

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律

蔡顺智, 李大鹏*, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要: 研究了3种扰动方式对外源磷在上覆水、间隙水、底泥中的数量分布的影响,并分析了内源磷形态间的转化过程。结果表明,与对照实验相比,物理扰动能促进上覆水中磷向底泥迁移,并高于生物扰动和组合扰动的促进作用,并且,三者均高于对照实验。这可归因于溶解氧的渗入。物理扰动能降低间隙水中DIP的平均含量,相比对照实验降低了12.13% (第6d和第10d平均值),但降低程度不如生物扰动(38.63%)和组合扰动(50.79%)。3种扰动均能促进Fe/Al-P和Ca-P的形成,其中,物理扰动下Fe/Al-P和Ca-P平均形成量最大,物理扰动下AAP含量一直在减小,暗示物理扰动明显促进了AAP向闭蓄态的Fe/Al-P或者Ca-P转化。

关键词: 外源磷; 扰动; 磷转化; 协同作用; 分布

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4607-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704166

Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances

CAI Shun-zhi, LI Da-peng*, TANG Xin-yu, LI Hao-ran, ZHU Wei, HUANG Yong

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

Abstract: The distribution of external phosphorus (P) in the overlying water, pore water, and sediment under different disturbances were investigated and the transformation between internal P forms was analyzed. The results show that physical disturbances can promote the migration of external P from the overlying water to the sediment. In addition, the enhancement was even higher due to the bioturbation of the combined disturbances. Noticeably, the improvement of the P migration in the control was lowest, compared with the three disturbances. This may be attributed to the penetration of dissolved oxygen. Meanwhile, the physical disturbance reduced the average content of (dissolved organic phosphorus) DIP in the pore water by 12.13% (a mean of 6d and 10d), compared with the control. However the reduction was less than that associated with the bioturbation (38.63%) and the combined disturbance (50.79%), respectively. These three disturbances may promote the formation of Fe/Al-P and Ca-P. The formation of Fe/Al-P and Ca-P was largest under the physical disturbance. However, the algal-available phosphorus (AAP) is reduced due to the physical disturbance, suggesting that physical disturbance may promote the transformation of AAP to occluded Fe/Al-P or Ca-P.

Key words: external phosphorus; disturbances; phosphorus transformation; synergy; distribution

磷是导致水体富营养化的关键性限制因子^[1-3]。外源输入是水体中磷的主要来源之一^[4]。而同时底泥扰动是促使内源磷迁移转换的关键因素^[5,6]。

近年来,有关底泥扰动对内源磷再生和形态转化的影响进行了诸多研究^[7,8]。风浪扰动主要侧重于对底泥微界面的改造^[9],而底栖生物扰动则主要侧重于对底泥微环境的改变^[10],同时增加了底泥微界面的面积,导致泥水界面面积大幅增加^[11]。除此之外,因生物扰动致使底泥-水界面的特征变化^[12-14]以及氮磷迁移转化^[15-17]也引起了人们的关注。但上述研究主要探讨了外源磷截除条件下内源磷在泥水两相间迁移转化规律,然而,在阐明内源磷在扰动状态下的转化机制时遇到困难,因为磷在泥水两相间的迁移和转化是双向的^[18,19],即泥相磷再生进入上覆水,水相磷在悬浮颗粒吸附作用下而进入底泥,但由于双向条件下,转化过程过于复杂,很

难捕捉磷在泥水两相,特别是泥相不同形态磷间的转化。因此,诸多研究均集中于此方向^[20,21],但由于迁移转化过程中参与的磷量较小,致使很难捕捉到内源磷转化这一过程。因此,本研究拟通过投加外源磷的方式,探讨物理-生物扰动下磷在不同形态间的数量分布,以期阐明扰动下内源磷转化过程和转化机制提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点与采样准备

2016年4月利用大口径重力采样器(Rigo Co.

收稿日期: 2017-04-17; 修订日期: 2017-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278523); 江苏省“六大人才高峰”项目(2013-JNHB-022); 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 2015年度研究生科研/实践创新计划项目(SKCX15_023)

作者简介: 蔡顺智(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为水体修复, E-mail: 42208383@qq.com

* 通信作者, E-mail: ustslp@163.com

直径 90 mm, 高 500 mm) 在大浦口采样点 (N31°18'42. 7", E119°56'52. 2"), 采集表层 15 cm 底泥柱样总计 16 根, 并保留采样管上覆水水样, 用橡皮塞密封采样管两端, 再垂直地把采集到的柱样放

入采样架中, 同时采集上覆水 50 L, 采样运输过程中尽量保持柱样不发生扰动. 采样点底泥及上覆水的各项理化性质见表 1.

本实验用摇蚊幼虫购自市场, 其中主要种为羽

表 1 采样点底泥和上覆水的理化性质

Table 1 Physics-chemical properties of sediments and overlying water from sampling points								
项目	DO /mg·L ⁻¹	pH	TP /mg·L ⁻¹	DTP /mg·L ⁻¹	DIP /mg·L ⁻¹	含水率 /%	烧失量 LOI /%	Tot-P /mg·g ⁻¹
上覆水	8. 83	7. 37	0. 258	0. 111	0. 035	—	—	—
底泥	—	—	—	—	—	38. 81	6. 48	0. 638

摇蚊幼虫 (*Chironomus plumosus*). 用大浦口采集来的底泥和上覆水驯化培养买回来的摇蚊幼虫, 使其适应实验条件, 1 周后用于实验.

1. 2 实验方法

实验用培养管构造见图 1. 培养管为长 40 cm, 内径 20 cm 的有机玻璃管, 底部用橡胶塞密封; 管壁留有安装 Rhizon 间隙水采样器和底泥采样器的孔口, 并用疏水胶带密封.

对采集来的上覆水和底泥进行去杂质处理, 上覆水处理后一部分用来做培养用水, 一部分放入冰箱作为实验期间上覆水的补充. 并把制得的 12 个底泥柱样放入培养水槽内进行前期培养 14 d, 使其稳定, 方法参考文献[22].

第 14 d, 从培养水槽中取出底泥柱样, 将 Rhizon 间隙水采样器包扎生胶带后插入培养管预定孔口以采集 1~6 cm 底泥各段间隙水(分 1~2、2~3、3~4、4~5、5~6 cm 五段采集), 并保持采样管水平和插合部密封, 然后按同样的插入方法将底泥采样管包扎生胶带后插入培养管, 底泥采样孔(间隙水采样孔正对面)位于泥-水界面以下 1.5、3.5 cm 处(分 0~2、2~4 cm 两段采集底泥样品), 为了使实验结果更可靠, 设置平行实验, 将制得的 12 根柱样分别作如下实验: 3 根用于对照实验、3 根用于物理扰动、3 根用于生物扰动(摇蚊幼虫)、3 根用于组合扰动(物理+摇蚊幼虫).

在第 17 d, 挑选活性较强的摇蚊幼虫, 向组合扰动组柱样中加入相应条数的摇蚊幼虫(密度与太湖自然密度一致), 并保持摇蚊幼虫均匀分布在泥水界面, 其中主要种为羽摇蚊 (*Chironomus plumosus*) 幼虫, 绝大多数的摇蚊幼虫能迅速打孔钻入底泥中, 0.5 h 后, 将尚未打孔钻入的摇蚊幼虫用镊子轻轻挑出, 用新的有活力的摇蚊幼虫代替, 然后将所有培养管放回实验架以开启实验.

采用恒速搅拌机 (IKA RW20 digital) 对柱样进

行扰动, 转速为 150 r·min⁻¹, 在水面上方 1 cm 处扰动 10 min, 使得表层 0.5 cm 底泥完全悬浮. 实验期间, 若发现摇蚊幼虫钻出泥面死亡时, 立即用镊子小心挑出, 并加入等量的活体.

采集上覆水水样测定 DIP. 采样后, 立即用存于棕色瓶中的等量预培养水补充. 间隙水 DIP 取样时用 2 mL 注射器抽取 1 mL 间隙水, Fe²⁺ 取样时预先在针管中加入适量显色剂后抽取 1 mL 间隙水.

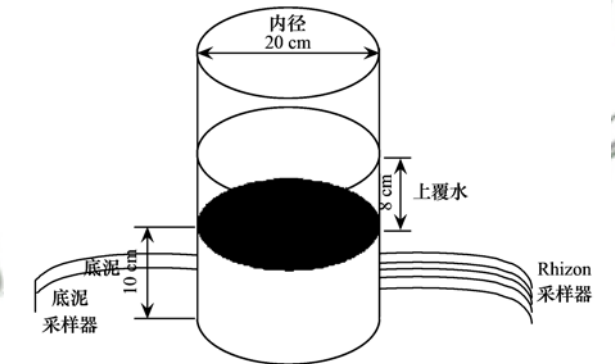


图 1 实验培养管
Fig. 1 Experiment incubation tube

实验共持续了 13 d (第 17~29 d). 每天取上覆水测量上覆水 DIP 浓度, 间隙水 DIP 分别在 17、23、27 d 测定, 每次抽取 2 mL 间隙水. 在此过程中分别在 17、20、23、26 d 测量完上覆水和间隙水指标后投加外源磷 KH₂PO₄, 每次投加使所有柱样上覆水磷浓度瞬间上升 0.5 mg·L⁻¹, 间隙水 Fe²⁺ 都在投加外源磷后测定, 分别是在 18、24、28 d 测定, 底泥样品分别在 22、25、29 d 采取, 测定底泥 4 种赋存形态磷含量以及 AAP、BAP. 实验在第 29 d 结束, 随后取出采样器.

1. 3 样品分析方法

DIP 含量是将水样过 0.45 μm 滤膜后测定^[23,24], 底泥累积磷吸附量根据 DIP 计算得出.

间隙水中 Fe²⁺ 用邻菲罗啉分光光度法测定^[25].

磷的形态分析方法:参考 Hietjes 等提出的四步连续提取法^[26],将底泥的磷形态分为 4 类: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(Ca-P)、残渣磷(Res-P)。

藻类可利用磷(AAP):使用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 浸提测定^[27]。

生物有效磷(BAP)以 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 AAP 之和表示,表征的是底泥中易释放磷的总量。

2 结果与讨论

2.1 投加外源磷后底泥累积吸附磷量的变化规律

在有外源磷投加的情况下,底泥累积吸附磷量发生了显著变化(图 2)。

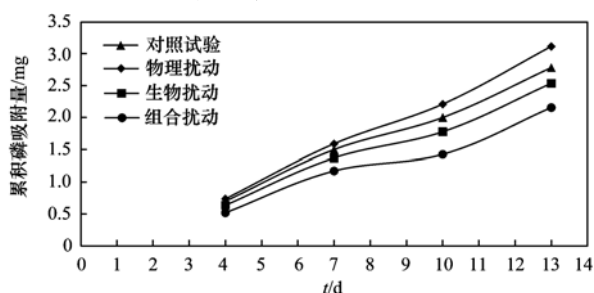


图 2 不同扰动条件下投加外源磷后底泥累积吸附量变化规律

Fig. 2 Variation of the total phosphorus adsorption after adding external phosphorus under different disturbances

图 2 显示了底泥累积吸附磷量的变化趋势,图 2 显示,4 个处理组在第 1 d (为方便以实验第 17 d 记为此处第 1 d) 投加使所有柱样上覆水磷浓度瞬间上升 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的外源磷后,第 4 d,对照实验、物理扰动、生物扰动和组合扰动上覆水中的磷被累积吸附 0.70、0.74、0.64 和 0.52 mg,说明外源磷的投入破坏了原先存在于泥相和水相之间的磷吸附和释放动态平衡,水体中的磷存在着向泥相扩散的趋势。第 7 d 时对照实验、物理扰动和生物扰动条件下磷的累积吸附量,和最少的组合扰动相比,分别相差 0.33、0.42 和 0.20 mg,而第 10 d 时分别相差 0.57、0.78 和 0.35 mg,可以发现此时虽然不同条件下磷的吸附量均有所增加,但磷吸附量的差距进一步增加,这暗示外源磷输入后,各种条件下外源磷的累积吸附量是不一致的。在整个过程中生物扰动和组合扰动条件下磷吸附量要低于对照实验,这是因为底栖生物对底泥微界面的改造^[28]引起的,相反,可以发现物理扰动条件下磷累积吸附量始终要高于其他条件,并一直保持在最高水平,以第 10 d 为例,分别是其他 3 组条件的 1.11、1.24 和 1.55 倍,相比而言,在外源磷输入下,物理扰动和其他扰

动相比明显增加了上覆水磷向底泥的迁移,这与物理扰动下内源磷的迁移转化规律类似^[29]。其原因是物理扰动能显著增加上覆水中的颗粒物质含量,强化底泥与上覆水中磷的接触从而使其发生沉淀或吸附,类似于混凝作用,在 10 ~ 13 d,底泥累积吸附磷量具有与 7 ~ 10 d 类似的趋势,这也间接表示在 10 ~ 13 d,底泥累积吸附磷量有着和 7 ~ 10 d 相似的规律。同样在第 7 d,对照实验、物理扰动、生物扰动和组合扰动条件下磷累积吸附量分别增加 114.29%、114.86%、114.06% 和 125.00%,相比于第 4 d,分别增加了不止一倍,这说明水体中外源磷输入越多,磷从水体向底泥迁移的趋势就越明显,再联系第 13 d,对照实验、物理扰动、生物扰动和组合扰动条件下磷累积吸附量分别增加 39.00%、40.72%、42.70% 和 51.05%,值得注意的是吸附量最少的组合扰动增幅量最大,说明组合扰动的协同作用虽然不利于磷从上覆水向底泥的迁移,但可能由于组合扰动的叠加作用使得底泥内部好氧区域增大从而促进了上覆水中磷进入间隙水中而发生与金属的沉淀作用而吸附。

2.2 各层间隙水 DIP、 Fe^{2+} 平均含量的变化规律

间隙水是底泥与上覆水之间的联系纽带,底泥中的 DIP 可以通过间隙水扩散到上覆水中,同时上覆水中的磷也可以通过间隙水被固定到底泥中,所以间隙水 DIP 的变化趋势反映了底泥-上覆水中磷的转化趋势。本实验采用 Rhizon 间隙水采样技术得出了 1 ~ 6 cm 各层间隙水 DIP 平均含量的变化规律,不同条件下各层间隙水 DIP 平均含量的变化规律如图 3 所示。

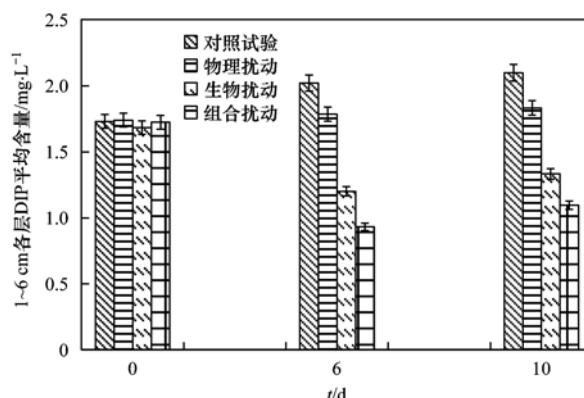


图 3 不同扰动条件下各段时间平均 DIP 含量随时间变化规律

Fig. 3 Average DIP content on day 0, day 6 and day 10 under different disturbances

图 3 显示,在实验开始时(为方便以实验第 17 d 记为此处第 0 d),各扰动条件下 1 ~ 6 cm 各层的间

隙水 DIP 平均含量无明显差异. 在外源磷输入下, 随着时间的变化, 不同扰动条件下间隙水中 DIP 明显降低, 且显著低于对照实验. 物理扰动下, 间隙水中 DIP 的降低主要源于溶解氧的融入^[8], 这有利于间隙水中 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ^[30], 从而增加固定间隙水中 DIP 的可能性, 当然, 物理扰动也能带起表面的底泥, 导致水体中悬浮颗粒和间隙水 DIP 充分接触, 这有利于底泥中的其他金属离子或者金属氧化物对间隙水 DIP 的固定^[31]. 但物理扰动降低间隙水 DIP 的程度有限 (且明显低于生物扰动和组合扰动), 这是因为物理扰动仅能使表层底泥悬浮, 对深层底泥影响作用不足. 生物扰动下间隙水 DIP 的减少主要源于摇蚊幼虫的生物引灌作用^[32]. 组合扰动下间隙水 DIP 的降低主要源于物理和生物组合扰动的协同作用. 同时通过第 6 d 和第 10 d DIP 平均含量分析, 相比对照实验, 组合扰动间隙水中 DIP 的平均含量降低了 50.79% (第 5 d 和第 10 d 平均值), 生物扰动为 38.63%, 物理扰动为 12.13%, 可以发现同一时间组合扰动的 DIP 平均含量要低于生物扰动, 而生物扰动又低于物理扰动, 物理扰动又低于对照实验, 这说明组合扰动的协同作用可以降低底泥间隙水中的 DIP, 甚至超过单纯的生物扰动, 物理扰动只是改变了底泥表面, 属于平面改造, 因此, 相比于生物扰动立体纵深的改造作用, 物理扰动对间隙水 DIP 的减少的贡献相对较小.

图 3 还显示, 对照实验条件下 1~6 cm 各层间隙水 DIP 平均含量呈增加趋势, 这符合图 2 中磷从上覆水向底泥迁移的趋势. 物理扰动间隙水 DIP 平均含量变化不大, 这与前面物理扰动组 DIP 幅度降低小的结果相吻合. 生物扰动组和组合扰动组间隙水 DIP 平均含量都有所降低, 说明生物扰动以及组合扰动的叠加作用是持续的.

由图 4 可知, 实验刚开始时 (为方便以实验第 18 d 记为此处第 0 d), 对照实验、物理扰动、生物扰动和组合扰动条件下 Fe^{2+} 平均含量有所不同但相差不大. 各扰动条件下 Fe^{2+} 浓度分别是 6.39、7.34、5.79 和 7.46 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 图 4 显示, 与对照实验相比, 物理扰动、生物扰动和组合扰动都进一步增大了 Fe^{2+} 的降低幅度. 究其原因, 主要是这 3 种扰动方式, 均可以增加底泥的好氧趋势, 从而使 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} , 组合扰动条件下 Fe^{2+} 的降低幅度最大, 其主要源于组合扰动的协同作用. 此外, 对照实验 Fe^{2+} 浓度随时间有所增加, 这主要是因为底泥没有扰动, 溶解氧渗入不足所致.

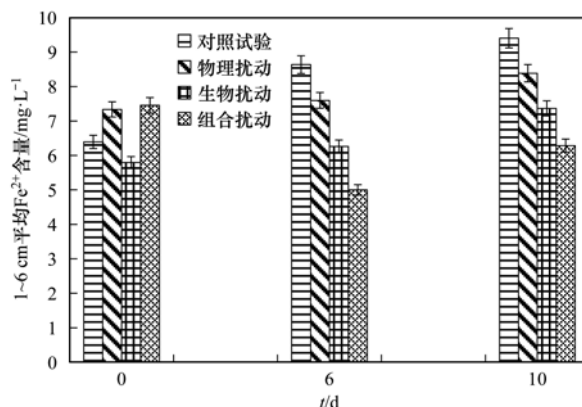


图 4 不同扰动条件下各段时间平均 Fe^{2+} 含量随时间变化规律

Fig. 4 Average Fe^{2+} content on day 0, day 6 and day 10 under different disturbances

2.3 底泥形态磷数量变化规律

本实验期间, 不同扰动方式导致 4 种形态磷的含量发生明显变化 (图 5).

图 5(a) 和图 5(b) 显示, 随着时间的推移, 不同扰动条件下, 0~4 cm $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的数量不断增加, 物理扰动组条件下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 从 39.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (第 1 d) 增加到 97.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (第 4 d), 再增加到 147.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (第 8 d). 除了对照实验增加幅度较小外, 其他扰动条件下增加幅度都较大. 这与无外源磷投加条件下底泥中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 数量变化规律不同^[33], 这主要是因为物理扰动、生物扰动和组合扰动均促进了水体中磷向底泥迁移 (图 2). 比较图 5(c) 和图 5(d), 相比对照实验, 其他扰动条件下 Fe/Al-P 含量均有上升, 其中物理扰动条件下 Fe/Al-P 含量最高, 达到了 700 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 说明物理扰动促进了 Fe/Al-P 的形成, 这很可能是由于底泥中的铁铝等金属离子和 pH 较低缘故^[34], 在扰动过程中更容易与游离的磷接触而形成 Fe/Al-P . 尽管物理扰动下生成的 Fe/Al-P 最多, 但呈下降趋势, 这主要与非闭蓄态的 Fe/Al-P 有关, 有研究表明 Fe/Al-P 在扰动大的情况下更容易释放^[35]. 组合扰动下 Fe/Al-P 的生成量低于物理扰动, 理论上, 组合扰动包括了物理扰动对底泥的表层改造作用和生物扰动的纵向改造作用, 因此, 推测组合扰动更有利于 Fe/Al-P 的生成, 但结果却与预测相反. 分析其原因可能在于, 由于物理扰动对底栖生物的存在环境产生影响, 迫使其活动频繁, 促使磷释放 (如图 2), 致使磷向底泥迁移量小于物理扰动, 使得 Fe/Al-P 的生成量降低. 此外, 另 1 种解释是强化了 Fe/Al-P 向其他形态磷 (如 Ca-P) 的转化. 由图 5(e) 和图 5(f) 发现, 3 种扰动都能促进 Ca-P 的生成, 结合 3 组扰动下 Fe/Al-P 含量随着时间不再增

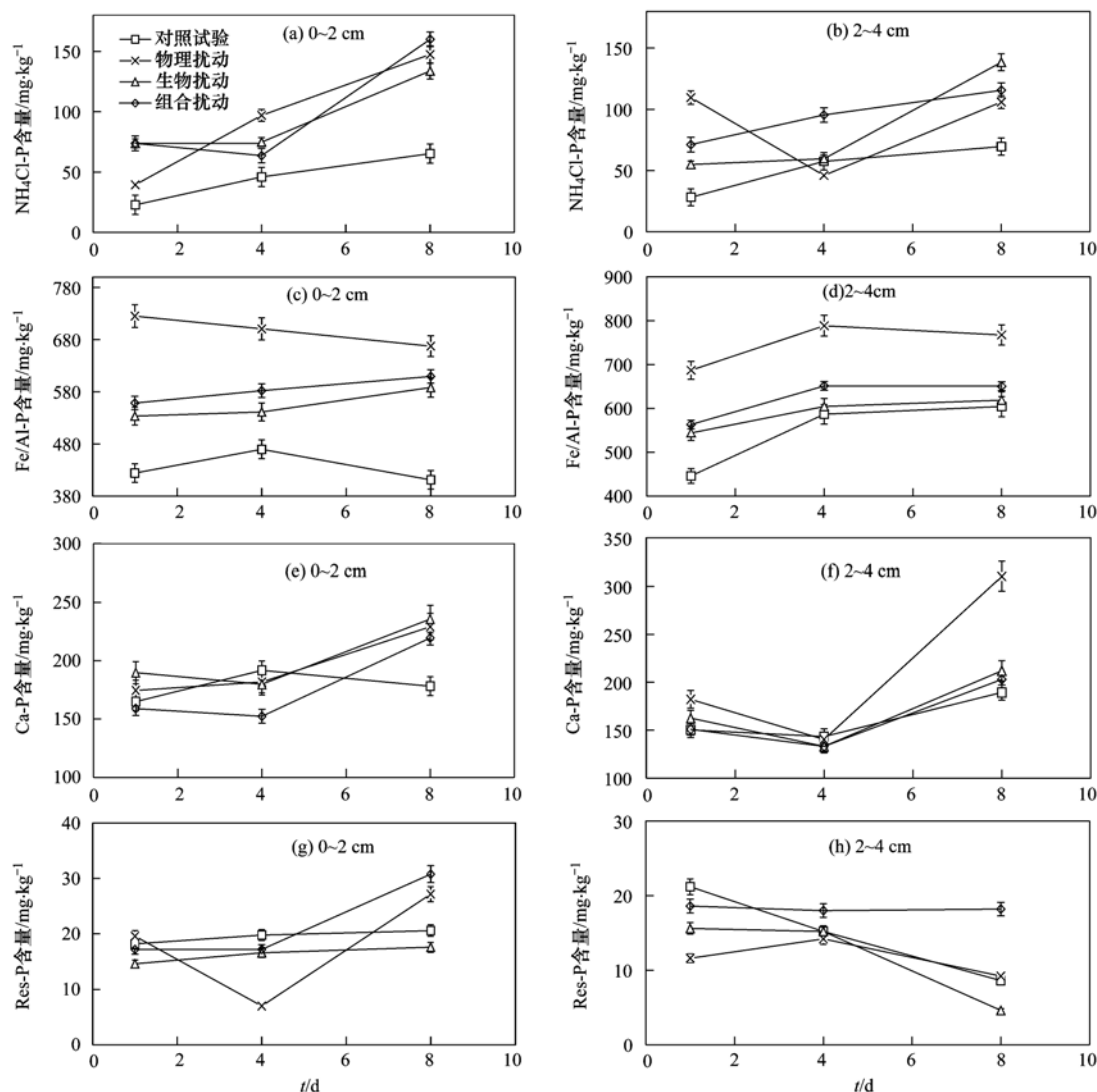


图5 0~4 cm 底泥磷赋存形态数量分布变化规律

Fig. 5 Distribution of phosphorus forms and percentages of different phosphorus forms of TP in 0-4 cm of sediment

加甚至减小,可以得出 Fe/Al-P 有着向 Ca-P 转化的趋势,其中 2~4 cm 段物理扰动组促进作用最为明显. 又因为 Ca-P 是难释放态磷^[36],这表明了在物理扰动下,底泥对磷的持留能力是最显著的.

2.4 底泥中 AAP 数量变化规律

AAP 通常用来表征非闭蓄态的 Fe/Al-P^[37],不

同扰动条件下 AAP 发生了明显变化(图 6).

图 6(a) 显示,0~2 cm 除物理扰动外,其他 3 种条件下,AAP 含量均先增加后减小,通过计算发现对照实验 AAP 占 Fe/Al-P 的质量分数先是下降 3.3%,然后上升 1.1%,变化不大. 生物扰动条件下 AAP 占 Fe/Al-P 的质量分数先是上升 4.4%,然

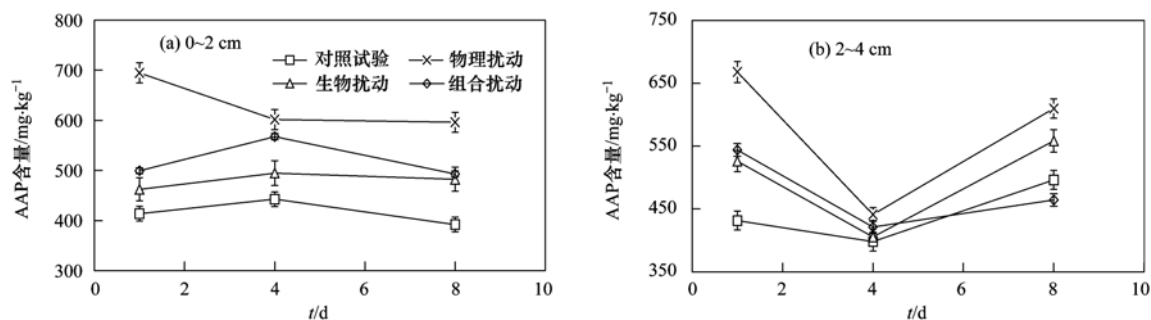


图6 0~4 cm AAP 数量分布变化规律

Fig. 6 Distributions of AAP in 0-4 cm of sediment

后下降 9.1%, 结合 0~2 cm Fe/Al-P 含量的增加 (图 5), 说明生物引灌能促进闭蓄态 Fe/Al-P 的生成. 组合扰动条件下 AAP 占 Fe/Al-P 的质量分数先是上升 8.0%, 然后下降 16.6%, 同时组合扰动下 0~2 cm Fe/Al-P 含量比生物扰动高, 表明组合扰动的协同作用对闭蓄态磷的形成更有利. 物理扰动下 AAP 含量呈降低趋势, 从侧面折射出物理扰动对闭蓄态磷的形成具有很大的促进作用. 说明这 3 种扰动都能把非闭蓄态磷转化闭蓄态的 Fe/Al-P 或者 Ca-P, 这与图 5 得到的结果一致. 图 6 (b) 显示, 与对照实验相比, 3 种扰动条件下 AAP

含量先不同程度地减少, 然后再上升, 究其原因, 应该是 2~4 cm 接近于生物扰动和组合扰动中生物作用优势区域, 从而使生成的 Fe/Al-P 更为稳定, 至于物理扰动下 AAP 大幅度的减少, 这或许是扰动促进了底泥中的 Fe、Al 等金属离子与间隙水或者上覆水中 DIP 接触几率, 并促使 DIP 被 Fe、Al 等金属离子捕捉而形成沉淀所致^[38], 进而吸收结合形成闭蓄态磷的情况.

2.5 底泥中 BAP 数量变化规律

BAP (生物有效磷) 通常表征底泥中易释放态磷的总和, 扰动也导致了 BAP 发生显著变化 (图 7).

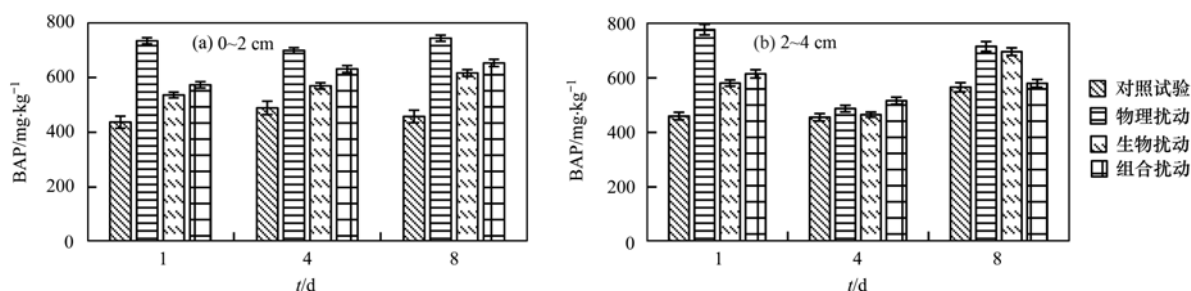


图 7 0~4 cm BAP 数量分布变化规律

Fig. 7 Distributions of BAP in 0-4 cm of sediment

图 7 (a) 显示, 第 1 d, 0~2 cm 底泥中对照实验、生物扰动、组合扰动、物理扰动 BAP 呈递增趋势, 生物扰动下 BAP ($536.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和组合扰动下 BAP ($573.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 明显高于对照实验 BAP ($436.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 对比第 1、4、8 d, 各种扰动条件下 BAP 的变化趋势并不大, 然而, 在外源磷的持续输入下, 有更多的磷被底泥吸收 (图 2). 计算可知, 物理扰动、生物扰动和组合扰动条件下 BAP 占 Tot-P 的质量分数分别从 77.56%、70.32% 和 73.71% (第 1 d) 降至 60.02%、63.39%、66.99% (第 4 d), 和 64.44%、67.36%、61.43% (第 8 d). 这表明, 随着外源磷输入, BAP 的形成量并未显著增加, 暗示了更多的外源磷转化为生物难利用态磷. 这主要是这 3 种扰动都可以增加底泥中溶解氧的渗入, 使得底泥中的 Fe^{2+} 被氧化成 Fe^{3+} , 从而增加了对磷的固定作用. 比较而言, 物理扰动下 BAP 占 Tot-P 的质量分数降低幅度最大, 这主要是因为物理扰动可以通过矿化作用和溶解氧渗入 2 种方式使 BAP 转化成难释放态磷, 并且规避了组合扰动下摇蚊幼虫构筑廊道而导致内源磷释放的风险.

3 结论

(1) 在外源磷输入下, 物理扰动能进一步促进上覆水中磷向底泥迁移, 而生物扰动和组合扰动的

作用与之相反.

(2) 物理扰动相比对照实验能减少间隙水中 DIP 的平均含量 (12.13%, 第 6 d 和第 10 d 平均值), 但减少程度不如生物扰动 (38.63%) 和组合扰动 (50.79%) 高.

(3) 3 种扰动都能促进 Fe/Al-P 的形成, 其中, 物理扰动的 Fe/Al-P 各层平均形成量最大, 3 种扰动都有利于 Ca-P 的生成, 物理扰动促进作用最大 (尤其 2~4 cm 段促进作用最为明显).

(4) 物理扰动下 AAP 含量一直在减小, 说明物理扰动明显促进了 AAP 向闭蓄态的 Fe/Al-P 或者 Ca-P 转化, 而生物扰动和组合扰动在一定程度上也能促进 AAP 向闭蓄态磷的转化.

参考文献:

- [1] Palomo L, Clavero V, Izquierdo J J, *et al.* Influence of macrophytes on sediment phosphorus accumulation in a eutrophic estuary (Palmones River, Southern Spain) [J]. *Aquatic Botany*, 2004, **80**(2): 103-113.
- [2] Edlund G, Carman R. Distribution and diagenesis of organic and inorganic phosphorus in sediments of the Baltic proper [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(6-7): 1053-1061.
- [3] Wen L, Recknagel F. In situ removal of dissolved phosphorus in irrigation drainage water by planted floats: preliminary results from growth chamber experiment [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, **90**(1): 9-15.
- [4] 李大鹏, 黄勇. 底泥扰动在水体富营养化发展进程中的作用

- [J]. 中国给水排水, 2009, **25**(14): 10-16.
- Li D P, Huang Y. Effect of sediment disturbance on development of water eutrophication[J]. China Water & Wastewater, 2009, **25**(14): 10-16.
- [5] Neal C, Neal M, Leeks G J L, *et al.* Suspended sediment and particulate phosphorus in surface waters of the upper Thames Basin, UK[J]. Journal of Hydrology, 2006, **330**(1-2): 142-154.
- [6] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖草型湖区沉积物再悬浮对水体营养盐的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 26-31.
- You B S, Wang T C, Fan C X, *et al.* Effects of sediment resuspension on aqueous nutrient loading in grass type zone of Lake Taihu[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 26-31.
- [7] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension[J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(7): 958-962.
- [8] 李大鹏, 黄勇, 袁砚, 等. 城市重污染河道底泥对外源磷的吸附和固定机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 96-101.
- Li D P, Huang Y, Yuan Y, *et al.* Mechanism of phosphorus adsorption and immobility by sediments in inner-city heavily polluted canal[J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 96-101.
- [9] 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.
- [10] Zhang L, Gu X Z, Fan C X, *et al.* Impact of different benthic animals on phosphorus dynamics across the sediment-water interface[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(11): 1674-1682.
- [11] Kristensen E. Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals[J]. Hydrobiologia, 2000, **426**(1): 1-24.
- [12] Gallepp G W. Chironomid influence on phosphorus release in sediment-water microcosms[J]. Ecology, 1979, **60**(3): 547-556.
- [13] Lewandowski J, Hupfer M. Effect of macrozoobenthos on two-dimensional small-scale heterogeneity of pore water phosphorus concentrations in lake sediments; a laboratory study[J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50**(4): 1106-1118.
- [14] Hansen K, Mouridsen S, Kristensen E. The impact of Chironomus plumosus larvae on organic matter decay and nutrient (N, P) exchange in a shallow eutrophic lake sediment following a phytoplankton sedimentation[J]. Hydrobiologia, 1997, **364**(1): 65-74.
- [15] Andersson G, Granéli W, Stenson J. The influence of animals on phosphorus cycling in lake ecosystems[J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 267-284.
- [16] Matisoff G, Fisher J B, Matis S. Effects of benthic macroinvertebrates on the exchange of solutes between sediments and freshwater[J]. Hydrobiologia, 1985, **122**(1): 19-33.
- [17] Mermillod-Blondin F, Nogaro G, Detry T, *et al.* Do tubificid worms influence the fate of organic matter and pollutants in stormwater sediments? [J]. Environmental Pollution, 2005, **134**(1): 57-69.
- [18] 李斌, 贾飞, 张银龙, 等. 沉积物间隙水溶解态磷和铁(II)高分辨同步分析方法的研究[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(3): 485-489.
- Li B, Jia F, Zhang Y L, *et al.* High-resolution and synchronous analyses of dissolved reactive phosphorus (DRP) and dissolved ferrous iron in pore waters of sediments [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(3): 485-489.
- [19] 李建金, 黄勇, 李大鹏, 等. 底泥不同悬浮方式对水体生物有效磷的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(10): 20-24.
- Li J J, Huang Y, Li D P, *et al.* Effect of different sediment resuspension modes on particulate phosphorus bioavailability in overlying water [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(10): 20-24.
- [20] 钱宝, 刘凌, 肖潇, 等. 环境微界面对湖泊内源磷释放的影响研究[J]. 水利学报, 2013, **44**(3): 295-301.
- Qian B, Liu L, Xiao X, *et al.* The effect of environmental micro-interface on internal phosphorus release of the lake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, **44**(3): 295-301.
- [21] 张雷, 商景阁, 王兆德, 等. 河坝扰动沉积物界面效应及其在水中代谢速率[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 1001-1006.
- Zhang L, Shang J G, Wang Z D, *et al.* Bioturbation effects of *Corbicula fluminea* on sediment-water interface progresses and its metabolic rate in water [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(6): 1001-1006.
- [22] 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 等. 物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 955-962.
- Shi X D, Li D P, Wang R, *et al.* Synergistic effect of physical and *Chironomus plumosus* combined disturbance on regeneration and transformation of internal phosphorus [J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 955-962.
- [23] 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.
- Li D P, Huang Y. Effect of disturbance intensity on phosphorus release and its transformation in the sediment from Taihu Lake [J]. Environmental Science, 2012, **33**(8): 2614-2620.
- [24] 费忠民, 李大鹏, 黄勇. 不同水温时底泥扰动对不同形态磷分布的影响[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(11): 13-16.
- Fei Z M, Li D P, Huang Y. Effect of sediment disturbance on the phosphorus forms migration under different water temperature [J]. Environmental Pollution and Control, 2009, **31**(11): 13-16.
- [25] Stookey L L. Ferrozine-a new spectrophotometric reagent for iron [J]. Analytical Chemistry, 1970, **42**(7): 779-781.
- [26] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters [J]. Analytica Chimica Acta, 1962, **27**: 31-36.
- [27] 武晓飞, 李大鹏. 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[J]. 环境科学, 2014, **35**(6): 2164-2170.
- Wu X F, Li D P. Bioavailable phosphorus on suspended solids of lake under short-term and repeated sediment disturbance [J]. Environmental Science, 2014, **35**(6): 2164-2170.
- [28] 商景阁, 张路, 王建军, 等. 中国长足摇蚊幼虫和霍普水丝蚓扰动下沉积物氧气特征分析[J]. 水生生物学报, 2011, **35**(4): 610-615.
- Shang J G, Zhang L, Wang J J, *et al.* Bioturbation effects of tanytus chinensis and limnodrilus hoffmeisteri on penetration and distribution of sediment oxygen[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,

- 2011, **35**(4): 610-615.
- [29] 武晓飞, 李大鹏, 汪明, 等. 反复扰动下加藻对不同形态磷相互转化的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1187-1196.
- Wu X F, Li D P, Wang M, *et al.* Migration and transformation of phosphorus forms under dual effect of sediment resuspension and the addition of algae[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(4): 1187-1196.
- [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] 文亦蒂, 艾有群. 南方红壤磷素化学研究进展和展望[J]. 云南农业大学学报, 2005, **20**(4): 534-538, 547.
- Wen Y F, Ai Y Q. Research and expectation on phosphorus transformation in southern red soils[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2005, **20**(4): 534-538, 547.
- [32] 商景阁, 张路, 张波, 等. 中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*)幼虫底栖扰动对沉积物溶解氧特征及反硝化的影响[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(5): 708-713.
- Shang J G, Zhang L, Zhang B, *et al.* Bioturbation effect of *Tanytus chinensis* larvae on denitrification rate and process in sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(5): 708-713.
- [33] 蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 等. 多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4203-4211.
- Cai S Z, Li D P, Wang R, *et al.* Impacts of multiple disturbance on migration and transformation of endogenous phosphorus in lake[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4203-4211.
- [34] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 底泥再悬浮条件下 pH 值对磷的形态及其生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(4): 1540-1544.
- Li D P, Huang Y, Li W G. Effect of different pH values on forms and bioavailability of sedimentary phosphorus under the conditions of sediments re-suspension[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(4): 1540-1544.
- [35] 王晶, 李大鹏, 李勇, 等. 沉积物高强度扰动下生物有效磷的变化规律[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(3): 10-14, 19.
- Wang J, Li D P, Li Y, *et al.* Variation of bioavailable phosphorus under sediment disturbance with high intensity[J]. Environmental Pollution and Control, 2013, **35**(3): 10-14, 19.
- [36] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 底泥预处理对磷等温吸附特征及磷形态的影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(3): 346-351.
- Li D P, Huang Y, Li W G. Influence of different sediments pretreatment on phosphorus adsorption characteristics and phosphorus forms[J]. China Environmental Science, 2007, **27**(3): 346-351.
- [37] 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.
- Li D P, Huang Y, Fan C X. Influence of intermittent sediment disturbance-sedimentation process on the bioavailable phosphorus in standing water[J]. Environmental Science, 2010, **31**(8): 1795-1800.
- [38] 刘广深, 许中坚, 徐冬梅. 酸沉降对土壤团聚体及土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持通报, 2001, **21**(4): 70-74.
- Liu G S, Xu Z J, Xu D M. Effects of acid deposition on soil aggregate and soil erodibility[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, **21**(4): 70-74.

CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)