

林湛伟, 乔庆庆, 李刚强, 汪冬, 陈宇东, 高仲寅. 干旱区煤矿周缘重金属污染土壤的环境磁学特征及污染源解析[J]. 土壤学报, 2026,
LIN Zhanwei, QIAO Qingqing, LI Gangqiang, WANG Dong, CHEN Yudong, GAO Zhongyin. Environmental Magnetic Characteristics and
Source Apportionment of Heavy Metal Contaminated Soils Surrounding Coal Mines in Arid Regions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

干旱区煤矿周缘重金属污染土壤的环境磁学特征及污染源解析*

林湛伟^{1, 2, 3}, 乔庆庆^{1, 2, 3†}, 李刚强^{1, 2, 3}, 汪冬^{1, 2, 3}, 陈宇东^{1, 2, 3}, 高仲寅^{1, 2, 3}

(1. 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 新疆矿产资源与数字地质重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 环境磁学方法已被广泛应用于土壤重金属污染的快速识别与溯源研究中, 但传统的简单相关性分析难以揭示磁学参数与重金属之间的驱动方向和因果机制, 尤其是在污染源复杂、输入途径多样的矿区周缘地区。以新疆吐鲁番七泉湖某煤矿周缘土壤为研究对象, 针对锌 (Zn)、铅 (Pb)、砷 (As)、镍 (Ni)、铬 (Cr) 和铁 (Fe) 等重金属, 通过耦合环境磁学指标 (磁化率 (χ)、饱和等温剩磁 (SIRM)、非磁滞剩磁 (χ_{ARM})、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 、 χ_{ARM}/χ)、绝对主成分得分-多元线性回归 (APCS-MLR) 源解析模型与地理收敛交叉映射 (GCCM) 模型, 旨在识别重金属来源, 揭示其与磁学参数间的因果驱动机制。结果表明, 研究区内土壤重金属污染具有显著的多源叠加特征。其中, Pb、Zn 和 Fe 主要受近源冶炼活动影响, 表现为近工业区磁化率明显增强; As 和 Ni 则与煤矿开采及运输过程中产生的细粒磁性颗粒输入密切相关, 对 χ_{ARM} 及其比值参数具有显著响应; Cr 的异常富集主要来源于固废堆积的作用。基于 GCCM 模型的因果驱动分析进一步明确了不同磁学参数对各类污染源的响应差异及作用方向, 有助于降低单纯相关性分析可能带来的误判风险。研究结果系统揭示了干旱区煤矿周缘土壤重金属污染的环境磁学响应特征及其来源机制, 为复合污染区的环境管理与风险防控提供了科学支撑。

关键词: 环境磁学; 土壤重金属; 绝对主成分得分-多元线性回归 (APCS-MLR) 受体模型; 地理收敛交叉映射模型 (GCCM); 源解析

中图分类号: X53 文献标志码: A

Environmental Magnetic Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metal Contaminated Soils Surrounding Coal Mines in Arid Regions

LIN Zhanwei^{1, 2, 3}, QIAO Qingqing^{1, 2, 3†}, LI Gangqiang^{1, 2, 3}, WANG Dong^{1, 2, 3}, CHEN Yudong^{1, 2, 3}, GAO Zhongyin^{1, 2, 3}

*新疆维吾尔自治区自然科学基金杰出青年科学基金项目 (2024D01E34)、新疆人才发展基金项目 (XJRC-2025-KJ-PY-KJLJ-085)、国家自然科学基金项目 (42474100) 共同资助 Supported by the Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars of Xinjiang Uygur Autonomous Region, China (No. 2024D01E34), the Talent Development Fund of Xinjiang Uygur Autonomous Region, China (No. XJRC-2025-KJ-PY-KJLJ-085), and the National Natural Science Foundation of China (No. 42474100)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qiaoqq@ms.xjba.ac.cn

作者简介: 林湛伟 (2000—), 男, 广东人, 硕士研究生, 主要从事环境磁学研究。E-mail: 1275253048@qq.com

收稿日期: 2025-12-22; 收到修改稿日期: 2026-05-31; 网络首发日期 (www.cnki.net):

(1. State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Mineral Resources and Digital Geology, Urumqi 830011, China)

Abstract: 【Objective】 Soil heavy metal contamination in mining areas has become an important environmental concern, particularly in arid regions where fragile ecosystems and intensive anthropogenic activities accelerate pollutant accumulation. While environmental magnetism has emerged as a cost-effective proxy for monitoring heavy metals, conventional statistical methods, such as simple correlation analysis, often fail to decipher the complex driving directions and causal mechanisms between magnetic parameters and pollutants. This is especially severe in areas with heterogeneous emission sources. Therefore, this study aimed to characterize the spatial distribution of heavy metals (Zn, Pb, As, Ni, Cr, and Fe) and to elucidate their causal linkages with magnetic mineralogical proxies. 【Method】 This study focuses on the Qiquanhu coal-mining area in the Turpan Basin, Xinjiang, China. A total of 330 soil samples were collected from 165 sites at two depths (0–10 cm and 10–20 cm) across the study area. Magnetic susceptibility (χ), saturation isothermal remanent magnetization (SIRM), and anhysteretic remanent magnetization (ARM) were measured, alongside the calculation of grain-size-dependent ratios (χ_{ARM}/χ and $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$). The concentrations of six heavy metals were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP–MS). To quantitatively apportion pollution sources, the absolute principal component scores–multiple linear regression (APCS–MLR) receptor model was employed. The geographical convergent cross mapping (GCCM) method was utilized to identify the bidirectional causal relationships and driving strengths between magnetic parameters and heavy metal concentrations based, overcoming the limitations of traditional linear correlation. 【Result】 The results demonstrated that heavy metal enrichment in the study area was characterized by distinct multi-source superposition. The concentrations of Pb, Zn, and Fe were significantly higher in proximity to industrial facilities, showing a strong coupling with magnetic concentration-dependent parameters (χ , SIRM, and χ_{ARM}). This suggested that high-temperature smelting activities released coarse-grained magnetic spherules that co-precipitated with these metals. In contrast, As and Ni were primarily associated with fine-grained magnetic particles generated during coal mining and transportation, exhibiting a sensitive response to χ_{ARM}/χ and $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$. However, Cr enrichment showed localized heterogeneity, primarily linked to the accumulation of mining solid waste. The APCS–MLR model identified three primary pollution factors accounting for 86.2% of the total variance, representing industrial smelting, coal-related activities, and lithogenic/waste sources, respectively. GCCM analysis further confirmed that magnetic concentration parameters exerted a strong causal drive on Pb and Zn, while grain-size-sensitive ratios served as robust causal indicators for As and Ni, effectively reducing the risk of misinterpretation inherent in simple correlation. 【Conclusion】 This study confirms that environmental magnetic parameters can effectively fingerprint the source-specific distribution of heavy metals in arid coal-mining soils. The integration of environmental magnetism, APCS–MLR source apportionment, and GCCM causal analysis provides an advanced diagnostic framework for pollution identification. These findings offer critical scientific evidence for targeted environmental management, risk mitigation, and the development of magnetic-based monitoring protocols in complex polymetallic contaminated regions.

Key words: Environmental magnetism; Soil heavy metals; Absolute principal component scores–multiple linear regression (APCS–MLR) receptor model; Geographical convergent cross mapping (GCCM); Source apportionment

矿山开采、运输、洗选及冶炼等矿业活动，会使重金属从源区向周缘土壤持续扩散并不断累积，从而引发难以逆转的土地退化与生态风险^[1]。此外，重金属具有毒性强、难降解和生物累积性高等特征，对生态系统稳定和人类健康构成长期潜在威胁^[2]。

既有研究表明，土壤中重金属的迁移、赋存状态通常与磁性矿物密切相关，受污染土壤通常表现出显著的环境磁学特征^[3]。例如，在工业园区土壤中，磁化率 (χ) 与铜 (Cu)、锌 (Zn)、铅 (Pb)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、锰 (Mn) 和铁 (Fe) 等多种重金属呈现显著正相关关系^[4]；印度 Vembanad 湖沉积物中磁性参数与重金属含量的峰值变化与工业活动时间序列高度一致^[5]。在中国广

州农田区的研究中,土壤磁化率与 Pb、Cd、Cr 和砷(As)之间的线性关系已被用于重金属空间分布预测^[6]。此外,Salazar-Rojas 等^[7]基于树叶和道路粉尘磁性特征,利用多元线性回归(MLR)和支持向量机(SVM)成功构建了空气中重金属浓度预测模型;Moradpour 等^[8]采用随机森林(RF)进行数字土壤制图,结果显示 χ 是影响多金属预测精度的关键自变量之一。综上,环境磁学参数已被广泛用于土壤重金属污染的快速识别、评估与溯源研究中^[9]。然而,由于重金属赋存形态复杂、污染来源多样(如工业排放、农业活动和母质风化等),磁学参数与重金属含量之间在实际应用中通常并非简单线性关系^[10],而是表现出较强的非线性、不确定性和空间异质性^[11]。在此背景下,传统相关分析方法难以有效揭示二者之间的驱动方向及潜在因果机制,尤其在多源叠加显著的矿区周缘地区,该问题更为突出。

因此,准确地评估土壤磁性 with 重金属之间的潜在因果关系对于矿区土壤重金属溯源十分重要。然而,传统的因果检验(如 Granger 因果检验^[12])严格依赖时间序列的先后关系。这一前提在多数土壤污染调查中难以满足,因为相关研究通常基于一次性或少次数的空间采样数据,缺乏足够的时间维度以支撑因果方向的统计判定。尽管收敛交叉映射(CCM)在非线形系统因果推断上取得了突破,但其依然受制于对长时间序列的刚性需求。为此,Gao 等^[13]首次提出了地理收敛交叉映射模型(GCCM),该方法基于非线性动力系统理论与广义嵌入定理,创新性地利用空间滞后(Spatial lags)替代时间延迟来重构系统的状态空间。GCCM 不仅能够有效滤除空间共现中的“镜像效应”(Mirroring effect),还能在变量间表现线性相关性不显著时,识别出复杂的非线性因果驱动关系及其非对称主导方向。

基于此,本研究以中国新疆吐鲁番盆地七泉湖镇某露天煤矿周缘土壤为研究对象,系统测试了磁化率(χ)、饱和等温剩磁(SIRM)、非磁滞剩磁(χ_{ARM})等环境磁学参数及 Zn、Pb、As、Ni、Cr 等重金属含量,以分析其空间分布特征和污染水平。进一步采用已在城镇、农田、工业区表土、道路尘埃及沉积物研究中广泛验证的绝对主成分得分-多元线性回归模型(APCS-MLR)进行污染源解析^[14]。并引入地理收敛交叉映射模型(GCCM),以识别重金属污染与磁学参数之间的潜在因果驱动关系。本研究通过融合磁学特征、重金属信息与空间分析手段,构建“源解析-因果判定-治理建议”的综合技术路径,旨在以低成本、可复用的方法锁定关键驱动因子及其作用方向,为露天煤矿周缘土壤污染监测、风险评估与治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆维吾尔自治区吐鲁番市高昌区七泉湖镇(图 1),地理坐标为 43°07'N—43°12'N, 89°23'E—89°31'E。该区地处天山山脉东段、博格达山南麓,整体呈半封闭盆地地貌,北、西、南三面环山,东向开口。区域气候干旱炎热,夏季极端最高气温可达 42℃,年均气温约 14℃,年降水稀少^[15]。研究区内的主要工业活动以煤矿开采和金属冶炼为主。区内含煤地层主要为中侏罗统西山窑组和下侏罗统八道湾组,共赋存可采煤层 8 层,平均总厚度约 39.42 m^[16]。此外,该区昼夜温差较大,葡萄种植是当地具有代表性的农业支柱产业,农业活动与矿业开发在空间上高度叠加,使研究区成为典型的矿-农复合影响区。

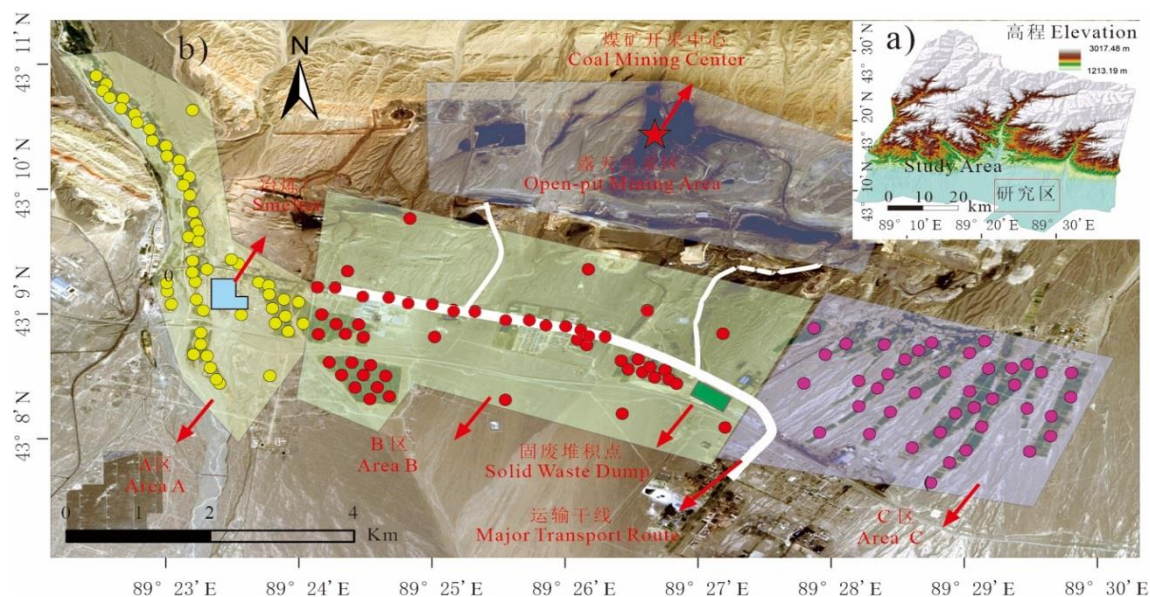


图1 研究区区位与采样布局 (a. 研究区高程图; b. 研究区(七泉湖)采样点示意图)

Fig. 1 Location of the study area and sampling layout (a. 3D topographic view of the study area; b. Schematic diagram of sampling points in the study area (Qiquanhu))

1.2 样品采集

本研究在吐鲁番市七泉湖镇设置了 A、B、C 三个区域 (图 1b)。其中, A 区为近工业区, 主要紧邻镇内的金属冶炼厂及相关设施, 受高温冶炼排放影响较大; B 区为居民区, 其地理位置相对更靠近北侧的露天煤矿开采区及煤炭运输主干道; C 区为葡萄耕作区, 距离上述核心工业点源位点相对较远; B、C 区交界处存在一矿业固体废物的堆积点。使用地质罗盘和手持 GPS 测定各采样点的坡度和位置坐标。在去除地表植物残留物后, 每个采样点分别采集 0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层的土壤样品。共设置 165 个采样点, 采集土壤样品 330 份。所有样品密封后运送至实验室, 自然风干, 去除动植物残留物及大块砾石等杂质。风干后的样品经 40 目筛筛分后, 装入 2 cm × 2 cm × 2 cm 的无磁立方样品盒中, 用于环境磁学指标测试; 另取经 100 目筛筛分后的样品, 用于地球化学参数分析。

1.3 实验室测量

χ 可反映铁磁性矿物的总体浓度, 并受到顺磁性和反磁性矿物的影响^[17]。煤矸、燃烧、降尘等产物输入通常会使得 χ 增大^[18]。 χ_{ARM} 对样品中铁磁性矿物的浓度和颗粒均较敏感, 尤其是对细颗粒单畴 (SD) 磁性矿物更为敏感, SIRM 可作为样品中磁性矿物浓度的粗略度量。硬剩磁 (HIRM) 通常用于估算高矫顽力矿物的浓度^[18-19]。

所有环境磁学参数测试均在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。采用多频率磁化率仪 (MFK1-KA, 卡帕桥, AGICO 公司, 捷克) 在频率为 976 Hz 下测定低频磁化率 χ 。使用交变退磁仪 (D-2000, ASC Scientific 公司, 美国) 在 100 mT 峰值交变场和 0.05 mT 直流场下待交变磁场由峰值缓慢衰减至零后撤除直流场, 再使用旋转磁力仪 (JR6-A, AGICO 公司, 捷克) 进行测量非磁滞剩磁 (ARM), 结果以 χ_{ARM} 表示。利用脉冲磁化仪 (DPM1, 优赛寰宇科技有限公司, 北京) 在 1 000 mT 场强获得的等温剩磁作为饱和等温剩磁 (SIRM), 随后施加 300 mT 的反向磁场, 获得 -300 mT 下的等温剩磁 ($\text{IRM}_{-300\text{mT}}$)。基于上述磁学参数, 计算得到 χ_{ARM}/χ , $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$, SIRM/χ 等比值参数, 并进一步用 SIRM 与 $\text{IRM}_{-300\text{mT}}$ 的比值计算 S-ratio 和硬剩磁 (HIRM)。

地球化学参数测试在干旱区生态安全与可持续发展国家重点实验室完成, 土壤重金属 (Cr、Ni、As、Zn、Pb 和 Fe) 含量采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS, 8800, Agilent 公司, 美国) 进行测定; 土壤样品自然风干, 去除杂物后研磨并过 100 目尼龙筛备用。称取约 0.100 0 g 土样于聚四

氟乙烯消解罐中, 加入 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 混合酸体系, 置于密闭微波消解仪中进行程序升温消解。待消解液近干后冷却, 用超纯水定容至 50 mL, 摇匀后待测。

在前期预分析阶段, 本研究对包括 Cd 在内的常见重金属元素进行了初步相关性检验。结果显示, Cd 与主要环境磁学参数 (χ 、SIRM、 χ_{ARM} 及其比值参数) 之间未表现出显著相关关系 ($P > 0.05$), 其皮尔逊 (Pearson) 相关系数整体较低且不具统计显著性。同时, Cd 含量接近区域背景值, 空间变异系数较小, 难以形成稳定的驱动信号。因此, 为保证因果分析结果的可靠性, 本研究未将 Cd 纳入后续 APCS-MLR 与 GCCM 分析体系。

1.4 数据分析

采用 SPSS Statistics 23 对土壤样品各指标进行 Pearson 相关性分析, 使用 Origin 2021 绘制基础图表。在 ArcGIS 10.8 中使用自然邻域插值法分析研究区土壤重金属和磁学参数的空间特征。APCS-MLR 重金属源解析在 Python 3.12.4 环境下实现。具体分析流程为: 以元素矩阵 (Ni、As、Pb、Zn、Cr、Fe) 为输入, 联合磁学参数 (χ 、 χ_{ARM} 、SIRM、HIRM、 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$) 以及与冶炼厂的距离在同一空间网格配准, 并进行标准化处理, 输出元素—因子绝对贡献与百分比贡献, 并获得拟合优度 (R^2 、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)); 采用绝对值后求均值 (abs_mean) 计算贡献率, 对回归系数与绝对主成分得分乘积的绝对值 ($|\beta \cdot \text{APCS}|$) 进行跨样本平均, 并归一化为 0~100%, 据此得到元素在各因子上的贡献百分比, 并计算 APCS 因子分数与外部变量的 Pearson 相关系数。

依据 APCS-MLR 模型划分出的因子与磁学以及距离变量相关性, 在 R (4.1.3) 中使用 GCCM 模型对土壤磁学参数 χ 、 χ_{ARM} 、SIRM、HIRM 及比粒径指标 (χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$) 与六种重金属元素 (As、Ni、Pb、Zn、Fe、Cr) 进行因果关系分析。GCCM 是一种基于动力系统理论和广义嵌入理论的空间因果推断模型, 旨在从空间横截面数据中识别变量之间的因果关系。该模型能够在无时间变化的空间横截面数据中通过空间变化来推断因果关系, 特别适用于地球系统科学中复杂的非线性系统^[20-21]。

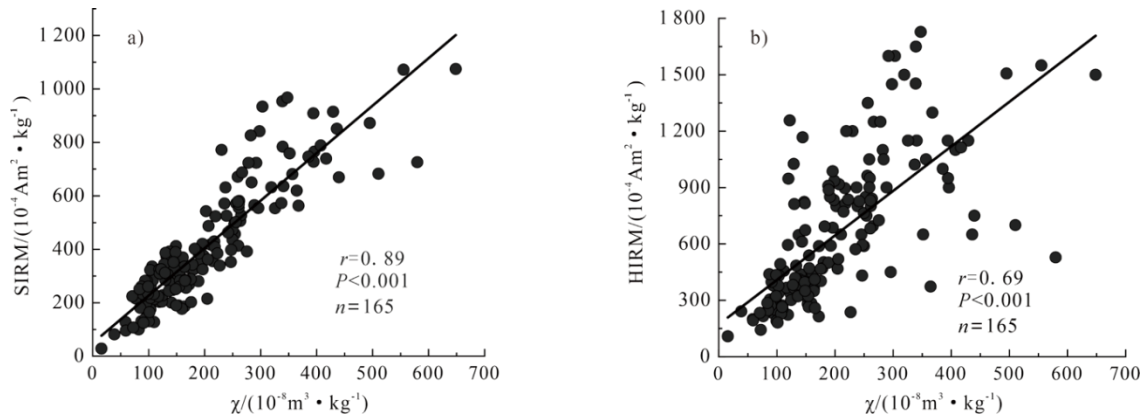
为确保 GCCM 在本研究中的适用性, 需满足以下理论前提: 首先, 各变量需处于同一耦合动力系统中, 即重金属浓度与磁学参数应共同响应于相同的环境驱动过程; 其次, 系统应具有确定性动力结构, 而非完全随机噪声主导; 此外, 样本数量应足以支持状态空间重构。本研究区内磁学参数与重金属在空间上表现出显著协同变化特征, 样本数量 ($n = 165$) 亦满足状态空间重构所需的数据规模要求。因此, 在上述条件下, GCCM 方法适用于识别研究区磁学参数与重金属之间的潜在因果关系。

为确定嵌入维数 (E) 的合理取值, 参考 Gao 等^[13]提出的空间嵌入原则, 并结合预测技能 (ρ) 在不同 E 条件下的变化趋势进行预实验比较, 结果表明, 当 $E = 3$ 时交叉映射技能达到稳定且无明显提升, 因此, 选取 $E = 3$ 作为本研究的嵌入维数。该取值亦与多数空间 GCCM 应用研究保持一致。库长度 (L) 由 0 逐步递增至 120, 用于检验交叉映射技能随样本规模增加的收敛性特征。考虑到本研究样本总数为 165, 为避免边界效应及邻域重叠过强的影响, 未采用全部样本作为最大库长度。当 $\rho(L)$ 曲线趋于稳定时, 判定变量间存在因果耦合关系。绘制 $\rho(L)$ 收敛曲线, 并以相位打乱与地理置换获得显著性与方向不对称性的置信依据。具体方向判据为: 在显著条件下, 较高且更早收敛的一方判为主导驱动; 仅一条方向显著则为单向因果, 两条方向同时显著则判为双向耦合, 不显著则视为无因果。GCCM 模型分析结果与 APCS-MLR 的来源贡献矩阵对照, 用以校准与加固分源结论。

2 结果

2.1 磁学参数特征

研究区磁学指标总体表现为低矫顽力组分占优的特征。全区 S-ratio(%)均高于 90%， χ 与 SIRM 呈良好线性关系 ($r=0.89^{***}$, $P<0.001$) (图 2a)，指示剩磁主要由软磁相贡献，主要磁性矿物是亚铁磁性矿物。HIRM 与 χ 的皮尔逊相关系数为 0.69^{***} ($P<0.001$) (图 2b)，表明样品中高矫顽力矿物占有一定的比例。

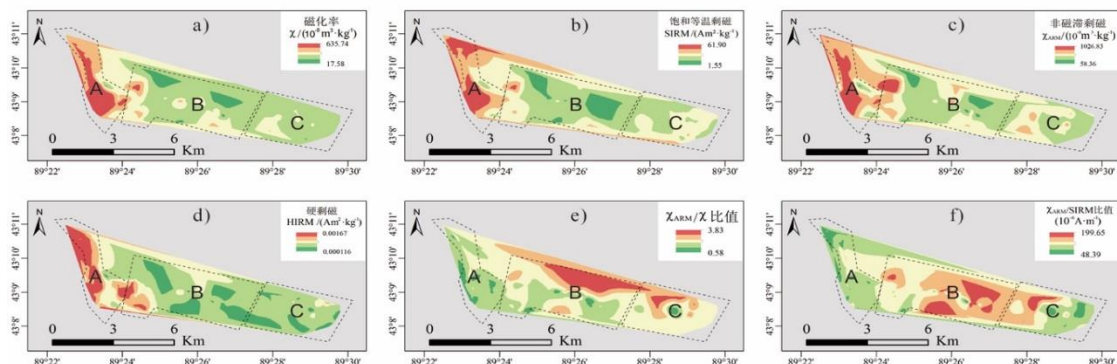


注: r 为相关系数, P 为显著性水平, n 为样本数。下同。Note: r , correlation coefficient; P , significance level; n , sample number. The same below.

图 2 磁化率 (χ) 与饱和等温剩磁 (SIRM) 相关性散点图(a)及 χ 与硬剩磁 (HIRM) 相关性散点图(b)

Fig. 2 Scatter plot of magnetic susceptibility (χ) versus saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) (a) and scatter plot of χ versus hard isothermal remanent magnetization (HIRM) (b)

空间格局上, 磁性矿物浓度指标 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 在研究区 A 区均表现为高值 (图 3a~图 3c), 反映出磁性矿物总体浓度在该区域较高, 接着向 B 区和 C 区逐渐过渡为中—低值区, 载磁矿物浓度逐步降低。HIRM 的高值分布与 χ 、SIRM 的高值分布也具有一定的空间相似性 (图 3d), 表明高矫顽力磁性矿物在该区的浓度较高。对粒径敏感的比值参数 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 χ_{ARM}/χ 在 B 区内以及与 C 区过渡带形成另一高值带, 并且高值空间分布也存在一定的相似性 (图 3e~图 3f), 表明这些高值区富集的磁性矿物粒径较细。此外, $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 χ_{ARM}/χ 的高值与 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 的高值在空间存在较大差异, 说明磁性矿物总量的升高与较粗的亚铁磁性颗粒密切相关。



注: A 区为近工业区, B 区为居民区, C 区为耕作区。下同。Note: A represents the industrial area, B represents the residential area, and C represents the cultivated area. The same below.

图 3 χ (a)、SIRM (b)、非磁滞剩磁 (χ_{ARM} , c)、HIRM (d)、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 比值 ($\chi_{ARM}/SIRM$, e)、 χ_{ARM}/χ 比值

2.2 土壤重金属含量特征

研究区土壤中六种重金属元素的统计特征见表 1，其平均含量表现为： $Fe > Cr > Zn > Ni > Pb > As$ 。各元素含量范围差异明显，这不仅反映了其空间分布的离散程度，也暗示了潜在污染来源的差异性。其中，Fe 含量为 $25.40 \sim 63.10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $40.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，高于新疆地区土壤背景值 ($30.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，约为背景值的 1.34 倍^[22]，变异系数 (CV) 为 17.7%，整体离散程度较小。Zn 含量介于 $51.30 \sim 305.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $96.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，明显高于背景值 $68.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，约为背景值的 1.42 倍，CV 为 33.2%；Pb 含量为 $10.70 \sim 53.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均 $21.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，高于背景值 $15.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，约为背景值的 1.34 倍，CV 为 28.8%。As 和 Ni 的数值区间相对集中，其中 As 含量为 $6.90 \sim 33.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $15.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，高于背景值 $9.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，约为背景值的 1.58 倍，CV 为 16.9%；Ni 含量为 $10.40 \sim 49.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，平均值为 $29.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，略高于背景值 $21.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，约为背景值的 1.37 倍，CV 为 16.2%。就含量特征而言，研究区土壤中 Zn、Pb、As、Ni 和 Cr 的平均含量均高于新疆土壤背景值，其中 Cr 的富集程度最为显著，表现出明显的局部异常特征。

就空间分布特征 (图 4) 而言，Fe 在研究区内呈现以中等强度背景为主的面状分布 (图 4a)，局部高值区与 Pb、Zn 的高值区域在空间上具有一定一致性 (图 4a~图 4c)。Zn 与 Pb 的空间分布特征较为相似，二者在 A 区内浓度明显较高，在 B 区和 C 区相对较低 (图 4b~图 4c)，表现出显著的分带差异。As 与 Ni 在三个子区内分布较为均衡，其高值区主要集中于 B 区 (图 4d~图 4e)，整体空间梯度相对平缓。

Cr 的空间分布特征与其他元素明显不同 (图 4f)。其极大值远高于平均水平，表现为局部极高异常区与广泛中低背景区并存的格局。Cr 的高值区仅局限分布于 C 区局部区域，空间集中程度明显高于其他重金属元素。

总体而言，研究区重金属元素在空间上表现出显著分带差异：A 区以 Zn、Pb 富集为特征，B 区以 As、Ni 相对高值为主，而 Cr 的异常高值则出现在 B、C 区的交界处。这些不同重金属元素在含量与空间分布格局上所呈现出的差异特征，充分表明研究区内土壤重金属污染存在显著的多源叠加效应，为后续甄别具体污染源及其因果驱动机制奠定了基础。

表 1 研究区土壤重金属元素统计特征

Table 1 Geochemical element characteristics

元素 Element	Fe/(g·kg ⁻¹)	Zn/(mg·kg ⁻¹)	Pb/(mg·kg ⁻¹)	As/(mg·kg ⁻¹)	Ni/(mg·kg ⁻¹)	Cr/(mg·kg ⁻¹)
最小值 Minimum	25.40	51.30	10.70	6.90	10.40	37.10
最大值 Maximum	63.10	305.00	53.80	33.00	49.60	1630.00
平均值 Mean	40.20	96.70	21.10	15.10	29.30	279.90
背景值 Background value ¹⁾	30.03	68.27	15.76	9.56	21.42	50.97
标准差 Standard deviation	7.10	32.10	6.10	2.50	4.80	264.30
变异系数 CV/ %	17.7	33.2	28.8	16.9	16.2	94.4

注：¹⁾ 背景值引自《中国土壤元素背景值》(中国环境监测总站, 1990)^[22]中新疆土壤背景值。Note: ¹⁾ The background values were obtained from the Xinjiang soil background values documented in *Background Values of Soil Elements in China* (China National Environmental Monitoring Centre, 1990)^[22].

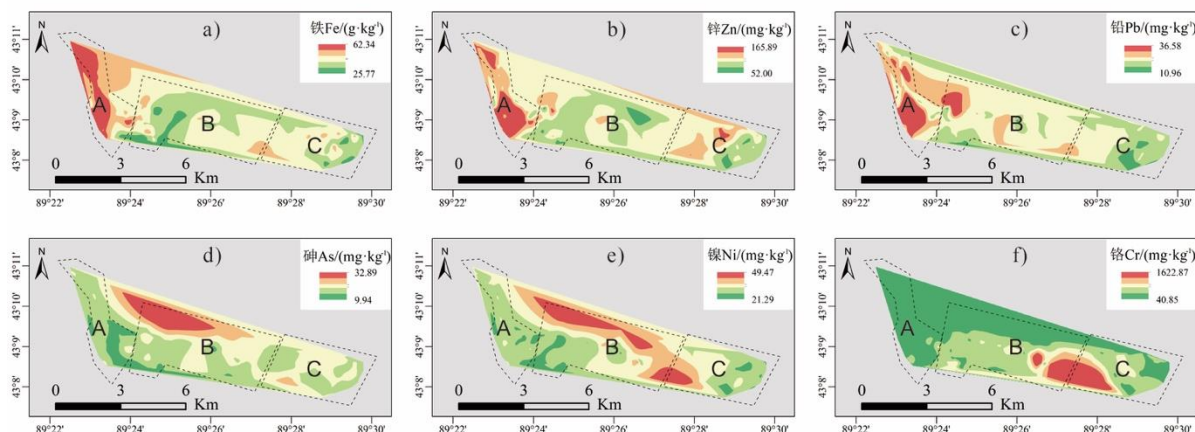


图4 铁 (a)、锌 (b)、铅 (c)、砷 (d)、镍 (e)、铬 (f) 的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of Fe (a), Zn (b), Pb(c), As (d), Ni (e), and Cr (f)

2.3 APCS 受体模型分析

在 APCS 分析中, 采用主成分分析最大方差旋转 (PCA Varimax) 提取到 3 个影响因素分量 F1、F2 和 F3, 其方差解释率分别为 F1=42.7%、F2=29.1%、F3=14.4%, 累计 86.2% (图 5a)。各元素在三个分量上的分配呈现出清晰的分化特征 (图 5b): Pb 与 Zn 主要负载于 F1, 贡献率分别为 83.8% 和 86.1%; Ni 与 As 主要负载于 F2, 分别占 73.4% 和 86.4%; Cr 几乎完全集中于 F3, 占比达 95.1%。Fe 在各分量中均有分布, 其中 F1 占 61.8%, F2 占 20.5%, F3 占 17.6%。旋转载荷显示 (图 5c), F1 在 Pb (0.60)、Zn (0.62) 与 Fe (0.49) 上载荷较高; F2 在 As (0.78) 与 Ni (0.60) 上载荷较高; F3 由 Cr (0.91) 主导。各元素拟合度较高, R^2 介于 0.75~0.92 (Ni: 0.86、As: 0.87、Pb: 0.82、Zn: 0.80、Cr: 0.92、Fe: 0.75), 说明三因子能够较好表征元素间的共同变异结构 (表 2)。为刻画分量与外部指标之间的客观联系, 计算了 Pearson 相关系数。Pearson 相关分析结果如图 5d 所示, F1 与磁性矿物浓度指标呈显著正相关 (χ : 0.79, SIRM: 0.67, χ_{ARM} : 0.70, HIRM: 0.51), 且与冶炼厂距离呈负相关 (-0.49)。F2 与粒度敏感比值呈正相关 (χ_{ARM}/χ : 0.35, $\chi_{ARM}/SIRM$: 0.25)。

为进一步识别磁学参数与重金属之间的潜在因果驱动方向及其空间差异, 在 APCS-MLR 源解析结果的基础上引入地理收敛交叉映射 (GCCM) 模型。将各子区内的磁学指标与地球化学元素视为沿空间梯度演化的耦合变量, 通过分析不同库长条件下交叉映射技能 (ρ) 的变化, 检验“磁学→重金属”与“重金属→磁学”的预测能力, 从而在非线性和多源叠加背景下, 对磁学参数与重金属元素之间的作用方向进行约束。

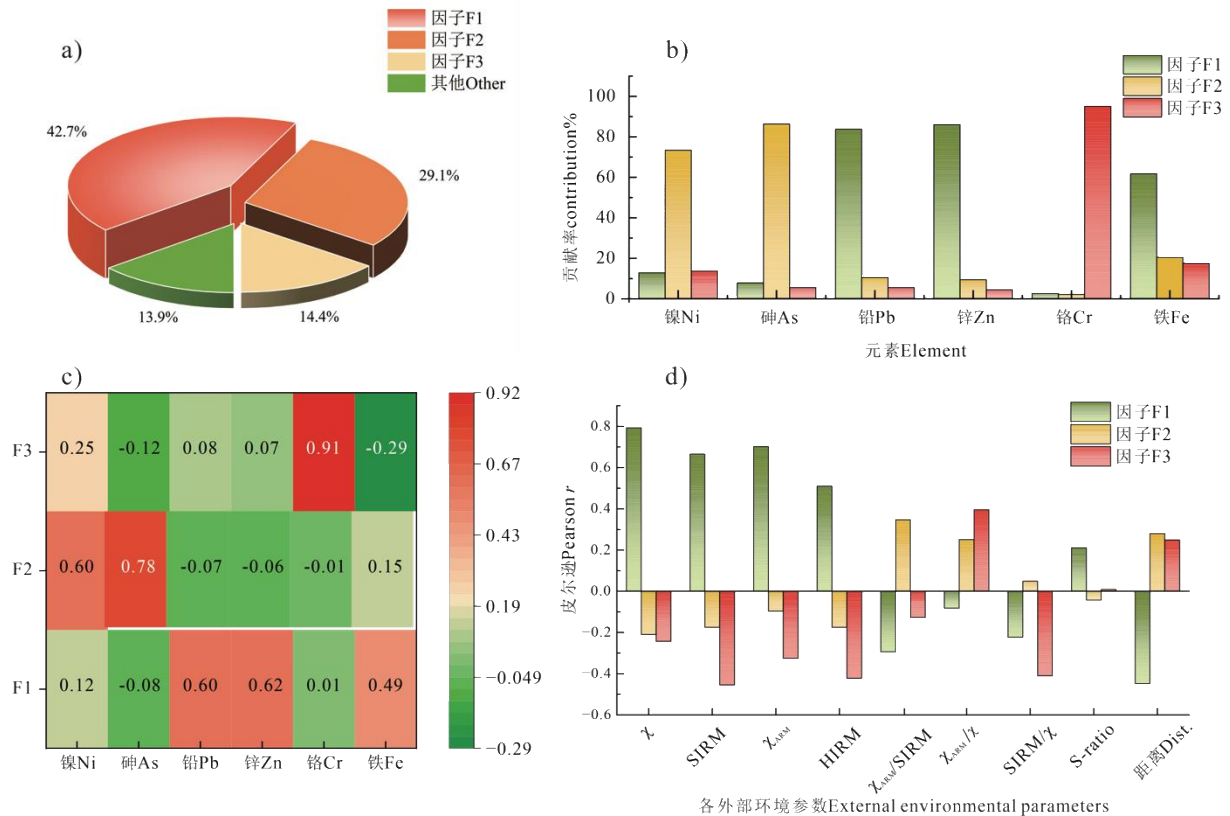


图 5 绝对主成分得分 (APCS) 因子解析结果 (a. 因子解释率占比; b. 各元素在不同因子上的贡献率; c. 旋转因子载荷矩阵; d. 因子与各外部环境参数相关性)

Fig. 5 Results of absolute principal component scores (APCS) factor analysis (a. Percentage of factor explained variance; b. Source attribution of each element; c. Rotation factor load matrix; and d. Correlation between factors and external environmental parameters)

表 2 APCS-MLR 模型的拟合精度评价指标

Table 2 Evaluation metrics for the fitting accuracy of the APCS-MLR model

元素 Element	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE	平均绝对误差 MAE
Ni	0.86	1.74	1.34
As	0.87	0.88	0.65
Pb	0.82	2.55	1.59
Zn	0.80	14.25	8.20
Cr	0.92	70.74	53.75
Fe	0.75	3.59	2.51

2.4 GCCM 因果关系

在进行因果推断前,本研究首先对典型环境磁学参数与土壤重金属含量的表观相关性进行了评估。结果(图6)显示,Pb、Zn和Fe与 χ 均呈现显著的正相关关系($P<0.01$)(图6a~图6c)。同时,As和Ni与粒径敏感比值 $\chi_{ARM}/SIRM$ 存在显著的正相关性(图6d~图6e),Cr与 $\chi_{ARM}/SIRM$ 之间亦表现出显著的相关性(图6f)。这种表观上的强相关性虽然指示了重金属与磁学参数在空间分布上的高度协同,但难以直接证明其背后的物理驱动机制与因果方向。

鉴于Pb、Zn和Fe主要与磁性矿物含量指标(χ 、SIRM、 χ_{ARM})呈协同变化特征,As和Ni分别与粒径敏感比值 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 在空间上呈现紧密的对应关系,同时,Ni与Cr在空间分布上表现出一定的一致性(图4e~图4f),因此,在GCCM分析中分别构建了Pb、Zn、Fe与磁性矿物含量指标,以及As、Ni、Cr与粒径敏感比值的变量组合,以聚焦于具有明确物理指向和空间耦合基础的因果关系检验。

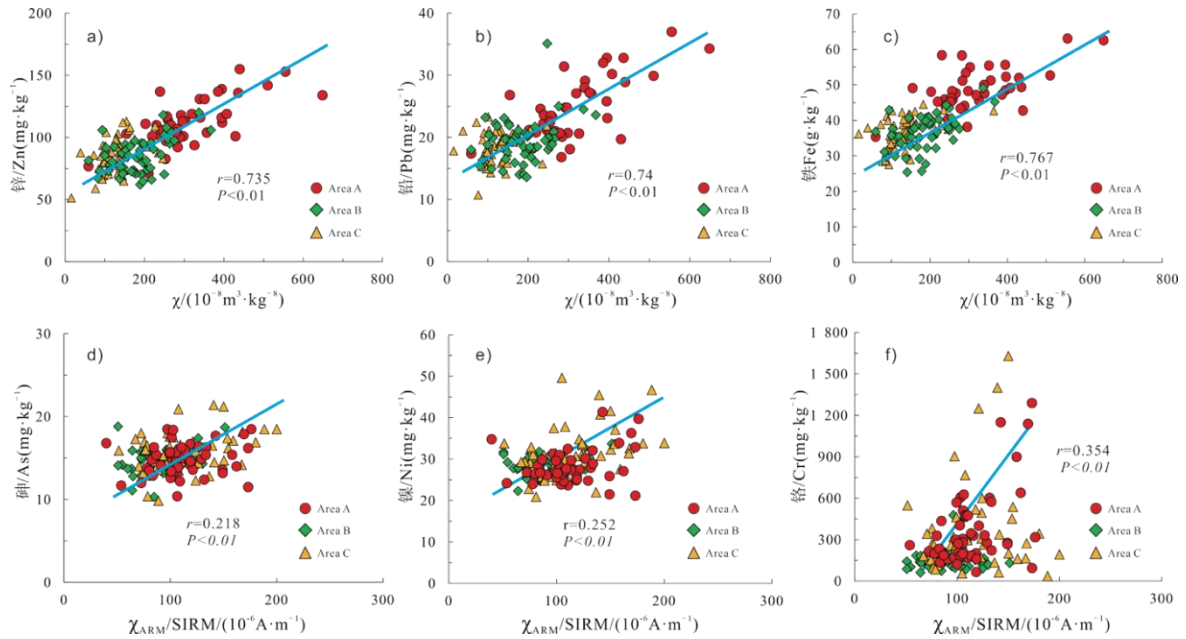


图 6 磁学参数与重金属相关性 (a~c 为 χ 与 Zn、Pb、Fe 含量的相关散点图, d~f 为 $\chi_{ARM}/SIRM$ 与 As、Ni、Cr 含量的相关散点图)

Fig. 6 Correlations between magnetic parameters and heavy metals (a~c show correlation scatter plots of χ with Zn, Pb, and Fe concentrations, and d~f show correlation scatter plots of $\chi_{ARM}/SIRM$ with As, Ni, and Cr concentrations)

结果表明, 不同重金属元素与磁学参数之间的因果强度及其方向性整体上存在显著差异。随着库长 L 的增长, Zn 和 Fe 与磁性矿物含量指标 (χ 、 $SIRM$ 、 χ_{ARM}) 之间均表现出可辨识的双向因果 ($\rho_{\chi-Zn}=0.6$, $\rho_{SIRM-Zn}=0.5$, $\rho_{\chi_{ARM}-Zn}=0.5$; $\rho_{\chi-Fe}=0.6$, $\rho_{SIRM-Fe}=0.5$, $\rho_{\chi_{ARM}-Fe}=0.5$) (图 7a~图 7f), 表明 Zn、Fe 与磁性矿物含量在空间上具有同步演化特征。相比之下, Pb 与磁性矿物含量指标之间的因果强度相对较弱 ($\rho_{\chi-Pb}=0.45$, $\rho_{SIRM-Pb}=0.2$, $\rho_{\chi_{ARM}-Pb}=0.3$) (图 7g~图 7i), 但仍呈现与 χ 、 $SIRM$ 、 χ_{ARM} 同步上升的变化趋势, 指示 Pb 与磁性矿物含量之间亦存在双向因果关联, 空间分布上表现为协同演化。

在 As 和 Ni 的 GCCM 分析中, 两者与粒径敏感比值 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 均表现出较强的双向因果关系 ($\rho_{\chi_{ARM}/SIRM-As}=0.5$, $\rho_{\chi_{ARM}/\chi-As}=0.6$, $\rho_{\chi_{ARM}/\chi-Ni}=0.5$, $\rho_{\chi_{ARM}/SIRM-Ni}=0.7$) (图 8a~图 8d), 表明 As 和 Ni 与细颗粒组分之间存在相互因果关系。Cr 与 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的 GCCM 曲线同样随 L 单调上升并趋于收敛 (图 8e~图 8f), 揭示二者之间也存在双向因果联系, 说明 Cr 浓度与粒径敏感比值处于同一动态系统中并相互影响, 该特征在前述相关分析中未被识别。相比之下, Fe 在与 χ_{ARM}/χ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的 GCCM 分析中仅表现出单向受其影响的特征 (图 8g~图 8h)。

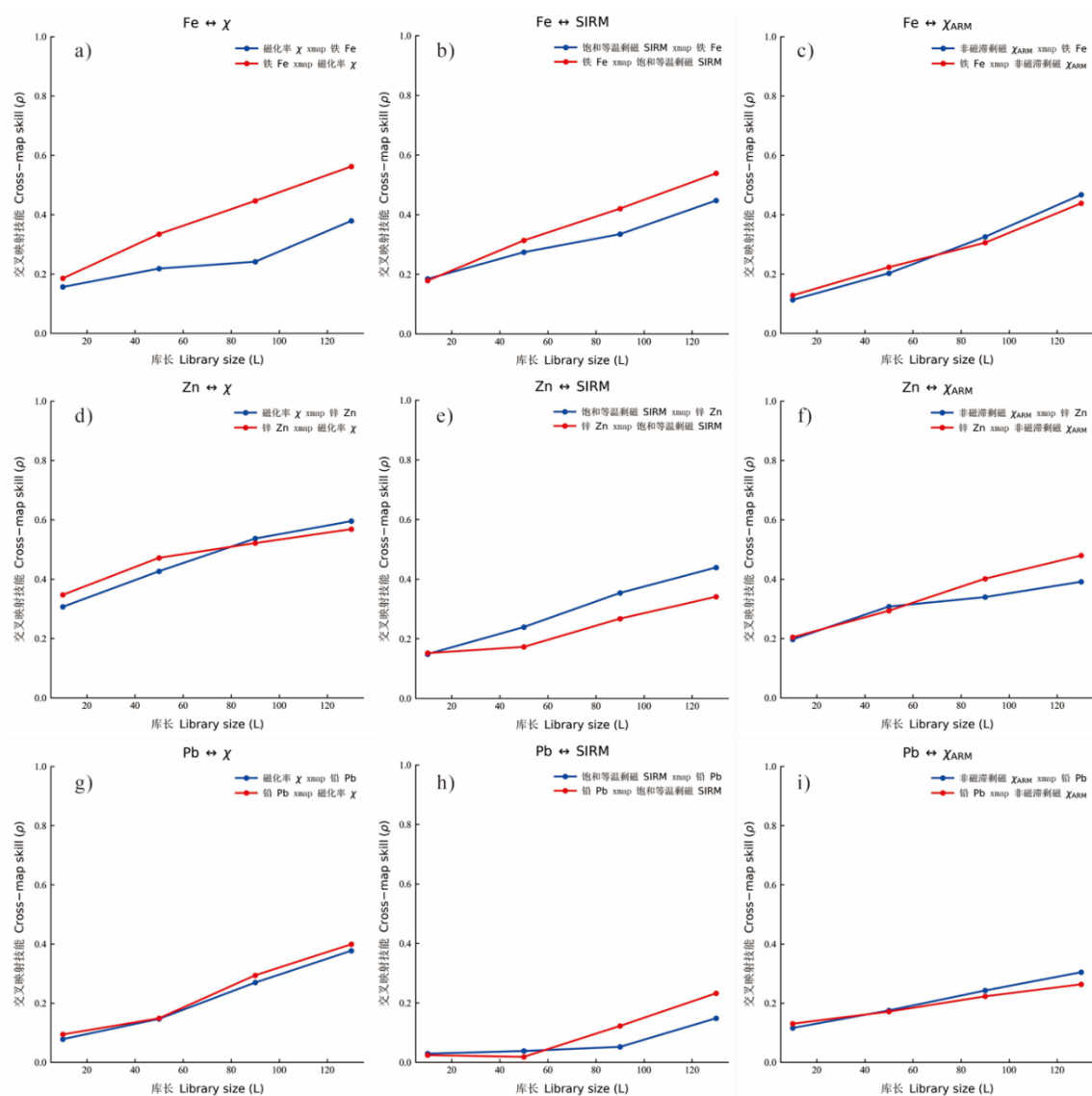


图 7 Fe (a~c)、Zn (d~f)、Pb (g~i) 与 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 的地理收敛交叉映射 (GCCM) 分析结果
Fig. 7 The geographical convergent cross mapping (GCCM) analysis results of Fe (a-c), Zn (d-f), Pb (g-i), and χ , SIRM, χ_{ARM}

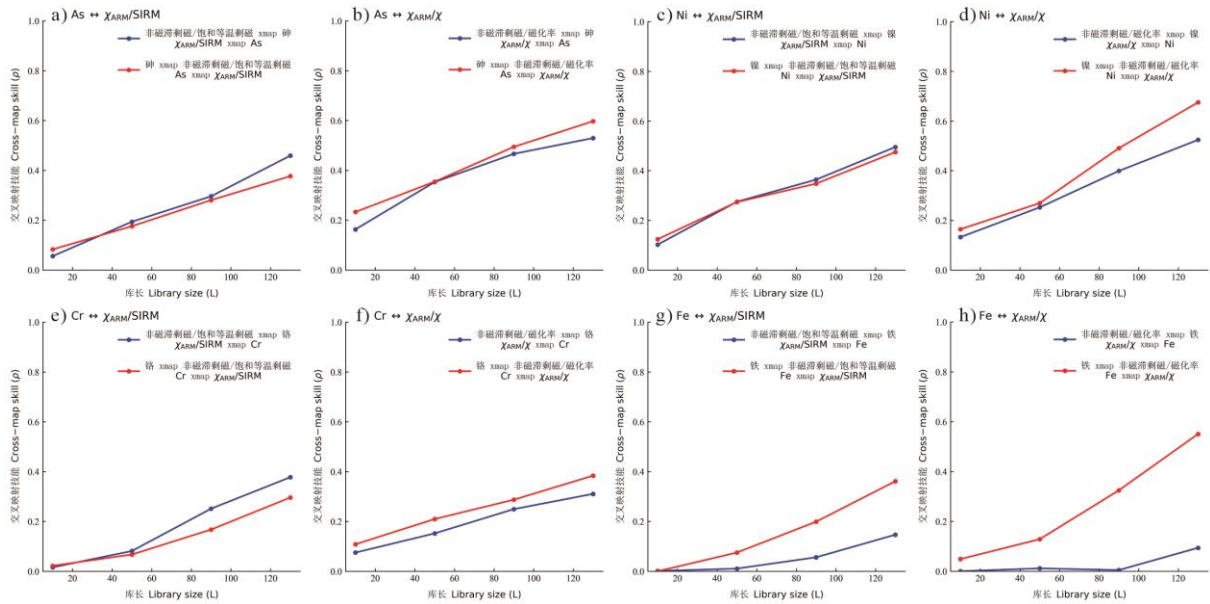


图 8 As (a~b)、Ni (c~d)、Cr (e~f)、Fe (g~h) 与 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 、 χ_{ARM}/χ 的 GCCM 分析结果

Fig. 8 The GCCM analysis results of As (a-b), Ni (c-d), Cr (e-f), Fe (g-h) and $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$, χ_{ARM}/χ

3 讨论

3.1 重金属来源

前人研究表明,在工业区土壤中,磁性参数与多种重金属元素之间通常表现出显著相关性^[23]。例如,工业区表土磁化率与 Zn、Mn、Pb 和 Cd 含量呈极显著正相关($P<0.01$),与 Cu 和 Fe 含量呈显著正相关($P<0.05$)^[24],表明磁学参数在工业区土壤中对重金属污染具有良好的指示作用。相比之下,农业区土壤中磁学参数与重金属的相关性相对较弱,这可能与农业区受工业和交通污染影响较小有关,同时农业耕作过程对磁性颗粒具有一定的“稀释”效应^[25],从而降低了磁学参数与重金属之间的关联程度。在上海市某居民街区土壤中,磁学参数与重金属的相关性也表现出明显差异:表土磁化率仅与 Mn 呈极显著正相关($P<0.01$)^[26],与 Cu 呈显著相关($P<0.05$),而与多数其他重金属元素无显著相关性,这可能与居民区土壤中重金属来源多样、非磁性成分占比较高有关^[27]。

在本研究中,F1 因子主要由 Pb (83.8%) 和 Zn (86.1%) 贡献,并承载了 Fe 变异的主要部分 (61.8%) (图 5b)。在空间格局上,Pb 和 Zn 的高值区集中于 A 区 (近工业区),并向外围逐渐衰减,该分布模式与 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 等磁性矿物浓度指标的高值区高度一致 (图 3a~图 3c,图 4b~图 4c),且 Pb、Zn 和 Fe 与 χ 均呈极显著正相关 (图 6a~图 6c)。APCS 分析结果 (图 5d) 显示,F1 与磁性矿物浓度敏感指标 (χ 、SIRM 等) 存在极显著的正相关关系,而与距冶炼厂距离呈显著负相关 ($r=-0.448$),表明 F1 所代表的元素富集与近源、产生富铁磁性颗粒的人为活动密切相关。研究区内存在金属冶炼企业,在高温冶炼过程中会释放大量含 Pb、Zn 等元素的烟尘颗粒,同时伴随生成富铁磁性氧化物颗粒。这些颗粒在大气输送后通过干湿沉降进入周围土壤系统^[28]。进一步的 GCCM 分析表明,Fe、Zn 和 Pb 与 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 之间均存在稳定的双向因果关系 (图 7a~图 7i),从因果意义上支撑了磁学指标可用于识别和预测 Pb、Zn 和 Fe 元素含量的结论。Pb 和 Zn 作为典型的工业活动示踪元素,其高强度、近源富集特征及与磁学参数的强耦合关系,共同指示了冶炼排放的主导影响。因此,F1 可确定为近源高温冶炼过程排放的重金属 (如 Pb、Zn) 污染因子。

F2 主要由 As 和 Ni 主导,且与粒径敏感比值 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 存在显著相关性 (图 6d~图 6e)。GCCM 分析进一步证实,As 和 Ni 与这些细粒敏感指标之间存在稳定的双向因果关系 (图 8a~图 8d),

表明二者主要通过细粒磁性载体与磁学参数发生耦合,这类细粒载体通常来源于煤矿扬尘、燃烧排放等人类活动过程^[29],因此,F2可归因于以细粒磁性颗粒输入为特征的煤矿活动影响。

F3因子几乎完全由Cr主导(贡献率达95.1%)(图5b)。Cr在研究区内的空间分布呈现明显的空间异质性,其高值异常区主要集中于B、C区交界处。考虑到Cr在地壳中多以原生矿物形式存在,其分布受控于研究区特定的母质背景,但局部显著的Cr高值与区域背景值的偏差,暗示了存在额外的人为输入^[30]。针对此区域重金属的复合特征,Cr与 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 之间表现出的显著正相关性(图6f)尤为关键。 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 是表征磁性颗粒粒径的敏感指标,数值升高通常指示细颗粒组分的增加。该相关性表明,Cr倾向于通过吸附或共沉淀作用富集在这些比表面积较大的细颗粒组分中,这可能是该元素在干旱区土壤中迁移转化的重要地球化学机制。此外,C区Ni含量的同步偏高进一步印证了人类活动的叠加效应。若考虑到该区域作为矿区周边可能存在的交通运输及固废堆积等工业活动,F3因子可能代表了“母质背景-局地工业-固废点源”三者共同作用下的复合污染因子。后续研究应结合土壤剖面分析,进一步剥离自然源与人为源对Cr富集的贡献差异,以验证该复合污染因子的溯源结论。

3.2 环境磁学参数在重金属溯源中的因果机制界定

传统的环境磁学方法已被广泛应用于土壤重金属污染的快速识别与溯源,其核心基于磁学参数与重金属含量的统计相关性^[31]。然而,简单相关性分析难以揭示变量间的驱动方向和因果机制,尤其是在矿区周缘存在复杂多源输入的情况下^[32]。本研究结合APCS-MLR源解析与地理收敛交叉映射(GCCM)模型,将磁学参数从传统的“指示剂”拓展为能够界定“因果驱动机制”的载体,为污染溯源提供新的方法途径。APCS-MLR模型识别的F1因子(Pb、Zn、Fe主导)与 χ 、SIRM、 χ_{ARM} 等磁性强度指标呈极显著正相关(图5d)。GCCM分析(图7)进一步证实,磁性矿物浓度指标与F1元素之间存在稳定的双向因果关系(如 χ 对Zn的反馈作用),表明高温冶炼过程排放的重金属(如Pb、Zn)与伴生的高浓度富铁磁性颗粒,通过大气干湿沉降途径共同进入土壤,在空间上构成了高度耦合的伴生污染系统^[33]。这种因果关系在机制上支持了磁学参数可作为识别和预测近源冶炼污染的有效工具。对于F2因子(As、Ni主导),APCS分析显示其与 χ_{ARM}/χ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 等粒径敏感比值密切相关(图5d)。GCCM结果表明,As、Ni与这些比值之间存在稳定的双向因果耦合(图8a~图8d),证明细粒、高矫顽力单畴(SD)磁性矿物是承载As、Ni等元素的主要载体。这与煤矿扬尘和燃烧排放产生的细微颗粒物中As、Ni易富集的现象一致^[34]。通过GCCM界定的因果关系,本研究不仅区分了近源冶炼污染载体(强度指标)与煤矿活动细粒载体(粒径指标),还从机制上揭示了磁学参数对不同类型人为污染的差异化驱动作用。这种基于因果驱动机制的识别与解析,弥补了传统相关性分析的局限性,为矿区周缘土壤重金属的环境管理与风险分区提供了科学参考。

此外,需要说明的是,GCCM所识别的因果关系本质上反映的是变量间在同一动力系统状态空间耦合特征,该因果含义并不等同于变量之间严格的物理或化学关系。因此,本研究所揭示的“磁学参数-重金属”因果关系,应理解为在矿区复合污染背景下的系统耦合响应,而不排除其他环境因素(如母质差异、风成输入等)对元素分布的共同影响。

4 结论

本研究以新疆吐鲁番盆地七泉湖镇某煤矿周缘土壤为对象,构建了环境磁学指标、APCS-MLR源解析与GCCM因果分析相耦合的技术路径,旨在定量识别重金属的来源属性及其与磁学参数间的驱动机制。研究结果显示,GCCM成功揭示了不同磁学指标对重金属富集的差异化驱动作用:磁性浓度指标(如 χ 、SIRM)与近源冶炼污染因子(F1)中的Pb和Zn存在稳定的双向因果耦合,表征了近源富Fe磁性颗粒的输入;粒径敏感比值(如 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$)则与细粒载体因子(F2)中的As

和 Ni 存在因果关联, 指示煤矿活动产生的细粒输入。基于此, 研究进一步明确了各重金属元素的来源属性: Pb 和 Zn 为典型近源人为控制元素, As 和 Ni 与细粒磁性颗粒输入密切相关; Cr 含量基线受母质背景控制, 但局部高值受到固废堆积因素影响。本研究揭示了 Pb、Zn、As、Ni 和 Cr 等元素的来源属性及其与磁学参数的驱动机制, 为矿区周缘土壤重金属的快速溯源提供了理论支撑, 同时强调在复合污染区实施分区治理, 为干旱矿区复合污染区及类似区的环境治理和风险防控提供科学依据。

参考文献 (References)

- [1] Ren L, Qi W Y, Ye H L. Spatial distribution characteristics and risk assessment of soil heavy metals from long-term mining activities: A case study of the Fengfeng mining area[J]. *Toxics*, 2025, 13(11): 969.
- [2] Hu Y H, You M, Liu G J, et al. Characteristics and potential ecological risks of heavy metal pollution in surface soil around coal-fired power plant[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(17): 566.
- [3] Fang H X, Gui H R, Li J, et al. Risks assessment associated with different sources of metals in abandoned soil of Zhuxianzhuang coal mine, Huaibei Coalfield (Anhui, China)[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 106(2): 370-376.
- [4] Liu D X, Ma J H, Sun Y L, et al. Spatial distribution of urban soil magnetic susceptibility and its implication as indicator of heavy metal pollution in Kaifeng city, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(6): 1242-1250. [刘德新, 马建华, 孙艳丽, 等. 开封市城市土壤磁化率空间分布及对重金属污染的指示意义[J]. *土壤学报*, 2014, 51(6): 1242-1250.]
- [5] Narayana A C, Ismaiel M, Priju C P. An environmental magnetic record of heavy metal pollution in Vembanad lagoon, southwest coast of India[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112344.
- [6] Ma R J, Huang Q, Gong H M, et al. Monitoring heavy metals in regional farmland by using magnetic susceptibility of soil surface layer[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(4): 198-205. [马瑞峻, 黄倩, 龚海明, 等. 利用土壤表层磁化率监测区域农田重金属[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(4): 198-205.]
- [7] Salazar-Rojas T, Cejudo-Ruiz F R, Calvo-Brenes G. Comparison between machine linear regression (MLR) and support vector machine (SVM) as model generators for heavy metal assessment captured in biomonitors and road dust[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 314: 120227.
- [8] Moradpour S, Entezari M, Ayoubi S, et al. Digital exploration of selected heavy metals using Random Forest and a set of environmental covariates at the watershed scale[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 455: 131609.
- [9] Banerjee S, Kumar A, Rana V, et al. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution in the Banaras Hindu University campus, Varanasi, India[J]. *Current Science*, 2021, 121(8): 1046-1055.
- [10] Guda A M, El Kammar A M, Abu Salem H S, et al. Integrated geochemical and magnetic potentially toxic elements assessment: A statistical solution discriminating anthropogenic and lithogenic magnetic signals in a complex area of the southeast Nile Delta[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2024, 196(3): 272.
- [11] Ye J X, Wu J, Shi T H, et al. New magnetic proxies to reveal source and bioavailability of heavy metals in contaminated soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 479: 135665.
- [12] Roebroek A, Formisano E, Goebel R. Mapping directed influence over the brain using Granger causality and fMRI[J]. *NeuroImage*, 2005, 25(1): 230-242.
- [13] Gao B B, Yang J Y, Chen Z Y, et al. Causal inference from cross-sectional earth system data with geographical convergent cross mapping[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5875.
- [14] Zhang X F, Wang L Y, Feng S H, et al. Application evaluation of APCS-MLR and PMF in source apportionment of heavy metals in farmland soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2025, 25(11): 3360-3368.
- [15] Li Y K, Yang L L, Zhao L Y, et al. Characteristics and genetic evolution process of geoheritage in Qiquan Lake, Turpan Xinjiang, China[J]. *Xinjiang Geology*, 2024, 42(4): 626-631. [李玉坤, 杨丽玲, 赵凌云, 等. 新疆吐鲁番七泉湖地质遗迹特征及成因演化[J]. *新疆地质*, 2024, 42(4): 626-631.]
- [16] Lang H L, Sun J L. Coal seam characteristics and comparative analysis of Qiquanhu Mining area of Xinjiang Tuha Coalfield[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2018, 41(6): 43-46. [郎海亮, 孙景龙. 新疆吐哈煤田七泉湖矿区煤层特征及对比分析[J]. *煤炭与化工*, 2018, 41(6): 43-46.]
- [17] Li X L, Yang Y, Yang J X, et al. Rapid diagnosis of heavy metal pollution in lake sediments based on environmental magnetism and machine learning[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 126163.
- [18] Shirzaditabar F, Heck R J. Characterization of soil magnetic susceptibility: A review of fundamental concepts, instrumentation, and applications[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2022, 102(2): 231-251.
- [19] Zhu Z M, Li Z G, Bi X Y, et al. Response of magnetic properties to heavy metal pollution in dust from three industrial cities in China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 246: 189-198.
- [20] Yang K, Zhang J T, Cui D G, et al. Multi-scale study of the synergy between human activities and climate change on urban heat islands in China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2025, 125: 106341.
- [21] Zhang W Y, Lu B, Liao L Y. Spatially explicit drivers of habitat degradation in coastal megacities based on MGWR-GCCM—evidence from Fuzhou, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 391: 126551.
- [22] China National Environmental Monitoring Center. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.[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.]
- [23] Wang G, Yang F, Wang Y Y, et al. Magnetic response and bioaccessibility of toxic metal pollution in outdoor dustfall in Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 363: 125115.
- [24] Zhao X X, Zhang J X, Ma R J, et al. Worldwide examination of magnetic responses to heavy metal pollution in agricultural soils[J]. *Agriculture*, 2024, 14(5): 702.
- [25] Yu Y, Liu Y Y, Zhao Z J, et al. An auxiliary method for evaluating soil erosion and pollution by magnetic susceptibility on black soil farmland[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2025, 236(10): 632.
- [26] Wang G, Chen Y Y, Xia D S, et al. Magnetic property of urban topsoil and its implication of heavy metal pollution in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(8): 3302-3312. [王冠, 陈裕颖, 夏敦胜, 等. 上海城市表土磁性特征对重金属污染的指示作用[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(8): 3302-3312.]

- [27] Wang X D, Hu X F, Zhang Y S, et al. Effects of the deposition of atmospheric particulate matter on the properties of urban soils: Evidence from magnetic susceptibility of road dusts[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(6): 1832-1840. [王新栋, 胡雪峰, 张延硕, 等. 大气颗粒沉降对城市土壤性状的影响: 道路灰尘的磁学证据[J]. *土壤学报*, 2023, 60(6): 1832-1840.]
- [28] Pu Y L, Tu Y R, You Z F, et al. Pb-Zn isotopic tracing technique in sediments: Review and propectives[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(3): 581-590. [蒲雅丽, 涂耀仁, 游镇烽, 等. Pb-Zn 同位素在沉积物重金属污染源解析方面的应用: 综述与展望[J]. *环境化学*, 2017, 36(3): 581-590.]
- [29] Li Y X, Zhao Z Y, Gu X, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} in autumn and winter in Yuncheng City[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2023, 15(5): 163-170, 186. [李玉霞, 赵正昱, 谷欣, 等. 运城市区秋冬季大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境监控与预警*, 2023, 15(5): 163-170, 186.]
- [30] Zhang M C, Cheng L S, Yue Z H, et al. Assessment of heavy metal(oid) pollution and related health risks in agricultural soils surrounding a coal gangue dump from an abandoned coal mine in Chongqing, Southwest China[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 18667.
- [31] Fu Y H, Guo X L, Cao R, et al. Study on environmental magnetic monitoring of heavy metal contaminated farmland soil in lead-zinc mining area[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2023, 35(3): 53-56, 70. [付云华, 郭雪莲, 曹蕊, 等. 铅锌矿区耕地重金属污染土壤环境磁学监测方法研究[J]. *环境监测管理和技术*, 2023, 35(3): 53-56, 70.]
- [32] Al-Robai S A. Ecological risk evaluation of heavy metals in soils near a water dam in Baljurashi, KSA, and their accumulation in *Dodonaea viscosa*[J]. *Sustainability*, 2023, 15(21): 15646.
- [33] Zhang B L, Liu L L, Huang Z B, et al. Source apportionment of soil heavy metal(loid)s in high geochemical background area based on the UNMIX model[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(2): 393-402. [张博伦, 刘玲玲, 黄占斌, 等. 基于 UNMIX 模型的地质高背景地区土壤重金属源解析[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(2): 393-402.]
- [34] Shen A, Yao Y Q, Wu X Y, et al. TEs enrichment characteristic in different size particulate from coal-fired flue gas: Part 1. Enrichment and leachability[J]. *Fuel*, 2024, 357: 129700.

(责任编辑: 陈荣府)