

为无害的二氧化碳和水，或者至少把它分解为毒性明显降低、生物降解性增强的小分子中间体，以此达成环境风险的彻底消除，绝非简单的相转移。

在众多的催化材料中，石墨相氮化碳基材料因对可见光具有良好响应特性而备受关注。当可见光照射 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 时，可被激发产生电子-空穴对，这些光生空穴自身有着强氧化性，激发态的电子可与水中溶解氧起反应，并进一步生成超氧自由基等多种活性氧物种。由这些强氧化性的空穴和自由基共同构成一个攻击体系，能够有效降解水体中的多种抗生素（如磺胺类、氟喹诺酮类）以及有机染料，展现出以太阳能驱动净化水体的巨大潜力。

金属有机框架材料于催化氧化领域展现出更多样的应用方式，特定具有光活性的 MOFs 类似 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ，直接用作光催化剂，也是其极具特色的应用方式，可充当一硫酸盐或过二硫酸盐的活化剂^[4]。MOFs 结构中大量存在的不饱和金属点位，能高效催化 PMS 分解以及 PDS 分解，生成氧化电位极高且半衰期较长的硫酸根自由基。SO₄•⁻ 对于含有特定官能团的顽固性新污染物而言，比如全氟化合物及部分药物残留，往往展现出比羟基自由基更突出的降解效率。这种经由活化过硫酸盐生成 SO₄•⁻ 的路径，为处理那些难被传统羟基自由基氧化的顽固性新污染物提供了有利技术手段。

4.3 在吸附-催化协同作用中的应用

把吸附和催化降解功能融合在单一复合材料中，是环境功能材料领域中一个极具前瞻性的发展走向。该策略意在攻克传统吸附剂易饱和、需频繁再生的难题，以及均相催化体系中反应物局部浓度较低的困境，进而实现对水体污染物的快速、高效及可持续性净化。其核心设计理念乃构建一个多功能的微反应环境，使污染物的“捕获”与“摧毁”两个步骤能在空间上紧密相邻且时间上近乎同步地出现，大幅提高了整体的净化动力学及材料利用率。

核壳结构是实现此功能集成的经典构型之一。在这种设计中，外壳层一般由具备高比表面积和可调控孔道结构的多孔材料组成，比如金属有机框架，MOFs 外壳好似一个高效的“捕集器”，通过其孔道尺寸筛分效应及表面官能团，迅速从复杂水体中选择性富集目标污染物分子，使壳层内达到局部高浓度。材料的核部便封装了具有催化活性的纳米粒

子，比如零价铁或二氧化钛，这些纳米粒子充当“摧毁中心”，能经由类芬顿反应、光催化或活化过硫酸盐等路径，造就强氧化性的自由基，把富集在周围的污染物分子迅速降解。

这种“富集-降解”一体化策略展现出多重协同优势，它极大地加快了表观反应速率。由于催化反应速度在很大程度上依赖于反应物局部浓度，MOFs 壳层提供的预富集作用，为内核高效催化创造了最优条件^[5]。该策略达成了材料功能的动态再生：污染物一旦被吸附且靠近内核，便会被即时降解，进而原位释放出 MOFs 壳层的吸附位点，使其能够不断捕获新的污染物分子。这不仅显著延长了材料的使用寿命，免去了频繁的物理化学再生过程，也从根源上杜绝了吸附饱和后可能引发的污染物脱附及二次污染风险，呈现出自驱动、可持续净化的先进特性。

5 结语

新污染物治理是当下环境保护领域的重大课题，全新功能材料包括 MOFs、COFs 和 $g\text{-C}_3\text{N}_4$ 等，因其独特的结构和性能优势，为应对这一挑战提供了有效方案。本文对这类材料的基本特性展开了系统论述，阐明了其在提升去除效率、助力绿色技术发展以及应对复杂体系方面的重大意义，并详细剖析了其在吸附、催化及协同作用中的出色表现。尽管在材料成本、长期稳定性及大规模应用方面仍需进一步钻研，但无可置疑，新型功能材料已成为且将持续充当新污染物深度净化与风险控制技术研发的核心驱动力，展现出广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 路建美.微纳功能材料在环境治理中的应用[J].化工进展, 2020, 39(6):17.
- [2] 张普智,张彦军,谷凯凯,等.光催化技术构建功能性纺织物在环境污染中的应用[J].化工设计通讯, 2020, 46(1):3.
- [3] 段文博,姚宏颖.石墨烯在环境有机污染物分析中的应用进展[J].皮革制作与环保科技, 2022(006):003.
- [4] 周云斌,李敏娜,吴琼,等.磁性MOFs材料在环境污染分离检测应用中的研究概况[J].化工新型材料, 2018, 46(9):4.
- [5] 米海刚,张平,曲高艳,等.基于磁性生物炭的TiO₂吸附性光催化材料的研究展望[J].当代化工研究, 2019(11):2.

Heavy metal detection and environmental risk assessment method for industrial site soil

Di Liu Xiaofeng Su

Guangdong Jianyan Environmental Monitoring Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510000, China

Abstract

This study systematically investigates heavy metal detection and environmental risk assessment in industrial site soils. It first clarifies the sources, migration pathways, and pollution characteristics of characteristic heavy metals in industrial sites. Subsequently, a comprehensive detection methodology is established, encompassing sample collection and preparation, diversified detection techniques, precision control, and quantitative data analysis. The research further elaborates on the core framework of environmental risk assessment, key indicators, mainstream evaluation methods, and the logic of result application. Ultimately, a closed-loop technical support system of "testing-analysis-assessment-control" is developed. The findings provide scientific evidence and methodological references for precise prevention and control of heavy metal pollution in industrial site soils, safe reuse of land resources, and environmental management decision-making.

Keywords

industrial site; soil heavy metal; detection method

工业场地土壤重金属检测及环境风险评估方法

刘娣 苏晓凤

广东建研环境监测股份有限公司, 中国 · 广东 广州 510000

摘要

本文围绕工业场地土壤重金属检测及环境风险评估展开系统研究, 首先明确了工业场地特征性重金属的来源、迁移路径与污染特点; 随后构建了涵盖样品采集与制备、多元化检测技术、检测精度控制及数据分析定量的完整检测方法体系; 进而阐述了环境风险评估的核心框架、关键指标、主流评估方法及结果应用逻辑; 最终形成了“检测-分析-评估-管控”的闭环技术支撑体系。研究成果可为工业场地土壤重金属污染精准防控、土地资源安全再利用及环境管理决策提供科学依据与方法参考。

关键词

工业场地; 土壤重金属; 检测方法

1 引言

工业活动导致的土壤重金属污染, 已成为影响生态安全与土地可持续利用的突出问题。重金属在土壤中累积后, 会破坏土壤生态功能、污染水体, 并通过多种途径危害人体健康。针对现有检测与评估方法的适配性不足问题, 本文系统梳理工业场地土壤重金属检测技术与风险评估框架, 旨在为污染治理与环境管理提供简洁可行的技术方案。

2 土壤重金属污染概述

2.1 重金属的定义与分类

重金属通常指密度大于 $5\text{g}/\text{cm}^3$ 的金属元素, 常见于工业场地土壤中的包括铅、镉、汞、铬、铜、锌、砷、镍等,

这类元素因具有难降解性和累积性, 易在土壤环境中长期留存。工业场地土壤重金属的污染源具有显著行业特异性, 主要来源于工业生产过程中的废气排放、废水渗漏、固体废物堆放及原料辅料泄漏等, 其迁移路径呈现多介质交叉特征, 既可以通过大气沉降、地表径流扩散至周边土壤, 也能借助土壤孔隙水淋溶向下渗透, 还可通过植物根系吸收进入食物链循环, 如图 1 所示。



图 1: 工业场地土壤重金属的污染源及迁移路径

【作者简介】刘娣 (1996-), 女, 中国湖南衡阳人, 本科, 助理工程师, 从事生态环境监测研究。

2.2 土壤重金属污染的影响

土壤重金属污染会对生态系统与人类生存环境造成多维度影响。在土壤生态层面,过量重金属会破坏土壤微生物群落结构,抑制酶活性,降低土壤肥力与物质循环能力,进而影响植物正常生长发育,导致植被退化甚至死亡。在水体影响方面,土壤中未被固定的重金属易随降水淋溶或地下水流动迁移,污染地下水和地表水,破坏水生生态平衡,同时降低水资源环境质量。对人体健康而言,重金属可通过土壤-植物-人体、土壤-地下水-人体的直接或间接暴露途径进入人体,长期累积后可能引发神经系统损伤、内分泌紊乱、脏器病变等一系列健康风险,且部分重金属具有致癌、致畸、致突变效应^[1]。

2.3 工业场地土壤重金属污染的特点

工业场地土壤重金属污染的核心特点与工业生产活动的空间布局、生产工艺密切相关。其污染源主要集中在工业生产过程中产生的各类废弃物,包括冶炼渣、化工残渣、废弃原料及处理不当的工业废水、污泥等,这些废弃物中的重金属通过不同方式释放并进入土壤环境。在空间分布上,工业场地土壤重金属积累呈现明显的异质性特征,污染浓度通常在生产装置区、排污口、废弃物堆放区等核心区域最高,向周边区域逐渐递减,形成以点源污染为中心的扩散格局,且污染深度往往与污染物排放强度、土壤质地及地下水埋深相关,部分场地可形成深层土壤污染,如图2所示。

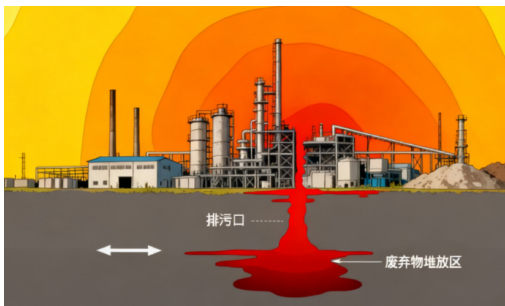


图2: 工业场地土壤重金属空间分布

3 土壤重金属检测方法

3.1 土壤样品采集与制备

土壤样品的采集与制备是保障检测结果准确性的基础环节,其核心在于通过科学的采样策略与规范的前处理流程减少误差。采样需结合工业场地的污染特征制定针对性方案,布点方法可根据场地形状、污染扩散规律选择网格布点、对角线布点或点源周边辐射布点,同时需兼顾表层与深层土壤,根据污染可能的渗透深度确定采样层次,确保样品具有代表性,单个样品采集量需满足检测与复检需求。样品前处理的核心是去除土壤基质干扰,常用消解技术包括微波消解、湿法消解与干法消解,分别适用于不同类型土壤与检测需求,消解后需进行过滤、定容等步骤;样品保存需遵循

低温、避光、密封原则,避免重金属形态转化或流失,保存时间需严格遵循相关检测标准,确保检测结果的时效性与可靠性^[2]。

3.2 重金属检测技术

当前土壤重金属检测技术已形成多元化体系,不同技术基于不同原理适用于不同检测场景与需求。原子吸收光谱法(AAS)通过原子对特征光谱的吸收实现定量,具有操作简便、成本适中的特点,是传统且应用广泛的检测方法,适用于单一或少量重金属的测定;电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)利用等离子体离子化样品,结合质谱仪检测,具有灵敏度高、检出限低、可同时测定多种元素的优势,适用于痕量重金属检测;激光诱导击穿光谱法(LIBS)通过激光激发土壤产生等离子体,依据特征光谱快速定性定量,无需复杂前处理,适合现场快速筛查;X射线荧光光谱法(XRF)利用X射线激发重金属原子产生荧光,具有无损、快速的特点,可用于现场初步检测与大面积筛查;高效液相色谱法(HPLC)则主要用于重金属形态分析,通过分离不同化学形态的重金属,为风险评估提供更精准的依据。

3.3 检测精度与方法选择

检测精度的控制与检测方法的合理选择是工业场地土壤重金属检测的关键,需结合检测目标、场地条件与技术条件综合考量。检测精度主要受采样误差、仪器误差与操作误差影响,采样误差源于样品代表性不足,仪器误差与设备校准状态相关,操作误差则需通过标准化操作流程规避,实际检测中需通过空白实验、平行样测定、加标回收实验等方式验证精度,确保结果满足相关标准要求。不同检测方法各有优劣:原子吸收光谱法成本较低但检测效率有限,适用于批量常规检测;电感耦合等离子体质谱法检测性能优异但设备与运行成本高,适合高精度、多元素检测需求;现场快速检测方法(LIBS、XRF)效率高、操作简便,但检出限与精度略低于实验室方法;高效液相色谱法在形态分析中具有不可替代性,但前处理相对复杂。方法选择需以检测需求为核心,兼顾精度要求、检测成本与时效性^[3]。

3.4 重金属的分析与定量

常用的重金属含量测定都是按照“标准曲线校准—样品测定—结果验证”的程序来开展,先配制一系列不同浓度的标准溶液以制作出标准曲线,并保证线性相关系数满足要求;样品测定时须开展平行样检测,减小随机误差;采用加标回收实验验证方法的准确度,并控制好回收率;以检测数据的特点为基础开展数据分析与统计处理工作,利用平均数、标准差和变异系数等统计数据体现检测数据的集中趋势和离散程度,同时判断并处理异常值,剔除偶然误差的影响;用检测数据统计分析获取重金属含量的空间分布特征,并结合实际获得含量数量等级的表征,可为后期的风险评估提供定量依据。整个过程中要严格按照检测的相关标准、规范来进行操作,保证检测的结果既符合规定也方便比对。