核电子学与探测技术

Nuclear Electronics ＆ Detection Technology

放射性污染土壤修复技术筛选方法研究

罗 恺 ，李 洋，赵杨军 ，顾志杰

( 中国辐射防护研究院，太原 030006 )

摘要:介绍了放射性污染土壤修复技术筛选方法。研究建立了放射性污染土壤修复技术筛选流程， 提出采用层次分析方法和混合型级别高于方法计算初步筛选和二次筛选的重要度和偏离度。通过该方 法可利用构建的放射性污染土壤修复技术筛选系统计算得到最终筛选结果，为放射性污染土壤的修复 技术选取提供参考。

关键词：HB-SIR方法;修复技术筛选；筛选流程 中图分类号: TL942+．1 文献标志码: A

放射性污染土壤修复技术的筛选需要考虑 多种参数**，**通常以专家判断为主**，**具有较强的主 观性。层次分析方法利用判断矩阵构建评价标 准**，**结合专家评分得到指标层和准则层权重指 标**;**混合型级别高于方法**(** HB-SIR**)** 可处理目标 与优势劣势距离评价问题**，**特别是属性值之间 的关系难以通过定量关系构建的问题**，**可以采 用 HB-SIR 方法通过建立模糊数的方式予以解 决**，**也克服直接进行评分而带来筛选结果的主 观性。课题以层次分析方法和混合型级别高于 方法为基础**，**提出放射性污染土壤修复技术筛 选流程**，**建立初步筛选和二次筛选指标体系以 及重要度和偏离度计算方法。通过初步筛选和 二次筛选排序结果加权获得最终修复技术筛选 结果**，**可以客观判断为原则处理放射性污染土

收稿日期： 2018－07－28

基金 项 目： 环保公益性行业科研项目( 201509074) 资助。

作者简介： 罗恺 ( 1990—) ，男，四川乐山人，研究 实 习 员，主要从事核设施环境影响评价工作。 文章编号： 0258-0934( 2019) 4-0430-06 壤修复技术问题。

1 方法简介 常用多目标决策方法包括层次分析法

**(** AHP**) ［**1**］**、逼近于理想值的排序法**(** TOPSIS**)［**2**］**、 折中排序法**(** VIKOR**) ［**3**］**、偏好顺序结构评价方 法**(** PROMETHEE**) ［**4**］**以及优势劣势排序方法 **(** SIR **) ［**5**］**。

**(** 1**)** AHP**:** 该法将决策问题按总目标、各层 子目标、评价准则和具体备选方案的顺序进行 层次划分**，**构建并利用判断矩阵获得方案的总 排序。该法具有将复杂问题简化为层次模型的 特点**，**但该法有低评价值被高评价值掩盖的 可能。

**(** 2**)** TOPSIS**:** 该法通过衡量方案与各项指 标参数的正、负理想值的距离**，**对方案优先次序 排序。方法弱化指标权重影响，可采用AHP方 法构建决策矩阵弥补缺陷。

**(**3**)** VIKOR**:** 该法以 TOPSIS 为基础**，** 通过 计算备选方案与最佳理想方案的距离来确定备 选方案的优先程度**［**4**］**。 VIKOR 克服 TOPSIS 忽 略正负理想方案之间相关性的问题**，** 适合于精

确数分析**，**可以用于确定放射性污染土壤修复 技术初步筛选和二次筛选中各指标参数的偏离 度和优劣程度**，**但不适合处理在筛选中的区间 数、模糊数定性参数问题。

**(** 4 **)** PROMETHEE**:** 该法从 TOPSIS 衍生**，**通 过比较修复方案与准则之间的接近程度并采用 偏好函数来获得方案优先程度的决策方法**，**同 样适合处理精确数问题。

**(**5**)** 混合型级别高于方法**(** HB-SIR**) [**6**]:** 该 法是基于 PROMETHEE 提出的优势劣势排序 方法**，**适合处理包含定性和定量关系的决策问 题。土壤修复技术的筛选参数中**，**技术使用/运 行成本、可靠性等属于定量属性**，**可以采用精确 数或区间表示**;** 维修性、技术先进性和适用性属 于定性属性**，**可采用模糊数等表示。

根据放射性土壤修复技术指标参数和多目 标决策方法特点**，**在进行修复技术筛选决策时 需要满足以下条件**: (** 1**)** 评价修复技术各指标 相对权重**; (** 2**)** 计算污染场地实际参数与备选 修复技术最佳和最劣参数之间接近程度**; (** 3**)** 满足对区间数、模糊数以及定性参数的决 策评价分析。

2 筛选方法

2．1 初步筛选

初步筛选通过污染场地/土壤参数与土壤 修复技术数据库的对比剔除不适合污染场地的 修复技术。初步筛选中涉及污染场地信息参 数、植物修复参数和污染场地预算信息参数三 大类共15个参数指标，采用AHP方法建立初 步筛选指标体系**，**如图 1 所示。

|初步筛选 T目标层

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 放射性污染水平 | 污染土壤类型 | 放射性污染核素 | 污染土壤**PH** | 污染土壤湿度 | 土壤有机碳含量 | 土壤阳离子代换量 | 水力传导系数 | 植被覆盖率 | 土壤总**N**含量 | 土壤总**P**含量 | 黏土含量 | 粉粒含量 | 土壤修复预估时间 |
|  |  |  |  |  | W |  |  |  |  |  | E |  |  |

|污染场血信息(石] |植物修妥参数(石| |修复预莫信息他)卜-|准则层1

图 1 初步筛选指标体系

|  |
| --- |
| 土壤修复预估费用 |
|  |

指标匡~~|

初步筛选引入偏离度爲描述污染场地参 数与修复技术最佳参数的符合程度:

爲=xlOO% (1)

式中:巾为An -A32共15个指标参数对应的第*i* 种污染场地信息数据;咼为第*j*种修复技术下 对应数据库中修复技术的最佳技术指标结 合不同土壤修复技术的重要性以及偏离度得到 初步筛选结果。

2．2 二次筛选

经初步筛选获得适合污染场地的修复技 术，但受二次污染( B11) 和环境剩余容量( B12) 的环境成本(Bi)；技术成熟度(B21)、修复效率

**(B**22**)**、修复时间(B23**)**的技术成本(*B****2)；***职业 照射**(** B31**)** 和单位时间费用**(** B32**)** 的经济成本 **(B**3**)**在内的成本影响，需进行二次筛选从已满 足污染场地条件的修复技术中筛选出最适合的 修复技术。

二次筛选引入优劣程度参数**s**表示修复技 术参数与数据库数据对比结果如式**(** 2**) ，**对于需 要估计值离最高值更近的参数时使用式**(**3**)**。

s=(E0－Emin) /( Emax－E0) (2)

s' =( Emax－E0) /(E0－Emin) (3)

式中**：s**为预估值离修复技术参数最低值的优 劣程度;Emax为参数最高值;Emin为参数最低值**;**

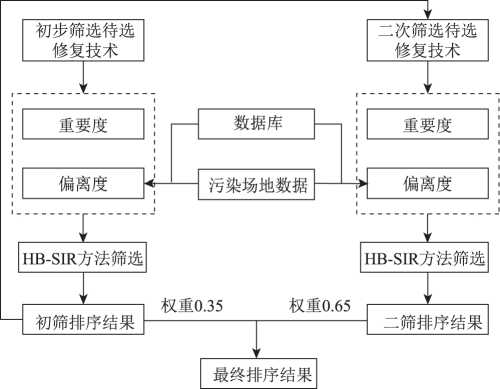
E0 为修复技术参数预估值。

2．3 筛选流程 度/优劣程度**，** 采用 HB-SIR 方法并将初步筛选

初步筛选和二次筛选分别根据数据库和污 和二次筛选结果按7**:**13 加权得到最终筛选结

染场地数据计算获得修复技术的重要度和偏离 果**，**筛选流程如图2 所示。

图 2 放射性污染土壤修复技术筛选流程



3 评估

3．1 重要度

放射性污染土壤修复技术筛选系统依据场 地调查所获得的污染场地信息、植物修复参数 以及修复预算信息与数据库中修复技术参数信 息进行比对**，** 剔除不适合污染场地条件的修复 技术完成初步筛选**，** 保留适合的修复技术从环 境、技术和经济效益三个方面进行二次筛选。

采用 AHP 获得准则层在目标层下的重要 度**：**W = (A”**,**2**,**3**)**=(0.581 5,0.309 0,0.109 5**),** 类似的获得指标层参数在对应准则之下的重要 度**：** W1 = **(** A11**,** A12**,** A13**,** A14**,** A15**,** A16**,** A17**,** A18 **)** = **(**0.232 6**,** 0.138 5**,** 0.232 6**,** 0.076 9**,** 0.138 5**,** 0.052 5**,**0.052 5**,** 0.075 9**),** W2=**(** A21**,** A22**,** A23**,** A24**,**A25**)**=**(**0.383 8**,** 0.189 0**,**0.189 0**,**0.119 1**,** 0.119 1**),**W3=**(** A31**,**A32**)** = **(** 0.5**,**0.5**)**。而在目 标层之下根据 w1 = **(** W1 T**,** W2T**,** W3T **)** W 获得初 步筛选 15 个指标的重要度**：**

w1=**(**0.135 3**,**0.080 54**,**0.135 3**,**0.044 72**,** 0.080 54**,**0.030 53**,**0.030 53**,**0.044 14**,**0.118 6**,** 0. 058 40**,** 0. 058 40**,** 0. 036 80**,** 0. 036 80**,** 0.054 75**,**0.054 75**)**。同样采用 AHP 获得二次 筛选的指标层在目标层下的重要度**：**

w2=**(**0.067 80**,**0.06780**,** 0.097 39**,**0.097 39**,** 0.09739**,**0.228 9**,**0.343 3**)**。

3．2 偏离度

3.2.1 初步筛选偏离度计算 在初步筛选过程中污染土壤类型和放射性 污染核素属于定性参数**,** 其余参数属于模糊定 量参数。 对定性参数**,** 采用定性偏离度 / 描述 与数据库中对应参数满足数目n与不满足数目 m比例，转化为语言变量后采用模糊数表示，见 表1,其中**:**/ = *m****：*** *n。*对于定量参数，由式(1**)**计 算可得初步筛选中各指标的偏离度。

表 1 初步筛选三角模糊数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 定量偏离度*E* | 定性偏离度 / | 语言变量( 等级) | 三角模糊数 |
| >300% | [m: 0] | 完全不符合/满足(I) | ( 0.000,0.000,0.167) |
| >300% | [5: 1] | 不符合/满足(H) | ( 0.000,0.167,0.333) |
| ( 100%,300%] | [2: 1] | 基本不符合/满足(皿) | ( 0.167,0.333,0.500) |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 定量偏离度*E* | 定性偏离度 / | 语言变量（ 等级） | 三角模糊数 |
| （ 50% ，100%] | [1 : 1] | 待定/满足（N） | （ 0.333，0.500，0.667） |
| （ 10% ，50%] | [1 : 2] | 基本符合/满足（V） | （ 0.500，0.667，0.833） |
| （ 5% ，10%] | [1 : 5] | 符合/满足（M） | （ 0.667，0.833，1.000） |
| [0 ，5%] | [0 : n] | 完全符合/满足（W） | （ 0.833，1.000，1.000） |

3．2．2 二次筛选偏离度计算

对于二次筛选中二次污染、环境剩余容量 和技术成熟度为定性指标并划分为五个等级。 对于定量参数**，**采用专家评分方式**:**评分专家不 应少于5人，专家评分结果分别计算平均值E 和标准方差S,得到评分数据离散系数**：**

“ =（S/E） X100% （4）

将“I。％ = 10%设为离散限值，当“Si。％时， E取所有专家评分平均值作为对应项的值**；**当 “ M“io% 时,E取去除专家在相应修复技术下对 应参数评分的最大值和最小值后剩余值得平 均值。

用f、、和n分别表示在污染场地下的预 估修复费用、预估修复时间、预估修复职业照射 和预计修复效率与某修复技术下最高/最低修 复费用、最短/最长修复时间、最强/最弱职业照 射及最低/最高修复效率之间的距离。 由式 **（**2**）**和式**（**3**）** 分别计算对应的优劣程度值。 采 用集合k = ***{****f****,*** *t****,*** *Y****，****n****}***表示单位面积修复费用 等各项距离比**，**二次筛选三角模糊数见表2。

表 2 二次筛选三角模糊数

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 距离比集合 k | 语言变量（ 等级） | 三角模糊数 |
| <0 | 差（ i） | （0.000，0.000，0.250） |
| （1.5,+s ） | 及格（ n） | （ 0.000，0.250，0.500） |
| （ 0.5，1.5] | 中5） | （0.250，0.500，0.750） |
| （ 0.1，0.5] | 良（N） | （0.500，0.750，1.000） |
| [0，0.1] | 优（ V ） | （0.750，1.000，1.000） |

3．3 综合评价

转换后的模糊数采用 HB-SIR 方法进行筛 选评价**,** 获得初步筛选和二次筛选结果。

当初步筛选Ni或n M1或二次筛选Nj M1 时，将对应修复技术剔除**；**当初步筛选“皿或*M* 3或二次筛选“口或皿*三3*时，将对应修复技术剔 除**;**当初步筛选Nm **V**M1或二次筛选NmW*三* 1时,修复技术采用HBWIR多目标决策方法进 行初步筛选和二次筛选排序得分R1*、****，***筛选 结果按w R1**, *Rj*** = {0.35, 0.65**}**加权，以优势 流表示最终筛选结果**，**得到的最大值表示最适 合污染场地的修复技术**，**说明可以采用该技术 对污染场地土壤去污修复。

其中Ni表示初步筛选或二次筛选等级i出 现频数。

4 软件设置

4．1 筛选系统平台

根据放射性污染土壤修复技术筛选决策方 法**，**开发筛选系统开发平台**，**实现放射性污染场 地的信息、放射性核素及放射性污染测量结果 等信息的输入**，**起到将筛选结果可视化的作用。 4．2 数据库

放射性污染土壤修复技术筛选数据库主要 由**:** 放射性污染土壤修复技术表、场地信息表和 生物修复技术备选植物表三个部分组成**，** 其中 放射性污染土壤修复技术表主要包含初步筛选 和二次筛选各种修复技术对应的最佳参数指 标**，** 生物修复技术备选植物表为植物修复技术 提供备选植物**，** 场地信息表储存已完成筛选的 污染场地数据。 放射性污染土壤修复技术表和 场地信息表如图3、图4所示。

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ID | 修复技术 | 最佳放射性 污染水平 | 最佳 土壤pH | 最佳土 壤湿度 | TOC | CEC | 最佳水利 传导系数 | 植被 覆盖率 | 最佳修 复时间 | 修复效率 | 最佳土 壤类别 | 最佳放射 性核素 |
| 1 | 铲土去污 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 2 | 深翻客土 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 3 | 悬浮移土 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 4 | 玻璃固化 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 5 | 水泥固化 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 6 | 沥青固化 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 7 | 土壤淋洗 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 8 | 可剥离膜法 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 9 | 电动力学 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 10 | 热处理 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 11 | 植物修复 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |

图3 (a)放射性污染土壤修复技术表(初步筛选)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ID | 修复技术 | 单位面积 最低费用 | 最低修 复效率 | 最低修 复时间 | 最低职 业照射 | 单位面积 最咼费用 | 最高修 复效率 | 最长修 复时间 | 最强 职业照射 | 二次污染 | 环境剩 余容量 | 技术 成熟度 |
| 1 | 铲土去污 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 2 | 深翻客土 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 3 | 悬浮移土 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 4 | 玻璃固化 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 5 | 水泥固化 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 6 | 沥青固化 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 7 | 土壤淋洗 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 8 | 可剥离膜法 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 9 | 电动力学 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 10 | 热处理 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |
| 11 | 植物修复 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |

图 3 (b) 放射性污染土壤修复技术表(二次筛选)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ID | 污染场地名称 | 修复技术1 | 修复技术2 | 修复效率 | 最低修 复费用 | 最高修 复费用 | 污染面积 | 放射性 污染水平 | 职业人员 照射剂量 | 修复植物 |
| 1 | 爱德华国家工程实验室 | 土壤淋洗 | 分离 | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 |  |
| 2 | 蒙特克莱尔•西奥兰治 | 土壤淋洗 | 植物修复 | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 |  |
| 3 | 阿拉斯加超级基金场址 | 土壤淋洗 | 植物修复 | 0 | 300 | 450 | 0 | 0 | 0 |  |
| 4 | 汉福特场址 | 玻璃固化 |  | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 |  |
| 5 | 橡树岭国家实验室 | 电动力学 |  | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 |  |
| 6 | 福岛第一核电厂 | 铲土去污 | 深翻客土 | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 |  |
| 7 | 切尔诺贝利核电厂 |  |  | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 |  |

图 4 场地信息表

5 结论

本课题研究了常用多目标决策方法和放射 性污染土壤特点**,** 建立放射性污染修复技术筛 选流程和筛选指标体系**,**通过层次分析方法计 算得到初步筛选和二次筛选指标参数重要度分 别为**(** 0.135 3**,** 0.080 54**,** 0.135 3**,** 0.044 72**,** 0.080 54**,**0.030 53**,**0.030 53**,**0.044 14**,**0.118 6**,** 0. 058 40**,** 0. 058 40**,** 0. 036 80**,** 0. 036 80**,** 0.054 75**,**0.054 75**)** 和**(** 0.067 80**,** 0.067 80**,** 0.097 39**,**0.097 39**,**0.097 39**,**0.228 9**,**0.343 3**),** 将场地参数与数据库参数进行对比并建立偏离 度体系**,**采用混合型级别高于方法将偏离度转 化为三角模糊数获得修复技术最终排序结果。

构建放射性污染土壤修复技术筛选平台**，**实现 筛选的自动化。

参考文献:

1. Lin Z C ，Yang C B. Evaluation of machine selection by the AHP method[J]. Journal of Materials Proces­sing Technology，1996，57: 3-8.
2. Dymova L，Sevastjanov P ，Tukhonenko A. A direct interval extension of TOPSIS method [J]. Expert Systems with Applications，2013，40: 41-47.
3. Wang Y， Zhang Y ，Yang W H. Selection of low- temperature phrase-change materials for thermal en­ergy storage based on the VIKOR method[J]. Energy

Technology，2015，3: 84-89.

4] Opricovic S，Tzeng G H. Extended VIKOR Method in Comparison with Outranking Methods[J]. European Journal of Operational Research，2007，178 ( 2 ) : 514-529.

5李安婕，全向春，王龑，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.

6] Yu X，Xu Z，Chen Q. A method based on preference degrees for handling hybrid multiple attribute decision making problems [J]. Expert Systems with Appli- cations，2011，38( 4) : 3147-3154.

Method Research for Screening Remediation  
Technologies of Radioactive Contaminated Soil

LUO Kai**，** LI Yang**，** ZHAO Yang－jun**，** GU Zhi－jie

( China institute for radiation protection ，Taiyuan 030006 ，China)

Abstract**:** This article introduces the method for screening the remediation technologies of radioactive contaminated soil. The screening procedure has been established based on the research**，** while the importance degree and deviation degree has also been suggested by Analytic Hierarchy Process and hybrid superiority and inferiority ranking method for calculating the primer and second screening results. According to the method recommended above**，** the screening result can be provided by the screening system for remediation technologies of radioactive contaminated soil and referred to choose the adaptive technology .

Key words**:** HB-SIR methodology**;** screening the remediation technology**;** screening process