

工程建设技术创新合作关系的结构特征及演化机制

——基于动态网络模型的实证研究

李子伦

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2025年3月10日; 录用日期: 2025年3月27日; 发布日期: 2025年4月25日

摘要

在工程建设领域, 各类行业组织基于各类长期及短期关系不断进行各类创新性技术的合作研发及应用, 行业组织围绕各类创新性技术的合作关系形成了具有高度动态特征的合作网络。本研究采用随机行动者导向模型的方法和2000~2020年国家科技进步奖工程建设领域获奖项目的纵向数据, 研究工程建设技术创新的合作网络的结构特征及其演化机制。结果表明, 网络随时间推移会越来越密集, 但其特征始终表现为网络节点间平均路径长度相对较短、聚类系数高, 网络结构有围绕某些主要组织发展的趋势。结果还进一步表明, 宏观层面的网络动态特征与微观层面上基于结构的偏好连接效应、反孤立效应和基于属性的所有制相似性效应、技术能力相似性效应呈显著正相关, 与组织类型相似性效应呈显著负相关。结果还表明, 与组织所有制类型和技术能力相关的个体协变量效应对合作网络的动态有显著影响。本研究有助于政府部门及行业组织更好把握工程建设行业技术发展趋势与合作特征优化相关创新战略。

关键词

工程建设, 创新网络, 合作网络

Structural Characteristics and Evolution Mechanism of the Technological Innovation Partnerships in Engineering Construction

—An Empirical Study Based on Dynamic Network Models

Zilun Li

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: Mar. 10th, 2025; accepted: Mar. 27th, 2025; published: Apr. 25th, 2025

文章引用: 李子伦. 工程建设技术创新合作关系的结构特征及演化机制[J]. 现代管理, 2025, 15(4): 176-186.
DOI: 10.12677/mm.2025.154100

Abstract

In the field of project construction, various industry organizations have been carrying out cooperative R&D and application of various innovative technologies based on various long-term and short-term relationships. Industry organizations have formed a highly dynamic cooperation network around the cooperative relationships of various innovative technologies. Using the method of stochastic actor-oriented models and longitudinal data of award-winning projects in the construction industry of the national science and technology progress award from 2000 to 2020, this study examines the structural characteristics and evolution mechanism of the cooperation network of construction technological innovation. The results provide evidence that the network becomes increasingly dense over time but persistently exhibits the average path length between network nodes is relatively short, the clustering coefficient is high. And the network structure tends to develop around some main organizations. The results further reveal that these macrolevel characteristics of network dynamics significantly positively correlated with the structure-based preferential attachment effect, anti in-isolates effect, attribute-based ownership similarity effect and technical capability similarity effect at the micro level, while they are significantly negatively correlated with the organization type similarity effect. The results also suggest that the individual covariate effects related to organizational ownership type and technical capability significantly influence the dynamics of the collaborative network. This study will assist the government departments and industry organizations to better grasp the technology development trend and cooperation characteristics of the construction industry and optimize relevant innovation strategies.

Keywords

Project Construction, Innovative Network, Collaborative Network

Copyright © 2025 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

工程建设行业历来被视为保守且缺乏灵活性的领域，其效率低下及对创新技术采纳意愿的不足常遭学界诟病[1] [2]。然而，鉴于该行业在经济增长中的关键作用，其亟需通过创新来突破当前的发展瓶颈。建筑行业活动具有项目导向性、跨区域性和分散性等特征，这促使建筑企业倾向于通过与其他企业及行业组织建立合作关系来推进项目建设和技术研发，以此降低开发成本并提升生产效率[3]。为减少技术开发过程中的试错成本及其他潜在风险，企业和其他行业组织形成了紧密的合作关系[3] [4]。从宏观角度来看，围绕特定技术和建设项目，企业和其他行业组织形成的复杂创新合作关系逐渐聚集成行业层面的建筑技术创新合作网络[5]。组织在既往合作关系中积累的知识和经验可能会进一步影响其后续项目中的技术创新[6]。因此，从行业整体视角出发，创新合作网络的内部结构和形成机制与建筑行业的知识扩散模式，以及行业整体是否倾向于投资技术创新以应对市场需求密切相关。

现有关于工程建设行业创新合作的实证研究多从项目或企业视角出发，主要聚焦于跨组织合作对提升建筑行业创新能力的描述性分析，或探讨企业、研发机构与高校间合作的效益与问题，以及建筑行业组织绩效等方面。近年来，随着网络分析方法的兴起，越来越多的学者开始运用网络视角探究建筑行业技术合作与创新的发展趋势。然而，这些研究大多局限于讨论合作网络对建筑绩效的影响及其机制[4]。

鲜有学者关注分析和阐述建筑行业创新合作网络的结构特征和形成机制,这有助于行业组织更好地把握建筑行业整体技术发展趋势和优化合作关系的创新战略。

鉴于此,本研究基于随机行动者导向模型(Stochastic Actor-Oriented Models,简称 SAOM)方法[7]及工程建设领域国家科学技术进步奖获奖项目的纵向数据集,旨在揭示工程建设行业技术创新合作网络宏观结构的动态演变过程,并探讨相关微观机制如何共同作用于网络的演化。本研究聚焦于建筑项目中技术创新的跨组织联合实施关系,将相关组织划分为企业、高校、研究机构及政府部门四类,以检验它们之间的关系。基于现有网络动力学模型的研究并考虑到建筑行业技术创新项目合作网络的特点,本研究中的微观机制包括内生效应和外生效应。内生效应表示网络关系的变化如何由网络结构决定,而外生效应则表示网络关系的变化如何由网络节点(即组织)的属性决定[7]。本文后续部分将首先阐述研究背景并提出关于不同效应影响的研究假设,随后基于 SAOM 方法和纵向数据集进行网络分析,并对结果进行分析讨论。

2. 理论基础与研究假设

2.1. 建筑创新中的动态网络视角

合作网络并非静态的结构性存在,而是一种动态的社会关系网络,其核心在于节点(参与主体)之间通过多样化的合作与互动所形成的复杂关系链条。作为一种在社会科学研究中广泛应用的分析视角,基于行动者(个人或组织)所嵌入的社会网络关系来解析各类社会现象的研究范式日益普及[8]。特别是在工程建设领域,创新合作网络的构建不仅体现了不同组织、机构及企业间的相互依存关系,同时也揭示了在激烈的市场竞争与动态变化的技术环境中,各主体如何通过资源整合、知识共享与技术协同,推动协同创新与技术进步的机制。

根据社会网络理论,合作网络是由若干具有特定性质的主体(如企业、科研机构、政府等)通过关系链条联系而成的复杂结构。这些关系链条不仅承载着信息流通与资源交换的功能,还涵盖了信任关系的建立、社会资本的积累以及各主体在协作过程中的角色分配[9]。在这一理论框架下,合作网络超越了单纯的物理或经济层面的合作,成为一个充满信息与知识流动的社会系统,凸显了主体间合作行为的集成性与互补性。网络中的每一个节点既是信息的接收者,也是知识的传播者,因此在建筑业的创新过程中,主体之间的互动和合作显得尤为重要,尤其是在跨行业、跨区域的协同创新中,网络结构的效能决定了创新的成效与规模。由于当前关于工程建设领域创新合作网络的研究主要集中在合作网络对企业或行业绩效的影响[4]。鲜少有研究从整个建筑行业角度定量分析创新合作网络结构如何随时间演变的机制,并进一步关注知识和创新如何在网络中流动和传播。其他社会研究领域研究表明,社会网络宏观结构特征的演变与微观层面的组织效应密切相关,这些效应包括基于网络结构的内生效应和基于网络节点属性的外生效应[7]。在工程技术创新过程中,跨组织合作能够有效整合不同类型组织的优势,例如高校的科研驱动与企业的需求导向相结合,共同促进技术创新的实现。因此,深入探讨建筑行业创新合作网络的结构演变机制及其对知识流动与创新传播的影响,对于理解行业创新动态具有重要意义。

2.2. 研究假设

2.2.1. 建筑创新网络动态中的优先连接效应

优先连接效应(Preferential Attachment Effect),也称为马太效应(Matthew Effect) [10]或累积优势效应(Cumulative Advantage Effect) [11],是一种基于网络结构的机制,指在合作网络中,已拥有更多连接的节点(行动者)更有可能获得新的连接,从而随着时间的推移在网络中占据更加中心化的地位。这一效应已在

建筑行业特定技术实施的合作网络中得到实证验证[12][13],表明其在塑造工程技术创新的网络动态中可能发挥着重要作用。由于学习机制对建筑企业的创新能力有显著影响[14],先前参与创新技术开发的组织可能在创新和技术能力方面具有优势。因此,这些组织在新项目中更有可能受到相关组织的青睐,从而积累更多的项目创新经验,并在建筑行业技术创新合作网络中占据更突出的地位(即与其他组织有更多的连接)。此外,获得多个合作网络连接也有助于行业组织在行业中传播其声誉,并进一步赢得更多合作机会,从而巩固其中心地位。创新活动中的相关组织通常分为主导组织和参与组织。主导组织负责提出和领导创新活动,并有权选择参与组织。在选择过程中,主导组织倾向于选择参与过更多创新活动的参与组织。同时,参与组织也倾向于参与由更有经验的主导组织领导的创新活动。因此,这些考虑引出了以下假设:

H1: 在建筑创新合作网络中,网络地位更突出的参与组织由于其在创新扩散中的“意见领袖”角色,更受主导组织的青睐,并更有可能随着时间的推移获得更多新的合作连接。

H2: 在建筑创新合作网络中,网络地位更突出的主导组织由于其资源优势和网络影响力,更有可能与更多组织合作,并更有可能随着时间的推移获得更多新的合作连接。

2.2.2. 建筑创新网络动态中的相似性效应

相似性效应(Similarity Effect),亦称同质性效应(Homophily Effect),指的是个体或组织倾向于与具有相似属性的其他参与者建立社会联系的现象[7][15]。这一效应是社会心理学中的一个普遍效应,已被认为是多种社会网络动态背后的基本机制。导致相似性的属性包括多种组织特征,如年龄、组织规模等,已在多项研究中得到实证验证[12][16][17]。在建筑行业技术创新合作网络的背景下,以下特定的相似性效应可能会影响主导组织在新项目中选择合作组织的决策:与组织所有权类型相关的效应、与组织类型相关的效应、与组织年龄相关的效应以及与组织技术能力相关的效应。就组织所有权类型而言,中国建筑行业中国有企业和非国有企业在企业规模、组织文化和管理风格上存在常见差异[18]。这些差异可能导致额外的跨组织协调成本,从而减少不同所有权类型组织之间的潜在合作。根据它们在中国社会中的不同社会责任,国有企业和非国有企业在创新技术的实施上存在分歧,尤其是在创新扩散的早期阶段[12],因此主导组织可能更倾向于选择具有相同所有权类型的组织进行合作。与所有权类型类似,不同类型的组织可能在同一项目上受到法律或其他法规的单独限制,导致管理态度等方面的差异。因此,主导组织可能更倾向于选择相同类型的组织作为新项目的合作伙伴。组织年龄可能影响组织管理体系和其他因素。研究表明,来自相似文化和背景的组织协调成本较低,更有可能彼此建立合作关系[19]。因此,组织年龄也可能是影响组织对技术创新态度的属性,在建筑创新合作网络中的组织相互选择中发挥作用。就技术能力而言,参与更多创新项目的组织往往拥有更多的实践经验和相关专利,相应地,它们的创新投资也比其他组织更大,这有助于提高它们的技术创新能力。这可能会减少新合作项目的试错成本,并导致合作网络和技术能力的同质化趋势。基于上述考虑,本研究提出以下假设:

H3: 在建筑创新合作网络中,具有相同所有权类型的组织由于资源依赖和制度同构性,更有可能形成新的合作关系。

H4: 在建筑创新合作网络中,具有相同组织类型的组织由于共享相似的资源需求和合作目标,更有可能形成新的合作关系。

H5: 在建筑创新合作网络中,具有相似组织年龄的组织由于相似的发展阶段和经验积累,更有可能形成新的合作关系。

H6: 在建筑创新合作网络中,具有相似技术能力的组织由于技术互补性和知识共享的便利性,更有可能形成新的合作关系。

3. 研究设计与方法

3.1. 网络数据

本研究使用了 2000~2020 年间中国建筑行业获得国家科学技术进步奖的项目的纵向数据集，以描述建筑行业技术创新合作网络并检验所提出的假设。国家科学技术进步奖是中国科技创新的最高奖项之一。自 2000 年设立以来，主要授予在技术开发、技术创新、高新技术产业化和重大科技项目完成过程中做出创造性贡献的个人和组织，反映了各行业高新技术研发的现状和方向。该奖项每年颁发一次，自 2000 年至 2020 年所有获奖项目的基本信息，包括项目名称、项目获奖年份和项目参与组织，均可在中华人民共和国科学技术部官方网站上公开获取。过去 21 年的国家科学技术进步奖项目数据因其严格的评审过程而适用，涵盖了中国工程建设领域的所有类型建筑项目，能够反映近年来国家建筑领域的技术发展和组织合作。共有 213 个获奖项目被纳入分析。每个项目的获奖信息包括项目名称、项目参与组织和获奖等级。为与五年计划的时间节点一致，本研究选择在以下四个时间点检查网络：2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年，每个网络涵盖从 2000 年到该观察时间点的获奖技术中建立的合作关系。在样本数据收集方面，除国家科技进步奖数据外，还通过企业官方网站获取企业的基本信息，包括其所在地、所属集团公司及其他社会经济属性。企业的所有制类型等信息通过中国国家企业信用信息公示系统获取。这些项目和参与项目的相关组织的统计信息如表 1 所示。

Table 1. Related statistical information of award-winning projects and organizations

表 1. 获奖项目及组织的相关统计信息

变量	类别	数量	百分比
项目获奖年份	2000~2005	49	23.00
	2006~2010	62	29.11
	2011~2015	55	25.82
	2016~2020	47	22.07
参与项目组织类型	企业	418	72.44
	高校	75	13.00
	研究部门	41	7.11
	政府部门	43	7.45
企业的所有制类型	国有	333	79.67
	非国有	85	20.33

表 1 清楚地显示了这 213 个项目在项目类型上的多样性。就项目参与组织而言，本研究将其分为以下四类以检验各种组织之间的关系，因为它们在项目创新实施中起着关键作用：企业、大学、研究部门和政府部门。因此，共有 577 个获奖组织(包括 418 家企业、75 所大学、41 个研究部门和 43 个政府部门)被纳入网络分析。动态网络是基于项目的合作网络，可以表示为双模网络(利用项目和组织作为网络节点)或单模网络(仅利用组织作为网络节点)。为了便于分析，本研究使用单模网络配置来检查所调查实体之间的合作关系。

3.2. 网络结构特征

为了定量评估网络的特征变化，针对不同的观测时间点进一步计算了一组网络结构的统计数据，包

括链接节点比例、平均节点度、网络密度、核心网络比例、核心网络节点之间的平均距离、聚类系数和弗里曼图中心势，见表 2。由于为了与基于 SAOM 方法的分析的数据处理要求保持一致[7]，且其中一些统计数据仅适用于未加权的网络，因此将描述合作关系的有向矩阵中的多值转换为二值用于统计计算及后续分析。

从表 2 中可以看出，在观测期间，链接节点分数稳步增加，2020 年的分数值是 2005 年的分数值的近四倍。这反映了在过去二十一年中，工程建设领域的技术创新合作关系形成较快，越来越多组织加入到合作网络中。与链接节点分数相关的平均节点度也大幅增加，在 2020 年达到 3.272，是 2005 年的六倍多。由于整个合作网络涉及的组织数量众多，因此网络密度的值相对较小，但也自 2005 年的 0.001 上升至 2020 年的 0.006，表明了合作网络中链接数量随着时间推移而逐年增加，组织链接越发密集。

一个有趣的观察结果是，虽然核心网络比例在 2000~2020 年期间增加近九倍，但在整个观察期间，核心网络节点之间的平均距离没有明显变化，保持在 4.096 至 4.832。尽管 2015 年和 2020 年的核心网络比例分别高达 0.790 和 0.962，但这两个时间点的距离值仍然在 5 以内，这反映出一个组织可以通过平均少于 5 步的路径到达主要组成部分中的任何其他组织。关于聚类系数，其值在观测期间持续上升，表明该合作网络中各个组织之间的联系越发紧密。较短的平均距离和升高的聚类系数提供了明确的证据，表明所研究的工程建设技术创新合作网络持续表现出小世界的特性。

表 2 中另一个有趣的观察结果是，尽管网络密度增加，但网络的弗里曼图中心势并没有相应下降，而是从 2000 年的 0.005 增加到 2020 年的 0.154。该结果表明，在所观察的时期内，网络结构有围绕某些主要组织发展的趋势。

Table 2. Network structure feature indicators at different observation time points from 2000 to 2020

表 2. 2000~2020 年不同观察时间点网络结构特征指标

观察时间点	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
链接节点比例	0.253	0.577	0.816	0.988
平均节点度	0.499	1.477	2.468	3.272
关系数	288	852	1424	1888
网络密度	0.001	0.003	0.004	0.006
核心网络比例	0.111	0.536	0.790	0.962
核心网络节点之间的平均距离	4.368	4.832	4.314	4.096
聚类系数	0.041	0.043	0.057	0.072
弗里曼图中心势	0.005	0.082	0.133	0.154

3.3. 数据分析方法

本研究使用随机行动者导向模型(SAOM)作为主要研究方法，同时分析基于结构和属性的效应如何共同驱动网络演化，该模型被认为是复杂网络结构动力学的最有前途的统计模型[20]。在 SAOM 网络中，节点被称为行动者，假定由行动者控制网络联系的形成、维护或解散。该方法的一个重要特征是基于纵向数据对微观层面行动者的选择进行建模以解释不同时期宏观网络结构的变化。

SAOM 对网络演化机制的分析是在基于 R 语言中的 RSiena 程序包编写代码实施的[21]。虽然国家科技进步奖的获奖技术中各个参与组织之间基于项目的合作关系存在通过相互选择而形成的趋势，但每个项目的促成往往存在一个牵头单位，牵头单位对于项目的参与单位的选择具有主导权，本研究假设由牵

头单位选择参与单位进行合作。因此将相应观测时间点(2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年)组织之间合作关系的有向矩阵作为输入数据,以分析工程建设领域技术创新的动态合作网络的形成。分析是使用基于矩方法的默认参数估计程序进行的[7]。

4. 数据分析与结果

表 3 总结了基于 1981 次估计迭代的模型估计结果。总体最大收敛率(0.1442)低于 0.25 的阈值,并且收敛 t 比率(即 t 估计参数与目标偏差的统计量)均低于 0.1 的阈值,表明估计算法结果的收敛性良好[21]。作为估计中默认报告的指标,速率参数表示在不同观测时间点之间网络变化发生的程度,即网络节点在相应时间段内有机会更改合作关系的预期频率。从表 3 中可以明显看出,四个观测时间点(即 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年)之间三个时期的速率参数在 0.938 和 1.108 之间,且均具有统计学意义($p < 0.001$),表明 2005~2020 年期间工程建设领域技术创新的相关组织之间新形成的合作关系大幅且稳定增长。

Table 3. SAOM analysis results
表 3. SAOM 分析结果

自变量	估计值	标准误差	收敛 t 比率	t 比率
速率参数				
2005~2010 年速率参数	1.108	0.066	N/A	16.755
2010~2015 年速率参数	1.115	0.067	N/A	16.568
2015~2020 年速率参数	0.938	0.064	N/A	14.778
网络结构效应(内生效应)				
偏好连接效应(牵头单位)	0.120	0.027	-0.032	4.423
偏好连接效应(参与单位)	0.055	0.006	0.001	9.356
反孤立效应	0.913	0.094	0.019	9.692
属性相似性效应(外生效应)				
所有制属性相似性效应	1.494	0.306	0.029	4.884
组织类型相似性效应	-0.529	0.109	0.050	4.849
组织年龄相似性效应	0.757	0.439	-0.070	1.723
技术能力相似性效应	3.615	0.950	0.010	3.804
控制效应				
所有制属性(ego)	25.453	3.878	0.024	6.563
所有制属性(alter)	-1.188	0.311	0.021	3.816
组织年龄(ego)	-1.235	0.687	0.006	1.799
组织年龄(alter)	0.052	0.042	-0.055	1.249
技术能力(ego)	49.294	6.119	0.035	8.056
技术能力(alter)	0.316	0.049	-0.080	6.426

本研究结合所提出的 6 个假设,主要研究了以下驱动网络动态效应:与网络结构相关的偏好连接效应和反孤立效应、与组织所有制类型相关的相似性效应、与组织类型相关的相似性效应、与组织年龄相关的相似性效应、以及与组织技术能力相关的相似性效应。本研究中提出的假设 1 是关于偏好连接效应

的。该效应指出,在新的项目中,具有更突出的网络地位的参与组织更受主导组织的青睐,并且随着时间的推移更有可能获得新的合作关系。本实验通过 RSiena 中的入度流行度效应(In-Degree Popularity Effect)和出度流行度效应(Out-Degree Popularity Effect)检验。入度流行度效应主要检验牵头单位对于有更多牵头单位选择的参与单位的进行合作的偏好程度,出度流行度效应主要检验参与单位与其他组织建立更多联系,其他牵头单位选择该参与单位的可能性越大。入度流行度效应($\beta = 0.120$)和出度流行度效应($\beta = 0.055$)两种效应的估计值均为正且非常显著($p < 0.001$)。因此,假设 1 成立。本研究提出的假设 2 关于反孤立效应。该效应是指在合作网络中趋向使没有任何联系的孤立组织与其他参与者建立联系,同时避免切断联系导致孤立组织的产生。该效应的估计值也为正且非常显著($\beta = 0.913, p < 0.001$),因此假设 2 成立。假设 3、4、5 和 6 基于属性的相似性效应,假设具有相似组织属性的牵头单位和参与单位更有可能形成新的合作关系,通过相应的协变量效应检验。其中,假设 3 与所有制类型的相似性有关,假设 4 与组织类型的相似性有关,假设 5 与组织年龄的相似性有关,假设 6 与技术能力的相似性有关。这四个假设均通过 RSiena 中的协变量相似性效应进行检验,其中组织的所有制类型被设置为虚拟变量以反映组织是否为国有组织(1 = 国有; 0 = 非国有),组织类型被设置为多值变量分别表示组织所属四类组织中的一类(1 = 企业; 2 = 高校; 3 = 研究部门; 4 = 政府部门)。从表 3 可以明显看出,所有制类型相似性效应的估计值为正且非常显著($\beta = 1.494, p < 0.001$),假设 3 成立;组织类型相似性效应的估计值为负且非常显著($\beta = -0.529, p < 0.001$),假设 4 不成立;组织年龄相似性效应的估计值为正,但其不具有统计学意义($\beta = 0.757, p > 0.05$),假设 5 不成立;技术能力相似性效应的系数也为正且非常显著($\beta = 3.615, p < 0.001$),假设 6 成立。

为了更好地评估这些效应的增量影响,本研究在检查基于项目的动态合作网络的同时,还控制了假设 3、5、6 中涉及变量的个体协变量效应(由于组织类型绝大多数为企业,因此此处不检验假设 4 的个体协变量效应)。它们反映了关系发送者(ego)或关系接收者(alter)的属性如何分别影响工程技术创新合作网络的形成。这些效应主要通过 RSiena 中的 covariate-ego effect 和 covariate-alter effect 进行检查,前者检查自我(即 ego)属性的影响,后者检查接收者(即 alter)属性的影响。与基于属性的相似性效应的设置一致,个体协变量的组织所有制类型(1 = 国有; 0 = 非国有)作为虚拟变量。从表 3 中可以明显看出,关于与组织所有制类型相关的个体协变量效应,关系发送者的组织所有制类型的影响为正且非常显著($\beta = 25.453, p < 0.001$),而关系接受者的组织所有制类型的影响为负且非常显著($\beta = -1.188, p < 0.001$),说明合作网络中关系发出者多为国有组织而关系接收者多为非国有组织。关系发送者($\beta = -1.235$)和关系接收者($\beta = 0.052$)与组织年龄相关的个体协变量效应均不具有统计学意义($p > 0.05$) (表 3),说明组织年龄不影响工程建设技术创新合作关系的形成。关于与组织技术能力相关的个体协变量效应,关系发送者的技术能力($\beta = 49.294$)和关系接受者的技术能力($\beta = 0.316$)的影响都非常显著($p < 0.001$),说明关系发送者和关系接收者的技术能力在影响工程建设领域技术创新的动态合作关系的形成方面均起重要作用。综上所述,组织所有制类型和组织技术能力是影响所研究的工程建设领域技术创新的动态合作网络的基本因素。

5. 结论

本研究利用 SAOM 方法和 2000~2020 年国家科技进步奖工程建设领域获奖项目的纵向数据对工程建设技术创新动态合作网络进行了实证研究,不仅描述了网络的宏观结构如何随时间变化,而且模拟了相关微观机制如何共同支撑网络的演化。描述性分析结果表明,随着时间的推移,该合作网络变得越来越密集,且国有组织始终占据主导地位,其特征始终是网络节点之间的平均路径长度相对较短、聚类系数高,持续表现出小世界的性质,且网络结构有围绕某些主要组织发展的趋势。关于支撑网络演进的机制,对偏好连接效应、反孤立效应的影响以及与组织所有制类型、组织类型、组织年龄和组织技术能力的相

似性效应提出了六个研究假设。SAOM 结果分析证明宏观层面网络的演化过程与微观层面上基于结构的偏好连接效应、反孤立效应和基于属性的所有制相似性效应、技术能力相似性效应呈显著正相关,表明在该网络中组织之间倾向于选择与其他组织已有合作关系的组织进行新的合作,孤立组织倾向于加入合作网络当中,且牵头单位会倾向于选择与自身具有相同所有制和相似技术能力的参与单位进行合作。孤立组织与创新扩散理论中“创新采纳者”的角色相符,通过加入网络获取创新资源,从而推动创新的进一步扩散。牵头单位倾向于选择技术能力相似的参与单位反映了创新扩散中的“同质性”原则,从而提升创新效率。这种机制有助于加速创新信息的传播,因为中心节点(如国有组织)能够更快地将创新扩散到整个网络。牵头单位倾向于选择与自身所有制类型相同的参与单位,这反映了资源依赖理论中的“制度同构性”。相同所有制类型的组织在资源获取、政策支持和风险管理方面具有更高的兼容性,从而降低合作中的不确定性和交易成本。而与组织类型相似性效应呈显著负相关,这表明牵头单位在新的技术创新项目中更倾向于选择不同组织类型的参与单位,这体现了资源依赖理论中的“资源互补性”,但选择不同的组织类型的参与单位往往能够利用其自身独特的优势,如利用企业的市场需求、高校和研究部门的科研能力以及政府部门的政策优惠等,从而提升项目的成效。组织年龄相似性效应被发现不具有统计学意义,这表明牵头单位并没有频繁选择年龄相似的参与单位的趋势。这可能是,组织年龄对组织管理体系和管理者偏好的影响有限,因为组织会通过市场、政策等因素进行自我优化和结构升级,适应环境变化实现动态调整,从而使得不同年龄的组织在资源需求和合作模式上趋于一致,削弱了年龄对合作关系的影响。此外,与组织所有制类型和组织技术能力相关的个体协变量效应作为控制效应也显著影响了基于项目的合作网络的演化。组织所有制类型的个体协变量效应表明合作网络中关系发出者多为国有组织而关系接收者多为非国有组织,前者应该与公共和私人项目中对工程建设技术创新施加的不同压力密切相关,后者可能是由于非国有组织的市场需求迫切且管理模式和项目流程具有便捷性。技术能力的个体协变量效应均表现为正显著,反映了资源依赖理论中“资源获取”的核心逻辑,充分说明了牵头单位和参与单位自身的技术能力是进入工程建设技术创新合作网络的主要影响因素,因为技术能力强的单位能够提供更多的创新资源。偏好连接效应以及与所有制类型、技术能力相关的个体和二元协变量效应可以解释为什么合作网络随着时间的推移变得越来越密集同时却持续表现出具有超连接中心节点(主要是国有组织)。这些中心节点的存在及反孤立效应可以进一步解释网络为什么表现为较短的平均路径长度和高局部聚类的小世界属性。

区别于早期研究仅分析特定阶段关系网络结构的静态特征,近年来越来越多学者研究建筑领域研究行业中的合作网络结构特征的动态变化[22]-[25]或性能影响[26]。有学者开始在行业层面更多关注项目临时性引致的关系网络动态性及其影响问题,由于相关研究仍处于初步阶段,目前进一步描述行业级宏观网络随着时间的推移的演化机制的研究仍相对较少。基于 SAOM 方法和上海基于 BIM 项目的独特纵向数据集,Cao [12]研究了 BIM 实施合作网络的演变过程,代表了基于动态视角分析工程建设领域合作网络这一方向的探索性努力。Li [13]在此基础上,利用 SAOM 方法和在香港进行的基于 BIM 的建筑项目的纵向数据集,在另一个机构和文化背景下重新验证了合作网络动态背后的优先连接效应、与组织 BIM 经验相关的相似性效应的重要性。而本研究跳出了 BIM 这一类技术的限制以及区域的限制,分析全国的工程技术创新的合作网络的结构特征及演化机制,有助于丰富工程建设领域中合作网络的相关研究,为动态合作网络的实证研究增添了案例和研究角度,进一步表明了网络动力学模型在解决工程建设领域问题上的可操作性。

这项研究的结果也具有若干管理和政策意义。首先,实证结果表明,工程建设技术创新合作网络当中存在围绕少数主要节点扩张的趋势,偏好连接效应总体上对影响行业组织的组织竞争力和网络地位起着重要作用。因此,在面临市场变化时,相关组织可以采用先发战略,占据行业内有利的网络地位,从

而提高组织的长期竞争力。鉴于具有超级连接的主要组织对其他组织的影响广泛,监管部门可能需要设计相应的针对性干预政策。其次,研究结果还证明了与技术能力相关的相似性效应显著影响了牵头单位与参与单位之间合作网络的形成。较高的聚类系数以及该同质化趋势可能会使行业组织之间产生分层并产生阶层固化的问题,阻碍技术创新相关的知识从技术能力较强的组织转移到技术能力较弱的组织。将不利于知识的传播和新知识的形成从而不利于行业的技术创新,因此监管部门可以采取相应措施促进各级组织之间的沟通,从而促进相关技术知识在整个行业的传播。第三,与技术能力相关的个体协变量效应在统计上表现为正且显著,表明牵头单位和参与单位的技术能力均能够影响其合作关系的形成。因此,相关组织可以通过提升自身技术能力从而提高其在行业中的竞争力。

但本研究仍然存在一定的局限性。首先,受研究范围、实证数据可用性和现有网络动力学模型的数据处理能力的限制,本研究仅分析了由牵头单位到参与单位的有向网络。未来的研究可以进一步分析组织之间的无向合作网络,进一步考虑参与单位与牵头单位的双向选择,使人们更全面地了解工程建设技术创新的合作网络的形成。第二,受经验数据可用性的限制,在研究工程技术创新合作网络的演化时,本研究侧重于评估基于结构的偏好连接效应和反孤立效应的影响以及与组织所有制类型、组织类型、组织年龄和技术能力相关的二元协变量效应(即相似性效应)和个体协变量效应。未来的研究可以尝试进一步评估其他基于结构的效应的影响(如市场开放度)以及与其他组织属性(例如组织规模和组织文化)相关的基于属性的影响,以更全面地模拟合作网络的演化。

参考文献

- [1] Brady, T., Davies, A. and Gann, D. (2005) Can Integrated Solutions Business Models Work in Construction? *Building Research & Information*, **33**, 571-579. <https://doi.org/10.1080/09613210500285064>
- [2] Shelton, J., Martek, I. and Chen, C. (2016) Implementation of Innovative Technologies in Small-Scale Construction Firms. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **23**, 177-191. <https://doi.org/10.1108/ecam-01-2015-0006>
- [3] Liu, L., Han, C. and Xu, W. (2015) Evolutionary Analysis of the Collaboration Networks within National Quality Award Projects of China. *International Journal of Project Management*, **33**, 599-609. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2014.11.003>
- [4] Miozzo, M. and Dewick, P. (2002) Building Competitive Advantage: Innovation and Corporate Governance in European Construction. *Research Policy*, **31**, 989-1008. [https://doi.org/10.1016/s0048-7333\(01\)00173-1](https://doi.org/10.1016/s0048-7333(01)00173-1)
- [5] Xue, J., Shen, G.Q., Yang, R.J., Zafar, I., Ekanayake, E.M.A.C., Lin, X., et al. (2020) Influence of Formal and Informal Stakeholder Relationship on Megaproject Performance: A Case of China. *Engineering, Construction and Architectural Management*, **27**, 1505-1531. <https://doi.org/10.1108/ecam-07-2019-0353>
- [6] Bartsch, V., Ebers, M. and Maurer, I. (2013) Learning in Project-Based Organizations: The Role of Project Teams' Social Capital for Overcoming Barriers to Learning. *International Journal of Project Management*, **31**, 239-251. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.06.009>
- [7] Snijders, T.A.B., van de Bunt, G.G. and Steglich, C.E.G. (2010) Introduction to Stochastic Actor-Based Models for Network Dynamics. *Social Networks*, **32**, 44-60. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2009.02.004>
- [8] Borgatti, S.P., Everett, M.G., and Freeman, L.C. (2002) Ucinet 6 for Windows: Software for Social Network Analysis. Analytic Technologies.
- [9] Burt, R.S., Jannotta, J.E. and Mahoney, J.T. (1998) Personality Correlates of Structural Holes. *Social Networks*, **20**, 63-87. [https://doi.org/10.1016/s0378-8733\(97\)00005-1](https://doi.org/10.1016/s0378-8733(97)00005-1)
- [10] Merton, R.K. (1968) The Matthew Effect in Science. *Science*, **159**, 56-63. <https://doi.org/10.1126/science.159.3810.56>
- [11] Price, D.D.S. (1976) A General Theory of Bibliometric and Other Cumulative Advantage Processes. *Journal of the American Society for Information Science*, **27**, 292-306. <https://doi.org/10.1002/asi.4630270505>
- [12] Cao, D., Li, H., Wang, G., Luo, X., Yang, X. and Tan, D. (2017) Dynamics of Project-Based Collaborative Networks for BIM Implementation: Analysis Based on Stochastic Actor-Oriented Models. *Journal of Management in Engineering*, **33**, Article 04016055. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000503](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000503)
- [13] Li, X., Li, H., Cao, D., Tang, Y., Luo, X. and Wang, G. (2019) Modeling Dynamics of Project-Based Collaborative

- Networks for BIM Implementation in the Construction Industry: Empirical Study in Hong Kong. *Journal of Construction Engineering and Management*, **145**, Article 05019013. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001726](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001726)
- [14] Gann, D.M. and Salter, A.J. (2000) Innovation in Project-Based, Service-Enhanced Firms: The Construction of Complex Products and Systems. *Research Policy*, **29**, 955-972. [https://doi.org/10.1016/s0048-7333\(00\)00114-1](https://doi.org/10.1016/s0048-7333(00)00114-1)
 - [15] McPherson, M., Smith-Lovin, L. and Cook, J.M. (2001) Birds of a Feather: Homophily in Social Networks. *Annual Review of Sociology*, **27**, 415-444. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.27.1.415>
 - [16] Lewis, K., Gonzalez, M. and Kaufman, J. (2011) Social Selection and Peer Influence in an Online Social Network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **109**, 68-72. <https://doi.org/10.1073/pnas.1109739109>
 - [17] Tang, Y., Wang, G., Li, H. and Cao, D. (2018) Dynamics of Collaborative Networks between Contractors and Subcontractors in the Construction Industry: Evidence from National Quality Award Projects in China. *Journal of Construction Engineering and Management*, **144**, Article No. 05018009. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001555](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001555)
 - [18] Xu, T., Tiong, R.L., Chew, D.A. and Smith, N.J. (2005) Development Model for Competitive Construction Industry in the People's Republic of China. *Journal of Construction Engineering and Management*, **131**, 844-853. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2005\)131:7\(844\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2005)131:7(844))
 - [19] Balland, P. (2012) Proximity and the Evolution of Collaboration Networks: Evidence from Research and Development Projects within the Global Navigation Satellite System (GNSS) Industry. *Regional Studies*, **46**, 741-756. <https://doi.org/10.1080/00343404.2010.529121>
 - [20] Broekel, T., Balland, P., Burger, M. and van Oort, F. (2014) Modeling Knowledge Networks in Economic Geography: A Discussion of Four Methods. *The Annals of Regional Science*, **53**, 423-452. <https://doi.org/10.1007/s00168-014-0616-2>
 - [21] Ripley, R., Snijders, T.A.B., Boda, Z., Vörös, A. and Preciado, P. (2016) Manual for R Siena, Dept. of Statistics. University of Oxford.
 - [22] Park, H., Han, S.H., Rojas, E.M., Son, J. and Jung, W. (2011) Social Network Analysis of Collaborative Ventures for Overseas Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, **137**, 344-355. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000301](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000301)
 - [23] 李永奎, 崇丹, 何清华, 郭英. 建筑企业社会网络关系及对市场竞争力的影响: 基于项目合作视角[J]. 运筹与管理, 2013, 22(1): 237-243.
 - [24] 李永奎, 刘祥彪, 常诚, 韩一龙. 工程建设领域重大科技创新主体及创新合作网络——基于 2000-2016 年国家科技进步奖的研究[J]. 中国勘察设计, 2017(8): 60-65.
 - [25] Lee, Y., Kim, J. and Lee, T.S. (2016) Topological Competiveness Based on Social Relationships in the Korean Construction-Management Industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, **142**, Article 05016014. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001175](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001175)
 - [26] West, J. (2014) Collaborative Patterns and Power Imbalance in Strategic Alliance Networks. *Journal of Construction Engineering and Management*, **140**, Article 04014010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0000846](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000846)