

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响

郭俊锐, 李大鹏*, 刘焱见

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 为了探讨底泥扰动下上覆水中悬浮物粒径分布规律及该分布规律对水体中溶解性形态磷的影响, 以太湖梅梁湾上覆水和沉积物作为实验对象, 开展室内模拟实验. 结合乌氏粒级标准分析了扰动下的水体中粒径变化情况以及上覆水中不同磷形态的变化规律. 结果表明, 扰动后的水体中, 悬浮物粒径分布发生明显变化, 其中小粒径颗粒 ($0 \sim 10 \mu\text{m}$)、中粒径颗粒 ($10 \sim 20 \mu\text{m}$)、大粒径颗粒 ($\geq 20 \mu\text{m}$) 的平均占比分别升高、降低、不变. 说明中小粒径颗粒物质有向大粒径转化的趋势. 另外, 在磷形态方面, 随着粒径分布的周期性变化, DTP/TP、DIP/TP 存在同样的周期性上升规律, 数据显示 DTP、DIP 的变化并不明显, 这说明扰动导致悬浮颗粒物对于磷的持留能力提高. 另一方面, 扰动下 DTP/TP 和 DIP/TP 平均值分别为 19% 和 13%, 其远低于对照实验 (80% 和 69%), 说明扰动引起的小粒径聚集与絮凝成大粒径颗粒的现象有利于上覆水中溶解性形态磷的吸附与沉降, 并转化成颗粒态磷, 进而延缓水体富营养化的发展进程.

关键词: 太湖; 上覆水; 底泥扰动; 粒径; 磷形态

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1422-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.029

Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus

GUO Jun-rui, LI Da-peng*, LIU Yan-jian

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: To clarify the influence of the sediments disturbance on the particle size distribution of suspended solids, and the influence of particle distribution on the forms of dissolved phosphorous in the overlying water, the sediments and overlying water from Meiliang Bay, Taihu Lake, were used to conduct the indoor simulation experiments to investigate the particle size of suspended solids according to the Ubbelohde particle size criteria and the distribution of phosphorus compounds in the overlying water under the disturbance circumstances. The results indicated that the average proportions of small ($0 \sim 10 \mu\text{m}$), middle ($10 \sim 20 \mu\text{m}$) and large ($\geq 20 \mu\text{m}$) diameter particles presented different trends of increasing, decreasing and staying stable, respectively. It indicated the possible transformation of particle size of suspended solids from small-middle diameter to large diameter. In addition, the data of DTP/TP and DIP/TP showed a periodical variation with the corresponding periodical variety of particle diameter in suspended solids, while no obvious variety of DTP and DIP was observed. It suggested that disturbance enhanced the ability of phosphorus immobilization by suspended solids. On the other hand, the percentages of DTP in TP and DIP in TP were 19% and 13% under the disturbance, respectively, and they were obviously lower than those (DTP/TP, 80% and DIP/TP, 69%) in the control. It indicated that the transformation of particle size of suspended solids from small-middle diameter to large diameter due to disturbance was in favor of the adsorption and sedimentation of dissolved phosphorus. Accordingly, the formation of particle phosphorus was enhanced. Therefore, it delayed the development of eutrophication in the water body.

Key words: Taihu Lake; overlying water; sediment disturbance; particle size; phosphorus

湖泊富营养化仍是当今重要的环境问题之一. 而磷是引起湖泊富营养化的重要元素. 通常情况下, 湖泊受到风浪、湖流、底栖生物和人为作用的影响较为明显, 扰动导致的沉积物悬浮会加快磷在沉积物和上覆水中的交换^[1~3]. 过往研究中人们主要研究了如上述水温、pH 值、溶解氧等环境因子对于磷形态数量分布的影响而忽略了悬浮物的粒径这一影响因子. 悬浮物作为沉积物与水体中磷迁移转化的媒介, 其物理特性对于磷在水体中数量形态分布有着十分重要的影响. 但是, 近年来的研究针对风浪等原因而产生的底泥扰动引起的上覆水中悬

浮物粒径的变化对于磷的形态数量分布的影响并未进行过多的探讨. 一般来说, 风浪引起的底泥扰动使得磷在悬浮物和上覆水中不停的进行迁移转化^[4]. 在扰动结束后的沉降过程中着时间的推移悬浮物颗粒的粒径分布开始发生变化, 悬浮物粒径的变化使得比表面积产生变化, 从而会影响到整个系

收稿日期: 2015-09-07; 修订日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178284, 51278523); 江苏省第四期“333”工程项目; 江苏省“六大人才高峰”项目 (2013-JNHB-022)

作者简介: 郭俊锐 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: 604086290@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: ustslp@163.com

统中悬浮物对于水体中的磷的吸附释放能力,会对水体中的磷形态数量产生一定的影响^[5]。所以进行悬浮物粒径分布变化情况对于水体中磷形态数量变化的影响的研究对于完善水体中磷的迁移转化机制是很有必要的。

本实验以太湖梅梁湾的上覆水及沉积物作为实验对象,进行反复的物理扰动(模拟太湖等浅水湖泊沉积物频繁悬浮),分析了上覆水中各种形态磷的变化规律以及上覆水中悬浮物粒径的变化情况,旨在从上覆水中悬浮物粒径的角度说明物理扰动对于上覆水中磷形态数量分布的影响。

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,选择了梅梁湾的上覆水及沉积物作为本次的实验对象。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多的湖水用于实验系统的上覆水。所有泥样及水样均在当天送往实验室,低温 4℃ 下保存。

1.2 实验方法

取 2 个 5 L 烧杯作为实验装置,分别编号为 E1、E2。在每个容器中分别加入 200 g 充分混匀的湿沉积物,沉积物厚度约为 1.2 cm,并小心加入采集自采样点的湖水 4.5 L,加水时尽量不引起底部沉积物的扰动。

其中 E1 作为空白实验不进行扰动,E2 每天进行扰动实验。根据尤本胜等^[1]的研究表明太湖全年风速占比最高是小风风速。但是考虑到小风风速对湖泊水动力影响较小^[6]。为同时满足风速代表性与沉积物再悬浮的要求,本实验采用了颜润润等^[7]研究的中风风速 $5.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 对应的扰动频率 $150 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。该风速全年累计频率在 63.33% 以上^[1]。扰动装置采用类似尤本胜等^[1]研究中 Y 型旋桨式沉积物再悬浮发生装置,该装置中电动可调传动部分使得旋桨在垂向上对于底泥界面产生动力扰动作用,从而装置底部沉积物发生完全再悬浮。

实验从第 0 d 开始,每 3 d 采集一次扰动后的水样,共进行 5 次采样。采样具体时间为每 3 d 扰动结束之后的第 1、5、9、24 h,每次采集水面以下 10 cm 处水样 150 mL(其中 100 mL 用作粒径分析,50 mL

用于磷形态数量分析)。采样结束后立即向实验装置内补充等量的太湖原位湖水。

1.3 分析方法

水样中总磷(TP)含量采用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法测定;溶解性总磷(DTP)是将水样经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后的滤液消解后测定;颗粒态磷(PP)是指 TP 与 DTP 的差值;溶解性磷酸盐(DIP)含量是将水样经过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后直接测定;溶解性有机磷(DOP)为 DTP 与 DIP 的差值。

粒径测定仪器:Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪,适用于干湿样品的测定。该仪器具有粒度范围宽(量程为 $0.1 \sim 1\,000 \mu\text{m}$)、测试速度快(采样频率可达 $10\,000 \text{ 次}\cdot\text{s}^{-1}$)、分散效率高等优势。

2 结果与讨论

2.1 沉积物扰动对于水体中粒径变化的影响

为了有效合理并方便进行粒径分析,笔者将悬浮物粒径大小按照水体中粒径分布的实际情况分为 3 个档次。由于扰动后的水体中悬浮物中值粒径在 $10 \mu\text{m}$ 左右,最大粒径值不超过 $50 \mu\text{m}$,并且不同时段时粒径分布会发生变化及偏移。参照以往对于粒级分析常用的乌氏粒级标准(黏土 $\leq 3.79 \mu\text{m}$ 、细粉砂 $3.79 \sim 16.8 \mu\text{m}$ 、中粉砂 $16.8 \sim 32.57 \mu\text{m}$ 等)^[8],综合乌氏粒级标准将黏土及小于 $10 \mu\text{m}$ 的细粉砂划分为小粒径,另外一部分细粉砂及小于 $20 \mu\text{m}$ 的粗粉砂为中粒径,而中粉砂以上的部分划分为大粒径。以此划分不仅方便之后的粒径分布研究,并且具有一定的科学依据。由此后文中小粒径、中粒径、大粒径分别对应以上 3 个档次粒径值。

实验过程中粒径变化情况如图 1 所示。从对照两组实验可以看出,空白样 E1 中小粒径颗粒占比始终保持在 50% 左右且变化较为缓慢。表明太湖水体中的悬浮物是以小粒径的黏土及细粉砂为主^[9],并且自然条件下的水体中悬浮物粒径变化迟缓。而扰动样 E2 中,在物理扰动的作用下,水体中各档次的粒径分布均发生了显著的变化。但无论在 E1 还是在 E2 中小粒径的颗粒始终占据较大的部分,这一点对于两个实验组来说是一样的,其中 E1 中小粒径的颗粒平均占比(52.93%)要比 E2 中小粒径的颗粒平均占比(71.17%)要低 20% 左右,而大颗粒的占比都显得比较低,并且 E1 中大粒径的颗粒平均占比(21.41%)与 E2 中大粒径的颗粒平均占比(18.58%)相仿。一般情况下,水体中一旦产生扰动,在底泥中占绝对主导地位的小粒径颗粒通过再

悬浮进入水体必然会产生小粒径颗粒占比升高的现象(平均增幅约为34%),如图1中曾多次到达90%左右.并且,小粒径颗粒占比的升高肯定会导致中大粒径颗粒占比在一定程度上的降低.然而从上述粒径平均占比变化来看,大粒径颗粒平均占比降低并不明显.由此,笔者初步认为,沉积物再悬浮使得上覆水中悬浮物的粒径分布向着大颗粒推移.

单独观察E2中粒径变化,图1中可以清晰地发现,从每个采样日内来看,由于间歇扰动和沉降作用,E2中的大小粒径颗粒分布在每个采样日内呈现出周期性的变化,周期时长为24 h.小粒径颗粒在第1 h占比最高而后呈现逐渐降低的趋势在24 h处达到最低.大粒径物质在第1 h处占比最少而后呈现出逐渐升高的趋势在24 h处达到最高.这种规律变化的产生可以归咎于两点:一是每个采样日内的沉降过程中,沉降最多的就是本身系统中悬浮起来的含量最高的小粒径颗粒.小粒径的大量沉降使得本身占比不多的大粒径颗粒在系统中百分含量逐渐升高.二是物理扰动加大了着上覆水中悬浮颗粒相互碰撞摩擦的机会,从而聚集成更大的颗粒^[5].从整个实验的变化趋势来看,可以发现,E2中不论是小粒径或是大粒径的占比在整个实验过程中都有明显的变化趋势,相比于实验初始阶段,E2中小粒径颗粒占百分比有所降低,而大粒径颗粒占百分比升高.其中小粒径颗粒在实验末尾阶段降低至39%左右,大粒径颗粒增加至42%左右.

综合上述对于两组实验组间的对比,和扰动组E2自身的变化趋势及规律,可以看出,扰动加快了水体中悬浮物粒径的分布的变化,使得大粒径颗粒增多而小粒径颗粒分布含量有所下降.说明物理扰动可以在一定程度上强化水体中的絮凝作用,进而加快了水体中磷形态数量的迁移转化^[10].

值得注意的是,过高的扰动强度可能会打碎上覆水中颗粒物质而不利于絮凝的产生,而过低的扰动强度也不能提供上覆水中悬浮物足够的动能及碰撞机会使得小颗粒发生聚集.这说明不同扰动强度对于水体中悬浮物粒径分布情况影响不一样.对于本研究中设定的扰动强度来说,该扰动频率对应的风速占太湖全年风速的累计频率有63.33%以上,说明在该风速对应的扰动强度对于模拟太湖风浪扰动引起水体中颗粒物粒径分布变化具有一定的代表性.但是要更加全面地了解太湖在不同强度风浪下,水体中悬浮物粒径分布的变化及该变化对于形态磷产生的影响还需要更进一步地深入研究.

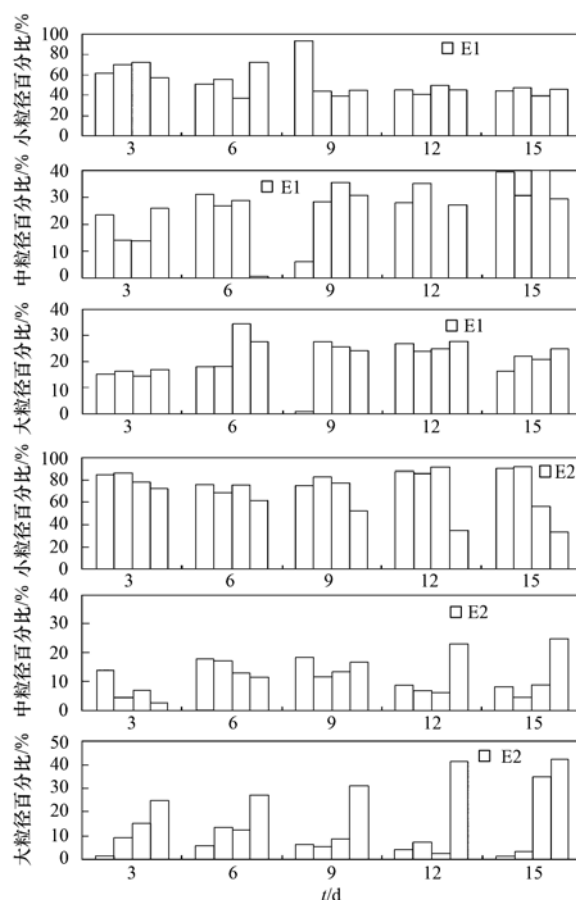


图1 上覆水中粒径变化

Fig. 1 Particle size variation of suspended solid in the overlying water

2.2 上覆水中形态磷的变化规律

上覆水中各种形态磷变化规律如图2所示.可以看出与实验初期相比,实验结束时的E1和E2中DTP、DIP都有所下降,而E1中各种形态磷变化较E2中的变化较为迟缓.并且整个实验过程中E2中DTP含量一直处于E1中DTP含量(DIP类似),E2中的DTP($0.0295 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和DIP平均水平($0.0191 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)只有E1中DTP含量($0.0546 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和DIP含量($0.0295 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)50%左右.从表面现象上来看,扰动直接致使水体中溶解性形态磷含量发生大量降低,分析其实质,一方面是扰动致使水体中溶解性形态磷的吸附点位增加,使得水体中溶解性形态磷发生物理、化学、生物吸附的几率上升^[11~14].另一方面根据太湖水体悬浮物沉降特性^[15],相同粒径的颗粒以絮凝方式进行沉降的沉降速率远大于以单颗粒方式进行沉降的速率,从而扰动促使的水体中絮凝的发生使得水体中悬浮物沉降速率大大增加导致被吸附的溶解性形态磷快速沉降至沉积物中.所以,扰动导致的沉积物再悬浮使

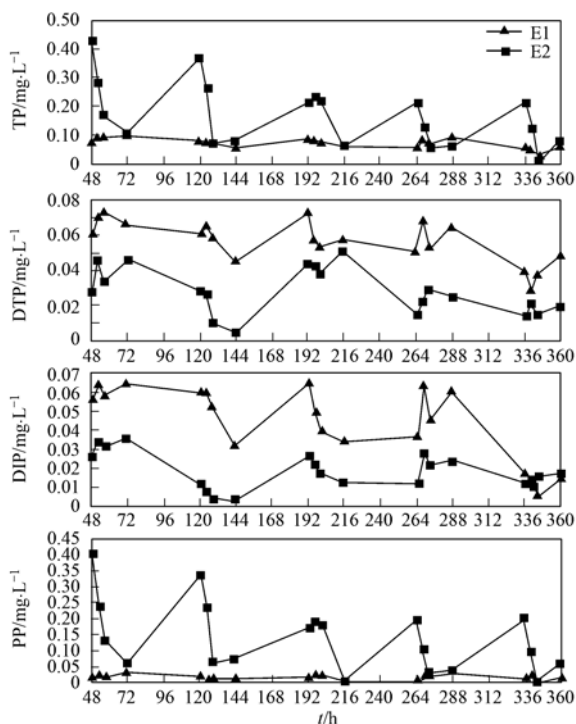


图2 上覆水中 TP、PP、DTP 和 DIP 变化

Fig. 2 Variations of TP, PP, DTP and DIP in the overlying water

得大量溶解性磷被吸附^[16]并以絮凝沉降方式快速沉降到沉积物中而使得上覆水中溶解性形态磷数量减少。由此,从表面上看,絮凝作用使得大颗粒增加的同时溶解性形态磷降低会使人误以为大颗粒的增多更利于溶解性形态磷的吸附,然而实际上这可能只是两种并行的现象而并没有直接联系,但是也不能排除扰动过程中,随着溶解氧的融入,导致金属离子被氧化,其附着在大颗粒物质上,相当于增加了其吸附能力的可能。

另外,在每次的采样日内,扰动样 E2 随着沉降

作用的时间增长悬浮颗粒物大量沉降,TP 和 PP 逐渐降低,并在每次的采样日内 24 h 处降低接近至空白样 E1,所以扰动并没有从根本上增加水体中 TP 含量,相反,整个实验阶段中 DTP、DIP 还有略微下降。根据 Cyr 等^[17]的研究,扰动过程中释放的溶解性磷会被生物快速吸附利用从而导致溶解性磷在水体中的含量不见变化,从图 2 可以看出,在扰动过后的沉降过程中 DTP 和 DIP 的释放也并不明显(采样日内第 1 h 和 24 h 磷含量相仿)。根据梁海清等^[18]的研究发现,细颗粒较粗颗粒有更强的释放磷的能力并且对水体富营养化影响大于粗颗粒物质,所以从颗粒物理特性上来讲,扰动致使小颗粒向大颗粒的转化一定程度上增加了悬浮物对于磷的持留能力。另外,根据高永霞等^[19]的研究也发现,随着扰动的持续和增强,水体中悬浮物浓度越高,对水体中磷的吸附能力也越高,从而使得水中溶解性磷的含量增高不显著甚至降低。所以综合本研究中的实验现象及前人的研究结论,笔者认为底泥扰动产生的絮凝作用使得 DTP 和 DIP 的释放不显著,其主要原因是扰动强化了颗粒物对磷的持留能力^[20~22]。

需要注意的是,迄今为止关于底泥扰动对于上覆水中溶解性形态磷是释放作用强还是吸附作用强并没有一个确切的结论。例如本研究中的吸附沉降理论就在一定程度上与朱广伟等^[23]的研究结论相悖。由于扰动分为振荡法、波浪水槽法、环形槽法各种不同的方式,研究方式的不同使得研究结论必然有所差异,并且各不同方式在模拟研究太湖风浪都有其突出的特点。本研究中采用的扰动方法和李大鹏等^[24]以往研究方式保持一致,其研究发现扰动作用下,溶氧增加使得上覆水中 Fe^{3+} 的含量增加并

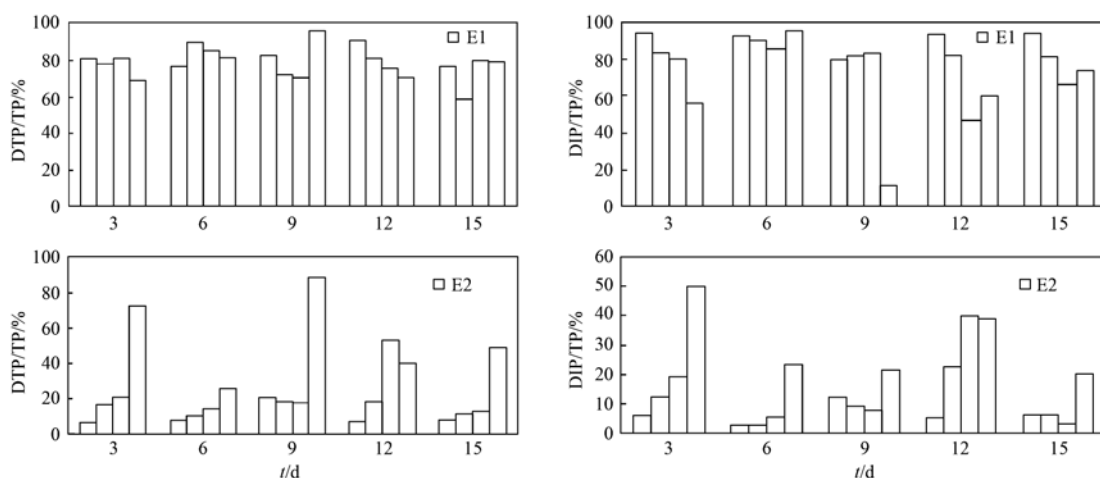


图3 上覆水中 DTP/TP、DIP/TP 的变化

Fig. 3 Variations of DTP/TP and DIP/TP in the overlying water

与溶解形态磷结合形成闭蓄态的 Fe/Al-P 沉降至沉积物中并固定下来,这是致使上覆水中溶解性形态磷降低的一个关键因素。

图 3 显示,在每个采样日内,随着图 1 中所显示的 E2 粒径呈现周期性的变化,E2 中 DTP/TP 和 DIP/TP 出现了同样的规律,即随着大粒径颗粒在每个规律周期内的占比逐渐升高,扰动样 E2 中 DTP/TP 和 DIP/TP 也逐渐升高.也就是说随着大粒径占比越来越高,溶解性形态磷对于 TP 的贡献力度越来越大,这种变化表明,在沉降过程中,溶解态磷降低速率明显小于颗粒态磷的降低速率^[25],扰动引起的水体中大粒径颗粒的含量及百分比升高在一定程度上对于磷的吸附沉降表现出消极的作用.但是,从整个的实验过程来看,相比于对照实验 E1 的 DTP/TP 和 DIP/TP 平均值 80% 和 69%,E2 的 DTP/TP 和 DIP/TP 平均值 19% 和 13% 要远远低于 E1,说明由于扰动导致的水体中小粒径颗粒的聚集与絮凝的强化,在长期效果上是使得上覆水中溶解性形态磷被吸附并沉降的,而后一直保持在较低的水平。

3 结论

(1) 物理扰动促使中小粒径颗粒向着大粒径颗粒转化,使得大粒径颗粒悬浮物在水体中的粒径分布占比增大。

(2) 扰动导致的沉积物再悬浮使得大量溶解态磷被吸附,降低了溶解态磷占总磷的百分比,并明显低于对照实验。

(3) 扰动加快了水体中磷向底泥转移,其主要是通过颗粒物絮凝沉降方式完成的。

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 in China Series D, 2006, 49(S1): 1-13.
- [4] 李大鹏,黄勇,李勇,等.沉积物扰动持续时间对悬浮物中磷形态数量分布的影响[J].环境科学,2012,33(2):379-384.
- [5] 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.
- [6] Jones R J, Knowlton M F. Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal processes[J]. Water Research, 2005, 39(15): 3629-3635.
- [7] 颜润润,逢勇,陈晓峰,等.不同风等级扰动对贫富营养下铜绿微囊藻生长的影响[J].环境科学,2008,29(10):2749-2753.
- [8] 张琰,陈晓玲,黄珏,等.鄱阳湖丰、枯水期悬浮体浓度及其粒径分布特征[J].华中师范大学学报(自然科学版),2014,48(5):743-750.
- [9] 刘玉真,成杰民,鲁成秀.不同来源太湖沉积物粒径分布及其对 Cu 的吸附特征[J].生态环境学报,2012,21(1):101-106.
- [10] 李大鹏,黄勇.扰动状态下 pH 值对内源磷生物有效性的影响[J].环境科学与技术,2012,35(8):16-19.
- [11] 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.
- [12] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, et al. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release[J]. Hydrobiologia, 2007, 584(1): 37-48.
- [13] Sun S J, Huang S L, Sun X M, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(3): 291-295.
- [14] House W A, Denison F H, Armitage P D. Comparison of the uptake of inorganic phosphorus to a suspended and stream bed-sediment[J]. Water Research, 1995, 29(3): 767-779.
- [15] 陈望,高光,李一平,等.太湖水体中悬浮物的静沉降特征[J].湖泊科学,2006,18(5):528-534.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 梁海清,王圣瑞,金相灿,等.不同污染程度沉积物不同粒级有机磷形态及其分布[J].中国农学通报,2007,23(3):380-385.
- [19] 高永霞,朱广伟,逢勇.消浪工程对太湖底泥再悬浮及营养盐释放的影响[J].长江流域资源与环境,2007,16(3):357-362.
- [20] 孙小静,秦伯强,朱广伟,等.持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J].环境科学,2007,28(6):1223-1229.
- [21] 李大鹏,黄勇,李伟光.底泥再悬浮状态下生物有效磷形成机制研究[J].环境科学,2008,29(7):1824-1830.
- [22] 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.
- [23] 朱广伟,秦伯强,张路,等.太湖底泥悬浮中营养盐释放的波浪水槽试验[J].湖泊科学,2005,17(1):61-68.
- [24] 李大鹏,王晶,黄勇.反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换[J].环境科学,2013,34(6):2191-2197.
- [25] 李大鹏,黄勇.底泥扰动状态下内源磷释放过程模拟研究[J].环境工程学报,2010,4(5):993-997.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行