

乌梁素海和岱海水-沉积物界面磷的扩散通量研究

关 瑞¹, 吕昌伟^{1,2*}, 何 江^{1,2}, 汪精华¹, 侯德坤¹, 谢志磊¹

(1.内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2.内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021)

摘 要:以乌梁素海(WLSH)和岱海(DH)为研究对象,采用柱状芯样模拟法,开展了湖泊水-沉积物界面溶解有机磷(DOP)、溶解性总磷(DTP)及溶解性正磷酸盐(DRP)的扩散通量研究。结果表明,乌梁素海2个柱芯中DTP和DOP通过水-沉积物界面向上覆水转移扩散,而岱海3个沉积柱芯中DOP和DTP则由上覆水通过水-沉积物界面向沉积柱芯迁移扩散,并分别符合负的幂指数或对数函数的释放规律。据扩散通量结果估算,在夏季90 d的时间内,乌梁素海明水区沉积物约向上覆水体释放了19.81 t的DTP和33.43 t的DOP,由上覆水体迁移至沉积物中的DRP约为13.95 t,明水区沉积物表现为DOP和DTP的源及DRP的汇;由岱海上覆水体迁移至沉积物中的DTP和DOP分别约为13.29 t和21.40 t,由沉积物释放至上覆水的DRP约为8.69 t,岱海沉积物表现为DTP和DOP的汇及DRP的源。揭示湖泊生态系统中,有机磷可以直接或经矿化降解的间接形式参与再循环,成为湖泊初级生产力的重要营养源,表明有机磷作为生物有效磷库的重要性及其在水-沉积物界面的环境地球化学行为对湖泊富营养化的重要影响。

关键词:扩散通量;磷;水-沉积物界面;湖泊

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)08-1609-09 doi:10.11654/jaes.2013.08.018

Diffusion Fluxes of Phosphorus Across Water-Sediment Interface in Lake Wuliangsuhai and Daihai

GUAN Rui¹, LÜ Chang-wei^{1,2*}, HE Jiang^{1,2}, WANG Jing-hua¹, HOU De-kun¹, XIE Zhi-lei¹

(1.College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2.Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: Taking the Wuliangsuhai and Daihai Lake as research objects, the diffusion fluxes of dissolved organic phosphorus (DOP), dissolved total phosphorus (DTP) and dissolved orthophosphate (DRP) across the water-sediment interface were investigated in this work by employing columnar simulation method. The results showed that DTP and DOP released from sediment of Lake Wuliangsuhai to overlying water, while it was diametrically opposite that DTP and DOP diffused from overlying water to sediment cores of Lake Daihai. The diffusion kinetics of DOP and DTP could be well fitted by negative power exponent function and logarithmic function. According to the estimate results of diffusion fluxes, there were approximately 19.81 t of DTP and 33.43 t of DOP entering overlying water while 13.95 t of DRP sank in sediments across the water-sediment interface in non-*Phragmites communis* area of Lake Wuliangsuhai during 90 days in summer. It indicated that the sediments from non-*Phragmites communis* area of Lake Wuliangsuhai act as source (for DOP and DTP) and sink (for DRP) for different phosphorus forms. Approximately 13.29 t of DTP and 21.40 t DOP sank in sediments while 8.69 t of DRP entering overlying water across the water-sediment interface, which indicated that the sediments from Lake Daihai act as source (for DRP) and sink (for DOP and DTP) for different phosphorus forms. So the organic phosphorus could directly take part in recycle or through the indirect way of mineralization degradation in the lake ecosystems. This study revealed the significance of organic phosphorus as bio-available phosphorus pool and impacts of its diffusion across the water-sediment interface on lake eutrophication. As potential nutrient pool, it should be given more attention on organic phosphorus.

Keywords: diffusion fluxes; phosphorus; water-sediment interface; lakes

收稿日期:2013-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41003049, 40863003, 41163006);内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601)

作者简介:关 瑞(1990—),女,硕士研究生,研究方向为环境地球化学。

*通信作者:吕昌伟 E-mail:lcw2008@imu.edu.cn

沉积物是湖泊及其流域中营养盐及其他污染物的重要归宿和蓄积库^[1-4]。水-沉积物界面是溶解物质在地球化学循环与生物体系之间进行耦合作用的最初场所,也是水生生态系统物质循环不可缺少的环节。当湖泊水-沉积物界面的环境条件发生变化时,尤其在季节性缺氧条件下,沉积物中的污染物质(N、P、重金属等)通过扩散、对流、沉积物再悬浮等过程向上覆水体释放,形成“二次污染”^[5]。研究表明,即使湖泊外源污染得到控制,沉积物对上覆水体季节性营养盐的释放仍可使湖泊富营养化维持数十年^[6]。Berelson等^[7]在Port Phillip湾的营养盐循环研究中发现内源性氮营养盐的产生量占外源性营养盐的比例均超过50%,而磷的内源再生量占湖泊溶解性磷酸盐的比例更是高达72%。因此,沉积物-水界面营养盐的交换速率及其释放规律研究对湖泊内源负荷的控制和水环境改善显得尤为重要。

C、N、P、Si等生源要素在湖泊水-沉积物界面及其附近发生剧烈的生物地球化学循环,并控制C、N、P、Si等在上覆水体和沉积物间的物质平衡、形态转化和沉积剖面分布。磷在湖泊水-沉积物间的界面行为直接影响沉积物磷的源汇功能。前人已将质量衡算法^[8]、孔隙水扩散模型法^[9]、表层底泥模拟法^[10]、柱状芯样模拟法^[11]及水下原位模拟法^[12]5种水-沉积物界面扩散通量的研究方法成功应用于水-沉积物界面N、P营养盐扩散通量和生物地球化学循环特征研究^[9,13-18],上述界面通量研究多关注氨氮、硝态氮及正磷酸盐,但有关水-沉积物界面溶解性有机磷(DOP)通量及过程的研究还鲜见报道。本文以乌梁素海和岱海2个类型不同且富营养化表征不同的湖泊为研究对象,采用柱状芯样模拟法,开展了湖泊水-沉积物界面DOP、溶解性总磷(DTP)及溶解性正磷酸盐(DRP)扩散通量研究,初步估算了2个湖泊水-沉积物界面的磷的扩散通量,评价了2个湖泊沉积物磷的源/汇功能,对重新认识和评价有机磷在湖泊磷循环中的作用及其对上覆水体富营养化的贡献有重要意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

乌梁素海(40°47'~41°03'N,108°43'~108°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,也是全球范围内荒漠半荒漠地区极为少见的具有生物多样性和环境保护等多功能的大型草型湖泊,为地球上同一纬度最大的自然

湿地。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 km²,80%水域水深0.8~1.0 m。农田退水是该湖最主要的补给水源^[19],受河套灌区农田退水的影响,近10年来乌梁素海富营养化进程加剧^[20]。湖中现有大型水生植物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,成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一。

岱海(40°29'27"~40°37'6"N,112°33'31"~112°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。湖区位于内蒙古凉城县境内,现有水域面积约80.72 km²,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、甲藻门、隐藻门、黄藻门、金藻门各2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,富营养化程度日益加剧。

1.2 研究方法与材料

1.2.1 样品采集与分析

2007年8月对乌梁素海和岱海进行了样品采集(图1),采用挪威Swedaq公司产KC mod A ochB型无扰动采样器和荷兰Eijkelpamp公司产SA Beeker型沉积物原状采样器,于乌梁素海北部和南部沉水植物区各采集1个沉积物柱芯(WLSH-2和WLSH-9),于岱海采集3个沉积物柱芯(DH-2、DH-5和DH-10)。为使模拟实验能反映湖泊真实环境中水-沉积物界面磷的扩散通量,保持沉积物柱上方的上覆水并使沉积物柱与上覆水柱界面清晰,为避免水-沉积物界面扰动,现场密封冷藏,垂直放置于垫有塑料泡沫的搁架中,于6 h内带回实验室。

在采集沉积物柱芯的同时,于同一站位采集用于水-沉积物界面磷扩散通量模拟实验的上覆水样,回实验室后立即经0.45 μm的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)过滤,水样过滤后于4℃下蔽光保存。

水样中DTP、DRP的含量采用国家环保部《水和废水监测分析方法(第四版)》^[22]中的钼锑抗光度法进行测定,DOP含量则由差值法获得。分析测试仪器为日本岛津公司产UV-2550型分光光度计。

1.2.2 水-沉积物界面扩散通量研究方法的选择

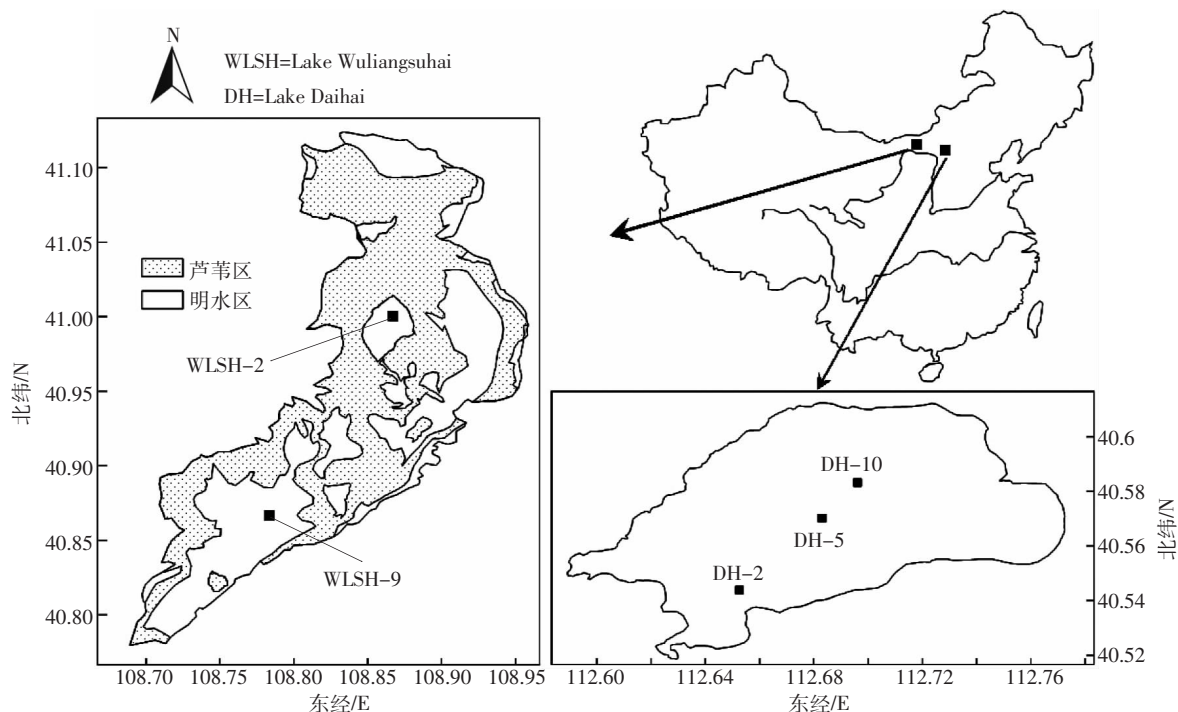


图 1 乌梁素海和岱海采样点位图

Figure 1 Location of sampling sites in Wuliangsuhai Lake and Daihai Lake

目前,水-沉积物界面交换通量研究方法主要有 5 种。质量衡算法根据目标物的收支平衡估算湖泊的内源负荷,在无沉积物释放数据时可参用,但对外源复杂的湖泊计算误差较大,不能详查湖区内源分布状况;孔隙水扩散模型法需有形态离子的物化参数^[18]、水和沉积物中目标物质的量及其垂直分布^[17];表层底泥模拟法破坏沉积物的表层物理状态,分析结果只可作为参考;水下原位模拟法可在不移动沉积物的情况下实时模拟,结果最接近实际^[9],但不能改变环境条件,费用也大;柱状芯样模拟法因基本不破坏沉积物性状,能在控制条件(pH、溶解氧、光照、扰动等)下进行模拟实验而得到广泛应用^[11,17]。鉴于上述,本文选用柱状芯样模拟法。

1.2.3 水-沉积物界面 DOP、DTP、DRP 交换通量模拟实验

于实验室内将沉积柱状样中的上层水体用虹吸法抽去,再用虹吸法沿管壁小心滴注已过滤的原采样点水样,至液面高度距沉积物表面 60~80 cm 处停止,标注刻度。另取一无沉积物的洗净采样管,下端用胶塞塞紧,水样加注操作及要求同上,作为对照样。于室温下,将所有采样管均垂直放于实验台。从加完过滤水样开始计时,在指定时刻用虹吸法于水-沉积物界面以上 10 cm 处取样,每次取样体积为 100 mL,同时

用原样点初始过滤水样补充至刻度,每次取完样立即分析测试水样中的 DOP、DRP、DTP 含量。模拟实验于所取水样中 DOP、DRP、DTP 的含量趋于稳定时结束。所有模拟实验均在长度为 1 m,内径为 5.6 cm 的聚丙烯采样管中完成。

1.2.4 实验结果计算

DOP、DRP、DTP 的释放速率按下式计算^[23]:

$$R = [V(C_n - C_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(C_{j-1} - C_a)] / (S \cdot t)$$

式中: R 为释放速率, $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; V 为柱中上覆水体积, L; C_n 、 C_0 、 C_{j-1} 分别为第 n 次、0 次(即初始)和 $j-1$ 次采样时 DOP、DRP、DTP 的含量, $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; C_a 为添加水样中 DOP、DRP、DTP 的含量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样体积, L; S 为柱样中水-沉积物接触面积, m^2 ; t 为释放时间, d。所计算的 DOP、DRP、DTP 为平均表观释放速率。

2 结果与讨论

2.1 模拟实验平衡时间确定

乌梁素海水-沉积物界面 DOP、DTP、DRP 扩散通量模拟实验结果表明(图 2),在实验开始的初始阶段,上覆水柱中 DOP、DTP、DRP 含量变化程度和幅度均较大,2 个柱芯静态模拟释放实验中,上覆水柱中

DOP、DTP、DRP 含量在前 4 d 内变幅较大, 在其后的释放时间段内呈波动变化趋势, 但变幅相对较小。在模拟真实环境条件下, 乌梁素海水-沉积物界面 DOP、DTP、DRP 扩散通量模拟实验在 15 d 后基本达到平衡, 可选取 15 d 后的平均释放速率估算其水-沉积物界面的 DOP、DTP、DRP 扩散通量。

岱海水-沉积物界面 DOP、DTP、DRP 扩散过程如图 3 所示。DH-2、DH-5 和 DH-10 3 个柱芯静态释放实验中, 上覆水柱中 DOP、DTP、DRP 含量约在 12 d 后渐趋稳定。因此, 在模拟真实环境条件下, 可选取 12 d 后的平均释放速率进行估算。

2.2 水-沉积物界面 DOP、DTP、DRP 释放速率

对于理想的水-沉积物界面, 界面物质交换速率应保持不变, 但在实际中, 往往首先寻找释放速率相对稳定的时段为有效时段, 然后再取在该有效时段下平均释放速率为释放强度数值。对乌梁素海和岱海 5 个沉积柱芯进行了近 20 d 的释放试验, 由释放速率变化图可知(图 4 和图 5), 释放速率变化曲线在试验初期(0~6 d)均有较大的下降或上升趋势, 变幅较大, 但所有柱芯的释放速率均在 10 d 后曲线逐渐变得较为平坦, 表明所有柱芯在释放实验进行 10 d 后, 释放

速率趋于稳定。

乌梁素海 2 个柱芯释放速率变化曲线存在明显差异(图 4)。在 20 d 的释放时间内, WLSH-2 柱芯中 DOP、DTP 和 DRP 的释放速率均为正值, 即此时段内 DOP、DTP 和 DRP 由沉积柱芯通过水-沉积物界面向上覆水转移, 沉积物表现为 DOP、DTP 和 DRP 的源。与 WLSH-2 柱芯相比, WLSH-9 柱芯在 22 d 的释放时段内 DOP 和 DTP 的释放速率始终为正值, 而 DRP 的释放速率始终为负值。这表明实验条件下 DOP 和 DTP 由沉积柱芯通过水-沉积物界面向上覆水转移, 沉积物表现为 DOP 和 DTP 的源; DRP 则有从上覆水通过水-沉积物界面向沉积柱芯转移的趋势, 沉积物表现为 DRP 的汇。WLSH-2 柱芯中 DRP 的释放速率为正值, 而在 WLSH-9 中为负值。这可能与 WLSH-2 柱芯更靠近总排干渠, 该湖区沉积物污染最为严重有关^[24]。与梅梁湾和五里湖相比^[17], 乌梁素海 2 个柱芯 DTP 释放速率介于 $1.50\sim 2.85\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间, 明显高于梅梁湖北和五里湖东 DTP 的释放速率($0.58\sim 0.77\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。本研究现场监测结果显示, 乌梁素海上覆水 pH 介于 8.2~10.3; 而梅梁湾和五里湖上覆水体 pH 介于 7.2~8.5^[17]。乌梁素海沉积物 DTP 的释放

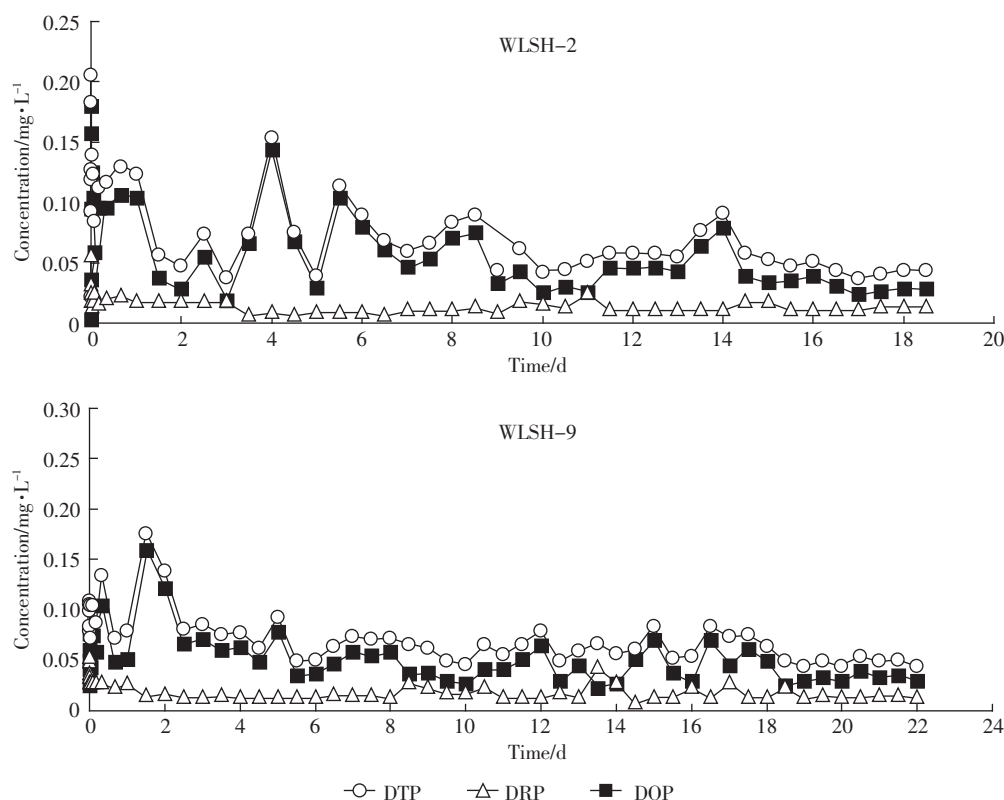


图2 乌梁素海模拟实验上覆水柱中 DOP、DTP、DRP 浓度变化

Figure 2 Variation of DOP, DTP and DRP in the overlying water of core sample(WLSH)

速率高主要与该湖上覆水明显偏碱性有利于沉积物中磷的释放有关^[25-26]。

总体上,当释放达到平衡后,乌梁素海 2 个柱芯的 DTP 和 DOP 的释放速率始终为正值,揭示 DTP 和 DOP 通过水-沉积物界面向上覆水转移和扩散,即乌梁素海沉积物在整个夏季均表现为上覆水中 DTP 和 DOP 的源。结合乌梁素海上覆水有机磷分布、沉积物中磷形态的研究成果及乌梁素海为草型湖泊的生态特征,本次释放模拟实验所得出的乌梁素海沉积物在整个夏季均表现为上覆水中 DOP 源的结论,再次揭示了有机磷作为生物有效磷源的重要性,也表明有机磷在水-沉积物界面的环境地球化学行为对湖泊富

营养化的重要影响。

与浅水草型富营养化湖泊乌梁素海不同,岱海 3 个沉积柱芯除 DRP 的释放速率为正值外,DOP 和 DTP 的释放速率均为负值(图 5)。在释放时段内,岱海 3 个柱芯 DOP 和 DTP 的释放速率始终为负值,而 DRP 的释放速率始终为正值。表明实验条件下 DOP 和 DTP 由上覆水通过水-沉积物界面向沉积柱芯转移,沉积物表现为 DOP 和 DTP 的汇;DRP 则有从沉积柱芯通过水-沉积物界面向上覆水转移的趋势,沉积物表现为 DRP 的源。释放模拟实验结果可能揭示作为深水藻型湖泊的岱海上覆水中,DOP 和 DTP 通过生物泵或以颗粒态沉积的形态逐渐向湖底沉积物

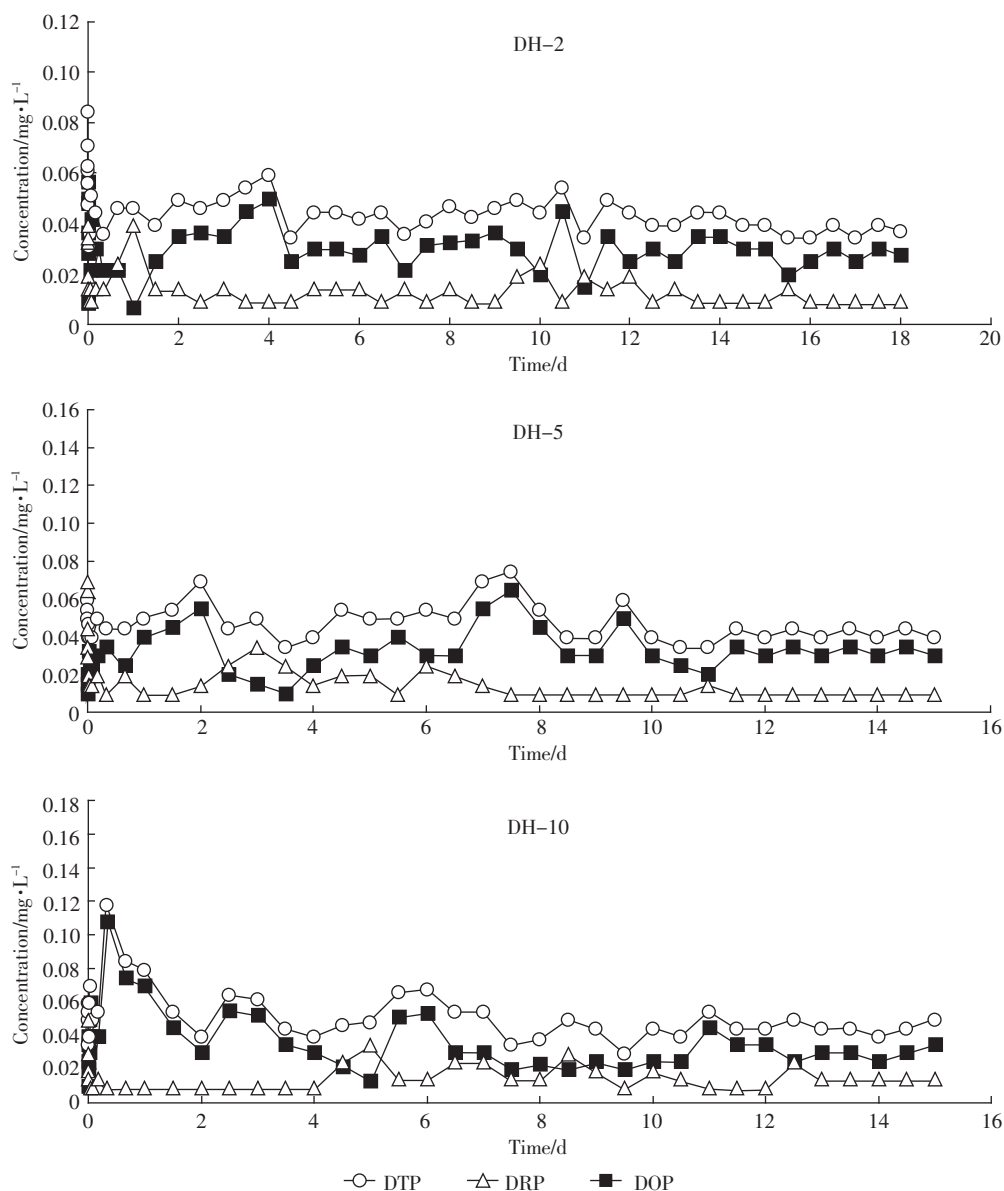


图 3 岱海模拟实验上覆水柱中 DOP、DTP、DRP 浓度变化

Figure 3 Variation of DOP, DTP and DRP in the overlying water of core sample (DH)

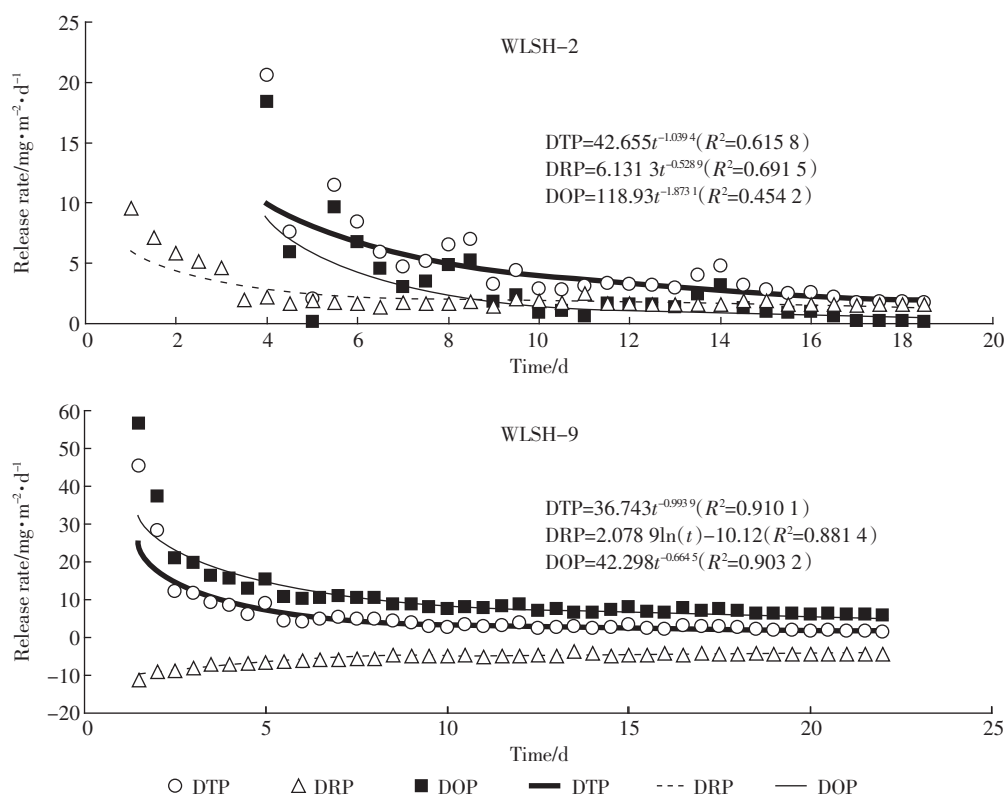


图 4 乌梁素海模拟实验中释放速率变化

Figure 4 DOP, DTP and DRP release rates from WLSH sediment cores

中富集,沉积物中累积的磷尤其是有机磷可能在深水厌氧环境中被逐渐矿化降解,从而以 DRP 的形式向上覆水释放,为藻类等的生长提供了生物可利用磷。

对释放速率与释放时间进行拟合,可得到两者间的拟合方程(图 4 和图 5)。拟合结果显示,WLSH-2 柱芯中 DTP、DOP、DRP, WLSH-9 柱芯中 DTP、DOP, 以及岱海 3 个柱芯中的 DRP 符合负的幂指数形式的释放规律($y=ax^b$); WLSH-9 柱芯中 DRP 与岱海柱芯中的 DTP 和 DOP 符合对数函数的释放规律($y=a+b \ln x$),表明沉积物释磷过程开始时为快速反应,随后变为缓慢反应,与已有研究结果相符^[27-29]。在本研究实验条件下,DTP、DOP、DRP 释放方程达到显著水平, R^2 介于 0.478 6~0.892 2 之间。上述释放规律虽然是基于室内模拟实验的基础上获得,也较好地表达了 DTP、DOP、DRP 扩散通量与释放时间的关系,可为湖泊底泥污染的治理提供科学依据。

2.3 水-沉积物界面 DOP、DTP、DRP 扩散通量

乌梁素海为大型浅水草型湖泊,湖泊平均水深仅为 0.7 m 且湖泊分布有大量的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。本次样品采集于明水区(不包括芦苇区),水深和水生植物分

配相对均一;本研究小组前期研究表明,乌梁素海明水区面积约为 110 km^2 ,因此可取乌梁素海两个柱芯的平均释放速率作为其夏季湖泊明水区水-沉积物界面的释放速率,并以此来估算乌梁素海夏季明水区水-沉积物界面的 DTP、DOP、DRP 交换通量。对岱海而言,水生生态系统类型及沉积物理化性质空间异质性小,取 DH-2、DH-5 和 DH-10 柱芯释放速率的均值作为岱海水-沉积物界面的释放速率,以此来估算岱海水-沉积物界面 DTP、DOP、DRP 的交换通量。

根据实验室内水-沉积物界面静态模拟实验结果估算(表 1),在夏季 90 d 的时间内,DTP 和 DOP 在乌梁素海明水区水-沉积物界面转移扩散的矢量方向指向上覆水,即乌梁素海明水区沉积物始终向上覆水体释放 DTP 和 DOP,约向上覆水体释放了 19.81 t 的 DTP 和 33.43 t 的 DOP;DRP 在乌梁素海明水区水-沉积物界面转移扩散的矢量方向则指向沉积物,即 DRP 始终由上覆水体向沉积物中迁移并富集,在夏季 90 d 的时间内,由上覆水体迁移至沉积物中的 DRP 约为 13.95 t。乌梁素海为大型浅水草型湖泊,湖泊分布有大量的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,由释放模拟实验可

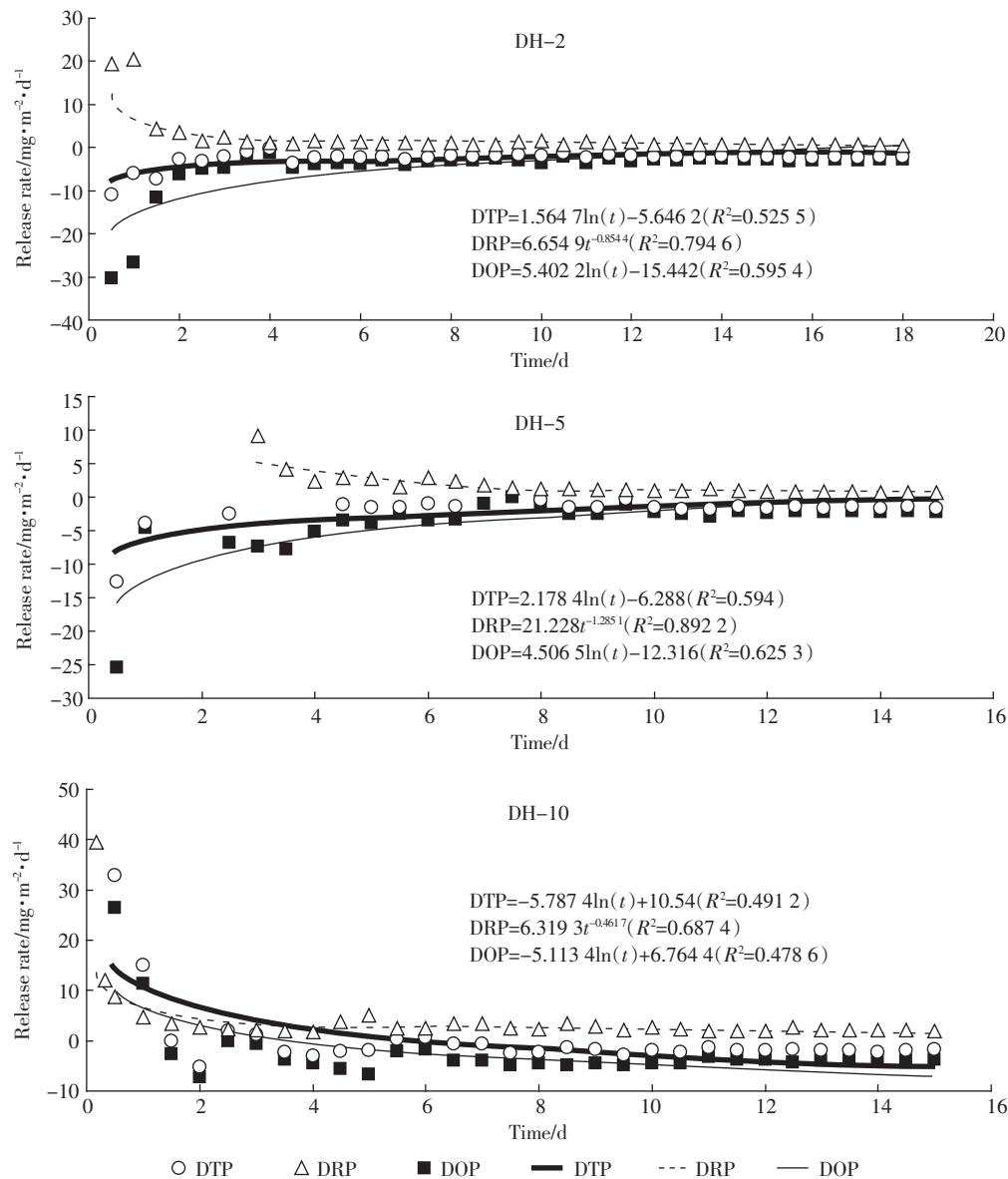


图 5 岱海模拟实验中释放速率变化

Figure 5 DOP,DTP and DRP release rates from DH sediment cores

表 1 夏季(90 d)乌梁素海和岱海水-沉积物界面
DTP、DOP、DRP 交换通量

Table 1 DTP,DOP and DRP fluxes at the water-sediment
interface of WLSH and DH in summer

湖泊	项目	平均释放速率/mg·m ⁻² ·d ⁻¹	面积/km ²	扩散通量/t
WLSH	DTP	2.00	110	19.81
	DOP	3.38	110	33.43
	DRP	-1.41	110	-13.95
DH	DTP	-1.85	80	-13.29
	DOP	-2.97	80	-21.40
	DRP	1.21	80	8.69

知,乌梁素海沉积物为湖中大量沉水植物的光合作用提供了大量的磷源,尤其是 DOP,可见 DOP 是该湖泊上覆水中最为重要的磷的存在形态,对湖泊生态系统初级生产力和富营养化具有不可低估的作用。与乌梁素海不同,岱海沉积物表现为 DTP 和 DOP 的汇,在夏季 90 d 的时间内,由上覆水体迁移至沉积物中的 DTP 和 DOP 分别约为 13.29 t 和 21.40 t;DRP 在岱海水-沉积物界面转移扩散的矢量方向则指向上覆水,沉积物表现为 DRP 的源,在夏季 90 d 的时间内,由沉积物迁移至上覆水体中的 DRP 约为 8.69 t。释放模拟实验揭示,深水藻型湖泊上覆水中 DTP 和 DOP 以

颗粒态或藻类生物有机体形式不断在湖底沉积累积。研究表明,岱海沉积物中 DRP 不断向上覆水释放,与本研究小组所得出的岱海沉积物释硅为硅藻类初级生产力成为其重要硅源的结论相符^[30]。湖底厌氧还原环境中,沉积磷尤其是有机磷的矿化降解对生物有效磷的贡献及有机磷对湖泊初级生产力的间接贡献等需重新认识和评估。

3 结论

总体上,当释放达到平衡后,乌梁素海 2 个柱芯的 DTP 和 DOP 的释放速率始终为正值,揭示 DTP 和 DOP 通过水-沉积物界面向上覆水迁移扩散。岱海 3 个沉积柱芯除 DRP 的释放速率为正值外,DOP 和 DTP 的释放速率均为负值,表明实验条件下 DOP 和 DTP 由上覆水通过水-沉积物界面向沉积柱芯迁移扩散,DRP 则有从沉积柱芯通过水-沉积物界面向上覆水迁移的趋势。WLSH-2 柱芯中 DTP、DOP、DRP, WLSH-9 柱芯中 DTP、DOP, 以及岱海 3 个柱芯中的 DRP 符合负的幂指数形式的释放规律 ($y=ax^b$); WLSH-9 柱芯中 DRP 与岱海柱芯中的 DTP 和 DOP 符合对数函数的释放规律($y=a+b\ln x$)。

据水-沉积物界面扩散通量结果估算,在夏季 90 d 的时间内,乌梁素海明水区沉积物约向上覆水体释放了 19.81 t 的 DTP 和 33.43 t 的 DOP,由上覆水体迁移至沉积物中的 DRP 约为 13.95 t,沉积物表现为 DOP 和 DTP 的源及 DRP 的汇;由岱海上覆水体迁移至沉积物中的 DTP 和 DOP 分别约为 13.29 t 和 21.40 t,由沉积物释放至上覆水的 DRP 约为 8.69 t,岱海沉积物表现为 DTP 和 DOP 的汇及 DRP 的源。

释放模拟实验结果揭示,在湖泊生态系统中,有机磷可以直接或经矿化降解的间接形式参与再循环,成为湖泊初级生产力的重要营养源,揭示了有机磷作为生物有效磷库的重要性,也表明有机磷在水-沉积物界面的环境地球化学行为对湖泊富营养化的重要影响。

参考文献:

- [1] 卢少勇,王 佩,王殿武,等. 北京六湖泊表层底泥磷吸附容量及潜在释放风险[J]. 中国环境科学, 2011, 31(11): 1836-1841.
LU Shao-yong, WANG Pei, WANG Dian-wu, et al. Phosphorus sorption capacity of the sediment in six lakes of Beijing and risk of potential phosphorus release[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(11): 1836-1841.
- [2] 张 彬,陈猷鹏,方 芳,等. 三峡库区淹没消落区土壤氮素形态及分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1126-1133.
ZHANG Bin, CHEN You-peng, FANG Fang, et al. Nitrogen forms and their distribution characteristics in the soils of water-level-fluctuation zone in the central Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5): 1126-1133.
- [3] 范成新,张 路,王建军,等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1523-1528.
FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, WANG Jian-jun, et al. The impacts of sediment dredging on the process and mechanism of internal release[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1523-1528.
- [4] 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 Lake Taihu and its main inflow rivers[J]. *Geochimica*, 2004, 33(4): 423-432.
- [5] FANG Tao, LIU Jian-tong, XIAO Bang-ding, et al. Mobilization potential of heavy metals: A comparison between river and lake sediments[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2005, 161(1): 209-225.
- [6] Kuwabara J S, Woods P F, Berelson W M, et al. Importance of sediment-water interactions in Coeur d'Alene Lake, Idaho, USA: management implications[J]. *Environmental Management*, 2003, 32(3): 348-359.
- [7] Berelson W, Heggie D, Longmore A, et al. Benthic nutrient recycling in Port Phillip Bay, Australia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46(6): 917-934.
- [8] 黄绍基,赵海洲. 质量衡算模型计算太湖底泥磷的交换量[J]. 环境科学, 1992, 13(1): 83-84.
HUANG Shao-ji, ZHAO Hai-zhou. Sediment-water exchange capacity of total phosphorus in Taihu Lake calculated by mass budget model[J]. *Environmental Science*, 1992, 13(1): 83-84.
- [9] Seiki T, Izawa H, Date E. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay[J]. *Water Research*, 1989, 23(2): 219-228.
- [10] Austin E R, Lee G F. Nitrogen release from lake sediments [J]. *J Wat Pollut Control Fed*, 1973, 45: 870-879.
- [11] Boers P, Van Hese O. Phosphorus release from the peaty sediments of the Loosdrecht Lakes(The Netherlands)[J]. *Water Research*, 1988, 22(3): 355-363.
- [12] Markert B E, Tesmer M G, Parker P E. In situ sediment oxygen demand sampler[J]. *Water Research*, 1983, 17(4): 603-605.
- [13] Vreča P. Carbon cycling at the sediment-water interface in a eutrophic mountain lake(Jezero na Planini pri Jezeru, Slovenia)[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(5): 671-680.
- [14] Jin X, Jiang X, Yao Y, et al. Effects of light and oxygen on the uptake and distribution of phosphorus at the sediment-water interface[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 357(1-3): 231-236.
- [15] Liikanen A, Martikainen P J. Effect of ammonium and oxygen on methane and nitrous oxide fluxes across sediment-water interface in a eutrophic lake[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(8): 1287-1293.
- [16] Soto-Jimenez M F, Paez-Osuna F, Bojorquez-Leyva H. Nutrient cycling at the sediment-water interface and in sediments at Chiricahueto marsh: A subtropical ecosystem associated with agricultural land uses

- [J]. *Water Research*, 2003, 37(4):719-728.
- [17] 范成新, 秦伯强. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面的物质交换[J]. 湖泊科学, 1998, 10(1):73-78.
FANG Cheng-xin, QIN Bo-qiang. Substance exchange across water-sediment interface in Meiliang Bay and Wuli Lake [J]. *Journal of Lake Science*, 1998, 10(1):73-78.
- [18] McDuff R E, Ellis R A. Determining diffusion coefficients in marine sediments: A laboratory study of the validity of resistivity techniques[J]. *American Journal of Science*, 1979, 279(6):666-675.
- [19] 内蒙古湖泊恢复治理项目-乌梁素海综合整治研究. 中国-瑞典-挪威合作项目[M].
Lakes restoration and governance of Inner Mongolia: Comprehensive remediation research of the Wuliangsu Lake. Collaborative Project of China-Sweden-Norway[M].
- [20] 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.
- [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. The Daihai Lake-lake environment and climate change[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:243-248.
Environmental Protection Administration of China. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:243-248.
- [23] 范成新, 张 路. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4):370-378.
FAN Cheng-xin, ZHANG Lu. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4):370-378.
- [24] 王志齐, 李 宝, 梁仁君, 等. 南四湖内源氮磷释放的对比研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(2):487-493.
WANG Zhi-qi, LI Bao, LIANG Ren-jun, et al. Comparative study on endogenous release of nitrogen and phosphorus in Nansi Lake, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2):487-493.
- [25] Jensen H S, Andersen F Ø. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from anaerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(3):577-589.
- [26] Jin X C, Wang S R, Pang Y, et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(2):288-295.
- [27] 张新明, 李华兴, 刘远金. 磷酸盐在土壤中吸附与解吸研究进展[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1):77-80.
ZHANG Xin-ming, LI Hua-xing, LIU Yuan-jin. Study progress of phosphate adsorption and desorption in soils[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1):77-80.
- [28] Kim L-H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(1):53-61.
- [29] 刘 杰, 郑西来, 陈 蕾, 等. 水库沉积物氮磷释放通量及释放规律研究[J]. 水利学报, 2012, 43(3):339-343.
LIU Jie, ZHENG Xi-lai, CHEN Lei, et al. Study on flux and release law of nitrogen and phosphorus of sediment in reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(3):339-343.
- [30] 吕昌伟, 何 江, 梁 英, 等. 岱海硅藻类浮游植物初级生产力 Si 限制初探[J]. 环境科学, 2010, 31(3):639-644.
LÜ Chang-wei, HE Jiang, LIANG Ying, et al. Examination of silicate limitation of primary production by diatoms phytoplankton in the Daihai Lake[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3):639-644.