

# 沥青路面就地热再生清洁化施工评价

郭小宏<sup>1</sup>,邓莉<sup>1</sup>,周明旭<sup>2</sup>

(1.重庆交通大学 经济与管理学院,重庆市 400074;2.重庆交通大学 土木学院,重庆市 400074)

**摘要:**为便于决策者掌握不同就地热再生机组在施工过程中的技术水平以及对环境的影响程度,该文提出基于博弈组合赋权和物元可拓模型下的沥青路面就地热再生清洁化施工评价方法。首先,在施工技术水平与环境的基础上,对就地热再生施工进行多方面分析,提出清洁化施工概念,并采用文献查询与实地调研构建清洁化施工的评价指标体系;其次,为保证评价过程的科学合理性,将博弈论引入层次熵中综合确定权重,采用改进物元可拓模型计算不同就地热再生施工技术的清洁化等级;最后,进行综合分析并提出相关建议。以巢湖市某沥青路面预防性养护工程(就地热再生技术)为例对多个方案进行清洁化等级评定并对比分析,结果表明:热风循环加热技术施工方案的清洁化等级为I级,在保证施工质量的同时,更符合绿色发展理念。

**关键词:**就地热再生;清洁化施工;博弈论;层次熵;改进物元可拓

**中图分类号:**U418

**文献标志码:**A

## 0 引言

截至2022年末,中国公路养护里程535.03万km,占公路总里程的99.9%<sup>[1]</sup>。随着养护需求的增大,公路行业提出了多种沥青路面养护工艺。其中就地热再生技术具有交通干扰小、开放交通快等特点,适用于大流量交通条件下沥青路面的养护,同时可实现旧沥青混合料(RAP料)的100%循环利用,节约大量沥青和集料等自然资源,具有显著的节能减排效益<sup>[2]</sup>。在路面养护众多施工技术中,沥青路面就地热再生技术逐渐受到关注。

党的十九大报告提出了加快生态文明建设、推进循环经济与绿色经济发展、建设美丽中国的战略部署<sup>[3]</sup>。因此,资源循环利用与环保是目前公路养护管理过程中的重要目标。但传统的就地热再生技术在施工过程中存在有害气体排放、周边植被烘烤等作业环境问题,其技术应用同时受到制约。所以对就地热再生施工技术研究,也应重视施工过程中所带来的环境问题,从而实现环保与质量共赢。

对于就地热再生的研究,以往的学者主要集中在

在其材料与加热技术方面:Ali等<sup>[4]</sup>通过分析路面中4种混合料的原有性能,评价了就地热再生过程中再生剂和骨料筛分的最佳用量;李雪连等<sup>[5]</sup>通过数字图像处理技术识别就地热再生新旧集料的细观结构,通过正交试验分析了其各项指标的变化规律与可靠性;Flores等<sup>[6]</sup>、Han等<sup>[7]</sup>、李雪毅等<sup>[8]</sup>均对就地热再生加热过程中的加热效果进行了评估。对于就地热再生技术评价方面,国内外极少有学者考虑到环境的影响。但有部分学者对绿色公路评价有一定的研究,可供本文参考。吴思<sup>[9]</sup>采用层次分析和灰色系统综合评价方式对就地热再生项目进行了综合评价;李邦武等<sup>[10]</sup>、屠书荣等<sup>[11]</sup>、陈学平等<sup>[12]</sup>分别从施工的不同阶段构建了公路建设绿色评价指标体系并确定了评分标准与权重。同时,山西、北京等多个省市针对绿色公路评价出版了地方标准<sup>[13-14]</sup>,构建了一个较为客观、完备的绿色公路施工评价指标体系,但其与就地热再生实际施工情况并不完全相符,本文不能直接引用,但仍具备重要参考价值。

为提高沥青路面就地热再生技术在施工过程中施工单位对环保的重视程度,本文根据绿色发展理念,提出清洁化施工——即在保证施工质量与安全

收稿日期:2023-07-13(修改稿)

基金项目:2020年中国公路学会标准编制计划项目《公路沥青路面清洁化就地热再生施工技术指南》(第二批)(编号:公学函字[2021]86号)

作者简介:郭小宏,男,教授.E-mail:1060468089@qq.com

的基础上,最大限度减少就地热再生施工过程对社会环境和自然环境造成负面影响的施工活动。并从就地热再生施工现场实际情况出发,筛选评价指标、构建就地热再生清洁化施工评价体系。

在评价的过程中,本文将博弈论引入层次熵中组合赋权,既消除了权重的主观性与客观性偏差,又最大限度地减少了信息的损失。同时,本文在采用物元可拓模型对现有的沥青路面就地热再生技术进行清洁化等级评定时,采用非对称贴近度原则代替传统的物元可拓模型中最大隶属度原则,用以解决最大隶属度原则下的失效问题。最后进行综合评价,为决策者在多种公路沥青路面就地热再生施工技术选择时,提供相应的建议与参考。

## 1 评价指标体系及评价等级划分

沥青路面养护过程中,为了提供给公众一个合格的服务与产品,对于就地热再生施工应符合国家相关法律法规的强制性要求。因此,在进行清洁化等级评定前,应在保证就地热再生施工技术方案满足强制性指标的基础上,再对多个就地热再生技术方案进行清洁化施工评价。

### 1.1 强制性指标体系

本文强制性指标体系的构建考虑施工质量、环境与安全3个方面要求:路面养护施工过程中养护质量必须满足技术规范要求并达到验收标准;施工环境保护要符合《中华人民共和国环境保护法》与《中华人民共和国环境噪声污染防治法》,施工过程中严格按环保检测制度执行,验收时应根据环保验收措施保证验收合格;同时,养护施工应做好确保安全施工的技术及环境保护组织措施,人员上岗前做好安全宣传,并定期进行安全检查与考核,确保施工现场的人员财产安全。因此本文构建了一个囊括3个一级指标,9个二级指标的就地热再生施工强制性指标体系,如图1所示。

### 1.2 非强制性评价指标体系

对于满足强制性指标后的技术方案可以进行就地热再生清洁化评价。评价过程中建立非强制性评价指标体系,应在考虑施工技术以及不同就地热再生施工技术未来的发展能力的同时,不可忽视就地热再生实际施工所带来的资源消耗与环境问题。因

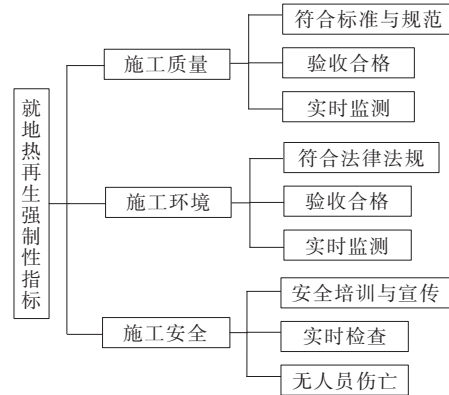


图1 就地热再生施工强制性指标体系

此,本文从决策者在对多方案比选的角度出发,将就地热再生清洁化评价体系分为资源节约、环境保护、施工技术、创新与发展4大要素。通过实地考察、咨询专家以及查阅相关文献<sup>[10-12]</sup>,最终构建了一个包含4个一级指标、14个二级指标的就地热再生清洁化施工评价体系,如表1所示。

### 1.3 构建清洁化等级

根据相关文献查阅、实地检测情况以及咨询相关专家意见,将就地热再生施工清洁化等级划分为{Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级}4个区间,等级越小表示清洁化程度越高。为保证指标区间划分的客观性,其中定量指标主要根据公路养护行业相关规范以及考虑实地检测情况确定其区间数值,定性指标是根据咨询相关领域的专家确定区间数值。具体数值见表2。

## 2 确定指标权重

### 2.1 层次分析法确定权重

AHP(层次分析法)是一种层次化的、系统的极具主观性的分析方法,服务于复杂决策问题,为其提供简便的决策方法<sup>[15]</sup>。应用AHP方法计算就地热再生各清洁化评价指标的权重步骤如下:

(1) 构建判断矩阵。采用1~9尺度理论根据各层级要素间的重要程度分别构建两两成对比较矩阵。

(2) 归一化处理。根据统一标准计算各元素的权重。

(3) 一致性检验。判别判断矩阵是否具有可靠性。

(4) 对待评方案的权重进行排序。

表 1 就地热再生评价指标 A

一级指标 B	二级指标 C	属性	性质	指标测度
资源节约 B <sub>1</sub>	废料利用率 C <sub>11</sub>	+	定量	旧路面材料回收利用量与总废弃量的比值
	能源节约利用 C <sub>12</sub>	+	定性	依据实际情况,咨询专家打分
	有害气体排放 C <sub>21</sub>	+	定量	利用烟气分析仪测定,并计算通过热风箱上方与通过集中排放口的有害物质平均含量的比值
环境保护 B <sub>2</sub>	热气外溢 C <sub>22</sub>	-	定量	利用风速仪测定就地热再生机组中加热机、拌和器、耙松机的外侧每秒通过的最大风速
	厂界温度 C <sub>23</sub>	-	定量	利用温枪测定纵向与设备最外侧零部件相距一定距离所形成厂界的平均温度
	噪声污染 C <sub>24</sub>	-	定量	利用分贝仪测定纵向与机组相距一定距离所形成厂界的平均分贝
	粉尘防治 C <sub>25</sub>	+	定性	依据实际情况,咨询专家打分
	养护质量 C <sub>31</sub>	+	定量	根据《高速公路养护质量评定标准》计算得分
施工技术 B <sub>3</sub>	养护周期 C <sub>32</sub>	+	定量	实际养护周期除以一般标准(5年)
	标准化施工 C <sub>33</sub>	+	定性	依据《高速公路沥青路面养护标准化技术指南》,咨询专家打分
	行车干扰措施 C <sub>34</sub>	+	定性	依据实际情况,咨询专家打分
	管理信息化 C <sub>35</sub>	+	定性	依据实际情况,咨询专家打分
创新与发展 B <sub>4</sub>	品质提升 C <sub>41</sub>	+	定性	依据实际情况,咨询专家打分
	公众满意程度 C <sub>42</sub>	+	定性	根据施工对周边民众的影响程度、公路养护后民众行驶的满意程度打分

注:表中属性“-”表示该评价指标为负向指标,“+”表示正向指标。

表 2 清洁化评估指标分级

二级指标	单位	I 级	II 级	III 级	IV 级
废旧材料利用率	%	90~100	80~90	70~80	60~70
能源节约利用	分	90~100	80~90	70~80	60~70
有害气体排放	mg/m <sup>3</sup>	0~1	1~2	2~3	3~4
热气外溢	m/s	0~1	1~2	2~3	3~4
厂界温度	℃	0~15	15~30	30~40	40~45
噪声污染	dB	0~20	20~40	40~55	55~70
粉尘防治	分	90~100	80~90	70~80	60~70
养护质量	分	90~100	80~90	70~80	60~70
养护周期		1.3~1.4	1.2~1.3	1.1~1.2	1.0~1.1
标准化施工	分	90~100	80~90	70~80	60~70
行车干扰措施	分	90~100	80~90	70~80	60~70
管理信息化	分	90~100	80~90	70~80	60~70
技术创新与研发	分	90~100	80~90	70~80	60~70
公众满意程度	分	90~100	80~90	70~80	60~70

## 2.2 熵权法确定权重

熵权法是根据某个指标值的差异程度来确定权重,它仅依赖于现实数据自身的离散性,其结果极具客观性<sup>[16-17]</sup>。而传统的熵权法在计算信息熵时,特征比重可能出现 0 值,本文参考贡力等<sup>[18]</sup>提出的方法进行了相应的改进。其步骤如下:

(1) 标准化处理。采用极限法计算。对原始数

据进行线性转换,其中  $a_j$  表示第  $j$  个指标  $c_j$  的基准值,即就地热再生技术能保证正常施工的最低限度或行业标准的最低要求。 $b_j$  表示第  $j$  个指标  $c_j$  的目标值,即就地热再生技术可能达到的较优值。

对正向指标的处理:

$$x_j = \begin{cases} 0 & c_j \leq a_j \\ \frac{c_j - a_j}{b_j - a_j} & a_j < c_j < b_j \\ 1 & b_j \leq c_j \end{cases} \quad (1)$$

对负向指标的处理:

$$x_j = \begin{cases} 0 & a_j \leq c_j \\ \frac{c_j - a_j}{b_j - a_j} & b_j < c_j < a_j \\ 1 & c_j \leq b_j \end{cases} \quad (2)$$

(2) 根据信息熵的定义计算  $j$  指标的信息熵。

为解决特征比重出现 0 值,在评价指标标准化后都加上 0.1,如式(3)所示:

$$p_j = (x_j + 0.1) / \sum_{j=1}^n (x_j + 0.1) \quad (3)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n p_j \ln p_j \quad (4)$$

(3) 根据信息熵计算  $j$  指标的熵权值。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum e_j} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

### 2.3 博弈组合赋权

层次分析法是根据决策者的主观经验赋予权重,未考虑客观原因,而熵权法是根据客观数据计算权重,忽略了评价者的主观意图。因此,主观赋权法和客观赋权法都存在一定弊端,采用博弈组合赋权法可以最大限度地减少信息的损失<sup>[19]</sup>。

由层次分析法的计算可得主观权重向量为  $W_1 = (w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1m})^T$ ,熵权法的计算可得客观权重向量为  $W_2 = (w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2m})^T$ 。则主观权重和客观权重的任意线性组合估计量为:

$$\hat{W} = \partial_1 W_1^T + \partial_2 W_2^T \quad (\partial_1, \partial_2 > 0) \quad (6)$$

根据博弈论的理论,可计算  $\partial_i$  的值,从而达到组合权重  $\hat{W}$  与  $W_i$  的离差最小。即根据最优化一阶导数条件得方程组为:

$$\begin{pmatrix} W_1^T W_1 & W_1^T W_2 \\ W_2^T W_1 & W_2^T W_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial_1 \\ \partial_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_1^T W_1 \\ W_2^T W_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

求得  $\partial_1, \partial_2$ , 并归一化:

$$\partial_i^* = \frac{\partial_i}{\sum_{i=1}^2 \partial_i} \quad (8)$$

最终获得博弈组合权重:

$$\hat{W}^* = \partial_1^* W_1^T + \partial_2^* W_2^T \quad (9)$$

## 3 构建清洁化等级可拓评价模型

传统的物元可拓模型判别准则采用的是最大隶属度原则,具有一定的缺陷。该方法在计算评价等级时会采用近似处理,有时无法包含待评物元完备的信息,会降低评价结果的准确性<sup>[20]</sup>。为有效解决最大隶属度失效原则,使评价更具普适性与合理性,本文在传统物元可拓理论的基础上,先将经典域物元矩阵与待测评物元矩阵归一化处理,再利用非对称贴近度<sup>[19,21-22]</sup>原则代替传统物元矩阵的最大隶属度原则。

### 3.1 确定待测物元、经典域与节域

(1) 确定待测评物元矩阵。确定待测评同特征物元矩阵  $R_e$ , 其中  $N_e$  为第  $e$  ( $e=1, 2, 3$ ) 个待评价就地热再生技术方案,  $C_1 \sim C_m$  为就地热再生技术评价下同特征物元的  $m$  个评价指标,  $c_{ij}$  表示  $i$  方案下第  $j$  个特征(指标)的特征值。因此其表达式为:

$$R_e = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \\ C_1 & c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ C_2 & c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(2) 确定节域与经典域物元矩阵。本文将清洁化等级分为4级,  $N_k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 代表第  $k$  个清洁化等级,  $c_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 为第  $i$  个就地热再生技术评价指标,  $v_{ki}$  为  $k$  等级下第  $i$  个指标的取值范围, 其范围为  $(a_{ki}, b_{ki})$ 。即确定节域为:

$$R_k = \begin{bmatrix} N_k & c_1 & v_{k1} \\ & c_2 & v_{k2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_m & v_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_k & c_1 & (a_{k1}, b_{k1}) \\ & c_2 & (a_{k2}, b_{k2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{kn}, b_{kn}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$G_i$  表示就地热再生方案的4个清洁化等级,  $v_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$  表示指标  $C_j$  的取值范围。即就地热再生清洁化等级的经典域矩阵为:

$$R_t = \begin{bmatrix} G & G_1 & G_2 & G_3 & G_4 \\ C_1 & v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} \\ C_2 & v_{21} & v_{22} & v_{23} & v_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & v_{m1} & v_{m2} & v_{m3} & v_{m4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & G_1 & G_2 & G_3 & G_4 \\ C_1 & (a_{11}, b_{11}) & (a_{12}, b_{12}) & (a_{13}, b_{13}) & (a_{14}, b_{14}) \\ C_2 & (a_{21}, b_{21}) & (a_{22}, b_{22}) & (a_{23}, b_{23}) & (a_{24}, b_{24}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & (a_{m1}, b_{m1}) & (a_{m2}, b_{m2}) & (a_{m3}, b_{m3}) & (a_{m4}, b_{m4}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 3.2 规格化待测评物元与经典域

将待测评物元与经典域矩阵归一化处理, 能解决因评价指标的数值超出节域的范围而导致关联函数无法得到计算结果<sup>[23]</sup>。其步骤如下:

对于正向指标归一化:

$$x'_i = \begin{cases} 0 & x_i \leq \min x_i \\ \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} & \min x_i < x_i < \max x_i \\ 1 & \max x_i \leq x_i \end{cases} \quad (13)$$

对于负向指标归一化:

$$x'_i = \begin{cases} 0 & \min x_i \leq x_i \\ \frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i} & \min x_i < x_i < \max x_i \\ 1 & x_i \leq \max x_i \end{cases} \quad (14)$$



式中:  $x_i$  为评价指标的现实值;  $\max x_i$ 、 $\min x_i$  分别为第  $i$  个评价指标下全部现实值的最大值、最小值。

通过以上公式对待测评物元矩阵和其经典域、节域矩阵进行标准化处理后得:

$$R'_e = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 \\ C_1 & c'_{11} & c'_{12} & c'_{13} \\ C_2 & c'_{21} & c'_{22} & c'_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & c'_{m1} & c'_{m2} & c'_{m3} \end{bmatrix},$$

$$R'_l = \begin{bmatrix} G & G_1 & G_2 & G_3 & G_4 \\ C_1 & v'_{11} & v'_{12} & v'_{13} & v'_{14} \\ C_2 & v'_{21} & v'_{22} & v'_{23} & v'_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & v'_{m1} & v'_{m2} & v'_{m3} & v'_{m4} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} G & G_1 & G_2 & G_3 & G_4 \\ C_1 & (a'_{11}, b'_{11}) & (a'_{12}, b'_{12}) & (a'_{13}, b'_{13}) & (a'_{14}, b'_{14}) \\ C_2 & (a'_{21}, b'_{21}) & (a'_{22}, b'_{22}) & (a'_{23}, b'_{23}) & (a'_{24}, b'_{24}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & (a'_{m1}, b'_{m1}) & (a'_{m2}, b'_{m2}) & (a'_{m3}, b'_{m3}) & (a'_{m4}, b'_{m4}) \end{bmatrix}$$

计算标准化处理后的待测评物元与各经典域的距离:

$$\rho_j(c'_i) = \left| c'_i - \frac{a'_{ij} + b'_{ij}}{2} \right| - \frac{b'_{ij} - a'_{ij}}{2} \quad (15)$$

### 3.3 确定加权关联度和清洁化等级

(1) 待测评物元  $N_e$  下各一级指标  $B_r$  的关联度:

$$K_j(B_r) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n \hat{W}_i^* \rho_j(c'_i) \quad (16)$$

(2) 待测评物元  $N_e$  的关联度向量:

$$K_j(N_e) = W_B^T * K_j(B_r) \quad (17)$$

(3) 确定清洁化等级:

$$\hat{K}_j(N_e) = \frac{K_j(N_e) - \min K_j(N_e)}{\max K_j(N_e) - \min K_j(N_e)} \quad (18)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \times \hat{K}_j(N_e)}{\sum_{j=1}^m \hat{K}_j(N_e)} \quad (19)$$

式中:  $j^*$  为  $N_e$  方案的特征值, 表示其与相邻等级的贴近程度。确定  $N_e$  方案的等级为  $\max K_j(N_e)$ 。

## 4 实例应用

以巢湖市某沥青路面就地热再生养护项目为例, 该项目采用清洁化就地热再生技术, 项目施工过

程均符合国家强制性指标要求。通过查阅相关文献、实地检测、室内试验以及专家打分的方法, 获得 3 种不同就地热再生施工方案(热风循环加热方案 A, 对照方案 B、对照方案 C)的评价指标数据如表 3 所示。

表 3 评价指标数据

一级指标	二级指标	单位	属性	就地热再生技术方案		
				方案 A	方案 B	方案 C
资源节约 $B_1$	废旧材料利用率 $C_{11}$	%	+	100	100	100
	能源节约利用 $C_{12}$	分	+	95	90	80
	有害气体排放 $C_{21}$	mg/m <sup>3</sup>	-	1.34	1.88	2.86
环境保护 $B_2$	热气外溢 $C_{22}$	m/s	-	0.2	0	3.2
	厂界温度 $C_{23}$	℃	-	33	26	40
	噪声污染 $C_{24}$	dB	-	30	27	31
	粉尘防治 $C_{25}$	分	+	95	80	80
施工技术 $B_3$	养护质量 $C_{31}$	分	+	94.24	95.1	90
	养护周期 $C_{32}$		+	1.2	1.2	1.1
	标准化施工 $C_{33}$	分	+	90	85	87
	行车干扰措施 $C_{34}$	分	+	90	85	87
	管理信息化 $C_{35}$	分	+	90	90	80
创新与发展 $B_4$	品质提升 $C_{41}$	分	+	95	83	83
	公众满意程度 $C_{42}$	分	+	95	90	80

### 4.1 计算权重

(1) AHP 计算权重

采用层次分析法计算其主观权重, 并通过咨询专家意见构建目标层与准则层的判断矩阵如下:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 1 & 1 & 1/9 & 1/9 \\ 9 & 9 & 1 & 5 \\ 7 & 5 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 & 3 & 7 \\ 1 & 1 & 5 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 & 1/3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 3 & 1 & 5 \\ 1/7 & 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_3 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 7 & 7 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 3 & 3 \\ 1/3 & 3 & 1 & 5 & 7 \\ 1/7 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1 \\ 1/7 & 1/3 & 1/7 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_4=\begin{pmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{pmatrix}$$

本文利用 Super Decision 软件进行层次分析法中的各层次排序与一致性检验,根据检验结果均小于 0.1 表明其通过一致性检验,最终得到准则层与目标层的主观权重。限于篇幅,本文只截取层次总排序与一致性检验过程如图 2~5 所示。



图 2 清洁化评价指标 AHP 模型

图 3 准则层指标间的重要性打分

得到目标层主观权重： $W_B=(0.05, 0.054, 0.661, 0.235)^T$ , 其一致性检验结果为  $0.0724 < 0.1$ , 通过一致性检验。

图 4 一致性检验

图 5 主观权重

(2) 熵权法计算权重

运用改进的熵权法计算客观权重。首先根据表 3, 构造矩阵  $X=(x_{ij})_{14 \times 3}$ 。即:

$$X=\begin{pmatrix} 100 & 100 & 100 \\ 95 & 90 & 80 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 95 & 90 & 80 \end{pmatrix}$$

根据式(1)、(2)将  $X$  标准化得:

$$X'=\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.875 & 0.75 & 0.5 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0.875 & 0.75 & 0.5 \end{pmatrix}$$

由表 2 可知: 其中基准值  $(a_j)=(60, 60, 4, \dots, 60)^T$ 、目标值  $(b_j)=(100, 100, 0, \dots, 100)^T$ 。

最后根据式(3)~(5)计算得熵权值见表 4。

(3) 确定综合权重

根据式(6)~(8)计算可知:  $\partial_1=0.38, \partial_2=0.72$ , 归一化得  $\partial_1^*=0.34, \partial_2^*=0.66$ , 然后根据式(9)计算就地热再生清洁化评价博弈组合权重见表 4。

4.2 清洁化等级评定

(1) 确定经典域与节域

根据式(10)~(12)可得经典域、节域、待测评物元矩阵分别为:

表 4 各项指标权重

指标	主观权重	客观权重	组合权重	指标	主观权重	客观权重	组合权重
$C_{11}$	0.250	0.000	0.086	$C_{31}$	0.509	0.040	0.201
$C_{12}$	0.750	1.000	0.914	$C_{32}$	0.119	0.602	0.435
$C_{21}$	0.366	0.226	0.274	$C_{33}$	0.052	0.046	0.048
$C_{22}$	0.349	0.370	0.363	$C_{34}$	0.271	0.046	0.124
$C_{23}$	0.078	0.243	0.186	$C_{35}$	0.049	0.266	0.191
$C_{24}$	0.164	0.049	0.089	$C_{41}$	0.250	0.455	0.384
$C_{25}$	0.043	0.112	0.088	$C_{42}$	0.750	0.545	0.616

$$R_k = \begin{pmatrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ C_{11} & (100, 90) & (90, 80) & (80, 70) & (70, 60) \\ C_{12} & (100, 90) & (90, 80) & (80, 70) & (70, 60) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{42} & (100, 90) & (90, 80) & (80, 70) & (70, 60) \end{pmatrix}$$

$$R_t = \begin{pmatrix} N_t & C_{11} & (60, 100) \\ & C_{12} & (60, 100) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_{42} & (60, 100) \end{pmatrix}$$

$$R_e = \begin{pmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 \\ C_{11} & 100 & 100 & 100 \\ C_{12} & 95 & 90 & 80 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{42} & 95 & 90 & 80 \end{pmatrix}$$

## (2) 无量纲化处理

根据式(13)、(14)对经典域与待测评物元矩阵

无量纲化处理:

$$R'_k = \begin{pmatrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} \\ C_{11} & (0.75, 1) & (0.50, 0.75) & (0.25, 0.75) & (0, 0.25) \\ C_{12} & (0.75, 1) & (0.5, 0.75) & (0.25, 0.5) & (0, 0.25) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{42} & (0.75, 1) & (0.5, 0.75) & (0.25, 0.5) & (0, 0.25) \end{pmatrix}$$

$$R_e = \begin{pmatrix} N & N_1 & N_2 & N_3 \\ C_{11} & 1 & 1 & 1 \\ C_{12} & 0.875 & 0.750 & 0.500 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{42} & 0.875 & 0.750 & 0.500 \end{pmatrix}$$

## (3) 计算关联度与评价等级

根据式(15)、(16), 计算得一级指标关联度见表5。

表5 一级指标关联度

方案	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
A	(1.019, 0.977, 0.936, 0.894)	(0.999, 1.004, 0.992, 0.984)	(0.997, 0.999, 0.995, 0.986)	(1.021, 0.979, 0.938, 0.896)
B	(1.000, 0.996, 0.955, 0.913)	(0.998, 0.998, 0.993, 0.985)	(0.997, 1.000, 0.995, 0.987)	(0.989, 1.005, 0.970, 0.928)
C	(0.962, 0.996, 1.031, 0.951)	(0.984, 0.993, 0.100, 0.999)	(0.991, 0.997, 0.997, 0.993)	(0.963, 1.005, 0.995, 0.954)

根据式(17)计算方案A待测物元对各等级的关联度:

$$K(N_1) = (0.05, 0.054, 0.661, 0.235) * \begin{pmatrix} 1.019 & 0.977 & 0.936 & 0.894 \\ 0.999 & 1.004 & 0.992 & 0.984 \\ 0.997 & 0.999 & 0.995 & 0.986 \\ 1.021 & 0.979 & 0.938 & 0.896 \end{pmatrix} = (1.004, 0.994, 0.978, 0.960)$$

同理可得方案B、C的关联度见表6。

根据式(18)、(19), 计算可得评价结果如表6所示。

表6 就地热再生技术方案清洁化等级评定

技术方案	评价贴近度					$j^*$
	I	II	III	IV	最大值	
A	1.004	0.994	0.978	0.960	1.004(I)	3.272
B	0.995	1.001	0.987	0.969	1.001(II)	3.106
C	0.982	0.998	0.999	0.982	0.999(III)	2.532

根据表6各方案中评价贴近度的最大值, 可以得到各方案的清洁化等级, 根据计算 $j^*$ 可以知道其与相

邻等级的贴近程度。结果为方案A的清洁化等级属于一级倾向二级, 方案B的清洁化等级属于二级倾向一级, 方案C的清洁化等级属于三级略微倾向二级。因此, 本项目参评的3个施工方案的清洁化程度为方案A最高, 方案B、C次之。

## 5 结论

(1) 为加强沥青路面就地热再生施工过程中的环保意识, 本文在评价其施工方案时, 提出清洁化施工理念, 并在施工技术的基础上, 将就地热再生施工过程中对环境的影响作为评价中的一项重要指标。在评价过程中采用博弈组合赋权消除主观与客观性偏差, 最大限度地减少信息损失, 并采用改进物元可拓模型对就地热再生施工方案进行等级评定, 规避了传统物元可拓模型采用最大隶属度所带来的失效问题。最终对比发现采用热风循环系统的机组具有较好的清洁化水平。

(2) 相较于以往在项目完成后对某建筑产物的

绿色建筑评价<sup>[15,24]</sup>的不同在于,本文是针对就地热再生技术的实际施工情况提出的评价方法,更具客观性与实用性,同时,本文是根据对现有的多个就地热再生施工技术方案进行清洁化施工等级评定并综合分析,为决策者在多种公路沥青路面就地热再生施工技术比选时,提供可参考的比选方法。

(3) 由于相关研究较为匮乏以及就地热再生技术在中国的应用不够成熟,本文虽然提出了部分就地热再生施工对环境的影响指标,但仍然不够全面。同时,本文在计算权重时没有考虑到部分指标之间的影响关系。因此,在后续的研究中将根据持续的实地考察与查阅文献不断完善其评价指标体系,并提出改进方法。

#### 参考文献:

- [1] 交通运输部.2022年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2023-06-21)[2023-06-30][https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content\\_6887539.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content_6887539.htm).
- [2] 徐剑,黄颂昌,邹桂莲.高等级公路沥青路面再生技术[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [3] 石敏俊.生态文明建设和绿色发展的路线图[J].公关世界,2018(11):68-69.
- [4] ALI H, MCCARTHY L M, WELKER A. Performance of hot in-place recycled superpave mixtures in Florida[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49: 618-626.
- [5] 李雪连,崔之靖,吕新潮,等.就地热再生沥青混合料均匀性的细观评价指标[J].中国公路学报,2020,33(10): 254-264.
- [6] FLORES G, GALLEGO J, GIULIANI F, et al. Aging of asphalt binder in hot pavement rehabilitation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 214-219.
- [7] HAN D D, ZHAO Y L, PAN Y Y, et al. Heating process monitoring and evaluation of hot in-place recycling of asphalt pavement using infrared thermal imaging[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103055.
- [8] 李雪毅,邹晓翎,吁新华.热风循环式就地热再生沥青路面温度场[J].中外公路,2018,38(2):69-74.
- [9] 吴思.山区国省干线公路沥青路面就地热再生绿色评价研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [10] 李邦武,杨梦柔,王晓路,等.海南省绿色公路施工阶段评价指标体系研究[J].公路,2020,65(2):265-272.
- [11] 屠书荣,秦绍清,王晓辉,等.基于过程控制的绿色公路评价方法和标准研究[J].中外公路,2020,40(6):327-331.
- [12] 陈学平,白思华,姚嘉林,等.绿色公路评价指标体系及评价方法[J].交通运输研究,2020,6(4):9-17.
- [13] 山西路桥建设集团有限公司,山西省公路建设与环境综合治理工程实验室,山西路桥集团阳麟高速公路有限责任公司.公路工程绿色施工评价标准:DB14/T 1724—2018[S].山西:山西省市场监督管理局,2018.
- [14] 北京市住房和城乡建设科技促进中心,北京建筑技术发展有限责任公司,中国建筑科学研究院有限公司,等.绿色建筑评价标准:DB11/T 825—2021[S].北京:北京市市场监督管理局,2021.
- [15] 李强年,鲍俊超,牛昌林.基于ANP-Fuzzy法的装配式绿色建筑评价[J].建筑节能,2020,48(10):67-71,101.
- [16] 李刚,程砚秋,董霖哲,等.基尼系数客观赋权方法研究[J].管理评论,2014,26(1):12-22.
- [17] 李辉山,杨丽.基于熵权法的被动式超低能耗建筑评价[J].建筑节能(中英文),2021,49(1):47-51.
- [18] 贡力,路瑞琴,靳春玲,等.基于博弈-改进可拓理论的寒冷地区长距离明渠冬季运行安全评价[J].自然灾害学报,2019,28(6):81-92.
- [19] 王艳红,张倩,薛向东.河北省大学生创业环境评价:基于博弈物元可拓模型的分析[J].河北经贸大学学报(综合版),2020,20(4):60-65.
- [20] 李世辉,葛玉峰,王如玉.基于改进变权物元可拓模型的碳信息披露质量评价[J].统计与决策,2019,35(21): 57-61.
- [21] 孙廷容,黄强,张洪波,等.基于粗集权重的改进可拓评价方法在灌区干旱评价中的应用[J].农业工程学报,2006,22(4):70-74.
- [22] 刘洋,刘晓云,李玉飞.基于改进物元可拓模型的高校突发事件应急管理评价[J].中国管理科学,2022,30(11):299-308.
- [23] 程元庚,李福林,范明元,等.基于组合赋权和改进物元可拓模型的泗河生态系统健康评估[J].济南大学学报(自然科学版),2021,35(3):230-238.
- [24] 李强年,赵巧妮.基于层次熵物元可拓模型的绿色建筑绿色度评价:以甘肃省为例[J].建筑节能,2020,48(7): 66-71.