

# 某酸性历史遗留矿山排土场土壤重金属 污染特征及环境评价

张建锋<sup>1,2</sup> 谢金亮<sup>1</sup> 何新春<sup>1</sup> 周建红<sup>3</sup> 刘永兵<sup>4</sup> 王志高<sup>1</sup> 钟秀琴<sup>3</sup> 陈宇菲<sup>3</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;

3. 广东省大宝山矿业有限公司, 广东 韶关 512127;

4. 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**[摘要]** 为了解多金属矿酸性排土场土壤污染现状,选择某酸性历史遗留矿山排土场表层土壤(0~20 cm)为研究对象,采集了表层9个混合土壤样品,分析了土壤中Pb、Cu、Zn、Cd共4种重金属含量,采用单因子指数法、内梅罗综合指数法、ArcGIS空间插值法探讨了重金属污染现状和空间分布特征,评价了研究区的土壤环境。结果表明,1)研究区土壤pH值均值为3.70,为强酸性。研究区存在重金属污染,Pb、Cu、Zn、Cd平均含量分别为6 134.36 mg/kg、642.01 mg/kg、1 035.83 mg/kg、1.52 mg/kg,分别为其风险筛选值的87.6倍、12.8倍、5.2倍、5.1倍;2)研究区土壤环境质量评价分级均处于V级,为重度污染。4种金属元素污染指数 $P_i$ 平均值排序为: $P_{Pb}(87.63) > P_{Cu}(12.84) > P_{Zn}(5.18) > P_{Cd}(5.08)$ ,Pb、Zn污染面积更大, $P_{综}$ 平均值为65.06,各样点间相差较大,范围为28.23~89.23;3)研究区土壤pH值与重金属元素Cu之间具有极显著的正相关关系,而各重金属元素之间相关性较弱。

**[关键词]** 多金属矿; 土壤污染; 酸性排土场; 重金属污染; 污染特征; 单因子指数法; 内梅罗综合指数法; 土壤修复

**[中图分类号]** X53 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2021)06-0034-07

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.06.008

## Soil Heavy Metal Pollution Characteristics and Environmental Evaluation of Some Historical Acid Mine Dump

ZHANG Jian-feng, XIE Jin-liang, HE Xin-chun, ZHOU Jian-hong, LIU Yong-bing,  
WANG Zhi-gao, ZHONG Xiu-qin, CHEN Yu-fei

**Abstract:** To understand the status of soil pollution in acid dumps of polymetallic mines, a study was carried out for some historical acid mine dump, collecting 9 mixed soil samples and analyzing heavy metal contents of Pb, Cu, Zn and Cd in the soil. The present situation and spatial distribution characteristics of heavy metal pollution were discussed by using single factor index method, Nemerow index method and ArcGIS spatial interpolation method, and the soil environment in the study area was evaluated. The re-

**[收稿日期]** 2021-10-18

**[基金项目]** 国家重点研发计划项目《场地土壤污染成因与治理技术专项》(课题编号:2018YFC1801800);国家重点研发计划项目《典型酸性废石堆场及周边污染土壤的修复技术体系及示范》(课题编号:2019YFC1805005)

**[作者简介]** 张建锋(1986—),男,山西吕梁人,博士后,工程师,主要从事金属矿山生态修复研究和设计等工作。

**[通讯作者]** 何新春(1978—),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事环境影响评价、土壤修复、绿色矿山建设等工作。

**[引文格式]** 张建锋,谢金亮,何新春,等. 某酸性历史遗留矿山排土场土壤重金属污染特征及环境评价[J]. 有色冶金节能,2021,37(6):34-40.

sults show as follows: 1) The average pH value of soil in the study area is 3.70, which is highly acidic. There is heavy metal pollution in the study area, and the contents of Pb, Cu, Zn and Cd are all higher than the risk filter value, with the average contents of 6 134.36 mg/kg, 642.01 mg/kg, 1 035.83 mg/kg and 1.52 mg/kg, and are 87.6 times, 12.8 times, 5.2 times, and 5.1 times of the risk filter value, respectively; 2) The soil environmental quality assessment grade in the study area is V, indicating heavy pollution. The average pollution index  $P_i$  value of the four metal elements is ranked as:  $P_{Pb}(87.63) > P_{Cu}(12.84) > P_{Zn}(5.18) > P_{Cd}(5.08)$ . The contaminated areas of Pb and Zn are larger, the average  $P_{com}$  value is 65.06, and the difference among sample points is large, ranging from 28.23 to 89.23; 3) The pH value and the heavy metal element Cu of soil in the study area show significant positive correlation, and the correlation among heavy metal elements is weak.

**Key words:** polymetallic mine; soil pollution; acid dump; heavy metal pollution; pollution characteristics; single factor index method; Nemerow index method; soil remediation

## 0 前言

金属矿山开采为人类社会发展作出贡献的同时,产生十分复杂而又严重的生态环境问题<sup>[1-3]</sup>,主要表现为极端酸化环境,重金属毒害,土壤营养匮乏,植被景观破坏,水土流失、滑坡等地质灾害等。现阶段,有色金属矿山还在以  $5 \times 10^2 \text{ km}^2/\text{a}$  的破坏速度不断占用土地<sup>[4]</sup>。金属矿业活动是我国重金属污染的最主要源头,而重金属污染具有不可逆性、长期性和累积性等特征,可能导致矿区土壤环境质量下降,进而危害人类健康<sup>[5-6]</sup>。

本研究以广东省境内某历史遗留矿山排土场表层土壤为研究对象,通过野外调查与实验室测试分析,采用单因子污染指数法、内梅罗综合指数法、ArcGIS空间插值法<sup>[7-9]</sup>,科学评价了土壤中主要重金属 Pb、Cu、Zn、Cd 的污染现状,为多金属矿酸性排土场生态恢复工程治理和我国历史遗留矿山污染控制修复提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

该矿区是广东省境内露天开采的大型多金属矿山,以铁、铜硫、铅锌等矿石为主<sup>[10-11]</sup>,矿区属亚热带季风气候,年均气温  $20.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,降雨量  $1\,782 \text{ mm}$ <sup>[12]</sup>。该酸性历史遗留矿山位于矿区露天采矿场东南侧,地理坐标为  $E\ 113^\circ 41' 53'' \sim 113^\circ 46' 40''$ ,  $N\ 24^\circ 30' 01'' \sim 24^\circ 35' 26''$ 。该矿区是遭受民采破坏最严重的区域,也是下游水体受重金属污染的主要原因,总面积约  $130 \text{ hm}^2$ 。由于土壤中的金属硫化物氧化产酸,在酸化土壤过程中导致大量重金属溶出,造成了极其严

重的环境污染问题。该矿区几乎寸草不生,水土流失极其严重。

### 1.2 样品采集

2020年5月初,依据现场勘察污染破坏情况,测试土壤采集于该酸性区内具有代表性、典型性的3处极酸化排土场,其编号分别为K1、K2和K3(图1)。采用“对角线”法,采集27个表层土壤(0~20 cm)样品,各样点间隔10~30 m,并均匀分布于K1、K2、K3排土场阳坡的坡顶、坡中和坡脚;根据图1分别将3个样品充分混合成1个混合样,共采集9个混合土样,分别编号为XS-1、XS-2、…、XS-9(1、4、7点位为坡顶,2、5、8点位为坡中,3、6、9点位为坡脚),每个土样取3 kg,采集样品装入洁净的自封袋,进行标记后运回实验室。各样点分布如图1所示。

### 1.3 实验方法

带回实验室的样品按照国家标准规范进行自然风干,去除落叶、石块,研磨,过20目尼龙筛,备用。土壤样品和水按1:2.5比例混合后,利用pH计测定各土样的pH值<sup>[13]</sup>;重金属全量检测分析利用王水-高氯酸( $\text{HNO}_3\text{-HCl-HClO}_4$ )消解,定容<sup>[14]</sup>,用ICP-MS电感耦合等离子体质谱法测定Cu、Zn、Pb、Cd全量。

### 1.4 评价方法与标准

本研究采用常见的单因子指数法和内梅罗综合污染指数法对采样区土壤重金属污染进行评价。

#### 1.4.1 评价方法

##### 1.4.1.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

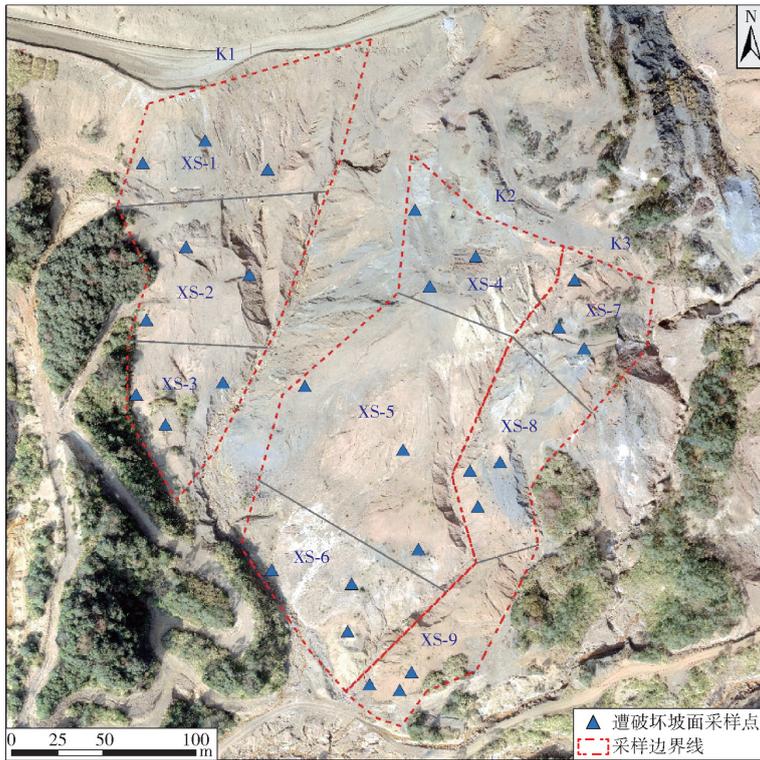


图1 研究区内排土场土壤采样点示意图

式中,  $P_i$  为污染物  $i$  的单因子污染指数;  $C_i$  为污染物  $i$  的实测含量, mg/kg;  $S_i$  为污染物  $i$  的环境标准, mg/kg。单因子指数评价分级见表1。

表1 单因子评价土壤环境质量评价分级

等级	$P_i$ 值	污染等级
I	$P_i \leq 1.0$	无污染
II	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻微污染
III	$2.0 < P_i \leq 3.0$	轻度污染
IV	$3.0 < P_i \leq 5.0$	中度污染
V	$P_i > 5.0$	重度污染

#### 1.4.1.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数是在单因子污染指数基础上计算出的数据,能够全面地反映土壤中各污染物的整体污染水平<sup>[7-8]</sup>。计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{imax}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{综}}$  为某样品的综合污染指数;  $P_{\text{ave}}$  为单因子污染指数算术平均值,  $P_{\text{imax}}$  为单项污染指数最大值。内梅罗综合污染指数评价分级见表2。

#### 1.4.2 评价标准

本文土壤重金属的评价标准值采用最新国家标准《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的筛选值,见表3。

表2 内梅罗综合污染指数法评价分级

等级	综合污染指数( $P_{\text{综}}$ )	污染等级
I	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全
II	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒限
III	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染
V	$P_{\text{综}} > 3.0$	重度污染

表3 重金属评价标准值和韶关市土壤环境背景值

污染物项目	风险筛选值	风险管制值	当地土壤环境背景值
Pb	$\leq 70$	$\leq 400$	37.84
Cu	$\leq 50$	—	27.12
Zn	$\leq 200$	—	71.84
Cd	$\leq 0.3$	$\leq 1.5$	0.177

注: pH $\leq 5.5$ , 矿区土壤 pH 平均值为 3.70

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中重金属污染分布特征

各混合样点土壤重金属含量与土壤 pH 值见表4。由表4可以看出,3处典型排土场区域土壤 pH 值为 2.70~5.81,均值为 3.70,表现为强酸性,说明排土场产酸严重。研究区土壤中 Pb、Cu、Zn、Cd 四种重金属平均含量均高于其风险筛选值,且远高于

韶关市土壤环境背景值,分别为 6 134.36 mg/kg、642.01 mg/kg、1 035.83 mg/kg、1.52 mg/kg,分别为其风险筛选值的 87.6 倍、12.8 倍、5.2 倍、5.1 倍,说明该区域土壤存在重金属污染,尤其是 Pb 污染,其次是 Cu 污染,造成这种现象的原因可能是极端酸性环境。金属矿山开采产生的大量黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )等其他硫化物矿物,容易产生富含重金属的酸性矿山废水,这些废水进入土壤会表现为酸化协同重金属污染,加速重金属的溶出和迁移<sup>[15-16]</sup>。

表 4 各混合样点土壤重金属含量与土壤 pH 值

样品编号	mg/kg				pH 值
	Pb	Cu	Zn	Cd	
XS-1	2 427.90	1 670.41	966.76	1.86	5.81
XS-2	4 612.36	444.29	612.36	0.99	2.78
XS-3	4 106.74	376.87	487.36	0.87	2.88
XS-4	8 470.51	551.97	1 197.57	1.55	2.70
XS-5	7 220.00	603.00	1 624.00	2.06	4.13
XS-6	8 217.23	418.54	971.91	0.80	3.60
XS-7	5 251.87	441.48	899.81	2.63	3.31
XS-8	8 405.43	588.01	1 157.77	1.17	4.10
XS-9	6 497.19	683.52	1 404.96	1.78	4.04
最大值	8 470.51	1 670.41	1 624.00	2.63	5.81
最小值	2 427.90	376.87	487.36	0.99	2.70
平均值	6 134.36	642.01	1 035.83	1.52	3.70

采用 ArcGIS 空间插值法对表 4 各混合样点的土壤重金属浓度进行插值,得到如图 2 所示的空间分布图。结合表 4 和图 2 可以看出,所有样点中 4 种重金属含量均超标;Pb 超标最严重的点位为 XS-4、XS-8、XS-6,主要分布于整个 K2 排土场的坡脚和坡顶,以及 K3 排土场的坡中区域;Cu 超标最严重的是 K1 排土场坡顶 XS-1 点位;Zn 含量分布图中,排土场 K2 和 K3 土壤 Zn 含量较高,XS-5、XS-9 点位超标最严重;土壤中 Cd 超标最严重的是 K3 排土场坡顶 XS-7 点位。以上结果说明各排土场区域重金属元素分布存在明显差异,这可能与排土场堆积的矿石种类、年限和堆积方式存在很大关系,后期实施土壤污染治理依据污染情况可针对各重金属进行精准修复。

## 2.2 土壤重金属污染的环境质量评价

### 2.2.1 单因子污染指数法

采用单因子污染指数法,排土场各混合土样中 Pb、Cu、Zn、Cd 四种金属的单因子污染指数见表 5,

其空间分布如图 3 所示。由表 5 和图 3 可知,研究区土壤中各金属污染指数  $P_i$  平均值排序为: $P_{\text{Pb}}$  (87.63) >  $P_{\text{Cu}}$  (12.84) >  $P_{\text{Zn}}$  (5.18) >  $P_{\text{Cd}}$  (5.08)。根据表 1 和单因子污染指数,土壤环境质量评价分级均处于 V 级,均表现为重度污染。从排土场污染空间分布看,Pb、Zn 污染面积更大,其中 K2 排土场污染最严重,主要表现为 Pb、Zn 重污染等级,K1、K3 排土场分别表现为 Cu、Cd 重污染等级。

### 2.2.2 内梅罗综合指数法

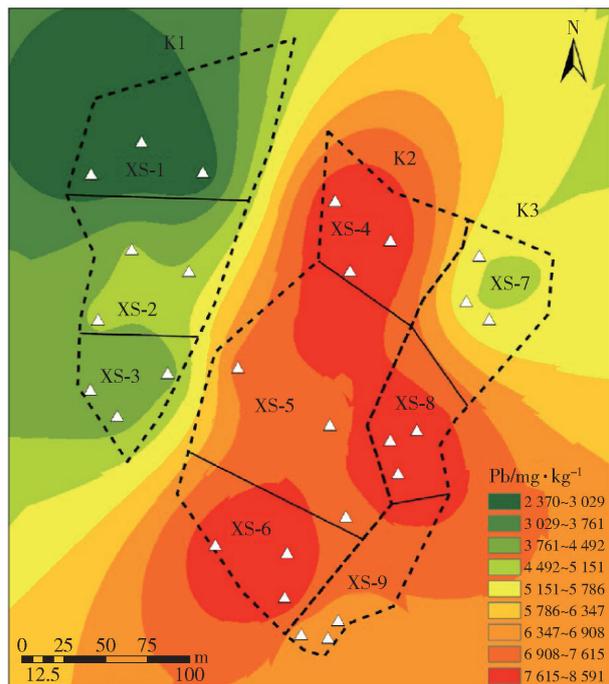
采用内梅罗综合指数法,排土场各混合土样的综合污染指数见表 5,其空间分布如图 4 所示。由图 4 可知,土壤环境污染综合指数  $P_{\text{综}}$  平均值为 65.06,各样点的  $P_{\text{综}}$  相差较大,为 28.23 ~ 89.23,说明研究区土壤属于重金属重度污染。整个排土场 K2 区域污染更严重(图 4),这主要是因为民采固体矿渣无序堆放,长期暴露在露天环境下,可溶性重金属离子被雨水淋溶出来,造成了排土场土壤中 Pb、Cu、Zn、Cd 严重富集,容易引发周边农田及下游水体重金属污染<sup>[17]</sup>。

表 5 单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价结果

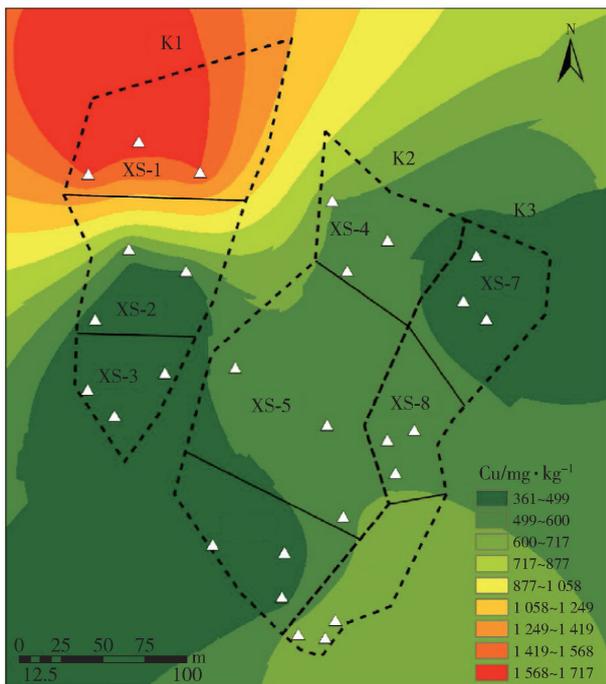
样品编号	$P_{\text{Pb}}$	$P_{\text{Cu}}$	$P_{\text{Zn}}$	$P_{\text{Cd}}$	$P_{\text{综}}$
XS-1	34.68	33.41	4.83	6.19	28.23
XS-2	65.89	8.89	3.06	3.31	48.75
XS-3	58.67	7.54	2.44	2.89	43.37
XS-4	121.01	11.04	5.99	5.17	89.23
XS-5	103.14	12.06	8.12	6.87	76.48
XS-6	117.39	8.37	4.86	2.66	86.29
XS-7	75.03	8.83	4.50	8.77	55.76
XS-8	120.08	11.76	5.79	3.92	88.52
XS-9	92.82	13.67	7.02	5.92	68.94
最大值	121.01	33.41	8.12	8.77	89.23
最小值	34.68	7.54	2.44	2.66	28.23
平均值	87.63	12.84	5.18	5.08	65.06

### 2.3 土壤重金属元素含量和土壤 pH 值间的相关性

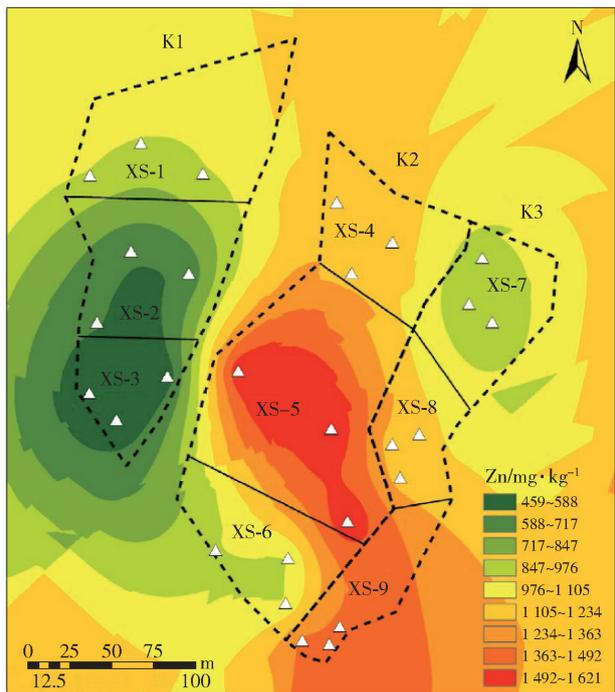
土壤酸化程度的加深和范围扩大会改变重金属赋存状态,使重金属毒性元素释出和活化,大大增强重金属的活性和迁移性<sup>[18-19]</sup>。4 种重金属和土壤 pH 之间的相关分析见表 6。结果表明,土壤 pH 值与重金属元素 Cu 之间具有极显著的正相关关系,推测为排土场的酸化进一步加剧了可溶性铜离子



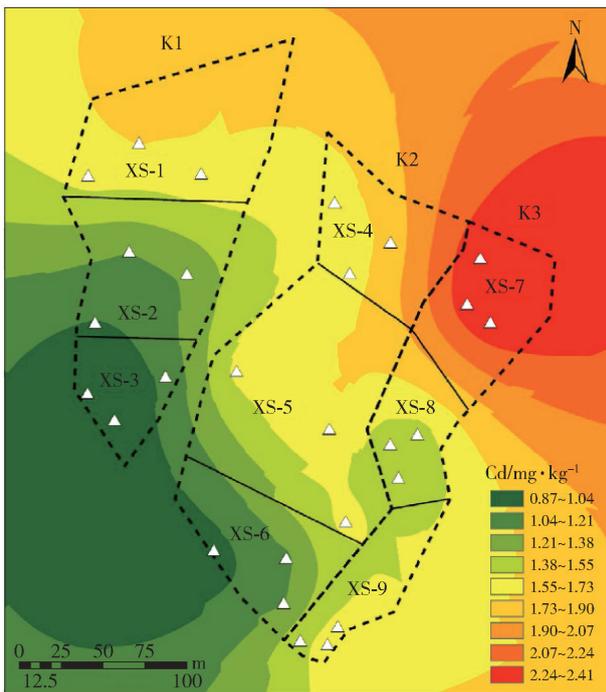
(a) Pb浓度空间分布图



(b) Cu浓度空间分布图



(c) Zn浓度空间分布图



(d) Cd浓度空间分布图

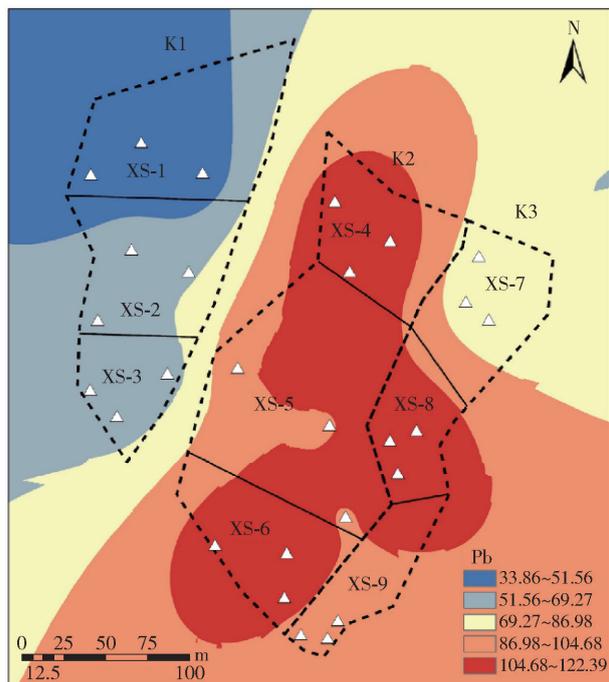
图2 研究区土壤中4种重金属浓度空间分布示意图

的溶出。此外,各重金属元素之间相关性较弱,说明重金属元素在来源上存在一定程度的相同性。一般认为Cd通常来源于成土母质,受人为活动影响较小<sup>[20]</sup>。4种重金属平均含量远高于韶关市土壤环境背景值,可推断该区域重金属来源受自然来源和人为来源共同影响,其中民采等人类活动影响更大。

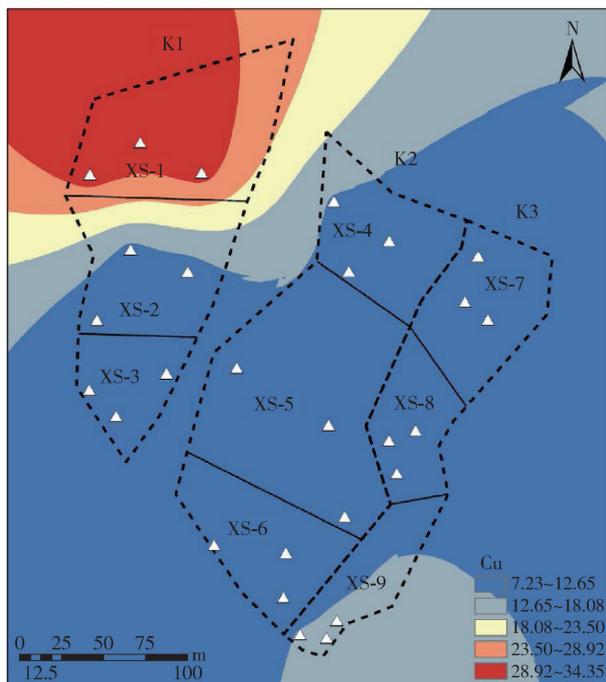
表6 样点区域土壤重金属含量和土壤pH间相关性分析

	pH	Pb	Cu	Zn	Cd
pH	1				
Pb	-0.325	1			
Cu	0.880**	-0.527	1		
Zn	0.364	0.553	0.149	1	
Cd	0.317	-0.156	0.29	0.467	1

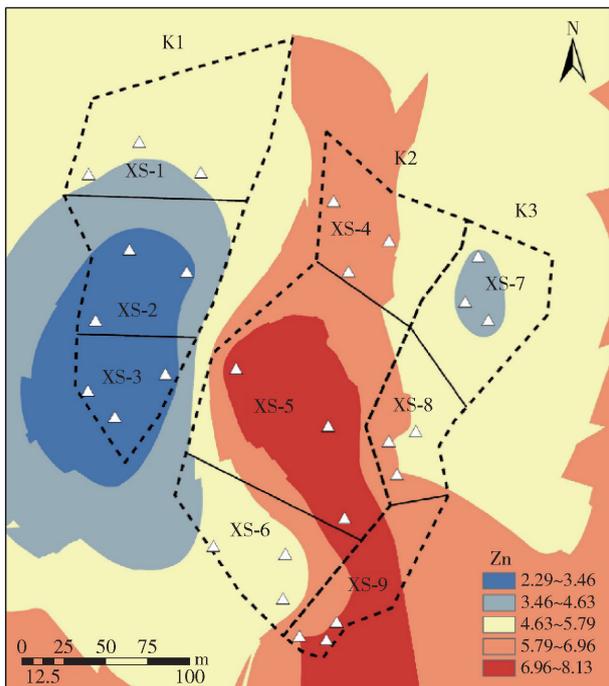
注:采用SPSS 20双变量Pearson相关分析进行显著性检验,\*\*代表极显著性差异( $P < 0.01$ )



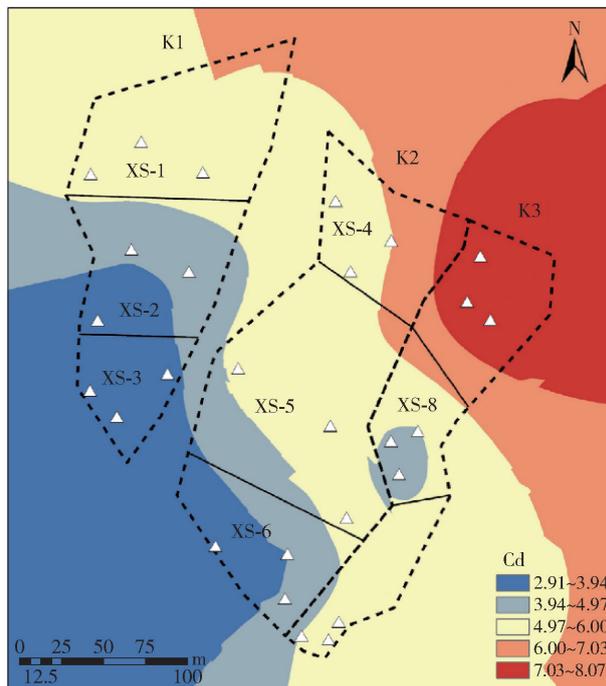
(a) Pb污染指数空间分布图



(b) Cu污染指数空间分布图



(c) Zn污染指数空间分布图



(d) Cd污染指数空间分布图

图3 研究区土壤重金属单因子污染指数空间分布示意图

### 3 结束语

1) 排土场采样区土壤 pH 均值为 3.70, 为强酸性。研究区存在重金属污染, Pb、Cu、Zn、Cd 含量均高于风险筛选值, 平均含量分别为 6 134.36 mg/kg、642.01 mg/kg、1 035.83 mg/kg、1.52 mg/kg, 分别为其风险筛选值的 87.6 倍、12.8 倍、5.2 倍、5.1 倍。

土壤中 4 种重金属元素分布也存在明显差异, 超标率均为 100%。

2) 单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数的评价结果表明, 土壤环境质量评价分级均处于 V 级, 均表现为重度污染。4 种金属元素的污染指数  $P_i$  平均值排序为:  $P_{Pb}$  (87.63) >  $P_{Cu}$  (12.84) >  $P_{Zn}$  (5.18) >  $P_{Cd}$  (5.08); 酸性排土场 Pb、Zn 污染面积

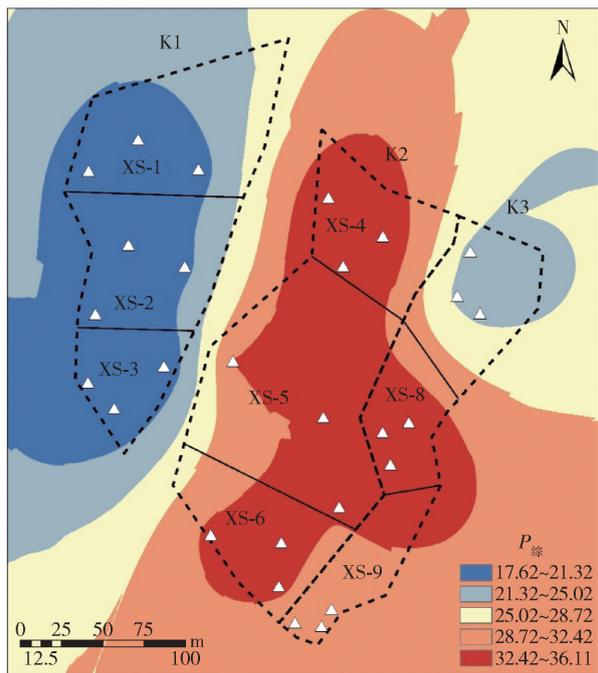


图4 研究区土壤重金属综合污染指数( $P_{综}$ )空间分布示意图

更大。综合污染指数  $P_{综}$  平均值为 65.06, 各样点间  $P_{综}$  相差较大, 范围为 28.23 ~ 89.23。

3) 研究区土壤 pH 值与重金属元素 Cu 之间具有极显著的正相关关系, 而各重金属元素之间相关性较弱, 说明重金属元素在来源上存在一定程度的同性。

#### [参考文献]

[1] SHI Jing, DU Ping, LUO Huilong, et al. Characteristics and Risk Assessment of Soil Polluted by Lead around Various Metal Mines in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(9):1-9.

[2] 刘玉华. 金属硫化物矿山酸性开采边坡原位固化及厚层基材喷射技术研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 95-99.

[3] 党志, 姚谦, 陈锴, 等. 粤北大宝山矿区污染成因与源头控制技术进展[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7):1377-1386.

[4] 陈波. 矿山排土场生态恢复实践——以德兴铜矿水龙山为例[J]. 江西建材, 2017(22):278-279.

[5] 陈文德, 朱坤, 姚文文, 等. 云南雪鸡坪铜矿区土壤重金属污染评价[J]. 高原科学研究, 2021, 5(2):5-12, 26.

[6] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J/OL]. 环境科学: 1-14 [2021-08-26]. <https://doi.org/10.13227/j.hjkk.202105019>.

[7] 谢金亮, 张建锋, 刘永兵, 等. 白云鄂博稀土伴生矿区土壤重金属污染及其环境评价[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(2):92-101.

[8] 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.

[9] 唐瑞玲, 王惠艳, 吕许朋, 等. 西南重金属高背景区农田系统土壤重金属生态风险评价[J]. 现代地质, 2020, 34(5):917-927.

[10] 唐启能. 广东曲江大宝山多金属矿床中伴生稀有, 分散元素的研究及评价[R]. 广东省地质局 705 队. 1959.

[11] 罗明, 鞠正山, 魏洪斌. 基于自然的重金属污染矿地解决方案——以广东省大宝山矿业废弃地为例[J]. 中国土地, 2020(1):39-41.

[12] 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 等. 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价[J]. 环境科学, 2019, 40(12):5629-5639.

[13] 丁俊男, 于少鹏, 史传奇, 等. 寒区湿地不同土地利用方式对土壤理化性质和团聚体稳定性的影响[J/OL]. 生态学杂志: 1-10 [2021-08-26]. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202111.003>.

[14] LI Kexin, LIANG Tao, WANG Lingqing, et al. Contamination and health risk assessment of heavy metals in road dust in Bayan Obo Mining Region in Inner Mongolia, North China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015(25):1439-1451.

[15] RUTTENS A, COLPAERT J V, MENCH M, et al. Phytostabilization of a metal contaminated sandy soil. II: Influence of compost and/or inorganic metal immobilizing soil amendments on metal leaching[J]. Environmental Pollution, 2006, 144(2):533-539.

[16] 丁翠, 李琦, 郭楚玲, 等. 酸性矿山废水对稻田土壤微生物菌群结构的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(9):3080-3089.

[17] 孙东, 张志鹏, 周亚萍, 等. 叙永县落卜硫铁矿矿山土壤环境治理效果研究[J]. 四川环境, 2021, 40(1):174-181.

[18] 段嘉欣, 梁斌, 李忠惠, 等. 川南兴文夔王山酸化土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 四川环境, 2020, 39(4):129-135.

[19] 王存龙, 郑伟军, 王红晋, 等. 山东烟台环境介质中重金属元素富集特征及与酸化土壤的关系[J]. 岩矿测试, 2012, 31(2):361-369.

[20] 赵曦, 黄艺, 李娟, 等. 大型垃圾焚烧厂周边土壤重金属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6):1013-1021.