

doi: 10.12029/gc20230228004

姜昕, 马一奇, 涂春霖, 黄安, 胡要君, 叶雷, 和成忠, 李世玉. 2024. 滇东典型煤矿区土壤重金属生态风险及来源解析[J]. 中国地质, 51(1): 327–340.

Jiang Xin, Ma Yiqi, Tu Chunlin, Huang An, Hu Yaojun, Ye Lei, He Chengzhong, Li Shiyu. 2024. Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in typical coal mining areas of Eastern Yunnan Province[J]. Geology in China, 51(1): 327–340(in Chinese with English abstract).

滇东典型煤矿区土壤重金属生态风险及来源解析

姜昕¹, 马一奇¹, 涂春霖^{1,2}, 黄安¹, 胡要君¹, 叶雷¹, 和成忠¹, 李世玉³

(1. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 云南昆明 650100;

2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 3. 云南大学生态与环境学院, 云南昆明 650504)

摘要:【研究目的】研究区地处滇东重要煤炭和农业产区, 弄清煤矿区土壤重金属空间分布特征、潜在生态风险和污染来源, 对煤矿区生态环境保护治理和确保农业安全具有重要现实意义。【研究方法】基于网格布点法于 2021 年 6 月在典型煤矿区采集土壤样品 497 件, 分析了土壤 pH、SOM、As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn, 运用污染负荷指数法和潜在生态风险指数法对重金属污染状况和潜在生态风险进行评价, 通过主成分分析和正定矩阵因子分析(PMF)模型分析了重金属潜在来源。【研究结果】土壤 pH 平均值为 5.39, 以酸性为主, SOM 含量平均值是云南省土壤背景值的 1.20 倍, Cr、Cu、Cd、Ni、Zn 和 Hg 含量平均值和中位数均超过云南省土壤背景值, 绝大部分采样点 Cd、Cu、Cr、Ni 含量超过风险筛选值, 分别占 94.97%、93.96%、91.35%、79.28%, 少部分采样点 As、Cd 含量超过管制值, 分别占 0.20%、1.41%。污染负荷指数法评价结果显示, 研究区整体呈现轻微污染。潜在生态风险指数法评价结果显示, 研究区整体呈现中等风险。主成分分析和 PMF 模型解析结果显示, 研究区土壤重金属主要来源于地质背景, 其次为农业活动和大气沉降。【结论】煤矿区土壤中 Cd、Hg 潜在生态风险较高, 土壤重金属主要来源于地质背景, 其次是农业活动和大气沉降, 建议加强相关污染土地的监测和管理, 减少农家肥不合理施用, 强化煤炭工业污染排放监管。

关键词: 煤矿区; 地质调查工程; 土壤重金属污染; 生态风险评价; 污染来源

创新点: (1)深化了对滇东典型煤矿区土壤重金属污染分布特征及潜在生态风险的认识; (2)综合运用相关性分析、主成分分析、PMF 模型等方法, 定量化识别了土壤重金属来源, 为滇东典型煤矿区土壤重金属污染防治提供了充实依据。

中图分类号: X53; X826 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0327-14

Ecological risk and source analysis of soil heavy metals in typical coal mining areas of Eastern Yunnan Province

JIANG Xin¹, MA Yiqi¹, TU Chunlin^{1,2}, HUANG An¹, HU Yaojun¹,
YE Lei¹, HE Chengzhong¹, LI Shiyu³

(1. Kunming General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming 650100, Yunnan, China; 2. School of Water Resources and

收稿日期: 2023-02-28; 改回日期: 2023-03-24

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20208075)资助。

作者简介: 姜昕, 男, 1994 年生, 工程师, 从事环境地球化学调查工作; E-mail: 254679049@qq.com。

通讯作者: 和成忠, 男, 1988 年生, 高级工程师, 从事水文地质环境地质调查工作; E-mail: 443220880@qq.com。

Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. College of Ecology and Environment, Yunnan University, Kunming 650504, Yunnan, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] The study area is located in an important coal and agricultural production area in eastern Yunnan Province. It is of great practical significance to understand the spatial distribution characteristics, potential ecological risks and pollution sources of heavy metals in soil of coal mining area for ecological environment protection and ensure agricultural security. **[Methods]** Based on the grid distribution point method, 497 soil samples were collected in June 2021 in typical coal mining areas, and soil pH, SOM, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn were analyzed. The Pollution Load Index method (PLI) and the Potential Ecological Risk Index method (PERI) were used to evaluate the status of heavy metal pollution and potential ecological risks. The potential sources of heavy metals were analyzed by using Principal Component Analysis (PCA) and positive definite matrix factor analysis (PMF) models. **[Results]** The soil is mainly acidic, the average pH value of the soil is 5.39, and the average of SOM content is 1.20 times that of the background value for soils in Yunnan Province. The average and median values of Cr, Cu, Cd, Ni, Zn and Hg contents exceed the soil background values in Yunnan Province. The vast majority of sampling points have Cd, Cu, Cr, Ni content exceeding the risk screening value, accounting for 94.97%, 93.96%, 91.35%, and 79.28%, respectively. A small number of sampling points have As and Cd content exceeding the control values, accounting for 0.20% and 1.41%, respectively. The evaluation results of the PLI showed that the study area as a whole shows slight pollution. The evaluation results of PERI showed that the overall risk of the study area is moderate. The results of the PCA and the PMF model analysis showed that soil heavy metals in the study area are mainly derived from the geological background, followed by agricultural activities and atmospheric deposition. **[Conclusion]** The potential ecological risks of Cd and Hg in the soil of the coal mining areas area relatively high, and the heavy metals in the soil mainly derived from the geological background, followed by agricultural activities and atmospheric deposition. It is suggested to strengthen the monitoring and management of related polluted land, reduce the unreasonable application of farmyard manure, and strengthen the supervision of pollution from coal industry activities.

Key words: coal mining area; environmental geological survey engineering; soil heavy metal pollution; ecological risk assessment; pollution source

Highlights: (1) It deepens the understanding of the distribution characteristics and potential ecological risks of soil heavy metal pollution in typical coal mining areas in eastern Yunnan; (2) By comprehensively utilizing methods such as correlation analysis, PCA and PMF model, the sources of heavy metals in soil were quantitatively identified, providing a solid basis for the prevention and control of heavy metal pollution in typical coal mining areas in eastern Yunnan.

About the first author: JIANG Xin, male, born in 1994, engineer, engaged in environmental geochemical investigations; E-mail: 254679049@qq.com.

About the corresponding author: HE Chengzhong, male, born in 1988, senior engineer, engaged in environmental geological survey; E-mail: 443220880@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20208075).

1 引 言

“云贵煤炭基地”是中国南方的大型煤炭基地,主要分布于云南省中东部——贵州省中西部地区(丁易, 2007),受地形限制,普遍存在煤矿与耕地交错分布的情况,随着煤炭产业的发展,引发的环境问题也逐步凸显(丁振华等, 2009; Wang et al., 2020; 李继华等, 2021),在煤矿开采、运输、洗选、燃煤、煤矸石堆存过程中,重金属通过淋滤、废水排

放、粉尘沉降等途径进入周边耕地,改变土壤理化性质,使得矿山周边耕地土壤表现出重金属污染特征(庞文品等, 2016; 吴先亮等, 2018; Pan et al., 2021; 李强等, 2023),造成土壤质量恶化,引发农作物重金属污染,对人体健康造成危害(姚成斌等, 2021; 宋绵等, 2022; 欧灵芝等, 2023)。

为减少土壤重金属污染对粮食安全、人体健康安全的影响,重金属污染评价及来源分析成为了实现该目标的重要前提(赵家印等, 2022)。重金属污

染评价的方法包括单因子污染指数法、内梅罗指数法、污染负荷指数法和潜在生态风险指数法等 (Joanna et al., 2018); 污染来源分析方法包括相关性分析、聚类分析、主成分分析、正定矩阵因子分析 (PMF) 模型等 (薛志斌等, 2018; 尹芳等, 2021; 蒋玉莲等, 2023)。由于土壤污染来源和污染过程具有复杂性, 使得单一的污染评价方法和来源解析方法具有一定的局限性, 结果无法满足需求。因此, 将多种方法配合使用, 可以使各方法得到的结果相互支持印证, 提高污染评价和来源解析结果的可靠性和合理性 (于旦洋等, 2021)。

以云南省东部典型煤矿区土壤为研究对象, 开展样品采集和分析工作, 定量描述土壤重金属污染情况, 通过统计分析、空间分布规律分析、主成分分析以及 PMF 模型等多种定性定量分析工具, 开展重金属污染源识别和定量解析工作。研究成果可为地方政府掌握土壤污染情况, 出台合理控制措施提供数据支撑, 也可为煤矿区耕地土壤重金属污染评价及来源解析工作提供参考。

2 材料与方 法

2.1 研究区概况

研究区位于云南省东部 (图 1), 为“云贵煤炭基地”主要产煤区域, 属南盘江上游, 地理坐标为 $104^{\circ}15' \sim 104^{\circ}20'E$, $25^{\circ}43' \sim 25^{\circ}51'N$, 属于北温带山地季风湿润气候区, 河流发育, 地形切割剧烈, 年平均温度 $14^{\circ}C$ 左右, 降水丰富, 四季温和。区内煤矿集中, 土地利用类型以旱地为主, 其次为林地、水田等。裸露地层主要为二叠系茅口组、梁山组、峨眉山玄武岩、宣威组及三叠系飞仙关组, 其中宣威组为区内产煤地层, 岩性为含煤碎屑岩; 飞仙关组为碎屑岩, 早期产铜矿; 茅口组为碳酸盐岩, 梁山组为黑色碎屑岩, 仅在研究区边缘出露。

2.2 样品采集与分析

2.2.1 样品采集

土壤样品采集时, 每个采样点周围 50~100 m 范围内采集 4 个子样, 采样深度为 0~20 cm, 混合均匀后组合成 1 件样品, 平均采样密度为 9 点/ km^2 。样品在室内通风处晾干, 干燥过程中使用木棒捶打, 防止结块, 干燥后去除根系、石块等杂质, 全部过 10 目尼龙筛, 混合均匀后, 采用四分法取样 500 g

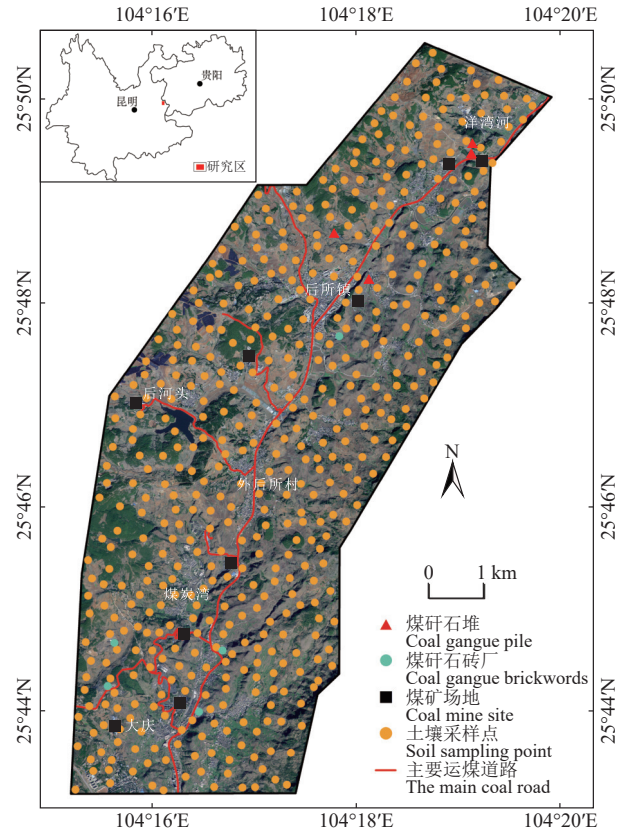


图 1 滇东典型煤矿区位置图

Fig.1 Location map of typical coal mine areas in eastern Yunnan

以上, 装入牛皮纸袋中密封, 送往实验室进一步加工并分析。

2.2.2 分析测试

土壤样品测试单位为中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心实验室。pH 试样采用去除二氧化碳的新制备蒸馏水溶解, 使用上海仪电科学仪器公司 pH 计 (PHS-3C) 测定; As 试样采用王水消解, 使用北京海光仪器有限公司原子荧光光度计 (AFS-9800) 测定; Hg 试样采用王水消解, 使用物化探研究所原子荧光分光光度计 (XGY-1011A) 测定; Cd、Cu、Pb 试样采用 $HF-HNO_3-HClO_4$ 消解, 使用赛默飞世尔公司等离子质谱仪 (iCAP QC) 测定; Cr 试样压片处理, 使用德国 PANalytical 公司 X 射线荧光光谱仪 (AxiosMAX) 测定; Ni、Zn 试样采用 $HNO_3-HCl-HF-HClO_4$ 消解, 使用赛默飞世尔公司电感耦合等离子体发射光谱仪 (iCAP 6300) 测定。本批次样品共插入 60 个国家一级标准物质控制分析的准确度, 分别计算每种元素, 每件标准物质, 每

次测定值与标准推荐值之间对数差($\Delta \lg C$)控制分析准确度。元素分析方法的检出限、报出率、准确度、精密度等质量指标均满足《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)要求。

2.3 污染负荷指数

采用污染负荷指数评价土壤重金属污染程度(麦麦提吐尔逊·艾则孜等, 2017), 其计算公式为:

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

$$P = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, CF_i 为土壤重金属 i 污染指数, C_i 和 S_i 分别重金属实测值和标准值, 标准值(表 1)选用云南省土壤背景值(魏复盛等, 1990), P 为某样点重金属污染负荷指数, n 为该样点重金属污染物的个数。

$$P_z = \sqrt[m]{P_1 \times P_2 \times \dots \times P_m} \quad (3)$$

式(3)中, P_z 为综合污染负荷指数, m 为研究区采样点个数。

污染负荷指数法分级标准为 P 或 $P_z \leq 1$, 为无污染; $1 < P$ 或 $P_z \leq 2$, 为轻微污染; $2 < P$ 或 $P_z \leq 3$ 为中度污染; P 或 $P_z > 3$, 重度污染。

2.4 潜在生态风险指数

采用 Hakanson(1980)提出的潜在生态风险指数法评价土壤重金属的生态风险情况, 定量划分重金属潜在生态风险。单一重金属潜在生态风险系数(E)计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \cdot \left(\frac{C_d^i}{C_i^i} \right) \quad (4)$$

式(4)中, E_r^i 为给定重金属 i 的潜在生态风险系数; C_d^i 为重金属 i 的实测含量; C_i^i 为重金属 i 的云南

表 1 土壤理化指标参比标准值

Table 1 Reference standard value of soil physicochemical index

元素 指标	土地 类型	风险筛选值/(mg/kg)				管制值/(mg/kg)				云南省土壤 背景值/ (mg/kg)
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5	pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5	
As	水田	30	30	25	20	200	150	120	100	18.40
	其他	40	40	30	25					
Cd	水田	0.3	0.4	0.6	0.8	1.5	2.0	3.0	4.0	0.22
	其他	0.3	0.3	0.3	0.6					
Cr	水田	250	250	300	350	800	850	1000	1300	65.20
	其他	150	150	200	250					
Cu	果园	150	150	200	200	—	—	—	—	46.30
	其他	50	50	100	100					
Hg	水田	0.5	0.5	0.6	1.0	2.0	2.5	4.0	6.0	0.06
	其他	1.3	1.8	2.4	3.4					
Ni	不区分	60	70	100	190	—	—	—	—	42.50
Pb	水田	80	100	140	240	400	500	700	1000	40.60
	其他	70	90	120	170					
Zn	不区分	200	200	250	300	—	—	—	—	89.70
SOM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3.89
pH	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5.70

注: 云南省土壤背景值中pH无量纲、SOM单位为%; 风险筛选值和管制值源自《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)。

表 2 土壤重金属潜在生态风险分级标准

Table 2 Classification criteria of potential ecological risk of heavy metals in soil

参数	取值范围	单一潜在生态风险等级	参数	取值范围	综合潜在生态风险等级
E	$E < 40$	轻度	RI	$RI < 150$	轻度
	$40 \leq E < 80$	中等		$150 \leq RI < 300$	中等
	$80 \leq E < 160$	强		$300 \leq RI < 600$	强
	$160 \leq E < 320$	很强		$RI \geq 600$	很强
	$E \geq 320$	极强			

省土壤背景值; T_i 为重金属 i 的毒性响应系数。重金属毒性水平顺序为: $Hg > Cd > As > Pb = Cu = Ni > Cr > Zn$, 给出的毒性响应系数为: $Hg=40$ 、 $Cd=30$ 、 $As=10$ 、 $Pb=Cu=Ni=5$ 、 $Zn=1$ 和 $Cr=2$ (王昌宇等, 2021)。综合潜在生态风险指数(RI)由各单一重金属潜在生态风险系数加和得到。土壤重金属潜在生态风险分级标准见表 2。

2.5 PMF 模型

PMF 模型是由 Paatero and Tapper(1994) 提出的基于因子分析技术的一种源解析方法, 通过最小二乘法和迭代计算, 不断分解受体样本矩阵从而得到最优解(孙锐等, 2021), 求解过程中对因子载荷和因子得分均作非负约束, 使得到的源成分谱和源贡献率具有可解释性和明确的物理意义(Chueinta et al., 2000), 计算公式为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (5)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right)^2 \quad (6)$$

$$Unc = 0.1C + MDL/3 \quad (7)$$

式(5)、(6)和(7)中, X_{ij} 为第 i 个样品第 j 种元素浓度矩阵; f_{kj} 为第 k 个源第 j 种重金属浓度矩阵; g_{ik} 为第 k 个源对第 i 个样品的贡献率; e_{ij} 为残差矩阵; u_{ij} 为第 i 个样品第 j 种重金属的残差矩阵。因子贡献和分布由 PMF 模型计算得出, Q 为最小化目标函数, Unc 为第 i 个样品第 j 种重金属的不确定度

(Reff et al., 2007), C 为某点土壤中元素含量, MDL 为元素检测方法的检出限。

3 结果与讨论

3.1 土壤理化指标

研究区土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、SOM 和 pH 的统计结果见表 3。土壤 pH 平均值为 5.39, 整体呈酸性, 低于云南省土壤背景值。SOM 含量平均值是云南省土壤背景值的 1.20 倍。Cr、Cu、Cd、Ni、Zn 和 Hg 含量平均值和中位数均超过云南省土壤背景值, 其含量平均值分别为云南省土壤背景值的 3.89、3.60、3.09、1.92、1.62 和 1.17 倍。对比土壤风险筛选值和管制值, 除 Hg、Pb 外, Cd、Cu、Cr、Ni、Zn 和 As 超过风险筛选值的比例分别为 94.97%、93.96%、91.35%、79.28%、3.42% 和 3.22%, 仅有部分样点 As、Cd 含量超过管制值, 比例分别为 0.20%、1.41%。

变异系数为标准偏差与平均值的比值, 变异系数越大, 可能受到人类活动影响越强(刘同等, 2022)。从变异系数来看, 研究区土壤重金属空间分布为中度至高度变异, 其中 As、Cd、Hg 和 Cu 变异系数分别为 280.19%、98.09%、91.92% 和 74.52%, 空间分异明显。变异系数顺序为 $As > Cd > Hg > Cu > Cr > Pb > Zn > Ni$ 。

3.2 空间分布特征

使用 ArcGIS 中反距离权重法对土壤重金属进行插值分析, 空间分布如图 2 所示。As、Cd、Hg 的空间分布有较大的相似性, 相对高值区主要呈点状分布在后所镇东部、外后所村东南部, 与研究区内出露的茅口组、梁山组等地层分布区耦合, Pb 的相

表 3 土壤理化指标数理统计

Table 3 Mathematical statistics of soil physicochemical indexes

元素指标	最大值/ (mg/kg)	最小值/ (mg/kg)	中位数/ (mg/kg)	平均值/ (mg/kg)	标准偏差/ (mg/kg)	变异系数/ %	超云南省土 壤背景值%	超风险筛选值/ %	超管制值/ %
As	556.00	0.88	5.14	10.05	28.16	280.19	9.46	3.22	0.20
Cd	8.75	0.13	0.57	0.68	0.67	98.09	99.60	94.97	1.41
Cr	577.00	123.00	223.00	253.91	95.15	37.47	100.00	91.35	0
Cu	1344.00	42.80	155.00	166.70	124.22	74.52	99.40	93.96	0
Hg	0.77	0.01	0.06	0.07	0.06	91.92	40.85	0	0
Ni	168.00	38.30	80.50	81.49	15.07	18.50	99.60	79.28	0
Pb	66.10	7.71	24.30	25.24	7.54	29.86	3.62	0	0
Zn	250.00	70.90	144.00	145.21	27.75	19.11	98.19	3.42	0
SOM	20.26	0.34	4.24	4.67	23.38	50.10	56.94	—	—
pH	8.19	3.84	5.10	5.39	0.86	15.95	29.58	—	—

注: 最大值、最小值、中位数、平均值、标准偏差中 pH 无量纲; SOM 单位为 %。

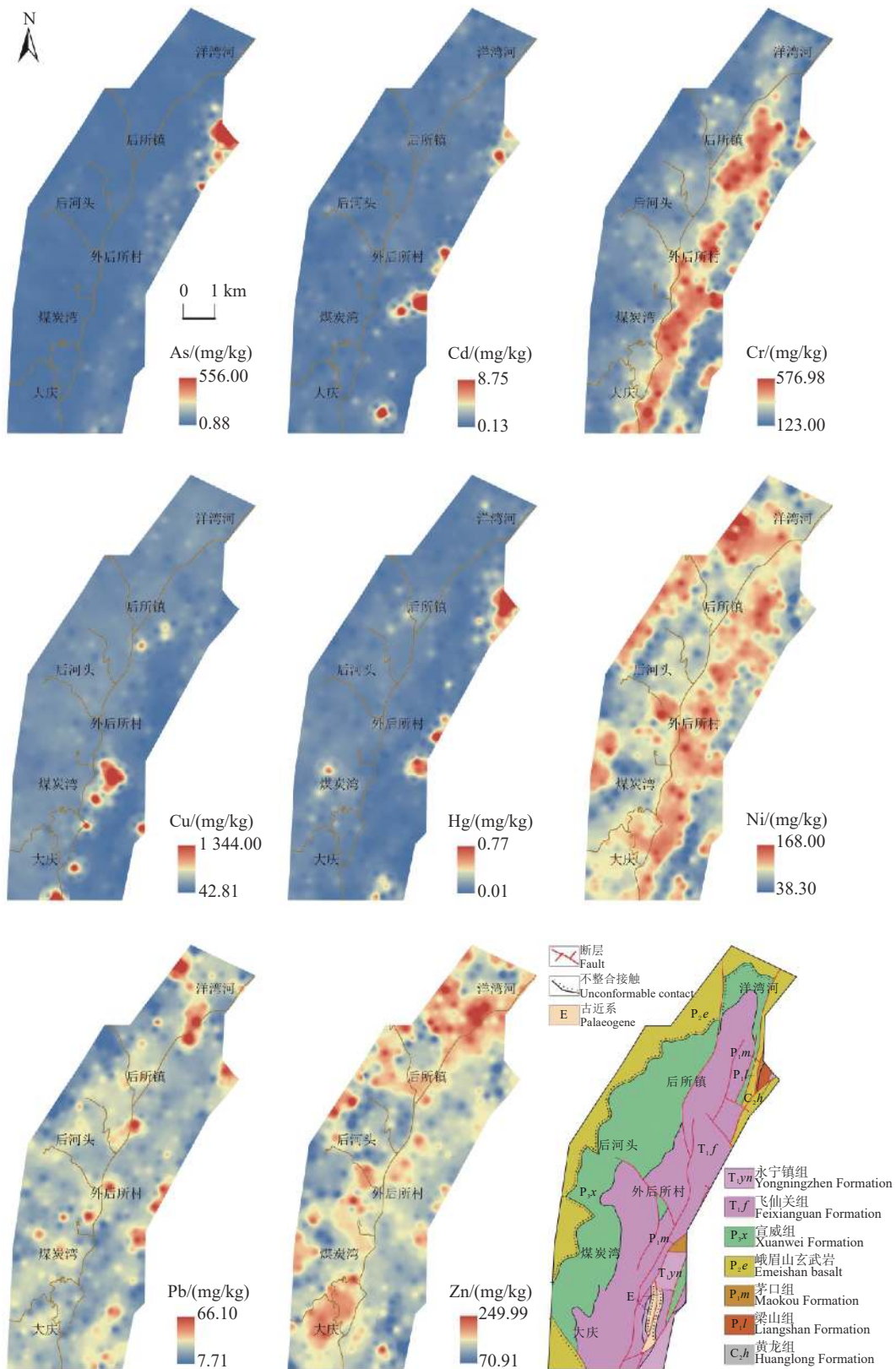


图2 滇东典型煤矿区土壤重金属分布及地层分布
Fig.2 Distribution of heavy metals in soil and strata in typical coal mining areas of eastern Yunnan Province

对高值区部分与 As、Cd、Hg 一致,其他相对高值区呈点状零散分布在研究区内。Cu 的相对高值区主要呈点状分布在外后所村南部至大庆一带,为飞仙关组分布区。Cr、Ni 的部分相对高值区分布较相似,在后所镇东部至大庆东部一带,为飞仙关组分布区,Ni 的其他相对高值区分布在峨眉山玄武岩分布区。Pb 的相对高值区除在碳酸盐岩分布区出现外,还分布在主要运煤道路及村庄周边。Zn 的相对高值区主要分布在峨眉山玄武岩和宣威组分布区。整体来看,地质背景对研究区重金属空间分布影响十分明显,这与李丽辉和王宝禄(2008)研究结果一致。前人研究表明,土壤还可能受到农业生产、人类生活、燃煤取暖、煤矿开采和交通运输等影响(李伟等,2022;秦元礼等,2022)。

3.3 土壤重金属污染评价

3.3.1 污染负荷指数评价

研究区污染负荷指数(P)在 0.79~4.73,平均值为 1.46,空间分布特征见图 3。评价结果显示,研究区土壤以轻微污染为主,占 91.75%,其次为中度污染和重度污染分别占 3.82%、1.01%,无污染仅占 3.42%。茅口组和梁山组分布区与中度、重度污染区耦合,对污染负荷指数影响较大。综合污染负荷

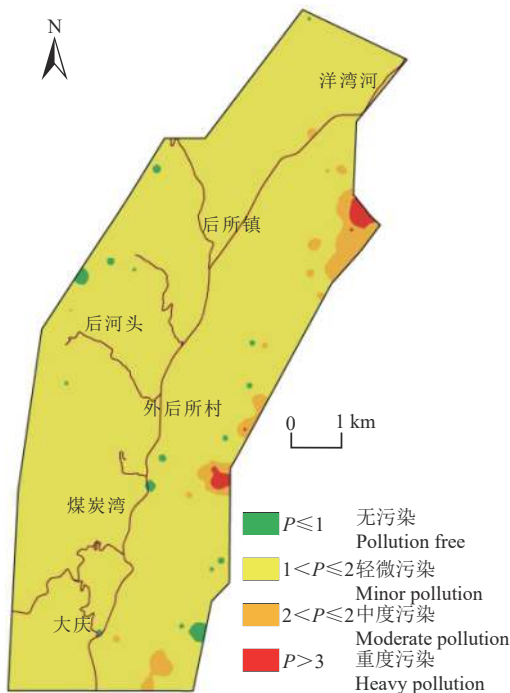


图 3 污染负荷指数空间分布

Fig.3 Spatial distribution map of pollution load index

指数为 1.43,整体表现为轻微污染。

3.3.2 潜在生态风险指数评价

研究区土壤单一重金属潜在生态风险系数(E_i^p)见图 4,As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的潜在生态风险系数的平均值分别为 5.46、92.68、7.79、18.00、44.74、9.59、3.11 和 1.62,潜在生态风险较大的元素为 Cd,其次为 Hg。其中 Cd 以中等生态风险为主,其次为强生态风险,分别占 50.30%、42.25%,轻度生态风险仅占 3.22%,很强和极强生态风险分别占 2.62%、1.61%。Hg 以轻度生态风险为主,其次为中等生态风险,分别占 49.70%、43.26%,少量强、很强和极强生态风险,分别占 4.63%、2.01%、0.40%。Cu 以轻度生态风险为主,少量中等、强生态风险,分别占 97.38%、1.01%、1.61%。As、Cr、Ni、Pb、Zn 潜在生态风险系数均小于 40,生态风险较小。

土壤重金属综合潜在生态风险指数(RI)空间分布情况(图 5a)显示,研究区以中等生态风险为主,其次为轻度生态风险,其中中等、轻度、强和很强生态风险比例分别为 55.53%、39.84%、3.02% 和 1.61%。统计 8 种重金属对 RI 的贡献率,结果(图 5b)显示:As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的贡献率分别为 2.64%、48.97%、4.85%、10.66%、23.90%、6.08%、1.88% 和 1.01%。其中 Cd 贡献率最高,其次为 Hg。Cd、Hg 本身毒性较高,并且在土壤中含量普遍超过风险筛选值,潜在生态风险较高。结合 Cd、Hg 空间分布来看,研究区边缘的强、很强生态风险区主要受到 Cd、Hg 影响,与涂春霖等(2023)对滇东典型煤矿区小流域沉积物重金属评价结果基本一致。

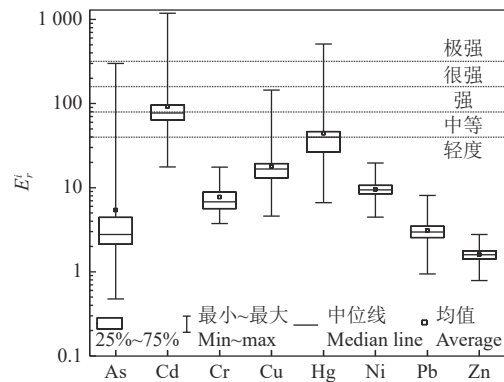


图 4 土壤重金属单一潜在生态风险系数

Fig.4 Single potential ecological risk coefficient of soil heavy metals

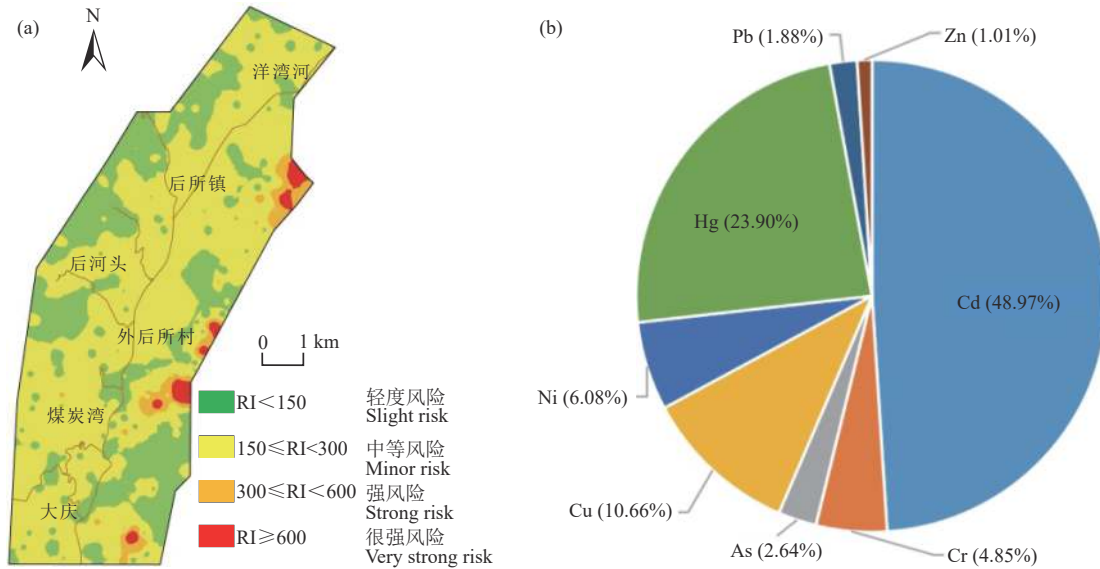


图5 土壤重金属综合潜在生态风险指数空间分布(a)与土壤重金属贡献率(b)

Fig.5 Spatial distribution of comprehensive potential ecological risk index of soil heavy metals (a) and contribution rate of soil heavy metals (b)

3.4 来源解析

3.4.1 相关性分析

相关性分析是判断元素来源的重要方法,元素间相关系数越大,来自于同一污染源的可能性越大。通过表4可知,As-Hg、Cd-Hg和Ni-Zn显著正相关($P>0.01$),相关系数分别为0.65、0.52和0.55,说明As-Hg、Cd-Hg、Ni-Zn部分来源一致,对土壤中该元素组合贡献较高。Ni-Cr显著正相关($P>0.01$),但相关系数较小,仅为0.45,结合元素空间分布特征,Cr-Ni分布具有一定的相似性和差异性,导致二者相关系数较小。SOM与Pb显著正相关($P>0.01$),相关系数为0.41。pH与重金属之间相关系数均比较小。

3.4.2 主成分分析

主成分分析是通过降维的方式,找出几个综合变量代替原有众多变量,使综合变量尽可能代表原来变量的信息,是有效解析土壤重金属来源的方法(杨玲等,2022)。如表5所示,使用最大方差法对成分矩阵进行旋转,提取出5个特征值大于1的主成分,累积贡献率达到86.56%,可以较好地解释原有变量信息。

第一主成分中As、Hg和Cd载荷量较大,分别为0.90、0.86和0.51,As、Cd、Hg部分相对高值区空间分布相似,与茅口组、梁山组分布区耦合,其中茅口组为碳酸盐岩,梁山组为黑色页岩,前人研究显示,碳酸盐岩和黑色页岩在风化成土过程中往往

表4 土壤理化指标相关性分析

Table 4 Correlation analysis of soil physicochemical indexes

元素指标	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	SOM	pH
As	1									
Cd	0.29	1								
Cr	0.09	0.19	1							
Cu	-0.10	0.11	0.21	1						
Hg	0.65**	0.52**	0.07	-0.08	1					
Ni	-0.07	0.03	0.45**	0.12	-0.15	1				
Pb	0.22	0.30	0.02	-0.09	0.38**	-0.25	1			
Zn	-0.05	0.16	-0.03	0.03	-0.01	0.55**	-0.01	1		
SOM	-0.04	0.13	-0.19	0.01	0.23	-0.28	0.41**	0.08	1	
pH	0.17	0.26	0.14	0.04	0.15	-0.12	0.14	-0.05	0.08	1

注: ** 在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著。

表 5 土壤重金属主成分分析结果
Table 5 Principal component analysis results of heavy metals in soil

元素	成分				
	1	2	3	4	5
As	0.90	-0.08	0.06	-0.03	-0.11
Cd	0.51	0.23	0.08	0.50	0.32
Cr	0.07	-0.01	0.96	0.06	0.13
Cu	-0.07	0.00	0.11	-0.06	0.95
Hg	0.86	-0.02	-0.02	0.30	-0.01
Ni	-0.07	0.71	0.57	-0.25	0.00
Pb	0.13	-0.09	-0.01	0.91	-0.12
Zn	-0.01	0.96	-0.08	0.06	0.02
特征值	1.85	1.48	1.28	1.26	1.06
贡献率/%	23.15	18.49	16.02	15.20	13.20
累积贡献率/%	23.15	41.64	57.66	73.36	86.56

导致重金属富集,是重金属空间分布出现相对高值区的重要影响因素(张国涛等, 2016; 马宏宏等, 2020; 陈梓杰等, 2021)。除相对高值区外,其他区域 As、Hg 空间分布较为均匀,可能受到广泛均匀的大气沉降影响。前人研究显示,区内煤层受玄武岩影响,煤炭中 As 含量较高(聂爱国和谢宏, 2004),且区内煤炭工业发达,生产过程中需要大量的煤炭作为燃料和原料,燃煤时产生大量含有 As、Cd、Hg 等重金属的烟气飞灰(郭胜利等, 2015),且煤炭运输过程中产生的灰尘、汽车尾气也含有重金属(刘鹏等, 2019),这些物质进入大气中,通过沉降作用进入土壤,导致土壤重金属累积。因此推测 As、Hg 主要受到大气沉降影响,Cd 部分受到大气沉降影响。第一主成分为大气沉降源,贡献率为 23.15%。

第二主成分中 Zn、Ni 载荷量较大,分别为 0.96、0.71。Ni 分布较均匀,空间上相对高值区与飞仙关组和峨眉山玄武岩地层分布区耦合,Zn 相对高值区与峨眉山玄武岩和宣威组分布区耦合。研究显示,玄武岩与其发育土壤中的 Cr、Cu、Ni、Zn 等微量元素间具有较好的继承性(吴月照和潘懋, 1993),宣威组物质主要来源于峨眉山玄武岩风化碎屑(Zhang et al., 2010)。因此推测 Zn 主要受到峨眉山玄武岩影响,Ni 部分受峨眉山玄武岩影响。第二主成分为峨眉山玄武岩自然源,贡献率为 18.49%。

第三主成分中 Cr、Ni 载荷量较大,分别为 0.96、0.57, Ni 在第二、三主成分均有较大载荷。Cr 空间分布特征与飞仙关组套合,研究显示,飞仙关组岩石重矿物中有大量碎屑铬尖晶石,物质来源于晚二叠世峨眉山高钛玄武岩,可见土壤中高 Cr、

Ni 含量与岩石中存在的碎屑铬尖晶石有关(肖高强等, 2021); Ni、Cr 相对高值区分布特征在飞仙关组分布区具有相似性。综合第二主成分分析结果,推测 Cr 主要受到飞仙关组碎屑岩影响, Ni 主要受到飞仙关组碎屑岩和峨眉山玄武岩共同影响。第三主成分为碎屑岩自然源,贡献率为 16.02%。

第四主成分中 Pb、Cd 和 Hg 载荷量较大,分别为 0.91、0.50、0.30, Cd 在第一、四主成分均有较大载荷。Pb 与 Cd、Hg 部分相对高值区空间分布相似,均在茅口组、梁山组分布区,除此之外,其它相对高值区与人类生活区和农业活动区较为套合。野外调查发现研究区化肥和农家肥配合施用,农家肥用量较大;生活垃圾和生活污水水集中处理能力还不足。研究显示,肥料(化肥、农家肥)均含有重金属,由于近年对化肥生产严格管控,化肥中重金属含量低于国家肥料相关标准,农家肥成为农田土壤重金属主要来源之一(童文彬等, 2020; 徐兴阳等, 2020),燃煤取暖的煤渣、生活垃圾和生活污水也含有重金属元素(倪琳等, 2020; 苏辉跃等, 2022),生活垃圾受降水淋滤作用,淋滤液汇入地表径流进入土壤,煤渣和生活污水直接倾倒进入土壤。综合第一主成分分析结果,推测 Cd、Hg 主要受到大气沉降源和农业及生活复合源共同影响,Pb 主要受到农业和生活复合源影响。第四主成分为农业与生活复合源,贡献率为 15.20%。

第五主成分中 Cu 载荷量较大,为 0.95。Cu 在研究区内超过云南省 A 层土壤算术均值,相对高值区呈点状沿飞仙关组地层分布,附近曾有铜矿开采,野外调查也发现沿飞仙关组地层分布的炼铜废渣,部分可见铜矿物,是导致相对高值区出现的主要原因。研究显示,峨眉山玄武岩中 Cu 含量较高,风化碎屑为宣威组物质主要来源,玄武岩分布区土壤中 Cu 受地层控制明显(贺灵等, 2021),因此推测 Cu 主要受到地质背景和早期铜矿开采冶炼影响。第五主成分为早期炼铜废渣与自然复合源,贡献率为 13.20%。

3.4.3 PMF 模型解析

使用 PMF 模型进行污染源解析,剔除了可能影响解析结果的异常值(魏迎辉等, 2018)。将浓度和不确定度导入 PMF 模型,信噪比(S/N)大于 6,默认为“Strong”,不断调整因子数量,当因子数量为

6 时, Q 值(1797.32)与理论 Q 值(1829.13)接近, 两者间差值小于 10%(蒋玉莲等, 2023)。选择 6 因子时, Pb 的 r^2 (数据拟合度)为 0.54, 其他元素 r^2 均大于 0.70, 其中 As、Cd、Cu、Hg 达到 0.90 以上, 说明所选因子数量能够较好解释原有数据包含的信息, 解析效果较好。

各因子中元素贡献率及浓度见图 6。因子 1 对 Cu、Cr、Ni 和 Zn 贡献较大, 分别为 63.84%、22.56%、12.55% 和 10.45%, Cu 相对高值区主要分布在早期铜矿冶炼场地周边, 且在玄武岩和宣威组中含量较高, 因此推测因子 1 为早期炼铜废渣与自然复合源, 贡献率为 15.92%。

因子 2 对 Cd、Pb 和 Zn 的贡献率较高, 分别为 67.88%、55.48% 和 30.71%。因子 2 中 Cd、Pb 含量及贡献率均超过其他因子, 空间分布特征与农业活动区和人类生活区耦合, 受到人类活动影响。徐兴阳等(2020)研究发现昆明烟区不同种类农家肥中 Cd 含量为 0.59~2.40 mg/kg, Pb 含量为 20.00~36.10 mg/kg; 陈其永等(2022)对 2000—2018 年我国大气重金属沉降通量时空变化特征进行了研究, 发现我国大气中 Cd、Pb 年通量分别为 0.48 mg/(m²·a)、23.37

mg/(m²·a), 由农家肥输入土壤的重金属年通量高于大气沉降物, 考虑该因子对人类生活影响较大的 Hg 贡献非常低, 因此推测因子 2 为农业源, 贡献率为 23.20%。

因子 3 对 Cr、Ni 的贡献率较高, 分别为 52.19%、28.88%, 研究显示, 飞仙关组碎屑岩中大量铬尖晶石为土壤中 Cr 重要来源(肖高强等, 2021), 且 Cr、Ni 空间分布特征在飞仙关组区具有相似性, 因此推测因子 3 为碎屑岩自然源, 贡献率为 14.40%。

因子 4 对 As 的贡献率较高, 为 80.60%, 研究区内煤层受玄武岩影响, 煤炭中 As 含量较高(丁振华等, 2009), 野外调查走访发现早期炼铜活动和现今工业活动均使用本地煤炭作为燃料, 燃烧过程中 As 被大量释放到大气中, 通过沉降作用进入土壤。土壤对砷的吸附主要依靠正电荷与带负电荷的 As 络阴离子相互作用实现, SOM 作为土壤中普遍存在的带负电荷胶体与正电荷反应优先于 As 络阴离子(翁焕新等, 2000), 研究区土壤中 SOM 含量平均值高于云南省土壤背景值, 导致 As 被土壤吸附较少, 使得 As 平均含量低于云南省土壤背景值, 因此推测因子 4 为大气沉降源, 贡献率为 13.27%。

因子 5 对 Zn、Ni 和 Cu 贡献率较高, 分别为 45.79%、39.33% 和 26.31%, 研究显示, 玄武岩与其发育土壤中的 Cr、Cu、Ni、Zn 等微量元素间具有较好的继承性(吴月照和潘懋, 1993), 因此推测因子 5 为峨眉山玄武岩自然源, 贡献率为 17.70%。

因子 6 对 Hg、Pb 贡献率较高, 分别为 70.29%、21.52%, Hg、Pb 部分相对高值区与茅口组与梁山组分布区耦合, 部分相对高值区又与人类生活区耦合。一般认为 Hg 与化石燃料使用和含汞现代工业产品相关(Qiu et al., 2006; 李伟等, 2022), 研究区内居民取暖、做饭还经常使用煤炉, Hg 易挥发, 随烟尘飘散(倪琳等, 2020), 沉降在人类生活区周边。因此推测因子 6 为生活源, 贡献率为 15.52%。

对比主成分分析结果来看, 两种源解析方法均表明地质背景是研究区土壤重金属主要来源, 其次为农业活动和大气沉降。

4 结 论

(1) 土壤 pH 平均值为 5.39, 以酸性为主, SOM 含量平均值是云南省土壤背景值的 1.20 倍,

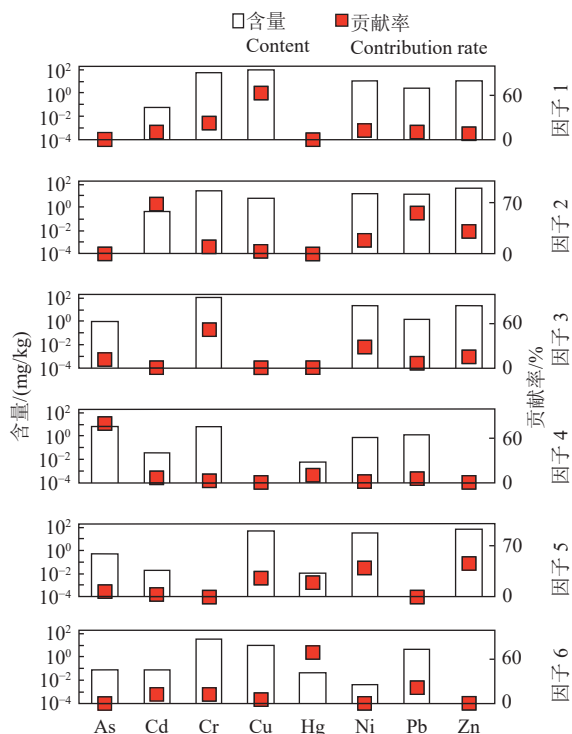


图 6 土壤重金属 PMF 模型解析结果
Fig.6 PMF model analysis results of heavy metals in soil

Cr、Cu、Cd、Ni、Zn 和 Hg 含量平均值和中位数均超过云南省土壤背景值。除 Hg、Pb 外, Cd、Cu、Cr、Ni、Zn 和 As 在部分样品中含量超《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)中风险筛选值, 仅有部分样点 As、Cd 含量超管制值。

(2) 污染负荷指数法评价结果显示, 研究区土壤重金属主要为轻微污染, 占 91.75%, 其次为中度污染和重度污染分别占 3.82%、1.01%, 无污染仅占 3.42%。研究区综合污染负荷指数为 1.43, 呈现轻微污染, 中度、重度污染区与茅口组和梁山组等地质高背景区耦合, 受其影响明显。潜在生态风险指数法评价结果显示, 研究区土壤重金属以中等生态风险为主, 其次为轻度生态风险, 分别占 55.53%、39.84%。Cd、Hg 为主要生态风险因子。

(3) 主成分分析结果显示, 研究区土壤重金属来源主要有 5 种, 分别为大气沉降源, 峨眉山玄武岩自然源、碎屑岩自然源、农业与生活复合源和早期炼铜废渣与自然复合源。PMF 模型解析结果显示, 研究区土壤重金属来源主要有 6 种, 分别为大气沉降源、峨眉山玄武岩自然源、碎屑岩自然源、农业源、生活源和早期炼铜废渣与自然复合源。主成分分析与 PMF 模型解析在结果上趋于一致, 即地质背景是研究区土壤重金属主要来源, 其次为农业活动和大气沉降, 建议加强相关污染土地的监测和管理, 减少农家肥不合理施用, 强化煤炭工业污染排放监管。

References

Chen Qiyong, Gao Yunbing, Ni Runxiang, Pan Yuchun, Yan Yuguan, Yang Jing, Liu Xiaoyang, Gu Xiaohe. 2022. Temporal and spatial variation characteristics of heavy metal in atmospheric deposition in China from 2000 to 2018[J]. *Environmental Science*, 43(9): 4413-4424 (in Chinese with English abstract).

Chen Zijie, Xiao Tangfu, Liu Yizhang, Xing Dan, Yang Jun, Zhu Zhengjie, Ning Zengping. 2021. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and maize in a typical black shale area with high geochemical background[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 40(8): 2315-2323 (in Chinese with English abstract).

Chueinta W, Hope P K, Paatero P. 2000. Investigation of sources of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization[J]. *Atmospheric Environment*, 34(20): 3319-3329.

Ding Yi. 2000. Overview of national large-scale coal base planning[J]. *Coal Engineering*, 39(2): 12-14 (in Chinese with English abstract).

Ding Zhenhua, Zheng Baoshan, Zhuang Min, Hu Tiandou, Liu Tao. 2009. Modes of occurrence of arsenic in High-As coals from north western Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(1): 70-74 (in Chinese with English abstract).

Guo Shengli, Li Dongwei, Geng Weile, Zhang Jian. 2015. Controlling effect of the modified calcium carbonate on the capture of As, Cd and Zn during coal combustion[J]. *Journal of China Coal Society*, 40(12): 2967-2973 (in Chinese with English abstract).

Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975-1001.

He Ling, Wu Chao, Zeng Daoming, Cheng Xiaomeng, Sun Binbin. 2021. Distribution of heavy metals and ecological risk of soils in the typical geological background region of Southwest China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 40(3): 384-396 (in Chinese with English abstract).

Joanna B K, Ryszard M, Michał G, Tomasz Z. 2018. Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination-A review[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 40: 2395-2420.

Jiang Yulian, Yu Jing, Wang Rui, Wang Jiabin, Li Yu, Yu Fei, Zhang Yunyi. 2023. Source analysis and pollution assessment of soil heavy metals in typical geological high background area in Southeastern Chongqing[J]. *Environmental Science*, 44(7): 4017-4026 (in Chinese with English abstract).

Li Jihua, He Jun, Kan Qiangbo, Duan Zhongming, Huang Yunchao. 2021. Geostatistical analysis of village-level lung cancer mortality from 2010 to 2019 in Fuyuan County, Yunnan Province[J]. *China Cancer*, 30(10): 8(in Chinese with English abstract).

Li Lihui, Wang Baolu. 2008. Geochemical characteristics of As and Cd in soils of Yunnan province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 32(5): 497-501 (in Chinese with English abstract).

Li Qiang, Ai Feng, Wang Xi, Ma Yongbo, Liu Lang, Zhu Zhanrong, Zhang Kaiyu. 2023. Theoretical analysis and practical exploration on ecological restoration of mines with Multi-source solid wastes: example from Yulin City, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 56(3): 70-77(in Chinese with English abstract).

Li Wei, Gao Haitao, Zhang Na, Sun Jing, Basang, Lü Xuebin, Xiong Jian. 2022. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soil of Lasha City[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 12(3): 869-877 (in Chinese with English abstract).

Liu Peng, Hu Wenyou, Huang Biao, Liu Benle, Zhou Yi. 2019. Advancement in researches on effect of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in soils and crops[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 56(5): 1048-1059 (in Chinese with English abstract).

Liu Tong, Liu Chuanpeng, Deng Jun, Kang Pengyu, Wang Kaikai, Zhao Yuyan. 2022. Ecological health risk assessment of soil heavy

- metals in eastern Yinan County, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1497–1508 (in Chinese with English abstract).
- Ma Honghong, Peng Min, Liu Fei, Guo Fei, Tang Shiqi, Liu Xiujin, Zhou Yalong, Yang Ke, Li Kuo, Yang Zheng, Cheng Hangxin. 2020. Bioavailability, translocation, and accumulation characteristic of heavy metals in a soil-crop system from a typical carbonate rock area in Guangxi, China[J]. *Environmental Science*, 41(1): 449–459 (in Chinese with English abstract).
- Mamattursun Eziz, Ajigul Mamut, Anwar Mohammad, Ma Guofei. 2017. Assessment of heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 72(9): 1680–1694 (in Chinese with English abstract).
- Ni Lin, Cui Xiaofeng, Xu Lijia, Lin Qian, Guo Kun. 2020. Study on distribution and enrichment of heavy metal elements in fly ash and slag from fuel coal[J]. *Coal Science and Technology*, 48(5): 203–208 (in Chinese with English abstract).
- Nie Aiguo, Xie Hong. 2004. A research on origin between Emei Mountain basalt magma and High-As coal in Guizhou[J]. *Coal Geology and Exploration*, 32(1): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- Ou Lingzhi, Hu Mingming, An Dezhang, Tang Ming, Qin Fanxin, Li Fei, Sun Yuanyuan. 2023. Characteristics and health risk assessment of heavy metals in dryland soil and crops around a coal mine with high levels of arsenic[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 40(1): 25–35 (in Chinese with English abstract).
- Paatero P, Tapper U. 1994. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. *Environmetrics*, 5(2): 111–126.
- Pan L B, Guan X, Liu B, Chen Y J, Pei Y, Pan J, Zhang Y, Hao Z Z. 2021. Pollution characteristics, distribution and ecological risk of potentially toxic elements in soils from an abandoned coal mine area in Southwestern China[J]. *Minerals*, 11(3): 1–16.
- Pang Wenpin, Qin Fanxin, Lü Yachao, Li Yingju, Li Gang, Li Xinli. 2016. Chemical speciations of heavy metals and their risk assessment in agricultural soils in a coal mining area from Xingren County, Guizhou Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(5): 1468–1478 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yuanli, Zhang Fugui, Peng Min, Zhang Li, Tang Ruiling, Cheng Hangxin. 2022. Influencing factors and ecological risk assessment of soil heavy metals in agricultural areas of Xuanwei City, Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 58(2): 360–368 (in Chinese with English abstract).
- Qiu G L, Feng X B, Wang S F, Shang L H. 2006. Environmental contamination of mercury from Hg-mining areas in Wuchuan, Northeastern Guizhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 142(3): 549–558.
- Reff A, Eberly S I, Bhave P V. 2007. Receptor modeling of ambient particulate matter data using positive matrix factorization: review of existing methods[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(2): 146–154.
- Song Mian, Gong Lei, Wang Yan, Tian Dazheng, Wang Xinfeng, Li Yue, LI Wei. 2022. Risk assessment of heavy metals in topsoil on human health in Fuping County, Hebei Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 41(1): 133–144 (in Chinese with English abstract).
- Su Huiyue, Liu Jiangchuan, Wang Lu, Li Bo, Yu Huan, Chen Zhikui, Hu Yueming. 2022. Geographic distribution and source apportionment of heavy metals in soils and vegetable in urban fringe[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 38(2): 184–193 (in Chinese with English abstract).
- Sun Rui, Zhou Xiaofang, Chen Yang, Wang Xinfu, Gao Liangmin. 2021. Positive definite matrix factor model analysis of the source of heavy metals in coal mine soils in the Ordos Plateau[J]. *Science Technology and Engineering*, 21(16): 6937–6943 (in Chinese with English abstract).
- Tong Wenbin, Guo Bin, Lin Yicheng, Liu Chen, Song Jianzhong. 2020. Assessment of input-output patterns of Cd and Pb of typical heavy metal polluted agricultural land in Quzhou[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 34(5): 1061–1069 (in Chinese with English abstract).
- Tu Chunlin, Yang Kun, He Chengzhong, Zhang Liankai, Li Bo, Wei Zong, Jiang Xin, Yang Minghua. 2023. Sources and risk assessment of heavy metals in sediments of small watersheds in typical coal mining areas of Eastern Yunnan[J]. *Geology in China*, 50(1): 206–221 (in Chinese with English abstract).
- Wang Changyu, Zhang Surong, Liu Jihong, Xing Yi, Li Mingze, Liu Qingxue. 2021. Pollution level and risk assessment of heavy metals in a metal smelting area of Xiong'an New District[J]. *Geology in China*, 48(6): 1697–1709 (in Chinese with English abstract).
- Wang W J, Wang Q L, Zou Z L, Zheng F Y, Zhang A H. 2020. Human arsenic exposure and lung function impairment in coal-burning areas in Guizhou, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190: 110174.
- Wei Fusheng, Chen Jingsheng, Wu Yanyu, Zheng Chunjiang. 1990. Study on Soil Environmental Background Values in China[M]. Beijing: China Environmental Press, 330–483(in Chinese with English abstract).
- Wei Yinghui, Li Guochen, Wang Yanhong, Zhang Qi, Li Bo, Wang Shicheng, Cui Jiehua, Zhang Hong, Zhou Qiang. 2018. Investigating factors influencing the PMF model: A case study of source apportionment of heavy metals in farmland soils near a lead-zinc ore[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(11): 2549–2559 (in Chinese with English abstract).
- Weng Huanxin, Zhang Xiaoyu, Zou Lejun, Zhang Xingmao, Liu Guangshen. 2000. Natural existence of arsenic in soil of China and its cause of formation[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 34(1): 90–94 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xianliang, Huang Xianfei, LI Chaochan, Hu Jiwei, Tang Fenghua,

- Zhang Zedong. 2018. Soil heavy metal pollution degrees and metal chemical forms around the coal mining area in Western Guizhou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(6): 335–341 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuezhao, Pan Mao. 1993. Study on the regularity of changes of contents of the parent rock and soil elements in the basalt regions, Eastern China[J]. *Advances in Environmental Science*, 1(5): 26–36(in Chinese with English abstract).
- Xiao Gaoqiang, Chen Jie, Bai Bing, Li Yuanbin, Zhu Nengang. 2021. Content characteristics and risk assessment of heavy metals in soil of typical high geological background areas, Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 57(5): 1077–1086(in Chinese with English abstract).
- Xu Xingyang, Qian Facong, Luo Yun, Yang Yi, Chen Chu, Zhang Jing, Dong Shifei, Yang Yingming. 2020. Basic characteristics and safety of farmyard manure in Kunming tobacco-growing area[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 33(8): 1748–1753 (in Chinese with English abstract).
- Xue Zhibin, Li Ling, Zhang Shaokai, Dong Jing. 2018. Comparative study between nemerow index method and compound index method for the risk assessment of soil heavy metal pollution[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 16(2): 119–125 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ling, Tian Lei, Bai Guangyu, Pei Shengliang, Zhang Deqiang. 2022. Ecological risk assessments and source analysis of heavy metals in the soil of Xin Barag Youqi, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 49(6): 1970–1983 (in Chinese with English abstract).
- Yao Chengbin, Zhou Mingzhong, Xiong Kangning, Zhang Di, Yang Hua, Zhang Xianrong, Yang Liansheng. 2021. Contents of heavy metals in soils and crops in the demonstration area of karst rocky desertification control of the karst plateau-gorge[J]. *China Environmental Science*, 41(1): 316–326 (in Chinese with English abstract).
- Yin Fang, Feng Kai, Yin Cuijing, Bai Dezhen, Wang Rui, Zhou Yuanyuan, Liang Yongchun, Liu Lei. 2021. Evaluation and source analysis of heavy metal in cultivated soil around typical industrial district of Qinghai Province[J]. *China Environmental Science*, 41(11): 5217–5226 (in Chinese with English abstract).
- Yu Danyang, Wang Yanhong, Ding Fu, Chen Xin, Wang Jingran. 2021. Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in china in last ten years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 52(4): 1000–1008 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guotao, Peng Zhongqin, Wang Chuanshang, Li Zhihong. 2016. Geochemical characteristics of the lower permian Liangshan formation in dushan area of Guizhou Province and their implications for the paleoenvironment[J]. *Geology in China*, 43(4): 1291–1303 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z W, Yang X Y, Li S, Zhang Z S. 2010. Geochemical characteristics of the Xuanwei Formation in West Guizhou: Significance of sedimentary environment and mineralization[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 29(4): 355–364.
- Zhao Jiayin, Yang Di, Yang Xiangzhi, Zhang Ning, Liu Yu, Wang Mengmeng, Wu Yuncheng, Chen Qihui, Tian Wei. 2022. Pollution assessment and source identification of heavy metals in farmland soils around a coal mine area in Yunnan Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 38(11): 1473–1481 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤. 2022. 2000–2018 年我国大气重金属沉降通量时空变化特征[J]. *环境科学*, 43(9): 4413–4424.
- 陈梓杰, 肖唐付, 刘意章, 邢丹, 杨军, 朱正杰, 宁增平. 2021. 典型黑色岩系地质高背景区农田土壤-玉米系统重金属富集特征[J]. *生态学杂志*, 40(8): 2315–2323.
- 丁易. 2007. 国家大型煤炭基地规划概述[J]. *煤炭工程*, 39(2): 12–14.
- 丁振华, 郑宝山, 庄敏, 胡天斗, 刘涛. 2009. 贵州中北部燃煤型神中毒地区煤中神的赋存状态研究[J]. *矿物学报*, 29(1): 70–74.
- 郭胜利, 李东伟, 耿伟乐, 张建. 2015. 调制碳酸钙对燃煤重金属 As, Cd, Zn 的排放控制[J]. *煤炭学报*, 40(12): 2967–2973.
- 贺灵, 吴超, 曾道明, 成晓梦, 孙彬彬. 2021. 中国西南典型地质背景区土壤重金属分布及生态风险特征[J]. *岩矿测试*, 40(3): 384–396.
- 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸. 2023. 渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 44(7): 4017–4026.
- 李继华, 何俊, 阚强波, 段忠明, 黄云超. 2021. 基于行政村级的云南省富源县 2010—2019 年肺癌死亡空间分析[J]. *中国肿瘤*, 30(10): 8.
- 李丽辉, 王宝禄. 2008. 云南省土壤 As、Cd 元素地球化学特征[J]. *物探与化探*, 32(5): 497–501.
- 李强, 艾锋, 王玺, 马泳波, 刘浪, 朱占荣, 张凯煜. 2023. 煤基固废协同矿山土壤生态修复的理论解析与实践探索—以陕西榆林市为例[J]. *西北地质*, 56(3): 70–77.
- 李伟, 高海涛, 张娜, 孙晶, 巴桑, 吕学斌, 熊健. 2022. 拉萨市城区土壤重金属分布特征及生态风险评估[J]. *环境工程技术学报*, 12(3): 869–877.
- 刘鹏, 胡文友, 黄标, 刘本乐, 周怡. 2019. 大气沉降对土壤和作物中重金属富集的影响及其研究进展[J]. *土壤学报*, 56(5): 1048–1059.
- 刘同, 刘传朋, 邓俊, 康鹏宇, 王凯凯, 赵玉岩. 2022. 山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评估[J]. *中国地质*, 49(5): 1497–1508.
- 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新. 2020. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 41(1): 449–459.
- 麦提提尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 马国飞. 2017. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. *地理学报*, 72(9): 1680–1694.
- 倪琳, 崔小峰, 徐立家, 林茜, 郭坤. 2020. 燃料煤重金属元素在飞灰

- 及炉渣中的分布与富集研究[J]. 煤炭科学技术, 48(5): 203-208.
- 聂爱国, 谢宏. 2004. 峨眉山玄武岩浆与贵州高硫煤成因研究[J]. 煤田地质与勘探, 32(1): 8-10.
- 欧灵芝, 胡鸣明, 安德章, 唐明, 秦樊鑫, 李菲, 孙媛媛. 2023. 高硫煤矿周围旱作土壤重金属污染特征及农作物健康风险评估[J]. 农业资源与环境学报: 40(1): 25-35.
- 庞文品, 秦樊鑫, 吕亚超, 李英菊, 李刚, 李新丽. 2016. 贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估[J]. 应用生态学报, 27(5): 1468-1478.
- 秦元礼, 张富贵, 彭敏, 张利, 唐瑞玲, 成杭新. 2022. 云南省宣威市农耕地土壤重金属元素分布影响因素及生态风险评估[J]. 地质与勘探, 58(2): 360-368.
- 宋绵, 龚磊, 王艳, 田大争, 王新峰, 李跃, 李伟. 2022. 河北阜平县表层土壤重金属对人体健康的风险评估[J]. 岩矿测试, 41(1): 133-144.
- 苏辉跃, 刘江川, 王璐, 李波, 于欢, 陈志奎, 胡月明. 2022. 城乡过渡区土壤-蔬菜中重金属耦合分异特征及形成机理解析[J]. 生态与农村环境学报, 38(2): 184-193.
- 孙锐, 周晓芳, 陈阳, 王新富, 高良敏. 2021. 正定矩阵因子模型解析鄂尔多斯高原煤矿土壤重金属来源[J]. 科学技术与工程, 21(16): 6937-6943.
- 童文彬, 郭彬, 林义成, 刘琛, 宋建忠. 2020. 衢州典型重金属污染农田镉、铅输入输出平衡分析[J]. 核农学报, 34(5): 1061-1069.
- 涂春霖, 杨坤, 和成忠, 张连凯, 李博, 魏总, 姜昕, 杨明花. 2023. 滇东典型煤矿区小流域沉积物重金属来源及风险评估[J]. 中国地质, 50(1): 206-221.
- 王昌宇, 张素荣, 刘继红, 邢怡, 李名则, 刘庆学. 2021. 雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评估[J]. 中国地质, 48(6): 1697-1709.
- 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 郑春江. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 330-483.
- 魏迎辉, 李国琛, 王颜红, 张琪, 李波, 王世成, 崔杰华, 张红, 周强. 2018. PMF 模型的影响因素考察——以某铅锌矿周边农田土壤重金属源解析为例[J]. 农业环境科学学报, 37(11): 2549-2559.
- 翁焕新, 张霄宇, 邹乐君, 张兴茂, 刘广深. 2000. 中国土壤中砷的自然存在状况及其成因分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 34(1): 90-94.
- 吴先亮, 黄先飞, 李朝婵, 胡继伟, 唐凤华, 张泽东. 2018. 黔西煤矿区土壤重金属污染水平及其形态[J]. 水土保持研究, 25(6): 335-341.
- 吴月照, 潘懋. 1993. 中国东部玄武岩地区母岩及土壤元素含量变化规律研究[J]. 环境科学进展, 1(5): 26-36.
- 肖高强, 陈杰, 白兵, 李元彬, 朱能刚. 2021. 云南典型地质高背景区土壤重金属含量特征及污染风险评估[J]. 地质与勘探, 57(5): 1077-1086.
- 徐兴阳, 钱发聪, 罗云, 杨义, 陈初, 张静, 董石飞, 杨应明. 2020. 昆明烟区农家肥的基本特性与安全性现状研究[J]. 西南农业学报, 33(8): 1748-1753.
- 薛志斌, 李玲, 张少凯, 董晶. 2018. 内梅罗指数法和复合指数法在土壤重金属污染风险评估中的对比研究[J]. 中国水土保持科学, 16(2): 119-125.
- 杨玲, 田磊, 白光宇, 裴圣良, 张德强. 2022. 内蒙古新巴尔虎右旗土壤重金属生态风险与来源分析[J]. 中国地质, 49(6): 1970-1983.
- 姚成斌, 周明忠, 熊康宁, 张迪, 杨桦, 张先荣, 杨连升. 2021. 喀斯特高原石漠化治理示范区土壤和农作物重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 41(1): 316-326.
- 尹芳, 封凯, 尹翠景, 拜得珍, 王蕊, 周园园, 梁永春, 刘磊. 2021. 青海典型工业区耕地土壤重金属评价及源解析[J]. 中国环境科学, 41(11): 5217-5226.
- 于旦洋, 王颜红, 丁茯, 陈欣, 王镜然. 2021. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较[J]. 土壤通报, 52(4): 1000-1008.
- 张国涛, 彭中勤, 王传尚, 李志宏. 2016. 贵州独山下二叠统梁山组地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 中国地质, 43(4): 1291-1303.
- 赵家印, 杨地, 杨湘智, 张宁, 刘宇, 王蒙蒙, 吴云成, 陈秋会, 田伟. 2022. 云南省某煤矿开采遗址周边农用地土壤重金属污染评价及源解析研究[J]. 生态与农村环境学报, 38(11): 1473-1481.