

长三角地区城市经济网络的时空演化特征¹

蒋金亮^{1,2} 鲁嘉颐³ 戈大专⁴ 孙东琪^{5*}

(1.) 南京大学社会学院, 江苏南京 210093;

2. 江苏省规划设计集团, 江苏南京 210019;

3. 比利时荷语鲁汶大学公共治理研究所, 鲁汶 3000;

4. 南京师范大学地理科学学院江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏南京 210023;

5. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

【摘要】:流空间成为城市群空间结构研究重要内容, 而如何识别城市群流空间结构特征, 揭示其对城市群实体空间的影响, 是当前城市群空间结构研究的重点及难点问题。采用 1992、2001、2010、2019 年企业异地投资数据, 构建长三角地区城市联系网络, 借助复杂网络分析、K- means 聚类等方法, 探究区域经济网络整体特征演变, 分析网络空间组织结构演化规律。结果显示: (1) 1992~2019 年长三角地区城市联系强度大幅提升, 城市节点的重要性和影响力的离散和不均衡程度在不断缩小。城市经济网络“小世界”特性逐渐显著, 无标度特性在逐渐弱化。(2) 长三角地区城市经济网络从早期的“V 型”结构转向核心城市相互连接的多边形网络结构; 网络联系从核心城市间相互联系向外拓展至核心城市与其周边相邻城市之间的联系, 空间邻近性网络联系特征开始显现; 网络体系中参与城市从核心城市逐步扩展至全域, 南京、杭州、合肥等核心城市形成相对独立的对外辐射网络体系。(3) 长三角地区城市等级体系已经形成金字塔结构, 以上海市为核心城市地位最为突出; 杭州、南京影响力次之; 宁波、合肥、绍兴、苏州、无锡、嘉兴等城市再次之。(4) 长三角城市经济网络的发展演化从初始发育阶段、等级化阶段逐步走向网络化阶段。

【关键词】:城市经济网络; 复杂网络; 时空演化; 长三角; 企业联系

【中图分类号】: F299 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004- 8227(2023)01- 0024- 16

¹ **【收稿日期】:** 2022- 01- 14; **【修回日期】:** 2022- 07- 18

【基金项目】: 国家自然科学基金项目(41971162)

【作者简介】: 蒋金亮(1991 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市地理和城市社会学. E- mail: jinliangjiang@foxmail. com

【* 通讯作者 E- mail】: l: sundq@igsnrr. ac. cn

城市间相互作用及空间联系一直是地理学研究热点。自 20 世纪 70 年代以来,随着经济全球化和信息化的不断推进,区域及城市的功能和形态发生显著变化,任何城市不再是孤立的存在,而是在相互联系中迸发活力,由此形成的网络体系成为理解城市的关键^[1]。Castells 指出,在全球化、网络化及信息化交织作用下,人类社会正逐渐从“地方空间”走向“流的空间”^[2]。流的空间是指通过人流、物流、信息流、资金流等一系列物质流和非物质流要素的不断运动所形成的空间场域或载体^[3],一方面流的空间通过城市节点产生和积累影响力^[2],另一方面又被各种流所生产和再生产,最终取代“地方空间”成为主导区域空间组织形式的决定性力量^[4]。一些学者据此认为,区域空间组织模式正从传统的中心地模式走向网络化模式^[5]。二者相比,中心地模式表现为高等级城镇对低等级城镇的垂直联系,强调空间组织的向心性,而网络化的空间联系则表现为多个中心城市间的水平多向联系,更强调节点性^[6,7]。无论是 Taylor 等的中心流理论还是 Castells 等的流动空间理论都表明,围绕全球生产与服务网络的扩张,城市发展的边界日益模糊,跨行政区甚至国界的溢出效应不断显现,随着“The city as a network of networks”的提出,即城市作为网络存在于网络之中,标志着城市地理学研究的网络转向^[8]。

自城市网络研究兴起以来,研究者通过构建城市网络解读城市间功能联系,取得大量研究成果。目前主要从 4 个方面展开:集中于航班、铁路班次、港口吞吐量、公路流量、物流网络等基础设施网络研究^[9,10,11,12];基于带有位置服务的社交网络和移动通信等人口、信息联系的网络研究^[13,14,15,16,17,18,19,20];针对城市创新联系、创新空间开展的城市网络研究^[21,22,23,24,25];结合企业间空间关系进行城市网络研究^[26,27,28]。从研究数据来看,从使用统计年鉴、政府公报、经济普查等统计数据,到逐渐采用城市间联系实时数据如铁路班次、物流线路数等。随着大数据采集的升级,逐步实现对人口迁徙、总部分支机构、社交网络联系等更大数据量的获取。从研究方法来看,由引力模型、断裂点模型等叠加空间可达性等估算城市联系可能性^[29,30],到通过网络分析工具对城市复杂网络节点、边空间特征进行描述,除分析网络拓扑结构外,开始寻找节点间关系模式,探究网络体系中的凝聚子群、社区聚合关系等^[31,32]。其中,复杂网络分析方法被广泛应用在城市网络空间特征及复杂性分析中,研究者借助各种复杂网络测度指标探究区域网络特征,包括经济网络结构^[33]、城市群一体化发展^[34]、城市网络体系分析^[35,36]、创新网络研究^[37]、旅游空间格局^[38]、交通联系^[39]、人口迁移及演化^[40]、物流链空间演化^[41]等。

由于企业在城市经济活动中的重要地位及相关数据的可获取性,借助企业关联构建城市网络得到了学者较多关注^[42,43,44,45]。企业间通过分支机构设立、对外投资等方式形成关联网络,促进人才、信息、资本等要素在城市间流动,进而影响和改变城市体系。以 Taylor 及其领导的 GaWC 为代表的城市网络研究,学者巧妙利用企业空间分布化解描述城市网络的难题^[46,47]。此后,研究者利用企业之间相互关系,借助上市企业^[48]、金融机构及企业^[49]、医药公司^[50]等不同类型的企业及部门关系构建城市网络联系,刻画城市间不同类型功能联系。

另一方面,随着经济全球化和区域一体化的不断发展,城市群成为国家参与全球竞争与国际分工的重要空间地域单元,深度影响世界政治经济新格局^[51,52]。城市群因内部经济联系更为紧密、空间组织更加紧凑,正成为区域增长中心、创新中心,通过建设城市群进而提升国家在国际城市体系中的地位成为各国参与国际竞争的重要途径^[53]。作为一定地域范围内存在巨大能量流动的空间整合体,流空间成为城市群空间结构研究重要内容,而如何识别城市群流空间结构特征,揭示其对城市群实体空间的影响,是当前城市群空间结构研究的重点及难点问题。特别是长三角地区,依靠优势的地理区位,发展成为中国经济重要增长极,自改革开放以来,随着经济快速发展,城市群空间形态向网络化发展格局迈进,长三角地区城市网络成为国内外学术界研究重点,已有学者围绕交通联系网络^[54,55]、金融网络^[56]、创新网络^[57]、人口迁移^[58]等进行了大量研究。现有关于长三角地区城市经济网络联系成果较为丰富,但关注全样本企业联系、企业投资规模强度、长时间序列研究较少,本文在以下几个方面尝试进行延伸和拓展:(1)采用长三角地区全样本的企业异地投资数据,进而构建城市群城市经济联系网络,区别于运用高级生产性服务业(APS)、上市公司、金融机构、物流企业等门类数据,更能全面反映城市经济网络面貌;(2)相较于企业总部分支数量数据,采用不同企业异地投资规模数据,更能反映城市之间真实经济网络联系强度;(3)选择 20 世纪 90 年代至 2019 年长时间序列作为研究时间段,从长时间范围分析长三角地区城市经济网络特征及空间组织结构演化特征。

基于此,本文利用长三角地区历年城市之间企业异地投资数据,作为表征城市间经济联系强度的媒介,借助复杂网络分析方法、K-means 聚类方法等分析方法,探究区域网络整体特征演变,分析网络空间组织结构演化规律,深入剖析长三角地区城市经济网络层级结构,试图总结长三角城市经济网络演化阶段,以此对城市群网络进行特征提取和规律挖掘,为深入分析城市群网络发育程度提供区域认识,有助于企业区位决策、区域规划的优化调整,深化城市网络理论研究。

1 研究对象和方法

1.1 研究区域和数据来源

本文研究对象为长三角地区,采用2019年印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中的表述,指苏、浙、皖、沪四省市全部区域,具体包括上海市、江苏省的13个城市、浙江省的11个城市以及安徽省的16个城市,共计41个城市(图1)。截至2019年底,长三角地区国土面积共35.8万 km^2 ,地区总人口共2.27亿。2020年,长三角地区生产总值为24.5万亿元,常住人口城镇化率超过60%。以不到4%的国土面积,长三角地区产生中国近1/4的经济总量,1/3的进出口总额。根据数据的可获取性,本文在研究过程中考虑时间跨度为20世纪90年代至2019年,以10年作为一个周期,但是考虑到1992年我国明确了建立社会主义市场经济体制的目标,市场化道路开始整体推进,而2001年我国加入了WTO,标志着主动迎接经济全球化挑战,因此,结合研究时段的特殊性 & 数据的可获取性,且1992、2001与1990、2000年时间相近,不影响网络特征的趋势分析,本文最终选择1992、2001年作为研究节点,其余则分别以2010、2019年作为研究节点,分析城市经济网络体系变化。



图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Study area

长三角地区行政区划统一按照 2019 年的边界进行相应调整，因巢湖市 2011 年开始由合肥市代管，因此合并进入合肥处理。基础地理数据来源于 1:400 万中国地形数据库地图，通过 ArcGIS 软件进行边界提取和处理。历年企业异地投资数据来源于中国工商企业注册数据，从全国海量异地投资数据中筛选长三角地区异地投资数据，将企业异地投资的金额作为测度指标，衡量城市相互之间的投资情况，最终提取 1992~2019 年长三角地区城市联系流数据，涉及城市共 41 个。

1.2 研究方法

(1) 城市联系强度测度

本文研究长三角地区城市经济网络采用基于企业异地投资联系的视角，具体来说则需要将企业异地投资联系转换为城市经济网络联系。参考世界城市网络研究方法^[47]，利用定向矩阵(V)计算城市之间的联系强度。将企业之间的投资联系投影为城市之间的关系链接(图 2)，构建城市联系网络。

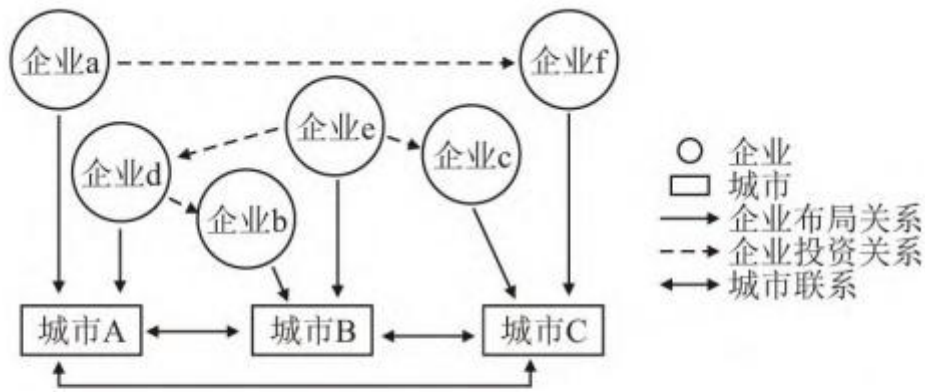


图 2 企业间关系与城市间关系

Fig. 2 Relationship between cities and enterprises

式中： $v_i(a, b)$ 是城市 a 的企业 i 对城市 b 的服务价值，即企业对其他公司投资的额度，故城市 a 对城市 b 的联系值则为 n 个企业形成的联系值之和，具体计算公式如下。

$$V = \sum_{i=0}^n v_i(a, b)$$

(2) 复杂网络分析方法

本文采用复杂网络分析方法，建立长三角城市节点间联系的有向、有权和加权邻接矩阵，采用 Gephi、Matlab 等工具计算网络特征值，并利用 ArcGIS 软件对网络空间分布格局和组织模型进行可视化处理。选取的复杂网络相关指标如表 1 所示。

(3) 基尼系数和变异系数

运用基尼系数和变异系数对城市复杂网络中心性指标差异进行测度。总的来说，变异系数和基尼系数越大，中心性的指标差异也越大。其中，基尼系数关注的是单元间的对比，变异系数针对的是单元与平均值之间的对比，计算公式如下：

$$G = \frac{1}{2n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |x_i - x_j|$$

$$C_v = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中：G 是基尼系数；Cv 是变异系数；n 为对应的城市总数；xi 和 xj 分别是 i 城市和 j 城市中心性指标的值； $\bar{x}$ 为各城市的中心性指标均值。

表 1 复杂网络评价指标公式及含义

指标	公式	数学含义	地理意义
度	$k_i = \sum_{j \in n} a_{ij}$	a _{ij} 指与城市 i 相连的城市 j 的数目；n 为网络中城市总数	表征网络中与某一城市相连的城市个数，反映该城市处于网络中心位置的程度
加权重	$S_i = \sum_{j \in n} w_{ij}$	w _{ij} 为城市 i 和 j 之间的连接边权重，也即相互联系强度之和	指以某一城市为端点的城市联系流的权重之和
度中心性	$DC = \frac{1}{n-1} k_i$	n 为网络中的城市总数；k _i 为城市 i 的度数即与城市 i 相连的城市个数	可以直观反映该节点与网络中其他节点发生直接联系的可能性大小，节点的度中心性值越大，则与其他节点联系的可能性越大
邻近中心性	$CC_i = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij} \right]^{-1}$	n 为网络中的城市总数；d _{ij} 为任意城市 i 和 j 之间最短路径数量	指某一城市到所有城市的最短路径距离和，反映该城市在网络中的相对可达性大小

介数中心性	$BC_k = \frac{2}{n^2 - 3n + 2} \sum_{i=1, i \neq k}^n \sum_{j=1, j \neq k}^n \delta_{kij}$	n 为网络中的城市总数； δ_{kij} 为从城市 i 到城市 j 的最短路径中经过城市 k 的数量； δ_{ij} 为城市 i 到城市 j 的最短路径数量	通过某一城市的最短路径数目，反映该城市在网络中的中转和衔接功能
平均路径长度	$L = \frac{1}{\frac{1}{2}n(n-1)} \sum_{i>j} d_{ij}$	L 是平均路径长度；n 为网络中的城市总数； d_{ij} 为城市 i 和城市 j 之间最短路径边数	表征网络整体连通性，平均路径长度越小，说明网络连通性越好，网络空间组织性能和效率越高
平均聚类系数	$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$ $C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$	C_i 为城市 i 的聚类系数； E_i 为城市 i 与邻接城市间实际存在的边数； k_i 为城市 i 的度数。 C_i 介于 0 到 1 之间。C 为网络平均聚类系数， C_i 为城市 i 的聚类系数，n 为网络中的城市总数	平均聚类系数反映整个网络的城市间联系紧密程度，C 的值越大，表明整个网络的局部连接程度越紧密

(4) K-means 聚类方法

K-means 是经典聚类方法之一，已经被广泛应用在城市网络联系研究中。给定数据集 $P \in R^m \times n$ 及聚类数量 K, K-means 聚类方法使得聚类后相同类内差别尽量小，不同类之间差别尽量大，以使得各类的点到其相应类别质心的距离平方和 E 最小。具体为下式：

$$\min(E) = \min \sum_{k=1}^K \sum_{x \in Y_k} (y_k - x)^2$$

式中： Y_k 是第 k 个类；x 是类 Y_k 中的点； y_k 是第 k 个类的质心。结合相关文献，加权重度、度中心性、邻近中心性、介数中心性可以表征节点在网络体系中的地位，值越高，表明中心地位相对越高^[59, 60]。本文以 K-means 聚类方法进行中心等级识别，以加权重度 x_1 、度中心性 x_2 、邻近中心性 x_3 、介数中心性 x_4 构建 K-means 聚类数据集 P, 如下所示。

$$P = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$$

2 长三角地区城市经济网络整体特征演变

2.1 网络拓扑结构演化特征

总体来看,长三角地区城市经济网络规模在 20 世纪 90 年代后迅速扩张,节点数和边数分别从 40、263 增加到 41、1 529,特别是网络边数增加了近 6 倍(表 2)。网络密度由 0.169 增加到 0.932,网络直径由 1992 年的 4 减少到 2019 年的 2,网络密度扩大了 5.5 倍。由此表明,长三角地区城市经济网络联系在 1992~2019 年期间大幅提升,城市之间网络化体系逐步形成。

城市经济网络平均度从 1992 年的 6.575 一直增长到 2019 年的 37.293,从相对稀疏网络体系逐步向密集网络体系发展。1992~2019 年,度中心性变异系数呈现下降趋势,从 1.781 下降到 1.249,基尼系数始终在 0.5 以上;邻近中心性的变异系数和基尼系数表现为下降趋势,变异系数从 0.280 降低到 0.074,基尼系数从 0.122 下降到 0.038;同样,介数中心性的变异系数和基尼系数也呈现逐年下降趋势,变异系数从 2.625 下降到 0.334,基尼系数从 0.847 下降到 0.188。综合来看,中心性指标变化趋势表明,随着城市间经济联系在不断加强,长三角地区城市经济网络中城市节点重要性和影响力存在离散和不均衡,但是差异程度在不断缩小。

表 2 1992~2019 年长三角地区城市经济网络的特征量统计

统计特征	统计指标	1992 年	2001 年	2010 年	2019 年
网络规模	节点数	40	41	41	41
	边数	263	739	1 176	1 529
	网络密度	0.169	0.451	0.717	0.932
	网络直径	4	2	2	2
度中心性	平均度	6.575	18.024	28.683	37.293
	平均加权度	55 626.195	472 684.747	2 319 095.241	21 258 834.746
	变异系数	1.781	1.769	1.235	1.249
	基尼系数	0.742	0.715	0.551	0.545
邻近中心性	平均邻近性	0.471	0.658	0.799	0.942
	变异系数	0.280	0.153	0.158	0.074
	基尼系数	0.122	0.080	0.090	0.038
介数中心性	平均介数	39.300	21.976	11.317	2.707
	变异系数	2.625	1.589	0.776	0.334
	基尼系数	0.847	0.649	0.392	0.188

2.2 网络复杂性特征

(1)网络整体组织结构效率提升，“小世界”特征显著

若网络体系聚类系数较大、平均路径长度较短，则表现出小世界网络特征，也即任意两点之间建立联系可能性较大，信息传递速度快，且通过缩短平均路径长度可显著提高网络性能^[61]。整体来看，城市经济网络平均聚类系数在逐渐增大，平均路径长度在逐步减小，城市经济网络结构效率和集聚性增强(表 3)。具体来看，聚类系数在 1992 年为 0.623, 2019 年上升为 0.934, 表现出较高的聚集性。以此来看，长三角地区网络联系基础较好，随着经济的发展，大部分城市与其他城市相互之间的联系更加紧密。1992~2019 年期间，长三角地区城市经济网络平均路径长度在 1.068~2.061 之间，且逐年减小。综合以上变化来看，长三角地区城市经济网络表现出“小世界”特性，并且逐渐显著。

表 3 1992~2019 年长三角地区城市经济网络小世界特性指标演变 导出到 EXCEL

统计指标	1992 年	2001 年	2010 年	2019 年
平均聚类系数(C)	0.623	0.643	0.757	0.934
平均路径长度(L)	2.061	1.549	1.283	1.068

(2)网络无标度特性逐渐弱化

网络中节点加权重度分布情况可以用概率分布函数和累积概率分布函数标识，当概率分布函数和累积频率概率分布函数为幂函数时，则称其结构具有“无标度”性质。从加权重度累积频率分布图来看(图 3), 长三角地区城市经济网络加权重度分布呈现典型的“长尾分布”特征，即少数节点加权重度值较高，多数节点加权重度值较低且相近。此外，1992~2019 年累积概率分布曲线幂率拟合值(R2)在逐步减小，网络的无标度特征逐渐弱化。具体来看，1992 年网络节点累积频率分布表现明显“长尾”特征，幂率拟合度 R2 值为 0.978, 2001 年曲线幂率拟合度有所下降，R2 值为 0.923, 到了 2010、2019 年分别下降到为 0.637 和 0.785, 整体呈现下降趋势(表 4)。可以发现，城市经济网络在 1992~2019 年期间，节点加权重度累积概率分布曲线呈现幂率分布态势，但是幂率拟合度在逐渐减小，也即说明长三角地区城市间投资联系规模差距在逐渐缩小，投资过度集中某些城市的态势有所缓解，城市经济网络结构得到优化。

表 4 1992~2019 年长三角地区城市经济网络无标度性指标演变

统计指标	1992 年	2001 年	2010 年	2019 年
加权重度分布	$P(k)=415 \quad k^{-0.416}$	$P(k)=15 \quad 330 \quad k^{-0.565}$	$P(k)=30 \quad 960 \quad k^{-0.578}$	$P(k)=3*106k^{-0.756}$
幂律拟合	(R2=0.978)	(R2=0.923)	(R2=0.637)	(R2=0.765)

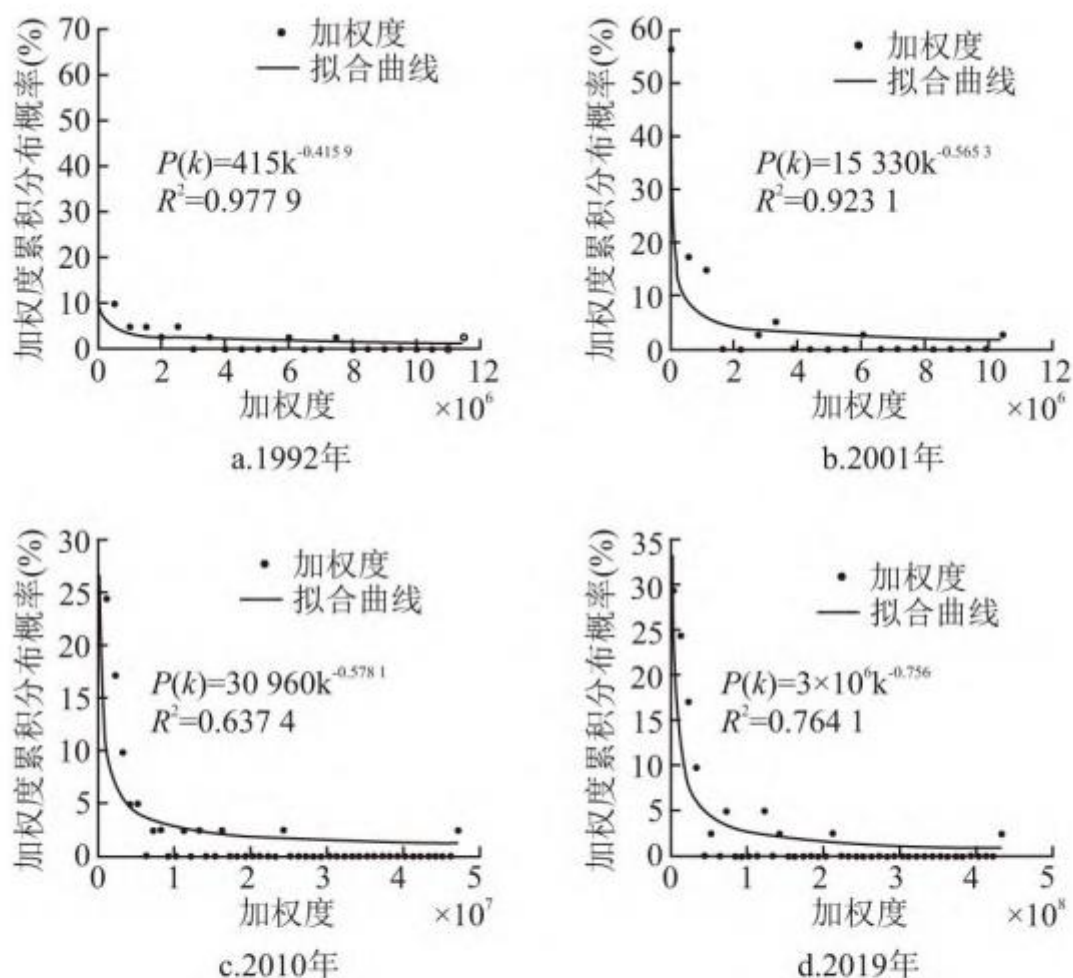


图 3 1992~2019 年长三角地区节点加权重度累积概率分布图

Fig. 3 Cumulative probability distribution of weighted degree of nodes in Yangtze River Delta from 1992 to 2019

3 长三角地区城市经济网络空间组织结构演化

3.1 城市经济网络联系整体演化特征

在 GIS 平台将城市经济网络拓扑关系转换为空间联系,按照自然断裂法划分为 5 个等级,将 1992~2019 年城市间经济网络联系进行空间可视化表达,如图 4 所示。结果表明,1992~2019 年长三角地区城市经济网络体系从早期发育阶段逐渐向网络化发展。从初始的上海、南京、杭州组成的“V 型”结构,转向上海、杭州、南京、宁波、苏州、合肥等城市相互连接的多边形网络结构。

1992 年长三角地区城市经济网络相对稀疏,此时联系流以上海市与其紧密联系城市为主,最高等级的联系为上海-南京、上海-宁波,其他则为杭州-嘉兴、杭州-宁波、杭州-绍兴等联系,整体形成了“V 型”网络结构,上海、南京、杭州为“V 型”的 3 个顶点。此时,除上海外,杭州、南京等均为长三角地区重要核心节点。这一时期,上海、南京、杭州作为沿海地区经济、文

化和科学技术发达的中心城市，利用其综合优势对外辐射，发展成为城市群核心节点。宁波作为沿海开放城市，利用政策、区位优势，发展外向型经济，在改革开放中发展壮大。苏州、无锡、常州等城市在这一时期，以乡镇企业发展较为突出，更多以内生性经济为主。

2001 年长三角地区城市经济网络联系程度明显提高，上海的核心节点地位进一步凸显，其对苏州、南京、杭州、宁波的投资联系均位于第一梯度。此外，苏州节点核心地位进一步加强。上海-苏州、上海-南京、上海-杭州、上海-宁波等成为网络联系流第一梯队。这一时期，受到“苏南模式”和上海辐射影响的苏州，在区位、交通和经济等方面表现突出，节点加权重于南京。宁波是国家计划单列市，且具有天然良港优势，节点加权重度保持较高。

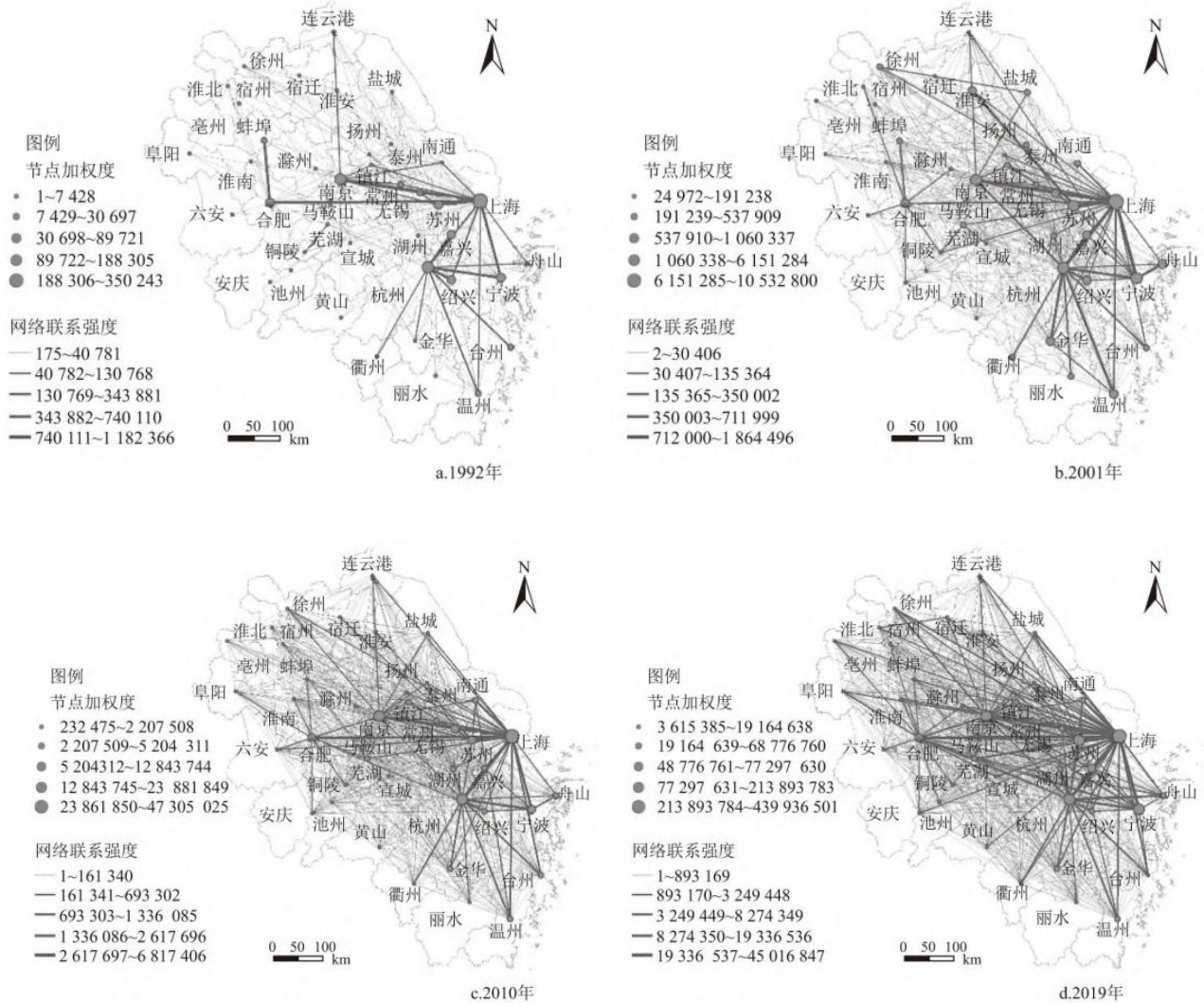


图 4 1992~2019 年长三角地区城市经济网络的空间联系流

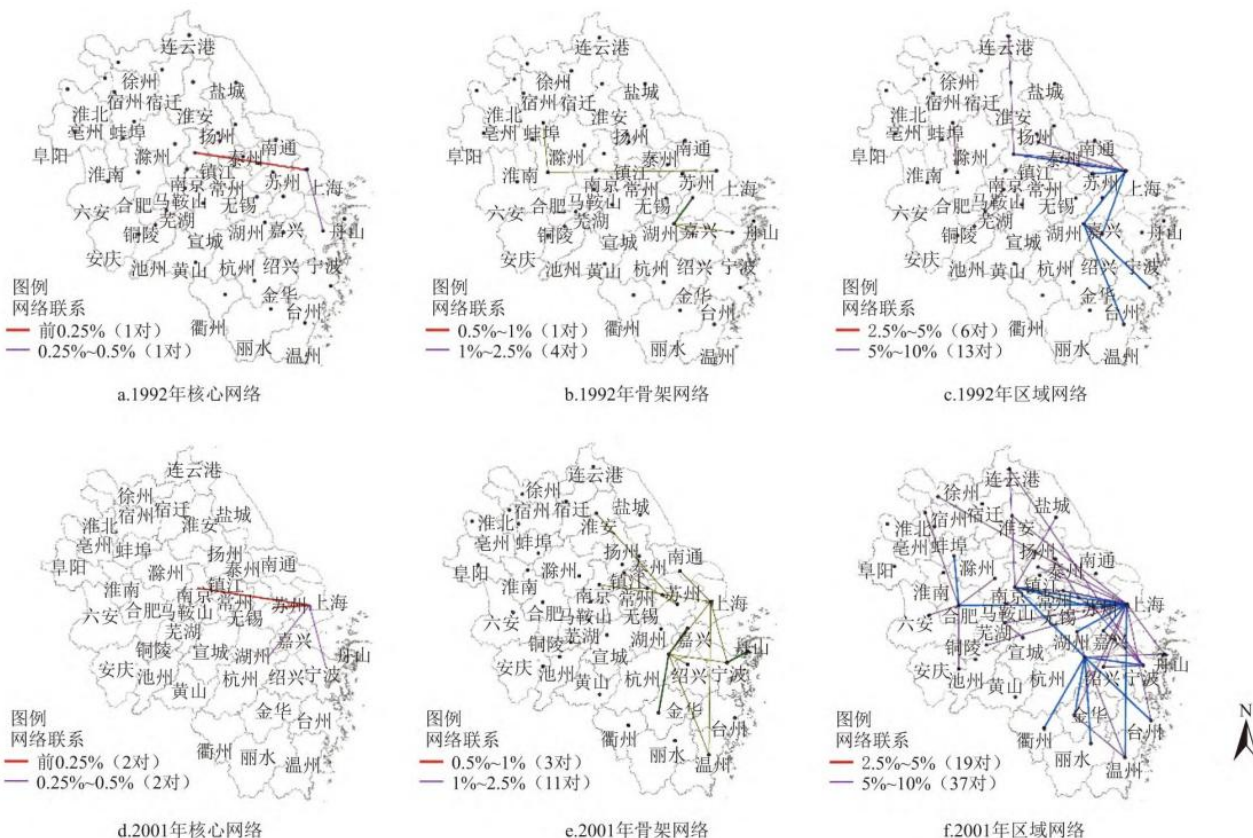
Fig. 4 Spatial connection flows of urban economic networks in Yangtze River Delta from 1992 to 2019

2010 年长三角地区城市经济网络联系程度进一步提升，除上海与杭州、南京、苏州、宁波形成高联系强度外，杭州、南京、苏州、宁波开始向周边地区对外投资辐射。以杭州为例，杭州-嘉兴位于网络联系中第 9 名，杭州-绍兴位于第 12 名，杭州-金华位于第 14 名，表现明显对外辐射态势。随着“长三角经济一体化发展”的提出，长三角地区基础设施建设提速，交通网络基本形成，城市联系更加紧密，特别是杭州与上海、宁波、嘉兴、绍兴等城市联系加强，节点加权重度大幅提升。

到了 2019 年,长三角地区城市经济联系网络体系基本建立,形成上海、杭州、南京、宁波、苏州、合肥等城市相互连接的多边形网络结构。除杭州、宁波、南京、苏州外,上海-合肥之间投资联系加强,合肥核心节点作用逐渐凸显,成为网络重要节点。合肥与宣城联系位于第 29 名,合肥-芜湖位于第 30 名,合肥-南京位于第 35 名,逐步向周边地区辐射。随着长三角区域一体化上升为国家战略,合肥与上海、南京、杭州、宁波等城市联系更为紧密,且对本省宣城、芜湖等城市辐射能力加强,整体节点加权重度得到提升。

3.2 城市经济网络联系的层级结构特征

为进一步探讨长三角地区城市经济网络各节点城市联系强度及特征,本文将 1992~2019 年所有城市联系强度进行排序分析,参照相关阈值研究成果^[62,63,64],考虑到城市经济网络的联系数量,提取前 0.25%, 0.25%~0.5%、0.5%~1%、1%~2.5%、2.5%~5%、5%~10% 共计 6 种主要联系强度的联系对,合并为三类联系网络,从而将复杂联系网络进行简化。借助 GIS 分析软件进行可视化,将三类网络分别界定为核心网络、骨架网络和区域网络(图 5)。



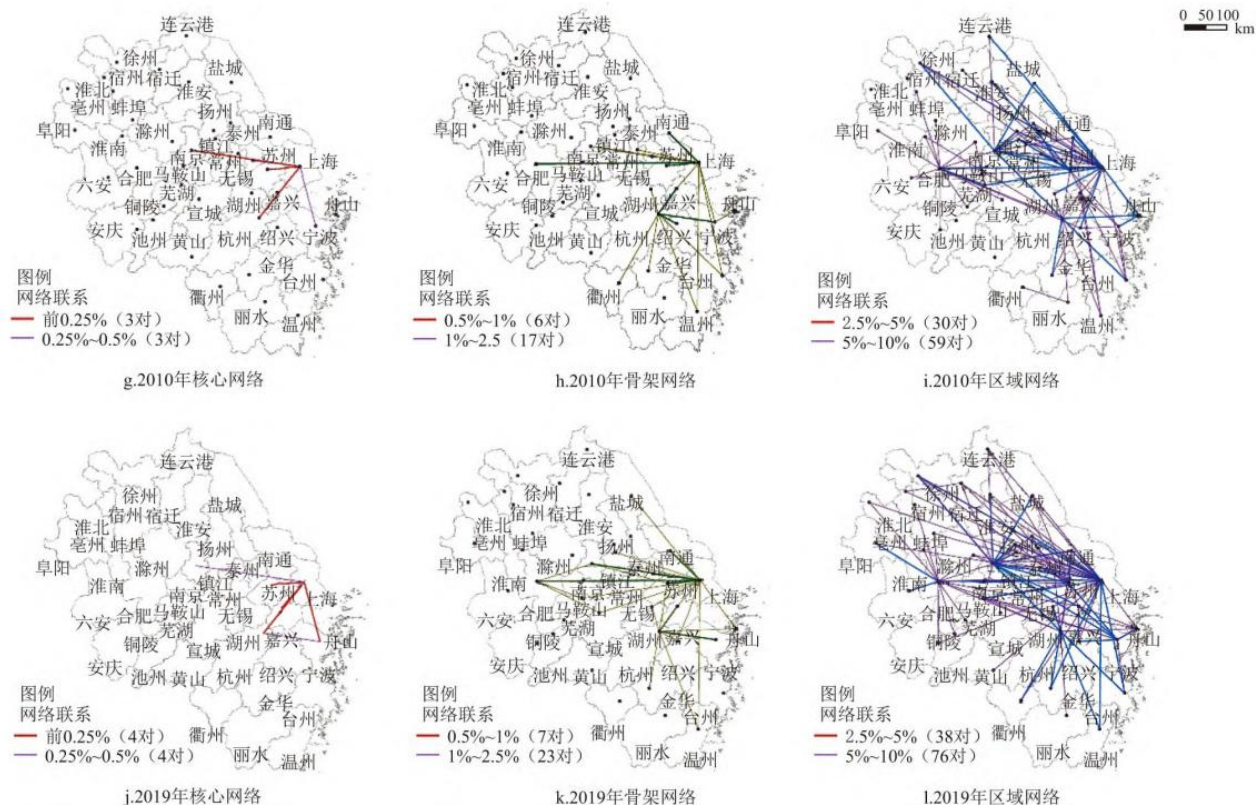


图5 长三角地区不同网络联系的空间演变

Fig. 5 Spatial evolution of urban network connection in Yangtze River Delta

核心网络(图 5a、d、g、j)中前 0.25%、前 0.25%~0.5%联系网络均从 1992 年的 1 对增加到 2019 年 4 对。核心网络涉及的城市从上海、南京、宁波 3 个城市拓展到上海、南京、苏州、嘉兴、杭州和宁波 6 个城市。主要联系从上海-南京、上海-宁波 2 对拓展到上海-杭州、上海-宁波、上海-苏州、上海-嘉兴、上海-南京、杭州-上海、杭州-宁波、宁波-上海 8 对。总体来看,前 0.5%的网络联系流主要发生在网络核心节点之间,尤其上海与南京、苏州、嘉兴、杭州和宁波等城市之间。

第二类网络联系流强度主要集中在前 0.5%~2.5%之间(图 5b、e、h、k)。前 0.5%~1%联系的网络流从 1992 年的 1 对增加到 2019 年的 7 对,涉及节点城市除核心网络 6 个城市以外,增加了无锡、合肥和南通三个城市,主要的网络流包括苏州-上海、上海-无锡、杭州-嘉兴、南京-上海、上海-合肥、宁波-杭州、上海-南通等。前 1%~2.5%的联系流从 1992 年的 4 对增加到 2019 年 23 对,涉及的城市进一步增加了湖州、舟山、绍兴、芜湖、温州、常州、宣城、镇江、金华、芜湖、盐城等,联系流主要表现为与上海、南京、杭州、苏州、宁波等核心城市之间的联系。从空间格局看,前 2.5%的网络从核心城市相互之间的联系逐步向外拓展到核心城市周边相邻城市。从以上海为中心的对外辐射网络演化为上海与南京、杭州、宁波、合肥等城市相互联系,且南京、杭州、合肥等城市对外辐射网络开始显现。

第三类网络联系强度主要集中在 2.5%~10%之间的联系网络(图 5c、f、i、l)。其中,前 2.5%~5%的联系网络、前 5%~10%联系网络分别从 1992 年的 6 对、13 对增加到 2019 年的 38 对、76 对。与核心网络和骨架网络相比,区域网络更为复杂,几乎覆盖了长三角地区所有城市,之前以上海及其周边城市、南京、杭州、合肥等省会城市形成的骨架结构,逐步拓展到上海、南京、合肥、杭州、宁波等城市及其与周边城市相互联系的网络格局。此外,区域网络的连接格局更加均衡,杭州、南京、宁波、合肥等城市与周边城市的网络联系强度并不弱于上海市对扬州、泰州、台州、徐州等城市的投资强度,且网络联系涉及的区域更为广泛,这与骨架网络中仅涉及核心城市及其周边城市的网络格局明显不同。

总体来看，一是上海与江苏、浙江的联系逐步加强，从早期核心网络的 3 个城市拓展到 6 个城市。二是网络联系从以上海为中心、核心城市之间的相互联系逐步向外拓展到核心城市与其周边相邻城市之间的联系，空间邻近性网络联系特征开始显现，特别是骨架网络逐步向安徽拓展，南京、杭州、合肥等核心城市逐步形成对外辐射网络。三是长三角地区城市经济网络参与城市从核心城市逐步扩展至全域，除上海外的南京、杭州、合肥等核心城市形成相对独立的对外辐射网络体系。

3.3 城市等级体系演变特征

虽然长三角地区经济网络体系节点层次结构明显，但仍需采用科学分类方法进行等级体系划分，识别其演变特征。本文基于加权重、度中心性、邻近中心性、介数中心性四个指标，采用 K-means 聚类方法对长三角地区城市节点进行分类。聚类结果表明，城市经济网络节点可以划分为四类。长三角地区城市等级体系已经形成金字塔结构，数量上从塔尖到塔底依次递增，至 2019 年，形成 1 个一级城市，1 个二级城市，5 个三级城市和 34 个四级城市(表 5)。

表 5 长三角城市 K-means 聚类统计

分类	1992 年	2001 年	2010 年	2019 年
第一类	上海市	上海市	上海市	上海市
第二类	南京市、杭州市	杭州市	杭州市、南京市	杭州市
第三类	宁波市、合肥市、绍兴市	宁波市、苏州市、南京市	苏州市、宁波市、无锡市、合肥市	宁波市、南京市、苏州市、合肥市、嘉兴市
第四类	其余市，共 35 个，名单略	其余市，共 36 个，名单略	其余市，共 34 个，名单略	其余市，共 34 个，名单略

从 1992~2019 年一级中心城市均只有一个，即为上海市，表明上海市在长三角地区城市经济网络体系中等级最高，中心地位稳定，对于整个城市群而言影响力始终居于首位。二级中心城市在 1992~2019 年发生波动，杭州市始终为二级中心城市，南京市在 1992 和 2010 年期间为二级中心城市，而 2001 相较于 1992、2019 相较于 2010 年中心地位有所弱化。1992 年南京市加权重、度中心性、邻近中心性、介数中心性等指标均高于杭州市，到 2001 年度中心性、邻近中心性、介数中心性与杭州市相当，而加权重仅为杭州市的 50%左右。2010 年，南京加权重为杭州市的 70%左右，其他中心性指标相当，而到 2019 年加权重指标为杭州市的 60%左右，中心城市影响力低于杭州。这也说明，在不同时期，杭州和南京虽同为省会城市，但杭州在省内区域影响力高于南京市，如杭州-宁波、杭州-嘉兴在不同时期的区域联系高于南京-苏州、南京-无锡。

三级中心城市数量在 1992 和 2001 年期间为 3，2010 和 2019 年分别为 4 和 5，呈增长趋势。其中宁波市始终为三类中心，1992 年期间合肥和绍兴为三级中心城市，2001 则为苏州和南京，到 2010 年新增无锡和合肥两个城市，2019 年又增加嘉兴市。这些城市加权重、度中心性等指标均具有较高水平，为江苏、浙江、安徽等地区区域性中心。从这一点看，以苏州为例，虽然城市 GDP 超过省会城市南京，但是在城市群内部的区域影响力方面不如省会城市南京。第四类城市数量比较多，主要为两类节点城市，一是某一个指标较高，其他指标相对较低，另一种是处于网络的边缘地区，仅与城市群中心城市有直接联系，与其他城市联系较弱。

3.4 城市经济网络演化阶段分析

随着长三角地区的经济格局演变和一体化进程，交通基础设施建设、地区一体化政策效应、产业扩张和转移、技术变革等因素对城市经济网络产生深远影响，长三角地区城市经济网络经历了从发育到逐步网络化的过程。根据上述研究成果，本文将

网络发展演化阶段归纳为初始发育阶段、等级化阶段和网络化阶段，并对不同阶段进行分析。

(1) 第一阶段：初始发育阶段

该阶段长三角城市经济网络结构尚处于初始发育状态，网络体系为单核心结构，二级、三级中心城市数量较少，城市之间网络联系较弱。上海、南京、杭州是网络体系中的三个核心节点城市，仅有苏南地区、浙北地区等少量城市与三个城市有紧密联系，上海市处于绝对核心地位。自改革开放以来，上海市作为长三角地区龙头城市，对外与国际经济相衔接，对内发挥中心城市辐射带动作用，拥有最多的跨城市企业，对其他各个城市表现出紧密的投资联系，与宁杭甬联系最为紧密。南京、杭州得益其沿海地区的区位优势及省会城市地位，与上海共同构成了核心网络结构。这一阶段，省会城市对于省内其他城市的配置作用凸显，成为网络体系中的枢纽，节点层级性逐步凸显。跨省之间的联系更多限于上海与周边城市、上海与省会城市以及省会城市之间的联系，三级中心城市、一般城市之间的联系则较弱，处于相对分散、无序状态。在这一时期，城市经济网络体系虽初见雏形，但城市间的联系并未完全形成，处于初始发育阶段。

(2) 第二阶段：等级化阶段

在长三角地区产业分工细化及城市规模经济发展的作用下，城市间联系日益紧密，二级、三级中心城市与其他城市联系加强，各城市之间职能分工开始形成，城市等级体系逐步显现。得益于区域经济的发展和综合交通网络的改善，知识和技术向外溢出，企业总部通常聚集在高等级城市，而对外投资和分支结构则流向等级较低的城市，网络联系进入快速发展时期。杭州、南京、宁波、苏州、无锡等城市除加强与上海市联系外，也与邻近城市联系强度增大，在区域中的地位进一步凸显，辐射范围开始向更大空间尺度拓展，节点间的区域等级差异扩大。二级中心城市之间、二级中心城市与三级中心城市之间功能联系增强，与三级中心城市紧密联系的一般城市数量也开始增多。安徽省的合肥、芜湖等城市进入长三角地区主要联系网络，参与区域合作与竞争，改变了安徽省城市的区域地位。在这一时期，网络体系处于快速发展阶段，城市间联系强度增大，各级城市的等级地位得到巩固，一级中心城市在网络体系中发挥枢纽作用，二级、三级中心城市发挥次枢纽作用，总体空间结构呈现等级网络状态，层级特征明显。

(3) 第三阶段：网络化阶段

该阶段长三角地区大城市受限于生态环境、土地资源、人力成本等约束，产业不断外溢，对腹地形成溢出效应，边缘城市的发展速度快于中心城市；而随着高铁、跨江大桥等基础设施的建设完善及产业的转型升级，城市之间各项联系成本大幅降低，产业逐渐从等级高的城市向等级较低的城市转移，非中心城市要素集聚与辐射能力增强，除原有行政等级垂直联系外，非中心城市之间水平联系日益紧密。城市之间的竞争和合作机制得到充分体现，城市经济网络不断优化和完善，二级中心城市、三级中心城市开始向边缘城市建立相对独立的网络，长三角地区城市等级化网络开始向网络化阶段发展。这一阶段，长三角地区中心城市的劳动密集型产业开始向周边转移，部分加工制造行业向外围地区迁移，越来越多的城市纳入到核心网络体系，城市之间垂直联系和水平联系交织发展，南京、杭州等城市与周边城市联系进一步加强，形成相对独立的辐射网络。合肥市除了与其他核心城市联系紧密外，还形成与周边马鞍山、芜湖等城市的稳定联系，纵向一体化、横向一体化规模水平大幅提升。在此背景下，随着一体化政策的完善，推动了城市间经济一体化发展，更多的城市加入了长三角地区城市经济网络体系中，城市规模等级开始逐步缩小，逐步走向网络化阶段。

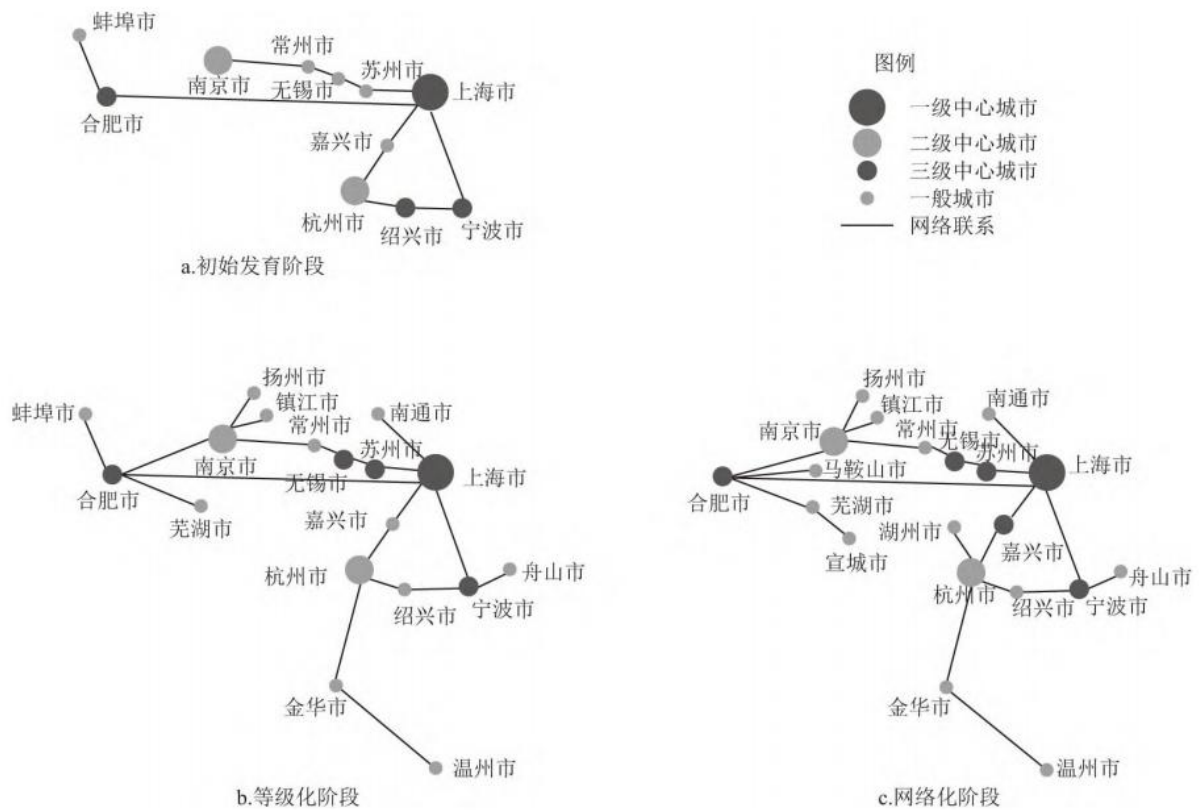


图 6 长三角地区城市经济网络演化阶段示意

Fig. 6 Schematic diagram of evolution stage of urban economic network in Yangtze River Delta

4 结论与讨论

城市群是区域工业化和城镇化发展到高级阶段的产物，区域内人口、技术及资金等要素高度聚集，成为新型城镇化空间主体。在长三角区域一体化推进的背景下，本文研究区域城市之间经济网络关系，尤其从企业异地投资视角分析城市联系及网络特征，体现了学术研究的时代性及应用价值。本文以企业异地投资作为城市经济网络表征对象，以长三角地区作为实证案例，借助复杂网络、K-means 聚类等方法，分析长三角地区城市经济网络整体特征演变，深入刻画长三角地区城市经济网络空间组织结构演化，尝试总结自 20 世纪 90 年代以来长三角地区城市经济网络演化阶段，主要结论如下：

(1) 长三角地区城市经济网络联系在 1992~2019 年期间大幅提升，城市之间网络化体系逐步形成。随着城市间经济联系不断加强，网络中城市节点重要性和影响力存在离散和不均衡，但是差异程度在不断缩小。城市经济网络表现出“小世界”特性和无标度特性，“小世界”特性逐渐显著，无标度特性逐渐弱化。

(2) 1992~2019 年长三角地区城市联系从早期的上海、南京、杭州组成的“V 型”结构，转向上海、杭州、南京、宁波、苏州、合肥等城市相互连接的多边形网络结构，上海与江苏、浙江的联系逐步加强。城市联系从以上海为中心、核心城市之间的相互联系逐步向外拓展到核心城市与其周边相邻城市之间的联系，空间邻近性网络联系特征开始显现。城市经济网络体系中参与城市从核心城市逐步扩展至全域，南京、杭州、合肥等核心城市形成相对独立的对外辐射网络体系。

(3) 长三角地区城市等级体系已经形成金字塔结构，以上海市为核心城市地位最为突出；杭州、南京影响力次之；宁波、合肥、绍兴、苏州、无锡、嘉兴等城市在长三角城市经济网络中影响力再次之。

(4)受产业分工细化、城市规模经济发展、产业溢出效应、基础设施建设完善及产业转型升级等因素综合影响,长三角城市经济网络从初始发育阶段、等级化阶段逐步走向网络化阶段。

本文探究长三角地区城市经济网络时空演化特征,在研究数据覆盖面、城市联系数据代表性、研究时间段等方面进行了延伸和拓展,围绕城市经济网络整体特征演变、空间组织结构演化、演化阶段总结等方面取得了一定进展,但仍存在一些不足:(1)选择企业异地投资代表城市联系强度难免存在一定的局限性,需要与城市间人流、信息流、物流等联系进行交叉验证;(2)制造业、服务业等不同行业表征的城市经济网络联系存在差异性,需要进一步分析,总结不同产业联系的网络特征;(3)文章聚焦不同时间段长三角地区城市经济网络演化特征,但对其背后的经济、文化、技术变革、行政区划等影响因素分析仍显不足,需进一步对城市经济网络演化背后的驱动机制进行探究。

企业分支机构选择、异地投资等是企业基于市场规律作出的理性选择,城市群内部空间差异更多是企业、人才“用脚投票”造成的,城市与区域规划可根据这种市场特征作出相应的响应。未来,在长三角区域一体化背景下,应该充分发挥上海作为城市群核心城市的作用,加强上海与环沪地区的组织联系,注重基础设施的建设,增强中心城市的区域服务能级,最大限度发挥中心城市“借用规模”效应,共同打造科技创新共同体。其次,明确南京、杭州的区域带动作用,保持并优化城市网络联系格局,发挥城市网络中关键节点的中介作用。三是明确苏州、无锡、宁波、合肥、嘉兴等城市在长三角地区中承担的功能差异,围绕都市圈和同城化建设,提升都市圈城市间联系强度,优化长三角地区网络体系。

参考文献

- [1] TAYLOR P J,HOYLER M,VERBRUGGEN R.External urban relational process:Introducing central flow theory to complement central place theory[J].Urban Studies,2010,47(13):2803-2818.
- [2] CASTELLS M.Globalisation,networking,urbanisation:Reflections on the spatial dynamics of the information age[J].Urban Studies,2010,47(13):2737-2745.
- [3] 王钊,杨山,龚富华,等.基于城市流空间的城市群变形结构识别——以长江三角洲城市群为例[J].地理科学,2017,37(9):1337-1344.WANG Z,YANG S,GONG F H,et al. Identification of urban agglomerations deformation structure based on urban-flow space:A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration[J].Scientia Geographica Sinica,2017,37(9):1337-1344.
- [4] TAYLOR P J,CATALANO G,WALKER D R F.Measurement of the world city network[J].Urban Studies,2002,39(13):2367-2376.
- [5] TAYLOR P J.Urban economics in thrall to christaller:A misguided search for city hierarchies in external urban relations[J].Environment and Planning A:Economy and Space,2009,41(11):2550-2555.
- [6] ZHEN F,TANG J,WANG X.How does castells' s the rise of the network society contribute to research in human geography?A citation content and context analysis[J].The Professional Geographer,2020,72(1):96-108.
- [7] 赵渺希,黎智枫,钟烨,等.中国城市群多中心网络的拓扑结构[J].地理科学进展,2016,35(3):376-388.ZHAO M X,LI Z F,ZHONG Y,et al.Polycentric network topology of urban agglomerations in China[J].Progress in Geography,2016,35(3):376-388.

[8] PFLIEGER G, ROZENBLAT C. Introduction. Urban networks and network theory: The city as the connector of multiple networks[J]. Urban Studies, 2010, 47(13):2723-2735.

[9] 陈维肖, 刘玮辰, 段学军. 基于“流空间”视角的铁路客运空间组织分析——以长三角城市群为例[J]. 地理研究, 2020, 39(10):2330-2344. CHEN W X, LIU W C, DUAN X J. Spatial organization evolution of railway passenger transportation in the perspective of “space of flow”: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Geographical Research, 2020, 39(10):2330-2344.

[10] 叶磊, 段学军, 吴威. 基于交通信息流的长三角地区网络空间结构及其效率研究[J]. 地理研究, 2016, 35(5):992-1002. YE L, DUAN X J, WU W. Spatial structure and efficiency of the urban network within the Yangtze River Delta based on traffic and information flow[J]. Geographical Research, 2016, 35(5):992-1002.

[11] 潘坤友, 曹有挥, 刘可文, 等. 长江三角洲集装箱班轮网络空间格局及其演化[J]. 地理科学, 2017, 37(5):682-690. PAN K Y, CAO Y H, LIU K W, et al. Evolution and spatial structure of container liner network in the Yangtze River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(5):682-690.

[12] 孙阳, 姚士谋, 张落成. 长三角城市群“空间流”层级功能结构——基于高铁客运数据的分析[J]. 地理科学进展, 2016, 35(11):1381-1387. SUN Y, YAO S M, ZHANG L C. Functional structure of spatial flow in the Yangtze River Delta: Analysis of passenger based data for the high speed railway[J]. Progress in Geography, 2016, 35(11):1381-1387.

[13] 刘望保, 石恩名. 基于 ICT 的中国城市间人口日常流动空间格局——以百度迁徙为例[J]. 地理学报, 2016, 71(10):1667-1679. LIU W B, SHI E M. Spatial pattern of population daily flow among cities based on ICT: A case study of “Baidu Migration” [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(10):1667-1679.

[14] 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[J]. 地理学报, 2012, 67(8):1031-1043. ZHEN F, WANG B, CHEN Y X. China's city network characteristics based on social network space: An empirical analysis of sina micro-blog[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(8):1031-1043.

[15] 文超, 詹庆明, 刘达, 等. 基于有向转变中心性与控制力的长三角城市网络空间结构分析[J]. 地理科学, 2021, 41(6):971-979. WEN C, ZHAN Q M, LIU D, et al. Urban network structure analysis of the Yangtze River Delta based on directed alternative centrality and power[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(6):971-979.

[16] 唐锦玥, 张维阳, 王逸飞. 长三角城际日常人口移动网络的格局与影响机制[J]. 地理研究, 2020, 39(5):1166-1181. TANG J Y, ZHANG W Y, WANG Y F. The pattern and influencing factors of daily population movement network in the Yangtze River Delta[J]. Geographical Research, 2020, 39(5):1166-1181.

[17] FANG C, YU X, ZHANG X, et al. Big data analysis on the spatial networks of urban agglomeration[J]. Cities, 2020, 102:102735.

[18] ZHANG W, FANG C, ZHOU L, et al. Measuring megaregional structure in the Pearl River Delta by mobile phone signaling data: A complex network approach[J]. Cities, 2020, 104:102809.

[19] PAN J, LAI J. Spatial pattern of population mobility among cities in China: Case study of the National Day

plus Mid-Autumn Festival based on Tencent migration data[J].Cities,2019,94:55-69.

[20] ZHANG W,CHONG Z,LI X,et al.Spatial patterns and determinant factors of population flow networks in China:Analysis on Tencent Location Big Data[J].Cities,2020,99:102640.

[21] 黄晓东,马海涛,苗长虹.基于创新企业的中国城市网络联系特征[J].地理学报,2021,76(4):835-852. HUANG X D,MA H T,MIAO C H.Connectivity characteristics for city networks in China based on innovative enterprises[J].Acta Geographica Sinica,2021,76(4):835-852.

[22] 周灿,曾刚,宓泽锋,等.区域创新网络模式研究——以长三角城市群为例[J].地理科学进展,2017,36(7):795-805. ZHOU C,ZENG G,MI Z F,et al.The study of regional innovation network patterns:Evidence from the Yangtze River Delta Urban Agglomeration[J].Progress in Geography,2017,36(7):795-805.

[23] 马双,曾刚.网络视角下中国十大城市群区域创新模式研究[J].地理科学,2019,39(6):905-911. MA S,ZENG G. Regional innovation models of China's ten major urban agglomerations from the perspective of network[J].Scientia Geographica Sinica,2019,39(6):905-911.

[24] 马海涛,黄晓东,李迎成.粤港澳大湾区城市群知识多中心的演化过程与机理[J].地理学报,2018,73(12):2297-2314. MA H T,HUANG X D,LI Y C. The evolution and mechanisms of megalopolitan knowledge polycentricity of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J].Acta Geographica Sinica,2018,73(12):2297-2314.

[25] 刘承良,管明明.基于专利转移网络视角的长三角城市群城际技术流动的时空演化[J].地理研究,2018,37(5):981-994. LIU C L,GUAN M M. Spatio-temporal evolution of interurban technological flow network in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration:From the perspective of patent transaction network[J].Geographical Research,2018,37(5):981-994.

[26] 王聪,曹有挥.生产性服务业视角下城市网络的演化模式与机制研究——以长江三角洲为例[J].地理科学,2019,39(2):285-293. WANG C,CAO Y H. The evolution mode and mechanism of urban network from the perspective of producer services industry:A case of the Yangtze River Delta[J].Scientia Geographica Sinica,2019,39(2):285-293.

[27] 刘可文,袁丰,潘坤友.长江三角洲不同所有制企业空间组织网络演化分析[J].地理科学,2017,37(5):651-660. LIU K W,YUAN F,PAN K Y. Evolution analysis of different ownership enterprises spatial organization network in the Yangtze River Delta[J].Scientia Geographica Sinica,2017,37(5):651-660.

[28] LI D,WEI Y D,WANG T.Spatial and temporal evolution of urban innovation network in China[J].Habitat International,2015,49:484-496.

[29] 杨志民,化祥雨,叶娅芬,等.金融空间联系及K-means聚类中心等级识别研究——以长三角为例[J].地理科学,2015,35(2):144-150. YANG Z M,HUA X Y,YE Y F,et al. Spatial combination of finance and center level identify based on K-means clustering:A case study of the Changjiang River delta[J].Scientia Geographica Sinica,2015,35(2):144-150.

[30] 钟业喜,冯兴华,文玉钊.长江经济带经济网络结构演变及其驱动机制研究[J].地理科学,2016,36(1):10-19. ZHONG Y X,FENG X H,WEN Y Z. The evolvement and driving mechanism of economic network structure in the Changjiang River economic

zone[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(1):10-19.

[31] 李苑君, 吴旗韬, 张玉玲, 等. 中国三大城市群电子商务快递物流网络空间结构及其形成机制研究[J]. *地理科学*, 2021, 41(8):1398-1408. LI Y J, WU Q T, ZHANG Y L, et al. Spatial structure and formation mechanism of E-commerce express logistics network in the three major urban agglomerations of China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(8):1398-1408.

[32] 蒋自然, 曹卫东, 王成金, 等. 基于势能联系模型的区域潜在经济关系研究——长三角 26 个城市的实证分析[J]. *地理科学*, 2020, 40(12):1967-1977. Jiang Z R, Cao W D, Wang C J et al. Regional potential economic relations based on the potential energy connection model: Empirical analysis of 26 cities in Yangtze River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(12):1967-1977.

[33] 冷炳荣, 杨永春, 李英杰, 等. 中国城市经济网络结构空间特征及其复杂性分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(2):199-211. LENG B R, YANG Y C, LI Y J, et al. Spatial characteristics and complex analysis: A perspective from basic activities of urban networks in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2):199-211.

[34] 段德忠, 谌颖, 杜德斌. 技术转移视角下中国三大城市群区域一体化发展研究[J]. *地理科学*, 2019, 39(10):1581-1591. DUAN D Z, CHEN Y, DU D B. Regional integration process of China's three major urban agglomerations from the perspective of technology transfer[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(10):1581-1591.

[35] 孙阳, 姚士谋, 张落成. 中国沿海三大城市群城市空间网络拓展分析——以综合交通信息网络为例[J]. *地理科学*, 2018, 38(6):827-837. SUN Y, YAO S M, ZHANG L C. Spatial expansion of urban network for the three coastal agglomerations of China: A study based on integrated traffic information network[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(6):827-837.

[36] 王录仓, 刘海洋, 刘清. 基于腾讯迁徙大数据的中国城市网络研究[J]. *地理学报*, 2021, 76(4):853-869. WANG L C, LIU H Y, LIU Q. China's city network based on Tencent's migration big data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4):853-869.

[37] 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, 34(9):1051-1059. LYU G Q, ZENG G, GUO J L. Innovation network system of industry-university-research institute of equipment manufacturing industry in the Changjiang River delta[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(9):1051-1059.

[38] 卢淑莹, 陶卓民, 李涛, 等. 泛长三角区域入境游客空间格局与意象研究[J]. *地理研究*, 2021, 40(1):263-278. LU S Y, TAO Z M, LI T, et al. Study on the spatial pattern and image of inbound tourists in the Pan-Yangtze River Delta[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(1):263-278.

[39] HUANG Y, HONG T, MA T. Urban network externalities, agglomeration economies and urban economic growth[J]. *Cities*, 2020, 107:102882.

[40] 王珏, 陈雯, 袁丰. 基于社会网络分析的长三角地区人口迁移及演化[J]. *地理研究*, 2014, 33(2):385-400. WANG J, CHEN W, YUAN F. Human mobility and evolution based on social network: An empirical analysis of Yangtze River Delta[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(2):385-400.

[41] 梁双波, 曹有挥, 吴威. 长江三角洲地区物流供应链时空演化及其影响因素——基于国际货代企业数据的分析[J]. *地*

理研究, 2017, 36(11):2156-2170. LIANG S B, CAO Y H, WU W. Spatial-temporal evolution and influencing factors of Logistics Supply Chain in the Yangtze River Delta:Based on international freight forwarding enterprises data[J]. Geographical Research, 2017, 36(11):2156-2170.

[42] 李哲睿, 甄峰, 傅行行. 基于企业股权关联的城市网络研究——以长三角地区为例[J]. 地理科学, 2019, 39(11):1763-1770. LI Z R, ZHEN F, FU X X. Mapping urban network through inter-firm investment relationship:A case study of Yangtze River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(11):1763-1770.

[43] 王成, 王茂军, 柴簪. 城市网络地位与网络权力的关系——以中国汽车零部件交易链接网络为例[J]. 地理学报, 2015, 70(12):1953-1972. WANG C, WANG M J, CHAI Q. The relationship between centrality and power in the city network[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(12):1953-1972.

[44] ZHAO M, DERUDDER B, HUANG J. Examining the transition processes in the Pearl River Delta polycentric mega-city region through the lens of corporate networks[J]. Cities, 2017, 60:147-155.

[45] CHONG Z, PAN S. Understanding the structure and determinants of city network through intra-firm service relationships:The case of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Cities, 2020, 103:102738.

[46] TAYLOR P J. Specification of the world city network[J]. Geographical Analysis, 2010, 33(2):181-194.

[47] TAYLOR P, DERUDDER B. World City Network:A global urban analysis[M]. :Routledge, 2015.

[48] 季菲菲, 陈雯, 魏也华, 等. 长三角一体化下的金融流动格局变动及驱动机理——基于上市企业金融交易数据的分析[J]. 地理学报, 2014, 69(6):823-837. JI F F, CHEN W, WEI Y H, et al. Changing financial flow patterns and driving mechanisms of financial flows under the integration of the Yangtze River Delta:An analysis of the financial transaction data of listed companies[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(6):823-837.

[49] 赵金丽, 盛彦文, 张璐璐, 等. 基于细分行业的中国城市群金融网络演化[J]. 地理学报, 2019, 74(4):723-736. ZHAO J L, SHENG Y W, ZHANG L L, et al. Evolution of urban agglomeration financial network in China based on subdivision industry[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(4):723-736.

[50] 叶雅玲, 杨博飞, 何紫云, 等. 中国城市网络空间结构研究——基于 A 股上市医药公司网络[J]. 地理科学进展, 2018, 37(8):1096-1105. YE Y L, YANG B F, HE Z Y, et al. Spatial structure of urban network based on Chinese A-share listed medicine enterprise network[J]. Progress in Geography, 2018, 37(8):1096-1105.

[51] FANG C, YU D. Urban agglomeration:An evolving concept of an emerging phenomenon[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 162:126-136.

[52] SCOTT A J. Global city-regions:trends, theory, policy[M]. Cambridge, UK:Oxford University Press, 2001.

[53] 孙伟, 闫东升, 吴加伟. 城市群范围界定方法研究——以长江三角洲城市群为例[J]. 地理研究, 2018, 37(10):1957-1970. SUN W, YAN D S, WU J W. On the urban agglomeration scope definition method:A case study of the Yangtze River Delta[J]. Geographical Research, 2018, 37(10):1957-1970.

-
- [54] WANG L, DUAN X. High-speed rail network development and winner and loser cities in megaregions: The case study of Yangtze River Delta, China[J]. *Cities*, 2018, 83: 71–82.
- [55] WANG S, WANG J, LIU X. How do urban spatial structures evolve in the high-speed rail era? Case study of Yangtze River Delta, China[J]. *Habitat International*, 2019, 93: 102051.
- [56] 张虎, 周迪. 城市群金融等别视角下的长三角金融资源流动研究——以城市商业银行异地扩张为例[J]. *地理研究*, 2016, 35(9): 1740–1752. ZHANG H, ZHOU D. Financial resource flows in Yangtze River Delta from the perspective of financial gradation city in urban agglomerations: A case study of city commercial banks' expansion[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(9): 1740–1752.
- [57] 谢家艳, 曾刚. 长三角地区复杂知识的空间特征及地方知识库类型[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(12): 1968–1976. XIE J Y, ZENG G. Geography of complex knowledge and types of local knowledge pool in the Yangtze River Delta[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(12): 1968–1976.
- [58] CUI C, WU X, LIU L, et al. The spatial-temporal dynamics of daily intercity mobility in the Yangtze River Delta: An analysis using big data[J]. *Habitat International*, 2020, 106: 102174.
- [59] 焦敬娟, 王姣娥. 海航航空网络空间复杂性及演化研究[J]. *地理研究*, 2014, 33(5): 926–936. JIAO J J, WANG J E. Spatial structure and evolution of Hainan Airlines Network: An analysis of complex network[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(5): 926–936.
- [60] 郭建科, 何瑶, 侯雅洁. 中国沿海集装箱港口航运网络空间联系及区域差异[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(11): 1499–1509. GUO J K, HE Y, HOU Y J. Spatial connection and regional difference of the coastal container port shipping network of China[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(11): 1499–1509.
- [61] 甄茂成, 张景秋, 杨广林. 基于复杂网络的商业银行网点布局特征——以北京市中国银行为例[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(12): 1732–1741. ZHEN M C, ZHANG J Q, YANG G L. Characteristics of commercial bank branch networks based on complex networks theory: A case study on Bank of China in Beijing[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(12): 1732–1741.
- [62] 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. WU K, FANG C L, ZHAO M X. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks[J]. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 711–728.
- [63] 宗会明, 吕瑞辉. 基于物流企业数据的 2007–2017 年中国城市网络空间特征及演化[J]. *地理科学*, 2020, 40(5): 760–767. ZONG H M, LYU R H. The spatial characteristics and evolution of Chinese urban network based on logistics enterprise data in 2007–2017[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 760–767.
- [64] 叶士琳, 曹有挥, 王佳韡, 等. 基于企业视角的中国集装箱运输组织网络[J]. *地理学报*, 2017, 72(8): 1520–1530. YE S L, CAO Y H, WANG J W, et al. Organization network of Chinese container transportation from the perspective of enterprises[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1520–1530.