

长江中游城市群知识创新合作网络研究

——高水平科研合著论文实证分析

谢伟伟¹, 邓宏兵^{1,2}, 苏攀达¹

(1. 中国地质大学(武汉) 经济管理学院;

2. 湖北省区域创新能力监测与分析软科学研究基地, 湖北 武汉 430074)

摘要:选取长江中游城市群 28 个城市作为研究区域, 基于 2006—2017 年区域高水平合著论文构建知识创新合作网络, 分析网络特征并探讨网络邻近性作用机制。结果表明: 网络规模日趋扩大, 联系日趋增强并趋于稳定, 基本形成了以长沙、武汉、南昌为核心的多中心网络空间结构, 且网络节点具有显著等级层次性。通过特征路径长度和集聚系数分析发现, 网络具有小世界特征, 但无标度特征不明显。QAP 回归结果表明, 地理、社会、技术和人力资本邻近都对知识合作网络有显著影响。

关键词:知识创新; 创新合作网络; 论文合著; 网络特征; 长江中游城市群

DOI: 10.6049/kjbydc.2018100428

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(2019)16-0044-07

Research on Knowledge Innovation Cooperation Network in the Middle Reaches of the Yangtze River

——Evidence from High-Level Scientific Research Co-Author Papers

Xie Weiwei¹, Deng Hongbing^{1,2}, Su Panda¹

(1. School of Economics of Management, China University of Geoscience;

2. Institutes of Soft Science on Regional Innovation Capacity Monitoring and Analysis, Wuhan 430074, China)

Abstract: Using the high level thesis cooperation to construct the cooperation network of knowledge innovation from 2006 to 2017 in the middle reaches of the Yangtze River. We analyzed the evolutionary trends and the characteristics of complex networks, and also explored the proximity mechanism of innovation cooperation network. The results show that: in terms of the overall structure of the knowledge innovation network, the network scale and contact strength have become increasingly stable. What's more, a multi-center structure with Changsha, Wuhan and Nanchang as the core is basically formed. The nodes of network have obvious hierarchical levels. Through the analysis of the characteristic path length and agglomeration coefficient, it is found that the knowledge cooperation network in the middle reaches of the Yangtze River has small-world features, but the scale-free characteristics of the network are not obvious. The QAP (quadratic assignment procedure) regression results indicate that the geographical proximity, social proximity, technological proximity, and human capital proximity all have a significant impact on the knowledge cooperation networks.

Key Words: Knowledge Innovation; Innovation Cooperative Network; Co-Author Papers; Network Characteristics; the Middle Reaches of the Yangtze River

0 引言

区域创新是促进区域经济协调发展、提高区域整体竞争力的重要力量^[1], 通过科技创新引领社会经济

发展已经成为一种必然趋势。区域创新网络能够有效发挥创新主体协同效应, 对知识溢出、技术扩散过程、区域经济发展路径等具有重要意义^[2]。当前, 区域知识创新活动日益频繁, 区域之间的知识创新合作已经成为

收稿日期: 2019-03-13

基金项目: 中国地质大学(武汉)“地学长江计划”项目(CUGCJ1823); 湖北省科技支撑计划项目(2015BDF032); 湖北省区域创新能力监测与分析软科学研究基地开放基金项目(HBQY2017z03)

作者简介: 谢伟伟(1993—), 女, 江苏省如皋人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院博士研究生, 研究方向为区域经济学; 邓宏兵(1966—), 男, 湖北五峰人, 博士, 中国地质大学(武汉)经济管理学院教授、博士生导师, 湖北省区域创新能力监测与分析软科学研究基地负责人, 研究方向为区域经济学; 苏攀达(1992—), 男, 福建福州人, 中国地质大学(武汉)经济管理学院博士研究生, 研究方向为区域经济学。本文通讯作者: 邓宏兵。

武汉大学区域经济研究中心 协办

区域创新的新力量。以往很多学者基于引力模型或者重力模型建立区域之间的创新联系^[3,4],但这种方法受模型局限性的影响较大,并且与现实网络有所差别,而新兴科研合作网络和专利合作网络已经引起国内外学者广泛关注^[5-7]。联合申请专利和论文合作是目前高等院校、科研院所、企业等科学研究机构进行知识交流的主要载体,同时也被认为是反映合作创新活动的主要指标。专利合作侧重于技术性合作,而论文合作则偏向于知识交流。因此,论文合作相比于专利合作,更能反映区域之间的知识创新合作水平,故本文选择科研论文合作数量作为知识合作创新指标。随着社会网络分析方法在区域经济领域的广泛应用,网络中心性^[8]、结构洞^[9,10]、小世界性^[11-13]、无标度特征^[14]等创新网络特征研究日益丰富。学者们发现,国际和国家层面的知识合作网络具有小世界性^[15],并具有“核心—边缘”结构^[16],区域层面的知识合作网络相对中心度的城市等级层次性较强^[17]。此外,关于知识合作创新网络结构背后的邻近性影响机理也被广泛关注,学者们主要从地理距离、社会邻近、组织邻近、经济邻近方面分析其对知识合作网络演化的作用。对于装备制造业创新网络研究发现,地理邻近仍是网络重要影响因素,社会邻近能够促进网络节点间的知识流动^[18],行政邻近和知识邻近也是影响网络的重要因素^[19]。对于全球科研论文合作网络研究发现,地理距离对国际科研论文合作起到了微弱抑制作用,而社会邻近和经济邻近则表现出积极促进作用^[16]。但关于地理距离对创新合作网络的作用,现有研究也存在着不一致的结论,如 Ma^[20]指出地理邻近对国家城市科学合作网络的作用逐渐增强。

整体看,目前知识创新网络研究更多地关注全球、全国以及特定产业,对于特定区域尤其是处于科技创新上升期的长江中游城市群研究不足;对于网络特征的研究有待于从网络等级规模及二模网络时间序列演化角度进行深入分析。此外,邻近性角度研究忽略了

表 1 长江中游城市群城市知识创新合作网络特征统计结果(2006—2017年)

| 特征 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 节点数 | 21 | 24 | 24 | 25 | 25 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 28 | 28 |
| 边数 | 88 | 96 | 114 | 136 | 130 | 160 | 182 | 204 | 222 | 216 | 248 | 380 |
| 密度 | 1.85 | 1.93 | 1.89 | 1.84 | 1.89 | 1.93 | 1.81 | 1.73 | 1.75 | 1.72 | 1.70 | 1.73 |

1.2 研究方法

1.2.1 网络中心度分析

网络中心度主要包括度数中心度、接近中心度、中介中心度等。本文选择点的度数中心度直观地反映节点中心性,点的度数中心度可以分为绝对度数中心度和相对度数中心度。绝对度数中心度是指与节点直接相连的点的个数,相对度数中心度是绝对度数中心度的标准化形式。本文选择绝对度数中心度作为反映网络节点中心性的指标。

$$D_i = \sum_j m_{ij} \quad (1)$$

式(1)中, D_i 表示节点*i*的绝对度数中心度,如

果节点*i*与除*i*以外的其它节点*j*相连,那么 $m_{ij} = 1$,否则 $m_{ij} = 0$ 。综上,本文选择长江中游城市群作为研究区域。由于仙桃、天门、潜江统计数据缺失,故最终选择 28 个城市并构建 2006—2017 年知识创新网络。首先,通过 Ucinet 6 建立时间和地区之间的二模网络,分析网络时间演化特征,并利用 Arcgis10.2 绘制 2006—2017 年网络联系图,分析网络空间演化特征。其次,基于节点度数划分网络等级规模并分析长江中游城市群知识创新合作网络等级规模演化特征。再次,阐明知识创新网络的复杂性,继而对知识创新合作网络的小世界性和无标度特征进行研究。最后,为研究网络影响因素,从多个角度构建邻近矩阵并对知识创新网络进行 QAP 回归分析。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本文基于高水平合著论文合作构建知识创新合作网络,能够有效反映区域之间的科学合作水平及知识流动水平。Web of ScienceTM核心合集数据库收录了 12 000 多种世界权威的高影响力学术期刊,能够方便确定作者所处单位并分析检索结果^[16]。因此,本文以 Web of ScienceTM数据库为数据来源,基于长江中游城市群高校、研究单位等机构之间的高水平合作论文构建网络。针对数据库提供的高级检索方式,选择时间段 2006—2017 年,对长江中游城市群 28 个区域进行检索,最终可得到 12 个 28*28 的无向论文合作矩阵。表 1 列出了长江中游城市群知识创新合作网络统计特征。从统计特征看,与 2006 年相比,2017 年的网络节点和网络边数都明显增加,说明网络规模逐渐扩大的同时,网络节点之间的知识溢出流动性也得到加强。与此同时,网络密度较低且呈现降低态势,一方面说明网络整体联通性不强,尤其是边缘城市之间的弱关系连接较多,另一方面是由于网络中新增节点尚处于初级发展阶段,网络联系强度较低。

果节点*i*与除*i*以外的其它节点*j*相连,那么 $m_{ij} = 1$,否则 $m_{ij} = 0$ 。

1.2.2 小世界特征分析

复杂网络指标的分析与判断主要包括小世界特性(small world)与无标度特征(scalefree)分析,以及中心度(centrality)、结构洞(structure hole)、凝聚子群分析(cohesive subgroup)、块模型分析(blockmodels)、核心—边缘模型分析(core—periphery model)等个体网络结构特征分析。本文主要考察知识创新网络小世界性和无标度特征规律及演化形态。

在创新网络研究演化进程中,小世界理论逐渐成为主流。个体之间的创新活动,一方面,受地理距离的

限制,同时与区域间经济发展水平、政策开放力度等因素有必然联系,即规则的创新网络节点之间的连接方式受到一定社会规律的影响;另一方面,创新网络节点之间以一个随机概率联结成网络,并不遵循既定规则。因此,创新网络是介于完全规则和完全随机之间的复杂网络,即小世界网络。Travers&Milgram^[21]于1969年率先提出“六度分离理论”,即世界上任何人之间都可以通过大约6步就可以建立联系。在此基础上,Watts&Strogatz^[22]于1998年提出的小世界网络模型(Small World Network),是一种介于规则网络和随机网络之间的复杂社会网络。由于随机网络特征路径长度(characteristic path length)较短,规则网络集聚系数(clustering coefficient)较大,故小世界网络应该同时具备上述两种指标特性。此外,小世界熵数(small world quotient)这一指标能够较好地体现网络整体性和关联性^[23],Uzzi & Spiro^[24]对其的定义是集聚系数/特征路径长度。近年来,越来越多的学者开始研究创新网络的小世界性,认为小世界特征有利于促进区域创新^[25]。

1.2.3 无标度特征分析

无标度特征是反映度数分布规律的指标,网络度数能够充分反映网络节点之间的连接性质。假设 $p(k)$ 是度数为 k 的节点在网络中出现的概率, $P(k)$ 是 $p(k)$ 的累计概率分布。当 $p(k)$ 或 $P(k)$ 服从幂律分布时,说明网络具有无标度特征,即 $P(k) \propto k^{-\gamma}$ ($2 \leq \gamma \leq 3$)。其中, γ 为幂函数指数,当其在 $[2, 3]$ 之间时,网络具有较强的无标度特征,反之不然。

1.2.4 网络回归分析方法

由于 OLS 方法要求变量之间是完全独立的,而网络二元数据节点之间总是存在着直接或间接联系,采用传统的 OLS 方法不能完成参数估计和统计检验。QAP 最初是研究社会关系的重要方法,是一种对两个

方阵中各元素相似性进行比较的方法。QAP 相关性分析以矩阵数据置换为基础,对两个方阵中的元素进行比较,从而计算出两个矩阵之间的相关系数。QAP 回归分析则是研究一个矩阵与多个矩阵之间的回归关系,即研究因变量矩阵与多个自变量矩阵之间的关系。Krackhardt^[26]提出对系数进行非参数检验的 QAP 回归。首先,对自变量和因变量进行常规多元回归分析;然后,对因变量矩阵各行各列进行随机置换并重新计算回归,同时保存所有系数值和判定系数 R^2 值;最后,重复上述步骤几百次,以保证估计统计量的标准误差。本文选用 UCINET 6.0 软件作为 QAP 分析工具,论文合作网络基本回归模型构建如下:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 X_{ij} + e_{ij} \tag{2}$$

式(2)中, Y_{ij} 是论文合作矩阵, X_{ij} 是自变量矩阵, e_{ij} 是误差项, β_0 是常数项系数, β_1 是自变量系数。

2 网络特征分析

2.1 网络时空动态结构演化特征

为分析知识创新网络随时间推移所产生的变化,通过 Netdraw 绘制 2006—2017 年各时间节点地区的二模网络图(two-mode network)(见图1),直观地分析总联系强度随时间推移的变化情况。其中,节点之间的连线表示存在创新合作,线条粗细代表创新合作强度。选择合理的切分点可以直观地看出网络演化特征。二模网络平均联系值为 98,因此,联系强度 98 可以作为反映网络整体的集中趋势。但是,由于网络联系低于 98 的连线较多,为了更加突出知识创新合作水平的时间演化差异,经过多次敏感性分析发现,分割点 350 能够更加合理、直观地划分节点是否属于强联系区域。

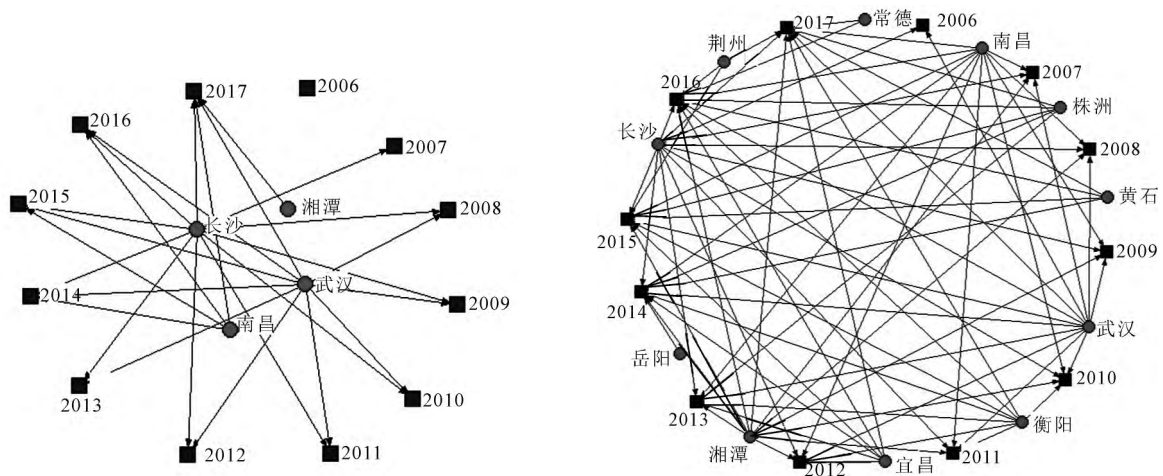


图1 长江中游城市群知识创新合作网络时间演化情况(2006—2017年)

图1(左)是联系强度高于350的所有存在联系的节点,图1(右)创新合作强度均高于98,未出现的其余城市表示与其它城市之间不存在知识创新合作关系。

观察图1(左)可以发现,长沙、武汉和南昌市是仅有的3个知识创新合作强度高于350的城市。整体来看,2006—2017年长江中游城市群知识创新合作可以分为

3 个阶段,分别是低速增长期(2006—2007 年)、中速增长期(2008—2011 年)、高速增长期(2012—2017 年)。由图 1 可见,2006 年是一个孤立节点,尚没有合作数量高于 350 的地区出现,2007 年有且仅有长沙市论文合作强度高于 350,2008—2011 年新增节点武汉市,两市创新合作强度不断提升。2012 年知识创新合作增长速度开始明显提升,以 2014、2015 年为终点的节点增加了南昌市,以 2017 年为终点的节点增加了湘潭市。各地区在 2014 年以后的创新合作水平显著提升,要素流动加快,知识交流频繁。综合来看,2006—2017 年网络规模逐渐扩大,但合作强度有待提升,网络内部存在差异,极化特征十分明显,发展不均衡现象将持续存在。

通过 Arcgis10.0 数据管理分析模块绘制网络图,并将网络联系按照自然断裂法分层级,每隔 4 年选取

一个时间节点以观察知识创新合作网络空间格局变化(见图 2)。整体来看,武汉和长沙一直位于网络中心,且 2006—2017 年创新合作呈现明显增长态势。2006 年主要以武汉和长沙为热点区域,但两个节点的合作强度与 2017 年相比差距较大。2011 年网络联系强度比 2006 年新增了一个层级,热点区域新增了湘潭,次热点区域新增了南昌和宜昌。从 2017 年的知识创新合作网络图可以看出,基本上形成了以武汉、长沙、南昌、湘潭为稳定核心的知识创新网络,核心—边缘结构凸显。从热点区域空间格局看,以武汉为中心形成了一个扇形放射形状,其辐射作用相比于长沙和南昌更明显。整个长江中游城市群的跨界创新合作强度依次为:武汉城市圈>长株潭城市群>环鄱阳湖城市群。总体而言,长江中游城市群的跨界创新合作强度依次,严重阻碍了区域一体化发展。

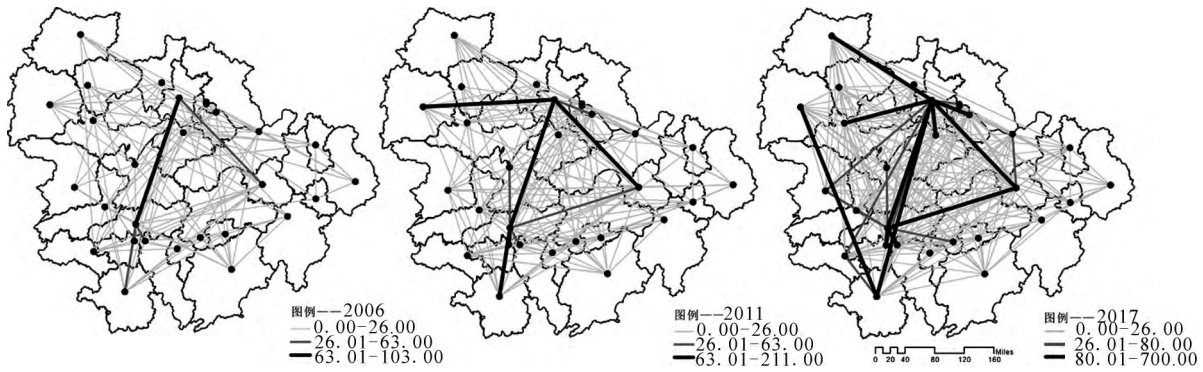


图 2 长江中游城市群知识创新合作网络空间结构(2006、2011、2017 年)

2.2 网络等级规模特征分析

网络中心度是定量描述网络集聚程度的常用指标。应用 Ucinet 计算 2006—2017 年各节点的相对度数中心度(D),通过多次敏感性测试,确定适当阈值,从而设定 5

个层级。第一层级(核心)的节点为 $D \geq 10$,第二层级(半核心)是 $4 \leq D < 10$,第三层级(半边缘)是 $1 \leq D < 4$,第四层级(边缘)是 $0 < D < 1$,第五层级是 $D = 0$ 。本文仅选择 2006 年、2011 年和 2017 年代表研究时间点,如表 2 所示。

表 2 长江中游城市群知识创新合作网络等级规模划分

| 层级 | 2006 | 2011 | 2017 |
|-------------------------|--|--|--|
| 第一层级($D \geq 10$) | 长沙市、武汉市 | 长沙市、武汉市 | 武汉市、长沙市、南昌市 |
| 第二层级($4 \leq D < 10$) | 无 | 南昌市 | 湘潭市 |
| 第三层级($1 \leq D < 4$) | 湘潭市、南昌市、株洲市、衡阳市 | 湘潭市、衡阳市、宜昌市、株洲市 | 衡阳市、荆州市、宜昌市、株洲市 |
| 第四层级($0 < D < 1$) | 黄石市、宜昌市、岳阳市、常德市、娄底市、咸宁市、九江市、益阳市、吉安市、黄冈市、荆门市、宜春市、景德镇市、荆州市、萍乡市 | 黄石市、岳阳市、益阳市、娄底市、黄冈市、吉安市、咸宁市、九江市、荆州市、常德市、宜春市、景德镇市、荆门市、新余市、上饶市、萍乡市、鄂州市、鹰潭市、孝感市、襄阳市 | 黄石市、常德市、咸宁市、襄阳市、黄冈市、岳阳市、九江市、娄底市、益阳市、宜春市、荆门市、吉安市、景德镇市、萍乡市、孝感市、新余市、鄂州市、上饶市、鹰潭市、抚州市 |
| 第五层级($D = 0$) | 襄阳市、孝感市、新余市、鄂州市、上饶市、鹰潭市、抚州市 | 抚州市 | 无 |

从表 2 可以得到如下结论:第一,中心层级节点始终包括武汉市和长沙市。值得注意的是,武汉中心度在 2006—2013 年低于长沙,2014—2017 年高于长沙。2017 年,第一层级新增了南昌市,同时湘潭市位于第二层级。第二,第四层级节点数量占比最多,说明网络中存在大量处于边缘位置的城市,也解释了网络密

度不高的原因。第三,处于第五层级的节点数量逐渐减少,到 2017 年已经不存在孤立节点,基本形成了以武汉和长沙为核心,南昌为次核心的网络格局。第四,位于第三层级的节点数量呈逐渐增加态势。总的来说,网络结构更加紧密,网络格局逐渐清晰,但仍存在明显问题,如南昌始终与武汉和长沙存在较大差距,江西与

湖北、湖南的差距也依旧显著。又如,信息流动速度和知识扩散速度滞后问题导致核心城市与非核心城市的创新合作能力差异过大,网络知识外溢效应还不显著。

2.3 复杂网络特征分析

2.3.1 小世界特征分析

判断网络是否具有小世界特征的标准为: $L/L_{Random} \approx 1, C/C_{Random} \geq 1$,且 Q 值较大。当上述条件满足时,说明网络具有小世界特性。 L_{Random} 、 C_{Random} 是与现实网络具有相同节点的随机网络特征路径长度和集聚系数,通过 Matlab 生成一个节点为 28 的随机网络,平均路径长度是 1.918,集聚系数是 0.295 88。由表 3 可以看出,论文合作创新网络具有较短的平均路径长度和较大的集聚系数,即网络具有明显小世界特征,说明虽然网络内部联系强度较不均衡,但网络整体连通性和网络效率比较高,网络中孤立节点比较少。

2.3.2 无标度特征分析

选取 2006、2011、2017 年 3 个时间节点,分别对其网络节点度数和度数累计概率分布进行拟合。图 3 是 3 个时间节点的度数与度的累计概率分布拟合曲线及实际值的折线图。显然,2006 年、2011 年及 2017 年网络度数和度数的累计概率之间都呈现一定的幂律关系,但指数分别是 0.791 4、0.853 3 和 0.796 2,均小于 2,说

明知识创新合作网络无标度特征不明显,但是网络中仍然存在大量低度数节点,高度数节点仅占少数,网络异质性较高。此外,2011 年实际值散点偏离拟合函数的偏离程度明显高于 2006 年和 2017 年,度数拟合效果较好,且其斜率较其它年份更小,下降幅度明显较小。总的来说,长江中游城市群创新合作网络集中化程度经历了一个先加强后减弱的过程。由此可见,创新合作能力日益加强的同时,也带来了网络联系强度极大不均衡分布的问题。

表 3 2006—2017 年长江中游城市群知识创新合作网络小世界特征

| 年份 | 平均路径长度 | | 集聚系数 | | 小世界熵数 |
|------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| | L | L/L _{Random} | C | C/C _{Random} | Q |
| 2006 | 1.852 | 0.966 | 28.206 | 95.329 | 15.230 |
| 2007 | 1.935 | 1.009 | 35.536 | 120.102 | 18.365 |
| 2008 | 1.891 | 0.986 | 40.29 | 136.170 | 21.307 |
| 2009 | 1.837 | 0.958 | 43.644 | 147.506 | 23.758 |
| 2010 | 1.887 | 0.984 | 45.709 | 154.485 | 24.223 |
| 2011 | 1.926 | 1.004 | 30.412 | 102.785 | 15.790 |
| 2012 | 1.815 | 0.946 | 35.302 | 119.312 | 19.450 |
| 2013 | 1.732 | 0.903 | 56.164 | 189.820 | 32.427 |
| 2014 | 1.749 | 0.912 | 30.651 | 103.593 | 17.525 |
| 2015 | 1.721 | 0.897 | 55.315 | 186.951 | 32.141 |
| 2016 | 1.701 | 0.887 | 50.356 | 170.191 | 29.604 |
| 2017 | 1.732 | 0.903 | 52.465 | 177.319 | 30.292 |

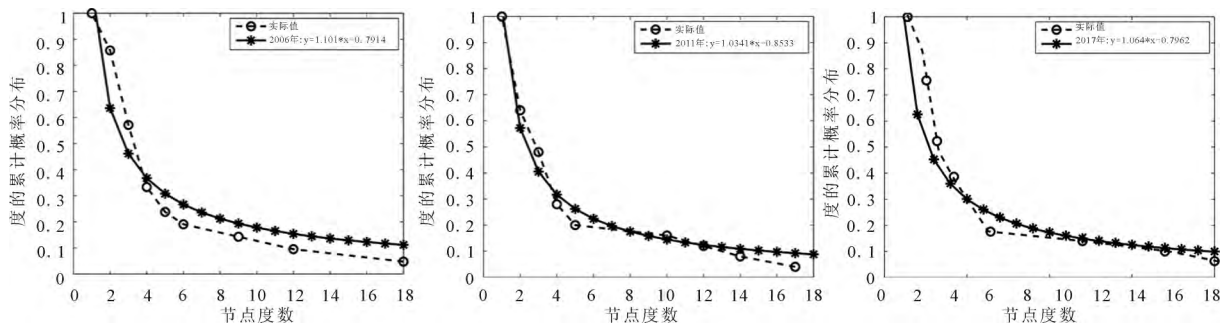


图 3 长江中游城市群知识创新合作网络度数累计概率分布

3 网络邻近性作用机制分析

知识创新合作网络的形成与加强是诸多因素共同作用的产物,本文通过构建相关邻近矩阵,对长江中游城市群知识创新合作网络进行 QAP 回归分析。

3.1 因素选择

根据以往研究,地理邻近、经济邻近、社会邻近、技术邻近及人力资本邻近等因素都会驱动区域创新网络发展与优化。

地理邻近是指节点在地理距离上的接近程度,一般地理邻近有以下几种度量方法:①以 Arcgis 计算地图上两个城市之间的直线距离;②两个城市之间的最短交通时间距离;③两个城市之间的最短公路距离。本文选取第一种方法衡量地理邻近水平,计算公式如下:

$$W_1 = \begin{cases} 1/d_{ij}^2 & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, d_{ij} 为 i 地和 j 地之间的实际地理距离。

社会邻近测度参考吕国庆对社会邻近的测度方法,基于 Anatole Rapoport 在 1953 年提出的三元闭包理论构建社会邻近矩阵。本文通过 $t-1$ 时段两个节点在网络中的关系距离的倒数表示 t 时刻社会邻近水平 (W_2)。为了表征科学技术邻近程度对合作创新的影响,参考王火根、沈利生^[27]的做法,建立新的技术邻近矩阵,具体表示如下:

$$W_3 = W_1 \text{diag}(Y_1/\bar{Y}, Y_2/\bar{Y}, \dots, Y_n/\bar{Y}) \quad (4)$$

式(4)中, W_1 是地理距离邻近矩阵, Y_i 为第 i 个地区的 3 种专利授权数, \bar{Y} 为总专利授权数均值。

对于人力资本邻近程度的衡量,有学者使用人均

受教育年限、大学生人数等指标。本文认为,相较于其它指标,科学研究、技术服务和地质勘查业从业人员与创新是直接相关的。因此,选择这一指标构建人力资本邻近矩阵,方法同技术邻近相似,具体表示如下:

$$W_4 = W_1 \text{diag}(H_1/\bar{H}, H_2/\bar{H}, \dots, H_n/\bar{H}) \quad (5)$$

式(5)中, W_1 是地理距离邻近矩阵, H_i 为第 i 个地区的人力资本, \bar{Y} 为总人力资本均值。经济邻近通过重力模型构建经济距离,公式如下:

$$W_5 = \frac{(PGDP_i - PGDP_j)^2}{GDP_i * GDP_j} \quad (6)$$

式(6)中, $PGDP_i$ 、 GDP_i 分别代表 i 地区人均 GDP 和 GDP 。

3.2 QAP 相关性分析

本研究构建 2008 年、2012 年及 2017 年 3 个 QAP 回归模型。首先利用 Ucinet 软件进行 QAP 相关性分析。由表 4 可知,地理邻近、社会邻近、技术邻近及人力资本邻近与论文合作之间均呈现显著正相关关系。而经济邻近水平与合作创新在模型 1 和模型 2 中的相关关系不显著,表明经济水平相似性在合作创新网络早期演化过程中并没有给区域之间的合作带来积极显著的影响,因此,在接下来的 QAP 回归分析中将经济邻近要素予以剔除。

表 4 QAP 相关性分析结果

| 变量 | 2008 | 2012 | 2017 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| 地理邻近(W_1) | 0.171 ** | 0.145 ** | 0.138 *** |
| 社会邻近(W_2) | 0.345 *** | 0.314 *** | 0.280 *** |
| 技术邻近(W_3) | 0.140 *** | 0.295 *** | 0.332 *** |
| 人力资本邻近(W_4) | 0.424 *** | 0.402 *** | 0.358 *** |
| 经济邻近(W_5) | 0.002 | 0.006 | 0.220 * |

3.3 QAP 回归分析

根据 QAP 回归方程,将自变量和因变量矩阵导入 Ucinet 当中,进行 2 000 次矩阵置换得到结果,如表 5 所示。

表 5 QAP 回归结果

| 变量 | 2008 | 2012 | 2017 |
|-----------------|------------|------------|------------|
| 地理邻近(W_1) | 0.002 | 0.012 | -0.228 *** |
| 社会邻近(W_2) | 0.244 *** | 0.236 *** | 0.199 *** |
| 技术邻近(W_3) | -0.465 *** | -0.388 *** | 1.342 *** |
| 人力资本邻近(W_4) | 0.727 *** | 0.687 *** | -0.368 ** |
| R^2 | 0.329 | 0.170 | 0.182 |
| Adj R^2 | 0.326 | 0.167 | 0.177 |

结果显示:第一,地理邻近的回归系数分别是 0.002、0.012 和 -0.228,且仅在 2017 年通过了显著性检验。在网络形成初期,整体网络的低密度和弱关系连接导致空间距离对于长江中游城市群知识创新合作的影响还不显著。但随着要素流动加快,网络逐渐形成了以武汉、长沙和南昌为核心的稳定结构,此时地理上与核心城市的邻近与否对合作创新网络有显著影响,地理距离越远,创新合作就越困难;第二,社会邻近的回归系数不断变小,分别为 0.244、0.236 及 0.199,且

都通过了显著性检验,说明社会邻近是知识创新合作网络的重要影响因素,且随着时间推移,社会关系邻近对于网络的作用逐渐减小,而与之相反的是技术邻近对合作创新的影响;第三,技术邻近的回归系数分别为 -0.465、-0.388 及 1.342,同样通过了显著性检验。本文认为,专利合作对论文合作的促进作用是日益增强的,尤其是进入科技创新时代以来,专利合作促进了区域之间的知识流动水平提升;第四,人力资本邻近的回归系数是 0.727、0.687 及 -0.368。本文认为,人力资本邻近对知识创新网络的影响由正到负,可能的原因是近年来以武汉和长沙为代表的“人才大战”所致。随着人才引进政策的落实,创新人才进一步集中在少数地区,跨省人力资源流动存在严重壁垒,从而导致不同区域在不同研究领域具有相对优势。

4 结语

4.1 结论

本文以长江中游城市群作为研究对象,分析知识创新合作的复杂网络特征,基于 QAP 分析方法研究网络影响因素,结论如下:

(1)2006 年以来,长江中游城市群知识创新合作网络规模发生了较大变化。尤其是 2013 年以来,网络中节点数量呈增长趋势,边的强度呈现提升趋势,说明长江中游城市群区域间的创新合作日益紧密,网络中心趋于多元化。但网络联系强度的空间分布不均衡情况更加严重,以武汉和长沙为核心的“核心—边缘”网络格局凸现。

(2)网络存在明显小世界特性,但无标度特征不明显。集聚系数较高意味着创新个体之间一体化程度较高,有利于区域获取新信息,共享新资源,加快知识溢出。但过高的集聚系数会导致冗余信息传递,阻碍创新个体之间的信息与资源交流扩散。小世界特征的另一个表现是特征路径长度较短,意味着创新主体能够通过比较短的路径与其他个体相互影响,加强区域之间的创新合作,提高城市群整体创新水平。网络无标度特征不明显,但网络度数和度的累计概率分布依然满足幂律分布特征,即网络中仅有少数节点在知识创新中起重要作用,网络节点连接的局部择优性比较明显。

(3)QAP 回归结果显示,地理邻近、社会邻近、技术邻近及人力资本邻近是长江中游城市群创新合作的主要影响因素。但随着时间推移,各邻近要素对知识创新合作网络的影响变化较大。社会关系更紧密、技术合作更频繁、人力资本竞争力更小的地区之间存在更为成熟、完善的知识创新合作网络。

长江中游城市群知识创新合作网络研究为从宏观层把握城市群发展战略提供了有益的启示。首先,由于信息、资源的不均衡扩散,导致区域创新水平、区域

创新合作发展有所差异,因此,有必要建立合作创新激励机制,鼓励中小城市创新;其次,对边缘城市加强基础设施建设,提高其信息化水平、科教水平和外商投资水平,为城市跨界合作提供有利条件;最后,提高科技成果转化,使创新成果发挥最大价值。

4.2 不足与展望

知识创新合作网络是一个复杂的动态网络,以科研合著论文体现的知识创新合作网络可以反映的信息十分丰富,包括合作主体异质性如高校、科研院所等,学科异质性如数学、物理学、经济学等,研究主题异质性等,本文仅从区域角度对科研合作网络进行了宏观的分析,因此在下一步研究中,以单位主体和学科异质性为主题的研究需要进一步深入以厘清网络演化趋势及内在机理。此外,网络的影响因素除本文中考虑的几个邻近性外,高校、科研单位本身之间的项目、人才合作也是网络形成的重要原因。未来还需要继续探索创新合作的特征和规律。

参考文献:

- [1] SOLOW R M. Technical change and the aggregate production function [J]. *Review of Economics & Statistics*, 1957, 39(3):554-562.
- [2] 吕国庆,曾刚,顾娜娜.经济地理学视角下区域创新网络的研究综述[J].*经济地理*,2014(2):1-8.
- [3] 蒋天颖,谢敏,刘刚.基于引力模型的区域创新产出空间联系研究——以浙江省为例[J].*地理科学*,2014,34(11):1320-1326.
- [4] 吕拉昌,梁政骥,黄茹.中国主要城市间的创新联系研究[J].*地理科学*,2015,35(1):30-37.
- [5] MA Z, LEE Y. Patent application and technological collaboration in inventive activities: 1980-2005[J]. *Technovation*, 2008, 28(6):379-390.
- [6] ZHENG J, ZHAO Z Y, ZHANG X, et al. International scientific and technological collaboration of China from 2004 to 2008: a perspective from paper and patent analysis [J]. *Scientometrics*, 2012, 91(1):65-80.
- [7] LI D, WEI Y D, WANG T. Spatial and temporal evolution of urban innovation network in China[J]. *Habitat International*, 2015(49):484-496.
- [8] 汤放华,汤慧,孙倩,等.长江中游城市群经济网络结构分析[J].*地理学报*,2013,68(10):1357-1366.
- [9] 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.
- [10] 于明洁,郭鹏,张果.区域创新网络结构对区域创新效率的影响研究[J].*科学与科学技术管理*,2013(8):56-63.
- [11] FLEMING L, KING III C, JUDA A I. Small worlds and regional innovation [J]. *Organization Science*, 2007, 18(6):938-954.
- [12] CHEN Z, GUAN J. The impact of small world on innovation: an empirical study of 16 countries [J]. *Journal of Informetrics*, 2010, 4(1):97-106.
- [13] ZHANG G, GUAN J, LIUX. The impact of small world on patent productivity in China [J]. *Scientometrics*, 2014, 98(2):945-960.
- [14] 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(6):28-36.
- [15] 李丹丹,汪涛,周辉.基于不同时空尺度的知识溢出网络结构特征研究[J].*地理科学*,2013,33(10):1180-1187.
- [16] 刘承良,桂钦昌,段德忠,等.全球科研论文合作网络的结构异质性及其邻近性机理[J].*地理学报*,2017,72(4):737-752.
- [17] 姜珂,于涛.长三角区域城市间知识网络特征研究——基于论文合作的视角[J].*地域研究与开发*,2017,(1):49-54.
- [18] 吕国庆,曾刚,顾娜娜.基于地理邻近与社会邻近的创新网络动态演化分析——以我国装备制造业为例[J].*中国软科学*,2014(05):97-106.
- [19] 吕国庆,曾刚,郭金龙.长三角装备制造业产学研创新网络体系的演化分析[J].*地理科学*,2014,34(09):1051-1059.
- [20] MA H, FANG C, PANG B, et al. The effect of geographical proximity on scientific cooperation among Chinese cities from 1990 to 2010[J]. *Plos One*, 2014, 9(11):705.
- [21] TRAVERS J, MILGRAM S. Experimental study of small world problem [J]. *Oceanologia*, 1969, 43(3):353-363.
- [22] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world networks [J]. *Nature*, 1998(393):440-442.
- [23] 张古鹏.小世界创新网络动态演化及其效应研究[J].*管理科学学报*,2015(6):15-29.
- [24] UZZI B, SPIRO J. Collaboration and creativity: the small world problem [J]. *American Journal of Sociology*, 2005, 111(2):447-504.
- [25] 陈畴镛,胡泉峰,周青.区域技术创新生态系统的小世界特征分析[J].*科学管理研究*,2010(5):17-30.
- [26] KRACKHARDT D. Predicting with networks: nonparametric multiple regression analysis of dyadic data [J]. *Social Networks*, 1988(10):359-381.
- [27] 王火根,沈利生.中国经济增长与能源消费空间面板分析[J].*数量经济技术经济研究*,2007(12):98-107.

(责任编辑:张悦)