

doi: 10.12029/gc20230703001

许青阳, 戴亮亮, 彭志刚, 张俊, 肖凯琦, 巩浩, 吴欢欢. 2025. 湖南省龙山县土壤重金属特征与健康风险评价[J]. 中国地质, 52(3): 834–848.

Xu Qingyang, Dai Liangliang, Peng Zhigang, Zhang Jun, Xiao Kaiqi, Gong Hao, Wu Huanhuan. 2025. Characteristics and health risk evaluation of soil heavy metals in Longshan County, Hunan Province[J]. Geology in China, 52(3): 834–848(in Chinese with English abstract).

湖南省龙山县土壤重金属特征与健康风险评价

许青阳¹, 戴亮亮^{1,2}, 彭志刚¹, 张俊¹, 肖凯琦¹, 巩浩¹, 吴欢欢^{2,3,4}

(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南 长沙 410600; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100; 4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:【研究目的】在龙山县采集土壤样品 775 件, 分析土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的含量特征, 评价土壤重金属造成的健康风险。【研究方法】利用地累积指数进行了土壤重金属污染评价, 基于相关性分析和主成分分析讨论了土壤重金属的来源, 采用健康风险模型评估了土壤重金属对人体产生的健康风险。【研究结果】龙山县土壤中 Cd 含量的平均值明显高于湖南省土壤背景值, 表明龙山县土壤中 Cd 存在一定程度的富集。As 和 Cd 的变异系数均大于 0.5, Hg 的变异系数大于 1, 可能受到人类活动的影响。龙山县土壤中存在不同程度的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 污染, 其中, Cd 污染范围较广, 局部地区 Hg 污染程度严重。龙山县土壤重金属来源可分为三类: Cr、Cu、Ni 主要来源于成土母质; As、Cd、Pb、Zn 主要来源于铅锌矿开采选冶, 同时, Cd 的来源与地质背景有一定的关系; Hg 主要来源于化石燃料燃烧。龙山县土壤重金属对儿童造成的健康风险高于成人, 需注意龙山县里耶镇、苗儿滩镇和洛塔乡土壤重金属产生的健康风险。此外, As、Cr 是造成非致癌风险的主要重金属元素, Cr、Ni 是造成致癌风险的主要重金属元素, 经口摄入是产生健康风险主要暴露途径。【结论】龙山县土壤中重金属存在不同程度的污染, As、Cd、Ni 是健康风险的主要贡献因子。

关键词: 土壤重金属; 镉-铅-锌; 砷-汞; 污染评价; 来源; 健康风险评价; 地质调查工程; 龙山县; 湖南省

创 新 点: 以地累积指数法、相关性分析、主成分分析和健康风险模型等方法研究了龙山县土壤重金属含量特征、污染情况及来源和对人体的健康风险。

中图分类号: X825 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-0834-15

Characteristics and health risk evaluation of soil heavy metals in Longshan County, Hunan Province

XU Qingyang¹, DAI Liangliang^{1,2}, PENG Zhigang¹, ZHANG Jun¹, XIAO Kaiqi¹, GONG Hao¹,
WU Huanhuan^{2,3,4}

(1. Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha 410600, Hunan, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Xi'an Mineral Resources Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

收稿日期: 2023-03-07; 改回日期: 2023-08-11

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211576、DD20230480)资助。

作者简介: 许青阳, 女, 1996 年生, 助理工程师, 主要从事环境地球化学研究; E-mail: xuqingyang@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 戴亮亮, 男, 1993 年生, 工程师, 主要从事环境地球化学研究; E-mail: dailiangliang@mail.cgs.gov.cn。

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

[Objective] A total of 775 soil samples were collected in Longshan County to analyze the content characteristics of heavy metals in soil, including As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn, and to evaluate the health risks associated with these contaminants. **[Methods]** The geo-accumulation index was applied to assess soil heavy metal pollution levels. Correlation analysis and principal component analysis were used to identify the sources of soil heavy metals. A health risk model was employed to evaluate the potential risks posed by these metals to human health. **[Results]** The analysis revealed that the average Cd concentration in Longshan County soils significantly exceeds the background value for Hunan Province, indicating a certain degree of Cd enrichment. The variation coefficients for As and Cd exceeded 0.5, while Hg's coefficient surpassed 1, suggesting a potential influence from human activities. Various degrees of contamination by As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn were identified, with widespread Cd pollution and severe Hg contamination in certain areas. The sources of these heavy metals were categorized into three groups: (1) Cr, Cu, and Ni primarily originate from soil parent materials; (2) As, Cd, Pb, and Zn are largely linked to lead-zinc mining and smelting, with Cd also showing some association with geological background; (3) Hg primarily stems from fossil fuel combustion. The health risk assessment indicated that children face higher risks from soil heavy metals compared to adults. Attention should be focused on the health risks in Liye Town, Miaoertan Town, and Luota Town. As and Cr were identified as the primary contributors to non-carcinogenic risks, while Cr and Ni were the main contributors to carcinogenic risks. Oral ingestion was found to be the dominant exposure pathway for health risks. **[Conclusions]** Heavy metal pollution in Longshan County soils exists at varying levels. As, Cd, and Ni are the primary contributors to health risks.

Key words: soil heavy metals; Cd-Pb-Zn; As-Hg; pollution evaluation; source; health risk assessment; geological survey engineering; Longshan County; Hunan Province

Highlights: Using methods such as the geo-accumulation index, correlation analysis, principal component analysis, and a health risk model, this study comprehensively investigated the content characteristics, pollution status, sources, and health risks of soil heavy metals in Longshan County.

About the first author: XU Qingyang, female, born in 1996, assistant engineer, mainly engaged in environmental geochemistry research; E-mail: xuqingyang@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: DAI Liangliang, male, born in 1993, engineer, mainly engaged in environmental geochemistry research; E-mail: dailiangliang@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20211576, No.DD20230480).

1 引言

土壤是人类赖以生存的宝贵资源,在人类生存和农业生产中占据至关重要的位置(刘同等, 2022; Chen et al., 2023; 赵鑫娜等, 2023; 张栋等, 2024)。2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,全国土壤环境状况总体不容乐观,土壤重金属污染较为严重。由于土壤中重金属元素具有隐蔽性、持久性和难降解性等特点(Alloway, 1995; 郇光海等, 2020; 程贤达等, 2022),所以常在土壤中积累,危害土壤动物和微生物等(陈有鑑等, 2001; 任宇等, 2024),部分重金属还可以通过食物链以有害浓度在人体内蓄积,严重危害人体健康(程贤达等, 2023)。因此,查明土壤重金属含量特征,进行土壤重金属污染评价、土壤重金属来源解析和人体健康

风险评价,对于提高土壤质量和保护居民健康等具有重要意义。

龙山县是位于湘鄂渝三省(市)交界处的农业大县,曾是湘西州脱贫攻坚的主战场。目前,龙山县土壤重金属问题已得到了部分学者的关注,如张俊等(2022)发现龙山县土壤 8 种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)均未超过农用地土壤污染风险管制值,其中,除土壤中 Cd 超过农用地土壤污染风险筛选值占比在 50% 以上外,其他 7 种重金属元素超过农用地土壤污染风险筛选值占比均在 2% 以下;戴亮亮等(2023)通过分析龙山县岩溶区玉米 Cd 和土壤 Cd、pH 及氧化物等指标,揭示了不同母质土壤 Cd 地球化学特征及其生物有效性的影响因素。但缺乏针对龙山县土壤 8 种重金属污染特征和健康风险评价的研究,据此,本文以龙山

县为研究区,开展了土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 污染情况与健康风险评价的研究,以期为龙山县防治土壤重金属污染、提高生态环境质量、保护居民健康等提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

龙山县位于湖南西北边陲,地理坐标为 28°45'N~29°30'N、109°10'E~109°53'E,总面积为 3131 km²(杨茜, 2014; 江莉佳, 2015)。地势总体北高南低,东陡西缓。地貌以山地为主,海拔介于 218.2~1736.5 m(江莉佳, 2015)。属亚热带大陆性湿润季风气候区,四季分明,雨热同期,年均气温为 15.8℃,年均降雨量约为 1400 mm(杨茜, 2014; 张俊等, 2025),主要粮食农作物为水稻、玉米,经济作物为百合、脐橙、烤烟等。区内地层出露有寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、二叠系、三叠系、白垩系、第四系(图 1),岩性主要为碳酸盐岩、碎屑岩和第四系沉积物(张俊等, 2022)。区内土壤类型繁多,主要为黄壤、石灰(岩)土和黄红壤等。土地利用类型主要为林地和耕地等。

2.2 样品采集与测试

在龙山县以《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)和《土地质量地球化学评价规范》(DT/T 0295—2016)为技术方法,参考网格布样法采集表层土壤样,采样密度为 1 点/km²,以 1 km² 采样小格中 GPS 定位的采样点为中心向周围 100 m 范围内 3~5 处多点采集组合,采样深度 0~20 cm,待样品经过风干、敲碎和过筛等加工处理后,将 4 km² 采样大格中的样品等重量组合为一个分析样,共有组合分析样 775 件。

土壤样品中 8 种重金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)分析测试由自然资源部武汉矿产资源监督检测中心完成,元素分析方法及检出限见表 1,具体测试方法如下。

土壤 As 和 Hg 测定,称取土壤样品 0.5 g,通过王水和盐酸溶样并提取后,利用 5% 的硫脲-抗坏血酸作预还原剂,高强度空心阴极灯作激发源,硼氢化钾作氢化物发生剂,通过原子荧光光谱法测定 As 和 Hg。土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 测定,称取土壤样品 0.1 g,通过氢氟酸、盐酸、硝酸和高氯酸溶样

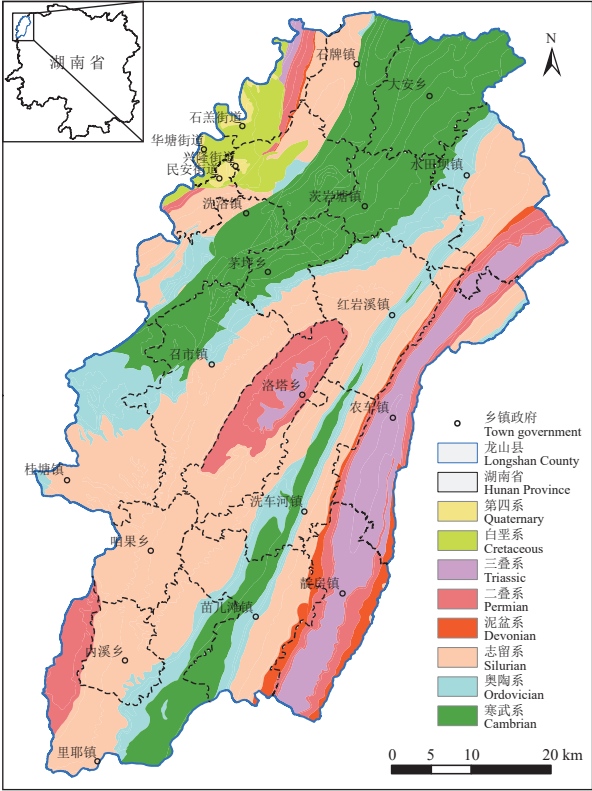


图 1 区域地质简图及龙山县位置(李晨阳等, 2019)
Fig.1 Regional geological map and location of Longshan County(after Li Chenyang et al., 2019)

表 1 元素分析方法与检出限

Table 1 Analysis methods and detection limits for elements

项目	测定方法	检出限
As	原子荧光光谱法	0.2
Cd	电感耦合等离子体质谱法	0.02
Cr	X射线荧光光谱法	1.5
Cu	电感耦合等离子体质谱法	0.1
Hg	原子荧光光谱法	0.0005
Ni	电感耦合等离子体原子发射光谱法	0.2
Pb	电感耦合等离子体质谱法	1
Zn	电感耦合等离子体质谱法	1
pH	离子选择电极法	0.01

注: As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn检出限单位为mg/kg, pH无量纲。

并提取后,利用电感耦合等离子体质谱法测定。土壤 Cr 测定,称取 105℃ 下烘干的土壤样品 4 g,通过粉末压片法制样,利用 X 射线荧光光谱法测定。土壤 Ni 通过氢氟酸、盐酸、硝酸和高氯酸溶样并提取后,利用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定。土壤 pH 测定,称取土壤样品 10 g,加无二氧化碳蒸馏水浸溶,利用 pH 计测定。

采用国家一级标准物质和重复样进行分析方法的准确度和精密度控制土壤样品测试分析及

质量控制均按照《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T 0258—2014)和《土地质量地球化学评价规范》(DT/T 0295—2016)等标准执行,所有分析测试结果均符合要求,数据可靠。

2.3 数据分析与图件绘制

数据整理与分析利用 Excel 和 IBM SPSS Statistics 25 完成,图件绘制利用 ArcGIS 10.7 和 Origin 2021 完成。

2.4 土壤重金属污染评价方法

由德国学者 Muller 提出的地累积指数法最初是用于定量评价水环境沉积物中的重金属污染程度,近年来已被广泛应用于土壤重金属污染评价(Li et al., 2020),其计算式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_i}{k \times S_i} \right] \quad (1)$$

式中, I_{geo} 为重金属元素 i 的地累积指数; C_i 为土壤重金属元素 i 的实测值, mg/kg; k 为修正系数,一般取 1.5; 重金属元素 i 的参考值 S_i 选用的是湖南省表层土壤重金属元素背景值(中国环境监测总站, 1990), mg/kg。地累积指数污染评价方法见表 2。

2.5 健康风险评价方法

土壤中的重金属主要通过经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入这三种暴露途径进入人体,从而对人体造成非致癌风险与致癌风险。采用美国环保署推出的健康风险模型评估土壤重金属对人体产生的健康风险,计算公式如下(US EPA, 1989, 1992, 2000, 2002, 2011):

$$\text{ADD}_{\text{经口摄入}} = \frac{C \times \text{IngR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$\text{ADD}_{\text{皮肤接触}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{SL} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

表 2 地累积指数污染评价方法

Table 2 Geo-accumulation index-based pollution assessment method

地累积指数 I_{geo}	级别	污染等级
$I_{\text{geo}} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	1	轻污染
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	2	中污染
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	3	中—重污染
$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	4	重污染
$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	5	重—极重污染
$I_{\text{geo}} > 5$	6	极重污染

$$\text{ADD}_{\text{呼吸吸入}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

$$\text{HQ}_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\text{ADD}_{ij}}{\text{RfD}_{ij}} \quad (5)$$

$$\text{HI} = \sum_{i=1}^8 \text{HQ}_i \quad (6)$$

$$\text{CR}_i = \sum_{j=1}^3 (\text{ADD}_{ij} \times \text{SF}_i) \quad (7)$$

$$\text{TCR} = \sum_{i=1}^5 \text{CR}_i \quad (8)$$

式中, ADD 为重金属通过不同暴露途径的日均暴露量, mg/(kg·d); HQ_i 为重金属元素 i 的非致癌健康风险指数; HI 为 8 种重金属元素的非致癌健康风险指数; CR_i 为重金属元素 i 的致癌健康风险指数; TCR 为 8 种重金属元素的致癌健康风险指数。公式(2)~(8)中相关参数见表 3 和表 4。

在健康风险模型中,当 HQ_i 或 $\text{HI} < 1$, 表示无显著非致癌风险;当 HQ_i 或 $\text{HI} > 1$, 表示存在非致癌风险。当 CR_i 或 $\text{TCR} < 10^{-6}$, 表示无显著致癌风险;当 CR_i 或 TCR 介于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 表示致癌风险在人体可接受范围内; CR_i 或 $\text{TCR} > 10^{-4}$, 表明存在致癌风险。

3 结果与讨论

3.1 土壤重金属含量特征

龙山县土壤重金属含量统计性分析结果(表 5)显示,其土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量的平均值分别为 11.89 mg/kg、0.37 mg/kg、78.11 mg/kg、28.86 mg/kg、0.12 mg/kg、36.12 mg/kg、37.29 mg/kg、96.15 mg/kg,分别为湖南省表层土壤元素背景值的 0.76、2.92、1.09、1.06、1.01、1.13、1.26、1.02 倍;除土壤 As 平均含量低于湖南省土壤背景值(中国环境监测总站, 1990)外,土壤 Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 平均含量均与背景值相当或略高于背景值,土壤 Cd 平均含量明显高于背景值,表明龙山县土壤中 Cd 存在一定程度的富集。

变异系数是标准差与平均值的比值,可以表征不同量纲数据的离散程度(王乔林等, 2021),一般地,离散程度越大,变异系数就越大(柴磊等, 2020),表明其受人类活动影响越大(李伟等, 2021; 刘同等, 2022; 程贤达等, 2023; 孙建伟等, 2023; 张栋等,

表 3 健康风险模型参数
Table 3 Parameters of the health risk model

参数	含义	参考值		单位
		成人	儿童	
IngR	土壤摄入频率	100	200	mg/d
EF	暴露频率	350	350	d/a
ED	暴露年限	24	6	a
InhR	土壤吸入频率	16	7.6	m ³ /d
BW	平均体重	60.5	27.7	kg
AT	平均暴露时间	24x365（非致癌）	6x365（非致癌）	d
		75.8x365（致癌）	75.8x365（致癌）	d
SA	暴露皮肤面积	5700	2800	cm ²
SL	皮肤黏附系数	0.07	0.2	mg/（cm ² ·d）
ABS	皮肤吸收因子	0.001	0.001	-
PEF	颗粒排放因子	1.36×10 ⁹	1.36×10 ⁹	m ³ /kg

注：参数的参考值详见文献（US EPA, 1989, 1992, 2000, 2002, 2011；环境保护部, 2013；Chen et al., 2016；段小丽, 2016；林承奇等, 2021）。

表 4 不同暴露途径下土壤重金属的 RfD 与 SF 值
Table 4 RfD and SF values of soil heavy metals for different exposure routes

元素	参考剂量RfD/(mg/(kg·d))			致癌斜率系数SF/((kg·d)/mg)		
	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入
As	3.00×10 ⁻⁴	1.23×10 ⁻⁴	3.00×10 ⁻⁴	1.50×10 ⁰	3.66×10 ⁰	1.51×10 ¹
Cd	1.00×10 ⁻³	1.00×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁵	6.10×10 ⁰	6.30×10 ⁰	6.30×10 ⁰
Cr	3.00×10 ⁻³	6.00×10 ⁻⁵	2.86×10 ⁻⁵	5.00×10 ⁻¹	2.00×10 ¹	4.20×10 ¹
Cu	4.00×10 ⁻²	1.20×10 ⁻²	4.02×10 ⁻²	-	-	-
Hg	3.00×10 ⁻⁴	2.10×10 ⁻⁵	8.57×10 ⁻⁵	-	-	-
Ni	2.00×10 ⁻²	5.40×10 ⁻³	9.00×10 ⁻⁵	1.70×10 ⁰	4.25×10 ¹	8.40×10 ⁻¹
Pb	3.50×10 ⁻³	5.25×10 ⁻⁴	3.52×10 ⁻³	8.50×10 ⁻³	-	-
Zn	3.00×10 ⁻¹	6.00×10 ⁻²	3.00×10 ⁻¹	-	-	-

注：RfD和SF参考值详见文献（Wang et al., 2020; Zhang et al., 2020; 林承奇等, 2021）。

表 5 土壤重金属含量统计
Table 5 Statistics of soil heavy metal concentrations

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH
最小值/(mg/kg)	2.24	0.09	37.70	10.50	0.03	13.00	16.90	33.00	4.46
最大值/(mg/kg)	59.00	1.66	203.00	71.40	3.16	126.00	110.00	336.00	8.25
中位值/(mg/kg)	10.40	0.32	75.40	27.60	0.10	35.50	35.00	93.80	5.49
平均值/(mg/kg)	11.89	0.37	78.11	28.86	0.12	36.12	37.29	96.15	-
标准差/(mg/kg)	7.51	0.20	13.96	6.77	0.14	8.18	10.17	22.44	-
变异系数	0.63	0.54	0.18	0.23	1.22	0.23	0.27	0.23	-
湖南省土壤背景值/(mg/kg)	15.70	0.13	71.40	27.30	0.12	31.90	29.70	94.40	5.60

注：pH无量纲，“-”表示无数据。

2024)。龙山县土壤重金属含量变异系数为 Hg>As>Cd>Pb>Cu>Zn>Ni>Cr, 其中, As 和 Cd 的变异系数均大于 0.5, Hg 的变异系数大于 1, 可能受到人类活动的影响。

运用 ArcGIS 10.7 中的反距离权重法插值得到龙山县土壤重金属含量空间分布图(图 2)。由图 2 可知, 龙山县土壤重金属元素在空间上基本呈条带状和岛状分布, 其中, As、Cd、Pb 高值区与龙山县铅锌矿矿区高度重叠(陈明辉等, 2008), 表明这些重

金属元素可能受到了铅锌矿开采活动的影响; Hg 的高值区主要集中在洗洛乡和茅坪乡, 结合 Hg 大于 1 的变异系数, 认为其可能在该区域受到了人类活动的影响。

3.2 土壤重金属污染评价

利用地积累指数(I_{geo})评价龙山县土壤重金属的污染情况, 结果如表 6 所示。由表 6 可知, 土壤重金属污染率由高到低依次为 Cd(85.68%)>Pb(15.87%)>Hg(8.39%)>As(7.23%)>Cu(5.68%)=

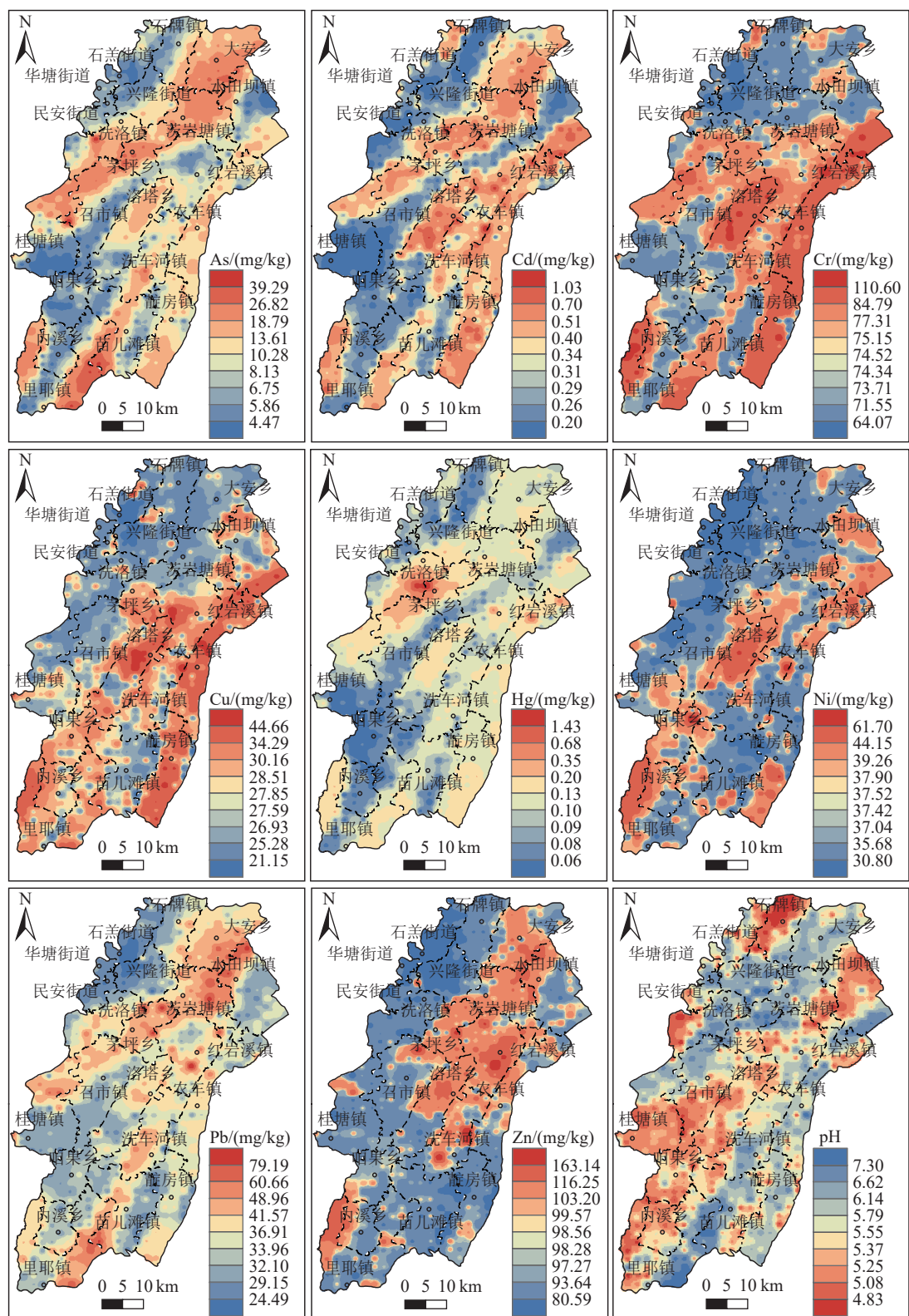


图 2 龙山县土壤重金属含量空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of soil heavy metal concentrations in Longshan County

Ni(5.68%)>Cr(3.61%)>Zn(1.94%), I_{geo} 平均值由大到小排序为 Cd(0.78)>Pb(-0.30)>Ni(-0.44)>Cr(-0.48)>Cu(-0.54)>Zn(-0.59)>Hg(-0.77)>As(-1.26)。从重金属元素地累积指数污染评价结果来看,龙山县土壤中存在不同程度的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 污染。其中,土壤 Cd 污染范围较广(图 2),主要沿大安乡—茨岩塘镇—茅坪乡和红岩溪镇—洛塔乡—靛房镇一带分布,局部地区 Hg 污染程度严重,主要分布在洗洛镇和茅坪乡(图 3)。

3.3 土壤重金属来源解析

3.3.1 相关性分析

不同土壤重金属元素之间的相关性分析可以

反映其相关程度以及是否具有同源性,是辨识土壤重金属来源的重要依据(柴磊等, 2020; 王乔林等, 2021; 孙志佳等, 2022; 王玉等, 2022; 姜昕等, 2024; 赵莉源等, 2024)。由表 7 可知,土壤重金属 Cr-Cu-Ni、As-Cd-Pb、Cd-Pb-Zn、Cd-Cr 之间的相关系数均大于 0.4,且在 0.01(双侧)水平上显著相关,表明这些重金属可能有相同来源,且可能存在复合来源。Hg 与其他重金属元素的相关关系较弱或无显著相关性,表明 Hg 与其他重金属的来源不同。

3.3.2 主成分分析

主成分分析是有效判别土壤重金属来源的重要手段(Rodríguez Martín et al., 2013; 王伟鹏等,

表 6 土壤重金属地累积指数统计

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
I_{geo} 最小值	-3.39	-1.04	-1.51	-1.96	-2.49	-1.88	-1.40	-2.10
I_{geo} 最大值	1.32	3.13	0.92	0.80	4.18	1.40	1.30	1.25
I_{geo} 平均值	-1.26	0.78	-0.48	-0.54	-0.77	-0.44	-0.30	-0.59
无污染/%	92.77	14.32	96.39	94.32	91.61	94.32	84.13	98.06
轻污染/%	6.84	43.74	3.61	5.68	7.35	5.42	15.23	1.68
中污染/%	0.39	37.55	0	0	0.65	0.26	0.65	0.26
中—重污染/%	0	4.26	0	0	0.13	0	0	0
重污染/%	0	0.13	0	0	0.13	0	0	0
重—极重污染/%	0	0	0	0	0.13	0	0	0
极重污染/%	0	0	0	0	0	0	0	0

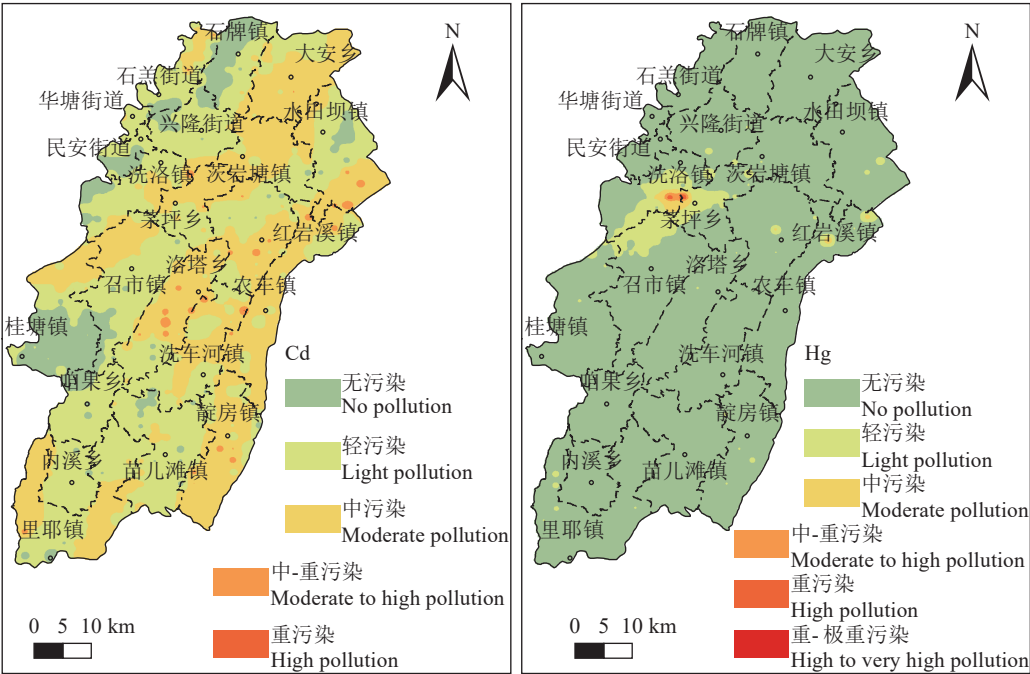


图 3 土壤 Cd 与 Hg 的污染等级分布
Fig.3 Distribution of pollution levels of Cd and Hg in soil

表 7 土壤重金属元素相关性分析
Table 7 Correlation analysis of soil heavy metals

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	0.463**	1						
Cr	0.348**	0.591**	1					
Cu	0.134**	0.367**	0.556**	1				
Hg	0.253**	0.178**	0.142**	0.001	1			
Ni	0.066	0.327**	0.552**	0.613**	-0.013	1		
Pb	0.625**	0.441**	0.215**	0.221**	0.124**	0.143**	1	
Zn	0.220**	0.455**	0.246**	0.362**	0.040	0.345**	0.524**	1

注: **表示在0.01(双侧)水平上显著相关。

2020; 杨玲等, 2022; 姜昕等, 2024; 赵岩等, 2024)。利用 IBM SPSS Statistics 25 软件对数据进行 KMO 和 Bartlett 球形度检验, 经检验, KMO 值为 0.718>0.7, Bartlett 球形度检验显著性水平为 0.00<0.05, 表明数据适合做主成分分析。基于主成分分析, 采用 Kaiser 正态化最大方差法对提取的成分矩阵进行正交旋转, 结果见表 8。由表 8 可知, 前 3 个主成分(PC, principal component)特征值均大于 1, 累积方差贡献率为 72.564%, 能较好地代表原始数据所包含的信息。

主成分 1(PC1)的方差贡献率为 29.978%, 其中, Cr、Cu、Ni 在 PC1 上具有较高的因子载荷, 分别为 0.791、0.828、0.855。前人研究表明, 土壤中的 Cr、Cu、Ni 主要来源于成土母质(吕建树等, 2018; 王锐等, 2020; 尹芳等, 2021; 赵莉源等, 2024)。同时, 将区域地质背景图(图 1)与土壤 Cr、Cu、Ni 含量空间分布图(图 2)对比发现, 寒武系、奥陶系、志留系和泥盆系中 Cr、Cu、Ni 的含量与湖南省土壤背景值相当, 二叠系和三叠系中 Cr、Cu、Ni 的含量相对背景值较高, 白垩系和第四系中 Cr、Cu、Ni 的含量则略低于背景值, 且土壤中 Cr、Cu、Ni 含量的

变异系数(表 5)相对较低, 表明 Cr、Cu、Ni 主要受成土母质等自然因素控制, 未受到明显人为因素的影响。因此, PC1 可以解释为地质背景引起的, 为自然来源。此外, Cd 在 PC1 和 PC2 上的因子载荷相当(PC1 对 Cd 的贡献略低于 PC2 对 Cd 的贡献), 表明 Cd 的来源与地质背景有一定的关系。

主成分 2(PC2)的方差贡献率为 27.392%, 其中, As、Cd、Pb、Zn 在 PC2 上具有较高的因子载荷, 分别为 0.712、0.566、0.907、0.692。龙山县土壤重金属 As、Cd、Pb、Zn 的变异系数分别为 0.63、0.54、0.27 和 0.23, 表明这些元素可能受到了人类活动的影响。前人研究报道, 土壤中的 As、Cd、Pb、Zn 来源于铅锌矿开采选冶过程中的排废(Ma et al., 2014; Li et al., 2015; 周艳等, 2018; 王雪雯等, 2022; 徐磊等, 2024)。经查明, 龙山县确有铅锌矿带, 其属于“湘西—鄂西成矿带”中的“湖北鹤峰—湖南龙山铅锌找矿远景区”的一部分, 有过一定数量的铅锌矿矿区。尽管, 这些铅锌矿矿区目前已被废弃, 但其过去矿山开采和选冶过程中产生的富集重金属的废水、废气、废渣, 通过风或水的运输及不断地浸出导致大量重金属进入土壤(邬光海等, 2020)。同时, 龙山县铅锌矿矿区与土壤重金属 As、Cd、Pb 高值区高度重叠(陈明辉等, 2008)。综上, 推测 PC2 代表了铅锌矿开采选冶来源。

主成分 3(PC3)的方差贡献率为 15.193%, 仅 Hg 在 PC3 上占有较大载荷, 为 0.855。龙山县土壤重金属 Hg 的含量平均值与湖南省土壤背景值相当, 但其变异系数为 1.22, 表明 Hg 来源受到人为因素影响的程度较高。前人研究发现, 煤等化石燃料燃烧向大气中排放的 Hg 能够通过大气干湿沉降和地表径流进入到土壤中, 导致 Hg 在土壤中不断积累(Lü et al., 2014; Xu et al., 2015; 徐夕博等, 2018;

表 8 土壤重金属旋转成分矩阵
Table 8 Rotated component matrix for soil heavy metals

项目	PC1	PC2	PC3
As	0.037	0.712	0.459
Cd	0.489	0.566	0.282
Cr	0.791	0.183	0.324
Cu	0.828	0.152	-0.080
Hg	0.012	0.053	0.855
Ni	0.855	0.059	-0.104
Pb	0.048	0.907	0.052
Zn	0.336	0.692	-0.264
特征值	2.398	2.191	1.215
方差贡献率/%	29.978	27.392	15.193
累积方差贡献率/%	29.978	57.370	72.564

黄永达等, 2020; 王乔林等, 2021; 陈航等, 2022)。经调查, Hg 高值区集中分布的洗洛乡与茅坪乡有相当数量的百合加工企业, 它们主要以煤等化石燃料为主要燃料。据此, 判断 PC3 代表了化石燃料燃烧来源。

3.4 健康风险评价

龙山县土壤重金属非致癌健康风险评价结果如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知, 只考虑单一元素单一暴露途径对人体的非致癌风险时, 仅 As 经口摄入对儿童的非致癌风险指数 HQ 存在大于 1 的值, 介于 0.05~1.36, 表明存在非致癌风险。综合考虑多种元素多种暴露途径对人体的非致癌风险时, 成人非致癌风险指数 HI 介于 0.05~0.39, 均值为 0.14, 表明龙山县土壤重金属对成人无显著非致癌风险; 儿童非致癌风险指数 HI 介于 0.21~1.68, 均值为 0.58, 其中 HI 大于 1 的样品有 22 件, 占比

2.84%, 表明龙山县局部地区土壤重金属对儿童具有非致癌健康风险。

由图 5 可知, 不同重金属和暴露途径对成人和儿童的非致癌风险贡献相似。不同重金属对人体的非致癌风险贡献由高到低为 As>Cr>Pb>Ni>Cu>Cd>Hg>Zn, 其中, As、Cr 对人体的非致癌风险贡献之和超过 82.60%; 不同暴露途径对人体的非致癌风险贡献由高到低为经口摄入>皮肤接触>呼吸吸入, 其中, 经口摄入对人体的非致癌风险贡献大于 92.51%。

龙山县土壤重金属致癌健康风险评价结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知, 只考虑单一元素单一暴露途径对人体的致癌风险时, 仅 Ni 经口摄入对成人和儿童的致癌风险指数 CR 存在大于 10^{-4} 的值, 分别介于 $1.11 \times 10^{-5} \sim 1.07 \times 10^{-4}$ 和 $1.21 \times 10^{-5} \sim 1.17 \times 10^{-4}$, 表明存在致癌风险。综合考虑多种元素多种

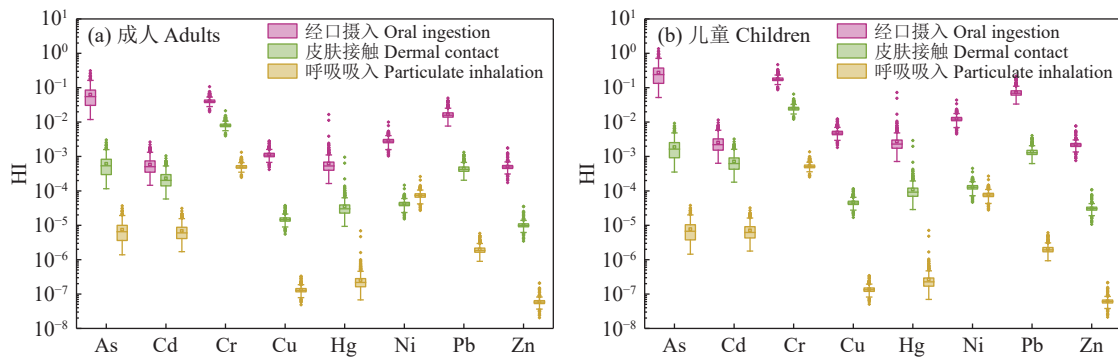


图 4 不同重金属和暴露途径的非致癌风险指数

Fig.4 Non-carcinogenic risk index of different heavy metals and exposure routes

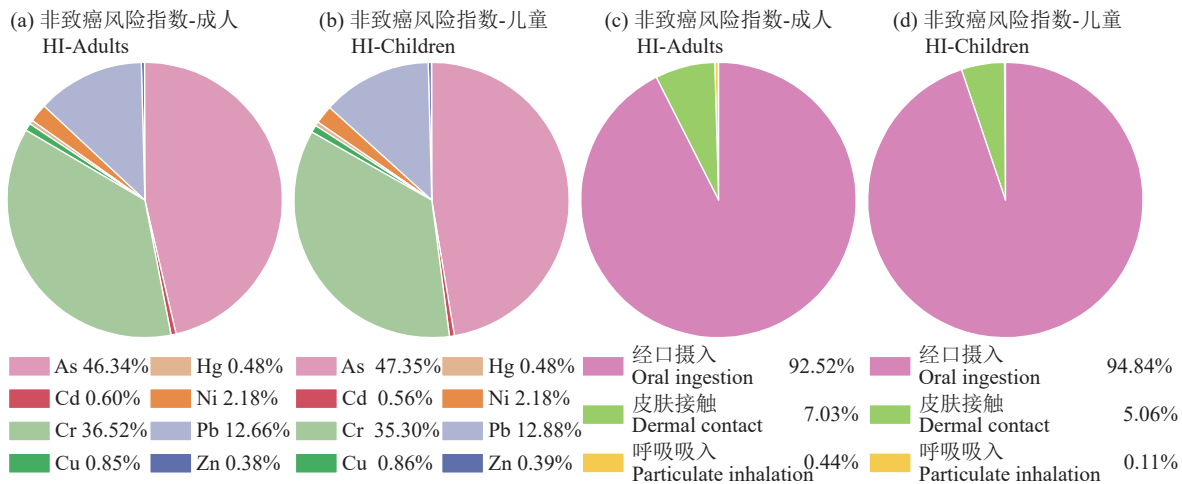


图 5 不同重金属和暴露途径对非致癌风险指数的平均贡献率

Fig.5 Average contribution rates of different heavy metals and exposure routes to non-carcinogenic risk index

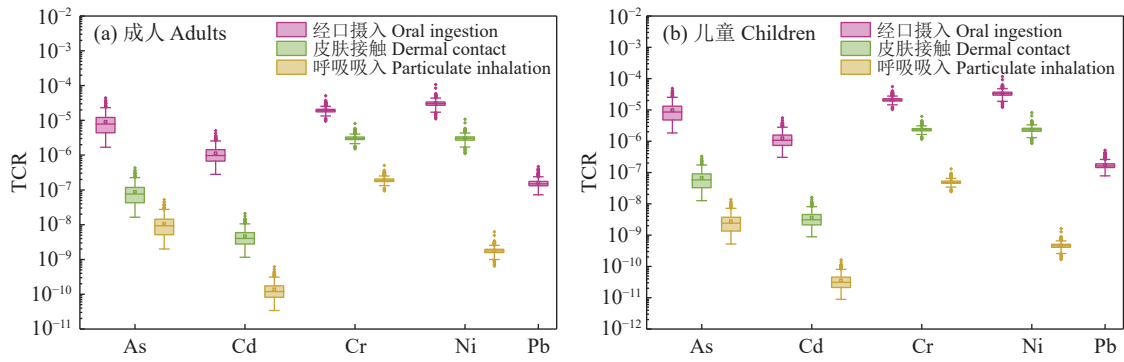


图 6 不同重金属和暴露途径的致癌风险指数
Fig.6 Carcinogenic risk index of different heavy metals and exposure routes

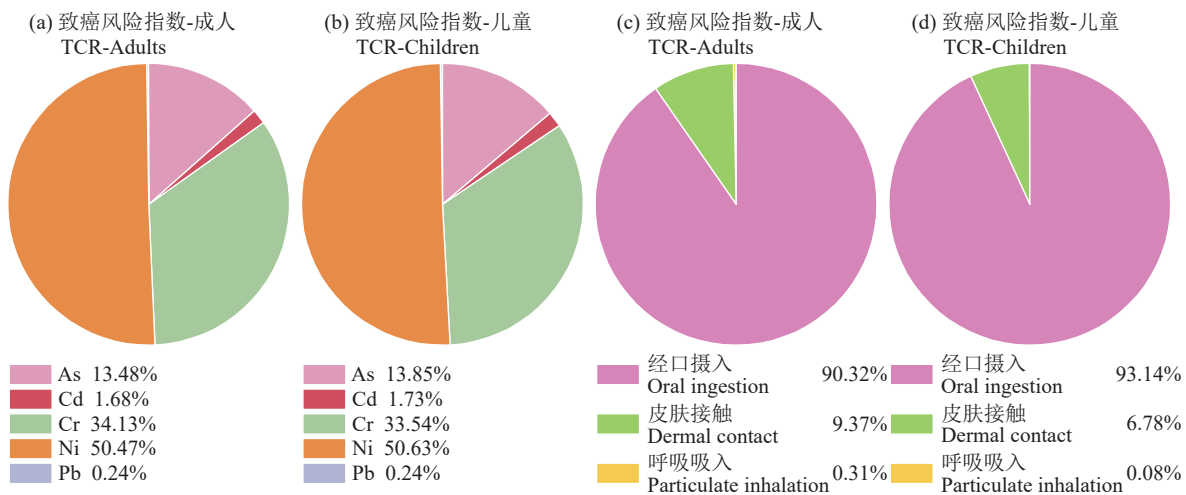


图 7 不同重金属和暴露途径对致癌风险指数的平均贡献率
Fig.7 Average contribution rates of different heavy metals and exposure routes to carcinogenic risk index

暴露途径对人体的致癌风险时, 成人致癌风险指数 TCR 介于 $2.60 \times 10^{-5} \sim 1.48 \times 10^{-4}$, 均值为 6.71×10^{-5} , 其中 TCR 大于 10^{-4} 的样品有 15 件, 占比 1.94%, 表明龙山县局部地区土壤重金属对成人具有致癌健康风险; 儿童致癌风险指数 TCR 介于 $2.74 \times 10^{-5} \sim 1.57 \times 10^{-4}$, 均值为 7.11×10^{-5} , 其中 TCR 大于 1 的样品有 30 件, 占比 3.87%, 表明龙山县局部地区土壤重金属对儿童具有致癌健康风险。

由图 7 可知, 不同重金属和暴露途径对成人和儿童的致癌风险贡献相似。不同重金属对人体的致癌风险贡献由高到低为 $\text{Ni} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Pb}$, 其中, Ni、Cr 对人体的致癌风险贡献之和超过 84.10%; 不同暴露途径对人体的致癌风险贡献由高到低为经口摄入 > 皮肤接触 > 呼吸吸入, 其中, 经口摄入对人体的致癌风险贡献大于 90.31%。

3.5 健康风险空间分布格局

运用 ArcGIS 10.7 中的反距离权重法插值得到龙山县土壤重金属导致的非致癌风险指数 (HI) 与致癌风险指数 (TCR) 空间分布格局 (图 8)。由图 8 可知, 成人和儿童的 HI 与 TCR 的高值区在空间分布上基本一致, 龙山县土壤重金属对儿童造成的健康风险高于成人。同时, HI 高值区与 As、Cr 的高值区高度重叠 (图 2), TCR 高值区与 Cr、Ni 的高值区高度重叠 (图 2), 这与健康风险评价中 As、Cr 是造成非致癌风险的主要重金属元素和 Cr、Ni 是造成致癌风险的主要重金属元素的结果吻合。根据健康风险评价结果和图 8 所示, 需注意龙山县里耶镇东部和苗儿滩镇东南部土壤重金属对儿童产生的非致癌健康风险, 里耶镇西部和洛塔乡中部土壤重金属对成人和儿童产生的致癌健康风

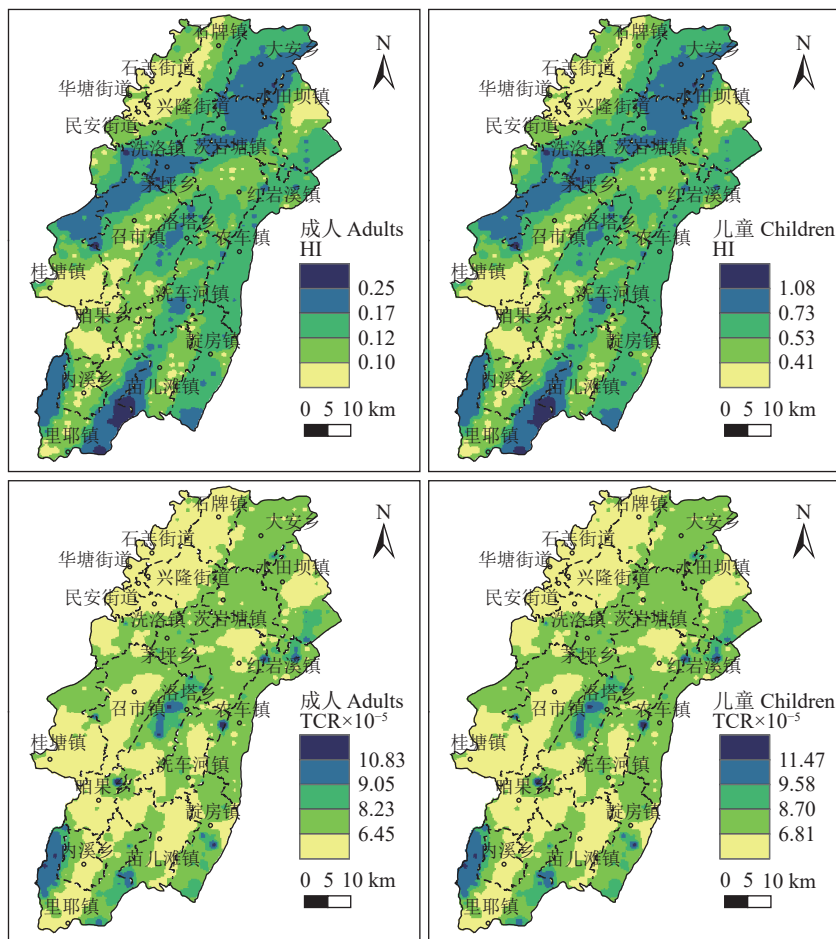


图 8 HI 与 TCR 空间分布格局
Fig.8 Spatial distribution patterns of HI and TCR

险。此外,龙山县土壤重金属 Cd 污染范围较广,但造成非致癌风险的主要重金属元素为 As、Cr,造成致癌风险的主要重金属元素为 Cr、Ni,两者不具协同性,这主要与土壤 As、Cr、Ni 具有较高的含量以及它们的毒性导致其在健康风险评价模型中具有较高的致癌斜率系数(SF)和较低的参考剂量(RfD)有关(鲍丽然等, 2020)。

3.6 健康风险评价的不确定性

本研究健康风险评价中仅考虑了土壤 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 这 8 种重金属元素,未考虑其他重金属元素对人体健康的影响,会导致评价结果偏低。此外,本研究假设了计算健康风险的部分参数,如土壤摄入频率、平均体重等,可能与实际情况存在出入。同时,本研究基于重金属总量进行健康风险评价,但重金属进入人体并不能被完全吸收,可能会使健康风险被高估。再者,由于本研究

未区分不同土地利用类型,所得健康风险评价结果可能无法准确反映特定土地利用类型(如农用地、建筑用地等)的实际状况。另外,本研究未考虑重金属在人体内的拮抗与协同作用、重金属通过食物链等途径的暴露量,因此本研究的健康风险评价具有一定程度的不确定性,可能结论和实际情况有所偏差。

4 结 论

(1)龙山县土壤 As 平均含量低于湖南省表层土壤元素背景值,Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 平均含量均与背景值相当或略高于背景值,Cd 平均含量明显高于背景值,表明龙山县土壤中 Cd 存在一定程度的富集。同时,As 和 Cd 的变异系数均大于 0.5, Hg 的变异系数大于 1,可能受到人类活动的影响。

(2)龙山县土壤中存在不同程度的 As、Cd、

Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 污染, 其中, Cd 污染范围较广, 局部地区 Hg 污染程度严重。

(3) 龙山县土壤重金属来源可分为三类: Cr、Cu、Ni 主要来源于成土母质; As、Cd、Pb、Zn 主要来源于铅锌矿开采选冶, 同时, Cd 的来源与成土母质有一定的关系; Hg 主要来源于化石燃料燃烧。

(4) 龙山县土壤重金属对儿童造成的健康风险高于成人, 需注意龙山县里耶镇、苗儿滩镇和洛塔乡土壤重金属产生的健康风险。此外, As、Cr 是造成非致癌风险的主要重金属元素, Cr、Ni 是造成致癌风险的主要重金属元素, 经口摄入是产生健康风险主要暴露途径。

References

- Alloway B J. 1995. Heavy Metals in Soils[M]. London: Chapman and Hall.
- 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).
- Chai Lei, Wang Xin, Ma Liang, Cheng Zhenxiang, Su Limin, Wang Yuhong. 2020. Sources appointment of heavy metals in cultivated soils of Lanzhou based on PMF models[J]. *China Environmental Science*, 40(9): 3919–3929 (in Chinese with English abstract).
- Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, Wang Y Y, Wu J, Wang J S. 2016. Source apportionment and health risk assessment of trace metals in surface soils of Beijing metropolitan, China[J]. *Chemosphere*, 144: 1002–1011.
- Chen Hang, Wang Ying, Wang Shu. 2022. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan Mining Area[J]. *Environmental Science*, 43(5): 2719–2731 (in Chinese with English abstract).
- Chen Minghui, Sun Jimao, Fu Yiping, Bao Zhenxiang, Bao Juemin. 2008. Geology and geochemistry of lead–zinc ore zone and prospecting potential in Longshan County, Western Hunan[J]. *Resources Environment & Engineering*, 22(2): 151–158 (in Chinese with English abstract).
- Chen Youjian, Tao Shu, Deng Baoshan, Zhang Xueqing, Huang Yi. 2001. Effect of root system on metal fractionation in rhizosphere of contaminated soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 38(1): 54–59 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Zhao Y Y, Chen D L, Huang H T, Yu Z, 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(1): 15–26.
- Cheng Xianda, Sun Jianwei, Jia Xu, Liu Xiangdong, Zhao Yuanyi. 2023. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the molybdenum mining area in Luanchuan, Henan Province[J]. *Geology in China*, 50(6): 1871–1886 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Xianda, Sun Jianwei, Jia Xu, Shang Liannan, Zhang Long, Sun Yake. 2022. Pollution and source apportionment of heavy metals in the farmland soils of the gold mining area in Tantou Basin, western Henan metallogenic belt[J]. *East China Geology*, 43(3): 313–323 (in Chinese with English abstract).
- China National Environmental Monitoring Centre. 1990. The Background Concentrations of Soil Elements in China[M]. Beijing: Chinese Environment Science Press, 1–500 (in Chinese).
- Dai Liangliang, Xu Honggen, Gong Hao, Peng Zhigang, Xiao Kaiqi, Wu Huanhuan, Xu Qingyang, Guo Jun, Tang Yuanyuan, Zhang Jun. 2023. Geochemical characteristics of Cd in different parent soils in kasta area and prediction of Cd content in maize[J]. *Environmental Science*, 44(4): 2243–2251 (in Chinese with English abstract).
- Duan Xiaoli. 2016. Highlights of the Chinese Exposure Factors Handbook (Children)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 55–82 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yongda, Hu Hongyun, Gong Hongyu, Liu Huimin, Fu Biao, Li Shuai, Luo Guangqian, Yao Hong. 2020. Research progress on emission and control technologies of arsenic, selenium and lead in coal–fired power plants[J]. *Journal of Fuel Chemistry Technology*, 48(11): 1281–1297 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Lijia. 2015. Based on the RUSLE Model Xiangxi Rockey Area of Soil Erosion Research in Longshan County[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 1–55 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Xin, Ma Yiqi, Tu Chunlin, Huang An, Hu Yaojun, Ye Lei, He Chengzhong, Li Shiyu. 2024. Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in typical coal mining areas of Eastern Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 51(1): 327–340 (in Chinese with English abstract).
- Li Chenyang, Wang Xinchun, He Chunzhen, Wu Xuan, Kong Zhaoyu, Li Xiaolei. 2019. China national digital geological map (public version at 1 : 200 000 scale) spatial database (V1)[DB/OL]. Development and Research Center of China Geological Survey, <http://dcc.ngac.org.cn/geologicalData/rest/geologicalData/geologicalDataDetail/7d7ac63df9805f39a92591d105b7b0f2> (in Chinese).
- Li P Z, Lin C Y, Cheng H G, Duan X L, Lei K. 2015. Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113: 391–399.
- Li Wei, Bu Duo, Sun Jing, Shan Zaiyi, Lv Xuebin, Xiong Jian. 2021. Distribution and ecological risk assessment of heavy metal elements in the surface sediments of Bagaxue wetlands in Lhasa[J]. *Environmental Chemistry*, 40(1): 195–203 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Li X Y, Zhang J R, Ma J, Liu Q Y, Shi T R, Gong Y W, Yang S H, Wu Y H. 2020. Status of chromium accumulation in agricultural soils across China (1989–2016)[J]. *Chemosphere*, 256: 127036.
- Lin Chengqi, Cai Yuhao, Hu Gongren, Yu Ruilian, Hao Chunli, Huang Huabin. 2021. Bioaccessibility and health risks of the heavy metals in soil–rice system of Southwest Fujian Province[J]. *Environmental Science*, 42(1): 359–367 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Lü Jianshu, He Huachun. 2018. Identifying the origins and spatial distribution of heavy metals in the soils of the Jiangsu Coast[J]. *Environmental Science*, 39(6): 2853–2864 (in Chinese with English abstract).
- Lü J S, Liu Y, Zhang Z L, Dai J R, Dai B, Zhu Y C. 2014. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country (Eastern China) using multivariate and geostatistical approach[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 15(1): 163–178.
- Ma Z W, Li T T, Qu C S, Bi J, Huang L. 2014. Evaluation and source identification of trace element contamination of soils in the Qixia lead–zinc mining area, Jiangsu, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 14(10): 1703–1712.
- Ministry of Environmental Protection. 2013. Exposure Factors Handbook of Chinese Population (Adults)[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 746–796 (in Chinese with English abstract).
- US EPA. 1989. Risk assessment guidance for superfund. Volume I : human health evaluation manual[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency.
- US EPA. 1992. Guidelines for exposure assessment[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency.
- US EPA. 2000. Handbook for non–cancer health effects evaluation[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency.
- US EPA. 2002. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency.
- US EPA. 2011. Exposure factor handbook[R]. Washington D C: United States Environmental Protection Agency.
- Ren Yu, Cao Wengeng, Xiao Shunyu, Li Xiangzhi, Pan Deng, Wang Shuai. 2024. Research progress on distribution, harm and control technology of heavy metals in soil[J]. *Geology in China*, 51(1): 118–142 (in Chinese with English abstract).
- Rodríguez Martín J A, Ramos–Miras J J, Boluda R, Gil C. 2013. Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain)[J]. *Geoderma*, 200–201: 180–188.
- Sun Jianwei, Jia Xu, Liu Xiangdong, Cheng Xianda, Shang Liannan. 2023. Influence of mining activities in the gold ore concentration area in Western Henan on the heavy metals in surrounding farmland Soil[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 42(1): 192–202 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhijia, LiBaofei, Chen Yuhai, Yuan Qingzheng, Yan Xingguo, Zhao Mingjie. 2022. Assessment of agricultural land on soil heavy metals pollution and ecological risk in the northeast of Zhanjiang City[J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 45(1): 61–68 (in Chinese with English abstract).
- Wang F F, Guan Q Y, Tian J, Lin J K, Yang Y Y, Yang L Q, Pan N H. 2020. Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor[J]. *Catena*, 191: 104573.
- Wang Qiaolin, Song Yuntao, Wang Chengwen, Xu Renting, Peng Min, Zhou Yalong, Han Wei. 2021. Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in Western Yunnan[J]. *China Environmental Science*, 41(8): 3693–3703 (in Chinese with English abstract).
- Wang Rui, Deng Hai, Yan Mingshu, He Zhongxiang, Zhou Jiao, Liang Shaobiao, Zeng Qinqin. 2020. Assessment and source analysis of heavy metal pollution in farmland soils in Southern Youyang County, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 41(10): 4749–4756 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weipeng, Lu Hongwei, Feng Sansan. 2020. Ecological risk assessment of soil heavy metals in the middle of the "One River and Two Tributaries" basin in Tibet[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 37(6): 960–980 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuewen, Liu Hongyan, Gu Xiaofeng, Tu Yu, Yu Enjiang, Wu Pan. 2022. Distribution characteristics of heavy metals in soil affected by different land use types in a superimposed pollution area with high geological background[J]. *Environmental Science*, 43(4): 2094–2103 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yu, Xin Cunlin, Yu Shi, Xue Honglei, Zeng Peng, Sun Pingan, Liu Fan. 2022. Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. *Environmental Science*, 43(9): 4756–4766 (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).
- Xu J Y, Bravo A G, Lagerkvist A, Bertilsson S, Sjöblom R, Kumpiene J. 2015. Sources and remediation techniques for mercury contaminated soil[J]. *Environment International*, 74: 42–53.
- Xu Lei, Guan Jiyun, Ba Yong, Chen Weizhi, Huang Jiazhong, Cheng Yanxun, Zhang Ya, Qu Qiang, Zhao Mengsheng. 2024. Spatial distribution pattern and driving mechanism of heavy metal elements in soils of middle–alpine hilly region, Yunnan Province[J]. *Geology in China*, 51(1): 304–326 (in Chinese with English abstract).

- Xu Xibo, Lü Jianshu, Xu Ruru. 2018. Source spatial distribution and risk assessment of heavy metals in Yiyuan County of Shandong Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 34(9): 216–223 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ling, Tian Lei, Bai Guangyu, Pei Shengliang, Zhang Deqiang. 2022. Ecological risk assessments and source analysis of heavy metals in the soil of Xin Barag Youqi, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 49(6): 1970–1983 (in Chinese with English abstract).
- Yang Qian. 2014. Lily Cultivation, Yield and Quality Improving Policy and Technology in Longshan County[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 1–34 (in Chinese with English abstract).
- Yin Fang, Feng Kai, Yin Cuijing, Bai Dezhen, Wang Rui, Zhou Yuanyuan, Liang Yongchun, Liu Lei. 2021. Evaluation and source analysis of heavy metal in cultivated soil around typical industrial district of Qinghai Province[J]. China Environmental Science, 41(11): 5217–5226 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dong, Li Yongchun, Su Rilige, Yuan Guoli, Tai Surigala, Wang Yongliang, Chen Guodong, Zhou Wenhui, Du Yuchunzi, Yang Jianyu. 2024. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in Wuyuan County, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 51(1): 248–263 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Dai Liangliang, Zhang Hongchao, Zhang Tao, Gong Hao, Peng Zhigang, He Can. 2022. Analysis of land geochemical characteristics in Longshan County[J]. Acta Geologica Sichuan, 42(3): 479–484 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jun, Dai Liangliang, Gong Hao, Peng Zhigang, Xu Qingyang, Hu Xiangrong, He Can, Wu Wenbin, Chen Wei, Zeng Jian. 2025. Construction of Se-enriched land quality evaluation system based on predicted Se content in crops: A case study of Longshan County, Hunan Province[J]. Geology in China, 52(1): 362–371 (in Chinese with English abstract).
- Zhang R, Chen T, Zhang Y, Hou Y H, Chang Q R. 2020. Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils and identification of main influencing factors in a typical industrial park in northwest China[J]. Chemosphere, 252: 126591.
- Zhao Liyuan, Kong Linghao, Zhao Zhigang, Zhou Wenhui, Qiu Jiandong, Huang Jianhua, Geng Baili, Yang Maosen, Han Xiangcai, Li Yachao, Gu Songsong, Zhao Mingjie, Shan Kai. 2024. Pollution characteristics, source analysis and risk assessment of heavy metals in soil around a gold mine in Jiaodong Peninsula[J]. Geology in China, 51(5): 1485–1500 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinna, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2023. Review on heavy metal pollution and remediation technology in the soil of mining areas[J]. Geology in China, 50(1): 84–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yan, Guo Changlai, Cui Jian, Zhang Yanfei, Li Ying, Li Xuguang, Yu Huiming. 2024. Distribution characteristics, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil of Beizhen agricultural area, Jinzhou City, Liaoning Province[J]. Geology in China, 51(5): 1469–1484 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yan, Chen Qiang, Deng Shaopo, Wan Jinzhong, Zhang Shengtian, Long Tao, Li Qun, Lin Yusuo, Wu Yunjin. 2018. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb–Zn mine in Southwestern China[J]. Environmental Science, 39(6): 2884–2892 (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.
- 柴磊, 王新, 马良, 成震香, 苏利民, 王宇红. 2020. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. 中国环境科学, 40(9): 3919–3929.
- 陈航, 王颖, 王澍. 2022. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 43(5): 2719–2731.
- 陈明辉, 孙际茂, 付益平, 鲍振襄, 包觉敏. 2008. 湘西龙山铅锌矿带地质地球化学及其找矿前景[J]. 资源环境与工程, 22(2): 151–158.
- 陈有鑑, 陶澍, 邓宝山, 张学青, 黄艺. 2001. 不同作物根际环境对土壤重金属形态的影响[J]. 土壤学报, 38(1): 54–59.
- 程贤达, 孙建伟, 贾煦, 刘向东, 赵元艺. 2023. 河南栾川县钼矿区周边农田土壤重金属污染特征与健康风险评价[J]. 中国地质, 50(6): 1871–1886.
- 程贤达, 孙建伟, 贾煦, 商连南, 张龙, 孙亚柯. 2022. 豫西成矿带潭头盆地金矿区农田土壤重金属污染及来源解析[J]. 华东地质, 43(3): 313–323.
- 戴明亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊. 2023. 岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测[J]. 环境科学, 44(4): 2243–2251.
- 段小丽. 2016. 中国人群暴露参数手册 (儿童卷) 概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 55–82.
- 环境保护部. 2013. 中国人群暴露参数手册 (成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 746–796.
- 黄永达, 胡红云, 龚泓宇, 刘慧敏, 付彪, 李帅, 罗光前, 姚洪. 2020. 燃煤电厂砷、硒、铅的排放与控制技术研究进展[J]. 燃料化学学报, 48(11): 1281–1297.
- 江莉佳. 2015. 基于 RUSLE 模型的湘西石漠化地区土壤侵蚀研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 1–55.
- 姜昕, 马一奇, 涂春霖, 黄安, 胡要君, 叶雷, 和成忠, 李世玉. 2024. 滇东典型煤矿区土壤重金属生态风险及来源解析[J]. 中国地质, 51(1): 327–340.
- 李晨阳, 王新春, 何春珍, 吴轩, 孔昭煜, 李晓蕾. 2019. 全国 1 : 200 000 数字地质图 (公开版) 空间数据库 (V1)[DB/OL]. 中国地质调查局发展研究中心, <http://dcc.ngac.org.cn/geologicalData/rest/geologicalData/geologicalDataDetail/7d7ac63df9805f39a92591d105b7b0f2>.
- 李伟, 布多, 孙晶, 单再毅, 吕学斌, 熊健. 2021. 拉萨巴嘎雪湿地土壤重金属分布及生态风险评价[J]. 环境化学, 40(1): 195–203.

- 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌. 2021. 闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险[J]. 环境科学, 42(1): 359-367.
- 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.
- 吕建树, 何华春. 2018. 江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 39(6): 2853-2864.
- 任宇, 曹文庚, 肖舜禹, 李祥志, 潘登, 王帅. 2024. 重金属在土壤中的分布、危害与治理技术研究进展[J]. 中国地质, 51(1): 118-142.
- 孙建伟, 贾煦, 刘向东, 程贤达, 商连南. 2023. 豫西金矿集区矿业活动对周边农田土壤重金属影响研究[J]. 岩矿测试, 42(1): 192-202.
- 孙志佳, 李保飞, 陈玉海, 袁庆政, 闫兴国, 赵明杰. 2022. 湛江东北部农用地土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 河北农业大学学报, 45(1): 61-68.
- 王乔林, 宋云涛, 王成文, 徐仁廷, 彭敏, 周亚龙, 韩伟. 2021. 滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 中国环境科学, 41(8): 3693-3703.
- 王锐, 邓海, 严明书, 何忠庠, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴. 2020. 重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析[J]. 环境科学, 41(10): 4749-4756.
- 王伟鹏, 卢宏伟, 冯三三. 2020. 西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 37(6): 970-980.
- 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀. 2022. 地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征[J]. 环境科学, 43(4): 2094-2103.
- 王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡. 2022. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 43(9): 4756-4766.
- 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.
- 徐磊, 管继云, 巴永, 陈伟志, 黄加忠, 程琰勋, 张亚, 瞿疆, 赵萌生. 2024. 云南中高山丘陵区土壤重金属元素空间分布格局及驱动机制[J]. 中国地质, 51(1): 304-326.
- 徐夕博, 吕建树, 徐汝汝. 2018. 山东省沂源县土壤重金属来源分布及风险评价[J]. 农业工程学报, 34(9): 216-223.
- 杨玲, 田磊, 白光宇, 裴圣良, 张德强. 2022. 内蒙古新巴尔虎右旗土壤重金属生态风险与来源分析[J]. 中国地质, 49(6): 1970-1983.
- 杨茜. 2014. 龙山县百合种植现状及增产提质政策与技术研究[D]. 长沙: 湖南农业大学: 1-34.
- 尹芳, 封凯, 尹翠景, 拜得珍, 王蕊, 周园园, 梁永春, 刘磊. 2021. 青海典型工业区耕地土壤重金属评价及源解析[J]. 中国环境科学, 41(11): 5217-5226.
- 张栋, 李永春, 苏日力格, 袁国礼, 邵苏日嘎拉, 王永亮, 陈国栋, 周文辉, 杜雨春子, 杨建雨. 2024. 内蒙古五原县某地土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 51(1): 248-263.
- 张俊, 戴亮亮, 张洪潮, 张涛, 聂小力, 巩浩, 彭志刚, 贺灿. 2022. 龙山县土地地球化学特征分析[J]. 四川地质学报, 42(3): 479-484.
- 张俊, 戴亮亮, 巩浩, 彭志刚, 许青阳, 胡向荣, 贺灿, 吴文彬, 陈伟, 曾剑. 2025. 基于预测农作物 Se 含量构建富硒土地质量评价体系——以湖南龙山县为例[J]. 中国地质, 52(1): 362-371.
- 赵莉源, 孔令号, 赵志刚, 周文辉, 仇建东, 黄建桦, 耿百利, 杨茂森, 韩祥才, 李亚超, 顾松松, 赵明杰, 单凯. 2024. 胶东半岛某金矿周边土壤重金属的污染特征、来源分析及风险评价[J]. 中国地质, 51(5): 1485-1500.
- 赵鑫娜, 杨忠芳, 余涛. 2023. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. 中国地质, 50(1): 84-101.
- 赵岩, 郭常来, 崔健, 张艳飞, 李莹, 李旭光, 于慧明. 2024. 辽宁省锦州市北镇农业区土壤重金属分布特征、生态风险评价及源解析[J]. 中国地质, 51(5): 1469-1484.
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1-500.
- 周艳, 陈樯, 邓绍坡, 万金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金. 2018. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. 环境科学, 39(6): 2884-2892.