

雅安某废弃铅锌矿及周边区域土壤和地下水环境风险分析

鲜 杨^{1,2}, 周芙蓉^{1,2}, 唐鹤溪^{1,2}, 尤 青¹

(1. 四川省自然资源实验测试研究中心(四川省核应急技术支持中心), 成都 610084;

2. 稀有稀土战略资源评价与利用四川省重点实验室, 成都 610000)

摘要:为探究某废弃铅锌矿山及周边区域土壤和地下水的环境风险,以矿山历史开采区内及周边土壤、矿山上下游地下水中的砷、汞、镍、镉、铬、铜、铅、锌重金属为研究对象,采用单因子污染指数法及潜在生态风险评价等方法对重金属含量进行评价。结果表明,土壤受到明显污染,砷、镉、铅、锌污染较严重,主要超标原因可能为矿山开采过程中历史上环境措施不到位,且区域本底值较高。地下水含量未超标。废弃矿山生态风险存在,建议废弃矿山应尽快进行治理修复,地下水应做好长期监测。为废弃矿山后续的治理修复提供理论依据。

关键词:废弃矿山;铅锌矿;土壤;地下水;重金属;污染;生态风险

中图分类号:TD167

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2024)02-0115-05

Environmental risk analysis of soils and ground water in an abandoned Pb-Zn mine and its surrounding areas in Ya'an

XIAN Yang^{1,2}, ZHOU Furong^{1,2}, TANG Hexi^{1,2}, YOU Qing¹

(1. Sichuan Experimental Testing and Research Center of Natural Resources

(Sichuan Nuclear Emergency Technical Support Center), Chengdu 610084, China;

2. Evaluation and Utilization of Strategic Rare Metals and Rare Earth Resource Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610000, China)

Abstract: To investigate the environmental risk of soils and groundwater in an abandoned Pb-Zn Mine and its surrounding areas. The heavy metals As, Hg, Ni, Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn of soils and groundwater in an abandoned Pb-Zn Mine and its surrounding areas were determined. The single factor pollution index method and potential ecological risk assessment were employed to analyze the effects of abandoned Pb-Zn Mine and its surrounding areas on the concentrations of heavy metals in the soil. The results indicate that soil had been significantly polluted. As, Cd, Pb, and Zn were severely polluted. The main reason for exceeding the standard was inadequate environmental measures in the mining process, and the regional background value was relatively high. The groundwater content did not exceed the standard. The ecological risks exist in abandoned mines, it is recommended that abandoned mines be treated and repaired as soon as possible, and long-term monitoring of groundwater should be carried out. The significance of the research was to provide the theoretical basis for the subsequent treatment and restoration of abandoned mines.

Key words: abandoned mines; Pb-Zn mine; soil; ground water; heavy metals; pollution; ecological risk

铅锌矿是我国重要的矿产资源,铅、锌的应用领域极为广泛,如电气、机械、军事、冶金、化工、轻工业

和医药业^[1]。根据自然资源部《2022 中国矿产资源报告》资料显示,截至 2021 年底,我国铅锌资源储量分别达 2.04×10^7 t 和 4.42×10^7 t^[2],位居世界前列。四川省雅安市作为我国铅锌矿的资源产地,自 20 世纪以来,经过早期粗放无序的开采,开采、冶炼过程中产生的“三废”因处理方式不当,易通过降

收稿日期:2023-10-09

基金项目:四川省地质调查项目(SCIGS-CYBXM-2023016)

作者简介:鲜 杨(1993—),女,工程师,硕士,环境污染与修复专业,E-mail:xianyang1993@163.com。

雨、大气沉降、地表径流等途径进入土壤,导致矿区及周边环境中的土壤重金属污染^[3-7]。而土壤重金属污染具有隐蔽性强、易累积、难降解性、毒性大的特点^[8]。土壤中的重金属一方面通过土壤-农作物-人体的食物链,使人体摄入重金属,影响人类健康;另一方面在环境条件作用下发生迁移,污染地下水,将影响饮用水的安全^[9]。因此,开展废弃矿山及周边土壤的重金属调查及生态风险评价具有重要的现实意义。

本次调查的废弃铅锌矿于 1958 年开始开采,开采初期因环境管理方式不当,使周边土壤被污染,该铅锌矿已停产多年,但因未规范处理遗留的露天开采区域,导致开采区域及周边土壤持续遭受污染。本文拟对该废弃矿区及周边区域土壤进行采样分析,探究土壤中砷(As)、汞(Hg)、锑(Sb)、镍(Ni)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)的含量,并采用单因子指数、内梅罗综合污染指数与潜在生态风险指数对矿山周围土壤重金属进行评价,旨在为废弃矿山周边的土壤环境影响提供基础数据及环境污染风险预测,为后续进行矿山周边土壤修复研究提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

调查区域位于雅安市荣经县,该矿山为铅锌矿,于 1958 年左右开采,最初开采方式为露天开采,后转变为硐采,现已停止开采多年。调查区域属亚热带季风湿润气候带的山地气候区,具有日照少、年平均气温低、夏无暑热、冬多严寒、多风下雨的气候特点;多年平均降水 1 200 mm 左右。调查区域地处峨眉山-五指山构造侵蚀块状中山地貌区与龙门山断褶强烈侵蚀斜坡式中山地貌区接壤地带,区内地形东高西低,尖峰山位于东侧,海拔 2 205 m,最低侵蚀基准面 1 490 m,相对高差 700 m;调查区域水系呈树枝状分布。区域周边有居民点、农田分布。

1.2 样品采集与测定

为探究遗留的废弃铅锌矿山及周边土壤重金属的影响,本次根据现场踏勘及人员访谈历史采矿生产情况,在历史开采区内共布设 17 个土壤点位,开采区外布设 10 个土壤点位,每个土壤采样点位均采集 0~20 cm 的土壤,取 2 kg 土壤样品装入聚乙烯密封袋和 250 mL 棕色玻璃瓶,做好现场采样记录后带回实验室。同时根据地下水流向布设 4 个地下

水点位,分别位于地下水上游、地块内及地下水下游,采集地下水样品后立即装入无污染的聚乙烯塑料瓶、玻璃瓶和 1 L 棕色玻璃瓶,对样品处理后,按常温和 4 ℃ 以下分别密封保存。土壤、地下水的测试指标均为矿山开采时的特征污染物。样品点位分布图见图 1。



图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points

土壤样品各指标主要使用原子荧光法、电感耦合等离子体质谱法等测定,参考标准为 HJ 680—2013、HJ 766—2015 及 NY/T1121.2—2006;地下水各指标主要使用原子荧光法、电感耦合等离子体质谱法及分光光度法等测定,参考标准为 HJ 700—2014、HJ 694—2014 及 GB 7467—1987;固体废物各指标主要使用原子荧光法、电感耦合等离子体质谱法及分光光度法等测定,参考标准为 HJ 766—2015、HJ 702—2014 及 GB/T 15555.4—1995 等。

1.3 环境风险评价方法

1.3.1 单因子指数法

以矿区开采区外的对照点平均值为参比值,采用单因子指数法进行环境风险评价,计算式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤中污染物 i 的污染指数。 C_i 为元素 i 的实测含量; S_i 为元素 i 的参比值。

参比值的确定:

选用区域外未开采区域少受人为活动干扰的 5 个自然土壤样点作为对照样点。计算各重金属元

素检测值的算术平均值作为参比值。与四川省土壤背景值^[10]相比,各种金属元素含量均不同程度高于

四川省土壤背景值,具有区域特点,可作为评价的参比值(表 1)。

表 1 参比值选取

Table 1 Background value selection

/(mg · kg⁻¹)

金属元素	砷	镉	铬	铜	铅	汞	镍	锌
参比值	13.28	6.85	120	28.32	151.6	0.186	53	609.8

1.3.2 潜在生态风险指数法^[11]

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

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

式中: E_r^i 为单一重金属的潜在生态风险参数;
 $C_{\text{实测}}^i$ 为土壤中重金属的实测含量; C_n^i 为计算所需

的参比值; T_r^i 为单个污染物的毒性响应参数; RI 为多种重金属的综合潜在生态风险指数,分级标准见表 2。 T_r^i 以 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数为依据,其中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 重金属毒性系数分别为 2、5、5、1、60、30、5、40^[12]。

表 2 潜在生态风险分级标准

Table 2 Classification standard of potential ecological risk

E_r^i	单因子生态风险程度	RI	综合潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻度污染	$RI < 150$	轻度
$40 \leq E_r^i < 80$	中度污染	$150 \leq RI < 300$	中度
$80 \leq E_r^i < 160$	较强污染	$300 \leq RI < 600$	重度
$160 \leq E_r^i < 320$	很强污染	$RI \geq 600$	严重
$E_r^i \geq 320$	极强污染		

1.4 数据处理及统计分析

本次工作采用 Excel 2016 进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属污染特征与风险评价

根据表 3 土壤污染特征与污染评价结果可知,土壤样品中的 pH 为 5.05~8.58,除 S11 点位土壤呈酸性(最小值 5.05),其余点位土壤 pH 值均大于 7,整体呈碱性。与参比值相比,各点位重金属含量均有不同程度超标,砷、汞、镍、镉、铬、铜、铅、锌最大超标倍数分别为 0.78、1.36、1.09、166.88、0.54、5.11、193.59、171.19,各重金属最大超标倍数点位主要位于原矿山开采区域内,且

现状为未修复区域,无植被生长。各重金属的超标率均大于 30%,表明矿山开采后且未及时进行修复对当地土壤已造成一定污染,且铅锌矿的开采过程中多伴随多种重金属的污染,遗留矿山应尽快完成整治并进行修复,以达到保护环境、确保人类身体健康的目的。

根据表 4 土壤重金属潜在生态风险评价结果可知,镍、镉、铜三种重金属元素均为轻度风险,砷、汞、锌主要为轻度、中度及较强风险,各风险所占比例见表 4;而铬和铅分别有 18.52% 和 7.41% 的点位为极强风险。根据综合潜在生态风险程度(RI)数值也可知,14.81% 的比例为严重风险。表明遗留矿山的重金属污染较严重,应尽快进行治理修复。

表 3 土壤污染特征与污染评价结果

Table 3 Background value selection

监测指标	最大值/(mg · kg ⁻¹)	最小值/(mg · kg ⁻¹)	参比值/(mg · kg ⁻¹)	最大超标倍数	超标率/%
砷	23.7	3.83	13.28	0.78	59.26
汞	0.44	0.025	0.186	1.36	48.15
镍	111	12	53	1.09	55.56
镉	1 150	0.27	6.85	166.88	37.04
铬	185	14	120	0.54	59.26
铜	173	13.7	28.32	5.11	59.26
铅	29 500	19	151.6	193.59	48.15
锌	105 000	152	609.8	171.19	44.44

表 4 土壤重金属潜在生态风险评价

Table 4 Potential ecological risk assessment of soil heavy metals

监测指标	E_i 或 RI 最大值	E_i 或 RI 最小值	所占比例/%				
			轻度	中度	较强	很强	极强
砷	107.08	17.30	14.81	59.26	25.93	0.00	0.00
汞	137.50	7.81	51.85	25.93	22.22	0.00	0.00
镍	13.54	1.46	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
镉	6353.59	1.49	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铬	4.46	0.34	62.96	3.70	14.81	0.00	18.52
铜	31.23	2.47	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
铅	857.56	0.55	85.19	3.70	0.00	3.70	7.41
锌	126.96	0.18	92.59	3.70	3.70	0.00	0.00
RI	—	—	轻度	中度	重度	严重	—
—	7 601.29	44.14	51.85	29.63	3.70	14.81	—

2.2 地下水重金属污染特征与风险评价

根据表 5 可知,遗留铅锌矿区的地下水重金属污染较严重,与《地下水质量标准》(GB/T 14848—

2017)Ⅲ类标准值相比,地下水中砷、铬、六价铬、铜、镉、铅、汞、镍、锌均未超标,可放心饮用。

表 5 地下水环境现状监测数据表

Table 5 Ground water monitoring data

监测指标	标准值	GW1	GW2	GW3	GW4	污染评价
pH 值	6.5~8.5	7.29	8.22	7.72	7.85	达标
砷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.01	未检出	未检出	未检出	未检出	达标
镉/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.005	0.67×10^{-3}	未检出	0.34×10^{-3}	0.08×10^{-3}	达标
铬/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	/	0.54	0.71	0.71	0.85	/
六价铬/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.05	未检出	未检出	未检出	未检出	达标
铜/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 1.0	0.67	未检出	0.58	0.47	达标
铅/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.01	0.27×10^{-3}	未检出	1.58×10^{-3}	0.29×10^{-3}	达标
汞/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.001	0.19×10^{-3}	0.18×10^{-3}	0.18×10^{-3}	0.17×10^{-3}	达标
镍/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 0.02	1.05×10^{-3}	0.48×10^{-3}	0.58×10^{-3}	0.47×10^{-3}	达标
锌/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	≤ 1.0	327×10^{-3}	2.88×10^{-3}	26.6×10^{-3}	7.01×10^{-3}	达标

标准值参考《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)Ⅲ类标准。“/”表示无评价标准。

3 结论与建议

1) 矿山表层土壤偏碱性,与参比值相比,各点位重金属含量均有不同程度超标,砷、汞、镍、镉、铬、铜、铅、锌最大超标倍数分别为 0.78、1.36、1.09、166.88、0.54、5.11、193.59、171.19,各重金属最大超标倍数点位主要位于原矿山开采区域内,且现状为未修复区域,无植被生长。表明矿山开采后且未及时进行修复对当地土壤已造成一定污染,且铅锌矿的开采过程中多伴随多种重金属的污染。

2) 地下水中砷、铬、六价铬、铜、镉、铅、汞、镍、锌均未超标,可放心饮用。

3) 本次调查数据表明,遗留废弃矿山的土壤、地下水污染存在,针对土壤,应尽快摸清土壤污染的情况,针对性地采取治理修复措施,种植富集植物等;地下水方面当地管理部门应做好长期跟踪监测,全

面掌控矿区地下水环境质量动态状况。

参 考 文 献

- [1] 刘晓,张宇,王楠,等.我国铅锌矿资源现状及其发展对策研究[J].中国矿业,2015,24(增刊1):6-9.
LIU Xiao, ZHANG Yu, WANG Nan, et al. Pb-Zn metal resources situation and suggestion for Pb-Zn metals industry development in China [J]. China Mining Magazine, 2015, 24(Suppl. 1): 6-9.
- [2] 中华人民共和国自然资源部.2022 中国矿产资源报告[M].北京:地质出版社,2022.
Ministry of Natural Resources, PRC. 2022 China mineral resources[M]. Beijing: Geology Press, Beijing, 2022.
- [3] 陆建衡.汉源铅锌矿区土壤重金属分布特征及镉、锌迁移行为研究[D].成都:成都理工大学,2019.
LU Jianheng. A study on the spatial distribution of heavy metal elements and cadmium, zinc migration behavior in Hanyuan lead-zinc mining area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.

- [4] 廖经慧,李化伟,滕飞,等.南方某铅锌矿矿区周边农用地土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].当代化工研究,2023(17):87-89.
LIAO Jinghui, LI Huawei, TENG Fei, et al. Pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soil around a lead-zinc mining area in south china[J]. Modern Chemical Research, 2023(17):87-89.
- [5] 黄顺红.废弃铅锌矿区土壤重金属污染特征及其有效性研究[J].企业技术开发(学术版),2016,35(2):5-7.
HUANG Shunhong. Study on pollution characteristics and effectiveness of heavy metals in soil of discarded around a lead and zinc mining area [J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(2):5-7.
- [6] 邓忠,王健,赵胜军,等.广西梧州大黎镇利达铅锌矿区土壤重金属污染评价[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):155-160.
DENG Zhong, WANG Jian, ZHAO Shengjun, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution in Lida lead-zinc mining area of Dali town, Wuzhou, Guangxi[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(4):155-160.
- [7] 韦岩松,李海凤,冯琼慧,等.广西某铅锌尾矿库区土壤中重金属Cd、Pb、Zn、Cu的分布特征及源解析[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):172-178.
WEI Yansong, LI Haifeng, FENG Qionghui, et al. Soil pollutant distribution characteristics and source analysis for Cd, Pb, Zn and Cu in a lead-zinc tailings area of Guangxi[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(4):172-178.
- [8] 刘晓媛,刘品祯,杜启露,等.地质高背景区铅锌矿废弃地土壤重金属污染评价[J].有色金属(冶炼部分),2019(2):76-82.
LIU Xiaoyuan, LIU Pinzhen, DU Qilu, et al. Evaluation of heavy metal pollution in soil of lead-zinc mine wasteland with geological high background[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(2):76-82.
- [9] CHEN H M, ZHENG C R, TU C, et al. Heavy metal pollution in soils in China: status and countermeasures[J]. AMBIO A Journal of the Human Environment, 1999, 28(2):130-134.
- [10] 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,1990:331-381.
China National Environmental Monitoring Centre. Elemental background values of soils in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:331-381.
- [11] 费利东,张婷,王艳芬,等.土壤重金属污染多种评价方法对比研究——以南京市龙潭沿江地区为例[J].有色金属(矿山部分),2023,75(4):142-149.
FEI Lidong, ZHANG Ting, WANG Yanfen, et al. Contrastive studies of various soil heavy metal pollution methods: a case study in riverside area in Longtan, Nanjing [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(4):142-149.
- [12] 张雨菲,谭静强,邓敏,等.华中某铅冶炼场地土壤重金属空间分布及其生态风险评价[J].中国科学院大学学报,2022,39(4):481-489.
ZHANG Yufei, TAN Jingqiang, DENG Min, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in a lead smelting site in Central China[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2022, 39(4):481-489.

(上接第107页)

- [9] 赵春波,张海涛,宋志伟.乌努格吐山铜钼矿边坡稳定及灾害防控技术研究[J].有色金属(矿山部分),2019,71(4):27-31.
ZHAO Chunbo, ZHANG Haitao, SONG Zhiwei. Research on slope stability and disaster prevention and control technology in unguetushan copper and molybdenum mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(4):27-31.
- [10] 李炼,陈从新,徐宜保,等.露天矿边坡的位移监测与滑坡预报[J].岩土力学,1997(4):69-74.
LI Lian, CHEN Congxin, XU Yibao. Displacement monitoring and landslide prediction of open-pit slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997(4):69-74.
- [11] 曹浪,袁利伟,杨渊,等.一种边坡稳定性多参量辨识模型及应用[J].有色金属工程,2023,13(3):110-120.
CAO Lang, YUAN Liwei, YANG Yuan, et al. A multi-parameter identification model for slope stability and application[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(3):110-120.
- [12] 郁平,任浩.露天采场高陡边坡治理方案研究与应用[J].矿业工程,2022,20(5):24-27.
YU Ping, REN Hao. Research and application of high and steep slope treatment scheme in open pit[J]. Mining Engineering, 2022, 20(5):24-27.
- [13] 刘建,彭府华,王春毅,等.多级框架锚索与微型抗滑桩群组合加固边坡技术[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(2):87-93.
LIU Jian, PENG Fuhua, WANG Chunyi, et al. Slope reinforcement technology of multi-stage frame anchor cable and micro-anti-slide pile group [J]. China Journal of Geological Hazards and Control, 2019, 31(2):87-93.
- [14] 许洪亮,王欢,李振民,等.预应力锚固洞在露天矿山边坡治理工程中的应用研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2021,22(2):69-74,80.
XU Hongliang, WANG Huan, LI Zhenmin. Research on application of prestressed anchorage tunnel in slope treatment of open-pit mine [J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021, 22(2):69-74, 80.
- [15] 刘成敏,刘红芳,罗福友,等.光面爆破技术在某大型露天矿山边坡治理中的应用[J].采矿技术,2017,17(6):99-101.
LIU Chengmin, LIU Hongfang, LUO Fuyou. Application of smooth blasting technology in slope treatment of a large open-pit mine[J]. Mining Technology, 2017, 17(6):99-101.
- [16] 李福艳.内蒙古八岔沟矿露天采场边坡滑坡灾害治理[J].黄金,2023,44(7):121-124,128.
LI Fuyan. Slope landslide disaster control in open-pit pit of Bachagou mine, Inner Mongolia [J]. Gold, 2023, 44(7):121-124, 128.