

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.03.006

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式: 吴元金, 刘永胜, 尹龙, 罗占夫, 王栋, 张继超. 基于灰色聚类的铁路隧道工程建造过程低碳评价研究[J]. 西安理工大学学报, 2023, 39(3): 353-359.

WU Yuanjin, LIU Yongsheng, YIN Long, LUO Zhanfu, WANG Dong, ZHANG Jichao. Low carbon assessment on railroad tunnel project construction process by the grey clustering method [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(3): 353-359.

基于灰色聚类的铁路隧道工程 建造过程低碳评价研究

吴元金^{1,2}, 刘永胜^{2,3}, 尹龙^{2,3}, 罗占夫^{1,2}, 王栋^{1,2}, 张继超³

(1. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 广东 广州 511458; 2. 中铁隧道局集团有限公司 隧道结构智能监控与维护重点实验室, 广东 广州 511458; 3. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458)

摘要: 为科学评价低碳施工水平, 助力铁路隧道工程绿色低碳转型与节能减排, 采用定量分析和定性分析相结合的方法, 建立了隧道工程低碳评价体系。以隧道工程建造过程为研究对象, 科学识别碳排放和低碳施工影响因素, 建立低碳评价指标体系; 采用主成分分析法和改进熵权法计算低碳评价指标组合权重, 建立基于灰色聚类的低碳评价模型, 对隧道工程建造过程低碳水平进行评价。以某铁路隧道工程为例对模型进行验证。结果表明: 该工程建造过程低碳评价综合聚类系数最大值为 0.088, 低碳等级为“三星级”, 建造过程低碳水平较好。本方法可为“双碳”背景下类似工程低碳评价和节能减排提供参考。

关键词: 铁路隧道工程; 低碳评价; 建造过程; 组合权重; 灰色聚类模型

中图分类号: U215.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2023)03-0353-07

Low carbon assessment on railroad tunnel project construction process by the grey clustering method

WU Yuanjin^{1,2}, LIU Yongsheng^{2,3}, YIN Long^{2,3}, LUO Zhanfu^{1,2},
WANG Dong^{1,2}, ZHANG Jichao³

(1. China Railway Tunnel Consultants Co. Ltd., Guangzhou 511458, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Monitoring and Maintenance of Tunnel Structure, CRTG,

Guangzhou 511458, China; 3. China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Guangzhou 511458, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the level of low-carbon construction and help railroad tunnel engineering green low-carbon transformation and energy saving and emission reduction, this paper adopts a combination of quantitative and qualitative analysis to establish a comprehensive evaluation system of low carbon for tunnel project. Taking the construction process of tunnel project as the research object, the influencing factors of carbon emission and low carbon construction are identified scientifically, with a low carbon evaluation index system established. The combined weight of low carbon evaluation indices is calculated using the principal component analysis and the improved entropy method. A low carbon evaluation model based on grey clustering is established to analyze the low carbon level of the tunnel construction process. The model validated in a railroad tunnel project is taken as an example. The results show that the maximum value of low carbon evaluation integrated clustering coefficient is 0.088, that the low carbon level is

收稿日期: 2023-07-21; 网络首发日期: 2023-08-07

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20230807.1028.002>

基金项目: 中铁隧道局集团科技创新计划重点课题(隧研合 2022-02)

通信作者: 吴元金, 男, 高级工程师, 研究方向为隧道通风和碳排放。E-mail: 258334960@qq.com

“three-star”, and that the overall low carbon construction level is good. This method can be used as a reference for low carbon evaluation, energy saving and emission reduction of similar projects in the context of “double carbon”.

Key words: railroad tunnel project; low carbon evaluation; construction process; combined weight; gray clustering model

隧道作为铁路建设中的重要组成部分之一,资源和能源的消耗高于其它基础设施建设^[1]。在当前“双碳”目标与可持续发展背景下,学者们提出了低碳隧道施工理念。这一理念随着生态文明建设的推进而日益受到关注^[2]。随着社会经济的发展以及铁路建造技术的不断创新,我国铁路逐渐向高原艰险山区推进,气候条件恶劣、生态环境敏感脆弱、机械设备降效严重、隧道弃渣产生量大等将成为铁路工程建设面临的共性难题,绿色低碳铁路工程尤其是绿色低碳隧道工程建造成为目前的研究热点之一^[3]。

学者们针对绿色建筑评价标准中能源消耗及CO₂排放等问题开展低碳评价研究,提出碳排放评价相关指标。但在低碳隧道研究方面,目前尚未建立完善的评价标准体系,已有研究主要集中在隧道绿色施工评价方面。例如:蒋振雄等^[4]构建了包含资源节约利用、生态环境保护、行车安全舒适等方面的绿色隧道“五横三纵”评价体系;李海文等^[5]基于向量夹角余弦与二维云评价模型,对风火山隧道绿色施工水平进行综合评价;鲍学英等^[6]以“四节一环保”为基础,提出一种基于灰色聚类法的铁路绿色施工等级评价方法。但是目前绿色隧道评价侧重于资源与能源消耗的基本情况以及营造的环境水平,较少考虑隧道建造过程中的碳排放性能与影响因素,与当前“双碳”背景下的低碳评价要求存在较大差异。因此,如何制定科学合理的低碳隧道评价标准体系,如何对隧道的碳排放水平与低碳等级进行评定,是目前需要重点研究的问题。

基于以上分析,本文从评价指标与评价方法两个方面进行改进,基于已有绿色评价标准框架构建低碳评价体系。通过标准与文献的梳理及指标筛选建立具有针对性的铁路隧道工程建造过程低碳评价指标体系,将组合权重计算与基于三角白化权函数的灰色聚类法相结合,构建综合评价模型,并通过应用验证综合评价方法的可靠性和结果的合理性。研究结果可为“双碳”背景下铁路隧道工程建造过程评价提供决策支持,为铁路隧道工程建造节能减排提供理论依据。

1 数据和方法

1.1 数据来源

选取某铁路隧道工程作为研究对象。该工程具有投资大、周期长、工程所在地环境因素复杂等特点。这些因素对建造过程人、材、机的投入及工作效率等都会产生较大影响。因此需考虑复杂环境因素及隧道自身特点的影响,有针对性地对隧道建造过程的低碳情况进行评价。

本研究涉及的资源与能源消耗量、材料本地化率等定量指标数据来源于工程施工组织设计、工程造价文件、建材和能源工程量清单以及现场测量结果等;管理控制、环境因素等定性指标通过专家问卷调查的方式获取。对部分较难获取数据的指标,参考国内平均水平或同类工程的数据对其进行赋值。

1.2 研究方法

1.2.1 低碳评价指标体系建立

考虑到工程外界环境和低碳评价的复杂性,首先通过梳理已有绿色低碳评价相关标准和文献,识别得到64个绿色低碳类指标。在此基础上,考虑到低碳隧道评价侧重于隧道资源与能源消耗的详细情况及碳排放性能,以减少碳源与增加碳汇为目标,根据评价对象和评价范围,剔除与低碳隧道相关程度较低的指标;与此同时,结合自然环境特点补充环境因素影响类指标,建立包含43个指标的初步指标体系。为了使评价指标更具代表性,进一步采用主成分分析法剔除冗余指标,得到包含能源利用碳排放与碳减排、资源利用碳排放与碳减排等6个方面共21个指标的最终指标体系。

5级标度法是一种常见的用于量化和描述研究对象某种特定属性或品质程度的评分工具。本文根据评价指标达到低碳效果的程度,采用5级标度法将指标分为好、较好、中等、合格、不合格5个级别^[7]。其中定性指标以专家对其重要性打分结果为基准进行等级区间划分;定量指标参考已有文献提出的指标^[8-9],以及《建筑工程绿色施工评价标准》(GB/T 50640—2010)相关规定确定本文定量指标分级标准。建立的隧道工程建造过程低碳评价指标体系及其分级标准如表1所示。

表1 隧道工程建造过程低碳评价指标体系及分级标准

Tab.1 Low carbon evaluation index system and classification standard for tunnel construction

目标层	准则层	指标层	单位	指标分级标准				
				好	较好	中等	合格	不合格
铁路隧道建造过程低碳评价 A	能源利用 碳排放与 碳减排 B ₁	燃油节约率 C ₁₁	%	≥2.0	[1.5,2.0)	[1.0,1.5)	[0.5,1.0)	<0.5
		电能节约率 C ₁₂	%	≥3.0	[2.5,3.0)	[2.0,2.5)	[1.5,2.0)	<1.5
		新能源机械设备使用率 C ₁₃	%	≥80	[70,80)	[60,70)	[50,60)	[0,50)
		可再生能源利用率 C ₁₄	%	≥20	[15,20)	[10,15)	[5,10)	[0,5)
	资源利用 碳排放与 碳减排 B ₂	主材平均节约率 C ₂₁	%	≥3.0	[2.5,3.0)	[2.0,2.5)	[1.5,2.0)	<1.5
		用水量节约率 C ₂₂	%	≥20	[15,20)	[10,15)	[5,10)	[0,5)
		临时土地有效利用率 C ₂₃	%	≥90	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)
		新型低碳材料使用率 C ₂₄	%	≥50	[40,50)	[30,40)	[20,30)	[0,20)
		材料本地化率 C ₂₅	%	≥50	[40,50)	[30,40)	[20,30)	[0,20)
	低碳 管理 控制 B ₃	碳排放信息化监测与管理程度 C ₃₁		≥4.2	[3.4,4.2)	[2.6,3.4)	[1.8,2.6)	[1.0,1.8)
		碳排放管理资金投入比 C ₃₂	%	≥3.0	[2.4,3.0)	[1.7,2.4)	[1.0,1.7)	<1.0
		低碳施工宣传与培训力度 C ₃₃		≥4.2	[3.4,4.2)	[2.6,3.4)	[1.8,2.6)	[1.0,1.8)
	自然 环境 恶劣 B ₄	机械设备效率提升措施 C ₄₁		≥4.2	[3.4,4.2)	[2.6,3.4)	[1.8,2.6)	[1.0,1.8)
		高原型机械设备使用率 C ₄₂	%	≥80	[70,80)	[60,70)	[50,60)	[0,50)
		防寒保温系统节能措施 C ₄₃		≥4.2	[3.4,4.2)	[2.6,3.4)	[1.8,2.6)	[1.0,1.8)
	隧道 长度大 B ₅	隧道弃渣综合利用率 C ₅₁	%	≥50	[40,50)	[30,40)	[20,30)	[0,20)
		通风系统节能减排技术应用 C ₅₂		≥4.2	[3.4,4.2)	[2.6,3.4)	[1.8,2.6)	[1.0,1.8)
		洞内运输系统节能减排技术应用 C ₅₃		≥4.2	[3.4,4.2)	[2.6,3.4)	[1.8,2.6)	[1.0,1.8)
	生态 环境 脆弱 B ₆	高原植被恢复率 C ₆₁	%	≥95	[90,95)	[85,90)	[80,85)	[0,80)
		水土流失治理度 C ₆₂	%	≥85	[82,85)	[77,82)	[72,77)	[0,72)
		固体废弃物回收利用率 C ₆₃	%	≥50	[40,50)	[30,40)	[20,30)	[0,20)

1.2.2 低碳评价指标权重计算

本文采用主成分分析法与改进的熵权法相结合的方法计算指标组合权重,以提高计算结果的准确性与科学性。

1) 主成分分析法

铁路隧道工程建造过程碳排放影响因素多,且各因素间相互关联,相互影响。采用主成分分析法将多维变量进行降维处理,去除评价指标间的信息交叠与传递依赖性^[10]。根据主成分分析得到的总方差解释表及旋转后的成分矩阵进行指标权重的计算,其具体步骤如下。

a. 构建指标初始矩阵 $A=(a_{ij})_{nm}$, 其中 a_{ij} 为第 i 个研究对象第 j 个评价指标实测值。

b. 采用 Z-score 法对初始矩阵进行标准化处理。

$$b_{ij} = (a_{ij} - \bar{a}_j) / S_j \quad (1)$$

式中, $\bar{a}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{ij}$, $S_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (a_{ij} - \bar{a}_j)^2}$, $i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n$ 。

c. 计算指标间的相关系数矩阵 $R=(r_{ij})_m$, 并求其特征值及特征向量。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m [(b_{ki} - \bar{b}_i)(b_{kj} - \bar{b}_j)]}{\sqrt{\sum_{k=1}^m [(b_{ki} - \bar{b}_i)^2 (b_{kj} - \bar{b}_j)^2]}} \quad (2)$$

式中, r_{ij} ($i, j=1,2,3,\dots,n$) 为标准化后变量 b_i 与 b_j 的相关系数。

d. 对特征值大于 1 的 q 个主成分进行分析, 得到总方差解释率及成分矩阵, 并计算线性组合系数矩阵 $D=(d_{jt})_m$, 其中 d_{jt} 为第 j 个指标在第 t 个主成分下的线性组合系数。

$$d_{jt} = f_{jt} / \sqrt{\lambda_t} \quad (3)$$

式中, f_{jt} 为第 j 个指标在第 t 个主成分下的载荷系数, λ_t 为第 t 个主成分对应的特征值。

e. 计算各指标的综合得分系数 ρ_j

$$\rho_j = \frac{\sum_{t=1}^q (d_{jt} R_2)}{\sum_{t=1}^q R_2} \quad (4)$$

式中 R_2 为方差解释率。

f. 计算指标权重

$$\omega_{aj} = \rho_j / \sum_{j=1}^n \rho_j \quad (5)$$

2) 改进的熵权法

熵权法是一种常见的利用指标的信息熵来表示权重的客观赋权法。传统熵权法计算中,当指标信息熵接近于 1 时,计算结果会出现信息熵值的微小变化引起指标熵权成倍变化的情况^[11],针对该问题,本文提出改进的熵权法,具体计算过程如下。

a. 为了消除各评价指标间量级、量纲与正负向的不一致性^[12],采用极差法对初始矩阵进行标准化处理,得到标准化矩阵 $\mathbf{X}=(x_{ij})_{nm}$ 。

$$x_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} & a_{ij} \text{ 为正向指标} \\ \frac{a_{\max} - a_{ij}}{a_{\max} - a_{\min}} & a_{ij} \text{ 为负向指标} \end{cases} \quad (6)$$

b. 计算比重矩阵 $\mathbf{P}=(p_{ij})_{nm}$

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (7)$$

c. 计算第 j 项指标的信息熵 e_j

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n [p_{ij} \ln(p_{ij})] \quad (8)$$

d. 计算低碳评价指标客观权重

$$\omega_{ej} = \frac{(\sum_{f=1}^n e_f) + 1 - 2e_j}{\sum_{h=1}^n [(\sum_{f=1}^n e_f) + 1 - 2e_h]} \quad (9)$$

3) 组合赋权

以主成分分析法与熵权法的计算结果为基础,取其重要性均衡,按照式(10)计算组合权重。

$$\omega_j = 0.5\omega_{aj} + 0.5\omega_{ej} \quad (10)$$

1.2.3 基于灰色聚类的低碳评价模型

考虑到铁路隧道工程低碳评价涉及资源与能源利用、管理控制等诸多影响因素,是一个典型的多因素相互作用、相互影响的灰色系统,为了避免传统评价方法存在的不足,本文基于三角白化权函数的灰色聚类法进行隧道建造过程低碳评价。根据表 1 确定的评价指标及分级标准,通过构造基于端点型的三角白化权函数来确定聚类对象所属灰类。

1) 指标取值范围划分

将 j 指标的取值范围 $[a_1, a_{s+1}]$ 划分为 s 个区间,并计算各个区间几何重心。

$$[a_1, a_2], \dots, [a_{k-1}, a_k], \dots, [a_s, a_{s+1}] \quad (11)$$

$$\lambda_k = (a_k + a_{k+1})/2 \quad (12)$$

2) 构造三角白化权函数 $f_j^k(x_{ij})$

白化权函数可将所考察的观测指标或观测对象划分为若干个可定义类别,构造白化权函数是整个评价过程的核心环节,本文建立的指标体系灰色边界清晰,可构造基于端点类型的三角白化权函数。

令 λ_k 属于第 k 个灰类的 $f_j^k(x_{ij}) = 1$,连接点 $(\lambda_k, 1)$ 与第 $(k-1)$ 个灰类的起点 a_{k-1} 和第 $(k+1)$ 个灰类的终点 a_{k+2} ,得到对象 i 指标 j 关于灰类 k 的三角白化权函数 $f_j^k(x_{ij})$ 。对于 $f_j^1(x_{ij})$ 和 $f_j^s(x_{ij})$,可将 j 指标的取数域向左、右分别延伸至 a_0 和 a_{s+2} ,得到如图 1 所示的白化权函数图像。

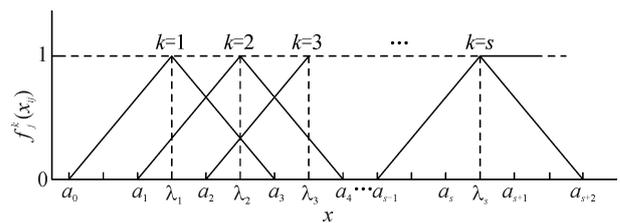


图 1 白化权函数图像

Fig. 1 Whitening power function image

3) 确定 $f_j^k(x_{ij})$ 函数表达式

对于指标 j 的一个观测值 x ,其函数表达式为:

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [a_{k-1}, a_{k+2}] \\ \frac{x - a_{k-1}}{\lambda_k - a_{k-1}} & x \in [a_{k-1}, \lambda_k) \\ \frac{a_{k+2} - x}{a_{k+2} - \lambda_k} & x \in [\lambda_k, a_{k+2}] \end{cases} \quad (13)$$

4) 计算综合聚类系数 σ_i^k

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m (f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j) \quad (14)$$

$$\sigma_i = \{\sigma_i^1, \sigma_i^2, \dots, \sigma_i^s\} =$$

$$\left\{ \sum_{j=1}^m (f_j^1(x_{ij}) \cdot \eta_j), \dots, \sum_{j=1}^m (f_j^s(x_{ij}) \cdot \eta_j) \right\} \quad (15)$$

式中, s 为灰类的个数, η_j 为指标的综合权重。

5) 等级确定

$$\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*} \quad (16)$$

由上式可判断对象 i 属于灰类 k^* 。

1.2.4 低碳评价等级划分

为了表征隧道建造过程的低碳水平,本文以《建筑工程绿色施工评价标准》(GB/T 50640—2010)、《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)的评价

等级为基础,将铁路隧道工程建造过程低碳评价等级划分为:基本级、一星级、二星级、三星级、四星级

5个级别。这些级别分别与指标等级不合格、合格、中等、较好、好对应。具体划分方式如表2所示。

表2 铁路隧道建造过程低碳评价等级划分

Tab. 2 Low carbon classification during railway tunnel construction in high altitude areas

评价等级	定性描述
基本级	碳排放不达标,未满足低碳施工要求
一星级	基本达到低碳施工水平,较少考虑碳排放影响因素,取得的节能减排效果有限
二星级	低碳施工水平中等,有考虑碳排放影响因素,取得一定的节能减排效果
三星级	低碳施工水平较好,对碳排放影响因素考虑较多,取得较好的节能减排效果
四星级	低碳施工水平很好,对碳排放影响因素考虑全面,取得很好的节能减排效果

2 结果与分析

该工程在施工过程中能够优化资源配置,强化机械设备使用管理,坚持绿色低碳与文明施工。现采用文中建立的低碳评价模型对其进行评价,确定其低碳等级。

2.1 评价指标权重计算

邀请铁路隧道建造设计、施工和管理等单位具有丰富经验的专家对指标的重要性程度进行打分,共收到问卷48份。通过对问卷进行初步筛选,确定有效问卷43份,其中隧道施工单位专业技术人员占60%,建设、设计及勘察等单位专家占40%。以1~5分分别表示指标重要性程度的5个等级,将打分结果作为权重计算的基础数据。相关数据如表3所示。

表3 指标重要性打分结果(以 B_2 指标层为例)

Tab. 3 Indicator importance scoring results (taking B_2 indicator layer as an example)

指标	专家										平均值	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		...
C_{21}	5	4	5	4	5	5	5	4	4	4		4.439
C_{22}	5	5	5	4	5	5	5	4	4	4		3.977
C_{23}	4	3	3	4	3	5	2	4	5	3		3.860
C_{24}	4	4	4	4	4	5	2	4	4	2		4.023
C_{25}	5	4	4	5	2	4	3	4	5	4		4.140

结合式(1)~(10)所述权重计算方法,对各级指标的综合权重进行计算,结果如表4和表5所示。

表4 准则层指标组合权重计算结果

Tab. 4 Calculation results of indicator combination weights for guideline layer

评价指标	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6
组合权重	0.320	0.220	0.177	0.102	0.092	0.088

表5 指标层指标组合权重计算结果

Tab. 5 Calculation results of indicator combination weights for indicator layer

评价指标	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{21}	C_{22}	C_{23}
组合权重	0.073	0.080	0.061	0.106	0.029	0.045	0.052
评价指标	C_{24}	C_{25}	C_{31}	C_{32}	C_{33}	C_{41}	C_{42}
组合权重	0.052	0.041	0.061	0.063	0.053	0.033	0.032
评价指标	C_{43}	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{61}	C_{62}	C_{63}
组合权重	0.038	0.040	0.024	0.027	0.029	0.029	0.030

由计算结果可知,准则层指标中“能源利用碳排放与碳减排”权重最大,为0.320,说明铁路隧道高度机械化施工过程中能源的使用情况会对碳排放以及低碳等级产生较大影响,应在保证工程质量的前提下,合理配置机械设备,定期对其进行维护与保养,减少能源的消耗与浪费。除此之外,在施工过程中还应注意提高新能源机械设备与可再生能源的利用率。其次,自然环境差、隧道长度大及生态环境脆弱三个方面的指标都受工程所在地复杂环境因素影响,其权重合计达到0.282,说明区域环境因素对铁路隧道建造过程碳排放的影响不容忽视,应从施工人员配备、机械设备选型与增效、节能减排施工技术应用等方面进行考虑,降低碳排放量。

2.2 确定白化权函数值

通过施工现场实际调研、查阅施工组织设计资料、邀请专家进行估算、参考同类工程等渠道获得定量指标数据,根据专家经验打分获得定性指标数据。结合图1所示白化权函数的构造方式,分别计算各指标的函数值,结果如表6所示(以准则层 B_3 与 B_4 为例)。

2.3 确定综合聚类系数

根据式(14),计算低碳评价指标体系准则层及待评工程的综合聚类系数,结果如表7所示。

表 6 待评工程指标白化权函数值(以 B_3 和 B_4 指标层为例)Tab. 6 Whitening weight function values of projects to be evaluated (taking B_3 and B_4 indicator layer as an example)

指标	好	较好	中等	合格	不合格
C_{31}	0.558	0.775	0.108	0.000	0.000
C_{32}	0.000	0.267	0.940	0.379	0.000
C_{33}	0.597	0.737	0.070	0.000	0.000
C_{41}	0.694	0.639	0.000	0.000	0.000
C_{42}	0.479	0.000	0.000	0.000	0.000
C_{43}	0.655	0.678	0.012	0.000	0.000

表 7 铁路隧道低碳施工综合聚类系数

Tab. 7 Comprehensive clustering coefficients for low carbon construction of railroad tunnels

评价维度	四星级	三星级	二星级	一星级	基本级	等级评定
B_1	0.073	0.175	0.157	0.137	0.022	三星级
B_2	0.013	0.022	0.050	0.100	0.086	一星级
B_3	0.066	0.103	0.070	0.024	0.000	三星级
B_4	0.062	0.046	0.000	0.000	0.000	四星级
B_5	0.042	0.027	0.000	0.000	0.020	四星级
B_6	0.010	0.023	0.015	0.045	0.030	一星级
A	0.049	0.088	0.075	0.074	0.030	三星级

2.4 结果分析

由计算结果可知,研究对象综合聚类系数的最大值为 0.088,隶属于第四灰类,即某铁路隧道建造过程的低碳等级为“三星级”,表明隧道工程低碳施工水平较好,对碳排放影响因素考虑较多,取得了较好的节能减排效果。

为验证评价结果的准确性,进一步对该隧道工程的 21 个指标以及 5 个评语集采用模糊综合评价法进行验证,首先根据各指标分级标准及综合权重计算结果构建模糊综合评判矩阵,然后将其导入 SPSSAU 分析软件进行综合计算,得到 5 个评语集的隶属度分别为:0.279、0.356、0.238、0.065、0.061,结合最大隶属度法则可知最终综合评价结果为低碳“三星级”,与本研究的评价结果一致。但灰色聚类法能够较好弥补数据量少、样本小的情况,使评价更客观合理,符合工程实际情况。

进一步对低碳指标体系不同维度进行分析,由表 7 可知 B_2 资源利用碳排放与碳减排和 B_6 生态环境脆弱隶属于第二灰类“一星级”,基本达到低碳施工水平,表明该隧道低碳施工仍然有较大的提升空

间;一方面,应加强对初期支护及二次衬砌等施工过程中钢筋和水泥等主要材料的节约利用,注重对施工人员节能减排相关技术的培训^[13],做好施工过程临时用地和用水等的监督管理工作,进而实现减少碳排放的目的;另一方面,应探索对施工余料和固体废弃物的回收利用途径,做到废弃物减量化、资源化与就近化处理^[3],全面提高铁路隧道工程建造过程的低碳水平。

3 结论与讨论

本文针对铁路隧道工程建造过程碳排放建立低碳评价体系,采用适合“小样本、贫信息”的灰色聚类法对隧道工程进行低碳评价,主要结论如下。

1) 基于绿色评价标准,初步识别铁路隧道工程低碳评价指标,以碳排放量为重要影响因素,结合特殊环境下隧道施工特点,对低碳指标进行筛选与补充,建立铁路隧道工程建造阶段低碳评价指标体系,确定评价指标分级判定标准。

2) 采用主成分分析与熵权法相结合的方法,计算低碳评价指标组合权重;建立基于灰色聚类法的低碳评价模型,通过构造三角白化权函数计算各灰类的综合聚类系数,确定低碳等级,依据评价结果为铁路隧道工程低碳施工提供理论参考。

3) 将建立的灰色聚类综合评价模型应用于实际工程中,计算得到该隧道建造过程低碳等级为“三星级”,与实际情况一致;采用模糊综合评价法进一步验证计算结果的准确性,验证了低碳评价体系和评价模型的可靠性。

由于铁路隧道施工过程复杂,碳排放影响因素多,本文所建立的评价指标体系主要从建造阶段开展低碳评价。在后期的研究中,将继续探索铁路隧道工程全生命周期的低碳评价,为铁路隧道低碳建造和节能减排提供理论依据和决策支持。

参考文献:

- [1] MILIUTENKO S, AKERMAN J, BJORKLUND A. Energy use and greenhouse gas emissions during the life cycle stages of a road tunnel—the Swedish case Norra Länken [J]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2012, 12(1): 39-62.
- [2] 唐娟娟,伍军,王孟钧,等. 绿色铁路工程评价研究的系统回顾与指标探索[J]. *铁道工程学报*, 2021, 38(9): 74-80.
- TANG Juanjuan, WU Jun, WANG Mengjun, et al. System review and index exploration of evaluation research of green railway engineering [J]. *Journal of*

- Railway Engineering Society, 2021, 38(9): 74-80.
- [3] 李化建,黄法礼,王振,等. 铁路绿色隧道工程材料技术研究进展[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11): 1992-2000.
LI Huajian, HUANG Fali, WANG Zhen, et al. Review of material technology used in green railway tunnel engineering [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1992-2000.
- [4] 蒋振雄,薛鹏,马欣,等. 绿色隧道评价体系研究[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(4):586-593.
JIANG Zhenxiong, XUE Peng, MA Xin, et al. Evaluation system of green highway tunnels [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(4): 586-593.
- [5] 李海文,鲍学英. 青藏高原地区铁路隧道绿色施工水平综合评价[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(2): 524-532.
LI Haiwen, BAO Xueying. Comprehensive evaluation of the green construction level of railway tunnels in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 524-532.
- [6] 鲍学英,杨姝,王起才. 基于灰色聚类法的铁路绿色施工等级评价研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(7): 106-110.
BAO Xueying, YANG Shu, WANG Qicai. Research on the grade evaluation for railway green construction based on grey clustering methods [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(7): 106-110.
- [7] 杨海红,刘梦颖,李金瑾. 基于灰色系统理论的低碳建筑评价[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2016,38(2):210-213.
YANG Haihong, LIU Mengying, LI Jinjin. An evaluation of the low-carbon building based on gray system theory [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2016, 38(2): 210-213.
- [8] 鲍学英,张健,王起才. 西北寒旱地区铁路绿色施工等级评价研究[J]. 铁道学报,2019,41(3):33-39.
BAO Xueying, ZHANG Jian, WANG Qicai. Study on grade evaluation of green railway construction in Northwest cold and arid areas [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 33-39.
- [9] 杨博,张争奇,张慧鲜. 沥青路面节能减排量化评价方法[J]. 公路交通科技,2014,31(1):32-38.
YANG Bo, ZHANG Zhengqi, ZHANG Huixian. Quantitative evaluation method of energy saving and emission reduction for asphalt pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(1): 32-38.
- [10] 李鹏,郭鹏程,李飒,等. 基于主成分分析法的电子式电能表计量性能影响研究[J]. 西安理工大学学报,2020,36(2):263-268.
LI Peng, GUO Pengcheng, LI Sa, et al. Study on the influence of static electricity energy meter based on principal component analysis [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(2): 263-268.
- [11] 王建波,有维宝,刘芳梦,等. 基于改进熵权与灰色模糊理论的城市轨道交通 PPP 项目风险评价研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(5):732-739.
WANG Jianbo, YOU Weibao, LIU Fangmeng, et al. Study of risk assessment of urban rail transit PPP project based on improved entropy weight and grey theory [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(5): 732-739.
- [12] 王思敏,姜仁贵,解建仓,等. 基于改进物元可拓模型的城市内涝灾害风险评估[J]. 给水排水,2023,49(2):145-152.
WANG Simin, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Urban waterlogging hazard risk assessment based on modified matter-element extension model [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(2): 145-152.
- [13] 赵金先,张英,武丹丹,等. 基于 WSR-组合赋权的地铁钻爆法施工安全灰色聚类评价[J]. 工程管理学报,2018,32(6):109-114.
ZHAO Jinxian, ZHANG Ying, WU Dandan, et al. Safety grey clustering evaluation of subway drilling and blasting method-a study based on WSR-combination weighting method [J]. Journal of Engineering Management, 2018, 32(6): 109-114.

(责任编辑 王卫勋)