

“一带一路”沿线国家科研合作网络的多元结构及形成机制

顾伟男^{1,2,4}, 刘慧^{1,2,3}, 王亮^{1,2,4}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 科技合作是“一带一路”倡议“民心相通”的重要组成部分, 2013年以来取得显著进展。以“一带一路”沿线65国为研究区, 运用WOS核心集合论文合作数据构建国家间科研合作矩阵, 通过GIS空间分析、社会网络分析以及负二项回归分析法, 探究沿线各国2013年和2018年科研合作网络的多元化结构及形成机制, 结果表明: ① 在全球尺度, “一带一路”沿线各国与其他国家之间的知识流动日趋频繁, 但内部合作紧密程度不及与沿线以外地区的合作程度。沿线区域对全球的科研合作网络由欧洲、美国和中国“三足鼎立”骨架结构向欧洲、美国、中国、加拿大、日本、澳大利亚等多个密集区构成的“多边形”骨架结构转变。② “一带一路”沿线地区的合作网络的空间结构, 由中国、中东欧区组成的“双核发散”向“一区多点”构成的“多极化”空间结构转变; 等级结构则呈现典型的“中心-外围”等级层次结构, 且由单核心向双核心转变; 控制结构呈现出由“单核心”向四周高、中间低的“多超多强”盆地型控制结构转变。③ 沿线国家的科研实力、经济发展水平、对外开放度等国家主体属性以及地理邻近性、社会邻近性等是沿线科研合作网络形成的主要机制, 其中科研实力、社会邻近性的作用最大, 地理距离对科研合作的阻碍作用逐渐减弱。

关键词: 科研合作网络; 多元结构; 形成机制; “一带一路”沿线国家

DOI: 10.11821/dljy020190376

1 引言

“一带一路”是中国政府于2013年提出的一个新型国际合作倡议, 正获得世界上越来越多国家的认可和积极参与, 成为推动全球治理体系变革的一个重要平台。“一带一路”倡议提出五年多来, 沿线地区在“政策沟通、设施联通、经贸畅通、资金融通、民心相通”五个重点领域工作均取得实质性进展, 效果显著。其中, 民心相通是“一带一路”建设的根基, 科技合作是民心相通的重要内容之一。世界范围内的知识流动日益频繁, 国家间的科研合作日益成为国家间科技交流的重要途径, 并催生出众多前沿领域的科研成果, 创新、知识创造以及知识合作成为产业乃至整个区域可持续高效稳定增长的重要推动力^[1]。与此同时, 东亚、东南亚、中东等地区的一部分国家作为新兴科技力量正在崛起, 以美欧为核心的世界科研合作网络格局正在加速重构^[2,3]。而“一带一路”沿线各国主要位于中东欧及以上这些新兴科技力量区, 并且中国、印度、新加坡、土耳其

收稿日期: 2019-05-13; 修订日期: 2019-07-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项项目A类(XDA20010103); 中科院重点部署项目(KFZD-SW-321)

作者简介: 顾伟男(1993-), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 研究方向为区域发展与区域创新。

E-mail: guwn.18b@igsrr.ac.cn

通讯作者: 刘慧(1964-), 女, 陕西兴平人, 研究员, 博士生导师, 主要从事区域可持续发展研究。

E-mail: liuh@igsrr.ac.cn

等国成为全球新兴科技增长极，因此“一带一路”沿线科研合作网络正成为全球科研合作网络的重要组成部分。

受西方经济地理学“关系转向”“制度转向”和“演化转向”的影响，学者们更是将合作联系作为影响创新网络形成和演化的根本因素。近年来，在网络分析技术的推动下，以知识流为主的区域性或全球性科研合作网络已成为创新网络研究的一个核心议题^[4]，科研合作网络的特征、空间属性和动态机制的研究不仅有利于科学联盟的构建，而且有助于决策者更深入地了解地理空间在科研合作中的作用，对区域发展具有重要影响^[5,6]。科研合作网络研究的对象主要包括：专利合作网络^[7]、论文合作网络^[8]、著作合作网络^[9]以及研发合作网络^[1,10]等，其研究内容则聚焦于科研合作网络的结构特征及结构演化特征，并且倾向于确定网络行动者的中心性，以及行动者嵌入封闭或开放网络结构的程度^[11]。从国家层面出发，De Prato等以全球所有国家的专利合作网络作为研究对象，认为全球科研合作网络在空间上呈现出集聚特征和小世界网络特征^[12]；Nepelski等以全球ICT研发合作网络为研究对象，发现全球ICT研发合作网络中不同国家的网络地位呈现出不同特征，并且影响着不同层次网络的密度^[13]。Fischer等^[14]和Scherngell等^[15]分别利用专利合作数据和科学合作项目数据探究了欧盟各国科学知识流动的无标度网络特征。城市或城市群层面，由于每个城市都有自己的科学资源和技术专长，因此城市之间的互补合作对提高知识多样性和建立更完整的知识网络具有重要作用^[16,17]，更多地揭示城市在知识转移和传播中的网络地位和等级结构变化^[18-20]，或特定知识网络的空间组织形式^[21]，例如城市群知识网络的多中心性等^[22,23]。除了以上尺度的科研合作网络，还有学者将科研合作网络运用于以企业、高校、研究机构为节点的组织间网络中去^[24-26]，以揭示其网络组织结构特征，使用这些特定的知识网络分析的节点，有时往往会过度发挥了“城市内部”合作的作用^[27-31]。此外，部分研究者将这些不同尺度的节点运用到特定的产业知识网络中去，以探究产业知识网络内部不同企业之间的横向或者纵向网络结构特征^[32-37]。同时，研究发现不同尺度下的科研合作网络大部分都呈现出典型的“中心-外围”和等级层次结构特征以及高度集聚性特征^[38,39]，尤其是国家间合作网络、区域间合作网络等^[15]。另外，还有学者对不同尺度下的科研网络的结构进行了对比分析^[40,41]。

此外，科研合作网络结构的形成也受多种机制影响。以法国邻近动力学派（French School of Proximity）为代表的一些学者引出多维邻近性的概念，并对多维邻近性在网络中的作用进行探讨。研究发现，地理邻近是网络形成的核心，是驱动网络形成和发展的首要因素，地理邻近性的重要性体现在区域内根植性的增强，可为区域间知识（尤其是隐性知识）的流动创造有利条件^[42-44]，但也有学者认为地理邻近在网络中的重要性变得越来越弱，其他形式的邻近性或许在网络形成演化过程中逐渐取代地理邻近^[45-49]。社会邻近是制度、文化等多个邻近性的融合，使得主体之间的合作网络具有“内部化（localization）”的特征，并且减少不确定性^[50-52]，但过度的社会邻近也会使得网络内部各要素之间缺乏灵活的互动机制，形成封闭的网络系统，并且导致过多的知识和技术溢出^[53,54]。认知邻近是指网络主体拥有相似的知识基础和技术水平^[55]，尤其以专利合作为主的知识创新网络，能够促进主体间知识的传播能力，从而带动创新网络形成类型的多样化和结构的动态化^[56,57]，然而过度的认知邻近会导致主体间知识基础的异质性降低，知识和技术锁定风险增加^[58,59]。因此，邻近性成为科研合作网络形成的重要机制。

从已有的研究看，目前国内外关于科研合作创新网络的研究主要集中在对专利合作网络和论文合作网络的探讨。研究区域和对象主要集中在特定的国家联盟内部（欧盟）、某个国家内部、城市群、城市、企业以及特定产业之间，目前，关于“一带一路”沿线

国家间科研合作网络的研究较少。研究内容主要集中在科研合作网络的形成过程和特征,以及科研合作网络的形成机制,但对于科研合作网络的结构特征仅是对其某一特定方面进行探索;对于形成机制的探讨也有待深化,特别是对于网络在不同时期的形成机制的差异性研究。因此,本文以2013年和2018年“一带一路”沿线各国科研论文合作数据为基础,构建科研论文合作矩阵,运用地理空间分析和网络分析的方法探讨“一带一路”沿线65国科研合作网络的多元化结构特征及变化,并且采用负二项回归分析模型探讨科研合作网络的形成机制及其变化,旨在厘清“一带一路”沿线科研合作的变化及其深层次机制体系,为“一带一路”建设和国内相关领域的研究提供理论参考。

2 研究区域、数据来源和研究方法

2.1 研究区域

根据商务部公布的文件^[60]，“一带一路”沿线国家是包括中国在内的65个国家和地区,这65国主要位于亚洲、欧洲和非洲。为了便于分析和揭示其中的一些结论,本文参照世界银行的分类法^[61]将“一带一路”沿线65国分成7个区域(表1)。

表1 “一带一路”沿线国家分区类型
Tab. 1 Classification of countries in the Belt and Road (BRI) regions

分区类型	具体国家
中国	中国
蒙俄区	蒙古、俄罗斯
中亚区	哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦
东南亚区	新加坡、马来西亚、印度尼西亚、菲律宾、文莱、泰国、缅甸、老挝、越南、柬埔寨、东帝汶
南亚区	印度、巴基斯坦、阿富汗、孟加拉国、斯里兰卡、马尔代夫、不丹、尼泊尔
西亚北非区	格鲁吉亚、亚美尼亚、阿塞拜疆、伊朗、土耳其、伊拉克、叙利亚、巴勒斯坦、以色列、约旦、黎巴嫩、沙特阿拉伯、阿联酋、科威特、巴林、卡塔尔、阿曼、也门、埃及
中东欧区	爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛、波兰、捷克、斯洛伐克、匈牙利、斯洛文尼亚、阿尔巴尼亚、白俄罗斯、波黑、保加利亚、克罗地亚、摩尔多瓦、黑山、罗马尼亚、塞尔维亚、马其顿、乌克兰

2.2 数据来源

Matthiessen等^[19]、Li等^[62]和Ma等^[20]学者认为合作论文作为不同区域间研究人员科学合作的结果,成为较为重要的知识流类型和科研合作最直接的表现形式,并且这些合作论文的数据相比于专利数据更容易获取,成为诸多研究科研合作网络的首要选择。

由于文章聚焦的是“一带一路”沿线国家之间和沿线对外科研合作网络,是全球尺度下的合作网络,因此与相关研究保持一致^[20,23],本文选择Web of Science核心集合,主要因为:WOS核心集合数据库是世界上最具权威和影响力的数据库之一,收录较全的SCI和SSCI期刊索引;WOS更容易获取全球尺度下的论文合作数据,具有典型性和代表性;中国国内的知网数据库难以获取国家之间的合作数据。

从WOS核心集合数据库高级搜索里面筛选条件,输入“一带一路”沿线65国的英文名称,分别设置年份为2013年和2018年,运用爬虫技术提取65国的论文数据。由于存在国家名称的多样化的表示,例如,中国的数据被划分成中国大陆、台湾、香港和澳门,因此合并相同国家的数据。接着,进一步对数据进行处理筛选,步骤如下:①剔除重复的论文数据,以及作者为一个人或者多个人同属一个国家的论文数据;②保留两个及以上不同国别合作作者的论文数据;③对于由3个或以上不同国家作者组成的论文数

据,则采用两两交叉的方式,计算国家间的合作关系;④最后采用R语言技术根据国家名称和合作量构建“一带一路”沿线国家内部合作和外部合作矩阵。

2.3 研究方法

2.3.1 GIS网络分析 借助ArcGIS软件平台,通过Network Analyst模块构建了O-D (Origin-Destination)矩阵,进而对国家间科研合作O-D网络连接路径进行了可视化表达,采用自然间断法对国家之间的合作联系数量进行等级划分,分为强联系、较强联系、中等联系和弱联系。

2.3.2 图论构造网络模型 科研合作网络主要由节点和边组成,节点代表各个国家,边主要是国家和国家之间的论文合作数量。由于科研合作网络是两个国家之间的共同发文章量,因此本文中的论文合作网络矩阵是利用图论原理建立起来的无向加权矩阵 C ,矩阵 C 中第 n 行和 n 列的合作论文数量值相等,也即 $C_{n(n-1)}=C_{(n-1)n}$:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & C_{12} & C_{13} & \cdots & C_{1(n-1)} & C_{1n} \\ C_{21} & 0 & C_{23} & \cdots & C_{2(n-1)} & C_{2n} \\ C_{31} & C_{32} & 0 & \cdots & C_{3(n-1)} & C_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \cdots & \cdots \\ C_{(n-1)1} & C_{(n-1)2} & C_{(n-1)3} & \cdots & 0 & C_{(n-1)n} \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & \cdots & C_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix}$$

2.3.3 强中心度模型 强中心度^[63] (strength centrality)是指与网络中某个节点关联的其他所有节点所形成边的权重总和,代表节点在网络中的联系规模。在“一带一路”科研合作网络中代表某个国家与其他国家之间科研合作论文的数量和,即代表某个国家在科研合作网络中的合作论文数量规模。

$$S_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N C_{ij} \quad (1)$$

式中: S_i 代表国家 i 的强度中心度,即 i 国与其他国家合作论文数量的总和; j 代表与国家 i 合作的其他国家; N 代表国家数量; C_{ij} 代表国家 i 与国家 j 合作论文数量。

2.3.4 度中心度模型 度中心度^[64] (degree centrality)是指与某个网络节点相连的其他节点的总个数,刻画的是网络中节点的等级结构特征、自身的交易能力和在网络中的权力。在“一带一路”沿线科研网络中,度中心度就代表与某个国家节点产生论文合作的国家数量,即某个国家自身的对外联系能力及在网络中的权力:

$$D_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N V_{ij} \quad (2)$$

式中: D_i 代表国家 i 的度中心度,即与 i 合作国家的总数量; V_{ij} 代表两个国家间是否存在科研合作,如果有科研合作, V_{ij} 则赋值为1,没有科研合作则赋值为0。

2.3.5 介中心度模型 介中心度^[65] (betweenness centrality)是测量网络中所有最短路径中经过该点的数量比例。网络中节点的介中心度值越大,说明其在网络中拥有更高的控制能力。在“一带一路”科研合作网络中,节点的介中心度代表该国家在网络中的“控制”能力,也即连接其他个体的能力,充当“知识守门员”的作用:

$$B_i = \sum_j \sum_k \frac{L_{jk}(i)}{L_{jk}} \quad (3)$$

式中: B_i 代表介中心度,即国家 i 在整体网络中的控制能力; k 代表除国家 i 和国家 j 之外的其他国家; L_{jk} 表示国家 j 和 k 之间的最短路径条数; $L_{jk}(i)$ 表示国家 j 和 k 之间最短路径经过国家 i 的条数。

2.3.6 负二项回归模型 Hazir等^[66]和Mitzea等^[67]认为网络中的节点属性(包括:节点规

模、属性、地位、中心度等)和节点之间的邻近性关系成为影响网络形成演化的重要因素。因此,本文参照刘承良等^[63]关于国家主体属性指标的选择和Cao等^[68]关于科研合作网络邻近性指标的选择,选取国家主体属性和国家间邻近性两个层面探究沿线各国科研合作网络多样性结构形成的机制,具体变量及其测度方式见表2。由于被解释变量为国家间科研合作论文数据,为非负整数,需要选择离散计数模型,考虑到被解释变量方差与期望值之间差距较大,存在过度分散的现象,因此选择负二项式回归(negative binomial regression)的方法来探究科研论文合作网络的机制:

$$C_{ij} = \alpha + \beta_1 Paper_i + \beta_2 Paper_j + \beta_3 Eco_i + \beta_4 Eco_j + \beta_5 FDI_i + \beta_6 FDI_j + \beta_7 Distance_{ij} + \beta_8 Socialpro_{ij} + \beta_9 Languagepro_{ij} + \delta_{ij} \quad (4)$$

式中: C_{ij} 表示被解释变量,即国家*i*和国家*j*之间的论文合作数量; α 为常数项; δ_{ij} 为随机误差项; $Paper_i$ 和 $Paper_j$ 代表国家*i*和*j*的发文数量; Eco_i 和 Eco_j 代表国家*i*和*j*的经济发展水平; FDI_i 和 FDI_j 代表国家*i*和*j*的对外开放程度; $Distance_{ij}$ 表示地理邻近性,即*i*和*j*之间的距离,距离越大,地理邻近性越低; $Languagepro_{ij}$ 代表语言邻近,如果*i*和*j*的官方语言为相同语言,则赋值为1,否则为0; $Socialpro_{ij}$ 代表社会邻近性,反映两个国家的关系亲疏。由于本文介绍的是国家之间的科研合作网络,因此基于国家间科研论文合作强度,借鉴 Scherngell 等^[9]的研究,构建 Jaccard 指数来代表两个国家之间的社会邻近性:

$$Socialpro_{ij} = \frac{C_{ij}}{S_i + S_j - C_{ij}} \quad (5)$$

式中: C_{ij} 表示两个国家论文合作数量; S_i 和 S_j 分别代表*i*和*j*国的论文合作强度。

表2 变量及其测度方式

Tab. 2 Variables and the measurement methods

		变量名称	测度方式
被解释变量		论文合作	两国之间科研论文合作数量
解释变量	国家主体属性	经济发展水平	人均GDP
		对外开放程度	当年外商直接投资总额
		科研实力	两国总发文量
		国家间邻近性	地理邻近
		社会邻近	Jaccard指数,见公式(5)
		语言邻近	各国的官方语言(CEPII数据库)

3 科研合作网络的多元化结构

3.1 全球尺度下的“一带一路”沿线国家科研合作网络

由于与全球其他国家科研合作网络的连线数量较密集,会掩盖网络的主要联系,因此,剔除了科研合作论文小于500的连线。为了便于分析“一带一路”沿线国家与全球其他国家之间的合作,将其他国家也进行群组分区,大致分成:美国、南美洲区、北美洲区(除美国)、欧洲区(除“一带一路”沿线欧洲国家)、亚洲区(除“一带一路”沿线亚洲国家)、非洲区(除埃及)、大洋洲区。2013年,“一带一路”沿线各国与世界其他122个国家间存在科研合作,有4495条国家间科研合作连接边,总的连接度为8990(表3);2018年,“一带一路”沿线国家与世界各国的科研合作网络的节点数、连接边数、总连接度都大幅增加(表3),表明“一带一路”沿线各国对外科研合作的国家数量

表3 “一带一路”沿线国家对内和对外科研合作网络的结构参数

Tab. 3 Structural parameters of internal and external scientific collaboration network of the BRI countries

	尺度	国家节点数	连接边数	总连接度	平均连接度
2013年	沿线国家与世界所有国家	188	4495	8990	—
	“一带一路”沿线范围内	65	1226	2452	37.7
2018年	沿线国家与世界所有国家	199	6737	13474	—
	“一带一路”沿线范围内	65	1676	3352	51.6

增多，各国之间的科研知识流动日趋频繁。但是，沿线国家内部合作联系占沿线国家与全球所有国家合作的比例较低，不足30%，说明沿线国家内部合作紧密程度不及与沿线以外国家合作程度。

从全球空间结构视角来看，2013年沿线所有片区与欧洲区、美国的科研往来程度较为密切，与二者联系占总联系的比例最大，基本达到50%及以上，蒙俄区、中东欧区、中亚区与欧洲区的联系达到50%以上，中国与美国的联系接近40%（图1a）。从合作数量看，合作数量最多的为中国和美国，合作数量较多的是中国与英国、澳大利亚以及印度与美国，而除中国以外的“一带一路”沿线国家与世界其他国家之间的联系数量则处于中等及以下水平（图2a）。因此，2013年科研合作网络呈现出欧洲区、美国和中国三个区构成的三角形主骨架结构。2018年沿线所有片区与欧洲区、美国的联系占比依然最大，与二者联系占全部联系的比重达到60%及以上（图1b）。从合作数量看，合作数量多的新增了英国和澳大利亚，合作数量较多的新增了加拿大、新加坡、德国、日本、法国等（图2b）。因此，2018年科研合作网络呈现出以欧洲、美国、加拿大、中国、日本、澳大利亚等多个密集区组成的“多边形”主体骨架结构。欧洲、北美和澳大利亚成为“一带一路”沿线国家与全球其他国家合作网络的重要节点区域，这也符合刘承良等研究的以北美（美国、加拿大）、欧洲（英国、法国等）、东亚（中国、日本）和澳大利亚构成的全球科研合作网络骨架结构^[63]。

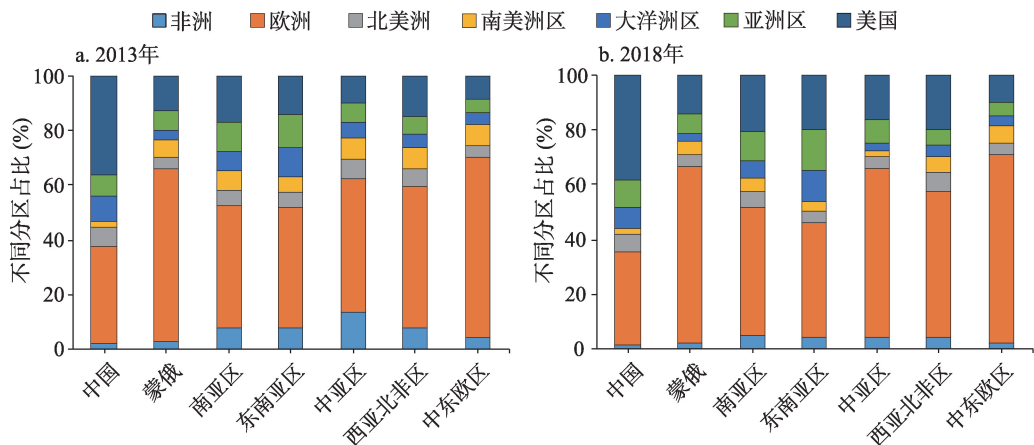


图1 “一带一路”沿线各区对外科研合作来源解析

Fig. 1 Sources of external scientific collaboration in various sub-regions of the BRI countries

3.2 “一带一路”沿线科研合作网络的空间结构

2013—2018年，“一带一路”沿线各国间科研网络连接边数增加，总的连接度和平均连接度也得到提升（表3），说明“一带一路”沿线国家之间知识溢出明显，科研论文合作

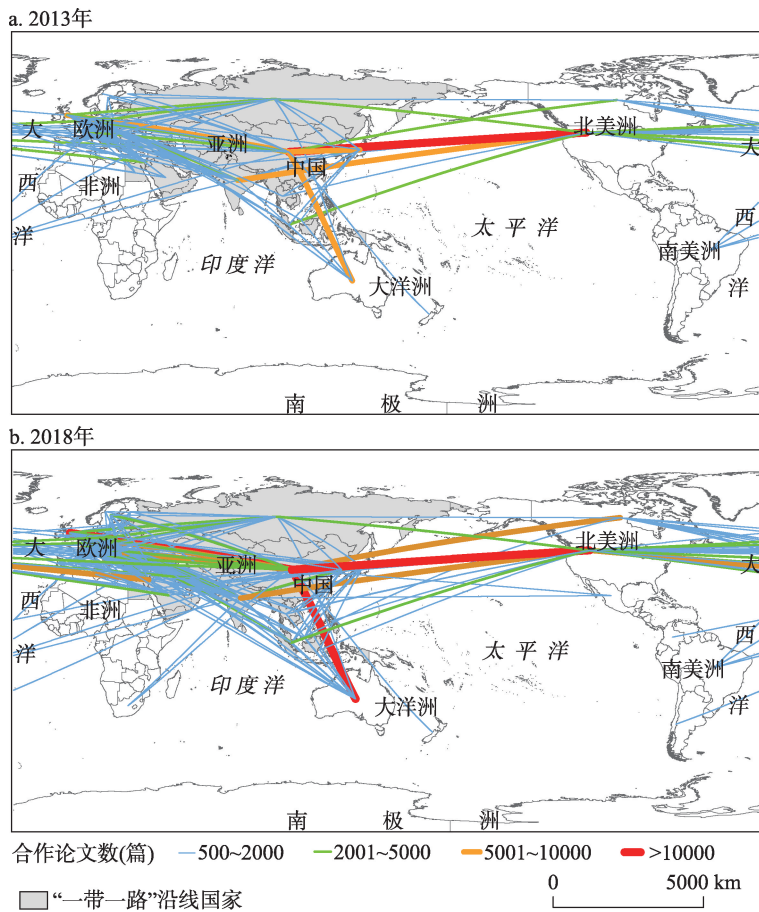


图2 “一带一路”沿线国家与世界其他国家的科研合作网络

Fig. 2 The scientific collaboration network between the BRI countries and other countries in the world
注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为GS（2016）1667）绘制，底图无修改。

往来日益密切。选取两两国家间合作联系数量大于等于100的连接边，并结合强度中心性值，采用Arcgis绘制“一带一路”沿线国家间科研合作网络和国家合作强度图（图3）。

2013年，网络整体联系偏弱，呈现出以中国、中东欧区为核心的发散型结构（图3a）。具体来看，“一带一路”沿线各国强度中心性即与其他国家论文合作规模具有明显的空间不均衡性，高度集中在少数国家，中国具有较高的强度中心度，中东欧区少数国家强度中心度处于中等水平。中国与东南亚区和中东欧区的联系占与沿线总联系的比重较高，中东欧区对沿线其他地区的联系也较频繁，沿线其他区与中东欧区、中国的联系占总联系的比重较高，西亚北非区由于其地理位置的特殊性也成为其他区对外联系中较为重要的区域（图4a，见第1078页）。较强及强联系包括中国与新加坡、沙特、印度、中东欧区的少数国家等，其他98%的联系多为中等联系和弱联系。因此，中国成为该阶段科研合作网络中指向最密集的区域，中东欧区内部的合作网络也很密集，但都属于中等和弱联系，该时段“一带一路”沿线国家之间的科研合作基础较弱，合作往来次数少，多个国家之间合作框架协议尚未达成。

2018年，网络整体联系提升，呈现出以中东欧区（波兰等）“一区”以及俄罗斯、中国、新加坡、印度、沙特等“多点”构成的多边形骨架结构（图3b）。具体来看，沿

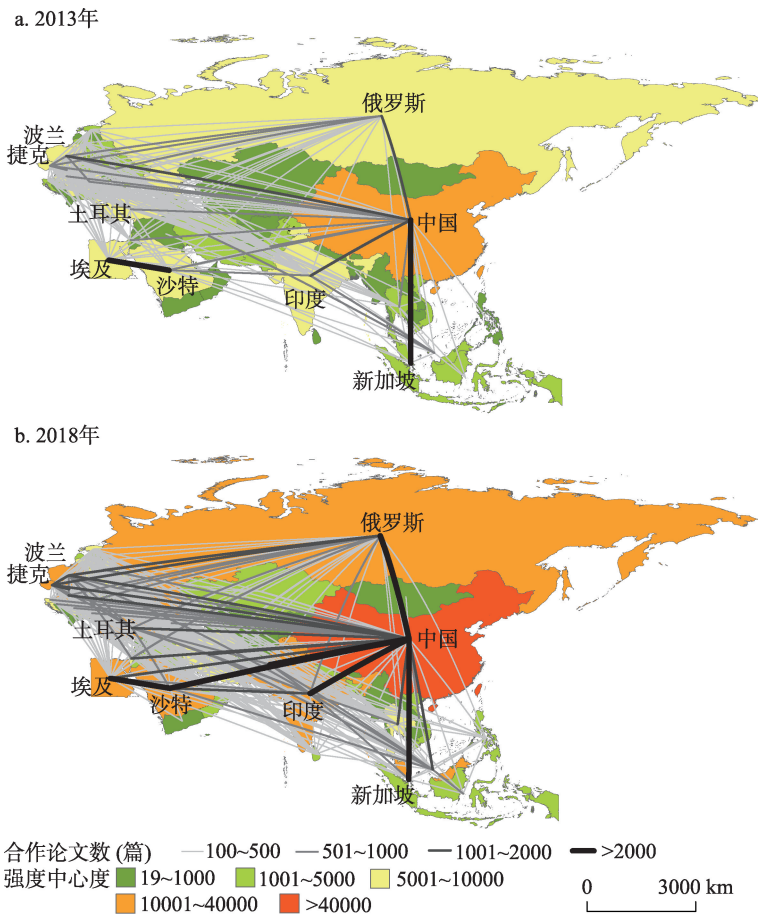


图3 “一带一路”沿线国家科研合作网络

Fig. 3 The scientific collaboration network of the BRI countries

注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图（审图号为GS（2016）1667）绘制，底图无修改。

线各国强度中心性格局呈现出以中国为核心，新加坡、印度、土耳其、沙特、埃及、俄罗斯、波兰等为次核心的格局，西亚北非区、中亚区大部分经济实力相对较弱、科教实力相对不足的国家为强度中心度低值区域。中国和中东欧区在其他区对外联系中仍保持优势，与沿线90%以上的节点产生联系，是沿线科研网络的中枢；中国成为沿线地区指向最密集的地区，中东欧区和西亚北非区国家由于其区域整体相似的文化基础、相近的距离对联系合作有着极强的促进作用，因而一直是科研合作网络最密集的区域，二者内部科研合作联系占总联系的比重达到47%和35%；由于俄罗斯与中东欧区国家、独联体国家之间传统的联系优势以及与中东地区“特殊”的关系，因而蒙俄区与西亚北非区和中东欧区的联系也较为密切（图4b）。中国与俄罗斯、中东欧区、西亚北非区部分国家，中东欧区内部国家之间，中东欧区与东南亚区部分国家呈现较强联系，中等联系数量占总联系数量的比例也提升至23.4%，带动了整体合作氛围和“一带一路”沿线科研合作网络密度的提升。

3.3 “一带一路”沿线科研合作网络的等级结构

网络的点度中心势是衡量整个网络中心化程度的指标。2013—2018年，“一带一路”沿线科研合作网络的点度中心势由0.39上升至0.63，表明整个网络具有比较明显的

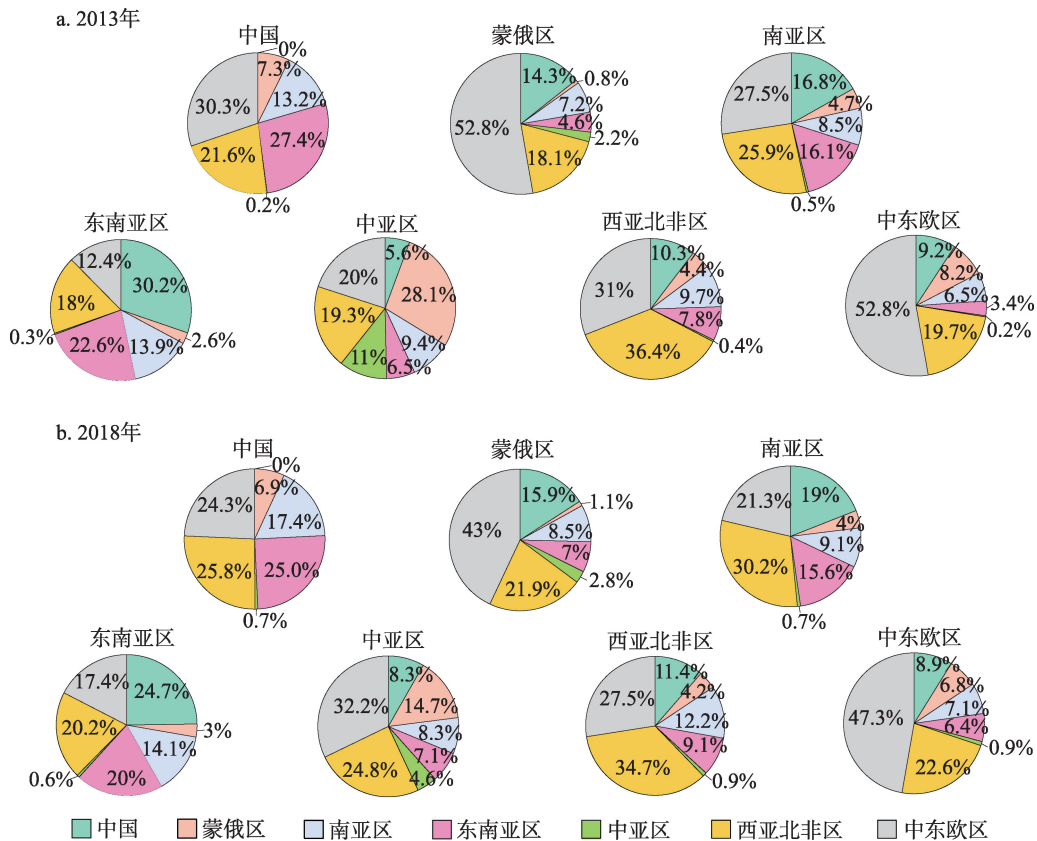


图4 “一带一路”沿线各区之间科研合作的比重

Fig. 4 The proportion of scientific collaboration among the sub-regions in the BRI countries

注: 中国国家内部的合作不算国家之间的合作, 因此比重为0%。

向某个国家或某些国家集中的趋势, 存在“中心-外围”结构。节点的度中心度是刻画该节点在网络中自身的联系和交易能力, 运用分层聚类算法, 将2013年和2018年“一带一路”沿线国家科研合作网络节点的度中心度值划分成四个等级, 转换成Pajek分区文件, 将分区文件以2D格式转换并用VOSviewer打开(图5), 图中节点大小代表该节点合作发文的总量大小, 连线的粗细代表两个节点之间合作论文的数量多少。从两个年份看, “一带一路”沿线国家科研合作网络呈现出典型的“中心-外围”等级结构, 并且由以中国为主的单核心向中国、印度两国为主的双核心转变。第一和第二等级成为“一带一路”沿线科研合作网络的核心和次核心区, 并且这些国家成为“一带一路”沿线科研合作网络的主要枢纽; 第三和第四等级是科研合作网络的半边缘和边缘区。

第一等级: 五年间, 第一等级的网络密度、平均点度和强度中心性都得以提升, 并且在网络中一直处于领先地位(表4, 见第1080页)。2013年主要以中国为主, 处于科研合作网络的中心位置, 拥有最多的合作伙伴; 2018年新增了印度, 两国成为“一带一路”沿线科研合作网络中的最顶端, 成为“一带一路”沿线科研合作网络中的核心节点和领导者。中国是沿线国家中论文产出数量最高的国家, 拥有着绝对的科研合作领导能力。

第二等级: 五年间, 第二等级网络的各项指标特征都呈现上升趋势, 并且与第一等级的差距较小(表4, 见第1080页)。2013年包括印度、巴基斯坦, 马来西亚、泰国, 土耳其、伊朗、以色列, 波兰、捷克、俄罗斯、匈牙利以及埃及等12国; 2018年包括马来

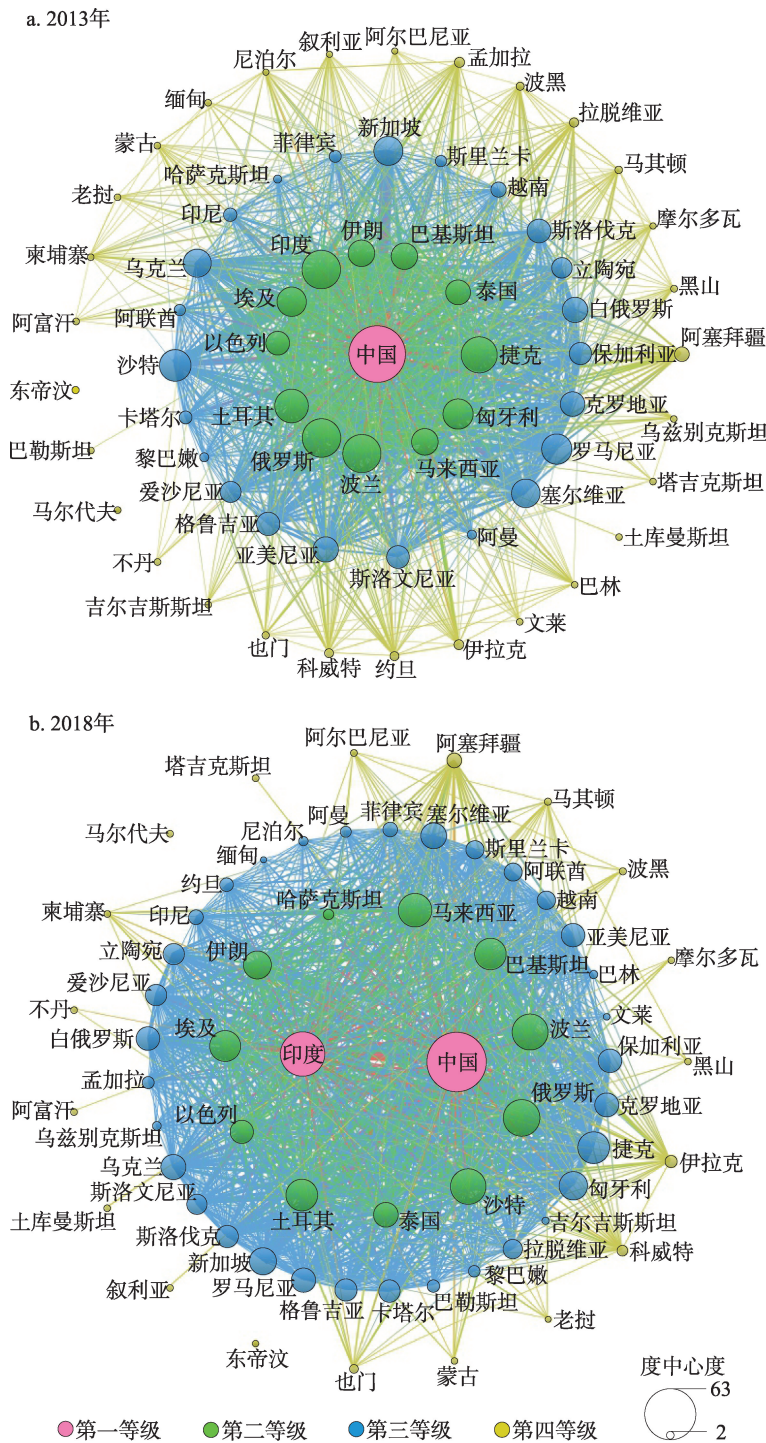


图5 “一带一路”沿线国家科研合作网络的等级结构

Fig. 5 The hierarchical structure of the scientific collaboration network of the BRI countries

西亚、泰国、巴基斯坦，哈萨克斯坦，伊朗、土耳其、以色列、沙特阿拉伯，俄罗斯、波兰以及埃及。五年间，第二等级的国家新增了哈萨克斯坦和沙特，印度上升至第一等

表4 “一带一路”沿线科研合作网络等级结构的网络参数特征

Tab. 4 Network statistical characteristics on hierarchical structure of the scientific collaboration network of the BRI countries

不同等级	国家数量		网络密度		平均点度中心性		平均强度中心性	
	2013年	2018年	2013年	2018年	2013年	2018年	2013年	2018年
整体网络	65	65	0.59	0.81	37.7	51.6	2571.5	5462.8
第一等级	1	2	1.00	1.00	60.0	63.0	19402.0	30041.0
第二等级	12	11	0.85	0.95	55.5	61.0	6332.7	11583.6
第三等级	23	33	0.67	0.83	44.9	56.3	2812.0	5551.7
第四等级	29	19	0.39	0.47	23.9	36.7	244.0	567.1

级,其他基本保持不变,成为“一带一路”沿线科研合作网络的次核心点和枢纽点,并且这些国家成为了“一带一路”沿线东南亚、中亚、西亚、南亚、中东欧以及非洲区域内论文产出大国及区域之间合作的领头军,相互之间联系密切,在网络中自上而下承接核心节点和其他一般节点。

第三等级:五年来,网络密度、平均度值等各项指标值都高于网络的平均值,内部联系也较为密切(表4)。2013年由罗马尼亚、白俄罗斯、乌克兰、塞尔维亚、克罗地亚、新加坡、越南、沙特等23个国家组成;2018年由捷克、匈牙利、塞尔维亚、乌克兰、越南、菲律宾、新加坡、印度尼西亚、阿联酋、巴勒斯坦、乌兹别克斯坦等33个国家组成。虽然他们之间科研论文合作往来次数和密切程度相对较高,但是对外联系多数是与核心和次核心区域的联系,而与边缘地区的联系则较弱。

第四等级:五年来,第四等级网络的各项指标都低于网络整体的平均值(表4)。2013年由剩下的29个国家组成,大部分位于西亚、中亚、南亚、东南亚等地区。2018年由剩下的19个国家组成,这些国家零散分布于东欧、西亚等地区,总数比2013年减少,“一带一路”倡议促进了沿线国家间的合作日益密切。第四等级的这些国家经济发展水平相对较低,或国土面积小、人口密度低,或受地缘政治的影响,科学技术发展缓慢,处在“一带一路”沿线科研合作网络的边缘地区。

3.4 “一带一路”沿线科研合作网络的控制结构

介中心度反映的是网络中某个节点对网络整体的控制能力,即在网络中连接其他个体的网络节点。2013年,高介中心度的国家主要是中国,俄罗斯、波兰也呈现出较高的介中心度(表5),表明中国在2013年呈现出对网络的极高控制和中转能力,而欧洲的俄罗斯和波兰对整体的科研网络也具有一定的控制能力,主要体现在其内部网络密度较高,并且与沿线国家交流也相对频繁,而其他地区在网络中的控制能力显然不足,说明在“一带一路”倡议提出初期国家间科研合作较弱,呈现出“单核心”的控制结构。2018年,高介中心度的国家主要有中国、俄罗斯、波兰、印度,较高介中心度的国家有捷克、土耳其、伊朗、马来西亚(表5),这些国家成为中东欧、东亚、南亚、西亚、东南亚等所在地区网络的关键控制节点和“一带一路”沿线科研合作网络的重要控制中心,对内起着控制作用,对外起着联系其他区域的中介作用。而在全域科研合作网络中^[63],中国与英国、美国、澳大利亚、德国、法国等处于高介中心度的地位,拥有绝对的控制能力;俄罗斯、波兰、印度、马来西亚处于较高介中心度地位,控制优势明显;捷克、土耳其、伊朗的介中心度值则相对较低,控制优势不明显。整体上,“一带一路”沿线介中心度呈现出东边是东亚高值区,西边是中东欧高值区,中间则为中亚低值区的格局,东西之间形成“塌陷地带”,整体表现出“四周高、中间低”的“多超多强”盆地型控制结构。

从原因上看,在“一带一路”沿线国家中,中国拥有绝对的科研资源,在全球科学

表5 “一带一路”沿线国家科研合作网络节点介中心度

Tab. 5 The betweenness centrality of BRI countries in the scientific collaboration network

层级	2013年国家	2018年国家
高值	中国	中国、印度、俄罗斯、波兰
较高值	俄罗斯、波兰	捷克、土耳其、马来西亚、伊朗
较低值	印度、土耳其、捷克、伊朗、马来西亚、埃及、巴基斯坦、泰国、以色列、新加坡、菲律宾、印尼、沙特	巴基斯坦、埃及、以色列、泰国、菲律宾、新加坡、匈牙利、阿联酋、沙特、乌克兰、斯洛文尼亚、越南、塞尔维亚、印尼、罗马尼亚、阿曼、哈萨克斯坦、白俄罗斯、保加利亚
低值	阿联酋、波塞、阿曼、缅甸、越南、孟加拉、尼泊尔、哈萨克斯坦、不丹、约旦、塞尔维亚、乌兹别克斯坦、罗马尼亚、匈牙利、斯里兰卡、黎巴嫩、白俄罗斯、爱沙尼亚、亚美尼亚、格鲁吉亚、保加利亚、乌克兰、克罗地亚、卡塔尔、拉脱维亚、吉尔吉斯斯坦、斯洛伐克、巴勒斯坦、斯洛文尼亚、立陶宛、文莱、蒙古、阿塞拜疆、也门、伊拉克、马尔代夫、阿尔巴尼亚、马其顿、柬埔寨、巴林、塔吉克斯坦、科威特、摩尔多瓦、阿富汗、老挝、黑山、叙利亚、东帝汶、土库曼斯坦	立陶宛、斯洛伐克、孟加拉、黎巴嫩、克罗地亚、格鲁吉亚、斯里兰卡、爱沙尼亚、卡塔尔、尼泊尔、亚美尼亚、阿塞拜疆、乌兹别克斯坦、叙利亚、柬埔寨、马其顿、蒙古、科威特、约旦、拉脱维亚、文莱、黑山、阿富汗、伊拉克、缅甸、摩尔多瓦、波黑、吉尔吉斯斯坦、巴林、阿尔巴尼亚、老挝、塔吉克斯坦、也门、不丹、土库曼斯坦、马尔代夫、巴勒斯坦、东帝汶

研究中也处于前列，在全球发文量方面拥有绝对的优势，远超过沿线其他国家。俄罗斯、波兰等国的科研实力虽然不及中国，但是对于区域性科研合作网络有着极强的带动作用。印度、新加坡、土耳其等科研实力在其所在片区内较为突出，并且与其他区的联系较为密切，因而成为西亚、东南亚和西亚地区对内和对外联系的重要控制节点。此外，中东欧区控制重点国家与南亚、东南亚的控制重点国家合作联系比较密切，并且英语在学术交流上具有天然的文化亲近性和语言便利性，使得这些国家之间论文合作更加紧密。

4 一带一路 沿线国家科研合作网络结构的形成机制

采用负二项回归分析模型方法，检验了国家主体属性和国家间地理邻近性、社会邻近性、语言邻近性与科研论文合作量的估计结果。为确保回归结果的可靠性，首先对变量进行多重共线性检验，模型的方差膨胀因子（VIF）都小于5，表明变量间不存在共线性；其次，为了使回归结果更加稳健，采用层次回归，分层逐渐引入解释变量（模型1~模型2），模型1为国家主体属性对于科研合作网络的影响，模型2为多维邻近性对科研合作网络的影响，最后融合所有的解释变量得到模型3，最终解释网络结构形成机制的以模型3为准。从模型拟合程度来看，参数均不等于0，模型拟合度较高，具有较好的解释力。模型结果见表6。

从国家主体属性上看，以论文发表量为代表的科研能力是影响科研论文合作的重要因素，论文合作规模与各自的科研论文产出成正比，即两国发表的科研论文越多，科研实力越强，两国之间合作的可能性就会越大^[69,70]，例如，Laursen等^[71]认为一个区域与邻近的科研实力薄弱的区域之间科研合作较少，而是更倾向于与科研实力较强的区域之间产生科研合作，这也验证了沿线发文强国之间呈现出高强度的合作化网络态势，这也贴合全球科研合作网络呈现出的强强联合的态势。经济发展水平系数两年都为正值，表明经济发展水平越是相似的两个国家，科研合作的几率和规模就会增加^[72]，但是2018年的显著性和作用效果相比2013年的有所下降，说明随着“一带一路”倡议得到许多国家的

表6 科研合作网络负二项回归模型

Tab. 6 The negative binomial regression of the scientific collaboration network

	模型1		模型2		模型3	
	2013年	2018年	2013年	2018年	2013年	2018年
国家a科研能力	0.368*** (0.058)	0.403*** (0.060)	—	—	0.302*** (0.050)	0.372*** (0.050)
国家b科研能力	0.252*** (0.048)	0.271*** (0.060)	—	—	0.205*** (0.030)	0.213*** (0.030)
国家a经济水平	0.113*** (0.029)	0.094** (0.023)	—	—	0.109*** (0.028)	0.087** (0.024)
国家b经济水平	0.108*** (0.027)	0.097** (0.025)	—	—	0.101*** (0.026)	0.083** (0.025)
国家a对外开放程度	0.172*** (0.025)	0.188*** (0.024)	—	—	0.168*** (0.024)	0.184*** (0.024)
国家b对外开放程度	0.182*** (0.013)	0.185*** (0.013)	—	—	0.171*** (0.033)	0.165*** (0.033)
地理邻近	—	—	-0.093*** (0.004)	-0.069*** (0.003)	-0.044*** (0.003)	-0.028*** (0.003)
社会邻近	—	—	0.477*** (0.081)	0.495*** (0.081)	0.457*** (0.094)	0.484*** (0.098)
语言邻近	—	—	0.003*** (0.003)	-0.006*** (0.004)	0.013*** (0.003)	-0.008*** (0.005)
样本数	1226	1676	1226	1676	1226	1676

注：*、**和***分别表示 $P < 0.10$ 、 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ ；括号内为估计系数的稳健性标准误差。

认可，沿线很多欠发达地区的经济发展实力无法满足自己的科研投入、产出和对外合作需求，为了提升自己的科研水平，与沿线经济发展水平较高的国家合作数量明显提升，但沿线主体的合作还是存在于相对发达的地区。对外开放程度有利于两国之间的科研合作往来，并且两年效果和作用大小都很显著，国家的对外开放有利于获取沿线其他国家的科学研究的进展和知识溢出，与沿线各国之间建立多样化的科研合作通道。

从国家间的多维邻近性机制来看，科研论文合作量与两国的地理距离成反比，即地理邻近性对科研合作网络的形成有着显著促进作用。例如Hoekman等^[43]认为欧洲内部尤其是欧盟国家间的科研合作往来较为密切，网络的密度较大，合作双方更愿意寻找邻近的科研合作对象，从而提高科研产出。但从影响的值来看，“一带一路”沿线的地理距离对科研论文合作的负向作用逐渐减小，这与上文的分析一致，强联系大部分发生在距离较远的两个地区，例如中国与中东欧部分国家，这是因为国家间签署的相关科研合作计划，以及现在许多前沿或重大的研究领域需要跨区域或全球性的科研联合攻关，此外互联网信息技术也引起了“地理距离作用的衰减”。社会邻近性对科研论文合作网络具有显著的正向作用，沿线多国建立起了科研合作信任机制，签署多项科研合作计划，国家间社会关系日益密切，降低了合作的不确定性和风险性，增加科研合作的可能性并且有助于提高科研产出，并且能够促进基于两国人才流动的社会关系的全球化，此外，Miorner等认为社会邻近性也为科研弱国能够充分吸收科研强国的溢出知识创造了条件，成为带动知识流动的关键动力^[52]。语言邻近性对2013年的沿线地区科研合作有着一定的促进作用，尤其是沿线中东欧、西亚、东南亚区域内部的官方语言接近或趋同，便于项目的交流、学习、管理和创新，从而对科研合作具有促进作用；但是2018年语言邻近性对沿线科研合作的影响开始呈现负相关，语言对科研论文合作影响逐渐减弱至负值，说明语言已经不再是影响“一带一路”沿线国家间科研合作的重要因素，这也从侧面说明沿线各国之间相互交流的频次增加，往来程度更加密切。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文以 Web of Science 核心集合的论文数据为基础, 分别采集 2013 年和 2018 年“一带一路”沿线 65 个国家的科研论文合作数据, 采用 GIS 空间分析方法、社会网络分析方法以及负二项回归方法, 研究“一带一路”沿线 65 国科研合作网络的多元化结构特征, 并分析其形成机制。主要结论如下:

(1) 在全球尺度上, “一带一路”沿线各国对外科研合作的国家数量增多, 各国之间的科研知识流动日趋频繁。但是, 内部合作紧密程度不及与沿线以外其他国家的合作程度。从全球空间结构视角来看, 2013—2018 年, “一带一路”沿线各国与全球科研合作的网络呈现出由 2013 年的欧洲、美国和中国三个区构成的三角形主骨架结构, 向 2018 年的欧洲、北美(美国、加拿大)、东南亚(新加坡)、东亚(中国、日本)、大洋洲(澳大利亚)等多个密集区组成的“多边形”主体骨架结构转变。

(2) “一带一路”沿线 65 国科研合作网络的空间结构在 2013 年呈现出以中国、中东欧区为核心的发散型结构, 中国成为科研合作网络中指向最密集的区域, 中东欧区域之间的合作呈现出弱联系高密度的网络结构; 2018 年, 网络整体联系提升, 呈现出以“一区”(中东欧区)以及俄罗斯、中国、新加坡、印度、沙特等“多点”构成的多边形骨架结构, 整体合作氛围和网络密度得以提升。在等级结构上, 沿线国家科研合作网络呈现出典型的“中心-外围”等级结构, 并且由单核心向双核心转变, 第一和第二级组成科研合作网络的核心及连接控制节点, 第三和第四等级则是构成科研合作网络的边缘地带。在控制结构上, 沿线科研合作网络呈现出由“单核心”的控制结构向四周高、中间低的“多超多强”的盆地型控制结构转变。

(3) 沿线国家的科研实力、经济发展水平、对外开放程度等主体属性对科研合作网络的形成具有促进作用, 尤其是科研实力和对外开放程度, 而经济发展水平的作用减弱。地理邻近性对科研合作网络的形成有着显著促进作用, 但作用值逐渐减弱。社会邻近性也是影响沿线科研论文合作的重要因素, 对各国科研合作具积极的促进作用。语言邻近性对“一带一路”沿线科研合作的影响逐渐减弱, 不再成为影响“一带一路”沿线国家间科研合作的重要因素。

5.2 讨论

本文的科研论文合作矩阵是采用全计数(full counting)方式, 尚未能将第一作者或者通讯作者所在国的贡献重点体现出来, 忽视了不同国家在合作论文中的重要性, 因此今后的研究可以根据加权计数(weighted counting)的方法进行优化。文章采用科研论文数据分析“一带一路”沿线国家科研合作网络的多元化结构, 其他例如专利合作、研发项目合作、专著合作等等都属于科研合作的范畴, 因此今后的研究有必要深化对多形式的科研合作网络的结构及机制进行综合分析, 并且针对论文、专利等不同类型的科研合作网络的结构及机制进行对比。运用论文合作数据目前只是体现在联系数量之上, 而对于论文合作的领域今后也是研究的重点。此外, 在科研合作网络的影响机制方面, 今后应加强不同尺度网络结构的形成机制对比分析, 突出网络内部不同子群之间的网络联系形成机制的差异。

参考文献(References)

- [1] Schermgell T, Barber M J. Distinct spatial characteristics of industrial and public research collaborations: Evidence from the Fifth EU Framework Programme. *The Annals of Regional Science*, 2011, 46(2): 247-266.

- [2] Adams J, Loach T. Comment: A well-connected world. *Nature*, 2015, 527(7577): S58-S59.
- [3] Adams J. Collaborations: The rise of research networks. *Nature*, 2012, 490(7420): 335-336.
- [4] 马海涛. 基于知识流动的中国城市网络研究进展与展望. *经济地理*, 2016, 36(11): 207-213. [Ma Haitao. Research progress and prospects of city networks based on knowledge flow in China. *Economic Geography*, 2016, 36(11): 207-213.]
- [5] Gluckler J. Economic geography and the evolution of networks. *Journal of Economic Geography*, 2007, 7(5): 619-634.
- [6] Nascimbeni F. Collaborative knowledge creation in development networks: Lessons learnt from a transnational. *The Journal of Community Informatics*, 2013, 9(3): 1-8.
- [7] Breschi S, Catalini C. Tracing the links between science and technology: An exploratory analysis of scientists' and inventors' networks. *Research Policy*, 2009, 39(1): 14-26.
- [8] TerWal A L. Cluster emergence and network evolution: A longitudinal analysis of the inventor network in Sophia Antipolis. *Regional Studies*, 2013, 47(5): 651-668.
- [9] Scherngell T, Hu Y J. Collaborative knowledge production in China: Regional evidence from a gravity model approach. *Regional Studies*, 2011, 45(6): 755-772.
- [10] Balland P A. Proximity and the evolution of collaboration networks: Evidence from research and development projects within the global navigation satellite system (GNSS) industry. *Regional Studies*, 2012, 46(6): 741-756.
- [11] Cassi L, Plunket A. Research collaboration in co-inventor networks: Combining closure, bridging and proximities. *Regional Studies*, 2015, 49(6): 936-954.
- [12] De Prato G, Nepelski D. Global technological collaboration network: Network analysis of international co-inventions. *The Journal of Technology Transfer*, 2014, 39(3): 358-375.
- [13] Nepelski D, De Prato G. The structure and evolution of ICT global innovation network. *Industry and Innovation*, 2018, 25(10): 940-965.
- [14] Fischer M M, Griffith D. Modeling spatial autocorrelation in spatial interaction data. An application to patent citation data in the European Union. *Journal of Regional Science*, 2008, 48(5): 969-989.
- [15] Scherngell T, Barber M J. Spatial interaction modelling of cross-region R&D collaborations: Empirical evidence from the 5th EU framework programme. *Papers in Regional Science*, 2009, 88(3): 531-546.
- [16] Ma H T, Fang C L, Pang B, et al. Structure of Chinese city network as driven by technological knowledge flows. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(4): 498-510.
- [17] Matthiessen C W, Schwarz A W, Find S. The ups and downs of global research centers. *Science*, 2002, 297(5586): 1476-1477.
- [18] Breschi S, Lenzi C. Co-invention networks and inventive productivity in US cities. *Journal of Urban Economics*, 2016, 92: 66-75.
- [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. *Urban Studies*, 2010, 47(9): 1879-1897.
- [20] Ma H T, Fang C L, Lin S N, et al. Hierarchy, clusters, and spatial differences in Chinese inter-city networks constructed by scientific collaborators. *Journal of Geographic Science*, 2018, 28(12): 1793-1809.
- [21] Liefner I, Hennemann S. Structural holes and new dimensions of distance: The spatial configuration of the scientific knowledge network of China's optical technology sector. *Environment and Planning A*, 2011, 43(4): 810-829.
- [22] Li Y C, Phelps N. Megalopolis unbound: Knowledge collaboration and functional polycentricity within and beyond the Yangtze River Delta Region in China, 2014. *Urban Studies*, 2018, 53(2): 1035-1047.
- [23] 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. [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.]
- [24] Scharfetter D, Rammer C, Fischer M M, et al. Knowledge interactions between universities and industry in Austria: Sectoral patterns and determinants. *Research Policy*, 2002, 31(3): 303-328.
- [25] Fritsch M, Kauffeld M. The impact of network structure on knowledge transfer: An application of social network analysis in the context of regional innovation networks. *The Annals of Regional Science*, 2010, 44(1): 21-38.
- [26] Huggins R, Prokop D. Network structure and regional innovation: A study of university-industry ties. *Urban Studies*, 2017, 54(4): 931-952.
- [27] Hou H, Kretschmer H, Liu Z. The structure of scientific collaboration networks in Scientometrics. *Scientometrics*, 2008, 75(2): 189-202.

- [28] Leydesdorff L, Persson O. Mapping the geography of science: Distribution patterns and networks of relations among cities and institutes. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2010, 61(8): 1622-1634.
- [29] Li D, Wei Y H, Wang T. Spatial and temporal evolution of urban innovation network in China. *Habitat International*, 2015, 49: 484-496.
- [30] 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. [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.]
- [31] 吕拉昌, 梁政骥, 黄茹. 中国主要城市间的创新联系研究. *地理科学*, 2015, 35(1): 30-37. [Lv Lachang, Liang Zhengji, Huang Ru. The innovation linkage among Chinese major cities. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(1): 30-37.]
- [32] Giuliani E. Network dynamics in regional clusters: Evidence from Chilean wine cluster. *Research Policy*, 2013, 42(8): 1406-1419.
- [33] Ballanda P A, Suireb R, Vicentec J. Structural and geographical patterns of knowledge networks in emerging technological standards: Evidence from the European GNSS industry. *Economics of Innovation and New Technology*, 2013, 22(1): 47-72.
- [34] Hazir C S, LeSage J, Autant-Bernard C. The role of R&D collaboration networks on regional knowledge creation: Evidence from information and communication technologies. *Papers in Regional Science*, 2018, 97(3): 549-567.
- [35] 汪涛, 李丹丹. 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. [Wang Tao, Li Dandan. 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.]
- [36] 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. [Wang Qiuyu, Zeng Gang, Lv Guoqing. Structural evolution of innovation networks of China's equipment manufacturing industry. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 251-264.]
- [37] 周灿, 曾刚, 王丰龙, 等. 中国电子信息产业创新网络与创新绩效研究. *地理科学*, 2017, 37(5): 661-671. [Zhou Can, Zeng Gang, Wang Fenglong, et al. Innovation network structure and innovative performance: A study of China's electronic information industry. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(5): 661-671.]
- [38] Heimeriks G, Boschma R. The path- and place-dependent nature of scientific knowledge production in biotech 1986-2008. *Journal of Economic Geography*, 2014, 14(2): 339-364.
- [39] Gertler M S. Tacit knowledge and the economic geography of context, or the undefinable tacitness of being (there). *Journal of Economic Geography*, 2003, 3(1): 75-99.
- [40] 李丹丹, 汪涛, 周辉. 基于不同时空尺度的知识溢出网络结构特征研究. *地理科学*, 2013, 33(10): 1180-1187. [Li Dandan, Wang Tao, Zhou Hui. The structural characteristics of knowledge spillover networks based on different spatial and temporal scales. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(10): 1180-1187.]
- [41] Rigby D. Technological relatedness and knowledge space: Entry and exit of US cities from patent classes. *Regional Studies*, 2015, 49(11): 1922-1937.
- [42] Bathelt H, Malmberg A, Maskell P. Clusters and knowledge: Local buzz, global pipelines and the process of knowledge creation. *Progress in Human Geography*, 2004, 28(1): 31-56.
- [43] 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.
- [44] Balland P A, Boschma R, Frenken K. Proximity and innovation: From statics to dynamics. *Regional Studies*, 2015, 49(6): 907-920.
- [45] Autant-Bernard C, Billand P, Frachisse D, et al. Social distance versus spatial distance in R&D cooperation: Empirical evidence from European collaboration choices in micro and nanotechnologies. *Papers in Regional Science*, 2007, 86(3): 495-519.
- [46] Agrawal A, Kapur D, McHale J. How do spatial and social proximity influence knowledge flows? Evidence from patent data. *Journal of Urban Economics*, 2008, 64(2): 258-269.
- [47] Breschi S, Catalini C. Mobility of skilled workers and co-invention networks: An anatomy of localized knowledge flows. *Journal of Economic Geography*, 2009, 9(4): 439-468.
- [48] Cassi L, Plunket A. Proximity, network formation and inventive performance: In search of the proximity paradox. *The Annals of Regional Science*, 2014, 53(2): 395-422.
- [49] Leszczyńska D, Khachlouf N. How proximity matters in interactive learning and innovation: A study of the Venetian glass industry. *Industry and Innovation*, 2018, 25(9): 1-23.

- [50] Caragliu A, Nijkamp P. Space and knowledge spillovers in European regions: The impact of different forms of proximity on spatial knowledge diffusion. *Journal of Economic Geography*, 2015, 16(3): 749-774.
- [51] Crescenzi R, Nathan M, Rodríguez-Pose A. Do inventors talk to strangers?: On proximity and collaborative knowledge creation. *Research Policy*, 2016, 45(1): 177-194.
- [52] Miorner J, Zukauskaite E, Tripl M, et al. Creating institutional preconditions for knowledge flows in cross-border regions. *Environment and Planning C*, 2018, 36(2): 201-218.
- [53] Boschma R, Martin R. *The Handbook of Evolutionary Economic Geography*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2010: 120-135.
- [54] Broekel T, Mueller W. Critical links in knowledge networks: What about proximities and gatekeeper organisations?. *Industry and Innovation*, 2018, 25(10): 919-939.
- [55] Nootboom B. Learning by interaction: Absorptive capacity, cognitive distance and governance. *Journal of Management and Governance*, 2000, 4(1): 69-92.
- [56] Balland P A, Belso-Martínez J A, Morrison A. The dynamics of technical and business knowledge networks in industrial clusters: Embeddedness, status or proximity?. *Economic Geography*, 2016, 92(1): 35-60.
- [57] 张翼鸥, 谷人旭, 马双. 中国城市间技术转移的空间特征与邻近性机理. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 370-382. [Zhang Yiou, Gu Renxu, Ma Shuang. Spatial characteristics and proximity mechanism of technology transfer among cities in China. *Progress in Geography*, 2019, 38(3): 370-382.]
- [58] Boschma R. Proximity and innovation: A critical assessment. *Regional Studies*, 2005, 39(1): 61-74.
- [59] Romero C C. Personal and business networks within Chilean biotech. *Industry and Innovation*, 2018, 25(9): 1-33.
- [60] 刘卫东, 田锦尘, 欧晓理, 等. “一带一路”战略研究. 北京: 商务印书馆, 2017: 32-38. [Liu Weidong, Tian Jinchun, Ou Xiaoli, et al. *The Belt and Road Strategy Research*. Beijing: The Commercial Press, 2017: 32-38.]
- [61] World Bank. World Bank Country and Lending Groups. <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519-world-bank-country-and-lending-groups>, 2019-02-15.
- [62] Li Y C, Phelps N. Knowledge polycentricity and the evolving Yangtze River Delta megalopolis. *Regional Studies*, 2017, 51(7): 1035-1047.
- [63] 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. [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.]
- [64] Mitze T, Strotebeck F. Centrality and get-richer mechanisms in interregional knowledge networks. *Regional Studies*, 2018, 52(11): 1-13.
- [65] Yoon J, Blumer A, Lee K. An algorithm for modularity analysis of directed and weighted biological networks based on edge-betweenness centrality. *Bioinformatics*, 2006, 22(24): 3106-3108.
- [66] Hazir C, Autant-Bernard C. Determinants of cross-regional R&D collaboration: Some empirical evidence from European biotechnology. *Annals of Regional Science*, 2014, 53(2), 369-393.
- [67] Mitze T, Strotebeck F. Determining factors of interregional research collaboration in Germany's biotech network: Capacity, proximity, policy?. *Technovation*, 2019, 80(3): 40-53.
- [68] Cao Z, Derudder B, Peng Z W. Interaction between different forms of proximity in inter-organizational scientific collaboration: The case of medical sciences research network in the Yangtze River Delta region. *Papers in Regional Science*, 2019, 98(4): 1-22.
- [69] Ter Wal A L, Boschma R. Co-evolution of firms, industries and networks in space. *Regional Studies*, 2011, 45(7): 919-933.
- [70] 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.
- [71] Laursen K, Reichstein T, Salter A. Exploring the effect of geographical proximity and university quality on university-industry collaboration in the United Kingdom. *Regional Studies*, 2011, 45(4): 507-523.
- [72] Plotnikova T, Rake B. Collaboration in pharmaceutical research: Exploration of country-level determinants. *Scientometrics*, 2014, 98(2): 1173-1202.

The multiple structure and formation mechanisms of the scientific collaboration network in the Belt and Road regions

GU Weinan^{1,2,4}, LIU Hui^{1,2,3}, WANG Liang^{1,2,4}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Scientific collaboration has become an important part of the people-to-people exchanges in the Belt and Road Initiative, and remarkable progress has been made since 2013. Taking the 65 countries in the Belt and Road regions, hereafter called the BRI countries, as the research areas and using the collaborated WOS core collection papers to construct the international scientific collaboration matrix, the paper explores the multiple structure and formation mechanisms of the scientific collaboration network of BRI countries through the GIS spatial analysis, social network analysis and negative binomial regression. The results show that: (1) at the global scale, knowledge flow is becoming more and more frequent, and the degree of internal collaboration within BRI countries is not as close as that of collaboration with other countries in the world. All the sub-regions of BRI regions have the most external collaboration links with Europe outside BRI regions. The global scientific collaboration network based on the BRI countries has changed from a "tripod" framework of Europe, USA, China to the "polygon" framework of Europe, USA, China, Japan, Canada, Australia and other dense regions. (2) The spatial structure of the collaboration network within the BRI countries is transformed from the "dual-core" type (China and Central & Eastern Europe) to the "multipole" type (Central & Eastern Europe, Russia, China, Singapore, India, Saudi Arabia, etc.). The hierarchical structure presents a typical "core-periphery" pattern, the core countries of which change from single core (China) to dual cores (China and India). In terms of control structure, the type has changed from one superpower (China) to multi great powers including China, India, Russia, Poland, Czech, Turkey, Malaysia and Iran, which presents a pattern of "high in the surroundings while low in the middle". (3) The main formation mechanisms of scientific collaboration network of BRI countries depend on scientific research ability, the level of economic development, the level of foreign linkage, and proximities such as geographical proximity, social proximity and language proximity. Among them, scientific research ability and social proximity play the most important role, while geographical distance gradually weakens the hindrance to scientific collaboration.

Keywords: scientific collaboration network; multiple structure; formation mechanisms; the Belt and Road countries