

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫酸类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响

刘婉清^{1,2,3}, 倪兆奎^{2,3}, 吴志强^{2,3,4}, 王圣瑞^{2,3*}, 曾清如¹

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 4. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031)

摘要: 选取不同水情下鄱阳湖表层沉积物, 研究江湖关系变化对其重金属 Cu、Pb、Zn、Cr 和 Cd 的分布及生态风险影响, 结果表明: ① 鄱阳湖沉积物受不同程度重金属污染, 入湖河流颗粒物输入是鄱阳湖沉积物重金属的主要来源, 其中 Cu 和 Pb 是主要污染因子。各重金属污染程度排列次序为: Cu > Pb > Zn > Cr > Cd, 丰水期沉积物各重金属含量的变化范围为 Cu 13.1 ~ 108.1 mg·kg⁻¹、Pb 37 ~ 119.1 mg·kg⁻¹、Zn 29.9 ~ 129.9 mg·kg⁻¹、Cr 13.3 ~ 98.6 mg·kg⁻¹ 和 Cd 0.19 ~ 2.77 mg·kg⁻¹; 枯水期为 Cu 3.05 ~ 69.7 mg·kg⁻¹、Pb 27.5 ~ 105 mg·kg⁻¹、Zn 18.8 ~ 95.4 mg·kg⁻¹、Cr 7.34 ~ 70 mg·kg⁻¹ 与 Cd 0.033 ~ 0.406 mg·kg⁻¹; 高值区域集中在“五河”尾间水域和鄱阳湖入长江的湖口水域。② 丰水期鄱阳湖沉积物重金属高风险区主要集中在五河尾间区; 枯水期, 沉积物重金属高风险区面积扩大, 不仅局限于五河尾间区, 且向北部进一步扩散, 湖口区域的风险较大, 但全湖生态风险总体上丰水期大于枯水期。③ 随着鄱阳湖与长江江湖关系进一步发生变化, 丰水期水位抬高且维系时间缩短、枯水期提前、湖泊由“湖相”至“河相”的转变进程加快、河流特性增强, 将导致全湖沉积物重金属生态风险相应降低, 但高风险区域的范围进一步向北扩大。

关键词: 江湖关系变化; 鄱阳湖; 沉积物; 重金属; 生态风险

中图分类号: X524; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1750-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.016

Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake

LIU Wan-qing^{1,2,3}, NI Zhao-kui^{2,3}, WU Zhi-qiang^{2,3,4}, WANG Sheng-rui^{2,3}, ZENG Qing-ru¹

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. College of Environment and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Effects of river (Yangtze River)-lake (Poyang Lake) relation on the distribution and potential ecological risk of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd were investigated in surface sediment of Poyang Lake under different waterregimens. The results indicated: ① the sediments of Poyang Lake were polluted by various concentrations of heavy metals mainly originated from particulates of Yangtze River, and Cu and Pb were the main pollution factors. The pollution level of determined heavy metals followed the order of Cu > Pb > Zn > Cr > Cd. The concentration ranges of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in the sediment of Poyang Lake were 13.1-108.1 mg·kg⁻¹, 37-119.1 mg·kg⁻¹, 29.9-129.9 mg·kg⁻¹, 13.3-98.6 mg·kg⁻¹ and 0.19-2.77 mg·kg⁻¹ during the wet period, and 3.05-69.7 mg·kg⁻¹, 27.5-105 mg·kg⁻¹, 18.8-95.4 mg·kg⁻¹, 7.34-70 mg·kg⁻¹ and 0.033-0.406 mg·kg⁻¹ during the dry period respectively. The region with the highest heavy metal concentrations was located in water input area of the "Five River" and water output area of "Hukou"; ② The regions with high risk of heavy metals in sediment were mainly located in the area of the trail of "Five Rivers" during the wet period; while during the dry period, the area with high risk of heavy metals in sediment enlarged, which was not only limited in the area of the trail of "Five Rivers", but also enlarged northwards. The potential ecological risk of "Hukou" was relatively high, however, the potential ecological risk of the sediment in the whole lake during the dry period was lower than that during the wet period. ③ With the change of river-lake relation, water level rose, the maintaining time was shortened during the wet period, the dry season appeared ahead of schedule, the transformation course of Poyang Lake from "Lake morphology" to "River morphology" increased, and the typical river properties were enhanced, which resulted in the decreased potential ecological risk of heavy metals in sediment of the

收稿日期: 2013-09-04; 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB417004); 国家自然科学基金项目(40873079); 国家社会基础性工作项目(2006FY110600)

作者简介: 刘婉清(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染模拟与修复, E-mail: lwq2051@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: wangsr@caes.org.cn

whole lake, however, the area of high risk-region was enlarged northwards.

Key words: river-lake relation change; Poyang Lake; sediment; heavy metal; ecological risk

沉积物重金属含量作为湖泊环境评价的一个重要指标,能够直接反映湖泊污染状态,生态环境演变过程以及人类活动信息^[1]. 重金属可在上覆水与沉积物之间迁移转化,富集在沉积物中,成为湖泊环境潜在的污染源,也可随环境因子的改变发生释放成为二次污染源^[2]. 研究表明,沉积物重金属在空间的分布格局是不同来源、不同种类污染物在多种因素下的综合结果^[3],对湖泊生态系统的潜在生态危害主要体现生物累积方面,虽然上覆水中重金属含量甚微,但易被颗粒物吸附,沉积到底泥中^[4],通过食物链等的放大作用影响整个生态系统的结构和功能^[5]. 鉴于此,分析沉积物重金属含量和空间分布特征可以及时判断出湖泊的污染状况,这对提出应对策略,避免污染的进一步恶化具有重要意义.

鄱阳湖是长江流域重要的调蓄湖泊,其流域地理环境特殊,三面环山,北邻长江,赣江、抚河、信江、饶河、修水“五河”从南、东、西三面汇入鄱阳湖^[6],构成山、江、湖为一体的完整的水系单元. 近 50 年来,由于“五河”上游兴建水利水电工程和水土流失频发等原因,重新分配了“五河”入湖泥沙,导致鄱阳湖的冲淤幅度和调蓄能力也发生改变^[7],流域内极端干旱、极端洪涝等灾害频繁出现^[8],特别是近 10 年间,受三峡建坝,气候变化等影响,江湖关系发生了进一步转变^[9],表现在丰水期高水位持续时间缩短、枯水期的时间延长,引发湖泊水位下降迅速,“河流特性”显著,推动了水体中的重金属由“水相”转“固相”从而进入到沉积物中^[10]给湖泊渔业和水生态环境带来潜在的生态隐患,制约了社会、经济发展和生态环境保护. 因此,研究湖泊水体沉积物重金属的空间分布和生态风险对认识长江与鄱阳湖的互动过程及江湖关系至关重要. 本文立足于近年来鄱阳湖流域江湖关系的进一步转变,由此引发枯水期提前和连续低枯水位的现象,对沉积物 Cr、Pb、Cu、Zn 和 Cd 等重金属空间分布的影响进行了分析,运用地积累指数法 (index of geoaccumulation)^[11] 和潜在生态风险指数法 (the potential ecological risk index)^[12] 评价鄱阳湖沉积物重金属的生态风险,旨在揭示江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属的分布及生态风险的影响,为鄱阳生态环境保护提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鄱阳湖是我国第一大淡水湖泊,也是长江流域最大的通江湖泊,位于我国江西省北部. 地理位置为东经 $115^{\circ}49' \sim 116^{\circ}46'$,北纬 $28^{\circ}24' \sim 29^{\circ}46'$. 由古代地跨长江两岸的彭蠡泽演化、变迁而形成. 湖体以松门山为界,南部宽广,为主湖区,水位较浅;北部狭长,为入江水道,水位较深,年内洪、枯水期间的湖泊形态指标差异悬殊,呈现“洪水一片、枯水一线”的景观^[13].

1.2 样品采集

鄱阳湖汛期(4~9月)长达半年之久. 其中4~6月为五大水系主汛期,进入10月,长江水位下降,湖口河段比降增大,出湖流量加大,水位锐减,此时洲滩裸露,湖区面积萎缩,湖泊形态大幅转变. 如图1所示,为了初步探究江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属的分布及生态风险的影响,分别于2012年5月20日(丰水期,湖口水位:17.9 m,吴淞)和2012年11月10日(枯水期,湖口水位:10.5 m,吴淞),采集了31和20个表层沉积物样品,合计51个,对不同水情下

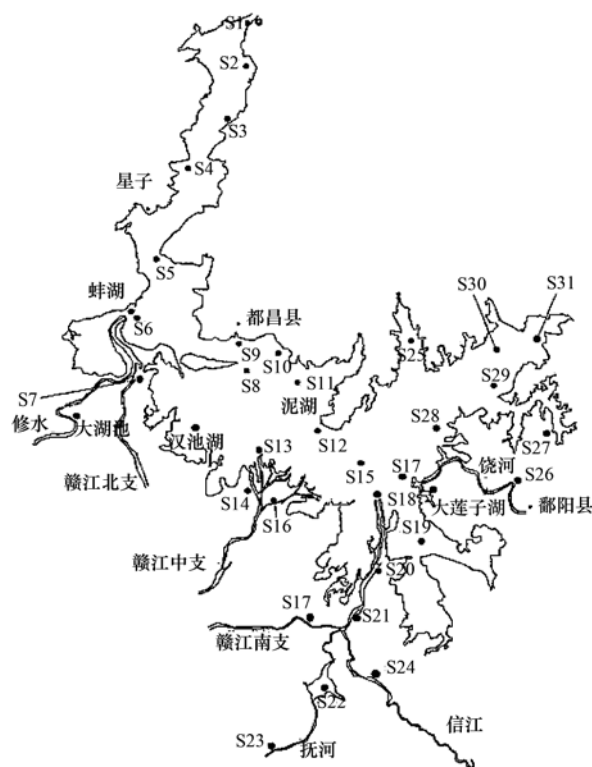


图1 鄱阳湖采样位点示意

Fig. 1 Map of the sampling sites of Poyang Lake

的鄱阳湖沉积物变化具有良好的代表性。

1.3 测定方法

采集的样品密封于聚乙烯自封袋中,冷藏,并迅速运回实验室,低温干燥碾碎研磨,充分混匀后过 100 目尼龙筛,按四分法取得样品保存备用。重金属测定采用国际湿消化法消解沉积物样品,采用浓硝酸、氢氟酸和高氯酸消解作为前处理,对每个样品选择铬(Cr)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、镉(Cd)这 5 个指标,其中 Cu、Pb、Zn、Cr 采用美国 Agilent 公司生产的电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定;Cd 用 Finnigan MAT 公司生产的高分辨电感耦合等离子体质谱仪(HR-ICP-MS)测定,同时与国家标准物质(GSD9)进行质量控制以确保数据的可靠,经计算得到沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 等重金属回收率均在 86.7%~103.3%之间。本实验所用玻璃器皿全部经过 5% 的硝酸溶液中浸泡 24 h 以上并用去离子水洗净烘干,实验用水均为去离

子水,试剂均采用优级纯。

1.4 数据处理

数据的处理主要采用数理统计学方法。运用 Sufer 8.0 和 Excel 2007 进行因子的相关分析和制图。

1.5 沉积物重金属污染生态风险评价方法

1.5.1 地积累指数(I_{geo})评价

地积累指数法 I_{geo} 是德国学者 Muller 于 1979 年提出的,该方法不仅考虑了自然地质过程对背景值的影响,也充分体现了人为活动对重金属的污染贡献。

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right]$$

式中, I_{geo} 为地质积累指数; C_n 为重金属 n 在沉积物中的实测含量; B_n 为沉积岩中所测元素的地球化学背景值。根据 I_{geo} 数值的大小,将沉积物中重金属的污染程度分为 0~6 级,见表 1。

表 1 地积累指数 I_{geo} 与污染程度分级

Table 1 Index of geoaccumulation and grading of pollution levels

I_{geo}	<0	0~1	>1~2	>2~3	>3~4	>4~5	>5
级数	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

地积累指数除了取决于样品测定的浓度外,还与不同地区重金属地球化学背景值有密切关系。本研究选取江西省地区土壤中重金属背景值作为评价依据^[14](表 2),对鄱阳湖沉积物重金属的污染程度进行评价。

表 2 鄱阳湖沉积物重金属背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 2 Background level of heavy metals in Poyang Lake/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

元素	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
背景值	29.5	12.5	4.75	45.75	0.75

1.5.2 潜在生态风险指数评价法

瑞典科学家 Hakanson 应用沉积学原理将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系起来,采用具有可比的、等价属性指数分级法,进行评价污染物的潜在生态风险。是一种相对快速、简便的标准方法,是目前沉积物质量评价应用最为广泛的方法之一^[15]。其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i C_f^i = T_r^i C_s^i / C_n^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_s^i / C_n^i$$

式中, E_r^i 为某一污染物潜在生态风险指数;RI 为多种污染物总的潜在生态风险指数; T_r^i 为污染物毒性

响应系数; ($Zn = 1 < Cr = 2 < Cu = Pb = 5 < Cd = 30$); C_f^i 为某一污染物的污染指数,即富集系数; C_s^i 为沉积物中某一污染物的实测浓度; C_n^i 为沉积物中相应污染物的背景值。

因本文研究的污染元素(Cr、Pb、Cu、Zn、Cd)少于 Hakanson 提出的 8 种,所以需要对 RI 进行相应的调整^[16,17],重新定以后的重金属元素 RI 范围见表 3,依据重金属的潜在生态风险指数(E_r^i)评价方法,可将沉积物中重金属污染状况划分为 5 个等级,依据重金属的潜在生态综合风险指数(RI)可将沉积物中重金属污染程度划分成 4 个等级。

2 结果与分析

2.1 丰水期鄱阳湖表层沉积物重金属分布特征及其生态风险

2.1.1 丰水期鄱阳湖表层沉积物重金属分布特征

丰水期沉表层沉积物重金属空间分布如图 2 所示。其中,Cr 含量变化范围在 $13.3 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,高值区集中在南部湖区和赣江中支入湖口。Pb 含量分布在 $37 \sim 119.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,湖心区和五河入口即五河尾间处含量较高;Cu 含量变化范围为 $13.1 \sim 108.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,在三江流域和汉池湖附近含

表 3 E_r^i 和 RI 值变化范围及其对应的污染程度和潜在生态风险

E_r^i	单因子生态风险程度	RI	潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	低风险	$RI < 50$	低
$40 \leq E_r^i < 80$	中等风险	$50 \leq RI < 100$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	较高风险	$100 \leq RI < 200$	较高
$160 \leq E_r^i < 320$	高	$RI \geq 200$	很高
$E_r^i \geq 320$	很高风险	—	—

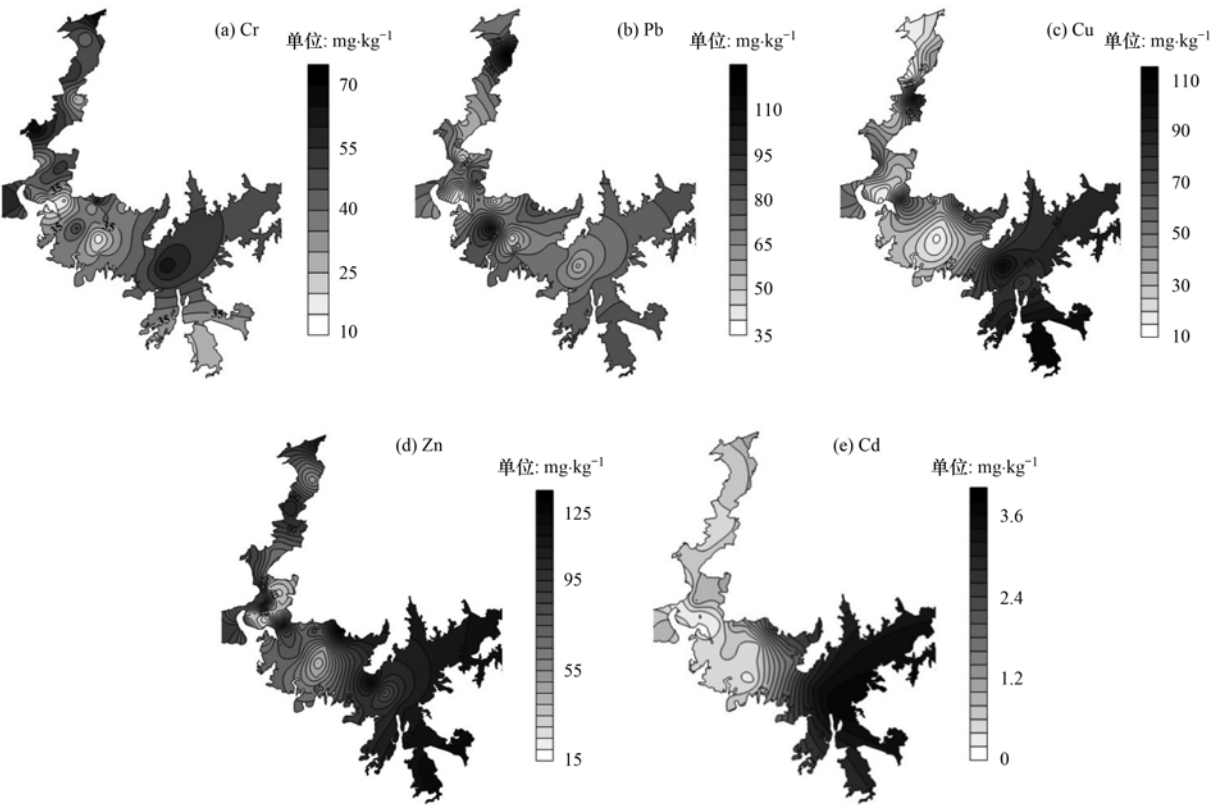


图 2 丰水期鄱阳湖表层沉积物重金属平面分布示意

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal in surface sediment of Poyang Lake during the flood season

量较高; Zn 含量分布在 $29.9 \sim 129.9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,最高值出现在赣江中支入湖河道的白沙洲附近,最低值出现在饶河入湖河口; Cd 含量变化范围为 $0.19 \sim 2.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大值出现在信江西支与抚河、赣江南支交汇入口处,最小值位于湖区中部的泥湖. 整体来看,Cr、Pb、Zn 的高值多出现在湖区中部,三江流域含量次之,湖口含量最低. Cu 和 Cd 的空间分布类似,高值区域集中在三江流域,其他区域变化不大.

2.1.2 丰水期鄱阳湖表层沉积物重金属生态风险评价

(1) 地积累指数法

沉积物重金属含量转化的 I_{geo} 和 E_r^i 见表 4. 丰水期,鄱阳湖表层沉积物重金属污染程度为 $\text{Cu} > \text{Pb}$

$> \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Cd}$,在污染最重的五河尾闾处,67% 以上位点的 Cu 的地积累指数为“强”污染等级,信江西支河道的采样点更是达到“极强”污染水平,除 Cu 和 Pb 外,其他重金属的地积累指数级别相对较低,Cd 仅在三江流域部分位点的 I_{geo} 值达到 2,其余位点都小于 1.

(2) 潜在生态风险评价法

由表 4 得知,鄱阳湖表层沉积物中除 Cu、Pb 和 Cd 外,其余元素潜在生态危险级别基本为“低”生态风险级别($E_r^i < 40$). Cu 的污染程度最为严重,全湖 E_r^i 的平均值为 49.86,三江交汇口处和湖口附近 Cu 的生态风险为“较高”($80 < E_r^i < 160$),Pb 和 Cd 达到“中等”生态风险. 根据多种污染物生态风险指数 RI 判别标准得出(图 4),鄱阳湖沉积物重金属总

表 4 丰水期鄱阳湖表层沉积物各重金属地积累指数和潜在生态风险评价结果

Table 4 Result of the potential ecological risk assessment and index of geoaccumulation (I_{geo}) of heavy metals in the surficial sediment of Poyang Lake during the wet period

区域	范围	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd	RI
北部湖区	I_{geo}	0.55 ~ 1.58	1.65 ~ 1.98	0.9 ~ 3.75	0.16 ~ 0.72	-1.31 ~ -0.02	76.29 ~ 150.52
	E_r^i	1.67 ~ 4.75	23.56 ~ 29.56	14.00 ~ 100.63	1.68 ~ 2.48	18.12 ~ 45.68	
湖心区域	I_{geo}	0.3 ~ 1.29	0.98 ~ 2.23	1.09 ~ 3.31	-1.81 ~ 0.92	-2.55 ~ -0.15	42.02 ~ 120.72
	E_r^i	0.9 ~ 4.69	14.76 ~ 35.16	16.00 ~ 79.37	0.43 ~ 2.84	7.68 ~ 96.24	
南部湖区	I_{geo}	0.3 ~ 1.47	0.97 ~ 2.67	0.62 ~ 3.92	-1.20 ~ 0.84	-2.66 ~ 1.74	41.54 ~ 272.36
	E_r^i	0.9 ~ 4.42	14.72 ~ 47.64	11.5 ~ 113.79	0.65 ~ 2.68	7.12 ~ 150.8	

体处于“较高”生态危害水平,“五河”河口部分点位甚至达到了“高”潜在生态风险,不同区域潜在生态风险存在差异,总体表现为:南部湖区>湖心区域>北部湖区.抚河、信江、和饶河河口 RI 值均超过 200,属于“很高”潜在生态风险范畴,湖区中部重金属潜在生态风险相对较低.

2.2 枯水期鄱阳湖表层沉积物重金属分布特征及生态风险

2.2.1 枯水期鄱阳湖表层沉积物重金属分布特征

枯水期,各重金属含量的变化范围为 Cu:3.05 ~ 69.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Pb: 27.5 ~ 105 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Zn: 18.8 ~ 95.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Cr: 7.34 ~ 70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、Cd: 0.033 ~

0.406 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cu 和 Pb 分别高出环境背景值 1.36 倍和 2.11 倍.空间分布上,Pb 和 Zn 在三江流域、泥湖和都昌附近含量较高,Cr、Cu 和 Cd 的含量分布较为相似,高值区主要分布在饶河入口处及三江口一带,由饶河至修水方向含量逐渐减少(图 3).

2.2.2 鄱阳湖沉积物重金属生态风险

(1)地积累指数法

通过分析得知,枯水期北部湖区 Cu 的污染级别达到 3 以上,为“强”污染等级,其余采样点的地积累指数为“中-强”污染范畴;Pb 在全湖区的 I_{geo} 值小于 3,同为“中-强”污染范畴;Cr 和 Zn 的地积累指数均小于 2,属于“无”污染到“中等”污染级

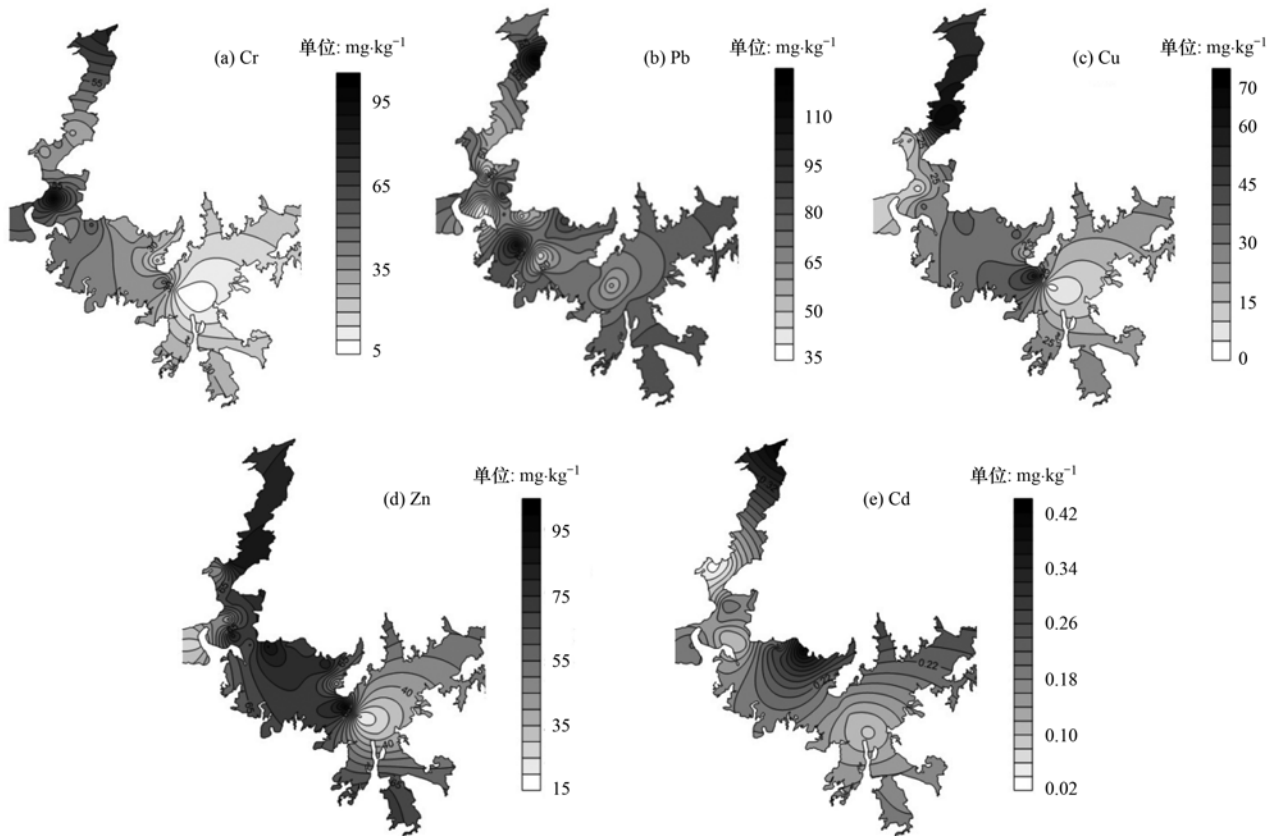


图 3 枯水期鄱阳湖表层沉积物重金属平面分布示意

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metal in surface sediment of Poyang Lake during the dry period

别; Cd 的污染级别最低, 多为“无-中”污染; 各重金属 I_{geo} 的高值区集中在三江流域和长江入湖口。

表 5 枯水期鄱阳湖表层沉积物各重金属地积累指数评价和潜在生态风险结果
Table 5 Result of the potential ecological risk assessment and Index of geoaccumulation(I_{geo})
of heavy metals in the surface sediment of Poyang Lake during the dry period

区域	范围	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd	RI
北部湖区	I_{geo}	-0.63 ~ 1.15	0.94 ~ 2.18	-0.02 ~ 3.29	-1.26 ~ 0.35	-3.18 ~ -1.44	40.09 ~ 116.17
	E_r^i	1.93 ~ 6.68	14.40 ~ 34	7.37 ~ 73.37	0.63 ~ 0.38	4.08 ~ 16.48	
湖心区域	I_{geo}	-0.45 ~ 0.21	1.44 ~ 2.17	0.43 ~ 2.28	-0.55 ~ 0.38	-5.09 ~ -2.51	35.02 ~ 96.41
	E_r^i	2.18 ~ 3.84	20.40 ~ 42	10.11 ~ 40.63	1.02 ~ 1.98	1.32 ~ 7.96	
南部湖区	I_{geo}	-2.59 ~ 0.35	0.55 ~ 2.48	-1.22 ~ 3.03	-1.86 ~ 0.48	-3.61 ~ -1.47	17.96 ~ 109.05
	E_r^i	0.5 ~ 3.25	11.00 ~ 36.8	3.21 ~ 61.47	0.41 ~ 2.09	4.64 ~ 16.24	

(2) 潜在生态风险评价法

枯水期重金属的风险等级除了 Cu 和 Pb 在三江流域和湖口处属于“中等”危害水平外, 其他区域的重金属的生态风险系数均小于 40, 处于“低”生态危害范畴。如图 4 和图 5 所示, 鄱阳湖丰、枯水期表层沉积物多种重金属的潜在生态风险指数 RI 均呈现显著地区域性差异, 结合水流从入五河入湖口-湖心-长江出湖口的特征, 呈现北部湖区 > 湖心区域 > 南部湖区的分布趋势, 由于枯水期湖泊形态“浅而窄”, 较快的水体流速促进了颗粒物间的相互扰动, 吸附在颗粒物表面的重金属, 沉积在地势相对较低的北部区域, 由此推断, 鄱阳湖表层沉积物重金属的潜在生态风险与入湖河流颗粒物特征、湖水的流速、流向和水位关系密切, 使重金属的高风险区域进一步向北扩大。

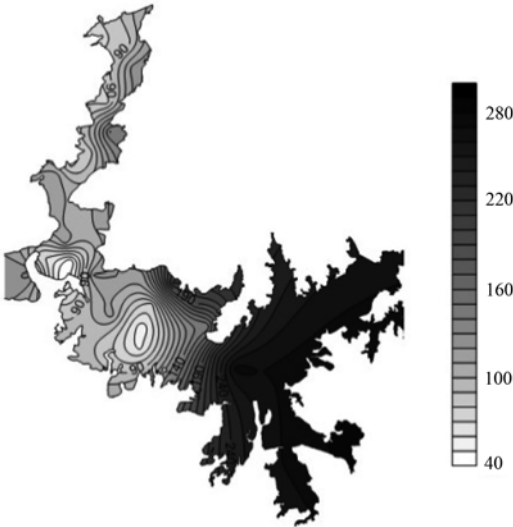


图 4 鄱阳湖丰水期重金属 RI 值空间变化
Fig. 4 Variation of the spatial distribution of RI during the wet periods

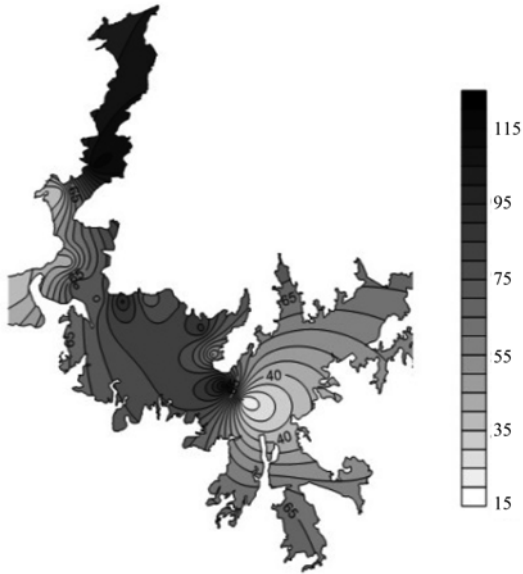


图 5 鄱阳湖枯水期重金属 RI 值空间变化
Fig. 5 Variation of the spatial distribution of RI during the dry periods

3 讨论

3.1 鄱阳湖水位的变化特征

水位变化是鄱阳湖江湖关系发生变化的重要体现之一。进入 21 世纪以来, 鄱阳湖水位受五河和长江洪水的双重影响, 江湖关系逐渐发生转变, 表现在丰、枯水时间间隔较短, 水位在年内变幅较大^[21,22], 且低水位提前, 维持时间增长。近 10 年来, 鄱阳湖几近成为季节性湖泊, 参照文献[23, 24]关于鄱阳湖水位的调查, 如表 6 所示, 以星子站为例, 鄱阳湖历年最高水位出现在 1998 年 8 月 2 日, 为 22.52 m; 最低水位发生在 2004 年 2 月 4 日, 为 7.11 m; 多年水位变幅达 15.41 m, 平均水位 13.39 m, 而且出现低于 10 m 以下的枯水位持续延长^[25], 有研究指出, 当鄱阳湖水位 > 15 m 时,

流速为 $0.1 \sim 0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而水位 $<15 \text{ m}$ 时, 流速达到 $1.48 \sim 2.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [26], 这种水位变化使水动力得到明显增强, 进一步促进了重金属的扩散. 随着江湖关系的进一步转变, 丰水期高水位和枯水期

低水位出现几率呈增大的趋势, 这意味着湖泊水位变幅也进一步增大, 鄱阳湖的河流特性将更加明显, 不同水情下的重金属分布与生态风险也随之发生变化.

表 6 星子站特征水位统计值

Table 6 Statistics of water level in Xingzi station

项目	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
高水位/m	14.57	13.94	17.6	17.77	19.88	21.86	22.51	22.52	21.58	19.39	17.52	13.94
出现年份(年)	1998	1959	1992	1992	1975	1998	1998	1998	1998	1954	1954	1982
低水位/m	7.19	7.11	7.20	7.51	10.43	11.47	12.79	10.62	9.56	8.62	8.14	7.32
出现年份(年)	1957	2004	1963	1963	1963	2000	1966	1963	2006	2006	2006	1956
变幅/m	7.38	6.83	10.40	10.26	9.45	10.39	9.72	11.90	12.02	10.77	9.38	6.62
月均水位/m	9.03	9.67	11.13	12.96	14.79	16.13	17.80	16.78	16.03	14.5	12.09	9.81

3.2 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布影响及生态风险的影响

3.2.1 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布影响

不同水情下鄱阳湖水文和水动力的变化导致沉积物重金属含量丰、枯水期差异显著(见表7), 且丰水期大于枯水期. 丰水期, 五河尾间区重金属含量高且分布广泛, Pb、Cu、Zn 的最大值分别达到 119.1 、 108.1 、 $122.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可能与五河来水量较大, 且工业废水的排放和农业面源污染多发生在丰水期有关 [27]. 同时, 由于该阶段湖泊水量较大, 水位较高, 五河来水进入湖泊后, 水体流速骤减, 携带的污染物易于沉积, 导致各重金属含量高且分布集中, 个别金属在湖口段出现最高值, 可能与丰水期

湖口段密集的船舶采砂引起河床下切进而导致下游水动力调整, 最终推动重金属进一步向下游迁移 [28]. 到了枯水期, 河流输入递减, 水体承载量相应减少, 从重金属分布上来看, 五河尾间仍旧是重金属含量的高值区域, 以 Cu 为例, 最大值为 $58.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb、Cu、Zn 的最大值分别为 85 、 69.7 、 $87.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而湖口区域的重金属含量有上升趋势, 究其原因, 可能是该阶段湖水落槽, 增强了鄱阳湖的河流特性, 更容易将底质中的重金属冲刷至水体中, 携带至更远的区域, 使得枯水期沉积物重金属分布更为均匀. 综上所述, 鄱阳湖沉积物重金属的含量和分布与湖泊水位的增高或递减呈正比关系, 水位越高, 重金属含量越高, 区域性的分布愈明显; 相反, 水位越低, 重金属含量越小, 空间分布就愈均匀.

表 7 丰、枯水情下鄱阳湖表层沉积物重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 7 Contents of the heavy metal in surface sediment of Poyang Lake during the wet period and dry period/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

时期	区域	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd
丰水期	北部湖区	24.6 ~ 70	58.8 ~ 73.9	13.3 ~ 95.6	76.8 ~ 113.4	0.453 ~ 1.142
	湖心区域	13.3 ~ 57.2	36.9 ~ 87.9	15.2 ~ 70.6	19.5 ~ 129.9	0.192 ~ 1.013
	南部湖区	13.3 ~ 65.2	36.8 ~ 119.1	10.9 ~ 108.1	29.9 ~ 122.4	0.178 ~ 3.77
枯水期	北部湖区	28.4 ~ 98.6	36 ~ 85	7 ~ 69.7	28.6 ~ 87.6	0.124 ~ 0.412
	湖心区域	32.2 ~ 51.2	51 ~ 84.5	96 ~ 34.7	46.5 ~ 89.5	0.033 ~ 0.197
	南部湖区	7.34 ~ 56.6	27.5 ~ 105	3.05 ~ 58.4	18.8 ~ 95.4	0.092 ~ 0.406

3.2.2 不同历史时期鄱阳湖沉积物重金属污染特征

参照文献资料和实验室分析, 不同时期鄱阳湖沉积物重金属含量结果见表8. 其中, 1987 ~ 2003 年数据从资料和文献获得 [29,30], 2006 年后的数据由本研究团队实验室分析测试获得. 从中可知, 鄱阳湖沉积物重金属自 1987 年至今含量变化可以分为 2 个阶段, 其中 1987 ~ 2006 年间, 沉积物重金属含量保持递增趋势, 鄱阳湖水体正由轻度污染向中度污染过渡, 以 2003 年为例, 除 Cr 外(数据缺失)各重

金属的含量均达到历年最高值, Cu、Pb、Zn 和 Cd 的含量分别超过背景值 9 倍、5.6 倍、3.8 倍和 2 倍, 该时期南昌周边和流域上游城市建设速度明显加快, 流域 GDP 迅猛上升, 年增长率超过 30%, 工厂生产规模不断扩大, 采矿废水和生活污水排放量增加, 导致部分入湖河流重金属含量多年超标. 2006 年三峡大坝全面建成之后, 沉积物重金属含量较以往有较大幅度地下降, 其中 Cd 和 Zn 含量在 2007 年低至 $0.18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $66.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 接近环境背

景值,这是因为三峡工程建成运行后,蓄水时节正好是鄱阳湖流域枯水期的开始,水库蓄水将加快鄱阳湖退水过程和降低湖内水位,使得鄱阳湖低(枯)水期提前来临,并降低其枯水位,延长枯水位的持续时间^[31],而水位的变化促使水动力也跟着变动,最终影响重金属在沉积物中的迁移扩散。

表 8 不同时期鄱阳湖表层沉积物重金属含量/mg·kg⁻¹
Table 8 Pollution history of heavy metals in surface sediment
of Poyang Lake during different periods/mg·kg⁻¹

年份	Cr	Pb	Cu	Zn	Cd	样品数量
背景值	29.5	12.5	4.75	45.75	0.75	—
1987~1988	—	32.5	43.9	140.5	0.36	13
1992	56	27	26	71	0.5	11
1993	72	30	31	75	0.7	11
2003	—	70	43.4	177	1.35	5
2006	41.95	67.68	28.4	66.04	0.18	23
2008	42.11	43.66	44.73	76	1.09	35
2012	29.08	68.55	43.76	89.7	1.56	25

3.2.3 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属生态风险影响

鄱阳湖沉积物不同重金属生态风险(地积累指数和潜在生态风险系数),丰水期大于枯水期。不同水情下,生态风险的高值区域分布不同,这可能与鄱阳湖受长江、五大水系水沙侵入及鄱阳湖湖盆特征的共同影响有关,导致丰、枯水期水体携带的颗粒物沉积速率和沉积地点各不相同。

丰水期的生态风险高值区集中在湖区南部工业密集的五河尾闾区域,泥沙和大量的颗粒物流入以及不间断的污水排放导致南部湖区重金属含量高且分布广,多种重金属的潜在生态风险指数(RI)的最高值甚至达到272.36,为“很高”污染级别,直接影响到湖泊底栖动物的繁衍,并可能通过食物链危及人类健康,由此可见,控制丰水期的污染排放以及对生态风险高值区域的清淤将是未来鄱阳湖整治的重点内容。枯水期,生态风险的高值区域集中在北部湖口段,此时的水环境和湖泊形态已发生较大转变,湖岸线提前,水位锐减,大量的泥沙蓄积在北部湖口段,导致重金属含量升高,成为枯水期生态风险的高值区域,与丰水期相比,风险值较低,但持续低水位致使湖泊蓄水锐减,流域内农田受旱,下游饮水困难,鱼类资源枯竭,湿地资源退化。因此,枯水期的水位调节对鄱阳湖流域的江湖水环境、水生态和生物群落安全起到了重要的作用。

随着鄱阳湖与长江江湖关系的进一步变化,年内“极高水位”和“极低水位”出现频率增加,不同水

情下,湖泊沉积物的重金属含量和生态风险的空间分布将呈现出明显的两极分化,且过渡的时间间隔缩短,丰水期南部湖区和枯水期北部湖区的污染将更加集中,再加上环境污染导致的环境效应具有滞后性,一旦暴发,将无法逆转,故相关部门在治理湖泊污染的同时需要设置相应的应急预案,避免事态的进一步恶化。

4 结论

(1) 鄱阳湖各重金属污染程度排列次序为:Cu>Pb>Zn>Cr>Cd,入湖河流颗粒物是沉积物重金属的主要来源,沉积物各重金属的含量丰水期大于枯水期。丰水期Cu和Pb的污染程度分别为“极强”和“中-强”污染水平,枯水期分别为“强”和“中-强”,Zn、Cr和Cd的污染程度较低。

(2) 地积累指数和潜在生态风险评价法都表明,鄱阳湖水系沉积物不同程度地受到了Cu和Pb的污染,尤其是在三江口一带有较高的含量,丰水期沉积物重金属集中分布在南部五河尾闾区域,且生态风险较高,枯水期重金属的分布较丰水期相对均匀,高值区域集中在五河尾闾和北部湖口,生态风险低于丰水期。

(3) 鄱阳湖沉积物重金属的潜在生态风险与入湖河流颗粒物特征、湖水的流速、流向和水位关系密切,而鄱阳湖与长江的江湖关系变化加速了湖泊由“湖相”至“河相”的转变进程,导致丰水期水位抬高和枯水期水位降低,且“河相”的维系时间延长,使得湖泊沉积物重金属在丰水期南部湖区富集,随着水位的下降,重金属含量和生态风险的高值区向湖口延伸。

参考文献:

[1] Birch L, Hanselmann K W, Bachofen R. Heavy metal conservation in Lake Cadagno sediments: Historical records of anthropogenic emissions in a meromictic alpine lake [J]. Water Research, 1996, 30(3): 179-687.

[2] Zhong A P, Guo S H, Li F M, et al. Impact of anions on the heavy metals release from marine sediments [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(6): 1216-1220.

[3] Nobi E P, Dilipan E, Thangaradjou T, et al. Geochemical and geo-statistical assessment of heavy metal concentration in the sediments of different coastal ecosystems of Andaman Islands, India [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(2): 253-264.

[4] Dauvalter V, Rognerudb S. Heavy metal pollution in sediments of the pasvikRiver drainage [J]. Chemosphere, 2001, 42(1): 9-18.

- [5] Zhang R, Zhou L, Zhang F, *et al.* Heavy metal pollution and assessment in the tidal flat sediments of Haizhou Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **74**(1): 403-412.
- [6] 郭华, 姜彤. 鄱阳湖流域洪峰流量和枯水流量变化趋势分析[J]. *自然灾害学报*, 2008, **17**(3): 75-80.
- [7] 闵骞, 时建国, 闵琳. 1956~2005年鄱阳湖入出湖悬移泥沙特征及其变化初析[J]. *水文*, 2011, **31**(1): 54-58.
- [8] 黄胜晔. 极端洪水遭遇下鄱阳湖调蓄能力研究[D]. 南京: 南京大学, 2011. 1-10.
- [9] Junkai Z, Jiufa L, Hong Y. Analysis on the water exchange between the main stream of the Yangtze River and the Poyang Lake[A]. In: Conference ESIAT 2011 Organization Committee. 2011 3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology ESIAT 2011 [C]. China: Procedia Environmental Sciences, 2011. 2256-2264.
- [10] 金艳, 何德文, 柴立元, 等. 重金属污染评价研究进展[J]. *有色金属*, 2007, **59**(2): 100-104.
- [11] Sundaray S K, Nayak B B, Lin S, *et al.* Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments-A case study: Mahanadi Basin, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186**(2-3): 1837-1846.
- [12] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [13] Zhang L L, Yin J X, Jiang Y Z, *et al.* Relationship between the hydrological conditions and the distribution of vegetation communities within the Poyang Lake National Nature Reserve, China [J]. *Ecological Informatics*, 2012, **11**: 65-75.
- [14] 黄国勤. 江西省土壤重金属污染研究[A]. 见: 中国环境科学学会. 2011 中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷)[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. 1731-1736.
- [15] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. *广东微量元素科学*, 2007, **14**(8): 13-17.
- [16] 邴海健, 吴艳宏, 刘恩峰, 等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累计及其潜在生态风险评价[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(5): 675-683.
- [17] 孙照斌, 邴海健, 吴艳宏, 等. 太湖流域西沱湖沉积岩芯中重金属污染及潜在生态风险[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(4): 563-569.
- [18] 吕兰军. 鄱阳湖水及其沉积物中的重金属调查[J]. *上海环境科学*, 1994, **13**(5): 17-26.
- [19] Foster I D L, Charlesworth S M. Heavy metals in the hydrological cycle: trends and explanation[J]. *Hydrological Processes* 1996, **10**(2): 227-261.
- [20] Hou D K, He J, Lv C W, *et al.* Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd) in water and sediments from Lake Dalinouer, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **93**: 135-144.
- [21] 程永建, 张俊才. 鄱阳湖水文气候特征[J]. *江西水利科技*, 1997, **17**(4): 291-296.
- [22] 倪培恩, 李道松. 鄱阳湖江湖河湖洪水关系水文分析[J]. *江西水利科技*, 1987, (4): 18-30.
- [23] 胡振鹏. 调节鄱阳湖枯水位维护江湖健康[J]. *江西水利科技*, 2009, **35**(2): 82-86.
- [24] 闵骞. 鄱阳湖水位变化规律的研究[J]. *湖泊科学*, 1995, **7**(3): 281-288.
- [25] 林玉茹. 鄱阳湖枯水现象的水文分析及湿地生态系统响应研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010. 89-94.
- [26] 顾平, 万金保. 鄱阳湖水文特征及其对水质的影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(3): 15-19.
- [27] 王圣瑞, 倪栋, 焦立新, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. *环境工程技术学报*, 2012, **1**(2): 23-28.
- [28] 李永进, 汤玉喜, 唐洁, 等. 洞庭湖滩地重金属分布及其生态风险评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, **31**(2): 55-59.
- [29] 鄱阳湖研究编委会. 鄱阳湖研究[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 273-289.
- [30] 代银萍, 吕兰军. 修河干流水环境现状及污染防治对策[J]. *江西水利科技*, 2007, **33**(1): 34-38.
- [31] 许继军, 陈进. 三峡水库运行对鄱阳湖影响及对策研究[J]. *水利学报*, 2013, **44**(7): 757-763.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行