

李大鹏, 黄勇, 李伟光. 2009. 底泥扰动对上覆水中磷形态分布的影响 [J]. 环境科学学报, 29(2): 279–284
Li D P, Huang Y, Li W G. 2009. Effect of sediment disturbance on the distribution of phosphorus forms in the overlying water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(2): 279–284

底泥扰动对上覆水中磷形态分布的影响

李大鹏^{1, 2}, 黄勇^{2*}, 李伟光¹

1 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090
2 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011

收稿日期: 2008-03-25 修回日期: 2008-06-16 录用日期: 2008-12-22

摘要: 通过室内试验模拟底泥受持续和间歇扰动的过程, 探讨了扰动作用对上覆水中不同形态磷分布的影响. 结果表明, 持续扰动和间歇扰动显著促进了上覆水中的溶解态磷向底泥迁移. 持续扰动与间歇扰动作用下, 上覆水中溶解性无机磷 (DIP) 分别在第 6h 和第 24h 达到平衡状态, 为 0.014mg L^{-1} 和 0.015mg L^{-1} , 显著低于对照试验 (0.04mg L^{-1}); 而溶解性总磷 (DTP) 则分别在第 6h 和第 48h 达到平衡状态, 为 0.047mg L^{-1} 和 0.045mg L^{-1} , 显著低于对照试验 (0.065mg L^{-1}). 持续扰动促进了颗粒态磷 (PP) 的释放, 扰动 6h 后, PP 达到最大值 (0.18mg L^{-1}), 随后下降, 第 24h 后, PP 稳定在 0.093mg L^{-1} 左右; 而间歇扰动作用下, 第 2h, PP 达到最大值 (0.2mg L^{-1}), 随后下降, 第 96h 后, PP 稳定在 0.093mg L^{-1} 左右. 扰动作用下, TP 的变化规律与 PP 一致. 与初始状态相比, 持续扰动和间歇扰动作用下, DIP/DTP、DIP/TP 和 DTP/TP 显著下降, 而上述该值在对照试验中则基本保持不变, 说明扰动导致的底泥再悬浮有利于降低上覆水中溶解态磷的含量.
关键词: 持续扰动; 间歇扰动; 磷形态; 底泥

文章编号: 0253-2468 (2009) 02-279-06 中图分类号: X171.4 文献标识码: A

Effect of sediment disturbance on the distribution of phosphorus forms in the overlying water

LID apeng^{1, 2}, HUANG Yong^{2*}, LIW eiguang¹

1 School of Municipal and Environmental Engineering Harbin Institute of Technology, Harbin 150090
2 School of Environmental Science and Engineering University of Science and Technology of Suzhou Suzhou 215011

Received 25 March 2008 received in revised form 16 June 2008; accepted 22 December 2008

Abstract Lab-scale experiments were conducted to investigate the effect of continuous or intermittent sediment disturbance on the distribution of different forms of phosphorus in the overlying water. The results show that the migration of dissolved phosphorus from water to sediment was enhanced by both continuous and intermittent disturbance as compared with the control. Equilibrium concentrations of dissolved inorganic phosphorus (DIP) in the overlying water were reached after 6 h continuous disturbance (0.014mg L^{-1}) and 24 h of intermittent disturbance (0.015mg L^{-1}). Both of the conditions led to lower DIP than the control (0.04mg L^{-1}). The equilibrium of dissolved total phosphorus (DTP) in the overlying water was reached after 6 h of continuous disturbance (0.047mg L^{-1}) and 48 h of intermittent disturbance (0.045mg L^{-1}). Again, DTP after disturbance was lower than the control value (0.065mg L^{-1}). Continuous disturbance promoted the release of particulate phosphorus (PP) from the sediments. The highest value of PP in the overlying water (0.18mg L^{-1}) was reached after 6 h. The content of PP dropped as the disturbance continued, remaining at about 0.093mg L^{-1} after 24 h. Under conditions of intermittent disturbance, the highest value of PP in the overlying water (0.2mg L^{-1}) was reached after 2 h and then PP decreased. The content of PP remained at about 0.093mg L^{-1} from 96 h to the end of the experiment. Under both disturbance conditions, the variation of total phosphorus (TP) was the same as PP. DIP/DTP, DIP/TP and DTP/TP decreased markedly under the disturbances compared with the initial state, but the ratios were almost unchanged in the control experiment. Therefore, the study reveals that sediment re-suspension caused by disturbance facilitates reduction of the content of dissolved phosphorus in the overlying water.

Keywords continuous disturbance; intermittent disturbance; phosphorus forms; sediments

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (No. 2003AA601070); 江苏省高校自然科学基金项目 (No. 07KJD610196)
Supported by the High-tech Research and Development Program of China (No. 2003AA601070) and the Grant of Fundamental Research of Natural Science for Universities and Colleges, Jiangsu Province (No. 07KJD610196)
作者简介: 李大鹏 (1975—), 男, 博士研究生, E-mail: ustldp@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn
Biography: LI Dapeng (1975—), male, Ph.D. candidate, E-mail: ustldp@163.com; * Corresponding author, E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn
©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引言 (Introduction)

近年来,因内源磷释放引起的水体富营养化问题越来越引起国内外研究者的关注 (Perkins *et al.*, 2001; House *et al.*, 2000; 胡俊等, 2005; 孙小静等, 2007). 研究认为,因扰动引起的底泥再悬浮可以促进内源磷的释放 (Palmo *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2005; Barlow, *et al.*, 2004), 甚至引起暴发性释放 (朱广伟等, 2005a), 而这种内源释放对上覆水的磷浓度有重要影响 (高丽等, 2004; Xie *et al.*, 2003). 对此类研究进行分析,发现存在着以下 2 个问题: ①目前底泥扰动试验的研究大多数以短期扰动为主 (孙小静等, 2007; 朱广伟等, 2005b; 范成新等, 2003; 张路等, 2001), 多数在几十分钟或几十小时不等,而这样的时间尺度与浅水湖泊中因风浪作用引起的底泥扰动相比,显然较小,由此可能导致扰动对磷的迁移转化的长期效应未被重视. ②以往的研究多是采用总磷 (TP) 作为营养盐释放的评价标准,并认为,上覆水中总磷含量升高,则促使水体富营养化程度升高 (朱广伟等, 2005a; 罗淑葱等, 2005; 秦伯强等, 2005; 秦伯强等, 2003). 但是,释放的磷能否被浮游生物所利用,取决于磷的形态,其中,溶解态磷最容易被浮游生物所利用 (秦伯强等, 2005). 朱广伟等 (2005a) 对风浪作用下的太湖进行实际观测时发现,在风浪刚刚启动时,水体中溶解性磷酸盐含量最高,但大风浪持续 1d 后总磷含量显著升高,而溶解性磷酸盐反而下降;并且在更多的研究中也发现了类似的现象 (朱广伟等, 2004; 罗淑葱等, 2005; 秦伯强等, 2005). 因而,弄清扰动后水中不同形态磷的变化有助于更好的揭示风浪的作用对富营养化的影响.

本研究中通过在实验室模拟底泥受到长期持续扰动的整个过程,定时观测上覆水 (原水) 中不同形态磷的变化,并与底泥间歇扰动和底泥未受扰动相对比,探讨底泥扰动对上覆水中不同形态磷分布的影响,以期探索风浪作用对水体富营养化的影响提供依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验用底泥及上覆水

采用自制的底泥采样器采集位于校园河道入口处的底泥样品. 采集表层 15cm 的底泥样品,立即用冰盒保存 (4℃) 送至实验室,采用孔径为 1mm 的

铁筛筛出大颗粒物,对筛过的底泥进行充分混匀,备用. 同时取采样点上覆水 50L 底泥氧化还原电位为 -140.92mV , 总磷含量为 $1218.49\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{pH}=7.08$ 含水率为 78.64%, 烧失量为 10.17%. 上覆水溶解氧含量为 $3.75\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{pH}=7.66$ 总磷含量为 $0.755\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 溶解性磷酸盐含量为 $0.40\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 溶解性总磷含量为 $0.475\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.2 试验方法

9个 5L 圆形容器作为实验装置 ($d=17\text{cm}$, $h=25\text{cm}$), 每 3 个容器为 1 组, 每组 3 个平行样. 3 组试验分别为底泥持续扰动试验、底泥间歇扰动试验和对照试验. 在每个容器中分别加 200g 湿底泥,沉积物厚度约为 1.2cm,并小心加入采集自底泥采样点的河水 3L, 尽量避免底泥悬浮.

底泥持续扰动试验: 采用恒速搅拌机对底泥进行持续搅拌 ($140\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$), 底泥处于完全悬浮状态. 底泥间歇扰动试验: 采用恒速搅拌机对底泥进行搅拌 ($140\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, $10\text{min}\cdot\text{d}^{-1}$), 每次间隔 24h 搅拌期间,底泥处于完全悬浮状态; 搅拌停止,底泥自然沉降. 对照试验: 底泥未受到任何扰动,底泥不悬浮.

试验从第 0h 开始,并于第 2、6、12、24h 分别取样,之后每隔 24h 采 1 次水样; 第 216h 后,每隔 48h 采 1 次水样. 每次采样位置为水面以下 10cm 处,采样量为 50mL. 每次采完水样,立即向容器中补充等量的河水. 试验共持续 720h.

2.3 分析方法

水样中总磷 (TP) 含量采用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法测定; 溶解性总磷酸盐 (DTP) 是将水样经过 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜过滤后的滤液消解后测定; 溶解性正磷酸盐 (DIP) 是将水样经过 $0.45\mu\text{m}$ 滤膜过滤后的滤液直接测定; 颗粒态磷 (PP) 是指 TP 与 DTP 的差值. 不同形态磷的数据以平均值表示. 底泥含水率的定义为 105°C 烘干 12h 的质量损失, 有机质含量的定义为 550°C 灼烧 2.5h 的质量损失.

3 结果 (Results)

3.1 底泥扰动条件下上覆水中磷含量的变化

不同扰动方式下,上覆水中的 DIP、DTP、TP、PP 含量的变化规律显著不同,其中, DIP 与 DTP 的变化规律一致,而 TP 则与 PP 的变化规律一致 (图 1).

试验期间,持续扰动和间歇扰动作用下,上覆水中的 DIP 和 DTP 均迅速下降,几小时便达到平衡状态,但对照试验中, DIP 与 DTP 降低速度极为缓

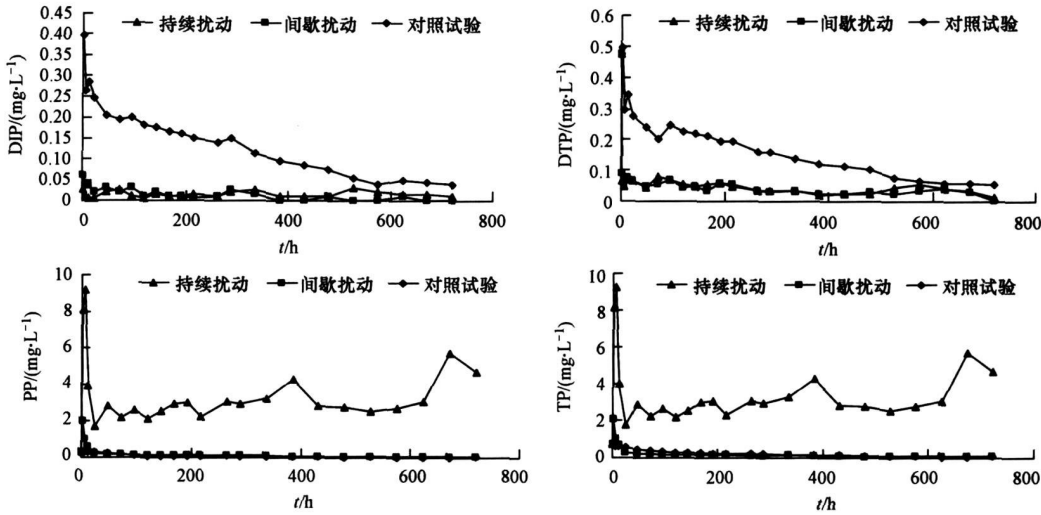


图 1 上覆水中不同形态磷的含量

Fig 1 Concentrations of different forms of phosphorus in the overlying water

慢,其含量始终显著高于扰动试验,直到 500h 以后才逐渐接近扰动试验的水平(图 1). 试验开始后第 2h 持续扰动与间歇扰动使 DIP 从 $0.400\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别降至 $0.025\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.060\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 DTP 则从 $0.475\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别降至 $0.065\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.09\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而在此时段,对照试验中的 DIP 与 DTP 却基本保持不变或略有上升.持续扰动作用下,DIP 与 DTP 在第 6h 均达到平衡状态,分别为 $0.014\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.047\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;间歇扰动作用下,DIP 与 DTP 分别 在第 24h 和第 48h 达到平衡状态,分别为 $0.015\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.045\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.对照试验中,DIP 与 DTP 则 在第 576h 才达到平衡状态,其浓度分别为 $0.04\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.065\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于扰动试验.

由图 1 可见,不同扰动状态下,PP 与 TP 的变化规律和 DIP 与 DTP 的变化规律显著不同.持续扰动作用下,PP 与 TP 先是升高,随后迅速下降,并稳定在远高于初始值的水平,后期又有所升高.孙小静等(2007)也发现了类似的现象.间歇扰动作用下,PP 与 TP 的变化趋势与持续扰动类似,并稳定在小于初始值的水平.对照试验中,PP 与 TP 呈持续下降的趋势,PP 在 90h 后达到低于间歇扰动试验的水平,而 TP 在 500h 后才达到间歇扰动的水平.持续扰动作用下,第 6h 时,PP 与 TP 达到最大值,分别为 $9.18\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.23\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后迅速降低,这与孙小静等(2007)的研究结果一致.第 24h 时,PP 与 TP 稳定在 $2.18\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.26\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.间歇扰动作用下,第 2h 时,PP 与 TP 达到最大值,分别为

$2.00\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.09\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后迅速降低;第 96h 时,PP 与 TP 稳定在 $0.093\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.130\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.对照试验中,PP 与 TP 在第 144h 和第 576h 稳定在 $0.045\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.090\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右.

3.2 底泥扰动后不同形态磷的分布

不同扰动方式对上覆水中磷形态分布具有显著的影响(图 2).由图 2a 可见,对照试验中,DIP 是 DTP 的主要组成部分,并且,DIP 占 DTP 的百分比显著高于底泥扰动作用,而底泥扰动作用下,DIP 并不是 DTP 的主要组成部分;这说明,底泥扰动有利于强化水体中溶解性磷酸盐向底泥迁移.持续扰动作用下,DIP/DTP 呈先下降后上升的趋势;第 0~192h,DIP/DTP 的平均值为 21.57%,与初始状态相比,下降了 62.63%;但从第 192h 到试验结束,该值则上升为 47.27%,这与上覆水中溶解性非活性磷酸盐的去除有关.间歇扰动作用下,DIP/DTP 呈持续降低的趋势,但试验过程中也出现了几次波动.

图 2b 和图 2c 显示,持续扰动作用下,DIP/TP 及 DTP/TP 显著降低.试验期间,DIP/TP 及 DTP/TP 的平均值分别为 0.47% 和 1.59%,与初始状态相比,分别降低了 52.51% 和 61.32%,说明持续扰动显著改变了上覆水中不同形态磷的分配规律.间歇扰动作用下,DIP/TP 及 DTP/TP 显著高于持续扰动作用.第 2~6h,DIP/TP 及 DTP/TP 显著降低,随后逐渐升高,并处于稳定状态,分别为 7.00% 和 27.54%,与初始状态相比,分别降低了 45.98% 和 35.37%.而对照试验中,DIP/TP 及 DTP/TP 均有所

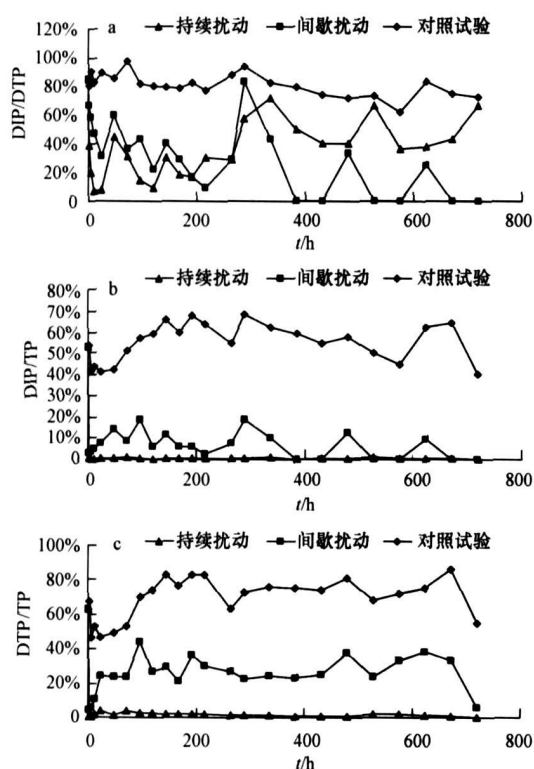


图 2 上覆水中不同形态磷的变化规律

Fig. 2 Variation of different phosphorus forms in the overlying water under different disturbance conditions

增加,与初始状态相比,分别增加了 2.06% 和 5.81%。与扰动作用相比,对照试验延缓了上覆水中溶解态磷向底泥的迁移,也就为浮游生物提供了充足的磷源。由此证明,扰动显著改变了上覆水中磷的形态分布,而扰动方式不同,对磷形态分布的改变效果也显著不同。

4 讨论 (Discussion)

本研究在长时间持续扰动促使底泥再悬浮。研究中发现,底泥扰动后,溶解性磷 (DIP 和 DTP) 并未发生释放,而是明显降低,并且显著低于对照试验。原因可能是,扰动促使底泥悬浮,从而使上覆水中的无机颗粒物质,如铁、锰等氧化物胶体以及带羟基基团的粘土矿物等含量显著增加,有利于底泥对磷的专属性吸附 (范成新等, 2006; 付强等, 2005); 扰动增加了细小颗粒物质与溶解性磷的接触几率,也会强化细小颗粒物的聚集与絮凝 (孙小静等, 2007; 张彬等, 2007), 从而使吸附了大量溶解态磷的悬浮物发生沉降,促使上覆水中溶解态磷含量迅速降低,并保持在较低浓度。这一结果明显不同于文献中有关短期扰动研究的报道。孙小静等

(2005)、朱广伟等 (2005b)、范成新等 (2003)、张路等 (2001) 在进行短期扰动研究后认为,扰动初期,溶解态磷发生明显释放,随后略有降低。研究结果不同的原因,除了扰动持续时间不同,还可能是研究中采用的上覆水水质不同。本研究中采用河水为上覆水,而上述文献中则分别采用自来水、蒸馏水以及经 0.45 μm 滤膜过滤的湖水为上覆水; 笔者 (2008) 采用去离子水为上覆水所做的研究,也得到与上述文献报道类似的结果。在本研究的对照试验中,上覆水中溶解态磷含量降低速度非常缓慢,这与上覆水中颗粒物质含量较少,絮凝作用不明显有关。由此可以得出,扰动促进了溶解态磷向底泥迁移,从而使水体中生物可利用态磷含量降低。上述分析还表明,扰动持续时间和试验所采用的上覆水会对研究结果产生重要影响。这一点在进行旨在探讨底泥扰动对磷的释放乃至水体富营养化影响的试验研究中,应得到足够的重视。

本研究中发现,持续扰动和间歇扰动对总磷的迁移规律有着显著不同的影响。这可能与上覆水中悬浮物的絮凝、沉淀关系密切。间歇扰动试验中,总磷在试验初期显著升高,随后迅速下降,但随着时间的延长,总磷含量一直保持在较低水平,并低于对照试验。这种现象明显不同于持续扰动。对其原因可作如下分析: 扰动增加了悬浮颗粒与水中的磷以及悬浮颗粒之间的接触和碰撞几率,通过絮凝作用形成较大的颗粒,在随后的静置过程中沉淀进入底泥; 每隔 24h 间歇扰动 1 次 (10 min), 形成了对水中悬浮物粒度和比重的分选 (孙小静等, 2007), 经过长时间分选作用,悬浮物的沉淀效果得到强化,促使上覆水中 PP 含量持续降低,进而导致 TP 降低。而在持续扰动作用下,因为悬浮物难以沉降,颗粒态磷的含量稳定在一个较高的水平,导致总磷含量也保持较高浓度。尽管如此,由计算可知,本试验期间,PP 占 TP 的百分比为 96.32% ~ 99.68%, 远高于初始状态 (37.09%)。这说明,底泥扰动主要导致了水中颗粒态磷的增加,而颗粒态磷很难被浮游生物利用 (秦伯强等, 2005)。

持续扰动作用下, DIP/DTP 呈先下降再升高的趋势。这可能与无机颗粒物质对 DIP 的吸附作用和扰动引起的絮凝作用有关。扰动初期,再悬浮的无机颗粒物质优先吸附 DIP (Froelich *et al.*, 1988), 而此时,絮凝作用并不明显,导致上覆水中 DIP 降低的速度快于 DTP,致使 DIP/DTP 降低; 但随着时间的

延长, 无机颗粒物对 DIP 的吸附能力逐渐达到饱和, 而此时, 因扰动引起的絮凝作用相对加强, 导致上覆水中溶解性非活性磷酸盐被絮凝去除的速度大于无机颗粒物对 DIP 的吸附速度, 致使 DIP/DTP 有所升高. 尽管如此, DIP/DTP 仍显著低于初始状态. 这恰好反映了底泥扰动对磷形态分布的长期效应.

朱广伟等 (2005a) 对风浪作用下的太湖进行实际观测时发现, 在风浪刚刚启动时, 水体中溶解性磷酸盐含量最高, 而当大风浪持续 1d 后, 总磷含量显著升高但溶解性磷酸盐含量反而下降, 但随着风浪作用的停止, 水体中悬浮物含量的降低, 总磷含量也明显降低. 在更多的研究中也发现了类似的现象 (朱广伟等, 2004; 罗淑葱等, 2005; 秦伯强等, 2005). 这与本研究中间歇扰动作用下 TP、DTP、DIP 的变化规律一致.

这似乎可以解释浅水湖泊在风浪作用下发生底泥再悬浮时磷的变化规律 (朱广伟等, 2005a; 朱广伟等, 2004), 即溶解态磷含量未明显升高, 甚至下降, 而总磷含量则在底泥再悬浮初期明显升高, 随风浪作用减小而明显降低的现象. 因此, 浅水湖泊中, 风浪导致的底泥再悬浮不仅对水体中磷形态的分布起着至关重要的作用, 而且对水体中营养盐向底泥迁移具有促进作用. 从长期效果来看, 风浪作用似乎更有助于延缓浅水湖泊富营养化的进程.

5 结论 (Conclusions)

1) 长时间扰动的试验结果表明, 扰动初期出现总磷升高; 但间歇扰动作用下, 随着时间的延长, 总磷含量反而下降, 并低于对照试验. 而持续扰动作用下, 上覆水中总磷一直保持在较高水平, 但其组成主要以颗粒态磷为主.

2) 与对照试验相比, 扰动作用下, 上覆水中溶解态磷 (DIP、DTP) 显著降低, 达到平衡的时间短, 而且, 平衡浓度明显较低. 不同扰动方式下, 上覆水中不同形态磷的分布显著改变. 持续扰动作用下, DIP/TP 和 DTP/TP 均最小, 其次为间歇扰动作用, 而对照试验中, DIP/TP 和 DTP/TP 均最大. 这一结果表明, 底泥扰动作用为溶解态磷被悬浮的颗粒物吸附和强化絮凝作用创造了更有利的条件, 由此导致上覆水中溶解态磷含量降低.

责任作者简介: 黄勇 (1958—), 男, 博士, 教授. 主要研究方向为废水生物处理和受污染水体修复的理论与技术.

E-mail: yhuang@mail.ustc.edu.cn

参考文献 (References):

- Barlow K., Nash D., Grayson R. 2004. Investigating phosphorus interactions with bed sediments in a fluvial environment using a recirculating flume and intact soil cores [J]. *Water Research* 38: 3420—3430
- 范成新, 张路, 包先明, 等. 2006. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及定量化. 2 磷释放的热力学机制及源-汇转换 [J]. *湖泊科学*, 18(3): 207—217
- Fan C. X., Zhang L., Bao X. M., *et al.* 2006. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu. II. Chemical thermodynamic mechanism of phosphorus release and its source-sink transition [J]. *J. Lake Sciences* 18(3): 207—217 (in Chinese)
- 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 2003. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物的动态释放估算 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 33(8): 760—768
- Fan C. X., Zhang L., Qin B. Q., *et al.* 2003. Wind on phosphorus release from surficial resuspended sediments in the shallow Lake Taihu, China [J]. *Sci. China (D)*, 33(8): 760—768 (in Chinese)
- Froelich P. N. 1988. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphorus buffer mechanism [J]. *Limnology & Oceanography*, 33(4): 649—668
- 付强, 尹澄清, 马允. 2005. 源头农业区不同类型水塘中水体沉积物磷吸附容量 [J]. *环境科学*, 26(4): 70—76
- Fu Q., Yin C. Q., Ma Y. 2005. Phosphorus sorption capacities of the pond sediments in a headstream agricultural watershed [J]. *Environ. Sci.* 26(4): 70—76 (in Chinese)
- 高丽, 杨浩, 周建民. 2004. 湖泊沉积物中磷释放的研究进展 [J]. *土壤*, 36(1): 12—15
- Gao L., Yang H., Zhou J. M. 2004. Research progress on phosphorus release from lake sediments [J]. *Soils* 36(1): 12—15 (in Chinese)
- House W. A., Denison F. H. 2000. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentrations in river sediments [J]. *Water Research* 34(4): 1187—1200
- 胡俊, 刘剑彤, 刘永定. 2005. 沉积物与悬浮物中磷分级分离形态差异的初步研究 [J]. *环境科学学报*, 25(11): 1517—1522
- Hu J. L., Liu J. T., Liu Y. D. 2005. Studying on the form and the relativity of nitrogen and phosphorus in the pore water of sediment in Dianchi Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 25(11): 1517—1522 (in Chinese)
- 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 2008. 底泥再悬浮对不同营养水平上覆水中磷酸盐迁移的影响 [J]. *水处理技术*, 34(6): 4—7
- Li D. P., Huang Y., Li W. G. 2008. Effect on migration of phosphate to sediment under different overlying water by sediment re-suspension [J]. *Technology of Water Treatment* 34(6): 4—7 (in Chinese)
- 罗淑葱, 秦伯强, 朱广伟, 等. 2005. 动力扰动下太湖梅梁湾水-沉积物界面的营养盐释放通量 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 35(增刊 II): 166—172
- Luo L. C., Qin B. Q., Zhu G. W., *et al.* 2005. Nutrient release flux on the sediment-water interface of Meiliang bayou of Taihu Lake under

- different hydrodynamic disturbance [J]. *Sci China (D)*, 35(II): 166—172 (in Chinese)
- Palmo L, Clavero V, Izquierdo J J *et al*. 2004. Influence of macrophytes on sediment phosphorus accumulation in eutrophic estuary (Palmes River, Southern Spain) [J]. *Aquatic Botany*, 80: 103—113
- Perkins R G, Underwood G J C. 2001. The potential for phosphorus release across the sediment-water interface in an eutrophic reservoir dosed with ferric sulphate [J]. *Water Research*, 35(6): 1399—1406
- 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 2003. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式 [J]. *科学通报*, 48(17): 1822—1831
- Qin B Q, Hu W P, Gao G, *et al*. 2003. The dynamic mechanism of resuspended sediment and conceptual model of nutrient release from inner source in Taihu Lake [J]. *Science Bulletin* 48(17): 1822—1831 (in Chinese)
- 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 2005. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法—以太湖为例 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 35(增刊 II): 33—44
- Qin B Q, Zhu G W, Zhang L, *et al*. 2005. Model of nutrient release and estimation in the sediments from the big shallow lake-Taihu [J]. *Sci China (D)*, 35(II): 33—44 (in Chinese)
- Smith D R, Haggard B E, Wamemunde E A, *et al*. 2005. Sediment phosphorus dynamics for three tile fed drainage ditches in Northeast Indiana [J]. *Agricultural Water Management*, 71: 19—32
- 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 2007. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响 [J]. *环境科学*, 28(3): 506—511
- Sun X J, Qin B Q, Zhu G W, *et al*. 2007. Release of colloidal N and P from sediment of lake Caused by continuing hydrodynamic disturbance [J]. *Environ Sci* 28(3): 506—511 (in Chinese)
- 孙小静, 朱广伟, 罗淑葱, 等. 2005. 浅水湖泊沉积物磷释放的波浪水槽试验研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 35(增刊 II): 81—89
- Sun X J, Zhu G W, Luo L C, *et al*. 2005. Phosphorus release from sediments of the shallow lake by flume experiments [J]. *Sci China (D)*, 35(II): 81—89 (in Chinese)
- Xie L Q, Xie P, Tang H J. 2003. Enhancement of dissolved phosphorus release from sediment to lakewater by Microcystis bloom—an enclosure experiment in a hyper-eutrophic subtropical Chinese lake [J]. *Environmental Pollution*, 122: 391—399
- 张彬, 李涛, 刘会娟, 等. 2007. 模拟扰动条件下太湖水体悬浮物的结构特性 [J]. *环境科学*, 28(1): 70—74
- Zhang B, Li T, Liu H J, *et al*. 2007. Structural characteristics of suspended solids in Taihu lake under simulative disturbing conditions [J]. *Environ Sci* 28(1): 70—74 (in Chinese)
- 张路, 范成新, 秦伯强, 等. 2001. 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*, 13(1): 35—42
- Zhang L, Fan C X, Qin B Q, *et al*. 2001. Phosphorus release and absorption of surficial sediments in Taihu Lake under simulative disturbing conditions [J]. *J Lake Sciences*, 13(1): 35—42 (in Chinese)
- 朱广伟, 秦伯强, 高光. 2004. 强弱风浪扰动下太湖的营养盐垂向分布特征 [J]. *水科学进展*, 15(6): 775—780
- Zhu G W, Qin B Q, Gao G. 2004. Vertical distribution of the concentrations of phosphorus and suspended solid in Taihu Lake affected by wind-induced wave [J]. *Advances in Water Science*, 15(6): 775—780 (in Chinese)
- 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 2005a. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据 [J]. *科学通报*, 50(1): 66—71
- Zhu G W, Qin B Q, Gao G, *et al*. 2005a. Direct evidence for phosphorus flux from the sediments in big shallow lake by wind disturbance [J]. *Science Bulletin* 50(1): 66—71 (in Chinese)
- 朱广伟, 秦伯强, 张路, 等. 2005b. 太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验 [J]. *湖泊科学*, 17(1): 61—68
- Zhu G W, Qin B Q, Zhang L, *et al*. 2005b. Wave effects on nutrient release of sediments from lake Taihu by flume experiments [J]. *J Lake Sciences*, 17(1): 61—68 (in Chinese)