

引用格式: 孙文昊, 郭亚林, 何应道, 等. 铁路隧道全生命周期绿色等级评价体系研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增刊2): 59.  
SUN Wenhao, GUO Yalin, HE Yingdao, et al. Green level evaluation system for whole life cycle of railway tunnels[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S2): 59.

## 铁路隧道全生命周期绿色等级评价体系研究

孙文昊<sup>1</sup>, 郭亚林<sup>2,3</sup>, 何应道<sup>1</sup>, 何卫<sup>1</sup>, 郭春<sup>2,3,\*</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 3. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 为倡导将绿色环保理念融入铁路隧道行业, 丰富完善绿色铁路隧道的综合评价系统, 对铁路隧道全生命周期绿色等级评价体系展开研究。首先, 明确绿色铁路隧道的内涵与定义, 将铁路隧道的生命周期划分为设计、施工、运营 3 个阶段, 分析筛选不同阶段与生态环境之间的直接或间接影响因素, 分三级层次构建铁路隧道全生命周期绿色评价指标体系。然后, 选用层次分析法和熵权法综合计算得到评价指标的组合权重, 依据灰色聚类评价理论与指标取值的数据结构特征, 构造指标隶属于不同绿色灰类等级的白化权函数, 并建立铁路隧道全生命周期绿色等级综合评价模型。最后, 以广州市某典型铁路隧道为研究案例, 经分析计算得到该案例的综合绿色等级为“绿色三星级”, 符合绿色铁路隧道的建设要求, 同时识别出非绿色或绿色等级不够理想的主要影响因素。

**关键词:** 铁路隧道; 全生命周期; 绿色评价; 组合权重; 灰色聚类

**DOI:** 10.3973/j.issn.2096-4498.2023.S2.006

中图分类号: U 45

文献标志码: A

文章编号: 2096-4498(2023)S2-0059-10

## Green Level Evaluation System for Whole Life Cycle of Railway Tunnels

SUN Wenhao<sup>1</sup>, GUO Yalin<sup>2,3</sup>, HE Yingdao<sup>1</sup>, HE Wei<sup>1</sup>, GUO Chun<sup>2,3,\*</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** To promote the integration of green and environmental protection concepts into the railway tunnel industry, and to enrich and improve the comprehensive evaluation system for green railway tunnels, the green level evaluation system for whole life cycle of railway tunnels is studied. First, the connotation and definition of green railway tunnels are clarified, and the life cycle of railway tunnels is divided into three stages: design, construction, and operation. The direct or indirect influencing factors between different stages and the ecological environment are screened, and a green evaluation index system for the whole life cycle of railway tunnels is constructed at three levels. Second, analytic hierarchy process and entropy weight method are used to comprehensively calculate the combined weights of evaluation indicators. Based on the grey clustering evaluation theory and the data structure characteristics of indicator values, a whitening power function is constructed for indicators belonging to different green gray class levels, and a comprehensive evaluation model for the green level of the whole life cycle of railway tunnels is established. Last, taking a typical railway tunnel in Guangzhou as a research case, the comprehensive green level of the case is analyzed and calculated to be "three star green", which meets the construction requirements of green railway tunnels. At the same time, the main influencing factors of non green or unsatisfactory green grades have been identified.

**Keywords:** railway tunnel; whole life cycle; green evaluation; combined weight; grey clustering

收稿日期: 2023-08-03; 修回日期: 2023-10-24

基金项目: 四川省社会科学规划项目(SC22B031); 四川省教育科研资助金项目(SCJG20A120); 四川省交通运输科技项目(2021-ZL-04); 中国交通教育研究会教育科学研究课题(JT2022YB163, JT2022YB405)

第一作者简介: 孙文昊(1975—), 男, 河北涪源人, 2005年毕业于西南交通大学, 桥梁与隧道工程专业, 硕士, 正高级工程师, 主要从事隧道与地下工程设计研究工作。E-mail: 297890680@qq.com。\* 通信作者: 郭春, E-mail: guochun@swjtu.edu.cn。

## 0 引言

铁路工程具有资源能源消耗大、使用年限时间长等特点,随着全球温室效应不断加剧,人们已不再只是关注铁路工程能够带来的经济价值,而与之相关的资源能源消耗、二氧化碳排放等问题也逐渐成为人们讨论的热点<sup>[1]</sup>。隧道是铁路工程的重要组成部分,隧道相关资源和能源的消费密度明显高于桥梁、道路等其他交通基础设施<sup>[2]</sup>。在国家大力推进生态文明建设的政策背景下,“绿色节能”、“生态保护”等理念逐步成为铁路隧道长远建设发展的核心指导思想,节约资源能源、减少环境污染,实现隧道建设运营与生态环境保护协同发展,如今已成为绿色铁路隧道长远建设的新方向。

近年来,国内外众多专家学者针对绿色评价方法开展了丰富的研究。Bao等<sup>[3]</sup>从土壤质量、植被质量和边坡防护性能等方面建立铁路路基边坡绿色防护效果评价体系。Tavana等<sup>[4]</sup>提出一种整合数据包络分析(DEA)和生命周期评价(LCA)的综合分析方法,用于衡量评估绿色建筑管理中生态友好类建筑材料的性能与效果。Liu等<sup>[5]</sup>从标准化管理、技术创新等8个维度构建针对绿色矿井施工建设的评价指标体系,并基于层次分析和集对分析的综合分析方法,为绿色矿井的可持续性建设发展提供新的思路。闫林君等<sup>[6]</sup>将铁路能耗的影响因素抽象成网络节点,通过建立“山区铁路工程—能源消耗”的上下双层联系网络,准确识别出山区铁路工程在施工及运营2阶段内节能设计的关键因素。蒋振雄等<sup>[7]</sup>以公路隧道的规划设计、施工建设和运营使用为纵轴,以结构安全耐久性、行车安全舒适等为横轴,构建“五纵三横”绿色隧道评价指标体系;依据专家调研结果,采用层次分析法分析判断公路隧道的绿色度等级。

目前关于绿色评价方法的研究成果较为丰富,多数课题围绕铁路或隧道工程的某一研究阶段内有关环保材料性能、节能设计关键要素、绿色等级评价等方面展开了多维度的分析研究工作,但是仍缺乏立足于铁路隧道全生命周期视角的系统性研究内容。考虑到铁路隧道生命周期时间跨度大、对生态环境的影响因素众多,单一阶段的评价结果无法全面反映绿色隧道的建设水平。因而,要实现铁路隧道可持续发展与长远建设的目标,需要从多阶段、多方面进行综合评价。基于此,本文以铁路隧道为研究对象,在分析总结铁路隧道全生命周期各子阶段对自然环境的影响、对资源能源的消耗等特点的基础上,分阶段建立准确、完善的绿

色评价指标体系,利用层次分析法、熵权法综合计算各指标的组合权重,结合灰色聚类理论构建出铁路隧道绿色等级综合评价模型。最后以广东省某铁路隧道作为研究案例,对该综合评价模型的实用性进行验证,并针对性给出绿色铁路隧道建设意见。

## 1 绿色评价指标体系构建

基于全生命周期的角度考虑铁路隧道对生态环境的整体影响,全生命周期应涵盖铁路隧道的规划设计、施工建设、运营维护再到报废处理和回收利用的一个完整的生命链;但考虑到铁路隧道工程使用寿命长,在隧道的全生命周期相关研究范畴里通常未考虑其报废处理和回收利用阶段的影响<sup>[8-9]</sup>。因此,本文将铁路隧道全生命周期内对生态环境的影响作用划分为规划设计、施工建设和运营维护3个阶段,并基于这3个阶段筛选汇总铁路隧道的绿色评价指标。

### 1.1 绿色隧道定义

参考GB 50378—2019《绿色建筑评价标准》对绿色建筑的定义描述:绿色建筑是指在建筑的全寿命周期内最大限度地节约资源(能源、土地、水、材料)、保护环境和减少污染,为人们提供健康、适用和高效的使用空间,与自然和谐共生的建筑。同时依据国家铁路局公布的TB 10429—2014《绿色铁路客站评价标准》(该标准用于评估衡量铁路客站在全生命周期内实现节约能源和保护环境目标所达到的程度),并结合铁路隧道所具有的沿线穿越的地质条件多样、能耗密度大、使用寿命长等特点,对绿色铁路隧道的定义作出解释:在规划设计、施工运营等阶段,能够与当地社会经济、生态环境相协调,以最小的生态影响成本满足安全合理的交通运输需求,最大限度地节约资源能源、保护生态环境、减少污染物排放的铁路隧道即为绿色铁路隧道<sup>[10]</sup>。

### 1.2 影响因素识别

铁路隧道生命周期内不同阶段对生态环境的影响程度各不相同,要对铁路隧道的绿色建设水平进行综合评价,就需要全面分析铁路隧道的规划设计、施工建设和运营维护期间可能造成的生态环境影响,为构建绿色评价指标体系提供理论依据。

#### 1.2.1 绿色设计

增强隧道主体支护结构的耐久性设计,提高支护结构在性能逐步退化条件下满足设计使用寿命的能力,可以降低后期隧道维护过程的更换翻修频率,减小资源能源的消耗。推广低温湿拌沥青、预制装配式等新型环保建材以及电力出渣货车等新能源机械设备的

使用,是建设绿色隧道的有效途径。同时,绿色隧道还需要配备可靠、高质量的紧急疏散通道,在隧道内发生灾害时,可以为人们提供安全、便捷的逃生通道。此外,铁路隧道穿山越岭,永久性改变了当地地形、植被作物的原貌,破坏了原有生态系统的平衡,需要制定一系列的水土流失治理、林草植被恢复等措施保护生态环境。

### 1.2.2 绿色施工

铁路隧道的施工建设过程是资源能源消耗使用和环境污染排放的重点阶段,参考 GB/T 50640—2010《建筑工程绿色施工评价标准》和文献[11-12],本文选择从资源能源的节约利用,以及扬尘、污水等施工污染物的排放限制 2 个方面分析筛选铁路隧道的绿色施工评价指标。具体而言,前者主要包括材料资源节约

利用、水资源节约利用、能源节约利用和土地资源节约利用 4 点。

### 1.2.3 绿色运营

运营阶段是绿色铁路隧道建设的另一大实践环节,隧道运营期间对照明、通风和供暖设施的使用较为频繁,对电能的消耗量巨大。因此,推广太阳能、风能和地能热等清洁能源的综合利用符合绿色隧道的建设理念。此外,还应该根据隧道运营标准、养护技术规范等要求,定期对隧道土建结构、机电设施进行维护检修,以提高隧道运营使用年限,保障列车运行安全。

基于以上分析,通过简化提取铁路隧道的设计、施工和运营阶段关于生态环境的影响因素,总结得到铁路隧道绿色评价影响因素识别图,如图 1 所示。

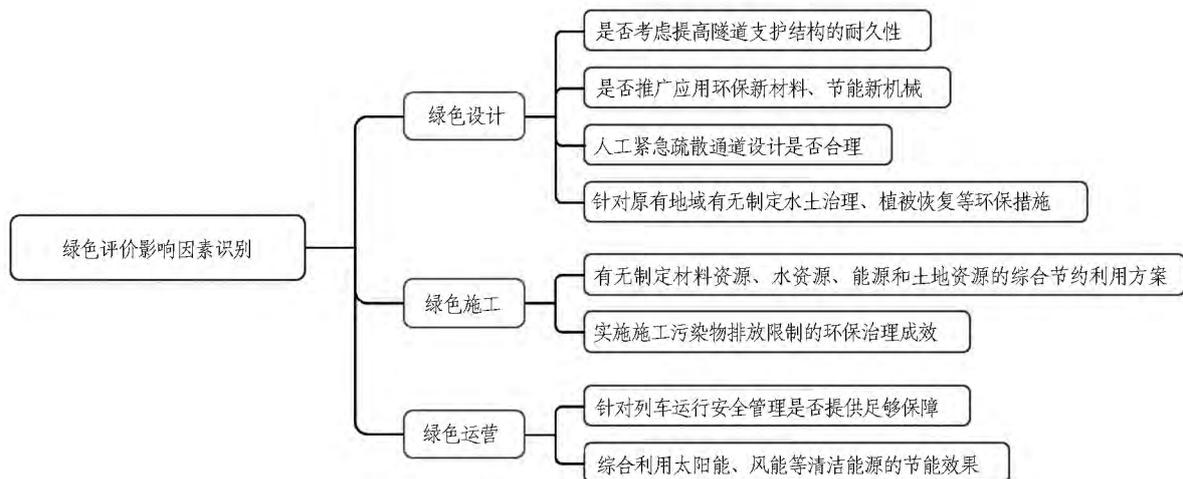


图 1 铁路隧道绿色评价影响因素识别图

Fig. 1 Identification of influencing factors for green evaluation of railway tunnels

## 1.3 评价指标体系

基于铁路隧道满足绿色节能、生态保护等属性,分阶段逐步分析筛选绿色评价指标,建立一套相对完善的铁路隧道全生命周期综合评价指标体系,以对铁路隧道的绿色建设水平做出客观、公正的评价<sup>[11]</sup>。

首先将铁路隧道全生命周期绿色评价指标的选取范围规定为规划设计、施工建设和运营维护 3 个阶段,参考 GB/T 50640—2019《建筑工程绿色施工评价标准》、TB/T 10429—2014《绿色铁路客站评价标准》等标准规范与相关文献<sup>[7,13-14]</sup>,遵循系统性、代表性和可操作性的指标选取原则<sup>[15]</sup>,结合图 1 初步筛选出 40 个铁路隧道绿色评价指标。

在此基础上,充分考虑铁路隧道全生命周期各阶段活动过程对自然生态环境的影响作用,比如铁路隧道的修建将永久改变原有土地的地形地貌;发挥围岩自承载能力,降低支护材料的投入使用与各类机械动

力能源的消耗,可以减少材料资源和能源上游生产过程的温室气体排放。剔除冗余多余的指标,最终建立多层次、多维度的铁路隧道全生命周期绿色评价指标体系,具体如表 1 所示。

## 2 评价指标权重计算

确定评价指标的权重是构建绿色铁路隧道评价模型的重要基础和前提,权重的确定方法主要有 3 类:主观赋权法、客观赋权法以及组合赋权法。主观赋权法的使用过程简单便捷,但人为主观性强,赋权结果很容易受到专家的偏好和经验的影响和干扰。客观赋权法着重于数据间的内在联系,客观性强,但与实际情况关联性较低<sup>[16]</sup>。考虑到单一赋权方法始终具有一定的局限性,为了提高权重计算结果的准确度和科学性,拟采用层次分析法和熵权法相结合的组合赋权法来确定评价指标的权重值。

表1 铁路隧道全生命周期绿色评价指标体系  
Table 1 Green evaluation index system for the whole lifecycle of railway tunnels

目标层	指标层			
	一级指标	二级指标	三级指标	
铁路隧道全生命周期绿色 评价体系 A	绿色设计 A <sub>1</sub>	隧道结构耐久性 A <sub>11</sub>	结构耐久性评估 A <sub>111</sub>	
			地下渗漏水、防腐蚀措施 A <sub>112</sub>	
		新型绿色技术应用 A <sub>12</sub>	隧道结构设计方案优化 A <sub>121</sub>	
			装配式材料使用 A <sub>122</sub>	
			新能源机械设备使用 A <sub>123</sub>	
		应急疏散设计 A <sub>13</sub>	火灾监测智能报警系统 A <sub>131</sub>	
			应急救援设施布置 A <sub>132</sub>	
			疏散通道设计 A <sub>133</sub>	
		水土保持 A <sub>14</sub>	占用土地治理率 A <sub>141</sub>	
			水土流失治理率 A <sub>142</sub>	
			拦渣率 A <sub>143</sub>	
			林草植被恢复率 A <sub>144</sub>	
		绿色施工 A <sub>2</sub>	材料资源节约利用 A <sub>21</sub>	材料损耗率 A <sub>211</sub>
				隧道弃渣回收利用率 A <sub>212</sub>
	就地取材率 A <sub>213</sub>			
	再生材料使用率 A <sub>214</sub>			
	水资源节约利用 A <sub>22</sub>		节水器具使用率 A <sub>221</sub>	
			非传统水源利用率 A <sub>222</sub>	
	能源节约利用 A <sub>23</sub>		节能灯具利用率 A <sub>231</sub>	
			可再生能源利用率 A <sub>232</sub>	
	土地资源节约利用 A <sub>24</sub>		临时土地占用率 A <sub>241</sub>	
			农田占用率 A <sub>242</sub>	
			隧道土方利用率 A <sub>243</sub>	
	施工污染物排放控制 A <sub>25</sub>	施工扬尘控制 A <sub>251</sub>		
		施工污水排放达标率 A <sub>252</sub>		
施工噪声控制指标 A <sub>253</sub>				
固体废弃物处理 A <sub>254</sub>				
绿色运营 A <sub>3</sub>	运营安全管理 A <sub>31</sub>	热湿温度控制 A <sub>311</sub>		
		列车噪声控制 A <sub>312</sub>		
	清洁能源利用 A <sub>32</sub>	机电设备定期维护管理 A <sub>313</sub>		
		风能 A <sub>321</sub>		
		光能 A <sub>322</sub>		
	地热能 A <sub>323</sub>			

## 2.1 主观权重

层次分析法的计算原理是将问题进行层次化分析,依据业内专家对各级评价指标重要性得分的调研结果,对同一指标层的不同指标进行两两逐对,并分层建立重要性程度判断矩阵,经计算分别得到每一指标层中各评价指标的主观权重,最后利用判断矩阵的最大特征值完成权重计算结果的一致性检验。具体计算过程如式(1)~(5)所示。

1) 设有  $i$  个评价指标,建立评价指标重要性程度判断矩阵  $X = x_{ij} (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$ , 其中  $a_{ij}$  表示同一指标层第  $i$  个指标相对于第  $j$  个指标的重要性大小。

2) 对判断矩阵  $X$  归一化处理:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (1)$$

3) 对矩阵  $\bar{x}$  中的数值按列相加得到

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (2)$$

4) 计算各评价指标主观权重

$$w_{i\text{主观}} = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{w}_i} \quad (3)$$

5) 计算判断矩阵  $X$  的最大特征值

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{XW_i}{nW_i} \quad (4)$$

6) 计算矩阵  $X$  的一致性比率

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)RI} \quad (5)$$

式中:  $CI$  为一致性检验指标;  $RI$  为平均随机一致性指标,取值如表 2 所示;  $n$  为矩阵阶数。若  $CR < 0.1$ , 则判断矩阵的一致性检验通过, 否则需要调整判断矩阵数据直到满足其  $CR < 0.1$  [17]。

表 2 平均随机一致性指标  $RI$

Table 2 Average random consistency indicator  $RI$

$n$	$RI$	$n$	$RI$	$n$	$RI$
1	0	5	1.12	9	1.45
2	0	6	1.24	10	1.49
3	0.58	7	1.32	11	1.52
4	0.90	8	1.41	12	1.54

## 2.2 客观权重

熵的概念最早在热力学中是用于表示空间中能量的均匀程度, 后来被引入信息论中用来衡量系统信息量的稳定程度 [18]。熵权法是一种常用的客观赋权法, 基本原理是根据各评价指标的离散程度确定权重, 当指标的信息熵越大时, 表明该指标的离散性越小, 对整体评价结果的影响程度越小, 其权重也越小 [19]。利用熵权法计算指标权重, 其优势在于能够通过每个样本的实际数据得到最优权重, 反映了指标信息熵的实用价值, 具有较强客观性。客观权重的计算过程如式 (6) — (11) 所示。

1) 设有  $i$  个评价指标, 有  $j$  个指标的得分数据来源。由原始样本数据组成矩阵  $X = x_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ , 对矩阵  $X$  进行无量纲化处理, 评价指标的属性分为 2 类: 极大型指标和极小型指标。

极大型指标:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (6)$$

极小型指标:

$$p_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (7)$$

无量纲化处理后的新矩阵  $= p_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$

2) 对矩阵  $P$  每行的数据进行归一化

$$q_{ij} = \frac{p_{ij}}{\sum_{i=1}^n p_{ij}} \quad (8)$$

3) 计算评价指标的信息熵  $e_i$  与差异性因数  $g_i$ 。

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m q_{ij} \ln q_{ij} \quad (9)$$

$$g_i = 1 - e_i \quad (10)$$

4) 对  $g_i$  进行归一化得到各评价指标的客观权重

$$w_{i\text{客观}} = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (11)$$

## 2.3 组合权重

基于上述层次分析法和熵权法的计算结果, 取两种权重的重要性程度均衡 [14], 按式 (12) 计算评价指标的组合权重。

$$w_{i\text{组合}} = \alpha w_{i\text{主观}} + (1 - \alpha) w_{i\text{客观}} \quad (12)$$

式中:  $w_{i\text{组合}}$  为第  $i$  个评价指标的组合权重;  $w_{i\text{主观}}$  为层次分析法计算得到的第  $i$  个指标的主观权重;  $w_{i\text{客观}}$  为熵权法计算得到的第  $i$  个指标的客观权重;  $\alpha$  为决策偏好系数, 取 0.5。

## 3 绿色评价模型构建

铁路隧道具有生命周期时间跨度大、环境影响因素众多等特点, 对铁路隧道绿色状态评价指标数据的采集难度大、基础样本少。因此, 可以认为铁路隧道绿色度评价是一个典型的“少数据、贫信息”, 且具有诸多不确定性因素的灰色系统。而灰色系统理论适用于“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本、贫数据”不确定性系统研究 [20]。本研究基于灰色系统理论中的灰色聚类评价方法, 通过观察各指标得分取值的数据结构特征, 构造白化权函数来确定铁路隧道的绿色灰类等级。具体计算步骤如下。

设有  $n$  个研究对象, 记为  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ , 每个研究对象有  $m$  个聚类指标, 记为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ; 用  $x_{ij}$  表示第  $i$  个研究对象中关于第  $j$  个评价指标的取值 ( $i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$ ), 并且每个指标  $x_{ij}$  有  $k$  个灰类等级。

### 3.1 划分评价指标等级

抽取若干相关专家和技术人员根据待评铁路隧道项目的实际情况, 对各指标进行打分评价, 各指标的得分区间为 0~10 分; 同时将评价指标的优劣程度划分为“不合格”(0~1)、“合格”(1~3)、“一般”(3~5)、“较好”(5~7)、“好”(7~9) 以及“优秀”(9~10) 6 个等级。依据专家打分结果整理后作为铁路隧道绿色等级评价分析的基础数据。

### 3.2 建立聚类灰类

依据 GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》对绿色建筑的分级标准, 并结合铁路隧道工程的相关特点, 将铁路隧道绿色度等级的评价结果分为“不合格”、“合格”、“绿色一星级”、“绿色二星级”以及“绿色三星级”5 个“灰类”等级 (对应编号为 1、2、3、4、5, 即  $k=5$ ), 如表 3 所示。

表3 铁路隧道绿色评价灰类等级

Table 3 Grey classification for green evaluation of railway tunnels

灰类等级	分级解释
不合格	不满足绿色铁路隧道的最低建设要求
合格	基本满足绿色铁路隧道的建设要求,取得的绿色节能、生态保护效益有限
绿色一星级	较好满足绿色铁路隧道的建设要求,取得一定的绿色节能、生态保护效益
绿色二星级	很好满足绿色铁路隧道的建设要求,取得明显的绿色节能、生态保护效益
绿色三星级	完全满足绿色铁路隧道的建设要求,取得显著的绿色节能、生态保护效益

### 3.3 构造白化权函数

白化权函数常见的表现形式一般有4种:典型白化权函数、上限测度白化权函数、适中测度白化权函数、下限测度白化权函数。结合本研究评价指标的取值标准、数据特征以及灰类等级个数,现构造白化权函数如图2所示。

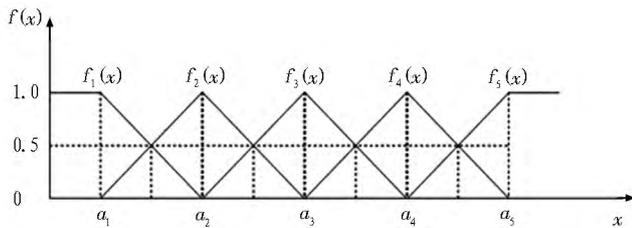


图2 白化权函数图

Fig. 2 Whitening power function graph

设  $f_j^k(x)$  为指标  $j$  关于灰类  $k$  的白化权函数,则  $f_{i,j}^k(x_{ij})$  为  $x_{ij}$  属于灰类  $k$  的概率。

$a_1, a_2, a_3, a_4$  和  $a_5$  分别表示各指标得分取值的界限值,同时也是指标  $j$  所属灰类  $k$  的分类界限值。

$a_1 = 1, a_2 = 3, a_3 = 5, a_4 = 7, a_5 = 9$  各灰类函数的表达式为:

$$f_j^1(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0, 3]; \\ 1, & x \in [0, 1]; \\ \frac{3-x}{2}, & x \in (1, 3)。 \end{cases} \quad (13)$$

$$f_j^2(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [1, 5]; \\ \frac{x-1}{2}, & x \in [1, 3]; \\ \frac{5-x}{2}, & x \in (3, 5)。 \end{cases} \quad (14)$$

$$f_j^3(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [3, 7]; \\ \frac{x-3}{2}, & x \in [3, 5]; \\ \frac{7-x}{2}, & x \in (5, 7)。 \end{cases} \quad (15)$$

$$f_j^4(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [5, 9]; \\ \frac{x-5}{2}, & x \in [5, 7]; \\ \frac{9-x}{2}, & x \in (7, 9)。 \end{cases} \quad (16)$$

$$f_j^5(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [7, 10]; \\ \frac{x-7}{2}, & x \in [7, 9]; \\ 1, & x \in (9, 10)。 \end{cases} \quad (17)$$

### 3.4 计算综合灰类等级

结合各评价指标的组合权重  $w_j$ , 计算各研究对象的灰类聚类系数,并确定最终综合灰类等级。

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_{i,j}^k(x_{ij}) \cdot w_j。 \quad (18)$$

$$\sigma_i = \max_{1 \leq k \leq p} \{ \sigma_i^k \}。 \quad (19)$$

式(18)–(19)中:  $\sigma_i^k$  为研究对象  $i$  属于灰类  $k$  的聚类系数;  $\sigma_i$  代表的灰类即为研究对象所属灰类等级。

## 4 实例分析

为验证上述评价指标体系及评价模型的实用性,选取广东省某典型铁路隧道段作为研究案例,线路全长 201.960 km。其中,正线路基段长 28.56 km、桥梁段长 111.15 km、隧道段长 62.25 km,桥隧比为 85.86%。

### 4.1 指标权重计算

为广泛收集不同专家对上述评价指标重要性程度的意见,向铁路隧道设计施工和运营管理等领域具有丰富工作经验的专家发放调研问卷,回收并整理了 41 份关于评价指标重要性得分的有效问卷。其中,来自隧道施工建设单位的技术人员所填的问卷占 50%,隧道设计单位占 40%,另有 10% 的问卷来源于铁路隧道管理单位、监理单位和科研单位。用 1–5 分表示评价指标的重要性得分情况,将专家打分的调研结果作为权重计算的基础样本数据,部分数据如表 4 所示。

表4 指标重要性得分情况(一级指标)

Table 4 Index importance score (Level 1 indicator)

指标	专家1	专家2	专家3	专家4	专家5	...	平均值
A <sub>1</sub>	4	5	4	4	4	...	4.34
A <sub>2</sub>	4	5	5	5	3	...	4.27
A <sub>3</sub>	3	5	5	4	3	...	3.85

结合式(1)–(12)可计算得到一级指标的主、客观及组合权重,结果如表 5 所示。

表5 一级指标权重计算结果

Table 5 Calculation results of primary indicator weights

一级指标	主观权重	客观权重	组合权重
A <sub>1</sub>	0.350 3	0.300 3	0.325 3
A <sub>2</sub>	0.341 8	0.465 7	0.403 7
A <sub>3</sub>	0.307 9	0.234 0	0.270 1

由一级指标的权重计算结果可知,绿色施工的权重占比最大,其次是绿色设计、绿色运营的影响。这一结果表明:在铁路隧道施工建设期间,相关资源和能源的消耗使用情况以及施工污染物排放后对生态环境的污染影响,将对铁路隧道全生命周期绿色等级的评价结

果产生重要影响。因此,如何在满足施工安全的情况下,做好资源能源的节约利用以及施工污染物的排放控制,是建设全生命周期绿色铁路隧道的重点考虑要素。

其余各二级、三级指标的权重计算结果分别如表 6、表 7 所示。

表 6 二级指标权重计算结果

Table 6 Calculation results of secondary indicator weights

二级指标	主观权重	客观权重	组合权重	二级指标	主观权重	客观权重	组合权重
A <sub>11</sub>	0.100 8	0.086 0	0.093 4	A <sub>23</sub>	0.060 1	0.061 4	0.060 7
A <sub>12</sub>	0.078 3	0.132 2	0.105 3	A <sub>24</sub>	0.075 1	0.055 1	0.065 1
A <sub>13</sub>	0.081 2	0.066 5	0.073 8	A <sub>25</sub>	0.071 9	0.048 1	0.060 0
A <sub>14</sub>	0.089 9	0.058 1	0.074 0	A <sub>31</sub>	0.166 7	0.083 3	0.125 0
A <sub>21</sub>	0.072 8	0.053 2	0.063 0	A <sub>32</sub>	0.141 2	0.187 4	0.164 3
A <sub>22</sub>	0.062 0	0.168 6	0.115 3				

表 7 三级指标权重计算结果

Table 7 Calculation results of third indicator weights

三级指标	主观权重	客观权重	组合权重	三级指标	主观权重	客观权重	组合权重
A <sub>111</sub>	0.048 6	0.019 1	0.033 8	A <sub>222</sub>	0.031 4	0.039 8	0.035 6
A <sub>112</sub>	0.052 2	0.017 6	0.034 9	A <sub>231</sub>	0.031 3	0.034 6	0.033 0
A <sub>121</sub>	0.031 9	0.022 3	0.027 1	A <sub>232</sub>	0.028 8	0.028 3	0.028 6
A <sub>122</sub>	0.023 4	0.017 4	0.020 4	A <sub>241</sub>	0.024 0	0.021 9	0.022 9
A <sub>123</sub>	0.023 0	0.047 4	0.035 2	A <sub>242</sub>	0.026 3	0.031 6	0.028 9
A <sub>131</sub>	0.025 8	0.046 7	0.036 3	A <sub>243</sub>	0.024 8	0.016 4	0.020 6
A <sub>132</sub>	0.027 8	0.030 2	0.029 0	A <sub>251</sub>	0.018 3	0.038 9	0.028 6
A <sub>133</sub>	0.027 6	0.032 8	0.030 2	A <sub>252</sub>	0.018 7	0.035 2	0.027 0
A <sub>141</sub>	0.022 7	0.035 3	0.029 0	A <sub>253</sub>	0.016 2	0.035 0	0.025 6
A <sub>142</sub>	0.023 0	0.028 3	0.025 6	A <sub>254</sub>	0.018 5	0.029 6	0.024 1
A <sub>143</sub>	0.022 3	0.029 1	0.025 7	A <sub>311</sub>	0.051 2	0.039 5	0.045 4
A <sub>144</sub>	0.021 8	0.028 2	0.025 0	A <sub>312</sub>	0.056 9	0.049 8	0.053 3
A <sub>211</sub>	0.017 4	0.026 6	0.022 0	A <sub>313</sub>	0.058 5	0.060 3	0.059 4
A <sub>212</sub>	0.020 3	0.015 2	0.017 7	A <sub>321</sub>	0.045 6	0.019 7	0.032 6
A <sub>213</sub>	0.019 1	0.019 4	0.019 3	A <sub>322</sub>	0.049 5	0.018 8	0.034 2
A <sub>214</sub>	0.016 0	0.017 7	0.016 9	A <sub>323</sub>	0.046 0	0.048 5	0.047 2
A <sub>221</sub>	0.030 6	0.018 7	0.024 7				

#### 4.2 灰色聚类分析

在获取项目相关资料后,向项目负责人充分说明铁路隧道绿色评价指标的分级标准,并邀请专家和项目负责人员依据案例工程的实际情况,对各指标的优劣程度进行打分量化,整理得到各指标的得分数据结果。需要注意的是,在确定铁路隧道绿色灰类等级时,仅需收集三级指标的得分数据,结合三级指标的组组合权重,即可计算得到待评铁路隧道工程的绿色灰类等级,部分指标的得分情况如表 8 所示。

表 8 铁路隧道绿色评价部分指标得分数据

Table 8 Score data of green evaluation indicators for railway tunnels

指标	指标得分
A <sub>111</sub>	10.00
A <sub>112</sub>	9.75
A <sub>121</sub>	9.50
A <sub>122</sub>	7.50
A <sub>123</sub>	7.50

#### 4.2.1 计算指标白化权值

依据专家对各指标打分评价的调研数据,结合上文构造的白化权函数,按式(13)—(17)计算得到聚类指标关于不同灰类的白化权函数值,部分结果如表9所示。

表9 铁路隧道部分指标白化权函数值

Table 9 Value of whitening power function for some indicators of railway tunnels

指标	不合格 $k=1$	合格 $k=2$	绿色一星级 $k=3$	绿色二星级 $k=4$	绿色三星级 $k=5$
$A_{111}$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
$A_{112}$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
$A_{121}$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
$A_{122}$	0.00	0.00	0.00	0.75	0.25
$A_{123}$	0.00	0.00	0.00	0.75	0.25

#### 4.2.2 确定灰类等级

在得到各指标的白化权函数值后,按式(18)可计算出待评铁路隧道关于5个绿色灰类等级的综合聚类系数,并由式(19)最终确定待评铁路隧道绿色度所属的灰类等级,如表10所示。

表10 待评铁路隧道绿色评价聚类系数与灰类等级

Table 10 Clustering coefficient and grey level of green evaluation for railway tunnels to be evaluated

不合格 $k=1$	合格 $k=2$	绿色一星级 $k=3$	绿色二星级 $k=4$	绿色三星级 $k=5$	绿色评价 灰类等级
0.000 00	0.000 00	0.014 14	0.379 41	0.606 25	绿色三星级

由表中计算结果可知,铁路隧道案例绿色评价聚类系数的最大值是0.606 25,表明该铁路隧道的绿色等级属于第五灰类,即从全生命周期的视角出发,对该铁路隧道的绿色度等级综合评价为“绿色三星级”,完

全符合绿色铁路隧道的建设要求。

## 5 讨论

通过综合评价,明确了该铁路隧道案例的绿色等级为“绿色三星级”,但影响评价结果的重点分析对象尚不清楚。水土保持、施工污染物排放控制、清洁能源利用等二级指标经查阅参考铁路相关标准规范,并广泛征集业内专家的意见汇总得到,通常是同类型铁路隧道工程关于绿色设计、绿色施工和绿色运营阶段通用考虑的指标要素,在同类型铁路隧道绿色评价指标体系的构建与绿色等级综合评价研究中具有普遍适用性<sup>[11-15]</sup>。而三级指标则是结合二级指标大类与待评铁路隧道工程自身的特点进行综合选取,三级指标的选取结果相较于二级指标更为灵活多变。因此,通过探究分析二级指标的绿色灰类等级,可准确识别非绿色或绿色程度不够理想的重点指标因素,并及时调整策略方案,为绿色铁路隧道的发展建设提供更直观的建议。依据上文构建的绿色评价模型可计算得到11个二级指标所属的聚类灰类,计算结果如表11所示。

由表11可知,新型绿色技术应用( $A_{12}$ )、材料资源节约利用( $A_{21}$ )、水资源节约利用( $A_{22}$ )以及清洁能源利用( $A_{32}$ )4个指标的绿色等级属于“绿色二星级”类别,稍逊于另外7个指标的综合评价结果“绿色三星级”。表明该铁路隧道工程的绿色建设可以采取如下措施优化改善。1)设计阶段:优化改进铁路隧道的支护方案,进一步扩大装配式建材和新能源动力机械等新型绿色环保建材和机械设备的使用比例。2)施工阶段:提高施工弃渣的回收利用效率与可再生材料的使用占比,优先使用本地建材,增大就地取材率;同时,注重雨水等非传统水源的收集利用,减少水资源的浪费。3)运营阶段:做好太阳能、光能等清洁能源的综合利用工作,能够大幅降低电力能源的损耗。

表11 二级指标绿色评价聚类系数与灰类等级

Table 11 Cluster coefficient and grey class grade of green evaluation for secondary indicators

二级指标	不合格 $k=1$	合格 $k=2$	绿色一星级 $k=3$	绿色二星级 $k=4$	绿色三星级 $k=5$	绿色评价 灰类等级
$A_{11}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.068 70	绿色三星级
$A_{12}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.041 70	0.041 00	绿色二星级
$A_{13}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.095 50	绿色三星级
$A_{14}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.105 30	绿色三星级
$A_{21}$	0.000 00	0.000 00	0.010 56	0.048 78	0.016 56	绿色二星级
$A_{22}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.060 30	0.000 00	绿色二星级
$A_{23}$	0.000 00	0.000 00	0.003 58	0.025 02	0.033 00	绿色三星级
$A_{24}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.018 89	0.053 51	绿色三星级
$A_{25}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.017 47	0.087 83	绿色三星级
$A_{31}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.061 80	0.096 30	绿色三星级
$A_{32}$	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.105 45	0.008 55	绿色二星级

## 6 结论

基于单一研究阶段或影响因素的评价结果难以全面反映铁路隧道的绿色建设水平,本文首先明确了绿色铁路隧道的定义,在充分考虑铁路隧道与生态环境之间的联系与影响作用的基础上,建立了铁路隧道全生命周期绿色等级综合评价体系,选用某典型铁路隧道作为研究案例,验证了该评价体系的实用性,得到的主要结论如下。

1)从铁路隧道的规划设计、施工建设和运营维护3个阶段讨论了对生态环境的影响作用,遵循系统性、代表性和可操作性的指标选取原则,分阶段、分层次建立铁路隧道全生命周期绿色评价指标体系。

2)选用层次分析法和熵权法计算评价指标的主、客观权重,并取二者重要性均衡得到组合权重值。根据计算结果,绿色施工的权重影响最大,其次是绿色设计,绿色运营的权重占比最小。这表明在铁路隧道的施工建设期间,做好资源能源的节约利用与施工污染物的排放控制是建设绿色铁路隧道的重要环节。

3)考虑到铁路隧道绿色评价指标数据的收集难度大、样本数据少,铁路隧道的绿色等级评价系统是一个典型的灰色系统。以灰色聚类评价理论为基础,通过观察分析评价指标取值的结构特征,构造了指标隶属于不同灰类等级的白化权函数,并构建出铁路隧道全生命周期绿色等级综合评价模型。

4)将构建好的铁路隧道绿色等级综合评价体系应用于广州市某典型铁路隧道,经分析计算确定该案例为“绿色五星级”,满足绿色铁路隧道的建设要求。此外,通过计算分析评价指标的灰色聚类系数,横向对比其灰色聚类等级,能够识别出非绿色或绿色程度不够理想的指标因素,可为绿色铁路隧道的可持续建设针对性提出改善措施。

### 参考文献 (References):

- [1] 郭亚林,孙文昊,许洪伟,等. 地铁隧道盾构及钻爆法施工碳排放强度对比[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 14.  
GUO Yalin, SUN Wenhao, XU Hongwei, et al. Comparison of carbon emission intensity between shield tunneling and drilling and blasting methods in subway tunnel construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3): 14.
- [2] 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 Lanken[J].

- European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2012, 12(1): 39.
- [3] BAO X, LI H. Study on the evaluation method of subgrade slope green protection effect in dry-hot valley of Sichuan-Tibet railway [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020(11): 1.
- [4] TAVANA M, IZADIKHAH M, SAEN R, et al. An integrated data envelopment analysis and life cycle assessment method for performance measurement in green construction management [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 28(1): 664.
- [5] LIU Q, QIU Z, LI M, et al. Evaluation and empirical research on green mine construction in coal industry based on the AHP-SPA model[J]. Resources Policy, 2023, 82(1): 103503.
- [6] 闫林君,杨继兴,鲍学英,等. 山区铁路工程节能设计关键要素识别研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报: 1 [2023-07-30]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230283>.  
YAN Linjun, YANG Jixing, BAO Xueying, et al. Research on key elements identification of energy saving design for railway engineering in mountain areas [J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering: 1 [2023-07-30]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230283>.
- [7] 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.  
JIANG Zhenxiong, XUE Peng, MA Xin, et al. Research on green tunnel evaluation system [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(4): 586.
- [8] 郭春,郭亚林,陈政. 交通隧道工程碳排放核算及研究进展分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 1.  
GUO Chun, GUO Yalin, CHEN Zheng. Analysis of carbon emission accounting and research progress in traffic tunnel engineering [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 1.
- [9] 郭亚林,郭春. 铁路隧道施工期碳排放计算模型研究[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(6): 5.  
GUO Yalin, GUO Chun. Research on carbon emission calculation model for railway tunnel construction period [J]. Transportation Energy Conservation and Environmental Protection, 2021, 17(6): 5.
- [10] 王花兰,吴芳,巩亮. 基于全生命周期的铁路客运站绿色等级评价[J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 14.  
WANG Hualan, WU Fang, GONG Liang. Green level evaluation of railway passenger stations based on the whole life cycle [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 14.
- [11] 鲍学英. 西北寒旱地区铁路绿色施工等级评价体系构

- 建及应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- BAO Xueying. Research on the construction and application of green construction grade evaluation system for railway in the cold and drought regions of northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [12] 贺晓霞, 鲍学英, 王起才. 基于组合方法计算权重的绿色铁路客站综合评估[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(4): 103.
- HE Xiaoxia, BAO Xueying, WANG Qicai. Comprehensive evaluation of green railway passenger stations based on combination method for calculating weights[J]. Railway Standard Design, 2016, 60(4): 103.
- [13] 吴元金, 刘永胜, 尹龙, 等. 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.
- WU Yuanjin, LIU Yongsheng, YIN Long, et al. Research on low-carbon evaluation of railway tunnel construction process based on grey clustering[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(3): 353.
- [14] 于尧. 铁路绿色施工环境保护综合评价的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- YU Yao. Research on comprehensive evaluation of environmental protection for green construction of railways[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [15] 张宇. 高速铁路绿色评价指标体系及评价结果研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- ZHANG Yu. Research on the green evaluation index system and evaluation results of high speed railways[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [16] 黄海龙, 王恩茂. 基于组合权的建筑工程绿色施工水平的灰色综合评价[J]. 工程管理学报, 2014, 28(1): 103.
- HUANG Hailong, WANG Enmao. Grey comprehensive evaluation of green construction level in building engineering based on combination weights[J]. Journal of Engineering Management, 2014, 28(1): 103.
- [17] 龚剑, 胡乃联, 崔翔, 等. 基于 AHP-TOPSIS 评判模型的岩爆倾向性预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1442.
- GONG Jian, HU Nailian, CUI Xiang, et al. Prediction of rock burst tendency based on AHP-TOPSIS evaluation model[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1442.
- [18] 单媛, 李朔, 方小斌, 等. 基于改进熵权协调分析法的农村道路安全评价决策[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(12): 2720.
- SHAN Yuan, LI Shuo, FANG Xiaobin, et al. Rural road safety evaluation decision-making based on improved entropy weight coordination analysis method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(12): 2720.
- [19] 吴东. 基于层次—熵权法和灰色关联分析的开放街区多目标比选研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- WU Dong. Research on multi-objective comparison and selection of open blocks based on hierarchical entropy weight method and grey correlation analysis[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [20] 汤飞, 赵方, 宁雪, 等. 铁路领域科技创新平台评价研究: 基于 PCA-灰色聚类综合评价模型[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2022, 21(3): 124.
- TANG Fei, ZHAO Fang, NING Xue, et al. Evaluation of science and technology innovation platforms in railway field: Based on PCA-Grey clustering evaluation model[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2022, 21(3): 124.