

doi: 10.12029/gc20220825003

李剑锋, 冯李霄. 2023. 湖南某锡矿区土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 中国地质, 50(3): 897–910.

Li Jianfeng, Feng Lixiao. 2023. Health risk assessment of heavy metal pollution in soil of a tin mining area in Hunan Province[J]. Geology in China, 50(3): 897–910(in Chinese with English abstract).

湖南某锡矿区土壤重金属污染及健康风险评估

李剑锋, 冯李霄

(辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:【研究目的】本文采集表层土壤 114 件、柱状土壤 3 组, 分析测定 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As、Hg 等 7 种重金属元素含量; 评价锡矿区周边土壤重金属污染状况与风险。【研究方法】采用地累积指数法、潜在生态风险指数法和健康风险评估模型, 对该地区污染程度、潜在生态风险和人体健康风险进行评价。【研究结果】(1) 研究区土壤重金属平均含量表现为 $As > Zn > Pb > Cu > Cr > Cd > Hg$; (2) 就空间分布而言, Cu、Pb、Zn、Cd 和 As 富集区主要分布于矿区附近, 含量随深度增加而降低, 在 60 cm 之下趋于稳定; Cr 富集区主要分布于人口较密集的生活区, Hg 分布均匀, 无明显富集区; (3) 地累积结果显示, 研究区 As 和 Cd 呈极重污染, Cu、Pb 和 Zn 呈轻—极重污染, Cr 和 Hg 呈现无一轻度污染; (4) 潜在生态结果显示, 研究区整体处于极重污染水平, As 和 Cd 生态风险最为突出; (5) 健康风险评估显示, 土壤中 As 和 Pb 为主要非致癌因子, As 为主要致癌因子; As 元素非致癌与致癌风险最大, 经口摄入为最主要的暴露途径, 儿童健康更易受到重金属污染的威胁。【结论】研究区 7 种重金属均在一定程度上受到人为因素的影响, As 和 Cd 受人为影响程度最大, 其次为 Pb、Zn 和 Cu, Cr 和 Hg 受人为影响较弱。

关键词: 土壤重金属; 污染程度; 风险评估; 矿山地质环境调查工程; 湖南

创 新 点: 本文对锡矿区土壤中重金属含量表层与垂向分布规律进行总结, 联用多种评价方法综合评价了研究区土壤中重金属的污染程度、生态风险和健康风险。

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)03-0897-14

Health risk assessment of heavy metal pollution in soil of a tin mining area in Hunan Province

LI Jianfeng, FENG Lixiao

(College of Geographic Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: This paper is the result of mine environmental geological survey engineering.

[Objective] This paper investigates the status and risk of heavy metal pollution in the soil surrounding a tin mining area, focusing on 7 heavy metal elements, namely Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, As and Hg, found in 114 surface soil and three column soil group. **[Methods]** The pollution level, potential ecological risk and human health risk in the area were evaluated using the geo-accumulation index method, potential ecological risk index method and health risk assessment model. **[Results]** The average content of soil heavy metals in the study area manifested that $As > Zn > Pb > Cu > Cr > Cd > Hg$. In terms of spatial distribution, the elements Cu, Pb, Zn, Cd

收稿日期: 2022-08-25; 改回日期: 2023-02-15

作者简介: 李剑锋, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事地貌学与矿床学研究工作; E-mail: 317649474@qq.com。

and As are predominantly concentrated near the mine area, exhibiting a decrease in content as the soil depth increases and tend to be stable below 60cm. The Cr element is primarily localized within congested area. While the Hg element displays a uniform distribution. The results of the cumulative land show that the As and Cd exhibit high levels of pollution, while Cu, Pb and Zn display low-heavy level polluted. The Cr and Hg elements show low-no level pollution in the study area. Potential ecological results reveal that the study area experiences high pollution levels, with As and Cd posing the most severe ecological risks. Health risk assessment shows that As and Pb elements in the soil are the main non-carcinogenic factors and the As element is the main carcinogenic factor. The As element is the main risk of non-carcinogenic and carcinogenicity. The oral ingestion is the main route of exposure, and children are more vulnerable to heavy metal pollution. **[Conclusion]** To varying degrees, anthropogenic activities have influenced the presence of all seven heavy metals within the study area. The As and Cd elements are the most influenced by humans, followed by Pb, Zn and Cu. The Cr and Hg elements have been less affected by humans.

Key words: soil heavy metal; pollution level; risk assessment; mine environmental geological survey engineering; Hunan

Highlights: This paper summarizes the surface and vertical distribution patterns of heavy metal content in the soil of a tin mining area, and combines various evaluation methods to comprehensively evaluate the pollution level, ecological risk and health risk of heavy metals in the soil of the study area.

About the first author: LI Jianfeng, male, born in 1986, doctor, lecturer, mainly engaged in geomorphology and mineralogy research; E-mail: 317649474@qq.com.

1 引 言

地壳中天然含有一定量的重金属,其中一些元素(如Cu、Zn、Cr)是人体代谢必需的;在自然条件下,它们很少累积到对环境和生态系统造成有害影响的水平(Sun et al., 2018)。然而,随着工业发展对矿产资源需求的增加,在金属矿山开采过程中,矿体中的重金属元素容易产生流失并进入土壤中,导致后者重金属含量升高;最终,它们可能通过各种介质进入人体,对矿区附近的居民构成潜在的健康风险(Lu et al., 2019; 张进德等, 2021; Chen et al., 2023)。Singh and Kalamdhad(2011)在重金属对土壤、植物、人类健康和水生生物的影响研究中,发现重金属在过度累积下,Cu的长期接触会导致肝肾损伤和中枢神经损伤,Zn的长期接触会导致系统功能失调、生长和繁殖受损,Cr的长期接触将导致肝、肾脏循环和神经组织受损等健康问题。Duruibe et al.(2007)对重金属污染和人类的生物毒性效应研究中,发现Cd、Pb、Hg在人类生物化学或生理学中没有任何已知的功能,在生物体中也不是天然存在的;因此,即使在较低暴露下,也会在生物中累积并造成影响。Cd对肾脏和骨骼具有高度毒性,较高水平的吸入会对肺部产生损伤,可能会引起呕吐和腹泻;长时接触会累积在肾脏中,最终导致肾脏疾病和肺损伤(Bernard, 2008)。Pb对人体具有生理和

神经毒性,可能导致肾脏、生殖系统、肝脏和大脑功能障碍,严重可导致死亡(Zahra and Kalim, 2017);已观察到Pb对神经系统有着最为敏感的影响,尤其是对儿童和婴儿,长期的接触会导致儿童发育不良、智商低下(Reuben et al., 2017)。Hg则被认为是环境中毒性较大的重金属,可以与其他元素结合形成无机汞和有机汞;会损害大脑、肾脏和发育中的胎儿(Al Osman et al., 2019)。Jaishankar et al.(2014)研究发现As具有显著的毒性和致癌性,以氧化物或硫化物的形式广泛存在;低剂量摄入会导致恶心和呕吐、心率异常、血管损伤等症状,长期接触可导致皮肤癌、肺癌、肝癌和膀胱癌。

湖南省矿产资源丰富,矿种较多,享有“有色金属之乡”的美誉。在采、选、冶等矿业活动过程中产生的“三废”会对周边土壤生态环境产生破坏。研究表明,湖南省因有色金属矿产开采导致的重金属污染土地面积达 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省总面积的13%(郭朝晖和朱永官, 2004)。虽然有部分学者对湖南省矿区土壤污染开展研究(余旋等, 2016; 江诚毅, 2020; 余嘉衍等, 2020),但针对锡矿区污染资料仍非常有限,需要进一步开展针对性的调查与评价。研究区位于湘南地区,区内有成规模的锡矿区、工业区以及农业区;在生活与生产过程中对周边土壤具有潜在的威胁,而其土壤重金属污染和健康风险研究几近空白。因此,基于对生态环境和当地居民

人体健康的保护,本文对研究区土壤重金属展开研究,采用多元评价评估锡矿区重金属含量与分布特征,探讨重金属污染程度与生态风险,为当地土壤环境安全及受同样问题影响的地区提供参考与科学依据。

2 区域地质与研究方法

2.1 研究区概况

研究区区域地层以南华系、泥盆系,石炭系为主(图1a),前者为浅变质碎屑岩夹碳酸盐岩,主要分布于泗洲山背斜;后者为浅海相碳酸盐岩夹滨海相碎屑岩,分布于大义山岩体周围;此外,河流周围发育少量第四系,为洪积、冲积及残坡积层。区域基底褶皱总体呈NNE走向,控制着区域整体构造格架;盖层褶皱多呈近SN—NNW向分布于岩体周边,背斜多具紧密线型特征,向斜则较开阔;区域断裂构造总体走向325°,倾向北东、倾角大于65°;按走向划分为NE、NW—NNW、NW、NNW—近SN向四组(张遵遵等,2022)。区域岩浆岩主要为大义山岩体,研究区主要发育中细粒斑状角闪黑云二长花岗岩

岩($\eta\gamma J_3^a$)、中细粒斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma J_3^c$)、细粒少斑状黑云母二长花岗岩($\eta\gamma J_3^b$)、细粒斑状(含电气石)二云母二(正)长花岗岩($\eta\gamma J_3^e$)、中细粒斑状角闪黑云二长花岗岩为本文所采集样品的母岩。

大义山是南岭地区重要的成锡岩体,自2000年以来,该区已查明万金窝、猫仔山、藤山坳、白沙子岭、大顺窿、台子上、狮形岭等大中型矿山7处,小型矿床(点)40余处;累计提交锡资源量10余万t。本文研究对象为该岩体东南部某大型锡矿区,地处南岭北麓,春陵江中上游。研究区地形地貌复杂,山地丘陵约占总面积的3/4,属于典型丘岗山地地带;地势由东南向西北倾斜,东南地势高峻多山地,西北山势低矮,以丘陵为主。研究区土类主要分为红壤、黄壤与水稻土3类,以林地、荒草地、耕地与园地为主,种植作物以烤烟、蔬菜、水稻为主。本区属亚热带湿润性季风气候,气候温暖,光照充足,雨热同期,1月平均气温2.5℃,7月平均气温28℃。区内年降雨量1460 mm,年内降雨变化较大,多集中于3—7月。

2.2 样品采集与分析

调查与研究表明,多数矿区土壤存在显著的重

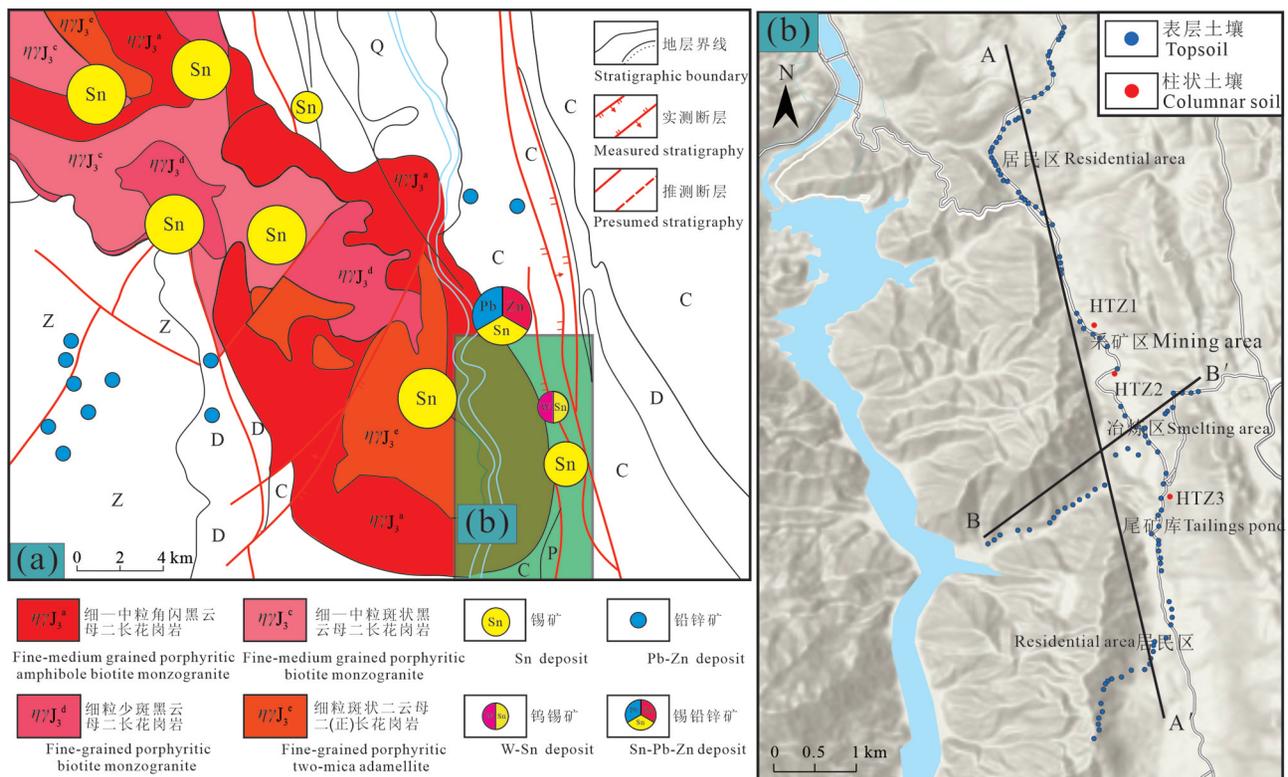


图1 研究区概况(a)与采样点位置(b)

Fig.1 The overview of study area (a) and the location of sampling site (b)

金属异常或污染,本文结合已有分析先例和研究区成矿元素的组成特点,选取Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As、Hg元素为分析内容。在矿区以及周边地区采集114个表层土壤样品(图1b),其中南北向土壤样本89个,东西向土壤样本25个,采样深度为0~20 cm,并在区内工程揭露的天然土壤边坡取3个垂向剖面,深度140~220 cm。土壤样品采用多点采样法,去除植物根系、碎石等杂质,留取1 kg装入样品袋。干燥后研磨过100目尼龙筛,取筛下粒级样品150 g备用。样品测试在中国地质调查局武汉地质调查中心完成,Cu、Pb、Zn和Cr含量采用原子吸收分光光度计AAS nos300-ZEEnit600测定,Cd、As和Hg含量使用全自动原子荧光分光光度计AFS-230E测定;采用国家一级标准物质对准确度和精密度进行验证,所有样本测试分析均在允许值范围内;Cu、Pb、Cr、As元素检出限为0.01 mg/kg,Cd、Hg元素检出限0.001 mg/kg,分析精度优于0.8%。

2.3 评价方法

2.3.1 地累积指数

地累积指数法是综合考虑人为污染因素、地球化学背景值和自然成岩作用的共同影响,判别土壤重金属污染程度的一种评价方法(Xia et al., 2020)。计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_i}{K \cdot B_i}\right)$$

式中, C_i 为第 i 种重金属的实测值, B_i 为土壤中第 i 种元素的地球化学背景值, K 为成岩作用引起的背景值的变动系数(通常取值 $K=1.5$)。根据 Forstner et al. (1993) 提出的划分标准, 可将重金属分为 7 个等级(表 1)。

表 1 地累积指数污染程度分级
Table 1 Classifications of geo-accumulation index pollution level

地累积指数 I_{geo}	级别	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	轻污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中-重污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	重污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	重-极重污染
$5 \leq I_{geo}$	6	极重污染

2.3.2 潜在生态风险评估

采用 Hakanson 潜在生态风险指数法评价土壤重金属的生态风险(表 2), 该指数法是将生态效应、毒理效应和环境效应联系在一起, 可系统、全面地评估土壤重金属污染状况(何东明等, 2014; 高瑞忠等, 2019)。计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot P_i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i}$$

式中, RI 为综合潜在生态风险指数; E_r^i 为第 i 种重金属单项潜在生态风险指数; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性相应系数; 各毒性响应系数为: $Cu=5$ 、 $Pb=5$ 、 $Zn=1$ 、 $Cr=2$ 、 $Cd=30$ 、 $As=10$ 、 $Hg=40$ (Hakanson, 1980; 徐争启等, 2008); P_i 为重金属 i 污染指数; C_i 为重金属 i 的实测值; C_n^i 为土壤重金属 i 元素背景值。

2.3.3 人体健康风险评估

根据 USEPA 风险评估方法, 土壤重金属往往通过 3 种途径被人体摄入并危害人体健康, 即经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒物。计算公式为:

$$ADD_{ing} = \frac{C_i \times IR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$$ADD_{derm} = \frac{C_i \times SA \times SF \times ABS \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

$$ADD_{inh} = \frac{C_i \times PM_{10} \times DAIR \times PLAF \times FSPO \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{derm} 和 ADD_{inh} 分别代表经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入的日均暴露剂量; C_i 为土壤中重金属 i 的含量。暴露皮肤表面积参照(刘同等, 2022), 其他参数值(表 3)参照《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)推荐值以及 EPA 暴露因子手册。

健康风险效应分析分为致癌效应和非致癌效应, 其中非致癌效应通过非致癌风险指数(HQ)和总

表 2 潜在生态风险评价等级划分
Table 2 Classifications potential ecological risk evaluation level

E_r^i	生态风险级别	RI	生态风险级别
≤ 40	轻微	≤ 150	轻微
40~80	中度	150~300	中度
80~160	重度	300~600	重度
160~320	很重	>600	极重
>320	极重		

表3 健康风险评估模型暴露参数
Table 3 Exposure parameters of health risk assessment model exposure parameters

符号	含义	单位	成人	儿童
IR	土壤摄入率	mg·d ⁻¹	100	200
CF	转换因子	kg·mg ⁻¹	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
EF	暴露频率	d·a ⁻¹	350	350
ED	暴露年限	a	24	6
BW	平均体重	kg	61.8	19.2
SA	暴露皮肤表面积	cm ²	5075	2448
SF	皮肤沾粘系数	mg·cm ⁻² ·d ⁻¹	0.07	0.2
ABS	皮肤吸收因子	—	0.001	0.001
PM ₁₀	空气中可吸入悬浮颗粒物含量	mg·cm ⁻³	0.15	0.15
DAIR	每日空气呼吸量	m ³ ·d ⁻¹	14.5	7.5
PIAF	吸入颗粒物在人体内滞留比例	—	0.75	0.75
FSPO	空气中来自土壤的颗粒物所占比例	—	0.5	0.5
AT	平均暴露时间(致癌)	d	27740	27740
AT	平均暴露时间(非致癌)	d	ED×365	ED×365

非致癌风险指数(HI)表示。致癌效应通过致癌风险指数(CR)和总致癌风险指数(TCR)表示。

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

$$HI = \sum HQ$$

$$CR = ADD \times SF$$

$$TCR = \sum CR$$

式中,ADD表示摄入、皮肤或呼吸暴露途径的日均暴露含量,RfD表示参考剂量,SF为斜率因子,具体

表4 不同暴露途径的参考剂量(RfD)和斜率因子(SF)
Table 4 Reference dose (RfD) and slope factor (SF) of different exposure routes

重金属	呼吸吸入		皮肤接触		经口摄入	
	RfD	SF	RfD	SF	RfD	SF
Cu	1.20×10 ⁻²	—	4.00×10 ⁻²	—	4.00×10 ⁻²	—
Pb	3.52×10 ⁻³	4.20×10 ⁻²	5.25×10 ⁻⁴	1.70×10 ⁻²	3.50×10 ⁻³	8.50×10 ⁻³
Zn	3.00×10 ⁻¹	—	6.00×10 ⁻²	—	3.00×10 ⁻¹	—
Cr	2.86×10 ⁻⁵	42	6.00×10 ⁻⁵	20	3.00×10 ⁻³	5.01×10 ⁻¹
Cd	2.40×10 ⁻⁶	6.3	1.00×10 ⁻⁵	6.1	1.00×10 ⁻³	6.1
As	3.01×10 ⁻⁴	15.1	1.23×10 ⁻⁴	3.66	3.00×10 ⁻⁴	1.5
Hg	7.66×10 ⁻⁵	—	2.10×10 ⁻⁵	—	3.00×10 ⁻⁴	—

参考值见表4(王昌宇等,2021;刘同等,2022)。当HI≤1时,非致癌风险属于可接受范围,当HI>1时,意味将因接触特定的有毒元素而具有潜在的非致癌风险。TCR<1.0×10⁻⁶不会对人体产生致癌风险;1.0×10⁻⁶≤TCR≤1.0×10⁻⁴时,致癌风险属于可接受范围;TCR>1.0×10⁻⁴时,则认为致癌风险不可接受,会对人体产生致癌风险(Rehmana et al., 2018)。

3 结果与讨论

3.1 表层土壤重金属含量与分布特征

结果显示研究区土壤中重金属含量均值均超出湖南省土壤环境背景值(表5),其中,Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As和Hg含量均值分别为湖南土壤背景值的12.26、35.27、11.84、1.66、218.52、115.31和2.11倍,样本超标率分别为94.74%、100%、100%、67.54%、100%、100%和82.46%。参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)筛选值,重金属元素存在部分点位超过筛选值的情况,其中,Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As和Hg超出筛选值样本分别占总样本的45.61%、79.82%、63.16%、4.39%、84.21%和100%,Hg样本均未超标。变异系数可以反映重金属元素在空间上的离散和变异程度,变异系数越大意味着受到人为影响越大(Li et al., 2017)。研究区表层土壤变异系数由大到小依次为: Cd > As > Cu > Zn > Pb > Cr > Hg, Cd、As、Cu、Zn和Pb变异系数分别为2.24、2.08、1.66、1.59和1.40,表明这些重金属分布具有明显空间差异,存在人为污染的可能。

研究区土壤环境地球化学表层剖面显示,土壤中Cd、As、Pb、Zn和Cu元素含量在空间分布上具有明显的相似性(图2)。富集区均位于矿区附近,尾矿库与冶炼区为矿山主要污染区域,可见冶炼区以及尾矿库具有集中分布和复合污染的特点(Hu et al., 2018);Cr元素含量较低,富集区呈岛状分布,集中于居民区;Hg元素浓度分布较均匀,高值区位于矿区北侧。综上所述,研究区土壤重金属在不同程度上受到外源物质的影响。根据土壤重金属的来源可知,土壤重金属来源主要分为自然源以及人为活动,自然来源与成土母质有关,而人为来源主要受到人为活动和强度的影响(王昌宇等,2021)。结合变异系数等已有分析初步判断,Cd、As、Pb、Zn和

表5 研究区土壤重金属含量特征分析(mg/kg)

Table 5 Characterization of soil heavy metal content in the study area (mg/kg)

特征参数	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
最小值	13.70	48.80	96.20	4.04	0.10	29.80	0.02
最大值	2240	5660	8400	329	186	19500	0.65
平均值	318.85	952.39	1113.26	113.20	17.48	1614.28	0.19
标准偏差	529.78	1333.66	1770.36	76.03	39.12	3349.73	0.11
变异系数	1.66	1.40	1.59	0.67	2.24	2.08	0.56
湖南省土壤背景值	26	27	94	68	0.08	14	0.09
超出个数	108	114	114	77	114	114	94
超标率	94.74%	100%	100%	67.54%	100%	100%	82.46%
超出倍数	12.26	35.27	11.84	1.66	218.52	115.31	2.11
农用地土壤pH>7.5	100	170	300	250	0.6	25	3.4
超出个数	52	91	72	5	96	114	0
污染风险管控标准	45.61%	79.82%	63.16%	4.39%	84.21%	100%	0
超出倍数	3.19	5.6	3.71	0.45	29.13	64.57	0.06

Cu异常富集主要是由于矿业活动中重金属流失进入土壤中造成的,Cr主要受到生活污染的影响,Hg可能受到部分人为活动的影响,但主要受到花岗岩

母岩风化作用的影响。此外,重金属污染程度还取决于重金属的迁移,雨水淋滤作用的强度是影响迁移的主要因素(Meite et al., 2018),研究区年降水量

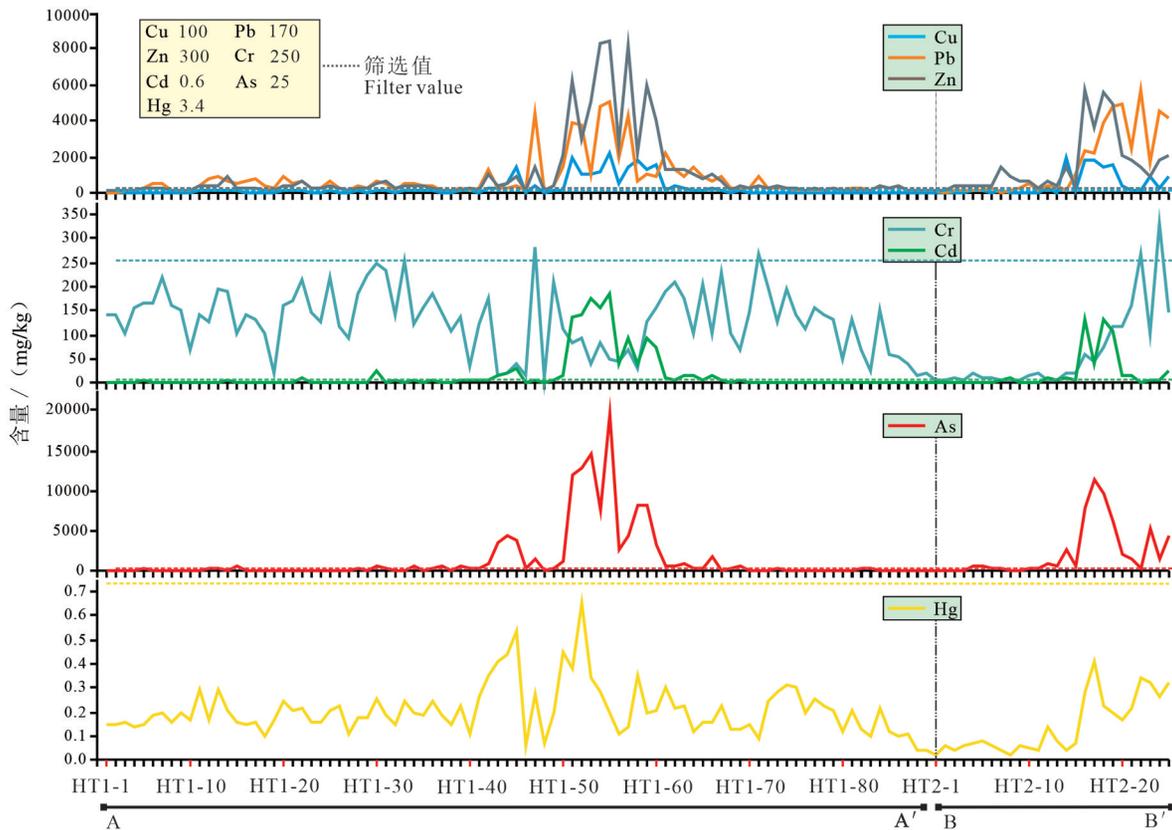


图2 表层土壤重金属含量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metal content in surface soils

约 1460 mm, 区内较强的淋滤作用可能是造成研究区污染范围较广的主要因素之一。

综上所述, 研究区内土壤中重金属浓度偏高, 并伴随向外扩散的趋势; 矿业活动被视为研究区重金属的主要来源, 通过风、水等其他可能运输的方式向周边输出重金属。由于矿区内以及居民区表层土壤中重金属的累积可能会增加当地居民的健康风险, 因此, 可以进行更多的调查, 以评估其风险和潜在的不利影响。

3.2 剖面土壤重金属含量与分布特征

为探究矿区土壤重金属垂向分布规律, 选取矿区内 HTZ1、HTZ2、HTZ3 剖面为研究对象(图 3)。Cu、Pb、Zn、Cd、As 含量随深度增加而降低, 在表层土壤中含量较高, 且在 0~60 cm 深度内含量下降较明显, 60 cm 之下深度含量趋于稳定; 这种表层土壤中重金属累积的现象, 可能受到矿业活动的影响。在不同剖面中, 剖面土壤重金属含量排序为

HTZ3 > HTZ2 > HTZ1; 根据剖面所在功能区可知, HTZ1、HTZ2 剖面均位于采矿区, 而 HTZ2 则更靠近冶炼区, HTZ3 剖面靠近尾矿坝和冶炼区。尾矿的堆积以及冶炼中产生的废气、废渣、废液对土壤重金属具有活化作用, 加速重金属的富集, 从而导致区域内重金属在环境中不断累积并高于周边地区(郭光海等, 2020)。这与郭世鸿等(2015)通过对矿区土壤重金属污染特征的研究中发现在不同功能区中污染排序呈尾矿库区 > 冶炼区 > 废弃冶炼区 > 采矿区的结果基本一致, 说明研究区矿业活动中冶炼以及尾矿的堆积是造成土壤重金属累积的主要原因, 而采矿导致的重金属累积则较小。Cr 剖面含量分布在 HTZ1、HTZ2、HTZ3 变化趋势相同, 含量增加与减少所在的深度单位略有不同: HTZ1 在 0~60 cm 重金属含量随深度增加而增加, 60~100 cm 重金属含量急剧下降, 随后逐渐上升, 至 160 cm 达到高峰, 160~220 cm 持续下降; HTZ2、HTZ3 在 20

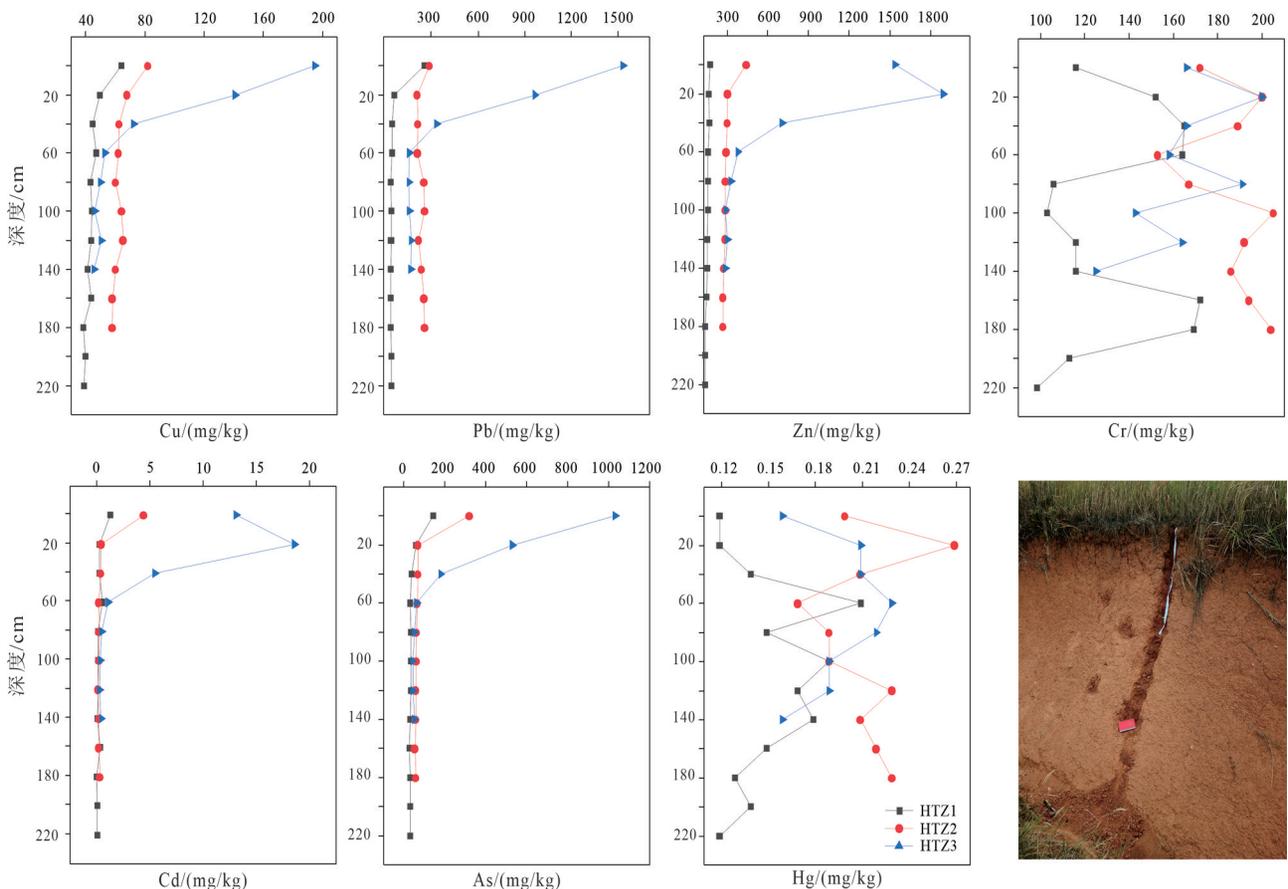


图3 柱状土壤重金属含量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of heavy metal content in columnar soils

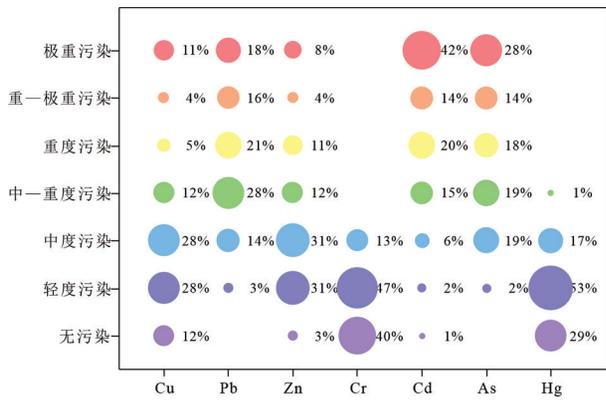


图4 土壤重金属地累积指数污染占比
Fig.4 Pollution percentage of soil heavy metal geo-accumulation index

cm处含量达到最大值,随后波动变化分别在80 cm、120 cm和100 cm、180 cm处出现小高峰。Hg剖面含量分布具有如下规律:HTZ1在0~60 cm含量增加并达到最大值,随后波动变化在100 cm、140 cm、200 cm出现小高峰;HTZ2在20 cm含量达到最大值,随后波动变化在120 cm、180 cm出现小高峰;HTZ3在0~60 cm含量波动变化并在60 cm达到最大值,随后持续下降;Cr与Hg元素在不同土层深度含量变化略有不同的状况,可能是由于不同土壤剖面中土壤理化性质相似层的厚度不同,从而影响重金属垂向迁移和富集(Bi et al., 2006)。

3.3 土壤重金属污染程度分析

采用地累积指数法对研究区表层土壤中7种重金属进行评价, I_{geo} 平均值从大到小依次为 Cd (4.80) > As(4.14) > Pb(3.55) > Zn(1.90) > Cu(1.68) > Hg(0.20) > Cr(-0.44)。不同等级污染样本占比结果表明(图4):研究区表层土壤中Cd污染最为严重,极重污染样本占比42%,中度及以上污染样本占比达97%;As和Pb元素极重污染样本分别占比28%和18%,中度及以上污染样本分别占比98%和97%;Zn和Cu极度污染样本分别占比8%和11%,中度及以上污染样本分别占比66%和72%;Hg和Cr不存在重度以上污染的样品,中度及以上污染样本占比不超过20%。研究结果表明锡矿最为突出的污染元素为Cd和As,其次为Pb、Zn和Cu,Hg和Cr污染相对较小,与前人得出的研究结果基本一致(莫佳等, 2015;陈希清等, 2021;张浙等, 2022),因此在锡

矿区周边土壤重金属污染治理中应重视Cd、As、Pb、Zn和Cu污染的治理。

3.4 土壤重金属潜在生态风险评价

研究区表层土壤Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As和Hg的潜在生态风险因子(E_i^p)平均值分别为15.94、28.01、3.71、0.91、874.07、645.71和2.20(图5),生态风险样本占比结果表明:Cr、Hg、Zn全部样本的生态风险指数均小于40,为轻微生态风险;Cu和Pb样本大部分为轻微污染,中风险以上样本占比不足20%;As生态风险处于中-极重风险区间,中度及以上风险样本占比75%;研究区Cd生态风险最高,中度及以上风险样本占比高达80%,是研究区土壤最主要的潜在生态风险因子。土壤的RI值范围为31.84~17392.10,平均值为1570.55;生态风险处于轻微-极重风险区间,其中,中度及以上风险样本占比67%,极重风险样本占比31%。整体而言,研究区生态风险较高,As和Cd元素为生态风险的主要贡献因子。

3.5 人体健康风险评价

3.5.1 暴露风险评估

基于健康风险评估模型暴露参数计算研究区土壤重金属的日暴露量,结果如表6和表7所示:成人致癌与非致癌平均日摄入量顺序为 $ADD_{ing} > ADD_{inh} > ADD_{derm}$,儿童致癌与非致癌平均日摄入量顺序为 $ADD_{ing} > ADD_{derm} > ADD_{inh}$ 。经口摄入是致癌与非致癌风险的主要摄入途径,根据不同途径暴露量可知非致癌风险暴露途径中儿童的暴露量均高于成人,致癌风险暴露途径中儿童经口摄入以及皮肤接触途径暴露量均高于成人,呼吸吸入途径低于成人。根据不同元素暴露量可知,在致癌与非致癌风险中儿童暴露量均高于成人;这可能是受到儿童的生理和行为特征(吮吸行为,以及较差的解毒和排毒能力)的影响,使得儿童的健康更易受到威胁。

3.5.2 健康风险评价

根据日暴露量和参考剂量计算研究区7种重金属的非致癌与致癌健康风险指数,结果如表8、表9所示。

非致癌健康风险指数显示:成人非致癌风险不同暴露途径顺序为 $HQ_{ing} > HQ_{inh} > HQ_{derm}$,儿童为 $HQ_{ing} > HQ_{derm} > HQ_{inh}$,表明经口摄入是非致癌风险的主要途径。从重金属元素来看,成人的非致癌风

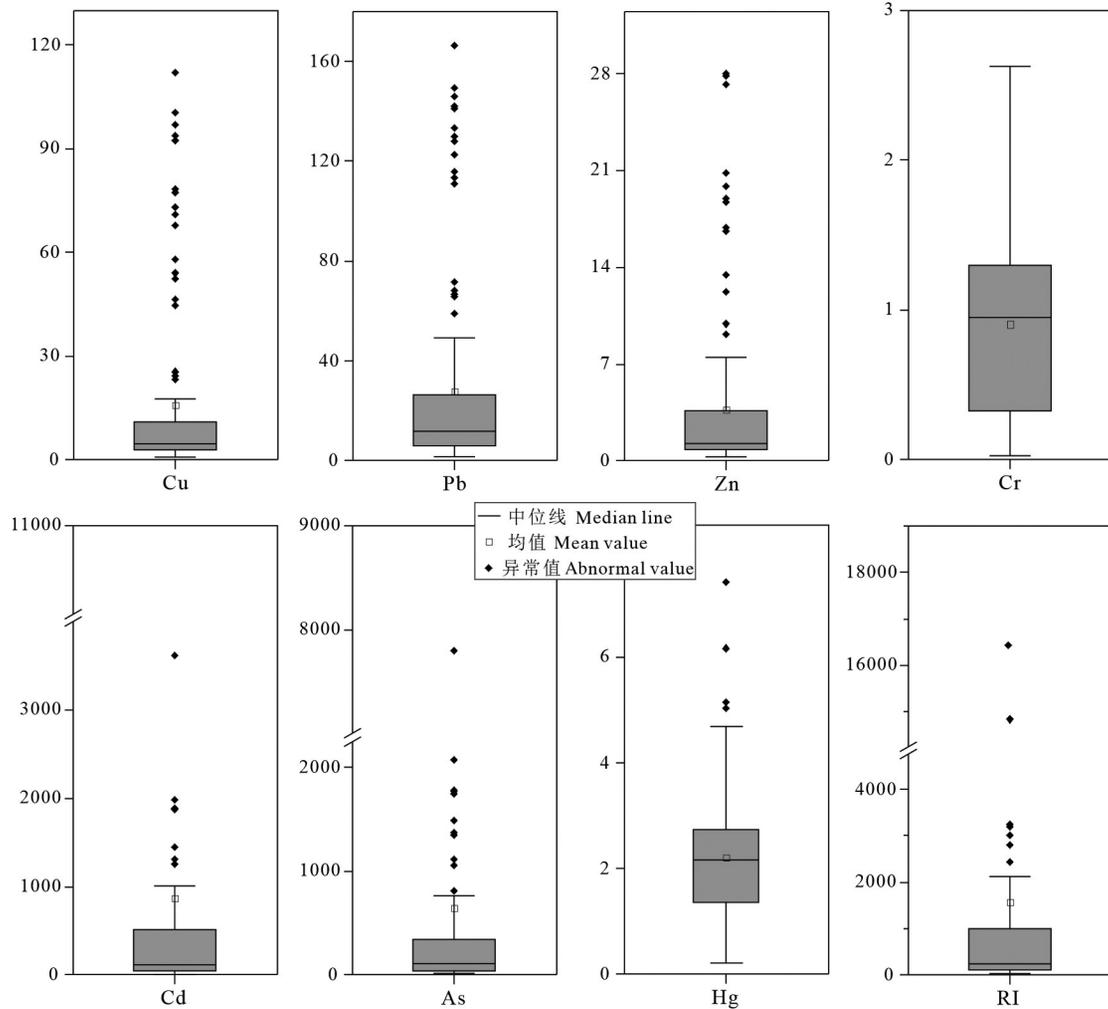


图5 土壤重金属潜在生态风险指数箱型图

Fig.5 Box plot of potential ecological risk index of soil heavy metals

险排序依次为 As > Pb > Cd > Cr > Cu > Zn > Hg, 儿童排序为 As > Pb > Cr > Cd > Cu > Zn > Hg。其中, As 和 Pb 元素为高风险元素, As 元素成人和儿童

经口摄入途径均值大于 1, Pb 元素儿童经口摄入途径均值大于 1; 意味着这些重金属将通过经口摄入途径对人体尤其是儿童健康造成不良影响。此外,

表 6 土壤重金属非致癌平均日暴露量(mg/(kg·d))

Table 6 Average daily exposure of non-carcinogenic heavy metals in soils (mg/(kg·d))

重金属	ADD _{ing}		ADD _{derm}		ADD _{inh}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cu	4.95×10 ⁻⁴	3.18×10 ⁻³	1.76×10 ⁻⁶	7.80×10 ⁻⁶	4.04×10 ⁻⁶	6.72×10 ⁻⁶	5.01×10 ⁻⁴	3.20×10 ⁻³
Pb	1.48×10 ⁻³	9.51×10 ⁻³	5.25×10 ⁻⁶	2.33×10 ⁻⁵	1.21×10 ⁻⁵	2.01×10 ⁻⁵	1.50×10 ⁻³	9.56×10 ⁻³
Zn	1.73×10 ⁻³	1.11×10 ⁻²	6.14×10 ⁻⁶	2.72×10 ⁻⁵	1.41×10 ⁻⁵	2.35×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻³	1.12×10 ⁻²
Cr	1.76×10 ⁻⁴	1.13×10 ⁻³	6.24×10 ⁻⁷	2.77×10 ⁻⁶	1.43×10 ⁻⁶	2.39×10 ⁻⁶	1.78×10 ⁻⁴	1.14×10 ⁻³
Cd	2.71×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁴	9.64×10 ⁻⁸	4.27×10 ⁻⁷	2.21×10 ⁻⁷	3.68×10 ⁻⁷	2.74×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁴
As	2.50×10 ⁻³	1.61×10 ⁻²	8.90×10 ⁻⁶	3.95×10 ⁻⁵	2.04×10 ⁻⁵	3.40×10 ⁻⁵	2.53×10 ⁻³	1.62×10 ⁻²
Hg	2.99×10 ⁻⁷	1.92×10 ⁻⁶	1.06×10 ⁻⁹	4.71×10 ⁻⁹	2.44×10 ⁻⁹	4.06×10 ⁻⁹	3.03×10 ⁻⁷	1.93×10 ⁻⁶
ADD	6.41×10 ⁻³	4.12×10 ⁻²	2.28×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻⁴	5.23×10 ⁻⁵	8.70×10 ⁻⁵	6.48×10 ⁻³	4.14×10 ⁻²

表7 土壤重金属致癌平均日暴露量 (mg/(kg·d))
Table 7 Average daily exposure of soil heavy metals causing cancer (mg/(kg·d))

重金属	ADD _{ing}		ADD _{derm}		ADD _{inh}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Pb	4.67×10 ⁻⁴	7.51×10 ⁻⁴	1.66×10 ⁻⁶	1.84×10 ⁻⁶	3.81×10 ⁻⁶	1.58×10 ⁻⁶	4.72×10 ⁻⁴	7.54×10 ⁻⁴
Cr	5.55×10 ⁻⁵	8.93×10 ⁻⁵	1.97×10 ⁻⁷	2.19×10 ⁻⁷	4.52×10 ⁻⁷	1.88×10 ⁻⁷	5.61×10 ⁻⁵	8.97×10 ⁻⁵
Cd	8.57×10 ⁻⁶	1.38×10 ⁻⁵	3.04×10 ⁻⁸	3.37×10 ⁻⁸	6.99×10 ⁻⁸	2.91×10 ⁻⁸	8.67×10 ⁻⁶	1.38×10 ⁻⁵
As	7.91×10 ⁻⁴	1.27×10 ⁻³	2.81×10 ⁻⁶	3.12×10 ⁻⁶	6.45×10 ⁻⁶	2.69×10 ⁻⁶	8.00×10 ⁻⁴	1.28×10 ⁻³
ADD	1.32×10 ⁻³	2.13×10 ⁻³	4.70×10 ⁻⁶	5.21×10 ⁻⁶	1.08×10 ⁻⁵	4.49×10 ⁻⁶	1.34×10 ⁻³	2.14×10 ⁻³

研究区土壤中Cd与Cr元素儿童经口摄入途径最大值大于1,Cd元素成人和儿童呼吸吸入途径最大值大于1,暗示二者会对人体产生非致癌风险;其余重金属元素在不同暴露途径中均小于1,对人体健康影响较弱。因此,需要着重管理和控制研究区内

As、Pb以及部分区域Cd和Cr的污染状况,以免对当地居民尤其是儿童产生不利影响。

致癌健康风险指数显示,成人与儿童不同暴露途径致癌风险顺序均为CR_{ing} > CR_{inh} > CR_{derm};表明经口摄入途径为成人和儿童致癌风险的主要途径,呼

表8 土壤重金属非致癌健康风险指数
Table 8 Non-carcinogenic health risk index of soil heavy metal

重金属		HQ _{ing}		HQ _{derm}		HQ _{inh}		HI	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cu	平均值	1.24×10 ⁻²	7.96×10 ⁻²	4.39×10 ⁻⁵	1.95×10 ⁻⁴	3.36×10 ⁻⁴	5.60×10 ⁻⁴	1.27×10 ⁻²	8.04×10 ⁻²
	最大值	8.69×10 ⁻²	5.59×10 ⁻¹	3.09×10 ⁻⁴	1.37×10 ⁻³	2.36×10 ⁻³	3.93×10 ⁻³	8.96×10 ⁻²	5.65×10 ⁻¹
Pb	平均值	4.22×10 ⁻¹	2.72×10 ⁰	1.00×10 ⁻²	4.44×10 ⁻²	3.42×10 ⁻³	5.70×10 ⁻³	4.36×10 ⁻¹	2.77×10 ⁰
	最大值	2.51×10 ⁰	1.62×10 ¹	5.94×10 ⁻²	2.64×10 ⁻¹	2.03×10 ⁻²	3.39×10 ⁻²	2.59×10 ⁰	1.65×10 ¹
Zn	平均值	5.76×10 ⁻³	3.71×10 ⁻²	1.02×10 ⁻⁴	4.54×10 ⁻⁴	4.70×10 ⁻⁵	7.82×10 ⁻⁵	5.91×10 ⁻³	3.76×10 ⁻²
	最大值	4.34×10 ⁻²	2.80×10 ⁻¹	7.72×10 ⁻⁴	3.42×10 ⁻³	3.54×10 ⁻⁴	5.90×10 ⁻⁴	4.46×10 ⁻²	2.84×10 ⁻¹
Cr	平均值	5.85×10 ⁻²	3.77×10 ⁻¹	1.04×10 ⁻²	4.61×10 ⁻²	5.01×10 ⁻²	8.34×10 ⁻²	1.19×10 ⁻¹	5.06×10 ⁻¹
	最大值	1.70×10 ⁻¹	1.10×10 ⁰	3.02×10 ⁻²	1.34×10 ⁻¹	1.46×10 ⁻¹	2.42×10 ⁻¹	3.46×10 ⁻¹	1.47×10 ⁰
Cd	平均值	2.71×10 ⁻²	1.75×10 ⁻¹	9.64×10 ⁻³	4.27×10 ⁻²	9.22×10 ⁻²	1.53×10 ⁻¹	1.29×10 ⁻¹	3.71×10 ⁻¹
	最大值	2.89×10 ⁻¹	1.86×10 ⁰	1.03×10 ⁻¹	4.55×10 ⁻¹	9.81×10 ⁻¹	1.63×10 ⁰	1.37×10 ⁰	3.95×10 ⁰
As	平均值	8.35×10 ⁰	5.37×10 ⁻¹	7.23×10 ⁻²	3.21×10 ⁻¹	6.79×10 ⁻²	1.13×10 ⁻¹	8.49×10 ⁰	5.42×10 ⁻¹
	最大值	1.01×10 ²	6.49×10 ¹	8.74×10 ¹	3.88×10 ⁰	8.20×10 ¹	1.36×10 ⁰	1.03×10 ²	6.54×10 ¹
Hg	平均值	9.97×10 ⁻⁴	6.42×10 ⁻³	5.06×10 ⁻⁵	2.24×10 ⁻⁴	3.19×10 ⁻⁵	5.30×10 ⁻⁵	1.08×10 ⁻³	6.69×10 ⁻³
	最大值	3.36×10 ⁻³	2.16×10 ⁻²	1.71×10 ⁻⁴	7.57×10 ⁻⁴	1.07×10 ⁻⁴	1.79×10 ⁻⁴	3.64×10 ⁻³	2.26×10 ⁻²

表9 土壤重金属致癌健康风险指数
Table 9 Cancer health risk index of soil heavy metal

重金属		CR _{ing}		CR _{derm}		CR _{inh}		TCR	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Pb	平均值	3.97×10 ⁻⁶	6.38×10 ⁻⁶	2.82×10 ⁻⁸	3.13×10 ⁻⁸	1.60×10 ⁻⁷	6.65×10 ⁻⁸	4.15×10 ⁻⁶	6.48×10 ⁻⁶
	最大值	2.36×10 ⁻⁵	3.79×10 ⁻⁵	1.67×10 ⁻⁷	1.86×10 ⁻⁷	9.50×10 ⁻⁷	3.95×10 ⁻⁷	2.38×10 ⁻⁵	3.89×10 ⁻⁵
Cr	平均值	2.78×10 ⁻⁵	4.47×10 ⁻⁵	3.94×10 ⁻⁶	4.37×10 ⁻⁶	1.90×10 ⁻⁵	7.91×10 ⁻⁶	5.07×10 ⁻⁵	5.70×10 ⁻⁵
	最大值	8.08×10 ⁻⁵	1.30×10 ⁻⁴	1.15×10 ⁻⁵	1.27×10 ⁻⁵	5.52×10 ⁻⁵	2.30×10 ⁻⁵	9.35×10 ⁻⁵	1.85×10 ⁻⁴
Cd	平均值	5.23×10 ⁻⁵	8.41×10 ⁻⁵	1.86×10 ⁻⁷	2.06×10 ⁻⁷	4.40×10 ⁻⁷	1.83×10 ⁻⁷	5.29×10 ⁻⁵	8.45×10 ⁻⁵
	最大值	5.56×10 ⁻⁴	8.95×10 ⁻⁴	1.97×10 ⁻⁶	2.19×10 ⁻⁶	4.68×10 ⁻⁶	1.95×10 ⁻⁶	5.58×10 ⁻⁴	8.99×10 ⁻⁴
As	平均值	1.19×10 ⁻³	1.91×10 ⁻³	1.03×10 ⁻⁵	1.14×10 ⁻⁵	9.74×10 ⁻⁵	4.05×10 ⁻⁵	1.29×10 ⁻³	1.96×10 ⁻³
	最大值	1.43×10 ⁻²	2.31×10 ⁻²	1.24×10 ⁻⁴	1.38×10 ⁻⁴	1.18×10 ⁻³	4.90×10 ⁻⁴	1.45×10 ⁻²	2.42×10 ⁻²

吸入途径为成人和儿童致癌风险的次要途径。研究区重金属元素对成人和儿童致癌风险贡献顺序依次为As>Cd>Cr>Pb。As元素成人和儿童的 CR_{ing} 的均值分别为 1.19×10^{-3} 和 1.91×10^{-3} , CR_{inh} 的均值分别为 9.74×10^{-5} 和 4.05×10^{-5} , CR_{derm} 的均值分别为 1.03×10^{-5} 和 1.14×10^{-5} ;即As经口摄入途径对人体健康构成了致癌风险,呼吸吸入和皮肤接触途径则属于可接受范围;Cd经口摄入途径的均值位于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$,呼吸吸入以及皮肤接触均值小于 10^{-6} 。表明经口摄入属于可接受范围,呼吸吸入以及皮肤接触途径不会对人体产生致癌风险;此外,Cd元素成人和儿童经口摄入的最大值分别为 5.56×10^{-4} 和 8.95×10^{-4} ,这表明研究区内部分采样点中Cd元素存在致癌风险;Cr所有接触途径均位于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$,属于可接受范围;Pb经口摄入属于可接受范围,呼吸吸入与皮肤接触途径不会对人体产生致癌风险。根据TCR以及上述分析可知,研究区土壤As元素对人体健康构成了潜在的致癌风险,Cd部分采样点同样存在致癌风险,Cr和Pb元素则属于可接受范围,对人体致癌风险较小。

3.6 讨论

土壤中重金属污染是当前环境、土壤等领域的主要研究问题之一,城市、工业区以及矿区是重金属污染的高危地带。本文通过对研究区土壤重金属含量,变异系数和空间分布分析可知:研究区土壤中Cd、As、Pb、Zn、Cu含量明显高于土壤环境背景值,呈现出富集于矿业区的特点;它们在空间分布上亦较为一致,重金属含量呈现尾矿库>冶炼区>采矿区的规律;研究区Cr富集区主要分布在生活区,可能与矿业无关;Hg分布较均匀,无明显富集区。

目前,土壤重金属评价主要基于生态风险和健康风险,本文结合已有研究发现,研究区土壤重金属生态风险与邻近区域研究结果趋于一致。沈红艳(2021)评价了湖南省某典型流域农田土壤重金属的生态风险,发现Cd、As、Pb受到工业、交通运输等影响污染最为突出,Cr和Hg受自然活动影响污染较轻;余璇等(2016)对湖南某铅锌矿生态风险评价,发现Cd、Pb、As、Cu、Zn属于中等及以上风险状态,Cr属于相对安全水平;雷鸣等(2008)对湖南9个县市采矿区和冶炼区附近水稻土5种重金属风险进行评价,发现土壤重金属Cd、As、Zn、Cu、Pb都在中

等潜在风险之上。通过上述研究发现该片区土壤重金属均存在严重的生态危害,需要对该地区土壤生态环境的治理采取综合且有效的措施。

研究区土壤重金属致癌与非致癌的主要暴露途径为经口摄入,儿童受到的致癌与非致癌风险总体要大于成人,表明儿童更易受到重金属的威胁。这与杨敏等(2016)、鲍丽然等(2020)等研究结果相近,可能是由于儿童的生理和行为特征(吮吸行为等)更易接触到土壤以及儿童较差的免疫所导致。该区As和Pb对人体构成了潜在的威胁,其中As为主要的风险元素,这可能是由于As较大的毒性和较高的含量所致。周楠(2016)、王昌宇等(2021)指出重金属健康风险除了与含量有关之外,还与重金属毒性有关,As具有较大的毒性,更易对人体产生潜在的健康威胁。考虑到重金属无法被人体全部吸收消化,李华等(2015)、刘同等(2022)引入生物可给性,发现基于总量的评价与生物体内含量相关性较差,往往夸大了危害程度。本次研究评价基于土壤中重金属总量,缺乏一些间接因素(如作物对重金属的转归、人体对重金属的拮抗作用),因此本次研究有一定程度的不确定性,真实情况还需进一步研究。但从土壤环境与健康角度出发,土壤环境治理依然不容懈怠,对潜在的健康风险应保持警惕。

4 结论

(1)地统计分析表明研究区土壤重金属含量高于土壤背景值,其中As和Cd最为突出;变异系数表明,Cu、Pb、Zn、Cd和As元素受到矿业活动影响较大,Cr和Hg元素受矿业活动影响较小;空间分布结果表明Cu、Pb、Zn、Cd和As含量富集区位于矿区附近,具有集中分布和复合污染的趋势。

(2)地累积指数评价结果显示,研究区Cd和As元素污染现象最为突出,Cu、Pb和Zn元素污染次之,Cr和Hg总体呈无污染—轻度污染状态。潜在生态风险指数表明,研究区土壤中重金属潜在生态风险主要以中—极重风险为主,As和Cd生态风险较高,是生态风险的主要贡献元素,Pb和Cu元素次之,Zn、Cr和Hg为轻微风险。

(3)人体健康风险评估结果表明,儿童更容易受到重金属威胁,经口摄入是重金属非致癌和致癌风险的主要暴露途径。土壤中Cd和Cr部分样本对

人体具有潜在的非致癌风险,Cd部分样品对人体具有潜在的致癌风险。As和Pb总非致癌风险指数大于1,为主要非致癌因子,具有潜在的非致癌风险;As总致癌风险指数大于 10^{-4} ,为主要致癌因子。

致谢:论文撰写过程中中国地质调查局武汉地调中心南岭项目组成员给予了大力的支持,两位匿名审稿专家和期刊编辑提出了宝贵意见和建议,在此一并致以衷心的感谢。

References

- Al Osman M, Yang F, Massey I Y. 2019. Exposure routes and health effects of heavy metals on children[J]. *Biometals*, 32: 563–573.
- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Bernard A. 2008. Cadmium and its adverse effects on human health[J]. *Indian Journal of Medical Research*, 128(4): 557–564.
- Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, Qiu G L, Li G H, Li F L, Liu T Z, Fu Z Y, Jin Z S. 2006. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang County, western Guizhou, China[J]. *Environment International*, 32: 883–890.
- Chen Xiqing, Qin Zhengwei, Li Jianfeng, Xia Jie, Zhang Zunzun, Lu Youyue, Fu Jianming. 2021. The environmental geochemical characteristics of the south slope of Qitianling Mountain, southern Hunan Province[J]. *South China Geology*, 37(3): 298–312 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Zhao Y Y, Chen D L, Huang H T, Zhao Y, Wu Y J. 2023. Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, central China[J]. *China Geology*, 6: 15–26.
- Duruibe J, Ogwuegbu M, Egwurugwu J. 2007. Heavy metal pollution and human biotoxic effects[J]. *International Journal of Physical Sciences*, 2(5): 112–118.
- Forstner U, Ahlf W, Calmano W. 1993. Sediment quality objectives and criteria development in Germany[J]. *Water Science and Technology*, 28(8): 307–314.
- Gao Runzhong, He Along, Zhang Sheng, Du Dandan, Qin Ziyuan, Wang Xixi. 2019. Spatial distribution characteristics and potential ecological risk assessment of Cr, Hg and As in soils of the Salt Lake Basin in northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(7): 2532–2544 (in Chinese with English abstract).
- Guo Shihong, Hou Xiaolong, Qiu Haiyuan, Liu Aiqin, Ma Xiangqing, Wang Yousheng. 2015. Speciation characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from different functional zones of the lead–zinc mine[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(11): 2047–2053 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhaohui, Zhu Yongguan. 2004. Contamination and available contents of heavy metals in soils in the typical mining and smelting circumjacent districts[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, (4): 553–555 (in Chinese with English abstract).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- He Dongming, Wang Xiaofei, Chen Lijun, Su Rong. 2014. Assessment on heavy metals contaminations of sugarcane soil in Guangxi Province by the geo–accumulation index and potential ecological risk index[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 31(2): 126–131 (in Chinese with English abstract).
- Hu Z G, Wang C S, Li K Q, Zhu X Y. 2018. Distribution characteristics and pollution assessment of soil heavy metals over a typical nonferrous metal mine area in Chifeng, Inner Mongolia, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 77: 638.
- Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew B, Beeregowda K. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals[J]. *Interdisciplinary toxicology*, 7(2): 60.
- Jiang Chengyi. 2020. Heavy Metal Pollution in Farmland Soil and Crops in a Mining Area in Hunan Province and its Health Risk Assessment[D]. Changsha: Hunan Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Lei Ming, Zeng Min, Zheng Yuanming, Liao Baihan, Zhu Yongguan. 2008. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, (6): 1212–1220 (in Chinese with English abstract).
- Li Hua, Li Hailong, Zhu Yuen, Liu Miao, Shi Weiyu. 2015. Health risk assessment based on bioavailability of heavy metals in contaminated sites[J]. *Journal of Earth Environment*, 6(1): 60–66 (in Chinese with English abstract).
- Li X, Yang H, Zhang C, Zeng G M, Liu Y G, Xu W H, Wu Y, Lan S M. 2017. Spatial distribution and transport characteristics of heavy metals around an antimony mine area in central China[J]. *Chemosphere*, 170: 17–24.
- Liu Tong, Liu Chuanpeng, Deng Jun, Kang Pengyu, Wang Kaikai, Zhao Yuyan. 2022. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in eastern Yinan County, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1497–1508 (in Chinese with English abstract).
- Lu J, Lu H, Lei K, Wang W, Guan Y. 2019. Trace metal element pollution of soil and water resources caused by small–scale

- metallic ore mining activities: A case study from a sphalerite mine in North China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(24): 24630–24644.
- Meite F, Alvarez-Zaldivar P, Crochet A, Wiegert C, Payraudeau S, Imfeld G. 2018. Impact of rainfall patterns and frequency on the export of pesticides and heavy-metals from agricultural soils[J]. *Science of the Total Environment*, 616: 500–509.
- Mo Jia, Lei Liangqi, Shi Zhenhuan, Mo Binji. 2015. Heavy metal pollution comprehensive evaluation of oxide tailings in Shanhu tungsten-tin mine area of Guangxi[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 5(4): 79–84 (in Chinese with English abstract).
- Rehmana I, Ishaq M, Alib L, Khanc S, Ahmada I, Ud Dinb I, Ullaha H. 2018. Enrichment, spatial distribution of potential ecological and human health risk assessment via toxic metals in soil and surface water ingestion in the vicinity of Sewakht mines, district Chitral, Northern Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 154: 127–136.
- Reuben A, Caspi A, Belsky D W, Broadbent J, Harrington H, Sugden K, Houts R M, Ramrakha S, Poulton R, Moffitt T E. 2017. Association of childhood blood lead levels with cognitive function and socioeconomic status at age 38 years and with IQ change and socioeconomic mobility between childhood and adulthood[J]. *Jama*, 317(12): 1244–1251.
- Singh J, Kalamdhad A. 2011. Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life[J]. *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 1(2): 15–21.
- Sun Z H, Xie X D, Wang P, Hu Y N, Cheng H F. 2018. Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: A case study from a polymetallic mine in South China[J]. *Science of the Total Environment*, 639: 217–227.
- Wang Changyu, Zhang Surong, Liu Jihong, Xing Yi, Li Mingze, Liu Qingxue. 2021. Pollution level and risk assessment of heavy metals in a metal smelting area of Xiong'an New District[J]. *Geology in China*, 48(6): 1697–1709 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guanghai, Wang Chensheng, Chen Honghan. 2020. Eco-environmental assessment and genetic analysis of heavy metal pollution in the soil around the abandoned tungsten-molybdenum mine area in Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 47(6): 1838–1852 (in Chinese with English abstract).
- Xia P H, Ma L, Sun R G, Yang Y, Tang X C, Yan D B, Lin T, Zhang Y T, Yi Y. 2020. Evaluation of potential ecological risk, possible sources and controlling factors of heavy metals in surface sediment of Caohai Wetland, China[J]. *Science of the Total Environment*, 740: 140231.
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang. 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science and Technology*, 31(2): 112–115 (in Chinese with English abstract).
- Yang Min, Teng Ying, Ren Wenjie, Huang Yang, Xu Defu, Fu Zhaocong, Ma Wenting, Luo Yongming. 2016. Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil around Shimen realgar mine[J]. *Soils*, 48(6): 1172–1178 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jiayan, Li Bingyu, Zhou Yimin, Li Yongjie, Lei Ming. 2020. Pollution and risk assessment of heavy metal in agricultural soil around an abandon mine site in Hunan Province[J]. *Environmental Chemistry*, 39(4): 1024–1030 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuan, Song Liuting, Teng Yanguo. 2016. Pollution analysis and ecological environment risk assessment of heavy metals in soil sofa Pb-Zn mine in Hunan Province[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 35(5): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Zahra N, Kalim I. 2017. Perilous effects of heavy metals contamination on human health[J]. *Pakistan Journal of Analytical and Environmental Chemistry*, 18(1): 1–17.
- Zhang Jinde, Tian Lei, Pei Shengliang. 2021. A discussion of soil and water pollution and control countermeasures in mining area of China[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 48(2): 157–163 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhe, Lu Ran, Wu Siyang, Jia Zhibin. 2022. Heavy metal pollution and health risk assessment of mine soil in Yangtze River economic belt[J]. *Environmental Science*, 43(7): 3763–3772 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzun, Lin Dongyong, Yu Yushuai, Lu Youyue, Fu Jianming, Li Jianfeng, Qin Zhengwei, Ma Liyan, Ning Yongyun, Zhang Jitao. 2022. Implications to the petrogenesis and Sn mineralization of the granite in the Tengshan'ao Sn deposit, the Nanling metallogenic belt[J]. *South China Geology*, 38(3): 441–458 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Nan. 2016. The Pollution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops Around A Taolongs in Hunan Province[D]. Hengyang: University of South China (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 47(6): 1625–1636.
- 陈希清, 秦拯纬, 李剑锋, 夏杰, 张遵遵, 卢友月, 付建明. 2021. 湖南骑田岭南坡环境地球化学特征研究[J]. *华南地质*, 37(3): 298–312.

- 高瑞忠, 张阿龙, 张生, 贾德彬, 杜丹丹, 秦子元, 王喜喜. 2019. 西北内陆盐湖盆地土壤重金属Cr、Hg、As空间分布特征及潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 39(7): 2532-2544.
- 郭世鸿, 侯晓龙, 邱海源, 刘爱琴, 马祥庆, 王友生. 2015. 基于形态学分析铅锌矿不同功能区土壤重金属元素的分布特征及污染评价[J]. 地质通报, 34(11): 2047-2053.
- 郭朝晖, 朱永官. 2004. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量[J]. 生态环境, (4): 553-555.
- 何东明, 王晓飞, 陈丽君, 苏荣. 2014. 基于地积累指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. 农业资源与环境学报, 31(2): 126-131.
- 江诚毅. 2020. 湖南某矿区农田土壤与作物中重金属污染情况及其健康风险评价[D]. 长沙: 湖南农业大学.
- 雷鸣, 曾敏, 郑袁明, 廖柏寒, 朱永官. 2008. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, (6): 1212-1220.
- 李华, 李海龙, 朱宇恩, 刘苗, 时伟宇. 2015. 基于人体可给性的重金属污染场地健康风险评价[J]. 地球环境学报, 6(1): 60-66.
- 刘同, 刘传朋, 邓俊, 康鹏宇, 王凯凯, 赵玉岩. 2022. 山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 49(5): 1497-1508.
- 莫佳, 雷良奇, 史振环, 莫斌吉. 2015. 广西珊瑚钨锡矿区氧化物型尾矿重金属污染综合评价[J]. 有色金属工程, 5(4): 79-84.
- 王昌宇, 张素荣, 刘继红, 邢怡, 李名则, 刘庆学. 2021. 雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评价[J]. 中国地质, 48(6): 1697-1709.
- 邬光海, 王晨昇, 陈鸿汉. 2020. 内蒙古废弃钨钼矿区周围土壤重金属污染生态环境评价及成因分析[J]. 中国地质, 47(6): 1838-1852.
- 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 31(2): 112-115.
- 杨敏, 滕应, 任文杰, 黄阳, 徐德福, 傅赵聪, 马文亭, 骆永明. 2016. 石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估[J]. 土壤, 48(6): 1172-1178.
- 余嘉衍, 李冰玉, 周一敏, 李永杰, 雷鸣. 2020. 湖南省某矿遗址周围农业土壤重金属污染及风险评价[J]. 环境化学, 39(4): 1024-1030.
- 余璇, 宋柳霆, 滕彦国. 2016. 湖南省某铅锌矿土壤重金属污染分析与风险评价[J]. 华中农业大学学报, 35(5): 27-32.
- 张进德, 田磊, 裴圣良. 2021. 矿山水土污染与防治对策研究[J]. 水文地质工程地质, 48(2): 157-163.
- 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁. 2022. 长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价[J]. 环境科学, 43(7): 3763-3772.
- 张遵遵, 蔺东永, 于玉帅, 卢友月, 付建明, 李剑锋, 秦拯纬, 马丽艳, 宁勇云, 张吉涛. 2022. 南岭成矿带大义山藤山坳锡矿床花岗岩成因及锡成矿作用的指示[J]. 华南地质, 38(3): 441-458.
- 中华人民共和国生态环境部. 2018. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB 15618-2018)[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 中华人民共和国生态环境部. 2019. 建设用地土壤污染风险评估技术导则(发布稿)(HJ 25.3-2019)[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 周楠. 2016. 湖南省某尾矿库周边农田土壤和农作物重金属污染及健康风险评价[D]. 衡阳: 南华大学.