

文章编号:1003-2053(2026)02-0346-13

扩容背景下金砖国家科技创新合作网络研究 ——结构演化与驱动因素

蒋自然¹, 吴悦¹, 张建珍¹, 杨修², 康志男²

(1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321004; 2. 中国科学技术交流中心, 北京 100045)

摘要:随着科技创新在全球竞争中的重要性上升,以金砖扩员为契机,深化金砖国家科技创新合作对重塑世界科技治理格局和提升“全球南方”国家话语权均具有重大而深远的意义。文章基于2000-2023年金砖国家论文合作数据,从动态演化视角,采用社会网络分析法和地理探测器,分析金砖科技创新合作网络的拓扑结构和中心性演化特征,考察各阶段多维邻近性及交互性对科技创新合作网络演化的影响方向和作用机理。结果表明:(1)研究期间,金砖科技创新合作网络规模扩大,主体间的合作联系逐渐增多,网络密度呈现先增长后缓慢下降并保持稳定的态势,创新网络内部存在紧密合作、集聚发展的趋势,重要的创新主体中心逐渐凸显,网络拓扑结构逐渐发育成熟,正处于随机网络向无标度网络演变的过渡期。(2)合作网络重要中心节点凸显,发挥重要影响力和辐射带动能力;同时关键中介节点排名较为稳定,起到中介桥梁的沟通作用。中国在金砖科技创新合作网络中处于领先带头的核心地位,具有较大的影响力。(3)多维邻近性各因子在网络中发挥不同程度的正向影响力,研发投入邻近性是研究时期内影响创新合作的主导因素,解释力最高;地理邻近性的影响程度随着时间推进逐渐降低并趋于平稳;不同邻近因子间存在双因子增强交互,具有不同程度的增强效应。

关键词:金砖国家;科技创新;合作网络;多维邻近性;地理探测器

中图分类号:F124.3;G321.5

文献标识码:A

当今世界百年之未有大变局加速演进,全球科技创新进入空前密集活跃期,新一轮科技革命和产业变革正在重构全球创新版图、重塑全球经济结构,大国创新实力正发生深刻变化,以金砖国家为代表的新兴经济体创新实力不断增强,正逐渐成为所在地区乃至全球创新发展的领跑者,冲击着以美国为首的全球现有架构。2024年1月,金砖国家正式扩员至10个成员,彰显金砖国家所代表的“全球南方”力量进一步提升。以金砖扩员为契机,深化金砖国家科技创新合作,不断推进“大金砖合作”,对于构建开放自由的科技合作生态,主动融入全球创新网络,催生更加包容、紧密的全球科技共同体,推动构建人类命运共同体均具有鲜明的时代价值。新成员的加入使科技创新合作网络呈现出更加复杂和多元的特征。一方面,新成员为合作带来了多样化的资源和视角,促进了知识和技术的交流;另一方

面,随着成员国数量的增加,合作网络的节点和连接变得更密集和复杂,这既提供了更多可能性,也对协调和管理提出了更高挑战。此外,影响金砖国家科技创新合作网络的因素也愈加多样,除了地理距离和经济实力,研发投入、制度和文化等因素的作用愈发关键。因此,以扩容后的金砖框架为研究对象,科学刻画其演化过程并深入阐释主要驱动因素,具有重要的理论和实践意义。

国内外学者从网络视角对科技创新合作进行了较多的研究,研究主要围绕以下几方面开展:(1)合作网络尺度选择方面。由于合作主体的多样性及合作覆盖的地理范围的区别,现有研究对科技创新合作网络尺度的选择主要包括国际尺度^[1]、国家尺度^[2]、区域尺度^[3]和省市尺度^[4]。国际和特定区域尺度,如全球尺度研究、“一带一路”等特殊划定的国际经济区研究,旨在揭示跨国知识流动和技术创

收稿日期:2024-12-16;修回日期:2025-02-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42571214);科技部国际合作司战略研究课题(2023ICP78)

作者简介:蒋自然(1983-),男,副教授,博士。吴悦(2001-),女,硕士研究生。张建珍(1980-),女,教授,博士。杨修(1988-),男,副研究员,博士,通讯作者,E-mail:yangxiu731@126.com。康志男(1993-),女,助理研究员,博士。

新合作的空间格局,从宏观视野探讨广域国际科技联系和全球创新格局,为各国在全球创新体系中的角色定位提供依据。国家、省市尺度以及国内特定区域,如长江经济带、科技园区等,聚焦于城市间科技合作,细化城际间的知识扩散和技术转移,探讨创新要素的溢出和集聚效应,为城市推动创新驱动发展战略提供具体策略方向。(2)合作效果测度方面。国内外学者基于文献计量方法^[5]、专利计量方法^[6]或转移数据计量方法^[7]等构建不同主体间的科技创新合作网络,合著论文数据反映了各主体间科技合作的基础研究成果,专利和专利转移数据分别代表了实际技术产出成果和流通效果,分别从基础、技术和应用测度科技创新合作效应;同时,社会网络分析方法被广泛应用于主体间的定量关系分析,陈欣在研究“一带一路”沿线国家科技合作时,运用网络规模、边数、密度等指标测度整体网络结构,并根据度数中心性、接近中心性、中介中心性表明网络中心性演化过程^[8],揭示合作的深度和广度以测度科技创新合作效果,衡量单个创新主体在合作网络中的地位和影响力演变。(3)驱动因素研究方面。多维邻近性视角作为理论框架在揭示网络形成和演化动力机制方面得到了广泛的关注,Boschma从地理邻近、认知邻近、制度邻近、社会邻近和组织邻近这五个方面对邻近性体系进行了明确划分^[9];地理邻近性有助于信息、知识等科技要素在合作主体之间的传递,但随着知识信息在全世界的溢出和普及,地理邻近性与创新合作网络的关系日益复杂化^[10],随着研究的不断深入,相关研究由单一地理邻近性向多维邻近性拓展^[11];Geldes等研究证明认知邻近性具有负向作用,过多的认知邻近会阻碍主体之间的交流合作^[12],杨大飞等学者在研究中证实知识邻近性与合作创新网络演化具有倒U型关系,在初创期具有显著促进作用,而在成长期和成熟期具有显著抑制作用^[11]。社会邻近性和组织邻近性对科技创新合作网络演化具有显著正向作用^[13]。在驱动因素研究方法的选取方面,现有研究一般采用负二项回归模型^[14]、Tobit回归模型^[14]、QAP回归分析^[15]、地理探测器^[16]等计量方法,以此为手段研究网络演化影响的相关机制。

为此,本研究从动态的演化视角,采用2000—2023年金砖国家合著SCI论文数据,分析科技创新合作网络的拓扑结构和空间特征,运用地理探测器方法考察各阶段多维邻近性及交互性对金砖国家科

技创新合作网络演化的影响方向和作用机理,揭示多个国家之间科技合作的总体特征及合作发展中的演化规律,为金砖国家在科技创新合作方面的政策制定和战略规划提供科学指导,也为我国在全球科技创新体系中的地位提升提供决策参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

本研究以扩员后的金砖成员国家为研究对象,包括中国、俄罗斯、巴西、印度、南非、沙特阿拉伯、埃及、阿联酋、伊朗、埃塞俄比亚在内的10个国家(图1);基于金砖国家合著论文数据,构建并解析科技创新合作网络。数据来源于Web of Science核心数据库,基于数据的可获得性,搜集时间范围设置为2000年1月1日—2023年12月31日,检索条件定义为10个金砖成员国中至少包含两个不同成员国的共同合著论文作者的地址(address),文档类型(document type)筛选为论文(article)、文献综述(review)、会议论文(proceedings paper)。通过对文献进行筛选,最终确定相关文献848934篇。

1.2 研究方法

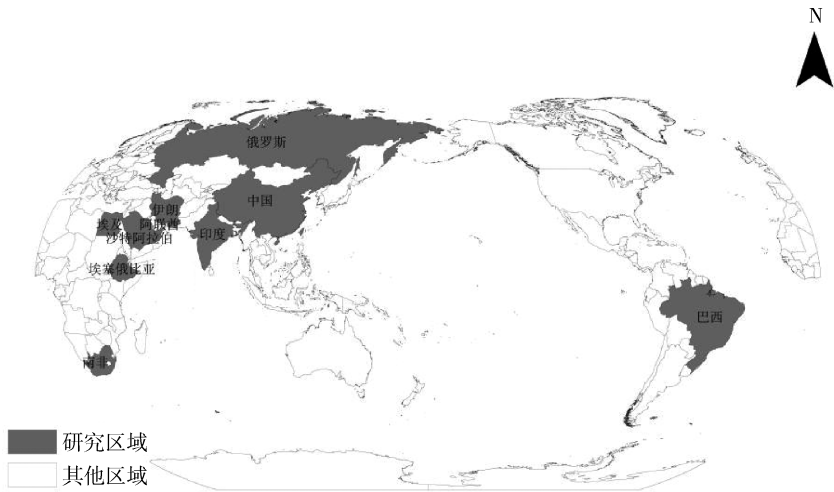
(1) 社会网络分析法

本研究通过社会网络分析方法对金砖国家科技创新合作网络的整体结构特征、网络中心性特征进行量化分析^[17],主要根据网络密度、平均路径长度、平均聚类系数、度数中心度、中介中心度和特征向量中心性等指标进行分析(表1)。

(2) 地理探测器与多维邻近性指标选取

地理探测器是基于因子、交互、风险和生态4个探测器,揭示地理事物或现象的空间分异性、探测因变量驱动力的一组统计学方法^[18]。本研究基于多维邻近性理论,采用因子探测和交互探测,识别多维邻近性对金砖国家科技创新合作网络的影响,其中,考虑研究对象以及数据的可获得性构建包括地理邻近性、经济邻近性、投入邻近性、制度邻近性、文化邻近性的多维邻近性框架。

地理邻近性表示网络中各节点的空间距离,本研究参考张俊等^[19]的度量方法,通过在地图上计算国家间首都的球面直线距离来测度空间距离的远近,数据来源于法国CEPII组织网站地理数据库,并对其进行标准化处理。计算公式为:



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2943 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区示意图

Figure 1 Study area diagram

表 1 社会网络分析指标与计算公式

Table 1 Social network analysis index and calculation formula

评价指标	指标解释	计算公式	公式解释
网络密度	反映网络的紧密程度和规模大小	$D = \frac{2l}{n(n-1)}$	式中, l 表示网络中的实际关联数量, n 表示网络中的节点数量
平均路径长度	反映了网络整体特性,平均路径越短,网络的通达性越好	$L = \frac{\sum_j^n d_{ij}}{n(n-1)}$	式中, L 表示网络的平均路径长度, n 表示网络中节点个数, d_{ij} 表示节点 <i>i</i> 与节点 <i>j</i> 之间的最短距离
平均聚类系数	反映网络的集聚程度	$C = \frac{1}{N} \sum_{i \neq 1}^N \frac{2l_i}{n k_i (k_i - 1)}$	式中, C 表示网络的平均聚类系数, l_i 表示节点 <i>i</i> 与邻近节点实际相连边数, N 和 n 表示节点数量, k_i 表示节点 <i>i</i> 的度数
度数中心度	反映节点在网络中的位置	$C_D(i) = \sum_{j=1}^N a_{ij}$	式中, a_{ij} 表示网络邻接矩阵, $a_{ij} = 1$ 表示节点 <i>i</i> 和节点 <i>j</i> 间存在合作关系, $a_{ij} = 0$ 表示节点 <i>i</i> 和节点 <i>j</i> 间不存在合作关系。
中介中心度	衡量通过一个节点的最短路径的数量,节点的中介中心度越高,则说明对其他节点的影响力越强	$C_B(i) = \sum_j^n \sum_k^n \frac{F_{jk}(i)}{F_{jk}}$	式中, F_{jk} 代表节点 <i>j</i> 与节点 <i>k</i> 之间存在的 shortest 路径的数量, $F_{jk}(i)$ 是节点 <i>j</i> 和节点 <i>k</i> 存在的经过节点 <i>i</i> 的最短路径的数量
特征向量中心性	指以邻近节点的影响加权的中心性指数,通过衡量邻国的影响力来反映本国在网络的严重程度	$EC_i = x_i = c \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j$	式中, EC_i 为特征向量中心性, c 为常数, a_{ij} 是网络 <i>G'</i> 的邻接矩阵 <i>A</i> 中第 <i>i</i> 行第 <i>i</i> 列的元素, x_j 为矩阵 <i>A</i> 的特征向量 <i>x</i> 的第 <i>j</i> 个元素

$$GeoP_{ij} = \begin{cases} 1 - (\ln(d_{ij} + 1) / \ln(\max d_{ij} + 1)), & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

式中: $GeoP_{ij}$ 为*i*国与*j*国的地理邻近性,其值越大,地理邻近性越强,反之越弱; d_{ij} 为*i*国与*j*国的首都球面直线距离; $\max d_{ij}$ 为最远两国之间的首都球面距离。

经济邻近性表示网络节点之间经济发展水平的

相似水平,主体之间经济差异越小,越有利于资源和知识要素在网络中的流动以及合作网络的建立,本研究借鉴陈跃刚等^[20]的研究,以各国人均生产总值表示经济发展水平。计算公式为:

$$EcoP_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{|e_i - e_j|}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

式中: $EcoP_{ij}$ 为 i 国与 j 国的经济邻近性, e_i 和 e_j 分别表示 i 国与 j 国的人均生产总值。两国人均生产总值差异越小,代表经济水平越接近,被赋予的权重越大;反之权重越小。

投入邻近性表示网络中各合作主体双方技术经验和知识基础的相似程度,本研究采用研发经费投入占国民生产总值的占比及研发经费投入强度指标来衡量区域内的科技研发水平,参考杨大飞等学者^[11]的计算公式,数据来源于世界银行 WDI (World Development Indicators) 数据库。计算公式为:

$$InveP_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{|RDexP_i - RDexP_j|}{\max |RDexP_i - RDexP_j|}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

式中: $InveP_{ij}$ 为 i 国与 j 国的投入邻近性, $RDexP_i$ 和 $RDexP_j$ 分别表示 i 国与 j 国的 R&D 经费投入强度, $\max |RDexP_i - RDexP_j|$ 表示所有区域 R&D 经费投入强度差值的最大值。

制度邻近性反映了创新主体在政治环境方面的相似程度,参考 Kogut 和 Singh^[21]与赵灿^[22]等学者的测度方法,根据世界银行 (World Bank) 全球治理指数 (World Governance Indicators, WGI) 的数据,从话语权和责任、政治稳定性、监管质量、政府效率、控制腐败和法制化程度 6 个维度进行测度,计算公式为:

$$InstP_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sum [(I_{ki} - I_{kj})^2 / V_k] / 6}, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases}$$

式中: $InstP_{ij}$ 为 i 国与 j 国的制度邻近性, I_{ki} 代表 i 国的第 k 个制度维度的指标值, I_{kj} 表示 j 国的第 k 个制度维度的指标值, V_k 分别表示第 k 个制度维度的方差。

文化邻近性表示网络主体体现出对文化选择的偏好,参照杨文龙^[23]等学者的研究方法,以宗教文化作为文化邻近性识别的主要指标,根据徐家玲编著的《世界宗教史纲》^①,将世界宗教分为三大宗教——佛教、基督教、伊斯兰教,并将金砖国家所处的宗教文化圈分为:佛教文化圈^②、基督教文化圈、伊斯兰教文化圈,属于同一个文化圈的国家视为具

有文化邻近性。计算公式为:

$$CulP_{ij} = \begin{cases} 1, & i, j \text{ 两国处于相同宗教文化圈} \\ 0, & i, j \text{ 两国处于不同宗教文化圈} \end{cases}$$

式中: $CulP_{ij}$ 为 i 国与 j 国的文化邻近性。

2 金砖科技创新合作网络演化分析

2.1 科技创新网络整体结构演化分析

根据合著论文合作数量的年变化特征,将 2000 - 2023 年分成 5 个时段 (图 2) 进行科技创新合作网络的结构研究,即萌芽期 (2000 - 2007 年)、起步期 (2008 - 2011 年)、稳步发展期 (2012 - 2016 年)、快速发展期 (2017 - 2021 年)、成熟期 (2022 - 2023 年)。运用 Gephi 软件分别绘制 5 个阶段金砖国家科技创新网络 (图 3),其中节点代表构成网络的主体,节点之间的连线即为边,其粗细程度代表合作次数的多少。萌芽期 (图 3 - a) 科技创新网络规模小,主体间合作少,仅有沙特阿拉伯—埃及关系对存在较大合作关系,整体合作网络均处于萌芽阶段;起步期 (图 3 - b) 较上一阶段科技创新合作网络规模扩张,研究区域内的成员国均参与到创新网络中,同时增加了中国—印度和中国—俄罗斯两组合作规模较大关系对;稳步发展期 (图 3 - c) 网络主体之间的合作次数稳步增多,沙特和埃及两国的合作仍在网络中处于显著地位,且其他主体之间的合作联系程度逐渐加深,整体网络逐渐向稠密方向发展;快速发展期 (图 3 - d) 网络规模迅速扩张,各主体之间联系趋于紧密,重要的创新主体逐渐显露,中国、印度、俄罗斯、埃及和沙特阿拉伯 5 个成员国作为核心构成了较为立体的“金字塔”构造,中国—沙特阿拉伯两国作为“金字塔”的顶端,在合作数量和地位上均发挥着关键作用;成熟期 (图 3 - e) 科技创新合作网络的“金字塔”结构逐渐发育成熟,沙特阿拉伯成为重要的创新主体中心。

利用 Ucinet 软件测算 2000 - 2023 年创新合作的网络拓扑结构特征量 (表 2): 2000 - 2023 年,网络边数总体呈上升趋势、具体先增长后下降,在节点未变化的情况下,合作关系增长近 3 倍,表明创新网

① 徐家玲,兰建英,毛丽娅,等. 世界宗教史纲[M]. 北京:高等教育出版社,2007.

② 印度教是印度地区的传统宗教,是在婆罗门教的基础上融合佛教等思想逐步形成的,是一种地区性的宗教。鉴于本文研究区域涉及多个国家和地区,具有国际性和广泛性,本文将佛教、印度教等宗教分布的地区笼统纳入佛教文化圈。王德才,王浩. 图说世界宗教文化[M]. 长春:吉林人民出版社,2008.

络规模扩大,主体间的合作联系逐渐增多。网络密度同边数变化趋势一致,2000 – 2012 年以较为稳定的速率增长并在 2012 年达到最大,代表主体间的创新合作紧密度提升,合作较为频繁;2012 年后,网络密度缓慢下降并保持稳定,这可能与世界范围内的经济疲软以及政治地缘局势的复杂化有关,2020 年

后因疫情在经济社会持续而深远的影响,网络密度出现了小幅度的下降,网络结构的稠密度虽略有下降,但对比萌芽期网络密度上升明显。平均路径长度波动下降,平均聚类系数先升后降,其数值围绕 0.7 上下波动,说明网络传输性能与效率不断上升,在内部存在紧密合作、集聚发展的趋势。

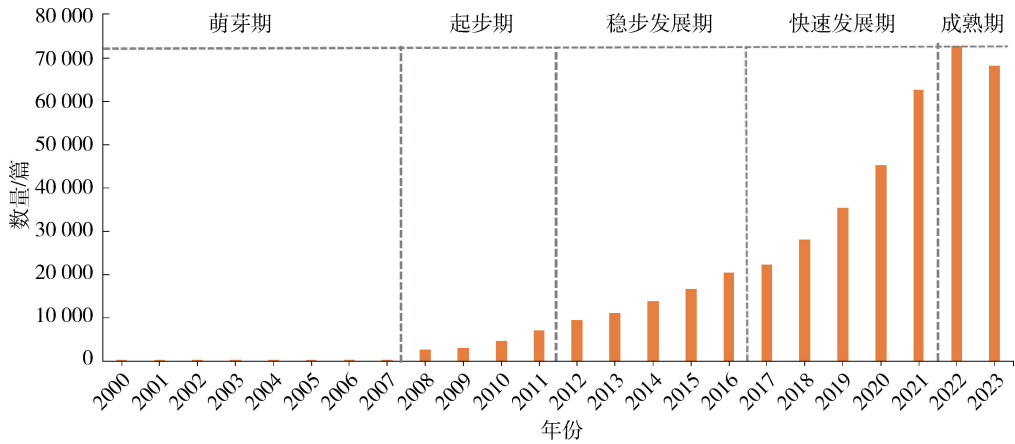


图 2 2000 – 2023 年金砖国家合著论文数量统计

Figure 2 Statistics on the number of papers co – authored by BRICS countries from 2000 to 2023

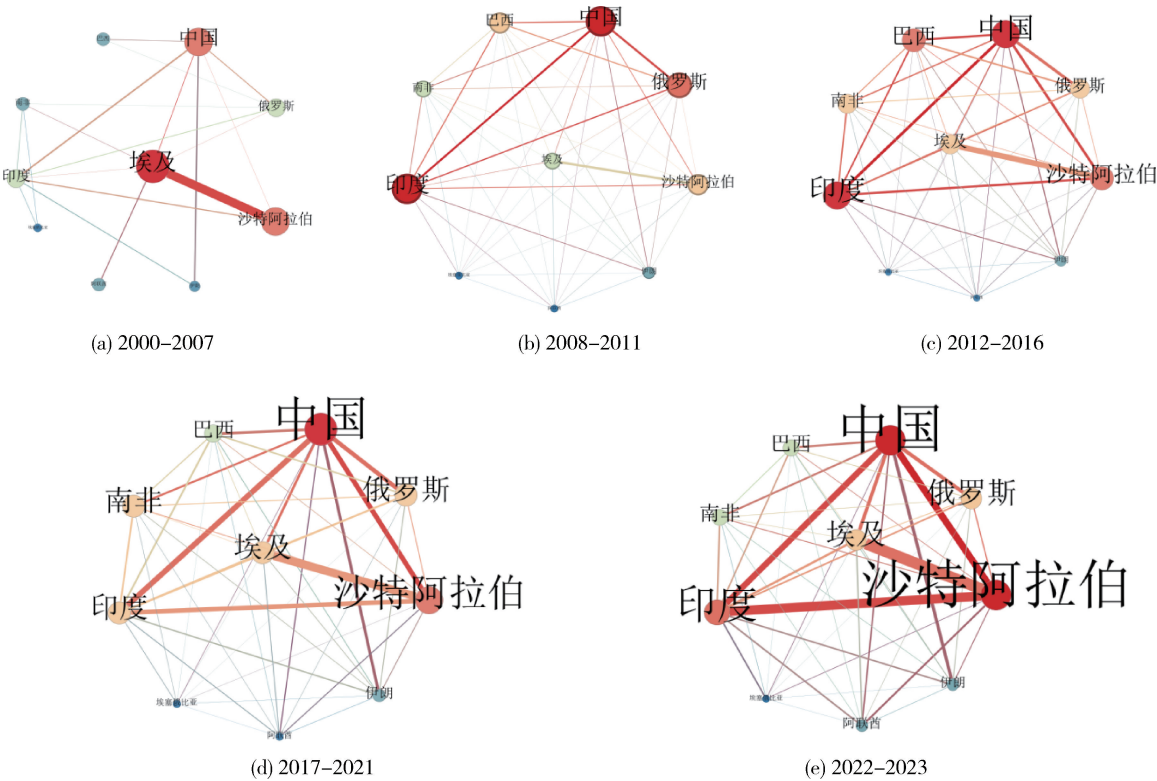


图 3 金砖国家科技创新合作网络

Figure 3 BRICS S&T innovation cooperation network

复杂网络中,节点度是指与该节点相邻的节点的数目,网络的度指网络中所有节点度的平均值,节

点度分布 $P(k)$ 是指网络中节点度值为 k 的节点数占有节点个数的比例^[24]。运用 R studio 软件计算金砖国家科技创新合作网络的节点度值,并运用 Origin 对网络节点度分布进行拟合,结果如图 4 所

示, $R^2 = 0.934$, 具有较高的置信水平, 节点的度分布表明网络正处于随机网络向无标度网络演变的过渡期, 创新合作成果逐渐向少数合作主体集聚, 具备不均衡性。

表 2 金砖国家科技创新网络拓扑结构基本特征

Table 2 Basic characteristics of the topological structure of the BRICS S&T innovation cooperation network					
时期	年份	边数	网络密度	平均路径长度	平均聚类系数
萌芽期	2000 年	10	0.1111	2.333	0.000
	2001 年	12	0.1333	1.846	0.000
	2002 年	16	0.1778	2.389	0.000
	2003 年	12	0.1333	2.476	0.000
	2004 年	16	0.1778	2.464	0.333
	2005 年	14	0.1556	2.238	0.333
	2006 年	18	0.2000	1.500	0.750
起步期	2007 年	22	0.2444	1.643	0.352
	2008 年	20	0.2222	1.091	0.900
	2009 年	26	0.2889	1.714	0.690
	2010 年	28	0.3111	1.643	0.729
	2011 年	30	0.3333	1.464	0.793
	2012 年	32	0.3556	1.429	0.829
	2013 年	28	0.3111	1.500	0.776
稳步发展期	2014 年	28	0.3111	1.500	0.776
	2015 年	28	0.3111	1.500	0.776
	2016 年	28	0.3111	1.500	0.776
	2017 年	26	0.2889	1.536	0.779
快速发展期	2018 年	26	0.2889	1.536	0.779
	2019 年	26	0.2889	1.536	0.779
	2020 年	24	0.2667	1.571	0.758
成熟期	2021 年	24	0.2667	1.571	0.790
	2022 年	24	0.2667	1.750	0.718
	2023 年	26	0.2889	1.722	0.726

2.2 金砖科技创新合作网络中心性演化分析

利用 Ucinet 软件计算金砖科技创新合作网络的度数中心度和中介中心度(表 3),并对两个网络结构特征量进行排序以研究网络中心性演化分析。在 2000-2023 年五个阶段中,得益于对科技发展助推现代化的高度重视与主动融入全球创新体系的坚持,中国始终是金砖科技创新合作网络中度数中心度排名居于首位且遥遥领先的国家节点,在该网络中具有重要的影响力。沙特阿拉伯在《2030 年愿景》的驱动下,全力支持技术变革,度数中心度持续

上升,并在第五阶段反超印度、巴西等国家,在网络中的地位和参与度迅速提升。研究期间,度中心度大于平均值的国家占比逐渐下降,且随着时间不断推进,网络内部度数中心度较大的核心国家与其他国家的差距逐渐增大,排名靠前的国家的影响力及辐射带动能力逐渐凸显。

在中介中心度指标上,中国、印度、沙特阿拉伯、埃及、巴西五个国家位于前列,具有突出的中介合作能力和广泛的合作对象,以合作内容的丰富数量 and 高质量优势推动建立网络联系,掌握并支配科技合

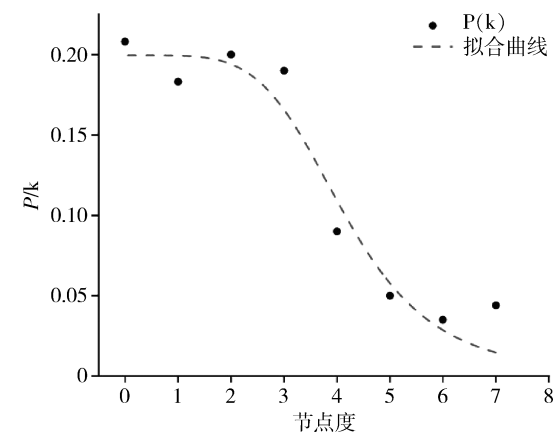


图 4 金砖国家科技创新合作网络节点度分布拟合曲线图
Figure 4 Fitting curve of node degree distribution of
BRICS S&T Innovation cooperation network

作网络中的大部分创新信息和资源。在科技合作网络发展的前四个阶段,沙特虽然在度数中心度指标的表现方面不如巴西、俄罗斯、南非等国家,但中介中心度的排名始终高于上述 3 个国家,在成熟阶段位居第二位,同时度数中心度的排名得到了较大程度的飞跃,这反映了沙特在科技合作网络中的中介优势,在促进创新发展、维持科技合作关系方面发挥了较大努力。

2.3 中国在金砖科技创新合作网络中的地位演变分析

提取 2000 – 2023 年中国的合作频次(图 5),发现中国与其他金砖成员国在科技创新方面的合作频次在过去的 5 个时期均呈现出不同程度的连续、稳定上升态势。其中,在快速发展期,中国与除阿联酋

表 3 2000 – 2023 年 5 个阶段金砖国家科技创新合作网络中心度指标排名

Table 3 Ranking of BRICS S&T innovation cooperation network centrality in five stages from 2000 to 2023

中心度	序号	第一阶段	第二阶段	第三阶段	第四阶段	第五阶段
度数中心度	1	中国	中国	中国	中国	中国
	2	印度	印度	印度	印度	沙特阿拉伯
	3	埃及	巴西	巴西	巴西	埃及
	4	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	印度
	5	伊朗	南非	南非	沙特阿拉伯	巴西
	6	沙特阿拉伯	沙特阿拉伯	沙特阿拉伯	南非	南非
	7	巴西	伊朗	埃及	埃及	俄罗斯
	8	阿联酋	埃及	伊朗	伊朗	阿联酋
	9	南非	阿联酋	阿联酋	阿联酋	伊朗
	10	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚
中介中心度	1	中国	沙特阿拉伯	中国	中国	中国
	2	印度	印度	印度	印度	沙特阿拉伯
	3	埃及	中国	沙特阿拉伯	沙特阿拉伯	巴西
	4	沙特阿拉伯	巴西	巴西	巴西	俄罗斯
	5	巴西	南非	南非	南非	南非
	6	南非	俄罗斯	俄罗斯	俄罗斯	印度
	7	俄罗斯	埃及	埃及	埃及	埃及
	8	阿联酋	阿联酋	阿联酋	阿联酋	阿联酋
	9	伊朗	伊朗	伊朗	伊朗	伊朗
	10	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚	埃塞俄比亚

和埃塞之外的其他金砖成员国的合作强度均得到了显著提升,合作频次呈倍数增长,尤其同印度的增幅最大;在成熟期,中国与沙特、印度和埃及 3 个国家的合作关系持续增强,特别是与沙特和印度的合作

频次超过 5000 次,遥遥领先于其他成员国,且上述 4 个国家也成为了金砖科技创新网络中的重要的 4 个节点,共同构成了网络中发育较为完整的“金字塔”结构。

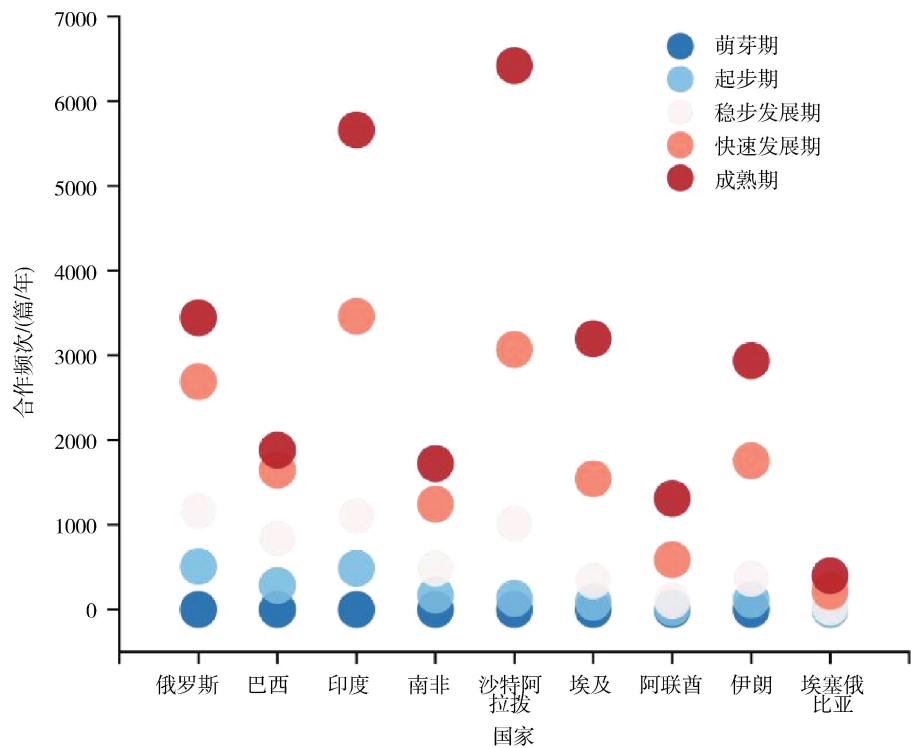


图 5 2000 - 2023 年 5 个时期中国和其他金砖国家的合作频次

Figure 5 Frequency of cooperation between China and other BRICS countries in five periods from 2000 to 2023

从各中心性指标的排名看(表 4),5 个时期中国在度数中心性指标方面稳居首位,中介中心性除萌芽期外均排名第一,表现出强劲科技竞争力的同时,还展现出优越的信息沟通和资源传递的中介能力,在网络中处于“领头”地位。特征向量中心性认为,除了网络节点的自身特性,相邻节点的重要性也是影响节点中心性的重要因素^[25],需要根据网络节点间的相互关系来综合评判。由表 4 和图 6 可知,中国的特征向量中心性在研究时期内均稳排第一,但中心性数值在起步期和稳步发展时期均低于萌芽

时期,说明在发展初期中国在金砖体系内广泛开展合作,合作对象并不局限于科技强国,以自身实力和影响力广泛、积极带动网络中其他成员国进行科技发展;而在发展中后期,得益于国内科技创新的支持政策,中国在自身实力飞速发展的同时,对金砖伙伴的影响力也逐渐上升,使其成为网络中的重要节点,尤其是沙特阿拉伯和埃及两国,其特征向量中心性数值较发展初期翻了两番,这也间接体现了中国的引领推动作用。

表 4 2000 - 2023 年 5 个时期中国在网络中各中心性指标排名

Table 4 Ranking of China's centrality indicators in the network in five periods from 2000 to 2023

时期	萌芽期	起步期	稳步发展期	快速发展期	成熟期
度数中心性排名	1	1	1	1	1
中介中心性排名	1	2	1	1	1
特征向量中心性排名	1	1	1	1	1

3 邻近性机制的地理探测

3.1 因子探测

因子探测用于探测因变量的空间分异,以及不同自变量因子对空间分异的解释程度,用 q 值度量,通过分析层内方差与全区方差的关系来确定空间异质性 q 值的大小, q 的值域为 $[0,1]$, q 值越大表示

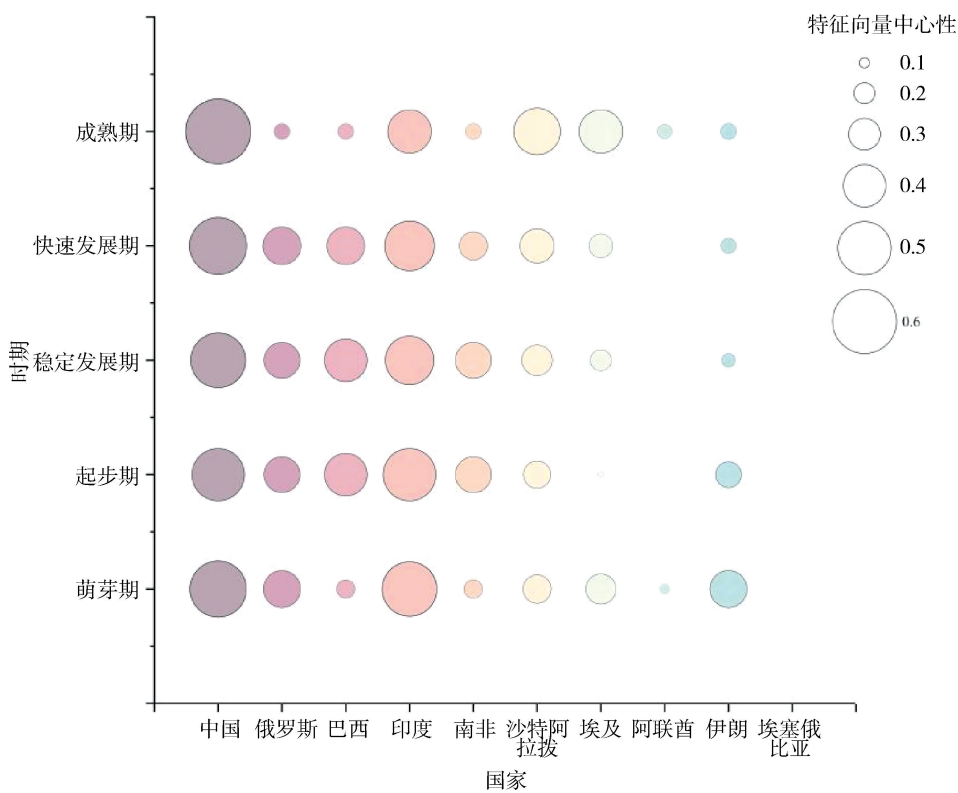


图 6 金砖国家科技合作网络特征向量中心性演化图

Figure 6 Evolution diagram of feature vector centrality of BRICS S&T innovation cooperation network

自变量对因变量的解释力越强,反之则越弱^[18]。本研究利用 SPSS 软件的 K 均值聚类对各邻近性因子进行类型化处理,并运用地理探测器分析多维邻近性对金砖国家科技创新合作的影响程度,结果如表 5 所示。

测算结果发现,不同时期多维邻近性对金砖国家科技创新合作的影响程度不尽相同。投入邻近性是影响创新合作的主导因素且解释力在 5 个阶段内虽有波动,在起步期和快速发展时期影响程度略有下降,但仍是影响合作率的最重要因素。其次是制度邻近性,在合作网络建立起步初期影响力下降,但是在发展时期,影响力变化速度先慢后快,整体呈现出“波浪形”的发展态势,说明在寻求国际合作时,合作主体的制度距离包括政治体制和社会背景等方面的相似性与差异性,是创新主体考虑是否建立合作的重要因素。地理邻近性在萌芽期和发展中后期影响力较高,合作建立初期,较近的地理距离所带来的低交流成本、创新要素便捷传递等优势条件,是网络主体开展合作的重要条件;随着交通物流技术的进步和信息网络的普及,远距离带来的合作成本逐渐降低,对合作的限制逐渐削弱,地理邻近的影响力

也相应缩小;在中后期阶段,合作网络发育较为成熟,地理相近的创新主体创新合作联动。合作主体之间的经济邻近性在创新网络快速发展时期发挥了关键作用,经济背景的相似性对知识要素的普及和技术条件的溢出、转移提供了良好的支撑,促使该时期主体之间的创新联系迅速扩张;而在稳步发展时期,经济邻近性的影响力表现并不突出,可能是由于相近经济背景的国家发展科技以提升经济实力的目的相似,合作意愿不高。文化邻近性在起步阶段成为合作网络发展的关键驱动力,各国基于相似的文化背景以减轻科技合作中科学研究和技术转移的障碍和摩擦。整体来说,创新主体与合作对象之间的制度情况稳定,科技研发投入水平,文化背景相似等方面的优势,可以有效规避科研合作的风险并推动合作的建立和深化。

3.2 交互探测

交互作用探测同于识别不同因子之间组合对因变量的影响力,结果分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强 5 种^[18]。

交互探测测算结果如表 6 所示,多维邻近性各因子之间的联系相对紧密,双因子交互的解释力高

表 5 多维邻近性因子探测结果

Table 5 Multi – dimensional proximity factor detection results

	2000 – 2023		萌芽期		起步期		稳步发展期		快速发展期		成熟期	
	<i>q statistic</i>	<i>p value</i>	<i>q statistic</i>	<i>p value</i>	<i>q statistic</i>	<i>p value</i>	<i>q statistic</i>	<i>p value</i>	<i>q statistic</i>	<i>p value</i>	<i>q statistic</i>	<i>p value</i>
地理邻近性	0.8170	0.4461	0.7778	0.9383	0.7158	0.0812	0.7939	0.1880	0.8340	0.3836	0.8333	0.3908
经济邻近性	0.9994	0.0000	0.8061	0.0960	0.7336	0.8378	0.4118	0.5704	0.9995	0.0000	0.8086	0.1446
投入邻近性	0.8111	0.3831	0.9922	0.0000	0.8637	0.6759	0.8837	0.8306	0.7840	0.1239	0.9969	0.0000
制度邻近性	0.9991	0.0000	0.9783	0.0416	0.7476	0.9467	0.7895	0.2850	0.9474	0.1018	0.7901	0.4391
文化邻近性	0.7999	0.0472	0.6481	0.1813	0.8730	0.0115	0.8001	0.0420	0.7769	0.0580	0.7663	0.0666

表 6 多维邻近性交互探测结果

Table 6 Multidimensional proximity interaction detection results

阶段	指标	地理邻近性	经济邻近性	投入邻近性	制度邻近性	文化邻近性
2000 – 2023	地理邻近性	0.8170				
	经济邻近性	1.0000 *	0.9994			
	投入邻近性	1.0000 *	1.0000 *	0.8111		
	制度邻近性	1.0000 *	1.0000 *	1.0000 *	0.9991	
	文化邻近性	0.8353 *	1.0000 *	0.9830 *	1.0000 *	0.7999
萌芽期	地理邻近性	0.7778				
	经济邻近性	1.0000 *	0.8061			
	投入邻近性	1.0000 *	1.0000 *	0.9922		
	制度邻近性	1.0000 *	0.9930 *	1.0000 *	0.9783	
	文化邻近性	0.8000 *	0.8516 *	1.0000 *	1.0000 *	0.6481
起步期	地理邻近性	0.7158				
	经济邻近性	1.0000 *	0.7336			
	投入邻近性	0.9363 *	1.0000 *	0.8637		
	制度邻近性	1.0000 *	0.7728 *	1.0000 *	0.7476	
	文化邻近性	0.8899 *	0.9874 *	0.9363 *	1.0000 *	0.8730
稳步发展期	地理邻近性	0.7939				
	经济邻近性	0.8773 *	0.4118			
	投入邻近性	1.0000 *	1.0000 *	0.8837		
	制度邻近性	0.9591 *	0.8953 *	1.0000 *	0.7895	
	文化邻近性	0.8554 *	0.8773 *	1.0000 *	0.9591 *	0.8001
快速发展期	地理邻近性	0.8340				
	经济邻近性	1.0000 *	0.9995			
	投入邻近性	0.9841 *	0.9996 *	0.7840		
	制度邻近性	1.0000 *	1.0000 *	0.9957 *	0.9474	
	文化邻近性	0.8506 *	1.0000 *	0.9524 *	0.9531 *	0.7769
成熟期	地理邻近性	0.8333				
	经济邻近性	0.8861 *	0.8086			
	投入邻近性	1.0000 *	1.0000 *	0.9969		
	制度邻近性	1.0000 *	0.9556 *	1.0000 *	0.7901	
	文化邻近性	0.8500 *	0.8389 *	1.0000 *	0.9556 *	0.7663

注：“*”代表双因子交互类型为“双因子增强”，即 $q(X1 \cap X2) > Max(q(X1), q(X2))$ 。

于独立因子,交互类型均属双因子增强,表明合作网络发展的过程中,不同的因子之间并不是孤立作用,也不是简单的叠加,而是存在显著的交互效应。地理邻近性与经济邻近性的交互在前两个阶段和快速发展时期完全影响了科技创新合作,在稳步发展期和成熟期解释力骤降,说明在合作网络成长初期以及迅速扩张时期,同时具备地理和经济邻近性的国家合作较易发生,但随着地理距离限制的减弱以及部分国与国之间经济差距的增大,两个因子交互后的影响力下降。投入邻近性与其他因子的交互和其他双因子交互作用相比,对科技创新合作的影响力的强化最为突出,尤其是社会邻近性与经济邻近性的交互,对创新合作的解释力在萌芽期、稳步发展期、成熟期三个阶段均达到了完全影响,投入邻近性与经济邻近性和制度邻近性的交互除快速发展期外均达到完全解释,进一步说明投入邻近性在创新合作中的主导因子地位。创新主体在寻求合作对象时,充足、完备的科研资金基础促使并支撑合作的发生,在一定程度上弥补其他邻近性的差距带来的限制;同时,根据本研究各邻近性交互均具有不同程度的增强效用的分析结果,金砖科技创新合作的进行不仅需要单因子如投入邻近性主导因素的推进作用,保证有充足的研究与开发经费支撑的同时,还需要建立稳定、互信的政治体制和社会背景,相似的文化环境铺垫,综合考虑多维邻近性对合作的影响。

4 结论与讨论

从动态演化视角,采用网络分析法和地理探测器,研究了扩容背景下金砖科技创新合作网络的拓扑结构、演化特征和影响机制,主要结论有:(1)从网络整体结构看,2000-2023 年金砖科技创新合作网络规模扩大,主体间的合作联系逐渐增多,合作较为频繁;创新网络内部存在紧密合作、集聚发展的趋势,重要的创新主体中心逐渐凸显,并在合作中起到关键领导作用;网络拓扑结构逐渐发育成熟,“金字塔”网络结构渐趋显著。(2)从网络中心性看,中国表现出较为强劲的科技竞争力和影响力,在金砖科技合作网络中占据“领头”地位,对合作网络发挥重要影响力和辐射带动能力;网络内部合作度不断提升,以重要成员国家为核心,打通网络交流通道,鼓励并带动其他成员深度参与合作。(3)从影响机制上看,多维邻近性各因子在网络中发挥不同程度的

正向影响力,投入邻近性是研究时期内影响创新合作的主导因素;地理邻近性的影响程度随着时间推进和网络的发展逐渐降低并趋于平稳,对合作的限制程度逐渐削弱;不同邻近因子间存在双因子增强交互,具有不同程度的增强效用,金砖科技创新合作的推进应综合考虑多维邻近性之间的交互作用。

金砖合作机制正处于扩员的历史性节点,以科技创新为提高合作水平与质量的重要内容拓展合作网络,是金砖科技合作的未来发展重点。在“金砖+”的机制框架下,金砖科技创新合作网络的构建是一个长期且复杂的动态过程,未来还需不断适应新兴节点涌入和核心主体转换所带来的变化与挑战。虽然论文合著是基础研究合作的直接反映,但国际间科技创新合作还涉及技术转移和成果转化、人才流动、研发平台共建、跨国企业布局和投资等方面,因此有必要从多维视角全面度量金砖科技创新合作网络的细节特征。此外,基于合著论文的复杂性研究,科技创新合作的研究应进一步划分研究领域,细化科技论文的影响力,揭示不同领域和尺度下创新合作的特征与效应。

参考文献:

- [1] 王丹,邓灿辉,赵新力,等.“一带一路”共建国家农业科技创新合作网络结构演化及影响因素探究[J]. 科技管理研究,2024,44(5):32-39. Wang D, Deng C H, Zhao X L, et al. Study on structure evolution and influencing factors of national agriculture science, technology and innovation collaboration network of the Belt and Road[J]. Scientific and Technology Management Research,2024,44(5):32-39.
- [2] 周宏浩,谷国锋.外部性视角下中国城市网络演化及其环境效应研究[J]. 地理研究,2022,41(1):268-285. Zhou H H, Gu G F. The evolution of China's city network and its environmental effects from the perspective of externalities[J]. Geographical Research,2022,41(1):268-285.
- [3] 庄德林,杨羊,晋盛武,等.基于战略性新兴产业的长江三角洲城市网络结构演变研究[J]. 地理科学,2017,37(4):546-553. Zhuang D L, Yang Y, Jin S W. Evolution of the Yangtze River Delta's city network based on the strategic emerging industries[J]. Scientia Geographica Sinica,2017,37(4):546-553.
- [4] 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. 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.
- [5] 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. Structural characteristics and influencing factors of the global inter-city knowledge flows network[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(5): 1320–1337.
- [6] 赵彩云, 吕拉昌. 中关村科技园国际创新合作网络演化特征——基于PCT专利分析[J/OL]. *世界地理研究*, 1–15[2024-07-10]. ZHAO C Y, LYU L C. Evolution characteristics of international innovation cooperation network in Zhongguancun: Based on PCT patent analysis[J/OL]. *World Regional Studies*, 2024, 33(8): 148–160.
- [7] 刘承良, 管明明. 基于专利转移网络视角的长三角城市群城际技术流动的时空演化[J]. *地理研究*, 2018, 37(5): 981–994. Liu C L, Guan M M. Spatio-temporal evolution of interurban technological flow network in the Yangtze River Delta urban agglomeration: From the perspective of patent transaction network[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(5): 981–994.
- [8] 陈欣. “一带一路”沿线国家科技合作网络演化研究[J]. *科学学研究*, 2020, 38(10): 1811–1817, 1857. Chen X. Study on scientific and technological collaboration network evolution of countries in one belt one road area[J]. *Studies in Science of Science*, 2020, 38(10): 1811–1817, 1857.
- [9] Boschma, Ron. Proximity and innovation: A critical assessment[J]. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61–74.
- [10] 李琳, 雒道政. 多维邻近性与创新: 西方研究回顾与展望[J]. *经济地理*, 2013, 33(6): 1–7, 41. Li L, Luo D Z. Multi-proximity and innovation: The retrospect and prospect on western researches[J]. *Economic Geography*, 2013, 33(6): 1–7, 41.
- [11] 杨大飞, 孙守恒, 胡倩. 多维邻近性及交互性对合作创新网络演化的影响——以中国智能制造装备业为例[J/OL]. *科技进步与对策*, 1–11[2024-07-10]. Yang D F, Sun S H, Hu Q. The influence of multi-dimensional proximity and interactivity on the evolution of cooperative innovation network: A case study of China's intelligent manufacturing equipment industry[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 1–11[2024-07-10].
- [12] Geldes, Cristian, et al. How does proximity affect inter-firm marketing cooperation? A study of an agribusiness cluster[J]. *Journal of Business Research*, 2015, 68(2): 263–272.
- [13] 李冰, 张纪海. 军民科技创新合作网络结构与演化——基于专利合作与社会网络实证分析[J]. *科技进步与对策*, 2021, 38(21): 142–151. Li B, Zhang J H. The structure and evolution of military-civilian technological innovation cooperation network: An empirical Analysis based on patent cooperation and social network[J]. *Science & Technology Progress and Policy*, 2021, 38(21): 142–151.
- [14] 姚辉, 赵础昊, 杨瑞, 等. 中国农业科技创新跨域合作的多维邻近差异性研究[J]. *技术经济与管理研究*, 2023(4): 90–96. Yao H, Zhao C H, Yang R, et al. Research on multidimensional proximity difference of cross-domain cooperation of agricultural science and technology innovation in China[J]. *Journal of Technical Economics & Management*, 2023(4): 90–96.
- [15] 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, Du F Y, Jing Y, et al. Space-industry path of technology transfer: An empirical study of Northeast China[J]. *Resources Science*, 2022, 44(2): 365–374.
- [16] 戴靓, 丁子军, 曹湛, 等. 长三角地区城市协同创新网络的演化特征及其驱动力[J]. *资源科学*, 2023, 45(5): 1006–1019. Dai L, Ding Z J, Cao Z, et al. Change and driving forces of intercity collaborative innovation networks in the Yangtze River Delta region[J]. *Resources Science*, 2023, 45(5): 1006–1019.
- [17] 郭建科, 田冬翠. 基于海洋产业的城市创新网络特征及邻近性分析[J]. *地域研究与开发*, 2024, 43(1): 46–52, 60. Guo J K, Tian D C. Characteristics and proximity analysis of urban innovation network based on marine industry[J]. *Areal Research and Development*, 2024, 43(1): 46–52, 60.
- [18] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134. Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.
- [19] 张俊, 姜海宁. 合成型产业全球创新网络演化与邻近性机理——以节能环保产业为例[J]. *地理研究*, 2024, 43(2): 357–376. Zhang J, Jiang H N. Evolution of global innovation network and its proximity mechanism in synthetic industry: A case study of energy conservation and environmental protection industry[J]. *Geographical Research*, 2024, 43(2): 357–376.

- [20] 陈跃刚,张弛,吴艳. 长江三角洲城市群多维邻近性与知识溢出效应[J]. 城市发展研究,2018,25(12): 34-44. Chen Y G, Zhang C, Wu Y. Proximities and knowledge spillover in the Yangtze River Delta[J]. Urban Development Studies,2018,25(12):34-44.
- [21] Kogut B, Singh H. The effect of national culture on the choice of entry mode[J]. Journal of International Business Studies, 1988, 19: 411-432.
- [22] 赵灿. 多维邻近性、网络结构与科技合作绩效——基于中国与“一带一路”沿线国家的证据[D]. 北京邮电大学,2023. Zhao C. Multidimensional proximity, network structure and performance of science and technology cooperation based on evidence from China and countries along the “Belt and Road”[D]. Beijing University of Posts and Telecommunications,2023.
- [23] 杨文龙,杜德斌,马亚华,等. “一带一路”沿线国家贸易网络空间结构与邻近性[J]. 地理研究,2018,37(11):2218-2235. Yang W L, Du D B, Ma Y H. Network structure and proximity of the trade network in the Belt and Road region[J]. Geographical Research, 2018,37(11):2218-2235.
- [24] 刘建香. 复杂网络及其在国内研究进展的综述[J]. 系统科学学报,2009,17(4):31-37. Liu J X. Complex network and review of domestic research[J]. Journal of Systems Science,2009,17(4):31-37.
- [25] Bonacich P. Some unique properties of eigenvector centrality[J]. Social Networks, 2007, 29(4): 555-564.

Analysis of the BRICS science and technology innovation cooperation network in the context of expansion: Structural evolution and driving factors

JIANG Zi-ran¹, WU Yue¹, ZHANG Jian-zhen¹, YANG Xiu², KANG Zhi-nan²

(1. School of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. China Science and Technology Exchange Center, Beijing 100045, China)

Abstract: As the importance of science and technology innovation rises in global competition, taking the BRICS expansion as an opportunity, deepening the science and technology (S&T) innovation cooperation among BRICS countries is of great and far-reaching significance to reshape the world's scientific and technological governance pattern and enhance the discourse power of the countries in the “Global South”. Based on the data of BRICS countries' thesis cooperation from 2000 to 2023, the article analyzes the topology and centrality of BRICS S&T innovation cooperation network from the perspective of dynamic evolution, adopting social network analysis and geographic detector, and examines the influence of multi-dimensional proximity and interaction on the evolution of S&T innovation cooperation network in each stage and the mechanism of the influence. The results show that: (1) during the study period, the scale of BRICS science and technology innovation cooperation network has been enlarged, the cooperation links between the subjects have been gradually increased, the network density has shown a trend of growth followed by a slow decline and remained stable, there is a trend of intensive cooperation and cluster development within the innovation network, the important centers of the innovation subjects have gradually come to the fore, and the topology of the network has gradually developed and matured, and it is in the transitional period of the stochastic network evolving into a scalar-free network. (2) Important center nodes of the cooperation network have come to the fore, exerting important influence and radiation-driven ability; at the same time, the ranking of key intermediary nodes is relatively stable, playing the role of intermediary bridge communication. China is in the core position of leading and spearheading in the BRICS S&T innovation cooperation network, with greater influence. (3) Multi-dimensional proximity factors play different degrees of positive influence in the network, R&D investment proximity is the dominant factor affecting innovation cooperation in the study period, with the highest explanatory power; the influence of geographical proximity gradually decreases and tends to be stable with the advancement of time; and there is a two-factor enhancement interaction between different proximity factors, with different degrees of enhancement effect.

Key words: BRICS countries; science and technology innovation; cooperation network; multi-dimensional proximity; GeoDetector