性呼吸暂停。

诊断低通气的根据:呼吸气流较正常振幅下降50%,同时伴有血氧饱和度下降4%。

2. 发作性睡眠病。系不可抗拒的睡眠,可于走路、吃饭甚至骑车、驾车时入睡,酿成大祸。在清醒脑电图中 $\alpha$ 波很快被睡眠的慢

波所代替,而疲乏思睡时的 $\alpha$ 解体、驼峰及顶部尖波很少,即睡眠潜伏期很短。睁闭眼试验时可出现 $\alpha$ 倒错现象。为严格诊断发作性睡眠病的标准,北京协和医院呼吸睡眠实验室于1986年开始开展了多次小睡潜伏期时间的测定,测其平均睡眠潜伏期的时间,成年正常人平均睡眠潜伏期时间大于10min,无REM睡眠;而患者平均睡眠潜伏期时间为5~10min即为嗜睡;小于5min并出现1~2次REM睡眠者为发作性睡眠病。

#### 临床脑电生理检查的新进展

1. 自发脑电检测。迄今已有近70年的历史,是检测人脑生理、病理变化的重要手段。由于能较长时间地描记脑电图及可运用睡眠及各种药物诱发,可进行脑电变化的动态观察,特别对各类癫痫的特殊病理波及其阵发状态均可进行直接观察,故是当前临床常规检测手段之一。

2. 诱发电位检测(EP)。是指神经系统在接受各种外界刺激后所产生的特定电反应,在中枢神经系统及周围神经系统的相应部位所检出的与刺激有临时关系的电位变化,有其定量的及精确定位的特点,故对一些疾病较常规脑电图检查有较大的效果,在诊断及研究神经系统各部位神经电生理的变化方面起到重要的作用,现已有体感诱发、视诱发、听诱发等检测方法服务于临床。

3. 运动诱发电位。是1985年Barker's经颅采用电刺激,或磁刺激运动皮层,从肢体远端记录运动系统的动作电位,以测定中或周围的运动传导功能。

4. 脑地形图检测(BEAM)。始于60年代,到70年代发展迅速。本技术通过计算机分析及成像技术,将脑电信号在一定时间内提出后,画出相等值的彩色头形分布图,并将脑电信号通过时空空量分析,显示各频段每一导联的绝对的及相对的功率谱及能量直方图,以反应大脑各部位的机能变化。

5. 对脑电的监测手段。(1)磁带记录:一般采用可携式盒式磁带(AEEG),贮存来自头皮并通过差分前置放大器信号,可贮24h的信号。(2)遥测脑电录像(TEEG-VR):又名闭路电视脑电图(CCTV-EEG),即在病人身上带有前置放大器、导联选择器及编码仪,可将脑电信号转变为数字信号,通过50m电缆传送到编码仪及计算机,再将数字信号复原为脑电信号,由脑电仪记录或显示于屏幕上,病人可在一定范围内活动,另有两个摄像机监视病人,广角镜头观视全身,特殊镜头监视面部,最后在1个屏幕上同步显示脑电图及病人情况。(3)多导无线电遥测(Multiplexed radio telameter):通过无线电发射机传递信号,病人可自由活动。

6. 事件相关电位(Event related potential,ERP)。ERPs系人们对各种散离的刺激事件进行信息加工时所诱发出来的一系列脑电活动,于头皮上记录到这种相关的诱发电位变化称之为事件相关电位。它是一种有心理因素参与的诱发电位,这种ERPs变化被认为是观察人脑信息加工过程的第二窗口,它比一般采用的行为测量能更精细地说明神经机理。ERPs是1965年Sutton等利用Oddball方法,于事件刺激后大约250~450ms记录到一个大的正向慢波,故命名为P<sub>300</sub>。目前在临床和科研中最常用的诱发电位即P<sub>300</sub>。据文献报道,ERPs已用于多种工作负荷或工作能力的评定,近几年也逐渐用于临床,如美国空军已用于测试选拔飞行员及预测未来飞行成绩。大泽美贵雄(1989)用此方法对正常青少年的智力发育进行研究。下河内等(1986)用于研究成年人的脑萎缩。Judith(1983)用听、视觉刺激测试痴呆、抑郁症和精神分裂症病人的ERPs,其潜时均有延长。Gummon(1985)测试脑血管意外病人的ERPs,结果表明其P<sub>300</sub>幅度下降明显。

#### 参考文献

- Guilleminault C. Science, 1993;18:856~858
- 冯应珉. 临床脑电图学. 北京:人民卫生出版社,1980.1
- Guilleminault C. Sleep and waking disorders, indications and techniques, Menio park Addisonwestleg publishing CO. Medical/Narsing division. 1982,183~209
- 徐敬琴,等. 北京市脑电图学组论文集(第1集),1984,1~5

- 5 张振民,等.中国运动医学杂志,1984,3~4  
 6 黄席珍,等.中华医学杂志,1987,67~11  
 7 徐敬琴,等.中华神经精神科杂志,1987,20:362~364  
 (北京协和医院徐敬琴副教授撰)

**肌电图** electron gography 肌电图 EMG 是研究或检测骨骼肌的生物电活动,借以判断神经、肌肉的机能状态的一种检测技术。目前 EMG 已成为临床诊断周围神经疾病、神经肌肉接头疾病及肌肉疾病的一项重要方法。

1843年, D. Reymond 用原始的方法记录出蛙肌肉电图。A. Bronk(1929)用同心针电极并借助于示波器研究了单个运动单位的功能。Proebster(1928)首次分析了人的肌肉动作电位,研究了周围神经损伤、脊髓灰质炎病人的肌电图改变,使肌电图的检查技术取得飞跃进步。从这以后,各种异常肌电图相继被发现。自1961年起,在世界各地开展了多种专题肌电图理论研究,开创了肌音图、向量肌电图、单纤维肌电图等多种方法学。近年来肌电图的检查技术已开始微机化。人体骨骼肌由锥体系统及锥体外系统共同支配,使肢体完成某一动作。这两个系统的任何部位发生病变都可引起肌电图改变。周围神经、神经肌肉接头、肌肉发生病变,肌电图也会发生异常改变。EMG 检查虽不能作出病因学诊断,但可以协助临床做出定位诊断、判断病变损伤程度、预后及对相关疾病进行鉴别诊断。

运动单位由前角细胞、轴突以及该轴突支配的所有肌纤维构成,这是随意肌最小的功能单位(Sherrington, 1929)。每个运动单位所含肌纤维的数目(神经支配化)在各肌肉之间差别很大。早期应用多导电板进行的实验表明:各运动单位的所有肌纤维多呈圆形区域分布,其直径为5~11mm(Buchthal 等, 1957)。

正常肌电图插入电位正常时限为300ms,当被检测肌肉完全松弛时EMG呈电静息。如出现自发电活动(纤颤、正相束颤电位)均为异常。在作轻度用力收缩时,可以记录到单个运动单位电位,这个电位不是来自肌肉的单根肌纤维,而是来自成组的肌肉纤维。运动单位电位波幅的高低不只是取决于电极和被检肌纤维的距离,也取决于参与活动的肌纤维数目。因此,波幅是反映肌纤维密度大小的尺度(Buchthal 等, 1959)。由于记录的方法不同,平均波幅的变化范围可能是很大的(正常运动单位波幅100~300 $\mu$ V,不超过5mV),波动在正常值上下40%的范围内不能看作异常,运动单位时限正常为2~10ms,运动单位电位时限差异原因:一方面由于神经末梢的长度不同,因此在一个运动单位中每根肌纤维的兴奋不完全同步;另一方面每根肌纤维的兴奋在到达电极之前所走过的距离不相等(Buchthal, 1955),在不同的肌肉中动作电位平均时限有很大差异,上下波动20%亦为正常。随着年龄的增长,时限亦增长(Buchthal, 1954, sacco 等, 1962)。在正常人肌肉中,运动单位电位大部分是两相或三相,大于4相的电位称多相电位。正常人中多相电位约占5%(Buchthal, 1954)。实际工作中>10%为多相电位增多。正常肌肉在用力不同收缩时,参与运动单位的数目多少不一,肌电图上放电频率不同,可表现为单纯相、混合相及干扰相。其中干扰型的波幅和各运动单位电位的波幅一样,在正常人身上也有很大变化,一般在2~5mV之间,有时可达12mV。

Helmholtz(1850)首次测定了蛙的坐骨神经传导速度。得出公式  $cv = s(m)/t(s) \text{ m/s}$ 。实验观察表明,最快的运动神经  $cv$  必须在大量运动神经慢,而最快的感觉神经  $cv$  变慢只需200根直径在10 $\mu$ m以上的纤维病变即可。因此,感觉神经  $cv$  的变化比运动神经  $cv$  的变化要敏感。引起  $cv$  变慢的原因是粗纤维的丧失、动作电位波幅的降低、起点不易刺激准确及脱髓鞘病变。

$cv$  也明显地取决于年龄,这可能与髓鞘的成熟和神经纤维直径的增大有关。如成年人随年龄的增长而  $cv$  减慢(Melvin 等 1966)。温度对  $cv$  也有明显的影响,温度每降低1 $^{\circ}$ C,  $cv$  减慢1.2~2.4m/s(Henriksen, 1956)。

同步电位,在一块肌肉、一定间距的两点同时引导运动单位

电位时,两种相同的电位同时出现,称同步电位。同步电位为脊髓前角细胞病变的特征电位,一般可将它作为肌原性疾患与周围神经疾患相鉴别的重要的EMG指标之一。

用电生理技术可以记录各种刺激诱发的反射性反应。这些反应的测定具有科研和临床诊断价值。如用电刺激胫后神经引起其支配的腓肠肌诱发电位为M波。另外刺激作用在IA类传入纤维,冲动进入脊髓后产生反射性肌肉收缩而出现H波。该反射由Hoffmann(1918)报告,所以称H反射。其次还有F反射、腱反射等。H反射是脊髓单突触反射,它可以代表脊髓前角运动神经元的兴奋性。

神经原性疾病的EMG 患者临床应用很广泛。神经原性疾病患者,肌肉完全松弛时可以见到各种自发电活动,如纤颤电位、正相电位等及神经传导速度改变。

1. 自发电活动:(1)纤颤电位及正相电位,发生神经原性疾病时,肌肉失去神经支配而产生的自发电位。但必须注意,肌病时有时也可记录到这两种电位,少数正常人的肌肉中也可能出现。纤颤电位常是双相或三相的,时限1~5ms,平均电压100 $\mu$ V。在终板纤颤电位容易和终板电位混淆。必须注意纤颤电位第1相为正相。正锐波几乎是在正相之后常跟一个波幅很低、时限很短的负相偏转。纤颤电位的频率取决于病变的程度和类型。该电位的出现并非神经被切断后立即出现。一般病变距所支配的肌肉越远这些自发电位出现时间也越晚。(2)束颤电位,常见于前根病变及其他神经原性疾病及肌炎(Lambert 等, 1954),正常人也可以出现良性束颤电位。

2. 运动单位电位的改变:神经源性病变的典型EMG表现为电位平均时限延长、波幅增高以及多相电位比数增多。

用力收缩时干扰型的减弱是神经病变的典型表现之一,这是运动单位脱失现象。

3. 神经电图异常表现:周围神经疾患病人的神经电图最主要的表现为传导速度减慢。

总之,因为自发电位不仅见于神经原性损害也可见于肌原性病例,因此自发电位出现不能看作是神经原性损害特有的证据。所以一般常用的“失神经电位”这一概念是不确切的。神经原性病变时,运动单位电位时限延长,电位波幅增高及多相电位增多,但少数肌病也可有这样改变。实践证明,当EMG检查明确为神经源性病变而肌肉活检为肌肉疾病时,EMG结果常常更为可靠。

肌病患者的EMG 主要表现为运动单位电位时限缩短、波幅降低、多相电位增多,出现病理性干扰相及神经电图检查MCV、SCV正常。Talck在1963年描述了肌营养不良者出现的自发电位。

1. 上运动神经元损害时EMG:由于传出冲动发放减少或完全阻滞,EMG不会出现干扰相,运动单位电位电压偏低而时程、波形大致正常。如合并锥体外系统损害,作轻度随意运动时可出现群放发电位。上运动神经损害特异性EMG变化是反射肌电图亢进,如H反射。由于上运动神经元发生病变时 $\alpha$ -运动系统机能亢进,则EMG表现为H反射亢进(H波潜伏期缩短、波幅增高),H/M比值>64%,H波形为多相。另外腱反射亢进EMG表现为后放现象等。

2. 下运动神经元损害时EMG:(1)前角病变:有价值的是EMG出现巨大同步电位,同步试验阳性。另外,可以出现自发电位等改变。(2)神经根病变:EMG有价值的改变是失神经电位是根性分布,但仅可供临床参考。(3)周围神经病变:周围神经病变可分成两种主要类型,即原发性轴突病变和原发性髓鞘病变。病变时EMG表现各有其特点,但在实际工作中很难用电生理方法区别。周围神经EMG最有价值的是运动传导速度(MCV)及感觉传导速度(SCV)减慢。可以借助CV在周围神经损害时改变了周围神经损害程度及再生情况,双重神经支配和异常神经支配的存在感,是神经原性病变主要诊断依据。

3. 神经-肌肉接头病变时EMG作衰减试验阳性,注入新

斯的明后很快恢复,即可作出疾病诊断。

4. 肌肉疾病:EMG是诊断肌肉疾病的不可缺少的重要方法之一。EMG能够反映肌肉的功能状态,区别肌肉萎缩性质,判断某些肌肉的治疗效果及检查遗传性肌肉病的基因携带者。

近年来EMG的发展 (1)单纤维肌电图 SFEMG,Ekstedt (1964)和(Stalbeig(1973)用电生理学及组织化学方法观察了人和动物的运动单位肌纤维的解剖排列,并在单根肌纤维的细胞外用一定技术条件记录出微小随意活动时的动作电位,并且发现jitter(颤抖现象)(Ekstedt,1964)。近年来SFEMG得到了越来越多的重视,尤其是在诊断运动终板的功能障碍方面。(2)多导针电极检查:多导针电极是为确定运动单位的范围(Buchthal,1957)和测量单个峰型电位的空间范围(Buchthal等,1957,Elstead,1961)而进行的检查。(3)经皮采用磁刺激或电刺激大脑皮层及脊髓的中枢运动系统,在肢体远端肌群记录的运动诱发电位(MEP)技术,已成为国际神经电生理界最为活跃的研究领域之一。

#### 参考文献

- 1 刘磊,岳义虎主编,神经肌电图原理,北京:科技出版社,1983
- 2 沈永国编,内科疾病讲座15分册,北京:人民卫生出版社,292~311

(安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

**癫痫** epilepsy 一组临床常见的综合症,其本质是由于神经元异常放电所致,根据异常放电部位不同,其发作表现可为运动性的、感觉性的、精神性的、植物性的等。癫痫发作临床上具有发作性、暂时性、和有再发趋势的特征;癫痫作为临床综合征,同时又具备发作性、异常放电、脑部病变3个共同点。因此,机体急性的或慢性的代谢障碍(肝昏迷、尿毒症性肺病、肺脑、糖尿病等)、心血管疾病(Ⅱ度房室传导阻滞、高血压脑病等)、中毒(雷米封、有机磷等)、子痫、精神性刺激等均可导致惊厥(convulsion)或抽搐。由于这类发作短暂,病因清除发作即可终止,因此不纳入癫痫范畴。热性惊厥有年龄的依赖性,在急性高热性疾病时出现短暂的全身性发作,一般无严重并发症,少数可有暂时性的或永久性的神经后遗症,如偏侧瘫痪——偏侧肌萎缩癫痫(HIE),有人统计,热性惊厥患者1/3有复发,其中部分病人转为癫痫。在一般情况下大多不需要预防用药,预后较好,不属于癫痫范畴。从流行病学角度来看,临床诊断癫痫至少患者发作两次以上才能确诊为癫痫,仅有一次发作尚不能构成癫痫诊断。

癫痫为一种多发病和常见病,在一般人群中患病率约为5%~6%,常在幼儿期和青少年期发病。部分病例由于诊断治疗方面有一定困难,因而严重影响患者身心健康和生命安全,因此目前已成为社会上普遍存在的问题。

癫痫的流行病学调查结果:癫痫发病率(每年每10万人人口癫痫发病例数)在中国6城市(长沙、成都、广州、哈尔滨、上海、银川)协作组(1982)为37(均为两次以上发作),性别无差异,63%病因不明;日本Sato(1964)统计发病率为17.3;澳大利亚Crombil(1960)发病率为100(其中包括单次发作和高热惊厥);美国Hanser和Kurland统计发病率为18。男>女;64%病因不明。癫痫患病率(1000人调查对象中癫痫患者的例数),中国6城市协作组统计患病率为4.4%(1982);日本Sato(1984)患病率为1.5%;澳大利亚、Vrombil(1960)患病率为2.8%;美国Hanser和Kurland(1965)患病率为5%。癫痫发作类型以大发作为常见。起病年龄,我国6城市调查男女两性患者癫痫起病年龄均以20岁以前多见,占患病例数的60.9%,特别是10岁以前的婴幼儿为多,占病例数的35.3%。国外文献也认为癫痫发病以儿童多见。性别:我国6城市调查男、女两性患病率无显著差异( $P>0.05$ ),国外大多数资料表明,癫痫发病率男性较女性高,并分析认为与男性社会活动多、脑外伤机会较多有关。病人死亡率有随年龄增加而减少的特点。Singer(1960)报告资料,癫痫病人死亡率比对照组高2~3倍,美国1963~1967年的癫痫病人死亡

率为每年10万人中11人,我国6城市1982年统计癫痫病人死亡率为9人/10万人。

癫痫的病因学极其复杂。胚胎发育初3个月易受宫内损害,此时期如母体患有风疹、疱疹、巨细胞病毒感染、细菌感染、物理的或化学的物质作用、缺氧、严重营养不良等均可引起婴幼儿脑部损伤致癫痫发作;产时损伤(滞产、急产、早产等)及产时窒息、缺氧均常导致癫痫发作;产后感染(各种脑炎、脑寄生虫)、脑外伤、肿瘤、血管疾病、中毒、缺氧、中枢神经系统变性疾病也是导致癫痫的常见原因。癫痫的遗传问题:据统计,癫痫在普通人群中的患病率为3%~6%,癫痫患者的亲属中癫痫患病率为59.9%。因此,癫痫(特别是原发性癫痫)患者的亲属患病率明显高于普通人群。经统计,血缘关系越近患病率越高,从而说明癫痫是受遗传因素的影响。在脑电图检查方面,有的作者分析认为,失神发作患者的兄弟和后代出现3c/s棘-慢综合波危险率可高达50%,进一步说明癫痫发作和遗传有一定关系。有关遗传方式目前尚无定论,有以下说法:认为原发性癫痫是常染色体显性遗传病,由多种遗传方式引起,属异源性;近年来的学者提出多基因遗传看法,有待进一步证实。

癫痫与脑外伤关系:由脑外伤所致癫痫发作称为外伤性癫痫。因工业、交通事业发展,外伤性癫痫发病率有逐年增高趋势,临床诊断外伤性癫痫要注意以下几方面:(1)癫痫发作和损伤者程度有一定关系,一般认为脑损伤者程度越重癫痫发生可能性就越大。开放性颅脑损伤者发病率较闭合性者高,前者为20%~50%,闭合性者仅0.5%~5%,伤后颅内异物者发病率更高。(2)癫痫发作与损伤部位的关系:大脑皮层运动区、海马、杏仁核的损伤常引起癫痫发作。(3)脑外伤后并发颅内感染、血肿、凹陷性骨折者容易引起癫痫发作。外伤性癫痫发作的潜伏期变异很大,在脑外伤后即刻发作(指伤后2h内产生癫痫)其原因多为颅内出血、颅骨骨折刺激等占外伤性癫痫的比例相对较高。癫痫在脑外伤后1个月以内发生的称早期癫痫,多由于创伤愈合和脑组织反应所致,脑外伤后1个月以上乃至数年发病者,病因多为脑裂伤损伤后脑组织形成疤痕和脑囊肿形成及颅内血肿等,称晚发性癫痫,占外伤性癫痫大部分。外伤性癫痫发病机制尚不清楚,包括有脑外伤后电生理改变、脑血循环改变、脑部疤痕和胶质增生、轴突侧支抑制系统的破坏和顶树突的损伤及大脑皮层生化改变等综合因素。外伤性癫痫发作形式以部分性发作为主,而且发作类型比较固定,脑电图一般检查结果,据统计正常者占30%,异常脑电图为70%,其中局限性异常占异常脑电图的40%。

癫痫与妊娠关系:对妊娠对癫痫的影响这一问题有不同的意见,一部分病人妊娠期才出现癫痫发作,称为妊娠性癫痫,发作病因也是多方面(脑部病变、水、电解质代谢紊乱,内分泌紊乱等)的。另一种病人妊娠前就有癫痫发作。据Knigh等报告34例原发性癫痫患者的84次妊娠中,有45%发作的次数增加,30%没有变化,5%发作减少。在孕期,由于母体各方面的改变,抗癫痫药物血清浓度趋于降低而引起发作次数增加。考虑到妊娠期间抗癫痫药物对胎儿的影响,增加药物量应慎重(最好结合脑电图及测定血浆中药物浓度),癫痫患者妊娠期间服用抗癫痫药物有致畸报道,其中以苯妥英钠为多,其次苯巴比妥、丙戊酸钠和卡马西平较少见。从文献统计,抗癫痫药物导致畸形的危险性并不算大,相反应防止因停药引起癫痫频繁发作的危险。因此,不应劝阻病人放弃治疗。在用药方面要以较小剂量、最小副作用、单一用药为原则。妊娠后须适当增加剂量。胎儿在母体接触苯妥英钠、苯巴比妥或三甲双酮后引起维生素K缺乏会导致新生儿出血性疾病,因此对癫痫病人分娩的新生儿可作常规注射维生素K治疗,以防止新生儿出血,降低癫痫发病率。

癫痫的诊断:包括临床诊断、神经电生理诊断和颅脑影像学诊断等。如癫痫发作典型,仅根据临床有关资料(病史、神经系统检查等)基本可以确立诊断。由于癫痫发作表现极其复杂,尤其是对不典型作者的诊断以及和有关疾病的鉴别诊断(头痛、晕

厥、瘵病、精分症等),单靠临床诊断往往不准确,必须进一步作神经电生理检查,其中脑电图检查是癫痫诊断不可缺少的重要手段。脑电图对癫痫的诊断阳性率为70%,若增加多种活法(过度换气、闪光诱发、药物诱发、睡眠诱发及改进脑电的描记技术——鼻骨电极)阳性率可高达90%以上。脑电图诊断癫痫最有价值的波形如棘波、尖波、棘-慢、综合波、高峰失律、爆发性节律等。少数癫痫患者由于发作次数少,常规描记往往脑电图无改变,因此,对怀疑有癫痫的患者而脑电图正常时,不可轻易排除癫痫的诊断。经过多年来脑电图的临床实践证明,脑电图不仅给癫痫的诊断提供有力的佐证,同时对癫痫的分类、疗效判断、是否增减药量、是否停药等均是不可缺少的手段。目前世界上一些国家癫痫研究中心已不满足于常规脑电图的描记,而积极推行新的诊断措施。如Udel/EEG癫痫监测系统,遥测脑电图录像(TEEG-VR)、携带型盒式磁带(AEEG)等均可实行24h连续监测。这些检查方法有利于鉴别癫痫性发作者和非癫痫性发作,有利于客观记录临床发作者和脑电图发作情况。在复杂部分性发作者和难治性癫痫患者中应加用(QEEG)、功率谱分析(PSA)、脑电地形图(BEAM)等,它们直观性强,能显示部分性发作、异常部位和范围。脑诱发电位在癫痫诊断上处于探索阶段,如视觉诱发电位(VEP)、对光源性癫痫、听觉诱发电位(AEP)对声源性癫痫、体觉诱发电位(SEP)对继发性大脑半球灶性癫痫均有一定的诊断价值。

颅脑影像学技术的发展,大大提高了继发性癫痫的病因学诊断水平,对原发性强直性-阵挛性癫痫患者和儿童良性癫痫患者行头颅CT扫描异常率低。磁共振成像(MRI)在癫痫病因学的诊断中,对于各类器质性脑部病变所引起的继发性癫痫,其异常率高于头颅CT扫描。正电子计算机扫描(PCT)等,对癫痫病因学诊断也有一定价值。以上检查项目费用昂贵,目前尚不能作为癫痫的常规检查方法。

癫痫治疗,包括一般治疗、药物治疗及病因治疗等。一旦确立诊断,即应开始有计划的周密治疗。一般治疗,在长期治疗过程中,同时要维持患者正常的神经精神功能,要让病人对癫痫有足够了解。在生活中保持乐观情绪,树立坚定同疾病作斗争的信心。对控制发作较好的病人,除嘱病人不去危险地方外,一般可和常人一样工作、生活。目前癫痫的心理咨询和心理治疗学正在发展中。儿童癫痫可作为特殊学科,还可以增加生物反馈、行为治疗和环境治疗,与药物治疗紧密结合,以期达到患者全面康复,对癫痫患者还应正确指导生活、饮食卫生及婚姻、妊娠、生育等。关于药物的治疗,一旦癫痫的诊断成立而又无病因治疗时,即行药物治疗。药物治疗仍以单味药物为主。治疗开始前必须正确了解癫痫发作类型,根据不同类型选用不同种类药物。剂量应从低限开始,如控制不住再考虑联合用药。联合用药要注意药物配伍。药物治疗,除要重视用药指征外,还要观察药物疗效及药物副作用。目前开展的抗癫痫药物血液浓度监测,不仅可观察药物浓度变化,而且可以预防服药后副作用发生。服药终止,应根据每位病人具体情况不同而分别对待,要在脑电图严密监测下缓慢试停,必要时应用过渡用药如安定类。

部分发作患者的病因常为脑内存在某种致病灶,因此应针对病因采取相应措施以消除致病灶,其中包括手术摘除脑瘤、畸形血管、外伤或炎症后脑膜疤痕粘连及药物治疗脑寄生虫病(脑囊虫、血吸虫、肺吸虫病等)。癫痫的外科手术治疗应在临床神经电生理医生和神经影像医生密切配合下进行,如脑立体定向术(S、E、G)和脑电立体定向术(S、E、E、G)开展较多。脑立体定位术操作简便,定位准确,破坏性小,无需切除脑叶,对难治性癫痫患者精神症状突出的病例可取得一定的效果。另外,脑深部电极、埋藏电极与胼胝体手术等课题都有一定研究价值。切除局灶性癫痫结构,提高袖摘等研究均取得一定成果。

#### 参考文献

- 1 Sutherland J M, Tait J. H., *Epilepsies Modern Diagnosis and Treatment* CHURCHILL LIVINGSTONE, 1974

- 2 Penry J K. Principles for clinical testing of anti epileptic drugs. *Epilepsia*, 1973, 14: 451
- 3 Levig R H. Valpricate modern perspectives. *Epilepsia*, 1984, 51: 77
- 4 周树森, 编著. 癫痫学. 成都: 四川省科学技术出版社, 1987. 4 (安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

#### 脑性瘫痪

脑性瘫痪 cerebral palsy 简称脑瘫,是指在出生前到出生后1个月内,脑发育时期由非进行性脑损伤所致的综合征,主要表现为持续性中枢性运动障碍及姿势异常。它是儿童时期常见的肢体致残疾病,发生率为1.8%~6%。自小儿麻疹症被控制后,脑性瘫痪患者是肢残疾病康复治疗的重要对象。在中国,脑瘫最常见的病因是缺氧、产伤、低体重出生儿及核黄疸、围产期感染及疾病等,窒息及低体重对脑瘫的影响较对智能低下更密切。急慢性感染进行期、先天性代谢性疾病、梗阻性脑积水等进行性病因而致的运动障碍和智能低下者运动落后均不属于脑瘫范畴。虽然脑瘫患者的病情不进展,但病变的表现随着年龄的增长,继发性萎缩畸形的产生会有改变。

脑瘫是发育早期的脑组织受到损害,常伴有各种其他功能的异常。单纯性脑瘫仅占18.9%。常见的合并症有智力低下、继发性癫痫、语言障碍、神经性耳聋、皮质盲、行为问题、学习困难、精神异常等。尤其是智能低下及癫痫可分别有30%的发生率,对这些并发症必须重视,及时进行相应检查及诊断。但小儿未成熟的脑可塑能力最强,大脑皮层神经元的移行持续到生后5个月才完成,早期颅内出血及脑梗塞病变所造成的损害可经轴突绕道投射或产生非常规的神经突触连系而形成新的功能通道。这些代偿机制只有早期开始并坚持进行运动及智能训练才能实现。同时,早期进行性格行为的干预训练也较容易成功。2岁后神经细胞的发育基本完成,6岁后神经髓鞘的发育基本完成,在此之前如不予治疗,便会丧失最佳的恢复时机。

根据脑组织受损部位、脑功能异常的表现,国际及中国分型情况如下:(1)痉挛型:受损在皮质运动区及皮层下/内囊锥体束传导途径。(2)手足徐动型:受损在基底节。(3)强直型:为基底节损害的另一表现。(4)失张力型:痉挛型的早期表现。(5)共济失调型:小脑损害为主。(6)震颤型:底节或小脑受损。(7)混合型及无法分类型。其中痉挛型占70%,次为手足徐动型。按受累的范围又可分为单瘫、偏瘫、双瘫(下肢重于上肢)、四肢瘫(程度一致)、双重瘫(上肢重于下肢或左右程度不等)、三肢瘫等。为估计病情及治疗,脑瘫的诊断应说明类型、部位、合并症及明确的致病原因、全身其他系统异常。

由于脑损伤的自然恢复期可延长至伤后12~18个月,生后3个月内婴儿的活动大部分不受大脑皮质的控制,所以轻度至中度脑瘫病例在3~6个月时早期诊断较为困难。早期诊断的根据是:(1)母亲妊娠及围产期的高危因素。(2)运动发育落后。(3)新生儿反射异常,或立直反射、平衡反射延迟出现。(4)异常的姿势及肌紧张力。其中肌张力增高者可达88.9%。以(3)、(1)为主。一般4个月时新生儿原始反射应消失,姿势反射应对称。生后6个月异常运动姿势较明显,如不能抬头竖颈、姆指内收、紧握双拳、上肢内旋后展、双下肢伸直或扶持下不能站立等典型的可以诊断为脑瘫,可疑的可诊断为中枢协调障碍(CCD)或脑瘫高危儿,以后追踪观察。至1.5岁后脑瘫较易诊断,3岁后合并症肯定,而学习困难、精神障碍则需在学龄期后才能表现出来。

脑瘫患儿需做如下辅助检查:头部CT,异常率为44%~92%,其阳性率与病因、分型、年龄有关。有颅内出血史者,四肢痉挛性瘫痪,年幼者阳性率高;轻度脑萎缩至2~3岁后会自然恢复,最重要的表现是脑萎缩、脑室扩张、脑梗塞灶及脑膜回缩、硬膜下积液等。少数为脑穿通畸形、小脑畸形、第五六脑室畸形等。基底节病变及髓鞘发育不良、胶质细胞增生等损害,CT显示不良,故阳性率低。同时CT形态改变和神经功能异常不完全相关,临床应注意。头颅核磁共振(MRI)对白质病变显示清晰,阳性率

可靠性较CT优越,但因设备及价格问题不能普及。新生儿期有高危因素的患儿可做头颅B超,它对颅内出血、脑室扩张、硬膜下积液等有较大诊断价值,但对缺氧缺血病变显示性均差,后者可用新生儿行为测试来随诊观察。脑电图阳性率 $>50\%$ ,但无诊断特异性,适用于脑瘫伴惊厥发作的病例,脑电图阴性不能除外继发性癫痫。定期的发育商、智商测定有利于家长和医生合作、坚持训练及作为治疗的监测项目之一。脑干听觉诱发电位运用于听反应迟钝、言语障碍病人,可早期发现神经性耳聋。经颅超声多普勒检查(TCD)可了解颅底血管环及颅内主要动脉的供血情况。对不典型病例可做肌电图及体感诱发电位,辅助诊断。做血芳香脑脂酶(ASA)及血铜蓝蛋白测定有助于和异染性脑白质营养不良和肝豆核变性等疾病鉴别。

脑瘫治疗的目的,除最大限度恢复运动功能外,还要尽量恢复其社会生活能力及劳动能力。因此,治疗脑瘫绝非某一疗法所能完成,它应包括功能锻炼、理疗、装置整形疗法、语言和特殊教育及职业教育。目前国际及国内较多应用的运动功能疗法主要有德国的Vojta法、英国的Bobath法、匈牙利的Peto法。它们的根据是神经生理学及发育学理论。抑制异常的病理体征,异常的运动模式,促进正常机能,正常运动、基本运动的发育。Vojta法最适用于早期婴儿,Bobath法亦可于婴儿期开始,Peto法强调运动和神经的关系,适用于儿童智力较好者,充分发挥大脑的潜力,利用残存的能力来达到适应生活、适应社会的目的。其他如导平疗法、激光治疗、头针针灸、按摩理疗等治疗方法常有助于恢复肌力、肌张力,而不能代替全部功能训练的内容,更不宜因此忽略并发症的诊断及治疗。为提高运动功能训练的疗效,应发展各种训练设备及矫形器具。中国除佳木斯脑瘫中心及北京康复中心外,其他地方这方面设备还很差,还缺乏一个综合治疗的网络系统,这方面还有待于国际交流及进一步的组织完善。脑瘫的药物治疗适用于婴幼儿期,主要是改善脑血流脑供氧、脑代谢、脑组织再生等。可用脑复康、都可喜、尼莫地平、脑活素、维生素等;为改善肌张力过高可用安坦、安定、力奥素等。若伴发惊厥可按发作类型程度分别选药及调整剂量。反复惊厥发作可加重运动障碍及智力障碍,尤应警惕。通过以上治疗,一部分脑瘫患者可以治愈,大部分成轻度残废。但脑瘫的预防是更积极现实的方法。第一要预防围产期的各种损害。第二要预防产后的第2次打击如低血糖、低温、水及电解质和酸厂失衡、缺氧、高胆红素血症、感染等。第三要预防脑瘫患儿的各种畸形及继发性营养发育障碍。

#### 参考文献

- 1 申大光. 国外医学(儿科分册), 1986, 13(3): 122
- 2 李树春. 国外医学(儿科分册), 1988, 15(2): 85
- 3 林庆. 中华儿科杂志, 1989, 27(3): 162
- 4 丁国芳. 国外医学(儿科分册)(儿科分册), 1992, 19(1): 25  
(天津市儿童医院叶露梅主任医师撰; 杨葆真审)

**脑积水** hydrocephalus 正常脑脊液的分泌及吸收经常处于动态的平衡状态。当脑脊液循环发生障碍(通路受阻、吸收障碍或分泌过多), 颅内脑脊液过多地积存于脑室系统, 或有时在蛛网膜下腔内, 多伴有颅内压增高, 称为脑积水。常发生在2岁以内的婴幼儿。成人也可发生, 其表现多为慢性颅内压增高, 但不伴头颅扩大, 而婴幼儿脑积水常伴头颅扩大、脑功能障碍。

病因及分类 根据脑脊液流通情况可分为:

1. 交通性脑积水。是指脑室与脊髓蛛网膜下腔相通的脑积水。其原因可有:(1)脑脊液吸收功能障碍。交通性脑积水多属此情况。多因患儿感染脑膜炎或出生时患外伤性蛛网膜下腔出血, 其后蛛网膜发生粘连, 使蛛网膜下腔、蛛网膜粒及其表浅的血管间隙、神经根周围间隙发生闭塞, 造成脑脊液吸收机能障碍。(2)颅内静脉或脑池发育异常。如先天性两侧横窦及乙状窦闭塞或狭窄, 先天性脑池发育不全也可导致脑脊液回流障碍。(3)脑脊液产生过多。如脉络丛乳头状瘤或脉络丛组织增生, 均可使脑脊液产生过多。

2. 阻塞性脑积水。指脑室系统或其出口处梗阻, 致使部分脑脊液不能流至蛛网膜下腔或脑池, 梗阻以上的脑室系统可显著扩大。产生原因可有:(1)先天性畸形。如室间孔闭锁、导水管狭窄, 第4脑室正中孔和侧孔闭锁, 小脑扁桃体下疝畸形等。(2)炎症后粘连。新生儿或婴儿期患化脓性脑膜炎、结核性脑膜炎及其他脑膜炎, 常是脑积水的原因。(3)外伤后出血。特别是产伤颅内出血, 致使导水管阻塞, 或使第4脑室开口处粘连闭塞。(4)颅内占位性病变、肿瘤、寄生虫囊肿等使脑室梗阻。

临床表现 头颅增大, 头围增加, 常于生时或生后不久就出现, 有的出生时头围即明显大于正常儿, 而大多数患儿在生后数周或数月开始, 头围呈进行性扩展, 前囟大, 张力增高, 患儿因头重颈不能直起, 头皮静脉怒张, 毛发稀疏, 头缝多开, 颅骨变薄, 叩打前囟附近的头盖有破壶音(Malewen氏征阳性), 头颅增大, 脸部相对缩小, 双眼呈落日现象, 婴儿脑积水病程多缓慢, 早期症状较轻, 营养和发育都可能正常, 当进行性发展时, 头围不断扩大, 智力、视力逐渐下降, 肢体活动障碍, 直至卧床不起, 少数病儿的病情可能自然静止或缓解。成人及大儿童发生积水后, 表现为颅内压增高的一般症状, 如头痛、呕吐及乳头水肿等, 无明显头颅增大。

检查 (1)测量头围。正常小儿出生时头颅周径为33~35cm, 6个月时为44cm, 1周岁为46cm, 2周岁为48cm, 6周岁为50cm, 16岁为55cm, 脑积水小儿头围可不同程度增大。测量项目: 周径(最大头围, 乃眉间至枕外粗隆水平的周径), 直径(眉间至枕外粗隆, 沿矢状缝), 横径(两耳乳突面连线)。(2)颅骨X线片。颅骨变薄, 板障结构稀少或完全消失, 血管沟变浅或消失, 脑回压迹可能加深, 但突出的改变为颅腔容积扩大, 囟门增宽。(3)脑脊液酚红(p. s. p)实验。向脑室内注入p. s. p 1ml, 观察其在腰穿时脑脊液出现的时间, 正常时在脑室注药后12min脑脊液出现红色, 如超过30min不出现, 则表示为梗阻性脑积水。(4)脑室造影。对诊断导水管梗阻, 颅内肿瘤特别是脑室系统的肿瘤及交通性脑积水有帮助, 并可准确测量脑室扩大的程度和脑皮层的厚度, 但随CT逐渐普及, 目前此项检查已逐渐少用。(5)CT扫描。可观察脑室系统扩大情况及有无占位性病变, 梗阻或交通性积水均可明确诊断, 同时还可追踪观察分流术的效果。

#### 治疗

1. 手术治疗, 效果不佳。从1898年Ferguson首先提出脑积水的外科治疗方法后至今相继已有20余种方式出现, 但理想的手术疗法是去除病因, 可是病因不易根除, 因此应考虑如何重建脑脊液循环通路。

2. 解除阻塞的原因。如切除引起阻塞脑脊液通路的肿物, 小脑扁桃体下疝畸形可行枕下减压术(切除第①椎后弓)。

3. 减少脑脊液产生。用脉络丛切除术或电烧灼术, 因效果不显著, 死亡率高, 已少用。

4. 脑脊液分流术。主要是重建脑脊液通路, 以达到脑脊液分流的目的。此手术分为颅内分流及颅外分流两种。

颅内分流: 包括沟通侧脑室及蛛网膜下腔的分流术, 如托氏(Torkildsen氏)内引流、三脑室终极造瘘术等。但这两种手术需要脑部蛛网膜的吸收功能正常才能有效。

颅外分流: 目前临床常用者有脑室-心房分流术(简称V-A)、脑室-胸导管分流术(简称V-T)、脑室-腹腔分流术(简称V-P)、脑室-上矢状窦分流术(简称V-S)。这4种手术方法和指征要点和并发症如下:(1)手术指征: V-A适用于各种类型的脑积水, 包括小儿先天性脑积水及肿瘤压迫和炎症粘连所引起的脑积水。但颅内活动性感染及心脏衰竭的病人禁忌手术, 脑室气脑造影术后颅内气体尚未完全吸收者, 暂不宜做手术。V-T适用于各种成人脑积水患者, 因小儿胸导管较细, 故不适宜, 对于有颅内感染的病人, 应先给予大剂量有效抗生素治疗, 待感染控制后方可行分流术。V-P适用于各种原因引起的阻塞性脑积水。V-S适于各种原因引起的梗阻性脑积水或交通性脑积水, 较其他体腔分流更符合生理要求, 并可避免分流术后出现的许多并发症, 尤其可解

决分流术共有的随婴儿生长使导管发生移位的难题。上述分流术必须在脑脊液蛋白正常、脑脊液内红细胞数、细胞数不高时进行,这样才能保证引流的通畅。(2)手术要点:主要材料是利用有活瓣的硅制导管,分3个部分:脑室导管,其头端有数个侧孔可以防止阻塞;心房导管、胸导管、腹腔导管,上矢状窦导管,其末端有控制液体流向的4个裂隙;指压活瓣装置。4种术式脑室穿刺方法相同,穿刺要求轻巧、准确,避免脑室内出血或碎块脑组织阻塞引流管;导管插入深度一般为皮下6~7cm,插入过深则导管触及脑室壁或脉络丛致阻塞管孔,过浅导管滑出室外易引起低颅压。V-A时导管前端位置相当于右侧第三肋骨与胸骨交角处。V-T时主要在于寻找胸导管,并将分流管插入胸导管之内(颈部胸导管位置通常位于颈内静脉外侧)。V-P时腹腔管端应放置在腹腔内,无须固定。V-S时插入上矢状窦的导管深度达到窦汇处,矢状窦刺破口要大小适宜。(3)手术后并发症:①分流管阻塞,脑脊液外溢,切口裂开;②感染,如切口感染或颅内感染、腹腔内感染等均可发生;③颅内血肿,比较少见,主要因脑室穿刺时损伤皮层血管而造成硬膜下血肿,或因突然脑脊液流出过多引起脑室内出血;④低颅压,可能由于脑室内导管插入过浅,脑脊液流失过多造成;⑤癫痫,颅内积气,比较少见。

#### 参考文献

- 1 Wn H L. Surg Neurol, 1982; 17: 432
- 2 任本,考宏盛. 国外医学神经病学、神经外科学分册, 1983, 3: 126
- 3 吕福林,等. 小外科学. 北京:人民卫生出版社, 1990. 235~237

(安徽医科大学第一附属医院王远兴副教授撰)

**脑梗塞 cerebral infraction** 系指由于血管狭窄或闭塞,血供不足而使相应的局部脑组织缺血软化。绝大多数为缺血性梗塞,少数梗塞区伴有出血形成出血性梗塞。按其不同的病因和发病机理,临床上分为脑动脉血栓形成性脑梗塞、栓塞性脑梗塞和腔隙性脑梗塞。其病因和发病机制有动脉管壁损害、血液成分和(或)血液流变学改变、血流动力学异常、心源性的和心外源性的各种栓子所造成的局部脑血管狭窄或闭塞。

**诊断:**脑血栓形成可根据突然起病、数日内达到最严重程度的脑局部损害症状、体征,并且这些症状可归纳为某一血管供血区的脑动脉损害,常无脑膜刺激征、脑脊液检查正常临床多可作出诊断。脑栓塞病人,有急骤起病的局灶性脑缺血症状和原发疾病及栓子来源,诊断并不困难。腔隙性梗塞的综合征临床分为纯运动型的、纯感觉型的、感觉运动型的、构音障碍-手笨拙综合征、共济失调性轻偏瘫等。确定诊断须进行CT或MRI检查,检出梗塞灶的部位和数目,亦可排除出血性可能。

**治疗:**(1)首先为病因治疗。(2)脱水降颅压减轻脑水肿治疗。在脑血管疾病病人,血管闭塞初期,因缺血缺氧而出现脑水肿,所以急性期脑梗塞者使用抗脑水肿药。最近WHO(1989)指出,若脑梗塞者出现嗜睡状态并且进行性加重或有可能出现脑疝患者,应短期应用抗脑水肿药物。一般无明显脑水肿及非进行性脑梗塞,又无意识障碍者,尤其是腔隙性梗塞者则不需应用。脱水降颅压甘露醇为首选药物,静脉滴入后使血浆渗透压迅速增高,组织中的水分回渗入血管,有扩容作用,使血液粘滞度降低,增加脑血流而且还有清除自由基等作用。(3)脑血管扩张剂:早期因梗塞中心区血管麻痹,应用血管扩张剂会引起颅内压综合征,因此以于发病2~3周后颅内压恢复正常、麻痹血管恢复而进入广泛性脑缺血时使用为宜。血压偏低的恢复期脑梗塞患者用血管扩张剂往往引起全身血管扩张使血压更低,可能降低脑血流量,应慎用。常用罂粟碱类、钙离子拮抗剂等。(4)血液稀释疗法:高溶性血液稀释疗法和等溶性血液稀释疗法为目前常用的方法。低分子右旋糖酐为首选。(5)血栓溶解剂:血栓溶解剂常有继发脑出血可能,临床慎用抗凝疗法。目前使用限于进展型脑梗塞者,对于急性脑梗塞者很少应用。(6)脑梗塞恢复期治疗:脑血管

疾病恢复期患者除积极参加功能锻炼外,药物治疗也日益受到重视,对脑功能的恢复和预防复发有一定价值。目前有脑代谢活化剂,其次可用ASA、pss等药物直接活化能量代谢。脑血管扩张剂、血液性能改善剂、根据具体情况分别选用脑活素、脑通、舒脑宁、ATP、胞二磷胆碱、钙离子拮抗剂(尼莫地平)等。(7)预防危险因素的处理见脑出血。

**附:进展型缺血性卒中的治疗:**进展型缺血性卒中是指脑缺血发生后神经功能障碍症状在发病后数小时至数天里进行性发展直至症状固定,约占缺血性卒中的4%~43%。引起病情进展原因很多,由于其病因与发病机制与非进展型卒中有所不同,故决定其治疗的特殊性,成为卒中病人治疗中的一大难题。目前治疗方法有:(1)抗凝治疗:肝素抗凝治疗能否防止缺血性卒中的进展仍然存在争论,但如确定进展的原因为梗塞范围的扩大、反复发生梗塞,侧支循环阻塞、心源性栓塞和高凝状态,肝素抗凝治疗仍为首选治疗方法,多采用持续静注肝素,但必须注意有诱发脑出血危险。(2)纤溶治疗:Meyer等使用链激酶或尿激酶治疗进展型卒中病人,治疗效果均较差,且治疗后出血的危险性增加。(3)血管扩张剂:只要全身血压不下降,血管扩张剂能增加脑血流量。常用钙拮抗剂、前列腺素等。除使血管扩张外还具有改善脑细胞代谢、防止脑细胞缺血的功能。首选尼莫地平,对偏低血压者应慎用。(4)氧疗:进展型缺血性卒中病人的血液氧合作用是降低的,持续性低氧血症可加重脑组织损害、脑水肿形成,因此保持呼吸道通畅、增加通氧功能,高压氧治疗可迅速改善病人症状。(5)抗脑水肿治疗:脑水肿是进展型卒中的常见原因。缺血性脑水肿是一种既有血管源性又有细胞毒性成分的复杂性脑水肿,可采用地塞米松、甘油、甘露醇等。(6)血压应维持在一定水平,不可突然升高或突然显著降低,因此最好将血压控制在患者发病前的稍高水平。

(安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

**脑血管疾病 cerebral vascular disease** 由于多种原因,尤其是高血压、动脉硬化所引起的以脑动脉系统为主的病变。是一种常见病,急性脑血管疾病的发病率、病死率均居神经系统各类疾病首位,且在存活者中致死率极高。脑血管疾病、恶性肿瘤与心血管疾病已为当今人类社会患者死亡率最高的三大疾病。

根据其病因、发病机制和临床表现及CT、MRI将其分为缺血性脑血管疾病(短暂性脑缺血发作、脑梗塞)、出血性脑血管疾病(脑出血、蛛网膜下腔出血)及缺血、出血混合性脑血管疾病。另外,脑血管疾病还可依CT、MRI改变进行以下分类:

1. 有明确血管性器质性脑病者。(1)缺血性=脑梗塞:脑血栓形成;脑栓塞。(2)出血性=颅内出血;脑出血;蛛网膜下腔出血。其他颅内出血。(3)其他、临床难以区别的脑出血、脑梗塞等。
2. 其他:(1)TIA;(2)慢性脑供血不足。(3)高血压脑病。(4)其他。

随着现代科技的发展,医学影像学为脑血管疾病的诊断提供了有力的佐证,从而更好地指导临床治疗。如:(1)CT:在脑梗塞发病24~48h后即可显示梗塞区低密度灶及急性期低密度灶周围水肿带,对梗塞的性质、数目、部位及范围均可提供客观依据。脑出血时,CT在发病后即能显示出高密度影,血肿液化后渐变为低密度影。因此,头颅CT在鉴别脑血管病的性质中有决定意义,从而指导临床治疗。(2)磁共振成像(MRI-CT):它是一项较新技术,在脑血管病诊断方面,对脑梗塞不仅检出率高,检出时间早,而且可检出头颅CT难以检出的脑干及小脑梗塞灶。利用流体效应原理,NMR-CT可准确地测定血流速度及检出血管病变。(3)单光子发射计算机断层成像(SPECT):与CT相比,检出脑梗塞灶时间早,范围精确,图像更清晰,明显地提高缺血性脑梗塞的诊断率。(4)正电子发射断层摄影(PET):对脑梗塞发病后急性期者能明确显示脑功能减低成像,表明PET对脑梗塞的诊断早于CT,对TIA和腔隙性梗塞CT常不能显示TIA和微小腔隙梗塞灶,而PET却能通过病灶局部的r-CBF、

rCMRO<sub>2</sub> 及 rCEF 的改变, 清晰地描出缺血的图像。(5) 彩色三维多普勒诊断: 对狭窄的动脉段可作病变定位, 亦可作狭窄程度估计。通过对颅内大脑供血动脉的狭窄空窄、“盗血”等监测, 了解颅内血管血液动力学情况。(6) 数字减影血管造影(DSA) 是应用数字计算机程序将组织图像转变为数字信号输入储存, 以后可经动脉或静脉把造影剂注入血流所获的第二次图像也输入计算机, 两次数字相减再转变产生一个新的只有充满造影剂的图像。目前已被广泛用于脑血管病检查, 优点是只须作选择性拍片即可获得清晰的血管图像。

(安徽医科大学第一附属医院) 卅世杰教授撰

**脑血管疾病的外科治疗** surgical treatment of cerebrovascular disease 脑血管疾病是多发病, 是人类三大主要死因之一; 在中国, 1979 年 14 个城市人口的主要死因分析中, 脑血管病占 24.1%, 居首位。

50 年代, 各国先后开展了出血性脑血管疾病的外科治疗。近年来, 随着脑血管疾病的诊断仪器设备与手术治疗方法不断改进与发展, 如股动脉插管选择性脑血管造影、数字减影血管造影、CT、显微血管外科的技术及近 20 年来介入神经放射技术(或称血管内神经外科) 的开展与推广, 扩大了脑血管疾病的外科治疗范围, 提高了手术疗效与安全性。

脑血管疾病的外科治疗可分两类: (1) 出血性脑血管疾病, 如自发性脑出血、颅内动脉瘤及脑动静脉畸形等。(2) 缺血性脑血管疾病, 如供血不足引起的短暂性缺血性发作(TIA)、可逆性缺血性神经功能缺失(RIND)、进展性卒中(PS) 和完全性卒中(CS)。

#### 脑血管疾病外科治疗所需的诊断性检查

1. 颅骨平片。可显示动脉瘤或动静脉畸形的钙化灶、颅底棘孔扩大、颅骨血管沟的扩大等。

2. 脑血管造影。是脑血管疾病最重要的诊断方法, 可以借此作出准确的诊断。对考虑为动脉瘤破裂所致而定位不明的蛛网膜下腔出血病人, 为求全面检查两侧脑血管, 现在多采用经股动脉插管行选择性脑血管造影。为了更清晰地观察脑血管形态与病变的所在, 现已可采用电子计算机数字减影机进行数字减影脑血管造影(DSA)。其工作原理是应用数字计算机程序首先将扫描组织图像转成为数字信号输入储存, 然后再将造影剂注入血流后所获得的第 2 次组织图像也转为数字信号输入, 两次信号经过数字相减, 清除相同结构(骨及其他软组织) 的图像, 从而获得单独充满造影剂的血管的图像。其检查方法有经静脉(IVDSA) 的与经动脉(IADSA) 两种, 后者造影剂用量少, 危险性小, 对比好而清晰。

3. CT 检查。一般都应经造影剂增强扫描才能显示动脉瘤与动静脉畸形等血管病变情况, 但 CT 仍不能替代脑血管造影。对于脑出血者 CT 平扫就能很好地了解颅内出血情况, 并可及早与脑梗塞鉴别。

4. 磁共振(MRI) 检查。MRI 以 T1 值不同, 因而对脑缺血及脑出血甚易鉴别。MRI 在脑缺血发作 1~2h 后即可显示改变, 甚至尚可查出甚小的脑干梗塞灶, 大大提高了早期诊断率。MRI 对颈动脉狭窄或闭塞者可利用“流空效应”进行诊断, 且可测定血流速度。

5. 单光子发射计算机断层扫描(SPECT)。SPECT 对脑梗塞灶诊断率高, 且早于 CT 显示, 并可检出 CT 无法检出的缺血区, 且较 CT 多一个检测局部脑血流量(rCBF) 的手段。SPECT 对于动脉瘤、动静脉畸形的检出率略高于 CT 的检测率。

6. 经颅超声多普勒(TCD)。为一非侵入性检测方法, 通过头颅自然孔或颅骨鳞部检查整个脑底部主要动脉血流, 它可以检得颅内、外颈动脉闭塞或狭窄时的异常血流速度与音频特点, 在检测蛛网膜下腔出血后血管痉挛症状的发生、消退及指导治疗时机的选择上有一定价值。TCD 检查脑动静脉畸形, 阳性预测率可达 100%。TCD 也可为缺血区有无足够侧支循环供应提供客观

依据, 借以检测并指导手术。

#### 各类脑血管疾病的外科治疗

1. 颅内动脉瘤。较多见, 蛛网膜下腔出血病例中, 动脉瘤破裂占 51%。颅内动脉瘤的分级: 1968 年 Hunt 和 Hess 补充改良 Botterell 分级法分为 5 级, 适用于破裂的动脉瘤, 不破裂的属 0 级。手术方法分直接法与间接法。直接手术法即直接开颅处理动脉瘤, 计有瘤颈夹闭术、瘤壁包裹加固术、动脉瘤血栓闭塞法、动脉瘤孤立术或加颅内外血管吻合及动脉瘤填塞法。近来又开展了各类球囊栓塞技术。动脉瘤破裂的手术时机: 破裂出血后可导致血管痉挛, 多在 1d 之后出现, 持续可达 8~16d, 破裂出血后可再出血, 高峰时间在 24h 之内。因此多主张超早期手术, 即在自发出血后 6~8h 内手术, 同时为预防血管痉挛要清除局部的及脑池内积血。结合分级: I~II 级患者亦应争取早期手术(3d 内), III~IV 级患者, 病情许可, 条件具备, 也应尽早手术。对于手术难以切除或接近的动脉瘤, 外伤性假性动脉瘤鼻腔大出血者, 可采用球囊栓塞法。

2. 脑动静脉畸形(AVM)。较动脉瘤少见, 占蛛网膜下腔出血病例的 24.6%。AVM 手术适应征为: (1) 有出血史或近期出血后有颅内血肿者; (2) 有神经功能缺失或智力障碍逐步加重者; (3) 病变浅和在非主要功能区者; (4) 有不可控制癫痫者; (5) 有颅内压增高者; (6) 有不可忍受的血管杂音者; (7) 有顽固性头痛者。AVM 的外科治疗, 最可靠的方法是 AVM 切除术。对于手术不可接近的部位(如脑干、基底节深部、内囊、运动区、语言区等) 的 AVM 及高流量的 AVM 可采取栓塞术。为扩大手术适应症, 栓塞术亦可用于将巨大、复杂部位的 AVM 缩小, 使不可手术的变成可以手术的。对于脑深部小的 AVM(直径 < 25~30mm), 亦可以采用立体定向放射外科治疗。

3. 自发性脑出血。主要是高血压脑出血, 占 74.8%。脑出血好发部位为: (1) 壳核出血, 约占 60%。(2) 丘脑出血, 约占 10%。(3) 大脑半球皮层下出血, 约占 10%。(4) 小脑出血, 约占 10%。(5) 桥脑出血, 也约占 10%。高血压性脑出血的手术适应症和禁忌症: 1978 年第 2 届全国神经精神科学学术会议制订有标准, 但目前 CT 已广泛应用, 对出血情况从 CT 片上可了如指掌, 因此, 现在多以 CT 所见分型, 结合临床以决定治疗方法。根据陆荣庆建议, 根据 CT 显示出血部位, 将血肿分为 8 型、5 个亚型, 结合意识、血肿量、中线结构移位及环池和四叠池消失与否决定是否行手术治疗。凡病人意识昏迷, 壳核、丘脑内重度扩延型(血肿 2 个长轴 > 4.5cm) 或壳核及丘脑闭塞型(即血肿破入脑室且 III、IV 室充满血肿) 及壳核与丘脑内囊的混合型(非闭塞型或闭塞型)、血肿量 > 60ml、中线结构移位 > 1.5cm, 甚至伴有环池—四叠池变窄、消失示有脑疝可能者, 以急作手术清除血肿为宜。至于大脑皮层下出血 > 50~60ml 者, 小脑出血血肿量 > 10ml 以上者, 原则上应该手术治疗。桥脑出血一般采取保守疗法, 个别可以开颅吸除。手术方法可根据血肿部位开颅清除。1978 年, Backlund 首创应用立体定向术及螺旋穿刺针排空者血肿, 现在已开展 CT 引导立体定向排空血肿术, 一次不能排空者可用尿激酶溶解残留血块后再抽吸或引流排空。对于脑室内积血多者, 可以作脑室持续引流术。

4. 缺血性脑血管疾病。是脑血管疾病中最常见的, 约占 70%~90%。通常可分为 4 类: (1) 短暂性缺血发作(TIA), 出现局灶性神经功能缺失并于 24h 内恢复。(2) 可逆性缺血性神经功能缺失(RIND), 症状持续时间超过 24h。(3) 进展性卒中(PS)。(4) 完全性卒中(CS)。后三者应属脑梗塞。本症的外科治疗原则, 主要是血运重建和建造: (1) 血栓摘除术(如对大脑中的动脉栓塞)。(2) 动脉内膜切除术(如对颈部颈动脉狭窄等)。(3) 颈部动脉架桥术。(4) 颅内外动脉吻合术。(5) 大网膜颅内移植术(带蒂或游离片)。(6) 脑、肌、血管共生术(连通术或贴敷术)、脑、硬膜、血管共生术等手术, 这类手术简单, 可以使颅内外新生血管互相连通改善脑缺血状况。(7) 介入性血管内溶栓和血管成形术, 前者可以溶解新近发生的血栓或栓塞; 经皮血管成形术(PTA), 是



以合适的导管扩张痉挛的或狭窄的动脉以达到血循环恢复的目的。

#### 参考文献

- 1 Becklund EO, von Holst H. Surg Neurol. 1978, 9: 99~101
- 2 谭方伦, 赵仰胜. 中风与神经疾病杂志, 1984, 1(2): 104~106
- 3 赵雅度. 中华神经外科杂志, 1986, 2(3): 193~195
- 4 刘承基. 脑血管病的外科治疗. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982. 26~253
- 5 薛洪利. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1988, 15(1): 7~8
- 6 张晨. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1988, 15(1): 9~11
- 7 陆荣庆, 等. 中华神经外科杂志, 1988, 4(3): 140~143
- 8 许荣家, 刘寿之. 国外医学(神经病学神经外科学分册), 1990, 17(2): 60~63
- 9 凌锋. 介入神经放射学. 北京: 人民卫生出版社, 1991. 45~210

(安徽医科大学第一附属医院杨次文撰)

**脑出血** 指原发于脑实质内的、非创伤性出血。血肿可穿破脑实质形成继发性脑室内及(或)蛛网膜下腔出血。主要病因为高血压动脉硬化, 其他较少见的病因有: 脑内小的先天性动脉瘤或动静脉畸形破裂; 脑动脉炎性管壁坏死; 脑瘤出血; 血液病; 抗凝药物等常可导致脑内出血。临床上常见出血部位为: 内囊底节区出血; 桥脑出血; 小脑出血, 依据不同的出血部位临床上出现相应的症状和定位体征。

有高血压病史的中老年人在动态情况下发病, 病后很快出现意识不清、肢体偏瘫及早期出现头痛、恶心、呕吐等颅内压增高症状就可考虑脑出血的可能。进行CT或MRI检查便可确诊。

1. 内科治疗: 脑出血的内科治疗除一般治疗外, 控制脑水肿降低颅内压、防止脑疝的发生是脑出血急性期一个极其重要环节, 常用甘露醇、甘油、地塞米松、白蛋白、速尿等。其次, 维持一定血压(19.9~21.3/12.0~13.3kPa)。注意水电解质平衡, 预防并发症等。

2. 手术治疗: 手术治疗高血压性脑出血已有很多报道, 至今各家意见不一。文献报导: 壳核出血下列情况宜手术治疗: (1) 意识障碍由轻变重。(2) 即使神志清楚, 为使功能恢复亦应作定位血肿清除术。(3) 病情重笃为抢救生命需行手术。另外根据CT测算壳核出血血肿>50ml者应开颅手术抢救病人生命, 血肿在20~40ml者用CT定位清除血肿对功能恢复有益。丘脑出血手术治疗预后较差, 继发脑室内出血的重症病人行手术引流。小脑出血, 有人认为确诊后立即手术。脑出血手术病例选择还要注意一般情况变化, 如生命体征, 心肾功能等情况。手术种类, 钻颅血肿碎吸术或钻颅尿激酶溶解法与开颅血肿清除术, 各有优缺点应慎选。

3. 脑出血的恢复期治疗。

4. 预防处理: 脑血管疾病的预防工作必须建立在对危险因素的研究和预防上, 因此积极研究和预防卒中的危险因素对降低卒中的发病率和死亡率都是十分重要的。(1) 高血压, 一致被公认为卒中的主要危险因素且和动脉粥样硬化性脑梗塞及脑出血的发病有肯定关系。(2) 饮酒, 日本研究提示出血性卒中与饮酒关系密切。(3) 吸烟是缺血性和出血性卒中的危险因素之一。(4) 心脏疾患, 心肌梗塞, 心房纤颤, 心脏瓣膜疾病, 二尖瓣脱垂等。(5) 药物因素, 口服避孕药其危险性可增至6~7倍, 抗凝治疗并发出血率为6.8%~8.2%。(6) 其他因素有糖尿病、高血脂症、高尿酸血症、肥胖、TIA发作、季节气候、饮食(食盐摄入、高动物胆固醇)、年龄、性别、家族史等。在脑血管疾病中都有一定作用。但是存在危险因素并不是所有人一定要发病, 相反, 不存在危险因素并不意味着不会发生脑卒中, 如发现危险因素患者应采取预防措施对减少脑血管疾病发生率尤为重要。

(安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

### 短暂性脑缺血发作 transient ischemic attacks (TIA)

系指脑血管病所致短暂的局限性功能障碍, 症状突起又迅速消失, 一般持续数分钟至数十分钟, 并在24h内缓解不遗留后遗症。一般认为TIA是中风的危险因素和报警信号, 其自然发展约有1/3患者可发生脑梗塞。

TIA是以主动脉-颅脑动脉系统的动脉粥样硬化为主要病因的多病因综合征, 目前有微栓子学说、盗血现象、颈动脉过长、外伤、颈椎病、颅内动脉炎、动脉痉挛、血粘度增高、高凝状态等方面的发病机制说法。

TIA的诊断主要依据病史; TIA发作历时短暂, 在24h内完全恢复, 不遗留有神经系统症状和体征; 发作时临床表现根据侵犯颈内动脉系统和椎动脉系统而不同, 可分为: 颈内动脉系统TIA和椎基底动脉系统TIA; 颅脑CT或MRI排除有颅内梗塞灶的存在; 通过放射性核素标志对大脑两半球的脑血流动力学变化的监测所得脑血流量与脑容积的比率(rCBF/rCBV)以及通过PET所显示缺血区的图像均有助于TIA的诊断。

TIA常为脑血栓形成的先兆症状, 如积极治疗TIA对防止脑血栓形成有很大意义。除病因治疗外(心律失常、心肌病变、高血脂症、糖尿病等)尚有如下治疗方法:

1. 抗血小板凝集剂, 首选阿司匹林(ASP), 主要有抑制环氧酶的活性, 阻止花生四烯酸合成环内氧化物, 另外有抑制内源性5-HT释放作用。用量说法不一, 多数学者认为小剂量(80mg/d), 能抑制TXA<sub>2</sub>而对PGI<sub>2</sub>无抑制, 因而有预防脑梗塞复发。潘生丁有抑制血小板的磷酸二酯酶活性, cAMP分解减少, 从而提高cAMP浓度间接地抑制花生四烯酸生成, 常用量50mg/d临床疗效难以肯定。藻酸双酯钠(pss)具有抗血栓、抗凝血、降血脂、降血粘度、解除脑血管痉挛、改善脑循环作用。

2. 抗凝疗法由于容易并发出血及临床实验条件限制, 很少应用。

3. 低分子右旋糖酐, 具有降低血液粘度, 预防血小板聚集、改善脑微循环, 增加脑血流量, 对预防TIA发作有积极作用。

4. 手术治疗: 根据病情可选用颈内动脉剥离-修补术, 血管重建术、搭桥短路术等。

(安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

### 蛛网膜下腔出血 subarachnoid haemorrhage (SAH)

主要是指原发性蛛网膜下腔出血(非外伤性), 脑底或脑表面血管破裂, 大量血液直接流入蛛网膜下腔。病因多为先天性动脉瘤和动静脉畸形。其它如高血压动脉硬化、颅脑外伤、颅内肿瘤、血液病所引起的脑实质内出血间接流入蛛网膜下腔, 则称为继发性蛛网膜下腔出血。

SAH患者的主要死因是动脉瘤破裂、脑疝形成和脑血管痉挛(CVS)。

典型SAH的临床特点是: 青年患者在动态情况下突然出现剧烈头痛、恶心、呕吐, 颈项强直和均匀血性脑脊液即可作出诊断。为进一步明确病因, 须作脑血管造影和数字减影, 发现动脉瘤或动静脉畸形, 应及时进行手术治疗防止复发。

治疗方法: (1) 一般治疗: 病人常有剧烈头痛, 除脱水降脑压外, 还应给予镇静止痛等对症治疗。(2) 防止再出血: 再出血常发生在出血早期。动脉瘤手术治疗是防止再出血最理想方法。抗纤溶治疗的目的是保护动脉瘤因血块不被溶解而减少再出血的危险, 常用药有6-氨基己酸(EACA)和止血环酸(AMCA), 用药时间不宜过长, 如在用药期间出现缺血症状, 须立即停药。最近研究资料表明, 抗纤溶药物与钙离子拮抗剂、硝苯吡啶(Nicarpinil)联用效果最好(D. W. Beck等, stroke 1988)(3) 外科治疗的主要目的是为了防止动脉瘤再破裂。脑血管造影可显示动脉瘤, 应该早期手术。(4) 脑血管痉挛的预防及处理: CVS并发迟发性的或弥漫性缺血性的神经功能缺失是造成SAH患者死

亡和致残的主要原因,其高峰期常在SAH后6~15d出现,有关CVS的防治迄今尚无令人满意的办法,有人主张用钙离子拮抗剂,如尼莫地平及扩充血管药(低分子右旋糖酐)。解除血管痉挛的药物很多,包括 $\beta$ -受体兴奋剂,磷酸二酯酶抑制剂(氨茶碱、罂粟碱等), $\alpha$ -受体抑制剂、单胺抑制剂、平滑肌松弛剂等。清除早期血肿可以防止CVS发生。

SAH部分病人出现渐进行痴呆、尿失禁、共济失调等,经头颅CT发现脑室系统对称性扩张,皮层无萎缩,提示出现正常脑压脑积水,应尽快手术治疗。

(安徽医科大学第一附属医院尹世杰教授撰)

### 重症肌无力与烟碱型乙酰胆碱受体和其抗体

myasthenia gravis (MG), nicotine acetylcholine receptor (nAChR) and acetylcholine receptor anti-body 重症肌无力(MG)是一种神经肌肉接头兴奋传递障碍的疾病,以骨骼肌异常地易疲劳为特征的慢性疾病。人类对MG的认识和研究已历经数世纪,早在1672年,英国Thomas-willis就描述了第1例骨骼肌易疲劳而休息后可减轻的肌无力典型症状者。Wilks(1877)和Erb(1879)又相继记载了临床病例。至1895年,由Jolly将本病命名为重症肌无力,并首次试用感应电重复刺激,诱获肌无力反应,作为诊断试验,即后人所称的Jolly's试验。Elliot(1934)证明毒扁豆碱对MG的作用,数年后瑞士学者Aeschman合成了新斯的明,而Dale(1936)证明支配肌肉的运动神经末梢释放的乙酰胆碱(Ach)是引起肌肉兴奋的递质。自此,对本病的研究才进入对神经肌肉接头间神经递质传递的生理、病理生理和药理的研究阶段。1939年,Blalock首次以切除胸腺治疗MG获得成功。但关于发病机制的研究,在数十年后,随着自身免疫学说的问世,才有突破性发展。

Simpson与MG的免疫学发病机制 虽然早年Buzzard(1905)和后来的Wilson、Stoner(1944)曾提出过血清因子可能会引起MG的症状。Smither(1959)推测MG可能是免疫性疾病;同期,Nastuk等提供了免疫学异常的实验室依据,但真正的自身免疫机制学说是由Simpson在1960年提出的。当时Simpson总结了440例MG临床病例,他提出该设想的主要理由是:(1)一些重症肌无力病人常伴有一些其他的自体免疫性疾病,如系统性红斑狼疮、风湿性关节炎或过敏性结肠炎或肾炎等。(2)发现MG患者有血液的及网状内皮系统的异常。(3)有较高的甲状腺炎或甲亢发生率。(4)新生儿MG的发生,说明有某种毒性物质可通过胎盘传递给胎儿,使新生儿患病。(5)MG患者肌肉的病理改变与风湿病、结缔组织病、慢性感染、肌炎及内分泌病时的肌肉变化相同。(6)在某些病例血清中白蛋白降低,而 $\gamma$ 球蛋白增高。(7)有实验发现MG患者的血液可引起蛙肌肉细胞溶解。(8)MG与机体的免疫器官-胸腺关系至为密切,胸腺瘤的发生率为15%~20%,多数患者均有胸腺的组织学改变。

鉴于上述种种,Simpson认为MG是一种由抗终板“蛋白”抗体引起的肌肉的自身免疫性疾病,类似于系统性红斑狼疮、皮肌炎等,它可能是机体对某种感染的免疫反应。神经终板肌纤维,甚至中枢神经系统都可累及。Strauss(1960)在30%的重症肌无力病人血清中发现有抗骨骼肌抗体,以后又有许多学者证明,这些抗体能与胸腺中肌样细胞(myoidCell)发生交叉反应。Colstein(1971)用胸腺生成素注入小鼠体内成功地制成MG的动物模型,他证明神经肌接头处、突触前膜的Ach释放、突触间隙中胆碱酯酶的含量均正常。给动物动脉注射Ach也不能改善肌无力症状,因此推测病变部位不在突触前膜,而可能在突触后膜的AchR的敏感性上。1973年Patrick、Lindstrom纯化了AchR,并以此获得实验性肌无力模型。Fambrough等(1973)发现MG病人血清中AchR数量减少,而Almorn(1974)又在病人血清中直接测到AchRab。因此,目前认为MG病人血清中有AchRab的存在,因而导致神经肌肉接头处有活性的AchR数量减少,是肌无力产生的原因。

$\alpha$  银环蛇毒素 自1944年发现银环蛇(Bungarus multicinctus)毒液具有箭毒样作用后,蛇毒蛋白的结晶和纯化工作不断进行。1963年,中国台湾学者李镇沅从台湾银环蛇毒液中分离出 $\alpha$ 和 $\beta$ 两种银环蛇毒素,并发现 $\alpha$ -银环蛇毒素( $\alpha$ -Bungarotoxin,  $\alpha$ -Bgt)阻断神经肌肉传递是由于其与骨骼肌运动终板AchR牢固结合的结果。有关研究表明: $\alpha$ -Bgt是银环蛇毒液中的1种碱性多肽,等电点为9.19,分子量7000~8000,是1种长肽链的神经毒素。 $\alpha$ -Bgt只与nAChR结合,对胆碱酯酶活性、Ach的释放、神经肌肉的静息和动作电位等均无影响,它结合AchR是专一的、饱和的和不可逆的,对终板内外的AchR都能结合,是肌膜受体有效的探测剂,因此成为当代研究nAChR的理想工具。 $\alpha$ -Bgt的主要功用:(1)用放射性同位素标记 $\alpha$ -Bgt作为nAChR追踪之用,可确定受体的部位和活力,通常以 $I^{131}$ 或 $I^{125}$ 标记。(2)用于亲和与纯化nAChR,即把 $\alpha$ -Bgt直接结合到支持胶上,使支持胶对nAChR有很强的吸附力,以便形成 $\alpha$ -Bgt与nAChR复合物,之后再以较强的洗涤条件洗脱,达到进一步分离和纯化nAChR的目的,使受体既纯净又保持生理状态和药理特性。还可将 $\alpha$ -Bgt与nAChR制备成的复合物( $\alpha$ -Bgt-nAChR)来测定抗AchRab,具有专一性强和超微量分析的特征,常用于诊断重症肌无力。

烟碱型乙酰胆碱受体 20世纪初,根据对毒蕈碱(Muscarnine)和烟碱(nicotine)的反应不同,而将胆碱能受体分为毒蕈碱样受体(M受体)及烟碱样受体(N受体)。已知乙酰胆碱在神经肌肉接头的传递作用是通过突触后膜上的nAChR的相互作用来实现的。由于电鳗电器官上存在高密度的nAChR,而 $\alpha$ -Bgt与nAChR有高度亲和力和牢固结合力,所以使得烟碱型受体成为第1个被阐明其1级结构(即分子结构)的受体。研究发现,nAChR为生物膜酸性糖蛋白,等电点为4.5~4.8,可以单体形式(分子量为25000)和双体形式(分子量为500000)存在,用 $I^{125}$ 标定的 $\alpha$ -Bgt以及用辣根过氧化物酶可以精确地确定nAChR的位置和分布。膜上受体的单体密度约为 $1.0 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^3 \mu m^{-2}$ ,人类骨骼肌的该受体的浓度为 $1.1 \times 10^2 \text{ mol/}$ 每克肌肉湿重,但AchR所占面积不到终板面积的1%,因此,只要有一部分受体被激活,即可完成生理效应。nAChR由4种共5个亚单位组成,按分子量从小到大,亚单位分别命名为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 。每一个AchR有两个 $\alpha$ 亚单位。电镜下,5个亚单位排列成5边形的对称结构,排列顺序按顺时针方向依次为 $\alpha$ 、 $\gamma$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 。每个亚单位都是由18种氨基酸组成的多肽链。每个 $\alpha$ 亚单位上有一个Ach结合位点,因此每一个AchR有两个Ach结合位点,它们位于受体的细胞外部分 $\alpha$ 链的192位和193位的半胱氨酸残基所在的区域,有识别和结合Ach的能力,当Ach与受体结合位点结合后,受体即发生构像变化,使离子通道的闸门开启,正离子(主要是 $Na^+$ )进入细胞内,突触后膜发生电位变化。1973年,Fambrough等利用 $I^{125}$ - $\alpha$ -Bgt选择性结合AchR的方法,发现70%~80%的MG病人的肌肉活检标本中,突触后膜上的nAChR数目减少至30%。Engel等经电镜组织测量分析证明,MG患者突触后膜皱缩萎缩,平均表面面积减小,nAChR也显著减少,并发现肌肉AchR的减少与微终板电位的振幅降低一致,关于有效受体数目减少的机制可能是由于AchR抗体交联AchR而加速了受体降解,封闭AchR的Ach结合部位,抑制AchR的合成,抗体与补体协作破坏了AchR或突触后膜所致。

抗乙酰胆碱受体抗体 (Anti-Acetylcholine Receptor Antibody, AchRab)继Simpson提出MG为自身免疫性疾病之后,Strass在MG病人中发现抗骨骼肌抗体,Patrick、Lindstrom纯化了AchR并产生实验性MG模型后,Almorn(1974)首先用放射免疫法在肌无力病人血清中直接测得抗AchRab;Appel(1975)用鼠去神经肌肉提取的受体与 $I^{125}$ 标记的 $\alpha$ -Bgt结合,采用双抗体放免测定,重症肌无力患者血清中AchRab阳性率为64%。Lindstrom(1977)用人类骨骼肌提取的AchR提高抗体检测的阳性率,可达90%。Lindstrom还指出,肌

无力病人血清中 AchR 的升高与 Tensilon 重复电刺激试验一样,对重症肌无力的诊断有重要价值。迄今,重症肌无力是由抗体介导的、累及神经肌肉接头突触后膜上 AchR 的自身免疫疾病的学说已得到公认,而 AchRab 的检测也成为 1 种普遍采用的临床研究方法,抗体水平也常作为诊断和治疗肌无力的重要参数。

1. AchRab 在 MG 发病中的作用机制。MG 患者血清中的 AchRab 是 1 种免疫球蛋白,大量研究资料表明,AchRab 在 MG 的发病中,尤其在导致肌无力的突触后膜 AchR 减少方面起着极为重要的作用,具体作用方式如下。(1)抗体与受体形成免疫复合物,在补体参与下引起突触后膜的溶解。Engel 等由组织学和电镜证实,MG 患者神经肌肉接头的突触后膜有 IgG 沉积,其分布与受体一致。(2)把 MG 病人的 IgG 注入实验动物,可使其微小终板电位波幅降低及神经肌接头处 AchR 数量减少,抗体与 AchR 结合后干扰 AchR 与 Ach 的结合,加速 AchR 的溶解和破坏。(3)AchRab 可能改变 AchR 的代谢率,即降解增加而合成减少。(4)抗体阻止 AchR 活性位点与 Ach 结合,但究竟是直接占据受体活性位点,还是接近它的活性位点尚不清楚。(5)AchR 功能的改变,即抗体也许可能在功能上妨碍 AchR 的离子移位而减少其活性。(6)血清中 AchRab 除了直接封闭该受体外,还促使受体溶解,突触后膜几何图形简单化,AchR 数目减少。

2. 临床意义。(1)正常人和非 MG 患者血清中 nAchRab 滴度甚低或不能检出,抗体滴度的增高特异地见于 MG 患者,可以辅助临床对表现肌无力的较疑难危重病人作出诊断与鉴别诊断。国外文献报道阳性率约 70%~95%,国内则为 70%~85%左右。(2)MG 患者用免疫抑制剂治疗后,在临床症状改善同时常伴 AchRab 滴度下降,皮质类固醇可使抗体滴度下降 29%~83%,通常于治疗后 2~5 月可下降 50%。(3)胸导管引流术后或血浆置换术后也可使抗体暂时下降,大多数患者胸腺切除后 AchRab 滴度随着病情好转而渐趋下降,3 个月后平均滴度下降 20%,下降幅度 28%~84%不等。

3. 抗体检出阳性率及滴度的影响因素。虽然大多数 MG 患者血清 AchRab 滴度增高,但其检查阳性率及滴度随采用方法及受体来源不同而异。(1)可能与患者的免疫遗传特征相关,实验证实中国 MG 患者主要与 HLADR4 有关。(2)实验条件差异。(3)与 AchRab 的异质性有关。(4)一般来讲与临床类型有关。临床重型者高于轻型者。(5)一般伴胸腺瘤的患者滴度较高。(6)多数患者抗体为多克隆的,其中仅某些种类抗体决定临床特征。Mittag 的研究资料表明,临床表现主要与封闭性抗体有关。(7)AchR 表面结合位点不同。Hinman 发现同样的可呈现出高 RIA 值/低 ELLSA 值,也可出现高 ELLSA 值/低 RIA 值。国内有学者认为,一般测定方法所得的是 AchR 抗体的总量,若 MG 病人血清内含非致病性的 AchRab 愈高,其 AchRab 的绝对滴度也可能愈高,但其肌无力症状不一定很重,所以推测 AchRab 绝对滴度与临床相关不密切,而相对滴度与肌无力严重程度密切相关。

1977 年 Fulpins 等在实验性变态反应性 MG 的动物和 MG 患者的脑脊液中发现有 AchRab,KamHansen(1982)又用放射法测定 6 例 MG 病人的脑脊液,发现有高水平的抗 AchRab,提示 MG 除了神经肌肉接头有免疫异常外,还可能伴有中枢神经免疫的异常。

4. 检测方法。目前常用的 AchRab 检测方法主要有放射免疫技术(RIA),Lindstrom, Viceni 等均以此法取得 70%~90% 的阳性检出率。近年来则逐步改用免疫酶联方法(Enzymt Linked Immunosorbent Assay, ELISA),该法简便易行利于推广,阳性率一般 80%左右。此外,还有双抗体免疫沉淀法等。在中国率先开展血清 AchRab 测定的单位有:中国医学科学院、首都医院、第二军医大学长海医院、上海医科大学华山医院等,他们并提供试剂盒,供推广普及使用。

突触前膜抗体 虽然大量的实验和临床研究资料证明, MG

的主要发病机制是突触后膜的破坏。皱褶变平和有效 AchR 数量减少,而致神经肌肉接头的兴奋传递障碍;但在研究 AchR 致病的过程中,尚有许多问题难以解释。如相当一部分病人的血清中测不到抗 AchRab,群体分析中抗 AchRab 水平与疾病的临床严重程度不成比例。抗 AchRab 阴性的 MG 病人血清亦能引起实验性小鼠膈肌的 AchR 数目减少,这些事实提示,在 MG 的发病中是否还存在非 AchRab 因子,故有学者应用  $\beta$ -Bgt 特异结合突触前膜的特性检测 MG 病人血清中的抗突触前膜抗体,发现 MG 病人中抗突触前膜抗体阳性者占 67.1%,与抗 AchR 抗体的 P/N 值呈线性相关,尽管其意义还不很清楚,但可能为 MG 自身免疫发病机制的研究资料开辟了新的前景。

近年来对 MG 特异性免疫的研究资料表明,AchR 具有免疫原性,之所以在正常情况下并不引起免疫反应是因为机体对其具有免疫耐受性。而这种免疫耐受性的维持,主要有赖于抑制性 T 细胞(Tn)和抗独特型抗体(anti-idiotypic antibody)的免疫调节作用,目前认为由于以下因素,使 AchR 特异性的辅助 T 细胞(Th)活化,产生 AchRab,打破 AchR 自身耐受而发病:(1)胸腺异常。打乱了胸腺细胞阳性选择和阴性选择过程,胸腺内的抗原呈递细胞摄取了死亡的肌样细胞。(2)病毒或细菌感染。一方面致胸腺异常,另外感染还可产生 AchR 模拟分子。感染因子与宿主自身成份之间的交叉反应可活化 AchR 特异性 Tn 细胞,导致 MG 发生。(3)MHC(主要组织相容性复合体)Ⅱ分子表达异常,活化了 Tn 细胞,引起 AchR 自身免疫反应。(4)Ts 细胞功能异常,抑制环路被破坏。另在分析 MG 病人的 AchR 时发现,其  $\alpha$  亚基有数个免疫原性肽段,它们容易与 MHC Ⅰ类分子结合,并活化自身反应 T 细胞。Brocke 等合成了非免疫原性的类似 AchR  $\alpha$  亚基 P<sub>195-212</sub> 的肽段,并证明这种肽段能封闭 T 细胞对 P<sub>195-212</sub> 的识别,阻止 AchR 抗体形成,此项研究成果可望用于治疗人类 MG。此外,抗 T 细胞受体单克隆抗体(TcRmAb)可封闭 TCR,目前已发现小鼠能识别 AchR  $\alpha$  亚基 P<sub>195-212</sub> 片段的相应 TCR 基因,其产物的单克隆抗体可消除 T 细胞对 P<sub>195-212</sub> 的免疫原性。目前尚不知道人类 AchR 免疫原性片段的 TCR 基因,一旦确定 T 细胞对人类 AchR 反应的 TCR 基因,则应用 TCR 基因产物抗体或用 TCR 疫苗治疗 MG 是完全可能的。有关自身免疫疾病的免疫调节网络学说在 MG 中已得到证实,最近在 MG 患者身上检出 AchRab 的抗个体基因型抗体,并且此抗体滴度增高者 AchRab 滴度则低,提示可能存在对 AchRab 的抑制作用。另外,有人在提纯 AchRab 的基础上进行用抗个体基因型抗体来治疗 MG 的动物实验,为本病免疫性治疗开辟了新的前景。

#### 参考文献

- 1 Simpson. Scot Med JS, 1960, 419
- 2 Ann N Y, Scand. science, 1971, 183, 67
- 3 Patrek J. et al. Science, 1973, 1(80): 871
- 4 Fambrough D M. et al. Science, 1973, 1(82): 293
- 5 Heidman T. et al. Ann Rew Biochem., 1978, 47: 317
- 6 涂来慧,等. 动物学研究, 1980, 1: 443
- 7 毛庆武,等. 第二军医大学学报, 1984, 2: 264
- 8 翟林. 神经生物化学. 北京: 人民卫生出版社, 1981. 293
- 9 Maell G. Acta Neurol Scand., 1982, 90: 112
- 10 许绍芬,等. 神经生物学. 上海: 上海医科大学出版社, 1990. 70

(浙江医科大学附属第二医院神经内科  
程源深教授, 陈怀红讲师撰)

**腰椎间盘突出症的诊断研究** diagnostic study of the lumbar intervertebral disk herniation 腰椎间盘突出症(以下简称腰突症)占腰痛的 1/5~1/4,是青壮年的多发病,20~40 岁占 80%,中西医对此都十分重视。但中医学无此病名,据其临床表现,属于痹证、腰痛、腰腿痛范畴。中医经典对某些病证的描述,与腰突症的表现极类似,但近代的中医文献仍按其传统,着重

从辨证分型着眼,将腰突症分为风、寒、湿、热、血瘀、气滞、痰阻、肾虚、肝肾不足、气血虚弱等多种“证”型,作为治疗的依据,而用中医理论揭示腰突症的实质及诊断方法,迄今正在探索,翔实资料尚少。1952年方先之在中国首先介绍了腰突症的病因、诊断治法。后来众多学者通过大量临床实践和实验,特别是80年代以来,由于先进的电子技术、生物技术等和医学的结合,使腰突症的诊断研究逐步深入,在定性、定位诊断上达到了相当确切的程度,定型诊断亦正在努力探索之中。

现代医学的传统理论认为,腰突症是因突出的椎间盘组织压迫了其后方神经根管内的神经根而引起的根性神经痛与功能障碍综合征。诊断依据是:有外伤、受凉、劳累等诱因而引发急性或慢性腰痛并伴有典型的坐骨神经或股神经的放射痛;腰肌痉挛并定向性活动障碍;腰椎生理曲度变异;腰椎棘突旁压痛并引发放射性神经痛;坐骨神经或股神经紧张试验呈阳性;受累神经支配区域的肌张力减低、萎缩、力弱及皮肤感觉改变;膝或跟腱反射改变(减弱或消失)。这些主、客观表现(再加上X线片分析排除其他骨关节疾病),已被公认为是腰突症传统的定性及定位诊断标准。但是,由于认识上的不同或技术水平的差异,临床上对腰突症的诊断准确率差别很大,因此,仍有不少学者致力于腰突症的特异性理学诊断方法的探索,以求得更为精确的定性和节段性定位。70年代初,冯天有对腰突症提出新的见解,认为“关节突关节错缝和棘突偏歪”是腰突症的重要特点,把棘突偏歪作为腰突症定性定位诊断的重要指标,并创用了“腰椎定点旋转复位法”,以整复关节错缝纠正偏歪棘突为主要治疗目标。大量临床资料证明,这种治疗方法确有一定效果,但对“关节错缝棘突偏歪”理论仍有争议。有人研究后认为,棘突偏歪与单个椎体移位无关,临床上触诊发现的棘突偏歪,一是发育中形成,一是棘突旁软组织肥厚造成,第3种可能是椎间移位,因而认为腰椎棘突偏歪不是腰突症的主要体征和手法治疗的主要依据。尽管有争议,冯氏理论对腰突症的诊断(包括治疗)毕竟是一项有益的补充。80年代初,宣登人等通过大量的临床研究,对传统的“神经根受压致痛”理论提出异议,认为神经根单纯受压只有麻木感而不是疼痛,典型的腰突症的临床症状和体征,乃是椎管内外软组织无菌性炎症病变引起的腰痛共有的症象和体征,认为腰突症的发生,只有当突出物长期压迫神经根周围与硬脊膜周围的脂肪组织产生水肿、充血、粘连、纤维组织增生等继发性无菌性炎症病变时才会引起疼痛。在这种“椎管内外软组织无菌性炎症学说”的指导下,提出了3种体征诊断法,即“脊柱侧弯试验”、“俯卧腰背柱伸屈位加压试验”、“股神经弹拨试验”,认为这3种试验的阳性体征只能在椎管内病变引起腰腿痛的病例中出现。这一学说已逐渐被人们所接受,对当今用多种方法治疗腰突症的疗效的解释提供了可信的理论依据。还有一些学者对腰突症的体征诊断提出了补充方法。新近,高福利施用“站位拇指顶推后扳法”检查腰突症,阳性率达98.3%,较一般检查70.7%的阳性率为高(均经CT证实)。令患者站立,术者一手拇指顶压放射性压痛点,另一扳患者向前向后使腰过伸,如有下肢放射痛或下肢痛加重为阳性。这一方法简便易行,可作为腰突症临床检查的一个步骤和方法。最近,王银喜介绍一种新检查法—拉踝试验,即令患者俯卧,抓住床头架,医者握其两踝,用力向床尾方向牵引,如牵引后腰腿疼痛减轻或有舒适感即为阳性。这一方法不仅有诊断价值,还可作为选择治疗方法的参考。实践证明,拉踝试验阳性者,用牵引疗法效果好。因该法检查在急性患者阳性率高,故亦可作为暂缓剧痛的一项应急措施使用。

X线平片仍作为常规诊断方法。仔细地分析X线平片(包括椎管测量),不仅限于排除诸如结核、肿瘤、椎弓峡部裂、畸形等,而对腰突症的诊断意义进一步被认识。赵大权等分析了132例腰突症X线平片后认为,虽然腰椎侧弯、棘突排列紊乱或偏歪、椎间隙变窄或左右不等宽、生理弧度改变等征象出现率极高,但不能作为腰突症的定性诊断,而椎间隙的前窄后宽则是诊断腰突症的重要依据。这一揭示,不仅对常规应用X线片诊断基本功的

训练有益,而且赋予该传统诊断方法以新的内容。

传统的碘剂造影包括脊髓造影、硬膜外造影等,一直被认为是腰突症最准确的方法,诊断准确率在60%~90%以上,被作为腰突症手术治疗的必不可少的诊断步骤。但其缺点是明显的,侵入性检查必然造成一定痛苦,再是造影剂本身带来的危害,尽管新剂造影剂的应用减少了并发症,但程度不等的医源性损害仍屡见不鲜。因而目前不少学者认为对非手术治疗者,不能作为常规诊断手段。X线电子计算机断层扫描(CT)作为当今最先进的X线诊断技术,80年代初在中国用于腰突症诊断以来,由于其明显的优点而被迅速推广。但其诊断准确率报告不一,低者32.2%,

一般在80%~90%,其最大优点是安全、舒适,能发现较小的突出,显示突出物对神经根及硬膜囊受压程度,还可从横断面测量椎管及侧隐窝的大小,椎间关节小面的退变增生情况等。随着机型性能的改进和使用技术的不断熟练,其诊断准确率亦不断提高。不少学者将造影与CT作比较研究,结论不一。吴世樵等分别用碘油脊髓造影、碘水腰骶神经根造影与CT作比较,诊断准确率分别为90%、90.6%、90.7%,以CT最高。欧阳甲等将脊髓造影与CT结合应用并与脊髓造影比较,前者符合率98.8%,后者77.9%,显示了造影与CT联合应用的高诊断准确率。但这种联用方法常规用于临床不太现实,因它们各自的缺点加在一起(CT昂贵),不易被患者接受。无疑,随着CT的普及、价格降低、使用技术的熟练,腰突症的CT诊断已有作为常规检查的趋势。

80年代末磁共振成像(MRI)在中国应用于腰突症的诊断,以其独特的优越性受到世界重视。贾连顺等用MRI与椎管造影作比较,试图探讨MRI能否取代椎管造影,结果表明,对于诊断腰突症,椎管狭窄及腰突症伴椎管狭窄,两种诊断方法无显著性差异。认为MRI为非侵入性,无放射损害,还能显示病理变化与其周围的关系,是其优点。陈兴元等亦将MRI与经硬膜外造影作比较,认为MRI各组织层次清晰,诊断更加明确。但由于MRI检查费用昂贵,目前只能在条件允许的情况下应用,还不能作为常规诊断方法。

肌电图检查神经损害早已被应用。周国林等报告对神经根受压1356例肌电图分析指出,轻收缩时多相电位增多对诊断神经病变有重要意义,对125例腰突症用肌电图诊断,定位与手术符合率为95.2%。尽管准确率高,且不出现假阳性,但对神经根受压的病因诊断无意义,因此,必须与其他方法结合,才能判断神经受压是否由腰椎间盘突出压迫所致。田德浩等采用单一脊神经支配的腰回旋肌肌电图检查法对20例腰突症做检查,定位诊断准确率为95%,认为此项检查较肢体肌定位准确率高,定量准确,可为验证腰突症的疗效提供客观指标。

近几年来,中国已试用B型超声探查腰突症,有人报告诊断准确率为87%。崔德亮报告24例,符合手术诊断率91%,并同时与椎管造影手术诊断符合率(83%)作比较,B超略高于椎管造影,定位的准确性二者相近。但,B超诊断受患者、检查者及仪器性能等主客观因素影响较大,其诊断价值正在探索中。如找出其规律,定出诊断标准,还是一项很有应用前途的无创性诊断方法。

特殊腰突症的诊断。随着对腰突症认识的不断深入,人们逐渐注意到多节段等特殊腰突症的诊断。崇步伟报告了多发性腰突症30例,其中两间盘突出26例,三间盘突出3例,四间盘突出1例。王伟等报告7例,其中1例为三间盘突出。多节段突出一般病程长,症状变化复杂,阳性体征多,应引起重视,以免漏诊。有人报告1例骶椎<sub>12</sub>隐性裂并椎间盘突出;周秉文等报告8例腰<sub>1</sub>以上的高位腰突症,均属少见病例。临床上表现不典型而有某一神经根受压的明显症状与体征时,应考虑特殊型腰突症的可能性,可通过特殊检查确诊。

腰突症的定型诊断。至今尚无定论。根据突出方向分为单侧型、双侧型、中央型,可通过传统的临床检查法明确诊断。蒋位庄等根据临床表现与手术所见分为弹力型、退变失稳型、增生狭窄型。周秉文等分为凸起型、破裂型和游离型。郑效文等将突出物分为活动型与固定型,固定型中有骨型、软骨型、游离型、菜花

型、死骨型、弹力型。分型很不统一,临床无法掌握这些“型”的诊断法。如何分型?根据什么分型?还应当从有利于临床应用为目标深入研究,找出临床症状、体征与病理类型的关系,并制定统一分型标准,以指导临床诊断与治疗。

综上所述,腰突症的诊断,在“突出物机械压迫”学说、“椎管内无细菌性炎症”学说、“腰椎关节错缝棘突偏歪”学说渐趋统一或求同存异的情况下,临床检查的内容不断丰富,诊断方法不断完善。目前,传统的病史与体征加X线片分析的诊断方法,仍然是腰突症的主要诊断法,新检查方法的不断补充,使其更趋全面。造影检查虽有其固有的缺点,必要时仍不失为一项有效的诊断手段。CT、MRI显示了诊断技术的现代化,有良好的应用前景,有条件时应积极应用。肌电图、B超等辅助检查,作为有益的补充,可选择应用。迄今,诊断中需要解决的问题仍然很多,如突出物的大小与症状的关系,突出物的病理类型的影像学表现、病理类型的临床表现特点、突出物继发性炎症程度的判定、突出物继发其他病理改变的综合评估及其在腰突症诊断中的地位等,都有待进一步研究,使腰突症的诊断更趋精确、细致、全面、标准化、规范化,反映出腰突症的“整体性”诊断,达到更高水平。值得特别提出的是,腰突症的定性定位定型诊断与中医学“辨证分型”的关系研究,迄今资料甚少,尽管有急性期属血瘀型、气滞型,慢性期属湿热型、痰阻型,恢复期属肝肾不足型等归纳,但都是临床表象联系通过思辨而得出的结论,缺乏可以遵循的客观标准。显然,就腰突症的诊断而言,还要走很长的探索之路。

(山东济宁医学院骨伤科王广智教授撰)

**精神病学** psychiatry 以研究各类精神疾病的病因、发病机理、临床特征、病程转归及治疗、预防为目标的一门学科。精神疾病是指人体在内外各种致病因素作用下,大脑功能活动发生紊乱,导致认识、情感、行为和意志等不同程度障碍的一组疾病。广义的是泛指所有的精神障碍,包括精神病、神经症、精神发育迟滞及人格障碍。狭义的仅指精神障碍中较为严重的一组疾病,其患病率为0.4%~1.1%。

精神病学发展史可追溯到2000多年前,那时中外医学书籍中就有了有关精神疾病的记载。但是,现代精神病学的创立和发展则是近百年的事。德国Emil Kraepelin(1856~1927)成为现代精神病学的重要奠基人之一,他提出了早发性痴呆和躁狂抑郁性精神病的诊断概念。瑞士的Engen Eleuler(1911)首先创用了精神分裂症一词,并详细叙述了临床症状及命名根据,这个命名被全世界广泛接受,沿用至今。俄国的巴甫洛夫(1849~1936)应用条件反射学说,对心理学、精神病学及实验性神经病学作出了卓越的贡献。

19世纪以来精神病学已发展成为医学的一个分支。20世纪50年代以来,精神病学与基础学科(神经生理、生化、精神药理学等)关系愈来愈密切。由于人们对健康有了更高的要求,健康不单是指没有疾病,还要求有良好的生理状态和心理状态及正常的社会适应力。因此,近年来有人主张将精神病学改为范围更广泛、内容更丰富的“精神医学”,这是发展的必然趋势。这样,除了研究精神疾病发生和防治外,还要研究心理因素和社会因素对人体健康和疾病的作用及影响,不少医学家提出了生物-心理-社会医学模式。

19世纪中叶以来,由于西方医学的传入,在中国一些大城市设立了精神病医疗机构和收容所。1949年以前,全国精神病床位约1100张。1949年建国后,精神病防治工作有了较快发展,一个较成熟的精神病学专业队伍正在发展壮大,已发行《中华神经精神科杂志》、《神经精神疾病杂志》、《国外医学-精神病学分册》3种全国性专业刊物。1984年、1989年相继颁布了《中国精神疾病分类方案与诊断标准》第1.2版。

精神病学研究虽取得很大进展,但还存在许多悬而未决的问题,因而现有治疗方法尚不理想。因此,今后精神病学研究,除必须建立在坚实的临床工作基础之上外,还要积极开展精神疾病

的发病机制的研究,这样才有可能出现根本性的突破。

#### 参考文献

- 1 夏镇夷,主编.中国医学百科全书精神病学.上海:上海科学技术出版社,1982
- 2 相德森,主编.中国精神疾病诊断标准与案例.长沙:湖南大学出版社,1989
- 3 夏镇夷,等编.实用精神医学.上海:上海科技出版社,1990  
(安徽省合肥市第四人民医院韩传美主任医师撰)

**精神分裂症** schizophrenia 是精神科临床最常见的一种疾病。本症多于青壮年。常有感知、思维、情感、行为等方面的障碍和精神活动的不协调。一般无意识障碍和智能缺损,病程多迁延。1980年美国精神病学学会估计本症患病率为0.2%~1%。1982年,中国12个地区精神疾病流行病学调查协作组的调查资料表明,本症患病率为0.569%。男女患病率相似。

本症病因尚不明确。临床遗传学开展了家系、双生子、寄养子等研究,认为遗传是本症的主要病因。其遗传方式有3种可能:单基因遗传、多基因遗传、多源性遗传。前两种理论是把本症当作一种单一疾病,后者则认为本症是一组疾病,是一个复杂的混合物,其中每一种都有自己的遗传方式。究属何种遗传方式尚无定论。

本症发病机理,有人认为是代谢障碍引起的。比较有意义的是5-HT传递障碍、甲基转移、多巴胺假说。20世纪50年代以来,治疗本症有效的药物都可以引起震颤性麻痹综合症,说明它们可能影响脑的黑质纹状体系统功能,即它们可能作用于脑内多巴胺。然而这些假说只能解释本症的部分症状。

70年代以来电子计算机断层扫描(CT)、核磁共振(MRI)及组织病理学研究的新技术,肯定了本症患者脑结构异常并不罕见,但这些改变是非特异性的。

精神分析学派认为本症是幼儿期性心理发育障碍所引起,强调内心矛盾与冲突。这一理论被后来强调外界因素的理论所替代,后者认为本症是由于人与人之间的关系不协调所致。

总之,可以推测本症患者是以一定的遗传因素为基础,在机体内外环境因素(生物学的、心理社会的)影响下发病

本症患者的临床表现是十分复杂多样的,就其特点可分为特征性症状和常见症状。思维联想缺乏连贯性和逻辑性;情感迟钝淡漠,情感反应与思维内容、外界刺激不协调;意志减退或缺乏,活动减少或行为被动,生活懒散,孤独离群,脱离现实,终日沉缅于自己的病态体验中等为本症的特征性症状。常见症状有幻觉,其最常见的是言语性听幻觉,亦可有触、嗅、味幻觉,功能性幻觉、假性幻觉及性幻觉均多见于本症;妄想结构松散,其对象和内容易于泛化和多变,以被害、钟情、疑病和夸大妄想多见;可表现为紧张综合症,呈紧张性木僵,病人缄默不动、违拗或被动服从,并有肌张力增高,可出现空气枕头、蜡样屈曲等姿势,有时可突然出现冲动。

精神分裂症起病可呈慢性、亚急性或急性,其中以缓慢起病者居多。早期患者可表现为类神经症症状,有的呈个性反常。当疾病发展至一定阶段,可表现出主要临床相,据此常分为4型:偏执型者较常见,发病年龄多在30岁左右,妄想为主要症状,多数病人伴有与妄想内容相应的幻觉。一般接触较好,病程较长,人格缺损不太明显。青春型者起病在25岁以内,主要表现为明显的情感不适或思维散漫,甚至思维破裂,行为幼稚愚蠢,即以思维、情感和行为的失调为主要临床相,妄想、幻觉等内容片断且短暂。此型发病较急,少数病人很快进入衰退状态。紧张型者是以紧张综合症为主要临床相,表现紧张性兴奋和木僵,两者可交替出现。近10余年已较少见。单纯型的,发病多在少年期,起病隐袭,缓慢发展,到发现症状病程至少已两年,以社会性退缩、情感淡漠、意志缺乏等阴性症状为主要表现,并逐渐趋向精神衰退,妄想、幻觉很少出现,本型患者不多见,预后较差。临床上约有1/3以上病人不能纳入以上4型,而被归入未定型。

1989年中国颁布《中国精神疾病分类方案与诊断标准》第2版(CCMD 2),将精神分裂症分为青春型的、紧张型的、偏执型的、未分化型的、单纯型的、分裂样精神病、精神分裂症后抑郁、残留型的、衰退型的及其它型的。

凡是在青壮年发病,以精神活动不协调为主,具有思维联想障碍、逻辑推理荒谬,不系统的幻觉、妄想、情感迟钝淡漠,意志活动减退或缺乏,人格改变,其疾病的严重度达到与现实不能保持恰当的联系,社会适应能力下降,自知力不全或丧失,意识和智能正常,缺乏解释这些症状的心理因素,神经系统和体检都不能发现相应的器质性疾患者,应考虑为本症。

为了纠正对精神分裂诊断的泛化,CCMD-1中提出本症诊断标准必须具备症状学标准、严重程度、病程持续至少3个月以上,排除器质性的、中毒性的及情感性的精神障碍才可下精神分裂症的诊断。

精神分裂症患者的治疗,主要应用是抗精神病药物,常用的有氯丙嗪、氯氮平、氟哌啶醇等,对兴奋躁动、妄想、幻觉等疗效较好。舒必利对于本症的疗效不亚于氯丙嗪、氟哌啶醇,中小剂量有抗孤独性、抗抑郁作用。有人认为三氟拉嗪可振奋慢性病人,使阴性症状好转。电休克治疗对缓解紧张症状、抑郁症状、兴奋躁动有较好疗效。60年代兴起的脑立体定向术对本症有一定疗效,有人认为对精神分裂症本身疗效不显,有的则认为对慢性精神分裂症患者的冲动攻击行为有效。心理治疗一般作为恢复期的辅助治疗方法,使病人正确认识和对待自己的疾病,消除顾虑,增强治病信心,以减少复发。

本症患者预后与病前性格、病型、治疗、环境等有密切关系。上海(1978)对1958年出院的1200例精神分裂症患者进行出院20年随访,预后有4种:临床痊愈者约占1/4,基本缓解者占1/3,有较轻精神症状者占1/4,精神症状严重者占1/6。如果第1次发病得到及时、合理的治疗,绝大多数都可以有不同程度的好转,2/3可以临床痊愈或基本痊愈。本症复发率甚高,预防复发十分重要,防复发问题亟待解决。

#### 参考文献

- 1 夏镇夷,主编.中国医学百科全书精神病学,上海:上海科学技术出版社,1982
- 2 上海第一医学院等编.精神医学丛书,长沙:湖南科技出版社,1984.2
- 3 沈渔邨主编.精神病学.北京:人民卫生出版社,1988
- 4 相德森,主编.中国精神疾病诊断标准与案例,长沙:湖南大学出版社,1989
- 5 郑瞻培,等编.精神疾病司法鉴定及案例分析,上海:上海科技出版社,1990
- 6 夏镇夷,等编.实用精神医学,上海:上海科技出版社,1990
- 7 颜文伟.上海精神医学,1991,3(2)

(安徽省合肥市第四人民医院韩传美主任医师撰)

**阿耳茨海默病** alzheimer disease(AD) AD是引起痴呆最常见的疾病之一。主要临床表现为进行性智能减退,随着年龄增大发病率逐渐增高,65岁以上发病率可至15%左右,80岁以上可超过20%。随着人类社会人口的老年化,AD将越来越成为老年医学及整个社会所面临的棘手问题。

1907年,Alzheimer在尸检1例因进行性痴呆而死亡的55岁女性病人时发现,其大脑皮层有大量神经纤维缠结(NFT)和老年斑(SP),后被医学界确认为是第1例AD。此后几十年中,在关于AD究竟是脑的正常老年化改变过程还是造成痴呆的主要病因等方面一直争论不休。1960年Terry等确定AD是造成痴呆的一个主要疾病,并有别于脑的正常老年化改变,从而奠定现代AD概念的基础。

AD的病因迄今未明,现代研究重点集中于遗传学、免疫学、慢病毒感染、铝或其他毒性物质累积等几个方面。在AD家族调查中发现早年发病患者的部分家族的遗传方式是常染色体显性,

推测另一部分为单基因变异。与此相反,大多数老年发病的AD患者遗传因素则不明显,有作者也认为是遗传性的,其临床表现为散发的原因在于大部分患者在AD基因表达完成时已因其他原因死亡。另一观点认为AD是一种多因素所致的疾病,而非单一遗传病。在对表现为常染色体显性遗传的AD病人的分子遗传学研究中,1987年George等首先证实病变基因位于21对常染色体长臂,这个位点被认为与Down's综合症中AD发生有关。与此同时,老年斑的主要蛋白成份 $\beta$ -淀粉基因编码被纯化和基因定位,也发现位于同一基因区,推测 $\beta$ -淀粉基因就是AD基因,但1990年J.Hardy等的研究资料提示两个基因非在同一位点,而发现在同一染色体不过是一个巧合。

AD病人伴发甲状腺疾病者较多,且发现外周血中免疫球蛋白升高和有抗脑抗体存在。在脑内老年斑的淀粉样层分析中,发现有异常蛋白质纤维,这种异常蛋白质纤维可能是全身免疫系统缺陷的表现;脑血管壁的淀粉沉积也可能是全身免疫变化的结果,所以有作者提出,由于AD的遗传因素而决定其特别的免疫易感性。而外伤、中毒、病毒等其他因素则是促发机体自身免疫反应,但至今未发现AD患者有自身抗体存在。更有作者认为这些免疫改变是疾病的结果而非病因。

由于边缘系统在AD中常受累,且也发现对嗅觉系统有影响,故有学者提到非典型的或慢病毒由鼻咽上皮穿过筛板进入脑引起感染的学说。在慢病毒引起老年人痴呆的研究中,发现在人类脑组织培养中加入AD患者的脑组织浸出液,则在神经纤维缠结中可以见到神经纤维。另有学者将能使羊脑组织变性的病毒接种于小白鼠脑内,可出现典型的老年斑。

最近发现铝和硅同存在于SP的中心核区,动物实验和人胎儿神经原培养中也发现铝可引起NFT样结构。此外,在含NFT的神经原中也可见铝的累积。虽然对铝在SP和NET的形成中以及在AD的发展中所起作用结论还为时过早,但仍不失为一吸引人的假设,即铝化合物通过嗅路直接进入脑,对所在部位产生神经毒性作用。在AD病人的嗅球中发现有NFT,且已知嗅束与中央颞叶和其他相关皮层有广泛的联系,而这些结构正是AD病理变化最明显的部位。最近动物实验已证实,鼻内的铝盐可通过嗅路直接吸收入脑。空气中存在大量吸人性悬浮铝硅酸盐污染物,这些在病因中的地位也受到相当的重视。

AD的病理特点为广泛大脑皮层萎缩,且以颞叶、额叶、顶叶最明显。镜检可见大脑皮层选择性的神经原缺失,其中海马神经核、杏仁神经核及基底神经核最显著,与对照组比较减少可达40%~60%。另外,胶质细胞增生及皮层下继发脱髓鞘。本病最具有特征性的组织变化为(1)老年斑;(2)神经原纤维缠结(NFT);(3)血管壁淀粉样蛋白沉积,且以脑膜、皮层和海马血管的表现最突出;(4)海马锥体细胞出现颗粒空泡变性。SP和NFT均散在于病变部位,其数目与痴呆程度呈正比。

SP的成熟物形成球形(直径100 $\mu$ m),由退变的神经末梢、星形胶质和小神经胶质细胞围绕一淀粉样蛋白核心所组成。所谓淀粉样蛋白指的是具有相似于淀粉特殊染色特征的蛋白质物质。SP淀粉样蛋白氨基酸序列已清楚,称 $\beta$ -蛋白,又称 $A_4$ 蛋白,它是主要的膜蛋白成分,也存在于正常脑和其他许多组织中。 $A_4$ 蛋白与其质分离后而沉积于组织中才能由免疫组化染色。然而在AD病人的皮层和海马神经纤维网中可发现有 $A_4$ 蛋白沉积,有时并不出现明显的细胞反应,亦不产生临床症状,因此就假设SP形成和成熟有一过程,即 $A_4$ 蛋白的沉积是SP发生的第一步,其后为小胶质细胞及星形胶质细胞浸润,最后密集的淀粉样蛋白和继发的神经细胞反应过程所引起的形态学改变产生SP的成熟物形式。

另外,用免疫组织化学方法发现Pick氏病患者也有NFT,且有Pick氏小体存于其中,以及有细胞外的NFT发现,鉴于Pick氏病和AD均为一进行性的痴呆过程,因此推测这是一个相类似的膜反应过程,和痴呆的发生和发展有密切联系。

AD早期主要影响认知和记忆,因此与其相关的胆碱能系统

改变也较突出,现已发现有乙酰胆碱(Ach)和乙酰胆碱转移酶(CAT)活力减低;Ach合成、释放能力改变和胆碱高吸附能力减退。5羟色胺(5-HT)系统则表现为尸检脑内5-HT和其代谢产物的减少,活体脑脊液中5-HT代谢产物显著减少,这和病人在生前的情感和行为障碍密切相关。大脑皮层的去甲肾上腺素能系统的起始核为蓝斑核,AD病人该核中神经细胞减少,与之相应脑内去甲肾上腺素和多巴胺β羟酶的活性也降低。AD病人的多巴胺系统改变为脑内多巴胺(DA)和其代谢产物高香草醛酸(HVA)浓度减低;临床也发现脑脊液中HVA降低的程度和其行为障碍程度密切相关。AD患者的神经肽检查发现生长素释放因子、促肾上腺皮质激素释放因子等有减少,说明AD有某些神经肽丧失的迹象。

本病起病缓慢,大部分病人60岁以后起病,临床症状主要分为:(1)精神心理障碍:①记忆障碍。近记忆障碍为首发突出症状,后可发展至完全性遗忘。②认知障碍。精细思考首先受累,继之可出现日常生活常识的理解和判断障碍,最后可丧失工作和生活能力,可伴有视觉失认和触觉失认。③言语障碍,可表现为各种失语,如遗忘性失语、命名性失语及完全性失语。④定向障碍。⑤人格和行为障碍,情感淡漠,行为退缩,无任何主动性和缺乏注意力。(2)神经功能障碍:常在晚期出现,表现为自动症和刻板动作,可有厌食、贪食、肌张力增高,出现原始反射、腱反射亢进,病理反射阳性等。AD病程一般5~10a,终末期病人常伴恶液质、肌强直和大小便失禁。目前临床上注意到伴有锥体外系统症状强直和有肌阵挛症状的AD患者智能和功能障碍严重,预后更差。

关于诊断,首先要考虑有无痴呆,各种智力量表的智力测定是必需进行的。此外,病人的社会活动、记忆、判断、抽象思维、逻辑等均有一定程度障碍,至后期常有言语障碍和人格改变。因此,在确诊本病之前应首先除外良性老年性遗忘、老年性抑郁所致的假性痴呆及全身性代谢、中毒、营养障碍、内分泌障碍所致的智能减退。此外,血管性痴呆、颅内占位病、正常颅压脑积水等也在除外之列。故而EEG、TCD、CT、MR、PET等有助于诊断和鉴别,特别是PET尚可测定脑局部的直流量和大脑局部氧耗量,因其降低程度和部位与AD病变的程度和部位呈正相关。

AD尚无特效疗法,目前研究的药物主要目的在于改善症状和预防并发症。为延长病人存活时间,应努力帮助AD病人做好家庭的、社会的和医疗服务工作。有效的病因治疗、延缓进展和预防有待于对AD病因和发病机制更深入的了解。

根据现有对AD病机的认识,所研究的主要药物可分下列多种:(1)拟胆碱类药物,包括乙酰胆碱合成和释放促进药、胆碱酯酶抑制剂、突触后乙酰胆碱受体激动剂。(2)其他神经介质和多肽类药,包括α<sub>2</sub>肾上腺受体激动剂、多巴胺激动剂、单胺氧化酶抑制剂、GABA类药物、神经多肽和神经生长因子等。(3)脑代谢增强剂。(4)磷脂类药物,能增强神经细胞膜的流动性。(5)钙通道阻滞剂,因细胞外钙离子过度内流,兴奋神经介质毒性作用可导致神经细胞死亡,然而疗效均不肯定或作用极微弱,且大部分还有明显的外周副作用及中枢副作用。值得一提的是目前正在临床验证的新型胆碱酯酶抑制剂Tetrahydroaminoacridize(THA),据报道该药除能提高脑乙酰胆碱水平外,尚能提高单胺类神经介质浓度,治疗后1/3病人记忆、认识功能得以改善。此外,小剂量的常用的抗抑郁药物对AD病人的抑郁有改善作用。

将来AD治疗的研究方面有:(1)能产生脑缺乏物质组织的脑移植;(2)下一代化学治疗方法,包括能作用于多种神经介质药物、神经激素干预剂,免疫学方法,神经毒素阻滞剂和淀粉样产物阻滞剂;(3)如AD基因表达得以抑制,将有可能有效地预防AD的发生。

参考文献

- 1 Fred Plum. Cecil textbook of Medicine, 1985,17:1999
- 2 Robert Katzman. New England J. of Medicine, 1986, 304 (15):964
- 3 Johr Hardy. Acta Neuro Scand, 1990,82(1 29)

- 4 王新德.老年神经病学.北京:人民卫生出版社,1990.1:163
- 5 Appel S H. Current Neurology London Year book, 1986, 314
- 6 Wilcock G K. Elderly Journal of Medicine, 1988,66(256): 117
- 7 Jurg Ulrich. Acta Neuro Scand, 1990,82(129):5
- 8 Gottfries. Acta Neuro Scand, 1990,82(129):23
- 9 Steven. Acta Neuro Scand, 1990,82(129):23

(浙江医科大学附属第二医院神经科程源深教授、胡兴越讲师撰)

情感性障碍 affective disorders

情感性障碍是一组由各种原因引起的以情感障碍为主要症状的精神病,包括原发性的和继发性的、内源性的和外源性的、精神病性的和官能性的等。从狭义上讲,情感性精神病是指躁狂抑郁症而言。本症患者临床特征是情感的异常高涨或低落,可伴有思维、感知、行为等方面的障碍,并与当时的情感基本协调一致,具有缓解与复发倾向,间歇期多能保持正常。一般预后较好。

19世纪中叶,Farlet和Baillarger发现躁狂和抑郁可在同一患者身上交替发作,故命名为循环型的或双相型的精神病。Kahlbaum(1882)首先提出躁狂和抑郁是一个疾病的两个阶段。Kraepelin(1896)正式命名为躁狂抑郁症,一直沿用至今。

据ACohen(1975)的资料,本症患病率为0.3%~0.4%。中国1982年12个地区协作流行病学调查资料表明,本症患病率为0.076。西方国家本症患病率比我国高得多,是诊断概念问题还是本症在中国确实如此,已引起中国学者的注意。

本症发病年龄在16~30岁。躁狂症的发病年龄一般比抑郁症的为早,女性者发病年龄一般较男性者早。

本症病因未明。近年来从遗传和生化两个方面对本症病因作了广泛研究。在遗传方面,从对双生子、寄养子、家系的研究提示,本症与遗传的关系很大。遗传方式:单基因X遗传,X连锁基因遗传。但这些研究未得到证实。生化方面有单胺学说(受体的敏感性、更新、浓度变化)及胆碱能-肾上腺素能平衡假说。迄今未有一项研究可作为这些假说的十分有力的证据。本症的病因可能是多因素的,即遗传、生化和心理社会因素,这些因素错综复杂、相互交织。

本症临床表现患者表现为躁狂状态和抑郁状态。躁狂状态典型症状有三:情感高涨、思维奔逸和精神运动性兴奋。有人统计典型病例只占30%。抑郁状态典型症状是情感低落、思维迟缓和精神运动性抑制根据临床表现分型:(1)躁狂型,仅有躁狂发作,病史中无抑郁发作的证据。(2)抑郁型,仅有抑郁发作,病史中无躁狂发作的证据。以上两型,在同一病型连续发作3次以上,或仅1、2次同病型发作,其末次发作后已缓解8年以上,则定为单相躁狂或单相抑郁。(3)躁狂抑郁型,病程中既有躁狂发作又有抑郁发作,包括抑郁症用电休克治疗或抗抑郁剂治疗诱发躁狂,均属本型,对此型诊断时须加第3级诊断,注明“目前为躁狂发作”、“目前为抑郁发作”或“目前为混合型发作”(躁狂与抑郁混合存在,或交替发作,其两类症状之间缓解期不明显)。

据临床观察,单相躁狂发作病人,不少人在发作前先有轻微而短暂的抑郁相,常被忽略,多数学者主张将单相躁狂归入双相躁狂症。因此,当前双相与单相的区分主要是以是否曾有躁狂发作为标志,有躁狂发作者归入双相,反之归为单相。

本症诊断要点:(1)以情感高涨或低落为基本临床相,伴有相应的思维、行为改变;(2)按照CCMD-2,首次发作,躁狂持续至少1周,而抑郁持续至少2周;(3)发作后缓解完全,间歇期精神活动正常;(4)有反复发作的倾向,一般不至于发生精神衰退;(5)病前个性多有外向特征;(6)家族遗传史有重要价值;(7)躯体、神经系统及实验室检查无相关的阳性发现。

本症应与器质性精神病、精神分裂症、神经症、反应性抑郁、更年期忧郁症等相鉴别。

治疗躁狂症,如无禁忌症,锂盐当为首选药物。对于不易迅速控制的兴奋状态,可联用抗精神病药物或电休克治疗,一旦症状减轻即可单用锂盐。长期应用锂盐实行维持治疗可防止复发,应用锂盐须防过量、中毒。

抑郁症的治疗,对有严重自杀企图的,若无禁忌症,应迅即予以电休克治疗。药物首选三环类抗抑郁剂,一般10~14d奏效,应用4周无效则应更换药物。常用的有氟丙咪唑、丙咪唑、阿密替林、多虑平等。四环抗抑郁剂麦替林具有较强的抗抑郁作用。对于部分应用三环抗抑郁剂、四环抗抑郁剂无效的病人,可考虑用单胺氧化酶抑制剂。用锂盐治疗双相抑郁症可能有效。

目前认为本症可有残留缺损状态,预后并非都良好。麦镇夷等报告595例,随访11年(平均),预后良好和较好的为67%,欠佳和很差的为13%,死亡为20%。

#### 参考文献

- 1 夏镇夷,主编.中国医学百科全书精神病学.上海:上海科学技术出版社,1982
- 2 上海第一医学院,等编.精神医学丛书.长沙:湖南科技出版社,1984
- 3 沈渔邨,主编.精神病学.北京:人民卫生出版社,1988
- 4 相德森,主编.中国精神疾病诊断标准与案例.长沙:湖南大学出版社,1989
- 5 郑瞻培,等编.精神疾病司法鉴定及案例分析.上海:上海科技出版社,1990

(安徽省合肥市第四人民医院韩传美主任医师撰)

### 智力低下 mental retardation(MR) 又称精神发育迟

滞和智力残疾等,患者面广人多,遍及全世界。它给国家、社会、家庭和本人带来沉重的负担。因此,对MR残疾的预防以及早期诊断,尽快教育和治疗,减轻和改善MR儿童在生理、心理上的功能障碍,逐步达到康复的目的,为他们重返社会、参与社会成为自食其力的劳动者创造条件具有十分重要的意义。

人类对于MR儿童的关注和研究,始于18世纪末,法国伊达(J. M. G Itard, 1775~1838)采用一些着重于感官和语言的教育方式训练1名在阿维龙森林里长大的MR儿童,使其身心发展获得某些进步,他的训练方法对后世有着深远的影响。到19世纪,法国雪康(E. D. Sequin, 1812~1880)从事“白痴”的研究,生理学教育方法可以改善“白痴”的社会生活能力,他的教育成果改变了“白痴不可教”的陈腐观点。与此同时,瑞士葛更比尔(J. J. Guggenbühl, 1816~1863)开办了疗育院,收容MR儿童,通过运动和感官训练,使他们获得了进步。受他的影响,19世纪末,法国、英国、瑞士和美国等国先后开设了MR儿童学校及收容所。开始对MR儿童进行教育和训练。然而由于受到“优生学”和社会高度发展结果的影响,又兴起了“白痴隔离论”,而以隔离和绝种代替训练和教育。但意大利玛丽亚·蒙特梭利(Montessori)仍继续从事MR儿童教育方法的研究。提倡要提高弱智儿童在单独自由行动中的主动性,须用感觉和肌肉训练来促进精神的发展。最终形成了如今众所周知的“蒙特梭利教育法”。进入20世纪以后,由于受到人道主义、人权主义和民主思潮的影响,对MR儿童由隔离逐渐转变为教育和治疗。从20世纪50年代开始,美、英和瑞典等国开始为MR儿童立法和实行义务教育。并对MR的病因、流行病学和诊疗进行了研究。特别是1971年,联合国大会通过了《精神发育迟滞者权利宣言》,进一步推动了MR研究工作的深入发展。

**诊断标准** 70年代以前,以IQ<70作为MR的诊断标准。1973年,美国MR协会(AAMD)指出:“MR是指正在发育时期内,一般智力功能明显低于同龄水平,同时,伴有适应性行为缺陷。”1978年,美国的Mastenbrook用韦氏儿童智力量(WISC-R)检测出300个IQ在50~70之间的儿童,其中伴有社会适应性行为(SAB)缺陷的(得分低于两个标准差)不到35%,符合上述定义的只有100人。也就是说,单纯通过IQ来诊断的轻度MR

儿童有2/3社会生活能力是正常的。因此,AAMD提出的定义被国际广泛采用,并趋于统一。即:(1)智力明显低于平均水平,即IQ低于人群值两个标准差(IQ(70~75));(2)适应能力不足,即个人生活能力和履行社会职务有明显缺陷;(3)表现在发育年龄,一般指18岁以下。此3条缺一不可。WHO1983年采纳了这一定义,1985年又作了强调。

**MR分度** 按照AAMD1983年分级标准。根据IQ值、学习能力和适应社会行为分为:轻度MR,IQ50~55到70~85,SAB轻度缺陷,通过特殊教育,可获得阅读和计算能力,约占MR的80%~85%;中度MR,IQ35~40到50,SAB中度缺陷。通过训练,可获得手工技巧,约占10%;重度MR,IQ20~25到35~40,SAB重度缺陷,能受益于系统的习惯训练,约占4%~4%;极重度MR,IQ<20~25,SAB极重度缺陷,对腿、手、颌的技能训练有反应,约占1%。临床上一般统称为轻度(IQ70~50)和重度(IQ<50)。后者常有中枢神经系统的生物学病损。

**MR的现患率** 因各地区民族、文化、诊断标准和评估方法不同,所以现患率的可比性较差。

1. 总现患率:根据WHO1985年报告,现患率在一般人群中为30%,若加上SAB缺陷这一标准,现患率约为10%~20%。中国1988年全国0~14岁普查,现患率为10.7%。其中城市为7.5%,农村为14.6%。WHO1985年报告,在发达国家中重度MR(IQ<50)为3%~4%。轻度MR(IQ50~70)为20%~25%。不发达国家更高。

2. 性别、年龄现患率:一般男略多于女,约为1.5~1.8:1。可能与X性连锁遗传伴男性发病有关。国外报道以6~10岁组最高,国内报告9~12岁组最高。常因学习成绩落后而被发现。

**评估方法** 要求选用比较好的方法,并要做好本地区标准化工作。

1. 智力测验:目前国内外比较公认的方法有:筛查、丹佛智力筛查试验(DDST)适用于0~6岁;绘人试验,适用于3~14岁。中国有北京儿保所的50项智能发育筛选测验。诊断量表:(1)盖塞尔(Gesell)发育量表,适用于4周到3.5岁,计算发育商(DQ)。现为贝利(Bayler)量表比盖塞尔量表好。(2)韦氏学龄前和学龄初儿童智力量表(WPPSI),适用于4~6.5岁。(3)韦氏儿童智力量表(WISC-R),适用于7~18岁。

2. SAB测验:中国湖南医学院和北京医科大学均引进国外量表作了标准化。

**MR的病因** MR的病因非常复杂。涉及的范围广泛,现今只了解部分病因。尚有很多病因不明。

1. 出生前因素:(1)遗传因素:主要是染色体病,单基因病和多基因病。近年来发现很多MR是由于脆性X综合症,染色体微缺失综合症、环状染色体综合症和先天性畸形综合症等引起。(2)颅脑畸形和宫内获得性疾病:主要为母孕期病毒(风疹、疱疹、巨细胞病毒等)和弓形体原虫等感染,严重营养不良、妊高症、内分泌和子宫疾患等,以及服药、吸烟、酗酒、暴露于高铅环境和X线照射等化学物理因素的损害等。(3)母子基因型不合:RH阴性的母亲怀有RH阳性的胎儿时,由于基因不合,而引起脑组织损害。

2. 出生时因素:多见于宫内外窒息,产伤和颅内出血等。

3. 出生后因素:主要见于各种脑炎和脑外伤等疾病后遗症。严重营养不良、感觉剥夺和心理社会因素低劣等。

4. 不明原因:国外报道占重度MR20%~33%,国内报道12.79%~23%。

**MR的康复治疗** 主要是教育和训练。

1. 一体化教育:从70年代开始,大多数国家将MR儿童安排到普通儿童学校里一起受教育,并由一受过特殊训练的教师,利用适当的教材,为MR儿童提供个别辅导。对轻度MR较好。

2. 特殊教育机构:如弱智学校、弱智幼托班和职业训练班组等从18世纪开始,一直沿用至今。中国1979年开始实行。适用于中重度。



3. Poreage 早期教育训练方法:是以家庭教育为中心的早期教育程序。对 Down's 综合征效果最好,对孤独症有效。1969 年在美国 Portage 地区开始试行,1975 年在美国推广普及。现已有世界、亚洲和许多国家地区的 Portage 协会。

4. 社会康复:MR 儿童是社会的 1 分子,生活在社区中,他们既需要家庭和学校给予的教育和训练,也需要社区的积极支持,协同为他们开展各项有益的康复服务。

5. 行为矫正法:由心理学家、言语治疗师、物理治疗师、作业治疗师、社会工作者和医师协同,用该方法训练 MR 儿童的自理、社会适应和学习能力。

6. 医药康复治疗:目前尚无特效药物。临床常用脑活素、育得镇和脑复康等促进脑细胞代谢药物以及维生素 E、叶酸、微量元素锌和中药等治疗,效果均不肯定。对 MR 伴矮小、孤独寡言、少动,无甲亢家族史,心率在正常范围内可加用小剂量甲状腺片,学龄期儿童每天不超过 20mg。对 MR 伴有多动可加用氟哌丁醇、泰必利和安坦。MR 伴有运动功能障碍可以用乙酰谷酰胺肌注,每周 1 次,以 50mg 开始,逐渐加到 250mg 1 次。对口、眼、四肢畸形和肌张力增高可予理疗、体疗和相应的外科手术矫治。弱视者要配眼镜,弱听者要及早配带助听器。用时要加强营养。

因为 MR 目前尚无特效疗法。病因和发病机理尚不清楚,所以今后的主要研究是病因、预防和治疗。因为只有弄清病因后才能进行有效的预防,所以产前诊断和终止妊娠来预防 MR 的出生,以及生后防治其他疾病来预防智力残疾的发生等,为 MR 工作的上策。对已发生 MR 的早期诊断和康复,以及有效的药物治疗也是值得进一步研究的重要课题。

(安徽医科大学第一附属医院唐久米、杨正修撰;朱子杨审)

## 皮肤病学与性病学

**鱼鳞病** ichthyosis 一组在临床上皮肤有鱼鳞状鳞屑,在病理上有角化过度的疾病。对此病的认识已有两千年的历史,对其病因、临床表现、治疗已有较多的研究,近代对其发病机制的研究已进入生物分子学水平。

鱼鳞病可分为两大组,1 组为遗传性的,另 1 组为获得性的。遗传性鱼鳞病又分为常见的常显性寻常型鱼鳞病、性连锁隐性鱼鳞病、板层样鱼鳞病和大疱型鱼鳞病;少见的有可变性红斑角化病、丑胎、胶样儿;更少见的是伴有鱼鳞病的几种综合症,如共济失调多神经炎样病、点状软骨发育不良、套叠性脆发症、智能不全空率性双瘫鱼鳞病、侏儒智能肾发育不良性鱼鳞病、白内障性鱼鳞病、耳聋性鱼鳞病红皮病等。获得性鱼鳞病在临床上和组织上类似于常显性寻常型鱼鳞病,发病于成年人,常合并:(1)肿瘤,如淋巴瘤、多发性骨髓瘤、肺癌、乳腺癌、子宫癌;皮损常在恶性病变发生之后,但偶也可在恶性病变之前,一般随恶性病变的治疗而好转。(2)红斑狼疮。(3)麻风。(4)肉样瘤。(5)慢性营养不良。(6)甲状腺功能低下。(7)也可因服用药物引起。某些药物可影响脂质代谢,尤其是降低胆固醇的药物,如菸草酸、triparanol、Dixyrazine 等。

1983 年, Rhonda 等对鱼鳞病的研究资料作了全面的复习,发现常显性寻常型鱼鳞病的发病率为 1/250~1/1000,性连锁隐性鱼鳞病为 1/6 000,板层样的和大疱型的鱼鳞病约为 1/900 000,临床上不同表现,常显性寻常型鱼鳞病常在 3 个月至 5 岁之间发病,两性发病率无差异。家族中有“干皮”病史。基本损害为细小的白色透明的或半透明的鱼鳞状鳞屑,边缘可游离。皮损分布于背、臀、四肢伸侧为主,头面部、肘肘膝等皮肤皱褶处常不受累。夏季症状减轻,冬季加重,青春期症状最严重,青春后期症状可缓解。常伴掌跖角化、纹理增粗增多;毛周角化及异位病史。1965 年 Kerr 和 Wells 从常显性型鱼鳞病中划分出在遗传史、临床表现不同的鱼鳞病,谓之性连锁隐性鱼鳞病 (Recessive X-linked Ichthyosis, RXLI),在 1 岁以内即发病,男性患者多见。临

床表现鳞屑较大,颜色深黑色,损害可累及腹部、四肢弯曲部及头面耳颈部。皮损常持续终身不缓解。可伴隐睾、角膜后弹性层混浊。板层样鱼鳞病为常染色体隐性遗传,两性均可发病。婴儿在出生时就可有“胶样儿”表现,全身覆有厚的角质膜,10~14d 角质膜开始脱落,代之全身大片鳞屑、红斑,常伴有秃发、手足皸裂、甲板有沟槽表现。鼻腔、口腔、眼睑粘膜外翻是有特征性诊断意义的体征。由于汗腺堵塞,在气温升高或运动后引起发热。大疱型鱼鳞病为常染色体显性遗传,两性均可发病,出生时皮肤潮红,受摩擦后易破而形成糜烂面。大疱在儿童是常见的损害,在成人约有 20% 发病,不同大小的水疱可成群发生,也可局限于小腿脚。鳞屑常较厚,早灰棕色,在肘、膝弯曲部位呈疣状增生,犹如“豪猪”样。

传统的治疗方法为对症治疗,采用水合作用较强的药物或角质还原剂外用,如尿素、 $\alpha$  羟酸、丙二醇乙醇等。为探讨对本病的有效治疗方法及预防方法,近代对鱼鳞病的发病做了多方面的研究工作:

1. 细胞动力学。正常情况下,表皮细胞的再生、分化、脱落是一种精微协调的过程,表皮细胞是一个很好的平衡系统,使角质层维持一定的正常厚度,而鱼鳞病患者这一系统功能发生紊乱。Frosf 等用氟胸腺嘧啶研究角质细胞的生长周期,发现在常染色体显性鱼鳞病和 RXLI 患者中,角质细胞的分裂指数是正常的,鳞屑的形成是因为细胞脱落速度减慢,造成保留性角化过度;而在板层样鱼鳞病和大疱型鱼鳞病患者中,角质细胞的分裂指数较正常增加几倍,造成增殖性角化过度。因此,对后两型鱼鳞病可选用抗代谢类药物,如氨基嘌呤、环磷酰胺进行治疗。

2. 脂质代谢。角质层主要由两部分组成,即角质细胞与细胞间质。角质细胞的增殖与脱落处于动态的平衡,维持着正常的角质层厚度。细胞的脱落是由细胞间质的粘合力来调节的,而细胞间质的主要组成是脂质,因此,正常的脂质代谢维持角质细胞间的粘合力,而代谢失常就可能影响粘合力,在鱼鳞病患者中,此种粘合力增强,以致细胞脱落速度减慢,临床表现为鳞屑。在 RXLI 患者中,脂质代谢的异常表现在患者的血清和表皮中胆固醇硫酸盐含量增加,游离胆固醇含量减少,从而造成二者比例失常。胆固醇硫酸盐虽然在角质层中含量很少,在脂质中约占 2.6 ± 0.2%,但是在维持细胞间的结合力方面是很重要的,它是一种双极性脂质,可与二价阳离子,例如钙、镁、锌结合,形成—S—S 键,使角质细胞紧密结合,影响正常脱落,促使鳞屑形成。游离胆固醇是维持细胞膜流动的重要调节者。因此,二者对角质层的稳定性起重要作用。在正常情况下,胆固醇硫酸盐和游离胆固醇在角质层中的比例为 10:1,如前者含量升高,或后者含量减少,造成比例失常,就可形成鳞屑。

这些研究为 RXLI 患者的诊断与治疗提供了新的方法。如胆固醇硫酸盐在血浆中主要由低密度脂蛋白携带,致使低密度脂蛋白电泳加快,因此可用脂蛋白电泳作为辅助诊断方法。临床上用 10% 胆固醇霜外用,以提高角质层中胆固醇的含量,使细胞脱落加快,取得较好的疗效。

3. 酶。1969 年 France 和 Liggins 报告了胎盘类固醇酯酶缺乏综合症,该症患者分娩的婴儿有鱼鳞病表现。以后研究发现,此酶存在于各种组织,如白细胞、角质细胞、毛囊、成纤维细胞。其作用底物是胆固醇硫酸盐,可移除硫酸盐而使其成游离胆固醇。1978 年, Shapior 等发现有 RXLI 患者皮肤成纤维细胞中类固醇酯酶 (STS) 缺少,并提出 STS 的缺陷是 RXLI 发病的生化基础,由于此酶缺陷,使其作用底物胆固醇硫酸盐含量增加,加大了细胞间质的粘合力,从而产生鳞屑。以后 Epstein 提出 STS 介导的膜流动在鳞屑的形成中起作用。

4. 基因。随着分子生物学的发展,通过体细胞杂交技术和 XY 染色体易位缺失的分析,证实 STS 的基因位点在 X 染色体短臂二区二带三亚带上 (XP22.3),并成功地克隆了 STS 基因的 cDNA 探针,以此证实 RXLI 患者中有高频率的 STS 基因缺失。这些研究为今后对携带者的检测、产前检查提供了可能性。

并为用基因工程方法根治 RXLI 带来希望。

#### 参考文献

- 1 Epstein E H. Science, 1981, 214: 659~660
- 2 CRhonda E R. Academy of Dermatology, 1983, 8(3): 285~297
- 3 Lykkesfeldt G. Clinical Genetics, 1985, 28: 231~237
- 4 Ballabio A. Proc Natl Acad Sci, 1987, 84: 4519~4523

(上海医科大学方丽教授撰)

### 性传播疾病防治 prevention and treatment of sexually

transmitted STD prevention and therapy 性传播疾病(STD)是一组由多种病原体引起的以不洁性生活接触为主要传播途径的传染病。随着医学科学的发展,国际间将凡可通过性接触传播的疾病,统称为性传播疾病。现今已知约有20多种在世界范围内广泛流行,对人类健康构成严重威胁。尤其是1981年6月,美国首先发现艾滋病(AIDS)以来,疫情迅猛上升,病死率极高,人称“超级癌症”。

STD已是世界上重要的社会公共卫生问题。因此,研究STD的防治,有着极为重要的现实意义及长远的社会意义。

60年代以前,医学界研究性病的范围,仅为梅毒、淋病、软下疳、腹股沟淋巴肉芽肿、性病性淋巴肉芽肿等5种,称为“经典”性病。70年代以来,随着某些社会人群性观念和行为习惯的改变、避孕药剂的广泛应用、国际间人群交往流动增多等社会条件的变化,以及实验诊断方法改进和提高、新的治疗药物问世等微生物学和临床医学知识的进步与发展,使性病的研究范围有了重大变化。这就导致老的性病概念被新的STD所代替。STD的概念与老的性病概念,不同点在于:(1)STD是以传播方式分类,所有STD的共同点是由某些病原微生物引起的以生殖器官患有的疾病,且主要为不洁性行为接触传播;(2)病人只要发现有一种STD,就可能有一种或几种STD同时存在;(3)由此,提示医生进行病原学检查。引起STD的病原体涉及到螺旋体、真菌、衣原体、支原体、细菌、病毒、寄生虫等。近些年来,至少发现6种病毒,如人巨细胞病毒(HCMV)、单纯疱疹病毒(HSV,尤以HSV-1与STD最密切)、人乳头瘤病毒(HPV)、人类免疫缺陷病毒(HIV)、乙型肝炎病毒(HBV)、传染性软疣病毒等与STD有关。因而,无论从STD的病原学、临床学和预防医学等,其研究范围都远远超出经典性病的领域。STD的预防控制以及消灭不仅是医学科学本身的问题,而与各国政府的重视和民族素质的提高有直接关系。

在中国及其他国家,在今后相当长一个阶段,STD将是医学研究的重要课题,而AIDS更是研究的重点。由于病毒性STD发病率较高,疫情发展迅速。欧美一些国家做了大量研究,如单纯疱疹病毒Ⅱ型(HSV-Ⅱ)引起的生殖器疱疹(GH),在美国性活跃人群中,有30%发生过,在一些大学生中的发病率已超过淋病,认为GH居STD中的第二位。在西欧、北美等工业化国家发病率也较高。GH除原发者外,尚可复发。有资料报告,第一次感染HSV-Ⅱ后,一年内近60%的病人复发。男性同性恋者HSV-Ⅱ感染占有相当重要地位,它是仅次于淋球菌引起男性肛门直肠炎的病原。由于GH引起的严重危害,又与宫颈癌、前列腺癌、阴茎癌的发病关系密切,而目前尚缺乏特异的预防和治疗手段,在医学界日益受到重视。中国目前缺乏HSV-Ⅱ感染现状的系统资料,急需认真予以调查研究。此外,尖锐湿疣系由人乳头瘤病毒(HPV)引起的又一种STD,在性活跃人群中发病率亦高。据西方国家对性接触者追踪调查资料,约有2/3与本病患者发生性接触的人,患有同样疾病。对尖锐湿疣,既往认为是无所谓的疾病。但近年来的资料表明,它不仅发病率逐年增高,而且与宫颈癌、阴茎癌的发生关系密切,因此,越来越受到医学界的重视。当前,尖锐湿疣在中国的发病逐渐增多,亦需积极开展防治研究工作。人巨细胞病毒(HCMV)可以持续感染,并可在宿主某些细胞内潜伏,当宿主免疫系统发生变化时,可使潜伏状态的HCMV得以重新

活化。有报道说,HCMV可以在前列腺潜伏,并在前列腺腺细胞核中查出HCMV抗原。同时,前列腺癌病人HCMV抗体滴度也随之增高,HCMV与宫颈癌发病关系密切,而与膀胱癌及其它恶性肿瘤的关系,是目前研究的热点。HCMV与乙型肝炎病毒(HB)可同时感染,因此,如何进行两者的鉴别诊断,也是医学界关心的问题。乙型肝炎病毒(HBV)可从精液或阴道分泌物排出,夫妻间一方感染HBV后,另一方感染机会增多。国际上已将其列为STD之一,但中国目前尚未明确为STD。艾滋病(AIDS)虽然可以通过多种途径传播,如母婴传播、吸毒或输血及血液制品传播,但性行为接触则是主要传播方式。男性同性恋或异性之间的性行为接触,则是AIDS疫情上升迅猛、传播广泛的重要途径。目前,医学界公认,人类免疫缺陷病毒(HIV)是引起AIDS的病毒的原因。近年来的研究资料证明,HIV有两种类型,即HIV-1(主要在美洲和西欧一些国家流行)、HIV-2(主要在西非)。非淋菌性尿道炎(NGU)也是近年来一些国家最常见的一种STD。NGU以往统称为非特异性尿道炎。主要是由砂眼衣原体和解脲支原体引起。NGU好发生在青、中年性活跃期,感染或发病者多半未婚,25岁以下者占总病例的60%。70年代以来,受到性解放思潮的影响,很多人不愿用避孕工具而改用避孕药剂等,故如女患阴道炎、尿道炎、宫颈炎者明显增多。因此,NGU已成为欧美国家最常见的STD之一。英国已将其列为必须报告的一种STD。女性患者多数无临床表现或表现为白带增多,难以确切掌握其发病率,但有报告指出,女性患NGU者是男性的4倍。NGU可与淋病同时或交叉感染,因症状相似,但其治疗用药不同,故在临床诊断上应予慎重区别。

早期获得明确诊断,对防治STD极为重要,也是以往的成功经验。诊断STD除以临床表现和流行病学史为依据外,实验诊断则是确定STD的重要诊断手段。关于STD的实验诊断,医学界积累了大量经验。如梅毒除可采用暗视野检查梅毒螺旋体外,VDRL、RPR、USR等非梅毒螺旋体抗原试验还可用于筛查试验,而确诊试验则可采用TPHA、FTA-ABS等血清学试验;淋病的实验诊断,除可直接涂片镜检在白细胞内查找革兰氏阴性双球菌外,培养分离淋球菌则是主要实验诊断手段;GH可采用病毒分离、Tzanck涂片检查病毒包涵体,电镜检查病毒颗粒,亦可采用ELISA、RIA等血清学试验;NGU的实验诊断,除尿道、宫颈分泌物涂片及淋球菌培养试验外,尚可做衣原体、支原体培养;软下疳可做杜克雷氏杆菌培养,阳性即可确诊。对其它STD,尚可根据其病原进行相关实验检查。关于STD的治疗,可参看文献介绍按常规进行。但对耐青霉素淋球菌的治疗,则视药敏试验结果选择相应抗生素,这对治疗至关重要。同时,应对耐青霉素淋球菌的耐药质粒进行深入研究。

性传播疾病的防治,各国政府及医学界极为关注。但由于受到社会条件的制约,短时期控制疫情将有很大难度。为此,今后应大力加强宣传教育,提高人们对性的正确认识,做好自我预防保健工作。而医学界的重要攻关项目,则应以增强个体免疫功能作为突破口,在有关STD的疫苗研制方面加强科研工作。尤其是对人类健康生命威胁极大的AIDS的治疗,预防疫苗的研究将是今后研究的热点,而且需要投入更多的人力、财力。中国和许多国家都在筛选中草药用于AIDS治疗,有些已在体外实验证明有抑制或杀灭HIV的作用,预计其将有光明的前景。

#### 参考文献

- 1 Jaffe H W. Ingesto Dis., 1981, 2: 1991
- 2 Catterall R D. Lancet., 1981, 8215: 315
- 3 片庭义. 综合临床, 1981, 30: 2121
- 4 Handsfield H H. N Engl J Med., 1982, 360: 950
- 5 Brown S. Lancet, 1982, 8315: 1366
- 6 国外医学(皮肤病学会分册), 1986, 3
- 7 叶干运, 等. 性传播疾病. 南京: 江苏科学技术出版社, 1988
- 8 国外医学(流行病学传染病学分册), 1989, 1: 8~11
- 9 Davis G R. J-Ingest-Dis, 1990, 162(1): 13~20

10 刘辅仁, 中华皮肤科杂志, 1990, 3, 163~164  
(辽宁省卫生防疫站陈书兴主任医师、李树藩主任医师撰)

## 眼、口腔与耳鼻咽喉科学

**眼科学** prevention and treatment of sexually transmitted diseases 眼科学是研究视中枢、视路、眼球及其附属器等视觉器官疾病防治的学科, 是临床医学的一个组成部分。

视觉与听觉器官是人体感受外部信息最多最重要的器官。耳聪目明才能赋予个体更多智慧。所以中国自古以来, 用聪明一辞以表示高智商。

人类历来对眼病防治十分重视。公元前 2200 年巴比伦 Hammurabi 玉法典中、公元前 1550 年古埃及纸草文和公元前 1400 年中国殷墟甲骨文中都有有关眼病的描写。古希腊在公元前 1 世纪左右就施行过白内障手术, 公元 8 世纪钜拔白内障手术自天竺传入中国, 王焘在《外台秘要》一书中详细叙述了这一手术的操作过程。公元 1078~1085 年间, 中国宋王朝太医局有了眼科专科。大概在公元 13 世纪中国有了眼科专著, 如托名孙思邈的《银海精微》、倪维德的《原机启微》等。

1851 年 Helmholtz 发明检眼镜, 被公认为眼科学的新起点。1856 年 von Graefe 创用线状刀作虹膜切除治疗青光眼, 1905 年 Schiöt 设计成功眼压计, 1911 年 Gullstrand 制成裂隙灯显微镜, 1925 年 Gonin 用透热凝固术封闭裂孔治疗视网膜脱离, 1940 年 Филатов 以同种角膜进行光学移植, 1961 年 Novotony 及 Alvis 将荧光血管造影术应用于眼底病检查, 1971 年 Machemer 设计了闭合式玻璃体注吸切割术, 此外, 如中心视力表的制订、视野计的研制、视觉电生理的成就, 以及眼内镜植入术 (IOL)、各种激光在眼科临床上的应用等等, 这些成就均可认为是眼科学发展史上的里程碑。

近代以来, 中国医学分成由西方传入的西医学及中国传统医学两大体系, 眼科学也不例外。

西医学自 19 世纪后叶传入中国后, 至 20 世纪 20 年代起, 中国就有了自己的西医学专家。1924 年李清茂翻译并出版的《梅氏眼科学》, 是用汉语系统介绍西医学的第一部专著。经过将近 1 个世纪, 在毕华德、林文秉、高文翰、罗宗贤、石增荣、陈耀真、郭秉宽、张锡祺等的努力下, 为中国的西医学奠定了基础。

中医眼科学在鸦片战争以后半封建半殖民地的历史条件下, 进展迟缓, 直到 50 年代初党中央提出“中西医结合”为卫生工作方针之一之后, 才有了新的生机。目前虽然尚处于起步阶段, 而在提高眼病治疗水平方面已有可喜成效。可以预见, 这种中、西医学的互补性将越来越受到学者重视。

随着国民经济迅速发展, 包括眼科学在内的医学事业迅速发展, 中、西医学工作者队伍不断扩大, 国内外学术活动十分活跃; 学术专著和译著陆续出版; 中、西医学专业杂志纷纷创刊发行, 呈现出繁荣局面。

眼科学发展与自然科学, 特别是各医学基础学科和各临床学科的发展紧密联系, 而眼科学的进步也促进着其他学科。例如显微手术和高分子化学的成就, 使白内障手术有了突破; 角膜移植术的成功, 实开各种器官移植之先河; 电子显微镜的发明, 对房角超微结构有了进一步认识, 使青光眼防治水平得到提高; 在降压药药理研究中, 受体学说有了新的证明, 而受体学说又为寻求抗青光眼新药指示了方向; 沙眼衣原体的发现不仅为防治沙眼开辟了局面, 也为微生物学分类增添了一个新纲目; 视觉电生理为设计人工智能提供借鉴, 电脑叠加技术又更新了视觉电生理的测定方法。其结果, 使眼科学作为临床医学中一门独立的系统学科, 且形成了新的分支学科。如眼流行病学、眼病理学、眼遗传学、眼免疫学、神经眼科学等等。

眼科学作为临床医学的一部分, 与临床各学科更有着广泛

联系。视器是一个光学器官, 结构特殊, 具有各种胚胎起源、细胞类型、代谢过程。例如视神经及视网膜是脑组织的直接延伸部分, 不仅可以从视野、瞳孔变化上反应出中枢神经系统的病变, 而且眼底检查、眼外肌功能检查等所见, 可以给心血管科、血液病科、内分泌科、皮肤科、消化科、神经内外科等等几乎所有临床学科提供某些疾病的诊断依据。反过来, 全身各系统中很多疾病都可能引起眼部改变。

第二次世界大战后, 世界范围内医药卫生事业发展迅猛, 随着新技术、新药物、新器械的开发, 眼科学在临床和基础研究方面均有很大提高。临床方面如亲水性角膜接触镜、眼内窥镜、冷凝、玻璃体切割、眼底血管荧光造影、视网膜电图 (ERG)、眼电图 (EOG)、视诱发电位 (VEP)、超声波扫描、电子计算机分层扫描 (CT)、磁共振 (MRI) 的应用等等。基础方面如遗传性眼病的遗传基因、免疫性眼病、视网膜色素细胞及视神经节细胞培养等等。中国眼科学者在以上这些领域里, 也做出了不少工作, 有的已达到国际先进水平。展望 21 世纪, 眼科学尚面临眼病模拟、细胞培养、生物控制、遗传工程、组织移植、人工视觉等重要课题。同时, 还必须充分应用现代科学方法研究中国传统眼科学, 不仅从临床上, 而且要从理论上得到新的飞跃, 使之与国际眼科学合流, 更好地为全人类造福。

(安徽医科大学眼科学教研室黄叔仁教授撰)

**眼科影像诊断** 显示病变形态的检查方法称影像检查法, 它在眼部疾病的诊断中占有重要地位, 眼科常用的影像检查包括 X 线、眼眶造影和眼眶血管造影、放射性核素扫描、超声、CT、磁共振成像 (MRI) 等, 各有其优点, 也有一定的局限性。

1895 年伦琴发现 X 线, 1897 年斯威特 (Sweet) 把 X 线检查应用于眼部异物诊断, 1915 年诺曼 (A. G. Norman)、1921 年伏格特 (Vogt)、1927 年康伯格 (Comberg)、1938 年戈尔德曼 (H. Goldmann)、1957 年施殿雄、1960 年张效房等设计出各种异物定位法, 几经改进, 已成为最常用的定位法。X 线平片是最早用于眼眶病诊断的影像法, 1941 年法伊弗 (R. I. Pfeiffer) 报告 200 例眼球突出的 X 线表现, 其中 70% 有阳性发现, 42% 有诊断意义。不少作者认为 X 线平片对脑膜瘤、视神经胶质瘤、骨瘤和软骨瘤等 30% 的病例有定性诊断意义。有些 X 线平片看不出病交, 断层摄影可显示, 1975 年劳埃德 (G. S. Leoyd) 认为垂直位断层是检查眼眶的好办法。但 X 线底片分辨力差, 只有到晚期发生眶骨改变才有肯定意义。

眼眶造影是在 X 线平片基础上发展起来的一种影像诊断技术。1955 年考伊 (J. W. Cowie) 等提出阳性对比剂眼眶造影, 1956 年伯特尔森 (T. I. Bertelsan) 等提出阴性对比剂眼眶造影, 均可发现早期眶内肿物, 但只能显示其轮廓, 且对病人有痛、有害, 现已很少应用。眼眶静脉造影比较安全, 1951 年德耶恩 (Dejean)、1969 年维格诺德 (J. Vignand) 等不断改进方法, 可以直接显示静脉畸形, 间接显示占位病变, 1975 年齐德斯 (B. G. Ziedses) 应用减影技术, 近年来数字减影血管造影 (DSA) 取代传统方法, 血管显影更清晰, 但操作复杂, 临床很少应用。眼动脉造影也只限于怀疑颅脑沟通或与颈动脉有关的疾病。

1952 年托马斯 (Thomas) 将  $^{32}\text{P}$  用以诊断眼内恶性肿瘤, 为放射性核素在眼科应用的开始。1972 年罗斯门德 (R. M. Rossonondo) 首先介绍核素泪道造影术, 1975 年赫维茨 (J. J. Hurwitz)、1978 年理查德 (M. C. Richard) 利用计算机辅助的  $\gamma$  线照相机进行定量泪道闪烁照相术 (QLS 法), 是一种有价值的方法, 但仍不能取代 X 线碘油造影。1977 年弗拉纳根 (Flangan) 以  $^{67}\text{Ga}$  及  $^{90\text{m}}\text{Tc}$  行眼眶扫描, 有助于内分泌突眼、囊性病及肿瘤的鉴别, 但特异性差, 假阴性多而被其他方法取代。

超声探查是眼病诊断的一次突破, 成为眼病尤其是眼内肿瘤和眼眶疾病不可缺少的诊断方法。1956 年蒙特 (G. H. Mundt) 首先介绍了超声探查眼病, 此后奥克斯拉 (A. Oksala)、鲍姆 (G. Baum)、布兰生 (N. R. Branson)、科尔曼 (O. J. Coleman) 等

对眼科超声诊断学的发展作出了重要贡献。1973 奥索利格(K. C. Ossoinig)首次采用标准化 A 型扫描技术,并称可对 50 种眼内和眶内疾病作出定性鉴别诊断,认为脉络膜黑色素瘤只要凸出 1mm 即可被测得,大于 1.5mm 可作出鉴别,超过 2.5mm 能可靠地与其他病变鉴别,诊断正确率为 96%,正确排除率为 98%。大多数学者认为 A 超适用于生物测量和病变组织学诊断,而用于临床诊断和指导治疗以 B 超为佳。超声探查为眼部生物学测量提供了更精确方法。1973 年奥索利格,1979 年科尔曼、虞积生等大批学者开展此项工作。1975 年伯克霍特(R. D. Binkhorst)用超声生物测量计算人工晶体度数,至今已广泛应用。1973 年科尔曼认为超声对脉络膜黑色素瘤揭示率为 96%。1984 年奥索利格认为标准化 A、B 型扫描交替检查技术是诊断和鉴别后玻璃体出血、视网膜脱离和视网膜前膜的特效方法。超声异物定位较直接,与球壁关系清楚明确,但小异物和视网膜前出血易混淆。1987 年费尔南德斯(J. Fernandez-vigo)认为超声扫描对白内障的鉴别诊断是一种可靠方法。1972 年科尔曼、1981 年宋国祥认为超声检查揭示眶内占位病变的准确率达 88%~98%,但组织学诊断比较困难,1983 年宋国祥把肿瘤边界,内部回声,可压缩性等综合考虑,对一些具有特殊声学结构的肿瘤术前可作出组织学诊断。超声对 Graves 病诊断正确率 1983 年奥索利格报告为 98.5%,1987 年赖巴比(A. Reibalbi)报告为 97.7%。但超声对眶尖、眶壁及眶周围结构的病变分辨力较差。1974 年海曼(B. N. Hyman)将超声 Doppler 应用于眼科,1987 年马德黑纳(M. Martorina),1990 年科特瓦尔(P. S. Kotval),1991 年利布(W. E. Lieb)、宋琛等认为超声 Doppler 尤其是彩色 Doppler 可作为低眼压性青光眼、眼及眼眶缺血性、血管性病变的常规诊断工具。

CT 的应用是眼科影像诊断的又一突破。可弥补 B 超的不足,被誉为活体影像解剖技术。1974 年兰伯特(V. L. Lampert)报告 CT 在眼科的应用,对于揭示眶内和邻近部位病变特别是肿瘤优于其它方法,注射造影剂后可提高对软组织病变的分辨力,增加病变可见度。1977 年劳埃德和安布罗斯(J. Ambrose)报告 75 例眼眶原发肿瘤,CT 和眶静脉造影准确率为 91%,超声为 86%,X 线断层照像术为 73%。1977 年达劳(R. L. Dallow)称 CT 易揭示实体肿瘤,但不易发现皮样囊肿。1990 年宋国祥则认为 CT 对眶内皮样囊肿可作出定位、定性诊断。CT 对眼型 Graves 病的诊断价值也已被大多数学者肯定,阳性率可达 74%~90%。1978 年吉田秀彦认为 CT 可鉴别眼眶真、假性肿瘤。1983 年鲁赫曼(M. C. Ruchman),1987 年蔡用舒等指出眶内海绵状血管瘤的 CT 特点,认为 CT 虽不能做出病理诊断,但常可提出有价值的参考意见。1977 年科尔雷斯(C. R. Kollarits)认为 CT 探测球内、眼眶内异物是一项先进的辅助检查技术,1989 年马世英认为 CT 对眼内多发和非金属异物有很高鉴别能力,对眼内及球壁边界异物检出率为 98%,而 X 线则为 90%。1977 年金子明博等认为 CT 扫描眼内病变其准确率比超声波差些,对病变内部结构不能揭示,组织学诊断能力低于 B 超,二者结合应用可达到最好的诊断效果。

磁共振成像(MRI)使眼科影像诊断更趋完善。1973 年卢特波(P. C. Luterbur)报道了 MRI,1983 年伊凡(I. Van Moseley)、拉里萨(J. Larrissa),1987 年周国筠开始用于眼病诊断。1985 年比兰克(L. T. Bilaniuk)利用部分饱和和回收次序显示出仅隆起 3.9mm 的脉络膜黑色素瘤。1989 年多蒂巴切(R. K. Dortzbach)等认为 MRI 以射频作为能量,穿透能力强,又有 4 个成像参数包括具有组织学特征的质子密度及  $T_1$ 、 $T_2$  和质子流动情况,因而对病变发现率、定性和定位诊断均优于 B 超和 CT。1987 年佩曼(G. A. Peyman)和马非(M. F. Mafee)认为黑色素瘤  $T_1$  和  $T_2$  均较短,在  $T_1$ WI 为较强信号,而在  $T_2$ WI 为低信号,动脉、静脉血管瘤在  $T_1$ WI 和  $T_2$ WI 像上为无信号或低信号,对于这些特殊组织参数变化,MRI 有组织学诊断能力。1987 年阿扎卡(B. Azarkia)认为 MRI 缺乏骨伪影,管内和颅内视神经、视交叉和视束及其肿瘤均可被发现,在视路和其病变的定位、定性诊断上,MRI

优于 B 超和 CT。显示动脉、静脉血管交通方面,MRI 优于超声,更优于 CT。MRI 通过变化 TR 和 TE 可显示肿瘤与视神经、脑组织和骨骼间关系,在定位诊断上优于 CT。1987 年比兰克认为在 Graves 病诊断方面,除发现肌肉肿大外,在眶尖部显示肌肉和视神经的压迫关系方面优于 CT。1991 年宋国祥等认为在诊断眼眶病方面,MRI 优于 CT,更优于 B 超,诊断眼内病方面,B 超优于 MRI 和 CT。

CT 机器仍在不断改进,使断层更加清楚细致,与其它新技术综合使用,产生一种实体感,对病变诊断和手术进路选择更有意义。电子计算机、数字图像处理等技术使超声更有高分辨力。丰富的灰度梯度或彩色显示,功能更加丰富,应用更为广泛。超声全息诊断仪仍在不断改进中,彩色 Doppler 在眼科显示出很好的临床应用前景。MRI 对软组织钙化斑、骨折线、骨破坏尚不能显示,扫描时间长。CT、MRI、超声尚不具备显微镜那样显示组织结构的能力,可根据多方观察及病变的影像学特点,推断病变性质或组织学诊断,为治疗方法的选择提供更可靠的依据。

(北京同仁医院眼科魏文斌主治医师撰;陈积中审)

**激光在眼科的应用** 激光是 60 年代初出现的一种新颖光源,激光技术是近代科学的一项重大成就。激光在医学领域的应用起始于眼科,世界上第 1 台医用激光机就是红宝石视网膜凝固机,1961 年在美国问世,在中国 1971 年上海市第六人民医院首次报导了红宝石激光凝固视网膜裂孔的临床应用。由于激光具有单色性好、相干性好、亮度高、方向性好的特点,加上现代各种新技术的结合,如电子计算机、光纤、图象分析、摄影录像、荧光光谱和超声技术等,使激光技术的研究与发展日新月异,在各种疾病的诊断和治疗上得到广泛的应用,现在已逐渐形成一门边缘学科—激光医学。激光的生物效应和眼的激光光谱特性与激光产生的工作物质和激光器的种类密切相关。目前眼科常用的激光有如下数种:

1. 氩激光。氩激光是当今最成熟的激光器,主要产生 3 条谱线光,它们的波长分别为 63.28 $\mu$ m、1.15 $\mu$ m 和 3.39 $\mu$ m,其中波长为 63.28 $\mu$ m 光最常用,为连续发射的红光,输出功率很低,一般是几个毫瓦,应用方便安全。局部照射可改进血液循环,增强代谢,调节神经功能,促进病变修复。眼科常用于治疗外眼部急性炎症和某些眼底疾病,如中心性浆液性脉络膜视网膜病变,外伤性视网膜病变,对促进黄斑部及视网膜水肿消退,促进视功能的恢复有良好的作用。对高度远视、屈光参差、斜视引起的弱视,也有助于提高视功能,这可能是由于视网膜色素层特别是黄斑部对 63.28 $\mu$ m 的氩激光有很高的吸收率,锥体细胞对光谱吸收的敏感度更靠近红波段的缘故。

2. 氩激光。氩离子激光器产生的激光波长在可见范围,其中最强的谱线有 2 条,一为 5.145 $\mu$ m 的绿光,一为 488 $\mu$ m 的青光,这些光能很好地为眼底色素组织吸收,同时血液中的血红蛋白对它们有较高的吸收率,故在眼科应用较为广泛。医用氩激光机是装在裂隙灯显微镜上的,具有低功率连续波和高功率脉冲波 2 种输出,前者作瞄准光,后者作治疗光源,2 种光源同轴。脉冲宽度幅度可调,输出功率 0.5~2W,是治疗眼部疾病特别是眼底血管疾病和眼内出血性疾病比较理想的激光。此外,氩激光小梁成形术在治疗开角性青光眼有重要价值,近年来有些学者提倡此法可作为开角性青光眼的首选治疗。单疱病毒性角膜炎局部照射可取得肯定效果。翼状胬肉及角膜新生血管可阻抑其发展。

3. 二氧化碳激光。波长 9.6~10.6 $\mu$ m,位于光谱中的红外线中段。由于水可大量吸收此波长的光线,因此二氧化碳激光可应用于一切含水的组织,输出功率从数瓦至数十瓦量级,具有高效率的特点。局部照射后产生热效应使病变组织产生非特异性凝固坏死、产生碳化、氧化作用。在眼科常用于治疗外眼赘瘤如疣状痣、粟丘疹、寻常疣、血管瘤、色素痣和基底细胞瘤等。

4. 红宝石激光。为波长 69.43 $\mu$ m 的红色可见光,脉冲发射,因不同眼病治疗的要求激光机可制成各种类型,用于治疗眼底疾

病的输出能量需从零点几焦耳到 1.0J 连续可调,用于虹膜打孔或滤帘切除的能量要达 2.3J。在网膜裂孔周围进行激光照射可使裂孔封闭治疗视网膜脱离,但有其一定的适应范围,单纯性视网膜裂孔或合并扁平视网膜脱离者有效。此外,尚可作为其他网膜手术的一种补充治疗手段。利用红宝石激光作虹膜切除在我国因虹膜颜色较深可取得满意透切的效果,在国外因种族及虹膜色泽较淡效果则较差,故仍需寻找虹膜不同颜色的有效波长激光。

对前房和玻璃体积血块进行焦点脉冲照射可加速血块崩解,血红蛋白逸出,促进吸收。但需注意激光投射方向要避开黄斑部及直接暴露的虹膜。

5. 掺钕钇铝石榴石(Nd-YAG)激光。波长 1.06 $\mu\text{m}$ ,是不可见光波,特点是增益大,功率阈值低,适宜做连续激光及重复频率激光器,利用倍频技术可获得波长 0.53 $\mu\text{m}$  的绿色激光,比氦离子激光输出稳定。应用 Q 开关及锁膜技术可得 1.15ns 及 30ps 的脉冲。短脉冲掺钕钇铝石榴石激光系统应用于眼科临床是近几年发展起来的,它不需要在眼球上做切口,能直接射入眼内,对半透明或混浊结构进行切割。由于此种激光为不可见光,故临床应用时需用氦氖红光作插准,而且要附加各种接触镜进行照射。眼科常用于白内障前囊膜切开、白内障后囊膜切开、玻璃体嵌顿于伤口、无晶体眼或人工晶体眼的瞳孔阻滞和前玻璃膜混浊、虹膜切除、玻璃体膜及条索切割。屈光间质混浊时对聚焦有影响,有人工晶体者应将焦点调至膜后玻璃体内,然后逐渐前移,以减少对人工晶体的损伤。

6. 染料激光。染料激光器一般用有机染料制作,目前已有近百种染料可获得受激辐射,用输出功率高的氩激光激发有机染料若丹明即可产生波长从 575nm~630nm 的染料激光。可间隔 1nm 任意选择,并能改变激光束直径的大小,以适应视网膜光凝斑大小的要求,发射规则的单脉冲。这是一种非常适合眼科需要的激光。

590~600nm 是眼科常用的波长,对网膜裂孔、眼底血管荧光渗漏、糖尿病性视网膜表面膜形成、格子状变性、老年黄斑盘状变性、视网膜静脉阻塞、中心性脉络膜视网膜炎和脉络膜血管瘤都可应用,均有一定效果。

在视网膜静脉阻塞的病例,用相同剂量、相同时间和相同大小的凝固斑进行照射,结果网膜水肿出血吸收的顺序为 577nm > 590nm > 610nm,说明同一条件下 577nm 波长的激光易被血红蛋白吸收,适应于血管凝固。波长愈长,愈具有达到视网膜深层组织的特性。610nm 的激光对视网膜下新生血管的凝固效果更好。

黄斑中心凹直径 800 $\mu\text{m}$  以内的叶黄素,不能吸收 570~630nm 的染料激光,故只能在中心凹旁进行光凝。

7. 准分子激光。准分子激光于 80 年代初开始在眼科应用,激光介质为一种稀薄的卤族气体分子,波长在远紫外区,不同的激光介质可产生不同的准分子激光,其切割阈值不同,准分子激光被认为在角膜屈光手术方面有着广阔的前景,包括治疗中低度近视的角膜放切术,角膜表面磨镶术及屈光性的角膜移植术,都是利用它的准确、无损伤切割的特点对角膜进行切割。其他小梁切开、脸部美容、预测人工晶体度数亦有应用报导。目前该激光正通过大量的动物试验用于临床。

8. 其他激光。氦激光具有 3 种波长,氦红 647.1nm,氦黄 568.2nm,氦绿 514.5nm。它们各有特点,在眼底色素少的区域用氦红,否则易引起出血,在色素多的病变区,应选择氦黄,可收到良好的效果。氦红激光的应用近年来受到较多的关注。Co:MgF 激光为一种新型的固体激光器,波长范围 1.65~2.25 $\mu\text{m}$ ,连续可调。可用来作角膜热成形术,治疗近视。

以上各种激光在进行治疗时,需慎重选择激光种类及波长,严格掌握适应证,控制能量、时间、作用范围及成焦状态,防止并发症的产生及意外损伤是非常重要的。

激光不仅可以用来治疗很多眼病,而且在诊断上亦有很大的价值,如激光干涉视力的测定、激光散斑验光及眼全息术等的

研究,给眼科带来了崭新的内容,在眼的生理、病理及临床方面揭开了新的篇章。激光在眼科领域里的应用前途是无限广阔的和令人鼓舞的。

(安徽医科大学附属医院石锦辉主任医师撰)

## 先天性和幼儿期青光眼 congenital and infantile glaucoma

幼儿期青光眼是由于眼内房水排泄系统主要组成部分的前房角胚胎发育不完善,或继发于其他眼病所引起的一组症状,包括眼压升高、视神经及其他组织受压迫而萎缩、视野缩小,最终丧失视力。大体上分为 3 类:(1)原发性先天性青光眼。(2)先天性青光眼合并眼或全身的其他异常。(3)眼外伤、炎症和肿瘤引起的继发性青光眼。虽然幼儿期青光眼没有成人青光眼发病率高,但因病程进展快,延误治疗或治疗不当可在短期内失明,幼儿期青光眼的即时诊断和正确处理是挽救视力的关键。

原发性先天性青光眼 75% 累及双眼,轻重程度可能不同。1 岁前发病者占 80%。散发为主,也有家族遗传倾向,常染色体显性遗传、隐性遗传、多基因遗传或伴第 10、11、13、14、16、18、21 常染色体畸变者均有报道。其发病机制尚没有一致性的观点。1928 年 Mann 提出胚胎发育过程中中胚叶组织萎缩不全残留于前房角小梁前,阻塞房水进入小梁,贮留于眼内引起眼压升高。1955 年 Barkan 阐述了前房角中胚叶膜即 Barkan 氏膜阻碍房水排出的观点。1963 年 Maumenee 对先天性青光眼组织学检查发现 Schlemm 管缺如。1981 年 Anderson 对 40 个胎儿的眼用电镜检查,发现胚胎 5 个月后房角隐窝形成,小梁网开始发育,复盖在原始小梁网表面的内皮层渐渐吸收,与小梁网重叠的虹膜根及睫状体向后移位。胎儿出生时虹膜根与睫状体的附着点恰好位于小梁的后界虹膜突上,以后继续向后迁徙,1 岁左右虹膜根与睫状体的附着点才后徙至成人水平,前房角隐窝充分发育。Anderson 提出虹膜根及睫状体胚胎期发育迟缓,向后移位不充分,其附着点与部分小梁网重叠,是先天性青光眼发病的主要原因。Smelser 等小梁发育不良学说为电镜检查发现小梁增厚, Schlemm 管内皮层下无结构物质沉淀所证实。前房角 Barkan 氏膜的形成未被后人电镜检查证实,不少学者认为 Schlemm 管的缺如是高眼压压迫小梁,使小梁间隙变窄、Schlemm 管腔关闭,是高眼压的结果而不是原因。

眼压升高引起的主要病理改变一是眼球膨胀,二是组织受压后的变性和萎缩,眼组织受损的程度与眼压升高的程度和青光眼发生的时期关系密切。眼压越高,临床表现越严重,3 岁以前发病由于角膜巩膜纤维有高度弹性,在高眼压的作用下眼球扩张:(1)角巩膜缘扩张,该区为角巩膜移行区,受牵拉扩延的最为显著,上方 1.5mm 宽的角巩膜缘可宽达 5mm 以上,甚至为葡萄肿,正常的解剖关系发生了变异,作为进入前房标致的角巩膜后界向后移位,角巩膜缘切口应酌情前移,忽视了这点容易发生术中合并症,伤及睫状体。(2)角膜增大,横径从正常的 10~10.5mm 增加到 12mm 以上,甚至超过 16mm。眼球过度的牵拉角膜内皮及狄氏膜破裂,形成线状混浊及角膜水肿。青光眼早期角膜水肿是可逆性的,眼压下降后角膜恢复透明,长时期高眼压使角膜形成瘢痕发展为永久性的混浊。(3)全眼球扩大,眼轴长度增加,先天性青光眼多伴近视性屈光不正。高眼压使角膜内皮减少,虹膜睫状体和脉络膜萎缩,视网膜神经纤维层缺损和视神经乳头病理性陷凹,晶状体悬韧带变性容易发生晶状体脱臼。高眼压进一步损害小梁结构及功能,小梁间隙消失, Schlemm 管闭塞,眼压持续升高最终因视神经萎缩而失明。3 岁以后发病因眼前部已接近成熟,角膜弹性减弱,高眼压不再引起角膜扩大,而巩膜纤维较角膜弹性强,高眼压仍然使眼轴向后延长,其他临床表现与原发开角型青光眼相似,称之为青年性青光眼。

手术治疗是挽救先天性青光眼的唯一途径。明确诊断后就应即手术,出生时青光眼已发病的患者,出生后的第 2~3 天已能够接受手术治疗。先天性青光眼的手术分为 3 种类型:(1)清除房水排泄系统的阻力;(2)建立新的排泄系统;(3)减少

房水生成。第1类手术的代表为前房角切开术和小梁切开术。1942年Barkan首次报道了前房角切开术,借助前房角镜经前房在直视下切开小梁前的中胚叶组织,每次切开的范围约 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ,术后眼压仍不能降至正常者,3个月后做第2次手术,将其余的房角切开。前房角切开术适用于2岁以前发病、角膜尚透明的病例。其优点:(1)不损伤球结膜,为以后的手术需要留有余地;(2)在直视下手术;(3)不影响以后其他手术的操作及效果。1960年Buriam和Smith各自设计了小梁切开术,从眼球外部用特制的探针插入Schlemm管,把schlemm管的内壁和小梁组织切开,因此扩大了手术适应征,角膜混浊的、2岁后发病的病例也都能获得较好的降压效果。这两种手术的成功率相似,约70%到90%左右。第1类手术失败后,选择重建房水排泄通道的滤过性手术,小梁切除术为其代表。小梁切开和小梁切除术的联合,能够提高手术成功率。房水生成减少的手术适用于晚期重症病例。第2、3类手术主要用于成人各种类型的青光眼。

先天型青光眼的药物治疗是辅助性的,不仅因为婴幼儿对抗青光眼药物不敏感,各种药物的副作用对婴幼儿发育也有不利影响。因此药物治疗主要用于术前降眼压或各种检查,术后眼压控制不理想者。常用的药物如0.25%噻吗心胺每天1~2次,每次1滴。0.5%~1%毛果云香碱溶液,每天2~3次。需要注意的是缩瞳剂引起的虹膜括约肌及睫状肌的收缩,加重了对小梁的压迫,有些病例用药后眼压反而升高,应即时停药。睫状肌的痉挛又能够促成或加重近视性屈光不正,也有诱发视网膜脱离的报道,婴幼儿青光眼不宜长期接受这类药物治疗。乙酰唑胺口服,5~10mg/kg体重,每天2~3次。与碳酸氢钠联用可以减少药物副作用。超剂量使用及肝、肾、肾上腺皮质功能不全、呼吸道梗阻的患儿容易出现电解质紊乱及代谢性酸中毒,长期口服还要警惕造血功能障碍副作用的发生。

许多眼及全身性的先天性异常常伴随青光眼,主要是因为这类先天性异常造成了前房角发育不良所致,处理原则与原发先天性青光眼相同。下述疾病青光眼的发生和处理与原发先天性青光眼不同,应特别注意。先天性晶状体半脱臼伴随的青光眼,常见于蜘蛛指综合征(Marfan)和球形晶状体短指综合征(Marchesani)同型胱氨酸尿症等(Homocystinuria),发病机制是由于晶状体悬韧带松弛,晶状体呈球形,脱臼或半脱臼的晶状体引起瞳孔阻滞时,眼压升高。这类疾病伴随的青光眼禁用缩瞳剂,缩瞳剂引起的睫状肌痉挛加重了晶状体悬韧带的松弛,增加了晶体的厚度,恶化了瞳孔阻滞,眼压进一步升高。而散瞳治疗增加了晶状体悬韧带的张力,使晶状体变薄且向后移位,使瞳孔阻滞缓解,眼压下降。虹膜周边切除有效地解除了瞳孔阻滞,可以预防青光眼的发生。晶状体脱入前房时应手术摘除。

继发于眼的炎症、外伤和肿瘤的幼儿期青光眼处理原则与成人青光眼相同。

原发先天性青光眼与眼及全身先天性异常伴随的青光眼的胚胎发育过程中的致畸因素、遗传因素是今后研究的课题。遗传工程的进展有望为遗传性疾病伴随的青光眼带来防治曙光。提高幼儿期抗青光眼手术的成功率仍是青光眼专家研究方向。激光小梁成型术和超声技术在幼儿期青光眼的应用将有所推广,滤过性手术结膜滤过瘢痕化的抑制也有待于更有效的解决办法。

#### 参考文献

- 1 Shields MB. Textbook of Glaucoma. 2nd, Baltimore, Williams, Wilkins, 1987, 186~234
- 2 Anderson DR. Trans Am Ophthalmol Soc., 1981, 79: 458~469
- 3 Senft SH, et al. Arch Ophthalmol., 1989, 107: 1773~1778
- 4 Burgess SEP. Ophthalmology, 1986, 93: 839~8420

(北京医科大学第一临床医学院陈瑞英教授撰,刘家琦审)

**原发性开角型青光眼** primary open-angle glaucoma  
简称 POAG。具有病理性高血压而引起视神经损害和视野缺

损者称为青光眼。高血压、视乳头萎缩和凹陷、视野缺损以及视力下降是本病的主要特征。青光眼是一种常见的致盲性眼病,其发病率约占全民的1%,40岁以上的人其发病率约为2.5%。青光眼致盲者占盲人总数的5.3%~24.38%,居致盲原因的第三或第四位。根据前房角的宽窄,分为原发性开角型青光眼和原发性闭角型青光眼,前者无明显症状,病情隐蔽,一旦致盲,难以复明,若能早期诊治,多数病人病情可以得到控制。

中国正常人眼压是1.33~2.79kPa。部分病人眼压大于2.8kPa,但长期观察并不出现视乳头损害和视野损害,称为高眼压症,但其中也有一小部分人可发展成具有视乳头损害和视野缺损的真正青光眼。也有部分病人的眼压在正常范围或临界值,而视盘损害和视野损害却十分显著,这种特殊类型青光眼称为低眼压性青光眼或低临界压青光眼。上述事实为 POAG 的早期诊断提出一个新的课题,并改变了一些传统的概念。

病因:POAG的前房角是开放的,其房水排出障碍已由房水动力学研究所证实,目前一般认为房水排出阻力增高的原因是小梁网阻滞的结果。通过光镜和电镜对小梁标本的观察,发现在Schlemm氏管内壁内皮下及内皮网间隙中沉积大量的斑状物——酸性粘多糖蛋白复合物,这些斑状物的量与房水流出易度有明显的负相关关系。房水内抗坏血酸含量减少,也可能影响房水排出。近年来对 POAG 病理生理研究认为,POAG与小梁网葡萄糖胺多糖有关。此外尚有小梁硬化、小梁变性、小梁软弱、小梁网阻塞及Schlemm氏管腔变窄、进行性萎陷闭塞等使房水流出阻力增大,导致眼压增高。

近年来,POAG的流行病学调查有助于了解疾病发生的高危因素,探索内在的联系及参与机制,为病因学的确立及临床诊断提供了必要的参考依据。黑人因青光眼致盲的患病率和发病率显著高于其他人种。以美国为例,黑人与白人的发病人数之比为7:1到8:1。POAG是具有遗传性和家族性的疾病,通过家谱调查发现具有阳性家族史 POAG 的患者,约占 POAG 发病人数的13%~47%,患者亲属的发病率增高约3.5%~16%,其确切的遗传方式尚无最后定论,多数学者认为属多基因遗传。年龄越大,发生青光眼的可能性越大。40岁以上的人群,平均眼压也增高。眼压与血压亦相互有关,血压的高低关系到眼球的血液供应。高血压影响睫状体动脉的渗透压,促使体液渗出,增加房水的被动生成,导致眼压上升;低血压可引起供应视盘的小血管血压降低,减少对视神经灌注,从而产生视野损害。近视眼被认为是青光眼的危险因素。Perkins研究了POAG、高血压、低眼压性青光眼的屈光状态,发现每一组人群中近视眼的发生率要比同年龄人的正常组高。随访发现,伴有近视的高眼压者,有1/3出现青光眼的视野损害并进展为POAG,而正常组为1/20,远视组为1/40,结果提示近视眼容易受高血压的影响产生视野损害。

#### 临床表现

1. 眼压升高。测量眼压是简单而重要的检查方法。早期眼压不稳定,只有测量24h眼压曲线才有助于诊断,随着病情发展基压逐渐升高。应用Schiotz氏眼压计测量眼压时,需注意眼球壁硬度(E值)。目前国内外推广应用的压平眼压计,不受E值影响,较为准确。非接触式眼压计(NCT),通过气体脉冲力压平角膜中央部分,经光电系统计算出眼压,其优点是不接触眼球,避免擦伤、结膜炎、药物过敏者均可应用,测量过程仅需2~3s,但价格昂贵,测量不够准确,故未被广泛应用。POAG病人的房水排出易度降低,眼压描记之房水流畅系数(C值)常在0.19以下。

2. 中心视功能改变。POAG早期患者在中心视力下降、视野缺损出现之前,中心视功能就已受到损害。色觉、对比敏感度、视觉电生理及黄斑中心光阈值等反映黄斑中心功能的检测手段均已证实此点。(1)色觉:采用Farnsworth-munsell色彩试验,可定量分析色觉障碍,绝大多数研究者认为蓝-黄色觉比红-绿色觉受侵犯较常见而且更严重,色觉障碍常在青光眼的极早期有时在视野改变出现以前。(2)对比敏感度(CS):是测量能够察觉两个区域照度差别的能力。越来越多的研究资料表明,CS是检测

POAG 中心视功能最敏感的方法。ROSS 等发现, POAG 患者及高眼压症患者尽管中心视力正常, 但其 CS 明显低于正常对照组, 且 CS 的下降先于视野损害、视乳头损害的发生, 并随着视野损害、视乳头损害的加重而更加降低。他还发现时间对比敏感度 (TCS) 较高频段的空间对比敏感度 (SCS) 在 POAG 中心视功能测定上更为敏感。(3) 视觉电生理: 许多研究资料表明用视觉诱发定位 (VEP) 检测 POAG 患者是否有视神经损害及其损害程度和范围, 是可行而敏感的方法。图形视诱发电位 (P-VEP) 主要反映后极部视网膜功能, 尤其黄斑区固视点的功能, 在 POAG 较对照组其潜伏期明显延长, 且视野缺损范围越大 C/D 值越大, 视乳头颜色越苍白, 则 VEP 潜伏期越长, 说明其潜伏期的延长与视网膜视神经纤维损害的程度相一致。图形视网膜电图 (P-ERG) 更能反映黄斑区的及固视点的功能。P-ERG 对眼压升高极为敏感, 当眼压超过 3.99kPa 时, 波幅明显降低, 峰潜时延长, P-ERG 的波幅与视野改变和视乳头 C/D 相关, 其波幅随视野缺损的增大而降低。在 POAG 早期患者, C/D 比值小时, P-VEP 正常, 而 P-ERG 出现异常, 表现在 POAG 时 P-ERG 较 P-VEP 更敏感。(4) 黄斑中心光阈值, POAG 早期患者, 在视力下降、视野缺损之前就有黄斑光阈值的升高。也有研究资料表明, 虽然中心视力均优于或等于 1.0, 而青光眼黄斑光阈值明显高于正常人, 说明早期青光眼即有黄斑中心凹功能受损。

3. 视野缺损。慢性眼压升高所致视乳头损害为视网膜神经纤维束的病变, 所造成的视野缺损有其特征性的改变。在中心视野  $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$  范围内有 1 个或多个比较性的或绝对性的旁中心暗点, 是 POAG 最早期的征象。随着病情的进展, 几个旁中心暗点可以融合或与生理盲点相连, 形成典型的弓形暗点, 这是典型的神经纤维束型视野缺损。鼻侧阶梯状暗点为视网膜神经纤维束损害的特征性改变, 表现为 1 条或多条等视线在鼻侧水平子午线处上下错位, 形成鼻侧水平子午线处阶梯状视野缺损。POAG 的发展期可出现环状暗点, 鼻侧视野缺损及向心性视野收缩等。晚期中心视力形成“管视”, 虽中心视力消失, 尚可保存颞侧视岛。只要训练有素的人员用传统的弧形视野计、投影视野计进行耐心认真的检查, 仍可查出 POAG 的早期损害。重要的早期视野变化是  $15^{\circ}$  以内的孤立暗点, 最好应用静态视野检查法。近年来国外使用电脑视野计, 虽然提供了先进的检查手段, 提供了很多视野指标和随诊分析方法, 但对其结果的评价有待进一步探讨。

4. 视乳头损害。(1) 视盘凹陷增大是常见的体征之一, 正常人 C/D 常在 0.3 以下, 若超过 0.6 或两眼 C/D 之差超过 0.2, 应进一步作检查排除 POAG。(2) 视盘凹陷有无进行性变化, 一般认为生理凹陷是不进展的, 如果变大、变深则为病理性的。正常人视盘凹陷常呈圆形或椭圆形, 而 POAG 患者的视盘凹陷为垂直扩大。(3) 凹陷和苍白区不一致, 凹陷以小血管弯曲处为其界线, 苍白区代表凹陷底部色淡区。正常时二者大小相同。POAG 视神经萎缩的早期, 凹陷的扩大先于苍白区的扩大, 而其他原因的视神经萎缩, 典型的苍白区大于凹陷。(4) 视盘凹陷边缘不等, 注意视盘的盘沿比单独看凹陷的大小更为重要, 视盘盘沿是均匀一致的, 如果有限局性变窄, 产生切迹或盘沿消失则是病理性的。(5) 视盘盘沿面积的改变: 盘沿是视神经纤维通过视盘的部分, 也是青光眼造成视神经损害的部位。所以盘沿面积可间接反映神经纤维的量, 在判断组织缺失方面有直接定量的价值, 与 POAG 病情的轻重密切相关。盘沿面积还受视盘大小的影响, 二者呈正相关。使用计算机图象处理或面积仪测量盘沿面积是近年来的热门研究课题。(6) 碟子样改变: 为视乳头盘沿逐渐倾斜或后退, 像个碟子, 它可侵及视乳头的一部分或全部, 它是肯定性的青光眼改变。(7) 视盘周围视网膜脉络膜萎缩: 由于后睫状动脉供血不足, 引起视乳头周围视网膜脉络膜萎缩, 且累及色素上皮, 形成环形的或部分的晕轮, 又称青光眼晕, 多出现在青光眼的进展期。(8) 视神经萎缩的血管改变: 在 POAG 病人, 特别 LTG 病人, 在视乳头边缘可出现小的片状出血, 多发生在视乳头上下极弓形纤维分布区, 是由于组织急性梗死所致, 是进行性

POAG 患者视神经损害的可靠特征。视乳头上血管向鼻侧移位, 环形血管暴露, 过去曾被认为对青光眼的诊断有一定的价值, 但并非青光眼者所特有。眼压升高到动脉的舒张压或动脉舒张压降至眼压的水平时, 就会出现视网膜中央动脉搏动, 但主动脉搏闭锁不全, 大动脉瘤患者也可出现。

5. 视网膜神经纤维缺损 (RNFLD)。研究发现,  $80\% \sim 85\%$  的青光眼可发生 RNFLD, 检眼镜下正常眼可见视网膜神经纤维层的反光线条完整无缺。POAG 患者神经纤维层的受损可表现为反光线条变成细沟状或细槽状或弓形区暗裂隙。用立体照相相机拍摄, 尤其用无赤光线观察可以看得更为清楚, 它是区分高眼压症和真正青光眼最早的和比较可靠的方法。

综上所述, POAG 患者的临床表现分为 3 大类: (1) 危险因素 (参考指标) 主要是眼压和 C/D。眼压最好取几次测量的平均值。其他还有青光眼家族史、年龄、近视等, 可利用多因素综合判定法提供发病概率。(2) 可疑性征 (警惕信号)。视功能方面有色觉、对比敏感度、眼电生理的检查及视野阈值波动增大, 散在的相对暗点。视神经方面有 C/D 稍大, 轻度盘沿面积小, 视盘出血、血管暴露、视盘同视网膜脉络膜萎缩、裂隙状 RNFLD 等, 这些体征均非青光眼所特有, 轻度改变者并不能除外正常的变异。(3) 损害征 (诊断依据): 视功能方面有旁中心暗点, 鼻侧阶梯, 弓形暗点。视神经方面有 C/D 大且形态不规则, 盘沿切迹, 楔状及弥漫性 RNFLD。

POAG 的诊断: (1) 可疑青光眼: 危险因素存在, 或加一项青光眼可疑症。(2) 青光眼: 出现青光眼损害体征者。若有条件还可划分青光眼前期, 即危险因素加两方面的可疑症。

POAG 的治疗原则: (1) 先用药物治疗, 若各种药物而且在最大药量情况下眼压仍不能控制者, 考虑手术治疗。(2) 先用低浓度药液然后用高浓度药液滴眼。(3) 长期应用抗青光眼药物, 若出现药效降低时可改用其他降压药或联合用药。传统的降压药毛果云香碱继续发挥其作用, 比较常用的缩瞳剂还有毒扁豆碱、碘磷。近年来新型药物不断问世, 噻吗心胺、青光胺、催醒宁、催醒安、丁公藤碱、石蒜碱、左旋米麻立安、美多心安、前列腺素 F<sub>2a</sub>、可乐定及乙酰唑胺滴眼剂等临床应用均有降压效果, 为青光眼药物治疗开拓了广阔前景。青光眼手术, 目前中国常用的术式有预防性虹膜切除术、小梁切除术、巩膜咬切术、巩膜灼烧术、前房角切开术、小梁切开术。激光治疗青光眼已有相当成功的经验, 激光虹膜切除术可与传统的周边虹膜切除术相媲美, 激光虹膜成形术合并激光虹膜切除术是治疗高褶虹膜综合征的理想手术。还有激光小梁成型术、睫状体激光凝固术及睫状体冷冻手术也都是有效的治疗方法。

#### 参考文献

- Hiller R, et al. Am J. Ophthalmol 1975, 80: 62~69
- Wilson MR, et al. Arch Ophthalmol., 1987, 105: 1066~1077
- 楼彪刚. 国外医学, 1992, 16(2): 93~95
- Perkins ES, et al. Archd Ophthalmol 1982, 100: 1464~1469
- Weinreb RN, et al. Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids, 1989, 36(2): 97~100
- 申尊茂, 等. 眼科新编, 1991, 297~304
- 徐亮. 国外医学, 1991, 15(8): 198~203
- 毛文书, 主编. 眼科学, 1990, 114~118
- 周文柄, 等. 中华眼科杂志, 1991, 28(1): 28~30

(安徽医科大学第一附属医院眼科陈送教授撰)

**视网膜脱离** 简称网脱, 为眼科的一种症状, 由眼部或全身疾病引起。网脱是指视网膜神经上皮层与色素上皮层之间分离。

胚胎学上, 视网膜神经上皮层与色素上皮层分别由视杯的内层与外层发育而成。2 层之间原来就存在一潜在性间隙, 病理情况下这 2 层结构容易相互分离而产生网脱。根据发病机制的不同, 临床分类为原发性网脱与继发性网脱 2 大类。后者又分为渗

出性网脱与牵引性网脱。另外,从有无裂孔形成又可将网脱分类为裂孔性网脱与非裂孔性网脱。原发性网脱常有裂孔,故称裂孔性网脱;继发性网脱多无裂孔。

**原发性视网膜脱离** 原发性网脱好发于中老年人尤其是高度近视的患者,这与老年人或高度近视的玻璃体和视网膜变性有关。

1. 原发性网脱的病因与发病机理的研究:原发性网脱是视网膜变性性与玻璃体变性性2个因素综合作用的结果,二者缺一不可。(1)玻璃体病变:玻璃体发生变性、液化、后脱离、玻璃体混浊和浓缩以及膜形成,这是导致网脱的重要因素。(2)视网膜变性性与裂孔的形成:网格样变性、铺路石样变性、视网膜加压变白或不加压变白、子午线皱裂、视网膜劈裂症等也可引起网脱。但远不及网格样变性多见,这是因为前者较后者容易形成网膜裂孔之故。(3)其他因素:遗传因素、视网膜神经上皮层与色素上皮层粘着力下降等因素。此外,外伤、激烈活动及上下斜肌活动也是网脱的诱因。

2. 原发性视网膜脱离的鉴别诊断:原发性网脱临床上较为常见,诊断一般不难。但有些病例,若不熟练掌握其特点也难免会误诊,要与下列疾病相鉴别:(1)视网膜劈裂症(后天性视网膜劈裂症、遗传性视网膜劈裂症),(2)牵引性网脱,(3)中心性浆液性脉络膜视网膜病变,(4)葡萄膜渗漏综合症,(5)眼内占位性病变如视网膜母细胞瘤、脉络膜血管瘤、脉络膜恶性黑色素瘤、脉络膜转移癌,(6)眼内寄生虫所致的网脱如猪囊尾蚴,(7)外层渗出性视网膜病变(Coats病),(8)急性后极部多灶性色素上皮症(大泡状网脱)等。

3. 特殊类型的视网膜脱离:有先天性脉络膜缺损合并网脱、无晶体眼的网脱、马凡氏综合症合并网脱、黄斑裂孔网脱、锯齿缘离断、视网膜脱离合并脉络膜脱离。

4. 增殖性玻璃体视网膜病变(PVR)的分级:(1)1982年美国视网膜协会术语委员会制定了PVR分级标准,分为A级、B级、C级(C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>)、D级(D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>、D<sub>3</sub>)。(2)国内赵东生分级:0级、I级、II级、III A级、III B-1级、III B-2级、III B-3级。

5. 关于视网膜脱离手术的进展:视网膜脱离手术发展可分为3个时期:(1)Gonin前时期(1929年以前)。(2)Gonin时期(1930~1950)。(3)Gonin后时期(于50年代的现代视网膜手术)。

**手术基本原则** (1)封闭视网膜裂孔,这是关系网脱手术成败的最主要问题。人为造成裂孔附近的脉络膜炎症,使之与相对应的视网膜粘连,从而封闭裂孔。方法有电凝、冷凝和光凝(激光凝固又有眼内与眼外光凝两种)。(2)缩小眼球内空腔或裂孔局部顶压。作用有两方面:一是减轻玻璃体对视网膜牵引,二是使脉络膜向视网膜靠拢,促进裂孔愈合。(3)补充玻璃体,支撑视网膜,玻璃体内注入消毒空气 SF<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>、混合气体、透明质酸、硅油等。(4)玻璃体手术,解除玻璃体对视网膜的牵引,用于复杂性网脱。

**现代视网膜脱离手术的方式**:(1)巩膜缩短术,(2)巩膜内填充术,(3)巩膜外加压术,(4)坏扎术,(5)玻璃体切割术。每个病例手术方式的选择要根据视网膜、玻璃体情况并结合眼部其他情况综合考虑来决定。

**玻璃体切割术在治疗复杂性网脱方面的进展**:玻璃体切割术是70年代兴起的新型显微手术,70年代初 Machemer 首先设计初期的封闭式玻璃体切割器,在治疗复杂性网脱方面有很多优点,它不仅能去除玻璃体牵引,起到比巩膜扣带更为直接的效果,还可清除混浊的中间质如白内障、玻璃体出血,为检查眼底、进行治疗创造条件;切去玻璃体后形成的空间可以注入空气、惰性气体或硅油,从内堵塞使视网膜复位;玻璃体手术还为从眼内进行各项操作开辟了途径,如通过视网膜裂孔或人为作视网膜切开,一面引流视网膜下液,同时向玻璃体内注入气体使视网膜复位,待视网膜完全复位后再用眼内氩激光封闭网膜裂孔或切开处。对增殖性玻璃体视网膜病变即可剥去视网膜表面膜,解除网膜与网

膜间的粘连,使视网膜游离。如视网膜后增殖显著也可切开网膜后,剪断或去除视网膜下色素或增殖膜,使网膜复位。还可以开展用视网膜钉封闭网膜巨大裂孔。故玻璃体手术经常用于治疗复杂性视网膜脱离如 PVPD3、巨大裂孔、增殖性糖尿病性视网膜病变、视网膜静脉周围炎、穿孔性外伤后引起的牵引性网脱以及中间质混浊的网脱等。

**眼内注气治疗视网膜脱离的进展**:1911年 Ohm 首先应用眼内注气治疗网脱,至今已80年,气体种类由空气向长效惰性气体发展,气液交换器也问世。注气和玻璃体手术相结合,成为视网膜和玻璃体综合手术的一部分,气体的选择方面,简单病例首先考虑使用消毒空气。如有增殖性改变,根据轻重可考虑用 SF<sub>6</sub> 等,另外可使用混合气体、空气和 SF<sub>6</sub> 混合或与 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> 相混合。这样可避免惰性气体膨胀引起的眼压增高又可持续一定时间。所以混合气体使用较广。现在国外已普遍生产及应用 SF<sub>6</sub> 及 C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>,国内北京、上海、广州等地已广泛用于网脱手术。可以断言,眼内注气治疗网脱必将有广阔前景。

**硅油在复杂性网脱复位术中的应用**:Rosengren、Armaly、Stone 等于50年代初将硅油注入兔眼玻璃体治疗实验性网脱,1962年,Cibis 介绍硅油应用于复杂性网脱的治疗,至今已近40年。在临床应用中,由于硅油手术的严重并发症,以及某些学者认为硅油对视网膜有毒性,致使它一度几乎陷于被废弃的境地,自70年代后,玻璃体手术的兴起和发展,硅油作为玻璃体腔内长久的填充物,成为玻璃体手术的一个组成部分,使玻璃体手术更为完善,并提高了效果。这种手术日前在国外较普遍开展,中国仅广州中山眼科中心在开展。

**视网膜钉治疗巨大裂孔性网脱**:Fumirurando 等于1983年设计了一种把内卷网膜瓣固定于脉络膜上的特制塑料半头钉,中国尚未使用。它是由多乙缩醛组成,为绝对硬的塑料,钉长3mm,直径0.8mm,尖端大约1mm,通过视网膜插入脉络膜巩膜内。

**继发性视网膜脱离** 虽然网脱可分为原发性和继发性两种,实际上都是继发于眼部或全身病。但习惯上把致病原因明确的网脱称为继发性网脱,它可由于眼局部的严重炎症、眼部或全身循环障碍、脉络膜或眶部肿瘤等而发生,视网膜多无裂孔,病因控制后,脱离的视网膜多可复位。继发性网脱又分为渗出性网脱和牵引性网脱。

1. 渗出性网脱:例如肾炎性视网膜病变、妊娠高血压综合症、白血病、葡萄膜大脑炎、交感性眼炎、中心性浆液性脉络膜视网膜病变、大泡状网脱、葡萄膜渗漏综合症、Coats病、网膜母细胞瘤、脉络膜肿瘤、眼内寄生虫所致的网脱等。渗出性网脱按病因治疗。

2. 牵引性网脱:(1)视网膜血管病变所致的网脱,如增殖性糖尿病性视网膜病变,视网膜静脉周围炎。(2)穿孔性眼外伤所致的网脱。牵引性网脱的治疗以手术为主,玻璃体切割术或巩膜缩短术或二者并用。

(安徽医科大学第一附属医院眼科陈积中教授撰;宋汝庸审)

**白瞳症** 具有肉眼观察到的瞳孔后面呈白色或黄白色反光共同特征的某些眼病称之为白瞳症(Leukokoria)。因其与猫眼内所反射的黄白色光线相似,故亦称猫眼。它包括约20余种眼病。报告稍多者有先天性白内障,视网膜母细胞瘤,原始玻璃体持久性增生,晶体后纤维增殖症(Terry综合征),Norrie病,Krause综合征,Block-sulzbetger综合征,Coats病,视网膜脱离,玻璃体内机化物,眼球穿通伤后玻璃体机化,线虫性眼内容炎,转移性眼内炎,发育不良性视网膜纤维增殖,视网膜血管瘤病,视网膜母细胞以外的肿瘤,幼年性视网膜劈裂症,渗出性视网膜炎,渗出性脉络膜视网膜炎,外伤性脉络膜视网膜炎,脉络膜与视神经缺损,视网膜髓鞘纤维以及高度近视合并发生的进行性脉络膜视网膜炎等。

**视网膜母细胞瘤(RB)** 为一种原发于视网膜组织的恶性肿瘤,占15岁以前小儿恶性肿瘤的第8位,在中国发病率占整个人



群中恶性肿瘤及儿童眼部肿瘤的第1位。有遗传性与非遗传性2种类型,前者占40%,其中1/4有家族史,3/4是由于合子形成过程中发生了新的突变所致,后者占60%,系体细胞突变所致。很早发病,有的生后即被发现,多数单眼发病,但也有2%~30%为双眼或先后患病,虽有报告各种年龄可罹患,但90%在3岁以前发病,而7岁以后发生者极罕见。当肿瘤生长到一定程度充满大部分玻璃体后,瞳孔区始出现白瞳症。早期因症状不易发现,故出现白瞳症不是本病最早表现。一旦确诊,应尽早行眼球摘除,否则危及生命,罕见的情况下RB可自行消退,最终引起眼球萎缩。

临床上,除RB引起白瞳症外,其它情况亦可引起白瞳症。这些情况除使视功能丧失外,不致引起生命危险,所以大多眼球不摘除。因恶性肿瘤不早期摘除眼球,必将导致患儿死亡,故下列情况应与RB相鉴别。

1. 晶状体后纤维增生症多发生于接受过高浓度氧气治疗的早产婴儿,经过暖箱抚养。其瞳孔区发白。眼底可见纤维血管组织由视网膜颞侧周边部伸向视乳头及晶状体后方。眼球较小,前房非常浅,常致虹膜与角膜后面相接触而发生角膜混浊。可做超声波或X线检查以资区别。

2. Coats氏病多见于5岁以上男孩,病程进展缓慢,眼底除广泛的黄白色渗出物外,可见胆固醇结晶及小血管呈瘤样扩张。

3. 转移性眼炎患儿既往有发热史。常见的是小儿患脑膜炎或脑脊髓膜炎后,发生脓性眼内炎,以致眼球变形,眼压降低,并常伴有虹膜睫状体炎。眼底可见黄色斑块,但其上并无新生血管。X线片上无钙质沉着的斑点。

4. 原始玻璃体残存增生是除视网膜母细胞瘤以外,最常见致瞳孔区发白的眼病。常发生于足月婴儿,只累及一眼,病眼可正常大小,也可稍小些。可见睫状突变长,晶状体后残存有血管增生的白色组织,常有进行性的后囊下白内障。

5. 原发性视网膜脱离患者一般年龄较大,多发生于近视或外伤后。眼压偏低。视网膜脱离呈波浪状皱褶,高低不平。可作巩膜透照、超声波或X线检查加以区别。

6. 先天性视网膜皱裂,眼球正常,玻璃体透明。眼底可见自视乳头颞侧开始的灰白色束状物,内含血管伸向颞侧锯齿缘部。晶状体透明。

7. 脉络膜团球状结核多有结核病史,一般发病年龄较大。眼底可见黄白色视网膜下肿物,边缘不清,突出于玻璃体内。玻璃体混浊明显,常伴有虹膜睫状体炎。

**先天性白内障** 为一种在胎儿期内由于各种因素致使晶体的发育受影响,在出生后呈现不同程度的晶体混浊疾病。只有晶体混浊达到足够的程度,能使大量光线从瞳孔中反射出来时,才会有白瞳症。通常在出生时即能见到,多为双眼发病,表现为多种类型,晶体混浊程度亦不尽相同,有时可伴有其他眼部或全身先天异常而构成的综合症,如Lowe综合症,Down氏综合症,Marinesco-sjogren综合症,Rothmund-Thomson综合症等。

**视网膜发育不良症** 常伴有双侧小眼球,先天性瞳孔膜残留,白内障,精神迟钝,水脑等现象。眼底自视乳头边缘有少数血管,视网膜皱褶或纤维组织团块,高起于玻璃体中,呈白瞳症。附近视网膜见玫瑰花样结构及神经胶质的异常分化。通常认为系感染,Vit A缺乏,放射性损害或缺氧而引起胚胎期视网膜神经成分或胶质组织发生异常分化,部分为常染色体隐性遗传或性连锁性遗传。

**Terry综合症** 多见于体重1800~1900g的早产儿,在暖箱中给高浓度O<sub>2</sub>一段时间后,再接触大气压时,继发缺O<sub>2</sub>,而使视网膜发育不良,视网膜血管产生中毒和刺激反应。常在生后2~6周发病,首先血管收缩,继之代偿性视网膜血管扩张、出血、水肿,新生血管增殖,新生血管小分支呈刷子状长入玻璃体,导致纤维组织形成,晶体后膜形成,视网膜脱离并发性白内障,继发性青光眼或眼球萎缩,预后不良,但此病中国不多见。早产越早,体重越轻,用氧越多病变越严重。足月产或未用氧的婴儿偶亦可发

本病。

**Coats病** 多见于20岁以下男性,常单眼发病,病程缓慢呈进行性。其特征为眼底大量渗出物,渗出物周围伴出血及发亮的胆固醇结晶,偶有色素沉着,黄斑可有星芒状渗出。不断增加的渗出物和血机化物可致继发网脱,白内障,葡萄膜炎等。白瞳症只出现于病变晚期视网膜脱离阶段。早期多无症状,病变波及黄斑时视力下降,氩离子激光冷冻结合治疗取得较好效果,晚期预后不良。

**玻璃体脓肿** 为化脓性致病菌通过血行或创口侵入眼内,迅速蔓延而形成。分为:(1)内源性眼内容炎。这类病人一般情况往往较差,病原菌从身体其他部位的化脓灶经血行到达眼内,或由于恶性肿瘤、器官移植后长期应用皮质类固醇和免疫抑制剂药物,使机体处于免疫抑制状态,而遭致感染。各种化脓细菌(如白色念珠菌,隐球菌)致病有增多趋势。这种途径造成的眼内容炎也称转移性眼内容炎,细菌在视网膜内繁殖的结果,首先造成视网膜组织坏死,然后形成玻璃体脓肿,出现白瞳症。病初期因患者病情较严重,有的处于昏迷状态,视力不易察觉故早期发现较少,出现白瞳症时始发现内容炎,故对高热患者经常注意视力,查眼底是非常必要的;(2)外源性眼内容炎:为穿透性眼外伤和眼内手术后最严重的并发症,也可发生于角膜溃疡穿孔之后。细菌亦可通过抗青光眼性滤过手术后所形成的滤泡薄壁侵入眼内。肺炎球菌、链球菌和葡萄球菌是最常见的病原菌,近来一些革兰氏染色阴性细菌如绿脓杆菌,产气杆菌,变形杆菌的发生率有所增加,关于真菌引起的感染也有报告。细菌尚可由外界物体或消毒不严密的手术器械带入眼内,结膜、睫毛、皮肤特别是慢性泪囊炎的脓液分泌物是危险的病菌隐蔽处。外伤或手术后存留的异物(线头,人工晶体,残余皮质等)也常构成感染的根源。玻璃体脓肿形成或眼内炎症组织出现机化时表现白瞳症。眼内炎一旦发生,或可疑时,应立即抗菌治疗,明确诊断和选择有效抗生素,穿刺前房或玻璃体腔吸出脓液作涂片及培养药敏试验,以指导用药。外源性早期感染局限在某部位时可采用封闭式玻璃体切割术,结合向玻璃体腔内注入庆大霉素可收到较好的效果。

在中国,先天性白内障,视网膜母细胞瘤、外层渗出性视网膜病变与转移性眼内容炎是最常见到的白瞳症,临床上,除结合病史及进行全面系统检查外,需作鉴别诊断,以上几种疾病应首先考虑。

#### 参考文献

- 1 Patz A. Oxygen administration to the premature infant. *Am. J. Ophthalmol.*, 1967, 63: 351
- 2 Egerer I, et al. Coat's disease, *Arch. Ophthalmol.*, 1974, 92: 109
- 3 Binder P S. Unusual manifestations of retinoblastoma, *Am. J. Ophthalmol.*, 1974, 77: 674~679
- 4 geeraets WJ. *Ocular Syndroms*, 3rd ed, Lea & Febiger, Philadelphia, 1976
- 5 Watson PC, et al. *Br J Ophthalmol.*, 1976, 60: 163
- 6 Pau H (translated by Cibis G). *Differential Diagnosis of Eye disease*, Georg thieme Pub, Stuttgart, 1978
- 7 Brod Wall J. *Acta Ophthalmol.*, 1981
- 8 邓应平,等. 视网膜母细胞瘤RB基因点突变的研究, *眼底病*, 1991, 7: 133
- 9 王光路,等. Coats病的冷冻的及激光治疗, *中华医学会眼科学会眼底病学组第5届学术讨论会论文汇编*, 1992, 62

(重庆市第三人民医院李一维撰)

**单疱病毒角膜炎** 致盲角膜炎中重要的一种。在发达国家是最常见的盲目原因之一,美国每年约有30万以上的单疱病毒感染;在中国因角膜病致盲作角膜移植治疗的病例中,诊断单疱病毒角膜炎者占第1位。本病因其病原体可在体内潜伏和再复发,而成为临床极为棘手的问题。

自 Grüter(1912)发现本病的病原体是单纯疱疹病毒(HSV)以来,已证明引起角膜感染的 HSV 有两型,即主要是 HSV-I 型,偶见 HSV-II 型,属 DNA 病毒。人是 HSV 的自然宿主,对人的传染性很高,多从口、眼或皮肤的活动性病灶或带病毒者获得感染,婴幼儿在出生后即受感染,约 80%~90%的人群至 15 岁已获得初次感染,血清学检测显示有抗 HSV 的中和抗体。初次感染者可以不表现临床症状,亦有表现为轻微的结膜炎或点状角膜炎。虽然眼部单纯疱疹病毒感染可有自限性,但约 25%可复发,且有些病例呈严重复发。HSV 的 1 年复发率约 20%~30%。角膜感染 HSV-I 后,HSV 在三叉神经节等处潜伏,并在一定条件下可活化、复制和释放,引起复发。潜伏与复发成为本病的重要特征。

已知 HSV-I 感染后可潜伏于三叉神经节。HSV-I 型病毒的三叉神经节潜伏率依病毒株的不同而异。Mckrae 株感染后 100%潜伏。Rodanvs 株感染潜伏率约为 60%。近年已有不少学者先后从慢性 HSV 感染或静止期病人的角膜片中,经体外器官培养后分离出 HSV,或检测 HSV 抗原电镜阳性,认为在静止期病毒 DNA 处于潜伏状态,或已整合到角膜细胞的 DNA 上,一旦环境适合,便迅速复制,引起复发感染。Shimeld(1985)还发现病毒存在于正常角膜基质中,并认为角膜细胞的安静状态是病毒 DNA 整合到细胞内的良好环境。众多的研究表明,角膜组织细胞极可能是 HSV-I 的另一个潜伏地。临床上 HSV 感染的复发,很可能是潜伏于角膜内三叉神经节内病毒活化的结果。致如何使病毒活化,引起 HSK 复发的机制仍不十分明确,Kaufman 认为对复发起决定因素的是病毒的基因结构,而 Legenolre 则认为复发与宿主的易感性有关,即与特应体质和 HLA 的遗传特点有关。但目前多数学者认为复发主要与机体的细胞免疫功能低下有关。中国何玉兰等对单疱性角膜炎患者的外周血 T-淋巴细胞亚群进行检测,发现深层型患者  $WuT_3$  细胞及  $T_4$  细胞减少,  $T_8$  细胞增加及  $T_4/T_8$  比值下降,并认为免疫调节功能紊乱,是通过细胞免疫失调,进而影响到体液免疫,为深层单疱角膜炎的复发提供了免疫基础。Sainic(1990)也观察到细胞介导的免疫反应在实质型角膜炎是低下的,在双侧 HSK 患者更显不足,认为 HSK 的各种不同临床表现可能与细胞介导的免疫水平有关。近年来不少学者对免疫调节机制做了大量的研究。在活动性 HSK 患者,  $OKT_4/T_8$  比值下降或倒置,而非活动者,比例正常,说明活动期单疱角膜炎存在免疫调节紊乱状态,深层型紊乱比上皮型表现更明显。 $OKT_4/T_8$  比值下降或倒置可作为 HSK 复发的一个标志。

单疱角膜炎复发的诱因常见于一些非特异性刺激或影响因素,如感冒发烧,上呼吸道感染,热性传染病,感情刺激,失眠,疲劳,月经,外伤,胃肠道炎症等等都可以是 HSK 复发的诱因,这些诱因或许主要通过影响细胞免疫功能的影响与体液性免疫的影响导致 HSK 复发。

HSK 的临床表现主要有两型,即浅层型与深层型,这两型的发病机理有所不同,上皮型 HSK,最典型的所谓树枝状角膜炎是单纯疱疹病毒直接感染角膜上皮细胞,活跃增殖引起的病理改变。角膜深层 HSK,是机体对病毒抗原的迟发型免疫反应,或与病毒株的毒力有关,临床偶见坏死性角膜基质炎,是一种严重的临床类型,表现为角膜基质溶解、坏死和前房反应,可合并角膜穿孔,此型的发生不仅可能与较强传染力的病毒株的感染有关,而且与眼的不合理用药及患者的特异性状态有关。孙秉基推测这类患者的  $T_8$  细胞减少,从而导致 B 细胞受到过度刺激产生自身抗体,致使该型发生。除此之外,还有角膜内皮炎型的临床报道。

大多数病例诊断并不困难,临床诊断依据:(1)反复发作的病史,(2)角膜感染灶的特殊形态如树枝状角膜上皮破坏,或角膜基质的水肿浸润,(3)全角膜知觉减退,(4)病程较长,发展缓慢,刺激较轻,(5)抗菌治疗无效。然而有些表现为模棱两可的,或对治疗没有反应的,实验室的诊断则很有帮助。实验室的诊断方法有:(1)病毒分离,是 HSK 病原学诊断公认的方法之一,但因设备与技术的影响,不可能满足临床病原学快速诊断的需要。(2)血清学检测中和抗体,其临床价值仅限于发现原发性(初次)

感染。(3)免疫荧光抗体染色法,将角膜组织切片作荧光抗体染色,在细胞浆或核内可找到病毒抗原的特殊色区而作出诊断,但可能有假阳性。(4)单疱病毒单克隆抗体免疫荧光间接诊断法,此法较快速、准确,对 HSK 是有高度特异性的病原学诊断。(5)病毒感染的 DNA 诊断法——PCR 法,这是最新的分子水平的诊断方法,通过 PCR(聚合酶链反应)可以使样品中极微量的特定核苷酸片段在体外进行大量扩增,几小时后即可扩增几万倍。PCR 诊断法比病毒培养及免疫化学法的检出率更高,具有特异性,而且快捷。还有用 DNA 的限制性内切酶消化产物作电泳分析,即 DNA 酶解图谱分析法,用这个方法不仅能决定 HSV 的型,而且可鉴别病毒株或同型异株,这个方法最近已用于 HSV 感染的流行病学分析,这是流行病学中的一个新领域,称之为分子流行病学,在 HSK 的研究中将有很大价值。

HSK 的治疗原则,主要针对发病机理的不同而有所侧重。及时选用高效的抗 HSV 药物治疗,对浅层型 HSK 极为重要。这类药物主要有碘苷(IDU),环胞苷(C、C)、三氟胸腺嘧啶核苷( $F_3T$ ),和无环鸟苷(ACV)。前 3 者作用机理基本相似,是掺入病毒 DNA 中,阻止 DNA 的合成,有耐药性,碘苷还有过敏反应,甚至有致畸变危险(孕妇慎用),主要对浅层型有较好效果;IDU 无环鸟苷作用机制是选择性抑制病毒 DNA 聚合酶,进而影响病毒 DNA 的合成,抑毒作用也较强。对正常细胞 DNA 的合成基本无抑制作用。对 IDU 有耐药者对 ACV 仍敏感,无交叉耐药性,ACV 是目前较理想的对角膜上皮损害较轻的抗病毒药。上述药对角膜基质的穿透性较差,因而对深层型 HSK 疗效比浅层型稍差。复发性深层型角膜炎的治疗最为困难。1990 年 Holbach 等第 1 次证明 HSV 抗原在人的角膜内皮细胞和在 Descemet 膜水平的肉芽肿反应处,因此除眼局部给药外,深层型 HSV 通过静脉滴注或口服无环鸟苷等,可得到较满意结果。此外,由于深层型 HSK 的发病与免疫反应有关,激素的联合应用对缓解角膜炎症方面有重要作用。单疱病毒单克隆抗体及特异性转移因子经治疗初试有一定效果,干扰素也是有效的治疗方法之一,主要有人的细胞干扰素和成人成纤维细胞与淋巴细胞干扰素,但由于生产复杂,纯化困难,产量有限,价钱昂贵,应用受到限制。1981 年日本已试验成功用“基因工程”制备人干扰素,这是由细胞生产干扰素飞跃到了基因工程水平,1990 年金秀英等报道,基因工程干扰素用于临床,看来前景乐观。HSK 的角膜移植治疗,主要指征 1 是 HSK 后角膜疤痕混浊,为了光学目的者,2 是 HSK 反复发作为药物治疗不能控制炎症,迫近角膜穿孔或角膜穿孔者。现在已较明确,采用穿透性角膜移植,是最优的术式,因为角膜内可能存在病毒,而且角膜组织本身也可能是除了三叉神经节外的另一个潜伏感染地(Cook 于 1987 首先提出,1990 年 Shimomura 等进一步证实了这个论点,因内谢立信等近年的研究也得到相同的结果)。由于穿透性角膜移植比板层角膜移植清除病灶或病毒的潜伏地更彻底,所以术后 HSK 复发率较低。

单疱角膜炎是个严重的致盲病,HSV 感染后在感觉神经节潜伏及反复的复发感染是处理本病最感困难的问题,目前虽然有不少抗病毒药物,但未有能力将潜伏感染从潜伏点清除。对复发感染的治疗也不十分有效,深层感染更为棘手。潜伏地除了三叉神经节,角膜组织本身的潜伏仍要进一步研究证实,头颈部其他神经节或神经核细胞是否也可潜伏都有待查证。明确潜伏点与潜伏机理的目的是要为清除潜伏感染、预防复发提供必要的依据。与此同时今后还必需大力发掘新的高效、特效选择作用更高的抗 HSV 感染复发与清除潜伏感染的药物,其中抗单疱病毒单克隆抗体、单疱病毒多价免疫疫苗及基因工程干扰素等仍值得进一步探索。利用限制性内切酶消化 HSV DNA 作电泳分析即 DNA 指纹法或酶解图谱法分析,以及病毒 DNA 诊断法如 PCR(聚合酶链反应)法,研究 HSV 潜伏感染的机制及潜伏点的查证,临床不同类型与感染病毒株的关系、HSV 的流行病学和 HSV 的型与同型异株的诊断与鉴别都将是进一步研究的课题。

(北京同仁医院眼科魏文斌撰;李志辉审)

**眼库技术** 角膜病为主要致盲眼病之一,角膜移植是公认的角膜病患者脱盲最有效的方法,眼库和角膜保存技术是开展角膜移植的物质基础,角膜保存技术的进步同时又推动角膜移植术的发展。

1908年普兰基(O. Plange)主张把角膜材料存放在生理盐水中,1934年托马斯(J. W. T. Thomas)提倡在消毒橄榄油中储存角膜,但对角膜保存技术均未进行深入研究。1935年费拉托夫(V. P. Filatov)率先采用尸体眼球作为角膜移植供体,并将眼球摘除后在冰箱冷藏,然后用于移植,创立了最原始的“眼库技术”——湿房保存技术。学者们公认角膜组织在湿房内保存的最大有效时限仅为死后48h,时间再长,角膜内皮细胞即出现不同程度的不可逆性损害,活性密度有不同程度的下降,术后发生原发性供体衰竭的危险性较大。从而各国学者竞相研究角膜保存方法。

1944年佩顿(R. T. Paton)在美国纽约建立了第1个眼库,1963年成立了全美眼库学会,美国至今已有100多个眼库,每年收集尸体眼球4万多个,进行角膜移植2.5万人次。1982年中山医学院在广州建立了中国第1个眼库,北京、上海、山东等地也相继建立了眼库。1984年在美国成立了国际眼库协会,已有许多国家参加,中国上海医科大学眼科研究所和北京同仁眼库已成为该协会的会员。

角膜保存技术是重要的眼库技术。1911年马吉特(E. Magitot)证明保存在血细胞溶解的血清中角膜能维持透明20d以上。1968年斯托克(F. W. Stocker)将人角膜保存在受者血清中100h,移植植片仍然透明。用血清法保存角膜,有时很难避免血清来自肝炎患者,且角膜内皮细胞活性逊于湿房保存者,目前已基本废弃。1973年萨默林(W. T. Summerlin)开始用器官培养保存角膜,1974年杜尔曼(D. J. Doughman)用器官培养入和动物角膜4周以上,细胞仍保持活性,用该法贮存35d的角膜成功地用于人角膜移植。1984年林斯特龙(R. L. Lindstrom)用伴有硫酸软骨素的器官培养法保存角膜,虽然保存时间较长,但因技术过于复杂而难以普及。1974年麦凯里(B. E. McCarey)和考夫曼(H. E. Kaufman)发明M-K液保存法,提供了内皮活性较好、保存时间较长的角膜材料,改变了眼库的面貌。此法保存的兔角膜内皮至少9d仍保持正常,贮存140h的人角膜已成功用于穿透性角膜移植,但实验尚未证明M-K液保存角膜的功能优于湿房保存。美国大部分眼库用以该法保存72h或更长时间的植片行穿透性角膜移植。1977年朱自忠用以Hank氏液为主要成份的含有小牛血清的营养液保存角膜。1981年马镇西以5%低分子右旋糖酐代替小牛血清,10只兔角膜保存10d,台盼蓝染色内皮细胞活性均在70%以上,保存1~11d的32个角膜行穿透性移植后3周内植片透明率为96.9%,1~3年透明率为68.8%。1981年谢立信用人脐带血清营养液保存角膜也成功用于临床。1985年考夫曼在M-K液的基础上发明了K~液保存法,是保存方法的又一进展,用硫酸软骨素取代M-K液中的右旋糖酐,临床结果揭示K~液中的角膜至少可保持2周,保存16d的角膜临床上也获得满意结果,K~液保存的角膜比M~K液略厚,且有极轻微的混浊,但无损于角膜内皮健康及内皮“泵”的机能,也不会给术者带来任何妨碍,在4°C K~液中保存的角膜至少18d内不会因为保存而比新鲜角膜更易受真菌感染。1989年拉斯(J. H. Lass)认为用CSM基质保存角膜可减轻角膜水肿。K~液及CSM基质保存角膜的深入研究仍在进行中。表皮生长因子(EGF)能促进上皮细胞分裂,1982年法布里桑特(R. Fabricant)和1986年雷蒙德(G. Raymond)等认为EGF可以促进内皮细胞再生,近来许多学者在原保存基质中加入EGF可使保存的角膜质量更高。

早在1938年贝兹洛娃(M. A. Bazhenova)用冷冻于-20°C的角膜培养出角膜细胞,以后不少学者从事冷冻保存角膜的研究,但均未成功。1949年波尔基(C. Polge)发现甘油的冷冻保护作用后,深低温保存角膜才获成功。1954年伊斯特科特(H. H.

G. Eastcott)用冷冻保存的7个角膜行穿透移植后,2个透明,3个部分透明,板层移植则全部成功。1959年洛夫洛克(J. E. Lovelock)用二甲亚砜(DMSO)代替甘油作冷冻保护剂,对细胞具有更好的防冻作用,1963年被史密斯(R. E. Smith)用以保存角膜。1965年卡佩拉(J. A. Capella)和1967年奥尼尔(P. O'Neill)分别发明了各自的深低温保存技术,在国外一些大的眼科中心一直沿用。卡佩拉随访问佛罗里达(Florida)大学所作的585例穿透性角膜移植,有78%的深低温保存角膜和80%的新鲜角膜移植后随访6月至5年均保持透明。1976年伯恩(W. M. Bourne)报告1964~1974年用冷藏法保存的角膜片移植380例均获成功。1985年舒尔茨(R. O. Schultz)也证明深低温保存的角膜内皮细胞能长期存活。中国1985年邱孝芝用Capella法冷冻保存角膜做15例穿透移植取得较好效果。1986年王传富简化了Capella的4步法为2步法,用冻存平均108d人角膜行穿透移植35眼,经1.5~28个月随访,22眼透明,6眼半透明。多数学者认为深低温保存活角膜组织,保存期可长达数月甚至数年,移植后,透明率与新鲜角膜相仿,是眼库保存角膜的一种理想方法。

快速而可靠地评价内皮细胞活性在移植前是必须的。1966年卡佩拉和考夫曼用组织化学酶染色法评定内皮细胞活性,此法临床应用受到一定限制。1970年斯托克提出更适用于临床的台盼蓝染色法,台盼蓝与茜素红联合染色既能准确计算损伤与非损伤细胞的比例,还能较好鉴别细胞损伤的情况。1974年伯恩用放射自显影技术评价实验中的内皮细胞活性,同年杜尔曼用扫描电镜检查器官培养10~21d的角膜,证明内皮细胞有活性。1976年布雷斯特林(Breslin)用温度逆转试验评价M-K液保存角膜的内皮活性。自从1968年莫里斯(D. M. Maurice)设计制成镜面反射内皮显微镜后,1970年霍弗尔(Hoefle)在角膜移植术前用以上方法检查眼库中人眼的角膜,1976年伯恩和考夫曼简化了仪器,使之能在大多数病人中快速常规检查角膜内皮并可照相,放大200倍,成为评价内皮细胞活性和密度的常规检查方法。

开展角膜移植最重要的一环是角膜材料的选择。从年龄上来说,5~55岁猝死者角膜最为理想。3岁以前的角膜组织较成人的柔软,曲率半径较小,术后容易发生植片的前突而形成高度近视,故可用于高度远视和无晶体眼的穿透移植。采集时间原则上在死后尽快地摘除眼球或原位采取角膜,国外大多数眼库不允许把采集时间超过6h的供体组织用于移植手术。采集时间的临界值因尸体存放的条件而异,1973年谢拉德(E. S. Sherrad)指出,如死后任凭角膜在尸体原位且在相当于体温的环境下存放12h,内皮细胞可全部灭活,莱因(Reinin)等研究认为,温度每降低10°C,代谢率可降低一半,存活时间加倍延长,按此标准,27°C时可存活12h,17°C时存活24h,7°C时可存活48h。从死因考虑尚缺乏一致的标准,1981年史密斯指出关键是要有活性的内皮、健康的基质和上皮。比较一致的意见是败血症、梅毒感染和以前有血清阳性肝炎患者角膜不能作供体,大部分眼库废弃了死于变性的神经系统病和慢性病毒性病的病人的眼作为供眼,关于癌瘤病人可否作供体意见不一,但50%~80%的眼库不予采用。1986年萨拉达恩(S. Z. Salahuddin)首次来自人类免疫缺陷病毒(HIV)血清抗体阳性的无症状患者且在M~K液中保存7d的角膜上皮细胞中发现有HIV存在,同年多尔兹(S. Doroz)从症状明显的AIDS病人角膜中也分离出HIV,尽管迄今尚未发现通过角膜移植发生AIDS病或血清抗体阳性转化的证据,但角膜受体仍承受着感染HIV极大的威胁,因此,对于潜在的供体进行迅速的HIV血清学筛选是一合理谨慎之举。

随着医学科学的发展,人们对角膜保存法的研究必将进入更高、更新、更理想的阶段,广泛成立眼库,制定眼库医学标准亦是当务之急;筛选供体及供体角膜的技术同角膜移植的发展和普及同等重要;为临床角膜移植和实验研究提供角膜内皮活性好、保存时间长且方法简便经济的角膜保存方法的研究将大有发展前景。

(北京同仁医院眼科魏文斌主治医师撰,李志辉审)

[General Information]

书名=现代科技综述大辞典（上册）

作者=

页数=1597

SS号=11118419

出版日期=