

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

王海花,孙芹,杜梅,李玉

(上海大学管理学院,上海 200444)

摘要:基于依存型多层网络视角,利用2009—2018年长三角城市群产学研协同创新联合申请专利数据,构建包括合作网络、知识网络和城市—知识元素隶属网络在内的多层网络,探究长三角城市群协同创新网络结构特征演化,构建ERGM模型研究长三角城市群协同创新网络形成机制的内在、外在影响因素。结果表明,长三角城市群协同创新水平不断提升但仍处于弱联结状态;协同创新网络空间由“三足鼎立”格局向“多中心、多层次、趋平衡”格局转变;协同创新能力不断增强,技术领域出现空间聚集,各城市在不同领域各有侧重发展;协同创新网络形成受地理同配性、知识独特性和结构嵌入的影响,合作关系更倾向于中介2-路径结构。

关键词:依存型多层网络;协同创新;长三角城市群;ERGM

DOI:10.6049/kjbydc.2019090688

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:F127.5

文献标识码:A

文章编号:1001-7348(2020)09-0069-10

Research on the Evolution Trend and Mechanism of Collaborative Innovation Network in the Yangtze River Delta

——the Perspective of Interdependent Network

Wang Haihua, Sun Qin, Du Mei, Li Yu

(School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Based on the perspective of interdependent network, this paper constructs the multilayer network including collaborative network, knowledge network and affiliation network connecting cities to knowledge elements, to analyse structure characteristics and evolution trend of the collaborative innovation network. In addition, the formation mechanism of collaborative innovation network in urban agglomeration in the Yangtze river delta is also analyzed in this paper by establishing ERGM. Using the data of industry-university-research institutes joint patent application in urban agglomeration of Yangtze river delta from 2009 to 2018, we find that: the level of collaborative innovation in the Yangtze river delta has been constantly improved, but still in weak connection. The cyberspace pattern of collaborative innovation network has shifted from "three pillars" pattern to "multi-core, multi-level and balanced" pattern. With the continuous enhancement of collaborative innovation ability, technology field appears spatial aggregation, and each city has different emphases on development. The formation of collaborative innovation network is influenced by geographic homophily, knowledge uniqueness and structure embedding, and the cooperative relationship is more inclined to the intermediary 2-path.

Key Words: Interdependent Network; Collaborative Innovation; the Yangtze River Delta; ERGM

0 引言

创新已经成为推动国家和区域经济发展、科技进步的内驱动力。城市群作为我国区域创新的主体空间,已经成为我国经济发展的核心区域^[1]。随着“十三五”期间推动区域协调发展、建设全国20个城市群等

国家重大规划提出,以及十九大报告中创新驱动发展战略、加快建设创新型国家战略出台,城市群协同创新已成为政府部门和学术界关注的热点之一。长三角城市群作为我国最具经济活力、产业体系最完备、开放程度最高、科技创新能力最强区域被称为“世界第六大创新城市群”^[2]，“一带一路”与长江经济带重要交汇地带

收稿日期:2019-11-13

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJA630076);教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(15JZD017);上海市“科技创新行动计划”软科学研究领域重点项目(19692104300)

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;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;李玉(1997—),女,山东枣庄人,上海大学管理学院硕士研究生,研究方向为创新创业与知识管理。

武汉大学区域经济研究中心 协办

的地理位置也使其成为我国综合实力最强的区域。国务院印发的《关于进一步推进长江三角洲地区改革开放和经济社会发展的指导意见》明确提出,要着力增强长江三角洲地区自主创新能力,将其建设成为亚太地区重要的国际门户、全球重要的先进制造业基地、具有较强国际竞争力的世界级城市群。《中国城市群发展报告(2016)》^[3]显示,长三角城市群以明显优势位居全国城市群首位。然而,《长三角城市群发展规划》指出,与美国东北部大西洋沿岸城市群、日本太平洋沿岸城市群、英国中南部城市群等世界级城市群相比,长三角城市群仍然存在城市间分工协作不足、低水平同质化竞争严重、创新资源分配不合理、城市功能相对较弱等问题。因此,优化长三角城市群协同创新网络结构和空间布局、提高协同创新效率、健全一体化发展体制机制是其竞争力提升的关键(辜胜阻等,2013)。

当前,城市群协同创新网络研究主要聚焦在网络结构特征演化和形成机制分析方面。首先,在创新网络结构特征演化方面,随着跨组织创新活动网络组织形成和壮大^[5],集中在组织或区域内部创新网络研究^[5]向跨区域创新和协同创新研究发展。现有研究主要利用城市间合作论文数据^[6]或联合申请专利数据^[7]构建城市群合作网络,进而通过分析网络规模、中心性、结构洞、“小世界”特性以及凝聚子群特征等刻画城市群协同创新网络结构特征及演化。Scherngell等^[7]基于欧洲255个地区之间的专利数据探讨城市合作网络演变特征;周灿^[8]、许敏^[9]利用联合申请专利数据研究长三角城市群创新网络结构。不同的是,前者从本地和跨界多维空间尺度出发,后者从省际比较角度出发;李建成等^[10]基于长三角城市群论文合作数据,从整体网与自我网的空间分布、拓扑特征、结构复杂性等特征分析该城市群科学知识网络结构特征及其发展演化;谢伟伟等^[11]通过刻画长三角城市群绿色发展创新网络密度、节点中心度和网络中心势,证实该网络以发达城市为核心的半轮轴型集聚格局基本形成。其次,在形成机制分析方面,现有研究大多使用关系数据,采用QAP分析法进行分析。唐建荣等^[12]在分析长三角城市群协同创新网络结构特征的基础上,剖析该网络形成的重要驱动因素是地理邻近性、产业结构、高校人数和科技支出;许培源等^[1]从邻近性视角证明,地理、技术结构、经济、制度和语言多维邻近因素对粤港澳大湾区城市间创新合作有显著影响;高丽娜等^[13]指出,创新要素集聚与扩散是推动城市群协同创新网络形成的根本机制,城市创新要素规模与结构、产业特征异质性影响城市群协同创新模式。

现有文献为城市群协同创新网络研究奠定了基础,但是仍存在以下不足:首先,现有研究大多数着眼于单层网络并分析其结构特征^[10],较少考虑协同创新过程中的知识网络嵌入,未将城市与知识元素置于一个框架中分析、刻画协同创新程度和协同创新网络结构特征。此外,多数研究侧重于从邻近性视角探讨其外部影响因素,忽视了网络内在因素影响,或者仅从定性层面分析协同创新网络驱动因素^[14],难以充分揭示

协同创新网络形成机制。

创新主体本质上是知识元素的集合,创新主体协同创新过程也是知识元素之间不断重组、形成知识网络以实现创造新知识的过程^[15]。协同创新网络中的知识网络和合作网络具有非同构解耦特性,二者同时决定创新行为和创新结果^[16,17],合作网络为创新主体提供接触外部异质性知识的机会,知识网络则解释了创新主体知识组合潜能及应用模式等问题^[18]。因此,研究当前长三角城市群协同创新网络,需要同时考虑知识网络结构嵌入的影响,从而突破以往研究将知识网络和合作网络作为并行变量的限制。依存型多层网络^[19,20]能够突破单层网络中节点同质性和连边同质性的限制,增加包括两种不同性质节点的隶属网络,并将其与合作网络和知识网络有机结合,进一步剖析城市群协同创新网络结构特征演化及形成机制。复杂网络认为,网络边的相关性是网络结构形成的关键要素,即现有结构会影响新的边形成,而传统Logistic回归模型以网络边的独立性为前提,无法测量网络内生结构影响因素。随机指数图模型(Exponential Random Graph Model,简称“ERGM”)将网络中边的发生概率建模,包括外生性网络属性(节点或边的属性)和内生性结构(三角结构、星型结构等网络构型)^[23]嵌入,分析网络生成的因果关系,从而预测未来网络关系生成概率。Brennecke等^[16]基于ERGM预测企业知识网络结构特征对发明者之间的人际互动以及知识在组织内扩散和重组的影响;Chrobat等^[21]利用ERGM预测组织和团队中重要领导关系形成;何喜军等(2018)基于ERGM从网络内生结构、科技主体间关系属性、科技主体个体属性等维度预测科技主体间的专利技术交易机会。因此,ERGM在预测网络关系形成机制方面具有优势。

基于以上分析,本研究基于依存型多层网络视角,将长三角城市群合作网络、知识网络和城市一知识元素隶属网络3个不同网络整合到一个框架中,利用指数随机模型识别网络内生结构特征和外生变量(结点和结点间关系)的综合影响,解答以下问题:长三角城市群协同创新程度如何?其协同创新网络结构特征及演化如何?其协同创新网络形成机制如何?这对于长三角城市群协同创新网络结构优化、创新资源合理配置和更高质量的一体化发展具有重要意义。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与处理

相较于其它科研成果,专利是目前创新领域使用最广泛的数据,具有先进性和创新性^[22]。因此,将合作专利作为协同创新衡量指标具有合理性。本研究选取长三角城市群,包括上海、江苏、浙江和安徽在“三省一市”共41个城市作为研究对象,以2009—2018年城市群内产学研联合申请专利为数据,研究其协同创新程度、协同创新网络结构特征演化及形成机制。

本研究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>),检索

2009 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日长三角城市群 139 所本科院校申请的发明专利信息, 在检索栏专利申请(专利权)人处输入“XX 大学”(如复旦大学), 将检索到的 488 658 条专利数据批量下载, 剔除单个专利申请主体(仅有一个申请人)、非长三角区域主体(北京大学)、非产学研主体(军队、医院、个人)等不符合条件的专利数据, 最终得到 14 849 条专利数据。首先利用专利计量方法, 分析产学研协同创新联合申请专利数据时间分布和地域分布, 然后针对同一条专利申请人地域分布进行拆分, 获得城市间协同创新合作频次共计 7 653 次。拆分规则见表 1, 如果某条专利申请人为同济大学、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、上海与徐州, 则可拆分为上海和徐州以及上海和徐州两条合作关系。

表 1 联合申请专利拆分规则(示例)

原始主体	拆分结果	原始主体	拆分结果
AB	AB	ABC	AB; AC; BC
AAB	AB; AB	ABBC	AB; AB; AC; BC; BC

注: A、B、C 分别代表城市

1.2 研究方法

本研究利用长三角城市群产学研联合申请专利数据, 基于依存型多层网络视角构建一个能体现长三角城市群城市间合作关系、知识元素间组合关系以及城市—知识元素间隶属关系的多层次社会网络, 如图 1 所示。合作网络是以长三角城市群的 41 个城市为网络节点(Nodes), 城市之间联合申请专利的合作关系为联结(Ties)构建而成; 知识网络根据 Guan 等^[23]的划分原则, 以专利 IPC 分类号前 4 位划分出的 946 类知识元素作为网络节点, 以不同知识元素出现在同一条专利数据中作为联结。中间的城市—知识元素隶属网络是以 41 个城市和 946 类知识元素作为网络节点, 并以两类节点间的隶属关系为联结构建。

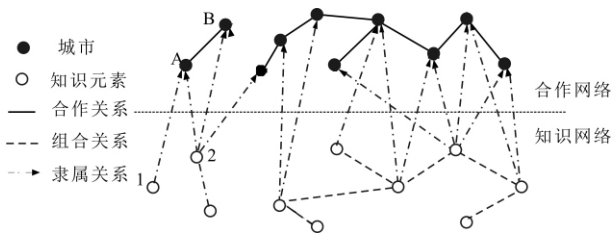


图 1 依存型多层网络

结合刘军^[24]、Barrat^[25]、Burt^[26] & Guan 等^[27]的研究成果, 本研究选取网络规模、网络密度、网络中心势、平均路径长度、平均聚类系数和点度中心度指标, 从整体网络和个体网络两个方面刻画长三角城市群产学研协同创新合作网络结构特征, 选取网络规模、网络密度和网络中心度测量知识网络结构特征演化。结合 Wang^[28]、Fleming^[29] & Brennecke^[16]的研究成果, 选取知识多样性、知识组合机会和知识独特性 3 个指标测量隶属网络结构特征及其演化。

2 协同创新网络结构特征分析

长三角城市群内各城市产学研联合申请专利情况如图 2 所示, 各城市联合申请专利总量呈上升趋势, 但城市间申请专利情况差异较大。长三角城市群产学研联合专利申请数量从 2009 年的 792 件增长至 2018 年的 2 829 件, 增长了 2.57 倍。上海、南京、杭州、苏州、无锡和南通等城市联合申请专利总量一直位居前列。长三角城市群内各城市产学研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, 但城市间联合申请专利情况差异较大。长三角城市群产学研联合申请专利数量从 2009 年的 792 件增长至 2018 年的 2 829 件, 增长了 2.57 倍。其中, 上海、南京、杭州、苏州、无锡和南通等城市联合申请专利总量一直位居前列; 宿州、亳州、黄山、池州和丽水等城市联合申请专利总量较少且增长速度明显慢于其它城市。

从长三角城市群城产学研协同创新频次看, 2009—2018 年协同创新频次呈逐年递增趋势, 其中 2018 年合作频次最多, 达到 1 341 次。2009—2018 年上海、江苏、浙江和安徽参与产学研协同创新频次占比分别为 13.8%、55.8%、22.0% 和 8.4%。其中, 南京、上海、杭州、苏州、无锡、南通和合肥分别以参与协同创新合作频次占比 17.0%、13.9%、10.6%、8.3%、6.6%、5.9% 及 3.5% 位于前列。这表明 2009—2018 年长三角城市群各城市知识创新合作关系密切, 协同创新程度不断加深并形成了以多个中心城市领先带动发展的格局。由此可见, 研究长三角城市群协同创新网络就必须分析长三角城市群创新网络结构特征。

2.1 合作网络结构演化分析

使用 Ucinet6.0 计算合作网络结构特征各项指标, 结果如表 2 所示。①节点数表示合作网络中参与协同创新的城市数量, 用于衡量合作网络规模。2009—2018 年长三角城市群参与产学研协同创新城市主体由 33 个增加到 41 个, 网络规模不断扩大且趋于稳定, 2018 年实现长三角城市群 41 个城市全部覆盖。网络规模越大, 网络资源越丰富, 就越有助于知识整合和创新^[30]; ②网络边数表示两城市主体之间的合作关系数量。联结次数表示合作网络中城市主体之间的合作次数。由表 2 可见, 合作网络边数和联结次数均呈逐年增长趋势, 联结次数数量和增长幅度均远大于网络边数, 说明各城市之间的合作更加频繁、合作关系更加密切, 同时协同合作也达到相对稳定状态; ③网络密度是指合作网络中各城市之间的合作紧密程度。结果显示, 合作网络密度逐年递增, 最高达到 0.190, 但整体仍处于低密度网络状态。这表明长三角城市群知识创新合作状态虽然得到改善且达到相对稳定状态, 但联系强度还没有达到完备状态; ④网络中心

势是指合作网络在一定程度上表现出向某中心城市集中的趋势,体现的是网络整体中心性。随着网络规模扩大,网络中心势在40%—53%的范围波动变化,说明该网络已经形成依赖于某些中心城市的空间集聚;⑤平均最短路径是指已建立合作关系的两个城市之间存在的最少边条数,用于衡量城市之间合作关系建立的难易程度。呈下降趋势的平均最短路径表明,城市之间的通达性提高,信息传递和合作交流效率提高,因合作成本和中间环节过多导致的风险降低(宋晶等,2017);⑥平均聚类系数是指两城市与同一城市存在合

作关系,且这两城市之间恰好也存在合作关系的概率,用于衡量创新主体之间聚集程度。结果显示,合作网络平均聚类系数一直维持在0.590~0.724之间,较高的平均聚类系数说明合作网络中各城市之间的聚集程度大,信息通达路径多,有利于信息传递和知识创新,但过度聚集也可能造成城市之间的知识冗余,导致资源浪费^[31]。此外,长三角城市群协同创新合作网络呈现较高的平均聚类系数和逐渐减小的平均路径长度表明,该网络呈现逐渐向“小世界”网络^[32]演化的趋势。

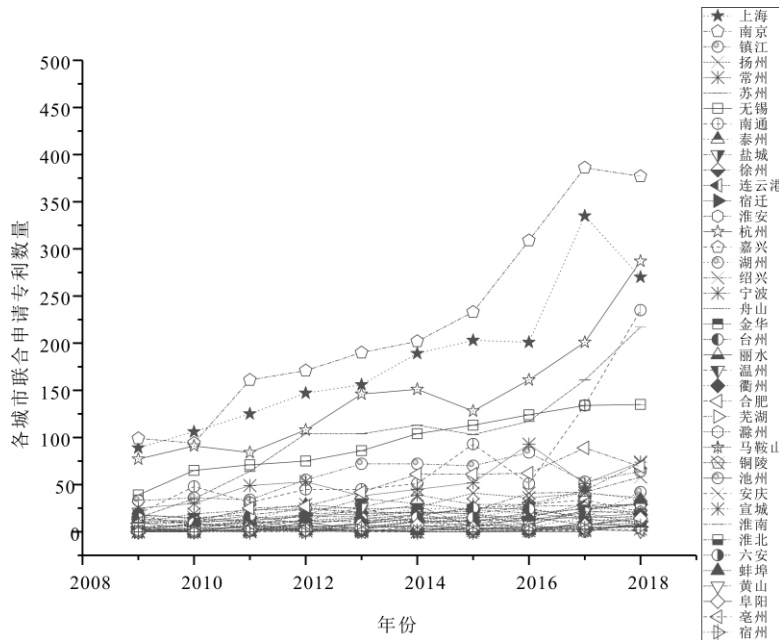


图2 2009—2018年长三角各城市联合申请专利情况

表2 合作网络测度指标

年份	节点数	网络边数	联结次数	网络密度	网络中心势(%)	平均路径长度	平均聚类系数
2009	33	158	318	0.096	45.06	2.131	0.662
2010	33	180	375	0.110	51.54	2.076	0.637
2011	37	204	465	0.124	44.74	2.165	0.687
2012	39	222	648	0.135	43.59	2.150	0.724
2013	38	242	669	0.148	52.82	2.077	0.695
2014	36	258	767	0.157	43.91	1.998	0.590
2015	38	262	854	0.160	48.91	2.053	0.692
2016	40	250	924	0.152	41.79	2.129	0.723
2017	40	266	1 292	0.162	48.65	2.047	0.753
2018	41	312	1 341	0.190	53.59	1.957	0.650

分析节点在网络中位置及与其联系的节点数量,可以探讨不同节点在网络演化过程中的差异性演化特征。表3和图3反映出2009—2018年长三角城市群协同创新网络中各城市点度中心度。

点度中心度是指在合作网络中与该城市有合作关系的其它城市个数,采用与该城市直接连线数量衡量,反映了该城市的相对重要程度。由表3可见,2009—2018年各城市点度中心度均有提升,表明相较于2009年,长三角城市群中各城市协同创新程度提高,城市群内各城市联系更加密切。从各个城市看,

上海、南京和杭州始终位于城市点度中心度的前3;苏州和无锡中心度排名一直稳定且居于前列;合肥自2012年进入中心度排名前5之后成长迅速,2016年和南京并列第一;阜阳、亳州、宣城、黄山、铜陵和安庆等城市中心度一直处于低值,表明上述城市处于长三角城市群协同创新网络边缘位置。总体来看,上海、南京和杭州始终处于长三角城市群协同创新网络核心位置;苏州和无锡发展稳定,处于长三角城市群协同创新网络关键位置;合肥创新能力提升迅速,对长三角城市群协同创新的影响越来越大,成为其协同创新

网络“多中心”布局中的“一个中心”。

图 3 反映了 2009—2018 年长三角城市群协同创新合作网络动态演化过程, 图中各节点为城市, 边线为城市之间的合作关系, 合作网络节点大小表明与该节点联系的节点数量, 节点越大表明与该节点直接联系的其它节点越多, 即该节点影响力越大; 联结两节点的边的粗细表明两节点之间的合作频次, 边越粗表明两节点之间的合作频次越高。在每年合作网络中, 上海、杭州、南京的节点都是最大的, 与其它城市之间的连线也是最多、最粗的, 说明上海、杭州和南京一直以来都处于长三角城市群协同创新网络核心位置, 发挥着辐射其它

城市协同创新、合作发展的作用。此外, 自 2014 年以后, 长三角城市群协同创新网络中心城市增多且关键城市数量获得增长, 主要原因有两个: 一是 2013 年以后, 随着“一带一路”倡议和“长江经济带”战略提出, 长三角城市群作为重要交汇地带, 在国家现代化建设大局中占有重要地位, 从而进一步推进长三角城市群协同发展; 二是《长江三角洲城市群发展规划》(2016—2020) 将长三角地区扩容到“三省一市”, 并对其空间格局、基础设施网络、创新网络、开放平台等进行规划, 为长三角城市群知识交流和共享、全面协同、加速创新提供了保障。

表 3 城市点度中心度

城市	2009	2012	2014	2016	2018	城市	2009	2012	2014	2016	2018	城市	2009	2012	2014	2016	2018
上海	20.0	22.0	23.0	21.0	28.0	绍兴	4.0	6.0	6.0	6.0	10.0	舟山	1.0	0.0	3.0	3.0	4.0
南京	21.0	22.0	21.0	22.0	25.0	盐城	4.0	7.0	12.0	5.0	9.0	淮安	1.0	3.0	6.0	5.0	8.0
杭州	17.0	18.0	17.0	18.0	22.0	徐州	3.0	6.0	8.0	7.0	11.0	宣城	1.0	2.0	0.0	1.0	1.0
无锡	10.0	16.0	14.0	16.0	16.0	宁波	3.0	6.0	8.0	7.0	7.0	衢州	1.0	2.0	2.0	2.0	2.0
镇江	9.0	10.0	10.0	15.0	13.0	黄山	3.0	1.0	3.0	2.0	1.0	淮南	1.0	4.0	9.0	3.0	7.0
南通	6.0	7.0	9.0	9.0	10.0	嘉兴	3.0	2.0	2.0	6.0	5.0	铜陵	0.0	1.0	0.0	1.0	2.0
常州	6.0	11.0	12.0	12.0	11.0	湖州	2.0	2.0	2.0	4.0	6.0	芜湖	0.0	1.0	3.0	2.0	4.0
扬州	5.0	7.0	7.0	6.0	9.0	滁州	2.0	2.0	5.0	2.0	7.0	淮北	0.0	3.0	4.0	3.0	4.0
合肥	5.0	14.0	16.0	22.0	20.0	温州	2.0	5.0	2.0	4.0	4.0	池州	0.0	2.0	0.0	0.0	3.0
苏州	4.0	12.0	12.0	12.0	12.0	连云港	2.0	3.0	3.0	4.0	8.0	六安	0.0	1.0	2.0	1.0	4.0
泰州	4.0	6.0	7.0	6.0	6.0	蚌埠	2.0	1.0	5.0	1.0	3.0	阜阳	0.0	1.0	2.0	2.0	2.0
台州	4.0	2.0	4.0	4.0	5.0	丽水	2.0	2.0	1.0	1.0	2.0	亳州	0.0	1.0	0.0	2.0	2.0
金华	4.0	6.0	7.0	3.0	6.0	宿迁	1.0	2.0	5.0	5.0	2.0	宿州	0.0	0.0	0.0	1.0	4.0
马鞍山	4.0	2.0	4.0	3.0	5.0	安庆	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0						

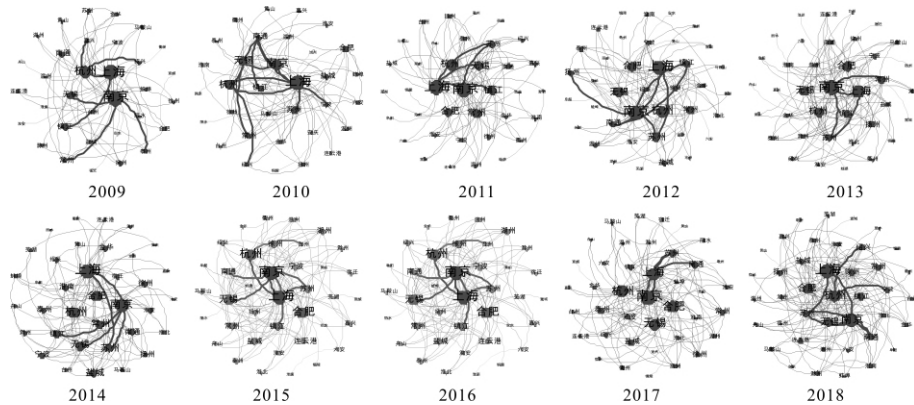


图 3 合作网络演化过程

凝聚子群是指由更加直接、密切、积极的关系构成的节点子集合, 用于分析网络整体结构的小子群构成^[6]。凝聚子群的存在说明城市群内部存在合作更加频繁、联系更加密切的集群^[1]。本研究中, 凝聚子群是指在长三角城市群协同创新网络中, 合作关系更加密切的城市集合。本研究选用迭代相关收敛法 (CONCOR) 进行聚类分析, 以最大分割深度为 2、收敛标准为 0.2 进行计算。

凝聚子群分析结果如表 4 所示, 纵向来看, 若凝聚子群数量较多, 则不利于整个创新网络中的成员进行密切联系, 将长三角城市群各年协同创新网络均分为 4 个子群则比较易于长三角城市群各城市之间的直接联系^[24]。横向来看, 第一子群集中了长三角城市群协同创新网络中合作关系紧密、中心度较高的城市, 以上

海、南京等城市为主; 第二子群集中了相互联系较为密切的城市, 以杭州、合肥等城市为主; 第三、四子群则集中了中心度较低且与其它城市存在较少联系的城市, 以衢州、阜阳等城市为主。结合表 5 可知, 2009 年联系密度最大的是第一子群和第二子群, 2012 年第一子群和第三子群的联系密度最大, 2014 年第二子群内部联系密度最大, 2016 年第一子群内部联系密度最大, 2018 年第一子群和第三子群的联系密度最大, 说明随着长三角城市群一体化战略推进, 长三角城市群形成了包括以上海和南京为核心, 以及以杭州和合肥为核心的多个组团创新凝聚子群。此外, 以衢州、阜阳等城市为代表的第三、四子群的联系密度突破零, 达到 2.125, 说明长三角城市群创新网络中处于较为边缘位置的城市与其它城市之间的创新联系得到加强, 整个创新网络

联系密度向均衡趋势发展。总体而言,长三角城市群协同创新网络呈现“多中心、多层次、趋均衡”结构布局,并且由上海、南京、杭州、合肥、苏州和无锡等中心城市带动辐射周边城市发展。

表4 长三角城市群知识创新网络凝聚子群分区

Table with 6 columns: 子群 (Subgroup), 2009, 2012, 2014, 2016, 2018. It lists cities belonging to four different subgroups over time.

表5 长三角城市群合作网络凝聚子群密度矩阵

Table with 5 columns: 子群 (Subgroup), 1, 2, 3, 4. It shows a density matrix for the four subgroups.

注:每个数值分别代表2009、2012、2014、2016、2018年的子群密度

2.2 知识网络结构演化分析

知识网络各测度指标结果如表6所示。①节点数用来衡量知识网络规模,即各年参与长三角城市群协同创新的知识元素数量。网络规模由2009年的205个增长至2018年的335个,表明知识网络规模不断扩大,知识要素和创新资源越来越丰富,长三角城市群协同创新技术领域得以扩展。此外,网络边数从836条增长至1836条,表明知识元素之间的组合越来越频繁,不同技术领域之间的合作更加密切;②网络密度由0.0020增长至0.0043,表明协同创新知识元素之间的合作关系增加且联系程度加深,但仍属于低密度网络;③点度中心度由1.284增长至2.812,说明知识元素之间的平均联系次数不断增加,但仍有进一步提升的空间。

为了更直观地观察长三角城市群2009—2018年协同创新知识网络结构特征及演化趋势,本研究运用软件Gephi0.9.1构建知识网络并将其可视化,结果如图4所示。

2.3 城市—知识元素隶属网络

城市—知识元素隶属网络分析,以2009、2018年为例展示,结果见表7和图5。①知识多样性是指各城市所拥有的异质性知识元素数量,城市知识多样性越高,就越有利于其与外部其它城市建立合作关系,从而提高自身协同创新能力;②知识组合机会是指各城市所拥有的知识元素在任意其它两个知识元素组合路径中

起中介作用的能力,用来衡量知识元素之间可能发生的组合关系,城市知识组合机会越大,说明其拥有的知识元素越有可能对不同知识元素进行重组,就越有利于利用现有知识进行创新;③知识独特性是指城市在与其相联系的其它城市不熟悉的领域具有丰富的异质性知识,知识独特性绝对值越大,说明其拥有的异质性知识资源越多。表7结果显示,长三角城市群各城市知识多样性和知识组合机会均有提升,表明长三角城市群创新知识和资源不断丰富,新知识开发及利用现有知识进行创新的能力不断增强;各城市知识独特性绝对值提高,拥有的异质性知识增多,表明城市有各自侧重发展的技术领域和产业,整体创新水平得到提升。

表6 知识网络测度指标

Table with 5 columns: 年份 (Year), 节点数 (Nodes), 边数 (Edges), 网络密度 (Network Density), 网络中心度 (Network Centrality). It lists metrics from 2009 to 2018.

分析长三角城市群各城市拥有的知识元素种类及数量变化,可以发现长三角城市群协同创新网络中技术领域变化。根据国家知识产权局中国专利公布公告

的 IPC 分类查询的分类号 (A——人类生活必需; B——作业、运输; C——化学、冶金; D——纺织、造纸; E——固定建筑物; F——机械工程、照明、加热、武器、爆破; G——物理; H——电学) 进行统计, 结果发现:

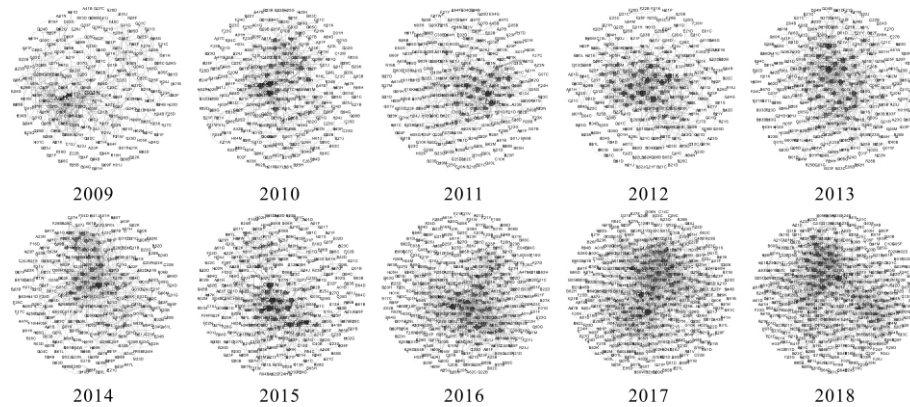


图 4 知识网络演化过程

表 7 隶属网络测度指标

2009				2018			
城市	KD	KO	KU	城市	KD	KO	KU
上海	169	108.21	-647	滁州	6	13.23	-21
南京	114	75.61	-563	温州	9	6.63	-67
杭州	104	33.50	-531	连云港	7	1.00	-54
无锡	42	7.63	-291	蚌埠	7	3.95	0
镇江	45	20.53	-266	丽水	2	16.22	-21
南通	30	20.15	-206	宿迁	1	0.00	-8
常州	35	30.54	-209	安庆	1	2.43	-12
扬州	10	20.48	-85	舟山	8	13.20	-63
合肥	23	9.18	-192	淮安	4	0.00	-26
苏州	29	5.21	-182	宣城	5	0.00	-41
泰州	15	5.49	-131	衢州	5	0.86	-59
台州	14	3.18	-131	淮南	10	3.19	-56
金华	20	1.14	-102	铜陵	0	6.85	0
马鞍山	17	4.51	-106	芜湖	0	2.18	0
绍兴	22	0.94	-138	淮北	4	0.00	-35
盐城	8	66.95	-81	池州	0	3.63	0
徐州	10	17.54	-69	六安	0	6.66	0
宁波	14	3.04	-73	阜阳	0	0.00	0
黄山	9	18.49	-75	亳州	0	0.00	0
嘉兴	27	8.80	-220	宿州	0	0.00	0
湖州	4	6.10	-39				

注: KD 表示知识多样性, KO 表示知识组合机会, KU 表示知识独特性注: KD 表示知识多样性, KO 表示知识组合机会, KU 表示知识独特性

(1) 从每年各城市拥有的知识元素数量占长三角拥有的知识元素总量看, 2009 年上海拥有的各类知识元素数量在各类知识元素总量中占比均为第一, 分别为 0.161 9、0.203 5、0.153 8、0.191 5、0.218 8、0.333 3、0.241 9、0.267 4。2018 年, 上海在 B 类和 F 类知识元素中占比仍为第一, 分别为 0.118 7 和 0.181 8; 杭州在 A 类、C 类和 D 类知识元素中占比第一, 分别为 0.118 4、0.106 2 和 0.149 1; 南京在 E 类知识元素中占比为 0.112 4, 居 41 个城市之首; 南通分别以 0.095 7 和 0.191 5 的占比在 G 类和 H 类知识元素中居于第一。

(2) 从各类知识元素增长情况看, 相较于 2009 年, 2018 年各类知识元素数量分别增长了 2.895 2、3.504 4、1.919 2、2.425 5、2.781 3、2.200 0、2.612 9、2.186 0 倍, “作业、运输”技术领域协同创新发展速度最快; C 类知识元素仍然分别以 260 和 499 的数量位于各年第一, 但相较于其它知识元

素, 其增长幅度最小。由此可见, 随着协同创新战略推进, 长三角城市群协同创新领域出现空间聚集, 各城市在不同领域各有侧重地进行协同创新; 各技术领域协同创新力度不同, 传统“化学、冶金”仍为协同创新的重点, “作业、运输”领域发展更加迅速。

3 协同创新网络生成机制分析

3.1 ERGM 模型构建

指数随机图模型的一般形式为: $Pr(X = x) = \frac{\exp\{\sum \theta_A Z_A(x)\}}{k}$ 。其中, k 是确保网络结构新的概率范围在 0~1 的常数, θ_A 是网络结构统计量 $Z_A(x)$ 的系数。本文考虑长三角城市群协同创新网络中知识网络嵌入并结合已有研究成果, 构建包含内生因素、外生因素两个层面的分析框架, 建立 ERGM 模型

如下：

$$P(X=x) = \frac{1}{k} [\exp(\theta_1 \text{Edges} + \theta_2 \text{Gwdsp} + \theta_3 \text{Gwesp} + \theta_4 \text{Gwdegree} + \theta_5 \text{Kstar}(2) + \theta_6 \text{nodecov}(\text{"KU"}) + \theta_7 \text{nodematch}(\text{"Province"}))]$$

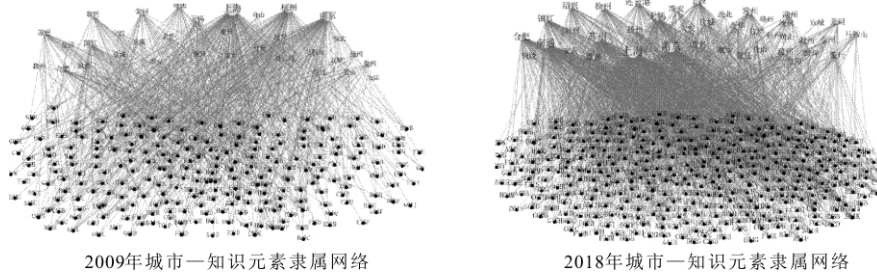


图 5 城市—知识元素隶属网络

具体变量及相关解释见表 8。考虑到知识多样性、知识组合机会和知识独特性表示知识网络的不同维度,且三者之间的相关性较高,故本研究选取代表各城市拥有异质性知识资源程度的知识独特性测量隶属网络特征对协同创新网络的影响。

表 8 ERGM 模型统计量含义

变量	名称	对应图形	机制	解释
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
Gwesp	几何加权共享伙伴		闭合性	是否倾向形成闭合三角形
Gwdegree	几何加权度分布项		聚合性	是否倾向形成星型结构
Kstar(2)	2 星		聚合性	是否倾向联结两个节点
nodecov("KU")	节点协变量		马太效应	知识独特性多大的节点是否越倾向于发生联结
nodematch("Prvince")	节点同配		同配性	相同省份的节点是否倾向于发生联结

3.2 ERGM 结果分析

采用 R 环境下的 Stattenet 程序包计算 ERGM 模型,并使用马尔科夫连蒙特卡罗最大似然估计法(MCMC)估计模型参数,结果如图 6 和表 9 所示。统计结果显示,样本网络密度为 0.334,拥有节点 41 个,边 274 条,三角形 874 个,2-路径 5 006 个,表明存在数量庞大的星型结构。

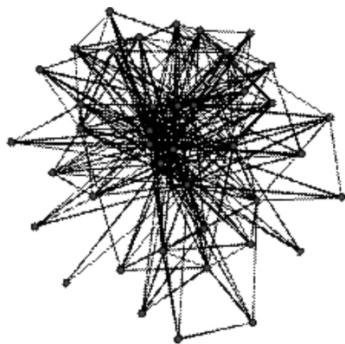


图 6 样本网络

参考段庆锋等^[33]的研究成果,对参数拟合程度采用以下两种方法进行判定:一是 t 检验法,由 p 值判断参数显著性水平;二是参数绝对值至少是标准差的 2 倍,若成立则可判断变量在模型中能够发挥显著效应。从整体上看,本研究变量均表现出较好的拟合效果。

(1) 结构嵌入方面。变量 Gwdsp、Gwesp、Gwdegree 和 Kstar(2)系数均显著为正,意味着新成立的关

系能够形成中介 2-路径、闭合三角形、星型结构和 2 星的概率是其它情形的 1.117(= exp(0.111))、1.496(= exp(0.403))、1.281(= exp(0.248))和 1.074(= exp(0.071))倍,说明协同创新网络合作关系形成倾向于中介 2-路径、闭合三角形、星型结构和 2 星结构。

(2) 在马太效应机制方面,nodecov("KU")系数显著为负,意味着城市每增加一个知识独特性,与其它城市形成合作关系的几率是原来的 0.999(= exp(-0.001))倍,说明知识独特性对城市之间合作关系形成具有反向效应,即拥有独特性知识的城市与其它城市形成合作关系的概率较小,出现这种情况的原因可能是:一方面,城市所拥有的独特性知识对整个城市群协同创新没有重要性,难以在知识创新过程被利用;另一方面,创新主体会潜心于自己独特的知识领域进行研发而不会积极与其他创新主体展开合作。

(3) 在同配性方面,nodematch("Province")系数为正,说明地理层面的同配性可促进城市之间合作关系形成,同一省份内各城市之间的合作关系建立概率是不同城市之间的 15.120(= exp(2.716))倍,同配性效应显著。

检验 ERGM 模型对城市之间合作关系形成机制的捕捉能力,需要进行模型拟合优度诊断。基本思路是检验根据拟合模型模拟得到的随机模型是否与原模型具有相同的结构特征,若存在则说明模型拟合效果好。本研究选取经典结构特征指标——二元共享伙伴 DP(i)进行拟合优度诊断。结果如图 7 所示,实线

表示原模型的统计特征,箱体代表随机模型的结构特征,实线基本位于箱体中线附近,表明模型拟合效果良好。

表9 ERGM 模型参数估计结果

变量	拟合系数	标准差	p 值
Edges	-8.741***	0.064	0.000 1
Gwdsp	0.111*	0.045	0.013
Gwesp	0.403***	0.089	0.001
Gwdegree	0.248***	0.074	0.001
Kstar(2)	0.071**	0.025	0.005
KU	-0.001***	0.000 1	0.000 1
Province	2.716***	0.077	0.000 1

注:***代表 $p < 0.001$, **代表 $p < 0.01$, * 代表 $p < 0.05$

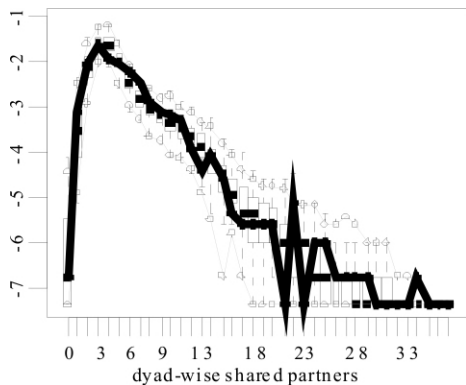


图7 ERGM 模型拟合优度诊断

4 结语

4.1 研究结论

本研究基于依存型多层网络视角,通过对长三角城市群协同创新网络结构特征、时空演化趋势以及生成机制影响因素进行分析,主要得出以下结论:

(1)长三角城市群协同创新水平不断提升但仍处于弱联结状态。2009—2018年协同创新网络呈现出网络规模不断扩大、网络密度持续提高、关键节点不断增多、联结次数稳步上升、平均路径长度波动下降等发展趋势,城市协同创新水平不断提高,创新技术领域不断扩大,创新资源更加丰富。但创新合作网络与知识网络密度最大值仅为0.190和0.0043,两类网络均处于弱连接状态,一体化程度有待加深。

(2)长三角城市群协同创新网络空间由“三足鼎立”格局向“多中心、多层次、趋平衡”格局演变。从网络中心性看,上海、南京和杭州一直处于协同创新网络中心位置,合肥、苏州和无锡等城市迅速成长为协同创新网络的“新中心”,池州、六安、阜阳、亳州和宿州等城市一直处于网络边缘位置。“小世界”发展趋势以及凝聚子群分析结果表明,长三角城市群协同创新网络发展呈现由中心城市带动、辐射边缘城市创新的格局,协同创新网络整体趋于一体化和均衡化发展。

(3)长三角城市群协同创新能力不断增强,技术领域出现空间聚集。从隶属网络分析结果看,知识多样性、知识组合机会和知识独特性绝对值均呈递增趋势,各城市拥有的知识元素种类及数量也发生了变化。协

同创新网络知识和资源不断丰富,新知识开发能力以及利用现有知识进行创新的能力不断增强。长三角城市群协同创新领域出现空间聚集,各城市在不同领域各有侧重地进行协同创新,传统“化学、冶金”仍然是创新重点,但是“作业、运输”领域发展更加迅速。

(4)长三角城市群协同创新网络形成受地理同配性、知识独特性和结构嵌入的影响。同配性方面,相同省份的城市之间更容易形成合作关系;马太效应方面,城市所拥有的独特性知识会对其合作关系形成起抑制作用;结构嵌入方面,协同创新网络中各城市之间的合作关系倾向于中介2-路径、闭合三角形和星型结构,即合作关系社区化倾向、关系资源的中介性以及网络结构的“核心—边缘”倾向,其中,社区化发展倾向最为显著。

4.2 理论贡献

(1)使用社会分析方法将城市 and 知识元素置于一个隶属框架下,分析城市所拥有的知识元素属性与演化,全面探究城市群协同创新网络动态演化趋势。

(2)基于依存型多层网络视角构建长三角城市群协同创新中合作网络、知识网络和城市—知识元素隶属网络的多层次网络结构,分析协同创新网络结构特征和演化趋势,弥补现有研究仅从单层网络进行分析的不足,从多层网络视角揭示城市群协同创新网络特征与演化。

(3)构建 ERGM 回归模型,识别影响长三角城市群协同创新网络的内生结构变量和外生变量,分析协同创新网络形成机制,拓展 ERGM 模型应用领域,从而丰富产学研协同创新与合作关系预测相关研究。

4.3 政策启示

(1)长三角城市群协同创新发展需要整合创新资源,实现优势互补。政府部门应加快机制体制创新,积极推动以上海、南京、杭州、合肥、苏州和无锡等城市为主的“多中心”城市辐射,拉动周边城市发展。同时,发挥上海、南京、杭州和合肥等城市的人才优势、资源优势,苏州、无锡等城市的地理位置优势,马鞍山、阜阳、亳州和宣城等城市的劳动力优势,整合各地创新资源,打破城市之间的发展壁垒,促进信息、知识、技术和人才交流,发挥各自创新优势。

(2)长三角城市群协同创新发展需要统筹区域资源,推动公平发展。“小世界”网络特性虽然可以使网络信息传递更加快速和便捷,但是几个联结的改变便可能改变网络特性。因此,网络中资源公平性原则格外重要^[10]。位于网络边缘位置的第三、四子群资源匮乏,国家政策需要平衡各城市创新能力,因地制宜,协同发展。从促进安徽省深度融合到长三角城市群一体化发展过程中,政府应该采取相关促进措施,例如增加财政支持、引进人才、发展研究型院校等,助推边缘城市创新水平提高,加强各城市一体化发展协同作用。

(3)长三角城市群协同创新发展需要发挥各区域资源优势,优化产业结构。立足各城市功能定位,调整产业布局,形成各自优势产业。例如,上海是国际金融中心,杭州发展电子商务平台,南京集聚中国制造业,

以合肥为中心发展电子产业集群,利用各城市优势资源形成产业聚集,构建高效开放融合的产业网络。提高创新资源和知识元素聚集性,促进多学科、多产业领域协同创新和融合发展,从而推动协同创新网络良性发展。

(4)长三角城市群协同创新发展需要突破集体行动困境,建立长效合作机制。政府应该通过相关政策引导,突破省内合作局限,打破资源垄断并摆脱关系依赖,建立起城市群内部由中心城市带动边缘城市发展的协同创新和长效合作机制。合理布局创新资源,提高协同创新效率并保持合作关系的稳定性。

本研究使用长三角城市群内部产学研协同创新数据,但是各城市与城市群外部也存在产学研合作和创新合作,后续研究可以对长三角城市群内外部协同创新网络进行研究,从而为长三角城市群一体化发展与协同创新提供具体政策建议和实践启示。

参考文献:

[1] 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.

[2] 世界六大创新城市群[J].张江科技评论,2019(1): 8-9.

[3] 刘士林,刘新静.中国城市群发展报告2016[M].北京:东方出版中心,2016.

[4] 冯泰文,李一,张颖.合作创新研究现状探析与未来展望[J].外国经济与管理,2013,35(9): 72-80.

[5] COOK P.Regional innovation system,clusters,and the knowledge economy [J].Industrial & Corporate Change,2001,10(4).

[6] 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.

[7] SCHERNGELL T,LATA R.Towards an integrated european research area? findings from eigenvector spatially filtered spatial interaction models using european framework programme data[J].Papera in Regional Science,2013,92(3): 555-577.

[8] 周灿,曾刚,宓泽锋,等.区域创新网络模式研究——以长三角城市群为例[J].地理科学进展,2017,36(7): 795-805.

[9] 许敏,王慧敏.基于社会网络分析的校企专利合作网络结构研究——长三角城市群高校的省际比较[J].科技管理研究,2018,38(24): 87-95.

[10] 李建成,王庆喜,唐根年.长三角城市群科学知识网络动态演化分析[J].科学学研究,2017,35(2): 32-40.

[11] 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.

[12] 唐建荣,李晨瑞,倪攀.长三角城市群创新网络结构及其驱动因素研究[J].上海经济研究,2018(11): 63-76.

[13] 高丽娜,宋慧勇,张惠东.城市群协同创新形成机理及其对系统绩效的影响研究[J].江苏师范大学学报(哲学社会科学版),2018,44(1): 125-132.

[14] 张荣天.长三角城市群网络结构时空演变分析[J].经济地理,2017,37(2): 46-52.

[15] 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.

[16] 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.

[17] YAYAVARAM S,CHEN W.Changes in firm knowledge couplings and firm innovation performance: the moderating role of technological complexity[J].Strategic Management Journal,2015,36(3): 377-396.

[18] 付雅宁,刘凤朝,马荣康.发明人合作网络影响企业探索式创新的机制研究——知识网络的调节作用[J].研究与发展管理,2018,30(2): 21-32.

[19] 张欣.多层复杂网络理论研究进展:概念、理论和数据[J].复杂系统与复杂性科学,2015,12(2): 103-107.

[20] GAO J,BULDYREV S V,STANLEY H E,AL E Networks formed from interdependent networks [J]. Nature Physics,2011,8(1): 40-48.

[21] CHROBOT-MASON D,GERBASI A,CULLEN-LESTER K L.Predicting leadership relationships: the importance of collective identity[J].The Leadership Quarterly,2016.

[22] 赵建吉,曾刚.创新的空间测度:数据与指标[J].经济地理,2009,29(8): 1250-1255.

[23] GUAN J,YAN Y J Z.How do collaborative features affect scientific output? evidences from wind power field[J].Scientometrics,2015,102(1): 333-355.

[24] 刘军.整体网分析讲义:UCINET 软件实用指南 [M].上海:格致出版社,2009.

[25] BARRAT A,BARTHELEMY M,PASTOR-SATORRAS R. The architecture of complex weighted networks[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2004,101(11): 3747-3752.

[26] BURT R S.Structural holes: the social structure of competition[M].Harvard University Press,1993.

[27] GUAN J,ZHANG J,YAN Y.The impact of multilevel networks on innovation[J].Research Policy,2015,44(3): 545-559.

[28] WANG C,RODAN S,FRUIN M.Knowledge networks, collaboration networks, and exploratory innovation[J].Academy of Manage Journal,2014(57): 484-514.

[29] FLEMING L,WAGUESPACK D M.Brokerage, boundary spanning, and leadership in open innovation communities [J].INFORMS,2007(7).

[30] MCEVILY R B.Network structure and knowledge transfer: the effects of cohesion and range[J].Administrative Science Quarterly,2003,48(2): 240-267.

[31] 赵炎,王琦,郑向杰.网络邻近性、地理邻近性对知识转移绩效的影响[J].科研管理,2016,37(1): 128-136.

[32] WATTS D J,STROGATZ S H.Collective dynamics of small world networks[J].Nature,1998,393(6684): 440-442.

[33] 段庆锋,冯珍.基于随机指数图模型的学术社交网络形成机制研究[J].情报科学,2019,37(7): 84-145.

(责任编辑:张悦)