

川南地区某硫铁矿废渣堆周边农田 土壤重金属污染水平及源解析

常凯威¹, 邵 啸², 杨 韬¹, 余 杰¹, 余 江^{1,3}

(1. 四川大学建筑与环境学院环境科学与工程系, 成都 610065;

2. 西澳大利亚大学农业与环境学院, 珀斯 6907;

3. 宜宾四川大学产业技术研究院, 宜宾 644000)

摘要: 为探究硫铁矿区废渣堆对周边农田造成的影响, 系统采集了川南某硫铁矿废渣堆及周边农用地土壤样品共 61 件, 测定其重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg)的含量, 分析 8 种重金属污染水平及空间分布特征, 利用相关性和主成分分析对重金属进行源解析, 并借助综合生态风险指数、地累积指数等方法评估土壤污染风险水平. 结果显示, 研究区土壤中 Cr、Cu 和 Cd 含量超过国家相应标准, 且 Cr、Cd、Pb 和 As 的含量明显高于土壤背景值, 分别为背景值的 1.56、1.40、1.45、2.89 倍; Ni、Cu 和 Zn 含量的空间分布相对均匀, 而其它 5 种重金属的空间分布相对集中; 矿区周边农田土壤整体处于中等生态风险水平($150 < RI < 300$), 其中 Cd 为主要生态风险因子. 通过主成分分析进一步发现, 研究区农田土壤中的 Ni 和 Cu 主要来源于成土母质, Cr、Cd、Pb 和 As 主要是通过径流和淋滤等方式从废渣堆中进入到土壤, 其次是由废渣堆产生的扬尘随大气沉降扩散影响至周边土壤. 研究表明, 硫铁矿废渣堆进行风险管控以及周边受污染农用地修复治理已是当务之急.

关键词: 硫铁矿; 废渣堆; 重金属; 主成分分析法; 来源分析

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2023.036002

Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in farmland soil around a pyrite slag heap in Southern Sichuan Province

CHANG Kai-Wei¹, SHAO Xiao², YANG Tao¹, YU Jie¹, YU Jiang^{1,3}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, College of Architecture and Environment,
Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Agriculture and Environment, University of Western Australia, Perth 6907, Australia;

3. Yibin Institute of Industrial Technology, Sichuan University, Yibin 644000, China)

Abstract: To explore the impact of pyrite slag heap on surrounding farmland, 61 soil samples were systematically collected from a pyrite slag heap and surrounding agricultural land in Southern Sichuan Province, and the contents of heavy metals (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, As, Hg) were determined, and the pollution levels and characteristics of the spatial distribution of eight heavy metals were analyzed. The sources of heavy metals were identified by correlation and principal component analysis, and the risk lev-

收稿日期: 2022-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802605); 四川省科技重点攻关项目(2022YFQ0081); 四川大学-宜宾市校市战略合作专项(2019CDYB-26, 2020CDYB-9)

作者简介: 常凯威(1997-), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤及地下水污染修复. E-mail: 1206096127@qq.com

通信作者: 余江. E-mail: yuj@scu.edu.cn

el of soil pollution was evaluated by a comprehensive ecological risk index and geo-accumulation index. In the soil, the results showed that the contents of Cr, Cu and Cd of the study area exceeded the corresponding national standards, and the contents of Cr, Cd, Pb, and As were significantly higher than the background values, which were 1.56, 1.40, 1.45 and 2.89 times of the background values, respectively. The spatial distribution of Ni, Cu and Zn content was relatively uniform, while the spatial distribution of the other five heavy metals was relatively concentrated. The farmland soil around the mining area was at a medium ecological risk level ($150 < RI < 300$), among which Cd was the main environmental risk factor. Through principal component analysis, the results further show that Ni and Cu in farmland soil in the study area are mainly derived from soil parent materials, and Cr, Cd, Pb and As mainly entered the soil from the slag heap through surface runoff and rainwater leaching, followed by the dust generated by the slag heap spreads with the atmospheric deposition and diffusion and affects the surrounding soil. The study shows that risk control of sulfur iron ore slag piles and remediation of the surrounding contaminated agricultural land is an urgent task.

Keywords: Pyrite; Waste dump; Heavy metals; Principal component analysis; Source analysis

1 引言

随着工业化和城市化的发展,我国土壤重金属污染问题愈发突出^[1,2]. 矿山开采等活动是土壤重金属污染的一大主要原因^[3,4],且矿山开发过程中产生的大量矿渣长期无序堆放,占用了大量的土地资源^[5,6],而矿渣中又存在多种重金属元素,极易通过风化、雨淋、地表径流等方式进入到土壤和地下水中^[7,8],长此以往会造成附近土地质量退化,对周边居民的生命健康造成严重威胁^[9]. 为此,针对矿区周边土壤重金属污染特征的研究近来受到了广泛关注^[10,11],毛志强等^[12]以我国广西某金属废矿区为研究对象,分析了 Cd、As、Cr、Zn、Ni、Cu、Sn、Sb 和 Pb 的重金属污染特征和生态风险,发现矿区附近农田土壤的生态风险较高($RI > 300$),其中 Cd、As 和 Sb 为主要生态风险因子. 陕永杰等^[13]对山西省某铁矿区内土壤进行研究,利用变异系数和地累积指数评价剖析当地重金属的污染特征,发现当地的 As、Se、Zn、Pb 4 种元素达到了强污染水平, Cd、Cr、Cu、Ni 4 种元素为轻中度污染. 相关研究虽揭示了重金属矿区周边土壤重金属污染程度,但均未分析其土壤重金属污染的源与汇.

鉴于此,本文以川南地区某硫铁矿废渣堆周边农田土壤为研究对象,系统采集研究区渣堆及土壤样品,分析 Cr、Cu、Ni、Zn、Cd、Pb、As 和 Hg 8 种重金属元素的污染水平及源解析,为该地区硫铁矿废渣堆进行风险管控及修复治理提供相关科学依据^[14].

2 材料与方法

2.1 区域概况

研究区域位于四川省南部某地级市,年平均气温 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,主导风多为西北风和东北风,年平均降水量为 $1050\sim 1618\text{ mm}$,该地区为典型的喀斯特地貌,具有丰富的矿产资源,主要地带性土壤为黄壤土、红壤土、冲积土、石灰土、水稻土等,重金属易富集. 研究区硫铁矿开采历史久远,经过 40 余年的开采以及土法炼磺,造成大量的尾矿渣露天集中堆放,占用大量土地资源. 本研究区域共计 474.4 亩,其中渣堆面积共约 99.4 亩(46.31 万平方米),周边农田面积共约 342.6 亩,道路及民房等其它占地共约 32.4 亩. 研究区土地利用类型为农用地,基本为旱地,未来几年土地利用类型不变.

2.2 样品采集与测定

研究区共取渣堆样品 13 个;农田表层($0\sim 20\text{ cm}$)土壤样品 48 个,其中包括 4 个背景点样品,分别位于研究区域东、南、西、北四个方向且远离废渣堆场. 渣堆采用多点混合采样法;农田和背景点表层土壤采用五点采样法,保证每个采样区面积不大于 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$. 每个样点周边采集 5 个等量样品混匀,并用四分法取样. 每个采样点的地理位置均使用 GPS 确定,并记录其周边地形地貌等信息. 样品自然风干后清除其异物,如草根和碎石等,分成四等份取出,研磨过筛备用. 样品 Cr、Cu、Ni、Zn、Cd、As 和 Pb 的含量采用 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)测定, Hg 的含量采用冷原子吸收测汞仪测定. 在整个测量过程中,采用国家标准土

壤物质 GSS-1 和 GSS-5 进行质量控制,各重金属的测定误差值均小于±10%。

2.3 研究方法

2.3.1 相关性分析 相关性分析^[15]是指对两个以上具备相关性的变量元素进行分析,衡量元素之间的相关密切程度。因本研究农田土壤重金属浓度数据不满足线性关系,所以利用相关性分析探究土壤中重金属元素共性。

2.3.2 主成分分析 主成分分析(Principal Component Analysis,PCA)^[16]是数据处理中常用的降维方法,可将多个相关性指标转化为少数主要指标,并且主要指标保留了原本大部分信息,确保了分析结果的可靠性,从而实现污染源的定性识别。

2.3.3 综合生态风险评价 综合生态风险指数^[17]经常被用来评估土壤中重金属污染的环境风险水平。表达式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i}$$

(1)

式中 RI 为土壤中重金属的综合环境风险指数; E_r^i 为土壤中重金属元素 i 的潜在环境风险系数; T_r^i 为重金属 i 的毒性系数; C^i 为重金属 i 的测量值; C_n^i 为计算所需的参考值,以当地川南地区土壤背景值作为参考。Cr、Ni、Zn、Cu、As、Cd、Pb 和 Hg 的毒性系数分别为 2、5、1、5、10、30、5 和 40。

表 1 潜在生态风险系数和综合生态风险指数分级标准
Tab.1 Potential ecological risk coefficient andcomprehensive ecological risk index grading criteria

综合生态风险指数(RI)范围	潜在生态风险系数(E_r^i)范围	结果
<150	<40	低
150~300	40~80	中
300~600	80~160	较高
>600	160~320	高
	>320	极高

2.3.4 地累积指数 地累积指数(I_{geo})又被称为 Muller 指数^[18],是 20 世纪 60 年代由德国科学家 Muller 提出并应用于研究土壤中重金属污染程度的定量指标,且在考虑人为因素、环境地球化学背景值及自然地质过程对背景值影响的基础上,反映土壤中重金属富集程度和污染水平^[19]。其表达式:

$$I_{geo}=\log_2 C_n/(K \times B_n)$$

(2)

式中: C_n 为土壤重金属的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; B_n 为土壤中 n 元素的背景值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $K=1.5$,考

虑到背景值因成土母质的形成不同而设定。地累积指数的分级和污染程度的划分标准是:无污染($I_{geo}<0$),轻—中度污染($0 \leq I_{geo}<1$),中度污染($1 \leq I_{geo}<2$),中—强度污染($2 \leq I_{geo}<3$),强度污染($3 \leq I_{geo}<4$),强—严重污染($4 \leq I_{geo}<5$)和严重污染($I_{geo} \geq 5$)。

2.3.5 数据处理与作图 本研究中数据的描述性统计分析、主成分分析由 Excel 2019 和 SPSS 25.0 完成,采用 Origin 2021、ArcGIS 10.2 软件绘制图。

3 结果与分析

3.1 描述性统计

表 2 为土壤及渣堆的 pH 值测量结果。废渣堆 pH 值变幅为 2.16~8.07,平均值为 5.09;表层土壤 pH 值变幅为 4.10~8.50,平均值为 6.15;背景点 pH 值变幅为 3.95~7.09,平均值为 5.53,从标准差和变异系数来看,背景点的 pH 值变幅不大,呈弱酸性。

表 2 土壤 pH 值数据统计表
Tab.2 Soil pH data statistics

类型	中值	均值	最大值	最小值	标准差	变异系数
废渣堆	4.93	5.09	8.07	2.16	1.74	0.34
表层土壤	6.07	6.15	8.50	4.10	1.11	0.18
背景点	6.00	5.53	7.09	3.95	1.11	0.20

废渣堆和农用地表层土壤重金属含量测定结果如表 3 所示,以不同位点的采样结果平均值来看,废渣堆中 Cd、Pb、As、Hg 的含量分别为 0.21、30.56、12.01、0.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于当地土壤背景值,依次为背景值的 1.4、1.13、4.41、1.69 倍,其中 Cu、Cr 含量的平均值分别为 267.81、107.14 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均严重超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)中的风险筛选值(50、150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

农田表层土壤中 Ni、Zn、Pb、As 的含量分别是 68.09、167.80、39.32、7.86 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,显著高于当地土壤背景值,依次为背景值的 1.11、1.29、1.45、2.89 倍,Hg 的含量与当地背景值相近,而 Cu、Cr 和 Cd 含量的平均值分别为 151.89、117.05 和 0.85 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 均超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)中的风险筛选值(50、150、0.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

同时也存在部分重金属变异系数较大的现象,农田表层土壤中 Pb 含量最大可达到 325.00 $\text{mg} \cdot$

kg⁻¹,最小为 17.00 mg · kg⁻¹,变异系数为 1.16. 说明在本研究区域内该元素的空间分布可能存在较大的差异性,因此,在进一步风险管控与治理时,必须考虑到该元素含量在空间分布上的差异.

表 3 土壤重金属含量描述性统计
Tab. 3 Descriptive statistics of heavy metal content in soil

项目	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
最大值/mg · kg ⁻¹	493.00	84.60	209.00	143.00	0.50	50.60	59.00	0.36
最小值/mg · kg ⁻¹	48.50	11.40	30.80	24.50	0.10	9.40	3.34	0.03
平均数/mg · kg ⁻¹	267.81	39.14	107.14	80.55	0.21	30.56	12.01	0.22
废渣堆								
中位数/mg · kg ⁻¹	238.00	31.80	96.10	72.60	0.20	31.40	5.86	0.24
标准偏差	148.46	23.06	54.69	35.65	0.14	13.51	14.79	0.12
变异系数	0.55	0.59	0.51	0.44	0.67	0.44	1.23	0.55
最大值/mg · kg ⁻¹	426.00	99.00	158.00	252.00	3.51	325.00	15.90	0.52
最小值/mg · kg ⁻¹	23.00	20.00	16.00	88.00	0.13	17.00	3.70	0.04
平均数/mg · kg ⁻¹	151.89	68.09	117.05	167.80	0.85	39.32	7.86	0.13
表层土								
中位数/mg · kg ⁻¹	146.00	67.50	120.50	170.00	0.66	27.00	7.04	0.09
标准偏差	58.41	16.39	24.72	29.45	0.72	45.73	3.12	0.11
变异系数	0.39	0.24	0.21	0.18	0.85	1.16	0.40	0.85
风险筛选值/mg · kg ⁻¹	150.00	70.00	50.00	200.00	0.30	90.00	40.00	1.8
当地背景值/mg · kg ⁻¹	97.70	61.60	90.70	130.00	0.15	27.00	2.72	0.13

3.2 重金属的空间分布情况

农田表层土壤中重金属含量的统计结果表明,不同重金属元素的空间分布存在较大差距,为了进一步研究土壤中重金属的分布情况,对重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg)含量进行空间分析得到图 1 所示的空间分布特征图. 由图 1 可以看出,Ni、Cu 和 Zn 的含量分布相对均匀(变异系数分别为 0.24、0.21、0.18),Cu 含量整体偏高,而其它 5 种重金属分布较为集中,研究区北部的 Ni、

Cd 和 As 的含量均普遍偏高,中部是多种重金属元素含量较高区域. 农田表层土壤重金属分布差异可能是由多因素导致,一方面是自然因素,重金属污染可能源于成土母质,特别是不同的母质在成土过程中形成的土壤在重金属含量上有明显差异^[20];另一方面为外源因素,如工矿企业三废排放、废渣堆重金属污染迁移、大气沉降,以及化肥过量施用等均可能造成土壤中污染物的累积^[21].

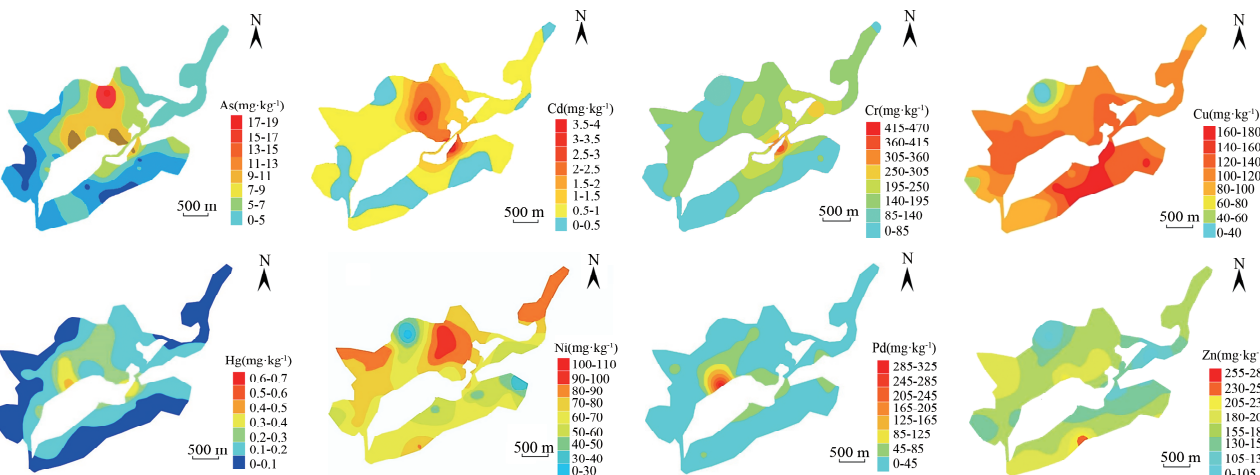


图 1 农田表层土壤各金属含量的空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of each metal content in the surface soil of agricultural land

3.3 重金属来源差异性分析

相关性结果显示,表层土壤中的一些重金属之 间存在高度显著的相关性(表 4). Cr 与 Ni、Cu、Cd、Hg 之间存在高度显著的相关性,相关系数分

别达到 0.406、0.433、0.680、0.429 ($P<0.01$), Ni 与 Zn、Cd 之间的相关系数分别达到 0.536 和 0.388 ($P<0.01$), Cd 与 Hg 的相关系数达到 0.576 ($P<0.01$), Pb 与 As、Hg 的相关系数分别为 0.527 和 0.709 ($P<0.01$), As 与 Hg 的相关系数

达到 0.834 ($P<0.01$) 极显著的相关性. 其中 Cr 与 Ni、Cu、Cd、Hg 和 Ni 与 Zn、Cd 在 0.01 水平上显著相关, 由此得出, Cr-Ni-Cd 来自同一源的可能性较大. Pb 与 As、Hg 和 As 与 Hg 之间也显著相关, 得出 Pb-As-Hg 属于同一源的可能性较大.

表 4 表层土壤重金属相关性分析
Tab. 4 Correlation analysis of heavy metals in surface soils

	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
Cr	1	0.406 **	0.433 **	-0.179	0.680 **	0.079	0.338 *	0.429 **
Ni		1	0.267	0.536 **	0.388 **	-0.085	0.069	-0.036
Cu			1	0.325 *	0.107	0.079	-0.159	0.059
Zn				1	-0.044	-0.059	-0.157	-0.265
Cd					1	0.111	0.666 *	0.576 **
Pb						1	0.527 **	0.709 **
As							1	0.834 **
Hg								1

** 表示 $P<0.01$ (极为显著); * 表示 $P<0.05$ (显著)

主成分分析作为一种环境数理统计方法, 常被应用于土壤重金属的来源识别和分析^[14]. 表层土壤 Cr、Ni、Cu、Cd、Zn、Pb、As 和 Hg 的主成分分析结果中提取了三组主成分(图 3), 第一、第二和第三主成分的方差分别为 39.35%、25.18% 和 14.16%, 共解释了总方差的 78.69%, Cd、Cr、Hg 和 As 在第一主成分中的载荷较高, Ni、Cu 和 Zn 在第二主成分中的载荷较大, 而 Pb 和 Zn 在第三主成分中的载荷较大, 土壤重金属主成分载荷图如图 3 所示.

本研究区域涵盖硫铁矿开采所遗留的废渣堆, 结合相关性分析结果, 第一主成分中 Cr、Cd、Hg 和 As 4 种重金属元素彼此之间存在着显著的相关性(表 4), 而废渣堆中 Cr、Cd、Hg 和 As 的含量较高, 据此推测, 废渣堆中的重金属元素可能通过地表径流和雨水淋滤等方式进入农田土壤^[22]. 由于第二主成分上载荷较大的 Ni、Cu 和 Zn, 且由于项目区所处地区背景值含量较高, 所以这 3 种重金属更有可能受到成土母质的影响. 第三主成分上载荷较大的是 Pb 和 Zn, 可能是由于以 Pb、Zn 等重金属元素为主的废渣堆扬尘, 经过自然沉降和降水^[23], 造成土壤重金属含量较高.

3.4 生态风险分析

通过综合生态风险指数 RI 的计算结果, 得出研究区内的 44 个表层土壤采样点中, 生态风险指数 RI 的平均值为 261.80, 处于中等生态风险水平, 其中 63.64% 的点位为中等生态风险水平,

13.64% 的点位为较高生态风险水平, 6.82% 的点位为高生态风险水平. 潜在生态风险计算得出 Cd 元素为高生态风险, 贡献率为 23%(表 5), 因此 Cd 为研究区农田土壤主要生态风险元素, 通过本次采样调查研究区废渣堆等可能的污染源, 得出外部输入污染可能性最大. 首先, 废渣堆场的废渣及含有重金属的酸性淋溶水等, 通过地表径流或者直接冲刷进入附近土壤; 其次, 结合研究区域内农户化肥施用情况, 不科学的使用化肥可能会导致土壤中重金属的累积; 此外, 废渣堆产生的扬尘还可能通过大气沉降作用影响周边土壤.

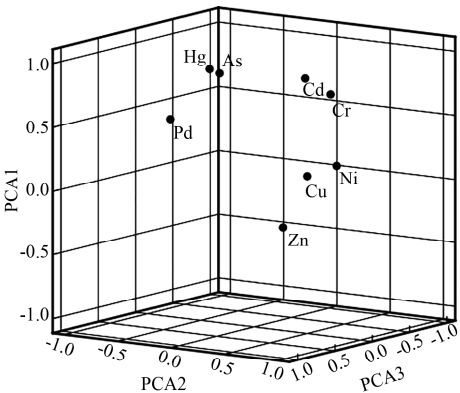


图 2 土壤重金属主成分载荷
Fig. 2 Soil heavy metal principal component loadings

3.5 地累积风险分析

研究区农田表层土壤重金属地累积指数均值表现为 $Zn(-2.24) < Cu(-2.15) < Hg(-0.95) < Ni(-0.49) < Pb(-0.32) < Cr(-0.05) < As$

(0.84)<Cd(1.59). Zn、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Cr 元素为无污染,As 存在轻微到中度污染,Cd 存在中度污染. 重金属达到轻度及以上的污染的样点比例排序为 As (95.45%)> Cd (93.19%)> Cr (47.73%)> Pb(27.27%)> Hg(20.46%)> Zn (13.64%)> Ni(4.55%)> Cu (0%)(图 3). 总体来说,该研究区 Cd、As 元素的富集程度相对较高,其它 6 种重金属元素含量与本地土壤背景值接近,富集程度较轻微.

表 5 土壤潜在生态风险指数统计结果

Tab. 5 Statistical Results of Potential Ecological Risk Index of Soil

	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg
均值	3.11	5.53	6.45	1.29	170.27	7.18	28.91	39.01
最小值	0.47	1.62	0.88	0.68	26.00	3.15	13.60	12.31
最大值	8.72	8.04	8.71	1.94	702.00	60.19	58.46	159.08
风险等级	低	低	低	低	高	低	低	低

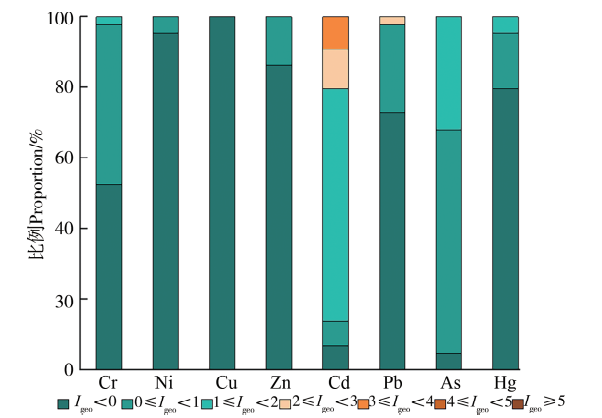


图 3 土壤重金属地累积指数分布比例

Fig. 3 Distribution ratio of soil heavy metal land accumulation index

4 讨 论

尹芳等^[24]测定了青海省某工业园区附近耕地表层土壤重金属 Cd、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 等 7 种元素含量,并采用地累积指数、污染负荷指数、主成分分析等方法对研究区耕地土壤重金属污染水平和空间分布进行了分析。结果表明,研究区耕地土壤重金属污染以中部偏东地区最为严重,Cd 和 Zn 是其主要贡献元素,其污染来源主要包括自然成土过程、工业生产、大气沉降、农业活动等。本文通过分析重金属污染水平,得出农田土壤中 Cr、Cu 和 Cd 含量超过国家标准,结合重金属的空间分布特征和主成分分析结果,推测其污染来源包括成土母质、地表径流、大气沉降及农业活动等,其结果和文

献结果基本一致。

张之才等^[25]对广西某铅锌矿区的农田土壤中铅、锌、镉等重金属含量开展了污染评价和生态风险评价,发现土壤中 Cd、Zn 存在重度污染,Cd 的潜在生态危害系数最大。由此提出了切除污染源,开展治理修复防控策略。徐玉霞等^[26]对陕西省三个煤矿区周边农田土壤重金属污染状况进行了分析,利用单因子指数法、综合污染指数法、地累积指数法评价得出,三个矿区周边农田土壤已受到不同程度的重金属污染(主要为 Hg、Cd),并提出应采取一定的措施修复治理。本文利用综合生态风险指数、地累积指数等方法评价得出研究区农田土壤处于中等生态风险水平,Cd 是主要风险因子。因此研究结果与文献基本一致,均表明了矿区周边农田土壤已经受到严重污染,急需开展修复治理。

为了全面了解矿区周边农用地土壤重金属的污染程度,今后将考虑重金属多种途径来源的贡献量,并结合近期和长期目标,监测评估修复过程中效果,动态优化调整修复技术和修复目标,以期为矿区进行风险管控及其周边农田土壤的修复治理提供了科学支撑。

5 结 论

(1) 该区域农田土壤已经受到硫铁矿废弃渣堆的影响,重金属 Ni、Cr、Cu、Cd、Zn、Pb、As 和 Hg 含量均高于背景值,其中 Cr、Cu 和 Cd 存在不同程度的超标现象。

(2) 农田土壤元素的空间分布特征上,Ni、Cu 和 Zn 元素分布相对均匀,而其他 5 种重金属(Cr、Cd、Pb、As、Hg)的分布趋势较集中,造成这种差异的原因:一方面是地质成因,另一方面是外部来源,如废渣堆中的污染物迁移和化肥过量施用等均可能造成土壤中污染物的累积。

(3) 重金属的源解析表明,农田土壤中 Ni 和 Cu 的主要来源可能为成土母质;而 Cr、Cd、Pb 和 As 的来源,一方面是废渣堆中的重金属元素通过地表径流和雨水淋滤浸出进入土壤,另一方面是废渣堆产生的扬尘可能会通过大气沉降等方式进入土壤. 这意味着农田土壤的风险管控过程需要考虑多种污染途径的影响。

(4) 综合生态风险评价和地累积指数分析的结果表明,研究区的农田土壤具有中等程度的污染,其中 Cd 是主要污染元素,富集程度较高,两种评价方法结论一致。

参考文献:

[1] 吴科堰, 范成五, 刘桂华, 等. 黔西南某农用地土壤重金属风险评估与来源解析[J]. 西南农业学报, 2021, 34: 1721.

[2] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, *et al.* A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment [J]. *Science Total Environ*, 2018, 642: 690.

[3] 顾会, 赵涛, 高月, 等. 贵州省典型铅锌矿区土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 地球与环境, 2022, 50: 506.

[4] 张永康, 冯乃琦, 张耀, 等. 某铜铅锌多金属矿区土壤重金属污染评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021, 09: 97.

[5] 吴劲楠, 龙健, 刘灵飞, 等. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38: 1054.

[6] Zhao X Q, Huang J, Lu J, *et al.* Study on the influence of soil microbial community on the long-term heavy metal pollution of different land use types and depth layers in mine [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 170: 218.

[7] 李亚静, 黄庭, 谢哲宇, 等. 非正规垃圾填埋场土壤和地下水重金属污染特征与评价[J]. 地球与环境, 2019, 47: 361.

[8] Falagan C, Grail B M, Johnson D B. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings [J]. *Miner Eng*, 2017, 106: 71.

[9] 邓海, 王锐, 严明书, 等. 矿区周边农田土壤重金属污染风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40: 1127.

[10] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 等. 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, 2022, 43: 2104.

[11] 李志涛, 王夏晖, 何俊, 等. 四川省江安县某硫铁矿周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 8: 1272.

[12] 毛志强, 田康, 刘本乐, 等. 广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40: 987.

[13] 陕永杰, 张磊. 塔儿山铁矿区土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 环境工程, 2016, 34: 141.

[14] 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 等. 多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析[J]. 环境科学, 2021, 42: 1105.

[15] 何宇, 洪欣, 闭潇予, 等. 九洲江流域水环境重金属污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2021, 40: 240.

[16] 尚婷婷, 张亚群, 周静, 等. 多元统计分析在农田土壤重金属污染源解析中的应用[J]. 环境生态学, 2022, 4: 93.

[17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control asedimentological approach [J]. *Water Res*, 1980, 14: 975.

[18] MüllerG. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2: 108.

[19] 才项措毛, 周强, 毛旭烽, 等. 高原城市梯级湿地底泥重金属时空分布及生态风险评估[J]. 安徽农业科学, 2020, 48: 88.

[20] 高月, 孙荣国, 叶彩, 等. 贵州省丹寨县某铅锌矿区土壤重金属污染生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2020, 9: 928.

[21] 冯乾伟, 王兵, 马先杰, 等. 黔西北典型铅锌矿区土壤重金属污染特征及其来源分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39: 863.

[22] 刘劲松, 胡俊良, 张鲲, 等. 柿竹园矿区及周边农田土壤重金属形态分布与生物有效性研究[J]. 金属矿山, 2018, 11: 155.

[23] 熊秋林, 肖红伟, 程朋根, 等. 北京表层土壤重金属污染分布及大气沉降贡献[J]. 生态环境学报, 2021, 30: 816.

[24] 尹芳, 封凯, 尹翠景, 等. 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, 2021, 41: 5217.

[25] 张之才, 农泽喜, 唐茜, 等. 广西某铅锌矿区农田土壤重金属污染调查与防控策略[J]. 广州化工, 2021, 49: 114.

[26] 徐玉霞, 汪庆华, 彭囡凯, 等. 宝鸡市麟游县煤矿区周边农田土壤重金属污染安全评价[J]. 环境保护, 2017, 43: 145.

引用本文格式:

中 文: 常凯威, 邵啸, 杨韬, 等. 川南地区某硫铁矿废渣堆周边农田土壤重金属污染水平及源解析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2023, 60: 036002.

英 文: Chang K W, Shao X, Yang T, *et al.* Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in farmland soil around a pyrite slag heap in Southern Sichuan Province [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2023, 60: 036002.