

李斯林, 王贺封, 刘佳, 等. 冀南非露天煤矿土壤重金属风险评价与影响因素分析[J]. 岩矿测试, 2024, 43(5): 769-782. DOI: 10.15898/j.ykcs.202401180006.

LI Silin, WANG Hefeng, LIU Jia, et al. Risk Assessment and Influencing Factors Analysis of Heavy Metals in Soil of Non-Surface Coal Mines in Southern Hebei Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(5): 769-782. DOI: 10.15898/j.ykcs.202401180006.

冀南非露天煤矿土壤重金属风险评价与影响因素分析

李斯林¹, 王贺封^{1,2*}, 刘佳¹, 张安兵¹, 魏凯濠¹, 李斌¹

(1. 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 邯郸市自然资源空间信息重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 非露天煤矿开采是获取煤炭资源的重要手段, 研究非露天煤矿土壤重金属含量影响因素及生态风险, 对矿区生态环境保护和治理至关重要。当前冀南非露天煤矿——峰峰煤矿土壤重金属相关研究多聚焦于对局部区域土壤污染程度的评估以及对影响因素的线性作用分析, 难以为整个区域土壤重金属的有效治理提供科学依据。为综合评价整个峰峰煤矿土壤重金属污染程度, 并深入分析其主要影响因素及非线性作用机制, 本文在峰峰煤矿采集 49 处表层土壤样品测定 7 种重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 含量; 运用单项污染指数法和潜在生态风险评价法评估矿区土壤重金属污染程度和潜在生态风险, 并利用地理探测器分析矿区土壤重金属含量空间分布的主要影响因素。结果表明: 矿区内土壤 7 种重金属含量表现出一定的空间异质性, 总体呈北高南低的分布格局, 样品中仅有 Cd 元素平均含量超过国家自然背景值。土壤潜在生态风险综合指数为 45.70~132.77, 处于轻度到中度风险等级之间, 其中各重金属单项污染指数呈现 Cd(1.818)>Pb(0.744)>Cu(0.715)>Ni(0.714)>Cr(0.701)>Zn(0.684)>As(0.656)。矿山开采、矸石山等人为因素及降水、土壤湿度等自然因素共同影响着峰峰煤矿区土壤重金属含量的空间格局, 其中企业分布和交通运输活动是 Ni 空间分异性的主要影响因素; 矿山开采是 Cu、Cd、Cr、Pb 和 Zn 的主要影响因素; 土壤侵蚀和土壤湿度是 As 的主要影响因素。

关键词: 土壤重金属; 土壤污染; 地理探测器; 生态风险评价; 影响因素

要点:

(1) 通过最优参数地理探测器的自动优化参数选择, 深入分析了研究区重金属风险主要影响因素及非线性作用机制, 为定向污染防治提供科学参考。

(2) 重金属 Cd 对土壤环境危害最大, 超出自然背景值的 78%, 其余重金属样点平均含量均低于邯郸市土壤自然背景值, 峰峰煤矿土壤潜在生态风险综合指数为 45.70~132.77, 处于轻度到中度风险之间。

(3) 矿山开采活动对峰峰煤矿潜在生态风险的贡献率为 0.144, 是影响土壤环境质量的主要因素。

中图分类号: X53

文献标识码: A

煤矿资源的开发利用成为支撑经济社会发展的重要基石, 然而此过程中伴生的环境问题日益凸显, 尤其是非露天煤矿开采所诱发的土壤重金属污染问题, 已成为不容忽视的严峻挑战。非露天煤矿在其开采、冶炼、处理和运输过程中, 各种成分的矿山废

石暴露于地表环境, 对周边地区土壤造成直接或间接的重金属污染, 进而通过食物链威胁土壤生态系统和人类健康^[1], 其中以煤矸石的地表堆放问题最为突出。因此, 分析矿区表层土壤重金属的污染程度, 探究不同影响因素作用机制, 有助于有效地治理

收稿日期: 2024-01-18; 修回日期: 2024-04-20; 接受日期: 2024-08-15

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2020402006); 河北省重大科技成果转化专项项目(22287401Z)

第一作者: 李斯林, 硕士研究生, 专业方向为土壤重金属污染。E-mail: 13599055367@163.com。

通信作者: 王贺封, 博士, 教授, 主要研究方向为 GIS 与遥感应用、城市地理数据挖掘。

E-mail: wanghefeng@hebeu.edu.cn。

土壤重金属污染,对预防重金属污染产生的潜在危害具有重要的指导意义。

近年来国内外学者针对非露天煤矿土壤重金属污染及影响因素探测开展大量研究工作。Yan 等^[2]以山东省泰安市某具有代表性的煤矿矿区为研究区,采用单因素污染指数法、内梅罗污染指数法和潜在生态危害指数法计算得出,所有样点的综合污染等级均在轻度污染以上,研究区综合潜在生态风险中等污染等级占 64.41%,重金属 Cd 污染率最高;张永康等^[3]利用单因子指数法和潜在生态危害指数对江西省某废弃矿区土壤重金属污染状况和潜在生态风险进行分析,确定废弃煤矿区内重金属 Cd 污染较严重,且矿区潜在生态风险为中等-强等级;Li 等^[4]指出鲁西南某煤矿区域内土壤重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的平均值均超过山东省自然土壤背景含量,并通过空间分布分析得出土壤中有毒金属的含量受到煤矿活动的影响。从以往研究来看,常用于矿区土壤重金属污染评价的方法有地累积指数法^[5]、单项污染指数法^[6]、内梅罗污染指数法^[5]和潜在生态风险评价法^[7-8]等。然而,单一的评价指标会导致评价结果的失真,为此,许多学者综合多种重金属指标进行污染评价,提高土壤重金属污染评价的准确性,也有研究结合单项污染指数法和潜在生态风险评价法(RI),引入 Hakanson 毒性响应系数,使得污染评价结果兼顾重金属毒性的不同和重金属累积浓度的差异^[9]。对于土壤重金属污染影响因素的识别方法,主要包括多元统计分析^[10-12]和地统计分析^[13],这两种方法可用于定性识别土壤中的主要污染源,但不能有效地定量各污染源的主要贡献大小,存在一定的局限性^[14-16]。近年来,地理探测器(GeoDetector, GD 模型)因其具备揭示不同影响因素之间相互作用及作用大小的优势,在探究重金属污染影响因素的研究中得到广泛应用^[17-20];但在空间数据离散化方法选择方面易受主观条件的影响^[21-23],往往根据专业经验选择,且地理探测器空间分层异质性分析易受空间尺度效应的影响。为此,要提高空间分析的准确性和有效性,应优化选择空间数据离散化方法和空间分析的空间尺度,确定地理探测器模型最佳参数组合^[24]。

河北省邯郸市峰峰矿区是冀南一座资源型老工矿区,曾是中国第二大主焦煤产地,原煤储量高达 35 亿吨,大规模开采不仅对土壤环境造成一定影响,也加速了矿区内资源枯竭。为实现经济社会的可持续性发展,峰峰矿区面临着经济转型和产业升级的

迫切需求,因此更要注重土壤环境污染水平,是资源型矿区土壤重金属的研究代表^[25]。当前对峰峰矿区土壤重金属研究主要集中于煤矸石山周边地区的污染评价和影响因素分析^[26-27],对大区域土壤重金属的综合分析尚显不足,且土壤重金属污染影响因素存在多源叠加作用,仅凭简单的线性分析已不足以为区域土壤重金属污染治理提供充分的支持^[7]。为确定峰峰矿区土壤重金属污染空间分布及影响因素作用机制,本文综合了单项指数和潜在生态风险指数定量评价和可视化研究区表层土壤重金属分布状况及污染程度;并在试验不同离散化方法及参数组合的基础上,采用地理探测器揭示不同重金属含量的主要影响因素及其贡献度,旨在为加强矿区土壤环境监测、定向污染防治提供参考。

1 研究区概况

峰峰矿区位于晋、冀、豫三省交界处,隶属于河北省邯郸市,总面积约 353km²^[25]。该区气候属于暖温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。研究区地势起伏较大,位于平原与丘陵过渡带,西高东低。土壤类型以具有较高重金属吸附能力的初育土和半淋溶土为主;土地利用类型以耕地为主,多种植玉米、小麦等农作物^[28]。如图 1a 所示,峰峰矿区原煤储量丰富、煤种齐全、埋藏浅、质量高,形成了包括万年矿、梧桐矿、九龙矿、通二矿、小屯矿等在内的十多处煤矿。其中,一矿、二矿、通二矿等采煤通道已经关闭,梧桐庄矿和九龙矿等仍在开采^[29],由于煤矿开采历史悠久、规模庞大以及煤矸石地表堆积等问题,煤矿开采及相关产业活动对周围土壤造成一定影响。

2 实验部分

2.1 土壤样品采集

根据研究区内矿区及矸石山分布位置,样点布设采用由研究区中部矿区分布密集处沿河道向东部带状推进方式,考虑到地形和周边环境等实际情况优化和增加采样点位,利用 GNSS 定位技术测量土壤样点地理坐标,根据五点取样法^[30](图 1b)将各点位收集到的 5 处表层土壤(0~20cm)进行均匀混合,采用四分法将筛选出的土壤装入自封袋,共采集 49 个土样点。样品分布在矿区、矸石山、水库、村庄及河流附近,涉及的土地利用类型包括:耕地、草地、林地。考虑到采样难度,且受采矿影响相对较小,西部部分地区未进行实地采样。

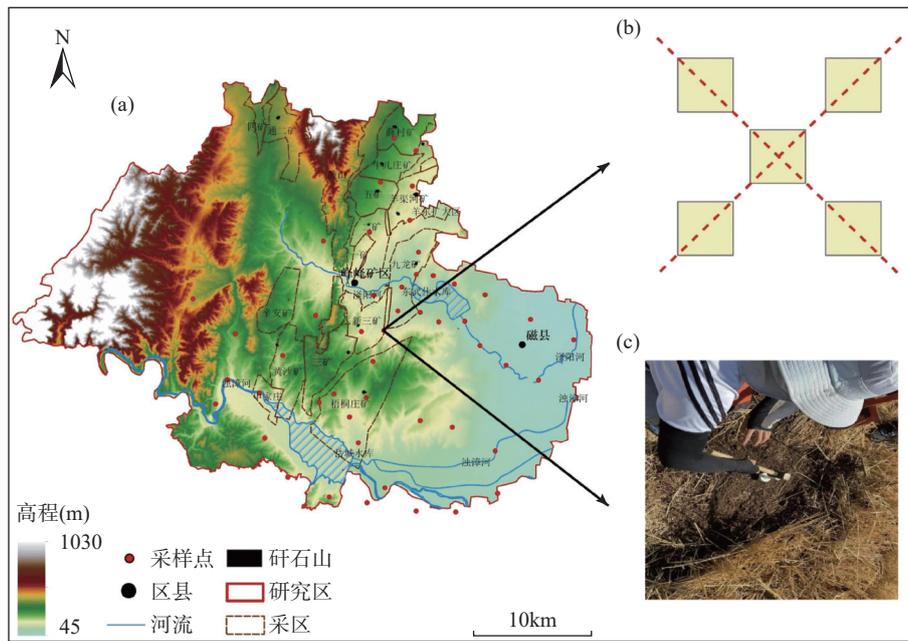


图1 研究区及土壤样品点分布

Fig. 1 Distribution of research area and soil sample points.

2.2 土壤重金属含量测定

土壤样品按照《土壤质量 土壤样品长期和短期保存指南》(GB/T 32722—2016)的相关要求进行保存,经自然风干并用玛瑙研钵研磨,过200目尼龙筛备用。以《土壤中砷、铅、铜、锌、镉、铬、镍、镁、钾、钙、锰、铁、硒、钼的测定 电感耦合等离子体质谱法》(DB35/T 1142—2020)为依据,称取预处理后土壤样品至坩埚中,利用优纯级硝酸、盐酸、氢氟酸和高氯酸进行土壤样品的湿法消解,通过电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定土壤重金属As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn含量。样品分析过程中,采用混合标准物质、相同试剂和步骤,设置2个以上全程序空白溶液。取100mL容量瓶,稀释各元素标准使用液,配制标准系列:Cu和Pb的标准系列溶液浓度为0.00、0.10、0.50、1.00、3.00、5.00mg/L;As的标准系列溶液浓度为0.00、10.00、20.00、30.00、40.00、60.00ng/L;Cd的标准系列溶液浓度为0.00、0.10、0.20、0.40、0.60、1.00mg/L;Ni、Cr和Zn的标准系列溶液浓度为0.00、0.10、0.20、0.30、0.50、0.80mg/L。由低到高依次测定,并建立不同重金属的标准曲线,用于一般样品测定。此外,各重金属的仪器检出限(mg/L)分别为As 0.00005、Cd 0.00001、Cr 0.000271、Cu 0.00005、Ni 0.000024、Pb 0.000003、Zn 0.000747,均达到或优于DB35/T 1142—2020的要求,方法回收率达85%~105%,数据质量可靠。

2.3 重金属生态风险评价研究方法

2.3.1 单项污染指数法

通过单项污染指数法,对研究区的土壤重金属污染程度进行测算,具体公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 表示重金属*i*的污染评价指标; C_i 表示土壤重金属*i*的实测数据; S_i 表示土壤重金属*i*对应的自然背景值。 $P_i \leq 1$ 为清洁等级; $1 < P_i \leq 2$ 为轻微污染; $2 < P_i \leq 3$ 为轻度污染; $3 < P_i \leq 5$ 为中度污染; $P_i > 5$ 为重度污染。

2.3.2 潜在生态风险评价法

Lars Hakanson教授提出了一个综合生态学、生物学和毒理学等方法的土壤和沉积物潜在生态风险评估模型^[9],其计算公式为:

$$EI^i = \sum E_r^i = T_r^i \times \frac{C_r^i}{C_0^i} \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n EI_r^i \quad (3)$$

式中: EI^i 为重金属*i*的潜在生态风险指数; RI 为研究区样品潜在生态风险指数; T_r^i 为第*r*个样品重金属*i*对应的毒性相应系数,As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn的毒性相应系数分别是10、30、2、5、5、5和1^[31-32]; C_r^i 为第*r*个样品重金属*i*土壤样品的真实值; C_0^i 是重

金属 i 对应的自然背景值; n 为各样品测量重金属种类数量。

Hakanson 的 EI 和 RI 分级标准是针对 8 种污染物 (PCBs、Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn) 设计的, 而本文仅 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 七种土壤重金属。因此, 需要根据马建华等^[33] 在 2011 年首次提出的 RI 值分级调整方案进行污染等级的划分, 即将 Hakanson 的第一级 RI 值 (150) 除以 8 种污染物 (PCBs、Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr 和 Zn), 再乘以本研究所有参评污染物毒性系数总值 (58), 并取十位整数得到第一级界限值; 将 RI 第一级界限值乘 2 得到第二级界限值, 余者类推。最终 EI 和 RI 分级标准如下: $EI < 30$, $30 \leq EI < 60$, $60 \leq EI < 120$, $120 \leq EI < 240$, $EI \geq 240$ 分别对应轻度、中度、高度、强、极强风险等级; $RI < 70$, $70 \leq RI < 140$, $140 \leq RI < 280$, $RI \geq 280$ 分别对应着轻度、中度、强和极强潜在生态风险。

2.3.3 地理探测器

地理探测器是结合 GIS 空间叠加技术和集合论的多因子关系分析模型, 包含分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测四个模块^[34-35], 其中, 分异及因子探测主要探测因变量 Y 的空间分异性, 以及不同影响因子 X_i 对变量 Y 空间分异的解释程度^[36]。交互作用探测能够识别不同驱动因子 $X_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 相互叠加后对因变量 Y 的作用力: $q(X_i \cap X_j)$, 通过比较单因子 q 值与两因子叠加后的 q 值大小来判断两因子是否存在交互作用, 以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性等, 两个因子间关系可分为非线性减弱、双线性减弱、双线性增强、相互独立和非线性增强五种类型 (表 1)。

结合研究区概况和相关文献^[18-20], 选取 12 个土壤重金属含量影响因素, 包括交通运输、企业分布、

PM_{2.5} 及矿山开采活动等 5 个人为活动因素, 以及土壤湿度、土地利用类型、高程、河流、气温、降水与土壤侵蚀 7 个自然环境因素。其中, 企业分布来源于高德地图采集的兴趣点数据; 河流数据来自河北省地图矢量化结果, 根据矿区边界建立缓冲区, 通过近邻分析得到距河流距离、距企业距离和距矿区距离数据; 路网数据来自 OpenStreetMap, 矸石山位置采用 Real-time kinematic (RTK) 进行实地勘察记录, 并对路网数据和矸石山位置数据分别进行线要素与点要素的核密度分析, 得到路网密度和矸石山分布密度的栅格数据; 1km 分辨率 PM_{2.5}、气温降水数据来自国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn/aboutus.html>); 土壤湿度数据来自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/home>), 利用世界土壤数据库 (ISRIC-World Soil Information) 中的土壤类型, 根据 ArcSWAT 模型计算得出不同土壤类型的土壤侵蚀数据; 12.5m 分辨率 DEM 数据由地理空间数据云遥感数据提取获得; 土地利用数据由中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 提供。

3 结果与讨论

3.1 研究区土壤重金属含量特征

基于样品检测结果, 得到研究区土壤重金属含量统计特性, 具体见表 2。土壤重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 样点的平均含量分别为 45.092、19.847、16.492、47.554、6.625、0.273 和 16.748mg/kg, 与河北省邯郸市土壤自然背景值相比^[37], 样品中重金属含量超标样品占比分别为 4.08%、6.12%、8.16%、4.08%、10.20%、100.00%、4.08%。土壤重金属的变异系数均在 15% 以上, 且 $Cu > As > Zn >$

表 1 两个自变量对因变量交互作用的类型

Table 1 The type of interaction between two independent variables and the dependent variable.

交互作用五种类型图示	判断依据	交互作用类型
	$q(X_i \cap X_j) < \min[q(X_i), q(X_j)]$	非线性减弱
	$\min[q(X_i), q(X_j)] < q(X_i \cap X_j) < \max[q(X_i), q(X_j)]$	双线性减弱
	$q(X_i \cap X_j) > \max[q(X_i), q(X_j)]$	双线性增强
	$q(X_i \cap X_j) = q(X_i) + q(X_j)$	相互独立
	$q(X_i \cap X_j) > q(X_i) + q(X_j)$	非线性增强

注: ●代表 $\min[q(X_i), q(X_j)]$, 取 $q(X_i)$ 和 $q(X_j)$ 间的最小值; ●代表 $\max[q(X_i), q(X_j)]$, 取 $q(X_i)$ 和 $q(X_j)$ 间的最大值; ●代表 $q(X_i) + q(X_j)$, 取 $q(X_i)$ 和 $q(X_j)$ 两者之和; ▼代表 $q(X_i \cap X_j)$, 取 $q(X_i)$ 和 $q(X_j)$ 两者交互作用大小。

Note: ●Represents $\min[q(X_i), q(X_j)]$, taking the minimum value between $q(X_i)$ and $q(X_j)$; ●Represents $\max[q(X_i), q(X_j)]$, taking the maximum value between $q(X_i)$ and $q(X_j)$; ●Represents $q(X_i) + q(X_j)$, taking the sum of $q(X_i)$ and $q(X_j)$; ▼Represents $q(X_i \cap X_j)$, taking the magnitude of the interaction between $q(X_i)$ and $q(X_j)$.

表 2 土壤重金属含量统计分析

Table 2 Statistical analysis of heavy metals content in soil.

重金属元素	含量最大值 (mg/kg)	含量最小值 (mg/kg)	含量平均值 (mg/kg)	偏度	峰度	变异系数 CV(%)	背景值 ^a (mg/kg)	百分比 ^b (%)	样品含量 分布类型
Cr	69.175	30.253	45.092	0.327	2.898	19.47	64.300	4.08	对数正态分布
Ni	30.675	10.605	19.847	0.917	4.306	19.59	27.800	6.12	正态分布
Cu	52.201	8.708	16.492	1.457	6.923	40.07	23.100	8.16	对数正态分布
Zn	98.060	24.596	47.554	0.341	3.944	26.34	69.500	4.08	对数正态分布
As	12.876	3.014	6.625	0.024	2.320	37.81	10.100	10.20	对数正态分布
Cd	0.480	0.173	0.273	0.134	3.363	20.39	0.150	100.00	对数正态分布
Pb	38.035	10.766	16.748	1.046	6.604	24.61	22.500	4.08	对数正态分布

注: a 为邯郸市表层土壤重金属的自然背景值^[37]; b 为超过自然背景值的土壤样品比例。

Note: a is the natural background value of heavy metals in surface soil of Handan City^[37]; b is the proportion of soil samples exceeding the natural background value.

Pb>Cd>Ni>Cr, 说明研究区土壤重金属含量的空间分布相对离散, 具有较高的空间异质性, 特别是 Cu 和 As, 而 Ni、Cr、Zn、Pb 和 Cd 含量呈现中等空间异质性^[38]。

对土壤样点重金属含量数据进行正态分布检验的基础上, 采用对数变换方法对重金属 Cr、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 含量数据进行处理, 使其更符合正态分布。运用地统计学程序对样品重金属含量进行半变异函数分析^[39], 依据决定系数 (R^2) 和残差平方和 (RSS) 的大小选择半方差函数模型。块金值 (C_0) 和基台值 (C_0+C) 的比值 $C_0/(C_0+C)$ 可有效地解释变量

的空间自相关程度^[40], 重金属 Ni 块金值和基台值的比值最高, 为 39.03%, 呈现中等程度空间自相关性, 重金属 As 块金值和基台值的比值仅为 3.72%, 呈现低等程度空间自相关性, 与上述各重金属变异系数结论相一致。

3.2 研究区土壤重金属含量的空间分布特征

基于上述函数模型选择, 利用普通克里金法绘制重金属含量空间分布 (图 2), 分析其空间分布特征。整体上看, 不同重金属含量空间分布具有相似性, 各重金属含量高值区域主要集中在研究区北部, 这是由于煤矸石山分布密集导致, 而低值区域则主要分

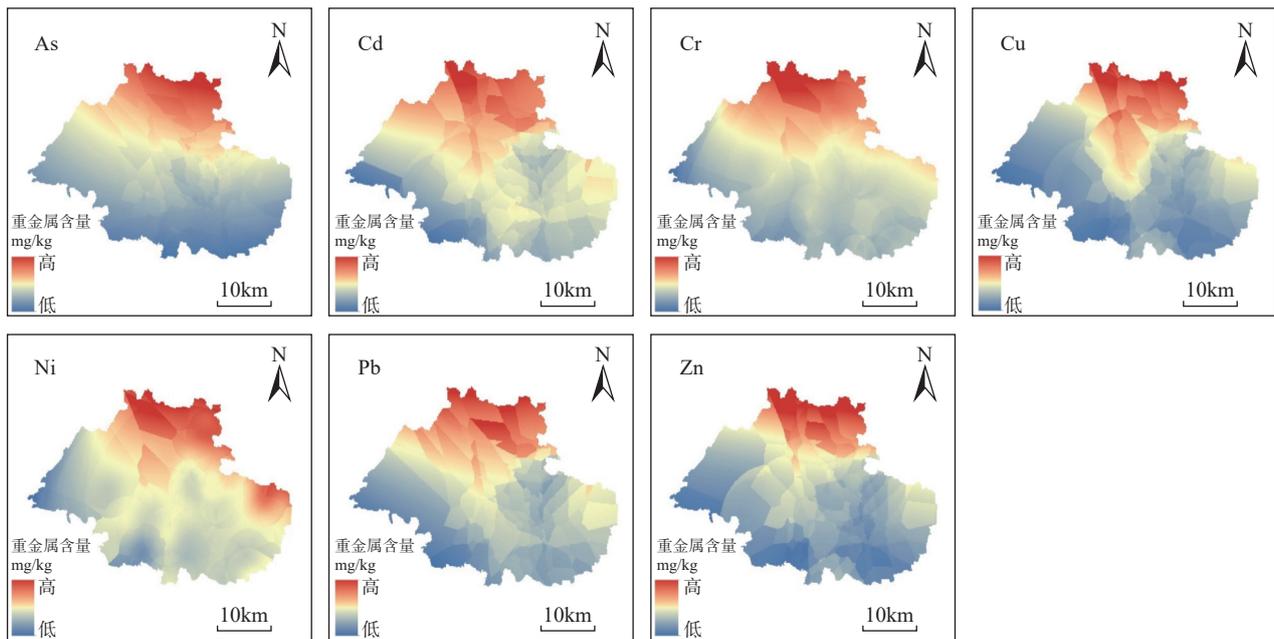


图2 研究区 7 种土壤重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of 7 soil heavy metals in the research area.

布在西部林地和南部靠近漳河支流区域。其中, 重金属 Ni 含量在东部地区较高, 可能与工业企业分布有关; Cu 含量分布与邯郸市 PM_{2.5} 浓度分布密切相关; As 与 Cr 含量由南向北逐步增加, 可能受中部滏阳河的河水侵蚀作用; Pb 受路网密度和工业企业影响, 中部与东部地区其含量呈中等水平; Zn 的高值区集中在北部, 中部和南部低值区域较大, 表明 Zn 主要受到矿区和矸石山的影响。

3.3 研究区土壤重金属生态风险评价

3.3.1 土壤单项污染评价

基于中国表层土壤重金属自然背景值, 研究区不同重金属土壤样品单项污染程度如图 3 所示。土壤样品重金属平均单项污染指数为: Cd (1.818) > Pb (0.744) > Cu (0.715) > Ni (0.714) > Cr (0.701) > Zn (0.684) > As (0.656)。其中, 土壤重金属 Cd 污染远超其他元素, Wang 等^[41]收集了 2000—2022 年中国农业土壤重金属污染数据, 从时空分布和累积量来看, 邯郸市土壤重金属 Cd 含量呈上升趋势, 与本研究结论相一致。Zhang 等^[27]利用单项污染指数法对峰峰煤矿煤矸石山周边地区土壤重金属进行研究, 认为 Cr、Pb、Cd、Cu、Zn 五种重金属含量随矸石堆的远近和土层深度的增加呈现不同的下降趋势, 且土壤单项污染评价结果显示重金属 Pb 污染最严重, Cd 污染次之。造成这一结论差异, 可能是因为 Zhang 等^[27]的研究区域在煤矸石山附近, 且煤矸石中重金属 Pb 含量较高, 而峰峰煤矿的土壤重金属污

染程度是由众多因素共同决定。例如, 研究区中部和东部部分地区的土壤重金属 Cd 含量较高, 表明矿山开采和矸石山的分布可能对重金属 Cd 含量造成累积效应; 东部地区是居民区, 地形平坦且以玉米、小麦为主要种植作物, 受化肥施用影响^[42], 导致土壤重金属 Cd 含量较高; 其余重金属样品污染程度相近, 大部分重金属样品污染指数处于 0~1 之间, 属于清洁等级, 表明峰峰矿区可能不存在除 Cd 外的重金属生态风险。As、Cr、Pb 和 Zn 仅有少量样品点处于轻度污染等级, 均分布在采矿区 and 矸石山周围。研究区东部存在 Cu 和 Ni 的污染样品点, 表明 Cu 和 Ni 含量与路网密度存在一定关联, 可从源头控制、传播路径和接收处三方面加以改进。

3.3.2 重金属潜在生态风险评价

研究区潜在生态风险和重金属单因子生态风险评价如图 4 所示。其中 Cd 元素的单因子生态风险指数处于 34.67~95.93, 67.35% 的土壤样品达到中度生态风险等级, 高度生态风险等级占 32.65%, 对研究区土壤环境的危害程度最大; 其他重金属元素的单因子生态风险指数均低于 30, 属于轻度生态风险等级, 这可能是由于土壤样点多分布于农田耕地, 受化肥施用影响。张行等^[43]研究也表明矸石山周围土壤中重金属 Cd 的潜在生态风险指数相对较高, 表现出较高的污染风险, 可通过施用生石灰等碱性物质, 提高土壤 pH 值, 降低重金属 Cd 的活性。综合来看, 研究区潜在生态风险指数处于 45.70~132.77,

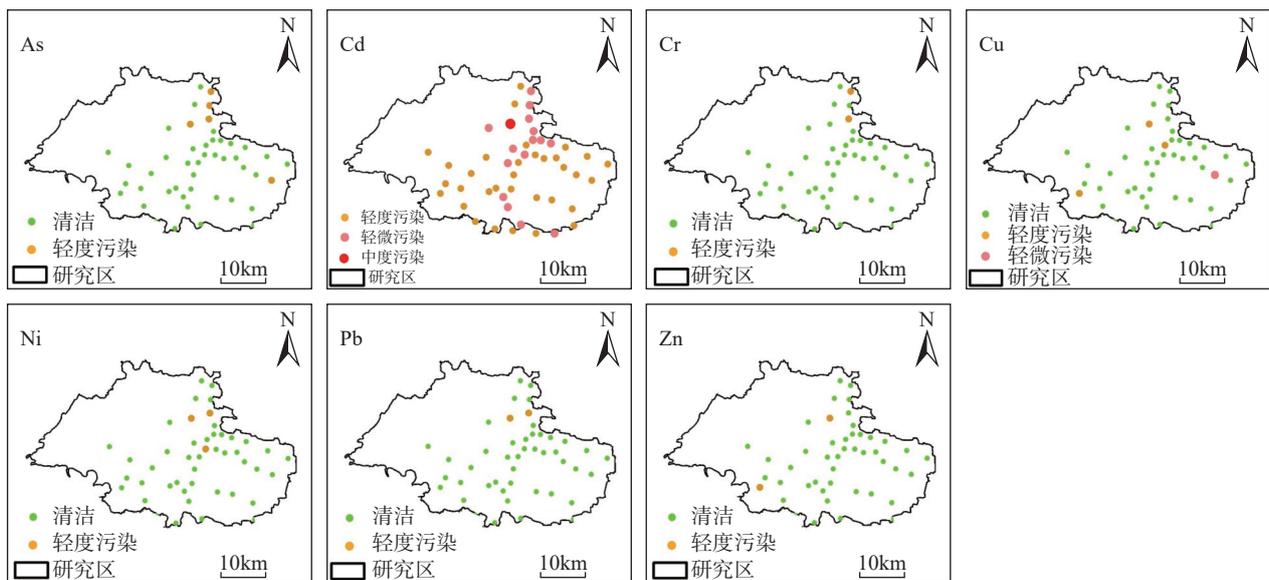
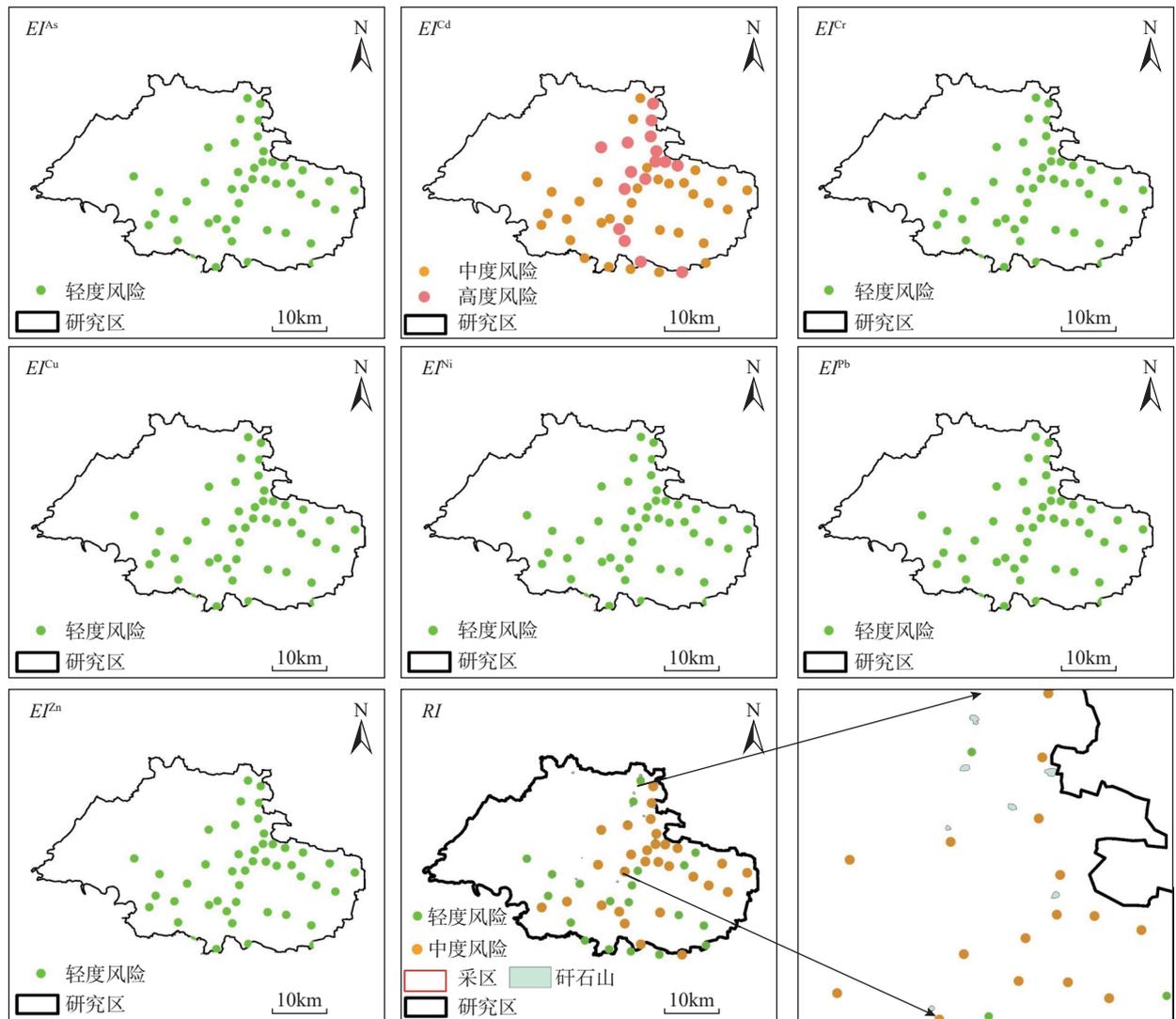


图3 研究区土壤重金属样品单项污染指数程度

Fig. 3 Degree of single pollution index of soil heavy metal samples in the research area.



RI 为研究区潜在生态风险指数; EI 为研究区单个重金属生态风险指数。

图4 土壤重金属单因子与潜在生态风险评价

Fig. 4 Single factor and potential ecological risk evaluation of heavy metals in soil.

介于轻度到中度等级风险之间, 风险等级较高区域位于研究区中部; 土壤样品整体上处在中度风险等级, 存在 59.18% 样品达到中度风险等级。张昊然等^[44]研究表明峰峰矿区煤矸石山周边土壤 4 种重金属都存在一定潜在生态风险, 其程度为轻度风险, 其中 Cd 元素的潜在生态风险为中等。值得注意的是, 分布在矸石山与矿区附近的样品均处于中度污染等级, 表明矿山开采是影响峰峰矿区潜在生态风险的主要因素, 为降低风险区内土壤重金属含量, 可对矿山开采产生的固体废弃物进行化学处理, 采取有效综合利用措施消纳煤矸石或对煤矸石山进行植被绿化。由于土壤治理是一个长期的过程, 需要制定长期修复计划并实时监测土壤修复效果。

3.4 研究区土壤重金属空间分布驱动因子分析

3.4.1 因子探测

除土地利用数据外的数值变量需进行离散化处理, 而不同离散化方法显著影响重金属空间异质性的解释力。为此, 采用 Song 等^[24]开发的最优参数地理探测器模型 (OPGD 模型), 以 q 值最大化为准则, 寻求不同离散方法与中断参数最优组合方案。结果表明: 温度、降水、PM_{2.5}、矸石山分布密度、土壤侵蚀和距矿区距离离散化处理采用自然间断点法与中断参数为 5 组合方案最优; 距企业距离采用标准差法与中断参数为 4 组合方案最优; 距河流距离、路网密度、高程和土壤湿度采用分位数法与中断参数为 6 组合方案最优。

基于因子检测模型,采用 q 值定量评估人为因素和自然因素对土壤重金属含量的影响大小(图 5)。在显著性 ($\alpha < 0.05$) 的情况下,除重金属 As 外, Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的首要影响因素均为距矿区距离,其影响大小分别为 0.169、0.150、0.251、0.194、0.154、0.199,而土壤侵蚀对 As 的影响最大,达到 0.215。对于研究区潜在生态风险指数,距矿区距离、矸石山的影响分别为 0.144、0.137。图 2 显示矸石山密集的地区和矿区周边土壤中的重金属含量较高,而西部林地和南部靠近漳河支流区域重金属含量较低,表明矿山开采活动是研究区部分土壤环境处于中度风险等级的主要因素。

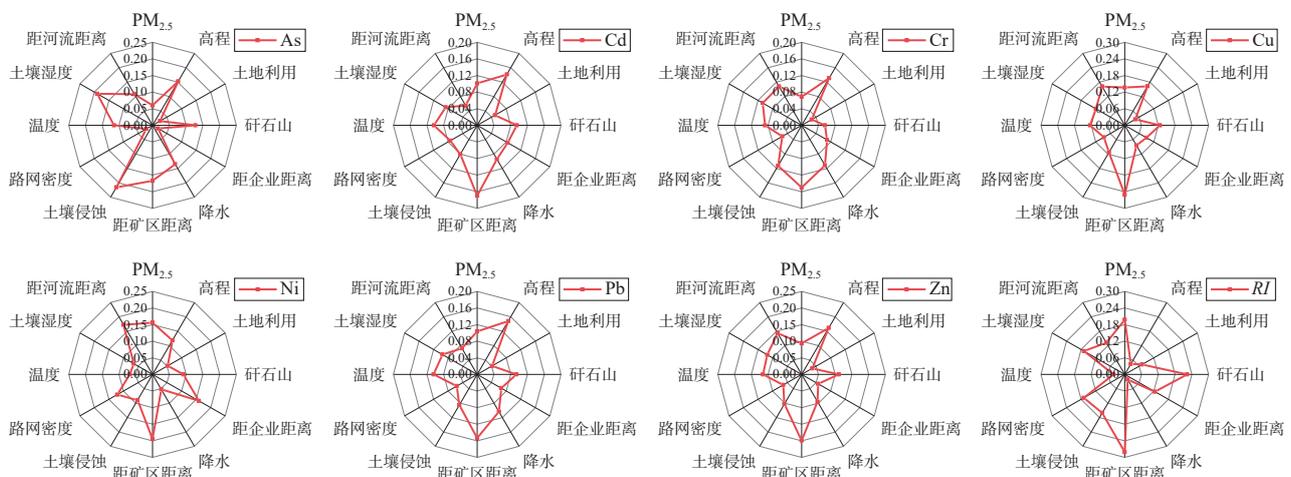
因子探测结果表明,除矿山开采活动,土壤重金属还受到不同影响因素作用。图 2 显示了峰峰矿区土壤重金属含量空间分布为“中部高,东西低”,这是因为峰峰矿区西倚太行山脉,东临冀南平原,受到高程的影响,研究区西部土壤重金属含量整体低于东部,由于煤矿开采区多分布于中部,导致中部地区土壤环境潜在生态风险强度较高。已有研究表明 $PM_{2.5}$ 中富含 Cu、Ni 元素^[45],且研究区中部和东部属于城镇区,交通发达,易产生大量含 Ni 元素的尾气排放颗粒物^[46],这些重金属颗粒物扩散至公路灰尘并沉降于土壤中,导致路网密度是 Ni 和 Cu 重金属含量增加的重要因素,因此从 Cu 和 Ni 的空间分布来看,研究区中部和东部土壤重金属含量相较于西部山区较高;此外,土壤理化性质和土壤重金属含量关系密不可分,土壤湿度会影响重金属在土壤中的吸附过程,并通过土壤可蚀性改变土壤侵蚀量

影响土壤重金属的迁移,研究区土壤类型具有较强的重金属吸附能力,其中半淋溶土具有较高的可溶性,易受土壤侵蚀影响从而改变重金属的空间分布格局。本研究土壤样品取自研究区内草地、林地、耕地等不同土地利用类型,但土地利用类型对土壤重金属含量无统计学意义 ($p > 0.05$),可能与工矿业活动和农药化肥的不合理施用有关,这与曹淑珍等^[42]的研究结果一致,但 Qiao 等^[47]针对长江中上游城市土壤重金属的研究中,除采矿活动外,重金属含量受到土地覆盖组成的显著影响,说明不同地区土壤重金属的主要影响因素受开采技术、自然环境和人为等多方面条件作用。

峰峰矿区潜在生态风险主要受到矸石山和矿区的影响,同时也受到土壤湿度、 $PM_{2.5}$ 、土壤侵蚀自然作用。采矿过程中固体废弃物未得到妥善处理,其中的重金属可能会渗入周围的土壤,另外矸石山的风化、运移、自燃产生的烟尘颗粒物伴随降水和大气沉降而融入土壤^[48];土壤侵蚀可以将富含重金属的表层土壤带到其他地方,使其在新的区域扩散,增加土壤重金属含量。

3.4.2 交互作用探测

各种因素间的协同和拮抗作用构成了土壤重金属环境的复杂性^[49]。交互作用探测模块能够识别两个不同因素间的交互作用 $q(X_1 \cap X_2)$,并通过比较 $\text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$ 、 $\text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$ 、 $q(X_1) + q(X_2)$ 、 $q(X_1 \cap X_2)$ 大小,判断因素 X_1 与 X_2 的共同作用下,因变量 Y 的解释力是否存在增加、减少或者相互独立的情况。利用交互作用探测器分析影响研究区土壤



RI 为研究区潜在生态风险指数。

图5 土壤重金属含量影响因素贡献度

Fig. 5 Contribution of factors influencing heavy metal content in soil.

7 种重金属含量及潜在生态风险主要因素间的交互作用, 结果如图 6 所示。以重金属 As 为例, “土壤侵蚀-土壤湿度”对重金属 As 含量的解释力为 0.215(即土壤侵蚀对重金属含量的贡献力), 土壤侵蚀与其他 4 个影响因素间的交互作用较单因素解释力有所提高, 但不仅仅是二者 q 值相加, 因此土壤侵蚀与其他因素间存在对 As 含量线性或非线性的增强作用。图 6 所示, 每种重金属含量的任意两个影响因素间交互作用解释力较单因素解释力有所提高, 体现为双因子增强和非线性增强, 不存在两种影响因素相互减弱和相互独立的现象。

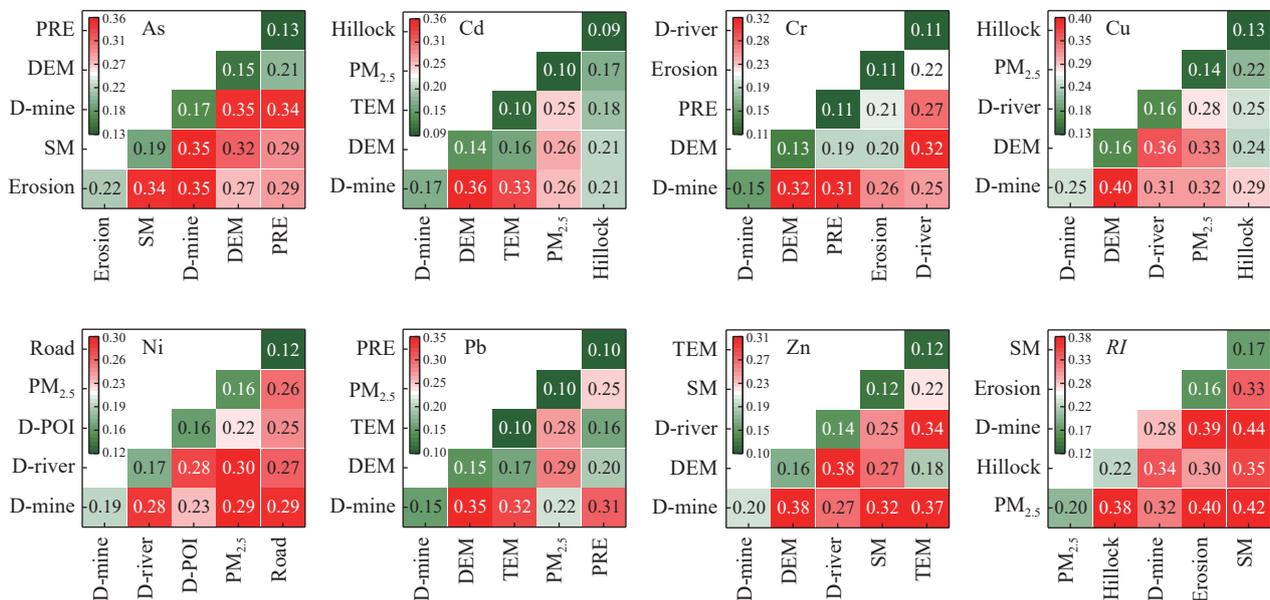
土壤中重金属含量与环境因素之间可能存在复杂的非线性关系, 其中“距矿区距离-高程”相互作用是影响土壤重金属 Cd、Cu、Pb、Zn 含量及研究区潜在生态风险空间分布的最大因素, 解释力分别为 0.357、0.400、0.354、0.383 和 0.310, 且除 Cu 含量外, 两者交互作用影响均表现为非线性增强, 且远远大于两者之和。Ni 元素的 5 种主要影响因子(距矿区距离、距河流距离、距企业距离、路网密度、PM_{2.5})相互作用类型均为双因子增强。解释 As、Cr、Ni 含

量空间分布的相互作用最大因素分别为“距矿区距离-土壤湿度”(0.354)、“距河流距离-高程”(0.318)和“距河流距离-PM_{2.5}”(0.297)。

值得注意的是, 地理探测器交互因子作用结果显示, 距矿区距离是研究区生态风险的解释力最强的单一驱动因子 ($q=0.281$), 其次是矸石山 ($q=0.223$) 和 PM_{2.5}($q=0.197$), 但距矿区距离与矸石山交互作用的贡献率最大为 0.339, 远小于矿区与土壤湿度的交互作用 (0.438), 表明尽管个别因素造成的影响相对有限, 但它们的交互作用可以显著地增强对重金属含量空间分布的影响能力。

4 结论

通过单项污染指数法和潜在生态风险评价法定量分析冀南峰峰煤矿表层土壤重金属污染程度及潜在生态风险, 并结合最优参数地理探测器确定重金属污染主要影响因素及其非线性作用机制。得到以下结论: ①峰峰矿区土壤重金属含量分布呈现北高南低的变化格局, 土壤环境中重金属 Cd 污染较为严重, 土壤 As、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 样点平均浓度均



D-mine 代表距矿区距离; DEM 代表高程; PRE 代表降水; SM 代表土壤湿度; Erosion 代表土壤侵蚀; D-river 代表距河流距离; TEM 代表温度; Hillock 代表矸石山; PM_{2.5} 代表细颗粒物; D-POI 代表距企业距离; Road 代表路网密度; RI 为研究区潜在生态风险指数。

图6 不同土壤重金属及生态风险指数主导因素的相互作用

Fig. 6 Interaction of dominant factors of different soil heavy metals and ecological risk indice (D-mine represents the distance from the mining area; DEM represents elevation; PRE represents precipitation; SM represents soil moisture; Erosion represents soil erosion; D-river represents the distance from the river; TEM represents temperature; Hillock represents a gangue hill; PM_{2.5} represents fine particulate matter; D-POI represents the distance from the enterprise; Road represents the density of the road network; RI is the potential ecological risk index of the study area).

未超过邯郸市自然背景值。②研究区潜在生态风险处于 45.70 ~ 132.77, 介于轻度到中度等级风险之间, Cd 污染程度远超其余各重金属, 单项污染指数为: Cd > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn > As。③因子探测显示峰峰矿区生态风险受人类活动与自然因素共同影响, 交互探测表明不同影响因素交互作用解释力较单因素解释力均有所提高。

本研究综合评价了峰峰煤矿土壤重金属潜在生态风险, 并定量分析其主要影响因素及非线性作用机制, 为土壤重金属的防控、修复和治理提供了重要的理论依据和技术支持。然而, 当前研究未考虑 Hg 等重金属以及铁锰化物、有机磷和有机氮等土壤有机污染物的影响, 研究结果可能与实际情况存在一定偏差, 这也是后续实验研究需要进一步改进的内容。

Risk Assessment and Influencing Factors Analysis of Heavy Metals in Soil of Non-Surface Coal Mines in Southern Hebei Province

LI Silin¹, WANG Hefeng^{1,2*}, LIU Jia¹, ZHANG Anbing¹, WEI Kaihao¹, LI Bin¹

(1. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Key Laboratory of Natural Resources Spatial Information, Handan 056038, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Through automatic optimization parameter selection of the optimal parameter geographic detector, the main influencing factors and nonlinear mechanism of soil heavy metal content in the study area were analyzed in depth, providing scientific reference for targeted pollution prevention and control.
- (2) Heavy metal Cd posed the greatest threat to the soil environment, with its content exceeding 78% of the natural background value. The average contents of other heavy metals of the samples were lower than the natural background values of the soil in Handan City. The potential ecological risk value of soil in the Fengfeng coal mine was between 45.70 and 132.77, ranging from mild to moderate risk.
- (3) The contribution rate of mining activities to the potential ecological risks of the Fengfeng coal mine was 0.144, which was the main factor affecting soil environmental quality.

ABSTRACT: Non-surface coal mining is an important means to obtain coal resources. It is crucial to study the influencing factors and ecological risks of soil heavy metal contents of non-surface coal mines for the protection and management of mine area ecosystems. The current study on soil heavy metals in the Fengfeng coal mine, a non-surface mine located in southern Hebei Province, primarily focuses on assessing local soil pollution levels and analyzing the linear effects of influencing factors, which makes it difficult to provide a scientific basis for the effective treatment of soil heavy metals in the entire region. To comprehensively evaluate the pollution level of soil heavy metal of the Fengfeng coal mine and deeply analyze the main influencing factors and their nonlinear mechanisms, 49 surface soil samples were collected and the contents of seven heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) were determined. The single pollution index method and potential ecological risk assessment method were employed to evaluate the soil heavy metal pollution level and potential ecological risks of the mine area, and the geographic detector was utilized to analyze the main influencing factors of the spatial distribution of soil heavy metal content. The results indicated that the soil heavy metal contents of seven types in the mine area exhibited certain spatial heterogeneity, with an overall distribution pattern of high in the north and low in the south. Only the average content of Cd in the samples exceeded the national natural background value. The comprehensive index of

soil potential ecological risk was between 45.70 and 132.77, ranging from mild to moderate risk levels. The single heavy metal pollution indices were ranked as Cd (1.818)>Pb (0.744)>Cu (0.715)>Ni (0.714)>Cr (0.701)>Zn (0.684)>As (0.656). The spatial pattern of soil heavy metal content in the Fengfeng coal mine was influenced by human factors such as mining activities and gangue hills, as well as natural factors such as precipitation and soil moisture. Among them, enterprise distribution and transportation activities were the main influencing factors of the spatial differentiation of heavy metal Ni; mining activities were the main influencing factor of heavy metals Cu, Cd, Cr, Pb, and Zn; soil erosion and soil moisture were the main influencing factors of heavy metal As.

KEY WORDS: soil heavy metals; soil pollution; geographic detector; ecological risk assessment; influence factor

参考文献

- [1] Ma B, Yang X, Yu Y, et al. Investigation of vegetation changes in different mining areas in Liaoning Province, China, using multisource remote sensing data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5168.
- [2] Yan T, Zhao W, Yu X, et al. Evaluating heavy metal pollution and potential risk of soil around a coal mining region of Tai'an City, China[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(3): 2156–2165.
- [3] 张永康, 曹耀华, 冯乃琦, 等. 某废弃煤矿区土壤重金属污染风险评价[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(7): 3188–3198.
- Zhang Y K, Cao Y H, Feng N Q, et al. Risk assessment of heavy metals in the soil of an abandoned coal mine area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(7): 3188–3198.
- [4] Li F, Li X, Hou L, et al. Impact of the coal mining on the spatial distribution of potentially toxic metals in farmland tillage soil[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 14925.
- [5] Saljnikov E, Mrvić V, Čakmak D, et al. Pollution indices and sources appointment of heavy metal pollution of agricultural soils near the thermal power plant[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41: 2265–2279.
- [6] Sukiasyan R A, Kirakosyan A A, Pirumyan P G. Evaluation of heavy metal pollution in the vicinity of the Shnokh River by the geoaccumulation index[J]. *Russian Journal of General Chemistry*, 2020, 90(13): 2659–2663.
- [7] 赵红坤, 唐世新, 付燕刚, 等. 海南琼中岩-土体系重金属迁移特征及表土环境质量评价[J]. *岩矿测试*, 2024, 43(1): 137–151.
- Zhao H K, Tang S X, Fu Y G, et al. Migration characteristics and environmental quality assessment of heavy metal elements in the rock-soil system in Qiongzong, Hainan Island[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2024, 43(1): 137–151.
- [8] 杨振宇, 廖超林, 邹炎, 等. 湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(9): 5288–5298.
- Yang Z Y, Liao C L, Zou Y, et al. Distribution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in typical river source areas of northeastern Hunan Province[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5288–5298.
- [9] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [10] 胡旭刚, 谭继勇, 覃兴涛, 等. 广西天峨主要耕地区农作物中重金属元素富集特征与影响因素[J]. *现代地质*, 2024, 38(3): 784–792.
- Hu X G, Tan J Y, Qin X T, et al. Enrichment characteristics and influencing factors of heavy metal elements in crops from the primary cultivated areas of Tian'e county, Guangxi[J]. *Geoscience*, 2024, 38(3): 784–792.
- [11] 李文明, 孙朝, 陈霄燕, 等. 青海省典型高山农业区域土壤重金属污染评价及来源探析[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(3): 598–615.
- Li W M, Sun C, Chen X Y, et al. Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soils in typical alpine agricultural areas of Qinghai Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(3): 598–615.
- [12] Zhong X, Chen Z, Li Y, et al. Factors influencing heavy

- metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 123289.
- [13] 孙建伟, 贾煦, 刘向东, 等. 豫西金矿集区矿业活动对周边农田土壤重金属影响研究[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(1): 192–202.
- Sun J W, Jia X, Liu X D, et al. Influence of mining activities in the gold ore concentration area in Western Henan on the heavy metals in surrounding farmland soil[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(1): 192–202.
- [14] Ma Y, Li Y, Fang T, et al. Analysis of driving factors of spatial distribution of heavy metals in soil of non-ferrous metal smelting sites: Screening the geodetector calculation results combined with correlation analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 445: 130614.
- [15] 管祥楠, 董士伟, 刘玉, 等. 土壤重金属含量变化的影响因素多目标识别方法[J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4791–4801.
- Guan X N, Dong S W, Liu Y, et al. Multi-objective identification method for influencing factors of soil heavy metal content change[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8): 4791–4801.
- [16] Wu Y, Zhou L, Meng Y, et al. Influential topographic factor identification of soil heavy metals using GeoDetector: The effects of DEM resolution and pollution sources[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(16): 4067.
- [17] Jiang Y, Sun Y, Zhang L, et al. Influence factor analysis of soil heavy metal Cd based on the GeoDetector[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34: 921–930.
- [18] Huang S, Xiao L S, Zhang Y C, et al. Interactive effects of natural and anthropogenic factors on heterogenetic accumulations of heavy metals in surface soils through geodetector analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147937.
- [19] Liu H, Qu M, Chen J, et al. Heavy metal accumulation in the surrounding areas affected by mining in China: Spatial distribution patterns, risk assessment, and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 154004.
- [20] Zhang R, Chen T, Zhang Y, et al. Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils and identification of main influencing factors in a typical industrial park in Northwest China[J]. *Chemosphere*, 2020, 252: 126591.
- [21] Zhen B W, Shu Y L, Yuchen Z, et al. Exploring the relative importance and interactive impacts of explanatory variables of the built environment on ride-hailing ridership by using the optimal parameter-based geographical detector (OPGD) model[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13: 2180.
- [22] Duque J C, Laniado H, Polo A. S-maup: Statistical test to measure the sensitivity to the modifiable areal unit problem[J]. *PloSONE*, 2018, 13(11): e0207377.
- [23] 季建万, 姜琳琳, 刘文亮, 等. 基于多参数优选地理探测器的京津冀城市群地质灾害影响因子分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2023, 39(2): 39–45.
- Ji J W, Jiang L L, Liu W L, et al. Analysis on influence factors of geological hazards in Beijing—Tianjin—Hebei urban agglomeration based on multi-parameters optimized by GeoDetector[J]. *Geography and Geo-information Science*, 2023, 39(2): 39–45.
- [24] Song Y, Wang J, Ge Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593–610.
- [25] 刘敏, 郝春明. 峰峰矿区矿井水污灌区重金属污染评价及定量源解析[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(17): 7377–7384.
- Liu M, Hao C M. Evaluation and quantitative source analysis of heavy metal pollution in Fengfeng mine drainage irrigation area[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(17): 7377–7384.
- [26] 叶洪岭, 张金尧. 资源枯竭区不同地貌类型土壤重金属污染特征及风险评价[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(3): 346–351.
- Ye H L, Zhang J Y. Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in soils of different landform

- types in resource exhausted areas[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(3): 346–351.
- [27] Zhang Y, Zhang H, Meng L, et al. Spatial distribution and evaluation of heavy metal pollution in soil around coal gangue in Fengfeng mining area[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019, 371(3): 032080.
- [28] 孙涛, 宋世杰, 常青, 等. 煤矸石堆积区土壤重金属形态组成与生物有效性的空间变化特征——以峰峰矿区为例[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(10): 85–95.
- Sun T, Song S J, Chang Q, et al. Spatial variation characteristics of soil heavy metal speciation and bioavailability in coal gangue accumulation area—Taking Fengfeng mining area as an example[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(10): 85–95.
- [29] 马鹏飞. 基于改进遥感生态指数的峰峰矿区生态环境监测及影响因素分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
- Ma P F. Ecological environment monitoring and driving factors analysis of Fengfeng mining area based on improved remote sensing ecological index[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [30] 梁樑, 郭晓淞, 陈汉杰, 等. 乌鲁木齐核心区绿地土壤重金属累积特征及生态风险[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(11): 1868–1878.
- Liang L, Guo X S, Chen H J, et al. Accumulation characteristics and ecological risks of heavy metals in green land soils in core urban area of Urumqi City[J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(11): 1868–1878.
- [31] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2869–2876.
- He B, Zhao H, Wang T Y, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(6): 2869–2876.
- [32] Gupta S K, Chabukdhara M, Kumar P, et al. Evaluation of ecological risk of metal contamination in River Gomti, India: A biomonitoring approach[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 110: 49–55.
- [33] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. *地理研究*, 2020, 39(6): 1233–1241.
- Ma J H, Han C X, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1233–1241.
- [34] Yang J, Wang J, Liao X, et al. Chain modeling for the biogeochemical nexus of cadmium in soil–rice–human health system[J]. *Environment International*, 2022, 167: 107424.
- [35] Li W, Yan D, Weng B, et al. Nonlinear effects of surface soil moisture changes on vegetation greenness over the Tibetan Plateau[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 302: 113971.
- [36] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134.
- Wang J F, Xu C D. GeoDetector: Principle and prospect[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.
- [37] 张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 等. 河北省土壤化学元素的背景值与基准值[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2817–2828.
- Zhang L T, Cheng H X, Xie W M, et al. Geochemical background and baseline value of soil chemical elements in Hebei Province[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2817–2828.
- [38] 杨昱莹, 刘亮, 陈明, 等. 长三角地区南京市表土重金属污染特征及源解析[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(7): 3910–3918.
- Yang Y Y, Liu L, Chen M, et al. Characterization and source analysis of topsoil heavy metal pollution in Nanjing, Yangtze River Delta Region[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(7): 3910–3918.
- [39] 陈艺, 蔡海生, 曾君乔, 等. 袁州区表层土壤重金属污染特征及潜在生态风险来源的地理探测[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1112–1126.
- Chen Y, Cai H S, Zeng J Q, et al. Characteristics of heavy metal pollution in surface soil and geographical detection of potential ecological risk sources in Yuanzhou District[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1112–1126.
- [40] 祁志, 丁超, 韩兴, 等. 沟坡侵蚀汇水区黑土水分和养分的空间异质性[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(5): 79–87, 96.

- Qi Z, Ding C, Han X, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture and nutrients in valley-slope erosion watershed in black soil area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(5): 79–87, 96.
- [41] Wang C C, Zhang Q C, Yan C A, et al. Heavy metal (loid)s in agriculture soils, rice, and wheat across China: Status assessment and spatiotemporal analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163361.
- [42] 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 等. 稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区: 以重庆市某区为例[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5535–5544.
- Cao S Z, Mu Y, Cui J X, et al. Cd pollution and safe planting zoning in paddy soils: A case study in a district of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11): 5535–5544.
- [43] 张行, 吴运东, 郭旭丽, 等. 峰峰矿区九龙口煤矿矸石山周边土壤重金属调查和分析[J]. *农业科学*, 2019, 9(6): 461–467.
- Zhang X, Wu Y D, Guo X L, et al. Investigation and evaluation of heavy metal pollution in soil around the coal gangue mountain of Jiulongkou coalmine in Fengfeng mining area, Handan City[J]. *Hans Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 9(6): 461–467.
- [44] 张昊然, 张玉玲, 张艳杰, 等. 峰峰矿区典型煤矸石山周边土壤重金属污染生态风险评估[J]. *绿色科技*, 2019(24): 88–89.
- Zhang H R, Zhang Y L, Zhang Y J, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in soil around typical coal gangue hills in Fengfeng mining area[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(24): 88–89.
- [45] 邱雨荷, 王森, 刘婉玉, 等. 西安市大气 PM_{2.5} 中元素的污染特征及其来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(1): 161–170.
- Qiu Y H, Wang S, Liu W Y, et al. Characteristics and sources of elements in PM_{2.5} in Xi'an City[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(1): 161–170.
- [46] 滕吉艳. 上海城市中心区不同类型绿地土壤重金属污染特征[J]. *土壤通报*, 2021, 52(4): 927–933.
- Teng J Y. Contamination characteristics of heavy metals in soils from urban green space in Central Shanghai[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(4): 927–933.
- [47] Qiao Y, Wang X, Han Z, et al. GeoDetector based identification of influencing factors on spatial distribution patterns of heavy metals in soil: A case in the upper reaches of the Yangtze River, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2022, 146: 105459.
- [48] 尚誉, 桑楠. 煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性[J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3773–3780.
- Shang Y, Sang N. Pollution characteristics and phytotoxicity of heavy metals in the soil around coal gangue accumulation area[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7): 3773–3780.
- [49] Wang X, Sun Y, Zhang L, et al. Spatial variation and influence factor analysis of soil heavy metal As based on GeoDetector[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, 35(10): 1–10.