

SEDIMENT-WATER
INTERFACE PROCESS
OF LAKES

Nitrogen and Phosphorus
Biogeochemistry

湖泊沉积物-水界面过程

氮磷生物地球化学

王圣瑞 著



科学出版社

湖泊沉积物-水界面过程

氮磷生物地球化学

王圣瑞 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以浅水湖泊沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程为重点,以沉积物-水-生物构成的系统为对象,从氮磷形态、迁移转化、生物有效性及影响因素等切入,重点关注了水生植物的影响,系统研究了湖泊沉积物氮磷生物地球化学过程。全书共7章,论述了浅水湖泊沉积物-水界面结构特征、湖泊沉积物氮磷赋存特征、湖泊沉积物氮磷界面过程及其影响因素、湖泊沉积物有机质赋存特征及其对氮磷迁移的影响、水体营养和底质对沉水植物生长及生理特征的影响以及沉水植物对沉积物-水界面氮磷分布及迁移的影响等内容,深入探讨了浅水湖泊沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程。

本书可供湖泊学、生物地球化学、环境化学、环境工程等专业的研究人员、大专院校师生以及环境管理、水利管理等部门的管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

湖泊沉积物-水界面过程:氮磷生物地球化学/王圣瑞著. —北京:科学出版社,2013.3

ISBN 978-7-03-036798-3

I. ①湖… II. ①王… III. ①湖泊沉积物-生物地球化学-研究 IV. ①P588.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第037830号

责任编辑:杨震 刘冉 / 责任校对:朱光兰
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第一版 开本: B5 (720×1000)

2013年3月第一次印刷 印张: 24 1/2

字数: 490 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

湖泊作为重要的国土资源,是我国 21 世纪社会发展的重要保障。而事实却是,我国是世界湖泊富营养化问题最为严重的国家之一。近 30 年来,国家及各级政府投入了大量的人力物力用于湖泊富营养化的研究和治理,经历了从富营养化调查诊断到控源与生态修复相结合再到绿色流域建设和生态文明体系构建等不同发展阶段,虽然取得了一定成效,但是我国湖泊富营养化形势依然严峻,问题并未得到根本性解决。目前已经发生富营养化的湖泊面积达到 5000 km²,而具备发生富营养化条件的湖泊面积超过了 14 000 km²。产生这一结果既与相关的技术和装备等不能满足需求有关,也有机制和体制等方面的问题,其中关于湖泊富营养化发生机理和治理技术等方面的相关基础研究不足也是重要原因。我国发生富营养化的湖泊大多为浅水湖,主要分布在长江中下游湖区。而沉积物-水界面作为湖泊生态系统三大主要界面过程(大气-水界面、沉积物-水界面和生物-水界面)之一,是浅水湖泊氮磷等物质交换作用较为频繁和复杂的界面,对湖泊富营养化有重要影响。因此,系统的研究和阐明沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程是解决我国湖泊富营养化问题的关键环节;而目前这方面的研究系统性和综合性明显不足,且缺乏区域层面的定量研究。

该专著是国家自然科学基金青年基金项目“沉水植物根际磷迁移与形态转化及季节性变化(40703017)”、国家自然科学基金面上项目“长江中下游浅水湖泊沉积物可溶性有机氮特征及其对氮矿化影响研究(40873079)”国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“湖泊富营养化过程与蓝藻水华暴发机理研究”(2002CB412304)主要研究成果的综合和集成,是针对湖泊沉积物氮磷生物地球化学过程方面的专著。该专著以浅水湖泊沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程为重点,以沉积物-水-生物构成的系统为对象,从氮磷形态、迁移转化、生物有效性以及影响因素等切入,以生物影响,特别是水生植物的影响为重点,系统地开展了湖泊污染过程与富营养化机理研究。研究成果丰富和完善了湖泊富营养化理论,推动了沉积物-水界面氮磷生物地球化学学科的发展,为进一步揭示氮磷等生源要素对湖泊富营养化的影响机理引入了新思路,对湖泊富营养化的预测、治理控制和管理决策具有一定价值。

湖泊富营养化问题目前仍是当今国际环境问题中最难解决的问题之一,其发生机理复杂,受影响因素繁多。从湖泊沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程的角

度深入揭示湖泊富营养化发生机理,还需要进一步开展深入研究,还需要相关学者的共同努力。在湖泊水污染与富营养化机理与理论研究方面,期待有更多更好的成果面世。不久的将来,该书定会在湖泊保护与治理方面发挥重要作用,预祝我国湖泊保护与治理取得重要成果。



中国工程院院士
中国环境科学研究院院长
二〇一二年十二月

前 言

沉积物-水界面是浅水湖泊氮磷等物质交换作用较为频繁和复杂的界面,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)过程之一。该界面物质交换和信息交流过程复杂多变,不仅受湖泊物理、化学以及生物学等因素影响,而且受流域开发以及人类活动等干扰强烈。特别是沉积物不仅是氮磷等物质的重要蓄积库,对浅水湖泊富营养化具有重要影响;而且在一定程度上可记录流域发展变化及湖泊演变过程。因此,系统研究沉积物氮磷污染特征,特别是沉积物-水界面氮磷行为,备受国际学术界关注,是近年来湖泊学科的重要研究方向之一。国内外学者针对浅水湖泊沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程已经开展了较多研究,其重点主要集中在氮磷形态、迁移转化、界面通量以及影响因素等方面;而事实却是,浅水湖泊沉积物-水界面是一个多介质(沉积物、水与生物)和多过程耦合的复杂系统,需要从系统整体出发,多因素综合考虑其氮磷过程与机制。

水深较浅是我国湖泊的重要特点,特别是长江中下游湖区,不仅是我国浅水湖泊的集中分布区,更是我国湖泊富营养化的重灾区。该湖区不仅具有泛滥平原的特点,氮磷等营养物在湖泊内沉积明显,而且受流域经济社会快速发展等影响,一些湖泊或湖区沉积物氮磷污染较为严重。由于受沉积物氮磷污染以及风浪扰动等影响,沉积物-水界面氮磷行为对该区域湖泊富营养化具有重要影响。因此,定量研究和揭示沉积物-水界面氮磷行为不仅具有重要的理论意义,而且对该区域湖泊富营养化治理及生态修复具有重要的指导意义。

本书是国家自然科学基金青年基金项目“沉水植物根际磷迁移与形态转化及季节性变化(40703017)”、国家自然科学基金面上项目“长江中下游浅水湖泊沉积物可溶性有机氮特征及其对氮矿化影响研究(40873079)”、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)”和国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“湖泊富营养化过程与蓝藻水华暴发机理研究”(2002CB412304)部分研究成果的综合和集成。全书共分为7章,第1章为绪论,分析了浅水湖泊沉积物-水氮磷界面过程研究的意义,论述了浅水湖泊沉积物-水界面结构特征,初步提出了沉积物-水-生物组成的三相界面结构模式;第2章主要针对长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮、固定态铵、可转化态氮和有机磷、无机磷、潜在可交换性磷及其生物有效性等开展了定量研究;第3章重点剖析了沉积物磷酸盐等温吸附特征、pH和温度等环境条件和粒径等对磷释放的影响机制等;第4章重点论述了沉积物氨氮吸附与释放特征及有机氮矿化等内容;第5

章重点表征了长江中下游浅水湖泊沉积物有机质赋存特征,并以轻组有机质和溶解性有机质为重点,探讨了有机质组分对湖泊沉积物氮磷矿化以及吸附与释放等迁移行为的影响机制;第6章以底质对沉水植物生长、主要生理过程以及营养分配等方面的影响为重点,探讨和确定影响沉水植物生长的底质和水体氮磷浓度阈值;第7章重点阐述了沉水植物对不同形态磷的利用机制、沉水植物对浅水湖泊沉积物-水界面微环境特征的影响、沉水植物对沉积物磷形态影响以及外加碳源与沉水植物对沉积物-水界面氮磷迁移的影响机制等内容。

本书是作者近十年来围绕湖泊沉积物-水界面过程的研究成果的总结,是专门针对湖泊沉积物氮磷生物地球化学过程的专著,系统性和综合性是本书的特点。本书以浅水湖泊沉积物-水界面氮磷生物地球化学过程为重点,以沉积物-水-生物构成的系统为对象,从氮磷形态、迁移转化、生物有效性以及影响因素等切入,重点关注了水生植物的影响,系统地开展了湖泊污染过程与富营养化机制研究。研究发现长江中下游湖泊沉积物磷形态在相对清洁区以Ca-P为主,污染区以Fe/Al-P为主;我国浅水湖泊沉积物-水界面氮磷行为不仅受其界面微环境影响显著,而且与界面的生物作用关系密切,特别是沉水植物对界面过程的影响尤为重要;通过对有机氮磷的研究发现,浅水湖泊沉积物有机氮磷迁移对富营养化的影响不容忽视。本书的研究成果对湖泊富营养化治理具有一定的参考价值。

本书得以编撰完成,与研究生们的努力工作密不可分,更要感谢金相灿研究员的悉心指导。正是金先生把我带入了湖泊研究领域,帮我确定了研究方向,并指导、帮助和支持我继续深入研究。本书相关研究工作得到了中国环境科学研究院孟伟院长、郑丙辉副院长等领导 and 同事们的关怀和支持;特别是和我一起工作的储昭升研究员、焦立新博士和赵海超博士等给予了极大的支持和帮助,在成稿过程中,郑朔方和贺艳梅等在文字校对和排版等方面付出了辛勤的劳动。衷心感谢和我一起工作的同事们和研究生们,他们的很多数据和资料被用在本书的相关章节,作者在此一并表示感谢。

由于受时间和水平等限制,加上湖泊沉积物-水界面过程复杂多变,所涉及的学科领域较多,故书中难免存在错漏之处,恳请读者指正。

王圣瑞

2012年11月22日于北京

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出与研究意义	1
1.1.1 湖泊富营养化是我国最为重要的水环境问题,是关系国计民生的重大问题	1
1.1.2 沉积物-水界面氮磷过程是浅水湖泊富营养化的研究热点	2
1.1.3 沉水植物在浅水湖泊氮磷循环中发挥着重要作用	3
1.1.4 沉水植物对湖泊沉积物-水界面过程有重要影响	3
1.2 浅水湖泊沉积物-水界面结构特征	5
1.2.1 生物在湖泊沉积物-水界面的作用	5
1.2.2 沉积物-水界面三相结构模式及其特征	10
1.3 本章小结.....	13
第 2 章 湖泊沉积物氮磷赋存特征	14
2.1 湖泊沉积物氮赋存形态.....	14
2.1.1 湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵	15
2.1.2 湖泊沉积物可转化态氮	21
2.2 湖泊沉积物磷赋存形态.....	29
2.2.1 湖泊沉积物磷赋存形态	30
2.2.2 湖泊沉积物潜在可交换性磷	42
2.2.3 湖泊沉积物有机磷	47
2.2.4 湖泊沉积物磷生物有效性.....	56
2.3 本章小结.....	65
第 3 章 湖泊沉积物磷界面过程及其影响因素	67
3.1 湖泊沉积物磷等温吸附特征.....	67
3.1.1 湖泊沉积物磷酸盐等温吸附	68
3.1.2 湖泊沉积物磷吸附特征	74
3.2 环境条件对湖泊沉积物磷释放的影响.....	80
3.2.1 pH 对湖泊沉积物磷释放的影响	80
3.2.2 湖泊沉积物磷吸附热力学.....	85

3.3	粒径对湖泊沉积物磷分布及吸附的影响	87
3.3.1	不同粒径湖泊沉积物磷形态分布	88
3.3.2	不同粒径湖泊沉积物有机磷分布	92
3.3.3	粒径对湖泊沉积物吸附磷的影响	99
3.4	本章小结	104
第4章	湖泊沉积物氮界面过程及其影响因素	106
4.1	湖泊沉积物氨氮吸附/释放特征	106
4.1.1	湖泊沉积物氨氮吸附特征	107
4.1.2	湖泊沉积物氨氮释放特征	114
4.1.3	湖泊沉积物氮矿化特征	120
4.2	粒径对湖泊沉积物氮分布的影响	130
4.3	有机质对湖泊沉积物氨氮吸附/释放的影响	137
4.3.1	有机质含量对湖泊沉积物氨氮释放的影响	137
4.3.2	有机质含量对湖泊沉积物氨氮吸附的影响	145
4.3.3	有机质组分对湖泊沉积物氨氮吸附的影响	150
4.4	本章小结	155
第5章	湖泊沉积物有机质赋存特征及其对氮磷迁移的影响	158
5.1	湖泊沉积物有机质及其组分赋存特征	158
5.1.1	湖泊沉积物有机质含量及其分布	159
5.1.2	湖泊沉积物不同组分有机质分布	167
5.1.3	湖泊沉积物有机质组成及结合形态	169
5.2	轻组有机质对湖泊沉积物氮磷迁移的影响	172
5.2.1	轻组有机质对湖泊沉积物氮磷矿化的影响	172
5.2.2	轻组有机质对湖泊沉积物磷释放的影响	186
5.3	溶解性有机质对湖泊沉积物氮磷迁移的影响	194
5.3.1	溶解性有机质对湖泊沉积物氮矿化的影响	195
5.3.2	溶解性有机质对湖泊沉积物磷吸附的影响	208
5.4	本章小结	214
第6章	水体营养和底质对沉水植物生长及生理特征的影响	216
6.1	水体氮磷浓度、形态对沉水植物生长及生理特征的影响	216
6.1.1	水体氮浓度与形态对沉水植物光合特征的影响	217
6.1.2	上覆水不同形态磷对沉水植物生长和生理特性的影响	222
6.1.3	磷在水-沉水植物-底质中的分配	229
6.2	底质对沉水植物根系形态及养分吸收的影响	234
6.2.1	底质对沉水植物生长及光合作用的影响	235

6.2.2 底质类型与氮磷浓度对沉水植物根系形态及养分吸收的影响	241
6.3 有机质对沉水植物生长及生理特征的影响	249
6.3.1 有机质腐解对沉水植物生长及生理特征的影响	250
6.3.2 外加碳源对沉水植物氮磷积累的影响	257
6.3.3 外加碳源对沉水植物生理指标的影响	266
6.4 本章小结	273
第7章 沉水植物对沉积物-水界面氮磷分布及迁移的影响	275
7.1 沉水植物对沉积物磷形态的影响	275
7.1.1 沉水植物对沉积物有机磷、无机磷及潜在可交换性磷的影响	276
7.1.2 沉水植物对不同底质各形态磷的利用与转化	281
7.1.3 有机质降解对沉积物-水界面磷形态的影响	289
7.2 沉水植物对不同来源磷的利用机制	297
7.2.1 沉水植物对不同形态磷的转化利用	298
7.2.2 沉水植物对上覆水碱性磷酸酶动力学特征的影响	303
7.2.3 沉水植物对沉积物-水界面各形态氮磷含量的影响	309
7.3 外加碳源及沉水植物对沉积物-水界面氮磷迁移的影响	318
7.3.1 外加碳源及沉水植物对沉积物各形态磷的影响	319
7.3.2 沉水植物对沉积物氨氮吸附/释放特征的影响	324
7.3.3 不同氨氮浓度下沉水植物对沉积物 DOM 荧光特性的影响	331
7.4 本章小结	340
参考文献	342

第 1 章 绪 论

我国湖泊富营养化发展迅猛,近年来呈现面积增加、频率加快、范围扩大和危害加重的趋势,富营养化湖泊的数量和面积已居世界前列,湖泊富营养化已经成为严重威胁我国水资源和水环境安全的最重要的社会和环境问题之一(金相灿等,1990;屠清瑛和张信宝,2000;中国环境科学研究院,2012)。据环境保护部2010年统计数据显示,26个国控重点湖泊水库中,满足Ⅱ类水质的1个,占3.8%;Ⅲ类的5个,占19.2%;Ⅳ类的4个,占15.4%;Ⅴ类的6个,占23.1%;劣Ⅴ类的10个,占38.5%;主要污染指标为总氮和总磷。全国六大重点湖泊中,太湖、滇池、巢湖为劣Ⅴ类,鄱阳湖、洞庭湖和洪泽湖虽然整体水质为Ⅲ类到Ⅳ类,但局部水域部分时段为Ⅴ类,甚至劣Ⅴ类。

浅水湖泊是我国湖泊的重要特色之一,而长江中下游湖区是我国浅水湖泊的集中分布区。正是由于我国湖泊的这一特点,沉积物-水界面过程,特别是氮磷生物地球化学过程的研究是揭示我国湖泊富营养化发生机制的关键科学问题。

本章重点针对湖泊沉积物-水界面过程相关问题,特别是浅水湖泊沉积物-水界面结构特征等内容进行了研究。

1.1 问题的提出与研究意义

1.1.1 湖泊富营养化是我国最为重要的水环境问题,是关系国计民生的重大问题

湖泊富营养化及其引起的生态安全问题是当今世界各国面临的主要水环境问题之一(屠清瑛和张信宝,2000;金相灿等,2012)。国外众多河流湖泊水库都发生了富营养化,如西班牙的800座水库中,至少有1/3是高度富营养化的;南美、南非、墨西哥及其他一些地方的湖泊水库也都发生了严重富营养化(金相灿等,1990)。我国“七五”期间就开展了湖泊富营养化的调查研究,1984年全国重点调查的34个湖泊中,有26%处于富营养化水平,当时我国的湖泊富营养化问题主要表现为城市小型湖泊富营养化(金相灿等,1990)。而进入21世纪以来,我国湖泊富营养化问题呈现面积扩大、频率加大、程度加重和危害加剧的趋势。1996年,根据对全国26个湖泊的调查结果,处于富营养化水平的湖泊达85%(黄文任等,1998);2000年重点评价的24个湖泊中,有50%的湖泊水体污染严重;国家重点治理的太湖,优于Ⅲ类水质的断面仅占12.0%,富营养化水域占太湖总面积的

83.5%。据2006年全国水环境质量公报,全国重点评价的43个湖泊中,水质符合和优于Ⅲ类水的面积占49.7%,Ⅳ类和Ⅴ类水的面积共占15.3%,劣Ⅴ类水的面积占35.0%;对43个湖泊的营养状态进行评价,除云南泸沽湖为贫营养外,其中有17个湖泊处于中营养,25个处于富营养。2007年堪称为“蓝藻之年”,全国多个湖泊水库发生大规模藻类水华,其中4月太湖梅梁湾发生的大面积蓝藻水华,严重扰乱了无锡等地居民的正常生活。

因此,控制湖泊富营养化不仅是我国最为重要的环境治理任务之一,更是我国的一项重要民生工程,已成为全球特别是我国目前的紧急任务。

1.1.2 沉积物-水界面氮磷过程是浅水湖泊富营养化的研究热点

氮磷过量输入是导致湖泊富营养化的直接原因。在外源得到一定程度控制后,在一定条件下,沉积物作为内源仍可不断地向上覆水释放营养盐(刘建康,1999;Jin et al,2005),使湖泊仍处于富营养化,即沉积物积累的大量污染物伴随着有机质降解等过程,可能发生一系列变化,氮磷等将重新回到上覆水(Wang et al,2005)。因此,多年来沉积物内源污染过程与机制一直是浅水湖泊富营养化研究的热点问题之一(Phillips et al,1978;Jaynes and Carpenter,1986;Moss,1990;Scheffer et al,1993;刘连成,1997;Wang et al,2010)。

湖泊营养盐循环与生物地球化学过程研究是目前我国湖泊及流域科学的学科前沿和优先领域,其中营养盐循环的生化动力学机制是其重要内容,特别是营养盐的跨界面(沉积物-水界面)迁移和形态转化规律研究更是重中之重(王超等,2003;田伟君等,2003;Wang et al,2005)。针对沉积物-水界面氮磷生物地球化学行为的研究也一直是国际湖泊科学研究的重点。随着物理、化学和生物等环境条件的改变,由于有机质矿化分解等过程,氮磷通过沉积物-水界面,以溶解态进入沉积物间隙水,进而通过扩散作用进入上覆水,重新参加氮磷循环过程(Moore et al,1994)。Eckerrot等研究表明,湖泊沉积物间隙水中可溶性活性P(SRP)的浓度受沉积物有机质的影响,同时受到Fe(Ⅱ)浓度、细菌活性及水深等影响。另有研究表明,间隙水中总磷以及总有机碳含量对上覆水总溶解性磷浓度有较大影响(宋福等,1997;王海珍等,2002)。王圣瑞等(2005)研究表明,溶解性有机质(DOM)没有改变沉积物吸附磷动力学曲线的基本趋势,而明显改变了沉积物吸附磷的等温线,对沉积物吸附磷具有促进作用,且对有机质含量高、污染严重的沉积物的影响大于对污染轻的沉积物的影响。因此,研究湖泊沉积物氮磷行为,需要加强沉积物有机质含量、组成及其氮磷含量与形态以及水生植物等对界面过程的影响等方面的研究。

1.1.3 沉水植物在浅水湖泊氮磷循环中发挥着重要作用

水生植被不仅是浅水湖泊生态系统主要的初级生产者,对维持生态系统的结构和功能也具有重要作用(种云霄,2005),特别是沉水植物,作为浅水湖泊生态系统的主要高等植物,对生态系统物质和能量的循环和传递起调控作用(金相灿等,1990;马井泉等,2005)。水生植物在生长过程中吸收同化上覆水和底泥中的氮、磷等矿质营养,同时固持底泥、抑制藻类、澄清水质,对降低水体营养水平,防止富营养化起了重要作用(杨清心,1998)。但其作用机制非常复杂,如菹草兼具保持与释放磷营养的双重作用(刘兵钦等,2004);有学者通过27天的试验(宋福等,1997),发现种植沉水植物对水体总氮、总磷均有显著的去作用;而且,水生植物可将上覆水中氮磷积累到底泥中。包先明等(2006a,b)研究发现,种植沉水植物对上覆水氮磷浓度有很好的控制,沉水植物正常生长会使沉积物间隙水中氨氮浓度明显降低,并控制沉积物-水界面氮磷释放。因此,污染水体可通过适度种植或重建水生植被控制底泥内源氮磷污染负荷。同时,水生植物死亡可产出大量的有机物质,可为水生动物提供直接或间接的饲料,也可创造可供人类收获利用的植物产品;同时还有相当数量的植物产品不能被利用而残留在湖泊中,加速了湖泊淤积和沼泽化,产生了阻滞水流,促进淤积等效应(杨清心,1998)。所以,恢复和重建水生植被,特别是恢复和重建沉水植被是湖泊内源污染负荷控制、水质改善、富营养化治理和湖泊生态恢复的重要措施(Lauridsen et al,2003)。但就沉水植物对沉积物-水界面氮磷行为的影响机制以及植物残体腐解对沉水植物生理生态及营养盐的跨界面迁移和形态转化规律影响等方面的研究则较少。此外,有机质对氮磷的影响是多方面的(Kastelan-Macan and Petrovic,1996;徐轶群等,2003),但已有研究主要集中在沉积物有机质含量与氮磷间的关系方面(刘晓端等,2004;Wang et al,2008),而对有机质组分及其影响因素等方面的研究则较少。

1.1.4 沉水植物对湖泊沉积物-水界面过程有重要影响

沉水植物对浅水湖泊沉积物氮磷迁移和形态转化具有重要影响,但其机制并不十分清楚(Zhou et al,2000)。国内这方面的研究报道较少,欧冬妮等(2004)研究表明,根际沉积物氮磷形态具有明显的季节性变化,而这一变化与根际氧化还原状态的变化直接相关,即根际沉积物对沉水植物磷的供给在一定程度上受根际氧化还原状态的影响;胡俊等(2006)通过对比研究有无沉水植物的沉积物磷形态变化,发现沉水植物对沉积物不同结合态磷的赋存有显著影响;刘兵钦等(2004)对比研究了有无沉水植物沉积物磷的形态与含量、正磷酸盐的吸附行为以及碱性磷酸酶活性与动力学参数,结果表明提高沉积物氮磷的吸附能力和降低有机磷的酶促分解速率是沉水植物控制根际沉积物氮磷迁移的重要机制;笔者研究发现,明显抑

制沉积物-水界面氮磷的释放是修复沉水植被、控制湖泊富营养化的重要机制之一 (Wang et al, 2007)。

相对而言,国际上这方面的研究较多, Flessa (1994) 以及 Boon 和 Sorrell (1991) 研究发现, 沉水植物通过其根部放氧影响根际氧化还原状态, 不仅对根际周围有机质降解产生影响, 而且对沉积物氮磷形态转化也有重要作用; Revsbech (1989) 以及 Yu 和 Bishop (1998) 利用微电极对沉水植物根际微环境特征进行了研究, 发现根际沉积物有氧层厚度约为数毫米, 且与沉水植物的生长状况密切相关, 沉水植物存在的情况下, 不仅能改变根际的物理性质, 而且对根际沉积物氮磷的迁移和形态转化也有明显的影响; 另有研究发现, 沉水植物向其根际分泌碳水化合物、氨基酸以及有机酸等物质, 促进了根际微生物的生长, 直接影响根际沉积物氮磷的迁移和形态转化 (Barko et al, 1991; van Eeckhout and Quade, 1994)。

国内外虽然已经针对沉水植物根际沉积物氮磷迁移和形态转化及其季节性变化开展了一些研究, 但已有的研究系统性不够, 原因主要是大多数工作没有采用根际研究方法, 系统地针对沉水植物根际开展研究。实际上, 根际是沉水植物对沉积物磷迁移和形态转化影响最为活跃的区域 (Revsbech et al, 2005), 要想从机制上揭示沉水植物对沉积物氮磷迁移和形态转化的影响, 必须针对沉水植物根际开展研究。而根际是植物、土壤和微生物相互作用的重要界面, 也是物质和能量交换的结点 (张福锁和曹一平, 1992)。自 1904 年德国科学家 Hiltner 首次提出根际概念以来, 有关根际的研究已经历了 100 多年。研究内容涉及根际显微结构, 根际微环境中物质迁移和调控, 根际的物理、化学和生物环境动态, 植物的营养遗传特性, 根分泌物的作用, 根际的信息传递, 以及植物与植物、植物与微生物、植物与土壤、微生物与土壤、微生物与微生物之间的相互作用等方面, 在研究方法、研究手段以及研究思路等方面均已建立了较为完整的体系 (张福锁和申建波, 1999)。最为典型的研究成果是, 白羽扇豆通过形成大量的排根, 分泌柠檬酸活化土壤中难溶磷来适应缺磷胁迫。

目前国内外关于根际方面的研究大多是针对土壤-植物系统, 而针对沉水植物根际方面的研究较少。在淡水生态系统中, 表层 10~15 cm 沉积物富含微生物和酶, 而这些微生物和酶对沉积物营养物质的迁移和形态转化有重要影响, 这与在其表层生长的水生植物直接相关 (Wilhelm and Doris, 1988; Diaz-Espejo et al, 1999)。可以借鉴土壤-植物系统根际研究方法和思路, 对沉水植物根际沉积物氮磷迁移和形态转化开展研究。

基于以上分析可见, 我国是湖泊富营养化的重灾区, 而长江中下游浅水湖区又是我国湖泊富营养化最为严重的区域。随着环境治理措施的日益完善, 沉积物内源污染控制必将纳入我国湖泊富营养化治理的日程。而要解决内源污染问题, 剖析湖泊沉积物-水界面氮磷过程就显得尤为重要。同时, 修复水生植被, 特别是沉

水植被是治理富营养化浅水湖泊的重要手段;而研究揭示沉水植物对浅水湖泊沉积物-水界面过程的影响机制以及底质和水体营养对沉水植物生长及生理过程的影响是湖泊生态修复的重要基础。因此,笔者以我国长江中下游浅水湖泊为重点,结合模拟研究,经过近十年的工作,围绕湖泊沉积物-水界面氮磷过程及沉水植物对其的影响机制开展研究,力图为进一步揭示我国湖泊富营养化机制和探索湖泊生态修复的技术原理提供重要支撑。

1.2 浅水湖泊沉积物-水界面结构特征

沉积物是湖泊水体的三大组成要素(水、沉积物与水生生物)之一,是湖泊营养物质地球化学循环的重要环节与界面(Berelson et al, 1998; Kozerski and Kleeberg, 1998)。沉积物-水界面营养物质地球化学行为对湖泊,尤其是浅水湖泊水环境质量与生态系统有着极为重要的影响(Lijklema et al, 1993)。随着流域城市化进程与工农业发展,过量营养物质蓄积在沉积物中,使其成为污染物的蓄积库,同时也改变了沉积物-水界面的微环境特征,如界面 pH、氧化还原电位和生物组成等(Jensen and Mortensen, 1995)。蓄积在沉积物中的营养物在一定条件下通过形态变化、界面特性改变与释放等途径严重影响湖泊上覆水(Zhou et al, 2001)。因此,沉积物-水界面过程一直是国内外浅水湖泊富营养化机制及生物地球化学过程长期的研究重点和热点。

1.2.1 生物在湖泊沉积物-水界面的作用

1.2.1.1 沉积物-水界面两相结构

长期以来,国内外学者对湖泊沉积物-水界面开展了诸多研究,研究内容涉及众多学科,如物理化学、胶体化学、表面化学、生物化学、地球化学、水生生物学、微生物学、水动力学等,开展了多学科交叉研究,取得了大量的成果。但归纳起来,主要集中在界面结构与特征(王来斌, 2000)、营养元素的赋存形态(Zanini et al, 1998)、吸附/解吸及其动力学(Giles et al, 1974)与环境因子影响等方面。绝大多数的研究主要考虑了在水与沉积物两相之间的行为与过程,即相关研究是基于沉积物-水界面“两相结构”而开展的(图 1-2-1)。

而事实上,长期研究发现,在原先人们认为的沉积物和上覆水组成的两相结构界面间,存在一个生物相,即沉积物、生物与上覆水既相互独立又相互关联,既相互作用又相互制约。在沉积物-水界面过程研究中应当充分考虑生物的存在与作用。因此,针对湖泊沉积物-水界面三相结构模式开展了初步研究。

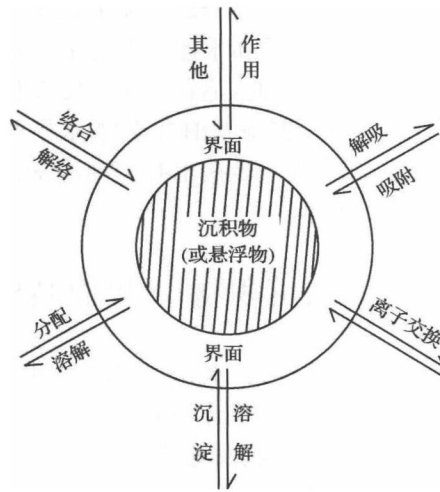


图 1-2-1 沉积物-水界面主要迁移转化过程(金相灿 等,1990)

1.2.1.2 沉积物-水界面的生物类群

众多研究表明,在湖泊沉积物-水界面存在生物类群,主要包括底栖动物(包括水生寡毛类、软体动物和水生昆虫幼虫等)、着生生物(主要包括固着藻类等)(李荣冠 等,1995)和微生物(主要包括细菌、真菌和放线菌等)等(张锐 等,2003;李春燕 和华德尊,2002),同时分布着水生维管束植物根系和一些由死亡生物组成的有机碎屑(图 1-2-2)。它们的存在不仅改变了沉积物-水界面的物质传递和交换过程(Blackburn et al,1988),同时也改变了沉积物-水界面的微生态环境(Luijn et al,1999)。

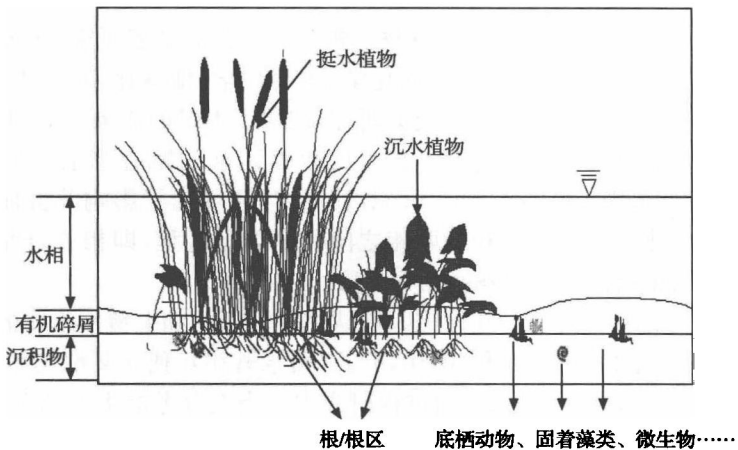


图 1-2-2 沉积物-水界面生物类群(金相灿 等,2004)

目前对沉积物-水界面生物的研究多集中于底栖动物,而对底栖藻类等底栖生物的研究相对较少。例如,Milla 对亚北极区 Saanajärvi 湖沉积物中的硅藻和甲壳类浮游动物群落进行了研究,结果表明这两种生物是贫营养湖泊中的优势种;Lui-jn 等(1999)研究了底栖固着藻类对沉积物-水界面营养物质迁移转化的影响,明确了其对界面生物化学过程的作用。中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地和南京大学环境学院在 2003~2004 年间对太湖沉积物-水界面的三次微生态调查发现,不同污染程度沉积物,在其沉积物-水界面都有生物存在。就清洁水体而言,其沉积物-水界面以大型底栖动物和固着藻类为主,而对于污染程度较重的水体,底栖动物则是以寡毛类等耐污性种类为主。

1.2.1.3 生物对沉积物-水界面过程的作用

沉积物-水界面的生物过程影响了其界面的物理化学性质,进而直接影响了营养物在该界面的交换和转化,同时也影响了界面的生物组成、数量和分布。万国江等多年的研究结果也表明,在湖泊沉积物-水界面存在生物层,且能通过其新陈代谢过程,使界面 pH、氧化还原电位和各种化学组成等形成显著的梯度变化,进而影响上覆水和沉积物之间的营养物质平衡(万国江,1990;吴丰昌等,1996b)。图 1-2-3 是固着藻类对湖泊沉积物-水界面物理、化学和生物过程影响的直观表述,以下将从几方面进一步探讨。

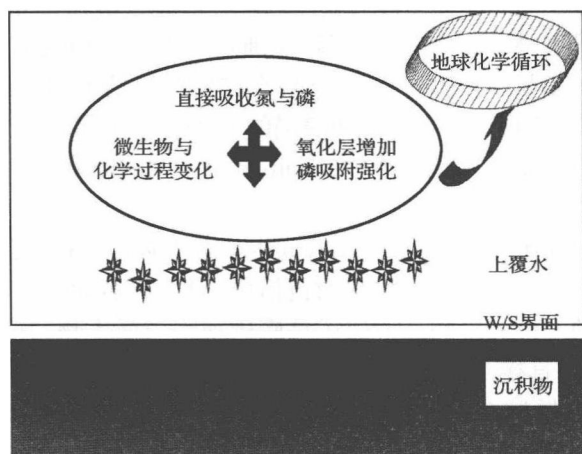


图 1-2-3 湖泊沉积物-水界面固着藻类对界面营养物的影响(金相灿等,2004)

(1) 生物对沉积物-水界面营养物质循环的影响

微型底栖生物可显著影响湖泊沉积物-水界面氮磷通量。为了研究沉积物-水界面生物对营养物在该界面的迁移与转化过程的影响,有关学者开展了界面生物