

下曼来铁矿区周边土壤重金属污染分析与评价

潘用昕, 张洋, 吴心慈, 王浩, 冯珊珊, 邓江啸, 吴灿灿*

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年5月18日; 录用日期: 2023年7月15日; 发布日期: 2023年7月21日

摘要

为探究下曼来露天的铁矿开采对周边土壤的影响, 本文对采矿区周边进行了不同距离、不同方位的采样研究, 共采集64处表层土壤样品, 对其重金属含量进行测定。采用成图法、单因子指数法和内梅罗综合指数法对测得数据进行分析。采用成图法分析重金属来源和分布情况, 采用单因子指数法分别对土壤重金属元素距矿区中心的不同方位和距离进行污染指数评价, 采用内梅罗综合指数法对该地的重金属污染进行综合分析, 得到综合污染评价。结果表明: 重金属污染元素主要由Zn、Pb元素组成。其中, Pb的污染范围最广, 污染程度较大。Cu元素分布与山体高度、降雨量相关。Zn元素分布与采矿区的距离和气候相关。Co元素含量分布与采矿活动相关。Ni元素分布与矿区活动和植被覆盖相关。Cr、Pb元素因矿区活动而在一定范围内富集。按内梅罗综合指数法评价, 根据距离划分, 其中800 m范围内皆为轻度污染。根据方位划分, 各方向皆为轻度污染。

关键词

采矿区, 土壤, 重金属污染, 分布, 污染评价

Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soil around Xiamanlai Iron Ore Area

Yongxin Pan, Yang Zhang, Xinci Wu, Hao Wang, Shanshan Feng, Jiangxiao Deng, Cancan Wu*

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

Received: May 18th, 2023; accepted: Jul. 15th, 2023; published: Jul. 21st, 2023

Abstract

In order to investigate the impact of iron ore mining on the surrounding soils in the Xiamanlai open
*通讯作者。

文章引用: 潘用昕, 张洋, 吴心慈, 王浩, 冯珊珊, 邓江啸, 吴灿灿. 下曼来铁矿区周边土壤重金属污染分析与评价[J]. 自然科学, 2023, 11(4): 702-712. DOI: 10.12677/ojns.2023.114084

pit, this paper collected sampling research at different distances and orientations around the mining area. A total of 64 surface soil samples were collected and their heavy metal contents were determined. The measured data were analyzed by the mapping method, the single-factor index method and the Nemelo composite index method. The mapping method was used to analyze the sources and distribution of heavy metals. The single-factor index method was used to evaluate the pollution index of soil heavy metal elements at different orientations and distances from the center of the mine, respectively. The comprehensive pollution evaluation was obtained by the comprehensive analysis of the heavy metal pollution at the site using the Nemero comprehensive index method. The results showed that the heavy metal pollution elements mainly consisted of Zn and Pb elements. Among them, Pb has the widest pollution range and the greater pollution degree. The distribution of Cu elements is related to the height of the mountain and rainfall. The distribution of Zn elements is related to the distance of the mining area and the climate. The distribution of Co elements is related to the mining activities. The distribution of Ni elements is related to the mining activities and the vegetation cover. The Cr and Pb elements are enriched in a certain range due to the mining activities. According to the evaluation of the Nemero composite index method, according to the division of distance, all of them are lightly polluted within 800 m. According to the division of orientation, all directions are lightly polluted.

Keywords

Mining Areas, Soil, Heavy Metal Pollution, Distribution, Pollution Evaluation

Copyright © 2023 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

铁矿资源是人类社会赖以生存和发展的物质基础。近几年来,随着经济的快速发展,中国钢铁产量大幅度的增长,使得对铁矿资源的消耗也在不断增加。所以在铁资源高需求的前景下,人们对资源进行过度开采,会在开采过程中造成了一系列包括土壤重金属污染的环境问题,严重影响了当地资源的可持续发展,因而我国在进行铁矿资源开发过程中,更要注重铁矿开采对周边土壤造成的影响[1] [2]。

铁矿周边土壤重金属影响程度研究对当地农业生产有积极的建设作用[3] [4]。土壤是农业发展的基础,现今资源的开采皆伴随着对土壤的破坏,尤其是重金属元素对土壤的污染,岸土壤重金属污染及土壤中的重金属极不容易分解[5],因此会在土壤中不断造成重金属污染的累积,造成土壤的严重污染,同时也使农作物的生长、潜在的生态危害指数与金属元素含量变化破坏,威胁人类健康。所以矿区周边地区土壤重金属污染已成为环境科学和土壤科学研究和关注的热点问题之一[6] [7]。

矿区污染评价研究在国内已相对成熟,但该铁矿区还矿区污染评价方面的研究相对较少,铁矿区的污染研究也相对较少,这次研究对该区域此领域的研究进展起到了一定程度上的帮助作用。

目前,国内外评价重金属污染的方法有很多种,比如瑞典科学家 Hakanson 提出的潜在生态危害指数法,国内通用的方法有单因子污染指数法、内梅罗综合指数法、地积累指数法和富集系数法等。Bux [8]测定了 Jamshoro 区 Sehwan Sharif 表层土壤利用潜在生态危害指数法并生成了风险指数图,发现 Cd 在所研究元素中表现出较高的潜在生态风险。王玮雅等[9]通过单因子污染指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态危害指数法评价了某冶炼厂周边的土壤污染现状。本文运用了单因子污染指数法和内梅罗综合指数法对土壤重金属污染进行研究。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究区位于西双版纳傣族自治州西南部，勐海县勐遮镇西南方向 10 km 的曼来村的一处露天矿山铁矿区(已停采)，如图 1 所示。西双版纳州矿产也较为丰富，拥有岩盐、铁、铜、锰、钴、稀土(磷钇矿、独居石)、褐煤、油页岩、铅、锌、汞、钨、金、高岭土等矿产。

勐海县的气候为高温多雨，终年温暖湿润，年降雨量 1024.4~1365.3 毫米之间，年平均气温各县市在 18.9~23.5℃之间，只有雨季与旱季之分。

待测区域四面环山，存在三处水潭，存在铁矿处理厂和尾矿堆放区域，几乎被植被覆盖范围。

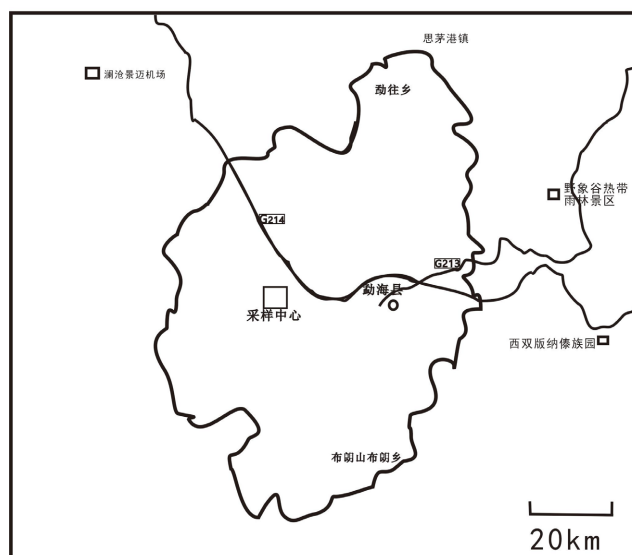


Figure 1. Sampling area location map

图 1. 采样区域位置图

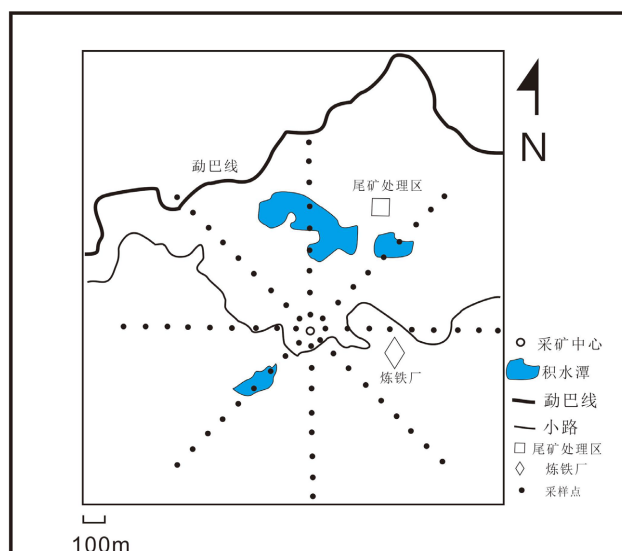


Figure 2. Sample dot plot

图 2. 采样点图

2.2. 样品采集

为探究矿区周围重金属分布情况和规律,一共设置了8个方向的采样方位辐射线采样,如图2所示,分别位于采矿中心区域的东南、西北、东北、东南、西北、西南八个方向,由近到远分别采集距离采矿中心50、100、300、400、500、600、700、800 m的样品,一个方向采8个,共采集样品65个,土壤样品均为0~20 cm表层土壤,用密封样品袋密封并贴上序号标签。记录采样的时间,位置坐标土壤类型和采样点周围环境等内容,采用的是不锈钢锹采样。

2.3. 样品处理及测试分析

将样品放置在通风干燥处进行自然风干,把风干后的样品放入干燥样品袋中保存。再将样品经过研磨钵进行研磨处理,使土壤样品能通过100目的尼龙筛。把过筛后的样品粉末装入干燥小袋中密封保存。样品通过压片模具加入硼酸作衬底进行压片处理制成片。将压片放入X荧光光谱仪进行XRF荧光分析,得到样品的数据。

2.4. 图像分析

通过Kriging插值和数学模拟成图,根据图像初步分析各重金属元素的成因和污染源,并分析其分布状态和运移规律[10]。

2.5. 评价方法

2.5.1. 单因子指数法

单因子指数法[10][11][12]是国内外普遍采用的对某一污染物的污染程度进行评价的方法,公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中: P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的评价标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2.5.2. 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合指数法[10][11][12][13]能全面反映土壤中污染物的平均污染水平,也突出了污染最严重的污染物给环境造成的影响,计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为内梅罗综合指数; C_i 为污染物 i 的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的评价标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为各污染物中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为各污染物中污染指数的算术平均值[11][12][14]。

Table 1. Soil heavy metal classification standards

表 1. 土壤重金属分级标准

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	$P_n \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 \leq P_i \leq 1.0$	$0.7 \leq P_n \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 \leq P_i \leq 2.0$	$1.0 \leq P_n \leq 2.0$	轻污染	轻度污染
4	$2.0 \leq P_i \leq 3.0$	$2.0 \leq P_n \leq 3.0$	中污染	中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P_n > 3.0$	重污染	严重污染

3. 分析与讨论

3.1. 成图分析

将土壤重金属含量测试数据通过 Kriging 插值和数学模拟成图进行分析。

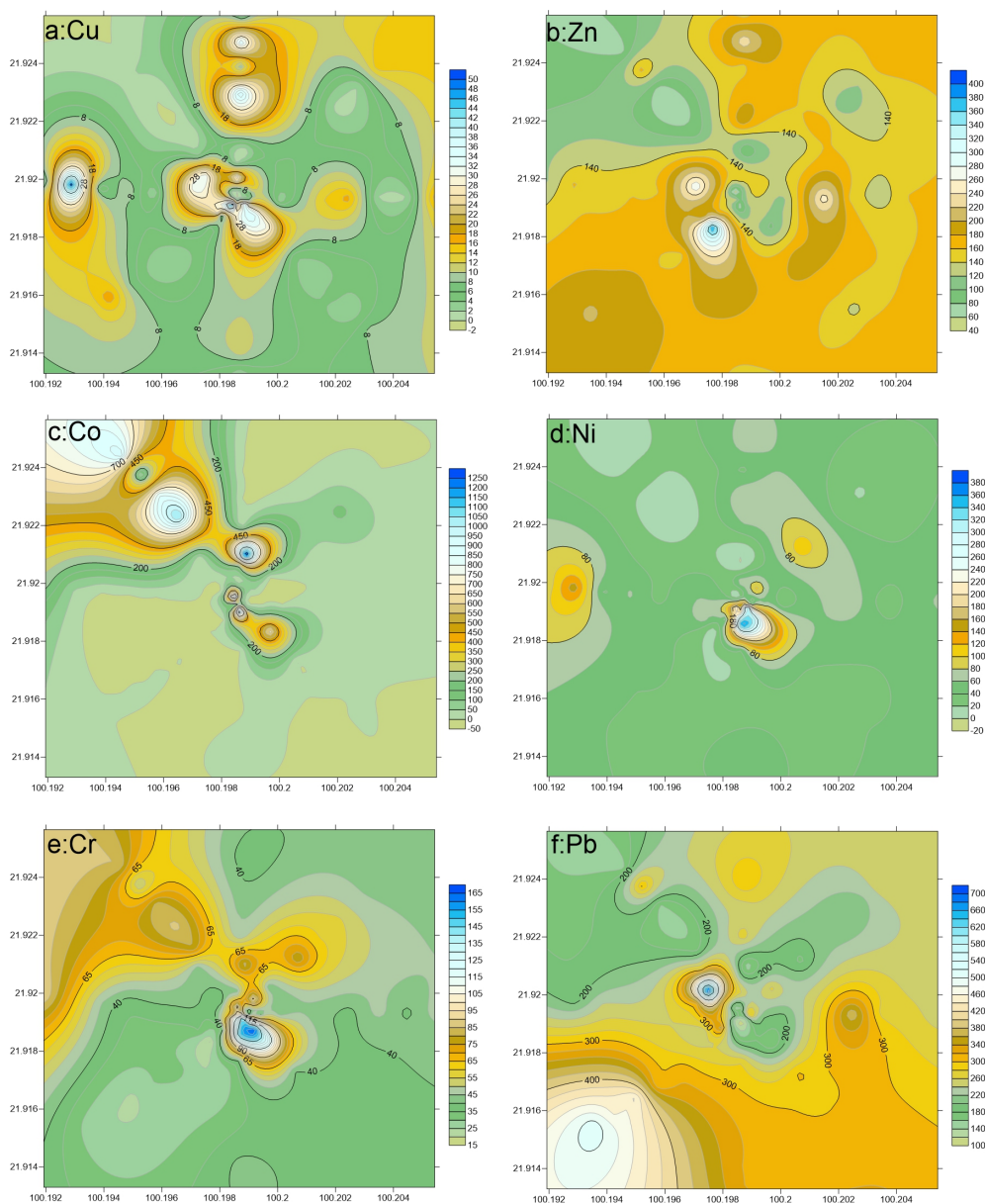


Figure 3. Element distribution
图 3. 元素分布

根据图 3(a)所示, Cu 元素主要有三个峰值点, 第一个 Cu 元素含量峰值点是采矿中心, 由采矿中心向范围 200 m 区域内呈递减趋势, 其峰值为 60.12 mg/kg。第二个 Cu 元素峰值点位于西面距采矿中心 700 m 处的山顶处向周围 100 m 区域内递减, 峰值为 50.36 mg/kg。第三个 Cu 元素含量峰值点位于采矿中心北方 700 m 处的山顶处向周围 100 m 区域内递减, 峰值为 35.8 mg/kg。Cu 元素分布与山体高度相关, 还

可能与降雨量相关, 高处山体的土壤受雨水浸泡冲刷时间低于低处土壤和植被覆盖相关, 但采矿中心区域却出现 Cu 元素富集异常, 初步判断与矿区开采活动有着密切的关系。

根据图 3(b)所示, 采矿区域内 Zn 元素主要在距采矿区 300 m 处的西南方向大面积富集, 峰值为 393.13 mg/kg。距离矿区 300 m 的西面, 300 m 的东面小面积富集峰值分别为 280.35 mg/kg、254.37 mg/kg, 距离矿区 800 m 处小范围富集, 其峰值为 236.8 mg/kg。采样区范围内最大的三个峰值均距离采矿中心距离为 300 m, 仅一处为较远的 700 m 处, 重金属富集区域与矿区距离较远可能与当地气候相关, 长时间高频率的降雨会对重金属的运移方向造成一定程度的影响, 由此判定 Zn 元素分布与采矿区的距离和气候相关。

图 3(c)为 Co 元素分布图, 根据图所示, Co 元素主要高浓度大范围富集在采矿区西北 400 m 处, 根据该图的 Co 元素高含量分布趋势可知, 采样区西北处为 Co 元素大面积富集区域, 采矿区范围 100 m 区域内呈现三处小范围富集, 由此判断该地 Co 元素含量分布与采矿活动相关。

图 3(d)为 Ni 元素分布图, 图中明显看出, 在采矿区 50 m 范围内呈现小范围较高含量 Ni 元素异常富集向周围递减扩散分布, 其余区域均在正常范围内波动变化。由此可见, 矿区活动使矿区周围元素含量受到一定程度变化, Ni 元素富集区域基本为植被未覆盖区域, Ni 元素分布与矿区活动和植被覆盖相关。

图 3(e)为 Cr 元素分布图, 根据图中信息, 观察峰值在采矿区 50 m 范围区域内且由中心向四周呈递减。除采矿区外, 整体从北部到南部含量呈递减趋势。矿区周围呈异常分布状态峰值达 165 mg/kg。矿区周围的 Cr 元素分布异常, 说明矿区活动使 Cr 元素在一定范围内富集。

图 3(f)为 Pb 元素含量分布图, 在采矿中心西北方向 50 m 处小范围聚集, 峰值为 700 mg/kg。西南方向 Pb 大范围聚集, 整体由南向北递减。东北处的小幅度富集位置与尾矿处理位置较近, 该处富集与尾矿处理区域相关。除原地质背景外, 矿区开采活动使部分地区 Pb 小范围聚集。

通过成图分析对该矿区重金属分布有了新的认知, 重金属元素不同于以往的沿采矿中心呈线性相关减少趋势, 不同重金属元素的分布及运移规律都不相同。重金属的运移成因是综合形成的, 需要考虑多种成因。

3.2. 单因子指数评价

单因子指数法是以土壤背景值为评价标准来评价重金属元素累计污染程度的方法[10]。根据表 1 进行污染标准评价。

Table 2. Single pollution index of each element at a distance of 50 m

表 2. 距 50 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.00	0.43	0.63	1.06
NW	0.00	0.17	0.51	0.94
W	0.28	0.77	0.41	1.56
SW	1.20	0.51	0.71	0.79
S	0.28	0.31	0.82	0.71
SE	0.88	0.58	1.05	0.95
E	0.06	0.65	0.15	1.95
NE	0.07	0.63	0.34	1.79

根据表 2 数据分析, 当距离采矿区 50 m 处, Cu 的 P_i 值范围为 0~1.20, 主要受污染方向为西南方, 基本为清洁状态。Zn 的 P_i 值范围为 0.17~0.77, 为清洁状态。Cr 的 P_i 范围为 0.15~1.05, 基本为清洁状态。Pb 的 P_i 值范围为 0.71~1.95, 为尚清洁状态。主要受污染方位为北、西、东、东北方向。

根据表 3 数据分析, 当距离采矿中心 100 m 处时, Cu、Zn 含量均为清洁状态, Cr 的 P_i 值为 0.23~1.10 范围内, 基本为清洁状态, 只有位于东南方向为尚清洁状态。Pb 的 P_i 值范围为 1.05~2.35, 基本为尚清洁状态, 位于西方向为轻度污染。

Table 3. Single pollution index of each element at a distance of 100 m

表 3. 距 100 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.60	0.80	0.27	1.75
NW	0.32	0.86	0.24	1.98
W	0.53	0.80	0.23	2.35
SW	0.06	0.93	0.25	1.74
S	0.60	0.63	0.97	1.05
SE	0.69	0.70	1.10	1.31
E	0.28	0.67	0.25	1.34
NE	0.30	0.79	0.66	1.55

Table 4. Single pollution index of each element at a distance of 300 m

表 4. 距 300 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.02	0.63	0.42	1.44
NW	0.64	1.07	0.27	4.90
W	0.64	1.40	0.29	2.14
SW	0.10	1.97	0.13	1.73
S	0.38	0.88	0.27	1.85
SE	0.60	0.46	0.85	1.03
E	0.06	0.56	0.29	1.29
NE	0.14	0.67	0.27	1.79

据表 4 分析, 当距采矿中心 300 m 处, Cu、Cr 元素均为位于各方向的清洁状态。Zn 的 P_i 值范围为 0.46~1.97, 为尚清洁状态, 位于西北、西、西南方向为 Zn 元素的主要污染方向。Pb 的 P_i 取值范围为 1.03~4.90 主要为尚清洁状态, 西北方向上为 Pb 的中度污染方向, 西方向为 Pb 元素的轻度污染方向。

据表 5 数据分析, 距采矿中心 400 m 处的 Cu、Cr 元素都为清洁状态, Zn 的 P_i 范围为 0.45~1.27, Zn 元素主要为清洁状态, 东方向为尚清洁方向。Pb 元素的 P_i 值范围为 1.14~2.02 为尚清洁状态, 向四周 8 个方向都进行污染。

Table 5. Single pollution index of each element at a distance of 400 m

表 5. 距 400 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.43	0.99	0.30	1.81
NW	0.01	0.45	0.53	1.14
W	0.05	0.79	0.26	1.67
SW	0.05	0.77	0.21	2.12
S	0.04	0.64	0.31	1.81
SE	0.09	0.96	0.27	2.02
E	0.28	1.27	0.28	1.95
NE	0.13	0.63	0.53	1.16

Table 6. Single pollution index of each element at a distance of 500 m**表 6.** 距 500 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.78	0.86	0.29	1.65
NW	0.00	0.31	0.58	1.01
W	0.20	0.80	0.24	1.61
SW	0.05	0.80	0.20	2.00
S	0.04	0.81	0.26	1.79
SE	0.04	0.89	0.26	1.93
E	0.34	0.75	0.26	2.51
NE	0.12	0.91	0.40	1.42

根据表 6 分析, 得知距采矿中心 500 m 处的 Cu、Zn、Cr 的 P_i 值都小于 1, 都为清洁状态。Pb 的 P_i 值范围为 1.01~2.51, 基本为尚清洁状态, 东方向为轻度污染状态。

根据表 7 分析, 距采矿中心 600 m 处采样点, Cu、Zn、Cr 的 P_i 值均小于 1, 都为清洁状态。Pb 基本为尚清洁状态, P_i 值范围为 1.04~3.08, 西南方向为轻度污染方向。

Table 7. Single pollution index of each element at a distance of 600 m**表 7.** 距 600 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.15	0.77	0.27	1.99
NW	0.00	0.33	0.55	1.04
W	0.09	0.72	0.30	1.61
SW	0.14	0.94	0.16	3.08
S	0.34	0.82	0.31	1.66
SE	0.10	0.82	0.26	2.01
E	0.04	0.64	0.31	1.81
NE	0.02	0.54	0.38	1.34

Table 8. Single pollution index of each element at a distance of 700 m**表 8.** 距 700 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.70	1.18	0.25	1.87
NW	0.05	0.84	0.33	2.03
W	1.01	0.81	0.45	1.26
SW	0.35	0.91	0.17	3.04
S	0.24	0.86	0.28	2.13
SE	0.04	0.66	0.25	2.02
E	0.04	0.81	0.26	1.79
NE	0.04	0.59	0.31	1.40

根据表 8 分析, 距采矿中心 700 m 的区域, Cu 的 P_i 值范围为 0.4~1.01, 主要为清洁状态, 西方向为尚清洁状态。Zn 的 P_i 范围为 0.59~1.18, 基本为清洁状态, 北方为尚清洁状态。Cr 为清洁状态。Pb 的 P_i 范围为 1.26~3.04, 基本为尚清洁状态, 西南方向为轻度污染区域。

根据表 9 数据分析, 距采矿中心 800 m 处, Cu 和 Cr 为清洁状态。Zn 基本为清洁状态, 西南方向为尚清洁状态。Pb 的北、西北、西、东、东北为尚清洁状态, 西南、南方、东南方向为轻度污染状态。

Table 9. Single pollution index of each element at a distance of 800 m
表 9. 距 800 m 各元素单项污染指标表

方位	Cu	Zn	Cr	Pb
N	0.09	0.76	0.27	1.76
NW	0.00	0.36	0.57	1.00
W	0.05	0.59	0.60	1.36
SW	0.22	1.02	0.18	3.44
S	0.05	0.77	0.27	2.14
SE	0.17	0.86	0.25	2.11
E	0.34	0.82	0.31	1.66
NE	0.30	0.85	0.28	1.70

综上, 通过不同距离各方位的 Cu、Zn、Cr、Pb 的单项污染指数的分析知道以下信息。单项污染指数大于 1 的为受污染区域。受 Cu 元素污染区域仅有 2 处, 单项污染指数的最大值为 1.2, 为尚清洁。研究区域内 Cu 元素污染程度较小。Zn 受污染处有 6 处, 其 P_i 最大值为 1.97, 都为尚清洁状态, 污染区域集中在距矿区 300 m 的范围内。受到 Cr 元素污染区域为 2 处, P_i 的最大值为 1.10, 为尚清洁状态。受到 Pb 污染处有 60 处, 其中尚清洁区域有 45 处, 轻度污染区域有 11 处, 中度污染区域有 4 处。中度污染区域主要集中在西南方向。

3.3. 内梅罗综合污染指数评价

Table 10. Comprehensive pollution index in the sampling area
表 10. 采样区综合污染指标表

方位	综合污染指数 P_n							
	N	NW	W	SW	S	SE	E	NE
最大值	1.52	3.67	1.80	2.58	1.63	1.61	1.90	1.36
平均值	1.30	1.34	1.33	1.77	1.29	1.33	1.37	1.18

Table 11. Composite pollution index orientation table
表 11. 综合污染指数方位表

距离 方位	综合污染指数 P_n							
	50 m	100 m	300 m	400 m	500 m	600 m	700 m	800 m
N	0.84	1.38	1.11	1.42	1.33	1.52	1.50	1.34
NW	0.72	1.52	3.67	0.89	0.79	0.81	1.55	0.79
W	1.23	1.80	1.71	1.28	1.25	1.23	1.09	1.07
SW	1.02	1.34	1.55	1.60	1.51	2.31	2.29	2.58
S	0.69	0.94	1.44	1.38	1.36	1.30	1.63	1.62
SE	0.96	1.14	0.90	1.54	1.47	1.53	1.52	1.61
E	1.47	1.05	0.99	1.53	1.90	1.38	1.36	1.30
NE	1.36	1.24	1.36	0.93	1.12	1.03	1.07	1.33
Max	1.47	1.80	3.67	1.60	1.90	2.31	2.29	2.58
Avg	1.04	1.30	1.59	1.32	1.34	1.39	1.50	1.45

根据表 10, 以距离矿区的距离划分, 按平均污染指数从大到小对其进行排行, 结果为 300 m 处 > 800 m 处 > 600 m 处 > 700 m 处 > 500 m 处 > 100 m 处 > 400 m 处 > 50 m 处。根据内梅罗综合污染指数分级标准, 其中 50 m、100 m、300 m、400 m、500 m、600 m、700 m、800 m 处皆为轻度污染。根据方位划分, 各方向皆为轻度污染。按平均污染指数对其进行从大到小排行, 结果为西南 > 东 > 西北 > 西 > 东南 > 北 > 南 > 东北。各方向的平均综合污染指数皆为轻度污染。根据不同距离和不同方位的综合污染指数的平均值数据分析, 采矿区周边的土壤整体基本呈轻度污染状态, 推测其污染分布较平均与当地雨季高频降雨和较大降雨量相关。根据表 11 的综合污染指数的最大值数据分析, 综合污染的峰值按距离和方位为西北 300 m 处, P_n 值为 3.67, 说明西北 300 m 处的综合污染较为严重。

3.4. 认识及解决方法

通过成图分析直观地了解和认识到了该区域重金属元素的迁移规律各不相同, 其成因也较复杂, 想要全面分析该区域重金属分布成因和运移规律, 还需要对当地环境进行更加充分的调查与研究, 需要有雨季降雨频繁区域的重金属一般迁移规律方面的研究, 才能更准确地得到结论。

4. 结论

1) 根据成图分析得知, Cu 元素分布与山体高度、矿区开采活动有着密切的关系。Zn 元素分布与采矿区的距离相关。Co 元素含量分布与采矿活动相关。矿区活动使 Cr 元素在一定范围内富集, 使部分区域 Pb 含量升高。

2) 根据单因子指数法分析得知, 铁矿开采对周围土壤造成主要由 Zn、Pb 元素组成的重金属污染。其中 Pb 的污染范围最广, 污染程度较大。

3) 根据内梅罗综合指数法分析得知, 按照距离划分, 800 m 范围内皆为轻度污染。按照方位划分, 各方向皆为轻度污染。其污染分布较平均, 与当地雨季高频降雨和较大降雨量相关。

4) 雨季高频降雨区域的重金属迁移与前人所研究的非雨季区域有较大的差异, 本文通过图像与单因子指数法综合分析得到了雨季区域单一元素分布方向不同且不均, 但综合污染分布均匀的特点。

基金项目

2022 年宿州学院大学生创新创业训练计划项目(项目编号: KYLXYBXM22-081; ZCXM22-312)。

宿州学院资助省级大学生创新创业训练计划项目(项目名称: 盐碱农田重金属污染评价及来源分析——以甘肃省酒泉市银达镇为例)。

2022 年国家大学生创新创业训练计划项目(项目编号: 202210379056)。

参考文献

- [1] 王淑丽. 我国铁矿资源评估与可供性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [2] 陕永杰, 张磊. 塔儿山铁矿区土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 环境工程, 2016, 34(11): 141-144.
- [3] 李文誉, 李德明. 盐碱及重金属对植物生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2010(8): 221-224.
- [4] 胡学玉, 孙宏发, 陈德林. 大冶矿区土壤重金属积累对土壤酶活性的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1421-1423.
- [5] 降勇. 矿区生态环境特征分析与生态修复模式研究[J]. 环境与生活, 2014(18): 58+61.
- [6] 邢奕, 司艳晓, 洪晨, 李洋. 铁矿区重金属污染对土壤微生物群落变化的影响[J]. 环境科学研究, 2013(11): 1201-1211.
- [7] 乔敏敏, 季宏兵, 朱先芳, 高彦鑫, 曹万杰, 解钰茜. 密云水库沉积物中重金属元素分布及形态研究[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 59-67.
- [8] Bux, R.K. (2023) Mapping the Spatial Distribution of Soil Heavy Metals Pollution by Principal Component Analysis

- and Cluster Analyses. *Water, Air, & Soil Pollution*, **234**, Article No. 330. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06361-1>
- [9] 王玮雅, 丁园, 陈怡红. 某冶炼厂周边土壤重金属污染现状分析与评价[J]. 江西科学, 2019, 37(3): 401-404+419.
- [10] 李武江, 朱四喜. 某矿区农田土壤重金属分布特征与生态风险评价[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(3): 93-101.
- [11] 贾莲, 刘盼盼, 吕琳琳, 英迪, 陈旭, 代芳芳. 鞍山某铁矿区土壤重金属污染评价[J]. 矿产保护与利用, 2018(4): 118-123.
- [12] 郭伟, 赵仁鑫, 张君, 包玉英, 王宏, 杨明, 孙小丽, 金帆. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3099-3105.
- [13] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 张掌权, 周旗. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310-315.
- [14] 史帅航, 白甲林, 余洋. 西南地区某矿产集采区土壤重金属迁移规律及生态风险评价[J]. 金属矿山, 2022(2): 194-200.