

# 工业污染场地修复技术的筛选

## ——以福建省泉州市某工业污染场地为例

吴敏

(福建省 197 地质大队地质环境研究院, 福建 泉州 362011)

**摘要:** [目的] 探究最适合的工业污染场地修复技术, 为类似污染场地修复技术的筛选及工程应用提供参考。[方法] 以福建省泉州市某工业污染场地为例, 结合场地的规划及位置特点总结出修复技术筛选矩阵, 采用层次分析法和逼近理想解排序法构建了污染场地修复技术筛选的指标体系进行筛选。[结果] 该方法筛选结果与研究场地的实际筛选结果相符。结合场地的规划及所处位置特点场地特点构建的筛选矩阵更能反映出场地的实际需求, 同时层次分析法(AHP)和逼近理想解排序法(TOPSIS)结合运用于修复技术筛选, 既可以克服层次分析法在不易量化指标上的主观性, 又可以避免逼近理想解排序法对评价指标权重的忽视。[结论] 采用层次分析法和逼近理想解排序法可有效筛选最优的污染场地修复技术。

**关键词:** 场地修复技术; 修复技术筛选矩阵; 层次分析法; 逼近理想解排序法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0195-05

中图分类号: X53

**文献参数:** 吴敏. 工业污染场地修复技术的筛选[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6):195-199. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.030. Wu Min. Remediation technique screening on industrial soil-polluted site[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6):195-199.

## Remediation Technique Screening on Industrial Soil-polluted Site — A Case Study of Industrial Soil-polluted Site in Quanzhou City of Fujian Province

WU Min

(Institute of Geology and Environment, 197 Geological Prospecting  
Team of Fujian Province, Quanzhou, Fujian 362000, China)

**Abstract:** [Objective] An optimal remediation technique for industrial contaminated sites was studied in order to provide a reliable approach for selection of remediation techniques in similar contaminated sites and engineering applications. [Methods] Taking an industrial contaminated site in Quanzhou City, Fujian Province as a case study, the matrix of the remediation technique selection was created according to its management plan and location. The combination of AHP(analytic hierarchy process) and TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution) was applied to build a remediation technique selection index system. [Results] This technique was verified with the actual screening outcome. The matrix that based on its location and management plan meets the actual needs easily. In addition, the application of both AHP and TOPSIS can not only overcome the issues of subjectivity of AHP in analyzing hard-to-quantify indices, but also avoid the shortcomings of TOPSIS that neglects index weights. [Conclusion] The application that combined the AHP with TOPSIS together could be effective in the selection of optimal remediation techniques for contaminated sites.

**Keywords:** site repair technology; selection matrix of remediation techniques; AHP; TOPSIS

污染场地修复技术类型多样, 包括土壤气体抽提、固定—稳定化、电力修复和淋洗修复等<sup>[1]</sup>。选择适宜的修复技术对经济、高效修复污染场地至关重要。在筛选修复技术过程中要考虑修复成本、修复周

期、土壤类型等多方面的因素。当前国内外在对技术进行筛选过程中主要有专家评价法、层次分析法(AHP)<sup>[2]</sup>、逼近理想解的排序方法(TOPSIS)<sup>[3]</sup>、生命周期评价法(LCA)<sup>[4]</sup>和环境技术评价法

收稿日期: 2018-05-23

修回日期: 2018-06-07

资助项目: 福建省国土资源厅 2017 年科技项目“泉州市工矿场地污染修复关键技术研究”(闽国土资文[2017]182 号)

第一作者: 吴敏(1990—), 男(汉族), 福建省莆田市人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事场地污染修复方面的研究。E-mail: 409979547@qq.com。

(EnTA)<sup>[5-7]</sup>。其中 TOPSIS 近年来多被用于多指标的综合评价中<sup>[8]</sup>,TOPSIS 是基于归一化后的原始数据矩阵,找出有限方案中的最优方案和最劣方案,然后分别计算诸评价对象与最优方案和最劣方案的距离,获得各评价对象与最优方案的相对接近程度,以此作为评价优劣的依据<sup>[9-10]</sup>。然而 TOPSIS 虽然对有多项评价指标的方案选择上有较好的客观性,但是该方法在评价指标的权重分配问题上有一定的缺陷,评价结果会随着评价指标的权重增加而改变而导致存在较大的误差<sup>[11]</sup>。而 AHP 很好地融合定性定量评价,通过计算得到不同评价指标的权重,避免了在评价过程中因个人的主观偏好而影响最终的评价结果。因此本文以福建省泉州市某工业污染场地为研究对象,根据《2014 年污染场地修复技术目录(第一批)》《污染场地修复技术筛选指南》和《污染场地修复技术方案编制导则》总结污染场地修复技术筛选矩阵,根据污染场地实际情况联合运用层次分析法和逼近理想解排序法进行修复技术筛选研究,为类似污染场地提供参考。

## 1 修复技术筛选

### 1.1 污染场地背景与现状调查

泉州市某工业场地因不符合当地的城市建设规划,被列入泉州市近海水环境综合治理重点项目。该工业场地于 2008 年 8 月全面关停,2012 年完成了所有厂房的拆除,规划为商业、办公、居住及公共配套设施用地。经场地污染初步调查、补充调查、风险评估确认场地土壤污染特征因子主要有锌(39.9~17 880 mg/kg)、铜(69~10 779 mg/kg)、镍(16.9~8 443 mg/kg)、铬(36~5 941 mg/kg),污染较严重,污染土壤深度为 2.0 m,受污染土壤层主要成分为硬杂质、中粗砂、黏土,透水性强,渗透系数为  $2.70 \times 10^{-3} \sim 3.60 \times 10^{-2}$ ,污染面积 8 993 m<sup>2</sup>,污染土壤方量 17 986 m<sup>3</sup>。

### 1.2 修复技术筛选基本流程

不同的场地有不同的特点,我们要从技术的修复效果、可实施性、成本等方面考虑,结合场地的土壤类型、利用规范、使用功能等多方面综合比较进而筛选出潜在可行的修复技术,优先选择可以降低污染物毒性、迁移性和含量的成熟修复技术。本文污染场地修复技术筛选研究基本流程如图 1 所示。首先应根据调查和相关资料确定场地污染特征;然后根据污染物特点利用修复技术筛选矩阵进行初筛;再根据场地特点结合国内外研究现状建立污染场地修复技术筛选指标体系并构造相应的比较判断矩阵,采用层次分析法计算

各评价指标的权重;最后使用逼近理想解排序法对各修复技术进行理想解计算并进行最终的排序。

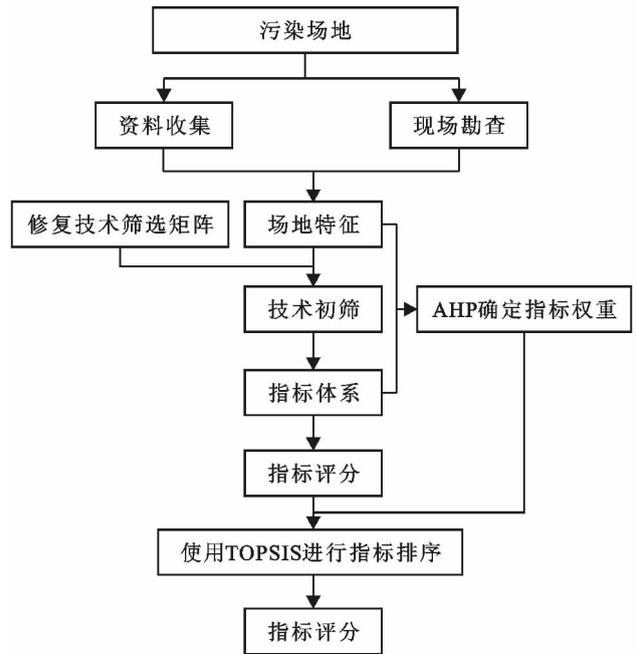


图 1 场地污染修复筛选流程图

### 1.3 修复技术筛选指标体系

筛选污染场地修复技术需考虑多重因素,要通过相关评价指标综合分析每种修复技术方能确定目标污染场地最适合的修复技术。根据各因素对修复技术的影响程度,选取可操作性、污染物去除率、费用、修复时间、技术成熟度、二次污染这 6 个指标建立修复技术筛选指标体系(说明:由于本次构造比较判断矩阵主要是根据场地实际情况和资料分析,有一定的主观性,因此筛选体系仅两层,减少误差)。如图 2 所示,第一层是目标层 A,第二层是指标层 B。

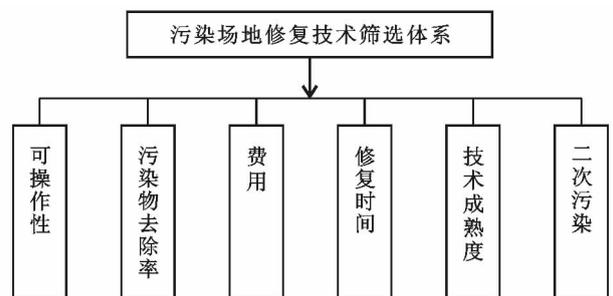


图 2 污染场地修复技术筛选体系

### 1.4 筛选指标权重确定方法

结合本场地的规划、所处位置特点对各指标之间的相对重要性做出标度判断,以 1—9 的标度对判断结果进行量化,量化标度含义如表 1 所示,构造的判断矩阵  $A-B$  如表 2 所示。

表 1 指标相对重要性量化标度

标度	含 义
1	表示 2 个元素相比,具有同样的重要性。
3	表示 2 个元素相比,前者比后者稍重要。
5	表示 2 个元素相比,前者比后者明显重要。
7	表示 2 个元素相比,前者比后者极其重要。
9	表示 2 个元素相比,前者比后者强烈重要。
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值。

注:若元素  $i$  和元素  $j$  的重要性之比为  $a_{ij}$ ,那么元素  $j$  与元素  $i$  的重要性之比为  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。

表 2 A-B 判断矩阵

A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>
B <sub>1</sub>	1	1/4	2	1/4	1	1/3
B <sub>2</sub>	4	1	4	4	2	1
B <sub>3</sub>	1/2	1/4	1	1/4	1/2	1/8
B <sub>4</sub>	4	1/4	4	1	2	1/2
B <sub>5</sub>	1	1/2	2	1/2	1	1/3
B <sub>6</sub>	3	1	8	2	3	1

层次分析法的计算步骤为:

(1) 对 A-B 判断矩阵的每一列元素进行归一化处理,计算公式如下:

$$b_{ij}' = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}$$

式中: $b_{ij}$ ——元素  $i$  和元素  $j$  的重要性之比;  $b_{ij}'$ —— $b_{ij}$  归一化结果。

(2) 将每一列经归一化处理后的判断矩阵按行相加为:

$$b_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}'$$

式中: $b_i$ ——第  $i$  列归一化后结果之和。

(3) 对向量  $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$  归一化处理,得到判断矩阵的属性权重向量:

$$\omega_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}$$

式中: $\omega_i$ —— $b_i$  归一化结果。

(4) 通过判断矩阵及其权重向量计算最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(B\omega)_i}{n\omega_i}$$

式中: $\lambda_{\max}$ ——权重向量最大特征根;  $B$ ——A-B 判断矩阵;  $(B\omega)_i$ ——第  $i$  个特征根。

(5) 对构造的判断矩阵进行一致性检验,判断其是否为一致矩阵。

① 一致性指标计算公式:  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ , CI 值越

大则表明矩阵偏离一致性程度越大,CI 值越小则表明判断矩阵一致性越好。

② 通过查表得到相应的平均一致性指标 RI。对  $n=1,2,\dots$ , Saaty<sup>[12]</sup> 给出了 RI 值。

③ 利用 CI 和 RI 计算判断矩阵的一致性比例:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

当 CR 值小于 0.1 时,说明该判断矩阵的一致性可以接受。经计算判断矩阵 A-B 的 CR 值为 0.046 1,小于 0.1,该矩阵的一致性可以接受,确定各指标的权重  $W_{\text{总}} = (0.079, 0.300, 0.047, 0.169, 0.099, 0.306)^T$ 。

### 1.5 修复技术评价及排序方法

TOPSIS 的具体计算步骤为:

(1) 构建规范化的决策矩阵。设一决策矩阵为  $Z = \{z_{ij}\}$ ,由  $Z$  可以构成规范化的决策矩阵  $Z'$ ,其元素为  $z_{ij}'$ ,且有

$$z_{ij}' = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

式中: $z_{ij}$ ——第  $i$  个方案对应的第  $j$  个评价指标的评价值,是由决策矩阵给出。

(2) 构造规范化的加权决策矩阵  $X = \{x_{ij}\}$ ,利用层次分析法计算获得的权重  $W_{\text{总}} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ ,其元素  $x_{ij}$ :

$$x_{ij} = \omega_j \cdot z_{ij}' \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

式中: $\omega_j$ ——第  $j$  个目标对应的的权重;  $x_{ij}$ ——是加权后的  $z_{ij}'$ 。

(3) 确定理想解  $x_j^*$  和负理想解  $x_j^-$ 。如果规范决策矩阵  $X$  中元素  $x_{ij}$  值越大表示方案越好,则

$$x_j^* = \{\max_j x_{ij} \mid j=1,2,\dots,m\} \quad (3)$$

$$x_j^- = \{\min_j x_{ij} \mid j=1,2,\dots,m\} \quad (4)$$

(4) 计算每个方案到理想解的距离  $d_i^*$  和到负理想点的距离  $d_i^-$ 。

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_j^*)^2} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - x_j^-)^2} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (6)$$

(5) 计算各技术的综合评价指数  $C_i^*$ :

$$C_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (7)$$

按每个方案的相对接近度  $C_i^*$  的大小排序,排在第 1 位的方案即为最佳的修复方案。 $C_i^*$  案计算公式的特点是:当某个修复方案在某一个评价指标有比较高的评分时,它会拉大最劣方案的距离;同样的,如果某个方案在某一个指标具有较低的评分时,它会拉

大与最优方案的距离。这样就可以将各个方案的优劣势最大化地凸显,然后决策者就可以根据场地的实际需求权衡不同方案的优劣势,从而选择最适合的修复技术进行修复。

## 2 污染场地修复技术筛选案例研究

### 2.1 修复技术初筛

根据场地的调查检测情况,该污染场地主要污染

物为重金属,查阅场地修复技术筛选矩阵(表 3)可知可采用的修复技术主要有挖掘—填埋、固化/稳定化技术、土壤洗脱、化学氧化/还原和土壤植物修复技术。由于场地已被规划为商用地,因此要求修复周期短,此外该地未来规划还有居住地存在,因此在污染物去除率及二次污染控制方面要求比较高,反而是修复成本这一指标要求不高,根据这些特点结合相关资料分析构造了比较判断矩阵(表 2)。

表 3 场地修复技术筛选矩阵

修复技术	挥发性非卤代有机物	挥发性卤代有机物	半挥发性非卤代有机物	半挥发性卤代有机物	燃料类	重金属
挖掘—填埋	2	2	1	1	1	1
固化/稳定化	3	3	1	1	1	1
土壤气相抽提	1	1	2	2	2	3
土壤淋洗	3	3	1	1	1	1
土壤洗脱	3	3	1	1	1	1
热脱附	1	1	1	1	1	3
焚烧	1	1	1	1	1	3
水泥窑协同处置	1	1	1	1	1	3
化学氧化/还原	2	2	1	1	1	1
生物通风	1	2	4	4	1	3
生物堆	1	1	4	4	1	3
植物修复	3	3	2	2	2	1

注:1 代表非常实用或性能较好;2 表示较为适用或性能适中;3 表示不适用或效果较差;4 表示待定,其效果取决于具体参数。

### 2.2 修复技术评价排序

根据《2014 年污染场地修复技术目录(第一批)》《污染场地修复技术筛选指南》《污染场地修复技术方案编制导则》对各个修复技术的各项指标进行评分,每项指标 1~5 分,数值越高则表示该修复技术的该项指标越好。针对本场地的 6 个备选修复技术进行评分构成最初决策矩阵如表 4 所示。

根据最初决策矩阵数值,按照公式(1)进行归一化处理,得到规范化矩阵(表 5)。

表 4 最初决策矩阵

项目	可操作性	污染物去除率	费用	修复时间	技术成熟度	二次污染
挖掘—填埋	5	5	5	2	5	3
固化/稳定化	5	5	4	5	5	5
土壤淋洗	3	3	4	5	4	4
土壤洗脱	3	4	2	4	4	4
化学氧化/还原	5	4	3	5	5	5
植物修复	5	3	5	1	5	5

表 5 规范化决策矩阵

项目	可操作性	污染物去除率	费用	修复时间	技术成熟度	二次污染
挖掘—填埋	0.460	0.500	0.513	0.204	0.435	0.279
固化/稳定化	0.460	0.500	0.410	0.510	0.435	0.464
土壤淋洗	0.276	0.300	0.410	0.510	0.348	0.371
土壤洗脱	0.276	0.400	0.205	0.408	0.348	0.371
化学氧化/还原	0.460	0.400	0.308	0.510	0.435	0.464
植物修复	0.460	0.300	0.513	0.102	0.435	0.464

将层次分析法计算的权重指标结果  $W_{\text{总}} = (0.079, 0.300, 0.047, 0.169, 0.099, 0.306)^T$ ,按照等公式(2)进行加权计算,得到加权规范阵(表 6)。

加权规范阵依次按照式(3)~(7)进行理想解  $x_j^*$

和负理想解  $x_j^-$  计算,然后根据相应的  $x_j^*, x_j^-$  计算  $d_i^*, d_i^-$ 。

最后根据  $d_i^*, d_i^-$  计算  $C_i^*$  值,将计算结果进行整理得到最终排序结果(表 7)。

表 6 加权规范化决策矩阵

项目	可操作性	污染物去除率	费用	修复时间	技术成熟度	二次污染
挖掘—填埋	0.036	0.150	0.024	0.034	0.043	0.085
固化/稳定化	0.036	0.150	0.019	0.086	0.043	0.142
土壤淋洗	0.022	0.090	0.019	0.086	0.035	0.114
土壤洗脱	0.022	0.120	0.010	0.069	0.035	0.114
化学氧化/还原	0.036	0.120	0.015	0.086	0.043	0.142
植物修复	0.036	0.090	0.024	0.017	0.043	0.142

表 7 最终评价排序结果

项目	$d_i^*$	$d_i$	$C_i^*$	排名
挖掘—填埋	0.077	0.066	0.463	5
固化/稳定化	0.005	0.109	0.957	1
土壤淋洗	0.069	0.075	0.522	4
土壤洗脱	0.050	0.066	0.569	3
化学氧化/还原	0.032	0.096	0.752	2
植物修复	0.091	0.061	0.401	6

### 2.3 最终方案确定

由评价结果可以看出,6 个备选修复技术得分在 0.401~0.957 之间,修复技术优劣的排序为:固化/稳定化、化学氧化/还原、土壤洗脱、土壤淋洗、挖掘—填埋、植物修复。其中,最理想的修复技术为固化/稳定化。在场地实际修复过程中,治理单位选择了固化/稳定化作为该场地修复技术,并且从技术路线、系统构成和主要设备、关键技术参数、修复周期估算、工程量与成本估算分别对原位固化/稳定化、原地异位固化/稳定化和异地异位固化/稳定化 3 种方案进行比选,最终确定采用异地异位固化/稳定化作为最终的修复方案。

## 3 结论

(1) 通过对场地环境调查及风险评估的资料解读,通过场地的未来规划及特点,判定该场地对修复周期的要求较高,对修复费用要求相对较低,因此对评价修复技术的 6 项指标进行标度判断时结合前人的经验的基础上对修复周期及修复费用进行重要性调整,构造了相应的比较判断矩阵,并通过层次分析法得出各项指标所占权重,得出的结果更能体现场地的修复需求,更具实用性。

(2) 在得出各项指标权重的基础上,利用逼近理想解排序法对各修复方法进行评分排序,结果显示该污染工业场地的最佳修复技术选择为固化/稳定化技术,最终的筛选结果与实际应用情况一致。

(3) 层次分析法与逼近理想解排序法互有长短,

但是二者又相辅相成,互补长短,配合运用于污染场地修复技术筛选效果明显,可为有关组织或部门在决策时提供有效的工具。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 谷庆宝,郭建林,周友亚,等. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨[J]. 环境科学研究,2008,21(2): 197-202.
- [2] 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(12):322-326.
- [3] 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.
- [4] 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(2/3): 129-137.
- [5] 司继涛,李冬,刘晋文,等. 危险废物处理处置技术评价方法研究[J]. 环境科学研究,2005,18(S1):39-42.
- [6] 刘平,邵世云,王睿,等. 环境技术验证评价体系研究与案例应用[J]. 中国环境科学,2014,34(8):2161-2166.
- [7] 汪翠萍,贾晨夜,王莹,等. 我国环境技术评价制度解析及发展趋势分析[C]//北京:中国环境科学学会学术年会论文集:第一卷,2012.
- [8] 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.
- [9] Chen S J, Hwang C L. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making[M]. Berlin: Heidelberg Springer, 1992.
- [10] Park K S, Lee K S, Yun S E, et al. Extended methods for identifying dominance and potential optimality in multi-criteria analysis with imprecise information[J]. European Journal of Operational Research, 2001,134(3):557-563.
- [11] 甘勇,李天生. 基于 AHP 和 H-TOPSIS 的火灾应急方案评估模型研究与应用[J]. 郑州轻工业学院学报:自然科学版,2009,24(3):1-5.
- [12] Saaty T L. The analytic hierarchy process, planning, priority setting, resource allocation [M]. New York: McGraw-Hill, 1980.