引文格式：秦育罗,张丽. 高铁流视角下长三角城市网络结构时空演变研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 54-57. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.03.013

高铁流视角下长三角城市网络结构时空演变研究

秦育罗[1]，张　丽[1]
（1. 宿迁学院 建筑工程学院，江苏 宿迁 223800）

摘　要：高铁的发展压缩了区域的时空距离，改变了城市网络的空间格局，高铁流逐渐成为城市网络研究的重要视角。以“十二五”、“十四五”规划开局之年为研究节点，利用社会网络分析法，从高铁流视角探讨了长三角城市网络结构的时空演变特征。结果表明：①长三角基本实现高铁城市全覆盖，网络规模不断扩大，网络密度有序提升，省内和省际联系均达到了较高水平；②高铁网络的发展经历了发育期、青春期，走向成年期，网络集聚程度减弱且趋于稳定，呈以省会为核心的多中心、均衡化多极网络模式；③高铁网络城市联系稠密化趋势明显，沪宁、沪杭、宁杭线形成了稳定的三角形结构，使得更复杂的城市网络结构取代了轴线式联系形态。

关键词：高铁流；城市网络结构；时空演变；社会网络分析
中图分类号：TU982　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0054-04

Research on the Spatio-temporal Evolution of Urban Network Structure in the Yangtze River Delta from the Perspective of High-speed Rail Flow

QIN Yuluo[1], ZHANG Li[1]
(1. School of Civil Engineering and Architecture, Suqian University, Suqian 223800, China)

Abstract: The growth of high-speed rail has compressed the region’s spatio-temporal distances significantly, and altered the spatial pattern of urban network. High-speed rail flow has grown to be a significant perspective for urban network studies. Taking the first year of the 12th, 14th Five-Year Plans as the research node, we used social network analysis method to study the spatio-temporal evolution features of urban network structure in the Yangtze River Delta region from the perspective of high-speed rail flow. The results indicate that ①the Yangtze River Delta has essentially attained full coverage of high-speed rail cities, the network scale has been steadily increased, the network density has been improved in a systematic manner, and the intra-provincial and inter-provincial links have attained a high level. ②The high-speed rail network has gone through three stages of development, such as childhood, adolescence, and adulthood, indicating a multi-center and balanced multi-polar network model with the province capital as its core. The degree of network agglomeration has weakened and tended to remain steady. ③In the Yangtze River Delta, there is a clear tendency toward dense urban connectivity in the high-speed rail network. Three stable triangles have been established by the Shanghai-Nanjing, Shanghai-Hangzhou, and Nanjing-Hangzhou intercity rail. The axial connection form has been replaced with the more intricate network structure.

Key words: high-speed rail flow, urban network structure, spatio-tempora evolution, social network analysis

在以信息技术革命、知识经济和全球化大市场为基础的新经济时代下，区域空间已由场所空间扩展为要素流动空间与地理场所空间复合并存、交互作用的新型空间[1]。流动空间概念的提出得益于互联网的广泛应用，城市与社会的发展在一定程度上突破了空间地域的约束，进入了一个高流动性时代[2]。要素流动在不同城市间建立起多元且复杂的联系，形成了一个不可分割的有机体系并呈现出网络型的空间结构，称为城市网络[3]。城市网络形成于流动空间[4]，越来越多的学者尝试从流动空间视角研究城市网络的组织模式，常用的“流”包括人口流[5-6]、货物流[7-8]、交通流[9-12]、信息流[13-14]等。人流、物流形成的交通流能直观体现城市联系强弱和空间作用程度，多时序的交通流还可映射城市网络结构时空演变规律，因此依托交通流探究城市网络结构正成为城市地理学的研究热点。最早用于城市网络研究的交通流数据为航空流和铁路流。航空运输具有速度快、航程远等特点，时空压缩效应显著，常用于全球或洲际尺度城市群识别和城市连接分析[9]；在我国中、长距离运输业务中同样占据主导地位，常用于全国尺度城市空间格局与区域

项目来源：宿迁市指导性科技计划资助项目（Z2024013）；宿迁学院青年基金资助项目（2023XQNA02）。
第一作者简介：秦育罗（1989—），博士研究生，讲师，研究方向为时空大数据分析，E-mail：19110@sqc.edu.cn。

差异探测[10]。与航空这种点对点的营运模式不同，铁路运输具有鲜明的廊道效应，通过带动轨道交通沿线城市要素流动，极大地改变了城市联系的空间格局，城市网络的研究视角也延伸到了铁路流[11]。2003年10月，随着秦沈客运专线全段建成通车，我国开启了高速铁路建设的新时代；截至2021年底，高铁运营里程突破4万km，“四纵四横”高铁网全面建成，“八纵八横”高铁网正加密成型。高铁带来的交通便利已惠及31个省级行政区的272个地级市，高铁城市覆盖率高达75%，已成为世界上运营里程最长、密度最大的高铁网络。值得注意的是，高铁已成为人们主要的出行方式，高铁网络不仅有利于从根本上缓解我国铁路客运压力，而且在推动交通运输经济带形成、深化交通运输供给侧结构性改革、促进交通运输高质量发展等方面发挥着重要作用。高铁在改变人们出行方式的同时，也在重塑城市网络结构，高铁班次数据能直接反映城市的联系特征[12]。长三角是我国经济发展最具活力、开放程度最高、综合竞争力最强的区域之一，在国家现代化建设大局中具有十分重要的战略地位。长三角一体化发展已经上升为国家战略，而交通一体化有助于促进区域一体化发展，高铁作为综合交通体系的重要一环，已成为构建长三角一体化高质量协调发展新格局的关键力量。在此背景下，基于高铁流视角探讨城市网络结构及其时空演变规律对摸清长三角高铁建设现状、进而科学有效地推进系统性的高铁布局和区域发展战略具有重要的现实意义，对其他地区高铁建设也具有一定的参考价值。

1　数据来源和研究方法

1.1　数据来源

本文利用高铁班次数据开展长三角城市网络结构时空演变研究。高铁班次数据来源于中国铁路客户服务中心，主要包括高铁的车次、站序、站点、时间等内容。中国高铁是指时速250 km及以上的铁路，《中长期铁路网规划》将部分时速200 km的线路也纳入高铁网范畴，为便于数据获取，本文将高铁班次范围扩展至所有动车组列车（G、C、D车型）。本文以长三角地级及以上城市为研究对象，以2011年、2021年为时间节点，利用高铁班次数据解算直达城市（两城市间无需换乘即可到达的城市，一个城市可能包含多个站点，只要经过城市任一站点即可认定为直达）情况，进而构建城市网络邻接矩阵。此外，城市与站点数据不匹配，应先建立城市与站点的关联关系，再进行数据统计形成城市网络邻接矩阵。

1.2　研究方法

1）网络密度是网络中实际存在边数与可容纳边数上限的比值，可反映网络节点联系的紧密程度。具有 n 个节点的城市网络，其网络密度可表示为：

$$D=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}b_{ij}\Big/n(n-1) \tag{1}$$

式中，b_{ij} 为城市 i 到 j 的直达情况，若为直达，值为1，反之为0；D 的取值范围为0~1，值越大，城市联系越紧密。

2）网络中心性。中心度是描述网络节点重要程度的度量指标，其标准化计算公式为：

$$CD(k)=d(k)\big/(n-1) \tag{2}$$

式中，$d(k)$ 为节点 k 的度；$CD(k)$ 介于0~1之间，值越大，节点与其他节点的联系越广泛。

中心势是刻画网络整体集中程度的度量指标，通过统计网络中各节点中心度的差异情况来反映网络的集聚特性。其计算公式为：

$$CD=\sum_{k=1}^{n}\left(CD_{\max}-CD(k)\right)\Big/(n-2) \tag{3}$$

式中：$CD_{\max}$ 为网络节点中心度的最大值；CD 介于0~1之间，值越大，网络越集中，节点等级差异越明显。

3）网络联系强度可反映城市联系的强弱程度，定义为两两城市高铁班次之和，计算公式为：

$$S_{ij}=N_{i,j}+N_{j,i} \tag{4}$$

2　网络密度视角下城市网络结构演变

经济发展、交通先行，作为我国区域经济发展蓝图的先行者，长三角的高铁建设领跑全国。2019年12月徐盐高铁开通运营，宿迁、淮安、盐城和连云港4市正式接入长三角高铁网络，高铁城市数量由2011年的19个增至40个，高铁城市占比也由46.34%升至97.56%，基本实现了高铁城市的全覆盖（舟山是海岛城市，至今未通火车）。此外，随着高铁城市数量的不断增加，长三角直达城市对由2011年的321个增至2021年的1 239个，意味着每个高铁城市平均直达城市数量由17个增至31个；相应的，高速铁路的网络密度由0.20升至0.76，10年间增长近4倍，城市间的联系越来越紧密。

长三角省内和省际网络密度见表1。在省内网络密度方面，2011年浙江省高铁城市数量最多，除湖

州、丽水和舟山外，8个城市建立了44个直达城市对，省内联系最紧密，网络密度最高；江苏省高铁城市空间分布不均衡，以长江为界，长江以南的5个城市均为高铁城市且相互连通，而长江以北的8个城市中，除徐州外其余城市均未开通高铁；安徽省高铁城市分布在以六安、合肥为横轴，宿州、蚌埠为纵轴，滁州为交汇点的轴线上，仅包含12个直达城市对，网络密度最低。到2021年，各省网络密度继续保持增长势头，浙江省高铁城市发展最均衡，除舟山外，其他城市均保持互联互通；江苏省高铁城市发展迅速，随着苏北4市的加入，已建成覆盖全省的高铁网络，网络密度在5年内增长了3倍，连云港、宿迁等处于从属或边缘地位的城市也在高铁网络的逐步完善中获益；相较于江苏省，安徽省也实现了高铁城市的全覆盖，但城市间差异较大，部分城市仅有少量连接，距离“市市通”还有一定差距。与省内情况相似，省际网络密度差异同样明显，上海作为我国最大的经济中心城市，对长江流域乃至全国都有辐射带动作用，长三角尤为明显，上海与3省的网络密度取决于3省高铁城市数量，网络密度高于3省的省内网络密度；浙江省高铁建设起步较早，在省际联系中占主导地位，10年间省际网络密度均高于与其他两省的省际网络密度。直到2021年，3省省际网络密度趋于同等水平。

表1 长三角省内和省际网络密度

省市	2011年				2021年			
	上海	江苏	浙江	安徽	上海	江苏	浙江	安徽
上海	0.00	0.23	0.45	0.08	0.00	0.84	0.83	0.74
江苏	0.23	0.19	0.29	0.12	0.84	0.81	0.76	0.73
浙江	0.45	0.29	0.40	0.16	0.83	0.76	0.82	0.76
安徽	0.08	0.12	0.16	0.05	0.74	0.73	0.76	0.71

3 中心性视角下城市网络结构演变

网络密度仅能评价网络整体发育水平，无法体现网络节点的重要程度。本文通过网络中心性指标探究长三角城市网络的结构和属性特征，节点中心度演变趋势见图1，长三角高铁网络的节点中心度呈上升趋势，与网络密度类似，不同时间节点呈现出不同形态。2011年长三角高铁网络正处于发育期，国家干线铁路是其主要组成部分，高铁城市数量较少，41个城市中仅有20个城市为高铁城市。高铁城市的空间分布具有鲜明的沿途效应，京沪高铁连接北京和上海，在长三角横跨江苏、安徽两省，江苏省的6个高铁城市和安徽省的宿州、蚌埠和滁州均分布在该干线上；安徽省的合肥、六安则分布在沪汉蓉快速客运通道合宁段、合武段；沪昆高铁沪杭段、杭长段串联了嘉兴、杭州、绍兴、金华和衢州5个高铁城市；此外，作为国家铁路一等级别的甬台温铁路也进一步丰富了浙江省和长三角高铁城市的联系。上海作为众多国家干线铁路的交汇地，在长三角高铁网络中处于核心地位，但此时的高铁网络多为干线相连，节点中心度差异并不明显，真正的网络格局尚未形成。2021年长三角高铁网络走向成年期。商合杭、徐盐高铁开通运营，填补了安徽和江苏两省高铁城市的留白，高铁城市中心度进一步提升。上海、南京、杭州连接除自身以外的所有高铁城市，中心度达到0.97，合肥、徐州、温州等城市也表现出较高的中心性，即使是新加入高铁网络的宿迁，其中心度也达到了0.48。高铁网络的中心势由2011年的0.29降至2021年的0.23，网络集聚程度减弱，呈现出多中心、均衡化的多极网络模式。

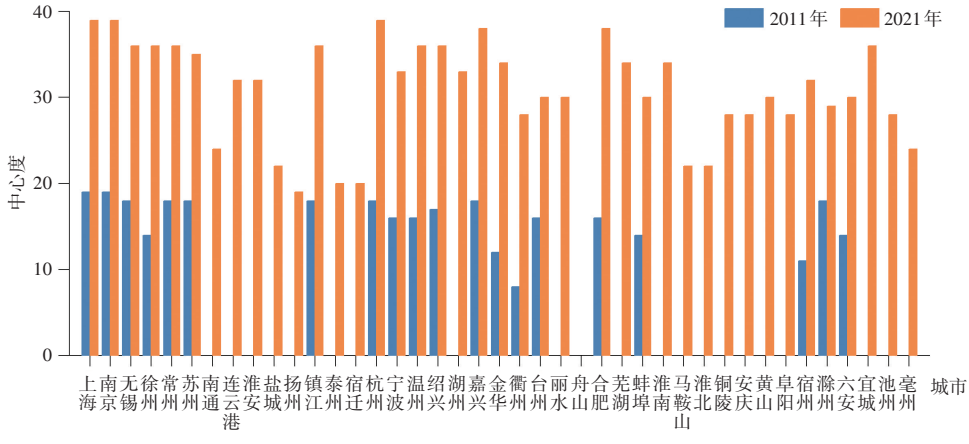
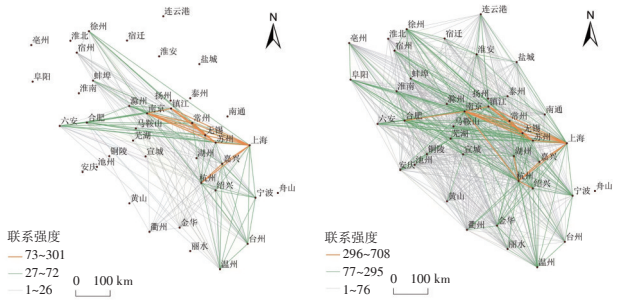


图1 高铁城市中心度

4 联系强度视角下城市网络结构演变

由于城市联系间差异明显，仅以网络密度、网络中心性无法全面反映长三角城市网络的真实情况，因此本文以网络联系强度来表征长三角高铁网络结构的演变。根据联系强度计算公式将长三角高铁客运班

次的有向矩阵转换为无向矩阵，即以主对角线为对称轴将两边对应元素相加，计算得到长三角城市间的联系强度；再利用自然间断点法对联系强度进行分级，兼顾组内相似性和组间相异性原则将联系强度分为高、中、低3个等级，分级结果可视化展示见图2。



a 2011年　　b 2021年

图2　高铁网络联系强度

总体来看，长三角在2011年、2021年的高铁联系强度分别为6 591、41 307，增长的联系强度既依赖于已有高铁城市联系的加深，又源于新增高铁城市联系的拓展，其中高强度联系分别为3 506、10 440，强度增长全部源于已有高铁城市新增的客运班次，增幅较平稳；中强度联系分别为2 176、20 287，飞跃式增长主要得益于越来越密的高铁网络弱化了地理距离对城市联系的制约，强化了边缘城市与核心城市的联系；低强度联系分别为909、10 580，边缘城市的连通性得到显著改善。此外，对于单个时间节点，2011年高铁城市数量较少，城市间联系也较集中，联系强度等级呈阶梯式分布；2021年高铁城市实现“全覆盖”，3个等级的联系强度仍在增加，但增幅差异明显，高、低强度联系增长后劲不足，这是由于高强度联系的城市已形成“公交化”运营模式，列车间隔时间短、开行密度大，低强度联系则受限于城市等级和地理距离的双重影响，中强度联系的增长势头强劲，且仍有较大的增长空间。

高强度联系是网络中强度层级最高、结构也较稳定的联系，能有效识别城市网络中的交通主轴线。上海是长三角乃至全国重要的交通枢纽，京沪高铁、沪昆高铁、沿海通道、沿江通道等多条客运专线在此交汇。沪宁城际铁路串联南京、镇江、常州、无锡、苏州和上海等城市，构建起长三角高铁网络的主骨架；沪杭城际铁路连接上海和杭州，途经嘉兴，构筑出该地区高铁网络的次骨架。主、次骨架以上海为交汇点形成“一城两翼”结构，是长三角客运最繁忙的高铁线路。统计数据显示，10年间上海—南京一直是该地区高铁网络联系强度最大的城市对，平均每4 min就有1列火车出发。随着时间的推移，高强度联系也在不断变化，杭州—金华、杭州—绍兴、杭州—湖州先后上升为高强度联系，杭州的交通首位度得到进一步提升。此外，得益于宁杭客运专线的持续发力以及合宁铁路普速列车的调整，南京—合肥、南京—杭州的城市联系也越发密切，省会城市联系强度提升对长三角一体化发展具有重要意义。不同于高强度联系的空间集聚特性，中强度联系空间表现较分散，研究初期中强度联系主要分布在跨区域干线沿线上，典型代表为京沪高速铁路线上的徐州、蚌埠，沿江通道的六安、合肥以及沿海通道的宁波、台州和温州等；随着徐盐高铁、合安高铁、金温铁路等短途城际客运的开通运营，越来越多的客运支线依附干线发育扩张，中强度联系在空间上进一步扩展，辐射整个长三角的中强度联系网络已经形成。在中强度联系的基础上，低强度联系进一步分化，拥有更多的直达城市对，仅以2021年为例，中强度联系有155对，而低强度联系则有465对。低强度联系让更多的城市得以连通，尤以边缘城市为主。综上所述，一个覆盖面更广、结构更合理、衔接更顺畅的高铁网络在长三角初步形成。

5　结　语

高铁的快速发展显著影响了城市在交通网络中的可达性和连通性，进而影响城市的区位优势及其在城市关系网络中的地位。本文采用网络密度、网络中心性和联系强度来分析2011—2021年长三角高铁网络结构和演变特征，得到的主要结论为：①网络密度提升显著，多数城市已处于强连接状态，相较于浙江省和江苏省，安徽省高铁网络密度还有较大的上升空间；②城市中心性的时序变动在一定程度上重塑了网络的空间格局，改变了由少数城市主导的网络格局，高铁网络也从区域极核模式向多极网络模式转变；③城市联系的空间形态呈现“上海—南京—杭州”三角形中心格局，中心格局之外又形成以合肥、苏州、无锡、常州等城市为次级核心的多个多边形空间网络。

研究结果对于确定长三角高铁网络城市等级具有重要意义。高铁网络的不断建设改善了沿线城市的联系，特别是对于人口密集和经济发达的城市。高铁网络中核心城市应充分发挥枢纽作用，不断扩大辐射范围，促进经济社会跨越式发展。长三角高速铁路仍在进一步建设中，高铁网络的不断完善必将推动长三角一体化高质量协调发展。

（下转第80页）