

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铈在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响

李大鹏, 黄勇

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要: 通过室内试验模拟了太湖沉积物在不同扰动强度下的悬浮过程, 研究了沉积物扰动强度对磷释放及其形态转化的影响。结果表明, 较高扰动强度下(相当于太湖风速 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 水体中不同形态磷(总磷、颗粒态磷、溶解性总磷)含量均高于较低扰动强度(相当于太湖风速 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。其中, 两者分别扰动 1h 后, 总磷和颗粒态磷分别达到 $0.950 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.384 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.882 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.328 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 该水平保持到试验结束。然而, 溶解性总磷则呈逐渐降低的趋势。这主要归因于悬浮物的吸附和微生物的快速利用。较高和较低扰动强度下, 悬浮物上总磷(Tot-P)分别增加了 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值)和 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值)。较高扰动强度下铁铝结合态磷的变化恰好说明了形态磷间存在转化趋势。因为铁铝结合态磷增加了 $85.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值), 明显高于 Tot-P 的实测值($10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值)和理论值($27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值), 说明有其它形态磷转化成铁铝结合态磷。弱吸附态磷和钙结合态磷含量的降低正说明这一点。这显示在扰动状态下, 不同形态磷之间至少发生了以水为媒介的间接性转化。

关键词: 扰动; 释放; 转化; 磷形态; 沉积物

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2614-07

Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake

LI Da-peng, HUANG Yong

(School of Environmental Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou, Suzhou 215011, China)

Abstract: Lab-scale experiments were conducted to investigate the effect of sediment disturbance under different intensity conditions on phosphorus (P) release and sedimentary P transformation. The sediments came from Taihu Lake. The results show that the concentrations of total P (TP), particulate P (PP) and dissolved total P (DTP) in the overlying water under high intensity conditions (equal to the force of $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wave velocity on the bottom sediment in Taihu Lake) were higher than those under low intensity conditions (equal to the force of $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). The concentrations of TP and PP were up to $0.950 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.384 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $0.882 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $0.328 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for both intensities after 1 h and then the levels kept unchanged almost till the end of the experiments. However, the DTP decreased gradually. It is attributed to the adsorption by suspended sediments and quick uptake by microorganisms. Under both intensities conditions, the Tot-P of the suspended particulate matter (SPM) due to disturbance increased by $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (mean during 0-12 h) and $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (mean during 0-12 h). The changes of Fe/Al-P during the experiment (0-12 h) verified the transformation trend between sedimentary P forms in the SPM under high intensity. Because the net increase ($85.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mean during 0-12 h) was higher than the measured value ($10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mean during 0-12 h) and the theoretically calculated value ($27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, mean during 0-12 h). It suggests that other sedimentary P forms were transformed into Fe/Al-P. Correspondingly, the decrease of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and HCl-P can verify this. It suggested that sediment disturbance might induce the indirect transformation between sedimentary P forms by the assistance of overlying water.

Key words: disturbance; release; transformation; phosphorus forms; sediment

对于浅水湖泊而言, 沉积物扰动是导致磷在水体与沉积物之间迁移转化的重要因素^[1]。太湖作为大型浅水湖泊, 有关风浪引起的沉积物扰动进行了一系列相关研究, 这些研究对扰动状态下内源磷的释放作了较为清晰的阐述^[2-4]。但这些研究仅探讨了沉积物扰动状态下水体中磷含量的变化规律, 而未阐明因扰动而进入水体的悬浮物上形态磷的数量分布是否发生变化。扰动动力消失后, 悬浮物会沉降而形成新的表层沉积物^[5], 如果形态磷的数量分布发生改变, 那么对磷的释放会有影响^[6,7]。因此, 沉积物扰动不仅影响到扰动过程中磷的释放, 而且可

会影响到这次扰动结束后下次扰动过程中磷的释放^[8]。

引起浅水湖泊沉积物悬浮的主要原因是风浪扰动。在不同风速条件下, 湖底沉积物所受的剪切力是不同的^[9], 从而影响进入水体的悬浮物量^[10]。水体中悬浮物含量对磷在沉积物与水体间的交换有显著影响^[11]。朱广伟^[12]和尤本胜^[13]等对不同风速条件

收稿日期: 2011-10-27; 修订日期: 2012-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908154, 50938005)

作者简介: 李大鹏(1975~), 男, 博士, 主要研究方向为水体富营养化修复理论, E-mail: ustslpd@163.com

下水体中磷含量以及沉积物中磷释放作了相关研究. 李大鹏等^[1,4]在相关研究中探讨了沉积物扰动对水体中磷含量的影响, 并且发现, 悬浮物上不同形态磷间存在着相互转化的趋势. 然而, 上述研究中均未探讨不同风速对悬浮物上不同形态磷间的转化有何影响. 基于此, 本研究通过实验室模拟了较大风速条件下沉积物的扰动情况, 分析了磷在沉积物与水体间的交换规律以及悬浮物上不同形态磷的变化规律, 试图了解沉积物扰动强度对悬浮物上不同形态磷间转化的影响, 这对于预测磷在浅水湖泊中的迁移转化具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 试验用沉积物及上覆水

试验用的沉积物于 2011 年 4 月采自太湖梅梁湾 (N31°31'33.9", E120°12'35.2"). 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, 用冰盒保存 (4℃) 送至实验室. 同时取采样点上覆水 50 L. 当天将沉积物与上覆水带回实验室, 并开始沉积物扰动试验.

沉积物总磷 (Tot-P) 含量为 $510.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 含水率为 63.48%, 烧失量为 3.75%. 上覆水总磷 (TP) 含量为 $0.314 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解性磷酸盐 (DIP) 为 $0.064 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解性总磷 (DTP) 为 $0.094 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 试验方法

2 个 5 L 圆形容器作为试验装置 ($d = 17 \text{ cm}$, $h = 25 \text{ cm}$), 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湖水 3 L.

对于 E1 和 E2, 分别调整恒速搅拌机转速 ($160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $210 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 使得 E1 和 E2 上覆水中悬浮物浓度分别稳定在 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 分别相当于太湖 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速在湖底产生的扰动强度^[12]. 扰动持续时间为 12 h.

试验从第 0 h 开始, 于第 1、3、6、9、12 h 分别取样. 每次采样位置为水面以下 10 cm 处, 采样量为 500 mL. 每次采完水样, 立即向容器中补充等量的湖水. 采集的水样, 50 mL 用于分析上覆水中磷含量; 另 450 mL 经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后, 收集悬浮物用于内源磷的检测.

1.3 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 (美国 HACH DR5000 型紫外可见分光光度计) 测定; 溶解性总磷 (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; 颗粒态磷 (PP) 是指 TP 与 DTP 的差值; 溶解性磷酸盐 (DIP) 含量是将水样经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后直接测定; 溶解性有机磷 (DOP) 为 DTP 与 DIP 差值.

悬浮物中形态磷的数量分布参照文献 [14] 的方法, 采用美国 HACH DR5000 型紫外可见分光光度计分析. 该法将形态磷分为 4 种: 弱吸附态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$); 铁铝结合态磷 (Fe/Al-P); 钙结合态磷 (HCl-P); 残渣磷 (Res-P). 悬浮物上总磷 (Tot-P) 以上述 4 种形态磷之和表示.

上覆水中溶解氧 (DO) 和 pH 值分别通过便携式溶解氧测定仪 (美国 HACH HQ30d) 和数显 pH 计 (pHs-3TC, 武汉) 测定. 上覆水中总铁采用火焰原子吸收法 (原子吸收分光光度计 3510, 上海) 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 结果与分析

2.1 扰动过程中上覆水水质参数

沉积物扰动试验从早上 08:00 开始到晚上 20:00 结束. 随着室温升高, 试验装置中水温也随之升高 [图 1(a)]. 最大升温幅度达到 2.4°C . 沉积物扰动导致上覆水中溶解氧 (DO) 含量迅速增加 [图 1(b)]. 尽管 E1 和 E2 扰动强度不同, 但上覆水中 DO 含量基本一致. 同样, pH 值对沉积物扰动的响应与 DO 基本一致. 扰动后 E1 和 E2 上覆水中 pH 值略有增加, 但两者基本一致 [图 1(c)]. 扰动过程中上覆水总铁含量呈先降低再升高的趋势 [图 1(d)], 但直到试验结束, 上覆水中总铁含量也未高于初始状态 ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 从第 9 ~ 12 h, E2 上覆水中总铁含量略高于 E1.

2.2 上覆水中形态磷的变化规律

沉积物扰动导致上覆水中悬浮物含量明显增加, 从而导致总磷、颗粒态磷含量也明显增加 (图 2). 与初始状态相比, E1、E2 中 TP 和 PP 均高于初始状态. 试验期间, E1 中 TP 平均浓度为 $0.368 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 一直明显低于 E2 ($0.878 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 同样, E1 中 PP 平均浓度仅为 E2 中的 40.8%. 由于悬浮物的吸附作用, E1、E2 中 DTP 则呈明显的下降趋势, 并低于初始状态. 到试验结束, E1、E2 中 DTP 浓度仅为初始状态的 8.5% 和 12.8%. 与 TP、PP 的变

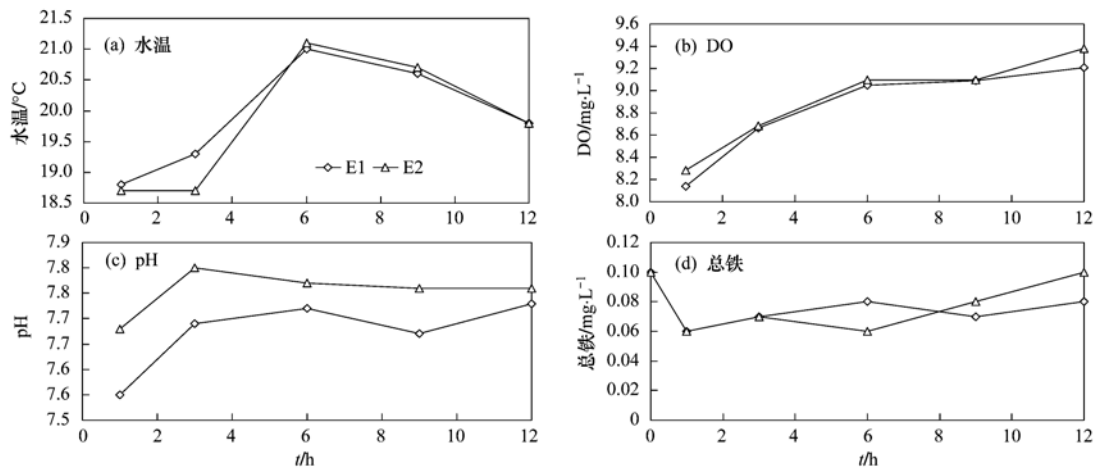


图1 扰动过程中水质参数的变化规律

Fig. 1 Variation of monitored overlying water parameters during disturbance

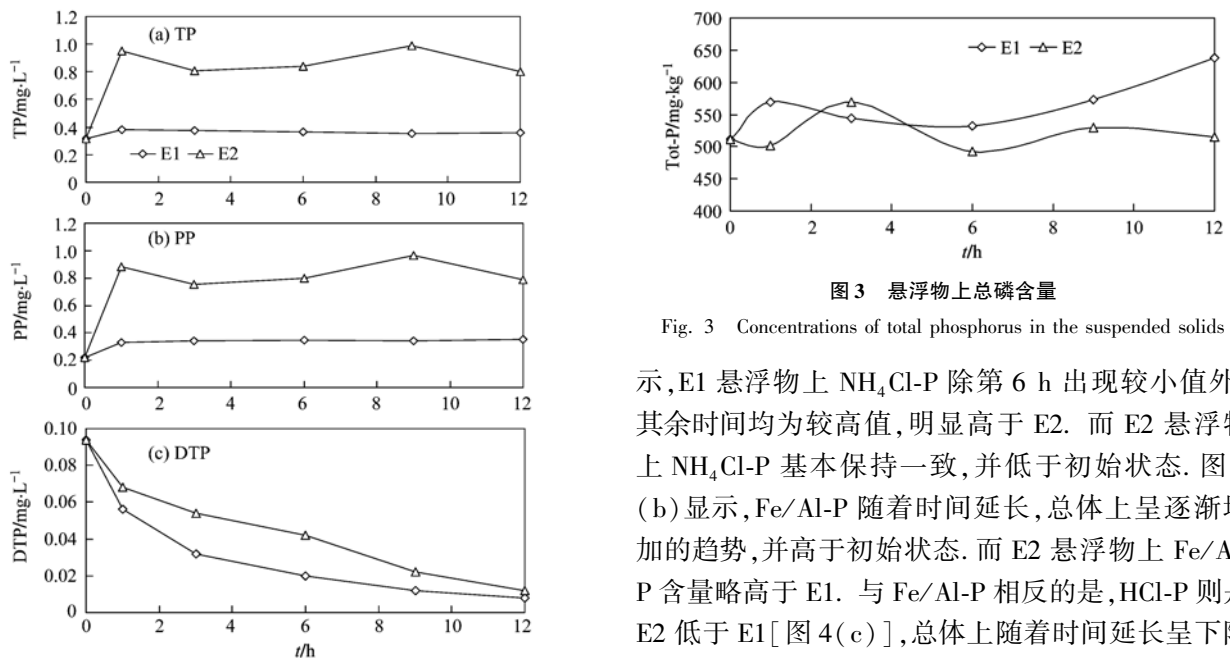


图2 上覆水中不同形态磷含量

Fig. 2 Concentration of different phosphorus forms in the overlying water

化规律相一致的是, E2 中 DTP 含量也明显高于 E1.

2.3 悬浮物上形态磷的变化规律

沉积物扰动导致上覆水中 DO、pH、总铁、不同形态磷(TP、PP、DTP)等发生变化,相应地,悬浮物上总磷也随之发生变化(图3).

图3显示,随着扰动时间的延长, E1 悬浮物上总磷含量总体上呈增加的趋势,而 E2 悬浮物上总磷则基本保持稳定. 在试验结束时, E1 悬浮物上总磷含量明显高于 E2. 悬浮物上总磷的变化导致磷形态的数量分布也发生了变化(图4). 图4(a)显

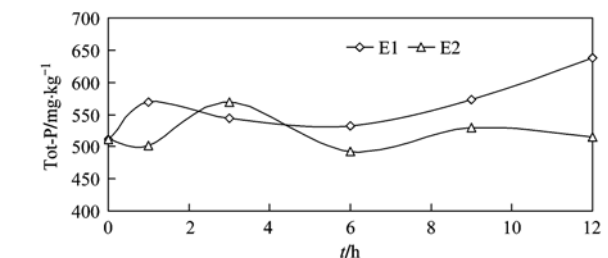


图3 悬浮物上总磷含量

Fig. 3 Concentrations of total phosphorus in the suspended solids

示, E1 悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 除第 6 h 出现较小值外, 其余时间均为较高值, 明显高于 E2. 而 E2 悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 基本保持一致, 并低于初始状态. 图4(b)显示, Fe/Al-P 随着时间延长, 总体上呈逐渐增加的趋势, 并高于初始状态. 而 E2 悬浮物上 Fe/Al-P 含量略高于 E1. 与 Fe/Al-P 相反的是, HCl-P 则是 E2 低于 E1 [图4(c)], 总体上随着时间延长呈下降的趋势, 并低于初始状态, 而 E1 则略高于初始状态. 图4(d)显示了 Res-P 的变化规律, 但由于其含量仅占总磷的 0.94% (E1) 和 1.37% (E2), 另外考虑到 Res-P 难释放的特性, 因此, 与其它形态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 HCl-P) 相比较, 其对水体磷的贡献可以忽略.

3 讨论

3.1 水体中磷浓度对沉积物扰动的响应

研究中发现, 上覆水中悬浮物含量增加后, 总磷(TP)和颗粒态磷(PP)含量有所增加, 相反, 溶解态总磷(DTP)却呈降低趋势. 但在悬浮物含量较高的水体(E2)中, TP、PP 和 DTP 含量均高于悬浮物含量较低的水体(E1), 说明不论是 TP 和 PP 还是 DTP

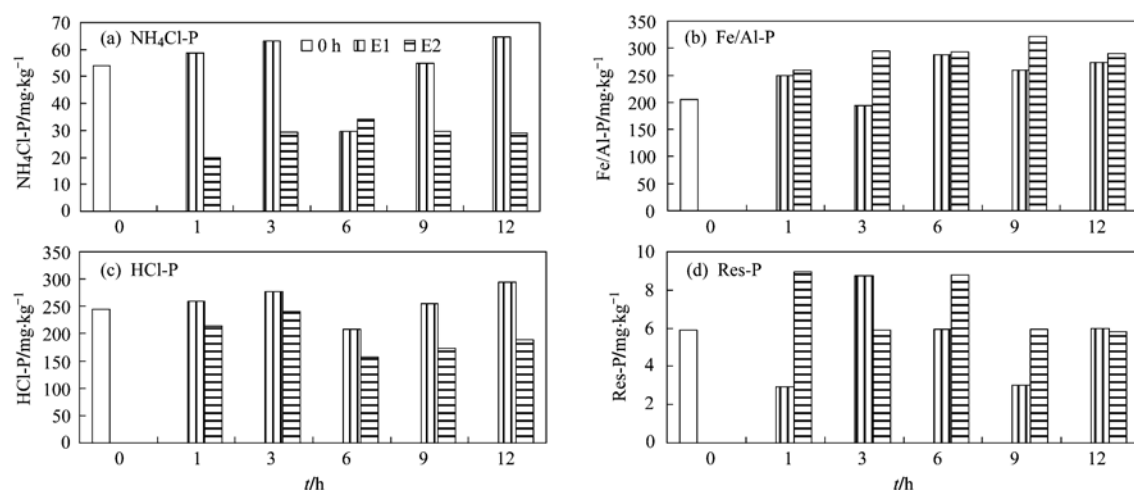


图4 悬浮物上不同形态磷含量

Fig. 4 Concentration of different phosphorus forms in the suspended solids

均与上覆水中悬浮物含量有明显关系. 有研究者^[15]在有关沉积物悬浮的研究中观察到, 水体中 TP 含量与悬浮物含量无任何关系. 然而, 在本研究中, E1、E2 中 PP 占 TP 的平均质量分数分别为 93.1% 和 95.5%, 远高于初始状态 (70.0%). 这也说明, 在沉积物悬浮的过程中, 带入水体的磷以颗粒态磷为主, 并且随着扰动时间的延长, 该质量分数呈逐渐增加的趋势 (E1, 85.4% ~ 97.8%; E2, 92.8% ~ 98.5%). 因此, 溶解态总磷 (DTP) 占 TP 的质量分数应该呈逐渐降低的趋势. 事实也确实如此, 而这从水体中 DTP 含量的变化规律也可以看出 [图 2(c)].

图 2(c) 显示, 随着沉积物扰动时间的延长, 水体中 DTP 含量呈降低的趋势. 这可归因于悬浮物对 DTP 的吸附以及水体中微生物对 DTP 的快速利用^[3,16]. 然而, 在悬浮物含量较高的水体中 DTP 含量反而较高 [图 2(c)]. 因为, 水体中悬浮物含量高意味着磷的“捕捉剂” (如黏土、碳酸钙颗粒等) 就越多^[17], 对 DTP 吸附的可能性就越大. 并且, E1、E2 水体中环境因素的变化规律基本一致, 如水温 [图 1(a)]、DO [图 1(b)]、pH [图 1(c)]、总铁 [图 1(d)]. 但仍可以看出, E2 水体中 DO 含量仅比 E1 高 0.08 mg·L⁻¹. 由于 E2 沉积物扰动强度显然大于 E1, 因此, 融入的 DO 显然应高于 E1. 其原因可能是 E2 中悬浮物含量较高, 导致 DO 含量被大量消耗. 但这并不能说明 E2 中悬浮物氧化程度就高于 E1, 更不能得出 E2 对 DTP 的吸附能力就高于 E1 的结论. 因为 E2 中悬浮物含量比 E1 高出 1 倍.

悬浮颗粒间的絮凝作用是导致 E2 中 DTP 含量

高于 E1 的一个重要原因^[1]. E2 中悬浮物含量比 E1 高出 1 倍, 因此, 悬浮物间相互碰撞、接触, 进而形成较大颗粒的可能性也越大, 导致悬浮物的比表面积减小, 影响到对 DTP 的吸附. 另外, 由于 E2 中较多的沉积物进入水体, 从而导致间隙水中的 DTP 也被释放到水体中^[18], 理论上, E2 通过间隙水释放到水体中的 DTP 比 E1 大 1 倍. 尽管 E2 中 DTP 高于 E1, 但并没有高出 1 倍.

如果考虑到 DTP 的组成可以解释这个问题 (图 5). DTP 主要是由溶解性磷酸盐 (DIP) 和溶解性有机磷 (DOP) 组成. 图 5 显示, DIP 和 DOP 均随着扰动时间的延长而逐渐降低. 但是, DIP 占 DTP 的质量分数逐渐降低, 对于 E1 和 E2 而言, 分别从 78.6% (1 h) 和 61.8% (1 h) 降至 50% (12 h). 这与朱广伟等^[12]在野外对太湖的观测结果相一致. DOP 占 DTP 的质量分数则呈逐渐增加的趋势. 将 DIP 与 DOP 占 DTP 的质量分数对照来看, 可初步认为, 沉积物扰动更有利于对 DIP 的吸附, 尽管本研究无法确定究竟是被悬浮物吸附还是被微生物快速利用, 但是试验过程中, E2 中 DOP 的平均值比 E1 中刚好高出 1 倍. 因为更多的沉积物进入水体, 不仅将更多的 DOP 带入水体, 而且使沉积物中更多的微生物进入水体. 根据 Richardson 等^[19]的研究, 在试验开始的 24 h 内, 微生物对磷的快速利用量等同于悬浮物对磷的吸附量. Cyr 等^[3]研究认为, 扰动过程中释放的 DIP 会被微生物快速利用而导致水体中 DIP 含量未见变化. 从而使得 DIP 占 DTP 的质量分数逐渐降低, 而 DOP 占 DTP 的质量分数则逐渐升高.

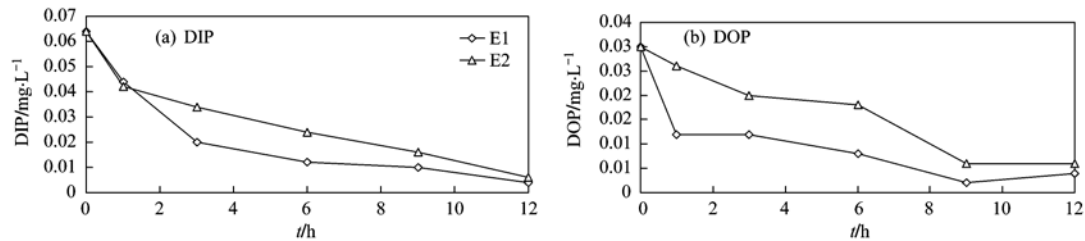


图5 水体中溶解态磷(DIP、DOP)的变化规律

Fig. 5 Variations of dissolved phosphorus (DIP and DOP) in the overlying water

为了模拟相当于太湖 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速在湖底产生的扰动强度, E1 和 E2 中的搅拌强度明显不同. 因此, 与 E1 相比, E2 沉积物上的以物理吸附为主的 DIP 释放的更多, 甚至导致部分铁铝结合态磷释放^[2]. 从图 4(a) 中可以看出, E2 悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量明显低于 E1, 低了 $25.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值). 假如 E1 悬浮物上这部分磷以 DIP 的形式进入水体, 则计算可知, E1 水体 DIP 平均浓度则提高 $0.006 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 从而导致 E1 中 DIP 平均浓度与 E2 相当. 在高强度的扰动作用下, 以物理吸附为主的形态磷会发生释放, 同样以化学吸附为主的形态磷含量也发生了变化[图 4(b) ~ 4(d)]. 与 E1 相比, Fe/Al-P 发生了吸附; 而 HCl-P 发生了释放; Res-P 有释放也有吸附. 从图 3 可以看出, 除了第 3 h 之外, E2 悬浮物发生了 DIP 释放, 与 E1 相比. 假如 E1 悬浮物上总磷高出 E2 那部分在同样大的扰动强度下也会释放, 则可以计算出水体中 DIP 变化的理论值(图 6). E1 水体中 DIP 理论值在第 1 h、第 9 h、第 12 h 明显高于 E2, 第 6 h 与 E2 水平接近. 这说明较高的扰动强度对水体中 DIP 含量的影响更加直接.

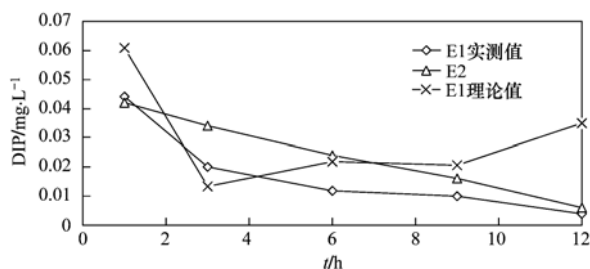


图6 悬浮物上总磷含量变化对水体中 DIP 的影响

Fig. 6 Effects of total phosphorus in the suspended solids on DIP in the overlying water

3.2 悬浮物上形态磷对沉积物扰动的响应

沉积物扰动过程中, 悬浮物上总磷(Tot-P)含量发生了明显变化(图 3). 在扰动过程中(0 ~ 12 h), 较高和较低扰动强度下, Tot-P 分别增加了 10

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值) 和 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值). 这与水体中溶解态磷(DTP)的变化规律[图 2(c)]相呼应. 从图 2(c) 中可以看出, 尽管较高扰动强度下水体中 DTP 含量一直高于较低扰动强度, 但试验结束时(12 h), 两者水体中 DTP 含量几乎相同($0.012 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 较高扰动强度; $0.008 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较低扰动强度).

笔者假设水体中消失的 DTP 就是被悬浮物吸附以及微生物快速利用(两者对 DTP 的吸附或者利用相同). 另外, 还要考虑每次取样(500 mL)后, 立即补充同样量的初始状态的湖水, 这会额外地引入部分 DTP. 因此, 根据水体中 DTP 的消失量以及引入的 DTP 量和水体中相应的悬浮物量计算可知, 较高和较低扰动强度下, 悬浮物上 Tot-P 的理论净增量分别为 $27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值) 和 $62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值).

与通过测定悬浮物上形态磷含量计算的 Tot-P 增量相对比, 较低扰动强度下, 两者几乎吻合; 而较高扰动强度下则略有不同. 分析其原因可能是水体中以藻类为主的微生物含量不同引起的. 研究认为, 扰动状态下, 水体中总悬浮物含量越高, 叶绿素含量则越高^[20]. 由此推测, 较高扰动强度下, 藻类的数量高于较低扰动强度, 对磷的快速吸附量比预想的要大, 从而导致悬浮物上 Tot-P 的实测值比理论值小.

无论是 Tot-P 的实测值还是理论值, 都表明 Tot-P 含量增加, 导致悬浮物上不同形态磷数量分布也随之变化(图 4). 笔者假设悬浮物上不同形态磷间无法相互转化, 那么, 悬浮物上不同形态磷的变化趋势应该一致. 然而, 图 4 结果显示, 无论是较高扰动强度下, 还是较低扰动强度下, 不同形态磷的变化趋势显然不同, 最重要的是, 不同形态磷的变化与图 2(c) 中 DTP 的变化趋势完全不同. 这说明悬浮物上不同形态磷之间发生了相互转化, 但这可能是以直接的形式也可能是以间接的形式. 前者是指某种形态磷不需要媒介直接转化成另一种形态磷.

Rydin^[21]认为,这种转化是存在的,但转化速率极小.后者是指需要借助某种媒介,如上覆水.具体的过程可以描述成:特定条件下,某种形态磷发生释放,进入水体的 DIP 立即被磷的“捕捉剂”捕捉,并结合成另外一种形态磷.沉积物扰动可能最有利于这种转化的发生^[8].

扰动之所以可能有利于导致磷形态之间发生转化,是因为其不仅会改变水体的环境条件,如 DO、pH、悬浮物数量分布等,而且水分子还会直接冲击悬浮物表面,导致以物理吸附为主的形态磷发生释放,如 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$,甚至导致形态磷的化学键断裂,如 Fe/Al-P ^[5].

对形态磷间的转化提供有力证据的是较大扰动强度下 Fe/Al-P 含量的变化[图 4(b)].与初始状态相比,较高扰动强度下, Fe/Al-P 增加了 $85.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值).该值明显高于 Tot-P 的理论值 ($27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),说明有其它形态磷释放为 Fe/Al-P 提供了磷源,如 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$.

试验结果也确实如此.从图 4(a)中可以看出,在较高扰动强度 ($12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 下,由于水分子的强烈冲击, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 以 DIP 的形式释放.尽管在较高扰动强度下, DIP 也会通过物理吸附的方式结合到悬浮物表面形成 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$,但由于 DIP 与悬浮物的结合力不够牢固,在水分子的强烈冲击下,导致其迅速释放.对于上覆水而言,尽管 PP 显著增加,但 DTP 并未增加,与初始状态相比,因此,悬浮物上通过 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 释放的 DIP 可能被转化成了其它以化学吸附形式存在的形态磷(如 Fe/Al-P)或者被浮游生物快速利用^[3].

同样, HCl-P 也发生了释放,平均释放量达到了 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [图 4(c)],为 Fe/Al-P 的形成提供了磷源. Kraal 等^[22]指出,在有氧及碳酸盐贫乏条件下,短时间内黄铁矿会被氧化,生成的 H^+ 会将 HCl-P 溶解释放,并被转化成 Fe/Al-P ,而一小部分可被转化成 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$.研究发现,太湖沉积物中是含有黄铁矿的^[23].这为解释本研究中 HCl-P 发生释放提供了理论依据.

在较低扰动强度下,悬浮物上不同形态磷的变化趋势与较高扰动强度下明显不同.与初始状态相比, HCl-P 增加了 $13 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值),而 Fe/Al-P 增加了 $47.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值).两者之和恰好与计算的理论值 ($62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 相符.但这并不能说明悬浮物上不同形态磷间未发生相互转化.将图 2(c)和图 4(b)、图 4(c)相比对, DTP 随时间呈逐渐降低的

趋势,但 Fe/Al-P 和 HCl-P 却并非如此.这暗示悬浮物上不同形态磷间发生了转化,而 Fe/Al-P 和 HCl-P 的增量与理论值相符可能仅仅是巧合.

然而,在较高扰动强度下, HCl-P 发生了释放,但在较低扰动强度下, HCl-P 却未见释放,而且呈增加的趋势.由于 2 种扰动强度下,水体的环境影响因素如温度、DO、pH、总铁含量等均十分相似.那么根据 Kraal 等^[22]关于 Fe/Al-P 和 HCl-P 之间的转化理论,水体中悬浮物含量可以解释这种现象.理论上,在较高扰动强度下,进入水体的黄铁矿的数量比较低扰动强度下高 1 倍.相应地,通过氧化产生的 H^+ 数量也高出 1 倍.这使得 HCl-P 溶解以及碳酸盐被消耗,从而为 HCl-P 向 Fe/Al-P 转化提供了更有利的条件.

值得指出的是,本研究是通过改变扰动强度来控制水体中悬浮物含量,而不同的扰动强度导致悬浮物受到的剪切力完全不同,这对悬浮物上不同形态磷间相互转化产生的影响也不容忽视.

4 结论

(1) 不同扰动强度下沉积物悬浮导致水体中不同形态磷(TP、PP、DTP)含量明显不同. TP 和 PP 明显升高,随后保持在相对稳定状态;而 DTP 含量则呈明显降低趋势.总体而言,较高扰动强度下水体中不同形态磷含量明显高于较低扰动强度.

(2) 不同扰动强度下悬浮物上总磷(Tot-P)含量有所增加.较高和较低扰动强度下, Tot-P 分别增加了 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值)和 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值).根据水体中 DTP 的消失量以及引入的 DTP 量和水体中相应的悬浮物量计算可知,较高和较低扰动强度下, Tot-P 的理论净增量分别为 $27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值)和 $62 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值).

(3) 在较高扰动强度下,悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 HCl-P 发生了释放,而 Fe/Al-P 则明显增加.在较低扰动强度下,悬浮物上 Fe/Al-P 也有所增加,但其增加量低于较高扰动强度;与初始状态相比, HCl-P 有所增加, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 基本保持不变.

(4) 尽管本研究无法证实悬浮物上不同形态磷之间发生了直接转化,但从试验过程(0 ~ 12 h)来看,不同形态磷之间发生了以水为媒介的间接转化.

参考文献:

- [1] 李大鹏,黄勇,李伟光.底泥扰动对上覆水中磷形态分布的影响[J].环境科学学报,2009,29(2):279-284.
- [2] 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.
- [3] Cyr H, McCabe S K, Nürnberg G K. Phosphorus sorption experiments and the potential for internal phosphorus loading in littoral areas of a stratified lake[J]. *Water Research*, 2009, **43**(6): 1654-1666.
- [4] 李大鹏, 黄勇, 范成新. 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*, 2010, **31**(8): 1795-1800.
- [5] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 207-217.
- [6] Lai D Y F, Lam K C. Phosphorus retention and release by sediments in the eutrophic Mai Po Marshes, Hong Kong[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **57**(6-12): 349-356.
- [7] Xavier F A D S, Oliveira T S D, Andrade F V, *et al.* Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil[J]. *Geoderma*, 2009, **151**(3-4): 417-423.
- [8] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension[J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(7): 958-962.
- [9] Qin B Q, Hu W P, Gao G, *et al.* Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(1): 54-64.
- [10] Hu C H, Hu W P, Zhang F B, *et al.* Sediment resuspension in the Lake Taihu, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(6): 731-737.
- [11] Uusitalo R, Yli-Halla M, Turtola E. Suspended soil as a source of potentially bioavailable phosphorus in surface runoff waters from clay soils[J]. *Water Research*, 2000, **34**(9): 2477-2482.
- [12] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 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*, 2005, **50**(1): 66-71.
- [13] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 风浪作用下太湖草型湖区水体 N、P 动态负荷模拟[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(1): 33-38.
- [14] Hieltjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphate in calcareous sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1980, **9**(3): 405-407.
- [15] Horppila J, Nurminen L. Effects of submerged macrophytes on sediment resuspension and internal phosphorus loading in Lake Hiidenvesi (Southern Finland)[J]. *Water Research*, 2003, **37**(18): 4468-4474.
- [16] Ballantine D J, Walling D E, Collins A L, *et al.* The content and storage of phosphorus in fine-grained channel bed sediment in contrasting lowland agricultural catchments in the UK [J]. *Geoderma*, 2009, **151**(3-4): 141-149.
- [17] Nöges P, Kisand A. Horizontal distribution of sediment phosphorus in shallow eutrophic Lake Võrtsjärv (Estonia)[J]. *Hydrobiologia*, 1999, **408/409**: 167-174.
- [18] Selig U. Particle size-related phosphate binding and P-release at the sediment-water interface in a shallow German lake [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **492**(1-3): 107-118.
- [19] Richardson C J, Marshall P E. Processes controlling movement, storage, and export of phosphorus in a fen peatland [J]. *Ecological Monographs*, 1986, **56**(4): 279-302.
- [20] 蒋伟伟, 刘正文, 郭亮, 等. 沉积物再悬浮对浮游动物群落结构影响的模拟实验[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(4): 557-562.
- [21] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [22] Kraal P, Slomp C P, Forster A, *et al.* Pyrite oxidation during sample storage determines phosphorus fractionation in carbonate-poor anoxic sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, **73**(11): 3277-3290.
- [23] 尹洪斌, 范成新, 李宝, 等. 太湖北部沉积物中铁硫的地球化学特征研究[J]. *地球化学*, 2008, **37**(6): 595-601.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行