

Beijing City Lab

Wu K, Zhao M, 2014, The connectivity and complexity of Chinese cities in an intercity corporate network. Beijing City Lab. Working paper # 40

基于企业组织的中国城市网络复杂性结构特征

吴康¹, 赵渺希²

(1. 首都经济贸易大学城市经济与公共管理学院, 北京 100070; 2. 华南理工大学建筑学院/亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 全球化、信息化与快速城市化深刻影响了中国的城市体系, 多区位企业组织所形成的城市网络正处于日益复杂的空间嬗变过程。基于 2010 年企业名录的总部—分支机构关联数据, 研究构建了 330×330 的地级以上城市网络连接关系, 并运用复杂网络分析工具来探索我国城市网络的空间组织特征。研究发现: ①我国的网络联系呈现以“北京—上海—广深—成都”为核心的菱形空间结构, 不同等级的网络流强度具有显著的空间异质性, 城市网络的空间组织是一个择优性和地理邻近性复杂作用的过程; ②城市网络正处于一个简单随机向复杂有序结构的转化期, 整体大尺度的网络结构还有待形成; ③城市网络整体表现出明显的小世界网络的效应; ④中国城市的二值点度网络为明显的异配性连接特征, 而加权强度网络连接则一定程度上表现出“富人圈”的现象; ⑤中国城市网络的层级性并不明显, 城市网络的点度和强度的关系呈非线性增加特征。

关键词: 城市网络; 复杂性; 企业网络; 空间组织; 中国

The connectivity and complexity of Chinese cities in an intercity corporate network

Abstract: This paper adopts a network approach and measures the connectivity of Chinese cities in an intercity corporate network. Fuelled by globalization and urbanization, the Chinese urban system has undergone dramatic changes in the past four decades, featuring amongst others expanded geographic scope and intensified intercity connections. More specifically, this study examines how 330 Chinese cities are connected through 108,570 ownership linkages of 307,915 local corporations for the year of 2010. Our analysis uses data visualization, social network analysis, network simulation, and complex network models to reveal spatial and network patterns. Major findings include: (1) the backbone of the Chinese intercity corporate network is diamond-shaped and anchored by four major metropolitan areas (Beijing in the North; Shanghai, East; Guangzhou-Shenzhen, South; Chengdu, West); (2) the underlying network generation process features both preferential attachment and spatial interaction; (3) the overall structure of the intercity corporate network is in a transition process from a simple random period to a complex but orderly one and also reveals small-world network properties; (4) degree distribution of cities in the intercity network is characterized by weak assortativity and rich-club effects; and (5) a combination interpretation of clustering coefficient and degree distribution identifies hierarchical and regional tendencies.

Keywords: city network; corporate network; spatial organization; complexity; China

1 引言

城市的经济发展无法置外于相互关联的城市体系,城市之间的网络交互作用也是城市体系的基本特征^[1]。网络是对复杂交织相互联系的客观世界的一种抽象表达,一般被抽象为由许多节点(nodes)和连接节点之间的边(edges)构建而成的“网络图”^[2],通过这种定义,事物间纷繁复杂的结构关系得到了简单化和一般化处理。伴随着社会经济的快速发展,网络或网络化的视角逐渐被引入主流社会科学研究,人文地理学中的两大分支学科城市地理和经济地理都出现了网络研究的热潮^[3,4]。

随着研究的不断深入,“网络”关注的对象由技术层面基础设施为代表的硬网络向社会、经济、政治等内涵更丰富的软网络不断拓展和延伸^[5-7]。在社会科学范畴,“网络”这一学术概念又与“全球化”和“信息化”等概念相互交织影响,突出表现在生产空间与地域空间两方面:新的国际劳动地域分工下,跨国公司在全球范围内寻找最佳的生产区位,经济一体化过程中的垂直一体化和横向一体化相互交融,导致全球生产呈现网络化的组织现象^[8-9];另一方面,在实体基础设施与虚拟网络的支撑下,出现了网络社会下“流动空间”的新形式,“地方空间”与“流动空间”的共存促使地域空间具有从等级化到网络化的发展趋势^[10-11],并引发了城市和区域空间形态以及功能和发展模式的变革,空间组织形式正由静止、封闭、等级性的中心地模式逐渐向多中心、扁平化、流动性的网络模式转变^[12-13]。面对这些新变化,以规模等级分布为核心观点的传统中心地理论解释力有限,城市地理的研究范式也出现了“网络化”转向,如 Taylor 等提出了“中心流”理论作为传统中心地理论的补充^[14], Pflieger 等认为“城市作为网络存在于网络之中”^[15], Batty 主张要深刻理解城市就不能仅将其当作空间中的地点,更应该将其视为网络和流的体系^[16]。

为了描述这种新的空间组织逻辑和发展范式,“城市网络”概念应运而生。一般认为,城市网络是在不同空间尺度下(可以是区域、国家甚至跨国)相互关联的城市间功能联系,其网络空间结构既有垂直分工联系,也具有水平分工联系。城市网络在空间形态上一般具有多中心结构;在功能上具有完善的职能体系或网络整合体系;同时包括了实体联系(如高速交通通道)和虚拟联系(通讯系统),是分散化、但具有竞争力且效益,经济、社会和环境可持续发展的一种城市形态和空间组织观念^[17-18]。当前对城市网络的研究可按空间尺度差异大致分为“世界城市网络”和“多中心城市区域”两大学派,分别研究全球尺度和区域尺度下的城市网络链接与关系^[13,19]。由于行为主体的不同,城市网络的类型也十分丰富,如航空网络^[20]、经济网络^[21]、通信与移动互联网^[22]、知识生产网络^[23]等。在实证方面主要形成了企业组织^[24]、基础设施^[25]和社会文化机制^[26]等三条研究路径,其中企业组织路径被认为是整合“生产网络”与“城市网络”的主流研究方向^[27-28],基于多区位企业组织的城市网络研究则是目前西方城市地理研究领域中的前沿^[29],并成为研究全球产业变革的基本分析单元。

改革开放以来我国的的城市经济得到了迅速发展,城市群已成为国家推进城市化的主体空间形态和国家参与全球竞争与国际分工的基本地域单元^[30],而网络化、多中心的发展趋势也在珠三角、长三角等发育水平较高的城市群区域显现,作为门户节点的部分城市正加速嵌入到全球和地方的各种生产网络中^[31]。在这一背景下,基于传统等级体系和规模属性的研究视角无法真实反映中国城市网络的发育状态,现有的研究虽不乏空间联系和交互作用的实证探索,但却受到流数据和网络分析条件的限制,大多采用重力模型修正之上的城市属性指标进行交互叠加计算^[32,33],这种研究难以准确反映城市间复杂交互关系^[34]。另一方面,在 GaWC 世界城市网络研究的影响下,学术界也开始探索以生产性服务业为基础的中国城市网络实证研究,空间尺度涉及到全国^[35]和重点城市群区域^[36-37],但因数据过于强调高级生产性服务业,无法度量一般性城市的网络连接特征,相关研究很难深入探索符合中国国情的城市网络格局;另外一些学者重点关注基础设施中的航空网络,就航空流量、城市体系、网络

组织及网络复杂性等议题进行了多种探索研究^[38-40]；同时，伴随着移动通讯与互联网技术的崛起，也有部分学者从域名、网络拓扑结构以及新浪微博、百度关联指数等方面入手研究中国互联网的城市网络体系^[41-44]。

总的来看，国内相关研究刚刚起步，在利用实证型关系数据方面还处于方兴未艾的研究阶段，虽出现了一批基于企业组织的城市网络研究，但受到数据样本的限制，大尺度、大数据量的宏观研究尚不多见，且缺乏对网络结构和空间组织规律等方面的深入研究。本研究将采用 2010 年全国企业名录中收集的 30 余万条企业数据，通过构建 330×330 的城市网络连接关系，试图揭示城市网络空间组织的复杂性特征，以响应《国家新型城镇化规划（2014—2020）》的空间实践。

2 研究方法

2.1 网络复杂性的分析工具

作为图论衍生出来的分析工具，复杂网络理论的系统研究源于 1960 年代匈牙利数学家 Erdős 和 Rényi 建立的随机图网络。20 世纪末 SW 网络（小世界网络）和 BA 网络（无标度网络）的提出对于复杂性网络理论具有开拓性的贡献。由于其相对完整的体系性统计量，复杂网络在物理学、生物学、社会学等交叉学科领域引起了广泛的重视^[45-46]，点度中心性、路径长度、群集性、匹配性（图 1）等统计量成为了体系性的应用工具^[47-48]。几乎在复杂网络兴起的时，国外城市研究者基于多区位公司的网络视角，对世界城市、全球城市作出了开创性的研究，并引发了世界城市网络的研究热潮^[49-50,19]。然而网络的地理空间特性在以上研究中很少涉及，近年来有学者转向空间网络的研究，如 Bartányi 认为在考虑网络增长时，不仅仅表现为 BA 网络的择优特征，还应该考虑选择已有节点同新增节点的距离特征^[51]；此外还有一些学者从小世界城市网络的视角补充和完善了空间网络的相关研究^[52-53]。

近年来，虽然西方研究领域更加注重对城市网络方法论的探索^[54]，并开始以多学科的视野来研究城市网络，但网络的点度分布、匹配性、群集性没有得到完整的分析，企业视角下城市网络的复杂性特征研究也就一直存在缺失。因此利用复杂网络这一体系性的分析工具所包含的统计量将有效地拓展城市联系分析的研究视野。

2.2 数据选择

经济联系无疑是产生其他网络联系的基础，因此城市网络的主流研究路径依然是多区位企业组织的空间联系。在经济高度发达的城市体系中大型多区位组织是城市间相互依赖关系的主要来源，因而要理解城市间的相互作用关系进而理解城市体系中城市发展的机制，多区位组织是最合适的考察对象^[55]。

作为典型的多区位组织，企业会出于多种目的在区域、国家、全球空间尺度上布局，形成复杂的企业网络，并将不同的城市

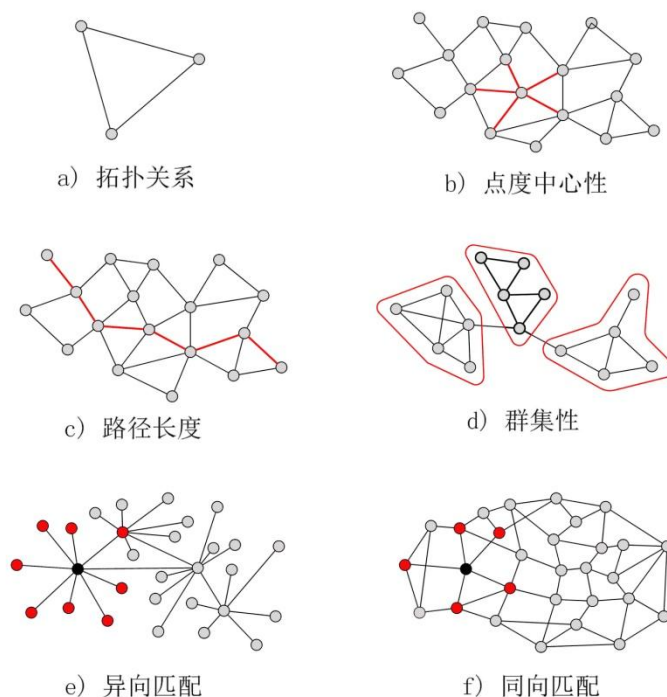


图 1 复杂网络的部分统计量模式

Fig 1 Models of some statistic tools for complex network

链锁成城市网络；此外，由于企业内部的网络数据相对容易获取，因此基于企业内部的网络联系开展城市网络的实证研究更为主流，也是在概念上最接近世界城市网络形成实际过程的视角^[25]。

企业组织下的城市网络研究一般可分为高级生产性服务业（APS）和跨国企业总部—分支（子公司）两种取向^[3,50]，前者强调 APS 在全球城市集聚从而形成的对世界经济的管理能力，后者更强调跨国公司总部在世界城市集聚从而产生的对分支机构所在城市的网络命令与控制力^[56]；前者主要关注高级生产性服务业企业网络，忽略了其他产业企业所创造的城市间的重要网络联系，尤其是正在崛起的发展中国家和新兴工业化国家地区的制造业城市，后者则关注全行业的企业网络，更能全面反映城市网络的面貌。因此，研究选择了全行业的企业分支机构数据，同时为了克服世界 500 强在度量相对落后地区的数据缺失问题，研究将数据采集对象放宽至所有的跨地域企业组织。

在此基础上，研究采用总部—分支归属联系模型法，主要通过选取位于城市中的公司和企业的总部及其分支机构的跨地域分布进行模型构建，通过分析分支机构所在城市与母公司所在城市之间的数量关系来分析城市网络的流向关系和节点关系。

定义 T_{ij} 为被联系的 j 城市（分支机构所在地）其目标联系地在 i 城市（企业总部所在地）的流量数据（带有向量性的企业经济流）， T_{ji} 则属于相反的向量数值，为了计算城市 i 和 j 之间的总的网络联系量，进一步做如下定义：

$$O_i = \sum_j T_{ij} \quad (1)$$

$$D_i = \sum_j T_{ji} \quad (2)$$

式中： O_i 、 D_i 分别代表了在城市网络作用中，位于城市 i 的企业总部数量和在城市 i 设立企业分支机构的数量，考虑连接的方向性， $T_{ij} \neq T_{ji}$ ， $O_i \neq D_i$ ；如果不考虑城市网络作用的方向性特征，则 $(T_{ij}+T_{ji})$ 表征了 i 、 j 两座城市间的网络联系强度。进一步地，借鉴航空交通网络的相关研究^[43]，定义 N_i 以表征作为节点的城市 i 在网络中结节性：

$$N_i = O_i + D_i \quad (3)$$

以 2010 年企业名录库中的企业为主要数据来源，该数据库一共登记收集了 2010 年中国大陆 307915 条公司企业的记录，其中企业总部是指企业的实际办公地点而非注册地点；分支机构信息主要指企业的全资或控股子公司、分公司、办事处和代表处所在的城市。由于研究主要关注城市间联系故剔除了同城的企业样本。在数据处理过程中，首先统计了样本企业所覆盖的所有地级以上行政区单元，共包括 330 个地级单元（其中包括 286 个地级市和 44 个自治州首府所在城市）；其次以这 330 个行政单元建立邻接矩阵，以横坐标的城市作为样本企业总部所在的城市输入关系数据，依此将所有样本企业的累计加总构建城市间企业网络的邻接关系矩阵表，最终得到一个有向多值网络矩阵，通过公式(1)~(3)的计算可转换为上下三角对称的无向多值网络矩阵，在 ArcGIS 下生成的具有起始点的 108570 条矢量线连接。

2.3 测度指标

采用网络分析方法对建立的城市经济网络关系矩阵进行测度与分析，测度指标主要用来考察城市经济网络中的节点关系和网络结构两个方面。研究涉及的城市网络连接有二值拓扑和多值加权之分，这里设城市网络中任意两个节点城市 i 和 j 的连接边为 a_{ij} 。

2.3.1 点度中心性

在复杂网络的统计工具中，设在一个有 N 个节点的无向网络图中，任一节点 i 的度表示与 i 具有连接边关系 a_{ij} 的数目，无向网络中如果两节点间有边连接，则 $a_{ij}=1$ ，反之为 0，节点的度记为 k_i ：

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij} \quad (4)$$

如果网络中度为 k 的节点个数为 n_k ，网络中节点度的分布情况用概率分布函数 $p(k)$ 来描述：

$$p(k) = n_k / N \quad (5)$$

考虑到部分实际网络规模较小以及节点度分布的非连续性，为减少误差，常用累积概率分布 $P(k)$ 来代替 $p(k)$ ，即：

$$P(k) = \sum_{k'=k} p(k') \quad (6)$$

而对于加权网络而言，节点 i 的强度为：

$$s_i = \sum_{j \in N} w_{ij} a_{ij} \quad (7)$$

w_{ij} 为节点 i 和 j 之间的连接边权重，城市网络研究中，连接边权重也即为相互联系强度 T_{ij} ，那么，对于度数为 k 的节点其点权（加权）强度的累积概率分布函数表达为：

$$P(s_k) = \sum_{k'=k} p(s_{k'}) \cdot p(s_k) = \sum_{i=1} s_{ki} / \sum_{j \in N} s_j \quad (8)$$

度是描述网络节点结构特性的基本参数，度分布则反映了网络系统的宏观统计特征，如果节点度分布具有幂函数分布特征，即 $P(k) \propto k^{-r}$ ($2 \leq r \leq 3$)，则被称为无标度分布，故具有幂律分布的网络被称为无标度网络^[46]。加权网络节点的幂律分布同样可以用如下式来表示。

$$P(s) = \sum_{s'=s} p_{s'} \sim \sum_{s'=s} s'^{-\gamma} \sim s^{-(\gamma-1)} \quad (9)$$

2.3.2 平均路径长度

平均路径长度指在所有连通 (i, j) 的通路中，经过其他节点最少的路径称为两点的最短路径，而连接两点的最短路径所包含边的数目就是两点间距离，记点 i 到节点 j 的距离为 d_{ij} ，它描述了网络中节点的分离程度。把所有节点对的距离求平均，就得到网络的平均路径长度，它描述了网络的全局性质^[45]：

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (10)$$

2.3.3 群集性

群集性是用来衡量网络节点局部聚类情况的参数，一个节点的群集系数是指它所有相邻节点之间连边的数目占可能最大连边数目的比例。对于某个节点 i ，考虑与它相邻的节点的集合 N_i ，则 $|N_i|=k_i$ ，也即 i 节点的度，那么在由 i 的 k_i 个临近节点构成的子网中，实际存在的边数 E_i 与全部 k_i 个节点完全连接时的总边数的比值就定义为节点 i 的群集系数，定义式为：

$$C_i = \frac{E_i}{C_{k_i}^2} = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (11)$$

网络的群集系数 C 就是所有节点群集系数的平均值，即：

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (12)$$

通常来说， C 越大，表示整个网络各个节点之间形成短距离联系的程度越大，也即整个网络的局部连接明显，若 C 为 0 表示网络中不存在三元环，而 $C=1$ 则为完全图。

2.3.4 匹配性

一般地，对于网络中的任何一条连接，根据两端的点度规模可以分为两种情况：规模相近节点间的连接和规模异质节点间的连接，这称为复杂网络匹配性问题（Assortativity），亦

称为网络节点的相关性研究^[57]。对于通常意义上的规模匹配问题，可以通过式(13)分析二值拓扑网络中每一个节点城市的邻近平均值^[58]：

$$k_{m,i} = \frac{1}{k_i} \sum_{j \in N_i} k_j = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} k_j \quad (13)$$

其中 N 是与节点 i 具有连接的节点集合。对于权重网络而言，其节点城市的邻近平均值可以定义为^[59]：

$$k_{m,i}^w = \frac{1}{s_i} \sum_{j \in N} a_{ij} w_{ij} k_j \quad (14)$$

上式中，当 s_i 为 0 时定义 $k_{nn,i}^w$ 为 0 时即可实现对权重邻近平均值的计算。通过 $k_{nn,i}$ 与 $k_{nn,i}^w$ 的大小比较，即可判别在节点 i 对城市规模的连接指向分布，也即节点之间连接相互选择的偏好性。如果 $k_{nn,i}^w$ 随着 $k_{nn,i}$ 的增大而增大，表明点度大的节点优先趋向于连接具有较高点度的节点，此时网络是正相关的，反之 $k_{nn,i}^w$ 随着 $k_{nn,i}$ 的增大而减小，则意味着点度大的节点趋向于优先与较小点度的节点连接，此时网络是负相关的。整个无权网络的匹配性，可以通过 Newman 的匹配系数进行分析^[60]，对于点权强度网络可进一步定义为：

$$r^w = \frac{M^{-1} \sum_{i,j \in N} s_i s_j - \left[M^{-1} \sum_{i,j \in N} \frac{1}{2} (s_i + s_j) \right]^2}{M^{-1} \sum_{i,j \in N} \frac{1}{2} (s_i^2 + s_j^2) - \left[M^{-1} \sum_{i,j \in N} \frac{1}{2} (s_i + s_j) \right]^2} \quad (15)$$

式中， M 为网络中连边的总条数， N 为 i 、 j 共同的连接节点集合， r^w 取值在 -1 到 1 之间， $r^w > 0$ 意味着该网络为同向匹配网络， $r^w < 0$ 则为异向匹配网络。

3 城市网络联系的空间结构及其空间异质性

3.1 节点的网络联系分布

基于企业联系的网络结节性空间差异性十分显著（图 3），上海和北京两个城市的总的企业联系量分别高达 27655 和 24807，深圳和广州也高于 10000，其次为杭州、南京和成都，企业网络联系量介于 5000 到 10000 之间，而最低的林芝和山南仅为 4 和 2。如果分企业总部联系和企业分支联系来看，两者虽然相关性极高（图 2），但对于个体节点而言，空间异质性依旧明显的（散点图中的两个圈域）。进一步地利用城市规模指标对企业空间联系的总量进行了相关性分析，具体选取了三个指标：2010 年城市人口、2010 年市区 GDP 和 2010 年市域 GDP。总的来看，这 3 个指标与各个节点的企业空间联系总量都高度相关（图 2），其中与城市人口和市区 GDP 的相关性系数都在 0.9 以上。基于企业布局的城市网络联系量与城市规模指标高度相关，这进一步证明了企业网络布局与城市体系的互动作用关系：一方面城市体系的形成发展深刻地受到企业多区位选择的影响；另一方面，企业的多区位选择和发展又不得不考虑城市规模、功能定位以及该城市在区域城市体系中重要性等因素，也就是说城市体系又直接作用于企业集团的网络空间布局^[55]。

3.2 城市网络联系呈菱形为核心的空间结构

为了研究我国城市网络联系的宏观空间格局，提取出 330 个节点城市间网络联系强度大于 0 的边权，并按照自然断裂点将边强度划分为 6 个等级绘制成为相应的中国城市经济网络的空间联系当量（也即边权值）图。

由图 3，我国城市经济的主要网络联系流呈现以菱形为核心的空间结构，菱形的四个角分别由北京（北）、上海（东）、广深（南）和成都（西）等节点城市构成。东北、东南、西

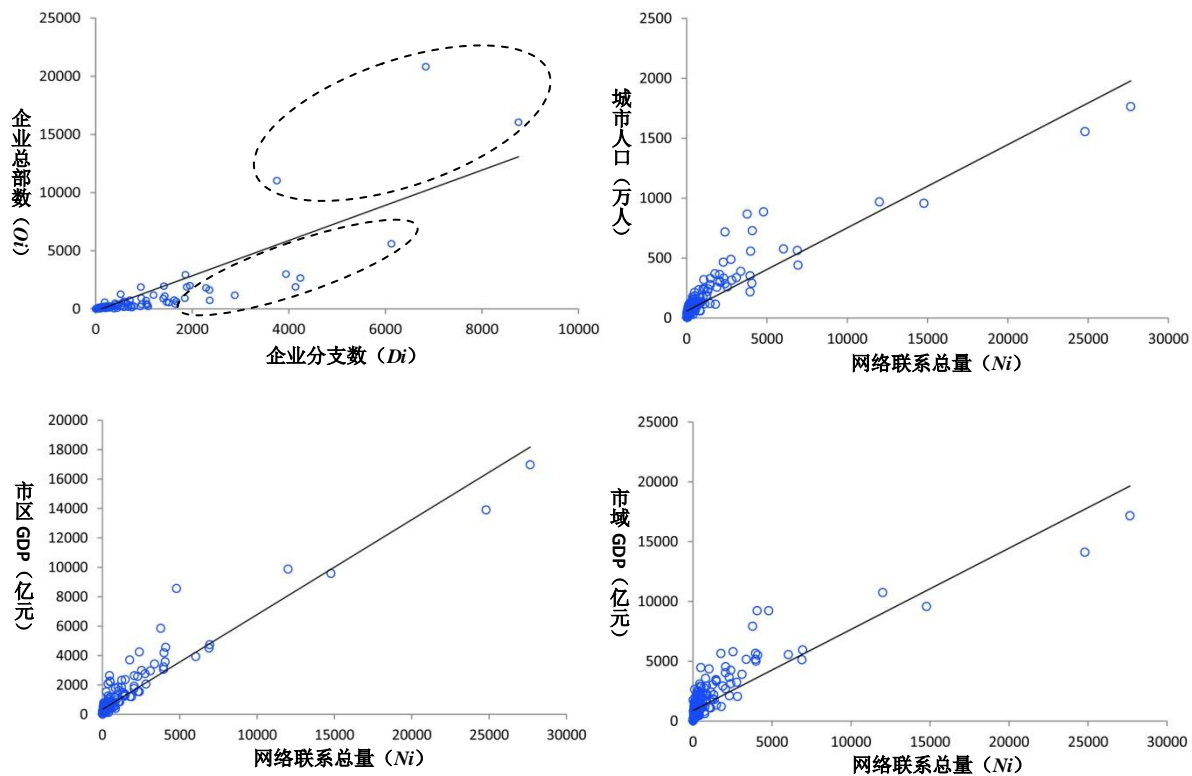


图2 节点网络联系的相关性

Fig. 2 The correlation of city network connectivities

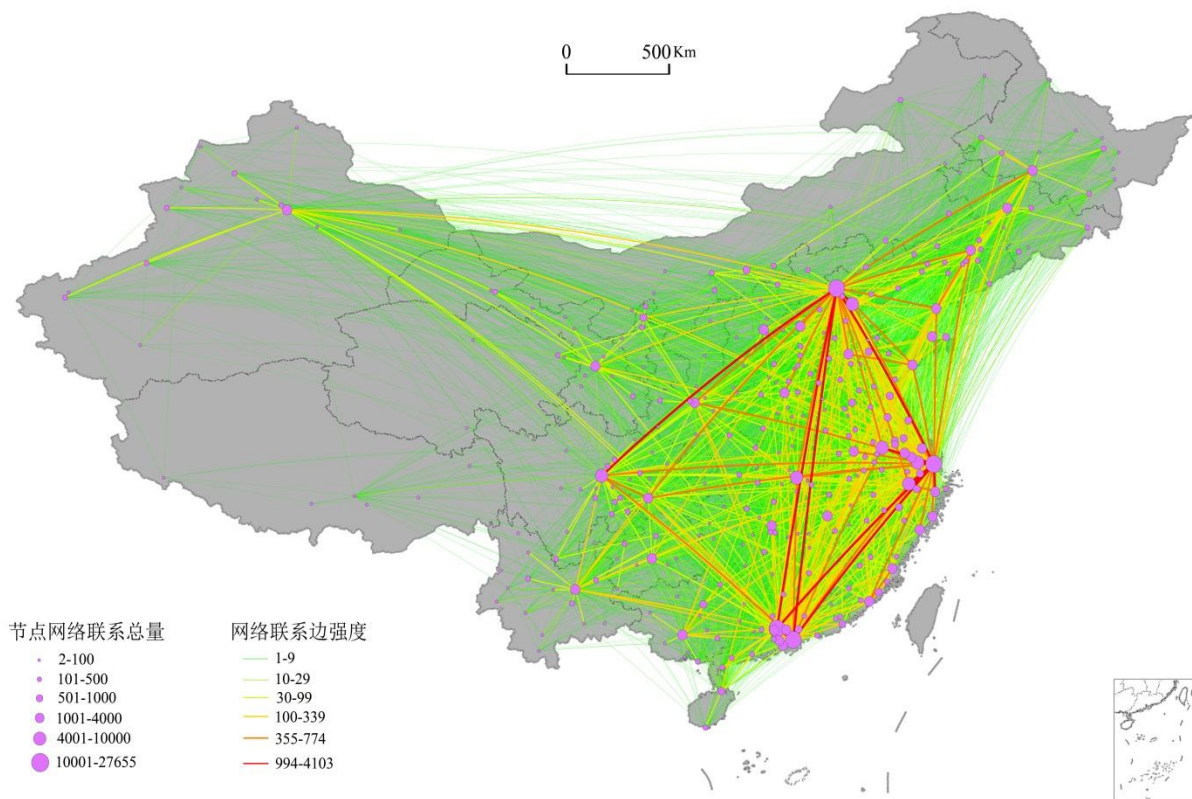


图3 城市网络的空间联系流

Fig. 3 The spatial connectivity of city networks in China

南和西北等外围区域则通过次一级的网络联系流与菱形区域连接。这表明基于城市间关系数据的城市网络空间结构并没有受到距离的明显约束,核心网络联系流也主要发生在核心节点城市之间,这与重力模型演绎得到的宏观格局表现并不一致^[32,33]。

3.3 网络流强度具有显著空间异质性

将网络联系边按照联系强度排序,分别提取所有联系流记录数的前 0.1%、0.1%~0.25%、

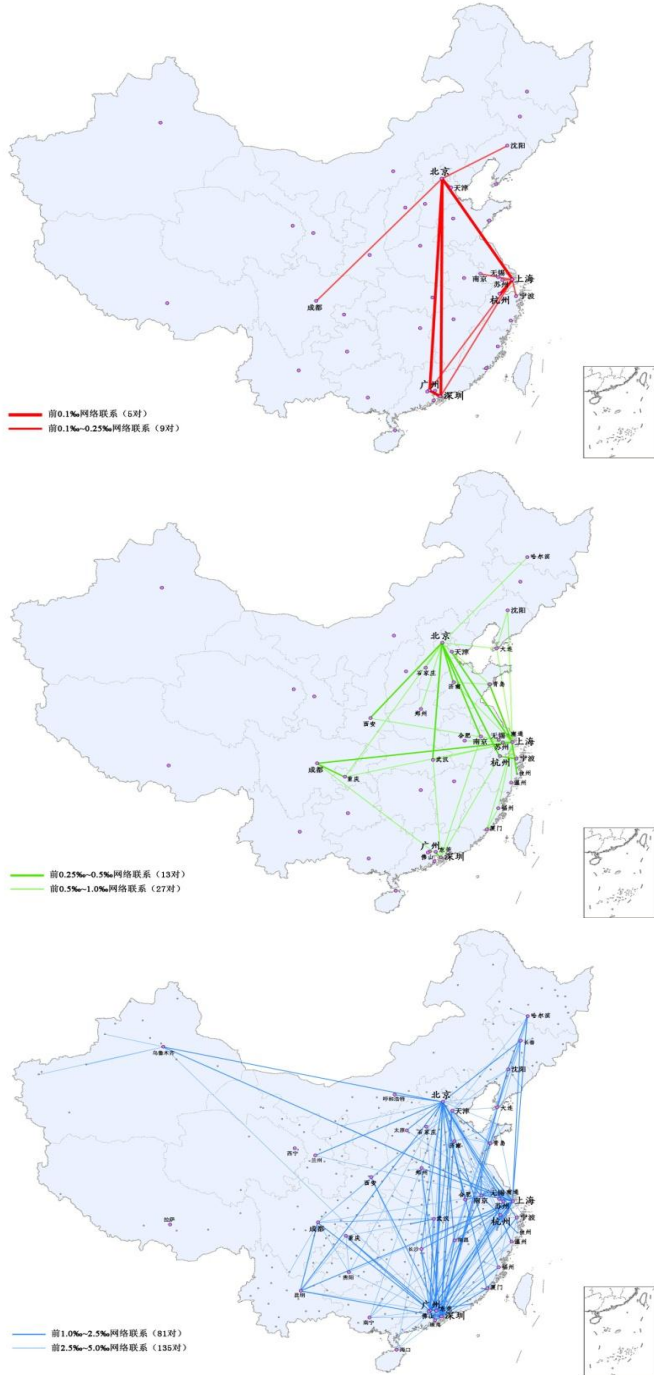


图4 三类网络联系流的空间分布

Fig. 4 The distribution of three type network connectivities

0.25%~0.5%、0.5%~1%、1%~2.5%和2.5%~5%这6种主要联系强度网络流,并把它们合并为3类(图4)。前0.1%的网络联系流共有5对,涉及到的核心节点城市包括北京、上海、深圳、广州和杭州。最大的一对网络联系流发生在京—沪间,其流当量高达4103,是第2大网络联系广州和深圳间流当量(2073)的近2倍,除此之外,进入前0.1%网络联系流的节点对还有北京—深圳(2025)、北京—广州(1706)和上海—杭州(1607),这5对联系的连接线主要构成了菱形核心结构的右半区。前0.1%~0.25%的网络联系流共有9对,在原有5个核心节点城市的基础上增加了苏州、南京、天津、成都、宁波、沈阳和无锡等7个节点城市,9条联系流分别为上海—广州(1575)、上海—深圳(1565)、上海—苏州(1504)、上海—南京(1358)、北京—天津(1231)、北京—成都(1034)、上海—宁波(994)、北京—沈阳(774)以及上海—无锡(734)。总的来看,前0.25%的网络联系流主要发生在网络的核心节点间,尤其是京沪广深这四个节点形成的菱形核心结构的右半区。

第二类是流强度在前0.25%~1%的联系网络。其中前0.25%~0.5%联系的网络流有13对,涉及的节点在原12个城市的基础上增加了东莞、青岛、济南、西安、佛山、武汉和台州等8个,主要的网络流发生在成都—重庆(728)、深圳—东莞(705)、杭州—宁波(704)、广州—佛山(561)等空间临近的巨型城市区域内以及北京与次级的节点南京、杭州、济南、西安、武汉之间;上海和次一级节点成都、青岛、天津、台州之间。

安、佛山、武汉和台州等8个,主要的网络流发生在成都—重庆(728)、深圳—东莞(705)、杭州—宁波(704)、广州—佛山(561)等空间临近的巨型城市区域内以及北京与次级的节点南京、杭州、济南、西安、武汉之间;上海和次一级节点成都、青岛、天津、台州之间。

前 0.5%~1%的联系流有 27 对，相互作用的城市进一步增加了南通、大连、哈尔滨、温州、合肥、福州、厦门、郑州和石家庄，主要的连接指向依然可以分为两类，一类是与核心节点的深圳、上海、北京，另一类是空间近邻的城市群区域如东莞—广州(485)、济南—青岛(481)、南京—苏州/无锡(457/379)、沈阳—大连(432)、福州—厦门(412)等。从空间格局看，前 1%的联系网络已经具有明显的异质性，即菱形核心结构的上半区（北京—上海—成都）节点间作用强度明显高于下半区（上海—深广—成渝）。

第三类为流强度在前 1%~5%的联系网络。其中前 1%~2.5%的联系流增加到 81 对，前 2.5%~5%的联系流增加到 135 对。与前两类网络联系相比，第三类强度的流网络相对复杂，覆盖了除拉萨以外的所有省会以上城市以及各省级行政区的次级节点，除了既有与全国核心节点的连接外，全国网络次级节点、各级亚网络节点间亦产生密集的联系流，形成交互的、复杂的网络连接格局，使得之前以北京—上海—深广—成渝形成的菱形核心连接区逐渐拓展到以哈尔滨、乌鲁木齐、昆明为次级节点、覆盖东北、西北和西南等外围区域的城市网络格局。此外，第三类流强度的连接格局更为均衡，如以深圳、广州为代表的珠三角对外网络联系流强度开始明显强于北京和上海，且网络连接的区域十分广泛，这与第二类流强度格局中的深圳、广州的网络连接格局并不一致，我们认为相较第三类网络联系，第一、二类的联系表征了更高等级的城市—企业网络联系流，如价值链两端高附加值的行业或 APS 企业，这种联系流更容易发生在核心节点间，正如第一类联系流主要发生在京沪深广和西部的重点节点成都之间，第二类联系流则主要发生在京沪和各次级核心节点间；从第三类联系流的企业涉及的行业开始向制造型等价值链中间部分蔓延，珠三角制造型企业 and 中小型科技企业无疑是具有量的优势的，这是产生三类网络联系异质性格局的重要原因。

4 城市网络的空间组织过程：择优性和地理邻近性

利用企业网络连接数据研究城市经济网络的空间组织，借鉴文献[33]，依次选取网络中各个节点的首位、前 2 位、前 3 位和前 5 位的流联系节点进行网络分析（下文称 Top1、Top2、Top3 和 Top5 城市网络）。在这样的情况下，不同于前文的空间联系网络是一个无向多值网络，城市网络的地域连接将产生方向性，如节点 i 的最大网络连接方向（Top1 网络）来自节点 j ，但节点 j 的最大连接方向未必是节点 i ，也即城市空间组织网络是一个有向网络。此时，节点的连接度（更准确的说是入度）将是考察网络空间组织和地域结构的重要指标。从 Top1 的城市空间组织网络来看，330 个节点中仅有 51 个节点的连接度大于 0，也就是说 330 个节点的首位网络联系流主要集中在 51 个节点上，其中北京、上海、成都、郑州、广州居前 5 位（表 1），北京更是以 37 的总连接度遥遥领先（占总连接边的 11.2%），Top1 城市网络具有显著的尺度异质性。在全国尺度，北京作为首位流联系点连接了华北、东北、西北、西南和华中区域大部分省会以上的节点城市（除了青岛、西宁、昆明和长沙），甚至包括了华南的南宁和海口，远远超过网络中心度类似的上海和深圳；上海连接了江浙皖赣的核心节点城市以及昆明、青岛。在区域尺度，各省会级以上城市作为次级节点连接了大多数省内的节点，可见大多数企业依然根据行政区划来组织企业的区域网络。值得注意的是，深圳和广州最为具有全国网络枢纽地位的节点在首位连接度上仅分别为 7 和 15，除了长沙外，连接的城市大多数集中在广东省内，影响力仅相当于一般的省会城市，甚至不及成都和郑州。而以成都、郑州和昆明为代表的节点，居省域网络中心，节点众多，网络腹地较大，其 Top1 的联系度则非常之高。总的来看，Top1 的网络组织结构分别显示出以京沪为代表的全国尺度核心网络连接（主要连接了全国各区域网络的次级节点，占总连接边比重达 19.1%）和以各省会城市为代表的区域尺度网络连接格局（主要连接一般节点，49 个次级节点总连接边占比 80.9%，平均每个次级节点的连接度为 5.45）。

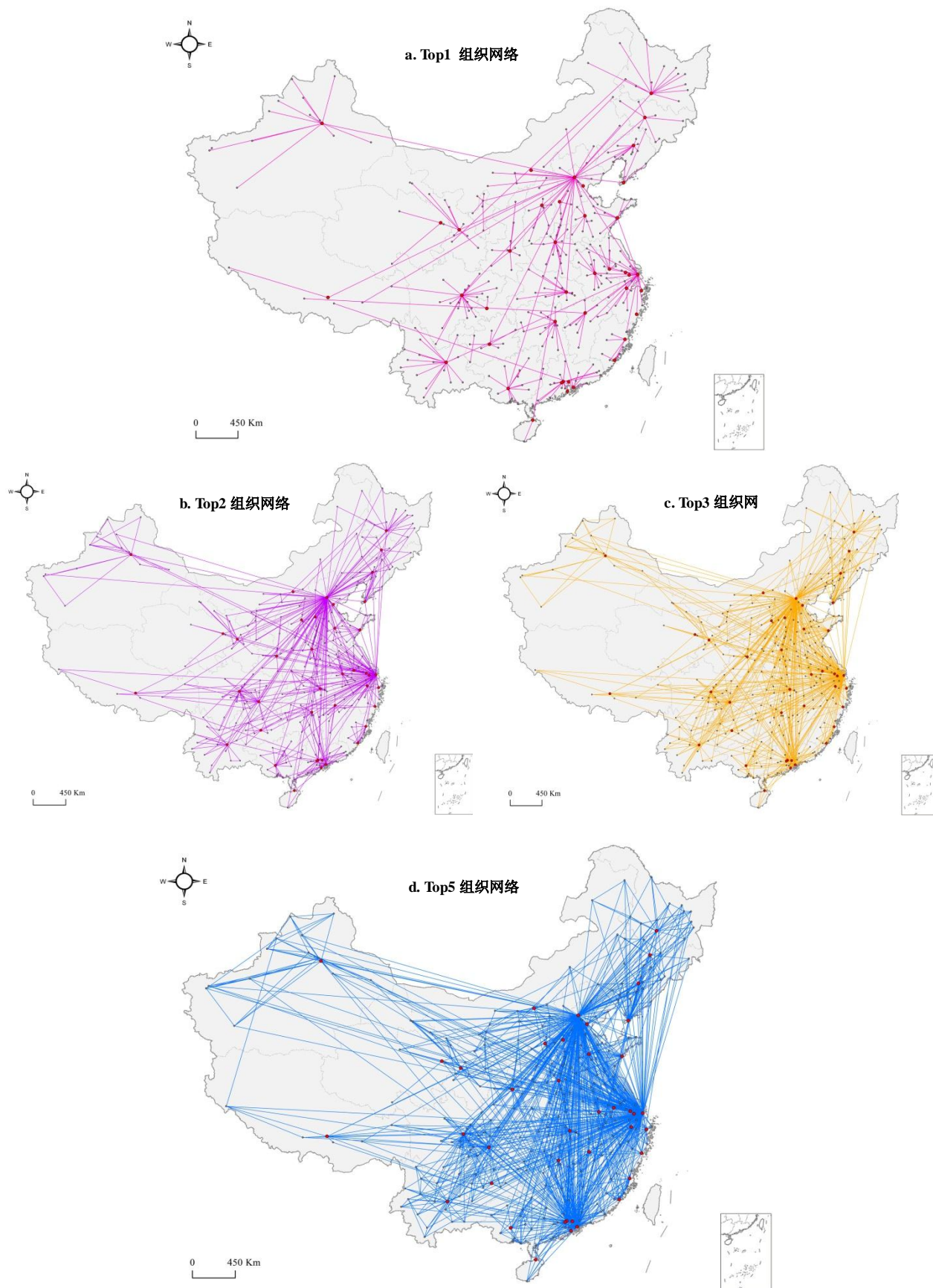


图 5 城市经济网络的空间组织连接图 (Top1/Top2/Top3/Top5)

Fig. 5 The spatial organization of city networks in China (Top1/Top2/Top3/Top5)

Tab. 1 The rank list of city connectivities (Top 10)

Top1 组织网络	Top2 组织网络	Top3 组织网络	Top5 组织网络
北京 (37)	北京 (108)	北京 (156)	北京 (236)
上海 (26)	上海 (81)	上海 (128)	上海 (208)
成都 (21)	深圳 (30)	深圳 (54)	深圳 (108)
郑州 (15)	成都 (25)	广州 (33)	广州 (65)
广州 (15)	广州 (24)	成都 (27)	重庆 (38)
昆明 (15)	重庆 (18)	重庆 (26)	成都 (36)
哈尔滨 (13)	郑州/合肥	沈阳 (21)	天津 (33)
武汉 (13)	(16)	南京/大连	大连 (32)
长沙 (12)	沈阳/武汉/昆明	(19)	沈阳 (24)
乌鲁木齐 (12)	(15)	武汉 (18)	南京 (24)

Top2 的城市空间组织网络中连接度大于 0 的节点由 Top1 网络中的 51 个增加到 107 个, 平均连接度为 6.16(表 2), 其中前 10 名的节点占全部连接边数的比重为 52.8%, 略低于 Top1 网络的 54.24%。在连接度大于 0 的 107 个节点中, 京沪深成广居前 5, 相较 Top1 网络, 深圳和重庆的连接度有了显著的提升。从空间上看, Top2 的组织网络连接量开始明显增多, 且空间格局与 Top1 网络相比发生了一些变化。北京和上海在全国的连接优势依旧非常突出, 北京几乎连接了东北、华北、西北、西南和华中所有的次级节点城市和相当一部分的一般节点城市; 上海在 Top1 网络的基础上连接范围由华东向东北、西南逐渐拓展; 广州和深圳在珠三角外的连接量开始增多, 但也主要局限在临近的湖南和江西, 相较其极高的节点中心度仍显得稍不匹配。在区域尺度, 省会城市因为占据空间近邻优势, 其节点连接优势仍然较为明显, 但是已有被以京沪为代表的大尺度的“择优”连接流逐渐“遮盖”之趋势。

Top3 和 Top5 的城市空间组织网络中, 连接度大于 0 的节点分别增加到 156 个和 244 个, 平均连接度增加为 6.32 和 6.71, 前 10 名的节点连接占比下降为 50.81% 和 49.11%。连接度排名前 5 的节点中, 京沪深广稳定在前 4, 成都和重庆在 Top3 和 Top5 网络中各自列第 5。相较 Top1 和 Top2 网络, Top3 和 Top5 的空间组织网络连接量进一步增多且网络交织化格局不断显现, 但全国尺度的网络组织体系却已经较为明晰。北京、上海和深广为代表的全国三大主要网络连接轮廓区已基本形成, 其连接线已逐渐覆盖住 Top1 和 Top2 组织网络中原本较为清晰的区域尺度连接线。对照表 2 中组织网络的主要统计量, 由 Top1 到 Top5 网络, 三大城市群和京沪深广四大核心节点的连接度比重逐渐上升, 相对应地, 区域尺度的连接度比重则不断下降, 这就很好地反映了由区域到全国不同尺度下城市网络的空间组织过程。

进一步关注到京沪深广四个核心节点的连接度变化。北京在 Top1 和 Top2 网络中的连接度优势非常明显, 在 Top3 和 Top5 网络中的连接比重则趋于稳定甚至有所下降; 而上海在前 3 种网络中的连接度一直稳定上升, 尤其在 Top2 和 Top3 网络中具有连接度优势, 而在 Top5 网络中的连接比重开始下降; 深圳和广州的格局连接度优势则在 Top5 网络中表现最为显著, 这可以用城市网络空间联系流的层级性来解释。尽管网络城市体系相较中心地体系具备流动性强、扁平化的特质, 但城市网络并不意味着完全扁平化或层级性消失, 那些具备高附加值和涉及核心功能的产业(如 APS 业)和部门(如核心管理、战略性决策)的物质流、信息流将更容易克服地理距离摩擦, 在大的空间尺度内塑造并形成高等级的网络流, 而对于连接节点的选取, 高等级网络流表现出明显地择优性连接特性, 而一般网络联系流则依然保持着顽强的空间固着性, 连接就具有浓厚的地理邻近特征, 在区域尺度上表现出来。京沪深广四个节点城市中, 北京显然具备吸引最高等级网络联系的优势, 其次为上海, 广深虽然节点的中心度和总联系量并不逊色于京沪, 但连接最高等级流的优势相较京沪就不突出了, 这在前文中城市网络空间联系的格局变化也得到了验证。

表 2 城市空间组织网络的主要统计量变化

Tab. 2 The statistic change on city network organization

	Top1 组织网络	Top2 组织网络	Top3 组织网络	Top5 组织网络
连接节点数	51	107	156	244
平均连接度	6.47	6.16	6.32	6.71
前 10 名节点连接比重 (%)	54.24	52.8	50.81	49.11
京津冀连接比重 (%)	12.42	18.36	18.86	17.78
长三角连接比重 (%)	10.91	17.15	19.07	19.43
珠三角连接比重 (%)	6.97	8.50	10.34	12.52
三大城市群连接合计 (%)	30.30	44.01	48.28	49.73
北京连接度比重 (%)	11.21	16.39	15.82	14.42
上海连接度比重 (%)	7.88	12.29	12.98	12.71
深广连接度比重 (%)	6.67	8.19	8.82	10.57
京沪深广连接合计 (%)	25.76	36.87	37.63	37.69
成渝连接比重 (%)	6.67	6.53	5.38	4.52

需要延伸说明的是，节点在城市网络中不是仅受到首位联系节点的作用，网络中除了自身以外的所有节点都会对其施加影响，只是作用强度有所差异，这也是文中构建了四种类型的空间组织网络的原因之一。由于流联系的层级性和作用的不均衡性，拥有不同权力地位的节点在不同空间尺度下的组织网络就表现出显著的异质性。如 Top1 和 Top2 网络可以清晰的看到连接核心节点和次核心节点间的全国尺度的高等级网络流以及连接次核心节点和一般节点间的区域尺度的一般网络流，而 Top3 和 Top5 网络更全面地展现出全国尺度下不同节点间、不同层级流联系的网络组织¹。因此，城市网络的空间组织表现出大尺度择优连接（区域对外）、中小尺度邻近连接（区域内部）的双重特征，这是网络流作用的异质性（高等级流与一般性流）和空间异质性（全国尺度和区域尺度）综合作用的结果。

5 城市网络的拓扑结构及其复杂性

5.1 城市网络的度分布统计特征

度是描述网络节点结构的基本参数，度分布是研究网络系统结构的宏观统计特征的重要指标，分别对前文基于企业总部—分支网络联系构建的几种城市网络进行度分布的统计，如图 6 即城市无向网络的点度和点权度（强度）的累计分布概率图。

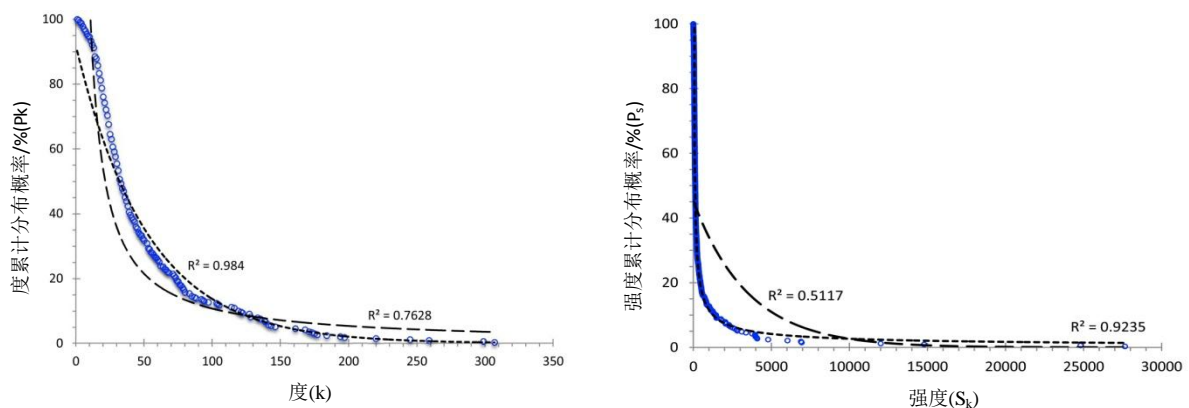


图 6 节点度和加权点度累计概率分布图

Fig. 6 The cumulative degree and strength distribution

¹ 顾朝林等基于重力模型构建的中国城市体系空间联系和层域划分研究认为，重力模型中的距离摩擦系数 b 取值不同对应着两个不同空间尺度的城市体系格局^[32]，这与本文的研究结果可进行相互印证和对比。

由图可见，无向网络的度分布跨度较大，表现出一定的“长尾”特征，其中有近一半的节点中心度不足 30，对外联系需要依赖其他节点，体现出少数节点连接了大多数节点的特征，但这并不及点权度（强度）分布明显，进一步地通过拟合函数来具体揭示网络的拓扑结构特征（表 3）。对于无向网络的度分布而言，采用幂次关系的拟合度明显不及指数函数（ $R^2=0.763<0.984$ ），因此其更呈现出指数分布的特征；相反，对于加权点度，其幂次的函数关系相较指数而言则更明显（ $R^2=0.9235>0.5117$ ）。根据复杂网络的研究，二值网络度分布一定程度上表现出了随机网络的特征，而城市网络的点权强度满足幂律分布，也即具备无标度性。为了便于理解，对网络度分布进行双对数转换，考察其散点图是否为直线分布（图 7）。

如图 7 所示，节点的二值点度分布没有表现为一条直线。仔细分辨这段曲线的形态可分为三段：第一段大致序号介于 1~4 之间，近乎水平分布；最后一段则近乎垂直的“拖尾分布”，中间一段形成对数线性分布。进一步对其进行拟合发现，节点的二值度服从一种近似的双幂律分布，形成双标度区，具有双分形结构（bi-fractals）。在每一个标度区内，网络近似为无标度，但整体上却表现为尺度迹象。

双标度区的拟合模型综合如下：

$$P(K > k) \sim \begin{cases} k^{-\gamma_1}, & \text{for } k \leq k_c \\ k^{-\gamma_2}, & \text{for } k > k_c \end{cases}$$

其中， $\gamma_1=0.466$ （ $R^2=0.938$ ）， $\gamma_2=1.567$ （ $R^2=0.796$ ）， $k_c=66$ 。因此，图 6-12 拟合的指数网络特征是对网络标度间断结果的一种反映，中国城市网络处于随机网络和无标度网络之间，具有过渡性。而加权点强度的分布可以用一条直线进行拟合（表 3），拟合率为 0.9265，因而其符合幂律分布，但是无标度区间也并非覆盖了全部节点（图 7 右），依然存在“拖尾分布”，累计度分布的幂次值为 1.44，因此有：

$$p(k) = \frac{\partial P(k)}{\partial k} \sim k^{-2.44}$$

类似地，考察四种类型的有向组织网络的入度分布。当不考虑联系强度时，由于存在大量入度为 0 的节点（Top1 网络有包括天津在内的总计 270 个；Top2 网络有包括唐山在内的 223 个；Top3 网络有包括秦皇岛在内的 174 个；Top5 网络有包括承德在内的 86 个），累计度分布的曲线只能采取指数形式，当去掉度数为 0 的节点时，从 Top1 到 Top5 网络度分布逐渐过渡为幂律形式；当考虑联系强度的边权分布时，则四种组织网络均满足幂次分布，且拟合度和幂次值都呈逐渐升高，体现出无标度网络特性（表 3），据表 2 统计，排名靠前的核心节点以及核心节点群（三大城市群）在网络连接比重方面具有显著的优势。

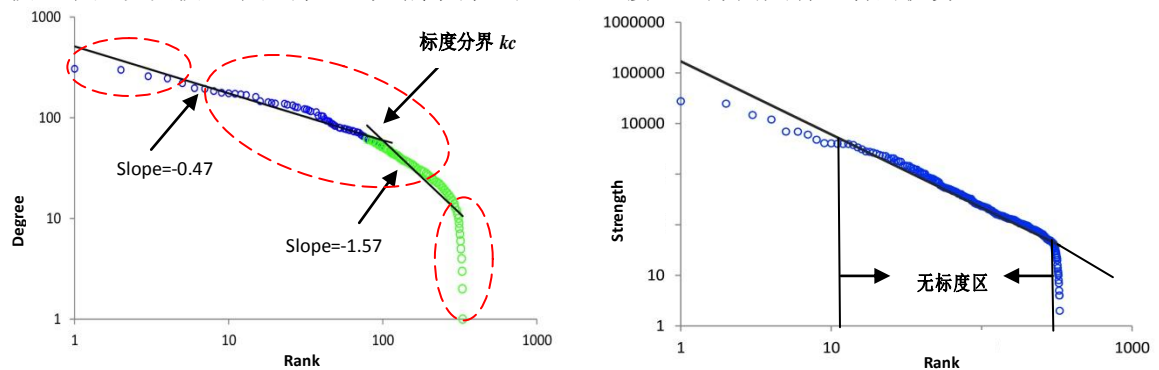


图 7 节点度和加权点度分布图（双 log 转换）

Fig. 7 The distribution of degree and strength

表 3 网络累计度分布的拟合函数

Tab.3 The fitting function of cumulative degree distribution

网络类型	拟合函数		
	度分布 (Degree)	(点权) 强度分布 (Strength)	
无向网络	$P(k)=0.9195e^{-0.019k}, R^2=0.984^*$	$P(s)=1.6951E4s^{-1.446}, R^2=0.9235$	
有向网络	Top1	$P(k)=24.672e^{-0.075k}, R^2=0.9186$	$P(s)=2.29E4s^{-1.293}, R^2=0.9224$
	Top2	$P(k)=224.82k^{-1.221}, R^2=0.913$	$P(s)=3.96E4s^{-1.322}, R^2=0.9326$
	Top3	$P(k)=279.69k^{-1.16}, R^2=0.959$	$P(s)=5.14E4s^{-1.337}, R^2=0.9366$
	Top5	$P(k)=410.28k^{-1.126}, R^2=0.967$	$P(s)=6.44E4s^{-1.342}, R^2=0.9372$

复杂网络研究已经证明，随机网络的节点分布呈“钟形”，两头节点较少，中间较多，如指数或对数分布；而无标度网络则体现出偏好性和自组织性，函数分布呈幂指型。论文的计算表明，城市网络各节点的度分布跨度较大，空间差异亦较为明显，但仍趋近于指数型，无标度区相对狭窄或呈双标度状就体现出一定的随机性，而点权网络的强度分布则满足幂律拟合分布，体现出无标度网络特征，但其标度区也并未覆盖全部节点。由于指数网络特征是对网络标度间断结果的一种反映^[61]，结合点权强度网络的分布，我们认为：中国的城市经济网络正处于一个简单随机向复杂有序结构的转化期，在局部区域和尺度已经发育形成了无标度分布，具备无标度网络结构的特征，但整体大尺度的网络结构还有待形成，网络的空间组织和度分布也表明，网络流联系呈现地域集中的趋势，即大多数网络连接集中于少数节点区域，这种空间上的不均衡恰恰是网络结构化和非随机性演化趋势的基本反映。

5.2 城市网络的整体结构表现为小世界网络

分别利用公式(10)-(12)计算了中国城市网络的平均路径长度和群集系数以考察城市网络结构的可达性和集聚性。计算结果（表 4）表明，整个城市网络的平均路径长度为 1.9，体现出较高可达性以及节点间较小分离度的结构特征。在 108570 条连接路径中，长度为 1（不需中介就直接产生联系）的最短路径有 16342 条，占比 15.05%，长度为 2（只需要通过 1 次中介就可连接）的最短路径有 89408 条，占 82.35%，因此累计有 97% 以上的节点对之间最多只需要一次中转节点就可产生联系。

在网络集聚结构方面，整个城市网络的群集系数达 0.618，表现出较强的集聚性。在所有的网络节点中，群集系数达到 1 的节点有 1 个（海东），其对应的度值为 2；群集系数为 0 的节点有 2 个（山南和玉树），其对应的度值分别为 2 和 1。可见，低度节点的群集系数倾向于两极分化，而高点度的节点则表现为较小的群集系数。由于群集系数是主要考虑任一节点其所有邻节点之间连边的数目占可能的最大连边

表 4 城市网络的平均路径长度统计

Tab.4 The average path length of city network

平均路径长度 (L)	路径数量	占全部路径比 (%)	累计百分比 (%)
1	16342	15.05	15.05
2	89408	82.35	97.4
3	2820	2.6	100

数目的比重，而网络中的边缘节点或者新节点都倾向于与高中心度的节点建立直接的联系，也即高点度节点的连接关系中包含了大量的低度和边缘性节点。此外，集聚与否不仅仅取决于节点间是否建立连接，还与节点间的空间自相关性、节点的属性强度密切相关^[39]。

进一步地，构建了 330 个节点规模的随机网络模型（设其平均度分布与城市网络的平均度分布一致），结果显示（表 5），随机网络平均路径长度的理论值为 1.848，与论文实证研究的网络平均路径长度（1.901）十分接近，而随机网络的群集系数理论值（0.151）则大大低于实际城市网络的群集系数值（0.618）。与主要的网络模型相比较^[45-46, 57-58]，城市网络的平均路径长度值很小，而群集系数值较大，呈现出典型小世界网络的特征。

表 5 实际城市网络与随机网络特征指标对比

Tab.5 The characteristic index comparison of stochastic network and city network in China

特征网络指标	实际城市网络	随机网络理论值
节点数 n	330	--
平均度 $\langle k \rangle$	5	--
平均路径长度 (L)	1.901	1.848
群集系数 (C)	0.618	0.151

5.3 城市网络的关联性分析

5.3.1 度度相关与网络连接的匹配性分析 复杂网络的连接匹配性主要考察网络连接究竟表现为同配性 (assortative) 还是异配性 (disassortative), 其主要通过对节点度度相关性的研究来实现, 根据式(13)~(15)分别计算了中国城市二值网络和权重网络的邻近平均度 k 和 k^w 。

在不考虑边权的情况下, 中国城市拓扑网络中所有节点的度度相关性系数 r 为-0.68 ($P=0.000$), 即各节点的度值与其所有连接节点的平均邻接度值呈负相关, 整个网络连接呈现负向匹配, 对于那些度值越高的节点, 其邻节点的平均度则越低 (图左)。具体来看, 一方面由于京、沪、深、广几乎与绝大部分节点城市都产生了直接的企业连接关系, 因此只要是指向这几个核心节点的其他节点城市就能获得较高的平均连接度, 反而核心节点指向的低度节点其连接量也较少, 因此这四大节点城市的临近平均连接度都低于 60; 另一方面, 一些与全国网络的连接较低的边缘节点虽然其平均邻接度值较高, 但主要是依赖与高点度的核心节点连接, 只要与京沪深广等核心节点连接有所缺失, 反映到临近平均连接度上就将出现明显的降低, 这样的节点包括阿里、阿勒泰、塔城、凉山 (西昌) 等城市。

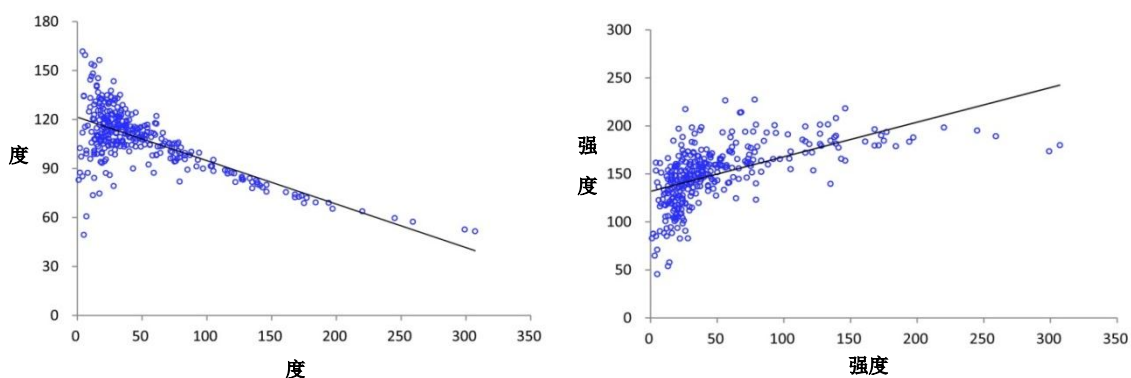


图 8 城市网络的度度相关性

Fig. 8 The degree-degree correlation in China city network

在权重平均邻接度 (k^w) 方面, 一些次级核心节点表现出了较高的 k^w 值, 典型的城市如佛山、东莞、苏州、无锡、台州、嘉兴、金华、廊坊、保定等, 这些节点大多数位于我国三大城市群地区, 由于权重网络的邻近度实质上反映的是“邻居”的力量, 因此具有较高连接强度的城市也一定程度依赖着本区域邻近的“首位节点”城市; 而不少网络边缘节点的邻近平均度并没有表现出如拓扑网络中的高值趋势, 如阿里、毕节、中卫等节点的 k^w 值均较低。类似地, 考察全局性权重匹配系数 (r^w), 该值为 0.563 ($P=0.000$), 说明权重网络表征下的城市企业联系具有较为显著的同向匹配特征 (图 8 右), 尤其是对于连接度一般的节点而言这种趋势更显著 (k 小于 80, Pearson 系数达 0.813), 但对于一些核心节点而言这种关系则趋近于一个常数 (k 大于 150)。总的来看, 权重网络各节点趋向于和网络强度相似的节点连接, 这与拓扑网络表现出的异向匹配并不一致, 权重网络的这种连接特征一定程度上反映了中国城市网络的“富人圈”现象。复杂网络的研究表明, 通常社会网络具有同配性, 而技术网络、生物网络、信息网络等具有异配性^[57]。城市网络的点度与点权的连接匹配并不一致一定程度上也印证了前文有关全国整体网络结构尚待形成的判断。城市网络的空间组织过程也表明, 择优连接主要体现在全国层面的核心节点间, 此时更多表现为“富人圈”式的

同配强度连接，而地理邻近主要体现在区域或省域层面的一般节点与次核心节点间，此时主要表现为异配连接。

5.3.2 群集系数与度的相关性分析 网络节点的度值与群集系数之间的数学关系（簇度相关性）也是甄别网络结构的重要方面。研究表明，如果群集系数与度值间存在近似的 $C(k) \sim k^{-1}$ 关系，则表明网络具有层级性^[62]。通过计算，中国城市企业网络的群集系数与度值之间呈现较为明显的负相关关系（Pearson 系数为-0.707， $P = 0.000$ ），即城市网络节点是否集聚与点度成反比（图 9）。进一步地看，当点度值小于 40 时，簇度之间没有表现出明显的负相关性（Pearson 系数为-0.032， $P = 0.652$ ）；当度值大于 40 时，簇度之间的负相关关系则十分显著（Pearson 系数为-0.903， $P=0.000$ ）。由于一部分度值小的节点由于在网络中与邻节点连接的缺失，其群集系数表现为 0；而另一部分低度节点由于仅和高度值的核心节点直接连接，而核心节点之间的相互连接度又是极高的，反而导致了这些低度节点具有较高的集聚表现。相反，高度值节点由于连接关系较为分散，且包含了大量低度和边缘性节点的连接，故而相较低度节点而言，并没有表现出集聚成团的趋势。总的来看，城市网络的簇度关系表现出了负相关性，但除了顶层的核心节点外，其他网络节点的层级性并不明显（经过拟合 $C(k) \sim k^{-0.214}$ ，幂次值小于 1）。

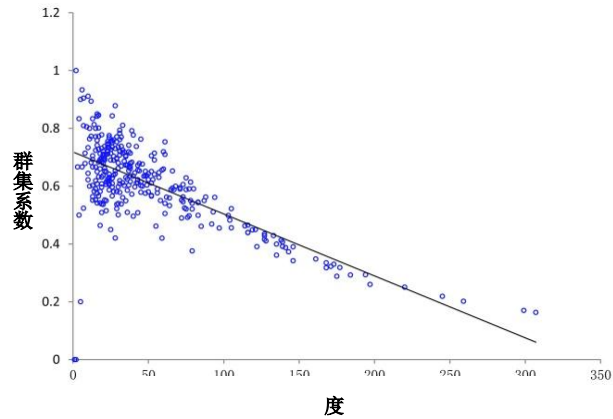


图 9 城市网络节点度值与群集系数相关性

Fig.9 The clustering-degree correlation of China city network

既有的网络研究由于大多基于拓扑网络，故很少有关注

5.3.3 度与加权重度的相关性分析 节点的拓扑点度和加权重度的研究。我们对城市企业网络的点度值和点权强度值进行了相关性分析，两者呈现较强的正相关关系（Pearson 系数= 0.78， $P = 0.000$ ），但表现出明显的非线性特征：度值小的节点其加权强度增加的较为缓慢，而随着节点度的增加，对应的强度增加越来越明显，体现出连接度越高，连接强度增加的越快的非线性特征。进一步地，分别对两个指标进行对数转换并落实在散点图上（图 10）发现这种非线性关系满足以下的幂律拟合： $s(k) \sim k^{1.55}$ 。

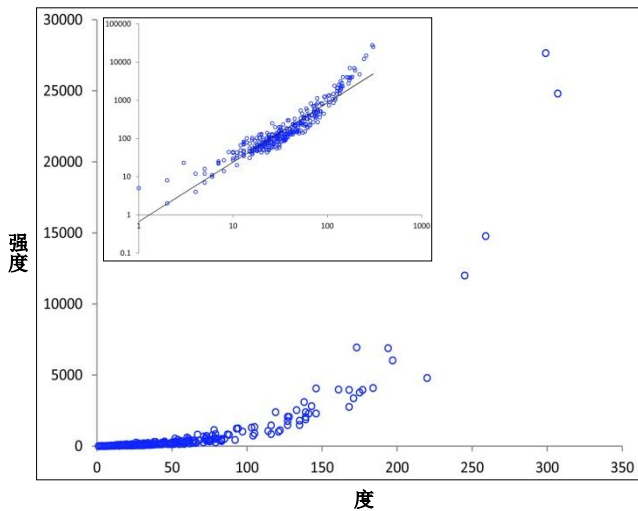


图 10 城市网络节点的度与加权强度相关性

Fig.10 The strength-degree correlation of China city network

6 主要结论

本文通过对企业总部一分支组织的关系型数据建构，运用复杂网络分析工具对中国城市

网络进行了综合测度,揭示了企业组织视角下城市体系空间网络结构的复杂性特征。实证研究剖析了节点、的边(联系强度)等网络要素,并对点和连接边的体系结构进行了复杂性探索。研究的主要结论包括:

(1) 我国城市网络联系的结节性空间差异性十分显著,核心节点具有极高的网络联系强度和对外连接度,这体现了企业网络布局与城市体系的互动作用关系;(2) 城市网络联系呈现以“北京—上海—广深—成都”为核心的菱形空间结构,不同等级的网络流强度具有显著的空间异质性,企业组织的城市空间组织是一个择优性和地理邻近性复杂作用的过程;(3) 中国城市经济网络正处于一个简单随机向复杂有序结构的转化期,局部区域和尺度已经形成无标度分布的网络结构,但整体尺度的无标度网络结构还处于发育之中;(4) 中国城市网络的局部连接明显,平均连接路径长度较短,整体层面表现出明显的小世界网络效应;(5) 中国城市的二值点度网络呈现出明显的异配性连接特征,而加权强度网络则为弱同配性特征,一定程度上表现出了中国城市网络连接的“富人圈”现象;中国城市网络的群集系数与度分布虽然表现为负相关关系,但层级性并不明显,城市网络的点度和强度的关系呈非线性特征,即随着节点度值的增加,对应节点的网络强度联系增加越来越明显的特征。

受到研究数据的时间尺度所限,论文仅探讨了单一时间截面的城市网络组织特征及其复杂规律性,城市网络的空间结构及其复杂性演化还有待于进一步的多时点比较研究;此外,对企业网络数据的利用不够充分,后续研究还可基于不同行业、不同部门间的企业关系数据进行更深层次的功能联系探索。

[参考文献] (References)

- [1] Berry B J L. Cities as systems within systems of cities. *Papers in Regional Science*, 1964, 13(1): 147-163.
- [2] Liu Jun. *Lectures on Whole Network Approach: A Practical Guide to UCINET*. Shanghai: Truth & Wisdom Press and Shanghai People's Publishing House, 2009. [刘军. 整体网分析讲义: UCINET 软件实用指南. 上海:格致出版社/上海人民出版社, 2009.]
- [3] Dicken P, *et al*. Chains and Networks, Territories and Scales: Towards a relational framework for analyzing the global economy. *Global Networks*, 2001, 1(2): 89-112.
- [4] Taylor P J. *World City Network: A Global Urban Analysis*. London and New York: Routledge, 2004.
- [5] Gregory Derek, *et al* (eds). *The Dictionary of Human Geography (5th Edition)*. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009.
- [6] Camagni R, Salone C. Network urban structures in Northern Italy: Elements for a theoretical framework. *Urban Studies*, 1993, 30(6):1053-1064.
- [7] Malecki E J. Hard and soft networks for urban competitiveness. *Urban Studies*, 2002, 39(5-6): 929-945.
- [8] Yeung H W. Critical Reviews of Geographical Perspectives on Business Organizations and the Organization of Production: Towards a Network Approach. *Progress in Human Geography*, 1994, 18(4):460-490.
- [9] Henderson J, Dicken P, and Martin H, *et al*. Global Production Networks and the Analysis of Economic Development. *Review of International Political Economy*, 2002, 9(3): 436-464.
- [10] Castells M. *The Space of flows: A theory space in the informational society*. Princeton: Princeton University, 1992.
- [11] Castells M. Grassrooting the space of flows. *Urban Geography*, 1999, 20(4):294-302.
- [12] Castells M. Globalization, networking, urbanization: Reflections on the Spatial Dynamics of the Information Age. *Urban Studies*, 2010, 47: 2737-2745.
- [13] Hall P G, Pain K. *The Polycentric Metropolis: Learning from Mega-City Regions in Europe*. London:

Earthscan, 2006.

[14] Taylor P J, Hoyler M, and Verbruggen R. External urban relational process: Introducing central flow theory to complement to central place theory. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2803-2818.

[15] Pflieger G, Rozenblat C. Urban networks and network theory: the city as the connector of multiple networks. *Urban Studies*, 2010, 47(13):2723-2735.

[16] Batty M. *The New Science of Cities*. Massachusetts: MIT Press, 2013.

[17] Camagni R, Capello R. *The city network paradigm: Theory and empirical evidence*. Netherlands: Elsevier B. V, 2004.

[18] Lu Minghua. The development of urban networks in Randstad Holland. *Urban Planning International*, 2010,25(6): 53-58. [卢明华. 荷兰兰斯塔德地区城市网络的形成与发展. *国际城市规划*, 2010, 25(6): 53-58.]

[19] Taylor P. Specification of the world city network. *Geographical Analysis*. 2001, 20(4): 181-194.

[20] Derudder B, Witlox F, and Faulconbridge J, *et al.* Airline Data for Global City Network Research: Reviewing and Refining Existing Approaches. *GeoJournal*, 2008, 71(1): 5-18.

[21] Oort F, Burger M, and Raspe O. On the economic foundation of the urban network paradigm: Spatial integration, functional integration and economic complementarities within the Dutch Randstad. *Urban Studies*, 2010, 47(4): 725-748.

[22] Townsend A M. The Internet and the rise of the new network cities 1969-1999. *Environment and Planning B*, 2001, 28 (1): 39-58.

[23] Matthiessen C W, Schwarz A W, and Find S. World cities of scientific knowledge: Systems, networks and potential dynamics. *Urban Studies*, 2010, 47(9):1879-1897.

[24] Wall R S, Knaap G A. Sectoral differentiation and network structure within contemporary worldwide corporate network. *Economic Geography*, 2011, 87(3): 267-308.

[25] Derudder B, Witlox F. An appraisal of the use of airline data in assessing the world city network: A research note on data. *Urban Studies*, 2005, 42(13): 2371-2388.

[26] Taylor P J. New political geographies: Global civil society and global governance through world city networks. *Political Geography*, 2005, 24(6): 703-730.

[27] Derudder B, Witlox F. World cities and global commodity chains: An introduction. *Global Networks*, 2010, 10(1):1-11.

[28] Mans U. Revisiting city connectivity. *Journal of Economic Geography*, 2013, 13 (2): 1-23.

[29] Taylor P J, Evans D M, and Pain K. The UK space economy as practiced by advanced producer service firms: Identifying two distinctive polycentric city-regional processes in contemporary Britain. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2009, 33(3): 700-718.

[30] Wu K, Fang C L., *et al.* Comprehensive delimitation and ring identification on urban spatial radiation of regional central cities: Case study of Zhengzhou. *Journal of Urban Planning and Development*, 2013, 139(4): 258-273.

[31] Li Guoping, Yang Jun, *et al.* *Network Metropolis: The New Strategy of Hangzhou Spatial Development*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. [李国平, 杨军等. 网络化大都市: 杭州市域空间发展新战略. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.]

[32] Gu Chaolin, Pang Haifeng. Study on spatial relations of Chinese urban system: Gravity model approach. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 1-12. [顾朝林, 庞海峰. 基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分. *地理研究*, 2008, 27(1): 1-12.]

[33] Leng Bingrong, Yang Yongchun, Li Yingjie, *et al.* Spatial characteristics and complex analysis: A Perspective from basic activities of urban networks in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2): 199-211. [冷炳荣, 杨永春,

- 李英杰等. 中国城市经济网络空间特征及其复杂性分析. 地理学报, 2011, 66(2): 199-211.]
- [34] Liu X, Neal Z, and Derudder B. Featured graphic. City networks in the United States: a comparison of four models. *Environment and Planning A*, 2012, 44(2): 255-256.
- [35] Zhao Miaoxi, Liu Zheng. Research on China's city network based on production service industry. *City Planning Review*, 2012.9:23-28,38. [赵渺希,刘铮,基于生产性服务业的中国网络研究,城市规划, 2012.9: 23-28,38.]
- [36] Wang Cong, Cao Youhui, Chen Guowei. Study on urban network of Yangtze River Delta region based on producer services. *Geographical Research*, 2014, 33(2): 323-335. [王聪, 曹有挥, 陈国伟. 基于生产性服务业的长江三角洲城市网络. 地理研究, 2014, 33(2): 323-335.]
- [37] Lu Xu, Ma Xueguang, Li Guicai. Spatial pattern of regional city network based on international advanced producer services' layout in Pearl River Delta. *Economical Geography*, 2012, 31(4): 50-54. [路旭, 马学广, 李贵才. 基于国际高级生产者服务业布局的珠三角城市网络空间格局研究. 经济地理, 2012, 31(4): 50-54.]
- [38] Xue Junfei. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on aviation network. *Geographical Research*, 2008,27(1):23-33. [薛俊菲. 基于航空网络的中国城市体系等级结构与分布格局. 地理研究, 2008,27(1):23-33.]
- [39] Wang Jiao'e, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. *Acta Geographica Sinica*, 2009,64(8):899-910. [王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性. 地理学报, 2009,64(8):899-910.]
- [40] Wu Wenjie, Dong Zhengbin, Zhang Wenzhong, *et al.* Spatio-temporal evolution of the China's inter-urban organization network structure: Based on aviation data from 1983 to 2006. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(4):435-445. [武文杰,董正斌,张文忠等. 中国城市空间关联网络结构的时空演变. 地理学报,2011,66(4):435-445.]
- [41] Wang Mingfeng, Ningyuemin. The internet and the rise of information network cities in China. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 446-454. [汪明峰, 宁越敏. 互联网与中国信息网络城市的崛起. 地理学报, 2004, 59(3): 446-454.]
- [42] Wang Mingfeng, Ningyuemin. The network advantage of cities: an analysis of spatial structure and node accessibility of Internet backbones in China. *Geographical Research*, 2006, 25(2): 193-203. [汪明峰, 宁越敏. 城市的网络优势——中国互联网骨干网络结构与节点可达性分析. 地理研究, 2006, 25(2): 193-203.]
- [43] Zhen Feng, Wang Bo, Chen Yingxue. China's city network characteristics based on social network space: An empirical of sina micro-blog. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1031-1043. [甄峰, 王波, 陈映雪. 基于网络社会空间的中国城市网络特征——以新浪微博为例. 地理学报, 2012, 67(8): 1031-1043.]
- [44] Liu Zheng, Wang Shifu, Zhao Miaoxi, *et al.* Exploratory analysis of directed weighted network of city. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1253-1268. [刘铮, 王世福, 赵渺希 等. 有向加权型城市网络的探索性分析. 地理研究, 2013, 32(7): 1253-1268.]
- [45] Watts D, Strogatz S. Collective dynamics of 'Small-World' networks. *Nature*, 1998, 393 (6684) 440-442.
- [46] Barabási A, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999,286 (5439):509-512.
- [47] Newman M. Assortative mixing in networks. *Physical Review Letters*, 2002, 89(20): 1-4.
- [48] Newman M. The structure and function of complex networks. *SIAM Review*. 2003, 45:167-256.
- [49] Beaverstock J, Smith R, Taylor P. A Roster of world cities. *Cities*, 1999, 16 (6):445-458.
- [50] Alderson A, Beckfield J. Power and position in the world city system. *American Journal of Sociology*, 2004, 109(4):811-851.
- [51] Barthélemy M, Crossover from Scale-Free to Spatial Networks. *Europhysics Letters*, 2003, 63(6):915-921.
- [52] Batty M. Cities as small worlds. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2001, 28: 637-638.
- [53] Rozenblat C, Melancon G. A small world perspective on urban systems, in Bavaud F, Mager C (Eds),

Handbook of Theoretical and Quantitative Geography. Lausanne: UNIL, 2009.

[54] Zhao Miaoxi, Wu Kang, Liu Xingjian, *et al.* A novel method to approximate intercity networks and its empirical validation. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(2): 169-183. [赵渺希,吴康,刘行健,等. 城市网络的一种算法及其实证比较.地理学报, 2014, 69(2): 169-183.]

[55] Pred A. *City-Systems in Advanced Economies*. London: Hutchinson, 1977.

[56] Derudder B. On conceptual confusion in empirical analyses of a transnational urban network. *Urban Studies*, 2006, 43(11): 2027-2046.

[57] Wang J, Mo H, and Wang F, *et al.* Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(7): 712-721.

[58] Boccaletti S, Latora V, and Moreno Y, *et al.* *Complex Networks: Structure and Dynamics*. *Physics Reports*, 2006, 424:175-308.

[59] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. Weighted evolving networks: Coupling topology and weight dynamics. *Physical Reviews Letters*, 2004, 92(22): 228701.

[60] Newman M E J. Co-authorship networks and patterns of scientific collaboration. *PNAS*, 2004, 101(1):5200-5205.

[61] Chen Yanguang. *Fractal Urban Systems: Scaling, Symmetry, spatial Complexity*. Beijing: Science Press, 2008. [陈彦光. 分形城市系统: 标度、对称和空间复杂性. 北京: 科学出版社, 2008.]

[62] Ravasz E, Somera A L, and Barabási, *et al.*, Hierarchical organization of modularity in metabolic networks. *Science*, 2002, 297: 1551-1555.