

Research on Evaluation of Pollutant Reduction Efficiency in Chemical Oxidation Remediation of Organically Contaminated Sites

Zhiguo Wang¹ Peng Wu¹ Mingcan Yue²

1. Jiangsu Runhuan Environmental Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

2. Jiangsu Longheng Environmental Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213000, China

Abstract

Remediation of organically contaminated sites is a key and challenging issue in the field of soil and groundwater environmental management. Chemical oxidation remediation has been widely applied in the treatment of various organic contamination scenarios due to its rapid reaction rate, broad applicability to different types of organic pollutants, and flexible engineering implementation. Pollutant reduction efficiency, as an important quantitative indicator for evaluating the effectiveness of chemical oxidation remediation, not only reflects the degree of pollutant removal but also directly influences the assessment of remediation target achievement and the optimization of technical schemes. Focusing on the reduction characteristics of organic pollutants during chemical oxidation remediation, this study systematically examines evaluation approaches for reduction efficiency from the perspectives of pollutant concentration variation, reaction process characteristics, and environmental medium conditions. The analysis contributes to improving the scientific rigor and reliability of remediation performance evaluation, and provides technical support for effectiveness determination and management decision-making in the remediation of organically contaminated sites.

Keywords

Organically contaminated sites; chemical oxidation remediation; pollutant reduction efficiency

有机污染场地化学氧化修复过程中污染物削减效率评价研究

王志国¹ 吴鹏¹ 岳明灿²

1. 江苏润环环境科技有限公司, 中国·江苏 南京 210000

2. 江苏龙衡环境科技有限公司, 中国·江苏 常州 213000

摘 要

有机污染场地修复是当前土壤与地下水环境治理领域中的重点与难点问题, 化学氧化修复技术因具有反应速率快、适用污染物类型广、工程实施灵活等优势, 被广泛应用于多类有机污染场地治理实践中。污染物削减效率作为衡量化学氧化修复效果的重要量化指标, 不仅反映污染物去除程度, 也直接影响修复目标达成判断及技术方案优化。围绕化学氧化修复过程中有机污染物的削减特征, 从污染物浓度变化、反应过程特性及环境介质条件等方面, 对削减效率的评价思路进行系统梳理与分析, 有助于提升修复效果评价的科学性和可靠性, 为有机污染场地修复效果判定与管理决策提供技术支持。

关键词

有机污染场地; 化学氧化修复; 污染物削减效率

1 引言

在工业生产、化工储运及不当处置等活动影响下, 大量有机污染物进入土壤和地下水环境, 形成污染程度高、迁移扩散风险大的污染场地问题。随着土地资源集约利用和环境风险防控要求不断提高, 有机污染场地修复已成为生态环境治理中的重要任务。化学氧化修复技术通过引入强氧化剂实现有机污染物结构破坏与转化, 在多类场地中展现出较好

的适用性。然而, 修复过程中污染物削减效果受多种因素共同作用, 仅依据修复前后浓度对比难以全面反映实际修复成效。开展污染物削减效率评价研究, 对于科学认知化学氧化修复过程、规范修复效果判定具有重要现实意义。

2 有机污染场地化学氧化修复技术基础

2.1 有机污染场地中典型污染物的组成特征

有机污染场地中污染物类型通常具有来源多样、组成复杂和理化性质差异明显等特点, 常见污染物包括石油烃类、卤代烃类、芳香族化合物及部分含氧有机物等。这类污染物在土壤和地下水环境中易发生吸附、迁移与富集, 部分

【作者简介】王志国(1992-), 男, 中国河南安阳人, 硕士, 工程师, 从事环境保护工程研究。

物质具有较强的持久性和生物毒性，难以通过自然过程实现有效衰减。受历史生产方式、污染释放途径及介质结构差异影响，有机污染物在场地中呈现明显的空间分异特征，垂向与水平分布不均，对修复技术选择和削减效果评价提出更高要求。

2.2 化学氧化修复技术的反应机理与适用条件

化学氧化修复技术通过向污染介质中投加强氧化剂，引发一系列氧化还原反应，使有机污染物分子结构发生断裂或转化为低毒、易降解的小分子物质，从而实现污染削减。反应过程中自由基或活性氧物种发挥核心作用，其生成效率与反应路径受氧化剂种类、环境条件及污染物特性共同影响。该技术适用于中高浓度有机污染场地，在具备一定渗透性和反应空间的土壤与地下水环境中更易发挥修复效果，对场地条件具有一定选择性^[1]。

3 化学氧化修复过程中污染物削减效率的影响因素

3.1 污染物初始浓度与空间分布特征

污染物初始浓度水平对化学氧化修复削减效率具有显著影响，高浓度污染区易引发氧化剂快速消耗，降低反应持续性，而低浓度区域则可能因反应驱动力不足导致削减效果有限。同时，污染物在场地中的空间分布不均，使氧化剂与污染物接触程度存在差异，影响实际反应效率。复杂的分布形态增加了修复过程的不确定性，也对削减效率评价提出更高精度要求。

3.2 氧化剂投加方式与反应条件控制

氧化剂投加方式直接影响其在污染介质中的扩散范围和反应均匀性，不同投加路径和速率会改变氧化反应的空间分布特征。反应条件如温度、pH 环境及水分状态等因素，对活性物种生成效率和反应稳定性具有重要作用。若条件控制不当，可能导致氧化反应效率降低或出现无效消耗现象，从而影响污染物削减程度及评价结果的准确性。

4 污染物削减效率评价指标体系构建

4.1 基于污染物浓度变化的定量评价指标

在化学氧化修复效果评价中，污染物浓度变化是最直观且可操作性较强的定量基础。通过对修复前后污染物浓度进行系统对比，可以构建削减率、残留率及单位时间削减量等指标，用于反映污染物去除水平。以某类有机污染物为例，修复前土壤中浓度为 1200 mg/kg，修复后降至 420 mg/kg，削减量达到 780 mg/kg，对应削减率为 65%。在连续监测条件下，可引入阶段性浓度变化指标，对 30 d、60 d、90 d 等时间节点的削减效果进行比较，以刻画修复过程的持续性和稳定性。同时，不同空间采样点之间的浓度差异可用于衡量削减效果的均匀程度，如同一深度范围内最大浓度与最小浓度比值由修复前的 4.2 降低至 1.6，表明修复效果趋于均衡。通过将浓度变化与修复周期、投加剂量相结合，可进一步形

成单位氧化剂投加量削减指标，例如每投加 1 kg 氧化剂实现污染物削减 45 mg/kg，为修复方案的经济性和效率评价提供量化依据^[2]。

4.2 基于反应动力学特征的效率评价方法

反应动力学特征能够从过程角度揭示化学氧化修复中污染物削减效率的变化规律。通过拟合污染物浓度随时间变化曲线，可建立零级或一级反应模型，对削减速率进行定量描述。在某修复阶段内，污染物浓度由 1000 mg/kg 在 20 d 内降至 500 mg/kg，对应平均反应速率为 25 mg/kg·d，反应速率常数约为 0.035 d⁻¹。不同阶段速率变化反映出氧化反应由快速消耗向缓慢衰减的转变特征，这一变化与氧化剂消耗和污染物可反应性密切相关。通过比较不同条件下反应速率常数，可评价修复条件对削减效率的影响，例如在 pH 6.5 条件下速率常数为 0.041 d⁻¹，而在 pH 8.0 条件下降至 0.026 d⁻¹。动力学参数的引入，使削减效率评价由单一结果判断转向过程效率分析，有助于识别修复过程中效率衰减节点，并为工艺调整提供依据^[3]。

4.3 综合环境效应导向的削减效率表征指标

单纯基于污染物浓度削减难以全面反映化学氧化修复的环境效应，引入综合环境效应导向指标有助于提高评价的完整性。该类指标将污染物削减程度与生态风险变化相结合，对修复效果进行多维度表征。例如，通过毒性当量变化评价修复前后环境风险水平，修复前综合毒性指数为 2.8，修复后降至 1.1，风险降低幅度超过 60%。同时，可将地下水中溶解态污染物浓度变化纳入评价体系，修复后地下水污染物浓度由 0.45 mg/L 降至 0.12 mg/L，显著降低迁移风险。在此基础上，结合氧化反应对土壤理化性质的影响，如有机质含量变化幅度控制在 5% 以内，体现修复过程对环境介质扰动的可控性。通过构建包含削减率、风险指数和介质稳定性参数的综合指标体系，可更加客观反映化学氧化修复的实际环境效益。

5 化学氧化修复过程中削减效率的监测与分析方法

5.1 修复前后污染物削减效果的对比分析方法

修复前后对比分析是削减效率评价的基础手段，通过系统采样与数据对比实现修复效果判定。在修复实施前，对污染场地进行网格化布点，获取基准浓度数据，例如布设 25 个采样点，平均浓度为 950 mg/kg。修复完成后在相同位置进行复测，平均浓度降至 380 mg/kg，总体削减率约为 60%。通过统计分析不同采样点削减幅度，可识别削减效果差异区，如削减率高于 70% 的区域占比达到 68%。同时，将不同深度层位的数据进行对比，可判断修复作用范围是否满足设计要求。修复前后数据的系统对比，为削减效率评价提供直接证据，也是后续综合分析的重要基础^[4]。

5.2 修复过程动态监测数据的效率判定思路

动态监测能够反映化学氧化修复过程中削减效率的实

时变化特征。通过在修复周期内设置多次监测节点,如第10 d、30 d、60 d进行采样,可获得污染物浓度随时间变化的数据序列。在某场地修复过程中,前30 d内污染物浓度由1100 mg/kg降至520 mg/kg,削减幅度占总削减量的55%,表明初期反应贡献显著;随后30 d内浓度降至410 mg/kg,削减速率明显放缓。通过对动态数据进行趋势分析,可判断氧化反应是否进入效率衰减阶段,为是否需要补充氧化剂或调整条件提供依据。动态监测数据的连续性,使削减效率评价更加贴近实际修复过程。

5.3 多指标协同下的削减效率综合评价方法

在复杂场地条件下,单一指标难以全面反映削减效率水平,多指标协同评价成为必要手段。该方法将浓度削减率、反应速率参数和环境效应指标进行综合分析,通过权重分配形成综合评价结果。例如,浓度削减率权重设定为0.5,反应速率指标权重为0.3,环境风险变化指标权重为0.2,计算得到综合效率指数为0.72,表明修复效果处于较高水平。通过对不同修复阶段综合指数的比较,可识别效率提升或下降趋势,为修复管理提供量化参考。多指标协同评价能够有效降低单一指标偏差带来的不确定性,提高污染物削减效率评价的科学性与可靠性。

6 污染物削减效率评价在修复效果判定中的应用

6.1 削减效率评价对修复目标达成度判定的支撑作用

在有机污染场地修复实践中,修复目标达成度是衡量工程成效的核心依据,而污染物削减效率评价为这一判定提供了量化支撑。通过将修复前后的污染物浓度变化、削减幅度与既定修复目标进行系统比对,可以判断修复措施是否达到预期要求。例如,当修复目标要求污染物浓度由初始水平降至风险管控阈值以下时,削减效率指标能够直观反映目标实现程度。在修复过程中,部分场地可能在总体平均浓度达标的情况下,仍存在局部高值区域,单纯依赖终点浓度容易掩盖问题,而削减效率评价可通过空间分布差异揭示目标达成的不均衡性。同时,不同阶段削减效率的变化趋势有助于判断修复目标是否具有持续稳定的实现基础,避免出现短期达标后反弹的风险。通过将削减效率结果与修复设计指标、管控标准进行对应分析,可形成对修复目标达成度更为全面、客观的判定结论,为修复验收与后续管理提供可靠依据。

6.2 削减效率结果在修复工艺优化中的应用价值

污染物削减效率评价结果不仅用于修复效果判定,同时在修复工艺优化中具有重要应用价值。通过对不同阶段、不同条件下削减效率的系统分析,可以识别修复过程中效率较高或偏低的关键环节,从而为工艺参数调整提供方向。

当削减效率在初期表现较高、后期明显下降时,说明氧化反应条件或氧化剂供给方式可能需要优化,以延长有效反应周期。不同氧化剂体系或投加方式下削减效率的对比结果,也可为工艺选择提供量化依据,避免单纯依赖经验判断。此外,削减效率与投加成本、修复周期之间的关系分析,有助于实现修复效果与经济性的平衡,推动修复方案由单一效果导向向综合效益导向转变。通过将削减效率评价嵌入修复过程管理,可形成动态优化机制,提高修复技术应用的针对性和稳定性。

6.3 削减效率评价对场地环境风险降低程度的反映作用

污染物削减效率评价在反映场地环境风险变化方面具有重要意义。环境风险的降低不仅取决于污染物是否达标,还与污染物削减幅度、残留水平及空间分布状态密切相关。削减效率评价能够揭示修复前后污染负荷的变化程度,从而反映风险降低的实际效果。当高毒性或高迁移性污染物的削减效率较高时,场地对周边环境和人群的潜在威胁随之减弱。相比单一浓度指标,削减效率更能体现污染控制过程中的风险变化趋势,有助于判断修复措施对地下水污染扩散、土壤再利用安全性的影响。通过将削减效率结果与风险评估结论相结合,可以更准确地识别剩余风险水平,为是否需要进一步修复或实施风险管控措施提供依据,从而实现有机污染场地环境安全状况的科学判定。

7 结语

有机污染场地化学氧化修复过程中,污染物削减效率评价在修复效果判定与技术管理中具有基础性作用。通过构建科学合理的评价指标体系,并结合过程监测与综合分析方法,可更加客观地反映污染物削减程度及修复稳定性。削减效率评价不仅有助于判断修复目标的实现情况,也为修复工艺优化和环境风险控制提供重要依据。将削减效率评价贯穿于修复全过程,有利于提升修复效果判定的科学性与规范性,推动有机污染场地修复工作向更加精细化和可持续方向发展。

参考文献

- [1] 张李昶,徐雷,李为明,石彩玲,谢文军,李佳楠.不同氧化技术对石油污染土壤性质的影响及修复效果分析[J].中国土壤与肥料,2025,(10):231-242.
- [2] 巫小燕.探析原位化学氧化技术在石油烃污染土壤修复中的应用[J].皮革制作与环保科技,2025,6(19):21-23.
- [3] 杨青琳.异位化学氧化修复有机污染土壤碳排放分析研究[D].导师:李社锋;陈培.武汉轻工大学,2025.
- [4] 夏腾.LNAPLs污染物原位氧化修复的电性响应机理与动态监测研究[D].导师:毛德强.山东大学,2023.