

长江三角洲地区铁路客运联系网络结构演变特征

陈名¹ 陈洪全² 蒋海兵² 孟德友³¹

(1. 南京师范大学 金陵女子学院, 中国江苏 南京 210097;

2. 盐城师范学院 城市与规划学院, 中国江苏 盐城 224007;

3. 河南财经政法大学 城乡协调发展河南省协同创新中心, 中国河南 郑州 450046)

【摘要】: 以长江三角洲地区为案例区, 旨在探讨地区铁路客运联系网络结构演变特征。在城市铁路客运网络构建的基础上, 运用 GIS 空间分析方法和 2005、2010 和 2017 年铁路客运班次刻画铁路客运联系强度特征, 通过网络密度、度中心性、核心—边缘结构、凝聚子群等复杂网络分析指标探究区域铁路客运联系网络结构演变特征。结果显示: ①长三角地区铁路客运量日益集中于少数铁路线路、城市对和中心城市。②沪宁轴线子群一直为核心子群, 在高铁线路作用下区域凝聚子群发生分化重组, 沪宁轴线子群和沪杭金轴线子群范围不断扩大, 沪宁轴线子群、沪杭金子群和杭甬子群之间的联系强度相对较高, 而新长轴线、宁启轴线和合九轴线子群处于长三角地区铁路客运联系网络“边缘化”状态。③在铁路客运大幅提速作用下, 铁路客运空间组织模式由轴线扩展模式向多核心圈层扩展模式转变, 度中心性高值区和核心城市由沪宁轴线集中分布向多核心分散格局演化。

【关键词】: 铁路客运联系 网络结构 凝聚子群 轴线扩展

【中图分类号】: F532 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2020) 12-0063 - 09

城市交通运输联系研究是交通地理学重要研究方向, 国内早期研究关注交通运输联系生成和增长规律^[1]、客货流运量时空演化规律与影响因素^[2-3]。2000 年以后研究侧重于剖析不同交通方式运输空间联系方向^[4-5]、联系强度及其演变^[6]、中心城市辐射范围和距离衰减规律及交通空间组织模式^[7]。近年来, “流空间”数据和复杂网络分析方法在城市交通运输联系研究中正在逐渐兴起。随着交通大数据不断积累, “流空间”数据为城市交通联系的深入研究提供重要支撑。交通流量能够最直观地反映城市联系强弱和空间相互作用程度, 更好地演绎城市空间相互作用和空间联系规律^[8], 弥补传统数据和引力模型的不足。“流空间”数据能直观地反映日益网络化的区域内部功能结构和关系^[9], 多时序交通流数据则可以揭示城市交通联系时空格局演化规律。国外学者通过“流空间”数据验证引力模型也是目前的研究热点, 主要针对距离衰减系数修正^[10]。同时, 复杂网络分析法能够有效分析交通运输联系网络特征、结构演变、空间组织特征和模式, 复杂网络理论为城市交通运输联系研究提供新的研究方法和评价指标, 推动城市交通联系研究的方法与思路转变。2000 年以来, 国内外越来越多学者尝试通过各类交通信息流等数据和复杂网络分析方法模拟交通运输流量分布格局及其演化, 解析城市交通联系网络结构特征与规律, 揭示航空、铁路、公路、高铁交通流作用下城市网络空间结构特征、联系程度和社区识别^[11-19], “中心流”理论修正了传统中心地理论^[20]。流空间视角下城市空间网络结构和区域空间一体化研究正成为目前研究热点, 受到国内外学者的持续广泛地关注^[21-22]。近期研究表明: 航空

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901244、41871159); 江苏省社会科学基金项目 (17DDB015、18GLB014); 江苏省高校哲学社会科学基金项目 (2019SJA0228)

作者简介: 陈名 (1989-), 男, 江苏盐城人, 博士, 讲师。主要研究方向为区域经济与资源管理。E-mail: chenming.1008@163.com。
陈洪全 (1963-), 男, 江苏盐城人, 博士, 教授。主要研究方向为城市与区域规划。E-mail: yctcchq@163.com。

等交通运输网络体现了“小世界”和“无标度”等复杂网络的基本特征^[23]，交通运输网络分析较好地刻画地域系统内的功能联系^[24]，多元和多时序“流空间”数据能更全面细致地刻画城市空间网络结构与空间相互作用特征，有利于深入揭示城市空间网络结构动态发展趋势。目前限于交通大数据获取的难易程度，基于多时序“流空间”数据的县区级城市交通联系格局演化研究成果依然较少，制约城市交通联系网络时序演化过程及其动力机制研究。

近年来，区域一体化发展国家战略和快速扩展的高铁设施网络对城市群铁路客运联系研究提出现实需求。京津冀协同发展、粤港澳大湾区建设、长三角区域一体化发展等国家战略成为引领城市群经济高质量发展的重要动力，而高速铁路网络则是支撑区域一体化发展的重要组织部分，它在城市互联互通、区域协同创新、创新资源共享与流动等方面发挥着日益突出的支撑作用。因而，为了更好地对接区域一体化国家发展战略，探究高铁网络支撑下长三角地区城市空间网络结构演化和区域一体化空间格局分异具有现实的必要性和紧迫性。学者们通常利用城市交通通讯联系强度表征城市网络空间结构特征，因而研究铁路交通大幅度提速作用下的地区城市铁路客运联系演化规律能有效地识别与预测城市群空间结构时空演变，为区域一体化国家发展战略提供决策依据。

有鉴于此，本研究以长三角地区为案例区，在 GIS 技术、流空间数据和复杂网络分析方法支撑下，旨在探究城市群铁路客运联系格局演化特征与发展趋势，加深对高速铁路客运设施网络支撑下长三角地区城市空间联系格局演化和区域一体化的认知程度，以期科学合理地预判城市群铁路客运量格局和交通空间组织模式的演化趋势提供参考依据。与长三角地区已有类似研究相比，本文采用多期县区尺度的城市对数据，并且结合复杂网络分析方法刻画城市群铁路客运联系演化特征，反映区域一体化格局演化趋势。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

由于多年长三角地区实际铁路客运量数据难以获取，本文采用参量替代法对铁路客运参数予以表征，参量替代法是“流空间”研究的常用方法^[9, 21-22, 24]。

本文使用 3 期铁路客运班次数据，解析长三角地区城市铁路客运联系网络演变特征。数据从极品时刻表和高铁网提取，包括极品时刻表 2005 年 11 月 23 日版本、2010 年 3 月 20 日版本和高铁网 2017 年 8 月份数据，对城市内多个站点班次合并，3 期涉及城市数分别为 52、57 和 75 个。将时刻表数据转化为城市对矩阵，3 期城市对依次为 981、1185 和 2055 个，并且将城市对矩阵空间化，将城市对矩阵和空间化数据分别导入 UCINET 软件和 ArcGIS 软件。

1.2 研究方法

1.2.1 社会网络分析指标

采用社会网络分析法，运用 UCINET 软件和度中心性、网络密度和凝聚子群等指标对铁路客运网络结构进行定量分析。

①节点特征指标一度中心性。度中心性指与该节点有直接联系的节点数，也称之为度，反映节点在网络中的重要程度和控制能力。节点的度中心性越高说明该节点与其他节点的联系越广泛。在有向网络中，节点的度分为入度和出度，入度反映了该节点对网络中其他节点的吸引力，出度反映了该节点对网络中其他节点的影响。在无向网络中，节点的度只有一个，表示该节点与其他节点直接相连的次数。计算公式如下式所示^[26]：

$$D_i = \sum^n L_{ij} \quad (1)$$

式中： L_{ij} 是节点 i 和节点 j 之间的边数； n 为节点的总数。度分布能够通过节点度的分布规律刻画不同节点的重要性和判断网络空间拓扑结构特征。

②网络特性指标—网络密度。网络密度反映网络中各城市交通联系的紧密程度，网络密度越大，城市间交通联系越紧密。公式为^[26]：

$$D = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{d(i,j)}{k(k-1)} \quad (2)$$

式中： D 为网络密度； k 为城市节点数； $d(i, j)$ 为城市 i 和城市 j 之间的交通联系量。

③核心—边缘结构分析。核心—边缘结构分析目的是识别网络结构中处于核心地位的节点和边缘地位的节点，它反映城市在铁路客运联系网络中的地位或重要程度，判断网络中的核心成员和节点核心度^[26]，本文采用 UCINET 软件 Core&Periphery 模块计算得到城市核心度值和核心城市，核心度能够量化核心城市对边缘城市的带动效应^[18]。

④凝聚子群分析。凝聚子群分析揭示网络聚集行为规律，用于分析网络中存在子群数量以及子群内部成员之间的关系，是一种网络聚类方法。本文采用 UCINET 软件的 Concor 模块开展凝聚子群分析，具体原理与算法见相关文献^[26]，通过城市铁路客运量班次数据，解析长三角地区城市小团体集聚现象，厘清铁路客运联系网络作用下城市之间的亲疏关系，从而梳理长三角地区铁路客运联系网络的组织结构，研判铁路客运联系网络支撑下区域一体化水平的空间差异与演变趋势。

1.2.2 其它指标

①城市对铁路客运量：

$$P_{ij} = P_{i-j} \quad (3)$$

$$P_{ji} = P_{j-i} \quad (4)$$

式中： P_{i-j} 是城市 i 到城市 j 的单向铁路班次数； P_{j-i} 是城市 j 到城市 i 的单向铁路班次数，使用该指标表征城市对铁路客运联系强度^[9]。

②城市位序—规模法则：

$$\ln P_r = a - q \ln r \quad (5)$$

式中： r 是城市对铁路客运班次数位序； a 表示常数； P_r 为第 r 城市对铁路客运班次数，当 $|q|=1$ ，为位序—规模分布， $|q|>1$ ，城市对铁路客运班次数等级差异大，为首位分布； $|q|<1$ ，城市对铁路班次数等级呈现出对数正态分布。 q 绝对值越大，表明城市对铁路客运量越集中，反之， q 绝对值越小，表明城市对客运量分散^[19]。

2 结果分析

2.1 长三角地区铁路客运联系强度空间演变特征

2.1.1 铁路干线客运量翻倍增长，合宁杭轴线和杭甬轴沿线城市对客运量快速增长

综合对比分析三期铁路客运联系强度变化，长三角地区三期客运班次总数分别为 7067、11715 和 32802 次。应用自然断裂点分级法，将 2005、2010 和 2017 年铁路客运联系强度划分 5 个等级，即高、较高、一般、较低和低级别（图 1）。2005 年高强度城市对分布于沪宁轴线，班次在 54 次以上，班次数由高到低分别为上海—苏州、上海—无锡、南京—无锡、苏州—无锡、常州—无锡、南京—常州和南京—上海等，较高强度城市对集中于上海—杭州—义乌轴线，班次在 39~54 次，2005 年形成一主一次两条重要轴线，其余线路客运量普遍较少。2010 年高强度的沪宁轴线班次数显著提高，班次在 91 次以上，几乎为 2005 年的 2 倍，沪宁轴线沿线高强度城市对数量增加，由高到低城市对分别为上海—南京、上海—苏州、上海—无锡、上海—常州、无锡—苏州、南京—无锡、南京—苏州等，上海—南京城市对班次数量增长突出。上海—杭州—义乌支线强度有所提高。2017 年高强度的沪宁轴线班次再次大幅提升，班次在 183 次以上，为 2010 年的 2 倍多，由高到低依次为上海—南京、上海—杭州、上海—苏州、南京—苏州、上海—无锡、南京—无锡、无锡—苏州等。沪杭轴线客运量大幅提升，沪杭、沪嘉班次进入高强度城市对序列，上海—杭州—金华轴线客运班次达到 99 班以上。另外，合肥—南京—杭州—宁波轴线客运班次增长较快，沿线城市铁路客运联系强度提高。

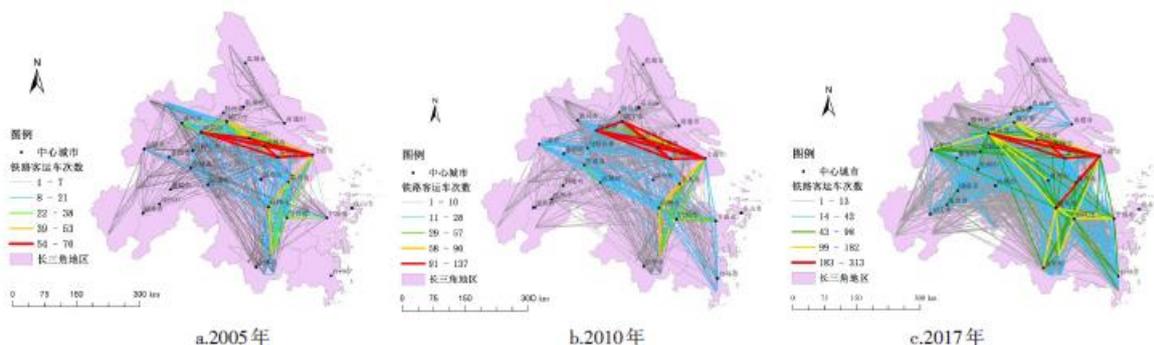


图 1 2005—2017 年长三角地区铁路客运联系强度空间演变

2.1.2 长三角地区铁路客运量集中于少数城市对和铁路线路

表 1 显示：城市对铁路客运量的 q 值由 2005 年的 1.093，分别提高到 2010 年的 1.184 和 2017 年的 1.28，表明长三角地区铁路客运量越来越集中于少数城市对。上海、杭州和南京之间的联系强度日趋增强，形成“一主轴两支带三核心”的高客运量格局，即：沪宁主轴线、沪杭金支带和宁杭甬支带，“又”字形轴带为长三角地区主要铁路客运走廊。上海、南京和杭州成为城市群铁路客运网络的核心城市，2005、2010 和 2017 年三条轴带铁路客运班次总数占所有班次比重，分别为 53.79%（沪宁：35.47%；沪杭金：14.32%；杭甬：4%），57.28%（沪宁：38.96%；沪杭金：11.28%；杭甬台温：7.02%），52.35%（沪宁：23.59%；沪杭金：13.17%；宁杭甬台温：15.58%）。

2.1.3 省会城市之间、省会城市与县级城市联系强度显著提高

通过对比 2005、2010 与 2017 年不同等级城市之间铁路客运量占比（表 2），2005—2017 年显示省会城市之间联系强度占比由 3.8% 增长到 6.1%，省会城市与县级城市联系强度由 7.9% 上升到 9.4%。省会城市与其它各类城市客运量占比由 2005 年 23.7% 增长到 28.3%，县级城市与省会城市和地级城市联系强度差距缩小，占比差距由 4.9% 缩小至 2.6%。数据表明：省会城市之间、

省会与县级城市之间的联系强度提高，省会城市与低等级联系加强，反映城市空间联系等级结构趋向于“扁平化”。

表 1 2005—2017 年长三角地区城市对铁路客运量位序—规模分布统计分析

年份	城市对铁路客运量		
	a	q	R_a^2
2005	7.67	1.093	0.915
2010	8.588	1.184	0.922
2017	10.262	1.28	0.878

表 2 2005—2017 年长三角地区不同等级城市之间铁路客运联系班次占比分析 (%)

年代	省会城市	省会城市至	省会城市至	地级市至
	之间客运	县级城市客	地级市客运	县级市客运
	量比重	运量比重	量比重	量比重
2005	3.78	7.92	12.01	12.87
2010	5.15	7.77	13.81	11.82
2017	6.07	9.42	12.80	11.99

2.2 长三角地区铁路客运联系网络演变特征

2.2.1 网络密度演变分析

①长三角地区铁路客运联系网络密度逐年显著提升。表 3 显示，2005—2017 年网络平均密度由 2.66 上升至 5.91，其中，2005—2010 年，网络平均密度由 2.66 上升至 3.67，提高了 37.9%。而 2010—2017 年，网络平均密度由 3.67 增至 5.91，提高了 61%，它表明 2010—2017 年铁路客运联系网络密度大幅提高，沪杭城际、宁杭城际、宁安城际、合福高铁、沪昆高铁等建设提高长三角地区城市之间的整体联系水平，促进城市之间的协同发展，推动区域一体化进程。

②长三角地区铁路客运联系网络密度存在显著空间分异。在 3 个时期，京沪沿线（滁州至上海段）城市处于铁路客运联系网络的核心地位，铁路客运班次数量多，网络密度高，2017 年它的网络密度达到 65.55，远高于其它地区，区域一体化水平高。其次为浙江城市网络密度较高，而苏中苏北城市和安徽城市位于城市群铁路联系网络的边缘地带，2017 年分别为 10.26 和 3.39，它们相对孤立，客运班次数量较少，网络密度相对较低（表 3）。

表 3 2005—2017 年长三角地区铁路客运联系网络密度的空间差异分析

年份	城市数量	网络平均密度	苏中苏北城市	浙江境内城市	安徽境内城市	京沪铁路沿线城市
					(扣除京沪铁路沿线城市)	(滁州至上海段)
2005	52	2.6648	1.38	5.48	1.95	28.42
2010	57	3.6673	3.47	6.12	2.99	45.45
2017	75	5.9103	10.26	15.96	3.39	65.55

2.2.2 城市铁路客运中心性演变分析

①中心城市辐射扩散能力大幅提升，城市之间铁路客运能力差异不断扩大。度中心性既能表征城市铁路客运量规模，又反映城市对网络控制能力。2005 年度中心性平均值为 141.65，排名前 10 的城市依次为上海、南京、无锡、苏州、常州、杭州、镇江、昆山、丹阳、义乌等城市。2010 年度中心性平均值为 219.79，排名前 10 的城市变化不大，仅义乌换成嘉兴。2017 年度中心性平均值 476.77，排名前 10 的城市中，增加了合肥和嘉兴。2005—2017 年部分城市中心性较快提高，合肥、宁波分别由 2005 年的排名 23 和 21 位，上升到 2017 年的第 8 和 11 位，该类城市铁路客运联系网络控制能力大幅度加强，城市客运量不断攀升，直达城市数量和车次均有显著提高，说明此类城市在铁路客运交通方式下城市对外辐射扩散能力大幅度增强。

通过对 3 期的度中心变异系数对比发现，2005、2010 和 2017 年城市度中心的变异系数分别为 1.19、1.26 和 1.34，显示度中心均衡性不断下降，城市度中心性差距扩大，表明度中心性差异不断扩大的趋势，铁路客运量仍集中于少数中心城市，反映铁路客运联系网络的“无标度”特性。

②铁路客运空间组织模式由轴线集聚扩展模式向多核心圈层分散扩展模式转变。按照自然断裂分类法，将 3 期度中心性值划分 5 个等级，分别表示高、较高、一般、较低和低水平（图 2）。在 2005 年度中心性格局中，沪宁轴线核心区度中心性整体最高，在核心区内具有 5 个高值区，包括上海、南京、苏州、无锡、常州，外围分布着以杭州为核心的高值区，度中心性由沪宁轴线和沪杭线向外围区域逐渐递减，形成长江以北和西南低值区。2010 年高值区范围收缩，集中于少数城市，如上海、南京、苏州、无锡、杭州等。2017 年度中心高值区的沪宁轴线高值区进一步收缩，日益演化为以上海、杭州和南京为中心的组团式圈层扩展区，显示上海、南京和杭州与其它城市度中心性差距不断扩大，外围区域出现合肥、宁波等较高值区，它们的铁路交通枢纽地位日益突出。同时，沪宁—沪杭—宁杭—杭甬的“又”字形轴线沿线城市度中心值整体水平相对较高，成为长三角地区铁路联系整体水平最高的区域。此外，图 2c 反映长三角地区铁路客运空间组织模式由轴线扩展模式向多核心圈层扩张模式转变，少数中心城市成为地区重要铁路枢纽。

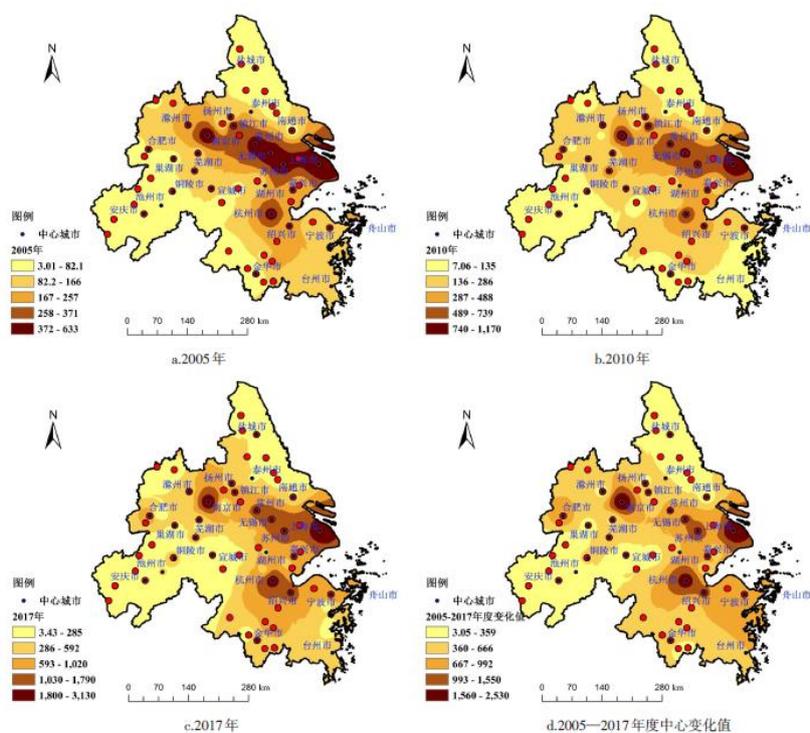


图 2 2005—2017 年长三角地区度中心性空间格局演变分析

③度中心性增量高值区集中分布于少数中心城市，低值区位于东北部和西南部地区城市。图 2d 显示 2005—2017 年度中性变化高值区集中分布于上海、南京和杭州及其周边城市，增量在 900 以上，度中心性增量较少的区域分布于东北部和西南部地区，增量在 360 以下。2005—2017 年城市度中心性增长排名前 10 的城市依次为南京、上海、杭州、苏州、绍兴、无锡、合肥、宁波、嘉兴和常州等。

2.2.3 核心—边缘结构分析

①核心城市由沪宁轴线集中转向多条轴线离散分布。采用自然断裂分类法，将 3 期核心度值划分 5 个等级，分别表示高、较高、一般、较低和低水平（图 3）。2005—2017 年，城市核心度的标准差由 0.116 下降至 0.099，非均衡指数由 0.046 下降至 0.038，表明城市群核心度的绝对差异和相对差异呈现缩小趋势，城市核心度值空间分布趋于均衡。核心—边缘结构分析显示（表 4，图 3）：核心城市由沪宁轴线城市为主向宁武轴线、沪杭轴线和杭甬轴线延伸，核心城市由区域集中格局走向分散，边缘城市主要集中于长三角的东北和西南地区。2005 年 8 座核心城市在沪宁轴线上，2010 年增加了沪杭金沿线 3 座城市和宁合沿线的 1 座城市。到 2017 年，增加了杭甬沿线的宁波、绍兴与宁安沿线的安庆等城市。

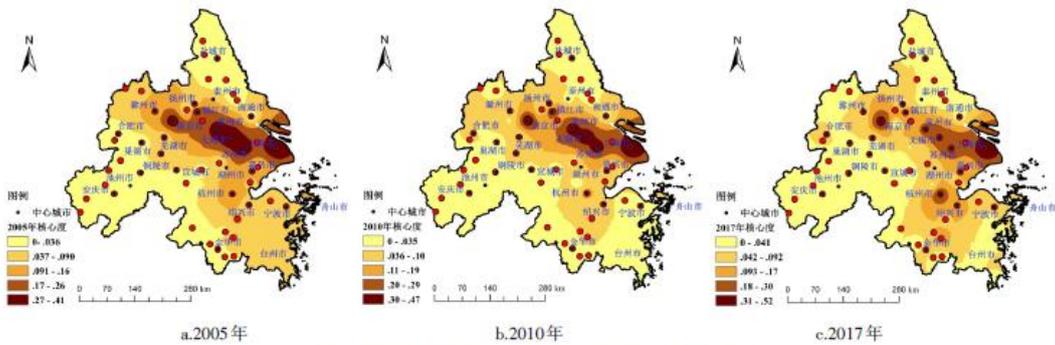


图 3 2005—2017 年长三角地区核心度空间演变分析

表 4 2005、2010 和 2017 年长三角城市群核心城市变化分析

年份	核心城市
2005	常州市、滁州市、丹阳市、杭州市、昆山市、南京市、上海市、苏州市、无锡市、镇江市
2010	常州市、滁州市、丹阳市、海宁市、杭州市、合肥市、嘉兴市、昆山市、南京市、上海市、苏州市、无锡市、义乌市、镇江市
2017	安庆市、常州市、丹阳市、杭州市、合肥市、嘉兴市、金华市、昆山市、南京市、宁波市、上海市、绍兴市、苏州市、无锡市、镇江市

②高核心度城市日趋疏散于少数中心城市，局部地区缺乏高核心度城市。2005—2017 年高核心度城市数量减少，核心度高于 0.3 的城市由 6 个缩减到 4 个，高核心度区域范围收缩。核心—边缘结构发生变化，由沪宁轴线集聚转向其它区域日趋分散，无锡和苏州的核心地位下降，区域核心度高值区逐渐由多数城市集中扎堆向少数中心城市分散分布，南京、杭州、上海、苏州等少数中心城市极化水平高，它们对边缘城市带动效应强。另外，铁路客运网络外围正在崛起一些区域性核心城市，包括宁波、金华、合肥、安庆和宁波等城市。相比之下，长三角地区东北部和西南部地区缺乏高核心度城市。

2.2.4 铁路客运联系网络凝聚子群演变分析

采用 UCINET 软件 Concor 算法模块分析铁路客运联系网络的凝聚子群，得到凝聚子群组成状况及其密度值（表 5、表 6，图 4），用来刻画铁路网络作用下长三角地区城市组团集聚与联系特征，反映地区一体化水平的空间差异及其演化。

①中片区和东片区子群持续分化重组，北片区和西片区子群相对稳定。2005—2017 年城市群铁路客运联系在二级层面上出现 4 个凝聚子群（表 5，图 4）。2005 年长三角地区内形成以南京—合肥为核心的中片区，上海—杭州—宁波为核心的东片区，盐城—南通—扬州为核心的北片区和以巢湖—桐城为核心的西片区。2010 年合宁城际、沪宁城际和甬台温动车开通，中片区和东片区凝聚子群出现分化重组，区内形成上海—南京—杭州为核心的中片区、宁波—合肥为核心的南片区、安庆—桐城为核心的西片区、盐城—南通—泰州为核心的北片区。2017 年京沪高铁、宁杭高铁、合福高铁、宁安高铁、杭长高铁已经开通运营，区内凝聚子群重组为上海—南京—合肥为核心的中片区、巢湖—桐城为核心的西片区、杭州—宁波—金华为核心的东片区、盐城—南通—泰州为核心的北片区。在二级层面上，北片区和西片区凝聚子群相对稳定，而中片区和东片区较为活跃，在高铁线路推动下，区域凝聚子群出现多次空间重组，它们的范围不断扩张。

②沪宁轴线为城市群核心子群，它与沪杭金子群联系紧密。在三级层面上出现 8 个子群（表 5，图 4）。2005 年传统铁路沿线形成 8 个子群，第 1 子群主要位于沪宁轴线，核心城市有苏州、无锡、南京等城市，铁路联系十分紧密，沿线分布着大多数核心城市，它显示该子群为核心子群。第 2 凝聚子群，城市包括合肥、芜湖、宣城、扬州等。第 3、4 子群分别沿着沪杭金轴线和杭甬轴线分布，核心城市包括上海和杭州等城市。第 5、6 子群主要沿着合九轴线分布，主要城市有巢湖和桐城。第 7、8 子群位于新长铁路和宁启铁路沿线的城市。2010 年沪宁城际和沪杭城际开通运营，在此作用下，上海融入沪宁轴林子群，沪杭金子群融入中片区，第 3、4 子群范围扩大。2017 年宁安高铁、合福高铁和宁杭高铁开通运营，它们促使合肥纳入沪宁轴林子群，沪宁轴林子群和宁安轴林子群组成中片区，宁杭轴林子群和杭甬温子群组成东片区。

表 5 2005、2010 和 2017 年长三角地区铁路客运联系网络凝聚子群划分

大区	小区	2005	2010	2017
1	1	南京、无锡、镇江、常州、苏州、	上海、南京、无锡、苏州、常州、上海、南京、苏州、无锡、常州、合肥、	昆山、丹阳、滁州、明光、凤阳、镇江、
		铜陵、安庆	肥东、明光	明光
	2	芜湖、宣城、马鞍山、合肥、长兴、杭州、嘉兴、义乌、海宁、诸暨、	芜湖、马鞍山、池州、安庆、当涂、繁昌、	芜湖、
		广德、宁国、扬州、仪征	嘉善、金华、兰溪	东至
2	3	上海、杭州、义乌、嘉兴、诸暨、	合肥、芜湖、宣城、长兴、德清、杭州、绍兴、嘉兴、宁波、义乌、余姚、	诸暨、台州、海宁、嘉善、温岭、桐乡、
		海宁、嘉善、永康、武义、浦江、	马鞍山、巢湖、广德、池州、宁	临海、宁海、三门、奉化
		金华、兰溪、淳安	国、东至、武义、永康	
	4	绍兴、宁波、余姚	绍兴、宁波、余姚、台州、温岭、长兴、湖州、宜兴、德清、溧阳冰康、宣	城、广德、句容、兰溪、金华、武义
			临海、宁海、奉化	
3	5	巢湖	庐江、安庆、	铜陵、巢湖、绩溪、长丰、无为、南陵、
				泾县、旌德、肥东、宁国
	6	桐城、怀宁、太湖、宿松、肥西、	桐城、怀宁、太湖、宿松	怀宁、桐城、庐江、太湖、潜山、宿松、
		庐江		舒城
4	7	盐城、兴化、阜宁、建湖	海安、南通、盐城、东台、如皋、	盐城、东台、阜宁、建湖
			阜宁、建湖	
	8	海安、南通、如皋	扬州、泰州、仪征	扬州、泰州、海安、南通、如皋、如东

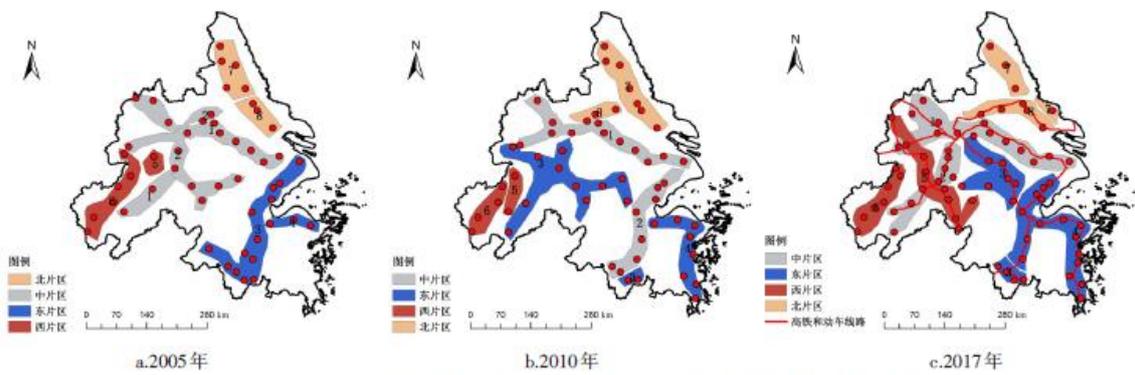


图4 2005—2017年长三角地区城市轨道交通客运联系网络凝聚子群演变分析

表6 2005—2017年长三角地区城市轨道交通客运联系网络凝聚子群密度分析

子群	2005							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	17.98	1.86	5.51	1.25	0.17	0.35	0.00	0.08
2	1.82	4.22	0.66	0.74	4.00	0.43	0.00	0.22
3	5.31	0.69	7.66	3.87	0.23	0.03	0.00	0.00
4	1.25	0.74	3.80	25.67	1.33	0.00	0.00	0.00
5	0.17	4.00	0.23	1.33	—	0.00	0.00	0.00
6	0.33	0.43	0.03	0.00	0.00	1.93	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	1.80
8	0.08	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	3.00

子群	2010							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	38.52	6.39	2.17	1.39	0.75	0.19	0.12	1.03
2	6.38	14.32	2.55	4.42	0.00	0.00	0.00	0.25
3	2.12	2.39	7.17	1.42	0.42	0.48	0.09	0.51
4	1.03	3.94	1.50	9.50	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.58	0.00	0.42	0.00	4.00	2.50	0.00	0.00
6	0.15	0.00	0.48	0.00	2.50	4.17	0.00	0.75
7	0.12	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	3.43	2.57
8	0.94	0.25	0.51	0.00	0.00	0.75	2.57	7.67

子群	2017							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	61.15	6.89	6.18	14.76	2.54	0.59	0.10	2.71
2	6.81	7.84	1.70	0.91	2.59	0.34	0.00	0.40
3	5.55	1.45	10.06	7.53	0.58	0.14	0.00	0.03
4	14.39	0.77	6.96	23.15	0.28	0.05	0.00	0.00
5	2.66	2.51	0.72	0.36	5.33	0.00	0.00	0.12
6	0.56	0.32	0.07	0.05	0.09	4.50	0.00	0.00
7	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.08	2.15

表5和表6显示：①2005、2010和2017年沪宁轴线和沪杭金轴线子群范围不断扩张，内部网络密度逐年大幅递增，沪宁轴线子群网络密度分别为17.98、38.52和61.15，沪杭金轴线子群密度依次为7.66、14.32和23.15。并且，凝聚子群内部联系网络密度差异较大，联系程度最高为沪宁轴线。②沪宁轴线与沪杭金轴线子群之间联系最为紧密，三期两子群之间的网络密度依次为5.51、6.39和14.76。核心子群与第6、7子群联系密度最低，5、6、7、8子群与1、2、3、4子群之间联系网络密度普遍较低。2017年与沪宁轴线子群联系紧密的子群依次为沪杭金轴线、宁安轴线和宁杭轴线子群，新长轴线、宁启轴线和合九轴线子群与其它子群联系较为薄弱，处于长三角地区铁路客运联系网络的“边缘化”状态。③高铁设施网络推动凝聚子群分化重组，促进主要子群范围扩张。通过对比三期二级层面和三级层面凝聚子群结构及其变化，长三角地区社区结构经历破碎分散到成片集聚的过程，部分凝聚子群范围扩大（图4）。三期铁路网络沿线城市形成不同片区的凝聚子群，而高铁设施网络在子群空间分化和重组中发挥关键作用。宁杭高铁和杭长高铁促进浙江西部和安徽东部铁路沿线区域整合，宁安高铁、宁合高铁和京沪高铁强化上海对长三角地区西部城市的辐射作用，宁安高铁沿线城市能够更好地融入沪宁子群。同时，合福高铁带动安徽省内城市子群的融合，加快区域一体化进程。目前苏中苏北跨江高铁线路匮乏，仅通过南京联接沪宁轴线，导致苏中苏北轴线子群与沪宁轴线子群联系薄弱，制约苏中苏北城市更好地融入核心子群和其它子群。

3 结论与讨论

3.1 结论

①长三角城市群铁路客运量日益集中于少数铁路线路、城市对和中心城市。铁路干线客运量翻倍增长，合宁杭轴线和杭甬轴线城市对客运量快速增长，“又”字形轴带成为长三角地区重要铁路客运走廊。

②在长三角地区铁路客运大幅提速作用下，城市铁路客运联系整体水平大幅提高，中心城市铁路客运能力大幅提升，中心城市间、中心城市和低等级城市之间联系程度不断加强，铁路客运空间组织模式由轴线扩展模式向多核心圈层扩展模式转变，度中心性和核心度高值区由沪宁轴线集中分布向多核心组团分散格局演化。

③铁路客运联系网络作用下区域一体化水平存在明显的空间分异。凝聚子群内部和之间联系程度差异大，沪宁轴线子群为长三角地区核心子群，沪宁轴线子群、沪杭金子群和杭甬子群之间的联系强度相对较高，而新长轴线、宁启轴线和合九轴线子群处于长三角地区铁路客运联系网络“边缘化”状态。2005—2017年，高铁设施网络延伸与扩展推动城市群凝聚子群分化重组，其中：中片区和东片区子群持续分化重组，北片区和西片区子群相对稳定。

3.2 讨论

铁路客运在长三角地区城市经济社会联系中的作用愈加凸显。当前长江对长三角地区铁路客运联系分割作用依然明显，加快建设宁淮、盐泰锡宜湖、通苏嘉甬跨江铁路通道，实现跨江融合应成为长三角地区高铁设施网络的优先安排。同时，在长三角地区内部，长江以北高铁网络规划与建设将重塑长三角地区铁路客运联系网络结构，对整个长三角地区铁路客运网络演变产生深远影响，随着苏中苏北和沿海高铁网络发展，未来将实现跨江融合与沪宁轴带多点衔接，长三角地区内部多个子群之间的铁路客运联系强度将大幅度增强，尤其是长江以北凝聚子群与核心子群之间联系将有质的飞跃。重塑长江以北城市铁路客运联系网络关系，将加快推动长江以北城市深度融入长三角一体化发展进程，从而有效地扭转当前长江以北城市子群“边缘化”倾向，增强长三角地区城市凝聚力和协同力。

参考文献：

-
- [1]张文尝,金凤君,唐秀芳.空间运输联系的生成与增长规律研究[J].地理学报,1994,49(5):440-448.
- [2]金凤君.我国空间运输联系的实验研究[J].地理学报,1991.46(1):16-25.
- [3]曹小曙,阎小培.珠江三角洲城际间运输联系的特征分析[J].人文地理,2003,18(1):87-89.
- [4]周一星,杨家文.九十年代我国国际货流联系的变动趋势[J].中国软科学,2001(6):85-89.
- [5]刘承良.中国大陆物流经济联系空间结构实证分析[J].经济地理,2004,24(6):826-829.
- [6]王海江,苗长虹.中国中心城市交通联系及其空间格局[M].北京:科学出版社,2016.
- [7]戴特奇,金凤君,王姣娥.空间相互作用与城市关联网演进:以中国20世纪90年代城际铁路客流为例[J].地理科学进展,2005,24(2):80-89.
- [8]靳诚,徐菁,黄震方,等.基于高速公路联网收费数据的江苏省交通流动特征与影响因素[J].地理学报,2018,73(2):248-260.
- [9]罗震东,何鹤鸣,耿磊.基于客运交通流的长江三角洲功能多中心结构研究[J].城市规划学刊,2011,194(2):16-23.
- [10]王焱,钮心毅,宋小冬.“流空间”视角下区域空间结构研究进展[J].国际城市规划,2017,32(6):27-33.
- [11]Choi J,Barnett G,Chon B.Comparing world city networks:a network analysis of internet backbone and air transport intercity linkages[J].Global Networks,2006,6(1):81-99.
- [12]Kwon O,Jung W S.Intercity express bus flow in Korea and its network analysis[J].Physica A,2012,391(17):4261-4265.
- [13]莫辉辉,王姣娥,金凤君.交通运输网络的复杂性研究[J].地理科学进展,2008,27(6):112-120.
- [14]武文杰,董正斌,张文忠,等.中国城市空间关联网结构的时空演变[J].地理学报,2011,66(4):435-445.
- [15]赵渺希,魏冀明,吴康.京津冀城市群的功能联系及其复杂网络演化[J].城市规划汇刊,2014,214(1):46-52.
- [16]焦敬娟,王姣娥,金凤君,等.高速铁路对城市网络结构的影响研究[J].地理学报,2016,71(2):265-280.
- [17]孟德友,冯兴华,文玉钊.铁路客运视角下东北地区城市网络结构演变及组织模式探讨[J].地理研究,2017,36(7):1339-1352.
- [18]柯文前,陆玉麒,陈伟,等.高速交通网络时空结构的阶段性演进及理论模型:以江苏省高速公路交通流网络为例[J].地理学报,2016,71(2):281-292.
- [19]Caceres N,Romero L,Morale F J,et al. Estimating traffic volumes on intercity road locations using roadway

attributes, socioeconomic features and other work-related activity characteristics[J]. *Transportation*, 2018, 45:1449-1473.

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

[21] 王姣娥, 杜德林, 金凤君. 多元交通流视角下的空间级联系统比较与地理空间约束[J]. *地理学报*, 2019, 74(2):2482-2494.

[22] 王少剑, 高爽, 王宇渠. 基于流空间视角的城市群空间结构研究: 以珠三角城市群为例[J]. *地理研究*, 2019, 38(8):1849-1861.

[23] 王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性[J]. *地理学报*, 2009, 64(8):899-910.

[24] 陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式[J]. *地理学报*, 2017, 72(2):224-241.

[25] 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.

[26] 刘军. 社会网络分析导论[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2004.