

# 杭州城市内河底泥磷污染与磷释放水力模拟

叶青青, 官宝红\*, 李君

(浙江大学环境工程系, 杭州 310027)

**摘要:**在分析杭州城市内河东新河底泥磷污染的基础上, 采用加长型环形水槽动态模拟水体流速( $0.002 \sim 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、上覆水质(水体总磷本底值分别为  $0.18$ 、 $0.072$  和  $0.007 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )及上覆水深( $5$ 、 $10 \text{ cm}$ )对底泥磷释放的影响, 并定量分析了不同流速下底泥磷的释放速率. 结果表明, 东新河底泥的 pH 值、含水率、磷含量等理化性质有利于磷的释放. 在动态水力条件下底泥磷主要以悬浮颗粒态形式向上覆水体释放. 流速对底泥磷释放的影响较为显著, 模型流速为  $0.008 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (原型流速为  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 时对应底泥的“少量动”, 此时底泥磷释放速率趋于最大, 达  $147.36 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ . 上覆水质影响底泥磷的释放, 尤其显著影响磷的初期释放, 内河水较自来水更有利于底泥磷的释放, 可能是由于内河水与底泥构成了良好的磷交换关系. 在浅水水体中, 上覆水深对底泥磷释放影响不大. 因此, 可以通过调节水力学条件和水质来抑制或强化河流底泥磷的释放.

**关键词:**城市内河; 底泥; 磷; 释放; 模拟

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)05-1351-06

## Phosphorus Pollution of the Sediment from Hangzhou Urban River and Hydraulic Simulation of Phosphorus Release

YE Qing-qing, GUAN Bao-hong, LI Jun

(Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The phosphorus pollution of the sediment from Dongxin River, an urban river in Hangzhou, was surveyed. Phosphorus release under various flow velocity ( $0.002\text{--}0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), quality of overlying water (the total phosphorus concentration:  $0.18$ ,  $0.072$  and  $0.007 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), depth of overlying water ( $5$ ,  $10 \text{ cm}$ ) were carefully studied in a hydraulic simulation setup. The results indicate that phosphorus was feasible to release from the sediment with high ratio of water content ( $40.09\%\text{--}68.57\%$ ) under alkali condition (pH  $7.2\text{--}8.3$ ). The phosphorus release was also influenced by high content of phosphorus ( $1.04\text{--}2.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) in the sediment. Phosphorus release was mainly in the form of suspended solid under dynamic hydraulic condition, and depended definitely on flow velocity. The release rate reached  $147.36 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ , which approached the maximum value, at flow velocity  $0.008 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (i.e.  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in archetype). Phosphorus release, especially the initial release rate, was obviously affected by the quality of overlying water. Phosphorus tended to release under river water than tap water. However, the depth of overlying water had little influence on phosphorus release in shallow water. Therefore, it is possible to restrain or enhance phosphorus release by adjusting the hydraulic conditions and the quality of overlying water.

**Key words:** urban river; sediment; phosphorus; release; simulation

我国城市内河污染十分突出, 在外源输入逐步得到控制的情况下, 底泥内源释放对上覆水体的影响逐渐突显出来<sup>[1]</sup>. 磷是引起水体富营养化的重要元素, 沉积物中磷的循环对水体磷含量有深刻影响, 在一定程度上决定着水体营养化的进程. 城市内河一般属于浅水河流, 其较深水水体具有更大的沉积物-水接触面积, 更强烈和频繁的水土界面物质交换, 其表层未固结的沉积物频繁再悬浮. 因此, 研究内河底泥中的磷向上覆水体的释放具有重要意义.

目前, 关于沉积物中磷释放的研究一般限于静态条件<sup>[1~5]</sup>, 但浅水水体明显不同于深水水体的特征是水力学条件可大大影响沉积物-水界面的物质交换<sup>[6~8]</sup>. 动态模拟比静态模拟更接近自然状态, 但是杯瓶实验<sup>[9, 10]</sup>难以模拟河流水力学条件, 也没有建立搅拌(或振荡)速度与水体实际流速之间的关

系, 尽管得出水力扰动造成的底泥磷释放远较静态条件下较大<sup>[8]</sup>. 本实验结合河流水力学理论, 采用加长型环形水槽动态模拟河流河道和水力条件, 研究底泥磷在动态水力条件下的释放规律.

杭州城区水系发达, 内河污染属于耗氧型和富营养型复合污染<sup>[11, 12]</sup>, 磷污染是杭州城市内河富营养化的限制性因素<sup>[13]</sup>. 目前, 杭州采用定期引入钱塘江水倒灌内河的方式来减轻内河污染. 倒灌冲污措施的 2 个出发点: ① 改变内河水力学条件, 带走内河污染物; ② 引入水质较好的钱塘江水稀释内河污染物. 因此, 本研究以杭州典型城市内河东新河及其底泥为对象, 在分析底泥磷污染的基础上, 动态模

收稿日期: 2008-06-06; 修订日期: 2008-09-15

作者简介: 叶青青(1984~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理与固体废物资源化技术, E-mail: windy662003@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: guanbaohong@zju.edu.cn

拟河道水力学特征,相应分析了水力学条件和水质对内河底泥磷释放的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 泥样采集及预处理

采样点位于杭州城区主要内河之一——东新河中段,共设置了 5 个采样断面,断面间距为 150~300 m.采用硬质塑料筒采集河流底泥样品,采样深度为底泥表层以下 5 cm.样品采集后去除沙石和动植物残体,密封静置 1 h 后除去上覆水.

### 1.2 模拟装置设计

根据东新河原型尺寸和动态模型的基本要求,为尽量减小侧壁效应,确定模型宽度比例尺  $\lambda_w$  为 200,变率为 5,由变率为  $\lambda_w/\lambda_h$  计算得水深比例尺  $\lambda_h=40$ ,由惯性力重力比相似原则<sup>[14]</sup>,即  $\lambda_u=\sqrt{\lambda_h}$ ,得流速比例尺  $\lambda_u=6.3$ .河流原型与模型主要参数列于表 1.

表 1 东新河原型与模型主要参数

| 参数                               | 原型        | 模型         | 比例尺             |
|----------------------------------|-----------|------------|-----------------|
| 宽度/m                             | 20        | 0.1        | $\lambda_w=200$ |
| 水深/m                             | 2~4       | 0.05~0.1   | $\lambda_h=40$  |
| 流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 0.01~0.25 | 0.002~0.04 | $\lambda_u=6.3$ |

为增加水力停留时间,并消除单一环形水槽带来的沿程流速分布不均及二次流等问题,本实验选用加长型环形水槽,见图 1.通过流量计和阀门可以精确调节水体流速,通过堰板开孔位置可以调节上覆水深.

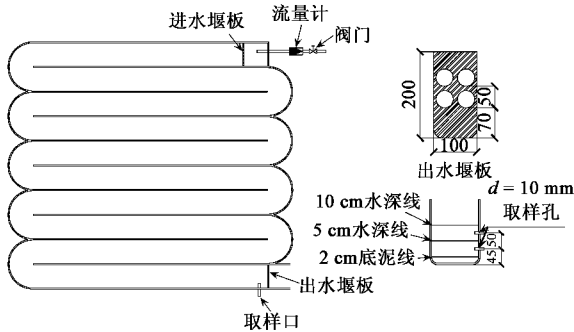


图 1 实验模型设计示意

Fig.1 Scheme of the environmental simulation setup

### 1.3 实验方法

在环形水槽中平铺厚度为 2 cm 的底泥,水体首先在进水堰板之前得到缓冲,漫过进水堰板后进入环形水道,最后漫过出水堰板流出装置.除研究水深

影响外,均固定水深为 5 cm.保持同一流速 18 h,研究水体流速对底泥磷释放的影响.在对应底泥“普遍动”的流速下,研究上覆水质与水深对底泥磷释放的影响,并分析不同流速下底泥磷的释放速率.

### 1.4 样品分析测试

采用钼锑抗比色法分析水样的 TP 浓度<sup>[15]</sup>,所取水样均为底层上覆水样.底泥样品先于背光处风干,再平摊在清洁的塑料薄膜上,用玻璃棒捻碎,剔出砾石及动植物残体等杂物后过 20 目筛,直至筛上物不含泥土,过筛样品用四分法取弃,再用玛瑙研钵磨细至全部过 100 目筛,装瓶备用.底泥分析项目主要有 pH 值、含水率、磷含量及磷形态分析.磷形态分析参考文献<sup>[16]</sup>的方法,各步骤提取液的磷含量分析均采用钼锑抗比色法.

## 2 结果与讨论

### 2.1 东新河底泥磷污染

东新河底泥呈灰黑色、有恶臭、含水率高、生活杂物和植物残骸多、呈淤泥状,部分代表性样品的理化性质列于表 2.

表 2 东新河底泥的理化性质

| Table 2 Physical and chemical characteristics of sediment from Dongxin River |       |      |                                    |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|------|------------------------------------|
| 采样断面                                                                         | 含水率/% | pH 值 | 磷含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
| 1                                                                            | 58.60 | 7.59 | 1.34                               |
| 2                                                                            | 61.62 | 7.68 | 1.41                               |
| 3                                                                            | 40.09 | 8.23 | 1.04                               |
| 4                                                                            | 60.13 | 7.86 | 1.38                               |
| 5                                                                            | 68.57 | 7.25 | 2.51                               |

pH 值会影响泥水体系中磷的吸附解吸作用,而对底泥磷释放产生影响<sup>[17,18]</sup>.pH 值 6.5 左右时,水中正磷酸盐以  $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  为主要存在形式,易被沉积物吸附;pH 值升高,体系中  $\text{OH}^-$  与金属态结合磷中的磷酸盐发生离子交换,磷易从底泥中解吸出来.东新河底泥的 pH 值大体为 7.2~8.3,呈弱碱性,一定条件下有利于底泥磷的释放.

东新河底泥含水率为 40.09%~68.57%,平均约为 58%.对浅水水体而言,底泥含水率大小直接影响其再悬浮程度,而底泥的再悬浮过程是磷在底泥与上覆水之间重新分配的重要途径,因此较高含水率也为底泥磷的释放提供了有利条件.此外,东新河底泥磷含量较高,为 1.04~2.51  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .东新河底泥的 pH 值、含水率和磷含量等理化性质有利于磷的释放.

底泥磷一般分为铁结合磷(Fe-P)、铝结合磷(Al-P)、钙结合磷(Ca-P)、闭蓄态磷(O-P)、溶解性磷(D-P)、碎屑态磷(De-P)和有机磷(o-P)<sup>[19]</sup>,磷的赋存形态不同,其稳定性也不同<sup>[20~22]</sup>.模拟释放均采用磷含量最高的断面5的泥样,该泥样中各赋存形态磷的含量列于表3.

表3 东新河底泥磷赋存形态分析

Table 3 Composition of certain forms of phosphorus in sediment from Dongxin River

| 磷形态  | 含量/g·kg <sup>-1</sup> | 占无机磷比例/% | 占总磷比例/% |
|------|-----------------------|----------|---------|
| D-P  | 0.011                 | 0.79     | 0.44    |
| Al-P | 0.299                 | 21.59    | 11.91   |
| Fe-P | 0.016                 | 1.16     | 0.64    |
| O-P  | 0.396                 | 28.59    | 15.78   |
| Ca-P | 0.663                 | 47.87    | 26.41   |
| 无机磷  | 1.385                 | —        | 55.18   |
| 总磷   | 2.510                 | —        | —       |

2.2 水体流速对底泥磷释放的影响

河流最显著的水力学特征就是水体流速,它是影响底泥磷释放的重要条件.模拟装置中水体开始流动时,泥面会发生变化,这是由于水流冲刷使底泥整体所受剪切力变大,泥面随水流发生错动.但是,泥面错动幅度随流速高低而有明显不同:①流速较低时,泥面上仅一薄层发生悬扬,底泥处于“个别动”状态,其对应流速范围为0.002~0.006 m·s<sup>-1</sup>.②流速增加到0.008 m·s<sup>-1</sup>时,底泥达到“少量动”,此时泥面由于紊动产生鱼鳞状泥纹,但泥面整体未受破坏,其上布满了很浅的、指甲大小的泥坑.随着水体流动,泥坑呈扇形向后方扩展,起动区域有加大趋势.③流速继续增大,达到0.02 m·s<sup>-1</sup>时,泥面紊动更加剧烈,底泥达到“普遍动”,此时旋涡不断掀起底泥,泥面受到较大破坏.特别是某一局部被破坏后,这一部分底泥的起动便急剧起来,底泥被成层掀起,水流很快便完全浑浊.水体流动初期出现的上述现象符合泥沙运动的规律,也与李一平等<sup>[23]</sup>在环形水槽中模拟水动力条件下底泥的起动规律得到的结论基本一致,蒋昌波等<sup>[24]</sup>也得到了类似的结论.此后,底泥重新沉积下来,泥面错动逐渐平复,流速越大,沉积过程越缓慢,泥面达到静止的时间越长,流速0.008和0.02 m·s<sup>-1</sup>时泥面在2h时达到静止,静止后取样口所取水样较为清澈,只有少量小颗粒悬浮于其中.

根据底泥起动与水体流速的关系,可将流速大致分为:低流速(0.002~0.006 m·s<sup>-1</sup>)、中流速(0.006~0.008 m·s<sup>-1</sup>)、高流速(0.008~0.02 m·s<sup>-1</sup>)

3个区间.不同流速下上覆水TP浓度的时变特征示于图2.

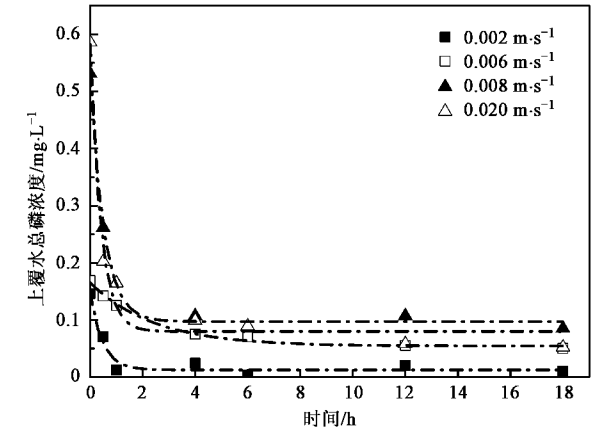


图2 水体流速对底泥磷释放的影响

Fig. 2 Effect of flow velocity on phosphorus release from sediment

由图2可见,各流速下水体TP浓度变化趋势相似,水体磷浓度最高点均出现在底泥磷释放初期,此后水体磷浓度不断降低,2h前下降较为急剧,随后下降趋于平缓,6h后水体TP浓度均达到基本稳定.上覆水总磷主要以溶解性磷及颗粒悬浮物形式存在,溶解性磷包括各种正磷酸盐和少量有机磷,而悬浮物中磷的组成较为复杂,它可能本身就是不溶的含磷有机体,也可能是以各种粘土矿物或矿物微粒为基本骨架,吸附了包括可溶磷酸盐在内的悬浮微粒.

在磷释放初期,水力扰动引起底泥悬浮,同时底泥间隙水中的磷也得以迅速释放,上覆水TP浓度升高.此后,底泥不断沉积下来,且非循环条件下上覆水中的磷随水流不断迁出,因而水体TP浓度不断下降.水体TP浓度在前期急剧下降正是由于上覆水中的磷不断迁出、含磷颗粒悬浮物迅速沉积造成的.2h后,大颗粒悬浮物重新沉积或随水流出,上覆水开始变得较为清澈,水体总磷大部分以沉积速度较慢的悬浮物形式存在,因而磷浓度下降趋势减缓.流速越低,水体磷浓度越快开始趋于平缓,这与底泥起动初期观察到的各流速条件下泥面趋于静止所需要的时间基本一致.随后,底泥继续沉积,直至水体总磷主要以难沉积的悬浮物形式存在,水体TP浓度基本稳定.低流速下水体TP浓度在6h达到基本稳定,高流速下由于磷随水流出的迁移较快,在4h时水体磷浓度达到基本稳定.由此可见,动态条件下底泥磷的释放导致水体TP浓度的变化趋势为:初期磷浓度最高,此后磷浓度不断下降,前期下降较为急剧,

随后下降趋于平缓,最终磷浓度基本稳定.此外,由表 3 可知,底泥中溶解性磷含量很低,仅占总磷含量的 0.44%,因此在动态水力条件下底泥磷主要以悬浮颗粒态形式向上覆水体释放,而非通过间隙水的扩散作用向上覆水体释放,这与静态条件下底泥磷的释放不同.

水体初始 TP 浓度均随流速增大而增大,流速越大,底泥起动越剧烈,初期水体悬浮物浓度越高,泥水接触面积越大,底泥与间隙水中的磷向上覆水中扩散也越迅速和充分,因而初始 TP 浓度越大.磷浓度基本稳定时,水体中的磷主要为难沉积的小颗粒态磷,与释放初期相比,此时各流速下水体 TP 浓度相差不大,因此低流速( $0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、中流速( $0.006\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )下,磷释放初期与磷浓度基本稳定时水体 TP 浓度差显著低于高流速( $0.008\sim 0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )下的水体 TP 浓度差,低流速、中流速下 TP 浓度差均为  $0.12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,而高流速下浓度差达  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右.

流速为  $0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,TP 稳定浓度最低,约为  $0.015\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,当流速为  $0.006$  与  $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,TP 稳定浓度均为  $0.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右,而流速  $0.008\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时 TP 稳定浓度最高,达  $0.085\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .为进一步阐明水体流速对底泥磷释放的影响,不同流速下某些时刻的 TP 浓度变化示于图 3.

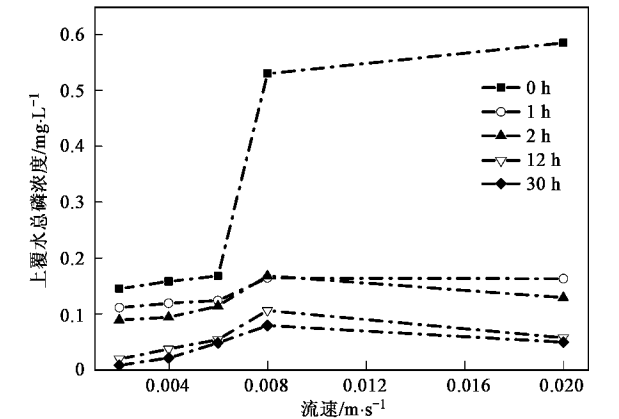


图 3 不同流速下各时刻上覆水 TP 浓度的变化  
Fig.3 TP concentration of overlying water at different time and flow velocity

当流速为  $0.002\sim 0.006\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,初期上覆水 TP 浓度变化很小,其随流速增大的趋势不太明显,此时底泥起动不完全,底泥磷向上覆水的释放不明显.当流速增大到  $0.008\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,初期上覆水 TP 浓度值出现极大跳跃,说明底泥磷向上覆水大量释放

的水力学条件是底泥的“少量动”.

流速为  $0.008\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,初期底泥磷释放略低于流速为  $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,此后二者磷释放情况相近,说明模型流速为  $0.008\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (原型流速为  $0.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 时,底泥磷释放趋于最大.流速  $0.008\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,TP 稳定浓度较  $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时略高,这是因为流速为  $0.008\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,底泥达到了“少量动”的状态,在水流过程中,既没有因为流速过低而导致底泥快速重新沉积,也没有因为流速过高而冲刷走大量泥沙.

流速  $0.006\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时底泥呈现“个别动”,对应底泥磷明显释放的启动点;流速  $0.008\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时底泥呈现“少量动”,对应底泥磷明显释放的带出点;流速  $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时对应底泥“普遍动”,但底泥磷释放量没有明显增加.由此看来,如果希望上覆水不被底泥磷污染,应控制上覆水流速在“个别动”之下;如果希望通过上覆水流动净化底泥磷污染,则应控制上覆水流速符合泥沙“少量动”流速,此时再增大流速,对底泥磷释放不会有太大影响.

为消除流速对底泥磷释放的影响,以下研究上覆水质与水深对磷释放的影响时均在底泥“普遍动”的流速,即  $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  下进行.

### 2.3 上覆水质对底泥磷释放的影响

上覆水质影响泥水体系的物质交换,从而对底泥磷释放产生影响<sup>[25,26]</sup>.本研究分别采用内河水(理化性质列于表 4),经稀释的内河水(稀释倍数:2.5)和自来水为上覆水,研究水质对底泥磷释放的影响.3 种上覆水的 pH 在  $6.8\sim 7.0$  之间,其 TP 本底值分别为  $0.18$ 、 $0.072$  和  $0.007\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .3 种上覆水质下,扣除水体 TP 本底值后底泥磷的释放情况示于图 4.

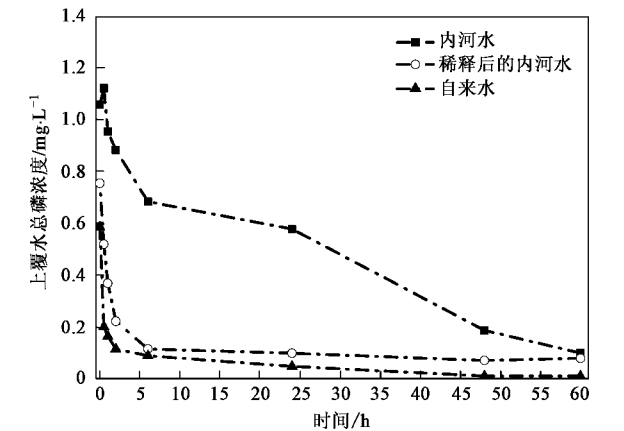


图 4 上覆水质对底泥磷释放的影响  
Fig.4 Effect of the quality of overlying water on phosphorus release from sediment

表4 东新河河水的理化性质/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Physical and chemical characteristics of water from Dongxin River/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

| pH   | DO   | COD  | BOD  | TN   | TP   | PE   | LAS  | CF/个 $\cdot\text{L}^{-1}$ |
|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------|
| 6.82 | 3.09 | 9.84 | 6.78 | 5.55 | 0.18 | 0.08 | 0.06 | > 16 000                  |

3种上覆水体中TP浓度的变化趋势均为:初期最高,此后不断降低,前期磷浓度下降较为急剧,随后下降趋于平缓,最终达到基本稳定。

内河水TP本底值为经稀释的内河水的2.5倍,而后者的TP本底值为自来水的10倍.底泥磷释放过程中,水体TP浓度大小一直保持:内河水>稀释后的内河水>自来水的顺序,但各个时刻3种水体中磷的浓度没有确定的定量关系,内河水较自来水更有利于底泥磷释放,这可能是由于内河水水质复杂,在长期的水化学环境中已经与底泥形成了有效的磷迁移机制,而自来水不具备这种机制。

在磷释放初期,上覆水质改变时,内河水中的TP浓度远大于自来水中的TP浓度,随后各时刻下2种上覆水体的TP浓度差逐渐变小.在水体流动过程,经稀释的内河水与自来水在各时刻下的水体磷浓度差的变化与此类似.由此可见,水质对底泥磷释放初期的影响较为显著。

上覆水为经稀释的内河水和自来水时,6 h后水体磷浓度基本稳定,而上覆水为内河水时,50 h后水体磷浓度才趋于稳定,这可能是由于上覆水质越复杂,水体磷释放规律也越复杂,水体TP浓度较难稳定。

2.4 上覆水深对底泥磷释放的影响

杭州市内河属于浅水水体,上覆水深对泥水界面物质交换的影响较为明显.底泥“普遍动”流速下上覆水深对底泥磷释放的影响示于图5。

水深5 cm和10 cm时水体TP浓度变化趋势基本相同:1 h之前急剧下降,此后磷浓度下降趋于平缓,到4 h时,水体磷浓度基本稳定。

水深10 cm时,水体初始TP浓度较水深5 cm时为低.上覆水越深,模拟水槽中泥水质量比越低,因而初始TP浓度也越低.在水体流动过程中,上覆水中的磷不断迁出,底泥不断重新沉积,最终泥水体系趋于稳定,各上覆水深下水体磷浓度的差值越来越小,稳定后几乎为零.这说明,浅水水体在底泥“普遍动”的流速下,由于水土界面的物质交换十分频繁和充分,水深对水质没有显著影响,这也与朱广伟等<sup>[19]</sup>的结论一致。

2.5 底泥磷释放速率

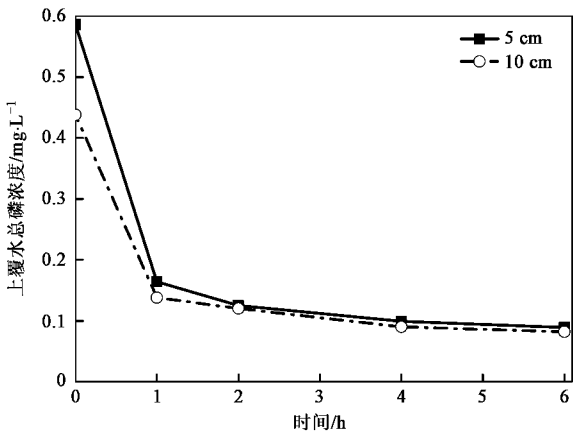


图5 上覆水深对底泥磷释放的影响

Fig.5 Effect of the depth of overlying water on phosphorus release from sediment

为进一步阐明底泥磷的释放规律,上覆水以不同速度流经模型河道,保持稳定流速36 h,排净上覆水,风干底泥.磷释放速率计算公式可表示为:

$$Q = \frac{10^4(A_1 - A_2) \times V \times \gamma}{S \times t}$$

模型水槽中  $V \approx S \times a$ , 故:

$$Q = \frac{10^4(A_1 - A_2) \times a \times \gamma}{t}$$

上两式中,  $Q$  为底泥磷释放速率 [ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ];  $A_1$  为释放实验前底泥磷含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ );  $A_2$  为释放实验后底泥磷含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ );  $V$  为底泥总体积 ( $\text{mL}$ );  $S$  为泥水接触面面积 ( $\text{cm}^2$ );  $t$  为水体流动时间 ( $\text{h}$ );  $a$  为底泥深度 ( $\text{cm}$ );  $\gamma$  为底泥比重 ( $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ).

实验中,  $a = 2\text{ cm}$ ,  $t = 36\text{ h}$ ,  $\gamma = 0.39\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 所以  $Q = 216.7(A_1 - A_2)$ , 计算结果列于表5。

底泥磷释放速率与水体流速密切相关,磷释放速率随水体流速增大而增加.对应水体流速0.002、0.004及0.006  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,底泥磷的释放速率较前一流速条件时依次增长10.0%和21.2%.流速0.008  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,释放速率从86.68  $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 激增到147.36  $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,增长率为70.0%,这是因为流速过低会导致底泥起动不完全,底泥快速重新沉积,因此磷释放不充分,而流速0.008  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时底泥达到“少量动”,底泥大量悬浮,同时间隙水中的磷向上覆水的扩散加剧,从而底泥和间隙水中释放的磷的

量较大.此后,磷释放速率仍随流速增大而增长,但增长不太明显.流速为 0.02 和 0.04 m·s<sup>-1</sup>时,磷释放速率依次仅增长了 7.3% 和 2.7%,流速为 0.04 m·s<sup>-1</sup>时的增长率远低于 0.008 m·s<sup>-1</sup>之前的增长率.这也与 2.2 中模型流速为 0.008 m·s<sup>-1</sup>时底泥磷释放趋于最大的结论一致.

表 5 不同流速时底泥磷的释放速率

| Table 5 Release rate of phosphorus from sediment at different flow velocity |                                 |                                      |      |                    |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------|--------------------|
| 模型流速                                                                        | A <sub>1</sub> - A <sub>2</sub> | 释放速率                                 | 增长率  | 原型流速               |
| /m·s <sup>-1</sup>                                                          | /g·kg <sup>-1</sup>             | /g·(m <sup>2</sup> ·h) <sup>-1</sup> | /%   | /m·s <sup>-1</sup> |
| 0.002                                                                       | 0.30                            | 65.01                                | —    | 0.0125             |
| 0.004                                                                       | 0.33                            | 71.51                                | 10.0 | 0.025              |
| 0.006                                                                       | 0.40                            | 86.68                                | 21.2 | 0.04               |
| 0.008                                                                       | 0.68                            | 147.36                               | 70.0 | 0.05               |
| 0.02                                                                        | 0.73                            | 158.19                               | 7.3  | 0.13               |
| 0.04                                                                        | 0.75                            | 162.53                               | 2.7  | 0.25               |

3 结论

(1)东新河底泥的 pH 值、含水率、磷含量等理化性质有利于磷的释放.在动态水力条件下底泥磷主要以悬浮颗粒态形式向上覆水体释放,而非通过间隙水的扩散作用向上覆水体释放,这与静态条件下底泥磷的释放不同.

(2)水体流速与底泥磷释放密切相关,流速 0.006 m·s<sup>-1</sup>(原型流速 0.04 m·s<sup>-1</sup>)时底泥呈现“个别动”,对应底泥磷明显释放的启动点;流速 0.008 m·s<sup>-1</sup>(原型流速 0.05 m·s<sup>-1</sup>)时底泥呈现“少量动”,对应底泥磷明显释放的带出点,此时磷释放速率趋于最大,达 147.36 g·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>.流速 0.02 m·s<sup>-1</sup>(原型流速 0.13 m·s<sup>-1</sup>)时对应底泥“普遍动”,但磷释放速率没有明显提高,即在底泥“少量动”的流速下,底泥磷的释放速率趋于最大.

(3)上覆水质影响底泥磷的释放,尤其显著影响磷的初期释放,内河水较自来水更有利于底泥磷释放,可能是由于内河水与底泥构成了良好的磷交换关系.浅水水体在底泥“普遍动”的流速下,水深对底泥磷释放影响不大.

(4)通过调节内河水体的水力学条件和水质,可以达到抑制或强化底泥磷释放的目的.

参考文献:

[ 1 ] 龚春生,姚琪,范成新,等.城市浅水型湖泊底泥释磷的通量估算——以南京玄武湖为例[J].湖泊科学,2006,18(2): 179-183.

[ 2 ] 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): 12-19.

[ 3 ] Istvanovics V. Seasonal variation of phosphorus release from the sediments of shallow Lake Balaton (Hungary) [J]. Water Res,

1988, 22(12): 1473-1481.

[ 4 ] 文威,孙学明,孙淑娟,等.海河底泥氮磷营养物静态释放模拟研究[J].农业环境科学学报,2008,27(1): 295-300.

[ 5 ] 李宝,丁士明,范成新,等.滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J].环境科学,2008,29(1): 114-120.

[ 6 ] Sondergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arreso, Denmark [J]. Hydrobiologia, 1992, 228(1): 91-99.

[ 7 ] Kristensen P, Sondergaard M, Jeppesen E. Resuspension in a shallow eutrophic lake [J]. Hydrobiologia, 1992, 228(1): 101-109.

[ 8 ] 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.

[ 9 ] 范成新,张路,秦伯强,等.风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J].中国科学(D辑),2003,33(8): 760-768.

[ 10 ] 蔡景波,丁学峰,彭红云,等.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.

[ 11 ] 官宝红,吴国华,曾爱斌,等.京杭运河杭州段水污染源特征与截污措施建议[J].给水排水,2005,31(2): 1-5.

[ 12 ] 曾爱斌,王春华,阮俊安.京杭大运河杭州段水质历史分析与污染治理对策[J].沈阳农业大学学报,2005,36(5): 631-633.

[ 13 ] 李君.杭州市运河水系磷污染及底泥磷释放水动力学研究[D].杭州:浙江大学,2006. 27-30.

[ 14 ] 武汉水利电力学院河流泥沙工程学教研室.河流泥沙工程学[M].北京:水利出版社,1983. 86-94.

[ 15 ] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002. 246-248.

[ 16 ] 李悦,乌大年,薛永先.沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J].海洋环境科学,1998,17(1): 15-20.

[ 17 ] Jin X C, Wang S R, Pang Y, et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China [J]. Environ Pollut, 2006, 139(2): 288-295.

[ 18 ] 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.

[ 19 ] 朱广伟,秦伯强,高光,等.长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J].环境科学学报,2004,24(3): 381-388.

[ 20 ] 戴纪翠,宋金明,李学刚,等.胶州湾不同形态磷的沉积记录及生物可利用性研究[J].环境科学,2007,28(5): 929-936.

[ 21 ] 王超,邹丽敏,王沛芳,等.典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系[J].环境科学,2008,29(5): 1303-1307.

[ 22 ] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Res, 2000, 34(7): 2037-2042.

[ 23 ] 李一平,逢勇,吕俊,等.水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J].湖泊科学,2004,16(4): 318-324.

[ 24 ] 蒋昌波,白玉川,姜乃申,等.海河口粘性淤泥起动规律研究[J].水利学报,2001,32(6): 51-57.

[ 25 ] 罗玉兰.城市内河沉积物营养盐污染特性及释放规律研究[D].南京:河海大学,2007. 59-60.

[ 26 ] 刘静静.巢湖内源氮磷的形态、释放规律及控制研究[D].合肥:合肥工业大学,2006. 20-22.