

地下水污染修复技术评价方法研究进展

杜新月^{1,2}, 张晓然^{1,3*}, 张玉玲⁴, 张紫阳^{2,3}, 李海燕^{2,3}

1. 北京建筑大学, 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 环境与能源工程学院, 北京 102616
2. 北京建筑大学, 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 102616
3. 北京建筑大学, 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044
4. 吉林大学新能源与环境学院, 长春 130021

摘要 综述了地下水污染修复技术评价方法的研究进展, 对比分析了不同评价方法的优缺点, 结果表明多准则决策分析法(MCDA)具有较明显的优势。此外, 在使用层次分析法构建评价体系时, 评价指标的选取和指标权重的确定对地下水修复技术的评价结果有显著的影响。为了优化现有的评价方法, 需根据中国的实际情况, 在评价指标的选取、指标权重的确定、评价方法有机结合等方面进行更深入的研究。

关键词 地下水修复; 评价方法; 多准则决策分析法; 生命周期评估法; 成本效益分析法

随着经济社会快速发展, 地下水污染问题备受关注, 为此, 国内外研究者们逐渐研发了各种地下水修复技术^[1-3]。然而, 中国污染场地修复市场近几年刚刚兴起, 由于地下水污染情况的多样性^[4]和水文地质条件的差异性、复杂性^[5-6], 导致在将修复技术应用于实际的污染场地时达不到预期效果^[7]。面对数量众多的污染场地与修复技术, 场地管理者、政府监督部门或场地投资者等利益相关者存在

着如何选择最佳场地修复技术的问题^[8]。

发达国家经过多年的修复实践发现, 修复方式的选择除了要达到将污染物浓度降低到规定的限值之下这一基础的目标外, 还应该将修复期间和修复之后有可能对环境和社会等造成的影响考虑进去^[9]。因此, 修复技术选择问题是一种多目标多准则分析评价过程, 其中经济效益、环境效益和社会效益是地下水修复技术评价的主要内容^[10]。从20

收稿日期: 2022-05-15; 修回日期: 2022-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1808804); 北京市属高校高水平教师队伍支持计划青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201804051)

作者简介: 杜新月, 硕士研究生, 研究方向为地下水污染控制, 电子信箱: Duxinyue202107@163.com; 张晓然(通信作者), 副教授, 研究方向为径流污染控制、地下水污染控制, 电子信箱: zhangxiaoran@bucea.edu.cn

引用格式: 杜新月, 张晓然, 张玉玲, 等. 地下水污染修复技术评价方法研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(11): 26-40; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.003

世纪70年代美国颁布并实施《超级基金法》以来,多个发达国家逐渐成立了污染场地修复管理机构或研究组织,如美国修复技术圆桌会议(FRTR)、欧盟污染场地恢复环境技术网络(CLARINET)、欧洲土壤和水环境管理网(EUGRIS)、北约土壤和地下水示范及新兴技术研究组织(NATO/CCMS)^[11]等,并且形成了较为完善的法律法规、管理制度体系^[12-14]。

随着社会对生态环境问题的关注逐渐升温以及中国土地紧缺的问题加剧,有大量的场地亟待修复,为此中国也已经陆续颁布了一系列相关标准规范,如《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南(试行)》《污染场地风险评估技术导则 HJ 25.3—2014》《污染场地土壤修复技术导则 HJ 25.4—2014》等,对于中国修复产业的发展有一定的指导和推动作用。目前中国已经有一些研究者对国外的修复技术评价方法和决策模型进行了研究^[15-17],并在实践中对这些方法进行了本土化的应用和改进,但是由于中国修复产业起步较晚,实际应用中常常使用专家经验法来进行决策,受决策者或专家知识水平、认知能力和个人偏好的影响,对环境指标内容及权重的认知存在较大偏差^[18],不够客观,在理论基础的研究和运用方面还不够成熟,因此对于实践的指导作用存疑。

随着修复技术的不断发展^[19-24],出现了一些具有明显经济环境效益的新技术,如缓释药剂修复技术^[25-29],该技术用于修复的污染类型和使用参数与传统技术有明显不同,且新技术的应用缺乏实践数据支撑,所以现有的评价体系难以适用,亟需建立具有针对性的评价体系。此外,中国的土地使用情况、污染情况在不断变化,已有的规范并不能完美地解决所有的修复问题,相关的标准也有待完善^[30]。

1 地下水修复技术评价方法

目前研究者广泛使用的地下水修复技术评价方法,有多准则决策分析法(multiple criteria decision analysis, MCDA)、生命周期评估法(life cycle

assessment, LCA)、成本效益分析法(cost-benefit analysis, CBA)等。其中,MCDA包括层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、逼近理想点法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)、选择消去法(elimination Et choice translating reality, ELECTRE)、偏好顺序结构评估法(preference ranking organization methods for enrichment evaluations, PROMETHEE)等(图1)。

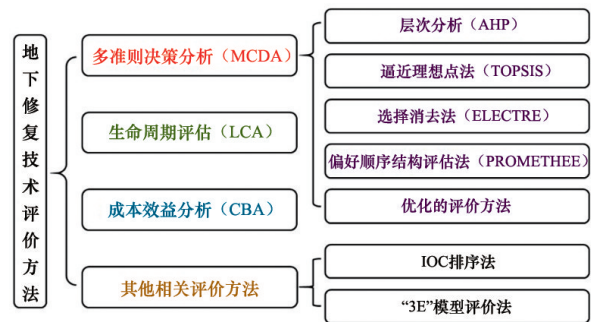


图1 地下水修复技术评价方法

1.1 MCDA

MCDA能针对多种地下水修复技术进行定性定量的决策分析,通过建立层次分析结构模型(图2),在不同准则、维度上体现方案的优劣性。为了避免单一评价方法可能造成的评价结果不准确问题,也有研究者通过引入其他的理论模型来对其进行优化或结合使用,形成一系列优化的评价方法,使评价体系更客观可靠。

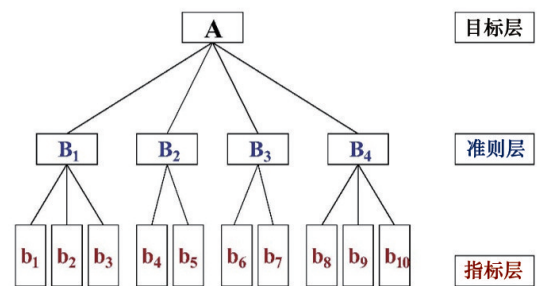


图2 层次分析结构模型

1) AHP。

AHP是1977年美国运筹学家托马斯·塞蒂(T. L. saaty)^[31]提出的一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法,通过建立层次分析结构模

型,设置目标层、准则层和指标层(图2),AHP用于确定指标权重,然后按照评价标准对待选方案的各指标进行评分,最后进行加权得到综合评价价值^[32]。该法适用于解决涉及多准则、多要素以及多层次的复杂决策问题,而且逻辑简单,在一定程度上能反映主观偏好,可靠性强。

在地下水污染修复领域,廉新颖等^[32]在对25种地下水修复技术研究的基础上,采用AHP从处理效果、环境影响、运行工艺、经济4方面下设13个指标,分层次逐级构成了评价指标体系。采用专家打分法和九标度法确定了指标权重,依据相关技术规范 and 该领域专家咨询意见,制定了指标评价标准和方法,并采用聚类分析对分类评价和综合评价进行评价结果分级。最后以多级强化地下水修复技术为例进行验证,结果表明该方法可有效评价地下水修复技术的先进性和合理性,并能够提供完善技术性能的建议。杜岳等^[33]对环境保护部发布的《2014年污染场地修复技术目录(第一批)》中的15种技术进行评价,其中包括5种地下水修复技术,采用AHP从技术、经济、环境3个方面选取指标并确定指标权重,建立了修复技术筛选指标体系并初步建立了评价矩阵为后人提供参考。刘国^[34]采用AHP对6种用于修复四川省典型矿山地下水的技术进行筛选,从场地、环境、经济、技术4个方面选取修复效果、渗透系数、环境影响、社会认可度、修复时间、修复成本、技术成熟度、技术联合使用等指标建立评价体系,采用九标度法确定指标权重,并对照评价标准对待选修复技术进行评分,得到4种矿山地下水污染修复技术依次为渗透反应墙、抽出处理、抽出处理、渗透反应墙。

白利平等^[35]认为AHP是中国在污染场地修复技术筛选中多采用的一种方法,但是由于该法在修复技术筛选过程中多依赖于专家赋值评分,因此筛选结果具有一定的主观性。潘文等^[36]认为用AHP确定污染场地处理技术最优方案,直观易懂,可操作性强,结果可靠性高,可以为修复技术优选提供科学依据。

2) TOPSIS。

TOPSIS可以根据有限个评价对象与理想化目

标的接近程度进行排序,在现有的对象中进行相对优劣的评价。TOPSIS法由Hwang和Yoon于1981年提出^[37],其评价的核心是欧几里德空间距离计算,通常首先由AHP确定指标权重,再通过计算各方案到正负理想解的距离,来得到综合评价价值^[38]。

在地下水污染修复领域,Li等^[39]针对预防和控制地下水污染时需筛选污染场地应采取的工艺方案,采用TOPSIS法排序技术来优化传统的AHP。将该法应用于3个污染场地,将评选出的修复方案进行应用,发现其效果优于传统专家评价方法筛选得到的方案,证明了该方法可行且有效,可为中国地下水污染监测与管理提供技术支持。张婧等^[40]针对华中地区某垃圾填埋场区域氨氮污染地下水,提出抽取处理加异位生物修复、空气注入加原位生物修复2种方案,并用AHP-TOPSIS方法进行方案的比选。先由AHP确定指标权重,再用TOPSIS对备选地下水修复方案进行排序,从而弥补了二者各自的不足。结果表明,空气注入+原位生物修复技术更适合于该区域地下水的修复。Wang等^[41]针对胜利油田石油污染地下水修复技术的筛选,建立了综合分析模型。该模型使用了简单加权加法、加权积法、合作博弈论和TOPSIS共4种MCDA方法,选取7项指标(含水层深度、渗透性、适用污染范围、适用的污染程度、技术成熟度、治理成本、污染去除率)构造参数矩阵,采用模糊AHP计算指标权重,对18种修复技术进行分别评价,互相印证,并采用平均排序法和Borda排序法对这4种评价结果进行综合分析,最终筛选得到最佳技术为轻非水相液体回收技术。

张倩等^[38]认为AHP和TOPSIS结合既能克服AHP在不易定量化指标上的主观性,又能避免TOPSIS对指标权重的忽视,有利于解决实际修复技术筛选的问题。罗云^[42]认为TOPSIS的筛选结果比AHP较合理,能够很好的反映修复技术之间的权衡关系,且能反映待选修复技术的特异性,不会出现评分一致的现象,但是不适用于如修复时间等非线性指标的评价。

3) ELECTRE。

ELECTRE由Roy和Sussman等最先提出,是解

决多属性决策问题中应用十分广泛的一种方法^[43]。ELECTRE 法通过方案相互比较,得到优先度矩阵和低劣度矩阵,通过阈值计算出方案的排名^[44-45]。

ELECTRE 在发展过程中形成了 ELECTRE 族,包括 ELECTRE I (Iv/IS)、ELECTRE II、ELECTRE III、ELECTRE IV 等^[46],最常用的是 ELECTRE III,它比 ELECTRE II 的参数更少,因此更容易使用^[47],且 ELECTRE III 的模糊优先关系比其他 ELECTRE 方法使用非模糊优先关系给出的判断更精确^[48]。

在地下水修复领域,张士宽等^[49]利用多准则决策分析 MCDA 模型中的消去和选择转化法,并结合改进的 ELECTRE II 处理地下水修复技术优选中的离散型决策问题,对初筛的地下水修复技术进行比选,提出修复技术优选顺序,并确定最优修复方案。尉晓君^[50]提供了适宜太原市地下水体污染修复的多种技术方案组合,利用多目标决策方法中的 ELECTRE II 在综合考虑技术、经济和社会效益等方面的基础上,对 5 种修复方案进行优选排序,从而选择出最优方案为曝气法+渗透反应格栅。An 等^[51]使用 AHP 与 ELECTRE II 相结合的方法对某石油烃、多环芳烃、重金属污染场地的 4 种地下水修复技术:抽出处理、监测自然衰减、可渗透反应屏障和空气喷射进行评价,选取建设、检测分析和运行维护成本、二次污染影响、水质改善效果、修复时间、公众健康影响、政策支持等指标,得到最佳修复技术为监测自然衰减技术。该方法有助于决策者根据实际情况和决策者的偏好定量评估最可持续的地下水修复技术^[51]。这一定程度上表明了 ELECTRE 法的有效性,但是也说明该法的不足之处是其主观性强,有待通过与其他方法结合的方式进行优化。张伯强等^[52]针对某苯系物污染场地,选取运行成本、后处理费用、修复周期、修复效率、水文地质适用性、污染物有效性、对生态环境及居民的影响等指标,使用 AHP+ELECTRE II 法对 5 种地下水修复技术进行评价,最终认为对于高污染区域,应采用抽出处理技术+多级强化地下水修复技术联合修复;对于低污染区域,应采用监测自然衰减监测技术。该法有逻辑简单、决策信息利用充分且计算精炼的特点。

4) PROMETHEE。

PROMETHEE 是 Brans^[53]在 1982 年首次提出的,是基于偏好指数的一种多准则决策方法,它通过引入优先函数来描述在多目标准则上方案之间的优先程度,常由 AHP 赋权法联用。随着应用领域的扩展,PROMETHEE 法逐渐由单一方法发展为方法族。PROMETHEE 方法族最初包括部分排序的 PROMETHEE I 和完全排序的 PROMETHEE II,后来又发展出多个版本:如基于区间估计的 PROMETHEE III、对连续方案集进行排序的 PROMETHEE IV 等^[54]。完全排序的 PROMETHEE II 是最常用的,过程相对简洁^[55]。

在地下水污染修复领域,李玮等^[55]针对某化工厂遗址早期排污渗坑产生的 1,2-二氯乙烷等氯代有机污染地下水,使用《工业企业场地环境调查评估与修复工作指南》的修复技术评估指标体系,对初筛得到的 4 项技术进行评估,利用 PROMETHEE II 排序,结果表明:在保证修复效率的前提下,当时间优先时,化学清除技术总得分最高;修复工程成本优先时,监测自然衰减技术总得分最高。Khelifi 等^[56]开发了一种地下水修复技术评估和选择的决策支持工具,能帮助决策者评估地下水修复技术,并选择最优的补救方案,该算法的核心是 PROMETHEE II^[56]。PROMETHEE II 与 ELECTRE 相比,优点是能够对备选方案进行完全排序,且该法不需要定义否决阈值,使参数的定义过程更简单,决策者更容易理解。但在 PROMETHEE 方法中,需要定义偏好函数^[56]。李安婕等^[57]认为 PROMETHEE II 的参数属性的偏好函数选择较为重要,直接影响到决策结果。

5) 基于 MCDA 优化的评价方法。

基于 MCDA 优化的评价方法通常是将其他辅助方法与上述单一方法相结合或者不同 MCDA 中的多法联用,这样可以充分发挥每种方法各自的优势,弥补各自的缺点,达到更优化的效果(表 1)。

1.2 LCA

LCA 可以通过量化评估修复方案实施过程中对经济、环境、社会产生的影响,从而帮助利益相关者选择最佳的技术^[64]。LCA 是国际标准化组织 (ISO)

表1 基于MCDA优化的评价方法

方法	污染物	修复技术或方案	评价指标	评价结果	文献
AHP+MC (层次分析法+蒙特卡罗法)	铬	空气扰动、生物曝气、原位化学氧化/还原、强化自然衰减、原位微生物修复、监测自然衰减、抽出处理、可渗透反应墙和循环井技术	技术有效性、施工可行性、社会安全性、修复费用、修复时间	最佳修复技术为原位化学氧化/还原技术	[58]
PROMETHEE+GAIA (偏好顺序结构评估法+交互式援助几何分析)	石油	抽出处理技术:共50组抽吸率组合,考虑4个修复期	总抽吸率、总费用、有机污染物浓度值、误差	修复期5、10、15、20年对应的最佳修复方案分别为:A32、A49、A26、A47	[59]
	石油	抽出处理技术:考虑4个修复期,每个周期有5种修复方案	最佳总泵送速率、修复成本、污染物浓度和拟合误差	修复期5、10、15、20年对应的最佳修复方案分别为:A11、A22、A31、A41	[60]
AHP+IMADM (层次分析法+基于区间理论的多属性决策分析方法)	萘	抽出处理技术:随机生成6口井的抽吸速率不同的50组修复方案,考虑4个修复周期	总抽吸量TPV、总成本TC和残留浓度RCC	修复期5、10、15、20年对应的最佳修复方案分别为:A48、A5、A33、A26	[61]
AHP+MCITA-MADM (层次分析法+与区间转换、蒙特卡罗法结合的多属性决策分析方法)	萘	抽出处理技术:选取4个修复周期,每个周期设计了15种修复方案	总抽吸量TPV、总成本TC、残留萘污染物平均浓度ARCC和监测井中最大致癌风险MELCR	修复期5、10、15、20年对应的最佳修复方案分别为每组方案中对应的A15、A8、A12、A2	[61]
TOPSIS+PROMETHEE (逼近理想点法+偏好顺序结构评估法)	萘	抽出处理技术:随机生成6口井的抽吸速率不同的50组修复方案,考虑4个修复周期	总泵送速率、总成本、平均残留污染物浓度、最大额外寿命癌症风险	修复期5、10、15、20年对应的最佳修复方案分别为:A33、A50、A26、A26	[62]
	石油	抽出处理技术:随机生成6口井的抽吸速率不同的40组修复方案,考虑4个修复周期	抽吸率、污染物残留浓度平均值、修复总成本、健康风险值	修复期5、10、15、20年对应的最佳修复方案分别为:A33、A24、A25、A37	[63]

定义的一种方法^[65],分为4个阶段:(1) 确定目标和范围,该阶段确定研究的目标,以及污染场地在空间、时间上的边界和候选的修复方案;(2) 列举生命周期清单(LCI),该阶段通过资料数据搜集及运算,编制并量化一份输入输出清单,包括消耗的资源及对水土气等的污染排放等;(3) 进行生命周期影响评价(LCIA),该阶段处理生命周期清单的结果,以评价潜在的环境影响,如全球变暖等^[66];(4) 结果分析,该阶段将LCI及LCIA的结果进行归一化处理,得出结论与建议^[67]。LCA研究的目的是筛选前是评估候选修复技术对环境的影响,在修复技术应用后是改进修复技术和改进修复前使用的

LCA框架^[68]。LCA在环境治理领域已经有广泛的应用^[69-72]。

在地下水修复领域的应用中,Godin等^[73]用LCA和地下水运移模型对某废弃罐衬里(spent pot lining, SPL)填埋场场地的修复方案进行评价。第一阶段确定修复目标是10万m³的SPL污染土壤和20万m³的淤泥层污染土壤,为期50年。方案包括:不干预(方案1)、挖掘及现场弃置(方案2)、挖掘及处理SPL(方案3)、挖掘及焚化SPL(方案4)。LCI结果表明方案1不消耗资源,而运移模型表明方案1的效果最差,最终浓度是管制标准的30~40倍。LCIA结果表明方案1的总环境影响(主要+次要)

最小,其次是方案4。第4阶段的敏感性分析表明方案1最佳。虽然LCA最终支持方案1,但是事实上方案1留下了一个未被修复的场地,是一个长期污染源,而方案4是唯一能完全去除SPL的方案,长期来看更有优势。该过程也没有考虑运输过程中的环境影响,参考的环境指标也较为老旧且局限,也许会得出误导性的结论,因此建议对方案1进行完整的环境风险评估,如果评估不通过,建议采用方案4作为最终决定。Cadotte等^[74]将LCA用于柴油污染场地的修复方案评估,方案1:抽出处理;方案2:生物吸食,生物通风和生物注射;方案3:生物吸食,生物通风和化学氧化;方案4:使用生物堆进行异位处理。结果表明,方案1的环境影响最严重,方案2的技术风险和环境影响最低且便宜,但修复时间相当长。方案3虽然时间短效率高,但是使用化学氧化剂较为危险,方案4时间最短,但是残余污染高于方案2、3。所以提出了两种方案:第一种优先考虑低环境影响,即方案2;第二种优先考虑时间,将方案3、4中修复速度最快的技术组合在一起,即使用生物吸食法来消除非水相液体,挖掘并使用生物堆处理土壤,并使用化学氧化法来处理地下水中的残余污染。最终修复方案的选择将取决于场地所有者的优先级。Cadotte等^[74]认为该研究在使用LCA时,对主要和次要的影响因子的考虑不全面,而且如果选择的标准不同,可能导致结果有较大偏差。此外,最终方案取决于场地所有者的主观意见可能导致评价结果不够客观。董璟琦^[75]采用LCA方法对西部某典型铬盐污染场地修复工程的二次环境影响进行全过程定量评估。系统边界包括修复至目标值所包含的全部场地工程量和各修复阶段资源的投入和运输过程,为期100年。LCI对4种修复技术在修复过程中的各项能量、原材料消耗和污染排放进行量化。LCIA将西欧人均排放数据作为4种最终损害影响类型的标准化基准数据进行评估。结果表明:深层土壤原位注入化学还原技术的修复土方量大且环境影响小,而抽出处理技术的环境影响最大。修复同样土方量时环境影响最大的为异位土壤淋洗,最小的为原位化学还原。由于LCA方法本身和专

业数据库的限制,相关过程参数可能不完全适用于中国的污染场地,此外,LCIA中没有对场地修复后遗留在土壤中的物质(如药剂残留物质)开展定量评估,不够全面^[75]。

1.3 CBA

CBA是通过计算项目或政策的全部成本和效益,以进行结果比较和价值评估的常用方法。1844年,法国工程师、经济学家Jules Dupuit在《论公共项目的效用度量》一文提出成本效益分析的概念,并将其运用于法国防洪工程和巴黎地下给排水系统^[76]。

牛坤玉等^[77]对英国的《基于成本效益分析的污染土壤管理技术指南》分析表明,使用CBA对修复技术进行筛选时,可以分为5个基本步骤:(1)初步筛选阶段,用于筛选满足修复目标的硬性限制条件的技术;(2)定性分析,在量化前识别污染事件以及各修复方案的潜在影响;(3)成本效果分析(CEA)与多项标准分析(MCA);(4)成本效益分析(CBA),这2步主要通过评分、加权和货币估值等方法更详细地评价技术的成本和效益,当备选方案的效益无法货币化时,采用步骤3,当备选方案的效益可以货币化时,采用步骤4,有时需结合使用;(5)灵敏度分析及选取首选方案,步骤5是为使得更多场地修复的特殊细节被加入最终选择的考虑因素内,需要测试某些因素的改变对排序的影响程度,通常涉及:修复方案的成本,实现修复目标的概率、贴现率,某种方案对应的某种指标的分值,评估类别、每个类别下的指标或不同修复时期的权重等。在实际操作过程中,并非每种修复方案的筛选均必须完成这5个步骤,对于一些比较简单的修复案例,若通过初步的筛选和简单的定性分析可以确定方案的优先序,可以直接进入步骤5。

在地下水修复领域的应用中,赵丹等^[78]对环境损害评估中修复方案的费用效益分析进行了系统的研究,发现虽然地下水修复成本较高,但是会带来很多直接效益和间接效益,因此对于多方利益相关者来说成本效益分析都十分重要。通过案例研究,在进行环境修复决策时,应由政府、企业、私人投资商等各利益相关方进行配合,从整个生命周期

出发考虑费用和效益,评估其经济可行性。但是由于土壤和地下水等环境资源没有固定的价值,房地产的价格也会随时间和距离发生变化,以及健康效益、生态效益等均难以用货币衡量,因此效益的评价通常很复杂。Döberl 等^[79]认为成本的量化需要对其影响因素进行成本折现,折现率则存在不确定性,因此成本的量化也存在一定的困难。为了评价结果的稳定性和排名的稳健性,需对不确定性因素进行敏感性分析。张红振等^[17]认为 CBA 虽然可以从场地自身环境改善的角度进行评估,但相比于 LCA,它无法全面评估项目全过程环境影响。

1.4 其他相关评价方法

1) IOC 排序法。

IOC 排序法(importance order of the criteria)是多属性效用理论下的多目标决策方法。它考虑场地水文地质条件、污染物特性、修复经济成本、时间效率、场地开发用途等,通过对各方案的总效用值排序,减小多目标决策过程中的主观偏差,对复杂的地下水污染场地具有针对性和有效性^[80]。

靳超等^[80]采用 IOC 筛选最高效的修复技术修复傍河污染场地的地下水。根据水文地质条件、目标污染物特性对地下水修复技术初筛,通过 IOC 法确定有效性和经济优先 2 种条件,组合技术抽出-生物反应器法结合地下水曝气技术适宜于该场地的修复。

然而,目前使用 IOC 排序法对地下水修复技术进行筛选的文献只有上述一篇,还有待深入研究。

2) “3E”模型评价法。

随着经济的发展,国家对可持续发展的理念愈加重视。Xu 等^[81]认为可将经济可持续发展定义为具有较高经济效益和较好的生态效益的经济发展,生态绩效包括资源-能源消耗和环境污染 2 个方面。从这一定义出发,建立了经济发展、资源-能源消耗和环境污染相互关系的新型三角模型,用 3 个指数:EDI-经济发展指数、EPI-环境污染指数、RECI-资源和能源消耗指数来定量评价经济发展的可持续性。为此目的而设计的三角形(图 3^[81-82])具有等边形状,EDI 位于最高顶点,RECI 位于左下

顶点,EPI 位于右下顶点。每个轴的读取方向为逆时针,从 0 到 100%。每个轴进一步平均分为 5 个分段或范围:“很低”值 0~20%，“低”值 20%~40%，“中”值 40%~60%，“高”值 60%~80%，“很高”值 80%~100%。因此,三角形图显示了 3 个综合指数 EDI、RECI 和 EPI 的相对百分比组合。此外,三角进一步细分为从上到下 5 个区域 A、B、C、D 和 E 表达了 5 种不同的可持续发展状态,越往上效益越好。根据与备选数据集相关的数据点的相对位置,可以评估相应的可持续性状况和趋势。

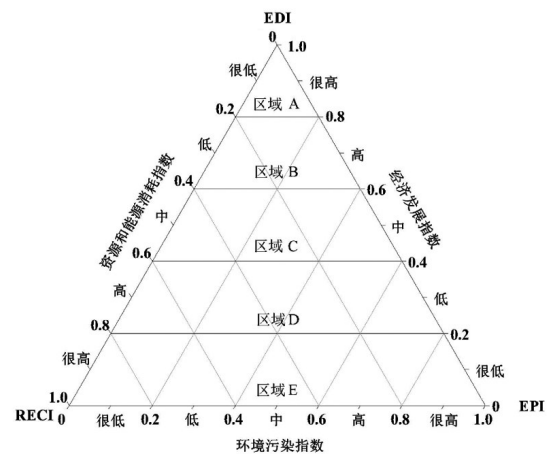


图3 “3E”三角模型

Sun 等^[82]将 3 个指标的名称分别改为经济利益(EB: economic benefit)、环境影响(EI: environmental impact)和能源消耗(EC: energy consumption),即“3E”评价模型。并对基于铁、锰离子和膨润土等制成的 Fe-Mn@Bt 多孔臭氧催化剂用于煤化工生化尾水处理的性能进行分析和评价,得到该催化剂的最优配比和运行条件。

该法简明直观,有效性好,在地下水修复技术评价方面,尤其是地下水修复药剂的性能评价方面很有应用潜力,可以作为未来的研究方向之一。

1.5 部分评价方法的实施步骤

为了更加清晰地了解不同评价方法在使用上的差别,通过对文献进行总结,列出了部分评价方法: AHP、TOPSIS、ELECTRE、PROMETHEE、IOC 排序法的实施步骤(表 2)。

表2 地下水修复技术评价方法实施步骤

方法	分类	实施步骤	计算公式	参数	文献	
多准则 决策分析 MCDA	层次 分析 AHP	① 建立层次分析结构模型,设置 n 个指标;采用专家打分法对各指标的重要性进行打分,通过改进九标度法 ^[83] 建立判断矩阵 $A=(a_{ij})$,然后采用几何平均法(式1)计算各个指标的权重 ω	$\omega_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} / \left(\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{\frac{1}{n}} \right)$	ω_i :第 j 个备选修复技术在第 i 个指标下的值	[37]	
		② 通过式(2)~(4)对判断矩阵进行一致性检验,避免权重混乱,当 $CR < 0.1$ 时,认为通过一致性检验	$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{\frac{1}{n}}$	ω_i :第 i 个指标的权重		
		③ 综合评价。依据地下水污染修复技术评价标准,得到修复技术对应的各指标的值,与分权重(ω_i)进行加权计算得到总值	$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad n = 1, 2, 3, \dots$	CI :一致性比例		
			$CR = CI/RI$	RI :平均一致性指标		
			$z_{ij} = y_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}$	(5)		
			$x_{ij} = \omega_j \cdot z_{ij}$	(6) y_{ij} :第 i 个备选修复技术在第 j 个指标下的值		
			$x_j^* = \left\{ \left(\max_{i \in I^+} x_{ij} \mid i \in I^+ \right), \left(\min_{i \in I^-} x_{ij} \mid i \in I^- \right) \right\}$	(7) $i=1, 2, \dots, m$ $j=1, 2, \dots, n$		
			$x_j^0 = \left\{ \left(\min_{i \in I^+} x_{ij} \mid i \in I^+ \right), \left(\max_{i \in I^-} x_{ij} \mid i \in I^- \right) \right\}$	(8) x_j^* :理想解 x^* 的第 j 个参数值 x_j^0 :负理想解 x_0 的第 j 个参数值		
			$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^*)^2}$	(9) F :效益型参数 F :成本型参数		
			$d_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_j^0)^2}$	(10) C_j^* :综合评价指数		
	$C_i^* = d_i^0 / (d_i^0 + d_i^*)$	(11)				
选择消 去法 ELEC- TRE		① 采用 AHP 构建指标体系,计算得到各指标权重 ω_j	$c_j(a, b) = \begin{cases} 0, & g_j(a) - g_j(b) \leq p_j \\ 1, & g_j(a) - g_j(b) \geq q_j \\ \frac{g_j(b) - (g_j(a) + p_j)}{q_j - p_j}, & \text{其他} \end{cases}$	$c_j(a, b)$:局部和谐指数,指在属性 j 上方案 a 优于 b 的程度		
		② 确定阈值。方案 a 和 b 满足 $(a, b) \in A$, 无差异阈值 q_j 、偏好阈值(严格优先阈值) p_j 、否决阈值 v_j 。3 个阈值均由决策人确定,通常取固定值, v_j 一般为 p_j 的 3 倍。对于属性 j , 一般: $0 \leq q_j \leq p_j \leq v_j$			$d_j(a, b) = \frac{g_j(b) - (g_j(a) + p_j)}{v_j - p_j}$, 其他	
		③ 和谐指数和不和谐指数。局部和谐指数 $c_j(a, b)$ 根据式(12)计算;局部不和谐指数 $d_j(a, b)$ 根据式(13)计算;和谐指数 $c(a, b)$ 则根据式(14)计算				$c(a, b) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \omega_j} \sum_{j=1}^n \omega_j c_j(a, b)$

表2 地下水修复技术评价方法实施步骤(续)

方法	分类	实施步骤	计算公式	参数	文献
选择淘汰法 ELEC-TRE		④ 计算 a 优于 b 这一论断的可信度得分 $S(a, b)$, 如式(15)	$c(a, b) = \prod_{j \in J} \frac{1 - d_j(a, b)}{1 - c(a, b)}, \quad j \in J; d_j(a, b) > c(a, b)$ $c(a, b), \quad \max\{d_j(a, b)\} \leq c(a, b)$	$c_j(a, b)$: 局部和谐指数, 指在属性 j 上方案 a 优于 b 的程度 $d_j(a, b)$: 不和谐指数, 表示属性 j 上方案 a 劣于 b 的程度 $c(a, b)$: 和谐性指数 δ_m : 方案 a_i 的级别优先得分	[84]
		⑤ 方案排序, 对于方案 (a_i, a_k) , 采用净优势分值法挖掘级别优先关系, 如式(16): δ_m 分数越高, 方案越优			
多准则决策分析 MCDA		① 采用AHP构建指标体系, 计算得到各指标权重 ω_k , 对方案集 A 中 m 个方案 (a_1, a_2, \dots, a_m) 在 n 个准则 $C_k (k=1, 2, \dots, n)$ 下进行评价	$H(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^m \omega_k P_k(a_i, a_j)$	$H(a_i, a_j)$: 多准则偏好优序指数	
		② 根据条件不同, 从6种基本偏好函数中选择一种设为 P_k , 则方案 a_i 相比于 a_j 的偏好程度为 $P_k(a_i, a_j) = P_k[C_k(a_i) - C_k(a_j)]$, 定义多准则偏好优序指数 $H(a_i, a_j)$ 如式(17)	$\Phi^+(a_i) = \sum_{j=1}^m H(a_i, a_j)$ $\Phi^-(a_i) = \sum_{j=1}^m H(a_j, a_i)$	$\Phi^+(a_i)$: 方案 a_i 优于其他方案的程度 $\Phi^-(a_i)$: 方案 a_i 劣于其他方案的程度	[46,48]
		③ 方案排序。定义 a_i 的偏好优序级别的正方向 $\Phi^+(a_i)$ 和负方向 $\Phi^-(a_i)$ 如式(18)~(19)值差距越大, 方案越优, 如式(20)	$\Phi(a_i) = \Phi^+(a_i) - \Phi^-(a_i)$	$\Phi(a_i)$: 综合优序级别值	
其他评价方法	IOC排序法	① m 个方案在 n 个指标上的数值构成一个决策矩阵 $V = [v_{ij}]$, 其中。该法不要求在排序之前给出权重的具体值, 只需要决策者给出各准则的重要性顺序, 即 $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n$ 。定义方案 j 的总效用值 U_j , 如式(21)	$U_j = \sum_{i=1}^m w_i v_{ij}$ $\max U_j = \max \sum_{i=1}^m w_i v_{ij} \left\{ \sum_{i=1}^m w_i = 1, w_m \geq 0 \right\}$ $\min U_j = \min \sum_{i=1}^m w_i v_{ij} \left\{ \sum_{i=1}^m w_i = 1, w_m \geq 0 \right\}$	v_{ij} : 方案 j 在指标 i 上的值 $\max U_j$: 最大化总效用 $\min U_j$: 最大化总效用 S_{ij} : 总效用值	[74]
		② 方案排序。根据每个方案可能达到的最大、最小总效用值进行排序, 用2个线性规划表示, 如式(22)~(24)得 S_{ij} 的最大最小值即为最大最小总效用值。根据 S_{ij} 的均值大小, 对所有方案进行排序	$S_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k v_{ij}, k = 1, \dots, m$		

表3 地下水修复技术评价方法对比分析(续)

方法	分类	工程案例	优点	缺点
多准则决策 分析MCDA	基于MCDA优 化的评价方法	通常将其他辅助方法或模型与MCDA 单一方法相结合或多个单一方法联用,能 充分发挥每种方法的优势,弥补各自的缺 点,达到更优化的效果	大多依赖于AHP构建的指标体系和 决策矩阵,存在主观性问题	[59]
生命周期 评估 LCA	—	使用广泛,可以从经济、社会、环境等各 方面对地下水污染修复技术从出生到死 亡的全生命周期的影响进行全面地定性 定量评估,为利益攸关者做决策提供参考	该法使用复杂,主、次要影响因子是 否全面客观对于结果的影响很大且无 法及时发现。评估时间界限可能长达 几百年,故难以准确预测其结果。我国 相关标准还不够完善,若借鉴国外的标 准则可能导致评估脱离实际	[72]
成本效益 分析 CBA	—	发展成熟,应用广泛。该法将所有的影 响因素折算为成本和效益2个指标,对不 同修复方案的优劣程度进行评价,能够较 好地指导修复技术的选择	但是由于该法所基于的数学算法对 输入数据质量高度依赖(如输入的成本 是基于估计)和对主观因素(如指标设 置及权重分配)的依赖,导致其评价结 果可能出现不合理的情况	[76]
其他相关评 价方法	IOC排序法	适用于复杂场地条件。通过对各方案 的总效用值排序,减小多目标决策过程 中的主观偏差。最大、最小总效用值还 给出了方案对权值的敏感程度	目前该法在地下水污染修复技术评 价领域应用很少	[78]
	“3E”模型 评价法	原理简单,使用图示,方便直观,有效 性好	目前该法在地下水污染修复技术评 价领域还没有应用。且最佳方案在图 中呈现并不突出,难以得到明确的方 案排序	—

评价体系进行优化往往能够达到更合理的评价结果,这也是未来的研究方向之一。而LCA法在评价时对前期考虑到的因素是否充分有很高的要求,否则可能对结果有较大影响。CBA法受到对难以量化的成本和效益的指标的制约,往往会出现较大偏差。其他相关评价方法在地下水修复技术评价方面有进一步研究和应用的潜力。

3 结论

通过文献调研,梳理了各种不同的地下水污染修复技术评价方法,包括MCDA、LCA、CBA等。目前最常用的是MCDA,主要包括AHP、TOPSIS、ELECTRE、PROMETHEE等,其次是LCA。通过对比不同方法的优缺点,可以看出MCDA法在各方面

均有较明显的优势,简单有效,适用性广,虽然存在主观因素,但能够满足不同利益攸关者的需求。另外,研究者在使用AHP建立评价体系时常常会选取技术有效性、经济、社会、环境影响等作为评价指标,但是由于依赖于专家经验,指标选取和权重确定的合理性会对评价结果有直接的影响,未来还需要在指标的选取和权重的确定方面进行更深入的研究。从研究者对MCDA方法的优化思路来看,将不同评价方法进行有机结合也是未来的研究方向之一。此外,简明有效的“3E”评价模型有益于地下水修复技术评价领域的潜力。

总之,地下水修复技术评价方法已有研究成果为修复技术的选择提供了一定的技术支撑,但要结合中国的实际情况,推进评价方法的规范化和标准化,仍需进行大量的深入研究。

参考文献(References)

- [1] 陈楠纬. 地下水污染修复技术研究进展[J]. 云南化工, 2019, 46(6): 1-5.
- [2] 赵勇胜. 地下水污染场地风险管理与修复技术筛选[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1426-1433.
- [3] U.S.EPA. Treatment technologies for site cleanup: annual status report[M]. Washington D C: National Service Center for Environmental Publications, 2007.
- [4] 梁竞, 王世杰, 张文毓, 等. 美国污染场地修复技术对我国修复行业发展的启示[J]. 环境工程, 2021, 39(6): 173-178.
- [5] 朱辉, 叶淑君, 吴吉春, 等. 中国典型有机污染场地土层岩性和污染物特征分析[J]. 地学前缘, 2021, 28(5): 26-34.
- [6] 宋家音, 赵玲, 滕应, 等. 污染场地采样调查技术与设备研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(3): 468-474.
- [7] 郑斯瑞. 污染场地修复决策中存在的问题及解决思路研究[J]. 绿色环保建材, 2020(11): 50-51.
- [8] 廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 等. 污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨[J]. 环境科学, 2014, 35(4): 1576-1585.
- [9] van Drunen M A, Beinat E, Nijboer M, et al. Multi-objective decision making for soil remediation problems[J]. Land Contamination & Reclamation, 2005, 13(4): 349-359.
- [10] 何理, 李晶, 任丽霞, 等. 地下水环境修复工艺优化设计研究进展[J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 1-4,18.
- [11] James S C, Kovalick Jr. W W. Evaluation of demonstrated and emerging technologies for the treatment and clean-up of contaminated land and groundwater[J]. Land Contamination & Reclamation, 2002, 10(4): 239-245.
- [12] U. S. EPA. Superfund green remediation strategy[R]. Washington D.C.: U.S.EPA, 2010.
- [13] Critto A, Cantarella L, Carlon C, et al. Decision support-oriented selection of remediation technologies to rehabilitate contaminated sites[J]. Integration Environment Assessment Management, 2006, 2(3): 273-285.
- [14] Bello-dambatta A, Farmani R, Javadi A A, et al. The analytical hierarchy process for contaminated land management[J]. Advanced Engineering Informatics, 2009, 23(4): 433-441.
- [15] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 基于 REC 模型的污染场地修复决策支持系统的研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(4): 66-70, 94.
- [16] 张海博, 张林波, 李岱青, 等. 基于 DESYRE 模型的污染场地修复决策研究[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(4): 339-348.
- [17] 张红振, 於方, 曹东, 等. 发达国家污染场地修复技术评估实践及其对中国的启示[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(2): 105-111.
- [18] 孟祥帅, 陈鸿汉, 何亚平, 等. 污染场地修复技术方案筛选中环境指标建立初探: 以某废弃焦化厂为例[J]. 环境工程, 2021, 39(2): 153-159.
- [19] 张永祥, 王晋昊, 井琦, 等. 地下水修复中纳米零价铁材料制备及应用综述[J]. 化工进展, 2021, 40(8): 4486-4496.
- [20] 王国华, 杨思芹, 周耀辉, 等. 生物还原法修复铀污染地下水的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(8): 47-53.
- [21] 黄文建, 陈芳, 么强, 等. 地下水污染现状及其修复技术研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(7): 12-18.
- [22] 李军, 梁永平, 邹胜章, 等. 微生物在地下水污染修复中的应用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(5): 638-643.
- [23] 袁梦姣, 王晓慧, 赵芳, 等. 零价铁与微生物耦合修复地下水的研究进展[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1119-1131.
- [24] 任加国, 郜普闯, 徐祥健, 等. 地下水氯代烃污染修复技术研究进展[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1641-1653.
- [25] O'connor D, Hou D Y, Ok Y S, et al. Sustainable in situ remediation of recalcitrant organic pollutants in groundwater with controlled release materials: A review[J]. Journal of Controlled Release, 2018, 283: 200-213.
- [26] Pierro L, Matturro B, Rossetti S, et al. Polyhydroxyalkanoate as a slow-release carbon source for in situ bioremediation of contaminated aquifers: From laboratory investigation to pilot-scale testing in the field[J]. New Biotechnology, 2017, 37: 60-68.
- [27] Zhang P, van Nostrand J D, He Z, et al. A slow-release substrate stimulates groundwater microbial communities for long-term in situ Cr(VI) reduction[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(21): 12922-12931.
- [28] 王茜. 基于刺激土著微生物降解地下水中芳香烃的无机盐缓释修复药剂研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [29] 尹斯琦. 基于生物刺激修复 VCHs 污染地下水的营养基质缓释药剂研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [30] 文一, 赵丹. 发达国家地下水修复技术现状及对我国的启示[J]. 环境保护科学, 2016, 42(5): 12-14,18.
- [31] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281.

- [32] 廉新颖, 杨昱, 席北斗, 等. 地下水污染修复技术验证评价方法研究[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1743-1750.
- [33] 杜岳, 贾建和. 污染场地修复技术筛选方法研究[J]. 河北工业科技, 2015, 32(5): 401-406.
- [34] 刘国. 四川省典型矿山地下水污染因子识别与修复技术筛选[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [35] 白利平, 罗云, 刘俐, 等. 污染场地修复技术筛选方法及应用[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4218-4224.
- [36] 潘文, 王鹤立. 层次分析法在污染场地修复技术优选中的应用[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(增刊2): 322-326.
- [37] Hwang C L, Yoon K. Methods for multiple attribute decision making[J]. *Multiple Attribute Decision Making*, 1981, 186: 58-191.
- [38] 张倩, 蒋栋, 谷庆宝, 等. 基于AHP和TOPSIS的污染场地修复技术筛选方法研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1088-1094.
- [39] Li J, Yang Y, Huan H, et al. Method for screening prevention and control measures and technologies based on groundwater pollution intensity assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 551-552(15): 143-154.
- [40] 张婧, 皮鑫, 崔佳鑫, 等. 垃圾填埋场区域氨氮污染地下水的修复方案比选[J]. 环境保护科学, 2017, 43(3): 125-131.
- [41] Wang H, Cai Y, Tan Q, et al. Evaluation of groundwater remediation technologies based on fuzzy multi-criteria decision analysis approaches[J]. *Water*, 2017, 9(6): 443.
- [42] 罗云. 基于Topsis的污染场地土壤修复技术筛选方法及应用研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
- [43] 魏建洲, 马国顺. 一种关于ELECTRE-II法的新排序方法[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2009, 18(2): 129-131.
- [44] 王寅, 顾小刚, 缪周伟, 等. 污染场地地下水修复技术筛选方法综述[J]. 中国市政工程, 2018(5): 25-27, 104-105.
- [45] 王冰, 陈伏龙, 吴泽斌, 等. 基于ELECTRE III法的引滦水量分配组织实施评估[J]. 水文, 2017, 37(2): 42-47.
- [46] Souza R B, Martins F C, Pereira V, et al. An algorithm to elicitate ELECTRE II, III and IV parameters[J]. *Data Technologies and Applications*, 2020, 55(1): 82-96.
- [47] Roussat N, Dujet C, Méhu J. Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis[J]. *Waste Management*, 2009, 29(1): 12-20.
- [48] Figueira J, Greco S, Ehrgott M. Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys[M]. New York: Springer New York, 2005, 78.
- [49] 张士宽, 王月, 安达, 等. 垃圾填埋场地下水污染修复技术优选研究[J]. 环境工程技术学报, 2017, 7(4): 463-469.
- [50] 尉晓君. 地下水污染修复的多目标决策研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2006.
- [51] An D, Xi B, Ren J, et al. Sustainability assessment of groundwater remediation technologies based on multi-criteria decision making method[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 119: 36-46.
- [52] 张伯强, 安达, 王月, 等. 基于MCDA的沙漠地区污染场地地下水修复技术优化方法[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5521-5527.
- [53] Brans J P, Vincke P H, Mareschal B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method[J]. *European Journal of Operational Research*, 1986, 24(2): 228-238.
- [54] 张飞, 岳立柱, 王国辉. 基于偏序集的PROMETHEE方法优化研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(1): 10-16.
- [55] 李玮, 王明玉, 韩占涛, 等. 棕地地下水污染修复技术筛选方法研究——以某废弃化工厂污染场地为例[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 131-140.
- [56] Khelifi O, Lodolo A, Vranes S, et al. A web-based decision support tool for groundwater remediation technologies selection[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2006, 8(2): 91-100.
- [57] 李安婕, 全向春, 王龔, 等. 基于PROMETHEE II法的污染场地土壤修复技术筛选及应用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(10): 3767-3773.
- [58] 鄂佳楠, 周睿, 郑龙日, 等. 基于蒙特卡罗法和层次分析法的污染场地地下水修复技术筛选方法研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(5): 499-503, 509.
- [59] 冯茂. 基于PROMETHEE和GAIA方法的石油污染地下水修复系统多目标决策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [60] Ren L, Lu H, He L, et al. Identifying desired groundwater remediation strategies by using PROMETHEE and GAIA methods[C]//International Conference on Material Science and Environmental Engineering (ICMSEE2015), Wuhan: Taylor & Francis Group, 2015: 645-647.
- [61] 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.
- [62] He L, Shao F, Ren L. Identifying optimal groundwater remediation strategies through a simulation-based PROMETHEE-TOPSIS approach: An application to a naph-

- thalene-contaminated site[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2020, 26(6): 1550–1568.
- [63] 邵峰. 不确定条件下的石油污染地下水修复系统多属性决策分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [64] Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1): 1–21.
- [65] Lemming G, Hauschild M Z, Chambon J, et al. Environmental impacts of remediation of a trichloroethene-contaminated site: Life cycle Assessment of remediation alternatives[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(23): 9163–9169.
- [66] Jolliet O, Margni M, Charles R, et al. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(6): 324–330.
- [67] Environmental management–life cycle assessment–principles and framework[S]. British: ISO, 2006.
- [68] Suèr P, Nilsson-Påledal S, Norrman J. LCA for site remediation: A literature review[J]. *Soil Sediment Contamination*, 2005, 13(4): 415–425.
- [69] 胡新涛, 朱建新, 丁琼. 基于生命周期评价的多氯联苯污染场地修复技术的筛选[J]. *科学通报*, 2012, 57(增刊1): 129–137.
- [70] Fisher A. Life-cycle assessment of in situ thermal remediation[J]. *Remediation Journal*, 2012, 22(4): 75–92.
- [71] Santiago D E, Hernandez rodriguez M J, Pulido-melin E. Laundry wastewater treatment: Review and life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2021, 147(10): 1–23.
- [72] Seo Y, Suzuki M, Takagi T, et al. Life-cycle assessment of adsorbents for biohydrogen production[J]. *Resources*, 2019, 8(1): 52.
- [73] Godin J, Ménard J F, Hains S, et al. Combined use of life cycle assessment and groundwater transport modeling to support contaminated site management[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2004, 10(6): 1099–1116.
- [74] Cadotte M, Deschênes L, Samson R. Selection of a remediation scenario for a diesel-contaminated site using LCA[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(4): 239–251.
- [75] 董璟琦. 污染场地绿色可持续修复评估方法及案例研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [76] 陈刚, 蓝艳, 彭宁, 等. 成本效益分析的美国经验与环保实践[J]. *环境保护*, 2016, 44(12): 62–64.
- [77] 牛坤玉, 金书秦. 成本效益分析视角的土壤修复方案筛选——英国经验及启示[J]. *环境保护*, 2018, 46(18): 24–28.
- [78] 赵丹, 於方, 王朕. 环境损害评估中修复方案的费用效益分析[J]. *环境保护科学*, 2016, 42(6): 16–22.
- [79] Döberl G, Ortmann M, Frühwirth W. Introducing a goal-oriented sustainability assessment method to support decision making in contaminated site management[J]. *Environmental Science & Policy*, 2013, 25: 207–217.
- [80] 靳超, 左锐, 王金生, 等. 傍河污染场地地下水修复技术筛选[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(6): 689–697.
- [81] Xu F L, Zhao S S, Dawson R W, et al. A triangle model for evaluating the sustainability status and trends of economic development[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 195(3/4): 327–337.
- [82] Sun W Q, Sun Y J, Zhu H, et al. Catalytic activity and evaluation of Fe-Mn@Bt for ozonizing coal chemical biochemical tail water[J]. *Separation Purification Technology*, 2020: 116524.
- [83] Song D B, Gao Z Q, Zhang H, et al. GIS-based health assessment of the marine ecosystem in Laizhou Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 125(1/2): 242–249.
- [84] 周文武, 陈冠益, 旦增, 等. 垃圾填埋场区域地下水铅的修复方案比选:以拉萨市为例[J]. *环境工程*, 2020, 38(6): 88–93.

Research progress in evaluation methods of groundwater remediation technologies

DU Xinyue^{1,2}, ZHANG Xiaoran^{1,3*}, ZHANG Yuling⁴, ZHANG Ziyang^{2,3}, LI Haiyan^{2,3}

1. Key Laboratory of Urban Rainwater System and Water Environment Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China
2. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China
3. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China
4. College of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130021, China

Abstract With the rapid economic and social development, China's groundwater pollution becomes serious and urgently needs repairing. However, due to the diversity of pollution and complexity of hydrogeological conditions, many of the remediation techniques actually used are not the best option. At present, researchers have tried to establish and optimize the technical evaluation system of groundwater pollution remediation using a variety of evaluation methods, such as multi-criteria decision analysis method (MCDA), life cycle assessment method (LCA), cost-benefit analysis method (CBA), etc. Aiming at the problem that China still lacks perfect standards and legal norms to guide remediation decision-making this paper reviews the research progress of groundwater pollution remediation technology evaluation methods by means of literature research and compares and analyzes the advantages and disadvantages of different evaluation methods. The results show that MCDA has obvious advantages. In addition, when using AHP to construct the evaluation system, selection of evaluation indicators and determination of index weights have a significant impact on the evaluation results of groundwater remediation technology. In a word, in order to optimize the existing evaluation methods it is necessary to conduct more in-depth research on selection of evaluation indicators, determination of index weights, and organic combination of evaluation methods according to the actual situation in China.

Keywords groundwater remediation; evaluation methods; multi-criteria decision analysis; life cycle assessment; cost-benefit analysis ●



(责任编辑 祝叶华)