

石化污染场地地下水修复技术多目标优化筛选方法综述

倪鑫鑫^{1,2} 孙红文¹ 刘泽军² 张鹏¹ 苗竹² 魏丽²

1 南开大学环境科学与工程学院天津市城市环境污染诊断与修复技术工程中心；

2 北京高能时代环境技术股份有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i11.7420

[摘要] 石油化工行业的快速发展虽然带来了经济的繁荣，但也导致了严重的地下水污染问题。针对石化污染场地地下水修复技术的选择和优化，本文对石化污染场地地下水修复技术多目标优化筛选方法进行了系统综述。旨在为石化污染场地地下水修复技术的选择和优化提供有价值的参考，促进该领域的研究和应用。

[关键词] 石化污染；地下水修复；多目标优化

Summary of multi-objective optimization and screening methods for groundwater remediation technology in petrochemical contaminated sites

Ni Xinxin^{1,2} Sun Hongwen¹ Liu Zejun² Zhang Peng¹ Miao Zhu² Wei Li²

1. Tianjin Urban Environmental Pollution Diagnosis and Restoration Technology Engineering Center, School of Environmental Science and Engineering, Nankai University;

2 Beijing High Energy Times Environmental Technology Co., Ltd.

[Abstract] Although the rapid development of the petrochemical industry has brought about economic prosperity, it also leads to a serious groundwater pollution problem. This paper systematically discusses the selection and optimization of the groundwater remediation technology in petrochemical contaminated sites. The aim is to provide valuable reference for the selection and optimization of groundwater remediation technology in petrochemical contaminated sites, and promote the research and application in this field.

[Key words] petrochemical pollution; groundwater restoration; multi-objective optimization

近年来，随着环境科学和技术的进步，多目标优化方法在地下水修复技术筛选中的应用逐渐受到关注。多目标优化方法可以综合考虑修复效果、成本、时间等多个因素，帮助决策者在多种修复技术中做出最优选择。然而，目前关于石化污染场地地下水修复技术多目标优化筛选的研究仍较为有限，缺乏系统的综述和评估。本文旨在对石化污染场地地下水修复技术多目标优化筛选方法进行系统综述，为石化污染场地地下水修复技术的选择和优化提供有价值的参考。

一、石油化工污染场地地下水修复技术介绍

根据修复原理和手段的不同，地下水修复技术可分为物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术^[1, 2]

1. 物理修复技术

1.1 地下水抽出-处理

地下水抽出-处理技术通过抽取污染地下水到地表进行处理，然后将处理后的水重新注入地下或排放。地下水抽出-处理技术是最早应用于地下水修复的技术之一，经过多年的发

展，已形成多种高效的处理工艺，如活性炭吸附、膜分离技术等^[5]。该技术广泛应用于各种地下水污染场地，特别是污染物浓度较高、污染范围较大的场地。技术的优势在于技术成熟、处理效果好；不足在于相对处理成本高、能耗大、修复周期长，对深层污染治理效果有限。

1.2 原位曝气技术

原位曝气技术通过向地下水中注入空气，促进污染物的挥发和生物降解。空气中的氧气还能增强微生物的降解能力。近年来，原位曝气技术在注气方式、气体分布控制等方面取得了重要进展，增强了修复效率。原位曝气技术主要应用于修复挥发性有机污染物（VOCs）污染的地下水场地，如苯、甲苯、氯代烃等。该技术具有设备简单、操作方便、成本低的优点，但对非挥发性污染物和深层污染效果有限。

1.3 气相抽提技术

气相抽提技术通过在污染场地土壤中安装抽气井，利用负压抽取土壤气相中的挥发性和半挥发性有机污染物。随着真空

技术和气相检测技术的发展，气相抽提技术的效率和控制精度不断提高。气相抽提技术适用于挥发性和半挥发性有机污染物污染的土壤和地下水场地，如石油烃、苯系物等。该技术具有高效、快速、适用范围广的优点，但对重质油类和非挥发性污染物效果较差，抽取的气体需进行处理。

1.4 多相抽提技术

多相抽提技术结合了抽出处理和气相抽提的优点，通过同时抽取气相、液相和非水相液体 (NAPLs) 来移除地下水中的污染物。多相抽提技术技术的多相抽提设备和控制系统不断改进，提高了多相分离和处理的效率。多相抽提技术广泛应用于复杂污染场地的修复，特别是含有 NAPLs 的场地，如油田、加油站等。该技术的优点是能综合处理多相污染，修复效果好；缺点是设备复杂、投资和运行成本较高。

1.5 原位热脱附技术

原位热脱附技术通过加热污染土壤和地下水，提高污染物的挥发性和流动性，从而促进其移除。近年来，热脱附技术在加热方式和温控技术方面取得了显著进展，提高了修复效率和安全性。原位热脱附技术主要用于高沸点有机污染物和重质油类污染场地的修复。该技术优势在于修复效果显著，对高浓度污染和重质油类污染效果好；不足主要是能耗高、成本较高，需防止加热过程中二次污染。

2. 化学修复技术^[9]

2.1 原位井注化学氧化技术

原位井注化学氧化技术通过在污染场地布设注入井，将强氧化剂（如过氧化氢、高锰酸钾等）注入地下，氧化降解污染物。国内外研究集中在氧化剂的选择、注入方式和反应副产物控制等方面，开发出多种高效、低副产物的氧化剂组合。该技术广泛用于修复有机污染物，如氯代烃、苯系物等污染场地，优势是反应迅速、处理效果好；缺点在于氧化剂成本高、需精确控制注入量和分布，可能产生有害副产物。

2.2 高压旋喷化学氧化技术

高压旋喷化学氧化技术通过高压喷射装置，将氧化剂以高速喷入地下，增强氧化剂与污染物的接触和反应效率。国内外研究集中在高压喷射设备的开发和氧化剂配方的优化，提高氧化效率和适用性。该技术主要用于修复深层有机污染和难降解污染物场地，效果显著，优点是氧化效率高、处理深度大；缺点是设备复杂、操作难度大、成本较高。

2.3 渗透性反应墙技术

渗透性反应墙技术在污染地下水流经的路径上设置反应墙，利用墙内填充的反应材料与污染物发生反应，去除或转化污染物。国内外研究集中在反应材料的选择和优化，提高了反应效率和墙体寿命。渗透性反应墙技术广泛应用于各种有机和无机污染物的修复，尤其是地下水流动性较强的场地。该技术的优点是长期稳定、无需动力设备、维护成本低；缺点是建设

成本高、适用性受地下水流动条件限制。

3. 生物修复技术

3.1 原位注入微生物修复技术

原位注入微生物修复技术通过在污染场地注入特定的微生物或营养物质，增强微生物对污染物的降解能力。国内外研究集中在微生物菌种的筛选、培养和注入方法的优化，开发出多种高效降解有机污染物的菌种。原位注入微生物修复技术广泛用于有机污染场地的修复，如石油烃、多环芳烃等。该技术的优点是环保、成本低、适用范围广；缺点是修复速度较慢、需控制环境条件以维持微生物活性。

3.2 植物修复技术

植物修复技术通过种植特定植物，利用其吸收、代谢和蒸腾作用修复污染物。植物根系和根际微生物的协同作用对污染物降解具有重要作用。国内外研究集中在耐污染植物的筛选和培育、植物-微生物互作机制的研究，提高修复效率和植物耐受性。植物修复技术广泛应用于有机污染和重金属污染场地的修复，如油田、矿区等。该技术的优点是成本低、生态友好、适用范围广；缺点是修复周期长、受到气候和地域条件限制。

二、石化污染场地地下水修复技术多目标优化筛选研究进展

选择合适的地下水修复技术对于有效治理污染至关重要。然而，各种修复技术的效果、成本、时间和环境影响等因素各异，使得技术筛选过程复杂且具有挑战性^[3, 8]。近年来，多目标优化方法在地下水修复技术筛选中的应用逐渐受到关注^[4]。本文将系统介绍多目标优化理论及方法^[7]，并分析其优缺点。

1. 多目标优化理论介绍

多目标优化是运筹学和决策科学中的一个重要分支，旨在同时优化多个相互冲突的目标函数。与单目标优化不同，多目标优化不仅追求某一单一目标的最优解，而是寻求一组在多个目标上相对平衡的帕累托最优解。多目标优化的基本概念包括目标函数、约束条件、决策变量和帕累托前沿。目标函数用于量化优化目标，约束条件定义了可行解的范围，决策变量是决定目标函数值的变量，而帕累托前沿则是所有帕累托最优解的集合。

2. 多目标优化方法介绍

常见的多目标优化方法主要包括以下几类：

2.1 权重法

权重法通过为每个目标函数分配权重，将多目标问题转化为单目标问题进行求解。该方法简单直观，但权重的选择具有主观性，且对非凸帕累托前沿的处理能力有限。

2.2 Pareto 优化法

Pareto 优化法直接对多目标进行优化，寻求帕累托最优解集。常见的算法有遗传算法、粒子群优化等。该方法能够处理复杂的多目标问题，但计算复杂度较高。

2.3 模糊逻辑法

模糊逻辑法通过引入模糊集理论，将不确定性和模糊性纳入优化过程，适用于处理具有模糊和不确定性的多目标问题。该方法能够提供灵活的决策支持，但模型构建和参数设置较为复杂。

2.4 组合优化法

组合优化法结合多种优化方法的优点，针对特定问题进行定制化优化。该方法能够提高优化效率和效果，但实现较为复杂，需要针对具体应用进行调整。

3. 多目标优化技术在石油化工污染地下水修复技术筛选中的应用

3.1 石油化工污染地下水修复技术筛选的评价指标

在地下水修复技术筛选过程中，常用的评价指标包括^[6, 11, 13]：

修复效果：污染物去除率、残留污染物浓度等。

修复成本：投资成本、运行维护成本等。

修复时间：达到修复目标所需的时间。

环境影响：二次污染风险、生态影响等。

技术成熟度：技术的应用历史、成功案例等。

3.2 石油化工污染地下水修复技术筛选的多目标优化模型构建

多目标优化模型的构建包括目标函数定义、约束条件设定和决策变量选择^[10, 12]。以石油化工污染地下水修复为例，模型的目标函数可以定义为：

最小化修复成本；最大化修复效果；最小化修复时间；最小化环境影响。

约束条件可以包括技术适用性、场地条件限制等。决策变量则是不同修复技术的参数设置和组合选择。

4. 多目标优化方法在石化污染场地地下水修复技术筛选中应用的优缺点分析

多目标优化方法能够同时考虑多个相互冲突的目标，提供更为全面的决策支持。通过帕累托最优解集，多目标优化方法能够提供多种备选方案，便于决策者根据实际需求进行选择。多目标优化方法能够处理具有复杂约束条件和非线性关系的问题，适用于复杂的地下水修复场景。但同时，多目标优化方法通常需要较大的计算资源，尤其是在处理大规模问题时，计算复杂度较高。多目标优化模型的构建需要充分了解问题的各个方面，约束条件和目标函数的设定较为复杂。多目标优化方法生成的帕累托最优解集可能包含大量备选方案，结果的解释和选择需要专业知识和经验。

三、结论

石化污染场地地下水修复技术的选择和优化是一个复杂的多目标决策问题，多目标优化方法在该领域具有重要的应用

价值。通过系统综述地下水修复技术和多目标优化方法的研究进展，可以为石化污染场地地下水修复技术的选择和优化提供有价值的参考。未来的研究应进一步完善多目标优化模型，探索更多的优化方法和应用实例，以提高石化污染场地地下水修复的效果和效率。

[参考文献]

[1]赵勇胜. 地下水污染场地污染的控制与修复[J]. 吉林大学学报：(地球科学版)，2007，37(2)：303-310.

[2]刘乙敏，李义纯，肖荣波. 西方国家工业污染场地管理经验及其对中国的借鉴[J]. 生态环境学报，2013，22(8)：1438-1443.

[3]鄂佳楠. 污染场地地下水修复技术筛选方法[D]. 长春：吉林大学，2017.

[4]任丽霞. 地下水修复多属性决策分析方法与应用研究[D]. 北京：华北电力大学，2017.

[5]白相东，张艳，刘智荣. 某冶炼厂污染场地抽出一处理技术优化方案研究[J]. 防灾科技学院学报，2012，14(4)：23-26.

[6]阳艾利. 基于模拟的地下水石油污染风险评估与修复过程优化技术研究[D]. 北京：华北电力大学，2013.

[7]崔逊学，林闯，方廷健. 多目标进化算法的研究与进展[J]. 模式识别与人工智能. 2003，(3). DOI：10.3969/j.issn.1003-6059.2003.03.009.

[8]邢涛，云波，黄娟. 基于 PROMETHEE 法的焦化废水处理技术评估与应用[J]. 环境工程，2014(7)：155-159.

[9]赵丹，廖晓勇，阎秀兰，等. 不同化学氧化剂对焦化污染场地多环芳烃的修复效果[J]. 环境科学. 2011，(3).

[10]陶欢. 污染场地修复决策支持系统的关键模块设计与验证[D]. 2014.

[11]DA A, XI B D, REN J Z. Sustainability assessment of groundwater remediation technologies based on multi-criteria decision making method[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017(119)：36-46.

[12]JALY A H, PERALTA R C. Comparison of a genetic algorithm and mathematical programming to the design of groundwater cleanup systems[J]. Water Resources Research, 1999, 35(8)：2415-2425.

[13]GUAN J B, ARAL M M. Optimal design of groundwater remediation systems using fuzzy set theory[J]. Water Resources Research, 2004, 40(1)：62-74.

基金号：场地土壤-水污染多介质组合技术优化协同整治机制与验证 2020YFC1807004。