

李大鹏,黄勇,范成新. 2011. 沉积物悬浮频率对水体颗粒态磷生物有效性的影响[J]. 环境科学学报, 31(10): 2217-2222
Li D P, Huang Y, Fan C X. 2011. Effect of sediment resuspension frequency on bio-availability of particulate phosphorus in overlying water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(10): 2217-2222

沉积物悬浮频率对水体颗粒态磷生物有效性的影响

李大鹏^{1,2}, 黄勇^{1,*}, 范成新²

1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008
收稿日期: 2010-12-03 修回日期: 2011-02-08 录用日期: 2011-03-02

摘要: 通过室内试验模拟沉积物在不同频率下的悬浮过程, 研究了悬浮频率对颗粒态磷生物有效性的影响. 结果表明, 沉积物悬浮导致颗粒态磷的生物有效性显著降低, 30 d 时, 藻类可利用态磷(AAP)占悬浮物总磷(Tot-P)的百分比仅为初始状态(56.75%)时的26.24%(悬浮频率较小)和20.04%(悬浮频率较大). 内源磷形态分析表明, 尽管悬浮物中铁铝结合态磷(Fe/Al-P)含量呈增加的趋势, 但非闭蓄态 Fe/Al-P (即 AAP)占 Fe/Al-P 的比重却明显降低. 这主要与沉积物悬浮导致溶解氧融入(溶解氧从初始状态时的 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至试验结束时的 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和 pH 值改变(pH 值从初始状态时的 8.02 分别降至 7.80(悬浮频率较小)和 7.60(悬浮频率较大))有关. 沉积物悬浮导致水体中可被利用颗粒态磷(BAPP)和溶解态磷(DTP)含量降低, 从而导致上覆水中生物有效磷(BAP)含量降低.

关键词: 悬浮; 生物有效性; 磷形态; 颗粒态磷; 沉积物

文章编号: 0253-2468(2011)10-2217-06 中图分类号: X171.4 文献标识码: A

Effect of sediment resuspension frequency on bio-availability of particulate phosphorus in overlying water

LI Dapeng^{1,2}, HUANG Yong^{1,*}, FAN Chengxin²

1. School of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011
2. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008
Received 3 December 2010; **received in revised form** 8 February 2011; **accepted** 2 March 2011

Abstract: Lab-scale experiments were conducted to investigate the effect of sediment resuspension under different frequency conditions on bio-availability of particulate phosphorus (PP) in the overlying water. The results show that the bio-availability of PP decreased obviously under sediment resuspension conditions, compared with the initial state. After 30 d, the percentages of algal available phosphorus (AAP) to total phosphorus (Tot-P) in suspended solids were 26.24% (lower frequency) and 20.04% (higher frequency) of the initial state (56.75%), respectively. Sequential fractionation indicated that the proportions of non-occluded Fe/Al-P (AAP) to Fe/Al-P decreased gradually under sediment resuspension conditions with time increasing, although the concentrations of Fe/Al-P increased markedly in suspended solids. This was attributed to dissolved oxygen (DO) penetration and pH values change. Under sediment resuspension conditions, DO concentrations increased from $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (initial state) to $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (the end). In addition, pH values decreased from 8.02 (initial state) to 7.80 (lower frequency) and 7.60 (higher frequency), respectively. The concentrations of bio-available particulate phosphorus (BAPP) and dissolved total phosphorus (DTP) reduced under sediment resuspension conditions. Correspondingly, the content of bio-available phosphorus (BAP) decreased in the overlying water, compared with the initial state.

Keywords: resuspension; bioavailability; phosphorus forms; particulate phosphorus; sediments

1 引言 (Introduction)

对于水体修复而言, 与控制外源磷输入相比, 控制内源磷释放具有相当大的难度. 风浪、生物、人为等干扰作用会导致沉积物悬浮, 加大内源磷释放

量, 导致上覆水磷浓度增加(朱广伟等, 2005). 然而, 因沉积物悬浮所致释放的磷主要是颗粒态磷(PP), 其占总磷(TP)的80%以上(Uusitalo *et al.*, 2000; Ellison *et al.*, 2006). PP 仅在其转化成溶解态磷(DTP)后才能被浮游生物利用, 这部分颗粒态

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50908154, 50938005)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50908154, 50938005)

作者简介: 李大鹏(1975—) 男, E-mail: ustslpd@163.com; * 通讯作者(责任作者) E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

Biography: LI Dapeng(1975—) male, E-mail: ustslpd@163.com; * Corresponding author E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

磷被称为可被生物利用颗粒态磷(BAPP)。因此,水体中可以被生物利用的磷(BAP)应该为DTP与BAPP之和。这说明无论采用TP($[TP] = [DTP] + [PP]$)还是采用DTP来评估水体富营养化风险都是有问题的,因为其要么偏高要么偏低地评估了水体中BAP的含量,而以往的研究大多忽视了颗粒态磷对生物有效磷的贡献。

沉积物悬浮不仅会改变水体中不同形态磷的数量分布(李大鹏等,2009),而且也会改变沉积物中不同赋存形态磷的数量分布规律(Li *et al.*, 2010),而后者与因扰动而进入水体的颗粒态磷的生物有效性密切相关(Elison *et al.*, 2006)。李大鹏等(2010)研究认为,沉积物悬浮后,水体中BAP呈下降趋势,但该研究中对BAPP的计算仅是参考了Ellison等(2006)的研究结果(BAPP占PP的百分比为19%),即仅考虑了水体中PP含量变化对BAPP的影响,而未考虑内源磷赋存形态数量分布变化对BAPP的影响。实际上,沉积物每一次悬浮均会改变内源磷的数量分布,进而影响到颗粒态磷的生物有效性。另外,研究发现,随着沉积物悬浮次数的增加,沉积物絮凝、沉淀效果得到强化(张彬等,2007)。但以往研究中并未比较在相同的沉积物悬浮时间内,沉积物悬浮频率对PP生物有效性和含量的影响。因此,了解沉积物悬浮对水体中颗粒态磷含量及其生物有效性的影响,将有助于更好地揭示风浪扰动对浅型水体富营养化的作用。

基于此,本研究通过在实验室模拟沉积物悬浮实验,研究沉积物悬浮频率对PP的影响规律,并定期采集悬浮物,分析PP生物有效性的变化规律,进而了解沉积物悬浮对BAP的影响,以期探索风浪作用对浅型水体中生物有效磷的变化规律提供理论依据。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验用沉积物及上覆水

试验用沉积物采自苏州科技学院校园河道入口处($31^{\circ}18'29.2''\text{N}$, $120^{\circ}33'28.1''\text{E}$)。利用进口大口径柱状采样器(Rigo Co., 直径110 mm、高500 mm)采集无扰动柱状样,并现场切得表层1 cm的沉积物样品,立即用冰盒保存(4°C)送至实验室,采用孔径为1 mm的铁筛筛除大颗粒物质,对筛过的沉积物进行充分混匀,备用。同时取采样点上覆水50 L,测得沉积物总磷(Tot-P)含量为 $877.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

pH=7.36,含水率为71.84%,烧失量为7.68%。上覆水溶解氧含量为 $3.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH=8.02,总磷(TP)含量为 $0.24\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性无机磷(DIP)为 $0.065\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性有机磷(DOP)为 $0.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,PP为 $0.135\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮为 $6.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高锰酸钾指数为 $4.27\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.2 试验方法

取2个5 L圆形容器的实验装置($d=17\text{ cm}$, $h=25\text{ cm}$),分别编号为E1和E2。在每个容器中分别加200 g充分混匀的湿沉积物,沉积物厚度约为1.2 cm,并小心加入采集自沉积物采样点的河水3 L。

对于E1,采用恒速搅拌机对沉积物进行扰动($140\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),使沉积物处于完全悬浮状态,每天扰动3 h,随后沉积物自然沉降。对于E2,采用恒速搅拌机对沉积物进行扰动($140\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),使沉积物处于完全悬浮状态,在24 h内,分为3个时段扰动,每个时段扰动1 h,随后沉积物自然沉降7 h。对于E1和E2而言,扰动时间均为3 h,自然沉淀时间均为21 h。

试验从第0 d开始,并于第1、2、3 d分别取样,之后定期取样。每次采样位置为水面以下10 cm处,采样量为50 mL。每次采完水样,立即向容器中补充等量的河水。在沉积物扰动过程中采集悬浮物样品用于BAPP的分析,采样时间分别为第10、20、30 d,采样量分别为500 mL,采样后迅速补充等量的河水。

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 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后的滤液消解后测定;溶解性无机磷(DIP)是将水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后的滤液直接测定;溶解性有机磷(DOP)是指DTP与DIP之间的差值;颗粒态磷(PP)是指TP与DTP之间的差值。

以悬浮物中藻类可利用磷(AAP)占悬浮物总磷(Tot-P)的百分比来表示沉积物悬浮对颗粒态磷生物有效性的影响。具体而言,采用AAP/Tot-P来表示BAPP/PP。分别采用初始状态与第10 d的AAP/Tot-P平均值、第10 d和第20 d的AAP/Tot-P平均值、第20 d和第30 d的AAP/Tot-P平均值来表示第1~10 d、第10~20 d、第20~30 d的BAPP/PP。

悬浮物中铁铝结合态磷(Fe/Al-P)的数量分布

参照 Hieltjes 和 Lijklema (1980) 的方法测定。

沉积物含水率的定义为 105 °C 烘干 12 h 的质量损失, 有机质含量的定义为 550 °C 灼烧 2.5 h 的质量损失。

2.4 统计分析

E1 和 E2 中 AAP 占 Tot-P 的百分比、AAP 占 Fe/Al-P 的百分比、BAPP、BAP 之间的区别采用单因子方差分析 (ANOVA) 进行检验。所有统计分析利用 SPSS 13.0 软件进行, 文中所有结果除上覆水中 DTP、DIP、PP 含量外, 均表示为平均值 \pm 标准偏差 ($n=3$) 的形式。

3 结果 (Results)

3.1 BAPP 的变化规律

沉积物悬浮后, AAP 占 Tot-P 的百分比发生了明显变化 (图 1)。图 1 结果显示, 与初始状态相比, 沉积物悬浮后, AAP 占 Tot-P 的百分比明显降低。第 30 d 时, E1 和 E2 中 AAP 占 Tot-P 的百分比仅为初始状态 (56.75%) 时的 26.24% 和 20.04%。在 E1 和 E2 中, 随着试验时间的延长, AAP 占 Tot-P 的百分比明显降低。与 E1 相比, 除第 10 d 外, 第 20、30 d, E2 中 AAP 占 Tot-P 的百分比均低于 E1 ($p < 0.05$)。这说明在相同的时间尺度内, 沉积物悬浮频率越大, 则越有利于降低颗粒态磷的生物有效性。

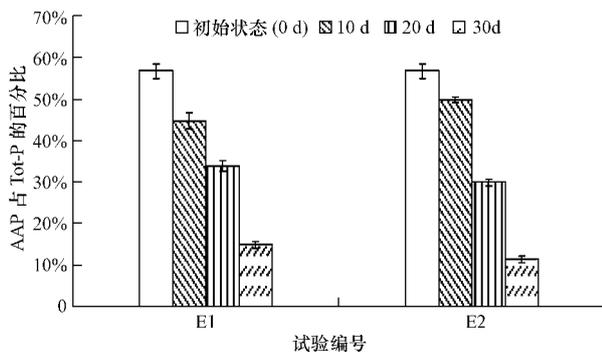


图 1 沉积物悬浮条件下 AAP 占 Tot-P 的百分比

Fig. 1 Percentage of AAP to Tot-P under sediment resuspension conditions

参照 AAP 占 Tot-P 的百分比计算了试验期间 E1 和 E2 中 BAPP 的变化规律 (图 2)。图 2 结果显示, 与初始状态相比 (BAPP 为 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 除第 1 d 外, E1 和 E2 中 BAPP 均低于初始状态。第 2 ~ 19 d, E1 中 BAPP 明显低于 E2 ($p < 0.01$)。随后直到试验结束, E1 和 E2 中 BAPP 含量基本一致。

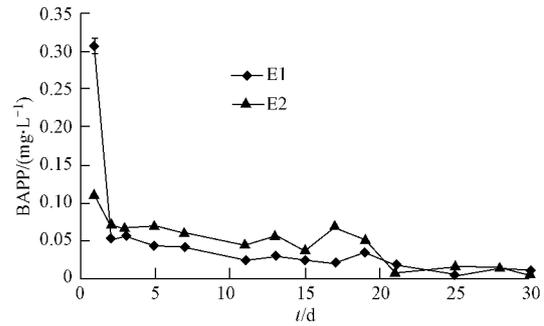


图 2 上覆水中 BAPP 的变化规律

Fig. 2 Variations of BAPP in the overlying water

3.2 BAP 的变化规律

BAP 由 BAPP 和 DTP 组成, 因此, 其含量随着 BAPP 和 DTP 含量的变化而变化 (图 3)。由图 3a 可知, BAP 的变化规律与 BAPP 的变化规律基本一致 (图 2)。除 E1 在第 1 d 外, E1 和 E2 在其余时间的 BAP 含量均低于初始状态 ($0.174 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 并且在试验后期 (第 20 ~ 30 d), E1 和 E2 中的 BAP 分别占初始状态时的 33.4% ~ 50.4% 和 24.3% ~ 36.2%。这说明沉积物悬浮后, 水体中的 BAP 含量显著降低, 并低于初始状态。但从 DTP 的变化来看 (图 3b) 在第 1 ~ 17 d, E1 和 E2 的 DTP 基本一致, 第 19 ~ 30 d, E1 中的 DTP 显著高于 E2, 这可能是导致试验后期 (第 20 ~ 30 d) E1 中的 BAP 略高于 E2 的另一个原因。

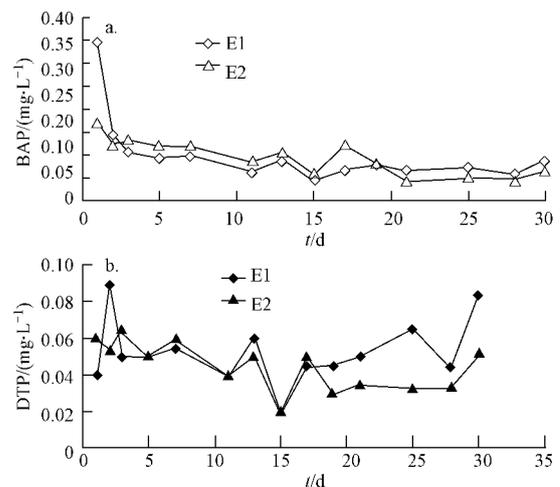


图 3 上覆水中 BAP (a) 和 DTP (b) 的变化规律

Fig. 3 Variations of BAP (a) and DTP (b) in the overlying water

3.3 悬浮物中铁铝结合态磷对 AAP 的贡献

藻类可利用磷 (AAP) 是指有氧条件下湖泊光合层中藻类可利用磷含量, 它能很好地表征沉积物中藻类可利用磷的含量 (图 4)。由图 4a 可知, 与初

始状态(第0 d)相比,E2悬浮物中AAP含量在第10 d增加,而E1悬浮物中AAP含量显著降低.在第20、30 d,E2悬浮物中AAP含量明显低于初始状态,且低于E1. Li等(2010)研究指出,沉积物悬浮状态下,AAP的形成与铁铝结合态磷($Fe/Al-P$)密切相关.沉积物悬浮状态下, $Fe/Al-P$ 含量及AAP占 $Fe/Al-P$ 的百分比如图4b和图4c所示.由图4b可知,随着试验时间的延长,E1和E2悬浮物中的 $Fe/Al-P$ 含量均有所增加.AAP被认为是非闭蓄态 $Fe/Al-P$,因此,AAP占 $Fe/Al-P$ 的百分比可以说明悬浮物对磷的固定能力.图4c显示,与初始状态(第0 d)相比,第10 d,E1和E2悬浮物中AAP占 $Fe/Al-P$ 的百分比基本保持不变,但在第20、30 d,E1和E2悬浮物中AAP占 $Fe/Al-P$ 的百分比均明显降低.在整个试验过程中,E1悬浮物中AAP占 $Fe/Al-P$ 的百分比均略高于E2($p < 0.05$).

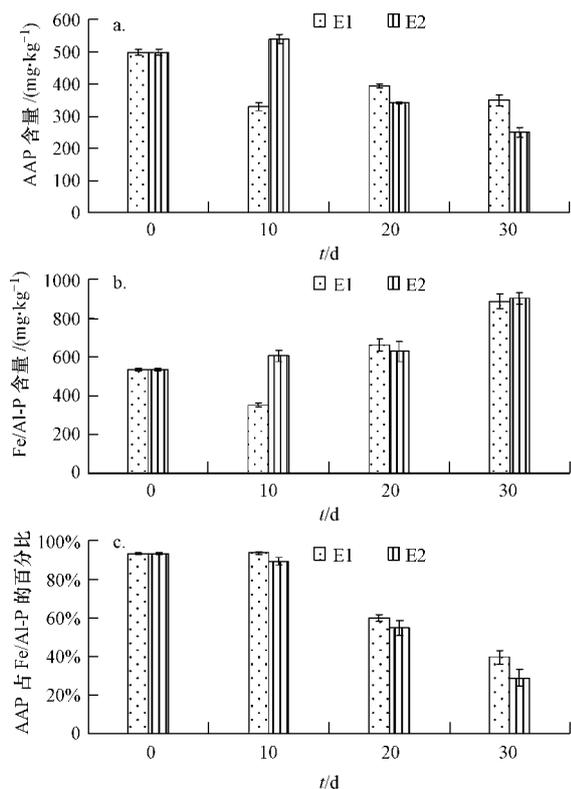


图4 悬浮物中AAP和 $Fe/Al-P$ 的变化规律及AAP占 $Fe/Al-P$ 的百分比

Fig. 4 Variations of AAP and $Fe/Al-P$ and the percentage of AAP to $Fe/Al-P$ in the suspended solids

4 讨论 (Discussion)

4.1 颗粒态磷的生物有效性

沉积物受扰动悬浮后,上覆水中溶解性总磷和

颗粒态磷含量显著改变.本研究发现,沉积物悬浮后,上覆水中颗粒态磷占总磷的百分比超过了50%,高于初始状态.因此,颗粒态磷对水体中生物有效磷的贡献不能被忽视. Ellison等(2006)研究表明,颗粒态磷的生物有效性与悬浮物中不同形态磷的数量分布密切相关.从不同形态磷的迁移活性考虑,铁铝结合态磷($Fe/Al-P$)最容易转化成溶解态磷而释放出来(Rydin 2000; Ribeiro *et al.*, 2008),并被水体中浮游生物利用.然而,也有研究表明,并非所有的 $Fe/Al-P$ 均能释放出来(Selig, 2003; Saavedra *et al.*, 2005),而仅是非闭蓄态 $Fe/Al-P$ 才能释放出来(Nguyen 2000),这部分 $Fe/Al-P$ 可以采用藻类可利用态磷(AAP)表示(Sharpley, 1993).因此,本研究中采用悬浮物中AAP占Tot-P的百分比来表示颗粒态磷的生物有效性.

沉积物悬浮后,与初始状态相比,无论是AAP含量还是AAP占Tot-P的百分比均有所降低,这可能与扰动过程中溶解氧融入和pH值改变有关.试验期间,E1和E2上覆水中溶解氧从 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右增加至 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,两者溶解氧含量并无太大差别.上覆水中pH值略有差别,E1中pH值保持在7.80左右,而E2则保持在7.60左右.与初始状态相比,E1和E2的pH分别降低了0.2和0.4,则E1和E2上覆水达到相应的pH值分别需要 0.316 和 0.632 mol H^+ .由于E1和E2具有同样的沉积物和上覆水,因此, H^+ 的来源可能与 Fe^{2+} 的氧化有关. Kraal等(2009)研究表明,将 1 mol Fe^{2+} 被氧化成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 会产生 2 mol H^+ .由此推断,E2在沉积物悬浮过程中生成了更多的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$.而 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 被认为是非晶型铁氧化物(Kraal *et al.*, 2009),其对磷的持留能力弱于晶型铁氧化物(Saavedra *et al.*, 2005).但是, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 在有氧环境中会迅速转化成晶型铁氧化物.因此,晶型 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的形成是导致E2悬浮物中AAP含量及其占Tot-P的百分比均低于E1的关键原因.

另外, Fe^{2+} 在氧化过程中,不仅是生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,还可以氧化成 Fe^{3+} .每生成 1 mol Fe^{3+} ,就会消耗水体中 2 mol H^+ (Kraal *et al.*, 2009).生成的 Fe^{3+} 不仅对水体中溶解态磷具有较强的吸附能力,而且对吸附的磷具有一定的持留能力. Fe^{3+} 与水体中溶解性有机物结合,则会显著提高对磷的持留能力(Peng *et al.*, 2007).因此, Fe^{3+} 的形成对悬浮物中AAP含量也有着至关重要的影响.由此可见,

沉积物悬浮状态下,晶型 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和 Fe^{3+} 的形成会导致 AAP 含量及其占 $\text{Fe}/\text{Al}-\text{P}$ 的百分比均随着试验时间的延长而逐渐降低,而闭蓄态 $\text{Fe}/\text{Al}-\text{P}$ 含量则分别从 6.54% (第 10 d, E1) 和 10.76% (第 10 d, E2) 增加至 60.40% (第 30 d, E1) 和 70.03% (第 30 d, E2). 这种变化可能源于扰动状态下底泥中大量闭蓄态磷的物理释放,也可能源于内源磷形态的化学转化,具体还有待于进一步的深入研究.

Rydin(2000) 研究表明,沉积物在静止状态下,易释放态磷存在向难释放态磷转化的趋势,但这种转化极其缓慢.与 Rydin(2000) 的研究结果相比,本研究中沉积物在悬浮状态下,易释放态磷(以 AAP 计)向难释放态磷转化的速率可能更快.这主要是源于沉积物悬浮过程中溶解氧的大量融入,导致沉积物中铁锰等金属离子被氧化,强化了对磷的持留.

Zhou 等(2001) 在有关浅水湖泊(太湖、杭州西湖)和深水湖泊(Lough Erne) 沉积物中生物有效磷的研究似乎可以证明了这一点.太湖沉积物中, AAP 占 Tot-P 的百分比为 17.2%,远低于 Lough Erne 的 44.3% 和杭州西湖的 50.6%.太湖的平均水深均为 1.9 m 左右,显著低于 Lough Erne 的 11.9 m.太湖是典型的易受风浪扰动的浅水湖泊,导致湖水溶解氧含量较高($7.0 \sim 9.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Qin *et al.* 2004).因此,风浪扰动下,沉积物悬浮过程中,铁锰等金属离子易于被氧化,同时也强化了处于氧化态的金属离子与水体中溶解性磷的接触几率,促进了对磷的吸附和固定,进而导致 AAP 占 Tot-P 的百分比比较低.而 Lough Erne 是典型的深水湖(沉积物很难受到风浪扰动而悬浮),沉积物表层水体呈明显的厌氧状态,这不利于金属离子被氧化,而且沉积物与溶解态磷的接触几率也低.尽管杭州西湖是浅水湖泊,但其 AAP 占 Tot-P 的百分比显著高于太湖.其原因可能与杭州西湖沉积物很少悬浮有关.因为杭州西湖被白堤和苏堤分割成 5 块,导致风浪对沉积物的扰动作用很小.因此,推测沉积物悬浮对内源磷的固定起到强化作用.

4.2 沉积物悬浮对 BAPP 的影响

BAPP 不仅与颗粒态磷(PP)的生物有效性有关,而且与水体中 PP 含量有关.图 1 显示,除第 10 d 外, E2 中颗粒态磷生物有效性均低于 E1,但第 2 ~ 19 d, E2 中的 BAPP 含量明显高于 E1(图 2).说明在此期间, E2 水体中 PP 含量明显高于 E1,试验结果也确实如此. E1 和 E2 沉积物悬浮时间相同(均

为 3 h),导致 PP 不同的主要原因可能是采集水样前悬浮物的沉淀时间不同.因为 E1 沉积物扰动 3 h 后开始自然沉淀,至采样前可以沉淀 21 h;而 E2 沉积物扰动分为 3 个阶段,导致在采样前仅沉淀了 7 h.这使得大量的悬浮物并没有完全沉淀.因此,试验期间(第 2 ~ 19 d), E2 上覆水的浊度明显大于 E1,从第 21 d 到试验结束时,两者上覆水中浊度基本一致.但由于 E2 中悬浮物在水体中的停留时间更长,并且 E2 中沉积物每天悬浮 3 次,形成了对水中悬浮物粒度和比重的分选,使得中小粒度悬浮物含量显著增加,强化了易释放态磷向难释放态磷的转化,从而使得 E2 中颗粒态磷的生物有效性比 E1 要低.这可能是颗粒态磷生物有效性降低的另一种解释.

4.3 BAPP 与 DTP 间的转换规律

水体中的 BAP 是由 BAPP 和 DTP 组成的.沉积物悬浮状态下, BAPP 和 DTP 的含量均随着时间的延长呈下降趋势(图 2 和图 3b),导致 BAP 含量随之降低(图 3a).说明沉积物悬浮对 BAPP 和 DTP 含量产生了显著影响,同时也改变了 BAPP 和 DTP 在 BAP 中所占的比重.图 5 结果显示,随着试验时间的延长, E1 和 E2 中 BAPP 占 BAP 的比重逐渐降低,相应地, DTP 所占比重则逐渐增加,但由于试验期间水体中 DTP 含量呈降低趋势(图 3b).因此,这可以说明 BAPP 并没有因沉积物悬浮而转化成 DTP, DTP 含量的降低是悬浮物吸附所致.这表明沉积物悬浮导致颗粒态磷生物有效性显著降低,强化了沉

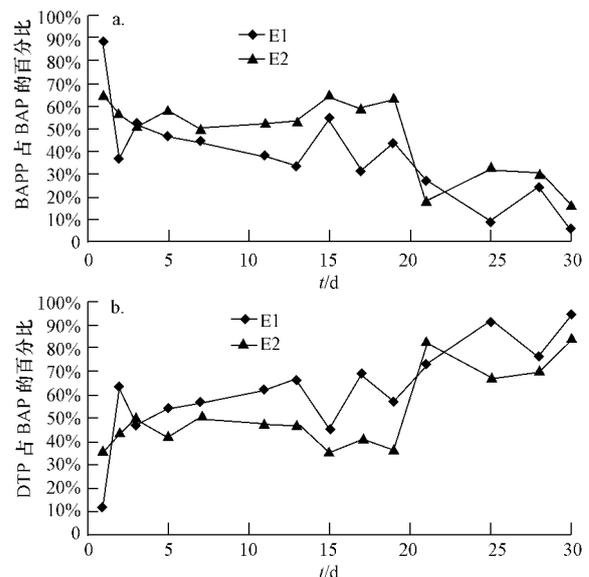


图 5 BAPP 和 DTP 在 BAP 中所占的比重

Fig. 5 Percentage of BAPP and DTP to BAP in the overlying water

积物对内源磷的持留能力。

另外, E1 中 BAPP 占 BAP 的比重明显低于 E2, 而 DTP 占 BAP 的比重则高于 E2. DTP 可以被水体中浮游生物直接利用, 而 BAPP 则必须转化成 DTP 才能被利用, 因此, BAPP 对于水体富营养化仅具有潜在风险. 这说明沉积物悬浮频率较大似乎更有利于控制水体富营养化风险.

5 结论 (Conclusions)

1) 颗粒态磷的生物有效性随着沉积物悬浮时间的延长而显著降低, 且沉积物悬浮频率较大时, 颗粒态磷的生物有效性明显低于沉积物悬浮频率较小时. 这主要与沉积物悬浮导致溶解氧融入和 pH 改变有关. 悬浮物内源磷形态分析表明, 铁铝结合态磷(Fe/Al-P) 含量随着沉积物悬浮时间延长而增加, 但非闭蓄态 Fe/Al-P 即(AAP) 含量及其占 Fe/Al-P 的百分比均呈减小的趋势.

2) 沉积物悬浮导致水体中生物有效磷含量呈下降的趋势, 试验期间(第 2~19 d), 沉积物悬浮频率较大情况下的生物有效磷含量较高. 这主要是由于沉积物悬浮频率较大导致水体中颗粒态磷含量较高所致.

3) 沉积物悬浮导致 BAPP 和 DTP 在 BAP 中所占比重发生了相互转换, 比较而言, 沉积物悬浮频率越大似乎导致水体发生富营养化的直接风险(DTP 占 BAP 比重) 越小.

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.usts.edu.cn.

参考文献 (References):

- Ellison M E, Brett M T. 2006. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover [J]. *Water Research*, 40: 1258-1268
- Hieltjes A H, Lijklema L. 1980. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 9: 405-407
- Kraal P, Slomp C P, Forster A, et al. 2009. Pyrite oxidation during sample storage determines phosphorus fractionation in carbonate-poor anoxic sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 3277-3290
- Li D P, Huang Y. 2010. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. *Ecological Engineering* 36: 958-962
- 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): 280-284
- 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): 280-284 (in Chinese)
- 李大鹏, 黄勇, 范成新. 2010. 底泥间歇扰动-沉降过程对静止水体中生物有效磷的影响 [J]. *环境科学* 31(8): 1795-1780
- Li D P, Huang Y, Fan C X. 2010. Influence of intermittent sediment disturbance-sediment process on the bioavailable phosphorus in standing water [J]. *Environmental Science* 31(8): 1795-1780 (in Chinese)
- Nguyen L M. 2000. Phosphate incorporation and transformation in surface sediments of a sewage-impacted wetland as influenced by sediment sites, sediment pH and added phosphate concentration [J]. *Ecological Engineering* 14: 139-155
- Peng J F, Wang B Z, Song S H. 2007. Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of a wastewater stabilization pond [J]. *Ecological Engineering* 31(2): 92-97
- Qin B Q, Hu W P, Gao G, et al. 2004. Dynamics of the sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(1): 54-64
- Ribeiro D C, Martins G, Nogueira R, et al. 2008. Phosphorus fractionation in volcanic lake sediments (Azores-Portugal) [J]. *Chemosphere* 70: 1256-1263
- Rydin E. 2000. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment [J]. *Water Research* 34: 2037-2042
- Saavedra C, Delgado A. 2005. Iron-related phosphorus in eroded sediments from agricultural soils of Mediterranean areas [J]. *Geoderma* 125: 1-9
- Selig U. 2003. Particle size-related phosphate binding and P-release at the sediment-water interface in a shallow German lake [J]. *Hydrobiologia* 492: 107-118
- Sharpley A N. 1993. An innovative approach to estimate bioavailable phosphorus in agricultural runoff using iron oxide-impregnated paper [J]. *Journal of Environmental Quality* 22: 597-601
- Uusitalo R, Yli-Halla M, Turtola E. 2000. Suspended soil as a source of potentially bioavailable phosphorus in surface runoff waters from clay soils [J]. *Water Research* 34(9): 2477-2482
- 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]. *Environmental Science* 28(1): 70-74 (in Chinese)
- Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. 2001. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. *Chemosphere* 42: 221-225
- 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 2005. 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. 2005. Direct Evidence for phosphorus flux from the sediments in big shallow lake by wind disturbance [J]. *Science Bulletin* 50(1): 66-71 (in Chinese)