

基于变权物元可拓模型的沙漠公路 防沙工程综合效益评价

李良英¹, 吕乐乐¹, 尹文华^{1,2}, 陶智忠¹, 李琦¹, 王振强¹

(1.兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2.宁夏公路勘察设计院有限责任公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: [目的] 对沙漠公路防沙工程综合效益进行评价, 为风沙区公路防沙工程的评价研究与后期运维工作提供科学参考。[方法] 以乌玛会(乌海—玛曲)高速公路沙漠区段的防沙工程为例, 在分析沙漠公路防沙工程综合效益影响因素的基础上, 从工程效益、经济效益、环境效益 3 个维度建立沙漠公路防沙工程综合效益评价指标体系。构建变权物元可拓模型, 利用变权理论对固定权重进行修正, 以体现指标值波动对指标权重的影响, 并通过敏感性分析指出对综合效益影响显著的指标。最后, 将模型应用于乌玛高速公路沙漠区段防沙工程。[结果] 乌玛高速公路沙漠区段防沙工程的综合效益处于“较好”效益等级, 但有大幅偏向“中等”效益等级的趋势, 与传统的固定权重法相比, 本研究结果更加符合工程实际; 在众多评价指标中, 防护效果、破损程度、施工质量、植被环境影响对评价结果影响最为显著。[结论] 为进一步提升乌玛高速沙漠区段防沙工程的综合效益等级, 在后期运营过程中应重点关注这几项指标的变化趋势, 针对性地开展维护工作, 保证综合效益最大化。

关键词: 沙漠公路; 防沙工程; 综合效益评价; 变权物元可拓模型; 乌玛高速公路

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)06-0148-07

中图分类号: X169, X171

文献参数: 李良英, 吕乐乐, 尹文华, 等. 基于变权物元可拓模型的沙漠公路防沙工程综合效益评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 148-154. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20231115.001; Li Liangying, Lü Lele, Yin Wenhua, et al. Comprehensive benefits evaluation of desert highway sand control engineering based on matter-element extension model with variable weight [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 148-154.

Comprehensive Benefits Evaluation of Desert Highway Sand Control Engineering Based on Matter-element Extension Model with Variable Weight

Li Liangying¹, Lü Lele¹, Yin Wenhua^{1,2}, Tao Zhizhong¹, Li Qi¹, Wang Zhenqiang¹

(1.School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070,

China; 2.Ningxia Highway Survey and Design Institute Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750001, China)

Abstract: [Objective] The comprehensive benefits of desert highway sand control engineering were evaluated in order to provide a scientific reference for research to evaluate sand control engineering of highways in wind-blown sand areas, and for subsequent work with respect to operation and maintenance. [Methods] The sand control engineering of desert section of the Wuhai-Maqin Highway was taking as a case study, based on an analysis of the influencing factors of the comprehensive benefits of desert highway sand control projects, a comprehensive benefits evaluation indicator system for highway sand control engineering was constructed from three aspects: engineering benefits, economic benefits, and environmental benefits. A matter-element extension model with variable weight was constructed. Fixed weights were then corrected using variable-weighting theory to reflect the effect of fluctuations in indicator values on indicator weights. The indicators

收稿日期: 2023-05-08

修回日期: 2023-06-12

资助项目: 宁夏交通运输厅科技项目“基于生态理念的沙漠腹地高速公路综合设计研究”(20200173)

第一作者: 李良英(1979—), 男(汉族), 山西省原平市人, 副教授, 博士研究生, 主要从事道路交通安全与风沙防护方面的研究。Email: liliangying@mail.lzjtu.cn.

通信作者: 吕乐乐(1996—), 男(汉族), 甘肃省天水市人, 硕士研究生, 研究方向为道路交通安全与风沙防护。Email: 11210273@stu.lzjtu.edu.cn.

that had a significant impact on the comprehensive benefits were also identified through sensitivity analysis. Finally, the model was applied to sand control engineering in the desert section of the Wuhai-Maqin highway. [Results] The comprehensive benefits of sand control engineering in the desert section of the Wuhai-Maqin highway were in the “relatively good” benefit level, but they strongly trended towards the “medium” benefit level. Compared with the traditional fixed-weight method, the benefits were more in line with engineering reality. Among the many indicators, the protective effect, breakage degree, construction quality, and effects of vegetation environment had the most significant impacts on the evaluation results. [Conclusion] To further improve the comprehensive benefit level of sand control projects in the desert section of the Wuhai-Maqin highway, the changing trend of these indicators should be focused on in the later stages of operation and maintenance, and maintenance work should be targeted to ensure maximum comprehensive benefits.

Keywords: desert highway; sand control engineering; comprehensive benefits evaluation; matter-element extension model with variable weight; Wuhai-Maqin highway

风沙灾害威胁沙漠公路的建设与运营安全^[1-2], 沿线布设防沙工程能够有效减弱风沙灾害对公路的影响,保障公路运行通畅。阻滞风沙流运动,防止流动沙丘前移是防沙工程的重中之重,评估其防护效益能够为防沙工程的设计与改进提供重要依据。周鑫等^[3-5]通过测定防沙工程附近的风速轮廓线、风沙流通量、地表蚀积量等参数,评估其防护效益,为沙漠地区防沙工程的建设提供参考。沙漠地区生态环境极度脆弱,防沙工程的建设不可避免地会对当地生态环境造成影响,为此展秀丽、王睿等^[6-7]以生态效益、经济效益、社会效益为准则层建立评价指标体系,以层次分析法计算指标权重,利用模糊综合评价对防沙工程的综合效益进行评价,明确了生态环境保护对于防沙工程综合效益的重要作用。为科学制定沙漠公路、铁路防沙工程,有效预防风沙灾害,祁延录、屈建军、张克存等采用风洞试验^[8-9]、激光扫描^[10]、数值模拟等^[11-12]方法评价其防护效益,为后期的养护维修与改进布设提供了方向。综合评价方面,高玉祥等^[13]从工程、环境两方面建立评价指标体系,采用改进层次分析法计算指标权重,以模糊综合评价法实现了对铁路防沙工程的综合评价,为铁路防沙工程方案的设计与比选提供了思路。关于沙漠公路、铁路防沙工程的评价研究,主要集中于防护效益评价、方案比选等方面,而对于沙漠公路防沙工程综合效益评价的研究较少,且以往的评价模型存在不足:①指标权重确定过于主观,未考虑指标实测值对于权重值的影响;②评价结果固定,缺乏对评价结果变化趋势的预测。因此,为进一步完善沙漠公路防沙工程综合效益评价模型,本文引入变权物元可拓模型,在考虑指标实测值的情况下,采用变权理论对固定权重进行修正^[14-15],通过构造物元矩阵将模糊性的问题定量化,能够直观地展现出评价对象的状态和变化趋势,已在环境管理^[16]、可持续性发展^[17]、公路运营等^[18]领域

得到应用,但在防沙工程综合效益评价中还鲜有运用。鉴于此,本文通过资料调查、现场勘测、专家咨询构建沙漠公路防沙工程综合效益评价指标体系,基于变权理论计算对指标权重进行修正,通过构造物元矩阵和计算贴近期实现效益等级的评定及其变化趋势的预测,并利用敏感性分析确定影响评价结果显著的指标。将模型应用于乌玛(乌海—玛曲)高速公路沙漠区段的防沙工程,可为风沙区公路防沙工程的评价与维护工作提供参考。

1 评价指标体系建立

1.1 指标体系构建

沙漠公路防沙工程旨在节约投资的基础上,减弱风沙活动对公路运营的影响,同时对沿线的环境起到保护甚至改善作用,其综合效益主要受到工程效益、经济效益及环境效益的控制。防沙工程设计和建设的核心就是防护效果,达到防护效益最大化,建设施工的质量与自身的破损程度严重影响着后期的防护效益。此外,不同组合类型的防沙工程在不同地形条件下的施工和维护难度具有差异性,需要根据实际环境和防护目标科学制定作业方案。经济效益是工程项目建设的基础,一般包括建设期和运维期的投资,而运维期的支出主要受每次维护支出和维护时间的控制。由于沙漠地区生态环境脆弱,易遭受外界因素的干扰,不仅施工时会破坏植被、地表土体结构及地下水体,且工程建成后会对动物的活动环境产生阻隔作用。通过以上分析,本文分别以工程效益、经济效益、环境效益为准则层建立评价指标体系(表 1)。

1.2 评价指标分级

参考已有防沙工程综合评价^[13]与其他领域^[19]效益评价等级标准,将沙漠公路防沙工程综合效益评价划分为差、较差、中等、较好、极好 5 个等级,建立对应的等级划分标准如表 2 所示。

表 1 沙漠公路防沙工程综合效益评价指标体系

Table 1 Comprehensive benefits evaluation indicator system of highway sand control engineering

目标层	准则层	指标层
综合效益	工程效益 B_1	防护效果 C_{11}
		破损程度 C_{12}
		施工难度 C_{13}
		施工质量 C_{14}
		运营维护难度 C_{15}
	经济效益 B_2	建设投资 C_{21}
		运营维护支出 C_{22}
		运营维护时间 C_{23}
		植被环境影响 C_{31}
		动物生活环境影响 C_{32}
	环境效益 B_3	土壤环境影响 C_{33}
		水体环境影响 C_{34}

表 2 防沙工程综合效益评价等级划分标准与评分区间

Table 2 Evaluation criteria and scoring range of comprehensive benefits of sand control engineering

等级	描述	区间分值
I (差)	效益差,远未达到预期目的	[0,2)
II (较差)	效益较差,未达到预期目的	[2,4)
III (中等)	效益一般,勉强达到预期目的	[4,6)
IV (较好)	效益较好,基本达到预期目的	[6,8)
V (极好)	效益极好,完全达到预期目的	[8,10)

指标值对于评价来说至关重要,不合理的指标值将直接导致评价结果失真。为减少人为主观性的影响,使得指标赋值更具合理性,根据《公路环境保护设计规范》《沙漠地区公路建设成套技术》和《风积沙路基公路设计施工与防沙》,并结合之前学者^[13]的研究成果,将指标进行等级划分(表 3)。在进行综合效益评价时,研究人员可根据实际防沙工程的资料,对指标进行赋值。

表 3 防沙工程综合效益评价指标值影响因素与评分标准

Table 3 Influencing factors and scoring criteria for indicator values of sand control engineering

指标	影响因素	类型	I (差)	II (较差)	III (中等)	IV (较好)	V (极好)
防护效果 C_{11}	防风效率	定量	<20%	20%~40%	40%~60%	60%~80%	>80%
	沿线整体沙害情况	定性	严重	较为严重	中等	较轻	无
	建设前后沿线植被覆盖度之比	定量	<1.0	1.0~1.2	1.2~1.5	1.5~2.0	>2.0
破损程度 C_{12}	沙埋长度占比	定量	>75%	25%~75%	10%~25%	10%~25%	<10%
	倾覆长度占比	定量	>75%	25%~75%	10%~25%	10%~25%	<10%
施工难度 C_{13}	地形条件	定性	极大起伏	较大起伏	明显起伏	略微起伏	平坦
	机械化程度	定性	极低	较低	中等	较高	极高
	施工安全性	定性	极低	较低	中等	较高	极高
	材料运输条件	定性	极差	较差	中等	较好	极好
施工质量 C_{14}	作业技术状态	定性	极差	较差	合格	良好	优秀
	验收标准	定性	极低	较低	中等	较高	极高
运营维护难度 C_{15}	地形条件	定性	极大起伏	较大起伏	明显起伏	略微起伏	平坦
	技术难度	定性	极高	较高	中等	较低	极低
建设投资 C_{21}	材料造价与市场均价之比	定量	>1.5	1.2~1.5	1.0~1.2	0.8~1.0	<0.8
	机械人工费用与材料造价之比	定量	>20%	15%~20%	10%~15%	5%~10%	<5%
运营维护支出 C_{22}	破损修补费用与材料造价之比	定量	>20%	15%~20%	10%~15%	5%~10%	<5%
	积沙清理费用	定量	根据实际数值划定				
运营维护时间 C_{23}	首次维护时间	定量	<5 a	5~8 a	8~10 a	10~15 a	>20 a
	维护周期	定量	<2 a	2~5 a	5~8 a	8~10 a	>10 a
植被环境影响 C_{31}	原有植被破坏情况	定性	严重	较严重	一般	较轻	无
	重新培育植被面积	定量	根据实际数值划定				
	植被生长情况	定性	极差	较差	中等	较茂盛	茂盛
动物生活环境影响 C_{32}	活动环境扰动	定性	极强扰动	强扰动	中等扰动	弱扰动	无扰动
	迁徙通道阻隔	定性	完全阻隔				部分阻隔
土壤环境影响 C_{33}	造成水土流失情况	定性	全部	大部分	部分	小部分	无
	固结土壤效果	定性	极差	较差	中等	较好	极好
水体环境影响 C_{34}	穿越地下水体数	定量	>5	5	2	1	0
	对水体破坏程度	定性	严重	较严重	一般	较轻	无

2 评价方法

2.1 指标权重计算

评价指标的权重对最终评价结果起着决定性作用, 以往采用的固定权重法, 主要吸收专家的经验判断进行赋权, 带有较强的主观性, 从而使得评价结果产生偏差。变权理论强调根据指标值的大小, 对原有的固定权重进行修正, 体现了实际指标值在评价过程中的主动参与性, 减小主观因素的影响。结合沙漠公路防沙工程的指标特点, 本文将层次分析法与变权理论相结合, 首先通过层次分析法计算指标的固定权重, 然后根据指标值, 利用变权理论进行修正, 得到最终的权重值。

(1) 根据 1—9 标度法(表 4), 邀请本领域多位专家进行打分, 以此来构造判断矩阵。

(2) 为了降低专家判断思维不一致性而导致的权重计算误差, 对判断矩阵进行一致性检验, 当一致性比率

CR<0.1 时, 判断矩阵的一致性满足要求。计算公式为:

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

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根; n 为矩阵的阶数; RI 为平均随机一致性指标, 可根据矩阵的阶数确定(表 5)。

表 4 专家打分所依据的 1—9 标度

Table 4 The 1—9 scale on which the expert score is based

标度	含义
1	a 和 b 同等重要
3	a 比 b 稍微重要
5	a 比 b 明显重要
7	a 比 b 强烈重要
9	a 比 b 极端重要
2, 4, 6, 8	重要程度取两相邻判断的中间值

表 5 平均随机一致性指标(RI)标准值

Table 5 Standard values of mean random consistency index

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

(3) 计算权重。求判断矩阵每一行元素的乘积 M_i 并计算其 n 次方根, 并归一化处理得到指标权重 w_i 。

$$M_i = \prod_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

$$u_i = \sqrt[n]{M_i} \quad (4)$$

$$w_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i} \quad (5)$$

(4) 根据指标值, 利用变权理论对固定权重进行修正, 得到最终的变权权重。

$$w_i(X) = \frac{w_i \exp[\alpha(d_{i\max} - d_{i\min})]}{\sum_{i=1}^n w_i \exp[\alpha(d_{i\max} - d_{i\min})]} \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

式中: w_i 为固定权重; (a_{pi}, b_{pi}) 为指标取值范围; v_i 为指标实际值; $d_{i\max}, d_{i\min}$ 分别为指标实际值与指标

边界的最大、最小距离, $d_{i\max} = \max\{|v_i - a_{pi}|, |b_{pi} - v_i|\}$, $d_{i\min} = \min\{|v_i - a_{pi}|, |b_{pi} - v_i|\}$; α 为变权因子, 当 $\alpha > 0$ 时, 产生激励型状态变权向量, 指标间的均衡性要求较低; 当 $\alpha < 0$ 时, 产生惩罚型状态变权向量, 指标间的均衡性要求较高; 当 $\alpha = 0$ 时, 模型为常权模型。由于沙漠公路防沙工程综合效益评价指标均较为重要, 决策者希望各项指标均能达标, 因此指标间的均衡性要求较高, 且参考相关文献^[20-21], 令 $\alpha = -1$ 。

2.2 评价模型

物元可拓模型通过建立经典域、节域以及待评物元, 基于客观数据对待评物元与相关评级等级的贴近度进行计算, 从而得出对象的评价等级。

(1) 构造经典域、节域与待评物元。通过事物的三元组(事物 P , 事物特征 C , 事物特征值 V), 即物元来构造经典域(R_j)、节域(R_p)与待评物元(R_0)。

$$R_j = (P_j, C_i, V_{ij}) = \begin{bmatrix} P_j & C_1 & v_{1j} \\ & C_2 & v_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_j & C_1 & (a_{1j}, b_{1j}) \\ & C_2 & (a_{2j}, b_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{nj}, b_{nj}) \end{bmatrix}$$

$$R_p = (P, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} P & C_1 & v_{p1} \\ & C_2 & v_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_1 & (a_{p1}, b_{p1}) \\ & C_2 & (a_{p2}, b_{p2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{pn}, b_{pn}) \end{bmatrix}, R_0 = (P_0, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} P_0 & C_1 & v_1 \\ & C_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & v_n \end{bmatrix}$$

式中： $\{c_1, c_2 \dots c_n\}$ 为第 j 个评价等级的 n 个不同特征，即不同指标； $\{v_{1j}, v_{2j} \dots v_{nj}\}$ 为不同评价等级对应的取值区间； a_{ij}, b_{ij} 分别为不同评价等级对应取值区间的左右边界值； $\{v_{p1}, v_{p2} \dots v_{pn}\}$ 为所有评价等级对应的取值区间； a_{pj}, b_{pj} 分别为所有评价等级对应取值区间的左右边界值； $\{v_1, v_2 \dots v_n\}$ 为各个指标的实际值。

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{N}_j(p_0)}{\sum_{j=1}^m \bar{N}_j(p_0)} \quad (11)$$

式中： v'_i 为规格化后的指标值； a'_{ij}, b'_{ij} 分别为规格化后各个等级的左右边界值； $D_j(v'_i)$ 为待评价物元 R_0 与规格化后经典域间的距离； $N_j(p_0)$ 为贴近度，根据评价对象与各个等级的贴近度最大值，可确定最终的评价等级； $j=1 \sim 5$ ，为等级区间数； j^* 为待评价对象 R_0 的等级变量特征值，根据其值可以判断待评价对象偏向邻近等级的趋势和程度。

3 实例应用

3.1 工程概况

乌玛高速公路沙漠区段位于腾格里沙漠腹地，公路沿线格状沙丘、新月型沙丘链分布密集，降水稀少，年风沙天数多达 200 d，风沙活动强烈^[22-23]。根据公路沿线的风沙活动规律，遵循因地制宜的原则，提出机械防沙措施为先导、植物防沙措施为核心的防沙体系。首先在公路外围至路基依次设置 HDPE 阻沙栅栏、高立式大网格沙障、低立式尼龙网沙障、草方格沙障，然后根据当地土壤、水分的调查结果，在靠近公路内侧种植柠条、花棒、杨柴、沙拐枣及油蒿等优势植物种，兼顾风沙防治、生态防护和绿色廊道建设的多重功效^[24]。

3.2 防沙工程综合效益评价

3.2.1 指标值的量化 参照表 1—2 的指标分级与打分标准，邀请来自设计、施工、运维单位和高校的 12 位专家，通过设计勘查文件、运维勘测数据资料、相关研究文献及专家自身专业知识经验，对各项指标进行打分，取平均值作为最终的指标值，结果详见表 6。

(2) 对经典域物元与待评物元进行规格化处理。

$$R'_0 = (P_0, C_i, V'_{ij}) = \begin{bmatrix} P_0 & c_1 & v_1/b_{p1} \\ & c_2 & v_2/b_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n/b_{pn} \end{bmatrix},$$

$$R'_j = (P_j, C_i, V'_{ij}) = \begin{bmatrix} P_j & c_1 & \left(\frac{a_{1j}}{b_{p1}}, \frac{b_{1j}}{b_{p1}}\right) \\ & c_2 & \left(\frac{a_{2j}}{b_{p2}}, \frac{b_{2j}}{b_{p2}}\right) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \left(\frac{a_{nj}}{b_{pn}}, \frac{b_{nj}}{b_{pn}}\right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 计算贴近度及评定等级。贴近度能够避免使用最大隶属度而造成的信息损失，评价对象与各个等级间的贴近度计算公式为：

$$D_j(v'_i) = \left| v'_i - \frac{a'_{ij} + b'_{ij}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b'_{ij} - a'_{ij}) \quad (8)$$

$$N_j(p_0) = 1 - \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n D_j(v'_i) w_i(X) \quad (9)$$

$$\bar{N}_j(p_0) = \frac{N_j(p_0) - \min N_j(p_0)}{\max N_j(p_0) - \min N_j(p_0)} \quad (10)$$

表 6 防沙工程综合效益指标分值

Table 6 Comprehensive benefits evaluation indicator scores of sand control engineering

指标	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}
分值	6.2	6.8	3.2	6.0	4.7	6.7	6.6	5.4	7.7	4.6	7.5	8.6

3.2.2 构造经典域、节域和待评物元 通过表 2—3, 6 分别构造各评价等级的经典域、节域与待评价物元。

$$R_j = \begin{bmatrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P & C_{11} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{12} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{13} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{14} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{15} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{21} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{22} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{23} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{31} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{32} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{33} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \\ & C_{34} & [0,2) & [2,4) & [4,6) & [6,8) & [8,10) \end{bmatrix}, R_p = \begin{bmatrix} P & C_{11} & [0,10) \\ & C_{12} & [0,10) \\ & C_{13} & [0,10) \\ & C_{14} & [0,10) \\ & C_{15} & [0,10) \\ & C_{21} & [0,10) \\ & C_{22} & [0,10) \\ & C_{23} & [0,10) \\ & C_{31} & [0,10) \\ & C_{32} & [0,10) \\ & C_{33} & [0,10) \\ & C_{34} & [0,10) \end{bmatrix}, R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & C_{11} & 6.2 \\ & C_{12} & 6.8 \\ & C_{13} & 3.2 \\ & C_{14} & 6.0 \\ & C_{15} & 4.7 \\ & C_{21} & 6.7 \\ & C_{22} & 6.6 \\ & C_{23} & 5.4 \\ & C_{31} & 7.7 \\ & C_{32} & 4.6 \\ & C_{33} & 7.5 \\ & C_{34} & 8.6 \end{bmatrix}$$

3.2.3 规格化处理 根据公式(7)对经典域和待评物元进行规格化处理。

$$R_j = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ P & C_{11} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{12} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{13} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{14} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{15} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{21} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{22} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{23} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{31} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{32} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{33} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \\ & C_{34} & [0,0.2) & [0.2,0.4) & [0.4,0.6) & [0.6,0.8) & [0.8,1) \end{bmatrix}, R_0 = \begin{bmatrix} P_0 & C_{11} & 0.62 \\ & C_{12} & 0.68 \\ & C_{13} & 0.32 \\ & C_{14} & 0.60 \\ & C_{15} & 0.47 \\ & C_{21} & 0.67 \\ & C_{22} & 0.66 \\ & C_{23} & 0.54 \\ & C_{31} & 0.77 \\ & C_{32} & 0.46 \\ & C_{33} & 0.75 \\ & C_{34} & 0.86 \end{bmatrix}$$

3.2.4 指标权重确定 首先邀请来自设计、施工、运维单位和高校的 12 专家根据 1—9 标度法分别对准则层和指标进行两两比较,分别确定准则层与各指标层的判断矩阵 B, C_1, C_2, C_3 , 通过公式(1)—(5)计算指标的固定权重,然后根据变权理论计算最终的指标权重(表 7)。

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 5 & 4 \\ 1/5 & 1 & 1/5 & 1/2 & 1/5 \\ 1/3 & 5 & 1 & 7 & 2 \\ 1/5 & 2 & 1/7 & 1 & 1/5 \\ 1/4 & 5 & 2 & 5 & 1 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 4 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 1/4 & 5 & 1 & 2 \\ 1/5 & 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

表 7 防沙工程效益评价指标权重

Table 7 Weight of indicator for evaluating comprehensive benefits of sand control engineering

指标	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{34}
固定权重	0.245	0.102	0.036	0.145	0.028	0.065	0.017	0.041	0.181	0.022	0.074	0.044
变权权重	0.267	0.098	0.035	0.164	0.036	0.064	0.017	0.052	0.146	0.028	0.062	0.030

3.2.5 评价结果 通过式(8)—(11),可计算得到沙漠公路防沙综合效益的评价结果,结果详见表 8。由表 8 可知,待评价物元与 IV—较好等级的贴近度数值最大,即 $N_4(p_0) = \max\{N_j(p_0)\} = 1.000\ 02$,因此确定乌玛高速公路沙漠区段防沙工程综合效益处于“较好”等级。由于等级变量特征值 $3 < j^* = 3.454 < 3.5$,可看出防沙工程综合效益存在大幅偏向“中等”效益等级的趋势。若采用传统的固定权重法,则评价结果为 $N_4(p_0) = \max\{N_j(p_0)\} = 1.000\ 04$,乌玛高速公路沙漠区段防沙工程综合效益仍确定为“较好”等级。但等级变量特征值 $3.5 < j^* = 3.527 < 4$,防沙工程综合效益仅存在略微偏向“中等”效益等级的趋势。与固定权重法所得到的评价结果相比,变权理论在计算指标权重更加考虑指标间的均衡性,因此在预测评价对象状态变化趋势时更为敏感,更加符合工程实际。在运维阶段,能够提前对运维部门预警,超前反馈,及时开展风险排查与维护工作,保证综合效益最大化。

表 8 防沙工程综合效益评价结果

Table 8 Evaluation results of comprehensive benefits of sand control engineering

等级	固定权重			变权权重		
	$N_j(p_0)$	$\bar{N}_j(p_0)$	j^*	$N_j(p_0)$	$\bar{N}_j(p_0)$	j^*
I(差)	0.997 10	0		0.997 19	0	
II(较差)	0.998 36	0.436 17		0.998 46	0.452 62	
III(中等)	0.999 56	0.836 57		0.999 64	0.866 88	
IV(较好)	1.000 04	1	3.527	1.000 02	1	3.454
V(极好)	0.999 06	0.665 94		0.998 97	0.629 15	

4 讨论

为进一步寻找对评价结果产生显著影响的敏感性指标,控制指标值分别以 $\pm 50\%$, $\pm 40\%$, $\pm 30\%$, $\pm 20\%$ 和 $\pm 10\%$ 变化,计算权重值与等级变量特征值 j^* (如图 1—2 所示),并计算权重值与 j^* 的变化幅度标准差(如图 3 所示)。可以发现,随着指标值的增减,指标权重值及其变化幅度的标准差会随之变化,且不同指标权重值变化规律存在差异,其中 C_{11}, C_{12} ,

C_{14} , C_{31} 的权重值变化幅度显著大于其他指标。此外,随着 C_{11} , C_{12} , C_{14} , C_{31} 这 4 项指标值的变化,等级变量特征值的变化幅度及其标准差也远大于其他指标。说明相对于其他指标,防护效果 C_{11} , 破损程度 C_{12} , 施工质量 C_{14} , 植被环境影响 C_{31} 这 4 项指标值的变化会显著影响最终评价结果,在后期运营过程中应重点关注这几项指标的变化趋势,针对性地开展维护工作,保证综合效益最大化。

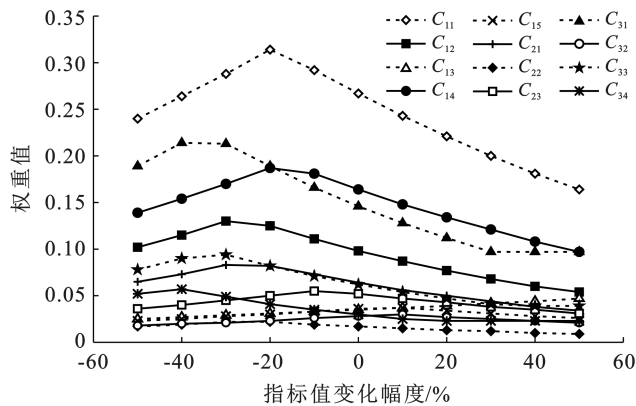


图 1 权重值随指标值变化

Fig.1 Variation of weights with indicator values

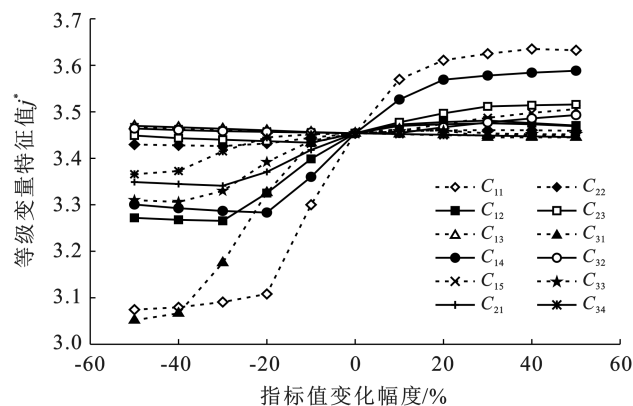


图 2 等级变量特征值 j^* 随指标值变化

Fig.2 Variation of eigenvalue j^* with indicator values

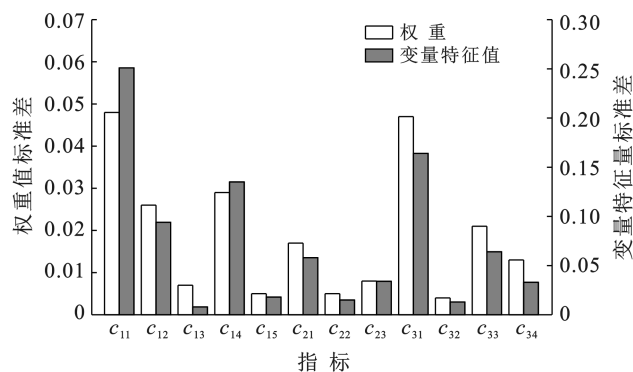


图 3 权重标准差与变量特征值的变化幅度标准差

Fig.3 Standard deviation of changes in weights and eigenvalues of rank variables

5 结论

(1) 本文以工程效益、经济效益、环境效益为准则层,建立沙漠公路防沙工程综合效益评价指标体系,构建变权物元可拓模型,在确定指标权重时充分考虑了指标值的影响,减少了主观因素的影响。

(2) 将所构建模型应用于乌玛高速公路沙漠区段防沙工程的综合效益评价,得出该工程的综合效益为“较好”等级,但存在大幅偏向“中等”效益等级的趋势,与传统的固定权重法相比,更加符合工程实际。

(3) 通过指标敏感性分析,得出防护效果 C_{11} , 破损程度 C_{12} , 施工质量 C_{14} , 植被环境影响 C_{31} 是对该工程评价结果影响显著的敏感性指标,在后期运维阶段,应重点关注这几项指标的变化趋势。

[参 考 文 献]

- [1] Mao Xuesong, Wang Fuchun, Wang Binggang. Nationwide desert highway assessment: a case study in China [J]. International Journal Environmental Research and Public Health, 2011, 8: 2734-2746.
- [2] Li Congjuan, Wang Yongdong, Lei Jiaqiang, et al. Damage by wind-blown sand and its control measures along the Taklimakan Desert Highway in China [J]. Journal of Arid Land, 2021, 13(1): 98-106.
- [3] 周鑫, 田丽慧, 张登山, 等. 青海湖沙区不同植被防风固沙效益研究[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(8): 180-185.
- [4] 丁延龙, 汪季, 胡生荣, 等. 吉兰泰盐湖风沙防护林体系建立 35 年以来防沙效益评估[J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 111-119.
- [5] 张奕, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(1): 87-96.
- [6] 展秀丽, 严平. 青海湖流域防沙治沙生态效益现状评价及分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1773-1778.
- [7] 王睿, 杨国靖, 库布齐沙漠东缘防沙治沙生态效益评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 174-179.
- [8] 祁延录, 南疆戈壁区机械防沙措施阻沙效益的风洞测试研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 892-900.
- [9] 屈建军, 肖建华, 韩庆杰, 等. 青藏铁路高寒风沙环境特征与防治技术[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(9): 1011-1024.
- [10] 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.
- [11] 李凯崇, 谭立海, 石龙, 等. 孔隙率对芦苇沙障风沙防护效果影响分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(5): 166-170.

(下转第 173 页)

- 学,2022(3):63-73.
- [19] 李治,孙悦,李国平,等.陕北黄土高原贫困农户生计策略对生计资本的敏感性:以佳县为例[J].生态学报,2022,42(19):7818-7829.
- [20] 杨新宇.沙化土地封禁保护区农户生计资本与生计策略的关系研究:以甘肃河西走廊 6 个县为例[D].甘肃兰州:兰州大学,2018.
- [21] 袁俐雯,张俊飏,何可,等.生计资本、多样化非农生计策略与农户清洁能源消费意愿:以生物天然气为例[J].长江流域资源与环境,2022,31(1):244-257.
- [22] Wan Jiangjun, Deng Wei, Song Xxueqian, et al. Spatio-temporal impact of rural livelihood capital on labor migration in Panxi, southwestern mountainous region of China [J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28(1):153-166.
- [23] 张凯莉,冯荣荣,刘潭,等.黄河流域城市化与生态系统服务价值协调性及障碍因素研究[J].干旱区地理,2022,45(4):1254-1267.
- [24] 刘璐璐,李锋瑞.黄土高原退耕农户生计资本对生计策略的影响:以甘肃会宁县为例[J].中国沙漠,2020,40(1):233-244.
- [25] 刘倩,张骛,何艳冰,等.秦巴山特困区农户生计资本及生计策略研究:以商洛市为例[J].干旱区地理,2020,43(1):237-247.
- [26] 吴廷美,吴渊,王多斌,等.三江源区牧户生计资本对其生计策略的影响研究[J].草业学报,2019,28(11):12-21.
- [27] 崔秀娟,杨婕妤,杜月红,等.农牧交错区农牧民生计策略选择及影响因素:以天祝藏族自治县为例[J].草业科学,2022,39(4):829-840.
- [28] 蒋振,靳乐山.牧户生计资本对其草原畜牧兼业化的影响研究:以四川省红原县和若尔盖县为例[J].干旱区资源与环境,2021,35(8):35-41.
- [29] 赵雪雁,李巍,杨培涛,等.生计资本对甘南高原农牧民生计活动的影响[J].中国人口·资源与环境,2011,21(4):111-118.
- [30] McDonald M, Brown K. Soil and water conservation projects and rural livelihoods: options for design and research to enhance adoption and adaptation [J]. Land Degradation & Development, 2015,11(4):343-361.

(上接第 154 页)

- [12] 杨伟超,岳欢,邓镔.沙漠腹地公路高立式沙障防风阻沙性能研究[J].铁道科学与工程学报,2023,20(1):178-189.
- [13] 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.
- [14] Wang Qiang, Li Siqi, He Gang, et al. Evaluating sustainability of water-energy-food(WEF) nexus using an improved matter-element extension model: a case study of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,202:1097-1106.
- [15] Wang Yongli, Li Fang, Yang Jiale, et al. Demand response evaluation of RIES based on improved matter-element extension model [J]. Energy, 2020, 212:118121.
- [16] Song Junnian, Li Kexin, Ren Jingzheng, et al. Holistic suitability for regional biomass power generation development in China: an application of matter-element extension model [J]. Journal of Environmental Management, 2020,276:111294.
- [17] Wang Yongli, Yang Jiale, Zhou Minhan, et al. Evaluating the sustainability of China's power generation industry based on a matter-element extension model [J]. Utilities Policy, 2021,69:101166.
- [18] 戴学臻,龙怡昕,周亚男,等.基于综合权重和物元可拓模型的城市道路运行状态评价[J].公路交通科技,2021,38(4):112-120.
- [19] 赵会茹,赵一航,王璐璐,等.基于贝叶斯最优最劣和改进物元可拓的特高压输电工程综合效益评价[J].中国电力,2022,55(6):161-171.
- [20] 卢凯璐,乔非,马玉敏.基于变权物元可拓模型的烧结矿质量评价[J].控制工程,2018,25(5):878-882.
- [21] 刘紫君,姜吉坤,冯乐.基于改进云模型的装配式建筑吊装施工安全风险评价[J].青岛理工大学学报,2023,44(1):30-38.
- [22] 尹文华,王旭,张继周,等.沙漠腹地高速公路风积沙填料压实特性及填筑方法试验研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(5):1177-1187.
- [23] Li Liangying, Tao Zhizhong, Yin Wenhua, et al. Numerical simulation research on plane alignment parameters of desert highway [J]. Applied Sciences, 2022,12(19):9579.
- [24] 张克存,安志山,何明珠,等.中国沙区公路风沙危害及防治研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):222-232.