

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0224

张友, 宋佳伟, 吕迎春, 等. 2017. 荣成天鹅湖沉积物有机磷的生物有效性及其时空动态[J]. 环境科学学报, 37(12): 4629-4635

Zhang Y, Song J W, Lü Y C, et al. 2017. Bioavailability and variations of organic phosphorus in sediments of Swan Lake, Rongcheng [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 37(12): 4629-4635

荣成天鹅湖沉积物有机磷的生物有效性及其时空动态

张友^{1,2,4}, 宋佳伟^{1,2}, 吕迎春¹, 徐刚^{1,*}, 高丽³

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 烟台大学, 烟台 264003

4. 铜仁职业技术学院, 铜仁 554300

收稿日期: 2017-05-09

修回日期: 2017-06-13

录用日期: 2017-06-13

摘要: 有机磷是沉积物磷的重要组成部分, 有机磷经酶水解后可以提供活性磷. 研究沉积物有机磷的生物有效性及其变化规律对于深入了解湖泊富营养化形成机制具有重要意义. 本研究选取富营养化的海岸泻湖—荣成天鹅湖湿地为研究对象, 通过采集表层沉积物, 结合酶水解技术分析了有机磷的生物有效性及其时空变化规律. 结果表明, 天鹅湖沉积物有机磷含量为 107.9~161.9 mg·kg⁻¹, 平均含量为 125.3 mg·kg⁻¹. 其中潜在生物有效性磷即酶水解有机磷含量为 21.8~100.3 mg·kg⁻¹, 平均含量为 53.2 mg·kg⁻¹, 占有机磷含量的 26%~56%. 有机磷的潜在生物有效性大小遵循: 植酸磷 (21.5 mg·kg⁻¹) ≈ 二酯磷 (20.7 mg·kg⁻¹) > 磷酸单酯磷 (14.1 mg·kg⁻¹). 酶水解有机磷 (包括 Monoester-P、Phytic-P) 的含量呈夏秋低, 冬春高的特点. 有机磷空间分布不均衡, 有机磷主要分布集北部入河口和南部藻类区域, 这和不同方位污染物的来源、水生动植物的分布和沉积物粒度等差异有关. 相关性分析表明, 金属氧化物 (Al、Fe、Mg、Ca) 是有机磷的主要结合介质, 金属氧化物含量和形态变化将决定有机磷分解矿化和生物有效性. 总之, 有机磷的水解是水体活性磷的重要补偿途径, 也是维持天鹅湖富营养化的重要机制. 在水体磷污染治理过程中应把有机磷纳入评价范畴, 应该防止沉积物有机磷的矿化分解.

关键词: 沉积物; 磷水解技术; 有机磷; 生物有效性; 天鹅湖

文章编号: 0253-2468(2017)12-4629-07

中图分类号: X17

文献标识码: A

Bioavailability and variations of organic phosphorus in sediments of Swan Lake, Rongcheng

ZHANG You^{1,2,4}, SONG Jiawei^{1,2}, LÜ Yingchun¹, XU Gang^{1,*}, GAO Li³

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3. Yantai University, Yantai 264003

4. Tongren Polytechnic College, Tongren 554300

Received 9 May 2017;

received in revised form 13 June 2017;

accepted 13 June 2017

Abstract: Organic phosphorus is an important source of soluble phosphorus via enzyme hydrolysis. It is of great significance to study the bioavailability of organic phosphorus in order to fully understand the mechanism of lake eutrophication. The surface sediments have been collected from a eutrophic coastal lagoon—Swan Lake of Rongcheng. The enzymatic hydrolysis has been used to analyze the bioavailability of organic phosphorus and its temporal and spatial variation. The results show that the contents of organic phosphorus in Swan Lake was 107.9~161.9 mg·kg⁻¹ with mean content of 125.3 mg·kg⁻¹. The content of enzymatic hydrolysis organic phosphorus (EHP) was 21.8~100.3 mg·kg⁻¹ with mean content of 53.2 mg·kg⁻¹ which accounted for 26%~56% of the organic phosphorus. The bioavailability of EHP followed the order of phytic-P (21.5 mg·kg⁻¹) ≈ Diester-P (20.7 mg·kg⁻¹) > Monoester-P (14.1 mg·kg⁻¹). The organic phosphorus was concentrated in the estuary and the center lake, which was attributed to the different phosphorus sources, the distribution of aquatic animals and algae and the sediments grain size. Results of The correlation analysis suggest that organic phosphorus was mainly combined with metal oxides (Al、Fe、Mg、Ca) which indicates that the content and the variation of metal oxides would control the hydrolysis and bioavailability of organic phosphorus. In conclusion, the hydrolysis of organic phosphorus played an important role in the source of soluble phosphorus and to a certain extent caused the eutrophication of Swan lake. As a result, much effort should be made on organic phosphorus in the amendments of water pollution.

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41573120,41273130)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41573120,41273130)

作者简介: 张友 (1990—), 男, E-mail: youzhang@yic.ac.cn; * **通讯作者 (责任作者)**, E-mail: gxu@yic.ac.cn

Biography: ZHANG You (1990—), male, E-mail: youzhang@yic.ac.cn; * **Corresponding author**, E-mail: gxu@yic.ac.cn

Keywords: sediment; enzymatic hydrolysis; organic phosphorus; bioavailability; Swan Lake

1 引言 (Introduction)

磷是造成水体富营养化的关键营养元素(王海军等,2009),有机磷(OP)是湖泊总磷的重要组成部分,在沉积物中可占总磷(TP)的20%~60%(Zhang *et al.*,2008;刘超等,2013).夏季藻类大量爆发时,活性磷不足以维持藻类的生长时,有机磷循环供磷成为活性磷主要来源(杨宏伟等,2012).研究有机磷的组成及转化特征是深入了解有机磷循环过程及其对富营养化贡献的重要环节.有机磷由于其化学结构复杂种类多样,同时受研究技术和方法等因素的限制(Turner *et al.*,2005;陆瑾等,2013),对环境磷的研究主要集中在无机磷(Wu *et al.*,2016;曹文卿等,2010;高丽等,2013;卢瑛等,2003),而对有机磷的研究相对有限(Hu *et al.*,2009).

目前针对有机磷的研究主要有化学连续提取法、核磁共振光谱技术及酶水解技术(朱广伟等,2003;熊强,2014),化学连续提取法中常用 Ivanoff 分级方法将有机磷分为活性、中活性、非活性、残渣有机磷.该法操作简单容易掌握,但先酸后碱的提取程序可能导致有机磷水解,从而低估有机磷的含量,其次该法只能提供有机磷的简单分类,不能表征有机磷分子结构.核磁共振光谱技术是有机磷研究强有力工具.该方法可以检测磷酸盐、正磷酸盐、单酯有机磷、二酯有机磷、焦磷酸盐和多聚磷酸盐(陆瑾,2013).但由于沉积物中各形态有机磷含量差异较大,核磁共振光谱技术较难检出一些含量极低的有机磷种类(Turner *et al.*,2005).且在测定过程中(强碱性和浓缩时间太长时间条件下)可能会造成不稳定有机磷水解或者图像模糊(朱广伟等,2003;熊强,2014).

近年来,商品化磷酸单酯酶、二酯酶和植酸酶被应用到环境有机磷的研究中(熊强等,2014;何宗健等,2014;Zhu *et al.*,2013),该方法可在较温和的实验环境下分析水体和沉积物有机磷的生物有效

性,从而避免了部分有机磷水解.李凌萍(2015)利用酶水解技术研究了滇池有机磷对水污染的贡献.结果表明,入湖河流输入湖泊酶水解磷总量为 $10.02 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,并且以单酯磷的含量最高.Zhu 等(2013)利用酶水解技术分析滇池表层沉积物有机磷形态及其生物有效性,发现滇池沉积物中 12.1%~27.2%的有机磷具有潜在生物可利用性.

滨海湿地是磷的“汇”、“源”和“转化器”,对保护近海海洋环境具有重要作用(高丽等,2009).荣成天鹅湖湿地是黄海和渤海交汇处最重要的湿地之一,近年来,由于人类活动的影响,天鹅湖湿地的生态环境恶化,藻类频繁爆发,泥沙淤积、天鹅等生物的生存环境告急,湿地功能退化(邵雪琳等,2015).因此,本研究以滨海荣成天鹅湖湿地为研究对象,利用酶水解技术研究了天鹅湖沉积物有机磷的生物有效性及其季节变化规律,这有助于了解水环境中磷的循环过程与再生机制,也为生态环境评价和治理提供科学依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 样品采集、保存和处理

分别在2015年9、12月,2016年3、6月,利用GPS全球定位系统在荣成天鹅湖全湖均匀选取15个采样点(高丽等,2009).用彼得森采泥器采集表层沉积物,装入塑料密封袋置于保温箱中,带入实验室经冷冻干燥,过2mm筛后,保存待分析.

2.2 样品处理与分析

选择来自Sigma公司的碱性磷酸酶(Alkaline Phosphatase, APase)(活性 $28 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$)、磷酸二酯酶(Phosphodiesterase, PDEase)(活性 $0.02 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$)及植酸酶(Phytase)(活性 $0.03 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$)等3种酶,并分别配置成活性为 $1 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的碱性磷酸酶、 $0.02 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的磷酸二酯酶和 $0.06 \text{ U} \cdot \text{mL}^{-1}$ 植酸酶.3种酶溶液在合适的pH和温度条件下进行组合,具体见表1.

表1 磷酸酶组合

Table 1 Combination of phosphatases

酶溶液	缓冲溶液	pH	水解温度/°C	目标水解有机磷
APase	Tris-HCl	9.0	37	磷酸单脂磷+聚合态磷
APase+PDEase	Tris-HCl	9.0	37	磷酸二脂磷+磷酸单脂磷+聚合态磷
APase+PDEase+Phytase	Tris-HCl	7.0	37	植酸磷+磷酸二脂磷+磷酸单脂磷+聚合态磷

沉积物样品提取固液比为 1:30, 采用 $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH} + 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ EDTA}$ 提取, 提取时间为 8 h. 然后在 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 15 min, 保留上层清液(张友等, 2017). 取 2 mL 沉积物提取液于 25 mL 比色管中, 添加 0.5 mL 相应的磷酸酶组合溶液(表 1). 分别加入 $0.05 \text{ mL MgCl}_2 (0.002 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1})$ 、 $0.05 \text{ mL } 0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaN_3 (Feuillade and Dorioz, 1992). 将比色管中的混合液密封后置于恒稳摇床中, 在对应温度下(表 1)恒温水解 16 h, 取出后冷却至室温, 定容后磷钼蓝比色法测定正磷酸盐含量. 根据酶水解前后的差值, 得出不同的酶水解出正磷酸盐的含量即对应有机磷的含量.

沉积物总磷、无机磷、有机磷参照 SMT 法(俞振飞等, 2013); 沉积物 pH 值采用酸度计法测定(水土比为 1:2.5), 粒径测量使用英国马尔文公司的 Mastersizer2000 (英国) 激光粒度仪测定, 沉积物 Ca、Fe、Al、Mn、Mg 采用 ICP-OES-7500 测定.

2.3 数据处理与分析

试验数据处理与分析在 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件上进行, 利用 Surfer.11 软件绘图.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 天鹅湖沉积物理化参数

天鹅湖沉积物理化参数如表 2 所示. 天鹅湖沉积物以粉粒和砂粒为主, 粘粒含量较少, 土壤质地为砂壤土. 沉积物中的 Al、Ca、Mg、Mn、Fe 等金属氧化物是与磷相结合的重要介质, 金属氧化物表面的吸附、解吸和沉淀等界面反应影响和决定磷在陆地和水环境中的形态、迁移和循环过程. 表层沉积物 pH 均值为 7.8, 表层沉积物偏碱性. 沉积物表层有机质 (OM) 通过内源负荷的循环促进营养物质的

表 2 天鹅湖沉积物理化性质

Table 2 The physical and chemical properties of sediments in Swan lake

类别	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数
粘粒	2.8%	17.8%	10.3%	5.5%	0.5%
粉粒	14.7%	73.3%	44.8%	21.2%	0.5%
砂粒	10.2%	81.7%	44.9%	26.5%	0.6%
Al/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.8	4.17	2.1	1.0	0.5
Ca/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.6	13.6	3.8	3.2	0.8
Mg/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.0	7.2	3.1	1.6	0.5
Mn/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.006	0.4	0.1	0.1	1.1
Fe/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.6	6.2	2.8	1.7	0.6
pH	7.5	8.1	7.8	0.2	0.02
OM	2.1%	12.6%	4.5%	2.6%	0.6%

再生, 是富营养化过程的初始驱动因素(陈芳等, 2007). 沉积物有机质含量低于我国一些内陆湖泊湿地, 沉积物有机质含量低可能跟质地偏砂有关, 一般来说粘土含量越高的土壤, 有机质越丰富(Zhang *et al.*, 2008).

3.2 天鹅湖沉积物磷含量及其季节变化

天鹅湖沉积物有机磷含量如表 3 所示, 天鹅湖沉积物总磷、无机磷和有机磷含量分别为 $374.7 \sim 496.8$ 、 $262.3 \sim 334.9$ 和 $107.9 \sim 161.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值含量分别为 424.0 、 298.6 和 $125.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 有机磷中潜在的生物有效性磷即酶水解有机磷 (EHP) 含量为 $21.8 \sim 100.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $53.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. EHP 占有有机磷含量的 26%~56%, 即说明 26%~56% 的有机磷具有潜在的生物有效性. 其中, 磷酸单酯磷 (Monoester-P) 含量为 $7.5 \sim 17.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占有有机磷的 6%~12%; 二酯磷 (Diester-P) 含量为 $12.4 \sim 27.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占有有机磷的 10%~24%. 植酸磷 (Phytic-P) 含量为 $10.9 \sim 33.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占有有机磷的 13%~18%. 显著性比较显示, 有机磷潜在的生物有效性大小顺序遵循: 植酸磷 ($21.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) \approx 二酯磷 ($20.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 磷酸单酯磷 ($14.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

有机磷的生物有效性目前还缺乏有效的研究手段, 尤其缺乏原位的在线研究方法 (Turner *et al.*, 2003; 赵少华等, 2004). 尽管酶水解给出有机磷潜在的生物有效性, 但由于实际环境条件远远达不到酶的最佳反应条件, 因此实际酶水解所能提供磷含量可能远远低于所报道结果. 从有机磷电子密度来看, $\text{Phytic-P} > \text{Monoester-P} > \text{Diester-P}$ (Paytan *et al.*, 2003), 因此有机磷与沉积物介质结合紧密度应该遵循 $\text{Phytic-P} > \text{Monoester-P} > \text{Diester-P}$, 这几种有机磷有效性大小应该遵循 $\text{Phytic-P} < \text{Monoester-P} < \text{Diester-P}$. 但二酯磷降解生成活性磷需要首先分解成单酯磷, 然后单酯磷再降解生成活性磷, 因此, 二酯磷有效性应该低于单酯磷 (Turner *et al.*, 2003). 植酸有效性研究已有报道, 结果表明植酸跟金属氧化物结合能力很强, 其发生降解或矿化可能性较低, 在土壤或沉积物中有效性较低 (严玉鹏, 2015), 因此植酸也被认为是有机磷的一种保存机制, 成为一个磷“汇”(柳飞等, 2013; 严玉鹏等, 2012). 因此, 酶水解技术给出有机磷有效性大小可能跟实际有效性存在较大的差距.

Diester-P: Monoester-P 的比值用于指示有机磷相对降解和迁移 (Bai *et al.*, 2015). 天鹅湖 Diester-P:

Monoester-P的比值为0.7~1.5,均值为1.0.而白秀玲和Shinohara采用核磁共振的方法测定太湖和Lake Kasumigaura的Diester-P: Monoester-P分别为0.54和1.05(Bai *et al.*, 2015; Shinohara *et al.*, 2012).这说明不同地域沉积物有机磷降解或迁移存在较大差异.本文采用的酶水解法能更好的反映实际环境中有机磷的降解和迁移.因为在核磁共振方法强碱提取有机磷的过程中,存在明显Diester-P水解现象(张友等, 2017),即报道结果可能低估了实际的Diester-P: Monoester-P比值.而酶水解法避免了Diester-P的水解,能更好的反映实际样品中Diester-P: Monoester-P的比值.因此,本研究提供了一种有机磷降解和迁移方法,但是目前类似的报道还十分有限.

显著分析表明(表3),TP、IP、OP季节差异不显

著($p > 0.05$). EHP(包括Monoester-P、Diester-P和Phytic-P)季节差异明显($p < 0.05$). EHP(Monoester-P、Phytic-P)的含量呈现夏秋低,冬春高的特点.EHP冬春季含量高可能跟冬春季大天鹅粪便分解和藻类分解有关(肖博文, 2015; 高光等, 2004).另一方面跟磷酸酶活性的季节差异有关.磷酸酶是EHP分解矿化的重要媒介,EHP含量受磷酸酶的活性影响显著.夏秋季活性磷含量降低诱导生成了磷酸酶,同时温度的上升可以增加酶与基质间的亲和力,提高酶的催化速率(黄睿智等, 2013).另外,微生物的代谢速率随温度升高而升高,温度上升会促使微生物合成分泌更多的磷酸酶(Wallenstein *et al.*, 2010).磷酸酶活性的增加,加快了有机磷降解速率,造成了EHP含量的降低.

表3 天鹅湖沉积物磷含量

Table 3 The content of phosphorus in sediments of Swan Lake

mg·kg⁻¹

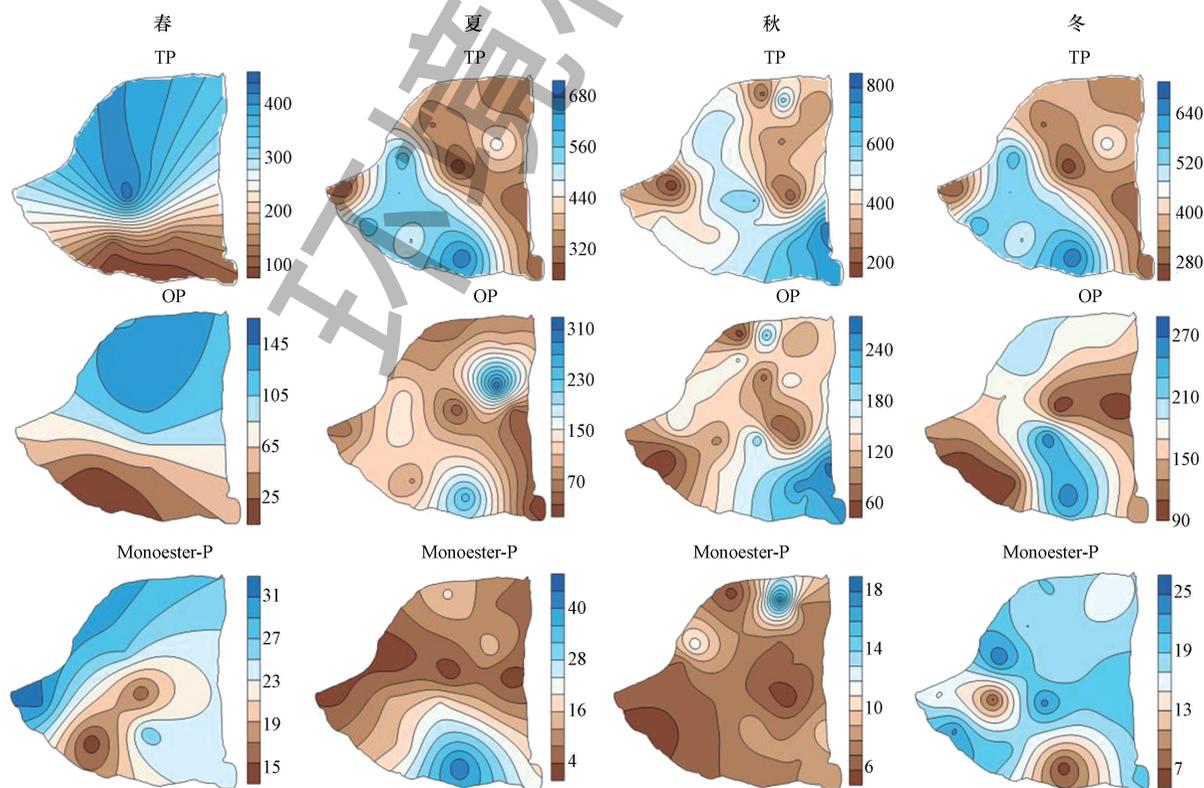
季节	TP	IP	OP	EHP	Monoester-P	Diester-P	Phytic-P	Diester-P:Monoester-P
春	374.7±65.3 ^a	262.7±45.1 ^a	112.0±32.7 ^a	62.6±19.4 ^c	16.5±1.3 ^{bA}	16.9±5.6 ^{abA}	33.0±19 ^{bB}	0.8±0.4 ^a
夏	423.5±135.5 ^{ab}	315.6±100.6 ^a	107.9±78.8 ^a	49.0±18.4 ^b	14.7±11.4 ^{abA}	24.3±8.7 ^{bcB}	13.8±7.5 ^{aA}	1.5±1.9 ^a
秋	401.0±155.7 ^{ab}	281.3±103.4 ^a	119.6±56.1 ^a	30.8±14.7 ^a	7.5±3.4 ^{abA}	12.4±4.8 ^{abB}	13.9±14.5 ^{ab}	1.0±0.7 ^a
冬	496.8±102.0 ^b	334.9±64.4 ^a	161.9±58.5 ^a	70.3±10.9 ^c	17.7±5.7 ^{bA}	27.1±10.2 ^{cB}	25.4±11.6 ^{bB}	0.7±0.3 ^a

注:数据为平均值±标准差;同一列中不同小写字母表示显著性水平 $P < 0.05$;同一行中不同大写字母表示显著性水平 $P < 0.05$.

3.3 天鹅湖沉积物有机磷空间分布

天鹅湖沉积物有机磷空间分布不均衡(图1).

总磷和有机磷分布大致相同,主要集中在北部入河口和南部藻类区域.Monoester-P春季主要集中分布



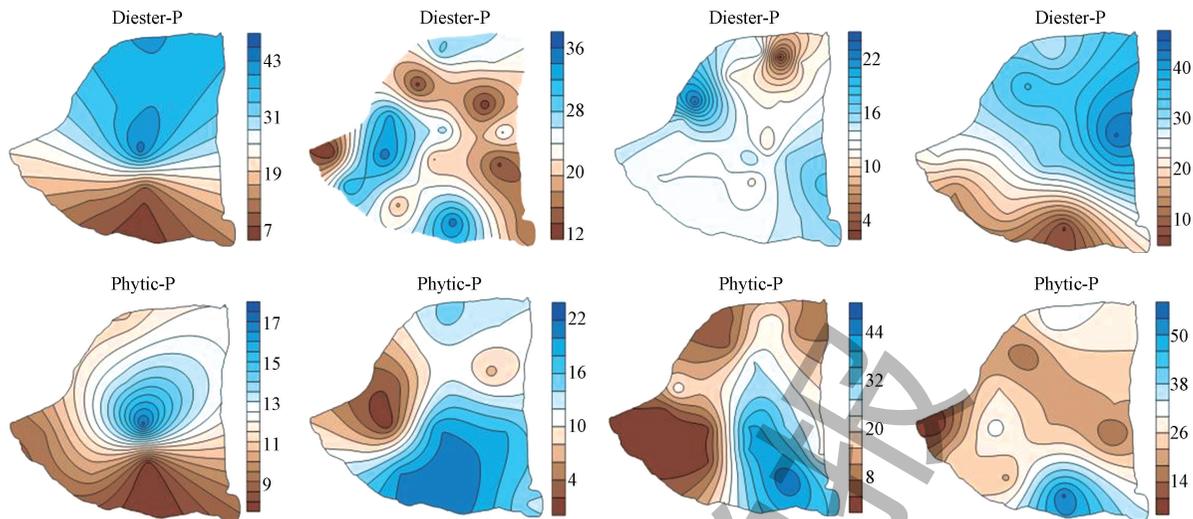


图1 天鹅湖沉积物有机磷空间分布($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig.1 The spatial distributions of organic phosphorus in sediment of Swan Lake($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

在入河口,夏季集中在入海口,冬季由湖心区向周围扩散。Diester-P 含量在春冬季集中在入河口和湖心区,夏季分布比较零散,秋季主要集中在入海口和入河口。Phytic-P 含量春季集中在湖心区,夏秋冬主要集中在入海口区域。这和不同方位污染物质的来源、水生动植物的分布以及沉积物粒度等差异有关(高丽等,2010)。河口区多为大天鹅等禽鸟的栖息地和旅游度假区,其携带工业废水、生活污水、养殖废水、污水处理厂废水中的污染物进入湖中,且人为活动频繁,故河口区有机磷含量较高,而入海口区周围多为农田、滩涂和沙坝,有机磷主要来源于农业排放和海水带入(邵雪琳等,2015)。另外,沉积物中有机磷含量遵从粒度控制规律(Ip *et al.*, 2007)。湖心区颗粒较细,且分布着大量水生植物,对水中污染物质的吸附能力强,有机磷含量较高。东岸沙坝和入海口沉积物类型以砂质、粉砂质为主,沉积物颗粒较粗,人为干扰相对较少,有机磷含量较低。

3.4 影响沉积物有机磷含量的环境因素

天鹅湖表层沉积物有机磷与沉积物理化性质的相关关系如表4所示。沉积物中有机磷与粉粒呈显著的正相关关系($p<0.05$),而砂粒呈现显著负相关关系($p<0.05$)。这与赵刚等(2015)的研究结果一致,即粒径越大越有利于有机磷的释放,相反,沉积物中粘粒部分对有机磷有较强的吸附能力。有机磷与矿物结合的强度和程度控制有机磷的生物有效性(严玉鹏,2015)。沉积物有机磷(包括 EHP、

Monoester-P、Diester-P和 Phytic-P)与 Al、Fe、Mg、Ca 金属离子显著相关($p<0.05$)。这说明金属氧化物是有机磷的主要结合介质。同无机磷一样,金属氧化物含量变化,或者由于氧化还原条件变化引起的金属氧化物形态变化都将影响有机磷结合程度,进而影响有机磷的分解矿化和最终的生物有效性(严玉鹏,2015)。有研究表明,有机磷的吸附作用主要依赖于铁铝氧化物。植酸对土壤铁铝氧化物表现出更大的亲和力(严玉鹏,2015)。这可能导致植酸低的解吸量和更小的生物有效性;Ca 在碱性条件下与 Monoester-P结合,形成稳定难溶盐类(Celi *et al.*, 2004)。沉积物有机磷与 pH 关系不显著,这可能是天鹅湖沉积物 pH 常年相对稳定的结果。有机磷与有机质关系极显著($p<0.01$),说明有机质是有机磷的重要载体,有机质的含量大小决定有机磷的含量(刘婉清,2014;孙静等,2011)。

表4 其他影响沉积物有机磷的环境因子

Table 4 The properties affecting organic phosphorus in sediments					
	OP	EHP	Monoester-P	Diester-P	Phytic-P
粘粒	0.561	0.558 *	0.296	0.640 *	0.246
粉粒	0.635 *	0.527 *	0.252	0.667 **	0.196
砂粒	-0.623 *	-0.538 *	-0.263	-0.668 **	-0.208
Al	0.829 **	0.801 **	0.605 *	0.741 **	0.729 **
Ca	0.659 *	0.888 **	0.832 **	0.467	0.799 **
Mg	0.821 **	0.887 **	0.716 **	0.705 **	0.804 **
Mn	-0.427	-0.032	-0.236	-0.081	-0.204
Fe	0.841 **	0.595 *	0.414	0.703 **	0.575 *
pH	-0.354	-0.067	0.011	-0.329	0.226
OM	0.800 **	0.872 **	0.747 **	0.710 **	0.273

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ 。

4 结论 (Conclusions)

1) 有机磷是天鹅湖沉积物磷的重要组成部分, 天鹅湖沉积物有机磷含量为 $107.9 \sim 161.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占总磷的 25%~40%。其中, 天鹅湖沉积物潜在生物有效性有机磷含量为 $21.8 \sim 100.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占有机磷含量的 26%~56%。湖泊磷污染不能只考虑无机磷, 应把有机磷纳入评价范畴, 治理水体富营养化过程中, 应该防止沉积物有机磷(特别是 EHP)的矿化分解。

2) 天鹅湖有机磷空间分布不均衡, 有机磷主要分布集北部入河口和南部藻类区域, 这和不同方位污染物质的来源、水生动植物的分布和沉积物粒度等差异有关。有机磷的生物有效性受到沉积物粒径、金属氧化物的影响。

参考文献 (References):

Bai X L, Zhou Y K, Sun J H, *et al.* 2015. Classes of dissolved and particulate phosphorus compounds and their spatial distributions in the water of a eutrophic lake: A ^{31}P -NMR study [J]. *Biogeochemistry*, 126(1):227-240

Celi L, Barberis E, Turner B L, *et al.* 2004. Abiotic stabilization of organic phosphorus in the environment [J]. *Organic Phosphorus in the Environment*, 23(1):113-132

曹文卿, 刘素美. 2010. 东黄海柱状沉积物中有机磷与无机磷的含量与分布研究 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 40(1):69-74

陈芳, 夏卓英, 宋春雷, 等. 2007. 湖北省若干浅水湖泊沉积物有机质与富营养化的关系 [J]. *水生生物学报*, 31(4):467-472

Feuillade M, Dorioz J M. 1992. Enzymatic release of phosphate in sediments of various origins [J]. *Water Research*, 26(9):1195-1201

高丽, 侯金枝, 宋鹏鹏. 2013. 天鹅湖沉积物对磷的吸附动力学及等温吸附特征 [J]. *土壤*, 45(1):67-72

高丽, 史衍玺, 孙卫明, 等. 2009. 荣成天鹅湖湿地沉积物对磷的吸附特征及影响因子分析 [J]. *水土保持学报*, 23(5):162-166

高丽, 宋鹏鹏, 史衍玺, 等. 2010. 天鹅湖沉积物中营养盐和重金属的分布特征 [J]. *水土保持学报*, 24(4):99-102

何宗健, 熊强, 焦立新, 等. 2014. 夏季滇池不同来源溶解性有机磷特征及其生物有效性 [J]. *中国环境科学*, (12):3189-3198

黄睿智, 王圣瑞, 赵海超, 等. 2013. 洱海表层沉积物碱性磷酸酶活性时空变化 [J]. *环境科学研究*, 26(3):250-255

Hu J, Liu L, You Y. 2009. Phosphorus fractions and phosphate adsorption characteristics analysis of xuanwu lake sediments [C]. The

3rd international conference on bioinformatics and biomedical engineering

Ip C C M, Li X D, Zhang G, *et al.* 2007. Trace metal distribution in sediments of the Pearl River Estuary and the surrounding coastal area, South China [J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 147(2):311-323

李凌萍. 2015. 滇池有机磷特征及其对水污染的贡献 [D]. 南昌: 南昌大学

刘超, 朱淮武, 王立英, 等. 2013. 滇池与红枫湖沉积物中磷的地球化学特征比较研究 [J]. *环境科学学报*, 33(4):1073-1079

刘婉清. 2014. 湖泊沉积物有机磷沉积特征研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学

柳飞, 张延一, 严玉鹏, 等. 2013. 不同结构有机磷在(氢)氧化铝表面的吸附与解吸特征 [J]. *环境科学*, 34(11):4482-4489

卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 2003. 南京城市土壤磷的形态和吸附-解吸特征 [J]. *土壤通报*, 34(1):40-43

陆瑾, 王海文, 郝红, 等. 2013. 环境磷形态分析中的磷-31 核磁共振技术 [J]. *土壤科学*, (1):15-20

Paytan A, Cade-Menun B J, McLaughlin K, *et al.* 2003. Selective phosphorus regeneration of sinking marine particles: Evidence from ^{31}P -NMR [J]. *Marine Chemistry*, 82(1/2):55-70

邵雪琳, 魏权, 高丽, 等. 2015. 天鹅湖泻湖表层沉积物中各形态磷的空间分布特征 [J]. *土壤通报*, 46(1):127-132

Shinohara R, Imai A, Kawasaki N, *et al.* 2012. Biogenic phosphorus compounds in sediment and suspended particles in a shallow eutrophic lake: A ^{31}P -nuclear magnetic resonance (^{31}P -NMR) study [J]. *Environmental Science & Technology*, 46(19):10572-10578

孙静, 王圣瑞, 曾清如, 等. 2011. 洱海表层沉积物有机磷形态分布特征及其影响因素 [J]. *环境科学研究*, 24(11):1226-1232

Turner B L, Cade-Menun B J, Condron L, *et al.* 2005. Extraction of soil organic phosphorus [J]. *Talanta*, 66(2):294-306

Turner B L, Cade-Menun B J, Westermann D T. 2003. Organic phosphorus composition and potential bioavailability in Semi-Arid arable soils of the western united states [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 67(4):761-772

Wallenstein M, Allison S D, Ernakovich J, *et al.* 2010. Controls on the temperature sensitivity of soil enzymes: A key driver of in situ enzyme activity rates [J]. *Springer Berlin Heidelberg*, 22:245-258

王海军, 王洪铸. 2009. 富营养化治理应放宽控氮、集中控磷 [J]. *自然科学进展*, 19(6):599-604

肖博文. 2015. 荣成天鹅湖碳氮磷的分布及鸟粪分解对碳氮磷含量的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学

熊强. 2014. 滇池不同来源有机磷特征及其生物有效性 [D]. 南昌:

- 南昌大学
- 严玉鹏. 2015. 几种土壤有机磷在铁铝氧化物表面的吸附、解吸与沉淀[D]. 武汉:华中农业大学
- 严玉鹏,万彪,刘凡,等. 2012. 环境中植酸的分布、形态及界面反应行为[J]. 应用与环境生物学报,18(3):494-501
- 杨宏伟,高光. 2012. 太湖流域不同类型区河流水体磷形态分布及矿化速率[J]. 土壤学报,49(4):758-763
- 俞振飞,王国祥,钱君龙,等. 2013. SMT 法测定沉积物标准样品有机磷形态分析方法探究[J]. 中国环境监测,29(3):117-121
- Zhang R, Wu F, Liu C, *et al.* 2008. Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. *Environmental Pollution*, 152(2):366-372
- 张友,吕迎春,高丽,等. 2017. 样品前处理方式对沉积物酶水解有机磷的影响[J]. 环境化学, 36(3):635-641
- 赵刚,谭万春,孙士权. 2015. 扰动下底泥粒径对溶解性有机磷释放影响的水槽试验[J]. 科技创新与应用,(12):39
- 赵少华,宇万太,张璐,等. 2004. 土壤有机磷研究进展[J]. 应用生态学报,15(11):2189-2194
- 朱广伟,秦伯强. 2003. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J]. 农业环境科学学报,22(3):349-352
- Zhu Y, Wu F, He Z, *et al.* 2013. Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 47(14):7679-7687
-

《环境科学学报》荣获第 4 届“中国精品科技期刊”称号

2017 年 10 月 31 日,中国科学技术信息研究所在“中国科技论文统计结果发布会”上公布了第 4 届“中国精品科技期刊”评选结果,包括 300 种以中文出版的中国精品科技期刊。《环境科学学报》再次荣获“中国精品科技期刊”称号。至此,本刊已连续 4 届获此殊荣。

国家科技部自 2000 年以来,先后立项进行了“中国精品科技期刊战略研究”和“中国精品科技期刊服务与保障系统”的研究工作。为提升中国科技期刊的整体水平,提出了打造精品科技期刊的概念。中国科学技术信息研究所分别于 2008 年、2011 年、2014 年公布了前 3 届“中国精品科技期刊”评选结果。