

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农,张小玲,王迎春,刘伟东,杜佳,赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍,温天雪,王跃思,刘子锐,王丽,兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满,雷前涛,谈明光,李晓林,张桂林,刘卫,李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟,李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱,张洪海,杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗,李纯厚,徐娇娇,肖雅元,林琳,黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇,张鸿,何龙,沈金灿,柴之芳,杨波,王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川,沈立成,袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁,陶贞,高全洲,毛海若,姜光辉,焦树林,郑雄波,张乾柱,马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚,李彩梅,秦作栋,邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩,琚宜文,翟航,许亮,沈媛媛,纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红,叶淑君,吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁,高扬,林勇明,朱波,徐亚娟,于贵瑞,吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超,毕孟飞,李泽利,沙健,王玉秋,钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红,李义敏,周艺,卫安平,周广顺,肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌,李阳,孙共献 (2156)
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·····	武晓飞,李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚,李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟,李瑞娇,张念,赵峰,谢从新,张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧,毕春娟,韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波,孙荣国,王定勇,王小文,张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙,张忠民,赵霞,焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海,叶招莲,文颖频,毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇,刘伟京,张耀辉,徐军,唐敏,陈勇,白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳,陈复彬,赵慧,常自强,章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春,年永嘉,张静,张明,张磊,龚鹏飞,肖太民,李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦,王娟,郑天龙,刘建国,汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽,薛罡,高品,吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振,胡大龙,乔卫敏,陈冠翰,蒋玲燕,李震,麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰,向洪锐,陈春丽,周文斌,王佳佳,刘春英,曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒,孙家仁,吴兑,范绍佳,任明忠,吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰,王铁宇,李奇峰,张海燕,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎,高丽荣,田益玲,朱帅,张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍,汪钊,蔡强,欧文斌,孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春,梁文艳,赵远,李飞贞,曹敬灿,胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏,梅帅,曹有福,丁进锋,徐嘉杰,李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹,王丽华,郝春博,李璐,李思远,冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪,赵大勇,曾巾,余多慰,吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪,王佳,范晓蕾,罗生军,郭荣波,邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚,邓欢,肖勇,赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江,彭霞薇,李霞,孙雅君,冯红梅,江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳,陈国耀,姜珂,许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲,杨芸,徐卫红,王崇力,陈蓉,熊仕娟,谢文文,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲,仇少君,陈印平,赵西梅,刘京涛,陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利,赵彤,闫浩,黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊,杨晓洪,葛峰,王娜,焦少俊,叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举,崔孝强,阮震,赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒,特拉津·那斯尔,程永毅,詹江渝,杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉,杜永芬,王丹丹,高抒,高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威,蔡冠清,黄浩波,耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛,王龙昌,黄召存,贾会娟,冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君,杨智杰,翁发进,刘小飞,陈朝琪,林伟盛,王小红,陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓烨,张洪,李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

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

武晓飞, 李大鹏*

(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、月亮湾的沉积物和上覆水为材料, 研究了较短时间尺度和沉积物反复扰动条件下, 悬浮物中不同形态生物有效磷数量分布的变化特征. 结果表明, 随着扰动次数的增加, 上覆水中藻类可利用磷(AAP)占溶解态总磷(DTP)的百分比均有所降低. 试验期间, 悬浮物中弱吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、可被生物利用颗粒态磷(BAPP)占总磷(Tot-P)的百分比平均值分别增加了 3.5%、37.3% (梅梁湾)和 2.0%、50.7% (月亮湾). 梅梁湾悬浮物上 AAP 含量及其占 Tot-P 的百分比随扰动次数增加而增加, 月亮湾则恰好相反. 扰动期间, 悬浮物上 BAPP 含量始终大于 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 AAP 之和, 表明 BAPP 的 80% 是由 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 AAP 组成的. 这也暗示了, 仅仅以悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、AAP 来估算 BAPP 存在一定的不合理性.

关键词:梅梁湾; 月亮湾; 藻类可利用磷; 可被生物利用颗粒态磷; 反复扰动; 悬浮物

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2164-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.06.017

Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance

WU Xiao-fei, LI Da-peng

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

Abstract: Variation of bioavailable phosphorus forms on suspended solids under short-term and repeated sediment disturbance was investigated, using sediments and overlying water from Meiliang Bay and Yueliang Bay. The results showed that the average percentage of algae available phosphorus (AAP) in the dissolved total phosphorus (DTP) decreased with the increase of disturbance number. The $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and bioavailable particulate phosphorus (BAPP) on the suspended solids increased by 3.5%, 37.3% (Meiliang Bay) and 2.0%, 50.7% (Yueliang Bay), respectively. In addition, the AAP and its percentage of AAP in Tot-P on the suspended solids in Meiliang Bay increased with the increase of disturbance number. However, the case was the opposite for Yueliang Bay. During the disturbance, the BAPP was higher than the sum of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and AAP, indicating that the sum of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and AAP constituted 80% of BAPP. It also suggested that estimating the BAPP on the suspended solids using the sum of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and AAP is problematic.

Key words: Meiliang Bay; Yueliang Bay; algal available phosphorus; bioavailable particulate phosphorus; intermittent disturbance; suspended solids

在浅水湖泊中, 风浪和人为等因素扰动会导致沉积物大量悬浮, 促使其水体总磷含量明显增加^[1, 2]. 然而, 沉积物中内源磷的释放究竟是促进还是延缓了水体富营养化的发展进程仍然存在着争议, 这主要与颗粒态磷的生物有效性有关. 研究表明, 扰动条件下内源磷释放主要以颗粒态磷为主^[3, 4], 但到目前为止, 人们对反复扰动下颗粒态磷中生物有效磷的再生与转化规律尚不明确, 对其估算也没有统一标准.

目前, 颗粒态磷生物有效性多以藻类可利用磷(AAP)来表征^[5], AAP 是以 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液作为萃取剂来提取的形态磷. 由于化学药剂的提取力要明显强于藻类, 因此, AAP 中可能包括了部分不能被生物利用的磷. 通常, AAP 被定义为非闭蓄态铁铝结合态磷(Fe/Al-P)^[6, 7], Golterman^[8]和

Grobler 等^[9]在研究中也把悬浮物中 AAP 归纳为部分铁结合态磷(Fe-P). 然而, 王琦等^[10]在研究中发现, AAP 不但与 Fe-P 表现出较好的相关性, 而且与钙结合态磷(Ca-P)的相关性更好, 这暗示了提取的 AAP 可能包括了 Fe-P 和 Ca-P , 且其中 Ca-P 所占的比例可能更大. 但是, Ca-P 通常被认为是难释放态磷^[11, 12]. 因此, 采用化学提取剂提取的 AAP 含量来表征其生物有效性就略显不妥. 此外, 微生物在代谢过程中也会对悬浮物中不同形态磷产生影响, 用来满足其生长所需^[13, 14]. 而在采用化学提取

收稿日期: 2013-10-08; 修订日期: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178284, 51278523, 50908154, 50938005); 江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX12-0873)

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

* 通讯联系人, E-mail: ustslp@163.com

剂进行悬浮物磷形态分析时也存在将这部分磷误认为难释放态磷的可能性. Ellison 等^[4]在研究中曾利用藻类培养方法来测定生物可利用磷(BAP)和溶解态总磷(DTP),从而间接计算可被生物利用颗粒态磷(BAPP),并用作评估悬浮物生物有效性的指标.然而,并不是所有 DTP 均可被生物利用,其中只有部分是生物有效的^[15, 16].

沉积物扰动通过改变上覆水和悬浮物上不同形态磷的分布,并且每一次扰动均会改变悬浮物上不同形态内源磷的数量分布^[5],从而改变水体中可被生物利用磷的含量,因此,沉积物反复扰动过程中,相邻扰动对生物有效磷的组成及其转化存在影响.目前,有关沉积物扰动状态下生物有效磷的研究多集中在较长时间尺度上,10 d 甚至更长,这使得研究者不能忽视微生物对生物有效磷的吸收以及对其他形态磷的转化,然而,在沉积物扰动作用下,物理、化学、生物作用共存,因此,很难阐明如此复杂作用下生物有效磷的变化规律.基于此,为

了避免微生物的影响,同时利用藻类培养方法,研究了较短时间尺度上反复扰动状态下,上覆水以及悬浮物上生物有效磷组成及其转化的变化规律,以期完善浅水湖泊悬浮物中不同形态磷的迁移转化理论提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 沉积物与上覆水的采集

利用进口大口径柱状采样器(Rigo Co. 直径 110 mm 高 500 mm)于 2012 年 9 月 26 日从太湖梅梁湾(坐标: N 31°31'33.6", E 120°12'32.4", 水深: 2 ~ 3 m)、月亮湾(坐标: N 31°24'38.8", E 120°6'4.57", 水深: 2 ~ 3 m)采集表层 1 cm 的无扰动柱状沉积物样品,装袋密封,用冰盒(4℃)保存,立即送至实验室,过孔径为 1 mm 的铁筛,对沉积物进行均化处理.同时取采样点上覆水 100 L.并于当日对沉积物和上覆水中各指标初始值进行测定.沉积物和上覆水理化性质见表 1.

表 1 梅梁湾、月亮湾沉积物和上覆水的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of sediments and overlying water from Meiliang Bay and Yueliang Bay										
项目	DO/ mg·L ⁻¹	pH	含水率/%	有机质/%	DTP /mg·L ⁻¹	Tot-P /mg·g ⁻¹	叶绿素 a /μg·L ⁻¹	粒径/μm		
								<5	5 ~ 50	50 ~ 250
月亮湾上覆水	3.45	8.85			0.041		13.894			
梅梁湾上覆水	3.52	8.00			0.021		4.859			
月亮湾沉积物			36.41	4.28		0.268		24.16%	72.48%	3.78%
梅梁湾沉积物			30.89	3.38		0.201		19.24%	79.98%	0.78%

1.2 试验方法

于 2012 年 9 月 27 日取两个 5 L 圆形容器作为试验装置($d = 17\text{ cm}$, $h = 25\text{ cm}$),分别放入取自梅梁湾、月亮湾湿沉积物 200 g,并缓慢加入采样点上覆水 3 L.

试验从 0 h 开始,到 13 h 结束.试验期间,分别在 0、3.5、7、10.5 h 采用恒速搅拌机(IKA RW20 digital)对沉积物进行扰动($140\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$),每次扰动时间为 0.5 h,扰动过程中使沉积物充分悬浮.每次扰动结束后,立即取水面以下 10 cm 处水样 150 mL,用于测定上覆水中总磷(TP)、DTP、溶解性磷酸盐(DIP)、DTP 中 AAP,并用 0.45 μm 滤膜(混合膜)过滤采集的水样以获取悬浮物,分析悬浮物磷形态和 BAPP,同时监测溶解氧(DO)、pH 值的变化.每次扰动后的自由沉降阶段,每隔 1 h 采集样品(25 mL)测定上覆水中 TP、DTP、DIP 以及 DTP 中 AAP 含量,同时监测 DO、pH 值的变化.每次采完水样,立即向容器中补充等量上覆水.

悬浮物中 BAPP 测定的具体方法为将藻在无磷

BG11(Bull-Green Medium)培养液中饥饿培养 7 d,供试验所用.取 30 mL 无磷 BG11 培养液并加入 0.01 g 悬浮物湿样以及经过饥饿培养的藻液 0.3 mL,每个样品 3 个平行样.在温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,光照度为 2 000 lx,亮暗比为 14 h: 10 h 条件下培养,每天早中晚各摇动一次,于 14 d 取样测定上覆水中叶绿素 a 含量.同时分别用不同已知磷浓度 BG11 培养液来培养饥饿藻类,14 d 后测定上覆水中叶绿素 a 含量,通过拟合曲线,得出量化悬浮物中 BAPP 含量公式.

1.3 分析方法

采用 Hietjes 等^[17]提出的 H&L4 步连续提取法对悬浮物进行磷形态分析,每个样品 3 个平行样,相对误差 < 5%.选用 Ellison 等^[4]的藻类培养方法来测定悬浮物上 BAPP 含量,试验中所用藻类为铜绿微囊藻(*Microcysis aeruginosa*).悬浮物中 AAP 采用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaOH}$ 溶液提取法进行测定.沉积物含水率的定义为 105℃ 烘干 12 h 的质量损失,有机质(OM)含量的定义为 550℃ 灼烧 2.5 h 的质量损

失. 沉积物粒径分析采用激光粒度仪[欧美克 LS-POP(Ⅲ)]测定.

TP 是直接将水样消解后采用钼锑抗分光光度法(美国 HACH DR5000 型紫外可见分光光度计)测定; DTP 是将水样过滤(0.45 μm 滤膜)消解后测定; DIP 含量是将水样过滤后(0.45 μm 滤膜)直接测定. DTP 中 AAP 的测定是将水样过滤后(0.45 μm 滤膜)选用 Ellison^[4]的方法来做藻类分析试验, 叶绿素 a 含量的测定采用 water Pam s/n edee0225 叶绿素仪.

上覆水中 DO 和 pH 值分别通过便携式溶解氧测定仪(美国 HACH HQ30d)和数显 pH 计(pHs-3TC, 武汉)测定.

2 结果与分析

2.1 扰动对上覆水中磷形态的影响

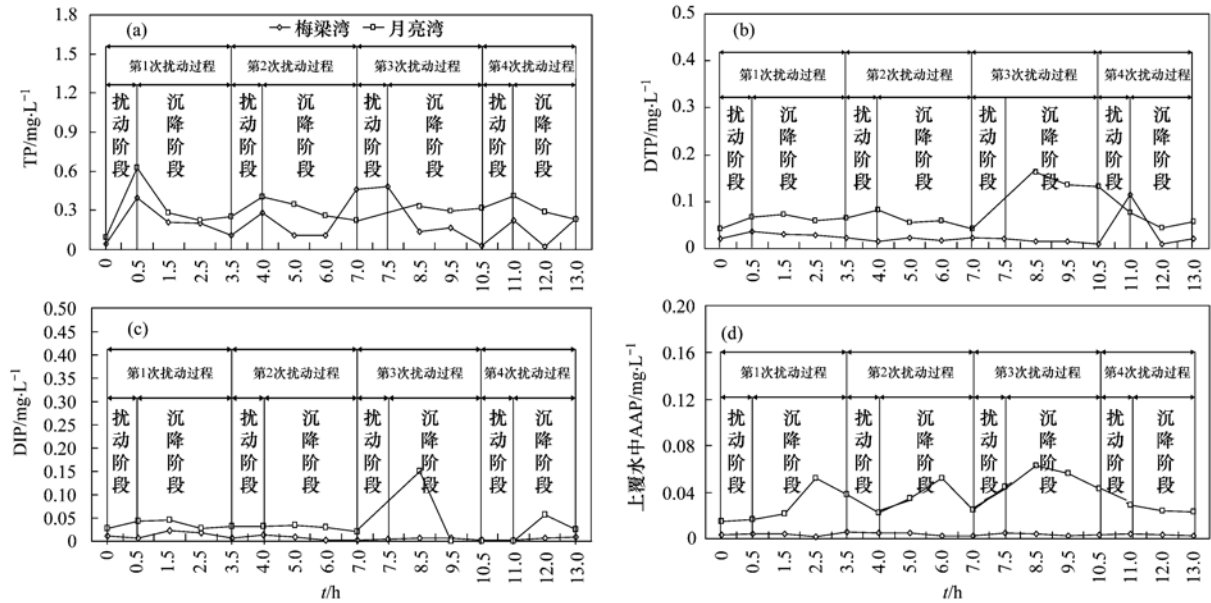


图 1 上覆水中不同形态磷的变化规律

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

表 2 沉积物中粒径分布/%

Table 2 Diameter distribution in the sediments/%

项目	黏土(< 5 μm)	细粉砂(5 ~ 50 μm)	粗砂粒(50 ~ 250 μm)
梅梁湾初始值	19.24	79.98	0.78
月亮湾初始值	24.16	72.48	3.36
梅梁湾试验结束时	24.35	69.60	6.05
月亮湾试验结束时	8.04	91.89	0.07

试验期间, 无论是上覆水中 DTP 的平均浓度(梅梁湾: 0.028 mg·L⁻¹, 月亮湾: 0.082 mg·L⁻¹)还是试验结束时上覆水中 DTP 浓度(梅梁湾: 0.022 mg·L⁻¹, 月亮湾: 0.058 mg·L⁻¹)都较初始值高(梅梁

湾: 0.229、0.241、0.203、0.160 mg·L⁻¹, 月亮湾: 0.345、0.308、0.315、0.307 mg·L⁻¹), 并且始终远高于初始值(梅梁湾: 0.044 mg·L⁻¹, 月亮湾: 0.096 mg·L⁻¹, 初始值为 0 h 时水样指标值), 这表明反复扰动促进了沉积物中内源磷向水体的迁移, 且随着扰动次数的增加后续扰动有降低内源磷释放的趋势. 这可能是因为扰动过程导致上覆水中颗粒态物质大量增加, 提高了颗粒态物质之间的碰撞几率, 强化了悬浮物的絮凝作用, 增加了悬浮物中较大粒径悬浮物所占比重(表 2), 通过加大其沉降速度使上覆水中 TP 含量发生改变^[18].

湾: 0.021 mg·L⁻¹, 月亮湾: 0.041 mg·L⁻¹). DTP 由 DIP 和溶解态有机磷(DOP)组成, 扰动强化了沉积物中易释放态磷(非闭蓄态 Fe/Al-P、NH₄Cl-P)的释放以及 DOP 向水体迁移, 增加了上覆

水中 DTP 浓度[图 1(b)]. 扰动停止后, 上覆水中 DTP 浓度则有所下降. 究其原因可能与颗粒态物质对其吸附及自由沉降有关^[18]. 扰动结束后, 降低了水动力作用对絮凝团粒的破坏, 同时由于絮凝作用存在, 强化了细颗粒有机质(OM)的集聚^[18], 有利于其对上覆水中 DTP 的专属性吸附, 并加大了沉降速度, 从而导致上覆水中 DTP 浓度降低^[19]. 另外, 扰动增加了水环境中溶解氧含量(图 2), 提高了沉积物-水体系的氧化还原电位, 促进了上覆水以及悬浮物中含磷物质以及铁锰等金属离子以氧化态的形式存在, 进而抑制了磷的释放. 相关研究^[20, 21]也证明了溶解氧含量增加对 DTP 释放的抑制作用.

反复扰动对上覆水中 DIP 浓度也产生了显著影响[图 1(c)]. 试验期间, 4 次扰动过程中梅梁湾、月亮湾上覆水中 DIP 浓度随扰动次数增加而逐渐降低, 除了月亮湾第 3 次扰动刚结束时 DIP 出现高值. 该高值的出现可能与取样过程中不小心扰动底泥有关. 如果除去该高值, 则扰动过程中 DIP 浓度低于初始值(梅梁湾 $0.010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 月亮湾 $0.028 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 这表明, 反复扰动有利于降低上覆水中 DIP 浓度. 沉积物再悬浮, 显著增加了上覆水中铁、锰等氧化物胶体以及黏土矿物的含量, 提高了细小颗粒态物质与 DIP 的接触几率, 促进了悬浮物对上覆水中 DIP 的吸附^[22]. 同时, 扰动促进了细小颗粒态物质的集聚、絮凝作用, 强化了内源磷向底泥的迁移和转化. 孙小静等^[23]在研究中发现, 扰动次数的增加会强化悬浮物的沉淀效果.

DTP 中 AAP 由部分 DOP 和 DIP 组成^[15, 16]. 试验期间, 梅梁湾、月亮湾在 4 次扰动过程中(0.5 h 的扰动)DTP 中 AAP 含量呈现了不同的趋势, 前者基本保持不变, 后者则先升高后降低. 而在 4 次自由沉降阶段(3 h 自由沉降), 梅梁湾 DTP 中 AAP 略有减低, 而月亮湾则呈减低趋势, 除第 3 次沉降过程中出现高值外. 这与扰动导致水体中颗粒物质含量增加有关, 特别是有机物(OM)的增加. OM 作为 DOP 的主要载体, 其可间接表征 DOP 含量, 并影响着水环境中 DOP 的形态转化和浓度变化^[19, 24~27]. 除此之外, 4 次扰动过程中梅梁湾与月亮湾 DTP 中 AAP 占 DTP 的百分比(质量分数)平均值均表现出先增高再降低的变化趋势(梅梁湾: 15.9%、22.4%、25.0%、14.3%; 月亮湾: 50.5%、59.4%、31.2%、26.7%), 见图 3, 且试验结束前最后 1 次扰动过程中梅梁湾、月亮湾 DTP 中 AAP 占 DTP 的百分比平均值均低于初始状态的 16.0%、

36.6%, 暗示了反复扰动有利于降低上覆水中 DTP 的生物有效性.

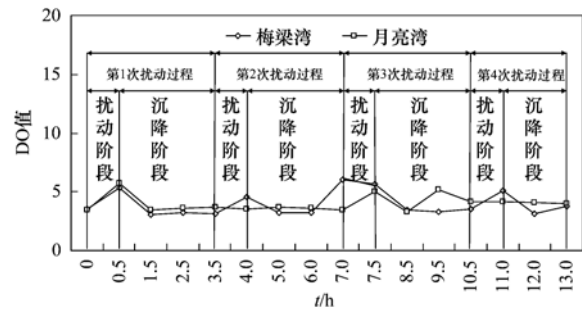


图 2 上覆水中 DO 的变化规律

Fig. 2 Variation of DO in the overlying water

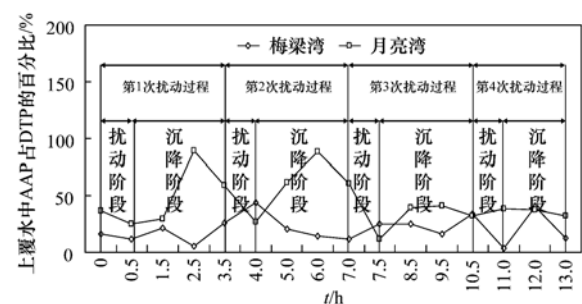


图 3 上覆水中 AAP 占 DTP 的百分比

Fig. 3 Percentage of AAP in the overlying water of DTP

试验发现: 月亮湾 DTP 中 AAP 含量明显高于梅梁湾, 这可能与月亮湾沉积物中 OM 含量较高有关(表 1). 朱广伟等^[28]的研究也证实了这一点. 而梅梁湾由于 OM 含量较低, 吸附和释放基本处于稳定状态[图 1(d)].

2.2 悬浮物中生物有效磷的变化

从图 4(a)中可以看出, 梅梁湾、月亮湾悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量均表现出先升高再降低的变化趋势, 且在试验结束时都下降到 $10.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 试验期间, 梅梁湾、月亮湾悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 平均含量分别为 $12.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $11.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均高于初始值(梅梁湾: $5.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 月亮湾: $10.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 此外, 梅梁湾、月亮湾悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占 Tot-P 百分比的平均值分别为 5.7%、5.8%, 也高于初始值(梅梁湾: 2.2%, 月亮湾: 3.9%) [图 4(c)], 这与李大鹏等^[29]的研究是相似的. 这与悬浮物对水体中溶解态磷的物理吸附、化学吸附及其他形态磷向 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的转化有关^[29, 30]. $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与 Fe/Al-P 间较好的相关性(表 3)也证明了这一点.

悬浮物中 AAP 通常是指能够以溶解态磷酸盐的形式释放到水体中, 并能够被藻类生长所利用的

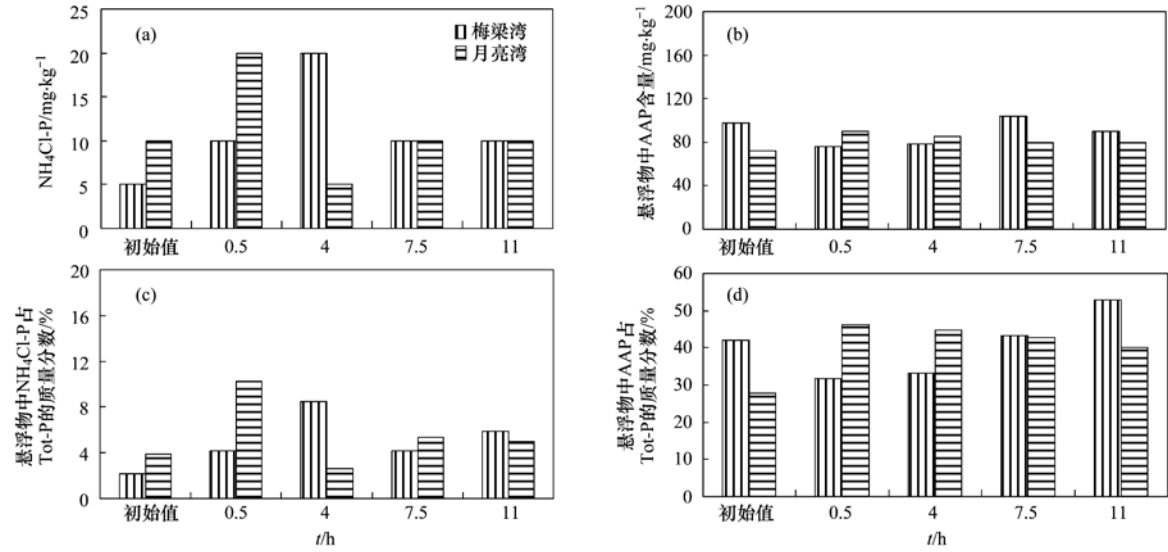


图4 悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、AAP 的数量分布及其在总磷中的质量分数

Fig. 4 Distribution of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, AAP and their percentages in Tot-P in the suspended solids

那部分磷^[31]. 4次扰动过程中, 悬浮物中AAP含量平均值分别为 $87.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (梅梁湾)、 $83.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (月亮湾), 相对于初始值而言(梅梁湾: $98.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 月亮湾: $72.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 梅梁湾有所降低, 月亮湾则有所增加[图4(b)]. 梅梁湾和月亮湾悬浮物中AAP占Tot-P百分比的变化规律则明显不同, 前者悬浮物中AAP占Tot-P百分比随着扰动次数增加而逐渐增加, 而后者则随着扰动次数增加明显降低. 并且试验结束时该值均高于初始值[图4(d)], 这与李大鹏等^[32]的研究有所不同. 反复扰动条件下, 每次扰动虽然都会

增加上覆水中颗粒态物质的含量, 但同时也促进了小颗粒态物质的絮凝、聚集、沉降作用, 导致上覆水中小分子颗粒态物质比例增加(表2). 并且随着扰动次数的增加, 前一次扰动有抑制后一次扰动条件下上覆水中大、中颗粒态悬浮物含量的趋势, 导致上覆水中悬浮物主要以小颗粒态物质为主, 降低了上覆水中悬浮物含量^[33], 从而降低了悬浮物中AAP含量. 另外, 扰动也强化了大气复氧作用, 提高了水体中DO含量, 导致大量中小分子量OM被氧化, 降低了悬浮物中AAP的含量^[34].

表3 悬浮物中不同形态磷的相关关系

Table 3 Correlation of different phosphorus fractions in the suspended solids

	$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	Fe/Al-P	Ca-P	AAP	BAPP
$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	1				
Fe/Al-P	0.290 96	1			
Ca-P	-0.340 18	0.414 60	1		
AAP	-0.521 45	-0.348 24	0.188 19	1	
BAPP	-0.261 69	-0.086 74	0.359 17	0.766 61	1

若将悬浮物中AAP含量等价于悬浮物中非闭蓄态 Fe/Al-P 含量^[6, 7], 那么根据以往研究, 扰动会导致悬浮物中非闭蓄态 Fe/Al-P 释放及向其他形态磷的转化, 其含量应有所降低^[32, 35], 可试验结果却并非如此. 也有学者采用Ca-NTA可提取 Fe-P 来估算沉积物中AAP含量^[8, 9]. 但通过相关分析发现, 相对于 Fe/Al-P , Ca-P 反而与悬浮物中AAP表现出更好的相关性(表3), 说明悬浮物中AAP可能包含部分 Ca-P , 这与王琦等^[10]在研究中的发现是

相似的.

2.3 悬浮物中BAPP数量分布规律

图5(a)显示, 梅梁湾、月亮湾悬浮物中BAPP的质量分布呈先增加后降低的趋势, 但始终保持在高于初始值(梅梁湾: $48.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 月亮湾: $28.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的水平. 同样, 梅梁湾、月亮湾悬浮物中BAPP占Tot-P的百分比也始终保持在高于初始值(梅梁湾:20.7%, 月亮湾:11.0%)的水平[图5(b)]. 试验期间, BAPP的平均值分别为

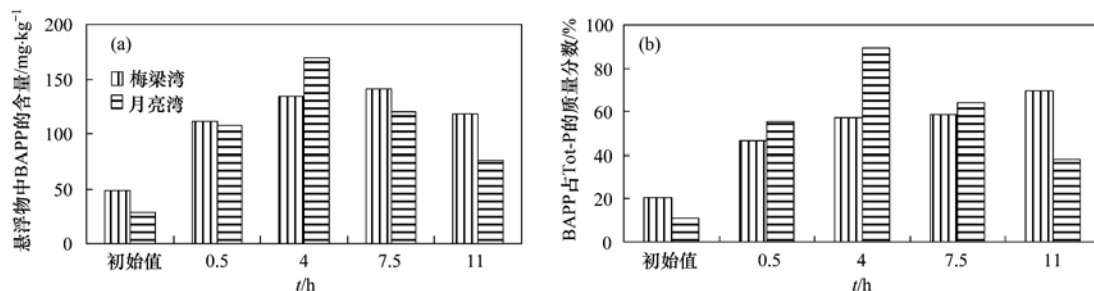
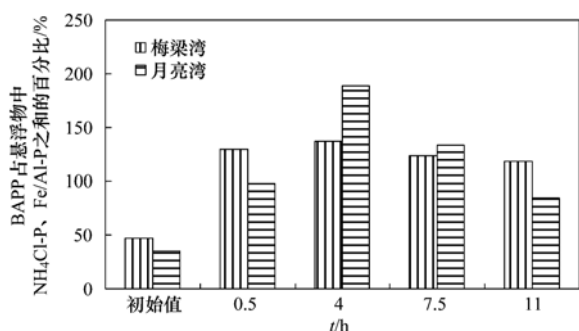


图5 悬浮物中 BAPP 的数量分布及其在总磷中的质量分数

Fig. 5 Distribution of BAPP and its percentage in Tot-P in the suspended solids

126.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (梅梁湾)、118.40 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (月亮湾), 其在 Tot-P 中所占百分比的平均值分别为 57.9% (梅梁湾)、61.7% (月亮湾), 也都显著高于初始值. 试验期间, BAPP 与悬浮物中 AAP、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 之和相比的平均值分别为 (梅梁湾: 127.0%, 月亮湾: 126.1%), 明显大于 1 (图 6), 表明悬浮物中 BAPP 含量始终是大于其 AAP、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 之和. 这说明采用 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 AAP 之和可分别代表 78.7% (梅梁湾) 和 79.3% (月亮湾) 的 BAPP, 即 BAPP 的 80% 是由 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 AAP 组成的, 剩余的 20% 可能来自于其它形态磷.

图6 BAPP 与悬浮物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、AAP 的百分比Fig. 6 Percentage of BAPP in $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and AAP in the suspended solids

通过相关性分析发现 (表 3), BAPP 除与悬浮物中 AAP 具有较好的相关性外, 其与 Ca-P 也具有一定的相关性, 反而与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的相关性较差, 这与王琦等^[10]在研究中的发现是相似的. 通常认为悬浮物中 AAP、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 之和能很好地表征其藻类可利用磷含量^[5], 且 Ca-P 为难释放态磷^[11, 12]. 事实上, Ca-P 并不是由单一成分组成, 除了自生钙磷 (ACa-P) 和碎屑态磷 (Det-P) 外, 还包括部分扰动过程中钙离子与上覆水中磷酸根所形成的钙磷酸盐^[36~39]. 其中, ACa-P 和部分钙磷酸盐具有一定的生物有效性, 在适当的物理化学以及生物条件下,

其可能会逐渐被生物利用^[40]. 除此之外, Ca-P 中的磷酸二钙 ($\text{Ca}_2\text{-P}$) 和磷酸八钙 ($\text{Ca}_8\text{-P}$) 均可被藻类直接利用, 且 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 为优先利用磷源^[41, 42]. 然而, 这部分磷通常被误认成了难释放态磷.

3 结论

(1) 较短时间尺度和反复扰动条件下, AAP 占 DTP 的百分比随着扰动次数增加呈逐渐降低的趋势. 说明反复扰动有利于降低 DTP 的生物有效性.

(2) 较短时间尺度和反复扰动对梅梁湾和月亮湾悬浮物上 AAP 含量及其占 Tot-P 的百分比的影响恰好相反. 而相关性分析发现悬浮物中 AAP 与 Ca-P 也有较好的相关性.

(3) 在较短时间尺度下, BAPP 含量随着扰动次数增加而呈先增加后降低的趋势. 另外, 悬浮物中 BAPP 含量明显大于其 AAP、 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量之和, 表明 BAPP 的 80% 是由 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 AAP 组成的.

参考文献:

- [1] Carter L D, Dzialowski A R. Predicting sediment phosphorus release rates using landuse and water-quality data [J]. *Freshwater Science*, 2012, **31**(4): 1214-1222.
- [2] Tsado P A, Osunde O A, Igwe C A, *et al.* Phosphorus sorption characteristics of some selected soil of the Nigerian Guinea Savanna [J]. *International Journal of AgriScience*, 2012, **2**(7): 613-618.
- [3] Uusitalo R, Yli-Halla M, Turtola E. Suspended soil as a source of potentially bioavailable phosphorus in surface runoff waters from clay soils [J]. *Water Research*, 2000, **34**(9): 2477-2482.
- [4] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover [J]. *Water Research*, 2006, **40**(6): 1258-1268.
- [5] 李大鹏, 黄勇, 范成新. 沉积物悬浮频率对水体颗粒态磷生物有效性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(10): 2217-2222.
- [6] 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.
- [7] Nguyen L M. Phosphate incorporation and transformation in surface sediments of a sewage-impacted wetland as influenced by sediment sites, sediment pH and added phosphate concentration [J]. *Ecological Engineering*, 2000, **14**(1): 139-155.
- [8] Golterman H L. Sediments as a source of phosphorus for algal growth [M]. Hague; Dr W Junk, 1977. 286-293.
- [9] Grobler D C, Davies E. The availability of sediment phosphate to algae [J]. *Water SA*, 1979, **5**(7): 114-122.
- [10] 王琦, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系 [J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(2): 120-126.
- [11] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [12] Peng J F, Wang B Z, Song Y H, *et al.* Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of a wastewater stabilization pond [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **31**(2): 92-97.
- [13] 张斌亮. 浅水湖泊沉积物-水界面磷的行为特征与环境风险评估 [D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [14] 杨逸萍, 宋瑞星. 河口悬浮物与海洋近岸表层沉积物中磷海洋浮游类生物测定 [J]. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 1996, **35**(4): 574-580.
- [15] 吴重华, 王晓蓉, 孙昊. 羊角月芽藻的生长与湖水中几种磷形态关系模型的建立 [J]. *环境化学*, 1997, **16**(4): 341-347.
- [16] 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.
- [17] Hietjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1980, **9**(3): 405-407.
- [18] 蒋国俊, 姚炎明, 唐子文. 长江口细颗粒泥沙絮凝沉降影响因素分析 [J]. *海洋学报 (中文版)*, 2002, **24**(4): 51-57.
- [19] 霍守亮, 李青芹, 咎逢宇, 等. 我国不同营养状态湖泊沉积物有机磷形态分级特征研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1000-1007.
- [20] 范成新, 相崎守弘. 好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响 [J]. *湖泊科学*, 1997, **9**(4): 337-342.
- [21] 尹大强, 覃秋荣, 阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响 [J]. *湖泊科学*, 1994, **6**(3): 240-244.
- [22] 付强, 尹澄清, 马允. 源头农业区不同类型水塘中水体沉积物磷吸附容量 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 70-76.
- [23] 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.
- [24] Ingall E D, Van Cappellen P. Relation between sedimentation rate and burial of organic phosphorus and organic carbon in marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, **54**(2): 373-386.
- [25] Whitton B A, Grainger S L J, Hawley G R W, *et al.* Cell-bound and extracellular phosphatase activities of cyanobacterial isolates [J]. *Microbial Ecology*, 1991, **21**(1): 85-98.
- [26] Ruiz-Fernández A C, Hillaire-Marcel C, Ghaleb B, *et al.* Recent sedimentary history of anthropogenic impacts on the Culiacan River Estuary, northwestern Mexico: geochemical evidence from organic matter and nutrients [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **118**(3): 365-377.
- [27] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素 [J]. *环境科学与管理*, 2008, **33**(6): 43-46.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(3): 488-494.
- [31] Sonzogni W C, Chapra S C, Armstrong D E, *et al.* Bio2 availability of phosphorus inputs to lakes [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1982, **11**(4): 555-563.
- [32] 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.
- [33] 孙小静, 朱广伟, 罗澈葱, 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.
- [34] 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.
- [35] 李勇, 李大鹏, 黄勇. 沉积物扰动频率对悬浮物中形态磷数量分布的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(10): 19-23, 34.
- [36] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 1953-1962.
- [37] Huang Q H, Wang Z J, Wang D H, *et al.* Origins and mobility of phosphorus forms in the sediments of Lakes Taihu and Chaohu, China [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2005, **40**(1): 91-102.
- [38] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology & Oceanography*, 1992, **37**(7): 1460-1482.
- [39] 郑丽波, 叶瑛, 周怀阳, 等. 东海特定海区表层沉积物中磷的形态、分布及其环境意义 [J]. *海洋与湖沼*, 2003, **34**(3): 274-282.
- [40] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾沉积物中磷的赋存形态及生物有效性 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(12): 2783-2788.
- [41] 林治安, 谢承陶, 张振山, 等. 石灰性土壤无机磷形态、转化及其有效性研究 [J]. *土壤通报*, 1997, **28**(6): 274-276.
- [42] 李孝良, 于群英, 陈世勇, 等. 土壤无机磷形态生物有效性研究 [J]. *安徽农业技术师范学院学报*, 2001, **15**(2): 17-19.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行