

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 ..... 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 ..... 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 ..... 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 ..... 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 ..... 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 ..... 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 ..... 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 ..... 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 ..... 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 ..... 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 ..... 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 ..... 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 ..... 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 ..... 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 ..... 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 ..... 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 ..... 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 ..... 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 ..... 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 ..... 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 ..... 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 ..... 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 ..... 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 ..... 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 ..... 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 ..... 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 ..... 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 ..... 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 ..... 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 ..... 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F<sub>rex</sub> 的特性检测水质环境中生物毒性物质 ..... 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 ..... 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 ..... 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 ..... 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 ..... 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 ..... 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 ..... 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 ..... 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 ..... 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 ..... 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 ..... 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 ..... 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 ..... 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 ..... 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 ..... 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 ..... 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 ..... 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 ..... 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 ..... 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

# 不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响

王尚, 李大鹏\*

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

**摘要:** 以重污染河道底泥和上覆水为材料, 研究了周期性加入外源磷条件下, 不同扰动强度下底泥吸附和固定磷的作用机制. 结果表明, 扰动可以增加底泥对外源磷的吸附, 而且扰动强度越大, 底泥对外源磷吸附效率越高. 另外, 尽管加入的磷以溶解性磷酸盐(DIP)形态存在, 但扰动强化了 DIP 向颗粒态磷(PP)的转化, 从而降低了水体中生物可利用磷含量. 内源磷形态分析表明, 弱吸附态磷( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ )呈降低趋势, 而铁铝结合态磷( $\text{Fe/Al-P}$ )、钙结合态磷( $\text{HCl-P}$ )和残渣磷( $\text{Res-P}$ )均呈增加趋势, 但以  $\text{Fe/Al-P}$  增加幅度最大(占总磷的百分比超过 80%, 以 3 种扰动强度下平均值计). 结合到非闭蓄态  $\text{Fe/Al-P}$  中的外源磷逐渐增加占  $\text{Fe/Al-P}$  净增加量的百分比分别为 37.49% ( $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )、42.32% ( $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )、54.24% ( $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ), 导致闭蓄态铁铝结合态磷净增加量占总磷净增加量的百分比随扰动强度增加有所降低, 同样, 钙结合态磷的变化趋势也基本一致. 说明在较短的时间尺度上和较大的扰动强度下, 连续加入的外源磷主要以易释放态磷形式存在, 即底泥对外源磷的吸附以暂时性的持留为主.

**关键词:** 底泥; 吸附; 扰动强度; 磷形态; 重污染河道

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2171-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.018

## Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal

WANG Shang, LI Da-peng

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

**Abstract:** The mechanism of phosphorus (P) adsorption and immobilization under different disturbance intensities was investigated in laboratory. The sediments and water used were taken from an inner-city heavily polluted canal. Addition of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  into the experimental units were made similar to the external P input into the canal and carried out periodically. The results show that sediment disturbance could increase the P adsorption amount by suspended solids. The higher disturbance intensity is, the greater P adsorption amount is obtained. Dissolved inorganic P (DIP) is the main form of additional  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , but sediment disturbance enhances the transformation of P from DIP to PP (particulate P), indicating that sediment disturbance decreases the bioavailable P in the overlying water. Sequential fractionation indicated that the  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  decreased, but the  $\text{Fe/Al-P}$ ,  $\text{HCl-P}$  and  $\text{Res-P}$  increased. More than 80% (the average value under three disturbance intensities) of the incorporated P accounts for  $\text{Fe/Al-P}$  in the sediments. The incorporated  $\text{Fe/Al-P}$  accounts for 37.49% ( $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ), 42.32% ( $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) and 54.24% ( $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) of non-occluded  $\text{Fe/Al-P}$  in the sediments respectively, indicating that the percentage of incorporated P to occluded  $\text{Fe/Al-P}$  decreases with the increase of disturbance intensity. The variation of  $\text{HCl-P}$  under the same disturbance intensity is the same as the occluded  $\text{Fe/Al-P}$ . It suggests that the continuous addition of external P is mainly incorporated into the mobile P forms under short-term and high-intensity disturbance, which means the adsorption of P by sediments is the short-term immobility.

**Key words:** sediment; adsorption; disturbance intensity; phosphorus form; heavily polluted canal

磷作为水体富营养化的关键性营养盐元素, 对藻类等水生植物的生长至关重要. 因此, 如何有效降低水体磷质量浓度是抑制水体藻类暴发的有效方法. 对于城市水体而言, 底泥不仅是磷的重要来源, 同时也是磷的重要蓄积场所. 通常, 磷的吸附或者释放均发生在泥水界面, 在质量浓度梯度的作用下由泥相向水相迁移或者相反. 底泥扰动可以促进底泥悬浮, 导致水体中能够与磷发生物理、化学、生物吸附的颗粒物数量迅速增加<sup>[1~4]</sup>, 进而增加水体中磷与这些物质的接触几率, 加快底泥对

磷的吸附和固定. 另外, 底泥扰动过程中, 随着大量溶解氧的融入<sup>[5]</sup>, 会加快铁铝氧化物的形成<sup>[6]</sup>, 改变某些物质的存在形态, 而这些物质对磷的吸附则显著提高了内源磷持留能力<sup>[7~9]</sup>. 研究表明, 底泥扰动方式<sup>[10]</sup>、持续时间<sup>[11]</sup>、频率<sup>[12]</sup>、强度<sup>[13]</sup>均

收稿日期: 2013-09-25; 修订日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178284, 51278523, 50908154, 50938005)

作者简介: 王尚(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为富营养河道修复理论, E-mail: skhdws@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: ustslp@163.com

会影响磷在泥水两相间的迁移转化, 并认为扰动可以促进外源磷进入底泥, 同时提高内源磷的持留能力. 然而, 以往研究却未对不同扰动强度下底泥对外源磷的吸附能力及其在底泥不同形态磷间的数量分布进行描述. 本研究采用不同强度扰动的方式, 分析了底泥对上覆水中外源磷的吸附和内源磷的固定效果以及机制, 以期到底泥资源化用于城市重污染河道的修复提供数据和理论支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验用底泥及上覆水

试验用底泥及上覆水于 2013-03-01 采自某校园河道. 自从 2004 年监测以来, 该河道一直处于重度富营养化状态 (TP  $0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 藻类水华频发. 底泥采样点位于河道入口处. 采用活塞式柱状沉积物采样器采得表层 3 cm 的底泥样品, 立即用冰盒保存 ( $4^\circ\text{C}$ ) 送至实验室, 采用孔径为 1 mm 的铁筛筛除大颗粒物质, 对筛过的底泥进行充分混匀, 备用. 同时取采样点上覆水 50 L. 底泥含水率为 88.7%, 烧失量为 15.1%, 氧化还原电位为  $-296 \text{ mV}$ , 总磷 (TP) 含量为  $1206.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 上覆水溶解氧含量为  $1.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 7.29$ , 总磷 (TP) 含量为  $0.294 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 溶解性正磷酸盐为  $0.034 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

### 1.2 磷吸附试验

4 个 5 L 圆形有机玻璃容器作为试验装置 ( $d = 17 \text{ cm}$ ,  $h = 25 \text{ cm}$ ). 分别编号为 E0、E1、E2、E3. 其中, E1 扰动强度为  $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , E2 扰动强度为  $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , E3 扰动强度为  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  (每天采用恒速搅拌机以不同的转速对底泥扰动 30 min, 然后静置沉淀 1410 min. 试验共持续 27 d), E0 作为对照试验 (对底泥和上覆水均不扰动). 在每个容器中分别加入 200 g 湿底泥, 沉积物厚度约为 1.2 cm. 沿器壁用虹吸管缓缓注入采集自底泥采样点的河水 2.5 L, 尽量避免扰动底泥. 试验从第 0 d 开始, 每天上午 09:00 开始扰动, 每次扰动前 2 h 采集水样, 并测定上覆水溶解氧含量. 在试验第 21 d, 便携式溶解氧仪出现故障, 之后的数据无法采集. 每次采集水面以下 10 cm 处水样 25 mL. 采集并分析完水样后, 立即向容器中补充等量的河水. 每次补充水样时, 河水中均含有一定体积的已知质量浓度的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液 ( $4.387 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ), 目的是模拟外源磷的加入. 当扰动后, 上覆水中溶解性磷酸盐含量接近  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 则降低外源磷加入量. 当

所有装置 (E0、E1、E2、E3) 中溶解性磷酸盐含量均超过  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 则试验停止. 因此, 每次采样后分别加入  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  溶液 0.5 ~ 2 mL. 试验期间, E0 共加入磷 18.5 mg (以 P 计), E1 共加入磷 21 mg (以 P 计); E2 共加入磷 47 mg (以 P 计); E3 共加入磷 49 mg (以 P 计). 试验结束后, 将 4 个试验装置中底泥分别取出, 干燥, 磨碎, 过 100 目筛网, 备用.

### 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 DR2800 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; 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, 每个样品有 3 个平行样. 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 ( $\text{Fe/Al-P}$ ); 钙结合态磷 ( $\text{HCl-P}$ ); 残渣磷 ( $\text{Res-P}$ ). 悬浮物上总磷 (Tot-P) 以上述 4 种形态磷之和表示. 藻类可利用磷 (AAP) 采用  $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaOH 溶液提取法进行测定 [15]. 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. 沉积物含水率的定义为  $105^\circ\text{C}$  烘干 12 h 的质量损失, 有机质含量的定义为  $550^\circ\text{C}$  灼烧 2.5 h 的质量损失.

### 1.4 吸附量和去除率计算

吸附量为扰动前后上覆水中 DIP 降低的量, 公式为:

$$\text{Adsorption capacity}_0 = \rho_0 \times 2.475 - \rho_1 \times 2.5 \quad (1)$$

式中,  $\text{Adsorption capacity}_0$  为第 0 天的吸附量;  $\rho_0$  为第 0 天上覆水 DIP 的质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $\rho_1$  为第 1 天上覆水 DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

$$\rho_{(n)} = \frac{m_n + \rho_n \times 2.475}{2.5} \quad (2)$$

式中:  $\rho_{(n)}$  为第  $n$  天加入外源磷后未扰动之前上覆水 DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $m_n$  为第  $n$  天加入外源磷的量 (mg);  $\rho_n$  为第  $n$  天上覆水 DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $n$  为采样时间,  $n \geq 1$  且  $n \leq 26$ .

$$\text{Adsorption capacity}_n = \rho_{(n)} \times 2.475 - \rho_{n+1} \times 2.5 \quad (3)$$

式中,  $\text{Adsorption capacity}_n$  为第  $n$  天的吸附量;  $\rho_{(n)}$  为

第  $n$  天加入外源磷后未扰动之前上覆水 DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $\rho_{n+1}$  为第  $n+1$  天上覆水 DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );

去除率表示为扰动前后上覆水 DIP 质量浓度变化的量占扰动前 DIP 的百分比, 公式为:

$$\text{DIP removal rate}_0 = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $\text{DIP removal rate}_0$  为第 0 天上覆水 DIP 的去除率 (%);  $\rho_0$  为第 0 天上覆水 DIP 的质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $\rho_1$  为第 1 天上覆水 DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

$$\text{DIP removal rate}_n = \frac{\rho_{(n)} - \rho_{n+1}}{\rho_{(n)}} \times 100\% \quad (5)$$

式中,  $\rho_{(n)}$  为第  $n$  天加入外源磷后未扰动之前上覆水

DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ );  $n$  为采样时间,  $n \geq 1$  且  $n \leq 26$ ;  $\rho_{n+1}$  为第  $n+1$  天上覆水 DIP 质量浓度 ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ).

## 2 结果与讨论

### 2.1 底泥对上覆水中磷的吸附

不同扰动强度下上覆水溶解性正磷酸盐的变化和溶解氧的变化见图 1 和图 2.

增加扰动强度可以增加水中悬浮物的数量和运动速率, 强化了底泥对上覆水中磷的吸附. 因此, 加快了上覆水中磷向底泥的迁移 (图 1).

图 1 显示, 随着试验过程中外源磷的加入, 对照试验上覆水中 DIP 的质量浓度急剧升高, 很快达到并超过  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 试验期间, 底泥共吸收外源磷

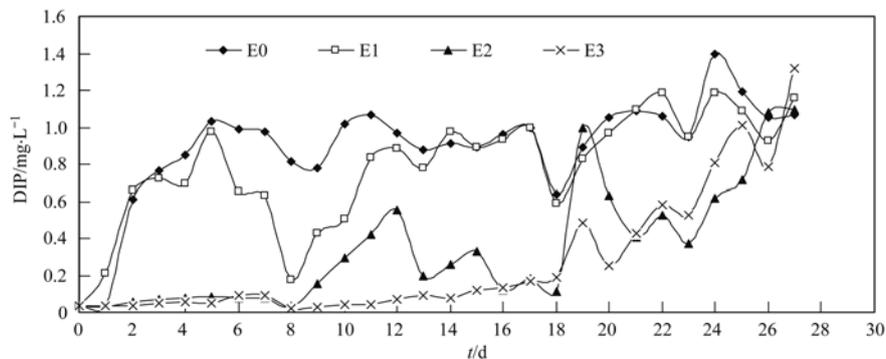


图 1 不同扰动强度下上覆水溶解性正磷酸盐的变化

Fig. 1 Variations of DIP in the overlying water under different disturbance intensities

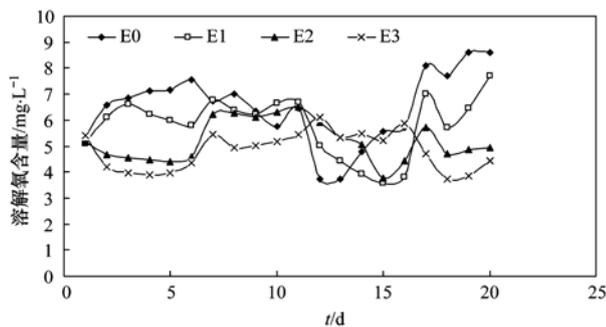


图 2 不同扰动强度下上覆水溶解氧的变化

Fig. 2 Variations of DO in the overlying water under different disturbance intensities

17  $\text{mg}$  (以 P 计). 底泥扰动状态下, 低扰动强度 ( $100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 下, 上覆水中 DIP 上升较快, 在吸附 19  $\text{mg}$  (以 P 计) 外源磷后, 上升到  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 试验初期 (第 0 ~ 18 d), 中扰动强度 ( $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 和高扰动强度 ( $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 的上覆水中 DIP 基本上稳定在  $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右, 而从第 19 d 开始, 上述 2 个扰动强度下 DIP 呈明显上升趋势, 并在第 27 d,

DIP 超过  $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 试验期间, 中扰动强度试验瓶共去除 44  $\text{mg}$  (以 P 计) 外源磷, 高扰动强度试验瓶共去除 45  $\text{mg}$  (以 P 计) 外源磷. E1、E2、E3 对外源磷的吸附百分比分别为 90.5%、93.6%、91.8%.

对照试验底泥对上覆水中磷的吸附动力主要来源于泥水界面间的质量浓度梯度, 并被表层底泥中的无机颗粒物捕捉、固定, 从而降低上覆水中磷质量浓度. 外源磷的加入打破了泥-水界面间原有的平衡, 导致水体中磷向底泥迁移, 并形成新的平衡<sup>[16]</sup>. DIP 的吸附量较小, 主要归因于上覆水中颗粒物含量较少. 因此, 随着外源磷的加入, 上覆水 DIP 呈逐步上升趋势. 这也说明, 对照试验底泥对磷的吸附容量有限, 这种有限主要源于磷由表层底泥向深层底泥迁移速度较小导致, 致使表层底泥易于吸附饱和, 而深层底泥的吸附容量并未被利用. 另外, 通过质量浓度梯度扩散至表层底泥并被吸附的磷易于形成易释放态磷, 在泥-水界面间不断的进行交换, 形成动态平衡.

而扰动状态下(E2、E3), 试验初期(第0~18 d), 上覆水 DIP 一直稳定在较低的水平, 并低于对照试验, 随后呈现明显上升趋势. 这主要是由于扰动增加了水体中颗粒物质的数量, 强化了颗粒物质对磷的吸附作用, 而这从图3中可以得到证实.

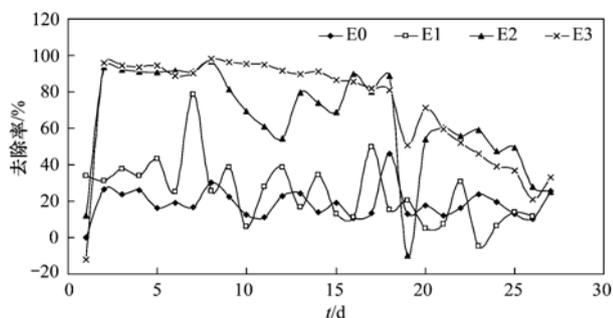


图3 不同扰动强度下上覆水溶解性正磷酸盐的去除率

Fig. 3 Removal of DIP in the overlying water under different disturbance intensities

图3显示, 随着扰动强度增加, 底泥对上覆水中 DIP 的去除率也明显增加. 但由于底泥对磷吸附量的增加, 导致 DIP 去除率逐渐降低. 通常, 悬浮物具有一定的比表面积, 特别是粒径在 1 nm 与 1  $\mu\text{m}$  之间的颗粒物质的比表面积更大<sup>[17]</sup>, 对水体中磷具有一定的吸附能力, 吸附的磷会通过物理、化学或者生物方式被结合到悬浮物表面, 甚至进一步被结合到某种形态磷中<sup>[18]</sup>. 扰动还增加了系统内溶解氧的含量(图2), E0、E1、E2、E3 上覆水中溶解氧含量的平均值分别为 6.47、5.82、5.20、4.83  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 扰动状态下上覆水中溶解氧含量低于对照试验, 并且呈随扰动强度增加而逐渐降低的趋势. 其原因主要与扰动状态下更多的颗粒物质进入水体, 同时扰动强度增加, 颗粒物质与溶解氧接触、被氧化的几率也相应增加, 从而致使更多的溶解氧用于还原性物质的氧化(如二价铁离子被氧化成具有较强离子吸附能力的  $\text{Fe}_{\text{ox}}$ <sup>[6]</sup>, 但相应也增强了对磷的专属吸附), 进而导致溶解氧含量略低. 由此可见, 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磷含量降低. 另外, 由于扰动增加了水体中颗粒物质数量, 即增加了水体中磷吸附剂含量, 从而延长了底泥吸附磷饱和时间, 这从图1中上覆水磷变化规律可以得到证明.

## 2.2 扰动对上覆水中不同形态磷质量浓度分布的影响

由于扰动的存在, 改变了泥水两相间颗粒物质的分布规律, 从而进一步改变了泥水两相间不同形态磷的数量分布规律(图4).

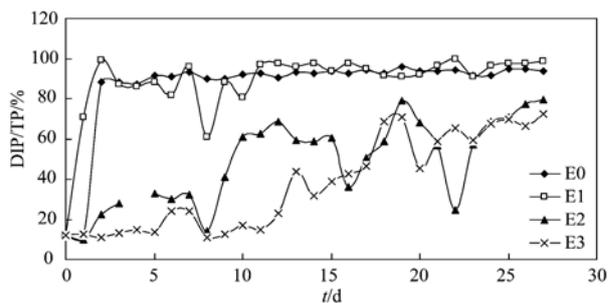


图4 不同扰动强度下上覆水中 DIP 占 TP 的百分比

Fig. 4 Percentage of DIP in TP in the overlying water under different disturbance intensities

从图4中可以看出, 不同扰动强度下, 上覆水中 DIP 占 TP 的百分比显著不同. 随着扰动强度的增加, DIP 占 TP 的百分比有降低的趋势. 说明扰动强度增加, 有助于溶解性磷酸盐向颗粒物质表面迁移, 并被吸附、固定, 从而降低水体中 DIP 含量, 进而降低可被浮游生物利用的磷含量. 相反, 在对照试验和底泥扰动强度较低情况下, DIP 占 TP 的百分比一直处于较高的水平, DIP/TP 平均值为 90% 和 92%, 并高于中扰动强度和高扰动强度. 这主要归因于上覆水中颗粒物质含量较低. 图1中对照试验和底泥扰动强度较低情况下, DIP 含量显著高于中扰动强度和高扰动强度也说明了这一点.

通常, 对水体的扰动强度越大, 水与大气接触界面更新的越快越剧烈, 则大气复氧速率越高, 因此, 融入的溶解氧含量也就越高, 从而致使中小分子有机物被氧化以及金属离子, 诸如铁、铝等, 从还原态转化成氧化态的几率越高<sup>[19]</sup>, 这均会有利于悬浮的颗粒物质对水体中 DIP 的捕捉和固定. 另外, 较高扰动强度(200  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  和 300  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )会增加颗粒物质间的碰撞, 影响絮凝作用<sup>[20, 21]</sup>, 从而避免较大的颗粒物质形成, 而较小扰动强度下, 会有利于絮凝作用, 因此, 两者相比较, 前者水体中颗粒物质的比表面积要大于后者, 更有利于对水体中 DIP 的吸附.

较大的扰动强度下产生的水动力作用和颗粒物质间的外摩擦力较大, 不仅会促进通过范德华力和静电力吸附在颗粒物质表面的弱吸附态磷, 而且, 由于其它形态磷如铁铝结合态磷、钙结合态磷间的化学键力小于颗粒物质间的外摩擦力, 从而迫使形态磷的化学键断裂, 导致内源磷释放, 使得上覆水中 DIP 含量升高. 李大鹏等<sup>[22]</sup>在研究太湖梅梁湾和月亮湾沉积物扰动(扰动强度为 200  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )时发现了该现象. 然而, 本研究中, 在较大扰动强度

下 ( $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  和  $300 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 却未发现内源磷释放的现象. 其原因可能是两者的试验条件不同, 与李大鹏等<sup>[23]</sup> 研究相比, 本研究中上覆水中 DIP 含量较高, 并每天加入一定量的外源磷, 使得上覆水中 DIP 质量浓度远高于他的试验研究.

### 2.3 底泥扰动对不同形态磷数量分布的影响

底泥扰动后, 增加了外源磷被悬浮颗粒物吸附的可能性, 从而导致总磷含量增加. E1、E2、E3 总磷含量分别达到 779.28、1944.70、1987.14  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 远高于对照试验的总磷含量 (556.33  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 分别达到对照试验的 1.4 倍、3.5 倍、3.6 倍. 同时, 被底泥吸附的溶解性磷酸盐除了通过范德华力和静电力被结合在颗粒物表面形成弱吸附态磷外, 也会通过化学键的结合而形成其它形态磷, 导致外源磷在内源磷不同形态中的数量分布不同 (图 5), 另外, 由于外源磷的加入, 致使不同形态磷占总磷百分比也显著不同 (图 6).

图 5 显示, 与初始状态相比, E1、E2、E3 中弱吸附态磷 ( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ ) 含量均明显降低, 其占总磷的百分比 (质量分数) 也显著降低 (图 6), 分别从初始状态 (8.50%) 降至 1.40% (E1)、0.50% (E2)、0.40% (E3). 说明扰动导致弱吸附态磷向其它形态磷发生了转化, 而扰动强度越高, 则转化力度越大, 这也与弱吸附态磷通过范德华力和静电力吸附在颗粒物表面的物理特性有关.

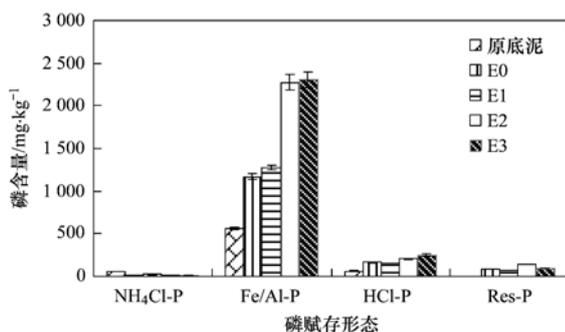


图 5 内源磷赋存形态的数量分布

Fig. 5 Distribution of phosphorus sequential fractionation

从图 5 中可以看出, 与初始状态相比, 铁铝结合态磷 (Fe/Al-P)、钙结合态磷 (HCl-P)、残渣磷 (Res-P) 含量显著增加. 其中, Fe/Al-P 增加幅度最大, HCl-P 次之, Res-P 再次之. 相比较初始状态, E1、E2、E3 中 Fe/Al-P 分别增加了 682.78、1741.24、1775.52  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其净增加量分别占外源磷吸附量的 87.62%、89.54%、89.35%. 说明加入的外源磷主要流向了铁铝结合态磷. 这一研究结

果与 De Grrot 等<sup>[24]</sup> 的研究结果类似, 但与李大鹏等<sup>[23]</sup> 的研究结果略有不同, 即铁铝结合态磷的净增加量明显高于同等扰动强度 ( $140 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 下铁铝结合态磷的形成量 (61.4%). 由于本研究的上覆水与底泥与李大鹏等试验用的材料均采自同一条重污染河道的同一采样点, 两者的理化性质并不是导致铁铝结合态磷差别的关键因素. 分析两者的试验条件发现, 核心在于李大鹏等研究条件为每次加入外源磷的间隔为 72 h (并每隔 24 h 扰动 1 次, 持续时间为 10 min), 而本研究则为 24 h, 这可能是导致两者铁铝结合态磷形成差别的主要原因, 而 Rydin<sup>[25]</sup> 在研究中则称, 内源磷中不同形态磷间存在相互转化的趋势, 但这种转化是缓慢的, 需要在较长时间尺度上才能完成. Li 等<sup>[26]</sup> 通过研究认为, 扰动可以加快这一转化进程. 但是, 本研究发现, 在外源磷连续加入情况下, 较短的时间尺度上, 形态磷间的转化受到了抑制.

目前的研究表明, Fe/Al-P 并非完全易释放态磷<sup>[27, 28]</sup>. 通常将非闭蓄态 Fe/Al-P (non-occluded Fe/Al-P) 称为易释放态磷, 这部分形态磷可以采用藻类可利用态磷 (AAP) 来表征<sup>[29]</sup>, 而将闭蓄态 Fe/Al-P (occluded Fe/Al-P)<sup>[30]</sup> 认定为难释放态磷. 研究中分析了加入外源磷后 AAP 的形成情况. 结果表明, 与初始状态相比, E1、E2、E3 中 AAP 含量分别增加了 256、737、963  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其占 Fe/Al-P 净增加量的百分比分别为 37.49%、42.32%、54.24%. 说明扰动强度越高, 越有利于非闭蓄态 Fe/Al-P 的形成, 其也蕴含着, 扰动强度越大, 越不利于闭蓄态 Fe/Al-P 的形成, 即抑制了外源磷向难释放态磷的迁移和转化. 然而, 底泥扰动强度越大, 颗粒物间的摩擦力和水动力作用越大, 应该越不利于易释放态磷的形成, 如通过范德华力和静电力结合弱吸附态磷以及化学键力较小的非闭蓄态 Fe/Al-P. 但试验结果却恰好相反, 分析其原因可能有二: 一是扰动强度高, 则使颗粒物易于以小粒径形式存在<sup>[31, 32]</sup>, 尽管氧的融入量较高, 但耗氧物质含量也在增加, 因此, 抑制了晶形铁氧化物的形成, 致使磷的结合形态仍以非闭蓄态 Fe/Al-P 为主; 二是颗粒物间的摩擦力和水动力作用越大<sup>[33]</sup>, 使得通过化学键结合的形态磷不断的吸附和脱附, 在两者间不停转换, 同时, 外源磷连续加入, 使得在较短时间尺度上, 由易释放态磷向难释放态磷的转化受到抑制. 因此, 这也说明, 在较短时间尺度上和较高扰动强度下, 外源磷被底泥吸附

仅仅是短暂的持留,而并非永久性持留.本研究也证实了这一点.研究中计算了弱吸附态磷和非闭蓄态 Fe/Al-P 的净增加量占总磷净增加量的百分比,分别为 23.26% (E1)、33.44% (E2)、43.95% (E3).这说明高强度扰动下,外源磷的加入增加了内源磷的生物有效性,使得底泥内源磷释放的风险显著增加.

从 HCl-P 的数量分布来看(图 5), E1、E2、E3 均有所增加,但其占总磷的百分比(质量分数)却未有明显变化(图 6),但是 HCl-P 净增加量占总磷净增加量的百分比却随着扰动强度的增加有所降低,考虑到闭蓄态铁铝结合态磷的数量分布情况,这也充分证实了较短的时间尺度和较高扰动强度并不适合难释放态磷的形成,在连续加入外源磷的情况下. HCl-P 的形成除形态磷间的转化外,可能还包括外源磷与钙离子或者磷酸钙反应<sup>[34]</sup>等.但是,由于本研究中未能采用同位素表征,因此,无法断定在钙结合态磷的形成过程中,外源磷和内源磷的贡献率各占多少.

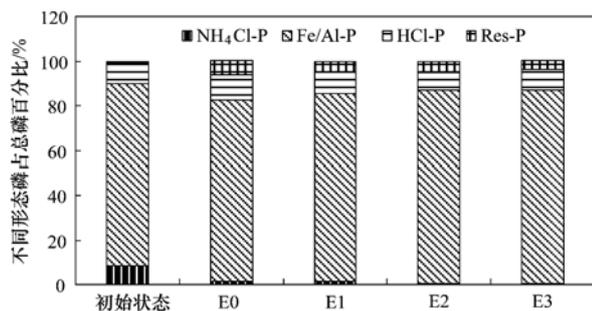


图 6 不同形态磷占总磷的百分比  
Fig. 6 Percentage of different forms of phosphorus in total phosphorus

### 3 结论

(1)与对照试验相比,扰动强化了底泥对外源磷的吸附,并且,较高扰动强度下可以显著增加底泥对外源磷的吸附量.底泥扰动也改变了上覆水中不同形态磷的数量分布,随着扰动强度的增加,溶解性磷酸盐占总磷的百分比呈降低的趋势.

(2)底泥扰动状态下,结合到底泥中的外源磷主要以铁铝结合态磷形式存在(占总磷的百分比超过 80%,以 3 种扰动强度下平均值计).随着扰动强度增加,铁铝结合态磷净增加量也有所增加,而增加的铁铝结合态磷又主要以藻类可利用磷(AAP)的形式存在,导致闭蓄态铁铝结合态磷净增加量占总磷净增加量的百分比随扰动强度增加

有所降低,同样,钙结合态磷的变化趋势也基本一致.说明在较短的时间尺度上和较大的扰动强度下,连续加入的外源磷主要以易释放态磷形式存在,即底泥对外源磷的吸附以暂时性的持留为主.

### 参考文献:

- [1] Peng J F, Wang B Z, Song S H. Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of a wastewater stabilization pond[J]. *Ecological Engineering*, 2007, **31**(2): 92-97.
- [2] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **584**(1): 37-48.
- [3] Sun S J, Huang S L, Sun X M, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(3): 291-295.
- [4] House W A, Denison F H, Armitage P D. Comparison of the uptake of inorganic phosphorus to a suspended and stream bed-sediment[J]. *Water Research*, 1995, **29**(3): 767-779.
- [5] 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.
- [6] House W A, Denison F H. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentrations in river sediments[J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1187-1200.
- [7] Reddy K R, Diaz O A, Scinto L J, et al. Phosphorus dynamics in selected wetlands and streams of the lake Okeechobee Basin[J]. *Ecological Engineering*, 1995, **5**(2-3): 183-207.
- [8] Reddy K R, Flaig E G, Graetz D A. Phosphorus storage capacity of uplands, wetlands and streams of the Lake Okeechobee Watershed, Florida [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1996, **59**(3): 203-216.
- [9] 李大鹏,黄勇,李伟光.底泥再悬浮状态下生物有效磷形成机制研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1824-1830.
- [10] 李大鹏,黄勇,范成新.不同扰动方式对底泥/水系统中生物有效磷的影响[J]. *安全与环境学报*, 2011, **11**(2): 24-28.
- [11] 李大鹏.底泥再悬浮对磷的吸附和不同形态磷转化的影响研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2008.
- [12] 李勇,李大鹏,黄勇.沉积物扰动频率对悬浮物中形态磷数量分布的影响[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(10): 19-23.
- [13] 姚鑫,关保华,安树青,等.物理扰动等环境因素对底泥磷释放的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2007, **31**(5): 62-66.
- [14] Hieltjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1980, **9**(3): 405-407.
- [15] 徐玉慧,姜霞,金相灿,等.太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化[J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 869-873.
- [16] 王圣瑞,金相灿,赵海超,等.长江中下游浅水湖泊沉积物

- 对磷的吸附特性[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 38-43.
- [17] Hohener P, Gachter R. Nitrogen cycling across the sediment-water interface in an eutrophic, artificially oxygenated lake[J]. *Aquatic Sciences*, 1994, **56**(2): 115-132.
- [18] Gachter R, Meyer J S, Mares A. Contribution of bacteria to release and fixation of phosphorus in lake sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, **33**(6): 1542-1558.
- [19] 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计[J]. 中国科学(D辑), 2003, **33**(8): 760-768.
- [20] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1223-1229.
- [21] 张彬, 李涛, 刘会娟, 等. 模拟扰动条件下太湖水体悬浮物的结构特性[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 70-74.
- [22] 李大鹏, 黄勇. 扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2614-2620.
- [23] 李大鹏, 黄勇, 袁砚, 等. 城市重污染河道底泥对外源磷的吸收和固定机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 96-101.
- [24] De Groot C J, Fabre A. The impact of desiccation of a freshwater marsh (Garcines Nord, Camargue, France) on sediment-water-vegetation interactions[J]. *Hydrobiologia*, 1993, **252**(1): 105-116.
- [25] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [26] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(7): 958-962.
- [27] 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.
- [28] Saavedra C, Delgado A. Iron-related phosphorus in eroded sediments from agricultural soils of Mediterranean areas [J]. *Geoderma*, 2005, **125**(1-2): 1-9.
- [29] Sharpley A N. An innovative approach to estimate bioavailable phosphorus in agricultural runoff using iron oxide-impregnated paper[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, **22**(3): 597-601.
- [30] Nguyen L M. 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*, 1999, **14**(1-2): 139-155.
- [31] Lindstro M, Hakanson L, Abrahamsson O, *et al.* An empirical model for prediction of lake water suspended particulate matter [J]. *Ecological Modelling*, 1999, **121**(2-3): 185-198.
- [32] Pettersson K. Phosphorus characteristics of settling and suspended particles in lake Erken [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1-3): 79-86.
- [33] Gloor M, Wüest A, Münnich M. Benthic boundary mixing and resuspension induced by internal seiches [J]. *Hydrobiologia*, 1994, **284**(1): 59-68.
- [34] Nguyen L, Sukias J. Phosphorus fractions and retention in drainage ditch sediments receiving surface runoff and subsurface drainage from agricultural catchments in the North Island, New Zealand [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, **92**(1): 49-69.

## CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing .....	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway .....	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region .....	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter .....	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks .....	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups .....	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water .....	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River .....	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment .....	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis .....	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application .....	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil .....	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed .....	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town .....	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water .....	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal .....	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment .....	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension .....	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury .....	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation .....	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park .....	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres .....	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification .....	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor .....	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride .....	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake .....	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission .....	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory .....	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China .....	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex .....	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition .....	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella .....	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake .....	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments .....	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments .....	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP .....	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability .....	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier .....	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato .....	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta .....	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China .....	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes .....	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil .....	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation .....	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province .....	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification .....	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage .....	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest .....	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor .....	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

# 《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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行