

制造业企业协同创新的网络结构、演化特征与影响因素

金婷婷, 巩文倩

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年4月19日; 录用日期: 2024年6月23日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

制造业高质量发展是我国经济高质量发展的重要内容, 协同创新网络是制造业企业创新的重要模式。采用2007~2020年制造业企业联合申请专利数据, 运用社会网络分析方法与指数随机图模型探究制造业企业协同创新的网络结构、演化特征与影响因素。其研究表明: 创新主体的网络规模以及合作趋势逐阶段增强, 但网络结构整体仍然比较松散, 绝大多数创新主体的协同能力不高; 制造业企业协同创新网络的演化受内外生因素的影响, 从内生网络结构来看, 星型结构的即期效应和闭合三角结构的演化效应对协同创新网络的影响程度均较大; 从外生节点属性来看, 协同创新网络的演化生长和网络规模不受马太效应影响, 城市同质性正向影响协同网络的演化, 组织同质性随时间演进对协同创新网络的形成起到抑制性作用。据此提出以下三点政策建议: 一是强化企业创新主体, 实现创新要素集聚; 二是避免马太效应加剧分化, 带动中小科技企业的创新发展; 三是推动产学研深度融合, 建立完备的创新生态系统体系。

关键词

制造业企业, 协同创新网络, 演化特征, 指数随机图模型, 影响因素

Network Structure, Evolution Characteristics and Influencing Factors of Collaborative Innovation in Manufacturing Enterprises

Tingting Jin, Wenqian Gong

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 19th, 2024; accepted: Jun. 23rd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

文章引用: 金婷婷, 巩文倩. 制造业企业协同创新的网络结构、演化特征与影响因素[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(3): 1269-1282. DOI: 10.12677/orf.2024.143356

Abstract

The high-quality development of manufacturing industry is an important content of the high-quality development of China's economy, and the collaborative innovation network is an important mode of manufacturing enterprise innovation. Based on the joint patent application data of manufacturing enterprises from 2007 to 2020, the social network analysis method and exponential random graph model are used to explore the network structure, evolution characteristics and influencing factors of collaborative innovation of manufacturing enterprises. The research results show that the network scale and cooperation trend of innovation subjects are enhanced step by step, but the overall network structure is still loose, and the collaborative ability of most innovation subjects is not high. The evolution of collaborative innovation network of manufacturing enterprises is affected by internal and external factors. From the perspective of endogenous network structure, both the immediate effect of star shaped structure and the evolutionary effect of closed triangle structure have a significant impact on the collaborative innovation network; From the perspective of exogenous node attributes, the evolutionary growth and network size of collaborative innovation networks are not affected by the Matthew effect, urban homogeneity positively affects the evolution of collaborative networks, and organizational homogeneity plays an inhibitory role in the formation of collaborative innovation networks over time. Accordingly, the following three policy suggestions are put forward: first, strengthen the main body of enterprise innovation and realize the agglomeration of innovation factors; The second is to avoid the Matthew effect aggravating the differentiation and promote the innovation and development of small and medium-sized science and technology enterprises; Third, we will promote the deep integration of industries, universities and research institutes and establish a complete innovation ecosystem.

Keywords

Manufacturing Enterprises, Collaborative Innovation Network, Evolutionary Characteristics, Exponential Random Graph Model, Influencing Factors

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

党的二十大报告明确提出“坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国”。《中国制造 2025》提出创新驱动是打造制造强国的基本方针。创新驱动发展要更加注重协同，优化创新协作体系有助于形成技术突破的新动力。协同创新是通过有效汇聚创新资源，突破创新主体间的壁垒，实现人才、资本、信息、技术等创新要素深度合作。制造业协同创新是以制造业企业为核心，企业、政府、知识生产机构和中介机构等行业内外多元创新要素主体协同互动的网络创新模式，通过知识创造主体和技术创新主体间的深入合作和资源整合，产生系统叠加的非线性效用[1]，有利于提高自主创新能力，实现新产品的价值。作为协同创新的“领头羊”制造业企业，需要具备整合和协同创新网络，引领其他参与主体进行技术合作的能力。

协同创新网络的相关概念是创新系统、创新生态，强调不同主体间的关联互动和科技资源的开放流动[2]。当前关于制造业创新协同网络的研究围绕国家、区域、城市三个方面，结合装备制造业、医药制

制造业、通信设备制造业等行业, 对网络结构特征、时空演化、影响因素等方面展开研究。在网络结构特征方面, 使用社会网络分析法计算制造业创新网络中的中心度[3]、结构洞[4]、网络密度、聚类系数[5]、合作强度[6]等指标, 刻画创新网络的结构特征及演化趋势, 当前研究发现制造业创新网络整体结构较松散[7], 呈现核心-边缘结构[7], 网络中心度和结构洞均会对企业创新绩效产生正向影响[8], 合作强度对企业创新绩效的影响呈现出倒 U 型特征[6]。在时空演化方面, 主要基于时间阶段演进及空间结构变动研究协同创新网络整体发展特征及趋势, 使用社会网络分析法、ArcGIS 空间分析法等, 演化特征主要表现在空间分异特征[7]、先集聚后分散特征[9]、等级辐射特征[5]、无标度特征[10]。在网络影响因素方面, 创新资源、创新机会、创新愿望、创新压力、关系强度、网络规模、网络范围等会影响创新网络的结构演化, 但是对于不同空间尺度的创新网络影响程度各异, 地理邻近、社会邻近、认知邻近、行政邻近和知识规模邻近[7]等正向促进网络的形成及演化。

国内外学者对创新网络演化的研究大多是探索某一行业或某一区域中多种创新主体之间的合作关系, 缺乏从具体企业角度考虑其协同创新网络, 且往往以网络中的统计指标描述网络特征及演化趋势, 或者使用传统回归探讨节点变量对创新网络的作用, 并没有详细阐述制造业创新网络的前因变量。文章从制造业企业研发创新合作角度, 以 2007~2020 年制造业企业与外部创新主体联合申请专利为切入点, 探究制造业企业协同创新网络在演化生长过程中的结构特征与影响因素, 为优化制造业创新协作体系提供政策依据。

2. 理论基础与研究假设

2.1. 制造业协同创新的内生网络结构特征

协同创新的内生网络结构类型主要表现为交互三角、2 星、中介 2-路径、星型等[11], 这些结构具有传递性[12]、互惠性、中介性[11]、扩张性[13]等特征。制造业企业协同创新合作的多元性, 使其网络结构更为复杂, 表现为复杂的多主体结构, 典型如星型结构和闭合三角结构, 这两类协同创新网络结构分别表现为扩张性的即期效应和传递性的演化效应。

1) 内生网络结构的即期效应

基于核心-边缘理论, 核心节点在整个关系网络中依靠自身资金实力、专业人才、高端技术等创新资源优势, 吸引更多新节点的加入, 而边缘节点由于资源匮乏, 受网络资源限制[14]。创新网络的连接在发展各阶段都呈现明显的核心-边缘范式, 具有即期效应。这种即期效应表现为每个阶段都呈现出扩张性特征。在制造业企业中, 扩张性特征的典型形态为星型结构。制造业企业在进行研发创新时, 往往会选择与多个创新主体建立合作关系的开放式创新, 路径依赖机制进一步强化核心节点的网络地位[14], 时间演进网络规模大大增加, 新节点倾向于与连接度更高的核心节点连接, 呈现核心-边缘特征的星型结构, 这种星型结构在网络演进中影响整体网络的规模和节点密度[15], 是网络演化过程中重要的结构性因素[16]。

2) 内生网络结构的演化效应

制造业企业创新存在稳态向新的阶段性发展的演化效应。这种协同创新网络的演化效应具有传递性特征, 表现为资源交互和协同偏好。资源交互是指在网络规模逐渐扩大的过程中, 随着越来越多创新主体的加入所形成的冗余路径, 有利于创新资源的交互效率[13]。协同偏好是指新进入主体为降低知识流动成本和提高要素流动效率, 会优先选择与已经建立关系的节点继续合作[17], 从而形成的创新主体之间稳定的合作关系。在资源交互和协同偏好共同作用机制下, 演化效应的传递性特征呈现闭合三角结构, 表现在协同创新网络是两个节点有一个共同邻居时的连接趋势[18], 这成为推动协同创新网络演化的驱动力[19]。

基于以上分析, 提出研究假设 H1 和 H2:

H1: 制造业企业协同创新网络具有即期效应, 呈现星型结构的扩张性特征。

H2: 制造业企业协同创新网络具有演化效应, 呈现闭合三角结构的传递性特征。

2.2. 制造业协同创新的外生节点属性特征

除了网络内部结构机制会影响到整体网络的演化, 网络的生成还受到节点自身属性因素的影响, 相互连接的节点之间存在驱使其进行合作的交互项, 不同属性特征对协同创新网络的结构影响不同, 主要分为两类, 即马太效应和同质效应[13]。

1) 外生节点属性的马太效应

基于 Barabási 和 Albert 提出的择优依附机制, 马太效应在社会网络中表现为优先连接性, 即具有更高连接度的节点能以更高的速率吸引新的连接, 是协同创新网络形成的主要动力学机制[17]。制造业企业协同创新存在“强者愈强, 弱者愈弱”的马太效应。制造业企业协同创新网络中部分创新主体由于自身的资源优势、位置优势等能够吸引更多的合作机会, 随着整体网络的演化, 这些创新主体的优势会更加凸显, 在网络中的连接程度更高。这种马太效应在制造业企业主要表现为研发能力和结构洞属性两个方面。一是研发能力的选择优势。根据技术竞争理论, 研发能力强的创新主体在合作研发时拥有更多的选择优势[20], 当面临着信息不对称时, 研发能力是衡量一个创新主体是否适合建立合作关系的关键要素, 反映了创新主体的知识吸收及资源整合能力[21], 研发能力较强的主体更容易吸收外部知识, 丰富的知识有助于与其他节点形成连接关系[22]。二是结构洞属性的信息优势。依据罗纳德·伯特的结构洞理论, 由于两个行动者之间的非冗余关系, 行动者通过占据结构洞的中心位置而更具有资源优势, 对其他节点之间的资源流动起到控制作用, 从而提升网络连接效率[23]。创新主体在网络中占据的结构洞越多, 掌握的信息就越多, 就越容易与其他主体建立合作关系。基于以上分析, 提出研究假设 H3:

H3: 制造业企业协同创新网络呈现马太效应, 通过研发能力和结构洞属性正向影响协同创新网络演化。

2) 外生节点属性的同质效应

制造业企业协同创新存在“物以类聚, 人以群分”的网络同质性特征, 即具有相同属性特征的创新主体更容易建立合作关系[24]。网络同质性的影响机制包括以下三个方面: 一是可及性机制。隶属于同一类型的创新主体之间更容易搭建协同创新桥梁, 企业之间的交易规则及技术诉求匹配度更趋于一致, 彼此之间的知识交流更加便捷, 有效降低研发过程中的试错成本, 因此, 企业更倾向于与其子公司、分公司合作研发[19], 但这种依赖偏好的合作关系也降低了技术在不同组织之间的流通性。二是同质相吸机制。不同等级城市对于创新主体的规则约束、技术诉求不同, 合作研发过程中难免遇到制约因素, 相反同等级的创新主体对于研发奖惩制度、信任程度、协同创新效率更容易达成一致, 建立合作关系[25]。三是网络平衡机制。创新节点间具有较强的依赖性, 存在“朋友的朋友也是朋友”的网络同质特征。比如, 当节点 A 与节点 B 存在合作链条, 且节点 A 与节点 C 也存在合作链条, 节点 B 与节点 C 有较大概率延伸合作链条, 构建包含节点 A、B 与 C 的三元闭包机制[26]。在可及性、同质相吸和网络平衡三个机制的交互作用下, 制造业企业协同创新网络表现为创新主体的城市同质性和组织同质性两个典型特征。基于以上论述, 提出研究假设 H4。

H4: 制造业企业协同创新呈现同质效应, 通过城市同质性和组织同质性正向影响协同创新网络演化(见图 1)。

3. 研究设计

3.1. 数据来源

专利是创新主体之间进行技术创新最直接的成果产出和形式, 选取专利数据衡量制造业企业同高等院校、科研院所及其他企业的协同创新, 通过创新主体联合申请专利作为关系数据搭建协同创新网络。

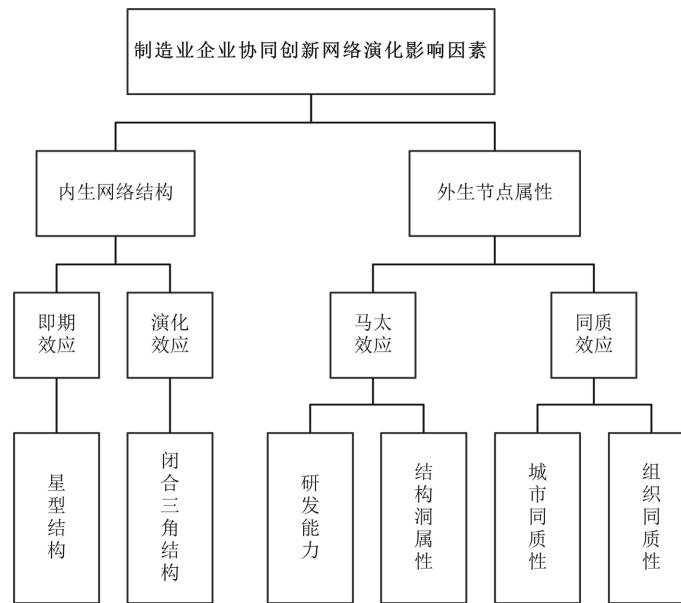


Figure 1. Factors influencing the evolution of collaborative innovation network of manufacturing enterprises

图 1. 制造业企业协同创新网络演化影响因素

区别于当前已有的研究主要围绕某一行业或者某一区域的专利,去探究其创新主体之间的合作情况,本文主要聚焦于我国 A 股制造业上市公司专利。选择国泰安数据库(CSMAR)的上市公司研发创新数据,根据证监会 2012 版行业分类选择制造业行业中 A 股上市公司申请的专利,检索出来 2007~2020 年的专利共计 107,139 条,并进一步剔除专利法律状态为授权失效、专利申请主体为个人以及仅包含一个专利申请单位的专利数据,同时对专利权人中的同一组织名称的不同写法进行统一规范,最终得到有效合作专利数据 4783 条,包含创新主体 1155 个,合作边数 6422 条。

3.2. 模型设计及变量选取

指数随机图模型(Exponential Random Graph Model, 简称 ERGM)依据关系数据研究网络关系的形成及影响机制,这一方法的重要特征是,认为网络的形成取决于外生变量和内生过程,前者是指网络成员的属性特征,后者是网络结构关系。与传统的回归模型相比,指数随机图模型能够整合网络的内生结构和外生变量来分析网络的形成[18]。ERGM 的一般形式为: $P(Y=y) = \frac{1}{c} \exp\left\{\sum_{i=1}^n \theta_i z_i(y)\right\}$, 其中 c 是常数, $\frac{1}{c}$ 则是为了保证网络形成的概率能够始终在 0 到 1 的范围内,并确保所有可能的网络概率之和为 1, i 表示网络统计量的个数, n 代表总数量。 $z_i(y)$ 表示网络统计量, θ 则表示相应统计量所对应的参数。

制造业企业协同创新受到诸多因素综合作用,除了企业规模、创新投入强度[27]等自身因素外,还受到合作广度、互惠关系、联盟关系等外部因素制约。采用指数随机图模型可以更好地刻画制造业企业协同创新网络形成机理,从内生网络结构与外生节点属性两个方面研究协同创新网络演化影响因素。为检验所纳入的内外生因素对网络形成的影响程度,将所设各个解释变量分别纳入 ERGM 的一般形式中,得到以下四个模型:

1) 零模型。零模型是 ERGM 中最简单的模型,仅由边(Edges)这一个统计项构成,其构建为后期加入其他统计项后的复杂模型提供了拟合优度评价的基准。

$$P(Y = y) = \left(\frac{1}{c}\right) \exp[\theta_1(Edges)] \tag{1}$$

2) 依赖性模型。依赖性模型在零模型的基础上加入了 GWD、GWESP 这两个网络结构统计项, 解释协同创新网络中各创新主体之间存在复杂的依赖关系, 探究内生网络结构特征对网络的形成所造成的影响。

$$P(Y = y) = \left(\frac{1}{c}\right) \exp[\theta_1(Edges) + \theta_2(GWD) + \theta_3(GWESP)] \tag{2}$$

3) 主效应模型。为了检验各网络成员的属性特征对协同创新网络构建的影响, 在零模型的基础上, 加入外生节点属性因素, 构成主效应模型。

$$P(Y = y) = \frac{1}{c} \exp\{\theta_1(Edges) + \theta_2[\text{nodecov}("R\&D\ ability")] + \theta_3[\text{nodecov}("Structural\ holes")] + \theta_4[\text{nodematch}("City")] + \theta_5[\text{nodematch}("Organization", \text{diff} = T)]\} \tag{3}$$

4) 综合模型。将以上内生网络结构以及外生节点属性变量共同纳入构建综合模型。探究所设定的所有统计量对协同创新网络形成的影响, 并对前三种模型进行对比。此模型需要使用马尔科夫链蒙特卡洛最大似然估计法(MCMCMLE)进行实现, 运算量较大。

$$P(Y = y) = \frac{1}{c} \exp\{\theta_1(Edges) + \theta_2(GWD) + \theta_3(GWESP) + \theta_4[\text{nodecov}("R\&D\ ability")] + \theta_5[\text{nodecov}("Structural\ holes")] + \theta_6[\text{nodematch}("City")] + \theta_7[\text{nodematch}("Orgnization", \text{diff} = T)]\} \tag{4}$$

采用 ERGM 探讨影响制造业企业协同创新网络演化的因素, 被解释变量为协同创新网络的形成概率, 解释变量分为两个方面, 即内生网络结构变量与外生节点属性变量。

1) 内生网络结构变量。分别采用几何加权度(GWD)、几何加权边共享伙伴(GWESP)两个统计项, 研究协同创新网络的扩张性的即期效应与传递性的演化效应。

2) 外生节点属性变量。分别从研发能力和结构洞属性检验协同创新的马太效应。研发能力用创新主体在样本期间所申请专利的总数量来衡量; 结构洞用网络约束系数来衡量。分别从城市同质性和组织同质性网络同质性两个方面分析网络同质效应。城市同质性根据创新主体所在城市进行划分, 将其划分为两类, 一类是直辖市与各省省会城市, 另一类是各省其他地级市, 若创新主体在同一等级城市, 则它们之间存在城市同质性[28]; 组织同质性分析是将创新主体划分为企业、高等院校和科研院所三类, 属于同一类型的创新主体, 具有组织同质性。

主要变量及其描述性说明见表 1 所列。

Table 1. The main variables and their descriptive descriptions
表 1. 主要变量及其描述性说明

	变量名称	变量符号	描述
内生网络结构	边	Edges	网络中的两个节点有合作关系就会相互连接形成一条边
	几何加权度	GWD	网络合作关系是否倾向于形成星型结构
	几何加权边共享伙伴	GWESP	网络合作关系中是否倾向于形成闭合三角结构

续表

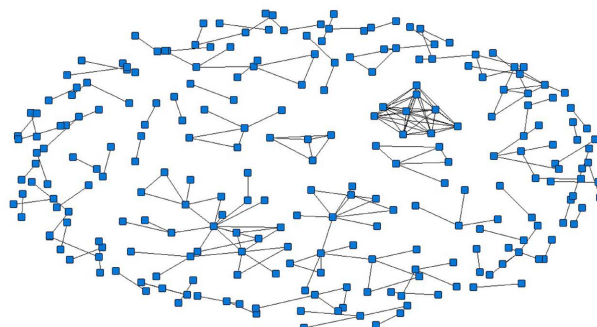
	研发能力	R&D ability	每个节点在网络中所连接的总数量
外生节点	结构洞	Structural holes	节点的网络约束系数越高网络的闭合性就越高
属性	城市同质性	City	两个节点所属城市是否为同一等级
	组织同质性	Organization	两个节点是否属于同一组织

4. 制造业企业协同创新的网络结构分析

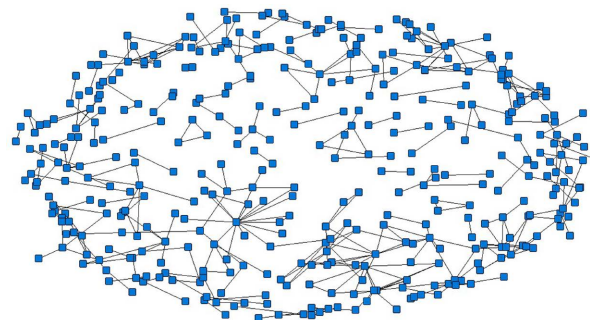
以十二五规划和十三五规划为时间节点, 将制造业企业协同创新网络划分为三个阶段, 即 2007~2010 年(第一阶段)、2011~2015 年(第二阶段)、2016~2020 年(第三阶段), 从整体网络以及核心节点两个角度分析协同创新的网络结构及其演化特征。

4.1. 协同创新网络结构分析

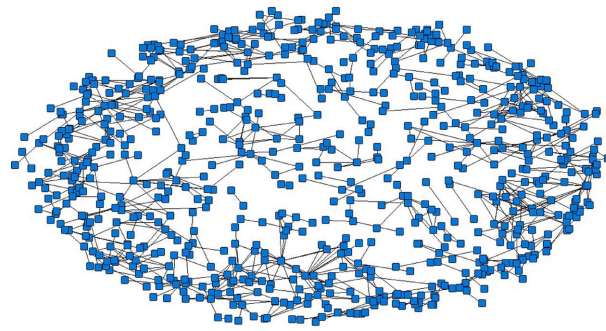
以参与专利申请的各创新主体为节点, 合作关系为边, 构建我国 2007~2020 年制造业企业协同创新无向网络, 见图 2 所示。各创新主体的规模均呈现增长趋势, 第一阶段整体网络较稀疏, 大多数主体倾向于与少数主体合作, 并且合作趋势多发生在各制造业企业之间的组织同质性, 缺乏跨越组织的合作创新。部分核心节点虽然合作节点较多, 只是形成局部小团体, 并未形成跨越组织的较大范围合作网络。但随着时间演进, 在第二阶段及第三阶段中, 各主体之间协同创新网络的节点数和边数大大增加, 网络规模不断扩大, 第三阶段中高等院校、科研院所等节点数是第一阶段的 3 倍多, 制造业企业逐渐增加与高等院校、科研院所这些组织外创新主体的信息交流及资源往来, 合作主体呈现多元化趋势。从协同创新网络演化生长全流程看, 企业组织内部合作仍然是各阶段专利申请的主导形式, 因此, 制造业企业与外部创新主体之间的研发合作仍需进一步加强。



(a) 第一阶段(2007~2010 年)



(b) 第二阶段(2011~2015 年)



(c) 第三阶段(2016~2020 年)

Figure 2. Evolution and growth process of collaborative innovation network of manufacturing enterprises
图 2. 制造业企业协同创新网络演化生长过程

制造业企业协同创新网络演化结构特征见表 2 所列, 随着网络规模快速增大, 各创新主体之间的合作次数由初始的 739 上升至第三阶段的 3453, 扩大了近 5 倍, 彼此之间的合作趋势不断增强; 但网络密度却呈现出先升后降的倒 U 型演化特征, 网络结构趋于松散, 这是由于第三阶段网络规模大大增加, 创新主体间的规模增速大于合作关系增速, 稀释了前期建立的协同关系, 多数主体之间还未形成稳固的合作关系。以第三阶段为例, 网络最大度数是 563, 即网络中主体最高合作专利数量达到了 563 个, 但整体平均度数仅有 9 个, 只有个别创新主体的创新意识较强, 绝大多数创新主体的协同能力仍然不高; 聚类系数用于描述网络节点的聚集程度, 协同创新网络的聚类系数呈现下降的趋势, 相邻创新主体之间建立合作关系仍存在困难; 三个阶段的网络平均路径长度值均较小, 节点在网络中与其他节点往来频次仍较低, 说明创新主体更倾向于与有合作基础的组织进行合作。Valverde 等人认为若观测网络具有大于 0.1 的聚类系数与小于 10 的平均路径长度, 则就具有小世界网络特性, 表 2 中各阶段的聚类系数和平均路径长度值均满足这种情况, 说明制造业企业协同创新网络呈现出小世界网络特性, 创新主体之间的合作交流日趋便捷, 但从具体数值看网络中信息传递的效率有待提升。

Table 2. Evolution structure of collaborative innovation network of manufacturing enterprises
表 2. 制造业企业协同创新网络演化结构特征

网络指标	第一阶段	第二阶段	第三阶段
网络规模	245	398	748
合作边数	739	2230	3453
网络密度	0.0247	0.0282	0.0124
网络最大度数	56	162	563
平均度数	6	11	9
聚类系数	0.6499	0.3565	0.4220
平均路径长度	2.1844	2.6220	2.3362

4.2. 协同创新网络核心节点分析

节点的中心度能够反映创新主体在网络中的重要程度, 选取点度中心度及中间中心度两个指标衡量协同创新网络排名前十的核心节点特征。

从点度中心度来看，排名越靠前，代表创新主体的专利申请次数越多，研发能力越强。协同创新网络演化三阶段的专利合作点度中心度排名前 10 的创新主体见表 3 所列，制造业企业同其他创新主体联合申请专利时，各阶段中研发实力居首的是制造业企业，随着创新活动的持续推进，第三阶段点度中心度的数值相较于第一阶段显著增长，创新主体间的合作联系日益密集，制造业企业由内部自主创新逐步过渡到内外部协同研发的新模式，尤其以深圳创维数字技术有限公司、深圳创维软件有限公司等为主的制造业企业点度中心度居于首位，其研发能力及协同意识相对超前。但从这些核心节点的合作对象来看，同一地域的创新主体间更容易建立合作关系，企业与邻近企业或者其子公司、分公司交流往来更加频繁，缺乏高等院校、科研院所这些技术产出优胜主体的产学研协同。

从中间中心度来看，若创新主体在相应阶段的协同创新网络中的中介调节效应较强，就能够在一定程度上控制信息的传递而对群体造成影响。演化三阶段中专利合作中间中心度排名前 10 的创新主体见表 4 所列，随着交流合作往来日趋频繁，第三阶段的中间中心度较前两个阶段有所提升，浙江大学、清华大学、上海交通大学等重点高校在各阶段中具有重要地位，其他主体在合作申请专利时彼此连接的最小距离经过这些点，其控制能力能够影响到整体网络的形成。在国家大力发展高新技术产业的背景之下，作为国家级高新技术企业的深圳市科陆电子科技股份有限公司在第三阶段跃居首位，利用其在网络中的位置优势得到丰富的信息资源，从而大力实施科技创新和产业转型。纵观制造业协同创新网络演化生长过程，制造业企业占据大多数，承担协同创新“领头羊”的角色，但创新网络“链长”延伸度不够，且多是同类企业的组织内合作，组织外合作不够，这一定程度限制了协同创新网络规模。

Table 3. The three stages of evolution ranked the top 10 innovation subjects in the point degree center

表 3. 演化三阶段的点度中心度排名前 10 的创新主体

第一阶段		第二阶段		第三阶段	
主体	点度中心度	主体	点度中心度	主体	点度中心度
福建三钢闽光股份有限公司	56	深圳市汇川技术股份有限公司	162	深圳创维数字技术有限公司	563
福建省三钢(集团)有限责任公司	52	东莞劲胜精密组件股份有限公司	161	深圳市创维软件有限公司	550
国光电器股份有限公司	39	杭州南都电池有限公司	154	东莞劲胜精密组件股份有限公司	150
广州市国光电子科技有限公司	36	杭州南都能源科技有限公司	154	江苏和成显示科技有限公司	129
清华大学	32	浙江南都电源动力股份有限公司	154	上海安诺其集团股份有限公司	121
杭州南都电池有限公司	30	聚光科技(杭州)股份有限公司	123	达兴材料股份有限公司	120
杭州南都能源科技有限公司	30	苏州汇川技术有限公司	123	江苏安诺其化工有限公司	120
深圳市汇川技术股份有限公司	30	苏州默纳克控制技术股份有限公司	114	上海安诺其数码科技有限公司	120
浙江南都电源动力股份有限公司	30	北京三聚环保新材料股份有限公司	106	烟台安诺其精细化工有限公司	114
苏州默纳克控制技术股份有限公司	29	江苏太平洋精锻科技股份有限公司	103	东营安诺其纺织材料有限公司	108

Table 4. The intermediate centrality of the three stages of evolution ranks the top 10 innovation subjects
表 4. 演化三阶段的中间中心度排名前 10 的创新主体

第一阶段		第二阶段		第三阶段	
主体	中间中心度	主体	中间中心度	主体	中间中心度
浙江大学	202	北京三聚环保新材料有限公司	314	深圳市科陆电子科技股份有限公司	491.046
浙江京新药业股份有限公司	113	浙江大学	253	国家电网公司	404.988
清华大学	85	浙江京新药业股份有限公司	220	浙江工业大学	265
北京三聚环保新材料有限公司	82	上海交通大学	179	浙江医药股份有限公司新昌制药厂	222
杭州锅炉集团股份有限公司	62	江苏太平洋精锻科技股份有限公司	158	武汉中元华电科技股份有限公司	149.435
上海医药工业研究院	43	浙江东南网架股份有限公司	135	上海交通大学	126
浙江康恩贝制药股份有限公司	43	中国科学院上海有机化学研究所	115	南方电网科学研究院有限责任公司	113.905
国光电器股份有限公司	41	华中科技大学	100	浙江新农化工股份有限公司	110
浙江银轮机械股份有限公司	22	联化科技股份有限公司	96.5	浙江大学	98
深圳市汇川技术股份有限公司	7	清华大学	77	江阴市宝利沥青新材料有限公司	88

5. 制造业企业协同创新的演化特征与影响因素分析

使用 R 语言的 Statnet 包对模型的参数进行估计，分析制造业协同创新的演化特征与影响因素，四个模型拟合结果见表 5 所列。变量系数为正代表该变量更有利于专利合作网络的构建，系数若为负表示该变量对于整体网络中合作关系的形成具有抑制效果。以赤池信息准则(AIC)和贝叶斯信息准则(BIC)评价模型拟合效果，AIC 与 BIC 的值越小，代表拟合的效果就越好。相较于零模型和主效应模型，依赖性模型与综合模型的拟合效果更好，内生网络结构对协同创新网络的形成影响较大。

1) 内生网络结构的即期效应检验。GWD 的系数在协同创新网络各个演化阶段均显著为正，创新主体通过与其他主体联合申请专利时倾向于形成扩张性特征的星型结构，假设 H1 成立，这一结构对网络形成的贡献在三个阶段分别为 98.4%($\exp(4.14)/[1 + \exp(4.14)] = 0.984$)、99.1%($\exp(4.69)/[1 + \exp(4.69)] = 0.991$)、98.6%($\exp(4.27)/[1 + \exp(4.27)] = 0.986$)，对网络整体联结的即期效应较大，星型结构影响协同创新网络的规模和节点密度，进而影响网络演化结构，使网络呈现以这些核心节点为中心的“核心 - 边缘”特征。

2) 内生网络结构的演化效应检验。GWESP 系数显著为正，且呈现出逐阶段递增的趋势，GWESP 对协同创新网络的贡献由初始的 91.8%($\exp(2.41)/[1 + \exp(2.41)] = 0.918$)增加到 94.7%($\exp(2.88)/[1 + \exp(2.88)] = 0.947$)，这说明随着制造业企业协同创新的深入，与其他创新主体间信息交流的频次、联盟

关系的稳定性得到提升, 具有闭合三角结构特征的演化效应, 即影响力在网络演化过程中逐渐增强, 假设 H2 成立。

3) 外生节点属性的马太效应检验。基于研发能力和结构洞的参数估计显示, 协同创新网络存在马太效应, 但只是影响协同创新初期的潜在合作伙伴的选择, 并不影响协同创新的网络演化生长和网络规模, 假设 H3 不成立, 具体分析如下: 一是基于研发能力的马太效应检验。研发能力在第一阶段对协同创新网络的形成产生正向影响, 表现为创新主体的研发能力对网络的构建是原来的 $1.02(\exp(0.02))$ 倍, 但这一指标在二、三阶段有下降的趋势, 说明一个节点的连接频次对于它与其他节点的连接并没有太大的影响, 即创新主体申请专利的多少并不会影响到该主体与其他主体的合作。这是由于创新主体初始阶段会因为组织研发能力强而与其联合申请专利, 但随着《关于深化科技体制改革加快国家创新体系建设的意见》等产学研扶持政策的落实, 制造业企业在进行协同创新时不会单单考虑到主体的研发能力, 组织间的知识转移能力、企业自身规模和吸收能力等也都会影响到合作关系的建立。二是基于结构洞属性的马太效应检验。结构洞属性指标在三个阶段均不显著, 这说明创新主体的结构洞属性不足以提升与其他主体建立新合作关系的概率, 并不存在“强者越强”的马太效应, 核心节点创新合作链条较短且延伸性差, 并未有效实现持续研发投入。

4) 外生节点属性的同质效应检验。基于城市同质性和组织同质性的网络同质性检验发现, 网络同质效应存在, 网络节点的集群特征受此两种因素的影响程度不同, 假设 H4 不成立。一是城市同质性检验。演化过程的三个阶段比较发现, 第一阶段城市同质性对网络的形成并无影响, 但在第二、三阶段的影响程度相较于第一阶段得到提升, 影响整体网络的演变趋势。这是由于随着信息技术逐渐发达, 彼此之间的交流更加便捷, 城市同质性的影响逐渐显现, 同一城市等级的创新主体由于创新资源、市场需求大致相当, 对于创新技术的诉求趋于一致, 更容易建立密切的合作关系。第三阶段创新主体对城市等级依赖性降低, 会根据其自身的资源缺口向各等级城市的主体协同创新。二是组织同质性检验。第一、二阶段系数并不显著, 第三阶段组织同质性显著为负, 对协同创新网络的形成起到抑制性作用, 即隶属于同一类型的组织不容易建立合作关系, 制造业企业不再局限于与同一类型组织合作, 逐渐加强与高等院校、科研院所这些外部创新主体联合申请专利, 一方面, 高等院校和科研院所能够以更加先进的技术扶持制造业企业的科技研发, 提升其生产效率, 促进科技成果的转化, 减少企业自主研发过程中的要素浪费; 另一方面, 高等院校和科研院所具备各个领域更加专业化的人才, 解决制造业企业在技术创新过程中遇到的难以解决的核心技术问题。

Table 5. Estimation results of ERGM parameters in three stages

表 5. 三个阶段 ERGM 参数估计结果

	变量	零模型	依赖性模型	主效应模型	综合模型
第一阶段	Edges	-4.90***	-7.17***	-5.31***	-7.76***
	GWD		3.98***		4.14***
	GWESP		2.39***		2.41***
	R&D ability			0.01**	0.02***
	Structural holes			0.05	0.05
	City			0.10	0.09
	Organization			0.13	0.19
	AIC	2601.50	2199.73	2601.57	2194.90
	BIC	2609.81	2224.65	2643.10	2253.04

续表

第二阶段	Edges	-5.41***	-7.87***	-5.20***	-7.23***
	GWD		4.67***		4.69***
	GWESP		2.61***		2.62***
	R&D ability			-0.00	-0.00
	Structural holes			-0.19	-0.40
	City			0.32**	0.30**
	Organization			0.01	0.00
	AIC	4493.96	3750.91	4491.63	3753.22
	BIC	4503.24	3778.74	4538.02	3818.16
	Edges	-6.00***	-8.37***	-6.23***	-8.65***
第三阶段	GWD		4.23***		4.27***
	GWESP		2.88***		2.88***
	R&D ability			0.00*	0.00**
	Structural holes			0.10	0.14
	City			0.23**	0.21**
	Organization			-0.15	-0.22*
	AIC	9689.30	8031.19	9680.67	8015.70
	BIC	9699.84	8062.81	9733.37	8089.48

*** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$ 。

6. 主要结论与政策建议

基于 2007~2020 年制造业上市公司的联合申请专利数据，分阶段构建协同创新网络，结合社会网络分析方法，量化分析各个阶段的整体网络结构及个体指标对协同创新网络特征的影响，并采用指数随机图模型研究网络演化过程中的影响因素。研究结论如下：

第一，从制造业企业协同创新网络结构来看，创新主体的网络规模及合作趋势逐阶段增强，协同创新网络呈现出小世界特性，但网络结构整体仍比较松散，绝大多数创新主体的协同能力不高；第二，从协同创新网络的内生网络结构检验结果看，星型结构和闭合三角结构影响制造业企业协同创新网络结构，星型结构对协同创新网络的即期效应较大，闭合三角结构具有演化效应，其影响力随着时间演化逐渐加强，合作关系的稳定性逐阶段提升；第三，从协同创新网络的马太效应检验结果发现，协同创新网络的马太效应存在，但对协同创新的网络演化生长和网络规模影响不大，创新主体申请专利的数量及其结构洞属性并不会影响到该主体与其他主体的合作；第四，协同创新网络的同质性检验结果表明，网络节点的集群特征受城市同质性和组织同质性的影响不同。城市同质性随时间演化其影响增强，创新主体的合作范围有所提升；组织同质性随时间演化影响降低，制造业企业不再局限于与同类型组织合作，将加强与高等院校、科研院所这些外部创新主体的合作。

根据以上研究结果，我国制造业企业近年协同趋势日益密集，尤其是对于前沿科技和先进技术要求更高的高技术制造业，更需要多方位借助外部创新主体的创新优势。但当前，创新主体的马太效应优势并不明显，部分中小企业也由于自身实力不足，与外部创新主体的合作有待提升。为进一步提升制造业企业的创新能力及效率，实现转型升级，本文提出以下政策建议：

1) 强化企业创新主体, 实现创新要素集聚。一是发挥内生网络结构星型和闭合三角的结构优势, 充分利用核心企业的资源优势及研发优势, 构建核心企业为领头羊的“产业链-创新链”, 形成产业链推动创新链的协同创新网络。二是降低核心企业经营成本、制定合理有效的创新政策, 协调各创新组织技术分工, 弥补市场创新短板, 存进更大规模更大范围的合作。三是加强企业内部管理体系和管理能力建设, 提升企业核心竞争力, 促进各创新要素向企业集聚。

2) 避免马太效应加剧分化, 带动中小科技企业的创新发展。中小科技企业由于自身融资能力、管理制度等层面受限, 大大减少了同其他创新主体的合作机会。一方面政府可通过颁布相应的财税激励政策, 降低制造业中小科技企业研发创新的成本, 鼓励其同外部创新主体协同创新, 吸纳外部创新主体更先进的技术; 另一方面, 制定相关法律法规, 明确规定达到一定规模的大型企业必须参与中小科技企业的创新研发, 以大型企业带动中小科技企业融入到创新链、供应链中, 推动中小科技企业的发展。

3) 推动产学研深度融合, 建立完备的创新生态系统体系。一是政府制定相关政策, 搭建制造业企业与高等院校、科研院所及其他大型企业的开放式创新平台, 缓解组织同质性趋势, 与外部创新主体建立长期稳定的合作关系, 从技术转移的角度提升制造业企业创新效率。二是降低城市同质性限制, 促进人才、技术、资金等创新资源的地域流通, 保证制造业企业技术创新中吸纳更多异质性资源, 平衡好协同创新与产业发展的关系。三是完善科研人员激励政策, 加强创新人才科研经费投入, 对科技成果突出者递延缴纳个人所得税, 提升科研人员创新积极性。

基金项目

国家社会科学基金青年项目“减税降费背景下我国企业并购税制的效果评价与优化设计研究”(20CGL005); 上海市 2021 年度“科技创新行动计划”软科学重点项目“促进创新要素向制造业集聚的财税政策: 激励机制与效应比较”(21692105500)。

参考文献

- [1] 陈劲, 阳银娟. 协同创新的理论基础与内涵[J]. 科学学研究, 2012, 30(2): 161-164.
- [2] 李哲, 蔡笑天, 杨晶. 强化国家战略科技力量需要立足新基础、构建新模式[J]. 科技中国, 2021(7): 9-13.
- [3] 何地, 白晰. 复杂网络视角下中国装备制造业创新网络研究[J]. 工业技术经济, 2018, 37(3): 12-19.
- [4] 陈伟, 张永超, 马一博, 等. 区域装备制造业产学研创新网络的实证研究——基于网络结构和网络聚类的视角[J]. 科学学研究, 2012, 30(4): 600-607.
- [5] 焦智博. 装备制造业协同创新网络结构演化与空间特征研究——黑龙江 1985-2017 年专利数据分析[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(21): 57-64.
- [6] Li, M., Zhang, M.J., Agyeman, F.O., et al. (2021) Research on the Influence of Industry-University-Research Cooperation Innovation Network Characteristics on Subject Innovation Performance. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, Article 4771113. <https://doi.org/10.1155/2021/4771113>
- [7] 吕国庆, 曾刚, 马双, 等. 产业集群创新网络的演化分析——以东营市石油装备制造业为例[J]. 科学学研究, 2014, 32(9): 1423-1430.
- [8] 赵炎, 郭霞婉. 结构洞度对联盟网络中企业创新绩效的影响研究——基于中国家用视听设备制造业企业联盟网络[J]. 科技进步与对策, 2012, 29(17): 76-81.
- [9] 周锐波, 李晓雯. 广东省制造业空间格局演化及其影响因素研究[J]. 人文地理, 2017, 32(2): 95-102.
- [10] 张瑜, 营利荣, 皮宗平, 等. 基于无标度网络的产学研合作网络模式[J]. 系统工程, 2013, 31(5): 54-59.
- [11] 王海花, 孙芹, 杜梅, 等. 长三角城市群协同创新网络演化及形成机制研究——依存型多层网络视角[J]. 科技进步与对策, 2020, 37(9): 69-78.
- [12] Faust, K. (2010) A Puzzle Concerning Triads in Social Networks: Graph Constraints and the Triad Census. *Social Networks*, 32, 221-233. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2010.03.004>

- [13] 段庆锋, 蒋保建. 基于 ERGM 模型的技术合作网络结构效应研究[J]. 现代情报, 2018, 38(8): 83-89.
- [14] 王传阳, 盛科荣, 张杰. 中国城市网络核心-边缘结构演化及影响因素研究——基于制造业企业网络视角[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 141-152.
- [15] 刘凤朝, 张娜, 孙玉涛, 等. 基于优先连接的纳米技术合作网络演化研究[J]. 管理评论, 2016, 28(2): 74-83.
- [16] 郭建杰, 谢富纪. 基于 ERGM 的协同创新网络形成影响因素实证研究[J]. 管理学报, 2021, 18(1): 91-98.
- [17] 高霞, 陈凯华. 合作创新网络结构演化特征的复杂网络分析[J]. 科研管理, 2015, 36(6): 28-36.
- [18] 罗泰晔, 马翠嫦. 基于指数随机图模型的协同创新网络形成机理研究[J]. 情报理论与实践, 2018, 41(10): 143-146, 72.
- [19] Liu, J., Chong, Z. and Lu, S. (2021) The Evolution and Determinants of Interorganizational Coinvention Networks in New Energy Vehicles: Evidence from Shenzhen, China. *Complexity*, **2021**, Article 6665945. <https://doi.org/10.1155/2021/6665945>
- [20] Peng, T.-Q. (2015) Assortative Mixing, Preferential Attachment, and Triadic Closure: A Longitudinal Study of Tie-Generative Mechanisms in Journal Citation Networks. *Journal of Informetrics*, **9**, 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2015.02.002>
- [21] 郑艳民, 张言彩. 创新环境对校企协同创新作用的实证分析[J]. 技术经济, 2014, 33(5): 46-49, 117.
- [22] Gao, J. and Yu, X. (2022) Factors Affecting the Evolution of Technical Cooperation among “Belt and Road Initiative” Countries Based on TERGMs and ERGMs. *Sustainability*, **14**, Article 1760. <https://doi.org/10.3390/su14031760>
- [23] 盛亚, 范栋梁. 结构洞分类理论及其在创新网络中的应用[J]. 科学学研究, 2009, 27(9): 1407-1411.
- [24] Capone, F. and Zampi, V. (2019) Proximity and Centrality in Inter-Organisational Collaborations for Innovation: A Study on an Aerospace Cluster in Italy. *Management Decision*, **58**, 239-254. <https://doi.org/10.1108/MD-01-2019-0086>
- [25] Godoy-Lorite, A. and Jones, N.S. (2021) Inference and Influence of Network Structure Using Snapshot Social Behavior without Network Data. *Science Advances*, **7**, eabb8762. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb8762>
- [26] 钮亮. 浙江省产学研合作网络形成机理——基于指数随机图模型的分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(4): 74-82.
- [27] 张杰, 刘志彪, 郑江淮. 中国制造业企业创新活动的关键影响因素研究——基于江苏省制造业企业问卷的分析[J]. 管理世界, 2007(6): 64-74.
- [28] 许培源, 吴贵华. 粤港澳大湾区知识创新网络的空间演化——兼论深圳科技创新中心地位[J]. 中国软科学, 2019(5): 68-79.