

区域创新合作网络演化特征与动力研究

——以长三角为例¹

唐建荣 姜雪

(江南大学商学院, 江苏 无锡 214122)

【摘要】: 基于 2005—2019 年长三角地区产学研联合申请专利数据构建合作网络, 运用空间网络分析法、模体分析和指数随机图模型研究网络的演化特征及动力机制。研究发现: 在空间格局上, 由“三足鼎立”向“核心 - 边缘”演变; 在局部模体上, 闭合模体是网络中的重要模体, 网络存在集团化现象; 在网络动力机制上, 内生结构效应和节点属性效应是网络关系形成的重要动力, 演化过程中存在显著的“马太效应”与“同质效应”。从战略协同、高地共建与机制重构等方面提出优化区域创新合作网络结构和促进长三角创新一体化发展的政策建议。

【关键词】: 区域创新网络; 模体分析; 指数随机图模型

【DOI】: 10.14059/j.cnki.cn32-1276n.2023.01.006

中国区域与城市发展的动力源泉逐渐从“要素驱动”转向“创新驱动”, 创新日益成为国家经济发展和区域科技进步的重要动力。在创新驱动发展的背景下, 2018 年习近平总书记提出将长三角一体化发展上升为国家战略。2019 年《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》提出长三角要构建区域创新共同体, 然而长三角存在创新能力与世界级城市群差距大、分工不明确等问题^[1]。因此, 本文探究长三角区域创新合作网络的动态演化特征及网络形成动力, 从而提高长三角整体创新水平, 形成高质量一体化的创新格局。

1 文献综述

目前区域创新合作网络引起学者的广泛关注与研究热潮, 研究方向主要聚焦于网络结构、演变趋势与动力机制三个方面。在网络结构方面, 胡艳、时浩楠发现创新关联不存在明显的行政边界效应^[2]; 孙宇、彭树远发现网络整体结构混合了凝聚子群和核心-边缘两者的特点^[3]。在演变趋势方面, 王承云等发现本地网络内部出现明显不均衡现象, 跨界网络整体规模明显增强^[4]。在形成机制方面, 高爽等借助空间结构指数法发现主体自身合作需求可以促进知识网络演化^[5]; 谢伟伟等使用 QAP 方法探讨邻近性因素对知识创新网络的影响^[6]。

通过文献梳理发现, 大多研究缺乏对网络微观联结模式的探索, 忽略了网络结构对网络形成的影响。本文运用空间网络分析法和模体分析法, 分别从宏观与微观视角探究长三角创新合作网络的演化特征, 借助指数随机图模型揭示网络关系形成的动力机制, 探索创新要素合理流动与高效集聚的实现路径, 推动区域协同创新发展进程。

¹ **基金项目**: 国家社会科学基金项目——“基于技术契合视角的公司创业投资生态链企业技术创新机理及其提升对策研究” (项目编号: 19BGL033; 项目负责人: 王雷) 成果之一。

作者简介: 唐建荣, 理学博士, 江南大学商学院教授, 研究方向: 生态经济与企业管理; 姜雪 (通信作者), 江南大学商学院硕士研究生, 研究方向: 知识与技术创新管理。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 网络模体 (Motifs)

模体分析可以从微观角度探究网络关系的形成，其统计指标通常包括频率、Z 值、P 值。其中，Z 值的计算公式为^[7]：

$$Z_i = \frac{N_{real}^i - \langle N_{rand}^i \rangle}{\sigma_{rand}^i} \quad (1)$$

式中： N_{real}^i 表示实际网络中模体 i 出现的次数， N_{rand}^i 表示随机网络中模体 i 出现的次数， $\langle N_{rand}^i \rangle$ 表示 N_{rand}^i 的均值， σ_{rand}^i 表示 N_{rand}^i 的标准差。

2.1.2 指数随机图模型 (ERGM)

指数随机图模型 (ERGM) 是基于网络数据、以网络结构为中心的概率模型，通常应用于社会网络分析[8]。该模型将网络节点间连接的概率作为被解释变量，将影响连接关系的变量纳入模型，解析各变量在网络关系形成中发挥的不同作用，公式为：

$$P(Y=y) = \left(\frac{1}{c} \right) \exp \{ \theta_{\alpha} z_{\alpha}(y) + \theta_{\beta} z_{\beta}(y) \} \quad (2)$$

式中： Y 表示随机网络的集合， y 表示实际网络， c 是标准化参数， P 之和为 1， $z_{\alpha}(y)$ 、 $z_{\beta}(y)$ 分别表示网络内生结构、网络外生统计量， θ_{α} 、 θ_{β} 为各网络统计量所对应的估计参数。

2.2 数据来源

本文选取 2005—2019 年长三角产学研联合申请专利数据为研究样本，数据来源于国家知识产权局专利检索数据库，筛选申请地址为长三角地区城市、申请主体为 2 个城市及以上的专利，得到 17 462 条专利数据。2005—2019 年产学研联合申请专利和创新主体数量的趋势见图 1。

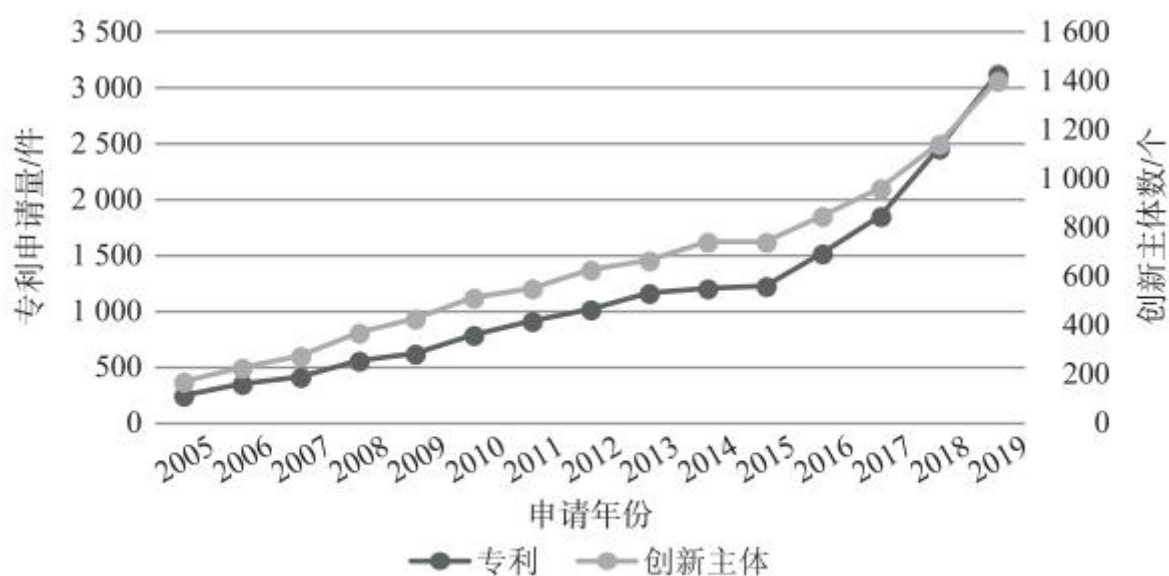


图1 专利与创新主体趋势图

由图1可知，联合申请专利数和创新主体数的增长趋势基本保持一致。2009年前，创新主体合作模式以“一对一”模式为主，表现为专利数与创新主体数的差距保持稳定。2010年国家发展和改革委员会发布的《长江三角洲地区区域规划》促进了区域内产学研合作，促使“一对多”模式占比提高。自2015年后，创新发展进入快速增长阶段，专利数和创新主体数的年增长率分别达到26%和18%，主要得益于长三角协同发展的全面深入，促进了创新网络、基础设施网络一体化发展，从而为区域内的校企合作提供便利条件。

长三角联合申请专利数呈现阶段性发展趋势，且分段技术处理可减少年度异常数据的影响，因此本文将研究对象划分为3个阶段：2005—2009年、2010—2014年、2015—2019年。

3 区域创新合作网络结构演化研究

按照申请人所属的城市对产学研联合申请专利进行分类，统计41个城市间的连接情况，剔除城市内连接关系，将城市作为节点，城市间合作关系为边，构建基于产学研合作专利的区域创新合作网络，识别长三角区域创新合作网络的演化特征。

3.1 网络空间格局演化特征

为研究区域创新合作网络空间演化情况，利用ArcGIS软件绘制3个阶段的演化图(见图2)。其中，节点间的连线越粗表示合作强度越大，节点越大表示城市拥有专利数量越多，即创新强度越高。

网络空间格局从“三足鼎立”向“核心-边缘”形态发展，整体呈现“西、北部零星发展，东、南部持续领头”的态势。从网络重心看，省会城市引领发展。以江浙沪省会城市构成的区域一直是网络的重心，表明省会城市拥有较大的创新优势。从创新强度看，区域发展不均衡。创新强度排名显示，上海、南京、杭州一直位居前列，无锡、苏州、南通的创新发展较快，而西、北部地区的城市一直处于末位。从合作强度看，杭州-绍兴、杭州-台州、南京-无锡的合作强度排名靠前，反映出区域创新网络受邻近效应的影响。区域内合作的强度与广度在第三阶段均有加深，尤其是安徽省内的城市，说明长三角范围扩大至“三省一市”提升了整体协同创新速度。

以往研究显示,长三角创新网络空间格局两极分化态势减缓,核心区域逐步凸显^{[9]9},基本形成“一心四极多点”的雁阵布局模式^{[10]10},与本文的研究结果相似。2005—2009年,创新合作网络的重心在杭州、上海、南京三个城市,网络处于分散阶段;2010—2014年,无锡、苏州、南通、常州等城市的创新能力显著增强,成为网络的次中心;2015—2019年,网络整体的创新强度得到显著提升,网络处于相对凝聚阶段,“核心-边缘”格局初显。

3.2 网络局部模体演化特征

通过对网络模体的研究,有助于从微观层面剖析长三角城市间的合作关系,描述网络局部结构的演化详情。现有研究表明,基于三元模体视角可以基本满足对网络局部结构演化的研究。结合长三角区域创新合作网络的实际特征,本文将边的权重引入模体分析,低于26为弱连接(灰色),高于26为强连接(黑色)。基于以上标准,三元模体的子图有7种类型(见图3)。

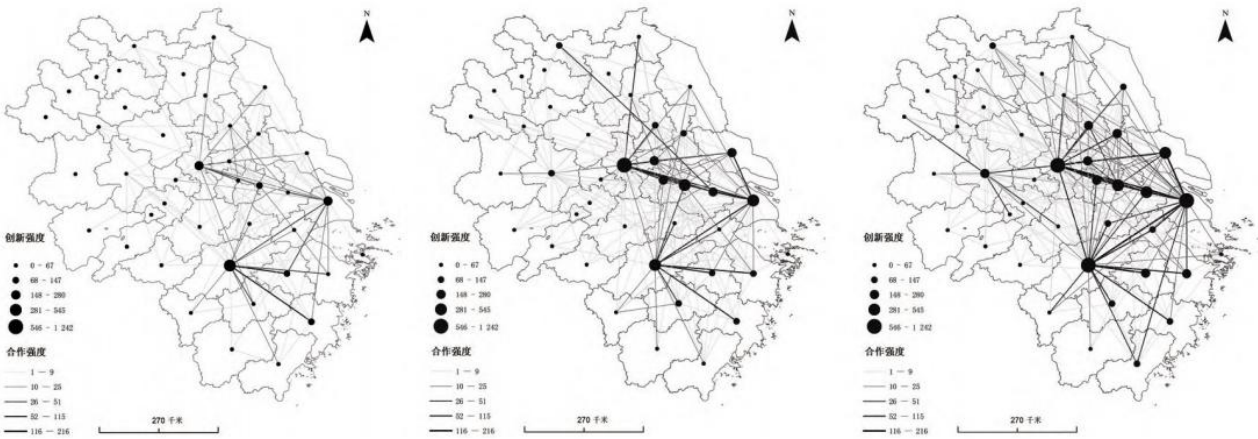


图2 区域创新合作网络空间格局演化图

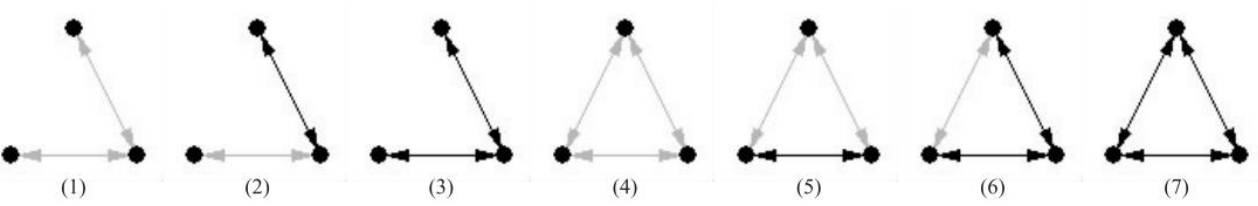


图3 加权网络三元模体子图类型

由图3可知,模体1、模体2、模体3中有两个节点不直接相连,呈链条状,被称为链式模体。模体4、模体5、模体6、模体7中三个节点互相连接,形成一个闭合结构,被称为闭合模体。本文运用 fanmod 软件计算相关统计指标,结果见表1。其中,Freq为模体的频率,Z-Score为模体的Z值,显著性水平为模体的P值。从表1可知,通过显著性检验的模体数量随时间增加,说明在现实网络中存在的模体结构增多,城市间的创新合作关系向多样性发展。

表1 区域创新合作网络模体分析

类型	2005—2009年	2010—2014年	2015—2019年
----	------------	------------	------------

	Freq (%)	Z-Score	Freq (%)	Z-Score	Freq (%)	Z-Score
模体 1	70.24	-8.87	64.33	-4.54	50.11	-10.11
模体 2	14.65**	4.47	16.41	-2.40	24.43*	1.38
模体 3	0.81	-0.90	0.95	-6.34	3.03	-7.20
模体 4	9.11***	9.38	8.42**	7.26	8.82***	12.81
模体 5	4.50	0.18	7.26*	2.60	8.56*	1.26
模体 6	0.58	0.45	2.31***	5.07	4.19***	11.55
模体 7	0.11***	0.95	0.32*	0.91	0.86***	14.85

注：*、**、***分别表示在 5%、1%、0.1%的水平上显著。下同。

区域创新合作网络的模体表现出规律化特征。从 Z 值得分看，闭合模体在网络中相对重要。其中，模体 4、模体 7 在三个阶段中 Z 值得分最高，表明网络具有三元闭包特征，存在显著的网络集团化现象，但模体出现的频率较低，说明该特征并不普遍。从模体频率看，链式模体的频率显著高于闭合模体，且随着强连接的增加逐渐减少。链式模体中的两个城市彼此不合作，但均与另一个城市存在创新合作关系，使得该城市成为中心，占据结构洞位置。

4 区域创新合作网络演化动力机制研究

区域创新合作网络关系的形成离不开网络结构的驱动作用，同样也可能是网络节点属性作用的结果。为进一步分析影响区域创新合作网络关系演变的重要因素，需将网络自组织因素和外界影响因素共同纳入模型做深入分析，挖掘驱动网络关系演化的主动力和次动力。

4.1 模型构建

本文在参考以往研究的基础上，从内生结构变量和节点属性变量两个维度构建 ERGM 模型，具体解释变量及意义见表 2。模型如下：

$$P(Y=y) = \left(\frac{1}{c} \right) \exp \left\{ \theta_1 Edges + \theta_2 Gwesp + \theta_3 Gwdsp + \theta_4 nodecov(Patent) + \theta_5 nodecov(GDP) + \theta_6 nodematch(Province) \right\} \quad (3)$$

表 2 ERGM 模型统计量及意义

变量名称	参数	机制	解释
------	----	----	----

边	Edges	截距效应	基本效应
几何加权边 共享伙伴	Gwesp	闭合效应	是否倾向形成闭合三角结构, 传递性趋势
几何加权二元 组共享伙伴	Gwdsp	中介效应	是否倾向形成开放三角形
创新能力 经济水平	nodecov. Patent nodecov. GDP	马太效应	属性越强的节点是否对其他节点更具吸引力
组织同质	nodematch. Province	同配效应	同类属性的节点间是否倾向形成合作关系

内生结构变量包括边、加权边共享伙伴和加权二元组共享伙伴。其中, 边(Edges)作为模型的控制变量。基于社会网络理论, 城市间可能同时存在直接和间接的合作路径, 形成三角结构, 但是三角结构可能造成模型不收敛等问题, 而加权几何项可以使模型有效收敛[11], 因此引入加权边共享伙伴(Gwesp)和加权二元组共享伙伴(Gwdsp)变量。

节点属性变量包括创新能力、经济水平和组织同质。选择城市拥有的联合申请专利数表征城市创新能力, 人均 GDP 表征城市经济发展水平, 分别考察马太效应对网络关系形成的作用机制。此外, 具有相同属性的城市更倾向形成合作创新关系[12], 因此选择城市所属的省份类别表征组织同质, 估计省份同质性对网络关系形成的影响。

4.2 模型结果

本文采用 R 软件计算 ERGM 模型参数的估计值(见表 3), 并采用 t 统计量检验估计参数的显著性, AIC、BIC 验证模型的拟合效果。从整体上看, 本文模型表现出较好的拟合效果。

表 3 指数随机图模型估计结果

变量	2005—2009 年		2010—2014 年		2015—2019 年	
	估计参数	标准差	估计参数	标准差	估计参数	标准差
内生结构						
Edges	-5.079***	0.021	-5.983***	0.029	-9.755***	0.091
Gwesp	0.274***	0.012	0.266***	0.017	3.542***	0.078
Gwdsp	-0.127***	0.002	-0.033***	0.002	-0.015**	4.749E-03
节点属性						
Patent	6.029E-03***	5.905E-04	2.983E-03***	2.79E-04	1.111E-03***	1.339E-04
GDP	2.327E-05***	3.919E-06	1.843E-05***	1.401E-06	1.774E-05***	8.934E-07
	1.934***	0.011	2.281***	0.014	2.14***	0.011

Province						
AIC	351.7		507.1		584.2	
BIC	378.3		535.4		612.4	

结构变量的回归结果显示，区域创新合作网络表现出闭合性特征。具体来看，变量 $Gwesp$ 显著为正，表明网络关系倾向于构成闭合三角形，促进形成聚集化与复杂化的网络结构。变量 $Gwdsp$ 显著为负，表明在网络中形成开放三角形合作关系的可能性较低，可能是通过中介城市形成的合作路径不可靠，容易造成信息失真、沟通障碍等问题。

马太效应对网络演化的促进作用逐渐下降。具体表现为某一城市拥有的联合申请专利数量增加 1, 与其他城市进行合作的概率分别提升 0.60%、0.29%和 0.11%。原因可能是城市主体在长三角创新一体化政策的推动下，拥有大量创新合作机会与需求，创新能力高的城市对其他城市的吸引效应有限，导致创新能力的马太效应被削弱。经济水平 (GDP) 虽然显著为正，但其估计系数较小，对促进城市间建立创新合作的作用微乎其微。

组织同质 (Province) 对网络演化起正向作用，表现为属于同一个省份的两个城市间形成合作关系的概率是不同省份城市的 7.65 倍。反映出在组织层面，网络关系形成存在强烈的同质性倾向。同一省份内各城市资源共享、交通互联互通，拥有组织邻近效应，因此城市间更容易构建创新合作关系。

4.3 模型检验

为判断 ERGM 模型应用于研究区域创新合作网络演化的有效性，需要进行 MCMC 检验和拟合优度检验。MCMC 检验可用于判断模型是否有效收敛，本文 3 个模型的 MCMC 检验结果中联合 p 值分别为 0.95、0.98 和 0.93, 说明模型均能有效收敛。

本文采用箱体图来诊断模型的拟合效果，黑色实线表示原网络的参数，灰色线与箱体图表示随机网络的参数。模型中自变量的黑线均落在灰色线之间，且靠近箱体中线，表示模型拟合效果良好 (见图 4)。

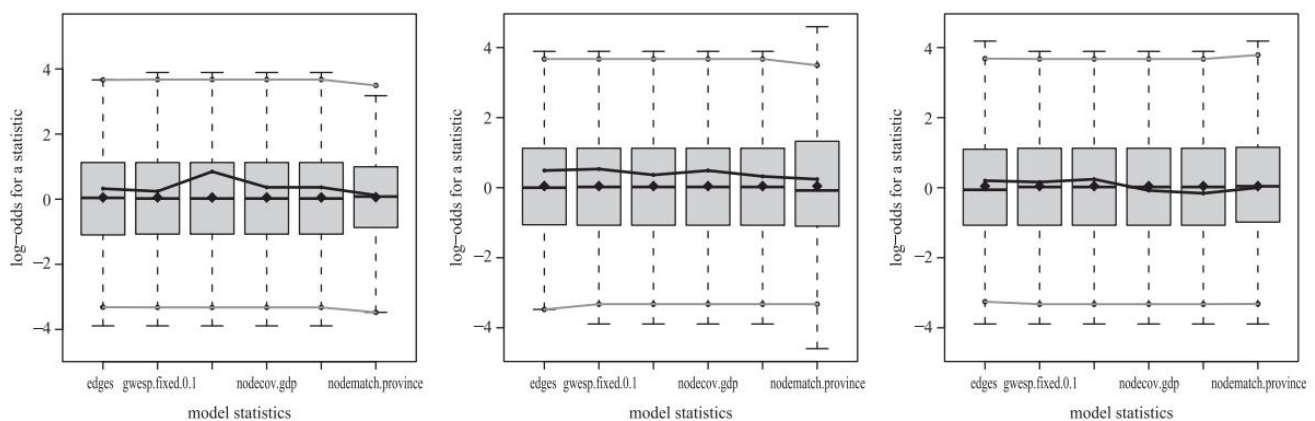


图 4 ERGM 模型拟合优度检验结果

5 结论与建议

本文利用 2005—2019 年产学研联合申请专利数据,研究长三角区域创新合作网络的演化特征与动力机制。结果表明,长三角创新合作网络整体发展水平不均衡,跨区域合作强度较低;模体对网络局部结构具有重要作用,但出现频率较低导致促进作用较弱;闭合性与开放性组织行为对网络关系形成起相反作用,创新能力的马太效应和省份同质性均对网络演化起正向作用。

为进一步优化区域创新合作网络,促进城市跨区域合作,提升长三角创新一体化发展水平,本文提出以下政策建议。

第一,垂直协同,缩小区域城市的发展差距。为破除空间不平衡发展,应立足区域创新要素禀赋,以“区域一体化”战略强化协同合作,弱化城市发展差距,形成区域创新一体化发展新格局。第二,高地共建,激发核心城市的溢出效应。上海、南京、杭州等作为核心城市,应凸显科技创新资源集聚优势,联合提升原始创新能力,加速构筑创新高地,扩大创新辐射范围,带动边缘城市实现创新一体化发展。第三,机制重构,强化合作对象的多元发展。各地政府应引导各城市跳出舒适圈,积极与更多城市保持创新合作关系,提高创新合作的多元化发展,以促进长三角建设高质量创新共同体。

参考文献

- [1] 陈雯,孙伟,刘崇刚,刘伟.长三角区域一体化与高质量发展[J].经济地理,2021,41(10):127-134.
- [2] 胡艳,时浩楠.长三角城市群城市创新的空间关联分析——基于社会网络分析方法[J].上海经济研究,2017(4):87-97.
- [3] 孙宇,彭树远.长三角城市创新网络凝聚子群发育机制研究——基于多值 ERGM[J].经济地理,2021,41(9):22-30.
- [4] 王承云,WANG Yongzheng,SHEN Zezhou.长三角城市群创新合作网络空间演化研究[J].上海师范大学学报(哲学社会科学版),2021,50(5):117-126.
- [5] 高爽,王少剑,王泽宏.粤港澳大湾区知识网络空间结构演化特征与影响机制[J].热带地理,2019,39(5):678-688.
- [6] 谢伟伟,邓宏兵,苏攀达.长江中游城市群知识创新合作网络研究——高水平科研合著论文实证分析[J].科技进步与对策,2019,36(16):44-50.
- [7] 刘华军,杜广杰.中国雾霾污染的空间关联研究[J].统计研究,2018,35(4):3-15.
- [8] ROBINS G. Social networks, exponential random graph(p*)models for[J].Computational Complexity,2012:2953-2967.
- [9] 滕堂伟,方文婷.新长三角城市群创新空间格局演化与机理[J].经济地理,2017,37(4):66-75.
- [10] 邓淑芬,朱佳翔,钟昌宝.长三角城市群科技创新投入的空间关联格局分析[J].统计与决策,2019,35(15):105-108.
- [11] ROBINS G,SNIJDERS T,WANG P,et al.Recent developments in exponential random graph(p*)models[J].Social Networks,2007,29(2):192-215.
- [12] 郭淑芬,张俊.中国内地 31 个省市科学合作强度及影响因素分析[J].南京工业大学学报(社会科学版),2016,15(2):103-110.