doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.168
引用格式: 黎舟,张松堂,赖清林,等. 赣州市废弃矿山土壤重金属空间分布特征及来源[J]. 中国地质调查,2025,12(4): 46-56. (Li Z,Zhang S T,Lai Q L,et al. Spatial distribution characteristics and source of heavy metals in abandoned mine soils in Ganzhou City[J]. Geological Survey of China, 2025,12(4): 46-56.)

赣州市废弃矿山土壤重金属空间分布特征及来源

黎 舟, 张松堂, 赖清林, 王 虎, 温秀娟, 肖志坚*
(江西省地质局第七地质大队,江西 赣州 341000)

摘要: 由于江西省赣南地区部分废弃矿山曾经存在无序开采和粗放经营现象,导致表层土壤和植被遭到破坏,造成尾矿堆积、水土流失、土壤酸化等问题,进而引发了区域性的环境污染。为深入了解赣南地区废弃矿山污染问题,以赣州市废弃矿山为研究对象,探讨矿山土壤重金属的空间分布特征及来源,对 0~20 cm 表层土壤样品的重金属含量进行测定,综合运用多元统计分析、地统计学和 GIS 技术相结合的方法,分析土壤重金属的空间分布规律,同时运用主成分分析法查找矿区土壤重金属的形成原因。结果表明: ①废弃矿山土壤重金属含量较高,均值超过江西省背景值,其中金属矿的土壤重金属含量均值总体偏高,建材及砖瓦黏土矿总体偏低,矿山土壤重金属空间自相关 Moran's I 指数均大于 0,在赣州市具有一定的空间正相关分布; ②废弃矿山土壤重金属含量空间分布格局总体呈从西向东逐渐减小的趋势,根据普通克里金插值法预测得到的土壤重金属含量空间分布情况与局部空间自相关性分布情况结果基本一致; ③采用主成分分析法对废弃矿山土壤中的污染物来源进行解析,两个主成分的方差贡献率分别为 28.427% 和 20.370%, Cu 和 Zn 含量的相关系数为 0.330,可能具有同源或复合污染关系,Cu、Zn、As 是矿区土壤污染物的主要组成部分,矿区土壤中 Pb 的吸附、迁移与土壤 pH 值关系密切。研究结果可为赣州市土壤污染防治和生态环境保护提供理论参考。

关键词: 废弃矿山; 土壤重金属; 变异函数; 空间分布特征; 复合污染
中图分类号: P681.7; S159.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-8706(2025)04-0046-11

0 引言

随着工业发展对矿产资源需求的增加,在矿山开采、选矿和冶炼等活动过程中,矿体中的重金属元素容易发生流失并进入土壤中,致使土壤重金属含量不断累积[1-2]。因此,揭示矿区土壤重金属空间变异特征和分布规律已成为土壤环境质量评价和重金属污染防治的重要前提。国内外学者基于空间自相关和地统计学理论,对不同条件下的矿山土壤重金属空间变异开展了研究[3-4]。Atanazio 等[5]通过空间自相关和克里金插值法建立了特定的稀土矿土壤质量参考值,识别出热点区域,优化了对天然稀土元素的监测; Ding 等[6]以湖南省苏县某典型有色金属矿山为研究对象,获得了土壤中 As、Pb、Cu、Zn 在地形和风向影响下的空间自相关分布特征,发现地形对重金属浓度的影响大于风的影响; Fu 等[7]调查了国内某锡矿山锑矿,采用多变量分析和空间自相关分析方法,得出风向是影响土壤重金属污染分布的主导因素,同时 Hg 与 Cd、Sb 是共污染关系。分析矿山土壤重金属元素的含量分布特征,对于追踪矿山区域内重金属元素的来源、迁移转化规律及开展矿山生态风险评价具有重要意义。

本文基于"江西省废弃矿山地质环境调查项目赣南片区调查"于 2017—2020 年在赣州市开展的地质环境调查工作成果,利用多元统计分析、地统计学和 GIS 技术相结合的方法,以赣州市下辖的 18

收稿日期: 2023-04-17; **修订日期**: 2025-02-10。
基金项目: 江西省国土资源厅"江西省废弃矿山地质环境调查项目赣南片区调查(编号: 赣国土资函[2017]163 号)"项目资助。
第一作者简介: 黎舟(1997—),女,硕士研究生,主要从事矿山土壤重金属污染方面的研究工作。Email: lizhou0824@163.com。
通信作者简介: 肖志坚(1968—),男,高级工程师,主要从事水工环地质方面的研究工作。Email: 794663823@qq.com。

个县(市、区)内的废弃矿山为研究对象,结合全局 Moran's I 指数反映的土壤重金属含量自相关性,在最佳拟合模型的基础上,计算局部 Moran's I 指数并制作聚类图,采用普通克里金插值法分析赣州市废弃矿山土壤重金属空间分布,利用主成分分析法厘清土壤重金属之间的联系。研究结果可为赣州市土壤污染防治和生态环境保护提供理论参考。

1　研究区概况

研究区位于江西南部,赣江上游,通称"赣南",研究范围涉及赣州市下辖的 18 个县(市、区)内的废弃矿山,总面积为 3.94×10^4 km^2,其中农用地在全市土地总面积占比 91.74%,建设用地占比 3.72%,其他用地占比 4.54%[8](图 1)。赣州市地处中亚热带南缘,属亚热带季风气候区,年平均气温为 18.9 ℃,受气候条件等因素的影响,土壤类型多样,主要成土母岩有花岗岩、紫色页岩等,主要土壤类型有红壤、山地黄壤等。地貌类型主要有山地和丘陵,山地主要分布于周边,山峰海拔为1 000 ~ 2 000 m,山高坡陡,沟壑纵横,纵坡降大,易引发滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。丘陵主要分布于中部红层盆地边缘,山顶海拔为 350 ~ 500 m,相对高差较小,自然坡度为20° ~30°。沟谷相对平缓[9]。赣州市西属南岭、中属雩山、东属武夷山成矿带,成矿地质条件优越,矿产资源丰富。赣州市废弃矿山的矿种以建材和砖瓦用黏土为主,其次为稀土和非金属矿产。

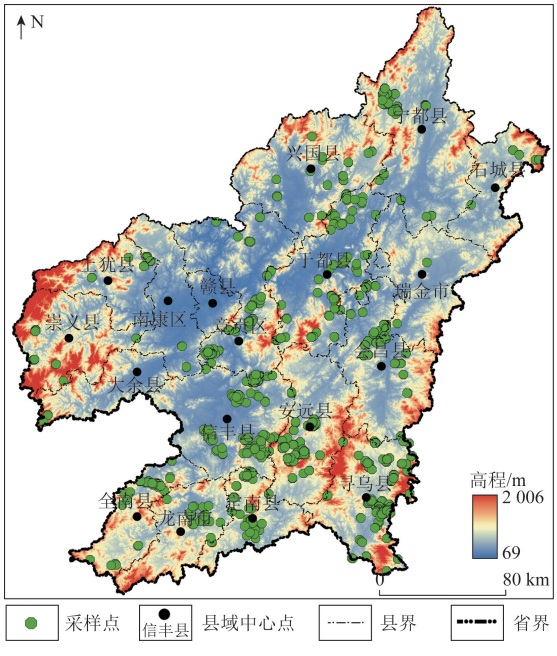


图 1　研究区位置及采样分布

Fig. 1　Location and sampling distribution of the study area

2　材料与方法

2.1　样品采集与处理

土壤样品采集覆盖赣州 18 个县(市、区)废弃矿山的污染区和污染影响区,废弃矿山主要由历史遗留矿山组成,仅少数矿山因民间盗采和政策性关停而废弃。以 3 组/km^2 设置采样点,使用多点混合法采集 0 ~ 20 cm 表层土壤。将采集的土壤样品装入自封袋中,取样时清除石块和其他杂质,并对每个样品进行编号。采样点位置采用 GPS 定位记录经纬度,共布设 787 个采样点(图 1)。行政区划矢量数据由 91 卫图企业版获得,赣州市 DEM 栅格数据通过地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)下载,并利用 ArcGIS 10.2 软件处理获得。样品由江西省地质局赣南中心实验室进行测试,将每个地块采集的 3 个样品称取相同质量样品并进行充分混合,经自然风干,研磨过 100 目筛作为金属含量检测的样品。检测中用三酸(硝酸 - 盐酸 - 氢氟酸)分步消解,使用电感耦合等离子质谱(ICP - MS)仪测定 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量,使用原子荧光光谱(AFS)仪测定 As 含量,使用酸度计测定 pH 值。

2.2　测试方法

通过计算土壤样本数据的均值、标准差、方差、变异系数、偏度、峰度,描述土壤特性的空间变异特征[10]。地统计学一般要求区域化变量均服从于正态分布或近似于正态分布。本文根据拉依达准则,将超出样本平均值加减 3 倍标准差区间外的数据定为异常值,以平均值与 3 倍标准差的和或差代替土壤重金属含量异常值。根据单样本 Kolmogorov - Smirnov 正态性检验法,当 $P_{K-S}>0.05$(P_{K-S}为单样本 Kolmogorov - Smirnov 正态性检验概率)时,认为结果服从正态分布,反之需要进行数据转换,再进行正态性检验[11]。

空间自相关性指位于同一区域内的实测数据可能存在的相关性,一般分为全局空间自相关(Global Moran's I)和局部空间自相关(Local Moran's I)[12]。全局 Moran's I 指数可描述研究变量在空间上的自

相关程度,判断区域化变量在研究区内是否存在空间聚集区。局部 Moran's I 指数可对区域化变量空间格局进行可视化,以便于进一步研究其空间分布规律。在完全随机的情况下,全局 Moran's I 指数的期望值 $E(I)$ 符合:当 $I>E(I)$ 时,表示正空间自相关,即相似的值聚集在一起;当 $I<E(I)$ 时,表示负空间自相关,即相异的值聚集在一起;当 $I\approx E(I)$ 时,表示空间上属性值的分布是随机的,没有明显的聚集性。计算公式为

$$I=\frac{N\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{S_O\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}, \quad (1)$$

$$I_i=\frac{(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^{N}w_{ij}(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2/N}, \quad (2)$$

$$E(I)=-\frac{1}{N-1}。 \quad (3)$$

式中:I 为全局 Moran's I 指数;I_i 为局部 Moran's I 指数;N 为观测点的总数;x_i 和 x_j 是第 i 个和第 j 个位置的属性值;$\bar{x}$是属性值的均值,$\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_i$;$w_{ij}$ 为位置 i 与位置 j 之间的空间权重,通常表示位置之间的邻近性,若 i 和 j 相邻则 w_{ij} 值为 1,否则为 0。S_0 是所有空间权重的总和,即 $S_o=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}W_{ij}$。

普通克里金插值法是最早被提出和系统研究的克里金法,其基本原理是利用半变异函数模型来拟合经验半变异函数,通过无偏和最优估计条件建立克里金线性程式,求解各样本线性权重,以各样本及其权重预测未知点变量[13]。计算公式为

$$Z(x)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(x_i)。 \quad (4)$$

式中:x 为待预测样点;n 为样本点数量;$Z(x)$ 为待预测点 x 的变量预测值;$Z(x_i)$ 为样点 x_i 处土壤重金属含量的预测值;λ_i 为样点 x_i 处预测值的权重。

利用 SPSS 软件对土壤重金属含量进行 Pearson 相关分析和主成分分析,主成分分析基于正交变换,对于原先多个相关性较强的变量,将其分量相关的原始随机向量转换成分量不相关的新随机向量,然后对多维变量系统进行降维处理,再通过构造适当的价值函数,进一步将低维系统转化为一维系统。方差较大的新变量能综合反映原来多个变量包含的主要信息,用这个新变量来代替原来的变量[14]。

本文土壤重金属数据采用 SPSS 27.0 进行描述性统计、相关性和主成分分析,半方差函数计算利用 $GS^+9.0$ 完成,空间自相关和普通克里金插值分析使用 ArcGIS 10.2 完成。

3 结果与分析

3.1 重金属含量统计特征

研究区土壤重金属含量统计结果见表 1。在赣州市废弃矿山的 787 个土壤取样点位中,各元素最大值均高于江西省背景值[15]。

表 1 研究区土壤重金属含量统计

Tab.1 Statistical results of heavy metal content in soil of the study area

指标	含量/10^{-6}		标准差	变异系数/%	偏度	峰度	P_{K-S}	江西省背景值[15]
	最小值	最大值						
pH 值	2.37	6.85	0.71	15.51	0.70	1.02	0.080	–
Cu	1.06	350.94	53.68	178.84	5.16	27.28	0.086	20.30
Pb	5.63	459.53	98.78	98.04	2.25	4.72	0.070	32.30
Zn	11.96	355.36	51.03	61.97	3.22	13.26	0.074	69.40
Cr	0.31	271.72	58.11	114.89	1.98	4.08	0.068	45.90
As	0.01	564.27	41.80	325.40	9.51	106.79	0.068	14.90

注:pH 值无量纲;“–”为无数据。

变异系数可以反映重金属含量分布的离散程度[16]。从变异系数看,不同指标从小到大为 pH 值 < Zn < Pb < Cr < Cu < As。pH 值、Pb 和 Zn 含量的变异系数变化范围为 10% ~100%,属于中等变异性;Cu、Cr 和 As 含量的变异系数大于 100%,呈强变异性,表明赣州市废弃矿山土壤中 Cu、Cr 和 As 含量分布的差异较大,离散程度高。从偏度和峰度来看,土壤重金属含量对称分布的可能性较低。对土壤重金属含量异常值经过处理之后的数据进行 Kolmogorov – Smirnov 正态性检验,其中 pH 值符合正态分布,

Zn、Pb、Cr、Cu 和 As 含量经过对数变换之后,呈对数正态分布。

按照不同矿类、矿种统计矿山土壤重金属均值特征(表 2),由于矿种分布不均,各类型矿山数量不一致,因此未考虑极值问题,不将其纳入统计结果。由表 2 可以看出: 金属矿的土壤重金属含量均值总体偏高,其 pH 值范围为 4.46 ~ 6.15,Cu 含量大于 100×10^{-6} 的矿种有金、钨、锡,Pb 含量大于 100×10^{-6} 的矿种有钼和铁,Zn 含量大于 100×10^{-6} 的矿种有金、铁、钨、锡,Cr 含量大于 100×10^{-6} 的矿种有锰,As 含量大于 100×10^{-6} 的矿种有金和锡; 建材及砖瓦黏土矿的土壤重金属含量均值总体偏低,土壤 pH 值范围为 3.90 ~ 4.70,Cu 含量最高的矿种为碳质页岩,Pb 和 Zn 含量最高的矿种为高岭土,Cr 含量最高的矿种为砖瓦黏土,As 含量最高的矿种为碳质页岩。金属矿区与建材矿区在土壤重金属含量之间的差异主要由矿物成分、开采和冶炼工艺、土壤 pH 值、地质条件、水文条件等多方面因素共同作用。金属矿区土壤重金属的积累较为显著,且这些元素更容易在酸性环境中溶解和迁移,而建材矿区土壤重金属含量相对较低,主要与矿物成分和开采工艺较简单有关。

表 2　不同矿类及矿种的土壤重金属均值特征

Tab. 2　Average content of heavy metals in soil of different mineral categories and ore types

矿类	矿种	pH 值	含量/10^{-6}				
			Cu	Pb	Zn	Cr	As
金属矿	金	4.46	350.94	36.93	147.40	62.74	163.24
	锰	4.55	49.66	38.75	98.78	203.11	43.73
	钼	5.64	17.10	138.41	91.38	19.20	8.91
	铁	5.19	29.86	459.53	271.99	53.68	16.83
	钨	5.66	156.14	98.42	129.72	68.81	50.15
	锡	6.15	184.10	42.41	202.73	70.89	564.27
其他金属矿	萤石	6.85	40.11	29.66	53.95	116.87	11.24
稀有金属矿	稀土	4.57	20.83	109.27	80.09	44.40	6.39
能源矿	煤	4.37	31.97	34.02	63.81	89.94	19.06
建材及砖瓦黏土矿	高岭土	4.70	8.63	81.59	97.40	6.90	1.37
	石灰岩	3.59	27.34	36.16	34.02	78.32	10.34
	碳质页岩	3.90	37.46	41.10	75.03	82.40	48.94
	页岩	4.11	25.72	35.48	71.59	55.66	10.71
	砖瓦黏土	4.70	24.17	26.26	68.10	95.50	36.38

3.2　空间自相关分析

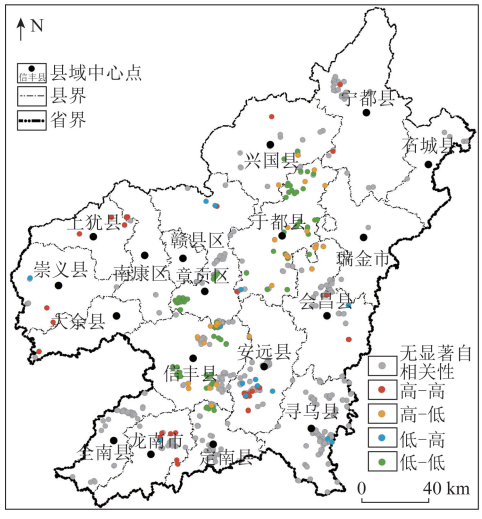
研究区土壤重金属含量全局自相关分析结果见表 3。不同重金属元素的 Moran's I 指数均大于 0,从全局角度来看,土壤重金属含量在赣州市内具有一定的空间正相关分布。Moran's I 指数越接近 1,代表单元间的关系越密切,性质越相似,存在一定的高值聚集或低值聚集分布[17]。为了验证 Moran's I 指数是否显著,选取蒙特卡罗迭代法对 Moran's I 指数进行假设检验[18],结果显示 Z 值均大于 1.96,P 值均小于 0.05,表明土壤重金属含量空间自相关 Moran's I 指数具有统计学意义。

表 3　研究区土壤重金属含量全局自相关分析

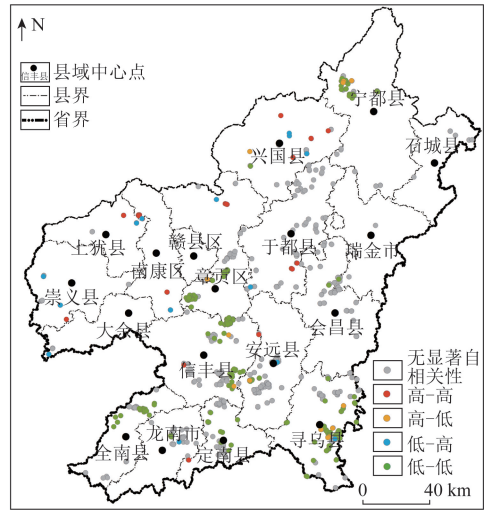
Tab. 3　Global Moran's I analysis results of heavy metal content in soil of the study area

指标	Moran's I 指数	Z 值	P 值
pH 值	0.23	4.94	0.000
Cu 含量	0.27	5.93	0.000
Pb 含量	0.62	13.41	0.000
Zn 含量	0.13	2.86	0.004
Cr 含量	0.15	3.18	0.001
As 含量	0.39	9.08	0.000

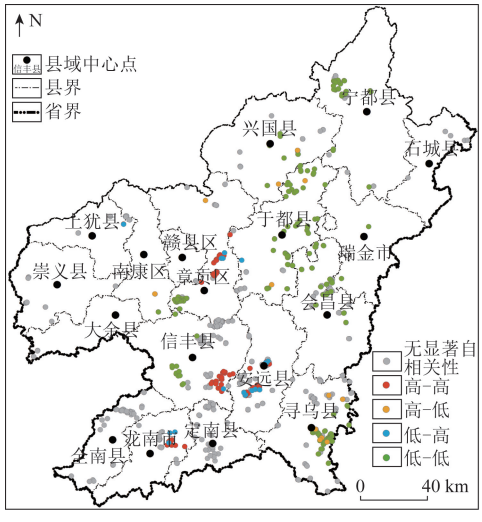
全局自相关分析是对整个研究区内的所有采样点进行的空间自相关分析,但对于部分特殊点位的自相关分析和空间特征分析不够清晰[19]。为探究可能存在的局部点位之间的关系,对土壤重金属数据进行局部自相关分析(图 2),进一步发掘其局部空间分布的特征。从高值聚集点(高 - 高)来看,pH 值热点主要分布在安远县、崇义县、龙南市和上犹县(图 2(a)),Cu 含量热点主要分布在于都县和兴国县(图 2(b)),Pb 含量热点主要分布在安远县、赣县区、龙南市和信丰县(图 2(c)),Zn 含量热点主要分布在全南县(图 2(d)),Cr含量热点主要分布在安远县、信丰县和于都县(图 2(e)),As 含量热点主要分布在崇义县、兴国县和于都县(图 2(f))。pH 值、Pb、Zn、Cr 含量均存在低值聚类点



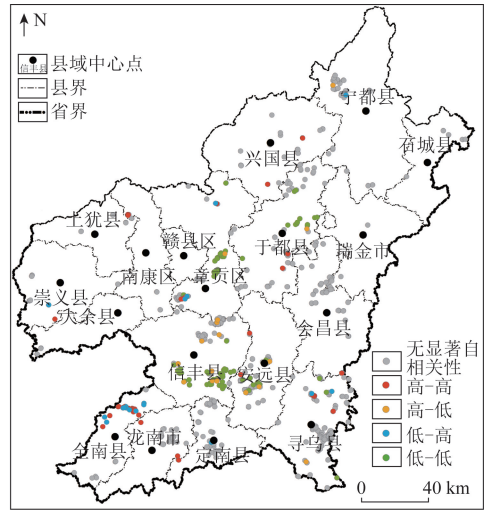
（a）pH 值



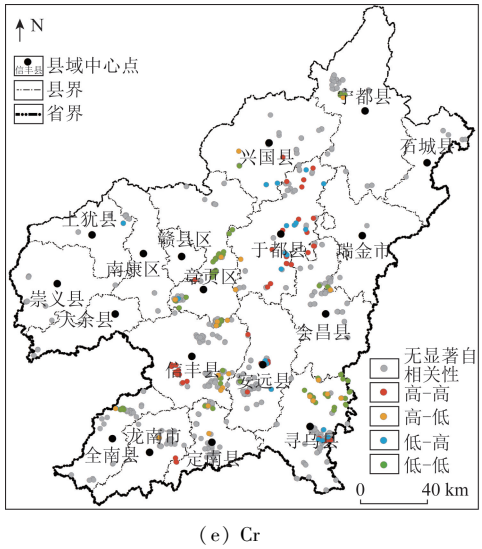
（b）Cu



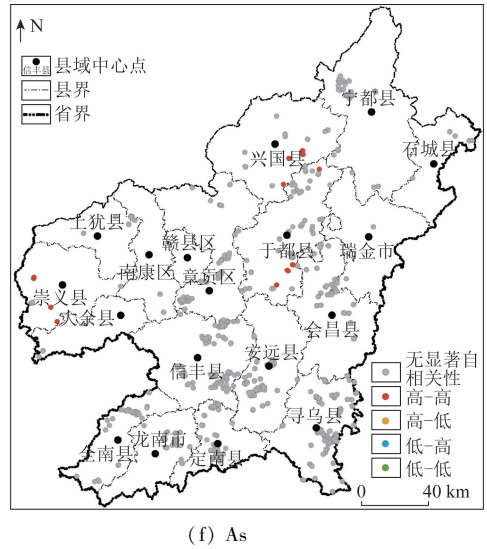
（c）Pb



（d）Zn



（e）Cr



（f）As

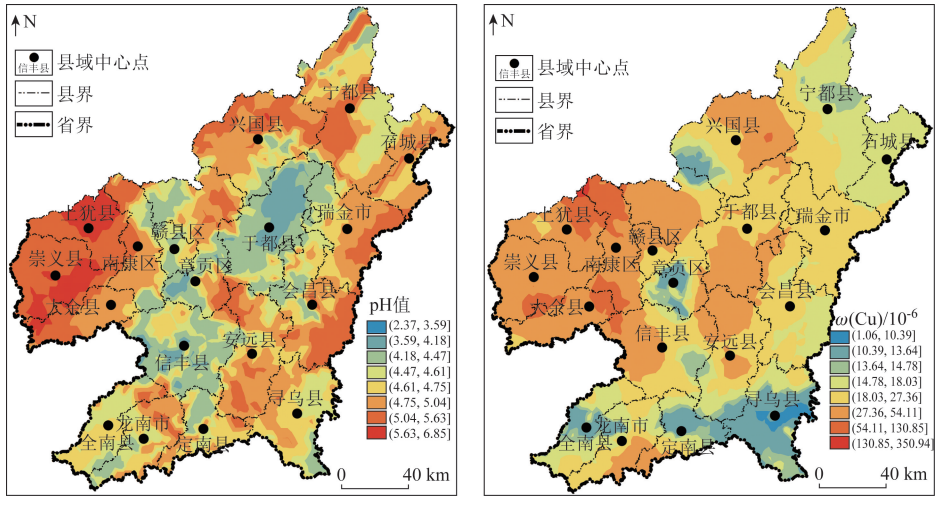
图 2　研究区局部空间自相关聚类图

Fig. 2　Local Moran's I clustering diagrams of the study area

(低 – 低),整体上冷点主要分布在赣县区、信丰县等地;从被高值围绕的低值异常点(高 – 低)来看,pH 值、Cu、Pb、Zn、Cr、As 含量特征点的分布规律并不明显;从被低值围绕的高值异常点(低 – 高)来看,pH 值、Cu、Pb、Zn、Cr、As 含量特征点均分布在与热点相邻处。pH 值、Cu、Pb、Zn、Cr、As 含量均存在聚类特征,说明这些特征点受某些自然或人为因素的影响,存在空间上的联系。赣州市具有近半个世纪的离子型稀土矿开发历史,本研究采集的 787 个样品中包含有 644 个稀土样品,推测废弃稀土矿中的土壤重金属在赣州市污染影响较大。结合土壤重金属含量空间分布预测,图 2 中高值点的可能成因是采矿活动中使用的化学药剂使土壤理化性质发生变化,并改变了土壤重金属的含量及迁移活性,导致某些土壤重金属在采矿区及周边出现富集。低值点主要位于赣县和信丰县,这些特征点的存在可能是采样点距离采矿区的距离较远所致。

3.3　空间分布特征

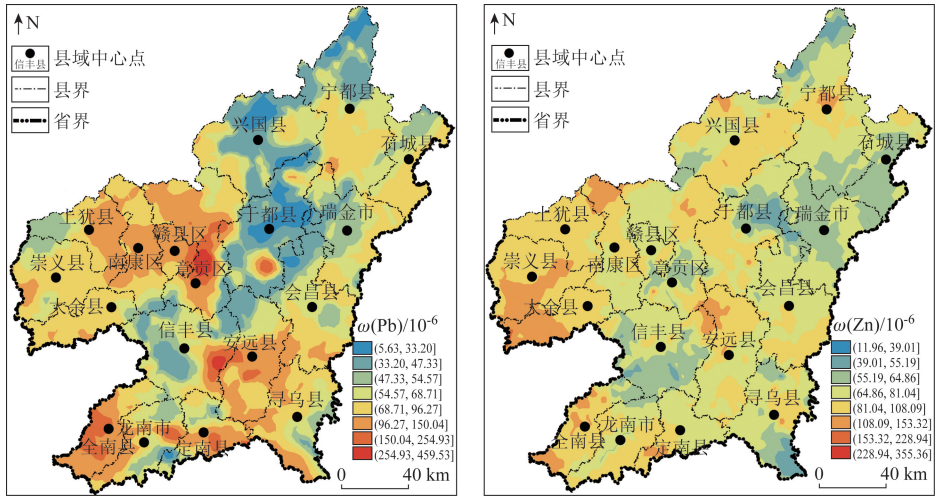
通过 GS$^+$9.0 软件计算普通克里金插值,将结果导入 ArcGIS 10.2 中绘制各土壤重金属指标的含量空间分布图,含量分级标准采用几何间距分级[20],分析结果见图 3。由图 3 可看出:赣州市废弃矿山土壤重金属含量空间分布格局总体呈从西向东逐渐减小的趋势,反映赣州矿产资源主要集中在中西部地区,采矿活动较为频繁。pH 值高值区主要分布在上犹县、崇义县和大余县(图 3(a));Cu 含量高值区主要分布在上犹县、崇义县、大余县、南康区和赣县区(图 3(b));Pb 含量高值区主要分布在赣县区、章贡区、安远县和全南县(图 3(c));Zn 含量高值区主要分布在崇义县、大余县和全南县(图 3(d));Cr 含量高值区主要分布在安远县、信丰县、于都县和会昌县(图 3(e));As 含量高值区主要分布在崇义县、大余县、上犹县、于都县和兴国县,土壤重金属含量低值区分布特征并不显著(图 3(f))。通过对比图 2 和图 3 可以看出:根据普通克里金插值法预测得到的土壤重金属含量空间分布情况与局部空间自相关性分布情况基本一致,说明赣州市废弃矿山土壤重金属在半变异函数计算范围与空间自相关距离一致时,含量呈现显著的空间异质性和地理空间相关。赣州市土壤整体为酸性 – 弱酸性,pH 值多为 4.50 ~ 6.50,酸性土壤可能增强了重金属的溶解性,导致重金属更易被植物吸收或发生迁移[21]。2017 年由中国地质调查局发布的《赣南苏区矿产资源分布图》[22] 显示,大余县、崇义县、上犹县和南康区相互毗邻,钨矿、铜矿、铅矿数量较多,这与 Cu、Pb 高值区的分布基本吻合。Cr 含量在赣州市南部的安远县、信丰县较高,这些地区可能受到玄武岩、花岗岩等富铬火成岩的影响。As 通常与其他重金属矿产(如铅锌矿和铜矿)伴生,在崇义县、大余县、上犹县和兴国县,高含量的 As 可能与多金属矿区的长期开采有关,尤其是在存在采矿废水排放和尾矿渗漏的情况下[23]。砖瓦黏土、石灰岩、页岩等矿种通常对土壤重金属含量影响较小,因此这些矿产所在的区域一般不是重金属高值区。此外,高岭土主要与非金属矿物相关,对重金属含量的贡献较少,也可能分布在低值区。



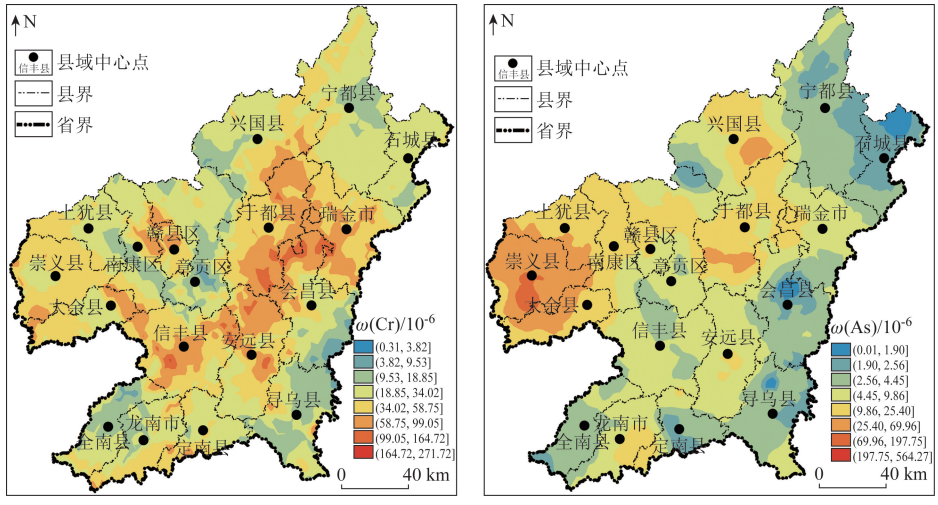
(a) pH 值　　(b) Cu

图 3 – 1　研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 3 – 1　Spatial distribution of heavy metal content in soil of the study area



(c) Pb (d) Zn



(e) Cr (f) As

图 3 – 2 研究区土壤重金属含量空间分布

Fig. 3 – 2 Spatial distribution of heavy metal content in soil of the study area

4 讨论

根据研究区土壤重金属含量空间分布(图 3),可以看出高值区主要分布在赣州市中西部矿业活动密集的区域。为了进一步查明该地区土壤重金属之间的相互关系,运用主成分分析法提取因子,采取最大方差法进行旋转[24],完成对研究区土壤样品 6 项指标的因子分析,得到 KMO(Kaiser – Meyer – Olkin)值和巴特利特检验结果(表 4)、土壤重金属含量相关性系数矩阵(表 5)、主成分分析特征值及方差贡献率(表 6)、成分旋转载荷矩阵(表 7)。

KMO 值是检验统计量,取值一般为 0 ~ 1,该指标被用于检查因子是否适合进行主成分分析。本

表 4 KMO 值和巴特利特检验结果

Tab. 4 Results of KMO and Bartlett tests

KMO 值	巴特利特检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.612	287.209	15.000	0

表 5 土壤重金属含量相关性系数矩阵

Tab. 5 Correlation coefficient matrix of heavy metal content in soil

指标	pH 值	Cu 含量	Pb 含量	Zn 含量	Cr 含量	As 含量
pH 值	1					
Cu 含量	0.273**	1				
Pb 含量	0.109**	0.041	1			
Zn 含量	0.110**	0.330**	−0.048	1		
Cr 含量	0.111**	0.140**	−0.119**	0.127**	1	
As 含量	0.112**	0.270**	−0.045	0.134**	0.142**	1

注:** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。

表 6　主成分分析特征值及方差贡献率

Tab. 6　Eigenvalues and variance contribution rates of principal component analysis

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	1.706	28.427	28.427
2	1.222	20.370	48.797
3	0.893	14.880	63.677
4	0.847	14.124	77.801
5	0.730	12.172	89.973
6	0.602	10.027	100.000

表 7　成分旋转载荷矩阵

Tab. 7　Component rotation load matrix

指标	因子载荷量	
	第一主成分	第二主成分
pH 值	0.520	0.536
Cu 含量	0.781	0.076
Pb 含量	0.012	0.680
Zn 含量	0.652	-0.063
Cr 含量	0.311	-0.643
As 含量	0.549	-0.223

文得到的 KMO 值为 0.612 (表 4),属临界中等水平,达到主成分分析的最低可接受阈值。巴特利特检验是以相关矩阵为基础,判断相关矩阵对角线的所有元素是否为 1,所有非对角线上的元素是否均为零,当显著性数值小于 0.05 时,拒绝原假设,表明变量间存在显著相关性,适合进行主成分分析。本文巴特利特检验的显著性为 0,说明可进行主成分分析。主成分分析法可以用于解释赣州市废弃矿山土壤重金属的主要来源,如表 6 和表 7 所示,选取特征值较大的两个因子作为主成分,两个主成分的方差贡献率分别为 28.427% 和 20.370%,累积方差贡献率达到了48.797%,表明这两个主成分可以解释土壤化学组成元素的部分信息,分析其形成的原因。Cu、Zn、As 含量与第一主成分呈正相关且因子载荷较大,表明这 3 种指标是矿山土壤污染物的主要组成部分; Pb 含量和 pH 值与第二主成分呈正相关且因子载荷较大,说明矿区土壤中 Pb 的吸附、迁移与土壤 pH 值关系密切。在酸性土壤条件下,Pb 的溶解度和生物可用性较高,从而在第二主成分中呈现较大荷载。第二主成分中 Cu、Zn、Cr 含量与 pH 值的关系可能较弱或已在第一主成分中得到体现,导致其未能在第二主成分中显著反映。此外,Pb 含量和 pH 值的特定分布趋势也可能使其在第二主成分中表现突出。

由表 5 可看出,除 Pb 与 Cu、Zn、As 含量以外,其余土壤重金属指标之间存在着较强的相关性,说明它们具有相同来源的可能性较大。此外,Cu 与 Zn 含量的相关系数为 0.330,在土壤重金属含量相关性中表现突出,说明在赣州市废弃矿山土壤中,Cu 和 Zn 可能具有同源或复合污染关系,即 Cu 含量越高,Zn 含量也越高。有研究认为采矿、冶炼等工业场地通常呈现重金属 - 重金属复合的污染特征,当这类污染物共存时,可通过生物吸收转运、降解转化、生物毒性等相互影响,产生协同、加和等联合效应[25-26]。因此,从统计学的角度分析赣州市废弃矿山周边土壤的污染物来源,在一定程度上有助于定量评价该区域的生态环境效应。

5　结论

(1)江西省赣州市废弃矿山土壤重金属含量较高,均值超过江西省背景值。金属矿的土壤重金属含量均值总体偏高,建材及砖瓦黏土矿的土壤重金属含量均值总体偏低。pH 值、Pb 和 Zn 含量呈中等变异性,Cu、Cr 和 As 含量呈强变异性。

(2)废弃矿山土壤重金属含量空间分布格局总体呈从西向东逐渐减小的趋势,根据普通克里金插值法预测得到的土壤重金属含量空间分布情况与局部空间自相关性分布情况结果基本一致。赣州市土壤整体呈现酸性 - 弱酸性。大余县、崇义县、上犹县和南康区钨矿、铜矿、铅矿数量较多,与 Cu、Pb 高值区分布基本吻合。

(3) 采用主成分分析法对废弃矿山土壤中的污染物来源进行解析,两个主成分的方差贡献率分别为 28.427% 和 20.370%。Cu 和 Zn 含量的相关系数为 0.330,在土壤重金属含量相关性中表现突出,说明赣州市废弃矿山土壤重金属 Cu 和 Zn 含量可能具有同源或复合污染关系。Cu、Zn、As 是矿区土壤污染物的主要组成部分,矿区土壤中 Pb 的吸附、迁移与土壤 pH 值呈正相关。

参考文献(References):

[1] 陈丽芳. 矿山重金属污染研究现状及修复技术[J]. 中国金属通报,2018(6):183 - 184.
Chen L F. Research status and remediation technology of heavy metal pollution in mines[J]. China Metal Bulletin, 2018(6): 183 - 184.

[2] 刘焕,张昆. 矿山重金属污染研究现状及修复技术展望[J]. 云南地质,2018,37(1):117 - 121.
Liu H, Zhang K. The present study situation and recovery prospect

of heavy metal pollution of mine[J]. Yunnan Geology, 2018, 37(1):117 – 121.

[3] 齐尚星,安邦,谭静,等. 安徽省潜山市土壤质量地球化学评价[J]. 中国地质调查,2024,11(6):54 – 63.
Qi S X, An B, Tan J, et al. Geochemical assessment of soil quality in Qianshan City of Anhui Province[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(6):54 – 63.

[4] 付小东,孙聪伍,姚叶婷,等. 冶炼行业企业周边土壤重金属分布特征及潜在生态风险评价[J]. 中国地质调查,2025,12(3):138 – 146.
Fu X D, Sun C W, Yao Y T, et al. Distribution characteristics of heavy metals in soils around smelting enterprises and potential ecological risk assessment[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3):138 – 146.

[5] Atanazio Cruz Silva C M C, Nascimento R C, Agra Bezerra Da Silva Y J, et al. Combining geospatial analyses to optimize quality reference values of rare earth elements in soils[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(7):453.

[6] Ding Q, Cheng G, Wang Y, et al. Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions[J]. Science of the Total Environment, 2017, 578:577 – 585.

[7] Fu S, Wei C Y. Multivariate and spatial analysis of heavy metal sources and variations in a large old antimony mine, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(1):106 – 116.

[8] 潘丹,陈佳,孔凡斌. 山水林田湖草保护修复工程对生态系统服务价值及权衡协同关系时空演变的影响——以赣州市为例[J]. 生态学报,2025,45(10):4758 – 4773.
Pan D, Chen J, Kong F B. Impact of mountain – river – forest – cropland – lake – grassland system project on the spatial – temporal evolution of ecosystem service values and trade – off synergistic relationships: A case study of Ganzhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10):4758 – 4773.

[9] 胡隆,饶敏欣,罗志军,等. 基于生态系统服务供需的赣州市国土空间生态网络构建[J]. 江西农业大学学报,2023,45(4):1038 – 1050.
Hu L, Rao M X, Luo Z J, et al. Construction of territorial spatial ecological network in Ganzhou City based on supply and demand of ecosystem service[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(4):1038 – 1050.

[10] 张维理,傅伯杰,徐爱国,等. 中国土壤调查结果的地统计特征[J]. 中国农业科学,2022,55(13):2572 – 2583.
Zhang W L, Fu B J, Xu A G, et al. Geostatistical characteristics of soil data from national soil survey works in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(13):2572 – 2583.

[11] 春风,那仁满都拉,张卫青,等. 白音华矿区土壤重金属含量的空间异质性[J]. 应用生态学报,2021,32(2):601 – 608.
Chun F, Na R M D L, Zhang W Q, et al. Spatial heterogeneity of soil heavy metal content in Baiyinhua mining area, Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2):601 – 608.

[12] 杨奇勇,杨劲松,余世鹏,等. 不同尺度下耕地土壤 Cr 含量的空间自相关性分析[J]. 应用与环境生物学报,2011,17(3):393 – 397.
Yang Q Y, Yang J S, Yu S P, et al. Spatial autocorrelation analysis of Cr content in cultivated soil at different scales[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2011, 17(3):393 – 397.

[13] 杨楠,连雅,夏新,等. 典型区域土壤重金属空间变异与多变量均质性分区研究[J]. 农业环境科学学报,2021,40(7):1451 – 1459.
Yang N, Lian Y, Xia X, et al. Spatial variability and multivariate homogeneity division of soil heavy metals in typical areas[J]. Journal of Agro – Environment Science, 2021, 40(7):1451 – 1459.

[14] 解学通,郑艳,张金兰,等. 主成分分析与 BP 神经网络结合的叶绿素 a 浓度反演模型[J]. 测绘科学,2024,49(10):50 – 58.
Xie X T, Zheng Y, Zhang J L, et al. Study on chlorophyll a concentration inversion method based on principal component analysis and BP neural network[J]. Science of Surveying and Mapping, 2024, 49(10):50 – 58.

[15] 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,1990:329 – 492.
China Environmental Monitoring Station. Background Values of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:329 – 492.

[16] 王波,王元仲,李冬梅,等. 迁安市农田重金属含量空间变异性[J]. 应用生态学报,2006,17(8):1495 – 1500.
Wang B, Wang Y Z, Li D M, et al. Spatial variability of farmland heavy metals contents in Qianan City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8):1495 – 1500.

[17] 秦治恒,师华定,王明浩,等. 湘江流域主要支流土壤 Cd 污染空间分布与相关性[J]. 环境科学研究,2018,31(8):1399 – 1406.
Qin Z H, Shi H D, Wang M H, et al. Spatial distribution and correlation of soil cadmium contamination in Xiangjiang River Tributary Basin of China[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(8):1399 – 1406.

[18] 尹炳. 不同尺度典型农田土壤硒富集特征及综合利用研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2021.
Yin B. Characteristics of Selenium Enrichment and Comprehensive Utilization in Typical Farmland Soils at Different Scales[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.

[19] 朱慧,王哲,焦广辉,等. 天山北坡经济带经济格局时空演变特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(3):23 – 29.
Zhu H, Wang Z, Jiao G H, et al. Spatial dynamic evolution of economic pattern in economic belt on the north slope of Tianshan[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(3):23 – 29.

[20] 张若婧,陈跃红,张晓祥,等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. 地理与地理信息

科学,2021,37(4):72 – 80.
Zhang R J, Chen Y H, Zhang X X, et al. Spatial – temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi Province analyzed by optimal parameters – based geographical detector[J]. Geography and Geo – Information Science, 2021, 37(4): 72 – 80.

[21] 张德富,陈希泉,庞新龙,等. 江西于都南部地区土壤重金属元素生态地球化学特征及其来源解析[J]. 东华理工大学学报:自然科学版,2024,47(1):45 – 54.
Zhang D F, Chen X Q, Pang X L, et al. Ecogeochemical characteristics and source analysis of heavy metal elements in southern Yudu, Jiangxi Province[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2024, 47(1): 45 – 54.

[22] 中国地质调查局. 赣南苏区矿产资源分布图[EB/OL]. 北京:中国地质调查局,2017. https://www.cgs.gov.cn/ddztt/qgddh/2017gzh/zcgj/gjright/201702/t20170221_422880.html.
China Geological Survey. Distribution map of mineral resources in the Gannan soviet area[EB/OL]. Beijing: China Geological Survey, 2017. https://www.cgs.gov.cn/ddztt/qgddh/2017gzh/zcgj/gjright/201702/t20170221_422880.html.

[23] 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.
Guo J G, Zhao H Q, Bian X D, et al. Characteristics and ecological risk of soil heavy metals of a Tungsten mine in Yudu, Jiangxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2021, 40(7): 1195 – 1202.

[24] 刘岩峰,崔冠楠,白鑫宇,等. 广西武鸣河流域非点源氮磷污染特征及源解析[J]. 中国环境科学,2021,41(6):2821 – 2830.
Liu Y F, Cui G N, Bai X Y, et al. Characteristics and source apportionment of nitrogen and phosphorus non – point source pollution in Wuming River Basin, Guangxi[J]. China Environmental Science, 2021, 41(6): 2821 – 2830.

[25] 许中坚,吴灿辉,刘芬,等. 典型铅锌冶炼厂周边土壤重金属复合污染特征研究[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版,2007,22(1):111 – 114.
Xu Z J, Wu C H, Liu F, et al. Study on combined pollution character of heavy metals in soils around a typical lead – zinc smeltery[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2007, 22(1): 111 – 114.

[26] 张静. 赣南钨矿区土壤重金属空间分布及其形态研究[D]. 赣州:江西理工大学,2015.
Zhang J. Distribution of Heavy Metals and Their Chemical Speciation of Tungsten Mine Area Soil in South of Jiangxi Province[D]. Ganjiang: Jiangxi University of Science and Technology, 2015.

Spatial distribution characteristics and source of heavy metals in abandoned mine soils in Ganzhou City

LI Zhou, ZHANG Songtang, LAI Qinglin, WANG Hu, WEN Xiujuan, XIAO Zhijian
(*No.* 7 *Geological Brigade of Jiangxi Provincial Geological Bureau*, *Ganzhou Jiangxi* 341000, *China*)

Abstract: The surface soil and vegetation in the southern Jiangxi Province have been severely damaged due to unregulated mining and extensive management practices in abandoned mines. This issue has resulted in accumulation of tailings, soil erosion, and soil acidification, which ultimately leading to regional environmental pollution. In order to gain a comprehensive understanding of the pollution problems in the abandoned mines of the southern Jiangxi Province, the authors in this paper took the abandoned mines in Ganzhou City as the research subject to explore the spatial distribution characteristics and sources of heavy metals in the mine soil. The content of heavy metal elements in surface soil samples (0 ~ 20 cm) was measured and the combined approach integrating multivariate statistical analysis, geostatistics, and GIS technology was employed to analyze the spatial distribution patterns of the heavy metals. Besides, the principal component analysis method was used to identify the factors contributing to heavy metal contamination in the mine soil. The research findings are as follows. ① The heavy metal content in the abandaned mine soils is relatively high, with the average value exceeding the background level of Jiangxi Province. Specifically, the average heavy metal content in the soil of metal mines is generally higher, while that content of building material and brick – tile clay mines is generally lower. The spatial autocorrelation Moran's I of heavy metals in the mine soil is consistently greater than 0, indicating a certain positive spatial correlation distribution within Ganzhou City. ② The overall spatial distribution pattern of heavy metals in the mine soil exhibits a decreasing trend from west to east. The spatial distribution of heavy metals in the soil, as predicted by ordinary kriging interpolation, is generally consistent with the results of the local spatial Moran's I distribution. ③ Through principal component analysis of pollutant sources in the abandoned mine soils, the variance contribution rates of

the two principal components are 28.427% and 20.370%, respectively. The correlation coefficient between Cu and Zn content is 0.330, suggesting a possible common origin or combined pollution relationship. Cu, Zn, and As are the main components of soil pollutants in the mining area. Moreover, the adsorption and migration of Pb in the mining area soil are positively correlated with the soil pH value. The results of this research could provide valuable theoretical references for soil pollution prevention and control as well as ecological environment protection in Ganzhou City.

Keywords: abandoned mines; heavy metals in soil; variation function; spatial distribution characteristics; combined pollution

(责任编辑: 魏昊明)