

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第2期

Vol.33 No.2

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究	郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 秦延文, 胡林林 (337)
基于人体健康风险的水污染事件遗传性致癌物安全浓度研究	罗锦洪, 郑丙辉, 付青, 黄民生 (342)
湿地水环境健康评价方法及案例分析	李玉凤, 刘红玉, 郝敬峰, 郑因, 曹晓 (346)
北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价	单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 张洪 (352)
漳卫南运河流域水质时空变化特征及其污染源识别	徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 于伟东, 程燕平 (359)
黄河三角洲浅层地下水化学特征及形成作用	安乐生, 赵全升, 叶思源, 刘贯群, 丁喜桂 (370)
沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响	李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨 (379)
沉水植物生长期对沉积物和上覆水之间磷迁移的影响	王立志, 王国祥, 俞振飞, 周贝贝, 陈秋敏, 李振国 (385)
长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 黄国忠, 胡文 (393)
洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究	张文斌, 余辉 (399)
降雨对农家堆肥氮磷流失的影响及其面源污染风险分析	彭莉, 王莉玮, 杨志敏, 陈玉成, 乔俊婧, 赵中金 (407)
浅水湖泊水动力过程对藻型湖区水体生物光学特性的影响	刘笑菡, 冯龙庆, 张运林, 赵林林, 朱梦圆, 时志强, 殷燕, 丁艳青 (412)
基于半分析模型的太湖春季水体衰减系数 K_d (490) 估算及其遥感反演	刘忠华, 李云梅, 李瑞云, 吕恒, 檀静, 郭宇龙 (421)
基于 QAA 算法的巢湖悬浮物浓度反演研究	张红, 黄家柱, 李云梅, 徐伟凡, 刘忠华, 徐昕 (429)
好氧/厌氧潜流湿地结构工艺优化	李锋民, 单时, 李媛媛, 李扬, 王震宇 (436)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻活性氧自由基的影响	别聪聪, 李锋民, 李媛媛, 王震宇 (442)
Rac-及 S-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究	蔡卫丹, 刘惠君, 方治国 (448)
羟基自由基致死船舶压载水海洋有害生物研究	白敏冬, 张拿慧, 张芝涛, 陈操, 孟祥盈 (454)
天然菱铁矿改性及强化除砷研究	赵凯, 郭华明, 李媛, 任燕 (459)
零价铁降解 4-氯硝基苯动力学研究	廖娣劫, 杨琦, 李俊鎔 (469)
水体中氧氟沙星的光化学降解研究	邵萌, 杨桂朋, 张洪海 (476)
阿替洛尔在硝酸根溶液中的光降解研究	季跃飞, 曾超, 孟翠, 杨曦, 高士祥 (481)
吡啶在紫外光辐射下的生物降解	方苗苗, 阎宁, 张永明 (488)
蜜环菌漆酶对蒽醌类染料的脱色条件优化	朱显峰, 秦仁炳, 余晨晨, 范书军 (495)
ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究	曹玉娟, 张杨, 夏军, 徐虹, 冯小海 (499)
丝状菌污泥致密过程的强化条件研究	李志华, 孙玮, 姬晓琴, 王晓昌 (505)
亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究	罗远玲, 杨朝晖, 徐峥勇, 周玲君, 黄兢, 肖勇, 曾光明, 汪理科 (511)
我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究	李东玲, 吴烨, 周昱, 杜让, 傅立新 (518)
北京市 PM_{10} 自动监测网络优化研究	齐玲, 赵越, 谢绍东 (525)
道路绿化带对街道峡谷内污染物扩散的影响研究	徐伟嘉, 幸鸿, 余志 (532)
Fe^{II} (EDTA) 络合协同 RDB 去除 NO 废气效能及过程分析	陈浚, 杨宣, 於建明, 蒋轶锋, 陈建孟 (539)
UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶氮、磷元素释放的影响	宋新章, 张慧玲, 江洪, 余树全 (545)
干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳表观稳定性	唐国勇, 李昆, 孙永玉, 张春华 (551)
九龙江河口表层水体及沉积物中甲烷的分布和环境控制因素研究	郭莹莹, 陈坚, 尹希杰, 孙治雷, 邵长伟 (558)
秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH_4 通量特征及影响因素研究	姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广 (565)
我国典型非木浆造纸二噁英排放研究	王志芳, 丁琼, 王开祥, 吴昌敏, 曲云欢, 赵晓冬 (574)
典型电器工业区河涌沉积物中的多溴联苯醚空间和垂直分布	邱孟德, 邓代永, 余乐洹, 孙国萍, 麦碧娴, 许玫英 (580)
电子废物拆解区农业土壤中多氯联苯的污染特征	王学彤, 李元成, 张媛, 缪绎, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (587)
北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险	彭驰, 王美娥, 欧阳志云, 焦文涛, 陈卫平 (592)
上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价	柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 庄腾飞, 施振香, 卢小遮 (599)
海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价	尚林源, 孙然好, 王赵明, 汲玉河, 陈利顶 (606)
三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价	王业春, 雷波, 杨三明, 张晟 (612)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中细菌群落结构分析	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝健, 蔡明山, 许燕滨, 占星星 (618)
大庆聚驱后油藏内源微生物群落结构解析与分布特征研究	赵玲侠, 高配科, 曹美娜, 高梦黎, 李国强, 朱旭东, 马挺 (625)
不同碳源刺激对老化污染土壤中 PAHs 降解研究	尹春芹, 蒋新, 王芳, 王聪颖 (633)
应用电致化学发光分子探针技术对微小原甲藻的检测	朱霞, 甄毓, 米铁柱, 于志刚, 池振明, 路兴岚 (640)
软骨藻酸直接竞争 ELISA 方法的建立及优化	王茜, 程金平, 高利利, 董宇, 席磊 (647)
固相萃取-高效液相色谱法同时测定水体中的 10 种磺胺类抗生素	洪蕾洁, 石璐, 张亚雷, 周雪飞, 朱洪光, 林双双 (652)
五氯酚对 HeLa 细胞毒性及 DNA 损伤的研究	金帮明, 王辅明, 熊力, 张晓峰, 刘堰 (658)
建筑陶瓷碳计量与优化模型研究	彭军霞, 赵宇波, 焦丽华, 曾路, 郑为民 (665)
《环境科学》征订启事 (447) 《环境科学》征稿简则 (475) 信息 (524, 586, 605, 624)	

沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响

李大鹏, 黄勇, 李勇, 潘杨

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要: 为了探讨沉积物扰动时间(分别扰动 10 min 和 9 h)对悬浮物中形态磷转化的影响,以太湖月亮湾沉积物和上覆水为对象,开展室内模拟试验,分析悬浮物中不同形态磷间的转化过程. 结果表明,扰动时间越长,上覆水溶解性总磷(DTP)含量越高. 对照试验中,上覆水中 DTP 含量远高于扰动试验. 磷形态分析表明,随着试验时间的延长,扰动作用下(10 min, 9 h),铁铝结合态磷(Fe/Al-P)占总磷(Tot-P)的质量分数逐渐降低,第 10 d 分别降至 42.5% (10 min) 和 38.1% (9 h). 试验结束,则有所升高. 相反,钙结合态磷(HCl-P)占 Tot-P 的质量分数则在第 10 d 分别达到最大(48.9%, 10 min) 和 (53.7%, 9 h). 这说明沉积物扰动促进了悬浮物中易释放态磷向难释放态磷的转化.

关键词: 悬浮物; 扰动; 磷形态; 转化; 太湖

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)02-0379-06

Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids

LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, PAN Yang

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

Abstract: To examine the impact of sediment disturbance time (disturbance 10 min and 9h, respectively) on the transformation of phosphorus forms in suspended solids, the microcosm experiment was carried out with sediment and lake water from Yueliang estuary in Taihu Lake. The transformation of phosphorus forms in suspended solids was analyzed. The longer disturbance time, the greater of dissolved total phosphorus (DTP) in the overlying water was observed. However, in the control experiment, the concentration of DTP was higher than that in the disturbance experiment. Sequential fractionations indicted that mass fraction of Fe/Al-P to Tot-P in the suspended solids decreased gradually under disturbance conditions (10 min, 9 h) with increasing the experiment time, and then, the values decreased to 42.5% (10 min) and 38.1% (9 h) at 10 d, respectively. At the end, they increased slightly, compared with the values at 10d. However, mass fraction of HCl-P to Tot-P in the suspended solids increased gradually with time, and then went up to the highest (48.9%, 10 min and 53.7%, 9 h) value at 10 d. It suggested that sediment disturbance promoted the transformation of phosphorus forms in the suspended solids, especially from mobile phosphorus forms to refractory forms.

Key words: suspended solids; disturbance; phosphorus forms; transformation; Taihu Lake

浅水湖泊中,沉积物受风浪、湖流、底栖生物、人为等作用的影响十分明显,由此导致的沉积物悬浮会加快磷在沉积物与水系统间的交换^[1~3]. 然而,对于溶解性总磷和颗粒态磷而言,这种被加快的交换作用是显著不同的^[4,5]. 并且,扰动状态下,颗粒态磷与溶解性总磷之间存在着相互转化的趋势,而这与悬浮物中形态磷的数量分布规律存在着密切关系. 近年来,关于沉积物扰动持续时间对水体中磷含量的影响展开了一些研究^[6],但其对悬浮物中形态磷的数量分布规律却鲜见报道.

扰动作用下,颗粒态磷含量会显著增加,但溶解性总磷是否增加则争议颇多^[6,7]. 因为扰动不仅促进了间隙水中的溶解性总磷向水体释放,同时由于水体中悬浮物的显著增加,即对水体中溶解性总磷有着非常积极的影响^[8],但是,扰动停止后,在悬浮物沉降过程中,悬浮物上吸附的及其所含有的磷可

能会向水体释放^[9,10],因此,又会产生消极影响. 这种释放主要取决于悬浮物中磷形态的数量分布,因为不同形态磷的生物有效性显著不同^[11,12]. 以往研究中多数采用“1次扰动模式”^[5,7],这不足以阐明沉积物悬浮频繁状态下(太湖,沉积物每3d悬浮1次)磷的迁移转化规律,并且,李大鹏等^[13]在研究中发现,从上覆水中磷含量的变化规律来看,沉积物扰动之间存在着内在联系. 这使得研究“反复扰动模式”下磷的迁移转化规律更能代表浅水湖泊. 基于此,本研究从沉积物扰动持续时间的角度,探讨了“反复扰动模式”下悬浮物中磷形态的数量分布规律,以期为更好地揭示风浪扰动对浅水湖泊富营养

收稿日期: 2011-04-02; 修订日期: 2011-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908154, 50938005); 中国博士后基金项目(20100471417)

作者简介: 李大鹏(1975~),男,博士,主要研究方向为城市水体修复理论, E-mail: ustslp@163.com

化的作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

太湖是典型的浅水湖泊. 结合太湖沉积物分布以及富营养化状况, 在月亮湾选择了采样点(N 31° 24' 38. 8", E 120° 6' 4. 57"). 利用进口大口径柱状采样器(Rigo Co. 直径 110 mm 高 500 mm)采集无扰动柱状样, 并现场切得表层 1 cm 的沉积物样品, 立即用冰盒保存(4℃), 另用若干 25 L 聚乙烯塑料桶在采样点采集足够湖水作为试验系统的上覆水. 所有泥样和水样均在当天送至实验室. 低温 4℃ 条件下保存. 该采样点沉积物总磷(Tot-P)含量为 373. 91 mg·kg⁻¹, 含水率为 60. 43%, 烧失量为 3. 2%, 粒径在 4 ~ 63 μm 的颗粒超过 86%.

1.2 试验方法

9 个 5 L 圆形容容器作为试验装置($d = 17$ cm, $h = 25$ cm), 每 3 个为 1 组, 分别编号为 E0、E1 和 E2. 在每个容器中分别加 200 g 充分混匀的湿沉积物, 沉积物厚度约为 1. 2 cm, 并小心加入采集自沉积物采样点的湖水 3 L.

对于 E1, 采用恒速搅拌机对沉积物进行扰动($140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 使沉积物处于完全悬浮状态, 每天扰动 10 min, 随后沉积物自然沉降. 对于 E2, 采用恒速搅拌机对沉积物进行扰动($140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 使沉积物处于完全悬浮状态, 每天扰动 9 h (模拟太湖小风时长^[7]), 随后沉积物自然沉降. E0 为对照试验, 对沉积物和上覆水均不扰动.

试验从第 0 d 开始, 并于第 1 d 取样, 之后定期取样. 每次采样时间为扰动开始前, 即 E1 和 E2 中悬浮物分别自然沉降了 1 430 min 和 900 min. 每次采样位置为水面以下 10 cm 处, 采样量为 50 mL. 每次采完水样, 立即向容器中补充等量的湖水. 采集的水样采用 0. 45 μm 滤膜过滤后测定溶解性总磷(DTP).

在沉积物扰动过程中采集悬浮物样品用于形态磷的分析, 采样时间分别为第 1、5、10、20 d, 采样量分别为 500 mL, 采样后迅速补充等量体积的湖水. 由于 E0 中悬浮物含量过小, 因此在试验过程中(第 1、5、10 d)并未采集悬浮物. 悬浮物采用 0. 45 μm 滤膜过滤收集.

1.3 分析方法

水样中溶解性总磷(DTP)是将水样经过 0. 45 μm 滤膜过滤后的滤液消解后测定.

悬浮物中形态磷的数量分布参照文献[14]的方法. 该法将形态磷分为 4 种: 弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$); 铁铝结合态磷(Fe/Al-P); 钙结合态磷(HCl-P); 残渣磷(Res-P). 将上述 4 种形态磷含量相加即得到沉积物总磷(Tot-P)含量.

溶解氧(DO)和 pH 值分别通过便携式溶解氧测定仪(HQ30d)和数显 pH 计(pHs-3TC)测定. 沉积物的粒度采用激光粒度仪分析(ZetaPALS, USA).

1.4 统计分析

E0、E1 和 E2 中 DTP 含量、悬浮物中不同形态磷含量之间的区别采用单因子方差分析(ANOVA)进行检验. 所有统计分析利用 SPSS 13. 0 软件进行, 文中所有结果, 除上覆水中 DO、pH 值外, 均表示为平均值 ± 标准偏差($n = 3$)的形式.

2 结果与分析

2.1 扰动时间对 DO、pH 值的影响

沉积物扰动后, 上覆水中溶解氧(DO)和 pH 值均发生了显著改变(图 1、图 2). 图 1 显示, 在试验初期(1 ~ 3 d), 对照试验上覆水中 DO 略低于扰动试验(扰动 10 min、9 h). 随后, 3 组试验中 DO 浓度基本一致. 但由于扰动作用导致溶解氧的融入量必定高于对照试验, 这说明, 扰动作用下融入的溶解氧被悬浮物中的中小分子量有机物所消耗. 中小分子量有机物被氧化, 则导致悬浮物的结构组成以矿物构架为主的铁、硅等无机大分子胶体为其主要组成^[15]. 这有利于对水体中溶解性总磷的吸附. 然而, 由于中小分子量有机物被氧化, 则导致有机磷释放^[16], 增加水体溶解性总磷浓度.

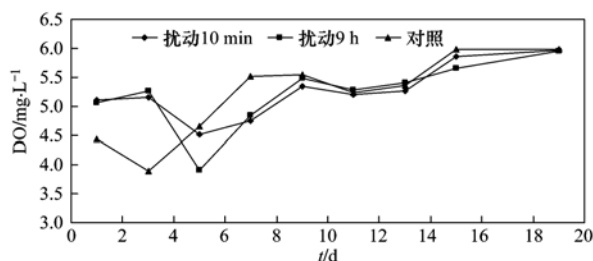


图 1 扰动时间对上覆水中 DO 的影响

Fig. 1 Effect of disturbance time on the content of DO in the overlying water

图 2 显示, 扰动作用下(扰动 10 min、9 h), pH 值明显小于对照试验. 随着试验时间的延长, 扰动作用下 pH 值呈下降的趋势, 随后趋于稳定. 其主要原

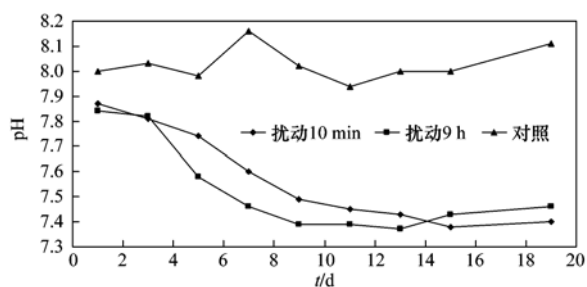


图2 扰动时间对上覆水中 pH 值的影响

Fig. 2 Effect of disturbance time on the content of pH in the overlying water

因可能与扰动强化了生物活动有关^[17]。另外, Kraal 等^[18]研究表明, 将 1 mol Fe^{2+} 氧化成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 会产生 2 mol H^+ 。因为上覆水中 DO 质量浓度较高(图1), 因此, Fe^{2+} 的氧化条件是具备的, 从而导致上覆水 pH 值降低。对照试验中 pH 值基本保持不变。

2.2 扰动时间对上覆水中 DTP 质量浓度的影响

沉积物扰动作用下, 显著改变了上覆水中 DO 浓度、pH 值以及悬浮物含量、尺度分布等因素^[19,20], 从而对上覆水中磷浓度也产生了显著影响(图3)。图3显示, 对照试验中 DTP 浓度显著高于扰动试验(扰动 10 min、9 h, $P < 0.0001$)。扰动 10 min 条件下, 第 1~9 d, 上覆水中 DTP 浓度保持在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从第 9 d 开始, 上覆水中 DTP 浓度低于检测限($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 试验中以 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 计。扰动 9 h 条件下, 试验初期(第 1~5 d), DTP 浓度明显升高, 高于扰动 10 min 条件; 随后降低, 尽管出现了几次 DTP 浓度低于检测限($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)的情况, 但分别在第 13 d、19 d 出现了高于检测限的情况。然而, 在对照试验中, DTP 浓度显著增加, 在第 5 d 达到最大值($0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 随后下降, 但仍然显著高于扰动试验。由于对照试验中, 沉积物并不悬浮, 上覆水中 DTP 浓度的降低主要是源于浓度梯度作用下的静态扩散以及悬浮物沉降过程中对 DTP 的吸附。另外, 微生物对 DTP 的吸附也不容忽视。

沉积物扰动过程中, 导致大量悬浮物进入上覆水, 其对水体中 DTP 而言, 其“积极作用”和“消极作用”是并存的, 最终会达到某种平衡状态。另外, 扰动作用下, 上覆水中 DO 质量浓度显著增加, 导致水体环境的氧化性逐渐增强, 因而, 悬浮物中处于还原态的铁锰等金属离子被氧化, 转变成吸附能力较强的氧化态^[21], 从而对水体中 DTP 的吸附能力越来越强。由此推断, 沉积物扰动时间越长, 悬浮物对 DTP 的吸附几率越大, 吸附能力越强, 上覆水中 DTP

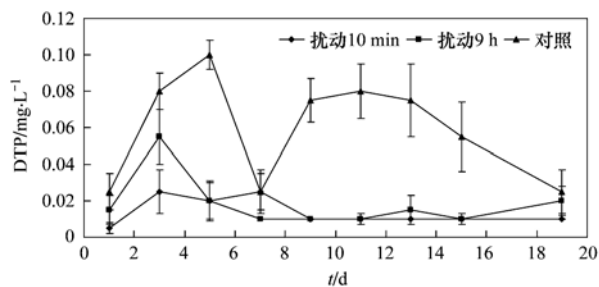


图3 扰动时间对上覆水中 DTP 的影响

Fig. 3 Effect of disturbance time on the content of DTP in the overlying water

质量浓度理应越低。

然而, 图3显示, 扰动 9 h 条件下, DTP 质量浓度不仅未显著低于扰动 10 min, 而且还略高。其原因可能有二: 一是悬浮物在水体中停留时间过长(9 h), 而 DTP 的吸附和释放应该处于动态平衡, 因此, 悬浮物表面吸附的磷以及悬浮物含有的磷释放可能性也越大。试验过程中发现, 扰动 9 h 条件下, 上覆水中悬浮物含量明显高于扰动 10 min。这也说明, 扰动时间越长, 对悬浮物的絮凝和沉降并不有利。这可能进一步延长了悬浮物在水体中的停留时间, 相应增加了颗粒态磷向 DTP 转化的可能性。尽管扰动作用下水体中悬浮物含量显著高于对照试验, 但水体中 DTP 质量浓度却明显较低。这说明扰动作用下悬浮物对 DTP 的吸附能力显著强于悬浮物释放 DTP 的能力。因为, 与对照试验相比, 扰动作用下, 悬浮物与水体接触的比表面积远远大于对照试验。充分说明, 扰动作用下悬浮物对 DTP 的吸附能力得到强化。二是扰动时间越长, 有机磷被矿化, 并转化成 DTP 的可能性越大^[16]。这就是扰动作用可能导致的“消极作用”。因此, 这是导致扰动 9 h 条件下 DTP 略高的一个重要原因。

悬浮物对 DTP 的吸附包括物理化学吸附和生物吸附^[19]。在本研究中, 无论在扰动作用下, 还是对照试验中, 这 2 种吸附机制都是存在的。但是, 本研究并没有分析系统中微生物含量的变化。因此, 很难确定物理化学吸附和生物吸附在悬浮物吸附 DTP 过程中所占的百分比。但 Richardson 等^[22]研究表明, 在试验开始的 24 h 内, 生物吸附与物理化学吸附作用同样重要。而孙晓杭等^[23]研究表明, 在水体中磷含量较高情况下, 生物吸附作用小于物理化学吸附作用。因此推断, 在较长的试验过程中, 物理化学吸附占主要地位。Cyr 等^[24]认为, 在磷含量较低的系统中, DTP 不增加并不意味着扰动没有促进内源

磷释放,因为释放的磷可能被快速生长的藻类或微生物吸附利用.与 Cyr 等^[24]的研究相比,本研究中对照试验上覆水中 DTP 要更高,而扰动试验上覆水中 DTP 也要高于 Cyr 等^[24]的研究.因此,综合上述研究,笔者推测,与生物吸附相比,物理化学吸附所占比重更大.这也说明,扰动作用下,DTP 被物理化学吸附的可能性更大一些.

在以往研究中,人们之所以认为扰动作用下沉积物对磷的物理化学吸附作用是限制水体中磷平衡浓度增加的主要原因,是因为沉积物扰动会加快溶解氧的融入,将水体中处于还原态的铁锰盐类氧化成氧化态,从而强化了悬浮物对溶解性总磷的吸附能力.然而,本研究中发现,对照试验中,溶解氧含量并不低于

扰动试验,甚至略高(图 1).因此,与溶解氧的融入相比,扰动可能更加重要.笔者在相关研究中发现,绝对厌氧条件下,对沉积物进行扰动,水体中 DTP 质量浓度显著增加,并远远高于非厌氧状态下对沉积物进行扰动试验.由于研究中并未对扰动状态下整个沉积物/水系统进行充氧,仅通过扰动作用下的大气复氧而已.因此推断,扰动是抑制上覆水中 DTP 浓度进一步升高的关键因素,而溶解氧则是 1 个辅助因素,但系统长期厌氧,则可能导致相反的作用.

2.3 扰动时间对悬浮物中形态磷数量分布的影响

由于沉积物扰动,使得水体中溶解氧、pH 值等环境因子发生改变,从而导致悬浮物中形态磷的数量分布发生了改变(图 4).

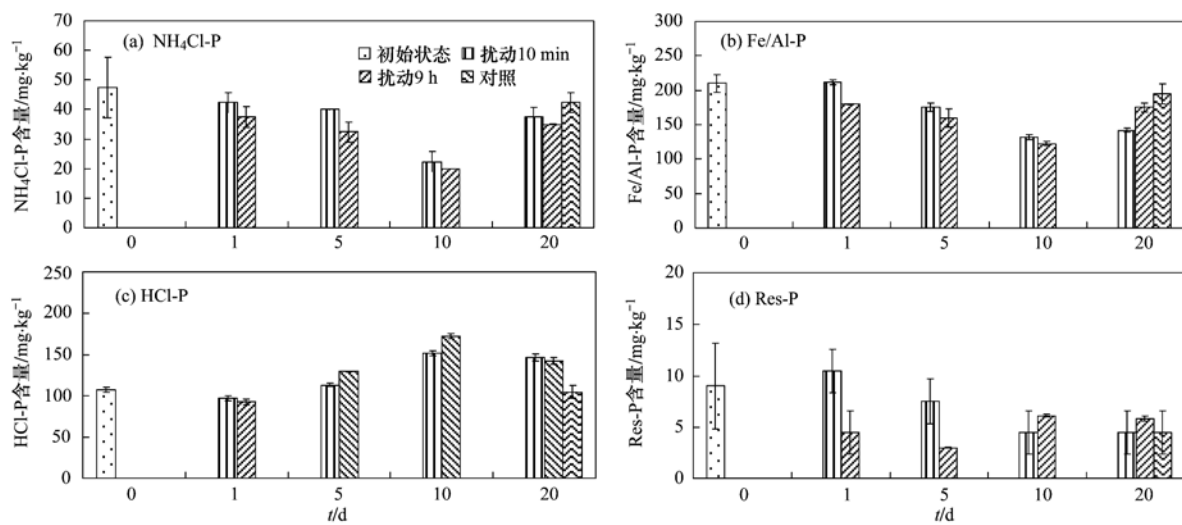


图 4 扰动时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响

Fig. 4 Effect of disturbance time on the phosphorus forms in the suspended solids

图 4 显示,随着试验时间的延长,不同形态磷的数量分布规律显著不同.扰动作用下,弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)在第 1~10 d 呈下降趋势,并在第 10 d 降至最低,分别为初始状态的 47.2% (扰动 10 min) 和 42.1% (扰动 9 h);但在第 20 d,又恢复到初始状态的水平.铁铝结合态磷(Fe/Al-P)的变化规律与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 基本一致.在试验过程中,扰动 9 h 条件下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Fe/Al-P 含量均略小于扰动 10 min 条件.相反,钙结合态磷(HCl-P)则随着试验时间延长而增加,并且,扰动 9 h 条件下, HCl-P 含量则高于扰动 10 min 条件.扰动作用下,残渣磷(Res-P)含量有所降低.但是由于 Res-P 含量较小(仅占 Tot-P 的 1.7% 左右),其对水体磷的贡献可以忽略.

研究认为,扰动过程中悬浮物对 DTP 吸附能力的强化主要源于处于还原状态的铁锰盐类被氧化,

并转化成具有较强吸附能力的氧化态^[21].然而,本研究中却发现,在试验的前 10 d 内, Fe/Al-P 并没有升高,而是显著降低(图 4),并且, Fe/Al-P 占 Tot-P 的质量分数也呈降低趋势.相对应地,整个系统中溶解氧质量浓度显著升高(图 1).说明悬浮物中铁锰盐类被转化成氧化态的条件是具备的.那么, Fe/Al-P 含量没有升高的一个原因是,扰动作用下,释磷能力较强的 Fe/Al-P 的化学键被打断而转化成溶解性磷酸盐和 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 释放^[9].另外,从相关磷酸盐热力学参数的角度来比较 Fe/Al-P 和 HCl-P 的形成^[15].磷酸铁的溶度积明显小于磷酸钙.太湖的上覆水和间隙水中,钙离子含量普遍较高.从而使得扰动状态下释放的磷酸盐更易于与钙离子结合,形成难溶的磷酸钙,并导致 HCl-P 含量增加(图 4).因此,扰动过程中释放的磷酸盐并未导致 DTP 升高

(图 3). 由于研究中,并未在扰动后立即测定水体中 DTP 浓度,而是在悬浮物分别自然沉降了1 430 min (扰动 10 min) 和 900 min (扰动 9 h)后取样测定,因此,释放的磷酸盐会被 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 、碳酸钙等吸附并沉降,从而导致水体中 DTP 含量并未升高. 从悬浮物上不同形态磷含量的数量分布规律也可以证明这一点(表 1). 从 Fe/Al-P 和 HCl-P 的数量分布来看, Fe/Al-P 占 Tot-P 的质量分数明显降低,而 HCl-P 占 Tot-P 的质量分数则明显增加(表 1). 尽管试验没有采用同位素示踪来表示磷在不同形态间的迁移转化,但从 Fe/Al-P 和 HCl-P 占 Tot-P 的质量分数可以初步推测,不同形态磷间发生了形态转化. 与 Rydin^[25]的研究对比,扰动状态下,磷的形态转化更

容易发生.

表 1 显示,试验的 1 ~ 10 d,扰动条件下,Fe/Al-P 有所降低,相应地,HCl-P 明显增加,从 Fe/Al-P 和 HCl-P 的数量分布来看,可以初步认为,Fe/Al-P 向 HCl-P 发生了转化. 但是,在第 20 d,Fe/Al-P 含量及其占 Tot-P 的质量分数有所增加,而 HCl-P 含量及其占 Tot-P 的质量分数有所降低. 其原因可能与系统中 pH 值的降低有关^[18]. 扰动状态下,pH 值从初始状态的 8.0 左右降至 7.4 左右,可能致使部分 HCl-P 释放. 另外一种解释是,系统中 pH 值的降低,可能源于 Fe^{2+} 的氧化,从而形成更难溶的晶型铁氧化物(crystalline oxides). 其对磷酸盐的持留能力更强^[18],导致 Fe/Al-P 含量增加.

表 1 不同形态磷占总磷的质量分数/%

试验编号	0 d		1 d		5 d		10 d		20 d	
	Fe/Al-P	HCl-P	Fe/Al-P	HCl-P	Fe/Al-P	HCl-P	Fe/Al-P	HCl-P	Fe/Al-P	HCl-P
扰动 10 min	56.2	28.7	58.5	26.9	52.2	33.6	42.5	48.9	42.9	44.4
扰动 9 h	56.2	28.7	57.2	29.4	49.2	40.0	38.1	53.7	48.8	39.8
对照试验	56.2	28.7	—	—	—	—	—	—	56.2	30.3

值得指出的是,研究中未探讨微生物对磷迁移转化的影响. 尽管有研究指出,微生物对于底泥吸附和持留磷的贡献与物理化学作用相比较小,但是,微生物在短时间内对磷的大量吸附及其死亡后对内源磷的贡献不能忽视.

3 结论

(1) 扰动作用下,上覆水中溶解性总磷(DTP)质量浓度明显低于对照试验. 扰动试验初期(1 ~ 3 d),扰动 9 h 条件下,DTP 质量浓度高于扰动 10 min 条件,扰动试验中后期(9 ~ 20 d),两者中 DTP 质量浓度均低于检出限. 相反,对照试验中,DTP 质量浓度明显高于扰动试验. 扰动作用下,DTP 质量浓度的降低可能与上覆水中溶解氧质量浓度增加有关. 然而,对照试验中,溶解氧浓度甚至略高于扰动试验,说明在有氧条件下,扰动对于悬浮物吸附磷的影响更大.

(2) 扰动时间对内源磷形态转化有明显影响. 扰动试验的前 10 d,Fe/Al-P 含量及其占 Tot-P 的质量分数有所降低,并且,扰动 9 h 条件下,Fe/Al-P 含量及其占 Tot-P 的质量分数低于扰动 10 min. 然而,HCl-P 的变化与 Fe/Al-P 恰好相反. 在第 20 d,Fe/Al-P 含量及其占 Tot-P 的质量分数有所增加,而 HCl-P 略有降低. 这可能与系统中 pH 值的显著降低

有关. 因此,从试验过程中 Fe/Al-P 和 HCl-P 的数量分布来看,可以初步认为,Fe/Al-P 向 HCl-P 发生了转化.

参考文献:

[1] 尤本胜,王同成,范成新,等. 太湖沉积物再悬浮模拟方法 [J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 611-617.

[2] 张雷,古小治,邵世光,等. 河蚬(*Corbicula fluminea*)扰动对湖泊沉积物性质及磷迁移的影响 [J]. 环境科学, 2011, 32(1): 88-95.

[3] Qin B Q, Zhu G W. The nutrient forms, cycling and exchange flux in the sediment and overlying water system in lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Science China (Earth Sciences), 2006, 49 (Supp. I): 1-13.

[4] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(7): 958-962.

[5] 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.

[6] 李大鹏,黄勇,李伟光. 底泥扰动对上覆水中磷形态分布的影响 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 279-284.

[7] 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.

[8] Nõges P, Kisand A. Horizontal distribution of sediment phosphorus in shallow eutrophic Lake Võrtsjärv (Estonia) [J]. Hydrobiologia, 1999, 408/409(0): 167-174.

[9] 范成新,张路,秦伯强,等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算 [J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(8):

- 760-768.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李大鹏, 黄勇. 底泥间歇扰动对静止水体磷迁移的累加效应 [J]. 环境化学, 2010, **29**(6): 1075-1078.
- [14] Hieltjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments [J]. Journal of Environmental Quality, 1980, **9**(6): 405-407.
- [15] 范成新, 张路, 包先明, 等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化—2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换 [J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 207-217.
- [16] 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.
- [17] Wang S R, Jin X C, Bu Q Y, *et al.* Effects of dissolved oxygen supply level on phosphorus release from lake sediments [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, **316**(1-3): 245-252.
- [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] 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**(1-2): 139-155.
- [20] 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.
- [21] 孙小静, 朱广伟, 罗淑葱, 等. 浅水湖泊沉积物磷释放的波浪水槽试验研究 [J]. 中国科学 D 辑, 2005, **35**(增刊 II): 81-89.
- [22] Richardson C J, Marshall P E. Processes controlling movement, storage, and export of phosphorus in a fen peatland [J]. Ecological Monographs, 1986, **56**(4): 279-302.
- [23] 孙晓杭, 张昱, 张斌亮, 等. 微生物作用对太湖沉积物磷释放影响的模拟实验研究 [J]. 环境化学, 2006, **25**(1): 24-27.
- [24] Cyr H, McCabe S K, Nürnberg G K. Phosphorus sorption experiments and the potential for internal phosphorus loading in littoral areas of a stratified lake [J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1654-1666.
- [25] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2037-2042.

CONTENTS

Safety Value of Contaminant in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	ZHENG Bing-hui, LUO Jin-hong, FU Qing, <i>et al.</i> (337)
Safety Concentration of Genotoxic Carcinogens in Water Pollution Accident Based on Human Health Risk	LUO Jin-hong, ZHENG Bing-hui, FU Qing, <i>et al.</i> (342)
A Quantitative Method and Case Analysis for Assessing Water Health	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (346)
Temporal and Spatial Variation of Nitrogen and Phosphorus and Eutrophication Assessment in Downstream River Network Areas of North Canal River Watershed ...	SHAN Bao-qing, JIAN Yu-xiang, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (352)
Spatiotemporal Variation Analysis and Identification of Water Pollution Sources in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, TANG Fang-fang, <i>et al.</i> (359)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Shallow Groundwater in the Yellow River Delta	AN Le-sheng, ZHAO Quan-sheng, YE Si-yuan, <i>et al.</i> (370)
Impacts of Sediment Disturbance Time on the Distribution of Phosphorus Forms in Suspended Solids	LI Da-peng, HUANG Yong, LI Yong, <i>et al.</i> (379)
Influence of Submerged Macrophytes on Phosphorus Transference Between Sediment and Overlying Water in the Growth Period	WANG Li-zhi, WANG Guo-xiang, YU Zhen-fei, <i>et al.</i> (385)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China	LU Shao-yong, XU Meng-shuang, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (393)
Vertical Distribution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Lake Hongze	ZHANG Wen-bin, YU Hui (399)
Effects of Rainfall on Nitrogen and Phosphorus Loss from Courtyard Compost and Its Risk of Nonpoint Source Pollution	PENG Li, WANG Li-wei, YANG Zhi-min, <i>et al.</i> (407)
Effects of Hydrodynamic Process on Bio-optical Properties in Algal-Dominated Lake Region of Shallow Lake	LIU Xiao-han, FENG Long-qing, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (412)
Estimation and Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient $K_d(490)$ in Lake Taihu in Spring Based on Semi-analytical Model	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, LI Rui-yun, <i>et al.</i> (421)
Monitoring the Total Suspended Matter of Lake Chaohu Based on Quasi-Analytical Algorithm	ZHANG Hong, HUANG Jia-zhu, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (429)
Optimization of Aerobic/Anaerobic Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Feng-min, SHAN Shi, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (436)
Effects of Allelochemical Dibutyl Phthalate on <i>Gymnodinium breve</i> Reactive Oxygen Species	BIE Cong-cong, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (442)
Toxicity Effects of <i>Rac</i> - and <i>S</i> -Metolachlor on Two Algae	CAI Wei-dan, LIU Hui-jun, FANG Zhi-guo (448)
Studies for Killing the Oceanic Harmful Organisms in Ship's Ballast Water Using Hydroxyl Radicals	BAI Min-dong, ZHANG Na-hui, ZHANG Zhi-tao, <i>et al.</i> (454)
Modification of Natural Siderite and Enhanced Adsorption of Arsenic	ZHAO Kai, GUO Hua-ming, LI Yuan, <i>et al.</i> (459)
Kinetic Study of 4-Chloronitrobenzene Degradation by Zero-Valent Iron	LIAO Di-jie, YANG Qi, LEE Chun-chi (469)
Photochemical Degradation of Ofloxacin in Aqueous Solution	SHAO Meng, YANG Gui-peng, ZHANG Hong-hai (476)
Photodegradation of Atenolol in Aqueous Nitrate Solution	JI Yue-fei, ZENG Chao, MENG Cui, <i>et al.</i> (481)
Biodegradation of Pyridine Under UV Irradiation	FANG Miao-miao, YAN Ning, ZHANG Yong-ming (488)
Optimization on Decoloration Conditions of Anthraquinone Dyes by Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	ZHU Xian-feng, QIN Ren-bing, YU Chen-chen, <i>et al.</i> (495)
Biosorption of Chromium(VI) by Waste Biomass of ϵ -Poly-L-lysine Fermentation	CAO Yu-juan, ZHANG Yang, XIA Jun, <i>et al.</i> (499)
Investigation on Enhanced Conditions for the Densification of Filamentous Sludge	LI Zhi-hua, SUN Wei, JI Xiao-qin, <i>et al.</i> (505)
Effect of Temperature on the Response Characteristics of Shortcut Nitrification Granular Sludge	LUO Yuan-ling, YANG Zhao-hui, XU Zheng-yong, <i>et al.</i> (511)
Fuel Consumption and Emission Inventory of Typical Construction Equipments in China	LI Dong-ling, WU Ye, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (518)
Optimization of PM ₁₀ Monitoring Network in Beijing	QI Ling, ZHAO Yue, XIE Shao-dong (525)
Effect of Greenbelt on Pollutant Dispersion in Street Canyon	XU Wei-jia, XING Hong, YU Zhi (532)
Investigation of Effect and Process of Nitric Oxide Removal in Rotating Drum Biofilter Coupled with Absorption by Fe ^{II} (EDTA)	CHEN Jun, YANG Xuan, YU Jian-ming, <i>et al.</i> (539)
Effect of UV-B Radiation on Release of Nitrogen and Phosphorus from Leaf Litter in Subtropical Region in China	SONG Xin-zhang, ZHANG Hui-ling, JIANG Hong, <i>et al.</i> (545)
Characteristics of Carbon Sequestration and Apparent Stability of New Sequestered Carbon in Forested Torrid Red Soil at Dry-Hot Valley	TANG Guo-yong, LI Kun, SUN Yong-yu, <i>et al.</i> (551)
Spatial Distribution of Methane in Surface Water and Sediment of Jiulongjiang Estuary and the Effect Environment factors of It	GUO Ying-ying, CHEN Jian, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (558)
Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn	JIANG Huan-huan, SUN Zhi-gao, WANG Ling-ling, <i>et al.</i> (565)
Study on Dioxin Emission for Typical Non-Wood Pulp Making in China	WANG Zhi-fang, DING Qiong, WANG Kai-xiang, <i>et al.</i> (574)
Horizontal and Vertical Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediment from a Typical Electrical Equipment Industrial Area	QIU Meng-de, DENG Dai-yong, YU Le-huan, <i>et al.</i> (580)
Characteristics of Polychlorinated Biphenyls in Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (587)
Characterization and Potential Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Green Space Soils of Educational Areas in Beijing	PENG Chi, WANG Mei-e, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (592)
Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai	LIU Yun-long, ZHANG Li-jia, HAN Xiao-fei, <i>et al.</i> (599)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments of Rivers in Northern Area of Haihe River Basin, China	SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, <i>et al.</i> (606)
Concentrations and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals at Different Water-level Altitudes in the Draw-down Areas of the Three Gorges Reservoir	WANG Ye-chun, LEI Bo, YANG San-ming, <i>et al.</i> (612)
Analysis of Community Structure on Sludge Aerobic/anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (618)
Research on Population Structure and Distribution Characteristic of Indigenous Microorganism in Post-polymer-Flooding Oil Reservoir	ZHAO Ling-xia, GAO Pei-ke, CAO Mei-na, <i>et al.</i> (625)
Study on Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) with Different Additional Carbon Sources in Aged Contaminated Soil	YIN Chun-qin, JIANG Xin, WANG Fang, <i>et al.</i> (633)
Detection of <i>Prorocentrum minimum</i> (Pavillard) Schiller with the Electrochemiluminescence-Molecular Probe	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (640)
Development of Direct Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay for the Determination of Domoic Acid	WANG Qian, CHENG Jin-ping, GAO Li-li, <i>et al.</i> (647)
Simultaneous Determination of 10 Sulfonamide Antibiotics in Water by Solid-phase Extraction and High Performance Liquid Chromatography	HONG Lei-jie, SHI Lu, ZHANG Ya-lei, <i>et al.</i> (652)
Effects of Pentachlorophenol on DNA Damage and Cytotoxicity of HeLa Cells	JIN Bang-ming, WANG Fu-ming, XIONG Li, <i>et al.</i> (658)
Modeling of Carbon Dioxide Measurement and Optimization on Building Ceramic Industry	PENG Jun-xia, ZHAO Yu-bo, JIAO Li-hua, <i>et al.</i> (665)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年2月15日 33卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 2 Feb. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行