

# Construction and application of soil and groundwater synergistic ecological restoration technology system in industrial contaminated sites

Qingzhai Meng<sup>1</sup> Chong Peng<sup>2</sup> Yuhui Zhao<sup>1</sup> Lei Jiang<sup>1</sup>

1. Shandong Institute of Geological and Mineral Engineering (Shandong Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, No.801 Hydrogeological and Engineering Geology Brigade), Jinan, Shandong, 250014, China  
2. Sishui County Bureau of Natural Resources and Planning, Jining, Shandong, 273200, China

## Abstract

This study focuses on the collaborative ecological restoration of soil and groundwater in industrial contaminated sites. It systematically constructs a technical framework that includes comprehensive investigation and assessment, integrated selection and integration of collaborative technologies, scientific engineering design and implementation, and enhanced monitoring and management. The paper proposes specific strategies for different types of sites, such as heavy metal pollution, organic pollution, and complex pollution, as well as for regions with varying geological and climatic conditions. It also provides measures to ensure the success of these strategies from multiple perspectives, including policy and regulations, technology research and development, talent cultivation, and public participation. The aim of this technical framework is to provide scientific guidance and practical pathways for the restoration of industrial contaminated sites, thereby contributing to the effective improvement and sustainable restoration of soil and groundwater ecosystems.

## Keywords

Industrial contaminated sites; Soil-groundwater collaborative restoration; Ecological restoration technology system; Pollution types; Regional characteristics

# 工业污染场地土壤－地下水协同生态修复技术体系构建与应用

孟庆斋<sup>1</sup> 彭冲<sup>2</sup> 赵宇辉<sup>1</sup> 蒋磊<sup>1</sup>

1. 山东省地矿工程勘察院（山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队），中国·山东 济南 250014  
2. 泗水县自然资源和规划局，中国·山东 济宁 273200

## 摘要

本研究主要聚焦于工业污染场地土壤与地下水协同生态修复，系统地构建了包含全面调查评估、协同技术筛选集成、科学工程设计实施及完善监测管理的技术体系。在文中针对于重金属污染、有机污染、复合污染等不同类型的场地，以及不同地质、气候条件的区域，均提出了相应的应用策略，并且从政策法规、技术研发、人才培养、公众参与等多个方面给出了保障措施。而该技术体系的构建与应用，旨在为工业污染场地修复提供科学的指导与实践路径，助力土壤与地下水生态环境的有效改善与可持续修复。

## 关键词

工业污染场地；土壤-地下水协同修复；生态修复技术体系；污染类型；区域特点

## 1 引言

随着工业化进程的快速推进，大量工业活动所产生的污染物在不断地向土壤和地下水环境排放与渗透，此问题导致我国工业污染场地的数量在持续地增多，使得土壤与地下水污染问题日益严峻。据相关的调查数据显示，我国部分地

区工业污染场地土壤中的重金属超标率高达 30% 以上，并且地下水的污染面积也在不断地扩大。因为土壤和地下水是紧密相连的生态系统，其中一个受到污染那么必然就会对另一个产生影响，但传统单一的修复模式难以从根本上解决工业污染场地的生态环境问题。所以构建工业污染场地土壤－地下水协同生态修复技术体系，助力两者同步修复的实现，对于改善区域生态环境质量、保障生态安全、促进土地资源可持续利用都具有重要的现实意义和紧迫性。

【作者简介】孟庆斋（1988-），男，本科，高级工程师，从事水文地质、工程地质、环境地质研究。

## 2 工业污染场地土壤—地下水协同生态修复技术体系构建要点

### 2.1 全面的调查评估体系

工业污染场地土壤-地下水协同生态修复的首要任务是建立全面的调查评估体系,以此准确地掌握污染现状。其中在场地调查阶段,需综合地运用多种技术手段,当中应该包括地质勘探、土壤采样、地下水监测井布设等等。

同时基于先进的检测分析技术,如原子吸收光谱(AAS)、气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)等,可以对采集的土壤和地下水样品进行精确地分析,进而确定污染物的种类、浓度、空间分布及迁移规律。例如利用 AAS 可准确地测定土壤和地下水中重金属(如铅、镉、汞等)的含量,通过 GC-MS 又能够有效地识别有机污染物(如多环芳烃、石油烃等)的成分。此外还可以结合地理信息系统(GIS)技术,将检测分析数据进行空间可视化处理,从而形成污染分布图,用于直观地展示污染的范围和程度,这样便能为污染风险评估和修复方案制定提供科学的依据。

### 2.2 协同的技术筛选与集成

根据调查评估结果,再针对不同类型的污染物和污染程度,需要筛选合适的土壤-地下水协同修复技术并进行集成。

对于重金属污染,一般可选用植物修复与电动修复协同的技术。植物修复利用超积累植物对于重金属的富集作用,能够将土壤中的重金属吸收并转运至地上部分,达到去除或降低土壤重金属含量的目的;电动修复则通过在污染土壤中施加直流电场,可以使重金属离子在电场作用下向电极方向迁移,进而实现重金属的分离和富集。而将两者协同即可提高重金属的去除效率。

对于有机污染而言,则可采用生物修复与原位化学氧化协同的技术。生物修复主要利用微生物的代谢作用,可以将有机污染物降解为无害的二氧化碳和水;而原位化学氧化通过向污染区域注入强氧化剂(如高锰酸钾、过氧化氢等),可以快速地氧化分解有机污染物。若两者结合,就能够充分地发挥出生物修复的长效性和原位化学氧化的快速性优势,有效地去除有机污染物。但在技术集成的过程中,相关人员要考虑到技术之间的兼容性和互补性,务必避免相互干扰,同时也要根据场地的实际情况,合理地确定各技术的应用顺序和参数,以实现最佳的修复效果。

### 2.3 科学的工程设计与实施

就工程设计阶段来说,相关人员需结合场地调查的评估结果和选定的修复技术,进行详细的工程方案设计。而设计又包括了修复区域的划分、修复设备和材料的选型、工艺流程的优化等等。例如采用原位修复技术时,相关人员要合理地确定修复药剂的注入方式、注入量和注入深度。

在工程实施的过程中,则要严格地按照设计方案进行施工,并且要加强质量控制和安全管理。为此需要建立健全的施工质量保证体系,以该体系为依据对修复设备的安装、

修复药剂的使用、施工进度等进行全程的监控,进而确保施工质量符合设计的要求。同时也要制定完善的安全应急预案,旨在对可能出现的环境污染、设备故障、人员安全等问题提前做好防范措施,保障工程的安全和顺利进行。

### 2.4 完善的监测与管理体系

完善的监测与管理体系在实践当中,是保障修复效果和生态安全的重要手段之一。而在修复的过程中,需建立长期的动态监测网络,以此对土壤和地下水的修复效果进行实时地监测。监测的指标则包括污染物浓度、土壤理化性质、地下水水位和水质等等。而后通过定期采集样品进行检测分析,即可及时地掌握修复过程中污染物的变化情况,再评估修复技术的有效性和稳定性。此外,也应加强修复过程中的环境管理,务必严格地控制修复过程中可能产生的二次污染。面对修复过程中所产生的废气、废水和固体废弃物,都应进行妥善地处理,一定要确保其符合相关的环保标准。

## 3 工业污染场地土壤—地下水协同生态修复技术体系应用建议

### 3.1 针对不同污染类型的应用策略

#### 3.1.1 重金属污染场地

重金属污染场地当中应用土壤-地下水协同生态修复技术体系时,应以稳定化/固化-植物修复-淋洗协同技术为主。首先采用稳定化/固化技术,即向污染土壤中添加稳定化药剂(如石灰、磷酸盐等),旨在通过化学反应将重金属转化为低溶解性、低迁移性的形态,进而降低重金属在土壤和地下水中的活性和迁移风险。然后结合植物修复技术,种植超积累的植物,持续地吸收土壤中的重金属,进而逐步地降低土壤重金属含量。

对于地下水重金属污染,则可采用人工湿地-化学沉淀协同技术。其中人工湿地通过植物根系吸附、微生物代谢和基质过滤等作用,可有效地去除地下水中的部分重金属;化学沉淀则通过向地下水中投加沉淀剂(如硫化钠、氢氧化钙等),使重金属离子生成难溶性的沉淀,从而达到去除的目的。而在实际应用之中,相关人员要根据重金属的种类和污染程度,合理地调整药剂用量和植物种植密度,这样才能确保修复的效果。

#### 3.1.2 有机污染场地

密切,有机污染场地的修复以生物强化-原位热脱附-臭氧氧化协同技术为重点。具体来说:生物强化技术通过向污染区域添加高效降解微生物菌剂和营养物质,能够增强微生物对有机污染物的降解能力。原位热脱附技术则利用加热设备将污染土壤和地下水加热至有机污染物的沸点以上,使其挥发即可进行收集处理,如此能够快速地去去除高浓度的有机污染物。而臭氧氧化技术利用了臭氧的强氧化性,可以将残留的有机污染物进一步氧化分解为无害物质。

实际在应用的过程中,相关人员要注意控制热脱附的温度和时间,一定要避免过高温对土壤结构和地下水环境造成破坏。同时还要合理地调配臭氧的投加量,以确保氧化

反应能够充分地进行。

### 3.1.3 复合污染场地

由于复合污染场地之中的污染物种类复杂,因此需采用多种技术联合进行修复。一般情况下,相关人员可先采用物理化学预处理技术,如吸附、萃取等,优先去除部分污染物,并降低污染物的浓度和毒性。然后再根据剩余污染物的主要类型,去选择合适的生物修复、化学修复或物理修复技术进行协同修复。但在修复的过程中,需要充分地考虑不同污染物之间的相互作用,进而避免修复过程中产生新的环境问题,还要加强对于修复过程中污染物迁移转化规律的研究,在操作中实时地调整修复方案。

## 3.2 结合区域特点的应用建议

### 3.2.1 不同地质条件

在不同地质条件的区域当中,土壤-地下水协同生态修复技术体系的应用需进行针对性地调整。通常在渗透性较好的砂质土壤地区,地下水污染的扩散速度快,因此可优先采用原位修复技术,如原位化学氧化、原位生物修复等。其核心是利用砂质土壤良好的渗透性,使修复药剂和微生物能够快速扩散至污染区域,进而提高修复的效率。

而渗透性较差的黏土地区,其土壤和地下水的污染物迁移比较缓慢,此时便可采用异位修复技术或结合水平井技术的原位修复方法。借助异位修复将污染土壤和地下水挖出进行集中处理,结合水平井技术在地下水平方向布设井管,进而增加修复药剂和污染物的接触面积,即可提高修复的效果。

### 3.2.2 不同气候条件

气候条件对土壤-地下水协同生态修复也有重要影响。在干旱地区,水资源匮乏,可采用节水型修复技术,如微生物固化修复技术,减少修复过程中的水资源消耗。同时,由于干旱地区蒸发量大,要注意防止修复过程中污染物随水分蒸发扩散到大气中。

在湿润多雨地区,土壤含水量高,地下水水位波动大,污染物容易随地表径流和地下水流动扩散。因此,需加强对地表径流的控制和地下水水位的调节,采用植被缓冲带、湿地处理系统等技术,拦截和净化地表径流中的污染物;通过设置地下水抽水井和回灌井,调节地下水水位,控制污染物迁移。在寒冷地区,冬季气温低,会影响微生物活性和修复设备的正常运行。可采用保温措施,如对修复设备和管道进行保温处理,添加抗冻型微生物菌剂等,确保修复工程在冬季也能正常开展。

## 3.3 推动技术体系应用的保障措施

### 3.3.1 政策法规支持

显而易见地,完善的政策法规是推动工业污染场地土壤-地下水协同生态修复技术体系应用的重要保障。所以政府需要制定专门的工业污染场地修复法规,并且在法规当中明确修复责任的主体、修复标准和技术规范。同步建立污染场地修复基金制度,对于历史遗留污染场地和无主污染场地

的修复提供资金层面的支持。

### 3.3.2 技术研发与创新

首先应该加大对工业污染场地土壤-地下水协同生态修复技术的科研投入,其中重点要支持高校、科研机构和企业开展联合的攻关。其次政府需重点研发新型的修复药剂、高效修复设备和智能化监测技术,进而提高修复技术的针对性和有效性。同时建立产学研用的协同创新机制,旨在促进科研成果的转化和应用。最后需要加强国际合作与交流,为国内引进国外先进的修复技术和管理经验,进而推动我国工业污染场地修复技术的创新发展。

### 3.3.3 人才培养与队伍建设

高校和职业院校应开设相关的专业和课程,为该领域培养具备土壤-地下水协同生态修复知识和技能的专业人才。一方面需加强对在职人员的培训,定期地组织技术培训和学术交流,进而提高从业人员的业务水平和综合素质。另一方面需要建立健全的人才激励机制,以此吸引和留住优秀的人才,为工业污染场地修复事业提供人才方面的保障。

### 3.3.4 公众参与与宣传教育

相关行业若能注重提高公众对于工业污染场地修复的认识和参与度,便有助于推动技术体系的应用。为此应该通过多种渠道,如电视、广播、网络、社区宣传等,面向公众开展工业污染场地修复知识的宣传教育活动,以此增强公众的环保意识和对修复工作的理解与支持。或者建立公众参与机制,鼓励公众对于污染场地修复工程进行监督,并且及时地反馈自己的意见和建议。

## 4 结语

工业污染场地土壤-地下水协同生态修复技术体系的构建与应用,是现阶段解决我国工业污染场地生态环境问题的重要途径。经研究提出,经由全面的调查评估体系、协同的技术筛选与集成、科学的工程设计与实施以及完善的监测与管理体系构建,可以形成一套完整的修复技术体系。而针对不同污染类型和区域特点提出的应用策略,以及从政策法规、技术研发、人才培养、公众参与等方面给出的保障措施,为该技术体系的实际应用提供了科学的指导和实践路径。未来随着技术的不断创新和完善,相信工业污染场地土壤-地下水协同生态修复技术体系将在我国工业污染场地治理中发挥出更大的作用,能够助力实现生态环境的可持续发展和生态文明建设目标。

## 参考文献

- [1] 闫雪莲.工业污染场地土壤修复技术研究[J].化工设计通讯,2020,46(11):184-185.
- [2] 潘尚跃.工业污染场地土壤修复技术研究[J].资源节约与环保,2023,(02):44-47.
- [3] 牛杏杏.略谈工业污染场地土壤修复常用技术[J].皮革制作与环保科技,2023,4(04):100-102.