

# 崛起的全球创新中心：中国城市在全球城市科研合作网络中的演化特征

曹 湛 彭震伟

**提 要** 城市在全球科研合作网络中的地位能级可以反映城市在全球科学版图中的门户作用和支配能力。研究以Web of Science合著论文数据为基础，选取全球526个主要城市（包括44个中国主要城市），借助空间分析和网络分析，研究了2002—2006和2014—2018年两个时段全球城市科研合作网络的演进过程，并重点关注中国城市在网络中的演化特征。研究结果显示：①全球城市科研合作网络的重心逐渐从欧美向亚太转移，中国城市的网络连接度提升显著，但具较强网络支配能力的顶级全球创新中心较少；②在中国，不同城市融入全球科研合作网络的节奏并不一致。位于东部沿海、长江流域沿线以及中原地区的城市连接度提升较快，而边缘地区城市提升较慢。中国城市在全球科研知识合作网络中的发展路径与中国经济地理演进的历史轨迹和发展趋势基本吻合；③城市在全球科研合作网络中的演化表现出自我强化的“马太效应”，这与知识生产的“空间依赖”特征和知识合作的“偏好依附”规律紧密相关。

**关键词** 全球创新中心；全球城市科研合作网络；演化特征；中国城市

中图分类号 TU984 文献标识码 A  
DOI 10.16361/j.upf.202105004  
文章编号 1000-3363(2021)05-0023-09

## 作者简介

曹 湛，同济大学建筑与城市规划学院，博士后，1989caozhan@tongji.edu.cn  
彭震伟，同济大学建筑与城市规划学院，高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室，教授，博导，通讯作者，pengzhiw@tongji.edu.cn

Rising Global Innovative Centers: The Evolution of Chinese Cities in Global Interurban Scientific Collaboration Networks

CAO Zhan, PENG Zhenwei

**Abstract:** A city's positioning in the global scientific collaboration network is a direct reflection of its hub function and control power in the global scientific landscape. The study analyses the development trajectories and geographical processes of the global interurban scientific collaboration networks (GISCNs) for two periods of 2002—2006 and 2014—2018 among 526 major cities (including 44 major Chinese cities) based on co-published data from the Web of Science with a particular focus on the changing paths and spatial features of Chinese cities. We draw the following conclusions: ① The gravity of global interurban scientific collaboration network has shifted from the Europe-North America duopoly towards Asia-Pacific in general and the rise of China is particularly visible. Most Chinese cities have witnessed significant connectivity gain in the network, but only a few can qualify as top global innovative centers with stronger network dominance; ② The wholesale rise in connectivity of Chinese cities is nonetheless geographically uneven, as cities along the east coast and the Yangtze River and those within the central plain have gained more significantly than cities in other parts of China. The changing positioning of the Chinese cities in the network are broadly in line with the historical trajectories and development trends of the Chinese economic geography; ③ The evolution of cities in the GISCNs exhibits a identifiable self-reinforcing "Matthew Effect", which can be attributable to the "space-dependent" feature of knowledge production and the "preferential attachment" mechanism in knowledge collaboration.

**Keywords:** global innovative centers; global interurban scientific collaboration networks; evolution patterns; Chinese cities

随着“知识经济”时代的到来，国家经济的持续增长和竞争力的提升已经由禀赋要素驱动（劳动力、资本投入和基础设施）向创新要素驱动（科学技术、智力人才和创新环境）转变（Cooke P, 2001）。集聚创新要素、提升创新水平、抢占和引领科技前沿已经成为国家实现可持续发展、维持并提升国际竞争力的出发点和落脚点（刘承良，等，2017）。科学研究是创新的重要组成部分。当代科学研究表现出愈来愈显著的系统复杂性、越来越广泛的学科交叉性、以及前所未有的高风险性和高投入性（Simon-ton D K, 2013）。许多前沿科学领域中所取得的突破性成果往往来自很多不同国家科研

团队的通力合作。“科学全球化”的趋势日益凸显，全球科研合作的广度与深度不断加强。合著论文是科研合作的重要表现形式。2019年的“Nature Index”报告显示，在2000—2018年间，参与全球科技论文合作的国家从174个增加至200个，跨国合作论文总数占全球科技论文总产出的比例从10.7%升至21.3%<sup>①</sup>。在“科学全球化”的进程中，全球科学地理版图逐渐从“欧洲—北美”双极结构向“欧洲—北美—亚太”三足鼎立格局演进（刘承良，等，2017）。其中，中国的快速崛起令人瞩目——根据Web of Science的三大科技论文索引数据（SCI，SSCI和A&HCI），2020年，中国科技论文总产出达1 013 039篇，位列世界第一，比第二位的美国多185 072篇。自改革开放以来，大力发展科学研究、构建现代化的科研体系、增强自主创新能力被作为国家迈向现代化、实现民族复兴的重要战略之一（张永凯，2019）。

城市是创新的发动机，为创新提供了必要的空间场所和人力资本、专业化与多样化、创新环境与政策保障（Duranton G, Puga D, 2001; Florid R, 等，2017）。当前，城市在国家创新体系中的重要性不断提升，成为国家参与全球创新竞争与协作的重要空间形式和地域单元（桂钦昌，等，2021）。打造具有世界影响力的“全球创新中心”也成为各国应对新一轮科技革命浪潮、争夺科技竞争先机的重要抓手（杜德斌，等，2015）。“全球创新中心”是指创新资源密集、科学研究和科技研发活动集中、科技成果溢出效应强大，从而在全球创新网络中发挥显著门户功能、枢纽作用和支配能力的城市（杜德斌，等，2015）。作为亚洲最大的发展中国家，中国经济在过去40年间一直保持高速增长，成为世界第二大经济体。经济实力的增强，为中国在全球科技创新版图中的快速崛起奠定了坚实的基础。当前，中国已经具备了孕育全球创新中心所需的资源深度和市场广度。上海、北京、广州和深圳等城市相继提出建设“全球创新中心”的战略目标，并制定了相应的规划指引和行动纲领。

需要强调的是，一个城市的科学知

识本底和创新资源是有限的，在越来越激烈的全球科学竞争中，不断地更新城市自身既有知识是实现持续增长的必然选择（陆天赞，等，2016）。嵌入全球城市科研合作网络、占据网络核心位置是城市摆脱锁定陷阱的有效途径（Bathelt H, 等，2004）。在这一过程中，不同城市之间由科研合作活动连接起来，形成“城市科研合作网络”，不同的科学知识在城市科研合作网络中集聚、溢出、交织与组合。一个城市在科研合作网络中拥有的合作连接越多，说明该城市集聚和吸引创新资源的能力越强，也在很大程度上说明其所拥有的知识是核心科技、科学前沿或研究热点。城市在全球科研合作网络中的地位能级可以反映城市在全球科学版图中的门户作用和支配能力。当前，已有研究大多关注城市创新的“属性特征”，如科研机构总量、科研人员总数、产出总量、创新环境与政策等，比较具有代表性的是澳大利亚智库“2thinknow”的全球创新城市指数（Innovation Cities™ Index）、麦肯锡公司的全球创新热图（McKinsey Innovation Heat Map）。相比之下，以“网络特征”为着眼点，考察城市在全球创新网络中作用和地位的研究相对较少。Matthiessen R及其团队基于Web of Science（WoS）合著论文数据研究了全球城市科研合作网络的空间结构、等级体系和时空演化，但其所选城市样本和空间覆盖范围以欧美为主，难以全面地刻画全球创新版图以及新兴经济体的快速涌现（Matthiessen R, Schwarz A W, 2006; Matthiessen R, 等，2010）。桂钦昌等（2021）利用WoS数据建构并分析了全球范围内900多个城市构成的科研合作网络，并进一步探讨了多维邻近性对网络结构的影响作用。他们的分析侧重于全球科研合作网络的地理结构，但并未聚焦中国城市进行特定分析，同时也仅探讨了网络的静态结构。

另一个与本研究密切相关的议题是“全球城市”（global city）与“世界城市网络”（world city network），它们是描绘和解释全球化经济格局及地理过程的重要实证范式（李涛，等，2017）。全球化与世界城市研究小组（Globalization and World City Network, GaWC）基于高端生产性服务业的系列实证是该领域的经典

研究之一（Taylor P J, Derudder B, 2015; 唐子来，等，2016）。他们利用高端生产性服务业公司的全球布局网络描绘全球城市在全球资本服务和资本控制格局中的演进路径和地理特征。在其最新研究中，Derudder B等（2020）指出，21世纪的全球化由三大过程共构而成，包括“扩张的全球化”（extensive globalization）“加深的全球化”（intensive globalization）和“中国全球化”（Chinese globalization），并尤其强调了中国城市在全球资本服务网络中的快速崛起。可以类推，理解“科学全球化”背景下的全球科学地理版图以及中国的发展路径亦可以从全球城市及其所组织的全球城市科研合作网络的角度展开。有鉴于此，本研究参照GaWC世界城市网络的系列研究，选取全球范围内526个主要城市（其中包含44个中国主要城市），并以WoS核心合集数据库的合著论文信息构建全球城市科研合作网络，分析2002—2006年和2014—2018年全球城市科研合作网络的演进路径，并重点关注中国城市的演化特征。此外，本研究也能拓展全球城市和世界城市网络研究的对象范畴，对进一步理解全球城市功能复合性以及世界城市网络复杂性有积极意义。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

合著论文是科研合作活动的重要表现形式。本研究利用合著论文中作者地址共现信息构造和分析全球城市科研合作网络的演化特征。科研合作伴随着知识的流动、交换与组合，不同的合作者之间在这一过程中形成了“科研合作网络”。相应地，若这些合作者位于不同的研究机构，那么这些研究机构间就构成了“机构间科研合作网络”；若这些机构位于不同的城市，那么这些城市间也就形成了“城市科研合作网络”。

首先，通过Python数据爬虫从WoS三大索引库（SCI-expanded、SSCI和A&HCI）批量获取论文数据，将研究机构的地址信息汇总至城市尺度，并筛选出包含2个及以上不同城市的论文。然后构建城市科技合作联系矩阵：若一篇科技论文由 $n$ 个不同的研究机构合作完

成,且这些机构位于 $n$ 个不同的城市,则该篇论文中存在 $n \times (n-1) / 2$ 次跨城合作,两两城市之间的合作连接强度为1。若一篇科技论文由 $n$ 个不同的机构合作完成,其中 $m$ 个机构位于同一城市( $m < n$ ),其它机构位于不同的城市,则该篇论文中存在 $(n-m+1) \times (n-m) / 2 + (n-m) \times (m-1)$ 次跨城合作,两两城市之间的合作连接强度为1(两个参与合作的机构分别位于两个不同的城市)或 $m$ (其中一个城市拥有 $m$ 个机构,另一个城市仅有1个机构)。以此类推,通过迭代计算和汇总叠加可构建所有城市之间的科研合作网络,最终形成 $526 \times 526$ 的城市科研合作网络矩阵(如图1所示)。由此,一个城市在网络中的网络连接度即为其在研究时段中所有跨城合作连接的总和,连接度越高的城市在网络中拥有更强的资源控制能力。

考虑到知识合作过程和论文发表之间存在“时间滞后”,可能导致年度数据波动,所以本研究选取2002—2006年和2014—2018年两个时间窗口,对原始数据进行5年加总处理。需要特别指出的是,本研究仅将英文科技论文纳入分析,主要出于以下考虑:其一、进行全球范围科研网络的比较研究需要建立在统一的参照标度之上,英文作为使用最为广泛的科学用语是跨越语言障碍和文化差异、实现和维系跨国科研合作的重要连接桥梁,对“科学全球化”的推进发展有重要的支撑作用;其二,科技论文被WoS三大论文索引库收录一定程度上能说明研究成果具有更高的国际认可度、国际传播性和认知广泛性,能够避免某些研究成果因为过于根植本地语境而对城市在全球网络中的连接度造成高估。

城市的选择参照GaWC关于世界城

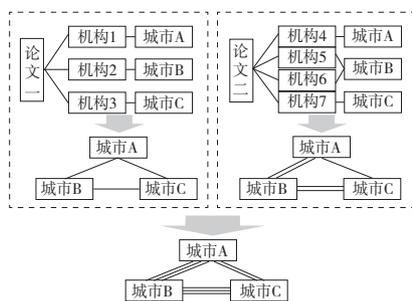


图1 城市科研合作网络构建示意图

Fig.1 Toy model for construction of the interurban scientific collaboration network

资料来源:作者绘制。

市网络的系列研究,将全球范围内526个主要城市作为基本单元构建全球城市科研合作网络。通过WoS数据库检索,在2002—2006年,全球共产出科技论文6 331 122篇,本研究所选的526个城市共产出4 170 530篇,占比65.87%;2014—2018年,全球共产出科技论文70 129 349篇,526个城市共产出54 834 137篇,占比升至78.19%,说明这些城市是全球科学知识产出的主导力量,很大程度上能够反映全球科学版图。在构建全球科研合作网络的过程中,跨国合作连接和国内合作连接均纳入计算分析,因为解释城市在全球科研合作网络中的地位和功能需要将其置于其所在的国家科技创新体系之中。

## 1.2 研究方法

在本研究中,主要利用城市在全球科研合作网络中的“网络连接度”(network connectivity,以下简称“连接度”)来测度城市在网络中的重要性。一个城市的连接度为其在研究时段中所有跨城合作连接数量的总和。为了便于比较,城市的网络连接度做百分制处理,即用城市的连接度除以网络中的最大连接度。由此,城市的连接度的分布从0%(无合作连接)到100%(最大网络连接)。

为了考察城市连接度在两个时间段的变化,本研究借鉴Derudder B等(2010)的研究,采用“标准化连接度变化”(standardized network connectivity change, SNCC,以下简称“标准化变化”)进行连接度变化的测度。采用该方法可以有效解决计算过程中的“饱和偏差”(saturation bias)。例如,两个时间段连接度均为100%的城市,其绝对连接度变化为0%,显然不合乎常理。标准化变化的测度方法是基于“Z值标准化”的逻辑计算单个城市对于所有城市连接度的相对连接度变化,能够有效规避“饱和偏差”问题。具体操作过程如下:首先,分别对城市在两个时间段的连接度(network connectivity, NC)进行Z值

标准化处理(公式1):

$$SNCCa = \frac{n \cdot NCa - \sum_i NCi}{\sqrt{n \cdot \sum_i \left[ NCi - \frac{1}{n} \sum_i (NCi) \right]^2}} \quad (1)$$

通过这一处理,可以获得城市在两个时间段的标准化连接度(standardized network connectivity, SNC)。然后,将这两个时间段的标准化连接度进行相减,并再次进行Z值标准化获得“标准化变化”(standardized network connectivity change, SNCC)(公式2)。

通过两次标准化迭代计算所得的标准化变化可以理解为城市相对连接度变化的回归残差。若值为正,则说明城市在研究时段内连接度的增长超出所有城市连接度的总体回归预期,增长较快;若值接近于0,则说明城市连接度的变化与所有城市整体预期变化趋于一致。需要强调的是,若值为负,并不一定代表城市的连接度有减少,而很大程度上可能是其连接度增长低于总体回归预期,即增长速度相对其它城市偏缓。

## 2 研究结果

### 2.1 全球城市网络连接度的变化与中国城市的崛起

#### 2.1.1 城市网络连接度的空间分布格局

图2和图3为全球城市连接度的空间分布,图中只选取了连接度大于10%的城市,颜色越深表明连接度越高,越浅表明连接度越低。尽管选择10%的阈值存在一定程度的主观性,但筛选结果基本囊括了全球各板块的主要城市,能较为完整地反映全球城市科研合作网络的地理格局。此外,研究也尝试了采用20%、15%和5%的筛选阈值,其可视化效果均不如使用10%的筛选阈值。

从图2和图3中不难看出,科研合作在已经呈现出相当程度的全球化特征,但这种全球化的空间分布并非均质。在全球尺度上,位于“全球北方”(Global North)的城市在网络中的连接度普遍高于位于“全球南方”(Global South)的城

$$SNCCa = \frac{n \cdot [SNCCi(2014-2018) - SNCCi(2002-2006)] - \sum_i [SNCCi(2014-2018) - SNCCi(2002-2006)]}{\sqrt{n \cdot \sum_i \left\{ [SNCCi(2014-2018) - SNCCi(2002-2006)] - \frac{1}{n} \sum_i [SNCCi(2014-2018) - SNCCi(2002-2006)] \right\}^2}} \quad (2)$$

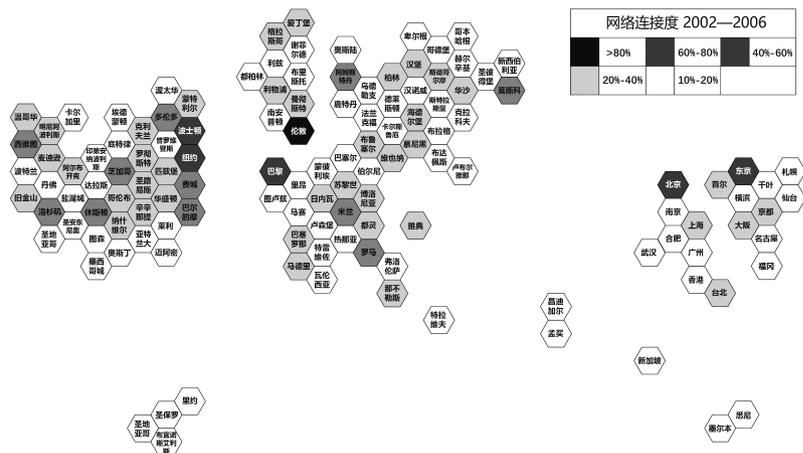


图2 全球城市连接度的空间分布格局 (2002—2006年)  
Fig.2 The spatial configuration of urban network connectivity (2002—2006)  
资料来源：作者绘制。

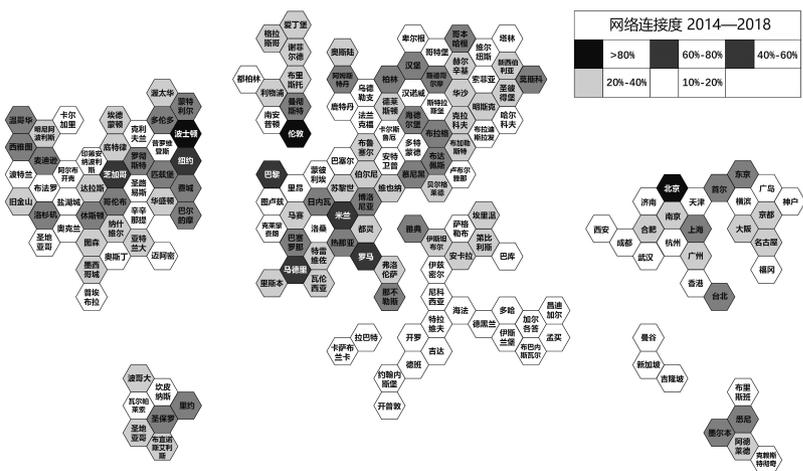


图3 全球城市连接度的空间分布格局 (2014—2018年)  
Fig.3 The spatial configuration of urban network connectivity (2014—2018)  
资料来源：作者绘制。

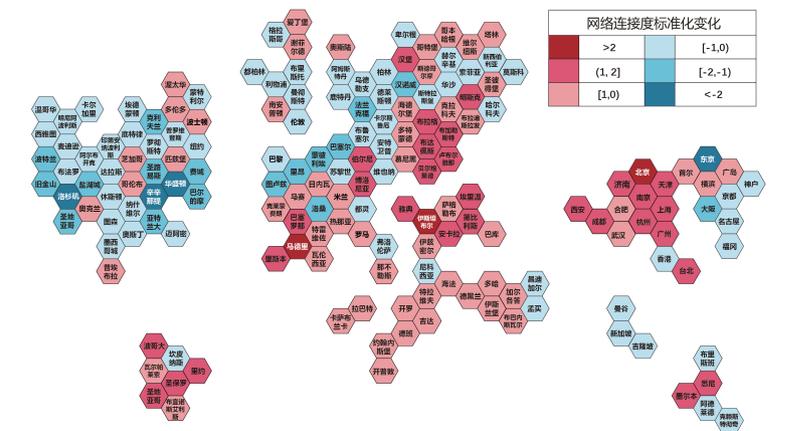


图4 全球城市连接度的标准化变化分布格局  
Fig.4 The standardized changes of urban network connectivity  
资料来源：作者绘制。

但合作强度较高的城市主要集中在三大核心地区——欧洲、北美以及亚太地区，总体呈现出“全球分散，地区集聚”的空间格局。在2002—2006年，这三个地区的连接度高于10%的城市数量分别达到61个、41个和20个，占比共计达到93.8%；在全球南方，仅有6个城市的连接度高于10%。到2014—2018年，连接度高于10%的城市增加了43个，而三大核心区域城市的总占比降至72.1%。尽管如此，全球科研合作网络的“南—北”分化和“东—西”差距并未发生结构性改变，而是呈现出相当显著的“空间依赖”演化特征。

### 2.1.2 城市网络连接度标准化变化

图4为全球科研合作网络中城市连接度的标准化变化。不难看出，全球城市的连接度总体上呈现出“南”与“北”“西”与“东”此消彼长的演化格局，即全球知识合作网络的重心有整体南移和东移的趋势。值得关注的是中国城市的整体崛起，其中北京的连接度提升幅度最为显著，位列所有城市之首。上海、广州、南京、济南、天津等主要国家中心城市的连接度也均有较大幅度的提升。表1列出了44个中国城市的标准化变化，几乎所有城市的标准化变化值都为正，说明它们连接度的增长均高于全球平均水平，反映出中国城市在全球科研合作网络中的快速崛起势头。然而，值得注意的是，香港的标准化变化为负，说明其增长速度显著低于大陆城市。这可能是因为“一国两制”体系之下，香港的科技发展相对独立。特殊的殖民历史以及其与英联邦国家的密切科研合作关系使得香港与大陆城市的科技发展节奏并不完全一致。

虽然这些中国城市在全球城市科研合作网络中表现出强劲的增长势头，但大多还无法与世界级创新中心相匹敌。表2列出了全球城市科研合作网络中连接度排名前25的城市，这些城市可以谓之具有世界影响力的“全球创新中心”。首先，两个研究时段内，这些城市虽然在排名上“此消彼长”，但大部分城市在榜单中保持稳定，仅有少数城市发生更替。另一个比较明显的特征是欧美城市的“垄断”，其中美国城市占据了25强榜单的一半以上，其余城市大部分来自

市；同时，传统西方强国的城市在网络中的连接度也普遍高于东方发展中国家

或欠发达国家的城市。虽然城市知识合作网络的空间覆盖广度已在全球延伸，

表1 中国城市标准化变化

Tab.1 Standardized connectivity changes of Chinese cities

排名	城市	标准化变化	排名	城市	标准化变化
1	北京	2.18	23	南昌	0.37
2	上海	1.99	24	长春	0.36
3	广州	1.98	25	兰州	0.36
4	南京	1.94	26	福州	0.26
5	济南	1.94	27	厦门	0.26
6	台北	1.78	28	石家庄	0.26
7	天津	1.68	29	贵阳	0.24
8	成都	1.57	30	海口	0.24
9	西安	1.47	31	基隆	0.20
10	杭州	1.36	32	乌鲁木齐	0.20
11	合肥	0.88	33	新竹	0.20
12	武汉	0.81	34	呼和浩特	0.17
13	深圳	0.77	35	昆明	0.17
14	苏州	0.76	36	台中	0.16
15	重庆	0.69	37	西宁	0.16
16	宁波	0.67	38	银川	0.16
17	长沙	0.59	39	高雄	0.15
18	青岛	0.59	40	南宁	0.15
19	郑州	0.59	41	沈阳	0.10
20	哈尔滨	0.58	42	拉萨	0.10
21	大连	0.49	43	澳门	0.10
22	太原	0.49	44	香港	-0.01

资料来源:作者根据WoS数据计算得出。

表2 全球城市科研合作网络中连接度排名前25的城市

Tab.2 The 25 most connected cities in the global interurban knowledge collaboration networks

排名	城市	连接度 2002— 2006年	城市	连接度 2014— 2018年
1	伦敦	100.00	伦敦	100.00
2	纽约	77.76	北京	87.52
3	波士顿	74.16	波士顿	82.22
4	东京	69.20	纽约	79.91
5	巴黎	68.40	巴黎	69.16
6	北京	62.77	芝加哥	56.39
7	洛杉矶	56.45	罗马	53.42
8	巴尔的摩	52.15	马德里	53.36
9	费城	51.83	米兰	52.21
10	芝加哥	48.76	巴塞罗那	48.38
11	休斯顿	44.83	多伦多	47.60
12	罗马	44.82	东京	46.13
13	莫斯科	43.06	巴尔的摩	44.99
14	西雅图	42.32	费城	44.93
15	多伦多	41.13	洛杉矶	44.79
16	米兰	40.70	西雅图	44.51
17	阿姆斯特丹	40.26	阿姆斯特丹	44.49
18	蒙特利尔	38.50	莫斯科	43.69
19	匹兹堡	35.78	休斯顿	42.99
20	柏林	35.37	匹兹堡	41.70
21	亚特兰大	34.15	日内瓦	41.35
22	罗彻斯特	33.47	上海	39.41
23	华盛顿	33.20	哥伦布市	39.38
24	旧金山	31.74	雅典	39.13
25	巴塞罗那	31.11	圣保罗	38.84

资料来源:作者根据WoS数据计算得出。

欧洲传统强国以及北美的加拿大,这些城市在知识创新方面都具有世界领先水

准。除欧美城市外,2002—2006年,仅有北京和东京来自亚洲。2014—2018年,上海也跻身榜单。北京的连接度从2002—2006年的第6名升至2014—2018年的第2名。北京跻身顶级全球创新中的势头并不令人惊讶。作为中国首都城市,北京拥有雄厚的科学技术基础、完善的教育科研设施和充足的人力财力投入。例如,北京的“双一流”建设高校数量达34所,占全国总数的24.8%。同时,北京也拥有许多国家顶尖的公共科研机构,如中国科学院、中国社科院和中国工程院等。根据Web of Science数据,2018年,中科院及中科院大学的科技论文产出总量为71 069篇,分别占到中国和全球科技论文总数的13.70%和1.56%,不仅是在中国范围内产量最高的机构,也是全球范围内产量最高的机构。除此之外,北京也是中国科学体系的控制中心和支配中心,许多科学政策制定和科学资源配置的国家级行政和财政部门也大多位于此,因而北京一直以来都是国家科技战略聚焦的中心,享有相当的政策支撑红利和资源优先配置。北京在全球城市科研合作网络中的主导地位反映出“自上而下”的行政体制在塑造国家科学体系过程中的重要作用。

上海在全球城市科研合作网络中的快速提升也令人瞩目。2002—2006年,上海连接度的全球排名为50名,2014—2018年上升至22名。上海的经济水平领先全国,拥有较好的科技本底,其网络连接度的快速提升很大程度上是因为上海率先抓住了改革开放进程中的国际化发展先机。上海领先的国际化程度和对外开放的先行政策,使其具备了成为全球科技创新中心的先天优势(杜德斌,2015)。自改革开放以来,上海一直都是引进国外资本和技术的先行者,在创新基础设施和创新环境培育方面也走在全国前列(郑德高,等,2020)。除了投资,越来越多的国外高新技术企业开始在上海设立海外研发机构。据统计,2018年,上海认定的外资研发中心已超过400家,其中世界500强企业在沪设立的研发机构超过150家。上海吸引了全国外资机构和世界500强企业所设研发机构的1/4和1/3。在外部知识的溢出效应和辐射作用下,上海本土科技和自主

创新水平获得较快提升(卢柯,等,2015)。

除此之外,在2014—2018年,连接度排名跻身全球前50的城市还有台北(31名)和南京(47名)。由于台海长期存在的政治问题,台北的科技发展独立于大陆城市,先于大陆抓住了发达国家向发展中国家产业和技术转移的机会,建立了在东亚具有优势的科技地位。南京在经济体量和人口规模方面远不及上海和北京,也落后于许多其它国内一线城市,但仍具有高的连接度,表现出“全球创新中心”的发展潜力。南京的高等教育和科技发展具有悠久的历史。南京自古以来就是一座崇文重教的城市,有“天下文枢”和“东南第一学”的美誉。同时,南京也是中国现代高等教育的发源地,清末洋务运动时期,清政府在南京开办江南实业学堂、江南武备学堂、江南陆师学堂、江南水师学堂、金陵工艺大学堂等新式学堂。这些历史积淀为南京的科技发展奠定了基础。现今,南京所拥有的高等学府和公共科研机构总数位列全国第三,2020年科技论文和专利总数也排名第三,仅次于北京和上海。

## 2.2 国家范围内城市网络连接度的空间演变

### 2.2.1 城市网络连接度的空间分布格局

表3列出了连接度排名前25的中国城市。从表3可以看出,中国城市的连接度分布呈现出显著的“无标度性”(scale-free property)<sup>②</sup>,即北京的连接度远高于国内其他城市。2002—2006年,中国城市连接度分布的基尼系数为0.89;2014—2018年,基尼系数为0.85,虽然这种极化分布有所趋缓,但仍旧相当显著。这种“无标度性”特征也反映出城市科研合作网络演化过程中的“偏好依附”(preferential attachment)机制:在科技合作的微观过程中,网络中的创新主体往往倾向于与那些已经具有较高威望或较高连接性的个体建立合作关系,以最小的成本获取最大的收益(Wagner C S,等,2005)。这一微观过程的不断累积使得网络中少数城市拥有大量的合作连接,而其余的大部分城市仅拥有很少的合作连接。

表3 连接度排名前25的中国城市  
Tab.3 25 most connected Chinese cities

排名	城市	连接度 2002—2006年	城市	连接度 2014—2018年
1	北京	62.77	北京	87.52
2	台北	21.81	上海	39.41
3	上海	21.58	台北	36.71
4	香港	14.54	南京	29.92
5	合肥	12.51	广州	29.11
6	南京	11.30	合肥	20.86
7	武汉	10.24	香港	18.89
8	广州	7.67	武汉	18.40
9	杭州	7.05	济南	17.40
10	新竹	6.97	杭州	12.09
11	天津	6.11	成都	10.91
12	高雄	5.89	西安	10.05
13	沈阳	5.77	天津	9.79
14	成都	5.61	新竹	8.42
15	西安	5.43	长沙	8.04
16	台中	4.73	深圳	6.93
17	兰州	4.51	重庆	6.35
18	长春	4.48	长春	6.18
19	长沙	4.30	沈阳	6.05
20	济南	4.10	兰州	5.87
21	大连	3.47	哈尔滨	5.86
22	哈尔滨	3.32	台中	5.59
23	昆明	2.77	苏州	5.31
24	青岛	2.53	青岛	5.19
25	重庆	2.33	大连	4.70

资料来源：根据 WoS 数据计算得出。

图5和图6为连接度大于1%的中国城市空间分布格局。不难看出，2002—2006年，具有较高连接度的城市主要分布在东部沿海的三大城市群：长三角城市群、京津冀城市群和粤港澳大湾区城市群。这一结果并不令人惊讶，这三大城市群不仅拥有相对较好的经济基础、较强的科技本底以及区位优势，同时也是享受改革开放红利、接收国外先进科学技术、参与国际科技合作的先行地。经历了从“学习积累”到“自主创新”的过渡转变，这些城市群已经从“学习者”向“引领者”逐渐转型升级。

除了三大城市群外，一些东北地区城市也表现出较高的连接度，如长春、沈阳和哈尔滨。由于日伪时期的工业开发政策、新中国成立初期与前苏联毗邻的地缘条件以及其自身的工业原材料优势，很早就奠定了东北作为当时中国重工业中心的地位。这些城市一度是抗战时期到新中国早期重要的工业基地，拥有相当的科技积淀和基础。虽然这些城市的科学、工业和技术优势在改革开放以后逐渐式微，但仍然在科研合作网络中维持了较高的连接度。此外，西部的

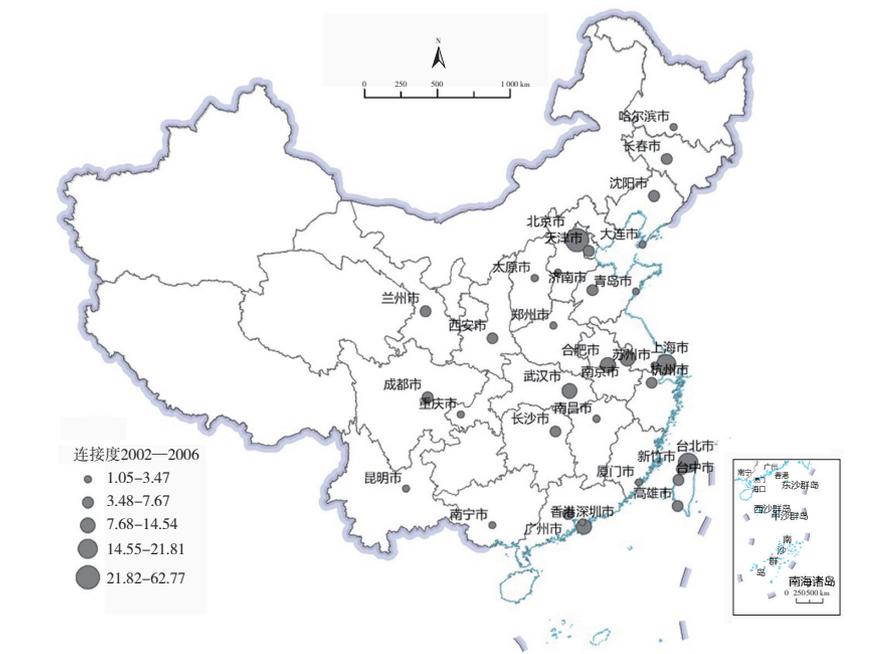


图5 中国城市连接度的空间分布格局（2002—2006年）

Fig.5 The spatial configuration of network connectivity of Chinese cities (2002—2006)

注：此图基于国家自然资源部地图技术审查中心标准地图服务网站的标准地图（GS（2019）1823号）绘制，底图无修改。  
资料来源：作者绘制。

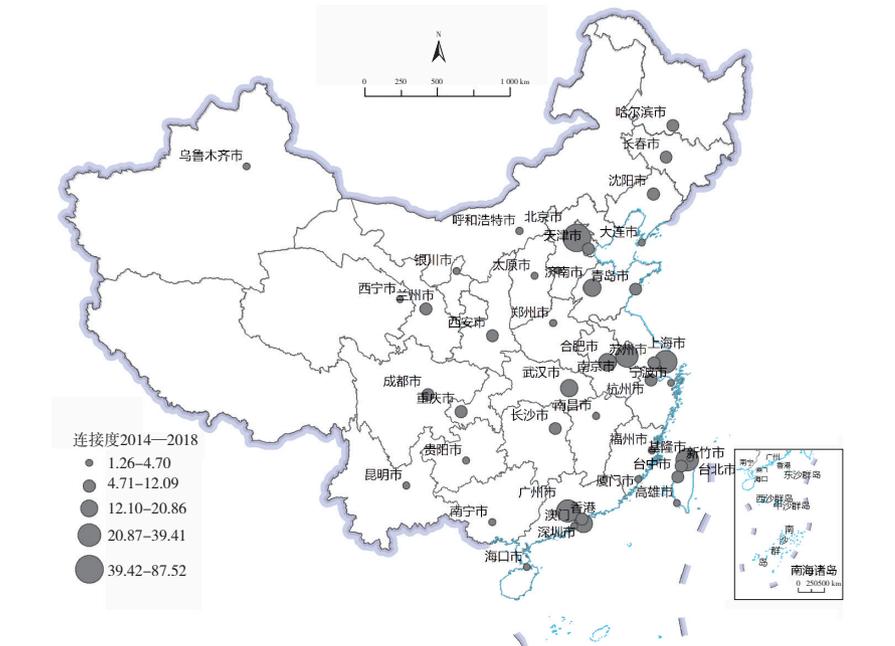


图6 中国城市连接度的空间分布格局（2014—2018年）

Fig.6 The spatial configuration of network connectivity of Chinese cities (2014—2018)

注：此图基于国家自然资源部地图技术审查中心标准地图服务网站的标准地图（GS（2019）1823号）绘制，底图无修改。  
资料来源：作者绘制。

重庆、西安和兰州也表现出较高的连接度，尽管这些城市并不具备区位优势，且未享受改革开放的第一波发展先机，但它们在新中国工业化初期都曾重要

的工业城市和科技中心。1964年起，随着与前苏联关系日趋恶化以及美国在中国东南沿海的持续军事施压，中国政府被迫采取“三线建设”策略以避免发生

潜在的战争冲突。在这一时期,许多国家关键科研机构、重点工业和高科技行业都被大规模地转移至西部地区,尤其是与军事相关的科技领域。至今,这些西部城市仍在某些方面,如汽车制造、核工业以及航天工业等领域具有相当的优势,因此也保持了较高的连接度。

2014—2018年,所有城市的连接度都有显著的提升,且位于边缘地区的城市在科研合作网络中逐渐涌现,但其总体地理格局并未发生结构性变化,呈现出稳定的自我强化发展特征,这与全球尺度下城市连接度的地理演进特征类似,再次反映出科研合作网络演化的“空间依赖”规律。这种连续的、渐进的和稳定的空间演进与知识组合再构的地理过程是一致的。知识具有“空间粘性”和“专属性”,不同地方拥有不同的专业化知识(Heimeriks G,等,2013)。在跨地域合作的过程中,既有知识的组合和新知识的产生并不是随机的,不同知识之间只有以特定方式进行再构才能产生有效的创新。这些微观过程的累加使得知识合作网络的宏观空间形制和拓扑特征表现出相当的稳定性和渐进性(Phelps C,等,2012)。

### 2.2.2 城市网络连接度标准化变化

虽然几乎所有中国城市的连接度均有显著提升,但并不意味着这些城市融入全球城市科研合作网络的深度和节奏是完全一样的。因此,本研究将44个中国城市从526个全球城市中单独提取成组,并计算其组内标准化变化。如图7所示,很明显可以看出位于东部沿海三大城市群和部分长江沿线的城市标准化变化值大多为正且值较高,说明它们的连接度与全国平均相比增长速度更快。对于东部沿海城市而言,前文分析中已经提过,它们的科技基础较为雄厚,加之知识生产过程中的“空间依赖”特性以及科研合作网络演化过程中的“偏好依附”机制,使得这些区域的城市在科技合作网络中表现出显著的“马太效应”。然而,位于京津冀城市群的石家庄却是一个例外:尽管石家庄也是京津冀城市群最为主要的核心城市之一,但其标准化变化为负。这一结果说明,虽然北京是全国范围内连接度最高的城市,但对其周边城市的知识溢出和辐射带动作用比较有限,

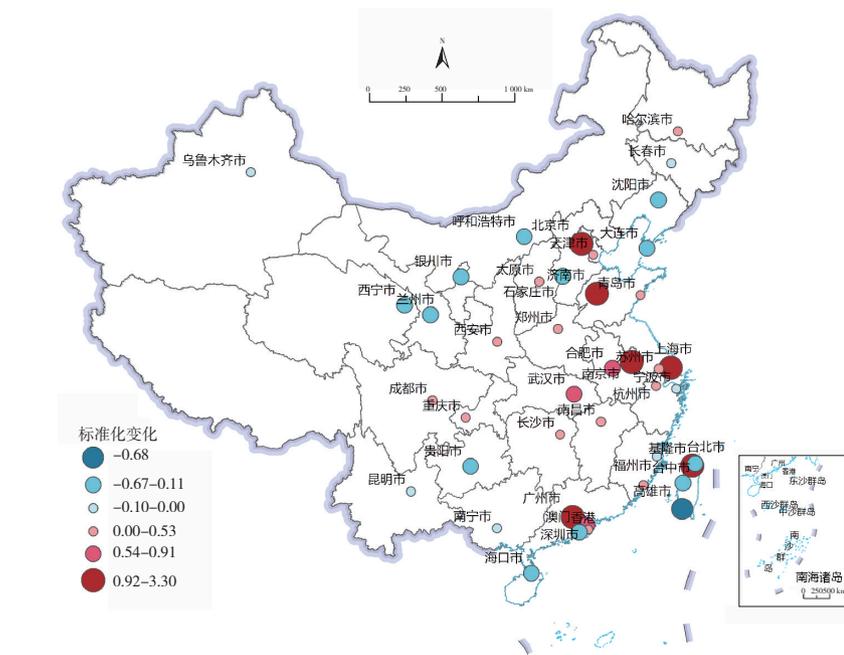


图7 中国城市连接度标准化变化分布格局

(基于中国城市连接度组内标准化变化计算得出)

Fig.7 The standardized network connectivity change of Chinese cities

注:此图基于国家自然资源部地图技术审查中心标准地图服务网站的标准地图(GS(2019)1823号)绘制,底图无修改。

甚至给周边城市带来了“集聚阴影”,形成了对周边城市创新资源的“虹吸效应”(陈玉,孙斌栋,2017)。

同时,位于长江中游和下游的城市也表现出较高的连接度增速,如武汉、长沙、合肥、成都和重庆。虽然这些城市未能取得改革开放早期的先发优势,但是它们在近年来一些系列国家再平衡战略中获得了新的发展契机,如“西部大开发”战略和“中部崛起”战略等。2016年9月,《长江经济带发展规划纲要》正式印发。该规划以长江黄金水道为依托,不仅强调推动区域经济由沿海溯江而上梯度发展,也强调自东向西的科技转移和溢出效应。在一系列优惠政策投放和资金定向投入的过程中,一批城市在某些新兴科技领域取得了显著的突破并具备了国内乃至国际先进水平,如武汉的光电科学、成都的电子信息科学等。

此外,郑州、西安和太原的连接度增速也较高。这些城市与沿海沿江城市相比所获得的国家级政策和资源倾斜较少,但也是国家级中心城市。这些城市地处中原,便捷发达的交通网络,及其与沿江沿海城市的地理邻近性,使得它们能更容易地从发达地区的辐射作用和

溢出效应中获益。

其余城市大多位于边缘区域,它们标准化变化值基本上为负,说明其网络连接度的增长相对比较缓慢。这些城市本身不具备良好的区位优势,经济发展水平也相对滞后,对科技资源的吸引和集聚能力也较弱,因此在网络中的增长势头相对较缓。最后,除了台北以外,其它台湾省城市的标准化变化均为负,说明连接度增速较低。与大陆城市不同,这些台湾城市的科技发展并非“从零开始”,它们更早地获得了欧美国家的科技输入和援助,具有较好的科技本底。因此,与许多“从零开始”的大陆城市相比,台湾城市在科研合作网络中的增长边际空间更小,也因此连接度增速相对较缓。总体而言,中国城市在科研合作网络中的“梯度增长”格局与国家经济地理演进的历史轨迹和发展趋势高度吻合。

### 3 结论与讨论

“科学全球化”正在重塑世界经济地理和全球科学版图,推动科学知识在全球范围的流动。科研合作是实现知识扩

散、溢出和重组再构的关键途径。在“科学全球化”的进程中，全球科研合作网络的空间范围不断扩张、作用强度不断加深。“全球创新中心”是全球科研合作网络中的枢纽性节点，是创新资源和创新活动的集聚中心，也是科学知识生产和传播扩散的策源中心，在全球科研合作网络中占据核心位置（杜德斌，等，2015）。加快建设一批具有全球影响力的创新中心，既是我国建设世界科技强国的内在要求，也是实现创新驱动发展、实现民族伟大复兴的必由之路。

已有关于全球科技创新中心的讨论和评价大多关注城市的“属性特征”，较少关注城市的“网络特征”。借鉴全球城市和世界城市网络的实证范式，本研究以526个GaWC城市为对象，基于Web of Science合著科技论文数据构建了全球科研合作网络，分析城市在网络中的演化特征和地理过程，并重点关注中国城市的崛起路径。研究发现：①在全球尺度上，全球城市科研合作网络的空间格局逐渐从“欧洲—北美”双核结构向“欧洲—北美—亚太”三足鼎立结构演化，其中中国城市的快速涌现最为显著。除了香港之外，所有的中国城市在网络中的连接度都有明显增长。但是，在网络中具有绝对资源支配和控制能力的中国城市仍较少，仅有北京、上海、台北和南京的网络连接度跻身前50；②虽然中国城市的连接度有显著的整体提升，但是不同城市融入全球城市科研合作网络的速度和深度却存在较大差异。北京的网络连接度提升最快，东部沿海城市、长江流域沿线城市以及中原部分城市次之，其他位于国家边缘地区的城市则较慢。中国城市在全球科研合作网络中的发展路径与国家经济地理演进的历史轨迹和发展趋势基本吻合；③城市在全球科研合作网络中的演化表现出自我强化的“马太效应”，这与知识生产的“空间依赖”特征和知识合作的“偏好依附”规律紧密相关。

此外，本研究借鉴了全球城市和世界城市网络的实证框架，拓展了全球城市和世界城市网络研究的对象范畴，对进一步理解全球城市功能复合性以及世界城市网络复杂性有积极意义。与GaWC关于全球城市生产服务网络的结

果相对比不难发现，科研合作网络中的全球创新中心与高端生产性服务业网络中的全球生产服务中心既存在重叠也存在差异。伦敦、纽约、巴黎、北京和东京等城市在全球科研合作网络和全球高端生产服务网络中都具有相当高的控制力和影响力。然而，顶级全球生产服务中心比全球创新中心的地理分布更加广泛也更加分散。具体来讲，顶级全球创新中心大部分分布在北美、欧洲地区，在亚太地区也仅有北京和东京两个城市。对比而言，顶级全球生产服务中心则在全球主要地区均有分布，除北美、欧洲和亚太城市外，位于中东的迪拜、拉丁美洲的圣保罗和墨西哥城、南亚的新加坡和吉隆坡以及位于非洲的约翰内斯堡也跻身于顶级生产服务中心之列（Taylor P J, 等，2016）。

这种差异并不令人惊讶，因为科研合作网络和高端生产性服务业网络的组织逻辑和内生动力并不完全相同。对于前者来说，网络的建立是合作者之间知识交换的过程，伴随着异质性且高度专业化知识的融合，这些知识往往具有极强的空间专属性和空间粘性，其地理分布也因此具有显著的非均衡、非均质特征。也就是说，科研合作网络反映的是异质性知识在地理空间上组合、叠加和累积的过程，网络连接度越高的城市往往拥有更加雄厚的知识资本，也往往占据着某些科技领域的关键前沿，这些城市大多集中在传统科技强国。所以，顶级全球创新中心在全球范围内的地理分布更加不均衡。对于后者来讲，建立网络的过程是高端生产性服务业公司跟随全球生产网络扩张、抢占资本服务市场、实现全球战略布局并进行全球资源配置的主要途径，占领地区门户枢纽或战略节点是这类企业扩大市场范围、追逐利益最大化的基本逻辑（Taylor P J, Derudder B, 2015; 唐子来, 等, 2015）。因此，反映在地理分布模式上，全球生产性服务业网络中顶级城市空间分布跨度更广也更分散。这反映出全球城市的功能复合性和世界城市网络的结构复杂性。需要认识到，这些功能并非是排他的分离关系，而是互补耦合的，这种交织的多重功能网络也有助于提升城市发展过程中的整体韧性（Burger M J, 等, 2014）。

本研究从“科学创新”的视角再次证实了Derudder B等（2020）关于“中国全球化”的论断。然而，中国在全球经济以及科学版图中的快速涌现使得西方发达国家尤其是美国频频煽动所谓的“中国威胁论”。自中美“贸易战”以来，美国及其盟国在诸多科技领域对中国持续进行制裁，单方面破坏和切断与中国正常的科技合作与交流，同时推行“科技保护主义”。面对外部压力，中国开始探索“以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进”的新发展格局，并着重强调“自主创新”和突破“卡脖子”技术壁垒。不论是欧美的单边“科技制裁”和“科技保护主义”，还是中国“增强自身内生动力”的应对策略和反制策略都是当前“科技全球化”所面临的重大挑战，也是中国建设“全球创新中心”进程中所必须面对的挑战。面对未来国际环境的不确定性，中国城市能否维持和提升在全球城市科研合作网络中的地位不得而知。即便如此，建设“全球创新中心”必须在提升和强化自身科技实力的同时，继续坚持扩大开放，积极融入全球科研合作网络，参与全球竞争与协作，积极抢占网络核心地位。

本研究也存在不足和局限：其一，科技创新不仅包括科学研究，也包括技术研发。专利是技术研发的主要成果形式，未来可以利用合作专利数据开展相关研究，探讨中国城市在全球技术合作网络中的演变特征；其二，在本研究中，城市间的合作强度通过城市间合作次数加总得出，而未将合作模式差异、合作质量高低纳入网络构建过程之中。事实上，在任何一篇合著论文中，不同参与作者之间和合作深度和合作方式千差万变，不同的合作活动对文章的贡献并不完全一致。此外，科技论文发表在不同层次的期刊上也意味着其合作质量存在差别，高水平的论文往往意味着高质量的合作。在未来的研究中，可以加入作者排序、期刊影响因子、文章被引次数等权重因子，尽可能真实地模拟和反映科研合作网络的结构特征。

## 注释

① 资料来源：Nature Index. Connected world: patterns of international collabo -

ration captured by the nature index.2019.  
<https://www.natureindex.com/country-outputs/collaboration-graph>

- ② 无标度网络是节点度分布（近似）为幂律分布的网络模型。其中，大多数节点的度较小，而少数枢纽节点的度很大。

## 参考文献 (References)

- [1] BATHELT H, MALMBERG A, MASKELL P. Clusters and knowledge: local buzz, global pipelines and the process of knowledge creation[J]. *Progress in Human Geography*, 2004, 28(1): 31-56.
- [2] BURGER M J, KNAAP B V D, WALL R S. Polycentricity and the multiplexity of urban networks[J]. *European Planning Studies*, 2014, 22(4): 816-840.
- [3] 陈玉, 孙斌栋. 京津冀存在“集聚阴影”吗——大城市的区域经济影响[J]. *地理研究*, 2017(10): 1936-1946. (CHEN Yu, SUN Bindong. Does “agglomeration shadow” exist in Beijing-Tianjin-Hebei region? large cities’ impact on regional economic growth[J]. *Geographical Research*, 2017(10): 1936-1946.)
- [4] COOKE P. Regional innovation systems, clusters, and the knowledge economy[J]. *Industrial and Corporate Change*, 2001, 10(4): 945-974.
- [5] DERUDDER B, TAYLOR P J. Three globalizations shaping the twenty-first century: understanding the new world geography through its cities[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2020.
- [6] DERUDDER B, TAYLOR P J, NI P F, et al. Pathways of change: shifting connectivities in the world city network, 2000-2008[J]. *Urban Studies*, 2010, 47(9): 1861-1877.
- [7] 杜德斌, 段德忠. 全球科技创新中心的空间分布、发展类型及演化趋势[J]. *上海城市规划*, 2015(1): 76-81. (DU Debin, DUAN Dezhong. Spatial distribution, development type and evolution trend of global science and technology innovation center[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2015(1): 76-81.)
- [8] 杜德斌. 上海建设全球科技创新中心的战略思考[J]. *上海城市规划*, 2015(2): 17-20. (DU Debin. Strategic thinking for Shanghai’s development into a global S&T innovation center[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2015(2): 17-20.)
- [9] DURANTON G, PUGA D. Nursery cities: urban diversity, process innovation, and the life cycle of products[J]. *American Economic Review*, 2001, 91(5): 1454-1477.
- [10] FLORIDA R, ADLER P, MELLANDER C. The city as innovation machine[J]. *Regional Studies*, 2017, 51(1): 86-96.
- [11] 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 Qinchang, DU Debing, LIU Chengliang et al. Structural characteristics and influencing factors of the global inter-city knowledge flows network[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1320-1337.)
- [12] HEIMERIKS G, BOSCHMA R. The path and place dependent nature of scientific knowledge production in biotech 1986-2008[J]. *Journal of Economic Geography*, 2013, 14(2): 339-364.
- [13] 焦美琪, 杜德斌, 桂钦昌, 等. 全球城市技术合作网络的拓扑结构特征与空间格局[J]. *地理科学*, 2019, 39(10): 1546-1552. (JIAO Meiqi, DU Debin, GUI Qinchang, et al. The topology structure and spatial pattern of global city technical cooperation network[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(10): 1546-1552.)
- [14] 李涛, 程遥, 张伊娜, 等. 城市网络研究的理论、方法与实践[J]. *城市规划学刊*, 2017(6): 43-49. (LI Tao, CHENG Yao, ZHANG Yina, et al. Theories, methods and practice of city network analysis[J]. *Urban Planning Forum*, 2017(6): 43-49.)
- [15] 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(4): 737-752. (LIU Chengliang, GUI Qinchang, DUAN Dezhong, et al. Structural heterogeneity and proximity mechanism of global scientific collaboration network based on co-authored papers[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017(4): 737-752.)
- [16] 卢柯, 孙翹. 从全球趋势谈上海建设全球科技创新中心的空间布局与策略思考[J]. *上海城市规划*, 2015(2): 1-6. (LU Ke, SUN Qiao. Spatial layout and strategic thinking for the development of global science and technology innovation center in Shanghai: from the perspective of global trends[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2015(2): 1-6.)
- [17] 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创新合作关系的比较分析[J]. *城市规划学刊*, 2016(2): 35-44. (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[J]. *Urban Planning Forum*, 2016(2): 35-44.)
- [18] MATTHIESSEN C W, SCHWARZ A W. World cities of knowledge: research strength, networks and nodality[J]. *Journal of Knowledge Management*, 2006, 10(5): 14-25.
- [19] MATTHIESSEN C W, SCHWARZ A W, FIND S. World cities of scientific knowledge: systems, networks and potential dynamics. an analysis based on bibliometric indicators[J]. *Urban Studies*, 2010, 47(9): 1879-1897.
- [20] PHELPS C, HEIDL R, WADHWA A. Knowledge, networks, and knowledge networks: a review and research agenda[J]. *Journal of Management*, 2012, 38(4): 1115-1166.
- [21] SIMONTON D K. Scientific genius is extinct[J]. *Nature*, 2013, 493: 602.
- [22] 唐子来, 李黎, 李涛. 全球资本体系视角下的中国城市层级体系[J]. *城市规划学刊*, 2016(3): 11-20. (TANG Zilai, LI Can, LI Tao. Interpretation of China’s urban hierarchy from the perspective of global capital system[J]. *Urban Planning Forum*, 2016(3): 11-20.)
- [23] 唐子来, 李黎, 肖扬, 等. 世界经济格局和世界城市体系的关联分析[J]. *城市规划学刊*, 2015(1): 1-9. (TANG Zilai, LI Can, XIAO Yang, et al. An analysis of the linkage between the world economic pattern and the world urban system[J]. *Urban Planning Forum*, 2015(1): 1-9.)
- [24] TAYLOR P J, DERUDDER B. World city network: a global urban analysis[M]. London: Routledge, 2016.
- [25] WAGNER C S, LEYDESDORFF L. Network structure, self-organization, and the growth of international collaboration in science[J]. *Research Policy*, 2005, 34(10): 1608-1618.
- [26] 张永凯. 改革开放40年中国科技政策演变分析[J]. *中国科技论坛*, 2019(4): 1-7. (ZHANG Yongkai. Evolution of China’s science and technology policy since the reform and opening up[J]. *Forum on Science and Technology in China*, 2019(4): 1-7.)
- [27] 郑德高, 马璇, 李鹏飞, 张亢. 长三角创新走廊比较研究——基于4C评估框架的认知[J]. *城市规划学刊*, 2020(3): 88-95. (ZHENG Degao, MA Xuan, LI Pengfei, ZHANG Kang. A comparative study of innovation corridor in the Yangtze River Delta: cognition based on 4C theoretical framework[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(3): 88-95.)