

乌梁素海和岱海的水-沉积物系统中有机磷分布特征

吕昌伟, 何江, 毛海芳, 梁英

(内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

摘要:以乌梁素海和岱海 2 个不同类型湖泊为研究对象,系统探讨了 2 个湖泊上覆水和沉积物中有机磷(Or-P)的地球化学特征。结果表明,乌梁素海和岱海上覆水中溶解性有机磷(DOP)的含量范围分别为 $0.02\sim 0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.01\sim 0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2 个湖泊上覆水中 DOP 均占 TDP 的 60%以上,是上覆水中 TDP 的重要组成部分和主要存在形态;乌梁素海和岱海沉积物中有机磷(Or-P)的平均含量分别为 $19.25\sim 69.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $168.21\sim 178.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;2 个湖泊上覆水中 DOP 含量明显高于英格兰 Tamar 河口区,2 个湖泊沉积物中 Or-P 的含量低于长江中下游浅水湖泊。据估算,乌梁素海和岱海上覆水中的 DOP 库分别达到 12 t 和 10 t;这 2 个湖泊沉积物中 Or-P 的差异性反映了湖泊环境及生态类型对 Or-P 生物有效性的重要影响,揭示有机磷库是不容忽视的潜在生物有效磷源。

关键词:有机磷;分布特征;上覆水;沉积物;湖泊

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)03-0541-05

Distribution Characters of Organic Phosphorus in the Overlying Water-Sediment System of the Wuliangsuhai and Daihai in the Inner Mongolia Plateau, China

LV Chang-wei, HE Jiang, MAO Hai-fang, LIANG Ying

(College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: In this work, the concentrations and distribution characters of organic phosphorus(Or-P) in the overlying water-sediments systems of the Wuliangsuhai and Daihai were discussed. The concentration ranges of dissolved organic phosphorus(DOP) in the overlying water from the Wuliangsuhai and Daihai were $0.02\sim 0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.01\sim 0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, which were higher than those in the waters of the Tamar estuary(SW England); the DOP concentrations account for not less than 60% of the total dissolved phosphorus(TDP) indicating that DOP was the dominant species of the TDP. The average concentration ranges of Or-P in the sediments from the Wuliangsuhai and Daihai were $19.25\sim 69.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $168.21\sim 178.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, which were lower than those in the sediments from shallow lakes in middle and lower reaches of the Yangtze River Area in China. On the basis of estimate, the DOP pools in the overlying water of the Wuliangsuhai and Daihai were of 12 t and 10 t respectively. The differences of Or-P revealed the differences of the environments and ecology types between the two lakes and the importance of the potential bioavailability of Or-P.

Keywords: organic phosphorus; distribution character; overlying water; sediments; lakes

磷(P)是生物光合作用和新陈代谢过程中不可缺少的关键元素,与水生生态系统的生物生产力紧密相关^[1],被认为是湖泊初级生产力的关键限制因子^[2-4],在全球生物地球化学循环中起重要作用^[3,5]。

水环境中,磷可分为无机磷和有机磷。由于无机磷(如正磷酸盐)易于被初级生产者吸收利用,水-沉积物系统中无机磷的迁移转化、生物有效性、界面交

换及其在湖泊富营养化过程的作用得到了国内外学者的广泛关注和深入研究^[2,6-8]。实际上,自然环境中磷的沉积埋藏过程伴随着成岩作用^[9-10],某些生物能通过酶的水解和/或细菌分解而从有机质中获得生长所需的磷^[11-13],在生物和非生物的再矿化作用下使有机磷能转变为生物可利用磷^[14]。尽管有机磷是水环境中磷的重要组成部分^[12,15-17],但有机磷作为潜在生物有效磷库的重要性还未得到广泛认同^[12,18],有关有机磷在湖泊富营养化过程中的作用和贡献方面的研究还鲜见报道,忽略了有机磷的生物有效性。

本研究以乌梁素海和岱海为研究对象,探讨了有机磷在草型和藻型富营养化湖泊水-沉积物系统中的地球化学特征,初步估算了 2 个湖泊水-沉积物系统

收稿日期:2009-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(40863003);内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601);内蒙古大学高层次人才科研启动基金项目(Z20080209)

作者简介:吕昌伟(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向为环境地球化学、污染生态学及湿地科学。E-mail:lcw2008@imu.edu.cn

通讯作者:何江 E-mail:ndjhe@imu.edu.cn

中有机磷库,对重新评价有机磷的生物有效性及深入理解磷的生物地球化学循环等具有重要意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

乌梁素海($40^{\circ}47' \sim 41^{\circ}03'N$, $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'E$)系黄河改道后形成的牛轭湖,是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊。湖区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,现有水域面积 333.48 km^2 , 80%水域水深 $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ 。农田退水是该湖最主要的补给水源,受河套灌区农田退水的影响,近 10 a 来乌梁素海富营养化进程加剧^[9]。湖中现有大型水生植物共 6 科 6 属 11 种,以芦苇、龙须眼子菜和穗花狐尾藻为优势种,沉水植物和挺水植物生长繁茂,遍布全湖。乌梁素海已成为以大型水生植物过量生长为表征的重度富营养化草型湖泊,目前腐烂水草正以每年 $9 \sim 13 \text{ mm}$ 的速度在湖底堆积,成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一,正向芦苇沼泽→碱蓬盐化草甸→白刺荒漠方向演化^[20]。

岱海($40^{\circ}29'27'' \sim 40^{\circ}37'6''N$, $112^{\circ}33'31'' \sim 112^{\circ}46'40''E$)是内蒙古高原中西部干旱半干旱区典型的地堑式深水藻型湖泊,位处温带半干旱区向干旱区的过渡带,是西伯利亚干冷气团南下与热带海洋暖气团北上交锋的敏感地带^[21]。湖区位于内蒙古凉城县境内,现有水域面积约 80.72 km^2 ,最大水深 16.05 m ,平均水深 7.41 m 。湖中有藻类共 76 属,其中绿藻门 28 属、

硅藻门 21 属、蓝藻门 16 属、裸藻门 16 属^[21];岱海补给水源来自大气降水以及湖周分布的间歇性河流,流域内工业企业数量少、规模小,所排放的工业废水经弓坝河直接入湖,农田面源污染是湖泊的主要污染源。近年来湖泊水位逐年下降、水面不断缩小,湖水咸化程度逐渐增高,环境问题日益突出,成为我国全球变化研究中倍受重视的地区。

1.2 样品采集及分析方法

依据《湖泊生态系统观测方法》,针对各湖泊现有水域面积及湖泊生态系统类型设置采样点。于 2007 年 8 月对乌梁素海和岱海进行了系统的现场监测和样品采集(图 1)。沉积物柱芯样视湖泊深度分别用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A och B 型无扰动采样器或荷兰 Eijkelkamp 公司产 SA Beeker 型沉积物原状采样器采集,现场以 2 cm 间隔分层;沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于 -24°C 冷冻保存;据《湖泊生态系统观测方法》中湖(库)监测垂线采样点的设置方法,视湖水深度同步采集上覆水样(4°C 保存);视测试目标元素和项目不同,分别用聚乙烯塑料袋或瓶盛装样品。采样点用 GPS 定位。

上覆水中总溶解磷(DTP)和溶解性正磷酸盐(DRP)采用钼锑抗分光光度法测定,溶解性有机磷(DOP)为二者差值^[22-23];沉积物中有机磷含量通过磷的形态分析^[24-26]获得。

2 结果与讨论

2.1 上覆水中有机磷的分布特征

乌梁素海上覆水中溶解性总磷(TDP)的含量范围 $0.04 \sim 0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,溶解性正磷酸盐(DRP)的含量范围 $0.01 \sim 0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为

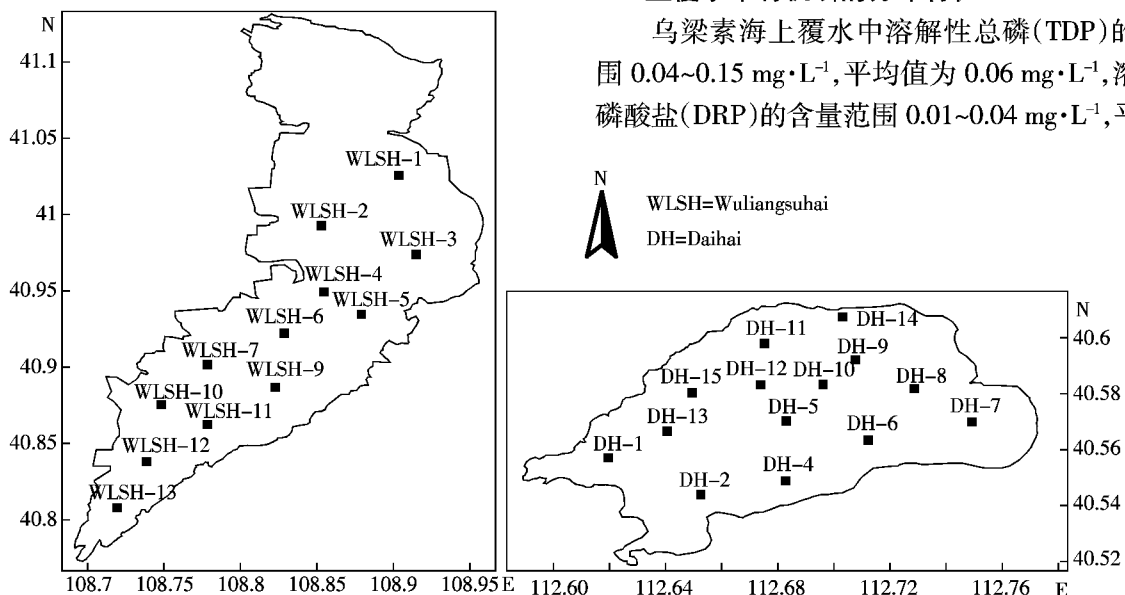


图 1 乌梁素海和岱海采样点位图

Figure 1 Location of sampling sites in Wuliangsu Hai and Dai Hai

0.02 mg·L⁻¹, 溶解性有机磷(DOP)的含量范围 0.02~0.12 mg·L⁻¹, 平均值为 0.04 mg·L⁻¹; 岱海上覆水中溶解性总磷(TDP)的含量范围 0.03~0.04 mg·L⁻¹, 平均值为 0.03 mg·L⁻¹, 溶解性正磷酸盐(DRP)的含量范围 0.01~0.02 mg·L⁻¹, 平均值为 0.01 mg·L⁻¹, 溶解性有机磷(DOP)的含量范围 0.01~0.03 mg·L⁻¹, 平均值为 0.02 mg·L⁻¹。

研究表明, 2 个湖泊上覆水中 DOP 均占 TDP 的 60% 以上, 揭示 DOP 是上覆水中 TDP 的重要组成部分和主要存在形态。若乌梁素海和岱海库容量分别按 3×10⁸ m³ 和 5×10⁸ m³ 计算, 其上覆水中的 DOP 库则分别达到 12 t 和 10 t, 是不容忽视的重要磷源。

与英格兰 Tamar 河口^[17]相比(表 1), 乌梁素海和岱海上覆水中 DRP 含量较低, 但无论是 DOP 含量还是 DOP 占 TDP 百分比均明显高于英格兰 Tamar 河口区。乌梁素海和岱海分别为内陆草型和藻型富营养化湖泊, 湖泊初级生产力均较高, 初级生产者对 DRP 的吸收利用可能是导致 2 个湖泊上覆水中 DRP 含量水平较低的主要原因。研究表明, 自然水体中有相当部分的有机磷能被微生物、浮游植物和/或浮游动物分解利用^[11], 且初级生产者也能直接利用溶解有机磷(DOP)^[13, 27-28]。结合 2 个湖泊上覆水中 DRP 含量水平较低及初级生产力较高的事实, 其上覆水中较高的 DOP 含量及其占 TDP 百分比可能反映了 DOP 在湖泊富营养化及初级生产力提高过程中的重要作用, 揭示了 DOP 库的潜在生物有效性。

相较而言, 乌梁素海上覆水中 TDP、DRP、DOP 的含量水平均高于岱海, 与湖泊流域内磷的输入量及湖泊的生态类型等有关。对 2 个湖泊的长期研究^[19, 29-31]表明, 乌梁素海的主要补给水源为河套灌区的农田退水及上游的城市生活污水和工业废水, 每年有大量的

磷随补水入湖; 而岱海则受工农业影响较小, 少量的农业点源排放是岱海的主要污染源。可见, 磷的入湖量是导致 2 个湖泊上覆水中 TDP、DRP、DOP 含量差异的主要原因。此外, 相关性研究表明, 岱海上覆水中 DOP 与 DRP 间存在极显著负相关关系($r=-0.684$), 可能表征了 DOP 向 DRP 的转化趋势, 揭示了 DOP 潜在生物有效性的重要性。当环境条件适宜时, DOP 可在酶水解作用下被细菌或浮游植物等吸收利用^[32-33]。岱海为藻型富营养化湖, 湖中有藻类共 76 属^[21], 乌梁素海为草型富营养化湖泊, 湖中藻类相对较少。岱海上覆水中 DRP 含量较低, 湖中大量藻类等浮游植物对 DOP 的吸收利用也可能是造成该湖中 DOP 含量较低的原因之一。2 个湖泊富营养化类型的差异对上覆水中 DOP 含量亦有重要影响。

乌梁素海上覆水中 DOP 空间分布呈沿湖水流向逐渐降低趋势(图 2)。受总排干、八排干、九排干及东岸入湖径流影响, 湖泊中部有一 DOP 高值区分布; 湖水缓慢流动过程中, 受龙须眼子菜和穗花狐尾藻等大量沉水植物直接或间接同化作用的影响, DOP 含量随水流方向逐渐降低。总体上, 湖心深水区为岱海上覆水中 DOP 的高值区, 且呈从东北至西南递减的空间分布特征(图 3)。根据本研究小组多年对岱海的研究及野外调研情况, 岱海渔场的养殖废水从湖泊东北部入湖, 揭示养殖废水是岱海上覆水中 DOP 的重要来源。

2.2 沉积物中有机磷的分布特征

根据磷的形态分析^[24-26]方法, 可交换态磷、铝磷和

表 1 乌梁素海与岱海上覆水中溶解态磷的含量 (mg·L⁻¹)
Table 1 DTP, DRP and DOP concentrations in the overlying water from the Wuliangsuhai and Daihai Lake (mg·L⁻¹)

项目		TDP	DRP	DOP	DOP/TDP(%)
WLSH	min	0.041	0.011	0.015	37.2
	max	0.147	0.037	0.124	84.1
	average	0.065	0.023	0.042	61.2
DH	min	0.026	0.006	0.007	23.2
	max	0.042	0.022	0.033	81.4
	average	0.033	0.011	0.022	66.2
英格兰 Tamar 河口	min	0.010	0.009	0.001	6.0
	max	0.068	0.061	0.021	40.0
	average	0.050	0.039	0.011	20.8

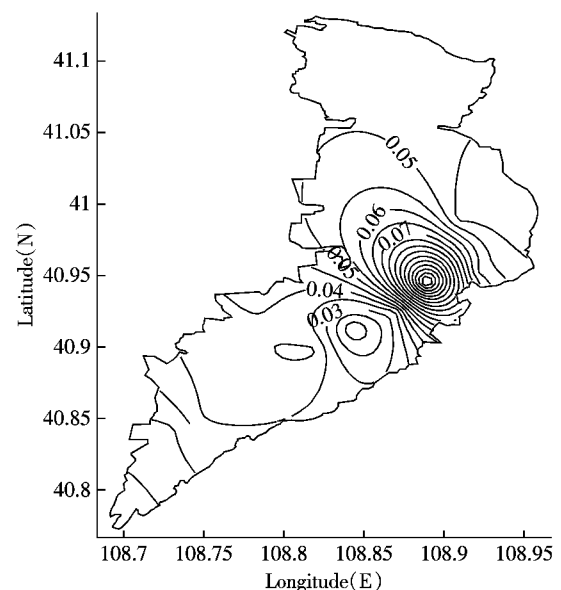


图 2 乌梁素海上覆水中 DOP 空间分布

Figure 2 DOP distribution in the overlying water from the Wuliangsuhai

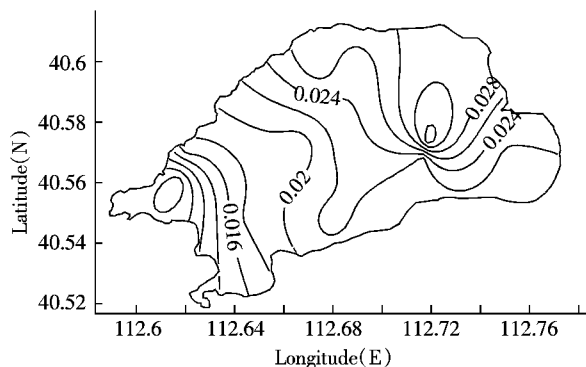


图3 岱海上覆水中 DOP 空间分布

Figure 3 DOP distribution in the overlying water from the Daihai Lake

铁磷主要来源于铁铝氧化物和氢氧化物对正磷酸盐的吸附或羟基磷灰石,最易于被生物直接利用,本研究将三者含量加和定义为活性磷(Bio-P);将可交换态磷、铝磷、铁磷、闭蓄态磷、自生钙磷、碎屑钙磷(De-P)含量加和定义为无机磷(Inor-P);形态分析的最后一种磷形态即为有机磷。本研究小组已对活性磷和无机磷的分布特征及地球化学意义开展了较为深入系统的研究^[20,29-31],故本文重点讨论有机磷。

研究表明,乌梁素海沉积物中 Or-P 的平均含量介于 19.25~69.40 mg·kg⁻¹,岱海沉积物中 Or-P 的平均含量介于 168.21~178.41 mg·kg⁻¹。与长江中下游浅水湖泊^[18]相比,2 个湖泊沉积物中 Or-P 的含量偏低,可能反映了我国南北方地理环境(干冷与湿热)及腐殖化程度和有机质降解速率的差异性。

湖泊沉积物中有机磷具有部分活性,大约 50%~60%的有机磷可被降解或水解为生物可利用磷形态,是沉积物中重要的“磷蓄积库”^[34-35]。研究表明,乌梁素海沉积物中 Or-P 的含量水平明显低于岱海(图 4)。本研究小组最新研究结果显示,乌梁素海沉积物中胡敏酸与富里酸比值小于 1,而岱海沉积物中二者比值大于 1,揭示岱海沉积物中有机质的腐殖化程度较乌梁素海高。相对而言,岱海较高的腐殖化程度使得沉积物中的有机磷被矿化转化为生物有效磷而参加再循环的速率较慢,加之湖泊的深水还原环境有利于 Or-P 在沉积物中的累积,故岱海沉积物中 Or-P 含量较高(占总提取磷的 20%左右)。乌梁素海为浅水草型富营养化湖泊,以芦苇为优势种的挺水植物和以龙须眼子菜为优势种的沉水植物的分布面积已占全湖的 85%以上,水草生物量(鲜重)最高为 22.50 kg·m⁻²,平均生物量为 12.85 kg·m⁻²,生物量远高于岱海。乌梁素海的沉积速率约为 9~13 mm,每年有大量芦苇和龙须眼子菜等植物残体在湖底堆积,但乌梁素海的浅水

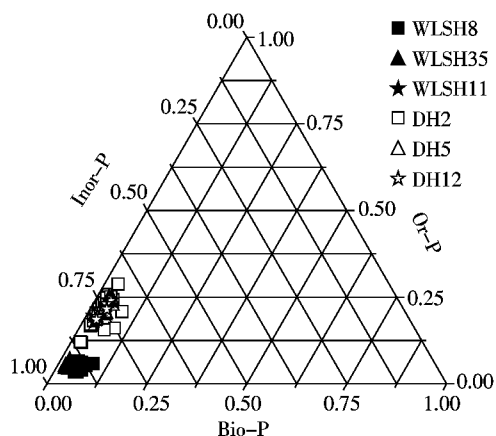


图4 乌梁素海与岱海沉积物中 Bio-P、Inor-P、Or-P 的三角相图

Figure 4 The percentages of Bio-P, Inor-P and Or-P in sediments from the Wuliangsu Lake and Daihai Lake

氧化环境及较低的腐殖化程度,使得沉积物中有机质能较快分解并发生矿化作用,沉积物中的有机磷亦在此过程中转化为能被挺水和沉水植物吸收利用的生物有效磷而参加再循环。乌梁素海沉积物中 Or-P 含量较低,占总提取磷的比例不足 10%,在一定意义上揭示了 Or-P 的潜在生物有效性在促进初级生产力过程中的重要作用。因此,尽管 2 个湖泊沉积物中 Or-P 的含量水平不同,但沉积物 Or-P 库均对湖泊富营养化进程及初级生产力具有重要意义,应重视有机磷作为潜在生物有效磷库的重要性及其在湖泊富营养化过程中的作用和贡献。

3 结论

乌梁素海和岱海上覆水中溶解性有机磷(DOP)均占总溶解磷(TDP)的 60%以上,是上覆水中 TDP 的重要组成部分和主要存在形态;2 个湖泊沉积物中有机磷(Or-P)的平均含量范围分别为 19.25~69.40 mg·kg⁻¹和 168.21~178.41 mg·kg⁻¹,略低于我国长江中下游浅水湖泊;据估算,2 个湖泊上覆水中的 DOP 库分别达到 12 t 和 10 t;2 个湖泊沉积物中 Or-P 的差异性反映了湖泊环境及生态类型对 Or-P 生物有效性的重要影响,揭示有机磷库是不容忽视的潜在生物有效磷源。

参考文献:

- [1] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33(4): 796-822.
- [2] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments Lakes Volvi and Koronia, N. Greece[J]. *Chemosphere*, 2002, 46(8): 1147-1155.
- [3] Sañudo-Wilhelmy S A, Kustka A B, Gobler C J, et al. Phosphorus limitation of nitrogen fixation by *Trichodesmium* in the central Atlantic O-

- cean[J]. *Nature*, 2001, 411(6833):66-69.
- [4] Björkman K M, Karl D M. Bioavailability of dissolved organic phosphorus in the euphotic zone at Station ALOHA, North Pacific Subtropical Gyre[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(3):1049-1057.
- [5] Babu C P, Nath B N. Processes controlling forms of phosphorus in surficial sediments from the eastern Arabian Sea impinged by varying bottom water oxygenation conditions[J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2005, 52(14-15):1965-1980.
- [6] Xie L Q, Xie P, Tang H J. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lake water by microcystis blooms—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic, subtropical Chinese lake[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122(3):391-399.
- [7] Linge K L, Oldham C E. Control mechanisms for dissolved phosphorus and arsenic in a shallow lake[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(9):1377-1389.
- [8] Zhou Q, Gibson C E, Zhu Y. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. *Chemosphere*, 2001, 42(2):221-225.
- [9] Schenau S J, De Lange G J. Phosphorus regeneration vs. burial in sediments of the Arabian Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 75(3):201-217.
- [10] Fang T H, Chen J L, Huh C A. Sedimentary phosphorus species and sedimentation flux in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(10-11):1465-1476.
- [11] Dyhrman S T, Chappell P D, Haley S T, et al. Phosphonate utilization by the globally important marine diazotroph *Trichodesmium*[J]. *Nature*, 2006, 439(7072):68-71.
- [12] Turner B L, Frossard E, Baldwin D S. Organic phosphorus in the environment[M]. CABI: Cambridge, 2005.
- [13] Sañudo-Wilhelmy S A. Oceanography: A phosphate alternative[J]. *Nature*, 2006, 439(7072):68-71.
- [14] Baldwin D S, Beattie J K, Coleman L M, et al. Hydrolysis of an organophosphate ester by manganese dioxide[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(4):713-716.
- [15] 金相灿. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. JIN Xiang-can. Lakes eutrophication of China[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990.
- [16] Lü J J, Yang H, Gao L, et al. Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake[J]. *Pedosphere*, 2005, 15(1):78-83.
- [17] Monbet P, McKelvie I D, Worsfold P J. Dissolved organic phosphorus speciation in the waters of the Tamar estuary (SW England)[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008; DOI:10.1016/j.gca.2008.1011.1024.
- [18] Jin X C, Wang S R, Chu J Z, et al. Organic phosphorus in Shallow Lake sediments in middle and lower reaches of the Yangtze River Area in China[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3):394-400.
- [19] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局[J]. 地理研究, 2006, 25(6):1003-1012. SUN Hui-min, HE Jiang, Lü Chang-wei, et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsu Lake[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6):1003-1012.
- [20] 孙惠民, 何江, 高兴东, 等. 乌梁素海沉积物中全磷的分布特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(4):579-584. SUN Hui-min, HE Jiang, GAO Xing-dong, et al. Distribution of total phosphorus in sediments of Wuliangsu Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4):579-584.
- [21] 王苏民, 吴瑞金, 余源盛. 岱海-湖泊环境与气候变化 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990. WANG Su-min, WU Rui-jin, YU Yuan-sheng. Climate change and environment of Lake Daihai [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1990.
- [22] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters[J]. *Anal Chim Acta*, 1962, 27(3):1-36.
- [23] Worsfold P J, Monbet P, Tappina A D, et al. Characterisation and quantification of organic phosphorus and organic nitrogen components in aquatic systems: A Review[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 624:37-58.
- [24] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in Marine Sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7):1460-1482.
- [25] Zhu G W, Qin B Q, Zhang L, et al. Geochemical forms of phosphorus in sediments of Three Large, Shallow Lakes of China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(6):726-734.
- [26] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1):15-20. LI Yue, WU Da-nian, XUE Yong-xian. A development sequential extraction method for different forms of phosphorus in the sediments and its environmental geochemical significance[J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(1):15-20.
- [27] Labry C, Herbland A, Delmas D. The role of phosphorus on planktonic production of the Gironde plume waters in the Bay of Biscay[J]. *J Plank Res*, 2002, 24:97-117.
- [28] Boyer J N, Dailey S K, Gibson P J, et al. The role of dissolved organic matter bioavailability in promoting phytoplankton blooms in Florida Bay[J]. *Hydrobiologia*, 2006, 569(1):71-85.
- [29] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海沉积物中磷的形态分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):878-885. LV Chang-wei, HE Jiang, SUN Hui-min, et al. Phosphorus speciation and distribution character in sediment of Wuliangsu Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):878-885.
- [30] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海和岱海沉积磷形态分布的差异性研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(3):508-512. LV Chang-wei, HE Jiang, SUN Hui-min, et al. The difference of phosphorus forms between different types of lakes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3):508-512.
- [31] LV C, He J, Sun H, et al. Application of allochthonous organic carbon and phosphorus forms in the interpretation of past environmental conditions[J]. *Environmental Geology*, 2008, 55(6):1279-1289.
- [32] Cotner J B, Ammerman J W, Peele E R, et al. Phosphorus-limited bacterioplankton growth in the Sargasso Sea[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1997, 13(2):141-149.
- [33] Labry C, Delmas D, Herbland A. Phytoplankton and bacterial alkaline phosphatase activities in relation to phosphate and DOP availability within the Gironde plume waters (Bay of Biscay)[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, 318(2):213-225.
- [34] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7):2037-2042.
- [35] Hantke B, Fleischer P, Domany I, et al. P-release from DOP by phosphatase activity in comparison to P excretion by zooplankton: Studies in hardwater lakes of different trophic level[J]. *Hydrobiologia*, 1996, 317(2):151-162.