

武汉东湖底泥释磷特点

隋少峰, 罗启芳* (同济医科大学环境医学研究所, 武汉 430030)

摘要:为了探讨东湖底泥的释磷状况, 采用实验室模拟法研究了环境条件变化对东湖底泥沉积物磷释放的影响以及底泥磷的形态分布与底泥释磷量的关系。结果表明: 升高水温和扰动上覆水均能加速磷释放。上覆水中性时 ($pH = 7.4$), 底泥释磷量最低; 在较高或较低 pH 值时, 底泥释磷量倍增。厌氧条件下底泥释磷量是好氧条件下的 30 倍。研究还显示, 底泥中不同形态的磷与底泥磷释放量有不同程度的相关性, 其中可溶性磷和铁磷与底泥磷释放量高度相关 ($r > 0.90, P < 0.01$)。

关键词:底泥; 释磷; 环境因子; 磷形态

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)01-04-0102

Release Character of Phosphorus from the Sediments of East Lake, Wuhan

Sui Shaofeng, Luo Qifang (Institute of Environmental Medicine, Tongji Medical University, Wuhan 430030, China)

Abstract: Effects of environmental factors on the release of phosphorus were studied at laboratory simulated test. The relationship between the different forms of phosphorus in sediments and the quantity of releasing phosphorus was studied at the same time. Results showed that the rates of phosphorus release from the sediment increased with rising the temperature of disturbing the overlying water. The content of phosphorus release from the sediment reached the lowest level when pH value was 7.4, high pH or low pH increased the rates of phosphorus release from the sediment. In anaerobic, the release rates of phosphorus was 30 times as much as in aerobic. Research also showed that different chemical forms of phosphorus in sediments were related to the quantity of phosphorus released from the sediments in varying degrees. The dissolved phosphorus and Fe binding phosphorus in sediments played the most important roles ($r > 0.90, P < 0.01$).

Key words: sediment; phosphorous release; environment factors; phosphorus forms

武汉东湖是典型的城郊浅水型湖泊, 总面积 33 km^2 , 平均水深 2.2 m, 最大深度 6 m, 是武汉市集中式生活饮用水水源二级保护区及著名的风景游览区。随着沿湖工业生产的发展和人口的增加, 工业废水, 生活污水, 农田及其它地表径流都给东湖带入大量的氮、磷等营养物质。磷元素被认为是控制湖泊藻类生长的关键营养元素, 多年的研究表明, 东湖已由 50 年代的贫营养湖过渡到 60 年代的富营养湖, 近几年达到了重富营养化^[1]。正在实施的东湖流域截污工程对缓解水体的富营养化将起到一定的作用。然而, 据其它湖泊的有关资料^[2]显示, 在外源性营养物质入湖减少后, 浅型湖泊的水质较之深型湖泊更难以改善, 磷酸盐浓度的回弹主要来自湖泊底泥的磷释放。底泥磷释放对截污后湖水水质能否得到迅速改善有很大影响。

本文以东湖沉积物为研究对象, 模拟研究了环境

因素对底泥磷释放的影响及底泥不同磷形态与底泥释磷的关系。其结果对东湖富营养化的进一步治理及有关部门的科学决策有积极意义。

1 材料和方法

1.1 试验材料

东湖位于武汉市武昌区东北, 由水果湖、郭郑湖、筲箕湖、汤菱湖、后湖、庙湖等子湖组成, 湖面被湖堤分割成几部分, 各部分之间靠桥洞相通(见图 1)。采样时选择 6 个采样点, 用彼得森采泥器采取沉积物表层样,

基金项目: 国家“九五”科技攻关项目(96-911-07-02-01)
作者简介: 隋少峰(1973~), 男, 硕士, 现在山东省卫生防疫站工作。
收稿日期: 2000-03-19
* 联系人

置于塑料袋并带回实验室,室温下晾干,除去碎石杂物,用玛瑙研钵研磨,过 100 目筛,装入广口瓶中备用. 1 号位点底泥的理化性质见表 1.



图 1 东湖底泥采样位点示意图
表 1 实验用底泥的营养状况/ %

pH	含水量	TOC	TN	NH ₃ -N	TP	PO ₄ -P
7.15	81.7	1.96	1.52	0.0034	0.139	0.0007

取含磷量较低的团湖水(见图 1 中 A 点),经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后作试验用上覆水.上覆水的理化性质见表 2.

表 2 实验用上覆水的理化性质/ mg·L⁻¹

pH	TN	NH ₃ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	TP	PO ₄ -P
7.4	0.49	0.34	0.003	0.1326	0.038	0.010

1.2 试验方法

(1)环境因素影响 取 1 号位点的底泥样和团湖 A 位点未受污染的团湖水(经 0.45 μm 微孔滤膜过滤),按水:底泥=3:1 小心置于有机玻璃制作的试验装置中(见图 2),适度通气维持溶解氧含量,在可调节的恒温箱中进行释放模拟.改变环境条件,定时采集水样,经

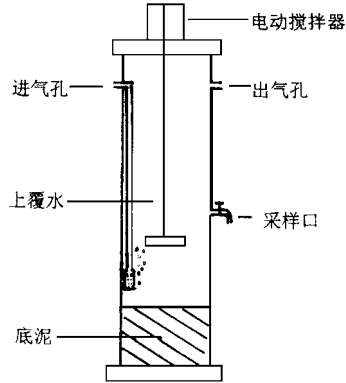


图 2 模拟实验装置示意图

0.45 μm 滤膜过滤后,测定总溶解性磷(TDP)含量. (2)底泥磷形态分布对磷释放影响 取 500 ml 三角烧瓶 6 只,分别加入 1~6 号位点风干底泥样 20g,上覆水 300 ml,置于 20 ℃的恒温箱中,每隔 3 d 取上覆水测定 TDP 含量,直至浓度恒定.同时对 1~6 号位点底泥样进行磷形态分析测定.

1.3 分析方法

底泥、上覆水理化性质测定参考文献[3],测定 TDP 用钼锑抗比色法[4]. 底泥磷形态分析参考文献[3]介绍的“逐级提取法”,将沉积物磷分为:可溶性磷(P_{sol}),铝结合磷(P_{Al}),铁结合磷(P_{Fe}),钙结合磷(P_{Ca}),闭蓄态磷(P_{σp}),有机磷(P_{org}),其逐级提取过程概括于图 3.

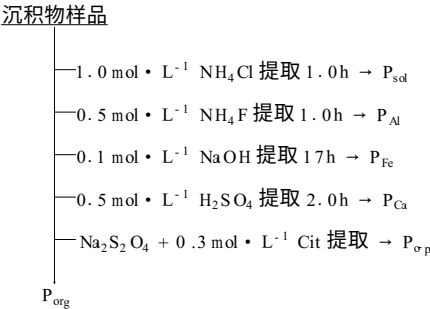


图 3 沉积物磷形态的逐级提取流程图

2 结果与讨论

2.1 环境因素对底泥释磷的影响

(1)温度影响 本实验模拟在 10 ℃,20 ℃,30 ℃水温条件下,沉积物中磷的释放,其它条件保持不变(pH 为 7.4,充气保持溶解氧 8.0 mg/L).由图 4 可见,温度对沉积物磷释放会产生一定影响,随着温度升高,底泥释磷量逐渐增多.30 ℃条件下上覆水中的 TDP 浓度是 10 ℃时的 2 倍.升高温度能增加底泥中微生物和生物体活动,耗 O₂ 增多,从而使底泥容易发生 Fe³⁺→Fe²⁺的化学反应,致使 Fe 结合磷中的磷释放出来[5].另外,微生物的活动还可以使沉积物中的有机态磷转化为无机态磷酸盐而得以释放.

(2)pH 值影响 用 1 mol·L⁻¹的 HCl 和 0.5 mol·L⁻¹的 Na₂CO₃ 调节上覆水 pH 值至 4.0,5.0,9.0,10.0,连同上覆水自然 pH 值 7.4 进行释磷模拟实验,其它条件保持不变(温度 20 ℃,溶解氧 8.0 mg·L⁻¹).结果见图 5.

由图 5 可知,中性范围磷释放量最小;在酸性条件下能促使磷释放;碱性条件下能大幅度提高磷的释放量.在富营养化湖泊中,湖水高 pH 值常见于藻类大量

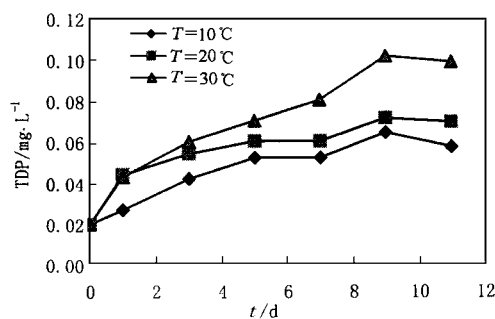


图4 温度对底泥磷释放的影响

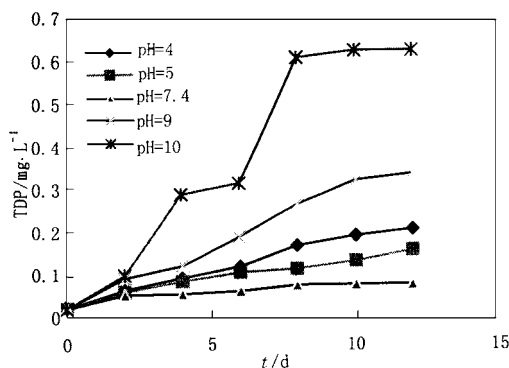


图5 pH对底泥磷释放的影响

繁殖时,由于藻类繁殖,光合作用加强,水中 CO_2 减少,通过改变水中 $\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 的平衡来改变 pH 值,平衡改变的结果, pH 值可升至 10,甚至更高^[6]。磷在湖底中通常被认为与 Fe、Al 盐相互作用,其中 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的吸附作用尤为重要,这种吸附受 pH 影响很大,低 pH 值时,溶解性的 H_2PO_4^- 含量增多,有利于底泥中磷的释放;在高 pH 值时,由于 OH^- 与铁、铝磷酸盐复合体中的磷酸盐发生交换,使底泥中的磷释放出来^[7]。

(3) 溶解氧影响 在 pH 为 7.4,水温 20℃ 条件下,通过不断充入空气或氮气,模拟好氧 ($\text{DO} \geq 9.5 \text{ mg/L}$),厌氧 ($\text{DO} < 1.0 \text{ mg/L}$) 条件进行试验。定时取样,测定溶液中磷的浓度,结果见图 6、7。好氧释放试验中,上覆水 TDP 浓度最大为 0.047 mg/L,且一天就达到平衡。厌氧条件,底泥中的磷大量释放,实验进行至 16 日时,水中 TDP 浓度达 1.445 mg/L,是好氧释放平衡浓度的 30 倍,且浓度尚未达到平衡。一般认为底泥释磷与 Fe-P 关系密切,当表层底泥 Eh 较高时,有助于 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ 反应,使 Fe^{3+} 与磷酸盐结合生成难溶的磷酸铁;而当 Eh 较低(小于 200 mV)时,有助于 $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$,胶体状的 $\{\text{Fe}(\text{OH})_3\}_x$ 转化为可溶性的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,使 PO_4^{3-} 脱离沉积物进入间隙水,继而在上覆水中扩散,促使水体

磷含量上升^[8]。

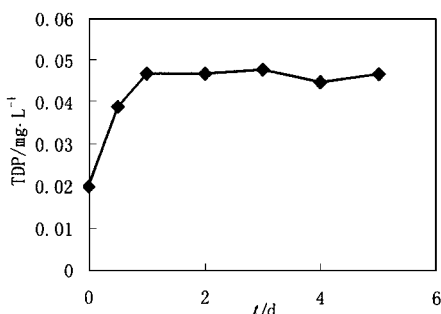


图6 底泥好氧磷释放规律

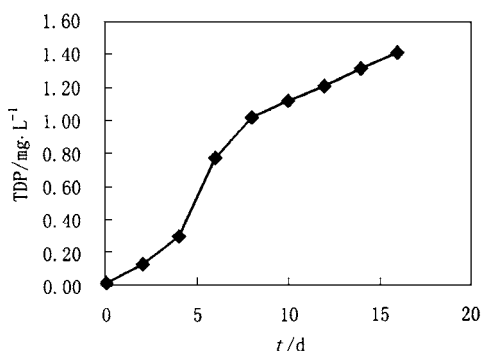


图7 底泥厌氧磷释放规律

(4) 扰动的影响 扰动是影响浅水湖泊水-沉积物界面反应的主要物理因素。由于东湖水浅,水面开阔,最大水面吹程近 8 km,走向与本地盛行风向相同,常形成一定规模的风浪,尤其在盛行北风和盛夏偏南风的吹送下,湖面常形成二维波,波高最大可达 1 m 左右。波浪对底泥产生扰动,郭郑湖湖心处受扰动深度为 8 cm^[9]。另外水果湖是水上运动、科研、渔业活动的重要场所,人类活动频率较其它湖区大,水果湖湖心处受扰动深度达 18 cm,人类活动对东湖沉积物的影响在某些地方已超过自然因素的影响。

为考察扰动对底泥释磷的影响,将模拟装置置于 20℃ 恒温箱中,通气保持上覆水 DO 为 8.0 mg/L, pH = 7.4,调节固定于装置上盖的搅拌器,在不同转速下使底泥再悬浮,浑浊程度用滤膜法^[3]测定。定时取样测定其中 TDP 值,结果见图 8。扰动促使沉积物再悬浮,促进沉积物中的磷释放,加速了沉积物间隙水中磷的扩散,从而增加了磷的释放。

2.2 底泥磷形态对磷释放影响

1~6 号位点底泥样的磷形态分析结果见图 9。磷释放达平衡时,1~6 号三角烧瓶中各上覆水 TDP 浓度见表 3。

表 3 磷交换平衡时各上覆水中 TDP 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

样品号	1	2	3	4	5	6
TDP	0.612	0.098	1.341	0.112	0.151	0.136

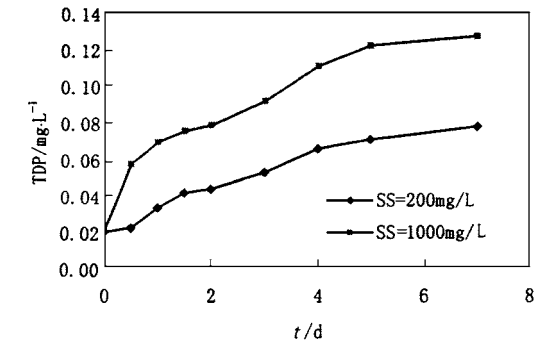


图 8 扰动对底泥磷释放的影响

6 个底泥样品中的起始磷形态含量分别与磷交换达平衡时上覆水中的 TDP 浓度进行线性相关分析,发现除 TP 与上覆水中 TDP 浓度高度相关外, P_{sol} 、 P_{Fe} 、 P_{org} 与上覆水中 TDP 浓度亦高度相关($r>0.80$, $n=6$),其

表 4 上覆水 TDP 浓度与各磷形态的回归方程

磷形态	P_{sol}	P_{Al}	P_{Fe}	P_{Ca}	P_{org}	P_{op}	TP
a	-0.062	0.164	-0.081	-0.169	-0.070	-0.473	-0.345
$b(\times 10^{-4})$	805.5	1784	12.34	18.13	27.15	28.59	6.216
r	0.987 ²⁾	0.405	0.936 ²⁾	0.776	0.823 ¹⁾	0.859 ¹⁾	0.985 ²⁾

1) 该数据显著性水平 $P\leq 0.05$ 2) 该数据显著性水平 $P\leq 0.01$

泥释放入水中,所以可以认为上覆水中的磷主要来自底泥中可溶性磷、铁磷及有机态磷 3 种磷形态,其中可溶性磷及铁磷形态对底泥释磷的贡献尤为重要($r>0.90$, $P<0.01$).

3 结论

底泥释磷是十分复杂的多因素综合作用的动态过程.本次实验只研究了影响东湖底泥释磷的几个主要因素.从实验结果看温度和扰动的影响相对小一些,pH 值的改变及溶解氧的变化对底泥释磷的影响相对大些.底泥中除可溶性磷,铁结合磷对底泥释磷有较大影响外,有机态磷在底泥的释磷中也起重要作用,有机态磷在微生物作用下转变为无机磷,而环境因素可能通过影响微生物数量及活动强度对底泥释磷产生作用,有关这方面研究需进一步深入进行.

参考文献:

1 严国安,谭智群,任南.武汉东湖水环境污染状况及控制和恢复对策.环境科学与技术,1994,(67):19~23.
2 Phillips G, R Jackson, C Bennett, A Chilvers. The importance

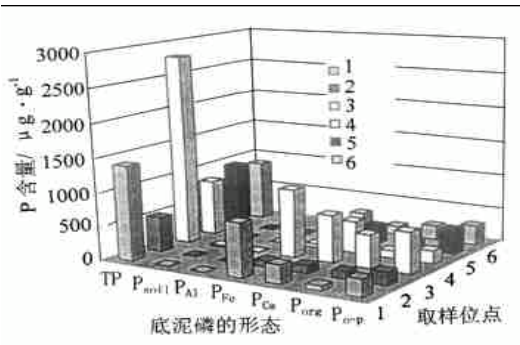


图 9 1~6 号位点底泥样的磷形态分布

它各形态磷与上覆水中 TDP 浓度相关性不大.上覆水中 TDP 浓度与各形态磷的回归方程见表 4.

对相关系数 r 进行假设检验,其中, P_{sol} 、 P_{Fe} 、 P_{org} 、 P_{op} 4 种磷形态对上覆水中 TDP 浓度回归相关系数 r 的显著性水平小于 0.05,从统计学角度考虑,上覆水中 TDP 浓度对这 4 种磷形态有很好的相关性($r>0.800$, $P<0.05$).闭蓄态磷被认为是硅酸盐晶格内的磷,有时称为不溶性磷,一般的自然环境改变并不能使其从底

of sediment phosphorus release in the restoration of very shallow lakes (The Norfolk Broads, England) and implications for biomanipulation. Hydrobiologia, 1994, (275/276): 445~456.
3 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第二版).北京:中国环境科学出版社,1990.
4 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法(第三版).北京:中国环境科学出版社,1989. 280~285.
5 Henning Skovgaard Jensen, Frede Stergaard Andersen. Important of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. Limnol. Oceanogr., 1992, 37(3): 577~589.
6 Paul C M Boers. The influence of pH on phosphate release from lake sediment. Wat. Res., 1991, 25(3): 309~311.
7 Provini A, PremaZZi G, 张萌华译.环境科学与技术(国际湖泊污染与恢复研究译文集), 1987. 56~68.
8 Bando R. Sediments: Chemistry and toxicity of in place pollutants. Michigan: Lewis Publisher, 1990. 131~144.
9 杨汉东,蔡述明.武汉东湖的现代沉积速率及其与扰动的关系.环境科学与技术,1993, 55: 11~13.