

文章编号: 1003-2053(2017)02-0189-09

长三角城市群科学知识网络动态演化分析

李建成, 王庆喜, 唐根年

(浙江工业大学技术创新与企业国际化研究中心, 浙江杭州 310023)

摘要: 科学知识网络的良性发展与繁荣演进是城市创新能力提升的重要基础。本文以2000~2015年长三角城市群论文合作数据, 构建科学知识网络, 分别从整体网与自我网的空间分布、拓扑特征、结构复杂性等特征, 着重分析长三角城市群科学知识网络的动态演变规律与演化方向。研究发现: (1) 长三角城市群科学知识网络整体网络结构指标间呈幂律函数关系。网络不断扩张, 权度、密度、聚集系数逐年增大; (2) 整体网的演进存在向“小世界”网络发展的趋势, 以2008年为拐点趋势愈加明显, 表现出无标度特征; (3) 长三角城市群自我中心网络的度分布为钟形分布, 表明合作机会的均等与公平。权分布为帕累托分布表现出合作资源的集中与不均衡。网络空间分布模式呈现层级性、向多中心结构发展, 科学知识合作能力具有等级扩散现象。(4) 城市自我中心网是从合作型向研究型演进, 是一个不断加速的进化过程。研究型城市是促进科学知识网络后期成长与进化的主要动力。

关键词: 科学知识; 空间格局; 拓扑特征; 演进方向

中图分类号: F061.5; F129.9 文献标识码: A

DOI:10.16192/j.cnki.1003-2053.2017.02.005

近年来, 经济增速放缓, 政府与学界提出经济步入新常态的观点, 以科技进步与创新作为转变经济发展方式的重要力量, 增长驱动力要从传统的要素向创新驱动转变。长江三角洲地域范围跨两省一市, 经济总量庞大, 是我国重要的经济重心区与产业集聚区。作为经济系统中的一支重大力量, 在产能过剩、经济增长动力不足的背景下, 加快提高创新水平, 加快经济结构、产业结构不断优化升级, 率先实现经济驱动力由传统向创新驱动的转变成为当前经济建设工作的重中之重^[1]。

科学技术与技术创新合作作为提升创新能力的重要途径^[2], 历来都受到政府与社会各界的重视。互联网技术的快速发展与交通运输的便捷使得不同地域、不同组织类型的企业、机构之间产生了广泛的合作与交流, 并建立起庞大的社交圈, 使得位于社交圈中的成员在信息传递、资源分享以及知识与技术创新的过程中获得不可言喻的优势。而形成社交圈的网络便成为成员间交流、学习的一种有效平台。微观层面的高校、企业、研究机构以及其他组织作为

科学知识主体参与到科学知识网络的建设中, 而以宏观层面的城市为中心建设的科学知识网络也为不同地域、不同文化的组织、机构提供了合作与交流的机会, 使得国家层面、区域层面、企业与机构层面等各类科学知识行为主体融入到建设日趋完善的、高密度、高效率的科学知识网络中来。

对企业组织间的网络关系不乏成熟的研究^{[3][4]}, 城市经济学的兴起与城市地理学研究的转向, 使得网络中参与主体的视角从微观企业层面转移到了宏观城市层面, 当城市作为网络节点存在时, 其之间的网络体系与演化成为当下的研究热点^{[5][6]}。

城市作为区域空间的基本单元, 扮演着区域科学知识水平建设的重要角色。城市网络量化、表征方法, 目前主要是从城市间吸引力角度与科研合作关系角度建立网络两类, 而度量方法大致也因此分为两种。基于吸引力角度的网络度量方法主要是利用数理模型, 例如引力模型^{[7][8]}、因子分析^[9]等手段计算节点之间联系的强度。基于科研合作关系是

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2016-11-30

基金项目: 教育部人文社会科学研究一般项目(15YJA790058); 浙江省科技厅软科学重点项目(2014C25001); 国家自然科学基金资助项目(71473224)

作者简介: 李建成(1992-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为知识溢出与区域经济发展。E-mail: 2111404069@zjut.edu.cn。

王庆喜(1972-), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 博士, 研究方向为知识溢出与区域经济发展。

唐根年(1969-), 男, 浙江湖州人, 教授, 博士, 研究方向为产业经济学。

利用合作数据构建网络的方法,主要采用专利合作数据^[10-13]、论文合作^[14-16]数据等等。而对网络进行分析时,一般是通过二值法将节点间的关系分为0、1。如果节点间存在联系使用1表示,不存在使用0表示。然而无权网络的表示方法只能给出节点之间是否存在相互作用,以及使用度之类的指标说明城市在网络中的地位。但是这忽略了对合作强度的度量,即便某些城市与其他成员合作频繁,却强度与深度不够,便不足以说明其在网络中的重要性。因此,在很多情况下,节点之间的相互作用的强度差异起着至关重要的影响,基于赋权网络的特征是必须考虑的重要因素。

对长三角地区合作创新的研究还主要针对的是核心区16个城市^{[11][16]},并未对长三角所有城市的情况进行探讨。而核心区16个城市并不能代表整体情形,众所周知,长三角核心区以南(浙南)、核心区以北(苏北)分异明显,无论是经济发展水平、还是产业结构、科技教育能力、基础设施水平均存在较大差异,因此,对长三角两省一市全域的科学知识网络演化规律的研究是十分有意义的。在科学知识网络的构建方法上,现有研究主要通过以生物技术为代表的合作数据来构建^{[17][18]}。而生物科技领域为高新技术行业,能够代表一定的科学知识水平,但是不能涵盖。侧重传统工业、新型服务业的城市,如果以生物技术领域的成果来衡量其科学知识的水平,则有失偏颇。本文以所有领域的论文合作数据来构建长三角科学知识网络是可行且必要的。

有鉴于此,本文在已有研究的基础上,将研究范围扩展到长三角25个城市,研究样本扩展为所有学科,数据扩展到2015年,构建科学知识网络。试图分别从整体网与城市自我中心网的空间格局、拓扑特征、结构复杂性等方面,重点分析长三角科学知识网络的动态演变规律以及网络的演进方向,以期为今后更深层次的研究、城市创新水平建设以及政府决策提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 复杂网络分析指标

(1) 关系数与网络密度

关系数度量的是网络中联结节点的边数,反映了两个城市间存在合作联系的数目。

网络密度度量了一个网络的完整性。一个完全

图具备所有可能连接的边,即任意两节点有边连接,一个网络的密度则是其已有连接的边与完全网络的边的比例,本文中也表示科学知识网络联系的覆盖率,其计算公式为:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{d(n_i, n_j)}{k(k-1)}}{k(k-1)} \quad (1)$$

(2) 中心性

点度是节点在网络中其他节点与之相连的个数,反映了节点的相对重要程度。在城市科学知识网络中,是对城市与其他城市科学知识联系是否广泛的测度。平均度为网络中所有节点度的平均值,计算公式如下:

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \quad (2)$$

其中, \bar{k} 表示网络的平均度, k_i 表示节点 i 的度值。

加权度表示一个节点与之关联的所有边的权重之和,是对一个城市与其他城市科学知识联系的深度与力度的测量。平均加权度由网络中所有节点的加权度平局所得。计算公式如下:

$$S_i = \sum_{j \in N_i} W_{ij} \quad (3)$$

其中, S_i 表示节点 i 的加权度, W_{ij} 表示节点 i 与节点 j 相连的边的权重。

中间中心性衡量的是成员处于网络路径上的状态,中间中心性越高表明该其他成员间的联系经过该节点的路径数越多,该成员对其他成员的控制能力越强。另一方面,也衡量一个城市作为与其他城市之间连接的桥梁作用。计算公式如下:

$$C_{Rbi} = \frac{2 \sum_j \sum_k g_{jk}(i) / g_{jk}}{n^2 - 3n + 2} \quad (4)$$

其中, $g_{jk}(i)$ 表示节点 j 和节点 k 之间经过节点 i 的捷径数目。

接近中心度又称为整体中心度,表示该节点与其他节点间的距离长短。如果一个城市接近中心性越大,表明该城市与其他城市间的联系程度越高,反之则越低。计算公式如下:

$$C_{Rpi} = \frac{n-1}{\sum_j^n d_{ij}} \quad (5)$$

其中, d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短距离。

(3) 聚类系数与平均路径长度

聚类系数同平均最短路径一起能够展示网络中的“小世界”效应。聚类系数表明了节点如何嵌入

其邻居当中。平均聚类系数给出了关于一个节点聚类或抱团的总体迹象,由网路中所有节点的局部聚类系数平均所得。局部聚类系数计算公式如下:

$$C_i = \frac{E_i}{C_{k_i}^2} = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (6)$$

其中, E_i 代表的是一个城市与相邻城市所存在的实际联系的数量。

平均聚类系数为局部聚类系数的均值,计算公式如下:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (7)$$

平均路径长度表示的是两个城市之间路径的平均值,反映了网络节点之间交流的平均通畅程度。计算公式如下:

$$L = \frac{1}{C_n^2} \sum_{1 \leq i < j \leq N} d_{ij} \quad (8)$$

(4) 结构洞

结构洞衡量的是节点在网络中的受限程度。如果城市 A 与城市 B 连接,城市 B 与城市 C 连接,而城市 A 却不与 C 连接,那么 A、B、C 之间的结构就是一种结构洞。测量结构洞 Burt 的算法考量了四种因素,即有效规模、效率、限制度、等级度。本文采用第三种因素,即限制度来衡量结构洞^[19]。计算公式如下:

$$C_{ij} = (P_{ij} + \sum P_{iq}P_{qj})^2 \quad (9)$$

其中, P_{iq} 是城市 i 的全部联系中与 q 的联系所占的比例。

1.2 数据来源

本文用于构建城市科学知识网络的数据为城市间论文合作的数据。论文合作作者分布在城市的高校、科研机构以及企业中,合作论文的发表表明在不同地域范围的不同机构间存在科学知识互动,将这些机构按所属的城市整合,便组成了城市间的科学知识合作与互动的网络。

论文合作数据来源于维普期刊网,通过检索所得。检索条件为“机构”+“机构”+“全部期刊”,检索时间为 2000 年~2015 年,并将检索得到的结果剔除不符合条件的数据。

选择全部期刊以及全部学科的原因在于本文认为单一学科领域内的成果并不能代表城市整体科学知识的水平。不同的城市由于地理环境、政府政策等原因会在某些高新技术领域内作重点研发,也会在传统优势产业内出现科研的重大突破,因此使用

某一领域内的成果并不能公平地刻画所有城市间科学知识与合作行为。另外,繁荣科学(包括社会科学)和人文科学能够为技术创新活动提供基础性支撑^[20],故本文选择在全局期刊、学科领域进行检索。

2 整体网络动态演化分析

2.1 整体网拓扑特征分析

对历年长三角科学知识整体网络拓扑特征进行分析(表 1),发现网络关系系数从 2000 年到 2006 为持续增加阶段,2007 年之后进入有较小波动的稳定时期,维持在 250 左右,覆盖率在 0.83 左右。网络密度 2000 年为 0.487,密度较低,说明当时参与到科学知识网络中的城市数量并不多,而且城市间的合作也不紧密,而在 2015 年为 0.84,增幅达到了 72.48%,网络结构变化较大,整体网络影响范围表现出明显的扩张,城市凝聚力得到了明显提升。

网络平均节点度与平均加权度均呈现出持续增长的趋势,表明越来越多的城市参与到网络中,尤其是加权度的显著变化,说明长三角区域内科学知识合作的频率与深度正在迅速增强。长三角科学知识网络平均聚类系数逐年稳步增加,由 2000 年 0.748 到 2015 年的 0.902,上升了 22.99%。平均路径长度持续降低,15 年间降低了 0.4,降幅达到 26.37%。

2.2 整体网结构复杂性分析

描述网络特征间的数理关系一定程度上也反映了网络结构的性质与特征^[22],因此分别对平均度、网络密度与平均加权度关联性进行分析(图 1)。

研究发现平均度与平均加权度呈现出较强的正相关性(Pearson 系数为 0.9386, $P=0.000$),网络密度与平均加权度也具有较强的正相关性(Pearson 系数为 0.9388, $P=0.000$),但是二者关系均表现出明显的非线性特征,即平均加权度的增长速率均远远超过了网络密度与平均度。网络中参与合作的城城市数量与城市间的关系系数越多,合作强度提升的速度越快。将指标对数线性化后绘制在各自的散点图上,发现散点图近似于一条直线,经拟合出平均度、网络密度与平均加权度之间的函数关系分别为: $s(k) \sim k^{4.033}$ 、 $s(k) \sim k^{4.035}$,符合幂律函数的特征。

表 1 科学知识整体网拓扑结构特征

年份	关系数	网络密度	平均度	平均加权度	平均聚类系数	平均路径长度
2000	146	0.487	11.68	175.68	0.748	1.517
2001	181	0.603	14.48	320.64	0.813	1.397
2002	183	0.61	14.64	466.72	0.786	1.39
2003	208	0.693	16.64	609.84	0.834	1.307
2004	215	0.717	17.2	732.16	0.8	1.283
2005	219	0.73	17.52	904.24	0.823	1.27
2006	234	0.78	18.72	1099.2	0.856	1.22
2007	243	0.81	19.44	1258.72	0.863	1.19
2008	243	0.81	19.44	1149.84	0.863	1.19
2009	242	0.807	19.36	1619.92	0.872	1.193
2010	235	0.783	18.8	1484.72	0.858	1.217
2011	254	0.847	20.32	1539.44	0.89	1.153
2012	243	0.81	19.44	1572.64	0.871	1.19
2013	267	0.89	21.36	1588.48	0.92	1.11
2014	262	0.873	20.96	1591.92	0.953	1.06
2015	252	0.84	20.16	1573.12	0.902	1.127

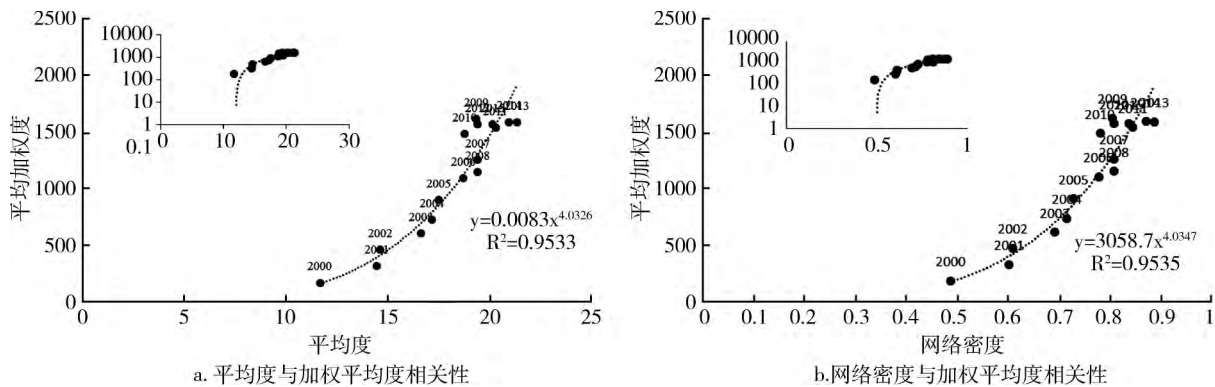


图 1 网络密度、平均度与平均加权度的相关性

2.3 整体网演进方向分析

利用 Gephi 软件模拟以 0.8 概率连接、拥有 25 个节点规模的随机网络,发现其平均聚类系数为 0.384,远低于长三角科学知识的历年平均聚类值。随机网络的平均路径长度为 1.199,值约等于 2008 年前后城市科学知识的平均路径长度值,08 年以后,平均路径长度则逐渐减小(图 2)。

高集聚、短路径是“小世界”网络基本特性^[21]。网络逐渐增大的平均聚类系数与逐渐减小的平均路径长度也表明长三角科学知识的整体网的演进是一个随机网逐渐向“小世界”网络发展的过程。2008 年以后“小世界”趋势更加明显。

整体网结构静态特征的历年变化与关联性质表

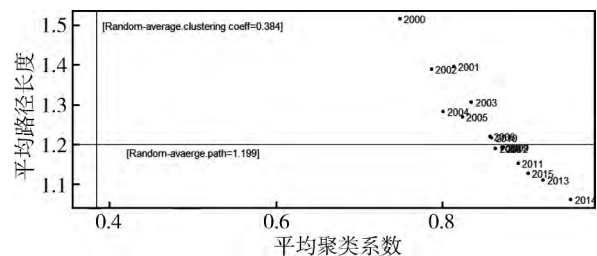


图 2 城市科学知识与随机网络特征指标的对比

明,长三角城市科学知识的整体网络正在不断扩张、不断成长,且成长的速度会随着网络的完善不断加快。长三角越来越多的城市积极地参与到区域科学知识的网络中来,合作日益频繁与密切、力度愈加强劲,城

市间知识流动与分享的成本降低、阻碍越来越少。科学知识网络整体的良性发展为区域城市创新能力的提升奠定了重要的基础。

3 城市自我网络动态演化分析

以每5年为间隔选取2000年、2005年、2010年、2015年四个主要年份分析城市自我网络的动态

演化。

3.1 城市自我网络空间分布演变

由于各个城市在高校、科研机构、企业拥有的数量上的不同、以及科学知识的制度环境、经济环境等的差异^[23],使得长三角科学知识网络空间分布表现出鲜明的层级特征,利用 Arcgis 空间绘图技术绘制历年科学知识网络图(图3)。

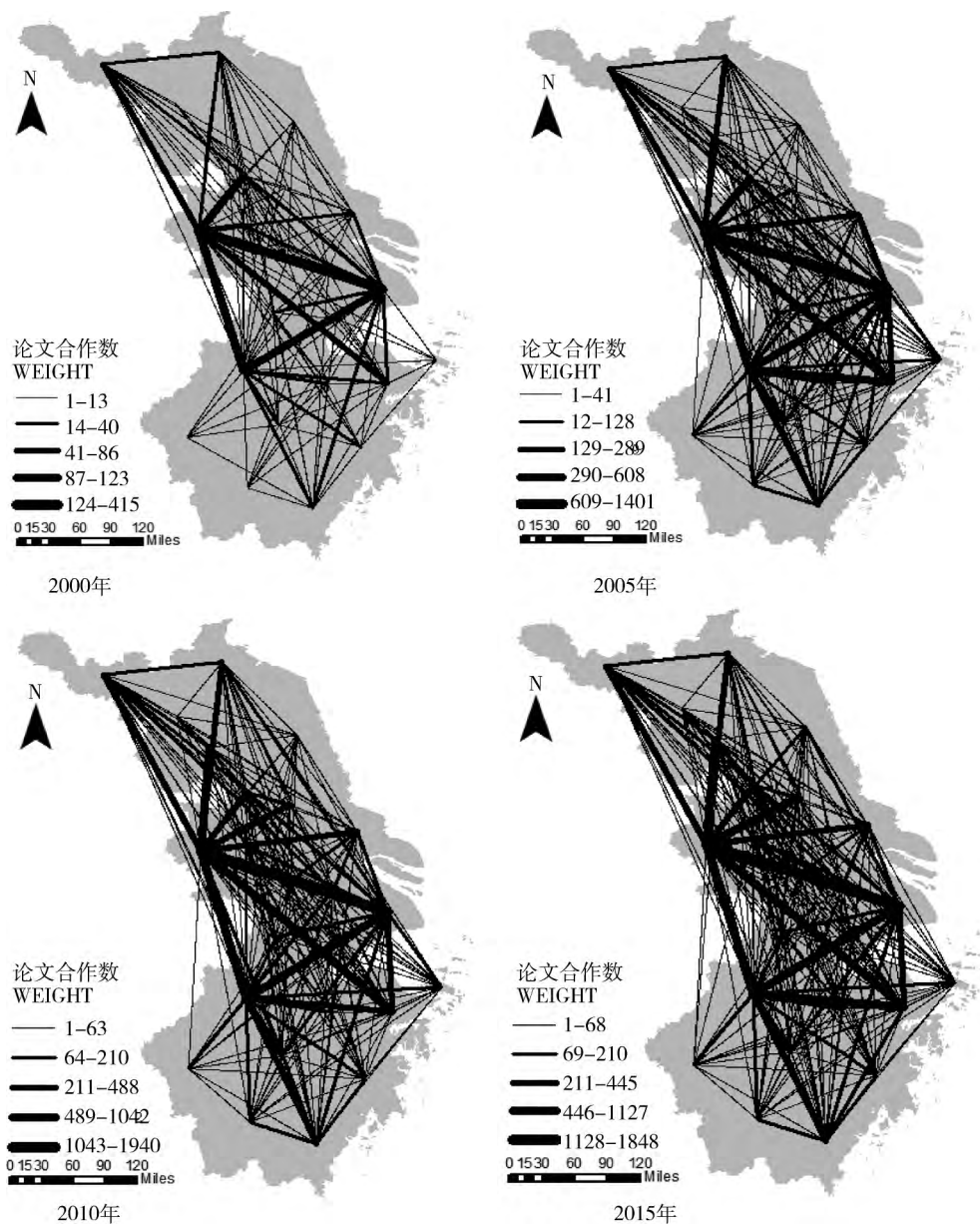


图3 城市自我网络空间结构演变

2000年,网络中心呈现以上海、南京、杭州为三极的三角形结构,2015年网络演进为多城市协同发展的多边形结构。历年合作水平最高的前9个城市

均位于长三角核心区,论文合作数量2000年占长三角合作总量的86.68%,2015年占77.97%。其中,南京、上海、杭州分别占24.09%、13.92%、

10.56%。合作能力最低的衢州、宿迁只占了 0.55%、0.40%，处于网络的边缘，可见城市科技教育实力与经济发展水平对城市间科学知识合作有较大影响。科学知识网络从以三角结构为中心演化为多边形结构中心辐射全局的空间特征，合作能力与影响以多边形结构为中心向周围呈梯级递减。

3.2 城市自我网络拓扑特征演变

通过分析城市度值与权值，发现度值与权值并非都呈现出正向比例关系，不同的比例结构可以反映出城市在网络中的演化路径。上海、南京、杭州度值与权值同比上升明显，大部分城市两者之间没有较强的正比例关系。镇江和温州市是江苏与浙江两省中发展最快的城市，已是区域内合作的中间力量。2000 - 2015 年，镇江点度从 11 提升到 21，点权从 155 增加到 1106。温州点度从 12 增加到 24，点权从 70 增加到 1024，起初较小的度值，却有相当良好的发展结果，权值在其中起到的作用更加明显。而扬州、徐州等城市，虽然点度较大，但是没有在权值取得良好的发展，使得 15 年间两个城市在网络中并没有明显的进步。由此可见，节点度数虽能反映城市在网络中一定的信息，但纯粹的提高合作的广泛性真正对城市科学知识能力的提升作用较小。可能前期会对网络的演化起到明显的作用，但后期应更多的考虑城市自身的吸收能力、合作水平，适当加深科研力度，提高权值对网络、合作深度对城市所起到的推动作用。

各城市的邻近中心性大致为逐年增加的趋势，中间中心性则逐年减小，两者此消彼长，城市间科研关系逐渐从控制与被控制向平等合作、从小城市依赖大城市发展向城市科研独立自主转变。上海、南京、杭州一直呈现出较强的控制能力，但是随着时间流逝有所衰减。盐城、宿迁、衢州、金华、丽水等城市的不受控能力最弱，历年邻近中心性皆在 0.8 以下。

具有结构洞位置的城市往往表现出良好的科研绩效，且合作能力远远高于其它城市，能够通过多种渠道促进知识传播与交流^[13]。上海、南京、杭州三个城市限制度最低，占据了网络有利位置。苏北、苏中、浙南各市 2000 年 - 2005 年降幅均达到了 24.04% 左右，但与中心城市相比仍然偏高。在网络结构中，表现出重要程度较大的节点，限制度在时间上的变化并不明显，而一些科学知识水平较低的城市，则在限制度上取得了较为显著的进步。由此可知，在初期占据有利位置的城市，在后期并没有让出

关键位置，其他城市只能后天弥补结构洞的缺陷、追赶领先城市。

3.3 城市自我网络复杂性演变分析

对网络的复杂性进行分析，发现城市自我网络的点度分布并没有呈现出幂律分布或指数分布的特征，而符合“钟形”分布(图 4)。2010 - 2015 年城市点度差距逐年缩小，“钟形”波峰往右移动，合作对象趋于饱和。

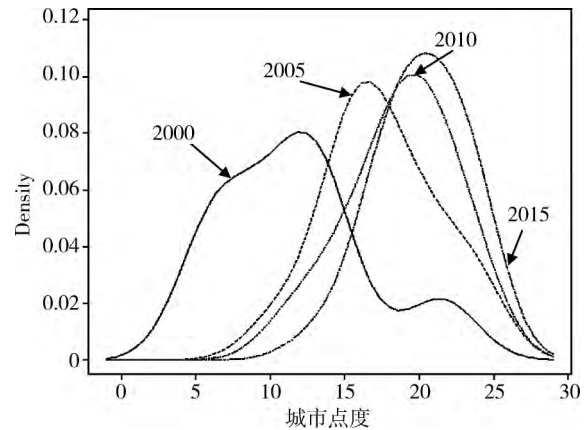


图 4 城市自我网节点度分布

通过拟合点权与边权分布函数(表 2)，点权分布与边权分布基本符合帕累托分布的特征，一定程度表现出科学知识资源分布的不均衡与集中趋势。而幂指数的高低反映了网络的异质性程度^[25]，总体而言，点权分布的异质性要低于边权分布，资源更加集聚在城市内部。点权分布函数的幂指数 2000 - 2010 年逐渐增加，说明城市间的合作总体差距在逐年缩小。2010 - 2015 年，幂指数在 1.65 上下浮动，网络总体表现出较低的异质性，说明长三角科学知识网络中城市并不存在绝对的弱势。

2000 - 2015 年，边权分布幂指数呈现出明显的递减趋势，科学知识资源与要素在合作关系上的分布并不均衡，主要集中在各自主要的关系边上。表明在合作对象的选择以及合作程度的大小上，城市间的差距较大，知识流通与溢出的渠道大小差异明显。

3.4 城市自我网络演进方向分析

网络是动态的、不断的进化的，城市自我网络的演化主要是由合作型向研究型网络演进。合作型网络表现为不断拓展城市科学知识合作的对象数量，建立积极、有效、信任、广泛的合作机制，以此降低沟通、理解、知识互补与交流的成本，能够提高合作频

率并建立稳定的互动模式。研究型网络则表现为在稳定的互动模式基础上, 拓宽科学知识合作渠道, 加大合作的力度与深度, 避免重复合作带来的技术空洞化, 并进一步降低合作的交易成本和协调成本, 提高合作绩效、增加合作价值。本文以对象数代表合

作型网络建设指标(所有年份平均节点度大于 18, 定义为合作广泛, 否则狭窄)、合作论文数代表研究型网络建设指标(所有年份平均加权重度大于 800 定义为合作力度大, 否则力度小), 对长三角城市群科学知识网络的演进方向进行具体分析(图 5)。

表 2 科学知识网络点权与边权分布的幂律拟合

年份	点权分布		边权分布	
	拟合函数	拟合优度	拟合函数	拟合优度
2000	$p(k) \sim k^{-1.2891}$	0.5437	$p(k) \sim k^{-0.7944}$	0.6362
2005	$p(k) \sim k^{-1.4391}$	0.8069	$p(k) \sim k^{-0.5437}$	0.6735
2010	$p(k) \sim k^{-1.6911}$	0.8107	$p(k) \sim k^{-0.4422}$	0.5941
2015	$p(k) \sim k^{-1.6086}$	0.7557	$p(k) \sim k^{-1.4382}$	0.5895

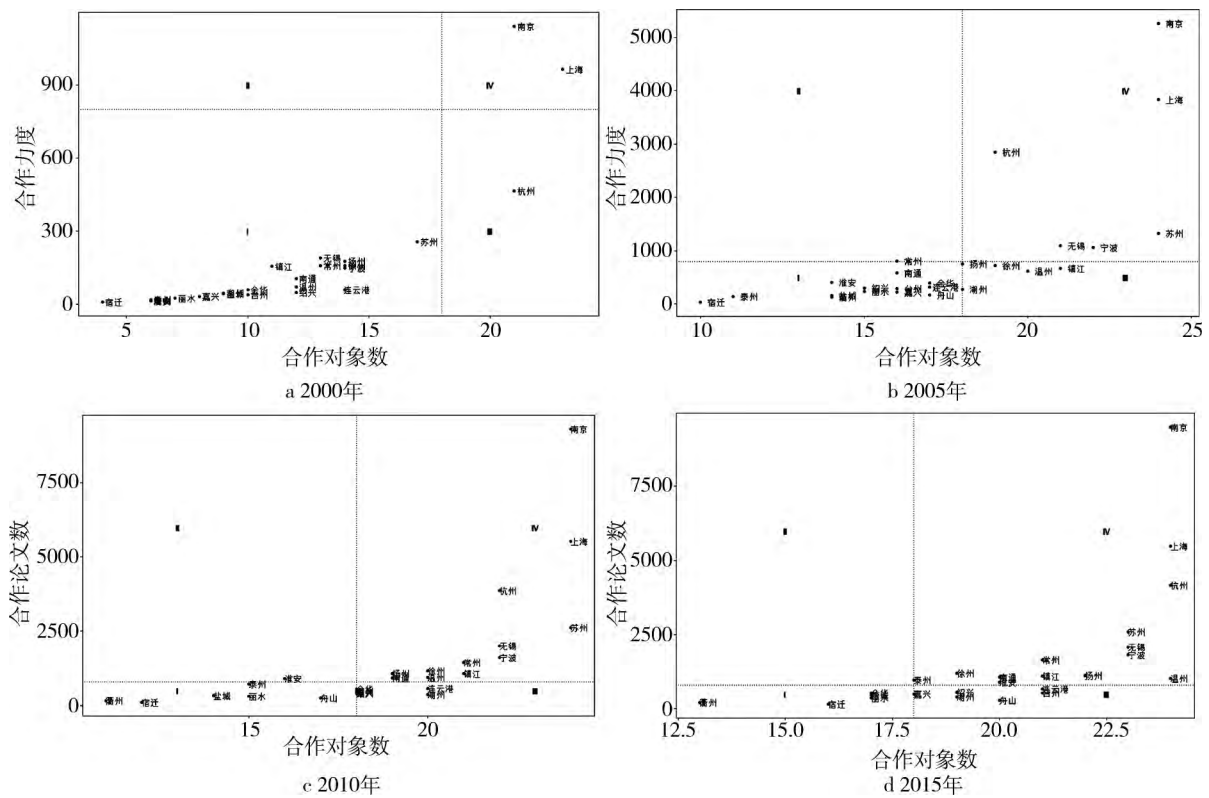


图 5 城市自我网络的演化

I 区域代表的是合作型网络建设的起步阶段, IV 区域代表的是研究型网络建设的基本完成阶段。II、III 区域为中间过渡阶段。

2000 年大部分城市都还处于 I 区域, 处在合作型网络的初步阶段。上海和南京则在合作对象与深度上都占据了绝对的优势, 具备了网络纵横一体化进一步发展的实力。而杭州的合作较, 力度稍弱于上海和南京, 位于 III 区域, 表明杭州在 2000 年横向建设业已成熟。这一时期还是科学知识网络发展的

低水平时期, 处于合作型阶段的城市占到了总量的 88%, 而研究型的城市只占了 8%。到了 2005 年, I 区域城市的比例由 88% 下降到了 52%, 表明接近一半的城市业已完成横向建设的初步阶段, 进入过渡阶段。杭州、苏州、无锡、宁波四个城市跻身进入了 IV 区域, 进入科学知识水平一体化发展的阶段。徐州、温州、镇江跻身第 III 区域, 扬州和湖州位于 I、III 区域交界处, 常州位于 II 区域的边缘。这一时期各城市的发展状况呈现出向研究型过渡情形, 并且

这一趋势愈加明显。2010 年,Ⅳ区域新增了扬州、徐州、南通、常州、镇江、温州等城市,湖州、连云港、金华、绍兴等城市进入了Ⅲ区域,具有开展科学知识深度合作能力的城市占到了 48%。这一时期,长三角科学知识网络演化基本以纵横一体化为重心,城市间合作交流愈加频繁。2015 年,Ⅳ区域的城市占据了长三角所有城市的 56%,其余大部分城市都已进入过渡阶段(Ⅲ区域)。而衢州、宿迁、丽水等城市仍然处于合作型网络建设的基础阶段。

长三角科学知识网络由合作型到研究型的演进是一个速度不断加快的过程,快速成长的速度可能是由于城市在合作过程中产生了正的外部性,知识溢出不仅发生在网络节点,也发生在网络的连边,有效带动了区域整体的发展,促使学习效用扩大,科学知识累积也越加迅速,从而对科学知识网络的演化起到了加速的作用。

4 结 论

城市是区域经济活动的重要载体,城市间的科学知识合作水平是创新型城市研究的重点。本文以城市间论文合作数据构建了长三角 25 个城市的科学知识网络,从空间格局、网络特征、结构复杂性等方面,重点分析了整体网络与城市自我中心网络的动态演变规律与演化方向,研究得出主要结论与启发如下:

(1) 长三角城市群科学知识整体网络存在向“小世界”网络发展的趋势。

2000 年 - 2005 年,网络不断完善、规模不断扩大。点度、网络密度与点权间均存在着幂律函数的关系,即点权的增长速率远远超过了点度和网络密度的增长速率,在此基础上的网络在加速扩张、加速成长,使得城市间的要素流动成本逐年减小,城市间合作日益频繁与密切,合作力度愈加强劲。把握住关键节点,充分发挥其作用,同时照顾好弱势城市,使优势城市有效带动弱势城市,在网络中参与合作的机会公平分配,使网络迅速膨胀,也更能发挥“小世界”网络特性,降低不必要的成本与时间,提高合作效率。

(2) 城市自我中心网络最终是由广泛合作型向深度研究型进化,并且进化过程同样是一个不断加速的过程。基于愈加广泛的合作机制,城市向研究型网络模式发展将更加迅速。可见广泛合作型是深

度研究型网络的上一个阶段,也是最为重要的基础阶段。城市点度在网络演化前期起到了推动作用,后期更多的是依靠权值的增加,即研究型城市在未来是促进科学知识网络扩张与进化的主要动力。权值的帕累托分布特征与点权、边权分布异质性的变化,意味着大量的科学知识资源将会集中在少数几条合作路线上,城市倾向于对资源丰富、合作水平较高的城市合作。科学知识网络中心以三角形向多边形演变,呈现多中心网络的发展趋势。各城市科学知识合作能力有较大提升,这依赖于长三角整体网与城市个体网的良性发展与不断的完善。

在网络进化过程中,处于高广度、低深度阶段的城市,应当积极探求合作深度以避免造成技术刚性。而仍然处于低广度阶段的城市,应避免陷入与其他城市的反复、重复合作,导致城市创新空洞化。

小世界的网络系统的高聚集、低路径特征,促使信息在网络中传递更加迅捷、交流便利,但是小世界网络的性质,使得少量改变几个合作关系,便可能改变整个网络的性能^[26],从而网络中主体参与机会、资源分配的公平性原则显得异常重要,不至于某些成员的退出而使得网络产生危机或者崩溃。而城市自我中心网的演化方向表明资源与机会一定程度的集中,可以加速网络向更高级的模式进化,能够提升科学知识的合作绩效,提高城市创新水平。因此,面对网络的参与主体,机会与资源的分配、效率与公平间的权衡,是让科学知识网络能够良性发展、在城市与区域建设中发挥重要作用的关键。相关政府部分与企业、机构在促进城市间科学知识合作、形成高度互动、高效的网络,可以围绕如何充分发挥科学知识网络小世界特性、充分利用资源集中带给网络的指数级增长效应这一矛盾而又互补的两个方面做出适当的策略。

参考文献:

- [1] 金碚. 中国经济发展新常态研究[J]. 中国工业经济, 2015, 29(1): 5 - 18.
- [2] 党兴华, 弓志刚. 多维邻近性对跨区域技术创新合作的影响 - 基于中国共同专利数据的实证分析[J]. 科学学研究, 2013, 31(10): 1590 - 1600.
- [3] 池仁勇. 区域中小企业创新网络的结点联结及其效率评价研究[J]. 管理世界, 2007, 23(01): 105 - 112, 121.
- [4] 张宝建, 胡海青, 张道宏. 企业创新网络的生成与进化 - 基于社会网络理论的视角[J]. 中国工业经济,

- 2011 25(4): 117 - 126.
- [5] Taylor P, Derudder B, Saey P, et al. Cities in Globalization: Practices, Policies and Theories [M]. London: Routledge, 2007.
- [6] Pflieger G, Rozenblat C. Urban networks and network-theory: The city as the connector of multiple networks. Urban Studies 2010 47(13): 2723 - 273.
- [7] 牛欣, 陈向东. 城市间创新联系及创新网络空间结构研究[J]. 管理学报 2013, 10(04): 575 - 582.
- [8] 吴志强, 陆天赞. 引力和网络: 长三角创新城市群的空间组织特征分析[J]. 城市规划学刊, 2015, 22(2): 31 - 39.
- [9] 吕拉昌, 梁政骥, 黄茹. 中国主要城市间的创新联系研究[J]. 地理科学 2015 35(1): 30 - 37.
- [10] 高霞, 陈凯华. 合作创新网络结构演化特征的复杂网络分析[J]. 科研管理 2015 36(06): 28 - 36.
- [11] 陆天赞. 长三角城市创新协作关系的社交网络、空间组织及演进—基于专利合作数[J]. 中国名城 2015, 8(10): 61 - 68.
- [12] 吕国庆, 曾刚, 郭金龙. 长三角装备制造业产学研创新网络体系的演化分析[J]. 地理科学 2014 39(9): 1051 - 1059.
- [13] 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[J]. 地理学报, 2016, 71(2): 251 - 264.
- [14] 吴素春, 聂鸣. 以创新型城市为主导的区域科研合作网络研究—以湖北省论文合著数据为例[J]. 情报杂志 2013 32(08): 125 - 131.
- [15] 夏恩君, 宋剑锋. 开放式创新研究的演化路径和热点领域分析——基于科学知识图谱视角[J]. 科研管理 2015 36(7): 28 - 37.
- [16] 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[J]. 地理科学, 2013, 33(10): 1180 - 1187.
- [17] 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[J]. 地理研究 2011 30(10): 1861 - 1872.
- [18] 李丹丹, 汪涛, 魏也华, 等. 中国城市尺度科学知识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.
- [19] 刘军. 社会网络分析导论[M]. 北京: 社会科学文献出版社 2004.
- [20] 吴敬琏. 中国增长模式抉择[M]. 上海: 远东出版社 2013.
- [21] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of “small - world” networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440 - 442.
- [22] 吴康, 方创琳, 赵渺希. 中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征[J]. 地理研究 2015 34(4): 711 - 728.
- [23] 吕拉昌, 李勇. 基于城市创新职能的中国创新城市空间体系[J]. 地理学报 2010 65(2): 177 - 190.
- [24] Clauset A, Newman M E J. Power - law distributions in empirical data [J]. Siam Review, 2014, 51(4): 661 - 703.
- [25] Albert R, Barabási A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47 - 97.
- [26] Strogatz S H. Exploring complex networks [J]. Nature, 2001 410(6825): 268 - 276.

Dynamic evolution of scientific knowledge network in the YangTze river delta

LI Jian - cheng, WANG Qing - xi, TANG Gen - nian

(Research of Center for Technology Innovation and Enterprise Internationalization University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Healthy development and evolution of scientific knowledge network is important to cities' innovation. This paper use the data of the paper cooperation between 25 cities in the YangTze River Delta from 2000 to 2015, analysis the dynamic evolution of whole network and ego network combining the indicators of structure, spatial characteristics and complexity. Major findings include: (1) Function in the topological indicators of the whole network are power - low functions. The network is expanding, weights, density and cluster coefficient are increasing every year. (2) The trend of integrated network is evolving to “small - world”, which is more obvious after 2008 and has scale - free characteristic. (3) Nodes Degree distribution of city ego network obey the bell curve which means the fairness of cooperated chances. The nodes and edges distribution of weight are consistent with the Pareto distribution, which means the agglomeration of the cooperated resource. Spatial mode of network are hierarchical diffusion and multiple centrality structure. (4) City ego network evolve from cooperation to research. The speed of evolve will be more far. Research cities are the major power of the network development and evolution lately.

Key words: scientific knowledge; network structure; topological characteristic; evolution direction