

引用格式:戴靓, 纪宇凡, 王嵩, 等. 中国城市知识创新网络的演化特征及其邻近性机制[J]. 资源科学, 2022, 44(7): 1494-1505.
[Dai L, Ji Y F, Wang S, et al. Evolutionary characteristics and proximity mechanism of intercity knowledge innovation networks in China[J]. Resources Science, 2022, 44(7): 1494-1505.] DOI: 10.18402/resci.2022.07.14

中国城市知识创新网络的演化特征及其邻近性机制

戴 靓¹, 纪宇凡¹, 王 嵩², 朱 青³, 丁子军¹

(1. 南京财经大学公共管理学院, 南京 210023; 2. 东北大学工商管理学院, 沈阳 110167;
3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘 要:在开放式创新模式下,分析中国城市间知识合作创新的网络结构并探讨其背后的邻近性机制对提高城市创新效率、推进国家创新体系建设具有重要意义。本文基于中国285个地级及以上城市间论文合作发表和专利联合申请的截面数据,综合构建了2011年和2019年中国城市知识创新网络,分析其结构演化特征,并采用多元回归的二次指派程序(MRQAP)从邻近性视角探讨其演化机制。结果表明:①2011—2019年中国城市知识创新网络密度增强,择优链接弱化,呈现出多中心发展趋势,合作格局由北京和上海主导转变为北京上海引领与区域中心带动相结合,从而形成多个区域网。②城市间知识合作创新除了受城市经济水平、科教支持力度、行政等级的正向影响外,也受地理、组织、文化、社会、制度邻近的显著促进,邻近性机制对中国城市知识创新网络演化具有较强解释力。③不同维度邻近性对城市知识创新网络的影响是动态的和交互的,过度的地理、社会、认知邻近会阻碍城市间知识合作创新,认知邻近可弥补地理距离,而社会邻近往往伴随着地理邻近。在此基础上,针对中国创新型城市建设和城市协同创新发展提出相关政策建议。

关键词:城市网络;知识创新;多维邻近性;非线性;交互性;MRQAP

DOI: 10.18402/resci.2022.07.14

1 引言

面对中国经济增长方式转型与百年未有之大变局,国家对提升城市和区域的创新能力日益重视,强调依靠创新实现高质量发展和内涵型增长。十四五规划提出,“支持北京、上海、粤港澳大湾区形成国际科技创新中心,建设北京怀柔、上海张江、大湾区、安徽合肥综合性国家科学中心,支持有条件的地方建设区域科技创新中心”。新时期,城市的功能正在由以要素资源驱动的生产制造加速迈向以技术信息驱动的知识创新。如今的市场和竞争环境复杂多变,产品和技术的生命周期愈发缩短,创新的成本和风险不断上升,这使得创新主体对外部知识的依赖性越来越强,合作成为知识创新

的重要途径^[1]。在流动空间下,传统封闭、单点线性的创新模式向开放式合作创新系统转变,积极融入全球和区域的创新网络成为城市创新发展的新趋势^[2,3]。因此,动态把握中国城市知识合作创新的时空格局与演化机制,对培育多级科创中心、优化合作结网路径和完善国家创新体系具有重要的现实意义。

创新网络最早由Freeman提出,随着人文社会科学对地理空间的重视以及城市地理学中关系研究的崛起,城市创新网络逐渐成为探讨区域知识溢出和城市创新系统的主要方式^[4]。学者们从不同视角对不同空间尺度的创新网络开展了广泛研究,而城际创新联系的构建是前提,既有文献主要通过模

收稿日期:2022-01-20 修订日期:2022-05-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41901189);江苏省自然科学基金项目(BK20190797);江苏省高校自然科学基金项目(19KJB170016)。

作者简介:戴靓,女,江苏镇江人,副教授,硕士生导师,研究方向为城市网络与区域发展。E-mail: 9120181027@nufe.edu.cn

通讯作者:王嵩,男,辽宁沈阳人,博士,讲师,研究方向为区域协同创新。E-mail: wangsong1@mail.neu.edu.cn

2022年7月

型拟合法和参量替代法来刻画^[5]。模型拟合法是在对城市创新禀赋综合评价的基础上,采用修正的空间交互模型测度城市间的创新联系。这类方法拟合出的城际创新关联较为综合,但结果并非真实,侧重于潜力的表征^[6]。随着大数据技术的发展,有关城市间合作创新的显性信息不再难以获取,参量替代法受到学者们的青睐。该方法中的城际创新联系表现为以论文产出为代表的科学型创新联系、以专利或项目研发为代表的技术型创新联系、以创新企业空间布局为代表的载体型创新联系,以高端人才跨城流动为代表的要素型创新联系^[7]。其中,城市间隐性的知识创新网络,主要通过论文合著的科学知识和专利合申的技术知识来显化。例如,Cao等^[1]基于城际论文合作数据,探讨了中国城市知识合作创新网络中的“本地嗡鸣—全球管道”。焦美琪等^[8]利用专利合作数据,分析了“一带一路”城市技术合作创新网络的时空演化。李丹丹等^[9]认为论文与专利合作作为科技发展的重要成果,是反映区域创新能力的主要指标,因而比较了中国城市间两种知识创新网络的异同。然而,既有研究对知识创新网络的表征总体局限于单一维度,将科学或技术知识集成考虑的文献不多,容易导致对中国城市知识创新格局的片面认知,因而需进一步探索城际知识创新网络的综合测度。

随着学者们对城市知识创新网络时空格局认识的深入,其形成与演化机制成为研究的重点。其中,多维邻近性作为区域知识溢出、创新与技术扩散的重要动力,为城市合作创新网络的影响机制分析提供了理论框架。法国邻近动力学派(French School of Proximity)最早提出“多维邻近性”的概念,并对其在创新中的作用进行探讨^[10]。其在经济地理中的流行得益于Boschma将多维邻近性拓展和归纳为地理、制度、认知、组织、社会等方面^[11]。大量实证研究揭示了多维邻近性对城市创新网络演化有着不同程度的影响^[12-14],但这些文献往往假设不同邻近性之间相互独立,且对创新网络的影响机制不变。事实上,邻近性的作用并非单调的、静止的,也不是相互独立的。一方面,过度邻近性容易引发锁定效应而产生“邻近悖论”(Proximity Paradox),即随着创新网络所处阶段不同,邻近性可能产生

“U”型或者倒“U”型的影响^[15]。另一方面,不同维度邻近性的作用机制之间存在依赖性。Boschma指出地理邻近性本身对创新合作可能没有影响,而需要作用于其他维度的邻近性才能发挥效应^[11];Ma等^[16]则认为地理邻近性与非地理邻近性对创新合作的影响是相互交织的,存在互补或替代效应。总体而言,虽然邻近性被认为是城市间创新结网的基本动力,但对于多维邻近对创新网络影响的动态性以及不同邻近对创新网络影响的交互性仍较少关注,需深入理解多维邻近性“相互联系和内在动态的本质”^[17]。

在此背景下,本文基于中国285个地级及以上城市的论文和专利合作数据,综合构建2011年和2019年的中国城市知识创新网络,分析其结构特征与演化规律,并运用多元回归的二次指派程序(Multiple Regression Quadratic Assignment Procedure, MRQAP),从邻近性视角探讨中国城市知识创新网络的演化机制。研究的主要特色在于:一方面,集成论文和专利合作综合测度城际知识创新联系,一定程度上克服了引力模型拟合的虚拟性和单一参量替代的片面性。另一方面,加入平方项和交互项深入考察邻近性影响的动态性和交互性,以期深化多维邻近性机制的理论认知和实证研究,并为区域创新政策的制定提供科学依据。

2 研究方法与数据来源

2.1 中国城市知识创新网络的构建

Johansson等^[18]将知识分为科学知识、技术知识以及与企业相关的知识。论文和专利作为知识产出的显性表达,是科技创新的重要载体,其合作生产往往需要著作者和发明人之间密切的联系和深厚的信任,成为当前追踪隐性知识溢出和创新资源流动的主要途径^[9]。不同于以往研究从单一维度刻画城市间知识合作创新联系,本文将论文合作和专利合作相结合,综合构建城市知识创新网络。2010年以来随着一系列科技创新政策的出台,中国各中心城市科技创新能力显著提升,城市间技术合作呈现爆发式增长^[19,20]。因此,以2010年为数据收集基年,对比近10年两个时段下中国城市知识合作创新格局的演变。考虑到论文发表和专利申请的周期,采用两年的时间窗口2010—2011年和2018—2019

年收集数据以消除知识产出的滞后性与单一年份的波动性。同时,考虑到中国行政区划的部分调整,为确保两个时间段城市统计口径的一致性及其社会经济数据的可得性,研究对象最终涉及中国境内的285个地级市和直辖市。

借鉴前人的研究^[18,21],专利合作申请数据来源于国家知识产权局专利信息服务平台,爬取2010—2011年和2018—2019年的所有专利信息,剔除独立申请和同城申请的样本,将专利按申请人所在城市两两组合进行拆分,得到2010—2011年和2018—2019年两期(下文简称为2011年和2019年)中国城市间的专利合作联系。若某个专利由 m 个不同地区共同完成,则其包含 $m(m-1)/2$ 次城际合作。将每条专利构建出的子网络,按285个城市进行叠加汇总,即得到 285×285 无向加权的城际专利合作网络矩阵。同理,论文合作发表数据来源于中国知网,数据的收集与处理过程与专利一致,也可得到 285×285 无向加权的城际论文合作网络矩阵。

在构建中国城市知识创新网络时,由于专利和论文的单位 and 量级不同,因而首先需要对城际专利合作数和论文合作量进行最大值标准化。考虑到不同年份的可比性,2019年也采用2011年的最大值进行无量纲化,从而将原始的专利和论文合作数量转化为城际专利和论文合作强度。其次,将两种合作强度通过加权求和法,得到城市间知识合作创新的综合联系强度,如式(1)和(2)所示。

$$inno_{ij,2011} = \frac{PAT_{ij,2011}}{\max(PAT_{ij,2011})} \times W_{PAT} + \frac{PUB_{ij,2011}}{\max(PUB_{ij,2011})} \times W_{PUB} \quad (1)$$

$$inno_{ij,2019} = \frac{PAT_{ij,2019}}{\max(PAT_{ij,2011})} \times W_{PAT} + \frac{PUB_{ij,2019}}{\max(PUB_{ij,2011})} \times W_{PUB} \quad (2)$$

式中: $inno_{ij}$ 为城市 i 和 j 之间的知识创新联系强度; PAT_{ij} 和 PUB_{ij} 为城市 i 和 j 之间的专利合作申请数和论文合作发表量; W_{PAT} 和 W_{PUB} 分别为城际专利联系和论文联系的权重。参考刘乃全等^[22],权重确定思路如下:首先,根据“产量越少难度越高”的假设,通过专利和论文数量的倒数表征其难度系数。其次,

利用技术水平保证率对难度系数进行修正。王明亮等^[23]认为,发明专利因严格的实质审查和公告等法定程序而比论文更具技术性,但实用新型专利只需形式审查而比论文技术性弱,所以对论文、发明专利和实用专利分别设定1.0、1.2和0.8的技术水平保证率,再将其乘以各自的难度系数。最后,将技术水平修正后的难度系数进行归一化处理,从而得到论文和专利的权重分别为0.44和0.56。相比于综合交通网络对不同城际交通模式的等权化处理^[24,25],在城市知识创新网络中,专利的商业化应用程度比论文高,其权重略大则更为合理。

为检验不同权重对综合创新网络的影响,将专利权重从0.50到0.95以0.05的间隔取值,论文权重为1减去相应的专利权重,根据公式(1)和(2)依次计算出各种权重赋值组合下的综合性城市知识创新网络。将得到的结果与论文和专利分别赋权0.44、0.56的原始网络作QAP相关性检验(图1),结果发现当专利权重取值介于0.50~0.60时,综合网络之间的相似性高达99%;取值在0.60~0.95之间时,相似性仍在90%以上。由此可见,当专利权重不低于论文权重时,综合网络在不同权重下具有较强的结构稳健性。

2.2 MRQAP模型与变量设定

考虑到城市间合作论文或专利数量为非负整数且过度分散,城市创新网络的影响机制研究多采用负二项引力模型^[5,8]。然而,本文的城际创新联系为专利和论文合作强度的综合测度,不符合以往的数据特征。此外,随着网络中边之间的相互依赖性

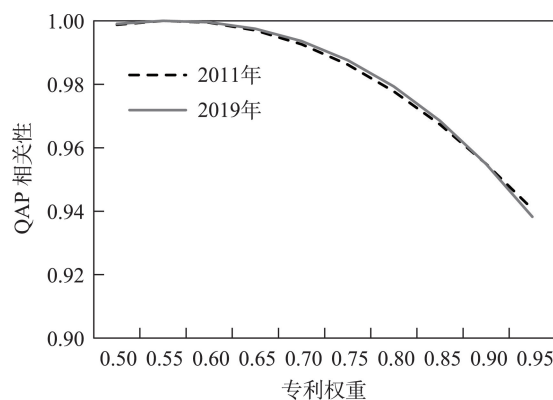


图1 不同权重下综合网络与原始网络的QAP相关性

Figure 1 Quadratic assignment procedure (QAP) correlations between original and composite networks of different patent weights

2022年7月

逐步被关注,学者们越来越转向网络计量模型,如利用多元回归的二次指派程序(MRQAP)、指数随机图模型(ERGM)、面向对象的随机行动者模型(SAOM)来检验创新网络中矩阵变量之间的关系^[4,26]。虽然ERGM和SAOM在内生结构动力方面具有较强的解释性,但其会弱化网络外生动力(如邻近性)的影响。同时,当内外生变量较多时,模型很可能无法收敛,从而不利于深入剖析多维邻近性影响的非线性和交互性。

本文采用MRQAP模型来分析中国城市知识创新网络形成和演化的动力机制。MRQAP是二次指派程序和多元回归模型的结合,以矩阵数据的随机置换为基础,对解释变量和被解释变量进行回归,并对回归系数进行检验。该模型的优势在于,对变量的数量和类型具有较强的包容性,可以包含关系变量并考虑网络中边之间的相互依赖性,也可以包含分类变量而不违反分布假设^[27]。模型中的所有变量均是285×285的矩阵形式,对角线值为零,其表达式如下:

$$INNO = \beta_0 + \beta_k X + \varepsilon \quad (3)$$

式中: $INNO$ 为城市知识创新联系矩阵; X 为自变量矩阵; β_0 为常数项系数; β_k 为自变量系数; ε 为误差

项。为增强拟合参数间的可比性,对自变量的原始值作最大值标准化处理。利用Double-semi-partialling算法对MRQAP进行参数估计,以确保结果的稳健性。

城市间知识合作创新的动力因素通常从城市自身的创新能力和城市间的多维邻近性来考量。参考王庆喜等^[13]和Zhang等^[27],选取城市的人均地区生产总值、科教支出、行政等级来反映其创新禀赋和规模,分别构建 $PGDP$ 、 EET 和 ADM 自变量矩阵;根据Boschma^[11]的多维邻近性框架,构建地理邻近性 GEO 、组织邻近性 ORG 、制度邻近性 INS 、社会邻近性 SOC 和认知邻近性 COG 的自变量矩阵,详见表1。由于本文侧重考察城市知识创新网络的邻近性机制,故以 $PGDP$ 、 EET 和 ADM 为控制变量, GEO 、 ORG 、 INS 、 SOC 、 COG 为核心变量,根据公式(3)构建模型A、模型B和模型C,具体如下:

$$\begin{aligned} \text{模型A: } INNO = & \beta_0 + \beta_1 PGDP + \beta_2 EET + \\ & \beta_3 ADM + \beta_4 GEO + \beta_5 ORG + \beta_6 INS + \\ & \beta_7 SOC + \beta_8 COG + \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{模型B: } INNO = & \beta_0 + \beta_1 PGDP + \beta_2 EET + \\ & \beta_3 ADM + \beta_4 GEO + \beta_5 ORG + \beta_6 INS + \beta_7 SOC + \\ & \beta_8 COG + \beta_9 GEO^2 + \beta_{10} SOC^2 + \beta_{11} COG^2 + \varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

表1 变量解释

Table 1 Definition of variables

变量矩阵	矩阵数值	数据说明
$INNO$	$inno_{ij}$	$inno_{ij}$ 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 的知识合作创新联系强度,由公式(1)(2)计算而得。
$PGDP$	$pgdp_{ij}$	$pgdp_{ij}$ 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 的人均地区生产总值的乘积,数据来自各省份统计年鉴。
EET	eet_{ij}	eet_{ij} 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 的科教支出乘积,数据来自各省份统计年鉴。
ADM	adm_{ij}	adm_{ij} 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 属于高能级城市(直辖市、省会城市和计划单列市)的数量。
GEO	geo_{ij}	geo_{ij} 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 之间的地理邻近性,用两城市市中心经纬度之间欧式距离的倒数表征,通过R语言的geosphere包计算。
ORG	org_{ij}	org_{ij} 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 之间的组织邻近性,若两城市属于同一省份, $org_{ij}=1$,否则 $org_{ij}=0$ 。
INS	ins_{ij}	ins_{ij} 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 之间的制度邻近性,通过非正式制度的文化邻近性测度 ^(a) 。根据《中国语言地图集》 ^[29] ,若两城市属于同一方言区, $ins_{ij}=1$,否则 $ins_{ij}=0$ 。
SOC	soc_{ij}	soc_{ij} 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 之间的社会邻近性,通过Jaccard指数计算 ^[30] 。 $soc_{ij} = \frac{inno_{ij}}{S_i + S_j - inno_{ij}}$,式中: S_i 、 S_j 是城市 <i>i</i> 、城市 <i>j</i> 与网络中其他城市知识创新联系强度的总和。
COG	cog_{ij}	cog_{ij} 是城市 <i>i</i> 和城市 <i>j</i> 之间的认知邻近性,可通过两城市间的产业结构相似度衡量 ^[13] 。 $cog_{ij} = \sum_{k=1}^n (IND_{ik} \cdot IND_{jk}) / \sqrt{\sum_{k=1}^n IND_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^n IND_{jk}^2}$,式中: IND_{ik} 、 IND_{jk} 分别代表 <i>k</i> 产业产值占城市 <i>i</i> 、城市 <i>j</i> 总产值的比重; n 表示产业数量。

注:(a)制度邻近性包括正式和非正式制度,考虑到研究的285个城市均在中国的统一正式制度框架下,因而仅探讨非正式制度,即文化邻近性的影响^[28]。

$$\begin{aligned}
 \text{模型C: } INNO = & \beta_0 + \beta_1 PGDP + \beta_2 EET + \\
 & \beta_3 ADM + \beta_4 GEO + \beta_5 ORG + \beta_6 INS + \\
 & \beta_7 SOC + \beta_8 COG + \beta_9 GEO \times ORG + \\
 & \beta_{10} GEO \times INS + \beta_{11} GEO \times SOC + \\
 & \beta_{12} GEO \times COG + \varepsilon
 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: β_1 – β_{12} 为自变量系数。模型A考察邻近性对城市知识创新网络的独立影响。模型B考察邻近性对城市知识创新网络的非线性影响,由于组织和文化邻近性均为虚拟变量,矩阵中的原始数值与平方项一致,所以只需纳入地理邻近性平方项矩阵 GEO^2 、社会邻近性平方项矩阵 SOC^2 、认知邻近性平方项矩阵 COG^2 。模型C考察地理与非地理邻近性对城市知识创新网络的交互影响,相应自变量的数值为地理邻近性与其他非地理邻近性的乘积,从而构建地理与组织邻近性交互项矩阵 $GEO \times ORG$ 、地理与文化邻近性交互项矩阵 $GEO \times INS$ 、地理与社会邻近性交互项矩阵 $GEO \times SOC$ 、地理与认知邻近性交互项矩阵 $GEO \times COG$ 。若交互项系数为正,则变量间存在互补效应;若为负,则存在替代效应。所有交互变量在相乘之前均进行中心化处理,即分别减去各变量的均值,以消除交互项与独立变量之间共线性的可能^[31]。

3 结果与分析

3.1 中国城市知识创新网络的时空演化

3.1.1 创新联系不断强化,合作路径逐渐优化

图2展示了2011年和2019年中国城市知识创新网络的空间格局,图中节点的大小与城市在网络中与其他城市知识创新联系的总和成正比,连线的粗细与城市之间知识创新联系的强度成正比。利用复杂网络理论对网络的拓扑指标进行测算,鉴于文章篇幅限制,相关计算方法详见 Dai 等^[28]。2011—2019年,中国城市创新网络覆盖面扩大,联系度增强。2011年,285个城市中有6个城市没有参与知识合作,279个城市间形成了3499条联系,每个城市在网络中平均有25个合作城市,网络密度0.090,总体较为稀疏。2019年,所有城市都参与了知识合作,形成了6695条联系,平均合作城市增至47个,网络密度为0.165,城市的平均合作创新联系强度也由2011年的0.163上升至2019年的0.959,可见城市间创新合作渠道增多的同时,联系强度也不断提高。同时,网络通达性也在增强,平均最短路

径由2.085降至0.165,整体效率从0.369提高到0.406,城市间知识合作愈发便捷,合作路径更加多元和优化。

3.1.2 城际合作择优链接,网络多中心性增强

2011年和2019年中国城市知识创新网络的度相关性分别为-0.310和-0.297,城市选择合作对象时具有异配性,即节点度低、创新能力弱的城市倾向与度数大、创新力强的城市直接合作。这种偏好使得中心城市的枢纽地位得到强化,以胡焕庸线为界,东密西疏的格局保持稳定。随着创新网络的生长,异配性有所下降,这与多中心崛起有关。如图2所示,2011年,北京和上海2个头部城市以辐射状连接区域内省会城市形成中国创新合作的核心结构;2019年,区域中心(南京、广州、深圳、武汉、天津、杭州、成都、苏州等)崛起,创新发展以点带面,形成了以京津冀、长三角、珠三角、成渝为支撑的菱形知识创新通道。从表2可知,知识创新联系强度排名前10的城市保持不变,但连接度值增长了5倍以上。除深圳名次上升外,其余城市的位次较为稳定。城际创新联系的基尼系数从0.627降至0.583,而网络的多中心性(城市创新联系强度排名第2至第6的平均值除以第1的实际值)由0.352升至0.387。网络逐步由头部城市主导向头部城市引领、区域中心带动的格局转化,节点度小的城市开始转向连接区域内邻近的中心城市。

3.1.3 城市组团分类集聚,多维邻近效应显著

2011—2019年,中国城市知识创新网络的集聚系数从0.354提高到0.417,越来越多的城市知识合作密切而形成了局部集聚。通过社区探测发现,2011年城市组团分为9类,不同组团之间地域交织较多,边界不清晰;2019年城市组团只有6类,形成明显的长三角组团、山东半岛组团、北京向东北辐射组团、珠三角组团、中部与西南组团、西北组团。知识合作创新过程中,城市不再强调择优链接,而是选择具有某些相同特征(如地理邻近、产业邻近、组织邻近、文化邻近、社会邻近等),便于降低成本、提高效率的城市进行合作,从而在某一区域形成具有地域特色的区域创新局部网,或在某一关联产业或文化中形成具有产业或文化特色的知识创新专业网^[20]。例如,2011年同省的创新联系平均为0.010,而跨省的为0.003;2019年同省和跨省的差距

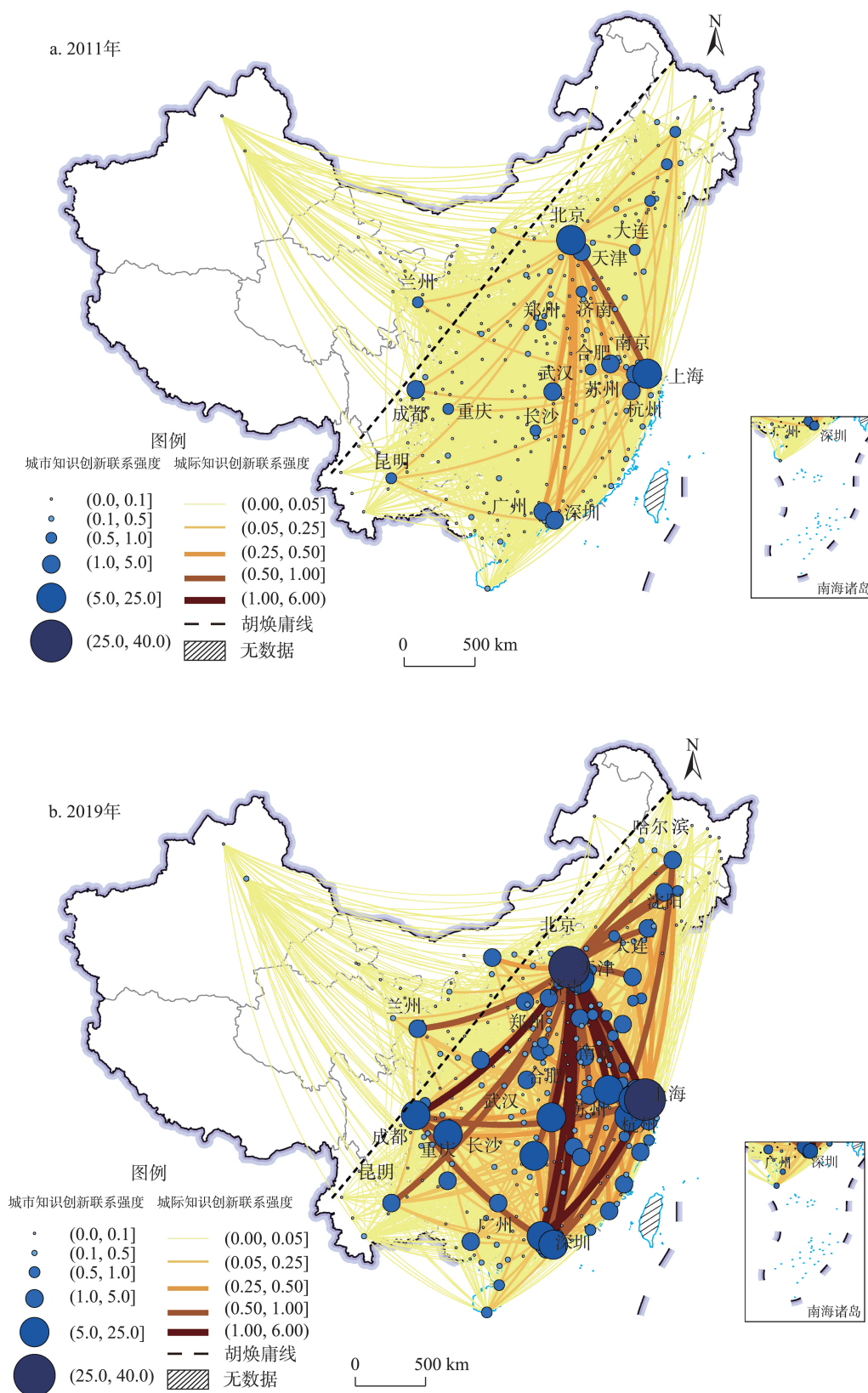


图2 2011和2019年中国城市知识创新网络图

Figure 2 China's intercity knowledge innovation network, 2011 and 2019

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1823号标准地图制作,底图边界无修改。

表2 知识创新联系强度排名前10的城市和城市对

Table 2 Top 10 cities and city pairs of knowledge innovation strength

排名	城市	2011年	城市	2019年	城市对	2011年	城市对	2019年
1	北京	6.988	北京	39.931	北京—上海	1.000	北京—上海	5.531
2	上海	5.139	上海	25.273	北京—天津	0.426	北京—深圳	3.149
3	南京	2.384	南京	15.147	北京—南京	0.404	北京—南京	2.342
4	广州	1.817	广州	13.432	上海—南京	0.367	上海—南京	2.062
5	武汉	1.589	深圳	12.158	北京—深圳	0.335	北京—广州	2.008
6	天津	1.385	武汉	10.519	北京—广州	0.335	北京—天津	1.960
7	深圳	1.378	天津	8.035	上海—苏州	0.319	北京—武汉	1.849
8	杭州	1.142	杭州	7.892	北京—武汉	0.291	北京—成都	1.271
9	成都	1.053	成都	7.494	上海—武汉	0.246	广州—深圳	1.227
10	苏州	1.034	苏州	5.487	上海—广州	0.222	上海—广州	1.196

扩大为0.014和0.005。其中,江苏、浙江和广东的省内平均合作联系最强。此外,将城际创新联系强度在不同距离下统计发现(图3),除了800~1000 km和1000~1200 km两段外,城市间的合作创新联系强度基本符合距离衰减定律。而800~1200 km集中了北京与南京、上海、广州、深圳、武汉、成都等高行政等级城市间的强关联。因此,中国城市知识创新网络是城市属性和城际邻近性综合作用的结果。

3.2 中国城市知识创新合作的邻近性机制

根据MRQAP模型和变量设定,对2011年和2019年的数据依次运行模型A、模型B与模型C。在Stata中先对自变量和因变量的边列表形式进行方差膨胀因子检验,发现VIF值皆小于2,不存在明

显的多重共线性问题^[32]。因此,对自变量和因变量矩阵进行MRQAP回归,得到表3的结果。

就城市自身属性而言,2011—2019年人均GDP、政府的教育与科技支出系数显著为正,表明经济越发达、科教投入越大,越有利于知识合作创新。人均GDP系数由0.044上升至0.258且科教支出系数由0.008增长至0.047,城市创新本底的影响不断强化,说明营造良好的创新环境在吸引创新要素流中扮演愈发重要的角色。行政等级的影响也显著为正,高行政等级城市拥有更丰富的创新资源,具有特殊的体制优势和优惠的创新政策,这有利于减少创新合作的不确定性,减少隐性壁垒,从而促进知识合作^[33]。同时,行政等级的系数从0.011

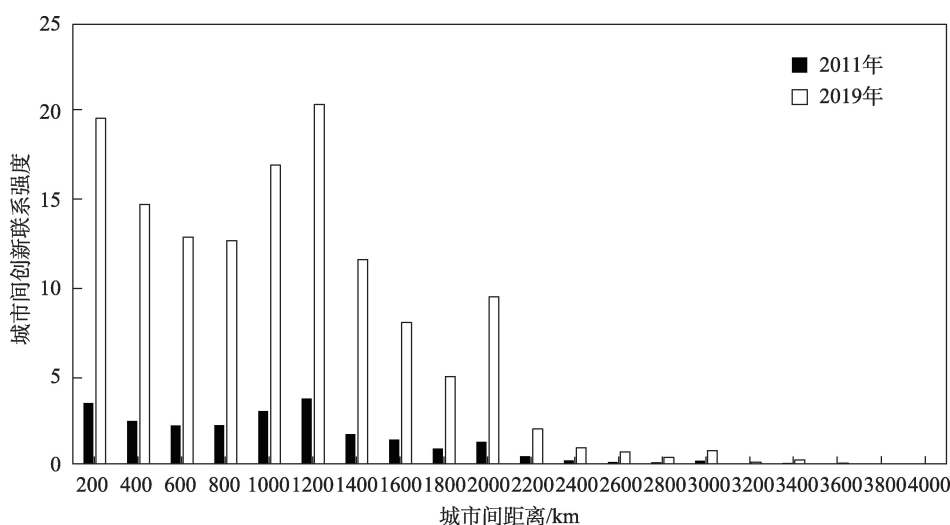


图3 中国城市间知识创新联系强度与距离的关系

Figure 3 Relationship between China's intercity knowledge innovation strength and distance

2022年7月

表3 MRQAP模型运行结果

Table 3 Results of the multiple regression quadratic assignment procedure (MRQAP)

自变量(矩阵形式)	2011年			2019年		
	模型A	模型B	模型C	模型A	模型B	模型C
PGDP	0.044*** (0.002)	0.040*** (0.002)	0.046*** (0.002)	0.258*** (0.006)	0.269*** (0.006)	0.254*** (0.006)
EET	0.008*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.047*** (0.003)	0.048*** (0.003)	0.046*** (0.003)
ADM	0.011*** (0.001)	0.012*** (0.001)	0.008*** (0.001)	0.004*** (0.000)	0.004*** (0.000)	0.004*** (0.000)
GEO	0.081* (0.002)	0.014*** (0.007)	0.023* (0.002)	0.019*** (0.004)	0.021*** (0.006)	0.062*** (0.007)
ORG	0.001*** (0.000)	0.002*** (0.000)	0.001*** (0.000)	0.021*** (0.001)	0.015*** (0.001)	0.016*** (0.003)
INS	0.000* (0.000)	0.000* (0.000)	0.000** (0.000)	0.002* (0.000)	0.002** (0.000)	0.002** (0.000)
SOC	0.182*** (0.003)	0.328*** (0.005)	0.214*** (0.004)	0.976*** (0.010)	0.778*** (0.016)	1.221*** (0.012)
COG	0.003* (0.002)	0.002* (0.002)	0.002* (0.002)	0.001** (0.000)	0.000** (0.000)	0.000** (0.000)
GEO²		-0.020** (0.010)			-0.068** (0.013)	
SOC²		-0.365*** (0.008)			-0.563*** (0.036)	
COG²		-0.004** (0.000)			-0.001* (0.000)	
GEO×ORG			-0.057 (0.010)			0.016 (0.011)
GEO×INS			0.014 (0.010)			0.002 (0.004)
GEO×SOC			1.510*** (0.093)			2.101*** (0.060)
GEO×COG			-0.083* (0.055)			-0.092** (0.019)
常数项	-0.002*** (0.000)	-0.002*** (0.000)	-0.001*** (0.000)	-0.015*** (0.002)	-0.018*** (0.002)	-0.011*** (0.002)
<i>N</i>	40470	40470	40470	40470	40470	40470

注:括号中的数值为标准误;*、**、***分别代表在10%、5%、1%统计水平上显著。

下降至0.004,说明随着各地吸引人才举措和创新政策的实施,普通城市间的合作也得到提升,其创新联系占比由2011年的6.39%增至2019年的8.07%,与创新网络的去中心化趋势一致。

就邻近性的独立项而言,地理、组织、文化、社会 and 认知邻近性,均可以独立地对城市间创新交流起促进作用。其中,社会邻近性的作用最强,与桂

钦昌等^[34]的研究一致,表明两城市的交集越多,“朋友圈”重叠度越高,越利于建立深厚的信任和成熟的合作范式,从而减低合作成本,提高合作效率。同时,2011—2019年社会邻近性的影响增强,这充分体现了创新合作的路径依赖性和合作三方组模式的自增强性^[35,36]。此外,地理、组织和文化邻近性的促进作用也有所上升,这与2011—2019年创新网

络的局域网强化吻合,是网络不断地地域化、分类集聚的潜在动力。认知邻近性的正向影响下降,产业邻近性对城市间创新合作的促进作用随着网络发育的成熟而边际效应递减。

就邻近性的平方项而言,从模型B可知,地理、社会 and 认知邻近性均存在一次项显著为正而二次项显著为负的规律,说明这些邻近性与城际知识创新强度均存在倒U型关系,即过强的地理、社会或认知邻近性确实会阻碍知识合作和创新交流。适当的地理和社会邻近性有利于形成本地嗡嗡产生集聚外部性,而过度的邻近则会缩小城市的合作范围,易引发信息过载、强制信任和被动交互,有碍于合作主体的主观能动性^[37]。同时,刘承良等^[14]指出适度的认知邻近是知识合作的基础,也可促进合作者之间知识的理解吸收与迁移转化;但过度的认知重叠则不利于知识溢出和扩散,可能会陷入“认知锁定”或“技术锁定”。

就邻近性的交互项而言,从模型C可知,地理邻近和认知邻近之间存在替代关系,这符合Boschma提出的地理邻近可以替代知识溢出中缺失的认知邻近的观点,反之亦然^[11]。随着该交互项变量的系数从2011年的-0.083下降到2019年的-0.092,替代效应越来越明显,这与Broekel^[38]在德国研发协作网络中的发现一致,相联系的两个跨地域组织在认知愈发接近时会伴随着地理距离的增加。地理邻近和社会邻近之间的关系是互补的,这印证了马双等^[39]对中国城市专利合作网络的探讨。已经有很多交集的城市如果在空间上也彼此靠近,则更有可能发生更多的未来合作。2011—2019年,这种互补性得到强化,正如Leszczynska等^[40]和Broekel^[38]的发现:社会邻近的主体通常也地理邻近,随着主体间地理距离的增加,网络中社会距离亦增加。地理邻近与组织邻近和文化邻近之间的交互效应在统计上并不显著,在中国知识创新网络中它们之间既没有替代也没有互补关系,Cao等^[31]在长三角知识合作网络中也得到类似结论。

4 结论与建议

4.1 结论

本文基于2010—2011年和2018—2019年两个时间截面下中国城市间的论文合作发表和专利联

合申请数据,通过加权求和综合构建了中国城市知识创新网络,从拓扑属性、等级特征、区域组团层面分析了网络结构及其演化特征,并引入MRQAP模型揭示了多维邻近性对城市知识创新网络的影响机制,主要结论如下:

(1)中国城市知识创新网络的拓扑结构、等级结构和组团结构均处于动态演化中。2011—2019年,城际知识创新联系显著增强,择优链接弱化,网络呈现多中心发展,主干结构由北京、上海两个头部城市主导的辐射状转变为京沪引领和区域中心带动相结合的菱形结构。城市组团分类集聚,形成多个区域性的局部网,多维邻近效应凸显。

(2)城市间知识合作创新首先与城市自身创新能力有关,经济发展水平、科教支持力度、行政等级均显著促进城际知识合作强度,其中经济发展水平和科教支持力度的影响在强化,而行政等级的影响在弱化。同时,城市知识创新网络也受到城市间地理、组织、文化、社会 and 认知邻近性的影响,多维邻近性是推动中国知识创新网络层级化、组团化的重要动力,而社会邻近性对城际知识合作的促进效果最强。

(3)不同邻近性对中国知识创新网络的影响具有动态性和交互性。地理、社会、认知邻近性与城际知识创新强度均为倒U型关系,过度的邻近性会阻碍创新合作。地理与认知邻近性是替代关系,认知邻近可弥补地理距离;地理与社会邻近性是互补关系,社会邻近的主体通常也地理邻近;地理邻近性与组织、文化邻近性不存在显著的交互效应。

4.2 政策建议

根据上述分析结论,对中国城市的协同创新发展提出3点政策建议:

(1)政府需进一步加大科教投入,营造良好的创新环境,吸引企业、人才和科研机构,促进创新资源集聚。同时,打破行政藩篱,缩小城市间资源和政策差距,鼓励和支持人才、技术等创新要素的城际交流,实现技术市场的一体化和创新平台的协同化。

(2)城市需积极推进基础设施建设,提高自身可达性,从时间和经济上降低合作成本。对于区位具有比较劣势的城市,充分评估自身的产业特色、网络资本、创新潜力,通过认知和社会邻近优势识

2022年7月

别合作对象,发展专业化合作网络。

(3)政策制定者需厘清创新网络的发展阶段,遵循邻近性影响的倒U型规律,把握边际效应递增的窗口期,鼓励城市间发展密实的本地合作,形成良好的“本地嗡鸣”。在此基础上,利用中心城市的行政优势发展与外部中心城市的知识合作,接受外部的知识溢出,形成多元的“全球管道”,不断为本地创新注入活力。

本文在不同类型知识合作网络的综合表征方面做了有效尝试,并为深入理解邻近性对城际知识合作创新网络的影响机制提供参考。需要指出的是,本文仍有一些不足,例如,论文和专利是可显化的知识,那些无法编码和记录的知识合作创新未能包含在内,未来需进一步考虑这类知识合作的测度。同时,城市间知识合作创新的驱动因素除城市属性、城际邻近性外,还可能包括网络内生结构等^[5]。然而,考虑到不同模型的适用性,目前较难将所有因素皆考虑并量化。

参考文献(References):

- [1] 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[J]. *Regional Studies*, 2022, 56(2): 290–306.
- [2] 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[J]. *地理学报*, 2021, 76(4): 835–852. [Huang X D, Ma H T, Miao C H. Connectivity characteristics for city networks in China based on innovative enterprises[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 835–852.]
- [3] 吕拉昌, 赵彩云. 中国城市创新地理研究述评与展望[J]. *经济地理*, 2021, 41(3): 16–27. [Lv L C, Zhao C Y. Review and prospect of the urban innovation geography of China[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(3): 16–27.]
- [4] 顾伟男, 刘慧, 王亮. 国外创新网络演化机制研究[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(12): 1977–1990. [Gu W N, Liu H, Wang L. International research on the evolution mechanisms of innovation networks[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(12): 1977–1990.]
- [5] 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[J]. *地理科学*, 2018, 38(11): 1759–1768. [Duan D Z, Du D B, Chen Y, et al. Spatial-temporal complexity and growth mechanism of city innovation network in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(11): 1759–1768.]
- [6] 戴靓, 纪宇凡, 张维阳, 等. 长三角知识合作网络的空间格局及影响因素: 以合著科研论文为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(12): 2833–2842. [Dai L, Ji Y F, Zhang W Y, et al. Spatial patterns and driving factors of intercity knowledge collaboration network in Yangtze River Delta: Evidence from scientific co-publications[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(12): 2833–2842.]
- [7] 马海涛. 知识流动空间的城市关系建构与创新网络模拟[J]. *地理学报*, 2020, 75(4): 708–721. [Ma H T. The theoretical construction and network simulation of intercity innovative relationships in knowledge flow space[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 708–721.]
- [8] 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[J]. *地理研究*, 2021, 40(4): 913–927. [Jiao M Q, Du D B, Gui Q C, et al. The spatio-temporal evolution and influencing factors of urban technical corporation networks: From the perspective of Belt and Road[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 913–927.]
- [9] 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[J]. *地理研究*, 2015, 34(3): 525–540. [Li D D, Wang T, Wei Y H, et al. Spatial and temporal complexity of scientific knowledge network and technological knowledge network on China’s urban scale[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(3): 525–540.]
- [10] Torre A, Gilly J P. On the analytical dimension of proximity dynamics[J]. *Regional Studies*, 2000, 34(2): 169–180.
- [11] Boschma R. Proximity and innovation: A critical assessment[J]. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61–74.
- [12] 王姣娥, 杜方叶, 景悦, 等. 东北地区城际专利转移的空间: 行业路径与影响因素[J]. *资源科学*, 2022, 44(2): 365–374. [Wang J E, Du F Y, Jing Y, et al. Spatial-industry paths of technology transfer: An empirical study of Northeast China[J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 365–374.]
- [13] 王庆喜, 胡志学. 多维邻近下浙江城市创新网络演化及其机制研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(8): 1380–1388. [Wang Q X, Hu Z X. Urban innovation network of Zhejiang from the perspective of multidimensional proximities[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(8): 1380–1388.]
- [14] 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. [Liu C L, Gui Q C, Duan D Z, et al. Structural heterogeneity and proximity mechanism of global scientific collaboration network based on co-authored papers[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(4): 737–752.]
- [15] Balland P A, Boschma R, Frenken K. Proximity, Innovation and Networks: A Concise Review and Some Next Steps[A]. Torre A, Gallaud D. *Handbook of Proximity Relations*[C]. Gloucestershire: Edward Elgar Publishing, 2022.
- [16] Ma H, Wei Y D, Dai L, et al. The proximity and dynamics of intercity technology transfers in the Guangdong–Hong Kong–Macau Greater Bay Area: Evidence from patent transfer networks[J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2022, DOI: 10.

- 1177/0308518X221104822.
- [17] Broekel T. The co-evolution of proximities—a network level study [J]. *Regional Studies*, 2015, 49(6): 921–935.
- [18] Johansson B, Karlsson C, Stough R R. *Entrepreneurship and Dynamics in the Knowledge Economy*[M]. London: Routledge, 2006.
- [19] 顾伟男, 申玉铭. 我国中心城市科技创新能力的演变及提升路径[J]. *经济地理*, 2018, 38(2): 113–122. [Gu W N, Shen Y M. The evolution of scientific and technological innovation ability of central cities and the improving paths[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(2): 113–122.]
- [20] 周锐波, 邱奕锋, 胡耀宗. 中国城市创新网络演化特征及多维邻近性机制[J]. *经济地理*, 2021, 41(5): 1–10. [Zhou R B, Qiu Y F, Hu Y Z. Characteristics, evolution and mechanism of inter-city innovation network in China: From a perspective of multi-dimensional proximity[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(5): 1–10.]
- [21] 戴靓, 曹湛, 朱青, 等. 中国城市群知识多中心发展评价[J]. *资源科学*, 2021, 43(5): 886–897. [Dai L, Cao Z, Zhu Q, et al. Analyzing polycentric urban development in China: Evidence from inter-city knowledge collaboration[J]. *Resources Science*, 2021, 43(5): 886–897.]
- [22] 刘乃全, 杨晓章. 长三角区域科技协同创新发展研究: 基于区域间论文和专利合作[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 55(5): 767–779. [Liu N Q, Yang X Z. Research on collaborative innovation development of science and technology in the Yangtze River Delta region: Based on regional paper and patent cooperation [J]. *Journal of Central China Normal University (Natural Sciences)*, 2021, 55(5): 767–779.]
- [23] 王明亮, 徐猛. 论文、专利、成果在科技绩效评价中的权重分析[J]. *科技成果纵横*, 2010, (6): 26–27. [Wang M L, Xu M. Weight analysis of papers, patents and achievements in scientific and technological performance evaluation[J]. *Scientific and Technological Achievements*, 2010, (6): 26–27.]
- [24] Liu X, Dai L, Derudder B. Spatial inequality in the Southeast Asian intercity transport network[J]. *Geographical Review*, 2017, 107(2): 317–335.
- [25] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 长三角城市群“空间流”网络结构特征: 基于公路运输、火车客运及百度指数的综合分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9): 1304–1310. [Sun Y, Zhang L C, Yao S M. “Spatial flow” network structural features of the urban agglomeration in the Yangtze River Delta: A comprehensive analysis based on road transportation, railway passenger transportation, and Baidu indexes[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(9): 1304–1310.]
- [26] 杨文龙, 杜德斌, 盛垒. 全球商品贸易网络生长特征及动力机制[J]. *资源科学*, 2022, 44(3): 508–522. [Yang W L, Du D B, Sheng L. Growth characteristics of the global commodity trade network and its dynamic mechanism[J]. *Resources Science*, 2022, 44(3): 508–522.]
- [27] Zhang W, Derudder B, Wang J, et al. An analysis of the determinants of the multiplex urban networks in the Yangtze River Delta [J]. *Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*, 2020, 111(2): 117–133.
- [28] Dai L, Derudder B, Cao Z, et al. Examining the evolving structures of intercity knowledge networks: The case of scientific collaboration in China[J]. *International Journal of Urban Sciences*, 2022. DOI: 10.1080/12265934.2022.2042365.
- [29] 李荣, 熊正辉, 张振兴, 等. *中国语言地图集*[M]. 北京: 商务印书馆, 2012. [Li R, Xiong Z H, Zhang Z X, et al. *Language Atlas of China*[M]. Beijing: Commercial Press, 2012.]
- [30] Gui Q C, Liu C L, Du D B. International knowledge flows and the role of proximity[J]. *Growth and Change* 2018, 49(3): 532–547.
- [31] Cao Z, Derudder B, Peng Z W. Interaction between different forms of proximity in inter-organizational scientific collaboration: The case of medical sciences research network in the Yangtze River Delta region[J]. *Papers in Regional Science*, 2019, 98(5): 1903–1924.
- [32] 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[J]. *地理研究*, 2020, 39(12): 2731–2742. [Si Y F, Sun K, Zhu Y W, et al. Spatial structure and influencing factors of knowledge network of highly cited Chinese scientists[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(12): 2731–2742.]
- [33] Cao Z, Derudder B, Peng Z W. Comparing the physical, functional and knowledge integration of the Yangtze River Delta city-region through the lens of inter-city networks[J]. *Cities*, 2018, 82: 119–126.
- [34] 桂钦昌, 杜德斌, 刘承良, 等. 全球城市知识流动网络的结构特征与影响因素[J]. *地理研究*, 2021, 40(5): 1320–1337. [Gui Q C, Du D B, Liu C L, et al. Structural characteristics and influencing factors of the global intercity knowledge flows network[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1320–1337.]
- [35] 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[J]. *科技进步与对策*, 2020, 37(22): 125–133. [Qin L T, Teng T W, Zhang Y, et al. Evolution’s characteristics and influence factors of China’s universities knowledge collaboration network[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2020, 37(22): 125–133.]
- [36] 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[J]. *科技进步与对策*, 2021, 38(14): 45–53. [Wang H H, Sun Q, Guo J J, et al. Research on evolution dynamic of collaborative innovation network in the urban agglomeration Yangtze River Delta based on ERGM[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2021, 38(14): 45–53.]
- [37] 曹湛, 戴靓, 杨宇, 等. 基于“蜂鸣—管道”模型的中国城市知识合作模式及其对知识产出的影响[J]. *地理学报*, 2022, 77(4): 960–975. [Cao Z, Dai L, Yang Y, et al. Knowledge collaboration patterns of Chinese cities and their impacts on knowledge output: An empirical study based the “buzz-and-pipelines” model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 960–975.]

- [38] Broekel T. The co-evolution of proximities—a network level study [J]. *Regional Studies*, 2015, 49(6): 921–935.
- [39] 马双, 曾刚. 多尺度视角下中国城市创新网络格局及邻近性机理分析[J]. *人文地理*, 2020, 35(1): 95–103. [Ma S, Zeng G. Analysis of China's urban innovation network pattern and its proximity mechanism from a multi-scale perspective[J]. *Human Geography*, 2020, 35(1): 95–103.]
- [40] Leszczyńska D, Khachlouf N. How proximity matters in interactive learning and innovation: A study of the Venetian glass industry[J]. *Industry and Innovation*, 2018, 25(9): 1–23.

Evolutionary characteristics and proximity mechanism of intercity knowledge innovation networks in China

DAI Liang¹, JI Yufan¹, WANG Song², ZHU Qing³, DING Zijun¹

(1. School of Public Administration, Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing 210023, China; 2. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110167, China; 3. Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Against the backdrop of open innovation system, analyzing the structures of China's intercity knowledge innovation networks and exploring the underlying proximity mechanism are of great significance for improving the efficiency of urban innovation and promoting the construction of the national innovation system. Drawing on the collaborative publications and patents data of 285 cities at the prefecture level and above in China, this study examined the intercity knowledge innovation networks for 2011 and 2019 through summing up publication and patent collaboration networks by weights, and analyzed the structural characteristics and spatiotemporal evolution of the networks. Furthermore, the multiple regression quadratic assignment procedure (MRQAP) model was employed to explore the evolutionary mechanism of the networks from the perspective of proximity. The results show that: (1) The density of China's intercity knowledge innovation networks increased from 2011 to 2019. The networks presented declined preferential attachment but increased polycentric development. The intercity collaborative patterns transformed from being dominated by Beijing and Shanghai to being led by Beijing and Shanghai and supported by regional centers, forming multiple regional sub-networks. (2) In addition to being positively influenced by urban economic level, technology and education expenditures, and administrative level, intercity knowledge collaboration was also significantly promoted by geographical, organizational, cultural, social, and institutional proximities. The proximity mechanism could well explain the evolution of China's intercity knowledge innovation networks. (3) The impacts of different proximities on the intercity knowledge innovation networks were dynamic and interactive. Excessive geographical, social, and cognitive proximities could hinder the collaboration between cities. Cognitive proximity could compensate geographical distance while social contacts were frequently located in geographical vicinity. On these bases, policy recommendations were proposed for the construction and coordination of innovative cities.

Key words: urban network; knowledge innovation; multidimensional proximity; nonlinearity; interaction; MRQAP