

有机质对大型富营养化浅水湖泊沉积物磷吸附特征的影响

肖文娟^{1,2}, 李 慧^{1,2}, 曹秀云¹, 宋春雷¹, 周易勇¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以大型浅水湖泊(太湖和巢湖)为研究对象,系统分析了沉积物有机质(OM)含量和组成、磷吸附参数、磷形态及间隙水溶解反应性磷(SRP)浓度在水平方向上的分布。吸附解吸平衡浓度(EPC_0)与SRP浓度的比较结果表明,在太湖北部与巢湖南淝河入湖口等污染较严重的区域,沉积物仍表现出吸附磷的功能;OM与土壤有效磷(Olsen-P)、磷吸附指数和碱性磷酸酶活性均显著正相关,有机质分解所产生的小分子物质可增加磷的吸附容量;添加小分子有机质的室内模拟试验进一步证实了上述假设,糖类主要影响磷的吸附能,而氨基酸主要增加最大吸附量。有机质自身及其降解产物以不同方式影响沉积物对磷的吸附能力,并据此调节湖泊富营养化过程。

关键词:沉积物;磷吸附;有机质;大型浅水湖泊;富营养化

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)06-0001-07

湖泊沉积物磷的吸附特征对底层磷的保持与扩散具有重要影响,故能有效调控湖泊的富营养化及其修复过程。太湖与巢湖均为我国大型富营养化浅水湖泊,而关于两湖沉积物磷吸附行为的研究多集中于吸附参数的分布与影响因素(Wang et al, 2005; Zhou et al, 2005);黄清辉等(2004)指出太湖磷吸附指数表现为北高南低、西高东低的特征;此外,太湖沉积物磷吸附能力受有机质、不定形铁与铝氧化物的影响(Wang et al, 2005; Wang et al, 2007);Jin等(2005)对巢湖沉积物磷吸附等温线及其吸附动力学过程进行研究并简单分析了沉积物理化性质对其磷吸附特征的影响。然而,通过吸附解吸平衡浓度(EPC_0)判断沉积物磷释放或解吸的研究相对较少(Zhou et al, 2005; Wang et al, 2006)。

沉积物中的有机质与沉积物-水界面磷的生物地球化学循环密切相关(易文利, 2008),尤其影响沉积物磷的吸附解吸过程(Anderson & Wu, 2001; Luo et al, 2009)。众多耕地与未耕地土壤样品的研究表明,磷吸附指数(PSI)与总有机质(OM)含量无相关关系(Boem et al, 2008);有研究显示,最大吸附量(Q_{max})或PSI与OM显著正相关(Lopez et al,

1996; Sallade & Sims, 1997; Bruland & Richardson, 2006);亚热带水库的湿地土壤及爱尔兰草原牧场土壤的吸附能(K)则与OM显著负相关(Daly et al, 2001; Liu et al, 2010)。因此,有机质对磷吸附行为的影响方式远未得到充分的研究(Hiradate & Uchida, 2004)。

本文系统分析了大型浅水湖泊(太湖和巢湖)沉积物OM含量、碱性磷酸酶活性(APA)、磷吸附参数、磷形态及其含量以及间隙水溶解反应性磷(SRP)浓度的水平分布特征,并借助磷平衡浓度(EPC_0)与SRP的关系评判沉积物作为磷源或磷汇的功能,同时通过室内模拟试验,证实小分子有机质对沉积物磷吸附行为的影响;旨在进一步揭示有机质对湖泊沉积物磷吸附行为的关键调控作用,了解沉积物磷营养的释放潜力,为富营养化湖泊的治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

太湖是我国第二大淡水湖泊,位于太湖西部的西苕溪和宜溧河是其最主要的2条入湖河流,人类活动对太湖的干扰和影响较大,水体富营养化十分严重,其中处于太湖北部的梅梁湾湖区为藻型湖区,污染较重,位于太湖东南部的东太湖为草型湖区,营养负荷相对较轻(张路等, 2004)。2008年4月,用彼得森采泥器采集太湖10个点的表层沉积物样品,采样点见图1。鲜样用于沉积物磷吸附行为的研究,风干之后进行沉积物PSI、土壤有效磷(Olsen-P)、APA及OM含量的测定。

收稿日期:2011-10-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2008CB418005);国家科技支撑计划(2012BAD25B08);国家自然科学基金(41073066)。

通讯作者:周易勇, 1956年生,男,博士,研究员,研究方向为环境生物化学。E-mail: zhouyy@ihb.ac.cn

作者简介:肖文娟, 1984年生,女,博士研究生,研究方向为水体富营养化。E-mail: 29440662@qq.com

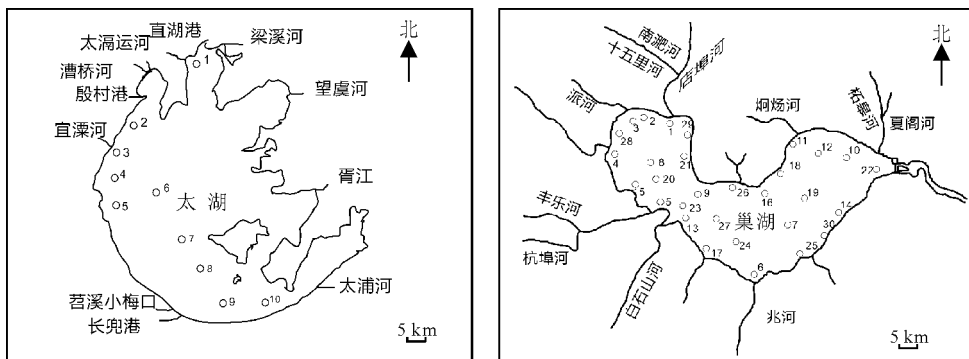


图1 太湖和巢湖采样点分布

Fig. 1 Sampling sites of Lake Taihu and Lake Chaohu

巢湖位于安徽省中部,地处长江和淮河之间,呈“凹”字形,水体富营养化问题也十分严重。2010年10月,用彼得森采泥器沿巢湖采集30个点(见图1)的表层沉积物样品,风干之后用于测定沉积物PSI、APA及OM含量。2011年2月22日,用彼得森采泥器集中选取巢湖5个点(C1、C5、C10、C20和C24)采集表层沉积物,鲜样用于沉积物磷吸附、磷分级、活性有机质组成的测定,风干之后进行沉积物OM含量的测定。

1.2 模拟试验设置

2009年11月,用彼得森采泥器采集太湖梅梁湾(T1)表层沉积物样品,混匀封装在封口袋中,将双氧水(H_2O_2)加入沉积物中持续搅拌去除有机质,直至泡沫消失(Negassa et al,2008),有机质含量从43.7 g/kg降到12.5 g/kg。然后在去除有机质的沉积物中添加葡萄糖、多糖、可溶性淀粉、甘氨酸,添加的量为原有机质含量与 H_2O_2 去除的有机质含量之差,之后进行沉积物磷吸附参数的测定。

1.3 分析方法和数据处理

沉积物磷吸附:取20 g新鲜沉积物样品于250 mL锥形瓶中,加入180 mL蒸馏水后用磁力搅拌器搅拌,混匀后取5 mL悬浮液于50 mL离心管中,并加入各浓度(0、0.02、0.05、0.1、0.2、0.5、1、2、5、8、10、15、20、25、50和100 mg/L)的磷溶液10 mL(每个浓度设3个平行,相对标准偏差小于5%),离心管加塞,在室温下200 r/min恒温振荡24 h,离心(3 000 r/min,15 min),取上清液过0.45 μm 滤膜,之后测定水体SRP浓度(Murphy & Riley,1962)。

用以描述磷吸附行为的等温吸附方程较多,本文选择Linear和Langmuir这2个对研究对象拟合较好的等温吸附方程,吸附参数计算方程如下。

Linear方程: $Q = K/C - Q_0$

其中: Q 为单位沉积物或其它固体颗粒磷的吸

附量, C 为平衡溶液浓度。 Q_0 为常数,当 $Q = 0$ 时, $C = \text{EPC}_0$, $\text{EPC}_{\text{sat}} = (\text{EPC}_0 - \text{SRP})/\text{EPC}_0$ 。

Langmuir方程: $C/Q = 1/Q_{\text{max}} + 1/KQ_{\text{max}}$

以 C/Q 对 C 作图,得一直线,其斜率的倒数为 Q_{max} ,再由截距推算 K 。

其他化学参数的分析方法见表1,其中沉积物磷分级是将沉积物分为铁结合态磷、钙结合态磷、酸提取有机磷、碱提取有机磷共4种形态,间隙水以离心法制备,沉积物样品离心15 min(3 000 r/min),离心后上清液过0.45 μm 滤膜后用于SRP的测定。

表1 其他化学参数的分析方法

Tab. 1 Analysis methods of other chemical parameters

参数	方法及参考文献
沉积物 Olsen-P 含量	Olsen et al,1954
沉积物 PSI	Sallade & Sims,1997
沉积物 APA	Liu et al,2009
沉积物 OM	重铬酸钾外加热法(鲍士旦,2000)
间隙水 SRP	钼蓝比色法(Murphy & Riley,1962)
沉积物磷分级	Golterman,1996
沉积物活性有机质(多糖、蛋白质、酯类)含量	Bradford 法(Boetius et al, 1996)

参数间的相关性检验和方差分析用SPSS统计软件进行分析,平行测量误差 $<5\%$ 。

2 结果

2.1 沉积物磷吸附参数的变化

在低浓度(初始浓度 <2 mg/L)下,太湖和巢湖沉积物的磷吸附行为可用线性等温模式加以描述且符合Linear方程($r^2 = 0.87 \sim 0.99$);磷浓度较高时,Langmuir等温线拟合较好($r^2 = 0.80 \sim 0.99$)。太湖和巢湖沉积物磷吸附参数在水平方向上变化明显(见图2);其中,太湖 Q_{max} 值的变幅为2 000 ~ 5 000 mg/kg,大多数采样点的 K 值相近,仅T2和T3采样点显示明显较高的数值。巢湖5个采样点的沉积物 Q_{max} 值的变幅为1 000 ~ 5 000 mg/kg, K 值

变幅较大,其中C1点K值最低。

如图2所示,太湖多数采样点的 EPC_{sat} 远大于20%,沉积物表现出较强的释放磷的趋势,而T2采样点的沉积物具有小于-20%的 EPC_{sat} 值,故有吸附磷的倾向,T3采样点则处于平衡状态,再者,T2采

样点沉积物 EPC_0 与间隙水SRP浓度均较低。另外,巢湖多数采样点的沉积物 EPC_{sat} 均大于20%,亦呈现较强的释放磷的趋势,仅C1采样点的沉积物具有小于-20%的 EPC_{sat} 值,故有吸附磷的倾向;此外,C1采样点的 EPC_0 较低,间隙水SRP最高。

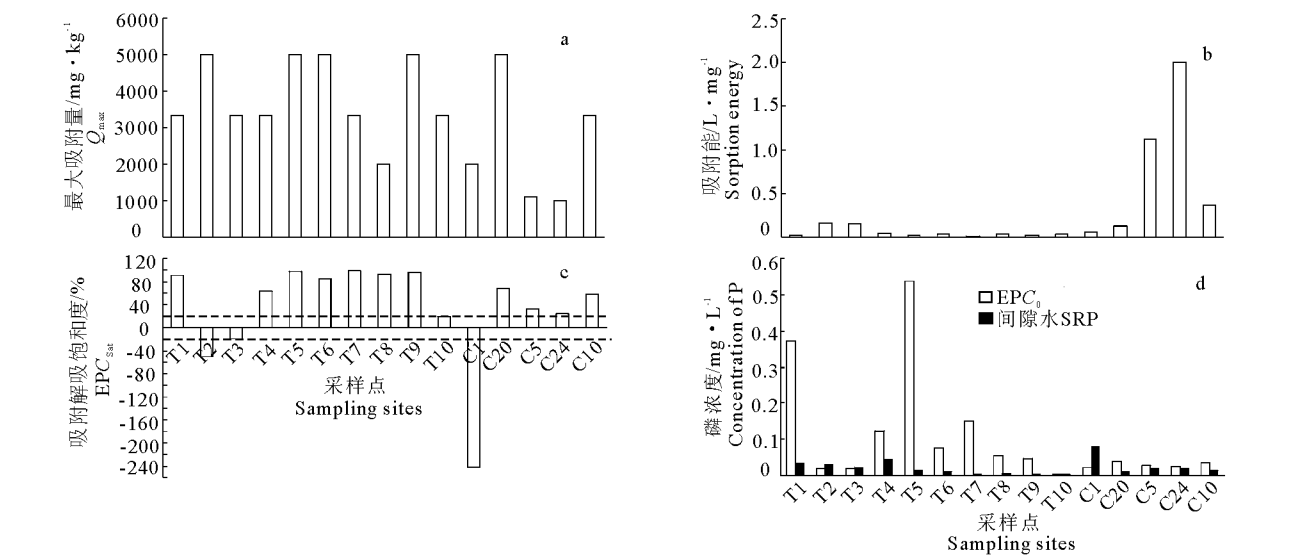


图2 太湖与巢湖沉积物磷吸附参数空间分布

Fig.2 Spatial distribution of phosphorus sorption parameters in the sediments of Lake Taihu and Lake Chaohu

2.2 沉积物有机质与磷吸附参数的关系

太湖沉积物 EPC_0 值与用Olsen-P和PSI表征的DPS(Olsen-P/PSI)之间呈现显著的非线性正相关关系($P<0.01,n=10$)(见图3)。再者,太湖与巢湖的综合数据显示,太湖沉积物Olsen-P含量与OM含量显著正相关($P<0.01$),两湖PSI和APA亦明显正比于OM含量($P<0.01$)(见图4)。

表2 巢湖有机质及活性有机质组成与磷吸附参数的相关关系

Tab.2 Relationships between phosphorus sorption parameters and organic matter,active organic matter components in the sediments of Lake Chaohu				
参数	有机质	多糖 (34%)	蛋白质 (24%)	酯类 (42%)
EPC_0	0.897 *	0.953 *		
Q_{max}			0.914 *	

注：“*”表示显著相关($P<0.05$)。
Note:“*” indicated significant correlation ($P<0.05$).

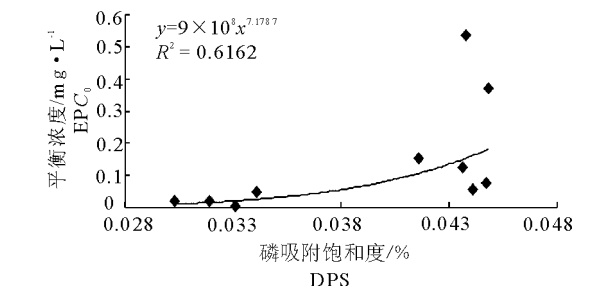


图3 太湖沉积物吸附解吸平衡浓度(EPC_0)与磷吸附饱和度(DPS)的关系

Fig.3 Relationship between equilibrium phosphorus concentration(EPC_0) and the degree of phosphorus sorption saturation(DPS) in the sediments of Lake Taihu

巢湖活性有机质以脂类为主,其次为多糖,沉积物有机质含量与 EPC_0 正相关($r=0.897,P<0.05,n=5$),蛋白质含量与最大吸附量正相关($r=0.914,P<0.05,n=5$),而多糖含量与 EPC_0 正相关($r=0.953,P<0.05,n=5$)(见表2)。

2.3 有机质去除对沉积物吸附参数的影响

经 H_2O_2 处理去除有机质之后,沉积物K值显著降低。糖类和氨基酸等小分子有机质的重新加入能在不同程度上改变吸附参数,糖类的添加致使K值上升,葡萄糖的效应最为明显,其次为蔗糖与淀粉;而甘氨酸的添加则进一步降低K值;此外,除甘氨酸的添加明显促进 Q_{max} 值之外,糖类对沉积物的 Q_{max} 并无明显影响(见图5)。

2.4 沉积物磷的形态及其含量

巢湖沉积物磷主要以铁结合态磷的形式存在,其含量约占总量的61%,酸提取有机磷的含量次之(18%),而碱提取有机磷(16%)和钙结合态磷(5%)的含量均相对较低(见图6)。

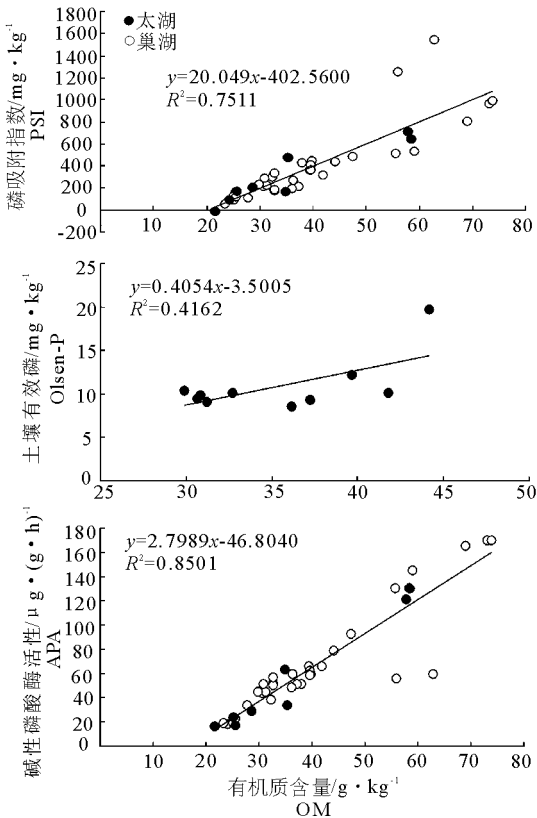


图4 太湖和巢湖沉积物有机质含量与磷吸附指数 (PSI)、Olsen-P (仅太湖)、碱性磷酸酶 (APA) 之间的关系

Fig.4 Relationships between phosphorus sorption index (PSI), Olsen-P (only Lake Taihu), alkaline phosphatase activity (APA) and organic matter (OM) contents in the sediments of Lake Taihu and Lake Chaohu

3 讨论

3.1 沉积物磷吸附参数的空间变化

太湖和巢湖沉积物磷吸附参数表现出明显的空间异质性,其生态学意义可集中见诸 EPC_0 值。Jarvie 等(2005)提出可用磷吸附饱和度(EPC_{sat})来大

体判定磷在沉积物与水相中的趋向,即 EPC_{sat} 大于 20% 时,沉积物向水体释放磷, EPC_{sat} 在 20% 内时,沉积物—水界面处于平衡状态,而当 EPC_{sat} 小于 -20% 时,沉积物从水体吸附磷。

值得注意的是,太湖南部 (T7 ~ T10 采样点) 沉积物具有显著的磷释放趋势,而在北部污染较重的 T2 采样点,沉积物仍行使磷汇的功能,其特征为吸附能 (K) 与最大吸附量 (Q_{max}) 均明显较高 (见图 2);此外,巢湖大部分采样点均呈现显著的磷释放趋势,而南淝河入湖口污染相对较重的 C1 采样点沉积物则仍作为磷汇而存在,其特征为低 K 值与相对较高的 Q_{max} (见图 2)。简言之,营养负荷较高的沉积物仍可能具有较强的吸附磷的潜力,且这种功能与沉积物磷的最大吸附量密切相关。

最大吸附量与 EPC_0 值的关系可用磷的饱和度加以解释,太湖沉积物 EPC_0 与 DPS 显著正相关 (见图 3),同样以 Olsen-P/PSI 表征的 DPS 亦能较好地预测土壤 EPC_0 值 (Hughes et al,2000);此外,400 余份土壤样品的研究结果表明 DPS 与 EPC_0 具有内在的联系 (Pöthig et al,2010)。PSI 为 Q_{max} 的简单量度,且两者显著正相关 (Espejo & Cox,1992; Li et al,2007)。作为 DPS 代数式的分母,相对较大的 Q_{max} (或 PSI) 能有效降低 DPS 数值, EPC_0 值亦将随之降低,其与间隙水磷在数量上的对比关系,将促使沉积物行使磷汇的功能。就具体意义而言,容纳位点的扩增自然有利于磷的吸附 (而非释放)。

3.2 有机质对沉积物磷吸附行为的影响

沉积物 DPS 的变化受控于有机质的分解,即有机质与 DPS 的分子 Olsen-P 和分母 PSI 均显著正相关 (见图 3),这种关系亦可见其他关于土壤的相关研究 (Bruland & Richardson,2006; 张海涛,2007; Maynard et al,2009)。因此,有机质分解过程中产生

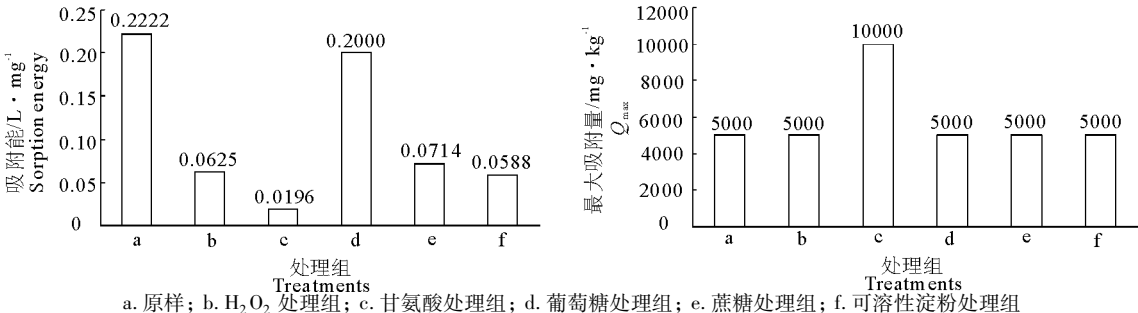


图5 不同处理组沉积物的磷吸附能 (K) 和最大吸附量 (Q_{max}) 变化

a. original sample; b. H_2O_2 -treated sample; c. glycine control; d. glucose control; e. sucrose control; f. soluble starch control

Fig.5 Variations in phosphorus sorption energy (K) and phosphorus sorption maximum (Q_{max}) for different treatments

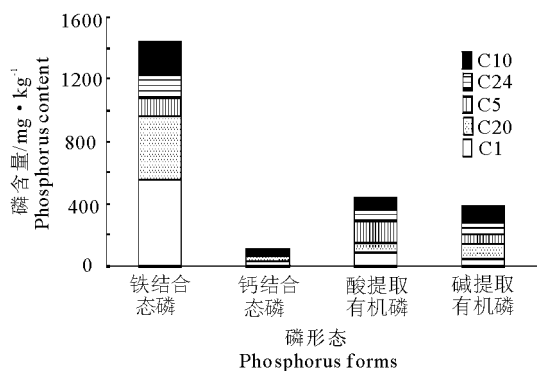


图6 巢湖沉积物不同磷形态含量的分布

Fig. 6 Distribution of different phosphorus farms in the sediments of Lake Chaohu

的无机磷和小分子物质可能成为调节沉积物磷吸附行为的重要因素。太湖沉积物中有机质含量与 APA 和 Olsen-P 均显著正相关 (见图 4), 微生物经有机质的诱导作用可产生胞外磷酸酶分解有机磷 (Liu et al, 2009), 从而向沉积物持续提供无机磷 (如 Olsen-P), 而小分子有机质的调节作用则可在模拟实验中得到部分验证。

模拟试验结果表明, 小分子有机质的添加, 可导致沉积物吸附参数的明显变化, 其种类和幅度因添加分子的性质而异。碳水化合物仅改变吸附能, 且分子量越小效果越明显 (见图 5)。碳水化合物改变 K 值的原因大体有二。首先, 小分子碳水化合物的增加可促进细菌的生长 (Hames-Kocabas & Uzel, 2007; Cooney & Simon, 2009), 从而强化其对磷的摄取与固定, 不同碳水化合物可伴随不同的细菌生长速度 (谭佑铭和罗启芳, 2003), 由此导致不同的磷利用效率; 其次, 多糖与铁的交互作用可增强磷的吸附能。巢湖沉积物铁结合态磷是沉积物磷的主要存在形态 (见图 6), 在富营养化沼泽区, 铁氢氧化物的沉淀可提高沉积物磷与 DOC 的保持能力 (Zak et al, 2004)。糖类影响磷吸附的程度亦因其自身的分子量而异, 分子量越小, 对吸附能的影响越大, 如绿肥与动物有机肥提取的溶解态有机质 (DOM) 对土壤磷吸附的影响方式明显不同, 动物有机肥 DOM 平均分子量较大, 故不能与土壤中的铝作用并由此影响磷的吸附; 相反, 平均分子量较小的绿肥 DOM 则抑制磷的吸附, 其主要机理在于低浓度 DOM 可以和土壤铝发生配位交换作用, 而高浓度的 DOM 则与之络合 (Ohno & Crannell, 1996)。另一方面, 氨基酸 (甘氨酸) 则降低沉积物 K 值, 并增加最大吸附量 ($Q_{\max}$)。源于有机质的有机酸可与磷竞争吸附位点, 并通过络合铁和铝来降低磷的吸附能力 (An-

drade et al, 2003; Pavinato et al, 2008), 此外小分子有机酸可抑制磷的解吸附 (Johnson & Loeppert, 2006)。即氨基酸其中的羧基具有降低吸附能, 且增加最大吸附量的功能, 在巢湖 5 个采样点中, 沉积物蛋白质含量与 $Q_{\max}$ 值显著正相关 ($r = 0.914$, $P < 0.05$, $n = 5$), 其分解过程中产生的自由氨基酸为增加磷最大吸附量的重要因素。

综上所述, 有机质是调节大型浅水湖泊沉积物磷吸附行为的关键因素, 其分解产物将以不同的方式影响磷的吸附能和最大吸附量, 改变磷的饱和度以及沉积物与水相之间磷的平衡关系, 并据此调节沉积物作为磷源和磷汇的功能, 从而对富营养化过程实施有效的反馈。

志谢: 在采样过程中, 得到纪磊、侯杰、陈玺、白云钦等的帮助, 谨致谢忱。

参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社.
- 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 2004. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估 [J]. 湖泊科学, 16(2): 97 - 104.
- 谭佑铭, 罗启芳. 2003. 不同碳源对固定化反硝化菌脱氮的影响 [J]. 卫生研究, 32(2): 95 - 97.
- 易文利. 2008. 有机质对磷素在沉积物—水—沉水植物间迁移转化的影响 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学.
- 张海涛. 2007. 磷肥、有机肥对土壤磷库及土壤磷缓冲能力的影响研究 [D]. 保定: 河北农业大学: 37 - 38.
- 张路, 范成新, 王建军, 等. 2004. 太湖草藻型湖区间隙水理化特性比较 [J]. 中国环境科学, 24(5): 556 - 560.
- Anderson R, Wu Y X. 2001. Phosphorus quantity-intensity relationships and agronomic measures of P in surface layers of soil from a long-term slurry experiment [J]. Chemosphere, 42(2): 161 - 170.
- Andrade F V, Mendonça E S, Alvarez Venegas V H, et al. 2003. Addition of organic and humic acids to latosols and Phosphate adsorption effects [J]. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo, 27(6): 1003 - 1011.
- Boem F H G, Alvarez C R, Cabello M J, et al. 2008. Phosphorus Retention on Soil Surface of Tilled and No-tilled Soils [J]. Soil Science Social of America Journal, 72(4): 1158 - 1162.
- Boetius A, Scheibei S, Tselepidis A, et al. 1996. Microbial biomass and activities in deep-sea sediments of the Eastern Mediterranean: trenches are benthic hotspots [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 43

- (9): 1439–1460.
- Bruland G L, Richardson C J. 2006. An assessment of the phosphorus retention capacity of wetlands in the painter Creekwatershed, Minnesota, USA[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 171(1/4): 169–184.
- Cooney T J, Simon K S. 2009. Influence of Dissolved Organic Matter and Invertebrates on the Function of Microbial Films in Groundwater[J]. *Microbial Ecology*, 58(3): 599–610.
- Daly K, Jeffrey D, Tunney H. 2001. The effect of soil type on phosphorus sorption capacity and desorption dynamics in Irish grassland soils[J]. *Soil Use and Management*, 17(1): 12–20.
- Espejo R, Cox F R. 1992. Factors Affecting Phosphorus Sorption in Paleixerults of Western Spain[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23(3/4): 389–398.
- Golterman H. 1996. Fractionation of sediment phosphate with chelating compounds: a simplification, and comparison with other methods[J]. *Hydrobiologia*, 335(1): 87–95.
- Hames-Kocabas E E, Uzel A. 2007. Alkaline protease production by an actinomycete MA1-1 isolated from marine sediments[J]. *Annals of Microbiology*, 57(1): 71–75.
- Hiradate S, Uchida N. 2004. Effects of soil organic matter on pH-dependent phosphate sorption by soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(5): 665–675.
- Hughes S, Reynolds B, Bell S A, et al. 2000. Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved P in runoff from arable soils[J]. *Soil Use and Management*, 16(3): 206–210.
- Jarvie H P, Jürgens M D, Williams R J, et al. 2005. Role of river bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins: the Hampshire Avon and Herefordshire Wye[J]. *Journal of Hydrology*, 304(1/4): 51–74.
- Jin X C, Wang S R, Pang Y, et al. 2005. The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments[J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 254(1/3): 241–248.
- Johnson S E, Loeppert R H. 2006. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 70(1): 222–234.
- Li M, Hou Y, Zhu B. 2007. Phosphorus sorption-desorption by purple soils of China in relation to their properties[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 45(3): 182–189.
- Liu W Z, Liu G H, Li S Y, et al. 2010. Phosphorus sorption and desorption characteristics of wetland soils from a subtropical reservoir[J]. *Marine and Freshwater Research*, 61(5): 507–512.
- Liu Y B, Guo Y X, Song C L, et al. 2009. The effect of organic matter accumulation on phosphorus release in sediment of Chinese shallow lakes[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 175(2): 143–150.
- Lopez P, Lluch X, Vidal M. 1996. Adsorption of phosphorus on sediments of the balearic islands (Spain) related to their composition[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 42(2): 185–196.
- Luo Z X, Zhu B, Tang J L, et al. 2009. Phosphorus retention capacity of agricultural headwater ditch sediments under alkaline condition in purple soils area, China[J]. *Ecological Engineering*, 35(1): 57–64.
- Maynard J J, O'Geen A T, Dahlgren R A. 2009. Spatial Relationships of Phosphorus Sorption in a Seasonally Saturated Constructed Wetland Soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5): 1741–1753.
- Murphy J, Riley J. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters[J]. *Analytica chimica acta*, 27: 31–36.
- Negassa W, Dultz S, Schlichting A, et al. 2008. Influence of specific organic compounds on phosphorus sorption and distribution in a tropical soil[J]. *Soil Science*, 173(9): 587–601.
- Ohno T, Crannell B S. 1996. Green and animal manure-derived dissolved organic matter effects on phosphorus sorption[J]. *Journal of Environmental Quality*, 25(5): 1137–1143.
- Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S, et al. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate[M]. Washington, DC: USDA: 939.
- Pavinato P S, Rosolem C A. 2008. Effects of organic compounds produced by plants on soil nutrient availability[J]. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 32(3): 911–920.
- Pöthig R, Behrendt H, Opitz D, et al. 2010. A universal method to assess the potential of phosphorus loss from soil to aquatic ecosystems[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(2): 497–504.
- Sallade Y E, Sims J T. 1997. Phosphorus transformations in the sediments of Delaware's agricultural drainageways: I. Phosphorus forms and sorption[J]. *Journal of Environmental Quality*, 26(6): 1571–1579.
- Wang S R, Jin X C, Zhao H C, et al. 2007. Effect of organic matter on the sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake sediments[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 297(1/3): 154–162.
- Wang S R, Jin X C, Pang Y, et al. 2005. Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower

- reaches of Yangtze River region, China [J]. *Journal of colloid and interface science*, 289(2): 339 – 346.
- Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, et al. 2006. Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 128(2/3): 95 – 105.
- Zak D, Gelbrecht J, Steinberg C. 2004. Phosphorus retention at the redox interface of peatlands adjacent to surface waters in northeast Germany[J]. *Biogeochemistry*, 70(3): 357 – 368.
- Zhou A M, Tang H X, Wang D S. 2005. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition[J]. *Water Research*, 39(7): 1245 – 1254.
- (责任编辑 杨春艳)

Effects of Organic Matter on Phosphorus Sorption Characteristics in Sediments of Large Eutrophic Shallow Lakes

XIAO Wen-juan^{1,2}, LI Hui^{1,2}, CAO Xiu-yun¹, SONG Chun-lei¹, ZHOU Yi-yong¹

- (1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Content and composition of sediment organic matter (OM), phosphorus sorption parameters, phosphorus forms and the horizontal distribution of interstitial soluble reactive phosphorus (SRP) concentration were addressed systematically, targeting large shallow lakes (Lake Taihu and Lake Chaohu). Comparison of equilibrium phosphorus concentration (EPC_0) with SRP concentration results showed that comparatively seriously-polluted area including northern Lake Taihu and inlet of the Nanfei River to southern Lake Chaohu, sediments still had phosphorus-absorbing function. In addition, OM and Olsen-P, P adsorption index, alkaline phosphatase activity (APA) were significant positive correlation, so the small molecular substance produced by the decomposition of organic matter increased phosphorus adsorption capacity. The indoor simulation experiments of adding small molecular substance furtherly confirmed the above hypothesis. Carbohydrate mainly affected the phosphorus sorption energy, while amino acid mainly increased the maximum phosphorus sorption. In short, the organic matter itself and its degradation products affected the sediment phosphorus adsorption capacity in different ways, and accordingly adjusted the process of lake eutrophication.

Key words: sediment; phosphorus sorption; organic matter; large shallow lake; eutrophication