

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20220729001

文章编号:1672-9331(2024)02-0113-09

引用格式:肖秋明,郑婵娟.考虑碳排放的市政道路绿色施工评价研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(2):113-121.

Citation: XIAO Qiuming, ZHENG Chanjuan. Research on evaluation of green construction of municipal road considering carbon emissions[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(2): 113-121.

# 考虑碳排放的市政道路绿色施工评价研究

肖秋明, 郑婵娟

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**【目的】有效减少施工过程中的碳排放量, 优选出绿色施工水平较高的市政道路建造方案, 提升市政道路科技创新和绿色建造水平。【方法】从碳减排的角度出发, 针对市政道路绿色施工综合评价问题, 结合市政道路施工的特点, 建立了市政道路绿色施工评价体系和标准, 构建了基于组合赋权的灰色关联模型, 在综合主、客观权重基础上进一步运用灰色关联法计算各指标和各路段施工方案的灰色关联度, 分析比较绿色施工水平。【结果】该研究建立的市政道路绿色施工评价体系具有适用性, 通过长沙市某市政道路各路段的施工建造方案对所提出的模型进行了验证, 其结果与实际情况相符, 据此确定了一套合理的市政道路绿色施工方案。【结论】基于组合赋权的灰色关联理论在市政道路绿色施工评价中的应用具有可行性和科学性, 并为市政道路绿色施工方案设计提供了参考依据。

**关键词:**道路工程; 绿色施工; 碳减排; 组合赋权; 灰色关联

中图分类号: U415.11

文献标志码: A

## Research on evaluation of green construction of municipal road considering carbon emissions

XIAO Qiuming, ZHENG Chanjuan

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** [Purposes] To effectively reduce carbon emissions during construction process, the construction schemes of municipal road with higher level of green construction is optimized and selected to improve the level of scientific and technological innovation and green construction for municipal roads. [Methods] From the perspective of carbon emission reduction, aiming at the comprehensive evaluation problem of green construction of municipal road, and combined with the characteristics of municipal road construction, the evaluation system and standards are established for green construction of municipal road, and a grey correlation model was constructed based on combination weighting. On the basis of the comprehensive subjective and objective weights, the grey correlation degrees of all indexes and construction schemes of each road section are further calculated by the grey correlation method, then the green construction levels are analyzed and compared. [Findings] The municipal road green construction evaluation system established in this

收稿日期: 2022-07-29; 修回日期: 2022-09-29; 接受日期: 2022-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878077); 中铁五局集团有限公司科技开发计划项目(2020[12])

通信作者: 肖秋明(1969—)(ORCID: 0000-0002-0712-1556), 女, 副教授, 主要从事土木工程管理方面的研究。

E-mail: 604046529@qq.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

study demonstrates applicability, as the proposed model is validated through the construction schemes of various sections of municipal roads in Changsha. The validation results align with the actual situation, leading to the identification of a rational set of green construction schemes for municipal roads. **[Conclusions]** The application of grey correlation theory based on combination weighting in the evaluation of green construction of municipal road is feasible and scientific, which provides a reference for the scheme design of green construction of municipal road.

**Key words:** road engineering; green construction; carbon emission reduction; combination weighting; grey correlation

**Foundation item:** Project (51878077) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2020 [12]) supported by Science and Technology Development Program of China Railway NO.5 Engineering Group Co., Ltd.

**Corresponding author:** XIAO Qiuming (1969—) (ORCID: 0000-0002-0712-1556), female, associate professor, research interest: civil engineering management. E-mail: 604046529@qq.com

## 0 引言

自第一次工业革命以来,环境问题日益突出。特别是发达国家大量消费化石能源以及破坏森林植被导致排放的 $\text{CO}_2$ 不断增加,加剧了全球气候变暖,成为了当今人类社会面临的巨大挑战之一。国际能源署统计数据显示,2020年全球碳排放主要来自能源发电与供热、交通运输、制造业及建筑业4个领域。因此,作为大量消耗资源、影响环境的交通运输业和建筑业,有效控制其碳排放量,实施绿色施工是非常重要的,也是节能减排、实现绿色发展的必然要求。

近年来,国内外学者对于绿色施工的研究主要针对建筑工程、铁路工程、公路工程等方面。OH等<sup>[1]</sup>提出了一种钢筋混凝土双向楼板绿色施工的优化设计模型,以获得最小化环境影响的设计;李远远等<sup>[2]</sup>对建筑行业的绿色施工方案进行了综合评价并建立了施工方案数据库,实现了在施工过程中对方案进行动态优化的目标;王乾坤等<sup>[3-4]</sup>根据装配式建筑的特点建立了绿色施工评价体系,并结合实例分析了施工绿色度;石振武等<sup>[5]</sup>从环境影响和公路建设的角度出发,对季冻区公路绿色施工进行了研究;李邦武等<sup>[6]</sup>通过分析公路施工和环境保护的矛盾,建立了海南省绿色公路评价体系;吴伟东等<sup>[7]</sup>、李艳鸽等<sup>[8]</sup>针对高速铁路的特点建立了铁路工程绿色施工评价体系;杨玉胜等<sup>[9]</sup>通过分析影响深基坑支护工程绿

色施工的因素,对施工方案进行了优选。

关于建筑工程、铁路工程和公路工程的绿色施工评价体系的研究已经趋向成熟,相关方面都有相应的标准规范。然而,我国目前对市政道路绿色施工的研究仍停留在环境保护措施分析上<sup>[10-11]</sup>,尚未形成一套完整且能有效指导实践的绿色施工评价体系。

大多数学者主要侧重于“四节一环保”建立绿色施工评价体系模型<sup>[12-14]</sup>,以为工程建设施工提供科学指导。然而,传统的绿色施工评价体系均未考虑碳排放量,因此,在致力于实现“双碳”目标的背景下,从低碳经济的视角来研究绿色施工具有一定的创新性和实际意义。作为交通中重要的一环,市政道路具有复杂性、长期性、系统性等特点且容易造成环境压力,然而,指导其绿色施工方面的规范极少。基于此,本研究在考虑碳减排的基础上,结合市政道路的特点,建立了一套科学合理的市政道路绿色施工评价体系,并将碳排放量纳入评价体系中,以期实现真正意义上的“绿色建造”,为我国市政道路实施绿色施工提供依据。

本研究从低碳经济的角度出发,在已有研究的基础上综合考虑市政道路的施工特点和绿色施工的目标要求。首先,通过频次分析和专家意见法筛选指标,将碳排放量纳入评价指标中,尝试从低碳环保、资源节约、绿色施工管理、道路空间设计、技术与创新5个方面建立市政道路绿色施工评价体系;其次,建立基于组合赋权的灰色关联模型,充分减少主观因素的影响;最后,结合实际案

例进行分析,验证该模型的可行性。

1 市政道路绿色施工综合评价体系的构建

1.1 评价指标的选取

1.1.1 评价指标初筛

由于市政道路涉及车行道、人行道、管网、绿化带和人防设施等多个方面,具有施工复杂、工程量大、专业性强的特点,因此,构建科学合理的绿色施工评价指标体系需要充分结合市政道路的这些特性。通过研究市政道路的施工环境及其独有的施工特点,从碳减排的角度出发,在满足独立性、先进性、科学性的基础上,检索阅读了 60 余篇国内外与绿色施工有关的文献以及绿色施工方面的规范和文件,并将绿色施工评价指标汇总,剔除重复的评价指标,选取使用频率较高以及与本研

究相关性较强的指标,初步筛选出 36 个评价指标。

1.1.2 评价指标二次筛选

运用专家意见法,并通过收集市政道路工程资料进行指标的二次筛选,对初步筛选的 36 个指标设计调查问卷,采用 Likert5 级量表对评价指标的重要程度进行评分。本次调查问卷共发放 100 份,实际收回有效问卷 79 份,有效回收率为 79%。应用统计产品与服务解决方案(statistical product and service solutions, SPSS)软件对数据进行信度分析,计算得出克朗巴哈系数(Cronbach's alpha)为 0.865,满足数据可靠性要求。运用方差检验和 *t* 检验将影响较小、相关性较强的因素进行删除和修正合并,进一步选出具有代表性、参考性、科学合理性的评价指标。通过反复甄选,最终确定了低碳环保、资源节约、绿色施工管理、道路空间设计、技术与创新 5 个一级指标,以及 27 个二级指标,如表 1 所示。

表 1 市政道路绿色施工等级划分  
Table 1 Grade division for green construction of municipal road

一级指标	二级指标	分级标准					指标类型
		不合格	合格	中等	良好	优秀	
低碳环保 $A_1$	扬尘高度 $A_{11}/m$	>3.0	(2.5, 3.0]	(2.0, 2.5]	(1.5, 2.0]	[0, 1.5]	定量
	“三废”排放与控制 $A_{12}$	[0, 6)	[6, 7)	[7, 8)	[8, 9)	[9, 10]	定性
	噪声控制 $A_{13}/dB$	(70, 100]	(65, 70]	(60, 65]	(55, 60]	[0, 55]	定量
	建筑垃圾回收利用率 $A_{14}/\%$	[0, 20)	[20, 30)	[30, 40)	[40, 50)	[50, 100]	定量
	建筑物及管线保护 $A_{15}$	[0, 6)	[6, 7)	[7, 8)	[8, 9)	[9, 10]	定性
	材料运输本地化率 $A_{16}/\%$	[0, 40)	[40, 50)	[50, 60)	[60, 70)	[70, 100]	定量
	道路绿地率 $A_{17}/\%$	[0, 15)	[15, 20)	[20, 25)	[25, 30)	[30, 40]	定量
	碳排放量 $A_{18}/(kg \cdot m^{-2})$	$\geq 20$	[18, 20)	[16, 18)	[14, 16)	[0, 14)	定量
资源节约 $A_2$	临时土地使用率 $A_{21}/\%$	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100]	定量
	临时用地保护 $A_{22}$	[0, 6)	[6, 7)	[7, 8)	[8, 9)	[9, 10]	定性
	用水效率 $A_{23}/\%$	[0, 20)	[20, 40)	[40, 60)	[60, 80)	[80, 100]	定量
	非传统水源利用率 $A_{24}/\%$	[10, 15)	[15, 20)	[20, 25)	[25, 30)	[30, 100]	定量
	废旧材料利用率 $A_{25}/\%$	[0, 5)	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	[20, 100]	定量
	周转材料重复使用率 $A_{26}/\%$	[0, 40)	[40, 50)	[50, 60)	[60, 70)	[70, 100]	定量
	绿色材料使用率 $A_{27}/\%$	[0, 20)	[20, 30)	[30, 40)	[40, 50)	[50, 100]	定量
	节能机具使用率 $A_{28}/\%$	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)	[90, 100]	定量
绿色施工管理 $A_3$	节能照明灯具使用率 $A_{29}/\%$	[0, 50)	[50, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 100]	定量
	组织与协调管理 $A_{31}$	[0, 6)	[6, 7)	[7, 8)	[8, 9)	[9, 10]	定性
	交通安全管理 $A_{32}$	[0, 6)	[6, 7)	[7, 8)	[8, 9)	[9, 10]	定性
	苗木移植存活率 $A_{33}/\%$	[70, 80)	[80, 85)	[85, 90)	[90, 95)	[95, 100]	定量
	文明施工管理 $A_{34}$	[0, 6)	[6, 7)	[7, 8)	[8, 9)	[9, 10]	定性
	人员安全与健康安全管理 $A_{35}$	[0, 6)	[6, 7)	[7, 8)	[8, 9)	[9, 10]	定性

表1 (续)  
Table 1 (Continued)

一级指标	二级指标	分级标准					指标类型
		不合格	合格	中等	良好	优秀	
道路空间设计 $A_4$	路网节点交叉设计 $A_{41}$	[0,6)	[6,7)	[7,8)	[8,9)	[9,10]	定性
	道路横断面设计 $A_{42}$	[0,6)	[6,7)	[7,8)	[8,9)	[9,10]	定性
技术与创新 $A_5$	耐久性路面结构应用 $A_{51}$	[0,6)	[6,7)	[7,8)	[8,9)	[9,10]	定性
	创新技术及专利成果 $A_{52}$	[0,6)	[6,7)	[7,8)	[8,9)	[9,10]	定性
	施工新技术应用比例 $A_{53}/\%$	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]	定量

## 1.2 评价指标分级标准的确定

市政道路管理隶属于中华人民共和国住房和城乡建设部。市政道路分为快速路、主干路、次干路、支路4个等级,这些不同等级的市政道路施工在一定程度上与相应等级的公路施工具有相似之处。因此,本研究以现有的研究成果、科技指南和相关标准规范为基础,参考了文献[3]、[7]和[13]关于绿色施工评价研究中设立的分级标准,以及《住房城乡建设部绿色施工科技示范工程技术指标及实施与评价指南》《绿色施工导则》《建筑与市政工程绿色施工评价标准》(DB37/T 5087—2021)等现行标准中对资源节约和环境保护的相关规定,还参考了《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)和《建筑工程绿色施工评价标准》(GB/T 50640—2010)中关于施工管理的规定,借鉴了《公路工程绿色施工导则》《湖南省建筑工程绿色施工评价标准》(DBJ43/T 101—2017)等同类评价项目中的约定标准,最后结合专家意见和市政道路的施工特点,综合国内外评估体系分级标准,将评价标准划分为5个等级,据此建立评价标准矩阵 $Q=\{Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5\}$ ,其中, $Q_1=\{\text{优秀}\}$ 、 $Q_2=\{\text{良好}\}$ 、 $Q_3=\{\text{中等}\}$ 、 $Q_4=\{\text{合格}\}$ 、 $Q_5=\{\text{不合格}\}$ 。等级优秀得分区间为[9,10],良好得分区间为[8,9),中等得分区间为[7,8),合格得分区间为[6,7),不合格得分区间为[0,6)。各评价指标等级标准见表1。

## 2 基于组合赋权的市政道路绿色施工评价模型

采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和模糊理论相结合的方法进行评估时,可能会因主观性强导致评估结果不客观<sup>[15]</sup>。针对这一问题,一方面需要结合粒子群优化算法(particle

swarm optimization, PSO)改善权重,使结果满足客观需要;另一方面考虑到CRITIC(criteria importance though intercriteria correlation)法是根据数据的波动性和指标之间的相关性来赋值指标权重的,完全依赖于数据本身的客观性,结合CRITIC法进行组合赋权。另外,传统的一致性检验计算会造成特征值和特征向量的精确求解比较复杂,可能出现权重结果失真的情况。基于此,本研究采用灰色关联理论对评价结果进行分析,由此构建基于组合赋权的灰色关联模型并确定市政道路绿色施工评价流程,如图1所示。

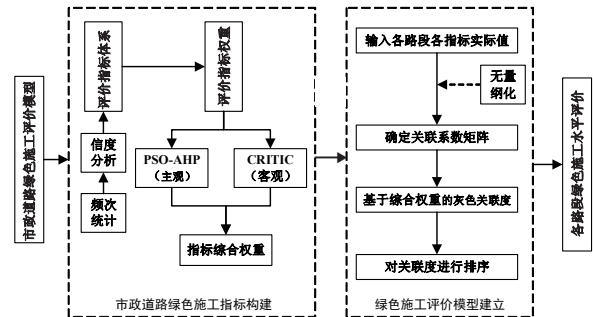


图1 市政道路绿色施工综合评价流程

Fig. 1 Flow chart of comprehensive evaluation on green construction of municipal road

### 2.1 基于 PSO-AHP 确定主权重

PSO-AHP法将PSO算法的最佳寻优性能与传统AHP法的基本原理相结合,通过选取合适的目标函数将两者联系起来,从而实现快速求解并提高权重的精度。该方法的具体求解步骤如下:①构建层次结构模型;②创建判断矩阵;③建立权重优化模型;④利用PSO-AHP模型求解权重并进行一致性检验,检验结果见表2, $C_i$ 为一致性指标, $C_R$ 为一致性比率, $R_i$ 为随机一致性指标,当 $C_R < 0.10$ 时通过一致性检验;⑤归一化处理<sup>[15]</sup>。据此求解得到基于PSO-AHP的主权重。

表 2 一致性检验结果

Table 2 Consistency checking results

最大特征根	$C_1$	$R_1$	$C_R$	一致性检验结果
29.199	0.085	1.663	0.051	通过

## 2.2 基于 CRITIC 客观赋权的权重确定

CRITIC 法是基于评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来综合衡量指标的客观权重赋权法。根据市政道路评价指标的特点,采用 CRITIC 法计算客观权重<sup>[16]</sup>。确定客观权重的步骤如下:

- 1) 首先对数据进行无量纲化处理。
- 2) 计算变异性指标  $V_j$ 。

$$\bar{u}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ij}, V_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{ij} - \bar{u}_j)^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中:  $\bar{u}_j$  为  $n$  个方案中指标  $u_j$  的平均值;  $V_j$  为评价指标  $u_j$  的标准差。

- 3) 计算相关系数  $r_{ij}$ , 从而得出信息量  $C_j$ ,  $C_j$  越大, 权重越大。

$$\left\{ \begin{aligned} r_{ij} &= \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ki} - \bar{u}_i)(u_{kj} - \bar{u}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (u_{ki} - \bar{u}_i)^2 \sum_{k=1}^n (u_{kj} - \bar{u}_j)^2}}, i \neq j \\ C_j &= V_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中:  $\bar{u}_i$  为  $n$  个方案中指标  $u_i$  的平均值;  $r_{ij}$  为指标  $u_i$  与指标  $u_j$  的相关系数。

- 4) 计算第  $j$  个指标的客观权重  $W_{vj}$ , 如式(3)所示:

$$W_{vj} = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (3)$$

## 2.3 综合权重的确定

假设基于 PSO-AHP 得出指标的主观权重为  $W_a = (W_{a1}, W_{a2}, \dots, W_{an})$ , 用 CRITIC 法得出客观权重为  $W_c = (W_{c1}, W_{c2}, \dots, W_{cn})$ , 则评价指标  $X_i$  的综合权重  $W_i$  为

$$W_i = \frac{W_{ai} W_{ci}}{\sum_{i=1}^n W_{ai} W_{ci}} \quad (4)$$

式中:  $W_{ai}$  为第  $i$  个指标的主观权重;  $W_{ci}$  为第  $i$  个指标的客观权重。

最终综合权重为  $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ 。

## 2.4 基于综合权重的灰色关联理论评价方法

灰色关联理论评价方法是一种探索主要因素之间定性和定量关系的数学分析方法, 通过方案与参考方案的充分比较来完成评价。运用灰色关联理论评价方法可以帮助了解在众多的评价指标中哪些因素是主要的, 哪些是次要的, 哪些指标具有积极的作用, 哪些指标的作用是消极的。该方法的基本思想是根据序列曲线几何形状的相似性确定相关性, 通过在分析中引入关联度, 可以解决使用数理统计方法进行系统分析所造成的缺陷。灰色关联理论评价方法同样适用于常规和无规律样本量。此外, 该方法计算量小且非常方便<sup>[17]</sup>。其评价步骤如下:

- 1) 确定母序列与子序列。母序列作为一个理想的参照标准通常由各指标的最优值构成, 可表示为  $Z_0 = (Z_{01}, Z_{02}, \dots, Z_{0n})$ 。子序列反映各指标与母序列之间的关联关系, 表示为  $Z_i = (Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, \dots, Z_{in}), (i=1, 2, \dots, m)$ 。

- 2) 对原始数据进行无量纲化处理。

- 3) 计算母序列与子序列的关联系数  $R_{ij}$ , 即:

$$R_{ij} = \frac{\min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |Z_{0j} - Z_{ij}| + \rho \cdot \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |Z_{0j} - Z_{ij}|}{|Z_{0j} - Z_{ij}| + \rho \cdot \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |Z_{0j} - Z_{ij}|} \quad (5)$$

通常取分辨系数  $\rho$  为 0.5, 关联系数矩阵  $R$  如式(6)所示:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & \dots & R_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

- 4) 求解关联度  $G = (G_1, G_2, \dots, G_m)$ , 如式(7)所示:

$$G = W \times R^T \quad (7)$$

- 5) 对关联度进行排序并分析结果。

当评价对象的指标体系为多层次构成时, 可在上述单层次灰色综合评价的基础上由多级指标向一级指标逐级分层评价, 评价方法相同。

## 3 案例分析

### 3.1 工程概况

以长沙市某市政工程为例, 该工程包含 24 个

非经营性子项目,其中17个为城市道路改造项目。本研究从中选出5个具有代表性的市政道路子项目进行分析,这5个子项目分别命名为路段L1、L2、L3、L4和L5。为响应长沙市“资源节约型、环境友好型”两型社会的建设,同时根据本项目在区域路网中的功能与作用,按照现行《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012),本项目在道路建设中积极推进绿色道路建造技术。

### 3.2 权重和模型计算

本项目中的定量指标数据可通过项目的施工组织设计和实地调研等方式获取,其中碳排放量 $A_{18}$ 为单位面积碳排放量,是通过参考文献[18]按式(8)计算出路段总碳排放量后,再根据路段面积确定的,主要考虑道路施工过程中运输汽车运输材料和机械设备作业时产生的碳排放量。另外,对于本项目中城市主干路、次干路和支路,分别参照一、二、三级公路的标准计算。其余的定性指标由相关领域的专家打分确定,本次邀请了10名从事市政工程领域方面的专家,其中有6名专家不同程度地参与了本项目,采用5级标度法对各评价指标打分,然后取截尾平均数作为指标最后的得分。应用AHP-CRITIC组合赋权法计算准则层和目标层权重,从而得出市政道路绿色施工评价指标体系的综合权重,如表3所示。

$$\begin{cases} E_t = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (N_{ki} \times D_{ki} \times F_k \times C_k \times M_i) \\ E_n = \sum_{j=1}^n (N_j \times F_j \times C_j) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $E_t$ 为运输汽车运输材料时产生的碳排放量,kg; $E_n$ 为机械设备作业时产生的碳排放量,kg; $k$ 为汽车类型; $i$ 为运输材料类型; $j$ 为机械设备类型; $N$ 为运输汽车台班量,台班; $D$ 为运距,m; $F$ 为燃料消耗量,kg; $C$ 为燃料的 $\text{CO}_2$ 排放因子,kg $\text{CO}_2$ /kg; $M$ 为运输材料的体积或重量, $\text{m}^3$ 。

以路段L1为例,由式(8)并结合路段面积计算得出的单位面积碳排放量如表4所示。

据此,首先对5个路段的绿色施工评价指标结果进行无量纲化处理,母序列由每个评价指标结果的最优值组成,子序列由各指标构成,计算过程以二级指标 $A_{11}$ 为例,求得其子序列 $Z_1=(Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}, Z_{15})^T=(0.667, 1.000, 0.000, 0.556, 0.111)^T$ ;

表3 市政道路绿色施工评价指标权重结果

Table 3 Weight results of evaluation indexes for green construction of municipal road

一级指标	权重	二级指标	主观权重	客观权重	综合权重
$A_1$	0.336	扬尘高度 $A_{11}$	0.037	0.037	0.037
		“三废”排放与控制 $A_{12}$	0.043	0.035	0.041
		噪声控制 $A_{13}$	0.020	0.037	0.020
		建筑垃圾回收利用率 $A_{14}$	0.016	0.034	0.015
		建筑物及管线保护 $A_{15}$	0.039	0.036	0.038
		材料运输本地化率 $A_{16}$	0.055	0.040	0.059
		道路绿地率 $A_{17}$	0.061	0.041	0.067
		碳排放量 $A_{18}$	0.063	0.035	0.059
$A_2$	0.292	临时土地使用率 $A_{21}$	0.038	0.042	0.043
		临时用地保护 $A_{22}$	0.016	0.042	0.018
		用水效率 $A_{23}$	0.023	0.036	0.022
		非传统水源利用率 $A_{24}$	0.024	0.034	0.022
		废旧材料利用率 $A_{25}$	0.042	0.036	0.041
		周转材料重复使用率 $A_{26}$	0.015	0.038	0.015
		绿色材料使用率 $A_{27}$	0.064	0.036	0.062
		节能机具使用率 $A_{28}$	0.027	0.040	0.029
		节能照明灯具使用率 $A_{29}$	0.037	0.040	0.040
$A_3$	0.202	组织与协调管理 $A_{31}$	0.016	0.038	0.017
		交通安全管理 $A_{32}$	0.047	0.037	0.047
		苗木移植存活率 $A_{33}$	0.032	0.034	0.029
		文明施工管理 $A_{34}$	0.063	0.040	0.068
		人员安全与健康安全管理 $A_{35}$	0.044	0.035	0.041
$A_4$	0.068	路网节点交叉设计 $A_{41}$	0.054	0.035	0.051
		道路横断面设计 $A_{42}$	0.017	0.037	0.017
$A_5$	0.102	耐久性路面结构应用 $A_{51}$	0.068	0.034	0.062
		创新技术及专利成果 $A_{52}$	0.016	0.037	0.016
		施工新技术应用比例 $A_{53}$	0.024	0.037	0.024

表4 L1单位面积碳排放量

Table 4 Carbon emissions per unit area of L1

碳排放量/kg		路段面积/ $\text{m}^2$	单位面积碳排放量/ (kg· $\text{m}^{-2}$ )
运输材料	设备作业		
264 586.36	29 758.64	15 500	18.99

再根据式(5)计算关联系数,取 $\rho=0.5$ ,由式(6)可得关联系数矩阵 $R=(R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{15})^T=(0.600, 1.000, 0.333, 0.529, 0.360)^T$ ;然后根据式(7)及表3中的综合权重计算各个路段各个指标的关联度,以路段L1的 $A_{11}$ 关联度计算为例, $G_1=R_{11} \times W_1=0.600 \times 0.037=0.022$ 。同理,可得其余二级指标的

关联度,如表5所示。通过比较表5中各个指标的灰色关联度可知,影响市政道路绿色施工水平的主要因素有 $A_{16}$ 、 $A_{17}$ 和 $A_{34}$ 。因此,在市政道路施工过程中,遵循材料就近获取的原则,提高道路绿化程度,严格执行文明施工管理是实现碳减排和提高绿色施工水平的有效途径。

以 $A_1$ 为例计算一级指标关联度。 $A_1$ 共有8个二级指标,其一级关联度 $G=(W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8) \times (R_1^T, R_2^T, R_3^T, R_4^T, R_5^T) = (0.231, 0.240, 0.151, 0.168, 0.204)$ 。同理,计算其余一级指标的关联度,如表6所示。

表5 各路段绿色施工二级指标关联度值

Table 5 Correlation values of second grade indexes of green construction in various sections

评价指标		L1	L2	L3	L4	L5	$\Sigma$
$A_1$	$A_{11}$	0.022	0.037	0.012	0.020	0.013	0.104
	$A_{12}$	0.041	0.015	0.019	0.014	0.023	0.112
	$A_{13}$	0.010	0.014	0.020	0.007	0.009	0.060
	$A_{14}$	0.007	0.015	0.006	0.005	0.009	0.042
	$A_{15}$	0.017	0.013	0.024	0.038	0.023	0.115
	$A_{16}$	0.046	0.059	0.020	0.022	0.046	0.193
	$A_{17}$	0.028	0.067	0.023	0.023	0.051	0.192
	$A_{18}$	0.060	0.020	0.028	0.041	0.028	0.177
$A_2$	$A_{21}$	0.014	0.017	0.043	0.014	0.015	0.103
	$A_{22}$	0.015	0.018	0.007	0.016	0.006	0.062
	$A_{23}$	0.011	0.007	0.008	0.022	0.009	0.057
	$A_{24}$	0.011	0.008	0.007	0.009	0.022	0.057
	$A_{25}$	0.019	0.033	0.014	0.041	0.033	0.140
	$A_{26}$	0.006	0.015	0.011	0.009	0.005	0.046
	$A_{27}$	0.021	0.031	0.062	0.024	0.028	0.166
	$A_{28}$	0.010	0.010	0.015	0.010	0.029	0.074
	$A_{29}$	0.040	0.028	0.025	0.031	0.013	0.137
$A_3$	$A_{31}$	0.006	0.016	0.007	0.010	0.005	0.044
	$A_{32}$	0.017	0.018	0.024	0.016	0.047	0.122
	$A_{33}$	0.029	0.018	0.011	0.010	0.014	0.082
	$A_{34}$	0.036	0.025	0.043	0.068	0.023	0.195
	$A_{35}$	0.041	0.021	0.015	0.014	0.025	0.116
$A_4$	$A_{41}$	0.024	0.017	0.027	0.051	0.035	0.154
	$A_{42}$	0.009	0.006	0.013	0.017	0.010	0.055
$A_5$	$A_{51}$	0.037	0.029	0.021	0.062	0.025	0.174
	$A_{52}$	0.005	0.007	0.016	0.008	0.014	0.050
	$A_{53}$	0.009	0.016	0.008	0.009	0.024	0.066

表6 各路段绿色施工一级指标关联度值

Table 6 Correlation values of first grade indexes of green construction in various sections

路段	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$
L1	0.231	0.145	0.052	0.033	0.052
L2	0.240	0.168	0.052	0.023	0.052
L3	0.151	0.192	0.043	0.040	0.045
L4	0.168	0.177	0.035	0.068	0.080
L5	0.204	0.160	0.066	0.045	0.061

综上可得各路段的绿色施工评价指标关联度如下:

$$G_{L1} = \sum_{k=1}^5 G_{1k} = 0.513$$

$$G_{L2} = \sum_{k=1}^5 G_{2k} = 0.535$$

$$G_{L3} = \sum_{k=1}^5 G_{3k} = 0.471$$

$$G_{L4} = \sum_{k=1}^5 G_{4k} = 0.528$$

$$G_{L5} = \sum_{k=1}^5 G_{5k} = 0.536$$

各路段指标关联度由大到小排序依次为 $G_{L5} > G_{L2} > G_{L4} > G_{L1} > G_{L3}$ 。由此可知L3的关联度最低,即L3的绿色施工水平最低,这主要因为L3在低碳环保及技术与创新两个指标上的得分相对较低。从现场施工情况以及管理上来看,主要有两个方面原因:一是L3所需材料的运距相对于其他路段较远;二是L3是较早开始施工的路段,施工前期确实存在环保意识不足和新技术应用缺乏等问题。其余4个路段由同一家施工单位施工且施工时间比较同步,所以这4个路段的绿色施工水平整体上相差不大且与实际情况相符。这也验证了基于组合赋权的灰色关联评价模型的科学性和合理性。

## 4 讨论

1) 在构建市政道路绿色施工评价体系时,本研究首先从已有文献和相关规范中初步筛选指标,然后运用专家意见法并结合市政道路的特点进行二次筛选,最终确立了包含5个一级指标和27个二级指标在内的绿色施工评价体系。然后在此基础上建立了基于组合赋权的灰色关联模型,并结合实际案例进行研究,为市政道路推进绿色

施工提供了参考依据。

2) 绿色发展离不开低碳环保,然而以往的绿色施工评价极少考虑碳排放量。本研究的创新之处在于从碳减排的角度构建评价指标体系,并将碳排放量纳入其中。该创新有助于制定合理的绿色施工方案,实现真正意义上的“绿色”施工。

3) 本研究主要针对市政道路施工过程建立的绿色施工评价体系,可为市政道路提供绿色施工方案。未来的研究可针对设计、养护等方面进行研究,以期实现市政道路全生命周期的“绿色”。

## 5 结论

绿色施工是实现可持续发展的重要体现,是实现“双碳”目标的必然要求。本研究在考虑碳排放的基础上结合已有的研究成果,针对市政道路的特点建立市政道路绿色施工评价指标体系,得到如下结论:

1) 本研究从“绿色”“低碳”的角度出发,建立了市政道路绿色施工评价体系,基于PSO-AHP和CRITIC法的组合赋权求解综合权重,克服了仅考虑主观或客观的不足。

2) 将综合权重结合灰色关联法对施工路段进行绿色施工水平评价,并验证其可行性,为市政道路绿色施工方案设计提供了一定的参考依据。

3) 将碳排放量纳入评价体系的提出对工程施工管理具有一定的现实意义,有助于在实际工程中制定更为合理的管理策略和规划,进一步实现施工过程中的低碳减排。

### [参考文献]

- [1] OH B K, GLISIC B, LEE S H, et al. Comprehensive investigation of embodied carbon emissions, costs, design parameters, and serviceability in optimum green construction of two-way slabs in buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 222: 111-128. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.003.
- [2] 李远远, 黄兆炜. 绿色施工方案的选择与优化研究: 基于综合赋权-TOPSIS-数据挖掘的系统模型[J]. 系统科学学报, 2020, 28(1): 78-82.
- LI Yuanyuan, HUANG Zhaowei. Research on selection and optimization of green construction scheme based on comprehensive empowerment-TOPSIS-data mining[J]. Chinese Journal of Systems Science, 2020, 28(1): 78-82.
- [3] 王乾坤, 亢显卫, 年春光. 基于灰色聚类的装配式建筑绿色施工评价研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(5): 567-574. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-05-007.
- WANG Qiankun, KANG Xianwei, NIAN Chunguang. Research on green construction evaluation of prefabricated building based on grey clustering[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(5): 567-574. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2023-05-007.
- [4] 王乾坤, 年春光, 邓勤犁. 基于云物元理论的装配式建筑施工绿色度评价方法研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(11): 84-89. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.202011084.
- WANG Qiankun, NIAN Chunguang, DENG Qinli. Study on the evaluation method of green degree of prefabricated building construction based on cloud matter element theory[J]. Construction Economy, 2020, 41(11): 84-89. DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.202011084.
- [5] 石振武, 华树新. 基于灰色聚类法的季冻区公路绿色施工评价体系研究[J]. 公路工程, 2019, 44(2): 73-79. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.02.014.
- SHI Zhenwu, HUA Shuxin. Study on green construction evaluation system of seasonal free highway based on gray clustering method[J]. Highway Engineering, 2019, 44(2): 73-79. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.02.014.
- [6] 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.
- LI Bangwu, YANG Mengrou, WANG Xiaolu, et al. Study of evaluation indices system for green highway construction in Hainan Province[J]. Highway, 2020, 65(2): 265-272.
- [7] 吴伟东, 黄鹏, 钟明茜, 等. 基于云模型的高速铁路绿色施工等级评价: 以西南地区为例[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6): 1418-1425. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200689.
- WU Weidong, HUANG Peng, ZHONG Mingqian, et al. Evaluation of green construction grade of high-speed railway based on cloud model: take Southwest China as an example[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1418-1425. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200689.
- [8] 李艳鸽, 姜楠, 韩征, 等. “绿色铁路设计”核心理念的界定及应用探讨: 以某西部铁路工程为例[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(11): 3439-3446. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20211513.
- LI Yan'ge, JIANG Nan, HAN Zheng, et al. Definition

- and application exploration of the core concept of "green railway design": taking a western railway project as an example [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19 (11): 3439-3446. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20211513.
- [9] 杨玉胜, 张红芬. 城市深基坑支护工程绿色施工的多层次灰色评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(3): 73-78. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.03.012.
- YANG Yusheng, ZHANG Hongfen. Multilevel grey evaluation of green construction in the urban deep foundation pit supporting engineering [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14 (3): 73-78. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.03.012.
- [10] 肖蓓薇. 市政道路工程建设中的绿色施工环境保护措施[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(14): 132-133. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8646.2020.14.062.
- XIAO Beiwei. Countermeasures of green construction environment protection in the construction of municipal road engineering [J]. Heilongjiang Science, 2020, 11 (14): 132-133. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8646.2020.14.062.
- [11] 钟南川. 市政道路工程中的绿色施工环境保护措施[J]. 中国标准化, 2017(16): 218-219. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5944.2017.16.118.
- ZHONG Nanchuan. Environmental protection measures for green construction in municipal road engineering [J]. China Standardization, 2017 (16): 218-219. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5944.2017.16.118.
- [12] 李强年, 边靓, 周岩. 多级可拓方法在绿色施工评价中的应用[J]. 建筑节能, 2016, 44(11): 119-123. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2016.11.027.
- LI Qiangnian, BIAN Jing, ZHOU Yan. Application of multi-level extension method for green construction evaluation [J]. Building Energy Efficiency, 2016, 44 (11): 119-123. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2016.11.027.
- [13] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2019.03.005.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2019.03.005.
- [14] 柴乃杰, 周文梁, 陈宜虎. 基于组合赋权-改进PCA法的铁路绿色施工评标方法[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(5): 100-107. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2020.05.015.
- CHAI Naijie, ZHOU Wenliang, CHEN Yihu. Evaluation method of railway green construction based on combination weighting-modified PCA method [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2020, 37(5): 100-107. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2020.05.015.
- [15] 黄亚江, 李书全, 项思思. 基于AHP-PSO模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 15-20, 40. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.004.
- HUANG Yajiang, LI Shuquan, XIANG Sisi. Evaluation of subway fire safety resilience based on AHP-PSO fuzzy combination weighting method [J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(3): 15-20, 40. DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.03.004.
- [16] BHADRA D, DHAR N R, ABDUS SALAM M. Sensitivity analysis of the integrated AHP-TOPSIS and CRITIC-TOPSIS method for selection of the natural fiber [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 2618-2629. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.178.
- [17] ZHU L H, ZHAO C, DAI J. Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete based on gray correlation analysis [J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121750. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121750.
- [18] 黄兵兵. 广东省典型路面工程施工阶段碳排放量影响因素研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021. DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2021.000400.
- HUANG Bingbing. Research on influencing factors of carbon emission during construction of typical pavement projects in Guangdong [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021 DOI: 10.27029/d.cnki.ggdgu.2021.000400.

(责任编辑:刘平;校对:赵冰;英文编辑:刘至真)