

中原典型产业集聚区农田土壤重金属生态风险评价及源解析

张宇佳¹, 董芯岑¹, 陈文芳¹, 周万蓬²

(1. 河南省地质局地质灾害防治中心, 郑州 450045;

2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 为探明中原典型产业集聚区周边农田土壤中重金属污染状况及来源,以河南省某产业集聚区周边农田土壤为研究对象,从表层和垂向两个维度对土壤中8种重金属元素(Cu、Cd、Hg、As、Cr、Zn、Ni、Pb)的含量、空间分布特征以及生态风险进行分析,采用相关性分析和绝对主成分分析-多元线性回归(APCS-MLR)模型解析研究区的土壤重金属来源。结果显示,研究区表层农田土壤中8种重金属元素的平均含量均未超过国家标准规定的农用地土壤污染风险筛选值,其中仅Cu、Zn、Cd、Hg和As的平均含量高于河南省土壤背景值。空间上,表层农田土壤中的Cr、Zn高值区主要集中在研究区东部,Cu、Ni和Cd高值区主要集中在研究区西部和南部,Hg和Pb主要为点源分布;垂向分布特征显示,研究区农田土壤中8种重金属元素大都富集在表层,难以向下迁移,可能是石油开采活动造成土壤板结进而影响元素迁移速率导致的。研究区农田土壤中8种重金属元素的综合污染程度较低,且综合生态风险水平为中等,其中Cd和Hg元素的生态风险水平较高,为中等及以上级别,其余重金属元素的生态风险水平均较低。APCS-MLR模型解析出三个重金属来源:Cr、Ni、Cu和Zn主要为工业来源,即石化企业和相关工业企业的生产活动,其对Cr、Ni、Cu和Zn的贡献率分别为92.40%、56.92%、62.20%和84.64%;Cd、Pb和As主要为交通来源,即交通运输过程中的尾气排放和轮胎磨损等产生的粉尘沉降,该来源对Cd、Pb和As的贡献率分别为53.25%、71.26%和42.78%;Hg主要为农业-人为固废堆放导致的综合污染来源,其中农业来源对Hg的贡献率为33.23%,未知来源对Hg的贡献率为48.17%。研究结果可为区域重金属污染精准化防控提供科学依据,对保障化工产业集聚区周边农田土壤环境质量与农产品安全具有重要实践价值。

关键词: 产业集聚区; 农田土壤; 重金属; 生态风险; 源解析

中图分类号: X53; X820.4

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0175-10

Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around Typical Industrial Agglomeration Areas in the Central Plains

ZHANG Yujia¹, DONG Xincen¹, CHEN Wenfang¹, ZHOU Wanpeng²

(1. The Prevention and Control Center for the Geological Disaster of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450045, China;

2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to investigate the pollution status and sources of heavy metals in farmland soils around the typical industrial agglomeration area in the Central Plains, taking the farmland soil around an industrial cluster in Henan Province as the research object, this study analyzed the contents, spatial distribution characteristics and

收稿日期: 2025-05-22

修回日期: 2025-08-28

接受日期: 2025-09-29

基金项目: 省级土壤污染防治资金项目(濮阳市直招标采购-2023-2)

作者简介: 张宇佳(1997-),女,助理工程师,硕士,主要从事水土污染状况调查和修复工作,E-mail: zyj3210123@163.com

引用格式: 张宇佳,董芯岑,陈文芳,等. 中原典型产业集聚区农田土壤重金属生态风险评价及源解析[J]. 河南科学,2026,44(1):175-184.

Zhang Y J, Dong X C, Chen W F, et al. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in farmland soils around typical industrial agglomeration areas in the Central Plains[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 175-184.

ecological risks of eight heavy metals (Cu, Cd, Hg, As, Cr, Zn, Ni, Pb) in both surface and vertical profiles of farmland soils in the study area. Correlation analysis and absolute principal component score-multiple linear regression (APCS-MLR) model were used to analyze the sources of heavy metals in the soil of the study area. The results indicated that the average contents of eight heavy metals in the surface farmland soil of the study area did not exceed the screening values for soil pollution risks of agricultural land stipulated by the national standard. However, the average levels of Cu, Zn, Cd, Hg and As were higher than the background values of the soil in Henan Province. Spatially, the high-value areas of Cr and Zn in the surface farmland soil were mainly concentrated in the eastern part of the study area, the high-value areas of Cu, Ni and Cd were mainly concentrated in the western and southern parts of the study area, and Hg and Pb showed point-source distribution patterns. Vertical distribution characteristics suggested that most of the eight elements in the farmland soil in the study area were enriched in the topsoil and were difficult to migrate downward, which might be caused by the soil compaction resulting from petroleum extraction activities. The comprehensive pollution degree of eight heavy metal elements in the farmland soil of the study area was relatively low, and the comprehensive ecological risk level was medium. Among them, the ecological risk levels of Cd and Hg elements were relatively high, at medium or above levels, while the ecological risk levels of the remaining heavy metal elements were all relatively low. The APCS-MLR model identified three sources of heavy metals. Cr, Ni, Cu and Zn were mainly from industrial sources, namely the production activities of petrochemical enterprises and related industrial enterprises, and the contribution rates of this source to Cr, Ni, Cu and Zn were 92.40%, 56.92%, 62.20% and 84.64%, respectively. Cd, Pb and As were mainly from traffic sources, that is, dust deposition caused by exhaust emissions and tire wear during transportation, and the contribution rates of this source to Cd, Pb and As were 53.25%, 71.26% and 42.78%, respectively. Hg was primarily associated with a comprehensive pollution source caused by the accumulation of agricultural-anthropogenic solid waste. Among them, the contribution rate of agricultural sources to Hg was 33.23%, and the contribution rate of unknown sources to Hg was 48.17%. These findings provide a scientific basis for the precise prevention and control of regional heavy metal pollution and have important practical value for ensuring the environmental quality of farmland soil and the safety of agricultural products around the chemical industry agglomeration area.

Key words: industrial agglomeration area; farmland soil; heavy metal; ecological risk; source analysis

0 引言

重金属污染可能引起的土壤质量问题和食品安全问题已引起人们的广泛关注^[1-4]。大量研究显示,农田土壤受重金属污染的途径越来越多样化,农田土壤重金属含量不仅受到基础农业活动中化肥、农药不当施用的影响,也受到工业“三废”排放和交通污染物沉降的影响^[5-7]。随着我国工业化进程的不断推进,工业企业生产活动造成的农田土壤重金属污染问题日益凸显^[8-10]。且研究指出,石油化工、电镀、电器制造、铝塑加工及皮革生产等工业活动产生的固体废物和废水排入土壤后,会显著改变农田土壤重金属的空间分布格局,对其污染程度的时空演变特征产生显著影响^[11-12]。因此对工业活动密集地区的周边农田土壤重金属污染状况、生态风险及污染来源进行分析十分必要。

目前已有较多学者对河南省一些区域的土壤重金属污染状况和污染源进行研究。多克辛^[13]对河南省六种典型农业区土壤的重金属和残留有机物污染状况进行了研究,结果表明农业活动(污水灌溉、化肥农药大面积使用)是土壤中重金属的主要污染源。刘小诗等^[14]对河南省商丘市农田土壤的重金属累积特征研究发现,集约化生产方式下,设施菜地土壤重金属含量随年限延长而持续累积,土壤环境风险明显增加,且该过程主要归因于化肥和有机肥的不当投入。成永霞等^[15]对河南省某铅冶炼厂周边农田的调查证实,土壤中Pb和Cd含量因冶炼活动已出现明显积累。马云霞等^[16]对河南省北部某开发区周边农用地土壤重金属的源解析结果表明,土壤中Cd、Pb、Hg、Zn主要受涉重金属企业工业源的影响。但总结发现,还未见有学者对河南省产业集聚区的农田土壤重金属污染状况及生态风险进行分析。

产业集聚区作为工业生产企业的聚集地,融合

了多种工业活动,兼具工业化与农业化特征,且周边土地利用类型多样,工农混合的分布形式使得产业集聚区周边农田土壤的重金属污染来源更加复杂^[17-18],作为工业活动与周边人群密集活动的过渡地带,其附近农田土壤的环境质量直接关系到粮食安全和人群健康。因此对产业集聚区周边农田土壤中重金属污染状况、生态风险和来源进行分析,查明工业活动对土壤重金属含量累积程度的影响,可为有效防控农田土壤重金属累积风险及区域重金属污染提供科学支撑,对保障区域生态环境安全和公众健康具有重要价值。

河南省濮阳市某产业集聚区是典型的化工园区,区域内石化、电镀、汽车制造及化工等企业生产过程中排放的重金属污染物,对周边农田土壤造成了一定的污染,区域潜在生态环境风险较高。本研究以该产业集聚区为研究区,以周边农田土壤为研究对象,分析产业集聚区周边农田土壤的重金属含量特征,评估其潜在生态风险并开展重金属污染溯源分析,以期为产业集聚区农田土壤污染防控和环境管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

研究区为河南省濮阳市某产业集聚区,其为一个典型的化工园区。该园区位于濮阳市化工产业集聚区的北区,面积 13.5 km²,以石油化工、精细化工和煤盐化工为主,周边工业污染企业共 17 个,主要为化学原料和化学制品制造业、化学纤维制造业和汽

车制造业,北部和南部分布集中,东部零星分布个别企业。区域周边土壤类型为黄棕壤土,以砂质壤土和黏壤土为主,耕地以种植小麦为主。

土壤样品采集点位围绕产业集聚区周边布设,采样点的位置分布如图 1 所示。采样点经纬度由手持式 GPS 定位。以采样点为中心,采用双对角线法 5 点混合采集混匀形成表层土壤(0~20 cm)样品,共采集表层土壤样品 51 个。围绕产业集聚区均匀选取 14 个采样点,自表层取样后向下逐层(20~60 cm、60~100 cm)各采集 1 组深层土壤样品,共采集深层土壤样品 28 组。

1.2 样品处理与土壤理化指标测定

土壤样品经自然风干后去除砂石等杂质,用玛瑙研钵研磨成粉末并经 20 目尼龙筛过筛后,取部分样品用电位法(HJ 962—2018)测定土壤 pH 值,其余样品再次研磨经 100 目尼龙筛过筛后,按照标准中推荐的分析方法进行重金属含量测定,具体如下:参照《土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解/原子荧光法》(HJ 680—2013),采用原子荧光光度计测定土壤中砷(As)和汞(Hg)的含量;参照《土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法》(HJ 803—2016),采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定土壤中镉、铬、铜、镍和铅的含量;参照《土壤和沉积物 铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》(HJ 491—2019),采用火焰原子吸收分光光度计测定土壤中锌的含量。为保证准确度,测试设置 10% 的平行样,平行样相对偏差、标准物质回收率均满足质量控制要求。

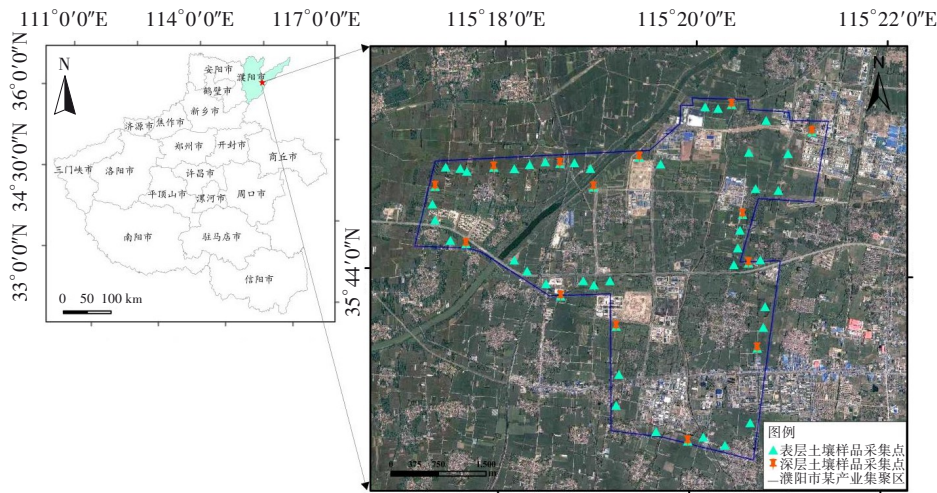


图 1 研究区地理位置及采样点位分布

Fig.1 Geographical location of the study area and the distribution of sampling points

1.3 重金属污染程度评价

1.3.1 单因子污染指数法

采用单因子污染指数法来评价土壤中某一重金属元素的污染程度,其表达式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}, \tag{1}$$

式中: P_i 为重金属元素*i*的单因子污染指数; C_i 为重金属元素*i*的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为重金属元素*i*的标准筛选值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据计算的 P_i 值判断土壤中某一重金属元素的污染程度,具体如下: $P_i\leq 1$ 为无污染, $1<P_i\leq 2$ 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。

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法是结合环境质量和重金属含量对土壤中多种重金属元素的综合污染程度进行评价的方法,该方法可兼顾各重金属元素单因子污染指数的平均值和最高值,揭示区域内重金属的平均污染水平。其表达式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2)}{2}}, \tag{2}$$

式中: P_N 为研究区内农田土壤中重金属元素的内梅罗综合污染指数; P_{ave} 为所有重金属元素单因子污染指数的平均值; P_{max} 为各重金属元素单因子污染指数的最大值。根据计算的 P_N 值判断研究区农田土壤中重金属的综合污染程度,具体如下: $P_N<0.7$ 为安全, $0.7\leq P_N<1.0$ 为警戒线, $1.0\leq P_N<2.0$ 为轻度污染, $2.0\leq P_N<3.0$ 为中度污染, $P_N>3.0$ 为重度污染。

1.4 重金属生态风险评价

潜在生态风险指数法是从沉积学角度提出的一种生态风险评价方法,兼顾了重金属性质和环境敏感性等环境行为,能够客观评价一个区域重金属的潜在生态风险水平。其表达式为:

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i}, \tag{3}$$

式中:RI为多种重金属元素的综合潜在生态风险指数; E_r^i 为重金属元素*i*的潜在生态风险指数; C^i 为重金属元素*i*的实测值, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_n^i 为重金属元素*i*的背景值,本研究以河南省土壤环境背景值为参考值; T_r^i 为重金属元素*i*的毒性响应系数,表征重金属元素毒性强度及土壤对重金属污染的敏感性,参考前人^[19]研究,Hg、Cd、As、Cu、Pb、Ni、Cr和Zn的毒性响应系数分别取值为40、30、10、5、5、5、2和1。

根据计算的 E_r^i 值判断研究区农田土壤中单个重金属元素的生态风险水平,具体如下: $E_r^i<40$ 为低生态风险, $40\leq E_r^i<80$ 为中等生态风险, $80\leq E_r^i<160$ 为较高生态风险, $E_r^i\geq 160$ 为高生态风险。根据计算的RI值判断研究区农田土壤中8种重金属元素的综合,具体如下:RI<150为低生态风险, $150\leq \text{RI}<300$ 为中等生态风险, $300\leq \text{RI}<600$ 为较高生态风险,RI≥600为高生态风险。

1.5 重金属来源解析

绝对主成分分析-多元线性回归模型(APCS-MLR)已被越来越多的学者应用于不同的环境介质中开展重金属来源解析,该模型可以较好地解析自然或人为源的贡献,基本思路是对原始数据标准化后进行主成分分析(PCA),通过引入各项指标为0含量的样本,将主成分分析因子得分转化为绝对主成分因子(APCS),以绝对主成分因子为自变量建立多元线性回归模型,最后根据回归系数计算不同来源对重金属元素的贡献率。计算公式和流程见文献^[20]。

1.6 数据处理与制图

采用SPSS 26.0软件对土壤重金属数据进行统计分析、相关性分析以及APCS-MLR分析,使用EPA PMF 5.0软件进行重金属污染来源解析,其他图件使用Origin 2022软件和ArcGIS 10.7软件完成。

2 结果与分析

2.1 农田土壤重金属含量及空间分布特征

2.1.1 表层农田土壤重金属含量描述性统计特征

经检测可知,研究区表层农田土壤pH值介于7.01~8.77之间,呈弱碱性~碱性。如表1所示,研究区表层农田土壤中Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Hg和As的平均质量分数分别是河南省土壤环境背景值^[21]的0.53、0.85、1.05、1.18、2.00、0.55、5.20和1.33倍,研究区表层农田土壤中8种重金属元素的平均质量分数均未超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定的农用地土壤污染风险筛选值。在土壤重金属研究中,变异系数(Coefficient of Variation, CV)常用来表征土壤重金属含量的异质性和空间变化。参考已有研究^[22],按CV值大小划分出四个等级,分别为低度变异(CV<20%)、中度变异(20%≤CV<50%)、高度变异(50%≤CV<100%)和超高度变异(CV≥100%)。研究区表层农田土壤中8种重金属元素的变异系数(CV)由高到

低依次为: $Hg>Pb>Cr>Zn>Ni>Cd>Cu>As$, 其中 Hg 为超高度变异, Pb 、 Cr 为高度变异, 其余重金属元素均为中度变异, 这表明研究区表层农田土壤中 Hg 受到外源人为因素干扰更大^[23], 分析原因可能是 JS152-20 点位中 Hg 的含量异常偏高, 说明其来源受外界干扰显著, 受园区生产活动点源污染的可能性较大。

2.1.2 表层农田土壤重金属空间分布特征

利用反距离权重法分析研究区表层农田土壤重金属的空间分布特征(图2), 结果表明研究区表层农田土壤中 Cr 、 Zn 、 As 、 Cu 、 Ni 、 Cd 的空间分布格局具有相似性, Cr 、 Zn 、 As 高值区主要集中在研究区东部, Cu 、 Ni 、 Cd 高值区主要集中在研究区的西部和南部。研究区大部分地区的 Hg 和 Pb 含量较低, Hg 和 Pb 高值区主要呈现点源性集聚现象。

2.1.3 农田土壤重金属垂向分布特征

为了更好地评估研究区农田土壤重金属在垂向上的迁移状况, 本研究进一步比较了不同深度土层土壤样品(0~20 cm、20~60 cm、60~100 cm 深度土壤样品各 14 个)中的重金属含量随土壤深度变化的情况, 各深度土层土壤样品的采集位置一一对应。图3显示, 随着土壤深度的增加, 土壤中 Zn 、 Cu 、 Pb 、 As 、 Hg 的平均含量均呈逐渐降低的趋势, 表明这些重金属元素受外源污染的可能性较大, 如石油开采活动和大气沉降导致研究区表层农田土壤中这些重金属元素的含量偏高; 此外这些重金属元素的含量随土壤深度的增加而逐渐降低的原因还可能与其在土壤中向下迁移的速率较为缓慢有关, 因为石油开采过程中排放的高盐废水会触发多重钝化机制, 高盐废水

表 1 研究区表层农田土壤重金属含量描述性统计特征

重金属元素	最小值/($mg\cdot kg^{-1}$)	最大值/($mg\cdot kg^{-1}$)	平均值/($mg\cdot kg^{-1}$)	中值/($mg\cdot kg^{-1}$)	标准差/($mg\cdot kg^{-1}$)	变异系数/%	超标率/%	国家标准值/($mg\cdot kg^{-1}$)		河南省土壤环境背景值 ^[21] /($mg\cdot kg^{-1}$)
								pH>7.5	6.5<pH≤7.5	
Cr	ND	95	33.35	27	17.07	51.2	0	250	200	63.2
Ni	ND	38	23.16	22	6.30	27.2	0	190	100	27.4
Cu	ND	33.2	21	20.7	5.02	23.88	0	100	100	20
Zn	ND	174	73.67	68	27.63	37.51	0	300	250	62.5
Cd	ND	0.19	0.13	0.13	0.03	25.06	0	0.6	0.3	0.065
Pb	ND	74	12.24	11	9.46	77.23	0	170	120	22.3
Hg	0.014	3.25	0.13	0.06	0.45	354.04	0	3.4	2.4	0.025
As	9.03	23.6	13.01	12.6	2.81	21.61	0	25	30	9.8

注: 表中 ND 表示重金属元素含量低于检出限, 视为未检出。

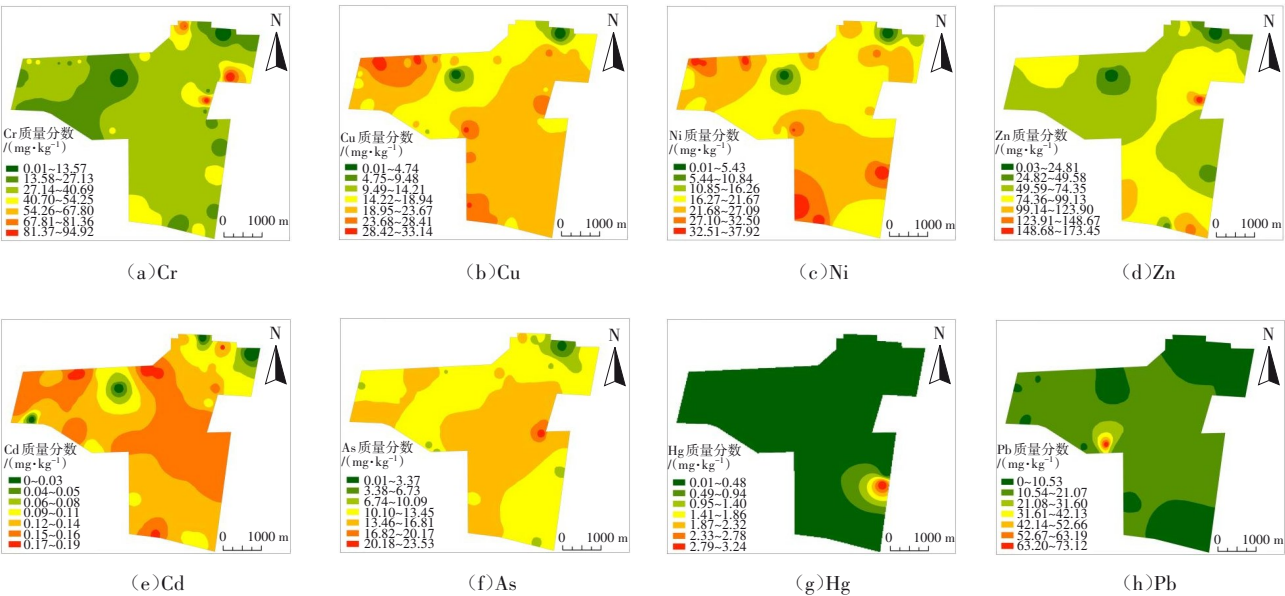


图 2 研究区表层农田土壤重金属含量的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of heavy metal content in surface farmland soil in the study area

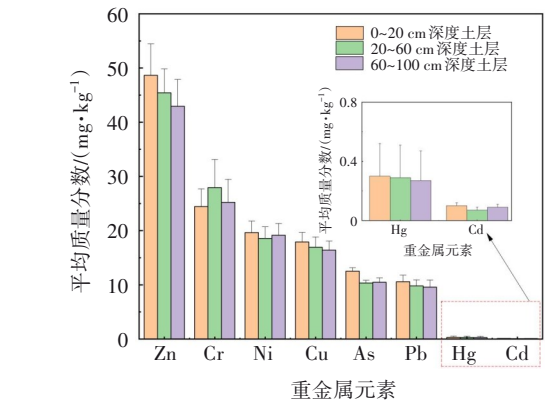


图3 研究区农田土壤重金属含量的垂向分布特征

Fig.3 Vertical distribution characteristics of heavy metal content in farmland soil in the study area

中SO₄²⁻和Cl⁻等组分与土壤重金属离子会发生络合反应将重金属固定在表层,抑制了重金属的纵向迁移能力,且Na⁺引起的土壤孔隙堵塞会降低土壤水分的渗透速率,从而间接延长重金属在土壤表层的滞留时间^[24-25]。重金属Cr的含量在垂向上呈现出先升高后降低的趋势,0~20 cm深度土层土壤中Cr的含量较低,20~60 cm深度土层土壤中Cr的含量增加,60~100 cm深度土层土壤中Cr的含量有所降低,但依旧高于0~20 cm深度土层土壤中Cr的含量,这表明Cr在表层土壤中会随雨水淋溶作用或灌溉水的渗透作用向下迁移,在60~100 cm深度土层中可能因氧化固定和矿物吸附作用被截留^[26];故该深度土层中重金属Cr的含量趋于稳定。重金属Cd和Ni的含量在垂向上则表现出先降低后升高的趋势,但总体含量变化不大。

2.2 农田土壤重金属污染程度与生态风险评价

如表2所示,研究区农田土壤中8种重金属元素*P_i*均值从高到低排序为:As(0.52)>Zn(0.24)>Cd(0.22)>Cu(0.21)>Cr(0.13)>Ni(0.12)>Pb(0.07)>

Hg(0.04),相较之下As的*P_i*均值较高,但8种重金属元素*P_i*均值均小于1,为无污染级别。研究区农田土壤中8种重金属元素的*P_N*值为0.392,污染程度为安全级别,说明研究区农田土壤中8种重金属元素的综合污染程度较低。研究区农田土壤中8种重金属元素的*E_rⁱ*均值从高到低排序为:Hg(202.13)>Cd(61.28)>As(13.3)>Cu(5.24)>Ni(4.22)>Pb(2.72)>Zn(1.18)>Cr(1.05),除Hg和Cd外,其他重金属元素均为低生态风险,Hg的生态风险水平为高等,Cd的生态风险水平为中等。根据测试结果来看,这是由于研究区周边部分点位的Hg含量偏高,因此研究区农田土壤中Hg的整体生态风险水平较高。经计算,研究区农田土壤中8种重金属元素的RI值为291.12,说明研究区农田土壤中8种重金属元素的总体生态风险水平为中等,这主要是因为Hg、Cd对研究区周边农田土壤的质量有较大影响。

表2 研究区农田土壤重金属污染程度及生态风险评价结果

Tab.2 Evaluation results for pollution level and ecological risk of heavy metals in farmland soil in the research area

重金属元素	<i>P_i</i> 均值	<i>P_N</i> 值	<i>E_rⁱ</i> 均值	RI值
Cr	0.13	0.392	1.05	291.12
Ni	0.12		4.22	
Cu	0.21		5.24	
Zn	0.24		1.18	
Cd	0.22		61.28	
Pb	0.07		2.72	
Hg	0.04		202.13	
As	0.52		13.3	

2.3 农田土壤重金属来源解析

2.3.1 相关性分析

采用Pearson相关性分析判断了研究区农田土壤中8种重金属之间的同源性。如表3所示:Cr和

表3 研究区农田土壤中重金属元素的相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of heavy metal elements in farmland soil in the research area

重金属元素	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	As
Cr	1							
Ni	0.407**	1						
Cu	0.332*	0.674**	1					
Zn	0.513**	0.319*	0.603**	1				
Cd	0.039	0.274	0.235	-0.018	1			
Pb	0.132	0.139	0.023	-0.018	0.304*	1		
Hg	0.182	0.334*	0.028	-0.221	0.085	0.064	1	
As	0.083	0.134	0.268	0.067	0.403**	0.267	-0.119	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双侧)上显著相关

Zn(相关系数 $r=0.513$)、Cu和Ni(相关系数 $r=0.674$)、Cu和Zn(相关系数 $r=0.603$)这3组元素间存在较强的相关性($p<0.01, r>0.5$),指示了这4种元素可能具有同源性;Cd与As、Pb元素也有一定的相关关系,但相关性较弱,可能这3种元素来源并不单一,受多种污染源控制的可能性更大,且这3种元素可能有部分相似的污染来源;Hg元素与其他重金属元素的相关性较弱,指示了Hg元素与其他重金属元素的污染源不同。综上可知,研究区农田土壤中重金属来源复杂,采用相关性分析方法难以精确判别其来源,需进一步建立模型对其来源进行解析。

2.3.2 APCS-MLR源解析

1)主成分分析

对标准化土壤重金属数据进行了KMO和Bartlett球形检验,结果显示KMO统计量为0.638, Bartlett球形检验显著性值接近于0,表明8种重金属元素之间有较好的相关性,可以进行主成分分析。采用最大方差旋转法进行了主成分分析,对研究区农田土壤重金属数据提取出3个主成分,特征值均大于1,累计方差贡献率达到72%,能有效表征土壤重金属主要污染源。

3个主成分指示了研究区农田土壤重金属的3个主要来源(图4)。主成分1的方差贡献率为35%,其中Cr、Ni、Cu和Zn在主成分1上具有较高载荷,指示了这4种元素的同源性。空间分布上,Cr和Zn高值区集中于研究区东部、北部和南部(图2),而实地调查结果表明,研究区东北部和南部是石化企业集中区,且分布较多采油井等采油设施,故推测Cr和Zn的外部来源主要为石化企业生产活动。Cu和Ni高值区集中分布在研究区的西部和南部,而实地调查结果显示,电子、汽车制造业等工业企业在研究区的西部和南部分布集中,故推测Cu和Ni很可能受到

电子加工和金属表面处置等工业活动影响。综上,石化企业和相关工业企业的生产活动可能对Cr、Ni、Cu和Zn这4种元素有重要影响。有学者对其他城市工业园区的土壤重金属进行研究也发现,工业生产中的冶炼、电子加工、金属表面处理等活动是造成土壤中Cr、Ni、Cu含量富集的主要原因,同时伴随的无组织排放(烟尘、污水污泥)、设备老化造成的跑冒滴漏和原油运输过程中的泄漏^[27-29]也是这3种元素的来源。因此,主成分1反映了工业生产活动对研究区农田土壤重金属的影响,将其定义为工业来源。

主成分2的方差贡献率为21%,主要载荷量为Cd、As和Pb。一般将土壤中Pb、Cd的来源归因于交通运输过程中的尾气排放、轮胎磨损等产生的粉尘通过大气干湿沉降进入土壤^[30-33],将As的主要来源归因于电池生产和铜(管、线)的生产以及化石燃料的燃烧^[33]。从图2可知,Pb元素在空间分布上为点源式集聚,且图2中显示的Pb富集区是处在研究区工业大道—阳新高速入口一带,该区域车流量较大,交通运输过程中的尾气排放和轮胎磨损等产生的粉尘沉降势必会引起Pb元素的累积。Cd富集区大都在研究区运输主干道周边农田。As富集区同样处在村庄交通主干道附近,且靠近一处石油开采井,往来大型车辆居多,柴油燃烧产生的尾气沉降是As的主要来源。因此可将主成分2视为交通来源。

主成分3的方差贡献率为16%,主要载荷量为Hg。本研究中Hg呈现出点源污染且变异系数高,受外源污染的影响很大。有研究认为,土壤中Hg的污染源较多,可能是化工企业生产活动和化石燃料燃烧产生的废气以大气沉降方式进入土壤,也可能是农业活动过程中污水灌溉、含Hg农药和杀虫剂的使用^[34-36]等直接作用于土壤。本研究中Hg为点源式污染,农药和杀虫剂的使用对Hg元素的积累有较大影响,此外Hg富集区周围有多家汽修厂、汽车城、驾校等,工厂运营期间的金属表面处置、固废堆放等生产活动势必也会引起Hg元素的积累。因此,可将主成分3视为农业—人为固废堆放导致的综合污染来源。

总体来看,研究区农田土壤重金属的污染情况复杂,涉及多个来源,且除了上述3类主要来源外,未知来源中可能还存在大气沉降等未被识别的污染源,这些因素都可能对土壤环境造成潜在影响。

2)APCS-MLR计算重金属来源贡献率

以绝对主成分因子得分为自变量,重金属含量

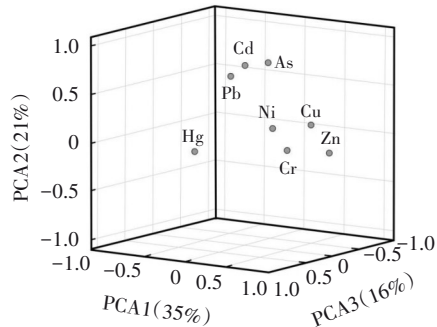


图4 主成分分析结果

Fig.4 Results of principal component analysis

实测值为因变量进行多元线性回归拟合。Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg 的拟合方程系数 R^2 分别为 0.544、0.761、0.775、0.828、0.561、0.571、0.880、0.618，且均在 0.05 水平上显著，拟合效果较好，说明了该模型的适用性。

采用 APCS-MLR 模型计算的贡献率结果(图5)表明，研究区农田土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn 的来源主要为工业来源，其对这 4 种元素的贡献率分别为 92.40%、56.92%、62.20% 和 84.64%，此外未知来源对 Ni 的贡献率为 20.99%，同样占较大比例，说明未知来源对 Ni 的影响也较大。土壤中 Cd、Pb、As 的来源主要为交通来源，其对这 3 种元素的贡献率分别为 53.25%、71.26% 和 42.78%，此外工业来源对 Cd 元素的贡献率为 38.30%，结合图 2 可知，部分 Cd 高值区周边同样分布有工业企业，表明 Cd 元素在一定程度上也受工业企业生产活动的影响。土壤中 Hg 元素的来源相对复杂，APCS-MLR 模型解析出农业来源对 Hg 的贡献率为 33.23%，未知来源对 Hg 的贡献率为 48.17%，结合 Hg 元素富集区地理位置认为，Hg 元素的累积更大程度上为农业-人为固废堆放导致的综合污染来源。

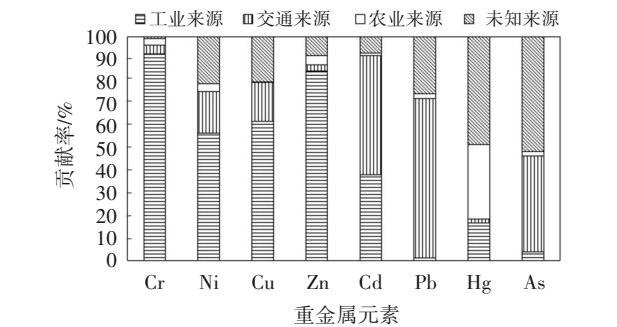


图5 APCS-MLR模型计算的重金属来源贡献率源

Fig.5 Contribution rates of heavy metal sources calculated by APCS-MLR model

3 结论

1)研究区农田土壤中8种重金属元素平均含量均未超过国家标准规定的农用地土壤污染风险筛选值，其中Cu、Cd、Hg和As元素的平均含量高于河南省土壤环境背景值。表层农田土壤中的Cr和Zn高值区主要集中在研究区东部，Cu、Ni和Cd高值区主要集中在研究区西部和南部，Hg和Pb主要呈现点源性集聚现象。

2)研究区农田土壤中重金属元素的综合污染程度较低，综合生态风险水平为中等，局部存在Cd和

Hg元素的中等和高生态风险，其他重金属元素的生态风险水平均较低。

3)Cr、Ni、Cu和Zn主要为工业来源，其对Cr、Ni、Cu和Zn的贡献率分别为92.40%、56.92%、62.20%和84.64%，Cr和Zn主要受石化企业生产活动的影响，Cu和Ni主要受电子、汽车制造业等工业企业生产活动的影响；Cd、Pb和As主要为交通来源，其对Cd、Pb和As的贡献率分别为53.25%、71.26%和42.78%，这3种元素与交通运输过程中的尾气排放和轮胎磨损等产生的粉尘沉降有关；Hg元素的来源相对复杂，推测为农业-人为固废堆放导致的综合污染来源，其中农业来源对Hg的贡献率为33.23%，未知来源对Hg的贡献率为48.17%。

参考文献：

[1] Guo G H, Wu F C, Xie F Z, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(3):410-418.

[2] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(2):507-515.

Dai B, Lyu J S, Zhan J C, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China[J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 507-515.

[3] 卢媛,郑君焱,韩顺莉,等.土壤污染研究领域进展的中文文献调研[J].生态毒理学报,2023,18(6):269-282.

Lu Y, Zheng J Y, Han S L, et al. Research progress of soil pollution in Chinese literatures[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2023, 18(6):269-282.

[4] 顾建芹,江健,任周桥.上海市奉贤区农田土壤-农产品中的重金属含量特征和污染评价[J].上海农业学报,2024,40(2):43-52.

Gu J Q, Jiang J, Ren Z Q. Content characteristic and pollution assessment of heavy metals in farmland soils and agricultural products in Fengxian District, Shanghai[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2024, 40(2):43-52.

[5] 蔡立梅,马瑾,周永章,等.东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J].环境科学,2008,29(12):3496-3502.

Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, et al. Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in agricultural soil in Dongguan City[J]. Environmental Science, 2008, 29(12):3496-3502.

[6] 王玉,辛存林,于爽,等.南方丘陵区土壤重金属含量、

- 来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4756-4766.
- Wang Y, Xin C L, Yu S, et al. Evaluation of heavy metal content, sources, and potential ecological risks in soils of southern hilly areas[J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4756-4766.
- [7] 梁樑, 郭晓淞, 陈汉杰, 等. 乌鲁木齐市核心城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.
- [8] 张丽, 张乃明, 包立, 等. 滇东南农田土壤重金属分布特征及污染风险评价[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 473-480.
- Zhang L, Zhang N M, Bao L, et al. Heavy metal distribution and pollution risk assessment in farmland soil in southeastern Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(2): 473-480.
- [9] 刁杰. 我国农田土壤重金属污染现状、危害及风险评价研究[J]. 江西化工, 2021, 37(6): 27-29.
- Diao J. Research of current situation, hazard and risk assessment of heavy metal contamination in agricultural soils in China[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2021, 37(6): 27-29.
- [10] 邢孟涵, 姜冰, 张杰, 等. 弥河流域土壤重金属污染生态风险评价和溯源分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2023, 37(6): 655-663.
- Xing M H, Jiang B, Zhang J, et al. Ecological risk assessment and traceability analysis of heavy metal pollution in soils of the Mihe River basin[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2023, 37(6): 655-663.
- [11] 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]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 423: 127116.
- [12] 徐建明, 何丽芝, 唐先进, 等. 中国重金属污染耕地土壤安全利用存在问题与建议[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1289-1296.
- Xu J M, He L Z, Tang X J, et al. Problems and suggestions on safe utilization of heavy metal (loid)-contaminated farmlands in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1289-1296.
- [13] 多克辛. 河南省部分典型农业区域土壤污染状况研究[C]//中国科学技术协会, 河南省人民政府. 第十届中国科协年会环境保护与生态文明建设论坛论文集, 2008: 44-48.
- Dou K X. Study on soil pollution status in some typical agricultural areas of Henan Province [C]//China Association for Science and Technology, Henan Provincial People's Government. Proceedings of the Environmental Protection and Ecological Civilization Construction Forum of the 10th Annual Conference of China Association for Science and Technology, 2008: 44-48.
- [14] 刘小诗, 李莲芳, 曾希柏, 等. 典型农业土壤重金属的累积特征与源解析[J]. 核农学报, 2014, 28(7): 1288-1297.
- Liu X S, Li L F, Zeng X B, et al. Characterization of heavy metal accumulation in typical agriculture soils and its source analysis [J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2014, 28(7): 1288-1297.
- [15] 成永霞, 赵宗生, 王亚洲, 等. 河南省某铅冶炼厂附近农田土壤重金属污染特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1505-1510.
- Cheng Y X, Zhao Z S, Wang Y Z, et al. Pollution characteristics of heavy metals in farmland soil near a lead smelter in Henan Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1505-1510.
- [16] 马云霞, 彭华, 朱泽军, 等. 河南省北部某开发区周边耕地土壤重金属风险评价及源解析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 66-75.
- Ma Y X, Peng H, Zhu Z J, et al. Risk assessment and source analysis of heavy metals in cultivated soil around a development zone of northern Henan Province [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2025, 53(1): 66-75.
- [17] 曹莉华. 能源型工业园区土壤重金属污染分布特征及评价[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- Cao L H. Distribution and evaluation of heavy metal pollution in soil of energy industrial park [D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- [18] 王古月. 镇江绿色化工新材料产业园土壤重金属污染现状及其风险[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- Wang G Y. Pollution status and risk assessment of heavy metals in soils of chemical new material industrial park in Zhenjiang [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [19] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112-115.
- [20] 唐志敏, 周墨, 张明, 等. 基于APCS-MLR受体模型的江西省宜丰县土壤重金属来源解析及生态风险评价[J]. 环境科学, 2025, 46(7): 4674-4683.
- Tang Z M, Zhou M, Zhang M, et al. Source analysis and ecological risk assessment of heavy metals in soil of the

- Yifeng County, Jiangxi Province based on APCS-MLR receptor model[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(7): 4674-4683.
- [21] 邵丰收,周皓韵.河南省主要元素的土壤环境背景值[J]. *河南农业*, 1998(10):28.
Shao F S, Zhou H Y. Soil environmental background values of major elements in Henan Province[J]. *Henan Agriculture*, 1998(10):28.
- [22] 李军,高占栋,马利邦,等.黄河兰州段城市饮用水源地土壤重金属污染及其溯源的多指标综合分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(11):6723-6733.
Li J, Gao Z D, Ma L B, et al. Multiproxy comprehensive analysis for source apportionment and pollution of heavy metals in urban drinking-water source soils from the Lanzhou Reach of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(11):6723-6733.
- [23] Hu B F, Shao S, Fu Z Y, et al. Identifying heavy metal pollution hot spots in soil-rice systems: A case study in South of Yangtze River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658:614-625.
- [24] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, et al. Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils—To mobilize or to immobilize?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 266:141-166.
- [25] Mahar A, Wang P, Li R H, et al. Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: A review[J]. *Pedosphere*, 2015, 25(4):555-568.
- [26] 耿国强,樊雅琼,申丽霞,等.不同水源灌溉对玉米田Pb、Ni、Cr迁移积累的影响[J]. *节水灌溉*, 2024(10): 68-76.
Geng G Q, Fan Y Q, Shen L X, et al. Effects of irrigation with different water sources on the migration and accumulation of Pb, Ni, Cr pollutants in corn fields[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(10):68-76.
- [27] 冯乙晴,刘灵飞,肖辉林,等.深圳市典型工业区土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(6):1051-1058.
Feng Y Q, Liu L F, Xiao H L, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in soil of typical industrial district of Shenzhen[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(6):1051-1058.
- [28] Cheng B Y, Liu K L, Liu Y L, et al. Source identification, spatial distribution pattern, risk assessment and influencing factors for soil heavy metal pollution in a high-tech industrial development zone in central China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2021, 27(2):560-574.
- [29] 倪碧珩,施维林,陈洁,等.某电镀厂地块重金属污染特征与健康风险空间分布评价[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3):878-885.
Ni B H, Shi W L, Chen J, et al. Pollution characteristics and spatial distribution evaluation of the health risk of heavy metals in an electroplating plant site[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(3): 878-885.
- [30] Hanesch M, Scholger R, Dekkers M J. The application of fuzzy C-means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(11-12):885-891.
- [31] Bosco M L, Varrica D, Dongarrà G. Case study: Inorganic pollutants associated with particulate matter from an area near a petrochemical plant[J]. *Environmental Research*, 2005, 99(1):18-30.
- [32] Cheng Z, Chen L J, Li H H, et al. Characteristics and health risk assessment of heavy metals exposure via household dust from urban area in Chengdu, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620:621-629.
- [33] 杨鹏至,赵元,肖粤新,等.基于空间插值与PMF模型的国道沿线土壤重金属源解析:以107国道岳阳段为例[J]. *现代地质*, 2024, 38(3):694-705.
Yang P Z, Zhao Y, Xiao Y X, et al. Source apportionment of heavy metals in soils along a national highway using spatial interpolation and PMF model: A case study of the Yueyang section of National Highway 107[J]. *Geoscience*, 2024, 38(3):694-705.
- [34] Zhou Y T, Aamir M, Liu K, et al. Status of mercury accumulation in agricultural soil across China: Spatial distribution, temporal trend, influencing factor and risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240:116-124.
- [35] 孟晓飞,郭俊梅,杨俊兴,等.河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(2):900-908.
Meng X F, Guo J M, Yang J X, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils surrounding a typical industrial area of Henan province[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(2):900-908.
- [36] 孙雪菲,张丽霞,董玉龙,等.典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J]. *环境科学*, 2021, 42(3):1093-1104.
Sun X F, Zhang L X, Dong Y L, et al. Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3):1093-1104.

(编辑 杨晓燕)