

【城市经济研究】

城市群网络联系的幂律分布规律与层级结构特征*

盛广耀

摘要:城市群的网络联系存在幂率分布规律,在这一规律的影响下,城市网络是“有等级倾向的网络”,其网络结构必然表现为明显的层级特征。首先,基于城市引力模型测度城市之间的相互联系,实证检验城市群城市间联系强度的概率分布规律,证明城市网络联系符合幂律分布的特征,且具有标度不变性。城市群的联系网络为服从幂率分布的无标度网络。然后,基于头尾断裂法对城市群城市网络的层级结构进行了划分和比较分析。尽管不同城市群城市网络的规模、强度和发育程度存在较大差异,强关联关系的空间形态也有明显的方向性不同,但其网络结构都具有明显的“核心—边缘”层级特征。

关键词:城市群;城市网络;幂律分布;头尾断裂法;网络分析

中图分类号:F290 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5766(2024)04-0110-09 **收稿日期:**2024-05-13

***基金项目:**中国社会科学院智库基础研究项目“城市群网络协同效应与治理模式研究”(GDZK-2021-010);北京市自然科学基金项目“基于城市水文模型模拟及深度学习算法读取视频积水信息的城市暴雨积涝临界雨量分析研究”(8222018)。

作者简介:盛广耀,男,中国社会科学院大学应用经济学院教授,中国社会科学院生态文明研究所研究员(北京100710)。

一、引言

城市群是城市之间相互作用的空间形态,城市之间的相互联系构成了城市群的网络结构。城市之间的相互联系和作用作为“城市的第二本质”(Taylor, 2004),是城市群发展演化的驱动因素。随着城市之间经济社会联系的增强,城市空间组织逐渐由传统中心地模式向多中心、网络化模式转变,城市网络在区域经济发展中扮演着越来越重要的角色(丁如曦等, 2020)。而城市群形成与发展的过程,本质也是城市间经济社会联系不断增强和扩大的过程(魏丽华, 2018)。形成联系紧密且结构合理的城市网络,是城市群发展的目标所在。“十四五”规划提出,优化城市群内部空间结构,形成多中心、

多层次、多节点的网络型城市群。从城市网络的角度,探讨城市群城市网络联系的一般规律与共性特征,有助于了解城市群的发展演化过程,可为城市群的网络化发展提供研究支撑。

城市群的城市网络结构近年来受到学者们广泛关注。一些学者分别从城市相互作用的引力模型、企业连锁网络模型、人口流动、交通流量、社交网络等不同角度,对城市间联系强度进行测度,并对这些关系指标构成的城市网络联系展开相应分析。同时,部分文献还对不同城市群城市网络的等级结构特征进行了比较研究(苗洪亮等, 2017;刘湘平等, 2021)。综合来看,对城市群网络结构的研究还有两方面的问题值得进一步探讨。一是已有研究对城市群不同类型关系网络的个性特征的分析较多,对城市群网络联系共性特征的探讨还较少。

城市网络是一个具有自组织性质的复杂网络系统,其网络连接应当具有某些共性的演进特征。更具体的议题如:城市网络是随机网络还是无标度网络?城市之间的联系强度分布是符合对数正态分布还是幂率分布?如果城市网络联系强度符合对数正态分布,则城市群内部的城市网络是随机网络;如果符合幂率分布特征,则为无标度网络。二是多数研究忽略了城市网络层级的概念,对城市网络联系的层级结构特征探讨不多。城市网络模式是相对于中心地模式而提出的,它突破了中心地理论中城市规模的等级关系,强调城市之间水平、横向的功能联系(Camagni, 1993; Meijers, 2007),并有学者认为,城市网络将取代中心地的等级体系成为城市间联系的主要形式(丁如曦等, 2020)。这似乎给人以“城市等级体系与城市网络结构相对立”的混淆观点。或者说,在城市网络范式下,城市之间的组织联系是水平的,城市等级体系被大大削弱而不再重要。而实际上,城市网络联系也存在鲜明的层级结构特征。所不同的是,城市等级制度从以规模为基础,转变为以城市间网络为基础,而且可能被加强(Neal, 2010)。

本文的重点在于探讨城市群网络结构的一些共性特征,运用概率分布拟合、头尾断裂法对城市网络联系的数据分布和层级结构特征进行分析。主要关注两个方面的问题:一是城市群内城市间联系强度分布的一般规律;二是比较不同城市群城市网络的层级结构特征。基本的假设是:城市网络如同其他具有自组织性质的复杂网络一样,其网络联系存在幂率分布规律;而在这一规律的影响下,城市网络是“有等级倾向的网络”,其网络结构必然表现为明显的层级特征。

二、研究设计

城市群网络联系的幂律分布与层级结构特征具有普遍性,不同城市群在此方面具有相似的网络结构特性。为便于结果展示,本文以中国发育程度相对较好的三大城市群(长三角城市群、珠三角城市群、京津冀城市群)为例,实证分析城市群城市网络联系的一般规律与层级结构特征。

1. 研究对象和数据来源

中国城市群的规划范围是不断扩展的。鉴于

城市网络是一个开放系统,本研究的初始范围为较大的省级空间,长三角区域包括上海、江苏、浙江一市两省,珠三角区域为广东省^①,京津冀区域包括北京、天津和河北两市一省。基本分析单元为地级及以上节点城市,长三角、珠三角和京津冀地区分别包含25个、21个、13个地级及以上节点城市,其城市网络分别由300个、210个和78个城市联系数据所构成。

由于三大城市群涉及的空间范围、城市数量相差较大,在分析城市联系强度分布规律时,采用多种空间范围的设定,如省市范围和距核心城市400千米、300千米、200千米空间范围等,进行幂律分布特征检验。在分析城市群城市网络的结构特征时,则采用头尾断裂法对城市网络联系的层级进行划分,并对城市群一级网络的结构特征进行比较分析。

本文所采用的经济数据为市辖区非农产业增加值,来源于《中国城市统计年鉴》;人口数据为市区常住人口,来源于《中国城市建设统计年鉴》;交通距离数据为城市间最短公路里程,来源于高德地图。

2. 分析方法

第一,城市引力模型。空间相互作用理论认为,城市之间通过商品、人口、资金、技术、信息等要素的流动,形成相互影响、相互作用的关系。城市间相互作用强度是衡量城市群空间联系的关键指标,也是测度城市群网络结构特征的依据。城市相互作用强度,一是根据调查统计的要素流进行测算,以城市之间某一类要素的流动量指代城市联系强弱;二是利用城市引力模型,对城市之间的综合联系强度进行测度。前者为城市之间已经发生的某一要素流的实际联系,但它只是城市联系的一个子系统;后者为综合性城市相互作用指标,表示理论上的城市联系或称为城市联系潜力(王欣等, 2006; 中国人民银行营业管理部课题组, 2019),但其与城市联系的实际强度存在一定差异。

本文研究的是城市之间综合性的经济社会网络,而不是这些城市的某一类要素流、企业或组织之间的网络。同时,考虑到城市相互影响和作用的复杂性,要素流的可获得性、数据质量以及指代城市联系指标的代表性等原因,基于研究需要,采用

修正城市引力模型来测算城市联系强度。城市引力模型是衡量城市之间经济社会联系的一个较好的综合性指标。运用引力模型计算的潜在城市联系强度,与实际城市联系强度虽有一定差异,但存在高度的正相关性。

城市引力模型的基本含义是:城市质量(规模)越大,城市间距离(可达性)越近,城市间相互作用强度就越大。不同研究所选择的城市质量和距离指标略有差异。计算公式如下:

$$R_{ij} = k \frac{M_i \times M_j}{d_{ij}^2} = k \frac{\sqrt{G_i \times P_i} \times \sqrt{G_j \times P_j}}{d_{ij}^2} \quad (1)$$

式(1)中, R_{ij} 为城市*i*与城市*j*之间的联系强度, M 为城市质量, G 为城市市辖区二三产业增加值, P 为市区常住人口, d_{ij} 为城市间最短公路里程; k 为常数,一般设为1。此公式计算的城市间联系强度为无向引力值。依据城市联系强度建立的城市网络为无向含权网络。

第二,幂律分布检验。在探讨城市群网络联系的分布规律时,对城市间联系强度是否符合幂律分布特征进行实证检验。幂律分布的数学形式一般可以表示为: $y=cx^{-\alpha}$;其图形呈现出陡峭且延伸很长的长尾分布特征。如果两边取对数,则为: $\ln y = \ln c - \alpha \ln x$;在双对数坐标下,其图形是斜率为负的直线。如果城市间联系强度分布符合幂律分布特征,则可以用式(2)对联系强度值与排序的幂律分布参数进行估计。

$$\ln(R) = A - b \ln(N) \quad (2)$$

式(2)中, R 为城市间联系强度值, N 为城市间联系强度的位序数, A 为常数, b 为幂指数。幂指数越大,说明城市之间强关联关系越集中于某几个城市,城市联系强度头部数据少、数值差异大,依此排序的城市间联系强度值下降得更快。

第三,头尾断裂法。在分析城市群网络联系的层级结构特征时,借鉴Jiang(2013,2015)针对长尾分布数据提出的头尾断裂(Head/tail Breaks)分类方法,对城市群的城市联系网络进行层次结构划分。头尾断裂法是基于数据的长尾分布特征,即数据序列中数值大的“头部”数据占整个数据的较少部分,数值小的“尾部”数据占绝大部分,进行层级分类的方法。它首先将所有数据值按平均值分成两部分,以此为断裂点划分为两个层级;然后对高于平均值的上半部分数据,继续按此范围的

平均值进行更高层级的划分;如有必要,持续进行递归划分过程,直到剩余部分数据不再是长尾分布,或者说,下半部分的数据不再远多于上半部分。

三、城市群网络联系的幂律分布规律

本部分首先对区域整体的城市联系状态进行分析。以长三角、珠三角和京津冀区域为例,采用城市引力模型分别计算各城市之间的联系强度。

1.城市群区域网络联系的特征分析

第一,城市间联系强度的数据具有明显的长尾分布特征。将城市联系强度按位序进行排列,各区域城市联系强度的分布呈现上尾稀疏、下尾密集且越往下越密集的状态。这种分布表明,城市群内部各城市之间联系强度差距很大,大多数城市之间的联系强度不高,只有少数几个城市联系紧密,有着相当高的联系强度。例如,珠三角地级以上节点城市联系强度最高的广州—佛山高达27280.6,长三角城市联系强度最高的上海—苏州为2394.6,京津冀城市联系强度最高的北京—天津为2229.3;而三个区域城市联系强度很小的“尾部”数据很多只在0.1左右。

第二,在空间尺度上,城市群网络联系强度的分布具有标度不变性。以长三角城市群为例(见图1),无论是在江浙沪一市两省空间范围内,还是在距核心城市(上海)400千米、300千米、200千米以内的范围,城市联系强度分布均呈现出相似的长尾特征。也就是说,在不同的空间尺度,城市网络联系具有自相似性。

第三,城市联系网络并非随机网络,而是存在枢纽性质的节点城市。也即少数中心城市与网络中的其他城市具有很高的联系强度,节点中心度很高;此外的多数城市与区内城市之间的联系并不紧密,节点度数很小。城市个体与区域联系的紧密度(即城市中心度)的数据序列也有长尾分布的特性(见图2)。由于长三角、京津冀与珠三角位序前列的联系强度数据差距很大,在同一坐标下长尾分布特征不够清楚,图2单独展示后,可清晰呈现同样的长尾特征。长三角、珠三角和京津冀区域中,城市中心度前5位数据合计占全部城市联系总量的比例分别为62.2%、90.8%和89.1%。

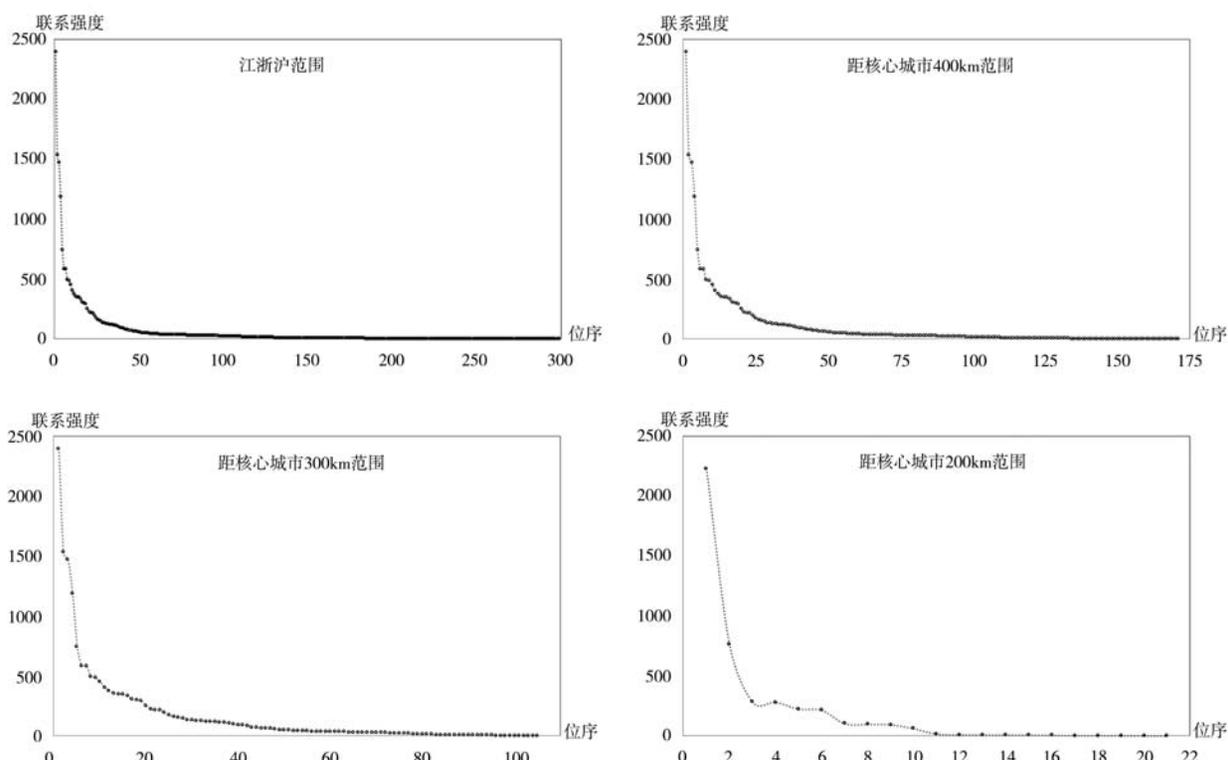


图1 城市网络联系分布的标度不变性(以长三角为例)

数据来源:作者计算得到。

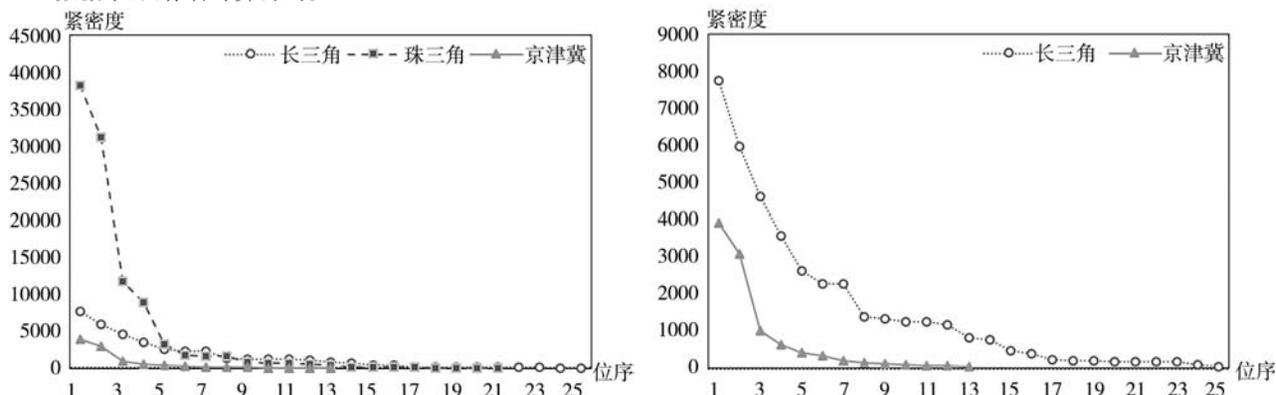


图2 城市与网络联系紧密度的位序分布

数据来源:作者计算得到。

第四,除了具有相似网络联系分布的共性特征,不同城市群也存在着较大的个体特征差异。各区域城市网络联系的规模、紧密程度和城市联系强度差异较大。例如,长三角、珠三角和京津冀区域城市网络联系差异悬殊,地级以上节点城市联系强度总量分别为19718、51409和5074,平均强度分别为65.7、244.8和65.1。珠三角城市群网络联系的紧密程度最高,不论是联系强度总量还是平均联系强度,均大幅高于长三角和京津冀城市群。

2.城市联系强度的幂律分布检验

具有长尾分布特征的数据通常服从对数正态分布或幂率分布。对各区域城市联系强度数据进

行对数正态性检验,可以发现不同空间尺度的数据均不符合对数正态分布。然后采用幂律分布函数,在双对数坐标系下,对城市联系强度分布进行模型拟合,估计结果见表1。用双对数幂律函数拟合城市间联系强度分布,模型的拟合优度 R^2 多在90%左右,显著性水平都小于0.001,且指数的绝对值均大于1。可以认为,城市群的城市联系网络服从幂律分布规律。同时,在不同的空间尺度,城市联系强度的分布均符合幂律分布特征,具有标度不变性,即与划定的区域范围无关,这表明城市网络属于无标度网络。

但是,在不同空间尺度下,城市间联系强度幂

表1 城市联系强度的幂律分布检验

样本选择	研究区域	城市数	样本量	幂指数	常数项	拟合优度 R ²
省市范围	江浙沪	25	300	1.9126	11.236	0.8779
	广东	21	210	2.4087	12.423	0.9282
	京津冀	13	78	2.2987	9.454	0.9199
核心城市400千米区域	长三角	19	171	1.7959	10.593	0.8510
	珠三角	18	153	2.5483	12.483	0.9239
	京津冀	11	55	2.3972	9.367	0.9173
核心城市300千米区域	长三角	15	105	1.6869	10.069	0.8046
	珠三角	15	105	2.6281	12.502	0.8904
	京津冀	11	55	2.3972	9.367	0.9173
核心城市200千米区域	长三角	9	36	1.5497	9.083	0.8778
	珠三角	11	55	2.2360	11.337	0.8779
	京津冀	7	21	2.3311	9.914	0.8589

数据来源:作者计算得到。

指数和拟合优度存在差异,这与样本数量有关。如果区域范围过大,样本数量过多,大量网络边缘与区域联系松散的城市纳入其中,双对数曲线随样本序列增多,下尾部会有明显的折弯下垂,使得整个

回归直线上翘(见图3)。这也影响了城市联系强度对数线性回归模型的拟合精度。

对于城市群而言,将过多与其他城市联系松散的区域边缘城市纳入,并无太大意义。有研究在进行

幂律分布的实证检验时,将大量底层低值数据称为“跛鸭层”

(lame-duck class),在建模中作为异常值处理(蒋明华,2021)。

为更好比较三大城市群区域,以京津冀样本数量为限,选择相同的样本数量,即城市群联系强度前78位的数据,采用长三角、珠三角的截尾数据再次进行模型估计(见图4)。

可以看出,长三角和珠三角区域城市联系强度幂律函数的拟合度明显提高,没有回归直线上部上翘、样本曲线下尾部折弯下垂的现象;而京津冀区域城市联系强度分布的下尾部折弯下垂,表明京津冀城市群较长三角、珠三角城市群发育水平更低,在相同样本数量的情况下,仍有部分与城市群联系松散的城市纳入其中。在相同样本数量的情况下,京津冀城市群的幂指数高于珠三角城市群,珠三角城市群又高于长三角城市群,即回归直线的斜率依次下降。这表明京津冀城市之间的紧密联系更集中于少数城市之间,城市群的等级结构较为极化,区域核心

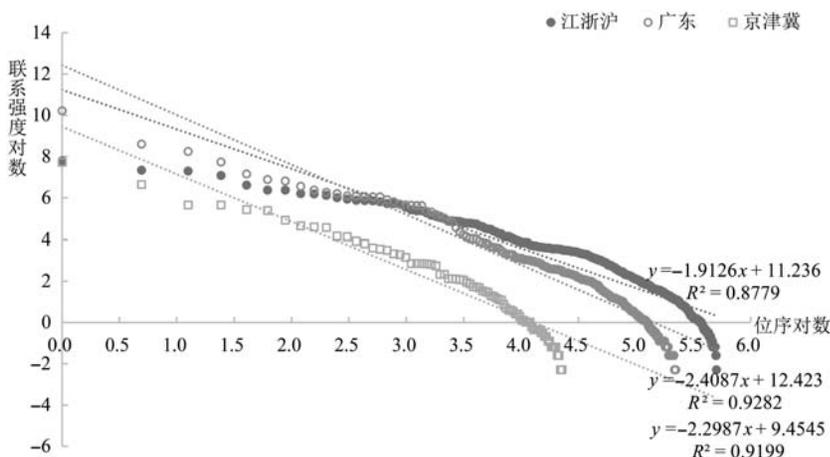


图3 三大区域城市联系强度—位序双对数坐标图

数据来源:作者计算得到。

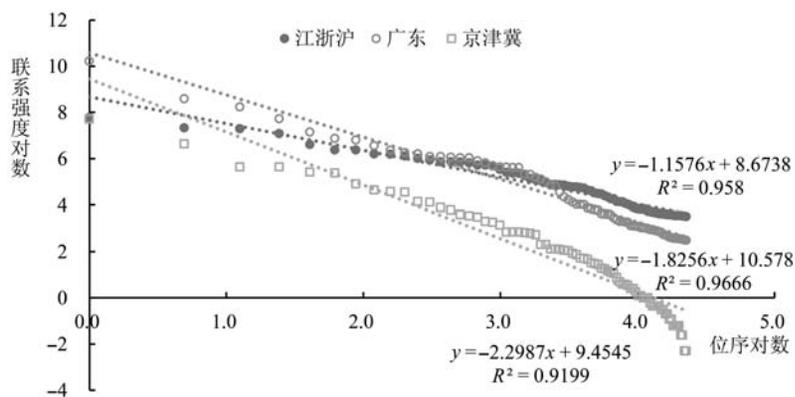


图4 三大区域前78位城市联系强度—位序双对数坐标图

数据来源:作者计算得到。

城市在城市网络中的地位更为突出。

3. 节点中心度的幂律分布检验

巴拉巴西和阿尔伯特(Barabási、Albert, 1999)将幂律分布引入网络分析,提出了无标度网络模型(即BA模型)。他们认为,具有复杂拓扑结构的网络有一个共同特性:节点连接性遵循无标度幂律分布。这一特征被认为是两种机制作用的结果,即网络通过增加新的节点不断生长,而新的节点优先连接于已经有较多连接的节点。BA模型解释的是网络中节点度数分布呈现的幂律特性,表现为各节点之间连接关系(数量)上的特征。城市群内的城市网络是一个完备网络,城市之间均存在着或强或弱的联系,但仍可对各个城市与其他城市联系强度总量(即含权网络的个体中心度)是否存在幂率分布特征进行检验。结果表明,经幂律函数拟合,城市网络联系的节点中心度在双对数坐标下呈现明显的线性关系(见图5),符合幂率分布特征。珠三角和京津冀城市群模型的拟合优度 R^2 在95%左右,长三角城市群的拟合优度相对低一点,为85%;三者的显著性水平都小于0.001,指数的绝对值都大于1。这说明,对于城市群的发展,在城市网络联系的扩展过程中,不同城市的网络地位存在相当大的落差。这也表明,在城市网络中存在以节点中心度衡量的城市等级体系。

四、城市群网络联系的层级结构特征

本部分利用头尾断裂法,对长三角、珠三角和京津冀三大城市群的城市联系网络进行层次结构划分,并比较得出三者城市网络结构的不同特征。

1. 头尾断裂法划分的城市网络层级

利用头尾断裂法对中国三大城市群的城市网络进行层级结构划分。首先,计算区域整体网络城市联系强度的平均值,大于均值的城市联系网络构成城市群的一级网络;其次,计算一级网络所有联系强度的平均值,大于此均值的城市联系网络构成城市群的核心层;最后,如有必要,可继续进行划分。区域整体网络是所有城市间均存在或大或小联系的完备网络,而头尾断裂法划分的一级网络和

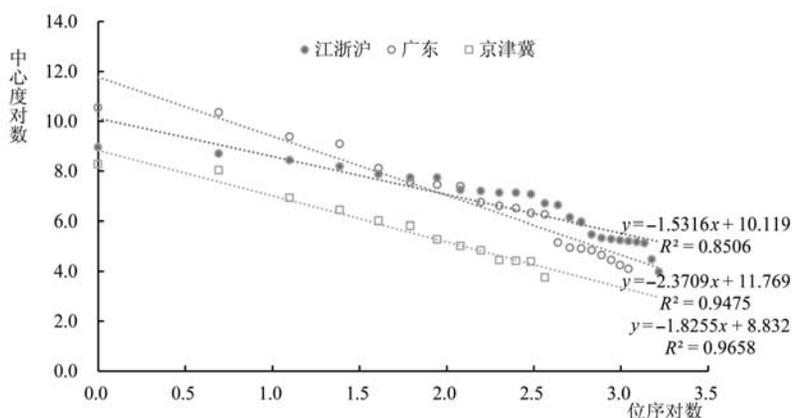


图5 三大区域城市中心度—位序双对数坐标图

数据来源:作者计算得到。

核心层(网络)是由较强关联关系所构成,表示城市群中城市联系较为紧密的网络部分。

头尾断裂法是对城市网络的层级结构进行划分的一种有效方法。采取此方法,可以清晰地揭示城市群网络结构的层次性。其中,长三角城市群可以进行三次层级划分,核心层仍可分出层次;珠三角城市群、京津冀城市群则可进行两次层级划分(见表2)。可见,城市群城市间网络联系的组织形态都具有明显的层级特征,不同城市按一定的层级结构相互连接;不同层级之间的城市联系强度存在相当大的差异。例如长三角、珠三角和京津冀城市群,整体网络、一级网络、核心层城市联系强度均值的比值关系分别为1:5.5:13.6、1:8.6:39.6和1:6.8:23.0,层级之间城市联系强度相差悬殊。

此外,三大区域之间城市联系网络的层级结构也存在较大差异,这与城市网络规模和节点城市空间分布有很大关系。长三角城市群整体网络规模较大,一级网络之上的核心层还可再分为核心网络和核心区两个层次。核心网络由上海、苏州、无锡、常州、南通、杭州、嘉兴、绍兴8个节点城市构成;核心区为上海、苏州、无锡、杭州、绍兴5个城市。珠三角城市群城市间联系最为密切,不论是整体网络、一级网络还是核心层,平均联系强度均为最大;核心层有广州、佛山、东莞、深圳4个城市。而京津冀城市群网络规模最小,网络紧密度最低;核心层仅有北京、廊坊和天津3个城市。

2. 城市群网络层级结构特征的比较

中国城市群规划范围差异较大,空间界定缺乏一致标准,通常难于比较分析。而通过对城市网络的层级划分,则可以比较不同区域不同规模城市网

表2 三大城市群城市联系网络层级划分

区域	指标	整体网络	一级网络	核心层	
长三角城市群	联系强度总量	19718.0	16591.4	10711.0	6587.3
	联系强度均值	65.7	360.7	892.6	1646.8
	联络线数(条)	300	46	12	4
	城市数(个)	25	17	8	5
珠三角城市群	联系强度总量	51409.5	48430.1	38736.6	
	联系强度均值	244.8	2105.7	9684.2	
	联络线数(条)	210	23	4	
	城市数(个)	21	10	4	
京津冀城市群	联系强度总量	5074.2	4429.4	2991.7	
	联系强度均值	65.1	442.9	1495.9	
	联络线数(条)	78	10	2	
	城市数(个)	13	8	3	

数据来源:作者计算得到。

网络的层级结构特征。上文的分析表明,不同城市群区域内的城市联系强度分布,均服从幂律分布规律,且具有无标度特征。这一特性决定了剔除城市群边缘城市,并不会改变城市网络结构的总体特征。通过对比分析,长三角、珠三角和京津冀区域城市网络结构具有以下异同之处。

第一,不同城市群城市网络的发育程度不同。长三角、珠三角和京津冀城市群的网络结构特征,如网络规模、层级数量、联系强度等有着较大的差异。长三角城市网络规模大,层级多,结构复杂;珠三角城市联系紧密度最高,网络凝聚力强;京津冀城市网络规模小,结构简单,紧密度最低。

第二,不同城市群城市网络的空间联络形态不

同。以头尾断裂法提取的表现城市强关联关系的一级联系网络,可大体勾勒出网络空间形态的方向性。从各城市群一级网络关系图可以看出,不同城市群城市网络联系的空间形态存在明显的方向性差异(见图6)。长三角城市群一级网络的空间联系以上海为核心,基本沿上海—苏州—无锡—南京、上海—嘉兴—杭州—绍兴—宁波两条主轴,呈“Z”字型网聚分布。珠三角城市群一级网络以广州为核心,围绕珠江东西两岸呈扇形展开。京津冀城市群一级网络联系明显呈现以北京、天津为核心的发散分布。这种一级网络联系是各城市群网络化发展的主体架构。

第三,不同城市群具有同样的网络组织模式,

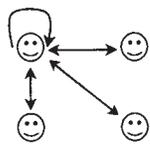


图6 三大城市群一级城市联系网络

资料来源:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图无修改。

即“核心—边缘”结构。通过块模型分析可以发现,尽管不同城市群的网络规模、联系强度和空间形态的差异很大,但都具有相同的网络结构特征。即使是在一级城市网络,城市群的网络联系也是围绕某几个主要节点城市组织连接起来的,存在明显的核心与边缘的角色差异。例如,长三角城市网络的组织核心为上海、苏州、南京、杭州、无锡和常州;珠三角城市网络的组织核心为广州、深圳和东莞;京津冀城市网络的组织核心为北京和天津。处于核心地位的城市相互之间联系紧密,构成凝聚子群;处于边缘地位的城市相互之间存在较弱的关系,甚至不存在关系,但它们与核心城市之间有着相对较强的关系。如表3的块密度矩阵所示,针对城市群一级城市网络,长三角核心城市子群内部城市联系的块密度为608.1,边缘城市子群与核心城市子群联系的块密度仅为101.8,而边缘城市子群内部城市联系的块密度只有13.6。

表3 城市网络“核心—边缘”结构的块密度矩阵

长三角城市网络			珠三角城市网络		
	1	2		1	2
1	608.1	101.8	1	3818.7	1646.2
2	101.8	13.6	2	1646.2	88.1
京津冀城市网络			简化图: 		
	1	2			
1	2229.3	183.3			
2	183.3	0.0			

数据来源:作者计算得到。

注:1为核心城市块,2为边缘城市块。

五、结论与讨论

上文利用城市引力模型构建城市联系网络,通过网络联系的幂率分布检验、基于头尾断裂法的网络层级划分和网络结构的“核心—边缘”分析,探讨城市群形成发展过程中城市网络演化的某些共性特征,形成了系列结论,但对于城市群城市网络联系的幂率分布与层级结构的研究,未来仍有不少问题值得进一步研究。

1. 主要结论

第一,城市群内城市间联系强度呈现明显的长尾分布形态,其概率分布服从幂律分布规律。但在双对数坐标下,样本曲线几乎都存在下尾部折弯下垂的现象,截尾数据的模型拟合度会明显提高。推

测幂律函数的拟合精度,与城市群发育程度和区域范围界定的匹配关系有关。这一判断可以作为基于城市联系的城市群范围识别的标准之一。

第二,城市群内的城市联系网络并非随机网络,而是无标度网络。通过不同空间尺度的数据检验,发现城市联系强度分布具有标度不变性,即在不同空间范围,城市间联系强度的分布均符合幂律分布的特征。这说明,城市群网络联系的发展演化具有自组织的性质,城市网络是一个复杂的自组织系统。

第三,城市群内的城市网络是“有等级倾向的网络”,其网络结构表现为明显的层级性。在城市网络中,存在基于网络的城市等级体系。通过头尾断裂法可以将城市网络划分出联系强度相差悬殊的若干层级。各城市群均是由少数城市为重要枢纽节点,在不同的规模层次上自我组织建立起来的网络联系,它们具有相似的“核心—边缘”网络结构特征。

2. 进一步讨论

第一,本文主要基于城市引力模型的综合性的城市网络联系数据展开研究,城市之间的专业性网络如企业关联网络、科技创新网络、交通流和信息流网络等,其联系强度数据是否也同样具有幂率分布特征,值得进一步验证。对此,初步利用已有文献中的数据进行验证后发现,其他类型的城市联系网络也具有相似的幂率分布特征。例如,利用唐子来和张泽(2022)研究中的长江下游区域城市之间企业关联网络数据,进行幂率分布检验,拟合优度高达97.8%;利用张鹏飞(2023)研究中关于京津冀城市群节点城市间信息流联系网络数据,进行模型检验的拟合度也达94.2%。

第二,本文在数学上探讨了城市网络联系的幂率分布规律,如何在理论上阐释城市网络联系幂率分布的形成机制有待继续研究。城市网络的无标度幂率分布现象不是偶然的,必然存在一定的形成机制。其中可能的理论解释包括:网络生长与优先连接机制、城市系统的自组织理论、城市相互作用的规模与近邻效应等,值得进一步探讨。

第三,本文证明了城市群内的城市网络是“有等级倾向的网络”,那么应该如何理解和运用网络化发展模式,以协调区域内大中小城市的发展有待继续讨论。网络发展模式为区域内不同城市的

发展提供了更多的选择和可能性,同时也为城市在网络发展格局中保持或提高竞争力提出了更大的挑战。在城市群网络化的发展趋势下,如何在规划和政策层面有效利用和扩大城市网络的协同效应,值得进一步的研究。

注释

①香港、澳门与广东省内城市存在制度差异,不完全适用基于交通距离的城市引力模型测度城市联系强度,故本文研究中未纳入港澳两地。本文认为如有合适方法将其纳入,文中的分析数据会有差异,但不会影响本文的结论。

参考文献

[1] BARABÁSI A, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286: 509—512 .

[2] CAMAGNI R P. From city hierarchy to city network: reflections about an emerging paradigm [C] // LASCHMANAN T, NIJKAMP P, et al. *Structure and change in the space economy* [M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993: 66—87.

[3] JIANG B. Head/tail breaks for visualization of city structure and dynamics[J]. *Cities*, 2015, 43(3): 69—77.

[4] JIANG B. Head/tail breaks: A new classification scheme for data with a heavy-tailed distribution [J]. *The Professional Geographer*, 2013, 65(3): 482—494.

[5] MEIJERS E J. From central place to network model: Theory and evidence of a paradigm change[J]. *Tijdschrift*

voor economische en sociale geografie, 2007, 98 (2) : 245—259.

[6] NEAL Z P. From Central Places to Network Bases: A Transition in the U.S. Urban Hierarchy, 1900—2000[J]. *City & Community*, 2010, 10(1): 49—75.

[7] TAYLOR P J. *World City Network: A Global Urban Analysis*[M]. London: Routledge, 2004.

[8] 丁如曦,刘梅,李东坤.多中心城市网络的区域协调发展驱动效应:以长江经济带为例[J].*统计研究*, 2020, 37(11).

[9] 蒋明华.我国城市创新规模的分布及结构特征:齐夫定律视角[J].*科技管理研究*, 2021, 41(6).

[10] 刘湘平,刘慧平,邹滨,等.基于城市联系网络的城市群等级结构对比[J].*经济地理*, 2021, 41(2).

[11] 苗洪亮,周慧.中国三大城市群内部经济联系和等级结构的比较:基于综合引力模型的分析[J].*经济地理*, 2017, 37(6).

[12] 唐子来,张泽.中国城市网络研究:新视野和新方法[M].北京:中国建筑工业出版社, 2022.

[13] 王欣,吴殿廷,王红强.城市间经济联系的定量计算[J].*城市发展研究*, 2006(3).

[14] 魏丽华.论城市群经济联系对区域协同发展的影响:基于京津冀与沪苏浙的比较[J].*地理科学*, 2018, 38(4).

[15] 张鹏飞.流空间视阈下城市群网络结构研究:以京津冀城市群为例[M].北京:经济管理出版社, 2023.

[16] 中国人民银行营业管理部课题组.中国三大城市群城市经济引力测度及对京津冀协同发展的启示[J].*金融论坛*, 2019, 24(4).

Power-Law Distribution Pattern and Hierarchical Structure Characteristics of Urban Agglomeration Network Linkages

Sheng Guangyao

Abstract: There is a power distribution law for urban networks in urban agglomerations. Under the influence of this law, urban networks are “networks with hierarchical tendencies”, and their network structures are necessarily characterized by obvious hierarchical features. First, based on the city gravity model to measure the interconnectedness of cities, the probability distribution law of the strength of inter-city linkages in urban agglomerations is empirically examined, and it is proved that the city network linkages conform to the characteristics of the power law distribution and are scale-invariant. The city network linkages in urban agglomerations is a scale-invariant network that follows a power-law distribution. Then, the hierarchical structure of the city network of the urban agglomeration was divided and comparatively analysed based on the head/tail breaks method. Although there are significant differences in the size, strength and development of the city networks of different urban agglomerations, and the spatial patterns of strong linkages also differ in direction, their network structures all have obvious “core-edge” hierarchical characteristics.

Key Words: Urban Agglomerations; City Networks; Power-Law Distribution; Head/Tail Breaks Method; Network Analysis

(责任编辑:文 锐)