

水生植被原位恢复对底泥磷释放的影响

包 先 明

(淮北师范大学 生命科学学院, 安徽 淮北 235000)

摘 要: 选取太湖五里湖水生植被生态重建大型围隔(10^5 m^2)为试验区,进行了水质和沉积物内源释放 2 a 的同步跟踪监测。结果表明,围隔内挺水植物区和沉水植物区 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 NH_4^+-N 的年平均浓度分别比围隔外对照区下降了 54.6%, 46.7% 和 17.1%, 13.8%; 围隔内水质得到明显的改善。通过室内静态模拟不同实验区沉积物中磷酸根的释放实验,发现围隔内沉水植物区和挺水植物区 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的释放速率的年平均释放速率分别为 $0.23 \pm 0.42 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $-0.38 \pm 0.65 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 明显低于围隔外对照区 ($1.13 \pm 1.31 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。因此重建和恢复湖泊水生植物系统能有效抑制内源磷酸盐向水体的释放。

关键词: 水生植被; 水质改善; 磷酸盐释放; 五里湖

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0068-05

中图分类号: X52

Effects of Macrophyte Rehabilitation on Phosphorus Releasing in Mesocosm Enclosures

BAO Xian-ming

(College of Life Sciences, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China)

Abstract: Wuli Lake of Taihu Lake region is a typical hyper-eutrophic, shallow lake in China, situated near the Wuxi City in Jiangsu Province. Since January 2004, a large-scale macrophyte restoration experiment (10^5 m^2) was carried out in southwestern Wuli Lake using a large enclosure. The results show that from August 2004 to July 2005 mean concentrations of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ and NH_4^+-N of submerged area and macrophyte area inside the enclosure were 54.6% and 46.7%, 17.1% and 13.8%, lower than those of outside enclosure, respectively, implying markedly improved water quality inside the enclosure. Phosphate releasing simulation from the cores collected from different areas in enclosure and outside enclosure was conducted in the laboratory. The resulted showed that the mean phosphorus release rates of the sediment from the submerged area and macrophyte area inside the enclosure were $0.23 \pm 0.42 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and $-0.38 \pm 0.65 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, respectively, contrasting to $1.13 \pm 1.31 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ outside the enclosure. Overall, rehabilitated macrophyte not only decreased the concentrations of nitrogen and phosphorus, but also controlled the phosphorus release rate of sediments.

Keywords: macrophyte; water quality improvement; phosphorus release; Wuli Lake

湖泊的富营养化是全世界范围内普遍关注的环境问题之一。已有的研究表明,外源营养物质的输入虽是造成湖泊富营养化的主要原因之一,但是控制和削减外源性污染后,湖泊并不一定得到应有的响应,其主要原因与沉积物营养物的释放可能是影响效果的主要因子有关。20 世纪 60 年代以来,世界各国先后对其治理方法进行了大量研究^[1-3],其中通过水生植物重建和修复来治理湖泊水体富营养化已被较广泛采用。在以水生植被恢复为主的湖泊生态修复和

重建过程中,水生植物位居湖泊水体和沉积物的结合部。正常生长的水生植物穿越湖泊水体和沉积物两大营养载体,通过吸收等作用等控制着沉积物中污染物(如磷)的释放^[4-5]。多年来,人们在评价湖泊水生植被恢复和重建对湖泊生态系统效果时,较多地是从水体质量本身的变化来加以分析,而相对忽视对内源污染的影响,因而难以获得完整的效果评估结论。因此在评估采用水生植物重建等措施对内源磷的控制效果,乃至是否对湖泊生态系统产生的影响时^[6],不

收稿日期:2010-07-22

修回日期:2010-08-23

资助项目:“十一五”国家水体污染控制与治理科技重大专项“自然本底营养对巢湖水体富营养化的影响及其控制技术与工程示范”(2008ZX07103-003)

作者简介:包先明(1978—),男(汉族),安徽省青阳县人,博士,副教授,主要从事水污染治理方面的研究。E-mail: xmbao96@126.com。

仅应研究水生植物对上覆水体中的磷负荷削减作用,更应研究在水生植物恢复生长过程中对磷在沉积物—水界面循环转化的机制和内源磷负荷释放的控制情况。本研究通过在太湖五里湖生态重建示范区,研究在大型围隔中水生植被恢复过程中沉积物内源磷负荷变化,为湖泊水生植被重建或恢复对污染湖泊的水质改善效应的科学评估,提供理论依据和定量参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太湖北部的五里湖是无锡市城郊湖泊,东西长6 km,南北宽0.3~1.5 m,面积约6.4 km²,常年水位3.07 m,平均水深1.6 m,pH值约为8.5,水体中NH₄⁺-N和PO₄³⁻-P及总氮总磷水平多年来为全太湖各湖区最高,未疏浚氮、磷的夏季释放速率平均为158.2和2.05 mg/(m²·d),是一个典型的内外源负荷均较显著、底泥氮磷含量较高的湖泊。2002年对全湖底泥进行了疏浚,目前的平均水深达到2.10 m。随着无锡市城市规模的扩大,该湖目前已发展成为一个城市景观湖泊。大型围隔示范工程区地处风浪冲击带,岸线长735 m,其中除有150 m硬质水泥岸外,水陆交错带均为碎石+粗沙组成。

本研究分别选择了3个试验点:围隔内的以沉水植物(主要组成是轮叶黑藻、苦草、菹草、马莱眼子菜、金鱼藻和伊乐藻)恢复为主的区域,离湖岸带约20 m,水深1.5 m;围隔内的以挺水植物(主要是荷花、香蒲以及芦苇)恢复为主的区域,靠近湖岸,水深0.5~1.0 m,该区域利用客土的方法修复过,平均加土厚度为0.5 m左右;围隔外未种植水生生物的西五里湖为对照区,水深2.7 m左右。

1.2 样品采集和室内静态释放实验

本实验分别于2004年9月27日和11月27日,2005年1月27日、3月27日、5月27日以及7月27日共进行6次采样。用装有Φ62×1 000 mm有机玻璃管的柱状采样器采集泥样,泥样厚度不少于25 cm,上部用原样点水样注满后两端用橡皮塞塞紧,垂直放置,带回实验室,用作本模拟静态释放实验和水土理化分析。上覆水样采集与沉积物样品采集同步,取水面下0.5 m处水体。在室内即刻过滤,放置4℃下避光保存备用。

在室内将柱状样中上层水体用虹吸法抽出,再用虹吸法沿壁滴注已过滤的原采样点水样,至液面高度距沉积物表面30 cm处停止(此时水柱体积为905.7 ml),标注刻度。另取一根无沉积物的洗净采样管,下端用橡皮塞塞紧,水样加注操作及要求同上,做为

对照样。所有采样管均垂直放入已恒定在指点温度下的循环水浴恒温器(Colara WK 100,±0.1℃)中,避光培养。即刻取原水样作起始样,此后在指定时间用移液管于水柱中段取样,每次取样体积为50 ml,同时用原样点初始过滤水样补充至刻度。其后于6,12,24,36,48,72 h时进行采样。全部实验于72 h止,结束时样品分析项目与起始相同。

1.3 计算处理

为了获得沉水植物和挺水植物区恢复过程中沉积物—水界面物质通量,根据质量衡算法对柱中的氮磷释放进行了计算^[7],其值为界面实际的物质通量,计算公式为:

释放量:

$$\delta = \bar{V}(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^n V_i(C_{j-1} - C_a) \quad (1)$$

式中: δ ——释放量(mg); \bar{V} ——实际柱中水样体积(L); C_n ——第 n 次采样时水中营养物浓度(mg/L); C_0 ——初始营养物浓度(mg/L); V_i ——每次采样量; C_{j-1} ——第 $j-1$ 次采样时水中营养物浓度(mg/L); C_a ——添加原水后水体营养物浓度(mg/L)。

释放速率 r :

$$r = \delta / t \cdot A \quad (2)$$

式中: r ——释放速率[mg/(m²·d)]; δ ——释放量(mg); t ——释放时间(d); A ——与水接触的沉积物表面积(m²)。

2 结果与分析

2.1 试验区水质变化

2004年3月示范工程围隔建设完成,内部水体与西五里湖水体基本隔离。水生植物的种植从2004年3月份开始,持续至2004年7月,这对围隔内水体干扰较大。本实验采样从2004年9月开始,每两个月采样一次,分别测定了水体中的PO₄³⁻-P、NH₄⁺-N含量、以及温度等项目。从图1可以看出,在围隔内的沉水植物和挺水植物重建区PO₄³⁻-P明显低于围隔外的疏浚对照区(西五里湖),到2006年7月29日采样,沉水植物区和挺水植物区PO₄³⁻-P和NH₄⁺-N的浓度分别为0.041,0.053 mg/L和0.61,0.58 mg/L,相对于围隔外疏浚对照区PO₄³⁻-P和NH₄⁺-N的浓度年均分别下降了54.6%,46.7%和17.1%,13.8%。参照陈开宁^[8]的统计分析数据,水体透明度也有较大幅度的提高,平均从0.39 m提高至0.70 m。表明在围隔进行的水生植被重建能有效地控制上覆水体中磷酸盐负荷,同时可逐步改善水质。

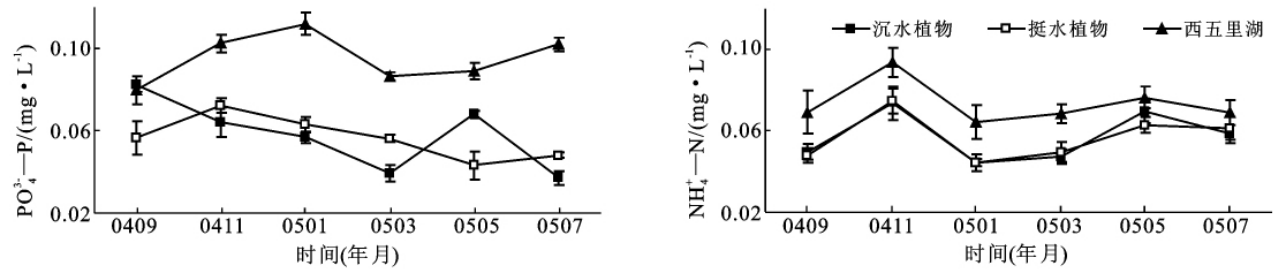


图 1 不同水生植被区上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 NH_4^+-N 的变化

2.2 实验区不同水草恢复类型沉积物磷酸盐释放速率的变化

2.2.1 实验区沉积物界面磷释放速率分析 本研究的磷释放采用的是柱状样水浴恒温静态模拟法,图 2 为对不同研究区域采集的柱状底泥模拟磷释放的过

程,可以看出,在实验初期,释放曲线多呈不稳定状态,随时间变化,曲线渐趋稳定。根据文献[9]对静态磷酸根释放模拟实验数据的误差估算,认为选用 1.5~3 d 间释放速率数据平均值作为计算参数较为合理。根据公式(1—2)进行计算及统计分析(表 1)。

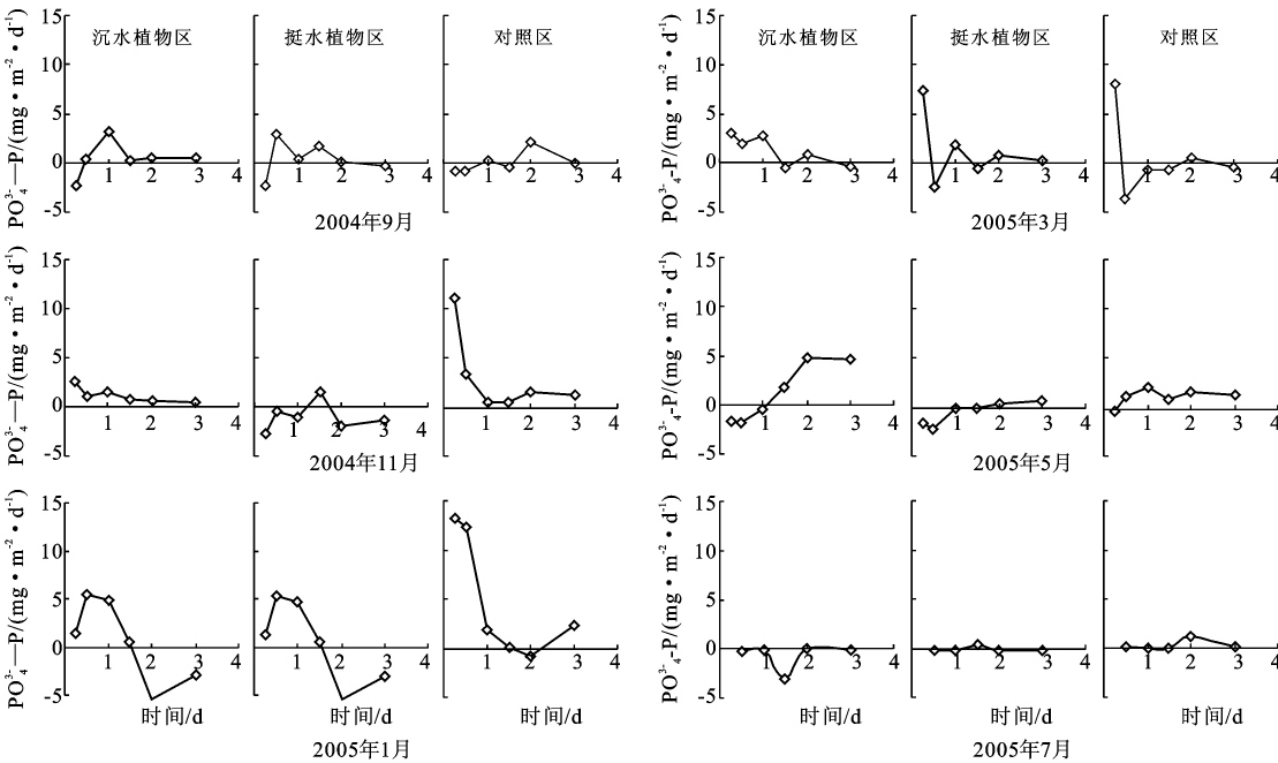


图 2 不同水生植物恢复区 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的释放速率随时间的变化

表 1 不同植被区沉积物—水界面 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的交换速率 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

实验区	2004 年 9 月	2004 年 11 月	2005 年 1 月	2005 年 3 月	2005 年 5 月	2005 年 7 月	年均释放速率
沉水植物区	0.38 ± 0.16	0.59 ± 0.21	-1.31 ± 0.59	-0.21 ± 0.37	1.40 ± 2.46	0.56 ± 0.67	0.23 ± 0.42
挺水植物区	0.46 ± 1.03	-0.69 ± 1.82	-2.65 ± 1.56	0.17 ± 0.36	0.58 ± 0.74	-0.14 ± 0.31	-0.38 ± 0.65
西五里湖区	0.54 ± 1.37	1.15 ± 0.48	0.51 ± 1.55	0.38 ± 0.13	1.72 ± 0.71	2.48 ± 3.65	1.13 ± 1.31

2.2.2 释放速率与水生植物生长的关系 表 1 列出了不同植被类型区域在年内不同时期 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的释放速率及其标准偏差。由表 1 结果分析,不同植被类型沉积物磷释放是有明显差异的。在一年不同采样时间内,同一批次采样时的沉积物静态释放,西五里

湖对照区 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的释放速率明显高于围隔内沉水植物恢复区和挺水植物恢复区的现象,表明在重污染水体,水生植被的恢复可抑制底泥中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的释放。虽然水生植物可以通过水中部分对上覆水中的物质进行吸收,但仍可通过其根部对营养盐更为强烈

的吸收作用,使得间隙水中的营养盐浓度的下降超过上覆水中的下降速度,从而缩小两者间的浓度梯度,减小营养盐通过浓度梯度向上覆水中的扩散。

在水生植物恢复区,由于水生植物的光合作用直接向水体中释放氧气,使上覆水中溶氧量增加,水体中 Eh 有明显的升高,而 Eh 的升高可以抑制沉积物中磷酸盐的释放^[10-12];同时水生植物的根系周围可以形成根系氧化区。在表层 0—5 cm 左右,沉水植物区和挺水植物区间隙水中的 Eh 明显高于围隔外的疏浚区,表层沉积物中高 Eh 可以减少沉积物磷通过形成铁—磷结合物的方式从沉积物释放到上覆水中;同时水生植被能减缓风浪,有效的控制沉积物的再悬浮,进而减少沉积物的营养盐释放。

在水生植物生长旺盛的夏季 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 释放速率明显高于冬季。这主要因为夏季是水生植物生长的旺盛季节,水温比较高,促进了沉积物 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 释放;水生植物群落的存在,为微生物和微型生物提供了附着基质和栖息场所,这些生物能极大加速截留在根系周围的有机胶体或悬浮物的分解矿化,如芽孢杆菌能将有机磷、不溶性磷降解为无机的、可溶性的磷酸盐,从而使植物能直接吸收利用。此外,水生植物的根系还能分泌促进嗜磷、氮细菌生长的物质,从而间接提高净化率,从而加速了沉积物磷酸盐的释放速率。

在挺水植物区和沉水植物区磷的释放均有呈现负值的现象,表明此时底泥对磷具有吸收功能。特别是在挺水植物区的 5 月和 7 月出现了磷的负释放,这一结果与人们普遍接受和认为的底泥释放随温度升高而增加的观点有异,这主要是由于有挺水植物存在造成的,因为挺水植物区沉积物进行过基底修复,从沉积物间隙水的分析中得知,其间隙水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 含量极低,由于采集柱状样在实验室进行恒温水浴静态释放的时候,不可能采集到挺水植物在柱状样品中,在室内进行模拟释放的时候,水体中一些有机颗粒物等进行降解向水体中释放磷,由于没有水生植物的吸收,导致上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 含量上升,甚至超过间隙水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 浓度,从而出现上覆水向间隙水中的逆向释放的出现,表现为“汇”的特征。在沉水植物区的 1 月和 3 月磷释放出现的负值现象,主要是温度的原因,1 月到 3 月太湖水的平均温度处于年内最低的 5~10℃左右,而低温可以抑制沉积物中磷的释放,另外在该时期沉水植物大部分处于衰亡期,大部分死亡,而死亡沉水植物残体在水体中的分解向水体中释放磷导致上覆水体中磷的含量上升,而此阶段隙水中磷的含量也相对较高,所以出现磷在该时期出现负释放。

2.2.3 温度对内源磷释放速率的影响 在其它条件相同的情况下,沉积物中磷的释放量随温度升高而增强。王挺健等^[13]对南京地区玄武湖底泥释放模拟实验表明,35℃比 25℃时磷的释放提高了 1 倍;Liikanen^[14]实验也证明,无论好氧与厌氧,磷的释放都随温度的升高而增加,温度升高 1~3℃,将使底泥中 TP 的释放增加 9%~57%;Holdren^[15]的研究表明,温度升高,微生物的活力增强,有机质分解加速,结果导致氧气的损耗和氧化还原电位的降低,使 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} ,磷从正磷酸铁和氢氧化铁沉淀物中释放出来。环境温度的变化对水域的微生物有一定的影响,在炎热的夏季和温度适宜的秋季,对于水体中许多微生物来说,是其生长代谢的有利时期,在此期间,细菌通常处于一种最活跃的状况,因此各种细菌的数量也是年内的高峰阶段,表层沉积物中的细菌数量同样也如此。所以随温度的升高,沉积物中磷酸盐释放速率增加。

在一年的不同采样时间内, $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 的释放速率也存在明显的差异,1 月份 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 的释放速率明显低于其它月份(表 1),在沉水植物恢复区和挺水植物恢复区出现了负释放,表明此时沉积物对磷酸盐具有吸收功能。出现这种情况的原因主要是由于温度引起的。从温度变化可以看出(图 3),在 1 月份湖水的温度最底。温度的增加,大体 $\text{PO}_4^{3-}\text{—P}$ 的释放速率也随之增加(表 1),但就具体每一个区域而言,并不一定有此规律,这表示浅水湖泊较深水湖泊和海洋对沉积物—水界面物质释放具有更多和更复杂的干扰因素。如水体中波浪、潮流和小生物的活动等都有可能对界面发生的各种氧化—还原、吸附—解吸、生物矿化和分解等作用产生一定的影响^[16-17],而这些过程又会影响间隙水中离子和分子的赋存状态和方式。太湖处于季风气候区,水体微生物和酶的季节性变化明显,因此在某些时候,物理和生物作用对表层沉积物状态的影响,有可能已部分或本质上改变了原先界面的物化和生化条件,所得到的释放结果与单纯用温度变化所获得的预想结果会有所不同^[18-19]。

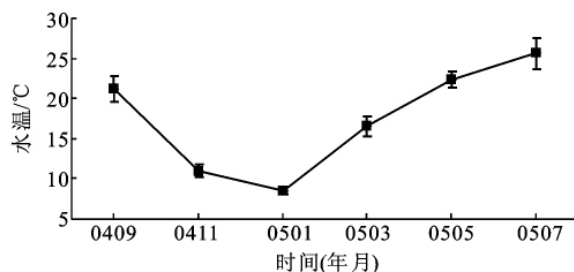


图3 2004年9月至2005年7月采样区湖水温度变化

3 结 论

(1) 经过近 2 a 的示范工程实验区水生植被恢复重建实验,相对围隔外的疏浚对照区,能显著地降低水体中磷酸盐和氨态氮等营养盐的浓度,提高水体透明度,水质逐步得到改善。通过室内静态模拟磷酸根释放研究,在示范工程区内,沉水植物区和挺水植物区磷酸根的释放速率相对围隔外疏浚对照区均明显降低,湖泊内源磷负荷的释放得到明显地控制。

(2) 本实验在示范区内得到的磷释放速率与范成新^[7]在太湖全湖内源释放定量化研究中得到的西五里湖 PO_4^{3-} —P 释放速率相比较发现,西五里湖的在未疏浚前年平均 PO_4^{3-} —P 释放速率为 $3.29 \pm 2.74 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,而本实验在西五里湖示范区的 3 个实验区域年平均 PO_4^{3-} —P 释放速率分别为 $0.23 \pm 0.42 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $-0.38 \pm 0.65 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $1.13 \pm 1.31 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; PO_4^{3-} —P 释放速率均有显著地降低,从 PO_4^{3-} —P 释放速率可以看出,疏浚后对西五里湖内源磷释放的控制取得很好的效果,特别对于示范区内水生植被恢复区,在挺水植被恢复区甚至出现了磷酸盐的“汇”,说明对于浅水性污染湖泊,底泥疏浚后进行必要的基底修复,为水生植物的恢复创造有利条件,也可加强疏浚对内源污染的控制效果。

[参 考 文 献]

- [1] 吴振斌,邱东茹,贺锋,等. 水生植物对富营养化水质净化作用研究[J]. 武汉植物学研究, 2001, 19(4): 299-303.
- [2] 王国祥,濮培民,张圣照. 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用[J]. 中国环境科学, 1998, 18(5): 410-414.
- [3] 宋海亮,吕锡武. 水生植物床预处理富营养化水源水中试研究[J]. 武汉植物学研究, 2004, 30(8): 8-12.
- [4] Li W, Zhong Y. Theories and Methods of the Study of Aquatic Vegetation [M]. Wuhan: Central China Normal University Press, 1992: 237-277.
- [5] Marsden S. Lake restoration by reducing external phosphorus loading: The influence of sediment phosphorus release[J]. Freshwater Biology, 1989, 21: 139-162.
- [6] Sondergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes[J]. Hydrobiologia, 1999, 408/409: 145-52.
- [7] 范成新,张路,秦伯强,等. 太湖沉积物—水界面生源要素迁移机制及定量化 I: 铵态氮释放速率的空间差异及源—汇通量[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 10-20.
- [8] 陈开宁,包先明,史龙新,等. 太湖五里湖生态重建示范工程: 大型围隔实验[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2): 139-149.
- [9] 范成新,张路,包先明,等. 太湖沉积物—水界面生源要素迁移机制及定量化 II: 磷释放的热力学机制及源—汇转换[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 207-217.
- [10] 戴莽. 利用大型围隔实验研究沉水植物对水体富营养化的影响[J]. 水生生物学报, 1999, 17(5): 418-421.
- [11] Helene A. Multiple techniques for lake restoration[J]. Hydrobiologia, 1999, 395/396: 77-85.
- [12] 宋碧玉. 利用人工围隔研究沉水植被恢复的生态效应[J]. 生态学杂志, 1999, 18(5): 21-24.
- [13] 王挺健,苏睿,会相灿,等. 城市富营养化湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994, 7(4): 12, 20.
- [14] Liikanen A N U. Effects of temperature and oxygen availability on greenhouse gas and nutrient dynamics in sediment of a eutrophic midboreal lake[J]. Biogeochemistry, 2002, 59: 269-286.
- [15] Holdren G C, David E. Armstrong factors affecting phosphorus release from intact lake sediments cores[J]. Environ. Sci. Technol., 1980, 14(1): 79-87.
- [16] Lu J F, Boers P C M, Lijklema L. Nitrogen fluxes and processes in sandy and muddy sediments from a shallow eutrophic lake[J]. Water Res., 1999, 33: 33-42.
- [17] Vidal M, Morgui J A, Latasa M J. Factors controlling spatial variability in ammonium release within an estuarine bay[J]. Hydrobiologia, 1992, 235/236: 519-525.
- [18] 钟继承,范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 1-10.
- [19] 包先明,陈开宁,范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 515-522.