

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)

珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价

王恩瑞¹, 张坤锋^{1,2}, 昌盛^{1*}, 张茉莉¹, 付青^{1*}

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 2. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 磨刀门和洪湾水道是珠江水系的主要出海口, 受潮汐影响, 沿线受其调水的凤凰山水库、大镜山水库和竹仙洞水库是粤港澳大湾区珠海市中部的重要饮用水水源地。为了解3座供水水库表层沉积物中的环境质量状况, 于2019年丰、枯两季(8月和10月)对库区共15个采样点的8项重金属进行监测, 并开展了相关性分析、地累积指数评价、生态风险评估和溯源分析。结果表明, 8种重金属在3座水库中的含量平均值大小排序均为: 竹仙洞水库 > 大镜山水库 > 凤凰山水库。凤凰山水库 Hg、Zn 和 Pb, 大镜山水库 Hg、As、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb, 竹仙洞水库 8 种重金属含量分别超过广东省土壤重金属背景值的 1.88~2.75、1.05~2.32 和 1.69~6.45 倍。除凤凰山水库的 As, 大镜山水库的 As 和 Cu, 竹仙洞水库的 Cr 和 Ni 外, 其余重金属含量均呈现枯水期 > 丰水期的特征。地累积指数法评价结果表明, 3 座水库污染程度为: 竹仙洞水库 > 大镜山水库 > 凤凰山水库。其中, 凤凰山水库和大镜山水库仅 Hg、Zn 和 Pb 元素表现为轻度污染, 竹仙洞水库整体均受到轻度或偏中度污染。潜在生态风险指数评价结果表明, 凤凰山水库和大镜山水库整体均为低生态风险, 竹仙洞水库为中生态风险, Hg 是 3 座水库主要的生态风险贡献因子, 贡献率分别为 78.8%、64.4% 和 51.0%。

关键词: 珠海市; 供水水库; 表层沉积物; 重金属; 污染特征; 生态风险

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)01-0189-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204006

Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City

WANG En-rui¹, ZHANG Kun-feng^{1,2}, CHANG Sheng^{1*}, ZHANG Mo-li¹, FU Qing^{1*}

(1. National Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The Modaomen and Hongwan waterways are the main estuaries of the Pearl River system. Affected by tides, the Fenghuangshan Reservoir, Dajingshan Reservoir, and Zhuxiandong Reservoir, which are subject to water transfer along the river line, are important drinking water sources in the central part of Zhuhai City in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Eight heavy metals in 15 sampling points in the reservoir area were monitored in the two seasons (August and October) of 2019. The environmental quality of the surface sediments of the three water supply reservoirs was surveyed using correlation analysis, geoaccumulation index evaluation, ecological risk assessment, and traceability analysis in the present study. The results showed that the order of the average content of the eight heavy metals in the three reservoirs was as follows: Zhuxiandong Reservoir > Dajingshan Reservoir > Fenghuangshan Reservoir. The contents of Hg, Zn, and Pb in Fenghuangshan Reservoir; Hg, As, Mn, Ni, Cu, Zn, and Pb in Dajingshan Reservoir; and Zhuxiandong Reservoir exceeded the background values of soil heavy metals in Guangdong province by 1.88-2.75, 1.05-2.32, and 1.69-6.45 times. Except for As in Fenghuangshan Reservoir, As and Cu in Dajingshan Reservoir and Cr and Ni in Zhuxiandong Reservoir, the other heavy metals elements showed the content characteristics of dry season > wet season. The evaluation results of the geoaccumulation index method indicated that the pollution degree of the three reservoirs was in the order of: Zhuxiandong Reservoir > Dajingshan Reservoir > Fenghuangshan Reservoir. Among them, the Fenghuangshan Reservoir and the Dajingshan Reservoir were only slightly polluted by Hg, Zn, and Pb elements, and the Zhuxiandong Reservoir as a whole was slightly or moderately polluted. The evaluation results of the potential ecological risk index showed that the overall ecological risk of Fenghuangshan Reservoir and Dajingshan Reservoir was low, and Zhuxiandong Reservoir was at a medium ecological risk level. Hg was the main ecological risk-contributing factor of the three reservoirs, with contribution rates of 78.8%, 64.4%, and 51.0%, respectively.

Key words: Zhuhai City; water supply reservoir; surface sediment; heavy metal; pollution characteristics; ecological risk

在水体-沉积物系统中, 沉积物既是重金属的汇集, 又可以作为对水体水质产生潜在影响的次生污染源^[1,2]。当重金属等污染物进入水体后, 绝大部分以溶解态或被悬浮物吸附存在于水环境中, 在一定的水动力条件下逐步迁移、吸附和沉积至表层沉积物中。当环境因素发生变化时, 这部分污染物会重新释放进入水体形成二次污染^[3~5]。因此, 沉积物中重金属含量常被用作判别水环境质量优劣的重要参考

指标^[6,7]。

珠海市过境河流主要为西江的出海水道, 过境水资源较丰富。其中凤凰山水库、大镜山水库和竹

收稿日期: 2022-04-01; 修订日期: 2022-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200804-02); 生态环境部饮用水水源及重大工程项目区环境监管项目(2110302)

作者简介: 王恩瑞(1990~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向饮用水水源地环境监测与风险评价, E-mail: 244864031@qq.com

* 通信作者, E-mail: changsheng83@163.com; fuqing@craes.org.cn

仙洞水库是粤港澳大湾区珠海市和澳门特别行政区的重要供水水源,水库水生态环境对珠海市居民饮水健康和粤港澳大湾区的发展建设具有重要影响.关于广东省内部分河流沉积物重金属及其污染物状况已有相关研究,例如,周树杰等^[8]对广州市 12 条主要河流沉积物重金属污染调查发现,超过半数河涌存在中等及以上程度的污染.牛红义等^[9]调查中发现珠江(广州段)沉积物中有 11 个监测断面的生态危害系数在 40~80 之间,达到了中等生态危害级别,数量占总数量近一半.宁建凤等^[10]分析出广东省多个大中型水库沉积物中铜、铅、锌和镉等重金属含量超过广东省土壤背景值.保障饮水安全已经成为世界共识并受到公众及相关部门的重视,饮用水源地水质保护是保障饮水安全的重要环节^[11~13].因此,珠海市供水水库沉积物污染风险需引起高度重视,然而关于珠海市湖库沉积物重金属时空分布特征、生态风险以及来源分析的研究,至今仍鲜见报道.开展珠海市供水水库沉积物中重金属污染状况调查,对研究湖库和河流生态环境质量具有重要

意义.

本文在对珠海市中部 3 座主要供水水库进行不同水期表层沉积物样品采集和分析的基础上,开展水库沉积物中重金属含量时空分布特征分析,并进行地累积指数和潜在生态风险评价,以期为珠海市安全供水、环境保护和污染防治工作提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

珠海市(北纬 21°48′~22°27′,东经 113°03′~114°19′)位于广东省珠江口西岸,濒临南海,属亚热带季风气候区,有明显的枯水期(10 月至次年 3 月)和丰水期(4~9 月).海洋对珠海市气候的影响十分明显,冬无严寒,夏无酷暑,温暖湿润,日照充足,热量丰富;多年平均气温为 22.4℃,全年无霜日为 358 d,年平均相对湿度 79%.珠海市多年平均降雨量为 2 037 mm,呈现由南向北递减的地区分布特征.结合地区实际情况,本文选取 3 座有代表性水库为研究对象,基本情况见表 1.

表 1 水库基本情况
Table 1 Basic information of the reservoirs

水库名称	入库水源	建库年份	集雨面积/km ²	总库容/万 m ³	文献
凤凰山水库	磨刀门水道	1992	9.28	1 510	[14]
大镜山水库	磨刀门水道	1972	7.00	1 160	[15]
竹仙洞水库	磨刀门和洪湾水道	1959	2.81	281	[15]

1.2 样品采集与预处理

本研究于 2019 年 8 月(丰水期)和 2019 年 10 月(枯水期)进行两次采样.每次采样在点位选取时参考了《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91-2002)^[16],并依据水库集水面积大小、连通水库的进出水位置和污染源位置等因素选取了代表性强、覆盖面全、能够代表该水库水质特征且满足研究需要的共计 15 个采样点位.其中,凤凰山水库 8 个(F1~F8)、大镜山水库 4 个(D1~D4)和竹仙洞水库 3 个(Z1~Z3)(图 1).采用皮得森抓斗式采泥器采集 0~20 cm 表层沉积物,在每个采样点附近 5 m² 采集 3 个样品混合做为 1 个沉积物样品密封于塑料自封袋中,冷冻保存.

样品的预处理步骤为:沉积物样品经过真空冷冻干燥后去除沙子、砾石和植物根部等杂质,研磨并过 100 目筛,置于聚四氟乙烯密闭消解罐中待用.将制备的 0.1 g(精确至 0.000 1 g)沉积物样品用 6 mL 王水(盐酸:硝酸=3:1)进行微波消解,消解过程中将沉积物样品一式三份,以减少随机性和实验误差.将完全消解后的样品冷却至室温,收集于 50

mL 容量瓶中.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.重金属检测分析方法包括土壤和沉积物汞、砷、硒、铋和锑的测定微波消解原子荧光法(HJ 680-2013)和固体废物金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法(HJ 766-2015).

1.3 样品分析与质量控制

重金属检出限范围为 0.002~3.2 mg·kg⁻¹,所用检测仪器包括原子荧光光谱仪、IE(GLP)556、IE(GLP)568 和 IE(GLP)548.测试分析参考文献[17]的实验室测试分析质量控制,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,各测试结果相对标准偏差 RSD 均小于 10%;同时每 3 个样品做一次分析空白.实验所用试剂均为优级纯,实验用水为超纯水.

1.4 评价方法

1.4.1 地累积指数法

地累积指数法由德国海德堡大学沉积物学者 Muller 于 1969 年提出^[18],该方法可以定量评价水体和沉积物中重金属的污染水平,已经被广泛用于

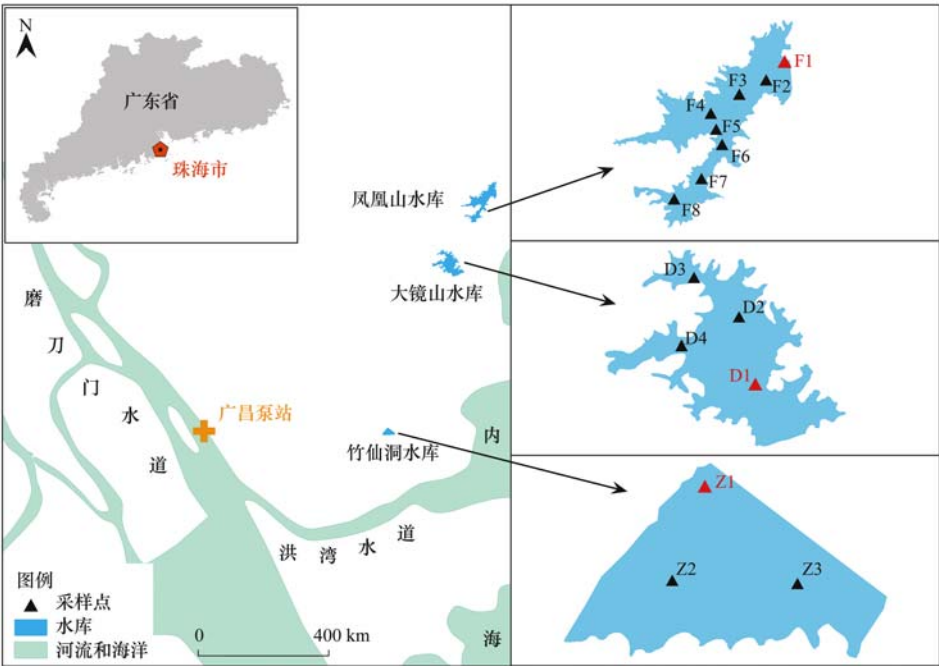


图 1 研究区域沉积物采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sediment sampling sites in the study area

水体和沉积物中重金属的污染评价^[19-22],尤其是可以更好地评价人为源产生的重金属污染,其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 (C_n / k B_n) \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为重金属 n 的地累积指数; C_n 为重金属 n 在沉积物中的含量,单位为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_n 为沉积物

中该元素的地球化学背景值,本研究采用广东省土壤重金属元素环境背景值的算数平均值^[23](见表 2), k 为修正系数,根据各地岩石差异引起的背景值的波动确定,一般 k 取 1.5^[24]. 根据 I_{geo} 数值的大小,将沉积物中重金属的污染程度分为 7 个等级^[9,25],具体污染程度分级见表 3.

表 2 广东省土壤元素背景值和重金属对应毒性系数

Table 2 Background values and corresponding toxicity coefficients of heavy metals in Guangdong Province

重金属	Hg	As	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.078	8.9	58.9	279	14.4	17	47.3	36
毒性系数	40	10	2	1	5	5	1	5

表 3 沉积物地累积指数污染程度分级

Table 3 Classification of geoaccumulation index of sediments

I_{geo}	≤ 0	(0,1]	(1,2]	(2,3]	(3,4]	(4,5]	> 5
级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	清洁	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重度污染	重度污染	严重污染

1.4.2 潜在生态风险指数法

本研究采用潜在生态风险指数法来开展重金属生态风险评价. 潜在生态风险指数法于 1980 年由瑞典科学家 Hakanson^[26] 提出,该方法引入毒性响应系数,为人类的健康生活提供参照,是评价水系沉积物重金属潜在生态风险的重要方法^[27,28]. 计算公式:

$$C_r^i = C_i / C_n^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_r^i) \quad (4)$$

式中, C_r^i 为沉积物中重金属 i 的富集系数; C_i 为沉

积物中重金属 i 含量的实测值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_n^i 为评价重金属 i 含量的背景值(见表 2), $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害指数; T_r^i 为重金属 i 在沉积物中的毒性系数^[7](见表 2); RI 为沉积物中多种重金属的综合潜在生态危害指数. 其潜在生态风险评价标准^[29]如表 4 所示.

1.5 数据处理

利用 Arcgis 10.8 进行采样点位信息的可视化 and 重金属含量的空间分析,利用 Excel 2010 和 Origin 2018 进行数据统计计算及条形图的绘制,利用 SPSS 进行相关性分析和主成分分析.

表 4 单项及综合潜在生态风险评价指数与分级标准

Table 4 Individual and general indices and grades of potential ecological risk assessment

E_r^i	单项污染物 生态风险程度	RI	综合潜在生态 风险程度
<40	低	<150	低
[40,80)	中等	[150,300)	中等
[80,160)	较重	[300,600)	重
[160,320)	重	≥600	严重
≥320	严重		

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属检出情况

3 座水库表层沉积物重金属检出含量见表 5. 本研究共检出 Hg、As、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb 这 8 种重金属. 除凤凰山水库 As、Cr、Mn、Ni 和 Cu, 大镜山水库 Cr 外, 其余重金属含量均超过广东省土壤

背景值. 单项重金属含量平均值均表现为: 竹仙洞水库 > 大镜山水库 > 凤凰山水库, 单因素方差分析显示, 各水库之间差异不显著 ($P > 0.05$). 8 种表层沉积物重金属含量平均值从大到小顺序依次为: Zn > Mn > Pb > Cr > Cu > Ni > As > Hg (凤凰山水库); Mn > Zn > Pb > Cr > Cu > Ni > As > Hg (大镜山水库); Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg (竹仙洞水库). 除凤凰山水库的 As, 大镜山水库的 As 和 Cu, 竹仙洞水库的 Cr 和 Ni 外, 其余重金属含量均呈现枯水期 > 丰水期的分布特征. 重金属在丰、枯水期单因素差异显著性分析结果可以看出, 3 座水库表层沉积物重金属含量在丰水期和枯水期间无显著差异 ($P > 0.05$), 表明 3 座水库中大多数表层沉积物重金属含量均随着季节变化发生变化, 但不够明显, 因此本研究将两者数据综合起来取平均值进行后续分析.

表 5 3 座水库表层沉积物中重金属含量及变异系数¹⁾

Table 5 Contents and coefficients of variation of heavy metals in surface sediments of three reservoirs

水库	项目	Hg		As		Cr		Mn	
		丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯
凤凰山水库	最大值	0.18	0.29	9.74	8.53	18.6	17.4	132	159
	最小值	0.11	0.11	3.84	3.61	4.6	9.3	56.5	66.3
	平均值	0.15	0.22	6.15	5.52	11.54	13.59	84.84	109.59
	变异系数	0.14	0.22	0.32	0.27	0.41	0.2	0.33	0.32
大镜山水库	最大值	0.17	0.17	17.3	17	57.8	52.7	325	383
	最小值	0.08	0.08	5.98	5.57	6.5	13.2	181	287
	平均值	0.14	0.14	10.47	9.33	27.2	28.6	269.25	329.75
	变异系数	0.27	0.26	0.42	0.48	0.74	0.53	0.2	0.11
竹仙洞水库	最大值	0.19	0.21	28.1	28.9	117	105	1 520	1 950
	最小值	0.17	0.19	22.5	26	92.8	94.7	1 420	1 570
	平均值	0.18	0.2	25.7	26.97	101.93	99.27	1 483.33	1 800
	变异系数	0.04	0.03	0.09	0.05	0.11	0.04	0.03	0.09
背景值		0.08		8.9		58.9		279	
水库	项目	Ni		Cu		Zn		Pb	
		丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯
凤凰山水库	最大值	13.8	11.5	18	21.2	147	153	99.2	115
	最小值	2.6	4.7	3.4	6.7	43.1	88.6	51.2	62.4
	平均值	7.6	7.88	9.94	11.38	91.1	112.66	70.51	84.8
	变异系数	0.48	0.25	0.45	0.41	0.36	0.2	0.22	0.17
大镜山水库	最大值	37.2	32.2	43.2	39.1	164	148	91.1	107
	最小值	4.7	10	4.8	7.6	51.4	79.7	56.2	69.2
	平均值	18.2	19.3	21.18	19.3	104.15	109.68	76.38	81.93
	变异系数	0.7	0.43	0.7	0.64	0.4	0.23	0.17	0.18
竹仙洞水库	最大值	59.9	50.8	74.7	69.3	249	266	71.7	98
	最小值	47.4	44.8	61.2	64.9	212	244	69.1	79.6
	平均值	51.93	47.43	66.93	67.23	225.33	254.33	70.6	88.4
	变异系数	0.11	0.05	0.09	0.03	0.07	0.04	0.02	0.09
背景值		14.4		17		47.3		36	

1) 背景值为广东省 A 层土壤的各元素背景值的算术平均值;“丰”表示丰水期,“枯”表示枯水期;重金属含量单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数无量纲

结合表 6 可以看出, 3 座水库表层沉积物重金属在丰、枯水期含量超过广东省土壤背景值倍数为: 凤凰山水库 3 种重金属, 分别为 Hg、Zn 和 Pb, 超标 1.88 ~ 2.75 倍, 3 种重金属丰、枯水期各点位含量均超标. 大镜山水库 7 种重金属, 分别为 Hg、

As、Mn、Ni、Cu、Zn 和 Pb, 超标 1.05 ~ 2.32 倍, 其中 Hg、Zn 和 Pb 在丰、枯水期各点位含量均超标; As 仅在丰水期 D1、D2 点位, 枯水期 D1 点位超标; Mn 在丰水期 D1 和 D2 点位, 枯水期 D1 ~ D4 点位均超标; Ni 在丰水期 D1 和 D2 点位, 枯水期 D1、D2

和 D4 点位均超标; Cu 在丰、枯水期 D1 和 D2 点位均超标. 竹仙洞水库 8 种重金属均超过广东省土壤背景值, 超标 1.69~6.45 倍, 8 种重金属丰、枯水期各点位含量均超标.

由表 7 可以看出, 与广东省其它地区水库表层沉积物重金属含量平均值^[10]相比, 凤凰山水库 Cu、Zn、Pb 和 Cr 这 4 种重金属含量均低于粤东、粤西、

粤北和粤中平均值; 大镜山水库除 Pb 含量超过粤西地区以外, Cu、Zn 和 Cr 这 3 种重金属含量均低于粤东、粤西、粤北和粤中平均值; 竹仙洞水库表层沉积物重金属含量总体来看居于广东省中等水平, Cu 含量位于粤东、粤北、粤西和粤中之间, Zn 和 Pb 含量位于粤东、粤西、粤北和粤中之间, Cr 含量位于粤西、粤东、粤北和粤中之间.

表 6 3 座水库表层沉积物中重金属含量占广东省土壤背景值倍数
Table 6 Content of heavy metals in the surface sediments of the three reservoirs accounts
for multiple of the soil background values in Guangdong Province

水库	Hg		As		Cr		Mn		Ni		Cu		Zn		Pb	
	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯	丰	枯
凤凰山水库	1.88	2.75	0.69	0.62	0.20	0.23	0.30	0.39	0.53	0.55	0.58	0.67	1.93	2.38	1.96	2.36
大镜山水库	1.75	1.75	1.18	1.05	0.46	0.49	0.97	1.18	1.26	1.34	1.25	1.14	2.20	2.32	2.12	2.28
竹仙洞水库	2.25	2.50	2.89	3.03	1.73	1.69	5.32	6.45	3.61	3.29	3.94	3.95	4.76	5.38	1.96	2.46

表 7 珠海市 3 座水库表层沉积物重金属含量平均值
与广东省其它地区水库对比/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 7 Average content of heavy metals in the surface sediments
of the three reservoirs in Zhuhai compared with reservoirs
in other areas of Guangdong Province/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	Cu	Zn	Pb	Cr
凤凰山水库	10.66	101.88	77.66	12.56
大镜山水库	20.24	106.91	79.15	27.90
竹仙洞水库	67.08	239.83	79.50	100.60
粤东	76.02	162.56	78.40	29.23
粤西	48.12	125.31	59.05	130.81
粤北	89.71	321.21	154.95	40.49
粤中	57.52	303.47	82.12	65.27

2.2 沉积物中重金属空间分布特征

3 座水库沉积物中重金属含量空间分布见图 2. 凤凰山水库 As、Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 在空间分布上规律较为一致, 高浓度区域为库中至出水口 (F4~F2); Hg 和 Mn 高浓度区域均分布在水库入水口 (F8) 和水库中部 (F4~F3); 从全库水平来看, 库区中部 (F4) 和出水口 (F1) 点位重金属含量值最高, 其次是库中偏北 (F3) 和入水口 (F8) 点位, F2 和 F5~F7 点位重金属含量相对较低. 大镜山水库 As、Cr、Ni、Cu 和 Zn 在空间分布上规律较为一致, 高浓度

区域为库尾 (D1); Hg、Mn 和 Pb 高浓度区域均分布在水库库首至库中 (D3~D2); 从全库水平来看, 水库库尾 (D1) 点位重金属含量值最高, 其次是库中 (D2) 和库首 (D3) 点位, D4 点位重金属含量相对较低. 竹仙洞水库 Cr、Mn、Ni、Cu 和 Zn 在空间分布上呈现规律较为一致, 高浓度区域为水库出水口 (Z2) 处; Hg、As 和 Pb 高浓度区域均呈现于水库入水口 (Z1) 处; 从全库水平来看, 水库出水口 (Z2) 点位重金属含量值最高, 其次是水库入水口 (Z1) 点位, Z3 点位重金属含量相对较低.

2.3 沉积物重金属的相关性分析

湖泊沉积物中各重金属元素间的相关性与元素的性质、吸附特征和沉积环境有关^[23]. 凤凰山水库、大镜山水库和竹仙洞水库表层沉积物 8 种重金属各元素间相关关系见表 8.

从表 8 可以看出, 除 Hg 和 Pb 外, 各元素间存在很好的相关性, 其中 As、Cr、Mn、Ni、Cu 和 Zn 之间均呈现极显著正相关, 相关系数均在 0.9 以上, 说明这些重金属污染具有同源性. Hg 和 Pb 与其他重金属相关性较弱, 且两个元素呈负相关关系, 可能与 Hg 和 Pb 在生物 (微生物、藻类和水草等) 的作用下富集有关^[25], 有待进一步探讨.

表 8 3 座水库沉积物中重金属相关性分析¹⁾
Table 8 Correlation analysis of heavy metals in sediments of three reservoirs

	Hg	As	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
Hg	1							
As	0.106	1						
Cr	0.167	0.978 **	1					
Mn	0.129	0.940 **	0.961 **	1				
Ni	0.108	0.975 **	0.992 **	0.931 **	1			
Cu	0.202	0.979 **	0.995 **	0.946 **	0.989 **	1		
Zn	0.275	0.954 **	0.965 **	0.924 **	0.951 **	0.974 **	1	
Pb	-0.32	-0.001	-0.032	0.077	-0.022	-0.022	0.077	1

1) ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

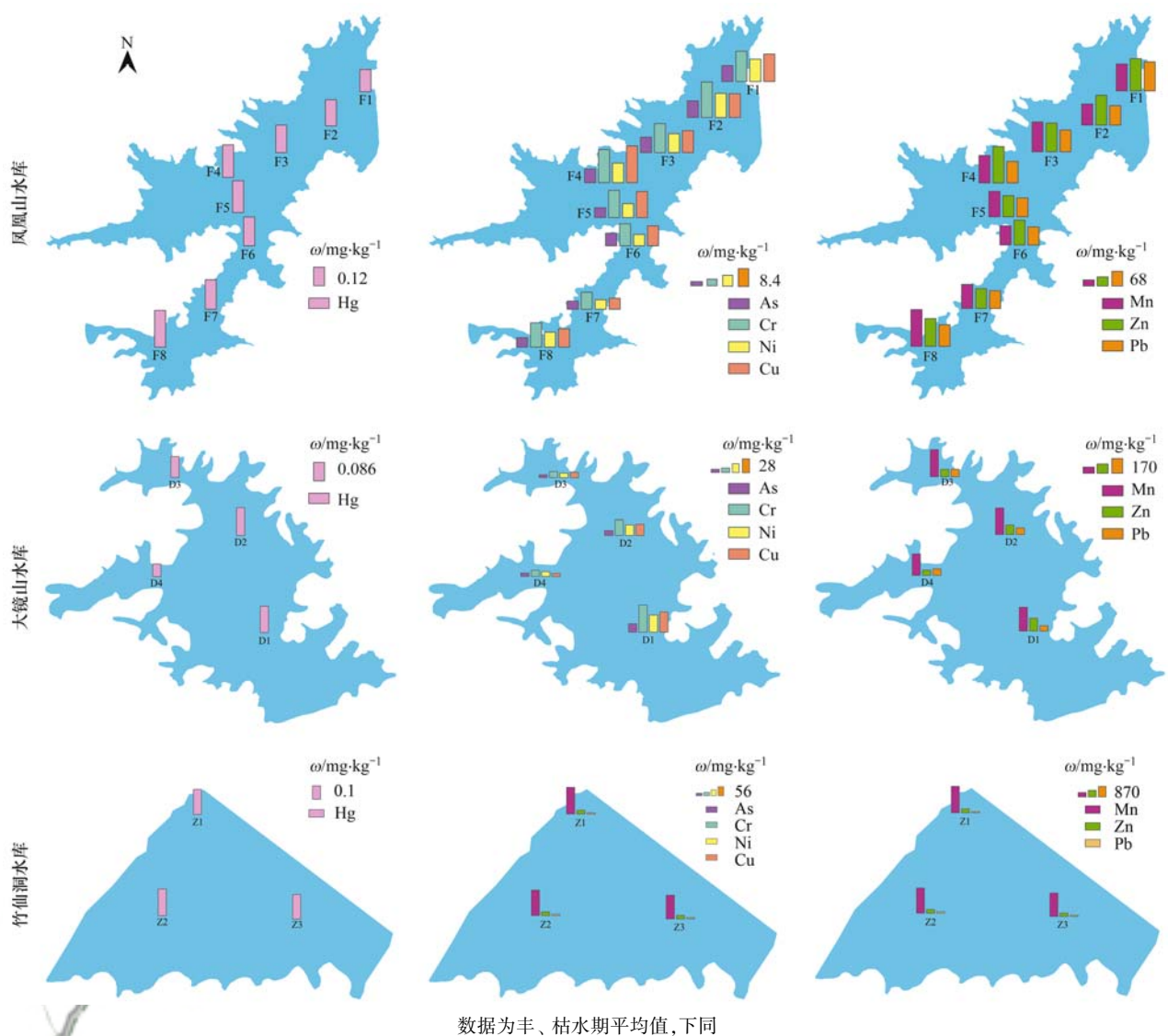


图 2 3 座水库沉积物中各重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metal content in the sediments of the three reservoirs

2.4 沉积物重金属的污染特征及生态风险评价

2.4.1 地累积指数法评价

采用目前国内外常用地累积指数法 (I_{geo}) 对重金属污染程度进行评价,3 座水库重金属地累积指数评价结果见图 3。整体来看,竹仙洞水库污染程度较重,凤凰山水库和大镜山水库污染程度相当,凤凰山水库总体污染程度略低于大镜山水库,两座水库污染程度总体低于竹仙洞水库,详述如下。

凤凰山水库各重金属 I_{geo} 排序为: $\text{Hg} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Cr}$, Hg、Zn 和 Pb 的污染程度较高, I_{geo} 平均值分别为 0.64、0.49 和 0.45,整体表现为轻度污染,其中 Zn 元素在水库库首偏北 (F7) 区域为无污染; As、Cr、Mn、Ni 和 Cu 的所有点位 $I_{\text{geo}} < 0$,整体为无污染。

大镜山水库各重金属 I_{geo} 排序为: $\text{Pb} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Cr}$, Pb 元素 I_{geo} 平均值为 0.53,全库整体均为轻度污染; Zn 元素 I_{geo} 平均

值为 0.51,整体表现为轻度污染,其中水库南端 (D1) 区域为偏中度污染,西南侧支流汇入口区域 (D4) 为无污染; Hg 元素 I_{geo} 平均值为 0.17,整体表现为轻度污染,其中西南侧支流汇入口区域 (D4) 为无污染; As、Ni 和 Cu 元素 I_{geo} 平均值分别为 -0.57、-0.48 和 -0.70,整体表现为无污染,仅水库南端 (D1) 区域为轻度污染; Cr 和 Mn 的所有点位 $I_{\text{geo}} < 0$,整体为无污染。

竹仙洞水库各重金属 I_{geo} 排序为: $\text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cr}$, Mn、Zn、Cu 和 Ni 元素的所有点位 $I_{\text{geo}} > 1$,整体污染程度偏中度; As 元素 I_{geo} 平均值为 0.98,整体为轻度污染,接近偏中度污染,其中水库入水口 (Z2) 区域为偏中度污染; Hg、Pb 和 Cr 元素的所有点位 $0 < I_{\text{geo}} < 1$,整体为轻度污染。

以上分析可以看出,竹仙洞水库表层沉积物重金属整体均受到轻度或偏中度污染,凤凰山水库和大镜山水库的 Hg、Zn 和 Pb 元素是水库表层沉积物

重金属污染的主要成分, 表现为轻度污染。

综上所述, 竹仙洞水库污染较为严重, 大镜山水库次之, 凤凰山水库污染最轻。因珠江三角洲地区是广东省经济最为发达的地区, 工业废水和生活污水相应居全省之最, 大量污水的排放使珠江三角洲地区河流普遍受到污染, 高的外源输入必然导致高的内源负荷。抽水是导致水库沉积物中重金属含量增加的关键因子^[30,31]。3 座水库区域气候具有相似性, 凤凰山水库和大镜山水库主要为自然降雨和调水, 周边无重大污染源, 因此调水是两座水库沉积物中重金属含量增加的关键因子。凤凰山水库的调水来源与大镜山水库相同, 均来自磨刀门水道, 但沉积物中重金属含量却低于大镜山水库, 除了库容大、调水频繁的原因外, 也与调水进入凤凰山水库前, 先要在大镜山水库滞留、沉积了大部分沉积物重金属有关。竹仙洞水库汇水面积较小, 不仅从磨刀门水道调水, 还从污染较重的洪湾水道调水, 增加水库中污染物来源。虽调水是水库沉积物含量增加的关键因子, 但水库东北侧紧邻的高尔夫球俱乐部和钢筋场等生活和工业活动成为竹仙洞水库表层沉积物重金属污染的又一重要来源, 导致竹仙洞水库沉积物中重金属含量均高于大镜山水库和凤凰山水库。

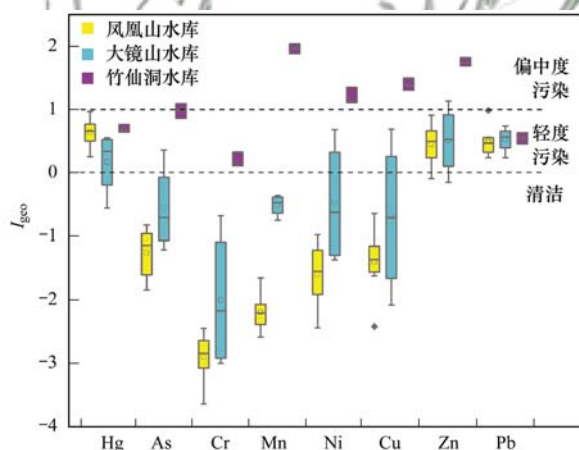


图3 3座水库重金属地累积指数评价箱式图

Fig. 3 Box diagram of the evaluation of the geoaccumulation index of heavy metals in three reservoirs

2.4.2 潜在生态风险指数评价

3 座水库表层沉积物重金属单项及综合潜在生态风险评价结果见图4。从综合潜在生态风险指数来看, 凤凰山水库 RI 值的范围为 106.81 ~ 144.79, 均值 123.01, 整体属低生态风险, 水库库首入水口处 (F8) 风险最高, 库尾出水口 (F1) 风险最低; 大镜山水库 RI 值的范围为 67.79 ~ 143.40, 均值 109.25, 整体属低生态风险, 水库库尾 (D1) 处风险最高, 西侧支流汇入区 (D4) 风险最低; 竹仙洞水库 RI 值的范围为 182.16 ~ 195.73, 均值 189.33, 整体

为中等的生态风险, 水库入水口处 (Z2) 风险最高, 水库东侧 (Z3) 风险最低。整体来看, 竹仙洞水库综合潜在生态风险高于凤凰山水库和大镜山水库, 空间分布上竹仙洞水库与大镜山水库相似, 主要与两座水库入水口和出水口均在水库大坝侧, 库中水流和水动力条件较一致有关。

从各水库重金属单项潜在生态风险指数来看, 凤凰山水库表层沉积物重金属 E_i^i 平均值顺序为: $Hg > Pb > As > Cu > Ni > Zn > Cr > Mn$, Hg 的 E_i^i 值范围为 73.08 ~ 121.03, 平均值 96.92, 整体表现为低风险, 是凤凰山水库综合潜在生态风险指数构成的最主要重金属, 对其贡献率为 78.8%; 大镜山水库表层沉积物重金属 E_i^i 平均值顺序为: $Hg > As > Pb > Ni > Cu > Zn > Mn > Cr$, Hg 的 E_i^i 值范围为 40.77 ~ 87.95, 平均值 70.38, 整体表现为低风险, 是大镜山水库综合潜在生态风险指数构成的最主要重金属, 对其贡献率为 64.4%; 竹仙洞水库表层沉积物重金属 E_i^i 平均值顺序为: $Hg > As > Cu > Ni > Pb > Mn > Zn > Cr$, Hg 和 As 的 E_i^i 值范围分别为 93.85 ~ 102.05 和 27.25 ~ 32.02, 平均值分别为 97.35 和 29.59, 整体均表现为低风险, 是竹仙洞水库综合潜在生态风险指数构成的主要重金属, 对其贡献率分别为 51% 和 16%。

结合地累积指数和综合潜在生态风险评价可以看出, Hg 元素在 3 座水库中均为轻度污染, 但其在环境中生物毒性较高, 导致综合潜在生态风险程度也较高, 因此, 有关部门在 3 座水库生态风险防治方面应引起重视。

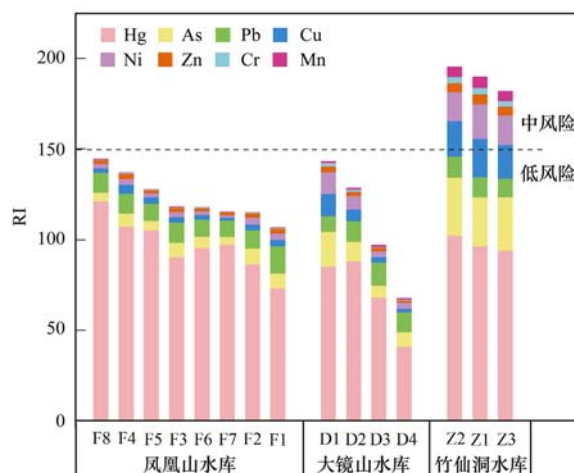


图4 3座水库表层沉积物重金属潜在生态风险指数评价箱式图

Fig. 4 Box diagram of evaluation of potential ecological risk index of heavy metals in three reservoirs

3 结论

(1) 3 座水库单项重金属含量平均值从大到小

依次均为:竹仙洞水库>大镜山水库>凤凰山水库,除凤凰山水库的 As,大镜山水库的 As 和 Cu,竹仙洞水库的 Cr 和 Ni 外,其余重金属均呈现枯水期>丰水期的含量特征。

(2)空间分布上,凤凰山水库库区中部(F4)和出水口(F1)重金属含量值最高,其次是库中偏北(F3)和入水口(F8)处;大镜山水库库尾(D1)重金属含量值最高,其次是库中(D2)和库首(D3);竹仙洞水库出水口(Z2)重金属含量值最高,其次是水库入水口(Z1)处。

(3)地累积指数表明,3座水库污染程度为:竹仙洞水库>大镜山水库>凤凰山水库。竹仙洞水库表层沉积物重金属整体均受到轻度或偏中度污染,凤凰山水库和大镜山水库的 Hg、Zn 和 Pb 元素是水库表层沉积物重金属污染的主要成分,表现为轻度污染。

(4)潜在生态风险指数评价结果显示,凤凰山水库和大镜山水库整体呈现低生态风险,竹仙洞水库为中生态风险。Hg 元素是3座水库综合潜在生态风险指数构成的最主要重金属,贡献率分别为78.8%、64.4%和51%。

参考文献:

- [1] Singh K P, Mohan D, Singh V K, *et al.* Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-A tributary of the Ganges, India[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **312**(1-4): 14-27.
- [2] Santos Bermejo J C, Beltrán R, Gómez Ariza J L. Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel River (Southwest Spain)[J]. *Environment International*, 2003, **29**(1): 69-77.
- [3] Rothwell J J, Evans M G, Allott T E H. Sediment-water interactions in an eroded and heavy metal contaminated Peatland catchment, southern Pennines, UK[J]. *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2006, **6**(5-6): 669-676.
- [4] Ting D S, Appan A. General characteristics and fractions of phosphorus in aquatic sediments of two tropical reservoirs[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(7-8): 53-59.
- [5] Ramamoorthy S, Rust B R. Heavy metal exchange processes in sediment-water systems[J]. *Environmental Geology*, 1978, **2**(3): 165-172.
- [6] Akcay H, Oguz A, Karapire C. Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz River sediments[J]. *Water Research*, 2003, **37**(4): 813-822.
- [7] 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.
- [8] 周树杰, 古健, 黄卓尔. 广州市主要河涌沉积物重金属污染状况调查[J]. *广州环境科学*, 2012, **27**(2): 4-6, 17.
- Zhou S J, Gu J, Huang Z E. Heavy metal pollution of river sediment in Guangzhou[J]. *Guangzhou Environmental Sciences*, 2012, **27**(2): 4-6, 17.
- [9] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层沉积物中重金属的生态风险研究[J]. *水生生物学报*, 2008, **32**(6): 802-810.
- Niu H Y, Wu Q H, Chen X G. Study on the ecological risk of heavy metals in the surface sediments in Guangzhou section of the Pearl River[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2008, **32**(6): 802-810.
- [10] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 广东大中型水库底泥重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. *生态学报*, 2009, **29**(11): 6059-6067.
- Ning J F, Zou X Z, Yang S H, *et al.* Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(11): 6059-6067.
- [11] 张坤锋, 昌盛, 付青, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3005-3015.
- Zhang K F, Chang S, Fu Q, *et al.* Pollution characteristics and risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in underground and surface drinking water sources in Northeast Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3005-3015.
- [12] 张坤锋, 昌盛, 涂响, 等. 新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 878-886.
- Zhang K F, Chang S, Tu X, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of DBPs in typical drinking water sources in Wuhan under the COVID-19 Pandemic[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 878-886.
- [13] 付青, 郑丙辉. 从规范化建设视角看城市饮用水水源地保护应重点解决的几个问题[J]. *环境保护*, 2016, **44**(21): 13-16.
- Fu Q, Zheng B H. Several important problems should be solved in protection of urban drinking water source from the perspective of standardization construction[J]. *Environmental Protection*, 2016, **44**(21): 13-16.
- [14] 李秋华. 珠海市两座典型供水水库生态特征比较分析[D]. 广州: 暨南大学, 2005.
- [15] 邹红菊. 珠海市三座调水水库浮游植物群落动态与藻类水华预警研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测与分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Duan B L, Zhang W P, Zheng H X, *et al.* Disposal situation of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants (WWTPs) and assessment of the ecological risk of heavy metals for its land use in Shanxi, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(7): 823.
- [18] 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 等. 东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3048-3057.
- Zhao X L, Li X, Lu H B, *et al.* Analysis of heavy metal pollution characteristics and potential ecological risks of surface sediments in Dongjiang Lake[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3048-3057.
- [19] 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 等. 九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(10): 4601-4612.
- Zhang H L, Yu R L, Wan R A, *et al.* Speciation and pollution assessment of heavy metals in mangrove surface sediments in Jiulong River estuary[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4601-4612.

- [20] 许梦雅, 张超, 单保庆, 等. 白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4532-4542.
- Xu M Y, Zhang C, San B Q, *et al.* Speciation and risk of heavy metals in surface sediments of different types of water bodies in Baiyangdian Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4532-4542.
- [21] 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 等. 青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3037-3047.
- Zhang Y R, Che F F, Fu Z H, *et al.* Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Lake Qinghai[J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3037-3047.
- [22] 王韬轶, 潘保柱, 韩谔, 等. 黄河沉积物重金属时空分布与污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2467-2475.
- Wang T Y, Pan B Z, Han X, *et al.* Spatial-temporal distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments of the Yellow River[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2467-2475.
- [23] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 703-709.
- Wang P, Lu S Y, Wang D W, *et al.* Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake[J]. China Environmental Science, 2012, **32**(4): 703-709.
- [25] 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.
- Yu H, Zhang W B, Yu J P. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Hongze Lake[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 437-444.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] 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.
- [28] 代静, 李欣, 王小燕, 等. 大明湖表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2020, **39**(1): 249-263.
- Dai J, Li X, Wang X Y, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Daming Lake[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(1): 249-263.
- [29] 徐金英, 郑利林, 徐力刚, 等. 南方丘陵区河流表层沉积物重金属污染评价[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3420-3429.
- Xu J Y, Zheng L L, Xu L G, *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments of rivers located in the hilly area of southern China [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3420-3429.
- [30] 聂祥. 广东省典型供水水库沉积物中磷形态与释放特征[D]. 广州: 暨南大学, 2009.
- [31] 周丽, 饶伟民, 史兰, 等. 竹银水库底泥氮磷含量调查与分析[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2020, **38**(4): 24-27.
- Zhou L, Rao W M, Shi L, *et al.* Investigation and analysis of nitrogen and phosphorus content in sediments of Zhuyin reservoir [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2020, **38**(4): 24-27.

CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)