

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
炔雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆隽鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 迟建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧灰渣浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换

李大鹏, 王晶, 黄勇

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要:以太湖梅梁湾和月亮湾沉积物为研究对象, 分析了沉积物反复扰动下磷在沉积物、悬浮物、上覆水间的交换规律。结果表明, 反复扰动下, 上覆水中 TP 和 PP 浓度降低; DTP 则是在第 8 d 达到平衡浓度, 分别稳定在 $0.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (梅梁湾) 和 $0.039 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (月亮湾); DIP 则发生了释放, 随后降低, DIP 的释放主要与沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量最大有关。第 8 d 达到平衡浓度, 分别稳定在 $0.013 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (梅梁湾) 和 $0.028 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (月亮湾)。与上覆水中溶解氧的变化规律吻合。另外, 扰动过程中梅梁湾上覆水 DTP 和 DIP 均明显高于月亮湾。由于扰动作用, 悬浮物和沉积物上不同形态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 HCl-P) 数量分布发生明显变化。扰动过程中, 梅梁湾悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 HCl-P 含量逐渐降低, 而同一时间段上覆水中不同形态磷含量同样降低, 但沉积物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 HCl-P 含量逐渐增加。尽管月亮湾的趋势不如梅梁湾显著, 但总体趋势一致, 暗示悬浮物在磷交换过程中所起的媒介作用。

关键词: 扰动; 悬浮物; 磷; 摩擦力; 太湖

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2191-07

Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance

LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong

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

Abstract: The variation of phosphorus (P) exchange between suspended solids, sediments and overlying water under repeated disturbance was investigated, with the sediments from Meiliang Bay (MLB) and Moon Bay (MB) as materials. The results showed that the concentrations of total P (TP) and particulate P (PP) decreased under repeated disturbance. Dissolved total P (DTP) reached equilibrium at 8 d, and was kept at $0.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (MLB) and $0.039 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (MB). On the contrary, dissolved inorganic P (DIP) increased in the overlying water, due to the highest concentration of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ in the sediments, and then decreased. It reached equilibrium at 8 d, and was kept at $0.013 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (MLB) and $0.028 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (MB). It was coincided with the variation of DO. In addition, the concentrations of DTP and DIP in MLB were higher than those of MB under repeated disturbance. The distribution of P forms ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$, Fe/Al-P , HCl-P) changed due to repeated disturbance. During the repeated disturbance, the concentrations of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, Fe/Al-P and HCl-P decreased gradually. At the same time, the concentrations of TP, PP, DTP and DIP decreased in the overlying water, but the $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, Fe/Al-P , HCl-P increased in the sediments gradually. The trend in MB was not obvious, but the trend was the same as MLB. The results suggested that suspended solids were the medium in the phosphorus exchange between sediments and overlying water under repeated disturbance.

Key words: disturbance; suspended solids; phosphorus; friction; Taihu Lake

浅水湖泊中, 风浪、底栖生物、湖流、人为等干扰作用导致的沉积物扰动是磷在沉积物/水系统中交换的重要影响因素, 进而对浅水湖泊富营养化发展进程起着重要作用^[1,2]。然而, 迄今为止, 人们对沉积物扰动是导致了内源磷“释放”还是“吸附”仍存在诸多争议。人们从上覆水水质^[3]、沉积物特性^[4]、环境因素^[5]、扰动特性^[6]等多个方面对沉积物扰动下内源磷的交换规律进行探讨, 试图揭示沉积物扰动对内源磷释放或吸附的内在机制, 以期对浅水湖泊富营养化防治策略制定提供理论依据。

以往研究可以大致分为 2 个阶段, 一是研究沉积物扰动下上覆水中不同形态磷 (总磷、溶解性总磷、溶解性磷酸盐、颗粒态磷、生物有效磷、胶体

磷等) 的变化规律^[7~10]; 二是不仅研究上覆水中磷的变化规律, 同时研究悬浮物或沉积物中内源磷形态数量分布、生物有效性的变化规律^[11~13]。较前者而言, 后者将更有可能阐明内在机制。因为上覆水中磷的变化规律与悬浮物或者沉积物密切相关, 沉积物中的颗粒物质进入水体成为悬浮物, 内源磷在水动力作用下或者环境因素影响下进入上覆水, 或者上覆水中磷被悬浮物捕捉和吸附, 随悬浮物沉降而进入沉积物。尽管悬浮物、沉积物、上覆水三

收稿日期: 2012-08-28; 修订日期: 2012-11-11

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

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

者之间密切相关,但未有研究从三者的角度来探讨扰动下磷的交换规律。

本研究以太湖梅梁湾和月亮湾沉积物为对象,采用沉积物反复扰动(模拟浅水湖泊沉积物频繁悬浮)的方法,分析了磷在沉积物、悬浮物、上覆水三者间的交换规律,试图从沉积物、悬浮物内源磷形态数量分布的角度来阐明上覆水中不同形态磷的变化规律,以期丰富浅水湖泊磷迁移转化理论体系提供理论和数据支持。

1 材料与方法

1.1 沉积物与上覆水的采集

试验用的沉积物于2012年3月采自太湖梅梁湾(N 31°31'33.9", E 120°12'35.2")和月亮湾(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,用冰盒保存(4℃)送至实验室。同时取采样点上覆水100 L。当天将沉积物与上覆水带回实验室,并开始沉积物扰动试验。

1.2 试验方法

取4个5 L圆形容容器作为试验装置($d=17$ cm, $h=25$ cm),分为2组,每组各设2个平行样。在第1组中分别加入取自梅梁湾的湿沉积物200 g,并小心加入梅梁湾上覆水2.5 L。第2组分别加入取自月亮湾的湿沉积物200 g,并小心加入月亮湾上覆水2.5 L。采用恒速搅拌机对沉积物进行扰动($200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),使悬浮物浓度处于 $(500\pm10)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (模拟太湖大风浪过程^[14]),目的是强化磷在沉积物及上覆水间的交换),每天扰动1 h,随后沉积物自然沉降。

试验从第0 d开始,并间隔一定时间取样测定上覆水中总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性磷酸盐(DIP)浓度。同时监测溶解氧(DO)、pH值的变化。采样位置为水面以下10 cm处,采样量为100 mL。每次采完水样,立即向容器中补充等量上覆水。

并于第7、14、21 d取沉积物和悬浮物用于内源磷形态分布的测定,其中悬浮物为当天扰动后立即采集,而沉积物则为当天扰动,并沉降24 h后采集。试验于第21 d结束。

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 μm 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 μm 滤膜过滤后直接测定;溶解性有机磷(DOP)为DTP与DIP差值。

沉积物中形态磷的数量分布参照文献[15]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)。沉积物上总磷(Tot-P)以上述4种形态磷之和表示。藻类可利用磷(AAP)参照Zhou等^[16]总结的方法。

上覆水中溶解氧(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)。

沉积物含水率的定义为105℃烘干12 h的质量损失,有机质含量的定义为550℃灼烧2.5 h的质量损失。

1.4 统计分析

本研究中涉及的梅梁湾和月亮湾上覆水中DO、pH值、TP、PP、DTP、DIP以及悬浮物和沉积物中的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 HCl-P 、 Res-P 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,文中所有结果均表示为平均值 $\pm$ 标准偏差($n=2$)的形式。

2 结果与讨论

2.1 沉积物与上覆水特点分析

取自梅梁湾与月亮湾的沉积物及上覆水的理化性质见表1和表2。表1显示,与月亮湾相比,梅梁湾沉积物中有机质,总磷含量更高。内源磷形态分析表明,梅梁湾沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量最高,占Tot-P质量分数高达58%; Fe/Al-P 次之,21.9%; HCl-P 再次之,19.5%。而月亮湾中,这3种形态磷的质量分数依次为53.2%、25.7%、21.2%。由于2种沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量均为最高,说明其内源磷极易释放^[17],当沉积物受到扰动时,进入水体的颗粒态磷的生物有效性也会较高,对水体富营养化具有潜在风险。

沉积物粒径分析显示,梅梁湾沉积物中粒径较大颗粒(50~250 μm)和中小粒径颗粒(<50 μm)所占质量分数基本一致,而月亮湾中则是中小粒径颗粒所质量分数(77.85%)明显高于较大颗粒。从本研究来看,梅梁湾与月亮湾中小粒径颗粒数量明显低于太湖中的五里湖和东太湖^[4]。

上覆水水质指标显示(表2),月亮湾上覆水中 TP、DTP、TN、叶绿素 a 等含量均高于梅梁湾. 尽管梅梁湾沉积物中含有更高的 Tot-P,易于释放的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量也最高,但上覆水中磷含量却低于月亮湾. 这可能与藻类数量,悬浮物含量(月亮湾中悬浮物含量 $11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,高于梅梁湾)等有关. 另外,可能也与梅梁湾受到风浪扰动更为强烈、频繁有关^[14].

表1 梅梁湾和月亮湾沉积物的理化性质

地点	含水率 /%	有机质 /%	pH	Tot-P / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	粒径分布/%		
					<5 μm	5 ~ 50 μm	50 ~ 250 μm
梅梁湾	53.14	4.9	6.23	1 052	8.49	39.56	51.95
月亮湾	39.01	2.9	7.33	817	25.53	52.32	22.14

表2 梅梁湾和月亮湾上覆水的理化性质

地点	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DTP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	叶绿素 a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
梅梁湾	9.7	8.03	0.105	0.055	3.09	6.07
月亮湾	8.9	8.31	0.140	0.065	4.01	12.15

2.2 上覆水中 DO 和 pH 值的变化

沉积物在反复扰动条件下,上覆水中溶解氧(DO)和 pH 值均有所变化(图1).

图1(a)显示,在沉积物反复扰动过程中,2个湖泊上覆水中 DO 均呈先降低(明显低于初始状态)再升高的趋势. 梅梁湾上覆水中 DO 含量一直低于月亮湾($P<0.001$),但试验后期(14~21 d),两者在 DO 含量方面的差异逐渐减小. 从图1(a)来看,两者 DO 含量均以第7 d 为分界点,第8 d,上覆水中 DO 含量逐渐升高. 前7 d,梅梁湾和月亮湾上覆水中 DO 平均浓度分别保持在 $5.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,第10~21 d 则分别保持在 $6.22\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 两者之间 DO 间的差异主要源于梅梁湾沉积物中有机质含量较高(4.9%),随着反复扰动过程的持续,沉积物中小分子有机物的氧化,使得两者上覆水中 DO 差异逐渐降低. 图1(b)则显示,月亮湾上覆水中 pH 值一直略高于梅梁湾($P<0.05$). 这与两者沉积物 pH 值存在密切关系,沉积物扰动后,大量的颗粒物进入水体,致使上覆水 pH 值降低.

2.3 上覆水中不同形态磷的变化

由于反复扰动导致大量颗粒物质进入上覆水,同时也改变了上覆水中 DO、pH 值,由此导致上覆水中不同形态磷(TP、PP、DTP、DIP)也发生了明显变化(图2).

图2(a)和图2(b)显示,与初始状态相比,梅梁湾和月亮湾上覆水中 TP 和 PP 均呈降低趋势. 月亮湾除了在第5 d TP 和 PP 明显升高外,其余时间,与梅梁湾上覆水中 TP 和 PP 的变化规律基本一致. 第2 d,梅梁湾和月亮湾上覆水中 TP 即达到平衡状态,分别稳定在 $0.055\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (去除第5 d),而 PP 则分别在第3 d 和第1 d 达到稳定状态,分别稳定在 $0.016\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.012\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (去除第5 d). 可以看出,沉积物反复扰动状态下,月亮湾上覆水中 PP 含量低于梅梁湾. 这归因于月亮湾沉积物含有更高比例的中小粒径颗粒物质(77.85%). 反复扰动导致中小粒径的颗粒物质相互碰撞,更容易黏附形成大颗粒物质而沉降^[18,19],从而导致 PP 含量降低. 图2(a)和图2(b)说明,沉积物反复扰动

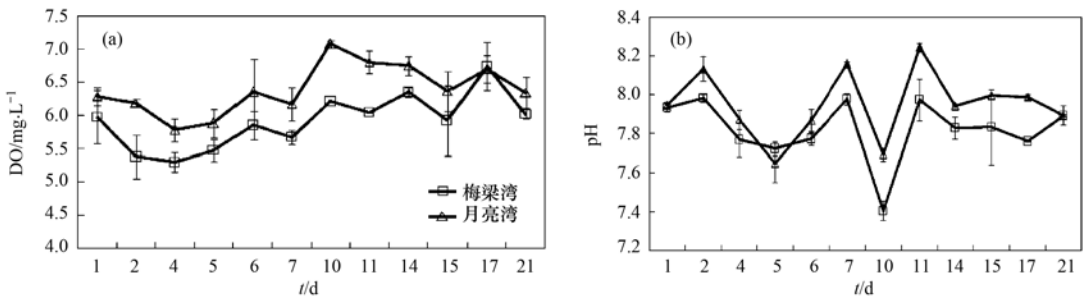


图1 上覆水中 DO 和 pH 值的变化规律

Fig. 1 Variation of DO and pH in the overlying water

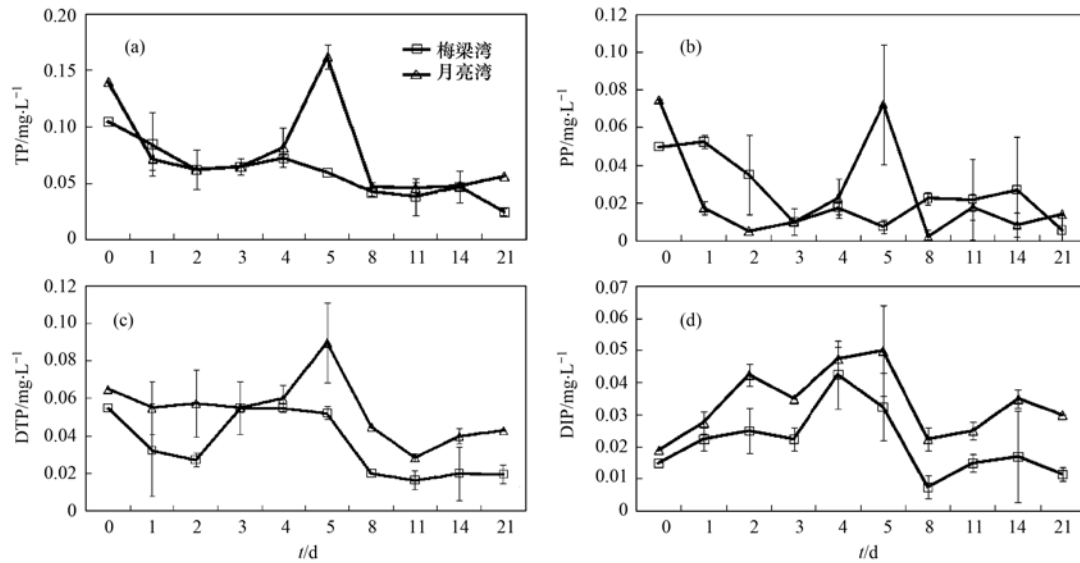


图2 上覆水中不同形态磷的变化规律

Fig. 2 Variation of phosphorus forms in the overlying water

降低了上覆水中 TP 和 PP 浓度. 同时也说明, 沉积物反复扰动降低了 PP 在水体中的停留时间. 由此, 抑制了颗粒态磷向溶解性磷的转化, 从而降低水体富营养化的潜在风险.

图 2(c) 表明, 梅梁湾和月亮湾上覆水中的 DTP 变化规律基本一致, 而且, 梅梁湾上覆水中 DTP 均处于低于月亮湾的水平 ($P < 0.01$). 对于梅梁湾上覆水而言, 第 1~2 d, DTP 明显降低, 但在第 3~5 d, DTP 有所升高, 保持在 $0.054 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (平均值) 的水平, 与初始水平相当; 随后 DTP 降至更低水平, 直到试验结束, 一直稳定在 $0.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而对于月亮湾上覆水而言, 第 1~4 d, DTP 稳定在 $0.057 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 低于初始水平 ($0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 除第 5 d 达到最高值 ($0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 外, 随后明显降低, 稳定在 $0.039 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 总体而言, 沉积物反复扰动致使月亮湾上覆水中 DTP 持续降低, 而梅梁湾除了第 3~5 d 外, DTP 呈降低趋势, 并且降低幅度高于月亮湾.

试验过程中, 月亮湾上覆水中 DTP 含量明显高于梅梁湾 ($P < 0.01$). 其原因与沉积物性质以及上覆水性质密切相关. 与梅梁湾相比较而言, 月亮湾沉积物含有更高比例的中小粒径颗粒物质, 在扰动状态下, 应该更有利于对 DTP 的吸附, 使其转化成 PP, 但是当中小粒径颗粒物质进入水体后, 在水动力^[20]以及颗粒物质间摩擦力作用下, 而中小粒径颗粒物质比例越高, 其接触几率越高, 产生颗粒物质间摩擦力的几率越大, 从而致使内源磷释放, 转化成

DTP[图 2(d) 也显示, DIP 明显发生释放]. 由于扰动过程中融入的溶解氧会氧化沉积物中的有机质, 从而使得部分内源磷释放, 导致 DTP 升高. 这可能是另一种解释. 当梅梁湾和月亮湾上覆水中 DTP 在第 8 d 发生明显降低时, 此时与上覆水中 DO 明显升高的时间完全吻合[图 1(a)]. 另外, 月亮湾上覆水中叶绿素 a 含量更高, 由于采样时间为春季, 太湖藻类仅少量生长, 更多的是来自于沉积物中休眠的藻类细胞^[21]. 在实验室中, 由于温度更高(与太湖相对比), 从而激活了更多的藻类细胞, 其不仅通过“泵吸”作用^[20]促进了沉积物中 DIP 的释放[图 2(d)], 而且藻类死亡也形成了更多的溶解性有机磷(DOP). 尽管从颗粒物质粒径、上覆水性质等方面做了分析, 但为揭示月亮湾沉积物为何在含有更高比例中小粒径颗粒物质的前提下, 上覆水中 DTP 含量仍高于梅梁湾, 笔者认为需要更多的有关沉积物性质(如金属离子)、内源磷转化机制等方面的综合分析.

图 2(d) 显示, 梅梁湾和月亮湾上覆水中 DIP 均发生了明显释放, 并分别达到最高值 ($0.043 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 第 8 d 开始降低, 并保持在稳定状态 ($0.013 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.028 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 并且, 梅梁湾上覆水中 DIP 含量明显低于月亮湾 ($P < 0.001$). DIP 的释放主要来源于沉积物含有较高比例的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 解析和有机质氧化. 对于前者而言, 本研究模拟了太湖 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下沉积物悬浮情况, 因此, 较大的扰动强度下产生的水动力和颗粒物

质间的摩擦力较大,从而使得吸附在颗粒物质表面的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 解析。另外,对于其它形态磷如 Fe/Al-P 、 HCl-P 、 Res-P 而言,化学键力远小于较大扰动强度下产生的水动力,在中小粒径颗粒物质含量较高的月亮湾,相似粒径颗粒物质间接产生的摩擦力远远大于形态磷间的化学键力,迫使形态磷的化学键断裂^[20],从而使得内源磷释放,这也可能是造成上覆水中 DIP 含量明显高于梅梁湾的一个重要原因。由于较高强度的扰动,使得 DIP 在 DTP 中所占比例(梅梁湾 37.5% ~ 90.9%; 月亮湾 50% ~ 87.7%)明显高于初始状态(梅梁湾 27.3%; 月亮湾 29.2%)。

2.4 悬浮物和沉积物上不同形态磷的变化

沉积物扰动会导致中小粒径颗粒物质进入水体,形成悬浮物,由于扰动状态下,环境因素、水动力、颗粒物质间摩擦力的作用,悬浮物上磷会发生释放^[20]或者通过捕捉水体中磷而发生吸附^[22],致使悬浮物上内源磷形态发生变化(图 3),进而导致水体中磷含量发生变化(图 2)。

图 3(a)显示,沉积物扰动期间,悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 发生了显著变化。但梅梁湾和月亮湾悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的变化规律完全不同,前者呈逐渐降

低趋势,而后者则先降低后升高。对于沉积物而言,梅梁湾和月亮湾均是先降低后升高。但试验结束(21 d),无论是悬浮物还是沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量均低于初始状态,但比较而言,悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的释放量大于沉积物($P < 0.05$)。这主要是采样时间所导致的,悬浮物为扰动结束时立刻采集(由于扰动产生的水动力和颗粒物质间的摩擦力导致 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 充分释放),而沉积物则是扰动结束 24 h 后采集,悬浮的颗粒物质已经充分沉淀(在沉降过程中通过捕捉和吸附 DIP,并将其首先吸附在颗粒物质表面形成 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$)。将梅梁湾与月亮湾悬浮物相对比,如果不考虑第 7 d,则第 14 d 和 21 d 梅梁湾悬浮物上 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的形成量明显低于月亮湾($P < 0.05$)。这与月亮湾中小粒径颗粒物质所占比例明显高于梅梁湾有关。

与其它形态磷(Fe/Al-P 、 HCl-P 、 Res-P)相比较,悬浮物和沉积物中的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 均发生了释放,其一部分导致上覆水中 DIP 浓度升高,另一部分则被吸附形成其它形态磷。这是因为 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 是通过物理作用力(如范德华力、静电力等)吸附在颗粒物质表面,而 Fe/Al-P 和 HCl-P 主要是通过化学键力结合,因此,后者的结合力更强,更不易释放。

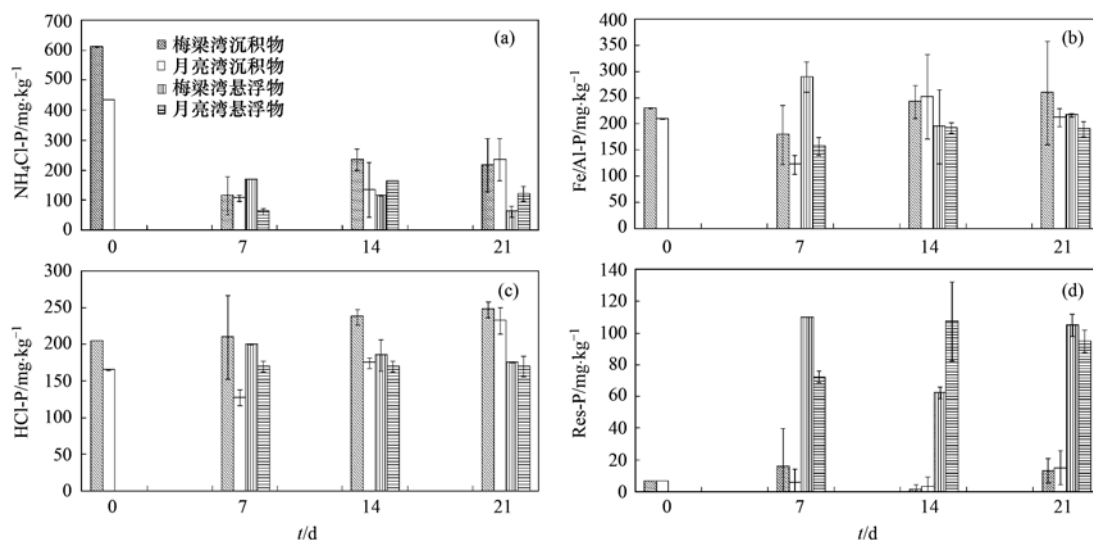


图 3 悬浮物和沉积物上不同形态磷的变化规律

Fig. 3 Variation of phosphorus forms in the suspended solids and sediments

图 3(b)显示,梅梁湾和月亮湾悬浮物和沉积物上 Fe/Al-P 与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的变化一致。与初始状态相比,悬浮物上 Fe/Al-P 发生了释放,而沉积物则从第 14 d 开始, Fe/Al-P 含量增加,可能来源于 Fe 、 Al 离子对 DIP 的捕捉^[23,24]或者其他形态磷的转化。这与上覆水中 DO 含量[图 1(a)]升高的时间一致。在

前 7 d,由于扰动而融入的溶解氧主要用于氧化进入水体的有机质和还原物质,从而导致间隙水中 DIP^[25]以及有机磷矿化^[26]产生的 DIP 等进入水体,这与图 2(c)和图 2(d)中 DTP 和 DIP 的变化规律也一致。但从第 8 d 开始,DTP 和 DIP 均发生明显降低。这与 Fe^{2+} 被氧化成水合铁氧化物对 DIP 等的吸

附固定密切相关^[27]. 尽管悬浮物上 Fe/Al-P 的增加不如沉积物上显著,但由于悬浮物是沉积物与上覆水直接接触的主要媒介^[28],因此,沉积物上 Fe/Al-P 的变化规律也暗示了悬浮物上 Fe/Al-P 的转化历程. 如果试验过程中延长对悬浮物的监测时间,则可能更能说明 Fe/Al-P 的转化历程.

与月亮湾相比,梅梁湾悬浮物上 Fe/Al-P 含量更高 ($P < 0.05$),而沉积物则并不显著 ($P > 0.05$). 梅梁湾间隙水中含有较高浓度的 Fe^{2+} ,在扰动导致的好氧状态下被氧化,导致 Fe/Al-P 含量升高^[27]. 与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 相对比,Fe/Al-P 的释放比例明显要低,并且,随时间增加,Fe/Al-P 逐渐增加. 尽管 Fe/Al-P 被认为是易释放态磷,但其也包含了部分难以释放的 Fe/Al-P^[23,25]. 而被认为可以释放的 Fe/Al-P 则主要是 AAP^[29] (图 4).

由于每次采集的悬浮物含量较少,故未分析悬浮物上 AAP 含量. 图 4 显示,与初始状态相比,梅梁湾沉积物中 AAP 含量明显降低,而月亮湾则变化不大. 梅梁湾沉积物, AAP 占 Fe/Al-P 的质量分数从 93.9% (初始状态) 降至 35.4% (扰动后平均值). 因此,梅梁湾沉积物难释放态 Fe/Al-P 所占比例大大增加. 说明沉积物反复扰动促进了 Fe/Al-P 由易释放态向难释放态的转化. 而月亮湾沉积物中这种转化则不明显,两者之间的差异还有待进一步深入研究.

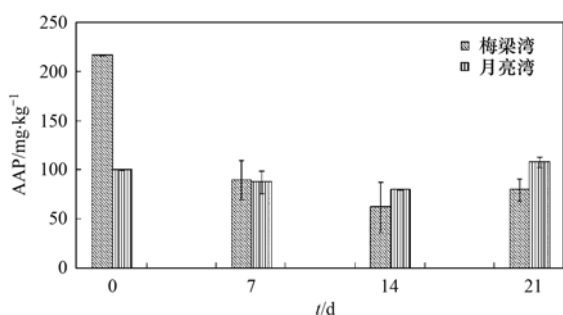


图 4 沉积物中藻类利用态磷的变化规律

Fig. 4 Variation of AAP in the sediments

图 3(c) 显示,悬浮物和沉积物上 HCl-P 的变化规律完全不同. 对于悬浮物而言,梅梁湾 HCl-P 呈逐渐降低趋势,而月亮湾则基本保持不变,但梅梁湾一直处于高于月亮湾的水平 ($P < 0.05$). 而对于沉积物而言,两者均呈逐渐增加的趋势,同样,梅梁湾一直处于高于月亮湾的水平 ($P < 0.05$). HCl-P 的形成主要与上覆水 pH 值有关^[30]. 本研究中,梅梁湾与月亮湾上覆水 pH 值分别稳定在 7.82 和 7.95 [图 1(b)],有利于 HCl-P 的形成.

悬浮物上 HCl-P 逐渐降低,而同一时间段,上覆水中 TP、PP、DTP 和 DIP 等形态磷均呈明显降低趋势 (图 2),此时,沉积物上 HCl-P 呈现了升高趋势,这说明了悬浮物上 HCl-P 逐渐向沉积物上转移,进一步证明了悬浮物在磷的交换过程中所起的媒介作用. 尽管这种作用在 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Fe/Al-P 中体现的不如 HCl-P 明显,但也显示了这种趋势. 尽管这种趋势在月亮湾悬浮物和沉积物上体现得不如梅梁湾明显,但不同形态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、Fe/Al-P、HCl-P) 在悬浮物上的增加量和增加幅度均低于沉积物. 所以,总体趋势上仍然呈现了悬浮物上磷向沉积物转移的趋势.

图 3(d) 显示,Res-P 的变化规律完全不同于 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、Fe/Al-P 和 HCl-P. 悬浮物上 Res-P 含量明显高于沉积物,这与其它 3 种形态磷完全不同. 这可能源于沉积物中结构疏松、无定形的无机大分子絮凝物和有机碎屑等大量进入水体^[20],增加了水体中有机磷含量,这些物质不仅沉淀性能差,而且被悬浮物吸附后导致悬浮物沉淀性能变差,进而导致悬浮物上 Res-P 含量明显升高,而沉积物中变化不大. 这些物质在溶解氧的作用下会被氧化,导致磷释放 [图 2(d)],但扰动 7 d 后,由于融入的溶解氧基本将容易被氧化的此类物质氧化殆尽,因此,溶解性总磷含量未见升高 [图 2(e)]. 尽管悬浮物上 Res-P 含量仍然处于高位,但剩余的未被氧化的物质需要在微生物作用下才能被转化^[7]. 由此,可能也证明了在反复高强度扰动作用下,微生物作用较弱,进而说明,物理化学作用是吸附和固定磷的主要机制. 但这并不能说明低强度扰动下磷的吸附和固定机制.

3 结论

(1) 梅梁湾和月亮湾沉积物中, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量及占 Tot-P 的比例高于其它形态磷,导致扰动过程中,上覆水中 DIP 浓度升高. 随着溶解氧含量升高, DIP 浓度逐渐降低,但由于颗粒物间较大的摩擦力作用,导致月亮湾上覆水中 DIP 平衡浓度高于梅梁湾.

(2) 底泥反复扰动过程中,梅梁湾和月亮湾悬浮物上不同形态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、Fe/Al-P、HCl-P) 的变化趋势明显不同,而沉积物上的变化趋势基本一致. 梅梁湾沉积物上 AAP 含量及其占 Fe/Al-P 的百分比明显降低,说明扰动对 Fe/Al-P 由易释放态向难释放态转化的促进作用.

(3) 悬浮物和沉积物上不同形态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 HCl-P)的变化趋势,暗示了悬浮物在磷交换过程中所起的媒介作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension[J]. Ecological Engineering, 2010, **36**(7): 958-962.
- [3] 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.
- [4] Jin X C, Wang S R, Pang Y, *et al.* The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments[J]. Colloids and Surfaces A, 2005, **254**(1-3): 241-248.
- [5] Katsev S, Tsandev I, Heures I L, *et al.* Factors controlling long-term phosphorus efflux from lake sediments: Exploratory reactive-transport modeling[J]. Chemical Geology, 2006, **234**(1-2): 127-147.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 风浪对太湖水体中胶体态营养盐和浮游植物的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 506-511.
- [9] 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.
- [10] 秦伯强, 胡维平, 高光, 等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, **48**(17): 1822-1831.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. 科学通报, 2005, **50**(1): 66-71.
- [15] Hietjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments[J]. Journal of Environmental Quality, 1980, **9**(6): 405-407.
- [16] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. Chemosphere, 2001, **42**(2): 221-225.
- [17] Wang S R, Jin X C, Zhao H T, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China[J]. Colloids and Surfaces A, 2006, **273**(1-3): 109-116.
- [18] Hatch L K, Reuter J E, Goldman C R. Relative importance of stream-borne particulate and dissolved phosphorus fractions to Lake Tahoe phytoplankton[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1999, **56**(12): 2331-2339.
- [19] Hu C P, Hu W P, Zhang F B, *et al.* Sediment resuspension in the Lake Taihu, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, **51**(6): 731-737.
- [20] 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.
- [21] 吴生才, 陈伟民, 高光. 太湖冬季底泥中活体藻类的检测[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(4): 339-344.
- [22] Nõges P, Kisand A. Horizontal distribution of sediment phosphorus in shallow eutrophic Lake Võrtsjärv (Estonia)[J]. Hydrobiologia, 1999, **408-409**: 167-174.
- [23] Saavedra C, Delgado A. Iron-related phosphorus in eroded sediments from agricultural soils of Mediterranean areas[J]. Geoderma, 2005, **125**(1-2): 1-9.
- [24] Seo D C, Cho J S, Lee H J, *et al.* Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland[J]. Water Research, 2005, **39**(11): 2445-2457.
- [25] 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.
- [26] Reynolds C S, Davies P S. Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: a British perspective[J]. Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2001, **76**(1): 27-64.
- [27] 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.
- [28] Ballantine D J, Walling D E, Collins A L, *et al.* The phosphorus content of fluvial suspended sediment in three lowland groundwater-dominated catchments[J]. Journal of Hydrology, 2008, **357**(1-2): 140-151.
- [29] Sharpley A N. An innovative approach to estimate bioavailable phosphorus in agricultural runoff using iron oxide-impregnated paper[J]. Journal of Environmental Quality, 1993, **22**(3): 597-601.
- [30] Nguyen L, Sukias J. Phosphorus fractions and retention in drainage ditch sediments receiving surface runoff and subsurface drainage from agricultural catchments in the North Island, New Zealand[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2002, **92**(1): 49-69.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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