

# 土壤污染源解析与溯源技术的研究进展

吴杰升

佛山市宏哲安环技术咨询有限公司, 广东 佛山 528000

DOI: 10.61369/EAE.2024020001

**摘要**：某地区土壤污染问题正愈发严峻，污染物来源显现出复杂特质，呈现多样化扩散模式，给污染治理增添挑战，为明确污染源及制定有效的防治措施本文，应用化学分析、同位素示踪、多元统计且搭配 Cubist 模型等溯源手段，对污染物迁移路径、来源及扩散模式进行系统分析。交通和建筑活动对城市区域污染影响显著，农业区污染物扩散与灌溉渠关联性较强，工业区及矿区的污染物集中之处为排污口及下风向地带。研究成果为污染治理供给科学支撑，为污染场地修复与隔离工程的实施给予有效引导，实现了降低污染物扩散风险这一目标，增进了污染防控效能。

**关键词**：土壤污染；污染溯源；化学分析；同位素示踪；Cubist 模型

## Research Progress of the Analysis and Traceability Technology of Soil Pollution Source

Wu Jiasheng

Foshan Hongzhe Anhuan Technology Consulting Co., LTD. Foshan, Guangdong 528000

**Abstract** : an area of soil pollution problem is increasingly serious, pollutant source shows complex characteristics, diversified diffusion mode, add challenges to pollution control, to clear pollution sources and formulate effective prevention and control measures in this paper, the application of chemical analysis, isotope tracing, multiple statistics and collocation traceability means such as Cubist model, the pollutant migration path, source and diffusion mode of system analysis. Traffic and construction activities have a significant impact on pollution in urban areas. The diffusion of pollutants in agricultural areas is strongly related to irrigation canals, and the pollutants in industrial and mining areas are sewage outlets and downwind zones. The research results provide scientific support for pollution control, provide effective guidance for the implementation of the restoration and isolation project of contaminated sites, achieve the goal of reducing the risk of pollutant diffusion, and improve the efficiency of pollution prevention and control.

**Keywords** : soil pollution; pollution traceability; chemical analysis; isotope tracing; Cubist model

## 引言

土壤中污染物的积累与迁移不仅危及农田、饮用水源地及生态系统稳定，亦会对居民生活以及区域经济发展形成威胁。污染源模糊、扩散路径复杂的问题而言，污染溯源技术在污染防治方面意义重大。研究参照某地区当下污染情形，采用多种达成污染溯源目的的技术，系统剖析污染源的类别、污染物迁移与扩散的规律以及污染物在土壤剖面里的分布特性。

## 一、土壤污染概述

### (一) 土壤污染的成因及特点

处于工业生产的阶段中，把未经处理或处理不彻底的废水、废气、废渣排到环境中，污染物借助大气沉降、径流下渗、固体废弃物堆放等途径渗入土壤，污染物于土壤之中不断积累渗透，造成土壤污染问题进一步恶化<sup>[1]</sup>。处于农业劳作活动阶段，过度施用农药化肥以及实施污水灌溉等活动，亦会将有害物质引入土壤环境。于城市化迅猛发展的进程内，施工现象、生活垃圾的堆

放、交通排放等因素也造成污染物进入土壤并蓄积，若污染物开始进入土壤，其迁移与转化受土壤类型、酸碱度、孔隙度以及水文条件等多因素左右，土壤中污染物或经化学反应、物理吸附与生物降解等过程迁移并改变形态。土壤中污染物的存在呈现出较强的隐蔽性与累积性，长时间隐匿于土壤环境里，给生态环境与人体健康造成不易察觉的侵害。

### (二) 土壤污染的环境与社会影响

土壤中污染物的积累有概率抑制植物根系正常生长，引起植物对营养元素吸收平衡的紊乱，结果影响农作物的产量以及质量

水平。污染物于土壤中的富集有抑制有益微生物繁殖活动的潜在性，引发土壤生态系统平衡陷入失调，引起土壤自净能力的减弱。污染物借由地下水、地表水等介质进入周边环境也存在可能性，进而对水体和生态系统稳定性形成影响，污染物于土壤中的留存或许会借“土壤-植物-人体”或“土壤-水-人体”等途径间接进入人体，为居民健康埋下潜在隐患。某地区鉴于土地利用呈现出密集局面，土壤中污染物的扩散影响范围甚广，大概会影响农田、饮用水源地乃至居民生活区域，使人类健康潜在的隐患状况进一步升级。

## 二、土壤污染源类型及特征

### （一）自然污染源

因该地区坐落于山地丘陵地带，地表径流状况剧烈，呈现出较大降雨量，水流凭借冲刷作用把岩石风化产物携至土壤中，逐渐于低洼区域形成沉积物，引发特定区域内污染物浓度显著升高。部分地区土壤受地下水渗透影响十分明显，地下水依托地质断裂带向上涌进，把天然矿物质及其他元素带到土壤中积聚。该地区亦有多个流域分布，存在着密集排列的支流水系，当降水阶段，降水阶段大量雨水夹带地表颗粒流入农田及居民区，造成污染物的积累现象进一步加剧。

### （二）人为污染源

工业废水流入周边河道，水体携带污染物随水流扩散，在河床与沿岸土壤沉积。区域内多个工业园区，企业排放生产废渣、废液，经雨水冲刷或渗漏，慢慢渗透到土壤，形成土壤污染带<sup>[2]</sup>。监测沿河区域土壤样品发现，受工业排污影响地带污染物浓度偏高，污染范围沿河流流向不断扩散。从农业活动看，此地耕地广阔，土壤污染受大量化肥、农药施用以及灌溉水影响大。过量施用化肥可能致使有害物质在土壤富集，农业农药喷洒时，部分药剂借风力飘散，沉降后留在周边土壤表层，加剧污染物积累。

### （三）典型污染物在土壤中的迁移与转化

降水充沛的区域，污染物容易借助雨水快速渗透到更深层土壤，若处于干旱的季节，有更多污染物滞留于表层，污染物的迁移与形态转化被土壤酸碱度显著左右。此地区土壤 pH 显现出偏酸性，酸性环境易推动部分污染物转变为游离态，加大了其迁移的概率。迁移过程中污染物有可能产生多种转化情形，涉及吸附、沉淀、络合、氧化还原反应等现象，引起土壤里污染物从活性较强的形态逐步变成稳定性更高的形态。较多农业区存在于某地区的河流沿岸，于实施农田灌溉流程中，污染物跟随灌溉水去流动，依着灌溉渠沉积进土壤里面，引发污染带形成。

## 三、土壤污染溯源技术

### （一）化学分析技术

在工业区、农田、道路两侧及生活区设置高密度采样点，每个样点采集 0-20cm、20-40cm 和 40-60cm 三个深度层次的土壤

样本。样本在实验室中采用酸消解法进行前处理，具体步骤包括称取 1g 风干土样，加入 10ml 硝酸-盐酸-氢氟酸混合酸溶液，并在电热板上加热至液体蒸干，随后用稀硝酸溶解残渣，过滤后定容至 50ml 容量瓶内。采用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）对样本中污染物浓度进行测定。通过对各样本浓度数据的对比分析，发现污染物浓度在工业区附近显著偏高，且污染物在土壤剖面中具有一定的垂直迁移特征。

### （二）同位素示踪技术

在不同功能区设置网格样点，每个样点采集 0-20cm、20-40cm 和 40-60cm 三层土壤样本<sup>[3]</sup>。样本在实验室中采用微波消解法进行前处理，随后利用多接收电感耦合等离子体质谱（MC-ICP-MS）对样本中特定元素的同位素丰度比值（ $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）进行测定。数据分析过程中，将各样本的同位素比值与已知污染源的同位素特征进行比对，利用双端元混合模型计算不同污染源对样本的贡献率。分析结果表明，工业排放源的样本同位素比值特征明显偏向某一范围，而农业污染源样本的比值则较为稳定。

### （三）多元统计分析方法

样本数据含土壤污染物浓度、pH 值、有机质含量、质地等；环境调查数据有工业企业分布、农业用地类型、交通干道分布、矿区分布这些。用主成分分析（PCA）法降维数据集，提取主要影响因子，再以因子分析法（FA）对污染物来源归类。模型运算里，把污染物数据当因变量，土地利用类型、地形地貌、交通条件等作自变量，经旋转因子矩阵得出不同污染源特征模式。某区域工业排放源贡献率明显偏高，农田密集区农业源表现突出。

### （四）机器学习与模型预测技术（结合 Cubist 模型的案例）

目标区域划分样本点，用多点混合法采集土壤样本。每个样点采集 0-20cm、20-40cm、40-60cm 三个深度样本，测定样本污染物浓度和土壤理化特征。整合样本与环境因子数据，借助 R 语言 Cubist 包构建模型。选土壤类型、pH 值、有机质含量、降水量、道路密度等 106 个变量做输入因子，以污染物浓度为目标变量。构建模型时，用训练集样本建回归树模型，找最优分裂点细化节点，形成多条回归路径。接着用测试集数据验证模型，发现模型预测精度挺高，还能准确反映污染物在不同区域的分布特征。

## 四、土壤污染源解析技术的应用

### （一）城市土壤污染溯源

进行了对城市区域土地利用类型、道路分布、工业区及居民区情况的详细调研，判定了污染大概较为集中的区域，采样工作借助网格布点方法实施，道路两侧、商业区及工业区的样点密度呈现相对较高的情况<sup>[4]</sup>。对每个样点分别进行表层、亚表层和深层土壤样本采集，采用酸消解法对样本进行处理，凭借电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）对污染物含量加以分析。把分析结果针对城市环境要素进行对比，凭借地理信息系统（GIS）绘制污染物浓度的分布图表。合并环境对应数据，采用 Cubist 模型将交通

流量、工业排放、建筑施工等元素纳入模型，再次剖析各类污染源对样本污染物的贡献份额，结果表明城市主干道周边两侧的污染物浓度偏高，其沿风向的污染物扩散趋势十分明显。

### （二）农田土壤污染源解析及治理

记录农业区土地利用类型、灌溉方式、农药化肥使用情况。在不同种植作物区域分别布点采样，样点涵盖灌溉渠、农田中央、田埂等关键区域。采集样本后在实验室用湿法消解处理，用电感耦合等离子体发射光谱（ICP-OES）测定污染物。结合农田灌溉水质监测数据分析样本，发现灌溉渠两侧污染物浓度偏高。为明确污染来源，用主成分分析法（PCA）处理污染物与农业活动数据。结果表明，污染物浓度和灌溉水质、农药残留、化肥种类关系密切。接着用 GIS 技术绘制污染物浓度扩散图，结合灌溉渠流向和降水季节分析，发现污染物沿灌溉渠流向扩散，呈现出明显的带状污染模式。

### （三）工业区及矿区土壤污染追溯

调查工业企业排污口、矿区排水口、堆料场以及生产车间周边，确定可能的污染扩散通道。采样于工业区和矿区周边设网格样点，依污染源分布调整密度。每个样点采集 0 至 20 厘米、20 至 40 厘米、40 至 60 厘米三个深度的土壤样本。样本经酸消解后，用电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）测定污染物含量。分析

中，将污染物数据与工业企业生产排放记录、矿区开采历史数据比对，发现下风向区域污染物浓度明显升高。为明晰污染扩散模式，采用同位素示踪技术分析污染物来源，结果显示矿区排水口下游区域污染物积累严重，且浓度随地势降低而逐步下降。

### （四）污染源解析在土壤修复中的作用

调查污染场地土地利用类型、地表径流与地下水流向这些环境特征。据现场调查，于污染物浓度高的区域密集布设样点，沿污染扩散方向延伸布点。完成样品采集，借化学分析技术检测污染物浓度与理化性质。数据分析时，用多元回归模型模拟污染物扩散模式，结合 GIS 技术绘制污染浓度分布图。结果显示，场地内污染物有明显聚集区域，经地表径流和地下水迁移到下游地带。

## 五、结束语

不同区域污染物来源差异显著，地势、土地利用类型还有水文条件对污染扩散模式影响极大。研究成果明确了污染防控措施制定依据，于污染物聚集区开展修复与隔离措施，有效降低污染物扩散风险。应用污染溯源技术，提升污染治理科学性与针对性，给类似污染区域防治工作提供参考。

## 参考文献

- [1] 罗贯洋. 华东某关停精细化工企业土壤污染物分布及溯源分析 [J]. 广东化工, 2024, 51(23): 100-103+139.
- [2] 时雯雯, 何峻岭, 张鹏伟, 等. 库尔勒绿洲区土壤污染溯源解析和风险评估 [J/OL]. 环境科学, 2024.11.27.
- [3] 许文, 周潇云, 张玥, 等. 土壤重金属污染源清单研究现状及进展 [J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(11): 2472-2486.
- [4] 张晓晶, 张圣微, 卢俊平, 等. 煤矿聚集区土壤重金属污染风险及 PMF-HHR 模型溯源 [J]. 中国环境科学, 2024, 44(11): 6291-6301.