

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

**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

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 ..... 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 ..... 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 ..... 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 ..... 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM<sub>10</sub>可替代源成分谱的建立方法及其应用 ..... 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 ..... 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 ..... 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 ..... 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 ..... 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 ..... 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 ..... 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 ..... 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 ..... 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 ..... 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 ..... 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 ..... 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 ..... 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 ..... 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 ..... 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 ..... 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 ..... 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 ..... 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 ..... 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 ..... 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>对厌氧氨氧化污泥活性的影响 ..... 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 ..... 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N<sub>2</sub>O 产生量的影响 ..... 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 ..... 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 ..... 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 ..... 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 ..... 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 ..... 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 ..... 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 ..... 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 ..... 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 ..... 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 ..... 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 ..... 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 ..... 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 ..... 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 ..... 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 ..... 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 ..... 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N<sub>2</sub>O 产生的影响 ..... 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 ..... 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 ..... 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 ..... 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 ..... 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

# 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性

熊强<sup>1,2,3</sup>, 焦立新<sup>1,2</sup>, 王圣瑞<sup>1,2\*</sup>, 彭希珑<sup>3</sup>

(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湖泊生态环境创新基地, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012; 3. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031)

**摘要:** 选取了滇池 4 个代表性柱状沉积物样品, 研究了其不同形态有机磷含量及垂直分布, 并利用酶水解技术表征了其不同形态有机磷生物有效性。结果表明: ①除水提取磷( $H_2O-P_o$ )外, 滇池沉积物可提取磷以无机磷为主, 其各形态有机磷含量大小为 NaOH 提取有机磷( $NaOH-P_o$ ) >  $NaHCO_3$  提取有机磷( $NaHCO_3-P_o$ ) >  $H_2O-P_o$  > HCl 提取有机磷( $HCl-P_o$ ), 其中  $H_2O-P_o$ 、 $NaHCO_3-P_o$  与  $NaOH-P_o$  迁移性较高, 其含量垂直分布呈现表层 > 中层 > 底层趋势。②滇池沉积物酶可水解磷(EHP)以活性单酯磷为主, 其  $H_2O-P_o$ 、 $NaHCO_3-P_o$  与  $NaOH-P_o$  酶可水解磷含量分别在 0.11 ~ 5.93、0 ~ 45.32 与 0 ~ 107.11  $mg \cdot kg^{-1}$ ; 各形态有机磷 EHP 含量大小为  $NaOH-P_o$  >  $NaHCO_3-P_o$  >  $H_2O-P_o$ , 且呈现表层 > 中层 > 底层趋势; 不同深度沉积物有机磷生物有效性大小为表层 > 中层 > 底层。③EHP 是滇池沉积物生物有效性磷的重要来源, 滇池水质保护应考虑沉积物 EHP 对其水质的影响。当外部磷负荷逐步得到控制后, 沉积物 EHP 生物地球化学循环对维持滇池富营养化具有重要作用。

**关键词:** 滇池; 沉积物; 有机磷; 垂直分布; EHP; 生物有效性

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4118-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.011

## Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake

XIONG Qiang<sup>1,2,3</sup>, JIAO Li-xing<sup>1,2</sup>, WANG Sheng-rui<sup>1,2</sup>, PENG Xi-long<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Environment and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** The content and vertical distribution characteristics of organic phosphorus were studied by collecting core sediments of Dianchi Lake, characterizing the bioavailability of different organic phosphorus species of these sediments by enzymatic hydrolysis. The results indicated that, ①The inorganic phosphorus represented primary portions of extractable phosphorus of sediments in Dianchi Lake, except for the  $H_2O$  extractable organic phosphorus ( $H_2O-P_o$ ). The rank of order of organic phosphorus fractionation in sediments was NaOH extractable organic phosphorus ( $NaOH-P_o$ ) >  $NaHCO_3$  extractable organic phosphorus ( $NaHCO_3-P_o$ ) >  $H_2O-P_o$  > HCl extractable organic phosphorus ( $HCl-P_o$ ). The vertical distribution of  $NaOH-P_o$ ,  $NaHCO_3-P_o$  and  $H_2O-P_o$  with relatively high mobility showed the trend of top layer > middle layer > bottom layer. ② Labile monoester P predominated in enzymatically hydrolysable phosphorus (EHP) of sediments in Dianchi Lake. The EHP content of  $NaOH-P_o$ ,  $NaHCO_3-P_o$  and  $H_2O-P_o$  in sediments of Dianchi Lake were 0.11-5.93, 0-45.32 and 0-107.11  $mg \cdot kg^{-1}$ , respectively. The EHP content of different organic phosphorus species followed the order;  $NaOH-P_o$  >  $NaHCO_3-P_o$  >  $H_2O-P_o$ , with the trend of vertical distribution of top layer > middle layer > bottom layer. The bioavailability of organic phosphorus of different depth showed the order of top layer > middle layer > bottom layer. ③ EHP was a considerable source of the bioavailable phosphorus of sediments in Dianchi Lake. The protection of water quality in Dianchi Lake should consider the effects of EHP in sediments. When the external phosphorus load was restricted gradually, the biogeochemical cycle of EHP in sediments might play an important role in maintaining the eutrophication of Dianchi Lake.

**Key words:** Dianchi Lake; sediments; organic phosphorus; vertical distribution; EHP; bioavailability

磷是湖泊生态系统限制性营养元素, 而沉积物作为湖泊磷的“汇”与“源”, 其对湖泊磷循环具有重要影响<sup>[1]</sup>. 沉积物磷在形成稳定矿物(永久埋藏)前, 若受有机质矿化降解驱动, 可发生复杂的迁移转化<sup>[2]</sup>. 当外源磷输入逐步得到控制后, 沉积物磷将成为湖泊重要磷源. 因此, 关于水-沉积物界面磷迁移转化及生物有效性等方面的研究较多<sup>[3,4]</sup>. 多种磷形态分级方法被用于表征沉积物磷含量及其形态

特征<sup>[2,5,6]</sup>. 然而这些方法只能定量分析沉积物不同形态有机磷(organic phosphorus, OP)含量, 无法揭示有机磷的结构及其生物有效性. 无机磷(inorganic

收稿日期: 2014-04-16; 修订日期: 2014-05-29

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

作者简介: 熊强(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境评价与监测, E-mail: 1454021934@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: wangsr@craes.org.cn

phosphorus, IP) 是沉积物生物可利用磷的主要形态, 以前湖泊富营养化研究重点关注了无机磷. 但是, 湖泊沉积物中的磷脂、肌醇磷酸盐及核酸等多种有机磷化合物可被磷酸酶水解转化为无机磷而被藻类或微生物等利用<sup>[7]</sup>, 且湖泊沉积物有机磷占其总磷 (TP) 比例高达 12% ~ 42%<sup>[8]</sup>. 当上覆水或底泥无机磷消耗殆尽时, 沉积物有机磷经磷酸酶水解后可为湖泊维持富营养化提供生物可利用磷源. 因此, 研究沉积物有机磷组成及其生物有效性对于深入阐明富营养化湖泊磷循环机制尤为重要.

滇池水污染严重, 每逢春、秋两季, 藻类“水华”频繁暴发. 近年来, 滇池外源磷输入已得到一定程度控制, 但其水质并未明显改善. 内源磷负荷可能是维持滇池富营养化的重要因素. 有关滇池沉积物磷内负荷的报道较多<sup>[9~11]</sup>, 且多集中在总磷、无机磷等方面, 而对沉积物有机磷却鲜有报道, 尤其针对不同形态有机磷及其垂直分布特征和生物有效性方面研究较少. 因此, 本研究采用改进的 Hendly 连续提取法分级提取滇池柱状沉积物有机磷<sup>[12]</sup>, 并用酶水解技术分析其酶可水解磷 (enzymatically hydrolysable phosphorus, EHP)<sup>[7,13,14]</sup>, 以期揭示滇池沉积物不同形态有机磷垂直分布及生物有效性, 可为全面评价滇池沉积物磷生物有效性提供依据. 保护滇池水质应重视沉积物 EHP 的贡献, 沉积物 EHP 生物地球化学循环可能也是维持滇池富营养化的重要机制<sup>[7]</sup>.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

滇池以海埂为界分为北部草海和南部外海, 用 GPS 定位在滇池选取了 4 个代表性采样点位 (图 1), 分别为草海 (D2) 和外海北、中、南 (D10、D18、D32). 其中, 草海 D2 和外海 D10 是滇池北岸重污染排水区和藻类密集区, 外海 D18 为花卉主生产区, 外海 D32 则靠近磷矿和磷肥厂. 2013 年 5 月在采样点处用装有有机玻璃管 ( $D = 10 \text{ cm}$ ,  $L = 100 \text{ cm}$ ) 的柱状采样器采集沉积物柱样, 上部用原样点水样注满后, 两端用橡皮塞塞紧, 垂直放置带回实验室. 在实验室按表层 (0 ~ 2 cm, 2 ~ 5 cm)、中层 (5 ~ 8 cm, 8 ~ 12 cm) 和底层 (12 ~ 16 cm, 16 ~ 20 cm) 分层切样, 然后用冷冻干燥仪对分层样干燥, 干燥后的沉积物样品研磨过 100 目筛, 装入封口袋中密封分析备用.

### 1.2 分析测定方法

#### 1.2.1 样品理化参数测定

沉积物 TP、IP 和 OP 测定采用 Ruban 等<sup>[15,16]</sup> 在

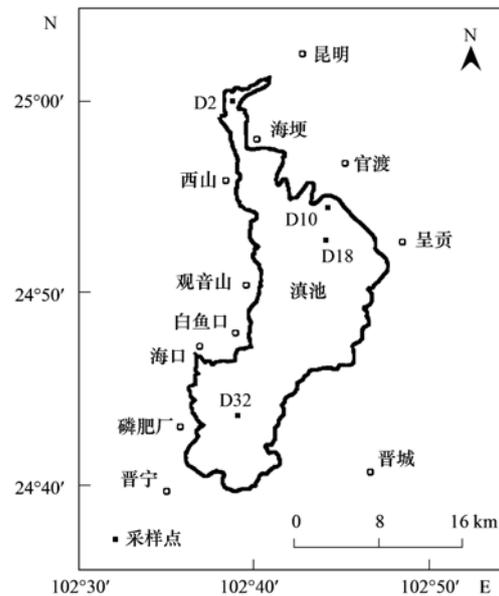


图 1 滇池采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites in Dianchi Lake

欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分析方法. 用改进的 Hendly 连续提取法对沉积物中无机磷和有机磷分级提取<sup>[12]</sup>, 获得弱吸附态磷 ( $\text{H}_2\text{O-P}$  和  $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ )、铁或铝结合态磷 ( $\text{NaOH-P}$ )、钙结合态磷 ( $\text{HCl-P}$ ) 和残渣态磷 ( $\text{Residual-P}$ )<sup>[17]</sup>, 其中弱吸附态磷、铁或铝结合态磷和钙结合态磷为沉积物可提取磷, 残渣态磷为  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{NaOH}$  和  $\text{HCl}$  不可提取磷. 提取液中的无机磷 ( $P_i$ ) 采用磷钼蓝比色法测定,  $120^\circ\text{C}$  条件下高温高压消解后测定提取液总磷 ( $P_t$ ), 提取液有机磷 ( $P_o$ ) 由  $P_t$  与  $P_i$  相减得到. TP 减去各提取态总磷 ( $P_t$ ) 可获得残渣态磷. 有机质 (organic carbon, OC) 测定采用重铬酸钾外加热法<sup>[18]</sup>.

#### 1.2.2 沉积物酶可水解磷测定

实验使用的磷酸酶见表 1, Tris-HCl 缓冲溶液配置酶溶液并进行组合 (表 2)<sup>[13]</sup>. 根据 Zhu 等<sup>[7]</sup> 测定沉积物可酶解有机磷的实验步骤并结合 Turner 等<sup>[14]</sup> 检测土壤可酶解有机磷的方法, 磷钼蓝比色法测定滇池沉积物磷提取液 ( $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$  和  $\text{NaOH-P}$ ) 酶水解后的正磷酸盐浓度. 磷提取液酶水解前后正磷酸盐的差值即为沉积物有机磷酶水解量或正磷酸盐释放量<sup>[7]</sup>, 每个样品做 2 次平行实验. 根据组合酶溶液释放的正磷酸盐量将沉积物中 EHP 分为 3 种类型<sup>[7,13]</sup>: ①活性单酯磷 (Labile monoester P, 碱性磷酸酶水解释放的正磷酸盐量); ②二酯磷 (Diester P, 磷酸二酯酶和碱性磷酸酶释放的正磷酸盐量与活性单酯磷的差值); ③类植酸磷 (Phytate-like P, 植酸酶、磷酸二酯酶和碱性磷酸酶联合作用

释放的正磷酸盐量与活性单酯磷、二酯磷的差值).  
EHP = Labile monoester P + Diester P + Phytate-like

P<sup>[13]</sup>. 同时将沉积物磷提取液中未水解的有机磷定  
义为“未知有机磷”(unknown P<sub>o</sub>)<sup>[7]</sup>.

表 1 磷酸酶

磷酸酶(缩写)	编号	Sigma 货号	类别	来源	活性(固体)/U·mg <sup>-1</sup>
碱性磷酸酶(APase)	EC3.1.3.1	P7640	Type I-S	牛肠粘膜	28.00
磷酸二酯酶(PDEase)	EC3.1.4.1	P4506	磷酸二酯酶 I 型, Type IV	响尾蛇毒液	0.02
植酸酶(Phytase)	EC3.1.3.26	P1259	粗产品	小麦	0.03

表 2 磷酸酶组合

组合	缓冲液	pH	水解温度/°C	可水解磷
APase	Tris-HCl	9.0	37	活性单酯磷 + 聚合态磷
APase + PDEase	Tris-HCl	9.0	37	二酯磷 + 活性单酯磷 + 聚合态磷
APase + PDEase + Phytase	Tris-HCl	7.0	37	植酸磷 + 二酯磷 + 活性单酯磷 + 聚合态磷

### 1.3 数据处理

数据分析采用 Excel 2003、SPSS 18.0、  
Sigmaplot 10.0 及 Sufer 11.0 软件进行.

## 2 结果与分析

### 2.1 滇池沉积物各形态有机磷含量及垂直分布特征

#### 2.1.1 有机磷含量及垂直分布特征

滇池沉积物 TP、IP、OP 含量分别在 566.3 ~  
2 434.0、292.1 ~ 1 751.8、206.2 ~ 597.6 mg·kg<sup>-1</sup>  
(平均 1 641.0、1 071.2、416.5 mg·kg<sup>-1</sup>, 图 2), 其  
中 IP、OP 分别占 TP 的 52% ~ 72%、17% ~ 38%  
(平均 64.0%、26.5%). 滇池沉积物 TP 以 IP 为主,

与李宝等<sup>[11]</sup>研究结论一致, 而太湖<sup>[19]</sup>、红枫湖和  
百花湖<sup>[2,20]</sup>沉积物则是以 OP 为主. 滇池沉积物有  
机磷具有表层富集特征, 其垂向含量总体随深度  
增加而减小, 即表层 (485.9 mg·kg<sup>-1</sup>) > 中层  
(385.3 mg·kg<sup>-1</sup>) > 底层 (378.1 mg·kg<sup>-1</sup>), 与高  
丽等<sup>[10]</sup>研究结果相似. 各点位沉积物有机磷含量  
呈现由北向南递增趋势, 即 D2 (298.4 mg·kg<sup>-1</sup>)  
< D10 (399.5 mg·kg<sup>-1</sup>) < D18 (459.8 mg·kg<sup>-1</sup>)  
< D32 (508.2 mg·kg<sup>-1</sup>). 滇池北部藻类生长较中  
部和南部旺盛, 而藻类生长可大量吸收沉积物有  
机磷, 即 D2、D10 沉积物有机磷含量低于 D18、  
D32.

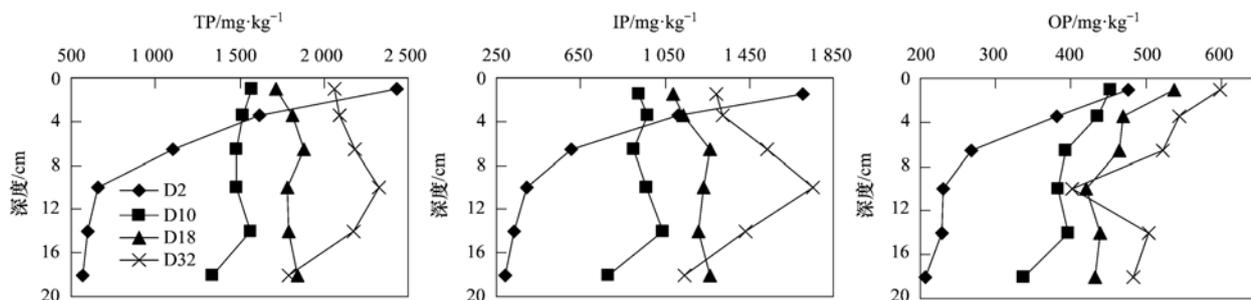


图 2 滇池沉积物 TP、IP、OP 垂直分布 (RSD &lt; 5%, n = 3)

Fig. 2 Vertical distribution of TP, IP and OP in the sediments of Dianchi Lake (RSD &lt; 5%, n = 3)

#### 2.1.2 不同形态有机磷含量及垂直分布特征

##### (1) 弱吸附态磷 (H<sub>2</sub>O-P 和 NaHCO<sub>3</sub>-P)

滇池沉积物 H<sub>2</sub>O-P<sub>i</sub>、H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub>、H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub> 含量分别  
在 2.1 ~ 15.3、0.1 ~ 1.9、1.9 ~ 14.6 mg·kg<sup>-1</sup> (平均  
6.0、0.6、5.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 图 3), 其中 H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub> 占 H<sub>2</sub>O-  
P<sub>i</sub> 的 72.6% ~ 97.1% (平均 89.6%). NaHCO<sub>3</sub>-P 活  
性稍低于 H<sub>2</sub>O-P, 可在一定程度上指示藻类可利用  
磷含量<sup>[4]</sup>, NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub>、NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub>、NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 在

滇池沉积物中含量分别为 17.8 ~ 148.5、14.8 ~  
85.7、3.0 ~ 94.4 mg·kg<sup>-1</sup> (平均 59.6、38、21.6  
mg·kg<sup>-1</sup>), 其中 NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 占 NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>i</sub> 的  
14.7% ~ 63.5% (平均 34%). 弱吸附态有机磷垂向  
含量基本随深度增加而递减, 即 H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub>: 表层 (8.4  
mg·kg<sup>-1</sup>) > 中层 (4.6 mg·kg<sup>-1</sup>) > 底层 > (3.3  
mg·kg<sup>-1</sup>), NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub>: 表层 (32.0 mg·kg<sup>-1</sup>) > 中  
层 (20.6 mg·kg<sup>-1</sup>) > 底层 > (12.1 mg·kg<sup>-1</sup>).

(2) 铁、铝结合态磷(NaOH-P)

NaOH-P 是滇池沉积物主要磷形态之一, NaOH- $P_i$ 、NaOH- $P_o$  含量分别在 87.1 ~ 621.7、61.8 ~ 549.6、25.3 ~ 199.0  $mg \cdot kg^{-1}$  (平均 346.0、261.3、84.7  $mg \cdot kg^{-1}$ ), 其中 NaOH- $P_o$  占 NaOH- $P_i$  的 10.2% ~ 45.0% (平均 25.7%), 其含量随深度增加而减少, 表层 (131.3  $mg \cdot kg^{-1}$ ) > 中层 (74.4  $mg \cdot kg^{-1}$ ) > 底层 (>48.5  $mg \cdot kg^{-1}$ ).

(3) 钙结合态磷(HCl-P)

HCl-P 在沉积物早期成岩(内生作用)过程中产生<sup>[2,21]</sup>, 是一种稳定性较高的非生物可利用磷(包括生物残骸、羟基磷灰石、过磷酸钙等)<sup>[22]</sup>. HCl-P 是滇池沉积物可提取磷的主要组成部分, 其 HCl- $P_i$  含量为 189.9 ~ 1132.6  $mg \cdot kg^{-1}$  (平均 621.1  $mg \cdot kg^{-1}$ ), 其中 HCl- $P_i$ 、HCl- $P_o$  含量分别在 189.9 ~ 1132.6、0.0 ~ 47.2  $mg \cdot kg^{-1}$  (平均 617.0、4.1  $mg \cdot kg^{-1}$ ), HCl- $P_o$  仅占 HCl- $P_i$  的 0.0% ~ 8.2% (平

均 0.6%).

(4) 残渣态磷(Residual-P)

Residual-P 可永久地与矿物结合, 是一种非生物有效磷<sup>[23]</sup>, 其在滇池沉积物中含量为 197.8 ~ 947.7  $mg \cdot kg^{-1}$  (平均 608.2  $mg \cdot kg^{-1}$ ), 占 TP 的 26.4% ~ 54.5% (平均 38.1%). 滇池沉积物连续提取获得的无机磷( $H_2O$ - $P_i$ 、 $NaHCO_3$ - $P_i$ 、NaOH- $P_i$  和 HCl- $P_i$ )回收率为 72.4% ~ 101.6% (平均 86.0%), 而有机磷( $H_2O$ - $P_o$ 、 $NaHCO_3$ - $P_o$ 、NaOH- $P_o$  和 HCl- $P_o$ )回收率为 11.2% ~ 50.7% (平均 26.7%), 所以滇池沉积物 Residual-P 中绝大部分可能为稳定性较高的非生物可利用有机磷. 而且, 残渣磷与有机质呈极显著负相关( $r = -0.608, P = 0.002, n = 24$ ), 说明其很可能来自沉积物有机质的分解.

综上所述, 滇池沉积物可提取磷以无机磷为主( $H_2O$ -P 除外), 可提取有机磷含量依次为 NaOH- $P_o$  (84.7  $mg \cdot kg^{-1}$ ) >  $NaHCO_3$ - $P_o$  (21.6  $mg \cdot kg^{-1}$ ) >  $H_2O$ - $P_o$  (5.4  $mg \cdot kg^{-1}$ ) > HCl- $P_o$  (4.1  $mg \cdot kg^{-1}$ ).

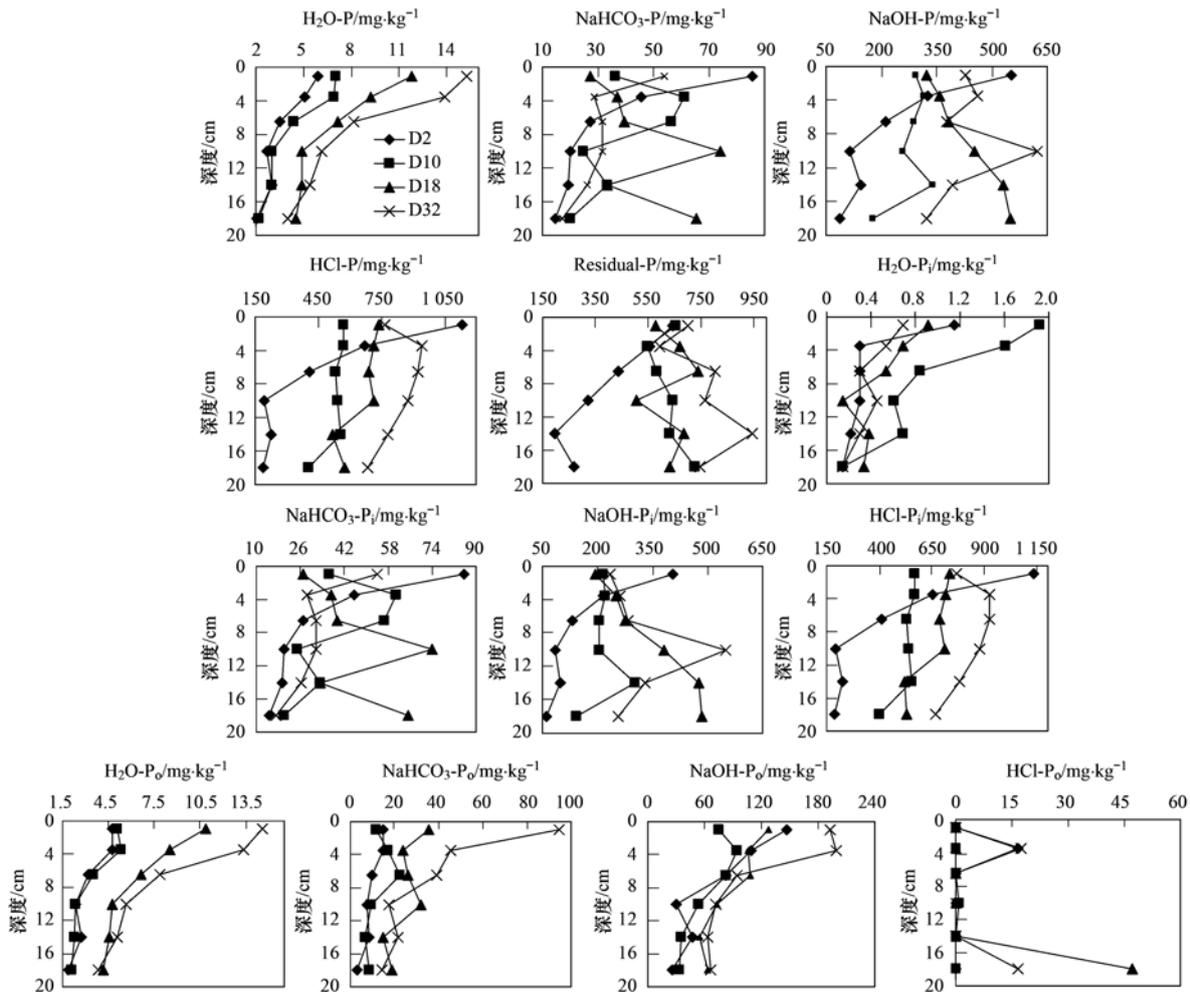


图3 滇池沉积物不同形态磷含量垂直分布 (RSD <5%, n = 3)

Fig. 3 Vertical distribution of different P forms in the sediments of Dianchi Lake (RSD <5%, n = 3)

NaOH-P<sub>o</sub> 是可提取有机磷的主要组成部分,与 Zhu 等<sup>[7]</sup> 研究结果相同. H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub>、NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 和 NaOH-P<sub>o</sub> 是沉积物潜在可释放形态磷,在水-沉积物界面迁移能力较强<sup>[24,25]</sup>,其含量垂直分布均随深度增加而减小,即表层 > 中层 > 底层,表层 H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub>、NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 与 NaOH-P<sub>o</sub> 含量之和(171.5 mg·kg<sup>-1</sup>)显著高于中层(99.6 mg·kg<sup>-1</sup>)和底层(63.9 mg·kg<sup>-1</sup>). 可见, H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub>、NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 和 NaOH-P<sub>o</sub> 在滇池表层沉积物中富集程度较高,说明相比中层和底层沉积物有机磷而言,滇池表层沉积物有机磷具有较高的释放风险,其更容易被生物利用.

## 2.2 滇池沉积物不同形态有机磷酶解特征

滇池沉积物 H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub> 酶可水解磷(EHP)含量在 0.11 ~ 5.93 mg·kg<sup>-1</sup> (平均 1.32 mg·kg<sup>-1</sup>,图4),占 H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub> 的 5.5% ~ 41.7% (平均 18.6%,图5),其中活性单酯磷、二酯磷、类植酸磷含量分别为 0.00 ~ 1.83、0.00 ~ 2.54、0.00 ~ 4.28 mg·kg<sup>-1</sup> (平均 0.31、0.25、0.76 mg·kg<sup>-1</sup>),分别占 H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub> 的 0.0% ~ 27.6%、0.0% ~ 17.4%、0.0% ~ 39.4% (平均 5.3%、4.4%、8.9%,图6).

滇池沉积物 NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 酶可水解磷(EHP)在滇池沉积物含量为 0.00 ~ 45.32 mg·kg<sup>-1</sup> (平均 10.74 mg·kg<sup>-1</sup>),占 NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 的 0.0% ~ 110.0% (平均 35.3%),其中活性单酯磷、二酯磷、类植酸

磷含量分别为 0.00 ~ 27.07、0.00 ~ 24.88、0.00 ~ 21.72 mg·kg<sup>-1</sup> (平均 4.89、3.93、1.92 mg·kg<sup>-1</sup>),分别占 NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> 的 0.0% ~ 76.2%、0.0% ~ 54.6%、0.0% ~ 35.9% (平均 17.0%、11.7%、6.6%).

NaOH-P<sub>o</sub> 酶可水解磷(EHP)是滇池沉积物酶可水解有机磷的主要组成部分,其含量在 0.00 ~ 107.11 mg·kg<sup>-1</sup> (平均 37.29 mg·kg<sup>-1</sup>),占 NaOH-P<sub>o</sub> 的 0.0% ~ 123.8% (平均 37.9%),其中活性单酯磷、二酯磷、类植酸磷含量分别为 0.00 ~ 107.11、0.00 ~ 21.83、0.00 ~ 33.59 mg·kg<sup>-1</sup> (平均 32.75、3.07、1.47 mg·kg<sup>-1</sup>),分别占 NaOH-P<sub>o</sub> 的 0.0% ~ 123.8%、0.0% ~ 48.6%、0.0% ~ 46.6% (平均 31.0%、4.9%、2.0%).

滇池沉积物不同形态有机磷 EHP 含量大小为 NaOH-P<sub>o</sub> > NaHCO<sub>3</sub>-P<sub>o</sub> > H<sub>2</sub>O-P<sub>o</sub>,与 Zhu 等<sup>[7]</sup> 研究结果相似,且各形态有机磷 EHP 含量总体随深度增加而减小(图4),即表层 > 中层 > 底层,而且表层沉积物 EHP 含量显著高于中层和底层,表明滇池表层沉积物生物可利用有机磷含量较高. 不同深度沉积物 EHP 各组分特征相同,即活性单酯磷 > 二酯磷 > 类植酸磷. 因此,活性单酯磷是滇池沉积物有机磷 EHP 的主要组成部分,其次为二酯磷和类植酸磷,与 Ding 等<sup>[8]</sup> 用<sup>31</sup>P-NMR 表征滇池沉积物有机磷的

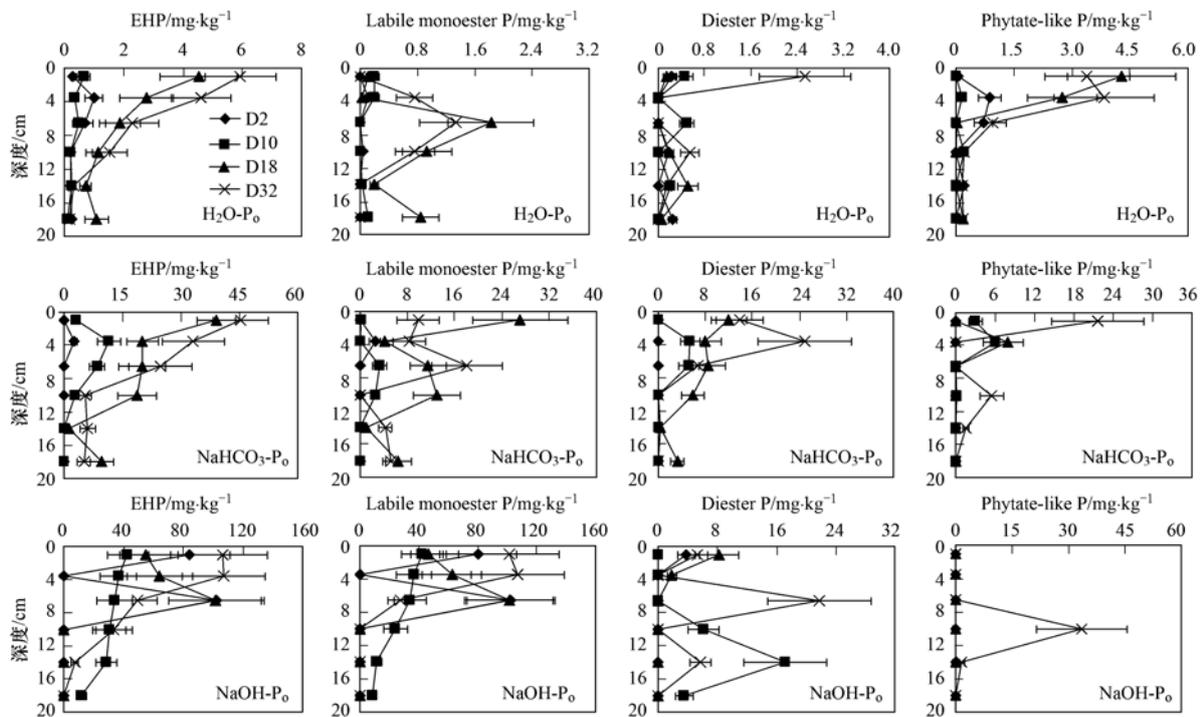


图4 滇池沉积物不同形态有机磷酶解特征

Fig. 4 Enzymatic hydrolysis characteristics of different forms of organic phosphorus in sediments of Dianchi Lake

结果相似.

滇池沉积物存在大量不能被实验所使用的磷酸酶水解的有机磷(图 5),这部分未知有机磷主要包括磷酸盐、磷脂、与腐殖质结合的高分子化合物等<sup>[13,17]</sup>,表征其生物有效性可能需要其它种类的磷酸酶以及更适合的酶水解方法.另外,由于滇池沉积物 HCl-P<sub>o</sub> 较稳定,且含量极低,所以未对 HCl-P<sub>o</sub> 进行酶水解特性研究.

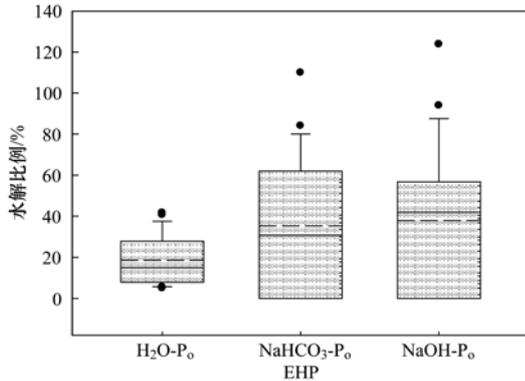


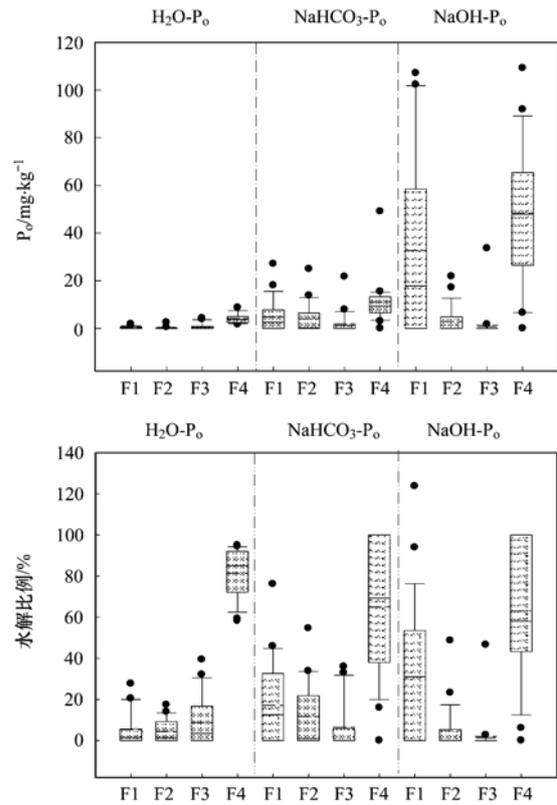
图 5 滇池沉积物不同形态有机磷酶水解比例

Fig. 5 Enzymatic hydrolysis ratio of different forms of organic phosphorus in sediments of Dianchi Lake

### 3 讨论

#### 3.1 滇池不同深度沉积物有机磷生物有效性及其对滇池富营养化影响

湖泊上覆水和沉积物中存在多种磷酸酶,包括碱性磷酸酶、磷酸二酯酶、植酸酶等<sup>[26,27]</sup>.本研究以酶水解技术表征滇池沉积物有机磷组分,表明活性单酯磷、二酯磷和类植酸磷均存在于滇池沉积物不同形态有机磷中,与文献<sup>[7~8]</sup>研究结果一致.沉积物该部分有机磷(EHP)为潜在生物有效磷,经磷酸酶水解后可被生物利用.然而,滇池沉积物 EHP 含量垂直分布特征表明,其有机磷生物有效性随深度增加而减小,即表层 > 中层 > 底层.这可能与滇池演变过程有机磷累积有关.研究表明,湖泊沉积物生物可利用有机磷与其有机质累积关系密切<sup>[4]</sup>.滇池沉积物 EHP 与有机质显著正相关( $r = 0.439, P = 0.032, n = 24$ ),表明有机质可能是滇池沉积物 EHP 的重要来源.滇池演变早期水体生产力较低,有机质积累量较小(有机质主要来源于湖体浮游生物残体等内源物质)<sup>[7]</sup>,从而使沉积物 EHP 含量较低.同时,部分 EHP 在长期湖泊演化过程中被水解利用,因而 EHP 在滇池早期沉积物(底层)中含量较低.近期,滇池进入富营养化,藻类等生产力较高,有



F1 = Labile monoester P; F2 = Diester P;  
F3 = Phytate-like P; F4 = unknown P<sub>o</sub>.

图 6 滇池沉积物不同形态有机磷组分特征

Fig. 6 Composition characteristics of different forms of organic phosphorus in sediments of Dianchi Lake

机质大量积累,造成 EHP 在近期沉积物(表层)中积累较多.

如图 7 所示,滇池表层沉积物 EHP 富集明显(表层磷极易释放至上覆水),空间上整体呈现由北向南递增的趋势,这可能是维持甚至加剧滇池北部(尤其是草海)富营养化的原因之一.滇池北部藻类生物量较高,特别是在藻类水华暴发期间,可吸收利用表层沉积物的 EHP,从而造成北部沉积物表层 EHP 含量较低.同时,北部和中部表层沉积物释放 EHP 于上覆水中,而释放的 EHP 由于水流和风浪扰动(滇池常年盛行西南风)又源源不断地流向北部,及时补充北部上覆水生物可利用磷.滇池中层和底层沉积物 EHP 含量空间分布特征不明显,但其较稳定,释放潜力较小,且含量均低于表层,中层和底层沉积物 EHP 对滇池北部富营养化的影响有限.

不同深度沉积物有机磷对滇池富营养化有一定影响.一方面,随着滇池富营养化的发生,早期沉积物有机磷生物可利用部分(EHP)逐渐被藻类等生物所消耗,而随着沉积物有机质在富营养化过程中

的不断累积,造成了近期沉积物 EHP 在表层富集,增强了表层沉积物有机磷的生物有效性.另一方面,当滇池上覆水正磷酸盐不足,其表层沉积物富集的 EHP 经酶水解可被释放进入上覆水,从而继续维持滇池上覆水较高的磷浓度.

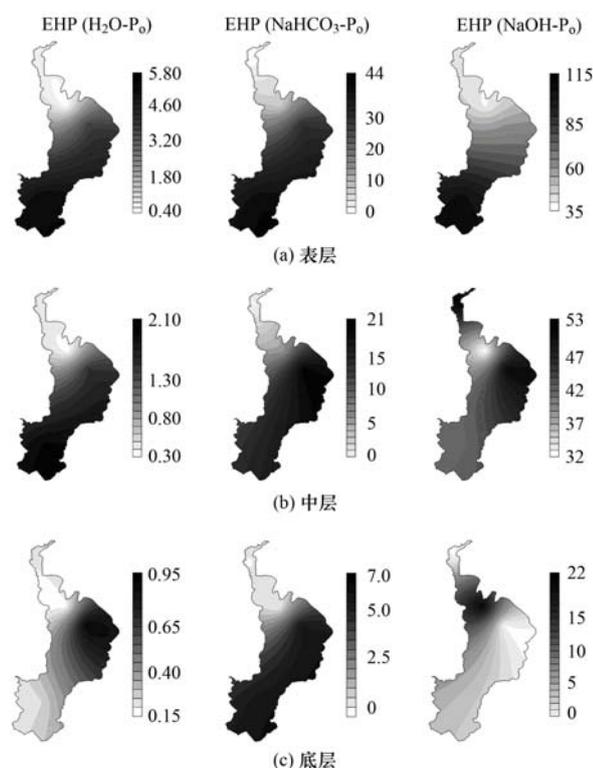


图7 滇池沉积物不同形态有机磷 EHP 空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of EHP in different forms of organic phosphorus in sediments of Dianchi Lake

### 3.2 沉积物有机磷生物地球化学循环及其对滇池水质保护的意义

磷酸酶水解作用是湖泊沉积物磷生物地球化学循环过程的重要“参与者”和推动力<sup>[26~28]</sup>.在富营养化湖泊中,有机质增多会引起磷酸酶活性升高<sup>[29]</sup>.当滇池“水华”暴发时,浮游生物死亡后其残体可在沉积物中大量积累,沉积物有机质也随之增加,磷酸酶活性升高促进沉积物 EHP 水解.同时,不断累积的有机质又可促进沉积物 EHP 增多<sup>[4]</sup>.沉积物 EHP 的再循环(经酶水解释放正磷酸盐)可以维持甚至加剧湖泊富营养化.因此,滇池富营养化与其沉积物 EHP 含量及其转化有关.而且,滇池流域属于富磷区<sup>[30,31]</sup>,流域内土壤磷本底值较高(尤其是滇池南部).土壤中大量磷随陆地径流汇入滇池,滇池磷污染控制形势较严峻<sup>[32]</sup>.沉积物 EHP 的生物地球化学循环可进一步加剧滇池富营养化,这可能

是治理滇池富营养化难度较大的原因之一.

以往研究认为,湖泊沉积物生物可利用磷主要来自无机磷,而有机磷较稳定并埋藏于沉积物中,对湖泊内源生物有效磷负荷贡献较小<sup>[33]</sup>,造成沉积物生物有效磷量常常被低估.然而,滇池沉积物 EHP ( $H_2O-P_o$ 、 $NaHCO_3-P_o$  与  $NaOH-P_o$  可酶解磷之和)含量为  $0.2 \sim 157.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (平均  $49.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),占 TP、OP 的比例分别为  $0.03\% \sim 9.36\%$ 、 $0.09\% \sim 38.50\%$ ,与 Zhu 等<sup>[7]</sup>研究结果相似,其中,50% 以上的沉积物 EHP 含量超过  $20.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,30% 以上的沉积物 EHP 含量超过  $70.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,只有不到 10% 的沉积物 EHP 含量低于  $10.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .瑞士富营养化湖泊 Lemana 沉积物 EHP 含量为  $14.50 \sim 29.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (平均  $19.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[34]</sup>,澳大利亚墨尔本亚拉河、拉特罗布河沉积物 EHP 含量分别为  $2.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.69 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[35]</sup>.可见,滇池沉积物生物可利用有机磷含量较高.虽然,滇池沉积物生物有效性无机磷 ( $H_2O-P_i$ 、 $NaHCO_3-P_i$  与  $NaOH-P_i$  之和)含量为  $76.8 \sim 581.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (平均  $299.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),远高于沉积物生物可利用有机磷 (EHP).但是,滇池沉积物 EHP 是迁移性较强的活性磷,特别是弱吸附态可酶解有机磷  $H_2O-P_o$  与  $NaHCO_3-P_o$  (上覆水极易获取的生物有效磷).而且,滇池沉积物 EHP 以活性单酯磷为主,而活性单酯磷是最易被生物利用的有机磷形态(相比二酯磷和类植酸磷)<sup>[14]</sup>.当浮游生物大量繁殖并消耗沉积物生物有效性无机磷后,沉积物 EHP,尤其是活性单酯磷,可成为湖泊生物有效磷的重要补充(EHP 经酶水解转化为正磷酸盐).在一定条件下,特别是在湖泊浮游生物生长磷需求量较大时,如藻华暴发期间,沉积物 EHP 对湖泊生物有效磷的贡献不容忽视.因此,在外部磷输入得到有效控制的情况下,沉积物 EHP 生物地球化学循环对滇池水质保护具有重要影响.

### 4 结论

(1) 滇池沉积物有机磷具有表层富集特征,各形态有机磷含量大小为  $NaOH-P_o > NaHCO_3-P_o > H_2O-P_o > HCl-P_o$ ,各形态有机磷 EHP 含量大小为  $NaOH-P_o > NaHCO_3-P_o > H_2O-P_o$ .滇池表层沉积物有机磷释放风险及生物可利用量较高.

(2) 滇池沉积物 EHP 以活性单酯磷为主,其次为二酯磷和类植酸磷.受湖泊演变影响,不同深度沉积物有机磷对滇池富营养化均有一定影响,且其生

物有效性大小为表层 > 中层 > 底层。

(3) EHP 是滇池沉积物生物有效性磷的重要来源之一。当外源入湖磷负荷逐步被控制, 沉积物 EHP 生物地球化学循环对滇池水质保护具有重要影响。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 1999, **100** (1-3): 179-169.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [ J ]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 135-145.
- [ 4 ] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [ J ]. *Environmental Pollution*, 2008, **152**(2): 366-372.
- [ 5 ] 王志齐, 李宝, 胡向辉, 等. 南四湖沉积物氮磷和有机质分布特征及其相关性分析[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(4): 867-874.
- [ 6 ] 周小宁, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖梅梁湾沉积物磷的垂直分布及环保疏浚深度的推算[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(4): 445-449.
- [ 7 ] Zhu Y R, Wu F C, He Z Q, *et al.* Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(14): 7679-7687.
- [ 8 ] Ding S M, Fan C X, Zhang L. Caution needed in pretreatment of sediments for refining phosphorus-31 nuclear magnetic resonance analysis: Results from a comprehensive assessment of pretreatment with ethylenediaminetetraacetic acid[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, **39**: 1668-1678.
- [ 9 ] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总磷的时空分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(1): 51-57.
- [ 10 ] 高丽, 杨浩, 周健民, 等. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(5): 776-781.
- [ 11 ] 李宝, 范成新, 丁士明, 等. 滇池福保湾沉积物磷的形态及其与间隙水磷的关系[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 27-32.
- [ 12 ] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **46**(5): 970-976.
- [ 13 ] Monbet P, McKelvie I D, Saefumillah A, *et al.* A protocol to assess the enzymatic release of dissolved organic phosphorus species in waters under environmentally relevant conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(21): 7479-7485.
- [ 14 ] Turner B L, McKelvie I D, Haygarth P M. Characterisation of water-extractable soil organic phosphorus by phosphatase hydrolysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34** (1): 27-35.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-A synthesis of recent works [ J ]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [ 17 ] He Z Q, Griffin T S, Honeycutt C W. Enzymatic hydrolysis of organic phosphorus in swine manure and soil [ J ]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(1): 367-372.
- [ 18 ] Gaudette H E, Flight W R, Toner L, *et al.* An inexpensive titration method for the determination of organic carbon in recent sediments[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1974, **44**(1): 249-253.
- [ 19 ] 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. *地球化学*, 2004, **33**(4): 423-432.
- [ 20 ] 王雨春, 万国江, 王仕禄, 等. 红枫湖、百花湖沉积物中磷的存在形态研究[J]. *矿物学报*, 2000, **20**(3): 273-278.
- [ 21 ] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. *水科学进展*, 2003, **14**(6): 714-719.
- [ 22 ] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [ J ]. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [ 23 ] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [ J ]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] Cross A F, Schlesinger W H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems[J]. *Geoderma*, 1995, **64**(3-4): 197-214.
- [ 26 ] Hakulinen R, Kahkonen M A, Salkinoja-Salonen M. Vertical distribution of sediment enzyme activities involved in the cycling of carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur in three boreal rural lakes[J]. *Water Research*, 2005, **39**(11): 2319-2326.
- [ 27 ] Bünemann E K. Enzyme additions as a tool to assess the potential bioavailability of organically bound nutrients [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, **40**(9): 2116-2129.
- [ 28 ] Chen C W, Lim B L. Beta-propeller phytases in the aquatic environment[J]. *Archives of Microbiology*, 2006, **185**(1): 1-13.
- [ 29 ] Zhou Y Y, Song C L, Cao X Y, *et al.* Phosphorus fractions and alkaline phosphatase activity in sediments of a large eutrophic Chinese lake (Lake Taihu)[J]. *Hydrobiologia*, 2008, **599**(1): 119-125.
- [ 30 ] 付登高, 何锋, 郭震, 等. 滇池流域富磷区退化山地马桑-蔗茅植物群落的生态修复效能评价[J]. *植物生态学报*, 2013,

- 37(4): 326-334.
- [31] 刘超, 朱淮武, 王立英, 等. 滇池与红枫湖沉积物中磷的地球化学特征比较研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(4): 1073-1079.
- [32] 阎凯, 付登高, 何峰, 等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 353-361.
- [33] Bai X L, Ding S M, Fan C X, *et al.* Organic phosphorus species in surface sediments of a large, shallow, eutrophic lake, Lake Taihu, China[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(8-9): 2507-2513.
- [34] Feuillade M, Dorioz J M. Enzymatic release of phosphate in sediments of various origins[J]. Water Research, 1992, 26(9): 1195-1201.
- [35] Shan Y, McKelvie I D, Hart B T. Determination of alkaline phosphatase-hydrolyzable phosphorus in natural water systems by enzymatic flow injection[J]. Limnology and Oceanography, 1994, 39: 1993-2000.

## 欢迎订阅 2015 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2015 年为 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb .....	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility .....	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013 .....	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter .....	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM <sub>10</sub> .....	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer .....	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region .....	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds .....	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen .....	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake .....	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake .....	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet .....	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an .....	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff .....	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality .....	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process .....	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process .....	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein .....	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution .....	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor .....	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions .....	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress .....	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> .....	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration .....	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe <sup>2+</sup> and Fe <sup>3+</sup> on the Activity of ANAMMOX .....	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N <sub>2</sub> O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge .....	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique .....	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil .....	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil .....	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle .....	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils .....	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis( <i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols .....	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator .....	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales .....	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years .....	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI <sub>Ac</sub> Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity .....	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables .....	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells .....	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals .....	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char .....	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer .....	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N <sub>2</sub> O Releases from Bioreactor Landfill .....	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth .....	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta .....	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation .....	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon .....	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

# 《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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