

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

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

1960~2013 年我国霾污染的时空变化	符传博,唐家翔,丹利,何媛 (3237)
太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征	王璐,温天雪,苗红妍,高文康,王跃思 (3249)
石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征	刘景云,刘子锐,温天雪,魏俊龙,黄小娟,乔宝文,王莉莉,杨洋,徐仲均,王跃思 (3258)
南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析	吴丹,曹双,汤莉莉,夏俊荣,陆建刚,刘刚,杨孟,李凤英,盖鑫磊 (3268)
南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析	肖思晗,于兴娜,朱彬,何稼祺 (3280)
上海崇明地区大气分形态汞污染特征	李舒,高伟,王书肖,张磊,李智坚,王龙,郝吉明 (3290)
三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量	王永敏,赵铮,孙涛,王娅,薛金平,张成,王定勇 (3300)
长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析	吴方堃,孙杰,余晔,唐贵谦,王跃思 (3308)
铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征	刘大钧,汪家权 (3315)
祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究	贾文雄,李宗省 (3322)
三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价	郭威,殷淑华,徐建新,徐东昱,高丽,郝红,高博 (3333)
太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素	车霏霏,王大鹏,甄卓,颜昌宙,王灶生 (3340)
太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险	张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (3348)
岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,徐昕 (3356)
西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例	詹兆君,陈峰,杨平恒,任娟,张海月,刘黛薇,蓝家程,张宇 (3365)
不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析	李如忠,秦如彬,黄青飞,耿若楠 (3375)
滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献	李乐,王圣瑞,焦立新,余佑金,丁帅,王跃杰 (3384)
荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,刘飞,夏超,丛海兵 (3394)
富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析	张思敏,李云梅,王桥,朱利,王旭东,温爽 (3402)
基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例	安新丽,陈廷廷,赵晗,张又弛,侯艳伟,蔡超 (3413)
于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系	王祖伟,王伟玮,侯迎迎,包姗姗,王子璐,王倩倩 (3423)
人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响	刘佳,易乃康,熊永娇,黄翔峰 (3430)
共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响	许平平,刘聪,王亚,郑燕恒,张春华,葛滢 (3438)
模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响	王兵,温奋翔,肖波 (3447)
对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为	周琦,蒋煜峰,孙航,慕仲锋,张振国,展惠英 (3453)
多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究	尹子华,盛晓琳,刘锐,陈吕军,张永明 (3460)
某微污染水源自来水管网的纳滤深度处理效果研究	吴玉超,陈吕军,兰亚琼,刘锐 (3466)
Fe ⁰ -PRB 去除 Cr(VI) 反应动力学及影响机制	卢欣,李森,唐翠梅,辛佳,林朋飞,刘翔 (3473)
EDTA-nSiO ₂ 纳米颗粒对 Cd ²⁺ 的吸附	蒋顺成,秦睿,李满林,李荣华,张增强,Amjad Ali,梁文 (3480)
硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征	沈伟航,朱能武,尹富华,吴平霄,张彦鸿 (3488)
人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能	崔蒙蒙,王殿升,黄天寅,刘锋 (3498)
生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能	牟锐,沈志强,周岳溪,陈学民,伏小勇,谭蕾蕾,瞿畏 (3508)
甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系	刘东,张小婷,张代钧,曾善文,卢培利 (3518)
光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制	胡倩,阳海,石妮,胡乐天,易兵 (3524)
宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响	王美娥,彭驰,陈卫平 (3532)
北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价	董捷,黄莹,李永霞,张厚勇,高甫威 (3540)
红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应	贾广梅,马玲玲,徐殿斗,成杭新,周国华,杨国胜,罗敏,路雨楠,刘志明 (3547)
外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应	辜娇峰,杨文骏,周航,张平,彭佩钦,廖柏寒 (3554)
改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应	杨兰,李冰,王昌全,刘倾城,张庆沛,肖瑞,李一丁 (3562)
生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果	周普雄,严颀,余震,王跃强,朱艺,周顺桂 (3575)
长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响	赵慧慧,肖娴,裴孟,赵远,梁玉婷 (3582)
应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响	曾清苹,何丙辉 (3590)
三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化	隋心,张荣涛,许楠,刘赢男,柴春荣,王继丰,付晓玲,钟海秀,倪红伟 (3598)
外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH ₄ 、CO ₂ 排放的短期影响	胡敏杰,任鹏,黄佳芳,仝川 (3606)
模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO ₂ 通量变化及其影响因素	杜兰兰,王志齐,王蕊,李如剑,吴得峰,赵慢,孙棋棋,高鑫,郭胜利 (3616)
太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性	严俊霞,郝忠,荆雪镨,李洪建 (3625)
生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响	王月玲,耿增超,王强,尚杰,曹胜磊,周凤,李鑫,刘福义,张萍 (3634)
氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响	辛月,尚博,陈兴玲,冯兆忠 (3642)
冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响	李洪建,杨艳,严俊霞 (3650)
堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究	李丹,何小松,席北斗,高如泰,张慧,黄彩红,党秋玲 (3660)
酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响	刘寒冰,杨兵,薛南冬 (3670)
《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289,3321,3422)	

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献

李乐^{1,2,3}, 王圣瑞^{1,2}, 焦立新^{1,2*}, 余佑金^{1,2}, 丁帅^{1,2}, 王跃杰⁴

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 3. 中北大学化工与环境学院, 太原 030051; 4. 山西省煤炭地质物探测绘院, 榆次 030600)

摘要: 选取了滇池外海北部、中部和南部柱状沉积物样品, 结合上覆水磷和柱状沉积物有机质数据, 研究了有机质(OM)及粒径组成对沉积物释放的影响, 并探讨了不同形态磷对沉积物释放的影响及贡献。结果表明: ①沉积物间隙水 ρ (DTP)和 ρ (SRP)均与 OM、沉积物黏土($<4.00\ \mu\text{m}$)和粉砂粒($4.00\sim63.00\ \mu\text{m}$)含量呈显著负相关, 但与砂砾($>63.00\ \mu\text{m}$)含量呈显著正相关, 表明沉积物有机质含量的增加显著降低了其间隙水中磷的质量浓度, 且黏土和粉砂粒含量的增加也会降低间隙水磷的质量浓度, 抑制了沉积物磷的释放。②滇池沉积物潜在可移动磷(BD-P和NaOH-nrp)与黏粒和粉砂砾均呈显著正相关, 与砂砾呈显著负相关, 表明黏粒和粉砂砾可能对沉积物磷的移动能力提升, 砂砾可能对沉积物磷的滞留能力提升。③在较短时间尺度内, 外海北部沉积物磷以释放为主, 中部和南部以滞留为主; 在较长时间尺度内, 外海北部和中部沉积物磷以释放为主, 南部的以滞留为主。控制滇池沉积物磷释放需要考虑不同磷形态特征及有机质和粒径的影响, 采取相应措施以主要控制滇池北部沉积物磷的释放。

关键词: 滇池; 沉积物; 磷形态; 粒径; 释放贡献

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3384-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.017

Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release

LI Le^{1,2,3}, WANG Sheng-rui^{1,2}, JIAO Li-xin^{1,2*}, YU You-jin^{1,2}, DING Shuai^{1,2}, WANG Yue-jie⁴

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Research Center of Lake Eco-Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China; 4. Shanxi Provincial Coal Geological Survey and Mapping Institute, Yuci 030600, China)

Abstract: Columnar sediment samples were collected from the Waihai of Lake Dianchi in northern, central and southern sediment, combined with the data of phosphorus in the overlying water and sediment organic matter, the effects of organic matter and particle size on sediment release were studied, and the influence of different forms of phosphorus release from sediments and their contributions were discussed. The results showed: Sediment pore water ρ (DTP) and ρ (SRP) was negatively correlated with contents of OM, clay ($<4.00\ \mu\text{m}$) and silt ($4.00\sim63.00\ \mu\text{m}$), but it showed a significant positive correlation with sand ($>63.00\ \mu\text{m}$) content. The increase in organic matter content of the sediments significantly reduced the gap water phosphorus mass concentration, and increasing clay and silt contents reduced the gap water phosphorus mass concentration, inhibiting the release of phosphorus in sediments. Potentially mobile phosphorus of the Lake Dianchi sediment was significantly positively correlated with the clay and silt contents, and was significantly negatively correlated with the sand content. It was indicated that clay and silt may enhance the phosphorus movement ability of the sediment, and the sand may enhance the retention of phosphorus in the sediment. In a short time scale, phosphorus of sediment was released mainly in northern Waihai, staying mainly in central and southern; in a longer time scale, phosphorus of sediment was released mainly in northern and central Waihai, staying mainly in southern. Control of phosphorus release from sediments in Lake Dianchi should take into account the effects of different forms of phosphorus, organic matter and particle size, and take corresponding measures to control the release of phosphorus in sediments of northern Dianchi mainly.

Key words: Lake Dianchi; sediment; phosphorus form; particle size; release contribution

磷是湖泊初级生产力限制性营养元素^[1], 也是导致水体富营养化的重要营养物质之一^[2]。水体磷来源可以分为外源和内源^[3]。沉积物是湖泊营养的内源, 沉积物磷的释放是湖泊水体中磷的重要来源之一, 尤其在外源减少的情况下, 营养丰富的沉积物

收稿日期: 2015-12-09; 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-004); 国家自然科学基金项目(U1202235)

作者简介: 李乐(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化机制, E-mail: 1195903350@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jiaolx@craes.org.cn

内负荷仍在一定时间内控制着水体的营养化水平^[4]。长期以来,学者们一直非常重视磷在湖泊水-沉积物界面吸附释放行为的研究^[5~8]。沉积物作为进入湖泊中污染物的汇,能够影响磷酸盐在沉积物-水分界面的转移和磷释放率^[9],进而对整个湖泊生态系统结构和功能产生重要的影响。通过测定湖泊柱状沉积物中磷的不同形态及其含量,对研究沉积物磷的行为特征和在沉积物与水界面的迁移以及湖泊富营养化状况具有重要意义^[10]。

滇池是我国著名的高原淡水湖泊,近年来富营养化程度日趋严重,其水体滞留时间长,沉积物中汇聚了大量氮、磷、重金属等污染物以及生物残体等有机物。磷在沉积物中以不同形态存在,并且每一种形态会根据不同条件对内负荷产生不同影响^[11]。沉积物理化性质众多,影响沉积物磷吸附释放的主要因素有沉积物有机质含量和粒径组成等。陈海龙等^[12]对苕溪干流沉积物磷形态分布和成因分析的研究中发现有机质和黏土矿物对沉积物中磷形态的影响最为显著。胡秀芳^[13]对东昌湖不同粒径沉积物吸附磷实验结果表明,沉积物颗粒越细,对磷的吸附能力也就越强。可见,磷形态与沉积物理化性质之间的相关性已有较多报道,但关于磷形态对沉积物释放贡献的研究鲜见报道,现有结果也仅仅是从沉积物磷释放风险的角度进行了探讨^[14,15]。本研究利用 SMT 法和离心法获取了滇池不同区域沉积物磷形态和底泥间隙水磷营养盐含量的垂向分布特征,并探讨了有机质含量及粒径组成对沉积物释放的影响,着重分析了磷形态对沉积物释放的贡献,以期客观评价沉积物中磷形态的释放能力及有针对性地采取措施以控制沉积物中不同形态磷的释放提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

使用 GPS 定位在滇池设置了采样点,根据不同区域沉积物污染特征差异将滇池划分为草海、外海北部、中部、南部这 4 个区域,并在外海北部、中部、南部各选取一个具有代表性的点(见图 1)。于 2013 年 5 月使用柱状采泥器采集柱状沉积物样品,现场切层收集表层 0~20 cm 样品。采集的样品经风干、研磨、过 100 目筛后,在室温条件下密封保存。

1.2 样品分析

上覆水中总磷(TP)及溶解性总磷(DTP)采用过硫酸钾-钼锑抗分光光度法测定,溶解性磷酸盐

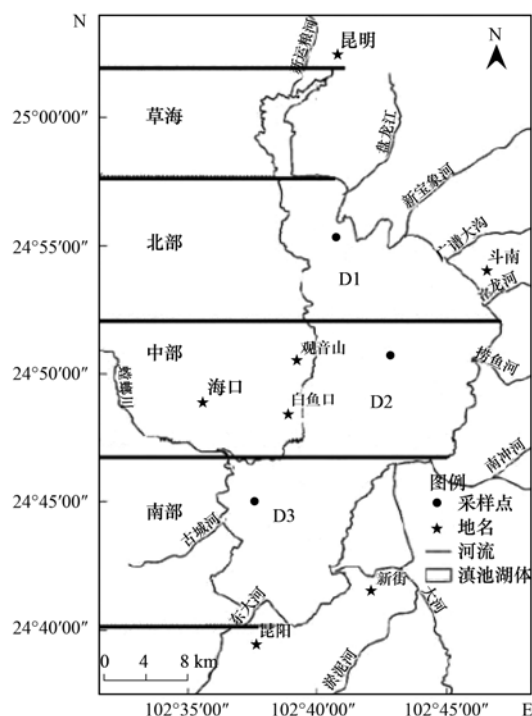


图 1 滇池采样点分布示意

Fig. 1 Distribution map of sampling points in Lake Dianchi

(SRP)采用钼锑抗分光光度法测定,具体方法参照文献[16],溶解性有机磷 $\rho(\text{DOP}) = \rho(\text{DTP}) - \rho(\text{SRP})$ 。沉积物总磷(TP)采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 法^[17],沉积物有机质含量根据沉积物在 500℃下煅烧 2 h 的烧失量计算^[18],沉积物磷形态提取方法采用 Psenner 等^[19]提出的连续提取法。

1.3 数据统计分析

图标制作采用 Origin 8.5 和 Surfer 11.0,统计结果采用 SPSS 17.0。

1.4 沉积物中磷形态分离提取

对于滇池沉积物磷形态的研究,可采用 Psenner 提出的连续提取法,这是目前国际上较为常用的磷提取方法,应用也较为广泛。磷形态提取步骤如图 2,该方法将沉积物磷分为: $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 BD-P 、 NaOH-rp 、 NaOH-TP 、 HCl-P 、 Res-P 。

2 结果与分析

2.1 柱状沉积物间隙水磷质量浓度垂向变化

滇池不同区域柱状沉积物间隙水磷质量浓度变化见图 3。不同采样点沉积物间隙水 DTP、SRP 和 DOP 随深度变化趋势不尽一致。外海北部 D1 点间隙水 $\rho(\text{DTP})$ 最高(0.46~0.95 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其次为南部 D3 点(0.20~0.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),外海中部 D2 点沉

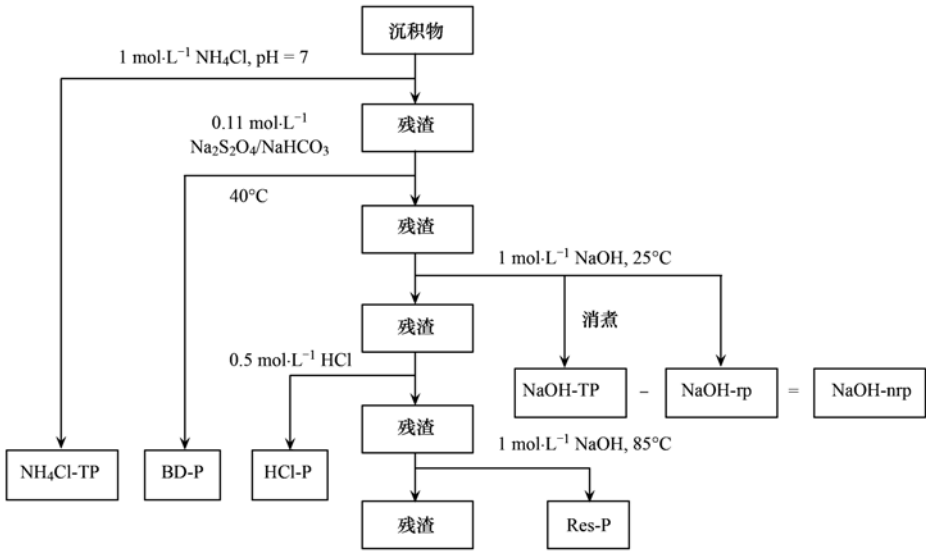


图 2 沉积物磷形态分级提取流程

Fig. 2 Flow chart of stepwise extraction of phosphorus speciation in sediments

积物间隙水 ρ (DTP)相对较低(0.03 ~ 0.23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 间隙水SRP以D1和D3点较高,分别为0.23 ~ 0.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.19 ~ 0.39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,二者均随沉积物深度增加呈现增加趋势. D2点间隙水 ρ (SRP)最低(0.01 ~ 0.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随着沉积物深度增加呈现降低趋势. 沉积物间隙水 ρ (DOP)仍以D1点最高(0.19 ~ 0.54 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),D2点间隙水 ρ (DOP)最低. 不同点间隙水DOP所占DTP比例不尽一致,尽管D3点间隙水 ρ (DTP)相对较高,但其DOP所占比例最低,平均仅占间隙水 ρ (DTP)的8.7%,D2点DOP所占比例相对较高,平均占间隙水 ρ (DTP)59.6%,D1点间隙水 ρ (DOP)平均占

ρ (DTP)的45.5%.

2.2 柱状沉积物潜在可移动磷形态垂向变化

$\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 是沉积物中的弱吸附态磷,主要是沉积物矿物颗粒表面吸附的磷酸盐,这种形态磷主要包括间隙水中磷、 CaCO_3 结合的磷,及沉积的植物碎屑中菌体细胞降解析出的磷. $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 是沉积物所有磷形态中含量最低的组分,尽管仅占总磷含量的1%左右,但其通常在环境条件变化时极容易重新进入水体,因此, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 是沉积物-水界面磷释放通量的重要指示指标,也是沉积物潜在可移动磷的组成部分. 滇池沉积物 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量较低,不同湖区3个点0 ~ 20 cm沉积物 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 平均仅占总磷含

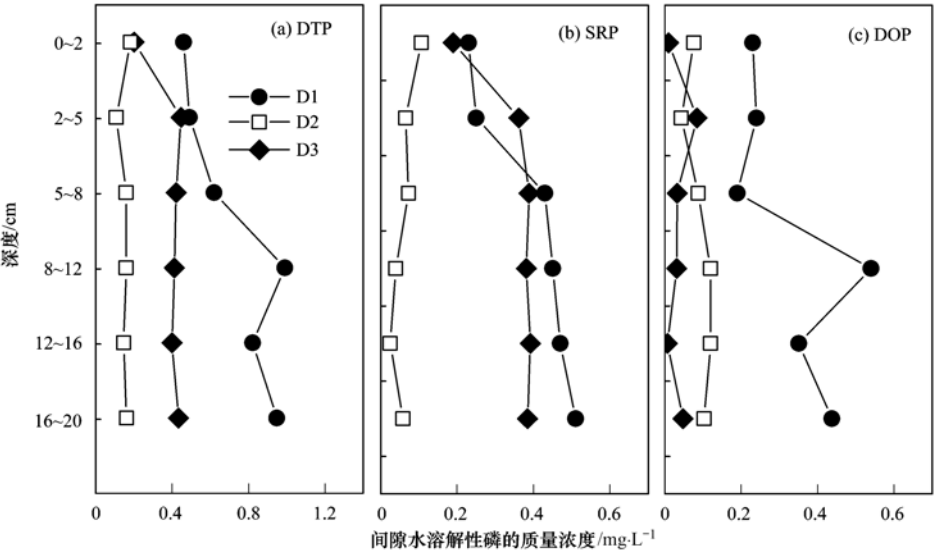


图 3 滇池柱状沉积物间隙水磷的质量浓度垂向变化

Fig. 3 Vertical variation of water and phosphorus mass concentration in the gap between the columns in Lake Dianchi

量的 0.22% ($n = 18$). 由图 4(a) 可见, 本研究中沉积物 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 以 D1 点最高, 平均 $4.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次为 D3 点, 平均为 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, D2 点 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量均较低, 仅为 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 总体来讲, D3 点沉积物 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量随着深度增加呈现增加趋势, 但 D1 点 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量则随着深度增加呈现降低趋势, D2 点随深度变化不明显.

BD-P 是一种氧化还原敏感性磷, 主要与铁的水合氧化物和锰复合物结合. 一般认为, 这种形态的磷是潜在可移动性磷的重要组成部分, 并可为藻类所利用, BD-P 通常被作为评价沉积物内源磷负荷的重要指示指标. 滇池沉积物 BD-P 含量相对较低, 不

同湖区 3 个点 0 ~ 20 cm 沉积物 BD-P 平均占总磷含量的 9.4% ($n = 18$), 由图 4(b) 可见, 本研究中 D2 点沉积物 BD-P 含量最高, 平均为 $178 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占沉积物 TP 含量的 11.3%; 其次为 D3 点, 平均含量为 $135 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 仅占 TP 含量的 5.8%; D1 点 BD-P 含量最低, 平均含量为 $81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占沉积物 TP 含量的 11.1%. 沉积物 BD-P 含量随深度增加总体呈现下降趋势. 可能因为: 随着沉积深度的增加, 非晶矿物变得有序化, 铁的氧化物和氢氧化物与磷的结合能力随之减弱^[20]; 溶解氧随深度增加不断降低, 使铁存在的氧化还原电位随之降低, 而氧化还原电位较高的表层沉积物抑制了磷酸根的迁移^[21].

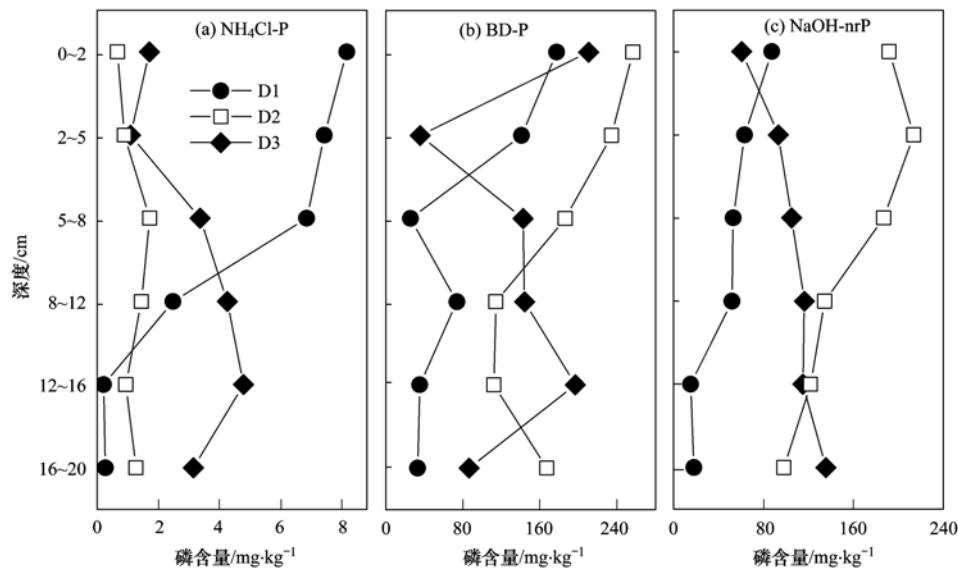


图 4 滇池沉积物潜在可释放磷的的垂向变化

Fig. 4 Vertical variation of potential releasable phosphorus in Lake Dianchi sediments

NaOH-nrp 为腐殖酸结合磷, 包括磷酸单酯、磷酸二酯、焦磷酸和多聚磷酸等有机磷化合物, 主要来源于生物有机体的沉积, 被认为是潜在可移动磷的重要组成部分. 滇池沉积物 NaOH-nrp 仅次于 BD-P 含量, 不同湖区 3 个点 0 ~ 20 cm 沉积物 NaOH-nrp 平均占沉积物 TP 含量的 6.6% ($n = 18$). 由图 4(c) 可见, 滇池沉积物 NaOH-nrp 含量以 D2 点含量最高, 平均为 $158 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 含量的 9.8%; D1 点含量最低, 平均为 $48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 含量的 6.6%; D3 点 NaOH-nrp 所占 TP 比例最低, 仅为 3.3%. 除 D3 点 NaOH-nrp 随深度增加呈现增加趋势外, 其它点 NaOH-nrp 均随深度增加呈现趋势. NaOH-nrp 平均含量随着沉积深度增加而减少可能是其出现了分解释放, 有一部分随着沉积深度的增加, 溶解氧含量随之降低, 厌氧程度越高, 而厌

氧条件加剧了有机质的矿化作用, 使 NaOH-nrp 转化为其他形态.

2.3 柱状沉积物稳定磷形态垂向变化

NaOH-rp 主要为 Al 氧化物或氢氧化物结合的磷形态, 该部分磷与 OH^- 或溶解的磷酸盐复合物发生交换而释放. $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是沉积物中最丰富的铝氢氧化物, 不仅具有较高的吸附能力, 而且可以在好氧和厌氧条件下稳定存在. 因此, NaOH-rp 被公认为沉积物较为稳定形态磷的组成部分, 沉积物 NaOH-rp 的增加对磷的滞留具有较大贡献. 滇池沉积物 NaOH-rp 含量相对较高, 不同湖区 3 个点沉积物 NaOH-rp 平均含量为 $311 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 含量的 22.1% ($n = 18$), 由图 5(a) 可见, 沉积物 NaOH-rp 以 D2 点含量最高, 平均含量为 $411 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 含量的 25.4%, 尽管 D1 点 NaOH-rp 含量最低 (245

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但其所占 TP 比例最高(32.0%),D3 点 NaOH-rp 含量相对较低,平均含量为 $280 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其所占 TP 比例最低,仅为 8.8%。总体来讲,D1 点 NaOH-rp 含量随深度增加呈现降低趋势,D2 和 D3 点则随着深度增加呈现先增后降趋势,拐点分别为 8~12cm 和 2~5cm。NaOH-rp 的“形成-释放-扩散”作用较显著,在沉积物表层与上覆水体的不断交换中,造成了沉积物表层高于底层^[22]。

HCl-P 主要是钙结合态磷,来源于陆源输入的碎屑岩以及自生磷灰石,一般环境条件下 Ca-P 不易释放,也难以被生物利用,但当沉积物环境为弱酸性条件下,一定程度上可被释放,而滇池水体呈现弱碱性,HCl-P 对水体磷质量浓度水平贡献较低,因此 HCl-P 被认为沉积物稳定态磷的重要组成部分。滇池沉积物 HCl-P 含量最高,不同湖区 3 个点沉积物 HCl-P 平均含量为 $1\,047 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 含量的 46.2% ($n=18$)。由图 5(b)可见,滇池沉积物 HCl-P 以 D3 点最高(平均 $2\,304 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),占 TP 含量的 64.1%;D1 点 HCl-P 含量最低(平均 237

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),占 TP 含量的 37.2%;D2 点 HCl-P 含量为 $600 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 含量的 37.2%。总体来讲,滇池沉积物 HCl-P 含量由北向南分布呈现增加趋势。除 D1 点 HCl-P 含量随深度增加呈现降低趋势外,其它点均随深度增加呈现先增后降趋势,但变化趋势均不明显,其中 D3 点在 2~5cm 区间 HCl-P 含量比表层 0~2 cm 显著增加。这与冀峰等^[23]研究结果一致:沉积物中 TP 含量的增加主要来自 HCl-P,其不易在沉积剖面中进行上下层间的迁移。

Res-P 是最稳定的磷形态,也被称为惰性磷,其中大部分为难溶解磷和稳定的有机磷。滇池沉积物 Res-P 含量相对较高,不同湖区 3 个点沉积物 Res-P 平均含量为 $350 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 含量的 15.5% ($n=18$)。由图 5(c)可见,D1 点沉积物 Res-P 含量最低(平均 $90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且随深度增加呈现降低趋势,D2 和 D3 点沉积物 Res-P 平均含量分别为 $254 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $706 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,二者随深度增加呈现显著增加趋势。

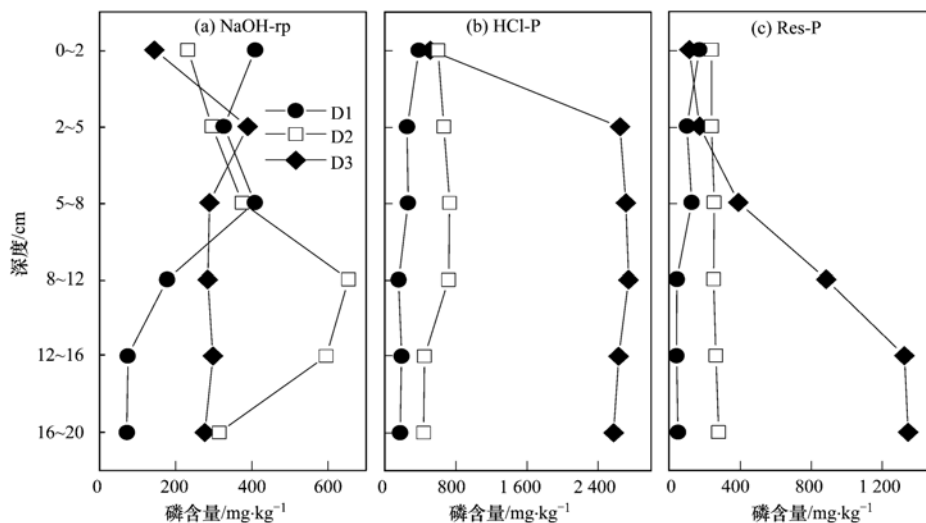


图 5 滇池柱状沉积物稳定磷形态垂向变化

Fig. 5 Vertical variation of the stable phosphorus forms in the columnar sediments of Lake Dianchi

3 讨论

3.1 有机质及粒径组成对沉积物磷释放的影响

根据稳态扩散下的 Fick 第一定律,单位时间内通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散物质流量(扩散通量)与该面积处的浓度梯度成正比^[24]。也就是说,沉积物磷迁移及释放取决于柱状沉积物垂直或水平方向上相邻两层之间间隙水的浓度梯度^[25]。在同一垂直剖面,当上层沉积物间隙水磷浓度高于下层时,沉积物中磷酸盐由高浓度区间向低

浓度区间垂直扩散,形成了磷酸盐由表层沉积物向底层沉积物迁移的趋势。相反,当下层沉积物间隙水磷浓度高于上层时,磷酸盐则由底层沉积物向表层沉积物迁移。

本研究中不同点柱状沉积物间隙水磷的质量浓度差异明显,D1 点沉积物间隙水 $\rho(\text{DTP})$ 和 $\rho(\text{DOP})$ 均显著高于其它点,而且其最高值出现在 8~12 cm 区间,表明 D1 点沉积物 DOP 在 8~12 cm 处存在分别向表层沉积物和底层沉积物迁移的趋势。相比较而言,沉积物间隙水 $\rho(\text{SRP})$ 则在 5~8 cm 区间显著

增加,之后随深度增加间隙水 ρ (SRP)变化较小,表明以5~8 cm为分界点,沉积物SRP存在由底层向表层沉积物迁移的趋势. D3点沉积物间隙水DTP、DOP和SRP随深度变化趋势相似,即均在2~5 cm区间间隙水磷质量浓度显著增加,表明D3点沉积物以2~5 cm为分界点,沉积物SRP存在由底层向表层沉积物迁移的趋势. 相反,D2点沉积物间隙水 ρ (SRP)与D1和D3点形成了鲜明对比,即间隙水 ρ (SRP)随深度增加呈现降低趋势,表明其间隙水SRP存在由表层沉积物向底层沉积物迁移的趋势. 可见,滇池不同湖区沉积物间隙水磷质量浓度差异较大,而且其垂直扩散趋势不尽一致.

滇池表层沉积物粒径基本上以细颗粒为主^[26],参照乌顿-温德华氏粒级标准,将沉积物粒径组分为黏土(<4.00 μm)、粉砂粒(4.00~63.00 μm)、砂砾(>63.00 μm)这三大类. 滇池沉积物有机质和粒径分级的垂向变化如图6和图7所示.

通常情况下,间隙水与上覆水磷浓度梯度是影响沉积物-水界面磷释放的主导因素,在上覆水营养盐浓度一定的条件下,沉积物磷吸附和释放取决于间隙水磷浓度. 通过对沉积物间隙水磷质量浓度与磷形态及沉积物性质之间的关系(见表1)的研究,得出沉积物间隙水 ρ (DTP)和 ρ (SRP)均与OM呈现显著负相关关系($P<0.001, n=18$),但与间隙水DOP相关性不显著($P>0.05, n=18$),表明沉积物有机质含量增加显著降低了其间隙水中磷酸盐的质量浓度. 前人研究认为,有机质是影响沉积物/水

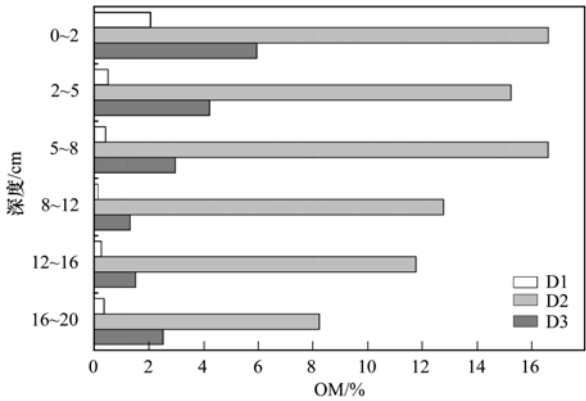


图6 沉积物有机质的垂向变化
Fig. 6 Vertical variation of organic matter in sediments

表1 沉积物间隙水磷质量浓度与磷形态及沉积物性质之间的关系¹⁾

	DTP	SRP	DOP
TN	-0.810 **	-0.906 **	-0.45
TP	-0.28	0.14	-0.666 **
OM	-0.778 **	-0.867 **	-0.44
NH ₄ Cl-P	0.13	0.22	-0.01
BD-P	-0.709 **	-0.635 **	-0.562 *
NaOH-rP	-0.550 *	-0.577 *	-0.36
NaOH-nrP	-0.771 **	-0.671 **	-0.640 **
HCl-P	-0.14	0.29	-0.583 *
Res-P	-0.18	0.17	-0.509 *
黏土(<4.00 μm)	-0.806 **	-0.818 **	-0.536 *
粉砂粒(4.00~63.00 μm)	-0.881 **	-0.934 **	-0.548 *
砂砾(>63.00 μm)	0.883 **	0.929 **	0.557 *

1) *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$

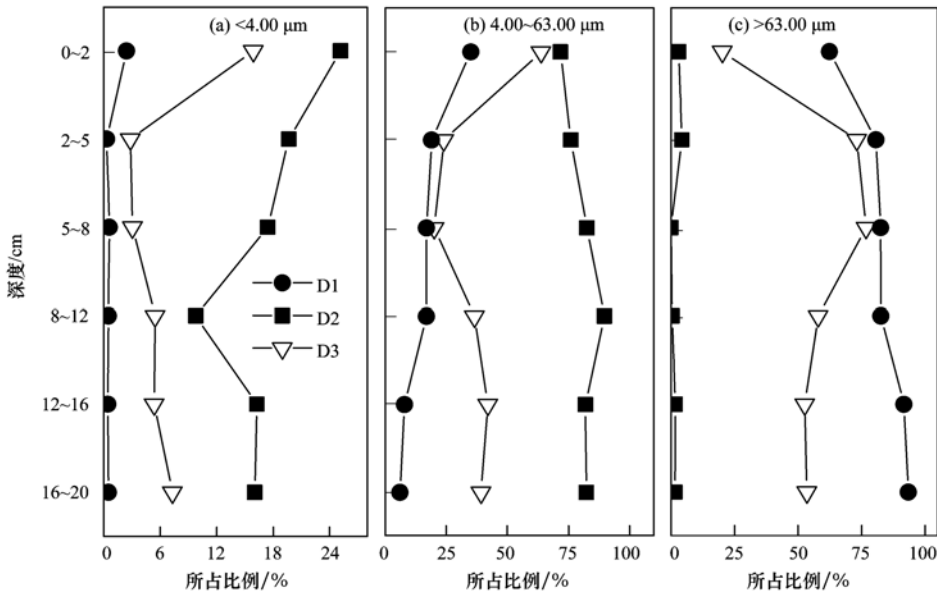


图7 沉积物粒径分级的垂向变化
Fig. 7 Vertical variation of grain size of sediment

界面磷迁移和释放的重要因素之一^[27,28],但由于沉积物/水界面环境条件较为复杂,不同研究结果不尽一致. Wang 等^[29]研究发现沉积物有机质抑制了沉积物 SRP 的释放,但促进了溶解性有机磷释放,随着有机质含量增加,沉积物有机和无机磷吸附能力均显著增强. 有研究表明,沉积物有机质好氧微生物降解过程中可使沉积物/水界面氧化还原电位降低,作为电子受体的 MnO_2 、 FeOOH 和 SO_4^{2-} 等被还原成溶解性的 $\text{Fe}(\text{II})$ 和 $\text{Mn}(\text{II})$,从而导致与铁锰氧化物吸附和结合的磷形态大量释放出来^[30]. 除此之外,本研究发现间隙水 $\rho(\text{DTP})$ 、 $\rho(\text{SRP})$ 和 $\rho(\text{DOP})$ 均与沉积物黏土 ($< 4.00 \mu\text{m}$) 和粉砂粒 ($4.00 \sim 63.00 \mu\text{m}$) 含量之间呈现显著负相关关系,但与砂砾 ($> 63.00 \mu\text{m}$) 含量之间呈现显著正相关关系,表明黏土和粉砂粒含量的增加也会降低间隙水中磷酸盐的质量浓度,从而抑制沉积物磷的释放,尤其 SRP 表现更为显著. 故可能因为沙土黏粒和粉粒微团聚体对磷的富集作用比较强^[31]:黏土中腐殖质含量显著高于砂砾;黏土中有机质是通过可溶有机质与黏土矿物相互结合形成复合体而富集,黏土和粉砂粒中的铁铝键有机矿物质复合体所占比例显著高于砂砾,在对磷吸附中发挥重要作用,其吸附机制除孔隙填充方式外,还存在

铁铝氧化物及水化氧化物对磷的配位吸附. 这也进一步证明了沉积物 BD-P、NaOH-rp、NaOH-nrp 与间隙水磷的质量浓度呈现显著负相关关系的原因. 可见,磷形态组成中,沉积物 BD-P、NaOH-rp、NaOH-nrp 的所占比例的增加对沉积物/水界面磷释放通量有较强的抑制作用.

3.2 磷形态对沉积物释放的影响及贡献

磷快速释放速率是通过比较在柱状沉积物最上面两层的 P 含量的变化,而慢释放速率是比较表层和底层磷含量的变化^[32].

快释放速率:

$$V_1 = \frac{(k_1 - k_2) \times 100\%}{\sum_{i=1}^n |k_1 - k_2|}$$

慢释放速率:

$$V_2 = \frac{(k_1 - k_3) \times 100\%}{\sum_{i=1}^n |k_1 - k_3|}$$

式中, n 为 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、BD-P、NaOH-rp、NaOH-nrp、HCl-P、Res-P, k_1 为 0 ~ 2 cm 磷含量, k_2 为 2 ~ 5 cm 磷含量, k_3 为 16 ~ 20 cm 磷含量,单位均为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 结果如表 2,在高原湖泊环境下, V 为正,表明此形态磷以释放为主; V 为负,表明此形态磷以滞留为主.

表 2 沉积物磷形态不同时间尺度上的释放贡献

Table 2 Release contribution of phosphorus from sediments in different time scales

时间尺度	采样点	沉积物磷形态释放贡献/%					
		$\text{NH}_4\text{Cl-P}$	BD-P	NaOH-rp	NaOH-nrp	HCl-P	Res-P
快释放 (较短时间尺度)	D1	0.21	10.59	24.08	7.05	38.07	20.00
	D2	-0.13	12.81	-36.79	-12.77	-37.22	0.29
	D3	0.02	6.60	-9.27	-1.23	-80.70	-2.17
	平均值	0.04	10.00	-7.33	-2.32	-26.62	6.04
慢释放 (较长时间尺度)	D1	0.89	16.29	38.00	7.82	23.57	13.43
	D2	-0.13	19.16	-17.58	20.05	34.47	-8.61
	D3	-0.04	3.42	-3.65	-2.06	-56.90	-33.93
	平均	0.24	12.96	5.59	8.60	0.38	-9.70

D1 点每一种形态 P 的快释放和慢释放贡献均为正,故都是释放的,其中释放贡献最大的是 NaOH-rp 和 HCl-P. 可能是因为滇池北部富营养化严重,藻类及浮游植物的大量繁殖过程中,沉积物-水界面处于厌氧状态, Fe^{3+} 会被还原成为可溶的 Fe^{2+} , NaOH-rp 较易被释放^[33]. 同时, Kopáček 等^[34]提出深层缺氧时,湖泊中 Al-NaOH/Fe-BD 的比率高于 25 的界限值时,不释放大量磷. 其中 NaOH-rp 的快释放和慢释放贡献分别为 24.08% 和 38.00%, D1 点沉积物中 Al-NaOH/Fe-BD 的比值为 2.31,故外海北

部的磷有较大的释放风险. HCl-P 的快释放和慢释放贡献分别为 38.07% 和 23.75%,这可能主要与滇池区域磷酸盐矿较多并不断被开采、含磷废水输入关系密切. 同时,在成岩作用过程中不稳定的水合磷酸盐等也会向较为稳定的磷灰石转化. 这可能与近年来滇池北部富营养化加剧过程中,湖泊浮游生物对内源生物可利用性 Fe/Al-P 需求,进而表现为有机磷的相对累积所致. 表层生物生长较旺盛,其代谢物及残体中含较多的钙质,导致表层 Ca-P 含量远高于底部,其在微生物作用下具有释放潜力,故

需引起足够重视^[35]。

D2 点在较短时间尺度以滞留为主,较长时间尺度以释放为主。其中 NaOH-rp、HCl-P 和 NaOH-nrp 的快释放贡献分别为 -36.79%、-37.22% 和 -12.77%。滇池南部有丰富的磷矿分布,矿石矿物主要由胶磷矿中的氟磷灰石组成,氟磷灰石稳定性较高,大量氟磷灰石在雨季随暴雨冲刷沉积于滇池,导致沉积物中稳定性磷含量较高。另外,相对草海的厌氧环境,好氧条件下沉积物-水界面扩散边界层会限制间隙水中磷向上覆水扩散,因此 HCl-P 和 NaOH-rp 以滞留为主。有机磷化合物在厌氧、缺氧、好氧条件下均会被相应的微生物分解为活性可溶性磷,其释放速率与微生物的活性密切相关。NaOH-nrp 主要受到人类活动及有机质累积的影响,外源污染物的输入较少,该区域生物有机磷含量在全湖中处于较低水平,故不易释放。

D3 点快释放和慢释放贡献均为负,故 D3 点也是以滞留为主的点,其中 HCl-P 的快释放和慢释放贡献高达 -80.70% 和 -56.90%。钙磷的组成比较恒定,其主要来源是各种难溶性的磷酸矿物,是沉积物早期成岩的最终产物之一。Res-P 是最稳定的磷形态,其慢释放贡献也极高(-33.93%),南部地区受到人类活动的影响小于北部地区,生活污水及工业废水入湖量相对较低,有机质含量明显低于北部湖区,表层沉积物氧化还原电位维持在较高水平。Res-P 含量偏高的原因可能有:聚磷菌可吸收磷酸盐,使其聚集在生物细胞内部形成聚磷酸盐,使聚磷

酸盐颗粒占据其全部细胞体积^[36]; Res-P 可能与早期成岩过程中形成的稳定含磷自生矿物有关^[37]。通过比较滇池外海在较长时间尺度上的释放贡献,不难发现从北到南的释放贡献,从以释放为主变为以滞留为主,有向北部迁移的趋势。外海北部有极大的释放风险,南部释放风险较低,故控制分区以控制滇池北部为主。

通过表 3 可以发现沉积物 BD-P 和 NaOH-nrp 的含量均与 OM、沉积物黏土(<4.00 μm)和粉砂粒(4.00 ~ 63.00 μm)含量之间呈现显著正相关关系,但与砂砾(>63.00 μm)含量之间呈现显著负相关关系。沉积物有机质主要来源于外源有机颗粒及水生生物残体的累积,且有机质可以影响沉积物对磷的吸附作用。有机质在其矿化过程中通过有机胶体形成胶膜覆盖在铁铝钙等矿物的表面来减少其与磷酸盐的接触^[38],进而减少了矿物对磷的固定,矿化过程最终将有机磷转化为无机磷并降低环境的氧化还原电位。有机质的阴离子通过专性吸附进入矿物颗粒^[39],使吸附于矿物表面的磷酸盐阴离子释放进入上覆水。但也有研究发现,有机质能够与金属离子形成复合体,为磷酸盐离子提供更多的吸附位点,从而增加沉积物对磷的吸附作用。滇池沉积物潜在可移动磷(BD-P 和 NaOH-nrp)与有机质呈现显著的正相关关系($P < 0.01$),表明有机质可能对沉积物磷的移动能力有所提升,滇池沉积物有机质对沉积物磷的影响可能以释放为主。

表 3 沉积物磷形态与沉积物性质之间的关系

Table 3 Relationship between sediment phosphorus forms and sediment properties

	NH ₄ Cl-P	BD-P	NaOH-rp	NaOH-nrp	HCl-P	Res-P
TN	-0.475 *	0.593 **	0.390	0.679 **	-0.269	-0.275
TP	0.132	0.146	0.185	0.389	0.967 **	0.864 **
OM	-0.492 *	0.592 **	0.403	0.821 **	-0.188	-0.146
黏土(<4.00 μm)	-0.482 *	0.730 **	0.181	0.761 **	-0.144	0.001
粉砂粒(4.00 ~ 63.00 μm)	-0.356	0.636 **	0.522 *	0.732 **	-0.131	0.054
砂砾(>63.00 μm)	0.391	-0.670 **	-0.458	-0.753 **	0.137	-0.043

因为沉积物中细颗粒越多,有机质含量越高^[40]。同时,在粗粒级中有机质是通过颗粒有机质与矿物颗粒相互共生而富集,在细粒级中有机质则是通过可溶有机质与黏土矿物相互结合形成复合体而富集^[41]。所以黏土和粉砂砾对磷的固持能力增大,滇池沉积物潜在可移动磷(BD-P 和 NaOH-nrp)与黏土和粉砂砾均呈现显著的正相关关系,表明黏土和粉砂砾也可能对沉积物磷的移动能力有所提升,滇池沉积物黏土和粉砂砾对沉积物磷的影响可

能以释放为主。同理,BD-P 和 NaOH-nrp 均与砂砾呈现显著的负相关关系,表明砂砾可能对沉积物磷的滞留能力有所提升,滇池沉积物砂砾对沉积物磷的影响可能以滞留为主。

4 结论

(1) 沉积物间隙水 ρ (DTP)和 ρ (SRP)均与 OM 呈现显著负相关关系($P < 0.001, n = 18$),但与间隙水 DOP 相关性不显著($P > 0.05, n = 18$),表明沉积

物有机质含量增加显著降低了其间隙水中磷酸盐的质量浓度. 本研究发现间隙水 $\rho(\text{DTP})$ 、 $\rho(\text{SRP})$ 和 $\rho(\text{DOP})$ 均与沉积物黏土($< 4.00 \mu\text{m}$)和粉砂粒($4.00 \sim 63.00 \mu\text{m}$)含量之间呈现显著负相关关系,但与砂砾($> 63.00 \mu\text{m}$)含量之间呈现显著正相关关系,表明黏粒和粉砂粒含量的增加也会降低间隙水中磷酸盐的质量浓度,抑制了沉积物磷的释放.

(2) 滇池沉积物潜在可移动磷(BD-P和NaOH-nrp)与黏土和粉砂砾均呈现显著的正相关关系,表明黏粒和粉砂砾也可能对沉积物磷的移动能力提升,其对沉积物磷的影响可能以释放为主. 与砂砾均呈现显著的负相关关系,表明砂砾可能对沉积物磷的滞留能力提升,对沉积物磷的影响可能以滞留为主.

(3) 就目前滇池外海而言,在较短时间尺度内,外海北部沉积物磷以释放为主,中部和南部以滞留为主;在较长时间尺度内,外海北部和中部沉积物磷以释放为主,南部的以滞留为主. 沉积物间隙水中TP、SRP的分布总体上是北高南低,这与滇池水质情况、有机质含量及粒径组成密切相关. 控制滇池沉积物磷释放需要考虑不同磷形态特征及有机质和粒径的影响,采取相应措施以主要控制滇池北部沉积物磷的释放.

参考文献:

- [1] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506**(1-3): 135-145.
- [2] SanClements M D, Fernandez I J, Norton S A. Soil and sediment phosphorus fractions in a forested watershed at Acadia National Park, ME, USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **258**(10): 2318-2325.
- [3] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-lakes Volvi and Koronia N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [4] 徐洋. 氧化还原环境制约湖泊沉积物内源磷释放过程的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [5] 钱宝, 刘凌, 肖潇, 等. 湖泊沉积物-水微界面上磷的释放过程研究[J]. *水利学报*, 2014, **45**(4): 482-489.
- [6] 何佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征[J]. *湖泊科学*, 2015, **27**(5): 799-810.
- [7] Zhang S W, An W C, Li X M. Research on phosphorus loads and characteristics of adsorption and release in surface sediments of Nanyang Lake and Weishan Lake in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(1): 4103.
- [8] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 951-957.
- [9] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(1): 53-61.
- [10] 向速林, 周文斌. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(5): 649-654.
- [11] Christophoridis C, Fytianos K. Conditions affecting the release of phosphorus from surface lake sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1181-1192.
- [12] 陈海龙, 袁旭音, 王欢, 等. 苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 464-470.
- [13] 胡秀芳. 东昌湖沉积物磷形态及吸附释放特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [14] Li L P, Liu L, Wang S R, et al. Spatial distribution of phosphorus fractions in sediment and the potential mobility of phosphorus in Dianchi Lake [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(5): 3721-3731.
- [15] 唐文坤, 李茹忠, 钱靖, 等. 合肥城郊典型排水沟渠沉积物磷形态及其释放风险[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(1): 73-80.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(1): 51-56.
- [18] Murphy T, Lawson A, Kumagai M, et al. Release of phosphorus from sediments in Lake Biwa [J]. *Limnology*, 2001, **2**(2): 119-128.
- [19] Psenner R, Boström B, Dinka M, et al. Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment [J]. *Archiv für Hydrobiologie Beihefte*, 1988, **30**: 83-112.
- [20] 潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(1): 43-47.
- [21] 王雨春, 马梅, 万国江, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(1): 21-27.
- [22] 周庆红, 姚素平, 高良敏, 等. 杨庄采煤塌陷水域沉积物中氮磷形态垂向分布特征[J]. *江苏农业科学*, 2015, **43**(4): 321-323.
- [23] 冀峰, 王国祥, 韩睿明, 等. 太湖流域农村黑臭河流沉积物中磷形态的垂向分布特征[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 55-63.
- [24] Kaspar H F, Asher R A, Boyer I C. Microbial nitrogen transformations in sediments and inorganic nitrogen fluxes across the sediment/water interface on the South Island West Coast, New Zealand [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, **21**(2): 245-255.
- [25] 陈国元, 周易勇. 不同生态修复措施对滇池沉积物无机氮迁移转化影响[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(11): 18-24.
- [26] 张远, 石陶然, 于涛, 等. 滇池典型湖区沉积物粒径与重金属分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(4): 370-379.
- [27] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, et al. Effects of organic matter on phosphorus release kinetics in different trophic lake sediment s and application of transition s t ate theory [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(4): 845-852.
- [28] Wang S R, Yi W L, Yang S W, et al. Effects of light fraction organic matter removal on phosphate adsorption by lake sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2011, **26**(3): 286-292.
- [29] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, et al. Effect of organic matter on the sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake

- sediments[J]. Colloid and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, **297**(1-3): 154-162.
- [30] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface[A]. In: Persson G, Jansson M (Eds.). Phosphorus in Freshwater Ecosystems [M]. Netherlands: Springer, 1988. 229-244.
- [31] 王而力, 王嗣洪, 徐颖. 沙土不同粒径微团聚体对磷的富集特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(3): 827-834.
- [32] Hupfer M, Lewandowski J. Retention and early diagenetic transformation of phosphorus in Lake Arendsee (Germany)-consequences for management strategies [J]. Archiv für Hydrobiologie, 2005, **164**(2): 143-167.
- [33] 张喜, 刘凌, 王流通, 等. 大纵湖沉积物中磷形态特征分析[J]. 水电能源科学, 2014, **32**(2): 46-49.
- [34] Kopáček J, Borovec J, Hejzlar J, *et al.* Aluminum control of phosphorus sorption by lake sediments [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(22): 8784-8789.
- [35] 宋媛媛, 冯慕华, 苏争光, 等. 抚仙湖不同来源沉积物磷形态垂向分布特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2579-2589.
- [36] Khoshmanesh A, Hart B T, Duncan A, *et al.* Luxury uptake of phosphorus by sediment bacteria[J]. Water Research, 2002, **36**(3): 774-778.
- [37] 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.
- [38] Oberson A, Fardeau J C, Besson J M, *et al.* Soil phosphorus dynamics in cropping systems managed according to conventional and biological agricultural methods[J]. Biology and Fertility of Soils, 1993, **16**(2): 111-117.
- [39] Kastelan-Macan M, Petrovic M. The role of fulvic acids in phosphorus sorption and release from mineral particles[J]. Water Science and Technology, 1996, **34**(7-8): 259-265.
- [40] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(S): 24-29.
- [41] 蔡进功, 徐金鲤, 杨守业, 等. 泥质沉积物颗粒分级及其有机质富集的差异性[J]. 高校地质学报, 2006, **12**(2): 234-241.
- [42] 李正磊. 洱海沉积物磷形态纵向分布及有机质、酶对其影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrite	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yan, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jinxi Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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