

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 Y S,LI S Y,WU Z X,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.

# 湘江源头某河段水体重金属污染特征与健康风险评价

陈用泷<sup>1,2</sup>,李思阳<sup>2</sup>,吴泽璇<sup>2</sup>,王艺霖<sup>2</sup>,赵子文<sup>2</sup>,黎京士<sup>2</sup>,骆其金<sup>2</sup>,谢刚<sup>1\*</sup>

1.兰州理工大学石油化工学院  
2.生态环境部华南环境科学研究所

**摘要** 为探究湘江源头某河段水体重金属分布特征并探讨其对沿岸居民健康的影响,在丰水期、枯水期以及平水期对该河段13个地表水样品中的5种重金属(As、Cu、Pb、Zn、和Cd)进行监测,通过内梅罗综合污染指数法、健康风险评价模型评价了该河段水体中5种重金属的污染现状、分布特征和可能产生的健康风险。结果表明,该河段水体中重金属浓度表现为Zn>As>Pb>Cd>Cu,污染程度为平水期~枯水期>丰水期,且上游~中游>下游。内梅罗综合污染指数法评价结果表明,该河段水体86.1%的采样点全年处于重度污染状态。健康风险评价结果表明,该河段地表水体中重金属引起的环境健康风险主要来自于As、Cd,二者浓度表现为上游>中游>下游,枯水期>平水期>丰水期,且儿童所面临的健康风险约为成人的2.1倍。

**关键词** 湘江源头;重金属;污染特征;健康风险

中图分类号: X522 文章编号: 1674-991X(2022)02-0590-07 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210685

## Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals of a certain river in headwater stream of Xiangjiang River

CHEN Yongshuang<sup>1,2</sup>, LI Siyang<sup>2</sup>, WU Zexuan<sup>2</sup>, WANG Yilin<sup>2</sup>, ZHAO Ziwen<sup>2</sup>,  
LI Jingshi<sup>2</sup>, LUO Qijin<sup>2</sup>, XIE Gang<sup>1\*</sup>

1.School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology  
2.South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment

**Abstract** To investigate the distribution characteristics of heavy metal elements in a river section in headwater stream of Xiangjiang River and assess their health risks to coastal residents, five heavy metal elements (As, Cu, Pb, Zn and Cd) in 13 surface water samples of the river were collected and monitored at three periods (wet, dry and normal). The Nemeru comprehensive pollution index method and the health risk assessment model were employed to study the pollution levels, distribution characteristics and potential health risks of these heavy metals. The results showed that the average metal concentrations in the surface water samples in the river followed the order of Zn > As > Pb > Cd > Cu. The pollution levels of these heavy metals were arranged as follows: normal period ≈ dry period > wet period, and upstream ≈ midstream > downstream. The results of Nemeru comprehensive pollution index method showed that 86.1% of the sampling sites in the river were heavily polluted by heavy metals throughout the year. The result of health risk assessment indicated that the environmental health risks in the surface water in the study area were mainly caused by As and Cd. The health risk level of these heavy metals in study area followed the order of upstream > midstream > downstream and dry period > normal period > wet period. And the children were nearly 2.1 times more susceptible to health effects than adults.

**Key words** headwater stream of Xiangjiang River; heavy metals; pollution characteristics; health risk

水环境中的重金属不能被微生物分解<sup>[1]</sup>,且具有明显的生物毒性<sup>[2-3]</sup>,可通过食物链传递和皮肤入渗途径在人体内富集<sup>[4]</sup>,对人体肝、肾、消化系统以及

神经系统均可造成严重损害<sup>[5]</sup>,因而受到全球研究人员的广泛关注<sup>[6-7]</sup>。此外,矿区地表水环境与区域内居民生活、生产活动息息相关,同时因本底值高、矿

收稿日期:2021-11-14

基金项目:长江生态环境保护修复联合研究项目(第一期)(PM-zx126-2019-324)

作者简介:陈用泷(1997—),男,硕士研究生,主要从事废水处理技术研究,1053544753@qq.com

\* 责任作者:谢刚(1977—),男,副教授,博士,主要从事环境污染修复化学研究,xiegang@lut.cn

产资源开采等因素更易受到重金属的污染。因此,对矿区地表水重金属污染情况进行调查并评估可能存在的健康风险对保护居民生命健康具有重要意义。

研究河段位于湖南省郴州市境内,是长江重要支流——湘江的源头之一。流域内有色金属储量丰富,是闻名全国的锡、锌矿产区,以“有色金属之乡”而闻名。受历史上有色金属资源野蛮开采以及落后生产生活方式的影响,区域自然生态环境遭到了严重的破坏,地表水重金属污染问题尤为突出。近年来,研究者对湘江干流<sup>[8-9]</sup>、洞庭湖<sup>[10-11]</sup>以及典型工业园区水环境中重金属污染进行了研究<sup>[12]</sup>。如肖双<sup>[13]</sup>采用美国国家环境保护局(US EPA)推荐的方法对湘江长沙段地表水源生活饮用水6种PAEs进行健康风险评估,得出DEHP为主要潜在致癌风险;杨海君等<sup>[14]</sup>基于US EPA的水环境健康风险评估模型对湘江流域衡阳水口山段进行了健康风险评估,得出其健康风险主要来自致癌重金属元素。而对于湘江源头地区的重金属污染特征及健康风险研究鲜见报道。笔者针对湘江源头河段开展采样调查,在全面掌握研究河段水环境中重金属污染时空分布特征的基础上,通过内梅罗综合污染指数法评价研究河段重金属污染水平<sup>[15]</sup>,利用健康风险评估模型评价该河段河水对成人和儿童可能产生的健康风险<sup>[16]</sup>,以期为区域重金属污染的管理与环境健康风险防控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与分析

于2019年8月和11月及2020年5月对研究河段的表层水(距水面下0.5 m处)进行采样监测,所有采样点均使用全球卫星定位系统进行定位,采样点分布如图1所示。水样采集后加入硝酸固定,使样品 $\text{pH} \leq 2$ ,置于4℃保温箱内运回实验室。使用0.45 μm滤膜过滤,用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, PerkinElmer NexION 350X)测定重金属浓度。试验所用玻璃器皿和分析测试用品均在硝酸溶液( $V_{\text{硝酸}}:V_{\text{水}}=3:1$ )中浸泡1 d以上,分析过程所使用的化学试剂均为优级纯,试验用水为超纯水。质量控制使用国家标准中心提供的标准物质进行,分析结果的相对标准偏差均小于10%。利用Excel 2020软件对数据进行统计计算,用ArcGIS 12.0及Oringin 9.0软件制图。

### 1.2 内梅罗综合污染指数法

采用内梅罗综合污染指数法评价研究河段水环

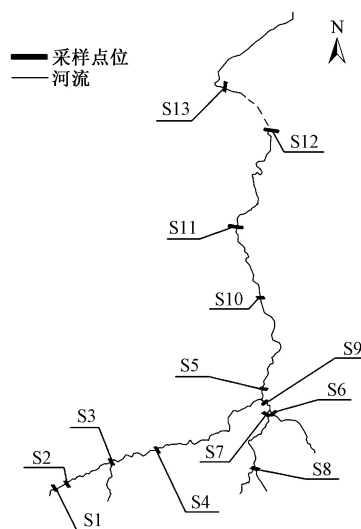


图1 采样点布置示意

Fig.1 Distribution of sampling sites

境中重金属污染状况。水环境中往往多种重金属并存,内梅罗综合污染指数法能够反映水体重金属污染程度,并甄别主要污染物,是水体重金属污染评价的常用方法<sup>[15]</sup>。计算公式如下。

单因子污染指数:

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

多因子综合污染指数:

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

式中: $C_i$ 为重金属*i*的实测浓度,mg/L; $S_i$ 为相应的水质标准,mg/L,采用GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水质标准作为参比, $\max(P_i)$ 为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。

表1 水体重金属污染评价标准<sup>[17]</sup>

Table 1 Evaluation criteria for heavy metal pollution

$P_i$	$P_n$	污染程度
$\leq 1$	$\leq 0.7$	安全
1~2	0.7~1.0	警戒
2~3	1.0~2.0	轻度污染
>3	>2.0	重度污染

### 1.3 健康风险评估模型

目前,国内通常使用US EPA推荐的健康风险评估模型来评价水环境中有害物质造成的健康风险<sup>[18-19]</sup>,采用该模型分别对成人和儿童暴露的致癌与非致癌风险进行评估。

通过饮用水途径摄入的致癌风险,计算公式

如下:

$$R_i = D_i q_i / 77 \quad (3)$$

若  $R_i > 0.01$ , 则按高剂量暴露计算:

$$R_i = (1 - e^{-D_i q_i}) / 77 \quad (4)$$

式中:  $R_i$  为致癌重金属  $i$  经过饮用水途径的平均个人致癌风险,  $a^{-1}$ ;  $D_i$  为  $i$  经过饮用水途径的单位体重日平均暴露剂量,  $mg/(kg \cdot d)$ ;  $q_i$  为  $i$  通过饮用水途径摄入的致癌系数,  $kg \cdot d/mg$ ; 77 为湖南省人均寿命,  $a$ 。

通过饮用水方式摄入的非致癌风险, 计算公式如下:

$$H_i = (D_i / RfD_i) \times 10^{-6} / 77 \quad (5)$$

式中:  $H_i$  为非致癌重金属  $i$  通过饮用水途径摄入的人均年致癌风险,  $a^{-1}$ ;  $RfD_i$  为  $i$  通过饮用水途径摄入的单位体重日均暴露剂量,  $mg/(kg \cdot d)$ 。

$D_i$  可表示为:

$$D_i = 1.0 C_i / 61.8 \quad (\text{成人}) \quad (6)$$

$$D_i = 0.7 C_i / 19.2 \quad (\text{儿童}) \quad (7)$$

式中: 1.0 为成人每天的平均饮水量,  $L$ ; 0.7 为儿童每天的平均饮水量,  $L$ ; 61.8 为成人平均体重,  $kg$ ; 19.2 为儿童平均体重,  $kg$ [20]。

根据国际癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)编制的分类系统, 以及 US EPA 的推荐值, 本次调查分析所测得的重金属污染物中, 致癌物质有 Cd、As, 非致癌物质有 Zn、Cu、Pb, 其致癌系数和非致癌物质参考剂量如表 2 所示[21]。

表 2 致癌物质的致癌系数和非致癌物质参考剂量  
Table 2 Carcinogenic coefficient of carcinogens and reference dose of non-carcinogens

类别	元素	致癌系数/参考剂量
致癌	As	15
	Cd	6.1
非致癌	Zn	0.300 0
	Cu	0.005 0
	Pb	0.001 4

注: 致癌系数计量单位为  $kg \cdot d/mg$ , 参考剂量单位为  $mg/(kg \cdot d)$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地表水重金属污染特征

研究河段水体重金属监测结果见表 3。从表 3 可以看出, Cu、Zn、Pb、As 和 Cd 在区域地表水环境中的浓度由高到底依次为  $Zn(0.03 \sim 40.83 \text{ mg/L}) > As(0.01 \sim 4.74 \text{ mg/L}) > Pb(0.000 5 \sim 1.67 \text{ mg/L}) > Cu(0.000 5 \sim 0.27 \text{ mg/L}) > Cd(0.000 2 \sim 0.08 \text{ mg/L})$ 。考

虑到该河段水功能区划为 GB 3838—2002 III 类, 则 Zn、As、Pb 以及 Cd 均存在不同程度的超标。其中 As 最高浓度达到  $4.74 \text{ mg/L}$ , 且枯水期、平水期的超标率均达到 90% 以上; Zn 浓度均值超标 4.7 倍, 在平水期、枯水期超标较为严重, 超标率分别为 77% 和 50%; Cd 浓度均值超标 2.8 倍, 平水期、枯水期超标较为严重, 分别为 85% 和 60%; Pb 浓度均值超标 1.6 倍, 平水期与枯水期的超标率分别为 15% 和 20%。从时间上看, 该河段在平水期、枯水期重金属污染较丰水期更为严重, 这是由于丰水期流域内水量充沛, 对水环境中的重金属污染具有一定的稀释作用[16-22]。从空间上看, 该河段上游(S1~S4 采样点)重金属污染程度普遍高于中游(S5~S10 采样点)和下游(S11~S13 采样点)地区(图 2), 说明该河段源头地区的重金属污染仍较严重。变异系数常用于表征区域重金属污染分布的均匀程度[23], 通过表 3 可知, 该河段 5 种重金属变异系数均高于 0.9, 说明研究区域水环境中重金属污染分布不均匀, 人类生活、生产活动是区域重金属污染的重要来源。据调研, 20 世纪 80—90 年代, 该区域处于采矿鼎盛时期, 悬崖峭壁上布满了蜂窝般的矿洞, 梯级选矿工场依山而建, 各种简易工棚鳞次栉比, 非法采矿产生的废水毫无遮拦地从山上倾泻而下, 随意堆放的废石、废砂、废渣经山洪冲刷进入河道, 造成了严重的重金属污染历史遗留问题。即便该河段已进行了 10 余年的重金属污染综合整治, 但历史上长期的野蛮开采仍对当地的生态环境产生了长远的损害和破坏[24], 且至今仍未完全恢复。

### 2.2 地表水重金属污染风险

使用单因子污染指数法对研究河段水体中重金属污染物进行筛选[26], 结果如表 4 所示。从表 4 可以看出, 除 Cu 外, 研究河段不同水文时期中 As、Zn、Cd 以及 Pb 的单因子污染指数均值分别达到 9.88、4.62、2.70 以及 1.37, 说明该河段水体重金属污染较为严重。多因子综合污染指数评价结果表明, 该河段 86.1% 的采样点在全年属于重度污染状态, 其中上游区域(S1~S4 采样点)重金属污染最为严重, 综合污染指数均值达到 15.3, 中游(S5~S10 采样点)和下游(S11~S13 采样点)相对较低, 分别为 7.5 和 4.0。从时间上看, 枯水期综合污染指数最高, 为 2.1~68.4, 均值达到 15.9, 明显高于平水期(8.1)与丰水期(5.8)(图 3)。

### 2.3 健康风险评估

考虑到我国在水环境基准方面研究基础较为薄弱[27], 相关系数中除了平均寿命与体重外并无适合

表 3 研究河段水体重金属监测结果统计

Table 3 Statistical analysis of heavy metal monitoring results in the study river section

重金属	水期	浓度/(mg/L)			标准差/(mg/L)	变异系数	标准值 <sup>1)</sup> /(mg/L)	超标采样点数/个	超标率/%
		最小值	最大值	均值					
Cu	丰水期	0.000 5	0.05	0.005	0.01	2.68	1.00	0	
	枯水期	0.001	0.27	0.04	0.08	2.20	1.00	0	
	平水期	0.001	0.08	0.02	0.02	1.36	1.00	0	
Zn	丰水期	0.03	15.30	1.92	3.99	2.08	1.00	4	31
	枯水期	0.04	40.83	5.62	11.90	2.12	1.00	5	50
	平水期	0.07	31.27	6.55	7.71	1.18	1.00	10	77
Pb	丰水期	0.000 5	0.009	0.001	0.002	1.99	0.05	0	
	枯水期	0.001	1.67	0.20	0.50	2.48	0.05	2	20
	平水期	0.001	0.13	0.03	0.04	1.23	0.05	2	15
As	丰水期	0.008	1.21	0.33	0.38	1.13	0.05	9	69
	枯水期	0.02	4.74	0.78	1.34	1.73	0.05	9	90
	平水期	0.02	1.62	0.44	0.48	1.09	0.05	12	92
Cd	丰水期	0.000 5	0.04	0.003	0.01	2.89	0.005	1	8
	枯水期	0.000 2	0.08	0.02	0.03	1.49	0.005	6	60
	平水期	0.001	0.08	0.02	0.02	0.91	0.005	11	85

1) GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类水质标准<sup>[25]</sup>。

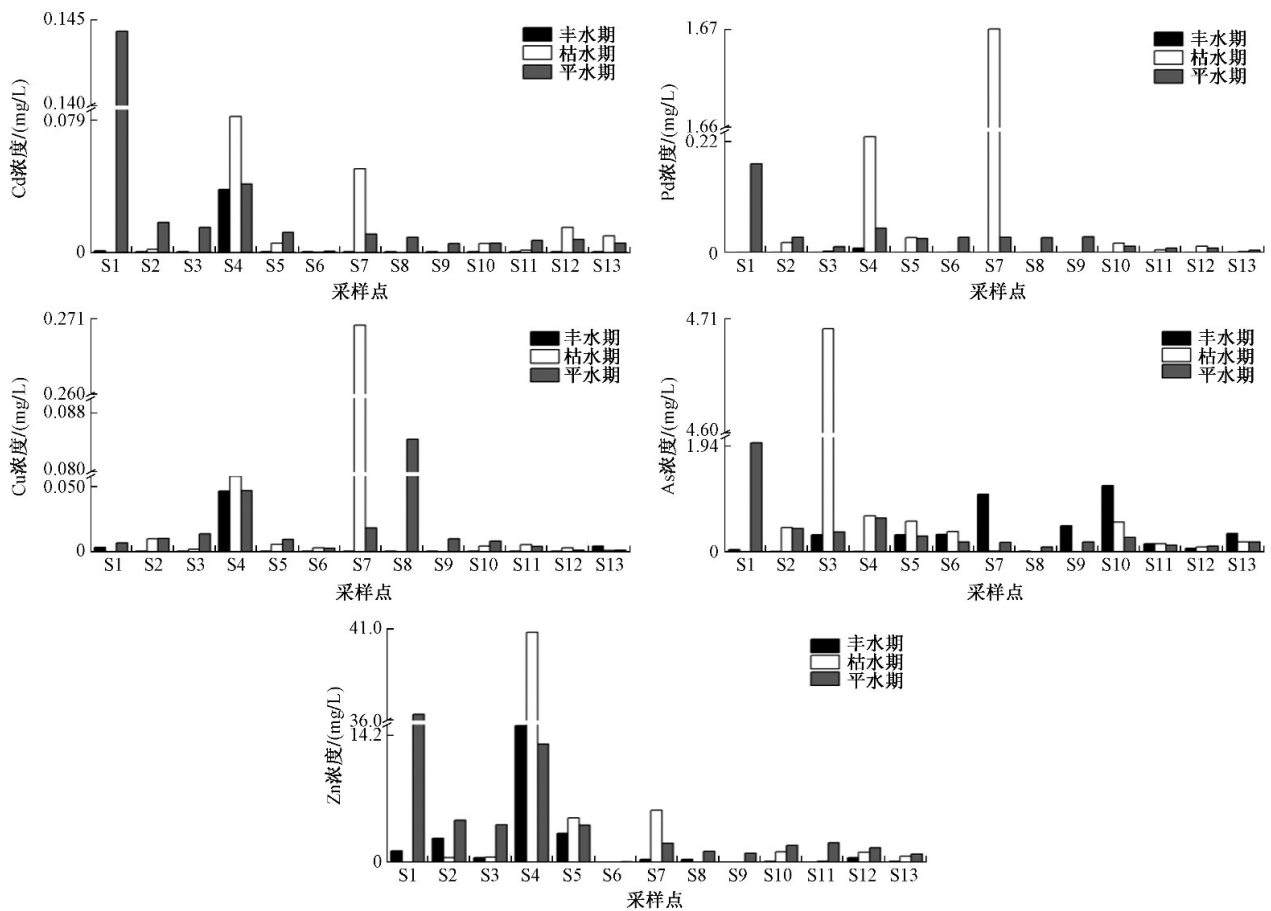


图 2 研究河段水体重金属浓度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metals concentrations in the study river section

表 4 研究河段水体重金属污染评价结果

Table 4 Evaluation results of heavy metals contamination in the study river section

河段	水期	单因子污染指数					内梅罗综合污染指数及评价结果	
		Cu	Zn	Pb	As	Cd	$P_n$	评价结果
上游	丰水期	0.013	4.983	0.055	1.828	1.988	4.705	重度污染
	枯水期	0.017	10.498	1.265	29.208	4.155	26.394	重度污染
	平水期	0.019	13.730	1.068	14.928	8.098	14.860	重度污染
中游	丰水期	0.001	0.717	0.010	11.313	0.100	8.187	重度污染
	枯水期	0.047	2.017	5.735	4.963	2.043	7.704	重度污染
	平水期	0.022	4.330	0.735	4.523	3.055	4.147	重度污染
下游	丰水期	0.002	0.267	0.010	3.613	0.100	2.617	重度污染
	枯水期	0.003	0.690	0.137	2.773	1.767	2.384	重度污染
	平水期	0.002	1.417	0.093	9.287	1.153	7.054	重度污染

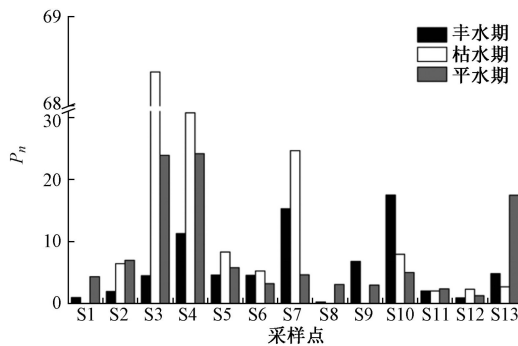


图 3 研究河段水体各采样点梅罗综合污染指数

Fig.3 Comprehensive pollution index of the studied river section

本土的相关规范或参考值,  $q_i$  和  $RfD_i$  均采用国际通用系数。根据研究河段水体中重金属浓度, 由健康风险评价模型计算出水体重金属通过饮用水途径可能引起的成人、儿童的致癌风险和非致癌风险, 结果见表 5 和表 6。

从表 5 可以看出, 研究河段水体重金属 As、

Cd 通过饮用水途径所引起的致癌健康风险数量级在  $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 。其中, 成人致癌总风险分别为: 丰水期,  $3.01 \times 10^{-4} \sim 1.78 \times 10^{-3} a^{-1}$ ; 枯水期,  $4.48 \times 10^{-4} \sim 4.15 \times 10^{-3} a^{-1}$ ; 平水期,  $7.33 \times 10^{-4} \sim 2.40 \times 10^{-3} a^{-1}$ 。儿童致癌总风险值分别为: 丰水期,  $6.78 \times 10^{-4} \sim 4.02 \times 10^{-3} a^{-1}$ ; 枯水期,  $1.01 \times 10^{-3} \sim 6.69 \times 10^{-3} a^{-1}$ ; 平水期,  $1.65 \times 10^{-3} \sim 5.42 \times 10^{-3} a^{-1}$ 。相比成人, 儿童受饮用水途径引起的重金属致癌健康风险更高, 约为成人的 2.1 倍。As、Cd 通过饮用水途径产生的人均致癌总风险分别为  $6.55 \times 10^{-3}$  和  $8.64 \times 10^{-5} a^{-1}$ , 其中 Cd 的人均致癌总风险接近国际辐射防护委员会(ICRP)所推荐的最大可接受水平( $5.0 \times 10^{-5} a^{-1}$ ), 而 As 为最大可接受水平的 131 倍。从时间上看, 枯水期( $2.70 \times 10^{-3} a^{-1}$ )、平水期( $2.50 \times 10^{-3} a^{-1}$ )的人均致癌总风险约是丰水期( $1.44 \times 10^{-3} a^{-1}$ )的 2 倍; 从空间上看, 上游、中游以及下游人均致癌总风险分别为  $3.27 \times 10^{-3}$ 、 $2.01 \times 10^{-3}$  和  $1.35 \times 10^{-3} a^{-1}$ , 呈自上游至下游逐渐降低的趋势。

由表 6 可知, Cu、Zn 与 Pb 产生的非致癌风险数

表 5 饮用水引起的致癌健康风险评价结果

Table 5 Results of health risk assessment of carcinogenesis caused by drinking water

水期	重金属	上游		中游		下游	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
丰水期	As	$2.88 \times 10^{-4}$	$6.49 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-3}$	$4.02 \times 10^{-3}$	$5.69 \times 10^{-4}$	$1.28 \times 10^{-3}$
	Cd	$1.27 \times 10^{-5}$	$2.87 \times 10^{-5}$	$6.41 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-6}$	$6.41 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-6}$
	致癌总风险	$3.01 \times 10^{-4}$	$6.78 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-3}$	$4.02 \times 10^{-3}$	$5.70 \times 10^{-4}$	$1.28 \times 10^{-3}$
枯水期	As	$4.12 \times 10^{-3}$	$6.61 \times 10^{-3}$	$1.17 \times 10^{-3}$	$2.64 \times 10^{-3}$	$4.37 \times 10^{-4}$	$9.85 \times 10^{-4}$
	Cd	$3.55 \times 10^{-5}$	$8.00 \times 10^{-5}$	$1.96 \times 10^{-5}$	$4.43 \times 10^{-5}$	$1.13 \times 10^{-5}$	$2.55 \times 10^{-5}$
	致癌总风险	$4.15 \times 10^{-3}$	$6.69 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-3}$	$2.69 \times 10^{-3}$	$4.48 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-3}$
平水期	As	$2.35 \times 10^{-3}$	$5.30 \times 10^{-3}$	$7.13 \times 10^{-4}$	$1.61 \times 10^{-3}$	$1.46 \times 10^{-3}$	$3.30 \times 10^{-3}$
	Cd	$5.19 \times 10^{-5}$	$1.17 \times 10^{-4}$	$1.96 \times 10^{-5}$	$4.41 \times 10^{-5}$	$7.40 \times 10^{-6}$	$1.67 \times 10^{-5}$
	致癌总风险	$2.40 \times 10^{-3}$	$5.42 \times 10^{-3}$	$7.33 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-3}$	$1.47 \times 10^{-3}$	$3.31 \times 10^{-3}$

$a^{-1}$

表 6 饮用水引起的非致癌健康风险评价结果

Table 6 Results of health risk assessment of non-carcinogen caused by drinking water

a<sup>-1</sup>

时期	重金属	上游		中游		下游	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
丰水期	Cu	5.33×10 <sup>-10</sup>	1.20×10 <sup>-9</sup>	2.10×10 <sup>-11</sup>	4.73×10 <sup>-11</sup>	7.36×10 <sup>-11</sup>	4.73×10 <sup>-11</sup>
	Zn	3.49×10 <sup>-9</sup>	7.86×10 <sup>-9</sup>	5.00×10 <sup>-10</sup>	1.13×10 <sup>-9</sup>	1.86×10 <sup>-10</sup>	4.18×10 <sup>-10</sup>
	Pb	4.03×10 <sup>-10</sup>	9.09×10 <sup>-10</sup>	7.51×10 <sup>-11</sup>	1.69×10 <sup>-10</sup>	7.51×10 <sup>-11</sup>	1.69×10 <sup>-10</sup>
	非致癌总风险	4.43×10 <sup>-9</sup>	9.97×10 <sup>-9</sup>	5.96×10 <sup>-10</sup>	1.34×10 <sup>-9</sup>	3.34×10 <sup>-10</sup>	6.35×10 <sup>-10</sup>
枯水期	Cu	9.78×10 <sup>-10</sup>	2.20×10 <sup>-9</sup>	2.97×10 <sup>-9</sup>	6.70×10 <sup>-9</sup>	1.33×10 <sup>-10</sup>	3.00×10 <sup>-10</sup>
	Zn	9.80×10 <sup>-9</sup>	2.21×10 <sup>-8</sup>	2.12×10 <sup>-9</sup>	4.78×10 <sup>-9</sup>	4.83×10 <sup>-10</sup>	1.09×10 <sup>-9</sup>
	Pb	1.26×10 <sup>-8</sup>	2.85×10 <sup>-8</sup>	6.46×10 <sup>-8</sup>	1.45×10 <sup>-7</sup>	1.00×10 <sup>-9</sup>	2.25×10 <sup>-9</sup>
	非致癌总风险	2.34×10 <sup>-8</sup>	5.28×10 <sup>-8</sup>	6.97×10 <sup>-8</sup>	1.57×10 <sup>-7</sup>	1.62×10 <sup>-9</sup>	3.64×10 <sup>-9</sup>
平水期	Cu	8.18×10 <sup>-10</sup>	1.84×10 <sup>-9</sup>	9.30×10 <sup>-10</sup>	2.09×10 <sup>-9</sup>	3.05×10 <sup>-10</sup>	6.88×10 <sup>-10</sup>
	Zn	9.62×10 <sup>-9</sup>	2.17×10 <sup>-8</sup>	3.03×10 <sup>-9</sup>	6.84×10 <sup>-9</sup>	9.91×10 <sup>-10</sup>	2.23×10 <sup>-9</sup>
	Pb	8.01×10 <sup>-9</sup>	1.81×10 <sup>-8</sup>	5.52×10 <sup>-9</sup>	1.24×10 <sup>-8</sup>	6.93×10 <sup>-10</sup>	1.56×10 <sup>-9</sup>
	非致癌总风险	1.84×10 <sup>-8</sup>	4.16×10 <sup>-8</sup>	9.48×10 <sup>-9</sup>	2.14×10 <sup>-8</sup>	1.99×10 <sup>-9</sup>	4.48×10 <sup>-9</sup>

量级在 10<sup>-11</sup>~10<sup>-7</sup>, 由高至低依次为 Pb>Zn>Cu。区域健康总风险等于致癌物质和非致癌物质产生的健康风险相加, 因此本研究河段水体重金属健康风险主要来自于 As、Cd 等致癌重金属, 考虑到长期暴露可能会导致肺癌、皮肤癌、肾癌及肝癌等疾病<sup>[28-29]</sup>, 故需加强区域 As、Cd 等污染源的排查与综合整治。

### 3 结论

(1) 研究河段水体主要超标的重金属为 As、Cd、Zn 以及 Pb。其中 As 超标最为严重, 最大值达 4.7 mg/L, 在平水期、枯水期的超标率均可达 90% 以上。内梅罗综合污染指数评价结果表明, 该河段 86.1% 的采样点在全年处于重度污染状态。同时, 该河段水体重金属污染分布不均, 存在明显的点源污染, 说明人类生活、生产活动对河流生态环境的影响较为显著。

(2) 健康风险评价结果表明, 通过饮用水途径引起的重金属环境健康风险主要来自于致癌重金属 As、Cd, 且儿童所面临的健康风险约为成人的 2.1 倍。因此, 为保障区域居民饮用水安全, 建议禁止使用该河段河水作为饮用水水源。

### 参考文献

- [ 1 ] DAVE D, SARMA S, PARMAR P, et al. Microbes as a boon for the bane of heavy metals[J]. *Environmental Sustainability*, 2020, 3(3): 233-255.
- [ 2 ] 辛成林, 任景玲, 张桂玲, 等. 海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1315-1323.

XIN C L, REN J L, ZHANG G L, et al. Distributions and pollution status of heavy metals in the suspended particles of the estuaries and coastal area of eastern Hainan[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4): 1315-1323.

- [ 3 ] 张智慧, 李宝, 梁仁君. 南四湖南阳湖区河口与湖心沉积物重金属形态对比研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(5): 1408-1416.
- ZHANG Z H, LI B, LIANG R J. Comparison of sediment heavy metal fractions at estuary and center of Nanyang Zone from Nansi Lake, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5): 1408-1416.
- [ 4 ] XIA F, NIU X, QU L, et al. Integrated source-risk and uncertainty assessment for metals contamination in sediments of an urban river system in eastern China[J]. *CATENA*, 2021, 203(8): 105-113.
- [ 5 ] 曾晨, 郭少娟, 杨立新. 汞、镉、铅、砷单一和混合暴露的毒性效应及机理研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(2): 221-230.
- ZENG C, GUO S J, YANG L X. Toxic effects and mechanisms of exposure to single and mixture of mercury, cadmium, lead and arsenic[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(2): 221-230.
- [ 6 ] ZHANG J, LI X, GUO L, et al. Assessment of heavy metal pollution and water quality characteristics of the reservoir control reaches in the middle Han River, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799(4): 149-156.
- [ 7 ] YAN C, QU Z, WANG J, et al. Microalgal bioremediation of heavy metal pollution in water: recent advances, challenges, and prospects[J]. *Chemosphere*, 2022, 286: 131870.
- [ 8 ] TANG J, CHAI L, LI H, et al. A 10-year statistical analysis of heavy metals in river and sediment in Hengyang Segment, Xiangjiang River Basin, China[J]. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1057.
- [ 9 ] HUANG Z, LIU C, ZHAO X, et al. Risk assessment of heavy

- metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2020, 32(1): 23-29.
- [ 10 ] XU J, CHEN Y, ZHENG L, et al. Assessment of heavy metal pollution in the sediment of the main tributaries of Dongting Lake, China[J]. *Water*, 2018, 10(8): 1060.
- [ 11 ] FANG X, PENG B, SONG Z, et al. Geochemistry of heavy metal-contaminated sediments from the four river inlets of Dongting Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(22): 27593-27613.
- [ 12 ] 徐冰冰, 许秋瑾, 梁存珍, 等. 湖南郴州柿竹园矿区乡镇地下水水源重金属水质评价[J]. *环境工程技术学报*, 2013, 3(2): 113-118.  
XÜ B B, XÜ Q J, LIANG C Z, et al. Water quality assessment for heavy metals in rural groundwater sources around Shizhuyuan Polymetallic Mine in Chenzhou, Hunan Province[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, 3(2): 113-118.
- [ 13 ] 肖双. 湘江长沙段地表水源生活饮用水PAEs健康风险评估[J]. *中国资源综合利用*, 2019, 37(6): 9-11.  
XIAO S. Health risk assessment of PAEs in the drinking water for Changsha Section of Xiangjiang River[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, 37(6): 9-11.
- [ 14 ] 杨海君, 许云海, 刘亚宾, 等. 湘江流域衡阳水口山段水环境健康风险评估[J]. *环境化学*, 2018, 37(9): 2061-2070.  
YANG H J, XÜ Y H, LIU Y B, et al. Environmental health risk assessment of Shuikou Mountain Section of Hengyang in Xiangjiang River Basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(9): 2061-2070.
- [ 15 ] WU J, LU J, ZHANG C, et al. Pollution, sources, and risks of heavy metals in coastal waters of China[J]. *Human and ecological risk assessment*, 2020, 26(8): 2011-2026.
- [ 16 ] 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估[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.
- [ 17 ] 丁婷婷, 李强, 杜士林, 等. 沙颍河流域水环境重金属污染特征及生态风险评估[J]. *环境化学*, 2019, 38(10): 2386-2401.  
DING T T, LI Q, DU S L, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in Shaying River Basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(10): 2386-2401.
- [ 18 ] 王进军, 刘占旗, 古晓娜, 等. 环境致癌物的健康风险评估方法[J]. *国外医学(卫生学分册)*, 2009, 36(1): 50-58.
- [ 19 ] 李丽娜. 上海市多介质环境中持久性毒害污染物的健康风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [ 20 ] 生态环境部. 建设用地土壤污染风险评估技术导则: HJ 25.3—2019[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [ 21 ] 孙超, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 61-65.  
SUN C, CHEN Z L, ZHANG C, et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Shanghai, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(1): 61-65.
- [ 22 ] 刘昭, 周宏, 曹文佳, 等. 清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 175-183.  
LIU Z, ZHOU H, CAO W J, et al. Seasonal distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water of Qingjiang River[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 175-183.
- [ 23 ] 王晓东, 田伟, 张雪艳. 宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估[J/OL]. *环境科学*. [2021-07-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202105037>.
- [ 24 ] 韦振丽, 吴湘滨, 刘悟辉, 等. 三十六湾矿区的水环境问题研究[J]. *湖南有色金属*, 2008(1): 53-57.
- [ 25 ] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [ 26 ] 吴蕾, 刘桂建, 周春财, 等. 巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 738-747.  
WU L, LIU G J, ZHOU C C, et al. Temporal-spatial distribution and pollution assessment of dissolved heavy metals in Chaohu Lake[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 738-747.
- [ 27 ] 陈艳卿, 孟伟, 武雪芳, 等. 美国水环境质量基准体系[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(4): 468-474.  
CHEN Y Q, MENG W, WU X F, et al. Ambient water quality criteria system in the United States[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(4): 468-474.
- [ 28 ] YIN S, FENG C, LI Y, et al. Heavy metal pollution in the surface water of the Yangtze Estuary: a 5-year follow-up study[J]. *Chemosphere*, 2015, 138: 718-725.
- [ 29 ] LI C, SUN L, JIA J, et al. Risk assessment of water pollution sources based on an integrated *k*-means clustering and set pair analysis method in the region of Shiyang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 307-316. □