齐大山铁矿土壤重金属空间分布特征*

柴青平[1],李雪松[2],刘思懿[3,4],王 莉[4],赵玉琪[1],赵昀奇[4]

(1.鞍钢集团矿业有限公司, 辽宁 鞍山市 114001;
2.鞍山冶金工业集团有限公司, 辽宁 鞍山市 114000;
3.鞍山市台安县自然资源事务中心, 辽宁 台安市 114100;
4.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:为探究齐大山铁矿周边土壤重金属污染特征及其空间分布规律,以露天采场、排土场、尾矿库三类单一污染源及其共同作用的多污染源区域为研究对象,通过系统布点采集土壤样品,测定Ni、Cr、Zn、Cu四种重金属的含量及土壤理化性质,结合反距离权重插值法构建空间分布模型,并采用相关性分析,展开了单一污染源和多污染源相互作用条件下土壤污染物迁移规律的研究。结果表明:4种重金属的含量普遍超过辽宁省背景值,其中Ni污染最为突出;水平方向上,单一污染源周边土壤重金属含量随距离的增大而降低,而多污染源复合区呈现中心高的分布特征;垂直分布上,重金属整体表现为表层富集,但在部分区域受雨水淋溶与土壤吸附作用影响,出现"表层低-中层高-深层低"的分布现象。相关性分析表明,重金属空间分布受污染源类型、距离及土壤pH、有机质含量、阳离子交换量等理化性质的共同影响。研究可为矿区土壤污染防控与生态修复提供科学依据。

关键词:铁矿;重金属污染;空间分布;污染源;土壤理化性质

中图分类号:X53;X753 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0207-10

Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Qidashan Iron Mine

CHAI Qingping[1], *LI Xuesong*[2], *LIU Siyi*[3,4], *WANG Li*[4], *ZHAO Yuqi*[1], *ZHAO Yunqi*[4]

(1.Ansteel Group Mining Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114001, China;
2.Anshan Metallurgical Industry Group Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114000, China;
3.Tai'an County Natural Resources Service Center of Anshan City, Tai'an, Liaoning 114100, China;
4.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: To investigate the characteristics of heavy metal pollution and its spatial distribution patterns in the soil around the Qidashan iron mine, three types of single pollution sources (open-pit mine, waste rock dump, and tailings pond) and their multi-pollution source areas were selected as the study objects. Soil samples were systematically collected, and the concentrations of four heavy metals (Ni, Cr, Zn, Cu) and physical and chemical properties of soil were measured. A spatial distribution model was constructed by using the inverse distance weighting interpolation method, and correlation analysis was conducted to explore the migration patterns of soil pollutants under both single and multi-pollution source conditions. The results show that the concentrations of all four heavy metals generally exceed the background values of Liaoning Province, among them, Ni pollution is the most prominent. Horizontally, the heavy metal contents in the soil around single pollution sources decrease with increasing distance, while the multi-pollution source composite area exhibits a center-high distribution pattern. Vertically, heavy metals show overall enrichment in the surface layer, but in some areas, influenced by rainfall leaching and soil adsorption, a "low at surface layer-high at middle layer-low at deep layer" distribution phenomenon has been observed. Correlation analysis indicates that the spatial distribution of heavy metals is jointly influenced by pollution source types, distance, and physical and chemical properties of soil such as pH, organic matter content, and cation exchange capacity. This study can provide a scientific basis for the prevention, control, and ecological remediation of soil pollution in mining areas.

Key words: Iron ore, Heavy metal pollution, Spatial distribution, Pollution source, Physical and chemical properties of soil

---

* **收稿日期**:2025-01-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52074061);辽宁省基本科研面上资助项目(JYTMS20230616);鞍钢集团矿业有限公司科研计划项目(2023-科A06)

作者简介:柴青平(1979—),男,辽宁鞍山人,硕士,高级工程师,主要从事露天矿境界设计及生态环境优化研究。E-mail:48226792@qq.com

通信作者:刘思懿(1998—),女,辽宁鞍山人,硕士,主要研究方向为露天矿生态环境优化。E-mail:2997477752@qq.com

0 引言

我国露天矿山普遍具有开采年限长、占地面积广的特点[1-2]。矿山开采过程中伴随着严重的环境污染问题[3-5]。长期采矿活动影响下,矿山内部及周边生态环境破坏严重,水、土壤以及大气等都受到污染物的侵蚀,其中,土壤受到的破坏尤为严重[6-9]。根据开采工艺特点,露天金属矿山的土壤重金属污染地主要来源包括露天采场、排土场和尾矿库等[10-14],且土壤重金属污染物具有停滞性、隐蔽性和破坏性[15-16]等特征。李晶等[18]为探究露天矿采场周边重金属含量的污染情况和空间分布特征,采用原子吸收光谱法测定 Pb、Zn、Cr、Cu 四种重金属含量,探索不同土壤重金属含量之间的相关性及来源。刘瑞瑶等[19]采用原子荧光法和原子吸收法测定某露天矿排土场土壤重金属 As、Hg、Pb、Cr、Cd、Cu 和 Zn 含量,并确定其主要来源为排土场排出的废石。胡凌霄等[20]采用电感耦合等离子体法、X-射线荧光光谱法、原子荧光光谱法得出尾矿库周边土壤中的 Pb、As、Cd、Cu、Hg、Zn 等重金属含量超标。李青等[21]指出尾矿库扬尘是将重金属及其他有毒物质随扬尘对周边土壤造成污染的重要方式之一。国内外研究对象多为单一污染源[22-25],而针对多污染源的研究文献较少。因此,本文以齐大山铁矿采区内单一污染源(露天采场、排土场和尾矿库)和多污染源(三者共同污染区域)为研究对象,基于目前铁矿山的开采现状和土壤受污染情况,展开了关于该露天铁矿单一污染源下土壤污染物迁移规律以及多污染源相互作用条件下土壤污染物迁移规律的变化研究,以期为矿山土壤污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

齐大山露天铁矿位于辽宁省鞍山市东北郊,铁矿矿坑中心距鞍山市 12 km;北侧紧邻该露天铁矿山的选矿厂,西南 1.3 km 处为调军台选矿厂,东南为风水沟尾矿库,南侧 6 km 为鞍千矿业公司及其选矿厂。研究区地形比较复杂,地貌为东高西低的低矮丘陵山地,山脉走向大致为西北-南东向,山势缓和,相对高差为 100～300 m,矿区西侧较为平坦,是一冲积平原,海拔标高一般在 35～45 m。

1.2 数据采集

采用 Arcgis10.8 对土壤进行 500 m×500 m 网格划分,并取网格中心点为土壤采样点。受现场岩土体影响及工程环境约束,分别在露天采场、排土场、尾矿库周边土壤和三者共同影响区域布设 5,5,5,4 个现场采样点,且 4 个区域部分设计的采样点不能实际采集,故采用反距离权重法对未知点进行估值,分别估值 7,6,3,2 个点位,如图 1 所示,红点为现场采样点,绿点为估值点(颜色标识见电子版)。同时为研究水平和垂直方向上的迁移特征,本次采集数据需参照采样标准采集表层(0～25 cm)、中层(25～60 cm)、深层(60～100 cm)土壤。

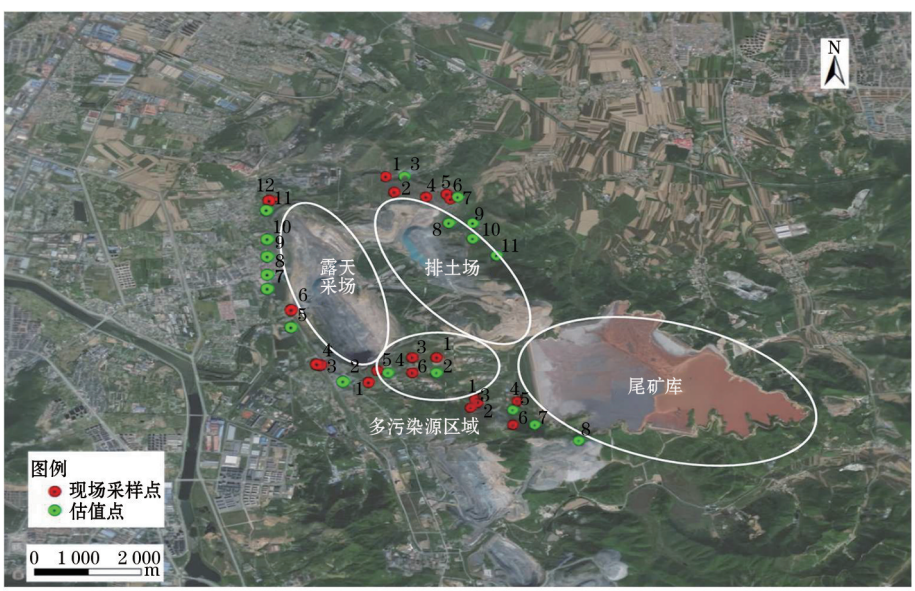


图 1 土壤采样点分布

Fig.1 Distribution of soil sample points

1.3　样品分析

对采集的土壤样品进行预处理，分别过 10 目(2 mm)、20 目(1 mm)、60 目(0.25 mm)和 100 目(0.15 mm)土壤筛并装袋，用于测试土壤 pH、含水率、阳离子交换量、有机质和重金属 Ni、Cr、Zn、Cu 元素等项目。所采用的检测方法包括电位法、烘干法、三氯化六氨合钴浸提-分光光度法、重铬酸钾容量法、硫酸硝酸法。

1.4　数据处理与分析方法

1.4.1　特征值法

以辽宁省背景值结合《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准用地，建立四种污染源区域周边土壤质量评价标准[26]。基于统计学对研究区域土壤重金属 Ni、Cr、Zn、Cu 含量的最小值、最大值、平均值、变异系数(CV，Coefficient of Variation)、标准值等特征值进行统计分析，研究总结该区域土壤重金属元素含量空间分布特征。其中，最小值和最大值用于确定该区域重金属浓度变化范围；平均值用于评估重金属整体超标程度；CV 为标准差(平均值与标准值的差值)与平均值的比值，用于表征该区域土壤重金属浓度的离散程度、空间变异程度以及反映重金属元素含量受人类活动的影响程度，且 CV 数值与三者呈正相关，即 CV 越大，表明数据的离散程度、空间分布上的差异、受人类活动的影响也越大。CV 变异程度可分为轻度变异(CV＜15%)、中度变异(15%≤CV＜36%)、高度变异(CV≥36%)[27]。

1.4.2　反距离权重插值(IDW，Inverse Distance Weighting)

反距离权重插值法认为任意一种观测点的值对插值点值的影响与二者之间的距离成反比关系。假设对插值点(x_0,y_0)的土样某一性质进行估值，最近的 N 个观测点对其影响程度随着它们之间距离的增加而减弱，故被赋予的权重系数 Q_i 更小，权重的和为 1[28]。

IDW 的数学表达式如式(1)所示：

$$\hat{Z}_0=\sum_{i=0}^{m}(Z_iQ_i) \tag{1}$$

式中：$\hat{Z}_0$ 为待估点的预测值；m 为插值点的个数；i 为所选取的某个插值点；Z_i 为插值点的赋值。权重系数 Q_i 的表达式如式(2)所示：

$$Q_i=\frac{f(d_{ej})}{\sum_{j=1}^{n}f(d_{ej})} \tag{2}$$

式中：n 为已知观测点的数量；j 表示所选取的某个观测点；$f(d_{ej})$ 表示已知观测点与插值点之间已知距离 d_{ej} 的权重函数，常用表达式为：

$$f(d_{ej})=\frac{1}{d_{ej}^{b}} \tag{3}$$

式中，b 是常数，当 $b=1$ 时，为反距离倒数插值；$b=2$ 时，为反距离倒数平方插值。

1.4.3　相关性分析法

采用 SPSS22.0 软件设置皮尔逊相关系数拟合方式对 4 个污染源区域周边土壤理化性质进行相关性分析。受环境约束，各研究区域所采集的数据量均小于 50，故采用夏皮洛-威尔克(S-W)检验结果，且当 S-W 值大于 0.05 时，数据符合正态分布。若两个变量之间的显著性 $p\leqslant0.05$，说明存在显著相关关系。分析两个变量之间的相关性关系，分为 0.01(**)和 0.05(*)两种显著性水平，分别表示相关性结果有 99%和 95%的置信度。相关性系数 r 的取值范围为[−1，1]，绝对值越大说明越相关。相关性系数的正负值代表两个变量之间的正负相关性，当 $|r|=1$ 时，变量间为完全相关；当 $0.8<|r|<1$ 时，为高度相关；$0.5<|r|\leqslant0.8$ 为中等相关；当 $0.3<|r|\leqslant0.5$ 时，相关度较低；当 $|r|\leqslant0.3$ 时，两个变量之间无相关。

2　结果与分析

2.1　土壤垂直方向重金属含量特征

对 4 个污染源区域周边土壤中不同深度土壤，通过现场采样和反距离权重法估值进行重金属元素特征值统计，结果见表 1。

据表 1 所示，在单一或多污染源区域，周边土壤的 Ni 元素含量均超过辽宁省背景值，甚至部分采样点数据超过国家二级标准，其中 Cr 元素污染程度较高，而 Zn 和 Cu 污染程度较低。4 种重金属的平均含量随土壤深度的增加而逐渐降低，表明 4 种重金属均存在表层富集的现象。其变异程度基本上处于中度变异或高度变异，表明 4 种重金属含量的数据离散程度大。经分析可知，表层土壤存在的重金属富集可能受人为影响较大，多个污染源之间的相互作用对土壤表层重金属富集有较大影响。

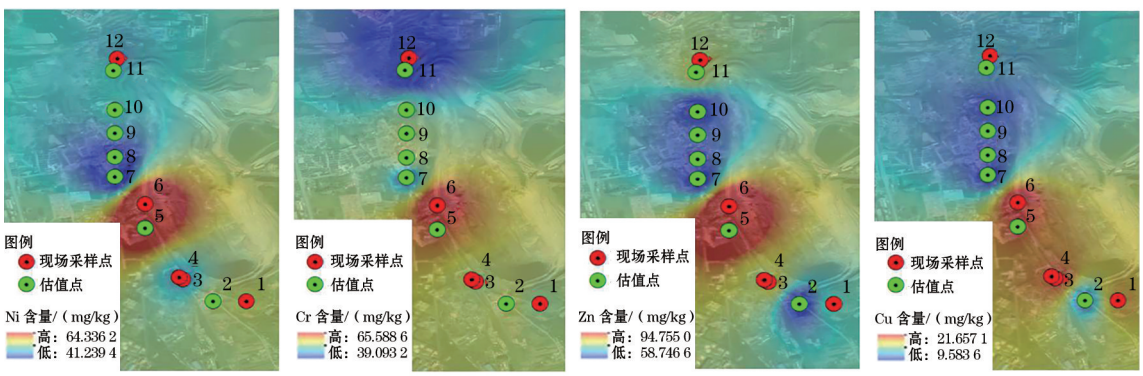
表 1 土壤重金属元素特征值统计

Table 1 Statistics of characteristic values of soil heavy metal elements

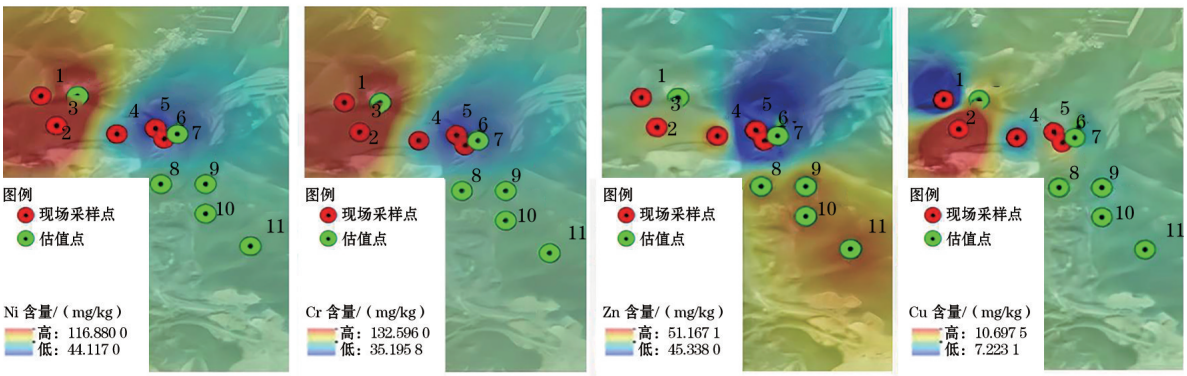
研究区域		特征值	土壤深度	Ni	Cr	Zn	Cu
单一污染源区域	露天采场	变化范围/(mg/kg)	表层	41.2～64.4	39.1～65.6	58.7～94.8	9.6～21.7
			中层	38.7～62.1	34.3～57.6	52.7～74.5	8～20.3
			深层	37.7～51.2	34.9～48.8	50～63.2	7.8～16.4
		平均值/(mg/kg)	表层	48.9	51.1	71.3	14.4
			中层	47.3	46.2	61	12.3
			深层	45.2	42.2	56.8	11.2
		变异系数/%	表层	13.00	14.30	17.20	29.80
			中层	13.60	14.30	11.20	31.80
			深层	8.90	9.80	7.20	23.90
	排土场	变化范围/(mg/kg)	表层	44.1～116.9	35.1～132.6	45.3～51.2	7.2～10.7
			中层	45.7～108	32.5～61	48～72.1	7.2～12.8
			深层	46.7～103.3	34.6～59	46.1～74	7.1～9.4
		平均值/(mg/kg)	表层	73.1	75.1	48.6	8.7
			中层	71.2	44.0	53.7	9.2
			深层	69.9	44.9	53.2	8.3
		变异系数/%	表层	38.10	49.40	5.20	14.90
			中层	33.80	26.00	19.20	23.00
			深层	31.40	23.70	22.00	9.90
	尾矿库	变化范围/(mg/kg)	表层	28.9～81.9	8～88.6	29.8～49	1.3～10
			中层	30.5～59.1	8.2～74.7	40.1～48.9	2.2～12.4
			深层	33.1～59.7	11～75.1	40.4～49.1	2.1～9.4
		平均值/(mg/kg)	表层	52	43.6	38.3	5.8
			中层	43.1	35.1	42.8	7.9
			深层	43.8	36.6	43.4	6.9
		变异系数/%	表层	37.10	68.40	19.20	68.40
			中层	25.70	69.30	8.20	47.20
			深层	25.10	64.10	7.90	42.40
多污染源区域		变化范围/(mg/kg)	表层	21.3～60.4	10.7～68.8	42.5～65.3	11.4～16.9
			中层	18.8～46.9	13.2～51	39.1～51.4	8～15.9
			深层	16.1～44.7	12.7～41.5	39.8～48.7	5.9～14.6
		平均值/(mg/kg)	表层	40.4	39.0	54.2	13.7
			中层	35.6	34.4	46	11.8
			深层	32.3	30.9	44.6	10.5
		变异系数/%	表层	40.60	62.00	20.60	16.90
			中层	35.60	46.20	11.80	27.60
			深层	40.70	42.20	8.20	34.30
辽宁省背景值				25.6	57.9	63.5	19.8
土壤环境质量二级标准				≤60	≤250	≤300	≤100

2.2 土壤水平方向上重金属含量分布特征

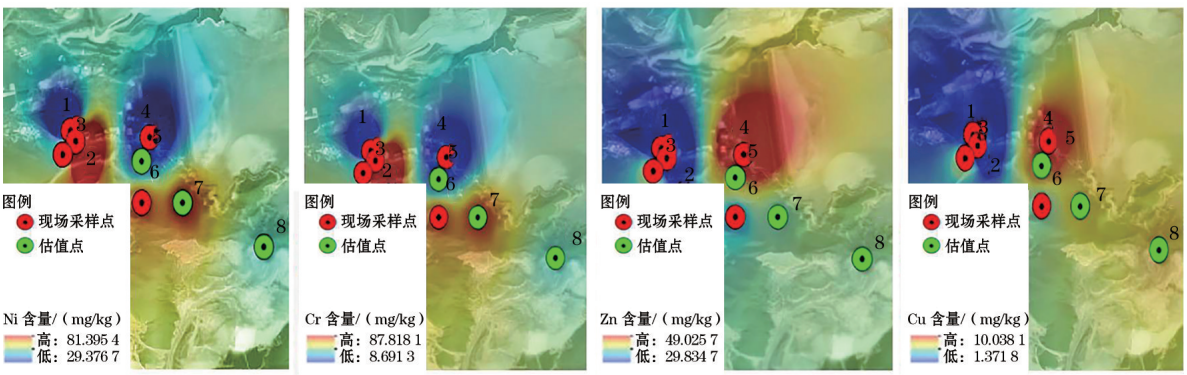
四个污染源区域周边土壤表层中,Ni、Cr、Zn、Cu重金属含量水平空间分布及浓度分布见图 2 和图 3,其中,图 3 中虚线表示各重金属元素的辽宁省背景值。



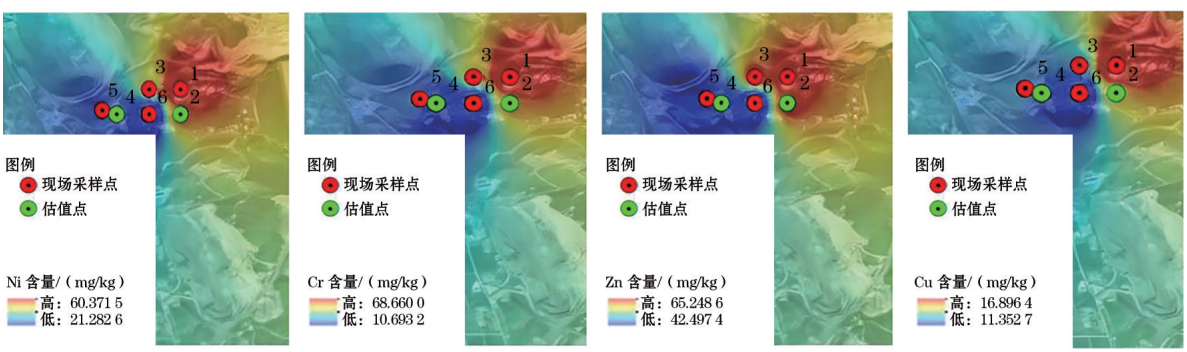
(a) 露天采场周边土壤



（b）排土场周边土壤



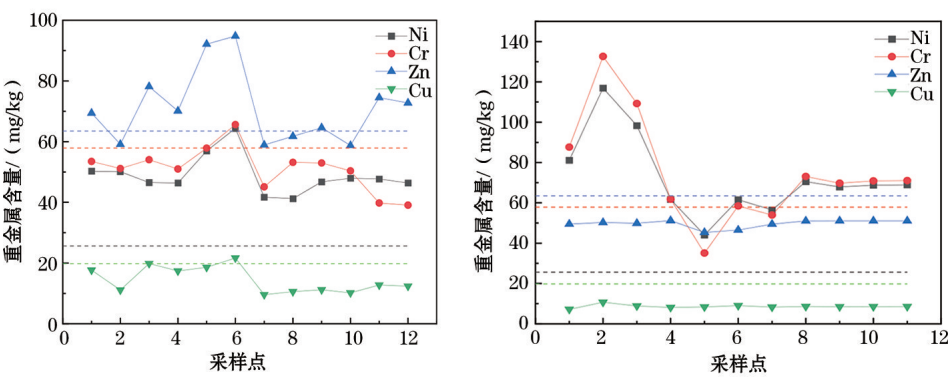
（c）尾矿库周边土壤



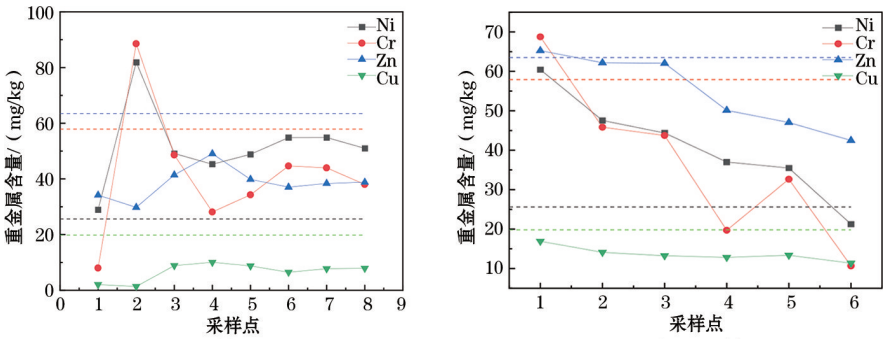
（d）多污染区域土壤

图 2　4 个污染源区域土壤重金属含量水平方向空间分布特征

Fig.2　The horizontal spatial distribution characteristics heavy metals content in soil of four pollution source areas



（a）露天采场周边土壤　　（b）排土场周边土壤



(c) 尾矿库周边土壤　(d) 多污染区域土壤

图 3　土壤重金属水平方向浓度分布

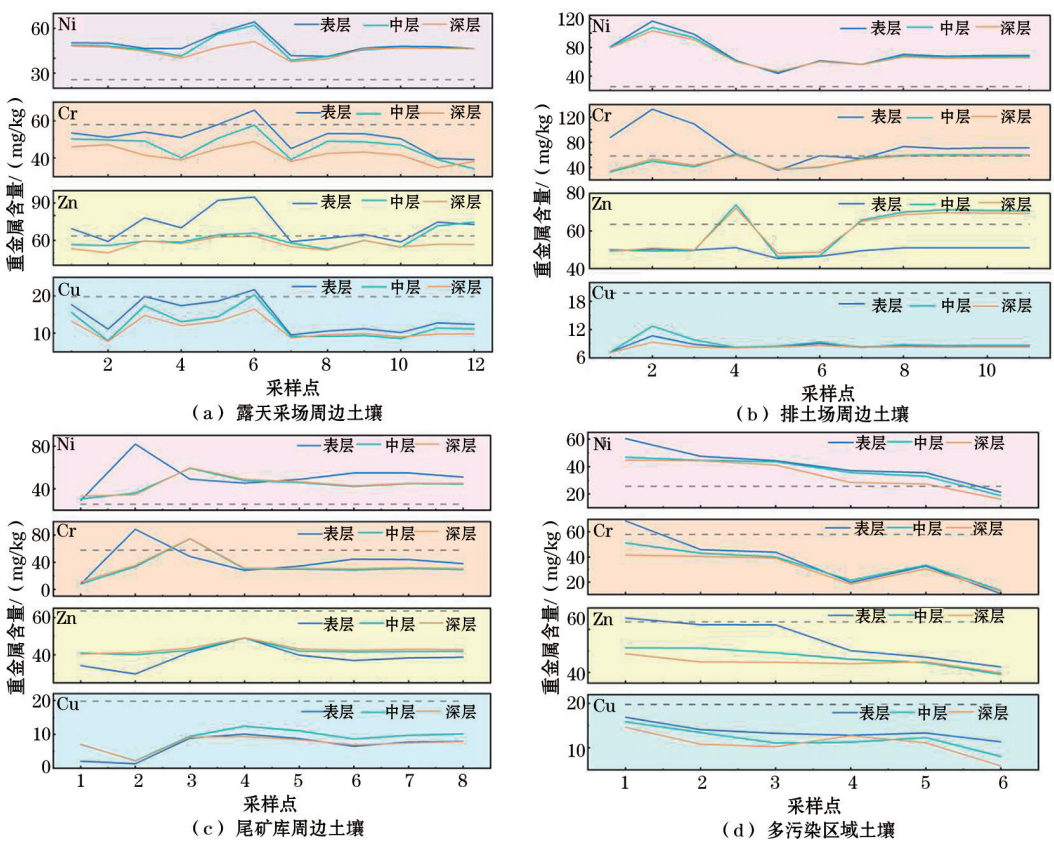
Fig.3　The horizontal concentration distribution of heavy metals in soil

由图 2、图 3 可知,水平方向上 4 种重金属含量变化一致。当采样点越靠近污染源,土壤的重金属含量越高,说明与污染源的距离是影响水平方向上重金属含量的关键因素。但尾矿库周边土壤中的 Ni 与 Cr 则呈现相反规律,两种元素均与有机质含量存在正相关关系。其原因可能包括两个方面:一是植物与尾矿库距离越远,覆盖度越高,从而导致随着距离增大,有机质含量增大;二是尾矿库周边水系可能较为丰富,土壤含水量较高,导致 Ni 和 Cr 等迁移能力较强的重金属极易迁移,从而会出现距离尾矿库越远,重金属含量越高的现象。

多污染源区中点位 1 的重金属含量最高,其位置近似位于多污染源中心,且与 3 个单一污染源的距离近似相同,说明该点位受到多个单一污染源协同影响程度最大。其他点位与个别污染源距离较远,多个污染源间相互影响程度减小,故其重金属浓度降低,土壤受污染情况减弱,表明多污染源区域土壤中的重金属污染物分布特征与污染源的数量、空间布置及扩散过程密切相关。

2.3　土壤垂直方向上重金属分布特征

4 个污染源区域中 Ni、Cr、Zn、Cu 四种重金属元素在不同采样点和不同深度上的含量分布如图 4 所示。



(a) 露天采场周边土壤　(b) 排土场周边土壤

(c) 尾矿库周边土壤　(d) 多污染区域土壤

图 4　土壤重金属垂直方向浓度分布

Fig.4　The vertical concentration distribution of heavy metals in soil

由图 4 可知,在单一污染源周边土壤中,4 种重金属含量在不同污染源区域土壤的不同深度中变化均有所不同,说明重金属的含量变化与土壤理化性质存在一定关系。在各层土壤中,Ni 和 Cu 两者的含量变化趋势相似,在同种土壤类型条件下,Cr 表层含量变化与下层含量变化差距较大,说明 Cr 的垂直迁移能力比 Ni 弱,重金属迁移能力与土壤理化性质和重金属自身性质均存在相关性。表层重金属含量普遍要高于中层和深层,但部分 Zn 和 Cu 元素的含量值在整体上随土壤深度增加呈现先上升后下降的趋势,这是因为排土场、尾矿库周边长期堆积的物料在雨水淋溶下,表层土壤中这两种重金属随水分大量向下渗透,而中层土壤因其特有的理化性质(如有机质含量或阳离子交换量)对重金属产生了较强吸附而阻碍其向更深层迁移,导致深层土壤成为次生富集层,从而出现重金属含量变化曲线出现“表层低—中间高—深层低”的分布现象。

在多污染源周边土壤中,4 种重金属的平均含量呈表层>中层>深层的变化趋势,且中层和深层土壤中的每种重金属的含量曲线接近或相似,则多污染源的地下土壤对重金属的渗透作用较为明显。且多污染源的土壤种类可能存在差异,其理化性质影响了土壤的向下渗透能力。

采用 SPSS22.0 软件设置皮尔逊相关系数拟合方式,对 4 个污染源区域周边土壤重金属含量与土壤的理化性质进行相关性分析,结果见表 2。

表 2 土壤重金属含量与理化性质相关性分析

Table 2 Correlation analysis of soil heavy metals contents and physical and chemical properties

研究区域		重金属与理化指标	Ni	Cr	Zn	Cu	pH	有机质	含水率	阳离子交换量
单一污染源区域	露天采场	Ni	1							
		Cr	0.564**	1						
		Zn	0.342*	0.327	1					
		Cu	0.455**	0.474**	0.690**	1				
		pH	0.460**	0.559**	−0.025	0.022	1			
		有机质	−0.197	−0.411*	0.039	−0.211	0.095	1		
		含水率	−0.285	−0.218	−0.661**	−0.658**	0.159	0.357*	1	
		阳离子交换量	−0.261	0.186	−0.387*	−0.425**	0.478**	0.226	0.700**	1
	排土场	Ni	1							
		Cr	0.480**	1						
		Zn	−0.222	0.057	1					
		Cu	0.534**	0.219	−0.181	1				
		pH	0.157	0.408*	0.202	0.225	1			
		有机质	−0.171	−0.235	0.671**	−0.221	0.085	1		
		含水率	−0.584**	0.107	0.17	0.059	0.515**	−0.535**	1	
		阳离子交换量	0.271	0.21	0.195	0.495**	0.253	−0.035	−0.111	1
	尾矿库	Ni	1							
		Cr	0.898**	1						
		Zn	−0.259	−0.26	1					
		Cu	0.071	−0.074	0.703**	1				
		pH	−0.093	−0.029	−0.26	0.770**	1			
		有机质	0.644**	0.514**	0.057	0.113	−0.076	1		
		含水率	0.024	0.2	−0.476*	0.057	0.079	0.387	1	
		阳离子交换量	−0.177	0.017	0.603**	0.085	0.095	0.411**	0.847**	1
多污染源区域		Ni	1							
		Cr	0.332	1						
		Zn	0.022	0.487**	1					
		Cu	0.338	0.169	−0.188	1				
		pH	0.590**	−0.195	0.031	0.254	1			
		有机质	−0.03	−0.292	−0.841**	0.047	0.068	1		
		含水率	−0.861**	−0.003	0.585**	−0.206	0.400*	−0.657**	1	
		阳离子交换量	0.296	0.036	0.065	0.495**	0.21	−0.046	−0.103	1

注:** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著;* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

由表 2 可知,不同的污染源土壤重金属与其理化性质具有一定的相关性。在多污染源周边土壤中,含水率对重金属 Ni 向下迁移有影响;阳离子交换量对重金属 Cr 的吸附能力有影响;土壤酸碱度越

高,Zn 含量越高,其迁移能力降低;土壤有机质含量越高,重金属 Cu 的迁移能力越低。但在单一污染源中,因污染源的不同,土壤理化性质与其重金属有着不同的相关性,详情见表 3。

表 3 土壤理化性质垂直方向数值

Table 3 The values of soil physical and chemical properties in the vertical direction

特征值	土壤深度	露天采场		排土场			尾矿库	
		pH	含水率/%	pH	含水率/%	有机质含量	阳离子交换量	有机质含量
最小值	表层	6.81	0.82	7.09	0.75	5.39	138.68	3.81
	中层	6.85	0.96	6.93	0.85	5.67	315.07	4.83
	深层	6.78	1.21	7.05	1.35	5.47	83.06	5.06
最大值	表层	7.60	2.52	7.39	2.71	6.34	523.15	6.23
	中层	7.46	2.65	7.28	3.22	6.91	531.97	6.30
	深层	7.54	2.92	7.43	3.35	6.55	500.29	12.34
平均值	表层	7.28	1.85	7.27	2.31	5.89	302.71	5.30
	中层	7.26	2.08	7.14	2.49	6.25	409.21	5.28
	深层	7.17	2.24	7.19	2.80	6.11	219.83	6.27

综合可知,在露天采场周边土壤中层和土壤深层中,重金属含量普遍呈逐渐下降的趋势,Ni 和 Cr 的含量与土壤 pH 均呈显著正相关关系,这表明在土壤碱性条件下,重金属吸附量随着 pH 的增大而增加,阻碍重金属向下迁移,从而使中层和深层的 Ni、Cr 含量逐渐减少;土壤含水率随深度的增加而逐渐增大,Zn 和 Cu 的含量变化趋势相反,由于重金属随水分迁移速率变慢,Zn、Cu 在中层和深层的含量呈下降趋势。

排土场周边土壤中,Ni 含量随土壤深度的增加而不断减小,Cr 含量随深度的增加先减小后增大,而 Zn 和 Cu 的含量随土壤深度的增加先增大后减小。土壤含水率随深度的增加,阻碍重金属 Ni 向下迁移,使其含量降低。而 Cr 与 pH 呈正相关关系,土壤 pH 变化趋势与其相同,pH 越高,重金属 Cr 越容易沉淀和吸附,导致其从表层向中层的迁移能力减缓。有机质平均含量与重金属 Zn 的变化趋势一致,这是由于有机质与重金属离子形成络合化合物,有机质含量越高,越易吸附重金属。Cu 的含量与阳离子交换量呈显著正相关关系,阳离子交换量随深度的增加先增大后减小。土壤中通常带有不同数量的负电荷,一般来说,土壤阳离子交换量越大,吸附正电荷重金属离子的能力就越强,因此阳离子交换量越高,吸附铜离子(Cu^{2+})的量就越大。

在尾矿周边土壤中,重金属 Ni 和 Cr 元素随深度的增加呈先增大后减小的趋势,与有机质的平均含量具有相同的变化趋势。Cu 元素各层平均含量表现为随深度的增加呈先递增后减小的趋势,且与 pH 具有正相关关系,说明在中层土壤中,pH 升高使重金属 Cu 的沉淀增多,从而削弱重金属向深层迁移能力。

3 结论

本研究基于齐大山铁矿矿区单一污染源区(露天采场、排土场和尾矿库)和多污染源区(三者共同污染区域)土壤的 Ni、Cr、Zn、Cu 四种重金属含量特征值,利用反距离权重法对研究区域内未取样的点位进行估值,分析了水平方向上的重金属浓度分布特征,通过相关性分析明确了研究区域内影响土壤重金属垂直方向迁移因素和空间分布特征,得到如下结论。

(1) 4 个污染源区域内土壤均检测出 Ni、Cr、Zn、Cu 四种重金属元素,且其含量均超过辽宁省背景值,在 4 个区域内重金属 Ni 的污染程度较高,其次是 Cr,而 Zn 和 Cu 污染程度较低。

(2) 水平分布特征方面,单一污染源周边土壤重金属含量总体上与污染源距离成反比。然而,尾矿库周边的 Ni 与 Cr 呈现出相反的空间分布模式,推测这与植被覆盖度增加导致的土壤有机质积累及水动力条件增强促进了重金属迁移等因素有关。多污染源复合影响区域则表现出中心高的分布特征,即位于各污染源几何中心区域的重金属浓度最高,表明多污染源区域土壤重金属分布特征由污染源的数量、空间布局及扩散过程密切相关。

(3) 垂直分布特征方面,研究区土壤重金属总体呈现表层富集现象。但在排土场和尾矿库等区域,部分重金属(如 Zn、Cu)含量出现“表层低—中层高—深层低”的分布特征。这表明在长期降雨淋溶作用下,表层重金属向下迁移,而中层土壤因其特定的理化性质,对重金属产生了较强的吸附与固定作

用,从而阻断了其向更深层的迁移,导致中层成为次生富集层。

参考文献(References):

[1] 郭书海,李刚,李凤梅,等.辽宁省土壤污染概况及污染防治技术需求[J].环境保护科学,2016,42(4):11-13.
GUO Shuhai, LI Gang, LI Fengmei, et al. Status and technical requirements of soil pollution in liaoning province [J]. Environmental Protection Science,2016,42(4):11-13.

[2] 周硕,吴胡,陈葛成.大冶县幅重金属元素污染迁移规律[J].中国煤炭地质,2019,31(增刊1):85-90.
ZHOU Shuo, WU Hu, CHEN Gecheng. Heavy metal elemental pollution migration pattern in Daye County map sheet[J]. Coal Geology of China,2019,31(Suppl.1):85-90.

[3] 路一帆.苏州某重金属污染场地土壤中的污染物空间分布特征及健康风险评价[D].苏州:苏州科技大学,2021.
LU Yifan. Spatial distribution characteristics and health risk assessment of soil pollutants in a heavy metal contaminated site in Suzhou[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology,2021.

[4] 李诗强,胥佳佳,段召强,等.露天开采矿山历史遗留地质环境问题及恢复治理措施研究[J].世界有色金属,2021(17):173-174.
LI Shiqiang, XU Jiajia, DUAN Zhaoqiang, et al. Research on the geological environment problems left over by the history of open-pit mining mines and the restoration and control measures[J]. World Nonferrous Metals,2021(17): 173-174.

[5] 金江鹏.露天采矿矿山地质环境问题与恢复治理措施[J].世界有色金属,2021(22):54-55.
JIN Jiangpeng. Geological environment problems and restoration measures of open-pit mining [J]. World Nonferrous Metals,2021(22):54-55.

[6] DUAN Renyan, LIN Yuxiang, ZHANG Jianing, et al. Changes in diversity and composition of rhizosphere bacterial community during natural restoration stages in antimony mine[J]. Peer J,2021(9):e12302.

[7] 解丽娟,谢志远,郭光光.试论我国土壤污染的现状、危害及治理策略[J].新农业,2020(19):63-64.
XIE Lijuan, XIE Zhiyuan, GUO Guangguang. On the current situation, hazards, and management strategies of soil pollution in China[J]. New Agriculture, 2020(19): 63-64.

[8] 方建新,王璞.我国土壤污染现状分析及防治对策研究[J].资源节约与环保,2019(8):79.
FANG Jianxin, WANG Pu. Analysis on the current situation of soil pollution in China and research on prevention and control strategies [J]. Resources Economization & Environmental Protection,2019(8):79.

[9] 曹钰,宋晓曦.采矿区土壤重金属污染现状及检测方法研究[J].世界有色金属,2022(16):90-92.
CAO Yu, SONG Xiaoxi. Study on the status quo and detection methods of heavy metal pollution in soil of mining area[J]. World Nonferrous Metals,2022(16):90-92.

[10] VESKOVIC J, BULATOVIC S, MILETIC A, et al. Source-specific probabilistic health risk assessment of potentially toxic elements in groundwater of a copper mining and smelter area[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2024,38(4):1597.

[11] 钟礼汉.土壤重金属检测方法的应用及发展趋势研究[J].化工管理,2019(35):58-59.
ZHONG Lihan. Research on the application and development trend of soil heavy metal detection methods[J]. Chemical Engineering Management,2019(35):58-59.

[12] TOMIC N T, SMILJANIC S, JOVIC M, et al. Examining the effects of the destroying ammunition, mines, and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit: part 1-pseudo-total concentration[J]. Water Air and Soil Pollution,2018,229(9):301.

[13] 梁嘉伟.抚顺东露天矿开采过程粉尘污染与防治措施[J].现代矿业,2024,40(2):233-235.
LIANG Jiawei. Dust pollution and prevention measures in the mining process of Fushun east open-pit mine[J]. Modern Mining,2024,40(2):233-235.

[14] 宫永吉.露天采矿开采工艺过程粉尘污染与防治策略[J].中国金属通报,2021(10):37-38.
GONG Yongji. Dust pollution and prevention strategies in open-pit mining process[J]. China Metal Bulletin,2021(10):37-38.

[15] ARREGOCÉS H A, BONIVENTO G J, LADINO L A, et al. Human health risk assessment of PM10-bound heavy metals and PAHs around the Latin America's Largest opencast coal mine[J]. Environmental Science and Pollution Research,2023,30(60):125915-125930.

[16] 李斌,华宇鹏,田继兰,等.黑岱沟露天煤矿排土场周边土壤重金属污染分析[J].四川环境,2023,42(3):170-173.
LI Bin, HUA Yupeng, TIAN Jilan, et al. Analysis of heavy metal pollution in soil around the dumping site of Heidaigou open-pit coal mine[J]. Sichuan Environment, 2023, 42(3): 170-173.

[17] 丁冉伟.浅析尾矿库扬尘综合治理[J].中国金属通报,2022(7):162-164.
DING Ranwei. Analysis of comprehensive management of dust pollution from tailings dams[J]. China Metal Bulletin, 2022(7):162-164.

[18] 李晶,杨超元,殷守强,等.草原型露天煤矿区土壤重金属污染评价及空间分布特征[J].煤炭学报,2019,44(12):3676-3684.
LI Jing, YANG Chaoyuan, YIN Shouqiang, et al. Evaluation and spatial distribution characteristics of soil heavy metals pollution in grassland open-pit coal mine area [J]. Journal of China Coal Society,2019,44(12):3676-3684.

[19] 刘瑞瑶,秦儒,斯庆,等.内蒙古西部露天矿排土场土壤重金属污染状况评价(英文)[J].Journal of Resources and Ecology,2023,14(4):683-691.
LIU Ruiyao, QIN Ru, SI Qing, et al. Assessment of soil heavy metal pollution in the dump of a western Inner Mongolian coal mine[J]. Journal of Resources and Ecology, 2023,14(4):683-691.

[20] 胡凌霄,佟磊,冯加永,等.基于GIS的北京万庄金尾矿库及周边地区土壤重金属污染评价[J].矿产综合利用,2025,46(1):80-85.
HU Lingxiao, TONG Lei, FENG Jiayong, et al. GIS-based evaluation of heavy metal contamination in soil of Wanzhuang gold tailing pond and surrounding areas in Beijing[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025,46(1):80-85.

[21] 李青,周连碧,祝怡斌.金属矿山尾矿库区土壤与水环评重点探析[J].环境影响评价,2015,37(1):15-18.
LI Qing, ZHOU Lianbi, ZHU Yibin. Soil and water environmental impact assessment focal points for metal mine tailings[J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(1):15-18.

[22] 刘茂生.全国金属采矿业矿区周边土壤重金属污染评价及潜在污染区域识别[D].赣州:江西理工大学,2023.
LIU Maosheng. Evaluation of soil heavy metal pollution and identification of potential soil pollution areas around metal mining areas in China[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2023.

[23] CHEN S S, GAO J, DONG B, et al. Use of sludge stabilization products for remediation of heavy metal (loid)s-contaminated mine tailings: physicochemical, biochemical and microbial mechanisms [J]. Chemical Engineering Journal,2024(488):150640.

[24] 李静.不同化学因素影响下Cu/Cd复合污染土壤的解吸/迁移及数值模拟[D].青岛:青岛大学,2022.
LI Jing. Desorption/migration and numerical simulation of Cu/Cd compositepolluted soil under the influence of different chemical factors[D]. Qingdao: Qingdao University,2022.

[25] 陈佳,范萍萍,龙文涛,等.土壤侵蚀对重金属迁移的作用规律与机制研究进展[J].水土保持研究,2024,31(1):460-470.
CHEN Jia, FAN Pingping, LONG Wentao, et al. Research progress in mechanism of impact of soil erosion on heavy metal migration [J]. Research of Soil and Water Conservation,2024,31(1):460-470.

[26] 国家环境保护局,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.
National Environment Protection Bureau, China Environmental Monitoring General Station. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press,1990.

[27] CAI K, LI C, NA S. Spatial distribution, pollution source, and health risk assessment of heavy metals in atmospheric depositions: a case study from the sustainable city of Shijiazhuang, China[J]. Atmosphere,2019,10(4):222.

[28] 李海涛,邵泽东.空间插值分析算法综述[J].计算机系统应用,2019,28(7):1-8.
LI Haitao, SHAO Zedong. Review of spatial interpolation analysis algorithm[J]. Computer Systems & Applications, 2019,28(7):1-8.