

doi: 10.12029/gc20230622001

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.

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).

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

赵莉源^{1,2}, 孔令号^{1,2}, 赵志刚^{1,2}, 周文辉³, 仇建东⁴, 黄建桦⁵, 耿百利^{1,2}, 杨茂森⁶,
韩祥才^{1,2}, 李亚超^{1,2}, 顾松松^{1,2}, 赵明杰^{1,2}, 单凯⁷

(1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000; 2. 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 山东 烟台 264000; 3. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古 呼和浩特 010010; 4. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 5. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 6. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 7. 黄河三角洲国家级自然保护区管理委员会, 山东 东营 257091)

摘要:【研究目的】本文采集了表层土壤样品 34 件, 分析测定 Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn、Ni 等 8 种重金属元素含量; 获取胶东半岛某金矿周边土壤重金属污染特征, 分析土壤重金属来源并进行风险评价。【研究方法】运用相关性分析和主成分分析方法探索土壤重金属的来源, 运用单项污染评价和地累积指数法确定其污染程度, 采用潜在生态风险评价和人体健康风险评价的方法评估其风险。【研究结果】(1)全区仅存在 3 处点源污染, 1 处为 Hg 元素污染, 2 处为 Cd 元素污染; (2)元素 Ni、Cr 和 As 主要来自于土壤母质, 元素 Pb、Cd、Zn 和 Hg 主要来自于矿业活动, Cu 元素主要来自土壤母质和农业活动; (3)个别点状区域存在较高的潜在生态风险, 风险主要来自于元素 Hg 和 Cd, 其他元素基本上不存在风险; (4)人体健康风险评价结果表明, 全区土壤中的重金属元素未对人体产生明显的健康风险。【结论】该金矿周边的土壤受到了矿业活动的影响, 并出现了点状污染, 但程度较轻, 风险可控, 应当加强对该区域土壤重金属的监测和评价。

关键词: 金矿; 土壤重金属; 污染程度; 来源分析; 风险评价; 环境地质调查工程; 胶东半岛

创新点: 本文研究了胶东半岛某金矿周边土壤的重金属污染情况, 分析了土壤中重金属的来源, 并进行了潜在生态风险评价和人体健康风险评价。

中图分类号: X753; X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1485-16

Pollution characteristics, source analysis and risk assessment of heavy metals in soil around a gold mine in Jiaodong Peninsula

ZHAO Liyuan^{1,2}, KONG Linghao^{1,2}, ZHAO Zhigang^{1,2}, ZHOU Wenhui³, QIU Jiandong⁴,
HUANG Jianhua⁵, GENG Baili^{1,2}, YANG Maosen⁶, HAN Xiangcai^{1,2}, LI Yachao^{1,2},

收稿日期: 2023-06-22; 改回日期: 2023-11-04

基金项目: 中国地质调查项目(ZD20220220、DD20230411、DD20230511、DD20242687)资助。

作者简介: 赵莉源, 男, 1993 年生, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质环境地质调查研究工作; E-mail: 353840397@qq.com。

通讯作者: 孔令号, 男, 1992 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山生态环境及海岸带地质调查研究工作; E-mail: 1245046910@qq.com。

GU Songsong^{1,2}, ZHAO Mingjie^{1,2}, SHAN Kai⁷

(1. *Yantai Coastal Zones Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, Shandong, China*; 2. *Observation and Research Station of Land–Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, Shandong, China*; 3. *Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Huhhot 010010, Inner Mongolia, China*; 4. *Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China*; 5. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*; 6. *Institute of Geophysical and Geochemical Prospecting, Jinan 250013, Shandong, China*; 7. *Yellow River Delta National Nature Reserve Committee, Dongying 257091, Shandong, China*)

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

[Objective] This paper collected 34 surface soil samples to analyze and determine the concentrations of eight heavy metal, including Hg, Cd, As, Pb, Cu, Cr, Zn, and Ni. The objective was to characterize the heavy metal pollution in the soil around a gold mine, identify the sources of heavy metals in the soil, and conduct a risk assessment. **[Methods]** Correlation analysis and principal component analysis were used to explore the sources of heavy metals in the soil. Single pollution evaluation and geo-accumulation index method were employed to determine the degree of pollution. Potential ecological risk assessment and human health risk assessment methods were utilized to evaluate the risks. **[Results]** (1) Only three point source pollutions were found in the study area: one for Hg contamination and two for Cd contamination. (2) Nickel, chromium, and arsenic mainly originated from soil parent materials, while lead, cadmium, zinc, and mercury primarily came from mining activities. Copper was derived from both soil parent materials and agricultural activities. (3) Some localized areas demonstrated high potential ecological risks, mainly due to Hg and Cd, while other elements posed minimal risks. (4) Human health risk assessment indicated that the heavy metal elements in the soil did not pose significant health risks to humans. **[Conclusions]** The soil around the gold mine was influenced by mining activities and exhibited localized pollution, albeit at a low level. The risks were manageable, but monitoring and assessment of heavy metals in this area should be strengthened.

Key words: gold mine; soil heavy metal; pollution level; source analysis; risk assessment; environmental geological survey engineering; Jiaodong Peninsula

Highlights: Heavy metal contamination of soil around a gold mine in Jiaodong Peninsula was studied, the sources of heavy metals in soil were analysed, and potential ecological risk evaluation and human health risk evaluation were carried out.

About the first author: ZHAO Liyuan, male, born in 1993, master, engineer, engaged in hydrogeological and environmental geological survey research; E-mail: 353840397@qq.com.

About the corresponding author: KONG Linghao, male, born in 1992, master, senior engineer, engaged in mine ecological environment and coastal geological investigation and research; E-mail: 1245046910@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.ZD20220220, No.DD20230411, No.DD20230511, No.DD20242687).

1 引 言

土壤是极为重要的自然资源,农业生产、工业发展以及日常生活都离不开土壤(刘同等, 2022; 张栋等, 2024)。随着经济社会的快速发展,人类活动产生的大量重金属污染物会不断进入土壤,进而对生态环境和人体健康产生威胁(Bernard, 2008; Jaishankar et al., 2014; Al-Osman et al., 2019; 陈云飞等, 2022)。重金属元素主要包括 Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn 和 Ni, 联合国环境规划署也将这

8 种重金属元素列为优先控制污染物(王海洋等, 2022)。土壤重金属污染是重要的研究课题(Granero and Domingo, 2002; Yang et al., 2019; Liu et al., 2020; Dong et al., 2023; Ling et al., 2023), 其中矿业活动是产生土壤重金属污染的主要因素之一(杨玲等, 2022), 吸引着大量的学者开展研究工作(徐友宁等, 2007; Lu et al., 2019; 孙厚云等, 2023)。目前, 土壤重金属的研究主要有: 分布特征(高健翁等, 2021; 徐磊等, 2024)、污染评价(息朝庄等, 2022; 范晨子等, 2022)、富集规律(徐友宁等, 2014;

孙泽航, 2020)、风险评估(居宇龙等, 2022; 李剑锋和冯李霄, 2023)、来源分析(杨育振等, 2021; Wang et al., 2022)以及生态修复(刘瑞平等, 2019; 石杨等, 2022)等。采用相应的方法对矿区周边的土壤重金属污染情况进行分析和评价, 对土壤中的重金属可能产生的生态风险和人体健康风险进行研究和评估, 不仅有助于了解矿区周边土壤重金属的污染程度, 也可以有针对性地做好风险防控, 还能够对症下药提出修复对策和防治建议(鲍丽然等, 2020; 涂春霖等, 2023; 赵鑫娜等, 2023)。

胶东地区的黄金产业闻名全国, 其工业体系完备, 生产历史悠久, 并且产量大、品位高, 是中国重要的金矿生产地。长期的金矿生产, 可能会对金矿周边的土壤产生一定程度的重金属污染(李倩等, 2013), 并随着自然循环或者人类活动, 对金矿周边的生态环境以及人体健康造成影响(Zhao et al., 2023)。根据 1: 25 万多目标地球化学调查结果, 胶东地区土壤重金属在表生条件下有相对富集的趋势, Zn、Hg 等多种重金属高背景主要分布在金矿集中区(代杰瑞等, 2011; 王存龙等, 2015), 且工业三废排放是土壤重金属污染的主要原因(王存龙等, 2011)。但是, 已有的调查研究成果也存在采样密度偏低的问题, 且综合采用多种分析方法对某具体金矿集中区域内土壤重金属分布特征、来源分析及风险评价的研究不多。基于此, 本文选取胶东半岛某金矿周边为研究区, 围绕区内的矿业活动区在农用地中采集表层土壤样品并进行分析测试, 采用相关性分析和主成分分析的方法分析土壤中重金属元素的主要来源, 运用相应的方法系统分析研究区土壤重金属的污染情况并进行风险评估, 为该金矿区的绿色矿山建设、土壤污染治理、居民健康生活以及生态保护修复等提供科学的支撑和依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

研究区位于胶东半岛某金矿周边, 面积约 17.86 km²。该金矿位于招平断裂带的中段, 太古宙胶东群变质岩与中生代玲珑花岗岩的接触带上。矿床范围内主要出露地层为前寒武纪胶东岩群和荆山岩系。NE 向招平断裂带是区内主要的控矿构造, 为一复杂的韧性剪切带, 断裂面呈舒缓波状, 带

内岩石片理化带、糜棱岩发育, 由此派生的 NNE、NE 向次生张性构造是主要的配矿和容矿构造(刘洋等, 2017)。区内岩浆岩十分发育, 其中, 中生代花岗岩与金矿关系密切。研究区内的金矿床主要产于招平断裂带下盘的玲珑花岗岩体中, 为一典型的破碎带蚀变岩型金矿床(李洪奎等, 2016)。研究区内的金矿石中, 最主要的载金矿物为黄铁矿, 黄铜矿次之, 方铅矿以及闪锌矿亦是常见的矿石矿物(王金雅, 2021)。

研究区属暖温带大陆性季风气候, 四季分明, 冬无严寒, 夏无酷暑, 年平均气温约 11.5℃, 年平均降水量约 671.1 mm。研究区内的主要地形地貌为低山丘陵, 西北部地势较高、东南部较低, 总体上高差不大, 地表水、浅层地下水整体流向以自北向南流动为主。土地利用类型以耕地为主, 其次为园地、矿山开发占地、居民生活用地和水库池塘等。

2.2 样品采集与测试

2.2.1 采样点的布设与样品采集

为开展本次研究, 2022 年 6 月, 在该金矿周边进行表层土壤样品采集, 共布设采样点 34 个, 总体上均匀布设。采用梅花取样法, 即在 4 个方位点和 1 个中心点共采集 5 个子样, 采样深度为 0~20 cm, 等量均匀混合后, 组成 1 件土壤样品。将土壤掰碎并去除砾石、根系、虫体等杂物, 利用四分法, 取重量大于 1 kg 的土壤装入塑封袋塑封后, 再装入写有对应样品编号的样品袋。样品采集完成后, 经自然风干, 去除杂质, 并过 100 目筛后, 及时送至实验室进行分析测试。为辅助本次研究, 在研究区内采集了 4 件地表水化学样品。采样点的分布情况详见图 1。

2.2.2 样品的分析测试方法

根据《岩石矿物分析》(DZG20.01—2011)中规定的方法对样品进行分析测试: 采用氢化物发生-原子荧光光谱法测定元素 As 的含量, 采用冷蒸气-原子荧光光谱法测定元素 Hg 的含量, 元素 Pb、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量的测定采用电感耦合等离子体质谱法, 采用 pH 值测定离子选择电极法测定 pH 值。

2.3 评价依据及方法

2.3.1 重金属单项污染评价

重金属单项污染评价是根据《土壤环境质量 农

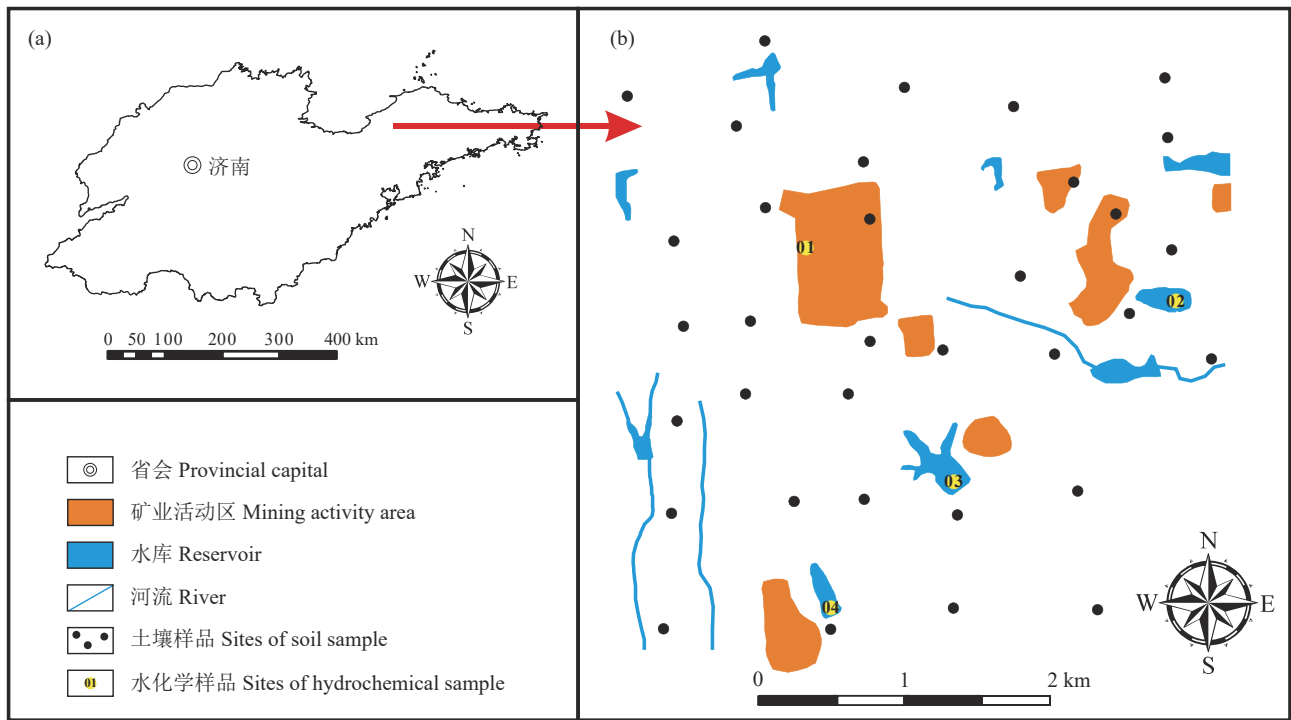


图1 研究区位置和土壤样品采样点分布图
Fig.1 Location of the study area and distribution of soil sample sites

用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定的农用地土壤污染风险筛选值(S_i)和管控值(G_i)进行评价,评价标准见表1。

2.3.2 地累积指数法

地累积指数法,最早由 Muller 于 1980 年提出,被广泛应用于评价沉积物、土壤中的重金属污染程度(程贤达等, 2023)。计算方法为公式(1):

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_i}{1.5B_i} \quad (1)$$

其中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为第 i 种重金属元素的实测值; B_i 为第 i 种重金属元素的背景值(采用当地土壤地球化学背景值; 庞绪贵等, 2019)。

地累积指数重金属污染程度分级见表2。

2.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法,是由瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年出的一种评价重金属污染及其

生态危害的方法(徐友宁等, 2008)。该方法既考虑了土壤中重金属的含量,也考虑了多元素的协同作用,同时还综合考虑了重金属的生态效应、环境效应和毒性效应的影响,因此被广泛的应用于生态风险评价中(代杰瑞等, 2013)。计算方法见公式(2)和(3):

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{C_n} \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

式中, E_r^i 为第 i 种重金属元素的潜在生态风险指数, RI 为多种重金属元素的综合潜在风险指数;

表2 地累积指数污染程度分级

Table 2 Evaluation standards of the geological accumulation index assessment

地累积指数	级别	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	无污染到中度污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中度污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中度污染到强污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	强污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	强污染到极强污染
$I_{geo} \geq 5$	6	极强污染

表1 重金属单项污染评价标准

Table 1 Evaluation standards of single factor

等级	重金属浓度 (C_i)	污染水平
I	$C_i < S_i$	无风险
II	$S_i \leq C_i < G_i$	风险可控
III	$C_i \geq G_i$	风险较高

T_i^r 为第 i 种重金属的毒性响应系数 (Hg 为 40, Cd 为 30, As 为 10, Pb、Ni 和 Cu 都为 5, Cr 为 2, Zn 为 1)(徐争启等, 2008); C_i^r 为第 i 种重金属的实测值, C_n^i 为第 i 种重金属元素的评价值(采用当地土壤地球化学背景值; 庞绪贵等, 2019)。

潜在生态风险指数法的评价标准见表 3。

2.3.4 土壤重金属人体健康风险评价

重金属元素被人体摄入或接触后, 可能会对人體产生健康风险。土壤重金属进入人体的途径主要有三种: 经口摄入、呼吸吸入以及皮肤接触(熊佳等, 2020)。摄入量的计算方法分别为公式(4)~(6):

$$ADD_{ing} = C_i \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$ADD_{inh} = C_i \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (5)$$

$$ADD_{iderm} = C_i \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (6)$$

式(4)~(6)中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{iderm} 分别表示第 i 种重金属元素通过经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触摄入的平均每日摄入量, C_i 表示第

i 种重金属元素的实测值, 其他参数的含义和参考值见表 4。

参考美国环境保护署(USEPA)提出的土壤健康风险模型, 对人体在接触土壤重金属后的致癌和非致癌风险, 进行健康风险评价, 计算方法为公式(7)和(8)。

$$HI = \sum HQ_{i,j} = \sum \frac{ADD_{i,j}}{RFD_{i,j}} \quad (7)$$

$$CR = \sum CR_{i,j} = \sum (ADD_{i,j} \times SF_{i,j}) \quad (8)$$

式中, HI 和 CR 分别表示非致癌风险和致癌风险; $HQ_{i,j}$ 表示第 i 种重金属元素在第 j 种途径下的非致癌健康风险指数, $CR_{i,j}$ 表示第 i 种重金属元素通过第 j 种途径产生的致癌风险; $ADD_{i,j}$ 表示第 i 种重金属元素通过第 j 种途径平均每日摄入的实际剂量, $RFD_{i,j}$ 表示第 i 种重金属元素通过第 j 种途径平均每日摄入的参考剂量, $SF_{i,j}$ 表示第 i 种重金属元素在第 j 种途径下的致癌风险的斜率度因子。各参数的参考值(USEPA, 2011; 林苾等, 2021)见表 5。

当 $HI < 1$ 时, 表示土壤重金属对人体的非致癌健康风险较小; 当 $HI > 1$ 时, 表示土壤重金属对人体存在非致癌健康风险。根据前人研究(尹伊梦等, 2018), 致癌健康风险指数 CR 的可接受风险范围被认为是在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$, 因此当 $CR > 10^{-4}$ 时, 表示土壤重金属对人体存在较高的致癌风险。

2.4 数据处理

采用 SPSS 26 和 Excel 2016 软件对数据进行处理和统计分析, 使用 CoreIDRAW X8 和 Surfer14 软件进行图件绘制。

表 3 重金属潜在风险指数评价标准

Table 3 Evaluation standards of the potential ecological risk index

E_r^i	潜在生态风险程度	RI	潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$600 \leq RI < 1200$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强	$RI \geq 1200$	极强

表 4 重金属元素健康风险评价暴露因子参数

Table 4 Calculation parameters of human intake of heavy metals

参数	含义	单位	参考值		数据来源
			成人	儿童	
IngR	每日经口摄入土壤量	mg/d	100	200	USEPA, 2011
InhR	每日呼吸吸入土壤量	m ³ /d	14.5	7.5	
ABS	皮肤吸附因子	无量纲	0.01	0.01	
ED	暴露年限	a	25	6	
BW	平均体重	kg	56.8	15.9	
AT	非致癌	平均暴露时长	9125	2190	USEPA, 2011
	致癌	平均暴露时长	26280	26280	
PEF	颗粒物释放因子	m ³ /kg	1.36×10^9	1.36×10^9	环境保护部, 2014
EF	暴露频率	d/a	350	350	
SL	皮肤黏着因子	mg/(cm ² ·d)	0.07	0.2	
SA	皮肤暴露面积	cm ²	2011	1078	

表 5 土壤重金属不同暴露途径的 RFD 和 SF

Table 5 Reference values of RFD and SF

元素	RFD/(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)			SF/(kg·d·mg ⁻¹)		
	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触	经口摄入	呼吸吸入	皮肤接触
As	3×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁴	1.5	4.3×10 ⁻³	1.5
Cd	1×10 ⁻³	1×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻⁵	6.1	6.3	6.1
Cr	3×10 ⁻³	2.55×10 ⁻⁵	7.5×10 ⁻⁵	—	42	—
Cu	4×10 ⁻²	—	4×10 ⁻²	—	—	—
Hg	3×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁴	2.1×10 ⁻⁵	—	—	—
Ni	2×10 ⁻²	2.3×10 ⁻⁵	8×10 ⁻⁴	—	0.84	—
Pb	3.5×10 ⁻³	3.5×10 ⁻³	5.3×10 ⁻⁴	—	—	—
Zn	3×10 ⁻¹	—	3×10 ⁻¹	—	—	—

3 结果分析

3.1 土壤重金属的含量特征

图 2 为研究区土壤重金属元素含量和 pH 值分布图。由图可知：(1)元素 Hg 除 1 处单点高值异常外，全区的含量较为均匀；(2)元素 Cd、Pb 和 Zn 均存在几处元素含量富集区，且基本重合；(3)元素 Cr 和 Ni 含量特征比较相似；(4)元素 Cu 和 pH 值

在研究区东侧的高值区相似；(5)大多数区域的 pH 值在 5.0~7.4。

结合表 6 和图 3 可知，在研究区的土壤中，各重金属元素在土壤中含量的平均值均未超过风险筛选值，土壤的 pH 平均值 6.31 与背景值 6.45 大致相当，因此从总体上来说尚未受到严重污染。但 Pb 和 Zn 两种重金属元素的平均含量略超过背景值，分别是当地背景值的 1.13 倍和 1.05 倍，其他元

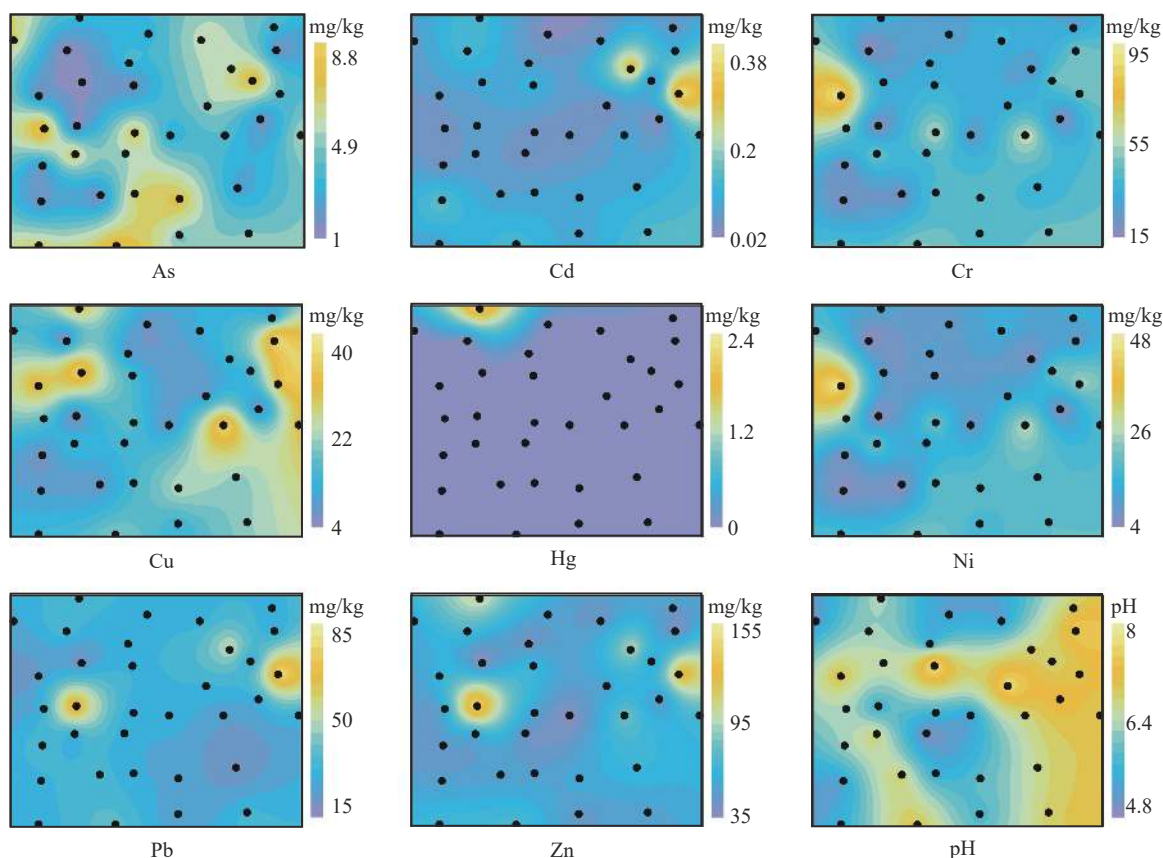


图 2 研究区土壤重金属元素含量和 pH 值分布图

Fig.2 Distribution map of soil heavy metal content and pH values in the study area

表 6 研究区土壤重金属含量特征

Table 6 Characteristics of soil heavy metal concentration in the study area

元素	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	背景值 (庞绪贵等, 2019)
As	1.13	9.19	4.53	2.57	56.82	6.4
Cd	0.03	0.396	0.098	0.077	78.62	0.117
Cr	14.8	95.3	38.54	16.26	42.19	57
Cu	4.55	41.5	18.05	11.12	61.59	26
Hg	0.00658	2.415	0.101	0.41	405.53	0.034
Hg*	0.00658	0.109	0.031	0.024	77.69	0.034
Ni	3.33	47.9	15.17	9.20	60.62	24.6
Pb	13.6	85.9	30.87	14.81	47.99	27.2
Zn	34	157	63.29	26.87	42.45	60.4
pH	4.75	8.08	6.31	0.91	14.49	6.45

注: Hg*为剔除单点高值异常后, 对应的数值; 含量单位为 mg/kg。

素的平均含量均低于背景值。元素 Hg 存在一个单点高值异常, 应当重点研究。

变异系数(CV)是标准差与平均值的比值。变异系数值越大, 意味着重金属元素在空间分布上不均匀程度越高, 即受人为因素的影响越大(孙建伟等, 2023)。一般认为, CV<10% 为弱变异, 10%≤

CV≤100% 为中等变异, CV>100% 为强变异。从表 6 可以看出, 研究区内土壤中, 受高值异常点的影响, Hg 元素的变异系数超过 400%, 属于强变异; 其余元素的变异系数在 42.19%~78.62%, 均属于中等变异。剔除高值异常点后, Hg 元素变异系数为 77.69%, 仅次于 Cd(78.62%)。因此, 研究区土壤中的元素 Hg 和 Cd 的分布受人类活动的影响相对较大。

3.2 土壤重金属的来源分析

通过 Pearson 相关性分析可以探究重金属元素的来源, 若重金属元素之间具有相关性, 其来源可能相同, 反之则来源不同(孙志佳等, 2022)。研究区土壤重金属元素的 Pearson 相关性分析结果(表 7)显示: 元素 Ni 和 Cr 之间以及元素 Pb 和 Zn 之间具有极强相关性(0.8≤|r|<1); 元素 Pb 与 Cd 之间, 以及元素 Cr 与 Cu 之间出现了强相关性(0.6≤|r|<0.8); 元素 Ni 与 Cu、As 之间呈中等相关关系, 元素 Cr 与 As 之间、元素 Cd 与 Zn 之间也呈中等相关关系(0.4≤|r|<0.6); 值得一提的是, 元素 Cu 是

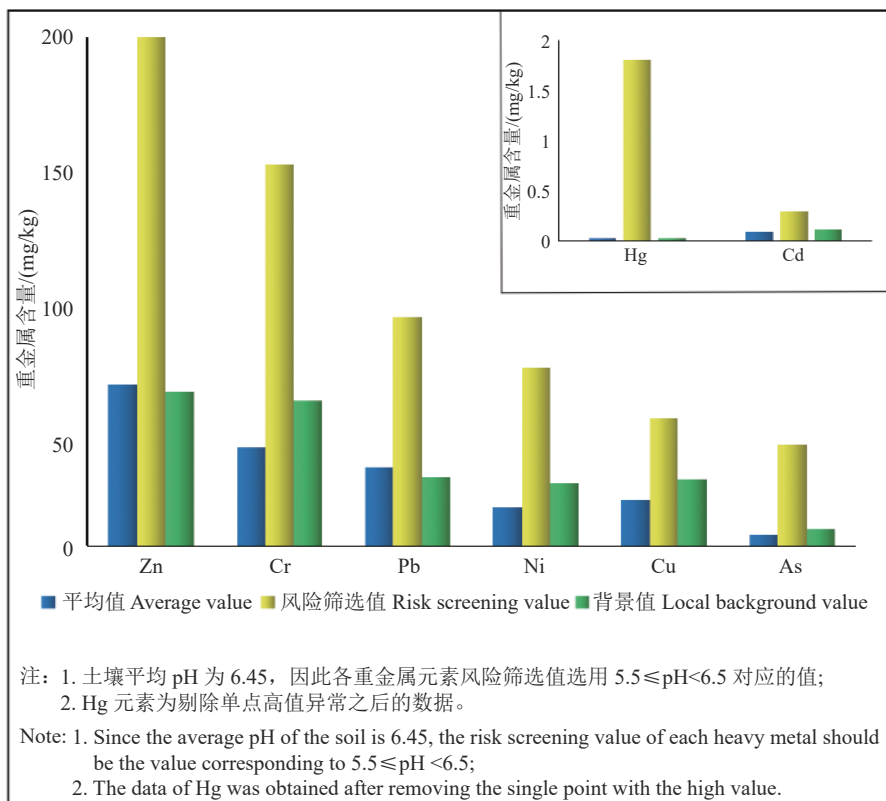


图 3 研究区土壤重金属含量对比柱状图
Fig.3 Bar chart of soil heavy metal content in the study area

表 7 土壤重金属元素的 Pearson 相关性分析
Table 7 Pearson correlation analysis of soil heavy metals

	相关性								
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	pH
As	1								
Cd	-0.014	1							
Cr	0.428*	0.003	1						
Cu	0.043	0.341*	0.629**	1					
Hg	-0.028	0.101	-0.012	0.288	1				
Ni	0.458**	0.030	0.944**	0.524**	-0.034	1			
Pb	-0.099	0.629**	-0.263	-0.121	0.023	-0.187	1		
Zn	-0.079	-0.079	-0.043	0.150	0.319	0.037	0.815**	1	
pH	-0.184	0.265	0.170	0.365*	0.012	0.135	0.079	0.120	1

注: **为在0.01级别(双尾), 相关性显著; *为在0.05级别(双尾), 相关性显著。

唯一与 pH 具有相关性的元素, 但仅呈弱相关性。其余元素之间的相关性不明显。

为进一步分析判断研究区土壤中重金属元素的来源, 基于 Pearson 相关性分析的结果, 运用主成分分析法, 并进行最大方差旋转处理, 对研究区土壤中的重金属元素进行主成分分析, 结果见表 8。其中, KMO 检验值为 0.548, 显著性为 0.000, 表明数据适合进行主成分分析。提取其中特征值大于 1 的主成分, 即前 4 个主成分, 其初始累积贡献率和旋转处理后累积贡献率均为 84.373%。因此对主成分 1~4 进行分析研究, 基本上可以代表全部数据的分析结果。

主成分 1 中的主要元素为 Ni 和 Cr, 其次为 As 和 Cu。由于 Ni、Cr、As 和 Cu 这 4 种元素在研究区土壤中含量的平均值都远小于背景值, 且变异系数都不大, 因此认为主成分 1 受矿业活动的影响较小, 应为自然源, 主要来源为土壤母质。

主成分 2 中的主要元素为 Pb、Cd 和 Zn。其中, 元素 Pb 和 Cd 的平均含量略超过背景值, 可能是人为因素所致。由于研究区内主要的含金矿物

为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿以及闪锌矿, 因此在金矿的生产过程中, 易产生以 Pb、Cd 和 Zn 为主的重金属污染, 且此三种元素的高值区域基本重合, 均分布在矿业活动区附近。因此认为主成分 2 的来源为人为源, 主要来自于金矿采选活动中产生的废渣、废液。

主成分 3 主要影响着土壤的 pH 值, 该主成分的主要元素是 Cu。经走访调研, 当地农民会配置波尔多液(硫酸铜、生石灰、水), 喷洒至作物或果树上, 以防治病虫害。由于波尔多液呈碱性, 因此喷洒波尔多液应为 Cu 元素与 pH 值具有相似的高值区的原因之一, 也使得 Cu 元素与 pH 值具有一定的相关性。因此, 主成分 3 也为人为源, 主要来自于农业活动中的施药施肥。

主成分 4 中的主要元素是 Hg, 由于单点高值异常几乎不可能自然产生, 因此主成分 4 应为人为源, 具体来源在讨论中进一步分析。

综上所述, 研究区土壤中, 主要来自于土壤母质的元素是 Ni、Cr 和 As, 主要来自于矿业活动的元素是 Pb、Cd 和 Zn, 元素 Cu 的来源为混合源(部分来自于土壤母质, 部分来自于农业活动), 元素 Hg 的来源是人为源。

3.3 土壤重金属的污染程度

土壤重金属污染的程度, 主要是通过土壤重金属含量的实测值与参考值的比值进行确定。选取的参考值不同, 得到的评价结果也不同。本研究中, 重金属单项污染风险评价以风险筛选值(S_i)和管控值(G_i)作为参考值, 可以从土地分类管理的角度出发, 确定土壤重金属的污染情况。

土壤重金属单项污染风险评价结果显示, 所有样品的重金属含量均未超过风险管控值, 有 1 件样

表 8 土壤重金属元素主成分分析

指标	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
As	0.634	0.024	-0.557	-0.106
Cd	0.102	0.807	0.268	0.028
Cr	0.953	-0.101	0.133	0.023
Cu	0.615	0.081	0.528	0.396
Hg	-0.013	0.104	-0.026	0.965
Ni	0.945	-0.02	0.050	-0.026
Pb	-0.200	0.935	-0.050	-0.091
Zn	0.008	0.892	0.010	0.259
pH	0.122	0.135	0.843	-0.079
特征值	2.647	2.368	1.394	1.184
累积/%	29.411	55.725	71.219	84.373

品 Hg 元素的含量(高值异常点处, $C_i=2.415$ mg/kg)超过了风险筛选值($S_f=1.8$ mg/kg), 另有 2 件样品 Cd 元素的含量(C_i 分别为 0.396 mg/kg 和 0.326 mg/kg)超过了风险筛选值($S_f=0.3$ mg/kg), 其他样品的评价结果均为无风险。因此, 从土地分类管理的角度来看, 研究区内的土壤整体上较为清洁, 与矿业活动相关的 Cd 元素在研究区东北角的矿业活动区附近存在轻微污染, 另有 1 处 Hg 元素单点污染, 总体来说污染风险可控。

由于各重金属元素的风险筛选值均远高于当地背景值(图 3), 以筛选值作为参考值的评价结果, 无法准确显示出研究区内土壤中重金属元素的富集情况。因此, 采用地累积指数法, 以当地背景值作为参考值进行评价, 可以弥补这一不足。

根据地累积指数法的分析评价结果, Hg 元素有 1 处样品为中度污染($I_{geo}=1.10$), 1 处样品(Hg 元素高值异常)为极强污染($I_{geo}=5.57$); 其余样品均较清洁($I_{geo}<1$)。研究区土壤中 Hg 元素的分布受人类活动的影响相对较大, 与变异系数显示的结果一致。

3.4 土壤重金属的风险评价

当土壤重金属元素的含量达到一定程度时, 可能会对周边环境或者人体产生一定的危害。潜在生态风险评价主要用于评价重金属元素对生态系统功能造成损失的可能性及程度。而人体健康风险评价主要用于评价重金属元素对人体健康造成不利影响的可能性及程度(王昌宇等, 2021)。

3.4.1 潜在生态风险评价

从单项重金属元素的潜在生态风险的分析结果来看, 研究区土壤中, As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 这

6 种重金属元素的生态风险指数普遍较低(E_i 的最大值为 15.79), 属于最低程度的危害; Cd 元素存在 1 处中等生态风险和 2 处强生态风险(E_r 的最大值为 101.54); Hg 元素存在 4 处中等生态风险、3 处强生态风险和 1 处极强生态风险(Hg 元素高值异常点, $E_r=2841.18$)。

8 种重金属元素的综合潜在风险程度则显示: 仅有 1 件样品达到了极强生态风险(Hg 元素高值异常点, $RI=2899.66$); 其余样品均为轻微—中等风险, 其中, 中等风险的样品数为 3 件, 风险主要来自于 Hg 元素和 Cd 元素, 其余 30 件样品均为轻微风险。

综上, 研究区土壤中的重金属元素产生的潜在生态风险呈点状, Hg 元素的贡献度最高, Cd 元素导致的风险较轻微, 其他元素基本上不存在风险。

3.4.2 人体健康风险评价

对研究区土壤重金属元素的摄入量进行评价, 成人和儿童的非致癌日摄入量情况见表 9, 致癌日摄入量情况见表 10。

在研究区中, 同一种重金属元素, 通过不同摄入途径的日平均摄入量, 无论是致癌摄入量还是非致癌摄入量, 成人和儿童均表现为 $ADD_{ing}>ADD_{idem}>ADD_{inh}$ 。在同一摄入途径下, 成人和儿童的土壤重金属元素非致癌日摄入量均表现为 $Zn>Cr>Pb>Cu>Ni>As>Hg>Cd$, 致癌日摄入量表现为 $Cr>Ni>As>Cd$ 。因此, 无论成人还是儿童, 其土壤重金属的致癌和非致癌的主要摄入途径均为由口摄入。

对研究区土壤中的重金属元素对人体(成人、儿童)产生的健康风险进行评价。其中, 非致癌风

表 9 研究区土壤重金属元素非致癌日摄入量

Table 9 Non-carcinogenic daily intake of soil heavy metals in the study area

元素	ADD _{ing}		ADD _{inh}		ADD _{idem}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	7.64×10^{-6}	5.46×10^{-5}	8.15×10^{-10}	1.51×10^{-9}	1.08×10^{-7}	5.89×10^{-7}	7.75×10^{-6}	5.52×10^{-5}
Cd	1.65×10^{-7}	1.18×10^{-6}	1.76×10^{-11}	3.25×10^{-11}	2.32×10^{-11}	1.27×10^{-11}	1.67×10^{-7}	1.19×10^{-6}
Cr	6.51×10^{-5}	4.65×10^{-4}	6.94×10^{-9}	1.28×10^{-8}	9.16×10^{-7}	5.01×10^{-6}	6.60×10^{-5}	4.70×10^{-4}
Cu	3.05×10^{-5}	2.18×10^{-4}	3.2×10^{-9}	6.00×10^{-9}	4.29×10^{-7}	2.35×10^{-6}	3.09×10^{-5}	2.20×10^{-4}
Hg	1.70×10^{-7}	1.22×10^{-6}	1.82×10^{-11}	3.36×10^{-11}	2.40×10^{-9}	1.31×10^{-8}	1.73×10^{-7}	1.23×10^{-6}
Ni	2.56×10^{-5}	1.83×10^{-4}	2.73×10^{-9}	5.05×10^{-9}	3.61×10^{-7}	1.97×10^{-6}	2.60×10^{-5}	1.85×10^{-4}
Pb	5.21×10^{-5}	3.72×10^{-4}	5.56×10^{-9}	1.03×10^{-8}	7.34×10^{-7}	4.01×10^{-6}	5.29×10^{-5}	3.76×10^{-4}
Zn	1.07×10^{-4}	7.63×10^{-4}	1.14×10^{-8}	2.11×10^{-8}	1.50×10^{-6}	8.23×10^{-6}	1.08×10^{-4}	7.72×10^{-4}
ADD	2.88×10^{-4}	2.06×10^{-3}	3.07×10^{-8}	5.68×10^{-8}	4.06×10^{-6}	2.22×10^{-5}	2.92×10^{-4}	2.08×10^{-3}

表 10 研究区土壤重金属元素致癌日摄入量

Table 10 Carcinogenic daily intake of soil heavy metals in the study area

元素	ADD _{ing}		ADD _{inh}		ADD _{derm}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	2.65×10 ⁻⁶	4.55×10 ⁻⁶	2.83×10 ⁻¹⁰	1.25×10 ⁻¹⁰	3.74×10 ⁻⁸	4.91×10 ⁻⁸	2.69×10 ⁻⁶	4.60×10 ⁻⁶
Cd	5.73×10 ⁻⁸	9.83×10 ⁻⁸	6.11×10 ⁻¹²	2.71×10 ⁻¹²	8.07×10 ⁻¹⁰	1.06×10 ⁻⁹	5.81×10 ⁻⁸	9.93×10 ⁻⁸
Cr	2.26×10 ⁻⁵	3.87×10 ⁻⁵	2.41×10 ⁻⁹	1.07×10 ⁻⁹	3.18×10 ⁻⁷	4.18×10 ⁻⁷	2.29×10 ⁻⁵	3.92×10 ⁻⁵
Ni	8.89×10 ⁻⁶	1.53×10 ⁻⁵	9.48×10 ⁻¹⁰	4.21×10 ⁻¹⁰	1.25×10 ⁻⁷	1.64×10 ⁻⁷	9.02×10 ⁻⁶	1.54×10 ⁻⁵
ADD	3.42×10 ⁻⁵	5.86×10 ⁻⁵	3.65×10 ⁻⁹	1.62×10 ⁻⁹	4.81×10 ⁻⁷	6.32×10 ⁻⁷	3.47×10 ⁻⁵	5.93×10 ⁻⁵

险评价详见表 11, 致癌风险评价详见表 12。

从研究区土壤重金属元素的非致癌健康风险的评价结果来看, 同一种重金属元素, 通过不同摄入途径的非致癌健康风险, 与摄入量的表现一致, 成人和儿童均表现为 HQ_{ing}>HQ_{derm}>HQ_{inh}, 由口摄

入是产生土壤重金属非致癌健康风险的主要途径,

土壤中的重金属元素对儿童的非致癌风险要高于成人。研究区中土壤重金属元素的 HQ 贡献率, 成人和儿童均表现为 Cr>As>Pb>Ni>Cu>Hg>Zn>Cd, 其中, Cr、As 和 Pb 三种元素的 HQ 贡献率的占比

表 11 研究区土壤重金属元素非致癌风险指数

Table 11 Non-carcinogenic risk index of soil heavy metals in the study area

元素	统计值	HQ _{ing}		HQ _{inh}		HQ _{derm}		HQ	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	平均值	2.55×10 ⁻²	1.82×10 ⁻¹	5.43×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁴	3.07×10 ⁻⁴	1.68×10 ⁻³	2.58×10 ⁻²	1.84×10 ⁻¹
	最大值	5.17×10 ⁻²	3.69×10 ⁻¹	1.10×10 ⁻⁴	2.04×10 ⁻⁴	6.24×10 ⁻⁴	3.41×10 ⁻³	5.24×10 ⁻²	3.73×10 ⁻¹
Cd	平均值	1.65×10 ⁻⁴	1.18×10 ⁻³	1.76×10 ⁻⁶	3.25×10 ⁻⁶	9.29×10 ⁻⁵	5.08×10 ⁻⁴	2.60×10 ⁻⁴	1.69×10 ⁻³
	最大值	6.69×10 ⁻⁴	4.78×10 ⁻³	7.13×10 ⁻⁶	1.32×10 ⁻⁵	3.76×10 ⁻⁴	2.06×10 ⁻³	1.05×10 ⁻³	6.85×10 ⁻³
Cr	平均值	2.17×10 ⁻²	1.55×10 ⁻¹	2.72×10 ⁻⁴	5.03×10 ⁻⁴	1.22×10 ⁻²	6.68×10 ⁻²	3.42×10 ⁻²	2.22×10 ⁻¹
	最大值	5.36×10 ⁻²	3.83×10 ⁻¹	6.73×10 ⁻⁴	1.24×10 ⁻³	3.02×10 ⁻²	1.65×10 ⁻¹	8.45×10 ⁻²	5.50×10 ⁻¹
Cu	平均值	7.62×10 ⁻⁴	5.44×10 ⁻³	—	—	1.07×10 ⁻⁵	5.87×10 ⁻⁵	7.73×10 ⁻⁴	5.50×10 ⁻³
	最大值	1.75×10 ⁻³	1.25×10 ⁻²	—	—	2.47×10 ⁻⁵	1.35×10 ⁻⁴	1.78×10 ⁻³	1.26×10 ⁻²
Hg	平均值	5.68×10 ⁻⁴	4.06×10 ⁻³	6.06×10 ⁻⁸	1.12×10 ⁻⁷	1.14×10 ⁻⁴	6.25×10 ⁻⁴	6.83×10 ⁻⁴	4.69×10 ⁻³
	最大值	1.36×10 ⁻²	9.71×10 ⁻²	1.45×10 ⁻⁶	2.68×10 ⁻⁶	2.73×10 ⁻³	1.50×10 ⁻²	1.63×10 ⁻²	1.12×10 ⁻¹
Ni	平均值	1.28×10 ⁻³	9.15×10 ⁻³	1.19×10 ⁻⁴	2.19×10 ⁻⁴	4.51×10 ⁻⁴	2.47×10 ⁻³	1.85×10 ⁻³	1.18×10 ⁻²
	最大值	4.04×10 ⁻³	2.89×10 ⁻²	3.75×10 ⁻⁴	6.93×10 ⁻⁴	1.42×10 ⁻³	7.79×10 ⁻³	5.84×10 ⁻³	3.74×10 ⁻²
Pb	平均值	1.49×10 ⁻²	1.06×10 ⁻¹	1.59×10 ⁻⁶	2.93×10 ⁻⁶	1.38×10 ⁻³	7.57×10 ⁻³	1.63×10 ⁻²	1.14×10 ⁻¹
	最大值	4.14×10 ⁻²	2.96×10 ⁻¹	4.42×10 ⁻⁶	8.16×10 ⁻⁶	3.85×10 ⁻³	2.11×10 ⁻²	4.53×10 ⁻²	3.17×10 ⁻¹
Zn	平均值	3.56×10 ⁻⁴	2.54×10 ⁻³	—	—	5.01×10 ⁻⁶	2.74×10 ⁻⁵	3.61×10 ⁻⁴	2.57×10 ⁻³
	最大值	8.83×10 ⁻⁴	6.31×10 ⁻³	—	—	1.24×10 ⁻⁵	6.80×10 ⁻⁵	8.96×10 ⁻⁴	6.38×10 ⁻³
HQ	平均值	6.52×10 ⁻²	4.66×10 ⁻¹	4.48×10 ⁻⁴	8.29×10 ⁻⁴	1.46×10 ⁻²	7.97×10 ⁻²	8.02×10 ⁻²	5.46×10 ⁻¹
	最大值	1.02×10 ⁻¹	7.29×10 ⁻¹	1.07×10 ⁻³	1.98×10 ⁻³	3.27×10 ⁻²	1.79×10 ⁻¹	1.23×10 ⁻¹	8.39×10 ⁻¹

表 12 研究区土壤重金属元素致癌风险指数

Table 12 Carcinogenic risk index of soil heavy metals in the study area

元素	统计值	CR _{ing}		CR _{inh}		CR _{derm}		CR	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	平均值	3.98×10 ⁻⁶	6.83×10 ⁻⁶	1.22×10 ⁻¹²	5.40×10 ⁻¹³	5.60×10 ⁻⁸	7.36×10 ⁻⁸	4.04×10 ⁻⁶	6.90×10 ⁻⁶
	最大值	8.08×10 ⁻⁶	1.39×10 ⁻⁵	2.47×10 ⁻¹²	1.10×10 ⁻¹²	1.14×10 ⁻⁷	1.49×10 ⁻⁷	8.19×10 ⁻⁶	1.40×10 ⁻⁵
Cd	平均值	3.50×10 ⁻⁷	5.99×10 ⁻⁷	3.73×10 ⁻¹¹	1.65×10 ⁻¹¹	5.08×10 ⁻⁹	6.67×10 ⁻⁹	3.55×10 ⁻⁷	6.06×10 ⁻⁷
	最大值	1.42×10 ⁻⁶	2.43×10 ⁻⁶	1.51×10 ⁻¹⁰	6.69×10 ⁻¹¹	2.06×10 ⁻⁸	2.70×10 ⁻⁸	1.44×10 ⁻⁶	2.45×10 ⁻⁶
Cr	平均值	—	—	1.01×10 ⁻⁷	4.49×10 ⁻⁸	—	—	1.01×10 ⁻⁷	4.49×10 ⁻⁸
	最大值	—	—	2.50×10 ⁻⁷	1.11×10 ⁻⁷	—	—	2.50×10 ⁻⁷	1.11×10 ⁻⁷
Ni	平均值	—	—	7.97×10 ⁻¹⁰	3.53×10 ⁻¹⁰	—	—	7.97×10 ⁻¹⁰	3.53×10 ⁻¹⁰
	最大值	—	—	2.51×10 ⁻⁹	1.12×10 ⁻⁹	—	—	2.51×10 ⁻⁹	1.12×10 ⁻⁹
CR	平均值	4.33×10 ⁻⁶	7.43×10 ⁻⁶	1.02×10 ⁻⁷	4.52×10 ⁻⁸	6.10×10 ⁻⁸	8.01×10 ⁻⁸	4.49×10 ⁻⁶	7.55×10 ⁻⁶
	最大值	8.29×10 ⁻⁶	1.42×10 ⁻⁵	2.53×10 ⁻⁷	1.12×10 ⁻⁷	1.17×10 ⁻⁷	1.53×10 ⁻⁷	8.54×10 ⁻⁶	1.44×10 ⁻⁵

最高,成人和儿童分别为 95.11% 和 95.19%,是产生非致癌健康风险的主要因素。所有 34 件土壤样品的非致癌健康风险指数均小于 1,说明在研究区的土壤中,重金属元素尚未对人体健康产生明显的非致癌健康风险。

从研究区土壤重金属元素的致癌健康风险的评价结果来看,成人和儿童对同一种重金属元素在不同摄入途径下的致癌风险同样表现为 $CR_{ing} > CR_{derm} > CR_{inh}$,摄入量越多的途径,造成的致癌风险越高。从 CR 贡献率来看,成人和儿童均表现为 $As > Cd > Cr > Ni$,其中,元素 As 的 CR 贡献率的占比最高,成人和儿童分别为 89.84% 和 91.38%。在所有 34 件土壤样品中,致癌健康风险指数均未超过 10^{-4} ,说明在研究区的土壤中,重金属元素尚未对人体健康产生明显的致癌健康风险。

4 讨 论

4.1 Hg 元素的来源分析

在前文的分析研究中,Hg 元素被确定为人为源,但其具体来源尚未确定,需进一步分析讨论。

根据前人的研究(吕建树,2022),在金矿区对重金属溯源的过程中,Hg 常常作为孤立的元素,与其他元素的来源均不相同,通常显示为来自于人为排放的大气沉降。虽然,在主成分分析的结果中,Hg 也是作为孤立的元素,有其独自的来源,然而,大气沉降造成的富集通常较为均匀,几乎难以造成单点高值异常,因此,Hg 元素的来源应当不是大气沉降。

结合采集的 4 件地表水化学样品,其中,01 号样品采集自矿业活动区内的地表水体,02~04 号样品均采集自水库。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)和《农田灌溉水质标准》(GB5084—2021),4 件样品的硫酸盐含量全部超过标准限值,Hg 元素全部超过Ⅲ类水限值,为Ⅵ类、Ⅴ类水,04 号样品超过灌溉水标准限值(表 13)。

由于研究区内主要的矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿、方铅矿和闪锌矿,因此在金矿采选过程中,会产生大量的硫酸盐,不可避免地被排放至周边的河流水库中。从样品中的硫酸盐含量来看,矿区周边的地表水应当受到了矿业活动的影响。而 Hg 元素是金矿生产的主要伴生元素之一,所以推断矿区周边

表 13 水化学样品超标指标情况

Table 13 Quality of Hydrochemical Samples

点号	硫酸盐含量/(mg/L)	汞含量/(mg/L)
01	1022	0.000995
02	641	0.000395
03	363	0.000365
04	894	0.002295
标准限值	250	—
Ⅲ类水限值	—	0.0001
Ⅵ类水限值(灌溉水限值)	—	0.001
Ⅴ类水限值	—	0.001

的地表水中的 Hg 元素应当主要来自于矿业活动。根据烟台市土壤环境质量调查结果显示(王存龙等,2015),金矿选冶厂及附近污染严重的地表水体,是土壤污染的主要因子。因而推测,受矿业活动的影响,Hg 元素含量较高的地表水体,可能会对研究区内的土壤产生一定的影响。

根据前人的研究(刘瑞平等,2017),在水力坡度较缓地区的河流水体中,Hg 元素易于被底泥吸附,且主要赋存在其中,水溶态的含量相对较少。当研究区内水化学样品中的 Hg 元素含量较高时,底泥中 Hg 元素的含量应当更高。Hg 元素高值异常点处为农田,种植的农作物为玉米,推断此处可能使用了河流或水库中的 Hg 含量极高的淤泥作为肥料,且此行为很有可能是个别行为,因而产生了单点高值异常。

而当地农业的灌溉水源主要来自于本区的河流水库,使用河流水库中的地表水进行灌溉则属于多数行为,且多处地表水 Hg 元素含量偏高,极有可能对全区的土壤产生影响。然而,Hg 元素却没有在表层土壤中出现大面积的、明显的富集的情况。根据学者研究(Zhao et al., 2021),由于汞及其化合物的性质,以及在土壤中的淋滤作用,Hg 元素会随着水渗入深层土壤中并在一定深度富集。这可能是表层土壤中 Hg 元素没有明显富集的原因。

综上,推测研究区土壤中 Hg 元素的来源可能是由矿业活动产生进入到水体中,而后通过农业活动迁移至土壤中。后续,建议在研究区内采集相应的底泥样品以及土壤垂向样品并进行分析测试,以验证上述推论。

4.2 风险分析

Hg 元素高值异常点处的生态风险指数(E_r)达到了 2899.66,存在着强烈的潜在生态风险,但人体

的直接摄入量却较少,因此对健康造成的风险是可以接受的。出现这种差异,可能与重金属元素自身的性质有关(田稳等,2022)。目前,通过食用该处农田生长的农作物而间接摄入 Hg 元素的情况以及对人体造成的危害尚不清楚,建议针对该高值异常点做进一步研究:一方面对该点土壤中 Hg 元素的形态进行分析测试,以确定其易于被农作物利用形态的含量;另一方面采集该处生长的玉米,测试玉米中 Hg 元素的含量,进而分析其对玉米食用安全的影响。

Cd 元素轻微污染的 2 处采样点也位于农田,但在采样时未种植农作物,应为轮作的间隙期。建议在此两处农田种植农作物后,参照上述针对 Hg 元素的研究方法,对 Cd 元素也做进一步研究,以评估研究区东北角的金矿生产活动对周边农业生产的影响。

研究区内土壤中的重金属元素,尚未对人体健康造成明显的不利影响。但是,元素 As 主要来自于土壤母质,基本上没有人为污染,且日均摄入量较低,然而对人体健康风险的贡献度却较高,尤其是致癌风险,这与前人的研究结论一致(石文静等,2022;成晓梦等,2022)。因此元素 As 的含量应当引起关注,提前进行相应的研究有助于避免地方病的发生。另外,主要来自于自然源的元素 Cr 和主要来自于矿业活动的元素 Pb,由于其毒理学性质和较高的日均摄入量,会对人体产生较高的非致癌风险。相比之下,Zn 元素的日均摄入量在 8 种重金属元素中最多,但由于毒性较低,其对人体产生的健康风险比较小。

5 结 论

(1)研究区内的土壤整体上较为清洁,矿业活动造成的土壤污染较为轻微,仅 1 处 Hg 元素和 2 处 Cd 元素超过了风险筛选值,其余未见超标。

(2)根据来源分析,元素 Ni、Cr 和 As 主要来自于土壤母质,元素 Pb、Cd、Zn 和 Hg 主要来自于矿业活动,Cu 元素主要来自土壤母质和农业活动。

(3)潜在生态风险评价结果表明,研究区内个别点状区域存在较高的潜在生态风险,Hg 元素的贡献度最高,Cd 次之,其他元素基本上不存在风险。人体健康风险评价结果表明,研究区内土壤中的重

金属元素对人体产生的健康风险在可接受范围之内。

(4)研究表明,该金矿周边的土壤受到了矿业活动的影响,并出现了点状污染,但程度较轻,风险可控。应当加强对元素 Hg 和 Cd 含量的监测和管控,做好生态环境的保护修复,避免污染范围的进一步扩大,防止对生态环境或者人体健康产生更多不利影响。

References

- Al-Osman M, Yang Fei, Massey I Y. 2019. Exposure routes and health effects of heavy metals on children[J]. *Biomaterials*, 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.
- Chen Yunfei, Zhou Jinlong, Hu Yan, Zeng Yanyan, Wang Songtao, Du Jiangyan, Sun Ying. 2022. Heavy metal pollution and health risk assessment of the jujube producing area on the southeastern margin of the Tarim Basin in Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 41(11): 3629–3639 (in Chinese with English abstract).
- 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 Xiaomeng, Sun Binbin, Wu Chao, He Ling, Zeng Daoming, Zhao Chen. 2022. Heavy metal concentration characteristics and health risks of farmland soils in typical pyrite mining area of the central Zhejiang Province, China[J]. *Environmental Science*, 43(1): 442–453 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jierui, Pang Xugui, Yu Chao, Liu Huafeng, Wang Zenghui. 2011. Geochemical features and contamination assessment of soil elements in east Shandong Province[J]. *Geology in China*, 38(5): 1387–1395 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jierui, Hu Xueping, Wang Zenghui. 2013. Characteristics of heavy metals pollution in soil and potential ecological risk assessment—A case study of blue economic zone of Shandong Peninsula[J]. *Journal of Safety and Environment*, 13(1): 134–137 (in Chinese with English abstract).
- Dong Q Y, Wen H T, Wang P, Song C, Lai S Y, Yang Z J, Zhao Y Y, Yan M J. 2023. Health risk assessment of heavy metals in soils and crops in a mining area (Au–Ag–Cu–iron–oil et al.) of the Nanyang Basin, Henan Province, China[J]. *China Geology*, 6(4): 567–579.
- Fan Chenzi, Yuan Jihai, Liu Chenghai, Guo Wei, Sun Dongyang, Liu

- Wei, Zhao Jiujiang, Hu Jundong, Zhao Linghao. 2022. Eco-geochemical survey and evaluation of heavy metals and other elements in soil in Anning City, Yunnan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(3): 761–771 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jianweng, Gong Jingjing, Yang Jianzhou, Tang Shixin, Ma Shengming. 2021. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal pollution in the soil of Limu Mountain – Wanling Town, Qiongzong, Hainan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(5): 807–816 (in Chinese with English abstract).
- Granero S, Domingo J L. 2002. Levels of metals in soils of Aleaa de Henares, Spain: Human health risks[J]. *Environment International*, 28: 159–164.
- 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.
- Ju Zilong, Qin Zhijun, Wang Xiang, Yuan Hang, Zhang Xiaobo, Wang Deng. 2022. Assessing the distribution and ecological risks of heavy metals in soil in Hong'an County, Hubei Province through ecological geological surveys[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 46(4): 988–998 (in Chinese with English abstract).
- Li Hongkui, Geng Ke, Zhuo Chuanyuan. 2016. Tectonic Environment and Mineralization of Gold Mines in Jiaodong [M]. Beijing: Geological Publishing House, 338–383(in Chinese).
- 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).
- Li Qian, Qin Fei, Ji Hongbing, Huang Xingxing. 2013. Contents, sources and contamination assessment of soil heavy metals in gold mine area of upstream part of Miyun Reservoir, Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 32(12): 2384–2394 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jin, Liang Wenjing, Jiao Yang, Yang Li, Fan Yaning, Tian Tao, Liu Xiaomeng. 2021. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 48(3): 749–763 (in Chinese with English abstract).
- Ling S, Junaidi A, Mohd-Harun A, Baba M. 2023. Heavy metal contamination assessment in marine sediments in the Northwest coast of Sabah, Malaysia[J]. *China Geology*, 6(4): 580–593.
- Liu R P, Xu Y N, Zhang J H, Wang W K, Rafaey M E. 2020. Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaoqinling Gold Belt, China[J]. *China Geology*, 3(3): 402–410.
- Liu Ruiping, Xu Youning, He Fang, Ke Hailing, Zhang Jianghua, Chen Huaqing, Qiao Gang. 2017. The mercury concentration time and space characterized of Shuangqiao River in the gold mine area[J]. *Northwestern Geology*, 50(3): 231–237 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruiping, Xu Youning, Zhang Jianghua, Qiao Gang, Ke Hailing, Chen Huaqing, He Fang. 2019. Safe technology of crops in reclaimed farmland of heavy metals tail slag field[J]. *Northwestern Geology*, 52(2): 236–246 (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).
- Liu Yang, Zhang Haidong, Wang Jinya. 2017. Elements migration in tectonic-alteration zones of the Xiadian gold deposit, eastern Shandong Province and its relationship with Au precipitation[J]. *Northwestern Geology*, 50(4): 176–185 (in Chinese with English abstract).
- Lu J Z, Lu H W, Lei K W, Wang W P, Guan Y L. 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.
- Lü Jianshu. 2022. Source apportionment and spatial prediction of heavy metals in soils of Yantai coastal zone[J]. *Acta Geographica Sinica*, 76(3): 713–725 (in Chinese with English abstract).
- Pang Xugui, Dai Jierui, Chen Lei, Liu Huafeng, Yu Chao, Han Lu, Ren Tianlong, Hu Xueping, Wang Hongjin, Wang Zenghui, Zhao Xiqiang, Zeng Xiantong, Ren Wenkai, Wang Cunlong. 2019. Soil geochemical background value of 17 cities in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 35(1): 46–56 (in Chinese with English abstract).
- Shi Wenjing, Zhou Hanpeng, Sun Tao, Jin Tao, Yang Wenhuan, Li Weiping. 2022. Research on priority control factors and health risk assessment of heavy metal pollution in soil around mining areas[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 31(8): 1616–1628 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yang, Li Jiahao, Yu Yue, Yang Yuwei, Li Bin, Chen Siqi, Chen Ji, Zhao Ke, Huang Jin. 2022. Progress and prospect of plant remediation technology joint with other technologies for heavy metal contaminated soil[J]. *Environmental Pollution and Control*, 44(2): 244–250 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Sun Xiaoming, Zhang Huiqiong, Yin Zhiqiang. 2023. An overview of evaluation criteria and model for heavy metal pollution ecological risk in small-scale drainage catchment of mountainous area[J]. *Geology in China*, 50(1): 36–51 (in Chinese with English abstract).
- 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 Zehang. 2020. Soil and Crops Heavy Metal Pollution and Potential Health Risk Assessment for the Residents Around Small-Scale Polymetallic Mine[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy

- of Science, 1–155 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhijia, Li Baofei, 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).
- Tian Wen, Zong Dapeng, Fang Chenggang, Wang Chengchen, Wang Jianmin, Xiang Ping. 2022. Health risk and toxic effect of heavy metals in soils from typical vegetable planting areas in southwest China[J]. *China Environmental Science*, 42(10): 4901–4908 (in Chinese with English abstract).
- Tu Chunlin, Yang Kun, He Chengzhong, Zhang Liankai, Li Bo, Wei Zong, Jiang Xin, Yang Minghua. 2023. Sources and risk assessment of heavy metals in sediments of small watersheds in typical coal mining areas of Eastern Yunnan[J]. *Geology in China*, 50(1): 206–221 (in Chinese with English abstract).
- USEPA. 2011. *Exposure Factors Handbook*[R]. Washington, DC: Environment Protection Agency.
- Wang Changyu, Zhang Surong, Liu Jihong, Xing Yi, Li Mingzhe, 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).
- Wang Cunlong, Pang Xugui, Hu Shenghong, Zheng Weijun, Liu Huafeng, Zeng Xiandong. 2011. The ecological effects of soil heavy metals in Yantai, Shandong Province: A case study of As[J]. *Geology in China*, 38(6): 1620–1630 (in Chinese with English abstract).
- Wang Cunlong, Zeng Xiandong, Liu Huafeng, Yang Liyuan, Wang Hongjin, Pang Xugui. 2015. The present situation of soil environmental quality and the distribution and migration regularity of heavy metals in soil of Yantai[J]. *Geology in China*, 42(1): 317–330 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haiyang, Han Ling, Xie Danni, Hu Huijuan, Liu Zhiheng, Wang Zhen. 2022. Distribution characteristics of heavy metals in farmland soil around mining areas and pollution assessment[J]. *Environmental Science*, 43(4): 2104–2114 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinya. 2021. Evolution of Au Ore-forming Fluid and Metallogenetic Regularity Research in Eastern Shandong[D]. Xi'an: Chang'an University, 1–122 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Zhang X X, Chen A F, Wang B, Zhao Q, Liu G N, Xiao X, Cao J N. 2022. Source analysis and risk evaluation of heavy metal in the river sediment of polymetallic mining area: Taking the Tonglushan skarn type Cu–Fe–Au deposit as an example, Hubei section of the Yangtze River Basin, China[J]. *China Geology*, 5(4): 649–661.
- Wang Zhe, Liu Shaoqing, Chen Xiaomin, Lin Chunye. 2008. Estimates of the exposed dermal surface area of Chinese in view of human health risk assessment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 8(4): 152–156 (in Chinese with English abstract).
- Xi Chaozhuang, Wu Linfeng, Zhang Pengfei, Fan Yunfei, Yang Mingtai, Xia Haodong, Deng Huijuan. 2022. Evaluation of heavy metals in crop–soil profiles of Huishui County in Guizhou Province[J]. *Geology and Exploration*, 58(4): 822–835 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Jia, Han Zhiwei, Wu Pan, Zeng Xiangying, Luo Guangfei, Yang Wentao. 2020. Spatial distribution characteristics, contamination evaluation and health risk assessment of arsenic and antimony in soil around an antimony smelter of Dushan County[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(2): 655–664 (in Chinese with English abstract).
- 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 Youning, Zhang Jianghua, Liu Ruiping, Ke Hailing, Li Yujing. 2007. Environmental effects of heavy metal pollution of farmland soils in gold mining areas[J]. *Geology in China*, 34(4): 716–722 (in Chinese with English abstract).
- Xu Youning, Zhang Jianghua, Zhao A'ning, Ke Hailing. 2008. Evaluation of the potential ecological risk of heavy metals in farmland soils in a certain gold mining area, Xiaoqinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(8): 1272–1278 (in Chinese with English abstract).
- Xu Youning, Zhang Jianghua, Ke Hailing, Chen Huaqing, Liu Ruiping, Qiao Gang, Shi Yufei. 2014. An assessment method for heavy metal cumulative risk on farmland soil in the mining area: A case study of the Xiaoqinling gold mining area[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(8): 1097–1105 (in Chinese with English abstract).
- 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 & Technology*, 31(2): 112–115 (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 S, Ge W Y, Chen H H, Xu W L. 2019. Investigation of soil and groundwater environment in urban area during post–industrial era: A case study of brownfield in Zhenjiang, Jiangsu Province, China[J]. *China Geology*, 2(4): 501–511.
- Yang Yuzhen, Liu Senrong, Yang Yong, Li Lifan, Liu Shenghua, Kang Yihua, Fei Xinqiang, Gao Yunliang, Gao Baolong. 2021. Heavy metals in peri–urban soil of Huangshi: Their distribution, risk assessment, and source identification[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(5): 1147–1156 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yimeng, Zhao Weituo, Huang Ting, Cheng Sheng Gao, Zhao Zhenli, Yu Congcong. 2018. Distribution characteristics and health

- risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in an E-waste dismantling area[J]. *Environmental Science*, 39(2): 916-926 (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).
- Zhao L Y, Wang Z J, Kong L H, Gu S S, Li Y C, Han X C, Liu S G, Li B F, Zhang J H. 2023. Risk assessment of soil heavy metals in mining activity areas: A case study in Eastern Shandong Province, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 82(21): 513 .
- 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 Z G, Jiang H S, Kong L H, Shen T Y, Zhang X H, Gu S S, Han X C, Li Y C. 2021. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in surface soils of Laizhou, Eastern China[J]. *Water*, 13: 2940.
- ### 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.
- 陈云飞, 周金龙, 胡艳, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英. 2022. 新疆塔里木盆地东南缘红枣产地土壤重金属污染及健康风险评价[J]. *环境化学*, 41(11): 3629-3639.
- 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.
- 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰. 2022. 浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险[J]. *环境科学*, 43(1): 442-453.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 喻超, 刘华峰, 王增辉. 2011. 山东省东部地区土壤地球化学特征及污染评价[J]. *中国地质*, 38(5): 1387-1395.
- 代杰瑞, 胡雪平, 王增辉. 2013. 土壤重金属污染及潜在生态风险评价——以山东半岛蓝色经济区为例[J]. *安全与环境学报*, 13(1): 134-137.
- 范晨子, 袁继海, 刘成海, 郭威, 孙冬阳, 刘威, 赵九江, 胡俊栋, 赵令浩. 2022. 云南省安宁地区土壤重金属等元素生态地球化学调查与评价[J]. *物探与化探*, 46(3): 761-771.
- 高健翁, 龚晶晶, 杨剑洲, 唐世新, 马生明. 2021. 海南岛琼中黎母山—湾岭地区土壤重金属元素分布特征及生态风险评价[J]. *地质通报*, 40(5): 807-816.
- 居宇龙, 秦志军, 万翔, 袁航, 张小波, 王登. 2022. 湖北红安县生态地质调查土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. *物探与化探*, 46(4): 988-998.
- 李洪奎, 耿科, 嵇传源. 2016. 胶东金矿构造环境与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 338-383.
- 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价[J]. *中国地质*, 50(3): 897-910.
- 李倩, 秦飞, 季宏兵, 冯金国, 黄兴星. 2013. 北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 32(12): 2384-2394.
- 林苾, 梁文静, 焦晔, 杨莉, 范亚宁, 田涛, 刘晓萌. 2021. 陕西潼关县金矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 48(3): 749-763.
- 刘瑞平, 徐友宁, 何芳, 柯海玲, 张江华, 陈华清, 乔冈. 2017. 某金矿带双桥河河水-底泥-悬浮物中 Hg 含量时程分布特征[J]. *西北地质*, 50(3): 231-237.
- 刘瑞平, 徐友宁, 张江华, 乔冈, 柯海玲, 陈华清, 何芳. 2019. 含重金属的尾矿渣场复垦还田种植农作物的安全技术[J]. *西北地质*, 52(2): 236-246.
- 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.
- 刘洋, 张海东, 王金雅. 2017. 胶东地区夏甸金矿床构造蚀变带元素质量迁移与 Au 沉淀关系研究[J]. *西北地质*, 50(4): 176-185.
- 吕建树. 2022. 烟台海岸带土壤重金属定量源解析及空间预测[J]. *地理学报*, 76(3): 713-725.
- 庞绪贵, 代杰瑞, 陈磊, 刘华峰, 喻超, 韩懿, 任天龙, 胡雪平, 王红晋, 王增辉, 赵西强, 曾宪东, 任文凯, 王存龙. 2019. 山东省 17 市土壤地球化学背景值[J]. *山东国土资源*, 35(1): 46-56.
- 石文静, 周翰鹏, 孙涛, 黄金涛, 杨文焕, 李卫平. 2022. 矿区周边土壤重金属污染优先控制因子及健康风险评价研究[J]. *生态环境学报*, 31(8): 1616-1628.
- 石杨, 李家豪, 于月, 杨雨薇, 李斌, 陈思奇, 陈稷, 赵珂, 黄进. 2022. 重金属污染土壤的植物修复技术与其他技术联用的进展与前景[J]. *环境污染与防治*, 44(2): 244-250.
- 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 张会琼, 殷志强. 2023. 山区小流域矿集区土壤重金属污染生态风险评价基准与模型[J]. *中国地质*, 50(1): 36-51.
- 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.
- 孙泽航. 2020. 小型多金属矿山周边土壤及作物重金属污染及居民潜在健康风险评估[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 1-155.
- 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.
- 田稳, 宗大鹏, 方成刚, 王成尘, 王健敏, 向萍. 2022. 西南典型菜地土壤重金属健康风险和毒性效应[J]. *中国环境科学*, 42(10): 4901-4908.
- 涂春霖, 杨坤, 和成忠, 张连凯, 李博, 魏总, 姜昕, 杨明花. 2023. 滇东典型煤矿区小流域沉积物重金属来源及风险评价[J]. *中国地质*, 50(1): 206-221.
- 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.
- 王存龙, 庞绪贵, 胡圣虹, 郑伟军, 刘华峰, 曾宪东. 2011. 山东省烟台地区土壤重金属的生态效应——以砷为例[J]. *中国地质*, 38(6): 1620-1630.
- 王存龙, 曾宪东, 刘华峰, 杨丽原, 王红晋, 庞绪贵. 2015. 烟台市土壤环境质量现状及重金属元素分布迁移规律[J]. *中国地质*, 42(1): 317-330.
- 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯. 2022. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 43(4): 2104-2114.
- 王金雅. 2021. 胶东地区 Au 成矿流体演化与成矿规律研究[D]. 西安: 长安大学, 1-122.
- 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 林春野. 2008. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. *安全与环境学报*, 8(4): 152-156.
- 息朝庄, 吴林锋, 张鹏飞, 范云飞, 杨茗钛, 夏浩东, 邓会娟. 2022. 贵州惠水农作物-土壤剖面重金属污染评价[J]. *地质与勘探*, 58(4): 822-835.
- 熊佳, 韩志伟, 吴攀, 曾祥颖, 罗广飞, 杨文弢. 2020. 独山梯冶炼厂周边土壤砷空间分布特征、污染评价及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 40(2): 655-664.
- 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.
- 徐友宁, 张江华, 刘瑞平, 柯海岭, 李育敬. 2007. 金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J]. *中国地质*, 34(4): 716-722.
- 徐友宁, 张江华, 赵阿宁, 柯海玲. 2008. 小秦岭某金矿区农田土壤重金属污染的潜在生态危害评价[J]. *地质通报*, 27(8): 1272-1278.
- 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 陈华清, 刘瑞平, 乔冈, 史宇飞. 2014. 矿业活动区农田土壤重金属累积风险的评判方法——以小秦岭金矿区为例[J]. *地质通报*, 33(8): 1097-1105.
- 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.
- 杨育振, 刘森荣, 杨勇, 李丽芬, 刘圣华, 亢益华, 费新强, 高云亮, 高宝龙. 2021. 黄石市城市边缘区土壤重金属分布特征、风险评价及溯源分析[J]. *物探与化探*, 45(5): 1147-1156.
- 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 赵珍丽, 余葱葱. 2018. 电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 39(2): 916-926.
- 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估[J]. *中国地质*, 51(1): 248-263.
- 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.