

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.010

贵州丹寨县铅锌矿区小流域土壤 重金属污染特征及生态风险评价

江丽,钟九生,黄国金,段纪维,敖成欢

(贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550001)

摘要:为探究贵州丹寨县铅锌矿区矿业活动对土壤系统运转对环境的影响,以丹寨县兴仁镇铅锌矿区土壤为研究对象,采集小流域内河流周边不同土地利用类型土壤表层(0~20 cm)的样品,分析测定土壤中Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Hg、As 7种重金属含量。应用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地质累积指数法、潜在生态指数法对矿区不同土壤层重金属进行污染程度和潜在生态风险进行评价。结果表明,0~10 cm土壤中Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Hg、As含量分别是贵州省土壤背景值的0.65、5.13、1.74、2.45、0.59、5.08、0.27倍。10~20 cm土壤中Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Hg、As含量分别是贵州省土壤背景值的0.71、3.11、1.18、2.21、0.65、4.88、0.21倍。不同小流域与不同深度土层危害程度有所差异,通过评价结果得出研究区主要污染重金属元素为Cd、Hg,土壤重金属处于中等及以上潜在生态危害程度。

关键词:铅锌矿区;小流域;土壤重金属;生态风险

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0057-08

Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soils in Small Watershed of Lead-Zinc Mine in Danzhai County, Guizhou Province

JIANG Li, ZHONG Jiu-sheng, HUANG Guo-jin, DUAN Ji-wei, AO Cheng-huan

(School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: In order to explore impact of mining activities on operation of soil system in lead-zinc mining area of Danzhai county, Guizhou province, soil of lead-zinc mining area in Xingren town, Danzhai county was taken as research object, and soil surface layers (0~20 cm) of different land use types around rivers in small watersheds were collected. Contents of 7 heavy metals Cu, Cd, Pb, Zn, Mn, Hg, As in soil samples were analyzed. Pollution degree and potential ecological risk of heavy metals in different soil layers in the mining area were evaluated through single-factor pollution index method, Nemeiro comprehensive pollution index method, geological accumulation index method, and potential ecological index method. The results show that contents of Cu, Cd, Pb, Zn, Mn, Hg and As in 0—10 cm soil are 0.65, 5.13, 1.74, 2.45, 0.59, 5.08, and 0.27 times of the soil background value in Guizhou province. Contents of Cu, Cd, Pb, Zn, Mn, Hg, and As in 10—20 cm soil are 0.71, 3.11, 1.18, 2.21, 0.65, 4.88, and 0.21 times of the soil background value in Guizhou province. Different small watersheds and different depths of soil layers have different levels of damage. The

收稿日期:2020-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41661081)

作者简介:江丽(1994-),女,贵州遵义人,硕士研究生;通信作者:钟九生(1984-),男,江西兴国人,博士,副教授

evaluation results show that the main polluting heavy metal elements in study area are Cd and Hg, and the soil heavy metals are at a medium or above potential ecological hazard level.

Key words: lead-zinc mining area; small watershed; soil heavy metal; ecological risk

土壤既是生产食物的场所,同时也是大量污染物的接纳场所,污染物质进入土壤后造成土壤污染,并在循环过程中造成水、大气和生物体污染,从而危害人类健康^[1-2]。在对自然矿产资源的开采过程中不仅给周边的环境带来各种土壤重金属污染问题,且冶炼过程排放的工业三废也会污染周边的自然环境^[3]。尾矿通过降水从而进入矿区地表径流,污染河流水质,下游以污染的河水进行灌溉,进一步污染土壤导致农作物减产^[4]。

近年来,有不少学者开展对铅锌矿土壤重金属生态风险评价研究。黄顺红等^[5]以潜在生态风险评价湖南某铅锌冶炼厂周边土壤中的 Cd、Pb、As;张广胜等^[6]对广东省丰顺县尖笔崇铅锌矿还未开采的铅锌矿周边土壤中的重金属进行生态安全评价;周艳等^[7]对西南某铅锌矿区周边农田土壤进行生态风险评价;陆泗进等^[8]以多种评价方法对会泽某铅锌矿周边农田土壤环境质量进行了相关评价;吴劲楠等^[9]基于土地利用类型对云南者海典型铅锌矿区周边土壤重金属含量进行相关分析与评价。杨文刚^[10]以小流域为研究单元对黄土丘陵沟壑区土壤重金属的风险进行评价。

某研究区的铅锌矿厂至今仍进行开采与冶炼活动,对其周边土壤与水体污染特征及风险目前仍未知。因此,有必要对铅锌尾矿库周边土壤重金属的污染程度进行评价。文中以小流域为评价单元对研究区某铅锌矿区及周边土壤中 7 种重金属污染状况进行风险评估,探讨铅锌矿周边土壤重金属空间含量分布特征,为铅锌矿区土壤重金属污染防治与修复提供科学依据。

1 研究区概况及土地利用空间分布

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省丹寨县北部兴仁镇某铅锌矿区,地处长江、珠江两流域的分水岭,以黄壤为主,海拔 600~1 320 m。年均气温 12.6~17.2℃,年均降雨量 1 230 mm,属亚热带季风性湿润气候。其境内分布着铅、锌、煤、铁、磷、重晶石等矿产资源^[11],根据 1:500 万中国铅锌矿分布图,在丹寨县兴仁镇存储大量铅锌矿,该矿于 2005 年至今仍进行开采及冶炼活动。

1.2 小流域与土地里利用空间分布

以 2017 年资源 3 号卫星遥感影像并参考贵州省国情普查丹寨县数据,提取研究区土地利用现状数据,结果得出兴仁镇土地利用空间分布以林地为主,其面积 115.19 km²;其次是旱地与水田,面积分别为 32.13、27.77 km²。

以 1:50 000 地形图人工提取地形图水系要素,参照《小流域划分及编码规范(SL 653—2013)》,以地形图为基础结合遥感影像进行小流域勾划进行人工划分小流域划分,将小流域划分为区间型、坡面型、完整型小流域,对小流域进行编号,兴仁镇划分小流域 16 条,依次编号为 1 至 16。采样点根据兴仁镇水流方向及铅锌矿点所在区域结合划分的小流域,共选取 7 个具有代表性的采样点。以小流域为一个分析单元,对铅锌矿所在小流域结合兴仁镇土地利用现状选取采样点,S1 是当地农业养殖区域,S3 为尾矿堆积区的农田,S2 和 S4 为尾矿堆积区,S5 为与铅锌矿相邻流域上游,S6 为村寨,S7 为人口密集区河流,分析铅锌矿开采冶炼过程中,对周边一定范围土壤污染程度,根据水流方向采样分析河流上游土壤与下游土壤重金属含量,探讨重金属随地表径流作用的迁移情况。

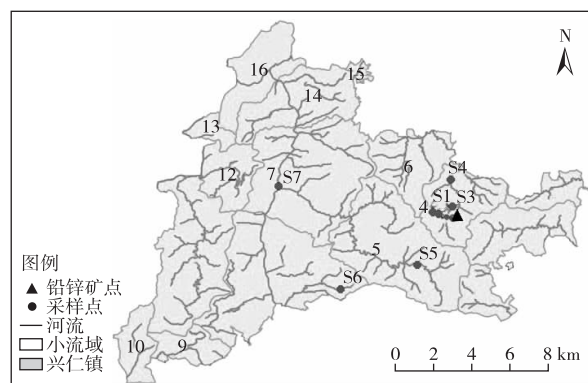


图 1 兴仁镇小流域与河流及采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of small watershed, rivers and sampling points in Xingren town

2 土壤样品采集与处理

本研究于 2019 年 4 月利用柱状采泥器在研究区采集 0~10 cm 和 10~20 cm 深度的土壤样品;24 h 内运回实验室自然风干后,用玻璃棒压散,剔除大小砾石、贝壳和动植物残体等杂质,研磨过 200 目筛待

测。采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-H}_2\text{O}_2$ 湿法消解,原子吸收法(仪器 WFX-210)测定 Pb、Zn、Mn、Cu 和 Cd 总量,用体积百分数 50%王水浸提后采用原子荧光法(仪器 AFS-230E)测定 Hg 和 As 总量^[12]。进行全程试剂空白以减少试剂误差、确保试验结果的准确性和精密性;同批次抽取 10%的样品进行平行样测定,相对标准偏差控制在 $\leq 5\%$;同步分析土壤参比物质(GSS-8),各元素相对误差控制在 $\leq 10\%$ ^[13];重金属的回收率为 86%~128%。

3 污染评价方法

分别采用单因子污染指数 P_i ^[14]、内梅罗综合污染指数 P_n ^[15]、地质累积指数 I_{geo} ^[16-17]、潜在生态风险系数 E_r^i 和综合潜在生态风险指数 RI 来评价土壤重金属污染程度和潜在生态风险。其中,单因子污染指数法中采用贵州省土壤重金属背景值^[14],综合潜在生态风险指数法中 Pb、Zn、Mn、Cu、Cd 和 Hg 的毒性响应参数分别为 5.00、1.00、1.00、5.00、40.0 和 30.0^[12],以贵州省土壤重金属背景值为参考值^[18-20]。潜在生态风险分级标准见文献[21-22]。

4 结果与分析

4.1 土壤重金属含量统计特征

丹寨县兴仁镇铅锌矿区 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤中重金属含量统计结果见表 1。0~10 cm 土壤中 Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Hg、As 含量分别为 15.22~37.21、0.83~10.01、25.50~85.93、63.67~419.95、227.26~814.38、0.23~1.13、3.48~11.71 mg/kg,平均值分别为 20.78、3.39、61.28、244.01、470.63、0.56、5.4 mg/kg,分别是贵州省土壤背景值的

0.65、5.13、1.74、2.45、0.59、5.08、0.27 倍。10~20 cm 土壤中 Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Hg、As 含量分别为 16.57~34.31、1.20~3.29、24.46~46.89、70.13~422.83、252.05~921.78、0.20~0.93、2.38~8.74 mg/kg,平均值分别为 22.66、2.05、41.46、219.59、515.61、0.54、4.26 mg/kg,分别是贵州省土壤背景值的 0.71、3.11、1.18、2.21、0.65、4.88、0.21 倍。从表 1 可见,不同小流域内土壤不同剖面发生层与各采样点重金属浓度有一定差异;研究区 0~10 cm 与 10~20 cm 土壤中 Cu 含量较高为 8 号小流域内 S6 采样点,分别为 37.21、34.31 mg/kg;0~10 cm 与 10~20 cm 土壤中 Cd 含量较高为 4 号小流域内 S1 采样点,分别为 10.01、3.29 mg/kg;0~10 cm 土壤中 Pb 含量较高为 4 号小流域内 S1 采样点 85.93 mg/kg,10~20 cm 土壤中 Pb 含量较高为 4 号小流域内 S3 采样点 68.36 mg/kg;0~10 cm 与 10~20 cm 土壤中 Zn 含量较高为 4 号小流域内 S3 采样点,分别为 623.94、607.99 mg/kg;0~10 cm 土壤中 Mn 含量较高为 7 号小流域内 S7 采样点 814.38 mg/kg,10~20 cm 土壤中 Mn 含量较高为 4 号小流域内 S1 采样点 921.78 mg/kg;0~10 cm 土壤中 Hg 含量较高为 7 号小流域内 S7 采样点 1.13 mg/kg,10~20 cm 土壤中 Hg 含量较高为 4 号小流域内 S4 采样点 0.93 mg/kg;0~10 cm 土壤中 As 含量较高为 4 号小流域内 S1 采样点 11.71 mg/kg,10~20 cm 土壤中 As 含量较高为 4 号小流域内 S4 采样点 8.74 mg/kg。铅锌矿所在的 4 号小流域采样点土壤中 Pb 含量比其他小流域采样点高,土壤中 Zn 含量在 S3、S2 高于其他采样点。可见,铅锌矿的开采过程中改变土壤中 Pb、Zn 含量具有小流域性质。

表 1 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤中重金属含量统计表
Table 1 Statistical table of heavy metals in 0—10 cm and 10—20 cm soil /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

采样点	项目	Cu		Cd		Pb		Zn		Mn		Hg		As	
		0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~
		10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
S1	平均值	15.86	17.46	10.01	3.29	85.93	44.47	63.67	70.13	727.23	921.78	0.46	0.50	11.71	4.47
	标准偏差	0.68	0.86	0.55	0.20	0.36	1.00	0.76	8.16	9.58	10.35	0	0.01	0.68	0.13
S2	平均值	15.22	18.18	1.65	1.46	63.16	42.10	419.95	422.83	227.26	252.05	0.35	0.37	4.50	3.59
	标准偏差	1.54	0.94	0.21	0.13	2.25	1.29	6.99	6.82	10.30	24.06	0.01	0.03	0.19	0.38
S3	平均值	16.63	18.81	1.34	2.23	52.94	25.48	92.61	80.23	459.39	551.41	0.23	0.20	3.48	2.38
	标准偏差	1.28	0.78	1.12	0.13	16.55	0.87	10.28	3.86	16.50	19.73	0	0.06	0.39	0.26
S4	平均值	15.85	16.57	3.08	1.20	74.57	46.89	148.91	123.29	572.36	485.71	0.62	0.93	5.59	8.74
	标准偏差	0.37	1.26	0.06	0.14	5.40	0.82	0.62	10.92	7.93	8.77	0.01	0.02	0.16	0.15
S5	平均值	16.63	18.81	1.34	2.23	52.94	25.48	92.61	80.23	459.39	551.41	0.23	0.20	3.48	2.38
	标准偏差	1.28	0.78	1.12	0.13	16.55	0.87	10.28	3.86	16.50	19.73	0	0.06	0.39	0.26
S6	平均值	37.21	34.31	4.97	2.18	25.50	24.46	156.27	112.88	290.17	280.71	0.35	0.25	5.39	3.42
	标准偏差	1.07	2.08	0.64	0.14	1.18	0.82	6.62	4.90	9.02	9.83	0.04	0.02	0.24	0.15
S7	平均值	23.69	24.42	0.83	2.45	49.79	38.43	202.74	119.75	814.38	903.29	1.13	0.79	4.19	3.86
	标准偏差	0.30	0.64	0.15	0.05	8.19	1.55	13.34	4.21	7.77	2.33	0.12	0.21	0.45	0.78

4.2 土壤重金属相关性分析

为能判定土壤中不同重金属的来源是否相似,对土壤中重金属元素含量进行相关性分析^[23]。通过对采样点土壤中0~10 cm与10~20 cm重金属元素含量进行相关性分析,得出Cu和Pb呈负相关,As与Cd呈正相关(表2);Mn与Cd呈正相关(表3)。

4.3 单因子与内梅罗指数法评价

表4为0~10 cm和10~20 cm土壤重金属单因子污染指数评价结果。在0~10 cm土壤层Cu的 P_i 值在0.48~1.16,其中S6为轻度污染,其余采样点属清洁;Cd的 P_i 值在1.26~15.17,其中S1、S4、S6为重度污染,其余采样点属中污染;Pb的 P_i 值在0.72~2.44,其中4号小流域3的采样点位重度污染,其余采样点属轻度污染;Zn的 P_i 值在0.64~

表2 0~10 cm土壤重金属元素之间的
person相关性系数

Table 2 Person correlation coefficient between
heavy metal elements of 0—10 cm soil

元素	Cu	Cd	Pb	Zn	Mn	Hg	As
Cu	1						
Cd	0.035	1					
Pb	-0.803*	0.305	1				
Zn	-0.049	-0.451	0.220	1			
Mn	-0.206	0.288	0.187	-0.659	1		
Hg	0.071	-0.296	0.123	0.260	0.469	1	
As	-0.167	0.949**	0.408	-0.532	0.494	-0.187	1

注: * 在0.05水平(双侧)上显著相关, ** 在0.01水平(双侧)上显著相关

表4 0~10 cm和10~20 cm土壤重金属单因子污染指数评价

Table 4 Single factor pollution index evaluation of 0—10 cm and 10—20 cm soil heavy metals

采样点	Cu		Cd		Pb		Zn		Mn		Hg		As	
	0~ 10 cm	10~ 20 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm	0~ 10 cm	10~ 20 cm
S1	0.50	0.55	15.17	4.99	2.44	1.26	0.64	0.70	0.92	1.16	4.16	4.56	0.59	0.22
S2	0.48	0.57	2.50	2.21	1.79	1.20	4.22	4.25	0.29	0.32	3.19	3.41	0.23	0.18
S3	0.66	0.90	2.78	2.36	2.19	1.94	6.27	6.11	0.26	0.27	6.97	6.40	0.15	0.17
S4	0.50	0.52	4.66	1.81	2.12	1.33	1.50	1.24	0.72	0.61	5.63	8.46	0.28	0.44
S5	0.52	0.59	2.02	3.37	1.50	0.72	0.93	0.81	0.58	0.69	2.14	1.81	0.17	0.12
S6	1.16	1.07	7.53	3.30	0.72	0.69	1.57	1.13	0.37	0.35	3.21	2.31	0.27	0.17
S7	0.74	0.76	1.26	3.72	1.41	1.09	2.04	1.20	1.03	1.14	10.28	7.18	0.21	0.19
平均值	0.65	0.71	5.13	3.11	1.74	1.18	2.45	2.21	0.59	0.65	5.08	4.88	0.27	0.21
危害程度	清洁	清洁	重度 污染	重度 污染	轻度 污染	轻度 污染	中度 污染	中度 污染	清洁	清洁	重度 污染	重度 污染	清洁	清洁

表3 10~20 cm土壤重金属元素之间的
person相关性系数

Table 3 Person correlation coefficient between
heavy metal elements of 10—20 cm soil

元素	Cu	Cd	Pb	Zn	Mn	Hg	As
Cu	1						
Cd	-0.004	1					
Pb	-0.043	-0.326	1				
Zn	0.232	-0.547	0.748	1			
Mn	-0.397	0.755*	-0.188	-0.658	1		
Hg	-0.176	-0.300	0.639	0.146	0.238	1	
As	-0.406	-0.374	0.245	-0.216	0.102	0.714	1

注: * 在0.05水平(双侧)上显著相关

6.27, S2、S3重度污染, S7中度污染, S4、S6轻度污染, S1、S5清洁; Mn的 P_i 值在0.26~1.03, 其中S7轻度污染, 其余采样点属清洁; Hg的 P_i 值在2.14~10.28, S5为中度污染, 其余采样点为重度污染; As的 P_i 值在0.15~0.59, 所有采样点都属清洁。10~20 cm土壤层各重金属的 P_i 平均值Cu、Mn比0~10 cm的 P_i 平均值高, 其余重金属的 P_i 平均值低于0~10 cm的 P_i 平均值。

表5为土壤重金属内梅罗污染指数评价结果。从表5可以看出, 土壤中7种重金属的 P_n 平均值在0.40~7.75, 其中Cd、Zn、Hg为重度污染, Pb为轻度污染, Cu、Mn为尚清洁, As为清洁。由单因子及内梅罗指数法都得出应加强对研究区土壤中Cd、Pb、Zn、Hg的综合治理与防治。

表 5 土壤重金属内梅罗污染指数评价

Table 5 Nemero pollution index evaluation of soil heavy metals

内梅罗污染指数法	Cu	Cd	Pb	Zn	Mn	Hg	As
0~10 cm	0.94	11.33	2.12	4.76	0.84	8.11	0.46
10~20 cm	0.91	4.16	1.61	4.59	0.94	6.91	0.34
平均值	0.93	7.75	1.87	4.68	0.89	7.51	0.40
危害程度	尚清洁	重度污染	轻度污染	重度污染	尚清洁	重度污染	清洁

4.4 地质累积指数法

以地质累积指数法采样点不同土壤层 0~10 cm 与 10~20 cm 土壤重金属进行评价,结果见表 6。在 0~10 cm 土壤层中 I_{geo} 平均值在 -2.61~1.58, 其中 Cd、Hg 为轻度污染,Pb、Zn 为轻微污染,Cu、Mn、As 为无污染。在 10~20 cm 土壤层中 I_{geo} 平均值在 -2.93~1.50,其中 Hg 为轻度污染,Cd、Zn 为轻微污染,Cu、Pb、Mn、As 为无污染。可见,不同土壤层中 0~10 cm 各重金属 I_{geo} 平均值低于 10~20 cm,

在铅锌矿区土壤中各重金属元素出现不断累积。4 号小流域内 S1~S4 采样点土壤层中 Pb 在 0~10 cm 都出现不同程度的污染,在 10~20 cm 中只有 S3 采样点出现污染。Cd 是典型的分散元素,通常伴生在铅锌矿床中,其具有亲疏性,常被固定或吸附在土壤的固相中^[24],在铅锌矿不合理的开采过程是导致土壤中 Cd 污染的直接因素。因铅锌矿开采,在流水作用和土壤侵蚀、搬运、沉积过程,导致采样点 Cd、Pb 重金属元素的 I_{geo} 值 0~10 cm 高于 10~20 cm。

表 6 0~10 cm 和 10~20 cm 铅锌矿区土壤重金属地质累积指数法评价

Table 6 Geological accumulation index evaluation of soil heavy metals in 0-10 cm and 10-20 cm lead-zinc mine area

采样点	Cu		Cd		Pb		Zn		Mn		Hg		As	
	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
S1	-1.60	-1.46	3.34	1.73	0.70	-0.25	-1.23	-1.09	-0.71	-0.37	1.47	1.61	-1.36	-2.75
S2	-1.66	-1.40	0.74	0.56	0.26	-0.33	1.49	1.50	-2.39	-2.24	1.09	1.18	-2.74	-3.06
S3	-1.19	-0.73	0.89	0.65	0.55	0.37	2.06	2.03	-2.55	-2.47	2.22	2.09	-3.36	-3.17
S4	-1.60	-1.53	1.64	0.27	0.50	-0.17	0.00	-0.28	-1.06	-1.29	1.91	2.50	-2.42	-1.78
S5	-1.53	-1.35	0.43	1.17	0.00	-1.05	-0.69	-0.90	-1.37	-1.11	0.51	0.27	-3.11	-3.65
S6	-0.37	-0.48	2.33	1.14	-1.05	-1.11	0.07	-0.40	-2.04	-2.09	1.10	0.62	-2.48	-3.13
S7	-1.02	-0.97	-0.25	1.31	-0.08	-0.46	0.44	-0.32	-0.55	-0.40	2.78	2.26	-2.84	-2.96
平均值	-1.28	-1.13	1.30	0.98	0.12	-0.43	0.31	0.08	-1.52	-1.42	1.58	1.50	-2.61	-2.93
危害程度	无污染	无污染	轻度污染	轻微污染	轻微污染	无污染	轻微污染	轻微污染	无污染	无污染	轻度污染	轻度污染	无污染	无污染

4.5 采用潜在生态指数(RI)法

表 7 为 0~10 cm 和 10~20 cm 铅锌矿区土壤重金属潜在生态风险评价结果。从表 7 可见,根据 E_i^* 值,0~10 cm 所有采样点附近的土壤单项潜在生态风险系数为 $Cd > Hg > Pb > Mn > As > Zn > Cu$ 。Cd 的单项潜在风险最大,S1、S6 单项潜在生态风险处于高生态风险等级,其次 Hg 的潜在生态风险程度较高,S3、S4、S7 处于高生态风险等级。10~20 cm 所有采样点附近的土壤单项潜在生态风险系数 $Hg > Cd > Pb > Mn > Zn > As > Cu$ 。Hg 的单项潜在风险最大,S3、S4、S7 单项潜在生态风险处于高生态风

险等级,其次 Cd 的潜在生态风险程度较高,S1、S7 处于高生态风险等级。

土壤中 0~10 cm 的 S1 采样点 $RI > 600$,表现出较高的潜在生态风险趋势,土壤中 10~20 cm 的所有采样点 $RI < 600$,没有较高的潜在生态风险趋势采样点。从不同采样点区域的单项潜在生态风险与综合潜在生态风险结果来看,应加强对研究区域的 Hg、Cd 重点治理,铅锌矿所在的小流域内 Pb、Zn 的重点治理,加强对 S1 采样点周边土壤中重金属的综合治理,及其他采样点小流域内土壤重金属综合治理与防治。

表7 0~10 cm 和 10~20 cm 铅锌矿区土壤重金属潜在生态风险评价

Table 7 Potential ecological risk assessment of heavy metals in
0—10 cm and 10—20 cm lead-zinc mining area

采样点	重金属潜在生态风险系数(E_i)																RI		危害程度	
	Cu		Cd		Pb		Zn		Mn		Hg		As							
	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~	0~	10~
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
S1	0.50	0.55	606.84	199.51	12.21	6.32	0.64	0.70	4.58	5.80	124.77	136.90	5.86	2.23	755.39	352.01	极强	强		
S2	0.48	0.57	100.15	88.54	8.97	5.98	4.22	4.25	1.43	1.59	95.80	102.17	2.25	1.80	213.30	204.90	中等	中等		
S3	0.66	0.90	111.26	94.47	10.95	9.71	6.27	6.11	1.28	1.35	209.01	192.06	1.46	1.67	340.89	306.27	强	强		
S4	0.50	0.52	186.60	72.48	10.59	6.66	1.50	1.24	3.60	3.06	168.85	253.84	2.80	4.37	374.43	342.16	强	强		
S5	0.52	0.59	80.91	134.91	7.52	3.62	0.93	0.81	2.89	3.47	64.06	54.37	1.74	1.19	158.58	198.96	中等	中等		
S6	1.16	1.07	301.25	132.19	3.62	3.47	1.57	1.13	1.83	1.77	96.41	69.23	2.69	1.71	408.53	210.58	强	中等		
S7	0.74	0.76	50.44	148.77	7.07	5.46	2.04	1.20	5.13	5.69	308.50	215.50	2.10	1.93	376.01	379.32	强	强		
平均值	0.65	0.71	205.35	124.41	8.70	5.89	2.45	2.21	2.96	3.25	152.49	146.30	2.70	2.13	375.30	284.89	强	中等		
危害程度	轻微	轻微	很强	强	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	强	强	轻微	轻微	强	中等				

5 结论

在铅锌矿区 0~10 cm 与 10~20 cm 土壤中层中, Cu、Cd、Pb、Zn、Mn、Hg、As 平均含量差异较大, 其中 Cd、Pb、Zn、Hg 的平均含量均显著高于贵州土壤背景值。不同深度土壤层评价结果表明, 不同小流域与不同土壤层危害程度有所差异。单因子与内梅罗综合污染指数法评价结果表明, 0~10 cm 与 10~20 cm 土壤层中 Cd、Hg 重污染, Pb 轻污染; Zn 单因子评价为中污染, 内梅罗综合污染指数评价为重污染。地质累积指数法评价结果表明, 0~10 cm 土壤层 Cd、Hg 为轻度污染, Pb、Zn 为轻微污染, 在 10~20 cm 土壤层中 Hg 为轻度污染, Cd、Zn 为轻微污染。潜在风险生态指数法评价发现, 铅锌矿区土壤中 Cd、Hg 潜在风险最大, 为最高生态风险等级, 其余土壤重金属处于中等及以上潜在生态危害程度。

参考文献

- [1] 叶俊, 任大军, 张晓晴, 等. 中国部分林地土壤重金属含量特征及污染评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2507-2514.
YE J, REN D J, ZHANG X Q, et al. Heavy metal contents distribution and contamination assessment in some Chinese forest soils[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6): 2507-2514.
- [2] 杨奇勇, 谢运球, 罗为群, 等. 基于地统计学的土壤重金属分布与污染风险评价[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 248-254.
YANG Q Y, XIE Y Q, LUO W Q, et al. Spatial distribution and soil pollution risk evaluation of soil

heavy metals content based on geostatistics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 248-254.

- [3] 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(3): 1054-1063.
WU J N, LONG J, LIU L F, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area [J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1054-1063.
- [4] 梁雅雅, 易筱筠, 党志, 等. 铅锌尾矿库对周围环境重金属污染风险评价指标的建立及方法[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1772-1780.
LIANG Y Y, YI X Y, DANG Z, et al. Methods and indices for risk assessment of heavy metal pollution surrounding Pb-Zn tail-ing ponds [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1772-1780.
- [5] 黄顺红, 杨伊, 李倩, 等. 铅锌矿区土壤重金属空间分布及生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 186-192.
HUANG S H, YANG Y, LI Q, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil around lead-zinc mining area [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(2): 186-192.
- [6] 张广胜, 徐文彬, 李俊翔, 等. 一个未开采的铅锌矿周边土壤重金属含量及生态安全评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 522-528.
ZHANG G S, XU W B, LI J X, et al. Heavy metals pollution and eco-security evaluation in the surrounding soil of an untapped lead-zinc mining [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 522-528.

- [7] 周艳,陈楠,邓绍坡,等.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,2018,39(6):2884-2892.
ZHOU Y, CHEN Q, DENG S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb-Zn mine in Southwestern[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2884-2892.
- [8] 陆泗进,王业耀,何立环.会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属风险评价研究[J].中国环境监测,2015,31(6):77-82.
LU S J, WANG Y Y, HE L H. Ecological and health risk of heavy metals in soils near a Pb-Zn mine in Huize county[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(6): 77-82.
- [9] 吴劲楠,龙健,刘灵飞,等.典型铅锌矿化区不同土地利用类型土壤重金属污染特征与评价[J].地球与环境,2018,46(6):561-570.
WU J N, LONG J, LIU L F, et al. Characterization and assessment of the heavy metal pollution in soils of different land use patterns around a typical lead-zinc mineralization area[J]. Earth and Environment, 2018, 46(6): 561-570.
- [10] 杨文刚.生态建设小流域土壤重金属迁移—沉积过程及其生态风险评价[D].西安:西安理工大学,2018.
YANG W G. Soil heavy metal migration-deposition process and ecological risk assessment in a small watershed of ecological construction[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [11] 黔东南统计局.黔东南统计年鉴—2017[M].贵阳:中国文化出版社,2017.
Qiandongnan Statistical Bureau. Qiandongnan Statistical Yearbook: 2017[M]. Guiyang: China Culture Press, 2017.
- [12] 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,2020,39(3):928-936.
GAO Y, SUN R G, YE C, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in soil of a lead-zinc mine area in Danzhai county, Guizhou province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 928-936.
- [13] 黄华斌,林承奇,胡恭任,等.基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析[J].环境科学,2020,41(1):430-437.
HUANG H B, LIN C Q, HU G R, et al. Source appointment of heavy metals in agricultural soils of the Jiulong River basin based on positive matrix factorization[J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 430-437.
- [14] 庞文品,秦樊鑫,吕亚超,等.贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估[J].应用生态学报,2016,27(5):1468-1478.
PANG W P, QIN F X, LYU Y C, et al. Chemical speciations of heavy metals and their risk assessment in agricultural soils in a coal mining area from Xingren county, Guizhou province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1468-1478.
- [15] 赵斌,朱四喜,杨秀琴,等.贵州草海菜地表层土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].生态环境学报,2018,27(04):776-784.
ZHAO B, ZHU S X, YANG X Q, et al. Characteristics of heavy metals pollution and ecological risk assessment of the surface soils in the vegetable fields around Caohai in Guizhou[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(4): 776-784.
- [16] 蔡芸霜,张建兵,陆双龙,等.涠洲岛土壤重金属分布特征及风险评价[J].江苏农业科学,2020,48(2):247-256.
CAI Y S, ZHANG J B, LU S L, et al. Distribution and risk assessment of soil heavy metals in Weizhou Island[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(2): 247-256.
- [17] 宋波,刘畅,陈同斌.广西土壤和沉积物砷含量及污染分布特征[J].自然资源学报,2017,32(4):654-668.
SONG B, LIU C, CHEN T B. Contents and pollution distribution characteristics of arsenic in soils and sediments in Guangxi Zhuang Autonomous region[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 654-668.
- [18] 陈凤,董泽琴,王程程,等.锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J].环境科学,2017,38(10):4360-4369.
CHEN F, DONG Z Q, WANG C C, et al. heavy metal contamination of soils and crops near a zinc smelter[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4360-4369.
- [19] 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.
China Environmental Monitoring Station. Background Value of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [20] 高庚申,陈婷婷,迟峰,等.贵州某废弃铝厂土壤重金属污染特征及风险评价[J].有色金属工程,2020,10(7):124-130.
GAO G S, CHEN T T, CHI F, et al. heavy metals contamination and risk assessment of surface soils in an abandoned aluminum plant, Guizhou provine [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7): 124-130.
- [21] 熊秋林,赵佳茵,赵文吉,等.北京市地表土重金属污染特征及潜在生态风险[J].中国环境科学,2017,37(6):

2211-2221.

XIONG Q L, ZHAO J Y, ZHAO W J, et al. Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in topsoil of Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2211-2221.

- [22] 李武江, 朱四喜. 某矿区农田土壤重金属分布特征与生态风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(3): 93-101.

LI W J, ZHU S X. Spatial distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soil of a mining area[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(3): 93-101.

- [23] 何海星, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 厦门西港近岸沉积物重金

属污染历史及源解析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(4): 1045-1051.

HE H X, YU R L, HU G R, et al. Pollution history and source of heavy metals in coastal sediments from Xiamen Western Bay[J]. China Environmental Science, 2014, 34(4): 1045-1051.

- [24] 张志毅, 黄丽, 卢胜, 等. 2种母岩发育的地带性土壤中粘土矿物的组成特点[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(3): 51-58.

ZHANG Z Y, HUANG L, LU S, et al. Characteristics of clay minerals in the zonal soil from two kinds of parent rock [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(3): 51-58.

(上接第 56 页)

- [11] 贾建丽, 李广贺, 张旭, 等. 基于 PCR-DGGE 技术的石油污染土壤微生物多态性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(9): 1217-1220.

JIA J L, LI G H, ZHANG X, et al. Microbial communities in petroleum polluted soils by PCR-DGGE[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(9): 1217-1220.

- [12] 顾美英, 刘洪亮, 李志强, 等. 新疆连作棉田施用生物炭对土壤养分及微生物群落多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20): 4128-4138.

GU M Y, LIU H L, LI Z Q, et al. Impact of biochar application on soil nutrients and microbial diversities in continuous cultivated cotton fields in Xinjiang [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(20): 4128-4138.