

装配式建筑供应链绿色度评价研究

刘子纪

上海工程技术大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年3月20日; 录用日期: 2024年6月12日; 发布日期: 2024年6月21日

摘要

为提高装配式建筑供应链绿色管理水平, 通过对影响绿色度的因素进行归纳分析, 建立了装配式建筑供应链绿色度评价体系, 并基于层次分析法、熵权理论及物元可拓理论建立了AHP-熵权-物元可拓模型。通过计算评价指标与评价等级之间的关联度, 结合AHP-熵权法确定指标权重, 最终得到装配式建筑供应链绿色度等级的综合关联度, 并以实际项目A为例, 验证了该模型的有效性和可行性, 并针对此项目不足之处提出建议。

关键词

装配式, 供应链, 绿色度

Research on Evaluation of Greenness of Assembly Building Supply Chain

Ziji Liu

School of Management, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Mar. 20th, 2024; accepted: Jun. 12th, 2024; published: Jun. 21st, 2024

Abstract

In order to improve the green management level of the assembly building supply chain, the greenness evaluation system of the assembly building supply chain was established by generalizing and analyzing the factors affecting the greenness, and the AHP-entropy weight-objective topology model was established based on the hierarchical analysis method, entropy weight theory and object element topology theory. By calculating the correlation between the evaluation indexes and the evaluation level, combining the AHP-entropy weight method to determine the index weights, the comprehensive correlation of the greenness level of the assembly building supply chain is fi-

nally obtained, and the validity and feasibility of the model is verified by taking the actual project A as an example, and suggestions are put forward to address the shortcomings of this project.

Keywords

Assembly, Supply Chain, Greenness

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 传统建筑业发展模式造成巨大环境破坏和资源浪费, 在高质量发展的要求下, 建筑行业迫切需要升级转型。装配式建筑能够提高资源利用水平、减少环境破坏、提高施工效率, 被国家大力推广。但装配式建筑更注重集成化生产, 参与企业众多, 纵向一体化程度高, 强调技术、信息、资金和管理能够有效集成整合, 在追求经济效益的同时保障全供应链上的每个阶段都做到“绿色化”管理具有一定难度, 而实施绿色供应链管理能够提升供应链竞争力和战略管理能力。

因此, 构建装配式建筑绿色供应链绿色度评价体系, 识别装配式建筑绿色供应链关键节点问题, 反映供应链绿色管理水平, 以提高装配式建筑绿色供应链的集约化、绿色化, 对促进我国建筑工业化改革, 推动我国经济绿色低碳发展具有深远意义。

2. 文献综述

随着对建筑行业高效、节能、低碳的要求, 装配式建筑的发展成为一定的趋势, 很多学者对装配式建筑供应链绿色管理进行了研究。Zhang 等(2020)从供应链的视角探讨了装配式建筑构件运输问题, 应用粒子群算法, 他们成功地解决了预制构件供应链的动态优化问题, 从而加强了供应链各个阶段之间的协同作用[1]。Zsidisin (2001)认为绿色供应链管理是为了环境友好地进行设计、采购、生产、分销以及原材料的使用及再使用, 此外还包括相应的在供应链内采取的管理策略、行动及所形成的合作关系等[2]。黄桂林等(2019)运用绿色供应链运作原理, 将供应链流程参考模型融入到装配式建筑供应链中, 并从计划层、运营层、支持层三个层次对模型进行分析, 从理论角度建立了装配式建筑绿色供应链运作参考模型的基本框架[3]。唐茜(2023)推行 Bim 技术提升项目管理水平, 以提升装配式建筑项目绩效[4]。张宇嘉等(2021)基于供应链运作参考模型构建了装配式建筑供应链, 并对供应链绩效进行评价[5]。

国内外学者对装配式建筑绿色管理的研究比较广泛, 无论从项目全寿命周期的角度或是针对装配式某一阶段的绿色管理研究都逐渐成熟。但少有学者从供应链整体性出发, 将绿色供应链与装配式建筑相结合来研究, 以提高装配式建筑项目的绿色化管理水平。基于此, 本文基于 AHP-熵权法和物元可拓法建立装配式建筑供应链绿色度评价指标评价模型, 对装配式建筑供应链进行评价。

3. 装配式建筑供应链绿色度评价体系

3.1. 指标选取

装配式建筑绿色供应链管理中关于绿色度的影响因素众多, 结构层次复杂。为得到有效而全面的评价指标体系, 梳理装配式建筑供应链全寿命周期的运作流程为设计、生产、运输、施工和回收, 并考虑

到供应链管理水平和产生的经济效益在绿色度评价中也起到至关重要的作用，确定了评价体系的一级指标。

通过 CNKI、WOS 等中外知识文库索引“装配式建筑供应链”“绿色建筑供应链”“建筑供应链”“绿色供应链绿色度评价”等主题以及关键词，收集获取并梳理相关文献 40 余篇，参考《绿色供应链管理企业评价指标体系》《中国建筑行业供应链发展报告》《装配式建筑行业年度发展研究报告》等数据分析报告，遵循时效性、系统性、科学性、可操作性、目的性五大原则，经过和专家商讨后，筛选出装配式建筑供应链绿色度评价指标体系，见表 1。

Table 1. Evaluation indexes of greenness of assembly building supply chain
表 1. 装配式建筑供应链绿色度评价指标

准则层	指标层
绿色设计 B1	装配率 C1
	标准化设计 C2
	一体化装修 C3
	绿色建材使用率 C4
绿色生产 B2	先进生产技术应用 C5
	材料本土化率 C6
	节约用水率 C7
	模板使用效率 C8
绿色运输 B3	运输准时率 C9
	节能运输设备使用率 C10
	构件仓储绿色水平 C11
绿色施工 B4	废污水排放控制率 C12
	非传统水资源利用 C13
	扬尘控制 C14
	土壤保护 C15
	施工文明程度 C16
	装配化施工质量 C17
绿色回收 B6	建筑垃圾回收利用率 C18
	周转性材料重复使用率 C19
	建筑废料资源化利用率 C20
绿色管理 B6	拆除难度 C21
	BIM 技术应用水平 C22
	供应链信息平台完善 C23
	供应链响应时间 C24

3.2. 绿色度评价体系指标权重确定

客观权重可以准确反映指标的信息量，但有些指标不适合量化评估；主观权重可以充分反映评估专家的专业知识，但客观性较低。因此，在确定指标权重时，本文采用德尔菲层次分析法确定主观权重，采用熵值法调整主观权重，最终确定评价指标的综合权重。

3.2.1. 德尔菲层次分析法确定主观权重

专家通过对各层次因素的两两比较, 判断该因素的相对重要性, 并赋予一定的分值。这里采用 T. L. Saaty 教授提出的 1~9 标度法。取多位专家打分结果的平均值, 组成判断矩阵 A:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

其中, $a_{ij} > 0$, $a_{ii} = 1$, $a_{ij} = 1/a_{ji}$, ($i, j = 1, 2, \dots, n$)。

首先, 对各判断矩阵 A 的每一列元素进行归一化处理, 即:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (3.2)$$

其次, 将归一后的判断矩阵按行相加, 即:

$$\bar{W}_{ij} = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (3.3)$$

再次, 对向量 $\bar{W} = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_n)^T$ 进行归一化处理, 即:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (3.4)$$

最后, 计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$, 即:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW_i)}{nW_i} \quad (3.5)$$

计算一致性指标:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3.6)$$

最后, 计算一致性比率 CR:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3.7)$$

根据以上计算原理和方法, 一级指标判断矩阵及权重结果见表 2。

Table 2. Hierarchical single ranking and consistency test of the weights of the first-level indicators

表 2. 一级指标权重层次单排序及一致性检验

指标	B1	B2	B3	B4	B5	B6	特征向量	权重值(%)	最大特征根	CR 值	一致性检验结果
B1	1	3	5	2	1	0.5	1.306	21.759			
B2	0.333	1	3	0.25	0.333	0.5	0.534	8.897			
B3	0.2	0.333	1	0.333	0.25	0.2	0.272	4.526	6.288	0.046	通过
B4	0.5	4	3	1	0.5	0.5	0.932	15.527			
B5	1	3	4	2	1	1	1.393	23.218			
B6	2	2	5	2	1	1	1.564	26.073			

1) 绿色设计

绿色设计指标判断矩阵及权重结果见表 3。

Table 3. Hierarchical single ranking and consistency test of green design index weights
表 3. 绿色设计指标权重层次单排序及一致性检验

指标	C1	C2	C3	C4	特征向量	权重值(%)	最大特征根	CR 值	一致性检验结果
C1	1	2	3	4	1.809	45.235	4.222	0.084	通过
C2	0.5	1	2	4	1.178	29.443			
C3	0.333	0.5	1	0.5	0.471	11.774			
C4	0.25	0.25	2	1	0.542	13.548			

2) 绿色生产

绿色生产指标判断矩阵及权重结果见表 4。

Table 4. Hierarchical single ranking and consistency test of green production index weights
表 4. 绿色生产指标权重层次单排序及一致性检验

指标	C5	C6	C7	C8	特征向量	权重值(%)	最大特征根	CR 值	一致性检验结果
C5	1	2.5	2	4	1.784	44.607	4.076	0.029	通过
C6	0.4	1	1.25	4	1.012	25.297			
C7	0.5	0.8	1	3	0.877	21.914			
C8	0.25	0.25	0.333	1	0.327	8.182			

3) 绿色运输

绿色运输指标判断矩阵及权重结果见表 5。

Table 5. Hierarchical single ranking and consistency test of green transportation indicator weights
表 5. 绿色运输指标权重层次单排序及一致性检验

指标	C9	C10	C11	特征向量	权重值(%)	最大特征根	CR 值	一致性检验结果
C9	1	0.333	0.2	0.329	10.959	3.004	0.004	通过
C10	3	1	0.5	0.927	30.915			
C11	5	2	1	1.744	58.126			

4) 绿色施工

绿色施工指标判断矩阵及权重结果见表 6。

Table 6. Hierarchical single ranking and consistency test of green construction index weights
表 6. 绿色施工指标权重层次单排序及一致性检验

指标	C12	C13	C14	C15	C16	C17	特征向量	权重值(%)	最大特征根	CR	一致性检验
C12	1	0.5	0.333	0.333	0.2	0.25	0.311	5.181	6.162	0.026	通过
C13	2	1	0.25	0.5	0.167	0.333	0.423	7.049			
C14	3	4	1	1	0.333	0.5	0.931	15.517			

续表

C15	3	2	1	1	0.5	0.5	0.862	14.365				
C16	5	6	3	2	1	1	1.921	32.021	6.162	0.026	通过	
C17	4	3	2	2	1	1	1.552	25.867				

5) 绿色回收

绿色回收指标判断矩阵及权重结果见表 7。

Table 7. Hierarchical single ranking and consistency test of green recycling indicator weights

表 7. 绿色回收指标权重层次单排序及一致性检验

指标	C18	C19	C20	C21	特征向量	权重值(%)	最大特征根	CR 值	一致性检验结果
C18	1	0.5	0.25	0.2	0.314	7.862			
C19	2	1	0.333	0.25	0.506	12.639			
C20	4	3	1	0.5	1.222	30.544	4.048	0.018	通过
C21	5	4	2	1	1.958	48.955			

6) 绿色管理

绿色管理指标判断矩阵及权重结果见表 8。

Table 8. Hierarchical single ranking and consistency test of green management indicator weights

表 8. 绿色管理指标权重层次单排序及一致性检验

指标	C22	C23	C24	特征向量	权重值(%)	最大特征根	CR 值	一致性检验结果
C22	1	0.5	0.333	0.491	16.378			
C23	2	1	0.5	0.892	29.726	3.009	0.009	通过
C24	3	2	1	1.617	53.896			

3.2.2. 熵权法确定客观权重

熵权法可以避免人为因素对指标值确定的缺失,采用客观方法确定的权重与主观方法确定的权重相比,熵权法确定的权重更加可靠,因此本文采用客观权重采用熵权法确定权重。

首先,构建 m 个评价等级 n 个评价指标的判断矩阵:

$$R = (X_{ji})_{m \times n}, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (3.8)$$

其次,归一化处理,得到矩阵 B ,其元素组成为:

$$B_{ji} = \frac{X_{ji}}{\sum_{i=1}^m X_{ji}} \quad (3.9)$$

式中: X_{ji} ——评价指标因素所对应的分级标准的隶属度 $\mu(x_{ji})$

再次,计算熵值。 n 个评价指标的熵分别为:

$$H_i = \frac{-1}{\ln n} \left| \sum_{j=1}^n b_{ji} \ln b_{ji} \right| \quad (3.10)$$

最后，计算权重。根据获取得到信息熵值求得权重：

$$W_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^n (1 - H_i)} \tag{3.11}$$

邀请高校学者、一线工作人员、行业内专家共 15 人，对涉及的 25 个指标进行打分评价，将专家打分结果归一化处理后，根据公式(3.10)、(3.11)求得装配式建筑绿色供应链绿色度评价指标的熵值 E 、差异性系数 H 和熵权 W ，见表 9。

Table 9. Table of entropy values, coefficients of variation and entropy weights
表 9. 熵值、差异性系数和熵权表

指标	E	H	W	指标	E	H	W
C1	0.9950	0.0050	0.0369	C13	0.9957	0.0043	0.0319
C2	0.9915	0.0085	0.0632	C14	0.9969	0.0031	0.0226
C3	0.9947	0.0053	0.0391	C15	0.9965	0.0035	0.0262
C4	0.9945	0.0055	0.0410	C16	0.9967	0.0033	0.0244
C5	0.9958	0.0042	0.0309	C17	0.9925	0.0075	0.0552
C6	0.9972	0.0028	0.0208	C18	0.9943	0.0057	0.0422
C7	0.9925	0.0075	0.0554	C19	0.9915	0.0085	0.0628
C8	0.9938	0.0062	0.0457	C20	0.9897	0.0103	0.0767
C9	0.9957	0.0043	0.0319	C21	0.9975	0.0025	0.0184
C10	0.9910	0.0090	0.0667	C22	0.9958	0.0042	0.0310
C11	0.9912	0.0088	0.0650	C23	0.9958	0.0042	0.0310
C12	0.9971	0.0029	0.0215	C24	0.9920	0.0080	0.0594

3.2.3. 综合权重确定

两种权重的合成主要有加法合成和乘法合成两种。在多指标评价过程中。为了使各指标之间的权重有较明显的差异，经常使用乘法合成，见公式(3.12)。即将层次分析法和熵权法得到的权重相乘，再进行归一化处理，见表 10。

$$W_i = \frac{W_i^1 W_i^2}{\sum_{i=1}^n W_i^1 W_i^2} \tag{3.12}$$

Table 10. Combined weighting table
表 10. 综合权重表

一级指标	二级指标	主观权重	客观权重	综合权重
绿色设计 B1	装配率 C1	0.0984	0.0369	0.0843
	标准化设计 C2	0.0641	0.0632	0.0939
	一体化装修 C3	0.0256	0.0391	0.0232
	绿色建材使用率 C4	0.0295	0.0410	0.0280

续表

绿色生产 B2	先进生产技术应用 C5	0.0397	0.0309	0.0285
	材料本土化率 C6	0.0225	0.0208	0.0109
	节约用水率 C7	0.0195	0.0554	0.0251
	模板使用效率 C8	0.0073	0.0457	0.0077
绿色运输 B3	运输准时率 C9	0.0050	0.0319	0.0037
	节能运输设备使用率 C10	0.0140	0.0667	0.0217
	构件仓储绿色水平 C11	0.0263	0.0650	0.0397
绿色施工 B4	废污水排放控制率 C12	0.0080	0.0215	0.0040
	非传统水资源利用 C13	0.0109	0.0319	0.0081
	扬尘控制 C14	0.0241	0.0226	0.0126
	土壤保护 C15	0.0223	0.0262	0.0136
	施工文明程度 C16	0.0497	0.0244	0.0281
	装配化施工质量 C17	0.0402	0.0552	0.0514
绿色回收 B5	建筑垃圾回收利用率 C18	0.0183	0.0422	0.0179
	周转性材料重复使用率 C19	0.0293	0.0628	0.0428
	建筑废料资源化利用率 C20	0.0709	0.0767	0.1262
	拆除难度 C21	0.1137	0.0184	0.0485
绿色管理 B6	BIM 技术应用水平 C22	0.0427	0.0310	0.0307
	供应链信息平台完善 C23	0.0775	0.0310	0.0557
	供应链响应时间 C24	0.1405	0.0594	0.1937

4. 基于物元可拓法的绿色度评价

4.1. 经典域、节域与待评物元的确定

1) 建立物元矩阵

物元作为可拓学的逻辑细胞，是描述事物的基本元，能够准确描述事物与量的关系。它包括了事物、特征以及该事物特征量值三者组成的三元组，记为 $R=(N,c,v)$ 。 N 表示事物， c 表示特征名称， v 表示 N 关于 c 所取的量值。

若评价对象 R 具有 n 个特征 $(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 与对应的特征值 $(v_1, v_2, \dots, v_n)$ ，则

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

R 称为 N 的 n 维物元。

2) 确定经典域

事物的特征及标准量值范围构成的物元矩阵称为经典域，本文用 R_j 表示，表达式如下：

$$R_j = [N_j, C_i, X_{ji}] \begin{bmatrix} N_j & C_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

其中, N_j 作为评价过程中划分的 j 个效果等级 ($j=1,2,\dots,m$), C_i 是效果等级 N_j 的特征值 ($i=1,2,\dots,n$), $x_{ji} = \langle a_{ji}, b_{ji} \rangle$ 是 N_j 相关的 C_i 规定的取值空间, 即各效果等级相关特征的量值空间。

3) 确定节域

经典物元加可转化为经典物元的事物及其特征和相应拓展的量值范围组成的物元矩阵称为节域, 本文用 R_p 表示, 表达式如下:

$$R_p = [p, C_i, X_{pi}] \begin{bmatrix} p & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

其中, P 为全部的效果等级, $x_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$ 是节域对象相关特征值 C_i 的取值区间。

4) 确定待评价物元

$$R_0 = \begin{bmatrix} p_0 & C_1 & x_1 \\ & C_2 & x_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & x_n \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

其中, R_0 是待评价物元, P_0 是标的物, X_i 是 p_0 关于 C_i 的量值。

4.2. 指标关联度和评价等级确定

关联度是指对各个评价对象内部以及各个评价指标内部关系的度量。通过分析装配式建筑供应链所具备的灵活性和系统性特点, 将供应链绿色度的关联度表示为:

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_i, x_{ji})}{|b_{ji} - a_{ji}|} & (x_i \in x_{ji}) \\ \frac{\rho(x_i, x_{ji})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})} & (x_i \notin x_{ji}) \end{cases} \quad (4.5)$$

其中,

$$\rho(x_i, x_{ji}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji})$$

$$\rho(x_i, x_{pi}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{pi} + b_{pi}) \right| - \frac{1}{2}(b_{pi} - a_{pi})$$

结合上述计算的指标权重, 可得到待评价对象绿色度等级关联度函数是:

$$K_j(p_0) = \sum_{i=1}^n W_{ij} K_j(x_i) \quad (4.6)$$

评价对象的等级是：

$$K_j = \max K_j(p_0)$$

(4.7)

5. 案例分析

5.1. 评价指标体系数据

本文以装配式建筑供应链 A 为案例收集实际数据。参考国家标准、行业标准及其他学者研究将装配式建筑供应链绿色度评价指标确定一星级、二星级、三星级、四星级 4 个等级的经典域、节域，进行绿色度评价，见表 11。

Table 11. Table of classical domains, section domains, and actual values of indicators
表 11. 指标经典域、节域、实际值表

指标层	经典域				节域	实际值
	一星级	二星级	三星级	四星级		
装配率 C1	[0, 60%)	[60%, 75%)	[75%, 90%)	[90%, 100%]	[0, 100%]	76.10%
标准化设计 C2	[5, 10)	[10, 15)	[15, 20)	[20, 25]	[5, 25]	16
一体化装修 C3	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	7.4
绿色建材使用率 C4	[30%, 50%)	[50%, 70%)	[70%, 80%)	[80%, 100%]	[30%, 100%]	72.40%
先进生产技术应用 C5	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	6.4
材料本土化率 C6	[0, 60%)	[60%, 75%)	[75%, 90%)	[90%, 100%]	[0, 100%]	88.60%
节约用水率 C7	[0%, 5%)	[5%, 10%)	[10%, 20%)	[20%, 30%]	[0, 30%]	16.50%
模板使用效率 C8	[0%, 30%)	[30%, 50%)	[50%, 70%)	[70%, 100%]	[0, 100%]	68.70%
运输准时率 C9	[0%, 20%)	[20%, 30%)	[30%, 40%)	[40%, 50%]	[0, 50%]	15.20%
节能运输设备使用率 C10	[0, 80%)	[80%, 90%)	[90%, 95%)	[95%, 100%]	[0, 100%]	92.60%
构件仓储绿色水平 C11	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	4.3
废污水排放控制率 C12	[0, 60%)	[60, 70%)	[70, 80%)	[80,100%]	[0, 100%]	71.90%
非传统水资源利用 C13	[0, 20%)	[20, 30%)	[30, 40%)	[40, 60%]	[0, 60%]	34.80%
扬尘控制 C14	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	8.1
土壤保护 C15	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	8.3
施工文明程度 C16	[0, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 100]	[0, 100]	78
装配化施工质量 C17	[0%, 20%)	[20%, 30%)	[30%, 40%)	[40%, 50%]	[0, 50%]	26.90%
建筑垃圾回收利用率 C18	[40%, 60%)	[60%, 70%)	[70%, 80%)	[80%, 100%]	[40%, 100%]	74.80%
周转性材料重复使用率 C19	[50%, 60%)	[60%, 70%)	[70%, 80%)	[80%, 100%]	[50%, 100%]	72.50%
建筑废料资源化利用率 C20	[60%, 70%)	[70%, 80%)	[80%, 90%)	[90%, 100%]	[60%, 100%]	67.20%
拆除难度 C21	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	6.8
BIM 技术应用水平 C22	[0, 50)	[50, 60)	[60, 80)	[80, 100]	[0, 100]	91.40%
供应链信息平台完善 C23	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	7.5
供应链响应时间 C24	[0, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10]	[0, 10]	7.7

5.2. 评价指标关联度分析

以案例中装配率 C1 为例进行计算, 根据公式(4.5)。因为 C1 的量值属于[75%, 90%)区间, 所以 C1 对于三星级的关联度计算过程如下:

$$\begin{aligned}\rho(x_1, x_{11}) &= \left| x_1 - \frac{1}{2}(a_{11} + b_{11}) \right| - \frac{1}{2}(b_{11} - a_{11}) \\ &= \left| 76.1 - \frac{1}{2}(75 + 90) \right| - \frac{1}{2}(90 - 75) \\ &= -1.1 \\ K_j(x_1) &= \frac{-\rho(x_1, x_{11})}{|b_{11} - a_{11}|} = \frac{1.1}{15} = 0.073\end{aligned}$$

而 C1 不属于(0, 60%], 所以 C1 对一星级的关联度为:

$$\begin{aligned}K_j(x_i) &= \frac{\rho(x_i, x_{ji})}{\rho(x_i, x_{pi}) - \rho(x_i, x_{ji})} \\ &= \frac{\left| 76.1 - \frac{1}{2}(0 + 60) \right| - \frac{1}{2}(60 - 0)}{\left| 76.1 - \frac{1}{2}(0 + 100) \right| - \frac{1}{2}(100 - 0) - \rho(x_i, x_{ji})} \\ &= -0.403\end{aligned}$$

继续计算可得出指标 C1~C25 关于各等级的关联度, 结果见表 12。

Table 12. Indicator correlation
表 12. 指标关联度

指标层	经典域			
	一星级	二星级	三星级	四星级
装配率 C1	-0.4025	-0.0440	0.0733	-0.3677
标准化设计 C2	-0.4000	-0.1000	0.2000	-0.3077
一体化装修 C3	-0.5667	-0.3500	0.3000	-0.1875
绿色建材使用率 C4	-0.4480	-0.0800	0.2400	-0.2159
先进生产技术应用 C5	-0.4000	-0.1000	0.2000	-0.3077
材料本土化率 C6	-0.7150	-0.5440	0.0933	-0.1094
节约用水率 C7	-0.4600	-0.3250	0.3500	-0.2059
模板使用效率 C8	-0.5529	-0.3740	0.0650	-0.0399
运输准时率 C9	0.2400	-0.2400	-0.4933	-0.6200
节能运输设备使用率 C10	-0.6300	-0.2600	0.4800	-0.2449
构件仓储绿色水平 C11	-0.0652	0.1500	-0.2833	-0.4625
废污水排放控制率 C12	-0.2975	-0.0633	0.1900	-0.2238
非传统水资源利用 C13	-0.3700	-0.1600	0.4800	-0.1711
扬尘控制 C14	-0.6833	-0.5250	-0.0500	0.0500
土壤保护 C15	-0.7167	-0.5750	-0.1500	0.1500

续表

施工文明程度 C16	-0.4500	-0.2667	0.2000	-0.0833
装配化施工质量 C17	-0.2300	0.3100	-0.1183	-0.3619
建筑垃圾回收利用率 C18	-0.3700	-0.1600	0.4800	-0.1711
周转性材料重复使用率 C19	-0.3571	-0.1000	0.2500	-0.2500
建筑废料资源化利用率 C20	0.2800	-0.2800	-0.6400	-0.7600
拆除难度 C21	-0.4667	-0.2000	0.4000	-0.2727
BIM 技术应用水平 C22	-0.5833	-0.3750	0.2500	-0.1667
供应链信息平台完善 C23	-0.6167	-0.4250	0.1500	-0.1154
供应链响应时间 C24	-0.4100	-0.2133	0.3600	-0.1324

5.3. 目标层绿色度评价

根据公式(4.6)、(4.7)计算一级指标层及目标层关联度，见表 13。

Table 13. Tier 1 indicator correlations

表 13. 一级指标关联度

指标层	关联度			
	一星级	二星级	三星级	四星级
绿色设计 B1	-0.0972	-0.0235	0.0386	-0.0703
绿色生产 B2	-0.0350	-0.0198	0.0160	-0.0154
绿色运输 B3	-0.0154	-0.0006	-0.0027	-0.0260
绿色施工 B4	-0.0470	-0.0075	0.0015	-0.0206
绿色回收 B5	-0.0092	-0.0522	-0.0421	-0.1229
绿色管理 B6	-0.1317	-0.0765	0.0858	-0.0372

由各指标关联度表可得 $K_j = \max(-0.3354, -0.1801, 0.0972, -0.2923) = 0.0972$ ，说明该装配式建筑供应链的绿色度处于三星级，整体情况较好。一级指标中，绿色设计、绿色生产、绿色施工、绿色管理的绿色度评价处于三星级，绿色运输为二星级，绿色回收为一星级。表明本装配式建筑供应链在实施中，建筑垃圾的回收管理、资源化利用水平较差，其中指标建筑废料资源化利用率 C20 处于一星级，说明资源化利用水平不合格，供应链管理者应引进新型工艺流程对建筑废料资源化利用，生产具有高附加值的产品。如废弃的混凝土砌块经打浆、破碎、筛分制成骨料，与再生水泥、外加剂混合形成再生混凝土。将建筑垃圾资源化利用为绿色建材，不仅减少二氧化碳排放，有利于环境保护，维护生态平衡，还能创造经济附加值。

6. 结论

在严峻环境形势的要求下，装配式建筑的环保开始显现，但其整个供应链节点企业众多，结构复杂且没有针对性的标准规范，使其绿色、环保、节能、高质量、短工期的等特点并未充分体现，使得对装配式建筑供应链进行绿色度评价进行研究更加重要。

参考文献

[1] Zhang, H. and Yu, L. (2020) Dynamic Transportation Planning for Prefabricated Component Supply Chain. *Engineer-*

-
- ing, *Construction and Architectural Management*, **27**, 2553-2576. <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2019-0674>
- [2] Zsidisin, G.A. and Siferd, S.P. (2001) Environmental Purchasing: A Framework for Theory Development. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, **7**, 61-73. [https://doi.org/10.1016/S0969-7012\(00\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0969-7012(00)00007-1)
- [3] 黄桂林, 张闯, 魏修路. 装配式建筑绿色供应链模型研究[J]. 建筑经济, 2019, 40(7): 48-52. <https://doi.org/10.14181/j.cnki.1002-851x.201907048>
- [4] 唐茜. BIM 应用对装配式建筑项目绩效的影响路径研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2021. <https://doi.org/10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.002102>
- [5] 张宇嘉, 瞿富强, 陈初一. 基于 PCSCOR-FANP 的装配式建筑供应链绩效评价研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(S1): 172-176. <https://doi.org/10.14181/j.cnki.1002-851x.2021S1172>