

长三角城市群协同创新网络演化动力研究： 基于指数随机图模型

王海花¹, 孙芹¹, 郭建杰², 杜梅¹

(1.上海大学 管理学院, 上海 200444; 2.上海商学院, 上海 201400)

摘要:利用 2009—2018 年长三角城市群产学研联合申请专利数构建协同创新网络, 建立指数随机图模型 (ERGM), 预测长三角城市群协同创新网络演化动力。实证结果表明, 协同创新网络存在传递性, 倾向于形成中介—2 路径的开放式三角形结构; 城市拥有的知识元素属性、经济发展水平和科研投入力度会对网络演化产生差异化影响; 知识邻近性和组织邻近性在长三角城市群协同创新网络关系形成中始终发挥积极作用, 制度邻近性和社会邻近性在网络演化前期发挥积极作用, 但是伴随协同创新的深入, 二者不利于协同创新网络合作关系形成。因此, 政府应该引导各城市因地制宜制定创新战略, 发挥各自资源与产业优势, 助力构建高效交互的协同创新网络。

关键词: ERGM; 长三角城市群; 协同创新; 创新网络

DOI: 10.6049/kjbydc.2021010538

中图分类号: F127.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1001-7348(2021)14-0045-09

Research on Evolution Dynamic of Collaborative Innovation Network in the Urban Agglomeration of Yangtze River Delta Based on ERGM

Wang Haihua¹, Sun Qin¹, Guo Jianjie², Du Mei¹

(1.School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2.Shanghai Business School, Shanghai 201400, China)

Abstract: Using the patent search and analysis website of State Intellectual Property Office, we construct a collaborative innovation network based on the data of joint patent application for industry—university—research collaborative innovation in urban agglomeration of Yangtze river delta from 2009 to 2018. Using the exponential random graph model (ERGM), it empirically analyzes the effects of institution, knowledge, organization and social proximity on the formation of innovative cooperative relationships within collaborative innovation network. In this paper, the hypothesis variables affecting collaborative innovation are proposed from multiple dimensions, such as the network endogenous structure, inter—city relationship properties, and urban individual properties, and the exponential random graph model (ERGM) is established to predict the evolution dynamics of collaborative innovation networks in Yangtze river delta city clusters. The results show that collaborative innovation network has transitive characteristics and tends to form an open triangle structure with intermediary—2 path. The attributes of knowledge elements owned by cities, the level of economic development and the investment in scientific research will have different effects on network evolution. Knowledge proximity and organizational proximity have always played an active role in the generation of collaborative innovation network relations in the Yangtze River Delta urban agglomeration, while institutional proximity and social proximity played an active role in the early stage of network evolution. However, the deepening of collaborative innovation between cities, institutional proximity and social proximity weakened the formation of cooperative relations, which was not conducive to the evolution of the network. Therefore, the government should guide cities to formulate innovation strategies according to local conditions, give play to their respective resources and industrial advantages, and help to build the efficient and interactive collaborative innovation networks.

Key Words: ERGM; Urban Agglomeration of Yangtze River Delta; Collaborative Innovation; Innovation Network

收稿日期: 2021-01-21 修回日期: 2021-03-15

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJA630076); 上海市软科学重点项目(20692109000)

作者简介: 王海花(1983—), 女, 山东聊城人, 博士, 上海大学管理学院副教授, 硕士生导师, 研究方向为产学研协同创新、创新与知识管理; 孙芹(1995—), 女, 山东临沂人, 上海大学管理学院硕士研究生, 研究方向为区域创新与知识管理; 郭建杰(1987—), 女, 山东聊城人, 博士, 上海商学院讲师, 研究方向为创新与知识管理; 杜梅(1995—), 女, 江苏徐州人, 上海大学管理学院硕士研究生, 研究方向为创新与知识管理。

武汉大学区域经济研究中心 协办

0 引言

随着我国创新驱动发展战略的实施,协同创新已经成为促进国家和地区经济发展的重要推力,协同创新网络也成为提高城市群创新能力的有力支撑。长三角城市群作为我国“一带一路”与长江经济带的重要交汇地带,是创新力和经济竞争力最高的城市群之一,在践行国家创新和经济发展战略过程中占有重要地位。区域一体化发展的核心是协同创新,而区域协同创新是指依托区域人才、信息等创新资源,以企业、高校、科研院所和政府部门等为创新载体,进行知识创造与扩散的过程。随着城市群一体化的推进,更多城市加入协同创新网络,城际合作关系也发生改变,进而导致网络结构变化,而网络结构的动态化体现了协同创新网络的演化^[1,2]。因此,研究长三角城市群协同创新网络演化动力,对于增强城市群创新活力、探索城市群协同创新机制具有重要意义。

城市群网络研究是在Friedmann^[3]研究基础上发展起来的。城市网络联系可在一定区域内实现大跨度联系,而网络联系节点就是其中的城市^[4]。作为一种以城市为载体的特殊跨区域创新系统^[5],其协同过程需要创新主体、环境、资源等结构要素的共同参与,并通过各要素间的相互作用,形成以产学研为主要创新因子的有序集合^[6]。目前,关于长三角城市群协同创新网络的研究主要集中在网络格局^[7]、演化趋势^[8]以及影响因素^[9]等方面,而鲜有研究探究长三角城市群协同创新网络演化动力。现有文献中关于创新网络演化动力的研究多从邻近性视角^[2,10,11]出发,探究其对协同创新的影响,且多集中在组织^[2,10]、省际^[12,13]层面,从城市群层面展开研究的较少。同时,研究多采用传统回归^[14]、案例研究^[15]分析网络外部影响因素与协同创新关系,未融合节点属性与网络结构的链接预测网络演化趋势;还有研究采用网络拓扑结构分析网络,虽然拓展了对网络的认识,但难以解释多个网络间的交互作用和网络演化动力^[16]。指数随机图模型(ERGM)能够综合考虑网络内生结构因素与外生属性因素,且强调网络节点间的相互依赖性,即已存在关系会影响未来关系生成概率,并通过估计、诊断、仿真、比较等步骤实现对网络的准确预测^[17,18],进而更精确地预测未来网络关系生成与探究网络演化机制^[16]。一些学者依据ERGM模型理论,从网络视角将专利交易关系、新闻转载关系、学术社交关系等概率建模为内生、外生相关因素,从内生结构嵌入和外生属性因素(节点属性、网络关系属性)维度解释网络关系生成的动力机制。如段庆锋等^[19]以科学网博客用户好友网络为例,构建ERGM实证模型,将学术社交网络形成机制归纳为学科差异、多维同配、马太效应和结构嵌入四方面。此外,还从网络嵌入视角分析专利技术扩散路径^[20],构建

扩散网络并从内生、外生因素两个方面建立指数随机图模型开展实证分析,将扩散因素归纳为专利价值、专利保护、多维同配、结构嵌入4个方面。由此可见,指数随机图模型与本文问题具有内在契合性。

基于此,本文利用2009—2018年长三角城市群联合申请专利数构建协同创新网络,建立指数随机图模型,从网络内在结构特征、节点属性和网络关系属性视角,探究长三角城市群协同创新网络演化动力。一方面,不同于已有研究中侧重于对某时点网络特征或者企业等微观层面协同创新网络的探索,本文关注的是城市群层面各城市间协同创新网络演化动力分析;另一方面,从协同创新网络内生结构特征与外生属性因素两个方面构建模型,分析长三角城市群协同创新网络演化动力,拓展ERGM应用领域,丰富城市群协同创新网络理论研究。因此,本文研究结论将为政府制定政策、指导协同创新活动、配置协同创新资源以及提高国家与地区创新竞争力提供实践启示。

1 研究设计

Huallachain^[21]认为,合作专利能够较好地体现网络节点间创新合作关系。若专利申请人中包含隶属于不同城市的多个申请人,即认为城市间存在合作关系。

本文利用长三角城市群产学研联合申请专利数,构建体现长三角城市群城际合作关系的协同创新网络,如图1所示。首先,利用专利计量方法分析联合专利申请时间和地域分布;然后,针对同一条专利申请人的地域分布进行拆分,如某一条专利的申请人为同济大学、上海XX有限公司和徐州XX有限公司,其地域分布分别为上海、上海和徐州,则可拆分为上海和上海、上海和徐州两条合作关系。由于本研究考虑的是城市群内部协同创新,故不考虑同一城市内部创新主体合作情况。

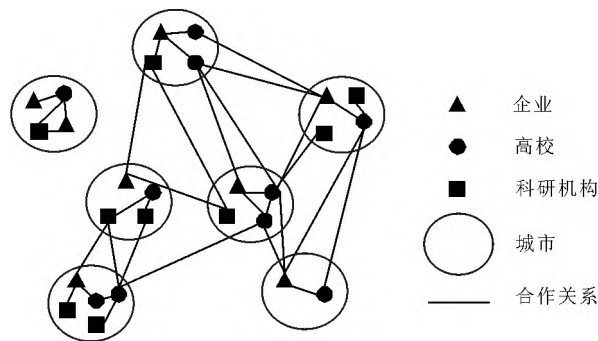


图1 长三角城市群协同创新网络模型

1.1 研究假设

1.1.1 网络结构

当网络中存在两个节点共享一个节点时,该二者也倾向于建立联结,体现了网络传递性这一重要特征^[22]。在城市群协同创新网络中,合作关系表现为城

市间共享知识、信息和技术等创新资源,合作关系的传递同时伴随城市间创新资源的传递,体现了城市合作关系的拓展。网络三角结构表示网络城市节点间合作关系的传递,反映了城市间形成闭合路径的倾向,而冗余路径的存在有利于提高城市间知识等创新资源的交互效率^[23]。此外,现有研究认为,在网络演化过程中,新进入节点会优先连接已经存在关系的节点,即优先依附假说^[12]。例如有研究证实欧洲区域间的知识网络质量与其合作伙伴在整个知识网络中的地位有关,优先依附致使区域间的知识网络呈现核心—边缘结构^[24]。网络结构的几何加权重度分布项 $Gwdegree$ 能够有效捕捉演变为星型结构的倾向性,反映出网络中处于核心地位的节点与其它多个节点建立联系。现有研究已经证实城市群合作网络中呈现出核心城市辐射周边城市的网络格局^[25],即核心城市会吸引边缘城市与之合作。基于以上论述,本文提出如下假设:

H_{1a} :长三角城市群协同创新网络存在传递性,即现有合作关系有利于新合作关系形成;

H_{1b} :长三角城市群协同创新网络倾向于形成核心—边缘分布的星型结构。

1.1.2 节点属性

马太效应与同配效应是解释网络演化的两个重要特征。马太效应即强者愈强效应。城市群协同创新网络中存在的核心城市体现了典型的马太效应,即核心城市能够通过集中和传递创新资源提升其合作与创新优势,吸引更多创新资源和创新伙伴,最终形成强大的网络效应^[26]。作为知识元素集合的创新主体,其进行协同创新的过程也是知识元素不断重组、形成知识网络并创造新知识的过程^[27]。知识独特性反映了创新主体在与其相联系的其他主体不熟悉的领域具有渊博知识,体现了其知识资源的异质性^[28]。由于城市的经济发展水平和研发创新能力在一定程度上决定其在协同创新网络中的影响力与地位。因此,基于以上论述,本文提出如下假设:

H_{2a} :长三角城市群协同创新网络呈现马太效应,即知识独特性、经济发展水平以及研发创新能力优势正向影响协同创新网络演化。

同配效应是指两个相似节点间更易建立联结。如刘璇等^[29]通过分析科研合作网络形成机理,发现同配性学者间更倾向建立合作关系;段庆锋等^[23]通过对学术社交网络的研究发现,学科同配、职称同配、机构同配正向影响学术社交关系形成。在城市群协同创新网络中,经济发展水平和创新研发能力相近的城市具有大致相同的创新需求与产业发展目标,拥有相似的知识技术、吸收能力等创新资源^[25],因此更易形成创新合作关系。基于以上论述,本文提出如下假设:

H_{2b} :长三角城市群协同创新网络呈现同配效应,即经济发展水平和创新研发能力的同配性正向影响协同创新网络演化。

1.1.3 网络关系属性

本文针对长三角城市群拥有复杂邻近关系的特殊性,从其嵌入的制度邻近网络、知识邻近网络、组织邻近网络和社会邻近网络 4 个网络关系属性进行分析。原因在于:①长三角城市群包括三省一市的 41 座城市,拥有直辖市、省会城市和地级市等不同行政级别城市,而行政区划会导致文化分割进而影响区域经济。相较于普通地级市,直辖市、省会城市等拥有更大的经济、财政、制度等优势,从而有助于本地区发展^[30],而制度邻近维度则能够衡量不同行政级别是否会影响到协同创新网络演化;②从产业来看,长三角城市群内产业类型丰富多样,从制造业到互联网新兴产业都有领袖城市,尤其是近年在以制造业产业升级为主导的情况下,金融业和现代服务业取得了长足发展。如以杭州阿里巴巴为代表的互联网经济的崛起,上海国际金融中心的持续推进。而知识邻近维度能够反映不同产业集群间知识基础的相似度与吸收能力;③不同地区的创新和发展政策各有差异,即使同处于长三角一体化发展政策下的长三角城市间也面临地方主义与同质竞争消耗的难题,而组织邻近维度能够衡量行政区域边界与竞争格局是否影响协同创新网络演化;④长江三角洲地区有着悠久的历史,加之水系发达、土地丰饶,在明清时期就已经初步形成一个可观的城市群。至 2010 年 5 月,国务院正式批准实施《长江三角洲地区区域规划》,明确了长江三角洲地区发展的战略定位,即亚太地区重要的国际门户、全球重要的现代服务业和先进制造业中心、具有较强国际竞争力的世界级城市群。基于城市之间形成了广泛的合作关系,采用社会邻近维度能够衡量路径依赖对协同创新网络演化的影响。

制度邻近性是指创新主体面临相同的政策法规,受共同惯例、规则的约束和激励^[31]。制度邻近性在创新主体间发挥“黏合”作用,制度相同或类似有助于增强创新主体间信任,降低合作不确定性和成本^[32]。此外,制度邻近的创新主体之间往往拥有类似的管理模式,有利于创新资源在主体间流动、吸收与转化,进而提高知识交换和协同创新效率^[33]。Balland^[34]通过对全球导航卫星系统产业的研究,证实了制度邻近有利于参与主体建立合作关系。因此,制度邻近为城市群协同创新提供了稳定的外部环境,随着时间推移,城市群内部形成不同制度,导致城市间形成制度壁垒,为了减少合作阻碍、降低创新成本,创新主体更倾向于与制度邻近的其它主体展开合作。根据以上论述,本文提出如下假设:

H_{3a} :制度邻近性有利于长三角城市群协同创新网络演化。

知识邻近性是指创新主体在知识网络中嵌入的相似性,反映了创新主体在知识基础和技术结构方面的重叠度^[28,35]。知识库相同或相似,彼此间互动交流的

成本会更小^[36],交流与学习也变得更加容易,因此合作效率更高。夏丽娟等^[14]利用产学研联合申请并授权的专利数据进行实证分析,发现技术邻近性对跨区域产学研协同创新具有显著正向影响。因此,本文认为城市主体为了降低沟通成本,获得创新突破和提高创新效率,会倾向于与拥有相同或类似知识库的其它主体进行合作,从而推动新合作关系建立。根据以上论述,本文提出如下假设:

H_{3b}:知识邻近性有利于长三角城市群协同创新网络演化。

组织邻近性反映了创新主体共享组织内部和组织间关系的程度^[37]。组织邻近的创新主体拥有相似或相同的社会关系、组织结构和组织文化,有助于为合作双方营造稳定环境,促进协调沟通,加快隐性知识传播,从而降低合作成本^[33],提高协同创新效率。李琳等^[15]指出,合适的组织邻近有助于合作主体间交互的知识与信息免于加工而被直接应用于创新活动。因此,受行政边界效应^[38]的影响,同省域城市间能够高效吸收和传播知识,进而提高整体创新水平。根据以上论述,本文提出以下假设:

H_{3c}:组织邻近性有利于长三角城市群协同创新网络演化。

社会邻近性是指主体之间存在涉及信任的社会关系,例如合作关系^[39]。区域协同创新网络演化是一个动态过程,这意味着当前网络结构在一定程度上受到网络历史结构的制约^[40]。一般来说,过去的类似经验为现在或未来合作创新提供了参考,创新主体间的信任程度越高,越有助于主体之间形成持续、稳定的合作关系^[41]。余谦等^[42]发现,只有在企业间技术邻近性较低的情况下,社会邻近性才会发挥对创新绩效的促进作用。本文认为,城市群协同创新网络是在现有合作关系基础上演化发展的,而现有合作关系有利于创新主体之间形成信任和相互依赖,这成为建立深入联盟

伙伴关系的条件^[43]。根据以上论述,本文提出以下假设:

H_{3d}:社会邻近性有利于长三角城市群协同创新网络演化。

1.2 数据收集与变量测量

1.2.1 数据收集

自 2008 年以来,长三角地区凭借其自然禀赋优势和比较优势进入一体化发展新阶段,尤其是 2010—2016 年,国家层面的长三角一体化政策经历了从规划一体化向多中心一体化的转变。本文主要关注进入一体化发展新阶段后长三角城市群协同创新网络演化动力,且由于发明专利从申请到公开需要 18 个月,为保证数据完整,因此选取 2009—2018 年长三角城市群产学研联合申请专利数据为研究样本,其中,专利数据来源于国家知识产权局专利检索及分析网站(<http://pss-system.cnipa.gov.cn>)。以长三角城市群 41 座城市中的 139 所本科院校为检索点,剔除仅含有单个申请主体、非长三角区域产学研主体等不符合条件的数据,最得到专利 10 948 件。

各城市联合申请专利情况如图 2 所示,可以发现,各城市联合申请专利总量呈上升趋势且各城市增长速度不均衡。城市群产学研联合申请专利数从 2009 年的 568 件增长至 2017 年的 2 076 件,增长了 3.65 倍。2009—2017 年上海、南京、杭州、苏州、无锡和南通的联合申请专利量和增长速度一直居于前列;合肥联合申请专利数增长迅速,尤其是自 2016 年以来增长迅猛,2017 年超过镇江,位于城市群第六位;而池州、丽水、亳州和宿州等城市联合申请专利量少且增长速度明显慢于其它城市。

1.2.2 变量测量

本文模型中的解释变量包括网络结构变量、节点属性变量和网络关系变量 3 类,具体如表 1 所示。

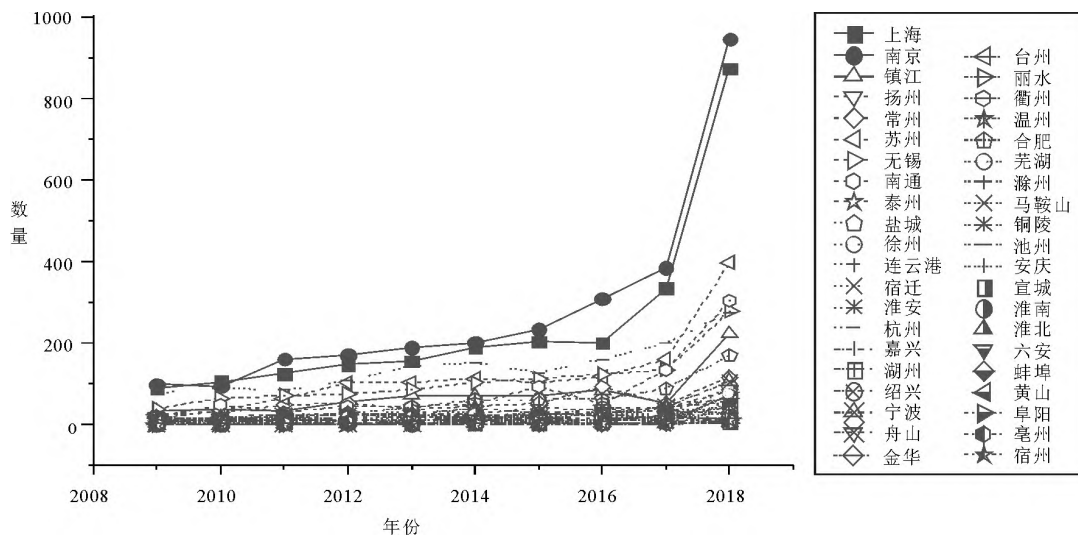

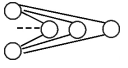






图 2 2009—2018 年长三角城市群联合申请专利情况

表 1 ERGM 模型统计量含义

解释变量	名称	对应图形	机制	假设检验	
网络结构变量	Edges	边		基础效应	
	Gwdsp	几何加权二元共享伙伴		中介性	是否倾向形成中介 2-路径
	Gwdegree	几何加权度分布项		聚合性	是否倾向形成星型结构
节点属性变量	Homop (γ)	节点同配		同配效应	属性相同的节点是否倾向发生联结
	DCov(γ)	节点属性		马太效应	属性越大的节点是否越倾向发生联结
网络关系变量	NCov(g-net)	关系属性			在其它网络 g 中存在关系的节点是否倾向发生联结

(1)网络结构变量。本文选取 Edges、Gwdsp 和 Gwdegree3 种网络内生结构变量,测量网络关系生成基本效应、网络生成的中介性与聚合性趋势。

(2)节点属性变量。

第一,马太效应。知识独特性 KU,参照 Brennecke 等^[28]的研究,其计算公式为,

$$KU = \sum \frac{1}{X_{im}}$$

其中, x_{im} 表示知识元素 m 被多少个城市 i 拥有,拥有该知识元素的城市越少,那么知识的独特性就越强。城市人均 GDP、R&D 体现了各城市研发创新能力,本文选取两者作为节点属性变量,考察其对长三角城市群协同创新网络演化的影响。

第二,同配效应。为了检验具有相同经济水平和 R&D 投入力度的城市间是否更容易进行协同创新,本文将各城市的 GDP 按排名前 25% 归为 GDPH,排名后 25% 为 GDPL,排名中间(25%~75%)归为 GDPM。相同地,将各城市人均 R&D 也根据排名分为 R&DH、R&DL 和 R&DM,采用 ERG 分别对 Homop GDPH、Homop GDPL、Homop GDPM、Homop R&DH、Homop R&DL 和 Homop R&DM 进行估计,以此考察各城市 GDP 水平与 R&D 水平同配性对城市群协同创新网络合作关系的影响。以上数据主要来自 2009-2018 年《中国城市统计年鉴》。

(3)网络关系变量。

第一,制度邻近性 IP。参照许培源等^[25]的研究,根据行政隶属关系进行划分,若两城市同为省会城市(直辖市)或者地级市,则记 $IP_{ij} = 1$,否则 $IP_{ij} = 0$ 。

第二,知识邻近性 KP。参考何喜军等^[16]对各主体间专利内容相似度的测量以及 Brennecke 等^[28]对两主体间知识接近性的测量,根据两城市共同拥有的知识元素与两城市拥有的全部知识元素的比值测度,即知识邻近性的计算公式为:

$$K P^{IPC}_{ij} = \frac{I^{IPC}_i \cap I^{IPC}_j}{I^{IPC}_i \cup I^{IPC}_j}$$

其中, $K P^{IPC}_{ij}$ 表示城市 i 与 j 之间的知识邻近, I^{IPC}_i 和 I^{IPC}_j 分别表示城市 i 与 j 的知识元素集合。

第三,组织邻近性 OP。参照 Balland 等^[44]的研

究,根据两城市是否属于同省域进行划分,若两城市属于同省域则记 $OP_{ij} = 1$,否则 $OP_{ij} = 0$ 。

第四,社会邻近性 SP。参照夏丽娟等^[45]的研究,根据以往两城市间是否存在合作关系进行测量,若两城市在 $t-1$ 年存在合作关系,则 $SP_{ij} = 1$,否则 $SP_{ij} = 0$ 。

根据上述整理的知识、组织、制度与社会邻近性矩阵,构建制度邻近性网络(Net-IP)、知识邻近性网络(Net-KP)、组织邻近性网络(Net-OP)以及社会邻近性网络(Net-SP),以此体现模型的网络关系属性。

1.3 ERGM 模型构建

指数随机图的一般表达式为 $\Pr(X=x) = \frac{1}{k} \exp\{\sum \theta_m Z_m(x)\}$,其中, k 是确保网络结构概率取值之和在 0~1 之间的常数参数, $Z_m(x)$ 为网络统计量, θ_m 为网络统计量的估计参数。ERGM 采用 MC-MC-MLE 对模型进行估计检验,一般使用 t 统计量检测参数的显著性,要求 p 值小于 0.01。此外,赤池信息量(AIC)和贝叶斯信息量(BIC)通常用来检测模型拟合程度,数值越小表明模型拟合优度越高。本文采用 R 语言中的 Statnet 程序进行模型处理。设计包含内生因素、外生因素两个层面的分析框架,建立 ERGM 模型:

$$\text{模型 1: } \Pr(Y=y) = (1/k) \exp (\theta_1 \text{Edges} + \theta_2 KU + \theta_3 R\&D + \theta_4 GDP + \theta_5 \text{HomopGDPL} + \theta_6 \text{HomopGDPM} + \theta_7 \text{HomopGDPH} + \theta_8 \text{HomopR\&DL} + \theta_9 \text{HomopR\&DM} + \theta_{10} \text{HomopR\&DH})$$

$$\text{模型 2: } \Pr(Y=y) = (1/k) \exp (\theta_1 \text{Edges} + \theta_2 Gwdsp + \theta_3 Gwdegree + \theta_4 KU + \theta_5 R\&D + \theta_6 GDP + \theta_7 \text{HomopGDPL} + \theta_8 \text{HomopGDPM} + \theta_9 \text{HomopGDPH} + \theta_{10} \text{HomopR\&DL} + \theta_{11} \text{HomopR\&DM} + \theta_{12} \text{HomopR\&DH})$$

$$\text{模型 3: } \Pr(Y=y) = (1/k) \exp (\theta_1 \text{Edges} + \theta_2 Gwdsp + \theta_3 Gwdegree + \theta_4 KU + \theta_5 R\&D + \theta_6 GDP + \theta_7 \text{HomopGDPL} + \theta_8 \text{HomopGDPM} + \theta_9 \text{HomopGDPH} + \theta_{10} \text{HomopR\&DL} + \theta_{11} \text{HomopR\&DM} + \theta_{12} \text{HomopR\&DH} + \theta_{13} \text{Net_IP} + \theta_{14} \text{Net_KP} + \theta_{15} \text{Net_OP} + \theta_{16} \text{Net_SP})$$

其中, Edges、Gwdsp、Gwdegree 是网络内生结

构变量,分别表示括边、几何加权二元共享伙伴、几何加权度分布项; KU 、 $R\&D$ 、 GDP 、 $Homop(R\&D)$ 、 $Homop(GDP)$ 是网络节点属性变量,分别表示城市知识元素的独特性、研发投入、经济发展水平、研发投入同配与经济发展水平同配; Net_IP 、 Net_KP 、 Net_QP 和 Net_SP 为网络节点关系协变量,分别表示地理邻近性、知识邻近性、制度邻近性和组织邻近性; $\theta_1 \sim \theta_{16}$ 是模型中的待估计系数。

2 研究结果分析

2.1 网络演化分析

为了直观反映自 2009 年以来长三角城市群协同创新网络演化情况,使用 Arcgis 测算其空间分布特征

并将其演化过程可视化,如图 3 所示。研究结果均以 2010 年、2014 年和 2018 年为例进行展示。由图 2 可以看出,2010—2018 年长三角城市群协同创新网络规模不断扩大,参与协同创新的城市主体不断增加,至 2018 年覆盖了长三角的全部 41 座城市。其中,上海、南京、杭州、苏州和无锡等城市一直保持最强联系节点地位,上海—南京、上海—杭州、镇江—南通之间的合作关系远比其它城市间密切,这些特征反映出协同创新网络中存在邻近效应和网络属性作用。此外,网络中形成了以上海、南京和杭州为核心,辐射同省域其它城市的“三足鼎立”布局向以上海、南京、杭州、苏州、无锡和合肥等城市为核心,辐射周边其它城市的多核心“核心—边缘”发展格局,这与现有文献结论一致^[7,46]。

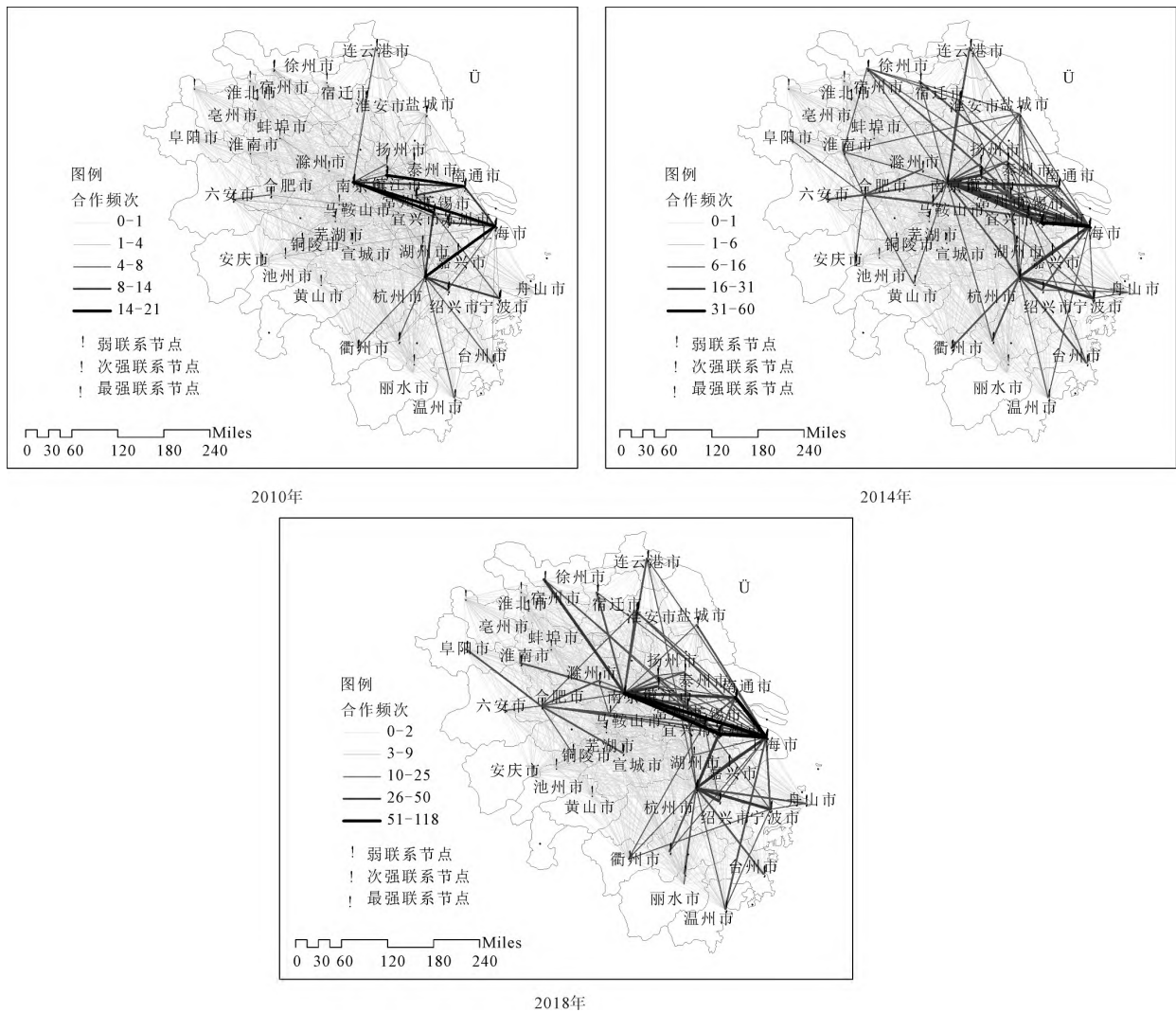


图 3 长三角城市群协同创新网络演化过程

2.2 ERGM 结果分析

采用逐步添加变量方法探讨 ERGM 拟合结果,模型结果如表 2 所示。表 2 中的模型 1 包括边属性变量和节点属性变量,模型 2 添加了内生结构变量,模型 3 加入了网络关系属性变量。在加入网络关系属性变量

后,模型 3 的 AIC 和 BIC 最小,表明模型 3 的拟合效果最好,因此采用模型 3 进行结果分析。

2.2.1 网络内生结构实证分析

在网络演化前期 $Gwdsp$ 和 $Gwdegree$ 均呈现显著的负向影响,主要表现为网络合作关系形成概率分别

是原来的 $0.836(= \exp(-0.179))$ 倍和 $0.262(= \exp(-1.338))$ 倍,后期 Gwdsp 呈现显著的正向影响,主要表现为网络合作关系形成概率分别是原来的 $1.07(= \exp(0.068))$ 倍。这说明随着城市群协同创新的深入,城市间合作更倾向于形成中介 2-路径,即中间节点连接两端并承担创新资源传递功能,反映了节点的中介性,此时城市群协同创新网络倾向于形成开放式三角形结构。

2.2.2 节点属性实证分析

由检验结果可知, H_{2a} 未得到验证, H_{2b} 得到部分验证。在马太效应方面,知识独特性在长三角城市群协同创新网络演化过程中发挥正向作用且影响力逐渐增强,主要表现为网络合作关系形成概率分别是原来的 $1.029(= \exp(0.029))$ 倍、 $1.038(= \exp(0.037))$ 倍和 $1.095(= \exp(0.091))$ 倍,表明独特性知识对追求创新突破的城市主体来说具有很强的合作吸引力^[47],从而对协同创新活动产生积极影响,有利于创新网络合作关系形成。虽然 GDP 通过显著性检验,但其对网络演化的影响微乎其微。在同配效应方面,高经济发展水平城市相较于中低发展水平城市而言,更倾向于建立强强联合(网络合作关系形成概率是原来的 $4.092(= \exp(1.409))$ 倍)或与同等发展水平城市进行协同创新,以实现资源最大化利用。相较于低科研资金投入城市,科研资金投入高的城市因掌握丰富的创新资源、具有

较强的独立科研能力,其与其它城市进行协同创新的需求较小。

2.2.3 网络关系属性实证结果

制度邻近性与社会邻近性在协同创新网络演化前期具有正向作用,主要表现为网络合作关系形成概率分别是原来的 $3.873(= \exp(1.354))$ 倍和 $3.452(= \exp(1.239))$ 倍;后期为负向影响,此时网络合作关系形成概率分别是原来的 $0.828(= \exp(-0.189))$ 倍和 $0.715(= \exp(-0.336))$ 倍。知识邻近性和组织邻近性在协同创新网络演化过程中始终发挥显著正向影响,主要表现为网络合作关系形成概率分别是原来的 $1.266(= \exp(0.236))$ 倍和 $8.776(= \exp(2.172))$ 倍。这说明在长三角城市群协同创新网络演化过程中,各城市更加倾向于与同省域其它城市开展协同创新,省会城市更易于带动本省域其它城市创新竞争力提升,而制度相悖会阻碍城际协同创新合作关系形成。随着协同创新的深入,创新复杂性也不断提升,需要知识库相近的城市间通过合作突破技术瓶颈;同省域城市间的知识、信息与技术交流成本低,同时,便于引导与管理知识创造过程以及协同创新过程;既往的合作经历有助于增强城市主体间信任,但是随着协同创新网络演化发展,网络中的主体更倾向于与未有合作经历的主体建立合作关系,以探索新知识、获取新资源以及拓展自身知识库。

表 2 ERGM 结果

变量	2010 年			2014 年			2018 年		
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3	模型 1	模型 2	模型 3
内生结构变量									
Edges	-6.629 *** (0.699)	-3.208 *** (0.017)	-4.638 *** (0.020)	-4.609 *** (0.529)	-2.134 *** (0.012)	-3.837 *** (0.017)	-5.970 *** (0.669)	-5.344 *** (0.012)	-7.227 *** (0.006)
Gwdsp		-0.259 *** (0.001)	-0.179 *** (0.001)		-0.139 *** (0.001)	-0.032 *** (0.001)		2.113e-04 (8.817e-04)	0.068 *** (0.001)
Gwdegrec		-1.051 *** (0.009)	-1.338 *** (0.011)		-1.726 *** (0.009)	-2.241 *** (0.012)		-1.127 *** (0.007)	-2.032 *** (0.002)
节点属性变量									
KU	0.059 *** (0.011)	0.078 *** (0.001)	0.029 *** (0.001)	0.063 *** (0.012)	0.082 *** (0.001)	0.037 *** (0.001)	0.087 *** (0.011)	0.086 *** (0.001)	0.091 *** (0.001)
GDP	3.048e-05 *** 3.462e-06 ** (7.257e-06)	9.771e-06 *** 7.437e-06 *** (2.221e-06)	1.523e-05 *** 5.821e-06 *** (2.447e-06)	8.088e-06 * 8.079e-06 *** (3.805e-06)	9.743e-07 (1.190e-06)				
R&D	-1.010e-07 (1.760e-07)	6.249e-07 *** (1.551e-07)	7.998e-07 *** (1.455e-07)	-1.614e-07 + (9.522e-08)	-1.160e-07 + (6.755e-08)	1.155e-08 (6.205e-08)	4.749e-08 * (4.011e-08)	5.139e-08 (3.535e-08)	5.698e-08 * (2.896e-08)
Homop(GDPL)	0.112 (0.494)	-0.068 *** (0.007)	-0.678 *** (0.009)	0.605 + (0.320)	0.293 *** (0.005)	-0.489 *** (0.007)	0.509 (0.406)	0.369 *** (0.007)	-0.119 *** (0.009)
Homop(GDPM)	-0.693 * (0.354)	-0.518 *** (0.006)	-0.163 *** (0.007)	-0.011 (0.288)	0.086 *** (0.005)	-0.218 *** (0.006)	-1.119 (0.287)	-1.106 *** (0.005)	-0.948 *** (0.007)
Homop(GDPH)	0.628 + (0.377)	0.350 *** (0.007)	0.274 *** (0.008)	0.052 (0.325)	-0.160 *** (0.006)	0.407 *** (0.007)	1.712 *** (0.352)	1.665 *** (0.007)	1.409 *** (0.008)
Homop(R&DL)	0.179 (0.459)	0.092 *** (0.007)	-0.192 *** (0.008)	0.858 ** (0.306)	0.451 *** (0.005)	0.345 *** (0.006)	-0.081 *** (0.323)	-0.076 *** (0.005)	0.166 *** (0.006)
Homop(R&DM)	0.181 (0.396)	0.167 *** (0.007)	-0.153 *** (0.007)	-0.146 (0.270)	-0.033 *** (0.005)	-0.160 *** (0.005)	0.582 * (0.260)	0.590 *** (0.005)	0.575 *** (0.006)
Homop(R&DHD)	-0.058 (0.417)	-0.339 *** (0.007)	-0.223 *** (0.008)	-0.258 (0.295)	-0.390 *** (0.006)	-0.334 *** (0.007)	-0.075 (0.291)	-0.107 *** (0.005)	-0.033 *** (0.007)
关系属性变量									
Net-IP	1.354 *** (0.012)	1.179 *** (0.010)	-0.189 *** (0.011)						
Net-KP	0.519 *** (0.007)	0.362 *** (0.006)	0.236 *** (0.009)						
Net-OP	2.069 *** (0.007)	2.318 *** (0.006)	2.712 *** (0.006)						
Net-SP	1.239 *** (0.008)	1.602 *** (0.006)	-0.336 *** (0.006)						
AIC	381.1	359.4	300	547.5	523.1	410	553.3	555.4	465.3
BIC	428.2	415.9	375.3	594.6	579.6	485.3	600.4	611.9	540.7

3 结论与讨论

本文基于2009—2018年长三角城市群各城市联合申请专利数构建协同创新网络,借助 ERGM 探究长三角城市群协同创新网络演化动力,得到一些研究结论与实践启示。

(1)长三角城市群协同创新网络存在传递性,现有合作关系与网络位置对协同创新网络演化产生重要作用。处于网络结构洞等关键位置的城市具有控制网络内知识、信息、技术等创新资源流动的优势。因此,对于其它城市来说,这些关键位置上的城市更具创新吸引力,因此更倾向于与该类节点形成创新合作关系。例如上海、南京、杭州、苏州、无锡和合肥等城市保持稳定的核心地位,它们辐射带动周边城市发展的网络布局优势依然强盛。鉴于此,政府应该发挥核心城市的辐射带动作用及其资源优势、产业优势,考虑将部分产业向周边城市迁移,推动创新资源流动和产业调整,进而驱动整个城市群协同发展。如上海要加快推进国际经济、金融、贸易、航运和科技创新“五个中心”建设,提升城市核心功能,实现长三角城市群内部更深层次的合作。

(2)独特的知识资源、高水平经济实力与研发能力对长三角城市群协同创新网络演化的影响显著。城市实力强有助于推进协同创新合作关系形成;而经济发展水平高的城市更倾向于“强强联合”或与同等发展水平的城市进行协同创新,而科研投入低的城市相较于科研投入高的城市,其寻求创新资源的需求更大。对此,政府应该积极探索经济发展与协同创新的协调机制和合作框架,引进补偿机制,缩小城市群内部经济发展差距,建设共享、开放和公平的协同创新环境,大力发展优势产业,提高对人才、知识等创新资源的吸引力。

(3)多维邻近性是长三角城市群协同创新网络演化的强大动力。知识邻近性和组织邻近性在长三角城市群协同创新网络合作关系形成中始终发挥积极作用,而制度邻近性和社会邻近性在网络演化前期发挥积极作用,但是随着协同创新的深入,制度邻近性和社会邻近性则不利于协同创新网络中合作关系形成。对此,政府应该制定相应政策,搭建产学研协同创新平台,完善创新资源布局;打破地方保护主义和市场分割,进一步引导产学研创新主体互动合作,推动人才、信息、技术和资金等创新资源的跨省域交互,助力各城市获得更多异质性资源;优化城市群内部产业结构,降低产业发展同质化,重视产业发展和协同创新之间的平衡,避免知识冗余与路径依赖,提高创新续航能力。

本文定位于研究长三角城市群不同城市间的产学研协同创新,但是不同产业协同创新网络的演化动力可能存在差异。未来研究可进一步细分产业,作深入

探讨。

参考文献:

- [1] 杨张博,高山行. 生物技术产业集群技术网络演化研究:以波士顿和圣地亚哥为例[J]. 科学学研究,2017,35(4):520-533.
- [2] 阮平南,王文丽,刘晓燕. 基于多维邻近性的技术创新网络演化动力研究:以 OLED 产业为例[J]. 研究与发展管理,2018,30(6):59-66.
- [3] FRIEDMANN J. The world city hypothesis[J]. Development and Change,1986,17(1):69-83.
- [4] DEMATTEIS G. Globalisation and regional integration; the case of the Italian urban system[J]. Geojournal,1997,43(4):331-338.
- [5] 熊小刚. 跨区域创新系统的协同发展研究[J]. 科技与管理,2013,15(1):39-43.
- [6] 解学梅. 协同创新效应运行机理研究:一个都市圈视角[J]. 科学学研究,2013,31(12):1907-1920.
- [7] 徐宜青,曾刚,王秋玉. 长三角城市群协同创新网络格局发展演变及优化策略[J]. 经济地理,2018,38(11):133-140.
- [8] 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.
- [9] 高丽娜,李湘君. 邻近性促进城市群创新了吗:基于长三角城市群的经验研究[J]. 科技管理研究,2019,39(23):103-108.
- [10] STEINMO M,RASMUSSEN E. How firms collaborate with public research organizations; the evolution of proximity dimensions in successful innovation projects[J]. Journal of Business Research,2016,69(3):1250-1259.
- [11] HONG J,FENG B,WU Y R,et al. Do government grants promote innovation efficiency in China's high-tech industries[J]. Technovation,2016,57-58:4-13.
- [12] SUN Y T,LIU K. Proximity effect, preferential attachment and path dependence in inter-regional network: a case of China's technology transaction[J]. Scientometrics,2016,108(1):201-220.
- [13] HONG W,SU Y S. The effect of institutional proximity in non-local university-industry collaborations: an analysis based on Chinese patent data[J]. Research Policy,2013,42(2):454-464.
- [14] 夏丽娟,谢富纪,付丙海. 邻近性视角下的跨区域产学研协同创新网络及影响因素分析[J]. 管理学报,2017,14(12):1795-1803.
- [15] 李琳,熊雪梅. 多维邻近性在集群外部知识获取与创新中的作用机制分析[J]. 科技进步与对策,2012,29(21):130-134.
- [16] 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,2018,33(3):184-192.
- [17] PATTISON P, WASSERMAN S. Logit models and logistic regressions for social networks; II. multivariate relations[J]. British Journal of Mathematical and Statistical

- Psychology, 1999, 52(2):169-193.
- [18] LUSHER D, KOSKINEN J, ROBINS G. Exponential random graph models for social networks[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [19] 段庆锋,冯珍. 基于指数随机图模型的学术社交网络形成机制研究[J]. 情报科学, 2019, 37(7):84-89, 145.
- [20] 段庆锋,马丹丹. 基于指数随机图模型的专利技术扩散机制实证研究[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(22):23-29.
- [21] HUALLACHAIN B O, LEE D S. Urban centers and networks of co-invention in American biotechnology[J]. The Annals of Regional Science, 2014, 52(3):799-823.
- [22] FAUST K. A puzzle concerning triads in social networks: Graph constraints and the triad census[J]. Social Networks, 2010, 32(3):221-233.
- [23] 段庆锋,蒋建. 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.
- [24] ORSENIGO L, PAMMOLLI F, RICCABONI M. Technological change and network dynamics: lessons from the pharmaceutical industry[J]. Research Policy, 2001, 30(3):485-508.
- [25] 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, 34(5):68-79.
- [26] 叶光辉,毕崇武. 知识交流视域下的跨地域科研协作发展态势及趋势分析[J]. 情报学报, 2020, 39(5):500-510.
- [27] 曾德明,周涛. 企业知识基础结构与技术创新绩效关系研究:知识元素间关系维度新视角[J]. 科学学与科学技术管理, 2015, 36(10):80-88.
- [28] BRENECKE 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.
- [29] 刘璇,汪林威,李嘉,等. 科研合作网络形成机理:基于随机指数图模型的分析[J]. 系统管理学报, 2019, 28(3):520-527.
- [30] 高翔,龙小宁. 省级行政区划造成的文化分割会影响区域经济吗[J]. 经济学(季刊), 2016, 15(2):647-674.
- [31] SHAW A T, GILLY J P. On the analytical dimension of proximity dynamics[J]. Regional Studies, 2000, 34(2):169-180.
- [32] BOSCHMA R. Proximity and innovation: a critical assessment[J]. Regional Studies, 2005, 39(1):61-74.
- [33] 杨博旭,王玉荣,李兴光. 多维邻近与合作创新[J]. 科学学研究, 2019, 37(1):154-164.
- [34] BALLAND P A. Proximity and the evolution of collaboration networks: evidence from research and development projects within the global navigation satellite system (GNSS) industry[J]. Regional Studies, 2012, 46(6):741-756.
- [35] BOSCHMA R, IAMMARINO S. Related variety, trade linkages, and regional growth in Italy[J]. Economic Geography, 2009, 85(3):289-311.
- [36] BOSCHMA R A, TER WAL A L J. Knowledge networks and innovative performance in an industrial district: the case of a footwear district in the south of Italy[J]. Industry and Innovation, 2007, 14(2):177-199.
- [37] BALLAND P A, BELSO-MARTINEZ J A, MORRISON A. The dynamics of technical and business knowledge networks in industrial clusters: embeddedness, status, or proximity[J]. Economic Geography, 2016, 92(1):35-60.
- [38] LESAGE J P, FISCHER M M, SCHERNGELL T. Knowledge spillovers across Europe: evidence from a Poisson spatial interaction model with spatial effects[J]. Papers in Regional Science, 2007, 86(3):393-421.
- [39] HEGDE D, TUMLINSON J. Does social proximity enhance business partnerships? theory and evidence from ethnicity's role in US venture capital[J]. Management Science, 2014, 60(9):2355-2380.
- [40] DAVID A P. Clio and the Economics of QWERTY[J]. The American Economic Review, 1985, 75(2):332-337.
- [41] 向希尧,裴云龙. 地理接近性对跨国专利合作的影响:社会接近性的中介作用研究[J]. 科学学与科学技术管理, 2016, 37(4):17-24.
- [42] 余谦,白梦平,覃一冬. 多维邻近性能促进中国新能源汽车企业的合作创新吗[J]. 研究与发展管理, 2018, 30(6):67-74.
- [43] CANTNER U, GRAF H. The network of innovators in Jena: an application of social network analysis[J]. Research Policy, 2006, 35(4):463-480.
- [44] BALLAND P A, DE VAAN M, BOSCHMA R. The dynamics of interfirm networks along the industry life cycle: the case of the global video game industry, 1987-2007[J]. Journal of Economic Geography, 2013, 13(5):741-765.
- [45] 夏丽娟,谢富纪. 多维邻近视角下的合作创新研究评述与未来展望[J]. 外国经济与管理, 2014, 36(11):45-54, 81.
- [46] 谢伟伟,邓宏兵,刘欢. 绿色发展视角下长三角城市群城市创新网络结构特征研究[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(17):52-59.
- [47] YAYAVARAM S, AHUJA G. Decomposability in knowledge structures and its impact on the usefulness of inventions and knowledge-base malleability[J]. Administrative Science Quarterly, 2008, 53:333-362.

(责任编辑:胡俊健)