

水生植物作用下浅水湖泊中营养盐(P、Fe、Mn)的分布特征及相关性研究

徐德兰^{1,2}, 闫 姝¹, 孙君瑶¹, 裴宗平¹, 韩宝平^{1*}

(1.中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2.徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要:通过对骆马湖进行采样分析,探讨大型水生植物生长区的水体和沉积物中磷(P)、铁(Fe)、锰(Mn)的分布特征,并对浅水湖泊沉积物-水界面中 Fe、Mn 和 P 的含量进行了相关性分析,结果表明:大型水生植物生长区的 TP、Fe、Mn 含量均显著低于对照;沉积物孔隙水中各营养盐浓度均较上覆水高,表层沉积物出现富集现象;沉积物中营养盐的垂直变化存在差异,磷的赋存形式以无机磷的 Ca-P 为主。相关性分析显示,在大型水生植物作用下,沉积物中 Fe 和 Fe-P、TP 呈显著负相关,摩尔比 Fe/P 和 Mn/P 随深度的增加而增大,表明 Fe 和 Mn 在湖泊体系的磷迁移过程中具有重要影响。

关键词:大型水生植物;铁;锰;磷

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2325-05

Correlations and Distributions of Nutrients(P、Fe、Mn) in Shallow Lake with Aquatic Macrophytes

XU De-lan^{1,2}, YAN Shan¹, SUN Jun-yao¹, PEI Zong-ping¹, HAN Bao-ping^{1*}

(1. China University of Mining and Technology, Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou 221116, China; 2. Department of Environmental Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: This paper investigates the distribution characteristics of P, Fe and Mn in Luoma Lake, and analyzes the correlation of contents of them at sediments-water interface. The results showed that the content of P, Fe and Mn in growing area of large hydrophyte was significantly lower than that in contrasted area. The nutrient concentration in the pore water was lower than those in the overlying water, with enrichment in surface sediment. Vertical distribution characteristics of nutrients in sediments were different, and the existing state of phosphorus was in the form of Ca-P. In addition, the correlation analysis showed that the content of Fe had significantly negative correlation with Fe-P, TP in sediments, and the molar ratio of Fe / P and Mn / P increased as the depth of sediment increases, indicating that Fe and Mn had important effect during phosphorus movement in the lake system.

Keywords: hydrophyte; Fe; Mn; P

在自然条件下,磷通常是湖泊生态系统的限制性因子,控制了湖泊的初级生产力水平^[1],其在湖泊环境中的赋存、迁移和转化等过程对湖泊生态系统具有重要意义。然而,大量研究^[2-3]表明,湖泊富营养化主要是由于水体中超负荷的磷引起湖泊水生生态系统初级生产力的异常发展所致。目前,国内对湖泊中磷的研究主要集中在太湖、滇池等浅水湖泊,有关沉积物-水界面磷交换及其环境影响因素、水体磷的时空变化

及对藻类生长的影响和水生植物对磷的富集与转移作用等已有较深入的研究^[4-6]。

就大多数湖泊而言,在较短的时间内,沉积物是磷的释放源头^[7]。铁、锰均是水环境中典型的氧化还原敏感性元素,在其他微量元素循环过程中起着关键作用,对沉积物中磷释放有重要的影响^[8-9]。目前,对铁、锰的研究主要集中在海洋沉积物和深水湖泊,有关浅水湖泊则极少。本文以骆马湖为例,结合水生植物在湖泊生态系统的研究,根据湖水和沉积物孔隙水磷与铁、锰的浓度分析,揭示浅水湖泊中营养盐磷和微量元素铁、锰的分布特征,并初步探讨浅水湖泊沉积物-水界面中铁、锰与磷的相关性,旨在进一步认识湖泊

收稿日期:2011-04-02

基金项目:江苏省住房和城乡建设厅科技计划项目(200906170001)

作者简介:徐德兰(1975—),男,安徽宿州人,地球化学博士,副教授,中国矿业大学博士后。

* 通讯作者:韩宝平 E-mail:bphan@cumt.edu.cn

生态系统磷循环过程,为改善水质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究位点

骆马湖 (34°00′~34°14′N,118°06′~118°18′E)位于江苏省北部,京杭大运河中段,是江苏省四大湖泊之一,湖区南北长 27 km,东西平均宽 13 km,总面积为 375 km²。正常蓄水位 23.0 m 时,平均水深 3.3 m,最大水深 5.5 m,年换水次数在 10 次左右,是典型过水性浅水湖泊。

选择骆马湖宿迁段东部为研究区域(图 1),水域生态系统大型水生植物覆盖率占 60%,多为马来眼子菜(*Potamogeton malaiianus*)+金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)+菹草(*P. crispus*)群落。

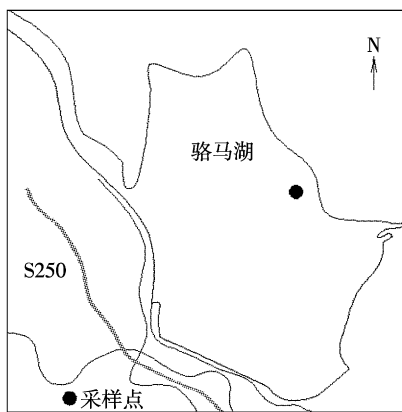


图 1 采样点布置
Figure 1 Arrangement of sampling points

1.2 采样方法

于 2010 年 9 月 27 日(秋季)对研究区域采样。以有草区为研究对象,设无草区为对照(CK),均设 3 个重复。

采用柱状采样器无扰动采集沉积物,沉积物样品从土壤表层开始按 3、3、3、3、5 cm 间距分层取样并迅速置于聚乙烯袋中密封。用虹吸法吸取采样装置内的上覆水于洁净塑料瓶中保存,加盐酸调至 pH=1,带回实验室后冷藏保存。在实验室内,用离心法制备孔隙水,冷藏待测。现场测定水温和 pH 等指标见表 1。

1.3 分析方法

水样指标为总磷(TP)、铁(Fe)和锰(Mn),测定方法均见《水和废水监测分析方法》^[10]。

沉积物样品自然风干后,经研钵磨细过 100 目筛待用。TP 采用 H₂SO₄-HClO₄ 消解钼锑抗比色法测定,无机磷分析采用修改后的张守敬-Jackson 土壤无机

表 1 骆马湖上覆水的物理化学特征

Table 1 Main physical and chemical properties in the overlying water in Luoma Lake

采样区	水温/℃	pH 值	透明度/cm
有草区	14.6±0.2	7.12±0.11	215.83±4.77
无草区	13.7±0.1	7.06±0.08	112.82±2.48

磷分级方法^[11-12];Fe 和 Mn 采用混酸(HNO₃-HCl-HF)全溶法消解,原子吸收法直接测定。

实验数据采用 SPSS 13.0 和 Excel 2007 进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 上覆水和孔隙水中营养盐分布特征

在生物的作用下,上覆水经常同底质进行物质和能量的交换^[13],而沉积物-水界面间营养盐的交换则主要通过孔隙水来实现。有草条件即在大型水生植物存在情况下,上覆水和孔隙水中的各营养盐含量均低于对照区(图 2),差异显著($P<0.05$)。大型水生植物在合适的环境中往往以营养繁殖方式快速积累生物量,而磷是植物大量需要的营养物质,所以对磷的固定能力也就非常高^[14];同时植物生长过程中需要铁、锰等微量元素,光合作用释放大量的氧使其以高价位难溶解性的离子形态沉淀至表层沉积物,导致有草区的浓度偏低。

另外,从沉积物中释放出的物质并非直接进入上覆水,而是通过沉积物孔隙水的扩散作用和在沉积物-水界面处由于氧化还原环境的改变而发生的再沉积作用共同影响上覆水^[15],导致孔隙水中的浓度与上覆水的相差很大,差异显著($P<0.05$)。

2.2 沉积物中营养盐分布特征

图 3 给出了骆马湖沉积物 TP、Fe、Mn 和各组分磷含量的剖面分布图。水生植物作用下沉积物磷浓度低,与王琦等^[16]研究结果一致。在大型水生植物作用下,总磷浓度随深度增加由 1.724 mg·g⁻¹ 逐渐递减至 0.753 mg·g⁻¹,即出现表层富集现象,考虑到骆马湖变化的历史^[17],可能是由于沉积物中磷的地球生物化学作用和近些年人类活动的影响共同作用,导致磷向表层迁移。对沉积物中各种磷形态剖面进行监测(图 3)发现,生物难利用的 Ca-P 所占比例最大,与 TP 比值在 45%~60%范围,并随深度的增加浓度减小,与 TP 规律一致。人为排放造成的上覆水体高浓度的钙离子和磷酸根往往能够形成钙磷酸盐沉淀^[18],由此认为骆马湖沉积物多以碱性的石灰类沉积而成,人为磷

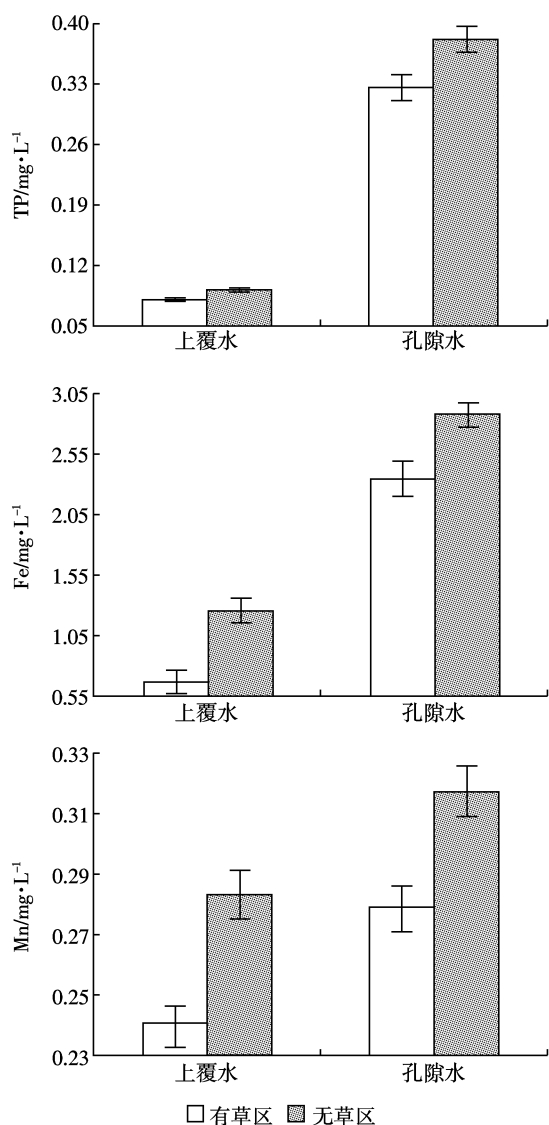


图2 骆马湖水体中营养盐(TP、Fe、Mn)的分布特征
Figure 2 Distribution of nutrients (TP, Fe, Mn) in the water in Luoma Lake

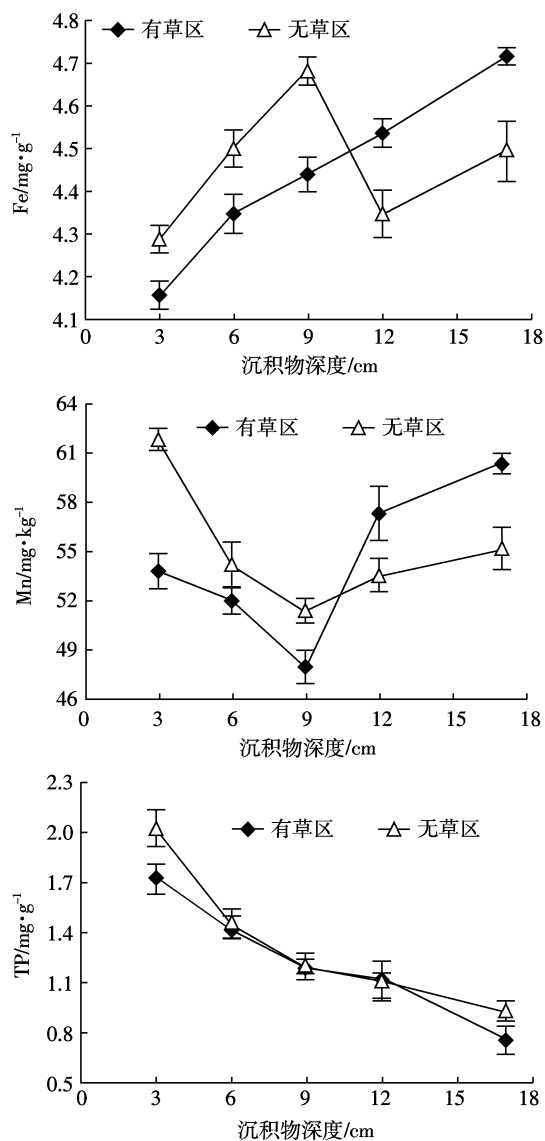
(农田面源污染,工业排放等)输入高,碱性环境也导致沉积物中 Al-P 含量低。O-P 是部分活性的磷形态,容易释放和分解,除了表层富集外,浓度波动不大。由于采样点位于湖面开阔处,受风的作用较大,所以 Fe-P 浓度相对较低,但这并不影响其作为沉积物中主要的活性磷组分,对沉积物-水界面磷的循环起着主要的作用^[19-20]。

植物生长中吸收表层沉积物中铁、锰等微量元素进行新陈代谢,导致在 0~10 cm 的深度范围内,有草区沉积物中铁、锰的浓度低于无草区;同时植物释放的氧使表层沉积物中 Fe²⁺、Mn²⁺氧化为 Fe³⁺、Mn⁴⁺进一步沉积到下层底泥,使 10~17 cm 深度的有草区铁、锰含量较无草区高。对于有草区而言,随沉积物深度的

增加,铁含量在 4.157 2~4.719 5 mg·g⁻¹ 范围内逐渐增多。植物代谢吸收表层的游离态铁和表层的铁磷易结合成 Fe-P、磷酸铁等原因造成铁的表层富集;在较深层还原性增强,硫酸盐也被还原,Fe²⁺与 H₂S 反应形成 FeS 沉淀并抑制 Fe²⁺向上覆水体扩散^[21-22]。沉积物中 Mn 则在 47.965~60.435 mg·kg⁻¹ 范围内呈现出“中间小、两头大”的分布趋势,即在深度 10 cm 左右, Mn 的含量达到最小值,从 10 cm 起,随深度的增或减而增多。由于铁、锰是氧化敏感元素,循环机制复杂,这里对铁锰的研究结论与前人的已有成果并不一致^[9,23-24],有待进一步研究。

2.3 沉积物-水界面的铁锰对磷分布的影响

在大型水生植物作用下,沉积物中 TP 与 Fe 呈显著负相关(表 2)。这主要是由于采样区域水动力条件复杂,磷释放过程中伴随的 Fe²⁺部分被氧化为 Fe³⁺,浓



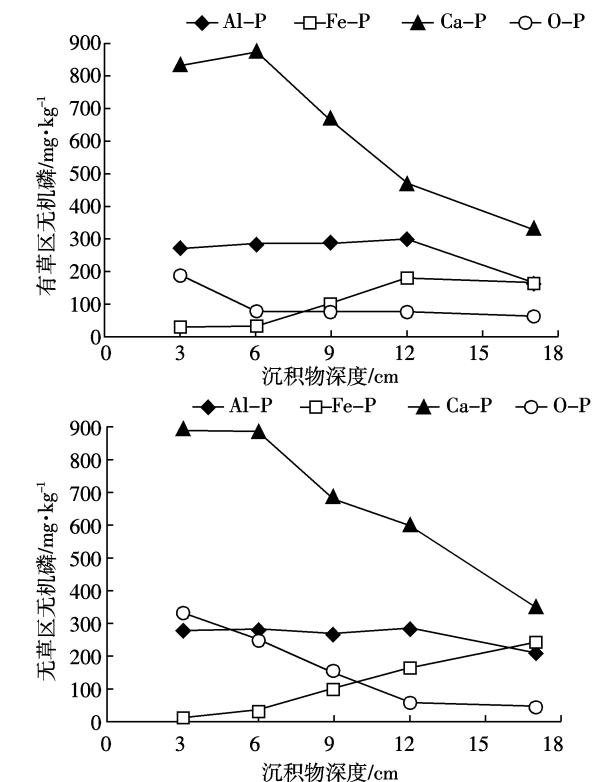


图3 骆马湖沉积物中营养盐(TP、Fe、Mn、无机磷)的剖面分布特征

Figure 3 Profile distribution of nutrients(TP, Fe, Mn, inorganic phosphorus) in the sediment in Luoma Lake

度梯度的作用又导致部分 Fe^{3+} 向上扩散, 以 $\{\text{Fe}(\text{OOH})\}$ 等胶体形态沉淀回到沉积物, 导致磷、铁在沉积物中的逆向迁移。Fe-P 作为重要的潜在可释放磷, TP 与其之间的相关性也较好。

通过对摩尔比研究发现, 由于植物的根吸收大量的营养物质, 聚集在沉积物里, 而磷的代谢更为活跃, 很快进入循环中, 相同深度的 Fe/P 和 Mn/P 为有草区高于对照区(图 4)。由图 4 可以看出, Fe/P 和 Mn/P 是随深度的增加而增大的。根据沉积物中电子受体的反应自由能顺序^[25], 随底泥厚度的增加, 氧的供应逐步缺乏, 铁锰氧化物作为微生物利用的主要电子受体, 由无定形向稳定晶体转化^[26], 使磷释放愈加剧烈。另外, Mn 的地球化学循环较 Fe 活跃, 对氧化还原电位更敏感, 在沉积物的底层缺氧时, Mn 的积累能力相对

表 2 沉积物中总磷与铁、锰和铁结合磷的相关系数
Table 2 Correlation coefficient between TP and Fe, Mn, Fe-P in the sediment

沉积物	Fe	Mn	Fe-P
有草区 TP	-0.995**	-0.533	-0.885*
无草区 TP	-0.498	0.795	-0.860

注: * 显著性水平 $\alpha=0.05$; ** 显著性水平 $\alpha=0.01$ 。

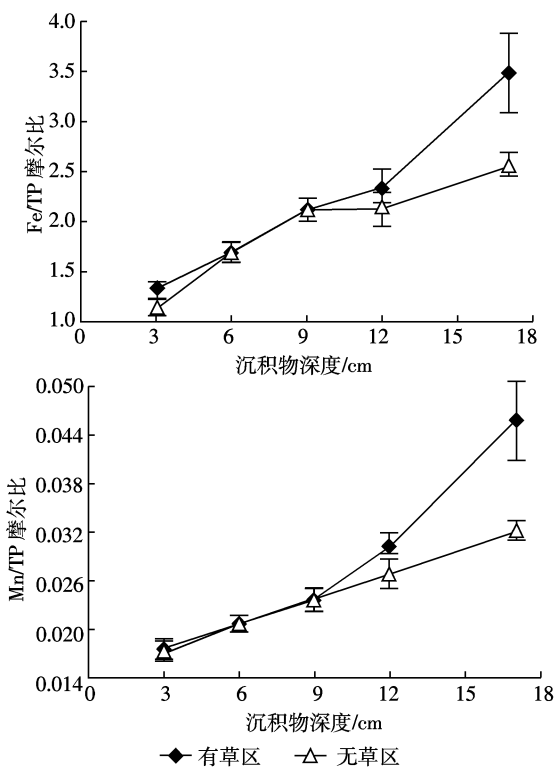


图4 沉积物中 Fe/P 和 Mn/P 的变化

Figure 4 Schematic diagram of molar ratio of Fe / P and Mn / P in the sediment

高些^[27], 导致锰、磷的摩尔比变化趋势明显。

3 结论

水生植物生长代谢吸收大量的营养元素, 促进湖泊生态系统的生物地球化学循环, 导致骆马湖有草区域的各营养盐含量均低于对照区, 差异性显著。沉积物孔隙水作为循环过程中的过渡介质, 各营养盐浓度相对较高, 这也造成表层沉积物出现富集现象。由于受沉积环境早期成岩作用和外界环境等因素的作用, 营养盐的垂直变化存在差异。沉积物中磷的赋存形式以无机磷的 Ca-P 为主, 人为磷输入高。相关性分析显示, 沉积物中铁、锰和铁结合态磷与总磷之间呈显著负相关。另外, 摩尔比 Fe/P 和 Mn/P 的趋势随深度的增加而增大, 表明 Fe 和 Mn 在湖泊体系的磷迁移过程中具有重要影响。

由于磷的季节性释放受水生生物、DO、铁锰氧化物、水动力状况和人类活动等共同影响, 结合本文研究结论, 还需从植物群落、水动力学、动态跟踪和生态调查等方面对磷迁移进行深入研究。

参考文献:

[1] 吴丰昌, 万国江, 蔡玉蓉. 沉积物-水界面的生物地球化学作用[J]. 地

- 球科学进展, 1996, 11(2):191-196.
- WU Feng-chang, WAN Guo-jiang, CAI Yu-rong. Biogeochemical processes at the sediment-water interface[J]. *Advances in Earth Science*, 1996, 11(2):191-196.
- [2] Mehner T, Diekmann M, Gonsiorczyk T, et al. Rapid recovery from eutrophication of a stratified lake by disruption of internal nutrient load[J]. *Ecosystems*, 2008, 11(7):1142-1156.
- [3] OECD. Eutrophication of waters: Monitoring, Assessment and Control [M]. Paris: OECD, 2006.
- [4] 张雷燕, 李柯, 刘正文. 太湖不同污染程度底泥对磷滞留能力的比较[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3):546-550.
- ZHANG Lei-yan, LI Ke, LIU Zheng-wen. Phosphorus retention capacity of sediments with different pollution in Taihu[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3):546-550.
- [5] 陈永川, 张德刚, 汤利. 滇池水体磷的时空变化与藻类生长的关系[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6):1363-1368.
- CHEN Yong-chuan, ZHANG De-gang, TANG Li. The spatial and temporal variations of phosphate concentrations and their relationships with algal growth in Lake Dianchi, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6):1363-1368.
- [6] 黄亮, 吴乃成, 唐涛, 等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J]. 中国环境科学, 2010, 30(增刊):1-6.
- HUANG Liang, WU Nai-cheng, TANG Tao, et al. Enrichment and removal of nutrients in eutrophic water by aquatic macrophytes[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(Suppl):1-6.
- [7] Holtan H, Kamp-Nielsen L, Stuanes A O. Phosphorus in soil, water and sediment: An overview[J]. *Hydrobiologia*, 1988, 170:19-34.
- [8] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7):2037-2042.
- [9] 罗莎莎. 云贵高原湖泊近代沉积作用的Fe、Mn、S指示[D]. 贵阳: 中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2001.
- LUO Sha-sha. The geochemical indication of Fe, Mn and S in recent lacustrine sediments on Yun-Gui plateau[D]. Guiyang: Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [10] 国家环境保护局. 水与废水监测分析方法编委会. 水与废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration of China. Monitoring analysis method of water and wastewater [M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [11] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of soil phosphorus[J]. *Soil Sci*, 1957, 84(1):133-144.
- [12] Petersen G W, Corey R B. A modified chang and jackson procedure for routine fraction of inorganic soil phosphates[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1966, 30(3):563-565.
- [13] 金相灿, 王圣瑞, 赵海超, 等. 磷形态对磷在水-沉水植物-底质中分配的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(5):631-635.
- JIN Xiang-can, WANG Sheng-rui, ZHAO Hai-chao, et al. Effects of phosphorus form on the distribution of the phosphorus in water-sediment-submerge plant ecosystem[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(5):631-635.
- [14] 钟云霄, 胡洪英, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2):36-40.
- CHONG Yun-xiao, HU Hong-ying, QIAN Yi. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(2):36-40.
- [15] 马英军, 万国江. 湖泊沉积物-水界面微量重金属扩散作用及其水质影响研究[J]. 环境科学, 1999, 20(2):7-11.
- MA Ying-jun, WAN Guo-jiang. Study on trace heavy metal diffusion at sediment water interface and its effects on overlying lake water quality[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(2):7-11.
- [16] 王琦, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2):120-126.
- WANG Qi, JIANG Xia, JIN Xiang-can, et al. Distribution of phosphorus fractions and bio-available phosphorus forms and their relationship in the sediments from different regions of Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(2):120-126.
- [17] 陈秀珍, 黄维民. 骆马湖富营养化因子分析及防治技术[J]. 污染防治技术, 2008, 21(5):74-77.
- CHEN Xiu-zhen, HUANG Wei-min. Control techniques and eutrophication analysis of Luoma Lake[J]. *Pollution Control Technology*, 2008, 21(5):74-77.
- [18] Huang Q H, Wang Z J, Wang D H, et al. Origins and mobility of phosphorus forms in the sediments of Taihu Lakes and Chaohu, China[J]. *Journal of Environmental Science & Health, Part A*, 2004, 40(1):91-102.
- [19] Baggie I, Rowell D L, Robinson J S, et al. Decomposition and phosphorus release from organic residues as affected by residue quality and added inorganic phosphorus[J]. *Agro-forestry Systems*, 2005, 63(2):125-131.
- [20] 胡进宝, 刘凌, 王哲. 南京玄武湖沉积物生物可利用磷的研究[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(10):19-23.
- HU Jin-bao, LIU Ling, WANG Zhe. Research on the bio-available phosphorus in sediments of Xuanwu Lake, Nanjing[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31(10):19-23.
- [21] Donald R, Southam G. Low temperature anaerobic bacterial diagenesis of ferrous monosulfide to pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(13-14):2019-2023.
- [22] Granina L, Muller B, Wehrli B. Origin and dynamics of Fe and Mn sedimentary layers in Baikal Lake[J]. *Chemical Geology*, 2004, 205(1-2):55-72.
- [23] 苏春利, 王焰新. 墨水湖上覆水与沉积物间隙水中重金属的分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2):285-290.
- SU Chun-li, WANG Yan-xin. Distribution of heavy metals in the overlying water and pore water of the sediments of Moshui Lake, Wuhan[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2):285-290.
- [24] 刘国锋, 何俊, 范成新, 等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面处Fe、Mn、S循环影响[J]. 环境科学, 2010, 31(11):2652-2660.
- LIU Guo-feng, HE Jun, FAN Cheng-xin, et al. Environment effects of algae-caused black spots: Impacts on Fe-Mn-S cycles in water-sediment interface[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11):2652-2660.
- [25] Froelich P N, Klinkhammer G P, Bender M L. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: Suboxic diagenesis [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1979, 43:1075-1090.
- [26] 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. 地球化学, 2004, 33(4):423-432.
- ZHANG Lu, FAN Cheng-xin, CHI Qiao-qiao, et al. Phosphorus species distribution of sediments in Taihu Lake and its main inflow rivers[J]. *Geochimica*, 2004, 33(4):423-432.
- [27] Beutel M W, Leonard T M, Dent S R, et al. Effects of aerobic and anaerobic conditions on P, N, Fe, Mn and Hg accumulation in waters overlaying profundal sediments of an oligo-mesotrophic lake [J]. *Water Research*, 2008, 42(8-9):1953-1962.