

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

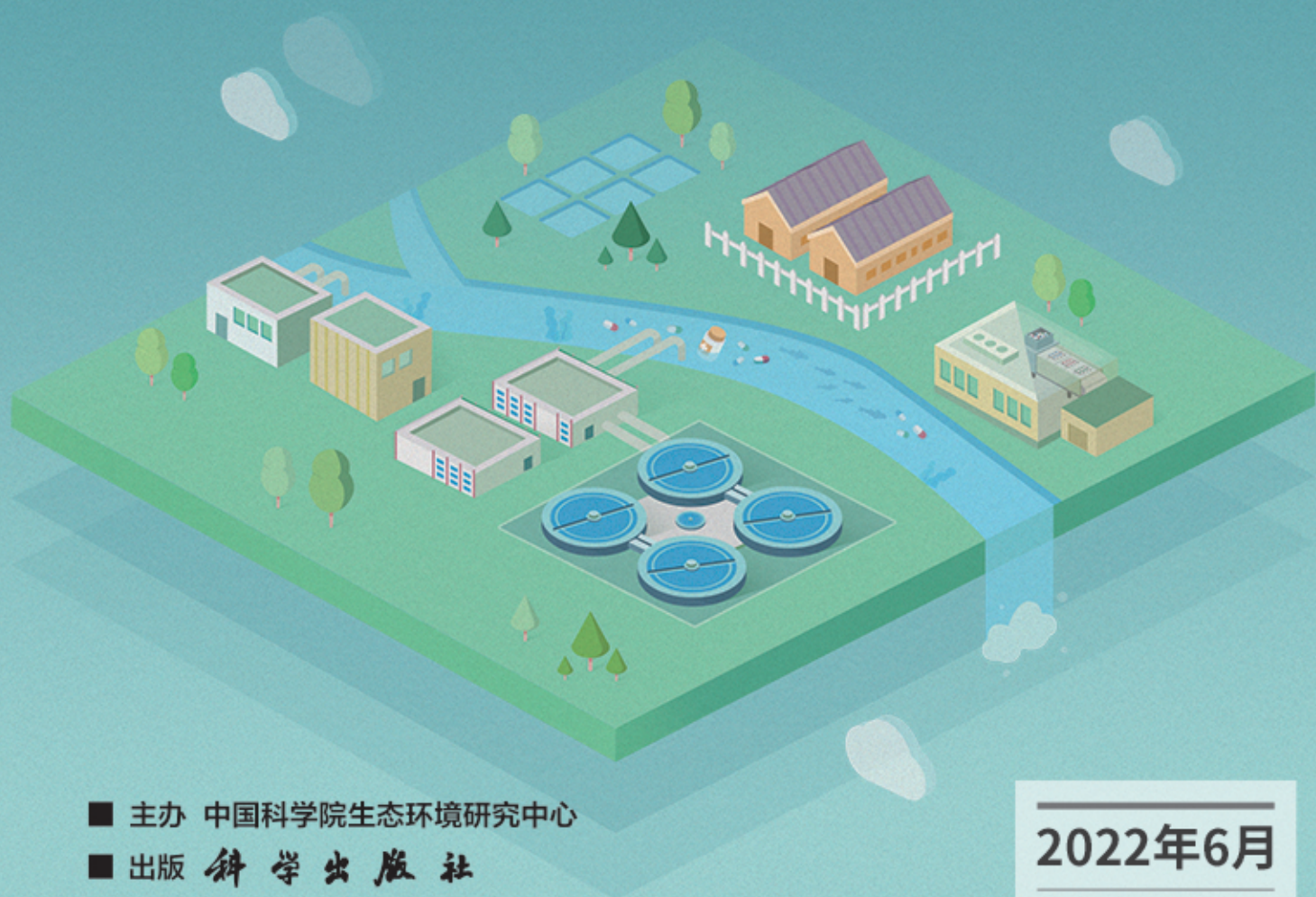
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜祺, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价

赵晓亮¹, 李响^{1,2}, 卢洪斌^{2,3}, 卢少勇^{2*}, 王涛², 张森霖², 国晓春², 张静², 弥启欣², 刘晓贺², 宋书峰⁴

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000; 2. 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, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 北京 100012; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4. 沧州师范学院生命科学学院, 沧州 061001)

摘要: 为了解东江湖表层沉积物重金属的污染特征、空间分布特征以及潜在生态风险和来源, 采集了东江湖 12 个点的表层沉积物, 对其中 20 种重金属 (Li、Be、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Rb、Sr、Ag、Cd、Cs、Ba、Pb 和 U) 的含量进行分析。采用地累积指数法和潜在风险指数法评估了沉积物重金属的污染程度和潜在风险, 并利用相关性分析和主成分分析对主要重金属进行了溯源分析。结果表明, 东江湖沉积物重金属中 $\omega(\text{Cd})$ ($2.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 $\omega(\text{As})$ ($80.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的平均值分别是湖南省背景值 ($0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $14.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 21.2 倍和 5.5 倍, 污染相对严重, 重金属空间分布整体呈现: 南部 > 北部 > 中部。地累积指数法评价显示 Cd 为偏重度污染, As 和 Se 为偏中度污染水平, Ag 和 Ga 为轻度污染。潜在生态风险指数评价表明东江湖表层沉积物整体表现为高风险水平, 主要环境风险因子分别为 Cd 和 As, 分别表现为极高风险和中等风险。

关键词: 东江湖; 沉积物; 重金属; 污染特征; 潜在生态风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3048-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109123

Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake

ZHAO Xiao-liang¹, LI Xiang^{1,2}, LU Hong-bin^{2,3}, LU Shao-yong^{2*}, WANG Tao², ZHANG Sen-lin², GUO Xiao-chun², ZHANG Jing², MI Qi-xin², LIU Xiao-he², SONG Shu-feng⁴

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongting, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. College of Life Science, Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001, China)

Abstract: To understand the pollution characteristics, spatial distribution characteristics, potential ecological risks, and sources of heavy metals in surface sediments of Dongjiang Lake, 12 surface sediment samples were collected from Dongjiang Lake. The contents of 20 heavy metals including Li, Be, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Sr, Ag, Cd, Cs, Ba, Pb, and U were analyzed in this study. The geo-accumulation index method and potential risk index method were used to evaluate the pollution degree and potential risks of heavy metals in sediments, and the correlation analysis and principal component analysis were used to trace the source of the primary heavy metals. The results showed that the average contents of $\omega(\text{Cd})$ ($2.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and $\omega(\text{As})$ ($80.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in heavy metals of Dongjiang Lake sediments were 21.2 times and 5.5 times the background value ($0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $14.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) of Hunan province. The overall spatial distribution of heavy metals was in the order of South > North > Central. The evaluation by the geo-accumulation index method showed that Cd was at the heavy pollution level, As and Se were at the moderate pollution level, Ag and Ga were at the light pollution level, and the other heavy metals were below the pollution standard. The evaluation by the potential risk index showed that all the surface sediments of Dongjiang Lake were at the high-risk level. The main environmental risk factor was Cd, which had an extremely high risk; the second was As, which had a medium risk; and the remaining heavy metals had no ecological risk.

Key words: Dongjiang Lake; surface sediments; heavy metals; pollution characteristics; potential ecological risk

湖泊能够存储气候变化和人类活动信息, 具有蓄水防洪和调节气候等生态服务功能, 在维护区域生态与环境安全方面具有特殊地位^[1]。随着湖泊流域内人类活动的日益频繁, 湖泊水生态环境安全堪忧, 湖泊富营养化, 蓝藻水华灾害和重金属污染等问题频繁发生^[2]。重金属通过干湿沉降和雨水径流等路径排入湖泊后, 累积在沉积物中^[3]。当重金属含量达到一定阈值时, 会降低植物根系对营养物质的吸收等能力, 导致植物营养不良甚至大量死亡, 还会造成动物和人类产生神经毒性及心血管损伤等健康风险^[4]。重金属污染危害大、影响范围广, 严重影响

了湖泊流域内居民的健康与生存质量^[5]。

东江湖是我国位于湖南省东南部的一个大型水电工程^[6], 其两岸群山环抱, 区内平均海拔 700 ~ 800 m, 最高点为桂东八面山 (海拔 2042 m), 最低点为资兴东江大坝码头 (海拔 290 m), 盆地整体地形

收稿日期: 2021-09-14; 修订日期: 2021-11-05

基金项目: 科技基础性工作专项 (2015FY110900); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07208008); 国家重点研发计划项目 (2019YFC180380104); 辽宁省教育厅科研项目 (LJ2020JCL031)

作者简介: 赵晓亮 (1981 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为重金属污染控制理论与技术, E-mail: zhaoxiaoliang2008@126.com

* 通信作者, E-mail: lushy2000@163.com

呈东北>东南>西南>西北的趋势。自1986年作为水库蓄水以来,东江湖充分发挥了湖南省重要饮用水源的作用^[7]。目前有关东江湖水质问题的研究主要集中在水环境承载力^[8]和水文特征^[9]等方面,关于重金属污染特征及潜在风险方面鲜见报道。

本研究在东江湖设置了12个采样点,测定了:锂(Li)、铍(Be)、钒(V)、铬(Cr)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、镓(Ga)、砷(As)、硒(Se)、铷(Rb)、锶(Sr)、银(Ag)、镉(Cd)、铯(Cs)、钡(Ba)、铅(Pb)和铀(U)共20种重金属的浓度,分析了东江湖沉积物中重金属的浓度水平和空间分布特征,并进行潜在生态风险评估和来源解析,以为东江湖及同类型湖泊水环境保护研究提供科学依据和必要数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区控制流域面积4 719 km²,占湘江一级支流耒水流域面积39.6%,主要支流有淞水、滁水和洪水等^[10]。流域内矿产资源丰富且分布广泛,已探明的矿种有煤、钨、铅、硅石和石灰石等30余种^[11],钨矿和铁矿主要分布在汝城县;锡矿主要分布在桂东县;煤矿主要分布在汝城文明、外沙、土桥和桂东沙田等地。同时,流域重点工业企业主要集中在汝城县和桂东县,涉及稀土金属矿采选业、非金属矿物制品业、有色金属合金制造业和无机盐制造业等,其中稀土金属矿采选业为流域主要工业,占整个流域工业行业的52.1%。由于人为流域开发等历史遗留原因,东江湖部分地区的水环境,特别是水库尾水已经遭到破坏,上游有色金属矿山遗留的大量尾矿、废石和废渣没有得到妥善处理,随着生态破坏和水土流失,其中的重金属随径流不断汇入湖中,东江湖水环境面临较大的风险^[10,12]。

1.2 仪器与试剂

电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent-7700x, 美国);硝酸和盐酸(AR级,上海国药集团,中国)等。

1.3 样品采集与测试

2021年2月,依据东江湖现有水域面积和地形条件,在库区共布置采样点12个,具体采样点位分布如图1所示。使用抓泥斗采集水库沉积物1~5 cm表层样品,并用自封袋密封寄回实验室,−35℃保存待测。

沉积物样品经过冷冻干燥后去除杂质,研磨并过100目筛备用:①称取待测样品0.1 g置于聚四氟乙烯密闭消解罐中,加入6 mL王水(盐酸:硝酸

=3:1)准备消解;②待样品完全消解后冷却至室温,取用慢速定量滤纸过滤提取液,收集于50 mL容量瓶中;③用少量硝酸溶液清洗消解罐的盖子内壁、罐体内壁和滤渣至少3次,并将洗液一并过滤收集于容量瓶中,用实验用水定容至刻度;④用ICP-MS进行重金属的测定。

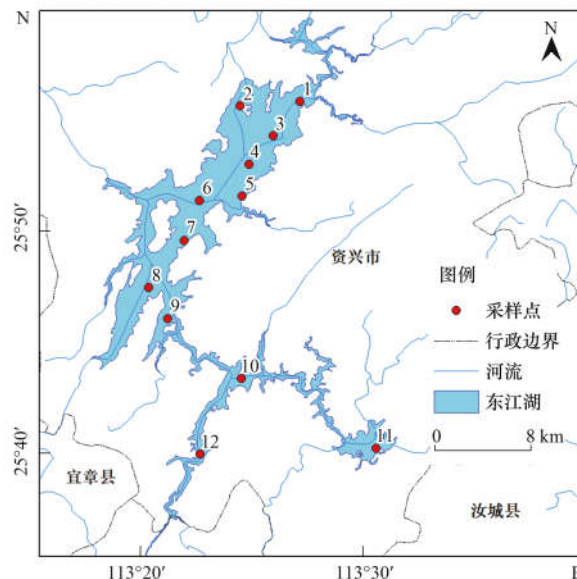


图1 东江湖表层沉积物采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of Dongjiang Lake

1.4 质量保证与控制

本实验全程避免接触金属物品,所有试剂均为优级纯,试剂溶液均用二次去离子水配制,实验前后将消解罐在酸缸中浸泡24 h。采用程序空白和国家标准土壤样品(GBW07366 GSD-2)作为质量控制样品,结果显示各元素回收率在91%~105%之间;所有样品均做3次平行样,最后的结果以3次测试分析的平均值显示,3次分析结果的误差范围<10%;同时每10个样品做1次分析空白。

1.5 地累积指数法

地累积污染指数法是研究重金属污染程度的定量指标,主要考虑重金属污染的人为因素、环境的地球化学背景值和自然成岩引起背景值变化的因素^[13]。其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 C_i / (K \times B_i) \quad (1)$$

式中, C_i 为第*i*种重金属的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为被测元素的环境背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本研究采用湖南省土壤各元素背景值的算术平均值^[14]作为参考值(表3), K 为考虑成岩作用引起环境背景值变动而取的系数,一般为1.5,根据地累积指数 I_{geo} 计算结果可将重金属污染程度划分等级,如表1所示。

1.6 潜在风险指数法

潜在生态风险指数法^[15]是常用的评估水体沉

表 1 重金属污染级别

Table 1 Heavy metal contamination levels

I_{geo}	分级	污染程度
<0	0	无污染
0~1	1	轻度污染
1~2	2	偏中度污染
2~3	3	中度污染
3~4	4	偏重度污染
4~5	5	重度污染
>5	6	严重污染

积物重金属风险的方法,综合考虑重金属毒性水平、环境背景值和多种重金属的协同作用,通过设定毒性响应系数对重金属进行综合评估,其表达式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m [T_r^i \times (C^i/C_n^i)] \quad (2)$$

式中,RI 为多因子综合潜在生态风险指数; E_r^i 为单因子危害指数; T_r^i 为毒性响应系数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度. 通过已有研究并结合本文测得重金属含量,得出了 V、Mn、Co、Ni、Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 和 As 共 10 种元素的毒性响应系数,分别为 2、1、5、5、2、5、1、30、5 和 10^[16, 17]. C^i 为第 i 种重金属的实测浓度 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); C_n^i 为被测元素的环境背景值,本研究采用湖南省土壤各元素背景值^[14]的算术平均值作为参考值. 根据 RI 和 E_r^i 值的大小,潜在生态风险指数划分标准见表 2.

表 2 潜在生态风险评估指标与等级划分

Table 2 Potential ecological risk assessment

indicators and classification		
E_r^i	RI	潜在生态风险程度分级
<40	<150	低风险
40~80	150~300	中风险
80~160	300~600	较高风险
160~320	>600	高风险
>320	—	极高风险

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属检出情况

东江湖表层沉积物重金属检出含量统计见表 3. 本研究共检测出 20 种金属元素,除 Li、Be、V、Cr、Co、Sr 和 U 外,其余元素的含量平均值均超过背景值,其中 Cd、As 和 Se 的含量平均值分别是背景值^[14]的 21.2、5.5 和 4.1 倍. 所有采样点中 Cd、As 和 Ga 均超过背景值, 66.7% 采样点中 Zn、Cu、Pb 和 Ag 含量超出背景值. 综合来看,东江湖 Cd 和 As 超标严重,这与已有研究的结果较为一致^[10]. 依据文献[18]中的风险筛选值与风险管制值,Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的含量平均值低于风险筛选值,As 和 Cd 的含量平均值高于风险筛选值,低于风险管制值,可能存在沉积物污染风险. 所有采样点中 As 含量均超过风险筛选值, 8.33% 采样点的 As 含量超过风险管控值, 58.3% 采样点的 Cd 含量超过风险筛选值.

表 3 表层沉积物中重金属含量的描述性统计¹⁾

Table 3 Descriptive statistics on the content of heavy metals in surface sediments

重金属	$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$									变异系数
	背景值	风险筛选值	风险管制值	检出限	最小值	中位数	最大值	平均值	标准差	
Li	44.90	—	—	0.01	15.54	40.31	78.72	42.76	19.05	0.45
Be	2.19	—	—	0.01	0.66	1.35	3.34	1.62	0.98	0.61
V	119.10	—	—	0.12	7.85	108.01	187.47	106.15	55.14	0.52
Cr	68.60	300	1 000	0.15	15.41	66.89	122.75	67.58	31.11	0.46
Mn	635.00	—	—	0.51	299.38	544.86	1 448.64	710.05	342.42	0.48
Co	15.50	—	—	0.20	7.38	14.66	23.79	15.07	4.65	0.31
Ni	31.80	100	—	0.12	5.51	33.31	66.52	33.66	16.46	0.49
Cu	25.80	100	—	0.09	11.01	30.43	54.06	33.01	12.79	0.39
Zn	91.60	250	—	0.26	34.77	103.43	218.63	113.90	60.09	0.53
Ga	20.80	—	—	0.05	19.06	46.59	92.72	48.69	19.11	0.39
As	14.70	25	120	0.02	28.54	93.84	124.98	80.80	33.20	0.41
Se	0.33	—	—	0.46	N. D	1.17	3.25	1.36	0.98	0.72
Rb	128.00	—	—	0.02	76.91	157.52	271.96	173.99	58.47	0.34
Sr	44.00	—	—	0.08	N. D	9.89	31.56	10.73	12.27	1.14
Ag	0.11	—	—	0.01	N. D	0.23	0.52	0.24	0.17	0.71
Cd	0.11	0.6	3	0.01	0.32	1.96	6.75	2.25	1.81	0.81
Cs	13.78	—	—	0.32	9.72	17.89	30.73	19.61	6.26	0.32
Ba	383.00	—	—	0.16	175.01	504.38	908.07	480.99	198.93	0.41
Pb	29.60	140	700	0.07	17.73	49.34	77.45	47.40	18.42	0.39
U	5.18	—	—	0.01	2.01	3.86	6.46	4.22	1.45	0.34

1) Li、Ga、Se、Rb、Sr、Ag 和 Cs 的背景值为湖南省 A 层土壤的各元素背景值的算术平均值,其余背景值为湖南省 C 层土壤的各元素背景值的算术平均值^[14]; N. D 表示未检出,“—”表示无数据

变异系数反映了沉积物重金属区域分布的变异程度,变异系数越大,表明人类活动对重金属区域分布影响越高.由表3可知, Sr 的变异系数为 1.14,属高度变异,V、Zn、Be、Ag、Se、Sr 和 Cd 的变异系数大于 0.5,其余重金属的变异系数范围为 0.31 ~ 0.5,属中等程度变异.

将东江湖表层沉积物重金属含量与省内洞庭湖^[19]的重金属含量进行比较,明显可以看出, Cr、Cu、Cd 和 Pb 的含量平均值低于洞庭湖, As 的含量

高于洞庭湖,这可能与湖泊的地质背景差异和人为活动因素有关.与湘江长沙段^[20]沉积物重金属进行比较,东江湖的重金属含量均处于较低水平,这可能是因为重金属不断迁移和累积富集在下游湘江长沙段所致.与国内外其他湖泊沉积物重金属含量进行比较可以看出(表4),东江湖沉积物重金属中 As 和 Cd 含量明显高于其他湖泊, Cr 和 Ni 含量与洪泽湖含量相当, Cu 和 Pb 含量在这些湖泊沉积物中处于平均水平,V、Mn 和 Co 含量处于较低水平.

表4 国内外不同湖泊/水库沉积物重金属含量¹⁾/mg·kg⁻¹

湖泊/水库	年份	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
东江湖(本研究)	2021	106.15	67.58	710.05	15.07	33.66	33.01	113.90	80.80	2.25	47.40
东洞庭湖(湖南省) ^[19]	2019	—	42.90	—	—	—	42.60	88.80	—	5.50	58.60
湘江长沙段(湖南省) ^[20]	2019	108.32	102.05	2531.52	20.14	50.72	76.12	464.16	—	—	138.38
太湖(江苏省和浙江省) ^[21]	2019	—	102.46	—	—	45.50	44.71	163.62	13.34	0.80	37.00
洪泽湖(江苏省) ^[22]	2021	—	66.78	—	—	33.89	25.35	74.77	16.55	0.23	27.20
大伙房水库(辽宁省) ^[23]	2015	—	116.30	1 018.50	—	—	73.00	175.00	—	2.40	52.50
沙河水库(北京市) ^[24]	2020	—	58.29	351.87	—	31.16	40.65	125.78	35.75	—	24.55
丹江口水库(湖北、河南省) ^[25]	2021	268.70	133.40	1 667.00	—	26.03	57.12	197.10	24.22	—	49.16
三峡水库(中国) ^[26]	2016	—	86.40	—	—	38.60	49.50	185.10	—	1.01	54.50
会东水库(韩国) ^[27]	2016	—	28.70	—	—	17.20	57.60	247.80	—	1.60	60.50
莱索托马卡利卡水库(马塞卢) ^[28]	2019	—	—	—	—	—	—	78.50	2.34	—	0.29
纳杰夫海洼水库(伊拉克) ^[29]	2019	—	75.24	657.63	21.28	38.77	—	177.63	—	0.06	18.16

1) “—”表示无数据

2.2 表层沉积物重金属空间分布特征

东江湖沉积物重金属含量的空间分布见图2.其中Li、Ni、Cu 和 Pb 在空间分布上呈现规律较为一致,高浓度区域为湖体中部; Be、V、Cr、As、Se、Cs 和 U 高浓度区域均呈现于东北方向和湖体中部; Zn 和 Ag 的最高值均出现在湖体中部和西南方向; Mn、Ga、Rb 和 Ba 的最高值出现在东北方向; Co 和 Sr 的最高值出现在湖体中部; Cd 的最高值出现在西南方向.从全湖水平来看,湖区南部的7、8、9、10 和 12 号点位重金属含量值最高,其次是北部的1 号和 2 号点位,湖区中部和东南方向 11 号点位重金属含量相对较低.

2.3 表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价

2.3.1 地质累积指数法评价

地累积指数统计结果见图3 和表5,东江湖表层沉积物中各重金属的污染程度顺序为: Cd > As > Se > Ga > Ag > Pb > Rb > Cs > Cu > Ba > Zn > Mn > Co > Ni > Cr > Li > U > V > Be > Sr. 其中 Cd 的污染程度最高, I_{geo} 平均值为 3.2,整体来看平均污染等级为偏重度,其中北部 Cd 污染情况相对较轻. As 的 I_{geo} 平均值为 1.7,污染等级为偏中度,其中南部 As 的污染情况较重. Se 的 I_{geo} 平均值为 1.1,全湖平均污染等级达到偏中度污染,北部和南部的污染情况

较重,中部较轻. Ga 的 I_{geo} 平均值为 0.5,全湖平均污染等级为轻度污染. Ag 的 I_{geo} 平均值为 0.3,整体呈现为轻度污染,南部的污染情况较重. 其余元素的 I_{geo} 平均值小于 0,无污染情况. Pb 在湖库南部略有污染. U 在所有采样点均为无污染.

东江湖沉积物中 Cd 元素与嘉陵江亭子口水库^[30]沉积物中 Cd 元素的 I_{geo} 平均值(3.68)水平接近,远高于洞庭湖(2020 年)^[31]沉积物中 Cd 的 I_{geo} 平均值(0.41). As 与沙河水库沉积物^[24]中 As 的 I_{geo} 值(1.73)水平相当.

2.3.2 潜在生态风险指数法评价

在众多用潜在生态危害指数法评价重金属污染的文献中,结合本研究测得重金属含量,找出了 V、Mn、Co、Ni、Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 和 As 共 10 种元素的毒性响应系数,根据公式计算所得重金属的 E_r^i 值和 RI 值结果见图4、图5 和表5. 东江湖表层沉积物中 10 种重金属的 E_r^i 平均值顺序为: Cd > As > Pb > Cu > Ni > Co > Cr > V > Zn > Mn(与鄱阳湖^[32] Cu 和 Pb 排序相反,其余保持一致), Cd 的 E_r^i 平均值为 635,单项潜在生态风险指数为极高; As 的 E_r^i 值为 19 ~ 85, E_r^i 平均值为 55,单项潜在生态风险指数为中等; 将东江湖整体大致分为北部、中部和南部,从全湖水平上看, Cd 和 As 在湖库南部的潜在

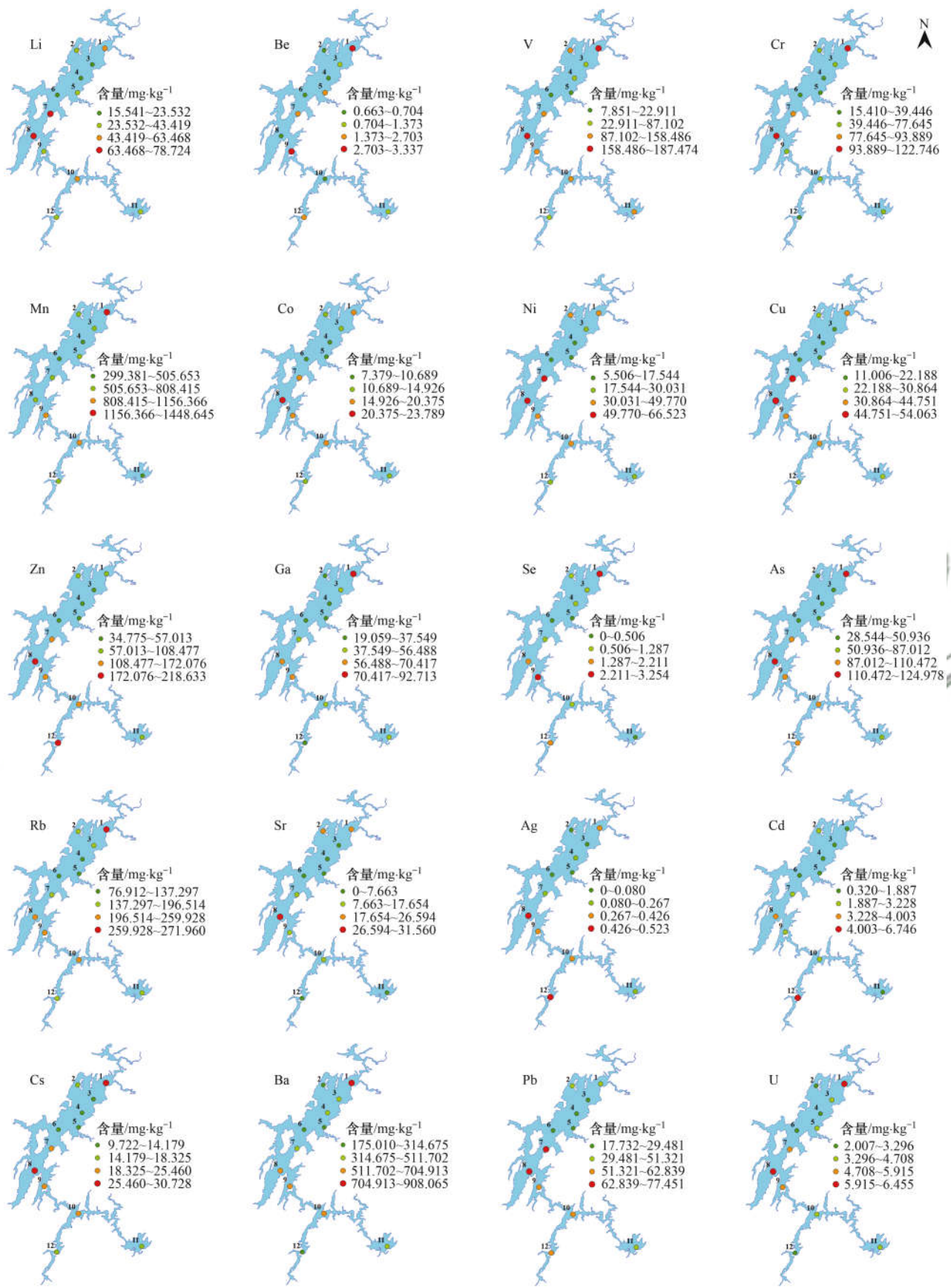


图2 东江湖沉积物重金属含量空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of heavy metal concentrations in sediments in Dongjiang Lake

风险最高. 其余重金属的潜在生态风险程度均表现为低风险.

RI 值的范围为 138 ~ 2 014, 平均值为 721, 西南方向 12 号采样点综合生态风险等级最高, 这说明东

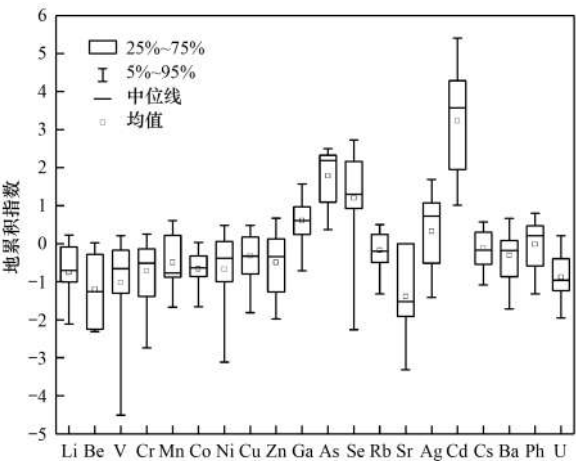


图3 东江湖表层沉积物重金属地质累积指数箱线图

Fig. 3 Box chart of heavy metal geological accumulation index of surface sediments of Dongjiang Lake

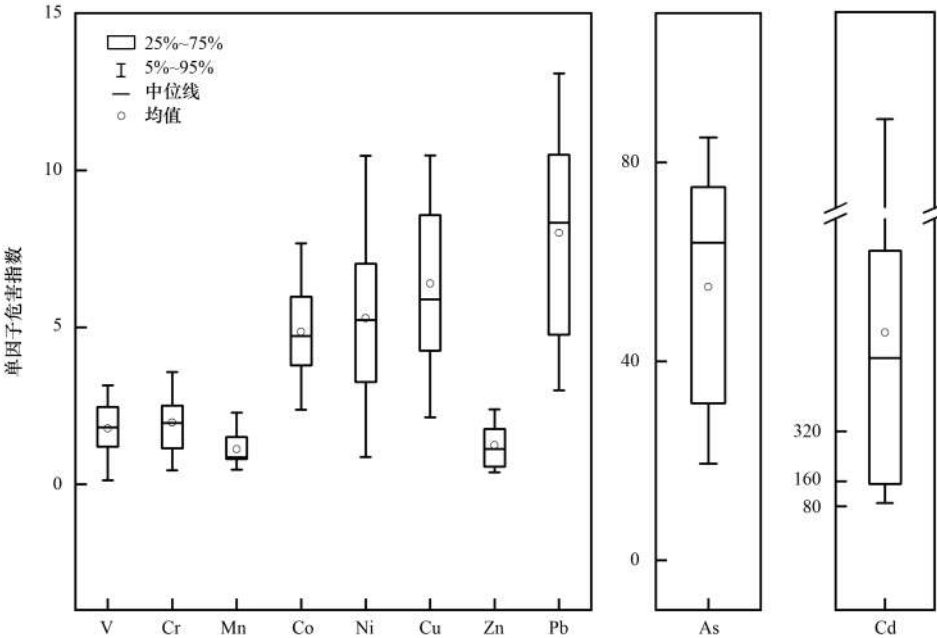


图4 东江湖表层沉积物重金属单项潜在生态风险指数箱线图

Fig. 4 Single potential ecological risk index box chart of heavy metals in the surface sediments of Dongjiang Lake

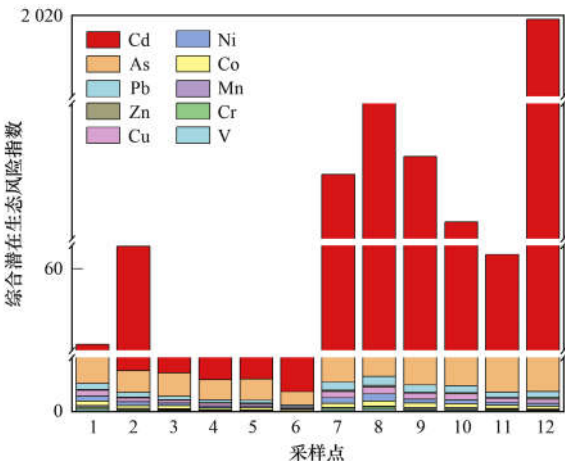


图5 东江湖各采样点综合生态风险指数

Fig. 5 Integrated ecological risk index for each sampling point of Dongjiang Lake

江湖部分区域沉积物的重金属污染对生态系统存在潜在风险,需采取相关措施来减缓重金属污染.从各重金属对综合潜在生态风险的平均贡献来看,Cd是最主要的生态风险贡献因子,对综合潜在生态风险指数的贡献率达到88.1%,可以看出,东江湖表层沉积物中Cd含量虽然较低,但潜在生态风险程度却最高,表明受到一定程度的污染,应引起有关部门的重视.

2.4 表层沉积物重金属的相关性及源解析

本研究结合东江湖主要重金属污染水平、毒性系数和重金属研究的广泛性等因素,重点选择沉积物中Cr、Cu、Zn、Ga、As、Se、Ag、Cd、Ba和Pb共10种重金属元素进行相关性分析和源解析.

相关性分析结果若显示金属元素之间相关性显

著,说明它们可能具有相同来源^[33].由表6可知,Cr与Cu、Ga和Pb之间显著相关,其中Cu与Pb之间极显著相关,但值得注意的是Cu与Ga之间并不存在显著正相关,且Cu与Se、Ag和Cd之间存在显著相关,Ga与As和Ba之间存在显著相关,这说明可能部分Cr与Cu和Pb具有相同来源,部分Cr与部分Ga具有相同来源,其余重金属均具有相似特征,说明在东江湖沉积物重金属之间可能产生了复合污染,有潜在的相似来源和迁移途径.

为进一步了解东江湖沉积物重金属的污染来源,采用因子分析对其进行源解析.KMO值(0.613>0.6)和Bartlett's球形检验(0.00<0.05)结果表明采用主成分分析是有效的^[34,35].结果如表7所示,主成分1和主成分2特征值分别为7.203和1.900,

表 5 地质累积指数法和潜在生态风险评估结果¹⁾

Table 5 Geological accumulation index method and potential ecological risk assessment results

重金属	地质累积指数 I_{geo}				污染程度				单因子危害指数 E_i^r				单项潜在生态风险程度			
	平均值	北部	中部	南部	全湖	北部	中部	南部	平均值	北部	中部	南部	全湖	北部	中部	南部
Li	-0.8	-0.9	-0.4	-0.7	无	无	无	无	—	—	—	—	—	—	—	—
Be	-1.3	-1.1	-1.3	-0.7	无	无	无	无	—	—	—	—	—	—	—	—
V	-1.1	-0.7	-0.9	-0.7	无	无	无	无	1.8	0.4	0.1	2.7	无	无	无	无
Cr	-0.8	-0.5	-0.6	-0.7	无	无	无	无	2	1.1	0.4	2.7	无	无	无	无
Mn	-0.6	-0.5	-0.8	-0.1	无	无	无	无	1.1	0.8	0.5	0.9	无	无	无	无
Co	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	无	无	无	无	4.9	3.4	2.4	5.9	无	无	无	无
Ni	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	无	无	无	无	5.3	2.6	0.9	8.3	无	无	无	无
Cu	-0.4	-0.4	-0.2	-0.1	无	无	无	无	6.4	3.6	2.1	9.1	无	无	无	无
Zn	-0.5	-0.9	-0.3	0.2	无	无	无	轻度	1.2	0.5	0.4	1.9	无	无	无	无
Ga	0.5	0.8	0.5	0.6	轻度	轻度	轻度	轻度	—	—	—	—	—	—	—	—
As	1.7	1.6	1.7	2.2	偏中度	偏中度	偏中度	中度	55	31.1	19.4	71.5	中等	无	无	中等
Se	1.1	1.7	0.7	1.7	偏中度	偏中度	轻度	偏中度	—	—	—	—	—	—	—	—
Rb	-0.2	-0.2	-0.2	0	无	无	无	无	—	—	—	—	—	—	—	—
Sr	-1.4	-2.4	-2.4	-2.6	无	无	无	无	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag	0.3	-0.2	0.1	1.3	轻度	无	轻度	偏中度	—	—	—	—	—	—	—	—
Cd	3.2	2.7	3.6	4.5	偏重度	中度	偏重度	偏重度	635.6	115.1	130.4	879.9	极高	高	高	极高
Cs	-0.2	-0.2	0	0	无	无	无	无	—	—	—	—	—	—	—	—
Ba	-0.4	-0.1	-0.4	-0.2	无	无	无	无	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb	0	-0.2	0.1	0.3	无	无	轻度	轻度	8	4.6	3	12	无	无	无	无
U	-1	-0.9	-0.8	-1	无	无	无	无	—	—	—	—	—	—	—	—

1) “—”表示无数据

表 6 沉积物中重金属含量的皮尔逊相关系数矩阵¹⁾

Table 6 Pearson correlation coefficient matrix of heavy metal content in sediments

	Cr	Cu	Zn	Ga	As	Se	Ag	Cd	Ba	Pb
Cr	1									
Cu	0.885 **	1								
Zn	0.382	0.435	1							
Ga	0.773 **	0.514	0.391	1						
As	0.494	0.423	0.847 **	0.738 **	1					
Se	0.542	0.755 **	-0.092	0.058	-0.157	1				
Ag	0.404	0.649 *	-0.228	-0.130	-0.329	0.971 **	1			
Cd	0.414	0.668 *	-0.184	-0.127	-0.299	0.974 **	0.999 **	1		
Ba	0.493	0.193	0.413	0.916 **	0.776 **	-0.321	-0.487	-0.485	1	
Pb	0.816 **	0.925 **	0.718 **	0.518	0.636 *	0.504	0.386	0.417	0.295	1

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性极显著, * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著; 样本数量 $n = 12$

对应方差贡献率为 72.027% 和 18.998%, 累计方差贡献率为 91.025%, 能反映所有数据的绝大部分信息.

主成分 1 中 Cr、Cu、Zn、Ga、As、Se、Ag、Ba 和 Pb 均具有较高载荷, 其中 Cr 元素含量趋于近湖南省背景值, 且生态风险较低、变异系数较小, 因此可以推测 Cr 主要受自然背景影响, 符合自然输入的规律, 为自然源金属. 有研究表明 As、Pb、Zn 和 Cu 的来源主要是采矿冶炼和金属加工等工业活动^[36, 37], 流域内郴州柿竹园矿区是我国最大的有色金属矿床, 主要伴生矿种包括: As、Cd、Cu、Ga 和 Ag 等^[38], Ga 主要存在于闪锌矿中^[39], Se 以黏土矿物吸附形式存在, Ba 污染主要以硫酸钡和碳酸钡的状态存在^[40]. 流域内的矿石冶炼等工业活动所排

放废气、废水和固废渗漏中的重金属会通过大气沉降、地表径流和地下渗流等途径进入湖泊^[41], 在一定程度上增加东江湖沉积物重金属含量. 还有研究表明 As 元素主要来源于废水灌溉、施用化肥和农药等方面^[42], 东江湖流域农田面积约为 695.3 km²^[43], 农田及周边土壤中的重金属会随着降水径流进入东江湖, 因此部分 As 还可能来源于农业生产. 除采矿冶炼外, 部分 Pb 污染的另一个重要来源是煤与汽油等燃料的燃烧, 最后通过大气沉降进入湖泊, 在沉积物中不断累积^[44]. 主成分 2 仅表征了 Cd 元素, 且 Cd 在主成分 1 和主成分 2 均表现出较高载荷, 可以认为湖泊中的 Cd 与流域上游矿石冶炼等工业活动带有关. 此外, 东江湖还是湖南省重要的渔业生产基地, 研究表明水产饲料中的鱼粉也

含有一定含量的 Cd 元素^[22, 45], 因此 Cd 还可能受到渔业饲料投放的影响。

综上所述, 可认为东江湖沉积物重金属主要受到生活生产污水、工农业废水排放和采矿冶炼工业等人类活动的影响, 部分元素由自然源产生。

表 7 东江湖沉积物重金属主成分分析
Table 7 Analysis of the main components of heavy metals in sediments in Dongjiang Lake

元素	成分 1	成分 2
As	0.958	0.077
Cu	0.956	-0.077
Pb	0.927	0.170
Cr	0.846	-0.423
Zn	0.845	0.515
Ag	0.843	0.401
Se	0.818	-0.161
Ga	0.806	-0.586
Ba	0.787	-0.580
Cd	0.658	0.741
特征值	7.203	1.900
方差占比/%	72.027	18.998
累积方差/%	72.027	91.025

3 结论

(1) 东江湖表层沉积物中有 20 种重金属检出, 其中除 Li、Be、V、Cr、Co、Sr 和 U 外, 其余重金属的含量平均值均超过了湖南省土壤背景值; 空间整体呈现为库区南部 > 库区北部 > 库区中部的特征, Li、Ni、Cr、Co、Cs、Cu、Sr、Rb、U、V、Ba 和 As 的空间分布相似, 其他重金属元素均在不同局部出现污染水平较高的情况。

(2) 地累积指数法评价显示东江湖表层沉积物中 Cd 为偏重度污染, As 和 Se 表现为偏中度污染水平, Ag 和 Ga 为轻度污染, 其他重金属无污染。潜在生态风险指数评价表明东江湖表层沉积物整体表现为高风险水平, 主要环境风险因子是 Cd, 表现为极高风险; 其次是 As, 表现为中等风险; 其他重金属的生态风险较低, 总体情况良好。

(3) 利用相关性分析和主成分分析表明, 东江湖表层沉积物重金属主要受到生活生产污水、工农业废水排放和采矿冶炼工业等人类活动的影响。

参考文献:

[1] Chen H Y, Jing L J, Yao Z P, *et al.* Prevalence, source and risk of antibiotic resistance genes in the sediments of Lake Tai (China) deciphered by metagenomic assembly: a comparison with other global lakes[J]. *Environment International*, 2019, **127**: 267-275.

[2] 高煜, 王国兰, 金梓函, 等. 千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5333-5345.

Gao Y, Wang G L, Jin Z H, *et al.* Spatial distribution, risk, and influencing factors of river water-sediment heavy metals in the

lower reaches of the Qianhe River[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5333-5345.

[3] 李贝, 道金荣, 朱润云, 等. 滇池重金属污染的分布、积累和风险评估[J]. *环境化学*, 2021, **40**(6): 1808-1818.

Li B, Dao J R, Zhu R Y, *et al.* Distribution, accumulation and risk assessment of heavy metal pollution in Dianchi Lake[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(6): 1808-1818.

[4] 李悦昭, 陈海洋, 孙文超. “河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2646-2652.

Li Y Z, Chen H Y, Sun W C. Environmental characteristics and source apportionment of heavy metals in the sediments of a River-Lake System[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2646-2652.

[5] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5410-5418.

Jiang T, Lin W W, Cao Y J, *et al.* Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan reservoir in the Meijiang basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5410-5418.

[6] 邹忠义, 姚德华, 孙立仲, 等. 东江水库碳汇渔业与生态保护的初步研究[J]. *水生态学杂志*, 2011, **32**(4): 79-84.

Zou Z Y, Yao D H, Sun L Z, *et al.* Preliminary studies on carbon sinking fisheries and ecological protection in Dongjiang reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(4): 79-84.

[7] 何望. 东江湖水环境及渔业可持续发展研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.

He W. Study on waters environment and sustainable fisheries development in Dongjiang Lake [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012.

[8] 马巾英. 东江湖库区水环境承载力评价及协调发展研究[J]. *经济地理*, 2015, **35**(11): 184-189.

Ma J Y. Dongjiang Lake reservoir area' evaluation of water environmental carrying capacity and the research of the coordinated development[J]. *Economic Geography*, 2015, **35**(11): 184-189.

[9] 黄速艇, 陈森林, 艾学山, 等. 基于流量分级的生态流量过程线确定方法——以东江水库为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, **25**(5): 22-27.

Huang S T, Chen S L, Ai X S, *et al.* Deterministic method of ecological flow process line based on flow classification: a case study in Dongjiang reservoir[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, **25**(5): 22-27.

[10] 王圣瑞. 东江湖水环境[M]. 北京: 科学出版社, 2018.

[11] 徐源, 师华定, 王超, 等. 湖南省郴州市苏仙区重点污染企业影响区的土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(5): 1213-1222.

Xu Y, Shi H D, Wang C, *et al.* Heavy metal pollution sources in soil affected by key pollution enterprises in Suxian District, Chenzhou City, Hunan province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(5): 1213-1222.

[12] 付广义, 邱亚群, 宋博宇, 等. 东江湖铅锌矿渣堆场优势植物重金属富集特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, **39**(4): 117-122.

Fu G Y, Qiu Y Q, Song B Y, *et al.* Heavy metals enrichment characteristics of the dominant plants in lead-zinc slag yard along Dongjiang lake reservoir[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, **39**(4): 117-122.

[13] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, **2**(3): 108-118.

[14] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值

- [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [16] 张晶晶, 马传明, 匡恒, 等. 青岛市土壤重金属污染的物元可拓评价[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(2): 661-668.
Zhang J J, Ma C M, Kuang H, *et al.* Assessment of heavy metals pollution in soil of Qingdao based on matter-element extension model[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 661-668.
- [17] 胡梦珺, 李春艳, 李娜娜, 等. 基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2457-2468.
Hu M J, Li C Y, Li N N, *et al.* Using the matter-element extension model to assess heavy metal pollution in topsoil in parks in the main district park of Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2457-2468.
- [18] GB 15618-2018, 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [19] 唐聪, 钱宝, 李炜钦, 等. 洞庭湖区表层沉积物重金属污染特征与风险评价[J]. *人民长江*, 2020, **51**(6): 49-56, 62.
Tang C, Qian B, Li W Q, *et al.* Pollution characteristics and risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake[J]. *Yangtze River*, 2020, **51**(6): 49-56, 62.
- [20] 王勤, 彭渤, 方小红, 等. 湘江长沙段沉积物重金属污染特征及其评价[J]. *环境化学*, 2020, **39**(4): 999-1011.
Wang Q, Peng B, Fang X H, *et al.* Characteristics and assessment of heavy metal contamination in sediments from Changsha section of the Xiangjiang River, Hunan Province of China[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(4): 999-1011.
- [21] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2202-2210.
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [22] 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 等. 洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5355-5363.
Zi X Y, Zhang M, Gu X H, *et al.* Impact of enclosure culture on heavy metal content in surface sediments of Hongze Lake and ecological risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5355-5363.
- [23] Zhu L, Liu J W, Xu S G, *et al.* Deposition behavior, risk assessment and source identification of heavy metals in reservoir sediments of Northeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **142**: 454-463.
- [24] 杨颖, 孙文, 刘吉宝, 等. 北运河流域沙河水库沉积物重金属分布及生态风险评估[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(1): 217-227.
Yang Y, Sun W, Liu J B, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Shahe Reservoir in Northern Canal Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(1): 217-227.
- [25] 罗哲, 许仕荣, 卢少勇. 丹江口水库表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, **44**(3): 1-8, 17.
Luo Z, Xu S R, Lu S Y. Pollution characteristics and evaluation of heavy metals in surface sediments of Danjiangkou Reservoir [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2021, **44**(3): 1-8, 17.
- [26] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, *et al.* Spatial variation of heavy metal contamination in the riparian sediments after two-year flow regulation in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 1004-1016.
- [27] Lee P K, Kang M J, Yu S, *et al.* Enrichment and geochemical mobility of heavy metals in bottom sediment of the Hoedong reservoir, Korea and their source apportionment [J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 74-85.
- [28] Gwimbi P, Kotelo T, Selimo M J. Heavy metal concentrations in sediments and *Cyprinus carpio* from Maqalika Reservoir-Maseru, Lesotho: an analysis of potential health risks to fish consumers [J]. *Toxicology Reports*, 2020, **7**: 475-479.
- [29] Hussein A M, Jabbar D N, Ali A R. Spatial distribution and evaluation of heavy metals in surface sediments of the Al-Najaf sea depression reservoir, Iraq [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, **59**(6): 5197-5206.
- [30] 可华明, 杨清伟, 刘守江, 等. 嘉陵江亭子口水库沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2020, **20**(6): 2389-2397.
Ke H M, Yang Q W, Liu S J, *et al.* Distribution of the heavy metal contaminants and the corresponding eco-hazard risk assessment in the sediment of Tingzikou Reservoir of Jialing River [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, **20**(6): 2389-2397.
- [31] 李照全, 方平, 黄博, 等. 洞庭湖区典型内湖表层沉积物中氮、磷和重金属空间分布与污染风险评价[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(6): 1409-1420.
Li Z Q, Fang P, Huang B, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of typical internal lakes in Dongting Lake area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(6): 1409-1420.
- [32] 匡荟芬. 鄱阳湖区沉积物和土壤重金属污染特征、风险评价及源解析[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
Kuang H F. Pollution characteristics, risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments and soils of Poyang Lake Area[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [33] 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 等. 海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1085-1094.
Zeng W T, Yang Y P, Zang D Q, *et al.* Sources, distribution of main controlling factors, and potential ecological risk assessment for heavy metals in the surface sediment of Hainan Island north bay, South China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1085-1094.
- [34] Bhardwaj R, Gupta A, Garg J K. Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India[J]. *Water Science*, 2017, **31**(1): 52-66.
- [35] 王漫漫. 太湖流域典型河流重金属风险评估及来源解析[D]. 南京: 南京大学, 2016.
Wang M M. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in typical rivers of Taihu Basin [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.
- [36] 李强, 曹莹, 何连生, 等. 典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5930-5937.
- [37] 张婉军, 辛存林, 于爽, 等. 柳江流域河流溶解态重金属时

- 空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4234-4245.
- Zhang W J, Xin C L, Yu S, *et al.* Spatial and temporal distribution and pollution evaluation of soluble heavy metals in Liujiang River Basin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4234-4245.
- [38] 盛维康, 侯青叶, 杨忠芳, 等. 湘江水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2230-2240.
- Sheng W K, Hou Q Y, Yang Z F, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xiang River[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2230-2240.
- [39] 赵飞燕, 张小东, 郭昭华, 等. 金属镓的分布、生产及应用前景[J]. 轻金属, 2017, (3): 1-3.
- Zhao F Y, Zhang X D, Guo Z H, *et al.* Distribution, production and application prospects of gallium[J]. Light Metals, 2017, (3): 1-3.
- [40] Wang G X, Zeng C, Zhang F, *et al.* Traffic-related trace elements in soils along six highway segments on the Tibetan Plateau; influence factors and spatial variation[J]. Science of the Total Environment, 2017, **581-582**: 811-821.
- [41] 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 等. 乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 691-701.
- Yu Y, Lü Y N, Wang W J, *et al.* Spatio-temporal distribution and risk assessment of heavy metals in middle and lower reaches of Le'an River[J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 691-701.
- [42] Dong B, Zhang R Z, Gan Y D, *et al.* Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 3127-3138.
- [43] 郭翔. 东江湖流域农田氮磷污染负荷特征研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2013.
- Guo X. Research of the farmland nitrogen and phosphorus pollution load in Dongjianghu Lake watershed [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2013.
- [44] 高进长, 唐强, 龙翼, 等. 长寿湖水库沉积物中重金属来源及生态风险评价[J]. 人民长江, 2020, **51**(4): 20-25.
- Gao J Z, Tang Q, Long Y, *et al.* Sources analysis and ecological risk evaluation on heavy metals in Changshouhu Reservoir sediments[J]. Yangtze River, 2020, **51**(4): 20-25.
- [45] 李星谕, 李朋, 苏业旺, 等. 汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 859-866.
- Li X Y, Li P, Su Y W, *et al.* Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Tangxun Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 859-866.



CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)