

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.13.010

南方某市供排水循环中重金属分布及风险评价

肖彬彬¹, 郭文路¹, 王小凤², 兰文波²

(1. 衡阳市水务投资集团有限公司, 湖南 衡阳 421000; 2. 湘南学院 公共卫生学院,
湖南 郴州 423043)

摘要: 为了进一步了解南方某市供排水循环中重金属元素的分布及相关风险,以2020—2022年供排水系统水质和污泥监测数据作为评价指标,分别采用单因子污染指数评价法、综合水质指数(WQI)法、物种敏感性分布(SSD)风险评价法、水环境健康风险评价模型和污泥潜在生态风险评价法对原水(地表水)、饮用水、污水和污泥进行综合评价。结果表明,原水(地表水)中除As、Hg外的重金属浓度极低,As浓度较低且具有明显的季节性特征,Hg浓度较低但2022年明显增加,WQI年均值为0.33~2.68,重金属污染整体处于无污染—轻度污染状态,As和Hg的风险熵分别不超过0.29和0.74,处于中等生态风险水平;水环境健康风险评价结果表明,饮用水总体健康风险达到 10^{-5} ,为中度风险级别,As是主要致癌因子;污水厂进水重金属浓度不高但变化明显,污水处理厂出水水质符合排放标准,但总汞的高值接近排水限值($1\text{ }\mu\text{g/L}$);供排水污泥的综合生态风险均低于150,属于低潜在生态风险,但Cd的潜在生态风险系数为64,远高于其他重金属,是供排水污泥中首要重金属污染物。通过多种方法定性定量的有机结合得出,研究区域内水环境主要风险来源为As、Hg,污泥主要风险来源为Cd。

关键词: 供排水循环; 重金属; 砷; 汞; 风险评价

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)13-0069-07

Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Water Supply and Drainage Cycle of a Southern City

Xiao Binbin¹, Guo Wenlu¹, Wang Xiaofeng², Lan Wenbo²

(1. Hengyang Water Investment Group Co. Ltd., Hengyang 421000, China; 2. School of Public Health, Xiangnan University, Chenzhou 423043, China)

Abstract: To further understand the distribution and associated risks of heavy metals in the water supply and drainage cycle of a city in southern China, monitoring data on water quality and sludge from the water supply and drainage system between 2020 and 2022 were used as evaluation indicators. A comprehensive assessment was conducted on raw water (surface water), drinking water, wastewater, and sludge using the single factor pollution index, water quality index (WQI), species sensitivity distribution (SSD) risk assessment method, water environmental health risk assessment model, and sludge potential ecological risk assessment method. The results showed that, except for arsenic (As) and mercury (Hg), the concentrations of other heavy metals in raw water (surface water) were extremely low. As concentration was low but exhibited significant seasonal variation, while Hg concentration remained low but increased

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目(23B0778,21B0754)

通信作者: 兰文波 E-mail: lanwb9011@163.com

notably in 2022. The annual average WQI values ranged from 0.33 to 2.68, indicating that the overall heavy metal pollution level ranged from non-pollution to mild pollution. The risk quotients for As and Hg didn't exceed 0.29 and 0.74, indicating a moderate ecological risk level. The health risk assessment of the water environment showed that the overall health risk of drinking water reached 10^{-5} , classified as a moderate risk level, with As being the main carcinogenic factor. Although the concentration of heavy metals in the influent of the wastewater treatment plant varied and was not high, the effluent quality met the discharge standards. However, the high total mercury values approached the discharge limit ($1 \mu\text{g/L}$). The comprehensive ecological risk index for sludge from water supply and drainage operations was below 150, indicating a low potential ecological risk. Nevertheless, the potential ecological risk coefficient for cadmium (Cd) was 64, which was significantly higher than that of other heavy metals, making Cd the primary pollutant in the sludge from water supply and drainage systems. Through a qualitative and quantitative combination of multiple methods, it was concluded that the main risk sources in the water environment of the study area were As and Hg, while the main risk source in the sludge was Cd.

Keywords: water supply and drainage cycle; heavy metal; As; Hg; risk assessment

随着社会经济的不断发展和居民生活水平的提高,饮用水重金属污染和城市水环境生态风险问题日益受到重视^[1-3]。湘江是湖南省主要的饮用水源地,又是沿江城市较大纳污水体,其沿线金属开采冶炼企业和沿江化工园区长期排放的含重金属废水对水体和沉积物造成了严重污染^[4-5]。目前,针对湘江流域重金属污染研究主要集中于湘江水体和表层沉积物的生态风险评价及来源解析,对于区域内供排水循环中重金属的分布、去除和风险评价研究不足^[6-8]。

本文以湘江中部南方某市供排水循环系统为研究对象,分析了该区域内城市供排水系统中具有潜在危害的As、Hg等重金属浓度及时空分布特征,探究了研究区域内水源地-水厂-管网-污水厂-污泥全流程重金属污染状况,评估了水环境和污泥中重金属污染程度、健康风险和潜在生态风险,旨在探析研究区域内重金属来源和迁移规律并为未来湘江水资源保护与有效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于中部某省,人口约为130万,日均供水量约为 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$,日均污水处理量约为 $33 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。A水厂取水口位于E河和F江的汇流处;B为A水厂的管网末梢点;C污水处理厂排水口位于E河,D污水处理厂排水口位于F江,排放的污染物对A水厂取水存在一定影响。近年来,研究区域在下游

建设了水利航运枢纽G,导致水源地水流缓慢,水体污染物自净能力变差。研究区域概况如图1所示。

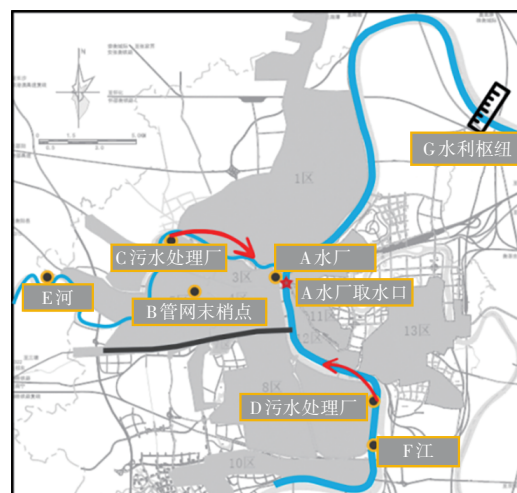


图1 研究区域概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 样品采集与分析方法

样品采样时间与频次:各水样采集时间为2020年1月—2022年12月,采样频次为1次/月;A水厂污泥采样时间为2022年12月,C、D污水处理厂污泥采样时间分别为2022年3月和2月。

采样点位布设与采集:原水(地表水)在A水厂的取水泵房内采样;A水厂出厂水在水厂内水质控制点采样;B管网末梢水在用户水龙头处采样;C、D污水处理厂进水水样在粗格栅前采样,出水在排放口采样;水厂和污水处理厂污泥依据《工业固体废

物采样制样技术规范》(HJ/T 20—1998)在污泥贮存间取样;污泥重金属浸出测定依据《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)。

样品检测方法与评价标准:供水检测方法为《生活饮用水标准检验方法》(GB/T 5750—2006);污水检测方法为《城镇污水水质标准检验方法》(CJ/T 51—2018)和《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002);污泥检测方法采用《城镇污水处理 污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)。原水评价依据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中地表水Ⅱ类水质标准;饮用水评价依据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022);污水厂出水评价依据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级A标准;污泥评价依据《城镇污水处理 污泥处置 单独焚烧用泥质》(GB/T 24602—2009)。

1.3 风险评价方法

原水重金属污染情况采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中地表水Ⅱ类的重金属浓度限值作为评价标准,使用单因子污染指数评价法和综合水质指数(WQI)法对水源地重金属的污染水平进行评价^[9-10];原水中重金属的生态风险采用物种敏感性分布(SSD)风险评价方法^[11-12],通过生态风险熵进行评价;饮用水中重金属健康风险评价采用美国环境保护署(EPA)推荐的水环境健康风险评价模型^[13-16],其中研究区域所在地人均寿命为78岁,成人和3~6岁儿童平均体质量分别为63和22.9 kg;供排水污泥的生态风险采用潜在生态风险评价法^[17-20]进行评价。

1.4 数据分析与制图

运用Origin8对数据进行绘图,未检出或检出率过低的重金属元素不再作图分析;运用SPSS20.0对数据进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 原水(地表水)重金属污染分析及风险评价

2.1.1 原水(地表水)重金属浓度分析

在采集到的36个原水(地表水)水样中,Mn、Cu、Zn、Cr(VI)、Pb、Cd均为未检出。As、Se和Hg有检出,其中Se浓度($\leq 0.7 \mu\text{g/L}$)远低于地表水限值($10 \mu\text{g/L}$),因此不再纳入讨论。As、Hg浓度分布情况如图2所示。可知,2020—2022年,原水As浓度

遵循春夏低、秋冬高的季节性变化趋势,最大浓度出现在2020年9月,达到 $14.5 \mu\text{g/L}$ 。每年6—8月As浓度升高的原因为汛期沿岸污染源污水溢流及可能存在的违规排放;每年10—12月浓度升高的原因包括湘江水量减少、沿岸工业污染源排放及底泥释放。原水Hg浓度出现了明显变化,2020—2021年中仅3个样品超出地表水限值;从2022年1月开始,原水中Hg浓度急剧升高,除2022年3月外,其余11个月样品均超标,超标倍数为0.12~15.28倍,最大浓度出现在2022年1月,达到 $0.814 \mu\text{g/L}$ 。其中2022年原水Hg浓度的变化趋势与As一致,可以推断出Hg污染加重的原因可能是汛期沿岸污染源污水溢流及可能存在的违规排放,相关情况值得持续关注。

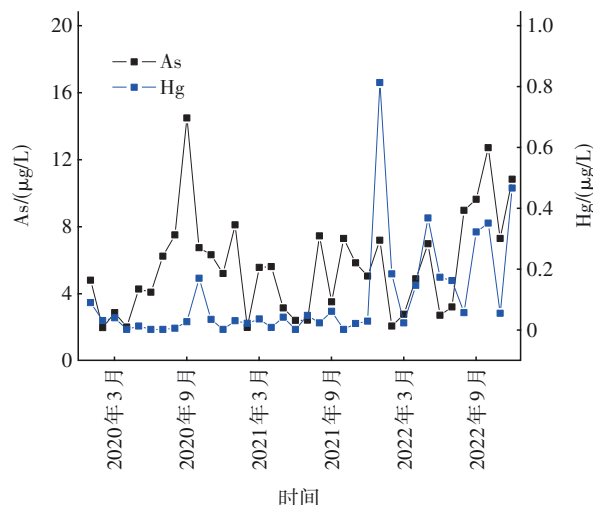


图2 2020—2022年原水(地表水)As、Hg浓度分布

Fig.2 Distribution of As and Hg concentrations in raw water (surface water) from 2020 to 2022

2.1.2 原水(地表水)环境质量评价

原水单因子污染评价显示,2020—2022年原水As未出现超标情况;原水Hg在多个月份呈现中、重度污染。2020年原水WQI为0.04~1.86,平均值为0.41;2021年原水WQI为0.05~0.66,平均值为0.33,个别月份WQI>1,但整体来看原水(地表水)仍处于无污染状态。受Hg多次超标影响,2022年原水WQI为0.27~8.21,平均值为2.68,原水重金属整体处于中度污染状态,污染情况明显加重。

2.1.3 原水(地表水)生态风险评价

2020—2022年原水As的风险熵 ≤ 0.29 ,Hg的风险熵 ≤ 0.74 ,均处于中等生态风险水平。受Hg多次

超标的影响,2022年Hg的生态风险急剧增大,风险熵高值(0.74)已经接近强烈风险水平,需要重点关注。

2.2 饮用水重金属污染分析及风险评价

2.2.1 饮用水重金属分布特征

A水厂净水工艺为原水-取水泵房-预氧化/反应池-平流沉淀池-V型滤池-中间提升泵站-臭氧/生物活性炭滤池-清水池-加压泵房。2020—2022年供水系统中A水厂原水、A水厂出水、B末梢水的As和Hg浓度情况如图3所示。

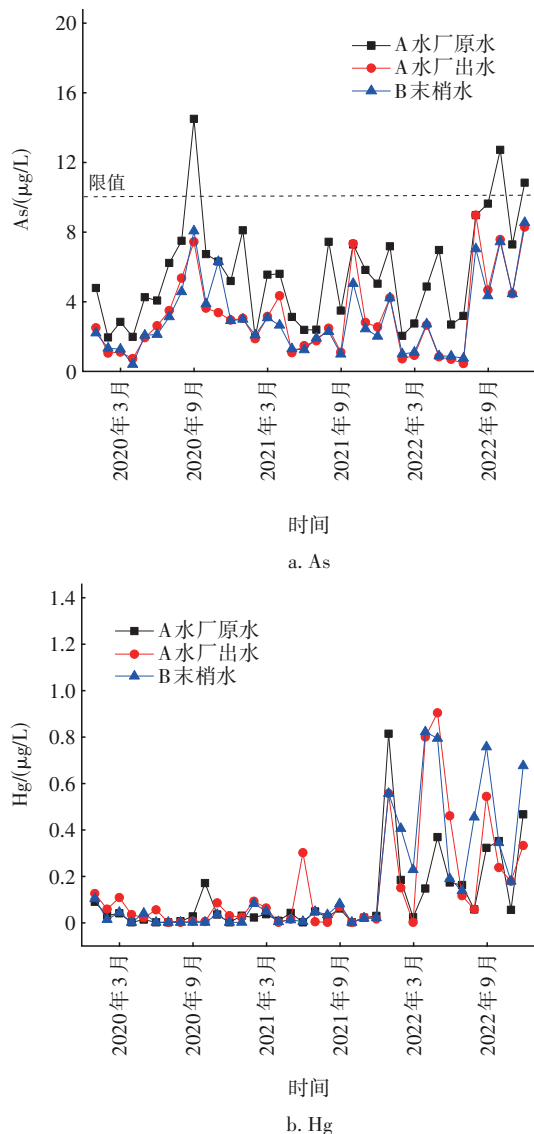


图3 2020—2022年供水系统As和Hg浓度分布

Fig.3 Distribution of As and Hg concentrations in water supply system from 2020 to 2022

由图3可知,A水厂出水和B末梢水中As浓度与A水厂原水存在明显的相关性,其中A水厂出水

和B末梢水中As浓度相关系数为0.956($p < 0.01$),输配水过程中重金属水质安全得到保障。实际生产中,A水厂使用的铝盐混凝剂对As的去除效果相对较差,部分月份A水厂出水和B末梢水中As浓度达到 $9 \mu\text{g/L}$ 左右,接近《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)中饮用水限值($10 \mu\text{g/L}$),存在超标风险。2020—2021年原水中Hg浓度极低,A水厂出水和B末梢水中Hg浓度大多分布在检出限($0.005 \mu\text{g/L}$)附近,2022年原水中Hg浓度大幅度升高。A水厂出水和B末梢水中Hg浓度急剧升高,且高于原水中Hg浓度,原因是为有效利用水资源,含有较高浓度Hg的滤池反冲洗水经过预浓缩处理后上清液被回用。

2.2.2 饮用水重金属健康风险评价

研究结果显示,研究区域内致癌物重金属As对人体健康危害的风险程度(10^{-5})已处于中度风险级别,远超过非化学致癌物Hg(10^{-10})的风险;儿童的重金属健康风险明显高于成人,儿童作为更敏感的风险受体,受到重金属的危害更大。因此,有必要在常规水质监测和评价中引入As的健康风险评价,有利于全面掌握饮用水水源地环境质量和饮用水水质安全情况。

2.3 排水系统重金属污染分析

2.3.1 排水系统重金属分布特征

C、D污水厂处理工艺均为进水-粗格栅-细格栅-旋流沉砂池-氧化沟-二沉池-高效沉淀池-滤池-消毒池-外排。对污水厂开展包括六价铬、总铬、总砷、总汞、总硒、总锰、总铜、总锌、总铅、总镉等项目的分析,水样中六价铬、总锰、总铜、总锌、总铅、总镉的进出水浓度均低于检出限,因此不再讨论。

2020—2022年排水系统中As和Hg浓度分布如图4所示。C、D污水处理厂进水中总砷($1.4 \sim 13.9 \mu\text{g/L}$ 和 $0.7 \sim 9.8 \mu\text{g/L}$)、总铬($\leq 106 \mu\text{g/L}$ 和 $\leq 129 \mu\text{g/L}$)、总汞($0.01 \sim 1.19 \mu\text{g/L}$ 和 $\leq 0.94 \mu\text{g/L}$)及总硒($0.19 \sim 1.06 \mu\text{g/L}$ 和 $0.18 \sim 7.22 \mu\text{g/L}$)的浓度总体不高,但最大值约为最小值的10倍以上,浓度变化明显。污水处理厂出水水质符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,但总汞的高值(C污水处理厂 $0.91 \mu\text{g/L}$ 和D污水处理厂 $0.86 \mu\text{g/L}$)接近污水排放限值($1 \mu\text{g/L}$),需要重点关注。

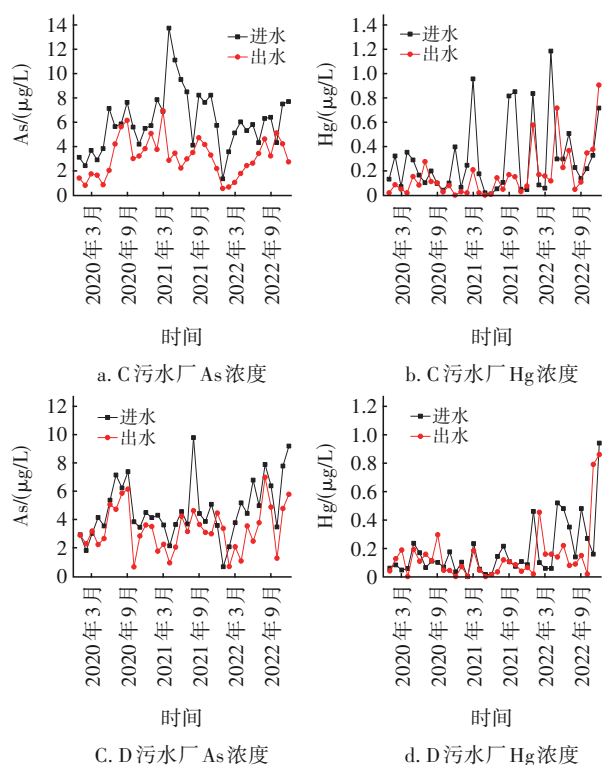


图4 2020—2022年排水系统中As和Hg浓度分布

Fig.4 Distribution of As and Hg concentrations in drainage system from 2020 to 2022

2.3.2 污水厂出水与水源污染情况分析

2020—2022年C、D污水厂出水As浓度远低于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中地表水Ⅲ类限值($50 \mu\text{g/L}$),也低于A水厂原水中As浓度,污水厂出水中的As未对A水厂水源地和原水水质造成影响。2020—2021年C、D污水厂出水Hg浓度略高于A水厂原水中Hg浓度,污水厂出水中的Hg对A水厂水源地和原水水质安全造成一定影响,是A水厂原水Hg污染来源之一;2022年C、D污水厂出水Hg浓度明显高于A水厂原水中Hg浓度,对A水厂水源地和原水水质安全的影响显著增加。

2.4 污泥重金属分布特征与风险评价

根据A水厂和C、D污水厂污泥中重金属的测定结果,以该省省会城市土壤重金属背景值作为参比,采用潜在生态风险系数法对污泥中重金属进行潜在生态风险评价和综合生态风险评价。结果显示,C污水厂污泥中Cd的潜在生态风险系数为64,远高于其他重金属,属于中等潜在生态风险;供排水污泥的综合生态风险介于2~70之间,平均值为26,属于低生态风险。整体来看,排水污泥中Cd潜在生态风险最高,是供排水污泥中首要重金属污

染物。

2.5 重金属浓度和风险的沿程变化及应对建议

在供水环节,As浓度和健康风险在水厂处理及通过管网系统输送到用户龙头的过程中逐渐降低,但受净水工艺影响,仍处于中度风险级别,需要通过增加预氧化和强化混凝工艺进一步处理。在排水环节,随着纳污区污染物的排放,污水中As浓度明显升高,但在污水厂二沉池、高效沉淀池和滤池的共同作用下,污水厂出水中的As浓度降至原水As浓度以下,不会对水源地和原水水质造成影响。

在供水环节,受回用水的影响,出厂水和末梢水Hg的浓度及健康风险在经水厂处理后进一步增加,但其风险程度(10^{-10})低,对人体不存在显著健康危害。在排水环节,污水厂出水中Hg浓度明显高于原水,对水源地和原水水质安全造成一定影响,需要进一步加强管理水源地上游和污水厂纳污区内污染物排放。

3 结论

① 2020—2022年水源地重金属污染整体处于无污染—中度污染状态,风险熵处于中等生态风险;Hg的生态风险急剧增大,风险熵高值接近强烈风险水平。建议相关部门尽快根据近年来重金属的变化趋势,加强源头控制,排查可能存在的污染源,做好水源地水质保护工作。

② 2020—2022年饮用水健康风险达到中度风险级别;As的健康风险远超Hg,As是研究区域重金属的主要致癌因子,供水企业应进一步加强水源地重金属监测,优化现有净水工艺,确保重金属污染物的有效去除。

③ 2020—2022年C、D污水处理厂进水重金属浓度不高但变化明显,污水处理厂出水水质符合《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,但总汞高值接近限值。相关部门应加强对污水厂纳污区域内重金属排放单位的管理,同时开展污水厂处理设施及工艺的提质改造,进一步提升污水厂重金属去除能力。

④ 2020—2022年供排水污泥的综合生态风险介于2~70之间,平均值为26,属于低潜在生态风险;Cd是供排水污泥中首要重金属污染物。供排水单位应做好污泥处理处置工作,并结合污泥的污染类型、风险程度,参照相关规定进行资源化利用,避

免潜在生态风险。

参考文献:

- [1] 米武娟,宋高飞,张羽珩,等. 陆水水库水环境中重金属含量及风险评价[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(增刊2):9-16.
Mi Wujuan, Song Gaofer, Zhang Yuheng, et al. Contents and risk assessment of heavy metals in water environment of Lushui Reservoir [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46 (S2): 9-16 (in Chinese).
- [2] 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 Chushan, Zhang Qian, Tang Fukai, 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(in Chinese).
- [3] 王海鹤,孙媛媛,张帅,等. 贵阳市集中式饮用水源地重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2022, 31(10):2039-2047.
Wang Haihe, Sun Yuanyuan, Zhang Shuai, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in drinking water source of Guiyang [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31 (10): 2039-2047(in Chinese).
- [4] 杨帆,袁隆湖,黎一夫,等. 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 生态学报, 2022, 42(5):1934-1946.
Yang Fan, Yuan Longhu, Li Yifu, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5):1934-1946 (in Chinese).
- [5] 唐振平,马如莉,陈亮,等. 湘江衡阳段地表水体重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(增刊1):190-197.
Tang Zhenping, Ma Ruli, Chen Liang, et al. The pollution characteristics and ecological risk assessments for the heavy metals of surface water-bodies in Hengyang section of Xiangjiang River [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(S1): 190-197 (in Chinese).
- [6] 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 Qin, Peng Bo, Fang Xiaohong, 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 (in Chinese).
- [7] 陈用泷,李思阳,吴泽璇,等. 湘江源头某河段水体重金属污染特征与健康风险评价[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2):590-596.
Chen Yongshuang, Li Siyang, Wu Zexuan, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals of a certain river in headwater stream of Xiangjiang River [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12 (2): 590-596 (in Chinese).
- [8] 邱国良,陈泓霖. 湘江流域衡阳段沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(2):125-132.
Qiu Guoliang, Chen Honglin. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in sediments from the Hengyang section of the Xiangjiang River basin [J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43 (2): 125-132 (in Chinese).
- [9] 施阳. 巢湖表层水体中砷及重金属分布特征、风险评价和来源[D]. 合肥:安徽医科大学, 2018.
Shi Yang. Contamination Characteristics, Ecological Risk Assessment and Sources of Arsenic and Heavy Metals in Surface Water from Lake Chaohu [D]. Hefei: Anhui Medical University, 2018(in Chinese).
- [10] 余天智,刘运涛,曹地,等. 沙颍河流域污染控制因素及水体重金属迁移规律研究[J]. 环境工程, 2023, 41(2):30-36, 52.
Yu Tianzhi, Liu Yuntao, Cao Di, et al. Study on pollution control factors and their influencing laws on heavy metal migration in the Shaying River basin [J]. Environmental Engineering, 2023, 41 (2): 30-36, 52 (in Chinese).
- [11] 封苏兰,李玉,朱琳,等. 海州湾海洋牧场重金属的空间分布及来源分析[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(5):114-122.
Feng Sulan, Li Yu, Zhu Lin, et al. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in the Haizhou Bay marine ranch [J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44 (5):114-122(in Chinese).
- [12] 刘昔,王智,王学雷,等. 应用物种敏感性分布评价中

- 国湖泊水体中重金属污染的生态风险[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1206-1217.
- Liu Xi, Wang Zhi, Wang Xuelei, et al. Ecological risks assessment of selected heavy metals in the waters of Chinese lakes based on species sensitivity distributions [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(5): 1206-1217 (in Chinese).
- [13] 秦宁, 刘运伟, 侯荣, 等. 基于概率方法的中国居民饮水途径砷暴露健康风险评估[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3338-3347.
- Qin Ning, Liu Yunwei, Hou Rong, et al. Probabilistic risk assessment of arsenic exposure through drinking water intake in Chinese residents [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3338-3347 (in Chinese).
- [14] 冯德达, 谢汝娟, 许艳芳, 等. 2015—2019年淮河流域某地区饮用水中重金属及类金属健康风险评估[J]. 卫生研究, 2023, 52(5): 721-725.
- Feng Deda, Xie Rujuan, Xu Yanfang, et al. Health risk assessment of heavy metals and metalloid in drinking water in a region of Huaihe River basin from 2015 to 2019 [J]. Journal of Hygiene Research, 2023, 52(5): 721-725 (in Chinese).
- [15] 张国珍, 高广辉, 汪光宗, 等. 西北高寒牧区水质评价与重金属健康风险评估[J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 42-48.
- Zhang Guozhen, Gao Guanghui, Wang Guangzong, et al. Water quality assessment and heavy metal health risk evaluation in northwest alpine pastoral area [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11): 42-48 (in Chinese).
- [16] 陈栋, 梁悦, 柳云广. 郑州市饮用水源水中砷含量检测及健康风险评估[J]. 中国给水排水, 2017, 33(7): 73-75.
- Chen Dong, Liang Yue, Liu Yunguang. Detection and health risk assessment of arsenic content of source water in Zhengzhou [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(7): 73-75 (in Chinese).
- [17] 胡明, 薛娇, 严玉林, 等. 北京市特征河流沉积物重金属污染评价与来源解析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(23): 73-81.
- Hu Ming, Xue Jiao, Yan Yulin, et al. Assessment and trace back to source of heavy metal pollution in typical river sediments in Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(23): 73-81 (in Chinese).
- [18] 周棉. 广东某水库底泥重金属含量特征及风险评价[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 104-107.
- Zhou Mian. Concentration characterization and risk assessment of heavy metals in sediment of a reservoir in Guangdong [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 104-107 (in Chinese).
- [19] 杨早, 李瑜, 王晶晶, 等. 上海农村污水污泥重金属污染水平及营养指标评价[J]. 中国给水排水, 2023, 39(21): 86-93.
- Yang Zao, Li Yu, Wang Jingjing, et al. Heavy metal pollution level of rural sewage sludge in Shanghai and its nutrition indicator evaluation [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(21): 86-93 (in Chinese).
- [20] 耿源濛, 张传兵, 张勇, 等. 我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评估[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 4834-4843.
- Geng Yuanmeng, Zhang Chuanbing, Zhang Yong, et al. Speciation and ecological risk assessment of heavy metal (loid)s in the municipal sewage sludge of China [J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4834-4843 (in Chinese).

作者简介: 肖彬彬(1990—), 女, 湖南衡阳人, 本科, 工程师, 主要研究方向为环境监测和供排水水质安全。

E-mail: 605620067@qq.com

收稿日期: 2025-10-14

修回日期: 2025-12-28

(编辑: 任莹莹)