

# 长三角城市群功能性网络结构

## 及其一体化程度研究

唐承辉 豆建民<sup>1</sup>

(上海财经大学 城市与区域科学学院/财经研究所, 上海 200433)

**【摘要】**基于企业联系、交通客流、科技与信息联系等多元关系型大数据,论文运用空间分析、社会网络分析以及位序规模法则等方法揭示了长三角城市群空间联系特征与结构,并测度其区域一体化程度。研究表明:①在不同类型网络,长三角城市群形成了异质性的空间结构,并呈现出多中心与网络化发展趋势。②整体联系中,长三角城市群企业与交通网络的连通性较好,但科技与信息网络密度较低并制约城市群高质量一体化发展。③个体网络中,长三角城市连通度具有幂律分布特征,但规模等级结构与理想状态仍存在差距,亟待打破城市间行政壁垒以推动生产要素自由流动。

**【关键词】**城市网络 区域一体化 空间联系 大数据

**【中图分类号】**:F061.5 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1006—2912(2020)12—0079—10

随着全球化和信息化的快速发展,生产分散化和管理集中化导致国家间竞争逐渐转变为核心城市及其依托城市群间的竞争<sup>[1]</sup>,城市群成为了国家实现经济增长和参与全球竞争基本的空间载体。早在1915年,Geddes提出了城市聚集区(Conurbation)的概念并对城市群体空间进行了研究。<sup>[2]</sup>然而,直到Gottmann明确提出大都市带(megalopolis)概念与理论,才开启现代意义的城市群研究,并引起了学者们和政府的广泛关注。<sup>[3]</sup>作为高度同城化与一体化的地区,城市群本质是相互联系的城市区域,包括核心城市及其邻近地区<sup>[4]</sup>。近年来,中国政府批复了粤港澳大湾区、长江三角洲以及成渝等多个城市群发展规划,甚至将长江三角洲(以下简称长三角)区域一体化上升为国家级发展战略。在这个背景下,以城市群主导的区域一体化不仅成为中国城市空间发展的新趋势,也成为了提高区域经济竞争力并实现其协调发展的目标<sup>[5]</sup>,吸引经济学与地理学等多学科研究者们的密切关注<sup>[6,7]</sup>。

区域一体化作为一个多尺度与多维度的概念,不仅指消除地区间贸易壁垒与差别待遇的过程<sup>[8]</sup>,也是贸易壁垒消除后的发展状态<sup>[9]</sup>。目前,学者们对区域一体化的理论内涵<sup>[10]</sup>、发展阶段<sup>[11]</sup>与驱动机理<sup>[12,13]</sup>等进行了较充分的研究,如从产业、市场以及基础设施等多个维度对区域一体化内涵进行阐释<sup>[14]</sup>。然而,现有研究对于区域一体化测度的相对不足,并主要通过指标体系、政策检验以及模型等方法进行分析<sup>[15]</sup>。具体而言,学者们一方面基于市场价格指数、产业结构相似度以及贸易流量等单一指标对区域一体化程度进行衡量<sup>[16,17]</sup>,另一方面也从空间、人口以及产业等维度构建综合指标体系<sup>[18]</sup>,分析城市群一体化程度发展与演变。政策检验法则通过对欧美等国家间金融与贸易等政策开放与关联程度,分析国际间一体化程度。<sup>[19]</sup>此外,部分学者利用引力模型、耦合协调度模型以及网络社团划分等测度城市间关系并评估城市群一体化程度<sup>[20,21]</sup>。近年来,随着信息技术的发展和网络社会的崛起,学者们逐渐利用资金流<sup>[22]</sup>、客运流<sup>[23]</sup>、信息流<sup>[24]</sup>以及技术流<sup>[25]</sup>等互联网大数据测度地域间要素流动,更精确分

<sup>1</sup>**作者简介:**唐承辉(1993-),男,江西赣州人,上海财经大学博士研究生,主要从事区域经济与城市地理研究;

豆建民(1966-),男,河南安阳人,上海财经大学教授,博士生导师,主要从事区域经济理论与政策,区域经济发展战略研究。

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目“区域一体化视角下污染产业空间分布的边界效应与区域协调对策研究”(71974120);上海市哲学社会科学规划项目“长三角一体化对污染产业区域分布的影响研究”(2018BJL005),项目负责人:豆建民。

---

析城市间关系并衡量城市群一体化程度，并为区域发展战略的制定与实施提供科学依据。

作为区域一体化发展的本质，要素流动的方向与强度不仅影响城市群空间形态与功能，而且成为其一体化发展的核心驱动力量。<sup>[26]</sup>基于要素流动而形成的城市网络，成为了分析城市群内部联系并测度其一体化程度的崭新视角与工具<sup>[27]</sup>。然而，由于数据获取困难，目前仍主要通过静态属性数据并构建指标体系对城市群一体化程度进行测度<sup>[28]</sup>，难以精确刻画城市群复杂要素流动。由于受国际贸易等理论影响，学者们对国际间一体化测度较多而对城市群等新型空间组织关注不足<sup>[29]</sup>。部分学者虽利用单一要素流对城市间联系进行分析并衡量城市群一体化程度，但较少探讨多元要素流作用下城市群空间结构特征及其对社会经济发展的影响。鉴于数据的可获取性与典型性，本文主要通过高端生产性服务业(Advanced Producer Service firms，简称 APS)网点数据、铁路客运流数据、专利交易数据以及百度指数等数据表征多维的城市网络，并利用空间分析、社会网络分析以及位序规模法则等多种方法综合测度长三角城市群地区间联系及其结构，定量分析其一体化程度。APS 网点数据主要揭示城市间资金等要素流动，铁路客运流主要反映地区间人员与物质的往来，专利交易数据侧重于表征城市间技术流动，百度指数则体现信息要素流动。相比于以往研究，本文立足于城市群一体化的本质，通过网络爬取技术获取长三角地区多元关系型大数据，并从空间格局、整体与个体等多个层次揭示长三角城市群内部不同要素的流动特征及其网络结构，更客观与全面测度其区域一体化程度并分析驱动机理。

## 一、研究区域、方法与数据

### (一) 研究区域

依据《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》，本文将上海市、浙江省、江苏省以及安徽省(三省一市)中 41 个城市作为研究区域。作为中国经济发展最活跃、开放程度最高以及创新能力最强的区域之一，长三角城市群凭借着独特的区位优势与政策支持引领着中国区域经济发展，并成为了世界第六大城市群。随着《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》的发布，长三角城市群一体化发展上升为国家级战略并获得了新的历史机遇。然而，在发展过程中长三角城市群区域经济发展不平衡与不充分，城市间要素流动仍受到行政壁垒的阻碍，城市群网络化与一体化程度亟待提高。因此，基于多元关系型大数据综合分析长三角城市间功能性联系，不仅有利于把握该城市群资金、物质以及信息等要素流动特征与规律，而且有助于厘清城市群网络结构并测度其区域一体化程度，从而为长三角城市群高质量一体化发展提供参考与借鉴。

### (二) 研究方法

#### 1. 基于企业数据的经济流分析

选取在长三角城市群设有总部与至少两个以上分支结构的银行、证券、保险、会计以及法律五个行业的 100 家 APS 公司，借鉴链锁模型构建网络并计算城市间连通度，以衡量城市群内部经济流<sup>[30]</sup>。鉴于网点数量与规模的影响，首先构建 APS 公司与城市的二模矩阵，并利用以下公式计算公司  $j$  在城市  $i$  的得分  $V_{ij}$ 。然后，将公司与城市的二模矩阵转换为一模矩阵并分别计算城市间连通度  $R_{ab}$  与单一城市连通度  $N_a$ 。为便于比较，将  $R_{ab}$  与  $N_a$  分别取各值与最大值的比值以进行标准化。

$$V_{ij} = \sum_h W_h \cdot n_{ij,h} \quad (h = 2, \dots, 5) \quad (1)$$

公式中， $h$  为公司网点的级别，分为总部、省分公司、市分公司以及普通网点等。若其它分支机构没有明确的级别，则参考相关研究依据服务范围与规模对级别进行确定。 $W_h$  为某一层级分支机构对应的权重值，依次从总部到普通网点赋值 5 到 2 分， $n_{ij,h}$  表示公司  $j$  在城市  $i$  所拥有  $h$  层级网点的数量。

---

公司 j 在城市 a 与城市 b 的连通度  $R_{ab,j}$ :

$$R_{ab,j} = V_{aj} \cdot V_{bj} (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

城市 a 与城市 b 之间的总体连通值  $R_{ab}$ :

$$R_{ab} = \sum_j R_{ab,j} (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

单一城市在网络中的联通度  $N_a$  是它与各城市连通度的总和:

$$N_a = \sum_i R_{ai} (i = 1, 2, \dots, n, i \neq a) \quad (4)$$

## 2. 基于客运数据的交通流分析

作为直接的关系型数据，交通客运流数据丰富且来源真实可靠，从而在城市网络研究获得了广泛应用<sup>[31]</sup>。长三角城市群铁路网络发达，尤其是高速铁路通过“时空压缩”效应提高了地区可达性，并成为了人们跨城出行的主要交通方式。因此，本文选取列车班次数据作为交通客运流的表征。首先，通过网络爬取技术获取长三角各城市列车经停站等信息，并将车站转换为对应的城市以及剔除重复数据。然后，通过排列组合与分类汇总获得城市间列车班次数据。最后，利用 GIS 软件将城市间铁路联系数据以起点(Origin)和终点(Destination)交互连接，从而形成 O-D 联系网络以分析长三角城市群交通网络特征。

## 3. 基于专利交易数据的科技流分析

作为衡量技术知识的重要指标，专利是城市创新能力的综合反映<sup>[32]</sup>。专利转移是需求方和供给方自愿的市场交易行为，反映了城市间技术流动与知识共享，从而成为直接的“技术流”<sup>[33]</sup>。本文基于专利所有权转让的交易数据，衡量长三角城市间科技联系。首先，通过网络爬取技术获取专利信息服务网站收录 2018 年的长三角专利转移数据。其次，通过地理编码识别专利数据的地理空间信息，并基于随机抽取与交叉检验对数据进行清洗与核对，以保证数据的科学性。最后，计算城市间专利转移量及其相互联系强度，并利用 GIS 软件以起点和终点交互连接，以形成科技网络并进行分析。

## 4. 基于百度指数的信息流分析

基于海量网民的搜索数据，百度指数通过统计关键词在百度网页搜索频次的加权和，反映用户关注度对特定事物的信息获取量<sup>[34]</sup>。通过城市对比的方式获取长三角两两城市间用户关注度，并取各值与最大值的比值进行标准化，以反映城市间信息流动。长三角城市群城市间信息联系强度用  $E_{ij}$  表示， $V_{ij}$  表示城市 i 对城市 j 的搜索指数， $V_{ji}$  表示城市 j 对于城市 i 的搜索指数。公式如下：

$$E_{ij} = V_{ij} * V_{ji} \quad (5)$$

## 5. 社会网络分析

运用 UCINET 软件对长三角城市群多维网络进行拓扑化，并测度网络密度、平均最短路径以及聚集系数等指标，从而分析整体网络的特征并衡量城市群一体化程度。网络密度指城市间联系的紧密程度，而聚集系数表示城市联系的聚集程度，平均最短路径则表示任意两个节点相互到达所必须经过的路径数量，往往用于测度网络中节点间通达效率。在整体网络结构，依据核心区与边缘区联系程度的巨大差异，核心边缘模型可用于识别处于核心与边缘位置的节点及其影响力，从而为城市群一体化程度测度提供依据。此外，度数中心度表示与某节点直接相连其它节点的个数总和，其数值越大表示某节点的联系能力越强，从而表征节点在网络的影响力及其融入城市群一体化的程度。节点度数中心度依据公式(6)进行计算，其中  $i$  表示与其他节点的关联数； $g$  为节点的可能连接数。

$$C_{D(N)} = \frac{X_{ij=1}^g (x \neq j)}{g - 1} \quad (6)$$

## 6. 位序规模分析

在经济一体化的区域，生产要素自由流动并追求效益最大化，并使得城市规模的变化服从 Zipf 指数分布<sup>[35]</sup>。为分析长三角城市群城市体系分布特征，以总体连通度表征城市规模，并利用 Zipf 法则对城市规模及其位序关系进行测度，对城市群一体化测度进行验证。公式如下：

$$P_i = P_1 R_i^{-q} \quad (7)$$

$$\lg P_i = \lg P_1 - q \lg R_i \quad (R_i = 1, 2, \dots, 41) \quad (8)$$

$P_i$  为  $i$  城市的连通度  $N_i$ ， $P_1$  为首位城市的连通度， $R_i$  为城市  $i$  在所有城市连通度的位序， $q$  为 Zipf 指数。若指数等于 1 则表示城市分布相对均衡，城市体系处于协调发展且城市群基本实现一体化。若  $q$  指数大于 1，则城市规模分布较集中，若指数  $q$  小于 1 则城市规模分布较分散，城市群呈现出多中心发展趋势。

### (三) 数据来源

鉴于企业数据的可获取性和分级结构，银行网点数据选取中国工商银行等排名前 20 名全国性银行。保险业则选取中国人寿保险(集团)公司等排名前 20 全国性保险公司。证券公司和法律与会计事务所分别选取 2018 年综合实力前 100 名且长三角城市群各城市有两个以上分支机构的公司，共计 100 家 APS 公司 25437 个网点数据。APS 公司网点数据主要来源于各个公司官方网站，分别查询研究区范围总部与分支机构地址与级别等信息。交通客运流数据通过集搜客软件爬取中国 12306—铁路客户服务中心网站([www.12306.cn](http://www.12306.cn))长三角城市群列车所有车站经停信息，并利用极品时刻表进行补充，从而获得列车班次数据 20726 条。专利交易数据来源于 SIPO(国家知识产权局)数据库中的“专利信息服务平台”，并通过数据编码与地理信息匹配识别每条专利信息的空间属性，获得 2018 年长三角城际间专利转移数据 19811 条。信息流数据通过城市对比方式查询百度指数网络界面(<http://index.baidu.com/>)，获取 2018 年长三角两两城市间用户关注度，并取总体搜索指数的平均值作为基础数据。

## 二、空间联系下城市群一体化

作为城市网络的重要表征，多元流数据反映了城市间联系的不同维度，从而为全面认识城市群网络结构及其一体化识别提供了依据。基于企业流、交通流、科技流以及信息流等多元关系型大数据，利用 GIS 软件自然间断点法对长三角城市群空间联系进行分级与可视化表达。

### (一) 单一要素流下城市群网络格局分析

在不同要素流，上海、苏州以及南京等核心城市间普遍存在密切的网络联系，并使城市群呈现出多中心与网络化的发展趋势。然而，长三角城市群的企业网络表现出明显的核心边缘结构，交通流网络则呈现出廊道结构，科技网络具有明显的地域邻近性与轴辐式结构，信息流网络出现较多突破行政边界远距离联系（图1）。

(1) 在经济网络，上海处于网络的核心位置，并与南京、苏州以及杭州等城市间连通度均超过0.5。这些经济发达的城市吸引着众多APS企业集聚，并且相互间形成密切的经济联系，从而成为城市群网络的主干与区域经济发展的影响源。城市群经济网络呈现出明显的核心边缘结构，上海、苏南以及浙北等地区网络联系密切并成为核心区，而其它地区网络联系较低并处于外围区。尤其是安徽亳州、阜阳以及六安等城市虽通过少量的城市联系成为网络中一部分，但处于城市群网络体系的底层且缺乏与其它城市资源流通渠道。

(2) 在交通网络，长三角城市间沿沪宁线、宁杭线以及沪杭线等铁路干线形成多条客流带并大致呈“Z”形的空间格局。尤其是沿沪宁线和宁杭线的分布着南京、无锡、苏州、上海以及杭州等多个城市，相互间铁路往来车次均超过200次，形成较多高等级客运联系并成为交通网络枢纽。尽管金华与丽水经济规模较为有限，但近年来随着金温铁路的改造，这两个城市作为多条铁路干线的中转站点，与温州形成也较高等级的客运联系。经停车次数的巨大差距也反映出城市群网络的等级规模特征，上海拥有着最多经停车次且对外联系能力也最强，南京、杭州、合肥以及温州则成为次一级区域客流集聚中心。此外，合肥、徐州以及温州等城市与上海形成第一与第二等级的跨地域客运联系，反映出长三角城市群交通网络较发达，并达到较高的交通一体化程度。

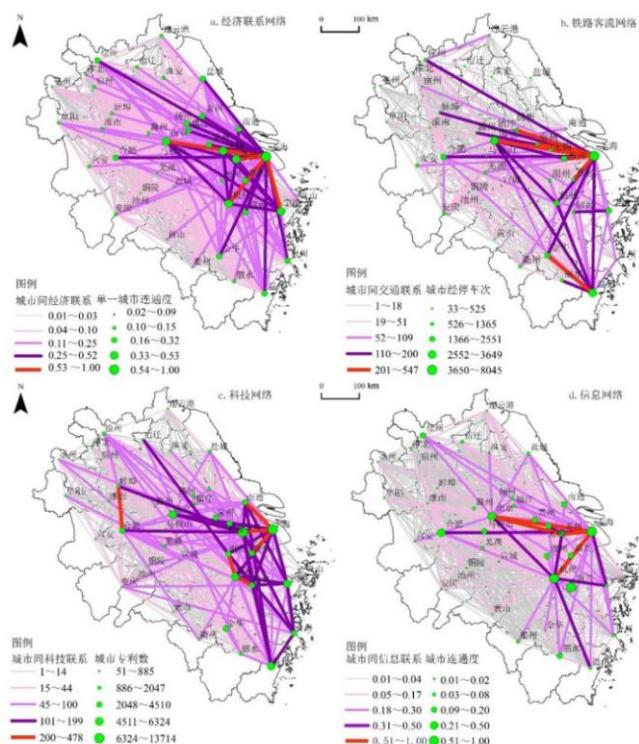


图1 长三角城市群多维城市网络的空间格局

(3) 在科技网络，城市间技术流动以上海等核心城市向邻近地区接触扩散为主，并形成了较明显轴辐式的空间结构。上海与苏州、南通以及嘉兴等邻近城市产生高等级技术联系，杭州与绍兴、湖州等邻近城市互动频繁，合肥与蚌埠等邻近城市联系强度也较高。反映出长三角技术转移以核心城市为轴心，并与邻近地区形成干线网络。长三角城市群技术流动存在空间异质性，

联系密集区主要集中在东部与南部地区，而西部与北部的城市联系数量较少且等级更低。此外，南京对外联系等级虽较低，但联系广度分散并与城市群34个城市形成技术流动，也成为了技术网络重要节点。

(4)在信息网络，上海、南京以及杭州等核心城市间联系密切并成为了信息枢纽，呈现出三角形空间结构。基于良好的互联网设施，上海和杭州等核心城市不仅与周边地区形成密切的信息联系，也和省外多个城市形成了长距离联系，使得城市群信息流动逐渐突破地理距离和行政边界的限制。然而，长三角城市群除了上海、南京与杭州等核心城市形成较密切联系外，其它大部分城市间信息联系等级普遍较低，影响城市群信息一体化。尽管合肥市对外联系能力较好，但与省内其它城市信息联系较分散且等级较低。

## (二)综合要素下城市群网络格局分析

单独要素流是城市间某一方面联系的体现，难以全面反映长三角城市群网络结构及其一体化程度。由于不同类型联系分别表征城市间资金、客流、科技以及信息等要素流动，对于长三角城市群区域经济格局演变与一体化进程均发挥着重要的作用。因此，将不同类型的城市间联系进行标准化，并按照相等权重进行赋值以构建综合联系网络<sup>[36]</sup>，并利用GIS软件进行分级与空间表征(图2)。在综合网络，上海、苏州、南京以及杭州等核心城市间不仅形成高等级的联系，而且成为众多其它城市联系对象。同时，城市间联系密切地区主要集中在上海及其邻近地区，而安徽省与江苏省北部等城市间联系数量较少且等级较低，综合网络呈现“东密西疏”的格局。此外，长三角城市群的综合网络联系特征与结构与企业网络更为接近，也具有一定的核心边缘结构，反映出经济联系是长三角城市群一体化发展的核心驱动力。相比于企业网络，宁波市因位于城市群相对边缘位置，在综合网络与其它城市客运流和科技流较不足，并未与上海等核心城市形成最高等级联系。

在首位联系，上海市联系对象数量最多且联系等级也较高，说明首位城市地位显著并对其它城市产生较明显辐射作用。杭州、南京以及合肥等核心城市分别成为省内的绍兴、镇江以及蚌埠等城市的首位联系对象，说明这些城市也是重要联系枢纽并对邻近地区经济发展产生带动作用。结合首位联系规模，发现长三角城市群网络体系具有等级规模分布特征，上海联系规模最大并成为了城市群集聚中心，南京、杭州以及苏州等成为了省域性集群中心。此外，首位联系弦图与地理网络具有一定的相似性，城市群东部地区联系较密，而西部地区联系较缺乏。

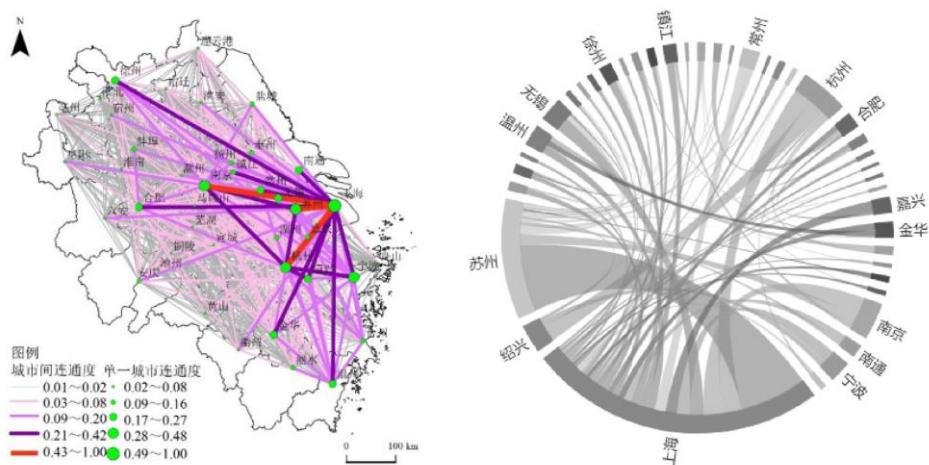


图2 长三角城市群综合联系网络与首位联系图

## 三、社会网络分析下城市群一体化

空间形态分析揭示了长三角城市群空间联系的宏观格局，但缺乏精确认识城市群结构特征与一体化程度。利用 UCINE 软件定量测度长三角城市群多维网络的整体属性指标，并利用核心边缘模型分析结构特征。

### (一) 整体联系强度

在多维网络，长三角城市群整体联系强度存在明显差异且一体化程度有待提高。具体而言，长三角城市群综合网络密度为 0.52，聚集系数是 0.68，说明长三角城市群整体网络关联度仍相对较低。长三角城市间企业和交通网络密度较高，而科技和信息网络密度相对较低，反映出该城市群凭借着发达的市场经济与良好的交通基础设施推动资金与人员等生产要素自由流动，并在交通与经济层面实现较高的城市群一体化程度。然而，由于创新资源和信息基础设施的地区差异，长三角城市群科技与创新资源流动仍受到地理距离等因素限制，导致科技与信息层面的城市群一体化程度相对不足。尤其是科技网络中，长三角城市群网络密度与互惠性等联系指标均较差，反映出城市间技术流动与外溢较有限，亟待构建城市间跨行政区技术转移服务体系，以实现科技资源的优势互补。从平均最短路径看，长三角大部分城市仅需通过 1.6 条线便可相连，建立了较为直接的连接并提高城市网络运行效率。通过综合比较整体联系指标，发现长三角城市群企业间网络平均最短路径最小但聚集系数却较高，说明企业网络节点间通达性与集聚力更良好，并具有更为显著的小世界性特征。

表 1 长三角城市群多维网络的整体属性指标

网络类型	网络密度	标准差	平均最短路径	聚集系数	互惠性
企业网络	0.70	0.46	1.326	0.81	0.72
交通网络	0.65	0.49	1.438	0.70	0.63
科技网络	0.51	0.47	1.597	0.63	0.47
信息网络	0.54	0.48	1.523	0.65	0.51
综合网络	0.52	0.49	1.537	0.68	0.52

### (二) 核心边缘结构

利用 UCINE 软件的核心边缘模型对城市群多维网络结构分别进行测度，并识别处于核心与边缘位置的节点，从而为分析城市群核心边缘结构与一体化程度提供科学依据。作为网络结构的重要指标，拟合系数数值越大表示核心边缘特征越明显。从表 2 可以看出，长三角城市群企业网络和交通网络拟合系数较高，并形成较明显的核心边缘结构。企业网络中，核心区城市数量更多且联系更密切，而边缘区城市数量更少而联系更稀疏，反映出城市群企业间联系呈现出一定的“马太效应”。科技与信息网络由于核心区与边缘区节点数较为接近但联系密度相对较低，并未形成显著的核心边缘结构。从具体城市来看，上海、南京、杭州以及苏州等城市在不同网络均处于核心区位置，相互间形成密切的城市间联系并在网络中处于优势地位，从而实现较高的区域一体化程度并引领着整个城市群发展。然而，亳州、池州以及舟山等城市在不同网络均处于边缘区位置，相互间联系较为稀疏且在网络中处于弱势地位，导致这些城市的区域一体化程度较低。此外，在不同类型的网络中，长三角城市群核心区的城市数量均少于《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》所确定的 27 个，其中舟山与安庆等城市仍处于城市群边缘区。在城市群未来发展中，不仅需要加大边缘区城市交通与信息等基础设施投入力度，而且需增强核心城市的辐射能力，从而促进城市群核心区与边缘区的协调发展。

表 2 长三角城市群多维网络的核心边缘结构

网络类型	拟合系数	核心区节点数	边缘区节点数	核心区密度	边缘区密度

企业网络	0.56	25	16	0.79	0.27
交通网络	0.48	22	19	0.72	0.19
科技网络	0.35	24	17	0.61	0.25
信息网络	0.31	20	21	0.69	0.27
综合网络	0.33	21	20	0.62	0.28

#### 四、节点分布下城市群一体化

前文虽从空间格局与整体联系等角度分析了长三角城市群网络特征，但缺乏探讨具体城市在网络中地位及其融入城市群一体化程度。利用 UCINET 软件生成节点度数中心度，以探讨长三角城市群复杂网络城市体系与城市影响力。在此基础上，构建各城市的区域一体化融入程度，并利用位序规模分析对其区域一体化程度进行验证。

##### (一)长三角城市群节点分布与一体化程度

利用 UCINET 软件绘制长三角城市群度数中心度的拓扑网络，以分析复杂网络城市体系以及节点联系能力(图 3)。在拓扑网络中，长三角城市群城市节点分布表现出层次性与“金字塔”布局。上海拥有着最多联系数量，并处于城市群体系的顶端，从而凭借着强大的要素集聚能力主导着城市群一体化进程。苏州、南京、杭州以及宁波则位于第二等级，成为较多节点联系对象并具备较高的度数中心度，成为城市间联系的重要枢纽并推动着城市群多中心格局发展。随着度数中心度的降低，节点规模也变小但数量却不断增加，城市节点分布呈现出一定的“金字塔式”布局。尽管亳州、阜阳以及马鞍山等城市凭借较少的城市联系成为了网络的一部分，但度数中心度较低且处于城市群网络体系的底层。此外，越靠近上海的节点，度数中心度越高且处于网络体系的核心层，从而具有较高的区域一体化程度。

作为要素流动强度的综合表征，总体连通度反映城市在空间网络中的联系能力及其经济活动的相互作用程度，成为衡量其区域一体化程度的核心指标。<sup>[37]</sup>因此，将综合网络的城市总体连通度作为其融入城市群区域的一体化程度，并利用 GIS 软件进行可视化表达。从整体来看，长三角城市的区域一体化融入度总体呈现出“东高西低”的空间格局，安徽省除合肥市外其它城市区域一体化程度普遍较低，成为城市群一体化发展的薄弱地区。上海、苏州、杭州、南京以及宁波分别成为区域一体化程度排名前五位的城市，并在网络中扮演十分重要的作用。苏州、无锡以及常州等分布在沪宁、沪杭等高速铁路沿线城市的区域一体化程度也相对较高，并大致形成东西向与南北向的沪宁合杭甬发展轴。近年来，随着高速铁路快速发展，温州、金华以及徐州等距离城市群核心地区较远的城市，也形成较高的区域一体化程度，并反映出现代化与网络化基础设施对于促进城市群一体化发展具有重要的促进作用。

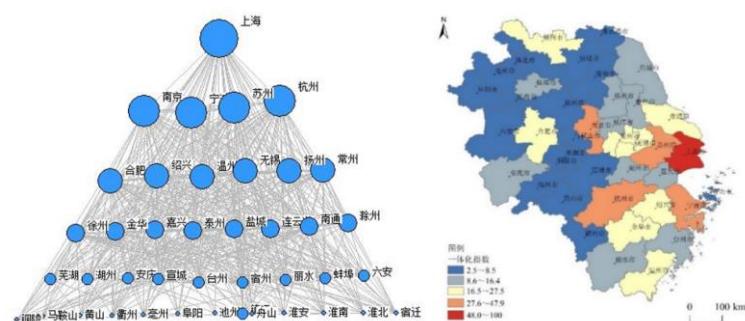


图 3 长三角城市群基于中心度的拓扑网络与区域一体化程度

## (二) 位序规模分析

随着区域一体化发展，生产要素自由流动并在特定地区集聚，并使得城市规模等级结构服从位序规模法则。<sup>[35]</sup>因此，将综合网络的节点连通度作为城市规模的表征，并对连通度进行排序与双对数拟合，以分析其规模分布特征并检验各城市融入城市群的区域一体化程度(图4)。结果显示，长三角城市规模呈现出较明显的幂律分布特征，上海、苏州、杭州、南京、宁波等核心城市分别处于连通度规模排序的前五位。上海凭借着高度发达经济与完善的基础设施吸引资金、信息与人才等众多生产要素流动与集聚，表现出明显的首位特征。然而，淮北、亳州以及池州等安徽西部与北部城市，由于距离上海较远且经济发展程度不足，处于连通度排序的末尾并反映出长三角城市群网络体系规模分布具有不均衡性。

在双对数分布图，点列若能拟合成直线则表示城市规模结构符合 Zipf 定律，并且若拟合成一条直线则为单分形结构，而拟合成两条直线则为双分形结构。该图中，城市连通度规模与位序拥有一条拟合直线，即存在一个无标度区。该直线的相关系数高达 0.93，表明基于城市总体连通度表征的长三角城市群网络体系符合 Zipf 定律，呈现出典型的单分形的空间分布形态。从拟合直线方程来看，Zipf 指数  $q$  为 0.82，表明除上海首位特征较突出外，其它大部分城市规模等级结构的变差较小，中间位序节点城市较多并呈现出对数分布特征。此外，长三角城市群连通度 Zipf 指数低于 1，反映出长三角城市群经济发展呈现出扩散趋势且中小城市实现较快发展，相比于理想状态的城市规模分布，长三角城市连通度的位序规模结构仍存在差距，并且长三角城市群并未真正实现生产要素的自由流动，亟待打破城市间行政壁垒以提高资源配置效率。

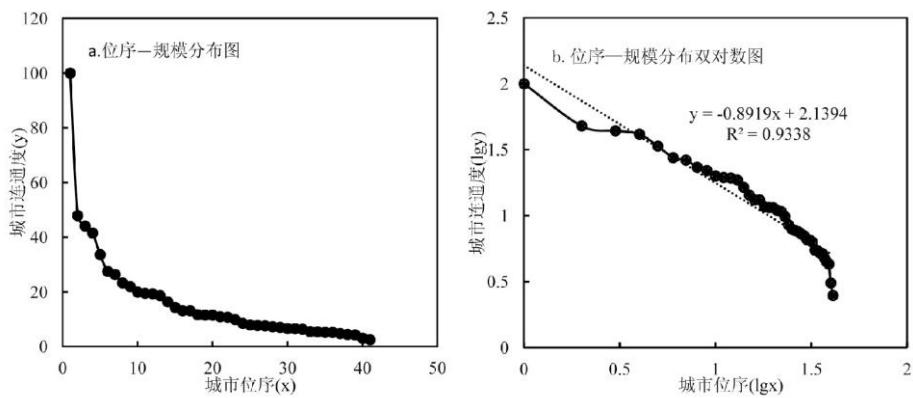


图 4 长三角城市群城市连通度的位序规模分析

## 五、结论与讨论

作为多尺度与多维度的概念，区域一体化本质是生产要素在地区间自由流动并形成网络化的城市间联系，从而实现区域整体利益最大化。在长三角高质量一体化发展上升为国家级战略的背景下，论文运用关系型大数据从流动空间视角出发，分析长三角城市群多维网络特征与结构，并对其区域一体化程度进行定量评价具有较好的科学意义与现实价值。基于企业联系、交通客流、科技以及信息联系等关系型数据，本研究构建长三角城市群多维网络并运用空间分析、社会网络分析以及位序规模法则等多种研究方法，从空间格局、整体联系以及节点属性等多个层次分析其网络结构与一体化程度。结论如下：

(1) 在不同要素流，上海、苏州以及南京等核心城市间普遍存在密切的网络联系，并使长三角城市群呈现出多中心与网络化发展趋势。然而，长三角城市群的企业网络表现出明显的核心边缘结构，交通流网络则呈现出廊道结构，科技网络具有明显的地域邻近性与轴辐式结构，信息流网络则出现较多突破行政边界的远距离联系。在综合网络，长三角城市群整体形成“东密西疏”的空间格局，并与企业网络更为接近，反映出经济联系是长三角城市群网一体化发展的核心驱动力。在首位联系，上海市联系对象数量最多且联系等级也较高，并在长三角城市群一体化进程中扮演着主导性作用。

---

(2) 在整体联系，长三角城市群企业与交通网络连通性与互惠性较好，并且交通与企业层面达到较高的区域一体化程度。然而，城市群的科技与信息网络密度较低且互惠性较差，导致其一体化发展程度较低，亟待增强长三角城市群科技与信息资源流动。长三角城市群企业网络和综合网络表现出一定的核心边缘结构，并且企业网络凭借着更好网络通达性和集聚性而具有小世界性。

(3) 在个体网络，长三角城市的连通度具有幂律分布特征，并且网络体系符合 Zipf 法则而呈现出单分形空间形态。基于度数中心度的长三角城市群拓扑网络表现出层级性特征，上海凭着强大联系能力处于网络体系的顶端，并主导着城市群一体化进程。然而，长三角城市连通度的位序规模结构与理想状态仍存在一定的差距，亟待打破城市间行政壁垒以推动生产要素自由流动。

(4) 长三角各城市的区域一体化程度表现出“东高西低”的空间格局，而安徽省较多城市区域一体化程度较低，成为区域一体化发展的薄弱地区。沪宁、沪杭等高速铁路沿线城市的一体化程度普遍较高，并大致形成了沪宁合杭甬发展轴，反映出交通基础设施对于城市群一体化进程具有较好的促进作用。此外，长三角城市群拓扑网络的城市体系与区域一体化程度的空间格局具有较高的相似性，并反映出城市群高质量一体化发展需完善大中小城市协调发展的网络体系。

本文对于长三角城市群高质量一体化发展战略的制定与实施具有参考价值。首先，不仅需加大城市群边缘区交通与信息等基础设施建设力度，而且可鼓励核心城市通过转移支付等方式增强与边缘区城市的经济社会联系并带动其发展，从而缩小城市群内部差距。其次，加快构建城市群跨行政区技术转移服务体系，减少行政壁垒对城市间科技与信息等资源流动的限制，推动长三角城市群利益共享与优势互补。最后，积极培育壮大中小城市，适当限制大城市的要素过度集聚，形成大中小城市协调发展的城镇体系。相比于以往研究，本文立足于区域一体化的本质，通过网络爬取技术获取长三角地区多元关系型大数据，从而为认识城市群一体化发展提供新型的视角与途径。同时，通过空间分析、社会网络分析以及位序规模法则等多种方法更全面与精确衡量长三角城市群空间网络特征与一体化融入程度，对于推进长三角城市群高质量一体化发展进程具有重要的借鉴意义。然而，由于数据局限性，本文暂未获取长时间序列关系型数据，对长三角城市群一体化演变过程与形成机制进行缺乏深入探讨。未来可利用更先进的方法获取长时间序列关系型数据，多尺度、多视角分析城市群一体化发展过程与驱动机理。

#### 参考文献：

- [1] 马学广. 全球城市区域的空间生产与跨界治理研究[M]. 北京:科学出版社, 2016:20-40.
- [2] Geddes P. Cities in evolution:an introduction to the town planning movement and to the study of civics[M]. London:Williams&Norgate, 1915:30-50.
- [3] Gottmann J. Megalopolis or the urbanization of the northeastern seaboard[J]. Economic Geography, 1957, 33 (3): 189-200.
- [4] Wu Fulong. China's emergent city-region governance:A new form of state spatial selectivity through state-orchestrated rescaling[J]. International Journal of Urban&Regional Research, 2016, 40 (6):1134-1151.
- [5] Zhang W Y,Derudder B,Wang J H et al. Regionalization in theYangtze River Delta,China:from the perspective of inter-city daily mobility[J]. Regional Studies, 2018, 52 (4):528-541.
- [6] 张佶. 政府主导的城镇群一体化发展实效研究:以长株潭城市群为例[J]. 城市规划. 2019, 43 (9):69-77.
- [7] Hanssens H,Derudder B, Van Aelst S. Assessing the Functional Polycentricity of the Mega-City-Region of Central

---

Belgium Based on Advanced Producer Service Transaction Links[J]. Regional Studies, 2014, 12(48):1939–1953.

[8]Kiggundu M N, De Ghetto K. Regional integration:Review of the management literature and implications for theory, policy, and practice[J]. Africa Journal of Management, 2015, 1(4):303–332.

[9]Balassa B. The Theory of Economic Integration[M]. London:Allen&Unwin, 1962:10–20.

[10]王珏, 陈雯. 全球化视角的区域主义与区域一体化理论阐释[J]. 地理科学进展. 2013, 32(7):1082–1091.

[11]汤放华, 古杰, 吕贤军, 等. 新区域主义视角下长株潭城市群区域一体化过程与影响因素[J]. 人文地理, 2018, 33(4):95–101.

[12]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.

[13]皮亚彬, 陈耀. 大国内部经济空间布局:区位、禀赋与一体化[J]. 经济学(季刊). 2019, 18(4):1289–1310.

[14]张衡春, 刘泉, 陈守强, 等. 城市区域经济一体化程度测度:基于深莞惠次区域的实证研究[J]. 城市发展研究. 2019, 26(7):18–28.

[15]汤放华, 吴平, 周亮. 长株潭城市群一体化程度测度与评价[J]. 经济地理. 2018, 38(2):59–65.

[16]陈雯, 王珏. 长江三角洲空间一体化发展格局的初步测度[J]. 地理科学. 2013, 33(8):902–908.

[17]千慧雄. 长三角区域经济一体化测度[J]. 财贸研究. 2010, 21(5):24–31.

[18]李雪松, 孙博文. 长江中游城市群区域一体化的测度与比较[J]. 长江流域资源与环境. 2013, 22(8):996–1003.

[19]Kahouli B. Regional Integration Agreements, Trade Flows and Economic Crisis:A Static and Dynamic Gravity Model[J]. International Economic Journal, 2016, 1(72):1–26.

[20]He D, Yin Q, Zheng M, et al. Transport and Regional Economic Integration:Evidence from the Chang-Zhu-Tan Region in China[J]. Transport Policy. 2019, 15(4):1–11.

[21]刘生龙, 胡鞍钢. 交通基础设施与中国区域经济一体化[J]. 经济研究. 2011, 46(3):72–82.

[22]Zhen F, Qin X, Ye X, et al. Analyzing urban development patterns based on the flow analysis method[J]. Cities. 2019, 86(3):178–197.

[23]龙奋杰, 郑龙飞, 石朗, 等. 基于公路大数据的黔中城市群一体化研究[J]. 浙江大学学报(工学版). 2019, 53(2):307–314.

[24]赵映慧, 高鑫, 姜博. 东北三省城市百度指数的网络联系层级结构[J]. 经济地理. 2015, 35(5):32–37.

- 
- [25]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.
- [26]豆建民, 张可. 中国区域经济格局与城市网络体系的演化趋势[J]. 城市问题, 2015, 24(7):54-61.
- [27]Zhan C, Derudder B, Zhenwei P. Comparing the physical, functional and knowledge integration of the Yangtze River Delta city-region through the lens of inter-city networks[J]. Cities, 2018, 82(5):119-126.
- [28]马学广, 唐承辉. 基于功能性联系的山东半岛城市群空间范围划定实证研究[J]. 经济地理, 2020, 40(5):106-117.
- [29]Krieger-Boden C, Soltwedel R. Identifying European Economic Integration and Globalization:A Review of Concepts and Measures[J]. Regional Studies. 2013, 47(9):1425-1442.
- [30]Peter, Taylor, Ben, et al. City-Dyad Analyses of China's Integration into the World City Network[J]. Urban Studies. 2014, 51(5):868-882.
- [31]马学广, 唐承辉. 中国城市网络化空间联系与格局:基于高铁客运流的大数据分析[J]. 经济地理. 2018, 38(4):55-64.
- [32]Hagedoorn J, Cloost M. Measuring Innovative Performance: Is There an Advantage in Using Multiple Indicators? [J]. Research Policy. 2003, 32(8):1365-1379.
- [33]刘承良, 管明, 段德忠. 中国城际技术转移网络的空间格局及影响因素[J]. 地理学报. 2018, 73(8):1462-1477.
- [34]虞洋, 宋周莺, 史坤博. 基于百度指数的中国省域间信息联系网络格局及其动力机制[J]. 经济地理. 2019, 39(9):147-155.
- [35]Bowen H P, Viaene H M A J. How integrated is the world economy? [J]. Review of World Economics. 2010, 146(3):389-414.
- [36]叶磊, 段学军, 欧向军. 基于交通信息流的江苏省流空间网络结构研究[J]. 地理科学, 2015, 35(10):1230-1237.
- [37]Gao Xin, Zhang Anlu, Sun Zhanli. How regional economic integration influence on urban land use efficiency? A case study of Wuhan metropolitan area, China[J]. Land Use Policy, 2020, 90(1):104-115.