

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



# 目次

|                                                                           |                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究 .....                                             | 吴起鑫, 韩贵琳 (2145)                                 |
| 成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建 .....                                           | 岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)               |
| 太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析 .....                                                 | 饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)              |
| 环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征 .....                                               | 徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)           |
| 南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布 .....                                     | 张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172) |
| 青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征 .....                                            | 刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)               |
| 城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性 .....                                               | 邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)         |
| 基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算 .....                                    | 陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)                |
| 浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究 .....                                               | 高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)                              |
| 福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析 .....                                                 | 李雪丁 (2210)                                      |
| HSPF 水文水质模型应用研究综述 .....                                                   | 李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)                             |
| 城市降雨径流模拟的参数不确定性分析 .....                                                   | 黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)                             |
| 利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 .....                                         | 姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)                            |
| 嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定 .....                                           | 谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)                     |
| 重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价 .....                                              | 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)         |
| 南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究 .....                                                | 郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)                   |
| 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究 .....                                                 | 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)                            |
| 影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析 .....                                            | 丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)                |
| 大型底栖动物生物评价指数比较与应用 .....                                                   | 耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)                        |
| 青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征 .....                                                | 王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郭伟 (2288)                |
| 青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征 .....                                              | 郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)                    |
| 用物理-生态集成技术局部控制富营养化 .....                                                  | 李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)      |
| 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究 .....                                                    | 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)                    |
| 富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应 .....                                                 | 袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)                   |
| 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 .....                                                  | 温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)                             |
| 南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究 .....                                                | 方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)               |
| 东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究 .....                                      | 林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)                |
| 嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征 .....                                                 | 蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)                        |
| 电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源 .....                                        | 王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)     |
| 基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究 .....                                         | 李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)       |
| 渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响 .....                                                | 秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)                |
| 崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价 .....                                            | 李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)                  |
| 白洋淀底泥重金属形态及竖向分布 .....                                                     | 李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)          |
| 西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究 .....                                                | 刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)                   |
| 氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制 .....                                                    | 刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)       |
| Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性 .....                                         | 张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)                       |
| 声电氧化处理扑热息痛的研究 .....                                                       | 戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)                    |
| 粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究 .....                                      | 白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)                            |
| 利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究 .....                                            | 张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)         |
| Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究 .....                              | 王小蓉, 吴平霄 (2432)                                 |
| 核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究 .....                                              | 武国正, 徐宗学 (2438)                                 |
| A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究 .....                                          | 翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)                    |
| 系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究 .....                                          | 蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)                             |
| 氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究 .....                | 李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)         |
| 1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析 .....                                          | 刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)                       |
| 蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化 .....                                                | 秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)                   |
| 双季稻田 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放特征及品种筛选研究 .....                 | 傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)                         |
| 闽江河口短叶茳苳湿地 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放对氮输入的短期响应 .....           | 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)                        |
| 青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征 .....                                              | 彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)              |
| 不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律 .....                                                | 吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)                       |
| 土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 .....                                            | 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)                        |
| 多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应 .....                                               | 潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)  |
| 不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究 .....                                               | 梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)                             |
| 废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究 .....                                                | 伊元荣, 韩敏芳 (2522)                                 |
| 中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析 .....                                            | 卢愿清, 史军 (2528)                                  |
| 《环境科学》征稿简则 (2431)      《环境科学》征订启事 (2532)      信息 (2157, 2271, 2367, 2418) |                                                 |

# 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究

温胜芳, 单保庆\*, 张洪

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:** 通过对巢湖表层沉积物磷形态、有机质及粒径分布特征分析, 与沉积物总磷历史数据进行对比, 结合不同形态磷的剖面变化, 探讨了内源磷释放风险. 结果表明, 巢湖表层沉积物 TP 自西向东呈递减趋势, 平均含量为  $790 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比 20 世纪 80 年代平均增加了 55%, 其中东半湖增加  $211 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、西半湖增加  $386 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 表层沉积物磷形态含量和分布有较大差别, 铁铝结合磷 ( $\text{NaOH-P}_i$ ) 和活性有机磷 ( $\text{NaOH-P}_o$ ) 含量占 TP 含量的 42%, 分别介于  $55 \sim 648 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $27 \sim 468 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  范围, 西半湖平均含量分别为  $331 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $225 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  显著高于东半湖 ( $147 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $P < 0.01$ ); 相对而言, 钙镁结合磷 ( $\text{Ca-P}$ ) 和惰性磷 ( $\text{Res-P}$ ) 含量在东西部湖区没有显著差别, 分别占 TP 含量的 18% 和 40%. 沉积物 TP 含量随深度减少而增加, 西半湖增加量高于东半湖, 各种磷形态中  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  的垂直变化规律与 TP 相似, 是沉积物磷增加的主要形态. 西半湖高活性磷、高有机质和多砂质粉砂的特征共同作用极大地增加了沉积物中磷向上覆水中释放的风险.

**关键词:** 巢湖; 沉积物; 总磷; 磷形态; 时空变化; 释放风险

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2322-08

## Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake

WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Phosphorus fractions, organic matter and particle size of the surface sediment from Chaohu Lake were analyzed for spatial distribution and the risk of phosphorus release. The result showed that total phosphorus (TP) of surface sediment was  $790 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which was 55% higher than that in 1980s, with  $386 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  higher in western lake and  $211 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  higher in eastern lake.  $\text{NaOH-P}_i$  of sediment ranged from 55 to  $648 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and occupied average 25% of TP.  $\text{NaOH-P}_o$  of sediment ranged from 27 to  $468 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , and occupied average 17% of TP.  $\text{NaOH-P}_i$  and  $\text{NaOH-P}_o$  in western lake were  $331 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $225 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which were significantly higher than those in eastern lake.  $\text{Ca-P}$  and  $\text{Res-P}$  accounted for 18% and 40% of TP, and were equably distributed in the lake. TP,  $\text{NaOH-P}_i$  and  $\text{NaOH-P}_o$  of sediment in the western lake increased intensively with the depth, while  $\text{Ca-P}$  and  $\text{Res-P}$  showed no significant change in the vertical profile in the lake. Profile of phosphorus fractions showed that  $\text{NaOH-P}_i$  and  $\text{NaOH-P}_o$  were the dominant fractions of the increasing phosphorus sedimentation in the western lake. Phosphorus of sediment in the western lake will release more easily to the water with higher organic matter and higher content of sandy silt.

**Key words:** Chaohu Lake; sediment; total phosphorus (TP); phosphorus fractions; spatio-temporal variation; release risk

巢湖是我国五大淡水湖之一, 随着流域内工农业的高速发展和人口的快速增长, 大量工农业废水和生活污水排入湖泊, 巢湖流域水体富营养化问题日益突出<sup>[1, 2]</sup>, 巢湖作为巢湖市和合肥市的饮用水源地其水质改善迫在眉睫<sup>[3]</sup>. 近 30 年以来, 国内外有关巢湖在流域污染过程、水域生态与水质变化、富营养化机制研究和内源污染控制研究方面做了大量的工作, 结果表明, 流域的工农业污染输入日益增加<sup>[4-7]</sup>, 水体总氮、总磷超标导致浮游藻种群结构发生改变<sup>[8-10]</sup>, 内源风险逐渐增加<sup>[11-14]</sup>. 沉积物向上覆水体释放磷的内源过程对水质的重要性已经得到公认<sup>[15, 16]</sup>. 沉积物中的无机磷与孔隙水中的可溶性磷保持动态的沉淀/溶解、吸附/解吸附等多种化学平衡, 同时通过孔隙水以扩散、紊流等方式向上覆水

体释放<sup>[17, 18]</sup>; 沉积物中有机磷则在微生物作用下与无机磷间进行转化; 不同磷形态在沉积物中的分布和生物地球化学转化过程的研究是揭示水环境变化过程的重要手段.

目前, 关于巢湖内源磷污染的研究仅限于湖区个别位点和磷形态, 未涉及影响内源磷释放的沉积物有机质、粒径等环境要素, 不能全面反映巢湖沉积物磷的分布状况和释放风险. 从湖泊尺度上研究经济快速发展背景下的沉积物的磷形态分布和影响磷迁移转化的环境因子的改变, 对湖泊内源磷释放和

收稿日期: 2011-09-27; 修订日期: 2011-12-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(20907067); 水利部公益性行业科研专项项目(200901008)

作者简介: 温胜芳(1983~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为磷迁移转化, E-mail: sfwen\_st@rcees.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: bqshan@rcees.ac.cn

控制有重要意义. 本研究通过对巢湖表层沉积物进行高密度采样分析, 调查沉积物磷形态及影响内源磷释放的沉积物有机质和粒径的分布, 结合沉积物总磷历史调查数据和沉积物磷形态剖面分布说明巢湖磷沉积变化, 并探讨不同湖区沉积物磷来源与工农业发展的关系和磷释放的风险, 以期为后续的沉积物内源磷释放研究提供基础.

1 材料与方法

1.1 研究区概况和采样点设置

巢湖位于北纬 31°25′~31°43′, 东经 117°17′~117°52′, 属长江下游左岸水系. 流域面积 13 350 km<sup>2</sup>, 属北亚热带湿润季风气候区, 年平均降水量 1 000~1 158 mm<sup>[19]</sup>, 有丰乐-杭埠河、派河、南淝-店埠河、白石山河、柘皋河、烔炀河、歧阳河、裕溪河等水系. 巢湖湖区面积 760 km<sup>2</sup>, 平均水深 3 m, 是典型的浅水湖泊, 以姥山、中庙和齐咀连线为界分为东西半湖. 2000 年以来, 巢湖水质一直处于 V 类和劣 V 类状态, 西半湖的富营养程度比东半湖严重<sup>[1]</sup>.

为获取巢湖湖区表层沉积物磷分布特征, 根据文献[20]采用网格布点法进行采样点设置. 网格宽度 3.8 km, 网格中心点 600 m 范围内(靠近湖岸、河口的网格内的采样点至少远离湖岸、河口 1 km)选

取一点采取沉积柱, 作为网格内 14.5 km<sup>2</sup> 湖区沉积物的代表, 共设置 57 个采样点(图 1). 根据巢湖形貌、流向分布和河流输入磷的情况, 从 57 个沉积柱中选择 2、10、23、37、40 和 52 号采样点的 6 个沉积柱代表从西向东不同湖区不同沉积状况的沉积物进行磷形态垂直剖面分析.

2010 年 7 月对巢湖湖区 57 个采样点采取表层水和沉积物进行分析. 表层水的基本理化性质见表 1.

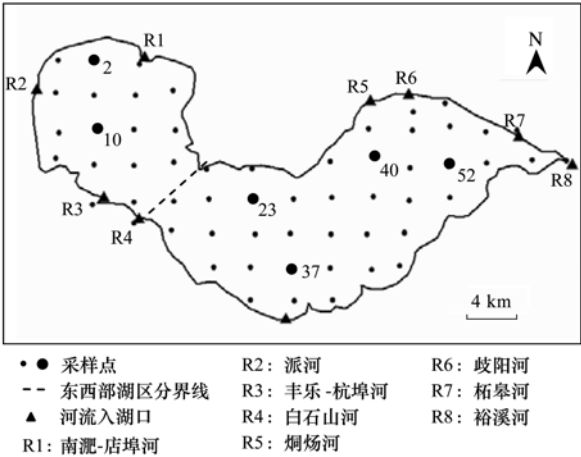


图 1 巢湖湖区采样点位置示意  
Fig. 1 Locations of the sampling sites in Chaohu Lake

表 1 2010 年巢湖表层水基本理化特征

| Table 1 Physico-chemical indexes in the surface water of Chaohu Lake |             |                       |                |                       |                        |
|----------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|----------------|-----------------------|------------------------|
| <i>t</i> /°C                                                         | pH          | DO/mg·L <sup>-1</sup> | ORP/mV         | TP/mg·L <sup>-1</sup> | SRP/mg·L <sup>-1</sup> |
| 29.33 ± 0.09                                                         | 7.52 ± 0.11 | 8.21 ± 0.21           | 446.81 ± 12.01 | 0.044 ± 0.032         | 0.025 ± 0.018          |

1.2 样品采集与分析

各采样点表层水的 *t*、pH、DO 和 ORP 指标用多参数水质分析仪(美国 YSI professional plus)在原位进行测定, 采集 100 mL 表层水酸化后于室内用磷钼蓝分光光度法分析表层水的活性磷(SRP)和总磷(TP).

各采样点沉积物用自重力柱状采样器(奥地利 UWITEC)采取, 随后用采样器配带的切割装置将沉积柱按 0~12 cm 范围内每层 1 cm, 12~32 cm 范围内每层 2 cm, 32~40 cm 范围内每层 4 cm 进行分层. 表层 0~1 cm 的沉积物用于分析总磷、磷形态、粒径和有机质的水平分布. 用于分析总磷和磷形态垂直分布的各点沉积柱的厚度分别是 2、10 号采样点 25 cm, 37 号采样点为 8 cm, 23、40、52 号采样点为 35~40 cm.

用激光粒度分析仪(英国 Mastersizer 2000)测

定未处理的表层沉积物的粒径. 所有沉积物冷冻干燥后磨细过 100 目筛, 用于分析沉积物总磷、磷形态和有机质含量. 用重铬酸钾容量法-稀释热法<sup>[21]</sup>分析沉积物有机质. 用微波消解仪(美国 CEM MARS Xpress, 6 mL 王水 + 2 mL 氢氟酸)高压消解沉积物后, 用 ICP-OES(美国 OPTIMA 2000DV)测定消解液中磷浓度. 沉积物磷形态分级采用 Hieltjes 的连续浸提法(具体操作步骤见图 2)<sup>[22]</sup>, 将沉积物磷逐级分为易解析磷(KCl-P)、铁铝结合磷(NaOH-P<sub>i</sub>)、活性有机磷(NaOH-P<sub>o</sub>)、钙镁结合磷(Ca-P)和惰性磷(Res-P), 用全自动化学分析仪(美国 Westco smartchem)测定沉积物提取液的磷浓度.

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物总磷分布

巢湖湖区表层沉积物的 TP 平均含量为 790

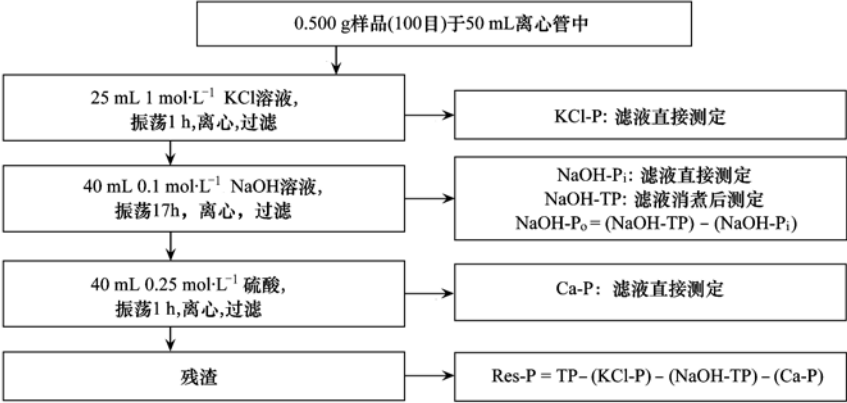


图 2 沉积物磷分级提取测定方法

Fig. 2 Extraction schemes for determining the fractions of sediment phosphorus

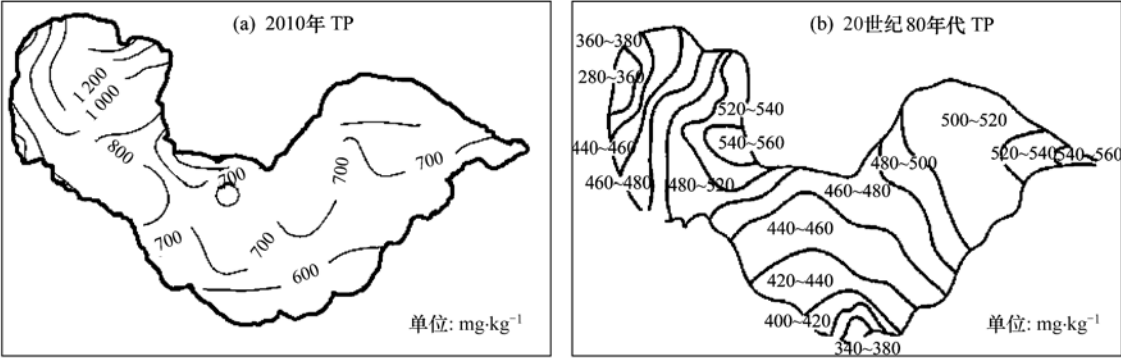


图 3 2010 年和文献[25]中 20 世纪 80 年代巢湖湖区表层沉积物总磷分布

Fig. 3 Isopleth maps of spatial distribution of TP in surface sediments of Chaohu Lake in 2010 and 1980s

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,在湖区分布总体呈现自西向东、自北向南减少的趋势(图 3). 西半湖表层沉积物的 TP 含量为  $936\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,显著高于东半湖( $706\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $P < 0.01$ ). 西半湖中河流入湖口 TP 含量相对其他区域较高,最高点出现在南淝-店埠河入湖口处,TP 为  $1\,848\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 南淝-店埠河流经工业发达、人口众多的合肥境内,流域内工业和城市生活污水带来大量磷污染<sup>[23]</sup>. 东半湖的北部 TP 含量普遍高于南部,这可能与巢湖北岸歧阳河、烔炀河的河流补给来源于含磷岩层出露区的地表径流<sup>[24]</sup>有关.

20 世纪 80 年代中国对大中湖泊进行了一系列调查,此时,巢湖表层沉积物 TP 含量在  $280\sim 560\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,东西部湖区间差别不大<sup>[25]</sup>. 经历 30 a 的人口和经济高速发展后,巢湖表层沉积物 TP 由  $510\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到  $790\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,增加了 55%,在东西部湖区的分布差异加剧(图 3). 2010 年西半湖表层沉积物 TP 含量比 80 年代增加了  $386\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,东半湖增加  $211\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 沉积物磷的含量和空间分布变化指示了磷污染源结构的变化. 80 年代农

田和村镇径流输入是磷的主要来源<sup>[26]</sup>,湖区表层沉积物 TP 含量最高点位于忠庙镇附近,30 a 后工业废水和城市生活污水成为磷的主要来源<sup>[4]</sup>,流经合肥的南淝-店埠河的入湖口附近成为巢湖湖区沉积物 TP 含量最高点.

2.2 表层沉积物磷形态分布

巢湖表层沉积物的磷形态主要以铁铝结合磷( $\text{NaOH-P}_i$ )、活性有机磷( $\text{NaOH-P}_o$ )、钙镁结合磷( $\text{Ca-P}$ )以及惰性磷( $\text{Res-P}$ )为主(表 2). 表层沉积物中易解析磷( $\text{KCl-P}$ )含量在  $0\sim 3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,不足 TP 的 1%; NaOH 溶液提取的磷形态占总磷的 42%, $\text{NaOH-P}_i$  含量在  $55\sim 648\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, $\text{NaOH-P}_o$  含量在  $27\sim 468\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间; $\text{Ca-P}$  平均含量为  $144\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占 TP 的 18%; $\text{Res-P}$  平均含量为  $314\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,占 TP 的 40%.

表层沉积物磷形态分布(图 4)和差异显著性分析表明, $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  含量在西半湖显著高于东半湖( $P < 0.01$ ), $\text{Ca-P}$  和  $\text{Res-P}$  含量在东西部湖区没有显著差别. 东西部湖区表层沉积物 TP

表 2 巢湖表层沉积物总磷及各种磷形态基本情况  
Table 2 Various fractions of sediment phosphorus in Chaohu Lake

| 项目                                 | TP            | KCl-P       | NaOH-P <sub>i</sub> | NaOH-P <sub>o</sub> | Ca-P         | Res-P         |
|------------------------------------|---------------|-------------|---------------------|---------------------|--------------|---------------|
| 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $790 \pm 260$ | $1 \pm 0.7$ | $202 \pm 127$       | $131 \pm 87$        | $144 \pm 55$ | $314 \pm 121$ |
| 占 TP 的质量分数/%                       |               | <1          | 25                  | 17                  | 18           | 40            |

含量的差别主要由于  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  存在差异。

在表层沉积物的各种磷形态中,  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  的水平分布特征与 TP 相似, 呈现自西向东、自北向南减少的趋势。  $\text{NaOH-P}_i$  含量在西半湖平均为  $331 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 约占 TP 的 34%; 在东半湖平均为  $147 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 仅占 TP 的 21%。表层沉积物的  $\text{NaOH-P}_o$  含量在西半湖平均为  $225 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 约占 TP 的 23%; 在东半湖平均为  $91 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 仅占 TP 的 13%。  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  在溶解氧变化和微生物作用下容易转化为生物可利用磷释放到孔隙水中<sup>[27~29]</sup>, 夏季末和冬季大型浅水湖泊中的沉积物因有机质分解经常处于

缺氧状态<sup>[30]</sup>, 因此,  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  含量高的西半湖沉积物磷释放风险较高。

湖区沉积物 Ca-P 最高点 ( $310 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 出现在丰乐-杭埠河入湖口, 占 TP 比例 (质量分数) 达到 36%。丰乐-杭埠河入湖径流量是巢湖总径流量的 65%, 流域内土地利用以自然林地和农业用地为主, 土壤 Ca-P 含量较高, 达到 40% 以上<sup>[31, 32]</sup>。由于降水的季节和地区分布不均, 土壤侵蚀十分严重, 夏季径流使大量 Ca-P 进入巢湖沉积。由于钙镁结合的无机磷组分代表了沉积物中与钙和镁矿物结合形成稳定化合物的磷形态, 很难被生物体利用, 因此释放风险不大。

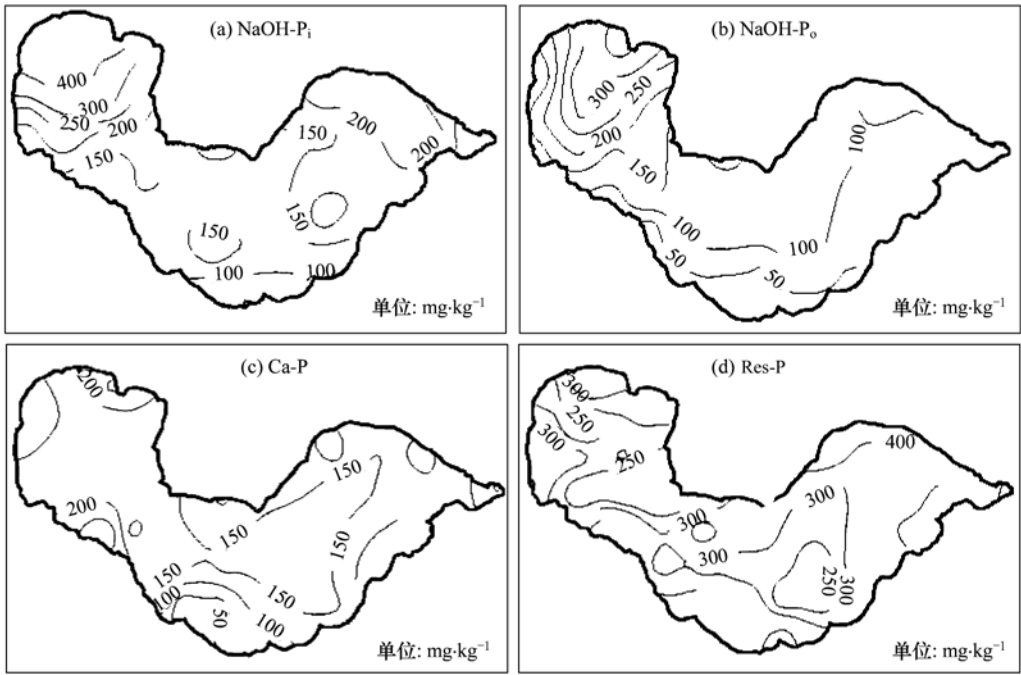


图 4 巢湖湖区表层沉积物  $\text{NaOH-P}_i$ 、 $\text{NaOH-P}_o$ 、Ca-P 和 Res-P 含量分布  
Fig. 4 Isopleth maps of spatial distribution of phosphorus species in surface sediments of Chaohu Lake

2.3 沉积物不同形态磷的垂直分布特征

巢湖不同湖区 6 个采样点的沉积柱 TP 垂直剖面变化差异大 (图 5), 表现为西部湖区 (采样点 2、10) 在 15 ~ 20 cm 深处沉积物的 TP 开始增加, 中部湖区 (采样点 23、37) 和东部湖区 (采样点 40、52) 的沉积柱 TP 剖面变化比较平稳。  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  的垂直剖面变化与 TP 相似。 6 个点的 Ca-P

和 Res-P 的垂直剖面变化均不明显。

西部湖区的 2 个采样点随深度的减少 TP、 $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  增加程度不同。 采样点 2 沉积物 TP 含量从 15 cm 深度 ( $432 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 处开始增加, 在 5 cm 达到最高 ( $1367 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 平均增加  $935 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 采样点 10 从 20 cm 深度 ( $610 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 开始增加, 10 cm 以后增加缓慢, 0 ~ 10 cm

的沉积物 TP 含量平均为  $1\,085\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均增加  $475\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 20 世纪 80 年代湖泊调查时采样点 2 的表层沉积物 TP 略低于采样点 10<sup>[23]</sup>, 30 a 后采样点 2 的表层沉积物 TP 比采样点 10 多  $282\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 这与 30 a 中南淝-店埠河流域人口和经济发展相关. 2010 年合肥人口为 491 万, GDP 为 1 665 亿元, 分别比 1990 年增加了 4 倍和 28 倍<sup>[19]</sup>, 如此高速的人口和 GDP 增长产生的大量含磷工业废水和生活污水通过南淝-店埠河进入半封闭湖泊进行沉积<sup>[23]</sup>. 采样点 2 沉积物  $\text{NaOH-P}_i$  表层 (0 ~ 6 cm) 比底部 (15 ~ 20 cm) 增加了  $573\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{NaOH-P}_o$  增加了  $184\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 采样点 10 沉积物  $\text{NaOH-P}_i$  表层 (0 ~ 10 cm) 比底部 (20 ~ 30 cm) 增加了  $279\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{NaOH-P}_o$  增加了  $173\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Ca-P 和 Res-P 在 2 个采样点的增加都不明显. TP 和磷形态的垂直分布说明西部湖区沉积物磷沉积的增加实际是活性较强的  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  含量的增加. 西部湖区沉积物向上覆水体释放磷的风险增加.

中东部湖区沉积物 TP 从沉积柱底部开始缓慢增加, 4 个采样点的 TP 增量均不足  $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  增幅低于  $80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 采样点

23 沉积物 TP 从底部 (30 ~ 35 cm)  $663\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  缓慢增加到表层 (0 ~ 3 cm)  $815\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  增加约  $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 采样点 52 沉积物从底部 (30 ~ 40 cm) 到表层 (0 ~ 3 cm) TP 由  $576\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  缓慢增加到  $761\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  增加约  $70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 东部湖区入湖河流主要为柘皋河, 年径流量仅占总入湖径流量的 3.3%, 东部湖区主要污染来源是柘皋河流域、湖区周边径流和汛期西部湖区来水<sup>[25]</sup>. 柘皋河流域以农业为主, 20 世纪 80 年代农业集约化过程投入大量化肥以使粮食增产, 2000 年磷肥使用量达到  $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  是 80 年代的 5 倍多<sup>[19]</sup>, 巨大的磷肥施用强度增加了流域磷素输入通量, 增加湖区磷沉积. 中东部湖区沉积物  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  增加缓慢, 磷释放风险增加不大.

## 2.4 表层沉积物的粒径和有机质分布

巢湖表层沉积物体积平均粒径  $28\text{ }\mu\text{m}$ , 河流入湖口在  $40\sim63\text{ }\mu\text{m}$  之间, 西半湖普遍高于东半湖, 中部湖区南岸高于北岸 (图 6). 根据福克沉积物分类法<sup>[33]</sup> 南淝-店埠河、丰乐-杭埠河、白石山河和柘皋河入湖口附近和西半湖大部分区域表层沉积物主要

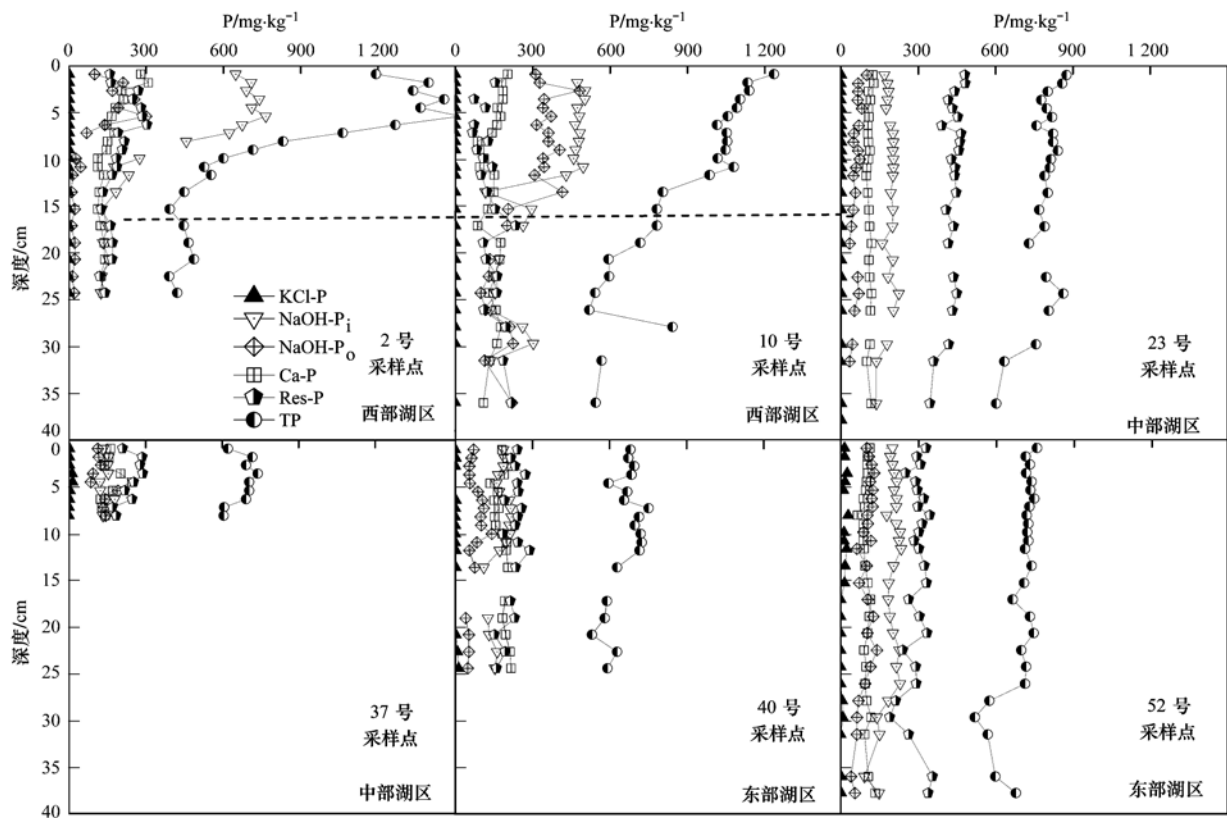


图 5 不同湖区沉积物总磷及磷形态剖面分布

Fig. 5 Phosphorus species in six sediment cores from Chaohu Lake

为砂质粉砂,东半湖和西半湖的湖心表层沉积物大多为粉砂(图6)。流域汛期径流带来大量粗粒径颗粒通过河流汇入湖泊,粗颗粒优先在入湖口沉积,这与河口附近沉积物的较高体积平均粒径相吻合。流量最大的丰乐-杭埠河流经地区的水土流失严重,因此河流入湖口附近沉积物体积平均粒径大。巢湖南岸湖岸崩塌较严重,导致中部湖区南岸的沉积物的

平均粒径普遍高于北岸。沉积物粒径分布一方面可以指示沉积物的来源,另一方面是沉积物孔隙状况的重要指标。沉积物磷转化进入孔隙水后,需要通过孔隙水扩散进入上覆水,进而影响水体水质。孔隙度是影响孔隙水物质扩散通量的重要参数<sup>[15, 34]</sup>,西半湖粗粒径颗粒含量高形成的孔隙度大,有利于内源磷通过孔隙水向上覆水体释放。

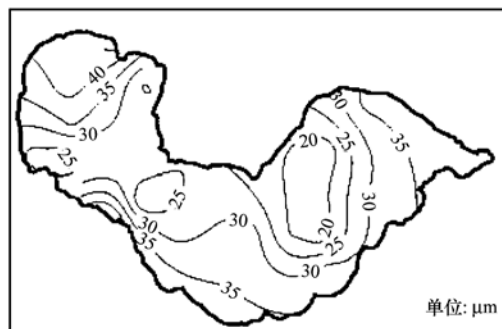
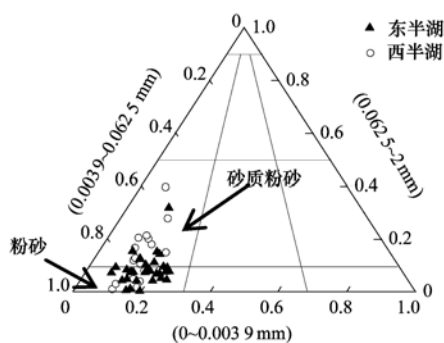


图6 巢湖湖区沉积物粒径分布三角图和体积平均粒径等值线

Fig. 6 Ternary and isopleth maps of sediment granularity in Chaohu Lake

巢湖湖区沉积物有机质平均含量为  $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比20世纪80年代增加了64%。西半湖有机质含量平均为  $22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  显著高于东半湖  $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $P < 0.01$ , 图7)。西半湖表层沉积物有机质含量大部分在  $18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上, 最高点位置在南淝-店埠河入湖口达到  $32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。南淝-店埠河带来的大量有机质可以作为桥联体促进颗粒物对磷的吸附和在西半湖的沉降<sup>[35]</sup>。沉积物总磷与有机质显著相关  $y = 3.776x^2 - 104.8x + 1371$  ( $R^2 = 0.822$ ) 也证明了这一点。沉积物  $\text{NaOH-P}_o$  和有机质也有很好的相关性  $y = 1.125x^2 - 29.06x + 270.8$  ( $R^2 = 0.713$ , 图8), 这说明西半湖沉积物有机质含量高的一个原因可能是该水体暴发藻华后形成大量含磷有机残体的沉积。已有研究表明, 在沉积物中有机质的分解会大量消耗溶解氧, 所以在西半湖这一过程会促进沉积物中

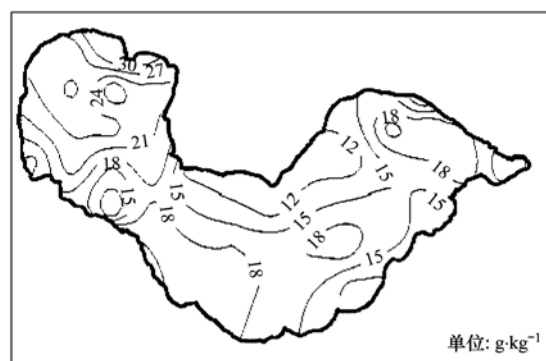


图7 巢湖湖区沉积物有机质分布

Fig. 7 Isopleth maps of organic matter in surface sediment of Chaohu Lake

铁铝结合磷向孔隙水释放磷酸根<sup>[30, 36, 37]</sup>, 进而扩散到上覆水体。

西半湖表层沉积物含较多潜在活性磷形态

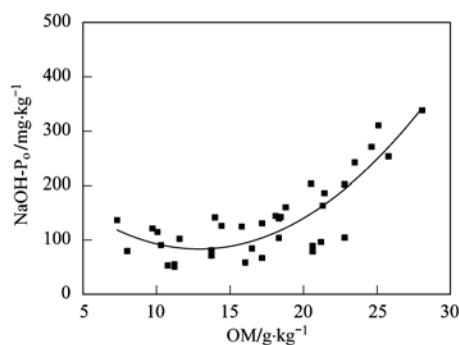
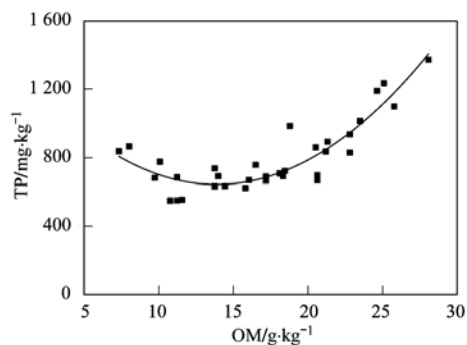


图8 巢湖湖区沉积物有机质和 TP、 $\text{NaOH-P}_o$  的相关性

Fig. 8 Correlation of TP,  $\text{NaOH-P}_o$  and organic matter



( $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$ ), 与此同时, 含量较高的有机质为  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  转化并向孔隙水释放提供较低溶氧的化学和微生物环境, 砂质粉砂为孔隙水中的可溶性磷向上覆水扩散提供较大孔隙的物理环境, 这 3 个方面共同作用将极大地增加西半湖沉积物磷向上覆水体释放的风险。

### 3 结论

(1) 巢湖湖区表层沉积物的 TP 含量平均  $790 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 自西向东呈递减趋势, 西半湖平均  $936 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  显著高于东半湖  $706 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  ( $P < 0.01$ ). 相比 20 世纪 80 年代, 表层沉积物 TP 平均增加了 55%, 其中西半湖平均增加  $386 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 东半湖平均增加  $211 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

(2) 表层沉积物铁铝结合磷 ( $\text{NaOH-P}_i$ ) 和活性有机磷 ( $\text{NaOH-P}_o$ ) 含量共占 TP 的 42%, 含量分别介于  $55 \sim 648 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $27 \sim 468 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  范围, 在湖区分布规律与 TP 相似. 西半湖  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  平均含量为  $331 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $225 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 显著高于东半湖 ( $147 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $P < 0.01$ ). 钙镁结合磷 ( $\text{Ca-P}$ ) 和惰性磷 ( $\text{Res-P}$ ) 含量分别为  $144 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $314 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 均没有东西部湖区差异.

(3) 巢湖沉积物的不同磷形态中 TP、 $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  的垂直剖面变化程度较大,  $\text{Ca-P}$  和  $\text{Res-P}$  变化不明显. 西部湖区 TP、 $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  剖面在 15 ~ 20 cm 处开始增加, 表层比底层分别增加了  $475 \sim 935$ 、 $279 \sim 573$  和  $173 \sim 184 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 中部和东部湖区磷形态剖面变化缓和, 表层比底层增加的 TP 含量不足  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 增加的  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  含量均约  $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .  $\text{NaOH-P}_i$  和  $\text{NaOH-P}_o$  是巢湖沉积物增加的主要形态.

(4) 西半湖高活性磷、高有机质和多砂质粉砂的特征共同作用将极大地增加沉积物磷向上覆水体释放的风险.

### 参考文献:

- [1] 王振祥, 朱晓东, 孟平. 巢湖富营养化年度尺度变化分析及对策[J]. 环境保护, 2009, **416**(6): 33-36.
- [2] Chen X, Yang X D, Dong X H, *et al.* Nutrient dynamics linked to hydrological condition and anthropogenic nutrient loading in chaohu lake (southeast China)[J]. *Hydrobiologia*, 2011, **661**(1): 223-234.
- [3] 周晓铁, 韩宁宁, 孙世群, 等. 安徽省河流和湖库型饮用水水源地水质评价[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 176-180.
- [4] 袁杭松, 陈来. 巢湖流域产业结构演化及其生态环境效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(S1): 349-352.
- [5] Tang W Z, Shan B Q, Zhang H. Phosphorus buildup and release risk associated with agricultural intensification in the estuarine sediments of chaohu lake valley, eastern China[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2010, **38**(4): 336-343.
- [6] 单保庆, 尹澄清, 于静, 等. 降雨-径流过程中土壤表层磷迁移过程的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2001, **21**(1): 7-12.
- [7] 孙庆业, 马秀玲, 阳贵德, 等. 巢湖周围池塘氮、磷和有机质研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1510-1515.
- [8] 吴敏, 王学军. 应用 modis 遥感数据监测巢湖水质[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 110-113.
- [9] 吴晓东, 孔繁翔, 张晓峰, 等. 太湖与巢湖水华蓝藻越冬和春季复苏的比较研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1313-1318.
- [10] Shi L M, Cai Y F, Wang X Y, *et al.* Community structure of bacteria associated with *microcystis* colonies from cyanobacterial blooms[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2010, **25**(2): 193-203.
- [11] 张敏, 谢平, 徐军, 等. 大型浅水湖泊——巢湖内源磷负荷的时空变化特征及形成机制[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(S2): 63-72.
- [12] 咎逢宇, 霍守亮, 席北斗, 等. 巢湖近代沉积物及其间隙水中营养物的分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(10): 2088-2096.
- [13] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 738-742.
- [14] 王绪伟, 王心源, 封毅, 等. 巢湖沉积物总磷含量及无机磷形态的研究[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(4): 56-59.
- [15] 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.
- [16] Marsden M W. Lake restoration by reducing external phosphorus loading: the influence of sediment phosphorus release [J]. *Freshwater Biology*, 1989, **21**(2): 139-162.
- [17] 吴丰昌, 万国江, 蔡玉蓉. 沉积物-水界面的生物地球化学作用[J]. 地球科学进展, 1996, **11**(2): 191-197.
- [18] Gíslason S R, Eiríksdóttir E S, Ólafsson J S. Chemical composition of interstitial water and diffusive fluxes within the diatomaceous sediment in lake myvatn, iceland [J]. *Aquatic Ecology*, 2004, **38**(2): 163-175.
- [19] 张克锁. 巢湖年鉴[M]. 合肥: 黄山书社, 2010.
- [20] Hakanson L, Jansson M. Principles of lake sedimentology [M]. Berlin and New York: Springer-Verlag, 1983.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 34-37.
- [22] Hietjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1980, **9**(3): 405-407.
- [23] 纪岚, 杨立武, 李菁. 南淝河水污染现状与可持续发展对策研究[J]. 安徽大学学报 (自然科学版), 2006, **30**(4): 91-94.
- [24] 汪家权, 沈燕华, 马玉萍. 巢湖流域岩源磷释放的动力学研究

- 究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(5): 979-984.
- [25] 屠清瑛 顾丁锡, 尹澄清, 等. 中国湖泊系列研究之二——巢湖富营养化研究[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990. 56-63.
- [26] 阎伍玖, 王心源. 巢湖流域非点源污染初步研究[J]. 地理科学, 1998, **18**(3): 263-267.
- [27] Slomp C P, Van der Gaast S J, Van Raaphorst W. Phosphorus binding by poorly crystalline iron oxides in north sea sediments [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **52**(1): 55-73.
- [28] Hupfer M, Gächter R, Giovanoli R. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis [J]. *Aquatic Sciences-Research Across Boundaries*, 1995, **57**(4): 305-324.
- [29] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, *et al.* Spatial and historical variation in sediment phosphorus fractions and mobility in a large shallow lake[J]. *Water Research*, 2006, **40**(2): 383-391.
- [30] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, *et al.* Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **584**(1): 37-48.
- [31] 夏林益, 王心源, 张广胜. 皖西丰乐河流域水土流失及防治对策[J]. 水土保持研究, 2006, **13**(3): 162-164.
- [32] 于群英, 李孝良, 李粉茹, 等. 安徽省土壤无机磷组分状况及施肥对土壤磷素的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(4): 57-61.
- [33] 刘志杰, 殷汝广. 浅海沉积物分类方法研讨[J]. 海洋通报, 2011, **30**(2): 194-199.
- [34] 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**(S1): 24-29.
- [35] 张斌亮, 张昱, 杨敏, 等. 长江中下游平原三个湖泊表层沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(4): 595-600.
- [36] Burdige D J. The kinetics of organic matter mineralization in anoxic marine sediments[J]. *Journal of Marine Research*, 1991, **49**(4): 727-761.
- [37] Holdren G C, Armstrong D E. Factors affecting phosphorus release from intact lake sediment cores [J]. *Environmental Science & Technology*, 1980, **14**(1): 79-87.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                              |                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China .....                                  | WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)                                        |
| Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring .....                          | YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)             |
| Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements .....                                                 | RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)       |
| Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai .....                                                        | XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)            |
| Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China .....                     | ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)     |
| Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao .....                                                                            | LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)                |
| Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant .....                                                                      | QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)        |
| Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model .....                            | CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)                 |
| Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i> ..... | GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)                            |
| Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years .....                                                                              | LI Xue-ding (2210)                                                   |
| Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes .....                                                                                           | LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)                               |
| Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling .....                                                                                                     | HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)                         |
| Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake .....                                                                        | JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)                   |
| Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan .....                                              | XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)           |
| Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing .....                                                                     | ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)     |
| Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China .....                                                                     | HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)         |
| Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake .....                                                                                 | QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)                    |
| Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales .....                                                         | DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)             |
| Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment .....                                                                      | GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)         |
| Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau .....                                                         | WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)        |
| Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau .....                                                                                    | GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295) |
| Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering .....                                                                                                  | LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)               |
| Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu .....                                                                                                    | CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)      |
| Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate .....                                                                                 | YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)             |
| Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake .....                                                                            | WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)                     |
| Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing .....                                                                                                | FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)    |
| Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants .....                                  | LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)              |
| Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing .....                                              | CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)         |
| Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area .....                                      | WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)          |
| Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study .....                                                               | LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)         |
| Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay .....                                                                                | QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)       |
| Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming .....                                             | LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)           |
| Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake .....                                                                                  | LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)             |
| AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors .....                                                                                                          | LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)            |
| Mechanism of $\text{NH}_4^+$ -N Removal in Drinking Water Biofilter .....                                                                                                    | LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)                |
| Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane .....                                                                        | ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)         |
| Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation .....                                                                                            | DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)            |
| Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration .....                                                                  | BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)                           |
| Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater .....                                                         | ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)    |
| Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN .....                                                        | WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)                                  |
| Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body .....                                                             | WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)                                     |
| Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process .....                                                           | ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)           |
| Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System .....                                                                                               | JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)                           |
| Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1 .....                                                                         | LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)              |
| Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production .....                                               | LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)      |
| Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i> .....                                                                  | QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)             |
| Characterization of $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2\text{O}$ Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields .....                                       | FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)             |
| Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on $\text{CH}_4$ and $\text{N}_2\text{O}$ Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary .....             | MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)          |
| Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province .....                                           | PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)          |
| Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition .....                                                                              | WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)         |
| Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils .....                                                            | WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)             |
| <i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial .....                                                | PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)            |
| Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops .....                                                                      | LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)                       |
| Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid .....                                                                  | YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)                                    |
| Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China .....                                                                                  | LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)                                         |

# 《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)

2012年7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 15, 2012

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科学出版社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                                 | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                    | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人