

全球科研合作网络的动态演化及其驱动机制

桂钦昌^{1,2}, 杜德斌^{1,2}, 刘承良^{1,2}

(1. 华东师范大学科技创新与发展战略研究中心, 上海 200062;

2. 华东师范大学城市与区域科学学院, 上海 200241)

摘要: 随着全球进入大发展、大变革的新时代, 国家/地区间科研合作环境发生剧烈变化, 全球科研合作既面临历史性机遇, 也遭遇重大挑战。因此, 探究全球科研合作网络的动态演化及其驱动机制, 对于研判全球科技竞合态势至关重要。本文采用科睿唯安的InCites数据库所收录的2000—2019年国家/地区间科研合作数据, 基于“点—线—网”的分析框架和动态的研究视角, 刻画了全球科研合作网络的节点位置、双边关系和网络结构3个方面的演化动态, 揭示了网络演化的综合驱动机制及其不同发育阶段驱动力重要性的变化。研究发现: ① 节点位置上, 传统科学强国的度中心性排名始终位居前列, 新兴科研国家的网络影响力不断增强。② 双边关系上, 国际合作联系数量快速飙升, 中美合作取代美德合作, 其成为全球最重要的双边联系。③ 网络结构上, 全球科研合作网络的等级层次性逐渐降低, 由美国单组团演化为美国—沙特双组团。④ 驱动机制上, 全球科研合作网络演化受到地理邻近性、认知邻近性、社会邻近性、共同语言、历史联系和人才流动等多重因素的共同作用。其中, 地理邻近性、共同语言和历史联系的重要性随着网络演化而降低, 合作网络的驱动力更多是依靠社会邻近性、认知邻近性和人才流动。

关键词: 国际科研合作; 科学全球化; 知识网络; 邻近性动态; 网络演化

DOI: 10.11821/dlxb202302010

1 引言

科学全球化被视为当代全球化最为显著的特征之一, 国家/地区之间的科研合作日益频繁^[1-2]。知识和技术等创新要素在全球范围内流动的速度与规模达到空前水平, 科技创新呈现全球化和网络化的新态势。根据科睿唯安的Incites数据库统计发现, 国际合作比例从1980年的4.41%上升至2020年的27.95%, 意味着大约1/3的科研论文是国际合作的结晶。对于*Nature*和*Science*这种全球顶级学术期刊, 其国际合作比例已经超过60%。国际合作成为科学研究的新常态, 合作比例不断提高, 产生了众多高质量的研究成果。在知识经济时代, 国家/地区间的科技竞合关系是新时代国际关系的重要内容。

然而, 当前百年未有之大变局和世纪疫情全球大流行相互交织, 国际力量对比变化和大国博弈日趋加剧, 世界进入动荡变革期^[3]。中美之间的竞争由经贸领域全面转向科技

收稿日期: 2022-04-22; 修订日期: 2022-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42201190); 中国博士后基金项目(2022M711152); 国家社会科学基金重大项目(19ZDA087) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.42201190; China Postdoctoral Science Foundation, No.2022M711152; Major Program of National Social Science Foundation of China, No.19ZDA087]

作者简介: 桂钦昌(1991-), 男, 四川达州人, 博士, 助理研究员, 中国地理学会会员(S110016476M), 研究方向为科技创新与城市发展。E-mail: qcgui@iud.ecnu.edu.cn

通讯作者: 杜德斌(1963-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市与区域发展。

E-mail: dbdu@re.ecnu.edu.cn

创新领域,两国关系进入长期竞争阶段^[4]。以美国为首的西方国家对中国的战略遏制与围堵日趋强化,试图切断双方正常的科技交流合作,推动与中国“科技脱钩”。与此同时,逆全球化思潮兴起,民粹主义、单边主义和孤立主义抬头,国际科研合作严重受阻。2019—2021年中美科研合作骤然降温,与中美两国的学术机构均有从属关系的作者数量呈现“断崖式”下降^[5]。因此,全球科研合作既面临历史性机遇,也遭遇重大挑战。在此新形势下,系统剖析全球科研合作网络的演化动态及其核心驱动力,对于分析中国在全球科研网络中的地位演变,研判中美科技竞争态势至关重要。

科研合作属于知识网络的研究范畴,一直是国内外学者关注的热点主题。但现有的实证研究多关注个人间^[6]、机构间^[7-8](企业、高校、企业与高校的产学研合作)和区域间^[9-11]的知识流动,从宏观视角开展全球尺度且长时间序列的国家/地区间科研合作网络演化研究并不多见。关于网络演化的影响机制,现有研究多采用邻近性分析框架来解释跨区域间的知识交流与互动^[12-15]。然而,邻近性理论最初是基于微观行动者之间互动而提出来的,用于解释国家/地区间的科研合作面临解释力有限的问题。此外,越来越多的研究关注其他非邻近性因素,如文化距离、历史联系和劳动力迁移等因素对国家/地区间科研合作的影响^[16-18]。因此,有必要跳出多维邻近性理论的束缚,建立更加综合的解释框架^[19]。最后在研究视角方面,当前的研究范式多从静态视角出发,而网络演化蕴含了一个由简单向复杂、由低级向高级和发育程度不断提高的过程,很少从动态视角审视不同发育阶段知识网络演化机制重要性的变动^[20]。近年来,越来越多的学者呼吁加强网络动态研究,增强对网络演化的理解^[21]。

基于此,本文以科学全球化为研究背景,国家/地区为分析单元,采用科睿唯安的InCites数据库科研论文合作数据,通过大数据挖掘构建了全球科研合作网络,采用“点—线—网”的社会网络分析范式和扩展的重力模型探究2000—2019年全球科研合作网络演化动态和驱动机制,助力中国全方位融入全球网络。

2 理论框架与研究假设

演化经济地理学的多维邻近性理论认为行动者之间的知识互动与交流依赖于主体之间的相似性程度,如地理、认知、组织、制度和社会邻近性等^[12]。由于研究主体是宏观的国家单元,本文重点关注地理邻近性、认知邻近性、社会邻近性对国际科研合作的影响。除此之外,国际贸易研究中经常考虑的语言文化和历史联系以及人力资本流动理论(Human Capital Flow)所强调的人才流动等因素。因此,国家/地区间的科研合作还受到语言差异、历史联系和人员流动的影响,普遍认为行动者使用共同的语言更容易交流,曾经的历史联系会促进国家/地区间的合作,双边人员流动是两国合作的纽带。综上所述,本文构建了六维度(地理、认知、社会、语言、历史和人员交流)的全球科研合作网络演化分析框架(图1)。

2.1 多维邻近性与科研合作

地理邻近性是指主体间的物理距离。地理距离越小,两者间的地理邻近性越高。地理邻近性主要通过以下3个方面发挥作用:① 沟通成本随着空间距离增加而上升,较短的空间距离有利于减少沟通费用。合作过程中需要频繁的互动与交流,产生了大量的商务旅行。正是这些跨境商务旅行极大地促进了知识在全球范围内的传递和扩散^[22],邻近的地理距离可以有效降低合作费用。② 空间邻近的行动者更容易获取知识外部性。空间距离越短,知识正外部性的强度越大,越有利于隐性知识的转移。邻近的地理距离增加

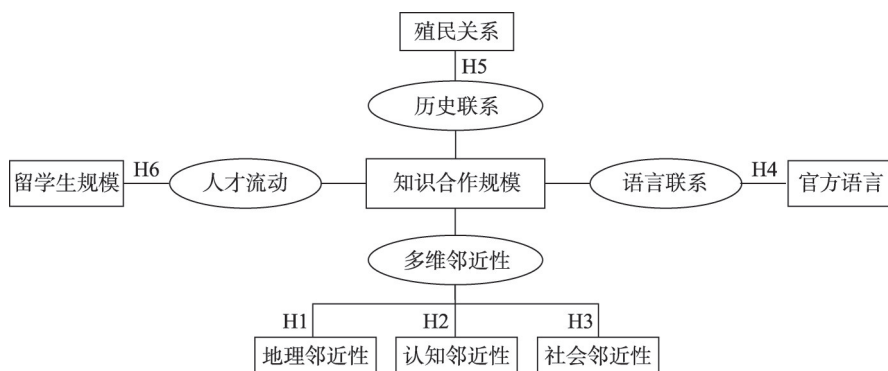


图1 分析框架

Fig. 1 Analytical framework

主体之间面对面交流和互动的机会，促进隐性知识的传播^[23]。③ 地理邻近性的互补作用机制。较近的空间距离，促进其他邻近性的建立。地理邻近性可以发挥互补作用，助力其他邻近性的形成^[24]。因此，提出研究假设：

H1：地理邻近的两个国家/地区，其科研合作规模越大。

认知邻近性是指主体之间共享知识的程度。两者的知识结构越相似，越有利于知识流动。主要理由如下：一方面，能力吸收理论表明合作交流需要相似的知识基础为前提条件^[25]。在寻找合作者时，行动者更愿意寻找那些与自己具有相似知识基础的合作伙伴，因为搜寻过程充满了不确定性和意外。另一方面，新知识的产生不是随机的、偶然的，而是受到知识基础的约束。行动者拥有相似的知识基础，更容易达成合作目标，促成双方合作^[26]。因此，提出研究假设：

H2：认知邻近的两个国家/地区，其科研合作规模越大。

社会邻近性起源于根植性的研究，是指主体间社会嵌入性关系的远近。当主体间基于信任、友谊和过去的经验所建立关系，这有助于非正式的知识交换，尤其是对创新起重要作用隐含的经验类知识得以扩散和传播^[27]。在社会网络中，行动者很倾向与朋友的朋友建立联系。这种以信任为基础的合作关系明显优于匿名关系，从而形成三角闭合^[28]。这种三角关系也被称为三方闭环，主要通过以下两个机制得以实现。一方面，三角关系带来了特殊的“稳定性”，主体间密集的互动关系可以抑制机会主义、增加信任和风险共担，因为朋友的朋友也是朋友^[29]。另一方面，主体间两两直接相连，这种强连接避免了信息传递过程中被扭曲和失真，增加了信息传递的效率^[30]。因此，提出研究假设：

H3：社会邻近的两个国家/地区，其科研合作规模越大。

2.2 共同语言与科研合作

共同语言是指主体间语言文化环境的相似性。语言是沟通的桥梁和媒介，共同语言有助于交流和互动的发生。Maskell等认为使用共同语言的主体间知识合作更加容易，交流与互动会变得更加简单直接^[31]。不同语言之间的转译会降低知识传播的效率和信息量，增加交流成本^[32]。在合作过程中，语言差异的存在阻碍着缄默知识的转移。许多隐性知识存在情境下的语境中，相似文化背景的行动者更容易理解。共同语言有助于主体间的对话、交流和互动，创造强联系。Amano等强调语言差异仍是阻碍全球科学知识转移的障碍^[33]。因此，提出研究假设：

H4：共同语言的两个国家/地区，其科研合作规模越大。

2.3 历史联系与科研合作

历史联系,尤其是殖民联系,也是影响国际知识流动的重要因素。历史联系可以通过组织邻近性和制度邻近性这两个途径发挥作用。组织邻近性是指组织间的战略依赖程度,组织安排/协议可以减少合作伙伴的机会主义行为^[34]。如英联邦、法语国家组织等国际组织基于曾经的宗主国和前殖民地而建立,密切了这些国家/地区间的科研合作。制度邻近性是指主体受到非正式约束和正式规则制约的相似性^[35]。正式的制度(法律和规则)和非正式的制度(文化和社会习俗)可以减少集体行动中的不确定性和降低传递成本^[36]。殖民地在独立过程中大多承接原来宗主国的制度安排,这些“制度遗产”减少了两者的合作障碍。因此,提出研究假设:

H5: 历史联系的两个国家/地区,其科研合作规模越大。

2.4 人才流动与科研合作

人员流动,尤其是人才流动,是跨区域知识流动的重要通道^[16]。知识,特别是隐性知识,内嵌于人才本身。人充当了知识的携带者,能够实现知识的远距离扩散^[37]。当人才从一个地方移动到另一个地方时,他们的知识和技能也随之移动。因此人力资本的国际移动已成为国际知识流动的重要渠道。人才的跨国移动不仅会带来“货币汇款”,也会产生“知识汇款”^[38]。人才流动的作用途径可以概括为以下3个方面:①“种族驱动”的知识流动,移动的人才只会与他们的母国保持人际的和职业的联系,并给东道国带来新的知识、技能和能力^[39]。②跨国公司的内部移动。跨国公司是国际知识扩散的重要途径,比市场调节渠道更加有效^[40]。为了克服跨地理距离转移知识的挑战,跨国公司依赖其熟练员工在母国和东道国之间的流动。③“海归”的直接贡献。高技能移民工作者决定返回祖国,带来新的知识和原东道国的社会关系^[41]。国际留学生是国际人才流动的典型代表,充当了母国和东道国科研合作的纽带,发挥着重要作用^[42]。因此,提出研究假设:

H6: 两国/地区双边的留学生数量越多,其科研合作规模越大。

3 数据来源和研究方法

3.1 数据来源

合作论文记录了研究者之间的交流和共享,是科研合作最直接的表现形式^[43-44]。本文的数据来源于科睿唯安的InCites数据库(<https://incites.clarivate.com>),收录了自然科学、社会科学与人文艺术等领域中全球最具影响力的研究成果^[45]。获取策略为:①信息检索。在数据框输入检索表达式,获得国家/地区^①2000—2019年的科研论文发表与合作数据,下载保存为.txt文本。②网络生成。采用Python编程语言将各个国家/地区的数据生成对称矩阵,对角线单元格为该国/地区的科研论文数量,其余单元格为国家/地区间合作发表数量。此外,本文采用3年的时间窗口来平滑数据波动,研究时期被划分7个的时段:2000—2002年、2003—2005年、2006—2008年、2009—2011年、2012—2014年、2015—2017年、2017—2019年。

3.2 研究方法

3.2.1 度中心性 中心性测量的是节点在网络中的重要性,如度中心性、接近中心性、介数中心性和特征向量中心等^[46]。相比其他中心性而言,度中心性是最为经典且使用最为广泛的指标,本文采用其表征国家/地区在网络中的位置。节点度表示与该国/地区建立论文合作关系国家/地区数量:

① 中国数据暂未含香港、澳门和台湾地区。

$$C_D(i) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 表示国家/地区科研合作邻接矩阵, 有科研合作则赋值为 1, 无则赋值为 0。

3.2.2 优势流分析 等级层次性是网络的基本特征。Nystuen 等提出了优势流分析, 其核心思想是节点被嵌套在网络中, 节点间的最大联系比其他联系更加重要^[47]。根据节点规模和联系强度, 节点被划分 3 种类型: 附属型节点——没有最大流指向该节点; 次级主导型节点——其最大流指向规模更大的节点, 也吸引来自规模更小节点的最大流; 主导型节点——其最大流指向一个规模比自身较小的节点。国家/地区发表的论文数量表征节点规模, 国家/地区间合作的论文数量表示合作强度。

3.2.3 重力模型 重力模型也称空间相互作用模型, 该模型认为行动者间的互动依赖于自身的规模和两者间的可达性。在本文的研究含义是: 国家/地区间的科研合作规模取决于两国/地区的属性特征和双边的关系特征。回归模型如下:

$$C_{ijt} = \alpha + \beta_1 Mass_{i,t-1} + \beta_2 Mass_{j,t-1} + \beta_3 Geoprox_{ij,t-1} + \beta_4 Conprox_{ij,t-1} + \beta_5 Socprox_{ij,t-1} + \beta_6 Comlang_{ij,t-1} + \beta_7 Hislink_{ij,t-1} + \beta_8 Talflow_{ij,t-1} + \varepsilon_{ij} + \theta_t \quad (2)$$

式中: C_{ijt} 为因变量, 表征国家/地区间科研合作的论文数量; $Mass_i$ 和 $Mass_j$ 分别为 i 和 j 的控制变量, 包括科学产出规模、研发人员数量、经济发展水平; $Geoprox$ 为地理邻近性; $Conprox$ 为认知邻近性; $Socprox$ 为社会邻近性; $Comlang$ 为共同语言; $Hislink$ 为历史联系; $Talflow$ 为人员交流; ε_{ij} 和 θ_t 分别为国家/地区对和时间固定效应。表 1 汇总变量设置和数据来源。

表 1 变量描述和数据来源

Tab. 1 Variable descriptions and data sources

	变量名称	变量描述	数据来源
因变量	合作规模 C_{ij}	国家/地区间科学论文合作的数量	InCties 数据库
自变量	地理邻近性 $Geoprox$	国家/地区间的地理距离的自然对数与 10 的差值	作者计算
	认知邻近性 $Conprox$	国家/地区间知识结构的 Jaffe 系数	作者计算
	社会邻近性 $Sociprox$	国家/地区间合作伙伴重叠的程度	作者计算
	共同语言 $Comlang$	虚拟变量, 英语是否两国/地区的主要语言	CEPII 数据库
	历史联系 $Hislink$	虚拟变量, 国家/地区间的殖民关系	CEPII 数据库
	人才流动 $Talflow$	国家/地区间的留学生数量的自然对数	UIS 数据库
控制变量	科学规模 $Publication_i$ (ln)	国家/地区 i 发表论文数量的自然对数	InCties 数据库
	科学规模 $Publication_j$ (ln)	国家/地区 j 发表论文数量的自然对数	InCties 数据库
	研发人员 $Researchers_i$ (ln)	国家/地区 i 每百万居民全时研发人员的自然对数	世界银行
	研发人员 $Researchers_j$ (ln)	国家/地区 j 每百万居民全时研发人员的自然对数	世界银行
	经济水平 EDL_i	国家/地区 i 的经济发展阶段	世界银行
	经济水平 EDL_j	国家/地区 j 的经济发展阶段	世界银行

地理邻近性 ($Geoprox$) 表示空间距离的远近。采用 10 减去国家/地区间地理距离的自然对数, 其中地理距离根据 R 语言 *geosphere* 包测算而得。公式如下:

$$Geoprox_{ij} = 10 - \ln(dist_{ij} + 1) \quad (3)$$

认知邻近性 ($Conprox$) 根据国家/地区在 22 个 ESI 研究方向产出的学科向量来测度, 即测算双方学科知识向量的非中心性相关系数^[48]。公式如下:

$$Conprox_{ij} = \frac{A_i A_j'}{\sqrt{(A_i A_i')(A_j A_j')}} \quad (4)$$

式中: $A_i = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_{22}]$ 和 $A_j = [A_1, A_2, A_3, \dots, A_{22}]$ 为 i 和 j 的学科向量。认知邻近性的区间介于 0~1, 为 1 意味着两者具有完全相同的知识结构, 为 0 意味着两者具有完全不同的知识结构。

社会邻近性 (*Socprox*) 是测度合作主体之间社会关系的强弱。Granovetter 提出两者朋友圈重叠的程度表征他们之间的关系强弱, 因为共同的第三方为双方的互动提供信任基础和合作机会^[49]。本文借鉴其研究思想, 采用杰卡德相似系数来测度国家间的社会邻近性, 其数学含义是两个集合的交集元素在并集中所占的比例。公式如下:

$$Socprox_{ij} = \frac{Q_{ij}}{R_i + O_j - Q_{ij}} \quad (5)$$

式中: Q_{ij} 表示 i 和 j 共同的合作伙伴数量; R_i 和 O_j 分别表示与 i 和 j 建立合作关系的国家/地区数量。该值的范围介于 0~1, 1 意味着两者的“朋友圈”完全重合, 反之为 0。

共同语言 (*Comlang*) 测量的是英语是否两国/地区的主要语言。该变量为虚拟变量, 若英语均为两者的主要语言, 则为 1, 否则为 0。因为英语是科学界使用最为广泛的语言, 一直主导着知识生产。无论是 Web of Science 数据库还是 Scopus 数据库, 全球约 95% 的科研论文采用英语写作, 占据绝对的主导地位。此外, 英语也是很多科研人员首选的第二语言。鉴于英语的主导地位, 有必要考虑英语对于全球科研合作的影响。历史联系 (*Hislink*) 考虑两者是否具有殖民关系以及共同的殖民经历, 存在则为 1, 否则为 0。该数据来源于 CEPII 数据库。留学生是人才流动 (*Talflow*) 的重要体现。由于留学生是有向流动, 本文采用无向求和的方式获得两者间的留学生数量, 该数据来源于联合国教科文组织的 UIS 数据库。

4 全球科研合作网络演化动态

4.1 传统科学强国占据网络核心位置, 新兴科研国家/地区逐渐崛起

节点的度中心性越大, 表明该节点的网络地位越重要, 拥有的权力和影响力也就越大。表 2 汇报了国家/地区度中心性位置排名变化。

2000—2002 年美国、英国、德国、法国、意大利等发达经济体的度中心性排名位居前列, 占据网络中的重要位置。排名前 20 的榜单中, 仅有巴西、印度、南非和中国为发展中国家, 其余全部为欧美科学强国。这一发现表明全球科学体系存在比世界经济体系更加显著的“南北分割” (North-south Divide) 现象。具体而言, 美国的度中心性为 183, 意味着美国与 183 个国家/地区建立了科研合作关系, 是网络中最重要和最连通的节点。紧随其后的是英国、法国、德国、加拿大和瑞士等。巴西和印度是发展中国家的突出代表, 分别位列第 15 和 16 位。

2009—2011 年美国排名位列第 1, 仍然是网络中最重要节点, 度中心性为 195, 意味着美国的科研合作伙伴数量达到 195 个。英国和法国分别为 193 和 185, 位列第 2 位和第 3 位。加拿大、意大利、澳大利亚、日本、西班牙和中国等排名有所提升。然而, 瑞士、德国、荷兰、比利时、印度和南非等则有所下降。墨西哥和肯尼亚以强劲势头, 挤进前 20 强, 奥地利和芬兰则退出。

2017—2019 年欧美传统科学强国垄断全球科研网络的现状虽未明显改变, 但一些新兴的科研国家不断向网络的核心位置靠近, 挑战英美学术霸权。一方面, 度中心性排名前 20 强, 欧美发达国家依然高达 15 个, 表现出极强的网络控制力。美国、法国和英国依然占据前三的位置。法国的度中心性有较大增长, 与美国并列第 1, 同样拥有 204 个合作

表2 2000—2019年国家/地区在全球科学合作网络中的位置变化
Tab. 2 Country/region position changes in the global scientific collaboration network, 2000-2019

排名	2000—2002年		2009—2011年		2017—2019年	
	国家/地区	度中心性	国家/地区	度中心性	国家/地区	度中心性
1	美国	183	美国	195	美国	204
2	英国	177	英国	193	法国	204
3	法国	173	法国	185	英国	203
4	德国	162	加拿大	184	澳大利亚	202
5	加拿大	155	意大利	179	德国	200
6	瑞士	153	澳大利亚	177	中国	199
7	意大利	148	瑞士	177	西班牙	199
8	荷兰	148	德国	176	加拿大	198
9	澳大利亚	147	日本	175	印度	198
10	比利时	143	荷兰	169	南非	198
11	日本	140	西班牙	169	意大利	197
12	西班牙	140	比利时	165	荷兰	197
13	瑞典	136	巴西	165	瑞士	197
14	丹麦	130	瑞典	165	新西兰	196
15	巴西	127	中国	162	日本	195
16	印度	127	墨西哥	159	比利时	194
17	南非	123	印度	158	巴西	194
18	奥地利	119	南非	158	葡萄牙	193
19	中国	119	肯尼亚	154	俄罗斯	192
20	芬兰	115	丹麦	152	瑞典	192

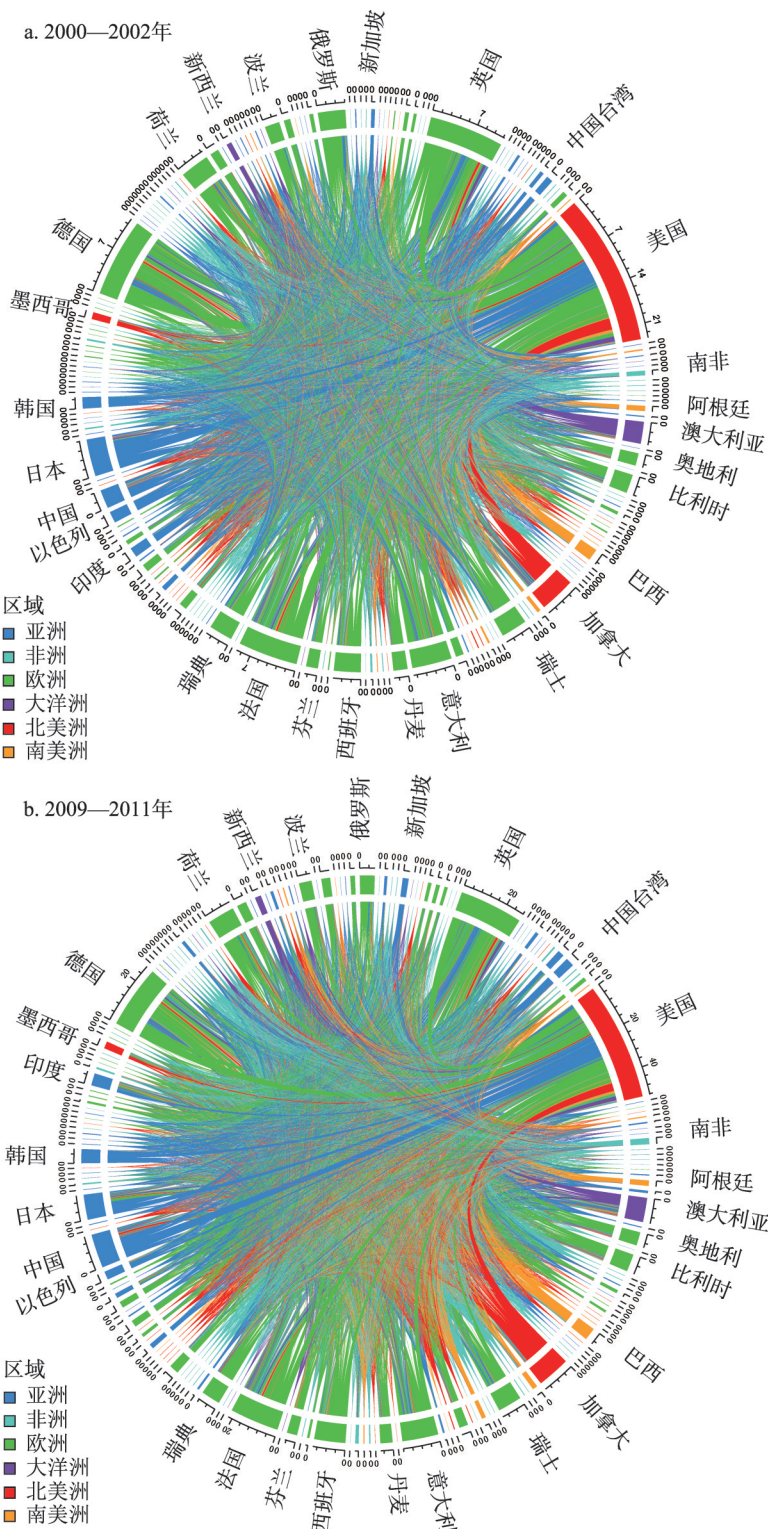
伙伴。澳大利亚取代德国，位居第4位；日本从第11位跌落至第15位。另一方面，部分新兴的科研国家/地区逐渐崛起，如中国、印度和南非等，网络影响力不断增强。中国从第15位上升至第6位，印度从第17位上升至第9位，南非从第18位飙升至10，有3个发展中国家挤进前10强，俄罗斯也进入了全球前20的榜单中。这表明发展中国家采取更加积极和开放的态度参与科学全球化，拥抱国际科研合作。

4.2 双边联系由中美联系取代美德联系,国际合作进入“中美”时代

图2采用R语言中的和弦图代码绘制了全球科研合作网络的双边关系。连线的宽度与国家/地区间合作论文的数量成正比，圆弧的长度与国家/地区的强度中心性成比例。2000—2019年双边关系数量快速增加，合作网络日益稠密化。这其中最为显著的变化莫过于中美联系取代美德联系，成为全球规模最大的双边合作关系。

2000—2002年全球科研合作网络的双边联系比较稀疏。196个国家/地区参与了国际科研合作，产生了5459条双边合作联系。其中，1452条边的联系强度仅为1，约占总数26.6%，这表明约1/4的国际合作属于偶然性联系。此外，全球顶尖的双边联系主要涉及美国、德国、英国、加拿大、法国和意大利等。美国在前10的合作联系中优势十分突出，有7对联系与美国有关；在前20的合作联系中，有13条围绕美国展开。其中，美国与德国的合作值最大，达到23179篇，美国—英国（22154篇）、美国—加拿大（19952篇）、美国—日本（17356篇）紧随其后。欧洲内部也有较强的联系。德国—英国、德国—法国和法国—英国联系分别排名第8、第9和第10位，三国构成欧盟核心三角。

2009—2011年全球科研合作网络的双边联系有所增强。201个国家/地区产生了8750条合作联系，相比前期增幅高达60.3%。合作数量为1的边有1892条，约占总数21.6%，



注: 连线的宽度与国家/地区间合作论文的数量成正比,
圆弧的长度与国家/地区的强度中心性成比例

图2

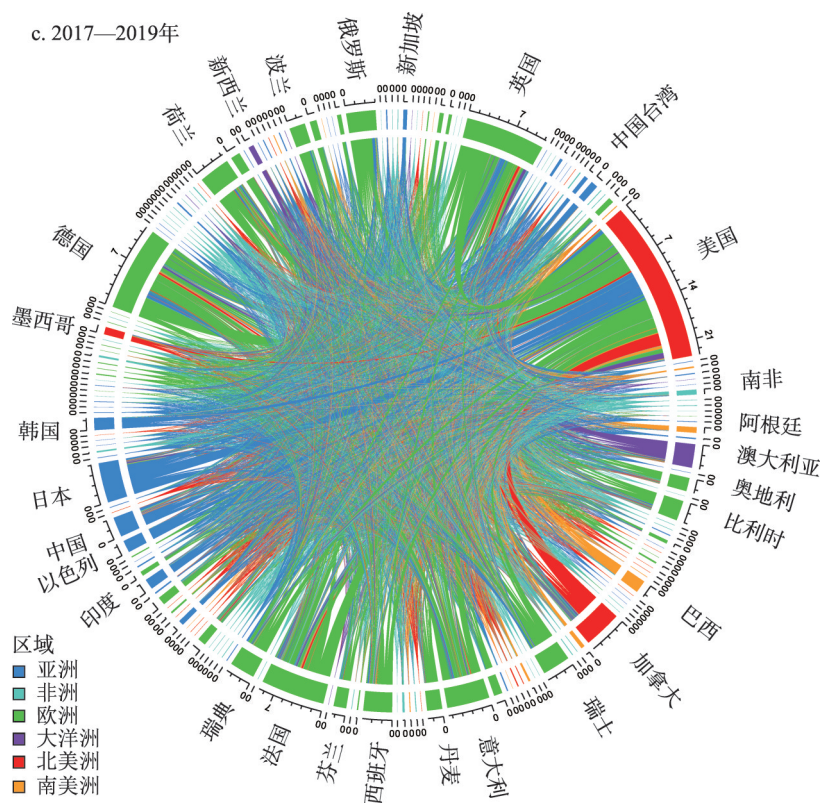


图2 2000—2019年全球科研合作网络的双边关系

Fig. 2 The bilateral partnerships in the global scientific collaboration network, 2000-2019

意味着偶然性的科研合作联系进一步下降。联系数量虽有所增长,但高强度联系被美国、英国、德国等传统科学强国所主导。在全球前10的联系中,美国是8个国家的合作伙伴;在前20的合作联系中,有12条与美国有关。此时,中美合作取代美德合作,一跃成为全球最大的双边关系,高达46336篇,略高于美国—英国(45542篇)、美国—德国(42746篇)和美国—加拿大(40610篇)合作,这表明国际合作开始步入“中美”时代。

2017—2019年全球科研合作网络的双边联系日益频繁。相比前期,合作联系飙升至15141条。联系强度为1的双边联系约占总数13.2%,表明大多数国家/地区对之间的科研合作更加稳健。国际合作依然高度集中在少数国家之间,主要包括美国、英国、中国和德国等。此时,中美合作高达151421篇,远远领先第2位的美国—英国(79249篇)和第3位的美国—德国(65164篇)合作,意味着国际合作全面进入“中美”时代。

4.3 网络结构由美国单一组团破碎为美国—沙特双组团,区域性科学中心崛起

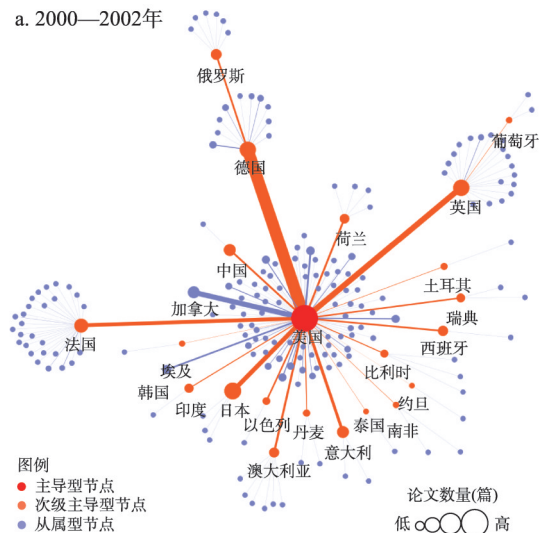
根据优势流分析,运用Gephi软件的Yifan Hu布局算法,绘制了全球科研合作网络的等级层次图(图3)。节点大小与国家/地区发表的科研论文数量成正比;连线宽度表示国家/地区间合作的论文数量。随着科学全球化的不断推进,合作网络的等级层次性逐渐降低,合作网络的去中心化趋势日趋明显,由连通网络发展为非连通网络,破碎为2个组团,区域性的科学合作中心逐渐崛起。

2000—2002年整个网络包含1个主导型节点、21个次级主导型节点和174个从属型节点。美国是网络唯一的主导型节点,也是98个国家/地区的第一大科研合作伙伴,通过间接传导控制了整个网络。这一结果也从侧面印证美国作为网络中超级的协调中心和巨

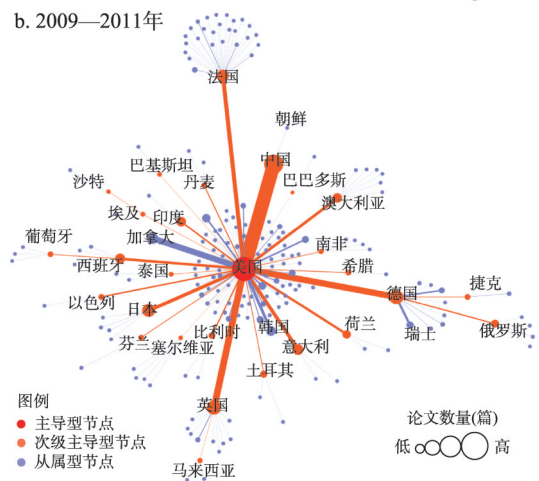
大的影响力。剩余的国家/地区被 21 个次级主导型节点所控制,如德国、英国、法国、意大利、澳大利亚和俄罗斯等。这些国家/地区多为所在区域的科学中心,充当连接域内国家/地区与美国的“桥梁”。此外,历史联系会带来更强的合作关系,大多数亚非拉国家/地区高度依赖其前宗主国。具体而言,法国的附属型节点高达 27 个,高度集中在非洲,主要为其前殖民地,如阿尔及利亚、喀麦隆和突尼斯等。部分英联邦国家/地区与英国保持紧密的联系,这似乎表明历史和语言也是影响国际合作的重要因素。11 个节点构成德国附属型集群,主要集中在东欧地区。俄罗斯的影响力集中在前独联体成员国,如中亚五国和亚美尼亚。澳大利亚的“势力范围”主要聚集在太平洋地区。中国是朝鲜最大的合作伙伴。剩余的 174 个国家/地区构成了庞大的从属型节点群。

2009—2011 年网络结构依然被美国所主导,包含 27 个次级主导型节点和 173 个从属型节点。美国仍是全网唯一的主导型节点,是 100 个经济体的最大合作对象,其直接影响范围有所扩大。法国、英国、澳大利亚、俄罗斯、南非和中国等 27 国组成了次级主导型节点群。除法国和英国的附属型节点遍及全球以外,其他国家/地区的影响范围主要分布在邻近区域。德国是奥地利、保加利亚、捷克、拉脱维亚和俄罗斯等最主要的合作伙伴,成为东欧地区的合作中心;澳大利亚对文莱、斐济、瑙鲁和汤加的影响力最大,是南太平洋的合作中心;日本是印度尼西亚、蒙古、缅甸、越南的最大合作对象,成为远东地区的合作中心;俄罗斯是中亚五国和白俄罗斯最大的合作伙伴,成为中亚地区的科学合作中心;塞尔维亚的影响力高度集中在北马其顿、黑山和波黑等国,是东南欧的合作中心;南非是莱索托、纳米比亚、斯威士兰、津巴布韦等国首要的

a. 2000—2002年



b. 2009—2011年



c. 2017—2019年

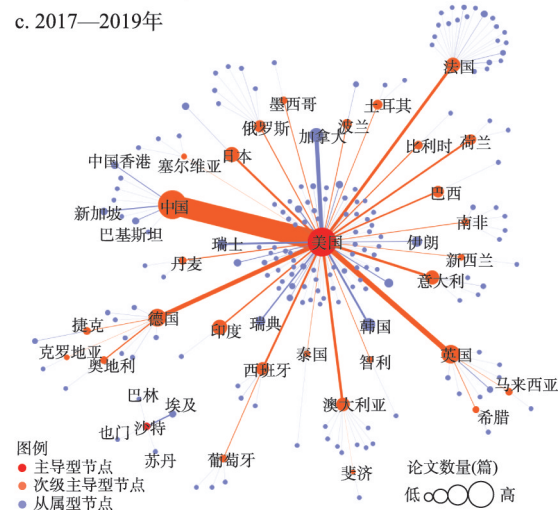


图3 2000—2019年全球科研合作网络的等级层次结构

Fig. 3 The hierarchical structure in the global scientific collaboration network, 2000-2019

合作伙伴,成为南非地区的合作中心。此时,中国仍只有朝鲜一个附属型节点。

2017—2019年全球科研合作网络破碎成两个非连通的组团:美国组团和沙特组团。美国组团是网络中最大的子群,包含1个主导型节点、29个次级主导型节点和171个从属型节点,共计201个节点。美国是组团内唯一的主导型节点,也是97个国家/地区最主要的合作伙伴。法国是21个国家/地区最大合作伙伴,主要为法国的前殖民地,以非洲为主,少量涉及大洋洲、欧洲和亚洲。英国的9个附属型节点高度集中在非洲,少量分布在欧洲和亚洲。德国是10个国家/地区的第一大合作伙伴,以东欧区域为主;澳大利亚的控制范围则高度集中于南太平洋地区;中国的附属型节点增加至8个,其影响范围以亚洲为主,开始波及到非洲;俄罗斯拥有6个附属型节点,主要集中为独联体成员国;南非是5个国家/地区最主要的合作伙伴,其覆盖范围由南非拓展至西非;意大利的影响范围以东南欧为主。加拿大、瑞典、韩国、伊朗等171个国家/地区构成该组团的从属型节点。沙特主导了另一个组团,包括埃及、也门、苏丹和巴林等,主要为阿拉伯国家。沙特和埃及互为对方最大合作伙伴,这在一定程度表明宗教信仰和文化习俗会影响国家/地区间科研合作。沙特凭借其油气资源的巨额收入,加大对科学研究的投入,有4所大学进入全球500强,已成为阿拉伯世界的科学中心。

5 全球科研合作网络驱动机制

5.1 网络演化的驱动力分析

由于本文的自变量是国家/地区间合作的科研论文数量,属于计数变量,其方差(3457)明显大于条件均值(875.1),存在过度分散的情形。遵循研究惯例,本文采用负二项式回归模型。此外,各变量之间相关系数并不大,平均方差膨胀因子VIF为2.15,表明模型不存在明显的共线性问题。表3汇报了固定效应的负二项式重力模型回归结果,方框内为一般标准误。模型1包含了所有的控制变量来捕捉国家/地区的异质性。正如预期的那样,国家的科学规模、研发人员投入和经济发展水平对国际科研合作产生积极而又显著的影响。

地理邻近性的回归系数在1%水平上具有正向显著性,意味着地理距离越近的国家/地区,其科研合作规模越大。这一发现与“一带一路”沿线国际科研合作和全球葡萄酒产业的科研合作的研究结果相一致,均确认了地理距离对科研合作产生阻碍作用^[11, 50]。其原因在于,科研合作主要涉及的是隐性知识,其对空间距离十分敏感。因此,研究假设1被证实。

认知邻近性的回归系数在1%的显著性水平上为正,表明具有共同知识基础的国家/地区间更容易开展科研合作。这一结果与Guan等有关全球可替代能源领域的专利合作^[51],贺灿飞等以中国与世界产业联系等实证研究相一致^[15],认知邻近性促进了区域间的知识流动。科研合作的发生需要一定的认知基础来吸收、理解和运用新知识,维持合作的顺利完成。因此,本文的发现支持研究假设2。

社会邻近性的回归系数具有积极而又显著的符号,表明两者的社会关系越密切,越有利于科研合作的展开和深化。这一结论与主流发现相一致, Ter Wal发现社会邻近性在德国生物技术发明网络演化过程中扮演着重要的作用^[52]。来自中国装备制造业的实证研究,吕国庆等发现社会邻近性丰富了主体间知识溢出的通道,已成为产业网络演化的重要因素^[28]。因此,研究假设3被支持。

表3 全球科研合作的回归结果

Tab. 3 Estimation results of the global scientific collaboration network

	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6	模型7	模型8
国家/地区 <i>i</i> 科学规模	0.414*** (0.008)	0.430*** (0.008)	0.392*** (0.008)	0.399*** (0.008)	0.414*** (0.008)	0.416*** (0.008)	0.408*** (0.008)	0.394*** (0.008)
国家/地区 <i>j</i> 科学规模	0.425*** (0.008)	0.440*** (0.008)	0.408*** (0.008)	0.404*** (0.009)	0.424*** (0.008)	0.425*** (0.008)	0.420*** (0.008)	0.404*** (0.009)
国家/地区 <i>i</i> 研发人数	0.051*** (0.010)	0.014 (0.010)	0.040*** (0.010)	0.051*** (0.010)	0.052*** (0.010)	0.051*** (0.010)	0.049*** (0.010)	0.009 (0.010)
国家/地区 <i>j</i> 研发人数	0.045*** (0.010)	0.007 (0.010)	0.039*** (0.010)	0.055*** (0.010)	0.047*** (0.010)	0.045*** (0.010)	0.046*** (0.010)	0.018* (0.010)
国家/地区 <i>i</i> 经济水平	0.121*** (0.010)	0.125*** (0.010)	0.127*** (0.010)	0.122*** (0.010)	0.122*** (0.010)	0.122*** (0.010)	0.121*** (0.010)	0.132*** (0.010)
国家/地区 <i>j</i> 经济水平	0.146*** (0.010)	0.150*** (0.010)	0.145*** (0.010)	0.146*** (0.010)	0.147*** (0.010)	0.147*** (0.010)	0.146*** (0.010)	0.151*** (0.010)
地理邻近性		0.256*** (0.014)						0.222*** (0.015)
认知邻近性			0.843*** (0.061)					0.687*** (0.061)
社会邻近性				0.580*** (0.056)				0.462*** (0.054)
共同语言					0.190*** (0.073)			0.274*** (0.074)
历史联系						0.222*** (0.062)		0.045 (0.063)
人才流动							0.015*** (0.003)	0.010*** (0.003)
常数	-7.436*** (0.109)	-7.587*** (0.109)	-7.652*** (0.110)	-7.523*** (0.109)	-7.452*** (0.109)	-7.461*** (0.109)	-7.373*** (0.109)	-7.806*** (0.111)
年份	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
国家/地区 <i>i</i>	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
国家/地区 <i>j</i>	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
观察值	15708	15708	15708	15708	15708	15708	15708	15708
样本量	2618	2618	2618	2618	2618	2618	2618	2618

注：括号内为标准误；* $p < 0.1$ ，** $p < 0.05$ ，*** $p < 0.01$ 。

共同语言对国家/地区间的科研合作具有积极而又显著的影响，确认了共同语言的促进作用。该结果也证实其他实证研究的发现，共同语言促进知识扩散，如技术全球化^[53]和国际知识流动^[54]。两国/地区均使用英语作为主要语言，比只有一方使用或者两方均不使用英语会产生更多的国际合作。本文非常审慎地将语言视为影响国际合作的重要因素。因此，结论也支持研究假设4。

历史联系对国际科研合作产生积极的影响，意味着曾经的殖民联系和共同的殖民者历史经历有利于国家/地区间的合作。这一结论支持了图3的分析结果，也证实了Montobbio等有关历史联系促进国际专利合作的结论^[53]、以及Migueluez等发现历史联系对国家/地区间专利引用的积极影响^[55]。因此，研究假设5被证实。

人才流动的回归系数通过1%水平的显著性检验，表明互相派遣的留学生能促进国家/地区间科研合作联系的形成与强化。这一结论与主流研究相一致，Migueluez等采用专

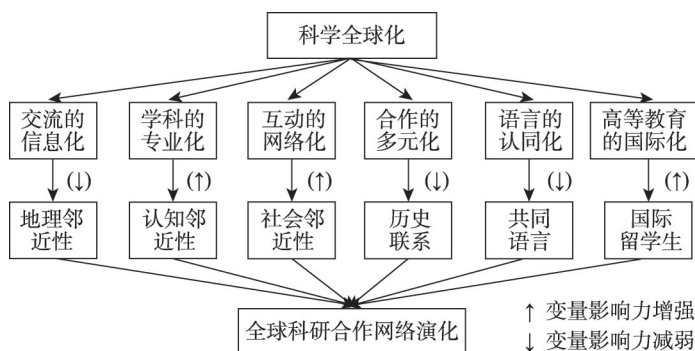


图4 全球科研合作网络演化的驱动机制框架

Fig. 4 Analytical framework of the driving mechanism of the global scientific collaboration network

利引用表征知识流动,证实技术移民对国际知识扩散的积极影响^[55]。人是知识流动的重要载体,留学生本身作为全球知识溢出的通道,发挥着桥梁的连接作用。Tian认为中国大量的海外科学家密切了中国和其他国家/地区之间的合作^[56]。因此,研究假设6被证实。

5.2 驱动因素的演变机制

驱动机制随着时间动态演化。为了保证不同群组回归系数的可比性,所有自变量均被Z-score标准化。此外,为尽可能避免内生性和反向因果问题,所有自变量滞后一期,故只有6个时段的估计结果。表4汇报了回归结果,发现地理、历史和语言因素的重要性

表4 全球科研合作的驱动因素时间演化

Tab. 4 Temporal evolution of the driving factors of the global scientific collaboration network

	时段					
	2003—2005	2006—2008	2009—2011	2012—2014	2015—2017	2017—2019
地理邻近性	0.506*** (0.024)	0.503*** (0.030)	0.432*** (0.021)	0.306*** (0.019)	0.284*** (0.020)	0.254*** (0.018)
认知邻近性	0.149*** (0.022)	0.187*** (0.028)	0.208*** (0.025)	0.208*** (0.024)	0.231*** (0.026)	0.263*** (0.022)
社会邻近性	0.187*** (0.028)	0.145*** (0.030)	0.318*** (0.032)	0.511*** (0.031)	0.524*** (0.031)	0.626*** (0.036)
共同语言	0.083*** (0.019)	0.051*** (0.015)	0.033** (0.013)	0.005 (0.012)	0.000 (0.010)	0.012 (0.009)
历史联系	0.074*** (0.019)	0.066*** (0.020)	0.059*** (0.018)	0.075*** (0.018)	0.050*** (0.017)	0.035** (0.0145)
人才流动	0.323*** (0.032)	0.386*** (0.030)	0.302*** (0.027)	0.282*** (0.024)	0.253*** (0.026)	0.313*** (0.025)
国家/地区 <i>i</i> 控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
国家/地区 <i>j</i> 控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES
常数项	4.271*** (0.025)	4.335*** (0.024)	4.455*** (0.021)	4.641*** (0.019)	4.783*** (0.028)	4.411*** (0.042)
观察值	2628	2628	2628	2628	2628	2628
Alpha	0.600	0.625	0.606	0.557	0.512	0.434
Wald chi2	13708.97	11456.21	14108.83	17239.37	8529.62	10407.21
Prob > chi2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Log pseudolikelihood	-10921.268	-12127.680	-13715.301	-15384.121	-16958.363	-17609.594

注: 括号内为稳健标准误; * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$; 全部自变量被Z-score标准化。

在下降, 认知和社会邻近性的影响在增强, 国际留学生的作用波动上升。本文提出了交流的信息化、学科分工的专业化、互动的网络化、合作的多元化、语言的认同化和高等教育的国际化为主要内容的“六化”分析框架来解释影响因素的演化及作用机制(图4)。

地理邻近性的回归系数呈现逐渐下降的趋势, 从2003—2005年的0.506下降至2017—2019年的0.254, 这意味着地理邻近性的重要性随着时间而逐渐降低。这一结果与Ter Wal有关德国生物技术网络^[52]、Cappelli等有关欧洲区域之间专利合作^[13]的研究相一致, 均发现地理距离的作用在下降。在信息通信技术飞速发展的背景下, 交流的信息化, 如高速网络、低成本/廉价航空、视频会议软件(Zoom等)、国际会议和期刊开放获取等增加研究人员之间的临时空间邻近性, 极大地降低空间距离的阻隔作用, 促进了科研人员之间的交流和互动^[57]。综上所述, 本文认为地理因素的作用随着时间在逐渐减弱, 但并没有消亡。

认知邻近性的回归系数呈现逐渐增加的趋势, 从0.149上升至0.263, 表明认知邻近性对科研合作的作用在增大。认知邻近性主要通过相似性(Similarity)和互补性(Complementarity)两个途径产生影响^[58]: 一方面, 科学全球化促进了科研工作者之间的劳动分工, 科研领域不断细化且学科发展向纵深推进, 科学家们变得越来越专业化。因此, 需要相似的知识基础为提供合作前提。另一方面, 科研活动的复杂性日益提高, 因为新知识会覆盖以前相对简单的知识, 并以此不断向前推进^[59-60]。许多科学问题已经不是单一学科能够应对, 需要更加多样化和互补性的知识储备, 跨学科研究和学科交叉融合不断发展, 这就要求更大规模的团队合作和更大范围内的国际合作。因此, 国际科研合作日益取决于国家/地区之间的认知邻近性^[61]。

社会邻近性的标准化系数也呈现递增的趋势, 从0.187增加至0.626。该结果与吕国庆等^[28]的发现相类似, 社会邻近性逐渐发展成为中国装备制造业寻求合作伙伴的重要方式。全球化增加了国家之间的连接性和相互依赖性, 科研活动的网络化趋势也愈加突出^[62]。大连接促进大合作, 大合作促成网络的涌现。国际科研合作不断深化, 国家/地区之间的科研联系日益密切, 形成了相互作用、相互影响、相互依赖的复杂网络, 从而将群体行为内化为群体规范, 形成强大内聚力。此外, 以共同合作伙伴为内容的社会机会结构(Social Opportunity Structures)也有利于网络形成^[63]。国家/地区被镶嵌在全球网络之中, 相互间的联系不可避免地受到第三方的影响。国家/地区的选择行为部分上取决于其在网络结构中的位置^[64]。随着网络发育程度的提高, 网络化特征对国际科研合作的影响会更加明显。

共同语言的回归系数由积极显著转变为正向不显著, 这意味着英语在国际合作中所发挥的作用在衰退。在研究早期, 英语国家间比非英语国家间更容易展开合作。后期, 语言因素变得不再显著。基于欧洲的专利数据, Cappelli等发现语言对于缄默知识(专利合作)和可编码知识(专利引用)流动的作用逐渐下降^[13]。随着全球化进程加快, 英语已经成为世界上最强势和使用最广泛的语言, 全球约有110个国家/地区将英语作为母语、官方语言或第二语言, 超过其他任何语言。根据民族语言网(Ethnologue: Languages of the World)的研究报告, 英语从1900年全球第三大语言一跃成为2013年会使用人数最多的语言^[65]。2020年全球约12.6亿人会使用英语, 其中作为第二语言的使用者为8.98亿。因此, 英语成为非英语国家/地区的研究者首选的第二语言。以英语为媒介, 建立起了不同语种研究者之间合作的桥梁。中美合作超越其他任何英语国家/地区之间的合作, 原因之一在于中国建立了从小学到大学的英语学习体系。

历史联系的回归系数也呈下降的趋势,从0.074降低至0.035,表明基于殖民关系的历史联系,其重要性正在逐渐减弱。科学全球化带来了合作伙伴的多元化,殖民地不再单一依赖原宗主国的知识溢出^[66]。一些新的科学计划为国际合作开辟了新的道路,如欧盟的伊拉斯谟世界计划(Erasmus Mundus)等。越来越多的国家/地区加大国际合作投入,设立国际合作专项基金,成立国际合作局等专门机构,旨在促进本国与其他国家/地区科研人员的合作。其次,越来越多的“大科学”(Big Science)计划和多国合作项目是推动国际合作的主要力量之一,为其他国家/地区参与国际合作提供了更多选择,减少对历史联系的依赖。最后,第二次世界大战以后国际组织运动蓬勃发展,1945—2017年间全球共成立47287个国际组织,占《国际组织年鉴》(Yearbook of International Organizations)收录总数的62.5%^[67]。全球200多个国家/地区成立了75613个政府间组织和国际非政府组织,这些组织为殖民地摆脱宗主国的束缚,拓展国际合作伙伴提供新平台。

人才流动的回归系数一直积极且显著,呈现波动上升的态势,这意味着国际留学生对全球科研合作的总体影响日益重要。Freeman认为国际留学生数量的急剧增长,极大地推动了科学全球化的进程^[1]。因此,以留学生为主要标志的高等教育国际化,也是促进全球科研合作的重要力量。根据经济合作与发展组织(OECD)发布的《2018教育概览》(Education at a Glance 2018)显示,1998—2016年间国际高等教育留学生人数翻倍,研究生以上阶段学位对留学生的吸引力更大^[68]。高等教育的国际化促成了留学生在世界范围内选择大学,无论是国外就业还是学成归国,他们都充当着国际科研合作的纽带^[42]。Saxenian指出单向流动的“人才外流”旧模式正在慢慢瓦解,逐渐形成更为复杂和分散的双向流动的“人才循环”^[69]。如何吸引海外留学生回国,充分利用“人才循环”的价值及其关联的全球网络是发展中国家/地区面对的重要问题^[70]。虽然全球留学生规模的总体趋势是逐步增加的,但国家/地区对间的派出和接受数量存在小幅度的波动,这或许是该回归系数波动上升的原因。

6 结论与讨论

在科学全球化时代,国家/地区间的科研合作日益频繁,国际合作成为新时代国际关系的重要内容。与此同时,世界正经历百年未有之大变局,全球进入大变革的新时代。全球化与逆全球化并存、国际力量对比变化和大国博弈日趋加剧,全球科研合作既面临历史性机遇,也面临重大挑战。因此,探究全球科研合作网络的动态演化及其驱动机制是十分重要的议题。基于2000—2019年的国际科研论文合作数据,本文采用“点—线—网”的分析框架和动态的研究视角,初探了全球科研合作网络的演化特征与驱动机制。

全球科研合作网络演化呈现以下发展态势:传统的欧美科学强国一直占据网络的核心位置,新兴科研国家/地区的网络影响力不断增强,两者共同推动世界科学体系演化;国家/地区间的双边联系急剧增加,中美合作取代美德合作,成为全球最重要的双边联系;国际科研合作网络的等级层次性逐渐降低,由单一组团破碎为美国—沙特双组团,科学全球化的同时伴随着强烈的区域化倾向。本文以演化经济地理学的多维邻近性理论为基础,吸收国际贸易和人力资本流动理论的研究成果,提出六要素(地理、认知、社会、语言、历史和人才交流)的全球科研合作网络演化因素的解释框架,实证结果表明地理邻近性、社会邻近性、认知邻近性、共同语言、历史联系、国际留学生均对国家/地区间科研合作产生积极而又显著的影响。更为重要的是,本文还发现地理、历史和语言因素的重要性随着网络演化逐渐降低,认知和社会邻近性的作用逐渐增强,国际留学生

的影响力波动上升,并从交流的信息化、学科的专业化、互动的网络化、合作的多元化、语言的认同化和高等教育的国际化等6个方面进行驱动机制动态演变的初步探索。

实证研究表明多维邻近性理论框架对于跨区域的知识流动具有较好的解释力,本文的回归结果也证实了其他有关全球葡萄酒产业的科研合作^[50]、全球制药领域的研究合作^[71]、国际专利合作^[53]以及欧盟区域间科学合作^[72]的研究发现,邻近的地理距离、相似的知识基础和根植性的社会关系均是促进知识扩散的重要驱动力。近年来,越来越多的学者认识到网络演化不仅受到邻近性因素的影响,还受到其他多种机制的作用,有必要建立更加综合的分析框架^[19]。本文还发现共同的语言文化、曾经的历史联系和双边的人员交流也是促进国际科研合作的重要变量,丰富了全球知识流动网络演化的理论体系。除此之外,现有研究大多采用静态的研究逻辑,探究跨区域知识网络的形成机制,却对知识网络背后的演化机制关注较少。知识网络随着时间变化而不断演化,是一个动态演变的过程。仅有少量学者采用动态视角进行了探索性的研究,关于驱动机制的变化趋势存在争论。本文与Ter Wal^[52]、Cappelli等的发现相一致^[13]:地理邻近性的重要性随着网络演化而降低,合作网络的驱动力更多是依靠社会邻近性、认知邻近性和双边的人员交流。然而,Balland等^[73]和Morescalchi等^[74]的研究结果表明地理邻近性的作用并没有弱化,而是日益重要。与此同时,本文在科学全球化的宏观背景下,从交流的信息化、学科的专业化、互动的网络化、合作的多元化、语言的认同化和高等教育的国际化等六个方面详细论述网络演化的内在机理。因此,本文进一步回应了有关知识网络演化驱动机制的学术争论。在此,本文也呼吁更多的实证研究来揭示知识网络的演化机理,从而解开知识网络演化的灰箱。

全球科研合作不仅事关国家/地区的科技创新发展战略,也是当前科技地理学研究的热点主题,仍有大量的理论和实证问题值得深入研究。① 重力模型解释国家/地区间的科研合作具有很大的局限性。随着科学活动的网络化特征日益明显,忽视网络内生机制对合作网络演化的影响,则会造成实证结果的片面性。近年来,新兴的随机指数图模型和随机行动者模型能够同时模拟网络内生机制、多维邻近性和节点属性特征对科研合作网络演化的影响,为我们理解科学全球化提供了新方法。② 随着逆全球化思潮兴起和中美之间矛盾的激化,中美之间的科研合作日益受阻,呈现部分脱钩之势。新形势下的全球科研合作网络演化及风险治理研究就显得尤为重要,研判中美脱钩风险,提出应对之策应是未来学者关注的新议题。③ 邻近性因素与自身以及非邻近性因素间的交互作用也是学术界关注的热点主题,有必要在未来的研究议程引入新内容。

参考文献(References)

- [1] Freeman R B. Globalization of scientific and engineering talent: International mobility of students, workers, and ideas and the world economy. *Economics of Innovation and New Technology*, 2010, 19(5): 393-406.
- [2] Du Debin, Zhang Renkai, Gong Li, et al. *Internationalization of University Science and Technology: International Experience and Chinese Practice*. Beijing: China Renmin University Press, 2015. [杜德斌, 张仁开, 龚利, 等. 高校科技国际化: 国际经验与中国的实践. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.]
- [3] Wang Yiming. Changes unseen in a century, high-quality development, and the construction of a new development pattern. *Management World*, 2020, 36(12): 1-13. [王一鸣. 百年大变局、高质量发展与构建新发展格局. 管理世界, 2020, 36(12): 1-13.]
- [4] Zhang Jie. The game strategy and symbiosis logic of the strategic competition of science and technology innovation between China and the United States. *Asia-Pacific Economic Review*, 2019(4): 5-12, 149. [张杰. 中美科技创新战略竞争的博弈策略与共生逻辑. 亚太经济, 2019(4): 5-12, 149.]
- [5] Van Noorden R. The number of researchers with dual US-China affiliations is falling. *Nature*, 2022, 606(7913): 235-236.

- [6] Si Yuefang, Sun Kang, Zhu Yiwen, et al. Spatial structure and influencing factors of knowledge network of highly cited Chinese scientists. *Geographical Research*, 2020, 39(12): 2731-2742. [司月芳, 孙康, 朱贻文, 等. 高被引华人科学家知识网络的空间结构及影响因素. *地理研究*, 2020, 39(12): 2731-2742.]
- [7] Liu Fengchao, Ma Rongkang, Jiang Nan. Research on evolutionary paths of industry-university-research institute networks of patent collaboration based on the "985 Universities". *China Soft Science*, 2011(7): 178-192. [刘凤朝, 马荣康, 姜楠. 基于“985高校”的产学研专利合作网络演化路径研究. *中国软科学*, 2011(7): 178-192.]
- [8] Wang Qiuyu, Zeng Gang, Lyu Guoqing. Structural evolution of innovation networks of China's equipment manufacturing industry. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 251-264. [王秋玉, 曾刚, 吕国庆. 中国装备制造业产学研合作创新网络初探. *地理学报*, 2016, 71(2): 251-264.]
- [9] 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.]
- [10] Lin Xiaofeng, Jiang Haining. Analysis on the characteristics of knowledge cooperation network of "the 1000- Youth Elite" in the Yangtze River Delta Region on the basis of paper cooperation. *World Regional Studies*, 2020, 29(2): 388-396. [林晓峰, 姜海宁. 基于论文合作的长三角“青年千人”知识合作网络特征分析. *世界地理研究*, 2020, 29(2): 388-396.]
- [11] Gu Weinan, Liu Hui, Wang Liang. The multiple structure and formation mechanisms of the scientific collaboration network in the Belt and Road regions. *Geographical Research*, 2020, 39(5): 1070-1087. [顾伟男, 刘慧, 王亮. “一带一路”沿线国家科研合作网络的多元结构及形成机制. *地理研究*, 2020, 39(5): 1070-1087.]
- [12] Boschma R. Proximity and innovation: A critical assessment. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61-74.
- [13] Cappelli R, Montobbio F. European integration and knowledge flows across European regions. *Regional Studies*, 2016, 50(4): 709-727.
- [14] Wang Qingxi, Hu Zhixue. Urban innovation network of Zhejiang from the perspective of multidimensional proximities. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(8): 1380-1388. [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. *地理科学*, 2021, 41(8): 1380-1388.]
- [15] He Canfei, Yu Changda. Multi-dimensional proximity, trade barriers and the dynamic evolution of industrial linkages between China and the world market. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(2): 275-294. [贺灿飞, 余昌达. 多维邻近性、贸易壁垒与中国: 世界市场的产业联系动态演化. *地理学报*, 2022, 77(2): 275-294.]
- [16] Breschi S, Lissoni F. Mobility of skilled workers and co-invention networks: An anatomy of localized knowledge flows. *Journal of Economic Geography*, 2009, 9(4): 439-468.
- [17] Zhou Ruibo, Chen Yinan, Qin Yuanhong. Evolution and influencing factors of global high-tech products trade network. *World Regional Studies*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20220308.0844.002.html>, 2022-09-14. [周锐波, 陈依楠, 覃远红. 全球高技术产品贸易网络演化及影响因素. *世界地理研究*: 1-13, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20220308.0844.002.html>, 2022-09-14.] (网络首发)
- [18] Gui Q C, Liu C L, Du D B. Globalization of science and international scientific collaboration: A network perspective. *Geoforum*, 2019, 105: 1-12. DOI: 10.1016/j.geoforum.2019.06.017.
- [19] Gu Weinan, Liu Hui, Wang Liang. International research on the evolution mechanisms of innovation networks. *Progress in Geography*, 2019, 38(12): 1977-1990. [顾伟男, 刘慧, 王亮. 国外创新网络演化机制研究. *地理科学进展*, 2019, 38(12): 1977-1990.]
- [20] Balland P A, Boschma R, Frenken K. Proximity and innovation: From statics to dynamics. *Regional Studies*, 2015, 49(6): 907-920.
- [21] Hermans F. The contribution of statistical network models to the study of clusters and their evolution. *Papers in Regional Science*, 2021, 100(2): 379-403.
- [22] Coscia M, Neffke F M H, Hausmann R. Knowledge diffusion in the network of international business travel. *Nature Human Behaviour*, 2020, 4(10): 1011-1020.
- [23] Audretsch D, Keilbach M. Entrepreneurship capital and economic performance. *Regional Studies*, 2004, 38(8): 949-959.
- [24] Hu Yang, Li Xun. The impact of multi-dimensional proximities on university-industry cooperative innovation: Case studies of high-tech enterprises in Guangzhou. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 695-706. [胡杨, 李勋. 多维邻近性对产学研合作创新的影响: 广州市高新技术企业的案例分析. *地理研究*, 2017, 36(4): 695-706.]
- [25] Cohen W M, Levinthal D A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 1990, 35(1): 128-152.

- [26] Winter S G, Nelson R R. An Evolutionary Theory of Economic Change. Cambridge: Harvard University Press, 1985.
- [27] Boschma R, Frenken K. The spatial evolution of innovation networks. A proximity perspective//Boschma R, Martin R. The Handbook of Evolutionary Economic Geography. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2010: 120-135.
- [28] Lv Guoqing, Zeng Gang, Gu Nana. Dynamic evolution of innovation network in China's equipment manufacturing industry: Geographic proximity versus social proximity. China Soft Science, 2014(5):97-106. [吕国庆, 曾刚, 顾娜娜. 基于地理邻近与社会邻近的创新网络动态演化分析: 以我国装备制造业为例. 中国软科学, 2014(5):97-106.]
- [29] Uzzi B, Spiro J. Collaboration and creativity: The small world problem. American Journal of Sociology, 2005, 111(2): 447-504.
- [30] Schilling M A, Phelps C C. Interfirm collaboration networks: The impact of large-scale network structure on firm innovation. Management Science, 2007, 53(7): 1113-1126.
- [31] Maskell P, Malmberg A. The competitiveness of firms and regions: 'Ubiquitification' and the importance of localized learning. European Urban and Regional Studies, 1999, 6(1): 9-25.
- [32] Wang Yue. On the transfer of knowledge in industrial cluster zones. China Coal, 2003, 29(8): 21-22, 24. [王越. 试论产业聚集区的知识转移. 中国煤炭, 2003, 29(8): 21-22, 24.]
- [33] Amano T, González-Varo J P, Sutherland W J. Languages are still a major barrier to global science. PLoS Biology, 2016, 14(12): e2000933. DOI: 10.1371/journal.pbio.2000933.
- [34] Wang Tao, Hennemann Stefan, Liefner Ingo, et al. Spatial structure evolution of knowledge network and its impact on the NIS: Case study of biotechnology in China. Geographical Research, 2011, 30(10): 1861-1872. [汪涛, Stefan Hennemann, Ingo Liefner, 等. 知识网络空间结构演化及对NIS建设的启示: 以我国生物技术知识为例. 地理研究, 2011, 30(10): 1861-1872.]
- [35] North D C. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [36] Knoben J, Oerlemans L A G. Proximity and inter-organizational collaboration: A literature review. International Journal of Management Reviews, 2006, 8(2): 71-89.
- [37] Trippl M. Scientific mobility and knowledge transfer at the interregional and intraregional level. Regional Studies, 2013, 47(10): 1653-1667.
- [38] Saxenian A L, Motoyama Y, Quan X. Local and Global Networks of Immigrant Professionals in Silicon Valley. San Francisco, CA: Public Policy Institute of California, 2002.
- [39] Breschi S, Lissoni F, Miguelez E. Foreign-origin inventors in the USA: Testing for diaspora and brain gain effects. Journal of Economic Geography, 2017, 17(5): 1009-1038.
- [40] Liu Ye, Shen Jianfa, Liu Yuqi. Transnational mobility of the highly skilled: A review. Human Geography, 2013, 28(2): 7-12. [刘晔, 沈建法, 刘于琪. 西方高端人才跨国流动研究述评. 人文地理, 2013, 28(2): 7-12.]
- [41] Choudhury P. Return migration and geography of innovation in MNEs: A natural experiment of knowledge production by local workers reporting to return migrants. Journal of Economic Geography, 2016, 16(3): 585-610.
- [42] Hou Chunguang. Spatial evolution, mechanism, and effect of global international student mobility and China's response [D]. Shanghai: East China Normal University, 2021. [侯纯光. 全球留学生流动的空间演化、机理、效应与中国响应 [D]. 上海: 华东师范大学, 2021.]
- [43] Li Dandan, Wang Tao, Wei Yehua, et al. Spatial and temporal complexity of scientific knowledge network and technological knowledge network on China's urban scale. Geographical Research, 2015, 34(3): 525-540. [李丹丹, 汪涛, 魏也华, 等. 中国城市尺度科学知识网络与技术知识网络结构的时空复杂性. 地理研究, 2015, 34(3): 525-540.]
- [44] Liu Chengliang, Gui Qinchang, Duan Dezhong, et al. Structural heterogeneity and proximity mechanism of global scientific collaboration network based on co-authored papers. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(4): 737-752. [刘承良, 桂钦昌, 段德忠, 等. 全球科研论文合作网络的结构异质性及其邻近性机理. 地理学报, 2017, 72(4): 737-752.]
- [45] Sun Yao, Wang Xianwen. Scientometrics profile of China's international papers since its reform and opening: A study based on InCites database. Science of Science and Management of S&T, 2018, 39(12): 46-53. [孙瑶, 王贤文. 改革开放以来中国国际科学论文产出的计量分析: 基于InCites数据库的研究. 科学学与科学技术管理, 2018, 39(12): 46-53.]
- [46] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification. Social Networks, 1978, 1(3): 215-239.
- [47] Nystuen J D, Dacey M F. A graph theory interpretation of nodal regions. Papers of the Regional Science Association. 1961, 7(1): 29-42.
- [48] Liu Fengchao, Wu Delin, Ma Rongkang. Patent technology licensing and innovation performance of licensee firms: The moderating effects of three different types of proximity. Science Research Management, 2015, 36(4): 91-100. [刘凤朝,

- 郭德林, 马荣康. 专利技术许可对企业创新产出的影响研究: 三种邻近性的调节作用. 科研管理, 2015, 36(4): 91-100.]
- [49] Granovetter M S. The strength of weak ties. *American Journal of Sociology*, 1973, 78(6): 1360-1380.
- [50] Cassi L, Morrison A, Rabellotti R. Proximity and scientific collaboration: Evidence from the global wine industry. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 2015, 106(2): 205-219.
- [51] Guan J C, Yan Y. Technological proximity and recombinative innovation in the alternative energy field. *Research Policy*, 2016, 45(7): 1460-1473.
- [52] Ter Wal A L J. The dynamics of the inventor network in German biotechnology: Geographic proximity versus triadic closure. *Journal of Economic Geography*, 2014, 14(3): 589-620.
- [53] Montobbio F, Sterzi V. The globalization of technology in emerging markets: A gravity model on the determinants of international patent collaborations. *World Development*, 2013, 44: 281-299.
- [54] Orazbayev S. International knowledge flows and the administrative barriers to mobility. *Research Policy*, 2017, 46(9): 1655-1665.
- [55] Miguelez E, Temgoua C N. Inventor migration and knowledge flows: A two-way communication channel? *Research Policy*, 2020, 49(9): 103914. DOI: 10.1016/j.respol.2019.103914.
- [56] Tian P. China's diaspora brings it home. *Nature*, 2015, 527(7577): S68-S71.
- [57] Torre A. On the role played by temporary geographical proximity in knowledge transmission. *Regional Studies*, 2008, 42(6): 869-889.
- [58] Makri M, Hitt M A, Lane P J. Complementary technologies, knowledge relatedness, and invention outcomes in high technology mergers and acquisitions. *Strategic Management Journal*, 2010, 31(6): 602-628.
- [59] Arthur W B. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *The Economic Journal*, 1989, 99(394): 116-131.
- [60] Balland P A, Jara-Figueroa C, Petralia S G, et al. Complex economic activities concentrate in large cities. *Nature Human Behaviour*, 2020, 4(3): 248-254.
- [61] Montobbio F, Primi A, Sterzi V. IPRs and international knowledge flows: Evidence from six large emerging countries. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 2015, 106(2): 187-204.
- [62] Adams J. The rise of research networks. *Nature*, 2012, 490(7420): 335-336.
- [63] Leifeld P, Schneider V. Information exchange in policy networks. *American Journal of Political Science*, 2012, 56(3): 731-744.
- [64] Borgatti S P, Mehra A, Brass D J, et al. Network analysis in the social sciences. *Science*, 2009, 323(5916): 892-895.
- [65] Eberhard D M, Simons G F, Fennig C D. *Ethnologue: Languages of the World*. 23rd edn. Dallas, TX: SIL International, 2020. <https://www.ethnologue.com>.
- [66] Nordling, L. Developing partnerships. *Nature*, 2015, 527(7577): S60-S62.
- [67] Union of International Associations. *Yearbook of International Organizations*. Belgium: Union of International Associations, 2022. <https://ybio.brillonline.com>.
- [68] OECD. *Education at a Glance 2018: OECD Indicators*. Paris: OECD Publishing, 2018. DOI: 10.1787/eag-2018-en.
- [69] Saxenian A L. *The New Argonauts: Regional Advantage in a Global Economy*. Cambridge: Harvard University Press, 2006.
- [70] Royal Society. *Knowledge, Networks and Nations: Global Scientific Collaboration in the 21st Century*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 26-28.
- [71] Cantner U, Rake B. International research networks in pharmaceuticals: Structure and dynamics. *Research Policy*, 2014, 43(2): 333-348.
- [72] Hoekman J, Frenken K, Tijssen R J W. Research collaboration at a distance: Changing spatial patterns of scientific collaboration within Europe. *Research Policy*, 2010, 39(5): 662-673.
- [73] Balland P A, De Vaan M, Boschma R. The dynamics of interfirm networks along the industry life cycle: The case of the global video game industry, 1987-2007. *Journal of Economic Geography*, 2013, 13(5): 741-765.
- [74] Morescalchi A, Pammolli F, Penner O, et al. The evolution of networks of innovators within and across borders: Evidence from patent data. *Research Policy*, 2015, 44(3): 651-668.

The network dynamics and driving mechanisms of global scientific cooperation

GUI Qinchang^{1,2}, DU Debin^{1,2}, LIU Chengliang^{1,2}

(1. Institute for Global Innovation and Development, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

2. School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: As the world enters a new era of big developments and changes, the inter-country and inter-region scientific collaboration has seen fundamental changes in its environment, which not only faces unprecedented opportunities but also encounters grand challenges. Consequently, exploring the network dynamics and driving mechanisms of global scientific collaboration plays a critical role in the judgment of global science competition and cooperation. This paper, from the perspective of "node-line-network" and based on the dynamic logic in proximity approaches, uses the internationally co-authored papers data from the InCites database of Clarivate Analytics company for the period 2000- 2019, and investigates the position of countries/regions, bilateral partnerships between countries/regions, the evolution of network structure, and reveals dynamic mechanisms of international scientific collaboration network as well as how the influence of driving factors changes over time. Firstly, results show that the traditional science powerhouses, such as the United States, the United Kingdom, France, and Germany, have occupied central and critical positions in the network. At the same time, the emerging scientific nations have strengthened their centrality and influence in the network, including China, South Korea, India, and South Africa, which are gradually close to the core position. Secondly, the number of ties between countries has increased dramatically. The research partnership between Germany and the United States is gradually giving way to China-US collaboration, which becomes the most important bilateral collaboration between countries in the world. Thirdly, the global scientific collaboration network is characterized by a star-shaped structure. As globalization and networking of science advance, decentralization in the collaboration network grows increasingly refined. The whole network has evolved from a single group dominated by the United States to a double group including the United States and Saudi Arabia. Finally, the extended gravity model indicates that geographical proximity, social proximity, cognitive proximity, common language, historical links, and talent flows have a positive effect on international scientific collaboration. As the knowledge network evolves, the importance of geographical proximity, common language, and historical links has waned over time, while the significance of social proximity, cognitive proximity, and talent flows has increased.

Keywords: international scientific collaboration network; globalization of science; knowledge networks; proximity dynamics; network evolution