

溶解氧等环境因素对 Alafia 河表层沉积物磷释放影响的模拟研究

韩璐^{1,3}, 黄岁樑¹, 罗阳², 宋永会³, C.D. Stanley⁴

(1.水环境数值模拟研究室,天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室,环境污染过程与基准教育部重点实验室,南开大学环境科学与工程学院,天津 300071; 2.海河水利委员会水资源保护局,天津 300170; 3.中国环境科学研究院城市水环境科学科技创新基地,北京 100012; 4.Gulf Coast Research and Education Center, Soil and Water Science Department, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Wimauma, FL 33598, United States)

摘要:在实验室条件下,采用混合均匀的 Alafia 河表层沉积物并以蒸馏水为上覆水进行沉积物磷释放模拟试验,研究了溶解氧、有机碳和金属铝对沉积物磷($\text{PO}_4\text{-P}$)释放的影响。结果表明,试验期间厌氧条件下沉积物磷释放量明显高于好氧条件下。厌氧条件下,未添加金属铝、添加有机碳源的试验组中沉积物释放平衡时水中磷浓度为 $5.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;好氧条件下,平衡时水中磷浓度为 $2.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。研究还发现,未添加金属铝的试验组,无论好氧还是厌氧条件下,未添加有机碳源时,沉积物磷释放量高于添加碳源条件;而在添加金属铝后,添加有机碳源的试验组中磷释放量略高于未添加碳源的试验组。添加金属铝能够明显抑制沉积物中磷的释放。未添加金属铝,厌氧条件下,平衡时水中磷浓度为 $6.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,好氧条件下,释放平衡时水中磷浓度为 $3.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而添加金属铝的试验组,无论厌氧还是好氧条件下,上覆水中磷浓度均很小,接近于 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

关键词:沉积物;磷释放;溶解氧;有机碳;金属铝

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2178-07

An Experimental Study of Phosphorus Release from Sediments of Alafia River, USA

HAN Lu^{1,3}, HUANG Sui-liang¹, LUO Yang², SONG Yong-hui³, C.D. Stanley⁴

(1.Numerical Simulation Group for Water Environment, Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2.Haihe River Water Resources Protection Bureau, Haihe River Water Conservancy Commission, Tianjin 300170, China; 3.Innovation Base of Urban Water Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4.Gulf Coast Research and Education Center, Soil and Water Science Department, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Wimauma, FL 33598, United States)

Abstract: In this study, the amounts and forms of phosphorus(P) in surface sediments of Alafia River, Florida, United States, were examined using a sequential chemical extraction procedure. P release from sediments of Alafia River and the effect of anaerobic/aerobic condition, organic carbon(OC) and aluminum(Al) on P transformation at the water-sediment interface were investigated via a series of indoor experiments. The results indicated that anaerobic condition was much more propitious to the P release at the water-sediment interface than the aerobic condition. The equilibrium concentrations of P were $5.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $2.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ under anaerobic and aerobic conditions, respectively. Addition of OC reduced the release of P from sediments to overlying water under both aerobic and anaerobic conditions without addition of Al. It also showed that without adding of OC reduced the release of P from sediments to overlying water with addition of aluminum(Al), suggesting that Al was able to retain P in sediments. The equilibrium concentrations of P in overlying water were $6.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $3.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ without addition of Al under anaerobic/aerobic conditions, respectively. However, with addition of Al under anaerobic/aerobic conditions the equilibrium concentrations of P in overlying water were quite low, closing to $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

Keywords: sediments; phosphorus forms; dissolved oxygen; organic carbon; aluminum

收稿日期:2010-05-14

基金项目:国家自然科学基金(51079068);天津市科技支撑计划重点项目(09ZCGYSF00400);国家水体污染控制与治理重大专项(2008ZX07314-005-011,2009ZX07209-001);水利部公益性行业科研专项子课题“蓝藻生长动力学模型研究”(200801135);中国水利水电科学研究院开放基金

作者简介:韩璐(1981—),女,辽宁人,博士。E-mail:hanlu1981@mail.nankai.edu.cn

通讯作者:黄岁樑 E-mail:slhuang@nankai.edu.cn

河流、湖泊水体富营养化是当今世界面临的最重要水污染问题之一^[1],而磷是控制富营养化的关键元素,沉积物吸附和释放磷对河流、湖泊、水库等水体的富营养化具有重要作用^[2]。因此,控制磷负荷就成为富营养化治理的基本措施之一。河流、湖泊水体中磷的来源主要包括内源和外源两部分,在外源得到有效控制后,如何抑制磷的内源释放,即减少沉积物中磷的释放,对解决河流、湖泊水体富营养化问题就显得尤为突出。通常,河流、湖泊沉积物与其上覆水体之间不断地进行着磷释放、吸附过程,维持着一种动态平衡。当水体中磷浓度较高时,这个动态平衡被破坏,沉积物表现出“汇”的特征,对磷进行吸附,使上覆水体中的磷浓度降低;相反,当水体中磷浓度过低时,沉积物则表现出“源”的特征,向水体中释放磷。

Alafia 河位于美国佛罗里达州中部,全长 40 km,流域面积 870 km²,起源于 Hillsborough 县,最终流入 Tampa 海湾^[3]。该流域内土地利用方式主要包括农田、森林、居民区和磷矿等。Alafia 河的污染调查表明,由于城市用水及农业用水、雨水径流,大量污水、废水,农药,有毒金属,油脂进入水体而引起水体污染^[4]。同时 Alafia 河是当地居民重要的饮用水备用水源地,但水污染严重。与国内水体沉积物污染状况相比较,以海河为例,Alafia 河表层沉积物中总磷含量明显高于海河邢家圈采样点,与张家嘴采样点相接近^[5]。

沉积物中磷以多种形态存在,不同形态磷释放强度差异较大,其向上覆水体释放磷的能力也有显著差异,如交换态磷(Ex-P)、铁磷(Fe-P)、铝磷(Al-P)易于向水体中释放,而闭蓄态磷(Oc-P、自生钙磷(Ca-P)、碎屑磷(De-P)、有机磷(OP)则不易向水体释放。已有研究表明,许多因素影响沉积物中磷的释放,如 DO、pH 值、温度、氧化态氮、铁含量,微生物活动等^[6-7]。有机质对沉积物磷的释放具有重要作用,影响着有机、无机磷成分的吸附/解吸过程^[8],有机质的矿化会引起氧化还原电位以及 pH 的变化,进而影响各种形态磷的释放过程^[9]。河流、湖泊水体中表层沉积物的微生物活动对磷循环有重要作用^[10],有机质能够通过影响微生物活动,进而影响溶解氧的消耗和营养盐磷的释放。关于金属铝对磷释放的抑制作用,前人做了很多工作,大部分集中在添加剂量、铝的溶解性、老化问题以及生态影响等^[11-13]。然而关于有机质、金属铝等多种因素联合作用对沉积物释放的研究鲜有报道。因此,笔者在实验室内,模拟研究好氧、厌氧条件下添加有机碳、金属铝对 Alafia 河表层沉积物磷释放的影

响,并分析溶解氧等多种环境因素共同作用对沉积物磷释放的影响及其原因,以期进一步研究磷在沉积物-上覆水中的迁移转化规律,为河流、湖泊生态管理,水质保护提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 样品的采集与处理

2009 年 4 月 30 日采用采泥器采集 Alafia 河 Fishhawk 处表层沉积物样品,在采样点按照上、中、下游三处平行采集。采样处沉积物含水率都很高,呈流态,色深黑,手感粘滑、细腻。样品装入密封塑料袋中,运回实验室后去除砾石、动植物残体,混合均匀后于密封袋中低温保存备用。

1.2 静态模拟释放试验

静态模拟试验反应器采用容积为 1 L 的广口瓶,反应器顶部留有进气口、出气口。在每个反应器内分别添加充分混合均匀的沉积物,深度为 4 cm,沿壁小心注入 0.9 L 去离子水作为上覆水,尽量避免对沉积物的冲击。在沉积物-水界面处留有取样口,装置外用锡纸包裹,避免光照对试验产生影响。在反应器内分别模拟厌氧/好氧,添加/未添加有机碳源,添加/未添加金属铝条件下 Alafia 河表层沉积物营养盐的静态释放。每日定时对上覆水进行曝气,充空气和氮气分别模拟好氧和厌氧条件,厌氧时保证 DO 小于 4 mg·L⁻¹。添加的碳源采用醋酸钠(C₂H₃O₂Na),添加的铝源采用普通聚铝(PAC)。所有试验在室温下进行,试验条件设计见表 1。试验过程中定期测定界面处 PO₄³⁻浓度及上覆水的 pH 值。从第 1 d 开始,连续一周每日取水样 1 次,之后每隔 2 d 取水样 1 次。采样量为 10 mL。每次取完水样,立即向反应器中补充等量的去离子水,并曝气 30 min。试验共进行 30 d。

1.3 分析方法

沉积物磷形态提取方法很多,国内外并不统一,相同形态的磷所采用的提取剂不尽相同,如 HCl 和

表 1 试验设计

Table 1 Experimental conditions

试验条件	溶解氧 (DO)	有机碳 (OC)	金属铝 (Al)	试验条件	溶解氧 (DO)	有机碳 (OC)	金属铝 (Al)
1	+	+	+	5	-	+	+
2	+	+	-	6	-	+	-
3	+	-	+	7	-	-	+
4	+	-	-	8	-	-	-

注:DO, +表示好氧, -表示厌氧;OC, +表示添加有机碳, -表示未添加有机碳;Al, 表示添加金属铝, -表示未添加金属铝。

H₂SO₄ 都可用来提取钙结合态磷^[14]。本文参照美国土壤、沉积物磷连续提取方法^[15],该方法将磷形态分为总磷(TP)、NH₄Cl 提取磷(NH₄Cl-P,松散结合态磷)、NaOH 提取磷(NaOH-P,主要以铁结合态磷为主)、CDB 提取磷(CDB-P,还原溶解态磷)和 H₂SO₄ 提取磷(H₂SO₄-P,钙结合态磷)。沉积物中各形态磷及水样中溶解性磷采用全自动化学分析仪测定;沉积物粒度采用比重计法测定;沉积物中含水率采用烘干法测定;沉积物有机质含量采用 Walkley-Black 法测定;pH 值采用多功能 pH 仪测定。

2 结果与分析

2.1 沉积物的理化性质及磷的形态分布

Alafia 河表层沉积物的理化性质及沉积物中各形态磷的含量如表 2、表 3 所示^[16]。本研究所采沉积物含水率较高,达到 20%,有机质含量为 0.4%,沉积物呈弱酸性,pH 值为 6.6。沉积物颗粒组成中砂粒占绝对优势,高达 95%,粉砂和黏粒含量很低,分别为 4%和 1%。与国内水体沉积物相比较,以海河为例,在海河邢家圈和张家嘴两采样点,沉积物颗粒组成以细砂、极细砂为主,占沉积物总量的 40%~60%。从表 2 可以看出,Alafia 河表层沉积物中占主要形态的是 H₂SO₄-P,含量达到 1 272 mg P·kg⁻¹,其次是 NaOH-P,含量为 46 mg P·kg⁻¹,而 NH₄Cl-P 含量最少,仅为 6 mg P·kg⁻¹。与海河表层沉积物相比较,Alafia 河表层沉积物中总磷含量明显高于海河邢家圈采样点,与海河张家嘴采样点相接近,钙结合态磷含量高于海河沉积物^[5]。

2.2 沉积物释放磷时水中 pH 值的变化

未添加金属铝的实验组,无论厌氧/好氧条件,添

加有机碳源还是未添加有机碳,上覆水的 pH 值变化范围分别在 6~8 之间(图 1a,b)。而添加金属铝后,无论厌氧/好氧条件,添加有机碳源还是未添加有机碳,上覆水呈弱酸性,pH 值变化范围在 3~4 之间(图 1c,d)。本试验中,金属铝溶液呈酸性(<5),添加的金属铝水解生成[Al(OH)₃(OH₂)₃],沉淀水解过程中伴随电化学、凝聚、吸附、沉淀等物理化学过程,添加金属铝溶液后水中 pH 值降低。由于金属铝水解生成 H⁺,添加金属铝后溶液中酸性增强(pH 值 3~4)。

2.3 溶解氧对沉积物磷释放的影响

无论是在添加外源碳、金属铝还是未添加外源碳、金属铝的条件下,厌氧状态下沉积物磷的释放量明显高于好氧状态,如图 2 所示。

未添加金属铝、有机碳源的试验组,厌氧条件下,平衡时水中磷浓度为 6.91 mg·L⁻¹;好氧条件下平衡时水中磷浓度为 3.70 mg·L⁻¹(图 2a)。厌氧条件下磷释放平衡浓度比好氧条件下高 3.21 mg·L⁻¹。

未添加金属铝、添加有机碳源的试验组,厌氧条件下,释放达到平衡时水中磷浓度为 5.93 mg·L⁻¹;好氧条件下,释放平衡时水中磷浓度为 2.39 mg·L⁻¹(图 2b)。厌氧条件下磷释放平衡浓度比好氧条件下高 3.54 mg·L⁻¹。

而添加金属铝、未添加有机碳的试验组,厌氧条件下,平衡时水中磷浓度很低(0.04 mg·L⁻¹),略高于好氧时磷平衡时浓度(0.03 mg·L⁻¹),如图 2c 所示。

添加金属铝、有机碳的试验组,厌氧条件下,释放平衡时水中磷浓度为 0.15 mg·L⁻¹;好氧条件下平衡时水中浓度为 0.08 mg·L⁻¹(图 2d)。厌氧时释放平衡浓度比好氧时高 0.07 mg·L⁻¹。

2.4 有机碳源对沉积物磷释放的影响

表 2 Alafia 河与海河沉积物部分理化性质

Table 2 Chemical and physical characteristics of stream sediments in Alafia River and Haihe River

指标	含水率/%	有机质/%	砂粒(62.5 μm~2 mm)/%	粉砂粒(3.9~62.5 μm)/%	黏粒(<3.9 μm)/%	pH	EC/dS·m ⁻¹
Alafia 河	20	0.4	95	4	1	6.6	0.10
指标	有机质/%		粗中砂(246~840 μm)/%	细砂(147~246 μm)/%	极细砂(74~147 μm)/%	粉粒(<74 μm)/%	
海河 ^[5]	5~8		13~34	24~30	18~28	17~33	

表 3 Alafia 河与海河沉积物中总磷和不同形态磷含量

Table 3 Contents of total phosphorus and phosphorus fractions in stream sediments in Alafia River and Haihe River

磷形态	NH ₄ Cl-P/mg P·kg ⁻¹	NaOH-P/mg P·kg ⁻¹	CDB-P/mg P·kg ⁻¹	H ₂ SO ₄ -P/mg P·kg ⁻¹	Total P/mg P·kg ⁻¹
Alafia 河	6	46	36	1 272	1 360
磷形态	MgCl ₂ -P/mg P·kg ⁻¹	NaOH-P/mg P·kg ⁻¹	OP/mg P·kg ⁻¹	HCl-P/mg P·kg ⁻¹	Total P/mg P·kg ⁻¹
海河 ^[5]	24~39	62~203	159~205	525~605	762~1 035

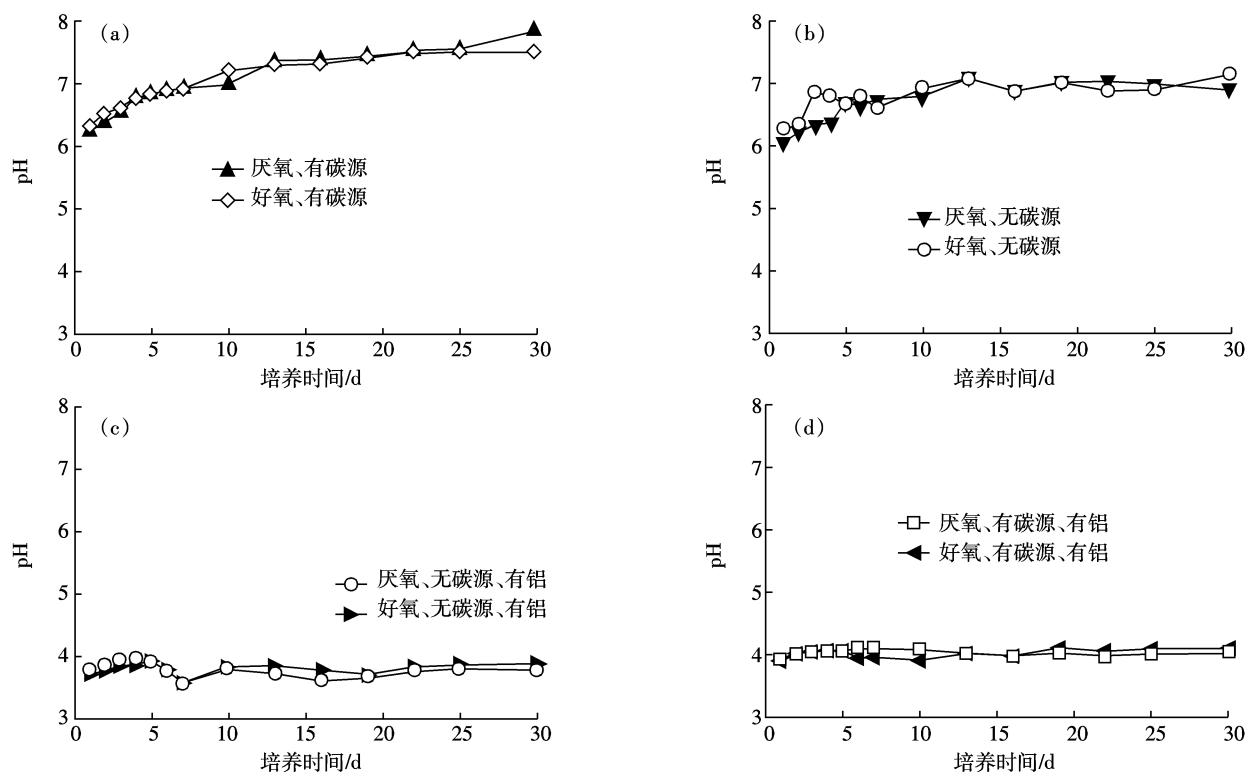


图 1 沉积物释放磷时水体 pH 值的变化

Figure 1 Variations of pH in the overlying water

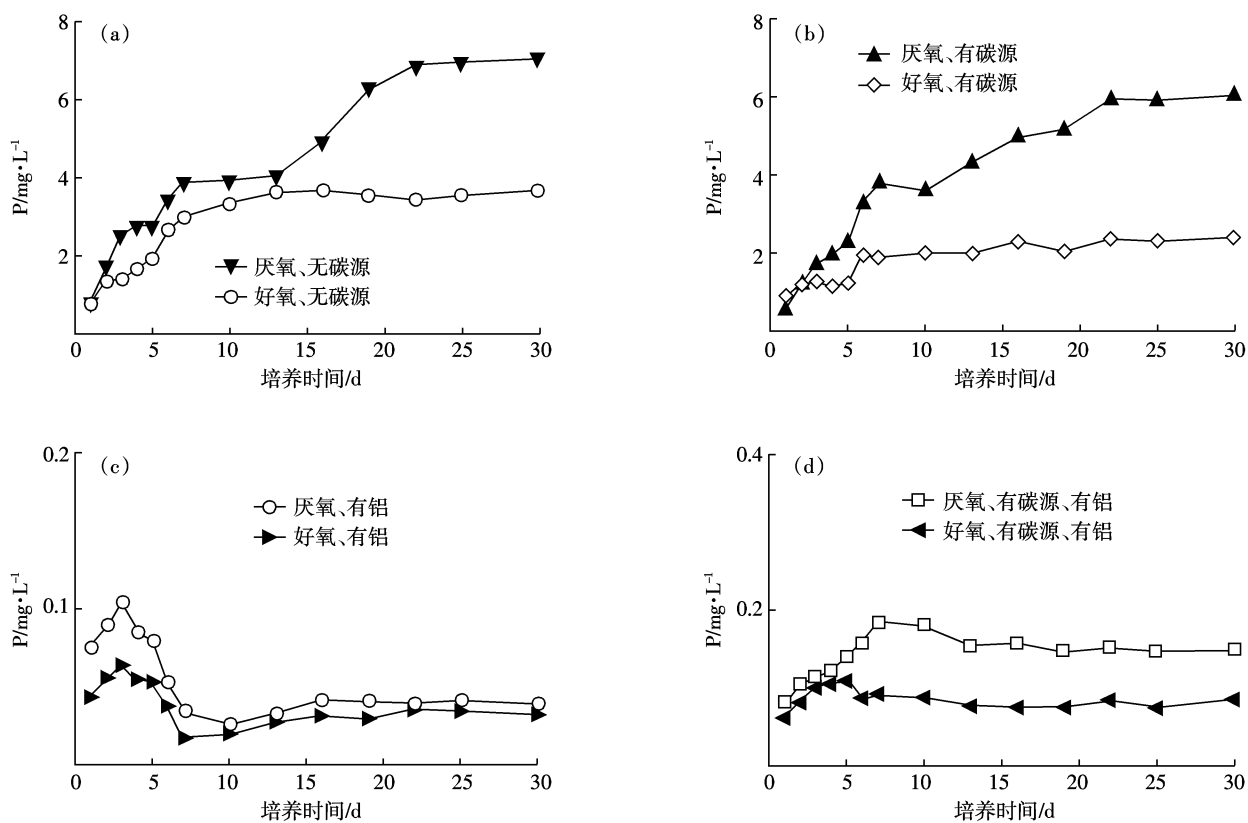


图 2 不同条件下溶解氧对沉积物磷释放的影响

Figure 2 Effects of DO on phosphorus release from sediments under different conditions

未添加金属铝的试验组,无论好氧还是厌氧条件下,未添加有机碳源时,沉积物中磷释放量高于添加碳源时的释放量(图 2a,b)。

厌氧条件下,未添加有机碳源,沉积物释放平衡时水中磷浓度为 $6.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而添加有机碳源,平衡时磷的浓度为 $5.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2a,b);好氧条件下,未添加有机碳源,沉积物释放平衡时水中磷浓度为 $3.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,添加有机碳源时,平衡时其浓度为 $2.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2a,b)。

添加金属铝的试验组,无论好氧还是厌氧条件下,添加有机碳源时,沉积物中磷释放量高于未添加碳源的释放量(图 2c,d)。这说明金属铝对沉积物释放磷的影响强于有机碳,同时添加有机碳降低了铝和磷吸附结合的能力^[17]。

2.5 金属铝对沉积物磷释放的影响

沉积物和上覆水为一个动态平衡系统,进行物质及能量交换直至达到平衡,沉积物可以向上覆水释放磷,在一定条件下,也可以从上覆水中吸附磷,使得上覆水中磷浓度始终维持在较低水平^[18]。金属铝的加入会抑制沉积物向上覆水释放磷。无论好氧还是厌氧,是否添加有机碳源,加入一定量外源铝后,上覆水中磷浓度与未添加外源铝相比明显下降(图 2)。各组中沉积物释放平衡时浓度前面已经叙述,这里不再重复。

3 讨论

pH 是水质的一个重要指标,对水体环境的各种物理化学反应有重要影响,pH 对沉积物释放磷影响的作用过程主要有两种,即影响沉积物对磷的吸附和离子交换作用。在酸性条件下,铁结合态磷和铝结合态磷不易释放,在碱性条件下,沉积物中的可变电荷胶体的表面会带上负电荷,降低了对水体中 HPO_4^{2-} 的吸附性。另外,水体中 OH^- 离子能与铁结合态磷和铝结合态磷中的 H_2PO_4^- 发生交换,增加了磷向上覆水释放的速率^[8]。综上所述,pH 值对沉积物磷释放的影响主要是通过影响 Fe、Al、Ca 等元素与磷的结合状态。

通常情况下,无论溶解氧水平如何,沉积物中的磷都可能向上覆水体释放,其释放量、释放速率与磷的存在形态有关^[9],按照 SMT 磷形态划分方法,磷一般以有机磷、铝磷、铁磷、钙磷等形态存在,溶解氧对沉积物磷释放的影响主要是与沉积物中的铁元素有关,因为铁元素存在可变化合价,而水中溶解氧的改变会引起沉积物氧化还原电位的改变。当底层水体有

足够的溶解氧时,水体-沉积物处于氧化状态, Fe^{3+} 与 P 结合,以 FePO_4 的形式沉积到沉积物中,水中可溶性磷被氢氧化铁 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 吸附而逐渐沉降。但在好氧状态下,沉积物中的有机质也会受到微生物的好氧分解,使不溶性的有机磷变成无机磷释放出来。只是由于沉积物中的有机磷含量一般较低,或是产生的腐殖质有吸附性,释放量不大。所以,总的影响结果是,好氧状态下沉积物中磷的释放量会降低^[20]。

当水体溶解氧下降至出现厌氧状态时,不溶性的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 易变成溶解态的 Fe^{2+} 化合物, Fe^{3+} 易变成 Fe^{2+} ,原先被 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 吸附的磷就会脱离 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的包裹进入间隙水,继而进入上覆水,使上覆水磷浓度上升^[21]。蔡景波等^[22]试验得出,厌氧状态下上覆水中磷浓度约是好氧状态下的 15 倍。由此可见,高溶解氧水平有利于控制沉积物向上覆水释放磷,维持水体较低的磷浓度。

有机质总量及其组分是沉积物物理化学性质中的重要指标,一方面,有机质能促进沉积物中磷的释放,其释放主要与有机质的氨基、羧基、羟基等官能团有关^[23],有机质矿化会改变沉积物的氧化还原电位和 pH,进而影响各种形态磷的释放过程^[24]。另一方面,有机质对沉积物磷的吸附也有很大影响。有机质中的腐殖质可以形成胶膜粘覆在粘土矿物、铁、铝氧化物以及碳酸钙等无机物内外表面,形成无机与有机的复合体,成为水-沉积物界面影响磷迁移转化的重要自然胶体。有机质还可以通过促进微生物的生长繁殖来消耗沉积物中的磷,但微生物的生长又促进了有机质的分解,加快矿化进程,分解产生的有机酸可以起到酸溶、络合作用,促进沉积物中难溶解的磷重新进入水层。因此,有机质对沉积物吸附、释放磷的影响是复杂的,这取决于有机质的物理化学性质。

Gerk 等研究认为,由于腐殖质能和铁、铝形成有机无机复合体,提供了重要的无机磷吸附点位,从而增强了对磷的吸附^[25]。Lopez 等研究揭示有机碳和碳酸钙含量对磷的吸附也有一定影响,沉积物对磷的吸附效率主要取决于总有机碳含量。本试验在未添加铝时,添加有机碳源的试验组水中磷浓度低于未添加有机碳试验组,说明有机碳源对磷有一定吸附作用,与 Lopez 等研究结果相吻合^[26]。

金属铝对沉积物中磷释放起抑制作用,同时在一定条件下对沉积物释放出的磷也有吸附作用^[27]。本试验中添加金属铝源的 Alafia 河沉积物具有相当强的吸附磷能力,其上覆水中磷浓度始终维持在较低水

平,此时,可以作为污染物的“汇”。有研究表明,沉积物中铁、铝等金属元素较丰富时,水体中的溶解性营养盐将由于吸附等作用而沉淀至水体底部,这样的水体(如长江中下游地区绝大多数湖泊)往往具有较强的自我净化能力。在厌氧条件下,由于Al结合了从 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 释放出来的P,沉积物中 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的浓度增大阻止了磷的释放^[28]。

4 结论

沉积物中的磷释放是复杂的多因素综合作用的动态过程,本试验研究了影响Alafia河沉积物磷释放的几个主要影响因素,得出以下结论:

(1)就试验结果看,试验期间,无论是否添加碳源,是否添加金属铝,厌氧条件下沉积物磷释放量明显高于好氧条件下。在沉积物磷的释放过程中起主要作用的微生物可能是厌氧微生物,有关微生物的影响作用需做进一步研究。

(2)有机碳源对沉积物磷释放影响的试验结果表明,未添加金属铝的实验组中,未添加有机碳源时,沉积物中磷释放量高于添加碳源时的释放量。而在添加金属铝后,添加有机碳源的试验组中磷释放量略高于未添加碳源的试验组。有机质分解过程中形成的有机胶体-腐殖质可以形成胶膜,覆盖在粘粒矿物、金属(铁、钙和铝)氧化物表面,减少这些无机物和磷酸盐的接触,防止或减轻这些无机物对磷的固定。此外,有机质也有较强的吸附能力,能有效减缓沉积物中磷的释放。

(3)金属铝对沉积物磷释放影响的结果表明,聚铝(PAC)有显著的抑制沉积物中磷释放的作用。添加金属铝后,上覆水中磷浓度明显下降。

沉积物磷形态分布势必影响沉积物磷的释放,因此有必要进一步研究沉积物释放后磷的形态分布,以了解不同形态磷之间的转化机制及其对释放的影响。

参考文献:

- [1] 梁海清,王圣瑞,金相灿,等.不同污染程度沉积物不同粒级有机磷形态及其分布[J].中国农学通报,2007,23(3):380-385.
LIANG Hai-qing, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, et al. Study on the organic phosphorus form & distribution of different particle size fractions in the different polluted sediments[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(3):380-385.
- [2] 李北罡,郭博书.黄河中游表层沉积物中无机磷的化学形态研究[J].农业环境科学学报,2006,25(6):1607-1610.
LI Bei-gang, GUO Bo-shu. Chemical forms of inorganic phosphorus in sediments in the middle of the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1607-1610.
- [3] Lamm, Greg. Alafia River. in Marth, Del and Marty Marth, eds. The Rivers of Florida[M]. Sarasota, Florida: Pineapple Press, Inc. 1990. IS-BN 0-910923-70-1.
- [4] Alafia River watershed management plan, 2002[R/OL]. <http://www.hillsborough.wateratlas.usf.edu/upload/documents/Volume01.pdf>
- [5] 韩璐,黄岁樑,王乙震.海河干流柱芯不同粒径沉积物中有机质、磷形态分布研究[J].农业环境科学学报,2010,29(5):955-962.
HAN Lu, HUANG Sui-liang, WANG Yi-zhen. Organic matter, different sized phosphorus fractions in the core sediments in the mainstream of Haihe River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):955-962.
- [6] Jiang X, Jin X C, Yao Y, et al. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China[J]. *Water Research*, 2008, 42: 2251-2259.
- [7] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, et al. Effects of dissolved oxygen supply level on phosphorus release from lake sediments[J]. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, 316:245-252.
- [8] Karthikeyan K G, Mandla A, Tshabalala D, et al. Solution chemistry effects on orthophosphate adsorption by cationized solid wood residues[J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38: 904-911.
- [9] Pizarro J, Belzile N, Filella M, et al. Coagulation/sedimentation of submicron iron particles in a eutrophic lake[J]. *Water Research*, 1995, 29(2): 617-632.
- [10] Li B, Ding S, Fan C, et al. Distributions of nitrogen and phosphorus in interstitial waters in the sediments of Fubao Bay in Lake Dianchi and their relationships with the activities of microbe and alkaline phosphatase in the surface sediments[J]. *Hupo Kexue*, 2008, 20: 420-427.
- [11] Berkowitz J, Anderson M A, Graham R C. Laboratory investigation of aluminum solubility and solid-phase properties following alum treatment of lake waters[J]. *Water Research*, 2005, 39: 3918-3928.
- [12] Berkowitz J, Anderson M A, Amrhein C. Influence of aging on phosphorus sorption to alum floc in lake water[J]. *Water Research*, 2006, 40: 911-916.
- [13] Gensemer R W, Playle R C. The bioavailability and toxicity of aluminum in aquatic environments[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1999, 29: 315-450.
- [14] Ruban V, Lopez-Sanchez J F, Pardo P, et al. Development of a harmonised phosphorus extraction procedure and certification of a sediment reference material[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2001, 3: 121-125.
- [15] John L Kovar. Methods of soil analysis, methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters [J]. *Southern Cooperative Series Bulletin*, 2009, 6: 50-54.
- [16] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30: 377-392.
- [17] De Vicente I, Jensen H S, Andersen F O. Factors affecting phosphate adsorption to aluminum in lake water: Implications for lake restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 389: 29-36.

- [18] 孙淑娟, 黄岁樑. 海河沉积物中磷释放的模拟研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 126–131.
SUN Shu-juan, HUANG Sui-liang. Simulated experiment of phosphorus release from Haihe River sediment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 126–131.
- [19] Jensen H S, Anderson F S. Important of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37(3): 577–589.
- [20] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 43–46.
JIANG Jing-long, WU Yun-hai. The factors on release of phosphorus from the sediment[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(6): 43–46.
- [21] 隋少峰, 罗启芳. 武汉东湖底泥释磷特点[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 102–105.
SUI Shao-feng, LUO Qi-fang. Release character of phosphorus from the sediments of East Lake, Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(1): 102–105.
- [22] 蔡景波, 丁学锋, 彭红云. 环境因子及沉水植物对底泥磷释放的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 151–154.
CAI Jing-bo, DING Xue-feng, PENG Hong-yun. Impact of environmental factors and submerged plant on phosphate release from sediment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 151–154.
- [23] 易文利, 王圣瑞, 金相灿, 等. 去除轻组有机质对湖泊沉积物磷释放速率的影响研究[J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2008, 4(1): 7.
YI Wen-li, WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, et al. Effects of light fraction organic matter removal on phosphorus release from lake sediment[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2008, 4(1): 7.
- [24] Pizarro J, Belzile N, Filella M, et al. Coagulation/sedimentation of sub-micron iron particles in a eutrophic lake[J]. *Water Research*, 1995, 29(2): 617–632.
- [25] Gerke J, Hermann R. Adsorption of orthophosphate to humic-Fe-complexes and to amorphous Fe-oxide[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1992, 155: 233–236.
- [26] Lopez P, Lluch X, Vidal M, et al. Adsorption of phosphorus on sediments of the Balearic (Spain) related to their composition[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42: 185–195.
- [27] 卢少勇, 金相灿, 胡小贞, 等. 扰动与钝化剂对水/沉积物系统中磷释放及磷形态的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(4): 437–440.
LU Shao-yong, JIN Xiang-can, HU Xiao-zhen, et al. Effect of perturbation and inactivation agent on the phosphorus release and phosphorus forms from sediment[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 437–440.
- [28] Kopacek J, Borovec J, Hejzlar J, et al. Aluminum control of phosphorus sorption by lake sediments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39: 8784–8789.

致谢:感谢国家留学基金委提供出国联合培养的机会, 同时感谢美国佛罗里达大学海湾海岸研究和教育中心、土壤和水实验室提供的实验仪器。