

云南东川区域重金属环境暴露健康风险评价

赵明明¹ 杨 远^{2*}

(1. 湖南警察学院 刑事科学技术系, 长沙 410138; 2. 湖南农业大学 资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要 以云南省昆明市东川主要河流及附近土壤、植物为研究对象, 对其进行采样分析, 并根据美国环境保护署(U. S. EPA)推荐健康风险评价方法对东川流域多种环境因素进行了重金属的健康风险评价。结果表明, 水环境中致癌物质造成的风险最大, 风险值在 $2.35 \times 10^{-4} \sim 8.27 \times 10^{-4}$, 达到 U. S. EPA 推荐的最大值 10^{-4} , 植物根部的健康风险值为 $0.40 \times 10^{-1} \sim 7.00 \times 10^{-1}$, 茎叶部分的风险值为 $2.42 \times 10^{-2} \sim 15.24 \times 10^{-2}$, 根部存在的重金属对人体的健康风险约为茎叶部分的 5 倍; 土壤中非致癌物质的健康风险影响较大, 总健康风险值区间为 $0.64 \times 10^{-1} \sim 3.83 \times 10^{-1}$ 。评价结果可为该区域地表水、土壤和植物资源的污染治理、保护开发提供依据。

关键词 东川; 重金属; 健康风险评价; 复合环境因素

中图分类号: O657.63 TH843 文献标志码: A 文章编号: 2095-1035(2022)05-0026-08

Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Main River Basins of Dongchuan, Yunnan Province

ZHAO Mingming¹, YANG Yuan^{2*}

(1. Criminal Technology Department, Hunan Police Academy, Changsha, Hunan 410138, China;

2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract Water, plants and soil samples in the domain basins of Dongchuan, Yunnan province were collected, investigated and analyzed. And health risk assessments of heavy metals in these environmental factors were conducted according to the U. S. EPA health risk assessment model. Results showed the largest health risk was found to be carcinogenic risk ($2.35 \times 10^{-4} - 8.27 \times 10^{-4}$) in aquatic environment, which has achieved the maximum level recommended by EPA (10^{-4}). Considering the risk levels in the roots ($0.40 \times 10^{-1} - 7.00 \times 10^{-1}$) and stems ($2.42 \times 10^{-2} - 15.24 \times 10^{-2}$) of plants, health risk levels of heavy metals in roots were about 5 times higher than those in stems. In soil, non-carcinogenic risks levels ($0.64 \times 10^{-1} - 3.83 \times 10^{-1}$) were found larger than carcinogens. The evaluation results could provide a basis for the pollution control, protection and development of surface water, soil and plant resources in the region.

Keywords Dongchuan; heavy metal; health risk assessment; composite environmental factors

收稿日期: 2022-05-30 修回日期: 2022-06-10

基金项目: 中国博士后基金资助项目(2019M652768); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5227)

作者简介: 赵明明, 男, 讲师, 主要从事刑事化验相关研究。E-mail: zmm_990103@126.com

* 通信作者: 杨远, 男, 博士, 主要从事环境中新兴污染物检测研究。E-mail: yangyuan041@163.com

引用格式: 赵明明, 杨远. 云南东川区域重金属环境暴露健康风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2022, 12(5): 26-33.

ZHAO Mingming, YANG Yuan. Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Main River Basins of Dongchuan, Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(5): 26-33.

近年来,我国重金属污染事件频频爆发,而大部分发生在矿产较为丰富或能源工业发达的地区。污染事件势必会对当地居民健康造成严重影响,因此对这些地区进行全面的健康风险评价具有重要意义。健康风险评价是一种联系污染物与人体健康,进而判断环境是否安全的评价方法^[1]。在美国环保署(U. S. EPA)公布的《优先资助场地健康评价手册》中提出健康风险评价主要分为数据收集与评估、毒性评估、暴露评估和风险表征四个步骤。近年来,国内外学者对部分地区重金属污染情况开展了研究^[2-3],赵振等^[4]对某冶炼厂附近土壤进行了采样研究,Cu、Pb等重金属超标严重。张迪等^[5]对贵州遵义松林 Ni-Mo 多金属矿区土壤和农作物进行了采样分析,发现矿区土壤受到了 Ni 的污染,农作物中 Ni 含量对人存在健康风险。OLAWOYIN 等^[6]对非洲尼日尔三角洲区域土壤中重金属进行了研究,发现土壤中 Pb 和 Cr 含量致癌风险较高。VAROL^[7]对土耳其 Tigris 河口处地表水中重金属含量进行了研究。

目前国内外研究的健康风险评价较多的集中在表面水、地下水、土壤、植物等单一环境因素,而较少有对某一地区多种环境因素的综合评价,因此所得结果对暴露在人体中的健康风险评价参考价值有限。本文通过地表水、土壤、植物中的重金属元素的调查,分析东川区域内多种环境因素对人体潜在的健康风险。

1 材料与方法

1.1 地区概况

东川区位于云南省昆明市东北部,境内矿产资源丰富,呈现种类多、范围广的特点,特别是铜矿资源,目前探明的铜储量达到 335 万 t,位居全国第三,是我国六大产铜基地之一。除铜矿外,金、铁等矿产资源也是该地区的主要矿种。本次研究集中在东川区大白河、小江等河流区域进行采样分析,对区域内的重金属环境暴露健康风险进行评价。

1.2 样品采集

对东川区域内的河流表面水、附近土壤及植物进行采样,采样范围主要在大白河、乌龙河、中厂河与小江等河流中段或河流交汇处布置 7 个采样点,采样点分布见图 1。使用聚乙烯采水器采集水样,塑封袋采集土样及植物样。水样采集后立即用浓硝酸进行酸化,将 pH 值调至小于 2,并保存于 2~5 ℃ 的冰箱中。土壤样及植物样在采集后进行冷

冻处理,植物样在冷冻前要清洗干净,根茎分离包装。

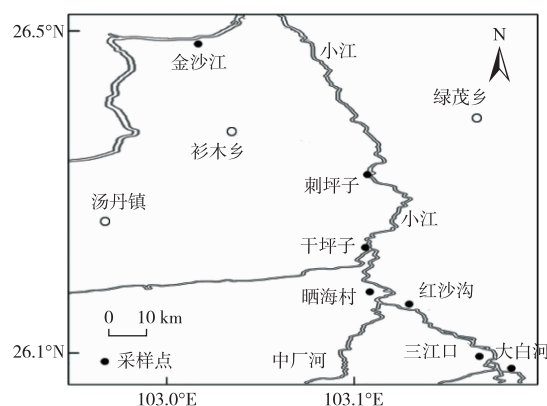


图 1 采样点位置

Figure 1 Location of sampling sites.

1.3 所用试剂

HNO₃、H₂O₂、HF、HCl(优级纯),0.45 μm 水系微孔滤膜(上海安普公司),Cr、Cu、As、Pb、Cd、Zn 元素混合标准溶液储备液(100 mg/L,国家有色金属及电子材料分析测试中心)。Be、Ce、Fe、In、Li、Mg、Pb、UICP-MS 调谐液(1 μg/L,PE 公司)。

土壤样品 GBW07445(GSF-5)、植物样品 GBW10049(GSB-27)(中国计量科学研究院)用于验证样品前处理准确性。

采用 HNO₃ 溶液(20%)浸泡实验器皿至少 24 h,使用高纯水冲洗 3 次,烘干,备用。

1.4 实验方法

1.4.1 样品前处理

水样前处理方法^[8]:准确量取 45.0 mL 水样于消解罐中,再加入 4.0 mL HNO₃ 和 1.0 mL HCl,微波消解 10 min,静置冷却、定容,过滤,采用 ICP-MS(NexION 350 X,美国 Perkin Elmer 公司)测定 Cr、Cu、As、Pb、Cd、Zn 等金属元素。

土壤样品的前处理方法^[9]:称取 0.1 g(精确至 0.000 1 g)土壤样品至消解罐中,加入 1 mL HCl、4 mL HNO₃ 和 1 mL HF,微波消解,样品消解完后静置冷却至室温,打开消解罐放入赶酸仪中,150 ℃ 至溶液近干,去离子水溶解并转移、定容,过滤,ICP-MS 测定对应金属元素。

植物样品的前处理方法^[10]:称取 0.5 g(精确至 0.000 1 g)植物样品至消解罐中,移取 5 mL 浓 HNO₃ 和 2 mL H₂O₂,进行微波消解,静置,定容,过滤,ICP-MS 测定对应金属元素。

水、土壤和植物样品的微波消解程序见表 1。

表 1 微波消解程序

Table 1 Microwave digestion procedure

消解步骤	温度/℃	升温时间/min	保持时间/min
1	90	10	5
2	120	5	10
3	180	10	30

1.4.2 ICP-MS 仪器参数优化

待 ICP-MS 点火成功后,分别使用 1% HNO_3 和超纯水冲洗进样系统 10 min 和 20 min,然后使用调谐液调谐仪器,待仪器达到进样要求后测定样品。表 2 为 ICP-MS 仪器工作条件。

表 2 ICP-MS 仪器工作条件

Table 2 Instrumental parameters of ICP-MS

参数	设定值
RF 功率/W	1 600
载气流速/(L · min ⁻¹)	0.9
辅助气流速/(L · min ⁻¹)	1.2
等离子体流速/(L · min ⁻¹)	18
氮气流速/(L · min ⁻¹)	3.8
雾化器	同心雾化器
采样锥	镍锥
重复次数/次	3
待测元素同位素	²⁰⁸ Pb、 ¹¹¹ Cd、 ⁵² Cr、 ⁷⁵ As、 ⁶³ Cu、 ⁶⁶ Zn

1.5 评价模型

1.5.1 水环境健康风险评价模型

饮水是水环境中重金属进入人体的主要途径^[11],其中饮用水途径的健康风险有致癌物质与非致癌物质两种风险途径。

1) 饮水途径致癌物质模型。一般认为,当有微量致癌物质存在的情况下,环境就会对人体造成致癌性健康危害,致癌风险值为 R_c ,其含义为致癌物质通过进入食道的途径所产生的年均致癌风险,其表达式为:

$$R_c = \sum R_{ci} = \sum [1 - \exp(-D_{ig} \times Q_i)] \div 70 \quad (1)$$

式中, R_{ci} 表示致癌物质 i 通过食入途径产生的年平均致癌风险, a^{-1} ; D_{ig} 为致癌物质 i 经该途径的单位体重日均暴露剂量, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$; Q_i 为致癌物质 i 经由该途径的致癌强度系数, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]^{-1}$; 70 为人体平均寿命, a 。

单位体重日均暴露剂量 D_{ig} 计算公式为:

$$D_{ig} = 2.2 \times C_i / 70 \quad (2)$$

式中,2.2 为成人每日平均饮水量,L; C_i 为当地水中该元素的实际测得浓度, mg/L 。

2) 饮水途径非致癌物质模型。通常认为非致癌

物质的浓度要达到特定值后才会对人体健康带来威胁,非致癌风险值定义为 R_n ,它表示污染物质暴露的日摄入量与参考剂量的比值,当 R_n 小于 1 时,其风险可忽略,但该比值大于 1 时,则存在健康风险,模型计算公式为:

$$R_n = \sum R_{ni} = \sum [(D_{ig}/RFD_i) \times 10^{-6}] / 70 \quad (3)$$

式中, R_{ni} 为物质 i 通过食入途径所带来的非致癌风险值, RFD_i 为通过该途径的摄入参考量, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$; 70 为人体平均寿命, a 。

假设各重金属污染物之间不存在对人体健康危害的协同以及拮抗作用,则重金属在饮用水环境中对人体的总健康风险值为 $R_k = R_c + R_n$ 。

1.5.2 土壤环境健康评价模型

土壤中的重金属污染物主要通过皮肤接触和直接吸入两种途径进入人体并造成健康风险,土壤中的重金属人体平均日摄入量计算公式为^[12]:

$$CDI_{\text{摄}} = \frac{CS \times IR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (4)$$

$$CDI_{\text{皮}} = \frac{CS \times SA \times CF \times EF \times ED \times ABS_d \times Fadh}{BW \times AT} \quad (5)$$

式中, $CDI_{\text{摄}}$ 表示污染物直接摄入的日平均摄取量, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$; $CDI_{\text{皮}}$ 表示污染物经皮肤接触产生的日平均摄取量, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$; CS 为重金属在土壤中的实测浓度, mg/kg ; IR 为摄取率, mg/d ,取 100 mg/d ; CF 为转换因子,取 $10^{-6} \text{ kg}/\text{mg}$; EF 为暴露频率,取 350 d/a ; ED 为成人暴露时间,取 24 a ; BW 为目标体重,取人均体重 70 kg ; AT 为平均接触时间,对于非致癌物质取 8 760 d ,致癌物质取 25 550 d ^[13]。 SA 为接触皮肤面积,因人体主要是四肢与土壤接触,因此取四肢皮肤表面平均面积计算,5 030 cm^2/d ^[14]; ABS_d 为皮肤吸收系数,取 1; $Fadh$ 为皮肤粘附系数,取 0.2 $\text{mg} \cdot \text{cm}^2$ 。

1) 土壤环境非致癌物质健康风险模型。模型中重金属元素产生的健康风险评价计算公式为:

$$HQ_i = CDI \div RFD \quad (6)$$

$$HQ = \sum HQ_i \quad (7)$$

式中, HQ_i 为非致癌物质 i 的健康风险指数, RFD 表示重金属的暴露参考剂量, $[\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})]$ 。当 $HQ > 1$ 时,则认为环境中存在非致癌物质污染的健康风险,其值与危害程度成正比;当 $HQ < 1$

时,不考虑该风险。

2)土壤环境致癌物质健康风险模型^[15]。模型中重金属元素产生的健康风险评价计算公式为:

$$Risk_i = CDI \times SF \tag{8}$$

$$Risk = \sum Risk_i \tag{9}$$

式中, $Risk_i$ 表示土壤环境中致癌物质 i 的健康风险值; SF 为斜率因子(kg·d)/mg。该地区土壤中的综合致癌风险评价值为各致癌污染物的风险值之和。

1.5.3 植物环境健康评价模型

植物环境中存在的重金属元素对人体造成健康风险的主要途径是通过农产品的摄入,农产品的摄入风险评价模型计算公式与水中直接摄入重金属风险模型相似,计算公式为^[16]:

$$HQ_i = CDI \div RFD \tag{10}$$

$$HQ = \sum HQ_i \tag{11}$$

$$CDI = \frac{C \times I \times BA \times EF \times ED}{BW \times AT} \tag{12}$$

式中, C 为样品重金属实测浓度,mg/kg;平均体重 BW 、平均接触时间 AT 、暴露时间 ED 取值见式(4); BA 表示生物中可利用分数,取 1%; I 为某一植物一成年人每日的摄取率,由于所采样品均为叶菜类植物,因此取叶菜类人均每日摄取率 0.15 kg/d; EF 为暴露频率,取 365 d/a^[17]。

2 结果与讨论

2.1 环境质量分析

各采样点表面水中重金属的测定浓度见表 3,其中 Pb 在各个点中均未检出,Zn 检出浓度最高。根据地表水环境质量标准^[18],大部分采样点的重金属含量达到Ⅱ类水标准,但其中红沙沟样品中砷的含量达到Ⅲ类水标准接近Ⅳ类水标准;三江口、红沙沟、洒海村、干坪子的镉含量均达到了Ⅳ类水。由于

表 3 水中重金属实测浓度

Table 3 Concentration of heavy metals in water

/(mg·L ⁻¹)						
采样点	Cr	Cu	Zn	As	Pb	Cd
大白河	0.014	0.019	0.038	0.014	-	0.005
三江口	0.021	0.048	0.078	0.016	-	0.006
红沙沟	0.027	0.097	0.312	0.048	-	0.007
洒海村	0.016	0.049	0.153	0.039	-	0.007
干坪子	0.008	0.054	0.242	0.038	-	0.006
刺坪子	0.009	0.053	0.210	0.029	-	0.005
金沙江	0.006	0.023	0.010	0.017	-	0.004

地处矿产区,因此与云南省其他表面水相比,Cu、Zn、Cd 及 As 浓度较高,其中 Cu 的浓度范围为 0.019~0.097 mg/L,为国家Ⅰ类水标准的 1.9~9.7 倍;Zn 浓度区间为 0.010~0.312 mg/L,最高达到Ⅰ类水标准的 6.24 倍;Cd 的浓度在 0.004~0.007 mg/L,其最高浓度接近Ⅴ类水限定浓度 0.01 mg/L。

采集的土壤重金属含量见表 4。根据土壤环境质量标准^[19],除洒海村与金沙江外,所有的采样点 Cd 元素都达到了二级土壤标准,大白河与三江口 Cu 元素含量也达到了二级土壤标准,其他元素均为一级标准。其中,污染程度最高的元素为 Cd,其浓度达到了 0.20~0.72 mg/kg,为一级土壤标准的 1~3.6 倍。与同地区土壤质量相比,除 Cd 的浓度较高,各重金属含量相差不大。

表 4 土壤中重金属实测浓度

Table 4 Detection results of heavy metals in soil

/(mg·kg ⁻¹)						
采样点	Cr	Cu	Zn	As	Pb	Cd
大白河	12.33	96.69	61.29	6.34	3.73	0.56
三江口	7.33	38.83	30.88	5.59	9.75	0.72
红沙沟	1.98	2.40	0.00	1.25	-	0.31
洒海村	0.86	0.00	0.00	1.31	-	0.25
干坪子	0.35	1.81	2.37	1.51	-	0.30
刺坪子	0.40	1.65	1.05	1.60	-	0.30
金沙江	0.76	0.71	0.96	1.67	-	0.20

植物中的污染物测定浓度见表 5、6,通过对比植物根系与茎叶中的重金属浓度可知,根部由于能更多地从土壤中吸收重金属离子,根部的各浓度均高于茎叶部分的浓度。因为采样点大多处于矿区,且以铜矿为主,所以测定出的浓度比其他非矿区重金属浓度高,特别是 Cu 与 Zn 的浓度要远高于一般地区的浓度。

表 5 植物中重金属实测浓度(根部)

Table 5 Concentration of heavy metals in plants(Roots)

/(mg·kg ⁻¹)					
采样点	Cr	Cu	Zn	As	Cd
刺坪子	18.77	41.85	113.32	0.00	3.56
红沙沟	2.74	7.74	11.05	0.10	0.00
洒海村	2.33	46.71	29.55	0.00	1.04
沙子岭	0.67	12.06	77.90	128.58	0.67
干坪子	6.35	146.28	78.82	0.40	2.49
三江口	7.29	69.33	49.06	5.33	4.59
大白河	15.53	75.97	63.25	2.63	0.55

表 6 植物中重金属实测浓度(茎叶)

Table 6 Concentration of heavy metals in plants(Stems)

采样点	/(mg · kg ⁻¹)				
	Cr	Cu	Zn	As	Cd
刺坪子	0.66	17.86	63.67	3.26	1.10
红沙沟	0.72	12.74	87.01	15.44	0.89
洒海村	11.40	12.52	57.58	1.50	0.21
沙子岭	0.17	6.18	71.21	19.02	1.18
干坪子	3.69	10.61	21.34	0.00	0.02
三江口	0.77	24.38	58.87	7.09	0.88
大白河	4.53	26.46	106.35	3.64	0.94

2.2 水环境风险评价结果

用上述模型公式计算出的饮用水途径造成的健康风险值结果见表 7。在该途径中,致癌物质造成的致癌风险要远大于非致癌物质的健康风险,而存在的致癌物质造成的风险从大到小依次为 Cr>As>Cd,非致癌风险为 Cd>Cu>Cr>Zn>As。各采

样点中,红沙沟的健康风险最大,其次是洒海村与三江口,可能与该地区更接近矿区有关,金沙江点风险值最低的原因可能是因为监测点地处河流与长江交汇处,水中重金属被稀释导致浓度降低。U. S. EPA 建议的致癌物质的风险值在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$,而该地区的各致癌物质的健康风险值均在 10^{-4} 区间,其中 Cr 为 $1.10 \times 10^{-4} \sim 4.88 \times 10^{-4}$; As 为 $0.94 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-4}$; Cd 为 $0.11 \times 10^{-4} \sim 0.19 \times 10^{-4}$,其致癌风险较其他已研究的非矿产地区偏高,其致癌风险值也高于 EPA 建议的值,具有较大的致癌风险。对于非致癌物质,Cd 的健康风险最大,其次是 Cu,推测可能是由附近的铜矿造成的。非致癌物质造成的健康风险值均在 10^{-10} 区间,证明其导致的健康风险影响极小,非致癌健康风险可忽略。

表 7 饮用途径产生的健康风险

Table 7 Intake health risk in water

采样点	$R_c (\times 10^{-4})$						$R_n (\times 10^{-10})$						$R_k (\times 10^{-4})$
	Cr	Cu	As	Pb	Cd	Zn	Cr	Cu	As	Pb	Cd	Zn	
大白河	2.55	-	0.94	-	0.14	-	6.29	17.06	0.13	-	22.45	0.57	3.63
三江口	3.81	-	1.07	-	0.16	-	9.43	43.10	0.14	-	26.94	1.17	5.05
红沙沟	4.88	-	3.20	-	0.19	-	12.12	87.10	0.43	-	31.43	4.67	8.72
洒海村	2.92	-	2.60	-	0.19	-	7.18	44.00	0.35	-	31.43	2.29	5.71
干坪子	1.47	-	2.54	-	0.16	-	3.59	48.49	0.34	-	26.94	3.62	4.17
刺坪子	1.65	-	1.94	-	0.14	-	4.04	47.59	0.26	-	22.45	3.14	3.72
金沙江	1.10	-	1.14	-	0.11	-	2.69	20.65	0.15	-	17.96	1.50	2.35

2.3 土壤环境风险评价

表 8 为直接摄入与皮肤接触两种途径所产生的致癌风险评价。在两种途径中通过皮肤接触产生的致癌风险要明显大于直接摄入的风险,大约是直接摄入途径的 10 倍。造成致癌风险的元素有 As、Cd,且 As 致癌风险大于 Cd,证明在东川区域土壤中 As 是主要致癌物质。致癌风险最大的两个地点分别为大白河与三江口,而其他采样点健康风险值均在相近范围内。

直接摄入与皮肤接触途径产生的非致癌健康风险评价值分别见表 9 和表 10。由结果可知,皮肤接触途径的风险要大于直接摄入的风险,原因可能是皮肤接触土壤频率更高。此外,大白河与三江口的非致癌健康风险同样大于其他各点。待测金属元素对人体造成的非致癌健康风险顺序依次为 As>Cu>Pb>Cd>Zn>Cr,可能是因为附近矿区造成的结果。两种途径的健康风险值都未达到 1,证明土壤中存在健康风险较小。

表 8 土壤中重金属的致癌健康风险

Table 8 Carcinogenic health risk of heavy metal in soil

采样点	直接摄入			皮肤接触		
	As($\times 10^{-5}$)	Cd($\times 10^{-7}$)	Risk ₁ ($\times 10^{-5}$)	As($\times 10^{-6}$)	Cd($\times 10^{-6}$)	Risk ₂ ($\times 10^{-6}$)
大白河	4.47	16.04	4.63	29.07	2.77	31.84
三江口	3.94	20.63	4.14	25.62	3.53	29.15
红沙沟	0.88	8.88	0.97	5.73	1.54	7.26
洒海村	0.92	7.16	0.99	6.00	1.24	7.24
干坪子	1.06	8.60	1.15	6.92	1.48	8.40
刺坪子	1.13	8.60	1.21	7.32	1.48	8.81
金沙江	1.18	5.73	1.23	7.64	0.99	8.63

表 9 直接摄入途径产生的非致癌健康风险

Table 9 Health risk of heavy metal via intake non-carcinogenic

采样点	HQ _i						HQ(×10 ⁻²)
	Cr(×10 ⁻⁴)	Cu(×10 ⁻³)	As(×10 ⁻⁵)	Pb(×10 ⁻³)	Cd(×10 ⁻⁴)	Zn(×10 ⁻⁵)	
大白河	16.90	26.50	17.37	3.65	7.67	27.98	3.30
三江口	10.04	10.64	15.32	9.54	9.86	14.10	2.24
红沙沟	2.71	0.66	3.42	-	4.25	-	0.14
洒海村	1.18	-	3.59	-	3.42	-	0.05
干坪子	0.48	0.50	4.14	-	4.11	1.08	0.10
刺坪子	0.55	0.45	4.38	-	4.11	0.48	0.09
金沙江	1.04	0.20	4.58	-	2.74	0.44	0.06

表 10 皮肤接触途径产生的非致癌健康风险

Table 10 Skin contacting non-carcinogenic health risk of heavy metal in soil

采样点	HQ _i						HQ(×10 ⁻¹)
	Cr(×10 ⁻⁵)	Cu(×10 ⁻³)	As(×10 ⁻²)	Pb(×10 ⁻²)	Cd(×10 ⁻³)	Zn(×10 ⁻⁴)	
大白河	11.33	33.31	29.12	1.47	7.72	28.15	3.50
三江口	6.74	13.38	25.68	3.84	9.92	14.18	3.20
红沙沟	1.82	0.83	5.74	-	4.27	-	0.63
洒海村	0.79	0.00	6.02	-	3.45	-	0.64
干坪子	0.32	0.62	6.94	-	4.13	1.09	0.74
刺坪子	0.37	0.57	7.35	-	4.13	0.48	0.78
金沙江	0.70	0.24	7.67	-	2.76	0.44	0.80

2.4 植物环境风险评价

植物的根与茎叶的健康风险评价分别见表 11 和表 12。由两表比较可看出,根部的风险值要大于茎叶部分,可能是因为根部与土壤直接接触,重金属吸收量更大。各元素中 Cu 造成的健康风险值最大,原因可能有:土壤中含有的 Cu

浓度较高;植物对 Cu 的吸收能力强;Cu 的人体健康风险占比较高。各采样点的健康风险值相差不大,都小于 1,人体健康风险较小,可能与环境的治理与植物更替生长不断吸收土壤中的重金属有关。计算结果与其他矿区相似,健康风险比非矿产地区高。

表 11 植物根部健康风险评价

Table 11 Health risk of heavy metal in roots

样品	HQ _i					HQ(×10 ⁻¹)
	Cr(×10 ⁻²)	Cu(×10 ⁻²)	Zn(×10 ⁻³)	As(×10 ⁻³)	Cd(×10 ⁻²)	
沙子岭(根)	0.14	5.17	5.56	55.11	1.43	1.28
三江口(根)	1.56	29.71	3.50	2.28	9.83	4.17
洒海村(根)	0.50	20.02	2.11	-	2.23	2.30
干坪子(根)	1.36	62.69	5.63	0.17	5.34	7.00
红沙沟(根)	0.59	3.32	0.79	0.04	-	0.40
大白河(根)	3.32	32.56	4.518	1.13	1.17	3.76
刺坪子(根)	4.02	17.94	8.09	-	7.63	3.04

表 12 植物茎叶健康风险评价

Table 12 Health risk of heavy metal in stems

样品	HQ _i					HQ(×10 ⁻²)
	Cr(×10 ⁻³)	Cu(×10 ⁻²)	Zn(×10 ⁻³)	As(×10 ⁻³)	Cd(×10 ⁻²)	
沙子岭	0.37	2.65	5.09	8.15	2.54	6.55
三江口	1.65	10.45	4.20	3.04	1.89	13.22
洒海村	24.43	5.37	4.11	0.64	0.45	8.73
干坪子	7.90	4.55	1.52	-	0.05	5.54
红沙沟	1.54	5.46	6.21	6.62	1.90	8.80
大白河	9.70	11.34	7.60	1.56	2.02	15.24
刺坪子	1.42	7.65	4.55	1.40	-	10.76

3 结论

本文针对东川矿区附近区域的地表水、土壤与植物环境进行了采样调查,旨在研究该地区多种环境因素的重金属污染状况并对其造成的人体健康风险作出评价。研究结果表明,水环境中存在的健康风险最大,土壤中非致癌物质造成的健康风险远大于致癌物质。各环境因素对人体造成的健康风险由大到小为水>植物>土壤,其中,对人体健康影响最大的元素主要是 Cu、As、Cd,可能与附近矿区所产矿物以及矿渣排放有关。

参考文献

- [1] 李祥平,齐剑英,陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. 环境科学学报,2011,31(3):547-553.
LI Xiangping, QI Jianying, CHEN Yongheng. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the main drinking water sources in Guangzhou [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(3): 547-553
- [2] 丁敏,陈璐,万春燕,等. 鲁西南沿黄县区玉米中铅、镉、砷、铬的重金属含量及健康风险评价[J]. 中国无机分析化学,2022,12(1):57-63.
DING Min, CHEN Lu, WAN Chunyan, et al. Heavy metal content and health risk assessment of lead, cadmium, arsenic and chromium in corn grains in Counties along the Yellow River of southwest Shandong province[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022, 12(1): 57-63.
- [3] 刘文政,贾亚琪,殷忠. 贵阳污灌区菜地土壤团聚体中有机碳和重金属的含量特征及相关性分析[J]. 中国无机分析化学,2021,11(5):36-43.
LIU Wenzheng, JIA Yaqi, YIN Zhong. Content characteristics and correlation of organic carbon and heavy metals in aggregates of wastewater irrigation soil of Guiyang[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(5): 36-43.
- [4] 赵振,史烨弘,毛小晶,等. 某冶炼厂周边土壤重金属污染评价分析及源解析研究[J]. 中国无机分析化学,2020,10(4):22-27.
ZHAO Zhen, SHI Yehong, MAO Xiaojing, et al. Characteristics assessment and source analysis of heavymetal pollution in soil surrounding a smelter[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(4): 22-27.
- [5] 张迪,周明忠,熊康宁,等. 贵州遵义松林 Ni-Mo 多金属矿区土壤 Ni 污染及农作物健康风险评价[J]. 农业环境科学学报,2019,38(2):356-365.
ZHANG Di, ZHOU Mingzhong, XIONG Kangning, et al. Risk assessment of nickel in soils and crops around the Ni-Mo polymetallic mining area in Songlin, Zunyi, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(2): 356-365.
- [6] OLAWOYIN R, OYEWOLE S A, GRAYSON R L. Potential risk effect from elevated levels of soil heavy metals on human health in the Niger delta [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2012, 85(3): 120-130.
- [7] VAROL M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River(Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 195(1): 355-364.
- [8] 生态环境部,中华人民共和国国家环境保护标准. 水质 65 种元素的测定电感耦合等离子体质谱法: HJ 700—2014[S]. 北京:中国环境科学出版社,2014.
Ministry of Ecological Environment, National Environmental Protection Standards of the People's Republic of China. Determination of 65 elements in water quality by inductively coupled plasma mass spectrometry: HJ 700—2014 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.
- [9] 生态环境部,中华人民共和国国家环境保护标准. 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[S]. 北京:中国环境科学出版社,2015.
Ministry of Ecological Environment, National Environmental Protection Standards of the People's Republic of China. Determination of metal elements in solid wastes by inductively coupled plasma mass spectrometry: HJ 766—2015 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.
- [10] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中多元素的测定: GB 5009. 268—2016[S]. 北京:中国质检出版社 2016.
State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. State food and drug administration national standard for food safety, determination of multi-elements in food: GB 5009. 268—2016 [S]. Beijing: China Quality Inspection press, 2016.
- [11] 黄温柔. 珠江河口与河网水环境安全评价研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
HUANG Wenrou. Water environment security assessment for the pearl river estuary and river network [D].

- Guangzhou; South China University of Technology, 2019.
- [12] 李鑫. 大庆市大同区土壤重金属污染及健康风险评估[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2015.
- LI Xin. Pollution and health risk assessment of soil heavy metal in Datong district of Daqing city [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2015.
- [13] 张瑜, 吴以中, 宗良纲, 等. POPs 污染场地土壤健康风险评估[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(7): 135-140.
- ZHANG Yu, WU Yizhong, ZONG Lianggang, et al. Health risk assessment: Case study of a brownfield contaminated by POPs at Changzhou [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(7): 135-140.
- [14] U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund volume1: human health evaluation manual. Part E; supplemental guidance for dermal risk assessment[R]. Washington DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2004.
- [15] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2014-2021.
- YANG Gang, SHEN Fei, ZHONG Guijiang, et al. Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 2014-2021.
- [16] 李武江, 朱四喜, 王众, 等. 西南山地煤矿区耕地土壤-农作物重金属富集及健康风险评估[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(5): 22-30.
- LI Wujiang, ZHU Sixi, WANG Zhong, et al. Heavy metals enrichment and health risk assessment of cultivated soil-crops in mountainous coal mining areas of southwest China [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021, 11(5): 22-30.
- [17] 段小丽. 暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评估中应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- DUAN Xiaoli. Research method of exposure parameters and its application in environmental health risk assessment [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [18] 生态环境部. 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.
- Ministry of Ecological Environment. Environmental quality standard for surface water: GB 3838—2002 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [19] 生态环境部. 土壤环境质量标准: GB 15618—1995 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- Ministry of Ecological Environment. Soil environmental quality standard: GB 15618—1995 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.