

# Study on comprehensive evaluation of soil environmental quality and pollution risk analysis in county area

Dandan Li

Dongtian Planning and Design Research Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

## Abstract

Soil, as the foundation of agricultural development and an essential component of the ecological environment, directly affects regional sustainable development and public health. In recent years, with the advancement of industrialization and agricultural modernization, soil in county areas has been significantly impacted by human activities. Some regions have experienced the accumulation of heavy metals and organic pollutants, necessitating systematic comprehensive evaluations and pollution risk analyses. This study uses typical county areas as examples, employing a multi-indicator comprehensive evaluation method to scientifically assess regional soil environmental quality. It also constructs a pollution risk analysis system based on the characteristics of pollutant migration and exposure pathways.

## Keywords

soil environmental quality; county scale; pollution risk analysis; heavy metal pollution

# 县域土壤环境质量综合评价及污染风险分析研究

李丹丹

东天规划设计研究有限公司, 中国 · 湖南 长沙 410000

## 摘 要

土壤作为农业发展的基础和生态环境的重要组成部分, 其环境质量直接关系到区域可持续发展水平与居民生命健康。近年来, 随着工业化和农业现代化的推进, 县域土壤受人为活动影响显著, 部分地区出现了重金属、有机污染物积累等现象, 亟需系统开展综合评价与污染风险分析。本研究以典型县域为例, 综合运用多指标综合评价法, 对区域土壤环境质量进行科学判定, 并基于污染物迁移转化特征与暴露途径构建污染风险分析体系。

## 关键词

土壤环境质量; 县域尺度; 污染风险分析; 重金属污染

## 1 引言

随着国家生态文明建设的持续推进, 土壤环境质量逐步上升为生态安全体系中的核心要素。《“十四五”全国土壤、地下水和农村生态环境保护规划》明确提出, 到 2025 年实现土壤环境风险有效防控、耕地污染治理稳步推进、土壤环境监测体系基本完善的目标。县域作为土地利用活动频繁、农业和工业交汇的重要单元, 面临土壤污染类型多元、风险分布复杂、生态功能脆弱等现实问题, 对其土壤环境进行精准管控和系统修复成为政策落地的关键环节。

## 2 县域土壤生态安全水平综合质量评价

县域土壤生态安全水平的综合质量评价需依托系统性、多尺度、多因子融合的理论框架, 建立基于土壤环境多元因

子的定量化评估模型。通过构建以重金属全量与可交换态浓度、有机污染物残留谱系、阳离子交换量 (CEC)、pH 缓冲能力、有机质含量 (SOM) 以及养分元素丰度 (如氮、磷、钾) 等为核心指标的评价指标体系, 可科学刻画土壤环境承载功能与潜在风险特征<sup>[1]</sup>。采用层次分析法 (AHP) 与熵权法融合的加权综合评价模型, 实现主观权重与客观权重的互补优化, 并引入变异系数法对各类指标标准化处理, 提高评价体系的灵敏度与辨识度。结合土壤地球化学背景值设定阈值标准, 形成分级预警机制。利用 GIS 空间插值与克里金法构建三维质量分布模型, 突破传统二维评价在空间结构表达上的局限, 增强区域识别能力与管理适配性。该模型具备较强的跨区域适应性与政策指导价值, 能有效服务于生态功能区划、农业用地优化与土壤资源分等定级等实践工作, 同时对土壤健康评估、耕地保护红线管控等生态治理制度提供理论支撑与量化依据, 推动县域土地资源管理走向精细化、数字化和可持续方向<sup>[2]</sup>。

【作者简介】李丹丹 (1987-), 男, 中国河北定州人, 本科, 工程师, 从事环境保护工程研究。

### 3 县域土壤环境污染的原因

#### 3.1 重金属元素累积迁移引发健康危害风险

重金属元素在土壤中的累积与迁移转化行为构成县域生态健康风险的重要驱动因素，特别是在酸性环境、低阳离子交换容量与有机质含量较低的土壤体系中（如图1），镉、砷、铅等典型毒性元素更易以活性态形式存在，增强其生物有效性与迁移潜力。土壤中可交换态和碳酸盐结合态金属比例是决定其生态毒性的重要参数，通过植物根际吸收机制进入食物链后，表现出较强的蓄积性与放大效应。高频率摄入被污染农产品将导致人体中毒风险上升，尤其在儿童、孕妇等敏感群体中表现出较高的累积毒性<sup>[3]</sup>。研究显示，居民日常暴露途径中，经口摄入路径占比超过70%，其中以富集能力强的水稻、小叶菜类为主要暴露媒介。

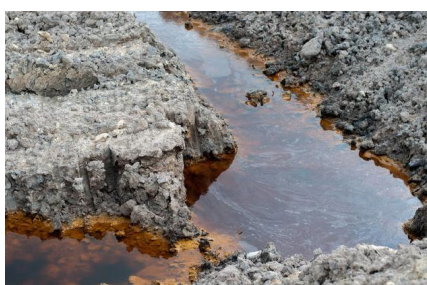


图1 重金属对土地的污染图片

#### 3.2 农药残留累积扩散导致生态系统紊乱

农药在土壤中的残留累积效应对土壤生态功能构成系统性干扰，长期高强度施用有机氯、草甘膦及三唑类新型农药导致其在土壤环境中稳定存在，并通过反复施用形成递进式富集效应（如图2）。此类有机污染物具有较强的脂溶性、生物富集性及持久性，不易降解，易在微生态系统中引起链式反应。其直接作用机制包括抑制土壤酶活性、破坏微生物多样性、降低土壤呼吸强度以及削弱有机质矿化过程，导致土壤养分转化效率降低和结构功能退化。同时，高浓度农药残留可通过胶体吸附、毛管作用及地下水渗流扩散进入邻近生态系统，引发面源性污染，加剧农田—水体—地下水三维联动的复合型风险过程。区域内高频率施药区域土壤中微生物群落结构出现显著的多样性下降和群落失衡现象，尤其是固氮菌、反硝化菌等功能菌数量明显减少，反映出土壤生物功能弱化与生态稳定性下降的趋势<sup>[4]</sup>。



图2 过度的农业残留污染图片

#### 3.3 城乡混合土地利用模式加剧空间污染扩散

城乡交错带由于土地功能交叉、污染源类型多样、土地利用高频度转换，成为土壤污染空间扩散最显著的区域之一。在此区域内，工业排放、生活固废堆放、农田高强度施肥用药等行为交织共存，污染物在空间上传导路径不明确，导致污染物种类多元、负荷强度不稳定、迁移途径复杂。土地利用结构的碎片化导致传统土壤污染识别方法难以准确圈定污染边界，常规监测手段难以满足动态变化的污染扩散需求。在空间上，混合利用区土壤中重金属、有机污染物与养分元素累积呈现出不同步性与不均质性，形成污染耦合区域与高暴露风险点。污染源的动态叠加易导致土壤中污染物迁移途径交叉，表现出强烈的非线性响应关系，加剧污染区域的不可控性。在规划层面，城乡交界地带土地用途规划与污染风险识别存在严重脱节现象，生态功能评估指标体系未能纳入土壤环境安全因子，造成区域开发过程中高污染用地未被有效识别与管控。该现象在近年来县域快速城市化进程中尤为突出，成为土壤污染防治中的关键难点与风险防控的重点区域。

### 4 精准化对县域土壤环境治理与污染控制对策

#### 4.1 构建分区管控，实现精准治理

建立分区分级的土壤环境管控体系是实现精准化土壤管理的核心路径，应依托区域土壤环境质量等级评估结果，以污染程度、土地利用类型、生态敏感性与人群暴露风险为划分依据，科学构建“三区三线”管控格局。在分区方面，依据土壤环境承载能力与生态功能划定优先保护区、安全利用区和严格管控区，分别对应高质量耕地生态屏障、具备可持续利用潜力的中等级土地以及需要修复或限制利用的高风险区域。

在空间划界上，应结合遥感反演技术、地统计空间插值模型与多源数据融合算法，建立高精度空间识别系统，实现分区边界动态调整与智能识别。在三线设置方面，基于风险阈值设定用途控制线、干预修复线与风险警示线，分别作为用途限制、治理启动与早期预警的管理依据。用途控制线对土壤功能实施用途导向控制，确保土地利用方式不超出其生态承载能力；修复干预线依据污染物浓度、活性态比例与暴露途径风险值进行量化判断，一旦超标立即纳入治理程序；风险警示线采用机器学习模型预测潜在污染演化趋势，实现预警提前发布。在制度保障上，应推动土壤用途准入制度与污染等级管理制度的有机融合，将土壤环境管控结果纳入国土空间规划与用途审批程序，通过数据闭环提升监管效率与约束力。该系统通过静态评估与动态管理相结合，形成差异化管理与空间精准识别机制，既可实现污染地块风险化解，也有助于保障耕地质量和国土资源生态化利用目标的实现。

#### 4.2 推进工程治理，保障农用安全

推进土壤污染治理与农用地修复的工程化实施需基于

土壤污染类型、污染程度、土壤理化性质及土地利用需求的多因素协同优化路径,建立以污染物定向去除与土壤功能恢复并重的技术体系。治理工程的技术路径选择需优先考虑污染物的迁移活性、生物有效性及生态毒性指标,结合场地地质结构、水文条件及微生物群落特征,选用原位固化稳定化技术控制金属活性态,利用螯合剂辅助植被修复提升重金属生物富集效率,同时采用生物炭、黏土矿物等改良剂提升土壤缓冲性能与有机质含量。

在农药、有机污染物为主的区域,应通过生物强化修复结合高效降解菌株(如假单胞菌属、枯草芽孢杆菌属)构建原位微生物修复平台,同时辅以通气调控与营养物调节促进降解反应速率与稳定性。针对高风险污染区域,可引入场地原位阻断—异位替换组合技术,通过工程切割与回填恢复耕地功能并减轻暴露风险。工程实施过程中应严格按照技术规程进行分区治理与过程监控,设置多参数在线监测系统追踪土壤修复过程中的污染物浓度变化、生物指标恢复动态以及修复效率评估结果。在治理后阶段,构建基于土壤生态功能恢复的评估指标体系,涵盖土壤团聚体结构、生物多样性指数、植物生长速率及地上生物量恢复等生物物理指标,确保修复效果的生态可持续性。

#### 4.3 完善监测体系,推动信息共享

完善县域土壤环境监测体系是实现全过程污染防治与科学监管的技术保障,应构建以动态数据采集、智能分析处理与分级预警发布为核心的监测技术体系。在采样策略上,应依据地块污染等级、功能分区与污染源特征设置分层次采样点,采用高密度、动态更新的布点模式,结合无人机遥感高光谱成像与地面物理探测技术实现非扰动式样品获取。在数据采集端,依托土壤传感器网络与物联网设备布设地下探头,实现pH、电导率、水分含量、有害元素浓度等关键指标的实时在线监测,通过边缘计算节点处理原始数据并传输至集中式土壤环境信息平台。

在数据分析方面,应用深度学习算法对历史污染演变

趋势进行训练,构建预测性污染扩散模型,实时对接气象、地质、水文多维数据开展动态风险评估与预警发布。在信息系统建设上,应以地理信息系统(GIS)为核心构建三维可视化展示平台,实现污染地块动态分布、风险等级叠加分析及修复进展全过程跟踪。推动县域土壤环境数据纳入统一生态环境信息平台,并构建政府、企业、公众三方协同的信息共享机制,定期发布环境质量公报,公开监测指标、警示信息与治理动态。通过建立多层次监督网络,强化公众环境知情权与参与度,提升土壤污染防治的透明化与社会协同效能。在技术支撑与制度推动双轮驱动下,监测体系将实现由静态、离散的被动监管向智能化、主动式动态治理模式转变,有效支撑县域土壤污染全过程识别、精准治理与高效管控的现实需求。

## 5 结语

土壤是关键的战略资源,其安全影响粮食、生态和公共健康。县域是生态农业和工业转型的关键区域,对土壤保护至关重要。本研究通过科学方法分析了县域土壤质量和污染风险,提出了治理和管控策略,旨在持续改善土壤环境。未来,需加强土壤环境保护制度、法规执行、技术支持和资金保障,形成政府主导、多方参与的社会共治格局。只有系统化、区域化地推进土壤污染防治和资源管理,才能实现人与自然和谐共生的美丽县域。

## 参考文献

- [1] 陶美娟,高尚赞,李伟,等.黄河流域菏泽段农村生态环境综合评价研究[J].中国环境监测, 2024, 40(5):135-142.
- [2] 鞠铁男,雷梅,郭广慧,等.长三角土壤污染重点监管单位综合风险评估[J].中国环境科学, 2023, 43(12):6490-6499.
- [3] 李嫚斐,何明珠,任建新,等.县域尺度土壤元素空间预测方法对比研究——以陇西县为例[J].国土与自然资源研究, 2023(4):45-53.
- [4] 王凤仪 赵东保 刘湃 肖炼.县域随机森林数字土壤属性制图预处理优化方法[J]. 2025.