

Construction of monitoring and risk early warning model of soil heavy metal pollution in industrial zone

Siwen Peng Menglong Hu

Wuhan Fangji Environmental Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

The problem of heavy metal pollution in industrial areas has become an important hidden danger affecting the stability of ecosystem and human health and safety. Traditional monitoring means are limited by response lag and rough spatial distribution, so it is urgent to build a scientific and effective monitoring and early warning system. Focusing on the characteristic distribution of heavy metal pollution in industrial areas, this paper analyzes the main sources of pollutants and the migration mechanism of pollutants, puts forward a set of systematic monitoring index system, and integrates advanced detection technology and spatial data analysis means, so as to improve the real-time and accuracy of data acquisition. On this basis, a risk early warning model integrating multi-source data is constructed to realize the dynamic determination and response prompt of pollution level. Through model framework design, algorithm path construction and adaptability verification, promote the transformation of early warning mechanism from static evaluation to intelligent response, and provide accurate decision-making basis for soil environmental management in industrial zones. The research results have a good engineering application prospect and theoretical support value.

Keywords

soil pollution; heavy metal monitoring; industrial zone; risk assessment; early warning model

工业区土壤重金属污染监测与风险预警模型构建

彭思文 胡梦龙

武汉方基环境科技有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

工业区土壤重金属污染问题已成为影响生态系统稳定性与人类健康安全的重要隐患, 传统监测手段存在响应滞后、空间分布粗略等局限, 亟需构建科学有效的监测与预警体系。本文围绕工业区土壤重金属污染的特征分布, 分析污染物主要来源与迁移机制, 提出一套系统化的监测指标体系, 并整合先进检测技术与空间数据分析手段, 提升数据获取的实时性与准确性。在此基础上, 构建融合多源数据的风险预警模型, 实现对污染等级的动态判定与响应提示。通过模型框架设计、算法路径构建及适应性验证, 推动预警机制由静态评估向智能响应转变, 为工业区土壤环境管理提供精准决策依据。研究成果具有良好的工程应用前景与理论支撑价值。

关键词

土壤污染; 重金属监测; 工业区; 风险评估; 预警模型

1 引言

工业化进程在推动经济发展的同时, 也带来了严峻的土壤环境污染问题, 尤其是在高强度排放的工业区, 重金属的积累呈现出高浓度、多源性与复杂迁移等显著特征。由于重金属元素难以降解, 且能在土壤中长期稳定存在, 其对土壤微生态、农作物质量乃至人体健康构成了潜在威胁。面对持续扩大的污染趋势, 传统监测手段无法满足快速识别、精准定位和动态预警的需求, 急需构建融合技术、算法与环境管理要求的监测预警模型。本文以工业区为研究对象, 聚焦

污染监测系统构建与风险预警机制设计, 旨在提升土壤环境污染防控的系统性与前瞻性。

2 工业区土壤重金属污染概况

工业区土壤中重金属污染物主要来源于冶金加工、化工生产、电镀排放以及含金属废弃物的堆存过程, 部分来源与运输泄漏和大气沉降有关。污染类型以镉、铅、汞、铬、砷等元素为主, 呈现复合型、多源叠加的污染特征。不同重金属在环境中表现出不同的毒性和迁移能力, 易与土壤胶体发生吸附、交换和络合反应, 形成持久性污染结构, 对生态系统构成长期胁迫。重工业区常伴随高浓度多金属污染, 冶炼类企业排放的锌、铜、镍元素易造成土壤毒性累积。化工类企业则以有机污染与重金属复合污染为显著特征, 污染形

【作者简介】彭思文(1986-), 男, 中国湖北武汉人, 硕士, 工程师, 从事环境监测研究。

态更为复杂。电子制造过程中使用的铅锡焊料与稀土元素也构成污染风险。轻工业排放中虽重金属浓度相对较低，但因排放频率高、处理水平差，仍对土壤质量造成长期影响。不同类型企业污染范围、深度及风险等级差异明显，需针对性防控与评估【1】。

3 土壤重金属监测指标体系构建

土壤重金属监测指标的构建应兼顾科学性、代表性与可操作性，优先考虑对生态风险影响显著、易于监测的重金属元素。选取过程中需结合区域污染现状、工业类型及历史排放资料进行系统分析。采用层次分析法、主成分分析等方法筛选关键污染因子，并建立定量指标矩阵。指标体系应体现出污染物的浓度水平、空间分布特征与潜在风险强度，确保监测成果的可比性与时效性。镉以高毒性、高迁移性著称，是土壤污染风险评价的重要因子；铅可通过阻碍植物生长和影响神经系统对生态与健康构成双重威胁；砷在特定氧化还原条件下转化为高毒态，具有强致癌性；汞易在环境中发生甲基化反应，形成高毒性化合物；铬在土壤中存在六价和三价状态，前者具高氧化性和致突变性。不同元素污染所引发的环境后果存在显著差异，需在监测中重点控制【2】。

4 土壤重金属污染监测技术体系

4.1 实时监测设备与传感器技术

实时监测技术通过布设现场传感器，实现对土壤中重金属含量的连续采集与快速反馈，提升污染动态掌握能力。电化学传感器、光谱传感器与电感耦合等离子体探头为主流设备类型，具备响应速度快、数据自动记录、现场适应性强等优点。在恶劣工业环境中，部分设备集成抗干扰材料和远程数据传输模块，可降低人为干预对数据的影响。无线网络与边缘计算技术的引入，进一步增强了设备的智能化程度与系统兼容性，便于构建分布式监测网络并进行数据汇总分析，为后续模型输入与风险评估提供实时依据。

4.2 实验室检测方法的准确性比较

实验室分析方法仍是重金属监测的精确基础，其检测精度和结果可靠性对监测体系构建具有决定性作用。常用方法包括火焰原子吸收光谱法、石墨炉原子吸收法、电感耦合等离子体质谱法和X射线荧光分析等，其中火焰原子吸收适用于高浓度样本，石墨炉适合超痕量检测。电感耦合等离子体质谱法在多元素同步分析中表现出色，具备极高的灵敏度与分辨率。不同方法在样品前处理、检测限、仪器复杂程度等方面存在差异，需结合目标元素特性与土壤基质条件进行匹配选择。检测过程中控制样品均质化与实验误差是保证数据有效性的关键。准确检测结果不仅能提供污染现状判断依据，也是构建风险模型参数校准与验证的重要基础，关系到整个监测体系的科学性与稳定性【3】。

4.3 空间数据采集与地理信息系统应用

土壤重金属污染具有明显的空间异质性与区域聚集性，

依托空间数据采集与地理信息系统可实现污染的多维表达与动态分析。采样过程中通过高精度GPS定位系统获取点位坐标，并结合遥感影像数据、无人机测绘成果与地质图层，建立多源空间数据库。地理信息系统平台可进行空间插值、污染热区识别与时序分析，揭示污染物的扩散路径与影响范围。污染数据叠加土地利用信息与工业企业分布后，可辅助溯源与风险分区，实现从点状信息向区域模式的演化。空间分析结果为监测点布设优化、预警阈值动态调整及管理措施制定提供了科学依据，显著增强了土壤重金属污染监控的全面性、精细性与可操作性。

5 风险预警模型设计与算法构建

5.1 预警模型的总体框架与功能目标

工业区土壤重金属风险预警模型旨在构建一个集数据采集、风险识别、等级预警与动态响应于一体的综合性系统框架，实现从污染监测到风险控制的全过程联动。模型架构以数据驱动为核心，基于土壤重金属监测指标、空间分布信息和历史污染特征构建参数输入模块，结合多维算法分析子系统形成风险评估输出，并通过反馈机制不断修正模型权重与判定边界。模型功能目标包括实现污染浓度动态追踪、高风险区域快速识别、潜在趋势变化提前感知与风险等级可视化表达。模型在结构上分为数据采集层、数据处理层、分析判定层与预警响应层，通过系统模块化设计可适应不同规模与类型的工业区部署需求。功能实现路径强调信息闭环管理，使预警体系具备实时性、前瞻性与可操作性，为环境管理与治理决策提供精准的技术支撑基础。

5.2 多源数据融合机制

土壤重金属污染风险具有复杂的时空耦合特性，单一数据源难以全面表征污染态势，多源数据融合机制是提高预警模型科学性与预测准确性的关键路径。融合数据类型涵盖传感器实时监测数据、实验室高精度检测数据、地理空间数据、气象水文数据及历史污染档案等内容，通过异构数据标准化处理与格式转换建立统一数据接口。采用贝叶斯推理、主成分提取、模糊聚类等算法实现数据之间的关联识别与权重分配，提升数据协同效能。融合机制注重时间序列一致性与空间尺度匹配，通过插值重构、缺失修补与异常剔除确保数据输入质量，为模型稳定运行奠定基础。在数据集成过程中引入动态更新策略，结合边缘计算与云端分析提升系统反应速度。融合结果不仅支撑污染风险的动态建模，还为模型自学习与参数调优提供多维支撑，显著增强风险预警模型的适应能力与泛化能力【4】。

5.3 风险等级判定标准与分类方法

风险等级划分是预警模型决策输出的核心环节，直接关系到后续响应机制的启动条件与管理措施的分级配置。判定标准需基于污染物浓度、生态敏感性、人口暴露率与土地利用类型等复合因子构建，采用定量与定性相结合的判定框

架,形成高、中、低不同等级风险区划。分类方法依托数学模型与环境阈值标准,通过聚类分析、支持向量机、多层感知器等算法建立判别边界,并结合历史污染数据进行训练与回归优化,提升等级判定的准确性与稳定性。模型设定的风险区间应具有动态调整能力,根据区域实际变化和监管需求进行自适应修正,避免预警信号误判或滞后。为增强判定结果的解释性与可操作性,等级输出同时配套相应的图示表达与响应建议,实现风险状态与应对措施的逻辑关联。分类方法还需兼顾不同工业区特点与污染成因差异,确保模型具备广泛适用性与扩展能力,真正实现从污染识别向风险控制的有效转换。

6 模型实用性验证与优化策略

6.1 模型预测效果评估方法

风险预警模型的预测效果评估是保障其实用性与推广价值的核心环节,需从准确性、稳定性与时效性三个维度进行综合考量。采用交叉验证法与留一法评估模型在不同样本组合下的泛化能力,利用均方根误差、平均绝对误差与Kappa一致性系数量化预测精度,比较实测值与预测值之间的吻合程度。引入ROC曲线与AUC指标分析模型在不同风险等级间的分类能力,检验其对高风险区的识别灵敏性。时间序列预测中引入滑动窗口与动态回归方法检测模型对污染趋势变化的响应能力,评估其在数据扰动条件下的稳健性。评估体系构建过程中需充分利用历史污染数据与现场监测结果,通过构建对比样本集实现多场景模拟验证,确保模型具备良好的应用推广基础。

6.2 参数灵敏度分析与优化调整

参数灵敏度分析是识别模型结构中关键影响因子的有效方法,可揭示不同输入变量对预警输出结果的驱动效应。采用局部敏感性分析与全局敏感性分析相结合方式,通过逐步扰动单个参数或参数组,观测模型输出变化幅度,量化其对风险等级判定结果的影响程度。运用蒙特卡罗模拟、Sobol序列与拉丁超立方采样等方法建立高维度参数空间,实现多变量协同下的响应关系解析。对灵敏度高的参数进行聚焦优化,通过反向传播算法与遗传算法进行参数校准,提升模型的收敛速度与预测精度。结合历史监测数据与专家知识引导参数边界设定与初始权重配置,增强模型对不同输入扰动的稳定适应能力。优化过程强调动态更新与循环反馈机

制,推动模型从静态规则型向自适应智能型过渡,实现对复杂污染场景的精准响应。

6.3 模型在不同工业场景中的适应性拓展

工业区类型多样、污染结构差异显著,风险预警模型需具备跨区域迁移与多场景适应的能力以满足多样化应用需求。在重金属种类、污染强度与地理背景存在显著差异的场景中,模型通过模块化设计与参数化构建实现结构通用与配置灵活,便于针对性调整。引入迁移学习方法将一个区域训练所得模型参数迁移至新区域,辅以少量本地监测数据完成适应性校准。采用自适应滤波算法与地理加权回归技术提升模型对区域空间异质性的识别能力,增强其对不同污染类型与工业布局的响应效果。在矿产加工区、化工集中区与电子制造基地等典型工业场景中进行实地验证,检验模型在预测精度、响应速度与风险判定一致性方面的表现,逐步建立具有可复制性与区域泛化能力的模型推广体系。模型适应性拓展路径强调从数据标准到算法结构的全流程动态匹配,确保其在不同工业背景下均能发挥稳定而有效的预警功能。

7 结语

工业区土壤重金属污染问题已成为制约区域可持续发展的重要环境因素,构建科学的监测与风险预警模型是提升污染治理效能的关键路径。通过建立系统化的监测指标体系、集成多源数据、设计多维算法模型,可实现对重金属污染的动态识别与精准预警,增强环境管理的主动性与响应力。模型在准确性、适应性与实用性方面的不断优化,将有助于构建全过程、多层级的土壤环境风险防控机制。未来应进一步强化模型在不同工业场景中的推广应用,以技术支撑助力区域生态安全保障。

参考文献

- [1] 吴文伟,沈城,沙晨燕,林匡飞,吴健,谢雨晴,周璇.城市工业地块土壤重金属污染风险评价与源解析[J].生态环境学报,2024,33(05):791-801.
- [2] 李杰飞,王棣,徐宇鹏,杨浩,蔺洪永,包海花,张玲敏.豫西典型工业区周边农田土壤重金属污染特征、生态风险与来源解析[J].河南农业科学,2024,53(04):76-91.
- [3] 陈伟伦.化工园区周边土壤重金属污染风险评估及修复技术[J].山西化工,2023,43(11):204-207.
- [4] 赵广.园区用地土壤地下水重金属污染调查分析及健康评估[J].山西化工,2023,43(11):261-264.