

城市道路土壤重金属污染及其防治技术

皮坤

上海申环环境工程有限公司, 中国·上海 200092

摘要: 随着城市化和工业化进程的加速, 城市道路土壤的重金属污染问题日益严重, 已成为影响城市生态环境和居民健康的重要因素。重金属污染物的来源多样, 且在土壤中具有累积性和长期性, 难以自然降解, 对植物生长、水体质量以及人体健康造成潜在威胁。论文对城市道路土壤重金属污染的主要特点进行研究, 并提出防治技术来治理城市道路土壤重金属污染, 以此来改善城市生态环境。

关键词: 城市道路土壤; 重金属污染; 防治技术

Heavy Metal Pollution in Urban Road Soil and Its Prevention and Control Technology

Kun Pi

Shanghai Shenhuan Environmental Engineering Co., Ltd., Shanghai, 200092, China

Abstract: With the acceleration of urbanization and industrialization, the problem of heavy metal pollution in urban road soil is becoming increasingly serious and has become an important factor affecting urban ecological environment and residents' health. The sources of heavy metal pollutants are diverse, and they accumulate and persist in soil, making them difficult to degrade naturally and posing potential threats to plant growth, water quality, and human health. The paper studies the main characteristics of heavy metal pollution in urban road soil and proposes prevention and control technologies to control heavy metal pollution in urban road soil, in order to improve the urban ecological environment.

Keywords: urban road soil; heavy metal pollution; prevention and control technology

0 前言

城市道路土壤重金属污染主要源于快速城市化、工业化及交通活动的增加, 在此情况下研究道路土壤中重金属污染的分布特征、来源解析及迁移规律, 有助于评估城市生态风险并制定精准的污染防治策略。在实际中还需开发经济高效的防治技术, 以此来减轻环境污染, 为可持续城市管理提供技术支持, 其对提升城市环境质量、保障公众健康及推动绿色城市发展具有重要意义。

1 城市道路土壤重金属污染特点分析

1.1 污染物的种类与来源

城市道路土壤重金属污染物种类主要包括铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、铬(Cr)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)等重金属元素, 这些重金属来源复杂且多样, 主要与城市化进程中人类活动密切相关。其中交通污染是最重要的来源之一, 包括汽车尾气中燃料不完全燃烧产生的铅, 刹车片磨损释放的铜和锌, 以及轮胎磨损导致的锌和镉等微粒, 这些污染物通过沉降进入道路附近的土壤中。而工业排放则是另一个显著来源, 周边工厂的废气、废水及固体废弃物往往含有大量重金属, 例如冶金、化工、电镀等行业容易释放铬、镍和镉等污染物, 这些重金属可通过风力扩散或水体渗透污染土壤。并且城市绿化过程中使用的化肥和农药中可能含有砷、汞等重金属, 这些化学品通过表

面径流或直接沉降污染道路土壤。上述来源相互叠加, 使得城市道路土壤中的重金属污染呈现出复合性和区域性特征, 不仅具有长期积累性, 还因城市功能分区不同而表现出明显的空间分布差异。

1.2 污染对环境与生态的影响

城市道路土壤重金属污染对环境与生态的影响具有显著的直接性和长期性, 危害范围涉及土壤质量、植物生长、微生物多样性及生态系统平衡。重金属污染显著降低了土壤的理化性能, 重金属在土壤中积累后会改变其酸碱度和养分结构, 造成土壤板结、有机质分解速率降低, 最终影响土壤的肥力和生态功能。并且植物作为土壤生态系统的重要组成部分, 会因重金属毒害而出现生长抑制和生理失调现象。同时, 部分植物可能通过根系吸收重金属, 将其富集在体内, 从而进一步通过食物链影响动物和人类健康。土壤中的微生物群落对重金属污染极为敏感, 重金属会抑制微生物的生长与代谢, 降低其多样性和功能性。许多有益微生物, 如固氮菌和分解有机质的真菌, 其功能会因重金属的毒性而大幅下降, 破坏土壤的自净能力和生态平衡。更为重要的是, 重金属污染的累积效应可能通过径流或地下水渗透迁移到周边水体, 导致更大范围的生态系统受到二次污染。这种长期且隐蔽的扩散性使得污染危害难以控制, 可能导致生态系统退化甚至生物多样性丧失^[1]。

2 城市道路土壤重金属污染的评价方法分析

2.1 土壤重金属含量检测技术

土壤重金属污染的检测与分析是评估污染程度、溯源污染来源以及制定治理方案的基础环节,其核心在于准确测定土壤中重金属的种类、含量及其分布特征。目前土壤样本的采集是检测的基础,通常需依据土壤污染分布的空间异质性选择合适的采样点,并结合道路交通流量、地形特征和土壤类型等因素确定采样深度。其中,0~20cm 的表层土壤是研究的重点,因为重金属多通过沉降或降水积累于此。采样时还需采用均匀混合或复合样本的方法,以尽可能反映区域内的整体污染状况。之后进行土壤样品的预处理,包括样品的风干、研磨、过筛和保存等步骤,需避免交叉污染和重金属损失。在检测技术方面,现代分析方法主要集中于高灵敏度和高分辨率的仪器技术。在数据分析阶段,常通过污染指数法、富集系数法或生态风险指数等模型对检测结果进行量化评价。这些方法不仅可直观反映污染程度,还能识别高风险区域和关键污染物。目前,地理信息系统(GIS)技术被广泛用于重金属污染的空间分布分析,能够通过可视化地图展现污染热点及其扩散趋势,为精准治理提供科学依据。

2.2 污染评价指标

污染评价指标是衡量城市道路土壤重金属污染程度及其生态风险的重要工具,通过定量分析为污染防治决策提供科学依据。单因子污染指数(PI)是常用的基础指标,用于评价某一特定重金属的污染程度。计算公式为某重金属实际含量与背景值的比值,PI 值越大,污染越严重。但单因子污染指数未考虑多种重金属的叠加效应,因此通常结合综合污染指数(PLI)进行多因子综合评价。PLI 通过所有重金属的污染指数加权平均计算,能够直观反映土壤整体污染水平。在污染评价指标中富集系数(EF)用于评估人类活动对重金属富集的贡献,公式中以地壳中某重金属的背景值为参考,结合标准元素的浓度比值校正结果。EF 大于 1 表明该重金属受人为活动影响显著,而小于 1 则表明来源以自然过程为主。污染评价指标中的地积累指数(Igeo)则进一步结合背景值与重金属含量,通过对数函数计算污染等级,将土壤污染分为无污染到极度污染七个等级,具有较强的实际指导意义。除了浓度评估,生态风险指数(RI)从生态系统受损的角度评估重金属的潜在危害,该方法基于污染因子与重金属毒性系数,重点分析高毒性金属对生态系统的威胁。RI 值越高,生态风险越大,通常分为低风险、中风险和高风险等级。各类污染评价指标从单一污染物到综合效应,从生态风险到健康风险,涵盖了土壤污染的不同层面,为全面理解城市道路土壤重金属污染提供了多维度工具。

2.3 污染源解析与风险评估

污染源解析与风险评估是识别城市道路土壤重金属污染来源及其生态和健康威胁的关键步骤,污染源解析通常通过多种方法进行,包括统计分析、同位素示踪法和地理信息

系统(GIS)技术等。其中,主成分分析(PCA)和因子分析(FA)是常用的统计方法,通过将土壤中重金属的浓度数据与潜在污染源特征相匹配,分离出不同来源的贡献比例。例如,铅和锌通常与交通排放密切相关,而镉和砷可能更多源于工业活动或农业化学品的使用。同位素示踪法则通过分析重金属的同位素比值,进一步明确污染物的具体来源,如燃料燃烧或矿物加工等。GIS 技术则结合空间分布数据构建污染源分布图,直观显示高污染区域及其与周边人类活动的关系。在污染风险评估方面,需要基于重金属毒性系数和污染因子,计算风险指数,以此来量化单一重金属对生态系统的威胁,综合评价多种重金属的叠加效应,从而划分不同风险等级^[2]。污染源解析与风险评估的结合能够实现从污染物来源识别到危害评估的全链条分析,为治理方案提供精准依据。

3 城市道路土壤重金属污染的防治技术分析

3.1 物理修复技术

在城市道路土壤重金属污染的防治中,物理修复技术主要通过物理手段对受污染土壤中的重金属进行去除、隔离或固定,以此来降低其环境危害性。在物理修复技术中换土法是较为常用的技术方法,主要是直接移除受污染土壤并用清洁土壤替代,适用于污染程度较高且面积有限的区域。而客土覆盖通过在污染土壤表面铺设一层清洁土壤或防护材料,阻隔重金属的迁移或暴露途径,优点在于施工简便,适用于表层污染的区域。土壤封闭技术通过物理屏障隔离污染土壤,防止重金属随水或风传播,常用于填埋场或长期污染区的控制。物理修复技术中热处理技术利用高温分解、蒸发或固化重金属,可有效去除部分挥发性重金属,但对高温稳定性强的重金属效果有限。物理修复技术在实施过程中对污染物性质和现场条件有较高要求,但其快速性和高效性使其在应急处理或重污染地区的初步治理中具有重要作用^[3]。

3.2 化学修复技术

化学修复法是治理城市道路土壤重金属污染的重要技术之一,其核心是通过添加化学试剂改变重金属在土壤中的赋存形态,从而降低其生物有效性和迁移性,减轻对环境和健康的危害。化学修复的主要机制包括稳定化、固化、氧化还原反应及螯合反应。稳定化技术通过添加石灰、磷酸盐或硅酸盐等稳定剂,与重金属形成难溶化合物,减少重金属的水溶性和生物有效性。固化技术则通常结合水泥、粉煤灰等材料,包裹重金属形成固态基质,增强土壤的物理稳定性并阻止重金属迁移。而氧化还原反应通过调整土壤的氧化还原条件,使重金属转化为毒性较低的形态,例如将六价铬(Cr^{6+})还原为三价铬(Cr^{3+}),从而降低其生态风险。而螯合技术利用如 EDTA 或 DTPA 的螯合剂与重金属离子形成稳定的可溶性络合物,减少重金属在土壤中的吸附,部分螯合剂还能通过浸提作用实现重金属的迁移去除。但螯合技

术的应用需谨慎,因其可能造成螯合物随水流迁移到其他环境介质中,引发次生污染^[4]。化学修复法的优点在于操作简便、见效快且适用范围广,尤其对高污染区域具有显著效果,通常与其他修复技术联用来实现更高效、更可持续的治理目标。

生态风险评估表明镉的毒性系数和迁移性风险最高,成为治理的主要目标。根据土壤特性,选用磷酸盐类稳定剂,通过土壤搅拌均匀混合技术,添加到污染土壤中。磷酸盐可与镉、铅等重金属形成磷酸盐沉淀物,大幅降低其生物有效性和水溶性。实验结果表明,磷酸盐施用后镉的生物有效性降低了 60% 以上,铅的迁移性也明显减弱。在部分污染浓度极高的区域,采用了 EDTA 作为螯合剂,通过浸提工艺移除土壤中的镉。螯合剂与镉离子形成稳定的可溶性络合物,使重金属更易被清除。处理后的废水经过严格过滤和离子交换系统净化,防止二次污染。修复完成后,对治理区域进行了连续 6 个月的监测。结果显示,土壤中镉的总含量变化不显著,但生物有效性降低至标准以下,铅和锌的迁移性大幅下降,修复区土壤的植物毒性显著减轻。并且表层土壤的 pH 值略有升高,表明磷酸盐的使用对土壤酸碱度有一定改善作用。

3.3 生物修复技术

城市道路土壤重金属污染的防治技术中,生物修复技术是利用植物、微生物或土壤动物的生物功能来去除、转化或固定土壤中的重金属污染来实现生态恢复。植物修复是目前研究较多的手段,包括植物提取和植物稳定两种方式。植物提取利用超富集植物通过根系吸收和富集土壤中的重金属,随后将富集重金属的植株移除以减少污染物总量。植物稳定则通过植物根系分泌物与重金属反应生成不溶性化合

物,从而降低重金属的生物有效性,适用于轻中度污染区域的风险控制。微生物修复利用特定微生物通过吸附、络合、氧化还原等作用固定或转化重金属^[5]。

将选定的微生物制剂接种到植物根基,配合有机肥料改良土壤环境,进一步提高修复效率。实验数据显示,接种后的植物镉吸收量平均提升 30%,而土壤中的铅和铜生物有效性降低了 20%~40%。生物修复技术具有成本低、环保性强的优势,但在处理高浓度污染、复合污染或某些高毒性重金属时存在局限性,且修复周期较长。

4 结语

城市道路土壤重金属污染是城市化进程中不可忽视的环境问题,其成因复杂、危害深远,不仅威胁生态系统的平衡,也对居民健康构成潜在风险。通过深入分析污染来源、评估污染现状,并结合物理、化学、生物等多种修复技术,可以有效降低土壤中重金属的含量和生物可利用性。在实际中还应进一步推动污染治理技术的创新与应用,构建智能化监测与管理体系,实现城市土壤重金属污染的科学防治。

参考文献:

- [1] 罗迪汉.城市道路土壤重金属污染及其防治技术[J].中国资源综合利用,2024,42(11):146-148.
- [2] 马涛.土壤重金属污染及其防治措施研究[J].清洗世界,2024,40(9):178-180.
- [3] 王莹.浅析土壤重金属污染修复技术[J].农村科学实验,2024(14):45-47.
- [4] 田迎,赵玉敏,种世桂,等.空间信息技术在土壤重金属污染研究中的应用[J].环境卫生学杂志,2024,14(6):520-527.
- [5] 刘阳,王继宇.土壤重金属污染的有效治理及生态修复方法探究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(10):96-98.