

基于云物元理论的装配式建筑供应链 可持续性评价

刘子琦，张云宁，欧阳红祥，宋亮亮

(河海大学 商学院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 随着我国工业水平的发展,装配式建筑模式逐渐成为主流,供应链在装配式建筑模式中是不可或缺的关键环节。本研究基于 SCOR 理论,从设计、采购、生产、运输、施工、运营和回收七个环节识别了影响装配式建筑供应链可持续发展的因素,并运用因素分解结构法,从经济发展、生态环境、资源利用、社会发展四个维度建立了装配式建筑供应链的可持续性评价指标体系,并在此基础上提出云物元评价模型。最后通过案例验证了云物元模型的可行性,为装配式建筑供应链的可持续性评价提供了新的思路。

关键词: 装配式建筑; 供应链; 云物元模型; COWA; 可持续性

中图分类号: F407.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2020)03-0109-07

Sustainability Evaluation of Prefabricated Building Supply Chain Based on Cloud Matter Element Theory

LIU Zi-qi, ZHANG Yun-ning, OUYANG Hong-xiang, SONG Liang-liang
(Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: With the development of China's industrial level, the prefabricated building model has gradually become the mainstream, and the supply chain is an indispensable key link in the prefabricated building model. Based on SCOR theory, this study identifies the factors that affect the sustainable development of the supply chain of prefabricated buildings from seven aspects of design, procurement, production, transportation, construction, operation and recycling, and establishes the sustainability evaluation index system of the supply chain of prefabricated buildings from four dimensions of economic development, ecological environment, resource utilization and social development by using the factor decomposition structure method. On this basis, the cloud matter element evaluation model is proposed. Finally, the feasibility of the cloud matter element model is verified by the case, which provides a new idea for the sustainability evaluation of the prefabricated building supply chain.

Key words: prefabricated building; supply chain; cloud matter element model; COWA; sustainability

建筑业是带动我国社会经济发展的基础行业,“安居”是人民对美好生活的根本需求之一,建筑业的成长与人民的生活水平息息相关。而传统的建筑模式,存在建设时间长、安全事故多、施工效率低、污染严重等问题,老旧模式亟待革新。当前,环境保护与能源节约是建筑模式研究的热点领域,旨在提出能实现经济发展与环境保护并

重需求的新型模式。具有环境友好、节约能源等优势 的装配式建筑模式应运而生。

近些年来我国建筑工业化的发展十分迅速。2016 年国家发布的《关于大力发展装配式建筑的指导意见》中指出装配式建筑发展的具体目标、关键要求和应对措施。2017 年住房和城乡建设部发布了《“十三五”装配式建筑行动方案》,其中

收稿日期: 2019-09-05 修回日期: 2019-11-01

作者简介: 刘子琦(1996-),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为工程项目管理(Email: liuziqi349@163.com)

通讯作者: 张云宁(1959-),男,江苏南京人,硕士,副教授,研究方向为工程项目管理和工程经济(Email: cuixiang220@126.com)

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(71801082);教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJCZH148)

要求通过对装配式建筑的设计环节、生产环节、施工环节等全产业链进行统筹发展,提高装配式建筑产业的可持续能力。2018 年,全国各地区分别提出了到 2020 年新建建筑中装配式建筑的占比要达到 30% 以上的工作目标。

我国制造业的供应链体系已成熟,但建筑业中的供应链体系仍处于发展阶段,特别是在装配式建筑供应链中仍然存在许多问题^[1]。目前,我国对装配式建筑供应链的研究很少,但是仍然可以通过传统建筑业的供应链与装配式建筑体系的结合,分析装配式建筑供应链的内涵。国内外对于建筑供应链的定义仍具差异,但其主要内容相似。通过借鉴装配式建筑行业现有的研究成果和目前建筑业供应链发展的现状^[2],本文提出装配式建筑供应链指总承包方作为装配式建筑供应链的中心,由施工分包商、物流企业、设计方等参与方共同构成的贯穿建设全过程的网链结构(图 1)。

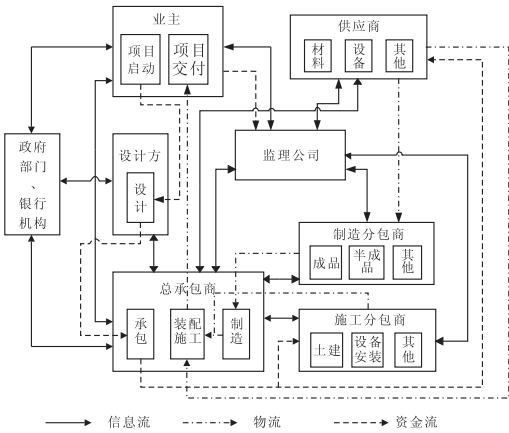


图 1 装配式建筑供应链组织构成

装配式建筑供应链可持续发展是指通过系统地协调和组织多个企业之间的核心业务流程,对各企业的社会发展、资源利用、生态环境、经济发展目标进行全面的、具体的整合及实施,以提高各参与方在装配式建筑供应链的长远经济效益。各参与方作为一个网链结构,应努力成为资源利用、社会发展、生态环境、经济发展四个维度的全面整合优化。由于装配式建筑供应链可持续发展所考虑的因素是多样化的、不确定的,所以其可持续性评价的研究内容十分庞大。

在装配式建筑供应链的可持续性评价方面,国内外学者已有大量研究。Cheng 等^[3]提出供应链的可持续发展是推动社会发展的动力。在社会发展与企业发展中,不仅需要考虑经济方面的问题,还需要认识到在供应链发展中产生的社会效益。Seuring 和 Müller^[4]的研究表明,供应链的可持续发展需要三个方面协调,首先是合理管理供

应链的内部,其次是不破坏客户的利益,最后是使供应链内部的各个参与方充分交流沟通。Carter 和 Rogers^[5]分析得出在供应链的可持续发展中最重要的是经济发展、生态环境、社会发展对中心参与方的影响,在供应链中每一个阶段都很重要,通过合理地管理与协调可以使供应链产生巨大的效益。

贺彩虹和周鲜成^[6]研究了限制供应链可持续发展的影响因素,并构建了关于促进和限制供应链在可持续发展中的模型。裘秀群等^[7]通过研究得出了限制建筑行业可持续发展的七个主要影响因素,例如科技创新、自然资源、工人的专业技术等。闫高杰^[8]通过供应链的可持续性研究,建立了评估供应链是否可持续的经济、社会指标体系,通过这些评价指标对供应链进行研究。朱嫵和魏宁娣^[9]从建筑业的可持续性方面进行分析,创建了我国建筑行业的可持续发展体系,通过各个地区的调研,分析研究了我国建筑业可持续发展的现状。

1 装配式建筑供应链可持续性评价指标体系

1.1 基于 SCOR 的装配式建筑供应链可持续因素识别

供应链运作参考模型(Supply Chain Operation Reference, SCOR)是由美国供应链协会提出的一个跨行业参考标准,可用于企业管理、综合绩效及成本控制,将其运用到装配式建筑工程领域可以客观有效地帮助各参与方发现供应链的不足,解决供应链内部存在的问题^[10]。考虑到装配式建筑工程自身的特点,应从设计、采购、生产、运输、施工、运营以及回收七个环节分析影响装配式建筑供应链可持续性的因素。本研究发现,设计环节诸因素,主要影响经济发展以及社会发展;采购环节的主要因素影响着库存管理情况、信息平台的成熟度和各参与方的信誉度;生产环节因素较为复杂,主要影响资源利用以及生态环境;运输环节的影响因素包括运输线路的选择和预制构件的保护;施工环节因素主要关系到生态环境和社会发展;运营环节因素关系到人性化管理和居民的满意程度;回收环节因素关系到废弃物再利用程度以及拆除难易程度。

1.2 基于 FBS 的装配式建筑供应链可持续性指标体系

本研究基于风险分解结构法(Risk Break-

down Structure, RBS)^[11], 提出因素分解结构法 (Factor Breakdown Structure, FBS), 该方法将风险分解结构法中的风险因素更改为影响因素, 用以对影响因素进行分类优化。它可以帮助因素识别人员对装配式建筑供应链可持续性指标进行分类优化。使用 FBS 方法将装配式建筑供应链可持续性指标划分为经济发展因素、生态环境因素、资源利用因素、社会发展因素四类。运用 FBS 建立准则与指标之间的关系, 如表 1 所示。

表 1 可持续性指标的 FBS 分类

目标	供应链环节	因素	因素分解			
			经济 发展	生态 环境	资源 利用	社会 发展
装配式建筑供应链可持续性评价	设计环节	深化设计程度	*			
		技术创新	*			
		选址与城市系统适应性				*
		尊重当地文化				*
		配套公共服务				*
		设计的完善性	*			
	采购环节	库存管理与成品保护	*			
		各参与方信誉度				*
		信息交流平台的成熟度				*
		环保材料的使用		*		
	生产环节	低碳材料使用率			*	
		围护结构节能			*	
		可再生能源利用率			*	
		固体废弃物排放量		*		
		废气排放量		*		
		节水率			*	
		预制构件制造成本	*			
		预制构件工厂选址		*		
	运输环节	运输路线		*		
		预制构件的保护		*		
	施工环节	技术工人的劳动生产率	*			
		绿化率		*		
		提供就业量				*
		粉尘污染		*		
		噪音污染		*		
		周边民居的影响程度				*
	运营环境	可持续的施工理念		*		
		施工作业安全性				*
		施工企业自我评价				*
		人性化管理				*
	回收环节	居民满意度				*
		废弃物的可利用性			*	
		拆除难易程度	*			

由表 1 可见, 生态环境因素同时影响生产及施工环节, 设计过程和运输过程都存在经济发展因素。

本文运用 FBS 方法以及专家打分法对可持续性因素重新整合优化, 对 33 项二级指标进行筛选, 最终将装配式建筑供应链可持续评价指标分为 4 类一级指标, 以及 18 项二级指标, 因此装配式建筑供应链可持续评价指标体系如表 2 所示。

表 2 装配式建筑供应链可持续性评价指标体系

准则层	编号	指标层	编号	类型
经济发展维度	A1	深化设计程度	B1	定性指标
		技术创新	B2	定性指标
		设计规范和标准的完善度	B3	定性指标
		预制构件制造成本	B4	定性指标
		技术工人的劳动生产率/%	B5	定量指标
生态环境维度	A2	固体废弃物排放量/t·1000 m ²	B6	定量指标
		废气排放量/t·m ²	B7	定量指标
		绿化率/%	B8	定量指标
		噪音/db	B9	定量指标
资源利用维度	A3	低碳材料使用率/%	B10	定量指标
		围护结构节能	B11	定性指标
		可再生能源利用率/%	B12	定量指标
		节水率/%	B13	定量指标
社会发展维度	A4	废弃物的可利用性	B14	定性指标
		提供就业机会	B15	定性指标
		尊重当地文化	B16	定性指标
		居民的满意程度	B17	定性指标
		选址与城市系统的适应性	B18	定性指标

2 基于 COWA 算子和云物元理论的装配式建筑供应链可持续性评价模型

2.1 装配式建筑供应链可持续性评价指标权重

2.1.1 基于 COWA 算子的装配式建筑供应链的主观可持续性指标赋权

组合数有序加权算子 (Continuous Ordered Weighted Averaging, COWA) 理论^[12,13]通过对数据重新排序及整合, 可以从不同位置开始对相关数据进行加权, 从而使不合理数据值的影响减少到最小。本研究应用该理论对装配式建筑供应链的主观可持续性指标赋权。

(1) 计算加权向量

通过排列组合数构建新的主观可持续性指标数据集 r_k 的权值, 可得加权向量 ε_{j+1} 为:

$$\varepsilon_{j+1} = \frac{C_{m-1}^j}{\sum_{i=0}^{m-1} C_{m-1}^i} = \frac{C_{m-1}^k}{2^{m-1}}, k = 0, 1, 2, \dots, m - 1$$

(1)

(2)计算绝对权重

借助加权向量 ε_{j+1} 对新的主观可持续性指标数据集中对应数据加权,可得主观可持续性指标 i 的绝对权重值 w'_i 为:

$$w'_i = \sum_{j=1}^m \varepsilon_j r_j \tag{2}$$

式中: ε_j 为第 j 个加权向量; r_j 为第 j 个数据集。

(3)计算相对权重

主观可持续性指标相对权重 w_i :

$$w_i = \frac{w'_i}{\sum_{i=1}^n w'_i} \tag{3}$$

式中: n 为指标个数。

2.1.2 基于熵权法的装配式建筑供应链的客观可持续性指标赋权

熵值反映各级指标对决策评价所提供的准确信息量,熵值越大的指标,提供的信息越少,权重越小。用熵权法计算装配式建筑供应链的指标 i 的客观权重 w_{ki} [14]。

$$[w_{ki}]_{1 \times n} = (w_1, w_2, \cdots, w_n) \tag{4}$$

根据此模型可以得出装配式建筑供应链的可持续性评价指标体系各要素指标客观权重。

2.1.3 综合主观权重与客观权重对可持续性指标赋权

综合权重 W_i 通过主观权重与客观权重线性加权确定。

$$W_i = \alpha w_i + (1 - \alpha) w_{ki}, \alpha \in [0, 1] \tag{5}$$

若有 n 个指标,则

$$\alpha = \frac{1}{n - 1} \left[\sum_{i=1}^n i w_i - \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right] \tag{6}$$

2.2 基于云物元理论的装配式建筑供应链可持续性评价模型

2.2.1 云物元理论

20 世纪 80 年代,蔡文[15]提出了物元理论,物元理论是将事物名称、事物特征以及事物特征所对应的值组合成一个有序三元组,通过这个有序三元组对事物进行描述,表示为 $R = (N, C, V)$,其中 V 表示装配式建筑供应链的可持续性评价指标的边界值,但该边界区间具有随机性和离散性。20 世纪 90 年代初,李德毅[16]提出了一个可以使评价指标中的定性指标与定量指标相互转换的云模型,该云模型的分布形式有许多种,其中正态云是使用最为广泛的一种形式。该云模型是由期望、熵以及超熵组成,期望 Ex 表示云模型的分布核心,本文表示装配式建筑供应链的可持续性等级分类概念的点值;熵 En 表示评价指标等级的

离散型;超熵 He 表示熵 En 的随机性和离散性。

云物元模型是将正态分布的云模型与物元可拓理论相结合,具有云模型定性指标与定量指标相互转化的特点,从而对事物进行评价[17]。将数据集 (Ex, En, He) 代替具体数值 V ,从而改进了物元模型。

2.2.2 装配式建筑供应链可持续性评价等级标准云的确定

(1)等级指标量化值的确定

根据国家《可持续发展评价管理办法》,可将装配式建筑供应链的可持续性划分为五个等级,分别为不可持续、较差可持续、一般可持续、较好可持续、可持续,评价分值越高,表示可持续性越好。综合该领域相关专家讨论及国家和企业的准则规范结果,各评价指标的等级界限和指标值如表 3 所示。

表 3 装配式建筑可持续性等级评价指标的界限与指标值

指标层	序号	等级界限				
		不可持续	较差可持续	一般可持续	较好可持续	可持续
深化设计程度	B1	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
技术创新	B2	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
设计规范和标准的完善度	B3	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
预制构件制造成本	B4	[80,100]	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)
技术工人的劳动生产率	B5	[0,10)	[10,20)	[20,30)	[30,40)	[40,50]
固体废弃物排放量	B6	[350,450]	[300,350)	[250,300)	[200,250)	[150,200)
废气排放量	B7	[70,75]	[65,70)	[60,65)	[55,60)	[50,55)
绿化率	B8	[10,15)	[15,20)	[25,30)	[30,35)	[35,40]
噪音	B9	[70,75]	[65,70)	[60,65)	[55,60)	[50,55)
低碳材料使用率	B10	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
围护结构节能	B11	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
可再生能源利用率	B12	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
节水率	B13	[0,5)	[5,9)	[9,12)	[12,20)	[20,50]
废弃物的可利用性	B14	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
提供就业机会	B15	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
尊重当地文化	B16	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
居民的满意程度	B17	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]
选址与城市系统的适应性	B18	[0,20)	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,100]

(2)将区间数值转换成云物元

将装配式建筑供应链的可持续性等级分类的边界看成一个双限制空间 $[C_{\min}, C_{\max}]$,并对该边界进行适度拓展优化,则云模型的期望 Ex , 熵

En,超熵 He 可由双约束界限值和正太分布云模型的转换关系得出,该关系见文献[18]。

根据熵 En 的特征可以确定;定性概念的模糊性随熵值的变大而提高^[19]。不同的定性概念评价需要不同的等级,一些指标的边界划分不需要较为清晰,这种情况下的云模型就需要足够模糊,经过一定的优化得出 En 为:

$$En=\frac{C_{\max}-C_{\min}}{2.3584}$$

(7)

(3)超熵 He 的确定

超熵 He 是一个不确定值,通常正太分布云模型的“宽窄”取决于 He 的大小^[20]。以“深化设计程度”指标为例,在分别确定熵 En 和期望 Ex 的条件下,根据 Matlab 软件编码,建立超熵 He 在 0.005,0.010,0.015,0.020 这几种条件下的正太云模型,分别见图 2a~2d。通过对比得出,当 He = 0.015 时正太云模型更加清晰,有利于计算出更为准确的隶属度,经综合考虑选取当 He = 0.015 的

风险云(图 2c)作为“深化设计程度”指标的 He 值。同理可得其余指标 He 的取值。

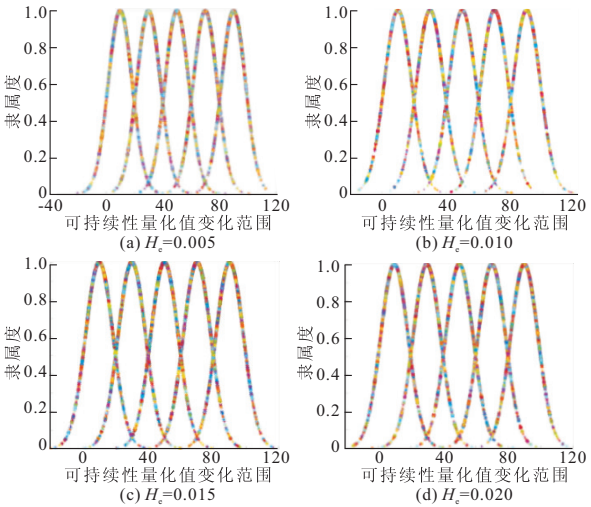


图 2 各可持续等级云图

综上可得,装配式建筑可持续性等级各评价指标的等级界限标准云模型(Ex,En,He),如表 4 所示。

表 4 装配式建筑可持续性等级评价标准云模型

序号	等级界限				
	不可持续	较差可持续	一般可持续	较好可持续	可持续
B1	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B2	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B3	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B4	(90,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(10,8.48,0.015)
B5	(5,1.67,0.015)	(15,1.67,0.015)	(25,1.67,0.015)	(35,1.67,0.015)	(45,1.667,0.015)
B6	(400,16.67,0.01)	(325,8.33,0.01)	(275,8.33,0.01)	(225,8.33,0.01)	(175,8.333,0.01)
B7	(72.5,0.83,0.015)	(67.5,0.83,0.015)	(62.5,0.83,0.015)	(57.5,0.83,0.015)	(52.5,0.833,0.015)
B8	(12.5,0.83,0.02)	(17.5,0.83,0.02)	(27.5,0.83,0.02)	(32.5,0.83,0.02)	(37.5,0.833,0.02)
B9	(72.5,0.83,0.015)	(67.5,0.83,0.015)	(62.5,0.83,0.015)	(57.5,0.83,0.015)	(52.5,0.833,0.015)
B10	(10,3.33,0.02)	(30,3.33,0.02)	(50,3.333,0.02)	(70,3.33,0.02)	(90,3.333,0.02)
B11	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B12	(10,3.33,0.015)	(30,3.33,0.015)	(50,3.333,0.015)	(70,3.33,0.015)	(90,3.333,0.015)
B13	(2.5,0.83,0.02)	(7,0.67,0.02)	(10.5,0.5,0.02)	(16,1.33,0.02)	(35,5,0.02)
B14	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B15	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B16	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B17	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)
B18	(10,8.48,0.015)	(30,8.48,0.015)	(50,8.48,0.015)	(70,8.48,0.015)	(90,8.48,0.015)

2.2.3 综合评判矩阵的确定

由于正太分布云模型的加入,传统的关联度计算方法也需要进一步优化。首先建立一个由期望为 Ex,标准差为 He 共同决定的正态随机分布数 En',最终各指标值 x_i 与可持续性等级边界云模型 $k(x_i)$ 的关联度计算公式为^[21]:

$$k(x_i)=\exp\left[-\frac{(x_i-Ex)^2}{2En'^2}\right]$$

(8)

综合评判矩阵 M 由全部的云关联度组成。

2.3 综合关联度计算及可持续性等级的确定

首先由式(8)得出与可持续性等级与指标层 B 的关联度,再与上文所计算的综合评价指标权重 W_{ij} 进行加权,得出可持续性等级与准则层 A 的关联度。

$$Y_j(a_i)=\sum_{i=1}^nW_{ij}Y_j(b_i)$$

(9)

式中: $Y_j(a_i)$ 为第 j 个可持续性等级与第 i 个准则层的关联度,文中 $i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4, 5$; $Y_j(b_i)$ 为第 B_i 个指标对应第 j 个可持续性等级的关联度。然后,利用计算出的 $Y_j(a_i)$ 可以确定各可持续性等级与目标层的关联度。

$$Y_j(a) = \sum_{i=1}^4 W_i Y_j(a_i) \tag{10}$$

最后,根据关联度最大原则,由式(10)计算出的最大关联度 $\max Y_j(a)$ 中的 j 即表示装配式建筑可持续性等级。

3 案例分析

3.1 指标体系与指标赋权

邀请了 6 位建筑供应链研究领域的专家,对某装配式建筑供应链进行可持续性评价,该建筑主体结构采用装配式混凝土剪力墙,项目用地面积为 0.0182 km²,建筑面积为 0.0854 km²,预制装配率为 45%左右。根据走访调研、项目施工报告以及专家打分综合确定各评价指标值。运用前文所述方法,用 COWA 算子和熵权法计算各指标的指标权重,最终得分见表 5。

表 5 某装配式建筑供应链评价指标值和权重

准则层	权重	指标层	主观权重	客观权重	综合权重	指标值
A1	0.33	B1	0.054	0.060	0.057	76
		B2	0.049	0.115	0.082	69
		B3	0.046	0.048	0.047	65
		B4	0.043	0.143	0.093	60
		B5	0.057	0.045	0.051	35
A2	0.18	B6	0.063	0.037	0.050	369
		B7	0.061	0.028	0.045	61
		B8	0.060	0.035	0.047	17
		B9	0.064	0.018	0.041	62
		B10	0.059	0.041	0.050	58
A3	0.25	B11	0.057	0.045	0.051	78
		B12	0.058	0.040	0.049	60
		B13	0.063	0.037	0.050	10
		B14	0.051	0.053	0.052	72
		B15	0.042	0.111	0.076	58
A4	0.22	B16	0.057	0.032	0.045	80
		B17	0.048	0.085	0.066	67
		B18	0.062	0.019	0.041	86

3.2 综合评判矩阵的确定

根据式(8),通过 Matlab 软件进行编程计算得出不同可持续性等级与各评价指标的关联度。如表 6 所示。

表 6 某装配式建筑各指标对属于不同可持续性等级的关联度

指标	等级界限				
	不可持续	较差可持续	一般可持续	较好可持续	可持续
B1	0	0	0	0.779	0.255
B2	0	0	0.081	0.993	0.046
B3	0	0	0.208	0.840	0.013
B4	0.001	0.496	0.501	0.001	0
B5	0	0	0	1	0
B6	0.177	0	0	0	0
B7	0	0	0.180	0	0
B8	0	0.829	0	0	0
B9	0	0	0.828	0	0
B10	0	0	0.055	0.001	0
B11	0	0	0.004	0.639	0.368
B12	0	0	0.011	0.010	0
B13	0	0	0.614	0	0
B14	0	0	0.034	0.972	0
B15	0	0	0.640	0.368	0
B16	0	0	0.002	0.497	0.500
B17	0	0	0.135	0.939	0.025
B18	0	0	0	0.167	0.895

3.3 可持续性等级评价结果及发展趋势预测

3.3.1 可持续性等级评价结果

根据表 5、6 和式(9)得到各可持续性等级与准则层 A 的关联度。并根据隶属度最大原则得到该装配式建筑供应链可持续性等级评价结果为(0.0017,0.0228,0.0516,0.1215,0.0265),说明该装配式建筑供应链的综合关联度对应的可持续性等级为“较好可持续”,见表 7。

表 7 装配式建筑供应链可持续性等级综合关联度和评价等级

指标	不可持续	较差可持续	一般可持续	较好可持续	可持续	最大值	次大值	当前等级	预测等级
A1	0	0.05	0.06	0.22	0.02	0.22	0.06	较好可持续	一般可持续
A2	0.01	0.04	0.04	0	0	0.04	0.04	一般可持续	较差可持续
A3	0	0	0.04	0.08	0.02	0.08	0.04	较好可持续	一般可持续
A4	0	0	0.06	0.12	0.06	0.12	0.06	较好可持续	可持续
综合关联度	0	0.02	0.05	0.12	0.03	0.12	0.05	较好可持续	一般可持续

3.3.2 可持续性评价及预测结果分析

根据最大隶属度原则,由表 7 可知,当前某装配式建筑供应链的可持续性等级是“较好可持续”等级,但该供应链的可持续性综合关联度有

向“一般可持续”等级发展的趋势。分析准则层 A 的关联度可以看出：

(1)该装配式建筑供应链的经济发展、资源利用、社会发展维度当前都处于“较好可持续”等级,但经济发展和资料利用维度有向“一般可持续”等级发展的趋势,而社会发展方面是向“可持续”等级发展。目前该供应链的生态环境维度处于“一般可持续”等级,但有向“较差可持续”等级发展的趋势。

(2)在经济发展方面,该供应链应该重点关注预制构件的成本问题,预制构件的成本过高是影响该供应链可持续发展的主要原因。在经济发展方面还应该重点关注设计规范化及标准完整性的问题,应该加大力度推进设计的规范化以及加强标准的完善性。

(3)在生态环境方面,“固体废弃物排放量”这一指标处于“不可持续”等级,该供应链应着重改善固体废物的排放处理,该情况严重影响了供应链的可持续发展,这一方面严重影响了该供应链的可持续发展。另外供应链还应重点改善绿化率、废气排放和噪音等问题。

(4)在资源利用方面,整体处于“一般可持续”等级,然而还应增加低碳材料的使用并且充分利用可再生能源。在节水问题上,该供应链应该加强管理,合理利用水资源。

(5)在社会发展方面,虽然该供应链目前处于“较好可持续”等级,但有明显的向好趋势。这说明该供应链充分提供了大量的就业机会,尊重了当地的文化,当地居民对其满意度高,这与该链所在城市的良好系统以及合理选址是不可分开的。

通过统计数据分析和实地考察,该供应链符合可持续发展条件,在重视经济发展的同时也考虑了生态环境、资源利用和社会发展方面的问题,但是纳入考虑的环境问题并没有实施到位。因此本文评价结果与实际相符。

4 结 论

装配式建筑供应链的可持续性评价及预测研究,对推进装配式建筑发展,提高装配式建筑可持续水平有着重要的作用。装配式建筑供应链中的各参与方可以根据可持续性评价及预测结果,进行发展战略的调整,改善当前存在的问题。

本文基于经济发展、生态环境、资源利用、社会发展这四个维度构建了科学可靠且完整的评价

指标体系。运用了 COWA 算子和云物元模型对装配式建筑供应链的可持续性进行了评价分析,增强了客观性,保证了评价结果的精确性和可靠性。在评价过程中,通过运用 Matlab 软件完成了对可持续性的评价及预测。结合云模型的随机性和物元理论的定性指标与定量指标相互转化和分析的特点,建立了基于云物元理论的装配式建筑供应链的可持续性评价模型,充分考虑了装配式建筑供应链的可持续性等级边界信息的模糊性和随机性。最后以某装配式建筑供应链为例验证了,该云物元模型能计算出可持续性等级与四个维度的关联度,并可预测各维度的可持续性发展水平。

但是该 COWA- 云物元评价模型仍存在一定的不足,其没有将不同维度不同指标间的影响考虑充分,使得本文所构建的评价指标体系相对简单。我国在装配式建筑方面的工作仍处于发展阶段,其供应链的可持续性评价更是一项复杂的系统。目前,构建一套完整、具体、易操作的装配式建筑供应链可持续性评价指标,还需要装配式建筑领域的专家对于装配式建筑供应链相关理论知识的更加全面和具体的研究以及国家规范的进一步完善。上述不足也是今后研究的重点方面。

参 考 文 献

[1] 柳堂亮. 预制装配式建筑企业供应链风险管理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

[2] 徐雨濛. 我国装配式建筑的可持续性发展研究 [D]. 武汉: 武汉工程大学, 2015.

[3] Cheng J C P, Law K H, Bjornsson H, et al. Modeling and monitoring of construction supply chains[J]. Advanced Engineering Informatics, 2010, 24: 435-455.

[4] Seuring S, Müller M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management[J]. Journal of Cleaner Production, 2008, 16: 1699-1710.

[5] Carter C R, Rogers D S. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory [J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2008, 38(5): 360-387.

[6] 贺彩虹, 周鲜成. 可持续供应链管理的驱动和制约因素[J]. 湖南社会科学, 2013, (1): 131-135.

[7] 裘秀群, 陈 夏, 杨玉龙, 等. 影响建筑业可持续发展的相关因素分析[J]. 建筑经济, 2001, (3): 16-18.

[8] 闫高杰. 基于三重底线的可持续供应链管理研究 [J]. 物流技术, 2009, 28(3): 114-116.

[2] Lowes L N, Mitra N, Altoontash A. Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(12): 1686-1697.

[3] Mitra N, Lowes L N. Evaluation, calibration, and verification of a reinforced concrete beam-column joint model[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(1): 105-120.

[4] Mitra N. An Analytical Study of Reinforced Concrete Beam-Column Joint Behavior under Seismic Loading [D]. Washington: University of Washington, 2007.

[5] Park R, Ruitong D. A comparison of the behaviour of reinforced concrete beam-column joints designed for ductility and limited ductility[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1988, 21(4): 255-278.

[6] Vecchio F J, Collins M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. ACI Structural Journal, 1986, 83(2): 219-231.

[7] 宋孟超. 钢筋混凝土梁柱节点核心区模型化方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

[8] 高 飞, 黄世涛, 刘 波, 等. 剪压比影响下配置 HRB500E 钢筋梁柱节点试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(4): 1-6.

[9] 马 健, 彭运动, 高 飞, 等. 配置 HRB500E 钢筋混凝土梁柱组合体抗震性能研究[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(4): 38-43.

[10] 黄世涛, 梅世龙, 唐智强, 等. 配置 HRB500E 钢筋混凝土梁柱边节点试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(4): 44-49.

[11] 高 飞, 黄世涛, 梅世龙, 等. 配置 HRB500E 钢筋梁柱节点数值模拟[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 11-15.

[12] 马 健, 彭运动, 高 飞, 等. 单调反对称荷载下钢筋砼梁柱中节点数值分析[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(1): 28-36.

[13] 王思启, 高 飞, 彭运动, 等. 核心区配箍率影响下 HRB500E 梁柱节点抗震研究[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 33-39.

[14] Vecchio F J, Collins M P. Compression response of cracked reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(12): 3590-3610.

[15] Vecchio F J. Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(9): 1070-1077.

[16] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S].

[17] 王 峥. 轴压比对钢筋混凝土框架节点抗震性能的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 1997.

[18] Park R, Paulay T. Behavior of Reinforced Concrete External Beam-Column Joints Under Cyclic Loading [C]//Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering. IAEE, 1973: 1-10.

[19] Paulay T, Park R, Prestitley M J N. Reinforced concrete beam-column joints under seismic actions [J]. Journal of ACI, 1978, 75(11): 585-593.

[20] NZS3101-1982, New Zealand Standard Code of Practice for the Design of Concrete Structures[S].

(上接第 115 页)

[9] 朱 嫵, 魏宁娣. 中国建筑企业的可持续发展框架及其可持续发展态势的调查[J]. 土木工程学报, 2009, 42(2): 126-130.

[10] 张卫华, 邱菀华. 基于供应链运作参考模型的供应链多目标绩效优化模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(9): 2052-2058.

[11] 任 南, 韩冰洁, 何彦昕. 基于 WBS-RBS-DSM 的项目风险识别与评估[J]. 系统工程, 2014, 32(11): 96-100.

[12] Yager R R. Families of OWA operators[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 59(2): 125-148.

[13] 刘振华, 张长江. 可持续视角下重污染企业绩效评价研究——基于 COWA 算子和云模型[J]. 科技管理研究, 2019, (1): 235-241.

[14] 郑晓云, 杜 娟, 苏义坤. 基于改进熵权法的城市可持续发展评价——以哈尔滨市为例[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(4): 65-71.

[15] 蔡 文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.

[16] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32(6): 15-20.

[17] 刘彩霞, 郭树荣, 纪 蕾, 等. 基于 OWA 算子和云物元的 PPP 项目审计质量评价[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(5): 152-158.

[18] 甘浪雄, 程小东, 王 晨. 基于云物元理论的引航环境风险评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 418-422.

[19] 徐 兵. 基于云物元模型的赣州城市轨道交通项目风险研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2017.

[20] 郑明贵, 文 唯, 杨 欣. 海外矿山项目并购外部风险评价[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(7): 825-829.

[21] 逯 程, 徐廷学, 赵 骏. 基于 DS_m 证据云物元模型的装备状态评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(7): 1549-1554.