

中国城市群技术知识多中心性演化特征及创新效应

马海涛^{1,2}, 徐植铤^{1,2}, 江凯乐^{2,3}

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 技术知识多中心性是多中心性在知识创新方面的表征, 是城市群技术知识生产与合作的空间结构反映, 对城市群创新与高质量发展具有重要作用。本文运用2000年、2005年、2010年、2015年、2019年中国293个城市的专利申请和城市间专利合作数据, 采用多中心性测度、工具变量和面板门槛模型等方法, 对19个城市群技术知识多中心性的时空演化特征、类型演替趋势与创新产出效应进行分析, 研究发现: ① 城市群形态和功能多中心性的演化过程差异明显, 形态多中心性总体呈现“降低—升高—再降低”波动发展, 而功能多中心性总体呈现“从低到高”递增发展。② 高形态—高功能型的城市群创新水平总体较强, 低形态—低功能型的城市群创新水平总体较低; 分布呈现出形态多中心性多年持续分散, 而功能多中心性呈现从较低功能多中心性向较高功能多中心性显著推进趋势。③ 模型结果显示城市群形态多中心性与创新产出呈现倒“U”型关系, 拐点值为0.438; 功能多中心性则与创新产出始终保持正相关关系, 证实城市间创新合作对城市群整体创新产出的重要性。研究得出的城市群创新多中心性发展规律可为城市群创新发展战略制定提供研究支撑。

关键词: 城市群; 形态多中心性; 功能多中心性; 城市网络; 技术知识; 专利合作

DOI: 10.11821/dlxb202302002

1 引言

知识经济时代的城市群正从经济中心向创新高地转变, 城市群的创新内涵在新时期再次得到关注。实际上, 城市群的早期界定就特别强调其创新特征, 1961年Gottmann就提出城市群具有新趋势、新知识和创新的孵化器功能^[1], 这种功能对惯习与稳定性是一种挑战, 能使城市群充满活力、增加全球竞争力。然而, 过去对城市群创新的关注集中在以企业和机构为主体的创新集群方面, 以城市为主体的创新网络研究较少。伴随着交通和通讯技术的革新及应用, 城市间知识信息转移共享的成本大大降低, 一方面城市群内部城市间的知识交流与合作创新大幅增加^[2], 另一方面城市群对外部创新资源的凝聚力和知识外部性得到增强, 使城市群成为国家甚至全球创新要素流的凝聚地^[3]。在中国国家创新驱动发展战略和城市群战略的同步实施, 要求中国的城市群应肩负起国家创新发展的使命。中共中央国务院2014年印发的《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》, 把城市群作为国家新型城镇化的主体形态; 2016年印发《国家创新驱动发展战略纲要》, 提出要整合创新资源, 打造区域协同创新共同体, 统筹和引领区域一体化发展; 之后陆续

收稿日期: 2021-10-08; 修订日期: 2022-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971209); 国家社会科学基金重大项目(21ZDA011) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41971209; Major Program of National Social Science Foundation of China, No.21ZDA011]

作者简介: 马海涛(1979-), 男, 山东滕州人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 中国地理学会会员(S110008167M), 主要从事城市网络与创新研究。E-mail: maht@igsnrr.ac.cn

出台的《长江三角洲城市群发展规划》《京津冀协同发展规划纲要》和《粤港澳大湾区发展规划纲要》等都极为重视创新发展,并制定了科技创新奋斗目标。2021年初国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出选择有条件的地方建设区域科技创新中心,作为国家创新发展战略进入第二阶段迈向世界科技强国的重大战略部署,这也给中西部地区的城市群创新发展赋予了时代使命。国内城市群研究学者非常重视城市群创新功能,姚士谋等关注到高技术产业及其集群会推动城市群地域结构的变化^[4];方创琳等将创新共同体纳入城市群共同体内涵^[5];樊杰将建设城市群科技创新体系纳入《城市群规划编制技术规程》^[6]。城市群创新研究已经得到广泛关注,更会成为未来关注的焦点和热点。

“多中心性”和“多中心主义”作为理解城市区域空间结构的新手段和新视角,也为城市群创新格局与创新网络研究提供了新思路。知识多中心性被定义为一个区域的知识生产及区域内外知识合作的多中心结构^[7],是区域多中心性在知识创新方面的一种表征,体现了区域内知识创新空间的一种平衡关系。知识多中心性在城市群区域的表现最为突出,相关学者以美国东北部城市群^[8]、长三角城市群^[9]和粤港澳大湾区城市群^[10-11]等创新水平较高的城市群为案例,运用城市科技论文生产与城市间合作发表论文数据,开展了城市群科学知识多中心性的相关研究,发现这些城市群基本上都朝着科学知识多中心性更高的方向发展。然而,当前研究一方面偏重科学知识多中心性的探讨,对技术知识的多中心性研究不足,而在城市群强调产业转型升级和高质量发展的当下,技术创新相比科学创新对城市群创新发展的作用更加紧迫、关系更为紧密;另一方面,全国多个城市群发展水平迥异、发展阶段不一,仅对少数几个发达城市群开展案例研究,缺乏对全国城市群知识多中心性长时段演化的对比研究,难以总结提炼规律。因此,本文选择中国19个城市群,运用专利数据开展城市群技术知识多中心性的演化研究,目的是探讨3方面的问题:19个城市群技术知识的多中心性如何演化?城市群技术多中心性其他如何演替?城市群形态和功能技术多中心性对创新产出的影响有何差异?通过这些问题的研究,揭示城市群技术知识多中心性的演化规律,为国家城市群提升创新能力和建设世界科技强国提供研究支撑。

2 城市群创新多中心性研究综述

伴随着城市之间频繁的物质流动和要素交换,城市区域演变为动态复杂的网络化系统,在集聚—分散的双重驱动下呈现出更加多中心的特征^[12]，“多中心主义”(polycentricism)和“多中心性”(polycentricity)已经成为理解城市区域空间结构的重要工具。早在1999年,欧洲空间发展规划(ESDP)^[13]便将多中心发展列为一项政策目标。20世纪末,多中心性作为一种规划理念进入中国,随后一些特大城市区域的空间发展规划开始采用多中心战略,旨在促进更可持续的均衡发展^[14]。多中心发展模式被认为会产生经济上更有竞争力、社会上更有凝聚力、环境上更可持续的城市区域^[15-18]。近年来,多中心性理念得到越来越多城市区域研究和规划界学者的关注。

然而,多中心性概念的日益流行和广泛应用也使其成为学术研究和规划领域中最模糊和不断被延伸的概念之一^[7]。多中心性概念的模糊性根源在于在不同的研究区域、不同的发展阶段、不同的分析视角下,多中心性的含义都有不同的解读方式。换句话说,多中心性本身是多方面的(不同指标)和多维的(形态和功能多中心性),本质上具有多尺度(城市、区域、国家等)特性^[19]。通常情况下,若以某个指标测度一个区域具有明显的多中心性,换用其他指标可能会得出截然不同的结果;同样,某个尺度上表现为多中

心的系统在另一个尺度上也可能呈现出单中心特征^[16, 20]。多中心内在的复杂性特征给其衡量评估和结果预测带来一定的困难。

在传统方法中，多中心性的衡量往往基于静态和形态学方法，由城市本身的属性特征来刻画，主要考虑区域内的经济活动、人口/就业规模和土地利用的空间分布^[15, 21-23]。随着城市系统分析中“网络范式”的兴起^[24-25]，城市的重要性日益体现在由人流、物流、信息流、知识流等介质建构的城市网络中的节点地位^[7, 26-27]，仅从形态学的视角衡量多中心性而忽略城市之间的相互作用难以全面理解多中心的本质内涵。目前，从形态和功能两个维度共同研究多中心空间组织模式已成为一种趋势^[12, 28-29]。针对知识创新而言，知识形态多中心性反映城市群内部各城市知识创新产出水平的差异，高形态多中心性指城市群内各城市的知识生产相对均衡发展；功能多中心性则反映群内各城市同群内外其他城市开展知识合作的差异，高功能多中心性意味着知识联系在城市之间是多向和均匀分布的。

城市群作为多个空间相邻、联系紧密的城市组成的有机系统，能够在区域范围内整合创新资源，通过协同发展弥补单个城市创新竞争力的不足^[30-31]。由于知识转移通道和共享需求大大增加，城市间知识交流与合作不断强化，创新网络在城市群空间上的凝聚逐步显现，城市群知识多中心性研究也开始受到城市地理和创新地理学者的关注^[11-12, 32]。譬如，陆天赞等研究发现美国东北部城市群创新网络“多中心、多节点、多层次”的复杂关联网络特征非常明显，创新合作的近域联系与跨区域联系结合比其他城市群更加明晰^[8]；Li等对长三角城市群的知识多中心性及其演化进行了探讨，发现长三角城市群的知识生产和知识合作正走向更加多中心的空间结构^[7]；李建成等研究表明长三角城市群科学知识网络从“以三角结构为中心演化为多边形结构为中心的格局”^[9]；马海涛等对粤港澳大湾区知识多中心的研究证实了多中心性演化的尺度敏感性和地理邻近影响机制^[10-11]。除了对创新能力较强的城市群进行案例研究之外，近期相关学者对中国19个城市群的知识形态多中心性与功能多中心性进行测算与对比研究，发现了空间异质性特征，并分类提出了城市群合作创新路径^[33-34]。然而，上述研究均是采用期刊数据库中的论文发表和论文合作数据，属于科学知识的范畴，对技术知识的多中心性研究尚没有引起足够重视。

对于城市群知识多中心性的研究，多基于城市群内部知识生产的形态格局探讨“孵化器”（incubator）功能，以及基于城市群内部知识流动和创新网络探讨“轮轴”（hub）功能，少有研究关注城市群作为连接区域内的“门户”（gateway）功能。城市在区域间知识合作网络中的地位与区域内部知识合作网络中的地位具有相同的重要性，应当受到同等重视。实际上，功能多中心性除了表现为城市群内部知识的高度流动之外，还包含城市群对外的知识转移流动和创新合作。Li等对长三角城市群的知识多中心性研究以及Ma等对粤港澳大湾区城市群的知识多中心性研究^[3, 11]，都发现城市群内有多个城市在国家尺度和全球尺度扮演了知识合作的“门户”功能，而且这种趋势还在增加。因此，本文将各城市的技术知识生产能力（专利申请总量）作为“孵化器”功能的代理变量，以城市群内部城市之间的技术合作强度（专利合作申请量）表示“轮轴”功能，城市群内部城市与群外城市之间的技术合作强度（专利合作申请量）代表“门户”功能。

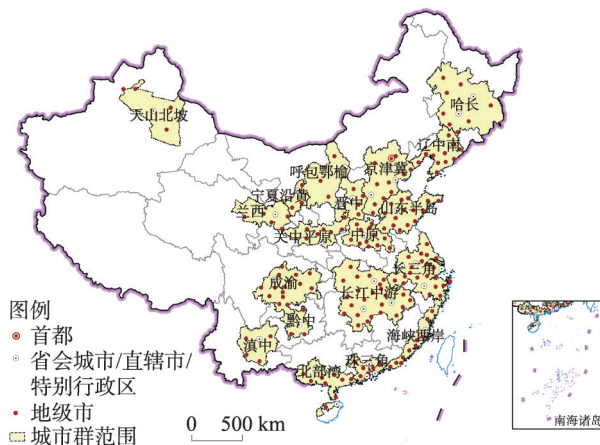
当前对城市群创新网络多中心性研究已经具有良好的理论和方法基础，然而还存在几个问题尚未解决：① 科技创新包含科学和技术两大类，其中科学是创造知识的研究活动，它所解决的主要是认识世界的问题，要回答“是什么”和“为什么”；而技术则是发明和创造操作的办法、技巧以及相应的物质手段，回答的是“做什么”和“怎样做”。目前研究多基于论文数据研究城市群科学知识的多中心性，对技术知识的多中心性缺少关

注,而城市群技术知识多中心性的发展对城市群产业转型升级和高质量发展具有更直接的作用,亟需开展研究。②对城市群知识多中心性的研究多是案例现状研究,选择一个或少数几个城市群;然而城市群知识多中心性规律的把握需要长时段、多城市群的对比研究,本文将选择中国19个城市群开展跨度2000—2019年的多中心性演化研究。③城市群知识多中心性与创新产出的关系如何,是一个广受关注却少有研究的话题。现有城市创新网络对创新绩效的研究多侧重于多维邻近性视角^[1],忽视了网络内在结构的影响,而实际上网络结构同主体节点一样,作为城市群创新系统的两大特征,共同决定了创新网络的整体竞争力^[35-36]。综上,开展多城市群技术知识多中心性的研究非常有必要。

3 研究对象与方法

3.1 研究对象

参考方创琳主编的《中国城市群地图集》^[37],选取中国19个城市群作为研究对象(图1)。该地图集中的城市群布局及范围与国家“十四五”规划中公布的城市群基本一致,这样选择的目的是为了使本文能更好服务国家的城市群创新发展实践。需要说明的是,专利合作不同于论文合作,受到政治制度安排的影响较大,因此研究对象没有考虑港澳台,粤港澳大湾区也仅选择了珠三角城市群。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4630号的标准地图制作,底图边界无修改。

图1 中国19个城市群范围

Fig. 1 19 urban agglomerations in China

3.2 数据来源

研究数据为2000年、2005年、2010年、2015年、2019年中国293个地级城市的专利申请量以及两两城市间的专利合作申请量。由于本文研究重点探讨城市间的技术合作关系及其演化,因此没有采用更能反映创新能力但公布期会滞后多年的授权专利,这样也可照顾到中西部创新较为滞后的城市群。专利数据来自IncoPat全球专利数据库(www.incopat.com),在所选的5个年份共获得3446898个合作申请专利信息,包含约20多万个创新主体;运用专利的地址信息将创新主体归并入所属地级市,进而建立起这些城市间的技术知识合作关系。这种关系既包括城市群内部城市间的专利合作关系(117817个),也包括城市群同外部城市的专利合作关系(396581个)。

3.3 研究方法

本文采用网络建构、网络分析、多中心性测度、类型划分、函数拟合、工具变量法和面板门槛分析等多种研究方法,其中采用城市间合作专利数建立城市间技术知识合作无向多值关系网络^[2],运用Ucinet软件计算城市度数中心度,运用二分法进而类型划分等。下面重点说明多中心性的测算方法、多中心性创新效应的工具变量法和面板门槛模型。

3.3.1 多中心性测度方法 城市群技术知识多中心性包括形态多中心性和功能多中心性两类,其中形态多中心性反映城市群内部城市技术知识生产的分布均衡程度,是城市群内部知识生产系统的结构指标;功能多中心性表示城市对外技术知识合作参与度的分布均衡程度,是城市群知识合作系统的结构指标。现有城市群多中心性测度方法比较成熟,多采用Green修正的测度方法^[3, 10-11],其中形态多中心的计算公式为:

$$P_M = 1 - \frac{\sigma_M}{\sigma_{M\max}} \quad (1)$$

式中： P_M 表示城市群技术知识的形态多中心度，取值范围从0（绝对单中心）到1（绝对多中心）； σ_M 代表该城市群内各城市专利申请总量的标准差； $\sigma_{M\max}$ 为极值状态下两城市专利申请量的标准差，即将其中一个城市的专利申请量为零，另一个城市的专利申请量设为观测值的最大值。

功能多中心的计算公式为：

$$P_F = \left(1 - \frac{\sigma_F}{\sigma_{F\max}}\right) \times \Delta \quad (2)$$

式中： P_F 代表城市群技术知识的功能多中心度，取值范围从0（绝对单中心）到1（绝对多中心）。 σ_F 和 $\sigma_{F\max}$ 的计算方式与 σ_M 和 $\sigma_{M\max}$ 类似，不同的是使用的数据为城市的合作申请专利量； Δ 为城市间专利合作的网络密度，引入该指标的目的在于确保在城市之间不存在专利合作的情况下，功能多中心性的取值为0^[36]， Δ 是实际存在的关系系数与完整网络理论上可能存在的所有关系系数的比值。

3.3.2 工具变量法 用于测度城市群多中心性对城市创新产出的影响。当解释变量与扰动项相关时，一般考虑使用工具变量法。上一期的技术知识多中心性与内生变量 X （当前的技术知识多中心性）相关而与 Y （专利申请量）不相关，因此将滞后内生变量作为工具变量，使用工具变量法进行回归分析。公式如下：

$$FOM_{it} = \beta_0 + \beta_1 FOM_{i(t-5)} + \beta_2 \ln GOV_{i(t-3)} + \beta_3 \ln UNV_{i(t-3)} + \beta_4 FPG_{i(t-3)} + \beta_5 \ln PGDP_{i(t-3)} + e_{it} \quad (3)$$

$$\ln PAT_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln GOV_{i(t-3)} + \alpha_2 \ln UNV_{i(t-3)} + \alpha_3 FOM_{it} + \alpha_4 FPG_{i(t-3)} + \alpha_5 \ln PGDP_{i(t-3)} + e_{it} \quad (4)$$

$$FUM_{it} = \beta_0 + \beta_1 FUM_{i(t-5)} + \beta_2 \ln GOV_{i(t-3)} + \beta_3 \ln UNV_{it} + \beta_4 FPG_{i(t-3)} + \beta_5 \ln PGDP_{i(t-3)} + e_{it} \quad (5)$$

$$\ln PAT_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln GOV_{i(t-3)} + \alpha_2 \ln UNV_{i(t-3)} + \alpha_3 FUM_{it} + \alpha_4 FPG_{i(t-3)} + \alpha_5 \ln PGDP_{i(t-3)} + e_{it} \quad (6)$$

式中： i 表示城市； t 为年份； PAT 为专利申请量； FOM 为形态多中心水平； FUM 为功能多中心水平； UNV 为高等学校在校人数； GOV 为政府研发经费投入； FPG 为外资占GDP比例； $PGDP$ 为人均GDP水平； β_0 和 α_0 为常量； e_{it} 表示残差； β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 为待定系数。模型中仅选择了一个工具变量，模型设定检验选择不可识别检验和弱工具变量检验，不需要进行过度识别约束检验和“多余”工具变量的检验。

3.3.3 面板门槛模型 用于估计城市群技术知识多中心性对创新产出的影响是否存在门槛效应。根据Hansen提出的门槛回归理论，门槛回归模型可以进行以门槛值划分两组样本的模型估计参数是否相同的显著性检验。对于处于不同发展阶段的城市群而言，在集聚经济和集聚不经济的共同作用下，技术知识生产的多中心结构可能会对创新产出产生不同的影响，因此本文构建了城市群技术知识形态多中心性与创新产出的门槛模型：

$$\ln PAT_{it} = \begin{cases} \gamma_1 FOM_{it} + \lambda X_{it} + u_i + e_{it} & q_{it} > \tau \\ \gamma_2 FOM_{it} + \lambda X_{it} + u_i + e_{it} & q_{it} \leq \tau \end{cases} \quad (7)$$

式中： γ_1 、 γ_2 分别为门槛变量在 $q_{it} > \tau$ 和 $q_{it} \leq \tau$ 时解释变量对被解释变量的影响系数。

4 结果分析

中国城市（群）技术知识生产与合作格局演化图如图2所示，展示了19个城市群内部所有城市多年的专利申请量、城市间专利合作量，以及城市群城市同外部城市的专利合作量与城市的对外合作总量。在此基础上，对城市群技术知识多中心性的时空演化过程、类型演变趋势和创新产出效应进行了研究。

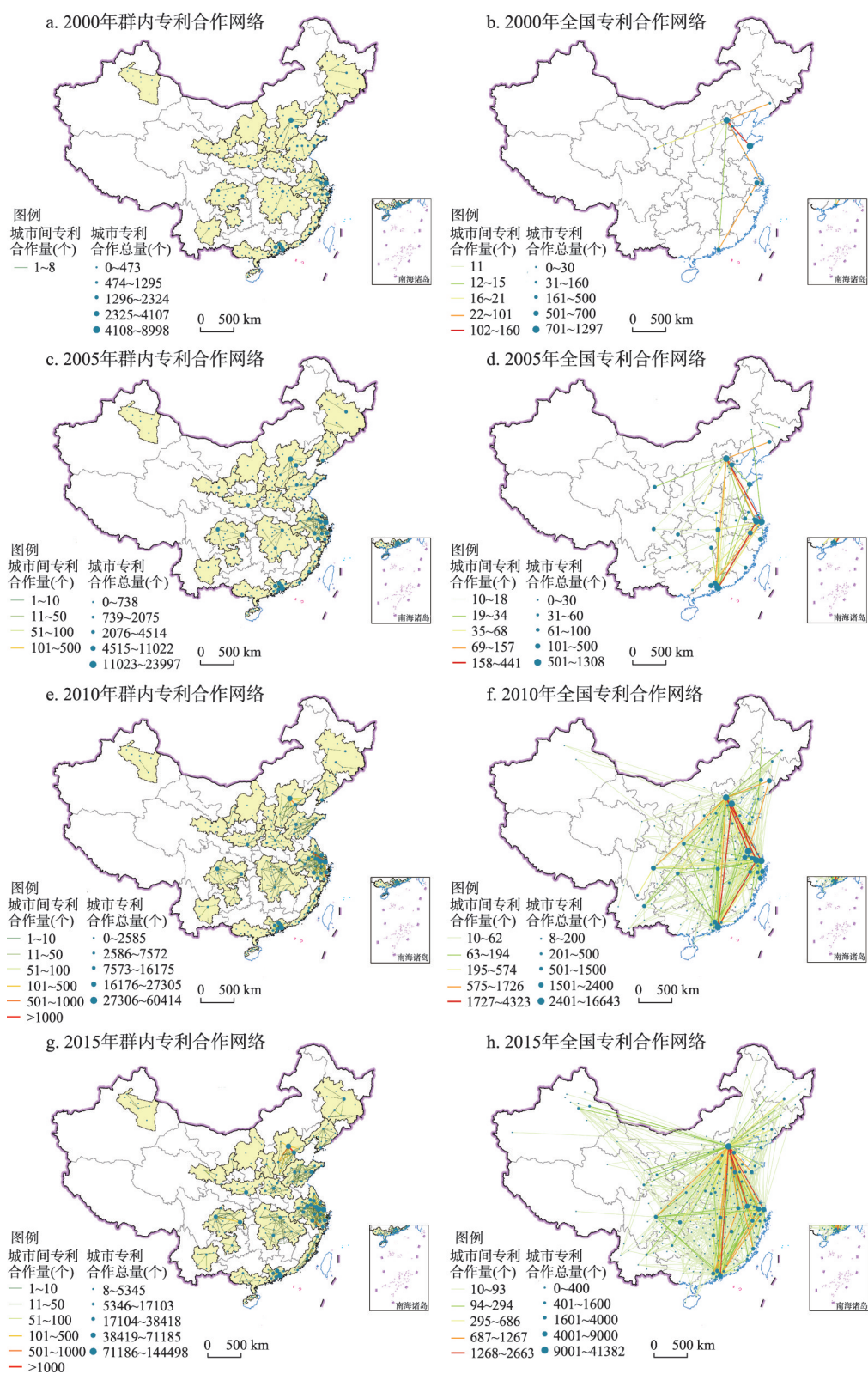
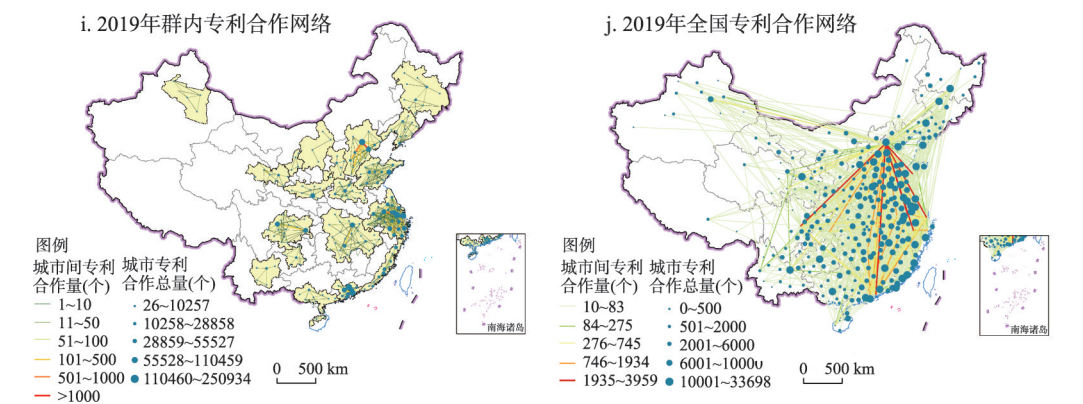


图2



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4630号的标准地图制作,底图边界无修改。

图2 2000年、2005年、2010年、2015年、2019年中国城市(群)技术知识生产与合作格局演化
Fig. 2 Evolution of technological knowledge production and cooperation in Chinese cities (urban agglomerations)

4.1 城市群多中心性时空演化过程

4.1.1 形态多中心性 中国19个城市群技术知识生产的集中化程度呈现明显差异，最高的长江中游城市群2019年形态多中心性高达0.617，最低的宁夏沿黄城市群2000年仅为0.222（表1）。从总体空间格局上看，城市群技术知识形态多中心性不存在明显的空间规律，东、中、西部的城市群都存在或高或低的形态多中心性。从城市群自身演化上看，形态多中心性变动幅度总体不大，但变动趋势差别较大，既有先降后升的“U”型（如长江中游城市群）、也有先升后降的倒“U”型（如珠三角城市群）、又有“W”型（如

表1 2000年、2005年、2010年、2015年、2019年中国城市群技术知识形态多中心性
Tab. 1 Morphological polycentricity of technological knowledge in Chinese urban agglomerations
in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2019

城市群	2000年	2005年	2010年	2015年	2019年
长三角城市群(YRD)	0.617	0.605	0.482	0.480	0.483
珠三角城市群(PRD)	0.239	0.392	0.413	0.423	0.390
京津冀城市群(BTH)	0.479	0.459	0.467	0.454	0.468
长江中游城市群(MYR)	0.582	0.536	0.605	0.607	0.610
成渝城市群(CHC)	0.503	0.464	0.537	0.513	0.506
辽中南城市群(CSL)	0.424	0.406	0.424	0.372	0.325
山东半岛城市群(SDP)	0.459	0.393	0.438	0.395	0.440
海峡西岸城市群(WTS)	0.492	0.481	0.486	0.483	0.496
哈长城市群(HAC)	0.450	0.443	0.439	0.437	0.439
中原城市群(CPL)	0.463	0.383	0.347	0.428	0.428
关中平原城市群(GZP)	0.397	0.392	0.385	0.424	0.287
北部湾城市群(GXB)	0.369	0.366	0.383	0.483	0.451
天山北坡城市群(TSM)	0.232	0.238	0.260	0.262	0.256
晋中城市群(CSX)	0.307	0.297	0.302	0.372	0.345
呼包鄂榆城市群(HBY)	0.281	0.267	0.319	0.283	0.284
滇中城市群(CYN)	0.379	0.381	0.402	0.385	0.389
黔中城市群(CGZ)	0.300	0.225	0.360	0.417	0.506
兰西城市群(LAX)	0.356	0.382	0.366	0.367	0.366
宁夏沿黄城市群(NYR)	0.222	0.282	0.254	0.234	0.311

成渝城市群)或“N”型(如宁夏沿黄城市群)(表1)。为了把握城市群技术知识形态多中心性演化的总体特征,计算19个城市群多中心性的均值,可见总体上城市群形态多中心性呈现先降后升再微弱下降的变动特征,与功能多中心性呈现持续递增的态势明显不同(图3),表明中国城市群内部城市的技术知识生产格局经历了从集中到分散再到集中的发展过程,这一过程与城市群整体技术创新能力的提升相伴发生。城市群创新发展初期,城市间技术生产能力差异很大,主要集中在中心城市;之后在中心城市的带动下,边缘城市技术生产能力增强,推动城市群技术知识向多中心发展;然而伴随着技术革新和产业升级,技术生产中心城市再一次承担起城市群技术创新核心功能,引领城市群适应新产业需求和新科技变革。图3中显示第二次集中的程度相比第一次要弱,这是由于城市技术发展的多样化和持续的累积,技术生产的集中程度难以像前面阶段那样高,而且还会再一次转向多中心发展。

4.1.2 功能多中心性 在聚焦中国内部技术创新格局的前提下,城市群功能多中心性需要从两个维度来探讨,一是从城市群内部的城市间技术合作关系探讨群内功能多中心性,来反映各城市融入城市群技术创新网络的均衡程度;二是从城市群对外技术合作关系来探讨群外功能多中心性,来反映是单一城市还是多个城市承担了城市群对外技术联系的“门户”角色。从功能多中心性计算结果看,不管是群内还是群外,一个共同的特点是所有城市群在2000—2019年间都经历了从低到高的快速发展过程,多数城市群在5个年份都表现出持续递增的态势,仅有少数城市群在中间年份有微小下降,但总体增长的趋势非常明显(表2)。

在群内功能多中心性方面,有多个城市群在不同年份存在零值现象,表明这些城市群尚未建立起技术合作关系,但零值现象不断减少,从2000年10个减少到2005年7个,再到2010年2个和2015年1个。另一方面多中心性数值增加明显,增加最少的是长江中游城市群,反映出该城市群内部城市间的技术合作关系发展程度与理想值之间存在较大差距,这与该城市群跨三省、包含城市较多且区域创新系统不健全有关^[38];增加最多的是呼包鄂榆城市群,作为西部发展水平不太高的城市群具有如此明显的增幅,表明中西部城市群近年来也非常重视城市间的协同创新^[39],也有较好的表现,当然该城市群仅有4个地级市组成,也是造成群内功能多中心性结果偏高的重要原因。珠三角城市群在2010年达到峰值,而且在中国所有城市群中具有最高的群内功能多中心性,但2015年和2020年又表现出微小下降,表明珠三角城市群又进入新一轮技术创新网络结构的调整,核心城市再次发挥群内技术创新的引领带动作用。总体而言,中国城市群内部城市间技术联系普遍增强,网络均衡性大大提升,但未来群内功能多中心性也有可能像珠三角城市群一样出现波动,因此只有通过长期分析和多城市群对比才能准确识别其内部创新网络结构特征。

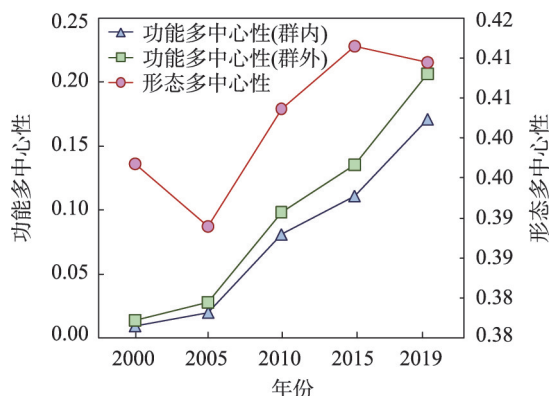


图3 中国城市群技术知识形态和功能多中心性比较(5年所有城市群的均值)

Fig. 3 The comparison of morphological and functional polycentricity of technological knowledge in Chinese urban agglomerations (five-year mean value)

表2 2000年、2005年、2010年、2015年、2019年中国城市群技术知识功能多中心性
Tab. 2 Functional polycentricity of technological knowledge in Chinese urban agglomerations
in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2019

城市群	2000年		2005年		2010年		2015年		2019年	
	群内	群外	群内	群外	群内	群外	群内	群外	群内	群外
长三角城市群	0.046	0.010	0.095	0.023	0.183	0.047	0.193	0.054	0.227	0.087
珠三角城市群	0.055	0.013	0.087	0.025	0.290	0.050	0.248	0.061	0.232	0.079
京津冀城市群	0.025	0.018	0.055	0.029	0.160	0.044	0.195	0.064	0.273	0.078
长江中游城市群	0.002	0.005	0.013	0.009	0.041	0.022	0.064	0.026	0.069	0.034
成渝城市群	0.001	0.005	0.020	0.004	0.075	0.016	0.103	0.024	0.165	0.039
辽中南城市群	0.012	0.006	0.023	0.009	0.033	0.016	0.111	0.016	0.150	0.030
山东半岛城市群	0.014	0.006	0.034	0.008	0.132	0.023	0.245	0.039	0.283	0.049
海峡西岸城市群	0.000	0.002	0.007	0.009	0.063	0.010	0.119	0.026	0.144	0.028
哈长城市群	0.018	0.004	0.006	0.002	0.024	0.009	0.069	0.015	0.080	0.023
中原城市群	0.000	0.003	0.031	0.004	0.074	0.014	0.139	0.018	0.170	0.037
关中平原城市群	0.000	0.004	0.002	0.007	0.058	0.016	0.025	0.018	0.079	0.028
北部湾城市群	0.002	0.002	0.000	0.004	0.027	0.007	0.108	0.015	0.118	0.028
天山北坡城市群	0.000	0.001	0.000	0.002	0.003	0.004	0.069	0.005	0.102	0.019
晋中城市群	0.000	0.003	0.000	0.001	0.048	0.009	0.034	0.011	0.258	0.017
呼包鄂榆城市群	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.012	0.000	0.021	0.276	0.038
滇中城市群	0.000	0.002	0.000	0.004	0.142	0.008	0.176	0.014	0.180	0.016
黔中城市群	0.000	0.000	0.004	0.003	0.113	0.005	0.109	0.013	0.194	0.015
兰西城市群	0.000	0.003	0.000	0.007	0.000	0.010	0.063	0.012	0.085	0.012
宁夏沿黄城市群	0.000	0.000	0.000	0.001	0.070	0.002	0.039	0.005	0.165	0.011

注：群内是指城市群内部城市间开展技术知识合作的功能多中心性，群外是指城市群同国家内部城市群外部城市开展技术知识合作的功能多中心性。

在群外功能多中心性方面，呈现出两个重要特征。一个特征是所有城市群的群外功能多中心性数值2000—2019年间均得到普遍提升，表明城市群同外部建立技术合作的城市不断增加，多个城市代替少数城市承担起城市群的技术“门户”作用，这一特征与群内功能多中心性较为一致。其中，增长最明显的是长三角城市群，2019年比2000年增加了0.077，主要是受上海、南京、杭州和合肥4个省会城市或直辖市具有较强的对外技术合作能力影响；而增长最小的是宁夏沿黄城市群，20年间仅增加了0.011，表明城市群技术“门户”城市比较单一，核心城市之外的城市尚未同外部建立起较强技术合作。另一个特征是群外功能多中心性表现与城市群总体发展水平较为一致，发展水平较好的城市群往往存在较高的群外功能多中心性，而且多中心性的增长也更为明显。比如长三角、珠三角、京津冀三大国家级城市群明显高于其他城市群，东、中、西部城市群也总体呈现梯度递减趋势，而形态多中心性和群内功能多中心性并没有表现出这一特征（表2）。

从19个城市群对比来看，长三角、珠三角、京津冀和山东半岛城市群同时具备较高的群内和群外功能多中心性，城市群内外联系的通道均比较发达，既可以有效整合城市群内部创新要素和资源，又可以与外部进行广泛技术和信息交流，有助于实现“本地蜂鸣—全球管道”的耦合效应^[40]。有些城市群寻求技术创新合作的外向型特征显著，多个中心城市与城市群外部城市建立了更为密切的技术联系，倾向于接受群外城市的异质性

技术知识,但在城市群内部技术创新合作网络中的地位并不突出,一定程度抑制了流入技术知识的本地溢出效应,降低了外部技术知识对城市群创新的贡献^[4],如长江中游、成渝、中原等城市群;这几个城市群应加强群内城市间技术交流合作,将外部多样化技术与本地技术充分结合并在群内广泛传播,作为未来创新发展中的努力方向。部分城市群的群内多中心性位序高于群外多中心性,说明该城市群更倾向于在群内节点城市间建立技术创新联系,与城市群外部城市的创新联系渠道相对单一,如晋中、呼包鄂榆、黔中、宁夏沿黄等城市群,这些城市群涉及城市相对少,城市群内部能够建立一定的合作关系,但创新能级较低导致能够发挥对外技术合作功能的城市较少。此外,还有城市群的群内和群外功能多中心性均较低,这类城市群大多整体技术创新能力相对滞后,除中心城市外,其余城市的内外创新联系均十分微弱,如兰西、天山北坡、哈长和关中平原等城市群。

基于上述分析,进一步总结城市群技术知识多中心性发展的阶段规律。根据城市在城市群内部技术知识生产与合作地位的高低,将城市划分成核心城市、中心城市和边缘城市3类,城市群内部城市的技术知识生产和合作格局不断发生变化,每个阶段所对应的形态和功能多中心性也随之变化(图4)。形态多中心性曲线反映了知识生产格局会从集中到分散向下一个集中分散过程演进,在中心城市的辐射带动下,城市群内继续形成多个中心城市,但再集中再分散会建立在上一次集中分散基础上,幅度会降低。而功能多中心性曲线反映了知识合作格局呈现出持续递增的态势,不同的城市之间基于“互补”或“合作”关系不断建立技术创新联系,城市群内部逐渐形成多向互动、有机联系的技术创新网络,城市群外部技术联系从核心城市承担主要联系职能发展成多个城市共同承担对外联系职能。未来高创新能力的城市群在形态和功能上都会逐渐向多中心结构演化。

4.2 城市群多中心性类型演替特征

城市群多中心性单方面的演化过程分析难以综合判断城市群多中心性发展程度及在国家中的相对地位,类型划分有助于对这些方面开展深入研究。参考相关学者对多中心

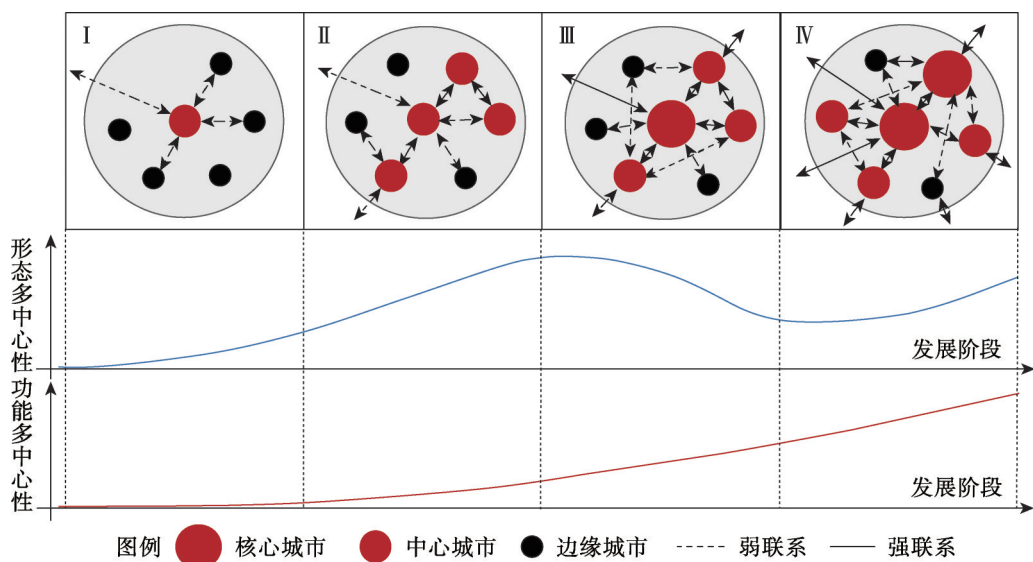
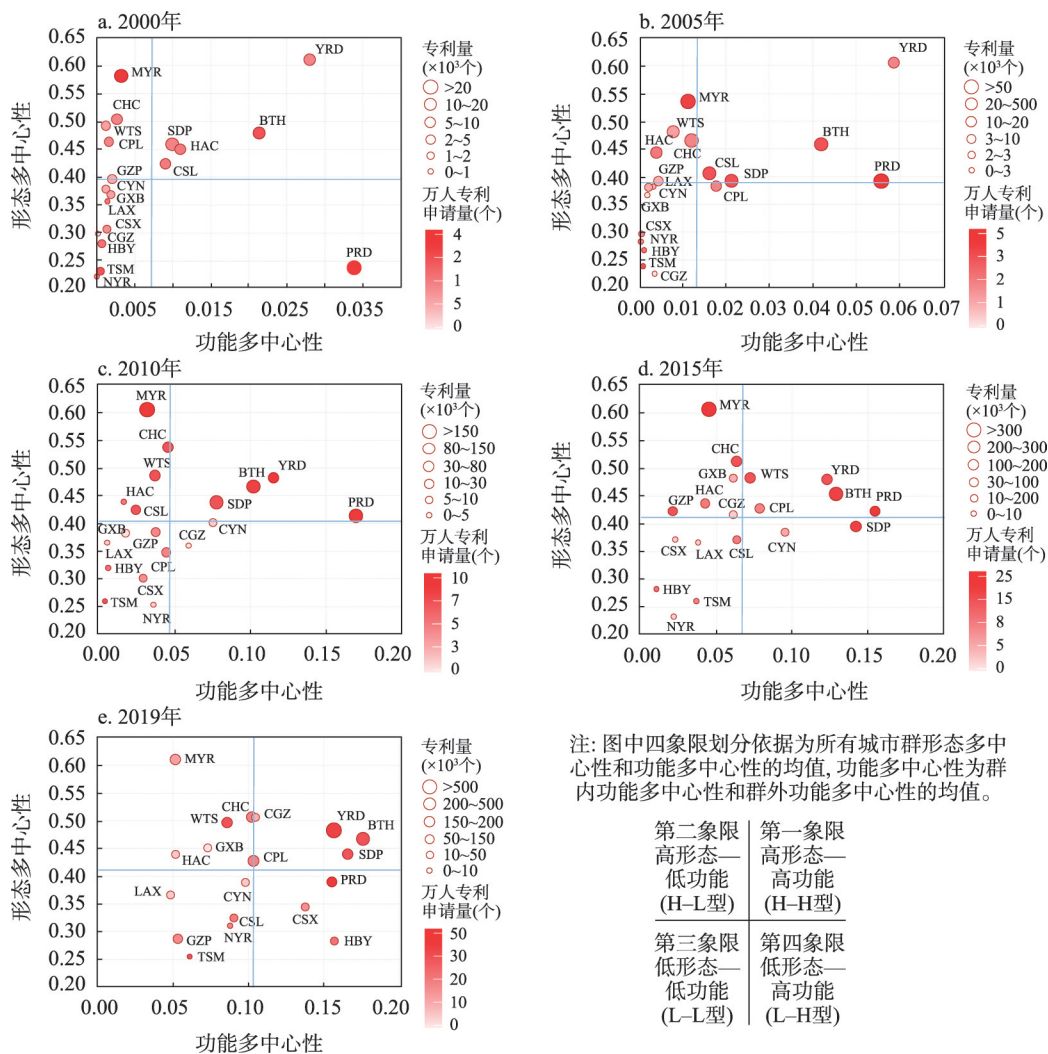


图4 城市群知识多中心性发展阶段规律示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the development stages of knowledge polycentricity in urban agglomerations

性的类型划分方法^[33, 42]，依据城市群技术知识的形态多中心性和功能多中心性，按照二分法分类的基础方法，取当年所有城市群的均值，将所有城市群划分成4种类型，分别为第一象限的高形态—高功能型（H-H）、第二象限高形态—低功能型（H-L）、第三象限低形态—低功能型（L-L）、第四象限低形态—高功能型（L-H）。H-H型代表城市群技术知识生产分散在多个城市，而且多个城市又承担起技术知识合作功能；H-L型代表城市群技术知识生产分散，但合作功能集中在少数城市；L-L型代表城市群技术知识生产与合作都集中在少数城市；L-H型代表城市群技术知识生产较为集中，但合作分散到多个城市。

图5展示了5个年份所有城市群的多中心性类型分区，同时用城市群专利申请总量反映城市群技术知识生产规模，用万人专利申请量反映城市群技术知识生产强度，进而综合判断城市群多中心性的内在特征。图6是在图5基础上归纳出19个城市群在2000—2019年间的类型变化趋势，可以得到以下几点认识。



注：城市群简称参照表1中国19个城市群名称。

图5 2000年、2005年、2010年、2015年、2019年中国城市群多中心性类型演变

Fig. 5 The evolution of polycentric pattern of Chinese urban agglomerations in 2000, 2005, 2010, 2015, and 2019

(1) 城市群技术知识生产能力展现出加快发展的态势。从图5中可以看出,不管是专利量还是万人专利申请量,从2000年到2019年都表现出指数式增长,表明中国城市群已经具有技术创新的孵化器功能,有越来越多的专利产生。

(2) 功能多中心性呈现整体向高水平方向推进。在2000年的时候,城市群集中分布在低功能多中心性一侧,之后各年份不断有城市群向高功能多中心性一侧推移,到2019年时已经呈现出分布均匀的格局;所有城市群功能多中心性的均值也从2000年的0.007持续增加到2019年的0.207。这表明2000—2019年间中国城市群城市间的技术知识合作得到了快速的发展,城市群内部的技术合作网络化“轮轴”城市和对外技术“门户”城市不断增多。相比来看,形态多中心性均值多年徘徊在0.4上下,不存在方向性趋势。

(3) 城市群的创新能力与多中心性存在较大一致性。结合城市群的多中心性象限分布与创新产出水平(专利量和万人专利申请量),可以看到拥有较高技术知识生产规模和强度的城市群,往往会具有较高的功能多中心性或形态多中心性。创新能力低的H-L型城市群最不理想,城市群既没有技术创新能力突出的核心城市引领带动,也没有与其他城市建立紧密的内外联系,这类城市群(如黔中、哈长、北部湾等城市群)需要通过培育核心城市引导创新要素集聚,进而带动城市群区域创新系统建设,推动城市群创新发展。

(4) 有些城市群多年始终处于同一类型。比如,长三角、京津冀和山东半岛城市群始终是H-H型,长江中游和成渝城市群始终是H-L型,天山北坡、兰西和宁夏沿黄城市群始终是L-L型。虽然同为H-H型,但城市群位置的象限内变动也反映出城市群在技术创新方面的发展方向,2000年、2005和2010年长三角城市群功能多中心性一直高于京津冀城市群,但2015年京津冀城市群反超长三角城市群,并在2019年攀升到中国城市群功能多中心性首位,表明2014年开始国家力推的京津冀协同发展战略有力推动了京津冀城市群的技术创新协同发展^[43-44],这一客观结果与相关研究用修正的引力模型模拟得出的京津冀城市群极核式结构并不一致^[45]。此外,另一个值得关注的是山东半岛城市群在形态多中心性相对位置基本不变的情况下,功能多中心性呈现出明显的向高值区移动态势,然而当前对山东半岛城市群创新网络的研究却非常缺乏。长江中游城市群功能多中心性很低,但形态多中心性却一直很高,表明长江中游城市群虽然是五大国家级城市群之一,但城市间技术协同创新关系发展却非常滞后,这是需要重点关注的问题。

(5) 多个城市群类型发生了正向迁移。海峡西岸城市群和中原城市群在高位形态多中心性的情况下,2000—2019年间功能多中心性从第二象限转移到第一象限;滇中、晋

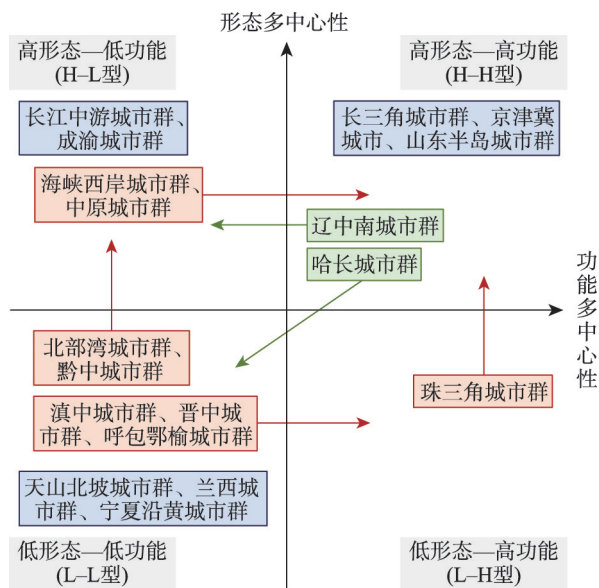


图6 2000—2019年中国城市群多中心性类型迁移趋势

Fig. 6 The evolution trends of polycentric types of technological knowledge in Chinese urban agglomerations from 2000 to 2019

中和呼包鄂榆城市群在低位形态多中心性的情况下，从第三象限转移到第四象限；表明这些城市群城市间技术合作关系得到了较大发展。北部湾和黔中城市群在低位功能多中心性情况下，从第三象限转移到第二象限；珠三角城市群在高位功能多中心性情况下，从第四象限转移到第一象限；表明这些城市群技术知识生产格局从集中走向分散。

(6) 仅有东北地区的两个城市群发生了逆向迁移。辽中南城市群从H-H型转移到H-L型，表明辽中南城市群核心城市在城市间技术合作中的作用持续增强。哈长城市群从H-H型转移到H-L型，再转移到L-L型，表明哈长城市群核心城市不仅在技术合作中的作用在增强，而且技术生产也越来越趋向集中。当然，这种转移并不能表明城市群创新发展的逆行，但却说明东北地区协同创新发展的确存在较大问题，至少从专利产出规模和强度看，他们在中国的地位下降明显，需要在未来创新发展中加以重视。

4.3 城市群多中心性创新产出效应

上文城市群技术知识多中心性时空演化和类型更替直观展示了多中心性演变特征，这里将使用模型定量揭示多中心性演化内在规律。为揭示城市群形态多中心性与城市创新绩效的统计关系，分别对形态多中心性与专利申请量进行一次函数和二次函数拟合。在四象限一次函数拟合图中（图7），一二象限（形态多中心性高）为负相关，三四象限（形态多中心性低）为正相关。而且，功能多中心性对斜率有影响，三四象限斜率都为正值，但功能多中心性高的第四象限斜率更大，正相关更强，这表明城市群在技术知识生产偏向集中化的情境下，技术合作关系分散化更能增进技术生产分散化的群体创新能力。一二象限都为负值，但功能多中心性高的第一象限斜率更小，负相关更强，这表明城市群在技术知识生产偏向分散化的情境下，技术合作关系分散化会导致技术生产分散化的群体创新能力下降更快。简言之，城市群形态多中心性的创新效应会受到功能多中心性的潜在影响。在二次函数拟合中（图8），显示出形态多中心性与取对数后的专利申请数呈现明显的倒“U”型关系，且当城市群技术知识的形态多中心性在0.5附近时，城市创新产出（专利申请数量）达到最大值。

根据上述函数拟合结果，分别对一二象限（形态多中心性高）、三四象限（形态多中心性低）、一四象限（功能多中心性高）、二三象限（功能多中心性低）以及总体样本进行面板工具变量回归分析。以形态多中心性和功能多中心性为核心变量，将核心变量滞后后期作为工具变量，构建了非平衡短面板模型。在控制变量的选择上，参考相关研究^[46-48]

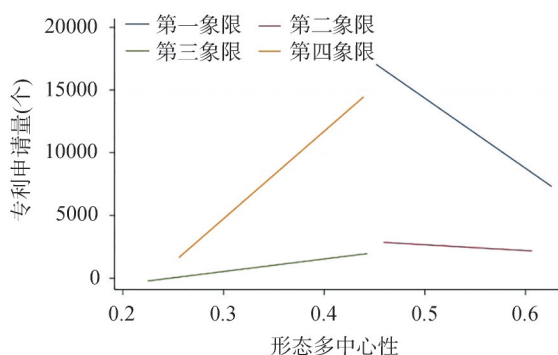


图7 形态多中心性与专利申请量一次函数拟合图
Fig. 7 Linear fitting diagram of morphological polycentricity and the number of patent applications

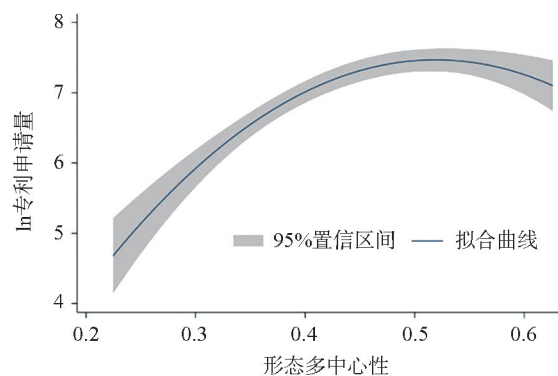


图8 形态多中心性与专利申请量二次函数拟合图
Fig. 8 Quadratic function fitting diagram of morphological polycentricity and the number of patent applications

并经过多次尝试,最终选择了政府研发投入 (*GOV*)、高校在校学生数 (*UNV*)、外资占 GDP 比重 (*FPG*)、人均 GDP (*PGDP*) 等指标,分别代表政府支持、人才基础、开放程度和发展水平。表 3 展示了回归结果,其中模型 1~4 分别是对应一二象限、三四象限、一四象限、二三象限,模型 5 和模型 6 对应总体样本 (表 3),可以看出:① 形态多中心性 (*FOM*) 与专利申请量在一二象限呈现显著负相关,而在三四象限呈现显著正相关,这与一次函数模拟结果一致。② 功能多中心性 (*FUM*) 与专利申请量呈现稳定且显著正相关,表明城市间技术知识合作关系的分散化会促进城市群整体的创新产出,加强城市的对外技术合作能力有助于提升城市群整体创新能力,再一次证实了发展城市群内和城市群间创新合作网络的重要性。③ 政府研发投入 ($\ln GOV$)、高校在校学生数 ($\ln UNV$)、人均 GDP ($\ln PGDP$) 都与专利申请量呈现稳定且显著的正相关关系,而外资占 GDP 比重 (*FPG*) 仅在一二象限和二三象限呈现出显著的正相关关系,在三四象限、一四象限、总体样本中都没有显著的相关性。外资对发展中国家内部技术创新扩散的负向作用已经被多个研究证实^[46-49],研究表明外资只有在城市群知识生产分散化的情况下才可能有助于城市群创新产出,因此需要清晰认识外资对区域创新的作用;这一结果或许与没有考虑同国外开展技术知识合作有关,但至少说明试图通过引进外资来提升城市的技术创新水平,对多数城市而言难以实现。

表 3 两阶段最小二乘法回归结果
Tab. 3 Results of two-stage least square regression

样本	一二象限 (模型 1)	三四象限 (模型 2)	一四象限 (模型 3)	二三象限 (模型 4)	全样本 (模型 5)	全样本 (模型 6)
<i>FOM</i>	-5.314***	7.101***			2.956***	
<i>FUM</i>			15.063***	21.467***		9.586***
$\ln GOV$	0.143***	0.176***	0.302***	0.094**	0.228***	0.167***
<i>FPG</i>	30.545*	0.104	0.487	50.242***	0.329	-1.255
$\ln UNV$	0.361***	0.354***	0.152**	0.515***	0.350***	0.375***
$\ln PGDP$	0.841***	0.745***	0.276*	0.344***	0.679***	0.290***
常数	8.992***	3.128***	4.756	4.982***	4.853***	5.686***
样本数量	345	341	270	416	686	686
Centered R^2	0.688	0.713	0.101	0.740	0.667	0.687
弱工具变量检验	352.586***	264.191***	110.154***	261.257***	2248.942***	851.865***
不可识别检验	175.889***	150.351***	79.490***	161.909***	526.734***	381.482***

注: *表示 $p < 0.1$, **表示 $p < 0.05$, ***表示 $p < 0.01$ 。

进一步开展稳健性检验。只保留 2015 年和 2019 年的样本,分象限进行工具变量法回归,检验城市群技术知识形态多中心性与城市创新产出的倒“U”型的关系是否随着经济社会的发展而弱化甚至消失。模型 7~模 12 的结果表明 (表 4),形态多中心性 (*FOM*) 与专利申请量在一二象限呈现显著负相关,而在三四象限呈现显著正相关,功能多中心性 (*FUM*) 与专利申请量呈现稳定且显著正相关,说明表 3 模型结果是稳健的,城市群技术知识形态多中心性与城市创新产出的倒“U”型关系在创新网络发育过程中稳定存在。

使用门槛效应模型确定城市群技术知识形态多中心性与城市创新产出的倒“U”型关系的拐点值。以城市专利申请量作为被解释变量,城市群技术知识形态多中心性水平作为核心变量和门槛变量,用 Bootstrap 方法抽签 400 次,结果如表 5 所示。单门槛结果

表4 两阶段最小二乘法稳健性检验回归结果
Tab. 4 Robustness test of two-stage least square regression

样本	一二象限 (模型7)	三四象限 (模型8)	一四象限 (模型9)	二三象限 (模型10)	全样本 (模型11)	全样本 (模型12)
<i>FOM</i>	-6.824***	8.621***			1.777**	
<i>FUM</i>			21.39***	17.504***		10.647***
<i>lnGOV</i>	0.045	0.158***	0.026	0.157**	0.174***	0.168***
<i>FPG</i>	64.578**	-14.111***	-32.35	-16.201***	-15.592***	-13.975***
<i>lnUNV</i>	0.406***	0.398***	0.336**	0.41***	0.412***	0.352***
<i>lnPGDP</i>	0.509***	0.914***	0.467	0.099	0.505***	0.228*
常数	10.299***	2.346**	2.458**	5.504***	5.739***	5.607***
样本数量	186	166	137	215	352	352
Centered R^2	0.441	0.594	.	0.556	0.443	0.471
弱工具变量检验	1220.87	89.681	28.439	167.578	1737.858	302.223
不可识别检验	162.101	59.624	24.437	95.675	293.555	164.114

注：*表示 $p < 0.1$ ，**表示 $p < 0.05$ ，***表示 $p < 0.01$ 。

表5 门槛效果显著性检验
Tab. 5 Results of the threshold effect significance test

门槛数	RSS	MSE	F 值	P 值	10%	5%	1%	门槛值
单一门槛	201.261	0.241	34.96	<0.000	10.181	12.206	17.930	0.438
双重门槛	195.883	0.234	22.95	0.112	33.330	51.797	73.223	0.413

显著，而双重门槛检验结果则不显著，门槛估计值为0.438，即在形态多中心性值小于0.438时，城市群技术知识形态多中心性与城市创新产出正相关；当形态多中心性值大于0.438时，城市群技术知识形态多中心性与城市创新产出负相关。

为了检验门槛结果的稳健性，以上述估计的门槛值0.438作为界限对样本进行分类回归。模型13、15、17结果表明（表6），当形态多中心性小于门槛值时，城市群技术知识形态多中心性与城市创新产出在1%水平上显著正相关；模型14、16、18结果表明（表6），当形态多中心性大于门槛值，城市群技术知识形态多中心性与城市创新产出在1%水

表6 门槛效应稳健性检验
Tab. 6 Results of the threshold effect robustness test

样本	普通最小二乘法		两阶段最小二乘法		面板工具变量	
	小于门槛值 (模型13)	大于门槛值 (模型14)	小于门槛值 (模型15)	大于门槛值 (模型16)	小于门槛值 (模型17)	大于门槛值 (模型18)
<i>FOM</i>	7.588***	-3.212***	9.16***	-1.98***	9.16***	-5.478***
<i>lnGOV</i>	0.162***	0.208***	0.147***	0.216***	0.147***	0.142***
<i>FPG</i>	-0.248	31.415**	-0.399	30.297**	-0.399	-24.149*
<i>lnUNV</i>	0.342***	0.365***	0.344***	0.364***	0.344***	0.155***
<i>lnPGDP</i>	0.792***	0.677***	0.811***	0.662***	0.811***	0.919***
常数	2.975***	7.94***	2.369***	7.322***	2.369***	9.279***
样本数量	300	386	300	386	300	386
R^2	0.7113	0.6767	0.7091	0.6748	0.744	0.805

注：*表示 $p < 0.1$ ，**表示 $p < 0.05$ ，***表示 $p < 0.01$ 。

平上显著负相关,即城市群技术知识的形态多中心性与城市创新产出呈现出以0.438为拐点的倒“U”型关系。这说明表6中门槛值估计结果是稳健的。门槛值的确定,可为城市群创新战略制定和创新空间布局提供参考。依此判断,长江中游、成渝、海峡西岸和黔中等城市群当前形态多中心性偏高,应强化核心城市的技术创新能力,提升在城市群中的技术生产地位;而天山北坡、晋中、呼包鄂榆、兰西和宁夏沿黄等城市群当前形态多中心性偏低,则应注重培育新的技术创新中心城市,分担核心城市的技术生产职能。依据门槛值进行城市群技术产出空间格局的调整,有利于总体提升城市群的技术创新效应。

5 结论与讨论

本文运用中国城市专利申请和城市间专利合作数据,对中国19个城市群的技术知识多中心性开展了时空格局演化、类型演替趋势与创新产出效应的定量研究,主要结论为:

(1)在对多中心性时空格局演化方面,发现形态多中心性、群内功能多中心性和群外功能多中心性演化存在明显异质性特征。首先是形态和功能异质,形态多中心性演化呈现明显的波动性,而功能多中心性演化呈明显递增趋势;其次是群内和群外异质,群外功能多中心性与城市群发展水平具有较高一致性,但群内功能多中心性并不明显;最后是空间上的异质,各城市群形态和功能多中心性演化的表现存在较大差异。这些异质性特征同科学知识多中心性研究的发现比较一致^[33-34],共同表明城市群创新格局具有不同形态、创新发展处于不同发展阶段,需要从全局把握、从长期分析,才可深入认知城市群创新结构特征。

(2)在对多中心性类型演替趋势方面,发现4种类型的城市群多年间发生了较多位移。位移方向以正向位移居多,珠三角、北部湾和黔中城市群向高形态多中心性移动,中原、海峡西岸、滇中、晋中、呼包鄂榆等城市群向高功能多中心性移动,仅有东北地区的哈长和辽中南城市群出现了“逆行”现象。虽然形态和功能多中心性高低难以反映创新水平,但结合创新水平看多中心性类型的演替,可基本判断城市群多中心性与创新水平的关系。正向移动证明中国城市群2000—2019年在技术创新方面总体实现了较快发展。

(3)在对多中心性创新产出效应方面,发现形态多中心性与创新产出呈现以0.438为拐点的倒“U”型关系,功能多中心性则与创新产出始终保持正相关关系。过去研究多探讨形态多中心性的效益^[50],本文定量分析了功能多中心性的创新效应,并与形态多中心性的创新效应进行对比,发现了技术知识功能多中心性对创新产出的显著正效应,这一效应的实现与知识传播的双向累积递增的特征有关^[34]。

按照国家创新发展战略布局,除了加快建设京津冀、长三角和粤港澳三大城市群支撑北京、上海和粤港澳三大国际科技创新中心之外,还要加快布局和建设一批区域科技创新中心,推动国际和区域科技创新中心互动发展,共同支撑世界科技强国建设和双循环新发展格局。本文认为,依托城市群推动区域科技创新中心建设将是符合中国国情的一条捷径。基于对城市群技术知识多中心性的研究发现,结合前期对科学知识多中心性的研究结果,认为对城市群知识创新空间格局的评价要科学严谨,城市群创新空间差异过大或过于分散并不能与城市群整体创新能力建立直接关系,需要在城市群发展阶段和动态视角下综合判断。建议在城市群知识创新多中心性规律科学认知的基础上,深入研究特定城市群的科技创新格局和演化过程,编制城市群科技创新专项规划,制定适合城

城市群自身发展阶段的空间布局和发展方案。当然,不管科技创新空间如何布局,采用积极的政策措施鼓励所有城市开展对外科技合作与协同创新,是提升城市群整体创新水平的必然路径。

城市群创新多中心性是一个复杂问题,尚有很多研究需要持续推进。仅用5年截面数据,虽然可以揭示总体规律,但未来还会考虑使用2000—2019年的面板数据,进一步提高模型精准度。城市群创新多中心,还需要加强与科学知识多中心性的对比,继续探索多类型创新合作,便于总结提炼城市群创新多中心性的内在规律。仅是对中国城市群多年间的变化模拟分析,不足以固化成城市群创新多中心性的规律,还需要对全球城市群开展综合研究,才能总结一般规律,但这一研究需要克服数据难题。此外,城市群创新多中心性与交通、经济、人口、就业等多中心性的关系如何?研究建立城市群多要素的多中心性关系框架,对城市群高质量发展会具有重要作用。这些问题都值得今后持续关注和深化研究。

致谢:感谢2020—2021年度“中国科学院大学生创新实践训练计划”小组余蕾、唐鑫瑜、刘玉、肖真、宋子硕等同学在合作专利数据处理过程中付出的艰辛努力。

参考文献(References)

- [1] Gottmann J. Megalopolitan systems around the world//Bourne L S, Simmons J W. Systems of Cities: Readings on Structure Growth and Policy. New York: Oxford University Press, 1978: 103-111.
- [2] 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.]
- [3] Li Y C, Phelps N. Megalopolis unbound: Knowledge collaboration and functional polycentricity within and beyond the Yangtze River Delta region in China, 2014. Urban Studies, 2018, 55(2): 443-460.
- [4] Yao Shimou, Wang Shuguo, Chen Shuang, et al. Spatial system of "urban agglomeration" in district development. Economic Geography, 2006, 26(5): 726-730. [姚士谋, 王书国, 陈爽, 等. 区域发展中“城市群现象”的空间系统探索. 经济地理, 2006, 26(5): 726-730.]
- [5] Fang Chuanglin. New structure and new trend of formation and development of urban agglomerations in China. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(9): 1025-1034. [方创琳. 中国城市群形成发育的新格局及新趋向. 地理科学, 2011, 31(9): 1025-1034.]
- [6] Fan Jie. Spatial organization pathway for territorial function-structure: Discussion on implementation of major function zoning strategy in territorial spatial planning. Geographical Research, 2019, 38(10): 2373-2387. [樊杰. 地域功能—结构的组织途径: 对国土空间规划实施主体功能区战略的讨论. 地理研究, 2019, 38(10): 2373-2387.]
- [7] Li Y C, Phelps N A. Knowledge polycentricity and the evolving Yangtze River Delta megalopolis. Regional Studies, 2017, 51(7): 1035-1047.
- [8] Lu Tianzan, Wu Zhiqiang, Huang Liang. International comparison of creative cities cluster: An analysis of social network and spatial organization on innovative collaboration: International comparison of creative city cluster between the Bosnywash megalopolis and the Yangtze River Delta region. Urban Planning Forum, 2016(2): 35-44. [陆天赞, 吴志强, 黄亮. 网络关系与空间组织: 长三角与美国东北部城市群创新合作关系的比较分析. 城市规划学刊, 2016(2): 35-44.]
- [9] Li Jiancheng, Wang Qingxi, Tang Gennian. Dynamic evolution of scientific knowledge network in the Yangtze River delta. Studies in Science of Science, 2017, 35(2): 189-197. [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. 科学学研究, 2017, 35(2): 189-197.]
- [10] 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.]
- [11] 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.
- [12] Audirac I. Information technology and urban form: Challenges to smart growth. *International Regional Science Review*, 2005, 28(2): 119-145.
- [13] Commission of the European Community. European spatial development perspective: Towards balanced and sustainable development of the territory of the European Union. Brussels: European Commission, 1999.
- [14] Li T, Zhou R, Zhang Y N, et al. Measuring functional polycentricity of China's urban regions based on the interlocking network model, 2006-2015. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 2018, 39(3): 382-400.
- [15] Parr J. The polycentric urban region: A closer inspection. *Regional Studies*, 2004, 38(3): 231-240.
- [16] Hall P, Pain K. *The Polycentric Metropolis: Learning from Mega-City Regions in Europe*. London: Earthscan, 2006.
- [17] Meijers E J, Waterhout B, Zonneveld W A M. Closing the gap: Territorial cohesion through polycentric development. *European Journal of Spatial Development*, 2007, 24(1): 1-24.
- [18] González-González E, Nogués S. Regional polycentricity: An indicator framework for assessing cohesion impacts of railway infrastructures. *European Planning Studies*, 2016, 24(5): 950-973.
- [19] Dadashpoor H, Saeidi Shirvan S. Measuring functional polycentricity developments using the flow of goods in Iran: A novel method at a regional scale. *International Journal of Urban Sciences*, 2019, 23(4): 551-567.
- [20] Lambooy J G. Polynucleation and economic development: The Randstad, European. *Planning Studies*, 1998, 6(4): 457-466.
- [21] Champion A G. A changing demographic regime and evolving poly centric urban regions: Consequences for the size, composition and distribution of city populations. *Urban Studies*, 2001, 38(4): 657-677.
- [22] Limtanakool N, Dijst M, Schwanen T. A theoretical framework and methodology for characterising national urban systems on the basis of flows of people: Empirical evidence for France and Germany. *Urban Studies*, 2007, 44(11): 2123-2145.
- [23] Neal Z P. The causal relationship between employment and business networks in US cities. *Journal of Urban Affairs*, 2011, 33(2): 167-184.
- [24] Neal Z P. From central places to network bases: A transition in the US urban hierarchy, 1900-2000. *City & Community*, 2011, 10(1): 49-75.
- [25] Malecki E J. Hard and soft networks for urban competitiveness. *Urban Studies*, 2002, 39(5-6): 929-945.
- [26] Liu Z, Liu S H. Polycentric development and the role of urban polycentric planning in China's mega cities: An examination of beijing's metropolitan area. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1588. DOI: 10.3390/su10051588.
- [27] Meijers E J, Burger M J. Spatial structure and productivity in US metropolitan areas. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2010, 42(6): 1383-1402.
- [28] Liu X J, Derudder B, Wang M S. Polycentric urban development in China: A multi-scale analysis. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2018, 45(5): 953-972.
- [29] Gu Chaolin. Study on urban agglomeration: Progress and prospects. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 771-784. [顾朝林. 城市群研究进展与展望. *地理研究*, 2011, 30(5): 771-784.]
- [30] Wei Lihua. Influence of urban agglomeration economic cooperation on regional coordinated development: Based on comparison between Beijing-Tianjin-Hebei and Shanghai-Jiangsu-Zhejiang. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(4): 575-579. [魏丽华. 论城市群经济联系对区域协同发展的影响: 基于京津冀与沪苏浙的比较. *地理科学*, 2018, 38(4): 575-579.]
- [31] Ma Haitao, Miao Changhong, Gao Junbo. To build learning network of industry cluster: An actor network theory perspective. *Economic Geography*, 2009, 29(8): 1327-1331. [马海涛, 苗长虹, 高军波. 行动者网络理论视角下的产业集群学习网络构建. *经济地理*, 2009, 29(8): 1327-1331.]
- [32] Ter Wal A L J, Boschma R A. Applying social network analysis in economic geography: Framing some key analytic issues. *The Annals of Regional Science*, 2009, 43(3): 739-756.
- [33] 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.]
- [34] Haitao Ma, Xuanfang Xu. The knowledge polycentricity of China's urban agglomerations. *Journal of Urban Planning and Development*, 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000828.
- [35] Huggins R, Johnston A, Thompson P. Network capital, social capital and knowledge flow: How the nature of inter-

- organizational networks impacts on innovation. *Industry and Innovation*, 2012, 19(3): 203-232.
- [36] Green N. Functional polycentricity: A formal definition in terms of social network analysis. *Urban Studies*, 2007, 44(11): 2077-2103.
- [37] Fang Chuanglin. Atlas of Urban Clusters in China. Beijing: Science Press, 2020. [方创琳. 中国城市群地图集. 北京: 科学出版社, 2020.]
- [38] Zou Fang, Jiang Lidan, Huang Ying. Research on technology innovation cooperation network in the middle reaches of Yangtze River urban agglomeration from the perspective of gradient theory. *Journal of Library and Information Science in Agriculture*, 2021, 33(6): 54-65. [邹芳, 姜李丹, 黄颖. 梯度理论视角下的长江中游城市群技术创新合作网络研究. 农业图书情报学报, 2021, 33(6): 54-65.]
- [39] Ma Haitao, Xu Xuanfang. High-quality development assessment and spatial heterogeneity of urban agglomeration in the Yellow River Basin. *Economic Geography*, 2020, 40(4): 11-18. [马海涛, 徐植钤. 黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异. 经济地理, 2020, 40(4): 11-18.]
- [40] 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.
- [41] Zhou Can, Zeng Gang, Cao Xianzhong. Chinese inter-city innovation networks structure and city innovation capability. *Geographical Research*, 2017, 36(7): 1297-1308. [周灿, 曾刚, 曹贤忠. 中国城市创新网络结构与创新能力研究. 地理研究, 2017, 36(7): 1297-1308.]
- [42] Liu X J, Derudder B, Wu K. Measuring polycentric urban development in China: An intercity transportation network perspective. *Regional Studies*, 2016, 50(8): 1302-1315.
- [43] Lyu Lachang, Meng Guoli, Huang Ru, et al. Spatial evolution and organization of urban agglomeration innovation network: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Areal Research and Development*, 2019, 38(1): 50-55. [吕拉昌, 孟国力, 黄茹, 等. 城市群创新网络的空间演化与组织: 以京津冀城市群为例. 地域研究与开发, 2019, 38(1): 50-55.]
- [44] Ma Haitao, Lu Shuo, Zhang Wenzhong. Coupling process and mechanism of urbanization and innovation in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Geographical Research*, 2020, 39(2): 303-318. [马海涛, 卢硕, 张文忠. 京津冀城市群城镇化与创新的耦合过程与机理. 地理研究, 2020, 39(2): 303-318.]
- [45] Sheng Yanwen, Gou Qian, Song Jinping. Innovation linkage network structure and innovation efficiency in urban agglomeration: A case of the Beijing-Tianjin-Hebei, the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(11): 1831-1839. [盛彦文, 苟倩, 宋金平. 城市群创新联系网络结构与创新效率研究: 以京津冀、长三角、珠三角城市群为例. 地理科学, 2020, 40(11): 1831-1839.]
- [46] 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.]
- [47] Lyu Lachang, Sun Feixiang, Huang Ru. Innovation-based urbanization: Evidence from 270 cities at the prefecture level or above in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1910-1922. [吕拉昌, 孙飞翔, 黄茹. 基于创新的城市化: 中国270个地级及以上城市数据的实证分析. 地理学报, 2018, 73(10): 1910-1922.]
- [48] Wei Y H D. Network linkages and local embeddedness of foreign ventures in China: The case of Suzhou municipality. *Regional Studies*, 2015, 49(2): 287-299.
- [49] Diez J R, Berger M. The role of multinational corporations in metropolitan innovation systems: Empirical evidence from Europe and Southeast Asia. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2005, 37(10): 1813-1835.
- [50] Sun Bindong, Hua Jieyuan, Li Wan, et al. Spatial structure change and influencing factors of city clusters in China: From monocentric to polycentric based on population distribution. *Progress in Geography*, 2017, 36(10): 1294-1303. [孙斌栋, 华杰媛, 李婉, 等. 中国城市群空间结构的演化与影响因素: 基于人口分布的形态单中心: 多中心视角. 地理科学进展, 2017, 36(10): 1294-1303.]

The evolutionary characteristics and innovation effects of technological knowledge polycentricity in Chinese urban agglomerations

MA Haitao^{1,2}, XU Xuanfang^{1,2}, JIANG Kaile^{2,3}

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China. 3. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: Technological knowledge polycentricity is a measure of the degree of polycentricity present in knowledge innovation; it can be used to model the spatial structure of technological knowledge production and cooperation within urban agglomerations, and can thus be used to gauge the level of innovation and the quality of development in an urban agglomeration. Drawing on patent application and inter-city patent cooperation data for 293 cities in China in the years 2000, 2005, 2010, 2015, and 2019, we used polycentricity measures, instrumental variables, and panel threshold models in order to explore the spatiotemporal evolution characteristics, type evolution trends, and innovation output effects of technological knowledge polycentricity in 19 urban agglomerations. Our results show that: (1) The evolution of the morphological and functional polycentricity of technological knowledge differs significantly between agglomerations—whilst morphological polycentricity showed a fluctuating trend (whereby a decline was followed by an increase and then a further decrease); in fact, we found functional polycentricity to have gradually increased over the study period. (2) Urban agglomerations with high morphological and functional polycentricity values were found to maintain higher innovation levels, while low morphological and functional polycentricity could be linked to lower innovation levels; the results of the type of distribution analysis, further, show that while morphological polycentricity did not present any obvious concentration or evolution trends over the study period, functional polycentricity increased significantly. (3) The modeling results show that the relation between the morphological polycentricity of urban agglomerations and urban innovation outputs has an inverted U-shaped relationship, with an inflection point at the value 0.438; functional polycentricity, in contrast, was found to maintain a consistently positive relationship with innovation outputs, confirming the importance of inter-city innovation cooperation when it comes to urban innovation output. Our conclusions on the development pattern of technological knowledge polycentricity can provide theoretical support for the formulation of innovation development strategies in urban agglomerations.

Keywords: urban agglomeration; morphologic polycentricity; functional polycentricity; urban network; technical knowledge; patent cooperation