

湖泊生态环境与治理 06

湖泊沉积物-水界面过程 基本理论与常用测定方法

王圣瑞 主编



科学出版社

湖泊生态环境与

湖泊沉积物-水界面过程

基本理论与常用测定方法

王圣瑞 主编



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了本研究团队近十年来从事浅水湖泊沉积物-水界面氮磷碳等形态、迁移转化、生物有效性及影响因素等相关研究所应用的基本理论与常用测定方法,以影响湖泊营养水平的沉积物氮、磷与有机质研究测定方法为重点,除了总结前人的研究方法,还对近年来本课题组在应用这些方法过程中所遇到的一些问题和注意事项等进行了分析和评述。本书共分九章,包括两部分:第一部分是湖泊沉积物-水界面过程基本理论;第二部分是湖泊沉积物-水界面过程研究常用测定方法,涉及 50 余种方法,主要包括沉积物碳、氮、磷形态测定方法,沉积物酶活性测定方法,沉积物微生物测定方法,沉积物主要元素测定方法,沉积物间隙水营养盐含量测定方法,沉积物氮磷释放研究方法等,主要内容包括方法原理、所需基本设备、所需试剂、基本操作方法、结果计算、注意事项与方法评述等。

本书可供从事湖沼学、生物地球化学、生态学、环境科学与环境工程等等的研究生、科研人员、管理人员以及大专院校师生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊生态环境与治理/中国环境科学研究院等编著. —北京:科学出版社, 2016. 1

ISBN 978-7-03-046714-0

I. ①湖… II. ①中… III. ①湖泊-生态环境-环境管理-研究 IV. ①X524

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 302493 号

责任编辑:杨 震 刘 冉 / 责任校对:韩 杨

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:18 1/2

字数:370 000

定价:3200.00 元(全 24 册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编 委 会

主 编：王圣瑞

副主编：赵海超 焦立新 李艳平

编 委（按姓名汉语拼音排序）：

毕韵之	程庆霖	崔超男	冯伟莹	高佃涛
胡海平	黄 丹	黄睿智	焦立新	黎 睿
李艳平	刘婉清	刘文斌	倪兆奎	王圣瑞
吴志皓	吴志强	席海燕	熊 强	杨艳丽
张 莉	张 文	赵海超	赵亚丽	

前 言

沉积物是浅水湖泊氮磷等污染物的重要蓄积库,沉积物-水界面是湖泊生态系统三大主要界面(大气-水界面、沉积物-水界面和生物-水界面)之一,是影响浅水湖泊水质的重要界面,其物质交换和生物活动等均较为复杂。因此,就浅水湖泊而言,在外源污染得到一定程度的控制后,其沉积物-水界面氮磷过程的研究和控制就成为湖泊富营养化治理的重要任务。国内外学者针对湖泊沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程已经开展了较多研究,但不同学者所用方法各不相同,导致研究结果可比性较差;而且不同学者由于受各自学科的限制,对不同研究方法的理解和掌握程度也各异,致使一些研究方法的应用存在困难,进而影响研究结果。

特别是近年来,沉积物作为内负荷的重要来源,对我国浅水湖泊而言,其重要性日益受到关注。本研究团队总结了针对湖泊沉积物-水界面氮磷过程、沉积物内负荷研究的基本理论相关测定方法,以湖泊沉积物-水界面氮磷形态、迁移转化、生物有效性及影响因素等研究所涉及的方法为重点,从方法原理、需要设备与实验条件、所需试剂及操作步骤、注意要点、结果计算和方法评述等方面,系统总结了国内外湖泊沉积物-水界面氮磷过程主要研究方法;其中,部分项目还进行了方法比较,供读者根据需求和具体条件选择参考。

本书是作者所承担的国家自然科学基金面上项目“湖泊沉积物可溶性有机氮衰减特征及生物有效性”(41173118)、重点项目“高原湖泊有机氮磷界面过程与藻类水华发生风险研究”(U1202235)和国家水专项课题“滇池水体内负荷控制与水质综合改善技术研究及工程示范”(2012ZX07102-004)等在研究方法方面的总结。全书共分9章两部分,第一部分是湖泊沉积物-水界面过程基本理论,包括“湖泊环境沉积学及湖泊沉积特征”、“湖泊沉积物-水界面过程基本理论与模型”、“湖泊沉积动力学及沉积物-水界面过程”三章;第二部分是湖泊沉积物-水界面过程研究常用测定方法,涉及50余种方法,其中第4章介绍21种沉积物碳、氮、磷形态测定方法;第5章介绍8种湖泊沉积物酶活性测定方法,第6章介绍6种湖泊沉积物微生物测定方法,第7章介绍9种湖泊沉积物主要元素含量测定方法,第8章对比2种营养盐测定方法和3种间隙水营养盐测定方法,第9章介绍7种沉积物氮磷释放及生物有效性表征方法。

本书以浅水湖泊沉积物内负荷及其氮磷生物地球化学过程研究常用测定方法为重点,是作者近十年来围绕湖泊沉积物-水界面氮磷过程这一科学问题在研究方法方面的系统总结,是专门针对湖泊沉积物内负荷及其氮磷生物地球化学过程研

究方法的专著。对湖泊沉积物-水界面常用研究方法的总结、分析和评述是本书的一大特点,特别是各研究测定方法的注意要点和方法评述部分是本研究团队多年来研究经验和多次实验失败的总结和提升。一个研究团队需要有属于自己的研究方法,最初总结这些研究方法是供研究团队内部使用,但在总结和使用过程中,遇到了较多的问题,从事相关研究工作的人员都可能遇到类似问题。出版本书希望能对从事相关工作的科研人员和研究生等有一定的参考价值。

本书的成稿与众多研究生的不懈努力密不可分,是他们许多次失败、许多次重复、不断思考、不断总结的结果。期间金相灿研究员给予了悉心指导和关心,我的同事储昭升研究员等也给予了很多帮助和修改意见。本书得到了国家自然科学基金和国家水专项的大力支持;在本书编写过程中,参阅了大量文献,由于篇幅所限,仅列出了主要文献资料,引用了一些著作者的插图,在此一并表示感谢。

本书的出版得到国家自然科学基金-云南联合基金重点项目“高原湖泊有机氮磷界面过程与藻类水华发生风险研究”(U1202235)的资助,在此表示感谢!

湖泊沉积物-水界面过程复杂多变,其所涉及的学科领域较多,所涉及的研究方法也较多,且很多方法本身还存在一些不足,有待于进一步完善。限于作者的学识和水平,书中内容难免有不妥或错漏之处,敬请专家和读者不吝指正。

王圣瑞

2013年8月20日于北京

目 录

前言

第一部分 湖泊沉积物-水界面过程基本理论

第 1 章 湖泊环境沉积学及湖泊沉积特征	3
1.1 沉积学与湖泊环境沉积学	3
1.2 湖泊环境主要沉积类型及其特点	6
主要参考文献	10
第 2 章 湖泊沉积物-水界面过程基本理论与模型	12
2.1 湖泊沉积物-水界面过程及其基本理论	12
2.2 湖泊沉积物-水界面过程常用研究方法及模型	14
2.3 湖泊沉积物-水界面过程研究常用设备	21
主要参考文献	22
第 3 章 湖泊沉积动力学及沉积物-水界面过程	24
3.1 湖泊沉积过程及其动力学	24
3.2 湖泊沉积物-水界面过程研究重点与常用方法	31
主要参考文献	50

第二部分 湖泊沉积物-水界面过程研究常用测定方法

第 4 章 湖泊沉积物碳、氮、磷形态测定方法	57
4.1 沉积物总氮测定方法: 凯氏定氮法	57
4.2 沉积物总氮测定方法: 碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度计法	60
4.3 沉积物可转化态氮形态测定方法	62
4.4 沉积物总磷测定方法: SMT	69
4.5 沉积物总磷测定方法: 过硫酸钾氧化分光光度计法	71
4.6 沉积物磷形态测定方法: 四步连续提取法	74
4.7 沉积物磷形态测定方法: SMT	77
4.8 沉积物有机磷分级方法	81
4.9 沉积物钙磷分级方法	83
4.10 沉积物可酶解有机磷测定方法	87
4.11 酶解测定湖泊沉积物有机磷形态及生物有效性方法	90

4.12	沉积物有机碳测定方法:油浴法	97
4.13	沉积物活性有机碳测定方法	100
4.14	沉积物轻组有机质测定方法	102
4.15	沉积物轻组有机质分组测定方法	104
4.16	沉积物溶解性有机质测定方法	107
4.17	沉积物溶解性有机质结构表征方法:三维荧光光谱法	108
4.18	沉积物溶解性有机质分组方法:XAD-8树脂分组法	112
4.19	沉积物溶解性有机氮提取方法	115
4.20	沉积物有机磷提取方法	118
4.21	沉积物粒径分级方法	121
	主要参考文献	127
第5章	湖泊沉积物酶活性测定方法	136
5.1	沉积物碱性磷酸酶活性测定方法	136
5.2	沉积物过氧化物酶活性测定方法	140
5.3	沉积物多酚氧化酶活性测定方法	143
5.4	沉积物蛋白酶活性测定方法	146
5.5	沉积物脲酶活性测定方法	149
5.6	沉积物转化酶活性测定方法	151
5.7	沉积物纤维素酶活性测定方法	154
5.8	沉积物脱氢酶活性测定方法	157
	主要参考文献	160
第6章	湖泊沉积物微生物测定方法	163
6.1	沉积物微生物生物量碳测定方法	163
6.2	沉积物微生物生物量氮测定方法	166
6.3	沉积物微生物生物量磷测定方法	169
6.4	沉积物微生物培养法:MPN法	171
6.5	沉积物反硝化细菌测定方法	175
6.6	沉积物反硝化速率测定方法	179
	主要参考文献	181
第7章	湖泊沉积物主要元素含量测定方法	184
7.1	沉积物有机质和氮来源研究方法	184
7.2	沉积物铁、铝、钙测定方法:微波消解 ICP-OES	188
7.3	沉积物铁氧化物测定方法	192
7.4	沉积物铝氧化物测定方法	195
7.5	扩散薄膜梯度技术测定沉积物金属含量	200

7.6 扩散薄膜梯度技术测定沉积物间隙水金属含量	206
7.7 扩散薄膜梯度技术测定沉积物及上覆水磷含量	210
7.8 扩散薄膜梯度技术测定沉积物硫含量	213
7.9 沉积物氨基酸含量测定方法	217
主要参考文献	221
第8章 湖泊沉积物间隙水营养盐含量测定方法	225
8.1 镉柱还原法与分光光度计法测定硝酸盐氮	225
8.2 次溴酸盐氧化法与分光光度计法测定氨氮	232
8.3 间隙水溶解性有机氮含量测定方法	238
8.4 间隙水溶解性有机磷含量测定方法	242
8.5 间隙水总氮含量测定方法	244
主要参考文献	247
第9章 湖泊沉积物氮磷释放研究方法	249
9.1 沉积物氮磷释放动力学研究方法	249
9.2 沉积物氮磷吸附热力学研究方法	253
9.3 沉积物氮磷吸附动力学研究方法	257
9.4 沉积物氮磷释放潜能研究方法	261
9.5 沉积物氮磷释放通量研究方法:原位法	264
9.6 沉积物氮磷原位释放动力学研究方法:静态模拟	269
9.7 沉积物氮磷生物有效性研究方法	272
主要参考文献	274
附表	278
附表1 不同 pH 值磷酸缓冲液[0.2 mol/L PB(100 mL)]配制	278
附表2 醋酸盐缓冲溶液配制	279
附表3 沉积物氮磷释放动力学模型及参数	280
附表4 标准筛孔对照表	280
附表5 不同温度下沉积物各粒级比重计测定时间表(国际制)	281
附表6 土壤容重与土壤总孔隙度查对表	281

第一部分 湖泊沉积物-水界面 过程基本理论

第 1 章 湖泊环境沉积学及湖泊沉积特征

1.1 沉积学与湖泊环境沉积学

1.1.1 沉积学

19 世纪中期,科学家开始利用偏光显微镜观测研究沉积岩,标志着沉积岩石学(Sedimentary Petrology)这一学科的诞生(姜在兴,2003)。而沉积学(Sedimentology)则是在沉积岩石学的基础上得以发展产生。1932 年沃德尔(H. A. Wadell)等认为沉积岩石学主要是针对沉积岩的薄片进行研究,从而在沉积岩石学的基础上,提出了“沉积学”是研究沉积物的学科,直到 1978 年弗里德曼(G. M. Friedman)才对“沉积学”做了较为完整的定义,即沉积学是研究沉积物、沉积过程、沉积岩和沉积环境等的学科。

多数学者认为沉积学是研究沉积物来源、沉积条件、沉积环境、沉积作用及沉积物演变为沉积岩等过程的一系列复杂的成岩作用及其变化的学科,其研究目的主要是揭示沉积物的来源特征以及沉积区域的环境条件和演变特征。沉积学家研究不同地理环境中沉积物堆积的成分、组成、构造及岩石含量等,以此来区别地质学记录上来自陆地、海岸和海洋等的沉积物。沉积学研究重点是结合土壤学,研究其风化作用;结合流体力学、水文学、大气科学、水化学和生物化学等,研究其搬运作用和沉积作用;结合矿物学、岩石学、化石岩石学等,研究其各种碎屑颗粒、黏土矿物和异化颗粒的类型和成因等,研究陆源沉积物和内源沉积物的类型及其成因,尤其对各种已知环境的沉积相特征进行分类,建立相模式和沉积体系等;结合岩石圈动力学等,研究大构造单元或大地理环境中的沉积特征,主要研究整个沉积盆地、岩石圈板块、褶皱带等的沉积特征。以上研究内容也有人称之为宏观沉积学。

从学科发展的角度来看,沉积学是地质学的一个分支,也是自然地理学的重要研究内容之一,沉积学的研究成果促进了自然地理学的发展。另外,沉积学与海洋学密切相关,研究海洋沉积物不但采用了海洋学的调查和取样方法,而且直接应用了海洋学关于海洋环境及其物理、化学和生物特性等方面的研究成果。沉积学还与生物学及古生物学、生态学及古生态学密切相关。因为不仅古代沉积物的沉积环境与古生物的生存环境相一致,而且某些沉积物本身就含有生物,或其遗体基本上就是由生物体组成(徐茂泉 等,2010)。

沉积学的发展大致可以分为四个阶段:

(1) 起步阶段(1830~1894 年)

这一阶段侧重于古生物地层、煤和生物礁等的研究。Lyell 于 1830 年推出专著《地层学原理》，提出了将今论古的现实主义原理；1850 年 Sorby 首次使用偏光显微镜研究了岩石，并指出“利用所有偏振光手段是必需的”，从此拉开了对岩石进行微观研究的序幕；1894 年 Walther 撰写了《作为地质历史的地质学导论》，提出了“相序”的概念。

(2) 专业化阶段(1894~1931 年)

这一阶段，科学家开始用显微镜研究重矿物。1914 年，Gilbert 首次用各种粒径的砂和不同的水流强度进行了水槽实验；1930 年，Friedman 和 Sanders 推出了《沉积学原理》一书；Wentworth 提出以 2 mm 作为砂粒级的上限；美国经济古生物学家与矿物学家学会 (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, SEPM) 创刊了《沉积岩石学杂志》。

(3) 快速发展阶段(1931~1950 年)

随着差热分析、X 射线衍射等新技术在沉积学领域的应用，沉积岩的研究趋于半定量化。1940 年 Halbouty 研究了墨西哥湾物源、海水进退、古岸线变化、地层尖灭和油气远景；1945 年 Krumbein 将统计学应用到了沉积学研究；1949 年 Pettijohn 编写了专著《沉积岩》。

(4) 成熟阶段(1950 至今)

该阶段最大的特点是与沉积学相关的交叉学科得以快速发展，如层序地层学、资源沉积学、环境沉积学、大地构造沉积学、事件沉积学、全球旋回地层学、大陆动力沉积学、实验沉积学和储层沉积学等，该阶段沉积学的研究开始由理论研究领域转向实用领域，由局部转向全球。20 世纪 50 年代初出现了浊流(重力流)理论，1961 年鲍玛建立了浊积岩层序——鲍玛层序。20 世纪 60 年代，开始从板块的角度进行沉积学研究。20 世纪 70 年代至今，伴随着上述交叉学科在研究手段与基本理论等方面的发展，沉积学也得以快速发展，其研究的重点也逐渐集中在沉积物、沉积过程、沉积岩和沉积环境等方面。

1.1.2 湖泊环境沉积学

1. 湖泊环境及湖泊分类

现代湖泊在形态、大小和稳定性等方面差别很大。较小的湖泊存在于沿岸平原、冲积平原、冰川地区或三角洲等区域，是该环境的组成部分之一。大多是由于沉积物壅塞、局部侵蚀、溶解或在沉降的盆地中由于沉积补给暂时中断而形成(赵澄林, 2001)。该类湖泊面积小，寿命短，并且很快就被淤塞。此外，在火山活动区内也有类似的暂时性湖泊出现。

较大的湖泊则主要是由于地壳运行而形成的构造湖,较大的湖泊可分成两类:其中一类是在构造地区形成的,包括东非裂谷和贝加尔裂谷等扩张的裂谷中的湖泊和沿一定走向滑动的造山带而形成的湖泊,如死海等。此情况下,湖盆沉降迅速,从邻近边缘来的沉积补给往往很充足,沉积充填厚(某些东非湖泊的沉积充填厚约 2 km,贝加尔裂谷的沉积厚约 2.5 km),而且沉积迅速。另外一类是在克拉通地区长期下陷区域(如乍得湖和埃雷湖)形成的。在地质历史中,可以持续较长时间,其沉积边缘的进退范围超过数百公里,而碎屑供给却相对较少。除碎屑供给外,湖泊沉积作用还受水化学性质和湖滨岸线变动等影响。而湖水的盐度则主要受来水量和湖内沉淀与溶解之比等影响,其中来水量的估算取决于降雨注入量与流出量加蒸发量之比,湖水组成主要取决于源区的基岩性质和局部地区的火山活动等。

湖泊是由湖盆、湖水和水中所含物质(如矿物质、溶解质、有机质和水生生物等)组成的整体,是在一定的地理环境下形成和发展的,且与环境诸因素相互作用,并受其影响。但是,无论湖泊如何形成,都必须具备两个最基本的条件:一是从物理学的角度来讲,具备洼地即湖盆;二是从化学和生物学的角度来讲,具备湖盆所蓄积的水体与包含的生物等。

湖泊可以从湖水的含盐度、湖泊成因、湖泊营养水平和湖水分层等方面进行分类。如按照含盐度,可将湖泊分为淡水湖泊和咸水湖泊,并以正常海水的含盐量 3.5% 作为其分界线。按照湖泊成因也可分为构造湖(断陷湖和拗陷湖)、河成湖、火山湖、滑坡湖、冰川湖、溶蚀湖、风成湖、海岸湖、有机成因湖、人工湖、陨石湖。基于温度分层,则可分为无循环湖(永冻湖)、冷单循环湖、双循环湖、暖单循环湖、多循环湖和少循环湖(沈吉等,2010)。

2. 湖泊环境沉积学

湖泊沉积学是湖泊学和沉积学的交叉学科。19 世纪早中期,关于湖泊沉积学的研究报道一直十分薄弱。自 1885 年 Gilbert 的《湖岸地形特征》发表以后,为了研究三角洲、沿岸流、浊流和蒸发作用等过程,湖泊经常被作为大型实验场而开展较为综合的研究。由此推动了湖泊沉积学的发展。到 20 世纪 20 年代,湖泊沉积学研究又有了新的发展,尤其是在湖泊环境沉积物学方面得到了较快的发展。Nipkow 在 1920 年采集了苏黎世湖第一筒岩芯,分析了沉积物的内部特征,并针对环境变化进行了分析研究。

自 20 世纪 50 年代以来,湖泊环境沉积学的研究得到了较大的发展。1952 年, Kullenberg 首次取得了 8.5 m 的岩芯,进行了较为系统的化学与孢粉的研究,揭示了冰后期以来湖泊环境演化历史和营养条件的改变。此项工作的开展,标志着湖泊环境沉积学的研究在采样技术与研究内容等方面均有了重大的变革。20

世纪 80 年代以来,随着全球科学技术,特别是环境科学的迅速发展,湖泊环境沉积学研究的意义及其蕴含的发展潜力不断地得到认识和开拓,湖泊环境沉积学已经逐渐成为国内外地球科学家共同瞩目的新领域之一。

湖泊约占大陆表面的 1%,由于其拦截了由河流搬运的大量固态和悬浮物质,使其成了沉积物堆积的重要场所。另外,特别是在内陆水系的盆地中,湖泊也可能成为化学沉淀的场所。湖泊是陆地水圈的组成部分,其与大气圈、生物圈和岩石圈有着密不可分的关系,是各圈层相互作用的连接点。此外,湖泊又是一个相对独立的体系,并且经过了较长的地质历史,再加上湖泊本身的规模一般较小,而且湖泊没有受到海水均化效应的影响。所以,湖泊沉积物,特别是在化学性质方面,对流域气候环境等非常敏感。因而,古代湖泊沉积物,尤其是封闭型湖泊的沉积物,在古气候反演和全球气候变化的对比研究具有重要意义。

我国现代湖泊沉积学的研究起步较晚,始于 20 世纪 20 年代,在一定程度上是石油工业的崛起和发展推动了该学科的发展。20 世纪 70 年代中期到 80 年代前期,湖泊环境沉积学逐渐成为热点,确定环境标志物、识别沉积类型和建立相模式等也成为了重要的研究内容。通过云南断陷湖泊、横断湖泊以及东部鄱阳湖、太湖、内蒙古岱海等湖泊的研究,对湖泊沉积物形成和演化、湖泊沉积动力学、湖泊沉积环境及其沉积特点等有了进一步的认识。为对比中-新生代湖泊三角洲、扇三角洲、湖底扇和滨岸滩坝沉积相标志、相层序和相模式等提供了重要的科学依据。20 世纪 80 年代后期,全球变化成为众多科学家的关注热点,湖泊沉积物作为大陆气候环境变化的重要信息载体,湖泊环境沉积学再度成为了研究的热点。

近年来,借鉴国际湖泊沉积环境研究的先进技术和经验,湖泊环境沉积学利用多环境指标,从不同角度对湖泊环境进行综合判识,对合理开发利用湖泊资源与解决我国日益严重的湖泊水污染、富营养化等环境问题进行了积极的探索(金相灿等,1990;王苏民等,1998)。

1.2 湖泊环境主要沉积类型及其特点

湖泊沉积是陆相沉积物中分布最为连续、层位最稳定的沉积类型之一。湖泊沉积类型及其组合关系,主要取决于气候条件和物质来源,特别是气候条件对湖泊的沉积模式起着十分重要的影响。在蒸发量小于降水量的湿润地区,多会出现“永久性”的淡水湖沉积;蒸发量大于降水量的干旱区,常见有间歇性的盐湖沉积。同时,湖泊沉积又是研究大陆古环境变化的重要手段。因为每一个湖泊都可以看作是一个独立的系统,从集水盆地的气候和地质条件,到湖水物理化学性质,再到湖泊生产力和有机质的堆积等,相互之间都有着密切的内在联系。图 1-1 所示为湖泊动力过程与沉积作用(根据 Hakanson,1977,1982 修改)。

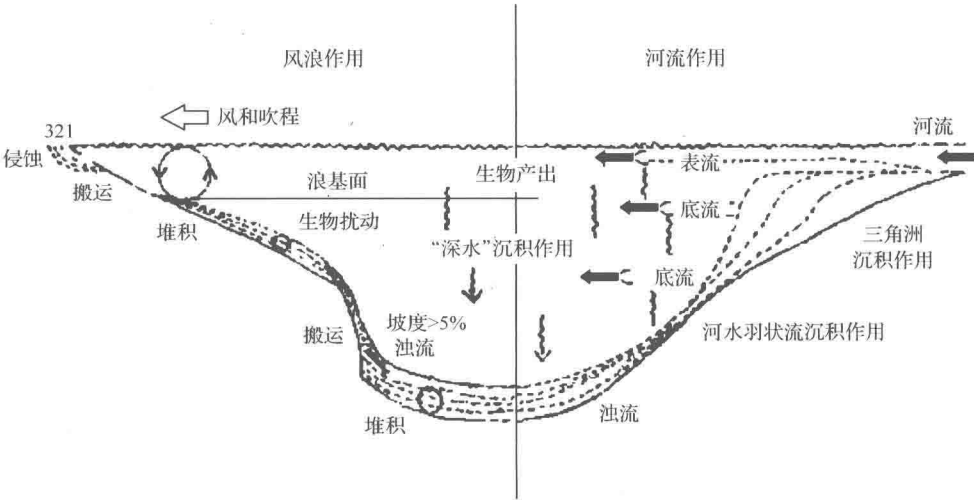


图 1-1 湖泊动力过程与沉积作用

根据前人总结的湖泊沉积类型,其大体可以划分为湖泊碎屑沉积、湖泊化学沉积、湖泊生物沉积、湖沼沉积、干盐湖沉积和盐沼沉积六种湖泊沉积类型,其中以湖泊碎屑沉积、湖泊化学沉积和湖泊生物沉积最为常见(沈吉 等,2010)。

1.2.1 湖泊碎屑沉积

湖泊碎屑沉积主要是黏土、淤泥和砂等,砾石较少,尽见于河流注入处。在气候湿润区发育较好。特温霍费尔根据湖泊中波浪作用的特征,曾给出湖泊中碎屑沉积物分布的理想图(赖内克和辛格,1982),认为理想的湖泊沉积形式应该是环带状,边缘为激浪作用的砾石带,中间是波浪基面以上的砂质带,内部为波浪基面下方的砂泥质带,以上三带构成湖滨浅水相沉积;中心部分是软泥,构成湖心相。碎屑沉积是湖泊沉积的主要类型,其物质输移主要是通过河流搬运作用。此外,入湖后的沉积过程也受到包括水下地形、水动力条件、水生植被、湖水理化性质和湖泊分层状况等湖泊环境系统的影响。

一般说来,湖盆周围常有河流注入,形成入湖三角洲沉积。因此,该沉积体系从湖滨到湖心,沉积相分布模式通常是河流-三角洲相渐变为湖滨浅水相,再渐变至湖心深水相(任明达 等,1981)。另外,湖相碎屑沉积的分布一般呈环状,沉积物颗粒湖滨粗,湖心细;河口粗,湖湾细;沉积物的颜色由湖滨向湖心随着氧化条件减弱而发生了相应的变化。

1. 河流-三角洲相沉积

相对于河流而言,湖泊水动力作用较弱,入湖河流的三角洲沉积一般以河流作

用为主,典型的三角洲沉积单元依次为顶积层、前积层和底积层。顶积层是由沙波层理与页理砂组成,几乎没有有机物质,粗粒物质主要沉积在分流河道的轴部,而由于分选作用,轴部以外地区沉积细粒物质。前积层是由深色黏土质粉砂夹浅色砂质粉砂组成,并且前积层生物扰动频繁,有机成分增加,由于有机质分解而释放出的气体形成的气泡空洞较多。底积层与前积层较为类似,但是常见有不明显层理、递变层理页理黏土质粉砂等沉积构造,无沙波层理分布。

2. 湖滨浅水相沉积

湖滨浅水相沉积物与海滨浅水相沉积物的特征比较相似。凡是有丰富砂源供给的湖泊,湖滩常为砂质。湖滩砂受潮浪作用,分选性好,圆度也较高,间有重矿物富集或是粗贝壳碎屑层,平面上构成条带状的构造。湖滩砂的堆积层理有规则地向深湖区缓斜,倾角一般小于 10° 。砂粒长轴一般与湖岸垂直,在隐蔽湖湾区,浅水相沉积也可以以细粒沉积为主,主要是淤泥,部分大湖湖滨泥滩广阔,由于周期性地露出湖面,有干裂缝等构造(沈吉等,2010)。

3. 湖心深水相沉积

现代湖心深水相沉积有以下几个主要特征:粒径细,多为黏土或淤泥;颜色较深,多为深灰或黑色;有机质含量远较湖滨浅水区高。例如武昌东湖沉积物有机质含量,由于其沉积相不同而差异较大,其中湖滨粗砂、细砂为 $2\%\sim 4\%$;粉砂为 $2\%\sim 6\%$;湖中软泥为 10% ,湖心腐泥大于 10% 。由此可见,沉积物中的有机质含量与粒径的粗细有关。部分湖泊的湖底淤泥中含大量碳酸盐,部分湖泊深水区的沉积物具有纹理,有的还有明显的季节层理。由于湖心的近湖底水层处于波浪基面以下,并且具有永久性或是季节性的分层现象。

因此,近湖底的水停滞不动,缺氧形成强烈的还原环境,有利于有机质被大量地保存下来,并且产生硫化氢。由于水生动物不适宜在该环境下生存,因而该区域具有无底栖动物扰动和破坏性沉积层理,即湖心深水相沉积物常保存有较完好的纹理或季节层理。

1.2.2 湖泊化学沉积

化学沉淀物在湖相沉积中十分重要,是许多有价值盐类矿床的重要组成部分。化学沉积受温度的影响比较大,冬季温度接近于零或低于零时,盐类析出。此外,湖水的化学成分主要取决于带入湖中的溶解质和悬浮质,若干盐类组分由于化学作用和生物化学作用被沉淀下来。在蒸发作用强烈而又缺乏低盐水补给的干旱盐湖中,湖泊卤水在蒸发浓缩的过程中,沉淀出一系列盐类矿物。一般化学沉积多见于干旱地区,湖泊由碎屑沉积开始,并以盐类沉积告终,即从淡水湖逐渐演变为咸