

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO₂协同效益评估肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM_{2.5}碳组分空间差异性来源解析武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM_{2.5}中碳质气溶胶的变化特征及来源解析桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM_{2.5}中金属元素特征及健康风险评估杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东新区土壤重金属潜在生态风险评估杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

重庆市长寿湖水库表层水体重金属时空分布及风险评价

张瑞溪¹, 刘娅君¹, 罗泳楠^{1,2}, 李杰芹¹, 李彩霞¹, 李佳佳¹, 张成^{1*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 黄河水利委员会河南水文水资源局, 郑州 450008)

摘要: 为了解重庆市长寿湖水体污染状况和环境风险, 采集并分析了不同季节的表层水体重金属(Cr、Cu、Zn、As、Cd和Pb)浓度, 探究长寿湖重金属时空变化和分布特征, 进一步评估其污染水平和健康风险. 结果表明, 6种重金属均低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) I类标准, 但近年来呈现增加趋势, Cu、As和Pb增加趋势显著($P < 0.05$). 不同重金属时空分布存在差异, 在时间上, 水体Cr和Cd在夏季较高, As和Zn在春季较高, Pb和Cu分别在秋季和冬季较高; 在空间上, Cr、As、Cu、Zn和Pb总体在水库南部出水口、西北部龙溪河入水口及水库中部较高, Cd在水库北部的滞水区较高. 长寿湖水体重金属整体为低污染水平, 水体Cr和Cu存在轻度污染, 其他重金属为清洁水平. 饮水是水体重金属致癌及非致癌风险的主要暴露途径, 水体Cr和As的健康风险值较高, 分别为 $6.2 \times 10^{-10} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ 和 $5.1 \times 10^{-8} \sim 3.9 \times 10^{-5}$, 其对儿童和成人的总健康风险贡献率分别达到87.18%和87.20%(Cr)及12.73%和12.71%(As), 对儿童和成人均存在一定的致癌风险. 因此, 需要重点关注长寿湖水体Cr和Cu的环境风险, 以及Cr和As的健康风险, 以期为长寿湖水体污染防治及环境质量的改善提供科学依据, 合理开发利用水资源.

关键词: 长寿湖; 重金属; 时空分布; 风险评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1428-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304147

Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing

ZHANG Rui-xi¹, LIU Ya-jun¹, LUO Yong-nan^{1,2}, LI Jie-qin¹, LI Cai-xia¹, LI Jia-jia¹, ZHANG Cheng^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Yellow River Conservancy Commission Hydrology and Water Resources Bureau of Henan, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: To understand the water pollution status and environmental risks of Changshou Lake, the concentrations of heavy metals (Cr, Cu, Zn, As, Cd, and Pb) in the water were collected and analyzed during different seasons. The study investigated temporal and spatial variations, distribution characteristics, pollution levels, and health risks associated with heavy metals in Changshou Lake. The results showed that all six heavy metals were below than the Class I standard of the Surface Water Environmental Quality Standard (GB 3838-2002), but recent years have witnessed an increasing trend, with Cu, As, and Pb showing a significant increase ($P < 0.05$). The temporal and spatial distributions of these heavy metals were different. Temporally, Cr and Cd concentrations in surface water were higher in summer, As and Zn were higher in spring, and Pb and Cu were higher in autumn and winter. Spatially, the concentrations of Cr, As, Cu, Zn, and Pb showed higher concentrations in the southern outlet of the reservoir, the northwestern Longxi River inlet, and the central part of the reservoir, whereas Cd was higher in the northern stagnant area. The overall levels of heavy metals in the water body of Changshou Lake were low, with Cr and Cu slightly polluted, while other heavy metals were identified as having an insignificant pollution level. Drinking water was the primary exposure pathway to carcinogenic and non-carcinogenic heavy metals in surface water bodies. The health risk values of Cr and As in water bodies were high, ranging from 6.2×10^{-10} to 3.0×10^{-4} and 5.1×10^{-8} to 3.9×10^{-5} , respectively. The corresponding contribution rates for children and adults to the total health risk were high, with Cr accounting for 87.18% and 87.20%, respectively, while As accounted for 12.73% and 12.71%, respectively. Therefore, it is crucial to prioritize environmental risks associated with Cr and Cu, as well as the health risks associated with Cr and As in Changshou Lake. These findings provide a scientific foundation for water pollution control and environmental quality improvement in Changshou Lake, and rational development and utilization of water resources.

Key words: Changshou Lake; heavy metals; spatial and temporal distribution; risk assessment

近年来, 水体重金属污染问题频繁发生, 水环境质量特别是饮用水源水环境安全受到国内外学者的广泛关注^[1-3]. 重金属是一种持久性污染物, 具有生物累积性、环境持久性和毒性等特点, 一些重金属(如Cd、Cr、As和Pb等)在非常低的浓度下也可以产生毒性作用^[4,5]. 随着我国城镇化、工业化和农业化的快速发展, 生产和生活中排放的重金属最终会进入水体环境, 同时, 当水动力条件发生变化时, 水体沉积物和底泥中的重金属极可能受到扰动并释放到上覆水体^[6], 此外, 通过雨水冲刷和地表径流等方式

也会将河流、湖泊和水库周围土壤中的重金属带入水体^[7,8]. 饮水途径是水体重金属进入人体的重要方式, 其中Cd、As、Pb、Cr、Cu和Hg等毒性较大的重金属受到研究人员的广泛关注^[9]. 有研究表明, 通过饮水途径摄入过量的重金属会对皮肤造成损伤, 对呼吸系

收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107413); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017B035)

作者简介: 张瑞溪(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体污染控制, E-mail: zhzhangruixi@126.com

* 通信作者, E-mail: zhzheng@126.com

统也会有一定影响^[10,11];铅主要对成人和儿童的神经系统造成影响,并且会对婴幼儿造成不可逆转的智力损伤^[12];饮用镉污染的水会造成慢性肾衰竭^[13].因此,开展饮用水水源中重金属污染状况和健康风险调查和研究,对于水环境的污染防治以及保护人体健康具有重要意义.

长寿湖是三峡库区流域内一个重要的大型水库,也是重庆市长寿区重要的饮用水源地,同时还兼具旅游、养殖和防洪等功能^[14],因此,长寿湖水生态环境对周围居民的饮水健康及生活安全具有重要影响.20世纪90年代,由于长寿湖开展网箱和网栏养鱼,向湖中投放大量饲料,加上生活污水、工业废水排入湖中,使水库水体污染严重.2002年,重庆市人民政府发布《关于加强龙溪河流域污染综合整治的通知》(渝府[2002]78号)后,长寿湖陆续取消了湖内的网箱和网栏养殖,恢复大水面散放养殖模式,改养鲢鱼和鳙鱼等清水鱼,并且禁止向湖中投放饲料,加强长寿湖渔业管理,使水库水质有所改善,但由于长期网箱和网栏养鱼造成的水体污染现象依旧存在^[14,15].刘淑容等^[16]和杨志敏等^[17]研究发现,长寿湖氮磷污染呈现增加趋势,且水体达到了富营养化水平.罗真富等^[18]2012年对长寿湖周边土壤进行调查,结果显示土壤Cd、Hg和As的富集较为严重,且Hg和Cd的潜在生态风险分别达到了较强和中等生态危害.高进长等^[19]2013年调查了长寿湖沉积物的污染情况,结果表明沉积物中各重金属的富集程度不同,其中Cd、Co和Zn的富集程度较高.余凤琴等^[20]2016年对长寿湖底泥和水体调查发现,底泥中的Cu、Pb、Cd、Hg和As均存在不同程度的污染,其中,Cd和Pb污染较为严重.同时,随着重庆经济快速发展,近年来大量工业企业和工业园区迁入长寿区,长寿区的工业化和城镇化速率加快,并且长寿湖旅游业也迅速发展,各种人为活动对长寿湖水体环境质量造成一定影响.长寿湖作为饮用水源地和旅游区,人体接触较多,因此对其水质要求更高,而过去针对长寿湖的研究主要集中在沉积物和土壤等方面,对水体重金属的研究较少,且缺乏对长寿湖水体重金属时间变化及污染评价方面的研究.因此,本文以长寿湖为研究对象,分析表层水体重金属的变化趋势和时空分布特征,评价其环境风险和健康风险,以期对长寿湖水污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长寿湖位于重庆市长寿区境内,是长寿区重要的饮用水源地,地理位置为 $107^{\circ}15' \sim 107^{\circ}25'E$,

$29^{\circ}50' \sim 30^{\circ}04'N$.长寿湖水域面积 65.5 km^2 ,总库容积 10 亿 m^3 ,水力停留时间 0.38 a ,其最大水深 40 m ,平均水深 15 m ,是西南地区最大的人工湖泊,兼具饮用、旅游、灌溉和发电等功能.其所处流域属于中亚热带湿润季风气候区,常年平均气温为 17.7°C ,降水量 1200 mm 左右.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 水样采集

根据长寿湖水域特征和空间分布,结合课题组前期研究工作^[14],按照长寿湖出水口(C1)、西北区(C2)、滞水区(C3)、东北区(C4)和湖心区(C5),设置5个定位采样点(图1),采用GPS定位仪确定采样点.其中,C1($29^{\circ}54'50"N, 107^{\circ}15'03"E$)位于长寿湖南部水库大坝前,水库出水口区域;C2($29^{\circ}58'25"N, 107^{\circ}15'40"E$)位于长寿湖的西北区,是水库主要补水河流龙溪河的入水口;C3($29^{\circ}57'39"N, 107^{\circ}18'09"E$)位于长寿湖北部的回水区,属滞水区,其水力交换时间较长,富营养化现象明显;C4($29^{\circ}56'34"N, 107^{\circ}19'59"E$)位于长寿湖东北区,是另一主要支流的来水口;C5($29^{\circ}56'04"N, 107^{\circ}17'05"E$)位于长寿湖中部,属于湖心区.样品采集时间为2020年8月至2021年7月,基于研究目标有限原则,以及不同季节降水量和温度等会对地表水重金属产生影响^[21],分季节(春、夏、秋和冬)采集长寿湖水样.采用有机玻璃采样器采集 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 水样,每个采样点采集 $3 \sim 5$ 个水面多点混合,注入 500 mL 硼硅玻璃瓶,每个水样采集3个平行样品,每个样品采集后加 $1\% \text{ HCl}$,低温保存运回实验室后,测定6种重金属(Cr、Cu、Zn、As、Cd和Pb)浓度.

1.2.2 水样分析与质量控制

水样未经过滤直接测定重金属总量,取 25 mL 水样于锥形瓶,加入 5 mL 优级纯硝酸,于电热板上加热,保持温度为 $(95 \pm 5)^{\circ}\text{C}$,蒸发至溶液为 5 mL 左右停止,继续加入 5 mL 浓硝酸直到没有棕色的烟生成,冷却后缓慢加入 3 mL 过氧化氢,继续加热至不再有大量气泡冒出,蒸发至约 5 mL 停止,冷却后用去离子水淋洗锥形瓶内壁和小漏斗至少3次,转移后定容 25 mL ,采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS 7900,安捷伦)测定.分析过程中的质量控制采用平行实验、空白实验、样品加标回收和标准物质回收等方法,方法空白均低于检出限.实验所用药品均为分析纯或优级纯,所有容器均经过 10% 的硝酸浸泡 24 h ,去离子水洗净后使用.所有样品做3次重复,相对误差低于 20% .

1.3 水体污染评价

采用内梅罗综合污染指数法评价长寿湖水体重

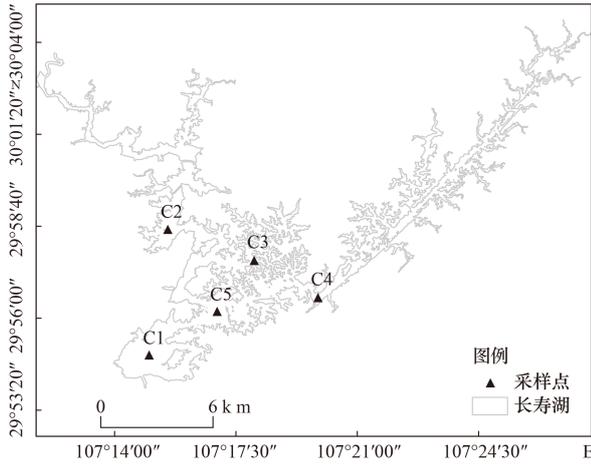


图1 长寿湖采样点分布示意
Fig. 1 Distribution of the sampling sites of Changshou Lake

金属的污染现状^[22]. 计算公式如下.

单因子污染指数:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

内梅罗综合污染指数:

$$P_N = \sqrt{\frac{\max(P_i)^2 + \text{ave}(P_i)^2}{2}} \quad (2)$$

式中, i 为不同的水体重金属; C_i 为重金属 i 的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; S_i 为相应的水质标准, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 采用《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的 I 类水质标准作为参比; $\max(P_i)$ 为所有重金属单因子污染指数的最大值; $\text{ave}(P_i)$ 为重金属单因子污染指数的平均值.

重金属的污染评价标准如表 1 所示^[23].

表 1 水体重金属污染评价标准

Table 1 Evaluation criteria for heavy metal pollution

P_i	污染水平	P_N	污染评价
$P_i \leq 1$	清洁	$P_N \leq 0.7$	无污染
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$0.7 < P_N \leq 1$	低污染
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$1 < P_N \leq 2$	中度污染
$P_i > 3$	重度污染	$P_N > 2$	强污染

1.4 健康风险评价

1.4.1 饮水途径健康风险评价模型

饮水途径的健康风险评价采用美国环境保护署 (US EPA) 推荐的模型^[24], 化学致癌物评价模型 (R^c) 公式为:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c = \sum_{i=1}^k \frac{1 - \exp(-D_{ig} \times SF_i)}{L} \quad (3)$$

$$D_{ig} = \frac{A \times C_i}{W} \quad (4)$$

式中, D_{ig} 为第 i 种化学致癌物饮水途径的单位体重日均暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; SF_i 为第 i 种化学致癌物评价模型参数, 见表 2^[25]; R_{ig}^c 为某点位第 i 种化学致癌物健康风险指数 (a^{-1}); C_i 为第 i 种化学致癌物浓度

($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); L 为研究区居民平均寿命值, 取 78.56 a ^[26]; A 为日均日饮水量 (L), 成人为 2.2 L, 儿童为 1.0 L^[27,28]; W 为当地居民人均体重 (kg), 成人为 56 kg, 儿童为 22 kg^[27,28].

非化学致癌物评价模型 (R^n) 公式为:

$$R^n = \sum_{j=1}^m R_{jg}^n = \sum_{j=1}^m \frac{D_{jg} \times 10^{-6}}{\text{RfD}_j \times L} \quad (5)$$

$$D_{jg} = \frac{A \times C_j}{W} \quad (6)$$

式中, D_{jg} 为第 j 种非化学致癌物饮水途径的单位体重日均暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; RfD_j 为第 j 种非化学致癌物模型参数, 见表 2^[25]; R_{jg}^n 为某点位第 j 种非化学致癌物健康风险指数 (a^{-1}); C_j 为第 j 种非化学致癌物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

表 2 重金属毒理学特性参数¹⁾/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

Table 2 Toxicological characteristic parameters of the heavy metals/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$

元素	致癌强度系数 (SF)	毒性参考剂量 (RfD)
As	15	—
Cd	6.1	—
Cr	41	—
Cu	—	0.005
Pb	—	0.001 4
Zn	—	0.3

1) “—”表示没有相关数据

1.4.2 皮肤接触途径健康风险评价模型

皮肤接触途径采用 Streng 等^[29]提出的模型. 化学致癌物评价模型 (R^p) 公式为:

$$R^p = \sum_{i=1}^m R_{ig}^p = \sum_{i=1}^m \frac{1 - \exp(-\text{CDI}_i \times \text{SF}_i)}{L} \quad (7)$$

式中, R_{ig}^p 为化学致癌物 i 经皮肤接触途径所致健康危害的个人年均风险 (a^{-1}); CDI_i 为每日单位体重对污染物 i 的摄入量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$].

非化学致癌物评价模型 (R^f) 公式为:

$$R^f = \sum_{j=1}^m R_{jg}^f = \sum_{j=1}^m \frac{\text{CDI}_j \times 10^{-6}}{\text{RfD}_j \times L} \quad (8)$$

$$\text{CDI}_i = \frac{I_i \times A_{\text{sd}} \times \text{FE} \times \text{EF} \times \text{ED}}{W \times \text{AT} \times f} \quad (9)$$

$$I_i = 2 \times 10^{-3} \times k \times C_i \times \sqrt{\frac{6 \times \tau \times \text{TE}}{\pi}} \quad (10)$$

式中, R_{jg}^f 为非致癌物质 j 经皮肤接触所致健康危害的个人年均风险 (a^{-1}); C_i 为水体中化学物质的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 其他参数的数值见表 3^[30].

1.4.3 水环境健康风险评价总体模型

假定水体中各化学物质对人体健康的毒害作用是相加关系, 而不是协同或拮抗作用, 则水环境总体

健康风险可表示为：

$$R_{\text{总}} = R^c + R^m + R^p + R^f \quad (11)$$

1.5 数据处理

空间分布图和采样点布设图采用 ArcGIS 10.8 软件进行绘制,热图等采用 Origin 2023 软件绘制,数据管理和均值、标准差等统计分析采用 Microsoft Excel 2019,单因素方差分析等采用 SPSS 24.0 软件进行分析。

表3 重金属暴露参数

Table 3 Exposure parameters of the heavy metals

参数	成人	儿童
人体表面积(A_{sd})/ cm^2	16 000	6 660
洗澡频率(FE)/ $\text{次}\cdot\text{d}^{-1}$	0.3	0.3
肠道吸附比率(f)	1	1
皮肤吸附参数(k)/ $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$	0.001	0.001
延滞时间(τ)/h	1	1
洗澡时间(TE)/h	0.56	0.56
暴露频率(EF)/ $\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	350(非致癌物)	350(致癌物)
暴露延时(ED)/a	35(非致癌物)	70(致癌物)
平均暴露时间(AT)/a	35(非致癌物)	70(致癌物)

表4 长寿湖水体重金属及与其他水域对比¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Heavy metals in Changshou Lake and its comparison with other waters/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

水域	年份	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	文献
长寿湖	2021	6.42	6.34	18.05	2.54	0.04	1.72	本研究
长寿湖	2016	—	2.22	17.06	1.08	0.03	0.37	[20]
嘉陵江(重庆段)	2018	—	1.38	5.56	1.91	0.01	0.34	[33]
陡水水库	2018	—	1.87	6.63	4.11	0.07	0.67	[34]
大河口水库	2017	5	98	—	6	—	19	[35]
Damsa 水库	2016	6.28	270	2.46	8.24	0.02	0.09	[36]
Chan Thnal 水库	2021	—	13.56	141.16	—	1.25	44.26	[37]
Rawal 湖	2011	53.77	13.07	55.30	—	13.87	191.00	[38]
地表水环境质量 I 类标准		10	10	50	50	1	10	[31]
生活饮用水卫生标准		50	1 000	1 000	10	5	10	[32]

1)“—”表示文章中没有相关数据,本研究对应数据为4个季节和5个点位的平均值

2.1.1 长寿湖水体重金属季节分布

长寿湖不同重金属的季节分布存在差异(图2)。Cr 浓度表现为春、夏季显著高于秋、冬季($P < 0.01$), As 在春季显著高于其他季节($P < 0.01$), Cd 夏季浓度高于其他季节($P < 0.05$), Cu 为冬季显著高于其他季节($P < 0.01$), Zn 在春季高于其他季节, Pb 则在秋季较高,但差异性不显著($P > 0.05$)。总体来说,大部分重金属(Cr、As、Cd 和 Zn)在春、夏季节的水库丰水期浓度较高,这与马迎群等^[39]的研究结果相似。这主要是由于长寿湖周围土壤重金属富集较为严重,潜在生态风险达到中等危害程度^[18],水库流域农业活动密集,土壤蓄水能力差,耕地受降雨径流冲刷严重^[14],春、夏季水库水量波动大,导致吸附有重金属

2 结果与讨论

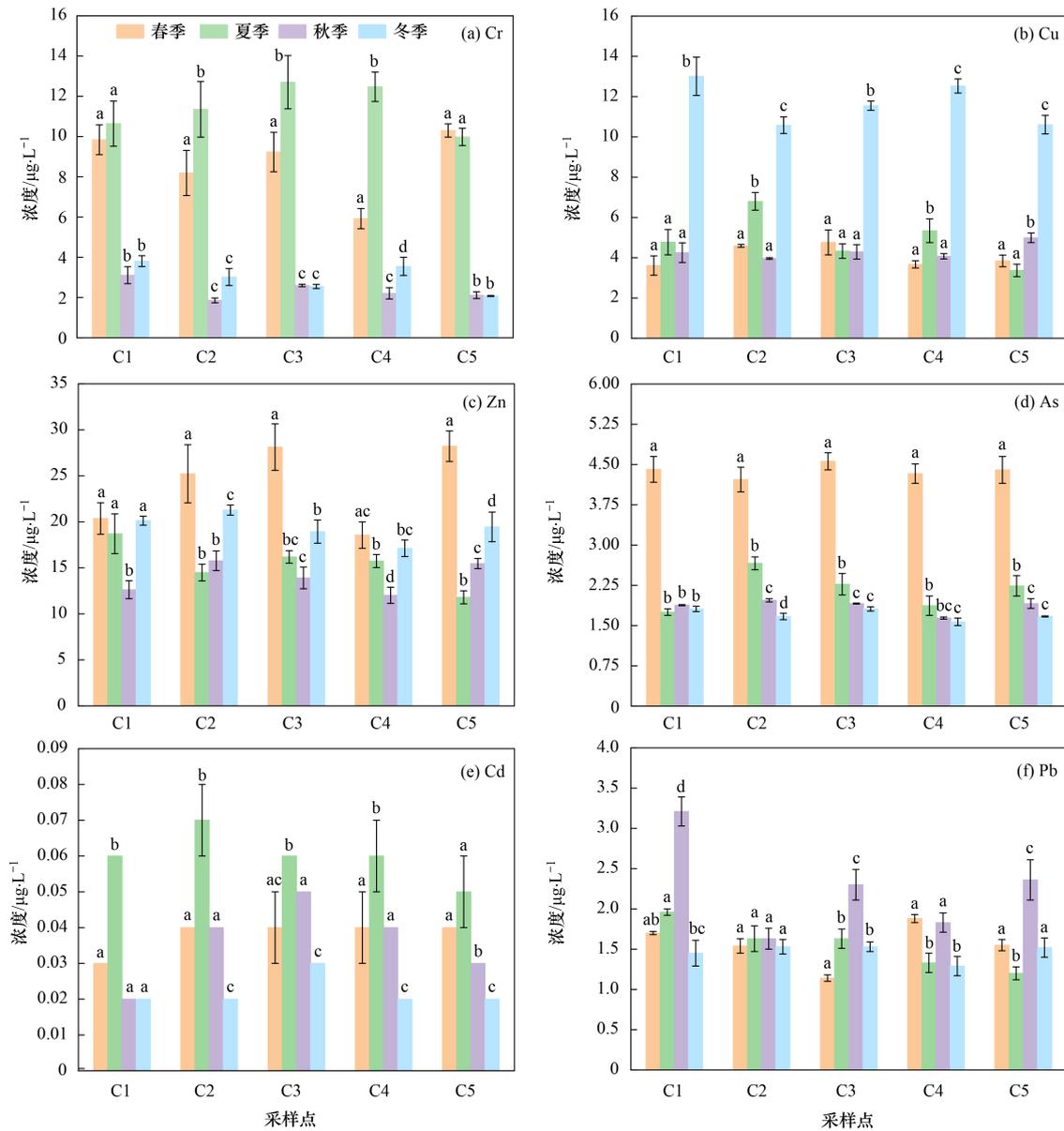
2.1 长寿湖水体中各重金属浓度

长寿湖水体重金属浓度见表4,水体 $\rho(\text{Cr})$ 、 $\rho(\text{Cu})$ 、 $\rho(\text{Zn})$ 、 $\rho(\text{As})$ 、 $\rho(\text{Cd})$ 和 $\rho(\text{Pb})$ 平均值分别为6.42、6.34、18.05、2.54、0.04和1.72 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。长寿湖6种重金属均未超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)类水体标准限值^[31],也未超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)限值^[32]。但与2016年^[20]相比,长寿湖水体重金属浓度均有升高趋势,其中Cu、As和Pb增加趋势明显($P < 0.05$),可能是近几年长寿湖流域内工业化、城镇化及旅游业发展较快,各种人为因素造成长寿湖水体重金属有所升高。除Cr外,长寿湖其他5种重金属浓度均高于三峡库区流域的嘉陵江^[33]。与其他水库和湖泊相比,长寿湖水体Cu、Zn和Pb浓度明显高于陡水水库^[34],但Cu、As和Pb浓度低于大河口水库^[35]。Cr、Zn、Cd和Pb浓度均高于土耳其Damsa水库^[36],但Cu、Zn、Cd和Pb均显著低于Chan Thnal水库^[37]和Rawal湖^[38]。总体而言,长寿湖水体重金属浓度处于中等水平。

及其化合物的土壤颗粒和泥沙随径流进入水库,而秋、冬季水库水流变缓,水体扰动降低,水体中颗粒态重金属发生沉降,从而使重金属总量降低^[40]。长寿湖水西部主要来水河流龙溪河周围分布化工厂、果园和村庄等,因此长寿湖水在春夏季丰水期由于周围河流的汇入造成大量外源性重金属输入,最后导致其重金属浓度也有所上升。此外,彭玉龙等^[41]研究发现,重庆降水中重金属沉降量存在春、夏季高于秋、冬季的差异,这可能也是导致长寿湖重金属浓度季节差异的原因之一。

2.1.2 长寿湖水体重金属空间分布

长寿湖不同季节重金属空间分布表明(图3),秋冬季Cr、冬季Cu和As、夏季Zn以及夏秋季节Pb浓



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图2 长寿湖水体重金属浓度季节性变化

Fig. 2 Seasonal comparison of heavy metal concentration in Changshou Lake

度的高值均出现在 C1 采样点 ($P < 0.05$), 夏季 Cu 和 As、秋季 Zn 浓度的高值则出现在 C2 采样点 ($P < 0.05$), 春季 Cr 和 Cu 浓度高值出现在 C5 采样点 ($P < 0.05$), 秋、冬季的 Cd 浓度最高值在 C3 采样点 ($P < 0.05$), 其他季节及采样点则没有显著的空间变化 ($P > 0.05$). 总体来看, 除 Cd 以外, 其他 5 种重金属均在 C1 点位有最高值; 在夏季的丰水期主要在 C2 点位出现重金属高值; 在春秋季节的平水期主要在 C5 点位出现重金属高值; 只有 Cd 在秋冬季节的 C3 点位达到最高值.

长寿湖水体重金属空间分布整体表现为水库中西部较高, 可能与调查区域的环境特点有关. 长寿湖 C1 区域重金属浓度较高主要是由于该区域位于水库

大坝附近, 长寿湖的两条主要支流最终在此处交汇, 污染物汇聚于此不易稀释扩散, 导致该区域重金属浓度较高; 同时, 该区域南部为风景区入口区域, 旅游业较为发达, 人类活动密集, 生活污水的排放是其重金属输入的污染源之一; 此外, 20 世纪 90 年代该区域曾进行网箱养鱼, 向水域投放了大量鸡粪和化肥等, 沉降到长寿湖底部, 导致该区域沉积物中重金属含量较高, 达到中等污染风险水平^[42], 当水体内部环境条件发生改变时, 沉积物中的重金属也会释放到上覆水体^[4]. C2 区域重金属浓度出现高值主要是该区域处于龙溪河入水口, 龙溪河流域污水排放较多, 且部分配套的污水处理设施不完善, 因此污水带来的外源性重金属输入是该区域的主要污染源. C5 区域北部有大

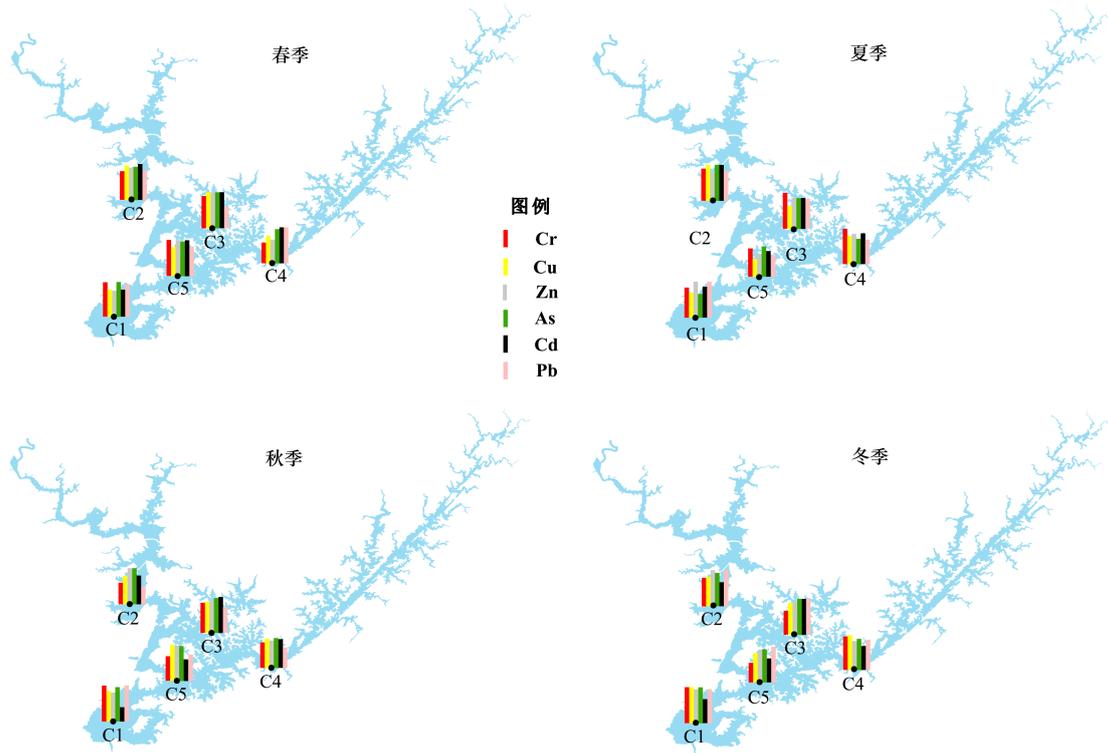


图3 长寿湖水体重金属浓度的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metal concentration in Changshou Lake

片果园,西部发展旅游业,可能受到农业及人为活动的影响;同时,该区域周围土壤重金属含量较高,达到中等生态危害程度^[18],且周边土壤蓄水能力差,在降雨冲刷和地表径流等的影响下会进入水体,造成C5区域重金属浓度较高. Cd在C3区域出现高值可能是因为附近土壤Cd含量 $[(0.73\pm 0.27)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 较高^[18],超过了相关标准^[43]的2.43倍,其通过地表径流等作用进入该区域,使得水体Cd浓度较高.

2.2 长寿湖水体重金属污染评价

长寿湖水体重金属单因子污染评价结果总体表现为: $\text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cd}$ (图4). 其中, Cr在夏季

的所有点位、Cu在冬季的所有点位单因子污染指数均大于1,属于轻度污染水平. 其余重金属各个季节的污染指数均较低,处于清洁水平. 从空间分布来看,各重金属的污染指数在不同点位没有显著差异 ($P > 0.05$). 从时间分布来看,主要是夏季和冬季的污染指数较高,其次是春季,秋季最低. 由图5可以看出,长寿湖水质在春季和夏季主要受Cr影响,其次为Cu和Zn;秋季和冬季主要受Cu影响,其次为Zn和Cr.

内梅罗综合污染评价结果见表5. 长寿水库在夏季和冬季的所有点位 P_N 值均大于0.7,达到低污染

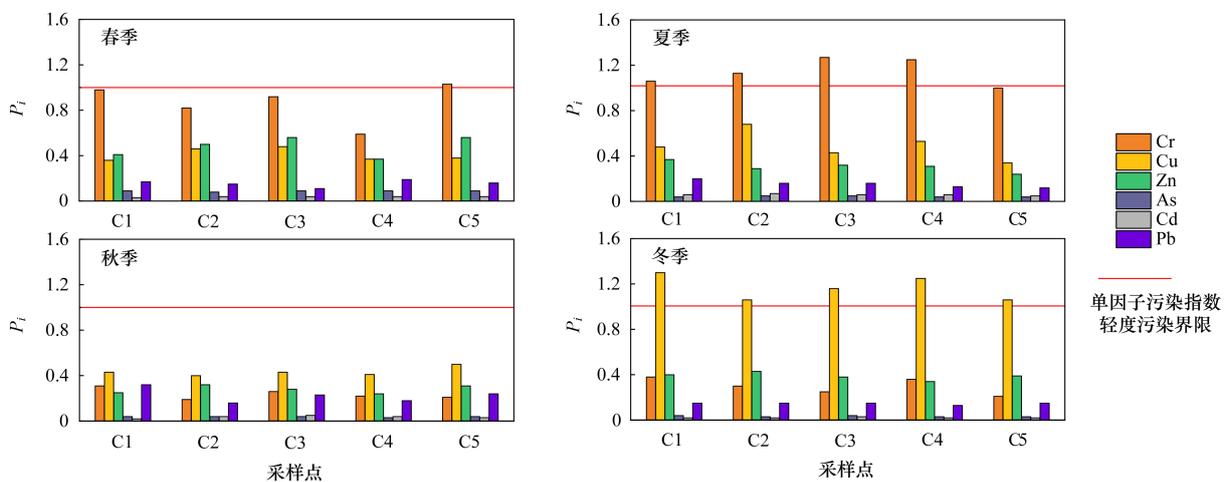


图4 长寿湖水体重金属单因子污染指数

Fig. 4 Single factor pollution index of heavy metals in Changshou Lake

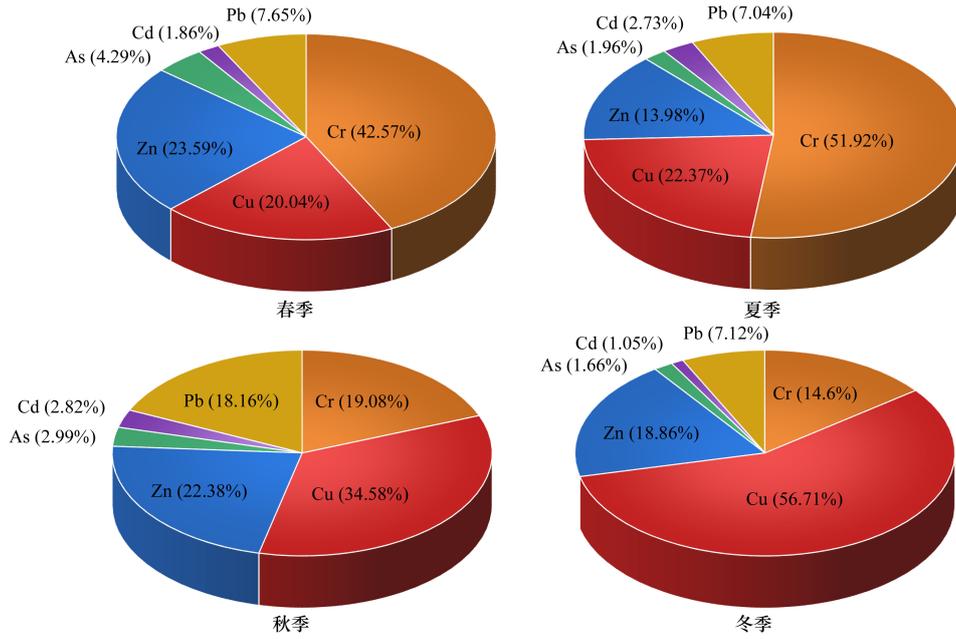


图 5 重金属单因子污染指数占比

Fig. 5 Proportion of heavy metal single factor pollution index

水平,且夏季的C2点位 P_N 值大于1,达到中等污染水平;春季的C1、C3和C5点位也达到低污染水平,其他季节和点位均处于无污染水平.整体来看,水库在夏季和冬季的污染水平较高,其评价结果与重金属

浓度季节分布特征有一定差异,这可能与污染评价计算方式有关.内梅罗综合污染指数法突出了最大因子对水质的影响,而未考虑各污染因子的权重^[4].在春季和冬季,对水库水质影响最大的因子分别为

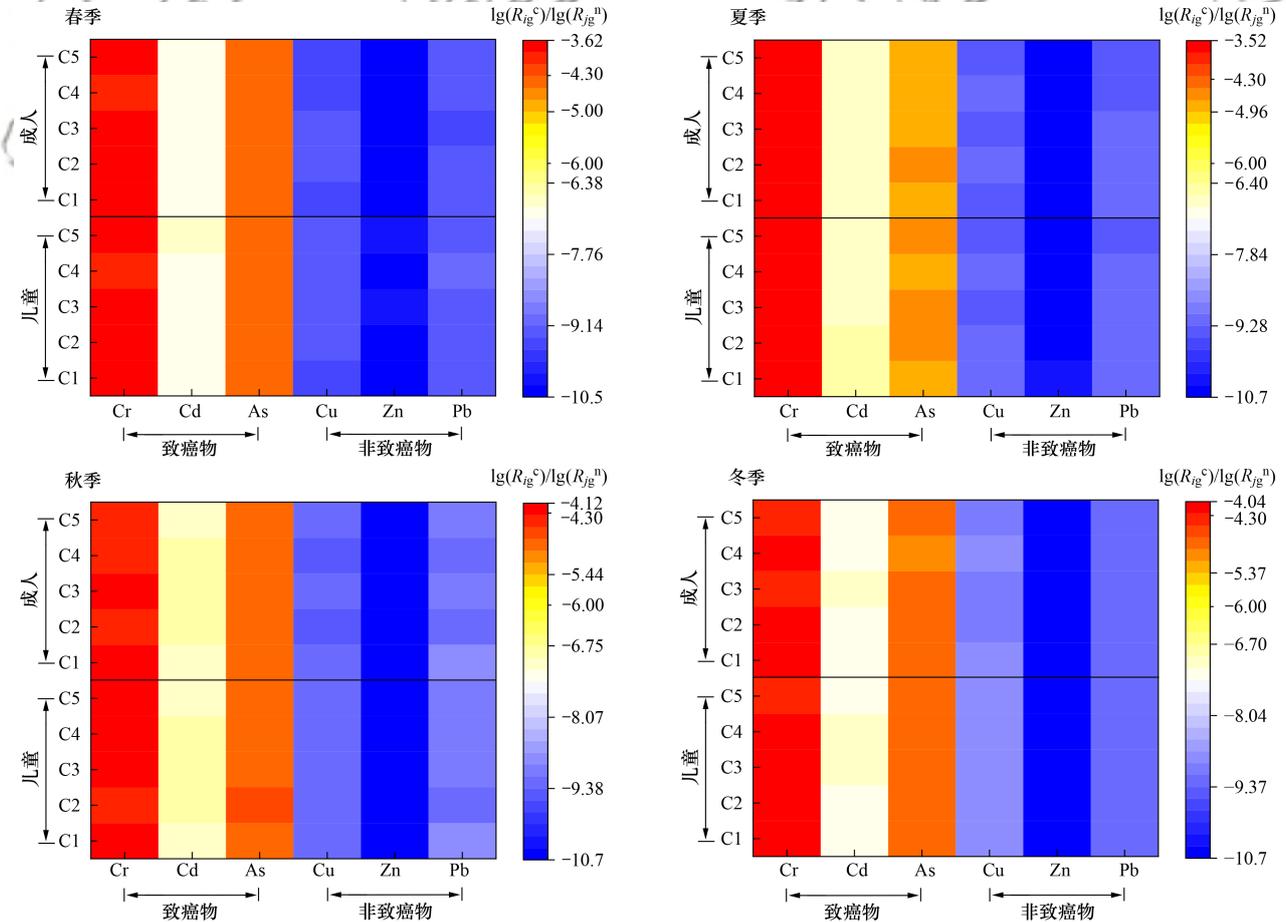


图 6 饮水途径健康风险

Fig. 6 Health risks of drinking water routes

表 5 长寿湖水体重金属内梅罗综合污染指数(P_N)

Table 5 Nemerow comprehensive pollution index of heavy metals in Changshou Lake(P_N)

季节	采样点				
	C1	C2	C3	C4	C5
春季	0.73	0.62	0.70	0.46	0.77
夏季	0.79	1.02	0.94	0.92	0.73
秋季	0.34	0.31	0.34	0.32	0.39
冬季	0.95	0.78	0.84	0.91	0.78

Cr和Cu,而冬季Cu的单因子污染指数高于春季Cr的单因子污染指数($P < 0.05$),因此水库冬季受Cu影响而综合污染水平高于春季.夏季长寿湖水由于降雨增多、外源性污染物输入等原因造成重金属浓度较高,其中Cr浓度高,所以导致夏季水体重金属污染水平较高;冬季则是由于Cu浓度较高,而冬季枯水期水库水量减少,重金属不易稀释扩散,从而使重金属综合污染水平升高.因此,长寿湖水应加强Cr和Cu污染来源排查和治理,特别是从季节变化方面入手进行重金属污染的防控工作.

2.3 健康风险评价

长寿湖水体重金属经饮水和皮肤接触途径引起的成人和儿童健康风险结果如图6和图7所示.致癌

重金属通过饮水途径和皮肤接触途径引起的致癌风险值分别在 $5.8 \times 10^{-8} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ 和 $3.2 \times 10^{-10} \sim 1.2 \times 10^{-6}$ 之间.以国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的最大可接受水平 $5.0 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$ [对数值(lg)为-4.3]为基准,除了两类人群在秋季C2点位、冬季C5点位及成人在秋季的C4、C5点位,其他季节和点位饮水途径Cr对成人和儿童引起的致癌风险值($5.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-4}$)均高于最大可接受水平.同时,Cr在秋季的C4、C5点位对成人引起的致癌风险值和Cr在秋季的C2点位、冬季的C5点位,以及As在4个季节的全部点位对两类人群引起的致癌风险值($1.2 \times 10^{-5} \sim 4.9 \times 10^{-5}$)虽然低于ICRP推荐的最大可接受水平,但高于瑞典环境保护局、荷兰建设和环境保护局以及英国皇家协会推荐的最大可接受风险水平 $1.0 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ [对数值(lg)为-6.0].经皮肤接触途径引起的致癌风险比饮水途径低2~4个数量级,且产生的致癌风险值均未超过ICRP推荐的最大可接受水平,这与余葱葱等^[30]的研究结果相似,表明饮水是水体重金属对人体健康产生影响的主要途径.

长寿湖水体重金属通过饮水和皮肤接触途径引起的非致癌风险值在 $8.5 \times 10^{-14} \sim 1.5 \times 10^{-9}$ 之间,远

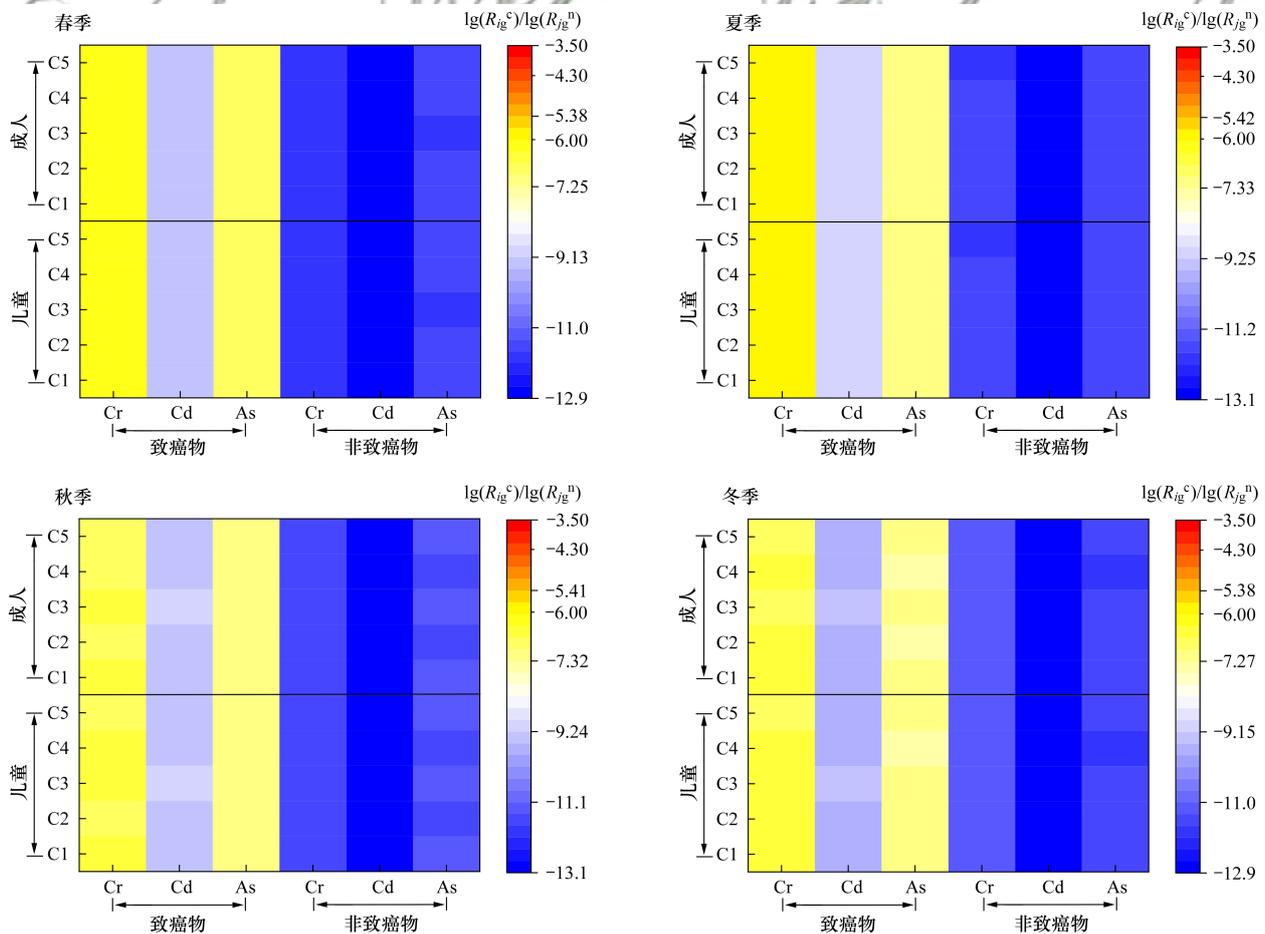


图 7 皮肤接触途径健康风险

Fig. 7 Health risks from skin exposure

低于ICRP推荐的最大可接受水平,不会对成人和儿童健康产生非致癌风险,且非致癌风险值比致癌风险值低4~5个数量级,这与王若师等^[45]的研究结果一致.由此可见,长寿湖水体重金属健康风险主要来自于饮水途径的致癌风险.儿童的健康风险水平高于成人,儿童的致癌风险和非致癌风险皆是成人的1.14倍,这与其他研究者的结果相似^[46,47],可能是由于儿童的免疫力较差,对重金属污染更为敏感,因此在儿童饮水安全方面的管控要更加严格.

从图8来看,Cr对儿童和成人的总体健康风险

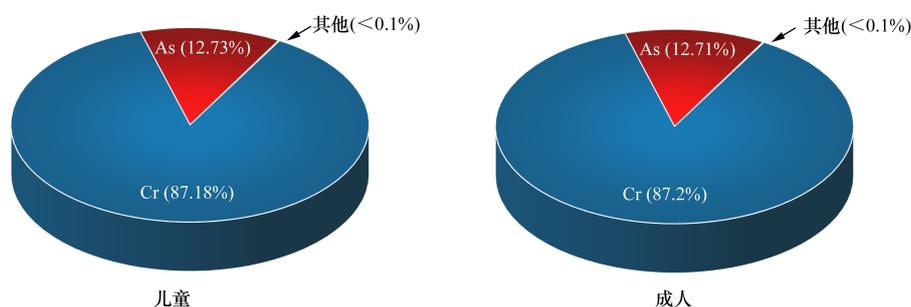


图8 儿童和成人健康风险贡献率

Fig. 8 Child and adult health risk contribution rates

3 结论

(1)长寿湖表层水体6种重金属虽然达到国家地表水质量Ⅰ类标准和生活饮用水卫生标准,但近年来呈现增加趋势,水库整体为低污染水平,Cr和Cu存在轻度污染.

(2)长寿湖重金属存在时空分布差异,Cr和Cd在夏季浓度较高,As和Zn在春季较高,而Cu和Pb分别在冬季和秋季较高.Cr、As、Cu、Zn和Pb总体在水库南部出水口、西北部龙溪河入水口和水库中部较高,Cd在水库北部的滞水区较高.

(3)健康风险评价结果表明,长寿湖水体重金属产生健康危害的元素主要为Cr和As,其对人体总健康风险的平均贡献率分别为87.19%和12.72%;饮水途径是水体重金属致癌及非致癌风险的主要暴露途径,儿童和成人皆为重点关注人群.

参考文献:

[1] 陈月芳,孙善伟,段小丽,等.兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估[J].环境科学,2020,41(1):262-272.
Chen Y F, Sun S W, Duan X L, et al. Refined assessment of exposure and health risks of heavy metals in water for the children in Xigu District, Lanzhou[J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 262-272.

[2] Cipriani-Avila I, Molinero J, Jara-Negrete E, et al. Heavy metal assessment in drinking waters of Ecuador: Quito, Ibarra and Guayaquil[J]. Journal of Water & Health, 2020, 18(6): 1050-1064.

贡献率最高,分别为87.18%和87.20%;其次为As,分别为12.73%和12.71%,其他重金属对人体健康风险的贡献率则较低(<0.1%).表明Cr和As是长寿湖水体主要的致癌重金属,这与张清华等^[48]的研究结果一致.从饮水安全角度考虑,应将Cr和As作为长寿湖水环境健康风险管理的重点关注重金属.但是,对于长寿湖的水体重金属风险评价只考虑了6种重金属,也未考虑重金属之间的拮抗和协同等相互作用,因此,评价结果存在一定不确定性,还需要进一步系统研究长寿湖水体重金属的环境风险和健康风险.

[3] Ghaderpoori M, Kamarehje B, Jafari A, et al. Heavy metals analysis and quality assessment in drinking water - Khorramabad city, Iran[J]. Data in Brief, 2018, 16: 685-692.

[4] 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, Shan 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.

[5] Rahman Z, Singh V P. The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(7), doi: 10.1007/s10661-019-7528-7.

[6] 张亚宁,朱维晃,董颖,等.氧化还原和微生物作用对沉积物中重金属迁移转化的影响[J].环境工程,2023,41(6):101-108.
Zhang Y N, Zhu W H, Dong Y, et al. Effect of redox condition and microbial action on heavy metals transformation in reservoir sediments[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(6): 101-108.

[7] Carolin C F, Kumar P S, Saravanan A, et al. Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(3): 2782-2799.

[8] Kumar V, Parihar R D, Sharma A, et al. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses[J]. Chemosphere, 2019, 236, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124364.

[9] Chowdhury S, Mazumder M A J, Al-Attas O, et al. Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in

- developing countries[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **569-570**: 476-488.
- [10] Ahsan H, Chen Y, Parvez F, *et al.* Arsenic exposure from drinking water and risk of premalignant skin lesions in Bangladesh: Baseline results from the Health Effects of Arsenic Longitudinal Study[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2006, **163**(12): 1138-1148.
- [11] Arain M B, Kazi T G, Baig J A, *et al.* Respiratory effects in people exposed to arsenic via the drinking water and tobacco smoking in southern part of Pakistan [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(21): 5524-5530.
- [12] Naranjo V I, Hendricks M, Jones K S. Lead toxicity in children: An unremitting public health problem [J]. *Pediatric Neurology*, 2020, **113**: 51-55.
- [13] Bawaskar H S, Bawaskar P H, Bawaskar P H. Chronic renal failure associated with heavy metal contamination of drinking water: A clinical report from a small village in Maharashtra [J]. *Clinical Toxicology*, 2010, **48**(7), doi: 10.3109/15563650.2010.497763.
- [14] 白薇扬, 张成, 唐振亚, 等. 长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3649-3661.
Bai W Y, Zhang C, Tang Z Y, *et al.* Seasonal variations in vertical profile of Hg species and the influential factors in Changshou Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3649-3661.
- [15] 白薇扬, 张成, 赵铮, 等. 三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2863-2869.
Bai W Y, Zhang C, Zhao Z, *et al.* Spatial distribution characteristics of different species mercury in water body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2863-2869.
- [16] 刘淑容. 重庆长寿湖氮磷污染状况分析[J]. *资源节约与环保*, 2013, (11): 83-84.
- [17] 杨志敏, 熊海灵, 张晟, 等. 重庆长寿湖富营养化评价及氮磷平衡研究[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(2): 73-75, 109.
Yang Z M, Xiong H L, Zhang S, *et al.* Assessment of eutrophication and balance of N and P in Changshou Reservoir [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, **19**(2): 73-75, 109.
- [18] 罗真富, 谭德军, 谢洪斌, 等. 重庆长寿湖周边地区土壤重金属污染评价[J]. *湖北农业科学*, 2012, **51**(1): 30-34.
Luo Z F, Tan D J, Xie H B, *et al.* Evaluation of soil heavy metal pollution in Changshou Lake surrounding area of Chongqing [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, **51**(1): 30-34.
- [19] 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 Changshou Reservoir sediments [J]. *Yangtze River*, 2020, **51**(4): 20-25.
- [20] 余凤琴, 陈元坤, 但言, 等. 长寿湖水体及底泥中重金属的空间分布及污染评价[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2017, **42**(11): 119-123.
Yu F Q, Chen Y K, Dan Y, *et al.* On spatial distribution and evaluation of heavy metals in water and sediments at Changshou Lake [J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, **42**(11): 119-123.
- [21] 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 等. 太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价[J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3184-3197.
Luo P C, Tu Y R, Sun T T, *et al.* Seasonal variation characteristics and pollution assessment of heavy metals in water and sediment of Taipu River [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3184-3197.
- [22] Ye J H, Yu T, Xu Z T, *et al.* Distribution and probabilistic integrated ecological risk assessment of heavy metals in the surface water of Poyang Lake, China [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2021, **49**(11): 29-34.
- [23] 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.
- [24] US EPA. Guidelines for exposure assessment [R]. Washington: US EPA, 1992. 1-126.
- [25] Ma K, Ren H, Zhou T H, *et al.* Water quality analysis and health risk assessment of the Lanzhou section of the Yellow River [J]. *Water Supply*, 2022, **22**(2): 2024-2033.
- [26] 重庆常住人口平均预期寿命达 78.56 岁, 高学历人口大幅增长 [EB/OL]. https://www.cq.gov.cn/ywdt/zwhd/bmdt/202205/t20220517_10723735.html, 2022-05-17.
- [27] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册-成人卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
Ministry of Environmental Protection. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population-adults [M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [28] 段小丽. 中国人群暴露参数手册概要-儿童卷[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
Duan X L. Highlights of the Chinese exposure factors handbook-Children [M]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [29] Strenge D L, Chamberlain P J. Multimedia environmental pollutant assessment system (MEPAS): exposure pathway and human health impact assessment models [R]. Richland: Pacific Northwest National Lab., 1995.
- [30] 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 等. 电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 993-1001.
Yu C C, Zhao W T, Gao X F, *et al.* Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water around electroplating factories [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 993-1001.
- [31] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
GB 3838-2002, Environmental quality standards for surface water[S].
- [32] GB 5749-2022, 生活饮用水卫生标准[S].
GB 5749-2022, Standards for drinking water quality[S].
- [33] 李燕, 但言, 王恕桥, 等. 嘉陵江重庆段水体富营养化及底泥重金属污染评价[J]. *西南农业学报*, 2020, **33**(9): 2069-2074.
Li Y, Dan Y, Wang S Q, *et al.* Evaluation on eutrophication of water and heavy metal pollution of sediment in Chongqing section of Jialing River [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **33**(9): 2069-2074.
- [34] 黄楚珊, 张倩, 唐夫凯, 等. 江西陡水水库水环境重金属时空分布特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2022, **41**(9): 2919-2930.
Huang C S, Zhang Q, Tang F K, *et al.* Profiles of heavy metals pollution and potential influence to aquatic environment of Doushui

- Reservoir from Jiangxi Province [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(9): 2919-2930.
- [35] 卢俊平, 崔志谋, 刘廷玺, 等. 内蒙古大河口水库水体重金属污染程度及健康风险评价[J]. *安全与环境学报*, 2021, **21**(2): 858-866.
- Lu J P, Cui Z M, Liu T X, *et al.* On the heavy metal contamination and the health risk assessment of Dahekou Reservoir in the Inner Mongolia Autonomous Region [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, **21**(2): 858-866.
- [36] Findik Ö, Aras S. Application of the metal pollution indices on surface waters for assessment of environmental risk: a case study for Damsa reservoir (Cappadocia, Turkiye) [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, **20**(2): 1689-1698.
- [37] Chheang L, Thongkon N, Sriwiryarat T, *et al.* Heavy metal contamination and human health implications in the Chan Thnal Reservoir, Cambodia[J]. *Sustainability*, 2021, **13**(24), doi: 10.3390/su132413538.
- [38] Saleem M, Iqbal J, Shah M H. Seasonal variations, risk assessment and multivariate analysis of trace metals in the freshwater reservoirs of Pakistan [J]. *Chemosphere*, 2019, **216**: 715-724.
- [39] 马迎群, 时瑶, 秦延文, 等. 浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 108-116.
- Ma Y Q, Shi Y, Qin Y W, *et al.* Temporal-spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the upper reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 108-116.
- [40] 王图锦, 胡学斌, 吉芳英, 等. 三峡库区淹没区土壤重金属形态分布及其对水质影响[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(2): 158-164.
- Wang T J, Hu X B, Ji F Y, *et al.* Chemical fraction composition characteristics of heavy metals and effects on water quality in submerged soil of Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(2): 158-164.
- [41] 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 等. 重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2490-2496.
- Peng Y L, Wang Y M, Qin C Q, *et al.* Concentrations and deposition fluxes of heavy metals in precipitation in core urban areas, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2490-2496.
- [42] 白薇扬, 全学军, 谭怀琴, 等. 重庆长寿湖沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地球与环境*, 2011, **39**(3): 382-387.
- Bai W Y, Quan X J, Tan H Q, *et al.* Pollution of heavy metals in the sediments from Changshou Lake in Chongqing and its potential ecological risk assessment [J]. *Earth and Environment*, 2011, **39**(3): 382-387.
- [43] 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].
- GB 15618-2018, Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land (Trial)[S].
- [44] Zeng Y G, Zeng Y, Chen H, *et al.* Base on the applicability analysis of five water quality assessment methods such as Nemerow pollution index method to surface water pollution characteristics [J]. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2022, **23**(4): 1385-1396.
- [45] 王若师, 许秋瑾, 张娴, 等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- Wang R S, Xu Q J, Zhang X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in typical township water sources in Dongjiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [46] 杨阳, 许策, 程高峰, 等. 保定市生活饮用水中重金属污染物健康风险初步评价[J]. *环境化学*, 2014, **33**(2): 292-297.
- Yang Y, Xu C, Cheng G F, *et al.* Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Baoding City [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(2): 292-297.
- [47] 周中枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 等. 崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2675-2685.
- Zhou J M, Jiang Z C, Xu G L, *et al.* Water quality analysis and health risk assessment for groundwater at Xiangshui, Chongzuo [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2675-2685.
- [48] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- Zhang Q H, Wei Y Z, Cao J H, *et al.* Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River Basin, and related health risk assessments [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1598-1607.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)