

SCREENING AND EVALUATION OF
CONTAMINATED GROUNDWATER REMEDIATION TECHNOLOGY



污染地下水修复技术

筛选与评估方法

张旭 周睿 郝秀珍 李广贺 赵勇胜 周东美 等著

中国环境出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

污染地下水修复技术 筛选与评估方法

张旭 周睿 郝秀珍 李广贺 赵勇胜 周东美 等著

中国环境出版社 · 北京

图书在版编目 (CIP) 数据

污染地下水修复技术筛选与评估方法 / 张旭等著. —北京: 中国环境出版社, 2015. 11

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-5111-2594-1

I. ①污… II. ①张… III. ①地下水污染 - 污水处理 ②地下水污染 - 评估方法 IV. ① X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 245331 号

出版人 王新程
责任编辑 李卫民
责任校对 尹芳
封面设计 宋瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (环评与监察图书分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2015 年 11 月第 1 版
印 次 2015 年 11 月第 1 次印刷
开 本 787 × 1092 1/16
印 张 8.25 彩插 6 面
字 数 200 千字
定 价 30.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编著委员会

顾 问：吴晓青

组 长：赵英民

副组长：刘志全

成 员：禹 军 陈 胜 刘海波

《污染地下水修复技术筛选与评估方法》

著者名单

主要著者

张旭 周睿 郝秀珍 李广贺 赵勇胜 周东美

其他著者

清华大学：柯杭 万鹏 杨宁

吉林大学：鄂佳楠 李卉

中国科学院南京土壤研究所：褚灵阳 汪登俊

序 言

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，“十一五”环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略，建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项启动实施，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；发布了502项新标准，现行国家标准达1263项，环境标准体系建设实现了跨

越式发展；完成了 100 余项环保技术文件的制修订工作，初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 234 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案，形成一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

前 言

地下水是水资源的重要组成部分，维持我国近 60% 的人口饮用和 40% 的农田灌溉，是举足轻重的供水水源、生态系统的重要支撑、维持水系统良性循环的重要保障，对于国民经济和社会发展、供水安全保障具有十分重要的作用。然而，随着我国社会经济的飞速发展，地下水环境问题日益凸显，且不同程度地呈加重趋势。在已调查的污染场地中，地下水呈现复合污染的特征，对人体健康造成风险，影响工业搬迁场地的再开发。

在污染场地地下水修复方面，发达国家开展了多种修复技术与应用研究，如抽出-处理、原位空气扰动、渗透性反应墙、原位化学氧化、原位微生物降解、自然衰减、电动力学方法等。这些修复技术的方法和原理不同，其适用的污染物和含水层条件也有差异。此外，不同的地下水使用目的、修复时间要求，以及费用方面的考虑等都会影响污染场地地下水修复技术的选择。我国在污染场地及地下水污染治理技术方面的研究起步较晚，由于复合污染地下水的污染物构成复杂，净化难度大，技术要求高，单一技术难以解决，因此往往需要多种技术组合。对于具体污染场地，尤其是复合污染场地，如何进行高效修复技术选择和评估，目前尚缺乏有效方法，难以支撑我国污染场地修复、污染地下水有效治理和科学管理。因此，有必要研究和探讨适合中国实际情况的地下水污染场地的风险管理策略和修复技术筛选方法。

本书在环保公益性行业科研专项经费项目“区域地下水污染监测系统与风险管理关键技术研究”的支持下，开展了污染地下水修复技术筛选方法研究，在广泛调研国内外污染场地地下水特征、污染地下水修复技术特征及污染场地管理决策支持系统的基础上，构建了我国地下水修复技术筛选的原则和决策支持框架，形成了层次筛选法和基于多属性效用理论的 IOC 排序法两种污染地

下水修复技术筛选方法，并建立了技术评估方法。

本书分为5章，第1章综述了我国地下水污染现状、地下水修复技术筛选与评估研究的现状，在此基础上，提出我国污染地下水修复技术筛选体系框架；第2章基于国内外大量的污染场地信息，系统分析了不同类型场地的地下水中污染物特征、场地水文特性及采用的修复技术，为修复技术筛选指标体系的构建奠定基础；第3章系统分析了地下水修复技术现状与特征，对国际上常用地下水修复技术的主要指标进行分析，为技术筛选指标的赋值提供了依据；第4章提出了用于污染地下水修复技术筛选的层次筛选法和基于多属性效用理论的IOC排序法，以及技术评估方法；第5章以某化工行业污染场地为例开展了案例研究。

本书提出的污染地下水修复技术筛选与评估方法，可为我国提高应对地下水复合污染的能力、选择污染地下水有效治理技术、提高地下水环境科学管理与决策的水平提供技术支持，对于我国地下水资源利用与保护具有重要的意义。本书可供从事地下水污染防治、污染场地修复等相关领域的科研、管理、工程设计等人员参考使用。

作者
2015年7月

目 录

第 1 章 污染地下水修复技术筛选研究现状与体系框架	1
1.1 我国地下水污染现状	1
1.2 污染地下水修复技术筛选与评估研究现状与趋势	2
1.3 我国污染地下水修复技术筛选体系框架	7
第 2 章 典型场地污染地下水特征及指标分析	10
2.1 国内外典型污染场地地下水污染特征分析	10
2.2 典型行业地下水复合污染特征分析	11
2.3 污染地下水特征指标的选择	15
第 3 章 污染地下水修复技术现状及技术特征分析	23
3.1 污染地下水修复技术现状	23
3.2 污染地下水修复技术模拟研究	37
3.3 污染地下水修复技术特征分析	46
3.4 复合污染地下水修复技术的选择	57
第 4 章 污染地下水修复技术筛选与评估方法	59
4.1 污染地下水修复技术筛选的层次筛选法	59
4.2 污染地下水修复技术筛选的 IOC 排序方法	74
4.3 污染地下水修复技术评估方法	81
第 5 章 地下水修复技术筛选与评估方法案例研究	83
5.1 案例研究区概况	83
5.2 研究区 1 号区污染地下水修复技术的筛选与评估	89
5.3 研究区 2 号区污染地下水修复技术的筛选与评估	114
5.4 技术筛选及评估方法适用性分析	118
参考文献	119

第1章 污染地下水修复技术筛选研究现状与体系框架

1.1 我国地下水污染现状

地下水是水资源的重要组成部分，维持我国近 60% 的人口饮用和 40% 的农田灌溉，是举足轻重的供水水源、生态系统的重要支撑、维持水系统良性循环的重要保障，对于国民经济和社会发展、供水安全保障具有十分重要的作用。加强地下水环境保护与管理，是国家环境管理面临的重大课题。

根据《水污染防治行动计划》提出的工作目标，到 2020 年，地下水超采得到严格控制，地下水污染加剧趋势得到初步遏制。要全力保障水生态环境安全，防治地下水污染，公布京津冀等区域内环境风险大、严重影响公众健康的地下水污染场地清单，开展修复试点。因此，加强地下水污染防治，改善地下水环境质量，对于保障城乡居民饮水安全，实现全面建设小康社会、人与自然的和谐，具有重要的现实意义和深远的战略意义。

我国在长期的经济发展过程中诱发大量污染场地，地下水环境问题日益凸显，且不同程度地呈加重趋势。在已调查的污染场地中，传统的石油开采、冶炼、化工等行业占有较大比例，地下水呈现明显的复合污染特征，表现为重金属和有机物共存、多种复杂有机组分共存的突出特点。在北京市已经开展场地环境调查和风险评估的 50 余家搬迁遗留工业企业场地的有机污染物中，溶剂类挥发性卤代烃出现频率最高（出现频次为 35），其次为苯系物（出现频次为 34），第三是多环芳烃（PAHs，出现频次为 27），第四是石油烃类污染物（出现频次为 23）。焦化厂场地内局部区域的深层土壤和地下水中重金属、苯系物（BTEX）、低分子多环芳烃（PAHs）、石油烃（TPH）等挥发性有机物（VOC）污染比较严重，苯的最高浓度为 498 mg/kg，超标 16 599 倍。大部分油田区和石油化工区浅层地下水含油量严重偏高，基本上达不到饮用水标准。某石油化工区地下水中石油类含量最高达 40 mg/L，某化工企业厂区地下水中超标组分以多环芳烃苯并（a）蒽、苯并（a）芘和苯并（b）荧蒽为主，超标率大于 50%，最高超标达 553 倍。

随着社会经济的飞速发展，有毒有害有机化学物的种类日益增多，生产与消费量逐年增加，使用范围不断扩大，由此带来污染场地地下水呈现复合污染的特征，对人体健康造成风险，影响工业搬迁场地的再开发。由于复合污染地下水中污染物构成复杂、化学性质差异大，在含水层中呈现复杂的赋存状态，给污染地下水的净化带来极大的挑战。此外，地下水含水层的地层条件极其复杂，污染物在地下水环境中的行为涉及水、气、土和生物四个界面，在松散介质和岩溶介质等不同介质中呈现出不同的迁移转化特征，致使问题更加复杂。

发达国家自 20 世纪 80 年代开展地下水污染修复至今，地下水污染修复技术在大量的研究和实践中不断改进和创新。目前，有许多地下水污染的修复方法和技术，如抽出-处理、原位空气扰动、渗透性反应墙、原位化学氧化、原位微生物降解、自然衰减、

电动力学方法等。这些修复技术的方法和原理不同，其适用的污染物和含水层条件也有差异，此外，不同的地下水使用目的、修复时间要求，以及费用方面的考虑等都会影响污染地下水修复技术的选择。我国在污染场地及地下水污染治理技术方面的研究起步较晚，且复合污染地下水的污染物构成复杂，修复难度大，技术要求高，单一技术难以解决，对于具体污染场地，尤其是复合污染场地，如何进行高效修复技术选择和评估，目前尚缺乏有效方法，难以支撑我国污染场地修复、污染地下水有效治理和科学管理。

1.2 污染地下水修复技术筛选与评估研究现状与趋势

1.2.1 污染地下水修复技术筛选研究进展

西方国家在污染地下水修复技术筛选方面的研究处于国际领先地位。技术筛选步骤通常有两种表现形式：一是有关部门制定的导则、指南，二是综合性的决策辅助软件。通常，导则与指南由于执行过程中具有比软件更强的透明性而获得了更广泛的应用。

美国是污染场地管理体系较为成熟的国家之一，20世纪70年代即出台了应对污染土壤与地下水的《环境应对、补偿与责任综合法》（The Comprehensive Environmental Response Compensation and Liability Act, CERCLA）。美国环保局在此基础上建立了污染场地管理程序（图1-1），并建立了超级基金以支持污染场地的管理与修复。随后，不仅《超级基金修正与授权法案》等法律性文件相继出台，一系列诸如《健康风险评价手册》《场地治理调查和可行性分析指南》等导则也逐步建立，形成了一整套污染场地管理体系。

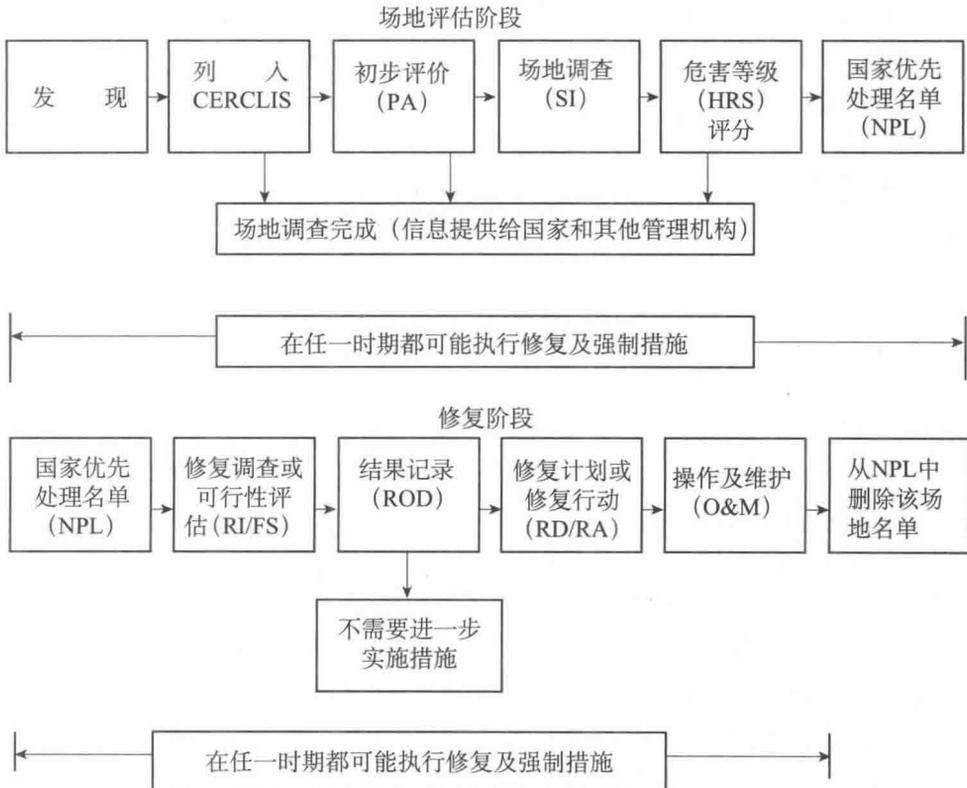


图 1-1 超级基金污染场地管理程序

在污染场地管理程序中，污染修复技术的筛选与评价过程在修复调查或可行性评估 (Remedial Investigation/Feasibility Study) 阶段完成，其基本步骤为 (图 1-2)：根据相关法律法规要求制定修复目标 (包括确定目标污染物、净化水平、治理面积、修复时间等)，然后选择与修复目标相一致的技术类型 (general response actions)，再由技术类型出发，基于技术有效性 (effectiveness)、可操作性 (implementability) 与成本 (cost)，去掉各类型中不可行的技术，之后在每种技术类型中推荐一种技术 (process options) 进行组合，得到一定数量的修复方案 (remedial alternatives)，通过对这些修复方案进行模型模拟与分析，从而决定最终的推荐方案。

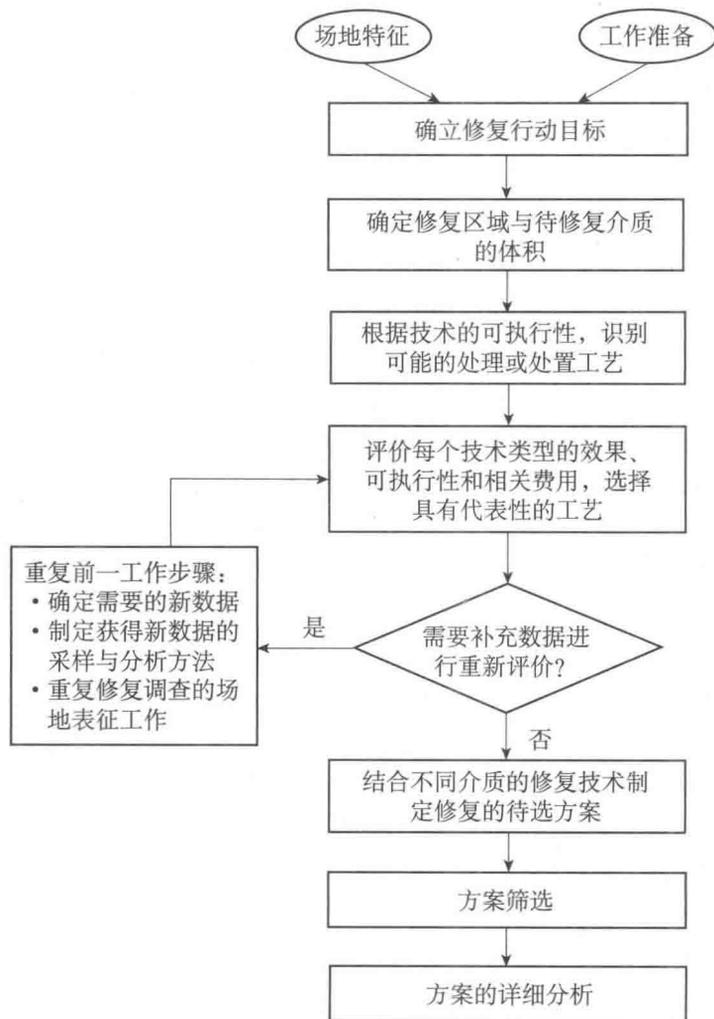


图 1-2 超级基金场地修复方案的筛选过程

对修复方案进行的分析评价是基于 CERCLA 规定的九项原则进行的，这九项原则包括：①对人体健康和环境的全面保护；②对相关适用要求的满足；③长期的有效性与稳定性；④降低污染物毒性、迁移性及污染负荷；⑤短期有效性；⑥技术的可实施性；⑦成本；⑧州政府的接受程度；⑨公众的接受程度。美国环保局要求在方案的详细分析中根据九项原则对可能备选的修复方案进行逐一阐述。

除了要在上述九项原则下进行技术比较,美国环保局规定,在场地修复技术筛选时还需要考虑以下几点:①在可能的情况下,对于高风险污染物应采取处理手段;②对低风险污染物或处理技术不适用的情况,应采取工程控制措施;③尽可能采取多种技术联合的方式;④采用制度管理措施作为工程控制措施的辅助;⑤当新技术具有与成熟技术相似或更优的表现时,应考虑采用新技术;⑥处理后的地下水结合场地环境状况尽其所用。

超级基金制度已有 30 多年的实施历史,在这一过程中其修复技术筛选原则没有太大的变化,但其实际修复技术的选择经历了一个变化过程,由最初的以封装处置技术为主,转变到较为昂贵的修复处理,之后又由于经费和管理等方面的因素转变到封装处置与修复处理结合的方式。可见,技术筛选的过程会受到很多因素的影响,决策者不仅要考虑技术因素,还要综合考虑经济、社会等多方面因素。因此,建立辅助决策的技术筛选方法能够增强决策的科学合理性。

各种污染场地修复决策支持方法,大致经历了以下变化:20 世纪 70 年代的方法以成本分析为重点,80 年代的方法主要以工程可行性研究(technology feasibility study)为基础,90 年代中期至今的方法则以风险评估(risk-based assessment)为指导。目前,由于全球气候变化广受关注,污染修复的可持续性(sustainability considerations)如二氧化碳排放、可再生能源和可回收材料的使用情况等也逐渐进入决策过程的考虑因素中。同时,随着人们环保意识的增强,关注污染场地修复的已不仅仅是土地所有者、投资人和工程咨询方,媒体和当地居民正逐步要求参与到决策过程中。因此,当前情况下最理想的决策方法应当能够在尽可能多的利益相关者的参与下,做出基于专业知识与工程经验的科学决策。

应用于污染场地管理的决策支持技术主要包括生命周期分析(Life Cycle Analysis, LCA)、多目标决策(Multi-Criteria Analysis, MCA)、成本有效性分析(Cost Effectiveness Analysis, CEA)和成本收益分析(Cost Benefit Analysis, CBA)。这些技术在使用方法和场合上不尽相同,因此它们常被整合进决策过程的不同阶段。在技术筛选阶段,生命周期分析和多目标决策是目前使用最为广泛的工具。

生命周期分析是对一种产品或一种行为的生命全过程进行评价的方法。这一方法最早在制造工业中流行,之后才被拓展到包括污染场地管理在内的其他领域。生命周期分析的优势在于能够客观地对不同方案进行对比,如一些修复技术在短期内为高能耗而另一些技术虽然能耗低但持续时间长。生命周期分析能够做到在对技术对比的同时考虑不同利益相关者的需求。不过,生命周期分析往往十分复杂且需要大量资料支持,因此它的使用范围受到了限制。

多目标决策是另一个用于环境系统分析的决策工具,它根据备选方案在不同准则上的表现给出这些方案的重要性排序。多目标决策可以用于选出最优方案,或对所有方案进行排序,更简单的情况是用于将可接受的方案与不可接受的方案分离开来。它的实施过程通常包括:分析决策要求,建立评价准则,对方案评分,对准则赋权值,得到综合得分,分析结果并进行敏感性分析。这一工具的运用强烈依赖于包括利益相关者和专家在内的决策团队,因此结果不可避免带有主观偏差,这也是多目标决策最主要的不足之处。不过,它还是在决策支持方法的发展中得到学者们的推荐,因为多目标决策能够提供一个系统的决

策支持过程让利益相关者参与其中,并且能够以十分透明的方式综合考虑各种可货币化和不可货币化的因素以对方案做出评价。

1.2.2 修复技术有效性评估研究进展

在修复技术有效性评估方面,国内鲜有人涉及,国外目前对此也没有一个明确的定义。一般来说,可以将决策的过程分为两个主要阶段。①评估(ASSASSMENT):该地区的污染物都有哪些?该地区的环境情况如何?可以用哪些方法和技术检测这些污染物?这些污染物对人类和环境都有哪些危害?必须遵循的法律法规体系有哪些?在决策修复方案时,是否有一些规划要求需要考虑?修复后最有利的土地应用方式是什么?影响污染场地的社会经济环境是什么?场地修复带来的经济利益有哪些?有哪些修复技术可以被应用?使用的多种修复技术是否可行和合适?这些修复技术的有效性如何?成本高低?有哪些方面的影响?②管理(MANAGEMENT):有多少种污染场地的修复方案可以选择?如何对这些修复方案进行有效性评估?为了达到一个高度一致的决策,还有哪些决策者和利益相关者的观点需要被考虑?这些利益相关者怎么有效地参与到这个过程中来?他们的利益如何体现在最终的决策中?所有的技术方面的专家如何参与到决策制定过程中来?

欧美国家已经有了一些成型的决策支持系统,包括 DESYRE、RAAS、RBLM、SMARTe、The Surf-UK Framework 等。各系统的特点如下:

(1) DESYRE (Decision Support system for Rehabilitation of contaminated sites) 主要针对大型的污染场地,是一款基于 GIS 的软件,由六个互相联系的模块组成,提供六个方面的信息,包括场地特性描述、社会经济分析、技术选择前后的危险性评估、各类技术信息及可选择的修复方案。

DESYRE 可以通过地质统计技术实现场区环境特性的 GIS 地图可视化,该模块是通过输入化学和地质方面的数据实现的,并允许选择首要物质。DESYRE 可以对风险的确定性和概率进行计算,它提供了风险指标,包括风险的大小、风险扩展的减少和风险的不确定性,并进行相关的不确定性分析。考虑的受体是成人和儿童,暴露场景是住宅、工业和娱乐场所。DESYRE 通过 GIS 的空间分析技术可以实现污染物的风险扩展及污染等级在土壤和地下水中的可视化,同时还提供了对剩余风险的计算。DESYRE 的社会经济模块基于模糊逻辑分析来研究不同土地利用方式的约束和利益。

DESYRE 为用户提供了关于技术的广泛的数据库,用户根据自己的标准来选择最适宜的技术手段,比如技术的适用性、方案的可行性等,技术模块还允许建立多种由不同修复技术组成的方案,并可以让用户对不同的技术进行比较和评估,评估的标准包括特定的污染物、公众可接受性、成本和商业可用性等方面。决策模块为用户提供不同方案进行在风险、技术和社会经济方面的指标的比较。

(2) RAAS (Remedial Action Assessment System) 是一个决策支持系统,设计的目的是为了给修复过程中每一步的调查和可行性研究过程提供帮助。RAAS 以两个主要部分为基础,即 ReOpt (对处理技术、污染物、规则等提供描述性的信息)和 MEPAS (人体健康风险模型),根据具体场地条件、修复的战略、清理的目标来确定修复的技术手段,并对这些技术手段的实际应用效果进行评估。

用户可以根据污染物和受体输入概念模型,然后 RAAS 系统利用关于场地的信息来确定潜在的污染物传输机制。RSSA 的人体健康风险模型是根据 EPA 的风险评估指导构建的,四个潜在的暴露媒介为空气、地下水、地表水以及直接暴露于外部辐射。对此,与媒介相关的潜在暴露途径为吸入、皮肤接触、饮用以及外部辐射。

RAAS 系统包含广泛的关于修复技术手段的数据,这能够帮助用户根据场地修复的战略、污染介质及污染物本身特点来确定特定场地的修复技术手段。在 RAAS 系统中,根据场区特性、污染媒介、污染物及技术手段的特性,可以实施可行性研究并评估修复技术应用后的影响,还可以计算技术实施的成本。系统根据成本、可实施性、修复范围、长期和短期效益及目标,对不同的修复方案进行评估。

(3) RBLM (Risk-Based Land Management) 是欧洲网络公司 CLARINET 通过定义一个基于风险的土地管理观念建立的污染场地管理的评估框架。RBLM 有三个主要的部分:①适用性,指的是在相关人士的许可下土地的适当应用;②环境保护,旨在阻止或者减少对环境的影响;③长期关注,主要考虑当前的选择对后代人的影响。RBLM 在土地管理中结合了可持续发展的理念,主要目的是将社会、环境和经济三个方面结合起来。

(4) SMARTe (Sustainable Management Approaches and Revitalization Toolselectronic) 是一个免费的、开放资源的、基于网络的决策支持系统,目的是振兴社区和恢复环境。SMARTe 主要是为了帮助受污染的土地重新投入使用,包含确定未来的土地利用,利益相关者参与,融资、市场成本和效益,环境问题和责任问题等诸多方面的资源和分析工具,是一个整体的决策分析系统,集成了修复的各个方面,同时促进所有利益相关者之间的交流和讨论。

SMARTe 包括以下几个部分:①场地描述工具,允许用户输入现有条件下的场地描述;此外,提供了一些统计分析功能,可以用来支持数据分析和风险评估。②监测数据分析工具,提供标准的统计分析方法来显示时间或空间数据。③人类健康风险计算器,在特定条件下根据选定的化学品的暴露途径及其浓度来进行风险计算,考虑的暴露途径包括吸入、皮肤接触和吸入。④净效益计算器,用来比较不同修复方案的成本收益比。⑤公众参与平台,鼓励所有利益相关者聚集在一起,讨论和评估各准则的重要性。

在 SMARTe 系统的 My Project 部分总结了所有关于场地的调查信息,能够帮助用户以成本收益比来选择不同的方案。同时用户也可以将社区价值考虑其中,不同方案的不确定性也可以进行计算。

(5) The SuRF-UK Framework (A Framework for Assessing the Sustainability of Soil and Groundwater Remediation) 是英国的管理框架,但也可以在欧洲其他国家乃至全球得到应用。The SuRF-UK Framework 有六项重要的原则:

原则 1: 对人体健康与环境的保护 (Protection of human health and the wider environment)。修复手段应保证污染场地对人体健康的威胁被移除,并通过对场地的合理使用,使其能在现在和将来都是对环境友好的;同时,应适当考虑修复手段的成本、收益、有效性、持久性及技术可行性。

原则 2: 安全的实际工作环境 (Safe working practices)。修复工作必须对所有工人、当地居民都是安全的,并应将其对环境的影响最小化。

原则 3: 决策制定应是以风险为基础的,是一致的、清晰的并可复制的 (Consistent,

clear and reproducible evidence-based decision-making)。基于风险的可持续修复作出决定时考虑到环境、社会和经济因素，并考虑当前和未来可能出现的影响。这种可持续的以风险为基础的修复方案，能最大化地实现潜在利益。

原则4：清晰的数据记录和透明的报告形式（Record keeping and transparent reporting）。修复方案的决定，包括用来决策的假设和数据支持，应以清晰和易于理解的格式被记录，以便向有关方面表明。

原则5：要关注利益相关者的参与（Good governance and stakeholder involvement）。修复方案的决定，应考虑到利益相关者的意见，并按照一个明确的、他们可以参加的过程进行。

原则6：科学可靠性（Sound science）。决策的制定应满足科学可靠性、相关数据的准确性，对假设和不确定性给予清晰的解释，并以专业判断为基础，以确保决策是以可获得的最佳信息为根据，是合理的和可重复的。

1.3 我国污染地下水修复技术筛选体系框架

1.3.1 技术筛选原则及体系框架

地下水修复技术筛选原则是为指导与规范技术筛选过程而制定的。美国环保局制定的超级基金修复行动选择导则规定了污染场地修复技术筛选的九项原则，欧洲各国也建立了相应的筛选框架（R. P. Bardo, 2001；Brian J. G, 1998）。以此作为参考，并结合我国地下水修复技术的发展情况，本研究提出涵盖法律法规、工程技术和环境保护三个方面的技术筛选体系框架，见图1-3。框架中包含6项技术筛选原则：

- (1) 符合国家、地区和行业的相关法律法规及标准；
- (2) 技术有效；
- (3) 工程可实施；
- (4) 工程规模、投资合理；
- (5) 劳动保护；
- (6) 公众可接受。

首先，进行比选的技术必须符合国家、地区和行业的相关法律法规及标准规定，如修复技术使用到的危险化学品的保管存放应符合《危险化学品安全管理条例》；抽出进行处理的地下水在排入地表水体前，水质应符合我国现行的《污水综合排放标准》等。由于我国地下水污染治理尚处于起步阶段，针对地下水污染控制的法律法规及标准还未完善，因此此项原则目前只在技术实施阶段发挥主要作用，暂时不进入技术筛选阶段。

技术有效是技术筛选的重要目标之一。不同场地含水层的地层条件、污染特征有很大差异，由于地下水修复技术有各自适用的场合，因此面对某一特定地下水污染问题，各技术的表现也会有所不同。此项原则旨在根据不同技术的效果筛选出积极主动的工程方案，保证修复效果能达到对环境和人体健康的全面保护。

工程可实施是技术筛选的基础，在具体的地下水污染问题上只有可行的技术才会发挥