

引用本文:周 涛,周亚萍,郭宇晨.装配式建筑产业链多维度阐释及其供应链自主可控力影响因素测评[J].建筑科学与工程学报,2022,39(4):192-203.

ZHOU Tao,ZHOU Ya-ping,GUO Yu-chen. Multi-Dimensional Interpretation of Prefabricated Building Industry Chain and Evaluation of Influencing Factor of Supply Chain Autonomous Controllability[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4): 192-203.

DOI:10.19815/j.jace.2021.10041

# 装配式建筑产业链多维度阐释及其供应链自主可控力影响因素测评

周 涛<sup>1</sup>,周亚萍<sup>1</sup>,郭宇晨<sup>2</sup>

(1. 山东理工大学 管理学院,山东 淄博 255020; 2. 山东理工大学 建筑工程学院,山东 淄博 255000)

**摘要:**为增强装配式建筑产业链供应链自主可控力,保障装配式建筑产业链供应链安全稳定,采用文献梳理与实际调研结合法,贯穿全生命周期时空链,阐释装配式建筑产业企业链、供应链与价值链内涵及相互关系,进而构建装配式建筑产业链供应链自主可控力评价体系,采用 COWA-DEMATEL 法分析其自主可控力影响因素的综合中心度及其原因、结果效用,并从科技自主性、组织安全性与产业脆弱性 3 个方面提出了改善建议。结果表明:装配式建筑企业链属结构单元层面,价值链属结构目标层面,供应链属结构运行层面,三者存在相互作用、相互依存关系;核心技术水平、外部环境波动、信息可控能力、合作协同程度、组织应急能力对装配式建筑产业链供应链自主可控力提升具有重要影响作用;外部环境波动、资金自主水平、人员综合素质为影响装配式建筑产业链供应链自主可控力水平的主要原因因素,而产品安全水平为影响装配式建筑产业链供应链自主可控力水平的主要结果因素。

**关键词:**产业链;供应链;自主可控力;装配式建筑;COWA-DEMATEL

中图分类号:TU-9

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)04-0192-12

## Multi-Dimensional Interpretation of Prefabricated Building Industry Chain and Evaluation of Influencing Factor of Supply Chain Autonomous Controllability

ZHOU Tao<sup>1</sup>, ZHOU Ya-ping<sup>1</sup>, GUO Yu-chen<sup>2</sup>

(1. Business School, Shandong University of Technology, Zibo 255020, Shandong, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

**Abstract:** In order to enhance the autonomous controllability and ensure the safety and stability of the supply chain of prefabricated building industry chain, the combination method of literature review and actual research was used to explain the connotation and interrelationship of the enterprise chain, supply chain and value chain of prefabricated building industry chain throughout the whole life cycle, and then the evaluation system of the supply chain autonomous

收稿日期:2021-10-19

基金项目:教育部规划基金项目(19YJA630126)。

作者简介:周 涛(1973-),男,山东淄博人,副教授,管理学博士,E-mail:61485231@qq.com。

通信作者:周亚萍(1996-),女,山东淄博人,工学硕士研究生,E-mail:1018492787@qq.com。

controllability of prefabricated building industry chain was constructed. The COWA-DEMATEL method was used to analyze the comprehensive centrality of the factors influencing the autonomous controllability and their causes and effects. The improvement suggestions were proposed in three aspects, including technological autonomy, organizational safety and industrial vulnerability. The results show that the prefabricated building enterprise chain is at the level of structural unit, the value chain is at the level of structural target, and the supply chain is at the level of structural operation. There are interactions and interdependencies among the three. The core technology level, external environment fluctuation, information control ability, cooperation and synergy degree, and organizational emergency response ability have important influence on the improvement of the supply chain autonomous controllability of prefabricated building industry chain. The fluctuation of the external environment, capital autonomy level, and personnel comprehensive quality are the main cause factors affecting the supply chain autonomous controllability of prefabricated building industry chain, while the product safety level is the main result factor affecting the autonomous controllability of the supply chain of the prefabricated building industry chain.

**Key words:** industry chain; supply chain; autonomous controllability; prefabricated building; COWA-DEMATEL

## 0 引言

2018年11月17日,习近平总书记在APEC峰会指出:“在各国相互依存日益紧密的今天,全球供应链、产业链、价值链紧密联系,各国都是全球合作链条中的一环,日益形成利益共同体、命运共同体。”在全球大合作背景下中国正发挥着越来越重要的作用。然而近年来,受新冠肺炎疫情和国际贸易保护主义双重冲击,中国经济发展遭遇空前危机,某些关键行业产业链供应链出现“断链”“断供”等不安全问题,产业链企业陷入困境。究其原因,既有国家产业规划不明确,产业主导技术掌控力薄弱等实践执行层面的缺陷,又有对产业链发展内涵理解不深入,对产业前景与风险考虑不全面等理论认识层面的不足。因此,加强对产业链多维度的全面认识,提升产业链供应链自主可控力,对保障产业链供应链健康、安全发展具有重要意义。

国内外关于“产业链”相关研究主要集中在以下几方面:

(1)产业链内涵研究。1958年赫希曼最先提出产业链概念,认为产业链是“具有相互衔接关系的企业集合”<sup>[1]</sup>,其经历了一个不断发展的过程,企业间由简单关联结构<sup>[2]</sup>到网络结构<sup>[3]</sup>,再到逻辑结构与时空布局结构<sup>[4]</sup>,发展成为一种战略联盟结构<sup>[5]</sup>。随着研究深入,产业链逐渐显现其价值增值功能<sup>[6]</sup>,产业链也被称为价值链<sup>[7]</sup>;深究其理,产业链形成原

理是由内模式和外模式的对接机理构成,其内模式是价值链、企业链、供应链和空间链4个维度的对接过程;其外模式是企业内部调控、市场结构和行业间调控和政府宏观调控3个维度的相互关联过程<sup>[8]</sup>。

(2)产业链评价研究。学者运用不同方法从不同角度对产业链进行了评价。运用SEM和FAHP方法,对电子信息产业链竞争力进行了评价<sup>[9]</sup>;基于事件树与模糊集理论,对产业链协同并购风险进行了评价<sup>[10]</sup>;基于协同理论,应用BP神经网络对产业链供应链协同驱动水平进行了评价<sup>[11]</sup>。

(3)装配式建筑产业链研究。装配式建筑属智能制造产业,自2016年9月30日,国务院发布《关于大力发展装配式建筑的指导意见》以来,其在整个建筑产业乃至整个国民经济中占有越来越重要的地位。截至2019年中国装配式建筑市场规模已经攀升到全球比重的42.75%,显现出产业爆发力强,技术依赖性高,产业脆弱性大等特点<sup>[12]</sup>。当前,关于装配式建筑产业链研究主要集中在合作伙伴选择、成本增量、风险管理等方面。

综上所述,国内外学者对产业链的研究取得了一系列成果和观点,但存在以下几点不足:①从不同层面对产业链内涵进行了界定,但从时空链、企业链、供应链和价值链多维度对产业链内涵进行深入阐释的文献还较少;②已有研究对产业链竞争力、并购风险等方面的评价关注较多,而从产业链供应链自主可控力评价角度对其影响因素的研究却鲜有文

献,已有资料也大多以政府报告为主,以综述性分析居多;③实践应用方面大多以高新科技产业为主,采用理论演绎与归纳相互印证较多,而针对装配式建筑产业,构建数学模型对产业链供应链自主可控力影响因素进行辨别、分析的研究较少。因此,以装配式建筑产业为例,厘清其产业链多维度链条间相互作用关系,科学探究影响产业链供应链自主可控力水平的关键因素,将为有效解决产业链供应链“断链”问题提供理论参考和实践借鉴。

1 装配式建筑产业链多维度阐释

当前,国内外学者对装配式产业链概念尚未达成统一认识。有些学者认为,装配式建筑产业链是以装配式建筑为对象,以各利益相关企业为载体,以风险共担、利润共享为导向的上中下游企业相互影响和依存的动态增值链<sup>[13]</sup>;还有学者认为,装配式建筑产业链是包括设计、生产、施工、管理和运营五大环节的全产业链<sup>[14]</sup>等。综合以上研究,可以认

为:装配式建筑产业链是以装配式建筑产品或相关服务为对象,以各利益相关企业为载体,受政府、市场、企业调控影响,在企业链、供应链、价值链和时空链 4 个维度相互对接均衡中,形成供需结合、信息共享、风险共担的动态增值链。本文将贯穿时空链,从装配式建筑产业链的企业链、供应链、价值链角度分别进行阐释。

1.1 装配式建筑产业链企业链分析

企业是构成装配式建筑产业链基本结构的功能主体,是完成装配式建筑全生命周期建设的基础,也是产品生产、价值增长的基本单元。装配式建筑产业链基于空间维度将企业分为上中下游三部分:上游企业主要以装配式建筑科技服务业为主;中游企业主要以绿色建筑制造业为主,包括建筑建造与设备制造两部分;下游企业主要以装配式建筑配套服务业为主,包括房屋、基础设施建设的运营维护和增值服务两部分。装配式建筑企业链与空间链关系如图 1 所示。

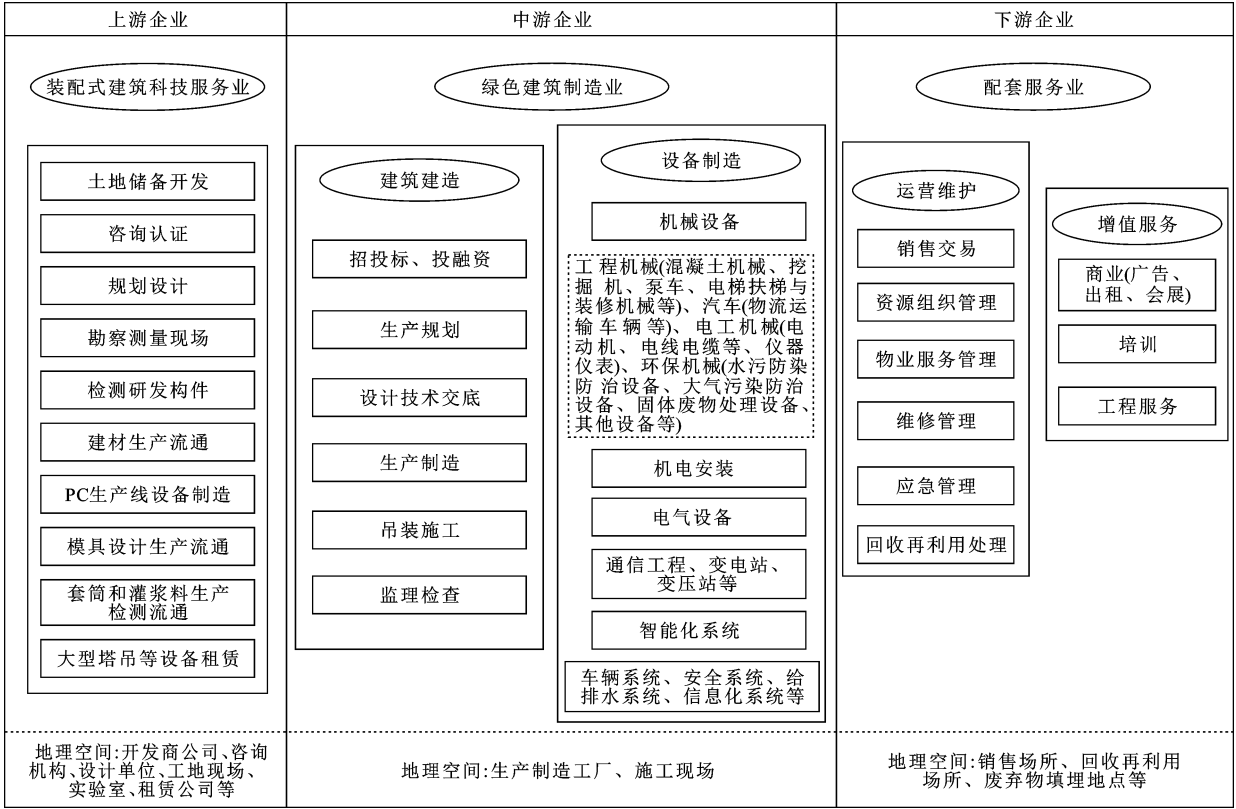


图 1 装配式建筑企业链与空间链关系

Fig. 1 Relationship Between Enterprise Chain and Space Chain of Prefabricated Building

由装配式建筑产业链上中下游企业空间布局分析,发现企业功能具备以下两方面特征:①功能多样性,能够满足市场多样化的产品需求;②功能完整性,确保装配式建筑产品各阶段功能完备。

1.2 装配式建筑产业链供应链分析

基于全生命周期的装配式建筑产业链供应链主要包括:项目决策、工程设计、生产采购、仓储运输、吊装施工、运维回收阶段。项目决策阶段:开发商综

合考虑外部环境因素,进行项目审查与可行性分析,总承包商确立投标意向。工程设计阶段:设计与构件生产商、施工单位充分沟通交流,以集成化设计为指导,将 BIM 基础设计与智能云设计融合进行技术论证;总承包商与各方一起参与施工图、关键节点连接详图的设计,确保构件的可施工性以及质量标准的满意性。生产采购阶段:构件生产商向设计负责方提出技术底线要求,采购所需材料组织生产;总承包商统筹安排,保证构件质量满足要求,监理单位进行全程跟踪检查。仓储运输阶段:总承包商借

助 BIM 技术与 RFID 技术充分了解构件的受力特性、构件运输进度等信息,保证构件质量安全;构件生产商与物流运输、仓储管理单位进行业务对接,完成装配构件的仓储运输。吊装施工阶段:总承包商总揽全局,与施工单位共同把握工期进度,组织设计人员与生产人员进驻现场辅助施工人员操作。运维回收阶段:开发商开展销售与售后服务工作,获取经济收益;基于可持续发展理念,当建筑使用寿命终止时,依托逆向物流对可处理构件进行回收再利用。装配式建筑供应链与时间链关系如图 2 所示。

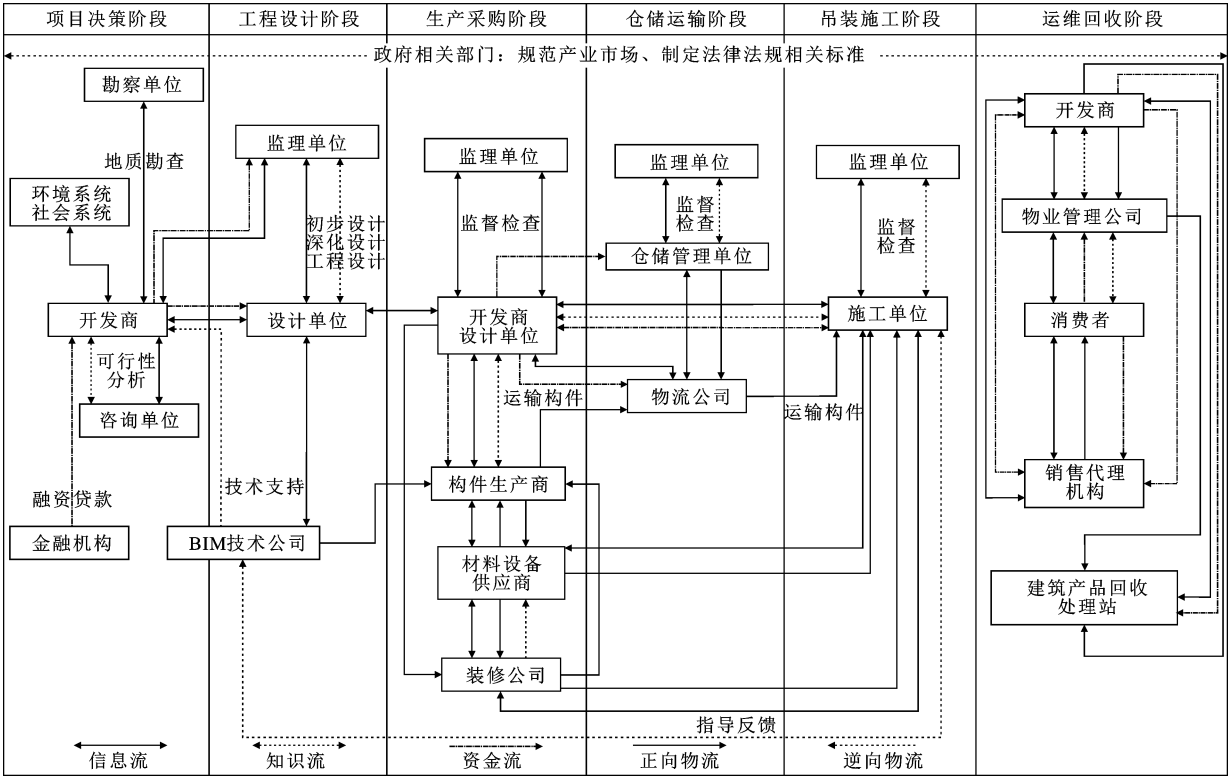


图 2 装配式建筑供应链与时间链关系

Fig. 2 Relationship Between Supply Chain and Time Chain of Prefabricated Building

装配式建筑供应链与传统建筑供应链不同,具备以下两点特征:①装配式建筑供应链建造周期短,生产方式为工厂预制、现场安装,具有订单生产的特点;②装配式建筑供应链参与企业数量多、涉及专业多,企业间联系紧密,信息共享,协调性高。

1.3 装配式建筑产业链价值链分析

价值链是产业链的根本,产业链是价值链形成和演化的基础。装配式建筑产业具有其独特的行业特性,其产业价值链涉及企业众多,各链条企业活动密切相关,要求企业必须以价值为导向,从技术研发、企业管理等方面增强自身核心竞争优势。项目决策阶段投资方和房地产开发企业对装配式建筑产

品进行判断,产生价值;工程设计到吊装施工阶段各主体分别负责相关经济活动,活动中利益相关者交流、合作产生价值;运维回收至建筑使用寿命终止阶段房地产开发企业进行销售、物业管理等活动,在消费者使用建筑产品过程中产生价值。装配式建筑价值链如图 3 所示。

装配式建筑产业链价值不仅追求经济效益,还要体现对社会和环境效益的改善,主要表现以下三点特征:①装配式建筑从项目构思到建筑使用期限终止,都离不开对其价值的判断,价值在使用过程中持续体现;②装配式建筑产业链的价值实现是一个有机累加的过程,各利益相关者对产业链价值本着

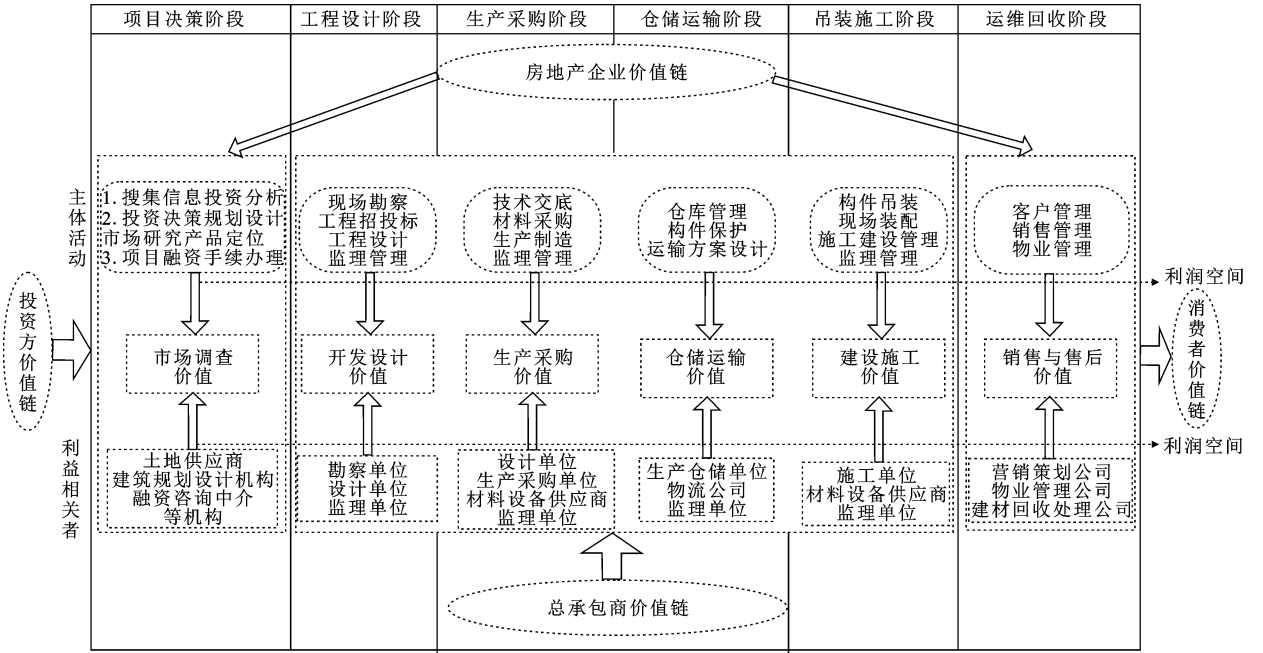


图 3 装配式建筑价值链

Fig. 3 Value Chain of Prefabricated Building

全面认识的宗旨,将共同利益作为最终目标,才能实现产业链整体利益;③装配式建筑产业链可通过各利益相关者内部制约均衡实现价值增长,也可通过产业链向上向下延伸、对外拓展实现价值增长。

1.4 装配式建筑产业链三维结构分析

基于以上分析,构建装配式建筑产业链立体三维结构关系,以清晰阐明企业链、供应链、价值链相互之间的作用机理,如图 4 所示。

由图 4 可知,受外部环境影响,在全生命周期时空链中,装配式建筑企业链、供应链、价值链相互交

叉融合、相互作用,形成产业链三维结构关系。

(1)企业链与供应链相互关系。企业是构建供应链的基础,任何供应链都是由若干互为供需的企业组成;供应链是企业链功能的延伸,企业链中各企业处于不同时空阶段,企业间只有通过相互合作竞争建立稳固的供需关系,形成一体化的供应链,企业功能才能实现互补和释放。在企业链与供应链相互作用中,“组织安全性”值得关注。

(2)企业链与价值链相互关系。企业链是实现价值链的载体,价值链是企业链追求的终极目标。企业链各项经济活动中,各企业通过不断技术创新实现功能价值,而相互关联的企业功能价值不断叠加形成价值链。在企业链与价值链相互作用中,“科技自主性”至为关键。

(3)供应链与价值链相互关系。供应链是价值链实现的支撑,价值链是供应链发展的方向。依托价值链制定战略目标,构建全生命周期供应链,并将所获收益在价值单元进行利益分配,从而保障供应链结构关系的稳定。在供应链与价值链相互作用中,“产业脆弱性”极为重要。

综上所述,在装配式建筑产业链三维结构关系中,企业链属结构单元层面,价值链属结构目标层面,供应链属结构运行层面,三者相互作用、紧密关联。因此,贯穿全生命周期时空链,以价值链为目标,依托企业链对装配式建筑产业链供应链自主可控能力进行研究具有重要意义。

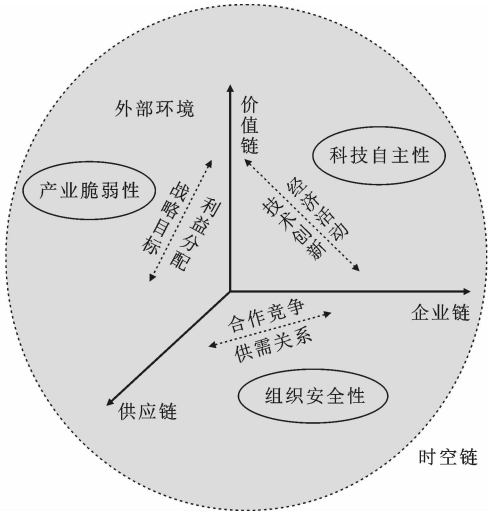


图 4 装配式建筑产业链三维结构关系

Fig. 4 Three-dimensional Structural Relationship of Prefabricated Building Industry Chain

## 2 装配式建筑产业链供应链自主可控能力影响因素测评

### 2.1 影响因素确立

产业链供应链自主可控能力研究还处于初期阶段,测评指标体系尚不完善。参考相关研究,结合专

家访谈法,综合考虑中国装配式建筑产业链供应链发展现状,选取装配式建筑产业链供应链自主可控力关键影响因素,作为各因素层来源解释,以凝聚因素层,并构建出以科技自主性 A、组织安全性 S 和产业脆弱性 F 为准则层的装配式建筑产业链供应链自主可控力评价体系,如表 1 所示。

表 1 装配式建筑产业链供应链自主可控力评价体系

Table 1 Prefabricated Building Industrial Chain and Supply Chain Autonomous Controllability Evaluation System			
准则层	因素层	因素代号	因素解释
科技自主性 A	人员综合素质	A <sub>1</sub>	研发人员占从业人员比例 <sup>[9]</sup> 、受高等教育人数占比、专业生产技术人才占比 <sup>[15]</sup> 、综合管理人员占比
	资金自主水平	A <sub>2</sub>	研发投入占营业收入比例 <sup>[9]</sup> 、国家专项资金供给占比、企业经营盈利能力、融资渠道数量(融资难易)
	核心技术水平	A <sub>3</sub>	核心技术占有比例 <sup>[16]</sup> 、知识产权自主率 <sup>[17]</sup> 、研发成功率、专利授权数
	生产装备水平	A <sub>4</sub>	装备国产化率、先进生产装备占比、设备精度水平 <sup>[18]</sup>
	材料自主能力	A <sub>5</sub>	原材料、零部件自给率、材料先进水平
组织安全性 S	人员安全水平	S <sub>1</sub>	员工培训频率 <sup>[16]</sup> 、本国科研人员比例、人员安全意识 <sup>[19]</sup> 等
	产品安全水平	S <sub>2</sub>	原材料优质率、产品优质率、安全等级测评真实性
	信息可控能力	S <sub>3</sub>	信息资源的投入 <sup>[9]</sup> 、信息安全与系统稳定性、信息共享程度 <sup>[19]</sup>
	组织管理能力	S <sub>4</sub>	责任划分明确度、管理团队工作效率、空间聚集能力 <sup>[9]</sup>
	组织应急能力	S <sub>5</sub>	信息获取能力、风险规避能力 <sup>[20]</sup> 、灾难备份和恢复能力
产业脆弱性 F	外部环境波动	F <sub>1</sub>	政策法规政府干预程度 <sup>[21]</sup> 、自然不可抗力因素干扰、市场经济的周期性波动、消费者偏好选择度
	合作协同程度	F <sub>2</sub>	合作伙伴选择合适度 <sup>[22]</sup> 、目标战略匹配度、自发联结度 <sup>[20]</sup>
	企业业务能力	F <sub>3</sub>	企业品牌知名度、供应商间竞争性、生产效率 <sup>[23]</sup> 、物流水平、供货能力、供应质量、服务质量
	利益分配水平	F <sub>4</sub>	利益分配 <sup>[24]</sup> 、风险分担合理性、奖惩措施合理性

### 2.2 研究方法选取

DEMATEL 方法是一种基于决策试验与评价试验的系统要素分析法,运用图论和矩阵辨别出复杂系统主要构成要素,通过简化系统结构分析过程,确立要素间因果关系和每个要素在系统中的地位<sup>[16,25]</sup>,可有效识别目标对象中的关键因素,但研究结论极易受专家主观经验影响。为了有效降低专家主观经验影响,特选用 COWA 算子进行赋权,以提升测评结果准确性。

#### 2.2.1 COWA 算子

COWA 算子是由在 OWA 算子基础上改进而来的区间组合数有序加权算子,通过对评价值进行重新排序,将可能影响评价结果的极端值放置于影响程度较小的位置,最大限度减少主观偏差对赋权结果造成的不合理影响<sup>[26]</sup>。该方法主要包括以下 3 个步骤:

##### (1)数据排序

邀请  $n$  个专家对影响因素(指标)打分,得到原始数据集  $X$ ,并将数据按照从大到小(由  $y_1$  到  $y_n$ )的顺序进行重新排序,得到新的数据集  $Y$ ,即  $y_1 \geq y_2 \geq y_3 \geq \cdots \geq y_k \geq \cdots \geq y_n, y_k \in [1, 2, 3, 4], k \in [1, n]$ 。

##### (2)权重赋值

运用式(1)对排序后数据进行权重赋值,并通过式(2)将所得权重  $\theta_k$  与初始数据进行计算,得到各指标的绝对权重值  $\bar{\omega}_i$ 。

$$\theta_k = \frac{C_n^k}{\sum_{k=1}^n C_n^k} = \frac{C_n^k}{2^n} \tag{1}$$

$$\bar{\omega}_i = \sum_{k=1}^n \theta_k y_k \quad \theta_k \in [0, 1] \tag{2}$$

式中: $C_n^k$  为在各数据中任意个数据的排列组合数; $\theta_k$  为数据集  $Y$  的权重。

##### (3)归一化处理

对式(2)求得的结果进行归一化处理[式(3)],可得到各指标的相对权重值  $\omega_i$ ,计算结果见表 2。

$$\omega_i = \frac{\bar{\omega}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{\omega}_i} \tag{3}$$

#### 2.2.2 DEMATEL 计算

DEMATEL 可有效识别并分析系统内各因素重要程度及相互间关系,包括以下 4 个步骤。

##### (1)建立直接关系矩阵

邀请专家对某指标影响其他指标的程度进行打分,得出直接关系矩阵  $O$ 。

表 2 因素层权重  
Table 2 Weight of Factor Layer

因素代号	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>
权重	0.079 2	0.055 0	0.097 8	0.058 9	0.049 9
因素代号	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>
权重	0.066 1	0.049 6	0.089 6	0.066 4	0.083 7
因素代号	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	
权重	0.097 8	0.078 1	0.069 0	0.058 9	

(2) 标准化处理

计算得每行每列之和,取其最大值 $\lambda$ ,并通过式

(4)求得规范化后的直接影响矩阵 $N$ (表 3)。

$$N=\lambda^{-1}O$$

(4)

表 3 直接影响矩阵

Table 3 Direct Influence Matrix

因素代号	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
A <sub>1</sub>	0.000	0.051	0.103	0.051	0.026	0.103	0.051	0.077	0.077	0.051	0.000	0.077	0.051	0.077
A <sub>2</sub>	0.051	0.000	0.103	0.103	0.051	0.051	0.077	0.051	0.051	0.077	0.051	0.051	0.077	0.103
A <sub>3</sub>	0.103	0.051	0.000	0.103	0.103	0.077	0.103	0.077	0.051	0.077	0.051	0.077	0.051	0.077
A <sub>4</sub>	0.026	0.026	0.077	0.000	0.051	0.026	0.103	0.000	0.026	0.000	0.026	0.026	0.051	0.000
A <sub>5</sub>	0.000	0.000	0.051	0.077	0.000	0.000	0.077	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026	0.026	0.000
S <sub>1</sub>	0.051	0.000	0.051	0.051	0.026	0.000	0.077	0.103	0.077	0.077	0.051	0.077	0.051	0.026
S <sub>2</sub>	0.000	0.000	0.026	0.051	0.051	0.026	0.000	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.000	0.000
S <sub>3</sub>	0.051	0.026	0.103	0.026	0.051	0.051	0.077	0.000	0.077	0.103	0.051	0.051	0.077	0.026
S <sub>4</sub>	0.077	0.051	0.051	0.000	0.026	0.051	0.077	0.077	0.000	0.103	0.051	0.077	0.077	0.077
S <sub>5</sub>	0.051	0.026	0.051	0.000	0.000	0.077	0.026	0.103	0.077	0.000	0.077	0.077	0.051	0.026
F <sub>1</sub>	0.077	0.103	0.077	0.026	0.077	0.026	0.077	0.103	0.103	0.103	0.000	0.103	0.051	0.077
F <sub>2</sub>	0.026	0.051	0.051	0.026	0.026	0.051	0.051	0.026	0.103	0.051	0.051	0.000	0.051	0.103
F <sub>3</sub>	0.000	0.026	0.026	0.077	0.051	0.077	0.026	0.051	0.103	0.051	0.051	0.103	0.000	0.077
F <sub>4</sub>	0.051	0.077	0.051	0.051	0.026	0.077	0.077	0.026	0.077	0.026	0.026	0.103	0.103	0.000

表 4 各影响因素 DEMATEL 计算结果

Table 4 DEMATEL Calculation Results of Each Influencing Factor

因素层	因素代号	$D_i$	$C_i$	$M_i$	$R_i$	因素属性
人员综合素质	A <sub>1</sub>	2.609	1.840	4.449	0.769	原因因素
资金自主水平	A <sub>2</sub>	2.846	1.569	4.415	1.277	原因因素
核心技术水平	A <sub>3</sub>	3.033	2.553	5.586	0.480	原因因素
生产装备水平	A <sub>4</sub>	1.317	2.022	3.339	−0.705	结果因素
材料自主能力	A <sub>5</sub>	0.695	1.826	2.521	−1.131	结果因素
人员安全水平	S <sub>1</sub>	2.310	2.255	4.565	0.055	原因因素
产品安全水平	S <sub>2</sub>	0.852	2.845	3.697	−1.993	结果因素
信息可控能力	S <sub>3</sub>	2.496	2.318	4.814	0.178	原因因素
组织管理能力	S <sub>4</sub>	2.629	2.724	5.353	−0.095	结果因素
组织应急能力	S <sub>5</sub>	2.264	2.411	4.675	−0.147	结果因素
外部环境波动	F <sub>1</sub>	3.234	1.724	4.958	1.510	原因因素
合作协同程度	F <sub>2</sub>	2.237	2.781	5.018	−0.544	结果因素
企业业务能力	F <sub>3</sub>	2.305	2.293	4.598	0.012	原因因素
利益分配水平	F <sub>4</sub>	2.479	2.148	4.627	0.331	原因因素

(3) 计算综合影响矩阵

通过式(5)求得综合影响矩阵 $T$ ,其中 $I$ 为单位矩阵。

$$T=N(I-N)^{-1}$$

(5)

(4) 计算“四度”

运用式(6)~(9)可求得“四度”,即 $D_i$ 、 $C_i$ 、 $M_i$ 、 $R_i$ ,其中 $D_i$ 为影响度,指 $T$ 矩阵各行指标加和值, $C_i$ 为被影响度,指矩阵各列指标加和值, $M_i$ 为中心度,指该指标在系统中的重要程度, $R_i$ 为原因度,表明该指标为原因因素,若 $R_i>0$ ,即该指标对其他因素产生影响,反之则表明其为结果因素,即该指标受其他因素影响。详细计算结果见表 4。

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{6}$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n t_{ji} \quad i = 1, 2, \cdots, n \tag{7}$$

$$M_i = D_i + C_i \tag{8}$$

$$R_i = D_i - C_i \tag{9}$$

式中: $t_{ij}$ 为矩阵  $T$  第  $i$  行第  $j$  列元素。

表 5 自主可控力各影响因素综合中心度排名

Table 5 Comprehensive Importance Ranking of Influencing Factors of Autonomous Controllability

准则层	因素层	因素代号	$\omega_i$	$M_i$	$\omega_i M_i$	$M_i^*$	因素排序	综合中心度排序
科技自主性 A	人员综合素质	A <sub>1</sub>	0.081 9	4.449	0.364 3	0.079 5	6	2(0.327 2)
	资金自主水平	A <sub>2</sub>	0.058 6	4.415	0.258 7	0.056 5	11	
	核心技术水平	A <sub>3</sub>	0.097 3	5.586	0.543 5	0.118 6	1	
	生产装备水平	A <sub>4</sub>	0.059 9	3.339	0.200 0	0.043 7	12	
	材料自主能力	A <sub>5</sub>	0.052 5	2.522	0.132 4	0.028 9	14	
组织安全性 S	人员安全水平	S <sub>1</sub>	0.065 8	4.565	0.300 3	0.065 4	9	1(0.354 4)
	产品安全水平	S <sub>2</sub>	0.049 4	3.697	0.182 6	0.039 8	13	
	信息可控能力	S <sub>3</sub>	0.083 0	4.815	0.399 6	0.087 2	3	
	组织管理能力	S <sub>4</sub>	0.066 0	5.353	0.353 3	0.077 1	7	
	组织应急能力	S <sub>5</sub>	0.083 3	4.674	0.389 3	0.084 9	5	
产业脆弱性 F	外部环境波动	F <sub>1</sub>	0.097 3	4.958	0.482 4	0.105 2	2	3(0.318 4)
	合作协同程度	F <sub>2</sub>	0.077 7	5.018	0.389 9	0.085 1	4	
	企业业务能力	F <sub>3</sub>	0.068 7	4.598	0.315 9	0.068 9	8	
	利益分配水平	F <sub>4</sub>	0.058 6	4.628	0.271 2	0.059 2	10	

注:综合中心度排序中括号内数字为  $M_i^*$  的和。

2.3 计算结果分析

2.3.1 综合中心度分析

中心度反映的是各影响因素在装配式建筑产业链供应链自主可控能力评价中所占有的重要程度。由表 5 可知,准则层中心度排序依次为:组织安全性 S、科技自主性 A 和产业脆弱性 F。三类准则层中心度程度相似,其中组织安全性略高。各指标综合中心度排序前五位依次为:核心技术水平 A<sub>3</sub>、外部环境波动 F<sub>1</sub>、信息可控能力 S<sub>3</sub>、合作协同程度 F<sub>2</sub>、组织应急能力 S<sub>5</sub>,均大于 0.08。说明要保持装配式建筑产业链供应链自主可控主要依靠先进技术、有效管理与环境稳定三方面的共同作用,如果三方面所含各项指标发生改变,都将不同程度影响装配式建筑产业链供应链的稳定。其中,核心技术水平 A<sub>3</sub>综合中心度最大,为 0.1186,表明核心智能建筑技术“卡脖子”隐患是影响装配式建筑产业链供应链自主可控能力的首位因素。中国当前装配式建筑产业在核心技术占比、知识产权自主率、研发成功率、专利授权数等指标已具备较强实力,所自主研发的软硬件技术已基本能够满足国内建设项目的需要,然而在国际高端建设项目竞争中,无论是软件设计还

2.2.3 COWA-DEMATEL 综合计算

通过式(10)将COWA算子所得权重与DEMATEL 所得的中心度进行计算即可求得各指标的综合中心度  $M_i^*$  (表 5)。

$$M_i^* = \frac{M_i \omega_i}{\sum_{i=1}^{14} M_i \omega_i} \tag{10}$$

是设备精度都还存在较大差距,核心技术水平还有待向高端提升。外部环境波动 F<sub>1</sub> 综合度重要程度居第二位,表明外部环境变化是导致装配式建筑产业链供应链断裂的重要原因。由于受中美贸易摩擦、全球新冠疫情双重影响,中国装配式建筑产业所引入的国外高端设备遭受技术封锁,出现某种程度断链损失,为此中国提出以国内循环为主,国际国内互促的双循环发展模式,倡导国与国之间建立友好竞争、公开透明的合作关系,力求通过减小外部环境波动缓解装配式建筑产业链供应链所遭受的负面影响。信息可控能力 S<sub>3</sub> 居第三位,表明信息可控能力高低直接关乎装配式建筑产业链供应链是否稳定。在互联网经济竞争格局下,信息成为稀缺且最具竞争力的资源,通过加大信息资源的投入,建立易于使用、即时反馈、信息安全的装配式建筑项目全周期生产和质量管理平台,可保障供应链自主可控力的提升。合作协同程度 F<sub>2</sub> 居第四位,表示产业链供应链自主可控力离不开企业间合作协同的程度。通过利益共享建立供应链企业间自发联结关系,实现供应链节点企业目标战略相互匹配,提升供应链各节点企业间紧密联系的合作程度,可促使装配式建筑产



业链供应链自主可控力提升。组织应急能力  $S_5$  居第五位,表明组织应急能力在产业链供应链可控力评价中处于应急保障地位。当外部突发事件或不可抗力因素引发装配式建筑产业链供应链断裂时,可通过增强产业链供应链信息获取能力、风险规避能力、灾难备份和恢复能力等减少风险损失,维护装配式建筑产业链供应链趋向稳定。另一方面,材料自主能力  $A_1$ 、产品安全水平  $S_2$ 、生产装备水平  $A_4$  和资金自主水平  $A_2$  综合中心度较低,说明以上因素对于装配式建筑产业链供应链自主可控力影响较弱。随着政策驱动和市场内生动力的增强,中国绿色建材、机械制造等装配式建筑相关产业发展迅速,原材料供给充足,产品替代性不断增强,设备自主研发能力稳步提升,基本能够满足国内装配式建筑产业链供应链发展需求;另外,资金自主水平  $A_2$  中心度偏低是由于在装配式建筑产业发展初期,国家政策扶持与资金注入较为积极且可靠,为装配式建筑行业提供了足够的资金储备。

2.3.2 原因度分析

由表 4 可知,影响装配式建筑产业链供应链自主可控能力 14 项因素中,包含:8 项原因因素,原因度越大对其他因素的影响程度越强烈;6 项结果因素,原因度越小表明受其他因素影响程度越敏感。原因因素不仅对装配式建筑产业链供应链自主可控力具有直接影响作用,还通过影响其他因素,对其具有间接影响作用。通过德尔菲专家匿名反馈法,构建装配式建筑产业链供应链因果影响关系,如图 5 所示。

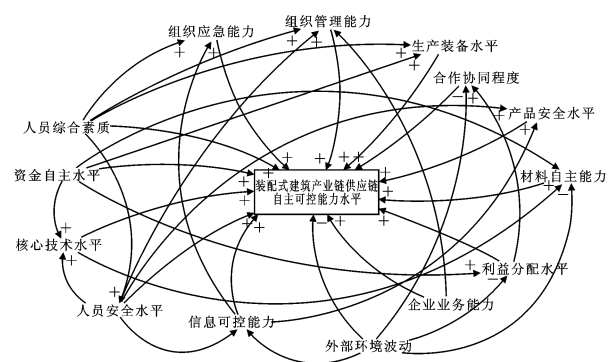


图 5 自主可控力影响因素因果关系

Fig. 5 Causal Relationship Among Influencing Factors of Autonomous Controllability

由表 5 可知,外部环境波动  $F_1$ 、资金自主水平  $A_2$  和人员综合素质  $A_1$  是原因度排名居前三位的重要原因因素。其中,外部环境波动  $F_1$  除直接影响产业链自主可控水平外,还间接影响原因因素利益

分配水平  $F_4$  和信息可控能力  $S_3$ 、结果因素合作协同程度  $F_2$  和材料自主能力  $A_5$ ,而利益分配水平  $F_4$  又作用于合作协同程度  $F_2$ ,信息可控能力  $S_3$  又制约产品安全水平  $S_2$  和组织应急能力  $S_5$ ,各因素最终综合影响装配式建筑产业链供应链自主可控能力(图 6)。

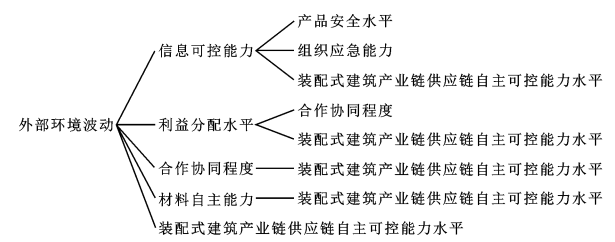


图 6 外部环境因素影响作用关系树

Fig. 6 Relationship Tree of Influence of External Environmental Factors

此外,核心技术水平  $A_3$ 、利益分配水平  $F_4$  也是影响装配式建筑产业链自主可控能力高低的次重要原因因素,一旦核心技术“卡脖子”,产业链自主性将受到威胁;所获利益是驱使相关企业融入产业链联盟的重要条件,产业联盟的稳定关键取决于企业利益分配的公平性。信息可控能力  $S_3$ 、人员安全水平  $S_1$ 、企业业务能力  $F_3$  是影响产业链自主可控能力提升的弱原因因素,企业掌控信息是否安全稳定、企业人员是否拥有安全意识、企业是否具有综合竞争力将直接关乎装配式建筑产业链供应链自主可控能力的高低。

产品安全水平  $S_2$ 、材料自主能力  $A_5$ 、生产装备水平  $A_4$  是结果因素中排名前三位的指标,其因果影响关系如图 5 所示,其中,产品安全性  $S_2$  为最敏感指标,其受原因因素人员安全水平  $S_1$  和信息可控能力  $S_3$  直接影响;人员安全水平  $S_1$  又受人员综合素质  $A_1$  因素影响,信息可控能力  $S_3$  同时受人员安全水平  $S_1$  和外部环境波动  $F_1$  因素影响,各因素综合作用影响装配式建筑产业链供应链自主可控能力。

3 对策建议

结合表 4 和表 5,绘制综合中心度与原因度关系图(图 7),将其划分为 I、II、III 和 IV 四个象限。其中,第 II 象限为核心关注区域,越偏向右上角的指标,其原因度和综合中心度数值均越高,表明该指标是装配式建筑产业链供应链自主可控力提升的关键作用因素;第 III 象限为有限关注区域,越偏向左下角的指标,其原因度和综合中心度数值均越低,表明该

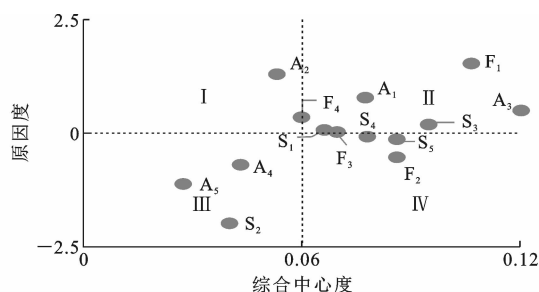


图7 综合中心度与原因度关系

Fig. 7 Relationship Between Comprehensive Centrality and Causality

Centrality and Causality

指标是装配式建筑产业链供应链自主可控力提升的限制备选因素;第Ⅰ象限为重要关注区域,第Ⅳ象限为关键关注区域,两区域指标重要程度及原因度介于第Ⅱ、Ⅲ象限之间,表明该区域指标是装配式建筑产业链供应链自主可控力提升的次要关注因素。根据图7,在第Ⅱ象限筛选装配式建筑产业链供应链自主可控力提升的关键作用因素,并提出以下三点建议。

#### (1)掌握科技命脉,提高科技自主性

人员综合素质  $A_1$  和核心技术水平  $A_3$  均位于第Ⅱ象限中间区域,且核心技术水平  $A_3$  重要程度最高。激烈的市场竞争中,企业是否掌握核心技术,是否拥有高素质人才是提高其科技自主性的关键。应做好以下两方面工作:①提高专项技术人才质量、数量,大力发展人才产业,为装配式建筑产业链发展提供专业性人才保障;②装配式建筑产业链要在关键设计阶段深入研发,配套生产装备和材料,并依据生产设计需求不断寻求创新突破。

#### (2)统筹组织管理,保障组织安全性

人员安全水平  $S_1$  和信息可控能力  $S_3$  均位于第Ⅱ象限边缘区域。增强员工安全意识,实现信息安全可控是保障组织安全性、稳定性的基础。具体从以下两方面入手:①不定期组织思想政治教育培训,从思想层面降低装配式建筑产业链不安全风险;②加强信息安全资源投入,完善信息网络安全防护系统,保障产业链企业间信息共享共通,并建立完备的装配式建筑产业链预警机制,优化产业链安全应急处理流程。

#### (3)抓住产业弱点,消除产业脆弱性

外部环境波动  $F_1$  位于第Ⅱ象限最核心位置,企业业务能力  $F_3$  和利益分配水平  $F_4$  处于第Ⅱ象限边缘位置。装配式建筑产业链脆弱性包括外部脆弱性与内部脆弱性,外部脆弱性主要受外部环境波动影

响,而内部脆弱性则主要受产业链企业间供需利益关系影响。要消除产业脆弱性,需做好以下几点:①加强政府宏观调控与市场调节协调统一,科学预测市场经济周期波动,调查掌握消费需求趋向,更好适应外部环境变化;②各企业深度融入产业链大环境,充分发挥企业功能价值,实现产业链各环节有效运行;③遵循市场供需规律,科学制定价格策略,实现企业间利益合理分配,最大限度保障装配式建筑产业链供应链自主可控。

## 4 结 语

(1)装配式建筑产业链涉及企业链、价值链、供应链3个维度,三者具有相互作用、相互依存的关系。

(2)装配式建筑产业链供应链自主可控力水平受核心技术水平、外部环境波动、信息可控能力、合作协同程度、组织应急能力等14项因素影响。

(3)通过COWA-DEMATEL综合计算得到:外部环境波动、资金自主水平、人员综合素质为影响装配式建筑产业链供应链自主可控力水平的主要原因因素,而产品安全水平为影响装配式建筑产业链供应链自主可控力水平的主要结果因素。

(4)提升装配式建筑产业链供应链自主可控力水平可从掌握科技命脉,提高科技自主性,统筹组织管理,保障组织安全性,抓住产业弱点,消除产业脆弱性等方面入手。

## 参考文献:

### References:

- [1] 盛朝迅. 推进我国产业链现代化的思路与方略[J]. 改革, 2019(10): 45-56.  
SHENG Chao-xun. Thoughts and Strategies for Promoting the Modernization of China's Industrial Chain [J]. Reform, 2019(10): 45-56.
- [2] 简新华. 产业经济学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.  
JIAN Xin-hua. Industrial Economics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001.
- [3] 杨公朴, 夏大慰. 产业经济学教程[M]. 2版. 上海: 上海财经大学出版社, 2002.  
YANG Gong-pu, XIA Da-wei. Modern Industrial Economics [M]. 2nd ed. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2002.
- [4] 龚勤林. 论产业链构建与城乡统筹发展[J]. 经济学家, 2004(3): 121-123.  
GONG Qin-lin. On the Construction of Industrial

- Chain and Urban-rural Overall Development [J]. Economist, 2004(3):121-123.
- [5] 蒋国俊, 蒋明新. 产业链理论及其稳定机制研究[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2004, 10(1):36-38.  
JIANG Guo-jun, JIANG Ming-xin. Research on Theory of Industry Chain and Its Stabilising Mechanism [J]. Journal of Chongqing University (Social Sciences Edition), 2004, 10(1):36-38.
- [6] 李心芹, 李仕明, 兰 永. 产业链结构类型研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2004, 6(4):60-63.  
LI Xin-qin, LI Shi-ming, LAN Yong. Structure and Types Analysis on Industrial Chain [J]. Journal of University of Electronic (Social Sciences Edition), 2004, 6(4):60-63.
- [7] 李万立. 旅游产业链与中国旅游业竞争力[J]. 经济师, 2005(3):123-124.  
LI Wan-li. Tourism Industry Chain and the Competitiveness of Chinese Tourism Industry[J]. China Economist, 2005(3):123-124.
- [8] 邵 昶. 产业链形成机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
SHAO Chang. Research on Formation Mechanism of Industrial Chain [D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [9] 刘烈宏, 陈治亚. 电子信息产业链竞争力评价模型构建及分析: 基于 SEM 和 FAHP 方法[J]. 世界经济与政治论坛, 2017(1):153-169.  
LIU Lie-hong, CHEN Zhi-ya. Construction and Analysis of Competitiveness Evaluation Model of Electronic Information Industry Chain Based on SEM and FAHP [J]. Forum of World Economics & Politics, 2017(1):153-169.
- [10] 李光荣, 杨锦绣, 黄 颖. 基于事件树与模糊集理论的产业链协同并购风险评价研究[J]. 技术经济, 2020, 39(12):26-35.  
LI Guang-rong, YANG Jin-xiu, HUANG Ying. Research on Risk Assessment of Merger and Acquisition from the Perspective of Industrial Chain Synergy Based on Event Tree and Fuzzy Set Theory [J]. Journal of Technology Economics, 2020, 39(12):26-35.
- [11] 王 静. 提升产业链供应链现代化水平的共融路径研究[J]. 中南财经政法大学学报, 2021(3):144-156.  
WANG Jing. Integration Path of Improving the Modernization Level of Industrial Chain and Supply Chain [J]. Journal of Zhongnan University of Economics and Law, 2021(3):144-156.
- [12] 程俊杰, 闫东升. 自主可控、产业识别与政策选择: 区域情境下提升产业影响力、控制力的分析框架[J]. 学习与实践, 2021(2):31-39.  
CHENG Jun-jie, YAN Dong-sheng. Independent Control, Industry Identification and Policy Choice — An Analytical Framework for Enhancing Industrial Influence and Control Under Regional Circumstances [J]. Study and Practice, 2021(2):31-39.
- [13] 齐宝库, 朱 娅, 刘 帅, 等. 基于产业链的装配式建筑相关企业核心竞争力研究[J]. 建筑经济, 2015, 36(8):102-105.  
QI Bao-ku, ZHU Ya, LIU Shuai, et al. Research on the Core Competence of the Related Corporations of Prefabricated Construction Based on the Industrial Chain [J]. Construction Economy, 2015, 36(8):102-105.
- [14] 康晓辉, 孙金颖, 金占勇, 等. 装配式建筑发展效率影响因素分析[J]. 建筑经济, 2019, 40(3):19-22.  
KANG Xiao-hui, SUN Jin-ying, JIN Zhan-yong, et al. Research on Influencing Factors of the Development Efficiency of Prefabricated Buildings [J]. Construction Economy, 2019, 40(3):19-22.
- [15] 钱存华, 苗士花. 基于区间直觉模糊数的装配式建筑供应链弹性评价[J]. 建筑经济, 2021, 42(6):43-47.  
QIAN Cun-hua, MIAO Shi-hua. Evaluation on the Resilience of Prefabricated Building Supply Chain Based on Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Number [J]. Construction Economy, 2021, 42(6):43-47.
- [16] 赵 靖, 杜荔红, 李廷锴. 基于 COWA-DEMATEL 的军民融合领域协同研发项目风险识别[J]. 管理现代化, 2021, 41(3):99-103.  
ZHAO Jing, DU Li-hong, LI Ting-kai. Risk Identification of Collaborative R & D Project of Civil-military Integration Based on COWA-DEMATEL [J]. Modernization of Management, 2021, 41(3):99-103.
- [17] 刘 谦, 姜 南, 戴凤燕. NVC 龙企功能升级模式演进及机理纵向案例研究: 技术自主性视角[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(16):1-10.  
LIU Qian, JIANG Nan, DAI Feng-yan. A Longitudinal Case Study of Evolution Mechanism of Functional Upgrade Modes Adopted by Leader Firms in NVC: From Technology Autonomy Perspective [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2021, 38(16):1-10.
- [18] 高 伟, 陶 柯, 梁 奕. “双循环”新发展格局: 深刻内涵、现实逻辑与实施路径[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2021, 42(4):7-18, 2.  
GAO Wei, TAO Ke, LIANG Yi. The “Dual-cycle” Development Pattern: Connotation, Logic and Realization [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Edi-

- tion of Philosophy and Social Sciences),2021,42(4):7-18,2.
- [19] 孟凡生,邱佳欢.我国军工企业科技项目自主可控程度评价[J].科技管理研究,2017,37(15):50-56.
- MENG Fan-sheng,QIU Jia-huan. Evaluation on Independent Controllable Degree of Military Enterprise Technology Project in China[J]. Science and Technology Management Research,2017,37(15):50-56.
- [20] 常耀中.先进性或稳定性:华为公司供应链替代决策[J].企业经济,2020,39(11):83-90.
- CHANG Yao-zhong. Advanced or Stable: HUAWEI Company's Supply Chain Substitution Policy[J]. Enterprise Economy,2020,39(11):83-90.
- [21] 周涛,周世祥,刘浏.政府、共享单车企业与消费者三方动态博弈演变及稳定性策略分析[J].管理学报,2020,33(5):82-94.
- ZHOU Tao,ZHOU Shi-xiang,LIU Liu. Dynamic Evolution and Stability Strategy Analysis of Game Among Government, Bicycle Sharing Enterprise and Consumer[J]. Journal of Management,2020,33(5):82-94.
- [22] 倪国栋,轩健,王静,等.我国装配式建筑产业链的制约因素研究[J].建筑经济,2020,41(6):13-18.
- NI Guo-dong,XUAN Jian,WANG Jing, et al. Research on Restrictive Factors of Prefabricated Building Industry Chain in China[J]. Construction Economy,2020,41(6):13-18.
- [23] 徐玉德.增强产业链供应链自主可控能力[J].红旗文稿,2021(10):30-32.
- XU Yu-de. Enhance the Independent Controllable Ability of Industrial Chain and Supplychain[J]. Red Flag Manuscript,2021(10):30-32.
- [24] 王红春,刘红云.装配式建筑供应链协同定价研究:基于BIM-RFID信息共享平台[J].建筑经济,2020,41(9):54-59.
- WANG Hong-chun,LIU Hong-yun. Research on Collaborative Pricing of Prefabricated Building Supply Chain:Based on BIMRFID Information Sharing Platform[J]. Construction Economy,2020,41(9):54-59.
- [25] 孙伟.基于DEMATEL方法的新兴技术产业化融资影响因素实证研究[J].科技进步与对策,2020,37(21):64-71.
- SUN Wei. Empirical Research on the Core Influencing Factors of Emerging Technology Industrialization Financing[J]. Science & Technology Progress and Policy,2020,37(21):64-71.
- [26] 李忠富,李州扬,戴利人,等.基于COWA-模糊集对的BIM绿建运维管理综合效益分析[J].施工技术(中英文),2021,50(13):134-138.
- LI Zhong-fu,LI Zhou-yang,DAI Li-ren, et al. Comprehensive Benefit Analysis of BIM in Green Building Operation Management Based on COWA-fuzzy Set Pair[J]. Construction Technology,2021,50(13):134-138.