

高玉祥,董晓峰,韩峰.铁路防沙工程方案的模糊综合评价[J].中国沙漠,2021,41(2):75-82.

## 铁路防沙工程方案的模糊综合评价

高玉祥<sup>1a</sup>,董晓峰<sup>1b</sup>,韩峰<sup>2</sup>

(1.北京交通大学 a.土木建筑工程学院, b.建筑与艺术学院,北京 100044; 2.兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 风沙灾害是威胁沙漠铁路安全运营的主要因素,科学合理的防沙工程可减小风沙危害和保护生态环境,但目前关于铁路防沙工程的评价方法还不多见。为了对防沙工程方案进行科学合理的评价,在分析铁路防沙工程影响因素的基础上,将其划分为工程设计因素和地理环境因素,利用提取的主影响因子建立铁路防沙工程模糊综合评价模型,将指数标度法与区间标度法结合,通过改进的层次分析法计算各影响因子的权重。方案评价时先确定单个评判对象对评语集的隶属程度建立单因素评判矩阵,再通过模糊综合评判矩阵计算评价价值来实现方案评价。以敦格铁路某段的防沙工程为例,进行了实例验证。结果表明:该方法可适用于铁路防沙工程的方案评价,评价结果与工程实际情况基本吻合,具有一定的合理性和工程应用价值。

**关键词:** 防沙工程; 铁路; 模糊综合评价; 改进层次分析法; 隶属度

**文章编号:** 1000-694X(2021)02-075-08

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00132

**中图分类号:** X169

**文献标志码:** A

### 0 引言

风沙灾害一直是困扰沙区铁路建设和安全运营的主要因素。根据《中长期铁路网发展规划》,中国铁路的建设重点将向中西部地区转移,然而在青藏高原、新疆、甘肃和内蒙古西部分布着大面积的沙漠,拟修建的很多条铁路都穿过沙区。自20世纪50年代中国第一条穿越沙漠铁路——包兰铁路的通车,再经过兰新铁路、青藏铁路、兰新高铁等沙区铁路的建设,中国逐步建立起了铁路风沙灾害防治的理论基础,积累了丰富的工程经验。

为了防治铁路风沙灾害,学者们通过现场调研与监测、风洞试验和数值模拟等方法对铁路风沙灾害的成因及整治对策、防沙工程优化设计与工程防护效益评价等内容进行了大量的研究<sup>[1-3]</sup>。铁路风沙灾害与其周围的地理环境紧密相关,研究人员研究了青藏铁路沿线的地理环境、风动力环境,明晰了沙害产生的原因和空间分布特征,结合实地调研与监测数据,提出了青藏铁路应以生物措施为主的风沙防治原则,并根据风洞试验结果,优化了防护

体系的布设方式,为后续新建铁路防护工程设计提供了重要参考<sup>[4-9]</sup>。防护体系是由各单项工程组成的整体结构,单项工程防护效果对整体防护能力的发挥具有重要意义。研究人员利用流体动力学数值仿真模拟的优势,以实际工程背景为基础,研究了风沙流作用时不同类型单项工程的流场特征及防护机理,并结合现场监测数据优化了各类挡风沙结构的设计参数和空间布置方式,为铁路风沙防护体系整体设计提供了重要的依据,研究成果广泛应用于兰新铁路、兰新高铁、格库铁路等线路的防沙工程设计中<sup>[10-14]</sup>。防沙工程的阻沙效益评价方面,主要通过现场实测、三维激光扫描等方式测量积沙的堆积量及形态特征来实现,为后续的养护维修和补充设计提供了方向<sup>[15-17]</sup>。

关于铁路风沙灾害防治的研究,集中在沿线的地理环境、风动力环境、防沙工程风洞试验、数值模拟和现场实测等方面,对于铁路防沙工程评价比选则鲜有研究。同一路段的铁路防沙工程通常有多个方案,设计时不仅要考虑工程的防护效果,还要

收稿日期:2020-10-17; 改回日期:2020-12-25

资助项目:国家科技基础资源调查专项(2017FY101303);国家自然科学基金项目(51568037)

作者简介:高玉祥(1993—),男,甘肃古浪人,博士研究生,主要从事铁路选线设计与风沙灾害防治研究。E-mail: 1679281575@qq.com

通信作者:董晓峰(E-mail: xfdong@bjtu.edu.cn)

考虑工程设置对生态环境的影响,科学合理的工程方案在实现沙害防治的同时还可节约工程投资。本文分析铁路防沙工程方案设计需要考虑的主要因素,建立防沙工程方案模糊综合评价模型,实现不同工程方案的量化分析与评价,合理确定风沙防治措施,为今后铁路风沙防护工程的评价和比选提供理论依据和实践参考。

## 1 铁路防沙工程及影响因素

### 1.1 防沙措施

铁路防沙工程是指在易受沙害的路段设置控制风蚀发生和改变沙粒搬运及堆积条件的工程设施<sup>[18]</sup>,主要目的就是阻止风沙流运动和活动沙丘前移,保证沙区铁路的安全运营,主要有3种措施(图1)。

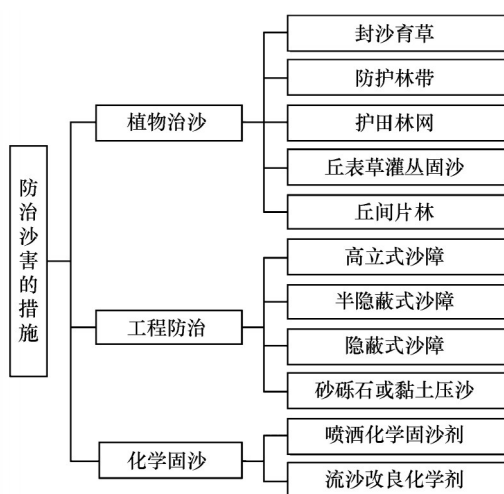


图1 防沙措施分类

Fig.1 Classification of sand control measures

植物固沙主要是在沙丘上栽种植物,通过增大地表的粗糙度来抑制风沙流活动,且植物根系也能固结周围沙粒,改变沙地的性质,是一种最根本且经济有效的固沙措施,通常需与工程防沙和化学固沙相结合。工程防沙是在流沙上设置阻滞风沙流和固定沙面的障碍物,增大风沙流运动的阻力,降低地表风速,从而削弱风沙流活动,是当前铁路防沙工程采用的主要措施。化学固沙是在流沙表面喷洒化学黏结材料,使松散的沙粒形成固结层,从而阻止风对沙粒的搬运来达到固沙目的,具有收效快、成本高的特点<sup>[19]</sup>。

建设铁路防沙工程治理沙害时应以长远的生态环境改善为目标,根据实地工程条件,统一规划、

分步实施。按照综合治理的原则,以生物措施为主,工程、化学措施相结合进行沙害防治。

铁路防沙工程作为保护线路免受或少受风沙危害的主要设施,在设计过程中主要受到地理环境、工程设计两方面因素的制约,通常是固、阻、输、导多种类型措施的组合。

### 1.2 工程设计因素

防沙工程最关键的就是其防护效果,需在节约工程投资的基础上达到防护效益最大化。不同组合类型防沙工程的风沙防护效果和施工难易程度具有差异,工程方案应根据当地的实测资料和防护目标合理设计,做到科学防治。防护工程是风沙区铁路安全运营的保证,使用时间很长,需充分考虑在防护体系内利用植物固沙的可能性,尽可能为植物固沙创造条件从而建立永久性防护工程。工程布置好以后,在阻沙和导沙工程周围会有沉积沙,逐渐降低防护效果或失去防护作用,还应定期进行维护、清理积沙,保证工程的防护能力。

### 1.3 地理环境因素

风沙活动强的地区往往生态环境较为脆弱,容易受到外界因素的干扰和侵害,对防沙工程的敏感性高,在设计过程中要考虑拟建工程对野生动植物、水环境、土壤环境的影响。工程用地、施工和人员活动会对原地表产生影响,造成地表破坏以致形成新的沙源,增大了风沙对铁路的危害,尽量要做到少改变原始的地貌形态。沙漠地区自然条件差,植被覆盖率低,且地表植被的恢复能力较差,保护原有地表植物至关重要。工程施工和环境绿化对地下水有一定影响,使水量减少,有时还会造成水污染。防沙工程建设过程中,必然对原始地层填挖,导致土层结构破坏,下部沙层再次暴露形成新沙源。沙漠地区的动物具有种类单一、数量少的特点,很多还属于国家保护动物,线路两侧一定范围的防沙工程可能会影响区域内动物的迁徙,打乱动物的生活规律,给动物生存造成影响。

## 2 铁路防沙工程方案综合评价模型

### 2.1 指标体系建立

防沙工程作为布设于地面阻止风沙灾害的工

程设施,设计时需要考虑的因素既有定性类型又有定量类型。模糊综合评价法具有将定量与定性分析相结合的优点,为了降低由于个人主观因素带来的弊端进行方案合理评价,构造了基于模糊综合评价法的防沙工程方案评价模型(图2)。

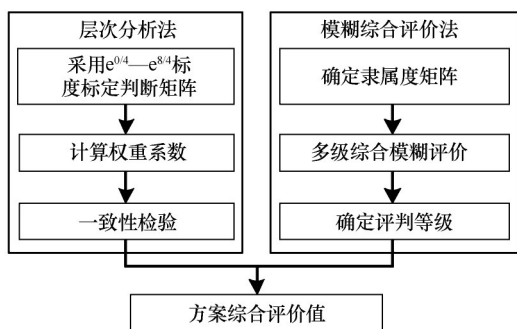


图2 防沙工程方案评价模型

Fig.2 Evaluation model of sand control engineering

铁路防沙工程应该满足经久耐用、技术可靠、经济合理、生态环境保护等要求,运用模糊综合评价法对防沙工程方案进行评价时,需要从多维度出发考虑相关因素来确定评价指标。根据防沙工程的措施类型、设计原则及影响因素作用机理,并充分考虑沙漠地区独特的自然地理环境来建立评价指标体系(图3)。

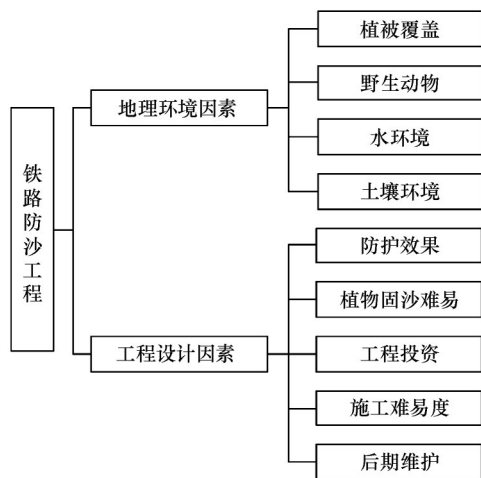


图3 铁路防沙工程评价指标

Fig.3 Evaluation indexes of railway sand control engineering

二级指标的值对方案评价至关重要,指标值标定不合理就会影响评价的结果。为了减少人为的主观臆断,在防沙工程方案评价时合理地标定各指标值,进一步分析影响9个二级指标的因素,根据《铁路线路设计规范》《铁路工程环境保护设计规范》和《铁路工程不良地质勘察规程》,并结合之前

学者研究成果,将其进行类型划分、等级划分。在利用模糊综合评价法对工程方案进行评价时,设计人员可根据实际的工程属性资料,进行指标值标定(表1)。

## 2.2 指标权重计算

层次分析法是一种将定性与定量相结合的多准则评价方法,可通过建立递增层次结构模型来实现各评价指标的权重计算<sup>[20]</sup>。通常采用的1—9标度法存在差异性不明显、判断一致性和标度权重拟合性差等缺点,不适用于较精确的权重计算。根据相关研究,指数标度法 $e^{0.4}-e^{8/4}$ 能更好地解决判断矩阵一致性和权重拟合问题,而区间标度又将标度值由点扩展到了空间,可有效量化主观判断的不确定性。

结合铁路防沙工程的特点,本文将指数标度法与区间标度法结合(表2),通过改进传统的层次分析法来计算各指标权重。

根据图3可知,模型分为3层:第一层为目标层 $X$ ,即铁路防沙工程;第二层为准则层,有地理环境因素 $X_1$ 、工程设计因素 $X_2$ ;第三层为具体指标,用 $X_{ij}$ 表示, $i$ 为1和2, $j$ 范围为1、2、 $\dots$ 、9。利用表2的指标标度方法,邀请本领域专家根据其工程设计经验构造层次分析的判断矩阵确定权重,先计算 $X_1$ 、 $X_2$ 对 $X$ 的权重,再分别计算 $X_{ij}$ 对 $X_1$ 、 $X_2$ 的权重,最后得 $X_{ij}$ 对 $X$ 的权重,具体步骤为:

(1)求判断矩阵每一行元素的乘积 $M_i$ ,并计算其 $n$ 次方根,公式如下:

$$M_i = \prod_{j=1}^n c_{ij} \quad (i=1,2,\dots,9) \quad (1)$$

$$u_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (i=1,2,\dots,9) \quad (2)$$

(2)对向量 $u_i(u_1, u_2, \dots, u_9)$ 作归一化处理,得到的 $W_i(w_1, w_2, \dots, w_9)$ 就是所求特征向量的近似解,也是各指标的权重系数:

$$w_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \quad (i=1,2,\dots,9) \quad (3)$$

(3)为了降低判断思维不一致性导致的权重计算误差,求得最大特征根 $\lambda_{\max}$ ,利用一致性比例 $CR$ 对指标一致性进行检验,计算公式为:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n (BW)_i}{nw_i} \quad (4)$$

表 1 指标标定的影响因素及等级划分

Table 1 Influencing factors and classification of index calibration

二级指标	影响因素	类型	I	II	III
植被覆盖 $X_{11}$	原有植被的破坏	定性	无	有	严重
	对景观的影响	定性	无	一般	明显
	恢复植被所占的面积	定量		数值	
野生动物 $X_{12}$	动物通道阻隔	定性	无	部分阻隔	完全阻隔
	动物生活环境的扰动	定性	无扰动	弱扰动	强扰动
水环境 $X_{13}$	穿越的地表水体数目	定量	0	0—2	>2
	对地下水的影响	定性	无	有	
土壤环境 $X_{14}$	造成水土流失	定性	无	基本没有	有
	占用土地面积	定量		数值	
	对土壤结构影响	定性	无	一般	明显
防护效果 $X_{21}$	抵抗风沙能力	定性	优	较优	一般
	防护效果衰减性	定量	年损失率<2%	2%≤年损失率≤5%	年损失率>5%
	使用时间	定量		数值	
植物固沙难易 $X_{22}$	可供植物栽植面积	定量		数值	
	地下水位深度	定量	≤ 4 m	4—30 m	>30 m
	可供利用的地表水	定性	有	无	
	单项工程风沙危害路径	定性	弱影响	一般影响	明显影响
工程投资 $X_{23}$	工程造价	定量		数值	
	维护费用	定量	<造价 10%	造价 10%—20%	>造价 20%
施工难易度 $X_{24}$	材料获取便捷性	定性	就地取材	外地运输	
	地形条件	定性	平坦	微起伏	明显起伏
	机械化施工程度	定性	高	中	低
	施工保护措施	定性	无	有	
后期维护 $X_{25}$	维护周期	定量	>10 a	5—10 a	<5 a
	首次维护时间	定量	>20 a	10—20 a	<10 a

表 2 指数型区间标度

Table 2 Exponential interval scale

定义	标度区间
同等重要	$[e^{-1/4}, e^{1/4}] = [0.78, 1.28]$
稍微重要	$[e^{1/4}, e^{3/4}] = [1.28, 2.12]$
明显重要	$[e^{3/4}, e^{5/4}] = [2.12, 3.49]$
强烈重要	$[e^{5/4}, e^{7/4}] = [3.49, 5.76]$
极端重要	$[e^{7/4}, e^{9/4}] = [5.76, 9.49]$
相邻判断中间值	$[e^{0/4}, e^{2/4}], [e^{2/4}, e^{4/4}], [e^{4/4}, e^{6/4}], [e^{6/4}, e^{8/4}]$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(5)

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

(6)

通过上述方法计算后得到指标权重系数(表3),且  $CR < 0.10$ , 满足指标一致性要求。

表 3 因素权重

Table 3 Factor weight

因子	组合权重	因子	组合权重
$X_{11}$	0.164	$X_{22}$	0.095
$X_{12}$	0.109	$X_{23}$	0.123
$X_{13}$	0.065	$X_{24}$	0.060
$X_{14}$	0.062	$X_{25}$	0.117
$X_{21}$	0.205		

2.3 评价模型

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合



评价方法,根据模糊数学的隶属度理论把定性评价转化为定量评价,能较好地解决模糊的、难以量化的问题<sup>[21]</sup>,评价的具体过程如下:

(1) 建立指标集:指标集是由评价防沙工程方案的各种因素组成的一个集合,即

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (7)$$

式中: $U$ 为指标集; $u_i$ 代表第 $i$ 个指标。

(2) 建立评语集:评语集为评价者对防沙工程方案可能做出的各种总的评价结果的集合,即

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (8)$$

(3) 构建评判矩阵:从指标集的每个指标出发,根据评语集分别确定评价对象对评语集元素的隶属程度,然后将单因素评价集 $R_i$ 组合得到多因素评价集:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(4) 模糊综合评价计算:

$$B = A \cdot R = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $B$ 为模糊综合评判集; $A$ 为指标的权重; $b_i$ 为模糊综合评价指标。将 $n$ 个单因素结果 $B_i$ 综合后建立上一层次的模糊隶属矩阵:

$$B_A = [B_1 \cdots B_n]^T \quad (11)$$

由 $B_A$ 和评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 得方案A的综合评价结果 $C_A = B_A \times V$ ,依次对所有方案进行计算,评价结果最高的即为工程设计的推荐方案。

### 3 实例应用

#### 3.1 工程概况

敦格铁路北起敦煌站,南至格尔木站,是连接甘肃省敦煌市和青海省格尔木市的一条国铁I级电气化铁路<sup>[22]</sup>,新建线路509 km,设计行车速度 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,在饮马峡站与既有青藏铁路接轨,连接了青藏铁路、兰新铁路两大干线,完善了西北地区铁路运输网(图4)。

敦格铁路沿线由于气候、土壤和水热条件的独特性,降雨稀少,植被覆盖率低,荒漠戈壁多,水土流失严重,土壤侵蚀类型以风力侵蚀为主。毗邻鸣

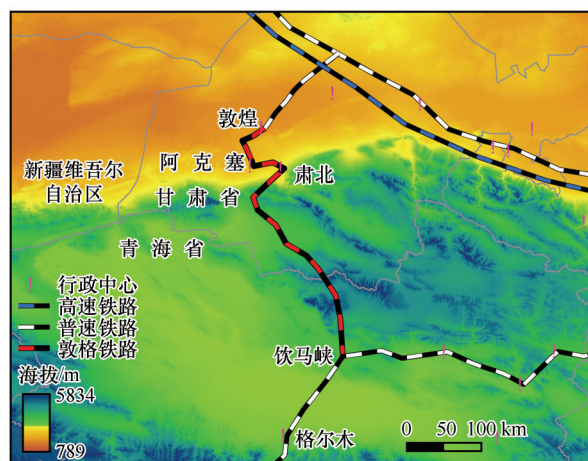


图4 敦格铁路地理位置

Fig.4 Location of the Dunhuang-Golmud Railway

沙山和库姆塔格沙漠,局部范围内分布有风积沙丘,风沙活动强烈,线路多处受到风沙危害。以敦格铁路经过风沙地区的某段防沙工程为例<sup>[23-25]</sup>(图5),用上述方法进行综合评价。

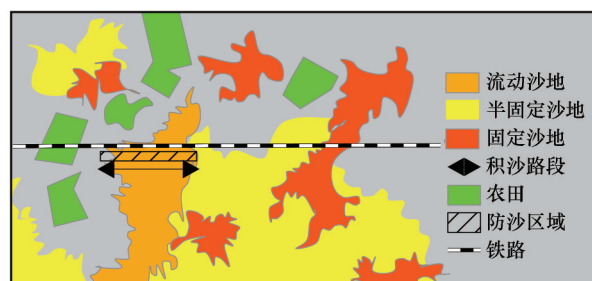


图5 敦格铁路某段防沙工程的风沙地貌环境

Fig.5 Aeolian landform of a sand control engineering along the Dunhuang-Golmud Railway

通过对工程布设地区土壤水分、植被、风沙环境和风沙危害的观测与调查,在掌握其环境特征的基础上,提出了工程防沙体系、工程与生物结合防沙体系两种思路,并有A、B和C等3个设计方案,均是整体体系采用前阻后固的原则,依据起沙风主方向和合成输沙方向,在流动沙丘地区布设防沙工程,通过降低风速来阻拦流沙,减小下风向的沙源。

A方案:采用工程措施与生物措施相结合的防护体系,在上风向流动沙丘区域沿线路布设4道1.8 m高度的高立式HDPE网沙障(4 m×15 m),实现阻挡外来流沙、降低风速的目的,在阻沙带的下风侧采用宽度为120 m的HDPE固沙网(1.2 m×1.2 m)固定流沙,植物栽植要与HDPE网充分结合,根据土壤水分、植被的调查结果,在固沙沙障中种植梭梭、黑果枸杞、柽柳等植物。由于防护体系靠近农田灌溉

干渠,充分利用地表水源优势,后期在阻沙带 HDPE 网阻沙障中间栽植 3—5 行植物,逐步建立人工补水条件下当地原生植物的防护林带。

**B 方案:**采用工程措施和植物措施相结合的防护体系,总宽度为 200 m。利用附近地区芦苇材料获取便捷、价格低廉的优势,防护体系的阻沙带采用 4 道 1.5 m 高的芦苇沙障(4 m×20 m),由于植物固沙需在工程措施的辅助下才会发挥最大的效益,在固沙带采用间距为 1 m 的行列式半隐蔽芦苇草方格沙障来固定流沙,设置宽度为 120 m,栽植当地原生的梭梭、沙拐柳、怪柳等作为防护体系的生物固沙部分。

**C 方案:**完全采用工程防沙措施,不进行植物栽植,防护体系总宽度约为 240 m。首先在防护体系外缘设置 4 道高立式 HDPE 网沙障(15 m×2+10 m+15 m×2)阻挡上风向的外来流沙,其次采用 HDPE 网方格(1.2 m×1.2 m)设置宽度为 140 m 的固沙带,最后在靠近铁路的一侧用 HDPE 网覆盖沙面来减少路基附近的流沙,设置宽度为 30 m。

### 3.2 防沙工程方案模糊综合评价

根据图 3 所示的铁路防沙工程指标体系,建立因素集  $U=\{u_1, u_2, \dots, u_9\}$ ,评语集  $V=\{9, 8, 7, 6, 5\}$ ,参照表 1 内容,将备选方案中最好的指标值标定为 9,最差的标定为 5,其余指标用线性插值法计算得到(表 4)。

表 4 方案评价指标

Table 4 Program evaluation index

方案	$X_1$				$X_2$				
	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	$X_{14}$	$X_{21}$	$X_{22}$	$X_{23}$	$X_{24}$	$X_{25}$
A	9	6.3	5	7	9	9	5	7	9
B	7.5	5	6.5	9	8.3	7.8	9	5	7.6
C	5	9	9	5	5	5	7.5	9	5

以方案 A 的工程因素  $X_1$  为例说明隶属度函数的构造方法:

$$X_{A1}=[9 \ 6.3 \ 5 \ 7]$$

设  $y_j, y_{j+1}$  为相邻评价等级的分级标准,如 7 和 6,则评价指标  $x$  对  $y_j$  的隶属函数为:

$$r(x)=\begin{cases} \frac{x-y_{j+1}}{y_j-y_{j+1}} & y_{j+1} \leq x \leq y_j \\ 0 & x < y_{j+1}, x > y_j \end{cases} \quad (12)$$

评价指标  $x$  对  $y_{j+1}$  的隶属函数为:

$$r(x)=\begin{cases} \frac{y_j-x}{y_j-y_{j+1}} & y_{j+1} \leq x \leq y_j \\ 0 & x < y_{j+1}, x > y_j \end{cases} \quad (13)$$

$$r_1=0, r_2=0, r_3=\frac{6.3-6}{7-6}=0.3,$$

$$r_4=\frac{7-6.3}{7-6}=0.7, r_5=0$$

剩余 3 个因素的隶属度用同样方法计算,行数为  $X_1$  的指标个数,列数为评价集元素的个数,故得出  $X_1$  的隶属矩阵:

$$R_{A1}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{A2}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(2) 计算综合评价值:

$$B_1=W_1 \times R_{A1}=\begin{bmatrix} 0.410 \\ 0.273 \\ 0.162 \\ 0.155 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$[0.410 \ 0 \ 0.237 \ 0.191 \ 0.162]$$

$$B_2=W_2 \times R_{A2}=\begin{bmatrix} 0.342 \\ 0.158 \\ 0.205 \\ 0.195 \\ 0.100 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$[0.600 \ 0 \ 0.195 \ 0 \ 0.205]$$

第一评价层构成的模糊矩阵为:

$$R_B=\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0.410 & 0 & 0.237 & 0.191 & 0.162 \\ 0.600 & 0 & 0.195 & 0 & 0.205 \end{bmatrix}$$

故

$$B_A=W \times R_B=[0.524 \ 0 \ 0.212 \ 0.076 \ 0.188]$$

$$C_A=B_A \times V^T=7.596$$

同样可得 B、C 两个方案的评价值分别为:  $C_B=7.346, C_C=6.472$ 。

根据计算结果可知,3 个方案中 A 方案最优, B 方案次之, C 方案最差。A 方案通过工程措施与生物措施相结合进行风沙治理,使用的 HDPE 网具有修补周期长的优点,在短期内可通过工程设施进行风沙防治,后期生物措施开始发挥作用,通过近远期结合的方式治沙,可有效保护线路工程及当地脆

弱的生态环境,具有长远的防护效益。B方案同样是工程与生物相结合的防护体系,充分利用了当地的材料资源,但芦苇杆容易老化,需要经常修补,在防护体系设立的后期的不利于植物部分的生长。该防沙区域地形相对平坦,与A方案相比,HDPE网与芦苇杆均能较好地适应地形,且考虑到防护工程的规模,芦苇沙障的材料优势并不明显。C方案完全采用工程措施来进行沙害防治,必然会使防护体系规模增大。虽然防护工程初期投资少、施工简单,但后期的养护维修量大,结合该地区的输沙量分析,成本会进一步持续增高。根据计算结果和实际情况比较分析,故推荐A方案为该防沙工程的实施方案。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

防沙工程作为布设于铁路两侧的带状结构物,不仅关系着铁路线路的安全运营,还会对沿线的地理环境产生长远的影响。因此,铁路防沙工程方案的评价比选是一个多层次和多因素共同作用的多目标决策过程,需在实现防护目标的同时尽可能减小对原地理环境的扰动。因此,本文从工程设计、地理环境两个方面出发,选取9个指标构建了铁路防沙工程评价指标体系。

由于不同因素对防护工程的影响程度不同,本文采用指数型区间标度优化传统的层次分析法,计算了各指标权重。但有时不同地区防护工程考虑的侧重点可能有差异,若每个方案评价时都采用固定的一套权重进行计算,并不能反映工程实际情况。若是利用变权理论方法,在方案评价时针对具体工程对固定的权重进行修正,获得能反映真实工程情况的指标权重,可更科学地实现方案比选。考虑到防沙工程的系统性,只有构建完备的指标体系才能科学合理地反映实际工程,本文通过研究选取了最具代表性的9个指标。通常选取的评价指标越丰富越能真实地表征实际工程,从而获得更科学的评价结果,但指标过多时易导致其相互间失去独立性和降低评价的科学性,更完善的评价模型有待进一步深化研究。

### 4.2 结论

铁路防沙工程是一个多因素作用的系统工程,

与工程投资、施工技术沿线地理环境等紧密相关。防沙工程布设地区多为风沙流活跃、生态环境脆弱的区域,结构物与生态环境之间的关系较为敏感,方案比选时应遵循工程防护与环境保护并重的原则。

从地理环境、工程设计两方面分析防沙工程设计的影响因素及作用机理,提取主要的影响因子作为评价指标,采用指数型区间标度优化层次分析法来计算各指标的权重,构建了铁路防沙工程方案模糊综合评价模型。根据已构建模型,利用敦格铁路某段实际防沙工程资料构造了模糊综合评价矩阵,并将计算的方案评价与实际工程进行对比,评价结果与工程实际基本吻合。

铁路防沙工程模糊综合评价模型能够比较全面地考虑不同类型的影响因素,并可实现定性指标的量化处理,为防沙工程的量化评价比选提供决策依据。而指标体系构建是防沙工程评价的前提,其科学性、完备性是实现合理评价的基础。由于风沙区脆弱的生态环境,无论是风沙防护工程,还是公路、铁路等主体工程,在对其进行方案评价时采用从工程属性、环境属性两方面构建指标体系的方法,能够基本实现工程建设与环境保护的统筹考虑,可为风沙区类似工程的指标体系建立及方案评价提供参考。

### 参考文献:

- [1] 张克存,屈建军,鱼燕萍,等.中国铁路风沙防治的研究进展[J].地球科学进展,2019,34(6):573-583.
- [2] 张克存,屈建军,姚正毅,等.青藏铁路格拉段风沙危害及其防治[J].干旱区地理,2014,37(1):74-80.
- [3] 王涛,谢胜波,屈建军,等.通天河七渡口风沙环境特征及沙害防治[J].中国沙漠,2019,39(2):70-78.
- [4] Xie S B, Qu J J, Han Q J, et al. Wind dynamic environment and wind tunnel simulation experiment of bridge sand damage in Xierong section of Lhasa-Linzhi Railway [J]. Sustainability, 2020, 12: 1-14.
- [5] Xie S B, Qu J J, Han Q J, et al. Experimental definition and its significance on the minimum safe distance of blown sand between the proposed Qinghai-Tibet Expressway and the existing Qinghai-Tibet Railway [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63: 1-12.
- [6] 张克存,安志山,庞营军,等.青藏铁路北麓河路段风沙防护体系阻沙效益[J].中国沙漠,2016,36(5):1216-1222.
- [7] 谢胜波,屈建军.青藏铁路沿线地形、气候、水文特征及其对沙害的影响[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):157-163.
- [8] 殷代英,屈建军,韩庆杰,等.青藏铁路错那湖段风沙活动强



- 度特征分析[J].中国沙漠,2013,33(1):9-15.
- [9] 孙永宁,王进昌,韩庆杰,等.青藏铁路格尔木至安多段沿线高寒植被、土壤特性与人工植被恢复研究[J].中国沙漠,2011,31(4):894-905.
- [10] 蒋富强,石龙,李凯崇.兰新二线挡风墙下部开口疏导线路积沙试验[J].铁道工程学报,2015,32(7):13-17.
- [11] Chen B Y, Cheng J J, Xin L G, et al. Effectiveness of hole plate-type sand barriers in reducing aeolian sediment flux: evaluation of effect of hole size[J]. *Aeolian Research*, 2019, 38: 1-12.
- [12] Cheng J J, Lei J Q, Li S Y, et al. Disturbance of the inclined inserting-type sand fence to wind-sand flow fields and its sand control characteristics [J]. *Aeolian Research*, 2016, 21: 139-150.
- [13] 石龙,蒋富强,韩峰.风沙两相对铁路路堤响应规律的数值模拟研究[J].铁道学报,2014,36(5):82-87.
- [14] 韩峰,石龙,李凯崇.风沙流对兰新高铁挡风墙的响应规律[J].中国铁道科学,2019,40(5):9-15.
- [15] 李凯崇,石龙,孔令伟,等.兰新高铁沿线不同挡沙墙防护效果评价[J].铁道工程学报,2017,34(3):11-14,21.
- [16] 张克存,安志山,屈建军,等.基于三维激光扫描仪的青藏铁路风沙工程效益评价[J].地球科学进展,2014,29(10):1197-1203.
- [17] 张凯,王起才,杨子江,等.新建格库铁路HDPE板高立式沙障防风效益数值模拟研究[J].铁道学报,2019,41(3):169-175.
- [18] 赵洋,高广磊,丁国栋,等.青藏铁路南山口段风沙灾害防护体系优化[J].中国水土保持科学,2018,16(4):132-137.
- [19] 吴正.风沙地貌与治沙工程学[M].北京:科学出版社,2010:315-320.
- [20] 徐丹,王双银,甘治国,等.基于改进层次分析法的突发水污染事故风险分析[J].水利水电技术,2020,51(10):159-166.
- [21] 杨永清,杨灯,余取.基于不确定AHP的桥梁加固方案模糊综合评价[J].西南交通大学学报,2019,54(2):219-226.
- [22] 张龙飞.敦格铁路小柴旦至饮马峡段风沙病害分析[J].四川建筑,2009,29(6):81-82.
- [23] 鱼燕萍,张克存,安志山,等.敦煌-格尔木铁路沿线风动力环境特征[J].中国沙漠,2020,40(1):41-48.
- [24] 姚宏乐.敦煌-格尔木铁路高大沙丘区的风沙环境特征及风沙危害综合防护体系[J].中国沙漠,2015,35(3):555-564.
- [25] 中铁第一勘察设计院集团.新建敦煌至格尔木线可行性研究报告[R].西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司,2010.

## Fuzzy comprehensive evaluation of railway sand control engineering scheme

Gao Yuxiang<sup>1a</sup>, Dong Xiaofeng<sup>1b</sup>, Han Feng<sup>2</sup>

(1.a.School of Civil Engineering / b.School of Architecture and Design, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Wind sand disaster is the main factor threatening the safe operation of desert railway. Sand control engineering designed scientifically and reasonably can reduce the wind-sand damage and protect the ecological environment. But at present, there are few evaluation methods of the sand control engineering. In order to make the scheme evaluation of sand control engineering more practical and scientific, on the basis of analyzing the influencing factors of engineering design, the factors are divided into engineering factors and geographical environment factors. The fuzzy evaluation model of railway sand control engineering is established by using the main influence factors that have been extracted. Combining the index scale method with the interval scale method, the weight of every factor is calculated by the improved analytic hierarchy process. The membership of a single evaluation object to the evaluation set is determined first, and the single factor evaluation matrix is established. Then, the evaluation value is calculated by fuzzy comprehensive evaluation matrix to realize the scheme evaluation. Taking a sand control project of the Dunhuang-Golmud railway as an example, the above method is verified by a case study. The results show that this method can be applied to the scheme evaluation of railway sand control engineering, and the evaluation results are basically consistent with the actual situation of the engineering, which has certain rationality and engineering application value.

**Key words:** sand control engineering; railway; fuzzy comprehensive evaluation; improved analytic hierarchy process; membership