doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.08.24

典型废弃锰矿厂渣库土壤重金属污染特征与评价

沈良辰1,2,胡文勇1,张丽娟2,李 歆2,丁 平2,胡国成2

(1. 吉首大学 生物资源与环境科学学院,湖南 吉首 416000;

2. 生态环境部华南环境科学研究所,国家环境保护环境污染健康风险评价重点实验室,广州 510535)

摘 要:为研究广西某废弃锰矿厂废渣堆存区土壤重金属污染状况及评价重金属对土壤环境质量的影响,以广西某废弃锰矿厂 废渣堆存区土壤为研究对象,在堆存区内设置 45 个采样点以及周边区域的 4 个对照点。利用内梅罗综合污染指数法和潜在生态 风险法结合 GIS 克里金插值法对堆存区土壤中 Pb、Hg、Cr、As、Cu、Cd、Ni、Co 8 种重金属的污染分布规律及来源进行分析。结果 表明:堆存区土壤样品中 8 种重金属含量均高于广西土壤环境背景值,在垂直分布上的特征为随着土壤深度的增加重金属含量先 升高后降低,而 Cr 因受到酸性土壤的影响含量随着土壤深度增加而增加。堆存区土壤样品中 As 处于轻度污染状态,Co 处于重 度污染状态,Hg、Cd 具有很强、强的潜在生态风险。

关键词:土壤重金属;矿区;污染特征;潜在生态风险

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-1744(2022)08-0187-11

Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soil of Typical Waste Dumping Area

SHEN Liangchen^{1,2}, HU Wenyong¹, ZHANG Lijuan², LI Xin², DING Ping², HU Guocheng²

College of Biological Resources and Environmental Sciences, Jishou University, Jishou 416000, China;
 Ministry of Ecology and Environment the People's Republic of China, State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510535, China)

Abstract: In order to study the heavy metal pollution status of soil in the waste storage area of an abandoned manganese mine in Guangxi and to evaluate the influence of heavy metals on soil environmental quality, 45 sampling points and 4 control points in the surrounding area were set up in the waste storage area of an abandoned manganese mine in Guangxi as the research object. The pollution distribution patterns and sources of eight heavy metals, Pb, Hg, Cr, As, Cu, Cd, Ni and Co, in the soil of the stockpile area were analyzed by using the Nemerow comprehensive pollution index method and the potential ecological risk hair method combined with the GIS kriging interpolation method. The results show that the content of eight heavy metals in the soil samples of the stockpile area is higher than the background value of the soil environment in Guangxi, and the vertical distribution is characterized by the content of heavy metals increasing and then decreasing with the increase of soil depth, while the content of Cr increases with the increase of soil depth due to the influence of acidic soil. As in the soil samples of the stockpile area is in a light pollution state, Co is in a heavy pollution state, Hg and Cd have a strong, strong potential ecological risk.

Key words: soil heavy metals; mining areas; pollution characteristics; potential ecological risk

引用格式:沈良辰,胡文勇,张丽娟,等.典型废弃锰矿厂渣库土壤重金属污染特征与评价[J].有色金属工程,2022,12(8):187-197.

SHEN Liangchen, HU Wenyong, ZHANG Lijuan, et al. Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Contamination in Soil of Typical Waste Dumping Area[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(8), 187-197.

收稿日期:2022-01-06

基金项目:国家重点研发计划课题(2018YFC1801505);中央级公益性科研院所基本科研业务(PM-zx097-202104-089);中央级公益性科研院所 基本科研业务(PM-zx703-202002-016)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFC1801505); Central Research Institutes of Basic Research and Public Service Special Operations(PM-zx097-202104-089); Central Research Institutes of Basic Research and Public Service Special Operations(PM-zx703-202002-016)

作者简介:沈良辰(1998一),男,硕士,主要研究方向:修复生态学。

通信作者:胡国成(1978-),男,博士,正高级工程师,主要研究方向:环境健康与环境毒理学。

目前,土壤重金属污染在我国普遍存在,且有 日益严重的趋势,现已成为国内目前主要需要控 制和治理的污染之一[1-3]。根据全国土壤污染状 况调查,发现土壤重金属超标率高达16.1%,铜、 铅、镉、砷和汞等重金属元素均出现不同程度的超 标^[4-6]。土壤重金属污染主要来源于金属冶炼、污 水排放、矿山开采、农药化肥滥用等几个方面[7-10]。 近年来,土壤中重金属污染引起广泛的关注,尤其 是工业用地重金属污染[11]。其中,采矿和冶炼行 业可能会导致严重的重金属污染[12-13],特别在选 矿后,大量的矿渣和废渣堆放在尾矿库内,经过雨 雪淋溶,可溶性的污染物随着雨水污染附近土壤 甚至向地下渗透,污染地下水,甚至会对矿区附近 的农田山林环境造成一定的污染。重金属容易在 土壤中富集且长期存在,具有难被生物降解、隐蔽 性强和毒性大等特性[14-15]。因此,对矿场堆存区 内的土壤重金属污染状况和潜在生态风险进行分 析和评价,具有重要的科学意义。

广西拥有丰富的矿产资源和水电资源,且各地 成矿地质不同形成众多独特的矿场,对发展高耗能 的有色金属冶炼业有着得天独厚的条件。多年来, 大量矿产资源的开发与利用造成了一定的土壤重金 属污染问题^[16-21]。金属冶炼、污水排放和废渣堆存 等人类活动,都可能将重金属带人土壤环境中造成 土壤重金属的污染^[22]。本研究针对广西省某废弃 的冶炼厂废渣堆存区不同深度的土壤中(Pb、Hg、 Cr、As、Cu、Cd、Ni,Co)8种重金属元素进行分析测试。利用重金属相关性、土壤重金属主成分因子和GIS克里金插值法分析堆存区土壤中重金属的空间分布特征和污染来源,并运用单因子指数、内梅罗综合污染指数和潜在生态风险进行评价。以期为我国矿区土壤重金属污染防控与土壤修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文以广西某废弃冶炼废渣堆存区为研究对 象,该地区属于南亚热带季风气候,年平均气温 21℃左右,土壤类型主要为砖红性红壤土和棕色石 灰土。其地形为侵蚀堆积所形成的丘陵地形,且大 部分为土坳地形,本文研究的废渣堆存区属于山谷 型渣场,占地面积约4.75万m²。2013年冶炼厂停 产时,渣场内已堆积约60万t的废渣,其中冶炼的 粗滤渣堆积高度在20~40m。由于该厂环保意识 淡薄以及对废渣综合回收再利用技术欠缺,造成大 量的冶炼废渣堆积在山谷内而没有得到综合利用再 回收,浪费土地资源和对周围环境造成影响,可能会 形成一个潜在的重金属污染源。

1.2 样品采集与测定

在清除堆积粗滤渣的基础上,对废弃锰矿厂的 废渣堆存区和周边区域进行取样调查。采样点分布 区如图1所示,将研究区划分为2个区域:堆存区和



图 1 采样点位图 Fig. 1 Sampling point location map

对照区。通过系统布点法,在废渣堆存区共设置 45个土壤采样点,在周边区域设置4个对照采样 点,利用全球定位系统GPS对采样点位进行精准定 位,从上而下采集0~0.5m、0.5~2m、2~3.5m、 3.5~4.5m、4.5~6m的剖面土壤样品。将采集的 土壤样品首先通过XRF快筛检测土壤中各重金属的 大概含量并且记录好土壤性状特征,置于托盘中混合 均匀,取大概1kg土样装入聚乙烯袋密封保存并且 记录采样地点、采样编号和采样时间。土壤样品运回 实验室置于阴凉处自然风干,使用木棍敲碎碾压,去 除大石块和动植物残体,通过0.149mm的尼龙筛, 用于样品分析。

称取 0.100 g 土壤样品利用微波消解仪进行消 解,用于土壤重金属含量分析。土壤样品中的 Hg 和 As 采用原子荧光光谱法(HJ 680-2013)测定;Pb 和 Cd 使用石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141— 1997)测定,Cu、Ni、Cr、Co 采用火焰原子吸收分光光 度法(HJ 1081-2019)测定,pH 采用玻璃电极法 (HJ 962—2018)测定。实验过程中采用空白样、平行 样和国家标准物质保障实验数据的准确度和精密度。

1.3 数据处理

利用 GIS 地统计中克里金插值对堆存区土壤重 金属的空间分布进行特征分析,Excel 2016 和 SPSS 26 对数据进行数据统计和相关性分析,使用 Origin 2018 制作图件。

1.4 重金属污染评价方法

1.4.1 内梅罗综合污染指数法

采用单因子指数法对堆存区重金属污染程度进行单元素评价^[23-24],并用内梅罗综合污染指数反映多种污染物的综合污染指数^[25],两者的计算公式分别见下列公式:

$$P_i = C_i / C_s^i \tag{1}$$

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{iave}^2}{2}} \tag{2}$$

式(1)中 P_i 为重金属i的单因子污染指数; C_i 为 重金属i的含量值; C_s 为重金属i的土壤污染风险筛 选值;式(2)中 P_n 为综合污染指数; P_{imax}^2 和 P_{iave}^2 分别 为单因子污染指数中的最大值和各单因子污染指数 的算术平均值。单因子及内梅罗综合污染指数的分 级见表1。

表 1 单因子及综合污染指数法的污染程度划分

Table 1 Classification of pollution level by single factor and integrated pollution index method					
Grade	Single factor $index(P_i)$	Integrated pollution $index(P_n)$	Pollution level		
0	<0.7	<0.7	Security		
1	0.7—1.0	0.7—1.0	Alert value		
2	1.0-2.0	1.0-2.0	Low pollution		
3	2.0—3.0	2.0-3.0	Medium pollution		
4	>3.0	>3.0	Heavy pollution		

1.4.2 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法^[26-28]是用于分析土壤中重金 属污染程度及其潜在危害评价的一种方法,计算公式:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_{r}^{i} = \sum_{i=1}^{n} (T_{r}^{i} \times C_{f}^{i}) = \sum_{i=1}^{n} (T_{r}^{i} \times \frac{C}{C_{n}^{i}})$$
(3)

(3)式中的 Eⁱ, 为某一重金属元素 i 的潜在生态

风险因子; T_r^i 为某一重金属元素 i的毒性响应因 子, $Cr_xCu_Pb_xNi_xCo_xAs_xCd$ 和 Hg的毒性响应参 数分别为 2、5、5、5、5、10、30 和 40,式中 C_n^i 为某重 金属参比值,参比值为广西省土壤背景值, C^i 为土壤 某重金属的实测值, C_f^i 为某一重金属的污染指数; RI为总的潜在生态风险指数^[28]。潜在生态风险程 度分级标准见表 2。

	表 2	潜在生态风险程度分级标准
Table 2	Poter	ntial ecological risk level grading criteria

			8 8	
Level	Single-element potential ecological risk index (E_r^i)	Degree of potential ecological risk for a single element	Integrated heavy metals potential ecological risk index(<i>RI</i>)	Comprehensive potential ecological risk level
1	<40	Low risk	<150	Low risk
2	40—80	Medium risk	150—300	Medium risk
3	80—160	Medium to high risk	300—600	Medium to high risk
4	160-320	High risk	600—1 200	High risk
5	≥320	Extremely high risk	≥1 200	Extremely high risk

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征

研究区土壤样品中 8 种重金属含量的统计结 果见表 3,堆存区土壤样品的 pH 值范围为 4.01~ 7.09,其中 97.96%的土壤样品 pH 值小于 6.5,堆 存区土壤总体呈现出酸性,而土壤酸性越高重金属 迁移能力越强,将会影响重金属在土壤中的分布。 表层土壤中 Cr、Cu、As、Pb、Hg、Ni、Cd 和 Co 8 种重 金属平均含量均高于广西土壤环境背景值^[29],Hg 累积最严重,含量是背景值的 5.13 倍。总体而言, 堆存区土壤中重金属出现了不同程度的累积,以《土 壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试 行)》(GB 36600-2018)中的风险筛选值为参比,As 和 Co 两种重金属元素超标,超标率分别为 42.86% 和 57.14%。

表 3 研究区域土壤表层重金属含量统计分析

Table 3 Statistical analysis of soil heavy metal content in the study area							$/(\mathrm{mg} \cdot \mathrm{kg}^{-1})$	
Region	Heavy metals	Minimum value	Maximum value	Average value	Coefficient of variation/%	Background value	Screening value	Exceedance rate/%
	Cr	11.00	272.00	86.49	64.82	82.10	2910	0.00
	Cu	55.00	167.00	99.83	29.44	27.80	18 000	0.00
	As	12.60	126.00	60.61	36.77	20.50	60	42.86
Cr. 11	Pb	14.00	331.00	69.67	83.95	24.00	800	0.00
Stacking area	Hg	0.23	6.58	0.80	122.50	0.152	38	0.00
	Ni	64.00	316.00	128.60	39.49	26.60	900	0.00
	Cd	0.03	3.13	1.32	56.82	0.267	65	0.00
	Co	26.00	237.00	93.27	41.75	40.00	70	57.14
	Cr	36.00	58.00	44.75	22.22	82.10	2910	0.00
	Cu	47.00	104.00	72.80	34.18	27.80	18 000	0.00
	As	32.60	57.00	43.68	23.10	20.50	60	0.00
C 1	Pb	37.00	52.00	44.50	14.51	24.00	800	0.00
Control area	Hg	0.48	0.65	0.56	15.28	0.152	38	0.00
	Ni	49.00	114.00	82.44	37.54	26.60	900	0.00
	Cd	0.03	0.49	0.30	65.49	0.267	65	0.00
	Co	30.00	126.00	73.75	53.90	40.00	70	50.00

2.2 堆存区土壤重金属空间分布特征

不同重金属元素在土壤中的污染特征不同,富 集和扩散的能力也不同。根据表3可知堆存区土壤 中Cr、As、Pb、Hg、Ni、Cd、Co7种重金属的变异系 数分别为64.82%、36.77%、83.95%、122.50%、 39.49%、56.82%、41.75%。堆存区土壤重金属含 量变异系数普遍高于30%,表明堆存区土壤中重金 属离散程度高分布不均匀,存在重金属污染浓度高 点。表明堆存区土壤受外界因素影响,导致部分地 区重金属污染严重。Cr、Pb、Hg、Cd4种重金属变 异系数大于50%,反映出堆存区局部受到这4种重 金属元素的污染,导致重金属污染的原因可能与矿 渣堆放和防护措施的破损有关。结合克里金插值法 绘制堆存区土壤重金属含量的空间分布图,从图 2 中可以看出 Cr、Cu、As、Pb、Hg、Ni、Cd 和 Co 8 种重 金属浓度在空间上均有突出的区域形成岛状分布。 Co、Ni、Cu 和 As 4 种重金属浓度突出区域主要集 中在堆存区中部和南部,Cd、Pb、Hg 和 Cr 4 种重金 属浓度突出区域主要集中在堆存区中部和北部,这 表明污染主要集中在堆存区的中部,还存在向四周 扩散的趋势,可能是雨水的淋洗作用导致重金属向 下渗透从而向四周扩散。其中 Cr 除了中部地区其 余大部分地区的含量均未超过广西土壤背景值,可 能是受到成土母质的控制。







2.3 土壤剖面重金属垂直分布特征

研究区土壤 8 种重金属含量的垂向分布见 图 3,堆存区各深度的土壤重金属含量明显高于对 照区,从对照区和堆存区的垂直剖面上来看,底层土 壤重金属含量低于表层,在向下的过程中重金属含 量有减小的趋势。堆存区的土壤垂直剖面 pH 呈弱





酸性,样品中 Cr、Cu、As、Pb 和 Ni 的含量在 0.5~2 m出现峰值,分别为 93.07、112.84、64.75、85.52、 133.34 mg/kg,分别是背景值的 1.13、4.06、3.16、 3.56 和 5.01 倍; Co 在 3.5~4.5 m 出现峰值,为 95.93 mg/kg,达到背景值的 2.4 倍; Hg 在表层出 现峰值 4.89 mg/kg,是背景值的 32.19 倍; Cd 在 4~6 m出现峰值,为 2.08 mg/kg,是背景值的 1.80 倍。

受到众多因素的影响,土壤重金属含量在垂直 方向的分布特征较为复杂,土壤的理化性质、酸碱程 度和土壤肥力等因素都会影响土壤重金属含量在垂 向上的分布。本场地表层土壤多为沙壤土,沙壤粒 径大、土质疏松和通气透水,有利于表层重金属向下 渗透,而中层土壤主要为中壤土和重壤土,粒径小、 黏性大和通气透水性较差,重金属含量会随着深度 的增加先升高后降低^[30]。因此,本场地内重金属含 量峰值基本出现在中层土壤,除了 Cd 的含量随着 深度的增加而增加,其余重金属都符合先增加后降 低。其原因是土壤 pH 对重金属迁移能力的影响, 土壤酸性越高重金属迁移能力越强,而场地中的平 均 pH 值随深度的增加而减少。吴燕玉等^[31]研究 发现 Cd 会随着土壤酸性加强淋失率增大,而程 睿^[32]研究发现土壤 pH 值低不利于 Pb 和 As 在土 壤中的迁移,与本场地中 Cd、Pb 和 As 的垂向含量 分布规律相似。

2.4 土壤重金属污染来源解析

2.4.1 相关性分析

利用相关性分析可以较为直观地反映各重金属 间相关性的程度和判断其来源是否相同。从表4中 相关系数可知,Cu与Ni、Cd、Co重金属之间具有极 显著的正相关性,Cr和As、Hg和Cd、Co和Ni重 金属之间具有显著的正相关性,说明这些重金属关 系紧密,迁移方式相似,可能具有相同的来源,例如 大气沉降、矿山开采和工厂冶炼等来源。As与其他 金属间的相关性弱,说明其来源与其他金属不同。 Hg和Cd具有显著的正相关,且Hg与其他重金属 之间无相关,两种重金属元素潜在生态风险指数和 含量空间分布特征相似。综合Hg和Cd金属元素 的污染在中部较为突出,推测两种重金属元素来源 可能与堆存区局部防护的破损及泄露有关。

表 4 研究区土壤重金属含量的相关系数 Table 4 Correlation coefficients of heavy metal content of soils in the study area

					•		v		
Heavy metal elements	Cr	Cu	As	Pb	Hg	Ni	Cd	Co	pН
Cr	1.000								
Cu	-0.238	1.000							
As	0.313*	0.160	1.000						
Pb	0.277	0.070	0.254	1.000					
Hg	0.071	0.237	0.011	-0.023	1.000				
Ni	-0.168	0.633**	0.205	0.106	0.270	1.000			
Cd	-0.106	0.402**	-0.089	0.222	0.306*	0.267	1.000		
Co	0.067	0.428**	0.172	0.214	-0.120	0.376*	0.051	1.000	
nН	0.012	-0.081	0 207	0 244	-0.133	0 009	0 123	0 114	1 000

Note: * * P<0.01 level is extremely significant correlation; * P<0.05 level is significant correlation.

2.4.2 土壤重金属主成分分析

土壤重金属来源复杂,主要的污染来源分为两 类,人为来源和自然来源,而主成分分析是一种对污 染来源的有效分析方法。本研究的来源分析结果如 表5所示。根据主成分分析结果提取了3个特征值 大于1的主成分,主成分累积贡献率为65.93%。 分析结果中的3大主成分能够解释原始数据的大部 分信息,反映出8种重金属元素的污染情况。堆存 区土壤重金属3大主成分方差解释分别为 31.50%、19.56%和14.83%,主成分1为Cu、Ni和Co,占总方差解释的31.50%,结合堆存区内重金属污染分布特征可以推测出这些重金属主要来源为工业冶炼产生的废渣、采矿时的扬尘^[33-34]。主成分2为Cr、As和Pb,占总方差解释的19.56%,这3种重金属元素主要来源为交通源,如在运输过程中的汽车尾气和轮胎摩擦产生的废气^[35]。主成分3为Hg和Cd,占总方差解释的14.83%,推测其主要来源于冶炼废气、煤炭燃烧和冶炼废水的排放^[36]。

Table 5 Loading factor extracted from principal components analysis (PCA)						
Heavy metal elements	PC1	PC2	PC3			
Cr	0.835	-0.027	0.323			
Cu	0.775	0.044	0.327			
As	0.750	0.259	-0.270			
Pb	-0.249	0.816	0.048			
Hg	0.275	0.677	-0.056			
Ni	0.154	0.677	0.095			
Cd	-0.017	0.034	0.846			
Со	0.318	0.060	0.694			

表 5 旋转后的成分矩阵

2.5 土壤重金属污染指数评价

2.5.1 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数 评价

利用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数 法可以直观地反映出堆存区土壤重金属的污染程 度。从图4可知,堆存区土壤中As处于警戒值污 染级别,Co处于轻度污染级别,其余重金属处于无 污染状态,单因子污染指数从小到大依次为Cu< Cd<Hg<Cr<Pb<<Ni<As<Co。内梅罗综合 污染指数可以全面地了解堆存区土壤多种重金属的 综合污染,根据内梅罗综合污染指数评价可知堆存 区土壤中 As 处于轻度污染状态,Co 处于重度污染 状态,其余重金属均为无污染,堆存区重金属污染受 废渣长期堆积的影响较大。

2.5.2 潜在生态风险评价

如图 5(a)热图可视化所示,堆存区土壤重金属 的平均潜在生态风险大小排序为 Hg>Cd>As> Ni>Cu>Pd>Co>Cr,其中 Hg 和 Cd 金属元素分







图 5 研究区单元素潜在生态风险(a)和综合潜在生态风险(b)

Fig. 5(a)Single-element potential ecological risk; (b)Combined potential ecological risk in the stockpile area

別在高生态风险范围和中高生态风险范围,是堆存 区土壤中最主要的两个潜在生态风险因子,其余重 金属元素均在低生态风险范围。将所有重金属的潜 在生态风险指数累加得到重金属的综合潜在生态风 险指数,其危害程度为强潜在生态风险。王昌宇等 对雄安新区某重金属冶炼厂研究发现场地土壤中 Cd和Hg具有强-很强的潜在生态风险^[37],结合本 文研究结果表明土壤重金属Cd和Hg对堆存区生 态环境可能会造成较强的生态风险,应引起高度重 视。如图5(b)空间分布图所示,堆存区各区域潜在 生态风险指数排序为中部>北部>南部,中部地区可 能存在局部的防护泄露造成较高的潜在生态风险。 综合上述,堆存区土壤中Hg和Cd金属元素有较高 的潜在生态风险,中部地区具有较高的潜在生态 风险。

3 结论

1) 堆存区土壤中 Cr、Cu、As、Pb、Hg、Ni、Cd 和 Co 8 种重金属平均含量均高于广西土壤环境背景 值,分别是背景值的 1.01、3.51、2.89、2.82、5.13、 4.69、4.61 和 2.29 倍,说明堆存区土壤中存在较为 严重的重金属污染和富集。其中 As 和 Co 超过建 设用地二类用地土壤筛选值,超标率分别为 42.86%和 57.14%。

2)堆存区 Co、Ni、Cu 和 As 的含量在空间上的 分布特征较为相似,突出污染区域主要集中在堆存 区中部以及南部,而 Cd、Pb、Hg 和 Cr 的突出污染 区域主要分布在中部及北部。堆存区土壤垂直剖面 pH 呈弱酸性,重金属含量随着土壤深度的增加总 体呈现先升高后降低的趋势,而 Cr 因受到酸性土壤 的影响含量随着土壤深度增加而增加。

3)相关性分析表明,Cu 与 Ni、Cd、Co 可能具有 较大的同源性,Cr 和 As、Hg 和 Cd、Co 和 Ni 也可 能具有较大的同源性。其中,Hg 和 Cd 可能与堆存 区局部防护的破损及泄露有关。主成分分析表明, 堆存区土壤中重金属来源主要分为三类,第一类为 工业冶炼产生的废渣、采矿扬尘和人为活动;第二类 为交通运输过程中产生的汽车尾气和轮胎摩擦产生 的废气;第三类为冶炼废气、煤炭燃烧和冶炼废水的 排放。

4)单因子污染指数表明,堆存区土壤中 As 处 于警戒值污染级别,Co 处于轻度污染级别,其余重 金属处于无污染状态。说明 As 为研究区土壤的主 要污染物,应重点关注。内梅罗综合污染指数法表 明,堆存区土壤中 As 处于轻度污染级别,Ni 和 Co 处于重度污染级别,其余重金属无污染。风险评价 表明,8 种重金属中 Hg 为高潜在生态风险,为最主 要的污染重金属,Cd 为中潜在生态风险,其余金属 均属于低潜在生态风险。潜在生态风险空间上的分 布为中部>北部>南部,研究区总体处于高潜在生 态风险,综上所述,锰矿厂渣库内土壤出现重金属综 合污染,应对其开展修复工作。

参考文献:

- [1] LI Z Y, MA Z W, VAN D K, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468:843-853.
- [2] DUDKA S, ADRIANO D C. Environmental impacts of metal ore mining and processing: A review[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(3):590-599.
- [3] 李强,何连生,王耀锋,等.中国冶炼行业场地土壤污染特 征及分布情况[J].生态环境学报,2021,30(3):586-595.
 LI Qiang, HE Liansheng, WANG Yaofeng, et al. The characteristics and distribution of pollution in smelting industry sites in China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2021,30(3):586-595.
- [4] 魏洪斌,罗明,吴克宁,等.长江三角洲典型县域耕地土 壤重金属污染生态风险评价[J].农业机械学报,2021, 52(11):200-209,332.

WEI Hongbin, LUO Ming, WU Kening, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in cultivated soil at typical county level in Yangtze River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):200-209,332.

[5] 郑影怡,刘杰,蒋萍萍,等.河池市某废弃冶炼厂周边农 田土壤重金属污染特征及风险评价[J].环境工程, 2021,39(5):238-245.

ZHENG Yingyi, LIU Jie, JIANG Pingping, et al. Pollution assessment of heavy metals in farmland soils around an abandoned smelter in Hechi, China [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(5):238-245.

[6] 孙德尧,薛忠财,韩兴,等.冀北山区某矿区周边耕地土 壤重金属污染特征及生态风险评价[J].生态与农村环 境学报,2020,36(2):242-249.

SUN Deyao, XUE Zhongcai, HAN Xing, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in cultivated land around mining area in northern Hebei province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(2):242-249.

[7] 丁永福,班玲.广西土壤环境背景值应用开发初探[J].

中国环境监测,1993(3):41-42.

DING Yongfu, BAN Ling. A preliminary investigation on the application development of background values of soil environment in Guangxi province [J]. Environmental Monitoring in China, 1993(3):41-42.

- [8] WEI X, GAO B, WANG P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 112; 186-192.
- [9] 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 of the Total Environment, 2018, 642 (15): 690-700.
- [10] LI P Z, LIN C Y, CHENG H G, et al. Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 113, 391-399.
- [11] 刘小燕,陈棉彪,李良忠,等.云南会泽铅锌冶炼厂周边 土壤重金属污染特征及健康风险评价[J].农业资源与 环境学报,2016,33(3):221-229.

LIU Xiaoyan, CHEN Mianbiao, LI Liangzhong, et al. Contaminant characteristics and health risk assessment of heavy metals in soils from lead-zincs melting plant in Huize County, Yunan province, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(3): 221-229.

[12] 李强,曹莹,何连生,等.典型冶炼行业场地土壤重金属 空间分布特征及来源解析[J].环境科学,2021, 42(12):5930-5937.

LI Qiang, CAO Ying, HE Liansheng, et al. Spatial distribution characteristics and source analysis of soil heavy metals in typical smelting industry sites [J]. Environmental Science, 2021, 42(12):5930-5937.

- [13] 邓新辉,柴立元,杨志辉.铅锌冶炼废渣堆场及周边土 壤物理化学特征研究[J].广东化工,2015,42(21):1-2. DENG Xinhui, CHAI Liyuan, YANG Zhihui. The study of the soil's physical and chemical characteristics at site of Pb/Zn smelting slag yard and nearby[J]. Guangdong Chemical Industry,2015,42(21):1-2.
- [14] 张永慧,麻冰涓,张东,等.南太行山山前平原工业园区 土壤重金属污染特征及来源[J].环境化学,2017, 36(8):1821-1830.

ZHANG Yonghui, MA Bingjuan, ZHANG Dong, et al. Contamination and sources of heavy metals in the soils of industrial cluster in piedmont plain of South Taihang mountain[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(8): 1821-1830.

[15] 王成军,冯涛,赵舒婷,等.治炼厂周边表层土壤重金属 关联特征及污染评价[J].环境工程学报,2016,10(4): 2064-2070.

WANG Chengjun, FENG Tao, ZHAO Shuting, et al. Correlation characteristics and pollution evaluation of heavy metals in surface soil around a smelting factory[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4):2064-2070.

[16] 赵振,史烨弘,毛小晶,等.某冶炼厂周边土壤重金属污 染评价分析及源解析研究[J].中国无机分析化学, 2020,10(4);22-27.

ZHAO Zhen, SHI Yehong, MAO Xiaojing, et al. Characteristics assessment and source analysis of heavy metal pollution in soil surrounding a smelter [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020,10(4):22-27.

- [17] 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 Jinnan, LONG Jian, LIU Lingfei, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J].
- [18] WU S, PENG S Q, ZHANG X X, et al. Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, 148, 71-78.

China Environmental Science, 2018, 38(3): 1054-1063.

- [19] AELION C M, DAVIS H T, Mcdermott S, et al. Soil metal concentrations and toxicity: Associations with distances to industrial facilities and implications for human health [J]. Science of the Total Environment, 2009,407(7):2216-2223.
- [20] WANG S, CAI L M, WEN H H, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong province, China[J]. Science of the Total Environment, 2019,655:92-101.
- [21] CHEN H, TENG Y, LU S, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 512/513: 143-153.
- [22] MEZA-M M M,GANDOLFI A J,SANTANA-A M E, et al. Metals in residential soils and cumulative risk assessment in Yaqui and Mayo agricultural valleys, northern Mexico[J]. Science of the Total Environment, 2012,433:472-81.
- [23] XIAO Q, Zong Y T, LU S G. Assessment of heavy

metal pollution and human health risk in urban soils of steel industrial city (Anshan), Liaoning, Northeast China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015,120:377-385.

- [24] ISLAM M S, AHMED M K, AHABIBULLAH M, et al. Potential ecological risk of hazardous elements in different land-use urban soils of Bangladesh[J]. Science of the Total Environment, 2015, 512;94-102.
- [25] 黄凯,张雪娇,冯媛,等.河南某尾矿库土壤重金属污染
 特征及风险评价[J].环境影响评价,2018,40(1):
 78-83.
 HUANG Kai, ZHANG Xuejiao, FENG Yuan, et al.

Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in a tailing pond of Henan[J]. Environmental Impact Assessment,2018,40(1):78-83.

- [26] 常沙,徐文迪,黄殿男,等. 葫芦岛锌厂周边土壤重金属 污染状况及生态风险评价[J]. 湖南生态科学学报, 2017,4(3):8-14.
 CHANG Sha, XU Wendi, HUANG Diannan, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of soil around Huludao zinc smelter[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2017, 4(3):8-14.
- [27] 都雪利,李波,崔杰华,等.辽宁某冶炼厂周边农田土壤 与农产品重金属污染特征及风险评价[J].农业环境科 学学报,2020,39(10):2249-2258.

DU Xueli, LI Bo, CUI Jiehua, et al. Assessment of heavy pollution and risk of farmland soil and agricultural products around a smelter in Liaoning[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39 (10): 2249-2258.

- [28] 徐争启,倪师军,庹先国,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(2):112-115.
 XU Zhengqi, NI Shijun, TUO Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science and Technology, 2008 (2): 112-115.
- [29] 郑武.广西桂东北地区农业土壤环境若干重金属元素背 景值的调查[J].农村生态环境,1993(4):39-42,63-64. ZHENG Wu. Investigation of the background values of some heavy metal elements in the agricultural soil environment of northeast Gui,Guangxi[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,1993(4):39-42,63-64.
- [30] 邱坤艳,赵阳,赵林林,等.铅冶炼区土壤剖面重金属污染 特征及风险评价[J].环境保护科学,2020,46(6):155-159. QIU Kunyan, ZHAO Yang, ZHAO Linlin, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal

pollution in soil profile of lead smelting area [J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(6):155-159.

[31] 吴燕玉,王新,梁仁禄,等.Cd、Pb、Cu、Zn、As 复合污染 在农田生态系统的迁移动态研究[J].环境科学学报, 1998(4):407-414.

WU Yanyu, WANG Xin, LIANG Renlu, et al. Dynamic migration of Cd, Pb, Cu, Zn and As in agricultural ecosystem[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1998(4): 407-414.

- [32] 程睿. 江西某铜矿弃渣场下游农田土壤重金属分布特 征研究[J]. 江西农业学报, 2019, 31 (11): 52-57.
 CHENG Rui. Distribution characteristics of heavy metals in downstream farmland soil of copper mine spoil yard in Jiangxi province[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31 (11): 52-57.
- [33] 张永慧,麻冰涓,张东,等.南太行山山前平原工业园区 土壤重金属污染特征及来源[J].环境化学,2017, 36(8):1821-1830.

ZHANG Yonghui, MA Bingjuan, ZHANG Dong, et al. Contamination and sources of heavy metals in the soils of industrial cluster in piedmont plain of South Taihang Mountain[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(8): 1821-1830.

- [34] 张媛.太原市城乡室内尘和室外土壤重金属污染特征 及来源解析[D].太原:山西大学,2020.
 ZHANG Yuan. The characteristics and sources of heavy metal pollution about indoor dust and outdoor soil in Taiyuan city[D]. Taiyuan; Shanxi University,2020.
- [35] 王小剑. 邯郸市区土壤重金属污染评价与来源解析[D]. 邯郸:河北工程大学,2021.
 WANG Xiaojian. Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in soil of Handan city[D]. Handan; Hebei University of Engineering, 2021.
- [36] 刘文辉,马腾,李俊琦,等. 资江河口区农田土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 地质科技通报,2021,40(2):138-146.
 LIU Wenhui, MA Teng, LI Junqi, et al. Pollution assessment an source analysis of heavy metals in agricultural soil around Zijiang River estuary [J].
 Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(2):138-146.
- [37] 王昌宇,张素荣,刘继红,等.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,2021, 48(6):1697-1709.

WANG Changyu, ZHANG Surong, LIU Jihong, et al.Pollution level and risk assessment of heavy metals in a metal smelting area of Xiongan New District [J].Geology in China, 2021, 48(6):1697-1709.