

典型农业城镇土壤重金属特定源健康风险评价及 优先控制源解析

张彧齐¹, 黄若漪¹, 高宗军¹, 姜冰²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东省第四地质矿产勘查院, 山东 潍坊 261021)

摘要:本研究以山东省典型农业城镇谭坊镇为研究区,通过耦合正定矩阵因子分解(PMF)源解析模型、蒙特卡洛模拟和健康风险评估模型,定量评估不同来源重金属对人体的健康风险并确定优先控制因子。研究结果显示:除Pb和Zn外,土壤中其他重金属平均含量均超过背景值,且Ni、Hg、Cu、Cr和Cd呈高度变异。PMF模型解析出4个主要污染源,按贡献率排序为工业活动(50.36%)、交通排放(20.72%)、农业输入(20.38%)和燃料燃烧(8.54%)。儿童群体的非致癌风险显著高于成人(累积概率为28.72%,处于显著风险水平),所有源会导致所有人群均面临不可忽视的致癌风险。其中工业活动源是优先控制源,Cr为关键风险元素。研究结果可为农业地区土壤重金属污染防治和风险管理提供科学依据。

关键词:重金属;PMF模型;健康风险;蒙特卡洛模拟;优先控制

中图分类号:X82

文献标志码:A

Health risk assessment and priority control source analysis of heavy metals from specific sources in soils of a typical agricultural town

ZHANG Yuqi¹, HUANG Ruoyi¹, GAO Zongjun¹, JIANG Bing²

(1. College of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shandong Provincial No. 4 Institute of Geology and Mineral Survey, Weifang 261021, China)

Abstract: Taking Tanfang Town, a typical agricultural town in Shandong Province, China, as the study area, this study quantitatively evaluated the health risks posed by different sources to human populations and determined the priority control factors by integrating the positive matrix factorization (PMF) source apportionment model, Monte Carlo simulation, and health risk assessment model. The results indicated that the average concentrations of all heavy metals except Pb and Zn in the soil exceeded the background values, with Ni, Hg, Cu, Cr, and Cd showing high spatial variability. The PMF model identified four major pollution sources, ranked by contribution rate as industrial activities (50.36%), traffic emissions (20.72%), agricultural inputs (20.38%), and fuel combustion (8.54%). The non-carcinogenic risk for children was significantly higher than that for adults, with a cumulative probability of 28.72%, exceeding acceptable risk thresholds. All identified sources contributed to non-negligible carcinogenic risks for the entire population. Industrial activities were determined to be the priority control source, and Cr was identified as the key risk element. The findings provide a scientific basis for the prevention, control, and risk management of soil heavy metal pollution in agricultural areas.

收稿日期:2025-08-07

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022QD092)

作者简介:张彧齐(1993—),女,山东青岛人,讲师,博士,主要从事环境地质、水文地质研究。

高宗军(1964—),男,山东泰安人,教授,博士(后),主要从事环境地质、水文地质研究,本文通信作者。

E-mail:gaozongjun@163.com

Key words: heavy metals; PMF model; health risk; Monte Carlo simulation; priority control

土壤是人类赖以生存的重要自然资源。近年来,众多农业资源优势地区通过农业产业化有效推动了工业化进程,实现了显著的经济增长。然而,工业发展带来的污染物排放,特别是重金属在土壤环境中的持续累积,引发一系列生态环境问题。重金属污染不仅导致土壤养分流失,破坏土壤结构和生态功能,还可能通过食物链的生物富集作用对暴露人群造成慢性健康风险^[1-2]。作为生态系统的重要基础,土壤健康直接关系到环境质量及可持续发展。因此,建立科学有效的重金属风险评估体系并制定相应防控策略具有重要的现实意义。

重金属污染源研究方法可分为定性识别和定量解析两类:定性识别主要借助以主成分分析和因子分析为代表的传统多元统计方法实现^[3-5];定量解析则通常采用受体模型,其中正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)、绝对主成分得分-多元线性回归(absolute principal component score-multiple linear regression, APCS-MLR)等模型以其独特的算法优势成为当前研究的热点。钱磊等^[6]利用相关性分析和 APCS-MLR 模型,明确了西南某钒钛磁铁矿周边土壤重金属主要来源于工业活动和成土等地质过程。在健康风险评估方面,美国环保署建立了一套完整的评估模型^[7]。然而,由于浓度空间分布、环境条件和人群暴露参数等均存在显著变异性,传统土壤重金属风险评估采用的确定性参数可能导致评估结果出现系统性偏差^[8-9]。

概率评估方法可以有效量化参数的不确定性,其中蒙特卡洛模拟作为最具代表性的数值计算方法,通过建立概率分布模型并执行大规模随机抽样,系统模拟各输入参数的不确定性和变异性,从而显著提升健康风险评估结果的科学性和可靠性。曾晓丽等^[10]采用蒙特卡洛模拟方法对赣西北典型金属矿区周边农田土壤中重金属的健康风险进行了评估,发现砷(As)是最主要的致癌重金属元素,对儿童和成人均存在不可忽视的可接受致癌风险。当前,大多数土壤重金属研究主要采用单一方法,例如仅侧重于污染源解析或健康风险评估,缺乏对基于污染源的健康风险的系统评估,这阻碍了优先控制污染源的有效识别,制约了针对性管控措施的制定。此外,前人研究多集中于大型工业城市或矿业区,对正处于工业化进程中的农业城镇关注相对较少。

谭坊镇作为典型的农业城镇,近年来积极引进工业项目,推动农业转型升级,促进了镇域经济的发展。然而,作为瓜菜生产重镇,面临的土壤质量安全问题不容忽视。基于此,本研究以谭坊镇为研究对象,将 PMF 源解析模型、健康风险评估及蒙特卡洛模拟方法相结合,建立源解析与风险评估相耦合的综合分析框架,实现对特定污染源所致健康风险的定量识别和评估,明确优先控制因子和关键污染源,以期为该地区重金属风险管控提供科学依据。

1 研究区概况

谭坊镇地处山东省青州市东部(图 1),面积 159.9 km²,人口 10.1 万,主要土壤类型包括褐土、潮土、粗骨土、棕壤。研究区建有多处有机农业示范园区、合作社、养殖场等,农业种植种类多、范围广。区内特色农产品较多,如西瓜、甜瓜、葡萄等。此外,依托本地资源与区位优势,积极培育和引进相关企业,已成功衍生出涵盖材料加工、机械制造、基础化工以及新能源等多个领域的产业体系,成为推动区域经济增长的重要支柱。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

采样位置见图 1,在 1 km² 范围内设置 5 个取样点,共采集 703 个表土样品,每个代表性样品由 2~6 个子样品等量混合而成。样品在室温下清理和风干,用木棍将土壤碾碎,以去除土壤以外的碎屑。所有样品被送到山东省第四地质矿产勘查院实验测试中心进行分析。测试样品中,Cd 采用 HF、HNO₃ 和 HClO₄ 处理,浓度通过电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定。Cu、Pb、Zn、Ni 和 Cr 采用粉末压片法处理,采用 X 射线荧光光谱法(X-ray fluorescence, XRF)进行分析。As 和

Hg 采用王水预处理,采用原子荧光光谱仪(atomic fluorescence spectrometry, AFS)进行分析。8 种重金属回收率为 95%~109%,准确度和精密度均符合土地质量评价规范 DZ/T 0295—2016 的要求^[11]。Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、As、Cd 和 Hg 的检出限 M_{DL} 分别为 1.00、2.00、4.00、2.00、5.00、0.50、0.02、0.000 5 mg/kg。

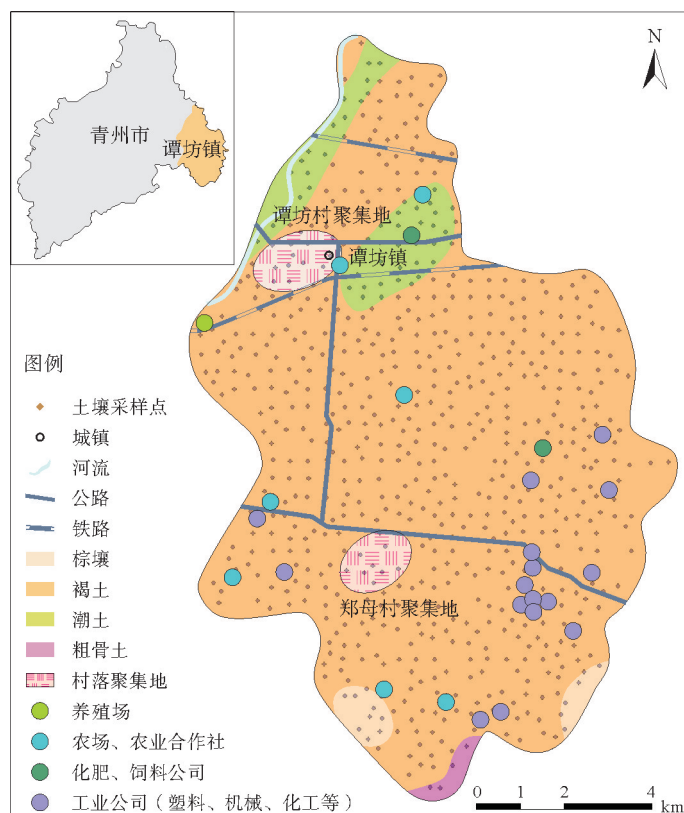


图 1 研究区位置及采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the location and sampling points in study area

2.2 PMF 模型

PMF 模型是一个多变量因素分析模型,基于加权最小二乘法进行限定和迭代计算,将受体原始数据矩阵 X 分解为因子得分矩阵 G 、因子载荷矩阵 F 和残差矩阵 E ,通过多次迭代计算 PMF 模型,使目标函数 Q 最小,得到最优的分量谱和源贡献。计算式为^[9]:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ik} F_{ik} + E_{ij}, \quad (1)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{u_{ij}} \right)^2, \quad (2)$$

$$u_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6} \times M_{DL}, & c \leq M_{DL}; \\ \sqrt{(\sigma \times c)^2 + M_{DL}^2}, & c > M_{DL}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: X_{ij} 为样品 i 中第 j 个重金属的浓度; G_{ik} 表示第 k 个源对样品 i 的贡献; F_{kj} 表示第 k 个源的第 j 个重金属的浓度; E_{ij} 为残差; p 为因子个数; u_{ij} 为不确定度; σ 为相对标准差; c 为重金属浓度, mg/kg。

2.3 概率性健康风险评价模型

本研究依据美国环保署的健康风险评价方法^[12],对目标区域成人和儿童群体通过三种暴露途径(经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入)的健康风险进行系统评估。计算式如下:

$$A_{\text{DDingest}} = \frac{c \times I_{\text{Ringest}} \times E_{\text{F}} \times E_{\text{D}} \times C_{\text{F}}}{B_{\text{W}} \times A_{\text{T}}}, \quad (4)$$

$$A_{\text{DDermal}} = \frac{c \times S_{\text{A}} \times A_{\text{F}} \times A_{\text{BS}} \times E_{\text{F}} \times E_{\text{D}} \times C_{\text{F}}}{B_{\text{W}} \times A_{\text{T}}}, \quad (5)$$

$$A_{\text{DDinhal}} = \frac{c \times I_{\text{Rinh}} \times E_{\text{F}} \times E_{\text{D}}}{P_{\text{EF}} \times B_{\text{W}} \times A_{\text{T}}}, \quad (6)$$

$$H_1 = \sum_i^n H_{\text{Q}_i} = \sum_{i=1}^n \frac{A_{\text{DD}_i}}{R_{\text{ID}_i}}, \quad (7)$$

$$T_{\text{CR}} = \sum_i^n C_{\text{R}_i} = \sum_{i=1}^n A_{\text{DD}_i} \times S_{\text{F}_i}. \quad (8)$$

式中: A_{DDingest} 、 A_{DDermal} 和 A_{DDinhal} 分别表示重金属经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入的日均摄入量,在式(7)、式(8)中统一表示为 A_{DD_i} ; H_{Q} 和 H_1 分别为单一和总非致癌风险指数; C_{R} 和 T_{CR} 分别为单一和总致癌风险指数。如果 $H_1 < 1$, 表示风险可忽略; 如果 $H_1 \geq 1$, 则表示风险显著。 $T_{\text{CR}} < 1 \times 10^{-6}$, 表示风险可忽略; $1 \times 10^{-6} \leq T_{\text{CR}} < 1 \times 10^{-4}$, 表示风险达警戒水平; $T_{\text{CR}} \geq 1 \times 10^{-4}$, 则表示风险显著。各参数的具体定义、单位及取值见表1和表2。

表1 健康风险评估相关参数信息^[9,13]

Table 1 Information on relevant parameters for health risk assessment

参数	概率分布类型	成年人	儿童
摄入速率 $I_{\text{Ringest}}/(\text{mg}/\text{d})$	三角	(4, 30, 52)	(66, 103, 161)
吸入速率 $I_{\text{Rinh}}/(\text{m}^3/\text{d})$	点	14.5	7.5
暴露皮肤面积 S_{A}/cm^2	对数正态	(18 182, 1.1)	(7 422, 1.25)
附着因子 $A_{\text{F}}/(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{d})$	贝塔-PERT	0.07(0, 0.3)	0.2(0, 3.3)
皮肤吸收系数 $A_{\text{BS}}/\text{无量纲}$	点	0.001	0.001
颗粒排放系数 $P_{\text{EF}}/(\text{m}^3/\text{kg})$	点	1.36×10^9	1.36×10^9
暴露频率 $E_{\text{F}}/(\text{d}/\text{a})$	三角	(180, 345, 365)	(180, 345, 365)
暴露时间 E_{D}/a	点	24	6
平均体重 B_{W}/kg	点	56.8	15.9
单位换算系数 $C_{\text{F}}/(\text{kg}/\text{mg})$	点	0.000 001	0.000 001
平均暴露时间 A_{T}/d	非致癌	$365 \times E_{\text{D}}$	$365 \times E_{\text{D}}$
	致癌	365×70	365×70

注:括号内数值为概率分布参数的定义值(非点估计值)。

表2 重金属参考剂量和斜率因子^[9,14]

Table 2 Reference doses and slope factors of heavy metals

重金属	参考剂量 $R_{\text{ID}}/(\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d}))$			斜率因子 $S_{\text{F}}/(\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg})$		
	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入
Cu	0.04	0.012	0.04	—	—	—
Pb	3.5×10^{-3}	5.25×10^{-4}	3.52×10^{-3}	8.5×10^{-3}	—	—
Zn	0.3	0.06	0.3	—	—	—
Ni	0.02	5.4×10^{-3}	9×10^{-5}	—	4.25	0.84
Cr	3.00×10^{-3}	6×10^{-5}	2.86×10^{-5}	0.5	2	42
As	3×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.23×10^{-4}	1.5	3.66	15.1
Cd	1.00×10^{-3}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	6.1	6.1	6.3
Hg	3×10^{-4}	2.1×10^{-5}	8.57×10^{-5}	—	—	—

3 结果与讨论

3.1 土壤重金属含量统计

研究区土壤中 8 种重金属统计结果如表 3 所示。各重金属元素的平均浓度呈明显差异,其顺序为:Cr (106.02 mg/kg)>Zn(81.30 mg/kg)>Ni(54.13 mg/kg)>Cu(27.99 mg/kg)>Pb(18.41 mg/kg)>As (7.94 mg/kg)>Cd(0.19 mg/kg)>Hg(0.038 mg/kg)。与山东省土壤背景值相比,Pb 和 As 的含量略低于背景值,而 Cu、Zn、Ni、Cr、Cd 和 Hg 的平均含量分别达背景值的 1.24、1.28、2.00、1.71、1.42 和 1.25 倍,表明上述重金属元素存在不同程度的累积现象,其中 Ni、Cr 和 Cd 的累积程度尤为显著,成为该区主要土壤重金属污染物。从空间变异特征来看,一般认为变异系数(C_v = 标准差/平均值) $\leq 15\%$ 为低变异性, $15\% < C_v \leq 35\%$ 为中等变异性, $C_v > 35\%$ 为高变异性^[15]。8 种重金属元素的 C_v 均超过 15%,显示不同程度的空间异质性,其中 Ni(64%)、Hg(47%)、Cu(42%)、Cr(41%)和 Cd(35%)呈高度变异,表明这些元素的空间分布受到人为活动的影响显著。空间分布特征分析(图 2)显示,Cu、Ni 和 Cr 的高浓度区主要分布在研究区东南部 and 西部;Pb、Zn、As 和 Cd 在全区广泛分布,以西北部 and 东南部浓度相对较高;Hg 则主要富集在西部和西北部地区。

表 3 土壤重金属统计
Table 3 Statistics of heavy metals in soil

重金属	最小值/(mg/kg)	最大值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	标准差	$C_v/\%$	背景值/(mg/kg)
Cu	6.4	70.0	27.99	11.81	42	22.6
Pb	3.4	32.6	18.41	4.15	23	23.6
Zn	30.8	190.9	81.30	25.04	31	63.3
Ni	16.7	229.2	54.13	34.78	64	27.1
Cr	46.7	297.5	106.02	43.34	41	62.0
As	1.31	16.88	7.94	2.08	26	8.6
Cd	0.05	0.49	0.19	0.065	35	0.13
Hg	0.005	0.130	0.038	0.018	47	0.03

3.2 土壤重金属源解析

利用 PMF 模型结合 Pearson 相关性分析对土壤重金属来源进行定量解析(图 3)。PMF 模型中设定不同因子数(2~6 个),采用鲁棒模式,运算次数设为 20 次。分析 Q_{rob} (鲁棒模式下的目标函数最优解)与 Q_{exp} (目标函数真值)比值的变化趋势,在 Q_{rob}/Q_{exp} 显著下降处确定最佳因子数为 4 个(图 3(a))。模型验证结果表明,各元素残差基本分布在 -3~3 的可接受范围内,且拟合系数(r^2)均大于 0.5,证实了模型结果的可靠性。为增强源解析的可信度,本研究将 Pearson 相关分析结果与 PMF 模型的因子贡献率进行关联比对,发现两者具有良好的一致性(图 3(b))。因子 1 主要与 Hg 高度相关;因子 2 的主导因子是 Zn、Cd 和 Pb;因子 3 的主导因子是 Pb 和 As;因子 4 的主导因子是 Cu、Ni 和 Cr。

因子 1 主要与 Hg 显著相关,其高值区集中分布于村落聚集区(图 2(h))。已有研究^[16]表明,人为排放的汞约有 80% 以气态元素形式进入大气环境,主要来源于化石燃料燃烧、垃圾焚烧及生物质燃烧等过程。通过实地调研发现,研究区冬季采暖仍以散煤燃烧为主,部分村庄存在使用秸秆、木柴等生物质燃料的现象。煤和生物质在不完全燃烧过程中会释放大量气态 Hg,通过干湿沉降进入土壤环境,并在表层富集。因此,因子 1 可解释为燃料燃烧源。

因子 2 以 Zn、Cd 和 Pb 为主,在西北部交通路网密集区呈显著峰值,与主干道路的分布高度吻合(图 2(b)、2(c)和 2(g)),表明汽车尾气排放和轮胎磨损是道路沿线土壤中重金属的重要来源。其中,汽车尾气颗粒物是土壤中 Pb 和 Cd 的重要来源^[7,17]。尽管含 Pb 汽油已禁用,但历史残留仍对土壤 Pb 含量有持续影

响。此外,Zn 作为轮胎添加剂(如氧化锌)的主要成分,其含量在道路两侧显著升高,说明轮胎磨损颗粒的扩散是 Zn 污染的重要途径^[18]。因此,因子 2 代表交通排放源。

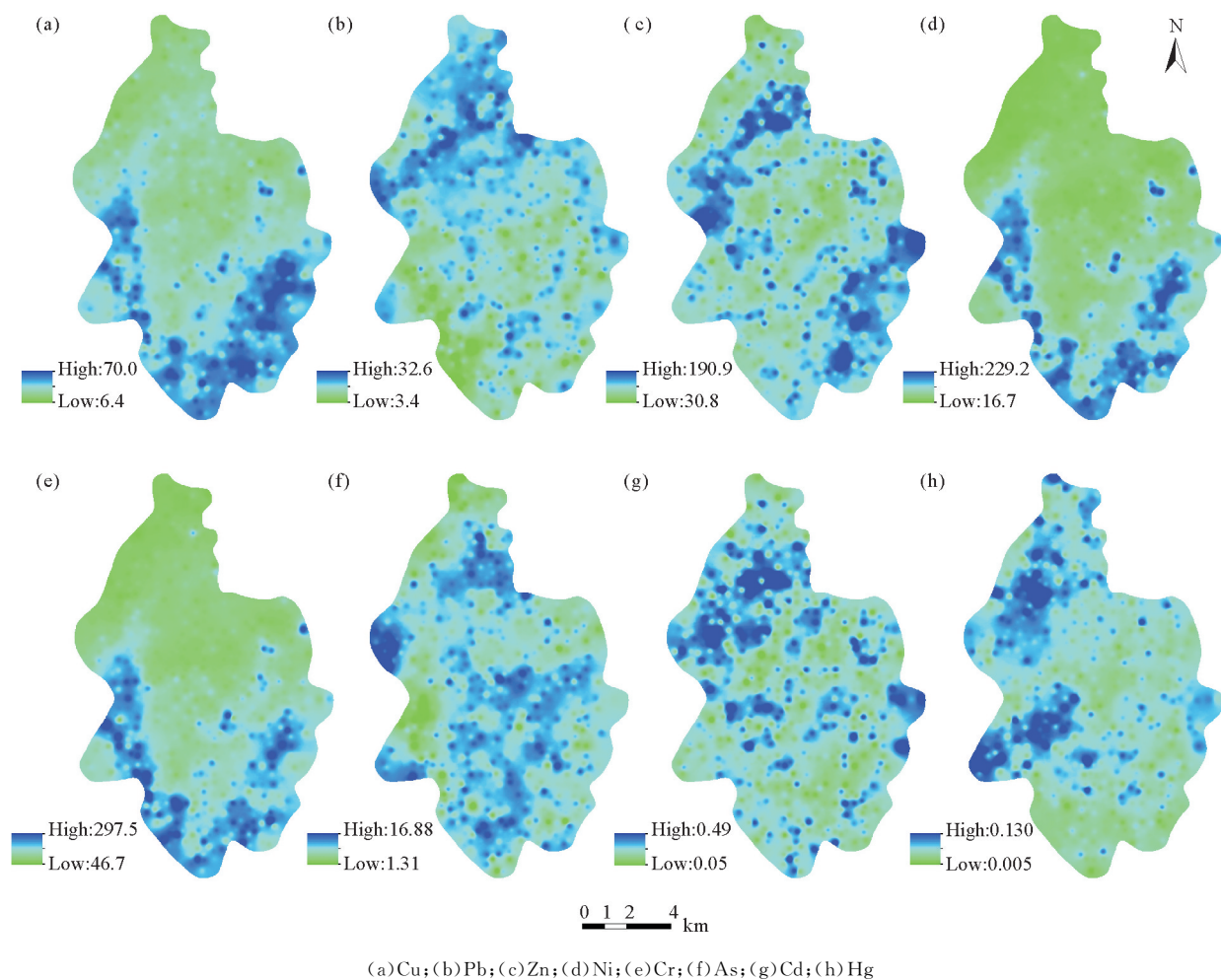


图 2 土壤重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in soil

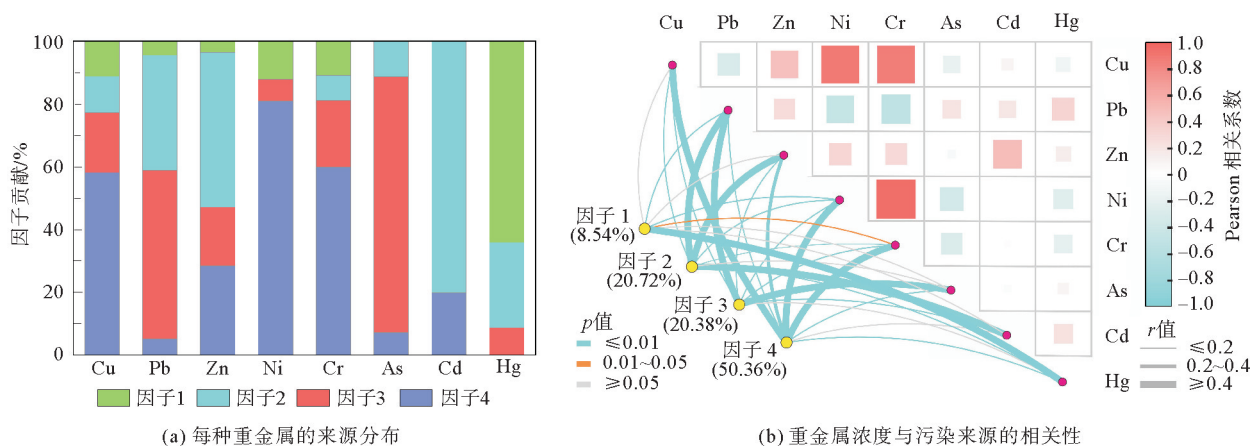


图 3 土壤重金属来源解析

Fig. 3 Source analysis of heavy metals in soil

因子 3 的代表元素是 As, 其次为 Pb。耕地是研究区的主要土地利用类型。As 的高值区广泛分布于耕地范围内, 研究区有很多农场、果园、养殖场等, 农业活动密集, 还有多家肥料、饲料生产企业(图 2(f))。说明 As 的富集主要与农业投入品的长期施用有关, 包括含砷磷肥、有机砷饲料添加剂及含砷农药(历史上曾广泛使用砷酸铅)等^[19]。畜禽粪便作为有机肥施用时可也将残留的砷带入土壤, 进一步加剧污染。尽管高毒含铅农药已被禁用数十年, 但因 Pb 在土壤中残留时间长、迁移性低, 在土壤中仍可检测到残留。因此, 因子 3 被判定为农业输入源。

因子 4 的代表元素为 Ni、Cr 和 Cu。土壤中的 Ni、Cr 通常与母质和成土过程有很大关系^[9]。然而, 由表 3 可以看出, Ni、Cu 和 Cr 的浓度均值均超过背景值, C_0 值为 41%~64%, 呈现高度变异, 因此推测这些重金属的富集主要受到人为因素的影响。空间上, 这些重金属集中分布在区域东南部和西部(图 2(a)、2(d)和 2(e)), 为化工和加工厂的聚集地, 主要涉及钢材建材加工和工业润滑油、胶黏剂等的生产。Ni 和 Cr 是不锈钢生产的关键组分, Cu 常用于工业催化剂、合金及电线电缆, Ni、Cr、Cu 通过工业粉尘沉降、废水排放或固体废物堆存进入土壤^[20-21]。因此, 因子 4 归因于工业活动源。

总的来说, 研究区土壤重金属污染来源复杂, 以工业活动为主导(50.36%), 其次为交通排放(20.72%)和农业输入(20.38%), 燃料燃烧的贡献率最低(8.54%)。

3.3 概率性人体健康风险评估

本研究采用健康风险评估模型结合蒙特卡罗模拟方法, 分析了土壤重金属对成人与儿童的概率性健康风险。由图 4 可以看出, 儿童的健康风险大于成人, 该结果与已有大量研究一致, 原因是儿童体重较轻、暴露时间长、手-口行为频繁, 导致其对环境污染更为敏感。对于非致癌风险, 成人和儿童的 H_1 均值分别为 0.078 和 0.867, 均低于风险阈值 1。从平均风险水平看, 研究区域土壤重金属对两类人群尚未构成明显的非致癌危害。然而, 通过概率评估发现, 儿童群体有 28.72% 的 H_1 值超过安全阈值(图 4(a))。这表明, 尽管平均风险较低, 但仍存在相当比例的儿童暴露于显著的非致癌风险中, 需引起重视。对于致癌风险, 所有人群的 T_{CR} 值超过可接受水平(1×10^{-6})的概率均为 100%, 表明研究区致癌风险达到警戒水平。值得注意的是, 对于儿童, 有 1.22% 的 T_{CR} 值超过 1×10^{-4} (图 4(b)), 达到显著致癌风险水平, 表明儿童可能面临明显的长期健康威胁, 有必要开展进一步调查和干预。

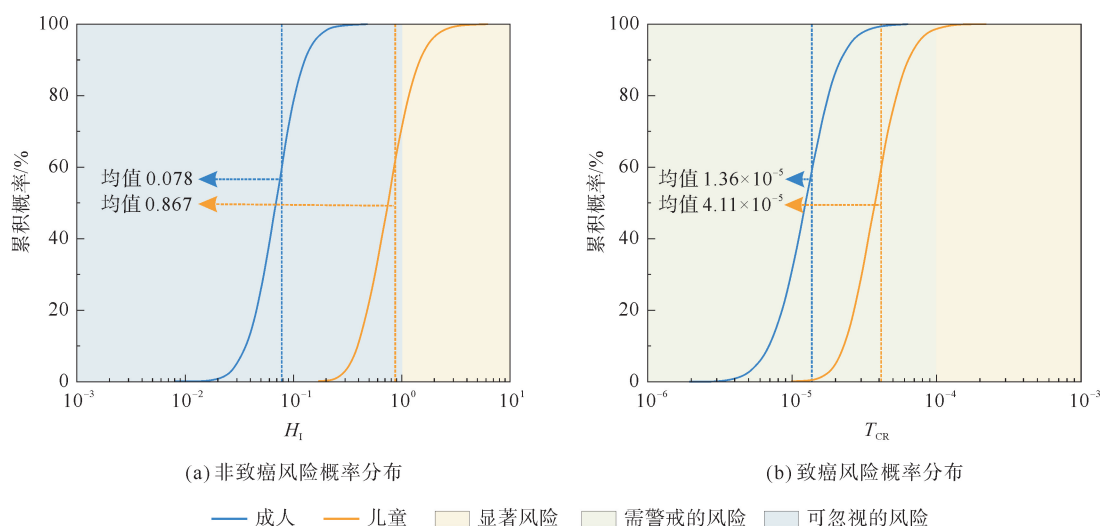
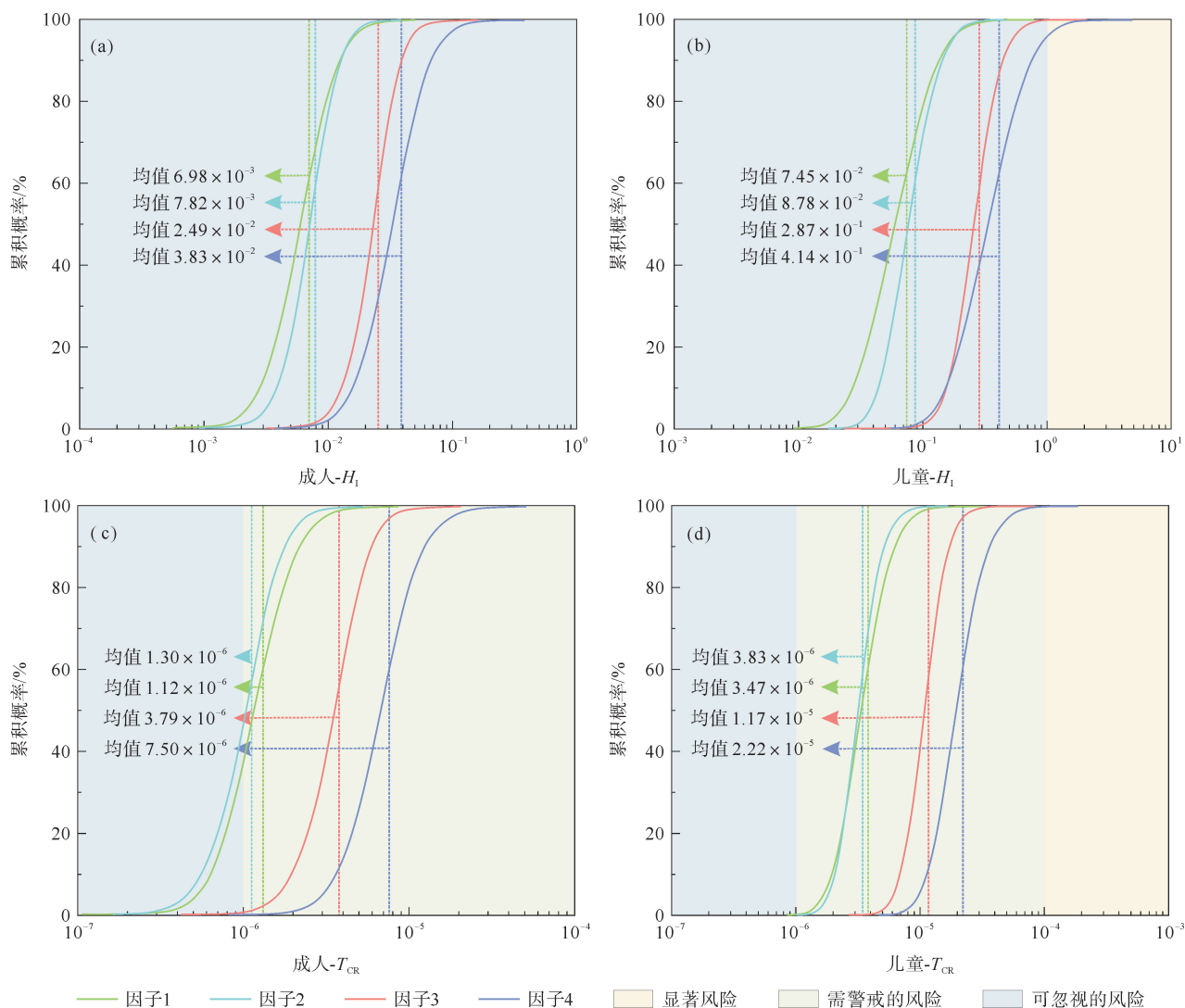


图 4 成人和儿童的健康风险概率分布

Fig. 4 Probability distribution of health risks for adults and children

基于源解析结果, 本研究进一步分析了特定源的健康风险。在非致癌风险方面, 所有源的 H_1 均值都小于 1(图 5(a)、5(b))。工业源与农业源分别存在概率为 4.25% 和 0.17% 的 H_1 大于 1 的情况, 表明这两类源在极少数情景下可能带来非致癌风险, 但总体上各污染源的非致癌风险较为有限。对于致癌风险, 所有源的

T_{CR} 均值均超过 1×10^{-6} (图 5(c)、5(d)), 成人 T_{CR} 值大于 1×10^{-6} 的概率在 62.07% 以上, 而儿童 T_{CR} 值大于 1×10^{-6} 的概率在 99.93% 以上, 说明污染源导致的致癌风险广泛存在, 特别是对儿童群体。其中, 在工业源导致的儿童暴露中, 有 0.08% 的 T_{CR} 值超过 1×10^{-4} , 进一步突显了工业污染在局部高风险中的重要影响。

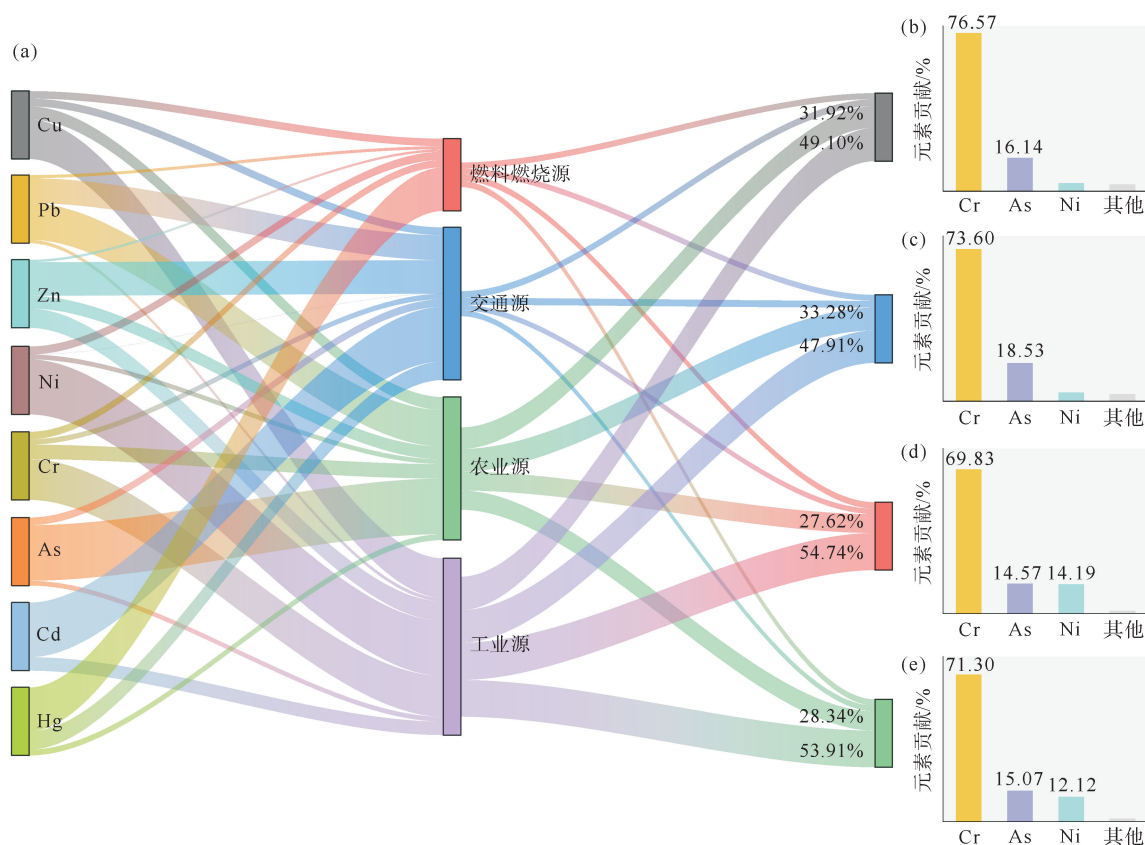


(a) 成人非致癌风险概率分布; (b) 儿童非致癌风险概率分布; (c) 成人致癌风险概率分布; (d) 儿童致癌风险概率分布

图 5 成人和儿童基于特定源的健康风险概率分布

Fig. 5 Source-based health risk probability distribution for adults and children

不同污染源对非致癌风险和致癌风险的贡献率对于成人和儿童表现出相似的趋势(图 5)。工业排放源是最大的贡献源, 其贡献率在 47.91%~54.74%; 农业输入源次之, 贡献率为 27.62%~33.28%。这与 PMF 模型中 Cr、As、Ni 等元素在工业源和农业源中具有较高载荷有关(图 6)。从元素贡献来看, Cr 对总致癌风险的贡献占主导地位, 达 69.83%~71.30%, 而其他元素贡献率的总和不足 31%(图 6)。很多研究^[7,18]也有类似报道, 认为 Cr 是导致人类致癌的关键重金属元素。长期暴露在 Cr 含量较高的环境中会增加皮肤溃疡、肝脏、肾脏等器官损伤的几率^[22-23]。因此, 综合考虑源贡献和元素的毒性, 工业源被确定为重点控制污染源, 并将 Cr 作为优先管控的目标元素。



(a) 浓度-源-健康风险关系; (b) 成人非致癌风险元素贡献; (c) 儿童非致癌风险元素贡献; (d) 成人致癌风险元素贡献; (e) 儿童致癌风险元素贡献

图 6 土壤重金属-污染源-人体健康风险的关系

Fig. 6 Relationship between heavy metals in soil, pollution sources and human health risks

4 结论

本研究以典型农业依托型城镇谭坊镇为研究区,对土壤中重金属的概率性健康风险进行研究,得到以下主要结论:

1) 研究区土壤中 Cu、Zn、Ni、Cr、Cd 和 Hg 的平均含量均超过当地背景值,其中 Ni、Hg、Cu、Cr 和 Cd 呈现高度变异($C_v > 35\%$),说明其分布受局部人为活动的影响,具有明显的空间异质性。

2) 基于 PMF 模型的源解析识别出四个主要重金属来源,按其贡献率排序依次为:工业活动(50.36%)、交通排放(20.72%)、农业输入(20.38%)和燃料燃烧(8.54%)。各源的特征元素分别为:工业活动以 Cu、Ni、Cr 为主;交通排放以 Zn、Cd、Pb 为主;农业输入源以 Pb 和 As 为主;燃料燃烧以 Hg 为主。

3) 概率健康风险评估结果表明,所有人群均面临不可忽视的致癌风险。成人群体非致癌风险可忽略,但儿童群体有 28.72% 的概率处于显著风险水平。儿童群体的风险均显著高于成人。需引起高度重视。

4) 源解析健康风险评估进一步揭示,尽管单一污染源未造成显著的非致癌风险,但各源对总致癌风险均有贡献,其中工业活动源为优先控制污染源,Cr 是最关键的致癌风险元素。建议后续环境管理以工业污染防治为重点,并加强对 Cr 等关键元素的源头管控。

本研究的风险评估主要基于重金属总量及污染源解析结果,未来将引入生物有效性分析,以期更准确地表征人体实际暴露风险。同时,后续研究将把“土壤-农产品”迁移链条纳入综合评估体系,从而更系统地揭示农业城镇环境中重金属的完整暴露风险格局。

参考文献:

- [1] 周广柱,曹译允,王翠珍,等.城市土壤中铅分布特征及环境风险[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):49-57.
ZHOU Guangzhu, CAO Yiyun, WANG Cuizhen, et al. Distribution characteristics and environmental risks of Pb in urban soil[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 38(1): 49-57.
- [2] 夏璐,刘龙云,李常锁,等.重金属离子胁迫对SRB修复酸性矿山废水效能的影响:功能基因与污染物去除的双重视角[J].山东科技大学学报(自然科学版),2025,44(3):31-42.
XIA Lu, LIU Longyun, LI Changsuo, et al. Effects of heavy metal ion stress on efficiency of SRB in remediating AMD: Perspectives of functional genes and pollutant removal[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2025, 44(3): 31-42.
- [3] 冯韶华,俞一帆,张旭峰,等.中国农田土壤重金属污染源解析研究进展[J].环境污染与防治,2023,45(9):1300-1306.
FENG Shaohua, YU Yifan, ZHANG Xufeng, et al. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil in China: A review[J]. Environmental Pollution and Control, 2023, 45(9): 1300-1306.
- [4] 毛翔,罗璐,吴陈冰洁,等.吉泰盆地新圩-富田地区浅层地下水地球化学特征及其对卤水锂矿的指示[J/OL].现代地质,1-22[2025-11-06]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.064>.
MAO Xiang, LUO Lu, WU Chenbingjie, et al. Geochemical characteristics of shallow groundwater in the Xinxu-Futian Area, Jitai Basin, and their implication for brine lithium-rich brine deposits[J/OL]. Geoscience, 1-22[2025-11-06]. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2025.064>.
- [5] 曾昭法,雷建,张浪汉.土壤地球化学测量在江西省蔚山钨矿中的应用及找矿效果[J].地质与勘探,2025,61(5):989-998.
ZENG Zhaoafa, LEI Jian, ZHANG Langhan. Application and prospecting effect of soil geochemical survey in the Shishan tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. Geology and Exploration, 2025, 61(5): 989-998.
- [6] 钱磊,邓思维,冯雯娟,等.西南某矿区尾矿库周边土壤重金属污染风险评价与源解析[J].金属矿山,2025,588(6):265-272.
QIAN Lei, DENG Siwei, FENG Wenjuan, et al. Heavy metals pollution risk assessment and source analysis of soil around the tailings pond in a mining area in southwest China[J]. Metal Mine, 2025, 588(6): 265-272.
- [7] ZHOU H, YUE X M, CHEN Y, et al. Source-specific probabilistic contamination risk and health risk assessment of soil heavy metals in a typical ancient mining area[J/OL]. Science of the Total Environment, 2024, 906. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.167772.
- [8] LIU Z, DU Q Q, GUAN Q Y, et al. A Monte Carlo simulation-based health risk assessment of heavy metals in soils of an oasis agricultural region in northwest China[J/OL]. Science of the Total Environment, 2023, 857. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.159543.
- [9] ZHANG Y Q, JIANG B, GAO Z J, et al. Source-specific probabilistic health risk judgement of soil heavy metals in a typical resource-based town in North China[J/OL]. Ecological Indicators, 2024, 169. DOI:10.1016/j.ecolind.2024.112854.
- [10] 曾晓丽,李惠民,樊艳春,等.基于蒙特卡罗模拟的金属矿区周边农田土壤重金属健康风险评估[J].生态毒理学报,2025,20(1):432-439.
ZENG Xiaoli, LI Huimin, FAN Yanchun, et al. Monte Carlo simulation-based health risk assessment of heavy metals in agricultural soil surrounding metal mining areas[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2025, 20(1): 432-439.
- [11] 中华人民共和国国土资源部.土地质量地球化学评价规范:DZ/T 0295—2016[S].北京:地质出版社,1996.
- [12] USEPA. Exposure factors handbook[M]. Final ed. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2011.
- [13] ZHOU Y, JIANG D D, DING D, et al. Ecological-health risks assessment and source apportionment of heavy metals in agricultural soils around a super-sized lead-zinc smelter with a long production history, in China[J/OL]. Environmental Pollution, 2022, 307. DOI:10.1016/j.envpol.2022.119487.
- [14] LU X W, WANG Z Z, CHEN Y R, et al. Source-specific probabilistic risk evaluation of potentially toxic metal(loid)s in fine dust of college campuses based on positive matrix factorization and Monte Carlo simulation[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2023, 347. DOI:10.1016/j.jenvman.2023.119056.
- [15] 刘劲琦,严小飞,孙聪聪,等.历史遗留冶炼区周边村庄土壤重金属污染优先控制因子解析[J/OL].环境科学,1-14[2025-09-25]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202412064>.
LIU Mengqi, YAN Xiaofei, SUN Congcong, et al. Analysis of priority control factors for soil heavy metal pollution in

- villages surrounding historic smelting areas[J/OL]. Environmental Science, 1-14. [2025-09-25]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202412064>.
- [16] PROSHAD R, KORMOKER T, ABDULLAH A M, et al. Receptor model-based source apportionment and ecological risk of metals in sediments of an urban river in Bangladesh[J/OL]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.127030.
- [17] 李启权, 张少尧, 代天飞, 等. 成都平原农地土壤镉含量特征及来源研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):898-906.
LI Qiquan, ZHANG Shaoyao, DAI Tianfei, et al. Contents and sources of cadmium in farmland soils of Chengdu plain, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(5):898-906.
- [18] GUO G H, WANG Y T, ZHANG D G, et al. Source-specific ecological and health risks of potentially toxic elements in agricultural soils in Southern Yunnan Province and associated uncertainty analysis[J/OL]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 417. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.126144.
- [19] SUN J X, ZHAO M L, HUANG J L, et al. Determination of priority control factors for the management of soil trace metal (loid)s based on source-oriented health risk assessment[J/OL]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423. DOI:10.1016/j.jhazmat.2021.127116.
- [20] 王子淳. 摩擦诱导金属耐磨层的制备及摩擦学性能研究[D]. 大连:大连海事大学, 2021.
WANG Zichun. Preparation of friction-induced metal anti-wear layer and tribological performance study[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021.
- [21] ZHANG Y Q, JIANG B, GAO Z J, et al. Source apportionment and assessment of risk to human health of soil heavy metals: A high-density sampling survey in the Dan River Basin, Shandong Province, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(6):2444-2456.
- [22] 郭莹莹. 基于体外方法的土壤铬生物可给性与生物有效性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.
GUO Yingying. Study on bioaccessibility and bioavailability of chromium in soil based on *in vitro* methods[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [23] YANG Y F, LU X W, YU B, et al. Exploring the environmental risks and seasonal variations of potentially toxic elements (PTEs) in fine road dust in resource-based cities based on Monte Carlo simulation, geo-detector and random forest model[J/OL]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 473. DOI:10.1016/j.jhazmat.2024.134708.

(责任编辑:高丽华)