



湖泊沉积物 界面过程与效应

The Sediment-water Interface of Lakes:
Processes and Effects

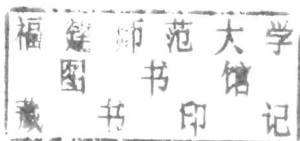
范成新 周易勇 吴庆龙 等 编著



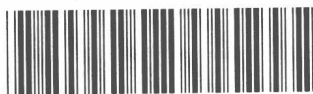
科学出版社

湖泊沉积物界面过程与效应

范成新 周易勇 吴庆龙 等 编著



1043148



T1043148

科学出版社

北京

The Sediment-water Interface of Lakes: Processes and Effects

Edited by

Fan Chengxin, Zhou Yiyong, Wu Qinglong et al.

**Science Press
Beijing**

内 容 简 介

本书以湖泊表层沉积物微环境特征、界面物理和生物扰动过程及其环境和生物效应为主线,围绕磷、氮及碳等营养物质在界面微环境介质中的存在形态、性质、行为及其影响,系统概括湖底复杂边界的基本特征、水动力和底栖生物扰动影响的空间尺度等,阐述扰动作用下不同形态物质在微界面迁移转化的过程和机理,并给出若干新认识和新观点。本书的特点是以浅水富营养化湖泊为例,以翔实的实验数据为依据,通过对微观过程、微小特征和微细效应的观察分析,对湖泊沉积物-水界面的微环境过程和机制进行系统分析和总结,以期对现有的湖泊沉积物界面过程和效应方面的相关认识给予补充和完善。

本书可供从事水体环境化学、环境生物学、水文物理学、沉积学、泥沙学、地球化学、环境保护等方面的科研人员、技术人员和大专院校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊沉积物界面过程与效应 / 范成新等编著. —北京: 科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-036150-9

I. ①湖… II. ①范… III. ①湖泊沉积作用—研究 IV. ①P512.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第293015号

责任编辑: 朱 丽 丛洪杰 / 责任校对: 包志虹
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013年1月第一次印刷 印张: 22 3/4

字数: 518 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

湖泊是内陆水体的一类典型地理单元。从湖面上空俯视,湖泊是一个时而静止、时而有波浪的水面,并具有清晰的岸线轮廓和相对明确的流域边缘。若视线能穿过水层看向湖底,则可见平面分布的水下湖底地形,以及具有皱褶和孔洞分布的沉积物表层;再由侧向剖面平视,可见湖泊是具有一定“厚度”水层的相对动态的自然混合体。其最典型的特征是湖体内水体的流动,以及颗粒物体(包括生命体)随水体携带的运动。在水-气界面和沉积物-水界面纵向限制的空间尺度内,水体的湍流等运动和颗粒物的悬浮与沉降,构筑着以颗粒物和生物体为固态分散相、水为连续相的横向伸展的巨幅水景。在湖水底部,因主要受湖盆地貌支配,沉积物成为与水体接触面积最大的一类固相介质。在水固两相间,构成了宏观物理意义上的沉积物-水界面。实际上,沉积物与水之间并不存在一个接触的“面”,两相之间也并非简单的接触,而是两种介质与对方的相互渗透和包容。这种渗透和包容造成了“界面”在垂向上的拉伸,使这种接触有了立体尺度。在这个立体界面的表层和内部,湖水通过各种方式对沉积物及其界面产生扰动作用,并据此影响沉积物-水界面的环境与生物地球化学过程。

水底沉积物是地球岩石圈、水圈和生物圈中各界面要素相互作用与相互渗透的典型区域,物理、化学和生物过程在此交织与耦合。水体底部还是水流、波浪和能量的主要耗散地,是热量、溶质或颗粒物在水柱和底层交换的场所;在其邻近区域,沉积物质的成岩作用甚为剧烈,同时也是多种底栖动物、植物和微生物生存之地。另外,湖泊沉积物-水界面层与海洋底部的显著差异在于其是理化性质的突变区。在此区域内,化学物质的产生、循环、转移过程异常活跃,且行为特殊;此外,界面区属于化学元素变化的灵敏区,在湖水和沉积物中变化不显著的行为,在界面层则可表现得非常明显。界面与上覆水体间发生且由生物积极参与的物理和化学反应,将对湖底界面附近物质(特别是营养物及敏感性元素)的状态和行为产生持续影响。

界面过程的发生大多是以微尺度体现的沉积物微环境下的物理、化学和生物效应。虽然静态的作用也具有一定的微观变化,但人们更加重视动态过程所产生的影响。潮流、波浪在湖底形成的湍流等作用,使水体对湖底发生相对运动。在水底边界层内流体摩擦形成的剪切作用大于起动切应力后,表层沉积物就将被扰动产生再悬浮作用,使沉积物-水界面受到破坏,在平面上呈一定程度的整体下移。生物(特别是底栖动物)在沉积物中的营穴、摄食和栖息等表层改造和引灌,则多以非均匀的方式影响沉积物物理结构。生物扰动使得沉积物孔隙率增大,含水量增加,颗粒物运动和沉积层理破坏;其中引灌还造成上覆水向沉积物内部渗透,将氧气传输进深层部位,加大沉积物底部的氧化还原电位,继而影响表层敏感化学物质形态和微生物活性分布等,加速物质在界面的输送和早期成岩等过程。无论是物理作用还是生物作用,都将深刻地影响表层沉积物及其间隙水

中物质的迁移扩散、有机质及磷和氮的形态的转化和再生,改变界面及其附近的生物地球化学过程,产生以物质迁移转化为主要特征的环境效应。

沉积物-水界面是陆地表层系统最重要的界面之一,是以物相为基础的相对固定的环境界面。界面上物质流过程和机理的研究是深入和系统了解水生态系统状态变化乃至结构与功能响应的切入点之一。鉴于界面的重要性,国际上对沉积物-水微界面过程的研究非常重视。在海洋领域,由欧洲科学基金(ESF)资助进行的 SEDFLUX 计划(2004~2006 年),欧盟推出的第 6 次框架一体化计划(AquaTerra 计划)(2004~2009 年)等,均涉及沉积物-水界面的研究,此外,尚有众多的相关研究已经在不同的国家和地区展开,如法国的“富营养化环境沉积物-水界面生物地球化学过程”(the Microbent-PNEC Program)专项研究计划等。由于以上诸多计划的实施,围绕沉积物-水界面过程的研究正在取得非常迅速的进展,突出表现在一些新技术和手段的应用,使得对界面特性的描述更加微观、原位和多维。中国的浅水湖泊众多,富营养化问题相对突出,近十多年来在湖泊界面过程和效应研究方面也取得了突飞猛进的进展,基础性研究不断加强,成果日益显现。

本书是对国家自然科学基金重点项目“物理和生物扰动对湖泊沉积物-水界面微环境与磷再生及迁移的影响”(No.40730528)研究成果的理论总结,并向氮和有机质等生源物质的迁移转化进行了拓展。全书共 11 章。第一章由范成新、张雷、商景阁、肖文娟、刘云兵撰写;第二章由周易勇、纪磊、陈玺、吴宇澄、曹秀云、姜莘红撰写;第三章由李清曼、施文卿、阚丹撰写;第四章由吴庆龙、吴宇澄、邢鹏、钟继承、向燕撰写;第五章由丁士明、白秀玲、李斌、范成新撰写;第六章由周纯、宋春雷、曹秀云、黄代中、白云钦、周驰、纪磊、李阳、陈玺、李慧撰写;第七章由范成新、张雷、尤本胜、商景阁、张路、王同成撰写;第八章由张路、商景阁、张雷、尤本胜、范成新撰写;第九章由范成新、张雷、丁士明、尤本胜撰写;第十章由李大鹏、尤本胜、肖文娟、侯杰、周驰、范成新撰写;第十一章由周易勇、黄代中、纪磊、孙爱华、曹秀云、白云钦、姜莘红撰写。全书由范成新统稿和审定。

在本书出版之际,作者诚挚地感谢国家自然科学基金委员会地球科学部有关领导给予本研究的关心和支持,同时感谢湖泊与环境国家重点实验室(2007DA173213)、淡水生态与生物技术国家重点实验室(14918707)和中国科学院太湖湖泊生态系统研究站在室内外工作和实验条件上提供的技术条件。由于受作者研究水平的限制,书中难免存在疏漏和不足,恳请专家和广大读者批评指正。

作 者

2012 年 8 月于南京

目 录

前言

第一章 表层沉积物微环境物理与化学特征.....	1
第一节 湖底界面尺度及微形貌特征.....	1
一、沉积物-水界面尺度.....	1
二、湖底形貌特征.....	2
第二节 表层沉积物物理性质及其分布.....	4
一、粒度.....	4
二、孔隙度.....	5
三、含水率.....	7
四、容重.....	9
第三节 表层沉积物主要化学性质分布特征.....	10
一、磷.....	10
二、氮.....	14
三、有机质.....	16
四、氧.....	18
参考文献.....	23
第二章 沉积物界面微环境生物特征及活动行为.....	26
第一节 沉积物中微型消费者群落分布特征及其活性.....	26
一、氮循环细菌.....	26
二、解磷细菌.....	32
第二节 底部边界层大型消费者及其生活习性与方式.....	41
一、寡毛类.....	42
二、摇蚊幼虫.....	42
三、软体动物.....	43
四、甲壳动物.....	44
五、游泳动物.....	46
六、多毛类.....	46
第三节 界面微环境底栖藻类的生长与生活习性.....	47
参考文献.....	48
第三章 氧化还原体系及对沉积物-水界面控制作用.....	55
第一节 沉积物氧化还原反应基本理论及体系特征.....	55
一、反应基本理论.....	55

二、反应控制体系	58
三、体系多样性	60
四、生化过程偶联	62
五、电位与酸度偶联	65
第二节 缺氧驱动下沉积物敏感元素体系还原过程	66
一、氧体系	66
二、硝酸盐体系	67
三、锰体系	68
四、铁体系	70
五、硫体系	73
第三节 沉积物界面氧化还原影响下的物质行为	74
一、水溶性磷	74
二、交换性磷	75
三、铁氧化物结合磷	76
四、硝态氮	78
五、氨态氮	79
参考文献	80
第四章 沉积物界面氮氧化及其微生物学过程	82
第一节 沉积物中氨氧化原核生物垂直分布及其特征	82
一、微生物结构与理化环境	82
二、AOB 与 AOA 群落结构变化	84
三、氨氧化微生物分子系统发育	85
第二节 表层沉积物中氨氧化原核生物水平分布及其特征	88
一、群落组成和相对丰度	88
二、环境因子影响	91
三、AOA 和 AOB 的分子系统发育	92
四、厌氧氨氧化细菌群落结构	96
第三节 表层沉积物硝化与反硝化潜力及其影响	99
一、反硝化速率分布	99
二、硝化潜力分布	100
三、温度及碳源影响	103
第四节 沉积物中生物体对氮循环微生物分布和多样性影响	104
一、蓝藻沉降影响	104
二、水生植物根际影响	111
参考文献	115
第五章 沉积物有机磷组成特征及界面迁移	117
第一节 沉积物有机磷组成与有效信息获取	117

一、有机磷组成	117
二、有机磷有效性	120
三、有机磷分子信息获取方法	121
第二节 沉积物有机磷的组成特征及与水体磷关系	124
一、有机磷组成特征	125
二、有机磷与水体磷关系	128
第三节 早期成岩作用下沉积物有机磷垂向再分布及动力机制	130
一、沉积物相关理化特征	130
二、有机磷组成分布	132
三、有机磷形态分布	135
四、磷形态转化动力学	138
参考文献	141
第六章 沉积物中有机质与生物及微环境关系	147
第一节 沉积物有机质分解及其与微生物活性关系	147
一、有机质种类及可分解性	147
二、微生物数量	150
三、微生物活性	151
第二节 沉积物有机质与底栖动物关系	153
一、底栖动物种类	153
二、底栖动物密度	154
第三节 沉积物有机质与初级生产者关系	155
一、浮游植物	155
二、高等水生植物	156
第四节 有机质在沉积物厌氧环境形成过程中的作用	158
一、厌氧状态表征方式	158
二、厌氧环境形成作用	159
参考文献	163
第七章 沉积物界面水动力和生物扰动特征与物理影响	167
第一节 沉积物表层水动力作用要素及界面影响	167
一、湍流扰动影响	167
二、波和流的底部剪切力作用影响	169
三、湖底粗糙度和摩擦作用影响	170
四、表层沉积物的动力再悬浮	172
第二节 沉积物界面底栖生物扰动过程及界面影响	175
一、底栖生物扰动种类	175
二、颗粒物的生物垂向搬运	177
三、底栖生物引灌	183

第三节 界面扰动对沉积物微环境物理性质影响	184
一、颗粒物沉降与湖底沉积	185
二、孔隙度	186
三、氧剖面	188
四、氧化还原敏感性物质	191
参考文献	194
第八章 扰动作用下沉积物界面微环境氮的迁移转化	198
第一节 底栖生物扰动对沉积物间隙水氮分布影响	198
一、间隙水中氨氮分布影响	198
二、间隙水中硝酸盐氮分布影响	201
第二节 底栖生物扰动对沉积物界面氮交换影响	202
一、硝酸盐氮迁移影响	202
二、氨氮迁移影响	205
第三节 水动力扰动对沉积物-水界面氮交换影响	206
一、风浪强度和空间差异影响	207
二、季节差异影响	212
三、动力影响机制	214
第四节 底栖生物扰动对沉积物反硝化及其特征影响	218
一、沉积物耗氧速率	220
二、沉积物反硝化层位	223
三、沉积物反硝化速率	226
四、生物行为影响差异	229
参考文献	233
第九章 扰动作用下沉积物界面微环境磷的迁移转化	237
第一节 底栖生物扰动对沉积物磷分布影响	237
一、形态磷垂向分布	237
二、间隙水磷垂向分布	238
三、活性磷二维分布	240
第二节 底栖生物扰动对沉积物-水界面磷交换影响	244
一、沉积物性质差异	244
二、生物种类差异	246
三、温度变化响应	247
第三节 水动力扰动对沉积物-水界面磷交换影响	249
一、风浪强度影响	249
二、季节差异影响	250
三、湖区差异影响	251
第四节 物理和生物扰动复合作用下界面释放效应	254

一、扩散速率对生物扰动的响应·····	254
二、水动力和底栖生物扰动复合效应·····	256
参考文献·····	257
第十章 表层沉积物形态磷的动力学转化及其效应·····	262
第一节 表层沉积物磷的吸附解吸行为与影响·····	263
一、磷吸附机制与影响·····	263
二、磷的解吸作用·····	265
三、磷的等温吸附平衡与影响·····	266
第二节 动态扰动对沉积物磷吸附与平衡影响·····	269
一、再悬浮及其时长·····	269
二、静动态下外部磷源·····	272
三、有机质含量影响·····	274
四、无机絮凝作用影响·····	276
第三节 动力扰动方式对沉积物磷迁移转化影响·····	277
一、扰动时长差异·····	277
二、扰动持续与间歇·····	278
第四节 沉积物-水界面形态磷间的动力学转化·····	281
一、再悬浮方式响应·····	281
二、再悬浮频率响应·····	283
三、再悬浮时间影响·····	285
四、潜在活性磷静态变化·····	288
第五节 表层沉积物磷的热力学稳态趋势及动态过程·····	291
一、磷的流向与再生·····	291
二、难溶态磷固定·····	294
参考文献·····	297
第十一章 沉积物界面微环境中营养物的生物转化过程·····	302
第一节 微生物及其胞外酶在沉积物界面过程中的作用·····	302
一、酶促水解·····	302
二、氧化还原过程·····	310
三、细菌的磷溶解·····	316
四、微生物呼吸·····	317
第二节 底栖动物非物理行为对沉积物氮磷释放过程影响·····	318
一、分泌与排泄·····	318
二、呼吸作用·····	320
第三节 沉积物-水界面磷释放的生物化学机制·····	325
一、溶解过程·····	325
二、水解过程·····	326

三、生物化学机制	335
参考文献	341

第一章 表层沉积物微环境物理与化学特征

沉积物是一种表观上的固态物质,由于其自身质地的非均匀性、组成的复杂性以及含水性等,其物理性质与一般固态物质性质存在明显差异。在沉积物内部这些固有差异,以及在外力、温度和外来物质等的影响下,表层沉积物可形成纷繁的外观和多变的内部物化性质。这些内外特征和性质及其时空变化,对沉积物界面微环境产生较重要的影响和异质效应。

第一节 湖底界面尺度及微形貌特征

一、沉积物-水界面尺度

界面是一个既具体又抽象的概念。宏观上,沉积物和水体两种固液介质因物理接触而形成沉积物-水“界面”,然而从中微观角度看,沉积物与水之间的物理关系并非简单地以面的方式接触,而是两种介质在一定垂向尺度上的相互渗透和相互包含。这种渗透和包含造成了这种所谓“界面”在垂向上的拉伸,使界面有了立体尺度。由于地心引力的作用,密度大于水的沉积物置于水底,在早期成岩作用和物理压实作用下,形成含水量和孔隙度不等的沉积层,并随自然沉降作用使这一界面尺度在垂向上延展。

从水体一侧分析界面尺度就必须与流体摩擦作用相联系,此时的界面尺度可参照水底边界层(BBL)的厚度定义(Boudreau and Jørgensen, 2001),即主要由水体的平均流速、波浪和湍流决定。在海洋和大型湖泊的深部区域,水底边界层的垂向尺度因地球自转效应使其扩展到整个水柱,这与埃克曼层(Ekman layer)的高度相当(图 1-1),即 u/f 的比值, u 为摩擦速度, f 为科氏参数。由于埃克曼层与水-沉积物界面现象几乎没有关联性,因此界面尺度也仅存在理论上的意义。在高于底床但小于底部边界层的区域,水体流动不受地球自转的影响,并且平均速度的增加随高度呈对数上升,该层被称为对数层(logarithmic layer)。在水底界面附近,物质以黏滞迁移为主的层,称之为黏滞亚层(viscous sublayer)。尽管非常薄,但由于黏滞亚层对物质迁移的阻力最大,物质在该层的流动并不顺畅,有类似在粗糙平面上运动的效果。该层中剪应力却相对恒定,溶质和热量混合相对充分。黏性亚层在沉积物表面上的尺度大约在厘米级,但在最接近界面处,即使存在波浪形成的重力流和水底涡流的影响,沉积物表层仍会存有约十分之一毫米厚的水膜。在该水膜内,分子扩散效应超过涡流扩散,该层称为扩散边界层(diffusive boundary layer, DBL),也称扩散亚层(diffusive sublayer)。

自水层下就将穿过理论上没有“厚度”的沉积物-水界面,进入由沉积颗粒组成的多孔渗水排列的布林克曼层(Brinkman layer)。这是一个可流动和多孔介质复合的广义边界

层, 介质呈多孔渗水状态。该层由于易受湍流运动, 并导致切应力扩散的影响, 形成一种水压力驱动的达西流(Darcy flow)。

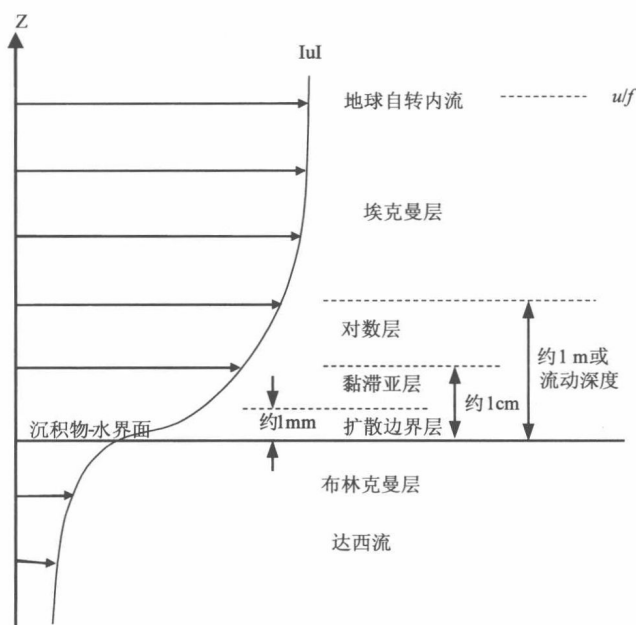


图 1-1 广义沉积物-水界面边界层垂直结构示意图(修改自 Boudreau and Jørgensen, 2001)

二、湖底形貌特征

湖底地表形态主要由形成湖盆的强大内营力(如断陷、构造)和外营力(如冰成、河成、风成、堰塞、侵蚀)等驱动因素塑造, 但沉积物却处于表征湖床地势高低起伏变化的最表层位置, 是水圈、岩石圈和生物圈交互作用圈层中最活跃的部分。另外, 在湖泊底部, 虽然不像海底有明显的大陆架、大陆坡、海沟、洋盆、洋脊等复杂结构以及较大的空间尺度变化, 但由于水深相对浅、受陆源影响和人类活动干扰强、生产力高等, 沉积物在湖盆上的相对厚度和对形貌的影响比海洋大得多, 所产生的界面生物地球化学效应通常也较大, 因此其在湖底的外观特征在界面过程研究中也显得非常重要。

在湖底形成大的地形地貌后, 外营力仍会通过泥沙的搬运继续塑造着湖底形貌。在塑造后期, 主要由湖内可搬运的沉积物量及其位置, 以及搬运沉积物的驱动因素等决定。湖内可搬运沉积物的量和位置, 大致可决定受物源直接影响区的底部沉积物的沉积量或厚度; 而水动力则是主要的物理作用, 是对造成湖底堆积或不平整形貌进行动力搬运以及使地表平滑化的主要驱动力。

对于有泥沙输入的人湖河口, 在泥沙输入位置相对不变的情况下, 悬移质输入量的大小将影响沉积区的面积和沉积厚度, 使湖底形貌发生空间变化。不同区域获得的沉积物量(包括此后的矿化和分解作用)是不同的, 这使得湖床表面不可能十分平整。在有些湖泊入湖口, 水底因沉积物堆积形成三角洲, 使得自河口向湖心的水下地形地貌变化极

大。物质来源丰富的碎屑沉积还会使湖底形成砾石带、砂石带、粉砂带和淤泥带的环状分布(沈吉等, 2010)。生物沉积一般发生在生产力较高的滨湖水域, 因此产生的沉积物会对滨岸带的沉积量产生贡献, 如贝壳、藻类和水草尸体及残存物等。

水底丘陵型地貌的差异实际上取决于沉积厚度的大小(Boudreau and Jørgensen, 2001)。波浪和湖流对湖岸及浅水区地形有深刻的影响, 高流速、波浪作用或不稳定流会造成短暂而强度罕见的剪应力, 这对底部形态的刻画有决定性作用, 以致形成微小地形或地貌。在塑造湖底地形的过程中, 水动力侵蚀的强度和频次是决定湖底沉积物起悬程度的主要因素, 湍流是造成湖底沉积物搬运的最主要水动力运动方式, 其结果都是使沉积物扰动悬浮后向异地迁移, 改变着湖底的形貌特征。

在自然湖泊岸边, 一般存在一定坡度的湖滨区, 这一区域的宽度与湖泊的类型和发育有关。在我国的蒙新高原区, 湖滨坡度通常极小, 有的甚至一直可延伸到湖心, 几乎没有平坦的湖盆水域; 而在我国东部湖泊, 较多的则是浅碟形态, 坡型滨岸带较窄, 有些岸带离开湖边水线 5~10m 就可直达深水区, 这样的湖泊水深大多较浅, 浅碟形特征非常明显。

实际上, 湖底的宏观地形地貌一般不会有大的变化, 能在较短时间尺度发生较大变化的却是在底部的微地形和微地貌方面, 而正是这些对界面具有重要的环境意义。在沉积物中, 真正与上覆水和底部生物直接相关的层不过数十厘米甚至数厘米, 物质的有效状态或对生物的危害性都是在这一深度的层内显现或发生作用, 因此任何影响沉积物层理和外观的微小因素, 均可对湖泊系统内的物质迁移转化、生物吸收富集等产生影响。在影响湖底微形貌因素中, 沉积物的再悬浮和生物扰动作用被认为是最主要的(Håkanson and Jansson, 1983)。底部水动力物理性扰动, 可通过剪切力及湍流作用使得表层沉积物发生悬浮甚至侵蚀, 结果使得表层沉积物被分散和搬运, 造成上层沉积物的减少或增加, 有些还会发生层理变化, 形成新的湖底微形貌, 对沉积物界面或附近的生物地球化学反应产生影响(Denis and Grenz, 2003)。

生物扰动则多指以觅食沉积物的大型底栖动物, 由于摄食、爬行、筑穴、钻孔等生物活动而对沉积物的原始结构造成的改变(Crusius et al., 2004), 如图 1-2 所示。这种扰动的影响作用通常分为两类, 即因底栖扰动等造成的界面完整性的破损称为改造(reworking), 而造成沉积物界面深穴或井管作用则称为生物引灌(bio-irrigation)。生物扰动作用的直接结果是对沉积物产生垂直搬运和混合(宋金明等, 2004)、加速间隙水与上覆水的物质交换以及加速微型生物和小型生物对有机质的分解、矿化和代谢过程等。这一过程导致沉积物物理、化学性质发生变化, 并给沉积物-水界面的生物地球化学过程造成重大影响。在早期成岩过程中, 由底栖动物



图 1-2 刚采集出水体的沉积物表层外观

活动引起的颗粒物与液体传递可能显著地影响表层沉积物中有机质矿化速率与途径,底栖动物的存在能够使颗粒态有机质再分配并通过微生物降解作用加速降解以去除颗粒态有机质(Papasprou et al., 2007)。生物扰动能够改变沉积物-水界面的溶解氧状况和微生物分布,对沉积物-水界面的物质循环过程产生影响(刘敏和侯立军, 2003)。在一些海洋区域,底栖生物对界面物质迁移所产生的影响效应甚至比水动力作用更显著。此外,受生物扰动影响的沉积物区,风驱动的水动力会很容易导致沉积物的再悬浮。

第二节 表层沉积物物理性质及其分布

对沉积物自身物理性质而言,较多的是涉及组成沉积物的最小个体颗粒物性及其组成沉积物后形成的整体结构所具有的物理性质,如粒度、比表面、含水率、容重、孔隙度等。另外,还有一类则是沉积物内部环境控制下所显现的物理性质,如酸碱性(pH)和氧化还原电位(Eh)等。由于它们多与沉积物中的碳酸盐系统、铁锰系统、酸性基团含量、微生物活性状态甚至水体的酸碱程度等非物理性质有关,因此酸碱性和氧化还原电位等特征也在沉积物物性分析时得到重视。

一、粒度

湖底沉积物是由无数多个颗粒物堆积而成的,个体颗粒物就是沉积物的基本单元。但这些组成沉积物的颗粒物粒径大小会因组成和结构性质的差异而不同,因此了解个体颗粒物的粒度分布对研究沉积物的整体性质非常重要。

粒度(grain size)是表征颗粒大小的量度,有体积值和线性值之分。体积值一般以标准直径 d_n 表示(也有较多采用 φ 粒度值的方法,即 $\varphi = -\log_2 d_n$);线性值是针对形态不规整的颗粒而言的,多以最长直径 d_L 、最短直径 d_l 或中间直径 d_i 表示。自然样品(如沉积物)中的颗粒数量极其巨大,粒度值几乎各不相同,实际采用的表达方式是给出两个标准直径之间的分级所占总量的百分比。传统方法是以 95% 的物料所通过的筛孔尺寸(mm 或网目)表示,随着先进分析仪器的出现,该类分析技术和表示方法也有了一定变化。

以水作为液体介质来分离或观察单个沉积物颗粒往往需要足够稀释和动力条件,较大的颗粒外观多呈悬浮絮凝体,单个或较小的颗粒也多呈无规则分布状态(图 1-3),其当量椭圆长轴和短轴比为 1.43~1.64,说明颗粒并非是规则的球体(刘会娟等, 2007)。颗粒物的无规则外形使得人们很难在沉积物中找出两个外观完全相同的颗粒物,尤其沉积物越是来源于表层,外观的复杂性也越大。

沉积物颗粒的粒度对湖泊地貌学、沉积学和水动力学的研究具有重要意义。常见的沉积物粒度分级方法采用 Muller 和 Forstner 方案,即砂大于 $63\mu\text{m}$ ($\varphi < -4$),粉砂为 $2\sim 63\mu\text{m}$ (φ 为 $-4\sim -1$),黏土为 $2\mu\text{m}$ ($\varphi > 1$)。一般而言,在湖泊的确定位置,沉积物的粒度基本保持一致,即受时间的影响相对较小,这也就直接反映了沉积物垂向分布上的相对一致性。然而,粒度的大小及其变化往往是受多因素影响的,其中水动力条件的影响最为显著。

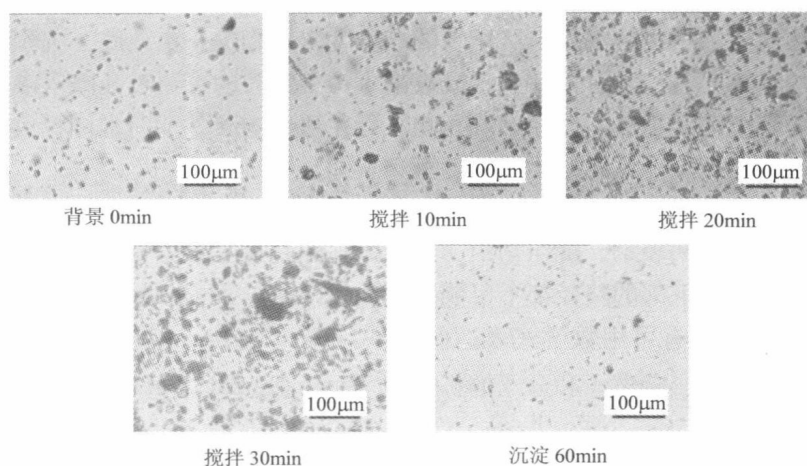


图 1-3 太湖周庄江口沉积物不同动态条件下颗粒物显微图像(刘会娟等, 2007)

搬运介质的动力大小和搬运方式是决定沉积物粒度组成的两个基本因子。对于封闭性湖泊, 陆源碎屑物是沉积物的主要物质来源。由于该类湖泊的沉积物来源比较单一, 因而湖水物理能量成为控制沉积物粒度分布的主要因素。湖积物属于静水沉积, 当没有河流穿越湖泊时, 波浪力是唯一的分选营力。在近岸浅水带波浪力影响所及的范围内, 波浪反复淘洗沉积物, 粗粒留在岸边, 细粒落于远岸区; 在波浪力影响较弱的湖心区, 沉积物最主要的组分是细小黏粒。因此, 形成岸边浅水处沉积物粒径粗, 向湖心逐渐向黏土含量高的方向过渡, 从湖岸至湖心大致出现砾-砂-粉砂黏土的沉积规律。与封闭型湖泊相比, 外流湖或洼地湖的湖面波动较小, 其水源补给主要为降水和洪水, 沉积物的粒度或许主要由其他因素而非距离湖岸远近所控制。洼地湖沉积物的物质来源主要有以洪水为介质动力的河流冲积物和以地表径流为介质动力的陆源碎屑物质, 其沉积物应具有与冲积物相似的粒度分布, 主要由悬移质构成; 而以地表径流为主要物源的洼地湖沉积物, 因地表径流注入湖区的同时短距离搬运大量粗颗粒物进入湖泊堆积区, 造成湖泊的多物源供应。另外, 在生产力较高的湖区, 由于水文物理因素(如风浪、湖流等)的影响, 粒度的垂向分布也会发生明显的不均匀性变化。

与沉积颗粒粒度密切相关的一个重要参数是比表面(specific surface)。沉积物悬浮在水中的单个颗粒很难认为是圆球体(图 1-3), 但其在水中与其他物质进行表面作用时仍被视为一球形物体, 它的比表面 $S_s = (4\pi r^2)/(4/3\pi r^3) = 3/r$, 即颗粒物的粒径越小其比表面越大。由于很多情况下表层沉积物是通过表面吸附等行为与污染物进行物化甚至生化作用的, 因此粒度越小, 对沉积物的环境意义也就越为重要。

二、孔隙度

对沉积物而言, 孔隙度(porosity)是指沉积物体积中孔隙体积所占的比例。即使全部以粗黏土(d 为 $0.2\sim 2\mu\text{m}$)和胶体黏土(d 约为 $0.02\mu\text{m}$)组成的沉积物, 其颗粒之间形成的孔径, 对常见的氮、磷和金属等元素所形成的原子、离子和分子而言, 都是非常宽敞的通