

# 中国城市知识合作网络结构演化的影响机制

戴靓<sup>1</sup>, 曹湛<sup>2,3</sup>, 马海涛<sup>4</sup>, 纪宇凡<sup>1</sup>

(1. 南京财经大学公共管理学院, 南京 210023; 2. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092;  
3. 自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室, 上海 200092; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所  
中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 城市知识合作网络的影响机制是创新地理的重要研究议题, 已有研究大多关注外生动力(城市资源禀赋、多维邻近性等)的影响, 而较少关注内生动力因素(择优链接、传递性等)。基于“Web of Science”中的论文合作发表数据构建中国城市知识合作网络, 分析其2006—2016年空间结构和拓扑结构的演化特征, 并通过加权随机指数图模型(ERGM)定量揭示内生和外生动力对该网络形成的影响。结果显示: ①从空间结构看, 东密西疏的格局比较稳定, 但整体由北京—上海双核结构向多中心发展, 五大国家级城市群成为孕育多极的重要空间。以高能级城市为核心形成的节点区域愈发与规划的城市群范围一致, 其发挥着知识资源邻近溢出和远程交互的双重作用。②从拓扑结构看, 知识合作的规模和密度显著增加, 对大城市的择优选择效应明显。但随着多中心崛起, 网络极化程度和异配性均在弱化; 随着城际合作路径不断优化, 网络聚合性提升, 成为小世界网络。③从影响机制看, 自演化与择优链接是知识网络的重要驱动力, 其作用与城市等级效应相重叠; 城市知识规模属性对知识流动的正向影响弱于多维邻近性和路径依赖性; 高铁的存在有利于促进知识合作, 而地理距离的影响不显著。

**关键词:** 知识网络; 论文合作; 影响机制; 内生结构变量; 加权指数随机图模型

DOI: 10.11821/dlxb202302005

## 1 引言

中国共产党“十八大”以来, 中国大力推动创新驱动发展战略, 加快创新型国家建设。在此背景下, 《国家创新驱动发展战略纲要》于2016年正式印发, 并对2050年国家成为世界主要科学中心和创新高地作出3个阶段战略部署。中国共产党“十九大”报告亦提出要强化基础研究, 实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破。知识逐步替代传统生产要素, 成为新经济时代城市重要的战略资源<sup>[1]</sup>。城市聚集着大量的专业化人才、高水平大学、科研院所和高新技术企业, 是知识创新的孵化器。面对创新活动的加速复杂化、创新成本的上升和创新风险的增大, 不同主体间跨组织跨地域的合作成为知识创新的重要方式, 而城市知识合作网络则是不同微观主体跨地域知识合作联系在宏观尺度的空间表现<sup>[2-3]</sup>。这种合作可产出论文、专利、产品等“显性知识”(Explicit Knowledge),

收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2022-02-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41901189, 52008298, 41971209); 江苏省自然科学基金项目(BK20190797) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41901189, No.52008298, No.41971209; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No.BK20190797]

**作者简介:** 戴靓(1989-), 女, 江苏镇江人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 中国地理学会会员(S110014330M), 研究方向为城市网络与区域发展。E-mail: 9120181027@nufe.edu.cn

**通讯作者:** 曹湛(1989-), 男, 湖北潜江人, 博士, 助理教授, 研究方向为国土空间规划、城市网络和创新网络。  
E-mail: 1989caozhan@tongji.edu.cn

并伴随着信息、技术、智力、文化等“隐性知识”(Tacit Knowledge)的溢出和流动,对知识要素流的吸收、转化和扩散,是城市创新发展的内在动力<sup>[4-5]</sup>。在“流动空间”时代,城市节点在知识网络中的地位及其“借用规模”(Borrow Size)的能力,正加速着区域空间的重构,成为城市网络和创新地理研究的重要议题<sup>[6]</sup>。

学者们从不同类型的知识出发研究不同尺度知识网络的空间格局与演化规律。就科学知识而言,Matthiessen等<sup>[7]</sup>基于自然、医药和工程科学领域的论文合作数据分析了全球城市知识网络的层级性与区域性;Ma等<sup>[8]</sup>采用中国知网(CNKI)中文论文合作数据揭示了中国城市知识网络的空间格局和拓扑特征。就技术知识而言,Berge等<sup>[9]</sup>通过专利合作申请网络对比了欧盟城市中心性和连接度的差异;段德忠等<sup>[10]</sup>基于专利转移数据分析了2001—2015年中国城市创新网络结构的时空演化。就企业知识而言,Neulandtner等<sup>[11]</sup>利用欧盟框架项目中联合申请的资助信息探讨了研发合作网络的空间结构与影响机制;黄晓东等<sup>[12]</sup>通过国家级创新企业部门间组织机构关联刻画了中国城市创新网络的联系特征。也有学者探索不同类型知识网络结构的异质性,如李丹丹等<sup>[13]</sup>对比了中国的论文合作和专利合作网络,而Lata等<sup>[14]</sup>则比较了欧盟的论文合作、专利合作、项目研发合作3种网络。3种知识间的逻辑关系层层递进,从学到研再转产进而促学,共同构成产学研协同创新的循环结构<sup>[15]</sup>。科学知识侧重于基本的科学原理,是技术知识发展的基础;技术知识以发明或技术方案的形式为主,可形成新生产过程或新产品;企业知识由项目、产品、商业理念、市场、企业等知识经济实体组成,是科技知识的成果转化<sup>[13, 16]</sup>。由此可见,科学知识一定程度上是其他两种知识的基础和前提。同时,汪涛等<sup>[17]</sup>认为中国是世界上最适合研究科学知识网络演化的案例之一,因为中国在短时间内取得学术理论领域的迅速发展以及中央政策对知识生产系统产生的深刻影响。因此,本文侧重于从科学知识视角探讨中国城市知识合作网络。

就网络结构而言,学者们大多通过空间分析法、社会网络法和复杂网络理论,从节点、边、社群、整体4个层面分析城市的等级性(中心性)、城际联系的空间异质性、城市组团的区域性(社区探测、凝聚子群等)、网络结构的复杂性(小世界、无标度、度匹配等)、多中心性与核心—边缘性<sup>[17-20]</sup>。就影响机制而言,部分学者通过知识合作网络特征或演化规律,定性归纳择优链接、路径依赖和邻近性机制的影响<sup>[13, 17-18]</sup>;也有学者通过空间交互模型、负二项式回归和引力模型、二次指派程序(QAP)回归模型等,定量解释城市自身特征和城市间多维邻近性对知识合作的影响<sup>[10, 21-22]</sup>。其中,城市自身特征包括其社会经济属性、知识创新本底规模等指标;而多维邻近性则包含地理邻近性、认知邻近性、社会邻近性、制度邻近性、组织邻近性、技术邻近性、经济邻近性等<sup>[23-24]</sup>。不论是基于城市的节点属性,或是基于城际关系的边属性,均只考虑了网络形成和演化的外生动力。随着对网络拓扑结构及其复杂性的关注,学者们亦发现知识合作网络具有明显的自组织自演化特征,即网络的生成与演化受到传递性<sup>[25]</sup>、择优链接<sup>[26]</sup>、互惠性<sup>[27]</sup>等局部网络构型(Network Configuration)内生动力的驱动。例如,与同一机构分别开展科研合作的两个机构之间,更容易形成直接的科研合作,形成数量较多且根植性较强的三元组(Triad)构型,即网络的传递性;已经拥有较多合作伙伴的科研机构,更容易吸引新的合作机构,呈现出一对多的星型(K-star)构型,即择优链接或择优依附效应;而对于非对称的网络,某一机构发起的对另一机构的联系,往往也更容易得到对方反馈的联系,即互惠合作关系。但是,相关研究集中在统计性描述或定性探讨上。因此,亟需将内生动力与外生动力相结合,进行中国城市知识合作影响机制的定量研究。

社会学领域的随机面向对象模型 (Stochastic Actor-based Model, SABM) 和指数随机图模型 (Exponential Random Graph Model, ERGM), 为城市网络的内外生影响机制探讨提供了有效手段。例如, 覃柳婷等<sup>[28]</sup>通过 SABM 模型, 将网络结构变量与多维邻近性和节点自身特征相结合加入模型, 发现传递三元组内生结构变量对中国知识合作网络的正向显著影响。Broekel 等<sup>[29]</sup>采用 ERGM 模型, 集成网络构型、城市属性、城市间邻近性自变量分析德国城市研发网络的影响机制, 也发现传递性具有显著的促进作用。然而, 这些研究也存在一定的不足: 一方面, SABM 适用于网络面板数据, 要求不同时期网络边的变化值不能太高或太低, 太高不符合连续渐进式变化假设, 太低则不能提供足够的信息以便参数估算与检验<sup>[30]</sup>; 另一方面, 既有研究主要针对二值网络, 加权网络在模拟前需要先二值化, 即对两城市间的加权联系进行有 (1 值) 或无 (0 值) 的处理, 这会带来不同程度的信息损失和拟合偏误<sup>[31]</sup>。因此, 本文将适用于网络截面数据的加权指数随机图模型<sup>[32]</sup>, 引入到城市知识合作网络模拟中。一方面, 在前人的基础上, 纳入知识合作网络内生动力变量开展定量研究, 可丰富网络影响机制的内涵; 另一方面, 将 ERGM 模型从传统二值网络模拟拓展到加权网络的模拟, 可深化城市网络研究的实证。

基于此, 本文以科研论文合作数据为基础, 从空间结构和拓扑结构层面分析中国城市知识合作网络的演化特征, 并通过加权指数随机图模型揭示外生动力 (城市禀赋、多维邻近机制) 和内生动力 (网络构型) 对知识合作网络形成和演化的影响, 以期政府制定区域创新政策等提供依据, 并深化城市网络和创新地理方向的定量研究。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 中国城市知识合作网络的构建

根据美国国家科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 统计数据, 中国科技论文发表量由 1996 年的 33273 篇上升到 2018 年的 528263 篇 (图 1)<sup>①</sup>, 年均增速高达 13.40%, 在全球总论文量的占比也由 3.42% 增至 20.67%。2016 年以来, 中国更是取代美

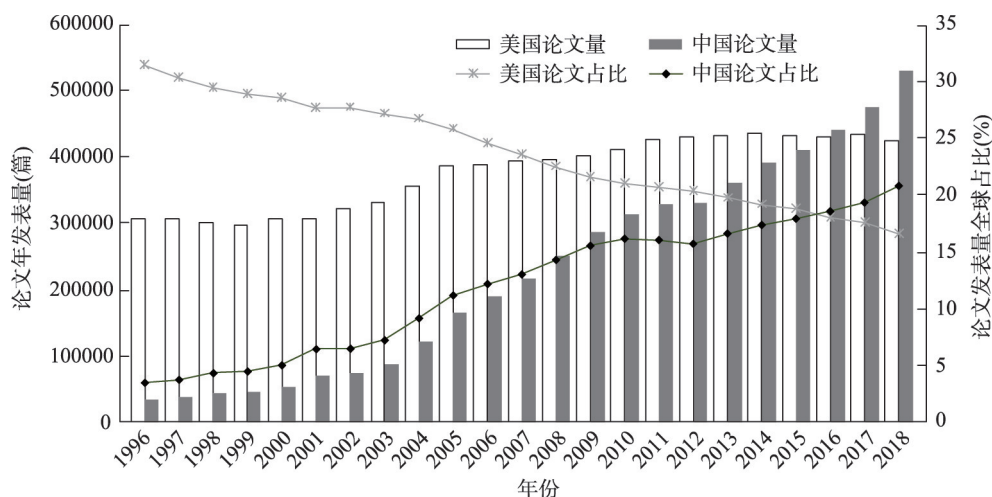


图 1 1996—2018 年中美科技论文发表情况变化

Fig. 1 Changes of science and engineering articles for China and the United States, 1996-2018

① 数据来源于美国国家科学基金会的《Science and Engineering indicator》报告 (<http://nces.nsf.gov/pubs/nsb20206/publication-output-by-region-country-or-economy>)。



国成为科技论文发表总数最多的国家,且总量优势逐年扩大。因此,本文选取中国逐渐成为全球科技论文发表量第一位的2006—2016年为研究时间段,分析城市知识合作网络演化的影响机制。需要指出的是,本文涉及的城市为中国地级及以上城市,暂未包含港澳台地区。同时,由于论文合作与论文发表存在时间滞后效应,一般采用5年窗口以消除单一年份数据的偶然性与波动性,最终确定数据收集时间段为2002—2006年和2012—2016年,以使结果更具稳健性,后文简写成2006年和2016年的中国城市知识合作网络。

与相关研究<sup>[2-3, 33-34]</sup>保持一致,通过Python爬虫技术,从“Web of Science”(WOS)核心合集数据库中获取2002—2006年和2012—2016年两个时间段内,作者单位在中国境内城市的所有论文信息,包括论文题目、期刊名称、研究领域、作者及其所属单位和城市等。选择WOS数据库主要考虑到其权威性、影响力强、质量高、覆盖面广以及中国学者的发文偏好和发文量的显著增加<sup>[18]</sup>。同时, Ma等<sup>[35]</sup>的实证研究中也发现WOS和中文期刊数据库构建的科学知识合作网络结构具有稳健性。构建中国城市知识合作网络时,首先,将独立作者和同城学者合作的论文数据予以剔除;其次,根据合作论文的作者归属单位所在城市,将作者间的合作投射到城市间的合作(城市内的合作不予考虑),从而每篇合作论文都涉及城际合作子网络;最后,将所有子网络进行叠加汇总即可得到中国城市间的知识合作网络,详细算法和过程参见戴靓等<sup>[2]</sup>。需要指出的是,数据中存在同一作者属于多个科研单位且位于不同城市的情况,也会被解译为城际论文合作联系。考虑到同一科研主体为多个单位服务时,也会促进其所在单位之间的资源互通和隐性知识流动,因此这类联系也具有合理性。

## 2.2 网络分析方法

本文分析城市知识合作网络的空间结构和拓扑结构演化,以对应外生动力和内生动力。空间结构主要通过边联系强度可视化分析知识流空间分布特征<sup>[36]</sup>,通过节点区域分析提炼出“中心—腹地”的层级结构及其区域范围<sup>[37-38]</sup>。拓扑结构通过复杂网络指标测度对知识合作网络的拓扑属性作统计性描述,包括网络密度、节点度、度分布、度度相关性、平均路径长度和全局集聚系数<sup>[39-40]</sup>,具体公式及其意义如表1所示。

## 2.3 加权随机指数图模型

**2.3.1 模型介绍与设定** 指数随机图模型(ERGM)是一种生成性网络仿真模型,源自社会网络分析法。其以网络中边的相互依赖性为基础,综合考虑内生结构因素与外生属性因素,计算已存在的关系会影响未来关系生成的概率,并通过估计、诊断、仿真、比较

表1 复杂网络指标解释

Tab. 1 Explanation of complex network indicators

指标	公式	解释
网络密度	$D = e/E$	网络密度 $D$ 为实际边数 $e$ 与最大可能边数 $E$ 的比值。
节点度	$k_i = \sum_{j \in V(i)} a_{ij}$	$k_i$ 为 $i$ 的节点度; $a_{ij}$ 为直接相连的两个节点; $V(i)$ 表示与节点 $i$ 直接相连的节点集合,即 $i$ 的邻居。
度分布	$P(k) = n_k/n$	$P(k)$ 表示节点度为 $k$ 的节点数 $n_k$ 占节点总数 $n$ 的比例。
度度相关性	$K(i) = \frac{1}{k_i} \sum_{j \in V(i)} k_j$ $\bar{K}(k) = \frac{1}{N(k)} \sum_{k_i=k} K(i)$	$K(i)$ 为节点 $i$ 所有邻居的平均节点度; $N(k)$ 表示度为 $k$ 的节点的数量; $\bar{K}(k)$ 表示度为 $k$ 的所有节点的邻节点平均度。度度相关性分析节点度与其邻节点平均度间的相关关系和程度。
平均路径长度	$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n d_{ij}$	$L$ 为平均路径长度,即网络中任意两个节点之间的距离 $d_{ij}$ 的平均值。
全局集聚系数	$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$	节点 $i$ 的集聚系数为邻节点内实际连接边数 $E_i$ 与最大可能边数的比率; $C$ 为全局集聚系数,即所有节点集聚系数的平均值。

等步骤实现对各种影响因素的参数估计与统计推断,从而解释网络的形成与演化机制<sup>[41]</sup>。标准ERGM是针对二值网络构建的<sup>[42]</sup>,但近期指数随机图模型不断发展与完善,将网络边权重纳入模型,提高了模型对网络演化机制的解释精度<sup>[31]</sup>。加权指数随机图模型的具体公式表达如下:

$$P_{r\theta; h, \eta, g}(Y=y) = \frac{h(y)\exp(\eta(\theta) \times g(y))}{k_{h, \eta, g}(\theta)} \quad (1)$$

式中:  $P_{r\theta; h, \eta, g}(Y=y)$  为实现概率;  $Y$  为实际网络;  $y$  为仿真网络;  $g(y)$  为模型统计量;  $\eta(\theta)$  拟合参数;  $k_{h, \eta, g}(\theta)$  是确保网络结构概率取值之和在 0~1 之间的归一化常数;  $h(y)$  为参考分布。

对于二值网络,参考分布为伯努利 (Bernoulli) 分布,即独立边产生的概率为 0.5;而对于加权网络,通常有泊松 (Poisson) 分布、几何 (Geometric) 分布、二项 (Binomial) 分布、离散 (Discrete) 分布可选<sup>[31]</sup>。参考分布的设定主要依赖于实际网络的分布类型,本文研究的论文合作网络数值为非负整数且具有“过度分散” (Over-dispersion) 的特点 (即方差大于期望),因此预先设定二项分布作为模型的基准参考分布<sup>[38]</sup>。

**2.3.2 统计量构造与检验** ERGM统计量包含网络构型、节点协变量、边协变量3类,在城市知识合作网络中对应于网络结构变量、城市属性变量、城际关系变量,具体如表2所示。网络结构变量为内生变量,主要包括边效应 (Edges)、互惠性 (Mutuality)、受欢迎性 (Popularity)、积极性 (Activity)、传递性 (Transitivity)。本文研究的是无向对称网络,无需再研究互惠性,所以针对加权网络选择加权边 (Edges)、K 星构型 (K-star)、三元组构型 (Triad) 3 个内生结构变量,以检验知识合作网络联系产生的基本效应、择优链接偏好、传递性与聚合性趋势是否显著。

表2 指数随机图模型统计量  
Tab. 2 Statistic configurations in the exponential random graph models

变量类型	统计量	机制	假设检验
网络结构变量	加权边	基础效应	相当于回归模型的截距项
	K 星	择优链接效应	是否倾向于形成星形结构
	三元组	传递效应	是否倾向于形成聚合三角形结构
城市属性变量	节点属性	马太效应	属性越强的城市是否更倾向发展联系
	$nodecov^{\circledast}$		
	$nodematch^{\circledast}$	同配效应	属性相同或差异小的城市是否更倾向产生联系
	$absdiff^{\circledast}$		
城际关系变量	边属性	协同效应	在其他网络存在关系的城市对是否更倾向产生联系

注:  $\circledast$ 表示适用于类型变量 (Categorical Variable);  $\circledcirc$ 表示适用于连续变量 (Continuous Variable);  $\circledast\circledcirc$ 表示类型变量和连续变量均适用。

城市属性变量和城际关系变量为外生变量,其对城市知识合作网络的影响主要体现在城市知识规模、等级和多维邻近性。本文选取城市研发投入 (R&D)、高校数量 (university)、人均地区生产总值 (PGDP) 和行政等级 (capital) 考察知识合作中是否存在马太效应,即属性越强的城市是否越倾向产生知识合作联系? 其中,行政等级变量是省会和直辖市为 1,其余为 0。传统模型中的多维邻近性因素主要体现在 ERGM 中对同配效应和协同效应的检验,即属性相同或差异小的城市是否更倾向产生联系? 在其他网络存在关系的城市对是否更倾向产生联系? 本文通过用否属于同一方言区 (dialect) 表征文化邻近性、是否在同一省份 (province)、同一城市群 (region) 表征制度邻近性、在 2006 年是否有过论文合作 (path) 表征社会邻近性,构建了 4 个虚拟变量 (是为 1, 否为

0)。其中, 方言划分参考《中国语言地图集》的十大方言区范围<sup>[43]</sup>; 社会邻近性也可以反映网络的发展是否存在路径依赖。地理邻近性通过城市间的欧氏距离 (*distance*) 和是否存在直达高铁/动车 (*HSR*) 两个变量表征, 前者为连续变量, 后者为类型变量 (是为1, 否为0)。知识邻近性通过两个城市知识产出结构的差距衡量, 为连续变量。与Cao等<sup>[3]</sup>一致, 本文通过赫芬达尔指数 (*HHI*) 根据论文的学科归属, 计算出每个城市知识生产的集中化或多样化程度。

所有外生变量统计数据来自《中国城市统计年鉴》, 与知识网络一致, 这部分变量数据采用2012—2016年的均值。所有外生变量的VIF均低于5, 不存在严重的多元共线性。本文是对2016年的网络进行模拟, 而2006年的网络二值化后作为边协变量 *path* (社会邻近性或路径依赖) 引入模型。最终确定加权ERGM算法如下:

$$\begin{aligned} Pr(Y=y) \sim & \theta_0 \text{sum} + \theta_1 \text{nodesqrtcovar} + \theta_2 \text{transitiveweights} + \theta_3 \text{nodefactor}(\text{capital}) + \\ & \theta_4 \text{nodecov}(R\&D) + \theta_5 \text{nodecov}(\text{university}) + \theta_6 \text{nodecov}(PGDP) + \\ & \theta_7 \text{absdiff}(HHI) + \theta_8 \text{nodematch}(\text{dialect}) + \theta_9 \text{nodematch}(\text{province}) + \\ & \theta_{10} \text{nodematch}(\text{region}) + \theta_{11} \text{edgecov}(\text{distance}) + \theta_{12} \text{edgecov}(\text{HSR}) + \\ & \theta_{13} \text{edgecov}(\text{path}) \end{aligned} \quad (2)$$

ERGM是关系型数据的统计模型, 可通过类似于逻辑回归的原理解释所观测到的影响因素对网络的影响机制。但由于样本非独立性, ERGM无法通过传统的方法进行拟合, 而是采用马尔可夫蒙特卡罗极大似然法 (MCMC-MLE) 进行估计检验, 通过 *t* 统计量检验参数的显著性, 并通过赤池信息准则 (AIC) 和贝叶斯信息准则 (BIC) 评价模型的拟合优度。BIC略大于AIC, 两个数值越小, 表明模型拟合优度越高。加权ERGM的模拟与检验可在R语言的statnet程序包中通过 *ergm.count* 实现。

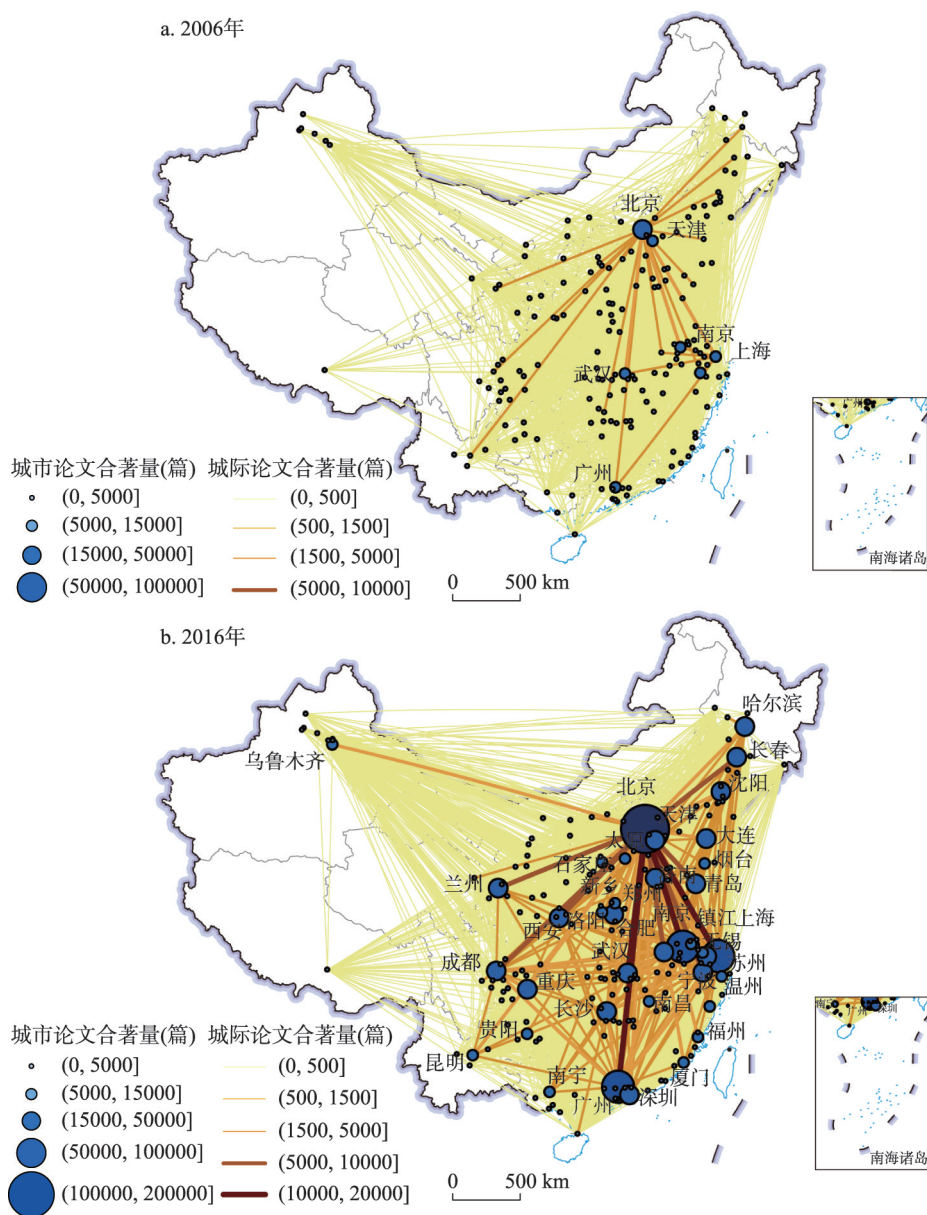
### 3 中国城市知识合作网络结构演化分析

#### 3.1 空间结构演化

2006年和2016年中国城市知识合作网络的空间格局如图2所示。整体而言, 中国城市知识合作网络“东密西疏”的格局比较稳定。2006年中国知识合作网络主要由北京—上海双核组织 (图2a), 其中、北京、上海、南京、武汉、天津、长春、广州、合肥之间部分城市对的论文合作量超过1500篇, 构成城际知识流动的主要通道。网络呈现出“首府引力效应”, 即高强度的知识合作基本形成于首府城市之间, 这与中国的行政等级体系或者网络的择优链接机制有关。首府城市往往集聚了更多的高校、研究机构、科研人员等创新资源, 即便在地理上空间并不邻近, 它们之间也仍旧拥有相当密切的合作联系。2016年区域中心节点显著增多 (图2b), 论文合作发表量超过1500篇的城市对除了与北京的知识合作外, 还包括由上海、合肥、成都、广州、南京、长沙等主导的城际联系。以北京为核心的“轴辐式”知识流动得到强化的同时, 京津冀、长三角、长江中游、成渝、珠三角五大国家级城市群之间及其内部的知识合作亦在增加, 所构成的“钻石型”结构逐渐显现。知识合作模式不再是长距离合作主导, 也包含城市群或省域的邻近扩散和知识溢出<sup>[36]</sup>。

2006年和2016年中国知识合作网络的节点结构如图3所示。在节点区域分析时, 中心 (或主导) 城市的最大知识合作联系指向一个与之相比知识规模较小的城市, 次级中心 (或主导) 城市的最大知识合作联系指向主导城市, 腹地 (或从属) 城市的最大知识合作联系指向与之相比规模较大的城市, 而城市的知识规模以合著论文总量表征。由



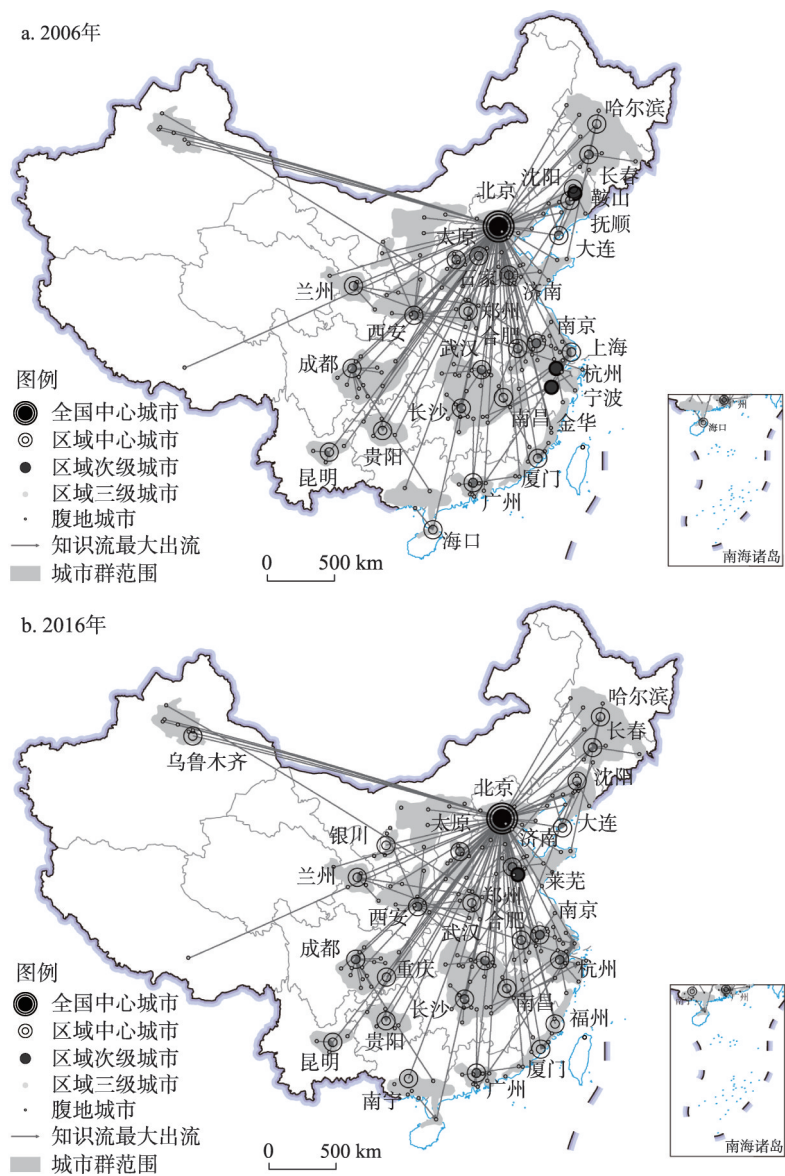


注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改

图2 2006年和2016年中国知识合作网络的空间格局

Fig. 2 Spatial patterns of China's intercity knowledge collaboration network in 2006 and 2016

此,得到图3中的全国中心城市、区域中心城市、区域次级城市、区域三级城市和腹地城市的层级划分。从节点结构图可以更清晰地发现,2006—2016年北京一直是中国城市间知识合作创新的绝对中心,而直辖市、省会城市、计划单列市等高行政级别的城市逐渐成为区域中心。总体而言,这些区域中心城市一方面与所在省份或城市群内部的中小城市进行邻近溢出与知识扩散,另一方面与北京或区域外部的其他中心城市进行远程合作与知识创新,形成“本地嗡鸣”(Local Buzz)与“全球管道”(Global Pipeline)的交织结构<sup>[44]</sup>。与此同时,这些区域中心连接腹地而形成的节点区域范围愈发与“十三五”



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号的标准地图制作,底图边界无修改

图3 2006年和2016年中国知识合作网络的节点结构

Fig. 3 Nodal structures of China's intercity knowledge collaboration network in 2006 and 2016

规划中的19个城市群范围吻合<sup>[2]</sup>。最明显体现在2016年节点结构中(图3b),出现了以乌鲁木齐为中心的天山北坡节点区域和以银川为中心的宁夏沿黄节点区域。2006年这两个城市群内城市的最大知识合作联系均是指向区域外的北京和南京(图3a),而2016年群内的中小城市强化了与首位城市的论文合作,促使乌鲁木齐和银川的中介作用得到一定发挥,但两个城市群的群内合作仍较弱,知识一体化程度有待进一步提升。

3.2 拓扑结构演化

随着知识合作网络在覆盖范围上的扩大和合作强度上的提升,整个网络的拓扑结构也发生变化。如表3所示,2006年有183个城市参与WOS论文合作发表,每个城市的平



表3 2006年和2016年中国知识合作网络的拓扑属性

Tab. 3 Topological properties of China's intercity knowledge collaboration network in 2006 and 2016

年份	节点	边	平均度	密度	幂指数	度度相关	平均路径长度	全局集聚系数
2006	183	2405	26	0.144	0.611	-0.444	1.920	0.443
2016	206	7011	68	0.332	0.143	-0.382	1.551	0.594

均合作城市有26个,整个网络中的合作城市对有2405个;而2016年参与合作的城市增至206个,每个城市的平均合作伙伴也上升至68个,并产生7011对合作关系。网络密度由0.144增长到0.332,表明城市间知识合作的渠道变多、形式也更多样化。

节点度分布是描述网络几何特征的核心统计参数,若度分布满足幂律分布,且幂指数介于2~3之间,则该网络为无标度网络<sup>[45]</sup>。由度分布幂律拟合指数可知,2006—2016年中国知识合作网络不是完全的无标度网络,但其一定程度上符合知识合作集中于大城市之间的规律。2006年节点度排名前20%的城市汇聚了整个网络61.95%的知识合作,而2016年该比例下降为58.32%,与幂指数的下降一致。说明近些年中国知识合作网络在首位城市的集中化降低,有多层次扁平发展的态势。2006—2016年的度度相关系数均为负,该网络呈现异配性,即节点度小的城市倾向于与度数大的城市进行知识合作,表明城市间知识溢出具有粘着性和路径依赖性<sup>[13, 17]</sup>。大节点是网络的中心节点,小节点的这种链接偏好有利于边缘城市高效地融入合作网络,直接吸收大城市的知识溢出。2016年异配性有所下降,结合幂指数的下降可知,网络连接的结构在优化,小城市的知识合作倾向逐渐向网络中的次级中心城市转移,次级中心的崛起一定程度分散了网络主导城市对知识资源控制的极化性。

将中国知识合作网络的平均路径长度、全局集聚系数与同规模下的随机网络对比发现,2006年实际平均路径为1.920(大于183个节点组成的随机网络的1.872),全局集聚系数为0.443(大于随机网络的0.143),虽然网络整体呈集聚发展,但最短路径不够优化,在随机网络之上,而未达到小世界特征<sup>[46]</sup>。2016年的平均路径长度缩短至1.551,即网络中206个城市任意两个之间达成合作平均需1.551步,小于206个节点组成的随机网络的1.670;而全局集聚系数增至0.594,城市间三元组合作模式得到强化,大于随机网络的0.333,符合小世界网络的标准。

## 4 中国城市知识合作网络演化机制分析

### 4.1 ERGM模拟过程分析

根据前文构造的14个统计量,采用逐个添加的方法探讨ERGM的拟合结果。ERGM无法对所有内生和外生变量的多重共线性进行检验,本文通过3个标准决定变量的保留:①加入变量后模型是否收敛;②加入变量后模型拟合优度是否提升,即AIC和BIC值变小;③加入变量的参数是否通过显著性检验,即 $p$ 值小于0.05,具体结果见表4。

模型1首先检验3个网络结构变量Edges、 $K$ -star和Triad假设,但发现三角形结构导致模型无法收敛,因此仅保留加权边和星形结构。模型2加入行政等级,虽然模型收敛且拟合优度有所提升,但其参数未通过显著性检验,因而移除该变量。模型3~5检验城市研发投入、高校数量和人均GDP对知识合作网络的影响,虽然都显著,但 $R\&D$ 和 $PGDP$ 的参数均小于0.0001,且3个变量加入后对拟合优度的提升程度不如只加入university,因此此后的模拟只考虑该变量。模型6~9依次加入反映知识邻近、文化邻

表 4 加权指数随机图模型拟合结果  
Tab. 4 Simulation results of exponential random graph models

变量类型	自变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9	模型 10	模型 11	模型 12
网络结构变量	网络构型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8	模型 9	模型 10	模型 11	模型 12
	<i>Edges</i>	-1.660*** (0.021)	-1.656*** (0.032)	-1.544*** (0.003)	-1.384*** (0.057)	-1.836*** (0.013)	-1.007*** (0.054)	-1.070*** (0.060)	-1.053*** (0.057)	-1.073*** (0.069)	-1.059*** (0.072)	-1.067*** (0.061)	-1.078*** (0.062)
城市属性变量 (节点协变量)	<i>K-star</i>	0.478*** (0.011)	0.475*** (0.014)	0.519*** (0.002)	0.560*** (0.020)	0.527*** (0.003)	0.585*** (0.019)	0.594*** (0.023)	0.628*** (0.021)	0.622*** (0.028)	0.634*** (0.024)	0.631*** (0.024)	0.626*** (0.021)
	行政等级		0.017 (0.064)										
	知识规模			0.000*** (0.000)									
	<i>R&amp;D</i>												
	<i>university</i>				0.050*** (0.002)	0.048*** (0.001)	0.046*** (0.002)	0.047** (0.002)	0.047** (0.002)	0.047** (0.003)	0.048*** (0.003)	0.048*** (0.003)	0.047*** (0.002)
	<i>PGDP</i>					0.000*** (0.000)							
	知识邻近						-2.256*** (0.347)	-2.229*** (0.369)	-2.785*** (0.303)	-2.501*** (0.302)	-2.581*** (0.256)	-2.635*** (0.285)	-2.629*** (0.378)
	<i>HHI</i>												
	文化邻近						0.245*** (0.041)	0.245*** (0.041)	0.146** (0.047)	0.145** (0.044)	0.135** (0.050)	0.140** (0.046)	0.135** (0.044)
	<i>dialect</i>												
	制度邻近								1.817*** (0.088)	1.490*** (0.153)	1.525*** (0.140)	1.482*** (0.164)	1.514*** (0.157)
	<i>province</i>												
	<i>region</i>									0.380** (0.140)	0.314** (0.102)	0.375** (0.129)	0.359** (0.124)
	地理邻近												
城际关系变量 (边协变量)	<i>distance</i>												
	<i>HSR</i>												
	社会邻近											0.048** (0.043)	1.133*** (0.030)
	<i>path</i>												
	路径依赖												
	<i>Alkaike Inf. Crit. (AIC)</i>	-20627	-20747	-20649	-20808	-20774	-21204	-21183	-21407	-21472	-21660	-21461	-22547
	<i>Bayesian Inf. Crit. (BIC)</i>	-20611	-20724	-20625	-20785	-20743	-21173	-21145	-21360	-21417	-21598	-21399	-22485

注: BIC 比 AIC 大,两值越小,模型拟合优度越好; \*\*表示  $p < 0.01$ ; \*\*\*表示  $p < 0.001$ ; 括号中数值为标准误。

近、制度邻近的4个变量,模拟结果较为稳健,优度逐步提升。模型10和11加入地理邻近性变量——城际距离和有无高铁,发现知识合作中的距离衰减效应并不显著;高铁的存在虽可促进城际知识合作联系,但该变量的加入并没有提升拟合效果,模型11的AIC和BIC值均大于模型9,因此忽略这两个边协变量。模型12检验了2006年存在知识合作的城市之间是否更倾向于2016年发展合作联系,假设成立,该二值变量大大提升了整个ERGM的拟合优度且呈现出较好的收敛性。图4展示了最优模型中8个变量的MCMC收敛性诊断结果,在踪迹(trace)图中,好的模拟需要避免较长的平坦区域和一个方向上持续的发展态势,所有变量拟合需收敛于横线处。实际的时序图类似于“白噪声”,这样的结果呈现良调配,模型收敛性较好<sup>[47]</sup>。

## 4.2 ERGM拟合结果分析

根据模型12的结果可以发现,中国知识合作网络受到择优链接、马太效应、同配性和历史路径的综合影响。在内生结构变量中,*Edges*的参数一直为负数且显著,说明中国城市知识合作网络并不是随机的<sup>[48]</sup>。由前文拓扑结构可知,其具有一定的小世界特征。*K-star*的参数一直显著,且在0.478~0.626之间,中国城市间的知识合作受网络自演化的成长性与择优链接机制驱动,这与李丹丹等<sup>[13]</sup>对中国科学知识和技术知识网络的定性研究结果一致。新加入知识网络的城市更倾向与已经拥有很多知识联系的城市进行合作:在等级扩散和迁移扩散等作用下,中心城市先进的知识会流向边缘城市;边缘城市除被动接受中心城市的知识溢出外,还会主动与创新能力高的城市合作,以最小的成本获得最优的网络资源。这种效应在城市信息网络<sup>[26]</sup>和城市交通网络<sup>[40]</sup>中也存在,是网络模拟不可忽视的因子,也体现了ERGM相比于传统回归模型具有一定优势。

在外生动力变量中,*capital*变量不显著,并非说明行政等级不重要,而是因为其与*K-star*变量高度重合,类似于回归模型里的共线性。中国城市知识合作网络倾向于星形结构化发展,而根据前文网络结构演化分析,这种星形结构主要存在于高等级城市与区域内或邻近的中小城市间合作。可见,*K-star*变量一定程度上已经验证了高行政等级的城市更易产生知识合作的假设。城市知识规模中,*R&D*和*PGDP*虽然通过显著性检验,但其对网络演化的影响微乎其微,这与王海花等<sup>[49]</sup>在长三角城市群协同创新网络演化动力研究中的发现一致。*university*的参数保持在0.05左右,对知识合作网络有显著的促进作用,即高校数量多的城市之间更倾向于产生知识合作,这个结果比较直观,因为高校是WOS论文产出的主要阵地。也侧面体现出研发投入和经济水平影响不大的原因可能是这两个变量更笼统,其效应不仅针对论文知识合作,还包括技术知识、企业知识等,可能对后者的影响更直接<sup>[12, 19]</sup>。

就邻近性而言,两城市间知识结构的邻近性对合作联系的影响最强,即赫芬达尔指数差距越大,越不利于产生知识合作。知识产出多样化的城市倾向于寻找与之类似的研究领域多元化城市合作,而不是知识生产高度集中的城市,后者不利于城市创新力的提升<sup>[3]</sup>。语言文化的邻近性也能促进城际知识流动,但影响较小,参数为0.135;而同一省内和城市群内城市的制度邻近性对知识合作的影响较大,说明区域发展规划等正式制度比语言文化、价值观、行为规范等非正式制度更能影响知识流动。省域的正向影响(1.514)强于城市群尺度(0.359),即同省城市的知识合作总体优先于同城市群的合作,说明中国城市群知识一体化发展有待深化,城际交流上壁垒需进一步破除<sup>[2]</sup>。地理邻近性方面的城际高铁能促进知识交流,而空间距离对知识合作的抑制作用并不显著。从前文网络结构演化分析可知,北京对全国城市的远程辐射式知识溢出已克服距离因素,虚拟空间的交流亦可实现论文合作之类的智力资源流动;而高铁等基础设施的全国化布局更



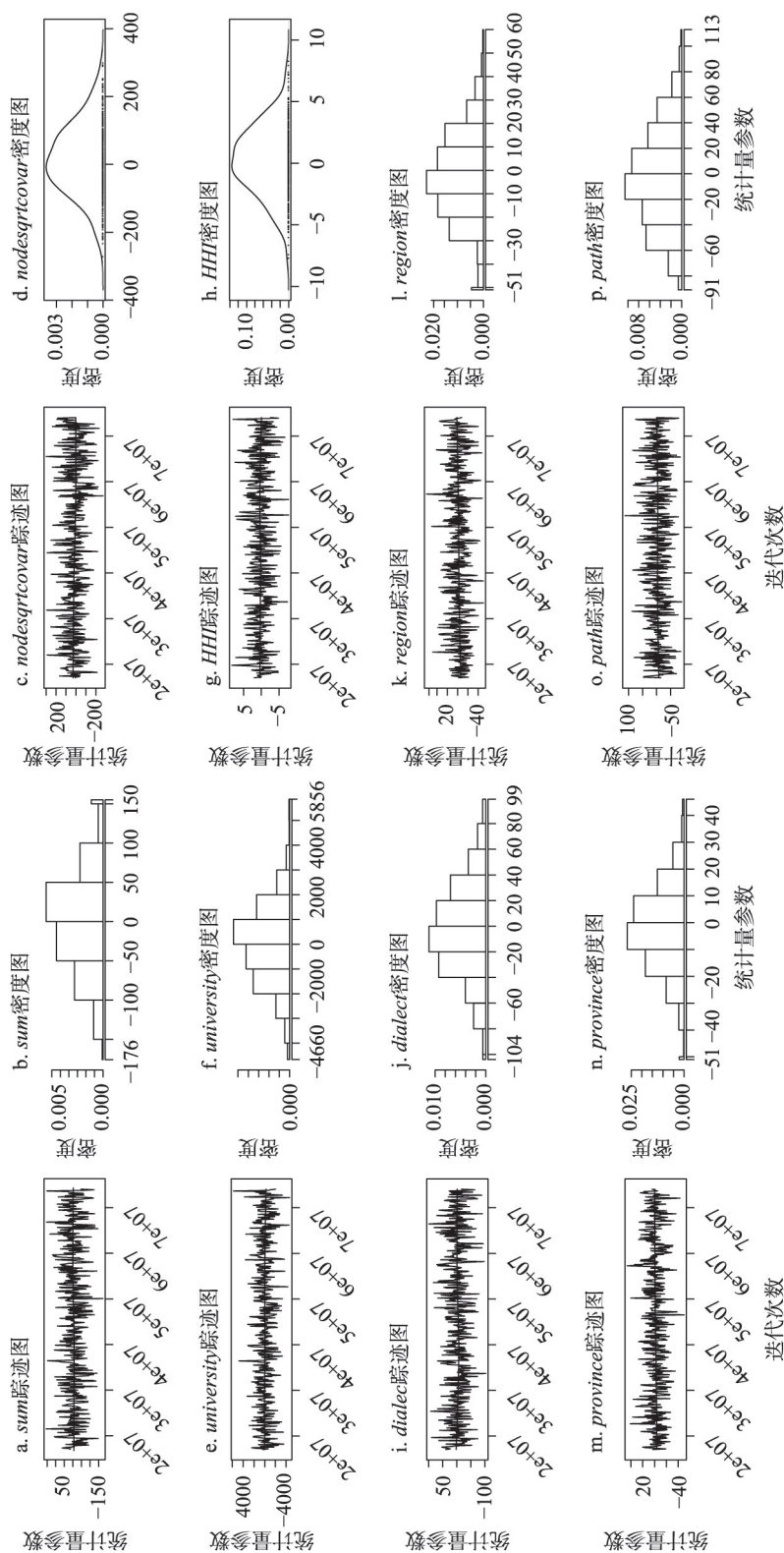


图 4 指数随机图模型的收敛性诊断图  
Fig. 4 Convergence diagnostics plots for exponential random graph models

是增加了城际合作的自由度,使得地理距离不再是学者间开展合作所需考虑的主要因素。虽然前人的研究发现物理距离对知识合作仍有负向影响,但这种影响一直在削弱<sup>[20]</sup>。最后,社会邻近性用过去是否有过合作衡量,该变量参数较大(1.133),仅次于知识结构邻近性和省域行政边界影响,在知识流动中发挥重要的推动作用,中国城市知识合作网络具有明显的路径依赖性<sup>[48]</sup>。

## 5 结论与讨论

本文基于WOS中国城市之间的论文合著数据构建中国城市知识合作网络,分析其2006—2016年的空间结构和拓扑结构演化特征,并引进加权随机指数图模型(ERGM)探究中国城市知识合作网络的演化动力机制。主要研究发现:

(1)就空间结构而言,北京是中国城市知识合作网络的绝对中心,“东密西疏”的格局比较稳定。整体网络由2006年北京—上海双核结构发展为2016年京津冀、长三角、长江中游、成渝、珠三角五大国家级城市群崛起的多中心格局。知识合作模式也由远程交互为主,转化为与邻近扩散相结合。高等级城市发挥着对内知识资源溢出辐射和对外知识资源合作互补的门户作用,以其为中心的节点区域逐渐与规划的城市群范围吻合。

(2)就拓扑结构而言,2006—2016年中国知识合作网络的规模和密度显著增加,城际合作的渠道变多、形式也更加多样化。城市间知识合作集中在少数大城市,具有“首府引力效应”,但这种极化性呈下降态势。网络中的小城市倾向于与大城市直接进行知识合作,但随着网络结构的优化和次级中心城市的崛起,这种异配性也逐渐弱化。随着合作路径的优化,中国城市知识网络在2016年演化为小世界网络。

(3)就影响机制而言,中国城市知识合作网络是内生结构与外生动力共同作用的结果。网络自演化的成长性与择优链接性是知识网络的重要驱动力,该作用与行政等级效应存在重叠;研发投入、经济水平和高校数量能促进城际知识流动,但前两者影响甚微,而高校数的正影响在城市属性因素中较强,但弱于邻近性和网络构型的影响;知识、文化、制度邻近性对知识合作起推动作用,其中知识结构相似的城市和同省的城市更易产生知识合作,制度环境比语言文化对知识流动影响大,同省城市的知识合作总体优先于同城市群的合作。高铁的存在增大了城际合作的自由度,地理距离对知识交流的影响不显著。社会邻近性的作用仍然较大,中国城市知识合作存在明显的路径依赖。

与前人的研究类似,本文亦证实了知识/技术邻近性、文化/语言邻近性、制度邻近性、社会邻近性(或历史路径依赖)对城际知识合作的正向影响,但也存在两点差异。①地理距离对中国城市知识合作虽然起阻碍作用,但不显著,这与刘承良等<sup>[24]</sup>对全球科研论文合作网络、段德忠等<sup>[10]</sup>对中国城市专利转移网络、司月芳等<sup>[20]</sup>对高被引华人科学家知识网络的研究结论相左,而与Zhang等<sup>[43]</sup>对长三角企业网络的研究发现一致。这可能是由于研究尺度和研究网络类型的差异所致,说明在全国尺度上论文合作比专利转移更能克服物理距离;同时,结合高铁变量的正显著影响可以推测,交通等基础设施的改善极大地压缩了时空;此外,在Broekel等<sup>[29]</sup>对德国城市研发合作网络的研究中,地理距离的负向作用也及其微弱。②城市的经济水平、研发投入对城际论文合作的促进作用甚微,而高校数量的正向影响虽比两者高,但仍比邻近性和内生动力的影响弱。因为当模型只考虑外生动力时,高校作为论文产出的重要阵地,其数量比经济水平和研发投入更能直接促进论文合作。而当模型同时考虑外生动力和内生动力时,城市属性变量的影响

会弱化, 城际关系变量和网络结构变量的拟合参数往往是城市属性变量的10~1000倍之多。这在王海花等<sup>[49]</sup>对长三角创新网络与Broekel等<sup>[29]</sup>对德国城市研发合作网络的研究中亦有体现。

根据研究结果, 可相应归纳出3点政策启示: ① 择优链接是知识网络演化的内在逻辑, 需充分考虑该效应, 优化知识资源规划布局, 促进培育新的知识增长极, 推动知识多中心扁平化发展, 从而通过大城市的涓滴效应带动中小城市知识交流水平, 以降低或避免马太效应。② 城市属性对知识流动的影响弱于城际同配性和其他协同效应, 需重点加强城际联系促进要素流动, 优化基础设施和合作政策配套, 进一步消除城际合作的认知、文化和制度壁垒, 提高城市群知识协同发展水平。③ 当前的知识合作具有较强路径依赖和较弱的聚合性, 需积极运用合作优势, 提升既有合作的创新水平, 并借助小世界网络拓展合作渠道, 以强化优质合作模式的根植性和降低新兴城际链接的合作成本。

在前人的基础上, 本文加入网络内生动力进行定量探讨, 并将ERGM从传统二值网络模拟拓展到加权网络的模拟, 深化了城市网络的实证研究。需要指出的是, ERGM无法对内外生变量进行多重共线性检验, 因此本文通过逐个添加变量的逻辑确定最优模型变量并进行解释, 变量添加的顺序总体不影响结果的稳健性。此外, 三角形结构变量在本文网络数据的拟合中未达到收敛, 但在其他类型的知识网络中未必如此。未来研究可比较科学知识网络与技术网络、企业网络在内外生影响机制的差别, 也可分析不同学科领域知识网络间演化动力的异同。

## 参考文献(References)

- [1] Si Yuefang, Zeng Gang, Cao Xianzhong, et al. Research progress of global innovation networks. *Progress in Geography*, 2016, 35(5): 600-609. [司月芳, 曾刚, 曹贤忠, 等. 基于全球—地方视角的创新网络研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 600-609.]
- [2] Dai Liang, Cao Zhan, Zhu Qing, et al. Analyzing polycentric urban development in China: Evidence from intercity knowledge collaboration. *Resources Science*, 2021, 43(5): 886-897. [戴靓, 曹湛, 朱青, 等. 中国城市群知识多中心发展评价. *资源科学*, 2021, 43(5): 886-897.]
- [3] Cao Z, Derudder B, Dai L, et al. 'Buzz- and- pipeline' dynamics in Chinese science: The impact of interurban collaboration linkages on cities' innovation capacity. *Regional Studies*, 2022, 56(2): 290-306.
- [4] Lyu Lachang, Liang Zhengji, Huang Ru. The innovation linkage among Chinese major cities. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 30-37. [吕拉昌, 梁政骥, 黄茹. 中国主要城市间的创新联系研究. *地理科学*, 2015, 35(1): 30-37.]
- [5] Lyu L C, Sun F X, Huang R. Innovation-based urbanization: Evidence from 270 cities at the prefecture level or above in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(8): 1283-1299.
- [6] Ma Haitao. The theoretical construction and network simulation of intercity innovative relationships in knowledge flow space. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 708-721. [马海涛. 知识流动空间的城市关系建构与创新网络模拟. *地理学报*, 2020, 75(4): 708-721.]
- [7] Matthiessen C W, Schwarz A W, Find S. World cities of scientific knowledge: Systems, networks and potential dynamics. An analysis based on bibliometric indicators. *Urban Studies*, 2010, 47(9): 1879-1897.
- [8] Ma H T, Fang C L, Lin S N, et al. Hierarchy, clusters, and spatial differences in Chinese inter-city networks constructed by scientific collaborators. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(12): 1793-1809.
- [9] Bergé L R, Wanzenböck I, Scherngell T. Centrality of regions in R&D networks: A new measurement approach using the concept of bridging paths. *Regional Studies*, 2017, 51(8): 1165-1178.
- [10] Duan Dezhong, Du Debin, Chen Ying, et al. Spatial-temporal complexity and growth mechanism of city innovation network in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(11): 1759-1768. [段德忠, 杜德斌, 湛颖, 等. 中国城市创新网络的时空复杂性及生长机制研究. *地理科学*, 2018, 38(11): 1759-1768.]
- [11] Neuländtner M, Scherngell T. Geographical or relational: What drives technology- specific R&D collaboration networks? *The Annals of Regional Science*, 2020, 65(3): 743-773.



- [12] Huang Xiaodong, Ma Haitao, Miao Changhong. Connectivity characteristics for city networks in China based on innovative enterprises. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 835-852. [黄晓东, 马海涛, 苗长虹. 基于创新企业的中国城市网络联系特征. *地理学报*, 2021, 76(4): 835-852.]
- [13] Li Dandan, Wang Tao, Wei Yehua, et al. Spatial and temporal complexity of scientific knowledge network and technological knowledge network on China's urban scale. *Geographical Research*, 2015, 34(3): 525-540. [李丹丹, 汪涛, 魏也华, 等. 中国城市尺度科学知识网络与技术知识网络结构的时空复杂性. *地理研究*, 2015, 34(3): 525-540.]
- [14] Lata R, Scherngell T, Brenner T. Integration processes in European research and development: A comparative spatial interaction approach using project based research and development networks, co-patent networks and co-publication networks. *Geographical Analysis*, 2015, 47(4): 349-375.
- [15] Wang S, Wang J X, Wei C Q, et al. Collaborative innovation efficiency: From within cities to between cities: Empirical analysis based on innovative cities in China. *Growth and Change*, 2021, 52(3): 1330-1360.
- [16] Karlsson C, Johansson B. Towards a dynamic theory for the spatial knowledge economy//Johansson B, Karlsson C, Stough R R. *Entrepreneurship and Dynamics in the Knowledge Economy*. London: Routledge, 2006: 12-46.
- [17] Wang Tao, Hennemann Stefan, Liefner Ingo, et al. Spatial structure evolution of knowledge network and its impact on the NIS: Case study of biotechnology in China. *Geographical Research*, 2011, 30(10): 1861-1872. [汪涛, Hennemann Stefan, Liefner Ingo, 等. 知识网络空间结构演化及对NIS建设的启示: 以我国生物技术知识为例. *地理研究*, 2011, 30(10): 1861-1872.]
- [18] Ma Haitao, Huang Xiaodong, Li Yingcheng. The evolution and mechanisms of megalopolitan knowledge polycentricity of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2297-2314. [马海涛, 黄晓东, 李迎成. 粤港澳大湾区城市群知识多中心的演化过程与机理. *地理学报*, 2018, 73(12): 2297-2314.]
- [19] Liu Chengliang, Guan Mingming, Duan Dezhong. Spatial pattern and influential mechanism of interurban technology transfer network in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(8): 1462-1477. [刘承良, 管明明, 段德忠. 中国城际技术转移网络的空间格局及影响因素. *地理学报*, 2018, 73(8): 1462-1477.]
- [20] Si Yuefang, Sun Kang, Zhu Yiwen, et al. Spatial structure and influencing factors of knowledge network of highly cited Chinese scientists. *Geographical Research*, 2020, 39(12): 2731-2742. [司月芳, 孙康, 朱贻文, 等. 高被引华人科学家知识网络的空间结构及影响因素. *地理研究*, 2020, 39(12): 2731-2742.]
- [21] Scherngell T, Hu Y J. Collaborative knowledge production in China: Regional evidence from a gravity model approach. *Regional Studies*, 2011, 45(6): 755-772.
- [22] Gui Q C, Liu C L, Du D B. Globalization of science and international scientific collaboration: A network perspective. *Geoforum*, 2019, 105: 1-12. DOI: 10.1016/j.geoforum.2019.06.017.
- [23] Boschma R. Proximity and innovation: A critical assessment. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61-74.
- [24] Liu Chengliang, Gui Qinchang, Duan Dezhong, et al. Structural heterogeneity and proximity mechanism of global scientific collaboration network based on co-authored papers. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(4): 737-752. [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. *地理学报*, 2017, 72(4): 737-752.]
- [25] Vértés P E, Alexander-Bloch A F, Gogtay N, et al. Simple models of human brain functional networks. *PNAS*, 2012, 109(15): 5868-5873.
- [26] Vinciguerra S, Frenken K, Valente M. The geography of internet infrastructure: An evolutionary simulation approach based on preferential attachment. *Urban Studies*, 2010, 47(9): 1969-1984.
- [27] Cao Wei, Dong Yao, Miao Jianjun. Research on formation mechanism of regional intellectual property protection network based on exponential random graph models. *Soft Science*, 2019, 33(11): 131-137. [曹薇, 董瑶, 苗建军. 基于ERGM的区域知识产权保护网络形成机制研究. *软科学*, 2019, 33(11): 131-137.]
- [28] Qin Liuting, Teng Tangwei, Zhang Yi, et al. Evolution's characteristics and influence factors of China's universities knowledge collaboration network. *Science & Technology Progress and Policy*, 2020, 37(22): 125-133. [覃柳婷, 滕堂伟, 张翌, 等. 中国高校知识合作网络演化特征与影响因素研究. *科技进步与对策*, 2020, 37(22): 125-133.]
- [29] Broekel T, Hartog M. Determinants of cross-regional R&D collaboration networks: An application of exponential random graph models//Scherngell T. *The Geography of Networks and R&D Collaborations*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2013: 49-70.
- [30] Zhang S R, Derudder B, Witlox F. Dynamics in the European air transport network, 2003-9: An explanatory framework drawing on stochastic actor-based modeling. *Networks and Spatial Economics*, 2016, 16(2): 643-663.
- [31] Pilny A, Atouba Y. Modeling valued organizational communication networks using exponential random graph models.

- Management Communication Quarterly, 2018, 32(2): 250-264.
- [32] Krivitsky P N. Exponential-family random graph models for valued networks. *Electronic Journal of Statistics*, 2012, 6: 1100-1128.
- [33] Li Y C, Phelps N A. Knowledge polycentricity and the evolving Yangtze River Delta megalopolis. *Regional Studies*, 2017, 51(7): 1035-1047.
- [34] Andersson D E, Gunessee S, Matthiessen C W, et al. The geography of Chinese science. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2014, 46(12): 2950-2971.
- [35] Ma H T, Li Y C, Huang X D. Proximity and the evolving knowledge polycentricity of megalopolitan science: Evidence from China's Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, 1990-2016. *Urban Studies*, 2021, 58(12): 2405-2423.
- [36] Xiang Lin, Dai Liang, Zhu Xihui, et al. Hierarchical and regional evolution of China's intercity knowledge innovation network: Evidence from scientific publication collaboration. *Modern Urban Research*, 2021, 36(1): 25-31. [香林, 戴靛, 朱禧惠, 等. 中国城市知识创新网络的等级性与区域性演化: 以合著科研论文为例. *现代城市研究*, 2021, 36(1): 25-31.]
- [37] Nystuen J D, Dacey M F. A graph theory interpretation of nodal regions. *Papers of the Regional Science Association*, 1961, 7(1): 29-42.
- [38] Hou Chunguang, Du Debin, Liu Chengliang, et al. Spatio-temporal evolution and factors influencing international student mobility networks in the world. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 681-694. [侯纯光, 杜德斌, 刘承良, 等. 全球留学生留学网络时空演化及其影响因素. *地理学报*, 2020, 75(4): 681-694.]
- [39] Jiao Meiqi, Du Debin, Gui Qinchang, et al. The spatio-temporal evolution and influencing factors of urban technical corporation networks: From the perspective of Belt and Road. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 913-927. [焦美琪, 杜德斌, 桂钦昌, 等. “一带一路”视角下城市技术合作网络演化特征与影响因素研究. *地理研究*, 2021, 40(4): 913-927.]
- [40] Dai L, Derudder B, Liu X J. The evolving structure of the Southeast Asian air transport network through the lens of complex networks, 1979-2012. *Journal of Transport Geography*, 2018, 68: 67-77.
- [41] Lusher D, Koskinen J, Robins G. *Exponential Random Graph Models for Social Networks: Theory, Methods, and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [42] Robins G, Pattison P, Kalish Y, et al. An introduction to exponential random graph ( $p^*$ ) models for social networks. *Social Networks*, 2007, 29(2): 173-191.
- [43] Zhang W Y, Derudder B, Wang J H, et al. An analysis of the determinants of the multiplex urban networks in the Yangtze River Delta. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 2020, 111(2): 117-133.
- [44] Bathelt H, Malmberg A, Maskell P. Clusters and knowledge: Local buzz, global pipelines and the process of knowledge creation. *Progress in Human Geography*, 2004, 28(1): 31-56.
- [45] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [46] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [47] Levin D A, Peres Y. *Markov Chains and Mixing Times*. 2nd ed. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 2017.
- [48] Chong Z H, Pan S. Understanding the structure and determinants of city network through intra-firm service relationships: The case of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. *Cities*, 2020, 103: 102738. DOI: 10.1016/j.cities.2020.102738
- [49] Wang Haihua, Sun Qin, Guo Jianjie, et al. Research on evolution dynamic of collaborative innovation network in the urban agglomeration of Yangtze River Delta based on ERGM. *Science & Technology Progress and Policy*, 2021, 38(14): 45-53. [王海花, 孙芹, 郭建杰, 等. 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. *科技进步与对策*, 2021, 38(14): 45-53.]

## The influencing mechanisms of evolving structures of China's intercity knowledge collaboration networks

DAI Liang<sup>1</sup>, CAO Zhan<sup>2,3</sup>, MA Haitao<sup>4</sup>, JI Yufan<sup>1</sup>

(1. School of Public Administration, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China;

2. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Spatial Intelligent Planning Technology, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China,

Shanghai 200092, China; 4. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The study of influencing mechanisms of intercity knowledge collaboration networks is an important research topic of innovative geography. Most existing research focuses on the influence of exogenous forces (e.g., urban resources endowment, multidimensional proximity), whereas less attention has been paid to endogenous factors (e.g., preferential attachment, transitivity). This research constructs an intercity knowledge collaboration network of Chinese cities based on the co-publication data from the Web of Science, analyzes its evolving characteristics of spatial and topological structures from 2006 to 2016, and quantitatively explores the endogenous and exogenous forces underlying the network formation through exponential random graph modelling. The results show that: (1) From the spatial structure perspective, the intercity knowledge flows are dense in the eastern region but spare in the western region, which is stable during 2006-2016. The overall network has developed from a dual-core structure of Beijing and Shanghai to a polycentric structure, in which five national-level urban agglomerations have become important bases for nurturing multiple centers. The nodal regions centered on highly administrative cities have become increasingly consistent with the planned urban agglomeration, which plays the dual role of proximal spillover and remote interaction of knowledge resources. (2) From the topological structure perspective, the scale and density of intercity knowledge flows have increased significantly, and the preferential attachment to big cities is obvious. However, with the rise of multiple centers, the network polarization and disassortativity have been weakened. With the optimization of intercity knowledge collaboration paths, the network cohesion has improved, thus becoming a small-world network. (3) From the influencing mechanism perspective, self-evolution and preferential attachment are important driving forces of knowledge collaboration networks, showing an overlapping effect with urban hierarchy. The positive impact of urban knowledge-related attributes on intercity flows is weaker than multidimensional proximity and path dependence. The presence of high-speed railways promotes knowledge collaboration, while the influence of geographic distance is not significant.

**Keywords:** knowledge network; scientific collaboration; influencing mechanism; endogenous structural variables; exponential random graph model