

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

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

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任崑, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 吴伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161) 《环境科学》征订启事 (4365) 信息 (4123, 4132, 4409)	

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征

董丹萍¹, 章婷曦^{1,2,3*}, 张丁予¹, 王巧云¹, 李德芳¹, 王国祥^{1,2,3}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 江苏省物质循环与污染控制实验室, 南京 210023)

摘要: 湖泊沉积物中磷的潜在释放很大程度上取决于有机磷的形态和分布. 以太湖西岸湖泛易发区毛茆港 (MDG) 为研究区域, 采用 Ivannoff 有机磷分级提取方法对沉积物中有机磷进行分析. 结果表明, 不同采样点沉积物中有机磷形态以胡敏酸结合态 OP 为主, 占有机磷总量的 35%. 总有机磷含量由岸边往湖心先降低后增加; 垂直方向 2~6 cm 含量最低, 4~8 cm 含量最高. 沉积物中各形态磷含量大小: 胡敏酸结合态 OP > 残渣态 OP > HCl-OP > 富里酸结合态 OP; 由岸边向湖心区延伸, NaHCO₃-OP 占总有机磷的相对含量呈先升高后降低再升高的趋势, 蓝藻残体的沉积增加了沉积物中 NaHCO₃-OP 含量. NaHCO₃-OP 和胡敏酸结合态 OP 垂直分布大致先降低后升高再降低, NaHCO₃-OP 在 4~6 cm 含量最低, 胡敏酸结合态 OP 在 4~8 cm 含量最高. HCl-OP 和富里酸结合态 OP 垂直分布大致随深度增加含量降低. 残渣态 OP 含量垂直方向无明显变化, 均稳定在 45 μg·g⁻¹ 左右. 活性有机磷与 pH、DO、水深呈显著负相关; OM、NaOH-Pi 均与总有机磷、活性有机磷、中等活性有机磷及非活性有机磷表现出了显著相关关系. 有机磷 3 种组分均具有生物活性, 对湖泊富营养化有着重要作用, 蓝藻堆积区活性有机磷的增加可能促进湖泛的发生.

关键词: 太湖; 湖泛; 沉积物; 有机磷; 形态; 分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4194-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201603057

Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu

DONG Dan-ping¹, ZHANG Ting-xi^{1,2,3*}, ZHANG Ding-yu¹, WANG Qiao-yun¹, LI De-fang¹, WANG Guo-xiang^{1,2,3}

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Material Cycle & Pollution Control, Nanjing 210023, China)

Abstract: Potential release of phosphorus in lake sediments depends largely on the fractions and distribution of organic phosphorus. MaoDu was chosen as the research area in the west of Lake Taihu. The chemical forms of the surface sediments were investigated by the Ivannoff extraction methods. The results showed that the main organic phosphorus form of sediments at different sampling places was humic acid-OP. It accounted for 35% of the total organic phosphorus. Horizontal distribution: Total organic phosphorus content from the shore to the middle of total showed a trend of rising after decline; vertical distribution: Total organic phosphorus content was the lowest in 2-6 cm and the highest in 4-8 cm. Various phosphorus content followed the order of humic acid-OP > residual-OP > HCl-OP > fulvic acid-OP; the relative content of NaHCO₃-OP in the total organic phosphorus content showed a trend of rising followed by reduction and then rising again from the shore to the middle, cyanobacteria residue deposition increased the content of NaHCO₃-OP in sediment. Contents of NaHCO₃-OP and humic acid-OP both first reduced, then increased and finally reduced in the vertical distribution, the content of NaHCO₃-OP was the lowest in 4-6 cm and humic acid-OP was the highest in 4-8 cm. HCl-OP and fulvic-OP decreased with increasing depth in the vertical distribution. The content of residual-OP showed stable tendency in the vertical direction and was about 45 μg·g⁻¹. Labile OP and pH, DO, the depth of water were significantly negatively correlated, OM and NaOH-Pi were significantly correlated with total organic phosphorus, labile OP, moderately labile OP and nonlabile OP. Three components of organic phosphorus had bio-availability and played an important role in lake eutrophication. The increase of the content of labile OP might promote the black water aggregation (BWA) in cyanobacteria accumulation.

Key words: Lake Taihu; black water aggregation (BWA); sediment; organic phosphorus; form; distribution

磷是湖泊藻类繁殖和生长的重要限制因子, 亦是湖泊水体富营养化的主控因素之一. 沉积物中不同形态磷的释放对推动湖泊富营养化的发生起着举足轻重的作用^[1~4]. 近年来对于湖泊沉积物中磷形态的研究大多都集中在无机磷上^[5~9], 而对有机磷

收稿日期: 2016-03-07; 修订日期: 2016-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41303058, 41573061); 江苏高校优势学科建设工程项目; 江苏省太湖水污染治理专项 (TH2014402)

作者简介: 董丹萍 (1992~), 女, 硕士, 主要研究方向为水环境生态修复, E-mail: 1187322915@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangtingxi@njnu.edu.cn

的研究则比较有限^[10~12]。事实上,作为水体中的潜在有效性磷——有机磷的分解及释放是湖泊营养物质循环和生命演替过程中的一个重要环节^[13],对湖泊富营养化有着重要的作用。有研究发现,沉积物中有机磷的含量约占总磷的 20%~80%^[14,15],其作用无法忽视。Zhang 等^[16]利用前人的方法对不同性质的 6 个湖泊沉积物有机磷进行了研究,发现重污染沉积物中有机磷组分含量明显高于其他沉积物,认为沉积物有机磷在湖泊富营养化过程中的作用值得关注。

在大规模重度蓝藻水华暴发之后,“湖泛”问题已成为我国乃至全球淡水富营养化的焦点,浅水湖泊面临又一严峻的生态灾难。近年来,太湖“湖泛”,特别是 2007 年发生在无锡市南泉水厂太湖水源地的藻华及“黑水团”事件,因其对生态系统的致命性破坏及巨大的社会和经济影响而受到国内外广泛关注^[17,18]。由于“湖泛”水体具有缺氧/厌氧的还原性特征并能在湖体中存在较长时间^[19],“湖泛”的发生对湖泊水体产生重要影响^[20,21]。太湖西岸、梅梁湾、贡湖曾多次出现湖泛现象^[22]。沉积物垂直方向上 0~10 cm 有机磷矿化过程强烈。研究太湖西岸湖泛易发区表层(0~10 cm)沉积物有机磷的

形态特征及各形态之间的相互关系,探究湖泛易发区有机磷对湖泛发生的潜在影响,对清淤的重点区域与清淤深度具有重要的指示意义。本文应用 Ivanoff 等^[23]的提取方法对太湖西岸湖泛易发区 MDG 的表层沉积物有机磷进行了分级提取,研究表层沉积物中有机磷形态分级特征与水平、垂向分布特征,并探讨有机磷组分与生物有效性的关系。

1 研究区域

太湖是中国五大淡水湖之一,太湖“湖泛”主要发生在太湖西岸、梅梁湾和贡湖湾局部水域。本文研究区域毛茆港位于太湖西岸湖泛易发区,采样点在太湖的位置见图 1。毛茆港具体采样点在一人工芦苇种植区。区内有 3 个槽沟(图 2),槽沟与槽沟间分布着大量的芦苇丛,槽沟内有大量的蓝藻淤积,第 3 个槽沟较其它槽沟中蓝藻淤积更多。MDG 的 5 个采样点位置分布如图 1 左以及采样所在点位的湖泊环境因子见表 1。MDG-01、MDG-02 分别位于第 2 个槽沟和第 3 个槽沟内,MDG-03 位于木桩外 1 m 远(图 2),MDG-04、MDG-05 位于离岸边较远的湖泊开阔区域。

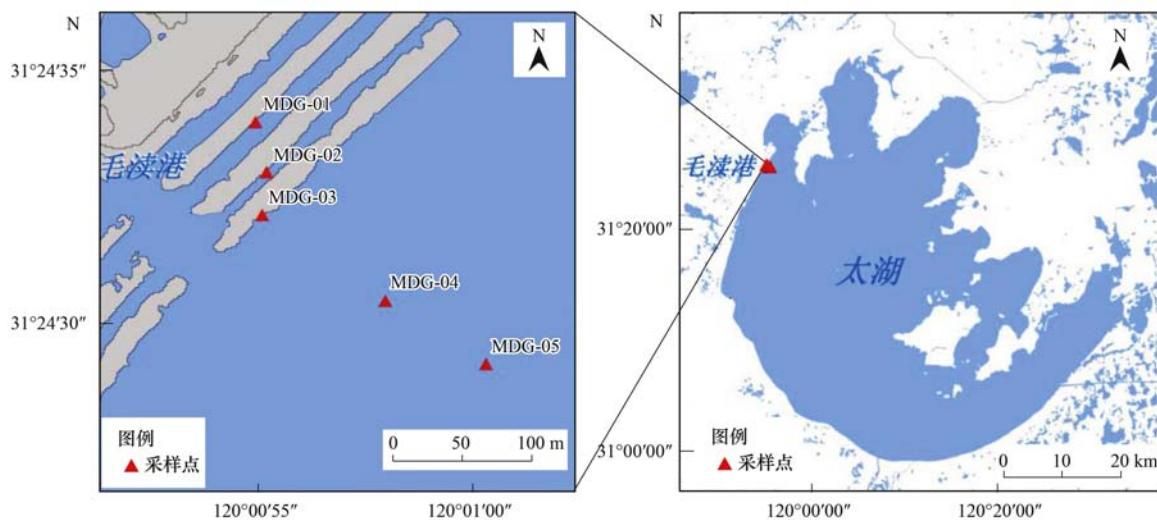


图 1 MDG 采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites of MDG

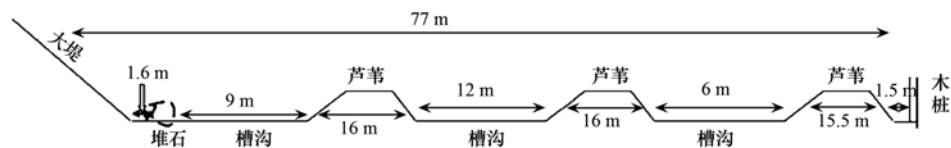


图 2 MDG 在槽沟内的采样点分布

Fig. 2 Distribution of sampling sites in the slots of MDG

表 1 MDG 采样点位的湖泊环境

Table 1 Geographic and limnological features of lake in sampling sites of MDG

点位	经纬度	水温 /℃	水深 /m	透明度 /m	pH	DO /mg·L ⁻¹	Eh /mV	电导率 /μS·cm ⁻¹	离岸边距离 /m
MDG-01	N 31°24'40.86"; E 120°0'37.44"	7.70	1.10	0.20	7.97	8.44	21.60	643	27
MDG-02	N 31°24'39.9"; E 120°0'37.80"	6.30	0.76	0	7.45	1.35	-369.20	736	55
MDG-03	N 31°24'39.12"; E 120°0'37.86"	7.20	1.93	0.20	8.00	10.48	—	638	75
MDG-04	N 31°24'36.12"; E 120°0'24'42"	7.30	1.90	0.40	8.04	10.03	-70.50	638	213
MDG-05	N 31°24'34.14"; E 120°0'44.22"	6.80	2.0	0.40	8.18	10.20	-67.80	638	300

2 材料与方法

2.1 样品的采集与处理

2015 年 1 月 2 日,采用柱状采泥器采集毛茆港 5 个点位的表层 0~10 cm 柱状沉积物样品,样品现场进行切割分层,每 2 cm 一层置于聚乙烯塑料袋中,用干冰覆盖低温封闭保存. 回实验室后经冷冻干燥后研磨,过 100 目筛,冷藏封闭保存分析.

2.2 样品分析

2.2.1 理化性质分析

采样区域水体的 pH、Eh、DO、电导率等指标现场测定,烧失量(LOI)通过 550℃ 条件下样品灼烧 6 h 得到^[24].

2.2.2 沉积物有机磷的分级提取

采用 Ivanoff 等^[23]的连续提取方法对 MDG 的 5 个点位表层柱状沉积物样品有机磷进行了分级提取,将沉积物中有机磷分为 3 种形态:活性有机磷包括 NaHCO₃-OP,中等活性有机磷包括 HCl-OP、富里酸结合态 OP 及非活性有机磷包括胡敏酸结合态 OP、残渣态 OP. 具体步骤如表 2 所示.

表 2 Ivanoff 法有机磷分级提取流程

Table 2 Extraction procedure of organic phosphorus fractions using Ivanoff method

形态	类型	分级提取方法
活性有机磷	NaHCO ₃ -OP	沉积物加 0.5 mol·L ⁻¹ NaHCO ₃ ,振荡离心,测定无机磷与总磷,差值即为碳酸氢钠有机磷
中等活性有机磷	HCl-OP	NaHCO ₃ 提取后的残渣再加入 1.0 mol·L ⁻¹ HCl,振荡离心,上清液测定无机磷与总磷,差值即为盐酸提取有机磷
	富里酸结合态 OP	HCl 提取后残渣再加 0.5 mol·L ⁻¹ NaOH,振荡离心,获得 NaOH 提取液. NaOH 提取液用浓 HCl 调 pH 至 0.2 并离心,胡敏酸沉淀,测定无机磷与总磷,差值为富里酸结合态有机磷
非活性有机磷	胡敏酸结合态 OP	NaOH 上清液有机磷与富里酸结合态的差值为胡敏酸结合态有机磷
	残渣态 OP	NaOH 溶液提取后的残渣灼烧,再加入 1.0 mol·L ⁻¹ H ₂ SO ₄ ,振荡离心,上清液测定总磷,即为残渣态有机磷

3 结果与分析

3.1 总有机磷的含量及其分布特征

含量分布见图 3,5 个点位是由岸边逐渐向太湖湖泊中心排列. 毛茆港总有机磷含量水平分布特征大致是由岸边向太湖湖泊中心,总有机磷含量逐渐减低. 离湖泊中心最近的 05 点位总有机磷含量增加,与该点位的地理位置以及其它环境因子有关. 在槽沟芦苇带的 3 个点位表层沉积物总有机磷垂直分布上大致呈现先降低后升高再降低的趋势. 毛茆港几个点位总有机磷含量在 2~4 cm 或 4~6 cm 最低,4~6 cm 或 6~8 cm 最高. 在第 2 个槽沟内的点位(MDG-01)总有机磷含量最高的 6~8 cm 是含量最低的 2~4 cm 近 5 倍,其余点位总有机磷含量垂直分布上最高含量比最低含

量都高约 100 μg·g⁻¹.

3.2 有机磷 3 种组分的含量及其分布特征

毛茆港沉积物有机磷形态以中等活性有机磷与非活性有机磷为主,两者占总有机磷 79.44%,其含量分别在 21.71~99.44 μg·g⁻¹和 34.12~488.46 μg·g⁻¹之间. 活性有机磷所占质量分数较小,占总有机磷 20.56%,是孙静等^[25]研究的洱海表层活性有机磷所占总有机磷质量分数的近 5 倍,活性有机磷含量在 4.28~112.58 μg·g⁻¹之间. 活性有机磷是土壤有机磷中最先被矿化部分^[26]. 活性有机磷含量较低主要是因为湖泊环境中沉积物-水界面的相互作用较为强烈,活性有机磷易被分解为小分子化合物或磷酸盐,进而释放到上覆水体中^[27]. 而活性有机磷与中等活性有机磷平均占有有机磷的 40.68%,与洱海等高原湖泊有机磷研究相比,太湖

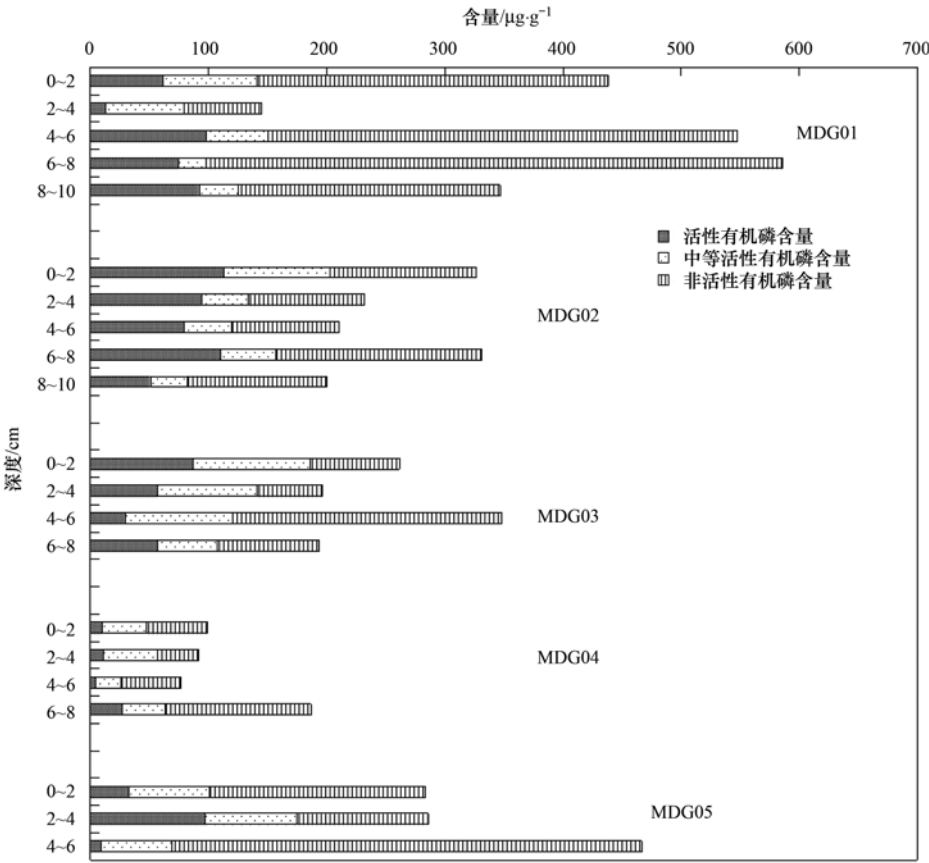


图3 OP 的3种组分的含量及其分布

Fig. 3 Content and distribution of three OP components

活性与中活性有机磷比值明显偏大,可能是因为沉积物和水界面微生物活跃^[28],生物活性强可以将非活性有机磷转化为活性有机磷与中等活性有机磷^[29]. 槽沟内较槽沟外活性有机磷绝对含量更高,其中02 采样点活性有机磷的绝对含量最高,表明蓝藻死亡后残体的沉积增加了沉积物活性有机磷的含量,从而增加磷的释放风险,待来年蓝藻复苏,促进湖泛的发生. 中等活性有机磷垂直方向上基本是随着深度增加含量减少,非活性有机磷除了离湖心最近的采样点(MDG-05)水平分布上离湖心越近含量越少,垂直分布上呈现先降低后升高再降低趋势,可能因为非活性有机磷主要来源是陆源排放.

3.3 毛茭港各点位各种形态的有机磷含量及其分布特征

毛茭港 01 点位各种有机磷的形态见图 4 所示. 以胡敏酸结合态 OP 为主,NaHCO₃-OP 含量其次,残渣态 OP 含量均值为 42 μg·g⁻¹. 胡敏酸结合态 OP 含量占总有机磷 57.91%,NaHCO₃-OP 占总有机磷 15.58%,两者共占总有机磷 73.49%. 胡敏酸结合

态 OP 的含量在 2~4 cm 含量最低,在 6~8 cm 含量最高,NaHCO₃-OP 在 2~4 cm 含量最低,在 4~6 cm 含量最高. HCl-OP、富里酸结合态 OP、残渣态 OP 分别占有机磷的 6.6%、5.09%、9.73%,后面这 3 种磷形态含量均较低,垂直方向分布无显著的趋势. 根据各种磷形态所占的质量分数发现各种磷形态含量大小依次为: 胡敏酸结合 OP > NaHCO₃-OP > 残渣态 OP > HCl-OP > 富里酸结合态 OP.

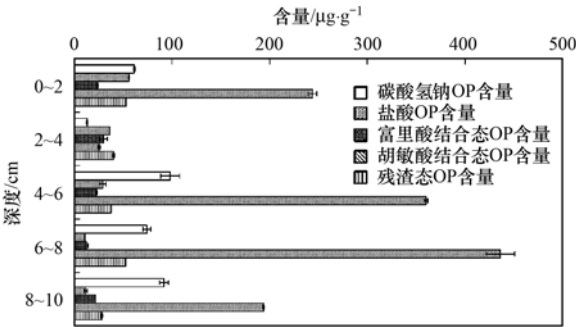


图4 MDG-01 各种形态 OP 的含量及垂直分布

Fig. 4 Content and vertical distribution of OP forms in MDG-01

毛茭港 02 点位各种有机磷的形态见图 5 所示. 与 01 点不同,02 点位以 NaHCO₃-OP 为主,占总有机磷

机磷 31.55%, 胡敏酸 OP 含量次之. NaHCO_3 -OP 所占比例明显增多, 与该点位蓝藻淤积层较上一个点位更厚有关. 其中胡敏酸结合态 OP 和 NaHCO_3 -OP 垂直方向分布趋势是 4~6 cm 含量最低, 6~8 cm 含量最高. 富里酸结合态 OP 垂直方向分布趋势是 2~4 cm 含量最低, 6~8 cm 含量最高. NaHCO_3 -OP、HCl-OP 垂直方向上随深度增加逐渐减低. 残渣

态 OP 由上往下含量变化不明显, 含量均值为 $42 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 胡敏酸结合态 OP、HCl-OP、富里酸结合态 OP、残渣态 OP 分别占总有机磷的 27.72%、9.22%、8.29%、14.92%. 根据各种磷形态所占的质量分数发现各种磷形态含量大小依次为: NaHCO_3 -OP > 胡敏酸结合态 OP > 残渣态 OP > HCl-OP > 富里酸结合态 OP.

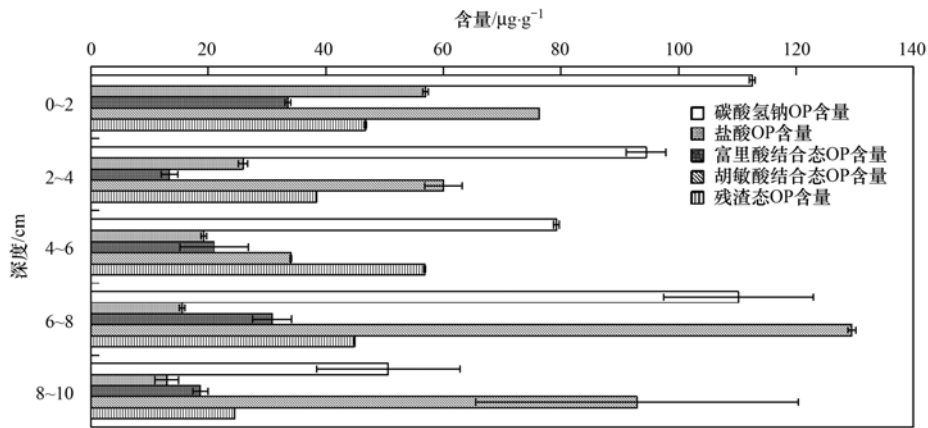


图5 MDG-02 各种形态 OP 的含量及垂直分布

Fig. 5 Content and vertical distribution of OP forms in MDG-02

毛渚港 03 点位各种有机磷的形态见图 6 所示. 0~4 cm 以 NaHCO_3 -OP 为主, 4~8 cm 以胡敏酸结合态 OP 为主, 残渣态 OP 含量均值为 $52 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 各形态磷在垂直分布上存在不同的趋势, 其中胡敏酸结合态 OP 和 HCl-OP 垂直方向均在 2~4 cm 含量最低, 胡敏酸结合态 OP 在 4~6 cm 含量最高, HCl-OP 在 0~2 cm 与 4~6 cm 含量差异不大, 均比较高. NaHCO_3 -OP 含量垂直分布呈现先降低再升高的趋势, 在 4~6 cm 含量最低. 富里酸结合态 OP 垂直方向在 4~6 cm 含量最低, 在 2~4 cm 含量最高. NaHCO_3 -OP、胡敏酸结合态 OP、HCl-OP、富里酸结合态 OP、残渣态 OP 分别占总有机磷的

21.38%、20.91%、20.64%、9.76%、17.54%. 在 2~4 cm 胡敏酸 OP 的含量几乎为 $0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 可能因为采样泥柱中有 3 cm 絮状物在水泥交界处影响了测量的结果. 0~4 cm 处各种磷形态含量大小顺序为: NaHCO_3 -OP > HCl-OP > 残渣态 OP > 富里酸结合态 OP > 胡敏酸结合态 OP, 4~8 cm 处各种磷形态含量大小依次为: 胡敏酸结合态 OP > HCl-OP > 残渣态 OP > NaHCO_3 -OP > 富里酸结合态 OP.

毛渚港 04 点位各种有机磷的形态见图 7 所示. 采样泥柱 0~6 cm 为黄泥, 6~8 cm 为黑泥. 0~6 cm 以残渣态 OP 为主, 6~8 cm 以胡敏酸 OP 为主. 残渣态 OP 含量均值为 $40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 6~8 cm 胡敏酸

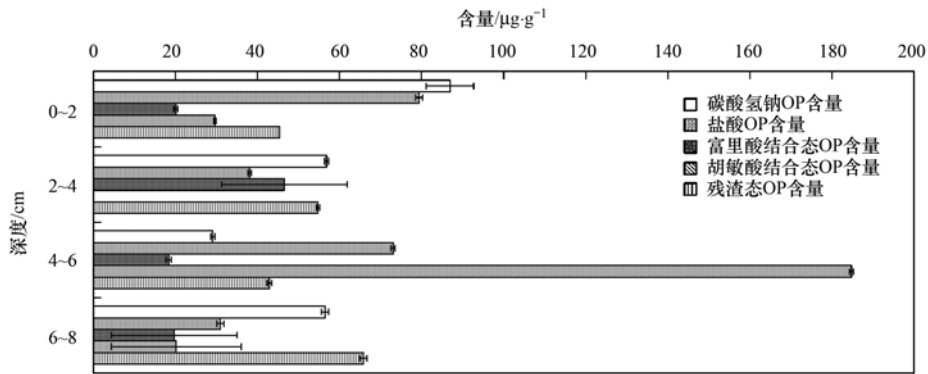


图6 MDG-03 各种形态 OP 的含量及垂直分布

Fig. 6 Content and vertical distribution of OP forms in MDG-03

OP 的含量约是 0~6 cm 胡敏酸 OP 含量总和的 3 倍. 其中胡敏酸结合态 OP 和残渣态 OP 垂直方向均在 2~4 cm 含量最低, 在 6~8 cm 含量最高. NaHCO_3 -OP 和 HCl-OP 垂直分布均在 4~6 cm 含量最低, 在 6~8 cm 含量最高. 富里酸结合态 OP 在 4~6 cm 含量最低, 在 2~4 cm 含量最高. NaHCO_3 -

OP、胡敏酸结合态 OP、HCl-OP、富里酸结合态 OP、残渣态 OP 分别占总有机磷的 11.35%、21.86%、16.62%、14.78%、20.61%. 根据各种磷形态所占的质量分数得出各种磷形态含量大小依次为: 胡敏酸结合态 OP > 残渣态 OP > HCl-OP > 富里酸结合态 OP > NaHCO_3 -OP.

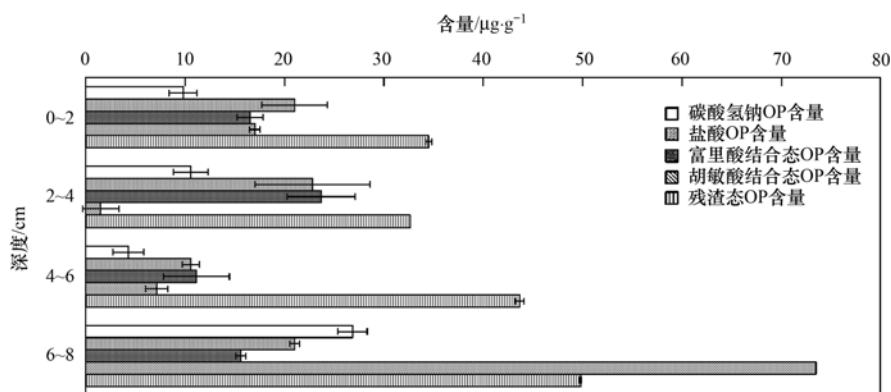


图7 MDG-04 各种形态 OP 的含量及垂直分布

Fig. 7 Content and vertical distribution of OP forms in MDG-04

毛洩港 05 点位各种有机磷的形态见图 8 所示. 以胡敏酸结合态 OP 为主, 残渣态 OP 次之. 胡敏酸结合态 OP 和富里酸结合态 OP 垂直方向分布先降低后升高, 均在 2~4 cm 含量最低. NaHCO_3 -OP 和 HCl-OP 垂直分布先升高再降低, 均在 2~4 cm 含量最高. 残渣态 OP 含量随着深度增加而增加, 含量较为稳定, 均值在 $50 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. NaHCO_3 -OP、胡敏酸结合态 OP、HCl-OP、富里酸结合态 OP、残渣态 OP 分别占总有机磷的 12.46%、48.63%、11.61%、6.97%、13.45%. 根据各种磷形态所占的质量分数得出各种磷形态含量大小依次为: 胡敏酸结合态 OP > 残渣态 OP > NaHCO_3 -OP > HCl-OP > 富里酸结合态 OP.

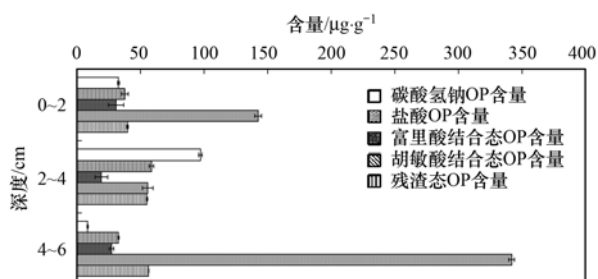


图8 MDG-05 各种形态 OP 的含量及垂直分布

Fig. 8 Content and vertical distribution of OP forms in MDG-05

根据 MDG 表层沉积物每个点位各种磷形态所占的质量分数所得的各种磷形态含量大小顺序, 可以总结出所有点位有机磷形态含量大小顺序均为:

胡敏酸结合态 OP > 残渣态 OP > HCl-OP > 富里酸结合态 OP, 而 NaHCO_3 -OP 由岸边向太湖湖泊中心延伸, 其所占总有机磷的质量分数呈现先升高后降低再升高的趋势.

4 讨论

MDG 的 5 个点位垂直分布的趋势应该与理化环境及微生物作用有关. 除了离湖心最近的点 (MDG-05), 其余点位 NaHCO_3 -OP 先降低后升高再降低并且在 2~6 cm 含量最低, 可能是因为 0~2 cm 活性有机磷向间隙水中迁移, 而在 2~6 cm 活性有机磷一方面被微生物溶解、水解矿化, 另一方面植物根部的酸性和碱性磷酸酶的活性增加^[30] 促进了活性有机磷的矿化. 在 4~8 cm, NaHCO_3 -OP 含量再升高可能是因为随着深度增加, 酶活性减低, 活性有机磷矿化量减少. 而在湖泊沉积物 8 cm 以下 NaHCO_3 -OP 含量继续降低是因为随着深度的增加, 沉积物处于一个厌氧环境, 活性有机磷被迅速矿化为无机磷释放到间隙水中^[31]. 在离湖心最近的点位 (MDG-05) NaHCO_3 -OP 含量是先增加后减少的, 这可能和该点位的地理位置有关, 离湖泊中心位置近, 表层没有大量的蓝藻堆积, 而第 2 层微生物活性作用显著. 胡敏酸结合态有机磷在第 1 层含量很高的原因可能是非活性有机磷较稳定, 主要受陆源的影响, 尤其是 0~2 cm 表层有蓝藻堆积; 6~8 cm 含

量最高可能是因为活性与中活性磷向非活性磷转化,该层的活性有机磷与中活性有机磷的含量都有降低的趋势. 活性有机磷与 pH、DO、水深显著负相关. 蓝藻淤积越多,活性有机磷含量越高. HCl-OP 与富里酸结合态 OP 中等活性有机磷大致也是随着深度增加含量降低的规律,可能是因为微生物、磷酸酶和有机质促进了中等活性有机磷向着活性、非活性转化^[32].

对毛茆港几个采样点有机磷组分与其它地理化学参数进行相关性分析,见表 3,OM 与总有机磷、活性有机磷、中等活性有机磷及非活性有机磷都表现出了显著相关关系,这与 Zhang 等^[16]研究一致,说明有机质是有机磷的重要载体. NaOH-Pi 一般指和 Al、Fe 等氧化物或氢氧化物结合的磷,当沉积物-水界面处在厌氧环境下,NaOH-Pi 可以被释放出来以满足浮游生物生长的需要^[5,8,33],NaOH-Pi 可用来评价沉积物短期和长期可利用性磷,是测定藻类可利用磷的一个重要手段,其生物活性相对较

高^[5]. 而总有机磷与 NaOH-Pi 的极显著相关性表明有机磷对上覆水质的营养状况起着重要作用. 表 3 表明,毛茆港不同点位沉积物中等活性有机磷与非活性有机磷均与 NaOH-Pi 显著相关. 而除了 02 点位其余所有点位的活性有机磷与 NaOH-Pi 也有显著相关性. 02 点位的 DO 较其它点位明显小很多,因为该点位表层蓝藻淤积较其它点位都多,且 DO 与活性有机磷具有显著负相关性,所以 02 点位的活性有机磷含量就会偏高,因此 02 点位的活性有机磷与 NaOH-Pi 的相关性可能会受到影响. 3 种磷形态与 NaOH-Pi 的显著相关性说明活性有机磷是生物可利用性磷,是沉积物向水体磷迁移转化的重要部分;酸可提取有机磷在一定条件下可矿化或水解成为溶解态的活性磷^[34],中等活性有机磷也是磷的重要储备,可被生物所利用;非活性有机磷也具有生物活性,并不仅是化学态的稳定性,中等活性有机磷与非活性有机磷均具有向水体释放的潜力.

表 3 MDG 沉积物有机磷组分与 OM、NaOH-Pi 等的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between organic phosphorus fractions and organic matter, inorganic phosphorus extracted by NaOH, *et al* in MDG sediments

类型	活性有机磷	中等活性有机磷	非活性有机磷	总有机磷	胡敏酸结合态有机磷
OM	0.499 *	0.452 *	0.440 *	0.633 * *	0.442 *
NaOH-Pi	0.414(0.550 *)	0.546 *	0.514 *	0.669 * *	0.515 *
pH	-0.529 *	0.178	0.179	0.053	0.166
DO	-0.539 *	0.179	0.088	-0.033	0.072
水深	-0.580 * *	0.258	-0.181	-0.301	-0.181

1) $n=21$,括号内表示除了 MDG-06 点位的相关性; * 和 * * 分别表示显著水平 $P<0.05$ 和 $P<0.01$

5 结论

(1)太湖西岸湖泛易发区毛茆港沉积物中有机磷形态以胡敏酸结合态 OP 为主,占有机磷总量的 35%;由岸边往湖心方向,总有机磷含量先降低后增加;垂直方向上总有机磷在 2~6 cm 含量最低,4~8 cm 含量最高.

(2)沉积物各种磷形态含量大小依次为:胡敏酸结合态 OP>残渣态 OP>HCl-OP>富里酸结合态 OP;由岸边向湖心区延伸,NaHCO₃-OP 占总有机磷的相对含量呈先升高后降低再升高的趋势. NaHCO₃-OP 和胡敏酸结合态 OP 垂直分布大致先降低后升高再降低,NaHCO₃-OP 在 4~6 cm 含量最低,胡敏酸结合态 OP 在 4~8 cm 含量最高. HCl-OP 和富里酸结合态 OP 垂直分布上大致是随深度增加含量降低. 残渣态 OP 含量垂直方向无明显变化,稳定在 45 μg·g⁻¹左右.

(3)毛茆港表层沉积物活性有机磷与 pH、DO、水深呈显著负相关,OM、NaOH-Pi 与总有机磷、活性有机磷、中等活性有机磷及非活性有机磷表现出了显著相关关系. 蓝藻残体的沉积增加了活性有机磷的含量,来年蓝藻复苏,微生物将活性有机磷转化为能吸收的正磷酸盐,进而促进湖泛的发生.

致谢:感谢南京师范大学刘宪圣、杭云飞对本文给予的帮助.

参考文献:

[1] 梁海清,王圣瑞,金相灿,等. 不同污染程度沉积物不同粒级有机磷形态及其分布[J]. 中国农学通报, 2007, 23(3): 380-385.
Liang H Q, Wang S R, Jin X C, *et al*. Study on the organic phosphorus form & distribution of different particle size fractions in the different polluted sediments[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(3): 380-385.
[2] 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.
Yin D Q, Qin Q R, Yan H. Effects of environmental factors on

- release of phosphorus from sediments in Wuli Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, **6**(3): 240-244.
- [3] 袁旭音, 陈骏, 季峻峰, 等. 太湖现代沉积物的物质组成和形成条件分析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2002, **38**(6): 756-765.
- Yuan X Y, Chen J, Ji F J, *et al.* Compositions and the formative conditions of sediments in Taihu Lake, Eastern China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2002, **38**(6): 756-765.
- [4] 黄清辉, 王子建, 王东红, 等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(2): 97-104.
- Huang Q H, Wang Z J, Wang D H, *et al.* Phosphorus sorption capacity of the surface sediment in the Lake Taihu and risk assessment of phosphorus release[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, **16**(2): 97-104.
- [5] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [6] 张路, 范成新, 王建军, 等. 太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1537-1543.
- Zhang L, Fan C X, Wang J J, *et al.* Space-time dependent variances of ammonia and phosphorus flux on sediment-water interface in Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(8): 1537-1543.
- [7] Petticrew E L, Arocena J M. Evaluation of iron-phosphate as a source of internal lake phosphorus loadings[J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1-3): 87-93.
- [8] 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.
- [9] 步青云, 金相灿, 王圣瑞. 长江中下游浅水湖泊表层沉积物潜在可交换性磷研究[J]. *地理研究*, 2007, **26**(1): 117-124.
- Bu Q Y, Jin X C, Wang S R. Study of the potential exchangeable phosphorus in sediments of shallow lakes in the middle and lower Yangtze River [J]. *Geographical Research*, 2007, **26**(1): 117-124.
- [10] 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.
- [11] Reitzel K, Ahlgren J, Gogoll A, *et al.* Effects of aluminum treatment on phosphorus, carbon, and nitrogen distribution in lake sediment: a ^{31}P NMR study[J]. *Water Research*, 2006, **40**(4): 647-654.
- [12] Reitzel K, Ahlgren J, DeBrabandere H, *et al.* Degradation rates of organic phosphorus in lake sediment [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **82**(1): 15-28.
- [13] 扈传昱, 潘建明, 刘小涯. 珠江口沉积物中磷的赋存形态[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(4): 21-25.
- Hu C Y, Pan J M, Liu X Y. Species of phosphorus in sediments from Peal River Estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2001, **20**(4): 21-25.
- [14] 夏学惠, 东野脉兴, 周建民, 等. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境影响[J]. *沉积学报*, 2002, **20**(3): 416-420.
- Xia X H, Dongye M X, Zhou J M, *et al.* Geochemistry and influence to environment of phosphorus in modern sediment in Dianchi Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, **20**(3): 416-420.
- [15] 俞振飞, 王国祥, 钱君龙, 等. SMT法测定沉积物标准样品有机磷形态分析方法探究[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(3): 117-122.
- Yu Z F, Wang G X, Qian J L, *et al.* A research of characterizing the organic phosphorus from standard sediment samples by SMT[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(3): 117-122.
- [16] 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.
- [17] Yang M, Yu J W, Li Z L, *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. *Science*, 2008, **319**(5860): 158.
- [18] 陈荷生. 太湖宜兴近岸水域“湖泛”现象初析[J]. *水利水电科技进展*, 2011, **31**(4): 33-37.
- Chen H S. Black water aggregation in Yixing in shore water area of Taihu Lake[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, **31**(4): 33-37.
- [19] 申秋实, 邵世光, 王兆德, 等. 风浪条件下太湖藻源性“湖泛”的消退及其水体恢复进程[J]. *科学通报*, 2012, **57**(12): 1060-1066.
- Shen Q S, Shao S G, Wang Z D, *et al.* Fade and recovery process of algae-induced black bloom in Lake Taihu under different wind conditions[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(12): 1060-1066.
- [20] 刘国锋, 钟继承, 何俊, 等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中Fe、S、P的含量及其形态变化[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- Liu G F, Zhong J C, He J, *et al.* Effects of black spots of dead-cyanobacterial mats on Fe-S-P cycling in sediments of Zhushan Bay, Lake Taihu [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- [21] 申秋实, 周麒麟, 邵世光, 等. 太湖草源性“湖泛”水域沉积物营养盐释放估算[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(2): 177-184.
- Shen Q S, Zhou Q L, Shao S G, *et al.* Estimation of *in-situ* sediment nutrients release at the submerged plant induced black bloom area in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(2): 177-184.
- [22] 陆桂华, 马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(3): 438-442.
- Lu G H, Ma Q. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake [J]. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(3): 438-442.
- [23] Ivanoff D B, Reddy K R, Robinson S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols [J]. *Soil Science*, 1998, **163**(1): 36-45.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 12-13.
- [25] 孙静, 王圣瑞, 曾清如, 等. 洱海表层沉积物有机磷形态分布特征及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(11): 1226-1232.
- Sun J, Wang S R, Zeng Q R, *et al.* Distribution characteristics of organic phosphorus fractions and influencing factors in surface

- sediments of Lake Erhai [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(11): 1226-1232.
- [26] Tiessen H, Stewart J W B, Cole C V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, **48**(4): 853-858.
- [27] 李强, 尹俊华, 席北斗, 等. 巢湖入湖河流沉积物中有机磷的形态分级研究[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(2): 441-447.
Li Q, Yin J H, Xi B D, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in sediments of inflow rivers of Lake Chaohu, China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(2): 441-447.
- [28] 胡春华, 濮培民. 太湖五里湖沉降通量及其有机质分解率研究[J]. *海洋与湖沼*, 2000, **31**(3): 327-333.
Hu C H, Pu P M. Downward flux of suspended substance and organic decomposition rate in Wulihu Bay, Taihu Lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, **31**(3): 327-333.
- [29] 霍守亮, 李青芹, 胥逢宇, 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.
Huo S L, Li Q Q, Zan F Y, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes, China[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1000-1007.
- [30] Tarafdar J C, Jungk A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1987, **3**(4): 199-204.
- [31] Khoshmanesh A, Hart B T, Duncan A, *et al.* Luxury uptake of phosphorus by sediment bacteria[J]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 774-778.
- [32] 李楠, 单保庆, 张洪, 等. 北运河下游典型灌渠沉积物有机磷形态分布特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2911-2916.
Li N, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Organic phosphorus forms in the sediments in the downstream channel of North Canal River watershed[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 2911-2916.
- [33] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, **273**(1-3): 109-116.
- [34] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系[J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(6): 583-586.
Huang Q H, Wang D H, Wang C X, *et al.* Relation between phosphorus forms in the sediments and lake eutrophication[J]. *China Environmental Science*, 2003, **23**(6): 583-586.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《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11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 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