

基于 MCDA 的沙漠地区污染场地 地下水修复技术优化方法

张伯强^{1,2,3} 安达^{1,2,*} 王月^{1,2} 梁欢欢^{1,2,4}
周炼^{1,2,5} 席北斗^{1,2} 唐军^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染过程模拟与控制重点实验室, 北京 100012; 3. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013; 4. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444; 5. 重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要 针对近年来频频出现的污染企业向沙漠地区地下排污造成地下水污染这一问题, 以腾格里沙漠地区某化工厂地下水污染为研究案例, 提出适合沙漠地区地下水污染修复技术的优选方法。在综合考虑修复技术的经济、技术和社会效益基础上, 利用层次分析法建立修复技术优化指标体系, 运用多准则决策分析模型 (multiple criteria decision analysis, MCDA) 中的消去和选择转换法 (ELECTREII) 对修复技术组合进行优选排序, 确定适合该地区的最优修复技术方案。结果表明, 5 种地下水修复备选技术中可渗透反应墙、抽出-处理、监测自然衰减技术较为理想, 综合考虑该污染场地特征以及地下水治理要求, 得出最佳修复方案为: 对高污染浓度区域采用抽出-处理技术 + 可渗透反应墙技术联合修复; 对于低污染区域采用监测自然衰减技术。该优化方法可为沙漠地区地下水污染修复技术的选取提供借鉴。

关键词 沙漠地区; 地下水; 修复技术; 多准则决策分析

中图分类号 X523 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)10-5521-07 DOI 10.12030/j.cjee.201603040

Optimization methodology of groundwater remediation technologies of contaminated sites in the desert areas by multi-criteria decision analysis

ZHANG Boqiang^{1,2,3} AN Da^{1,2,*} WANG Yue^{1,2} LIANG Huanhuan^{1,2,4}
ZHOU Lian^{1,2,5} XI Beidou^{1,2} TANG Jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 4. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 5. School of Civil Engineering Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract Because of the ever-increasing problem of groundwater pollution in deserts caused by enterprises polluting underground drainages, the groundwater pollution by a chemical plant in the Tenggeli desert region was used as a case study to develop an optimization method suitable for technological remediation of groundwater pollution in desert areas. Based on comprehensive consideration of economic, technological, and social benefits of rehabilitation technology using an AHP to establish the index system and the elimination and transformation method (ELECTRE) in MCDA to prioritize combinations of repair technology, then the outranking relationships of different schemes were obtained, to determine the optimal solution. The results show that permeable reactive barriers (PRBs), pump & treat (P&T), and Monitored Natural Attenuation were the optimal of the five alternatives. Finally, considering the characteristics of the sites contaminated by the chemical plant and the groundwater management requirements, the best solution was to use P&T + PRBs for joint repair in high pollution areas and monitored natural attenuation technology in low pollution areas. This optimization method provides a reference for selecting groundwater pollution remediation technologies in desert areas.

Key words desert area; groundwater; remediation technology; multi-criteria decision analysis

基金项目: 2015 年全国地下水基础环境状况调查评估项目 (144130012110302)

收稿日期: 2016-03-04; 修订日期: 2016-05-13

作者简介: 张伯强 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地下水污染风险评估。E-mail: 15135789378@163.com

* 通讯联系人, E-mail: anda@craes.org.cn

近年来,沙漠地区成为一些高污染、高耗能、高排放(“三高”)企业的重要聚集地。由于对“沙漠空间广阔、环境容量大,可以无限排污”的错误认识,致使污染企业直接将未经处理或处理不达标的废物排放到沙漠中,对脆弱的沙漠生态系统造成了严重破坏。2014 年,腾格里沙漠地区污染企业地下排污事件引起了国内外的高度重视。

腾格里沙漠是中国第四大沙漠,位于阿拉善地区东南部,面积约 4.27 万 km^2 ^[1]。由于对污染企业的监管缺位,大量污染物被直接排入沙漠的现象非常普遍,给当地生态环境带来严重污染问题。同时沙漠地区具有渗透能力强、埋深较浅以及补给来源单一等水文地质特征,也致使有毒、有害废物排入沙漠后,极易对地下水环境造成污染。据调查结果显示,距离腾格里工业园区约 2 km 的当地牧民饮用水中所含致癌物质苯酚超出国家标准 410 倍,已严重威胁当地民众的饮水安全和健康^[2]。该地区的地下水污染修复工作势在必行。

地下水处于复杂的多孔介质当中,且地下水具有低温、贫氧、流速缓慢的特点,决定了地下水一旦被污染,就要花费很长的时间和巨大的经济代价来进行修复^[3]。如何根据沙漠地区独特的水文地质特征以及社会、经济等实际情况,选择最适合当地的修复技术显得尤为重要。目前,对地下水污染修复的综合性方案通常只是就单一方法做出分析,而地下水修复技术的最优选取恰恰是一个多属性问题,其中包括多项离散型变量,也有模糊定性的因素,如何将定性的问题进行定量的描述,是决策者经常遇到的问题^[4]。多准则决策分析模型(multiple criteria decision analysis, MCDA)作为一种多准则综合分析模型是一种可在一些不相关、不一致的规则基础上评估一系列可供选择的方案和决策并找出最优决策的分析方法,结合多因素分析评判,客观的将定性的问题量化,且能够对指标之间的相关性进行很明确的判断,具有逻辑简单,决策信息利用充分,计算精炼的特点^[5-6]。因此,可利用多准则决策方法有效解决这一多属性问题。

本文以腾格里沙漠地区某化工厂蒸发池地下水污染修复为案例,开展地下水污染修复技术优选方法研究。利用多准则决策模型中的层次分析模块,建立综合考虑该地区社会、经济条件以及技术可行性等方面的修复技术优选指标体系,在此基础上,利用多准则决策模型中的消去和选择转换法(ELEC-

TREII),对目前应用比较广泛的 5 种地下水修复技术(监测自然衰减技术、原位化学氧化、空气曝气技术、抽出-处理等技术、可渗透反应墙)进行比选,提出修复技术优选顺序,并确定最优修复方案。

1 研究方法

1.1 地下水污染修复技术优化指标体系的构建

参考美国环保局制定的超级基金修复行动选择导则规定污染场地修复技术筛选的九项原则^[7],并结合我国地下水修复技术的发展情况,逐级构建修复技术优化指标体系。

地下水污染修复技术的科学选择,应体现在考虑社会效益的前提下,以较低的修复费用获得较理想的污染去除率。采用层次分析法进行地下水修复技术优化指标体系的构建,综合考虑当地社会、经济因素、场地水质特征及修复技术的特点,逐级分析构建修复技术优化指标体系^[8-9]。具体指标体系包括经济效益、技术指标以及社会效益 3 项一级指标,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 7 项二级指标,具体如图 1 所示。

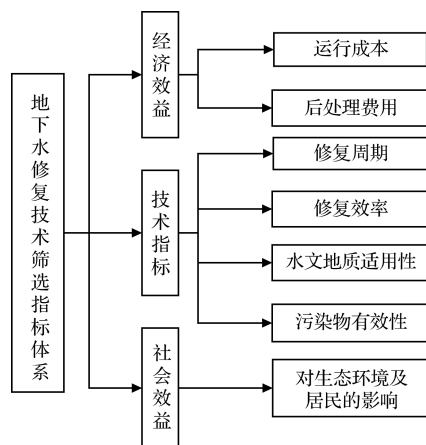


图 1 污染场地地下水修复技术优化指标体系

Fig. 1 Index system of groundwater remediation technology optimization

1.2 基于 MCDA 的地下水污染修复技术优化方法

本文采用多准则决策分析方法中的消去和选择转化法处理地下水修复技术优选中的离散型决策问题^[10-12]。具体步骤如下:

1) 构建决策矩阵及归一化处理。通过收集资料、查阅文献和专家意见构建各方案属性值的决策矩阵,然后利用线性变换进行属性值的规范化。

2)对指标体系中各指标权重赋值。利用层次分析法(AHP)建立层次结构模型,对每个评价指标都规定一个相应的权值,构造两两判断矩阵,利用AHP法中的方根法,即可求得权值反向量。

3)计算一致矩阵与非一致矩阵。根据之前所得决策矩阵与权值反向量,利用MCDA模型中改进的消去和选择转化法(ELECTREII)建立一致与非一致矩阵。

4)计算净优势值并进行排序。根据所求得修正型非一致矩阵及修正型加权合计矩阵,计算出净优势值,并对各方案进行比较,根据净优势值的大小进行优劣排序。

2 案例研究

2.1 污染场地背景与场地调查

某化工厂位于我国腾格里沙漠附近工业区内,主要生产物包括邻苯二甲酸、3,3'-二氯苯胺盐、3,4-二氯苯胺、单氰氨、大苏打;该场地所在区域包气带地层为第四系风积沙及石炭系砂岩、泥岩。由于岩性、风化带发育程度的差异,在平面及垂直剖面上均显示出地下水不均匀性的特征。区域地下水类型为基岩风化裂隙水,赋存于石炭系砂岩、泥岩的风化裂隙中,地下水水位埋深为7.50~16.00 m,根据岩性不同,含水层渗透系数也有所区别,其中砂岩渗透系数为 $3.0 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,泥岩的渗透系数为 $4.0 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。基岩风化裂隙水接受降雨和侧向补给,径流路径短,径流到新井沟后排泄至新井沟第四系潜水含水层,该含水层向南径流补给平原区第四系潜水。基岩上部风化,风化裂隙发育,连通性一般。现场调查表明周边2.5 km范围内无村庄、居民区以及水源地、饮用水井等敏感目标。

通过现场调查,在蒸发池周边共建有6口地下水监测井,1口背景监测井(1[#]),5口污染扩散井,该区域地下水流向为:由西北向东南流动(如图2所示)。根据场地水文地质条件以及污染浓度特点,利用地下水脆弱性和污染源综合评价耦合模型,并运用GIS平台进行构图表征,通过建立各因素的空间图层,进行图层叠加,表征该污染区域地下水污染风险^[13-14],最终把该区域分为4个等级分区,将地下水污染风险分区中的I、II级区定义为低污染风险区,III、IV级区定义为高污染风险区(如图3所示)。通过对该地区地下水样品进行采样分析,场地内地下水中的特征污染物为苯、对二氯苯、对硝基

氯苯、邻氨基苯甲醚、氯苯、对硝基苯酚、邻硝基苯酚、对硝基苯甲醚。

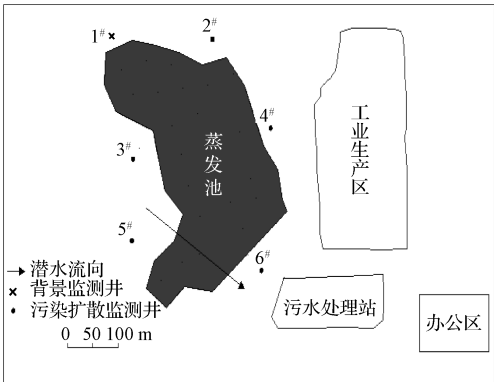


图2 研究区域场地布局示意
Fig.2 Layout sketch of study site

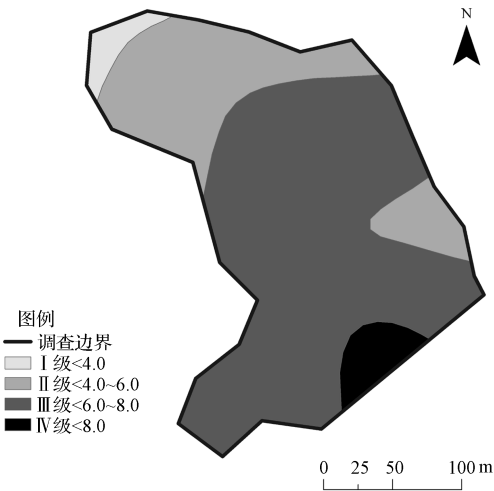


图3 地下水污染风险分区评价
Fig.3 Groundwater pollution risk mapping

2.2 修复技术初筛

地下水污染修复技术按照修复工程实施位置可划分为原位修复技术和异位修复技术。工程实践中应用比较广泛的原位修复技术包括渗透反应墙、原位氧化法、曝气技术及电动处理技术等,异位修复技术主要是抽出处理法^[15]。由于技术方法种类繁多,且技术本身的适用性有所差异。因此,在实际应用中需要对地下水污染修复技术进行遴选,以适合当地地下水污染特征、水文地质条件以及经济、社会发展水平等实际情况的需要。

根据场地调查和资料收集的结果可知该石油石化类污染场地所处沙漠地区具有渗透能力强、埋深较浅以及补给来源单一等水文地质特征,且地下水以苯系物为特征污染物,修复区域大,重污染区域污

染严重,急需进行治理,在综合考虑案例场地地下水污染物类型、污染阶段与强度,水文地质条件、技术经济性和技术应用现状及修复周期等因素的前提下,初步筛选 5 种修复技术作为备选技术方案,分别为监测自然衰减技术、原位化学氧化、空气曝气技术、抽出-处理技术、可渗透反应墙^[18-19]。

2.3 修复技术优化指标赋值

依据已建立的地下水污染修复技术优化指标体系,利用 MCDA 模型中的 ELECTRE 法对地下水污染修复技术进行优化排序。

用 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ 记为可供选择的修复技术方案集, $x_1 \sim x_5$ 分别代表监测自然衰减技术、原位化学氧化、空气曝气技术、抽出-处理等技术、多级强化地下水修复技术;用 $Y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}, y_{i4}, y_{i5}, y_{i6}, y_{i7}\}$ 记为第 i 个修复方案各属性值的集,分别为运行成本、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;由 Y_{ij} 记为第 i 个方案第 j 个属性的值。

依据相关文献[15-17]以及现场经验数据,对初筛后 5 种地下水修复技术方案的成熟性、时间条件及资金条件进行综合对比,并分析了各种技术的适应性。对 5 种修复技术方案中的各指标属性进行赋值,决策矩阵如表 1 所示。

表 1 地下水污染修复技术方案优化指标属性值决策矩阵
Table 1 Groundwater pollution remediation plan optimization index attribute value decision matrix

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
运行成本/万元	207	420	340	624	486
后期处理费用/万元	150	750	800	650	600
修复周期/a	6	2	3	1	2
修复效率/%	60	85	80	95	90
水文地质适用性	ii	ii	iii	ii	i
污染物有效性	ii	iii	iii	i	i
对生态环境及居民的影响	I	III	II	II	I

注:表中 i 表示水文地质适用性和污染物有效性最好,值越大适用性越差,有效性越低。表中 I 表示对生态环境及居民的影响最小,值越大影响越大。

考虑到如果使用各指标本身属性值,不利于比较,因此需进行属性值的归一化。上述指标属性可分为 2 种类型,即成本型和效益型。指标体系中的

7 项指标中,运行成本、后期处理费用、修复周期、对生态环境及居民的影响 4 项指标为成本型,修复效率、水文地质适用性、污染物有效性为效益型。此外,单位的不一致也会影响到计算过程,不利于比较各属性,因此需要通过线性变换予以规范。具体如下:

对于效益型指标,可令 $Z_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_i^{\text{Max}}}$, $Y_i^{\text{Max}} = \max_i Y_{ij}$, Y_i^{Max} 是决策矩阵第 i 行中最大元素,所以有 $0 \leq Z_{ij} \leq 1$;对于成本型指标,属性值越小越好,可令 $Z_{ij} = 1 - \frac{Y_{ij}}{Y_i^{\text{Max}}}$,同样也有 $0 \leq Z_{ij} \leq 1$ 。经处理,结果见表 2。

表 2 地下水污染修复技术方案优化指标属性值归一化结果
Table 2 Groundwater pollution remediation plan optimization index property values normalized results

指标	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
运行成本	0.668	0.327	0.455	1	0.221
后期处理费用	0	0.5	0.467	0.567	0.6
修复周期	0	0.667	0.5	0.834	0.667
修复效率	0.632	0.894	0.842	1	0.947
水文地质适用性	0.333	0.333	0	0.333	0.667
污染物有效性	0.333	0	0	0.667	0.667
对生态环境及居民的影响	0.667	0	0.333	0.333	0.667

2.4 修复技术优化指标权重的确定

利用 MCDA 模型中的层次分析模块,对各属性指标($Y_1, Y_2 \cdots, Y_7$)进行权重赋值($\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_m$),将地下水修复技术优化作为层次分析的目标层(A);将指标体系中的经济效益(B_1)、技术指标(B_2)、社会效益(B_3)作为层次分析的资源层(B);将各属性指标作为层次分析的元素层(C),是目标能否实现的更为具体的标准。通过组织相关领域的 9 位专家召开研讨会,获得各因素的相对权重。专家根据自身专业背景的经验判断,对同一层次的限制因素或评价因素进行两两比较,根据重要性做出标度判断,然后构成两两比较矩阵。计算得出的各因素的平均相对权重,如表 3 和表 4 所示。通过一致性检验 $CR < 0.1$,表明具有满意的一致性。从表 3 可见,经济效益、技术指标、社会效益 3 因素权重分别为 0.104 7,0.637 0,0.258 3。

表 3 目标层(A)与制约层(B)判断矩阵表
Table 3 Judgment matrix table of target layer A and control layer B

A	B ₁	B ₂	B ₃	W _i	λ _{max}	CR
B ₁	1	1/5	1/3	0.104 7		
B ₂	5	1	3	0.637 0	3.038 5	0.033 1
B ₃	3	1/3	1	0.258 3		

表 4 各制约层判断矩阵表

Table 4 Judgment matrix table of each control layer

B ₁	C ₁	C ₂	W _i	λ _{max}	CR
C ₁	1	1	0.5	2	0
C ₂	1	1	0.5		

B ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	W _i	λ _{max}	CR
C ₃	1	1/3	3	3	0.230		
C ₄	3	1	7	7	0.607	4.008	0.003
C ₅	1/3	1/7	1	1	0.081		
C ₆	1/3	1/7	1	1	0.081		

B ₃	C ₇	W _i	λ _{max}	CR
C ₇	1	1	1	0

根据目标层(A)与制约层(B)及各制约层的判断矩阵结果进行层次总排序,一致性比例 CR = 0.003 < 0.10,表明具有满意的一致性,层次总排序结果有效。权重结果表明,在地下水修复技术优化中,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 7 项属性所占的权重依次为 0.052,0.052,0.146,0.387,0.052,0.052,0.258。

2.5 优化计算过程及结果

设 A = (a_{ij})为该化工厂地下水修复技术优化的决策矩阵,a_{ij}表示第 i 个方案在第 j 个目标下经规范化后的属性值。A_i 为第 i 个方案在各目标下的属性值,A_i = X_i 也可表示第 i 个方案。目标权重向量 W = (ω₁,ω₂,⋯,ω_m)。将 2.3 和 2.4 所得的数据汇总在表格中(见表 5)。

首先,设 C_{kl} = {j | a_{kj} ≥ a_{lj}},D_{kl} = {j | a_{kj} ≤ a_{lj}}。C_{kl}称为方案 A_k对方案 A_l的优势集,即方案 A_k的属性值分量大于或等于方案 A_l对应分量的标号集合。D_{kl}称为方案 A_k对方案 A_l的劣势集,劣势集为优势集的补集。

1)计算协调矩阵。根据多准则决策分析方法(MCDA)中的消去和选择转化法定义 c_{kl} = ∑_{j∈C_{kl}} w_j 为

方案 A_k 相对于方案 A_l 的优势指数(其中 ∑_{j=1}ⁿ w_j = 1)。c_{kl}越大反映了 A_k 优于 A_l 的可能性越大。c_{kl} = 0 则 A_k 不可能优于 A_l,c_{kl} = 1 则 A_k 肯定优于 A_l。根据 c_{kl}建立协调矩阵:

$$c(i,j) = \begin{vmatrix} - & 0.411 & 0.411 & 0.362 & 0.310 \\ 0.637 & - & 0.689 & 0.104 & 0.198 \\ 0.589 & 0.362 & - & 0.310 & 0.052 \\ 0.690 & 0.948 & 0.948 & - & 0.585 \\ 0.948 & 0.948 & 0.948 & 0.467 & - \end{vmatrix}$$

2)计算非协调矩阵:

$$d_{kl} = \frac{\max_{j \in D_{kl}} |\omega_j(a_{kj} - a_{lj})|}{\max_{j \in J} |\omega_j(a_{kj} - a_{lj})|}$$

d_{kl}称为方案 A_k 相对于方案 A_l 的劣势指数。式中分子为劣势集中标号所对应 2 方案的加权属性值之差中的最大值,而分母为各目标中对应 2 方案的加权属性值之差的最大值。求得非协调矩阵:

$$d(i,j) = \begin{vmatrix} - & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.511 & - & 0.766 & 1 & 1 \\ 0.668 & 1 & - & 1 & 1 \\ 0.801 & 0.520 & 0.682 & - & 0.976 \\ 0.670 & 0.317 & 0.701 & 1 & - \end{vmatrix}$$

c_{kl}只含权重信息,而 d_{kl}表示加权属性之间的大小差距,不仅含有权重信息,而且还有方案属性信息。所以劣势指数与优势指数并无互补性。d_{kl}反映了 A_k 劣于 A_l 那部分处于劣势的程度,d_{kl}越小就意味着 A_k 可能劣于 A_l 的程度越小。

3)求修正型非一致矩阵及修正型加权合计矩阵。根据文献[18]的论述,重新定义了非一致性矩阵,其求法如下所示。

$$d(i,j)^* = [d_{ij}^*]_{n \times m}, d_{ij}^* = 1 - d_{ij} \quad (1)$$

将非一致性矩阵加以修正,使得修正型非一致性矩阵中的元素和一致性矩阵中的元素相同,其值越大,代表偏好程度越高。因此,可以利用一致性矩阵和修正型非一致性矩阵中对应位置的元素相乘,便可得到以下的修正型加权合计矩阵 E。

$$E = [e_{ij}]_{n \times m}, e_{ij} = c_{ij}d_{ij}^* \quad (2)$$

根据公式(1)、(2)可求得:

$$d^*(i,j) = \begin{vmatrix} - & 0.411 & 0.057 & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.716 & - & 0 & 0 \\ 0.395 & 0.802 & 0.611 & - & 0 \\ 0.811 & 0.968 & 0.860 & 0.716 & - \end{vmatrix}$$

表 5 多准则决策的属性值

Table 5 Attribute values of multiple criteria decision

A_i	$a_{ij}\omega_i$						
	$\omega_1 = 0.052$	$\omega_2 = 0.052$	$\omega_3 = 0.146$	$\omega_4 = 0.387$	$\omega_5 = 0.052$	$\omega_6 = 0.052$	$\omega_7 = 0.258$
A_1	0.668	0	0	0.632	0.333	0.333	0.667
A_2	0.327	0.5	0.667	0.894	0.333	0	0
A_3	0.455	0.467	0.5	0.842	0	0	0.333
A_4	0	0.567	0.834	1	0.333	0.667	0.333
A_5	0.221	0.6	0.667	0.947	0.667	0.667	0.667

$$e(i,j) = c(i,j) \cdot d^*(i,j)$$
$$= \begin{vmatrix} - & 0.169 & 0.023 & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.259 & - & 0 & 0 \\ 0.273 & 0.760 & 0.579 & - & 0 \\ 0.769 & 0.918 & 0.815 & 0.334 & - \end{vmatrix}$$

4)求净优势值。研究人员^[19]于1976年提出了净优势值概念^[19]。其定义如下：

$$c_k = \sum_{i=1}^m e_{ki} - \sum_{j=1}^m e_{jk} \tag{3}$$

c_k 称为方案 X_k 的净优势值。

c_k 为方案 X_k 对其他方案的优势指数之和减去其他方案相对 X_k 的优势指数之和,反映了 X_k 在方案集中所处优势程度。若 c_k 越大则方案 X_k 在方案集中就越具有优势。根据上述公式5-8可求得: $c_1 = 0.850$ 、 $c_2 = -2.106$ 、 $c_3 = -1.158$ 、 $c_4 = 1.878$ 、 $c_5 = 2.863$ 。

5)排序。根据各方案的加权合计净优势值 c_k 进行排序,得出各方案的优劣顺序,根据各方案的加权合计净优势值进行排序 $c_5 > c_4 > c_1 > c_3 > c_2$,如图4所示,得到最终各方案由优到劣的排序为 $X_5 \geq X_4 \geq X_1 \geq X_3 \geq X_2$ 。

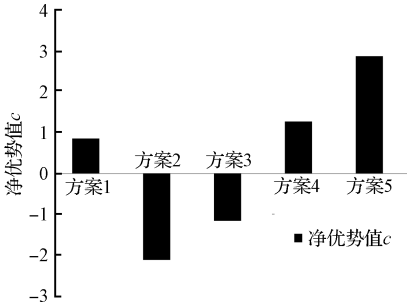


图 4 净优势值地下水修复技术优化排序结果

Fig. 4 Optimization sort the results based on the net value of the advantages worth of repair techniques

上述排序结果表明:净优势值 c_5 、 c_4 、 c_1 都为正值,明显大于 c_2 、 c_3 ,因此在该化工厂蒸发池高风险污染区5种地下水修复技术中可渗透性反应墙技

术(PRBs)、抽出-处理(pump-treat)与监测自然衰减技术(MNA)为较为理想的修复方案。

2.6 修复技术优化方案的确定

从修复技术优化排序结果可以看出,可渗透反应墙技术在5种修复技术中为最优。但每一种修复技术都存在其优点及局限性,而受污染地下水地区的受污染状况并非单一物质,且地质水文条件也令方法的使用受到限制。目前该区域内的地下水主要污染是苯系物,修复区域大,采用多种技术联合修复,实现快速、高效的治理。综合考虑该化工厂污染场地特征以及地下水治理要求,结合多准则决策分析对5种备选修复技术的分析,得出最佳方案为:对于高污染区域采用抽出-处理技术+可渗透反应墙联合修复,对于低污染区域采用自然衰减监测技术。技术路线如图5所示。

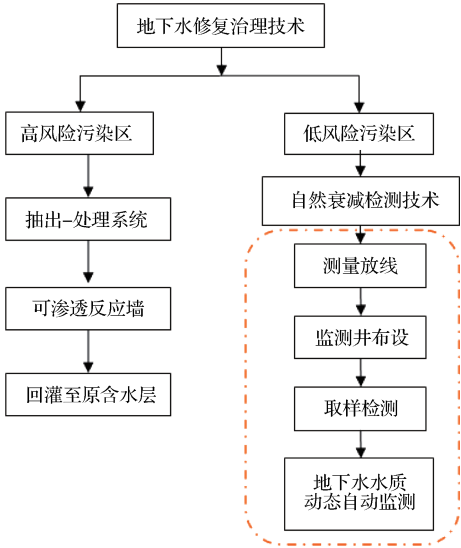


图 5 地下水修复治理技术路线图

Fig. 5 Groundwater repair management technology roadmap

该场地部分区域受污染的地下水污染程度较重,重污染区域需采取主动修复技术进行修复。蒸发池内土壤为砂质土,渗透性较好,对于地下水抽出处理较为有利,通过工程设计对整个场地进行抽水

井统一规划能够保证对全场地污染地下水的抽出,在抽出场地污染地下水后,对其进行氧化处理。

蒸发池地下水经抽出-处理技术处理之后,经布水管道进入 PRBs 装置中,经过物理化学进一步反应降解之后,回灌至地下水含水层。PRBs 采用以氧化材料(过硫酸盐缓释材料)、吸附材料(活性沸石和氧化锰)和还原材料(Fe^0 与反硝化微生物)为主复合缓释层物料,根据地表处理的污水量和污染物的种类,现场调配、安装,均匀铺设。

对于低浓度区域采用监测自然衰减技术。针对场地地层结构、水文地质特点等场地基本信息,并结合历史数据初步判断地下水中污染物的变化规律,掌握污染物是否自然降解。

3 结 论

1) 将建立的基于多准则决策分析的地下水污染修复优化技术方法体系,应用于沙漠地区污染场地地下水修复技术最优方案的制定,既克服了 AHP 在不易量化的指标上的主观性,又避免了 ELECTRE 法对指标权重的忽视,具有逻辑简单,决策信息利用充分,计算精炼的特点。可为决策者开展地下水污染修复工作提供一定的参考。

2) 基于多准则决策分析对 5 个备选方案的分析,结合该化工厂污染场地特征以及地下水治理要求,最终确定沙漠地区某化工厂地下水修复最佳方案为:对于高污染区域采用抽出-处理技术 + 可渗透反应墙联合修复;对于低污染区域采用监测自然衰减技术。

参 考 文 献

- [1] 何勇. 沙漠不是排污天堂. 绿色中国, **2014**(10): 9
HE Yong. The desert is not pollution heaven. Green China, **2014**(10): 9 (in Chinese)
- [2] 邹明英, 苑蓉, 张宇. 我国沙漠污染现状与治理措施. 中国环保产业, **2015**(6): 67-69
ZOU Mingying, YUAN Rong, ZHANG Yu. Status of desert pollution and control measures in China. China Environmental Protection Industry, **2015**(6): 67-69 (in Chinese)
- [3] 王玉秋, 钱茜. 浅谈地下水污染来源危害及防治对策. 山东环境, **2000**(S1): 204-205
- [4] AN Da, JIANG Yonghai, XI Beidou, et al. Analysis for remedial alternatives of unregulated municipal solid waste landfills leachate-contaminated groundwater. Frontiers of Earth Science, **2013**, 7(3): 310-319
- [5] 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. 环境工程学报, **2012**, 6(10): 3767-3773
LI Anjie, QUAN Xiangchun, WANG Yan, et al. Selection of contaminated site soil remediation technology based on PROMETHEE II. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2012**, 6(10): 3767-3773 (in Chinese)
- [6] GUITOUNI A., MARTEL J. M. Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. European Journal of Operational Research, **1998**, 109(2): 501-521
- [7] U. S. EPA. Annual superfund report to congress for fiscal 2004. [2016-03-01]. <http://www.epa.gov/oig/report/2005/20050826-EPA-350-R-05.001.pdf>
- [8] 罗程钟, 易爱华, 张增强, 等. POPs 污染场地修复技术筛选研究. 环境工程学报, **2008**, 2(4): 569-573
LUO Chengzhong, YI Aihua, ZHANG Zengqiang, et al. Remediation technology selection for POPs contaminated sites. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2008**, 2(4): 569-573 (in Chinese)
- [9] 李艳萍, 乔琦, 柴发合, 等. 基于层次分析法的工业园区环境风险评价指标权重分析. 环境科学研究, **2014**, 27(3): 334-340
LI Yanping, QIAO Qi, CAI Fahe, et al. Study on environmental risk assessment index weight of industrial park based on the analytic hierarchy process. Research of Environmental Sciences, **2014**, 27(3): 334-340 (in Chinese)
- [10] 徐克龙. 基于 ELECTRE 法的风险决策方法. 重庆工商大学学报(自然科学版), **2004**, 21(1): 7-10
XU Kelong. Risk decision-making method based on ELECTRE. Journal of CTUB (Natural Sciences Edition), **2004**, 21(1): 7-10 (in Chinese)
- [11] WANG Xiaoting, TRIANTAPHYLLOU E. Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods. Omega, **2008**, 36(1): 45-63
- [12] 袁星, 王亚炜, 魏源送, 等. 基于最佳管理实践的中新生态城面源污染控制措施优选研究. 环境工程学报, **2013**, 7(11): 4231-4235
YUAN Xing, WANG Yawei, WEI Yuansong, et al. Optimization of non-point source pollution control measures for Zhong-Xin eco-city in Tianjin based on best management practices. Chinese Journal of Environmental Engineering, **2013**, 7(11): 4231-4235 (in Chinese)
- [13] 申利娜, 李广贺. 地下水污染风险区划方法研究. 环境科学, **2010**, 31(4): 918-923
SHEN Lina, LI Guanghe. Groundwater pollution risk mapping method. Environmental Science, **2010**, 31(4): 918-923 (in Chinese)
- [14] 杨彦, 于云江, 王宗庆, 等. 区域地下水污染风险评价方法研究. 环境科学, **2013**, 34(2): 653-661
YANG Yan, YU Yunjiang, WANG Zongqing, et al. Study on the risk assessment method of regional groundwater pollution. Environmental Science, **2013**, 34(2): 653-661 (in Chinese)
- [15] 赵勇胜. 地下水污染场地风险管理 with 修复技术筛选. 吉林大学学报(地球科学版), **2012**, 42(5): 1426-1433
ZHAO Yongsheng. Risk management and screening of remediation technologies for contaminated groundwater site. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), **2012**, 42(5): 1426-1433 (in Chinese)
- [16] 谭勇. 基于数值模拟和响应面法的 PRB 设计研究. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, **2014**
TAN Yong. Research PRB design based on numerical simulation and response surface methodology. Changsha: Master Dissertation of Hunan University, **2014** (in Chinese)
- [17] 杨梅, 费宇红. 地下水污染修复技术的研究综述. 勘察科学技术, **2008**(4): 12-16
YANG Mei, FEI Yuhong. Research summary on groundwater pollution remediation technology. Site Investigation Science and Technology, **2008**(4): 12-16 (in Chinese)
- [18] KHAN F. I., HUSAIN T., HEJAZI R. An overview and analysis of site remediation technologies. Journal of Environmental Management, **2004**, 71(2): 95-122
- [19] SPIRA Y., HENSTOCK J., NATHANAIL P., et al. A European approach to increase innovative soil and groundwater remediation technology applications. Remediation Journal, **2006**, 16(4): 81-96