

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

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

雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM _{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估	谢元博, 陈娟, 李巍 (1)
长白山 PM _{2.5} 中水溶性离子季节变化特征研究	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 戴冠华 (9)
青岛大气颗粒物数浓度变化及对能见度的影响	柯馨姝, 盛立芳, 孔君, 郝泽彤, 屈文军 (15)
重庆市大气二噁英污染水平及季节变化	张晓岭, 卢益, 朱明吉, 蹇川, 郭志顺, 邓力, 孙静, 张芹, 罗财红 (22)
西南地区再生铝冶炼行业二噁英大气排放	卢益, 张晓岭, 郭志顺, 蹇川, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (30)
西南地区新型干法水泥生产中的二噁英大气排放	张晓岭, 卢益, 蹇川, 郭志顺, 朱明吉, 邓力, 孙静, 张芹 (35)
杭州市办公场所室内空气中 PBDEs 的污染现状与特征	蒋欣慰, 孙鑫, 裴小强, 金漫彤, 李云龙, 沈学优 (41)
模拟不同排放源排放颗粒及多环芳烃的粒径分布研究	符海欢, 田娜, 商惠斌, 张彬, 叶素芬, 陈晓秋, 吴水平 (46)
川东北地区元素大气沉降通量及其季节变化	童晓宁, 周厚云, 游镇烽, 汤静, 刘厚均, 黄颖, 贺海波 (53)
重庆市铁山坪 2001 ~ 2010 年酸沉降变化	余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 赵大为, 张冬保, 段雷 (60)
汉江上游金水河流域氮湿沉降	王金杰, 张克荣, 吴川, 张全发 (66)
麦秸及其烟尘中正构脂肪酸的组成	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (73)
兰州市室内大气降尘环境磁学特征及其随高度变化研究	吴铎, 魏海涛, 赵瑞瑞, 张蕊, 刘建宝 (79)
中亚热带针阔混交林土壤-大气界面释汞通量研究	马明, 王定勇, 申源源, 孙荣国, 黄礼昕 (85)
水稻秸秆生物炭对耕地土壤有机碳及其 CO ₂ 释放的影响	柯跃进, 胡学玉, 易卿, 余忠 (93)
黄海和东海海域溶解铋地球化学分布特征	吴晓丹, 宋金明, 吴斌, 李学刚 (100)
浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价	马迎群, 时瑶, 秦延文, 郑丙辉, 赵艳民, 张雷 (108)
POCIS 采样技术应用于九龙江流域水环境中雌激素的检测	张利鹏, 王新红, 李永玉, 吴玉玲, 张祖麟 (117)
降雨条件下岩溶地下水微量元素变化特征及其环境意义	陈雪彬, 杨平恒, 蓝家程, 莫雪, 师麟 (123)
锡林河流域地表水水化学主离子特征及控制因素	唐玺雯, 吴锦奎, 薛丽洋, 张明泉, Frauke Barthold, Lutz Breuer, Hans-Georg Frede (131)
子牙河水系河流氮素组成及空间分布特征	赵钰, 单保庆, 张文强, 王超 (143)
水稻种植对中亚热带红壤丘陵区小流域氮磷养分输出的影响	宋立芳, 王毅, 吴金水, 李勇, 李裕元, 孟岑, 李航, 张满意 (150)
黄东海表层沉积物中磷的分布特征	宋国栋, 刘素美, 张国玲 (157)
河流沉积物中有机磷提取剂 (NaOH-EDTA) 提取比例与机制研究	张文强, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (163)
沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制	武晓飞, 李大鹏, 汪明 (171)
三峡库区典型农村型消落带沉积物风险评价与重金属来源解析	敖亮, 雷波, 王业春, 周谐, 张晟 (179)
太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价	毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 曾庆飞, 谷先坤, 李旭光 (186)
滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究	王心宇, 周丰, 伊旋, 郭怀成 (194)
浓度层析荧光光谱局部匹配溢油鉴别技术	王春艳, 史晓凤, 李文东, 张金亮 (202)
光电 Fenton 技术处理污泥深度脱水液研究	王现丽, 王世峰, 吴俊峰, 濮文虹, 杨昌柱, 张敬东, 杨家宽 (208)
同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究	刘小英, 林慧, 马兆瑞, 王磊, 刘静伟, 郭超, 姜应和 (214)
垃圾填埋场渗滤液短程生物脱氮的长期稳定性实验研究	孙洪伟, 郭英, 彭永臻 (221)
油田区土壤石油烃组分残留特性研究	胡迪, 李川, 董倩倩, 李立明, 李广贺 (227)
水稻光合同化碳在土壤中的矿化和转化动态	谭立敏, 彭佩钦, 李科林, 李宝珍, 聂三安, 葛体达, 童成立, 吴金水 (233)
土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响	廖洪凯, 李娟, 龙健, 张文娟, 刘云飞 (240)
水稻土团聚体 Cu ²⁺ 吸附过程中铝的溶出及土壤溶液 pH 变化	许海波, 赵道远, 秦超, 李玉姣, 董长勋 (248)
Cr(VI) 对两种黏土矿物在单一及复合溶液中 Cu(II) 吸附的影响	刘娟娟, 梁东丽, 吴小龙, 屈广周, 钱勋 (254)
淹水时长对 3 种丛枝菌根 (AM) 真菌感染 2 种湿地植物的影响	马雷猛, 王鹏腾, 王曙光 (263)
太湖水质与水生生物健康的关联性初探	周笑白, 张宁红, 张咏, 牛志春, 刘雷, 于红霞 (271)
3 种典型污染物对水生生物的急性毒性效应及其水质基准比较	姜东生, 石小荣, 崔益斌, 李梅 (279)
某制药废水对发光细菌急性毒性的评价研究	杜丽娜, 杨帆, 穆玉峰, 余若祯, 左剑恶, 高俊发, 余忻, 滕丽君, 汤薪瑶 (286)
异丙甲草胺与锌共存对斜生栅藻毒性手性差异影响	胡晓娜, 张淑娟, 陈彩东, 刘惠君 (292)
Biotic Ligand Model 的简化模型及预测性能评价	王万宾, 陈莎, 吴敏, 苏德丽, 赵婧 (299)
基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究	郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育 (304)
微囊藻毒素降解菌 <i>Paucibacter</i> sp. CH 菌的分离鉴定及其降解特性	游狄杰, 陈晓国, 向荟圯, 欧阳溱, 杨冰 (313)
硝酸盐抑制油田采出水硫酸盐还原菌活性研究	杨德玉, 张颖, 史荣久, 韩斯琴, 李光哲, 李国桥, 赵劲毅 (319)
降解纤维素产甲烷的四菌复合系	吴俊妹, 马安周, 崔萌萌, 于清, 齐鸿雁, 庄绪亮, 庄国强 (327)
中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素	谢薇, 陈书涛, 胡正华 (334)
内蒙古羊草草原根呼吸和土壤微生物呼吸区分的研究	史晶晶, 耿元波 (341)
南京河流夏季水-气界面 N ₂ O 排放通量	韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 尹继福, 孙霞 (348)
杀菌剂对湖泊水体温室气体浓度分析的影响	肖启涛, 胡正华, James Deng, 肖薇, 刘寿东, 李旭辉 (356)
生物表面活性剂强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性研究	彭海利, 张植平, 李小明, 杨麒, 罗琨, 易欣 (365)
不同硅铝比 Fe-ZSM-5 催化剂对氧化亚氮催化分解性能的研究	卢仁杰, 张新艳, 郝郑平 (371)
硫酸铵和尿素对废物焚烧过程中多种途径生成氯苯类的抑制作用	严密, 祁志福, 李晓东, 胡艳军, 陈彤 (380)
县域尺度的京津冀都市圈 CO ₂ 排放时空演变特征	汪浩, 陈操操, 潘涛, 刘春兰, 陈龙, 孙莉 (385)
保水剂性能及其农用安全性评价研究进展	李希, 刘玉荣, 郑袁明, 贺纪正 (394)

沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制

武晓飞, 李大鹏*, 汪明

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要:以太湖梅梁湾的沉积物和上覆水为材料,研究了沉积物不同扰动方式条件下,悬浮物中不同形态磷数量分布的变化特征,并且探讨了其对悬浮物中可被生物利用颗粒态磷(BAPP)的影响. 结果表明,扰动使得上覆水中溶解性磷酸盐(DIP)的含量有所降低,与反复扰动相比,持续扰动作用下的下降幅度略大. 试验期间,悬浮物中弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、钙结合态磷(Ca-P)与残余磷(Res-P)占总磷(Tot-P)的百分比平均值分别增加了 2.97%、12.23%、4.09% (持续扰动)和 3.53%、10.35%、2.07% (反复扰动),非闭蓄态铁铝结合态磷(Fe/Al-P)则分别下降了 5.55% (持续扰动)、1.78% (反复扰动),说明扰动促进了易释放态磷向难释放态磷的转化. 然而,悬浮物上 BAPP 含量却未相应降低,反而升高,分别从 20.68% (初始状态)升高至 49.27% (平均值,持续扰动)和 57.92% (平均值,反复扰动). 这表明单纯地以悬浮物中的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、非闭蓄态 Fe/Al-P 等易释放态磷来估算 BAPP 是不合理的.

关键词:持续扰动; 反复扰动; 可被生物利用颗粒态磷; 磷形态; 悬浮物

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)01-0171-08

Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance

WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming

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

Abstract: The change of phosphorus forms in suspended solids under short-term sediment disturbance of different modes and its influence on BAPP in suspended solids were investigated, using sediments and overlying water from Meiliang Bay. The results showed that the concentrations of DIP in the overlying water decreased under disturbance. The concentrations of DIP under continuous disturbance were lower than those under intermittent disturbance. The $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, Ca-P and Res-P concentrations increased by 2.97%, 12.23%, 4.09% under continuous disturbance and 3.53%, 10.35%, 2.07% under intermittent disturbance and the non-occluded Fe/Al-P decreased by 5.55% under continuous disturbance and 1.78% under intermittent in suspended solids during the experiment, indicating that sediment disturbance could promote the transformation of sedimentary phosphorus from mobile forms to refractory forms. According to the speculation, the content of BAPP should decrease. However, it increased from 20.68% (initial state) to 49.27% (average, under continuous disturbance) and 57.92% (average, under intermittent disturbance). This result indicated that it is problematic to estimate the BAPP using solely the mobile phosphorus forms, such as $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and non-occluded Fe/Al-P .

Key words: continuous disturbance; intermittent disturbance; bioavailable particulate phosphorus; phosphorus forms; suspended solids

水体氮磷等营养物质主要储蓄在沉积物中^[1,2],其在风浪和人为等因素扰动作用下会加快沉积物中的氮磷等营养元素向水体释放. 然而,研究表明,扰动作用下水体中增加的磷主要以颗粒态磷为主^[3,4],但颗粒态磷中仅有可被生物利用颗粒态磷(BAPP)才能被浮游生物利用. BAPP与悬浮物上不同形态磷的数量分布密切相关. 因此,扰动对BAPP含量的影响极为明显. 然而,迄今为止,人们对扰动作用下BAPP的再生及转化规律尚不明确.

Ellison等^[4]利用藻类培养方法通过测定生物可利用磷(BAP)和溶解态磷(DTP)来间接计算BAPP,并指出BAPP与悬浮物浓度及其沉降速度密切相关. 李大鹏等^[5]利用悬浮物上藻类利用态磷来

表征颗粒态磷生物有效性的方法分析了沉积物扰动下BAPP的变化规律及其对水体生物有效磷的贡献,并指出扰动导致颗粒态磷生物有效性显著降低. 然而,上述研究均是采用间接方法测定BAPP. 实际上,藻类会优先利用溶解态磷,在溶解态磷含量减少的情况下才利用BAPP,使得测定结果的代表性大打折扣. 因此,本研究通过收集悬浮物,利用藻类培养方法直接测定BAPP,力求测定结果能够真实地代表BAPP. 另外,沉积物扰动方式对上覆水中不同

收稿日期:2013-04-08; 修订日期:2013-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51178284, 51278523, 50938005); 江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX12-0873)

作者简介:武晓飞(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为浅水湖泊修复理论,E-mail:szhkjwxf@163.com

* 通讯联系人,E-mail:ustslp@163.com

形态磷有显著影响,如持续扰动过程中由于没有沉降过程,并且颗粒物质间的摩擦力作用显著大于某些形态磷的化学键力,使得内源磷由易释放态磷向难释放态磷转化受到影响;而反复扰动不仅具有沉降过程,而且颗粒物质间摩擦力的作用时间也仅体现在扰动过程中。因此,对比两者对 BAPP 再生及转化的影响将为完善浅水湖泊磷迁移转化理论提供理论依据。

基于此,本研究采用持续扰动和反复扰动方式,以太湖梅梁湾沉积物和上覆水为材料,以 BAPP 的变化规律以及悬浮物上不同形态磷数量分布规律为

对象,分析了扰动对 BAPP 再生、转化的作用机制。

1 材料与方法

1.1 沉积物与上覆水的采集

利用进口大口径柱状采样器(Rigo Co. 直径 110 mm 高 500 mm)于 2012 年 9 月采集梅梁湾(N 31°31'33.6", E 120°12'32.4")沉积物,并现场切得表层 1 cm 的沉积物样品,装袋,立即用冰盒保存(4℃)送至实验室,过孔径为 1 mm 的铁筛,对沉积物进行搅拌使其充分混匀。同时取采样点上覆水 100 L。沉积物和上覆水理化性质见表 1。

表 1 梅梁湾沉积物和上覆水的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of sediments and overlying water from Meiliang Bay

项目	DO / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH	含水率 /%	有机质 /%	DTP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	Tot-P / $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	叶绿素 a / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	不同粒径所占质量分数/%		
								< 5 μm	5 ~ 50 μm	50 ~ 250 μm
沉积物			30.89	3.38		0.201		19.24	79.98	0.78
上覆水	3.52	8			0.021		4.859			

1.2 试验方法

选择 2 个 5 L 圆形容容器作为试验装置($d = 17 \text{ cm}$, $h = 25 \text{ cm}$),分别标记为 E1 和 E2,放入取自梅梁湾湿沉积物 200 g,并沿器壁缓慢加入采样点上覆水 3 L。

试验周期为 13 h,从早上 08:00 开始,采用恒速搅拌机(IKA RW20 digital)对沉积物进行扰动($140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)。其中,E1 为持续扰动(08:00 ~ 21:00)。E2 为反复扰动,每间隔 3 h 扰动 1 次,每次扰动持续 0.5 h,并从早上 08:00 开始第 1 次扰动。扰动过程中让沉积物充分悬浮。在 E2 每次扰动结束时,立即分别采集悬浮物,同时采集 E1 悬浮物,并用于磷形态分析以及 BAPP 的测定,同时从水面以下 10 cm 处采集水样,测定上覆水中总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性磷酸盐(DIP)。同时监测溶解氧(DO)、pH 值的变化。并在 E2 每次扰动所间隔的 3 h 内每间隔 1 h 对 E1、E2 分别取样测定上覆水中 TP、DTP、DIP 含量,同时监测 DO、pH 值的变化。每次采完水样,立即向容器中补充等量上覆水。

1.3 分析方法

TP 是将水样采用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法测定(美国 HACH DR2800 分光光度计);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;DIP 含量是将水样经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后直接测定。

悬浮物中磷的形态分析方法参考 Hietjes 和 Lijklema 提出的 H&L 4 步连续提取法^[6](表 2),每

个样品有 3 个平行样,相对误差 < 5%。悬浮物中总磷(Tot-P)含量为各步提取磷的总和。藻类可利用磷(AAP)采用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ 溶液提取法进行测定。悬浮物上 BAPP 的测定选用 Ellison 等^[4]的方法来做藻类分析试验,测定 BAPP 的含量,试验中所用藻类为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)。具体方法为将藻在无磷 BG11(Bull-Green Medium)培养液中饥饿培养 7 d,供试验所用。取 30 mL 无磷 BG11 培养液并加入 0.01 g 悬浮物湿样以及经过饥饿培养的藻液 0.3 mL,每个样品有 3 个平行样。在温度为 $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,光照度为 2 000 lx,亮暗比为 14 h : 10 h 条件下培养,每天早中晚各摇动一次,于 14 d 取样测定上覆水中叶绿素 a 含量(water Pam s/n edee0225 叶绿素仪)。同时分别用不同已知磷浓度来培养饥饿藻类,14 d 后测定上覆水中叶绿素 a 含量,通过拟合曲线,得出量化悬浮物中 BAPP 含量公式。

上覆水中 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°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 结果与讨论

2.1 对上覆水中磷含量的影响

扰动使上覆水中不同形态磷(DIP、DTP、PP、

表 2 悬浮物中磷形态及提取方法
Table 2 Species of phosphorus and sequential extraction methods

磷形态	提取方法
弱吸附态磷 (NH ₄ Cl-P)	称取过 100 目筛网的悬浮物干样 0.05 g 于比色管中,加入 50 mL 1 mol·L ⁻¹ NH ₄ Cl 溶液 (pH = 7),振荡 2 h,离心,取上清液经过 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定
铁铝结合态 (Fe/Al-P)	将上步残渣清洗 2 次,加入 50 mL 0.1 mol·L ⁻¹ NaOH,振荡 17 h,离心,取上清液经过 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定
钙结合态磷 (Ca-P)	将上步残渣清洗 2 次,加入 50 mL 0.5 mol·L ⁻¹ HCl,振荡 17 h,离心,取上清液经过 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定
残渣磷 (Res-P)	将上步残渣清洗 2 次,灼烧 5 h (550℃),加入 30 mL 1.0 mol·L ⁻¹ HCl,振荡 16 h,离心,取上清液经过 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定

TP) 含量发生了明显的变化(图 1)。由图 1(a) 可见,不同扰动方式下,上覆水中 DIP 的变化规律相似。试验初期,2 种扰动方式下上覆水的 DIP 含量都显著升高,并迅速达到整个试验间期的最大值(持续扰动: 0.018 mg·L⁻¹; 反复扰动: 0.024 mg·L⁻¹)。反复扰动下,上覆水中 DIP 大部分时间均高于持续扰动。这主要与扰动方式不同有关。持续扰动下,沉积物始终处于悬浮状态,显著增加了上覆水中的无机颗粒态物质和黏土矿物的含量,在释放 DIP 的同时也吸收 DIP^[7],并且易于达到动态平衡。而对于反复扰动而言,停止扰动后,悬浮物处于自由沉降阶段,减少了颗粒物质对 DIP 的捕捉几率,从而降低了对 DIP 的吸附,而被悬浮颗粒吸附的 DIP 在沉降过程中又会向水体解析。然而,在反复扰动条件下,发现一个非常重要的现象,即每次扰动过程中(0.5 h 的扰动与后续 3 h 自由沉降成为 1 次扰动),DIP 的变化趋势均为升高随后降低,并且,随着扰动次数的增加,DIP 的升高幅度逐渐降低(0.024、0.015、0.007、0.009 mg·L⁻¹)。这暗示了

反复扰动间对 DIP 的释放存在内在联系,即先前的扰动有降低后续扰动下内源磷释放的趋势。

随着试验的进行,不同扰动方式下,DIP 均呈显著降低趋势,DIP 的平均值分别为 0.007 mg·L⁻¹(持续扰动)、0.008 mg·L⁻¹(反复扰动),并低于初始状态(0.01 mg·L⁻¹)。这主要归因于扰动促进了细颗粒胶体物质^[8,9]与 DIP 的接触几率,同时强化了吸收大量 DIP 的小颗粒态物质的絮凝作用,有利于其沉降,从而降低了上覆水中 DIP 的含量。同时,扰动还有助于悬浮物中 Fe_{ox} 含量的增加,强化了对水体中 DIP 的吸附作用^[10]。

由图 1(b) 可见,持续扰动下,上覆水中 DTP 大体上呈现下降的趋势,但试验结束时,DTP 发生爆发性释放。这可能与吸附在颗粒态物质上 DTP 的释放以及聚集、絮凝、沉降效果的恶化有关^[11]。反复扰动下,DTP 的变化趋势与持续扰动相似,但 DTP 含量略低于持续扰动状态。但是每次扰动过程中,DTP 均呈现先升高后降低的趋势,但其变化幅度要明显小于 DIP[图 1(a)],并随着扰动次数增加而呈

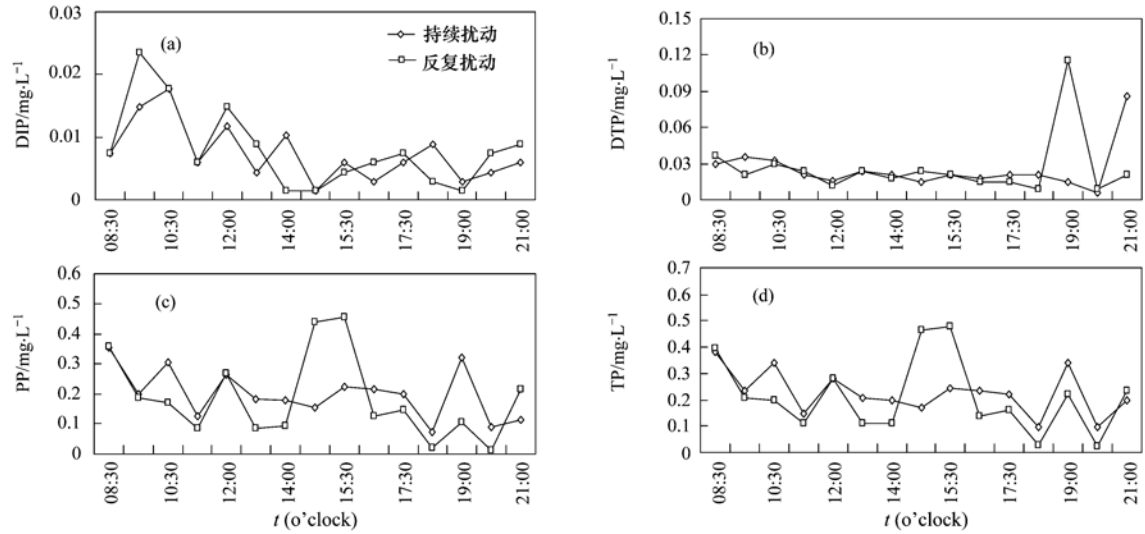


图 1 上覆水中不同形态磷的变化规律

Fig. 1 Variation of different phosphorus forms in the overlying water

降低趋势. 扰动强化了大气复氧, 使得上覆水、悬浮物系统中溶解氧含量增加(图2), 一方面强化了溶解性有机磷(DOP)的氧化^[12], 另一方面促进了DOP与腐殖酸的接触几率, 从而降低其生物有效性^[4].

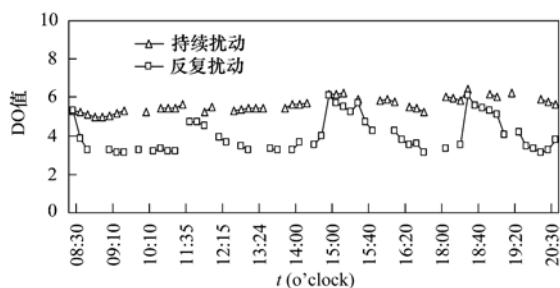


图2 上覆水中DO的变化规律

Fig. 2 Variation of DO in the overlying water

颗粒态磷(PP)的变化规律与TP表现出相似的趋势[图1(c)、1(d)]. 持续扰动和反复扰动状态下, 上覆水中TP、PP的含量均呈先升高再降低的趋势. 反复扰动下, 每次扰动后上覆水中TP、PP的含量都会增加, 并在停止扰动之后迅速降低, 这可能是沉积物再悬浮促进了内源磷向上覆水中的迁移, 而在停止扰动后, 进入到上覆水中的颗粒态物质会在重力作用下自由沉降, 再次回归到沉积物中. 试验初始期间, 持续扰动下, 上覆水中TP、PP含量波动较大, 导致这样现象的原因可能是扰动过程在促进内源磷向上覆水迁移的同时也强化了上覆水中颗粒态物质的聚集、絮凝作用, 有利于小颗粒态物质向沉积物的迁移. 随着扰动的继续, 上覆水中TP、PP的变化逐渐趋于平缓, 这可能由于颗粒态物质聚集、絮凝作用得到强化.

2.2 悬浮物中BAPP数量分布规律

扰动作用显著改变了上覆水中颗粒物质的数量分布, 同时, 促进了磷与颗粒物质的接触, 强化了颗粒物质对磷的捕捉和吸附; 然而, 扰动在使得颗粒物质处于水动力作用下的同时, 也使得颗粒物质受

到摩擦力的影响, 而摩擦力会导致化学键力较小的弱吸附态磷、铁铝结合态磷化学键断裂, 从而改变上覆水中不同形态磷分布(图1). 在此, 也改变了悬浮物上BAPP的数量分布(图3).

图3(a)显示, 持续扰动下, 悬浮物中BAPP的数量分布呈增加的趋势, 而反复扰动下, 则呈先增加后降低的趋势, 但始终保持在高于初始值($48.194 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的水平. 同样, BAPP占Tot-P的百分比也呈增加的趋势[图3(b)]. 表明沉积物扰动导致悬浮物中BAPP含量增加. 这主要归因于悬浮物对水体中DIP的吸附[图1(a)], 也可能与悬浮物中不同形态磷间的相互转化有密切关系. 悬浮物中BAPP含量的增加间接地促进了水体富营养化的进程.

试验期间, BAPP的平均值分别为 $119.959 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (持续扰动)、 $126.125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (反复扰动), 其在Tot-P中所占百分比的平均值分别为49.27% (持续扰动)、57.92% (反复扰动), 显著高于初始值($48.194 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、20.68%), 且反复扰动增加量要略高于持续扰动. 表明反复扰动更有助于BAPP在悬浮物中的集聚. 这与铁铝结合态磷(Fe/Al-P)和钙结合态磷(Ca-P)在悬浮物中数量分布的变化(图4)是相符的. 悬浮物中Fe/Al-P和Ca-P含量的平均值分别为 $125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $92.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (持续扰动)和 $121.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (反复扰动). 显然, 持续扰动相比于反复扰动更有利于促进了易释放态磷向难释放态磷的转化. 这与BAPP的增加趋势是相反的, 暗示了BAPP可能与Fe/Al-P、Ca-P之间存在内在联系.

2.3 悬浮物中磷赋存形态的变化

磷的生物有效性及迁移能力与其赋存形态密切相关^[13,14], 沉积物扰动条件下, 会对水环境因子产生显著影响, 进而改变悬浮物上不同形态磷的数量分布(图4).

图4(a)显示, 试验期间, 持续扰动和反复扰动下, 悬浮物中弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)含量呈先升高

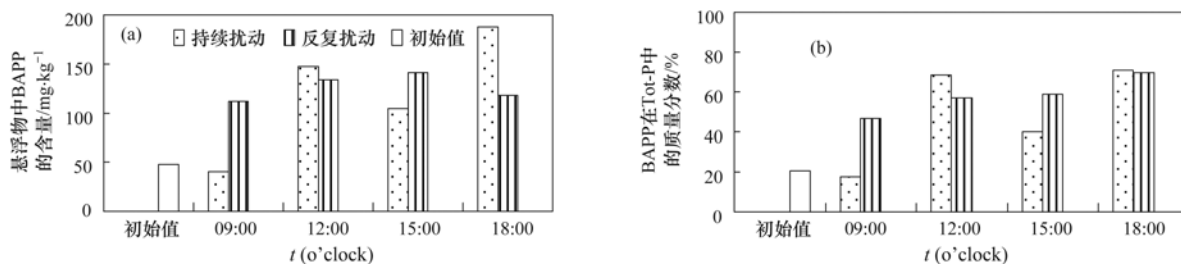


图3 悬浮物中BAPP的数量分布及其在总磷中的质量分数

Fig. 3 Distribution of BAPP and Percentage of BAPP in total P in the suspended solids

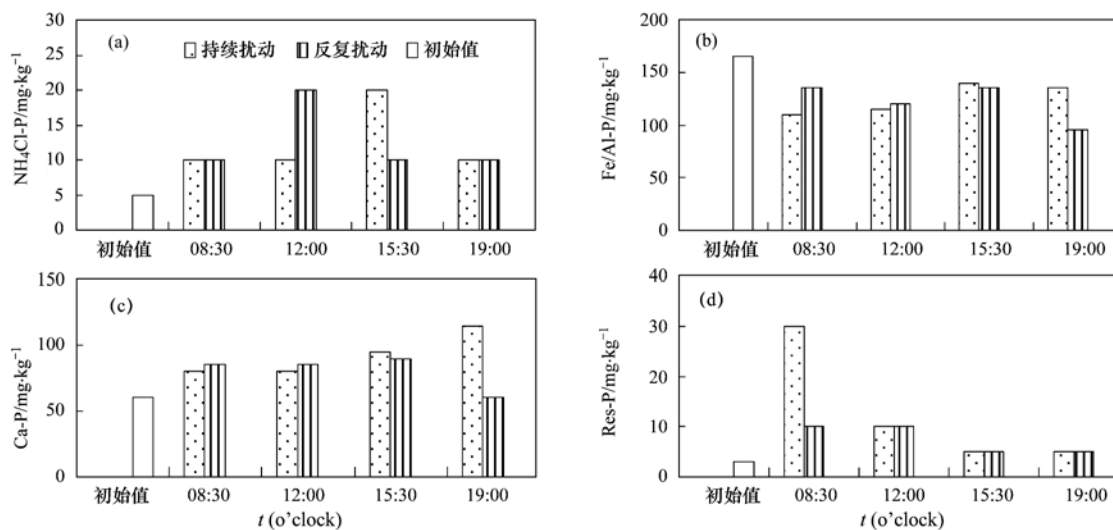


图4 悬浮物中不同形态磷的数量分布

Fig. 4 Distribution of phosphorus forms in the suspended solids

再降低的趋势,并在试验结束时保持在较低值($10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但却始终高于初始值($5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).另外,持续扰动和反复扰动下,悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量占 Tot-P 百分比的平均值分别为 5.12%、5.68%,明显高于初始值(2.15%),其可能是水体中的 DIP 向悬浮物迁移的结果,也可能是悬浮物中其他形态磷向 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 转化所导致.且相对于持续扰动,反复扰动对这种迁移转化的效果更为明显.

图4(b)显示,持续扰动作用下,悬浮物中 Fe/Al-P 含量逐渐增加,其占 Tot-P 的百分比也呈增加趋势(图5).而反复扰动作用下, Fe/Al-P 则呈降低趋势,其占 Tot-P 的百分比在 51.06% ~ 56.25% 间波动(图5).但是, Fe/Al-P 含量及其占 Tot-P 的百分比均低于初始值($165 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 70.82%).并且,持续扰动下, Fe/Al-P 占 Tot-P 百分比的平均值(51.53%)略低于反复扰动(54.86%).

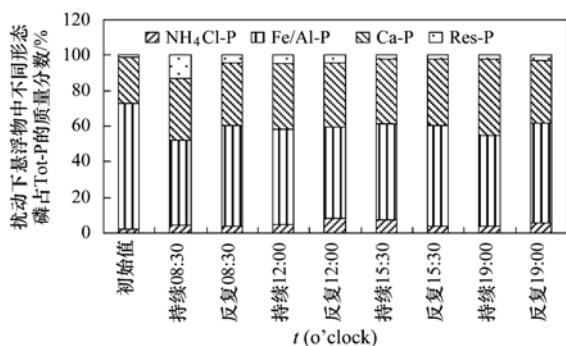


图5 不同形态磷在总磷中的质量分数

Fig. 5 Percentage of different phosphorus forms in total P in the suspended solids

悬浮物中 Fe/Al-P 由闭蓄态 Fe/Al-P 和非闭蓄态 Fe/Al-P 两部分组成^[15,16],非闭蓄态 Fe/Al-P 也

表示为 $\text{AAP}^{[15]}$. 沉积物再悬浮降低了悬浮物中 Fe/Al-P 的含量,但对于非闭蓄态 Fe/Al-P ,在试验结束时,其含量只是略低于初始值($98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),并且其占 Fe/Al-P 的百分比都明显高于初始值(59.39%).这与以往研究中的沉积物再悬浮促进了悬浮物中非闭蓄态 Fe/Al-P 释放是不相符的^[17].在试验结束时,持续扰动下悬浮物中非闭蓄态 Fe/Al-P 占 Fe/Al-P 的百分比达到了 65.19%,而反复扰动更是高达 94.74% (图6).其原因可能是由于持续扰动为水体提供了更好的复氧条件(图2).而水体溶解氧含量的增加有利于 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 的转化,生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$,并在水体氧含量充足的情况下继续被氧化成晶体铁氧化物,强化了对磷的固定能力^[18,19],虽然这部分被固定的磷主要以闭蓄态 Fe/Al-P 的形态存在^[20],但由于沉积物在扰动过程中可能会对 Fe/Al-P 的化学键造成破坏,促进了闭蓄态 Fe/Al-P 的释放,导致在 Fe/Al-P 中以非闭蓄态 Fe/Al-P 为主.而对于反复扰动而言,尽管扰动过程中也有利于水体复氧,增加 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的生成,但在其自由沉降阶段,由于复氧条件的消失导致水体中氧含量降低(图2),不利于 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 继续向晶体铁氧化物的转化,使水体中 Fe^{3+} 主要以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的形式存在,而 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 对磷的固定能力较弱^[18],进而导致悬浮物中 Fe/Al-P 主要以非闭蓄态 Fe/Al-P 的形式存在,并所占 Fe/Al-P 的百分比明显高于持续扰动.

在图4(c)中可以发现, Ca-P 含量逐渐增加,并且, Ca-P 占 Tot-P 的百分比也高于初始状态(25.75%).其原因可能是扰动增加了 Ca^{2+} 与磷酸

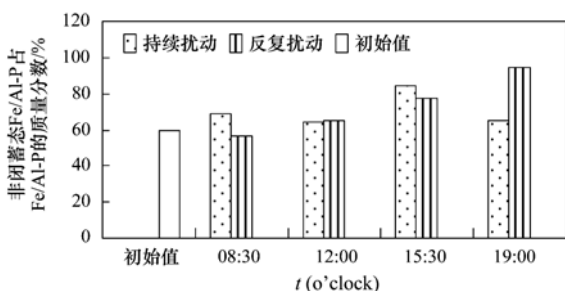


图6 非闭蓄态 Fe/Al-P 在 Fe/Al-P 中的质量分数

Fig. 6 Percentage of non-occluded Fe/Al-P of Fe/Al-P in the suspended solids

根的碰撞几率,促进了 Ca-P 的生成. 尽管有研究表明, pH 值高于 8 才有利于 Ca-P 的生成^[21], 但本研究中, 由于扰动作用, pH 呈增加趋势, 接近 8 (图 7), 而扰动状态下 Ca^{2+} 与磷酸根的接触几率的增加则可能弥补了 pH 值略小于 8 的不利条件. 由于 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的生成增加了上覆水中的 H^+ 的含量^[18], 且其处于反复扰动条件下, 因上覆水中溶解氧含量相对较低的缘故, 抑制了 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 向晶体铁氧化物的转化, 减少了水体中 H^+ 的消耗^[21], 但在试验中并未发现上覆水中 pH 明显降低, 这可能就是因为在抑制 Ca-P 生成时也消耗了水体中的 H^+ . 除此之外, 与持续扰动相比, 反复扰动下 Ca^{2+} 与磷酸根的碰撞几率较低也可能会导致 Ca-P 含量下降. 试验期间, Ca-P 占 Tot-P 的百分比始终高于初始值 (25.75%). 这表明, 沉积物扰动有利于其他形态磷向 Ca-P 的转化.

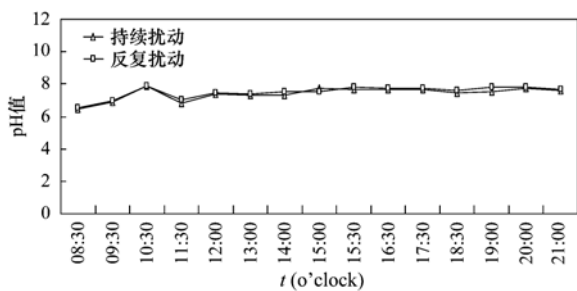


图7 上覆水中批 pH 的变化规律

Fig. 7 Variation of pH in the overlying water

图 4(d) 显示, 持续扰动和反复扰动作用下, 残余磷 (Res-P) 均呈下降趋势, 并保持在明显低于其它形态磷的水平. 由于 Res-P 属于难释放态磷, 悬浮物中其含量又相对较低, 导致在研究中常常忽视其数量分布的变化. 试验期间, Res-P 在 Tot-P 所占的比例无论是平均值还是试验结束时的值都大于初始值 (1.29%). 这表明, 沉积物扰动可能促进了悬浮物中其他形态磷向 Res-P 的转化, 且相对于持续

扰动, 反复扰动似乎更有利于 Res-P 的生成, 这可能是因为持续扰动提高了破坏 Res-P 化学键的几率.

试验期间, 虽然 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占 Tot-P 百分比平均值分别由 2.15% (初始值) 上升到 5.12% (持续扰动) 和 5.68% (反复扰动), 但同为易释放态磷的非闭蓄态 Fe/Al-P 的百分比平均值则分别从 42.06% (初始值) 下降到 36.51% (持续扰动) 和 40.28% (图 8). 与易释放态磷不同, 难释放态磷中的 Ca-P 和 Res-P 则表现出增加的趋势 (图 5), 其分别从 25.75%、1.29% (初始值) 增加到了 37.98%、5.38% (持续扰动) 和 36.1%、3.36% (反复扰动). 对于新增加的 Ca-P 而言, 其磷酸盐主要来自上覆水中的 DIP^[22], 而在扰动过程中悬浮物中的易释放态磷很容易转化成 DIP 释放到上覆水中. 除此之外, Li 等^[23,24] 在研究中发现, 扰动相对于未扰动而言, 不同形态磷间的转化速度明显较快. 这似乎表明扰动更有利于易释放态磷向难释放态磷的转化, 促进了悬浮物中难释放态磷含量的增加.

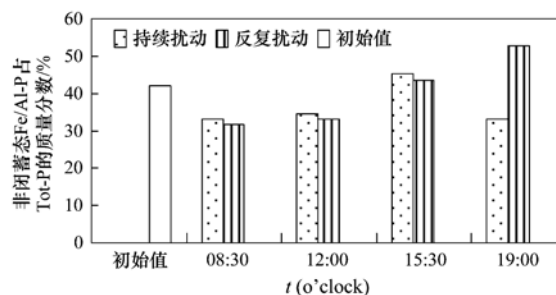


图8 非闭蓄态 Fe/Al-P 在 Tot-P 中的质量分数

Fig. 8 Percentage of non-occluded Fe/Al-P in total P in the suspended solids

2.4 BAPP 与悬浮物中不同形态磷的相关性分析

BAPP 与不同形态磷有密切关系, 研究中分析了 BAPP 与扰动下不同形态磷间的相关性 (表 3).

表 3 显示, 悬浮物中 BAPP 与 Fe/Al-P、Ca-P 都具有较好的相关性, 反而与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、AAP 等易释放态磷的相关性较差, 王琦等^[25] 在研究中也类似的发现. 这表明只是单纯的以易释放态磷来表征 PP 的生物有效性可能是不科学的. 事实上, 藻类在生命活动过程中也会利用部分闭蓄态 Fe/Al-P 和 Ca-P, 虽然闭蓄态 Fe/Al-P 和 Ca-P 都属于难释放态磷, 但并不代表其不可被藻类所利用. 藻类在生长代谢的过程中不但可以溶解部分 Ca-P 而且其代谢物质还可能会与悬浮物中的铁等金属离子发生络合作用^[25~27], 促进了悬浮物中磷的释放. 除此之外, Ca-P 的组成成分也会影响 PP 的生物有效性, 如

表 3 BAPP 与悬浮物中不同形态磷的相关关系

Table 3 Correlation of various phosphorus fractions and BAPP in the suspended solids

	BAPP	NH ₄ Cl-P	Fe/Al-P	Ca-P	Res-P	AAP
BAPP	1					
NH ₄ Cl-P	-0.059	1				
Fe/Al-P	0.320	0.269	1			
Ca-P	0.490	0.149	0.812	1		
Res-P	-0.774	-0.183	-0.348	-0.218	1	
AAP	0.080	0.391	0.458	0.268	-0.514	1

Ca-P 中的磷酸二钙 (Ca₂-P) 和磷酸八钙 (Ca₈-P). Ca₂-P 和 Ca₈-P 是可被生物直接利用的,且 Ca₂-P 的生物有效性还要高于 Fe/Al-P,为优先利用磷源,但 Ca₂-P 在 Ca-P 中的百分比较少,与 Ca-P 和 BAPP 具有较好的相关性相矛盾. 这可能与扰动促进了磷酸十钙 (Ca₁₀-P) 和 Ca₈-P 向 Ca₂-P 的转化有关,由于上覆水的复氧环境,为水体中 Fe²⁺ 的氧化提供了条件,增加水体中的 H⁺,可能会强化不同 Ca-P 之间的转化作用^[28,29].

3 结论

(1) 沉积物扰动有利于降低上覆水中不同形态磷 (DIP、DTP、PP、TP) 的含量. 反复扰动下,每 1 次扰动过程中,DIP、DTP 均呈先升高后降低的趋势,但随着扰动次数增加,DIP 和 DTP 升高的幅度逐渐降低. 这暗示扰动间对内源磷迁移转化存在内在联系.

(2) 沉积物扰动对悬浮物中不同形态磷的数量分布具有显著的影响. 反复扰动作用下,NH₄Cl-P 的增加幅度略低于持续扰动,Fe/Al-P 的下降幅度高于持续扰动,但两种扰动方式下悬浮物中非闭蓄态 Fe/Al-P 含量都低于初始值. 除此之外,悬浮物中 Ca-P 和 Res-P 的含量则都有所增加,且持续扰动作用下增幅较大,说明持续扰动更有利于促进易释放态磷向难释放态磷的转化.

(3) 试验期间,悬浮物中 BAPP 含量均有所增加,且反复扰动下增幅较大. 这与沉积物扰动促进了易释放态磷向难释放态磷转化的结论是恰好相反的,表明只是单纯的以悬浮物中的 NH₄Cl-P、非闭蓄态 Fe/Al-P 等易释放态磷来表示 BAPP 可能是不合理的,有些难释放态磷在相应的条件下也有可能被藻类所利用.

参考文献:

[1] Carter L D, Dzialowski A R. Predicting sediment phosphorus release rates using landuse and water-quality data [J]. Freshwater Science, 2012, 31 (4) : 1214-1222.

[2] Tsado P A, Osunde O A, Igwe C A, *et al.* Phosphorus sorption characteristics of some selected soil of the Nigerian Guinea Savanna [J]. International Journal of AgriScience, 2012, 2 (7) : 613-618.

[3] 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.

[4] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover [J]. Water Research, 2006, 40 (6) : 1258-1268.

[5] 李大鹏, 黄勇, 范成新. 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, 2011, 31 (10) : 2217-2222.

[6] Hietjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments [J]. Journal of Environmental Quality, 1980, 9 (3) : 405-407.

[7] Moazed H, Hoseini Y, Naseri A A, *et al.* Determining phosphorus adsorption isotherm in soil and its relation to soil characteristics [J]. International Journal of Soil Science, 2010, 5 (3) : 131-139.

[8] Li M, Whelan M J, Wang G, *et al.* Phosphorus sorption and buffering mechanisms in suspended sediments from the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay, China [J]. Biogeosciences Discussions, 2012, 9 (12) : 17519-17538.

[9] 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.

[10] 付强, 尹澄清, 马允. 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, 2005, 26 (4) : 70-76.

[11] 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析 [J]. 海洋学报 (中文版), 2002, 24 (4) : 51-57.

[12] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 再悬浮条件下底泥中磷赋存形态的转化研究 [J]. 环境科学, 2008, 29 (5) : 1289-1294.

[13] Lin C Y, Wang Z G, He M C, *et al.* Phosphorus sorption and fraction characteristics in the upper, middle and low reach sediments of the Daliao river systems, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170 (1) : 278-285.

[14] 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.

[15] 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.
- [16] 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*, 2000, **14**(1): 139-155.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 & Environment*, 1996, **59**(3): 203-216.
- [20] 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, 34.
- [21] 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 & Environment*, 2002, **92**(1): 49-69.
- [22] Huang Q H, Wang Z J, Wang D H, *et al.* Origins and mobility of phosphorus forms in the sediments of Lakes Taihu and Chaohu, China [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2005, **40**(1): 91-102.
- [23] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(7): 958-962.
- [24] Li D P, Huang Y, Fan C X, *et al.* Contributions of phosphorus on sedimentary phosphorus bioavailability under sediment resuspension conditions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **168**(3): 1049-1054.
- [25] 王琦, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系 [J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 120-126.
- [26] 张斌亮. 浅水湖泊沉积物-水界面磷的行为特征与环境风险评估 [D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [27] 杨逸萍, 宋瑞星. 河口悬浮物与海洋近岸表层沉积物中磷海洋浮游类生物测定 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1996, **35**(4): 574-580.
- [28] 林治安, 谢承陶, 张振山, 等. 石灰性土壤无机磷形态、转化及其有效性研究 [J]. *土壤通报*, 1997, **28**(6): 274-276.
- [29] 李孝良, 于群英, 陈世勇, 等. 土壤无机磷形态生物有效性研究 [J]. *安徽农业技术师范学院学报*, 2001, **15**(2): 17-19.

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} Related Health Risks and Impaired Values of Beijing Residents in a Consecutive High-Level Exposure During Heavy Haze Days	XIE Yuan-bo, CHEN Juan, LI Wei (1)
Seasonal Variation of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} at Changbai Mountain	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (9)
Variation of Atmospheric Particle Number Concentrations in Qingdao and Its Impact on Visibility	KE Xin-shu, SHENG Li-fang, KONG Jun, <i>et al.</i> (15)
Concentrations of PCDD/Fs in the Atmosphere of Chongqing City and Its Seasonal Variation	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, ZHU Ming-ji, <i>et al.</i> (22)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Secondary Aluminum Metallurgy Industry in the Southwest Area, China	LU Yi, ZHANG Xiao-ling, GUO Zhi-shun, <i>et al.</i> (30)
Atmospheric Emission of PCDD/Fs from Modern Dry Processing Cement Kilns with Preheating in the Southwest Area, China	ZHANG Xiao-ling, LU Yi, JIAN Chuan, <i>et al.</i> (35)
Pollution Status and Characteristics of PBDEs in Indoor Air of Hangzhou	JIANG Xin-wei, SUN Xin, PEI Xiao-qiang, <i>et al.</i> (41)
Size Distribution of Particle and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particle Emissions from Simulated Emission Sources	FU Hai-huan, TIAN Na, SHANG Hui-bin, <i>et al.</i> (46)
Atmospheric Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Elements in Northeast of Sichuan, Central China	TONG Xiao-ning, ZHOU Hou-yun, YOU Chen-feng, <i>et al.</i> (53)
Trend in Acid Deposition at Tieshanping, Chongqing During 2001-2010	YU De-xiang, MA Xiao-xiao, TAN Bing-quan, <i>et al.</i> (60)
Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen of the Jinshui Watershed in the Upper Hanjiang River	WANG Jin-jie, ZHANG Ke-rong, WU Chuan, <i>et al.</i> (66)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Wheat Straw and Its Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (73)
Magnetic Properties of Indoor Dustfall at Different Heights in Lanzhou	WU Duo, WEI Hai-tao, ZHAO Rui-rui, <i>et al.</i> (79)
Mercury Fluxes from Conifer-Broadleaf Forested Field in Central Subtropical Forest Zone	MA Ming, WANG Ding-yong, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (85)
Impacts of Rice Straw Biochar on Organic Carbon and CO ₂ Release in Arable Soil	KE Yue-jin, HU Xue-yu, YI Qing, <i>et al.</i> (93)
Geochemical Distribution of Dissolved Bismuth in the Yellow Sea and East China Sea	WU Xiao-dan, SONG Jin-ming, WU Bin, <i>et al.</i> (100)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Upper Reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China	MA Ying-qun, SHI Yao, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (108)
Determination of Estrogenic Compounds in Water of Jiulong River Using Polar Organic Chemical Integrative Sampler	ZHANG Li-peng, WANG Xin-hong, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (117)
Variation Characteristics and Environmental Significant of Trace Elements Under Rainfall Condition in Karst Groundwater	CHEN Xue-bin, YANG Ping-heng, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (123)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Xilin River Basin and the Possible Controls	TANG Xi-wen, WU Jin-kui, XUE Li-yang, <i>et al.</i> (131)
Forms and Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Ziya River Basin	ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (143)
Impact of Rice Agriculture on Nitrogen and Phosphorus Exports in Streams in Hilly Red Soil Earth Region of Central Subtropics	SONG Li-fang, WANG Yi, WU Jin-shui, <i>et al.</i> (150)
Study on Distribution of Phosphorus in Surface Sediments of the Yellow Sea and the East China Sea	SONG Guo-dong, LIU Su-mei, ZHANG Guo-ling (157)
Characterization and Optimization of the NaOH-EDTA Extracts for Solution ³¹ P-NMR Analysis of Organic Phosphorus in River Sediments	ZHANG Wen-qiang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (163)
Regeneration and Transformation of BAPP in Suspended Solids Under Short-term Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng, WANG Ming (171)
Sediment Risk Assessment and Heavy Metal Source Analysis in Typical Country Water Level Fluctuated Zone (WLFZ) of the Three Gorges	AO Liang, LEI Bo, WANG Ye-chun, <i>et al.</i> (179)
Pollution Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Different Eastern Dredging Regions of Lake Taihu	MAO Zhi-gang, GU Xiao-hong, LU Xiao-ming, <i>et al.</i> (186)
Study on the Stages of Major Sediments in Dianchi Lake	WANG Xin-yu, ZHOU Feng, YI Xuan, <i>et al.</i> (194)
Oil Spill Identification Using Partial Surface Fitting Method Based on Concentration-Synchronous-Matrix-Fluorescence Spectra	WANG Chun-yan, SHI Xiao-feng, LI Wen-dong, <i>et al.</i> (202)
Treatment of Sludge Liquor Produced in Deep Dehydration by Photoelectro-Fenton Process	WANG Xian-li, WANG Shi-feng, WU Jun-feng, <i>et al.</i> (208)
Characteristics of Nitrification and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal by Granular Sludge	LIU Xiao-ying, LIN Hui, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (214)
Study on Long-Term Stability of Biological Nitrogen Removal via Nitrite from Real Landfill Leachate	SUN Hong-wei, GUO Ying, PENG Yong-zhen (221)
Compositions and Residual Properties of Petroleum Hydrocarbon in Contaminated Soil of the Oilfields	HU Di, LI Chuan, DONG Qian-qian, <i>et al.</i> (227)
Dynamics of the Mineralization and Transformation of Rice Photosynthesized Carbon in Paddy Soils - a Batch Incubation Experiment	TAN Li-min, PENG Pei-qin, LI Ke-lin, <i>et al.</i> (233)
Effects of Land Use and Abandonment on Soil Labile Organic Carbon in the Karst Region of Southwest China	LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, <i>et al.</i> (240)
Aluminum Dissolution and Changes of pH in Soil Solution During Sorption of Copper by Aggregates of Paddy Soil	XU Hai-bo, ZHAO Dao-yuan, QIN Chao, <i>et al.</i> (248)
Effect of Cr(VI) Anions on the Cu(II) Adsorption Behavior of Two Kinds of Clay Minerals in Single and Binary Solution	LIU Juan-juan, LIANG Dong-li, WU Xiao-long, <i>et al.</i> (254)
Effect of Flooding Time Length on Mycorrhizal Colonization of Three AM Fungi in Two Wetland Plants	MA Lei-meng, WANG Peng-teng, WANG Shu-guang (263)
Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake	ZHOU Xiao-bai, ZHANG Ning-hong, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (271)
Acute Toxicity of Three Typical Pollutants to Aquatic Organisms and Their Water Quality Criteria	JIANG Dong-sheng, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (279)
Evaluation of the Acute Toxicity of Pharmaceutical Wastewater to Luminescent Bacteria	DU Li-na, YANG Fan, MU Yu-feng, <i>et al.</i> (286)
Influence of the Coexistence of Zn ²⁺ on the Enantioselective Toxicity of Metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	HU Xiao-na, ZHANG Shu-xian, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (292)
Simplification of Biotic Ligand Model and Evaluation of Predicted Results	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (299)
Priority Pollutants Ranking and Screening of Coke Industry based on USEtox Model	HAO Tian, DU Peng-fei, DU Bin, <i>et al.</i> (304)
Isolation, Identification and Characterization of a Microcystin-degrading Bacterium <i>Paucibacter</i> sp. Strain CH	YOU Di-jie, CHEN Xiao-guo, XIANG Hui-yi, <i>et al.</i> (313)
Inhibition of the Activity of Sulfate-reducing Bacteria in Produced Water from Oil Reservoir by Nitrate	YANG De-yu, ZHANG Ying, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (319)
Bioconversion of Cellulose to Methane by a Consortium Consisting of Four Microbial Strains	WU Jun-mei, MA An-zhou, CUI Meng-meng, <i>et al.</i> (327)
Factors Influencing the Variability in Soil Heterotrophic Respiration from Terrestrial Ecosystem in China	XIE Wei, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua (334)
Study on the Distinguishing of Root Respiration from Soil Microbial Respiration in a <i>Leymus chinensis</i> Steppe in Inner Mongolia, China	SHI Jing-jing, GENG Yuan-bo (341)
Nitrous Oxide Flux at the Water-Air Interface of the Rivers in Nanjing During Summer	HAN Yang, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, <i>et al.</i> (348)
Effects of Antiseptic on the Analysis of Greenhouse Gases Concentrations in Lake Water	XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, James Deng, <i>et al.</i> (356)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cell Enhanced by Biosurfactant	PENG Hai-li, ZHANG Zhi-ping, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (365)
Fe-ZSM-5 Catalysts with Different Silica-Alumina Ratios for N ₂ O Catalytic Decomposition	LU Ren-jie, ZHANG Xin-yan, HAO Zheng-ping (371)
Inhibition of Chlorobenzene Formation via Various Routes During Waste Incineration by Ammonium Sulfate and Urea	YAN Mi, QI Zhi-fu, LI Xiao-dong, <i>et al.</i> (380)
County Scale Characteristics of CO ₂ Emission's Spatial-Temporal Evolution in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (385)
Characterization and Soil Environmental Safety Assessment of Super Absorbent Polymers in Agricultural Application	LI Xi, LIU Yu-rong, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (394)

《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1月15日 35卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 1 Jan. 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