



· 青年编委专刊 ·

徐州市典型老工业基地土壤重金属 来源解析及风险评价

杨德军¹, 李馨兆¹, 王珉玥¹, 贺政翔¹, 郭远辉¹, 贝胜男¹, 杨 永¹,
金路洋¹, 仇云鹏², 何 环³, 曹文平^{4,5}

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 南京农业大学 草业学院, 江苏 南京 210095;
3. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 4. 江苏莲洋港环保科技有限公司, 江苏 徐州 221003;
5. 徐州工程学院 环境工程学院, 江苏 徐州 221018)

摘要 对典型老工业基地进行周边土壤重金属污染情况研究, 能够为老工业基地生态修复模式的探索打下坚实基础。采集徐州市某电厂周边 21 个土壤样本, 使用 ICP-MS 对 Cr、Cd、Cu、Ni、Pb 5 种重金属含量进行测量。结果表明, 老工业基地周边土壤 Cd、Cu、Pb 有一定积累, 部分点位 Cd 和 Pb 有超标现象。利用相关性分析和 PMF 模型对土壤重金属进行来源解析, 发现土壤重金属可能受工业源、交通源、大气沉降源和自然源影响。采用单因子污染指数法、内梅罗污染指数法、潜在生态风险指数法对土壤重金属进行污染风险评价, 表明 Cd 污染程度较为严重, 生态风险水平较高。研究结论证明老工业基地已对周边环境产生不利影响, 需进行污染防治。

关键词 老工业基地; 重金属; PMF; 污染评价

中图分类号: X53 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxzbzr.2025-06-012

Source analysis and risk evaluation of heavy metals in soils of typical old industrial bases in Xuzhou City

YANG Dejun¹, LI Xinzhaoyang¹, WANG Minyue¹, HE Zhengxiang¹,
GUO Yuanhui¹, BEI Shengnan¹, YANG Yong¹, JIN Luyang¹,
QIU Yunpeng², HE Huan³, CAO Wenping^{4,5}

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. College of Agro-Grassland Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
3. School of Chemical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
4. Jiangsu LYG Environmental Technology Co., Ltd., Xuzhou 221003, China;
5. School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

Abstract In this study, a typical old industrial base was selected for the investigation of heavy metal pollution in the surrounding soil to lay a solid foundation for the exploration of ecological restoration model of old industrial bases. In this study, 21 soil samples around a power plant in Xuzhou City were collected, and the

收稿日期: 2025-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(U2003103); 2025 年度徐州市前沿技术研发计划(KC25126)。

第一作者: 杨德军, 男, 博士, 副教授, 从事环境岩土工程研究, yangdj@163.com。

contents of five heavy metals, Cr, Cd, Cu, Ni and Pb, were measured by ICP-MS. The results showed that Cd, Cu and Pb had accumulated in the soil around the old industrial base, and Cd and Pb exceeded the standard at some points. The correlation analysis and PMF model were used to analyze the sources of soil heavy metals, and the results showed that the soil heavy metals might be influenced by industrial sources, transportation sources, atmospheric deposition sources and natural sources. Pollution risk evaluation of soil heavy metals was carried out using single-factor pollution index method, Nemero pollution index method and potential ecological risk index method, and the results showed that Cd pollution was more serious and the ecological risk level was higher. This proves that the old industrial base has adversely affected the surrounding environment and requires pollution prevention and control.

Keywords old industrial base; heavy metals; PMF; pollution evaluation

老工业基地作为我国工业化进程中的重要组成部分,对我国经济建设作出了不可磨灭的贡献。建国初期,我国的经济发展模式决定了老工业基地长期依赖自然资源进行经济发展的特点,这使得资源环境约束趋紧,生态环境也遭到极大破坏^[1-2]。生态环境的破坏不仅制约了老工业基地和城市的高质量发展,同时也影响了自然资源的可持续利用^[3]。在全球以及全国高度重视生态治理的大背景下,面对环境保护和经济发展的双重压力,老工业基地生态修复成为城市发展亟要解决的一大难题^[4]。对老工业基地土壤重金属污染进行系统的调查和评估,不仅是对历史遗留环境问题的回顾,更是对当前环境保护和可持续发展战略的响应。江苏是我国经济发展重心之一,位于江苏省北部的徐州市在江苏省内承担能源供应的重要角色。徐州市是因煤而兴的“百年煤城”,煤炭资源在徐州发展进程中发挥了不可磨灭的作用,但煤炭资源的过度开采带来了资源枯竭与生态风险^[5]。在资源枯竭之后,许多煤矿纷纷关停,改建成其他工业项目,成为典型的老工业基地。老工业基地会给周边土壤环境带来不同程度的重金属污染^[6]。徐州市积极响应国家生态文明建设的号召,努力推进老工业城市振兴和资源型城市转型,进行老工业基地生态修复成为转型中重要的一环。基于此背景,以徐州市典型老工业基地为研究对象,进行老工业基地及其周边土壤重金属来源解析并进行生态风险评价,以期徐州市老工业基地的生态修复提供参考。

目前,关于土壤重金属来源解析的研究方法主要分为定性分析和定量分析^[7]。定性分析主要采用相关性分析、多元统计分析等^[8-9];定量分析主要采用正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型^[10]、绝对主成分得分-多

元线性回归模型(APCS-MLR 受体模型)^[11]、主成分分析法(principal component analysis, PCA)^[12]等。在这些方法和模型中,PMF 模型不仅可以定量分析重金属,确保非负源贡献值和因子分布,而且具有无需前期源配制、分解矩阵中非负元素、利用数据的标准差进行优化等优点^[13-15]。

为了解土壤重金属对周边居民的影响程度,国内外研究会对目标区域进行土壤重金属污染指数评价和生态风险评价^[16]。吕玉娟等运用污染指数法和潜在生态风险指数法对浙江省某尾矿库周边农田土壤重金属污染程度以及生态风险进行评价^[17];杨楠楠等利用综合潜在生态风险指数探讨了沔东新城 Pb、Cu、Cd 和 Hg 的污染程度、污染风险及风险发生概率^[18]。

本研究选取徐州煤矿倒闭后的再建电厂做为徐州市典型老工业基地,对其周边土壤重金属污染情况进行调查,结合 PCA 和 PMF 模型对老工业基地周边土壤重金属污染进行溯源,采用多种评价方法评价土壤重金属污染程度。通过精确的污染调查,可以为制定针对性的土壤修复策略提供科学依据,同时为相关政策制定和环境管理提供数据支持,最终实现老工业基地的绿色转型和可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及采样点布设

徐州市是苏北地区老工业最为发达的城市。本研究选取位于徐州市中部柳新镇的某热电厂及其周边作为典型老工业基地,进行污染现状研究。该电厂成立于 1994 年,是全国特大型火力发电公司之一,2015—2017 年完成了超低排放改造,此后的几年中陆续进行升级改造,并筹建了污泥掺

烧等项目,是徐州市老工业基地典型代表。该电厂旁边原是庞庄煤矿庞庄井旧址,后该电厂将庞庄井并入。电厂周边分布着大量居民区,即该老工业基地影响人口数量较多,对当地社会经济影响显著。距离该电厂不远处有 1 处工业园区,九

里湖湿地公园也距离该电厂较近。采样点位根据当地的地形及实际情况,遵循《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)^[19],在电厂周边进行布点取样,采样点布设如图 1 所示。

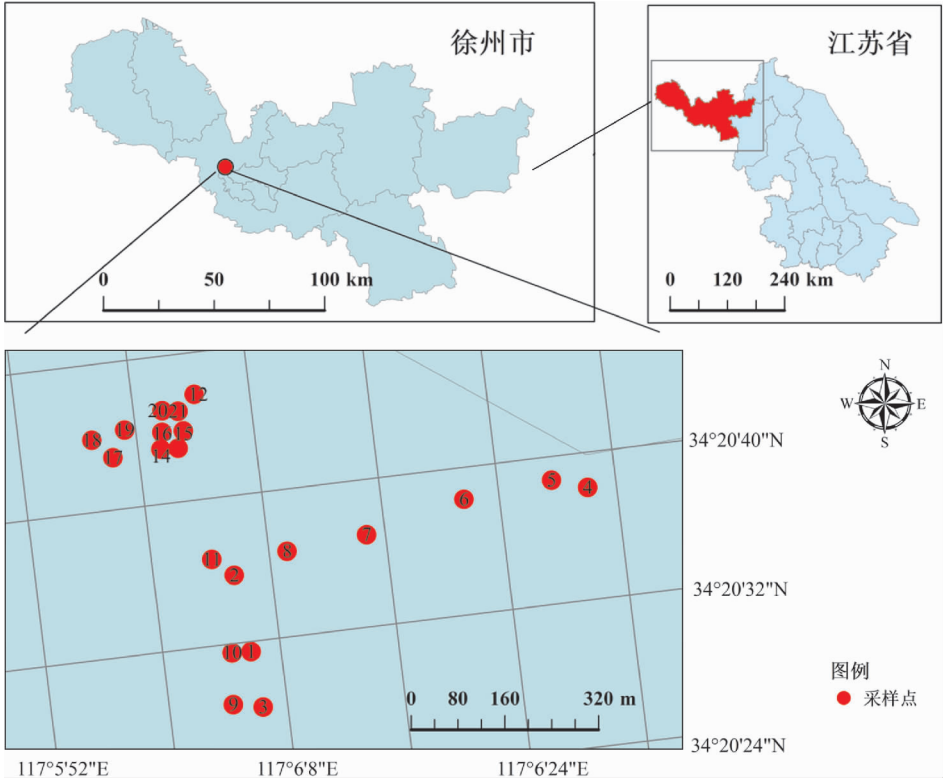


图 1 研究区域采样点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites in the study area

1.2 样品采集与分析

共设置 21 个采样点,采集样点深 0 ~ 20 cm 的土壤,每个样品由采样点周围 1 m 范围内 3 ~ 4 个样点的样品混合而成。样品采集后装入聚乙烯采样袋密封保存。采集的样品在实验室风干、剔除杂质、磨碎并过 100 目(0.5 mm)筛备用。

称取过筛后的土壤样品 0.2 g(±10%)于聚四氟乙烯坩埚中,依次加入 6 mL 盐酸、2 mL 硝酸、6 mL 氢氟酸和 2 mL 高氯酸,2 h 后视情况进行补酸,直至消解完全。消解完全后赶酸并定容至 25 mL。采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对 Cr、Cd、Cu、Ni、Pb 这 5 种重金属含量进行测量。为控制实验的精度和准确性,设置 4 个空白样品并进行重复测样以消除实验误差。本实验过程中所用的水均为去离子水。

1.3 正定矩阵因子分解(PMF)源解析模型

正定矩阵因子分析(PMF)是由 Paatero 等提出的一种多元因子分析方法,广泛应用于环境领

域污染物源解析。

该模型将原始矩阵 X 分解为源贡献率矩阵 G 、源成分谱矩阵 F 、残差矩阵 E ,计算公式如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^P G_{ik}F_{ik} + E_{ij} \tag{1}$$

式中: X_{ij} 为第 i 个土壤样品中 j 元素的含量(mg/kg); G_{ik} 为第 k 个源对第 i 种样品的贡献; F_{ik} 为第 k 个源中第 i 种元素的含量(mg/kg); E_{ik} 根据定义目标函数计算得到。

目标函数 Q 定义如下:

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

式中: u_{ij} 为 j 元素在第 i 个土壤样品中的不确定度。

当各元素的含量小于或等于相应的方法检出限(MDL)时,不确定度为

$$u = 5/6 \times MDL \tag{3}$$

当各元素的含量大于相应的方法检出限(MDL)时,不确定度为:

$$u_{ij} = \sqrt{(\delta \times C)^2 + (0.5 MDL)^2} \tag{4}$$

式中: δ 为相对偏差; C 为元素含量(mg/kg)。

本研究采用 USEPA 的软件 PMF5.0 进行 PMF 分析,选择增加因子个数 2~4,运算次数为 20 次,随机选择点位运行 PMF 模型。

1.4 土壤重金属污染指数评价

单因子污染指数法可以直观反映各重金属元素的污染程度,内梅罗污染指数法可以反映环境的综合污染状况,二者结合使用可以科学客观地反映研究区域土壤重金属污染状况。

单项污染指数法通过计算土壤重金属的实测值与质量标准值的比值,确定土壤污染状态。具体计算公式如下:

表1 土壤重金属含量单项污染指数评价分级标准

Tab.1 Grading standards for evaluation of individual pollution indices of soil heavy metal content			
等级	P_i	P_N	评价等级
1	$P_i \leq 1.0$	$P_N \leq 0.7$	无污染
2	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线
3	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
4	$3.0 < P_i \leq 5.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
5	$P_i > 5.0$	$P_N > 3.0$	重度污染

生态风险评价是研究污染源对生态系统可能造成的生态效应与危害的方法之一。潜在生态危害指数法主要用于衡量土壤重金属对环境的生态风险,计算公式为:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n^i} \tag{7}$$

$$E_r^i = C_f^i \times T_r^i \tag{8}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{9}$$

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{5}$$

式中: P_i 为土壤重金属*i*的单项污染指数; C_i 为土壤重金属*i*的实测值(mg/kg); S_i 为土壤重金属*i*的标准值(mg/kg),本研究采用《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)^[20] 筛选值($5.5 < \text{pH} \leq 6.5$)。

内梅罗污染指数法计算公式为

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i(\text{ave})}^2 + P_{i(\text{max})}^2}{2}} \tag{6}$$

单项污染指数和内梅罗污染指数法分级评判标准如表 1 所示。

式中: C_i 为重金属土壤实测含量(mg/kg); C_n^i 为重金属元素参比值(mg/kg),本研究选取徐州市土壤背景值(后文简称为“背景值”)作为参比值; T_r^i 为重金属毒性响应系数; E_r^i 为土壤中重金属元素的潜在生态危害指数; RI 为综合潜在风险指数。

相关指数取值如表 2 所示;风险等级划分如表 3 所示。

表2 潜在生态危害指数法相关指数取值

Tab.2 Potential ecological risk index method related index values

指标	化学元素				
	Cr	Cd	Cu	Ni	Pb
C_n^i	64.8	30.7	24.3	0.1	21.3
T_r^i	2	5	5	30	5

注:徐州市土壤类型以褐土为主,因此,本文采用我国自然褐土的重金属元素背景值做为徐州市土壤背景值^[20-23]。

表3 潜在生态风险程度分级表

Tab.3 Classification of potential ecological risk levels

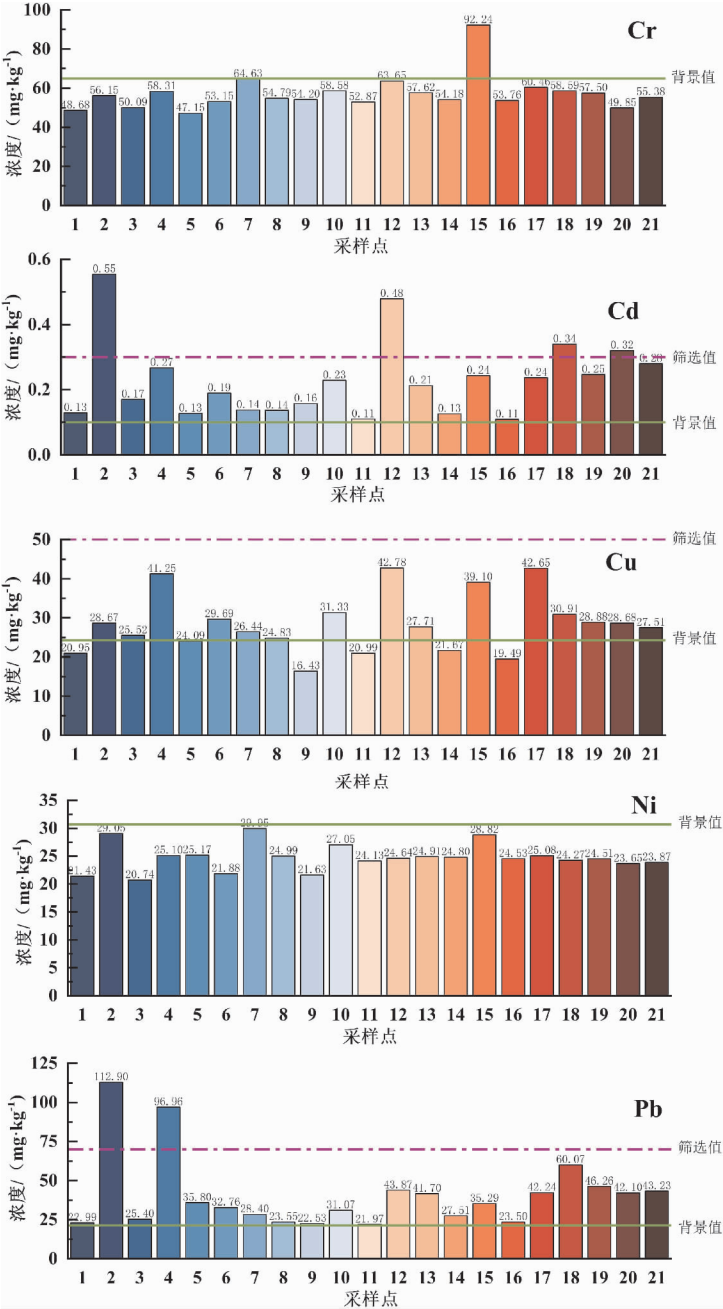
指标	生态风险程度				
	低	中	高	很高	极高
E_r^i	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<150	150~300	300~600	>600	—

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量描述性统计

根据图 2 和表 4,可知研究区土壤重金属元素含量的范围,Cr 为 47.15~92.24 mg/kg,Cd 为 0.11~0.55 mg/kg,Cu 为 16.43~42.78 mg/kg,Ni 为 20.74~29.95 mg/kg,Pb 为 21.97~112.90 mg/kg。Cd、Cu、Pb 的平均值均大于背景值,分别为背景值的 2.30、1.18、1.92 倍,说明这 3 种重金

属有不同程度的富集。结合图 1 可以看出,Cd 和 Pb 全部点位均超过背景值,个别点位甚至已经超过《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中农田 5.5 < pH ≤ 6.5 对应的筛选值,说明其 Cd 和 Pb 富集程度高。Cu 元素超过背景值的点位占总点位的 71.43%,但没有点位超过筛选值,说明 Cu 富集程度较高但污染程度较低。Cr 元素平均含量虽未超过背景值,但存在点位 15 远超背景值,是背景值的 1.42 倍,说明其有富集但不严重。



注:图中未显示筛选值的表明筛选值远高于各点位重金属含量。

图 2 研究区域各点位土壤重金属浓度

Fig. 2 Soil heavy metal concentrations at various sites in the study area

变异系数(CV)可以反映数据离散程度和分布状况,CV < 10% 为弱变异,10% ≤ CV ≤ 100% 为中等变异,CV > 100% 为强变异。研究区域土壤重金属含量变异系数大小排序为 Pb(57.67%) > Cd(51.76%) > Cu(26.31%) > Cr(16.08%) > Ni(9.71%)。Ni 为弱变异,其余 4 种重金属为中

等变异,这说明 Ni 受人类活动影响较小,重金属元素会因人类活动产生较大偏度。从表 4 中可以看出,Pb、Cr、Cd 的峰度和偏度均较大,这进一步说明研究区域 Pb、Cr、Cd 可能受到人类活动的明显干扰。

表 4 研究区域土壤重金属描述性特征及相关标准

Tab. 4 Descriptive statistics and related standards of soil heavy metals in the study area

重金属	最小值/ (mg · kg ⁻¹)	最大值/ (mg · kg ⁻¹)	平均值/ (mg · kg ⁻¹)	标准差/ (mg · kg ⁻¹)	CV/%	偏度	峰度	背景值/ (mg · kg ⁻¹)	筛选值/ (mg · kg ⁻¹)
Cr	47.15	92.24	57.230 0	9.203 39	16.08	2.902	10.890	64.8	150
Cd	0.11	0.55	0.229 5	0.117 32	51.76	1.454	2.045	0.1	0.3
Cu	16.43	42.78	28.551 0	7.513 35	26.31	0.657	-0.184	24.3	50
Ni	20.74	29.95	24.771 4	2.404 79	9.71	0.536	0.346	30.7	60
Pb	21.97	112.90	40.957 1	23.619 39	57.67	2.163	4.614	21.3	70

注:背景值为徐州市土壤背景值;筛选值为《农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中,5.5 < pH ≤ 6.5 对应的农田土壤风险筛选值。

2.2 土壤重金属来源解析

2.2.1 相关性分析

本研究使用 Origin 2022 对研究区域 Cr、Cd、Cu、Ni、Pb 5 种重金属元素进行了 Pearson 相关性分析,结果如图 3 所示。Cd 和 Pb 相关性系数高达 0.75,呈极显著正相关,有明显的同源性。其次是 Cr 和 Ni(0.60)、Cr 和 Cu(0.56)、Cd 和 Cu(0.56),均呈极显著正相关;Cu 和 Pb 相关性系数为 0.46,呈显著正相关。

2.2.2 PMF 模型

本研究采用 USEPA 的软件 PM5.0 进行 PMF 分析,分析中增加因子个数 2 ~ 4 个,运算次数设为 20 次,随机选择点位运行 PMF 模型。比较不同因子数下各重金属的 R²,仅在因子数为 4 时,R² 均大于 0.8,因此选择因子数为 4。比较不同运行次数 Q_{rob}与 Q_{exp},其中 Q_{rob}为目标函数 Q 的最优解,Q_{exp}为目标函数 Q 的真值,通过不同因子的比较,当 Q_{rob}与 Q_{exp}相差较小时,计算的方案最为稳定。运行结果表明,运行次数为 14 时,Q_{rob}与 Q_{exp}相差最小。

PMF 源解析结果如表 5 和图 4 所示。重金属相关性分析表明,Pb 和 Cd 极显著相关,说明两者拥有共同来源。PMF 模型源解析结果显示,Pb 和 Cd 共同影响因子为 1 和 3。已有研究表明,两者均会受到工业源^[24-25]和大气沉降源^[26-27]的影响,因此,因子 1 和 3 可能为工业源和大气沉降源。研究表明,Cu 在电厂周边土壤中的分布会受到风向的显著影响^[28]。Cu 在因子 1 上的载荷仅为 7.1%,在因子 3 上的载荷却高达 28.9%。据此我们判断,因子 1 为工业源,因子 3 为大气沉降源。因子 2 主要载荷元素为 Pb(36.1%)和 Cu(33.2%)。机动车尾气排放、轮胎磨损、燃油和润滑油泄漏等均可导致 Cu 和 Pb 等元素在土壤

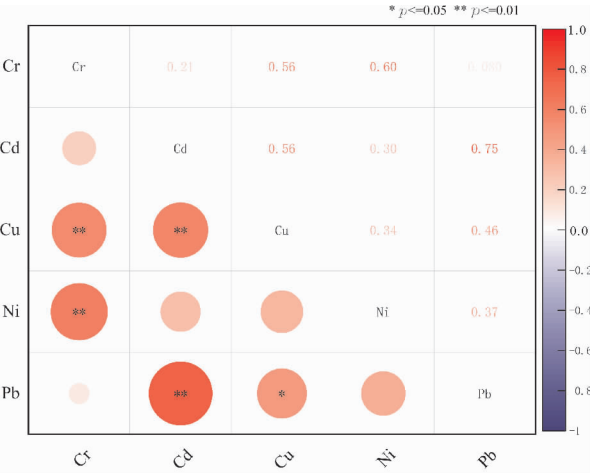


图 3 研究区域土壤重金属含量相关性分析
Fig. 3 Correlation analysis of soil heavy metal content in the study area

中积累^[29],因此,我们推测因子 2 为交通源。结合描述性统计结果大部分点位 Cr 含量低于背景值、全部点位 Ni 含量低于背景值,受人类活动影

响较小,受成土母质影响较大。在现有研究中,通常也认为土壤中 Cr 和 Ni 的主要来源为自然母岩^[30]。因此,我们判定因子 4 为自然源。

表 5 PMF 模型土壤重金属各因子载荷表

Tab. 5 PMF model soil heavy metal loading table for each factor

因子	Cr/%	Cd/%	Cu/%	Ni/%	Pb/%
因子 1	18.0	27.6	7.1	23.0	40.8
因子 2	21.8	0	33.2	20.6	36.1
因子 3	4.5	37.5	28.9	0	23.1
因子 4	55.7	34.8	30.7	56.4	0

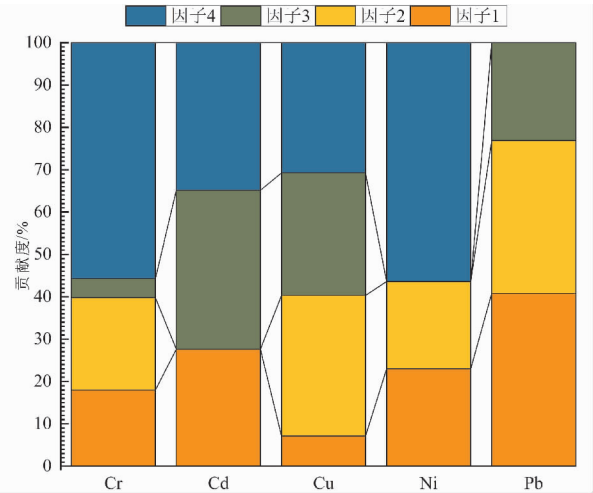


图 4 PMF 模型土壤各重金属源贡献率

Fig. 4 Source contribution ratio of heavy metals in PMF

2.3 土壤重金属污染风险评价

2.3.1 土壤重金属污染指数评价

Cr、Cd、Cu、Ni、Pb 元素的单项污染指数平均值分别为 0.382、0.762、0.571、0.413、0.585,5 种重金属均处无污染水平;变异系数的大小顺序为

Pb (0.577) > Cd (0.518) > Cu (0.263) > Cr (0.161) > Ni(0.097),除 Ni 外均属中等变异,Ni 为轻微变异。由表 6 可知:研究区域内所有样点的 Cr、Cu、Ni 元素均处于无污染水平;对于 Cd 元素,共有 4 个样点处于警戒线,分别为点位 2、12、18、20,占样点总数的 19.05%,其余点位均处于安全水平;对于 Pb 元素,共有 2 个样点处于警戒线,分别为点位 2、4,占样点总数的 9.52%,其余点位均处于安全水平。这可能于人类活动、土壤母质、农田耕作等影响,土壤中重金属的富集趋势不同,因此造成重金属土壤污染程度不同。点位 2 和 4 分别位于电厂的西侧和北侧,Cd 和 Pb 可能来源于电厂;点位 4 靠近公路,其 Pb 含量较高也可能来源于交通;点位 12 是电厂西北方向一条排水沟渠,沟渠内污泥呈深黑色,Cd 可能来源于电厂和废水/污水的排放;点位 18 和 20 位于电厂不远处的一块空地,该空地应为煤矸石充填区,其上种植少量农作物,推断污染物来源为煤矸石。

表 6 各点位单项污染指数以及内梅罗污染指数结果

Tab. 6 Individual pollution indices for each point and Nemerow pollution index results

点位	P_i					P_N
	Cr	Cd	Cu	Ni	Pb	
1	0.325	0.431	0.419	0.357	0.328	0.402
2	0.374	1.848	0.573	0.484	1.613	1.479
3	0.334	0.569	0.510	0.346	0.363	0.502
4	0.389	0.890	0.825	0.418	1.385	1.125
5	0.314	0.425	0.482	0.419	0.511	0.473
6	0.354	0.632	0.594	0.365	0.468	0.562
7	0.431	0.459	0.529	0.499	0.406	0.498
8	0.365	0.456	0.497	0.417	0.336	0.457
9	0.361	0.525	0.329	0.360	0.322	0.458

续表 6

点位	P_i					P_N
	Cr	Cd	Cu	Ni	Pb	
10	0.391	0.761	0.627	0.451	0.444	0.658
11	0.352	0.366	0.420	0.402	0.314	0.396
12	0.424	1.597	0.856	0.411	0.627	1.257
13	0.384	0.708	0.554	0.415	0.596	0.626
14	0.361	0.421	0.433	0.413	0.393	0.419
15	0.615	0.811	0.782	0.480	0.504	0.730
16	0.358	0.364	0.390	0.409	0.336	0.391
17	0.403	0.790	0.853	0.418	0.603	0.743
18	0.391	1.133	0.618	0.404	0.858	0.935
19	0.383	0.821	0.578	0.408	0.661	0.707
20	0.332	1.067	0.574	0.394	0.601	0.863
21	0.369	0.934	0.550	0.398	0.618	0.775
安全	21	17	21	21	19	18
警戒线	0	4	0	0	2	3
轻度污染	0	0	0	0	0	0
中度污染	0	0	0	0	0	0
重度污染	0	0	0	0	0	0
最大值	0.615	1.848	0.856	0.499	1.613	1.479
平均值	0.382	0.762	0.571	0.413	0.585	0.688
变异系数	0.161	0.518	0.263	0.097	0.577	0.438

内梅罗污染指数结果显示,3 个点位位于警戒线水平,分别为点位 2、4、12,其余点位位于安全水平。结合单因子污染指数评价结果来看,电厂对其周边环境造成了一定的影响,相关部门应对其采取相关措施。此外,相关部门应着重关注 12 号点位,查明其废水/污水排放源头,及时切断污染源以防止周边环境进一步恶化。点位 13 ~ 21 均处于电厂西北边煤矸石填充地,尽管这 9 个点位的内梅罗污染指数显示其位于安全水平,但整体指数偏高,且已有各别点位单因子指数到达警戒线水平,相关部门需进一步开展调查研究,确定其污染源,及时采取相应的预防措施。

2.3.2 土壤生态风险评价

用潜在生态风险指数法进行生态风险评价时,评价参比值的选择方法很多,目前使用较多的有全球土壤重金属含量背景值、当地土壤背景值、国家土壤环境质量标准值等。为保证评价结果更

科学,准确了解研究区域重金属富集情况及生态风险程度,本研究的参比值选择徐州市土壤背景值。评价结果如表 7 所示。

由表 7 可知,Cr 元素的潜在生态危害指数范围是 1.455 ~ 2.867,平均值为 1.766;Cd 元素的潜在生态危害指数范围是 32.801 ~ 166.350,平均值为 68.602;Cu 元素的潜在生态危害指数范围是 3.382 ~ 8.802,平均值为 5.875;Ni 元素的潜在生态危害指数范围是 3.377 ~ 4.878,平均值为 4.043;Pb 元素的潜在生态危害指数范围是 5.156 ~ 26.502,平均值为 9.614;综合潜在生态风险指数范围是 47.980 ~ 205.214,平均值为 89.892。

从潜在生态风险程度分级表可以看出,研究区域所有点位的 Cr、Cu、Ni、Pb 元素均为低生态风险。各点位存在不同等级的 Cd 潜在风险,1 个点位(点位 2)的 Cd 元素的潜在生态风险程度为很高,占比 4.76%;5 个点位存在高潜在风险,分

别为点位 4、12、18、20、21,占比 23. 81%;10 个点位存在中潜在风险,分别为点位 3、6、7、8、9、10、13、15、17、19,占比 47. 62%;其余点位为低潜在风险区。就综合潜在风险指数而言,点位 2 和 12 中潜在生态风险,其余点位为低潜在生态风险,点

位 13~21 虽处于低潜在生态风险区域,但 RI 值相比于电厂周围点位整体较高。这与前述土壤重金属污染指数评价结果一致,电厂及煤矸石填充或对其周边生态环境产生一定的负面影响。

表 7 土壤重金属潜在生态风险评价结果表
Tab. 7 Results of potential ecological risk evaluation of soil heavy metals

点位	E_r^i					RI
	Cr	Cd	Cu	Ni	Pb	
1	1. 502	38. 752	4. 311	3. 490	5. 397	53. 453
2	1. 733	166. 350	5. 898	4. 730	26. 502	205. 214
3	1. 546	51. 177	5. 252	3. 377	5. 962	67. 314
4	1. 800	80. 141	8. 488	4. 088	22. 760	117. 277
5	1. 455	38. 243	4. 957	4. 099	8. 405	57. 158
6	1. 640	56. 844	6. 109	3. 563	7. 691	75. 847
7	1. 995	41. 346	5. 440	4. 878	6. 667	60. 325
8	1. 691	41. 018	5. 108	4. 071	5. 529	57. 417
9	1. 673	47. 210	3. 382	3. 523	5. 288	61. 075
10	1. 808	68. 505	6. 447	4. 405	7. 293	88. 458
11	1. 632	32. 980	4. 320	3. 930	5. 156	48. 018
12	1. 964	143. 692	8. 802	4. 013	10. 298	168. 769
13	1. 778	63. 713	5. 702	4. 057	9. 789	85. 040
14	1. 672	37. 852	4. 459	4. 039	6. 458	54. 480
15	2. 847	72. 973	8. 044	4. 693	8. 284	96. 842
16	1. 659	32. 801	4. 010	3. 995	5. 516	47. 980
17	1. 866	71. 111	8. 776	4. 085	9. 916	95. 754
18	1. 808	101. 950	6. 360	3. 952	14. 101	128. 172
19	1. 775	73. 867	5. 942	3. 991	10. 860	96. 435
20	1. 539	96. 032	5. 900	3. 851	9. 883	117. 206
21	1. 709	84. 090	5. 661	3. 888	10. 149	105. 497
最大值	2. 847	166. 350	8. 802	4. 878	26. 502	205. 214
最小值	1. 455	32. 801	3. 382	3. 377	5. 156	47. 980
平均值	1. 766	68. 602	5. 875	4. 034	9. 614	89. 892
标准偏差	0. 284	35. 511	1. 546	0. 392	5. 544	40. 931
变异系数	0. 161	0. 518	0. 263	0. 097	0. 577	0. 455

3 结论

描述性统计分析结果表明,研究区土壤中

Cr、Cd、Cu、Pb 均属于中等变异,受人类活动影响较大。Cd、Cu、Pb 呈现显著富集,Cd 和 Pb 个别点位甚至出现超标现象。因此,研究区 Cd 和 Pb 污染应当受到重视。

各重金属元素相关性分析结合 PMF 源解析模型分析结果表明,Cr 主要受工业源和大气沉降源的影响,Cd 受工业源的影响,Cu 受交通源的影响,Ni 受自然源的影响,Pb 主要受工业源、大气沉降源和交通源的影响。后续管控工作中应对工业源、交通源及大气沉降源进行重点管控。

土壤重金属污染指数评价表明,研究区内所有样点的 Cr、Cu、Ni 元素均处于无污染水平,部分点位 Cd 和 Pb 元素处于警戒线水平,污染源主要包括电厂排放、交通以及煤矸石填充。土壤生态风险评价结果表明,研究区域所有点位的 Cr、Cu、Ni、Pb 元素均为低生态风险,但 Cd 元素在多个点位生态风险水平较高。该老工业基地已经对周边环境产生了负面影响,建议对此区域进行进一步污染溯源并采取预防措施。

参考文献

[1] 任嘉敏,马延吉. 东北老工业基地绿色发展评价及障碍因素分析[J]. 地理科学, 2018,38(7): 1042-1050.

REN J M, MA Y J. Green development level and the obstacle factors of old industrial base in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1042-1050.

[2] 付奎,张杰,刘炳荣. 产业转型政策能否推动城市低碳转型:来自资源型和老工业城市产业转型升级示范区的证据[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2590-2600.

FU K, ZHANG J, LIU B R. Can industrial transformation policies promote urban low-carbon transformation? Evidences from demonstration zones of industrial transformation and updating [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2590-2600.

[3] 尹妮妮,汪克亮. 基于环境压力视角的东北老工业基地生态效率研究[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(12): 1542-1548.

YIN N N, WANG K L. Study on the eco-efficiency of old northeastern industrial base of China from the perspective of environmental pressure[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(12): 1542-1548.

[4] 黄金枝,曲文阳. 环境规制对城市经济发展的影响:东北老工业基地波特效应再检验[J]. 工业技术经济, 2019, 38(12): 34-40.

HUANG J Z, QU W Y. The impact of environmental regulation on urban economic development: A re-examination of porter effect in the old industrial base of Northeast China[J]. Journal of Industrial Technologi-

cal Economics, 2019, 38(12): 34-40.

[5] 何付川,李勇,杨学民,等. 老工业基地转型发展路径探索:以徐州市创建国家生态园林城市为例[J]. 中国园林,2017,33(10):91-95.

HE F C, LI Y, YANG X M. Exploration of the transformation and development of old industrial bases: Taking Xuzhou as an example to establish national ecological garden city [J]. Chinese Landscape Architecture, 2017,33(10):91-95.

[6] ZOU H, LI W Q, REN B Z, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment: A study on Linlin county soils based on self-organizing map and positive factorization approaches [J]. Journal of Central South University, 2024,31(4):1371-1382.

[7] 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 S H, YU Y F, ZHANG X F, et al. Source apportionment of heavy metals in agricultural soil in China: A review [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(9): 1300-1306.

[8] 杨振宇,廖超林,邹炎,等. 湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5288-5298.

YANG Z Y, LIAO C L, ZOU Y, et al. Distribution characteristics, source analysis and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in typical river source areas of Northeastern Hunan Province, China [J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 5288-5298.

[9] 段海静,申浩欣,彭超月,等. 基于 APCS-MLR 模型的开封市公交站周边灰尘重金属源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2024,45(6):3502-3511.

DUAN H J, SHEN H X, PENG C Y, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in dust around bus stops in Kaifeng city based on APCS-MLR model [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3502-3511.

[10] 徐祖奔,伍艳,赵越,等. 黄河下游典型滩区土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业工程学报, 2023,39(15):200-207.

XU Z B, WU Y, ZHAO Y, et al. Source apportionment and pollution of soil heavy metals in typical floodplain in the lower reaches of the Yellow River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(15): 200-207.

[11] 毕永顺,朱勇兵,刘祖文,等. 基于 APCS-MLR 受体模型的弹药销毁场土壤重金属源解析[J]. 环境化

- 学, 2024, 43(7): 2313-2324.
- BI Y S, ZHU Y B, LIU Z W, et al. Analysis of heavy metal sources in soil of ammunition destruction site based on APCS-MLR receptor model[J]. *Environmental Chemistry*, 2024, 43(7): 2313-2324.
- [12] 范亚宁, 冯园, 张倩. 基于文献计量的关中地区农田土壤重金属污染特征及源解析[J]. *环境生态学*, 2023, 5(9): 19-27.
- FAN Y N, FENG Y, ZHANG Q. Characteristics of heavy metal pollution and source analysis in farmland soil of Guanzhong area based on bibliometric analysis[J]. *Journal of Environmental Ecology*, 2023, 5(9): 19-27.
- [13] YANG D, YANG Y, HUA Y. Source analysis based on the positive matrix factorization models and risk assessment of heavy metals in agricultural soil[J]. *Sustainability*, 2023, 15(17): 13225.
- [14] ZHOU L, ZHAO X, MENG Y, et al. Identification priority source of soil heavy metals pollution based on source specific ecological and human health risk analysis in a typical smelting and mining region of South China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 242: 113864.
- [15] 李军, 杨云钦, 台喜生, 等. 苦水玫瑰产地土壤重金属污染评价与溯源解析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 223-234.
- LI J, YANG Y Q, TAI X S, et al. Contamination evaluation and source apportionment of heavy metals from Kushui rose growing soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16): 223-234.
- [16] 卢中科, 曾钦朦, 孙建昌, 等. 贵州西部喀斯特地区森林土壤重金属的累积特征及风险评价[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(6): 81-88.
- LU Z K, ZEN Q M, SUN J C, et al. Accumulation characteristics and risk assessment of soil heavy metals in forest in Karst area of western Guizhou[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(6): 81-88.
- [17] 吕玉娟, 王秋月, 孙雪梅, 等. 浙江省某尾矿库周边农田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(4): 1464-1475.
- LYU Y J, WANG Q Y, SUN X M, et al. Pollution characteristics and source identification of heavy metals in farmland soils around a tailing pond in Zhejiang Province[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(4): 1464-1475.
- [18] 杨楠楠, 韩玲, 刘明. 基于信息扩散模型的沔东新城土壤重金属潜在生态风险评估[J]. *环境科学*, 2024, 45(3): 1749-1759.
- YANG N N, HAN L, LIU M. Potential ecological risk assessment of soil heavy metals in Fengdong new district based on information diffusion model[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(3): 1749-1759.
- [19] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004[S/OL]. (2004-12-09) [2025-03-08]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fghz/bz/bzwb/jcffbz/200412/t20041209_63367.shtml.
- [20] 生态环境部. 土壤环境质量—农用地土壤污染风险管控标准: GB15618—2018[S/OL]. (2018-08-01) [2025-03-08]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fghz/bz/bzwb/trhj/201807/t20180703_446029.shtml.
- [21] 周洪英. 徐州城市表层土壤重金属污染特征与环境磁学响应[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 9-16.
- [22] 毛应明, 沈海燕, 代奇志, 等. 徐州市城区土壤重金属污染状况及来源浅析[J]. *山东化工*, 2019, 48(10): 240-242.
- MAO Y M, SHEN H Y, DAI Q Z, et al. Survey of heavy metal pollution and source identification of the urban soil in Xuzhou City[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2019, 48(10): 240-242.
- [23] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [24] 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 等. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4578-4589.
- CHE K, CHEN C M, ZHENG Q Y, et al. Heavy metal emissions from coal-fired power plants and heavy metal pollution characteristics and health risks in surrounding soils[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4578-4589.
- [25] 李雨茹, 段伟杰, 董嘉臻, 等. 基于PMF模型和地理探测器的金陵河下游土壤重金属源风险评价[J]. *环境科学*, 2025, 46(4): 2512-2524.
- LI Y R, DUAN W J, DONG J Z, et al. Risk assessment of soil heavy metal sources in the lower reaches of the Jinling river based on PMF model and geo-detector[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4): 2512-2524.
- [26] 樊倍希, 张永清. 山西某火力发电厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(7): 953-960.
- FAN B X, ZHANG Y Q. Evaluation of heavy metal pollution in farmland around a thermal power plant in Shanxi Province[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(7): 953-960.
- [27] 吕占禄, 张金良, 张晗, 等. 生物质能电厂周边土壤

中重金属元素污染特征及评价[J]. 环境化学, 2020,39(12):3480-3494.

LYU Z L, ZHANG J L, ZHANG H, et al. Pollution characteristics and evaluation of heavy metal pollution in surface soil around the biomass power plant[J]. Environmental Chemistry, 2020,39(12): 3480-3494.

[28] 张喜亮, 闵宁, 程成, 等. 皖北某电厂周边土壤重金属污染现状及评价分析[J]. 河南科技, 2023, 42(2):79-82.

ZHANG X L, MIN N, CHENG C, et al. Current situation and evaluation and analysis of heavy metal pollution in the soil around a power plant in northern Anhui Province[J]. Henan Science and Technology, 2023, 42(2):79-82.

[29] 孙厚云, 马峰, 陈自然, 等. 高强度运输活动影响下承德钒钛磁铁矿集区土壤重金属生态风险与来源解析[J]. 环境科学, 2025, 46(4):2486-2500.

SUN H Y, MA F, CHEN Z R, et al. Source apportionment and ecological risk of soil heavy metals in typical vanadium-titanium magnetite mining areas affected by intensive transportation activities in Chengde[J]. Environmental Science, 2025, 46(4):2486-2500.

[30] 朱舒, 李舒怡, 鱼洋, 等. 关中平原农田土壤剖面重金属空间分布、影响因素、风险评价及源解析[J]. 环境科学, 2025, 46(4):2501-2511.

ZHU S, LI S Y, YU Y, et al. Spatial distribution, influencing factors, risk assessment, and source analysis of heavy metals in soil profile of farmland in the Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2025, 46(4):2501-2511.

(编辑 李波)

作者简介



杨德军, 中国矿业大学副教授, 博士(后), 硕士生导师, 主要研究方向为土壤污染治理与修复、水污染治理、环境污染损害与评估、给水排水科学与工程、环境科学与工程、矿区生态修复等。国家自然科学基金函审专家(2013起), 国际水文科学协会会员, 英国杰出青年人才协会会员, 中国力学学会会员, 江苏省力学学会会员, 中国岩石力学与工程学会矿山生态修复分会会员, 国家科技专家库在库专家, 全国生态环境监测行业发展社会智库专家, 中国环境科学学会减污降碳协同治理专业委员会委员, 中国生产力促进中心协会 2024 年度专家库人员, 江苏省生态环境损害鉴定评估与修复效果评估专家, 江苏省生态环境领域清洁生产审核专家。主持国家自然科学基金 2 项, 参与 973、国家重点研发课题、江苏省自然科学基金等省部级课题 30 余项, 横向课题 10 余项。发表科研论文 50 余篇, 获授权发明专利 8 项, 出版专著 1 部。入选 2022 年江苏省双创人才“科技副总”、2023 年“江苏科技智库青年人才计划”、2024 年江苏科技智库计划(青年)项目。