

李剑锋,冯李霄,陈希清,等.大义山东南部土壤重金属分布特征及其风险评价[J].环境工程技术学报,2023,13(1):287-294.

LI J F,FENG L X,CHEN X Q,et al.Heavy metal distribution characteristics of soils in southeastern Dayi Mountain and its risk evaluation[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 287-294.

大义山东南部土壤重金属分布特征及其风险评价

李剑锋^{1,2,3},冯李霄¹,陈希清^{2,3},付建明^{2,3},卢友月^{2,3},马可蒙¹,谢昊霖¹

1.辽宁师范大学地理科学学院

2.中国地质调查局武汉调查中心

3.中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心

摘要 为探明矿产开采对土壤生态环境的影响,采集大义山岩体东南部土壤样品分析其重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 浓度;综合利用单因子指数、污染负荷指数和潜在生态危害指数法评估研究区土壤的污染状况与生态风险。结果表明:As、Cd、Pb、Zn 和 Cu 平均浓度分别超出 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(pH>7.5)标准限值 119.70、47.33、6.18、4.67 和 4.43 倍;单因子指数从大到小依次为 As>Cd>Pb>Zn>Cu>Cr>Ni>Hg,其中,As、Cd、Pb、Zn 和 Cu 属于重度污染;单项潜在风险指数从大到小依次为 Cd>As>Pb>Cu>Zn>Hg>Ni>Cr,土壤综合潜在生态风险指数平均值为 2 680.40,属于极强生态风险水平。统计显示,Cu、Zn、Cd、As 富集中心位于矿区,Cr、Pb、Ni 富集于乡村、矿业生产区等人口活动区域,Hg 元素无明显分布规律。相关性主成分分析表明,土壤中 Cu、Zn、Cd、As 和 Pb、Cr、Ni 异常富集分别与矿业开采和人类活动有关,而 Hg 异常富集则主要源自母质风化与成土作用。

关键词 锡矿;矿区周边;土壤重金属;分布特征;生态风险

中图分类号:X53 文章编号:1674-991X(2023)01-0287-08 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210658

Heavy metal distribution characteristics of soils in southeastern Dayi Mountain and its risk evaluation

LI Jianfeng^{1,2,3}, FENG Lixiao¹, CHEN Xiqing^{2,3}, FU Jianming^{2,3}, LU Youyue^{2,3}, MA Kemeng¹, XIE Haolin¹

1.College of Geographic Science, Liaoning Normal University

2.Wuhan Center of Geological Survey, China Geological Survey

3.Research Center for Petrogenesis and Mineralization of Granitoid Rocks, China Geological Survey

Abstract In order to investigate the impact of mineral mining on soil ecology, soil samples were collected from the southeastern part of Dayi Mountain rock mass to analyze the concentrations of heavy metals Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As and Hg. The single-factor index, pollution load index and potential ecological hazard index methods were used to evaluate the pollution status and ecological risk of soil in mining areas. The results showed that the average concentrations of As, Cd, Pb, Zn and Cu exceeded the standard limits of GB 15618-2018 (*Soil Environmental Quality Standard for Soil Pollution Risk Control of Agricultural Land (Trial)*) (pH>7.5) by 119.70, 47.33, 6.18, 4.67 and 4.43 times, respectively. The single factor index was As>Cd>Pb>Zn>Cu>Cr>Ni>Hg in descending order, and As, Cd, Pb, Zn and Cu were heavily polluted. The individual potential risk indices were Cd>As>Pb>Cu>Zn>Hg>Ni>Cr in descending order, and the average soil RI was 2 680.40, which was a very strong ecological risk level. The statistics showed that the enrichment centers of Cu, Zn, Cd and As were located in mining areas, Cr, Pb and Ni were enriched in villages, mining production areas and other population activity areas, and there was no obvious distribution pattern of Hg element. The correlation and principal component analysis showed that the abnormal enrichment of Cu, Zn, Cd, As, Pb, Cr and Ni in soils was related to mining and human activities, respectively, while the abnormal enrichment of Hg mainly originated from parent material weathering and soil formation.

收稿日期:2021-11-10

基金项目:中国地质调查局地质矿产调查评价专项(DD20190154)

作者简介:李剑锋(1986—),男,讲师,博士,主要从事地貌学、矿床学研究,317649474@qq.com

Key words tin ore; around the mine site; soil heavy metals; distribution characteristics; ecological risk

土壤是人类赖以生存和发展的基础。近年来,随着工业发展对矿产资源需求的增加,矿区周边土壤环境面临严峻考验^[1-4]。长期的矿山开采和金属冶炼过程中产生的废气、废水和废渣排放会直接或间接造成土壤重金属的迁移和富集^[5-8]。由于矿区周边土壤重金属污染特征的差异性,其生态风险不尽相同。因此,客观、正确地评价矿区周边土壤污染分布特征对矿区环境治理和安全生产意义重大。

湖南省矿产资源丰富,享有“有色金属之乡”美誉。受矿业采、选、冶等过程影响,矿区周边土壤重金属污染问题显著^[9-13]。陆泗进等^[14]对湖南省桂阳县某铅锌矿周边农田土壤重金属污染及生态风险的研究表明,研究区土壤重金属污染严重,且大部分重金属来源于采矿作业。谢荣秀等^[15]对湘潭锰矿废弃地土壤重金属污染研究表明,矿区周边土壤 Mn、Pb 和 Cd 污染严重,重金属元素主要来源于矿业活动。张煜等^[16]对湖南香花岭某钨矿区土壤重金属污染和生态风险的研究表明,研究区土壤中重金属 Pb、Zn、Cu、As 受人类活动的影响较大,主要来源于采矿以及农业活动。总之,矿业活动通过大气沉降等途径向周边释放大量重金属,对土壤造成生态威胁。

湖南省小型矿山众多,由于矿产资源储量有限,外加多山、丘陵等地形因素影响,采矿难度较高,矿山开采、选矿和矿物加工过程产生的“三废”对周边

土壤存在较大生态风险^[17-19]。目前,对该区的土壤环境研究以数据评价为主,缺乏重金属污染空间分布规律及其潜在生态风险探讨^[20-21]。基于此,笔者以大义山东南部土壤为研究对象,以土壤重金属浓度及其分布规律为基础,联用多种数理统计方法评价土壤污染状况、生态风险程度及污染物来源,以期对矿区周边土壤重金属污染治理和安全利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大义山岩体位于南岭构造带北缘,衡阳盆地南侧。区域南华系-下古生界岩性为以复理石建造特征的浅变质碎屑岩夹碳酸盐岩;上古生界地层为浅海相碳酸盐岩夹滨海相碎屑岩,分布于花岗岩体周围;第四系为洪积、冲积及残坡积层,沿河谷两岸分布。区内断裂构造按走向划分为 NE、NW 及 SN 向 3 组,前者为区内重要控矿断裂。大义山岩体按岩性可划分为 6 类,研究区内以细-中粒角闪黑云母二长花岗岩和细粒斑状二云母二(正)长花岗岩为主(图 1)^[22]。区域气候为亚热带湿润型季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨;年均气温为 16~19℃,冬季最冷月平均气温在 4℃ 以上,夏季平均气温多在 19~26℃;年均降水量为 1 460 mm。

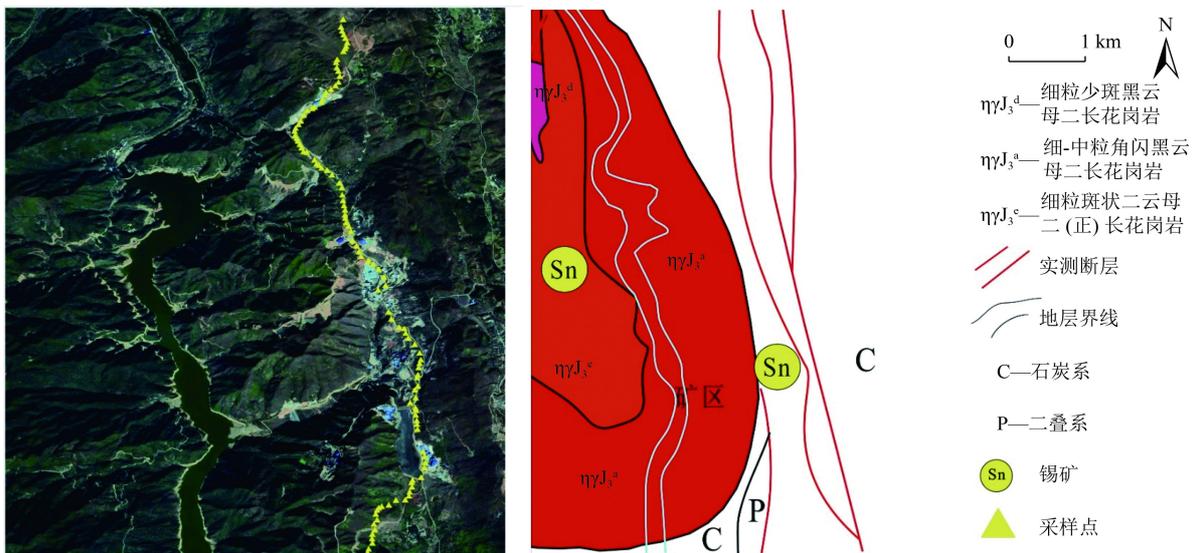


图 1 研究区与采样点位置

Fig.1 Location of study area and sampling sites

1.2 样品采集与测定

调查与研究表明,多数矿区土壤存在显著的重金属异常或污染。笔者针对大义山东南部土壤(土

壤母岩均为花岗岩),结合已有分析和研究区成矿元素的组成特点,选取 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 元素进行研究^[23-25]。使用梅花形采样法进行土样

采集,共采集土样 111 个,均为混合样,采样深度为 0~20 cm。土样风干后,去除植物根系、碎石等杂质,研磨过 100 目尼龙筛,备用。重金属浓度在中国地质调查局武汉地质调查中心检测,使用原子吸收光度计(AAS nos300-ZEEnit600)测定土壤 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 浓度,使用全自动原子荧光分光光度计(AFS-230E)测定土壤 Cd、As、Hg 浓度^[26-27]。

1.3 污染评价方法

以 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(pH>7.5)^[28] 为依据,使用单因子指数和污染负荷指数(PLI)^[29-31] 对大义山东南部土壤重金属污染进行评价,并使用潜在生态风险指数(RI)^[32] 进行潜在生态风险评价。

1.3.1 单因子指数

单因子指数法是以土壤元素背景值为评价标准来评价重金属元素的累积污染程度,计算公式如下:

$$CF_i = C_i / C_m \quad (1)$$

式中: CF_i 为重金属 i 单项污染指数; C_i 为重金属在土壤中实测浓度, mg/kg; C_m 为重金属在土壤中的污染风险筛选值, mg/kg。 $CF \leq 1$, 属于未污染; $1 < CF \leq 2$, 属于轻度污染; $2 < CF \leq 3$, 属于中度污染; $CF > 3$, 属于重度污染。

1.3.2 污染负荷指数

PLI 可以直观反映重金属元素对土壤造成污染的贡献程度,并划分其污染标准,计算公式如下:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (2)$$

式中 n 为参加评价的重金属种类数。PLI 一般分为 4 个污染级别: $PLI \leq 1$, 无污染; $1 < PLI \leq 2$, 轻度污染; $2 < PLI \leq 3$, 中度污染; $PLI > 3$, 重度污染。

1.3.3 潜在生态风险评价

潜在生态风险评价指数计算公式如下:

$$RI_j = \sum_{i=1}^n E_j^i = \sum_{i=1}^n T^i C_j^i = \sum_{i=1}^n T^i (c_j^i / c_r^i) \quad (3)$$

式中: RI_j 为 j 样点多种重金属综合潜在生态风险指

数; E_j^i 为 j 样点重金属 i 的单项潜在生态风险指数; T^i 为重金属 i 的毒性系数; C_j^i 为 j 样点重金属 i 的污染指数; c_j^i 为 j 样点重金属 i 的实测值; c_r^i 为重金属 i 的参比值。RI 分级见表 1。

表 1 重金属污染潜在生态危害指标分级

Table 1 Classification of potential ecological risks of heavy metals pollution

E_j^i	生态风险级别	RI	生态风险级别
≤ 40	轻微	≤ 150	低
40~80	中	150~300	中
80~160	强	300~600	重
160~320	很强	>600	极强
>320	极强		

1.4 数据处理

土壤重金属描述性统计、相关性分析和主成分分析等使用 SPSS 23.0 软件完成,反距离权重空间插值法使用 ArcGIS 10.2 软件完成。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤重金属浓度

研究区土壤重金属浓度统计见表 2。从表 2 可以看出,研究区土壤 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 浓度差异非常大,平均浓度分别为 422.81、1 050.50、1 399.69、129.36、71.39、28.40、2 992.60、0.24 mg/kg,分别为湖南省土壤背景值^[33] 的 17.03、38.91、14.89、1.90、2.23、359.48、213.76 和 2.67 倍,超标点位占比分别为 95%、100%、100%、73%、73%、75%、90% 和 94%;与 GB 15618—2018 标准限值相比,As、Cd、Pb、Zn、Cu 浓度分别超标 119.70、47.33、6.18、4.67、4.43 倍,Cr、Ni 和 Hg 浓度未超标,土壤中 As、Cd、Pb、Zn、Zn、Cr、Ni 超标点位占比分别为 100%、81.08%、82.88%、60.36%、45.95%、6.31%、4.50%,所有点位 Hg 均未超标。上述结果表

表 2 研究区土壤重金属浓度

Table 2 Heavy metal concentrations in soils at the mine site

项目	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
最小值	13.70	50.60	96.20	5.41	5.12	0.10	29.80	0.02
最大值	7 820	18 900	19 500	649	418	545	58 500	1.11
平均值	442.81	1 050.50	1 399.69	129.36	71.39	28.40	2 992.60	0.24
标准偏差	1 079.40	2 214.60	3 211	87.87	63.25	87.28	8 334.40	0.16
变异系数	2.44	2.11	2.29	0.68	0.89	3.07	2.79	0.67
湖南省土壤背景值	26	27	94	68	32	0.08	14	0.09
GB 15618—2018标准限值	100	170	300	250	190	0.60	25	3.40

明,土壤中各重金属都存在不同程度累积,其中,Cd和As累积严重,Cu、Pb和Zn累积较严重,Cr、Ni和Hg污染较低。

变异系数能反映各样点重金属浓度的平均变异程度,变异系数大于1时为强变异性,说明重金属空间浓度分布不均匀,存在点源污染^[34-35]。Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As和Hg的变异系数分别为2.44、2.11、2.29、0.68、0.89、3.07、2.79和0.67,其中,Cu、Pb、Zn、Cd和As变异系数大于1,表明这些重金属分布具有明显空间差异,存在点源污染风险;Cr、Ni和Hg变异系数相对较小,空间分布差异性较小。

2.2 研究区土壤重金属分布特征

反距离权重插值是离散变量进行连续无偏插值的可靠方法,可以直观地反映出研究区域重金属的

空间分布^[36]。利用ArcGIS软件对研究区土壤中8种重金属元素进行空间分析,空间插值搜索半径点数为12,插值幂参数为2。从图2可以看出,研究区Cu、Zn、Cd和As空间分布格局较一致,整体矿区中心较高,呈现向外扩散的趋势;重金属浓度低值区主要分布距矿区较远域,表明矿区周边土壤重金属富集受采矿、冶炼等影响较大。Cr、Pb和Ni分布规律相似,富集区呈岛状间断分布,主要分布在乡村居民地及矿业生产区等人口密集地区,表明土壤重金属浓度可能受到矿业和人类活动双重影响。Hg无明显分布规律,分布较均匀,且变异系数较小,其浓度高值区主要分布于矿山北侧的居住地,推断可能受到部分人为活动影响,但主要受花岗岩母岩风化作用控制。

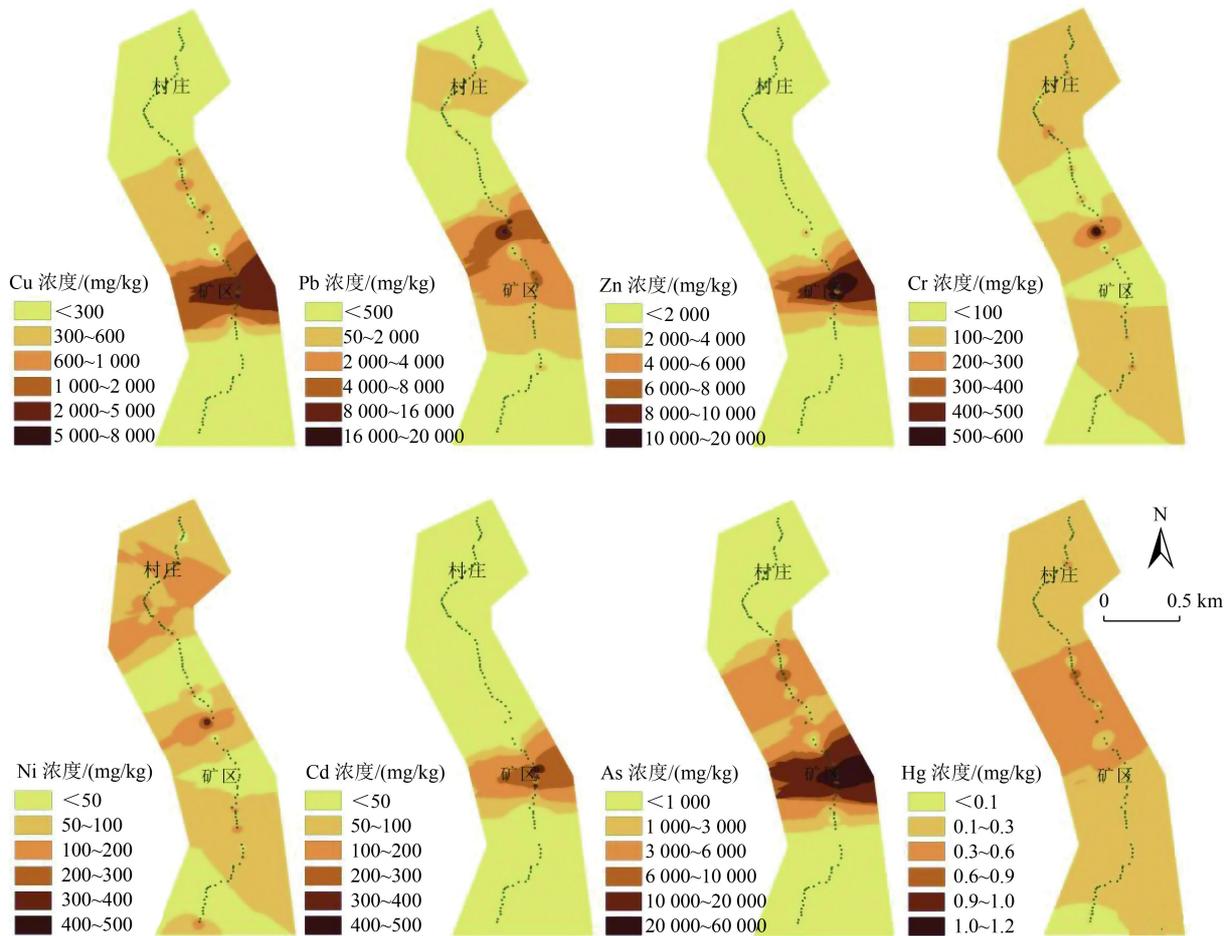


图 2 土壤重金属浓度空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metal concentrations in soils

2.3 土壤重金属污染状况评价

土壤重金属单因子指数平均值从大到小依次为As(119.70)>Cd(47.33)>Pb(6.81)>Zn(4.67)>Cu(4.43)>Cr(0.52)>Ni(0.38)>Hg(0.07)。其中,As、Cd、Pb、Zn和Cu属于重度污染,Cr、Ni和Hg属于

未污染。其中,As、Cd和Pb以重度污染为主,重度污染样点分别占比为85.58%、50.45%、42.34%;Zn、Cu以未污染为主,在不同程度上存在轻度至重度污染;Cr、Ni和Hg以未污染为主,未污染样点占比分别为94.60%、95.50%、100%(表3)。

表 3 单因子指数污染样点占比
Table 3 Percentage of single factor index pollution sample points

污染级别	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
未污染	54.05	17.12	40.54	94.60	95.50	19.82	0	100
轻度污染	18.92	27.93	26.13	4.50	3.60	18.92	7.21	0
中度污染	4.51	12.61	8.11	0.90	0.90	10.81	7.21	0
重度污染	22.52	42.34	25.22	0	0	50.45	85.58	0

各样点土壤重金属 PLI 计算结果见图 3。从图 3 可以看出, 各样点土壤重金属 PLI 变幅为 0.14~10.70, 平均值为 1.86, 研究区土壤重金属呈轻度污染, PLI 最大值达到重度污染程度。其中, 无污染样点占比为 49.55%, 轻度污染占比为 22.52%, 中度污染占比为 14.41%, 重度污染占比为 13.51%。从空间分布上看, 土壤重金属污染呈以矿区为中心向外扩散的分布趋势, 矿区生产区达到重度污染, 距矿区较

远的边缘地区则属于无污染, 这进一步说明了矿业活动对土壤环境的影响。

重金属 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As 和 Hg 的毒性系数分别为 5、5、1、2、5、30、10 和 40^[37]。依据式(3)计算得到各重金属的潜在生态风险指数, 从大到小依次为 Cd(1 419.94) > As(1 197.03) > Pb(30.90) > Cu(22.14) > Zn(4.67) > Hg(2.81) > Ni(1.88) > Cr(1.03)。Cd 潜在生态风险最高, As 次之, 均达到极强生态风险水平, 其他重金属均属于轻微污染水平。Cd 在 25.23% 的样点属于轻微风险, 20.72% 属于中度风险, 11.71% 属于强风险, 11.71% 属于很强风险, 30.63% 属于极强风险。As 在 26.13% 样点属于轻微风险, 24.32% 属于中风险, 11.71% 属于强风险, 10.81% 属于很强风险, 27.03% 属于极强风险。Cu、Pb 和 Zn 在大部分样点属于轻微风险, 在个别样点属于中风险和强风险, Ni、Cr 以及 Hg 在所有样点均属于轻微风险(表 4)。

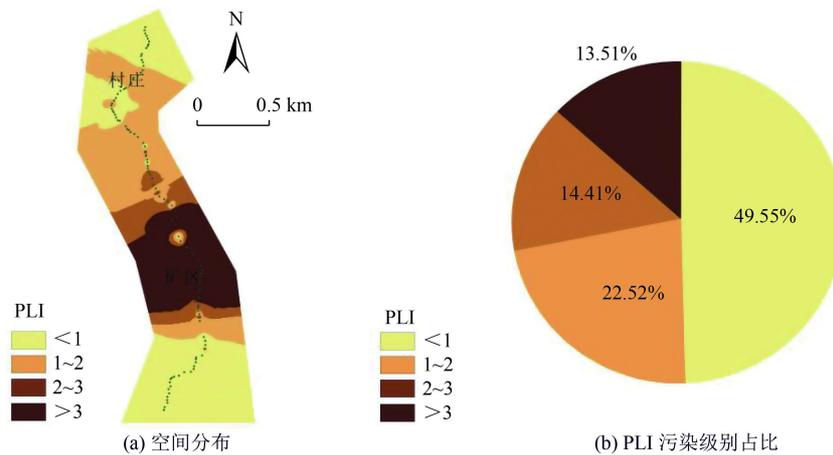


图 3 土壤重金属 PLI 评价结果

Fig.3 Evaluation results of soil heavy metal pollution load index

表 4 不同生态风险级别样点占比
Table 4 Percentages of sites at different risk levels in the total sample sites

潜在生态风险级别	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
轻微	84.69	84.68	97.30	100	100	25.23	26.13	100
中度	9.91	6.31	2.70	0	0	20.72	24.32	0
强	2.70	7.21	0	0	0	11.71	11.71	0
很强	1.80	0.90	0	0	0	11.71	10.81	0
极强	0.90	0.90	0	0	0	30.63	27.03	0

研究区各采样点土壤重金属 RI 均值为 2 680.40, 属于极强生态风险水平, 从空间分布来看, RI 呈现明显的地带性分布, 距离矿区较近的生产区域达到了

极强生态风险水平, 距离矿区较远的地区则为轻微生态风险水平, 总体上呈以生产区为污染中心向外延伸扩散的趋势(图 4), 说明矿业活动对生态存在明显的危害。

2.4 土壤重金属来源

2.4.1 相关性分析

依据相关性分析可以推断重金属来源是否相同, 土壤重金属相关性越大表明重金属之间可能存在同源性^[38], 土壤 8 种重金属相关性分析结果见表 5。从表 5 可以看出, Cu、Zn、Cd、As 两两之间以及 Cr 与 Ni 呈显著正相关 ($R > 0.8, P < 0.01$); Cu 与 Pb, Pb 与 Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 呈显著正相关 ($P < 0.01$); As 与 Hg 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。由此推断, 以上重金属具有同源关系或存在复合污染。Cu、

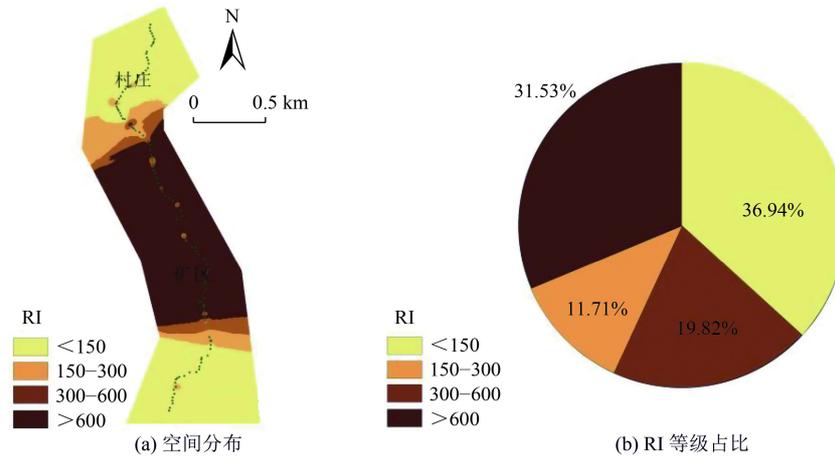


图 4 土壤重金属潜在生态风险评价结果

Fig.4 Results of potential ecological risk assessment of soil heavy metals

表 5 土壤重金属元素相关性分析

Table 5 Soil heavy metal element correlation analysis

元素	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
Cu	0.286**	0.934**	-0.232*	-0.184	0.927**	0.930**	0.176
Pb	1	0.388**	0.507**	0.452**	0.315**	0.313**	0.339**
Zn		1	-0.174	-0.115	0.971**	0.909**	0.073
Cr			1	0.832**	-0.226*	-0.246**	0.146
Ni				1	-0.180	-0.197*	0.172
Cd					1	0.954**	0.082
As						1	0.207*
Hg							1

注: **表示在0.01级别相关性显著; *表示在0.05级别相关性显著。

As 与 Cr 呈显著负相关,表明这些重金属之间存在拮抗作用。

2.4.2 主成分分析

为进一步了解研究区土壤重金属来源,对土壤中 8 种重金属元素进行主成分分析。经 KMO 以及 Bartlett 球形检验(KMO 为 0.655, Bartlett 球形检验为 0.000),表明研究数据适用于主成分分析,结果见表 6。

共提取 3 个特征值,累计解释了总方差的 90.99%。第一主成分(PC1)方差贡献率为 50.73%,主要变量包括 Cu、Zn、Cd 和 As 元素,4 种元素载荷均大于 0.9,这表明,这 4 种元素具有高度相似的同源性;结合土壤重金属浓度空间分布(图 2)可知,Cu、Zn、Cd 和 As 富集区主要分布在矿区附近。有研究表明,As 是燃煤污染源的标识元素^[39-41],矿业活动是导致 As 污染的重要原因之一,而 Cd 一般被认为来源于工业三废、工业生活用品、化肥农药等^[42]。综上,Cu、Zn、Cd 和 As 主要来源于矿产开采和冶炼等矿业活动,因此 PC1 可解释为矿业污染源。

表 6 主成分分析结果

Table 6 Results of principal component analysis

元素	主成分		
	PC1	PC2	PC3
Cu	0.966	0.005	-0.017
Pb	0.356	0.773	0.013
Zn	0.968	0.071	-0.162
Cr	-0.272	0.883	-0.214
Ni	-0.226	0.87	-0.204
Cd	0.978	0.003	-0.124
As	0.972	0.009	0.024
Hg	0.185	0.418	0.881
初始特征值	4.058	2.314	0.907
方差贡献率/%	50.730	28.924	11.338
累计方差贡献率/%	50.730	79.654	90.992

第二主成分方差贡献率为 28.92%,主要变量由 Cr、Ni 和 Pb 组成,3 种元素载荷分别为 0.88、0.87、0.77,均大于 0.75;表明这 3 种元素具有相似同源性。有研究表明,元素 Pb 和 Ni 与汽车尾气排放有关,是机动车污染源的标识元素^[43],Cr 主要来源于车体磨损等^[44]。结合土壤重金属浓度空间分布可知,Cr、Ni 和 Pb 富集区主要分布于乡村居民地以及矿业生产区等人口密集交通发达地区,由此可推断 Cr、Ni 和 Pb 主要来源于矿业以及交通运输在内的人类生活活动;因此,PC2 解释为工业与生活污染源。

第三主成分方差贡献率为 11.33%,Hg 元素具有较高的载荷,为 0.88。据 Hg 浓度分布可知,土壤 Hg 分布较均匀且浓度较低,Hg 浓度超出湖南省土壤背景值 2.67 倍,但与 GB 15618—2018(pH>7.5)标准限值相比,未超出标准限值,由此推断土壤 Hg 来源主要受母岩的风化以及成土作用影响。因

此, PC3 解释为自然污染源。

3 结论

(1) 研究区土壤重金属 Cu、Zn、Cd 和 As 空间分布格局较为一致, 元素富集区分布于矿业生产区附近, 低值区分布于矿区边缘区域; Cr、Pb 和 Ni 分布规律相似, 主要分布于乡村居民地以及矿业生产区等人口密集地区; Hg 元素无明显分布规律, 其高值区主要分布于矿山北侧的居住地。

(2) 土壤单因子指数表明, As、Cd、Pb、Zn 和 Cu 属于重度污染, Cr、Ni 和 Hg 属于未污染; 土壤 PLI 均值为 1.86, 土壤呈轻度污染; 单项生态风险指数从大到小依次为 Cd、As、Pb、Cu、Zn、Hg、Ni 和 Cr, RI 均值为 2 680.40, 属于极强生态风险水平; PLI 和 RI 空间分布与重金属浓度分布趋于一致。

(3) 相关性与主成分分析表明, 研究区土壤 Cu、Zn、Cd 和 As 元素主要来源于矿业活动, Pb、Cr 和 Ni 元素主要来源于矿业与人类生活活动, Hg 元素受人为活动干预较少, 主要受母岩风化过程与程度控制。

参考文献

- [1] SUN L, GUO D, LIU K, et al. Levels, sources, and spatial distribution of heavy metals in soils from a typical coal industrial city of Tangshan, China[J]. *Catena*, 2019, 175: 101-109.
- [2] WANG G Y, ZHANG S R, XIAO L Y, et al. Heavy metals in soils from a typical industrial area in Sichuan, China: spatial distribution, source identification, and ecological risk assessment[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, 24(1): 1-13.
- [3] WANG F, ZHAO W, CHEN Y. Spatial variations of soil heavy metal potential ecological risks in typical Moso Bamboo Forests of Southeast China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 102: 224-230.
- [4] ZHOU Y, WANG L, XIAO T, et al. Legacy of multiple heavy metal (loid)s contamination and ecological risks in farmland soils from a historical artisanal zinc smelting area[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137541.
- [5] ZHU D W, WEI Y, ZHAO Y H, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the agriculture soil in Xunyang mining area, Shaanxi Province, Northwestern China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, 101: 178-184.
- [6] HU Z G, WANG C S, LI K Q, et al. 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*, 2018, 77(18): 638.1-638.10.
- [7] XIAO R, WANG S, LI R H, et al. Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 141: 17-24.
- [8] 刘硕, 吴泉源, 曹学江, 等. 龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 270-279.
- LIU S, WU Q Y, CAO X J, et al. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(1): 270-279.
- [9] 徐源, 师华定, 王超, 等. 湖南省郴州市苏仙区重点污染企业影响区的土壤重金属污染源解析[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(5): 1213-1222.
- XU Y, SHI H D, WANG C, et al. Heavy metal pollution sources in soil affected by key pollution enterprises in Suxian District, Chenzhou City, Hunan Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(5): 1213-1222.
- [10] WANG X, HE M, XIE J, et al. Heavy metal pollution of the world largest antimony mine-affected agricultural soils in Hunan province (China)[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(5): 827-837.
- [11] LI X Z, ZHAO Z Q, YE Y, et al. Heavy metal accumulation and its spatial distribution in agricultural soils: evidence from Hunan Province, China[J]. *RSC Advances*, 2018, 8(19): 10665-10672.
- [12] ZHANG Z X, ZHANG N, LI H, et al. Risk assessment, spatial distribution, and source identification of heavy metal (loid)s in paddy soils along the Zijiang River basin, in Hunan Province, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(12): 4042-4051.
- [13] 雷鸣, 曾敏, 郑袁明, 等. 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*, 2008(6): 1212-1220.
- LEI M, ZENG M, ZHENG Y M, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008(6): 1212-1220.
- [14] 陆泗进, 何立环, 王业耀. 湖南省桂阳县某铅锌矿周边农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *环境化学*, 2015, 34(3): 591-592.
- [15] 谢荣秀, 田大伦, 方晰. 湘潭锰矿废弃地土壤重金属污染及其评价[J]. *中南林学院学报*, 2005(2): 38-41.
- XIE R X, TIAN D L, FANG X. Assessment of pollution of heavy metals on the slag wasteland of Xiangtan Manganese Mine[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2005(2): 38-41.
- [16] 张煜, 胡俊良, 刘劲松, 等. 湖南香花岭某钨矿区土壤中重金属的污染特征及生态风险研究[J]. *安全与环境工程*, 2018, 25(3): 117-124.
- ZHANG Y, HU J L, LIU J S, et al. Pollution characteristics and ecological risks of heavy metals in the soil from Xianghualing Tungsten Mining Area of Hunan Province[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(3): 117-124.
- [17] SUN Z H, XIE X D, WANG P, et al. 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*, 2018, 639: 217-227.
- [18] 帅红, 李景保. 南方小型矿业城镇土地生态敏感性评价: 以湖南省桂阳县为例[J]. *热带地理*, 2010, 30(3): 232-236.
- SHUAI H, LI J B. Appraisal of land-use eco-sensitivity on small-sized mining city in Southern China: a case study of GuiYang, Hunan[J]. *Tropical Geography*, 2010, 30(3): 232-236.

- [19] HUANG S H, LI Q, YANG Y, et al. Risk Assessment of heavy metals in soils of a lead-zinc mining area in Hunan Province (China)[J]. *Journal of Chemists and Chemical Engineers*, 2017, 66(3/4): 173-178.
- [20] 张黎. 桂阳县矿区土地复垦模式研究[D]. 湖南师范大学, 2013.
- [21] 桂一文. 土地利用与生态环境协调建设研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2010.
- [22] LU Y Y, CAO J Y, FU J M, et al. Petrogenesis of the granite related to the Dashunlong Sn polymetallic deposit, Dayishan ore field, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 139: 104478.
- [23] 赵兴青, 朱旭炎, 黄兴, 等. 安徽铜陵矿区不同功能区域土壤中重金属对微生物及酶活性的影响[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(12): 2139-2147.
- ZHAO X Q, ZHU X Y, HUANG X, et al. Effects of heavy metals in soils on microorganisms and enzyme activities in different functional areas of Tongling Mining Area in Anhui Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(12): 2139-2147.
- [24] 郭俊刚, 赵恒勤, 卞孝东, 等. 江西于都某钨矿区土壤重金属特征及生态风险评价[J]. *地质通报*, 2021, 40(7): 1195-1202.
- GUO J G, ZHAO H Q, BIAN X D, et al. Characteristics and ecological risk of soil heavy metals of a Tungsten mine in Yudu, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(7): 1195-1202.
- [25] 邓海, 王锐, 严明书, 等. 矿区周边农田土壤重金属污染风险评估[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1127-1137.
- DENG H, WANG R, YAN M S, et al. Risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil around mining area[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1127-1137.
- [26] 张泓, 吕维君, 茅建人, 等. 微波消解-原子吸收分光光度法、原子荧光分光光度法测定土壤中的铜锌铅镉铬汞[J]. *中国卫生检验杂志*, 2005(7): 830-831.
- [27] 白艳丽, 王利佳, 刘秀芝. 微波消解-原子吸收分光光度法测定土壤中的铜锌镍铬锰铅镉[J]. *黑龙江环境通报*, 2008, 32(4): 58-60.
- [28] 生态环境部. 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, 2018.
- [29] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17): 310-315.
- FAN S X, GAN Z T, LI M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 310-315.
- [30] 郭笑笑, 刘从强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 889-896.
- GUO X X, LIU C Q, ZHU Z Z, et al. Methods for evaluating soil heavy metal pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 889-896.
- [31] 王涛, 司万童, 欧阳琰, 等. 陕西某钨矿区土壤重金属污染特征及评价[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(4): 440-446.
- WANG T, SI W T, OUYANG Y, et al. Characteristic and evaluation of soil heavy metals pollution in the molybdenum mine area in Shaanxi[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(4): 440-446.
- [32] HAKAMSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [33] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [34] 沈洪艳, 安冉, 师华定, 等. 湖南省某典型流域农用地土壤重金属污染及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(3): 715-724.
- SHEN H Y, AN R, SHI H D, et al. Heavy metal pollution and influencing factors of agricultural land in a typical watershed in Hunan Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(3): 715-724.
- [35] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1075-1086.
- MAMATTURS E, AJIGUL M, ANWAR M. Soil heavy metal pollution and ecological risk warning assessment of pepper field in Yanqi Basin, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1075-1086.
- [36] 鞠铁男, 吴啸, 师华定, 等. 海沟河小流域耕地土壤重金属污染与生态风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(5): 556-562.
- JU T N, WU X, SHI H D, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of arable land soil in Haigou small watershed[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(5): 556-562.
- [37] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 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*, 2008, 31(2): 112-115.
- XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [38] XU Z, MI W B, MI N, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in desert steppe soil related to transportation and industrial activities[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 27(31): 38835-38848.
- [39] MANDAL B K, SUZUKI K T. Arsenic round the world: a review[J]. *Talanta*, 2002, 58: 201-235.
- [40] BARONI F, BOSCAGLI A, LELLA L, et al. Arsenic in soil and vegetation of contaminated areas in southern Tuscany (Italy)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2004, 81(1): 1-14.
- [41] LIU H, PRONS A, LIAO B. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 339(1/2/3): 153-166.
- [42] 穆莉, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 573-582.
- MU L, WANG Y H, XU Y P, et al. Pollution characteristics and sources of heavy metals in paddy soils in a county of Hunan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 573-582.
- [43] 湛天丽, 黄阳, 滕应, 等. 贵州万山汞矿区某农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *土壤通报*, 2017, 48(2): 474-480.
- ZHAN T L, HUANG Y, TENG Y, et al. Pollution characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in Wanshan Mining Areas, Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(2): 474-480.
- [44] 刘媚媚, 高风杰, 韩晶, 等. 黑土区小流域土壤重金属生态危害与来源解析[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(11): 12-21.
- LIU M M, GAO F J, HAN J, et al. Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in a mollisol watershed of China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(11): 12-21. □