

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

**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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 ..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)

利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 ..... 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)

南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 ..... 朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)

北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 ..... 苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)

重庆市主城区 PM<sub>2.5</sub>时空分布特征 ..... 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)

大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 ..... 庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)

深圳市大气中全氟化合物的残留特征 ..... 何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)

北京上甸子站大气 CO<sub>2</sub> 及 δ<sup>13</sup>C(CO<sub>2</sub>) 本底变化 ..... 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 ..... 刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)

城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 ..... 刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 ..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)

西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 ..... 王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)

PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 ..... 刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 ..... 张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)

曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 ..... 薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)

江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 ..... 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 ..... 刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)

我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 ..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 ..... 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)

太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 ..... 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 ..... 程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 ..... 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)

重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 ..... 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 ..... 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)

伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 ..... 韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 ..... 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 ..... 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 ..... 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)

锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 ..... 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)

电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 ..... 王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)

水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 ..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)

多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 ..... 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)

污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析 ..... 牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)

高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 ..... 李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 ..... 吴鹏, 张诗颖, 宋吟吟, 徐乐中, 沈耀良 (1472)

反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 ..... 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)

低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 ..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 ..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)

短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 ..... 谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 ..... 崔海, 张亚红 (1507)

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 ..... 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)

小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 ..... 刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)

鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 ..... 王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)

水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 ..... 罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)

高温纤维素降解菌筛选及产酶特性 ..... 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)

基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 ..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)

养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 ..... 金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 ..... 王兰君, 王金凤, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)

新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应 ..... 林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 ..... 李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)

《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

# 江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价

李莹杰<sup>1,2</sup>, 张列宇<sup>1</sup>, 吴易雯<sup>1,3\*</sup>, 李曹乐<sup>1</sup>, 杨天学<sup>1</sup>, 唐军<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430000; 3. 广东省浩蓝环保水污染治理院士工作站, 广州 510000)

**摘要:** 为了解江苏省内浅水湖泊表层沉积物中重金属污染情况, 对该省内 11 个湖泊表层沉积物进行采样, 测定了 As、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 这 6 种重金属的含量. 利用 GIS 对重金属进行空间分布分析, 并采用地累积指数法、改进的污染指数法、污染负荷法和潜在生态风险指数法对沉积物中重金属污染情况进行评价. 结果表明, 研究湖泊表层沉积物中, As、Cu、Zn、Cr、Pb、Ni 平均含量占江苏省土壤背景值的倍数分别为 1.74~3.85、0.65~2.66、0.48~3.56、0.43~1.52、0.02~1.49 和 0.12~1.42, 根据地累积指数法和潜在生态风险单项金属评价结果, As 为主要污染物, 不仅富集程度高而且具有较大的潜在生态风险, Cu 次之, 其余几种重金属污染程度相对较轻. 综合几种评价方法的结果, 三汊湖、高邮湖、邵伯湖表层沉积物中重金属污染情况相对最严重, 污染负荷最大, 潜在生态风险达到中等程度; 漏湖、白马湖、洪泽湖表层沉积物中部分区域存在某些金属的污染, 整体污染有加重趋势, 沉积物中重金属污染负荷较大, 潜在生态风险达到中等程度; 其余 5 个湖泊, 沉积物受重金属污染的风险以及污染负荷均较小, 整体为无污染状态.

**关键词:** 浅水湖泊; 表层沉积物; 重金属; GIS; 生态风险评价

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1321-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.017

## GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province

LI Ying-jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Lie-yu<sup>1</sup>, WU Yi-wen<sup>1,3\*</sup>, LI Cao-le<sup>1</sup>, YANG Tian-xue<sup>1</sup>, TANG Jun<sup>1</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China; 3. CNHOMELAND Environmental Protection Water Pollution Governance Academician Workstation, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** To understand pollution of heavy metals in surface sediments of shallow lakes, surface sediments samples of 11 lakes in Jiangsu province were collected to determine the content of six heavy metals including As, Cr, Cu, Pb, Zn and Ni. GIS was used to analyze the spatial distribution of heavy metals, and geological accumulation index ( $I_{geo}$ ), modified contamination index ( $mC_d$ ), pollution load index (PLI) and potential ecological risk index (RI) were used to evaluate heavy metal contamination in the sediments. The results showed that: in the lakes' surface sediments, the average content of As, Cu, Zn, Cr, Pb, Ni in multiples of soil background of Jiangsu province were 1.74-3.85, 0.65-2.66, 0.48-3.56, 0.43-1.52, 0.02-1.49 and 0.12-1.42. According to the evaluation results of  $I_{geo}$  and RI, As, which had high degree of enrichment and great potential ecological risk, was the main pollutant, followed by Cu, and pollution of the rest of heavy metals was relatively light. Combining the results of several evaluation methods, in surface sediments of Sanjiu Lake, Gaoyou Lake and Shaobo Lake, these heavy metals had the most serious pollution, the maximum pollution loading and moderate potential ecological risk; in surface sediments of Gehu Lake, Baima Lake and Hongze Lake, some regions were polluted by certain metals, the overall trend of pollution was aggravating, the pollution loading was large, and the potential ecological risk reached moderate; in the other 5 lakes, the risk of sediments polluted by heavy metals, as well as the pollution loading, was small, and the overall was not polluted.

**Key words:** shallow lakes; surface sediments; heavy metals; GIS; ecological risk assessment

湖泊沉积物是一个巨大的储存库, 进入湖泊水体中的污染物大部分沉积于湖泊沉积物中<sup>[1]</sup>. 重金属是一类具有毒性、持久性、能够生物累积及难生物降解等特性的污染物<sup>[2]</sup>, 当其进入环境并达到一定的浓度后, 就会对环境产生非常大的危害. 重金属污染物进入水体后, 大部分能快速被水体中悬浮

颗粒物和沉积物吸附, 并富集贮存<sup>[3]</sup>, 可通过食物

收稿日期: 2015-10-10; 修订日期: 2015-12-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX071101-002); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208485)

作者简介: 李莹杰(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: specialajie1989@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: wu\_yiwen@163.com

链在生物体内积累,对生物体产生毒害作用.而且,重金属具有潜在生态风险污染特征,在水动力、生物扰动及物理化学等条件适当的情况下,吸附在沉积物中的重金属又可重新释放到上覆水体<sup>[4]</sup>,从而造成二次污染.而湖泊是较为封闭的水体,流动性及与其他水体交换能力低,重金属污染物一旦进入很难被排出,会对湖泊生态系统造成长期影响<sup>[5]</sup>.

江苏省是我国淡水湖泊分布最集中的省份之一,境内有大小湖泊 200 多个,湖泊率高达 6%,为全国第一<sup>[6]</sup>.但自 1980 年以来,江苏省工业废水排放量呈平缓增长趋势,南京市、苏南三市和苏中苏北九市的排放量大致各占排放总量的 1/3,多年来江苏省工业废水一直占废水排放的 60% 左右<sup>[7]</sup>.而且,江苏省是我国城市化水平最高的省份之一<sup>[8]</sup>.随着工业化和城市化的发展,省内湖泊受到大量的工业废水和生活污水的污染,其中携带的重金属污染物随着水体进入沉积物中,对湖泊内水产养殖区造成直接的影响,并威胁饮用水源安全.已有的研究主要集中于对太湖、洪泽湖和玄武湖沉积物重金属污染水平的调查<sup>[9-15]</sup>,而对江苏省其他湖泊,如三沱湖、高邮湖、阳澄湖、澄湖等湖泊沉积物中重金属含量和污染情况研究相对较少,并且在含量分布特征分析上大多采用数据列表的方式,缺乏直观性.

本研究对江苏省内 11 个湖泊表层沉积物采样并进行重金属含量检测,利用 GIS 对沉积物中重金属的含量、空间分布特征进行直观分析,结合地累积指数法、改进污染指数法、污染负荷指数法和潜在生态风险指数法对研究区沉积物中重金属污染情况进行综合评价,并通过各元素间的相关性探讨各湖泊沉积物中重金属可能来源,以期对江苏省中南部湖泊重金属污染防治提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况<sup>[16]</sup>

本研究所调查的江苏省内的 11 个湖泊,均为水深不超过 6 m 的浅水湖泊,分别为洪泽湖、白马湖、高邮湖、邵伯湖、长荡湖、溔湖、三沱湖、固城湖、昆承湖、阳澄湖和澄湖.洪泽湖是我国第四大淡水湖泊,面积为 2 069 km<sup>2</sup>,跨洪泽、淮阴、泗洪和盱眙五县,是淮河水系最大的水利枢纽.高邮湖及其相邻的白马湖、邵伯湖等自北向南分布在京杭大运河的西侧,其中,高邮湖为苏、皖两省界湖,跨高邮、金湖、宝应、天长四市县,是江苏省第三大淡水湖

泊,面积 674 km<sup>2</sup>;邵伯湖是运西湖群中最南端的一个湖泊,面积 77 km<sup>2</sup>;白马湖是江苏省十大湖泊之一,是运西湖群中位置最北的一个湖泊,面积 108 km<sup>2</sup>.固城湖位于南京市高淳区,是典型的草型湖泊,面积 39 km<sup>2</sup>.其余 6 个湖泊均属于太湖水系,其中,长荡湖位于常州金坛区东南部,跨金坛、溧阳两县市,现有面积 89 km<sup>2</sup>;溔湖由武进县、宜兴市共辖,是苏南地区仅次于太湖的第二大淡水湖,江苏五大湖泊之一,面积 146.5 km<sup>2</sup>;三沱湖在宜兴市境内,由东沱、西沱和团沱组成,出流东注太湖,面积 23.2 km<sup>2</sup>;昆承湖位于常熟市南郊,属于太湖流域水系阳澄湖湖群,是常熟市境内最大的湖泊,面积 18 km<sup>2</sup>;阳澄湖位于苏州市区东北部,跨苏州、吴县和昆山三市,面积 119.04 km<sup>2</sup>,是江苏省内重要的水产养殖区;澄湖由吴县、昆山和吴江三市共辖,属泻湖型,面积 45 km<sup>2</sup>.

### 1.2 样品采集

本实验所用沉积物样品采集于 2014 年 10 月,来自江苏省内 11 个湖泊的 35 个沉积物采样点,采样点选在尽量靠近湖中部并远离排污口的地方,采样湖泊及各个湖泊采样点位分布如图 1 所示.野外采样用 GPS 定位,使用彼得逊采样器采集表层沉积物.将采集的样品混合均匀后装入聚乙烯自封袋密封,送回实验室低温保藏.

### 1.3 样品预处理与分析

将沉积物样品放入冷冻干燥机(BIOCOOL/FD-1A-50)中冻干,拣出杂物和石块,用研钵磨碎后过 100 目尼龙筛,装入聚乙烯自封袋中,干燥保存.采用 USEPA 3051a 方法,在 0.25 g 沉积物样品中加入 9 mL HNO<sub>3</sub> 和 3 mL HCl,使用微波消解仪(ETHOS ONE)进行消解.消解完成后,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Thermo/ICP6300)进行重金属元素含量的检测.分析过程中加入湖泊沉积物标准样品(NWSUD-1)以检测分析方法的准确性,结果表明,标准样品中重金属提取量与认证含量之间的误差在 5% 以内,符合要求.

### 1.4 评价方法

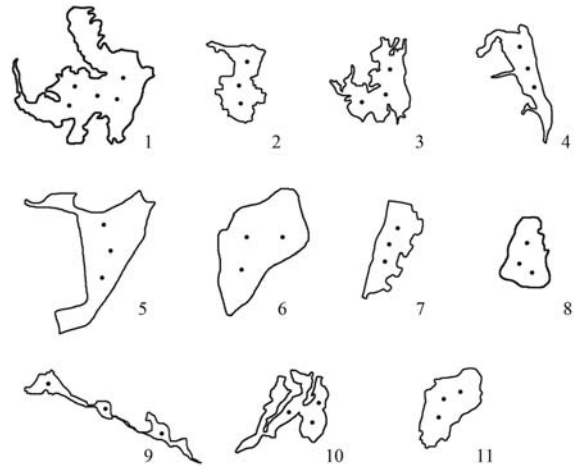
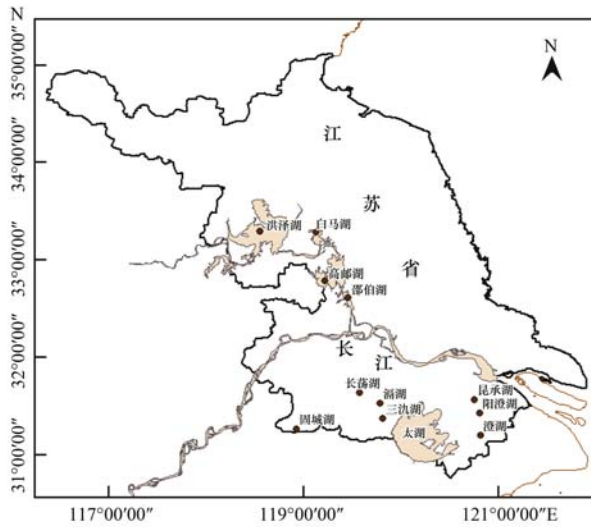
#### 1.4.1 地累积指数法

采用由 Müller<sup>[17]</sup>定义的地累积指数法,该方法主要用于描述单个元素对环境污染的程度,是用来反映沉积物中重金属富集程度的常用指标,计算公式如下所示:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left( \frac{C_n}{k B_n} \right) \quad (1)$$

式中,  $I_{geo}$  为地累积指数;  $C_n$  为沉积物中元素  $n$  的含量;  $B_n$  为黏质沉积岩中该元素的地球化学背景值, 采用江苏省环境背景值<sup>[18]</sup>;  $k$  为考虑到成岩作用可

能引起的背景值的变动而设定的常数, 一般  $k = 1.5$ . 污染程度等级及相对应的  $I_{geo}$  数值如表 1 所示.



1. 洪泽湖; 2. 白马湖; 3. 高邮湖; 4. 邵伯湖; 5. 固城湖; 6. 长荡湖; 7. 溇湖; 8. 昆承湖; 9. 三汊湖; 10. 阳澄湖; 11. 澄湖

图 1 采样湖泊和采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling lakes and sampling sites

表 1 地累积指数阈值区间及污染程度分级

Table 1 Geological accumulation index ( $I_{geo}$ ) threshold interval and pollution grading

$I_{geo}$	$\leq 0$	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	> 5
等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	清洁	轻度	偏中度	中度	偏重度	重度	严重

1.4.2 污染指数法

采用由 Hakanson<sup>[19]</sup> 提出的污染指数法来评价沉积物重金属污染, 计算公式如下:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \quad (2)$$

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (3)$$

式中,  $C_d$  为重金属污染综合指数,  $C_s^i$  和  $C_n^i$  分别为第  $i$  种重金属元素的检测浓度和背景值,  $C_f^i$  为某一元

素的污染指数. 在这个方法中, 需要对有多个采样点的湖泊沉积物中的重金属元素含量进行平均值计算, 然后和背景进行对比. 为了消除这一限制, 采用一种改进的方法<sup>[20]</sup>, 计算公式如下所示:

$$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^n C_n^i}{n} \quad (4)$$

式中,  $n$  为分析的元素数量,  $i$  为第  $i$  个元素, 污染程度分级如表 2 所示.

表 2 改进污染指数法的污染程度分级

Table 2 Pollution grading of modified contamination index ( $mC_d$ )

$mC_d$ 值	< 1.5	1.5 ~ 2	2 ~ 4	4 ~ 8	8 ~ 16	16 ~ 32	$\geq 32$
污染程度	无污染	轻度	中度	高	很高	极高	超高

1.4.3 污染负荷指数法

污染负荷指数提供了一种简单的、比较的方法来评价重金属的污染水平<sup>[21]</sup>, 计算公式如下所示:

$$PLI_i = (C_f^1 \times C_f^2 \times C_f^3 \times \dots \times C_f^n)^{1/n} \quad (5)$$

$$PLI \text{ for a zone} = (PLI_1 \times PLI_2 \times$$

$$PLI_3 \times \dots \times PLI_n)^{1/n} \quad (6)$$

式中,  $C_f^i$  为某一元素的污染指数, 计算公式如式(3)所示;  $PLI_i$  为某一点位的污染负荷指数;  $n$  为元素的数量. 当  $PLI < 1$  表示沉积物没有受到污染, 当  $PLI > 1$ , 表示存在污染.

#### 1.4.4 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是由 Hakanson<sup>[19]</sup>定义的,从沉积物学角度来评价重金属污染物的特征和环境行为的方法,计算公式如下:

$$E_i = T_i \cdot C_i^i \quad (7)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (8)$$

式中,  $C_i^i$  为某一元素的污染指数,计算公式如式(3)所示;  $E_i$  为单金属潜在生态污染指数;  $T_i$  为单项重金属  $i$  的毒性响应系数,  $As = 10$ ,  $Cu = Pb = Ni = 5$ ,  $Cr = 2$ ,  $Zn = 1$ ;  $RI$  为多种重金属的综合潜在生态风险指数. 重金属单项潜在生态风险指数  $E_i$  和综合潜在生态风险指数  $RI$  的分级标准如表 3 所示. 因为本研究所评价的重金属仅有 5 种,所以对  $RI$  值进行了适当的调整<sup>[22]</sup>.

#### 1.5 数据分析

本研究使用 ArcGIS 10.2 软件对沉积物中重金属元素含量进行插值计算,以得到每种重金属的空间分布;基本的数理处理及数据图的绘制分别使用 Excel 和 Origin 8.0;相关性分析和聚类分析使用

SPSS 19.0 统计软件完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 沉积物重金属含量分布特征

研究区湖泊沉积物中重金属的含量及其空间分布见图 2. 结合图 2 和表 4 可以看出,  $Cu$ 、 $Pb$ 、 $Zn$  和  $Ni$  空间分布十分相似,虽然它们的浓度各不相同,但是湖泊沉积物中重金属元素平均含量最低值都出现在长荡湖,  $Cu$ 、 $Zn$  和  $Ni$  平均含量最高值出现在三沱湖,  $Pb$  最高值出现在高邮湖,其次是三沱湖.  $As$  和  $Cr$  有相似的地方,沉积物中重金属元素平均含量最低值均为阳澄湖. 从单项金属含量来看,所有湖泊沉积物中  $As$  的平均含量均超过了江苏省土壤背景值,在 1.74 ~ 3.85 倍之间,且有部分已接近或超过土壤二级质量标准值,含量最高,说明所研究湖泊沉积物中可能存在较严重的  $As$  污染现象;其次为  $Cu$  和  $Zn$ ,分别为土壤背景值的 0.65 ~ 2.66 倍和 0.48 ~ 3.56 倍;  $Cr$ 、 $Pb$  和  $Ni$  分别为土壤背景值的 0.43 ~ 1.52、0.02 ~ 1.49 和 0.12 ~ 1.42 倍,含量相对较低,基本无污染.

表 3 潜在生态风险指数法分级

Table 3 Grading of potential ecological risk index (RI)

潜在生态风险程度	低	中等	强	很强	极强
$E_i$	<40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	≥320
RI	<45	45 ~ 90	90 ~ 180	≥180	

表 4 江苏省浅水湖泊表层沉积物中重金属平均含量/ $mg \cdot kg^{-1}$

Table 4 Average contents of heavy metals in surface sediments of shallow lakes in Jiangsu Province/ $mg \cdot kg^{-1}$

湖泊名称	As	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni
高邮湖	26.861 ± 1.02	76.091 ± 2.11	39.720 ± 0.85	25.272 ± 0.33	114.096 ± 6.12	34.008 ± 0.84
白马湖	36.206 ± 0.98	61.283 ± 3.07	43.272 ± 1.22	12.000 ± 0.27	79.608 ± 3.77	13.944 ± 0.26
溇湖	24.436 ± 0.32	65.011 ± 2.33	45.840 ± 0.76	17.784 ± 0.87	101.592 ± 4.56	20.856 ± 0.83
邵伯湖	23.915 ± 0.54	94.430 ± 1.79	38.328 ± 1.54	17.208 ± 0.64	112.560 ± 4.71	36.240 ± 1.23
固城湖	21.539 ± 0.77	65.494 ± 1.54	30.264 ± 0.35	7.560 ± 0.14	69.600 ± 3.58	16.536 ± 1.09
阳澄湖	17.112 ± 0.24	43.552 ± 2.31	24.897 ± 0.27	6.006 ± 0.32	62.997 ± 3.79	27.335 ± 1.46
三沱湖	19.892 ± 0.78	56.928 ± 1.97	60.192 ± 1.09	21.577 ± 0.48	200.777 ± 11.97	40.625 ± 3.44
澄湖	18.668 ± 1.12	63.157 ± 2.63	25.601 ± 0.48	7.330 ± 0.28	81.549 ± 2.91	26.699 ± 2.15
昆承湖	20.345 ± 0.35	69.811 ± 1.43	25.993 ± 1.04	3.030 ± 0.09	69.794 ± 1.61	14.612 ± 1.31
长荡湖	20.297 ± 0.46	110.521 ± 4.47	15.372 ± 0.36	0.780 ± 0.07	61.056 ± 3.28	10.608 ± 0.63
洪泽湖	25.527 ± 0.89	75.409 ± 2.55	34.032 ± 0.69	20.718 ± 0.88	94.767 ± 5.77	21.726 ± 0.93
江苏省土壤背景值	9.4	75.6	23.4	22	64.8	32.8
《土壤环境质量标准》 (II级标准, 6.5 < pH < 7.5)	30	300	100	300	250	50

## 2.2 重金属污染评价

### 2.2.1 富集程度评价——地累积指数法

研究区各湖泊表层沉积物中各种重金属地累积指数评价结果见表 5. 从结果看出,6 种重金属中,

$As$  是最主要的污染物,这 11 个湖泊表层沉积物中都存在该金属的污染. 其中,白马湖为 2 级,偏中度污染;洪泽湖部分点位达到 2 级,整体为 1 级,轻度污染;其余湖泊均为 1 级,为轻度污染.  $Cu$  次之,阳

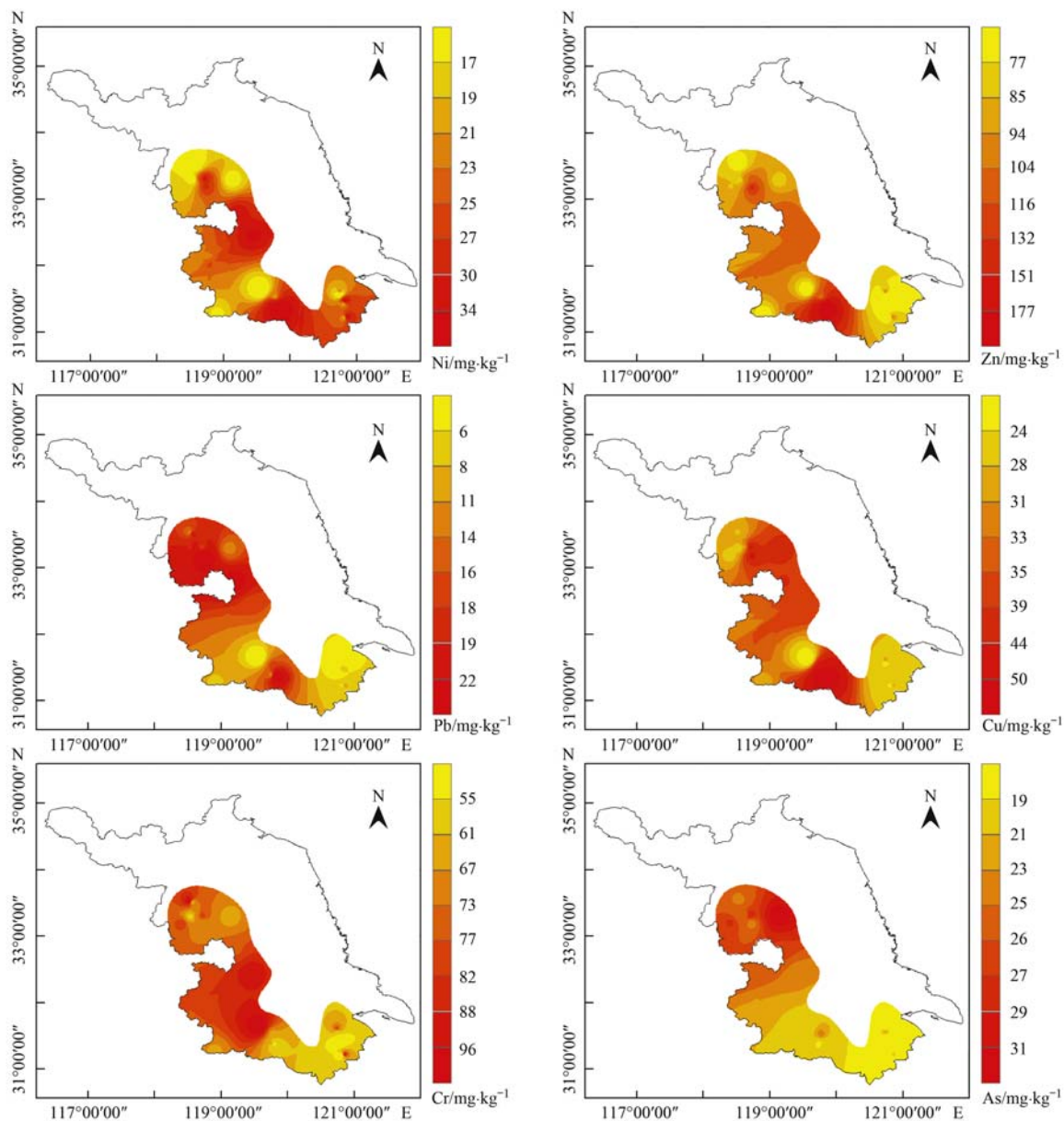


图 2 重金属含量分布

Fig. 2 Distribution of heavy metal contents

澄湖、澄湖、昆承湖、长荡湖、固城湖污染程度为 0 级,无污染;洪泽湖有部分点位呈 1 级污染,整体 0 级,白马湖和溇湖的部分点位呈 0 级污染,整体 1 级,说明这 3 个湖泊正逐渐受到 Cu 污染;其余 3 个湖泊均为 1 级,轻度污染. 然后为 Zn,三汊湖污染最严重,部分点位为 1 级,整体呈 2 级,偏中度污染;洪泽湖和澄湖有部分点位为 1 级,整体都为 0 级,溇湖部分点位为 0 级污染,整体 1 级,也表明这 3 个湖泊受到 Zn 的污染在加重;高邮湖、邵伯湖为 1 级,轻度污染;其余湖泊为 0 级,均未受到污染. 长荡湖沉积物中部分点位 Cr 污染水平达到 1 级,整体 0 级,有污染趋势. Pb 和 Ni 在所有湖泊中的地累积指

数为 0 级,无污染.

根据以上分析结果,可将研究湖泊大致分为三类:①污染程度较轻的是阳澄湖、昆承湖和固城湖,只受到轻度 As 污染;②污染程度相对较重的是澄湖、白马湖、长荡湖和洪泽湖,除了受到 As 污染外,湖泊中的部分点位还存在其他金属的污染,澄湖有 1 个点位存在轻微的 Zn 污染,白马湖有 1 个点位存在轻度 Cu 污染,长荡湖有 1 个点位存在轻微 Cr 污染,洪泽湖有部分点位存在轻度 Cu 和 Zn 污染;③污染程度比较严重的是三汊湖、高邮湖、溇湖和邵伯湖,都存在 As、Cu 和 Ni 这 3 种重金属污染,其余重金属无污染.

表 5 江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属地累积指数及污染程度评价

Table 5 The  $I_{geo}$  and pollution grade evaluation of heavy metals in surface sediments of shallow lakes in Jiangsu Province

湖泊名称	As		Cr		Cu		Pb		Zn		Ni		
	$I_{geo}$	分级	$I_{geo}$	分级	$I_{geo}$	分级	$I_{geo}$	分级	$I_{geo}$	分级	$I_{geo}$	分级	
阳澄湖	范围	0.213 ~ 0.350	1	-1.774 ~ -0.989	0	-0.518 ~ -0.482	0	-2.948 ~ -2.020	0	-0.916 ~ -0.275	0	-1.247 ~ -0.286	0
	均值	0.278	1	-1.418	0	-0.496	0	-2.508	0	-0.652	0	-0.922	0
三沱湖	范围	0.415 ~ 0.563	1	-1.175 ~ -0.868	0	0.689 ~ 0.828	1	-1.676 ~ -0.179	0	0.658 ~ 1.245	1 ~ 2	-0.454 ~ -0.078	0
	均值	0.495	1	-1	0	0.777	1	-0.747	0	1.024	2	-0.285	0
澄湖	范围	0.221 ~ 0.612	1	-1.600 ~ -0.147	0	-0.830 ~ -0.109	0	-3.722 ~ -1.545	0	-0.394 ~ 0.161	0 ~ 1	-1.617 ~ -0.195	0
	均值	0.396	1	-0.979	0	-0.486	0	-2.426	0	-0.294	0	-1.012	0
昆承湖	范围	0.316 ~ 0.715	1	-1.021 ~ -0.437	0	-0.938 ~ -0.059	0	-3.491 ~ -3.399	0	-1.639 ~ 0.157	0	-3.661 ~ -0.957	0
	均值	0.515	1	-0.729	0	-0.499	0	-3.4	0	-0.741	0	-2.31	0
高邮湖	范围	0.461 ~ 1.417	1	-1.258 ~ -0.116	0	0.047 ~ 0.689	1	-0.956 ~ -0.177	0	0.105 ~ 0.568	1	-1.332 ~ -0.129	0
	均值	0.93	1	-0.576	0	0.178	1	-0.385	0	0.231	1	-0.533	0
白马湖	范围	0.897 ~ 1.773	1 ~ 2	-0.174 ~ -0.552	0	-0.107 ~ 0.759	0 ~ 1	-2.017 ~ -0.934	0	-0.772 ~ -0.113	0	-2.387 ~ -1.051	0
	均值	1.361	2	-0.888	0	0.302	1	-1.459	0	-0.288	0	-1.819	0
溇湖	范围	0.447 ~ 0.946	1	-2.011 ~ -0.329	0	-0.079 ~ 0.726	0 ~ 1	-1.649 ~ -0.199	0	-0.547 ~ 0.413	0 ~ 1	-2.583 ~ -0.732	0
	均值	0.793	1	-0.803	0	0.385	1	-0.892	0	0.064	1	-1.238	0
长荡湖	范围	0.520 ~ 0.531	1	-0.094 ~ 0.018	0 ~ 1	-1.210 ~ -1.172	0	-6.103 ~ -4.933	0	-0.801 ~ -0.552	0	-2.563 ~ -1.932	0
	均值	0.526	1	-0.038	0	-1.191	0	-5.518	0	-0.676	0	-2.248	0
邵伯湖	范围	0.374 ~ 0.917	1	-0.478 ~ -0.152	0	0.104 ~ 0.327	1	-1.862 ~ -0.509	0	0.079 ~ 0.458	1	-0.833 ~ -0.376	0
	均值	0.762	1	-0.264	0	0.127	1	-0.939	0	0.212	1	-0.441	0
洪泽湖	范围	0.758 ~ 1.013	1 ~ 2	-1.089 ~ -0.077	0	-0.497 ~ 0.408	0 ~ 1	-1.442 ~ -0.008	0	-0.759 ~ 0.511	0 ~ 1	-2.223 ~ -0.506	0
	均值	0.854	1	-0.622	0	-0.085	0	-0.72	0	-0.086	0	-1.324	0
固城湖	范围	0.466 ~ 0.837	1	-1.179 ~ -0.401	0	-0.554 ~ -0.124	0	-3.017 ~ -1.758	0	-0.796 ~ -0.287	0	-2.752 ~ -1.091	0
	均值	0.611	1	-0.792	0	-0.214	0	-2.126	0	-0.482	0	-1.573	0

### 2.2.2 污染评价

各湖泊沉积物中重金属的  $mC_d$ 、PLI、 $E_i$  和 RI 评价结果如表 6 和图 3 所示. 根据改进污染指数法 ( $mC_d$ ) 评价结果, 三沱湖、高邮湖和邵伯湖污染指数都超过了 1.5, 为轻度污染; 三沱湖最高, 高达 1.793, 较为接近中度污染; 其余湖泊污染指数低于 1.5, 无污染, 其中以阳澄湖为最低, 污染指数为 0.923, 长荡湖与之相差不大, 为 0.930; 白马湖、溇湖和洪泽湖虽整体为无污染, 但污染指数已接近 1.5, 表明这 3 个湖泊沉积物中可能存在部分区域的重金属污染, 这一点可以从地累积指数结果中得到证明. 根据污染负荷指数法的评价结果, 三沱湖、高邮湖、邵伯湖、溇湖、洪泽湖和白马湖的污染负荷指数 (PLI) 依次降低, 值都大于 1, 说明这些湖泊沉积物都受到了重金属污染; 其余湖泊 PLI 值都小于 1, 未受到污染; 长荡湖 PLI 值为最低. 根据单金属潜在生态风险 ( $E_i$ ) 评价结果可以看出, 所有湖泊的单项金属均呈现出较低的生态风险, 总体上, As 的生态风险指数最大, Cu 次之, 其余 4 种金属风险指数相对较低, 这与地累积指数结果相似, 说明江苏

省湖泊沉积物中 As 不仅富集程度高而且具有较大的潜在生态风险. 综合潜在生态风险指数 RI 表明, 白马湖、高邮湖、三沱湖、邵伯湖、溇湖和洪泽湖风险指数依次降低, 生态风险达到了中等程度, 其余湖泊沉积物中的重金属综合潜在生态风险程度较低, 以长荡湖为最低.

根据以上多种评价方法的综合比较, 可减小评断误差, 使评价结果更可靠. 综上, 从  $mC_d$ 、PLI 和 RI 的评价结果看出, 三沱湖、高邮湖、邵伯湖沉积物中重金属污染情况相对较严重, 其中三沱湖沉积物受这 6 种重金属污染最严重, 且潜在生态风险已达到中等程度, 沉积物中重金属污染负荷相对为最大. 溇湖、白马湖和洪泽湖这 3 个湖泊, 由于部分区域存在某些金属的污染, 污染情况有加重趋势, 潜在生态风险也达到中等程度, 沉积物中重金属污染负荷较大. 其余 5 个湖泊, 沉积物受重金属污染的风险以及污染负荷均较小, 整体为无污染状态, 其中以长荡湖情况最为良好.

### 2.3 重金属元素间的相关性分析

湖泊沉积物中各重金属元素间的相关关系与元



素的性质、吸附特征以及沉积环境有关<sup>[23]</sup>。表 7 所示为以上 6 种重金属与 Fe、Al、Mn 和有机质之间的相关关系。从中可以看出, Ni、Zn、Pb、Cu 之间、Fe 与 Al、Mn、Cr、As 以及 Al 和 As 之间相关性显著,尤其是 Al-Fe、Fe-Cr、Cu-Zn、Zn-Ni 这 4 组元素之间相关关系较为显著,相关系数分别达到 0.792、0.717、0.898、0.769 ( $P < 0.01$ ),说明这些重金属元素的污染源相同,是通过共沉淀或吸附积累在沉积物中,化学特征相似<sup>[24]</sup>。但是 Ni、Zn、Cr、Cu、

Mn 这些重金属与 As 的相关性并不显著,表明湖泊沉积物中 As 的氧化物或氢氧化物共沉淀或吸附这些金属元素较少,也反映了人为来源对这些重金属的贡献<sup>[25]</sup>。其余的 Al-Cr、Al-Pb、Mn-Cr、As-Pb 之间虽然相关系数不高,但相关性却达到了显著性水平,说明它们之间有着部分相似的来源。在所研究重金属元素中,只有 As 和有机质表现出较好的相关关系,表明研究区湖泊表层沉积物中的 As 可能主要以与有机质结合成络合物的形式迁移<sup>[26]</sup>。

表 6  $mC_d$ 、PLI 和 RI 的评价结果Table 6 Evaluation results of  $mC_d$ , PLI and RI

湖泊名称	$E_i$						$mC_d$	PLI	RI
	As	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni			
阳澄湖	18.204	1.152	5.320	1.365	0.972	4.167	0.923	0.775	31.180
三泖湖	21.162	1.506	12.862	4.904	3.098	6.193	1.793	1.547	49.724
澄湖	19.860	1.671	5.470	1.666	1.258	4.070	1.054	0.861	33.995
昆承湖	21.643	1.847	5.554	0.689	1.077	2.227	0.976	0.652	33.037
高邮湖	28.575	2.013	8.487	5.744	1.761	5.184	1.585	1.474	51.764
白马湖	38.517	1.621	9.246	2.727	1.229	2.126	1.452	1.086	55.466
溇湖	25.996	1.720	9.795	4.042	1.568	3.179	1.405	1.234	46.300
长荡湖	21.593	2.924	3.285	0.177	0.942	1.617	0.930	0.521	30.538
邵伯湖	25.442	2.498	8.190	3.911	1.737	5.524	1.509	1.409	47.302
洪泽湖	27.157	1.995	7.272	4.709	1.462	3.312	1.372	1.193	45.906
固城湖	22.914	1.733	6.467	1.718	1.074	2.521	1.062	0.884	36.427
Max	38.517	2.924	12.862	5.744	3.098	6.193	1.793	1.547	55.466
Min	18.204	1.152	3.285	0.177	0.942	1.617	0.923	0.521	30.538

表 7 沉积物中 6 种重金属、Fe、Al、Mn 和有机质之间的相关关系<sup>1)</sup>

Table 7 Correlation among six heavy metals, Fe, Al, Mn and organic matter in sediments

	Al	Fe	Mn	As	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni	有机质
Al	1									
Fe	0.792 **	1								
Mn	0.193	0.513 **	1							
As	0.654 **	0.513 **	0.237	1						
Cr	0.401 *	0.717 **	0.415 *	0.220	1					
Cu	0.261	-0.016	0.062	0.215	-0.145	1				
Pb	0.448 *	0.249	0.186	0.437 *	-0.095	0.682 **	1			
Zn	0.125	0.007	0.177	-0.010	-0.058	0.898 **	0.676 **	1		
Ni	0.206	0.040	0.164	-0.196	-0.021	0.680 **	0.443 *	0.769 **	1	
有机质	0.379	0.150	-0.105	0.589 **	-0.111	0.274	0.034	0.000	-0.022	1

1) \* \* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

## 2.4 污染源分析

江苏省经济发展迅速,城市化和工业化水平较高,通过对发展格局的不断调整,使环境与人口、经济协调发展,但是仍旧存在环境污染问题<sup>[27,28]</sup>。研究的 11 个湖泊中,洪泽湖、白马湖、高邮湖和邵伯湖沿京杭大运河江苏段自北而南分布,该段是整个运河中水运最为繁忙的部分<sup>[29]</sup>,运河沿岸人口密集,并且洪泽湖是淮河水系最大的水利枢纽,因此,

它们极易受到河岸周边人类工农业活动及航道运输等的影响。而其余 7 个湖泊主要位于苏南(昆山、苏州、常州等地),该区域经济发展及城市化水平为江苏省之首,城市化水平的不断提高也使工业废水排放量增大,1991~2001 年间工业废水排放总量大致占全省的 1/3,自 2001 年开始增幅明显<sup>[7,8]</sup>,如此,长期以来一些含重金属的生活污水和工业废水排入湖泊,再加上汽车尾气和工业废气排放之后的

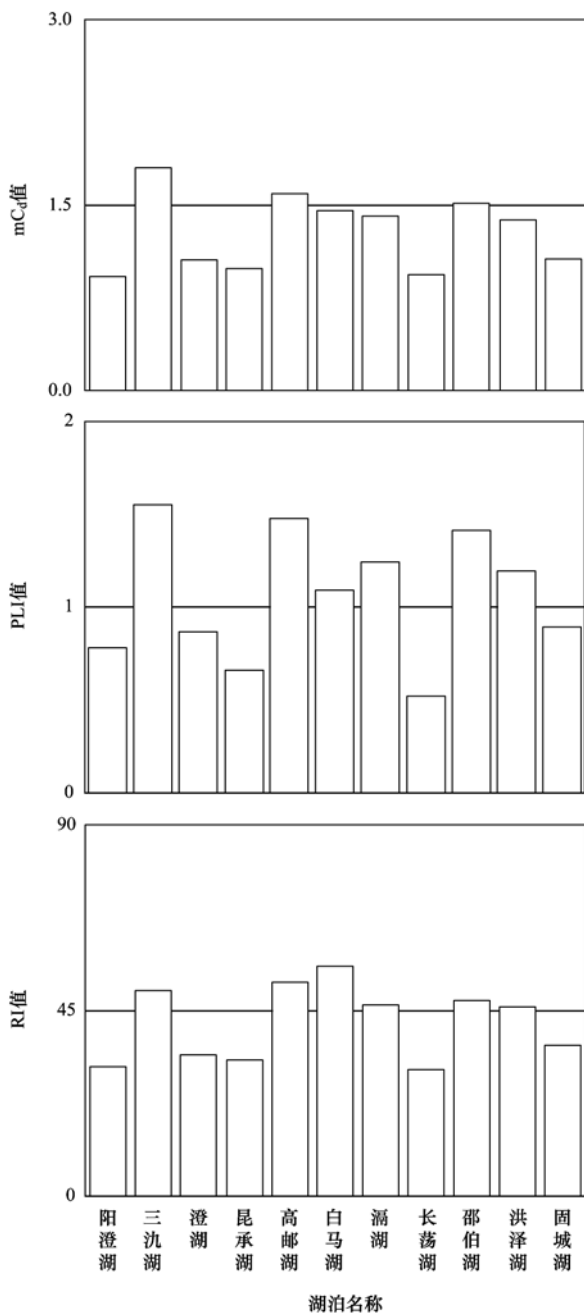


图3 mCd、PLI和RI评价结果

Fig. 3 Evaluation results of mCd, PLI and RI

沉降作用,就会造成沉积物污染负荷逐年加重。

在研究的6种重金属中,As是污染程度最高的污染物。地表环境中As主要来源于人为活动,尤其是金属冶炼和煤炭燃烧,同时农业生产使用污水灌溉及含As肥料、农药等也能引起As元素含量的增加<sup>[30]</sup>。根据地累积指数分析结果,洪泽湖、高邮湖和白马湖表层沉积物中As累积程度最高,这可能与近些年来湖泊周边乡镇工业迅速发展带来的大量工业废水的排放有关<sup>[12]</sup>。三沱湖、高邮湖、溇湖、邵

伯湖以及洪泽湖的部分点位都存在轻度甚至是偏中度的Cu、Zn污染,这与该流域电镀、制革和有色金属冶炼业有关,并且Cu、Zn具有生物累积效应以及与有机物较强的结合能力,这可能是造成沉积物Cu、Zn污染的主要原因。

### 3 结论

(1)研究区湖泊表层沉积物中,Cu、Pb、Zn和Ni空间分布相似,平均含量最低值都出现在长荡湖,Cu、Zn和Ni平均含量最高值出现在三沱湖,Pb最高值出现在高邮湖,其次是三沱湖,As和Cr的平均含量最低值出现在阳澄湖。6种重金属中,所有湖泊As含量均超过江苏省土壤背景值且超过倍数最高,存在污染现象;其次为Cu和Zn,存在部分湖泊的污染;Cr、Pb和Ni含量相对最低,基本无污染。

(2)根据地累积指数评价结果,将研究区11个湖泊分大致为3类:污染程度最轻的是阳澄湖、昆承湖和固城湖,只受到轻度As污染;污染程度相对较重的是澄湖、白马湖、长荡湖和洪泽湖,除了受到As污染外,澄湖有1个点位存在轻微的Zn污染,白马湖有1个点位存在轻度Cu污染,长荡湖有1个点位存在轻度Cr污染,洪泽湖有部分点位存在轻度Cu和Zn污染;污染程度最严重的是三沱湖、高邮湖、溇湖和邵伯湖,存在As、Cu和Ni这3种重金属污染。

(3)综合污染指数法(mCd)、污染负荷指数法(PLI)和潜在生态风险评价法(RI)的评价结果与地累积指数法相似,却比其更加准确可靠。三沱湖、高邮湖、邵伯湖沉积物中重金属污染情况相对最严重,潜在生态风险也达到中等程度,污染负荷最大;溇湖、白马湖、洪泽湖沉积物中部分区域存在某些金属的污染,污染情况有加重趋势,潜在生态风险也达到中等程度,沉积物中重金属污染负荷较大;其余5个湖泊,沉积物受重金属污染的风险以及污染负荷均较小,整体为无污染状态。

(4)研究湖泊表层沉积物中重金属污染大多是由江苏省工业化和城市化快速发展引起,因此,应针对不同地区的发展情况,协调好发展与环境之间的关系,有针对性的进行环境污染治理。

致谢:本研究沉积物样品采集得到了中国环境科学研究院地下水与环境系统工程创新基地多位师兄师姐的帮助,实验所需各项耗材由张列宇小组资助购买,在此表示感谢。

## 参考文献:

- [1] 王天阳, 王国祥. 昆承湖沉积物中重金属及营养元素的污染特征[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 51-58.
- [2] Diagomanolin V, Farhang M, Ghazi-Khansari M, *et al.* Heavy metals (Ni, Cr, Cu) in the Karoon waterway river, Iran[J]. *Toxicology Letters*, 2004, **151**(1): 63-68.
- [3] 余海燕. 河湖沉积物对重金属吸附-解吸的研究概况[J]. 化学工程师, 2005, **19**(7): 30-33.
- [4] Jara-Marini M E, Soto-Jiménez M F, Pérez-Osuna F. Bulk and bioavailable heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in surface sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California) [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **80**(2): 150-153.
- [5] 唐阵武, 程家丽, 岳勇, 等. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 61-68.
- [6] 中国科学院南京地理研究所湖泊室. 江苏湖泊志[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982.
- [7] 周静, 杨桂山. 江苏省工业废水排放与经济增长的动态关系[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 931-939.
- [8] 张燕峰, 朱晓东, 李杨帆, 等. 江苏省城市化与工业污染排放相关性初步研究[J]. 环境保护与循环经济, 2010, **30**(5): 45-48.
- [9] 向勇, 缪启龙, 丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 南京气象学院学报, 2006, **29**(5): 700-705.
- [10] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1842-1848.
- [11] 郑丙辉, 秦延文, 张雷, 等. 重金属污染沉积物质量评价研究——以太湖为例[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(10): 1860-1866.
- [12] 何华春, 许叶华, 杨競红, 等. 洪泽湖流域沉积物重金属元素的环境记录分析[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(5): 766-774.
- [13] 张文斌, 余辉. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 399-406.
- [14] 张立, 袁旭音, 邓旭. 南京玄武湖底泥重金属形态与环境意义[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 63-69.
- [15] 邹丽敏, 王超, 冯士龙. 玄武湖沉积物中重金属污染的潜在生物毒性风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(2): 280-284.
- [16] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.
- [18] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, **38**(5): 1363-1378.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [20] Abraham G M S, Parker R J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **136**(1-3): 227-238.
- [21] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1-4): 566-575.
- [22] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 南四湖表层底泥重金属污染及其风险性评价[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 252-256.
- [23] 余辉, 张文斌, 余建平. 洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 437-444.
- [24] 陈守莉, 王平祖, 秦明周, 等. 太湖流域典型湖泊沉积物中重金属污染的分布特征[J]. 江苏农业学报, 2007, **23**(2): 124-130.
- [25] 蔡清海, 杜琦, 钱小明, 等. 福建三沙湾海洋沉积物中重金属和过渡元素来源分析[J]. 地质学报, 2007, **81**(10): 1444-1448.
- [26] Bertin C, Bourg A C M. Trends in the heavy metal content (Cd, Pb, Zn) of river sediments in the drainage basin of smelting activities[J]. *Water Research*, 1995, **29**(7): 1729-1736.
- [27] 李芳林, 臧凤新, 赵喜仓. 江苏省环境与人口、经济的协调发展分析——基于环境安全视角[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(7): 832-837.
- [28] 沈红军, 杨文燮. 江苏省环境与社会经济发展协调性分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014, **39**(10): 5-9.
- [29] 李书恒, 郭伟. 京杭大运河的功能与苏北运河段的发展利用[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(5): 861-869.
- [30] 张宪军, 蓝先洪, 赵广涛, 等. 苏北浅滩表层沉积物中重金属元素 Cd、As、Hg、Se 分布及污染评价[J]. 海洋地质动态, 2007, **23**(2): 9-13.

## CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013 .....	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer .....	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing .....	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing .....	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Chongqing Urban Areas .....	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles .....	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen .....	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO <sub>2</sub> and δ <sup>13</sup> C(CO <sub>2</sub> ) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China .....	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period .....	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water .....	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing .....	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China .....	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS .....	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island .....	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility .....	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan .....	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province .....	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City .....	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China .....	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang .....	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan .....	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City .....	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments .....	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing .....	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China .....	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea natallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay .....	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu .....	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae .....	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus .....	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water .....	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process .....	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide .....	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing .....	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants .....	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor .....	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron .....	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter .....	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source .....	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System .....	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe .....	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin .....	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution .....	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots .....	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors .....	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains .....	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis .....	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock .....	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic .....	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles .....	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration .....	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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	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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行