

工业场地土壤污染物检测及修复效果评价

张丽丽

浙江静远环境科技有限公司 浙江 宁波 315000

摘要: 本文聚焦工业场地土壤污染物检测及修复效果评价。先阐述常见污染物类型、检测前准备及检测方法;接着介绍物理、化学、生物修复技术,构建修复效果评价指标体系;最后以废弃化工场地为例,分析其修复方案设计与实施过程,检测修复效果。结果表明,复合修复方案成效显著,场地土壤质量达标,满足后续使用要求,为同类场地修复提供参考。

关键词: 工业场地;土壤污染物检测;修复效果评价

引言:工业场地在长期生产活动中,土壤易受各类污染物侵袭,对生态环境和人体健康构成潜在威胁。准确检测土壤污染物并科学评价修复效果,是保障土壤环境安全、实现场地再利用的关键。本文深入探讨工业场地土壤污染物检测技术,剖析常见修复技术,构建修复效果评价指标体系,并通过实际案例分析,为工业场地土壤污染治理提供理论与实践支持。

1 工业场地土壤污染物检测技术

1.1 常见土壤污染物类型及特性

工业场地土壤污染物类型繁杂,核心可分为无机污染物与有机污染物两大类,且各具独特特性。无机污染物以重金属为主,如铅、镉、汞、铬、砷等,这类污染物稳定性强、难降解,易在土壤中累积,通过食物链富集对生态环境和人体健康造成长期危害,其中汞、镉毒性极强,低浓度即可引发神经系统损伤和脏器病变。此外,无机污染物还包括氰化物、氟化物等,多来自化工、冶金行业排放。有机污染物涵盖挥发性有机物(VOCs)、半挥发性有机物(SVOCs)、多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)等,这类污染物多具有致畸、致癌、致突变特性,部分易挥发扩散,污染土壤、大气和地下水,部分难降解且脂溶性强,易被土壤胶体吸附,迁移转化规律复杂,常见于石油化工、农药生产、印染等工业场地,其污染范围和程度往往与生产工艺、排污方式密切相关。

1.2 检测前准备工作

工业场地土壤检测前准备工作是保障检测结果准确性的关键,需按规范流程逐步开展,涵盖场地调查、布点采样、样品保存与运输等环节。首先进行场地前期调查,梳理场地历史生产活动、排污节点、污染物种类等信息,明确检测范围和重点区域,为布点提供依据^[1]。

布点需遵循随机性、代表性原则,结合场地地形、土壤类型、污染扩散趋势,采用网格布点法、对角线布点法等,合理设置表层、中层、深层采样点,兼顾污染严重区域与背景对照区域。采样时使用无污染工具,避免样品交叉污染,每个采样点采集多个子样品混合为一个综合样品,记录采样位置、深度、土壤性状等信息。样品采集后立即封装,标注样品编号、采集日期、场地信息等,根据污染物特性选择合适保存方式,如挥发性有机物样品需冷藏密封,避免挥发,重金属样品可加入硝酸固定。运输过程中保持低温、避光环境,全程监控样品状态,防止破损、变质,同时编制样品交接记录,确保样品从采样到检测的可追溯性,避免样品丢失或混淆。

1.3 检测方法及原理

工业场地土壤污染物检测方法需结合污染物类型选择,不同方法对应不同检测原理,核心目标是精准定量土壤中污染物含量。针对重金属无机污染物,常用检测方法有原子吸收分光光度法(AAS)、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)、原子荧光光谱法(AFS)等。AAS原理是利用重金属原子对特定波长光的吸收特性,通过测量吸光度计算污染物浓度,具有灵敏度高、选择性强的特点,适用于单一重金属检测;ICP-MS原理是将样品离子化后,通过质谱仪分离不同质荷比的离子,实现多元素同时检测,检出限低,可满足痕量重金属检测需求;AFS主要用于砷、汞等元素检测,基于原子在激发态下发射荧光强度与浓度的线性关系定量。针对有机污染物,常用气相色谱法(GC)、气相色谱-质谱联用法(GC-MS)、高效液相色谱法(HPLC)等。GC利用有机污染物在色谱柱中分配系数差异实现分离,通过检测器定量,适用于挥发性、半挥发性有机物;GC-MS结合色谱分离与质谱定性优势,可同时完成有机污染物的分

离、定性与定量,准确性更高;HPLC则适用于高沸点、难挥发的有机污染物,基于不同组分在固定相和流动相中的吸附-解吸平衡实现分离检测,广泛应用于多环芳烃、农药残留等检测。

2 工业场地土壤修复技术及效果评价指标体系

2.1 常见土壤修复技术

2.1.1 物理修复技术

物理修复技术是通过物理手段分离、移除土壤中污染物的修复方法,具有操作简单、修复周期短、无二次污染等特点,适用于重金属、挥发性有机物等污染治理。常见技术包括土壤淋洗法、固化/稳定化法、热脱附法、电动修复法等。土壤淋洗法通过向土壤中注入淋洗剂,溶解或吸附污染物,再将含污染物的淋洗液抽出处理,适用于砂质土壤中易溶解污染物,淋洗剂可选用清水、化学试剂或生物淋洗剂^[2]。固化/稳定化法通过添加固化剂(如水泥、石灰、粉煤灰)或稳定剂,改变污染物存在形态,降低其迁移性和毒性,形成稳定固体混合物,适用于重金属污染土壤,修复后土壤可用于绿化、填方等。热脱附法利用高温加热土壤,使挥发性、半挥发性有机污染物挥发分离,再对废气处理,根据温度不同分为低温热脱附(100-300℃)和高温热脱附(300-800℃),适用于有机污染场地。电动修复法通过在土壤中施加直流电场,利用电迁移、电渗流作用使污染物向电极迁移并收集处理,适用于低渗透性土壤中重金属和有机污染物修复。

2.1.2 化学修复技术

化学修复技术是通过向土壤中添加化学试剂,与污染物发生化学反应,实现污染物降解、转化或固定的修复方法,针对性强、修复效率高,广泛应用于中重度污染土壤治理。常见技术包括化学氧化法、化学还原法、化学萃取法、土壤改良法等。化学氧化法添加氧化剂(如过氧化氢、高锰酸钾、臭氧),氧化分解有机污染物为无害物质(如二氧化碳、水),适用于多环芳烃、挥发性有机物等污染,其中高级氧化技术反应速率快、氧化能力强,可处理难降解有机污染物。化学还原法针对重金属污染物(如六价铬、汞离子),添加还原剂(如硫酸亚铁、亚硫酸钠),将毒性强的高价态重金属还原为毒性低的低价态,降低其危害。化学萃取法利用有机溶剂或表面活性剂,萃取土壤中有有机污染物,再对萃取液处理回收,适用于高浓度有机污染土壤。土壤改良法通过添加石灰、有机肥等调节土壤pH值、吸附污染物,降低其生物有效性。

2.1.3 生物修复技术

生物修复技术是利用微生物、植物、动物等生物的代谢活动,降解、吸收或转化土壤中污染物的修复方法,具有环境友好、成本低、无二次污染等优势,适用于中轻度污染土壤的生态修复。微生物修复技术是核心,通过接种功能微生物(如细菌、真菌)或激活土壤土著微生物,利用其代谢作用降解有机污染物,或将重金属转化为低毒性形态,可分为原位修复和异位修复,原位修复无需搬运土壤,成本更低,异位修复需将土壤搬运至处理场地,修复效果更易控制。植物修复技术利用超富集植物(如蜈蚣草、东南景天)吸收土壤中重金属,或通过植物根系分泌物促进微生物降解有机污染物,修复过程中可改善土壤结构,恢复生态功能,但其修复周期较长,受植物生长条件限制。动物修复技术利用蚯蚓、线虫等土壤动物,通过摄食、代谢作用富集重金属,或促进土壤微生物活动,辅助污染物降解,多作为辅助修复手段,与微生物修复、植物修复结合使用,提升整体修复效果。

2.2 修复效果评价指标体系构建

工业场地土壤修复效果评价指标体系构建需遵循科学性、系统性、针对性原则,涵盖污染控制、生态功能、环境安全等多维度,全面反映修复后土壤质量状况。核心指标包括污染物残留指标,即修复后土壤中各污染物含量,需符合国家工业用地土壤污染风险管控标准,明确污染物去除率、残留浓度是否达标,这是评价修复效果的核心依据^[3]。生态指标涵盖土壤理化性质和生物多样性,修复后土壤理化性质需恢复至适宜植物生长、微生物活动的范围,生物多样性(微生物群落结构、土壤动物数量)需逐步恢复,体现土壤生态功能修复成效。环境安全指标包括地下水污染风险、大气挥发风险、生物有效性,需检测修复后土壤对周边地下水、大气的影 响,确保污染物无二次迁移,生物有效性降低,避免对人体和生态系统造成潜在危害。

3 工业场地土壤修复效果评价案例分析

3.1 案例场地概况

本次案例场地为废弃化工场地,位于华北地区工业园区内,占地面积约8000平方米,场地历史用于农药生产,运营时间长达30年,2018年因产业升级停产,现场遗留大量生产设备、废渣和排污沟渠。场地土壤类型以粉质黏土为主,透气性较差,土壤pH值为6.2-6.8,呈弱酸性。前期检测显示,场地土壤存在多环芳烃(PAHs)、六六六、滴滴涕等有机污染物,以及铅、镉等重金属污染物,污染集中在表层0-2米土壤,部分区域深层2-5米土壤也受到轻度污染,其中PAHs最高残留

浓度达120mg/kg, 铅最高残留浓度达350mg/kg, 均远超《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准》(GB 36600-2018)中第一类用地风险筛选值。场地周边1公里内有居民区和公共绿地, 若不进行修复, 污染物易迁移至地下水和周边环境, 对居民健康和生态环境构成严重威胁, 场地规划后续用于城市绿地建设, 修复需满足绿地用地土壤质量要求。

3.2 修复方案设计与实施

结合场地污染特征、规划用途及土壤性质, 设计“化学氧化+微生物强化修复+固化稳定化”复合修复方案, 分阶段实施修复工程。第一阶段为预处理, 清理场地遗留设备、废渣和表层污染杂物, 开挖排污沟渠, 对沟渠内污染土壤单独收集处理, 同时划分污染严重区域(表层0-1.5米)、轻度污染区域(表层1.5-2米、深层2-5米), 针对性布设修复单元。第二阶段实施化学氧化修复, 对污染严重区域喷洒高锰酸钾氧化液, 控制氧化液浓度为5%, 均匀搅拌土壤至深度1.5米, 反应72小时, 氧化分解难降解有机污染物, 降低污染物浓度。第三阶段开展微生物强化修复, 向土壤中接种降解菌剂(含假单胞菌、芽孢杆菌), 同时添加有机肥和木屑调节土壤碳氮比, 保持土壤湿度在25%-30%、温度在20-30℃, 促进微生物繁殖, 降解剩余有机污染物, 修复周期为60天。第四阶段对深层轻度重金属污染土壤实施固化稳定化处理, 添加水泥和粉煤灰复合固化剂, 搅拌均匀后压实, 降低重金属迁移性。整个修复过程严格控制施工质量, 定期检测土壤中污染物浓度变化, 调整修复参数, 工程总工期为120天, 修复面积约7500平方米, 确保修复工艺稳定达标。

3.3 修复效果检测与评价

修复工程结束后, 按照评价指标体系开展全方位检测与评价, 确保场地土壤质量满足绿地用地要求。检测采用网格布点法, 在修复区域布设30个采样点, 同时设置3个背景对照点, 采集表层0-2米及深层2-5米土壤样

品, 检测污染物残留、土壤理化性质、生物多样性及环境安全指标。检测结果显示, 修复后土壤中PAHs平均残留浓度为0.8mg/kg, 铅平均残留浓度为35mg/kg, 六六六、滴滴涕残留浓度低于检出限, 所有污染物均满足GB 36600-2018第一类用地风险管控标准, 污染物平均去除率达92%以上。土壤理化性质显著改善, pH值稳定在6.5-7.2, 有机质含量提升至2.5%, 孔隙度和透气性满足植物生长需求^[4]。生物多样性指标达标, 土壤微生物群落结构恢复稳定, 蚯蚓等土壤动物数量显著增加。环境安全检测显示, 地下水、周边大气中无目标污染物检出, 重金属生物有效性降低60%以上, 无二次污染风险。综合评价表明, 本次复合修复方案成效显著, 场地土壤生态功能、环境安全均达到修复目标, 可满足后续城市绿地建设的使用要求, 为同类化工场地修复提供参考。

结束语

工业场地土壤污染物检测与修复效果评价是环境治理的重要环节。通过科学检测技术明确污染物状况, 选用合适修复技术, 并构建全面评价指标体系, 可有效评估修复成效。案例分析表明, 合理设计的复合修复方案能显著改善土壤质量, 满足场地再利用需求。未来需持续探索创新技术, 提升修复效率与质量, 推动工业场地绿色可持续发展。

参考文献

- [1]李和昕,张哲.工业场地土壤污染状况初步调查分析[J].山西化工, 2024, 44(9):234-237.
- [2]王林娇.工业场地土壤污染修复技术与地下水联动防治策略研究[J].生态与资源,2025(2):28-30.
- [3]晏井春,宋静,孙钰沅,等.我国工业场地土壤污染防治十大科技问题与对策[J].环境科学研究,2024,37(12):2733-2744.
- [4]林斌.典型工业遗留场地土壤污染特征分析及风险评估[J].皮革制作与环保科技,2021,2(24):11-13.