

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.06.013

# 三大国家级城市群网络结构特征及其层级联系研究

王 瑞, 何文举, 鲁 婵

(湖南工商大学 经济与贸易学院, 湖南 长沙 410205)

**摘 要:** 为了探究城市群网络结构特征, 基于2010年、2020年城市群空间网络的客运数据, 运用社会网络分析研究沿海三大城市群空间网络的拓扑结构, 并对其内在经济效应进行评估, 同时运用自然断裂法对城市群的层级结构进行考查。结果表明: 珠三角城市群空间关联的网络密度最大, 城市之间的联系更强, 京津冀城市群次之, 长三角城市群较弱, 因长三角城市群跨越地域广, 各个省份之间的联系强弱不匀; 京津冀城市群空间网络呈现典型的主次结构, 长三角城市群空间网络呈现典型的多中心结构, 珠三角城市群空间网络呈现穗深双核结构; 城市间的距离、要素扩散与集聚、产业结构、经济全球化等4类因素对凝聚子群划分有显著影响。

**关键词:** 城市群; 空间网络; 社会网络分析; 自然断裂法; 层级联系

**中图分类号:** TU984.12

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2022)06-0090-09

**引文格式:** 王 瑞, 何文举, 鲁 婵. 三大国家级城市群网络结构特征及其层级联系研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(6): 90-98.

## Research on the Network Structure Characteristics and Hierarchical Relationships of Three National Urban Agglomerations

WANG Rui, HE Wenju, LU Chan

(School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

**Abstract:** In view of an exploration of the network structure characteristics of urban agglomerations, based on the passenger transport data of urban agglomerations in 2010 and 2020, a research has been conducted on the topological structure of the spatial network of the three coastal urban agglomerations by using the social network analysis, followed by an analysis of its internal economic effect. Meanwhile, an investigation has been made of the hierarchical structure of urban agglomerations by using the natural fracture method. The results show that there is the largest spatial correlation network density of urban agglomeration in the Pearl River Delta with a stronger links between cities, to be followed by Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, while the Yangtze River Delta urban agglomeration is rather weak, due to the fact that the Yangtze River Delta urban agglomeration spans a wide area with an uneven links between various provinces. The spatial network of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration is characterized with a typical primary and secondary structure, the Yangtze River Delta urban agglomeration a typical polycentric structure, while the Pearl River Delta urban agglomeration a panic-deep dual-core structure, with the distance between cities, factor diffusion

**收稿日期:** 2022-05-17

**基金项目:** 国家自然科学基金资助面上项目(71671063); 国家自然科学基金资助项目(71671063); 湖南省社会科学基金资助项目(16YBA234); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4277)

**作者简介:** 王 瑞(1997-), 女, 河南信阳人, 湖南工商大学硕士生, 主要研究方向为空间统计与计量,

E-mail: 1251701880@qq.com

**通信作者:** 何文举(1969-), 男, 湖南汨罗人, 湖南工商大学教授, 博士, 主要研究方向为空间经济, 人口资源与环境,

E-mail: hwj20111218@126.com

and agglomeration, industrial structure and economic globalization exerting a significant impact on the division of agglomeration subgroups.

**Keywords:** urban agglomeration; spatial network; social network analysis; natural fracture method; hierarchical connection

## 1 研究背景

城市群是城市发展到成熟阶段的最高空间组织形式,它代表了一个特定的地理区域,主要是以1个以上特大城市为核心,由最少3个大中城市组合而成,并以先进的交通和通讯等基础设施网络为依托,形成了紧凑的空间组织、紧密的经济联系的群体,最终形成了一个高度协同、高度同城和高度一体化的聚集的城市群体。城市群是由区域内集中分布的若干特大城市和主要城市组成的大型、多核、多层次的城市集团,是大都市区域的联合体。随着时代的进步,近年来信息网络愈发影响着当代人的社交生活,改变了企业的组织模式和商业模式,从而重塑了社会的空间结构,间接影响了城市群地域空间结构的演变<sup>[1-2]</sup>。

国外学者提出的流动空间理论认为城市流动空间是网络化的,城市的重要性不仅表现在它拥有的要素的数量,更因其是经济网络、信息网络等网络的重要节点<sup>[3]</sup>。国外对于城市空间网络研究的主要理论依据是流空间理论,如航空流<sup>[4]</sup>、基于公路铁路的客运流<sup>[5-6]</sup>和物流<sup>[7]</sup>,也有部分学者采用社会网络分析法(social network analysis, SNA)对城市空间网络的结构进行了研究<sup>[8]</sup>,探究整体城市网络的层级结构,明确个体城市节点的经济活动相互作用的内在机制<sup>[9]</sup>。国内学者关于城市空间网络的研究主要有以下3个方面:一是从地理视角,基于高铁网络,交通运输网络研究城市间的联系强度<sup>[10-12]</sup>;二是从经济视角,将城市经济和地理相结合,采用社会网络分析方法研究城市、城市群之间的空间关联网络特征以及城市联系强度<sup>[13-17]</sup>;三是从信息流视角,利用大数据技术,获取百度指数,微博大数据等,探究城市空间网络的显著特征<sup>[18-19]</sup>。

然而,现有的城市空间关联网络研究还仅限于网络结构的拓扑特征分析,缺乏对网络内部传播强度和要素流动的深入研究。一方面,作为城市空间网络水平较高的城市,有突破地理位置限制的辐射整体实力和聚集需求力,但难以避免受限于距离衰减定律,其影响力很难无限扩大。因此,除了对城市群空间网络拓扑结构的科学研究,也有必要对城市群空间

关联网络的内在经济效应进行评估以及更深层次的解读。另一方面,目前的研究对象多集中于单个地区、单个城市群,基于SNA对比不同城市群的研究较少。长三角、珠三角和京津冀城市群是中国发展最好的三大城市群,基于此,拟以三大城市群目前开通高铁的地级市为研究对象,构建长三角 $26 \times 26$ 、珠三角 $9 \times 9$ 和京津冀 $13 \times 13$ 的O-D(origin-destination)城市关联矩阵,运用SNA研究城市群空间关联网络结构特征、内在经济效应机制,为城市群的发展提供借鉴和参考。

## 2 研究方法 with 数据来源

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 社会网络分析法

社会网络分析法运用图论、数学等学科方法,将整个网络系统和社会网络中个体间关系相结合,进行定量分析。Ucinet、Networks、ArcGIS等软件的开发和运用,使社会网络分析法广泛运用于区域经济学、管理学和地理学等领域。本文采用SNA法思想,将网络结构分为整体网、局域网和个体网3部分。在整体网络层面,选取多项主要指标分析三大城市群空间网络结构的拓扑特征;在局域网层面,通过分析凝聚子群,分析城市群内部聚集状态;在个体网层面,通过分析城市节点的中心性,研究了每个城市群的空间结构和经济影响。各特征指标含义及度量方法如下。

1) 关系总数和网络密度。关系总数表示城市群空间网络中城市节点联系数,与网络结构的复杂性结果一致;网络密度是网络中各个城市节点之间联络的紧密程度,固定规模的点之间连线越多,该网络的密度越大,该网络对其中节点的行为产生的影响越大,具体公式如下:

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

式中: $D$ 为网络密度; $k$ 为城市数; $d(i,j)$ 为城市*i*和城市*j*之间的铁路客运量。

2) 平均聚类系数和平均路径长度。聚类系数表示网络结构的可达性,平均聚类系数是城市节点聚类

系数的均值,具体公式如下:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i, \text{ 其中 } C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}. \quad (2)$$

式中:  $C$  为平均聚类系数;  $N$  为节点数量;  $C_i$  为与节点  $i$  直接相连的其他节点的个数;  $E_i$  为节点  $i$  邻近节点中实际存在的边数;  $k_i$  为节点  $i$  的度数。

路径长度表示两个城市节点连接的最小边数,平均路径长度表明城市节点之间交流通畅程度,具体公式为

$$L = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{1 < i < j < N} d_{ij}. \quad (3)$$

式中:  $L$  为平均路径长度;  $d_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的最短路径距离。

3) 中心度。中心度是对个体节点权利的量化分析,分为度数中心度、中介中心度、接近中心度3种。其中,度数中心度 ( $M_i$ ) 表示与该节点相连的其他节点个数,表明该城市是整个城市群网络的中心城市,具体公式如下:

$$M_i = \frac{k_i}{N-1}. \quad (4)$$

中介中心度 ( $O_i$ ) 表示网络中节点城市对其他城市的控制能力,该节点起桥梁作用,表明其获取核心资源的能力较强,控制网络中的信息流动能力较强,具有较高的中介中心度,具体公式如下:

$$O_i = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{n_{st}^i}{g_{st}}. \quad (5)$$

式中:  $g_{st}$  为从节点  $s$  到节点  $t$  的最短路径数目;  $n_{st}^i$  从节点  $s$  到节点  $t$  的  $g_{st}$  条最短路径中经过节点  $i$  的最短路径数目。

接近中心度 ( $P_i$ ) 表示城市节点与其他节点联系的远近程度,该节点具有越大的接近中心度,则该节点与其它节点的距离越短。具体公式为

$$P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_{ij}. \quad (6)$$

4) 凝聚子群。当网络中某些行动者之间的关系特别紧密以至于集成为一个次级团体时,这样的集合在社会网络分析中被称为凝聚子群。城市网络凝聚子群可揭示城市群内部子结构状态,通过发现城市群网络中凝聚子群的个数以及每个凝聚子群包含哪些城市成员,分析凝聚子群间的关系和连接方式,观察城市群网络的发展状况。

### 2.1.2 层级联系法

1961年 Nystuen 和 Dacey 提出主导流的概念,该方法根据一个城市最大的要素流的流向和城市规

模判断该城市在城市体系中地位,是现在分析城市层级结构的较为常见的方法。

本文研究京津冀和长三角城市群网络联系,并利用 ArcGIS 将要素流可视化,根据要素流动的数值,按照自然断裂法将城市分为5个层级,第一层级是主导城市,第二层级是次级主导城市,第三、四、五层级是从属城市。

### 2.2 数据来源

本文的研究对象包括京津冀城市群13个城市,长三角城市群26个城市和珠三角城市群9个城市,共计48个城市。城市群空间网络由城市间的客运流数据构成,选取城市之间的汽车班次数据和火车车次数据来辨识客运流强度,收集2010年4月15日、2020年10月11日当天的客运量。客运车次数据来源于中国公路客运官网认可的巴士管家官网 (<http://www.chebada.com>), 火车车次数据来源于中国铁路客服中心 (<http://www.12306.cn>), 考虑动车和高铁的速度远远快于火车和汽车,并且它们对于促进城市间客运联系的功能不同,因此对车次信息进行加权求和,能准确体现城市间的联系强度。基于以上数据,运用复杂网络软件 gephi 进行城市群空间网络拓扑结构分析,再运用 ArcGIS 实现可视化表达。

## 3 三大城市群网络演化特征

### 3.1 整体网络拓扑结构

城市间联系用铁路客运流衡量,对三大城市群网络原始数据进行二值化处理,即城市网络中两两有联系城市间值取1,无联系城市间值取0,计算整体网络密度,整体网络密度指的是图中各个点之间联系的紧密程度,可以衡量一个网络的整体性。若固定规模的点之间的连线越多,则该网络的密度越大,该网络对每个节点产生的影响越大,网络整体联系越紧密。于是,整体网络密度是实际边数除以最大可能边数,计算公式是  $D=m/n(n-1)$ , 其中  $D$  是整体网络密度,  $m$  是网络中实际边数,  $n$  是网络中节点数。

表1对三大城市群整体网络拓扑特征情况进行了分析说明。分析表1中的数据可以得知,2020年三大城市群交通网络密度排序依次是:珠三角(0.6667)、京津冀(0.4615)、长三角(0.3923),这表明珠三角城市间联系更强,京津冀次之,长三角城市间联系较弱,即长三角城市群的交通网络结构较松散,城市群内各城市的联系有待加强。2010年三大城市群交通网络密度排序依次是:京津冀(0.4103)、长三角(0.2015)、珠三角(0.1111),表明2010年京津冀城市间的联系更强,长三角次之,珠三角相对较弱。

表1 三大城市群网络拓扑特征

Table 1 Network topological characteristics of three major urban agglomerations

年份	城市群	网络密度	标准差	图密度	平均度数	平均加权度	平均聚类数	平均路径长度
2010年	京津冀	0.410 3	0.491 9	0.859	10.308	203.385	0.900	1.141
	长三角	0.201 5	0.401 1	0.678	14.913	267.174	0.840	1.322
	珠三角	0.111 1	0.314 3	1.000	5.000	237.500	1.000	1.000
2020年	京津冀	0.461 5	0.498 5	0.907	11.786	521.214	0.904	1.099
	长三角	0.392 3	0.488 3	1.040	26.000	1279.462	1.000	1.000
	珠三角	0.666 7	0.471 4	1.083	8.667	1536.667	0.987	1.014

城市间交通流的差别较大,深圳-广州(864次)、佛山-广州(720次)、肇庆-广州(621次)、东莞-广州(547次)、广州-深圳(684次)、广州-佛山(580次)、广州-东莞(569次)、广州-肇庆(650次),上海-南京(532次)、上海-苏州(502次)、南京-上海(534次)、苏州-上海(605次)是高密度联系城市(日频次>500次),上述城市分别位于城市群网络的中心结构,是核心城市,对网络中其他城市有较大的影响力。

对比10a三大城市群网络密度,珠三角城市群的网络密度大幅度增加,世界金融危机蔓延以来,珠三角的对外贸易受到严重限制,所以珠三角城市群内各地级市之间的贸易往来增加,各市之间的生产要素流动大大增加,满足要素流动的班次逐渐增加,珠三角城市群交通网络紧密程度达到较高的稳定值。京津冀城市群的网络密度保持稳定,京津冀的人才引进、科技政策和产业政策,促进了城市间人才的流动,人才流动需出行,导致城市间的交通网络更便捷,交通网络逐渐完善,京津冀城市群整体关联紧密。长三角城市群跨越地域广,安徽省、江苏省、浙江省,各个省域内部城市的交通网络联系紧密,省份之间的联系强弱不匀,省份外围城市与其他城市的联系较弱,长三角城市群整体网络密度较低。

### 3.2 城市中心性分析

为了进一步分析城市群网络,本文测算了城市群的关联中心度,表2是以京津冀城市群网络为研究对象,分别从度数中心度、接近中心度、中介中心度3个方面进行研究得到的中心性结果。

分析表2中的数据可以得知,2010年北京、天津、石家庄的度数中心度分别是1 080, 698, 706,而2020年3个城市的度数中心度高达2 543, 1 952, 1 930, 10a间京津冀城市群的联系显著加强,京津冀城市群网络结构保持稳固。

京津冀城市群网络呈现典型的主次结构。从度数中心度看,北京是中国首都,是国家中心城市,其加权入度和加权出度高达1 252和1 291,充分体现其门户和目的地的城市功能,其经济增长对其他城市

具有“引领”作用,天津和石家庄在京津冀城市群网络中也处于核心地位。度数中心度排名靠后的城市有沧州、衡水等,这些城市与京津冀内其他城市联系较少,需要进一步寻找与其他城市经济联系的渠道,加快各城市的人才、技术等经济要素的流动,从而有助于自身更快更好的发展。

从中介中心度看,北京和唐山发挥着“桥梁”作用,对其他城市的经济联系有明显影响。北京充分发挥了京津冀城市群核心城市的位置优势,唐山是河北省重要的工业城市,拥有先进的技术和丰富的资源,有助于对其他城市的经济联系进行控制。此外,京津冀各城市的中介中心度差异显著,大部分的经济联系要通过北京实现。而2010年京津冀城市群中,石家庄既发挥着“桥梁”作用,又距离北京较近,发展速度较快,有助于其对其他城市进行产业转移。

从接近中心度看,京津冀城市群网络接近中心度的均值是0.922,排名靠前的城市有北京、唐山,表明他们在交换技术信息等资源方面具有优势。

表2 2010、2020年京津冀城市群城市关联网络的中心性结果

Table 2 Centrality results of the urban network in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2010 and 2020

城市	度数中心度						接近中心度		中介中心度	
	加权入度	加权出度	加权度	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020
北京	1 252	537	1 291	543	2 543	1 080	1.000	1.000	1.816	4.083
天津	958	347	994	351	1 952	698	0.923	0.923	1.257	0.917
石家庄	954	345	976	361	1 930	706	0.857	1.000	0.896	4.083
保定	645	228	688	229	1 333	457	0.923	0.857	0.786	2.500
邯郸	593	232	461	223	1 054	455	0.923	0.923	1.257	0.917
唐山	514	225	527	227	1 041	452	1.000	0.923	1.816	0.917
秦皇岛	449	192	398	182	847	374	0.923	0.923	1.257	0.917
邢台	429	184	411	171	840	355	0.923	0.923	1.257	0.917
沧州	273	117	266	119	539	236	0.857	0.857	0.833	2.889
衡水	178	107	164	106	342	213	0.800	0.800	0.461	0.222
廊坊	121	59	167	59	288	118	1.000	0.923	0.840	2.944
张家口	83	61	118	63	201	124	0.857	0.857	0.685	0.472
承德	55	10	43	10	98	20	1.000	0.632	0.840	0.222

铁路客运连接强度是指京津冀两个城市间的交通网络连接状况,以城市之间的铁路客运班次的日均

值表示。“供给侧”数据是列车班次数据，是中国铁路部门经过全面的市场调查和长期运行的反馈所给出的数据，很大程度上代表了地区间的社会经济活动以及客流状况。为对京津冀网络主体结构作更清晰的分析，运用 gephi 软件，根据收集的交通客运流数据，构建了如图 1 所示的京津冀城市群空间关联网络图。

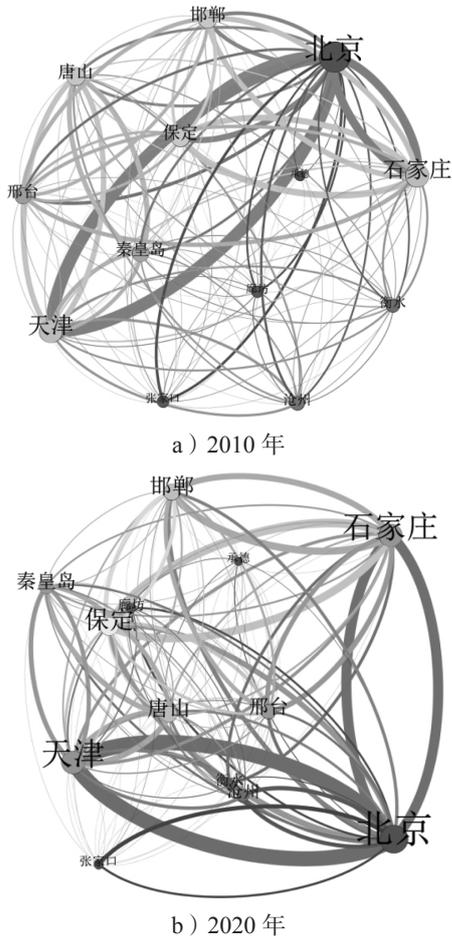


图 1 2010 年与 2020 年京津冀城市群空间关联网络  
Fig. 1 Spatial correlation network of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2010 and 2020

根据图 1 可以看出，京津冀地区的网络比较发达，一直都以北京、天津、石家庄为网络的重要节点，这些城市之间的联系愈发紧密，联系强度逐渐升高。从网络演变的角度分析，城市间的网络连接线逐渐变粗，说明各大城市间的联系逐渐加强，随着城市群内的不断发展，各大城市都在积极加入京津冀城市群一体化的大格局中，并且逐渐壮大，承德、廊坊和衡水等城市与京津冀城市群内部其他城市的联系还有待加强。表 3 以长三角城市群网络为研究对象，分别从度数中心度、接近中心度、中介中心度 3 个方面进行了研究。

分析表 3 中的数据可以得知，2010 年长三角城市群关联网络的最大度数中心度是 1 832，2020 年达

到 7 980，网络连线更加密集，表明 10 a 间，长三角城市群各城市之间的联系显著加强，增长速度高于预期，随着经济的复苏，城市之间的经济聚集、经济溢出效应更加明显。

表 3 2010、2020 年长三角城市群城市关联网络的中心性结果

Table 3 Centrality results of the urban network in the Yangtze River Delta urban agglomeration in 2010 and 2020

城市	度数中心度						接近中心度		中介中心度	
	加权入度		加权出度		加权重度		2020	2010	2020	2010
	2020	2010	2020	2010	2020	2010				
上海	3 973	918	4 007	914	7 980	1 832	0.962	0.917	2.645	12.115
南京	3 835	680	3 697	699	7 532	1 379	1.000	1.000	5.006	44.782
苏州	2 733	513	2 881	502	5 614	1 015	0.962	0.917	2.645	12.115
杭州	2 604	556	2 760	565	5 364	1 121	1.000	0.880	5.006	7.998
常州	2 606	512	2 629	507	5 235	1 019	1.000	0.880	5.006	10.177
无锡	2 542	544	2 599	551	5 141	1 095	0.962	0.917	2.645	12.115
镇江	1 730	409	1 726	414	3 456	823	0.962	0.759	2.645	4.300
合肥	1 647	184	1 539	189	3 186	373	0.962	0.846	2.277	11.357
宁波	1 088	235	1 231	237	2 319	472	0.962	0.759	4.470	2.263
芜湖	1 030	188	1 027	187	2 057	375	0.962	0.846	2.645	9.191
嘉兴	992	320	939	317	1 931	637	1.000	0.688	5.006	2.794
绍兴	838	193	885	193	1 723	386	0.926	0.759	1.768	2.263
湖州	842	0	808	0	1 650	0	0.962	0.000	2.235	0.000
金华	758	214	816	209	1 574	423	0.893	0.786	1.529	2.182
泰州	557	40	693	41	1 250	81	0.893	0.733	0.874	8.459
南通	523	16	689	16	1 212	32	0.962	0.595	3.331	1.500
铜陵	591	0	590	0	1 181	0	0.926	0.000	1.434	0.000
台州	638	140	490	134	1 128	274	0.781	0.629	0.103	0.000
马鞍山	565	103	544	103	1 109	206	0.862	0.786	1.316	6.116
宣城	526	153	517	152	1 043	305	0.926	0.815	1.815	3.691
池州	534	29	497	29	1 031	58	0.893	0.733	1.091	0.515
安庆	473	10	498	10	971	20	0.806	0.595	1.986	0.000
扬州	541	42	416	43	957	85	0.862	0.733	0.682	8.495
滁州	474	133	475	120	949	253	0.926	0.688	1.731	0.538
盐城	256	13	313	13	569	26	0.862	0.550	2.109	0.000
舟山	370	0	0	0	370	0	0.595	0.000	0.000	0.000

长三角城市群关联网络呈现典型的多中心结构，且江苏省联系强度高于浙江省。从度数中心度看，高于度数中心度均值的城市有 8 个，且有 5 个城市在江苏省内，即经济溢出效应中，江苏省处于中心地位，上海、南京、苏州是长三角城市群关联网络中的领导者。上海是国际经济中心，辐射能力远大于一般城市；南京是江苏省的省会城市，是全国经济中心城市，对城市群内其他城市的影响较大；随着苏州人口的迅速增长和经济实力的不断增强，它和其他城市的联系程度加强，因此这 3 个城市的经济溢出效应较强。

从中介中心度看，南京、杭州、常州和嘉兴的中介中心度最大，为 5.006，对流动资源有较强的控制能力，在城市网络中发挥着重要的桥梁作用。泰州、台州的中介中心度均小于 1，容易被中介中心度较大

的城市支配和控制,更加依赖其他城市的发展。

从接近中心度看,65%的城市接近中心度高于均值,表明长三角城市群网络中绝大部分城市能迅速地与其他城市产生连接,是网络中的中心行动者。其可能的原因是中心度较高的城市中,绝大多数是省会城市或交通便捷城市,这使得与其他城市的经济要素流动频率更快。

为对长三角网络主体结构作更为清晰的分析,以长三角城市群各城市间的铁路客运班次的日均值表示铁路客运连接强度,运用 gephi 软件,根据收集的交通客运流数据,构建了图 2 所示的长三角城市群空间关联网络图。

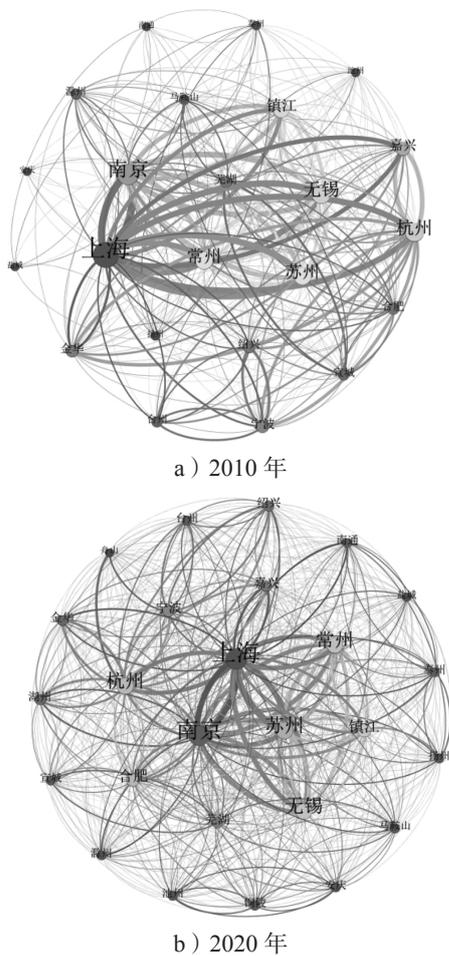


图 2 2010 年与 2020 年长三角城市群空间关联网络  
Fig. 2 Spatial correlation network of the Yangtze River Delta urban agglomeration in 2010 and 2020

根据图 2 可以看出,长三角地区的网络比较发达,一直都以南京、上海为网络的重要节点,越靠近中心节点城市,城市之间的联系愈发紧密,联系强度逐渐升高。从网络演变的角度分析,城市间的网络连接线逐渐变粗,变得更密集,说明各大城市间的联系逐渐加强,同时随着城市群内各大城市的不断发展,湖州、铜陵和舟山都在积极加入长三角城市群一体化

的大格局中,并且在逐渐壮大,这有利于加快长三角城市群的一体化进程。表 4 给出了从度数中心度、接近中心度、中介中心度 3 个方面研究珠三角城市群关联网络的中心性。

表 4 2010、2020 年珠三角城市群城市关联网络的中心性结果

Table 4 Centrality results of the urban network in the Pearl River Delta urban agglomeration in 2010 and 2020

城市	度数中心度						接近中心度		中介中心度	
	加权入度		加权出度		加权度		中心度		中心度	
	2020	2010	2020	2010	2020	2010	2020	2020	2010	
广州	3 956	435	3 852	433	7 808	868	1	1	0.143	0
深圳	2 144	406	2 045	408	4 189	814	1	1	0.143	0
佛山	1 616	43	2 070	42	3 686	85	1	1	0.143	0
东莞	1 690	430	1 411	432	3 101	862	1	1	0.000	0
肇庆	1 297	42	1 756	43	3 053	85	1	1	0.143	0
中山	1 017	0	771	0	1 788	0	1	0	0.143	0
惠州	854	69	875	67	1 729	136	1	1	0.143	0
江门	556	0	648	0	1 204	0	1	0	0.143	0
珠海	700	0	402	0	1 102	0	0.889	0	0.000	0

分析表 4 中的数据可以得知,2010 年珠三角城市群关联网络的最大度数中心度值是 868,而 2020 年达到 7 808,这表明珠三角城市群各城市间的联系随时代变迁更加密切。

从度数中心度看,广州和深圳 2020 年的度数中心度值分别是 7 808 和 4 189,远大于其他城市的对应值,这表明珠三角城市群已经形成了以广州、深圳为核心的城市空间结构格局。同时,广州和深圳之间的劳动力、人才等经济要素流动最显著,相应地带来的经济接收和经济溢出效应也较为显著,两市的加权入度和加权出度均较高,是珠三角城市网络中最主要的接收城市和出发城市。

从中介中心度看,2020 年东莞、珠海两市的中介中心度为 0,容易被其他城市“孤立”,因此其他中介中心度较大的城市应发挥“桥梁”作用,以减少东莞、珠海被孤立和边缘的风险。广州稳居珠三角城市群的核心地位,应充分发挥其辐射作用,加强与其他城市的资源、信息、人才等方面的交流,以促进珠三角城市群均衡发展。

从接近中心度看,2020 年珠三角城市群各城市节点的接近中心度为 1 或 0.889,即网络的完善使各城市间的“时空距离”缩短,提高了珠三角城市群吸收人才、信息、资源等经济要素的能力。

以珠三角城市群各城市间的铁路客运班次的日均值表示铁路客运连接强度,为对珠三角网络主体结构作更为清晰的分析,根据收集的交通客运流数据,运用 gephi 软件,构建珠三角城市群空间关联网络图,如图 3 所示。

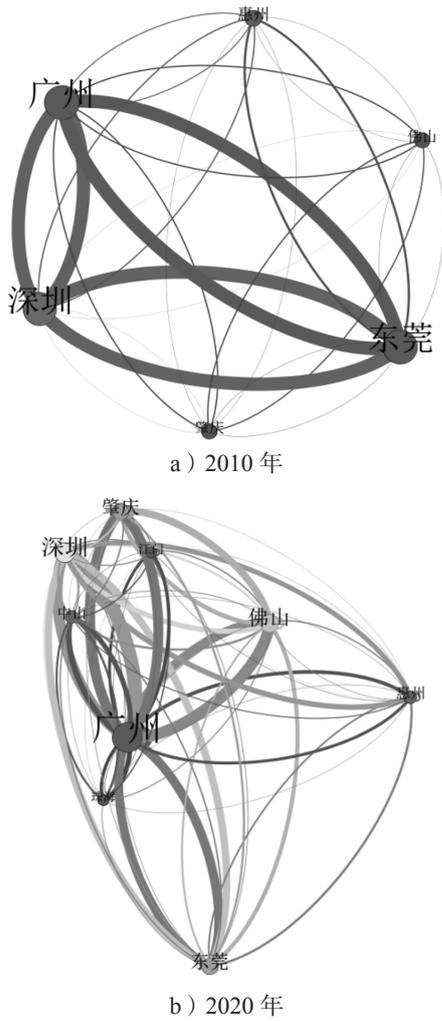


图3 2010年与2020年珠三角城市群空间关联网络  
Fig. 3 Spatial association network of the Pearl River Delta urban agglomeration in 2010 and 2020

由图3可知，珠三角城市群网络一直以广州、深圳为网络重要节点，随着时间推移这些城市的联系愈发紧密，联系强度逐渐升高。从网络演变角度分析，城市间的网络连接线变得更密集，说明珠三角城市群一体化取得显著效果，同时随着各大城市不断发展，中山、江门和珠海都在积极加入珠三角城市群一体化大格局中，积极推进珠三角城市群一体化进程。

### 3.3 凝聚子群分析

凝聚子群是指在城市空间网络中，各个成员之间有着密切的关系的“团体”，这些团体并不是因为互动而简单聚集在一起。由于凝聚子群中成员关系非常密切，一些学者把它形象地称作“社区现象”。在城市空间关联网络中，群体关系和派别都需要用凝聚子群来表达，对于探索城市群的空间结构特点具有积极作用。对城市群内的城市之间的联系、联系方式进行分析，有助于从新的角度来观察城市群的发展。本文采用Ucinet中的迭代相关收敛法，研究了三大城市

群空间关联网络凝聚子群的特点结果如图4所示。

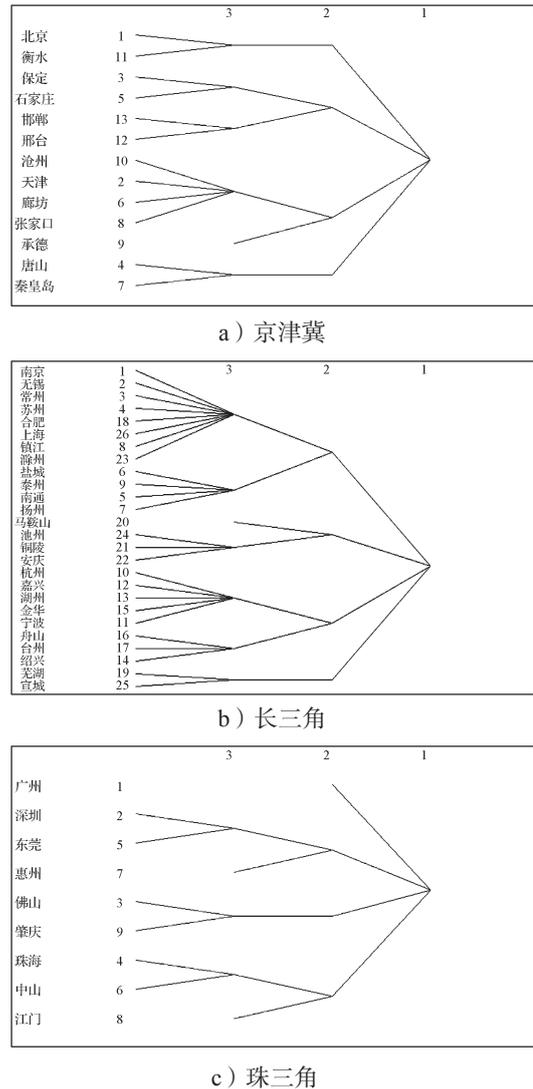


图4 京津冀、长三角、珠三角城市群空间关联网络凝聚子群图

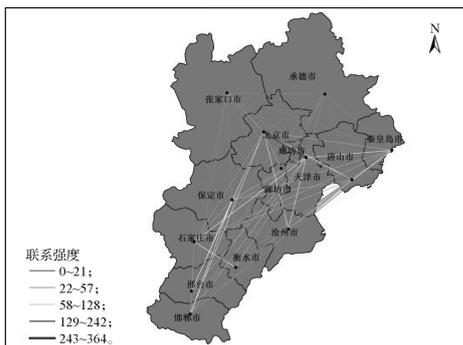
Fig. 4 Agglomerative subgroup diagram of the spatial network of Beijing-Tianjin-Hebei, the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta urban agglomerations

根据图4可以看出，北京、天津是直辖市，信息资源和经济要素集中，构成凝聚子群；唐山和秦皇岛城市抱团承接核心城市的资源要素，成为除核心城市外新的经济中心城市。长三角城市群凝聚子群大多由地理位置相近的城市组成，且凝聚子群内部城市的空间关联程度较强，但是省际间城市的关联度较低，融合程度较差，各省并没有跨越行政界线，区域壁垒依旧存在，上海作为中心城市，与苏南地区保持着活跃的经济联系。总体看，在长三角城市群一体化进程中，不同凝聚子群通过空间联系，实现了技术、信息、资源和劳动力等经济要素的流动。珠三角城市群凝聚子群基本依据城市地理位置的远近进行划分，各子群内部城市拥有较强的经济联系，有利于城市间劳动力、

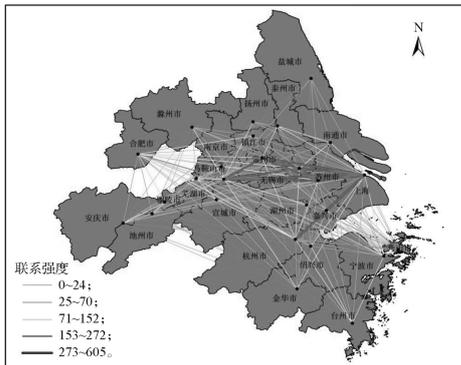
信息等资源要素的自由流动。

## 4 城市群层级联系分析

以京津冀和长三角城市群为例,运用 ArcGIS Janks (自然断裂法)对城市网络结构进一步分析,节点大小表示城市节点的联系入度,节点的粗细程度表示城市节点的联系入度总和,绘制了如图5所示的京津冀、长三角城市群层级联系图,同时根据组间差异最大、组内差异最小的原则进行分类,将城市群空间关联网络划分为5个层级。



a) 京津冀



b) 长三角

图5 京津冀和长三角城市群层级联系图

Fig. 5 Hierarchical connection diagram of Beijing-Tianjin-Hebei and the Yangtze River Delta urban agglomerations

根据图5可以得出,京津冀城市群第一层级是北京-天津,联系强度达到243~364。北京、天津是京津冀城市群的两个特大型城市,不论是经济总量还是人均消费水平,都处于明显的优势地位,是京津冀城市群的双核心。第二层级是北京-唐山,联系强度达129~242。唐山经济发展迅速,实力雄厚,随着曹妃甸新区的开发,唐山逐渐成为北方的制造业基地,其核心地位无可置疑。第三层级是廊坊-秦皇岛,联系强度达58~128。廊坊地处北京和天津中间,有“京津走廊,黄金地带”之称,因其独特的地理位置,廊坊的经济发展迅速,有可能成为京津冀城市群未来的核心城市。沧州东临渤海,南接齐鲁,北依京津的

渤海新区,经济发展后来居上,也是较具发展潜力的城市之一。张家口等城市处于京津冀城市网络结构的外围,构成网络的第四、第五层级,联系强度较小,分别是22~57和0~21。

长三角城市群第一层级是上海-苏州,上海-南京,联系强度达273~605,上海市是国家重要的经济增长极之一,通过溢出和集聚效应带动长三角地区其他城市的发展。南京是江苏省的省会,地处长三角地区的西北部,主要辐射的是苏中地区的城市,南京依靠长江的“黄金水道”,成为长江航运物流中心和先进的制造业基地。第二层级有杭州、镇江、宁波等,该层级城市的公共服务好、人口素质高、人口流动快,从而能快速吸收新技术,促进经济发展,也能辐射周边城市。第三层级是合肥、南通等,该层级城市因临近区域中心或者副中心城市,区域联系密切。合肥重视教育行业,教育可以储备高素质人才,形成知识溢出效应,在长三角城市群一体化进程中,提供创新型人才和相应的知识储备。盐城等城市构成了网络的第四、第五层级,联系强度分别是25~70和0~24。

## 5 结论与讨论

本文以沿海三大城市群48个城市间客运流为研究对象,利用社会网络分析法、层级联系法研究城市群空间网络拓扑结构特征及其内在经济效应,结果显示:1)珠三角城市群空间关联的网络密度最大,城市之间的联系较强,京津冀城市群次之,长三角城市群较弱,因长三角城市群跨越地域广,各个省份之间的联系强弱不匀。2)京津冀城市群空间网络呈现典型的主次结构,北京、天津、石家庄是网络中的领导者;长三角城市群空间网络呈现典型的多中心结构,上海、南京等8个城市居于核心地位;珠三角城市群空间网络呈现穗深双核结构,其中广州、深圳是核心城市。3)城市间的距离、要素扩散与集聚、产业结构、经济全球化等4类因素对凝聚子群划分有显著影响。4)京津冀城市群的主导城市是北京,其联系强度达243~364;长三角城市群的主导城市是上海,其联系强度达273~605。

京津冀城市群、长三角城市群以及珠三角城市群经济发达,如何促进三大城市群的经济、社会、信息的资源共享,使城市群均衡发展是一个值得研究的问题。本文仅从客运流角度分析城市群空间网络,缺少其他角度,角度不同会导致关键节点城市的排序存在差异,在实际网络的考察中需要综合利用不同方法,使结果更有说服力,这将是下一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] 甄峰, 顾朝林. 信息时代空间结构研究新进展[J]. 地理研究, 2002, 21(2): 257-266.  
ZHEN Feng, GU Chaolin. New Perspectives on Spatial Structure Research in Information Era[J]. Geographical Research, 2002, 21(2): 257-266.
- [2] 刘卫东, 甄峰. 信息化对社会经济空间组织的影响研究[J]. 地理学报, 2004, 59(增刊1): 67-76.  
LIU Weidong, ZHEN Feng. Spatial Implications of New Information and Communication Technologies[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(S1): 67-76.
- [3] CASTELLS M. The Rise of the Network Society[M]. Blackwell: Oxford, 1996: 26-28.
- [4] LEE H S. The Networkability of Cities in the International Air Passenger Flows 1992—2004[J]. Journal of Transport Geography, 2009, 17(3): 166-175.
- [5] XIAO X M, JIA L M, WANG Y H. Correlation Between Heterogeneity and Vulnerability of Subway Networks Based on Passenger Flow[J]. Journal of Rail Transport Planning & Management, 2018, 8(2): 145-157.
- [6] LIU G J, YIN Z Z, JIA Y J, et al. Passenger Flow Estimation Based on Convolutional Neural Network in Public Transportation System[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 123: 102-115.
- [7] DUPUY G. Urban Networks-Network Urbanism[M]. Amsterdam: Techne Press, 2008: 37-39.
- [8] HELSLEY R W, ZENOU Y. Social Networks and Interactions in Cities[J]. Journal of Economic Theory, 2014, 150: 426-466.
- [9] HAN L, KOENIG-ARCHIBUGI M, OPSAHL T. The Social Network of International Health Aid[J]. Social Science & Medicine, 2018, 206: 67-74.
- [10] 钟业喜, 郭卫东. 中国高铁网络结构特征及其组织模式[J]. 地理科学, 2020, 40(1): 79-88.  
ZHONG Yexi, GUO Weidong. High-Speed Rail Network Spatial Structure and Organization Model in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(1): 79-88.
- [11] 王圣云, 宋雅宁, 张玉, 等. 交通运输成本视角下长江中游城市群城市网络空间关联机制[J]. 经济地理, 2020, 40(6): 87-97.  
WANG Shengyun, SONG Yaning, ZHANG Yu, et al. Spatial Organization and Driving Mechanism of Connected Network of Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River[J]. Economic Geography, 2020, 40(6): 87-97.
- [12] 赵映慧, 初楠臣, 郭晶鹏, 等. 中国三大城市群高速铁路网络结构与特征[J]. 经济地理, 2017, 37(10): 68-73.  
ZHAO Yinghui, CHU Nanchen, GUO Jingpeng, et al. High-Speed Railway Network Structure and Characteristics in Three Urban Agglomerations in China[J]. Economic Geography, 2017, 37(10): 68-73.
- [13] 李艳, 孙阳, 姚士谋. 基于财富中国500强企业的中国城市群城市网络联系分析[J]. 地理研究, 2020, 39(7): 1548-1564.  
LI Yan, SUN Yang, YAO Shimou. Urban Network Linkages of Chinese Urban Agglomerations Based on an Analysis of the Fortune China Top 500 Enterprises[J]. Geographical Research, 2020, 39(7): 1548-1564.
- [14] 王磊, 李安琪, 杨文毅, 等. 城际房地产消费流的空间格局与驱动因素研究: 以长江中游城市群为例[J]. 湖北社会科学, 2019(12): 46-55.  
WANG Lei, LI Anqi, YANG Wenyi, et al. Research on the Spatial Pattern and Driving Factors of Intercity Real Estate Consumption Flow: A Case Study of Urban Agglomerations in the Middle Reaches of the Yangtze River[J]. Hubei Social Sciences, 2019(12): 46-55.
- [15] 王江, 赵川. 长江中游城市群数字普惠金融的空间关联及影响因素研究[J]. 武汉金融, 2020(6): 75-81, 69.  
WANG Jiang, ZHAO Chuan. Spatial Correlation and Influencing Factors of Digital Inclusive Finance in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of Yangtze River[J]. Wuhan Finance, 2020(6): 75-81, 69.
- [16] 李伟军, 李婷, 吴义东. 中国三大城市群金融集聚: 空间网络及结构分化[J]. 经济体制改革, 2020(2): 38-45.  
LI Weijun, LI Ting, WU Yidong. Financial Agglomeration of China's Three Major Urban Agglomerations: Spatial Correlation and Structural Differentiation[J]. Reform of Economic System, 2020(2): 38-45.
- [17] 谷国锋, 李俏, 周伊楠. 东北地区城市群经济增长空间关联网络结构演变[J]. 地域研究与开发, 2020, 39(2): 14-19.  
GU Guofeng, LI Qiao, ZHOU Yinan. Evolution of Economic Growth Spatial Correlation Network Structure of Urban Agglomeration in Northeast China[J]. Areal Research and Development, 2020, 39(2): 14-19.
- [18] 陆江潇, 李全, 汤坤. 基于百度指数的长江沿岸中心城市网络联系特征[J]. 现代城市研究, 2020, 35(1): 45-51.  
LU Jiangxiao, LI Quan, TANG Kun. The Network Connection Characteristics of Central Cities Along the Yangtze River Based on Baidu Index[J]. Modern Urban Research, 2020, 35(1): 45-51.
- [19] 龚朴一, 杨家文. 基于微博大数据的中国城市群空间结构研究[J]. 城市发展研究, 2020, 27(6): 1-8, 61, 181.  
GONG Puyi, YANG Jiawen. Spatial Structure Study of Urban Agglomerations in China Based on Weibo Big Data[J]. Urban Development Studies, 2020, 27(6): 1-8, 61, 181.

(责任编辑: 申剑)