

太湖不同污染程度底泥对磷滞留能力的比较

张雷燕^{1,2}, 李 柯³, 刘正文¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070)

摘 要: 磷(P)是湖泊富营养化的限制性营养元素,而沉积物是湖泊营养物质的重要蓄积库,沉积物对P的滞留能力是决定湖泊自净能力的重要因素。采用室内有机玻璃圆柱装置,研究了太湖两种污染程度不同的底泥对P的滞留能力。结果表明,污染程度较轻的黄泥在实验期间对P的最大滞留量为 $28.365 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$,污染程度较重的黑泥最大滞留量仅为 $9.321 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$,两种底泥对P的滞留具有极显著的差异($P<0.01$)。与实验初期相比,实验末期黄泥中总磷增加0.06%,而在黑泥中却减少0.02%,黄泥对P的滞留能力远远大于黑泥。

关键词: 底泥; P滞留能力; 太湖

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)03-0546-05

Phosphorus Retention Capacity of Sediments with Different Pollution in Taihu

ZHANG Lei-yan^{1,2}, LI Ke³, LIU Zheng-wen¹

(1.Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.College of Fisheries, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Phosphorus(P) is a limited nutrient of lake eutrophication. Sediment is the important nutrient pool of lake ecosystems, and P retention capacity of sediment is an important factor determining the self-purification capacity of lakes. This paper studied the P retention capacity of the sediments with different pollution(eutrophication) in Taihu. The results showed that the maximum P retention of yellow sediment with less pollution was $28.365 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$, but that of black sediment with more pollution was only $9.321 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$. There was significant difference between the P retention capacity of two different sediments (ANOVA $P<0.01$). The TP of yellow sediment at the end of the experiment increased 0.06%, but that of black sediment decreased 0.02%. Our research indicated that the capacity of yellow sediment P retention was far stronger than that of the black sediment.

Keywords: sediment; P retention; Taihu

富营养化已经成为湖泊生态系统结构退化的主要原因,这种退化往往导致湖泊功能的衰退,包括生物多样性丧失、优质鱼类(如肉食性鱼类)减产和环境容量降低等^[1-2]。沉积物作为进入湖泊中污染物的汇,能够影响磷酸盐在沉积物-水分界面的转移和P释放率^[3],进而对湖泊整个生态系统结构和功能产生重要的影响。同时,那些环境容量较高、对外源污染负荷

有较高抗干扰能力的湖泊,其沉积物往往对污染物有较高的吸附和滞留能力。但是,随着污染的增加,进入湖泊沉积物中的污染物不断积累,吸附能力逐渐达到饱和,对污染物的滞留能力也会大大降低,使得沉积物成为湖体营养物的内负荷^[4]。磷(P)是湖泊生态系统的限制元素,水体磷浓度是评价水体富营养化程度的主要指标之一,其过度输入是导致湖泊富营养化的主要原因^[2]。沉积物对P的滞留是影响湖泊对外源P负荷缓冲能力的主要因素之一,也是决定湖泊富营养化控制与生态系统恢复的关键因子之一。

随着富营养化的加剧,沉积物中磷含量不断增加,对磷的滞留能力也逐渐降低。富营养化也会导致

收稿日期:2009-06-01

基金项目:国家支撑项目(2007BAC26B02);973项目(2008CB418100)

作者简介:张雷燕(1982—),女,博士研究生,主要研究方向为湖泊环境工程与生态系统恢复。E-mail:zhangleiyan27@163.com

通讯作者:刘正文 E-mail:zliu@niglas.ac.cn

沉积物中有机质的变化,有机质的含量和组分对沉积物磷的释放和吸附有很大的影响^[5]。同时底泥中的金属离子,如铁、锰、铝、钙等对沉积物中磷的吸附和释放也有重要的影响^[5-6]。

太湖是我国第三大淡水湖泊,上世纪 80 年代后富营养化趋势十分严重。部分湖泊沉积物污染严重,营养盐和有机质含量较高。本实验以不同污染程度的太湖沉积物为对象,通过其对人工间隙水中磷的滞留率比较,探讨了不同特征沉积物对磷的滞留能力,为湖泊治理,尤其是沉积物治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 底泥采集

底泥采自太湖梅梁湾。梅梁湾富营养化较为严重,每年都有严重的蓝藻水华,蓝藻容易聚集的区域沉积物污染尤为严重,而较为开敞的区域沉积物污染相对较低。实验用沉积物于 2007 年 12 月分别采自污染严重和污染较轻的水域。污染较重的沉积物颜色较黑(以下简称黑泥),污染较轻的则为黄色(以下简称黄泥)。将采集的底泥带回室内风干,并用 10 目的土壤筛筛除杂物和石块,待用。

1.2 实验装置

本实验所用装置为 6 个由有机玻璃制成的圆柱形装置(高 54 cm,内径 19 cm)。将底泥风干过筛后,3 个装置装入黑泥,另外 3 个装置装入黄泥,装置中底泥的厚度均为 10 cm。将装置置于室内,然后分别加入 3 200 mL 经 0.45 μm 滤膜过滤的湖水,在自然条件下静置 3 d 后开始实验。配制人工间隙水,每升蒸馏水加入 96.8 μmol KH_2PO_4 混匀,随后放在一个不漏气的塑料袋中,通过充入 N_2 使其呈缺氧状态。装置的底部连接一个蠕动泵,在整个实验过程中从装置底部向内部连续不间断地注入人工配制的间隙水,蠕动泵的速率设置为 0.16 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。注入人工间隙水(即实验开始)后每隔 24 h 从装置的顶端取上覆水样 1 次,取水之前轻搅使上覆水混匀,每次取得水样的体积等于所注入的人工间隙水的体积,实验连续进行 14 d。为防止附着藻类影响底泥对 P 的滞留,实验过程中用黑塑料袋将 6 个装置整体罩住,使其完全处于黑暗状态。

1.3 化学分析

上覆水分析指标包括总磷含量(TP)、总溶解磷含量(TDP)、溶解无机磷含量(DIP),采用钼蓝比色法测定。

底泥中 P 采用连续萃取法分析。实验前后,分别从 6 个装置中由表层到底层垂直采集底泥,将取出的黄色底泥和黑色底泥分别混匀作为一个整体,按照连续萃取法测定 P 的形态,包括 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ (弱吸附态磷)、 BD-P (主要是铁、锰结合态磷)、 NaOH-rP (主要是铝结合态磷)、 NaOH-mP (有机磷)、 HCl-P (钙结合态磷)和 Res-P (残渣磷)^[7]。

1.4 P 滞留的计算

P 滞留能力以 24 h 为单位计算,P 的滞留量根据下列公式计算。

$$P_0 = [(P_1 - P_2) \times 10^3] / (31 \times S)$$

式中: P_0 为 P 的滞留量, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$; P_1 为 24 h 人工间隙水加入 P 的总量, mg, $P_1 = \rho$ (人工间隙水中 P 的浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) $\times V$ (加入的人工间隙水的体积, mL) $\times 10^{-3}$; P_2 为取得上覆水样中的 TP 含量, mg; S 为装置的底面积, m^2 。

2 结果与分析

2.1 底泥的特性

从表 1 可以看出,两种底泥的物理性质不同。黄泥的容重(1.33 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)要大于黑泥的容重(1.20 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),说明黄泥比较紧实,孔隙小,水分的透过能力较差;而黑泥比较松,孔隙相对较多,水分的透过能力较好。

表 1 底泥的基本性质

Table 1 The basic character of sediments

样品	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	实验开始			实验结束		
		pH	OM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TOC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	OM/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TOC/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
黄泥	1.33	7.37	6.92	4.01	7.13	6.99	4.06
黑泥	1.20	7.38	19.28	11.18	7.06	18.57	10.77

化学性质方面也存在差异。土壤有机质能够影响土壤的酸碱缓冲性、耐肥性、通气状况和土壤温度^[8],并能影响土壤对 P 的滞留和释放。从表 1 看出无论实验开始还是结束,黑泥所含有机物质的量远远大于黄泥所含的量,是其 3 倍多。而且黑泥的 TOC 大于黄泥的含量,因此,黑泥的营养程度要远远高于黄泥。

2.2 P 滞留能力

两种底泥在实验 14 d 内的 P 滞留量变化不同,如图 1 所示。实验开始时,黑泥滞留 P 的量为负值,说明其处于 P 释放状态。随着时间的延长,黑泥 P 释放的量逐渐减少,在第 7 d P 释放量为 2.844 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$,之后为 P 滞留状态,但滞留量很低,在整个实验期间

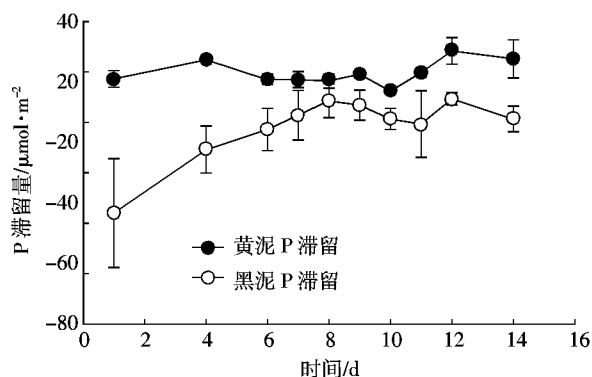


图 1 两种底泥对 P 滞留量随时间的变化

Figure 1 The change of P retention of two kinds of sediments with time

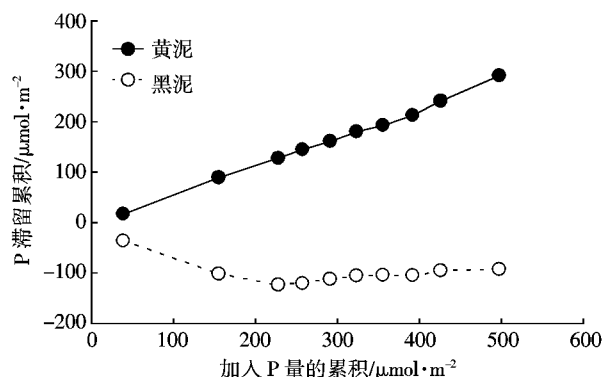


图 2 黄泥和黑泥对 P 滞留的累积

Figure 2 The cumulated P retention of the yellow sediment and black sediment

滞留量均在 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下波动,最大滞留量仅为 $9.321 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。与黑泥在实验初期的 P 释放不同,黄泥在整个实验期间的 P 滞留量一直大于 0,处于滞留状态(图 1)。黄泥 P 的滞留随时间延长而升高,到第 12 d 时达到最大值 $28.365 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。单因素方差分析结果表明,两种底泥对 P 的滞留有极显著的差异 ($P < 0.01$)。

实验中,黄泥随着每日加入 P 量的增加,滞留总量呈直线上升,实验结束时,黄泥对 P 滞留累积量为 $291.479 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 2)。而对于黑泥来说,随着加入 P 量的增加,对磷的滞留累积量是先减少,在第 6 d 达到最低值 $-123.365 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$,随后缓慢增加,但是在实验结束时对磷的总滞留量仍为负值,说明黑泥在整个实验期间 P 释放量大于滞留量(图 2)。

2.3 底泥 P 的形态变化

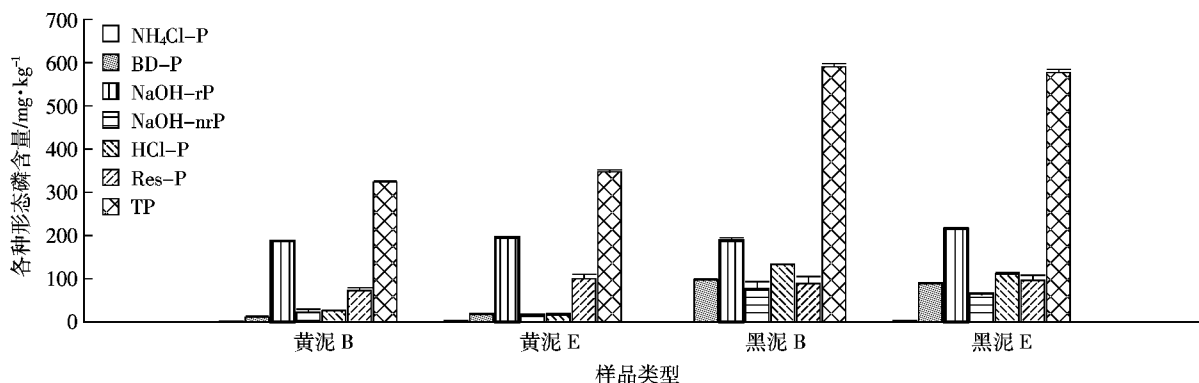
从图 3 可以看出,在实验开始和结束时,不论黄

泥还是黑泥,底泥中 NaOH-rP 含量均最大,分别占总磷含量的 57.75%、55.67%和 31.88%、37.19%; $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量最低,均不到总磷含量的 0.60%。黑泥中 HCl-P 的含量也较高,在实验开始和结束时分别占总磷含量的 22.62%和 19.27%。

从磷含量的变化来看,实验末期黄泥中 NaOH-nrP 形态的 P 含量减少 3.75%,其他形态的磷含量均增加,以 Res-P 的增加程度最大,总磷也增加 0.06%;而在黑泥中,实验末期的 BD-P 和 NaOH-nrP 形态的 P 分别减少 9.11%、2.73%,NaOH-rP 增加量为 4.48%,但总磷含量却减少 0.02%。两种底泥的 Res-P 含量均有所增加。

3 讨论

沉积物在湖泊的营养盐循环中起重要的作用。湖泊上覆水的 P 部分可能被底泥吸附,同时底泥中的 P



黄泥 B 和黑泥 B 代表实验开始时的值,黄泥 E 和黑泥 E 代表实验结束时的值。

Yellow sediment B and black sediment B stand for the value at the beginning of the experiment, yellow sediment E and black sediment E stand for the value at the end of the experiment.

图 3 实验结束时两种底泥中各种磷的变化量

Figure 3 The change in contents of phosphorus species of the sediments at the beginning and the end of the experiments

也可能向上覆水释放,吸附与释放是一个动态的过程,它们之间的差值就是底泥对P的滞留,滞留的多少是决定湖泊环境容量的重要因素。一般来说天然湖泊对磷等营养盐有一定的滞留能力,这与湖泊沉积物的特性有关,尤其是浅水湖泊。

在P的滞留方面,黄泥在整个实验中一直处于滞留状态,虽然黑泥的营养程度较高,但是黑泥对P仍然有一定的吸附能力,如图1所示。黑泥对P是先释放后滞留,但由于黑泥本身所含的P较多,开始释放较多,整个实验期间的P滞留为负值,即释放多于吸附。图3表明实验结束时黑泥中TP的含量减少也说明了这一点。黑泥对P滞留能力较低的主要原因可能是其本身含磷量过高,呈过饱和状态,在上覆水磷浓度较低时释放率较高。结果表明,黄泥对P的滞留能力远远大于黑泥。

除了沉积物P含量可以影响其滞留能力外,沉积物滞留P的能力还与物理、化学和生物等因素有关。底泥中滞留P的变化是由于物理、化学和生物等因素共同引起的。研究表明,影响沉积物对P的滞留能力的因子很多,包括物理和化学因子。湖水温度、pH值、溶解氧和水体扰动^[9-12],以及氧化还原电位^[4]、藻类^[13]、铁锰氧化物^[14]、有机质的含量和组成^[6]等都能影响沉积物中P的释放。黑泥和黄泥对P滞留能力的不同,可能也与底泥中各种离子和有机物对P的作用不同有关。对两种底泥进行分级测定表明,实验开始时两者在P的分级上有一定的差别,黄泥各种形态的P占TP百分比的顺序是NaOH-rP>Res-P>NaOH-nrP>HCl-P>BD-P>NH₄Cl-P;黑泥各种形态的P占TP百分比的顺序是NaOH-rP>HCl-P>BD-P>Res-P>NaOH-nrP>NH₄Cl-P。从实验前后各种磷的变化量来看,黄泥和黑泥的NaOH-nrP有所减少,可能是一部分有机磷在实验过程中转化为无机磷;而NaOH-rP有所增加,由于其主要是Al结合态磷,受有机络合物的影响较大^[15],在Al表面形成的氢氧化合物具有巨大的表面积,能够强烈地吸附正磷酸盐,增加了底泥对P的滞留^[16]。实验结束时,黑泥中BD-P含量减少。本研究两种底泥pH没有显著差别,实验温度一致,都处在缺氧的条件下。但是由于在实验前,底泥经过阴干处理,使得底泥中的Fe-Mn处于高价态,在实验初期吸附较多的P。随着实验的开始,底泥中氧逐渐减少,Fe-Mn离子被还原成低价态的,使磷酸根释放出来,这可以解释图3中黑泥中BD-P的减少。至于黄泥中BD-P的增加,可能是黄泥中P含量较低,

铁锰离子含量较高,部分离子被还原不影响其对P的吸附。

研究表明,底泥中的有机质也对P的滞留有重要的作用,其对P的滞留是多方面的。有机质分解过程中形成的有机胶体——腐殖质可以形成胶膜,被覆在氧化铁以及碳酸钙等无机物表面,减少这些无机物和磷酸盐离子的接触,从而防止或减轻了这些无机物对磷的固定^[16]。表1中黑泥的有机质含量是黄泥的3倍多,有机质对黑泥P滞留的影响远远大于对黄泥的影响,较高的有机质含量可能阻碍了黑泥对P的吸附,使其滞留能力较差。

4 结论

太湖黄泥(污染较轻水域的底泥)的P,有机质含量较低,对P的滞留能力较高;而黑泥(污染较重水域的底泥)的P,有机质含量较高,对P的滞留能力较低。因此,要增加沉积物对P的滞留,提高湖泊的自净能力,对有机质、P等含量较高的沉积物进行清淤十分必要。

参考文献:

- [1] Carpenter S R, Ludwig D, Brock W A. Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change [J]. *Ecological Application*, 1999, 9: 751-771.
- [2] Schinder D W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51: 356-363.
- [3] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 53-61.
- [4] 范成新. 漏湖沉积物理化特征及磷释放模拟[J]. *湖泊科学*, 1995, 7(4): 341-350.
FAN Cheng-xin. Physiochemical characteristics of sediments in GeHu Lake and simulation of its phosphorus release [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1995, 7(4): 341-350.
- [5] 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.
- [6] 朱广伟, 秦伯强, 高 光. 浅水湖泊沉积物磷释放的重要因子——铁和水动力[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(6): 762-764.
ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang. Hydrodynamics and iron: the key factors affecting resuspension of phosphorus from shallow lake sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6): 762-764.
- [7] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037-2042.

- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学出版社, 1978.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing. Soil physical and chemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science Publishing, 1978.
- [9] 王庭健, 苏睿, 金相灿, 等. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. 环境科学研究, 1994, 7(4):12-20.
WANG Ting-jian, SU Rui, JIN Xiang-can, et al. The effects to water quality of phosphorus loading and its release in the sediments of urban eutrophic lakes [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1994, 7(4): 12-20.
- [10] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6):738-742.
WANG Jia-quan, SUN Ya-min, QIAN Jia-zhong, et al. Simulated study on phosphorus release of Chao Lake sediment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2002, 22(6):738-742.
- [11] 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.
- [12] 杨荣敏, 王传海, 沈悦. 底泥营养盐的释磷对富营养化湖泊的影响[J]. 污染防治技术, 2007, 20(1):49-52.
YANG Rong-min, WANG Chuan-hai, SHEN Yue. Effects of internal pollution sources on the eutrophic lake [J]. *Pollution Control Technology*, 2007, 20(1):49-52.
- [13] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1):15-19.
WANG Xiao-rong, HUA Zhao-zhe, XU Ling, et al. The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1996, 15(1):15-19.
- [14] Christophoridis C, Fytianos K. Conditions affecting the release of phosphorus from surface lake sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35:1181-1192.
- [15] Darke A, Mark R Walbridge. Al and Fe biogeochemistry in a floodplain forest: Implications for P retention[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 51:1-32.
- [16] 徐轶群, 熊慧欣, 赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(11):147-149.
XU Yi-qun, XIONG Hui-xin, ZHAO Xiu-lan. The research of the adsorption and release of the sediment [J]. *Chongqing Environmental Science*, 2003, 25(11):147-149.