DOI 编码：10.3969/j.issn.1672-884x.2021.01.010

基于 ERGM 的协同创新网络形成影响因素实证研究

郭建杰[1] 谢富纪[2]
（1. 上海大学管理学院；2. 上海交通大学安泰经济与管理学院）

摘要：以电信产业申请并授权的合作专利为数据基础，从社会网络视角，构建企业、大学和研究院所间协同创新网络，并识别影响组织间协同创新网络形成的内生网络构型，以及外生节点属性两个维度的影响因素。基于指数随机图模型（ERGM），实证分析了这些因素对协同创新网络形成的影响程度。研究表明：协同创新网络是组织协同关系社会化特征的体现，其形成受内生因素和外生因素的共同作用；协同创新网络中，边结构表现出显著的稀疏效应，网络多涌现易于形成资源共享与交换的星型结构和三角结构；网络中组织的合作开放度和区域同配性，能够增加网络节点间的连接概率，而组织的协同创新能力与组织类型同配对网络中新合作关系的形成，并没有表现出显著的促进作用。

关键词：协同创新；ERGM；社会网络
中图法分类号：C93 **文献标志码**：A **文章编号**：1672-884X(2021)01-0091-08

An Empirical Study on the Determinants of Collaborative Innovation Network Formation: Based on the ERGM

GUO Jianjie[1] XIE Fuji[2]
(1. Shanghai University, Shanghai, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China)

Abstract: This paper uses the joint patent data of telecommunication industry to construct the collaborative innovation network among industry, university and research institute from the perspective of social network. And identifies the factors of the endogenous network configuration and the exogenous node attribute influencing the formation of collaborative network formed. Based on the Exponential Random Graph Model (ERGM), it analyzes the influence of endogenous and exogenous factors on the formation of collaborative innovation network. The results implicate that collaborative innovation network is the embodiment of collaborative relationship socialization, and its formation is influenced by the interaction of endogenous and exogenous factors. The edge structure of the network shows significant sparse effect. The network is easy to form the star structure and triangle structure for resource sharing and exchange. The cooperative openness and regional matching of the organization in the network can increase the connection probability between network nodes, while the collaborative innovation ability and organization type matching do not play a significant role in promoting the formation of new relations in the network.

Key words: collaborative innovation; ERGM; social network

1 研究背景

随着数字经济时代的到来，科技创新在创新驱动发展战略中的引领作用愈加凸显，为了强化这一引领作用，创新活动正逐步向网络化趋势发展，不仅要明确各类创新主体的功能定位，还应构建政产学研用一体的创新网络，在构建产业技术联盟的基础上，推动跨领域、跨行业

收稿日期：2020-02-27
基金项目：教育部哲学社会科学研究资助重大课题攻关项目（15JZD017）；国家自然科学基金资助项目（71373158）；教育部人文社会科学研究规划基金资助项目（19YJA630076）

的协同创新。近年来，各类科技园、创业园与孵化器等科研中介机构的不断涌现，为企业、大学与科研院所间资源共享、协同创新提供了多样化的发展平台，企业、大学和研究院所 3 类创新主体之间形成了知识、资源、技术共享的协同创新网络。协同创新网络是指企业、大学和科研院所间，为了共享彼此的知识、资源和技术等，在其创新过程中自发形成的规范的、正式的合作网络[1]。组织间进行资源交换与共享的协同创新网络，能够促进其实现“1＋1＞2”的协同效应[2]，减少组织在创新活动中承担的风险，降低研发和交易成本[3]，提高资源利用效率，协同创新网络相关研究逐渐成为研究的热点问题之一。但是，开放式创新背景下，协同创新网络具有融合性、复杂性以及不确定性等特征，是一个由多个性质不同的行为主体共同参与，多种创新要素交互协同的复杂系统。各主体在实现协同过程中，必然会受到节点个体特征、环境差异，以及网络联结自身结构特点等多种因素的影响，而无法达到协同效果。由此，对于协同创新网络，识别影响网络形成的关键因素，明确这些因素对协同创新网络的影响程度及内在影响机制，是推进协同效应的前提，对于协同创新网络的完善、组织创新目标的实现、创新效率的提高都具有重要的推进作用[4]。从理论背景来看，虽然既有研究多从影响组织创新的内、外部因素出发，实证探究协同创新网络对创新活动的影响机制[5]，却忽略了影响协同创新网络形成的前因变量。针对这一问题，少数学者虽然开展了协同创新网络形成动因的相关研究，但仍局限于运用传统统计方法，分析网络节点如何影响网络形成这一单一因素上[6]，少有研究考虑各因素的综合影响。此外，电信产业作为高技术领域的典型代表，其知识密集的特点使其涉及广泛的技术领域，同时需要高校与科研院所的知识支持，以及不同企业的专业技术支撑，该产业产学研合作频繁，并表现出复杂的网络化合作趋势。

鉴于此，本研究以 ICT 产业为例，探究促进企业、大学和研究院所不同组织间协同创新网络形成的因素有哪些，以及各因素的影响程度。

2　文献回顾与问题提出

关于协同创新网络的相关研究，以往学者从宏观与微观不同层面，对协同创新网络进行了相关探索。一方面，部分学者从网络演化过程出发，对协同创新网络进行了描述性研究：如 SUN[7] 以合作专利为研究数据，分析出区域协同创新网络表现出明显的“核心-边缘”特征，并指出区域内和区域间网络存在互补关系；YOON 等[8] 从跨区域合作网络视角，探究了国家创新系统的演化过程；孙天阳等[9] 基于专利数据构建协同创新网络，分析了网络拓扑结构的基本特征。另一方面，一些学者从组织创新的影响机制出发，从单层网络和多层网络两个角度，分析了创新网络结构指标对组织创新的影响。基于单层网络的研究，主要关注知识网络、合作网络、区域或企业间协同网络、专利引用网络的结构对创新的影响。徐露允等[10] 基于专利数据，通过构建汽车行业中 738 家企业间知识网络，分析了网络中心势与双元创新的关系；HO 等[11] 的研究表明，半导体企业基于专利引用的知识流动网络接近中心性对企业绩效有显著促进作用。AHUJA[12] 指出，企业在协同创新网络中的直接联系、间接联系与结构洞数量对企业创新均有显著影响。关于多层网络的研究，在探究单层网络结构指标对创新影响的基础上，剖析不同网络间的交互作用对创新的影响机制。GUAN 等[13] 分析了国家间的协同创新网络，在城市间协同创新网络与创新关系中的调节作用；BRENNECKE 等[14] 探究了企业创新过程中，员工建议网络与知识网络的内在联系。通过以上文献梳理发现，对于协同创新网络的相关研究，大多数学者要么基于演化的视角，只分析了网络本身的基本特征，没有深入挖掘促进其形成的影响因素；要么从网络视角出发，剖析协同创新网络结构指标对创新绩效或创新能力的影响，忽略了促进协同创新网络形成的前因变量。虽然有少数学者对网络形成的影响因素进行了初步探讨，但大都使用传统回归探究网络中边的形成，是如何受节点相关变量影响的[6]，如 CHUNG 等[15] 通过 Logistic 回归，证明投资银行联盟形成的可能性与其能力的互补性、地位的相似性呈正相关，银行直接或间接的合作经验所产生的社会资本，在联盟形成中也起着非常重要的作用。但传统回归方法并不能从内生结构角度观测其对网络的影响[16]，从内生因素与外生因素两个方面综合分析协同创新网络形成机制的研究就更为匮乏。

为了解决这一问题，相关领域的学者将指数随机图模型（exponential random graph model，ERGM）引入到社会网络分析中，这一建模工具能结合内生因素与外生因素刻画其与网络形成的因果关系。ERGM 最初由 FRANK

等[17]在 1986 年提出，随后学者对其进行了补充与完善，使得模型更具普适性，预测结果更加准确。与传统回归、仿真方法相比，ERGM 具有以下特点[16]：①模型能够剖析网络结构效应，打破了传统回归模型中网络连边间的独立性假设；②模型能够将结构属性等内生变量和节点属性、边属性等外生变量同时纳入分析中。协同创新网络是由企业、大学与研究院所相互间的合作行为构成的，这就使得 ERGM 与不同组织间协同创新相关研究的结合更加契合与有意义。基于 ERGM 的研究中，不同学者从个人、组织、区域等层面分析了不同网络形成的影响因素和形成机制。在个人层面的相关研究中，KIM 等[16]分析了促进 100 家企业间连锁董事网络形成的影响因素，并预测未来网络形成的趋势；BRENNECKE 等[14]基于多层网络视角，剖析了在德国一家高科技企业中，其 135 位专利发明人之间的知识网络是如何影响建议网络形成的；SCOTT 等[18]指出，协作小组成员共同参与同一类型合作小组的数量，会影响组织间的网络关系。在组织层面的相关研究中，CAPONE 等[19]探究了地理邻近、认知邻近、制度邻近分别对社会邻近与企业创新网络、技术建议网络和朋友网络 3 种非正式网络关系的差异化影响；何喜军等[20]通过构建科技主体间的专利技术交易网络，从不同维度提出了网络形成的影响因素，并预测专利技术交易机会。在区域层面的相关研究中，HE 等[21]基于专利技术交易信息，构建了中国 5 个省份间的专利技术交易网络，并明晰了影响网络形成的主要因素以及影响差异。综上分析，ERGM 方法在不同类型的社会网络分析中起到越来越重要的作用，但将这一方法应用于协同创新网络的研究极少，从多维角度探究协同创新网络形成的影响因素研究较为匮乏。

对于协同创新网络的研究，主要分为网络演化、网络对创新的影响和网络形成的影响因素 3 个方面。其中，对协同创新网络形成影响因素的研究相对较少，同时考虑内生因素与外生因素的研究更少。鉴于此，本研究结合现实背景与文献回顾，基于 ERGM 方法，将内生变量和外生变量纳入同一研究框架，以协同创新网络中节点连接的概率为被解释变量，网络构型和节点属性指标为解释变量，从以下 3 个方面展开研究：①从社会网络视角，分析 2013～2015 年电信产业协同创新网络的结构与特征，为后续模型的构建与分析奠定基础；②基于 ERGM，从网络构型和节点属性变量出发，探究促进企业、大学与研究院所间协同创新网络形成的内生与外生因素有哪些；③通过模型结果分析，剖析网络中边、三角结构、星型结构等网络构型变量，组织的协同创新能力、合作开放度（合作广度与合作深度）节点属性变量，以及组织类型同配和隶属区域同配节点属性交互项对未来网络中节点连接概率的影响程度，并剖析造成这些结果的原因。

3　研究设计

3.1　样本选择与数据来源

电信产业作为高技术领域的典型代表，是发展潜力最大、对经济社会发展影响最广泛的产业之一。我国电信行业以及上下游产业链完整，技术创新具有涵盖领域广、更新速度快、产品生命周期短的特征，因此，需要高校、科研机构的知识支持和其他企业的技术支撑，也使得产学研合作频繁；我国电信产业对全球电信产业发展的贡献率高达 40%，是知识密集型、技术创新活动较为活跃产业的典型[22]。此外，专利是企业保护其知识产权的有效机制，而联合申请专利又是企业、大学和科研院所知识产出和应用需求相互匹配的过程。由此，本研究选取参与电信产业专利合作的企业、大学和研究院所作为网络结构分析与实证研究的研究样本。

数据来源于国家知识产权局专利检索网站（CNIPA），检索时间为 2019 年 2 月 19 日～2019 年 3 月 3 日。按照 2010 年 OECD 公布的专利统计公报中电信产业的 IPC 分类号，检索 2013～2015 年中国 31 个省、自治区和直辖市（不包含港澳台地区）申请并授权的发明专利。选取 2013～2015 年作为研究阶段有以下两个原因：①专利从申请到授权需要经过 18～36 个月，2016～2019 年申请的专利尚未完全授权；②创新群体一般以 3 年为一个合作周期[23]，且 2013～2015 年专利数量与质量较以往年份更加完善。为确保数据的完整性与分析结果的准确性，以 2013～2015 年的申请并授权的专利作为样本数据集，参与专利合作的企业、大学、研究院所为研究对象。其中，授权的合作发明专利总量为 4 221 件，剔除不符合要求的专利数据（即剔除重复项、个人、港澳台及国外申请人等参与的专利）①，最终得到合作授权专利 3 787 件，专利申请人（网络节点数）1 803 个。

① 本研究关注的是企业-企业、企业-大学、企业-研究院所和企业-大学-研究院所的专利合作。

3.2 研究方法

首先，运用社会网络分析软件，构建企业、大学和研究院所间的产学的协同创新网络，并计算整体网络结构指标，对协同创新网络进行基本的描述性统计。其次，使用 ERGM 分析协同创新网络构型和节点属性变量对组织间连接概率的影响，并通过模型估计系数，判断这些因素对节点连接概率的影响程度。ERGM 的一般形式为：

$$P(Y \mid y) = \frac{\exp\{\theta_i \boldsymbol{g}(y, X)\}}{k}, \quad (1)$$

式中，Y 表示协同创新网络随机网络集合，当任意两点 i 和 j 之间存在联系时，$Y = 1$，否则 $Y = 0$；y 表示网络中的某个具体实现，即观测到的真实网络结构；X 表示协同创新网络中的外生变量，本研究中指的是各节点属性变量；$\boldsymbol{g}(y, X)$ 表示各统计量构成的向量，包括网络构型（边、三角结构、星型结构等）内生变量和节点属性（协同创新能力、合作广度、合作深度）及节点属性交互（组织类型同配、隶属区域同配）；k 表示常数，保证协同创新网络结构形成概率在 0 ～ 1 之间；θ_i 表示待估计参数（t 表示第几个待估计参数），即对应网络结构统计量的参数，是后续实证研究中主要关注的参数，通过 θ_i 的显著性与取值大小，来判断不同因素对协同创新网络形成的影响程度。此外，通过 AIC 与 BIC 指标判断模型的拟合优度，两个指标的数值越小，说明模型拟合越接近真实观测的协同创新网络。本研究使用 R 语言中的 Statnet 程序包，构建指数随机图模型与模型拟合，使用的方法为马尔可夫链蒙特卡洛最大似然估计。

3.3 变量选取

模型中变量的选取遵循两个原则：①综合考虑内生变量和外生变量在协同创新网络形成中的影响；②优化模型拟合效果，防止网络退化。由此，本研究选取以下变量进行后续的实证分析：内生变量包括各网络构型，外生变量包括各节点属性特征。

（1）**内生网络构型变量** 结合本研究协同创新网络特征，并借鉴以往研究，选择现有研究中比较典型的网络构型指标作为内生变量。其中，边（E_D）的数量在网络建模中是控制变量，在各模型中起着参照作用；交互三角结构（T_R）、几何加权度（G_W）、几何加权边共享伙伴（G_E）和几何加权二元合作伙伴（G_D）是网络构型中的依赖关系项，这些结构的存在可以防止网络退化[24]。交互三角结构刻画的是 3 个节点形成连通性三角结构的倾向，即协同创新网络中 3 个节点互为伙伴关系的结构，能够影响网络边形成的概率；几何加权度观测网络的扩张效应和星型结构[20]，即网络中形成冗余关系的程度，在协同创新网络中表示每个企业（大学或研究院所）作为中心节点直接与其他多个节点联系的倾向；几何加权度从不同角度刻画网络中聚类对应的传递性特征，指一个节点与其他多个节点形成三角结构和共享边的情况[20]；几何加权二元合作伙伴衡量的是具有共享伙伴关系的二元组的数量[16]，指的是企业、大学和研究院所之间至少存在一条路径为 2 的网络连接倾向，或节点在网络中作为中介的倾向。

（2）**外生节点属性变量** 节点属性变量中，既有衡量节点自身特征的变量，又有能够反映网络中两个相互联系的成员互动特征的交互项，节点的这些特征在协同创新网络的形成中起着不同的作用。由此，外生因素从节点自身特征和特征交互项两个方面考虑。

首先，节点自身属性变量选择协同创新能力（N_I）、合作广度（N_D）与合作深度（N_N）3 个变量，原因在于协同创新网络重点关注的就是参与主体间的相互协作，协同创新能力反映组织资源整合与吸收能力[25]，而合作广度与合作深度是衡量其合作开放度的重要指标[26]；创新主体构建与其资源整合、吸收能力相匹配的合作开放度，才能充分发挥其在协同网络中的资源与位置优势。其中，协同创新能力用节点拥有的合作专利数量表示[25]，指标越大，越容易吸引更多节点与之联系；网络中节点的合作广度指与之联系的节点数量，合作深度指该节点与其他所有节点联系的次数。

其次，从节点属性交互项选择组织类型同配（N_C）与隶属区域同配（N_R）两个变量，原因在于参与协作的主体具有相同或不同的组织类型和隶属区域，相同的组织类型使其拥有相近的组织目标[27]，而隶属区域相同使其获得不同资源的机会相同[7]，这些创新主体在网络中寻求合作的意愿就会更加相近。其中，组织类型同配，指两个节点同属于企业（大学或研究院所）；隶属区域同配，则是两个节点处于同一省份。

各变量的具体表示与测量方法，即 ERGM 的变量说明见表 1。

4 实证分析

4.1 网络构建与特征描述

在模型构建之前，分析协同创新网络的基本特征，为后续实证探究网络的形成动因奠定

表 1　ERGM 的变量说明

	变量		图例/含义	效应	测量方法
内生网络构型变量	E_D	边	○——○	/	网络边的数量
	T_R	交互三角		闭合性	拥有交互三角形的数量
	G_W	几何加权度		扩张性	网络形成星型结构的数量
	G_D	几何加权二元共享伙伴		中介性	网络中存在节点承担中介功能的结构数量
	G_E	几何加权边共享伙伴		传递性	两个组织拥有共同伙伴的结构数量
外生节点属性变量	N_I	协同创新能力	测度一个组织与其他组织的专利合作能力	马太效应	节点拥有的合作授权专利数量
	N_D	合作广度	测度一个组织合作伙伴的多样性		去重边的节点度数
	N_N	合作深度	测度一个组织与其他组织合作的平均次数		非去重边的节点度数除以合作广度
	N_C	组织类型同配(企业,大学和研究院)	●——●	同配性	两端点属于同类组织的边的数量
	N_R	隶属区域同配	●——●		两端点隶属同一省份的边的数量

注:○表示相同或不同类型的节点;●表示相同类型的节点。

基础。以企业、大学和研究院所为节点,两两之间的专利合作关系为边,构建协同创新网络(见图 1)。由图 1 可见,协同创新网络中存在大量的"星形结构""交互三角"结构,大量节点在不同创新主体之间起到了"中间人"的作用。说明这些不同的网络构型变量,在协同创新网络中起着重要的作用,网络中拥有几何二元共享伙伴和几何加权边共享伙伴关系。协同创新网络表现出显著的"核心-边缘"特征,处于中心位置的少数组织与其他组织间的联系更为密切,占据了网络中的大部分资源,而边缘节点的联系非常稀疏。说明网络位置不同的节点,其协同创新能力、合作广度与合作深度并不均衡、差距较大,与边缘节点相比,核心位置的创新主体 3 个指标都较大。

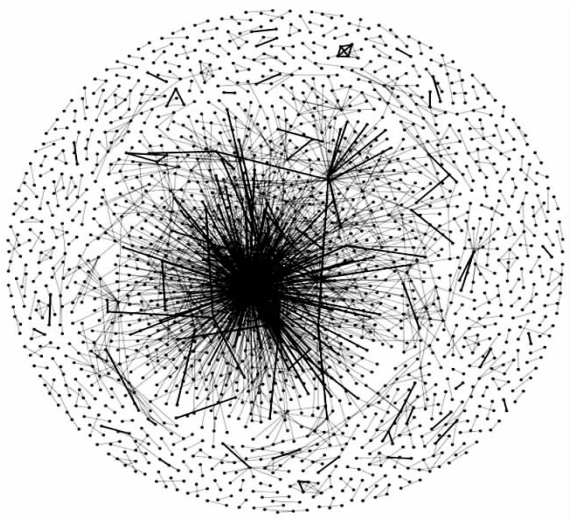


图 1　协同创新网络

从网络中各指标来看,网络节点为 1 803 个,企业节点为 1 477 个,大学节点 164 个[①],研究院所节点 162 个,网络边数 6 781 条(包含重复边)。从节点分布统计来看,协同创新网络中,企业节点数量远远大于大学和研究机构节点数量,这也说明了企业在协同创新主体中的战略地位凸显。从整体网络来看,网络密度和平均度数都较低,分别为 0.001 和 2.419,说明网络中连接关系比较稀疏,每个组织的平均合作伙伴数量不足 3 个;网络平均路径长度为 3.964,最长路径为 11,说明网络中任意两点相联系平均距离为 3.969,最远距离为 11;网络的平均聚集系数为 0.487,说明网络的联通性不高,网络中邻居节点之间的协同关系较为匮乏。

综上分析,初步判断该行业 2013～2015 年大学、企业、研究院所间的协同创新能力、合作广度与合作深度各有不同,3 类主体在协同创新网络中形成了不同的网络构型。然而,网络构型与节点属性变量对网络的形成影响,以及影响程度如何,需要通过实证分析进行检验。

4.2　模型构建

通过以上网络结构指标可以看出,协同创新网络整体结构表现出较为稀疏、连通性低的特征。由此,进一步探究形成这种网络结构的内生与外生因素对网络形成的影响程度如何,能够为提高协同创新网络质量,调整企业、大学与研究机构间的合作模式提供理论基础。本研究构建以下 4 个模型进行实证分析。

模型 1 是零模型,它是一个简单随机图模型,仅包含网络中边(E_D)统计项,即协同创新网络中企业-企业、企业-大学、企业-研究院所与企业-大学-研究院所 4 类合作关系的数量,为后续复杂模型的改进提供参照。对应的 ERGM 模型公式为:

$$P(Y=y\mid X)=\frac{\exp(\theta_1 E_D)}{k}。\tag{2}$$

模型 2 是在模型 1 的基础上,增加网络内生构型变量依赖关系项,关注的是网络中存在的复杂关系项。通过交互三角(T_R)几何加权度(G_W)、几何加权二元共享伙伴(G_D)和几何加权边共享伙伴(G_E),检验网络中大学、企业和研究院所之间联系形成的星型结构和三角结构对

① 基于一所大学各分校区所处省份和能够依赖的资源不同,因此并未进行合并处理。

协同创新关系形成的影响。对应的 ERGM 模型公式为：

$$P(Y=y\mid X)=[\exp(\theta_1 E_D+\theta_2 T_R+\theta_3 G_W+\theta_4 G_D+\theta_5 G_E)]/k \text{ 。}(3)$$

模型 3 是在模型 1 的基础上，增加外生节点属性变量的模型，一方面从节点自身特征出发，刻画合作关系形成的概率是否受协同创新能力（N_I）、合作开放度——广度（N_D）、深度（N_N）的影响及影响程度如何；另一方面，从节点特征交互项——组织类型同配（N_C）与组织隶属区域同配（N_R）出发，估计拥有相同属性端点的边的数量，是如何影响网络中新合作关系形成概率。对应的 ERGM 模型公式为：

$$P(Y=y\mid X)=[\exp(\theta_1 E_D+\theta_6 N_I+\theta_7 N_D+\theta_8 N_N+\theta_9 N_C+\theta_{10} N_R)]/k \text{ 。}(4)$$

模型 4 是综合模型，将网络构型变量和节点属性变量纳入同一统计模型中，综合分析不同类型统计项对协同创新关系形成的影响；同时，比较该模型与其他模型的拟合优度，判断是否综合模型更能刻画真实的协同创新网络特征。对应的 ERGM 模型公式为：

$$P(Y=y\mid X)=[\exp(\theta_1 E_D+\theta_2 T_R+\theta_3 G_W+\theta_4 G_D+\theta_5 G_E+\theta_6 N_I+\theta_7 N_D+\theta_8 N_N+\theta_9 N_C+\theta_{10} N_R)]/k \text{ 。}(5)$$

4.3 结果分析

通过 R 软件中的 Statnet 对 4 个模型进行参数估计，模型 1 作为基础模型，其他 3 个模型在此基础上加入不同类别的统计项进行模拟。ERGM 参数估计结果见表 2。

表 2 ERGM 参数估计结果（N=1 803）

统计项	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
E_D	−6.526***	−9.755***	−9.098***	−11.291***
	(0.020)	(0.101)	(0.081)	(0.277)
T_R		1.538***		0.966***
		(0.045)		(0.245)
G_W		6.311***		6.088***
		(0.503)		(0.412)
G_D		0.059***		0.009***
		(0.000)		(0.003)
G_E		1.489***		2.251***
		(0.087)		(0.236)
N_I			0.005***	0.002
			(0.000)	(0.001)
N_D			0.071***	0.049***
			(0.000)	(0.236)
N_N			0.005***	0.004*
			(0.000)	(0.002)
N_C			−0.184***	−0.024
			(0.004)	(0.165)
N_R			2.014***	1.806***
			(0.044)	(0.124)
AIC	35 890	33 954	28 296	27 271
BIC	35 902	30 419	28 370	27 394

注：*、***分别表示 $p<0.05$、$p<0.001$；括号内为标准误。

指数随机图模型中，系数为正表示企业、大学和研究院所间真实观测的协同关系比预测网协同关系形成概率更大，即某种结构或属性对网络的形成具有促进作用；系数为负表示真实观测的协作关系形成概率更小，即对网络的形成具有抑制作用。由表 2 可知，模型总体通过了显著性检验，且模型 2、模型 3、模型 4 与模型 1 相比，模型拟合指标 *AIC*、*BIC* 都有所下降。其中，与模型 1 相比，模型 3 的 *AIC* 与 *BIC* 指标比模型 2 下降的幅度更大，说明在协同创新网络形成过程中，节点属性特征在网络形成中发挥着更为重要的作用。模型 4 的拟合优度最高，说明同时包含网络内生网络构型变量和外生节点属性变量的网络结构，更能刻画真实的协同创新网络，同时实证结果也证明了模型具有稳健型。通过各模型分析协同关关系形成的因素与影响程度，具体统计分析如下①。

（1）边的系数为负，表明网络的密度在 50%以下，真实观测网络表现出稀疏效应的典型特征[28]。边系数为 −11.291（$p<0.001$），这表示网络中每增加一条边，新增加的协同关系的概率小于 1，说明企业、大学和研究院所之间增加一次合作关系，反而使网络中新边形成的概率减小。

（2）网络构型变量的依赖关系项参数估计中，系数为 0.966（$p<0.001$），网络倾向形成交互三角结构，说明如果两个组织 A、B 拥有共同节点 C，A 与 B 形成协同关系的概率比两点随机联系的概率增加 1.622（exp（0.964）=2.622）倍；G_W 的系数为 6.088（$p<0.001$），说明协同创新网络表现出扩张性，即一个企业同时与多个企业、大学或研究机构合作，能够促进更多协同关系的形成；G_D 与 G_E 的系数均显著为正，说明协同创新网络中，倾向于出现开放式和闭合型三角结构，这些结构的存在能够显著促进新合作关系的形成[21]。

（3）协同创新能力用组织已有的合作专利数量表示，其系数为正但并不显著，说明协同创新能力不能促使两个组织建立新合作关系的概率增加，即当一个企业（大学或研究院所）的合作专利数量增加时，其与另一个组织建立合作关系并未受到显著影响。

（4）合作广度的系数为 0.049（$p<0.001$）（exp（0.049）=1.050），说明合作广度的增加，能够促进协同创新网络的形成，即网络中企业、大学或者研究院所每增加一个合作伙伴，一组

① 模型 4 具有更高的拟合优度，具体统计结果以模型 4 进行分析。

新合作关系建立的概率增加 5%；合作深度的系数为 0.004（$p<0.05$）（exp（0.004）=1.004），说明节点合作深度的增加，能够促进新合作关系的形成，即一个节点与网络中其他节点合作关系每增加一次，新合作关系形成的概率就增加0.4%。

(5)从节点同配性来看，组织类型同配性的系数为负，但并不显著，说明相同性质的组织之间并不倾向于形成合作关系，即一个企业更倾向于与异质性大学或者研究院所合作，而不是与另一个同质的企业合作；区域同配性系数为1.806（$p<0.001$），表示同一省份的企业、大学和研究院所相互之间合作关系的形成概率是不同省份组织间合作关系形成的 6.086（exp(1.806)=6.086)倍，即与跨区域合作相比，组织在同一区域内更容易形成协同关系，这一结论再次印证了地理邻近性在协同创新中的促进作用[7]。

5　讨论与展望

本研究通过构建指数随机图模型（ERGM），实证分析促进协同创新网络形成的影响因素，一定程度上弥补了现有研究较少关注协同创新网络形成的前因变量的不足。得出以下基本结论与启示。

(1)企业、大学和研究院所间协同关系的形成，是内生因素与外生因素交互的结果。综合考虑网络构型内生因素和节点属性外生因素的 ERGM 拟合效果更好，更能明晰影响网络形成背后的复杂因素。由此，在研究和实践中不仅要重视节点自身特征对网络形成的作用，同时应关注现有协同关系（网络结构、组织同配等）在未来合作关系形成中的作用。

(2)协同创新网络的形成表现出稀疏效应[28]，网络边数的增加并不能促进组织间新合作关系的形成。原因在于一些企业、大学和研究院所之间的协同关系属于偶发性合作，组织间并未形成稳定的、相互信任的合作关系，不能提高创新能力，未来不能吸引新的合作伙伴与之合作。由此，无论是企业方，还是学研方，在协同关系建立过程中，都应尽量避免偶发性合作，通过建立长期稳定的合作关系，减弱边结构在网络中的稀疏效应，增强网络的联通性和传递性，使现有合作关系在未来协同创新网络形成过程中发挥重要作用。

(3)星型结构和三角结构是网络形成过程中重要的结构因素。原因在于星型结构代表了网络扩张性和中心-边缘结构，能够使中心节点获取更多的资源[13]，而 T_R 和 G_W 闭合三角结构能够促进合作组织之间的信息交互，G_D 开放式三角结构的存在会使网络中形成更多的结构洞，使得节点获得更多的异质性资源[12]，在其他节点选择合作伙伴时更具竞争优势。由此，组织在合作过程中，应重点构建星型结构与三角结构的合作关系，充分发挥其在资源获取中的优势。

(4)协同创新网络中，节点协同创新能力的提高并未增加边形成的概率。因为协同创新能力可能存在一个最优的临界值，而电信行业在我国已经处于发展的成熟期，不同组织在该领域的协同创新能力已接近这一临界值，不能继续维持其促进新合作关系建立的优势。由此，企业、大学和研究院所在协同创新能力达到一个最优水平时，适当关注自主创新能力，进行自主研发创新，平衡因过度合作造成资源冗余而带来的负面效应，从而使其在协同创新网络中起到持续的促进作用。

节点的合作开放度——合作广度与深度能够显著促进协同创新网络的形成。原因在于增加组织间的合作深度，能够维持现有合作的稳定性，增强组织间的相互信任，有利于资源的共享与利用；而新合作关系的建立，能够吸收更多的异质资源[26]，吸引更多的组织与之建立合作关系，进而使协同创新网络的结构更加完善。由此，管理实践中组织在维持合作关系稳定性和持久性的同时，还要积极拓展新合作关系，发挥二者在网络形成中的双重优势。

(5)组织类型没有表现出同配效应，而隶属区域表现出显著的同配效应。原因在于企业-大学、企业-研究院所以及企业-大学-研究院所之间的合作更能促进异质资源的共享[1]，而企业-企业同种类型组织间的合作容易造成资源冗余，不利于新合作关系的形成；而同一省份的组织由于地理距离更近、合作成本更低、风险更小[7]，更可能建立合作关系。但与此同时也会导致知识流动、扩散受到地理距离的限制，因此相关部门应当采取措施为不同区域的组织提供合作交流的平台，打破同配效应过度带来的局限性，促进跨区域组织间的技术交换与知识共享。

本研究仍处于探索性研究阶段，可能还存在大量节点属性变量和关系协变量影响网络的形成。此外，本研究选取电信行业的专利合作组织作为研究对象，结论的普适性可能存在一定的局限性。未来会将进一步的研究拓展到其他行业，并纳入更多的变量进行分析。

参　考　文　献

[1] XIE X, FANG L, ZENG S. Collaborative innovation network and knowledge transfer performance: a fsQCA approach [J]. Journal of Business Research,

2016, 69(11): 5210-5215.
[2] 李飞,陈岩,王海智.海外资源整合、全球网络嵌入路径与知识溢出[J].科学学研究,2019,37(4):679-688.
[3] 殷俊杰,邵云飞.联盟组合管理能力对焦点企业合作创新绩效的影响研究[J].管理学报,2018,15(6):865-873.
[4] 魏云凤,阮平南.企业创新网络协同的影响因素及形成路径研究[J].技术与创新管理,2018,39(4):359-364,385.
[5] DE NONI I, ORSI L, BELUSSI F. The role of collaborative networks in supporting the innovation performances of lagging-behind European regions[J]. Research Policy, 2018, 47(1): 1-13.
[6] 许和连,孙天阳,成丽红."一带一路"高端制造业贸易格局及影响因素研究——基于复杂网络的指数随机图分析[J].财贸经济,2015(12):74-88.
[7] SUN Y. The structure and dynamics of intra-and inter-regional research collaborative networks: the case of China (1985～2008) [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2016, 108: 70-82.
[8] YOON J, PARK H W. The unbalanced dynamics in Sino-South Korea scientific and technological collaboration: a triple helix perspective with insights from paper and patent network analysis[J]. Asian Journal of Technology Innovation, 2017, 25(1): 184-198.
[9] 孙天阳,成丽红.中国协同创新网络的结构特征及格局演化研究[J].科学学研究,2019,37(8):1498-1505.
[10] 徐露允,曾德明,李健.知识网络中心势、知识多元化对企业二元式创新绩效的影响[J].管理学报,2017,14(2):221-228.
[11] HO Y,CHIU H. A social network analysis of leading semiconductor companies' knowledge flow network[J]. Asia Pacific Journal of Management, 2013, 30(4): 1265-1283.
[12] AHUJA G. Collaboration networks, structural holes, and innovation: a longitudinal study[J]. Administrative Science Quarterly, 2000, 45(3): 425-455.
[13] GUAN J, ZHANG J, YAN Y. The impact of multilevel networks on innovation[J]. Research Policy, 2015, 44(3): 545-559.
[14] BRENNECKE J, RANK O. The firm's knowledge network and the transfer of advice among corporate inventors—a multilevel network study[J]. Research Policy, 2017, 46(4): 768-783.
[15] CHUNG S, SINGH H, LEE K. Complementarity, status similarity and social capital as drivers of alliance formation[J]. Strategic Management Journal, 2000, 21(1): 1-22.
[16] KIM J Y, HOWARD M, COX PAHNKE E, et al. Understanding network formation in strategy research: exponential random graph models[J]. Strategic Management Journal, 2016, 37(1): 22-44.
[17] FRANK O, STRAUSS D. Markov graphs[J]. Journal of the American Statistical Association, 1986, 81(5): 832-842.
[18] SCOTT T, THOMAS C. Do collaborative groups enhance interorganizational networks? [J]. Public Performance and Management Review, 2015, 38(4): 654-683.
[19] CAPONE F, LAZZERETTI L. The different roles of proximity in multiple informal network relationships: evidence from the cluster of high technology applied to cultural goods in Tuscany[J]. Industry and Innovation, 2018, 25(9): 897-917.
[20] 何喜军,董艳波,武玉英,等.基于 ERGM 的科技主体间专利技术交易机会实证研究[J].中国软科学,2018(3):184-192.
[21] HE X, DONG Y, WU Y, et al. Factors affecting evolution of the interprovincial technology patent trade networks in China based on exponential random graph models[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 514: 443-457.
[22] 戴勇,王诗卉.创新网络守门人区域比较研究:以电信领域为例[J].科研管理,2019,40(7):106-118.
[23] 高杰,丁云龙,郑作龙.中国创新研究群体合作网络的形成与演化机理研究——科学共同体视阈下优秀创新群体案例分析[J].管理评论,2018,30(3):248-263.
[24] ROBINSG, PATTISON P, KALISH Y, et al. An introduction to exponential random graph (p^*) models for social networks[J]. Social Networks, 2007, 29(2): 173-191.
[25] 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.
[26] 高霞,其格其,曹洁琼.产学研合作创新网络开放度对企业创新绩效的影响[J].科研管理,2019,40(9):231-240.
[27] CHEN K, ZHANG Y, ZHU G, et al. Do research institutes benefit from their network positions in research collaboration networks with industries or/and universities? [J]. Technovation, DOI: 10.1016/j.technovation.2017.10.005.
[28] YAN E, DING Y. Scholarly network similarities: how bibliographic coupling networks, citation networks, cocitation networks, topical networks, coauthorship networks, and coword networks relate to each other[J]. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2012, 63(7): 1313-1326.

(编辑　丘斯迈)

通讯作者: 谢富纪(1962～),男,山东日照人。上海交通大学(上海市　200030)安泰经济与管理学院教授、博士研究生导师。研究方向为创新与战略管理。E-mail: xiefuji@sjtu.edu.cn