

水体富营养化状态对城市河道底泥吸附/释放 P 的影响 ——以江苏省苏州市河道试验研究为例

冯海艳¹, 李文霞¹, 杨忠芳¹, 阮晓红²

FENG Hai-yan¹, LI Wen-xia¹, YANG Zhong-fang¹, RUAN Xiao-hong²

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China

摘要:以苏州主城区内的河道为研究对象,采用静态培养的方式,研究了上覆水体不同富营养化程度对底泥中 P 释放/吸附的影响。研究结果表明:截断外源污染后,苏州河道底泥对水体中营养盐 P 呈现吸收状态;随着上覆水体磷酸盐浓度的增大,单位面积底泥累积吸收的磷酸盐就越多;上覆水与底泥比值越大,底泥对 P 的吸附率有减小的趋势。

关键词:富营养化;底泥;磷;释放;吸附

中图分类号:X142

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2010)05-0739-06

Feng H Y, Li W X, Yang Z F, Ruan X H. Influence of water body eutrophication level on phosphorus releasing/absorption from sediments in Suzhou River, Jiangsu, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5):739-744

Abstract: Studies on the influence of water body eutrophication level on phosphorus releasing/absorption from sediments in Suzhou River were conducted under mimicked static state experiments. The results were given as follows: sediments from Suzhou River can absorb P in static state without external input; with the increasing of phosphate concentration, the phosphate adsorption capacity of sediment also has increased; the higher ratio of over-lying water to sediment it is, the lower phosphorus absorbing capacity on sediments will be.

Key words: eutrophication; sediments; phosphorus; release; absorption

河湖水体是环境系统的重要组成部分,与工农业生产、人类生活等息息相关。但是,现代经济的高速发展和人口的剧增使得水体的营养负荷急剧增加和累积,水体中的水生生物大量繁殖,水质富营养化过程加快,水质恶化,水功能丧失,已成为当今世界重大的环境问题之一。

河流湖泊众多的平原地区,人口稠密,工厂密布,每天都有大量污水排入河湖之中。污水中的可沉降物质逐年沉积在河底,形成具有一定厚度的含有各种污染物质的淤泥层。尤其是苏南地区的一些河

流,底泥厚度最大可达 1m 以上,底泥中有机质的含量超过 10%。在水流作用下,底泥的冲刷及再沉降、底泥向上方水体释放污染物、底泥耗氧等,都对河流的水质产生影响,因此河流底泥是一个不可忽视的重要污染源^[1-2]。

底泥中总 P 的含量与上覆水中 P 的浓度关系密切,其原因是上覆水较接近底泥,在生物的作用下,经常同底泥进行着物质和能量的交换^[3-4]。但是底泥向水体的释 P 过程并不是无条件进行的,而是受到上覆水中 P 浓度的限制^[5-7]。

收稿日期:2009-09-21;修订日期:2009-12-09

科技项目:国家“863”项目《苏州水环境质量改善与综合示范》子课题(编号:2003AA601070)和中国地质大学(北京)创新团队项目资助

作者简介:冯海艳(1974-),女,博士,副教授,从事环境地球化学与农业化学方面的研究。E-mail:haiyan@cugb.edu.cn

本次实验分别采用苏州内城河水(苗家河)、外城河水和内城+外城河水(根据实际状况取竹辉河水)为上覆水,取富营养化程度相对严重的苗家河底泥为实验用泥,进行静态培养,监测水体不同的富营养程度对底泥营养盐释放的影响,了解调水对底泥营养盐释放的影响等。

1 实验材料与方法

实验装置:直径为 5cm、高为 35cm 的柱状容器。
实验处理:上覆水分别采用苗家河水、外城河水和竹辉河水。具体操作如下:向柱子中加入混合均匀、新鲜、富营养化较严重河段的底泥 5cm 高,加入上覆水 20cm 高,水土比为 1:4。柱子用黑色布遮光,以模拟实际河道,进行静态培养。装柱后第 3~10d 每天取样,11~22d 3 天取 1 次样,23~37d 5 天取 1 次样,共培养 43d。每次取 100mL。取样后,用原水补充到柱中。对照实验中只加入相应的河水,不加底泥,其他操作同上。

分析项目:水样经 0.45μm 微孔滤膜过滤,测总溶解性磷(TDP)和磷酸盐的含量。
供试底泥和上覆水的基本化学性质见表 1 和表 2。

2 结果与分析

2.1 上覆水中总溶解性磷和磷酸盐浓度的变化状况
P 元素的地球化学特性决定了在水体和底质之间的转化处于一个平衡体系,因此在切断外源污染的前提下,上覆水中总 P 浓度的升高和降低可以反映底泥释放或吸收 P 的状况。

由图 1 可以看出,3 种上覆水的处理和对照实验都表现出前 20 天上覆水中 TDP 和磷酸盐含量波动幅度很大,可能是由于河水或者泥水体系还未到达平衡时间。但是之后,直到培养实验结束,磷酸盐的变化规律与可溶性总磷(TDP)的变化趋势相似,水中磷酸盐和 TDP 的浓度均明显低于对照水体中磷酸盐和 TDP 的浓度,表明 20 天之后直到实验结束,底泥都处于吸收的状态。也就是说,在截断外源污染后,苏州河道底泥对上覆水中的 P 以吸附作用为主。

2.2 不同上覆水对底泥中 P 释放量的影响

图 2 表示在静态条件下,不同上覆水对底泥释放总溶解性磷(TDP)和磷酸盐量的影响。由图 2 可见,上覆水对二者的影响变化趋势相似,在培养实验开始的 2 周,释放量逐渐增大,并均达到最大值,属于快速释放阶段;之后,3 种上覆水处理的底泥均处于吸附状态,底泥非但没有向水体释放 P,反而从水体中吸附 P,呈“负释放”状态。就底泥释放的量的绝对值而言,竹辉河水和苗家河水处理的较大,外城河水处理的最小。

2.3 不同上覆水对底泥中总 P 释放速率的影响

图 3 表示不同上覆水体对底泥释放 TDP 速率的影响。在培养实验的第 4、5 天,上覆水为外城河水的底泥 TDP 的释放率高于其他 2 种上覆水;随着实验的进行,上覆水为竹辉河水的底泥释放速率渐渐高于其他 2 种上覆水。在第 20 天以后,底泥开始吸收 P,上覆水为竹辉河水的底泥吸收速率最快,而外城河水的最慢。

表 1 供试底泥的基本化学性质
Table 1 Basic chemical characteristic of sampling sediments

指标	总氮(TN) /g·kg ⁻¹	总磷(TP) /g·kg ⁻¹	有效P /g·kg ⁻¹	有机质 /%	含水率 /%	pH
底泥	4.397	2.154	0.01033	7.93	73.46	7.46

表 2 实验用上覆水的基本化学性质
Table 2 Basic chemical characteristic of overlying water in the experiment

指标	总氮(TN)	氨氮(NH ₃ -N)	硝氮(NO ₃ -N)	总磷(TP)	总溶解性磷(TDP)	磷酸盐(PO ₄ ³⁻ -P)	pH
苗家河水	7.917	6.582	1.360	0.396	0.339	0.272	7.34
竹辉河水	8.351	6.743	1.500	0.411	0.324	0.186	7.32
外城河水	6.218	4.218	1.500	0.248	0.180	0.124	7.38

注:单位为 mg/L

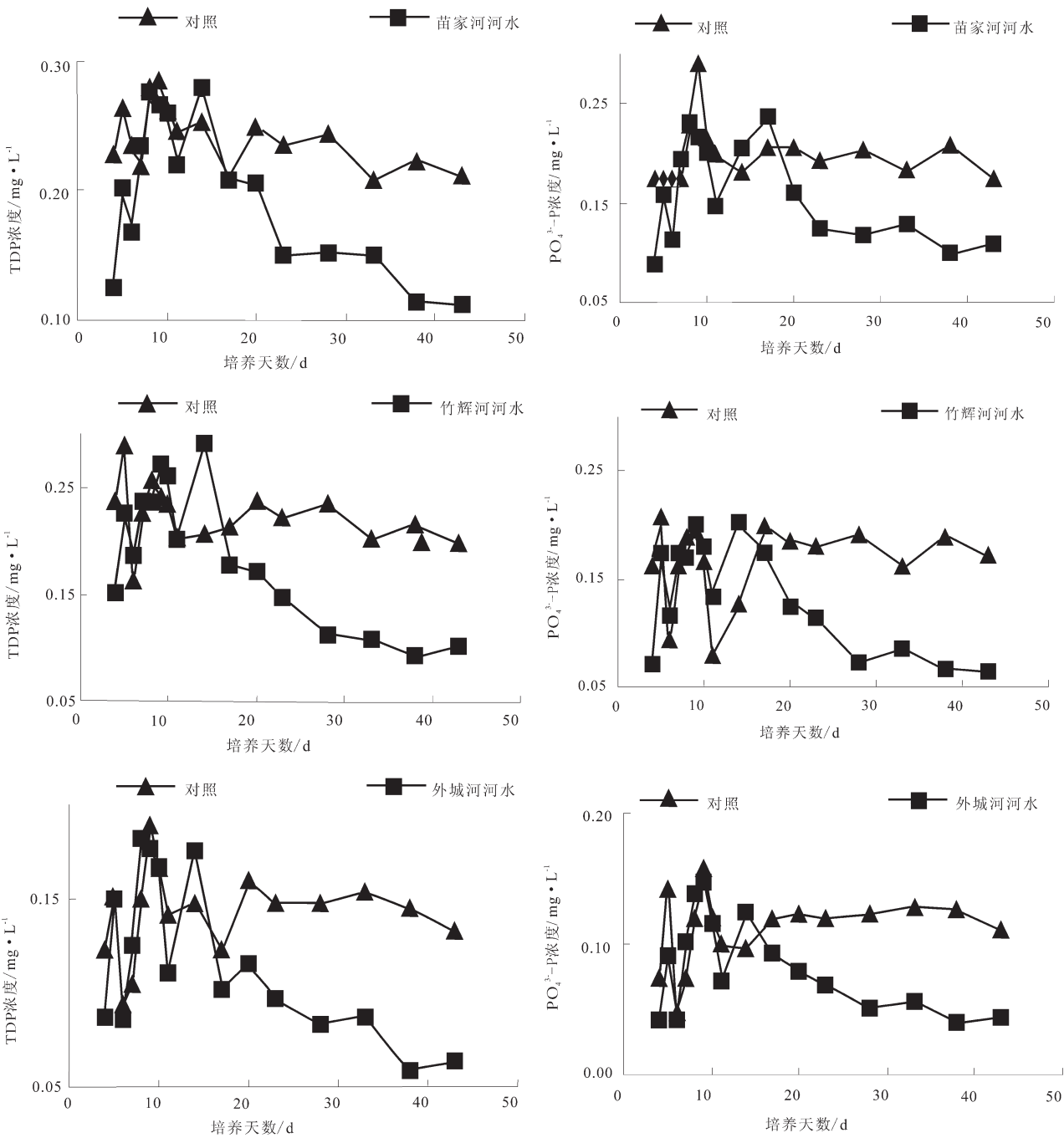


图 1 上覆水中 TDP 和磷酸盐浓度的变化曲线

Fig. 1 Variation curve of TDP and phosphate concentration in the overlying water

2.4 不同上覆水对底泥 P 累积释放量的影响

图 4 为不同上覆河水培养时,单位质量底泥累积释放总溶解性磷(TDP)和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的曲线图。由图 4 可以看出,不同富营养水平的上覆水,即竹辉河水、外城河水和苗家河水,底泥中的 TDP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的累积释放量均呈现负增长的趋势,也显示底泥

对磷酸盐呈累积吸收的规律。并且富营养化程度较重的苗家河水作为上覆水体时,底泥累积吸附营养盐的量最高。

2.5 不同上覆水培养前后底泥中 P 含量的变化状况

图 5 为实验前后不同上覆水相对应的底泥中 P 含量变化的直方图。可以看出,经不同上覆水培养过

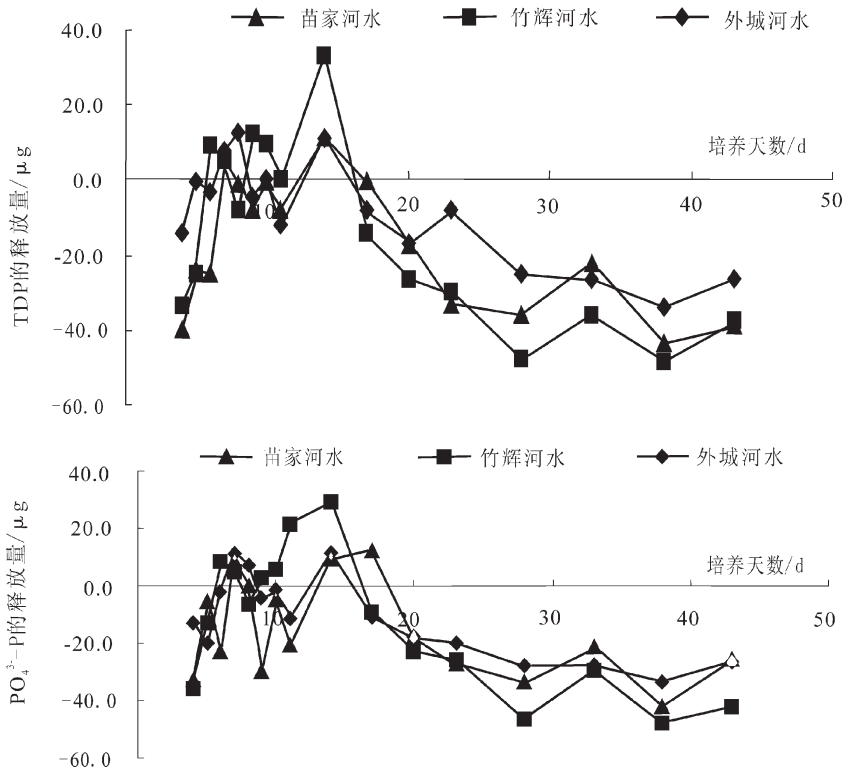


图 2 底泥中 TDP 和 $PO_4^{3-}-P$ 释放量的变化曲线

Fig. 2 Variation curve of TDP and $PO_4^{3-}-P$ release content from sediments

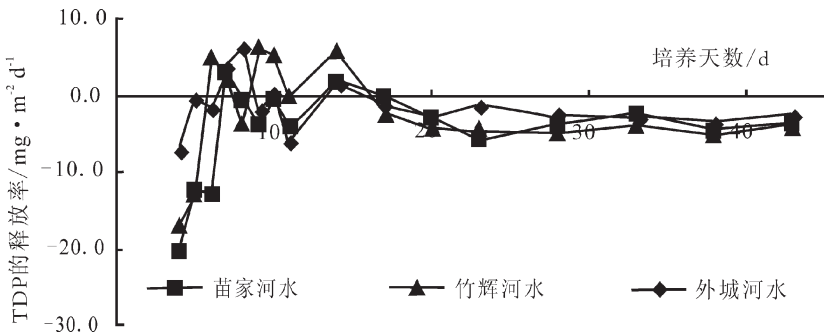


图 3 底泥 TDP 的释放速率

Fig. 3 Variation curve of TDP release rate from sediments

的底泥中营养盐 P 的含量均明显增加,表明底泥在培养过程中均吸收了营养盐 P。并且以苗家河水为上覆水处理的底泥吸收 P 的量最大,其次为竹辉河水,吸收 P 最少的是外城河水为上覆水的底泥。这与前文中得到的结果一致。

3 结论和讨论

在自然条件下,底泥对磷酸盐既有吸附作用又有解吸作用,两者同时发生。当底泥对水体中磷酸盐

的吸附能力大于释放能力时,水体的磷酸盐浓度下降,即表现为底泥吸附了水体中的磷酸盐。在本试验中,在培养实验开始的几天,底泥对 P 的释放量逐渐增大,属于快速释放阶段;在释放量达到最大之后,不同上覆水的实验中,底泥均开始吸附营养盐。

底泥中 P 的迁移转化过程主要包括各种化学反应和物理沉淀过程,化学反应包括吸附、生物分解和溶出过程,物理过程主要是沉淀、分配、扩散等过程。底泥是 P 迁移的载体、沉积的归宿和转化的起

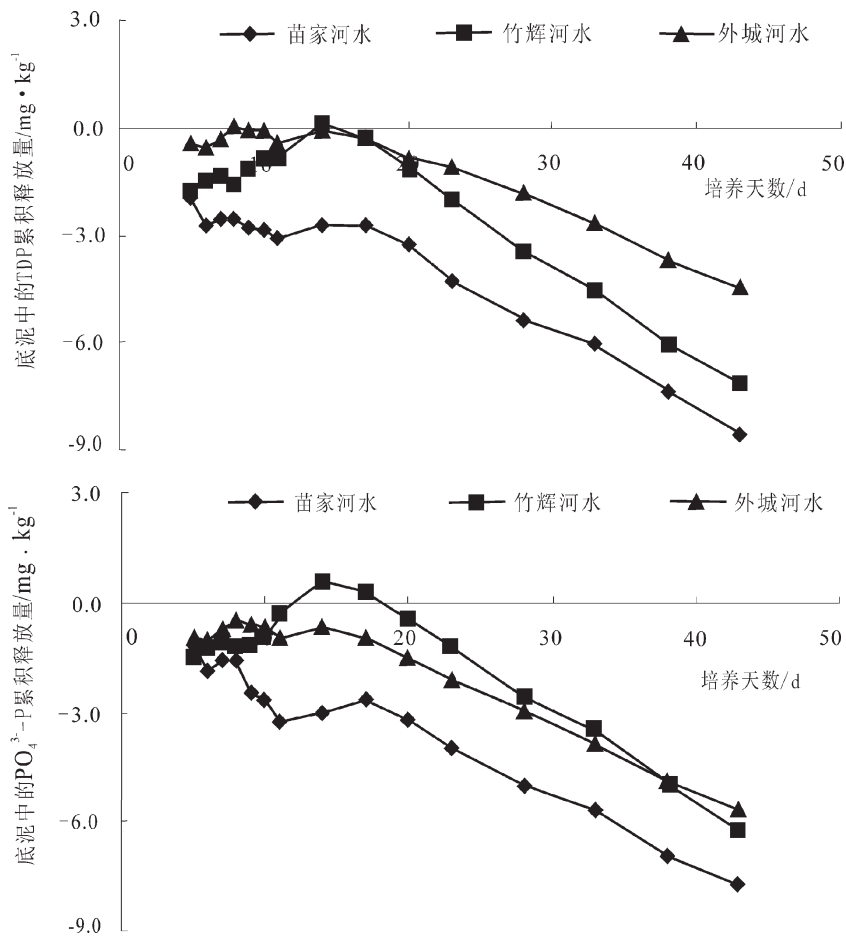


图 4 底泥中 TDP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的累积释放量

Fig. 4 Cumulative release contents of TDP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ from sediments in the overlying water

点。底泥能够从水中吸附可溶性磷酸盐和多磷酸盐,主要机理是胶体表面的正电荷金属阳离子,如 Ca、Al 和 Fe 离子与溶液中各种磷酸根结合形成不溶性的盐沉淀吸附于颗粒表面。被吸附的 P 和 N 以悬浮物的形式长途输送,并沉淀在湖泊水体中^[8]。

水体的磷酸盐浓度削减是由底泥吸附、生物吸收、微生物分解等多种化学生物过程共同作用造成的。在本实验中,观察到吸附作用 20 天内基本达到平衡,而短时间内生物作用是微乎其微的,且实验所用的水样已经过 $0.45\mu\text{m}$ 的滤膜过滤,水体中的藻类等微生物已被除去。所以认为底泥的吸附作用是水体中磷酸盐浓度削减最主要的原因,因此可以把磷酸盐浓度的削减量近似等同于底泥的吸附量。但并不是说在此过程中就没有释放了,而是释放与吸附这一对可逆的过程将同时发生在同一个体系中。表观削减量实际上是 2 个过程的综合结果^[9]。

总溶解性磷(TDP)能够迅速地溶解进入上覆水体,而且在底泥中含量往往很少,对释放平衡时间的影响不大。其余形态为结合态磷,可能通过天然水体中生物和化学的水解作用转化为溶解态无机磷^[10],其中,铝磷可以通过化学消解作用转化为溶解态磷。在本实验中,由于水体中生物的作用很小,实验水样的量也比较少,因此底泥中结合态磷转化为溶解态无机磷向水体释放的可能就非常小,而底泥中其他形态的 P,如闭蓄态磷、钙磷等在静止条件下很难水解进入上覆水体。实验用水的 TDP 和磷酸盐的浓度本身就较高,可能是导致在培养实验中后期水体中 TDP 和磷酸盐的浓度基本不变,且表现为底泥对水体中的磷酸盐有吸收作用的主要原因。

底泥在不同营养水平的上覆水中,培养大约 2、3 周的时间,P 的释放达到某种平衡,而后释放量持续下降。这可能是由于过滤上覆水和黑暗条件,上覆

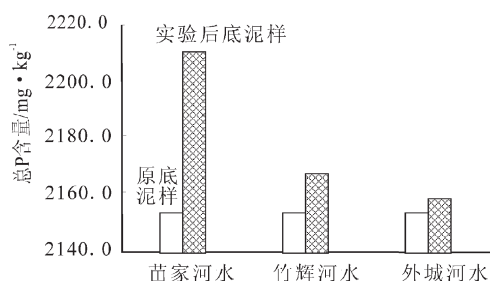


图5 底泥中总P含量的变化

Fig. 5 Change of total P content in sediments

水中藻类对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的同化过程已经被中断(进入水体中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 不能被水生植物和藻类吸收同化),有机碎屑层释放的 P 在上覆水中迅速积累,以致达到很高的浓度,远远超过了沉积物间隙水中的浓度;有机碎屑层得不到补充,其释 P 反应很快便衰减,屏蔽作用消失,水中高浓度的 P 向沉积物中扩散转移,最终达成新的稳定平衡^[10]。

相关研究发现,严重富营养化的东湖,只有当上覆水 P 浓度低于底泥 P 释放临界浓度值时,底泥中的 P 才会释放。而东湖底泥 P 释放临界浓度值与底泥 P 含量呈正相关关系,底泥 P 浓度越高,临界浓度值越大。当上覆水 P 浓度低于底泥 P 释放临界浓度值时,其释放常数与湖水 P 浓度呈负相关关系,即湖水 P 浓度越高,底泥释 P 量越低。在研究太湖水体的 P 负荷时,发现当上覆水为湖水时,水泥二相基本平衡, P 释放量基本为零,当上覆水为蒸馏水时,底泥 P 才有所释放^[11]。在白洋淀底质 P 的释放研究中也发现,当湖水中 P 含量高于底质 P 释放临界浓度时,总的表现是以沉积为主^[12]。本次实验所用上覆水的总 P 浓度在 0.180~0.339mg/L 之间,表现为水中的 P 向底泥迁移,底泥吸收 P。并且苗家河水为上覆水时,单位面积底泥累积吸收的营养盐最多。这与国外学者的发现相一致,即当富营养化水体 P 浓度小于 0.03mg/L 时,沉积物中的 P 才被释放,当水中 P 浓度为 0.09~0.12mg/L 时,水中的 P 会向沉积物迁移^[13]。总之, P 的释放与沉积物、上覆水之间的浓度差有关,浓度差越大,沉积物释 P 越快^[5]。

总之,底泥对污染物(营养盐)而言不仅是源,而

且是汇。3 种富营养化上覆水培养实验的结果表明,在截断外源污染后,苏州河道的底泥以吸收水体中的营养盐为主,起到净化水质的作用。并且,在实验时段内,调水带来的古城区河水的更新也没有引起底泥中营养盐的释放。因此,目前如何截断外源污染是苏州河道整治的关键所在。

实际河道水流有一定的流速,水质具有实时更新的特点,室内培养只反映了静态模式下上覆水与底泥释放之间的关系。虽然本实验的进行为苏州城市河道水体的富营养化防治工作提供了一定的理论依据,但是,对于实际河道中底泥向上覆水释放 P 的临界浓度和改变水动力条件引起的底泥中内源负荷的变化,还有待更进一步的研究。

致谢:在资料调研和项目实施过程中得到中科院南京土壤研究所高丽博士的帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]董浩平,姚琪. 水体沉积物磷释放及控制[J]. 水资源保护, 2004, 6: 20-23.
- [2]汪家权,董曼玲,孙亚敏. 内源污染对湖泊富营养化的作用及对策[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2000, 23(2): 210-213.
- [3]张路,范成新,秦伯强,等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 35-42.
- [4]陈玉娟,珠江广州河段中磷的形态研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 1990, 9(4): 73-78.
- [5]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): 107-110.
- [6]韩沙沙,温琰茂. 富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 98-101.
- [7]吴文卫,陈建中,潘波,等. 城市浅水湖泊沉积物与上覆水之间磷的行为研究[J]. 江西农业学报, 2007, 19(6): 118-120.
- [8]孙胜龙,丁蕴铮. 长春南湖底泥磷、氮和重金属元素环境地球化学行为研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(4): 37-41.
- [9]晏维金,亢宇,章申,等. 磷在土壤中的解吸动力学[J]. 中国环境科学, 2000, 20(2): 97-101.
- [10]李文朝,尹澄清,陈开宁,等. 关于湖泊沉积物磷释放及其测定方法的共识[J]. 湖泊科学, 1999, 11(4): 296-303.
- [11]廖文根. 太湖水体的磷负荷分析[J]. 水利学报, 1994, 11: 77-81.
- [12]于世繁. 白洋淀底质磷的释放及与水体中磷的关系[J]. 环境科学, 1995, 16(增刊): 30-34.
- [13]Sondergaard M, Jensen J P. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes[J]. Hydrobiologia, 1999, (408/409): 145-152.