

马迎群,迟明慧,温泉,等.嘉兴市北部湖荡区沉积物磷释放通量估算及影响因素研究[J].环境工程技术学报,2020,10(2):212-219.

MA Y Q, CHI M H, WEN Q, et al. Fluxes and influencing factors of phosphorus release in sediments in northern lacustrine areas of Jiaxing City[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2020, 10(2): 212-219.

嘉兴市北部湖荡区沉积物磷释放 通量估算及影响因素研究

马迎群,迟明慧,温泉,曹伟,秦延文*,刘志超,杨晨晨

中国环境科学研究院水环境管理研究室

摘要 为了解沉积物磷释放对水体磷污染的影响,以嘉兴市北部湖荡区为研究对象,结合薄膜扩散梯度技术(DGT)对湖荡区(汾湖、莲泗荡、北官荡)沉积物磷释放通量进行研究,分析磷释放影响因素,并对沉积物磷释放对上覆水体的影响进行了评估。结果表明:汾湖、莲泗荡和北官荡采样点沉积物-上覆水界面 DGT-P(溶解性有效态磷)浓度总体表现为莲泗荡(0.735 mg/L) > 北官荡(0.154 mg/L) > 汾湖(0.077 mg/L)。垂向分布上,3个湖荡采样点表层沉积物中 DGT-P 浓度均高于上覆水,但在沉积物-上覆水界面 ± 10 mm 范围内表现各不相同,其中汾湖采样点沉积物-上覆水界面 DGT-P 没有明显的浓度梯度,说明沉积物向上覆水释放磷能力较弱,而莲泗荡采样点呈现明显的浓度梯度,沉积物有较强的释放磷能力,北官荡采样点介于二者之间。各湖荡采样点沉积物-上覆水界面磷释放通量对上覆水体的影响有限,其中莲泗荡采样点磷释放通量最高,为 0.490 mg/(m²·d),对上覆水体的贡献率也最大(1.93%),表现为磷“源”;其次为北官荡采样点,其磷释放通量为 0.047 mg/(m²·d),对上覆水体的贡献率为 0.24%;汾湖采样点磷释放通量接近 0,表现为磷“汇”。相关性分析结果表明,铁氧化物还原溶解对沉积物-上覆水界面磷的迁移转化过程具有重要影响,同时有机质矿化过程对沉积物磷释放的影响也不容忽视。

关键词 磷;铁;薄膜扩散梯度;释放通量;沉积物

中图分类号:X524 文章编号:1674-991X(2020)02-0212-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20190090

Fluxes and influencing factors of phosphorus release in sediments in northern lacustrine areas of Jiaxing City

MAYingqun, CHI Minghui, WEN Quan, CAO Wei, QIN Yanwen*, LIU Zhichao, YANG Chenchen

Water Environmental Management and Research Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract In order to understand the effect of phosphorus release from sediment on water pollution, the diffusive gradients in thin-films technique (DGT) was introduced to clarify phosphorus fluxes and its influencing factors in sediments in Fen Lake, Liansidang Lake and Beiguandang Lake in northern lacustrine areas of Jiaxing City. The effect of phosphorus release from sediment on overlying water was evaluated. The results showed that concentrations of soluble available phosphorus (DGT-P) in sediment water interface (SWI) displayed various trend at three sampling sites and generally showed the following decreasing order: Liansidang Lake (0.735 mg/L) > Beiguandang Lake (0.154 mg/L) > Fen Lake (0.077 mg/L). In terms of vertical distribution, the concentrations of DGT-P in the surface sediments of the three lakes were higher than that of overlying water. But the situation was different within the range of ± 10 mm at the SWI; there was no obvious concentration gradient of DGT-P at the SWI of Fen Lake, indicating that the phosphorus release capacity of sediments to overlying water was weak, while that of Liansidang Lake presented an obvious concentration gradient and had a strong phosphorus release capacity, and that of Beiguandang Lake was between the two. From the perspective of the phosphorus release fluxes at the SWI, the phosphorus release flux of each lake sediment had a limited effect on the overlying water. Among them, the phosphorus release flux at the Liansidang Lake SWI was the highest (0.490 mg/(m²·d)), and its contribution to

收稿日期:2019-05-23

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07206-001-03,2017ZX07107-001);国家自然科学基金青年基金项目(41406098)

作者简介:马迎群(1982—),男,副研究员,主要从事水污染化学研究,mayq@craes.org.cn

* 责任作者:秦延文(1973—),女,研究员,博士,主要从事流域水环境污染物生物地球化学循环研究,qinyw@craes.org.cn

overlying water was also the highest (1.93%), which showed the source of phosphorus. The second was Beiguandang Lake, whose phosphorus release flux was 0.047 mg/(m²·d), and its contribution to overlying water was 0.24%. The phosphorus release flux at the SWI of Fen Lake was close to 0 and showed a phosphorus sink. Correlation analysis showed that the migration and transformation of phosphorus was significantly affected by the reduction and dissolution of iron oxides in SWI, meanwhile attention should also be paid to the influence of organic matter mineralization on phosphorus release in sediment.

Key words phosphorus; iron; diffusive gradients in thin-films technique (DGT); diffusion flux; sediment

磷是湖库水质的重要指示因子,也是富营养化水体的重要限制因子^[1]。在我国,天然水体尤其是内陆水体普遍受到磷限制,过量的磷输入会导致水体富营养化和发生水华。随着我国对水环境治理的不断加强,外源磷输入得到明显控制,来自内源沉积物磷释放的影响不容忽视^[2-4],在此背景下,控制内源磷污染成为湖库水污染治理的重要任务之一^[5-6]。明确磷在沉积物-上覆水界面的迁移转化过程对于深入了解沉积物内源磷释放机理及其对水体富营养化的影响具有重要意义。

原位被动采样技术是一种新型的环境污染物采样方法,可以在不影响介质环境的前提下收集目标物,能够反映污染物在被测体系中的真实浓度或时间平均浓度^[7],具有传统采样技术不可比拟的优势。薄膜扩散梯度技术(diffusive gradients in thin-films technique, DGT)是目前应用最为广泛的原位被动采样技术之一,在沉积物-上覆水界面污染物迁移转化过程研究中被广泛应用^[8-10]。笔者以太湖流域嘉兴市北部湖荡区为研究对象,利用DGT技术对北部湖荡区典型湖荡沉积物溶解性有效态磷(DGT-P)、溶解性有效态铁[DGT-Fe(II)]、溶解性有效态全铁(DGT-Fe)、溶解性有效态锰(DGT-Mn)浓度进行分析,在估算沉积物内源污染物释放通量的同时,研究沉积物-上覆水界面磷释放过程及影响因素,以期对沉积物内源磷迁移转化过程研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

嘉兴市地处浙江省东北部,在长江三角洲杭嘉湖平原水网区腹地地带,境内地势低平,平均海拔为3.7 m(吴淞高程),以北部秀洲区 and 嘉善县最为低洼。市域内水系密布,河道纵横,湖荡众多,大部分湖荡集中于秀洲区和嘉善县(北部湖荡区),其数量约占嘉兴市湖荡总数的82.4%,水域面积约占嘉兴市湖荡总水域面积的88.8%。面积较大的湖荡包括汾湖、梅家荡、莲泗荡、北官荡、南官荡、天花荡、西雁荡等。根据《2017年嘉兴市环境状况公

报》^[11],总磷是嘉兴市地表水主要污染物之一。随着嘉兴市水污染防治工作的不断推进,外源污染输入显著降低,沉积物总磷释放对水环境的影响越来越不容忽视。北部湖荡区是嘉兴市重要的雨洪调蓄和水体净化区,具有非常重要的生态功能,研究其沉积物总磷释放特点及影响因素对了解北部湖荡区的污染现状和实施水环境综合治理具有重要意义。

1.2 样品采集及分析

选择嘉兴市北部湖荡区较为典型的汾湖、莲泗荡和北官荡为主要研究区域,于2017年11月分别在3个湖荡靠近湖心位置(图1)采集沉积物柱状样品、上覆水和表层沉积物样品。由于铁、锰等氧化物对水体中磷的迁移转化过程具有重要影响^[8],同步分析水体中磷、铁、锰等浓度。

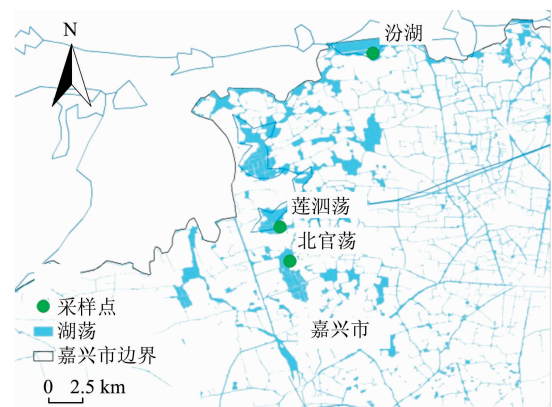


图1 3个湖荡采样点分布

Fig. 1 Distribution of three lacustrine sampling sites

1.2.1 上覆水样品的采集与处理

用采水器采集50 mL上覆水样品,经0.45 μm滤膜过滤后存于50 mL塑料瓶内,加入0.5 mL硝酸使pH≤2,于4℃保存,用于测定水体中铁、锰浓度;另取500 mL上覆水于500 mL棕色玻璃瓶中,加硫酸调节pH≤2,于4℃保存,用于测定水体中总磷浓度。

1.2.2 表层沉积物样品的采集与处理

用抓斗式重力采泥器采集表层沉积物样品,于

-20 °C 保存,在实验室中经冷冻干燥机(FD-1A-50,西安德派生物仪器有限公司)处理,研磨过 100 目(0.149 mm)筛后保存备用。经 HNO₃ + HF 微波消解后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7500cx, 美国)测定沉积物中的铁、锰等浓度^[12]。

1.2.3 沉积物柱状样品的采集与处理

用柱状采泥器(Uwitec, 奥地利)采集沉积物柱状样品。每个柱状样品长约 50 cm,采集时在柱状样表层保留部分上覆水以保持密封状态。柱状样用黑色塑料袋密封,带回实验室于 25 °C 恒温保存。

用购自南京智感环境科技有限公司的 DGT 装置进行 DGT-P、DGT-Fe(Ⅱ)、DGT-Fe、DGT-Mn 的提取。DGT 装置由滤膜、扩散膜、ZrO-Chelex 固定膜及起固定作用的塑料外套组成^[13]。取样时,将 DGT 装置垂直缓慢插入沉积物中,保留 2~4 cm 上覆水、11~13 cm 沉积物(装置有效长度 15 cm),静置 24 h 后取出,标记沉积物-上覆水界面位置,充分清洗装置表面泥土,将洗净后的装置放入自封袋中,加入少量去离子水保湿,密封保存待分析。DGT-P 和 DGT-Fe(Ⅱ)浓度委托南京智感环境科技有限公司测试,DGT-Fe、DGT-Mn 浓度采用 ICP-MS 测定。

1.3 数据处理和分析

1.3.1 沉积物-上覆水界面释放通量计算

基于 Fick's 第一定律计算沉积物-上覆水界面污染物释放通量,公式如下^[8,14-15]:

$$F = F_w + F_s = -\phi_w \times D_w \times \left(\frac{\partial C_{DGT}}{\partial X_w} \right)_{x=0} - \phi_s \times D_s \times \left(\frac{\partial C_{DGT}}{\partial X_s} \right)_{x=0} \quad (1)$$

$$D_s = \phi_s^2 \times D_w \quad (2)$$

式中: F 为某污染物在沉积物-上覆水界面的释放通量,mg/(m²·d), F 为正表明有效态元素由沉积物向上覆水释放, F 为负表明上覆水有效态元素被沉积物吸附; F_w 和 F_s 分别为污染物从上覆水到界面及从沉积物到界面的释放通量,mg/(m²·d); ϕ_w 和 ϕ_s 分别为水中孔隙度(取值 1)和沉积物中孔隙度(取值 0.9)^[16-17]; $\left(\frac{\partial C_{DGT}}{\partial X_w} \right)_{x=0}$ 和 $\left(\frac{\partial C_{DGT}}{\partial X_s} \right)_{x=0}$ 分别为上覆水和沉积物界面污染物的浓度梯度(选取距离界面 10 mm 内的浓度梯度),mg/(L·cm); D_w 和 D_s 分别为某污染物在上覆水体和沉积物中的扩散系数,10⁻⁶ cm²/s,各元素 D_w 取值见文献^[18-19]。

1.3.2 沉积物-上覆水界面有效态元素扩散迁移对上覆水体的贡献

假设分子扩散是沉积物物质迁移的主要途径,

且水体混合均匀,可以根据下式估算出沉积物有效态元素在沉积物-上覆水界面的扩散迁移对上覆水体的贡献率^[15,20]:

$$a = (F \times t)/(C \times h) \quad (3)$$

$$t = W/Q \quad (4)$$

式中: a 为沉积物-上覆水界面有效态元素扩散迁移对上覆水体的贡献率,%; t 为水体停留时间,d; C 为水体中该元素的浓度,mg/L; h 为水深,m; W 为湖荡贮水量,m³; Q 为湖荡平均流量,m³/s。

2 结果与讨论

2.1 沉积物-上覆水界面 DGT-P、DGT-Fe(Ⅱ)、DGT-Fe、DGT-Mn 浓度特征

汾湖、莲泗荡和北官荡采样点表层沉积物(0~54 mm)-上覆水(0~14 mm)界面 DGT-P、DGT-Fe(Ⅱ)、DGT-Fe 和 DGT-Mn 浓度如图 2 所示。由图 2 可知,汾湖、莲泗荡和北官荡采样点表层沉积物-上覆水界面 DGT-P 平均浓度分别为 0.077、0.735 和 0.154 mg/L,汾湖和北官荡采样点 DGT-P 浓度与 Ding 等^[16]在太湖的研究结果一致,而莲泗荡采样点 DGT-P 浓度高于太湖平均值,但低于太湖梅梁湾和东太湖^[21];DGT-Fe(Ⅱ)和 DGT-Fe 平均浓度以北官荡采样点最高,其次为莲泗荡采样点,汾湖采样点最低;DGT-Mn 平均浓度以汾湖采样点最高,莲泗荡和北官荡采样点相差不大。在垂向分布上,汾湖采样点 DGT-P、DGT-Fe(Ⅱ)和 DGT-Fe 浓度在沉积物-上覆水界面 -10~20 mm 有显著增加的趋势,其中 DGT-P 浓度在 -20 mm 处出现突变;莲泗荡采样点 DGT-P、DGT-Fe(Ⅱ)和 DGT-Fe 浓度均在沉积物-上覆水界面附近突然快速增加,并在 -10~-2 mm 达到高值;北官荡采样点各元素浓度总体呈现出自上覆水向沉积物逐渐增加的态势,无明显突变点。与其他元素表现不同,汾湖采样点 DGT-Mn 浓度最高,并在沉积物-上覆水界面 -4 mm 处突然增大,而莲泗荡和北官荡采样点 DGT-Mn 浓度相差不大,均表现为缓慢增加的趋势。可以看出,3 个湖荡采样点沉积物-上覆水及垂向沉积物中各元素均呈现较为明显的浓度梯度,但在接近沉积物-上覆水界面 ±10 mm 时,各湖荡采样点表现不一,其中汾湖采样点表层沉积物和上覆水中 DGT-P、DGT-Fe(Ⅱ)和 DGT-Fe 没有明显的浓度差,说明汾湖采样点表层沉积物向上覆水释放磷、铁能力较弱;而莲泗荡和北官荡采样点表层沉积物中 DGT-P、DGT-Fe(Ⅱ)、DGT-Fe 浓

度明显高于上覆水,存在明显的浓度梯度,从而产生一个由高浓度向低浓度的分子扩散作用^[3],导致莲泗荡和北官荡采样点沉积物向上覆水释磷、

铁能力较强;而 3 个湖荡采样点 DGT-Mn 浓度均表现为自沉积物向上覆水释放的趋势,其中以汾湖采样点表现最为突出。

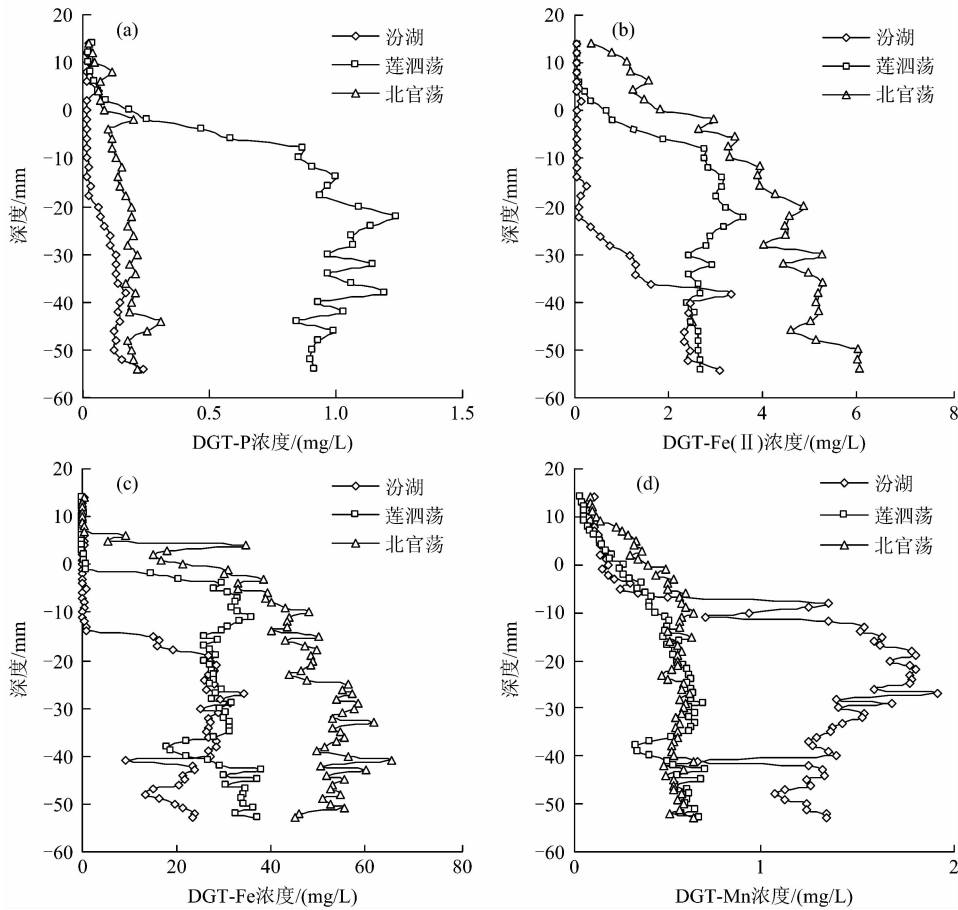


图 2 3 个湖荡采样点沉积物-上覆水界面及沉积物垂向 DGT-P、DGT-Fe(II)、DGT-Fe、DGT-Mn 浓度变化

Fig. 2 Vertical variation of DGT-P、DGT-Fe(II)、DGT-Fe and DGT-Mn concentration in the sediment water interface and core samples from three lacustrine sampling sites

2.2 沉积物-上覆水界面磷、铁和锰释放通量

汾湖、莲泗荡和北官荡采样点沉积物-上覆水界面磷、铁、锰的释放通量如图 3 所示。总体来看,除汾湖采样点 DGT-P 释放通量接近 0 外,其他湖荡采样点沉积物均表现为“源”。3 个湖荡采样点沉积物 DGT-P 释放通量差异显著,其中莲泗荡采样点 DGT-P 释放通量最大,为 0.490 mg/(m²·d),是北官荡采样点[0.047 mg/(m²·d)]的 10 倍;汾湖、莲四荡、北官荡采样点的 DGT-Fe(II)释放通量分别为 0.007、1.435 和 0.938 mg/(m²·d),DGT-Fe 释放通量分别为 0.046、12.814 和 20.634 mg/(m²·d),DGT-Mn 释放通量分别为 0.358、0.203 和 0.227 mg/(m²·d)。与相关研究结果相比(表 1),3 个湖荡采样点沉积物-上覆水界面磷释放通量与滇池福保湾^[22]、太湖^[16]及太湖梅梁湾^[21]、红枫湖^[7]相差不大,高

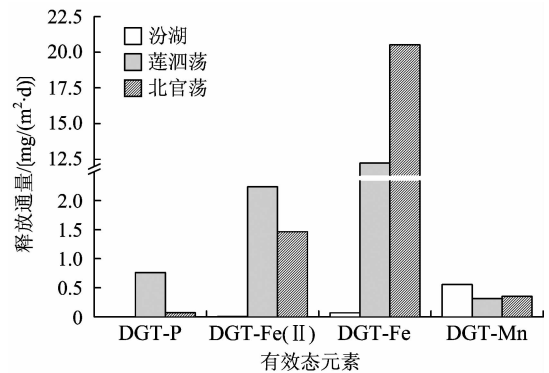


图 3 各湖荡采样点沉积物-上覆水界面磷、铁和锰释放通量

Fig. 3 Release fluxes of phosphorus, iron and manganese in sediment water interface at three lacustrine sampling sites

于三峡库区^[15]、巢湖^[23],但低于东太湖^[21]和杜塘水库^[24]。

表 1 不同水体沉积物-上覆水界面磷释放通量比较

Table 1 Comparison of phosphorus fluxes in sediment water interface in different basins

水体	磷释放通量/[mg/(m ² ·d)]
红枫湖 ^[7]	0.323~0.619
三峡库区干流 ^[15]	-0.0017~0.0055
三峡库区支流 ^[15]	-0.0016~0.0068
太湖 ^[16]	-0.21~0.65
太湖梅梁湾 ^[21]	0.058~0.553
东太湖 ^[21]	0.18~1.03
滇池福保湾 ^[22]	0.118~0.265
巢湖 ^[23]	-0.027~0.0063
杜塘水库 ^[24]	1.14~1.44
嘉兴市北部湖荡区(本研究)	-0.0004~0.490

莲泗荡和北官荡地处嘉兴市秀洲区,工业企业发达,农田和水产养殖分布也较多,大量的磷输入导致莲泗荡和北官荡沉积物中较高的磷浓度(总磷浓度分别为 829.91 和 862.94 mg/kg)。虽然莲泗荡和北官荡沉积物中总磷浓度相差不大,但其 DGT-P 释放通量却相差近 10 倍,这可能与这 2 个湖荡沉积物不同的理化性质有关。由图 3 可以看出,莲泗荡采样点沉积物 DGT-Fe(II) 释放通量为 1.435 mg/(m²·d),是北官荡[0.938 mg/(m²·d)]的 1.53 倍,莲泗荡采样点沉积物中较强的铁氧化物还原过程可能与其较高的磷释放通量有关。汾湖现已发展成为体育休闲中心,农田、水产养殖等造成的污染压力较小,其沉积物中总磷浓度为 767.14 mg/kg,小于莲泗荡和北官荡,加之其沉积物中较弱的 DGT-Fe(II) 扩散过程,导致其沉积物-上覆水界面 DGT-P 释放通量非常低。

2.3 沉积物-上覆水界面磷释放影响因素

磷的生物地球化学过程受生物、物理、化学等多种因素影响,如温度、Eh、pH、溶解氧(DO)、微生物以及有机质等都可能影响沉积物-上覆水界面磷的交换和吸附/解吸过程^[20,25-27]。铁氧化物在磷循环过程中起着关键的调控作用^[26],是水体中最重要的磷库^[8],在氧化环境下,铁氧化

物可以通过表面吸附和沉淀作用去除水体中的磷;在缺氧或厌氧环境中,铁氧化物发生还原溶解,使吸附于其中的磷重新释放到水体中^[28-29]。本研究中,汾湖、莲泗荡和北官荡采样点沉积物-上覆水界面 DGT-P 与 DGT-Fe(II)、DGT-Fe 与 DGT-Mn 浓度之间均存在极显著正相关关系(表 2),而从相关系数来看,DGT-P 浓度与 DGT-Fe(II) 浓度的相关性最强,说明沉积物-上覆水界面磷向上覆水的扩散与 Fe(II) 浓度密切相关,即铁氧化物的还原促进了沉积物中磷向上覆水的释放。结合图 3 可知,汾湖采样点表层沉积物 Fe(II) 和 Fe 释放通量分别为 0.007 和 0.046 mg/(m²·d),显著低于莲泗荡和北官荡采样点,说明莲泗荡和北官荡采样点表层沉积物中铁氧化物的还原过程更为活跃,导致这 2 个湖荡采样点沉积物中磷的释放通量较高。

除铁氧化物还原溶解导致沉积物中磷的扩散外,有机质矿化分解等过程也是沉积物中磷向上覆水释放的重要影响因素^[30],因此,也不应忽视这部分沉积物中磷的释放。研究发现,沉积物孔隙水中可溶性活性磷浓度不仅受 Fe(II) 浓度影响,还受沉积物中有机质输入的影响^[31-32];沉积物中可溶性磷的释放通量是沉积物中有机质矿化速率的函数,有机质的矿化可导致沉积物内源磷等营养盐向上覆水释放^[32-34];沉积物中有机质的降解需要消耗底层水体中的溶解氧^[35],使沉积环境处于相对还原条件,进一步导致其中的铁氧化物更容易发生溶解,进而促进沉积物中磷的释放^[15]。经检测发现,汾湖采样点沉积物中有机质浓度为 2.29%,显著低于莲泗荡和北官荡采样点(分别为 4.27% 和 5.63%),同时汾湖采样点沉积物中总磷浓度也较莲泗荡和北官荡采样点低,这也可能导致莲泗荡和北官荡采样点沉积物中有机质在矿化过程中释放更多的磷。

综上,嘉兴市北部湖荡区沉积物磷扩散是多种因素共同作用的结果,其中铁氧化物还原溶解和有机质矿化过程均可能对湖荡沉积物磷扩散产生重要影响。锰虽然也与磷密切相关,但因 DGT-Mn 的垂向变化(图 2)和释放通量(图 3)均没有与磷表现出一致性,其对沉积物磷扩散的影响还需进一步探讨。

表 2 不同湖荡采样点沉积物-上覆水界面 DGT-P、DGT-Fe(II)、DGT-Fe、DGT-Mn 浓度相关性分析

Table 2 Correlations between DGT-P、DGT-Fe(II)、DGT-Fe and DGT-Mn concentrations in samples from three lacustrine sampling sites

采样点	指标	DGT-P	DGT-Fe(II)	DGT-Fe	DGT-Mn
汾湖	DGT-P	1			
	DGT-Fe(II)	0.909 **	1		
	DGT-Fe	0.794 **	0.602 **	1	
	DGT-Mn	0.545 **	0.374 *	0.832 **	1
莲泗荡	DGT-P	1			
	DGT-Fe(II)	0.978 **	1		
	DGT-Fe	0.884 **	0.910 **	1	
	DGT-Mn	0.912 **	0.909 **	0.922 **	1
北官荡	DGT-P	1			
	DGT-Fe(II)	0.874 **	1		
	DGT-Fe	0.837 **	0.912 **	1	
	DGT-Mn	0.758 **	0.853 **	0.930 **	1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

2.4 沉积物-上覆水界面各元素扩散迁移对上覆水体的贡献分析

由 2.3 节可以看出,各湖荡采样点表层沉积物中磷的释放通量均与 DGT-Fe(II)相关性最强,因此选取 DGT-Fe(II)计算沉积物-上覆水界面铁扩散迁移对上覆水体的贡献,磷、铁、锰扩散对上覆水体贡献计算结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,除汾湖采样点沉积物-上覆水界面磷扩散贡献率为负,表现为磷“汇”外,其余采样点均表现为“源”,其中莲泗荡和北官荡采样点沉积物中磷扩散对上覆水体的贡献率分别为 1.93% 和 0.24%,大于三峡水库(-0.012%~0.150%)^[15],但小于福建山仔水库(0.74%~5.96%,平均 2.33%)^[36]。与磷表现相似,各湖荡采样点沉积物铁扩散对上覆水体的贡献率也表现为莲泗荡采样点最大(11.33%),北官荡采样点次之(8.50%),汾湖采样点最小(0.09%)。各湖荡采样点沉积物锰扩散对上覆水体的贡献率与铁和磷相反,说明较之锰,铁氧化物是影响 3 个湖荡采样点沉积物磷扩散的主要因素之一。莲泗荡和北官荡采样点沉积物磷扩散对上覆水体的贡献率较低,而铁扩散的贡献率较高,造成磷、铁扩散贡献率不一致的原因可能是多方面的。由于沉积物-上覆水界面磷扩散过程受多种因素共同作用,除与沉积物中铁元素氧化还原过程密切相关外,有机质矿化、水体扰动等因素均可导致沉积物中磷的释放,尤其在浅水湖泊中,水体扰动可促进沉积物中磷的释放^[20]。研究区所属平原河网区均为浅水湖荡,水体扰动频繁,因此沉积物实际的磷扩散通量要高于本

研究的计算结果。另外,与相关研究相比^[36],3 个湖荡水体停留时间较短,仅为 10.4~11.8 d,沉积物释放的磷被快速稀释,也可造成沉积物磷释放对上覆水体的贡献率较低。不仅如此,从计算方法来看,为更好地反映沉积物磷扩散对水体总磷污染的影响,本研究在计算沉积物磷扩散对上覆水体的贡献时选取了上覆水体总磷浓度,而与相关文献^[36]利用活性磷酸盐浓度进行计算不同,由于水体中活性磷酸盐浓度小于总磷浓度,这也可能造成计算结果较相关研究偏低。因此,针对湖荡区沉积物磷扩散,一方面应防止沉积物-上覆水界面磷-铁协同效应引起的对上覆水磷污染的影响,另一方面仍然不能忽视其他因素在沉积物磷释放过程中的作用。

表 3 3 个湖荡采样点沉积物磷、铁和锰扩散对上覆水体的贡献

Table 3 Contributions of diffusion of phosphorous, iron and manganese from sediment to the overlying water in three lacustrine sampling sites

项目	指标	汾湖	莲泗荡	北官荡
释放通量/ [mg/(m ² ·d)]	DGT-P	-0.000 4	0.490	0.047
	DGT-Fe(II)	0.007	1.435	0.938
	DGT-Mn	0.358	0.203	0.227
上覆水体浓度/ (mg/L)	磷	0.03	0.12	0.09
	铁	0.05	0.06	0.05
	锰	0.05	0.15	0.15
贡献率/%	磷	-0.01	1.93	0.24
	铁	0.09	11.33	8.50
	锰	4.67	0.64	0.69

注:汾湖水深为 1.81 m,莲泗荡为 2.24 m,北官荡为 2.30 m。

3 结论

(1) 嘉兴市北部湖荡区汾湖、莲泗荡和北官荡采样点沉积物-上覆水界面 DGT-P、DGT-Fe(II)、DGT-Fe、DGT-Mn 浓度表现出明显的差异性,其中莲泗荡采样点 DGT-P 和 DGT-Fe(II) 浓度显著高于汾湖和北官荡采样点。

(2) 汾湖采样点沉积物-上覆水界面磷释放通量接近 0, 表现为轻微沉积特征; 莲泗荡和北官荡采样点沉积物-上覆水界面磷均表现为自沉积物向上覆水释放的特征, 尤其以莲泗荡采样点磷释放通量最高, 为 $0.490 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

(3) 沉积物磷释放对上覆水体的贡献较为有限, 各湖荡采样点贡献率为 $-0.01\% \sim 1.93\%$, 远低于沉积物铁释放对上覆水体的影响, 但由于沉积物释放磷过程与铁氧化物的还原密切相关, 因此仍应注意由铁氧化物还原溶解导致的沉积物磷释放对上覆水磷污染的影响。

参考文献

- [1] BAIG J A, KAZI T G, ARAIN M B, et al. Evaluation of arsenic and other physico-chemical parameters of surface and ground water of Jamshoro, Pakistan [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166: 662-669.
- [2] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式 [J]. *科学通报*, 2003, 48 (17): 1822-1831.
- [3] 刘静静, 董春颖, 宋英琦, 等. 杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算 [J]. *生态学报*, 2012, 32 (24): 7932-7939.
LIU J J, DONG C Y, SONG Y Q, et al. The seasonal variations of nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (24): 7932-7939.
- [4] 翁圆, 苏玉萍, 张玉珍, 等. 福建山仔水库不同季节表层沉积物内源磷负荷分析 [J]. *湖泊科学*, 2014, 26 (6): 871-878.
WENG Y, SU Y P, ZHANG Y Z, et al. Internal phosphorus loadings and fluxes of surface sediments in four seasons in Shanzi Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26 (6): 871-878.
- [5] YIN H, DOUGLAS G B, CAI Y, et al. Remediation of internal phosphorus loads with modified clays, influence of fluvial suspended particulate matter and response of the benthic macroinvertebrate community [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 101-110.
- [6] 黎睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35 (6): 1831-1839.
LI R, WANG S R, XIAO S B, et al. Sediments phosphorus forms and loading in the lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River and Yunnan Plateau, China [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35 (6): 1831-1839.
- [7] 罗婧, 陈敬安, 王敬富, 等. 利用薄膜扩散梯度技术估算红枫湖沉积物磷释放通量 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34 (5): 1014-1020.
LUO J, CHEN J A, WANG J F, et al. Estimation of the phosphorus flux from the sediment of Hongfeng Lake using the Zr-oxide diffusive gradient in thin films (Zr-oxide DGT) technique [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34 (5): 1014-1020.
- [8] GAO Y, LIANG T, TIAN S, et al. High-resolution imaging of labile phosphorus and its relationship with iron redox state in lake sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 466-474.
- [9] ZHANG H, DAVISION W. Use of diffusive gradients in thin-films for studies of chemical speciation and bioavailability [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12 (2): 85-101.
- [10] SUI D, SUN T, FAN H, et al. Diffusive gradients in thin-films technique; a technique for in situ sampling [J]. *Chemistry*, 2007, 70 (12): 954-960.
- [11] 2017 年嘉兴市环境状况公报 [A]. 嘉兴: 嘉兴市环境保护局, 2018.
- [12] 马迎群, 温泉, 秦延文, 等. 辽宁省红透山铜矿区土壤中重金属迁移特征研究 [J]. *环境污染与防治*, 2013, 35 (9): 1-8.
MA Y Q, WEN Q, QIN Y W, et al. Migration characteristic of heavy metals in soil around Hongtoushan copper mining area in Liaoning Province [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2013, 35 (9): 1-8.
- [13] 李超, 王丹, 杨金燕, 等. 巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36 (6): 2077-2084.
LI C, WANG D, YANG J Y, et al. In situ high-resolution analysis of labile phosphorus in sediments of Lake Chaohu [J]. *Environmental Science*, 2015, 36 (6): 2077-2084.
- [14] XU D, GAO B, GAO L, et al. Characteristics of cadmium remobilization in tributary sediments in Three Gorges Reservoir using chemical sequential extraction and DGT technology [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 1094-1101.
- [15] 牛风霞, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡库区沉积物秋冬末初的磷释放通量估算 [J]. *环境科学*, 2013, 34 (4): 1308-1314.
NIU F X, XIAO S B, WANG Y C, et al. Estimation of releasing fluxes of sediment phosphorus in the Three Gorges Reservoir during late autumn and early winter [J]. *Environmental Science*, 2013, 34 (4): 1308-1314.
- [16] DING S, HAN C, WANG Y, et al. In situ, high-resolution imaging of labile phosphorus in sediments of a large eutrophic lake [J]. *Water Research*, 2015, 74: 100-109.
- [17] GAO Y, LESYEN L, GILLAN D, et al. Geochemical behavior of trace elements in sub-tidal marine sediments of the Belgian coast [J]. *Marine Chemistry*, 2009, 117: 88-96.
- [18] LI Y H. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1974, 38: 703-714.
- [19] CORNETT J, CHANT L, RISTO B. Arsenic transport between

- water and sediments[J]. *Hydrobiologia*,1992,235/236:533-544.
- [20] DING S M, CHEN M S, GONG M D, et al. Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625:872-884.
- [21] 时丹,丁士明,许笛,等. 利用薄膜扩散平衡技术分析沉积物间隙水溶解态反应性磷[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(6): 768-774.
- SHI D, DING S M, XU D, et al. Determination of soluble reactive phosphorus in porewaters of sediments using the technique of diffusive equilibration in thin films[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(6): 768-774.
- [22] 李宝,丁士明,范成新,等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. *环境科学*, 2008, 29(1):114-120.
- LI B, DING S M, FAN C X, et al. Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao bay in Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1):114-120.
- [23] 夏守先,杨丽标,张广萍,等. 巢湖沉积物-水界面磷酸盐释放通量研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(2):322-327.
- XIA S X, YANG L B, ZHANG G P, et al. Benthic flux of phosphate across sediment-water interface in Lake Chaohu [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 322-327.
- [24] 钟厚璋,苏玉萍,何灵,等. 杜塘水库春季沉积物内源磷的释放速率研究[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 26(6):85-91.
- ZHONG H Z, SU Y P, HE L, et al. Phosphorus release in the sediment of Dutang Reservoir in spring [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 26(6): 85-91.
- [25] 徐洋. 氧化还原环境制约湖泊沉积物内源磷释放过程研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2015.
- [26] 尹大强,覃秋荣,阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. *湖泊科学*, 1994, 6(3):240-244.
- YIN D Q, QIN Q R, YAN H. Effects of environmental factors on release of phosphorus from sediments in Wuli Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(3):240-244.
- [27] 钱燕,陈正军,吴定心,等. 微生物活动对富营养化湖泊底泥磷释放的影响[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(4):35-40.
- QIAN Y, CHEN Z J, WU D X, et al. Effects of microorganisms on phosphorus release from sediment of eutrophic lake [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(4):35-40.
- [28] BAKEN S, SALAETS P, DESMET N, et al. Oxidation of iron causes removal of phosphorus and arsenic from streamwater in groundwater-fed lowland catchments [J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(5):2886-2894.
- [29] MURRAY G C, HESTERBERG D. Iron and phosphate dissolution during abiotic reduction of ferrihydrite-boehmite mixtures [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70:1318-1327.
- [30] 王雨春,万国江,黄荣贵,等. 湖泊现代化沉积物中磷的地球化学作用及环境效应[J]. *重庆环境科学*, 2000, 22(4):39-41.
- WANG Y C, WANG G J, HUANG R G, et al. Geochemistry and environmental effect of modern sediments in Lake Baihua [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(4):39-41.
- [31] ECKERROT A, PETTERSSON K. Pore water phosphorus and iron content ratios in a shallow eutrophic lake-indications of bacterial regulation [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 253(1/2/3):165-177.
- [32] 朱广伟,陈英旭. 沉积物中共有机质的环境行为研究进展[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(3):272-279.
- ZHU G W, CHEN Y X. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(3):272-279.
- [33] D'ANGELO E M, REDDY K R. Diagenesis of organic matter in a wet land receiving hypereutrophic lake water; I. distribution of dissolved nutrients in the soil and water column [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5):928-936.
- [34] 闫兴成,王明玥,许晓光,等. 富营养化湖泊沉积物有机质矿化过程中碳、氮、磷的迁移特征[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(2):306-313.
- YAN X C, WANG M Y, XU X G, et al. Migration of carbon, nitrogen and phosphorus during organic matter mineralization in eutrophic lake sediments [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(2):306-313.
- [35] 何延召,柯凡,冯慕华,等. 巢湖表层沉积物中生物易降解物质成分特征与分布规律[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(1):40-49.
- HE Y Z, KE F, FENG M H, et al. Characteristics and distribution of biodegradable compounds of surface sediments in Lake Chaohu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(1):40-49.
- [36] 苏玉萍,林佳,何灵,等. 福建省山仔水库沉积物磷对水体磷浓度贡献的估算[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(6):748-754.
- SU Y P, LIN J, HE L, et al. Calculation of the contribution of the sediment phosphorus to the phosphorus concentration of the water body of Shanzi deep reservoir in Fujian Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(6):748-754. ◇