

# Study on Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Typical Industrial Zone Soils

Jizhe Liang<sup>1</sup> Long Shen<sup>1</sup> Xi Zhao<sup>3</sup> Yu Gao<sup>2\*</sup>

1. Liaoning Environmental Protection Group Fujie Ecological Environment Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110030, China

2. Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning, 110020, China

3. Liaoning Environmental Protection Group Keyuan Environmental Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110015, China

## Abstract

This article focuses on heavy metals in the soil of typical industrial areas and analyzes their spatial distribution characteristics and pollution sources. In terms of spatial distribution, heavy metals show a “point-line-surface” gradient diffusion and are highly correlated with pollution sources. The pollution differences in functional zones are significant, and the types match the corresponding industries. Vertical stratification protrudes, and the surface soil is most severely polluted. Source apportioning indicates that industrial production activities are the core sources of direct emissions, transportation activities are important pathways for flow and diffusion, and the accumulation and disposal of solid waste are potential pollution reservoirs that accumulate over a long period of time. The combined effect of the three factors leads to heavy metal pollution in the industrial zone soil, providing a crucial basis for pollution prevention and control as well as soil remediation.

## Keywords

Industrial zone Heavy metals in soil Distribution characteristics

# 典型工业区土壤重金属空间分布特征及源解析研究

梁吉哲<sup>1</sup> 申龙<sup>1</sup> 赵曦<sup>3</sup> 高宇<sup>2\*</sup>

1. 辽宁省环保集团辐洁生态环境有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110030

2. 沈阳工业大学, 中国·辽宁 沈阳 110020

3. 辽宁省环保集团科源环境技术有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110015

## 摘要

文章聚焦典型工业区土壤重金属, 分析其空间分布特征与污染来源。空间分布上, 重金属呈“点-线-面”梯度扩散, 与污染源高度关联; 功能分区污染差异显著, 类型匹配对应产业; 垂向分层突出, 表层土壤污染最重。源解析表明, 工业生产活动是直接排放核心源, 交通活动为流动扩散重要途径, 固体废弃物堆积与处置则是长期累积的潜在污染库。三者共同作用, 导致工业区土壤重金属污染, 为污染防控与土壤修复提供关键依据。

## 关键词

工业区; 土壤重金属; 分布特征

## 1 引言

随着工业快速发展, 典型工业区土壤重金属污染问题日益凸显, 威胁生态安全与人体健康。明确重金属空间分布规律、精准识别污染来源, 是开展污染防控与土壤修复的前提。本文针对典型工业区, 系统探究土壤重金属空间分布特

征, 深入解析主要污染来源, 旨在为工业区土壤环境管理、风险管控及治理修复提供科学支撑, 助力解决工业区土壤重金属污染难题。

## 2 典型工业区土壤重金属空间分布的特征

### 2.1 污染源指向性显著, 呈现“点-线-面”梯度扩散

典型工业区土壤重金属分布与污染源位置高度关联, 形成以污染源头为核心的梯度扩散格局。例如, 冶炼厂、化工厂等固定污染源周边, 重金属(如铅、镉、汞)含量呈现“核心区极高-缓冲区骤降-外围区趋稳”的特征, 核心区含量

【作者简介】梁吉哲(1986-), 男, 中国辽宁大石桥人, 硕士, 高级工程师, 从事环境工程研究。

【通讯作者】高宇(1979-), 男, 中国辽宁营口人, 博士, 教授, 从事生态环境保护与治理研究。

可能是区域背景值的 10-50 倍；交通干线（如厂区内铁路、货运道路）两侧则形成“线状污染带”，铅、锌等与交通相关的重金属含量随距离道路远近递减，通常在 0-50 米范围内降幅最为明显；而整个工业区边界与周边农田、居民区的过渡带，重金属含量逐渐接近区域土壤背景值，体现出“面状圈层扩散”的整体规律<sup>[1]</sup>。

## 2.2 功能分区差异明显，污染类型与产业高度匹配

工业区内不同功能分区的土壤重金属种类与含量差异显著，直接对应各区域的产业活动类型。生产区（如车间、反应釜周边）以特征性重金属污染为主，如电镀车间周边土壤铬、镍含量突出，电池生产区则铅、汞富集明显；仓储区（尤其是危化品仓库）可能因泄漏形成局部高浓度污染点，重金属种类更复杂，常伴随铜、锌、砷等多种元素叠加；污水处理区（如沉淀池、排污沟周边）则因污泥堆积，导致镉、铅等易沉淀重金属在表层土壤大量累积；而行政办公区、生活区的重金属含量最低，仅略高于区域背景值，且以交通源输入的铅、锌为主<sup>[2]</sup>。

## 2.3 垂向分层特征突出，表层土壤污染最为严重

在垂直方向上，工业区土壤重金属呈现“表层富集、深层递减”的分布规律，且不同深度的污染程度与土层性质密切相关。0-20cm 的表层土壤（耕作层或腐殖质层）因直接接收大气沉降、地表径流冲刷、固体废弃物堆放等污染输入，重金属含量最高，部分区域镉、汞的表层含量占整个土壤剖面（0-100cm）总含量的 60%-80%；20-60cm 的亚表层土壤，重金属含量因淋溶作用有所下降，但仍高于深层土壤，且黏粒含量高的区域易形成重金属“滞留层”；60cm 以下的深层土壤，重金属含量接近背景值，仅在污染源附近（如地下管道泄漏点）出现局部超标，体现出垂向污染的局限性<sup>[3]</sup>。

# 3 典型工业区土壤重金属源解析

## 3.1 工业生产活动源：直接排放的核心污染源

工业生产是工业区土壤重金属最主要的直接来源，具有污染强度大、针对性强、与生产环节高度绑定的特征，贯穿原料加工至成品出厂全流程，对土壤的破坏兼具持续性与累积性。

以金属冶炼行业为例，钢铁、铅锌冶炼厂的矿石破碎、焙烧、熔炼各环节均会释放重金属：焙烧时，铅、镉等挥发性重金属随高温烟气逸出，冷却后以颗粒物沉降，在冶炼炉周边 500 米内形成“污染核心区”，土壤铅含量常超背景值 30-100 倍，极端点位达 200 倍以上；熔炼炉渣若露天堆放且未经无害化处理，锌、铬等会经雨水淋溶渗透，导致堆放区及周边土壤重金属持续升高；酸洗、冷却废水若处理不达标排放，还会渗透污染深层土壤，形成难修复的“重金属污染带”。化工行业中，农药、染料厂的污染影响突出且元素具行业特异性<sup>[4]</sup>。有机磷农药生产需用含砷原料（如三氯化砷），若储存罐密封不严或管道老化泄漏，砷会快速渗入土

壤并在耕作层（0-20cm）富集，因砷移动性差、半衰期长，易形成稳定污染层，超标范围可扩散至厂区周边 100-200 米；染料厂合成偶氮、蒽醌染料时，镍、铜等金属催化剂会随未深度处理的反应废液泄漏入土壤，不仅升高重金属含量，还会与土壤有机质结合形成难降解络合物，加剧污染。电子制造业是新兴重金属污染源，特点为稀有重金属检出率高、污染隐蔽性强。电路板生产与元件组装中，焊接工艺用的传统含铅焊料高温下产生铅蒸汽，冷凝后沉降车间地面并渗透入土壤；元件拆解时，废弃电路板上的镉、汞会随机械磨损脱落，混入废料堆后缓慢释放。尤为关键的是，电子制造业还会产生铊污染，其来源于元件特殊涂层与半导体材料，在其他工业领域检出率低，仅电子工业区周边易见，且铊毒性强，低含量即威胁生态与人体健康<sup>[5]</sup>。

## 3.2 交通活动源：流动扩散的重要污染途径

工业区内密集的交通活动（含货运、生产运输）是土壤重金属的重要流动来源，呈现“线状扩散、区域覆盖”特征<sup>[6]</sup>。货运车辆（如载重卡车、集装箱货车）使用的含铅汽油（部分地区仍在用）燃烧后，铅会随尾气以颗粒物形式沉降，导致道路两侧土壤铅含量显著升高，通常在道路 0-30 米范围内，铅含量随距离增加而快速下降，降幅可达 50%-70%；厂区内铁路运输（如原料运输专线）因列车制动磨损（刹车片含铜、锌）、轨道腐蚀（含铬、锰），会产生金属碎屑，经雨水冲刷进入周边土壤，使铁路两侧土壤铜、锌含量超背景值 2-5 倍；此外，物流园区内频繁的车辆启停、轮胎磨损，还会释放锌（轮胎添加剂）、镉（橡胶稳定剂）等重金属，形成区域性的交通源污染叠加。

## 3.3 固体废弃物堆积与处置源：长期累积的潜在污染源

工业区内固体废弃物的不合理堆积与处置，会成为土壤重金属长期释放的“污染库”，易造成局部高浓度污染<sup>[7]</sup>。工业废渣（如冶炼渣、化工渣）是主要载体，例如钢铁厂的高炉渣含铬、镍、锰等重金属，若露天堆放在厂区边缘，经日晒雨淋，重金属会通过渗滤液渗透到土壤深层，形成直径 10-50 米的污染晕，且深层土壤（20-60cm）重金属含量可能高于表层；危险废物（如废电池、废灯管、废化学品）若未按规范处置，随意丢弃在厂区角落，会导致汞、铅、镉等剧毒重金属快速释放，例如 1 节废铅酸电池泄漏，可使周边 1 平方米土壤铅含量超国家标准 50-100 倍；此外，厂区内生活垃圾与工业固废混合堆放，会进一步加剧锌、铜等重金属的扩散，形成复合型污染区域<sup>[8]</sup>。

# 4 结语

本研究明确典型工业区土壤重金属空间分布呈“点-线-面”梯度扩散、功能分区匹配产业污染、表层污染最重的特征，且识别出工业生产、交通活动、固体废弃物处置为三大核心污染源。研究成果清晰揭示了工业区土壤重金属污染的

规律与成因，为后续精准防控提供了科学依据。未来可基于技术选择与治理方案制定提供方向，助力推动工业区土壤环境此优化工业区功能布局、强化污染源管控，同时为土壤修复境质量改善与可持续发展。

表 1 固体废弃物堆积与处置源：长期累积的潜在污染库

污染类别	污染机制	污染特征与数据
工业废渣污染（以钢铁厂高炉渣为例）	1. 工业废渣是工业区固废主要部分，污染特征与对应产业直接相关；2. 高炉渣含铬（0.05%-0.2%）、镍（0.01%-0.05%）、锰（1%-3%）等重金属；3. 未经无害化处理露天堆放，重金属随雨水形成渗滤液渗透至土壤深层。	1. 堆放区及周边形成直径 10-50 米的“污染晕”；2. 深层土壤（20-60cm）黏粒多、微生物活动弱，部分区域重金属含量高于表层，形成“深层富集”；3. 每产 1 吨钢铁约产 0.3-0.5 吨高炉渣，污染周期长且修复难度大。
危险废物污染（废电池、废灯管、废化学品等）	1. 危险废物含剧毒重金属，未按《危险废物贮存污染控制标准》存放，随意丢弃于厂区角落或废弃车间；2. 废铅酸电池外壳破损后，铅膏与电解液直接泄漏；3. 重金属短时间内快速释放，引发急性污染风险。	1.1 节标准 12V 废铅酸电池含铅 200-300 克，泄漏可使周边 1 平方米土壤铅含量超 GB 36600-2018 第二类用地筛选值 50-100 倍；2. 铅在土壤中稳定存在数十年，持续危害生态与人体健康；3. 污染具有突发性，局部浓度极高。
混合固废污染（生活垃圾 + 工业固废）	1. 厂区生活垃圾与工业固废（废弃零部件、破损包装）混合堆放；2. 生活垃圾中有机物加速工业固废中锌、铜等重金属溶出；3. 混合堆体经雨水冲刷形成成分复杂的渗滤液，携带重金属扩散。	1. 形成复合型污染，原本局限的点污染扩大为面状污染；2. 锌（来自金属件）、铜（来自电线）等重金属扩散范围扩大，污染面积增加；3. 污染物成分更复杂，加剧土壤生态系统破坏程度。

## 参考文献

- [1] 冯韶华,俞一帆,张旭峰,尚婷婷,王陆游,孟祥周. 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(09):1300-1306.
- [2] 王建明,施泽明,郑培佳,王新宇,朱英海,张凯亮,王钰. 四川铅锌冶炼工业区周边土壤重金属地球化学特征及源解析[J]. 地球与环境,2023,51(03):287-298.
- [3] 马丽,郭学良,王浩蓓,王冰冰,张丽英,杨森,田文静. 商丘市不同建设用地分区土壤重金属污染特征及评价[J]. 西北林学院学报,2022,37(05):80-87.
- [4] 万梦雪,焦文涛,胡文友,吕明超,黄洪辉,刘亚风. 城市工业区土壤重金属累积特征与来源解析——以上海市闵行区典型工业区为例[J]. 环境化学,2023,42(06):1886-1898.
- [5] 孟晓飞,郭俊梅,杨俊兴,郑国砥,陈同斌,刘杰. 石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价[J]. 环境科学,2022,43(09):4779-4790.
- [6] 孟晓飞,郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,乔鹏炜,卞建林,陈同斌. 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(02):900-908.
- [7] 杨倩,鲁新川,殷建国,尹常亮,吴靖宇,郭晖,张昱. 甘肃嘉峪关市表层土壤重金属空间分布与评价[J]. 沉积学报,2019,37(05):1006-1015.
- [8] 张东明,吕新,王海江,张泽,张国龙,马革新. 工业区农田土壤有效态重金属相关性分析及空间分布研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(12):223-227.