

# 装配式建筑产业生态系统行业主体的关系网络研究

沈良峰<sup>1</sup>, 刘婷<sup>1</sup>, 薛光军<sup>2</sup>, 孙李妍<sup>1</sup>, 袁俊<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学土木工程学院, 长沙 410004; 2. 湖南省第二工程有限公司, 长沙 410004)

**摘要:** 行业主体协同对装配式建筑高质量发展至关重要,但全寿命期内主体多、利益和专业领域各异。基于产业生态视角,采用社会网络分析法,从识别主体、明确关系、分析网络结构3方面研究其关系网络。研究显示:决策、施工和拆除阶段是高密度网络,主体协同紧密;设计阶段网络关系松散,结构最不稳定。开发商在决策等阶段、施工单位在施工阶段、拆除单位在拆除阶段中心度最高,主导着各主体协同。由此,提出优化网络结构建议,促进可持续发展。

**关键词:** 装配式建筑产业; 生态系统; 行业主体; 全寿命期; 社会网络分析

**中图分类号:** F423.3; TU741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)05-0162-11

建筑产业对当今中国经济高速发展有重要拉动作用。近年来,“绿色经济”理念深入人心<sup>[1]</sup>,传统建造模式已无法满足建筑工程高品质要求,建筑产业转型升级迫在眉睫。建筑工程装配化改变了传统粗放模式,是建筑业转型升级的重要手段。在绿色发展理念中,强调发展要“绿色化”“生态化”,故将其作为装配式建筑发展的重要理念,可推动建筑行业向环保、智能、可持续方向发展。装配式建筑产业(prefabricated building industry, PBI)涉及多个行业主体,且各个主体都是独立的组织实体,当多个主体间合作协同化时,有利于发挥职能分工、资源互补和信息共享的优势<sup>[2]</sup>,推动装配式建筑可持续发展目标的实现。因此,有必要从产业生态视角把握PBI生态系统内部要素和结构,研究系统内部行业主体间的协同关系,提出相应治理建议,对其产业结构进行优化。

社会网络分析法(social network analysis, SNA)通过将多元主体嵌入关系网络中,分析网络节点之间互动形成的网络结构,其具有全面反映多元主体在网络中的相对地位和网络特征的优势<sup>[3]</sup>。目前已被广泛应用于项目管理、协同治理、风险管理等研究领域。孙春玲等<sup>[4]</sup>、于洋等<sup>[5]</sup>运用SNA全面了解了大型且复杂的公共工程中参与主体的社会关系;Yang等<sup>[6]</sup>研究建筑垃圾回收的利益相关者之间的相互作用和互动问题,提出相应协同治理建议;武乾等<sup>[7]</sup>、成连华等<sup>[8]</sup>研究了项目中存在的风险

因素及其网络关系,并制定相应管控措施。上述研究集中于研究主体间的静态关系,但主体之间的相互依赖关系是随着时间的推移而不断变化的。部分学者在采用SNA进行研究时考虑了时间因素。Zhou等<sup>[9]</sup>系统地研究了建设用地减排项目4个阶段下利益相关者的多维动态价值诉求所产生的价值冲突;Lin等<sup>[10]</sup>使用模糊分析层次结构过程和SNA相结合的方法建立了一个在不同利益相关者之间进行分析的框架,用于探究实现棕地再生项目的利益相关者之间的动态关系;薛寒等<sup>[11]</sup>根据2007—2021年“华夏建设科学技术奖”获奖情况,以社会网络分析的视角对建筑行业创新主体合作网络及演化特征进行分析。目前,在装配式建筑研究领域,SNA主要用来研究风险管理<sup>[12-14]</sup>,对主体关系的研究主要集中于运用博弈论<sup>[15-16]</sup>研究政府、开发商及消费者等少数几个主体。综上,在装配式建筑领域,对于多元主体关系的剖析尚不充分,很少有学者使用网络方法对多元主体进行综合考量,深入探讨多元主体之间的互动关系。因此,引入网络方法有助于为装配式建筑领域提供新的视角,填补现有理论在多元主体互动关系分析上的空白。

在考虑时间因素的PBI生态系统内部,多元主体之间基于纵向职能分工和横向协调整合构成了复杂多变的关系网络。本文采用SNA阐释PBI生态系统中多元行业主体的网络特征,以期系统地揭示行业主体在工程建设过程中的协同关系,并为加

收稿日期: 2024-10-17

基金项目: 湖南省社会科学基金(23YBA119)

**作者简介:** 沈良峰(1968—),男,江苏南通人,博士,教授,硕士研究生导师,研究方向为土木工程管理、可持续建设与发展管理;刘婷(2000—),女,湖南长沙人,硕士研究生,研究方向为土木工程可持续发展管理;薛光军(1983—),男,湖南益阳人,硕士,高级工程师,研究方向为土木工程建造与管理;孙李妍(1999—),女,湖南益阳人,硕士研究生,研究方向为装配式建筑产业生态;袁俊(2000—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,研究方向为可持续建设与发展管理。

强主体间的协同合作能力,从整体网络和网络个体两层提出优化关系网络结构的治理建议。

## 1 研究思路

SNA 可准确量化分析不同的关系<sup>[9]</sup>,通过分析关系数据来描述网络社会化过程,并为优化网络结构提供科学依据。SNA 构建的无向赋权动态关系网络是由节点、边、关系强度组成,其数学表达式为加权聚集图  $G = (V, E, W)$ ,其中  $V$  为有限且不相交节点集合, $E$  为有限且不相交的无向边集合, $W$  为有限且不相交的关系强度集合。在 PBI 生态系统行业主体的关系网络中,节点代表 PBI 行业主体,即 PBI 生态系统的产业种群,边代表主体间的协同关系,边的粗细程度反映主体间关系强度,点线交织构成行业主体关系网络。

如图 1 所示,采用 SNA 研究 PBI 生态系统行业主体的关系网络包括 3 个主要步骤,关系网络的节点识别,采用工作分解结构(work breakdown structure, WBS)—三维模型法识别 PBI 生态系统中的产业种群(行业主体);关系网络的关系(边)确定,产业种群间关系类型的确定,并通过网络层次分析法(analytic network process, ANP)确定各关系指标的重要程度;关系网络的分析,以长沙市产业园为例,通过问卷调查收集基础数据,并处理得到各阶段产业种群的关系矩阵,将关系矩阵导入 NetDraw 软件构建各阶段无向赋权关系网络图,利用 UCINET 软件通过网络密度、中心势、中心度和结构洞 4 种测度指标对各阶段关系网络进行定量分析,探究其整体网络结构以及产业种群间关系和强度的动态变化,最后基于定量分析结果提出优化关系网络结构的治理建议。

## 2 PBI 生态系统行业主体识别

### 2.1 PBI 生态系统构成

自然生态系统指自然界的一定空间内生物与环境构成的统一整体,其层级从低到高包括生物个

体、生物种群、生物群落和生态系统。在装配式建筑研究领域,装配式建筑产业群落与外界环境构成了具有层次性的 PBI 生态系统,包含产业主体、产业种群、产业群落及 PBI 生态系统 4 个层级。产业种群表示同 1 种行业的集合体,代表了 PBI 多元行业主体,具体涵盖了政府、开发商、咨询单位、勘察设计单位、科研教育机构、融资机构、施工单位、构件供应商、材料设备供应商、装饰装修单位、物流运输单位、监理单位、技术管理人才培训机构、销售与中介单位、物业单位、拆除单位、建筑垃圾回收单位、建材再生单位和用户在内的 19 类主体。

PBI 生态系统由核心群落、支撑群落以及外界环境构成,如图 2 所示。核心群落中的产业种群承担着系统中主要的信息流、材料流和资金流,是推动装配式建筑可持续发展的主要动力。支撑群落中的产业种群主要为 PBI 生态系统提供技术及服务支持。外界环境是 PBI 生态系统成长的非生物影响因子,包括自然、经济及市场等环境。在全寿命期视角下,PBI 生态系统的产业种群们为推动装配式建筑的发展,始终存在着动态的协同合作关系,纵横交错形成了一个复杂多变的关系网络,在交互协作中完成各个建设阶段的任务,直至建设工程的完成,实现主体间价值的共创、共赢、共享。随着建设工程的不断推进,不同阶段的 PBI 生态系统中可能会有部分新的产业种群加入以及部分已有的产业种群退出,使其种群间关系及关系强度不断发生改变,网络结构也随之变化。另一方面,产业种群们为了实现建设工程目标或降低所承担的风险,会根据系统变化而不断调整自身行为,其网络角色随建设工程的不断推进而展现出动态变化,在不同阶段下扮演着各自的角色,承担不同的责任。

### 2.2 行业主体识别

建筑工程的整个寿命期由一个个有规律可循的工作阶段组成,一般涵盖了构思、立项、设计、施

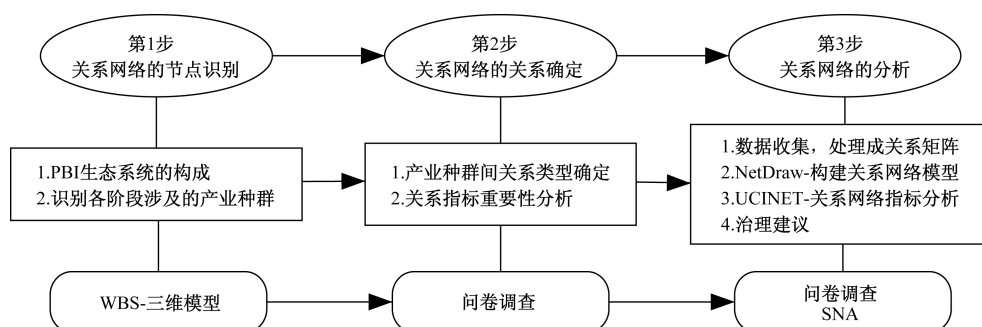


图 1 研究框架

工、使用直至拆除的全部过程,因此将装配式建筑全寿命期划分为“投资决策阶段—设计筹划阶段—建设施工阶段—运营维护阶段—拆除回收阶段”5个主要阶段。装配式建筑建设周期长,建设过程包含着不同的工作任务,各工作任务又涉及不同的行业主体,采用 WBS 将装配式建筑建设过程的工作任务细分,通过分析任务相关方识别网络节点。同时,结合三维模型从过程、工作任务以及角色 3 个维度全方位汇总 PBI 全寿命期各阶段的行业主体。识别流程如图 3 所示。

PBI 生态系统产业种群名称及代码见表 1,全寿命期视角下识别出的各阶段产业种群见表 2。

### 3 PBI 生态系统行业主体的关系分析

#### 3.1 关系分析

关系是连接网络中不同主体的多重纽带,其内容和强度存在差异。PBI 生态系统产业种群间协同合作有利于种群间实现资源共享,能有效增强系统的有序性,保证系统稳定,实现装配式建筑可持续发展。产业种群间主要利用制度规则、资源互换、协商沟通和有效监督 4 种方式促进彼此的协同以保障建设工程的有序开展<sup>[17]</sup>,将协同关系分为合同约束关系、依赖关系、沟通协调关系以及监督关系 4 种类型,并建立表 3 所示的产业种群关系指标体系。

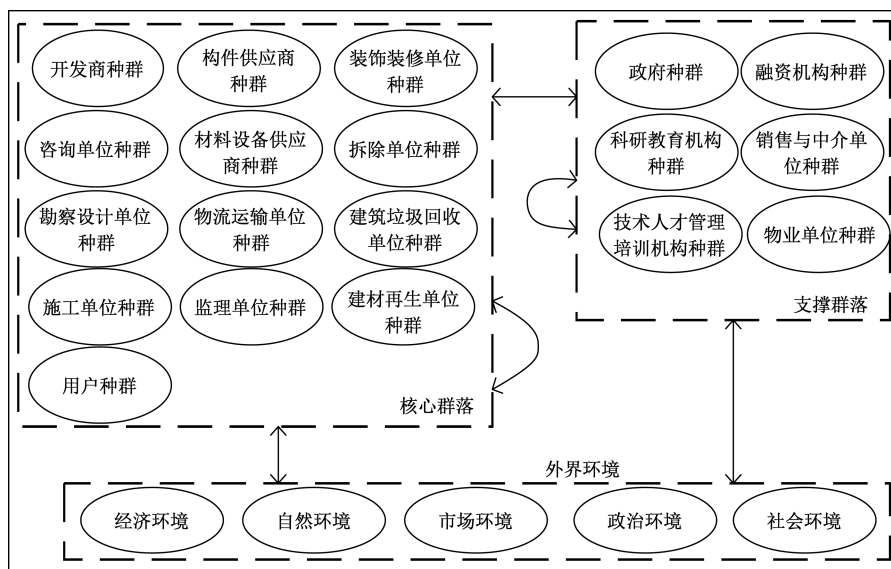


图 2 PBI 生态系统结构框架

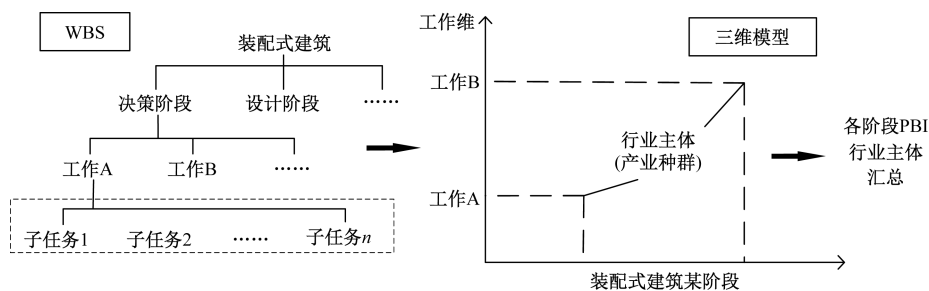


图 3 全寿命期视角下 PBI 行业主体的识别流程

表 1 PBI 生态系统产业种群名称及代码

产业种群名称	代码	产业种群名称	代码	产业种群名称	代码
政府	S1	构件供应商	S8	物业单位	S15
开发商	S2	材料设备供应商	S9	拆除单位	S16
咨询单位	S3	装饰装修单位	S10	建筑垃圾回收单位	S17
勘察设计单位	S4	物流运输单位	S11	建材再生单位	S18
科研教育机构	S5	监理单位	S12	用户	S19
融资机构	S6	技术人才管理培训机构	S13		
施工单位	S7	销售与中介单位	S14		

表 2 各阶段 PBI 生态系统产业种群汇总

阶段划分	主要工作	子任务	产业种群汇总
投资决策阶段	投资机会分析	市场调研;项目建议书;立项决策;项目总体规划	S1、S2、S3、S4、S5、S6
	可行性研究	建设方案论证;技术经济论证	
	项目审批	建设用地审批;立项审批	
设计筹划阶段	建筑设计	设计任务书;技术策划;方案、初步和施工图设计;标准化设计	S1、S2、S3、S4、S5、S7、S8、S9、S10、S11、S12
	招投标	相关种群招投标;构件拆分图设计;构件加工图设计	
	政府审批	节能环保评估;施工图审批;工程规划及施工许可审批	
建设施工阶段	构件生产与运输	原材料准备;构件生产;构件运输出场	S1、S2、S3、S4、S7、S8、S9、S10、S11、S12、S13
	现场装配	建设施工相关申请;资源进场检验;成品保护;构件吊装安装;结构主体验收;一体化装修	
	竣工验收	验收交付;费用管理;建设资料移交	
运营维护阶段	装配式建筑销售	政府审批;成品营销与销售	S1、S2、S4、S7、S10、S13、S14、S15、S19
	物业管理	基本管理服务;建筑维修服务	
拆除回收阶段	建筑成品拆除	成品拆除;废弃物收集分拣;废弃物运输	S1、S5、S8、S9、S11、S13、S16、S17、S18
	建筑废弃物回收再利用	废弃物分类回收;废弃物加工处理;建筑再生成品再利用	

合同约束关系:主体间通过正式签署契约协议达成的合作关系。将合同约束关系分成资源交换关系和委托代理关系。资源交换关系是主体间为进行资源交换而通过签订合同协议或申请批复文件所建立的关系,包括土地租赁合同、融资合同和行政审批文件等。委托代理关系是主体间通过合同契约雇用其他主体为其提供服务,并根据服务数量和质量支付相应报酬的关系,包括施工合同等。

依赖关系:PBI的发展离不开各主体协同合作,主体间良性合作离不开对自身不具备而合作主体可提供的技术、知识和信息等方面的依赖。依赖关系可分为政策关系、资源关系和任务关系3种。政策依赖关系指主体为保障自身权益对一系列政治、经济和法律法规等方面政策的依赖,如依赖政府制定的装配式建筑行业标准等。资源依赖关系指主体依赖其他主体所提供的信息、材料、技术、资金和人员等方面资源来开展自身工作任务的关系。任务依赖关系指主体依赖其他主体任务完成后进行自身任务的关系。

沟通协调关系:主体间基于建设任务所进行的双方或多方交流的关系。沟通、协调是主体协同合作的基础,主体间通过不断交流互动,增进对彼此的了解,加深对建设任务的认知,有效掌握各方主体的真实行动,从而实现信息的良性传递和反馈,避免误会的产生以及利益冲突的发生,将其分为正式沟通关系和非正式沟通关系。正式沟通关系是以正式的渠道或途径获得信息并进行协调的关系,包括主体间的工作指令、工作报告等,其主要目的是保证信息交流传递和协调的准确性。非正式沟通关系是指主体间在组织正式信息渠道之外进行的信息交流关系,是一种自发的、不受任何束缚的沟通关系。

表 3 PBI 生态系统产业种群关系指标体系

一级指标	二级指标	描述
合同约束关系	资源交换关系	与其签订资源交换合同
	委托代理关系	与其签订委托代理合同
依赖关系	政策依赖关系	依赖其制定的政策进行自身行动
	资源依赖关系	依赖其提供的资源进行自身行动
	任务依赖关系	依赖其完成任务后进行自身行动
沟通协调关系	正式沟通关系	通过正式的交流方式进行沟通和协调
	非正式沟通关系	通过非正式的交流方式进行沟通和协调
监督关系	义务监督关系	有义务对其进行监督
	激励监督关系	在激励作用下对其进行监督

监督关系:主体在建设过程中对其他主体实行监督管理存在着不同的动机,分为义务监督和激励监督两种关系。义务监督关系指主体为保证共同目标的实现以及保障自身利益需求,在合同的强制要求或自愿的情况下,对其他主体进行监督的关系,包括对工程的安全和质量进行监督等。激励监督指通过设计外部奖励形式,来激发和引导主体监督其他相关主体按时按量地完成工作任务。

### 3.2 关系指标重要性分析

在PBI生态系统产业种群关系类型指标体系中各指标间均相互影响,如有效的监督关系能增强合同履行的透明度和可靠性,同时合同条款的明确性和强制力为监督提供了法律依据和支持等,因此必须综合考虑各指标之间的相互作用。ANP能将各指标间的关系构建成网络结构的形式,更准确地描述指标间的复杂关系<sup>[15]</sup>,因此采用ANP对关系类型指标赋权以明晰产业种群关系指标的重要性,所构建的关系类型指标ANP单网络模型如图4所示。

使用 yaanp 软件计算关系类型指标权重,在软件中构建单网络模型,并将软件自动生成的“关系类型指标重要性比较”问卷发给 5 位装配式建筑研究专家(高校教授 1 名、副教授 1 名、博士生 1 名、企业中高层管理人员 2 名),让其按 1-9 标度法打分。回收问卷导入软件,计算得到关系类型指标权重,见表 4。

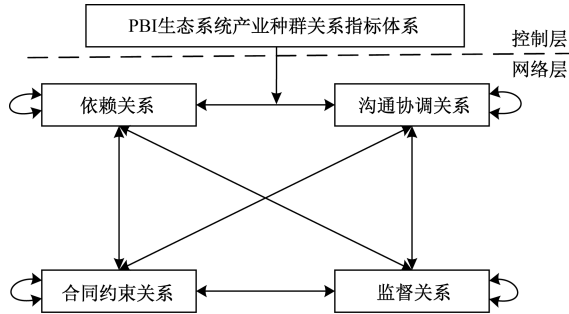


图 4 产业种群关系类型的 ANP 结构图

表 4 PBI 生态系统产业种群关系指标权重

一级指标	权重	二级指标	局部权重	全局权重
合同约定关系	0.363	资源交换关系	0.464	0.168
		委托代理关系	0.536	0.195
依赖关系	0.305	政策依赖关系	0.195	0.059
		资源依赖关系	0.491	0.150
		任务依赖关系	0.314	0.096
沟通协调关系	0.145	正式沟通协调关系	0.543	0.079
		非正式沟通协调关系	0.457	0.066
监督关系	0.186	义务监督关系	0.686	0.128
		激励监督关系	0.314	0.059

根据计算结果可知,合同约定关系权重占 0.363,虽为最重要的协同关系类型,但在整体关系类型指标权重中占比不高,这是因为非契约关系(依赖、沟通、监督关系联合)权重系数远大于契约关系(合同约定关系)。说明在 PBI 生态系统产业种群关系类型分析中,非契约关系重要性不可忽视。

#### 4 PBI 生态系统行业主体的关系网络分析

##### 4.1 关系网络的构建

运用 NetDraw 软件构建 PBI 生态系统各阶段产业种群的关系网络,直观地理解产业种群关系网络结构以及主体间关系和强度的动态变化。以长沙市某产业园为研究对象,通过电子问卷的形式对该产业园所涉及的主体及其合作主体发放“PBI 行业主体间关系强度”调查问卷,问卷以表 3 关系类型指标为打分依据,让其对有关联的主体按实际联系频繁程度 0~3 进行打分。问卷收回后,经过以下处理步骤以得到各阶段产业种群关系矩阵:①将同一阶段中,相同两个主体间的关系强度数据做算术平

均处理,以此得到各阶段主体关系的基础数据;②结合表 4 指标权重,将各阶段主体关系的基础数据乘以相应权重,得到各阶段产业种群间的关系强度;③整理成方阵形式,得到各阶段产业种群关系强度加权无向矩阵。

将各个阶段的关系矩阵依次导入 NetDraw 软件,绘制出产业种群在投资决策阶段、设计筹划阶段、建设施工阶段、运营维护阶段和拆除回收阶段的关系网络图,如图 5 所示。在图 5 中,产业种群节点大小表示度数中心性程度;灰色节点代表新进入网络的产业种群;白色节点代表再次进入网络的产业种群;连接线的粗细程度表示两节点间的关系强度。

##### 4.2 关系网络的分析

###### 4.2.1 社会网络分析指标

本文关注产业种群关系网络的动态变化,具体表现为网络结构和主体特征的变化。网络结构反映了多元主体在网络中的位置以及彼此间的关系<sup>[7]</sup>,是决定网络整体特征的基元结构;网络主体的特征取决于主体本身的属性及其在网络中的结构地位,因此选择 SNA 中整体网络层面的网络密度和中心势指标,以及网络个体层面的中心度和结构洞指标进行研究。

网络密度是反映网络节点间联系的密切程度。数值越大,说明网络凝聚力越强,节点联系越紧密,网络协调性越好。网络密度指标的计算公式为

$$D = \frac{2L}{N(N-1)} \quad (1)$$

式中: $D$  为网络密度, $0 < D < 1$ ;  $L$  为网络中包含的实际关系数; $N$  为网络节点数。

中心势是反映网络中各个节点的差异程度,是对群体权力的量化分析,包括了度数中心势、中间中心势和接近中心势 3 种。度数中心势反映关系网络的集中程度,数值越小说明网络不具有中心集中趋势,网络中权力分布越均衡,信息资源能更好传递;中间中心势反映网络中信息资源的传递情况,数值越小说明网络中信息资源传递越不通畅;接近中心势反映网络的接近集中趋势,数值越小说明主体间信息资源传递路径越长。中心势指标  $C$  的计算公式为

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{\max} - C_i)}{\max \left[ \sum_{i=1}^N (C_{\max} - C_i) \right]} \quad (2)$$

式中: $C_{\max}$  为网络中最大的中心度; $C_i$  为某节点的中

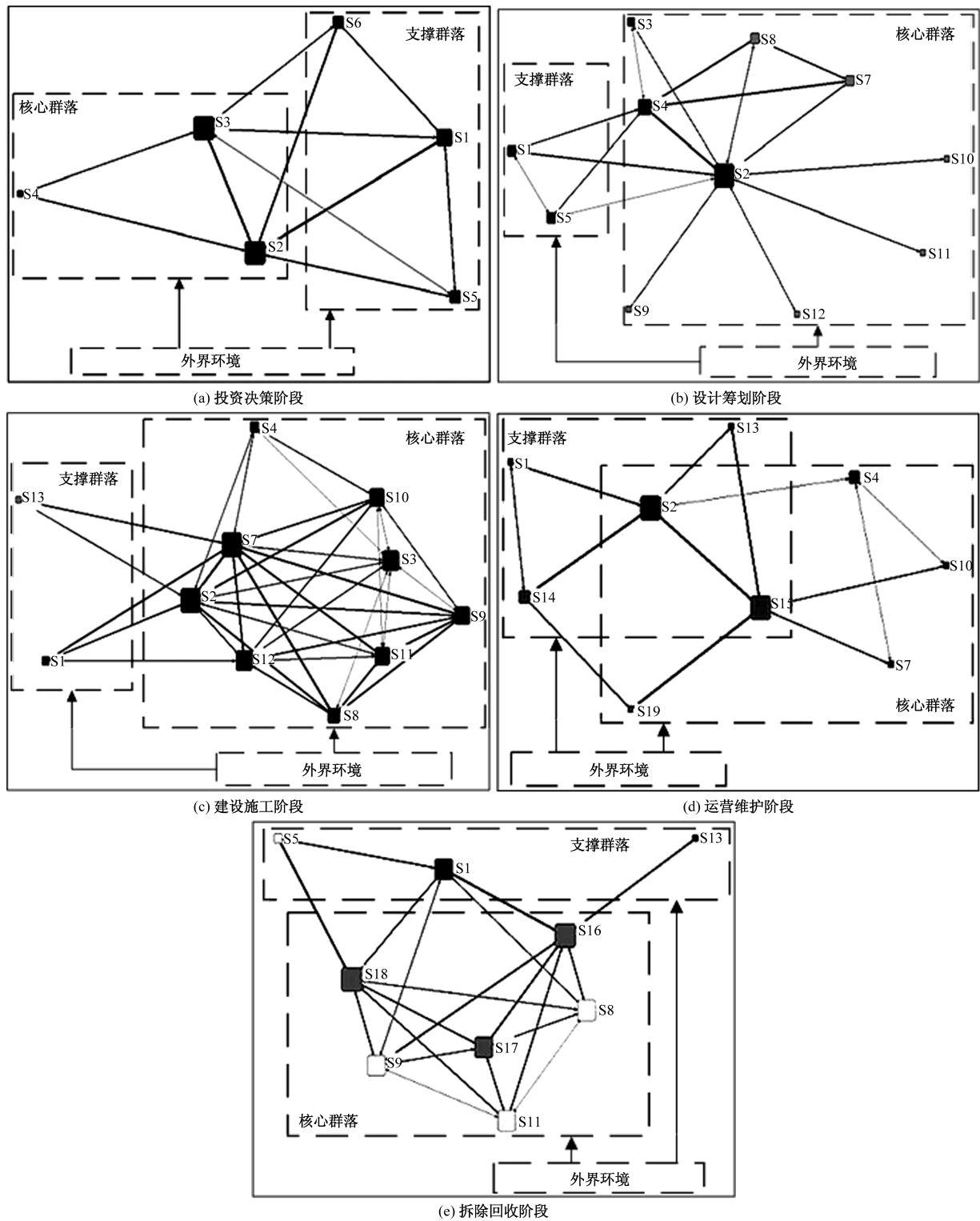


图 5 PBI 生态系统各阶段产业种群关系网络图

心度。

中心度用于反映节点在网络中的权利、地位、社会声望等,是个体权力的量化分析,包括度数中心度、中间中心度和接近中心度。

度数中心度是反映测量节点与其他节点发展交往关系的能力,直观体现节点在网络中的权力和

地位,数值越大则该节点与其他节点的相关性越高,在网络中越处于核心位置,所拥有的信息沟通和资源交换渠道越多<sup>[18]</sup>。度数中心度  $C_D$  的计算公式为

$$C_D(n_i) = \frac{d(n_i)}{N-1} \quad (3)$$

式中: $d(n_i)$ 为节点  $i$  的关系联结数量。

接近中心度是表示节点之间的距离,反映测量节点间关系的密切程度。数值越小则该节点与其他节点的接近程度越高,越能更快地获取、传递以及控制资源和信息。接近中心度  $C_c$  的计算公式为

$$C_c(n_i) = \frac{N-1}{\sum_{j=1}^N d(n_i, n_j)} \quad (4)$$

式中: $d(n_i, n_j)$ 为节点  $i$  和节点  $j$  之间的最短距离。

中间中心度是反映测量节点的控制信息传递和资源共享的能力。数值越大表示该节点越占据网络中的核心地位,影响力和占据资源的能力越强;反之,则表示其处于网络中的边缘地位。中间中心度  $C_B$  的计算公式为

$$C_B(n_i) = \sum_{j < k} \frac{g_{jk}(n_i)}{g_{jk}} \quad (5)$$

式中: $g_{jk}(n_i)$ 为依靠节点  $i$  作为桥的联结数量; $g_{jk}$ 为节点  $j$  和节点  $k$  之间的联结数量。

结构洞是反映节点间的非冗余联系,本文选取最为直观的限制度指标进行测度。限制度指标反映某节点受其他节点限制的程度,数值越小则该节点受到网络的限制越少,运用结构洞的能力更强。限制度  $C_{ij}$  的计算公式为

$$C_{ij} = (p_{ij} + \sum_q p_{iq} p_{qj})^2 \quad (6)$$

式中: $p_{ij}$ 为节点  $i$  对节点  $j$  的直接投入; $\sum_q p_{iq} p_{qj}$ 为节点间的间接投入。

#### 4.2.2 整体网络结构分析

整体网络指标测度变化情况如图 6 所示。

由图 6(a)可知,PBI 生态系统行业主体的关系网络密度指标呈“W”型变化,决策阶段网络密度最高,其次是施工、拆回和运维阶段,设计阶段最小。除设计和运维阶段外其余阶段均为大于 0.5 的高密度网络,说明行业主体间通过合同、资金和信息所建立的正式或非正式的联系较为紧密,主体间有着良好的协同合作能力,做到了资源互补、信息共享、发展共谋及合作共赢。决策阶段网络密度最高,因为该阶段网络节点数量最少,网络结构最简单,且决策阶段作为建设初始阶段存在很强的不确定性,在开展决策研究时产业种群间高度配合,彼此间存在较强依赖和沟通关系。与决策阶段相比,设计阶段虽有施工单位等大量种群加入,但网络密度降为最低,网络的凝聚力不足,是因为立项结束后,开发商为保证建设工程顺利进行补充了建设所需资源,与

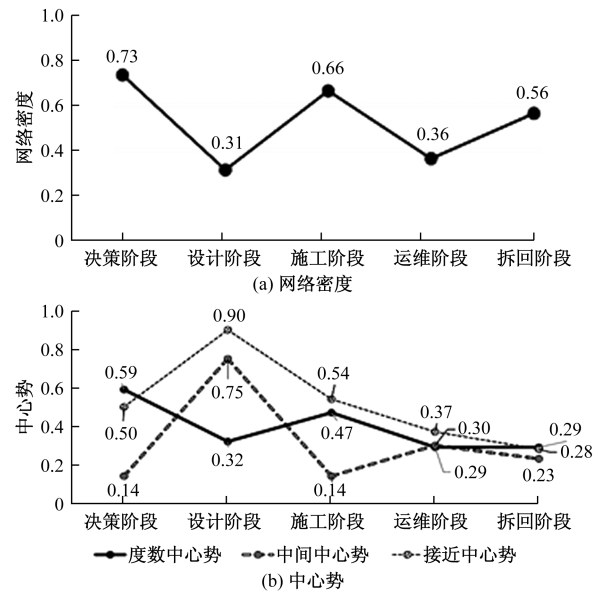


图 6 整体网络指标变化情况

施工单位等具有自身优势的种群进行合作,但施工单位等种群仅与开发商存在合同关系就进入网络,他们之间并无交流互动,此时种群间存在信息不透明、目标不一致及资源流动不畅通等问题。到施工阶段时,开发商作为催化剂,委托施工单位和监理单位进行现场监理工作,将多方主体聚集起来形成了紧密的网络结构,使得网络密度上升,此时产业种群联系紧密,对信息、资源的依赖和交流程度最高,产业种群间的有效监督更是推动了工程的顺利建设。拆回阶段的密度也较高,是因为此时网络中流动着丰富的建筑废弃物和再生建筑资源,为有效利用资源种群间建立起较紧密的联系,故网络凝聚力较强。

由图 6(b)可知,决策与施工阶段的度数和接近中心势高,中间中心势低,网络中权力、信息和资源集中于部分产业种群,但核心种群并没有约束和控制其他种群间信息、资源传递,种群间建立着紧密又良好的合作关系,此时网络中信息、资源的传递路径较短,网络整体较稳定。而设计阶段是最高中间和接近中心势,较低度数中心势,表示网络具有中心集中的趋势,权力较集中,但种群间联系松散,互相依赖的程度较低,较难形成统一的目标,存在着一定的信息不对称现象,网络最不稳定。运维和拆回阶段中心势较低,说明网络没有中心集中趋势,权力、信息和资源分布较散,传递路径较长,但种群间仍能较好地进行传递。

#### 4.2.3 网络个体结构分析

网络个体指标测度变化情况如图 7 所示。

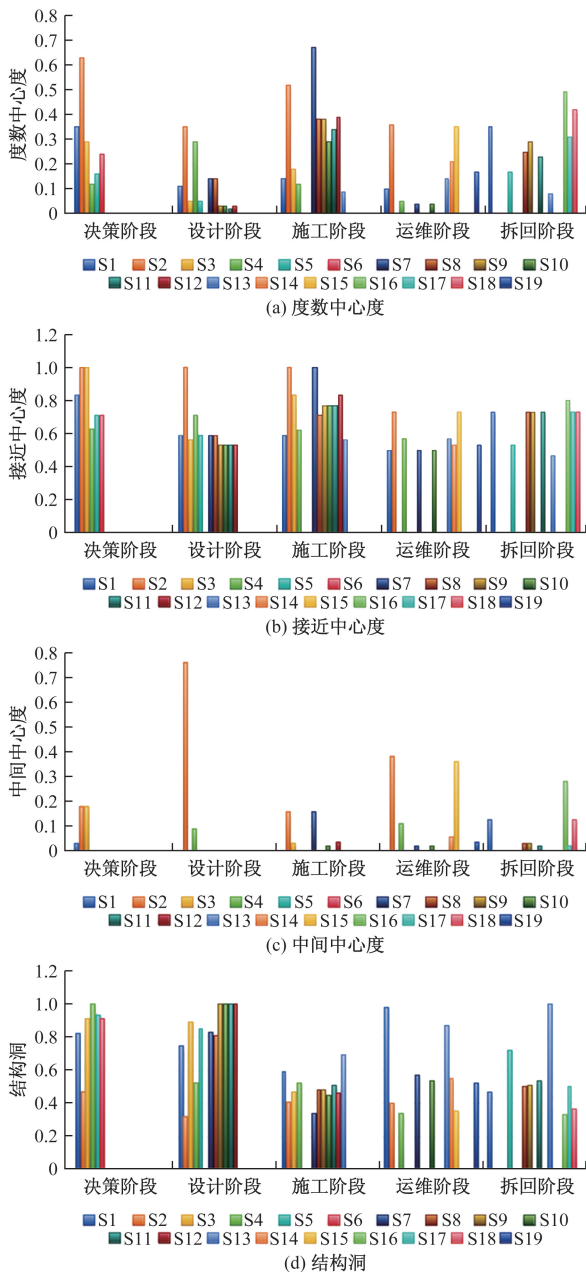


图7 个体网络指标变化情况

由图 7(a)可知,度数中心度最大的产业种群是决策、设计和运维阶段的开发商 S2,施工阶段的施工单位 S7 以及拆回阶段的拆除单位 S16,这表明他们具有较高的权力,能最多地连接到相应阶段的产业种群,能控制网络中较多的信息、资源。由图 7(b)所示的接近中心度指标可知,开发商在设计阶段以及拆除单位在拆回阶段均处于绝对领先地位,开发商和咨询单位 S3 在决策阶段、开发商和施工单位 S7 在施工阶段以及开发商和物业单位 S15 在运维阶段处于同等领先地位。度数中心度和接近中心度最大值的分布情况相似。然而,由图 7(c)得到,除设计阶段的开发商以及运维阶段的开发商和物

业单位外其他种群的中间中心度都相对较小,甚至某些阶段下许多种群的中间中心度指标为 0,说明 PBI 生态系统的行业主体对有关信息、资源的控制水平较低。由图 7(d)可知,开发商的限制度均很低,运维阶段物业单位以及拆回阶段拆除单位限制度最低。

决策阶段的开发商有最高中心度和最低结构洞(0.63, 1.00, 0.18, 0.47),说明在网络中权力最高,控制资源的能力最强,更多倾向从网络中获取资源和信息,同时利用自身在网络中的位置优势控制建设的决策过程,影响其他种群的决策。咨询单位有较高中心度和结构洞(0.29, 1.00, 0.18, 0.91),说明在网络中有一定地位,掌握着较多信息、资源,但也受到较高的约束,因为作为服务方,受开发商委托进行可研等报告的编写及决策咨询工作,所受限制较大,同时编写报告的数据来源较依赖网络中其他种群提供,所以与其他种群建立着较强的依赖和沟通关系。其他种群的度数和接近中心度较高,中间中心度低,结构洞较高,说明他们仅作为信息、资源的提供方,如融资机构 S6 提供建设资金支持、科研机构 S5 提供装配化相关技术支持等,他们在网络中处于受支配和服从的地位,不具备控制传递信息资源的能力。

设计阶段的开发商中心度远高于、结构洞远低于其他主体(0.35, 1.00, 0.76, 0.32),处于网络绝对中心的位置,掌握着最多的权力、信息和资源,作为“桥”来帮助其他主体实现信息沟通、资源共享,并通过合同约束着他们的行动。设计单位 S4 的中心度较高,结构洞较低(0.29, 0.71, 0.09, 0.52),在网络中也处于非常关键的地位,相较于决策阶段,他在此阶段有着较大的影响力和资源优势,且有一定的决策自由,较容易对其他种群的行为产生影响,这是因为建筑设计任务是建设工程能顺利施工的关键,其他种群依赖其设计成果。政府 S1 中心度低且中间中心度为零(0.11, 0.59, 0.00),作为这一阶段重要的间接种群,在网络中的地位较低,说明在该阶段政府并没有真正发挥管控和监督的作用。其他种群中心度低结构洞高,说明在该阶段的参与程度和拥有权力小,对信息、资源的控制能力低,行为受限制程度较大,且很难对其他种群和网络整体造成影响。

施工阶段时中心度最高的种群由开发商变为施工单位(0.67, 1.00, 0.16),说明进入施工阶段后,开发商为施工单位提供了一定的建设自主权,

使其与所有种群都频繁互动,在主体间起到了集成协调的“平台”作用。开发商和施工单位为高中心度低结构洞,处于网络连接各方种群的重要位置,掌握着丰富的资源和较强的权力。监理单位 S12 中心度也较高(0.39,0.83),因为其主要任务是对其他种群实施监督,起到协调各方种群的中介作用,在网络中有一定的影响力,但中间中心度较低(0.04),即传递信息、资源的能力不足。施工阶段的产业种群中心度指标相较于其他阶段均较高,结构洞指标均较低,说明在该阶段时 PBI 生态系统行业主体间联系紧密,相互制约程度低,主体们能更好地发挥自身优势以及表达自身需求,信息、资源在网络中能快速传递,这与整体网络的中心势指标分析结论一致。

运维阶段中心度最高的种群又变为开发商(0.36,0.73,0.38),占网络的中心地位。物业单位作为新加入的种群有高中心度(0.35,0.73,0.36),因为物业单位为保障建筑物正常运行维护建筑物质量,与施工单位等多方种群建立了较多的依赖和沟通关系。设计单位的结构洞最低(0.34),因为在运维阶段设计单位主要承担维护和更新改造方面的技术咨询,采取策略的自由度最大,能利用所提建议影响物业、施工单位等产业种群的决策。

拆回阶段时拆除单位作为控制网络中建筑废弃物资源流动的起点,拥有较强发展关系和控制资源传递的能力,处于网络的中心地位,具有最高中心度最低结构洞(0.49,0.80,0.28,0.33)。由于装配式建筑在绿色建筑可持续发展中起着举足轻重的作用,因此建材再生单位在这一阶段发挥着重要作用,有较高的网络地位,中心度较高结构洞较小(0.42,0.73,0.13,0.37),对资源有一定的控制能力,受其他种群的影响较弱。政府同样有较高中心度(0.35,0.73,0.13),因为政府为推动装配式建筑可持续发展,制定了相关激励政策,来鼓励各类供应商种群购买再生产品,支持研发机构种群进行建筑垃圾再生方面的研究,所以对其他种群有较强的影响能力,发挥着重要中介作用。

### 4.3 关系网络治理建议

#### 4.3.1 整体网络治理建议

(1)增强 PBI 生态系统行业主体关系网络的稳定性。在 PBI 生态系统中,行业主体关系网络的稳定性受主体进入、退出及再进入网络的行为影响,及时关注主体的行为能有效避免网络结构突变的风险。为保证网络的稳定性,首先需稳定各

阶段核心主体的网络地位,开发商、施工单位和拆除单位等主体在各阶段发挥着核心作用,推动着各方主体的合作和互动,形成了稳定的协同关系网络;其次核心主体应该关注其他主体进入和退出网络的行为,在新主体进入网络前应与其及时沟通,帮助其与其他主体建立联系,而在部分主体退出网络后应密切关注对与之相关主体所造成的影响。PBI 可持续发展的关键在于关系网络主体间协同发展,即主体间能否形成统一的建设目标,能否做到资源互补和信息共享,因此在建设的不同阶段下核心主体必须明晰和均衡网络中各方主体的职责、权力和利益,通过强化沟通和协作促成各方主体互利合作。

(2)加强网络主体间的合作交流。设计阶段的参与主体需要进行交流和沟通,以提高设计阶段的网络密度并降低中心势,增强网络稳定性,主体间提前沟通与规划有助于形成统一目标,而多元主体行为一致化有助于提高施工阶段的工作效率。运维阶段由于网络固定的关系,很难改善网络密度,因此可利用大数据建立物业与施工单位等主体的信息交流平台,提升主体间的沟通效率,同时又充分保障了各主体行使权利和表达意见的独立性,有效解决信息资源传递路径长等问题。

#### 4.3.2 网络个体治理建议

(1)强化主体间原有联系。设计阶段时政府的控制力不足,应加强设计与政府的协同关系以提高政府的中心度,让其在网络中的地位得到提升,真正发挥出管控和监督的作用。政府作为建设工程的主要监督者,严格把控并保障着工程质量,两者间紧密联系,有利于设计单位及早了解和遵守政府制定的法规和政策要求,确保设计成果的合规性和可行性;同时政府提供的有价值的指导和反馈能促使设计单位更全面地考虑工程的影响和风险,从而提高设计质量;设计单位在政府制定的激励政策下采用先进技术和理念进行成果设计,能推动装配式建筑绿色创新以及可持续发展。

(2)主体间建立新的联系。运维阶段时培训机构与政府建立新的联系,两者能直接获取更多的信息及资源,以及提升自身网络地位。政府通过资金扶持、补贴政策等方式支持培训机构开展相关培训工作,并提供装配化运维相关的最新技术、案例和经验分享供培训机构学习,而培训机构能力的提升,能使物业单位得到更规范化、更专业的培训和技术指导,提高了物业单位的管理质量和效率,以

及得到节能环保和成本效益等多重好处,推动建筑行业向更可持续和智能化方向发展。

(3)主体间形成产业联盟。科研机构在决策、设计和拆除阶段均为低中心度的边缘主体,但在网络中起到提供高质量技术供给的重要作用,是PBI中不可或缺的主体。因此政府可整合科研机构的科研力量,建立创新联合体,一方面能提高科研机构的中心度,提升PBI对重大研究成果和创新技术的有效利用效率,另一方面政府能借助科研机构的资源优势进一步提升自身网络地位。同时,政府—科研机构产业联盟的形成提高了关系网络的密度,也在一定程度上削弱了开发商的核心地位,使信息、资源在网络中的集中程度降低,提高了PBI生态系统的稳定性。

## 5 结论

基于PBI生态系统行业主体多元化和关系网络化的特点,采用SNA构建5个主要阶段的主体关系网络,探索了网络结构与主体关系的动态变化,提出了治理建议以增强协同合作能力。主要结论有:①随建设工程的推进,主体的网络角色展现出动态变化,主体间关系及强度随着改变,进而有着不同的关系网络结构。②从整体网络看,PBI生态系统主体间联系沟通效率和协同能力在全寿命期不同阶段有别,决策、施工和拆回阶段为高密度关系网络,主体间联系紧密,信息、资源流通较好;设计阶段网络密度最低、中心势最高,权力集中,主体关系松散,信息、资源传递效率低,网络最不稳定。③从网络个体看,各阶段活跃且核心的主体持续变化,开发商在决策、设计和运维阶段,施工单位在施工阶段,拆除单位在拆回阶段中心度最高,处于核心位置,主导协同并充当桥梁,对信息和资源掌控力强;同时,决策阶段的咨询单位、设计阶段的设计单位、拆回阶段的政府等主体在相应阶段网络地位较高。

## 参考文献

- [1] 毛蕴诗,叶佩仪,霍梓轩,等.绿色全产业链发展研究:以装配式建筑领军企业远大住工为例[J].产经评论,2022,13(6):34-45.
- [2] 李秋芳,汪文雄,崔永正,等.组织关系视角下全域土地综合整治多元主体协同治理的逻辑框架与网络形式[J].自然资源学报,2024,39(4):912-928.
- [3] 程翔,王宇琳,张明喜.科技创新新型举国体制下多元投资主体网络关联模式[J].中国科技论坛,2024(5):1-12.
- [4] 孙春玲,郑晓茹,邓斌超,等.诉求统筹下城中村改造利益相关者协同治理:以天津市北辰区改造项目为例[J].南方建筑,2024(1):48-54.
- [5] 于洋,李艺琳,余孟璇,等.集体土地租赁住房开发中的利益相关者及其网络分析:以北京市十八里店乡项目为例[J].城市问题,2022(11):84-93.
- [6] YANG S, QIU J, HUANG H. Research on the governance relationship among stakeholders of construction waste recycling based on ANP-SNA[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(24): 16864.
- [7] 武乾,孙敏,黄大兴,等.基于SNA视角的旧工业厂房绿色再生项目治理风险研究[J].安全与环境学报,2022,22(3):1121-1131.
- [8] 成连华,薛思婷,曹东强.基于社会网络分析法的建筑施工高处作业风险传递及管控措施[J].科学技术与工程,2022,22(20):8995-9003.
- [9] ZHOU J H, ZHU Y M, HE L, et al. Recognizing and coordinating multidimensional dynamic stakeholder value conflicts for sustainability-oriented construction land reduction projects in Shanghai, China: an integrated SA-SNA-TRIZ approach[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 348: 131343.
- [10] LIN H, ZHU Y, ZHOU J, et al. Understanding stakeholder relationships in sustainable brownfield regeneration: a combined FAHP and SNA approach[J]. Environment, Development and Sustainability, 2024, 26(6): 15823-15859.
- [11] 薛寒,郑志哲,周海青,等.基于社会网络的建筑行业科技创新主体合作网络演化研究:以“华夏建设科学技术奖”为例[J].科技和产业,2024,24(4):93-100.
- [12] 杜静,张珂珂,毛文俊.基于社会网络分析的装配式建筑全过程质量风险评估[J].建设监理,2022(3):58-65.
- [13] ZHOU J X, HUANG L, SHEN G Q, et al. Modeling stakeholder-associated productivity performance risks in modular integrated construction projects of Hong Kong: a social network analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 423: 138699.
- [14] 张爱琳,王光浩,丁超,等.基于社会网络分析法的装配式建筑供应链关键风险因素[J].科学技术与工程,2024,24(19):8372-8381.
- [15] 王凡俊,陈德凡,赵宝库.基于演化博弈理论的装配式建筑激励策略[J].科技和产业,2023,23(9):81-89.
- [16] 杨增科,樊瑞果,黄炜,等.政府干预下装配式建筑产业链核心企业协作策略研究[J].中国管理科学,2024,32(3):28-39.
- [17] 王涛.组织跨界融合:结构、关系与治理[J].经济管理,2022,44(4):193-208.
- [18] 于明洋,吕可夫,阮永平.供应链网络位置与企业竞争地位[J].系统工程理论与实践,2022,42(7):1796-1810.

## Relationship Network of Industry Stakeholders in the Ecosystem of the Prefabricated Building Industry

SHEN Liangfeng<sup>1</sup>, LIU Ting<sup>1</sup>, XUE Guangjun<sup>2</sup>, SUN Liyan<sup>1</sup>, YUAN Jun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. Hunan Construction Engineering Group No. 2 Co., Changsha 410004, China)

**Abstract:** The synergy of industry stakeholders is crucial to the high-quality development of prefabricated building, but there are many stakeholders with different interests and fields of specialization during the whole life span. Based on the industrial ecological perspective, the social network analysis method was adopted to study the relationship network from three aspects, including identifying the stakeholders, clarifying the relationship, and analyzing the network structure. The study shows that the decision-making, construction and demolition phases are high-density networks with close stakeholders synergy, the design phase has loose network relationships and the most unstable structure. The developer in the decision-making stage, the construction unit in the construction stage, the demolition unit in the demolition stage has the highest degree of centrality, dominating the synergy of the stakeholders. As a result, it is proposed to optimize the network structure to promote sustainable development.

**Keywords:** prefabricated construction industry; ecosystem; industrial stakeholders; whole life; social network analysis