

吉安县某矿山企业周边农田土壤重金属污染评价及风险评估

邓江啸, 陈振宇, 王继月, 冯珊珊

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年5月2日; 发布日期: 2025年5月12日

摘要

土壤重金属污染是指农业活动中化学用品的使用、工业活动中不正规的污染物排放和自然因素等导致某种重金属物质进入陆地表层土壤后, 引起土壤化学、物理、生物等方面特性改变的现象。长此以往进而影响土壤功能和有效利用, 甚至危害公众健康或破坏生态环境。位于江西吉安县地区的矿山企业所遗留的废弃矿区存在一系列环境问题, 重金属超标会影响周边居民的农田作物的增长和使用, 因此有必要对该区域的重金属污染问题及可能存在的健康风险进行评价和评估。基于此, 采取69份该矿山区周边土壤的农作物土壤样品为例, 利用XRF光谱仪测定这些土壤样品中的重金属含量。针对不同环境介质中的Pb、Cu、Zn、Cr、Cd、As、Ni和Hg等重金属元素, 运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、潜在生态危害指数法分析讨论废弃矿区周边农田土壤重金属环境风险评价等问题。结果表明, 以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中国家标准限量作为参考值表明该矿山企业周边农用土壤的重金属含量都存在不同程度的超标, 其中主要超标元素有Cd、Ni、Cu、Pb, 其中Cd污染的情况最为严重, 存在极高生态风险水平, 整体上有65%的区域处于极高生态风险水平。

关键词

土壤污染, 重金属, 来源解析, 生态风险评价, 废弃矿区

Assessment and Risk Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Mining Enterprise in Ji'an County

Jiangxiao Deng, Zhenyu Chen, Jiyue Wang, Shanshan Feng

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: May 2nd, 2025; published: May 12th, 2025

文章引用: 邓江啸, 陈振宇, 王继月, 冯珊珊. 吉安县某矿山企业周边农田土壤重金属污染评价及风险评估[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 475-485. DOI: 10.12677/ojns.2025.133050

Abstract

The phenomenon of soil heavy metal pollution refers to the alteration of soil chemical, physical, and biological properties due to the introduction of certain heavy metal substances into the surface layer of terrestrial soil, caused by the use of chemicals in agricultural activities, irregular discharge of pollutants in industrial activities, and natural factors. Over time, this affects soil functionality and effective utilization, and can even endanger public health or damage the ecological environment. The abandoned mining areas left by mining enterprises in Ji'an County, Jiangxi Province, present a series of environmental issues. Excessive levels of heavy metals can affect the growth and usability of crops in the surrounding farmlands, necessitating an evaluation and assessment of the heavy metal pollution and potential health risks in the area. Based on this, 69 soil samples from the agricultural lands around the mining area were taken, and the heavy metal content in these soil samples was measured using an XRF spectrometer. For heavy metal elements such as Pb, Cu, Zn, Cr, Cd, As, Ni, and Hg in different environmental media, the single factor pollution index method, Nemerow comprehensive pollution index method, and potential ecological risk index method were used to analyze and discuss the environmental risk assessment of heavy metals in the farmland soil around the abandoned mining area. The results indicate that, using the national standard limits from the "Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (Trial)" as reference values, the heavy metal content in the agricultural soil around the mining enterprise exceeds the standard to varying degrees, with the main excessive elements being Cd, Ni, Cu, and Pb. Cd pollution is the most severe, presenting a very high ecological risk level, with 65% of the area overall at a very high ecological risk level.

Keywords

Soil Pollution, Heavy Metals, Source Analysis, Ecological Risk Assessment, Abandoned Mining Area

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

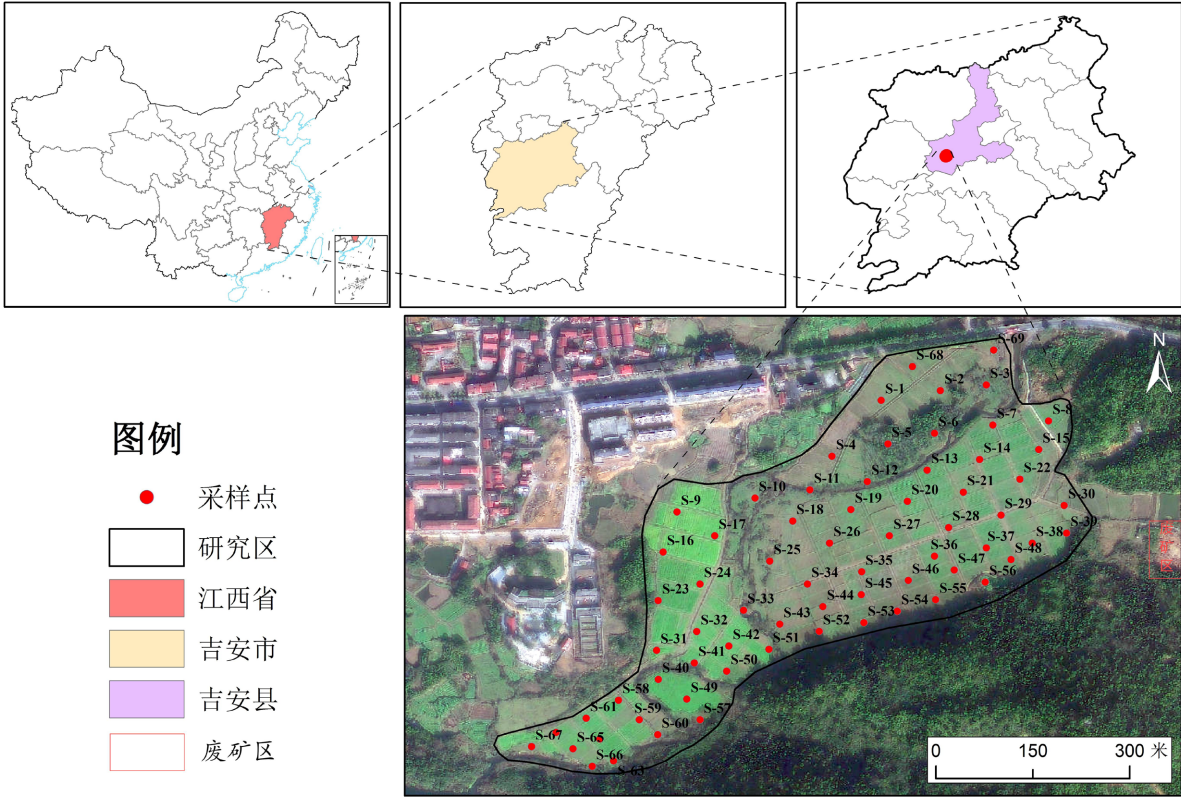
土壤是保障农产品、推进乡村产业振兴及可持续发展的重要资源，是陆地生态系统的基础。随着工业化、城市化的加速发展，土壤污染[1]问题日益严峻。重金属污染、有机污染、酸碱污染等都对土壤肥力和植物生长造成严重影响。相关工业企业不断向环境排放含有重金属的废气[2]、废水[3]和废渣[4]。由于 Cd、Ni、Cu、Pb、Zn、As 等重金属在土壤中具有隐蔽性、潜伏性且不易降解，其一旦进入土壤，便不断侵蚀着土壤的健康，破坏土壤的理化性质，进而抑制植物的生长和发育。更为严重的是，这些重金属还可能通过食物链进入人体，对人类健康构成潜在威胁。现如今土壤重金属污染事件[5]频发，如广西环江特大暴雨导致的尾矿库溃坝、广西大新县铅锌矿废水排放等，这些事件都造成了大量农田土壤的重金属污染。这些污染不仅导致农作物减产、农产品质量下降，还严重威胁到人类和动物的健康。如安徽怀宁儿童血铅中毒事件、河南“镉麦”事件、江西“镉大米”事件[6]等都演化成威胁和谐社会建设的公共事件。因此加强土壤污染防治和生态保护至关重要。通过加强废水废渣处理、化肥的合理使用及实施生态修复工程等措施，可以有效降低该地土壤污染风险[7]，保护土壤资源。

江西南部矿区主要分布在吉安市中南部及周边地区，如吉安县敖城镇、遂川县、永新县等地。这些矿区地理位置优越，交通便利，为矿石资源的开采和运输提供了便利条件。其大理石矿区出产的大理石质地细腻致密，纹理美观，色泽多样。这些优质特性使得该地区的大理石在建筑装饰、文化艺术等领域具有广泛的应用价值。但在不断开采的同时，附近的植被和泥土遭受到破坏，并遗留了上百处的废弃大理石矿区。如水土流失[8]，开采过程中产生的废矿渣、酸性尾液等污染物对土壤造成了严重污染，包括土壤酸化、肥力流失、重金属污染等问题。这些污染物不仅影响农作物的生长，还通过食物链进入人体，危害公众健康。部分开采工艺会使用大量硫酸铵或碳酸氢铵等浸矿剂，导致土壤中氨氮含量超标，影响周边农田作物生长和土壤质量。

矿山周边农用土壤是河流水体和重金属的主要汇集地，其对工业的重金属污染极为敏感，近年来，随着当地政府大力推行绿色环保等政策，这些农用土壤的重金属污染问题渐渐受到当地群众的关注。笔者采集了当地部分红土壤样品后进行了 8 种重金属污染分析，发现确实存在重金属污染严重的现象。近年来，井冈山红壤研究所(江西省农业科学院吉安分院)作为区域内的核心科研机构，致力于红土壤改良和土壤可持续化发展领域的研究。笔者通过加强土壤的重金属污染方面研究，为当地农业规划提供科学依据，为敖城镇乡村振兴和农业现代化提供有力支持。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为赣 S(2023)47 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. The distribution of sampling point locations
图 1. 采样点位置分布

研究区域位于吉安市吉安县敖城镇的一条乡道附近如图 1 所示, 采集的土壤样品来自废弃矿山企业周边的农用地土壤, 敖城镇位于吉安市南部, 南有泰和县, 北接安塘乡, 西邻永新县, 该镇面积 232 平方千米, 地处南方红土壤丘陵地带, 气候湿润, 降水量充足, 春季多阴雨, 气温回升速度快, 夏季高温多雨, 冬季温和少雨, 适合农业农田发展, 其土壤丰富因此适合种植水稻、中药材、油茶花, 除此之外敖城镇还拥有丰富的矿产资源和森林资源, 矿产资源主要有大理石、高岭土、石灰石、焦宝石、钨矿等, 其高岭土的探明储量高达 968 万吨, 现有的资源储量为 435.9 万吨, 在全省此领域中排第五位。

2.2. 土壤样品的布点采集和处理

根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T1662004)的相关要求和吉安市敖城镇研究区域在卫星地图上的位置进行采集, 在采集每个点位的土壤样品时采用梅花点法采集 0~20 cm 矿山周边农用土壤表层土壤样品, 根据吉安地区南北的地理自然环境的复杂程度, 确定布点密度, 以 100 m × 100 m 布置一个采样点 [9]-[11], 选择非常典型的土壤剖面开始采样, 将每个点位的 5 点样品等量混合后, 去除碎石、植物根系等杂物, 利用四分法保留 0.5 kg 土壤样品并装入聚乙烯密封袋内, 每个采样带采集完成后, 用 GPS 记录实地坐标, 并在样品袋上进行编号处理, 将采集回的土壤样品尽快进行干燥, 常用方法有自然风干和机器物理烘干。自然风干是在通风处暴晒后自然晾干, 而物理烘干则是在不超过 40℃ 的干燥箱中进行。干燥过程中需防止酸、碱等气体及灰尘污染, 需将混入土壤中的植物残渣、新生体、侵入体等杂物挑拣出去, 以确保样品的纯净度 [12] [13]。干燥研磨后的土壤样品需通过筛网进行筛分, 以确定所有样品都满足实验要求的粒度。筛分过程中需使用尼龙材质的筛网, 避免使用金属材质筛网可能引入的污染。过筛完后选择代表性好、干燥均匀、杂质少的土壤样品, 并注意选择不同深度的土壤样品以充分了解土壤性质。将处理好的土壤样品放入压片机模具中, 对土壤样品进行处理启动压片机进行压片, 保持一定的压力和时间以保证样品的压缩和结晶。压片完成后, 将样品取出并进行标记, 利用 X 射线荧光光谱仪分析重金属含量。XRF 光谱仪能应用于地质、环境和冶金领域, 是一种能发射伽马射线或 X 射线使样品激发其内部的原子特征从而测量元素种类和含量的仪器。其精准度能达到 ppm (百万分之一) 级别, 足以满足此次的研究需要。

2.3. 单因子污染指数法

单因子污染指数法 [14] 是一种简单有效的环境质量评价方法, 适用于单一污染物的快速评估, 是评价土壤污染程度是否严重的重要方法。计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: P_i 为土壤中重金属 i 的单项污染指标; C_i 为土壤重金属 i 的实测值, mg/kg; S_i 为土壤重金属 i 的评价标准, mg/kg。单因子评价污染指数法分类标准见表 1:

Table 1. Evaluation criteria for the single-factor pollution index method
表 1. 单因子污染指数法评价标准

污染等级	单因子污染指数	污染水平
I	$P_i \leq 1.0$	清洁
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

2.4. 内梅罗综合污染指数法

为了综合评价土壤中多种污染物如重金属、农药残留物等的污染程度，可以用内梅罗综合污染指数法[15]来综合考虑多种污染物的影响，通过引入最大值，能够反映最严重污染物的影响，其计算公式如下：

$$P_{综} = \sqrt{\frac{P_{max}^2 + P_{ave}^2}{2}}$$

该公式中： $P_{综}$ 为内梅罗综合污染指数； P_{max} 为单因子污染指数的最大值； P_{ave} 为土壤单因子污染指数的均值。根据其 $P_{综}$ 值，土壤污染的评价标准可分为 5 个等级见表 2：

Table 2. Evaluation criteria for soil using the Nemerow Integrated Pollution Index method

表 2. 内梅罗综合污染指数法土壤评价标准

污染等级	内梅罗综合污染指数	污染水平
I	$P_{综} \leq 0.7$	安全
II	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	警戒值
III	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中度污染
V	$P_{综} > 3.0$	重度污染

2.5. 潜在生态风险评价方法

此次研究中还用到了由瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法[16]，该方法从沉积学角度提出，依照重金属的性质和环境行为特点来对土壤中的重金属污染进行评价的方法。此评价方法结合重金属元素的毒性水平[17]、污染浓度[18]以及环境对重金属污染敏感性等关键因素，因此在土壤环境风险相关评价中得到了广泛的应用。其计算公式如下：

$$E_i^r = T_i^r * P_i$$

$$RI = \sum_i^n E_i^r$$

式中： E_i^r 为单项重金属潜在生态风险指数； T_i^r 为该重金属污染物毒性相应系数如表 3 所示； P_i 为单因子污染指数；RI 为综合潜在生态风险指数。潜在生态风险指数评价见表 4：

Table 3. Toxicity response coefficient for heavy metal pollutants

表 3. 重金属污染物毒性相应系数

重金属	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Hg
T_i^r	2	10	1	5	30	2	5	40

Table 4. Evaluation criteria for potential ecological risk

表 4. 潜在生态风险评价标准

E_{ir}	重金属污染等级	RI	综合潜在生态风险指数
$E_{ir} < 40$	低生态风险	$RI < 150$	低生态风险
$40 \leq E_{ir} < 80$	中等生态风险	$150 \leq RI < 300$	中等生态风险
$80 \leq E_{ir} < 160$	较高生态风险	$300 \leq RI < 600$	较高生态风险
$160 \leq E_{ir} < 320$	高生态风险	$600 \leq RI < 1200$	高生态风险
$320 > E_{ir}$	极高生态风险	$RI \geq 1200$	极高生态风险

2.6. 数据处理

运用 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析重金属含量, 利用 Excel 计算土壤重金属单因子指数、内梅罗综合污染指数和潜在生态危害指数, 运用 SPSS 软件进行重金属相关性分析。结合 ArcGis 软件对重金属进行土壤空间分布处理。

3. 结果与讨论

3.1. 土壤重金属含量分析

XRF 光谱仪测定的 69 份样品重金属含量及超标情况如下表 5 所示:

Table 5. Heavy metal content values and exceedance status
表 5. 重金属含量各数值及超标情况

重金属	最大值	最小值	均值	标准值	超标个数及超标率
Pb	30.7	19.82	25.14	25	39 (56.5%)
Cd	17.62	0.07	8.74	0.2	68 (98.6%)
Ni	80.64	12.8	50.37	40	56 (81.2%)
Cu	272.62	9.61	113.61	35	67 (97.1%)
Hg	0.54	0.01	13.84	0.15	26 (37.69%)
Zn	457.14	24.57	85.38	100	15 (21.74%)
Cr	132.22	65.56	90.48	150	0 (0%)
As	81.96	9.21	23.26	25	18 (26.1%)

初步的结果分析表明该地区的农用土壤只有 7 种主要重金属超标, 其中超标率从高到低依次为 Cd > Cu > Ni > Pb > Hg > As > Zn, 从均值大小上看 Cd、Cu、Hg 的含量是国家标准限量的 3 到 43 倍, Cr 元素中未发现超标样品, 其中 Cd 的超标最为严重。Cd 超标时常困扰着当地居民, 在铅锌矿的开采以及浮选过程中, 尾矿的堆存会占用土地资源, 尾矿沙表面风干后, 大风天气会引起扬尘污染。同时, 尾矿中含有固体颗粒、重金属离子、选矿药剂、硫化物的废水外排会对水体造成污染。这些污染物中包括镉等重金属, 它们会通过雨水淋溶等方式转移到水体和土壤中。矿山企业在冶炼过程中产生的烟尘是大气镉污染的主要来源之一。这些烟尘中含有镉等重金属元素, 会通过大气沉降等方式进入土壤和水体。通过走访当地居民, 他们表示经常会使用含有镉等重金属元素的磷肥或农药, 这些农药化肥虽然见效快, 但会长期暴露在土壤表层, 常年不断累积也会导致土壤中的镉含量增加。为减少当地镉等重金属超标问题, 要采取有效的措施来控制和减少镉的排放和释放并制定科学规范的防范措施。为精准评价该研究区的重金属污染水平, 需要进行更科学准确的分析。

3.2. 重金属土壤空间分布特征

在 ArcGis 软件对采集的土壤重金属含量进行分析, 采用反距离权重法(IDW)以研究区域的采样点地理位置坐标信息为基础, 对该区域土壤重金属元素进行空间插值模拟分析, 得到了 8 种重金属含量的空间分布特征。如图 2 所示, 研究区域的重金属分布不均, 在西北部的高值区中集中的元素有 Zn、As、Ni、Cu、Cd, Zn、As 除西北部外其余区域较为均匀。Pb、Ni、Cu、Cr、Cd 在研究区域东南边缘地带分布较多且含量较高, 总体呈现距离废弃矿区越近, 重金属含量越高的分布情况。Pb、Ni、Cd 在东部地区上的重金属空间分布较为相似, 在高值区上有集中分布特征, 而低浓度区域呈现连片状分布。8 种重金属元素

都呈现出分散的高浓度斑块分布特征，低浓度连片分布特征出现在 Zn、Hg、As 上。除 Zn、As 外，其他 6 种元素在自西南部往东北部都存在重金属含量高的现象。笔者猜测这些不均匀的分布与研究区域中各块农田的打理有关。

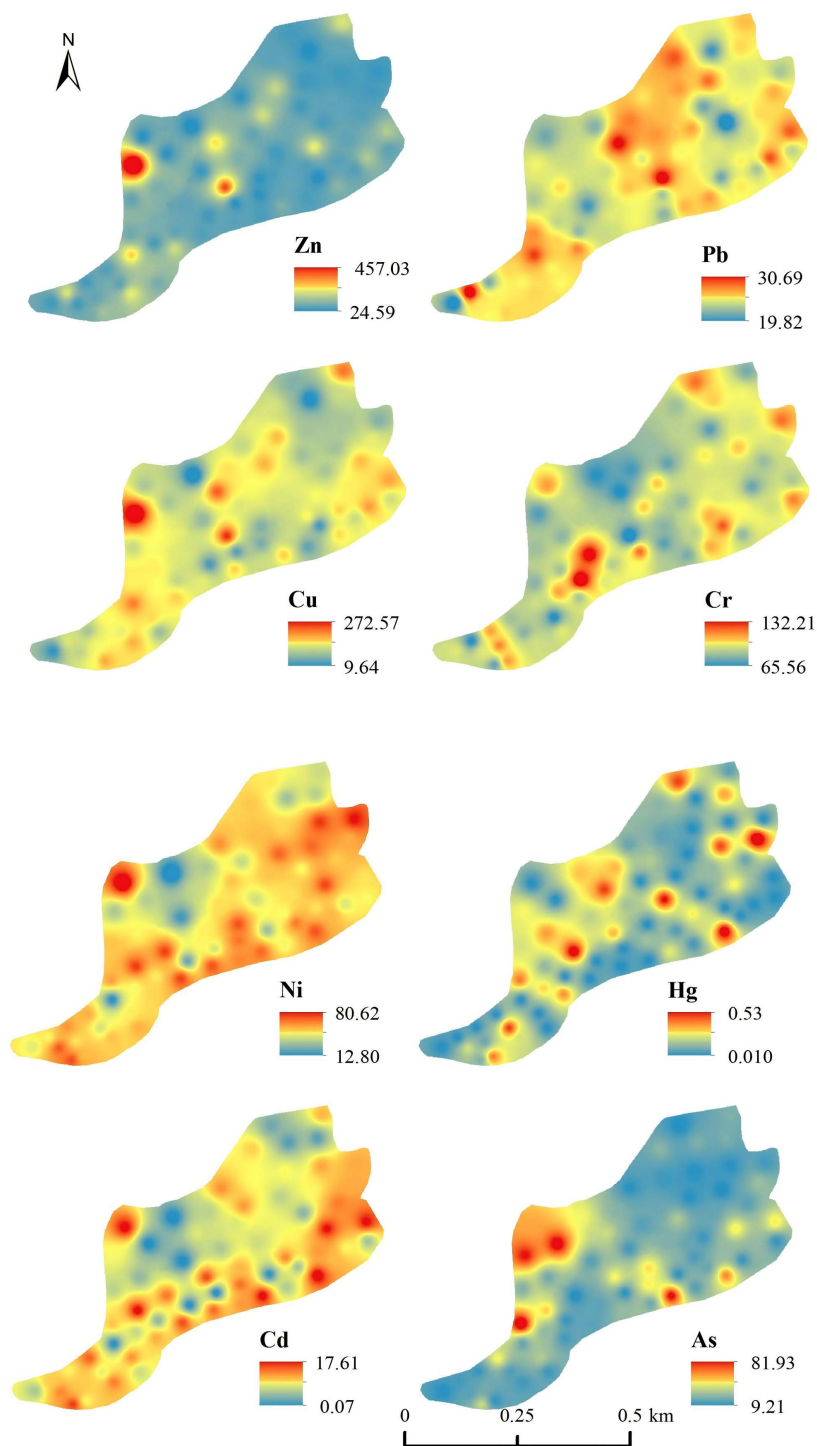


Figure 2. Spatial distribution map of heavy metal elements in soil

图 2. 土壤重金属元素空间分布图

3.3. 土壤单因子污染指数评价

如下表 6 所示, 8 种重金属元素单因子污染指数的均值大小从高到低依次为 Cd (43.71) > Cu (3.25) > Ni (1.26) > Pb (1.00) > As (0.93) > Hg (0.92) > Zn (0.85) > Cr (0.60), 其中 Cd 的单因子指数远大于 5, 处于重度污染水平; Cu 的单因子污染指数大于 3 且小于等于 5, 是中度污染水平; Ni 为轻微污染水平; Cr、As、Zn、Pb、Hg 的单因子污染指数均小于等于 1, 五种重金属表现为清洁水平。表明该研究区域农用土壤存在 Cd、Cu 和 Ni 污染的情况, 其中 Cd 的污染情况最为严重。

Table 6. Evaluation results of the single-factor index for heavy metals in soil
表 6. 土壤重金属单因子指数评价结果

重金属种类	最大值	最小值	平均值	不同污染程度采样点的占比/%				
				清洁	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染
Cr	0.88	0.44	0.60	69 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
As	3.3	0.37	0.93	51 (73.91%)	12 (17.39%)	5 (7.25%)	1 (1.45%)	0 (0%)
Zn	4.57	0.25	0.85	54 (78.26%)	11 (15.94%)	2 (2.90%)	2 (2.90%)	0 (0%)
Pb	1.23	0.79	1.00	35 (50.72%)	34 (49.28%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Cd	88.1	0.35	43.71	1 (1.45%)	4 (5.80%)	1 (1.45%)	1 (1.45%)	62 (89.86)
Ni	2.0	0.32	1.26	13 (18.84%)	55 (79.71%)	1 (1.45%)	0 (0%)	0 (0%)
Cu	7.79	0.27	3.25	2 (2.90%)	9 (13.04%)	18 (26%)	35 (50.72%)	5 (7.25%)
Hg	3.6	0.07	0.92	55 (79.71%)	6 (8.70%)	5 (7.25%)	3 (4.35%)	0 (0%)

从分析结果的污染程度占比来看, As、Zn、Pb 三种元素 90%以上的样品采集点属于清洁和轻微污染水平, Hg 元素 85%以上属于清洁和轻微污染水平, As、Zn、Pb、Hg 四种元素仅有不到 5%的土壤样品受到了中度污染; Ni 元素全部处于轻度污染以下水平; Cu 元素近 60%的样品点处于中度污染以上的水平; Cd 元素约 90%的样品点属于重度污染水平, 并且 Cd 的单因子指数远超于 5, 处于超标状态。说明该研究区域除了 Cr 元素(100%清洁水平)以外, 其他七种元素均存在个别样点受到污染的情况, 尤其是 Cd 和 Cu, 有明显的富集现象。

3.4. 内梅罗综合污染指数评价

如下表 7 所示, Cd 和 Cu 的污染等级处于重度污染, Pb 和 Ni 的污染等级为轻度污染, As、Zn、Hg 的污染等级处于中度污染, 只有 Cr 的内梅罗综合污染指数率大于 0.7, 表现为警戒值水平。

Table 7. Evaluation results of the Nemerow Integrated Pollution Index for heavy metals in soil
表 7. 土壤重金属内梅罗综合污染指数评价结果

重金属	Cr	As	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Hg
$P_{综}$	0.75	2.42	2.28	1.12	69.54	1.67	5.97	2.6

3.5. 潜在生态风险评价法评价分析

如下表 8 所示: 8 种重金属元素的潜在污染风险指数均值大小为 Cd > Hg > Cu > As > Pb > Ni > Cr > Zn, 除 Cd 和 Hg 外其余重金属均处于低生态风险指数水平。在该研究区中 Cd 的 E_r 平均值达到了 1311.22, 严重超标, 有近 90%的样品点表现出极高生态风险水平, 其余四种评估标准也有个别达到。而 Hg 有近

20%的采集位置达到了中等生态风险水平和较高生态风险水平。其余 6 种元素(Cu, As, Pb, Ni, Cr, Zn)的 E_i^r 平均值和最大值都未超过最低标准(40.00), 全部处于低生态风险状态。再一步分析显示综合潜在生态风险指数(RI)平均值高于极高风险标准, 有近 65%的区域处于极高生态风险水平, 只有 10%的区域处于低生态风险水平, 表明该研究区域的农田土壤生态环境差, 主要由 Cd 和 Hg 的污染所造成, 这可能源自于当地居民的施肥不规范或者废弃矿区残留的污水所致, 对该区域的生态环境造成了严重威胁。

Table 8. Evaluation results of the potential ecological risk of heavy metals in soil

表 8. 土壤重金属潜在生态风险评价结果

元素	潜在污染风险指数			不同污染级别样品个数及占比程度				
	最大值	最小值	平均值	低	中等	较高	高	极高
Cr	1.76	0.87	1.21	69 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
As	32.78	3.68	9.30	69 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Zn	4.57	0.25	0.85	69 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Pb	6.14	3.96	5.03	69 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Cd	2643	10.5	1311.22	2 (2.90%)	4 (5.80%)	1 (1.45%)	2 (2.90%)	60 (86.96%)
Ni	4.03	0.64	2.52	69 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Cu	38.95	1.37	16.23	69 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
Hg	144	2.67	36.91	43 (62.32%)	13 (18.84%)	13 (18.84%)	0 (0%)	0 (0%)
RI	2831.50	59.88	1383.27	7 (10.14%)	0 (0%)	4 (5.80%)	14 (20.29%)	44 (63.77%)

3.6. 土壤重金属相关性分析

相关性分析能直观地揭示出重金属元素之间的来源是否相同, 较高的正相关系数意味着重金属可能来源于同一污染源, 而较低的负相关系数意味着该研究区重金属来源于不同污染源。用 SPSS 软件对八种重金属元素进行相关性分析结果如下表 9 重金属元素间相关性分析可知 Cu 和 Zn、As、Cd、Pb 有较大的正相关, Zn 和 As、Pb 有较大的正相关, As 和 Cd 有较大的正相关, Cd 与 Hg、Pb 有较小的正相关, 表明这些元素可能来自相同污染源; Cr 和除 Ni 以外的六种元素呈现负相关, Ni 与 Cu、Zn、Hg、Pb 呈现负相关, 表明这些元素的污染源贡献比例较小。

Table 9. Correlation analysis among heavy metal elements

表 9. 重金属元素间相关性分析

变量	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
Cr	1							
Ni	0.201	1						
Cu	-0.354**	-0.027	1					
Zn	-0.377**	-0.244*	0.791**	1				
As	-0.395**	0.105	0.278*	0.238*	1			
Cd	-0.233	0.723**	0.416**	0.127	0.314**	1		
Hg	-0.090	-0.029	0.195	0.123	0.147	0.055	1	
Pb	-0.423**	-0.135	0.467**	0.354**	0.127	0.143	0.074	1

4. 结论

(1) 研究区域土壤重金属 Pb、Cu、Zn、Cd、As、Ni、Hg 的平均含量均超过国家标准限量, 超标倍数为 1.26 倍~92 倍; Cd、Cu 和 Hg 存在超风险筛选值状况, Cd 的污染问题相对而言最为严重。Cd 与 Cu、Hg、Pb 可能来自于相同的污染源。Ni 与 Cu、Zn、Hg、Pb 呈现负相关, 可能来自于不同污染源。

(2) 从空间上观察来看, 研究区 Cd、Ni 和 Hg 含量高值区出现在采样地带东南部分边缘, 那里离矿区排放的水源相对最近, 整体呈现废弃矿区越近, 含量越集中的状况, 且 Cd 和 Hg 都存在高浓度集中零星斑块状分布。Zn 和 As 则表现为高值区集中在西北部, 其他低浓度区域都呈现出连片状分布。Cu 的高值区集中在西北部, Cr 的高值区在西南部, Pb 的含量在研究区中部存在高浓度连片状分布, 其浓度含量向两侧呈放射状逐渐降低。

(3) 单因子污染指数评价表明 Cd 污染的情况最为严重, 约 90% 的采集点属于重度污染水平, 其农用土壤存在 Cd、Cu 和 Ni 污染的情况, Cd 和 Cu 有明显的富集现象。内梅罗综合污染指数评价表明 Cd 和 Cu 属于重度污染, Pb 和 Ni 的污染等级为轻度污染, 只有 Cr 表现为警戒值水平。潜在生态风险评价法评价分析表明只有 Cd 存在极高生态风险水平, 除 Cd 和 Hg 外其余重金属均处于低生态风险指数水平。整体上有 65% 的区域处于极高生态风险水平, 其中主要由 Cd 和 Hg 的污染所造成, 综上表明该研究区域的农田土壤污染水平很差。

基金项目

2024 年安徽省大学生创新创业训练计划项目(项目编号: s202410379171)。

2024 年宿州学院大学生创新创业训练计划项目(项目编号: ZCXM24-259)。

参考文献

- [1] 田会, 滕珊. 华东某人造板工业场地土壤与地下水污染状况调查研究[J]. 广东化工, 2024, 51(20): 131-133.
- [2] 王姝欣, 苏枫枫, 金东青. 沈阳废气主要污染物排放状况及环境空气质量分析[J]. 品牌与标准化, 2024(6): 172-174.
- [3] 张艳娟, 张锟. 竹皮活性炭高效吸附工业废水中高质量浓度铬离子的热力学和动力学研究[J]. 当代化工, 2024, 53(10): 2359-2364.
- [4] 钱栋, 贾贵发, 滕龙, 等. 改进的小型硫镍试金法测定废渣中微量铈和铟[J]. 贵金属, 2024, 45(S1): 204-207.
- [5] 刘家宏, 万聪, 潘尚霞, 等. 某工业区诱导儿童神经损伤的关键重金属及暴露途径[J/OL]. 地球化学, 1-12. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh8qiSq4WIX_5B0wpcuoH4L0zmz7ekc2FTirWx-sEflhaDntas8qX_B8io8s65DaVmMG3hMGSVeikIbLkxzzE17WlrGY0MD-ulAb5FuXxshsiXML-cYjtI8EquwNnsJCNkG0LJqlHSBm1dC7TGMzkPuoCUkiSKHUaXLcl=&uniplatform=NZKPT, 2024-10-30.
- [6] 梁瑞红, 李武, 李艳芳. 镉低积累水稻新品种在湖南重金属污染严重区的种植表现[J]. 现代农业科技, 2024(17): 20-23, 35.
- [7] 彭园花, 陈尹. 贵阳市某化工企业地块土壤修复技术案例分析[J]. 广东化工, 2024, 51(20): 149-152, 125.
- [8] 吴楠. 杭州未来科技城园区水土流失现状及生态修复体系措施研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(10): 61-64.
- [9] 孙双霜. 抚顺市石化企业土壤有机污染勘查技术方法示范研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(13): 151-153.
- [10] 陶美娟, 肖方, 高尚赞. 土壤环境监测样品采集工作要点与质量控制[J]. 资源节约与环保, 2023(8): 39-42.
- [11] 李爱东. 土壤污染状况调查及样品采集技术研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(11): 121-123.
- [12] 彭园花, 练川, 周江, 等. 关闭企业地块土壤污染状况调查布点方案浅析[J]. 山东化工, 2020, 49(8): 276-277.
- [13] 李健, 范学臻. 农产品产地环境采样中土壤样品采集点的布设[J]. 现代农业科技, 2020(1): 175, 180.
- [14] 刘超琦, 宋常志, 梁学峰, 等. 安徽省某铜矿区周边农田土壤重金属污染风险评价[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-20. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh_cGSKaCaFc-

- [xUI2f92c0DiqIWvLsNgvpYtjt87Biy6u4h_U5DMtLZnRMCrjLVe60pneO8HE4Gdy7vqIkCBHL7KwpCgYfzppS-mQJTv0Aw9Q9rxTVILp5nd_feTCuUtuJL7Qqksit_stGk6K8xIOtYwTfCVNuKleHkQ=&uniplatform=NZKPT](#), 2025-03-01.
- [15] 徐璐, 周洪印, 赵炫越, 等. 云南某矿区周边耕地土壤重金属污染特征及来源解析[J/OL]. 农业环境科学学报, 1-15.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh-OOUxsCaRzLTYXKLtYc7Y07CplSLJuzN6uW_ir537QIZsyq4ckRE60TQjcOXXxywC9fASgck32IE-uMugJ0EuGNATTjEPW5y4RBz6V21BYAqMb1riCKAh5VmQWki33-1EAeiup5UZPLfP7tvq68rt1O39Jzo-UHT8=&uniplatform=NZKPT, 2025-03-01.
- [16] 王佳琪, 柳蒙蒙, 汪志永, 等. 典型工业废水有机污染物特征和分析方法[J/OL]. 工业水处理, 1-46.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh8-Hsjs6zunCC_7ILhIQw77bkb6pjCNKhNkGfA_bJmf5RUQpL-l5eT0kxdNik6_cQcMaulJL1MTQWocc8JJQOirQvYTScy7kQFkw98NRhPPHhU-vjcCTUmcu3kegoUlMbGAlK0xcyVBlaNhPEOCxr9n-Gfxh9liPJbM=&uniplatform=NZKPT, 2025-03-01.
- [17] 孙旻涵, 范拴喜, 张楠. 水培条件下聚合草对 Pb、Zn 和 Cd 重金属的响应特征[J/OL]. 环境科学, 1-20.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=PCBa4GjaZh_VVfxUOEpoYO-JIzUOAQeJ2t3VYx-IZMS0zKpejYAUoN5v0zJxe648W7XFK1SEpkIL7X6Cgop_M2aBKMSnC8YIROqzDdFq2U_fZNYzUrPP3kFAl-gIm0cPzzAbZVdraEtSoRALBQ4Wa870xIjINbHOFfMxTW9g8gDek=&uniplatform=NZKPT, 2025-03-04.
- [18] 付小东, 王宗元, 孙聪伍, 等. 露天铅锌采矿区周边土壤重金属污染空间分布特征研究[J]. 环境科学与管理, 2025, 50(2): 56-61.