

铜陵冬瓜山铜矿周边地区表层土壤重金属污染评价

吴光平, 何季风, 许洁玮, 赵景宇

宿州学院, 资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年3月15日; 录用日期: 2023年4月19日; 发布日期: 2023年4月26日

摘要

为查明安徽铜陵冬瓜山铜矿周边地区土壤重金属元素污染特征及污染来源, 对铜陵冬瓜山铜矿周边地区土壤进行系统采样。测定土壤中Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, U, Cd重金属的含量, 采用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数和地积累指数法评价污染状况, 并结合相关性分析重金属来源。结果表明, 土壤中Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, U, Cd重金属的含量平均值分别为1570.32、156.01、321.3、37.08、1461.96、3.42、1.43 ppm。内梅罗综合污染指数表明, 研究区综合污染指数均值为4.59, 为重污染, 单因子污染指数地积累指数表明, 研究区土壤重金属Cu和Cd污染最严重, 其次是Pb、Zn、Mn、Ni、Cr、U污染。相关性分析表明, Ni和U、Cu、Mn、Zn存在显著正相关; Cd和Zn、Mn、Pb存在显著正相关; Cu和Mn, Pb和Zn存在显著正相关, Cu和Ni、U主要影响来自自然源。Pb可能主要受工业活动产生的气体以及交通排放的尾气沉降的影响。Zn、Mn和Cd受到混合来源的影响。

关键词

铜矿, 重金属污染, 土壤, 来源分析

Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in Tonglingdongguashan Copper Mine

Guangping Wu, Jifeng He, Jiewei Xu, Jingyu Zhao

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

Received: Mar. 15th, 2023; accepted: Apr. 19th, 2023; published: Apr. 26th, 2023

Abstract

In order to find out the pollution characteristics and pollution sources of heavy metal elements in soil around Dongguashan Copper Mine in Tongling, Anhui Province, soil samples were collected

文章引用: 吴光平, 何季风, 许洁玮, 赵景宇. 铜陵冬瓜山铜矿周边地区表层土壤重金属污染评价[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(2): 424-431. DOI: 10.12677/aep.2023.132053

systematically. The contents of heavy metals such as Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, U and Cd in the soil around Dongguashan Copper mine in Tongling were determined. The pollution status was evaluated by single factor pollution index, Nemerow comprehensive pollution index and ground accumulation index, and the source of heavy metals was analyzed by correlation. The results showed that the average contents of Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, U and Cd in the soil were 1570.32, 156.01, 321.3, 37.08, 1461.96, 3.42 and 1.43 ppm, respectively. The Nemerow comprehensive pollution index showed that the mean of the comprehensive pollution index was 4.59, which was heavy pollution. The accumulation index of single factor pollution index showed that the soil heavy metals Cu and Cd were the most polluted, followed by Pb, Zn, Mn, Ni, Cr, and U. Correlation analysis showed that Ni was positively correlated with U, Cu, Mn, and Zn. Cd was positively correlated with Zn, Mn, and Pb. There were significant positive correlations between Cu and Mn, Pb and Zn, and the influence of Cu and Ni and U was mainly from natural sources. Pb may be mainly affected by the deposition of gases from industrial activities and traffic emissions. Zn, Mn, and Cd are affected by mixed sources.

Keywords

Copper Mine, Heavy Metal Pollution, Soil, Source Analysis

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

铜作为一种重要的金属资源，在工业中起到不可替代的作用。据统计，2015年中国矿山已探明铜的储量9910.2万吨，2017年所探明铜的储量为10607.8万吨[1]。但在开采、加工、冶炼过程中会产生大量的尾矿，且在洗选、堆放的过程中造成重金属的迁移，增大了土壤污染的风险。重金属及其化合物不但对水体造成污染，还会在沉积物中富集造成土壤污染，成为环境中重要的潜在危害因素，更为严重的是通过食物链的传递和积累效应，对人的身体健康造成巨大的伤害。因此，研究铜矿周边污染情况进行研究具有重要的意义。目前，普遍采用的评价方法有污染指数法、地积累指数法、潜在生态危害法，可使土壤中重金属的污染特征评价更加准确，其评价结果不仅有助于了解重金属分布的自然变化特征，而且可以判别人类活动对重金属分布的影响。

近年来，针对铜矿对周边土壤污染国内外展开了一系列的研究。Bülent SAĞLAM等(2020)对土耳其东黑海的Murgul铜矿周边土壤研究发现，Cu、Mn、Pb、Zn均高于阈值，尤其越靠近污染源的地方污染越严重，土壤中重金属元素 $Mn > Cu > Pb > Zn > Ni$ [2]。王海洋等对潼关地区研究发现内梅罗综合污染指数显示重度污染率达到87.91%，主要来源是人为尾矿、成土母质的自然源和两者的混合源[3]。Zhendi Fan (2016)对某铀矿库附近的农田研究发现，农田区域主要受Ni和Cu的污染[4]。由此可见，地形地貌、成土条件、土壤的性质等不同的情况下，不同的地区受污染的程度和特征也有所不同。

铜陵市的铜矿主要分布在东西向展布的铜陵-南陵深断裂控制的岩浆成矿带上，本文选取铜陵市冬瓜山铜矿为研究对象，测定周边土壤测定Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, U, Cd重金属的含量，运用污染指数法、地积累指数法、潜在生态危害法评价土壤中重金属的污染特征，研究冬瓜山矿区附近的土壤生态环境情况，为以后的冬瓜山铜矿修复工作提供研究基础。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

研究区地处安徽铜陵市矿集区狮子山矿田内的中北部, 有研究表明冬瓜山铜矿是典型的层控式矽卡岩型和斑岩型矿床[5], 发展至今为国家提供了大量的铜、黄金、白银等, 为我国的发展做出了应有的贡献。截止 2020 年, 铜料的产量达 63 万吨[6], 是当之无愧的铜矿产出大省。

2.2. 样品的采集与测定

研究区共布设 16 个点位(图 1), 采用了系统布点法。使用地理信息系统技术围绕研究区周边的土壤进行研究。研究的具体范围为东经 117°80'~117°90'、北纬 30°90'~31°00'。土壤样品采集于 2021 年 10 月, 采样深度为耕作层土壤 20 cm, 最多采到犁底层的土壤。在采样的过程中充分考虑了冬瓜山矿区的土壤类型、土地的利用类型、所在区域的可达性包括安全性在内所采集样品总数为 18 件, 采样时应剔除枯枝等杂物后放入袋中密封保存, 记录好坐标。

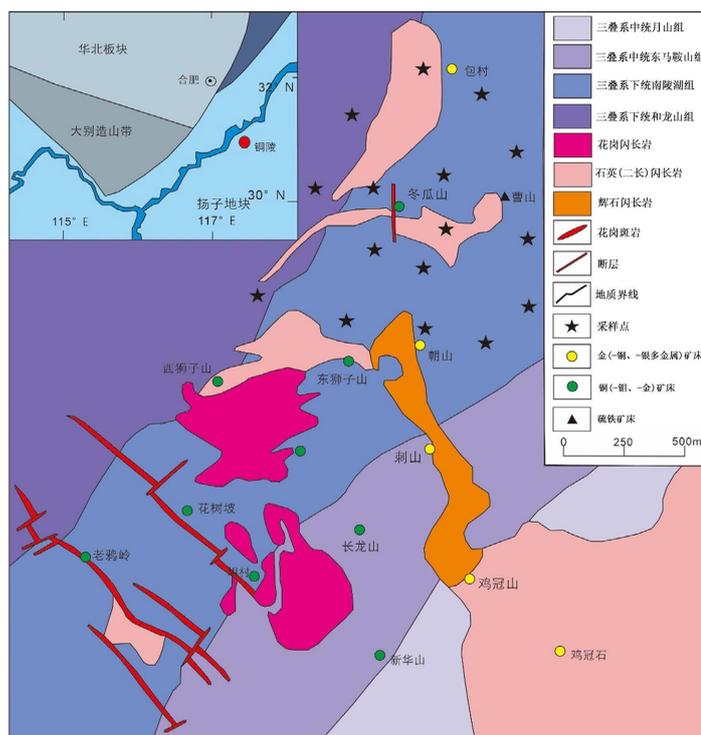


Figure.1. Location and soil sampling site distribution of Dongguashan Copper Mine (according to Xu X.C. *et al.* [5], 2014 Slightly modified)

图 1. 冬瓜山铜矿区位及土壤采样点分布图(据徐晓春等[5], 2014 略改)

样品风干后再次去除杂物, 并使之混合均匀, 使用玛瑙研钵进行研磨。在国家煤矿水害防治工程技术研究中心经过湿法消解后, 使用高分辨电感耦合等离子体质谱仪(Thermo Fisher Element 2)对样品进行重金属元素的含量测试。

2.3. 评价方法

2.3.1. 单因子指数法和内梅罗指数法

内梅罗污染指数法是通过评价标准对单项指标进行逐项分析评价, 通过指数计算, 选取各因子中最

大类别为样本的总体评价结果。其方法简单明了, 计算简便, 可以清晰地判断出评价样本与评价标准的比值关系, 容易判断评价区主要污染因子及污染状况。表 1 为土壤综合污染指数的分级标准。

单项污染指数的计算方法:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

综合污染指数的计算方法:

$$P = \sqrt{\frac{P_{\text{平均}}^2 + P_{\text{max}}^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^2}}$$

其中, C_i 表示的是污染物实测浓度; S_i 表示的是其相对应类别的标准值。

Table 1. Classification standard of soil comprehensive pollution index

表 1. 土壤综合污染指数分级标准

等级	综合污染指数($P_{\text{综}}$)	污染等级
I	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	尚清洁(警戒线)
III	$1 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染
V	$P_{\text{综}} > 3.0$	重污染

2.3.2. 地积累指数法

地积累指数又称 Mull 指数, 是 20 世纪 60 年代晚期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物及其它物质中重金属污染程度的定量指标, 其表达式为:

$$I_{geo} = \log_2 [Cn / (k * Bn)]$$

其中, Cn 是元素 n 在沉积物中的含量; Bn 是沉积物中该元素的地球化学背景值; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值变动的系数(一般取值 1.5)。地积累指数法正是考虑到自然成岩作用对背景值得变化影响所以弥补了其他评价方法的不足之处, 使评价结果更加精准。表 2 为地积累指数的分级标准。

Table 2. Evaluation index of ground accumulation index method

表 2. 地积累指数法评价指标

分级	Igeo						
	0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	5~10
	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无污染	轻~中等污染	中等污染	中~强污染	强污染	强~极严重污染	极严重污染

3. 结果与讨论

3.1. 土壤重金属含量特征

冬瓜山矿区周边土壤重金属含量见表 3, 由表 3 可知, 研究区内元素整体平均含量大小顺序为: $Cu > Mn > Zn > Pb > Cr > Ni > U > Cd$, 除 Cr 的平均含量是低于江淮流域土壤背景值以外, Cu、Pb、Zn、Ni、Mn、U、Cd 的平均含量均是超出安徽江淮流域土壤背景值, $\omega(Cu)$ 、 $\omega(Pb)$ 、 $\omega(Zn)$ 、 $\omega(Ni)$ 、 $\omega(Mn)$ 、 $\omega(U)$ 、 $\omega(Cd)$ 和 $\omega(Cr)$ 范围分别为 34.38~12122.19、19.46~903.86、59.64~1757.50、8.80~68.48、533.53~3499.85、2.37~4.22、

0.37~3.95 和 16.29~126.80 ppm, 中位数分别为 284.625、46.475、175.725、36.88、1409.08、3.535、0.865 和 55.62 ppm, 平均值分别为 1570.32、156.01、321.3、37.08、1461.96、3.42、1.43 和 57.73 ppm, 污染最明显的是 Cu、Pb、Zn、Mn、U 和 Cd 这六种元素, 其中 Cu、Zn、Mn、U、Cd 全部超标, 样本的超标率达到 100%, Pb 和 Ni 的超标率分别达到 93.75%、68.75%。其他元素也有着不同程度的超标, 根据结果显示冬瓜山矿区周边土壤中的重金属存在着不同程度的富集。

Table 3. Description of soil heavy metal content in the study area

表 3. 研究区土壤重金属含量描述

元素	含量范围(ppm)	中位数	平均值 ± 标准差	变异系数	土壤背景值	超出率*
Cu	34.38~12122.19	284.625	1570.32 ± 3471.34	2.21	24.9	100
Pb	19.46~903.86	46.475	156.01 ± 275.90	1.77	25.9	93.75
Zn	59.64~1757.50	175.725	321.3 ± 413.88	1.29	53.2	100
Ni	8.80~68.48	36.88	37.08 ± 17.80	0.48	25	68.75
Mn	533.53~3499.85	1409.08	1461.96 ± 798.61	0.55	525.2	100
U	2.37~4.22	3.535	3.42 ± 0.47	0.14	2.15	100
Cd	0.37~3.95	0.865	1.43 ± 1.17	0.82	0.104	100
Cr	16.29~126.80	55.62	57.73 ± 29.65	0.51	69.4	37.5

注: 表中计算所用土壤背景值选用自陈兴仁等[7] 2012 安徽省江淮流域土壤地球化学背景值, *代表该列数值为%。
 Note: The soil background value used for calculation in the table was selected from Chen Xingren *et al.* [7] 2012. The background value of soil geochemistry in Jianghuai River Basin, Anhui Province, where* represents the value of this column as %.

从变异系数来看, 这 8 种重金属的变异系数的大小关系为 Cu > Pb > Zn > Cd > Cr > Mn > Ni > U, Cu、Pb、Zn 的变异系数均大于 1, 属于强度变异, 且这 3 种重金属的离散程度较高, 在不同的点位土壤重金属含量差异较大, 说明研究区重金属含量受人为等随机性因素影响的作用明显, 同时说明矿区的环境改善初见成效。Ni、Mn、U、Cd、Cr 的变异系数分别为 0.48、0.55、0.14、0.82、0.51, 属于中等变异。可以指出的是, 其中 Cd 的变异系数接近于 1, 说明仍然有部分重金属危害性相对较小, 但是仍然不可忽视其对土壤的污染作用。

3.2. 土壤污染状况评价

3.2.1. 单因子污染指数法和内梅罗指数法

Table 4. Evaluation results of single factor index method

表 4. 单因子指数法评价结果

	Pi ≤ 1 (无污染)	1 < Pi ≤ 2 (轻微污染)	2 < Pi ≤ 3 (轻污染)	3 < Pi ≤ 5 (中污染)	Pi > 5 (重污染)
Cu	0 (0)	3 (18.75)	1 (6.25)	2 (12.5)	10 (62.5)
Pb	1 (6.25)	8 (50)	4 (25)	0 (0)	3 (18.75)
Zn	1 (6.25)	4 (25)	4 (25)	2 (12.5)	5 (31.25)
Ni	8 (50)	8 (50)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Mn	4 (25)	5 (31.25)	5 (31.25)	2 (12.5)	0 (0)
U	1 (6.25)	15 (93.75)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Cd	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	16 (100)
Cr	14 (87.5)	2 (12.5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

注: 表中计算所用土壤背景值选用自陈兴仁等[7] 2012 安徽省江淮流域土壤地球化学背景值, 括号内数值表示为样点个数在总样点个数所占百分比。

Note: The soil background value used for calculation in the table was selected from Chen Xingren *et al.* [7] 2012. The background values of soil geochemistry in the Jianghuai River Basin of Anhui Province are represented as the percentage of the number of sample points in the total number of sample points.

对研究区使用单因子指数法进行风险评估,得到的结果如表 4 所示,研究区域 Cu 重污染($PCu > 5$)占比 62.5%,中污染($3 < PCu \leq 5$)占比 12.5%,轻污染($2 < PCu \leq 3$)占比 6.25%,轻微污染($1 < PCu \leq 2$)占比 3%; U、Ni 和 Cr 轻微污染($1 < PU, Ni, Cr \leq 2$)占比分别为 93.75%、50%和 12.5%,其余均为无污染。Pb 的重污染($PPb > 5$)占比 18.75%,轻污染($2 < PPb \leq 3$)占比 25%,轻微污染($1 < PPb \leq 2$)占比 50%,无中污染。

在和采样点的比较中,Cu 的污染较明显,有 75%的采样点污染指数达到了中度污染水平。Cd 有 100%的采样点污染指数达到重度污染,Pb 有 18.75%的采样点污染指数达到重度污染,25%的采样点污染指数为轻污染。Ni、U、Cr 主要为轻微污染,达到中度污染的指数为 0%,Mn 的轻微污染指数为 31.25%,轻、中污染指数分别为 31.25%、12.5%,Zn 的重污染指数达到 31.25%,轻、中、轻微污染指数为 25%、12.5%、25%。按照内梅罗指数法评价结果如表 5 所示,研究区 $P_{综}$ 的均值为 4.59,对其点位评价为重污染($P_{综} > 3.0$)占比 50%,中污染($2 < P_{综} \leq 3.0$)和轻污染($1 < P_{综} \leq 2.0$)分别占比 12.5%和 37.5%。研究区土壤重金属污染 $Cd > Cu > Zn > Pb > Mn > U > Ni > Cr$ 。

Table 5. Evaluation results of Nemerow index method

表 5. 内梅罗指数法评价结果

等级	综合污染指数($P_{综}$)	污染等级	指数均值	点位占比(%)
I	$P_{综} \leq 0.7$	清洁(安全)		0
II	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	尚清洁(警戒线)		0
III	$1 < P_{综} \leq 2.0$	轻度污染	4.59	37.5
IV	$2 < P_{综} \leq 3.0$	中度污染		12.5
V	$P_{综} > 3.0$	重污染		50

3.2.2. 地积累指数法

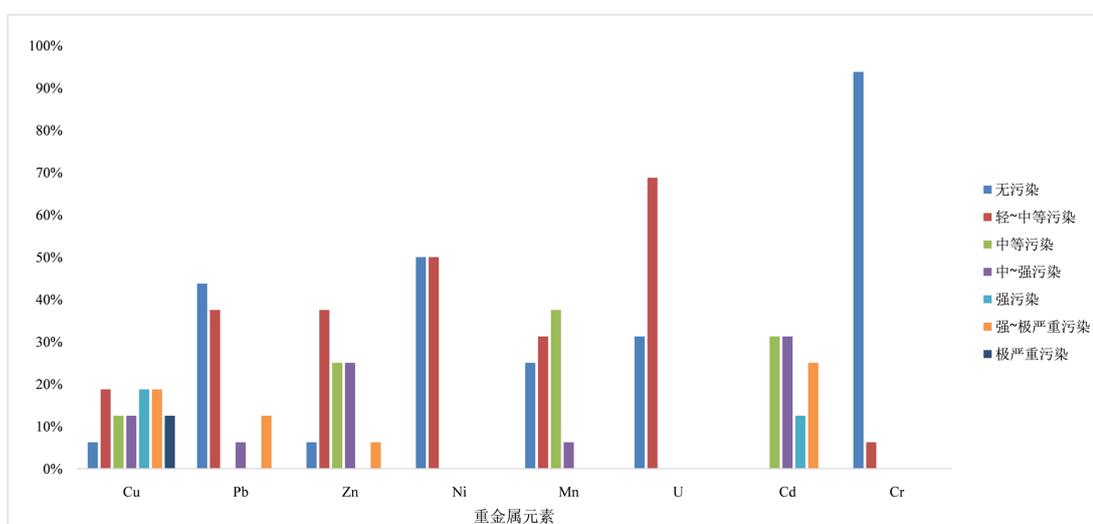


Figure 2. Statistical results of ground accumulation index method evaluation

图 2. 地积累指数法评价统计结果

以地质积累指数法对结果进行评价,得到的结果如图 2 所示,研究区域 Cu 评价为极严重污染($I_{geo} \geq 5$)占比 12.5%,强~极严重污染($4 \leq I_{geo} < 5$)和强污染($3 \leq I_{geo} < 4$)均占比 18.75%,中等污染($1 \leq I_{geo} < 2$)和中~强污染($2 \leq I_{geo} < 3$)均占比 12.5%,轻~中等污染($0 \leq I_{geo} < 1$)占比 18.75%; Pb 的强~极严重污染($4 \leq I_{geo} < 5$)占比 12.5%,中~强污染($2 \leq I_{geo} < 3$)占比 6.25%,轻~中等污染($0 \leq I_{geo} < 1$)占比 37.5%; Zn 的

轻~中等污染($0 \leq I_{geo} < 1$)占比 37.5%，中等污染($1 \leq I_{geo} < 2$)和中~强污染($2 \leq I_{geo} < 3$)均占比 25%，强~极严重污染($4 \leq I_{geo} < 5$)占比 6.25%；Ni 的轻~中等污染($0 \leq I_{geo} < 1$)占比 50%，其余全为无污染；Mn 的中~强污染($2 \leq I_{geo} < 3$)占比 6.25%，中等污染($1 \leq I_{geo} < 2$)占比 37.5%，轻~中等污染($0 \leq I_{geo} < 1$)占比 31.25%；U 和 Cr 的轻~中等污染($0 \leq I_{geo} < 1$)占比分别为 68.75%和 6.25%，其他均为无污染；Cd 的强~极严重污染($4 \leq I_{geo} < 5$)占比 25%，强污染($3 \leq I_{geo} < 4$)占比 12.5%，中等污染($1 \leq I_{geo} < 2$)和中~强污染($2 \leq I_{geo} < 3$)均占比 31.25%。研究区土壤重金属累积污染 $Cu > Cd > Pb > Zn > Mn > U > Ni > Cr$ 。

3.3. 土壤重金属相关性分析

相关性分析是对土壤重金属关联情况的分析，可以通过该方法推断出土壤的污染源，利用 Pearson 相关性分析探讨含量之间的相互关系，结果如表 6 所示。8 种重金属之间只有部分存在显著相关性。其中 Cu 和 Ni、Mn 之间存在极显著的正相关关系($P < 0.01$)，相关系数分别为 0.645 和 0.760，可以推断出 Cu 和 Ni、Mn 之间存在有相似的污染源；Pb 和 Zn、Cd 之间也存在极显著正相关关系($P < 0.01$)，相关系数在 0.8 左右；Zn 与 Ni 存在显著正相关的关系($P < 0.05$) Zn 与 Cd 之间存在极显著正相关($P < 0.01$)，相关系数分别在 0.5、0.7 以上，可以推断出 Zn 和 Ni、Cd 之间存在相似的污染源或复合污染源；Mn 和 Cd、Ni 之间存在显著正相关的关系($P < 0.05$)，相关系数均在 0.5 以上，说明 Mn 和 Cd、Ni 之间存在相似的污染源；Ni 和 U 存在极显著正相关关系($P < 0.01$)，相关系数为 0.638。综合分析来看，可能有相似的来源，Pb 来源不同，Zn、Mn 和 Cd 有复合来源。

Table 6. Analysis results of soil content correlation coefficient in the study area

表 6. 研究区土壤含量相关系数分析结果

	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn	U	Cd	Cr
Cu	1							
Pb	-0.09219	1						
Zn	0.119343	0.761753**	1					
Ni	0.644587**	0.200082	0.524884*	1				
Mn	0.759969**	0.09564	0.238568	0.520413*	1			
U	0.337092	-0.03415	0.286005	0.638075**	0.402328	1		
Cd	0.355041	0.801139**	0.714646**	0.451643	0.556826*	0.260342	1	
Cr	-0.43226	0.284631	0.25491	0.253293	-0.36462	0.158112	-0.11842	1

注：*表示显著相关性 $P < 0.05$ ，**表示显著相关性 $P < 0.01$ 。

Note: * indicates significant correlation $P < 0.05$, ** indicates significant correlation $P < 0.01$.

3.4. 土壤重金属来源分析

参考范子良，徐晓春等[8] [9]对铜陵市冬瓜山地区的研究结果表明，冬瓜山矿区含有层控式矽卡岩以及斑岩型和热液脉状矿床，Cu 和 Ni 可能主要受来自矽卡岩矿床产出的硅铝质矿石的自然源影响，再根据杨德平等[10]对斑岩型铜矿的研究可以推测 U 主要来源于斑岩型矿床的自然源。结合吕达[11]研究成果推测 Pb 可能主要受工业活动产生的气体以及交通排放的尾气沉降的影响。Zn 的来源可能受到铜锌矿的自然来源和工业农业活动人为源的双重影响。参考陈莉薇等[9]的研究推测 Mn 和 Cd 的来源可能存在于铁锰氧化物和矽卡岩中硅酸盐矿物和其他工业农业、降雨以及大气降尘的混合源影响。

4. 结论

(1) 研究区土壤重金属平均含量与背景值相比，除了 Cr 的土壤平均含量略低于背景值，Cu、Pb、Zn、

Ni、Mn、U、Cd的平均含量远高于背景值。从变异系数来看,研究区土壤重金属变异系数 $Cu > Pb > Zn > Cd > Cr > Mn > Ni > U$ 。

(2) 按照单因子指数法评价,研究区土壤重金属污染 $Cd > Cu > Zn > Pb > Mn > U > Ni > Cr$ 。按照内梅罗指数法评价,研究区 $P_{综}$ 均值为 4.59,其中点位评价为重污染($P_{综} > 3.0$)占比 50%,中度污染($2 < P_{综} \leq 3.0$)和轻污染($1 < P_{综} \leq 2.0$)分别占比 12.5%, 37.5%。按照地质积累指数法评价,研究区土壤重金属累积污染 $Cu > Cd > Pb > Zn > Mn > U > Ni > Cr$ 。综上所述,研究区土壤重金属 Cu 和 Cd 污染最严重,其次是 Pb、Zn、Mn、Ni、Cr、U 污染。

(3) 重金属含量相关性分析表明, Ni 和 U、Cu、Mn、Zn 存在显著正相关; Cd 和 Zn、Mn、Pb 存在显著正相关; Cu 和 Mn, Pb 和 Zn 存在显著正相关,说明 Cd 和 Ni 具有一定同源性,无显著负相关。

(4) 冬瓜山矿区周边土壤重金属受自然来源和人为来源的影响。Cu 和 Ni 受来自矽卡岩矿床产出的硅铝质矿石的自然源影响。U 主要来源于斑岩型矿床的自然源。Pb 可能主要受工业活动产生的气体以及交通排放的尾气沉降的影响。Zn、Mn 和 Cd 受到混合来源的影响。

基金项目

本文受到安徽省自然科学基金青年项目(编号: 2008085QD175); 宿州学院博士科研启动基金项目(编号: No. 2017jb01); 国家自然科学基金(编号: No. 42073059); 国家级大学生创新创业训练计划项目(编号: No. 202210379057); 安徽省大学生创新创业训练计划项目(通过葛万菌化石的显微镜下特征探索夹沟火山张夏组鲕粒灰岩成因); 宿州学院大学生创新创业训练计划项目(编号: No. KYLXYBXM22-078 和 KYLXYBXM22-080)的支持。

参考文献

- [1] 任彦瑛. 中国铜矿资源的现状及潜力分析[J]. 中国金属通报, 2021(1): 5-6.
- [2] Sağlam, B., Bilgin, A. and Aybar, M. (2020) Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Sediments of Murgul Copper Mine and Its Surroundings. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, **20**, 25-37. <https://doi.org/10.17475/kastorman.705816>
- [3] 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯. 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2022(4): 2104-2114.
- [4] Fan, Z.D., Chen, J.Y. and Gao, B. (2016) Risk Assessment of Heavy Metals Pollution in Farmland Soil Around a Mine. <https://doi.org/10.2991/icesame-16.2016.21>
- [5] 徐晓春, 范子良, 何俊, 刘雪, 刘晓燕, 谢巧勤, 陆三明, 楼金伟. 安徽铜陵狮子山矿田铜金多金属矿床的成矿模式[J]. 岩石学报, 2014(4): 1054-1074.
- [6] 汤菁. 凝聚“五红十力” 激活“班组细胞”——冬瓜山铜矿打造“千米井下党旗红”党建品牌, 引领班组建设[J]. 班组天地, 2021(1): 39-41.
- [7] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 陈永宁. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 302-310.
- [8] 范子良, 徐晓春, 陈林杰, 何俊, 谢巧勤. 安徽铜陵矿集区斑岩型铜钼金矿床地质特征及成矿背景[J]. 岩石学报, 2016(2): 351-368.
- [9] 陈莉薇, 徐晓春. 铜陵凤凰山铜矿周边土壤中镉的存在形态研究[C]//中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第 13 届学术年会. 2011: 391-391.
- [10] 杨德平, 刘鹏瑞, 迟乃杰, 吕振生, 舒磊, 于雷亨. 山东邹平王家庄铜矿钼及铂族元素矿物的发现及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(5): 863-876.
- [11] 吕达. 铜陵市冬瓜山铜矿区土壤重金属污染现状与评价[J]. 湖北理工学院学报, 2019, 35(1): 18-22+44.