

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

陈维肖^{1,2,3}, 刘玮辰^{1,2}, 段学军^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院流域地理学重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 当前,以“流空间”视角阐释现代交通运输方式在实现区域一体化中发挥的作用,通过关联性描述其网络空间组织过程,能为交通与城市体系互动发展提供科学支撑。基于此,以2000年以来铁路客运班次数据为依托,应用社区发现算法分析长三角城市群铁路客运网络及空间变化特征,结论如下:①城市群发育出京沪社区、浙江社区、皖江社区和苏中北社区等子群,各社区内部为铁路客运联系的主要范围和方向,且表现出差异性空间联系格局变化;②高内部联系社区具有较高外部社区间联系强度,枢纽城市间多发生跨社区高联系,形成不依赖于铁路可达性的“核心-边缘”式结构;③按空间特征将各社区分为单核心社区、双核心社区、多核心社区和无核心社区,从社区内联系模式看,核心城市数量不断减少、较高联系通道不断发育,但两者间存在不匹配;④从社区间联系模式看,高速铁路在增强跨社区交流过程中扮演重要角色,核心城市间联系增强,客运网络由通道指向转变为枢纽指向。

关键词: 流空间;铁路客运;社区发现;长三角城市群

DOI: 10.11821/dljy020190573

1 引言

2000年以后知识经济时代到来,区域发展方式的转变带动社会经济要素空间组织变化^[1]，“流空间”逐渐成为描述各地间关系的重要方式^[2]。区域依托现代交通运输方式和通信技术形成了城市网络^[3]，作为全球化、信息化时代的产物，该网络由具有相似或互补特质的城市所构建多层次、多形态空间组织，其发展不受制于行政区划等限制，且在多种空间张力交互作用下，能突破原有中心地理论腹地关系局限^[4,5]。分析各类“流空间”网络集聚与扩散组织结构、节点间联系、节点及连接通道职能，从多视角对要素组织模式及演变规律进行实证研究，以此丰富和发展城市空间组织理论，正成为研究热点。从研究对象看，包括交通运输流^[6-8]、信息传输流^[9-11]、产业组织关系流^[12,13]、资金流^[14]等，并开始讨论人口迁移流动、地区间科技协作等^[15-17]对区域发展、城市间联系的影响，结合实体和虚拟要素流刻画网络结构；从研究数据上看，由相关行业部门年鉴、公报等统计数据，到逐渐采用城市间联系实时数据如能体现列车经停城市和列车停靠密度的铁路列车时刻表及企业总部分部^[18,19]、产业链上下游关系等空间组织数据^[20-22]，并在计算机大数据采集技术升级过程中实现更广泛类型和更大数据量的获取；从研究方法上看，由引力模

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2020-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871123, 41071085)

作者简介: 陈维肖 (1991-), 女, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事区域规划与可持续发展研究。

E-mail: cwxemail@163.com

通讯作者: 段学军 (1970-), 男, 内蒙古赤峰人, 研究员, 博士生导师, 主要从事流域资源综合利用与可持续管理研究。E-mail: xjduan@niglas.ac.cn

型叠加城市间可达能力指标等模拟方法估算两地间产生要素联系的可能^[23], 到实现通过网络分析工具对复杂网络中各节点与边的空间特征描述^[6,9,20], 除测算拓扑属性外, 开始寻找各节点的关系模式, 探讨存在凝聚子群的数量及成员间、社区间的关系^[6,24,25]。交通行为是各地间实际交流的重要载体, 高速公路、高速铁路、民用航空、城市轨道交通等现代交通运输方式涌现, 引导各种要素汇聚^[26]并依托交通通道形成一定范围内的联系纽带和发展轴^[27,28], 在区域联系“时空压缩”同时实现结构重塑^[29,30]。“流空间”视角逐渐取代场所空间成为主要方向^[5,31,32], 但考虑到连续尺度断面数据的获取难度, 部分数据体量、代表性、时效性等存在不足; 另一方面, 往往只关注网络结构特征各数值解读, 而忽视对空间内部联系发生、发展逻辑关系深入研究, 导致研究创新性和实践指导意义不强。

铁路是中国国民经济动脉^[33], 随既有线提速增能和高速铁路网建设, 客运速度达到300 km/h以上, 其所扮演角色更加丰富, 依靠大运量、高速化的组织方式担负起城市群内部城际运输责任, 以此为核心构建综合交通网络^[34]。城市间要素关联受地理空间制约, 存在明显的距离衰减效应, 通过铁路提速扩大城市通达小时圈范围, 由于不同层级城市节点在铁路网络中地位差异, 认知各城市节点在铁路客运网络中职能及其相互关系的形成演化是本文的核心。以2000年以来不同重要时间节点铁路旅客列车班次数据为基础, 以长三角城市群为例, 应用社区发现算法深度剖析城市群铁路客运网络及空间特征变化, 解释以社区为单元的铁路客运关联模式, 以期能为以交通流为代表的区域“流空间”研究提供新视角, 并为合理利用铁路客运服务实现区域一体化提供科学支撑。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 城市铁路客运联系强度 本文采用服务于两城市间的客运列车班次之和反映铁路客运联系流强度, 因列车班次数据为“供给侧”数据, 是铁路公司通过详细市场调研和长时间尺度运营反馈所形成的结果, 能在一定程度上代表客流:

$$C_{ij} = C_{i \rightarrow j} + C_{j \rightarrow i} \quad (1)$$

式中: C_{ij} 为城市 i 与 j 间铁路客运联系强度; $C_{i \rightarrow j}$ 为城市 i 到城市 j 列车班次数; $C_{j \rightarrow i}$ 为城市 j 到城市 i 列车班次数。

城市铁路列车班次数为:

$$N_i = C(T_k) \quad (2)$$

式中: N_i 为城市 i 的列车停靠班次数; T_k 为第 k 班经停列车; $C()$ 为计数函数。

2.1.2 社区发现模型 社区也称作集群, 指在一个复杂网络结构中, 由部分相互间存在较紧密联系节点所形成的子集, 其最重要特质就是社区内部连接密度高, 而与社区外节点联系较低。对社区结构的研究是解释单个社区及整个空间网络构造形成发展的重要组成部分, 其中社区发现就是识别出具有相似性质的一个或多个组团(集群)的过程, 当今学者已能通过多种算法较为准确划分出不同需求目标下的社区情形: 如 Walktrap 等已被广泛运用于交通流视角下的区域空间研究^[35-37]。本文选用 Sobolevsky 等于2014年构建的“combo”分区方法^[38], 该算法完全基于连接强度将各节点分配给对应社区, 通过对多种已有算法测试, 认为本方法能提供最优“模块化”解决方案, 最终实现社区内部存在最大化连接并在社区间连接最小。在算法的迭代过程中, 将连接最为紧密的节点对放入同一个社区, 具体算法过程见 Sobolevsky 等^[39]。

2.2 数据处理

本文长三角城市群内2000年、2008年铁路列车班次数据来自铁道部运输局与中国铁道出版社联合出版的2000年4月、2008年8月中国铁路时刻表，2018年数据来源于2018年8月12306铁路客服中心网站。统计铁路运行图定旅客列车，不包括节假日等开行的临时旅客列车。在数据采集时，涵盖车次、类型、出发站、出发城市、到达站、到达城市等，并分别以“列车车次-出发城市/到达城市”和“出发城市-到达城市”进行汇总，得到每班次列车途径城市数据及市域尺度铁路客运联系O-D流量矩阵。研究中只考虑能在城市群内部提供服务的客运列车，排除途径或城市群内始发/终到、但在城市群内无2个或以上城市停靠的列车。长三角城市群范围参考《长江三角洲城市群发展规划》所确定的26个地级以上城市。为讨论各年铁路客运网络空间联系结构，城市对联系空间特征均采用自然断点法将当年份全部城市对联系量分为高联系、中高联系、中联系、中低联系和低联系五类进行成图。

3 铁路客运网络空间联系结构

3.1 铁路客运网络整体空间特征

2000年以来，随六次铁路提速与《中长期铁路网规划》下的高速铁路建设，长三角城市群铁路客运网络呈现整体扩张态势。铁路基础设施持续投入，除对既有京沪铁路、沪昆铁路、杭甬铁路、宣杭铁路、皖赣铁路、淮南铁路、宁铜铁路、合九铁路、宁启铁路等改造扩能外，新建最高运营速度300 km/h以上客运专线沪宁城际、京沪高铁、沪昆高铁、杭甬高铁、宁杭高铁、合蚌高铁、合福高铁等，250 km/h以上宁安城际、合宁城际、甬台温铁路（运营200 km/h）。铁路通达城市由2000年19个升至2018年25个，扬州、泰州、南通、盐城、池州、台州在研究时段内依次纳入铁路网。服务于长三角城市群内各市间旅客运输的列车数量持续增长，2018年总数达1396班，为2000年（242班）5.77倍、2008年（460班）3.03倍（图1）。其中高速动车组830班，动车组217班，占列车总数比重由2008年22.83%升至2018年75.00%，高速铁路逐渐成为城市群铁路客运服务的主力，仅宣城、盐城无动车组通达。普速列车总量下降，速度较慢的普快列车减

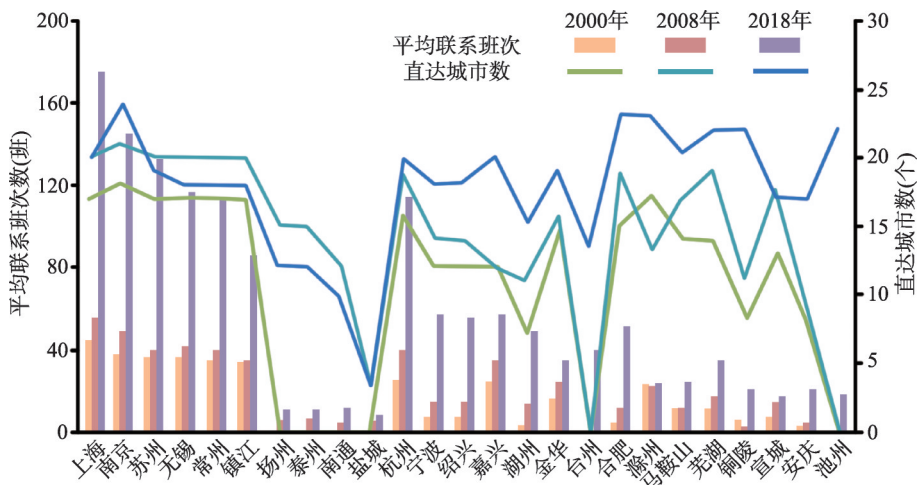


图1 长三角城市群内各城市铁路客运发展

Fig. 1 Development of railway passenger transport in the Yangtze River Delta urban agglomeration

少, 并转向以跨局长距离运输为主, 管内城际普速列车只占普速列车总数14.04%。各城市间铁路客运联系的强度不断增加、广度不断拓宽, 2000年、2008年、2018年分别有133个、179个、222个城市对拥有列车直连, 占当年已开通铁路客运服务城市的77.78%、70.75%、74.00%, 动车组服务由2008年39个城市对增长到2018年166个城市对, 主要客运通道不断编织高层级联系的同时, 客运网络逐渐延伸至城市群边缘地带, 中心与外围城市间建立起更广泛的联系。城市对平均客运联系强度由23升至62, 其中利用动车组列车的平均联系强度达65, 已成为铁路客运主力。而城市间联系的变异系数呈逐渐升高过程(1.28、1.48、1.57), 排名前10%的城市对均为沪宁(京沪通道)与沪杭(沪昆通道)沿线城市, 三年分别有73.55%、72.61%、83.88%的列车参与服务, 两通道沿线城市作为经济带社会经济发展最为倚重的地区, 存在巨大的联系需求叠加形成区域内外联系的主要通道方向, 高速铁路开通使其拥有三复线铁路与双复线铁路的独特供给优势, 铁路客运列车数量成倍增长。沪宁沿线城市较沪昆沿线有一定优势, 前5%联系总量城市对除2018年的上海-杭州外均为沪宁沿线城市。

2000年前, 主要采取通过一定数量长距离旅客列车在途径城市密集区的多车站停靠满足短距离人员流动, 弥补城市群城际客运能力不足并提高列车载客率, 长距离为主、兼顾中短途成为早期铁路客运状态。随高速铁路发展, 专门服务于城市群内城际客运的短途高速铁路列车数量明显增加, 新建客运专线能实现货运与客运、普速与高速的分离, 并通过先进的列车调度系统实现高运营速度下的高发车频次, 城际列车网络逐渐密集, 以满足城际间高要素联系需求。但京沪、沪汉蓉、沪昆、合福等高速铁路通道上的长距离高铁列车在城市群内部除停靠上海、南京、杭州、合肥等枢纽城市外, 仅选择性停靠部分沿线城市少量协助分担与主要中心城市间城际客运服务, 并利用以枢纽城市为终点的城际列车系统将客流输送至枢纽。有限的中长距离高铁列车停靠与萎缩的普速列车开行, 引导无论是城市群对外联系还是内部不同城市组团间联系更加依赖于枢纽城市, 产生职能分工。

3.2 客运联系社区识别

利用 combo 社区发现算法将长三角城市群铁路客运服务划分为多个子空间(表1)。划分结果体现城市群如下特征: 一方面, 通道效应显著, 京沪、沪昆、淮南-宣杭、宁启-兴长等铁路通道沿线城市分别位于同一社区内, 依靠本线内开行的较多班次列车串连起沿线地区联系。另一方面, 社区内存在经济一体化趋势, 沪苏锡常地区形成了紧密结合的一体化区域, 高强度要素流动催生铁路客运联系网络发展; 滁州作为南京都市圈的重要成员, 加之铁路通道获取优势, 产生与沪宁沿线城市特别是南京的较高联系。此外, 还受到行政区影响: 各社区边界逐渐与省域边界重合, 形成本省范围内的高班次网络, 皖江社区与浙江社区成员最终均为同省城市。

表1 长三角城市群铁路联系网络的社区发现

Tab. 1 Community detection of train networks in the Yangtze River Delta urban agglomeration

年份	京沪社区	浙江社区	皖江社区	苏中北社区
2000	南京、苏州、无锡、常州、镇江、滁州	上海、杭州、宁波、嘉兴、金华、绍兴	合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、宣城、湖州、安庆	-
2008	南京、苏州、无锡、常州、镇江、滁州、上海	杭州、宁波、嘉兴、金华、绍兴	合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、宣城、湖州、安庆	扬州、泰州、南通、盐城
2018	南京、苏州、无锡、常州、镇江、滁州、上海	杭州、宁波、嘉兴、金华、绍兴、湖州、台州	合肥、芜湖、马鞍山、铜陵、宣城、安庆、池州	扬州、泰州、南通、盐城

注: 黑体为新加入社区城市; 因2000年苏中北地区尚未开通铁路客运服务, 该时段仅3个社区。

3.2 社区内部铁路客运联系特征

长三角城市群存在多个内部有显著高密度铁路客运联系的子社区，作为铁路客运联系的主要范围和方向，三年份社区内城市间平均联系强度分别为35、52、125，高于所有城市间平均与社区间平均，同时表现出高联系集中于京沪、浙江社区的特征（表2）。研究时段内，服务两社区内的列车占全部列车比例分别保持在50%与40%左右，京沪社区城市均两两直达，开行列车数由130班升至652班，浙江社区除台州与金华外也均能直接通达，开行列车数由114班升至613班。高速铁路在2008年后的铁路客运联系中扮演了重要角色，动车组列车通达城市与参与服务班次在京沪、浙江两社区都占据较大比例，两社区直达城市对实现100%高速铁路覆盖，3/4以上开行列车由动车组执行。长期以来，苏南与杭州湾是长三角经济发展水平最高、各种要素集聚与扩散活动最为旺盛的地区，其内部拥有强烈的城市间要素流动需求。该地区也较早通过铁路建设串连起主要城市，并在不断发展中实现通道能级提升，形成多条能兼顾城市群内外和内部主要城市间联系的铁路轴线，依托行驶于其上的大量中长距离列车叠加数量和频次不断增长的城际列车服务，满足主要城市间交互速度和密度成倍提升下人员物资转运需求，以期实现社区内的“供给”与“需求”平衡。

将社区内铁路客运联系可视化，各社区均呈现以部分城市为核心的差异性空间格局（图2）。京沪社区为带状网络，即在南京、常州、无锡、苏州等沪宁铁路沿线的城市间产生高流量，且这种格局在上海加入后被强化，逐步形成高水平联系均势团块，各城市间联系班次排名一直居于前列。浙江社区早期为带状网络，高联系沿沪昆铁路向外扩展，并随上海离开、湖州加入，杭州聚合能力逐渐增强，转变为以其为单一核心的多层级空间结构。相比京沪社区，浙江社区班次数增长有限，研究时段内首位城市对客运联系在全部城市对排名中均不能进入前十，除杭州外城市间客运联系仅杭甬沿线能在中高等级以上，虽浙东北地区有较强的经济发展水平，铁路客运需求与服务供给仍存在不协调，可能需经杭州中转换乘。皖江社区与苏中北社区内部铁路客运联系相对较弱，小部分城市间能存在中等以上水平，这些社区通过新建或改扩建既有铁路提升通达率，但大部分城市对维持在较低列车班次。皖江社区研究时段内空间联系形态变化较大，各阶段铁路基础设施建设引导形成不同内部结构，2018年形成融合沿江带状网络与合肥为中心面向沿江放射状网络的组合形态。皖江社区与苏中北社区内出现一定相对高联系方

表2 长三角城市群各社区内通达城市对数与通达列车数

Tab. 2 Number of city pairs and train number of each community in the Yangtze River Delta urban agglomeration

统计类型	2000年			2008年				2018年				
	京沪	浙江	皖江	京沪	浙江	皖江	苏中北	京沪	浙江	皖江	苏中北	
直达城市对	全部直达城市对(个)	15	15	12	21	10	15	6	21	20	20	6
	动车组列车直达城市对(个)	-	-	-	20	3	0	0	21	20	13	3
	直达城市对占有所有城市对比例(%)	100.00	100.00	57.14	100.00	100.00	71.43	100.00	100.00	95.24	95.24	100.00
开行列车	动车组列车直达城市对比例(%)	-	-	-	95.24	30.00	0.00	0.00	100.00	100.00	65.00	50.00
	全部开行列车数(班)	130	114	47	215	174	94	30	652	613	211	63
	动车组列车数(班)	-	-	-	80	11	0	0	500	472	107	26
	开行列车数占有所有列车数比例(%)	53.72	47.11	19.42	46.74	37.83	20.43	6.52	46.70	43.91	15.11	4.51
动车组列车比例(%)	-	-	-	37.21	6.32	0.00	0.00	76.69	77.00	50.71	41.27	

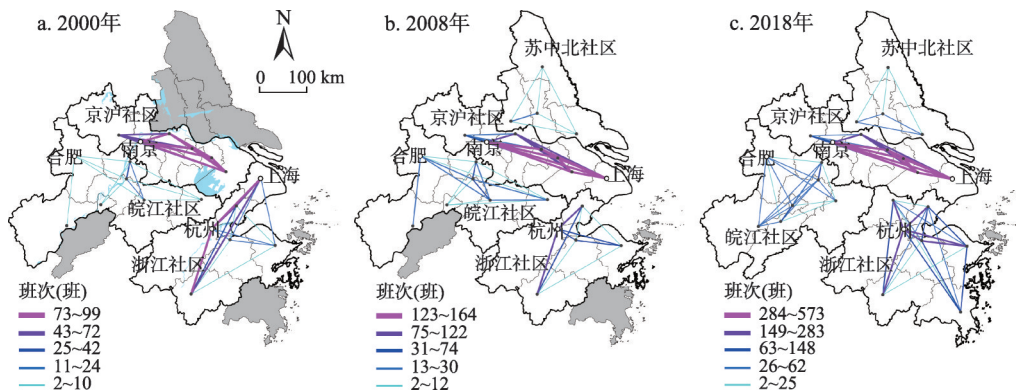


图2 长三角城市群各社区内部的城市间铁路客运联系特征

Fig. 2 Railway spatial connection within each community in the Yangtze River Delta urban agglomeration

向，但无论是宁安、淮南-皖赣还是宁通等轴线在直达城市对与列车班次的数量上均与京沪、浙江有较大差距，处于低水平发育阶段，这与社区内各市经济发展和相互作用的强度密切相关。其内部城市间客运需求量相对较小，与之对应，较薄弱的铁路设施供给也难以推动高联系的发生与发展。位于这些社区边缘地带特别是社区间联系通道上城市对间有较高客运联系，马鞍山芜湖间运行列车全部为与相邻京沪社区（南京）连接，扬州泰州间在2008年和2018年分别有70%和60%的列车为与相邻京沪社区（南京）连接，利用处于社区出口优势从而经停较多列车可成为社区内外中转平台，并为周边社区内城市间的更紧密联系提供机遇。

3.3 长三角城市群社区间联系特征

社区间铁路客运联系表现出不同于社区内部的特征（表3），因社区划分即要寻找联系密度较大的城市将其划分在同一社区内，社区间的铁路直达城市对与列车班次的数量都明显低于社区内部，三年份能服务社区间联系的列车仅占总开行列车数的54.55%、48.04%、58.38%。社区间列车直达城市对数占社区间全部城市对比例分别为75.83%、65.13%、67.10%，联系网络较松散、一定数量城市间无列车直达，城市群铁路客运服务并未捏合成有机整体。实现更加均等化的交通运输以满足不同地区间要素流动便捷性是城市群铁路客运发展目标之一，缩小城市群内的集团差异也成为2000年以来铁路客运服务能力提升的一项工作。社区间联系规模在研究时段内明显增强，更多不同社区城市获得了列车直连、列车班次增长，总社区间联系城市对由91个升至155个，开行列车总数由132班升至815班。高速铁路在其中同样起到关键作用，由于高速铁路建设分段实施且高速列车运行的交路存在通道依附等原因，导致社区间动车组服务城市对比例较社区内部低，但高铁班次数占比却与社区内相当，服务于社区间的高速列车在普速列车班次下降时保持绝对量持续上升。高内部联系社区具有较高外部联系强度，各社区与京沪社区联系班次均较多，上海、苏州等为长三角社会经济发展最好的地区，加之铁路网络中承东启西、贯通南北的独特区位优势，催生其他地区与之形成各种相互作用：京沪社区与浙江社区联系最为紧密，90%以上城市间列车直达，超六成跨社区停靠列车服务于此两社区间人员运输；其次为京沪社区与皖江社区间；相比之下，虽浙江社区与皖江社区间也有一定规模的联系班次数，但其联系规模及增长均不及京沪与皖江社区间。

将社区间联系可视化（图3）。高客运联系多发生于社区间的主要铁路枢纽城市间。联系网络的流量差异首先不表现于地理距离上，上海、南京、杭州、合肥等具有一

表3 长三角城市群社区间通达城市对数与通达列车数

Tab. 3 Number of city pairs and number of trains between every two communities in the Yangtze River Delta urban agglomeration

统计类型	2000年						2008年						2018年					
	京沪- 浙江	浙江- 浙江	浙江- 皖江	京沪- 浙江	京沪- 皖江	京沪- 苏中北	京沪- 浙江	京沪- 皖江	京沪- 苏中北	浙江- 浙江	浙江- 皖江	浙江- 苏中北	京沪- 浙江	京沪- 皖江	京沪- 苏中北	浙江- 浙江	浙江- 皖江	浙江- 苏中北
直达城 市对	36	37	18	33	41	18	20	2	13	45	46	7	38	0	19			
其中动车组列车直达城市对(个)	-	-	-	10	6	0	0	0	0	45	36	3	22	0	3			
直达城市对占所有城市对比例(%)	100.00	88.10	42.86	94.29	83.67	64.29	57.14	10.00	46.43	91.84	93.88	25.00	77.55	0.00	67.86			
其中动车组列车直达城市对比例(%)	-	-	-	30.30	14.63	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	78.26	42.86	57.89	0.00	15.79			
开行 列车	114	38	20	150	63	16	36	2	10	548	262	39	110	0	13			
其中动车组列车数(班)	-	-	-	24	10	0	0	0	0	435	222	24	61	0	6			
开行列车数占所有列车数比例(%)	47.11	15.7	8.26	32.61	13.7	3.48	7.83	0.43	2.17	39.26	18.77	2.79	7.88	0.00	0.93			
其中动车组列车比例(%)	-	-	-	16.00	15.87	0.00	0.00	0.00	0.00	79.38	84.73	61.54	55.45	0.00	46.15			

定范围的经济、政治等中心职能，也是大量连接多社区列车的始发或终到节点，能支配社区间交流过程，形成不依赖于铁路可达性的“核心-边缘”结构，其中上海与跨社区主要城市间的联系一直处于较高水平，依托区域中心城市引导高网络层级出现。在此基础上，邻近社区间存在联系网络化发展趋势。京沪社区与所有社区毗邻，能与多个社区产生直接客运联系，并在主要城市节点间构成较紧密关联格局，特别是高速铁路网络构筑

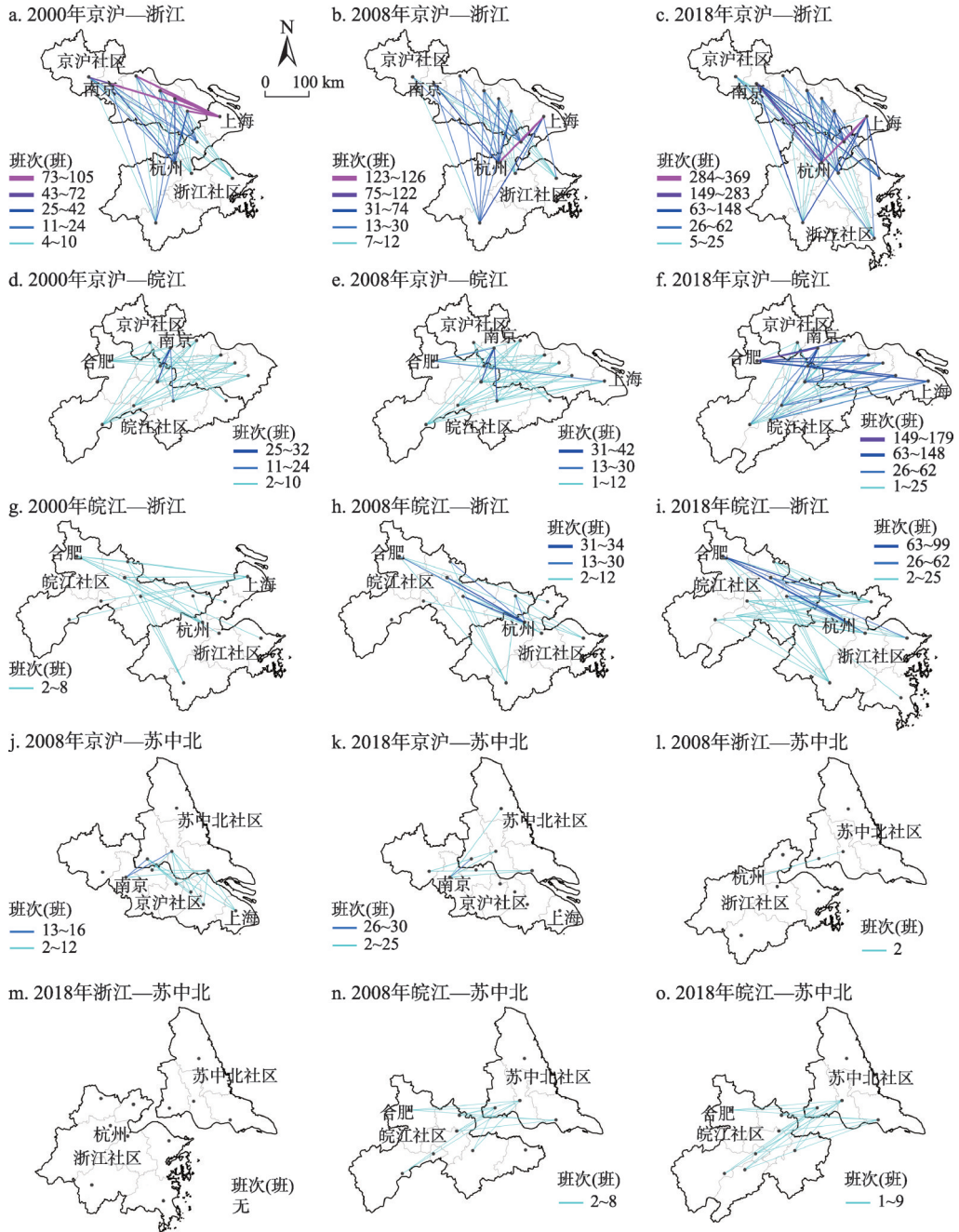


图3 长三角城市群各社区内部的城市间铁路客运联系特征

Fig. 3 Train spatial connection between every two communities in the Yangtze River Delta urban agglomeration

后,社区间直连铁路通道增多,为开行更多数量的城市群跨社区城际列车提供物质基础。到2018年,基于运营高速城际列车停靠站点多、发车频率高的特质,跨社区城市对开行列车班次摆脱低水平状态,京沪-浙江社区间依托宁杭高速铁路、沪杭高速铁路,京沪-皖江社区间依托合宁铁路、宁安城际铁路,沿线多城市间交织而成多对中等以上联系网络,为城市群各地区间交流所依赖的铁路通道轴线。但也看到,不衔接或距离较远社区间列车班次处于较低水平甚至无连接,整体联系较为分散,连接的发生多位于两社区邻近地区,苏中北社区铁路出口较单一,与各社区城市的联系均较稀疏,联系强度的增长和联系网络的扩张构造也不突出,当2018年无列车驶入沪宁、沪杭线后,苏中北社区与京沪社区、浙江社区间的联系呈现萎缩的逆网络化特征。

4 城市群铁路客运空间关联模式解析

4.1 城市社区类型划分

按照区域空间结构相关理论,抽象城市地域系统中的城市相互作用最终形成逐层嵌套的网络格局。从铁路城市节点看,主要包括在城市群或社区中拥有较高社区内外城市对连接数及联系班次数的中心枢纽城市节点和其它一般城市节点,中心城市是社区铁路枢纽和转运中心,而一般城市与中心城市间较高联系规模城市对网络是社区空间形态产生和发育的基础。从铁路联系通道看,将某一时段能大量集聚中等及以上班次城市对的铁路线作为该时段主要联系通道轴线,以2018年为例,中等及以上联系城市对仅占总联系对的26.13%,但平均联系180班,远高于中等以下城市间20班的平均联系量。以此,将城市群内部各社区在研究时段内空间特征凝练,主要包括无核心社区、单核心社区、双核心社区与多核心社区。

4.2 社区内铁路客运关联模式

单核心社区内部联系主要包括两种模式,一是中心城市为联系通道枢纽,如2008年、2018年浙江社区(图4e、图4f),实现由中心向外围的放射状高联系结构,而较低联系位于外围城市间;二是中心城市与主联系通道不重叠,如2018年皖江社区(图4i),高联系通道不经过核心城市,此通道上各城市间及与中心城市均有中等以上的联系。双核心社区即在相对中心与边缘位置同时布局较高停靠的铁路客运中心城市,呈双核结构,这种联系包括两种模式,一是高联系通道位于中心城市间,如2000年皖江社区(图4g),在区域中心城市与外围社区门户城市间形成高联系轴线,核心城市与部分其他城市间存在中等联系,多是较高联系通道发育地区,外围一般城市间为低等级的联系规模;二是高联系通道不连接两中心城市,如2008年皖江社区(图4h),社区内主联系方向上仅有一个核心城市,另一核心城市虽有高经停列车数,但与社区内城市间联系不如社区外。多核心社区即在区域内形成3个或3个以上铁路客运中心城市的结构,如京沪社区(图4a-图4c)和2000年浙江社区(图4d),其主要依托一条或多条贯穿社区的铁路通道形成,轴线上的各个城市间均有较高的联系强度,并利用该轴线和与之相交铁路,形成多方向联系,是区域发展所依托的轴线。无核心社区就是社区内尚未形成明显通道轴线和铁路客运中心城市,各地间联系班次处于较低水平,如苏中北社区(图4j、图4k)。

从社区内模式演变规律看,第一,有中心枢纽城市不断减少的极化倾向,虽总体上各城市间铁路客运联系均有较大幅度提升,但一些城市的中心职能被放大,一些城市的相对地位开始衰落,且枢纽城市逐渐与区域政治经济中心特别是省会城市重叠。在皖江社区与浙江社区,杭州与合肥铁路客运联系的中心地位因以其为中心的高速铁路连接通

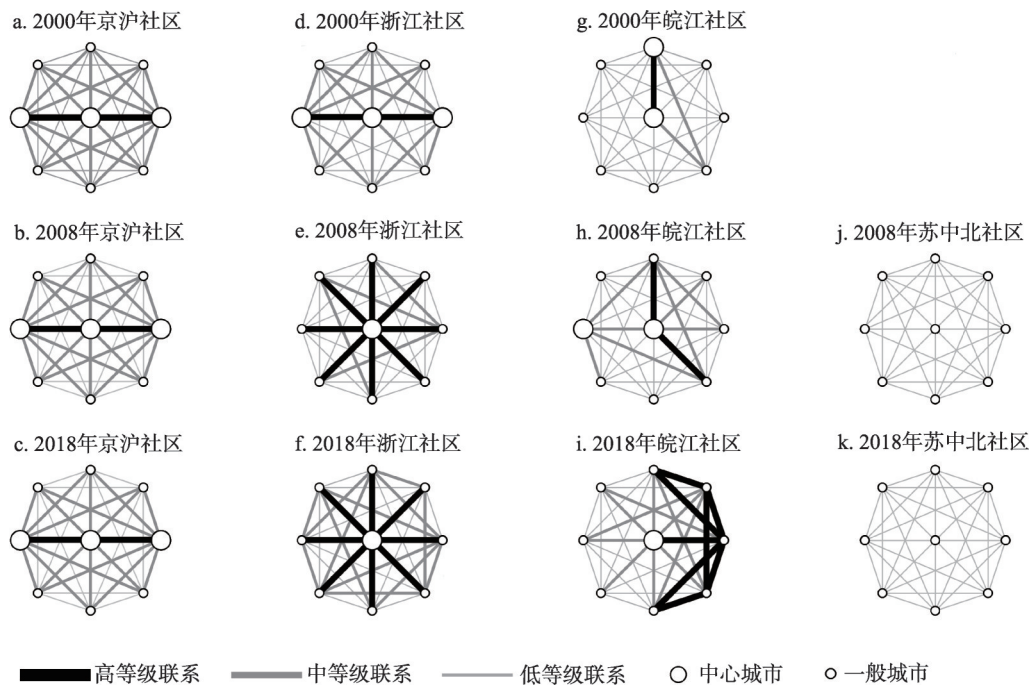


图4 长三角城市群铁路网络社区内部联系类型变化

Fig. 4 Types of the train connections within communities in the Yangtze River Delta urban agglomeration

车得到强化，直接改变原有社区内部状态为单核心。2018年仅京沪社区仍保持多核心，且同样出现了列车班次向位于东西两端上海、南京两门户城市集聚的特征。第二，通道轴线不断发育，串连主要城市并向外扩张，即使非中心城市通路也出现一定数量高联系。高速铁路强化传统通道通行能力，并在原有无直连城市或可能客运走廊方向形成新通道，因其高频次的公文化运输组织，加之在多通道间、多方向上开行不以枢纽城市为终点的跨通道列车，将更多城市纳入高联系网络。第三，通道与中心城市的不匹配可能，早期在一定范围内列车停靠等级差距不大，多以高联系通道为中心构建社区，而后出现一些高列车停靠数量的城市不位于社区内高联系通道上，在本文中，对于中心的理解即存在于整个铁路客运列车服务网络的优势地位，所以会出现社区边缘核心城市，利用自身社会经济等相对优势条件引导形成以此为社区的社区内外联系，通过与既有通道间逐渐增长的联系规模，形成核心城市-通道沿线城市的一对多空间形态。第四，社区可能出现中心的转移，铁路基础设施规划建设周期较长，铁路网络构架在研究时段内发生动态变化，造成各城市在铁路网络中的通达能力和经停班次数的变动，从而改变城市区位。这一过程在城市群外围铁路相对欠发达地区尤为明显，传统铁路通道多由其他社区延伸而来，在干支线铁路加密过程中，社区内部逐渐形成了符合自身发展与满足城市间交流的铁路网络形态，各城市逐渐与本地区的政治经济中心建立较为密切的联系，其间列车班次数量随之提升较大。

4.3 社区间铁路客运关联模式

长三角城市群内存在多种不同类型社区间的联系模式，包括多核与多核社区间（图5a）、多核与单核社区间（图5b、图5c、图5f）、多核与双核社区间（图5d、图5e、图5g）；双核与单核城市间（图5h）、单核与单核城市间（图5i）。另外，各类有核社区均与无核苏中北社区间产生联系（图5j~图5o）。总体上，不同社区主要铁路枢纽城市间能产

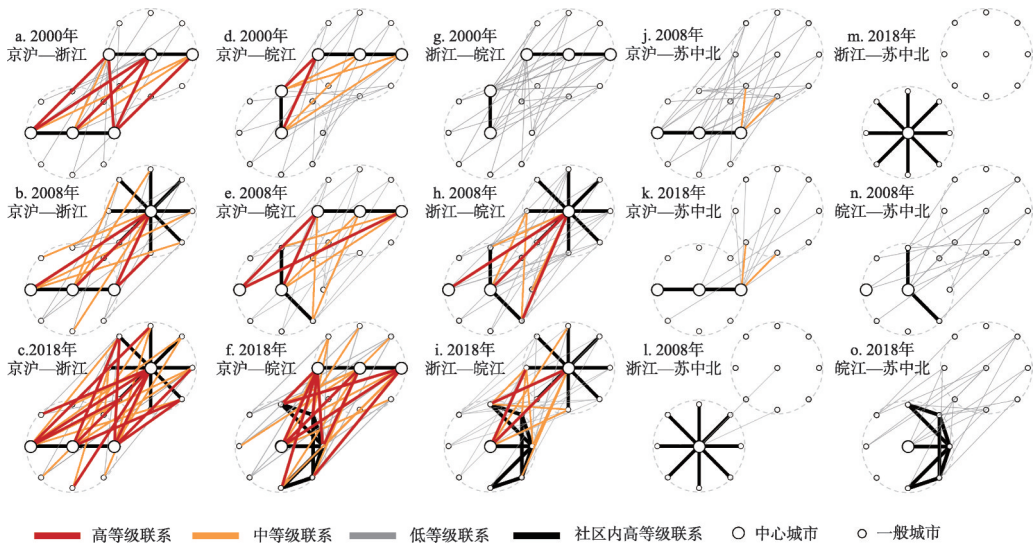


图5 长三角城市群铁路网络社区间联系类型变化

Fig. 5 Types of train connections between every two communities in the Yangtze River Delta urban agglomeration

生较高联系，而因社区间各城市相对位置、铁路基础设施布局情况表现出不同特征。铁路枢纽城市的跨社区联系强度高，铁路枢纽城市拥有较多的各类型列车停靠，这在单核心社区中更加突出，一方面会产生以此为心的多路径对外联系通道，另一方面可能中心城市位于相对外围地区。社区间高联系轴线的相对位置关系是影响社区联系的决定因素，双核心和多核心社区的中心城市依托干线铁路通道形成与发展，大多位于社区内部高联系网络上，若两社区间主干通道网络客运服务连通性较好或都位于某一更高层级通道上，能拥有较多的跨线贯通运营列车组织，则产生较高联系。若两社区间的铁路连通性差或线路等级低，部分列车绕行第三方社区，会降低两社区间联系的强度。社区间联系存在对等关系，两社区若都有一定规模本社区内联系网络和以一个或多个客运枢纽城市，则相应产生更多的社区间联系，苏中北等社区处于低水平发育状态，很难与其他社区产生较高联系。

从社区间模式演变规律看，① 社区间联系网络发展由点及面，中等以上联系由少量位于通道沿线或空间距离较近城市扩展到整个区域，这是通道网络不断发展成熟和城市在铁路客运系统中扮演角色发生转变的共同结果，各社区对间空间关联均表现出在不同的发展阶段，一些社区已经由点轴向网络化发展过程，一些则还处于初级发育中。② 跨社区联系与铁路连接互动发展，高速铁路在跨社区的发展过程中起到重要作用，当两社区间有了高等级铁路通道直连，就有提升联系强度的可能。传统铁路通道沿线社区客货运需求旺盛，通过不断提速增能，并向外延伸拓展并与其他铁路对接，良好的连通性促进其最终形成面向多方向的社区间规模联系。而位于城市群外围的社区只与少量外社区城市直接连接或连接线路等级低下，在整个研究时段内难以发育出高联系。③ 联系由通道指向转变为枢纽指向，早期高联系多依附于两地间的联系通路，即在跨社区铁路通道上的城市会有相互间高联系，一些社区正是由两社区交界地带城市与相连铁路形成客运核心与联系轴线，城市间列车经停的差距尚不突出，而后铁路发展特别是以区域内部分城市为核心的高速铁路建设导致不同城市体现出逐渐增强的客运服务差异性，作为多条高等级铁路的交汇点，长三角内各区域中心城市作为各社区核心存在更显著的高联系。

5 结论

城市群是城市发展一定阶段的高级空间组织方式,以铁路交通流为研究对象,通过对其联系网络演变分析,深入刻画中国在新发展阶段实现区域一体化过程中现代交通运输方式所扮演的积极角色,主要结论如下:

(1) 2000年以来,服务于长三角城市群的旅客列车由242班升至1396班,铁路直达城市对由133升至222,平均联系强度由23升至62。高速铁路列车占比到2018年已达75.00%、成为城际客运主力,强化主要铁路通道沿线城市联系并引导城市群对外联系与内部不同地区间联系更加依赖枢纽城市。

(2) 利用 combo 社区发现算法将长三角城市群铁路联系划分为京沪社区、浙江社区、皖江社区和苏中北社区。社区内部是城市群铁路客运联系的主要范围和方向,高列车班次集中于京沪和浙江社区内,各社区在研究时段内表现出以部分城市为核心的差异化空间联系格局。

(3) 社区间联系与社区内相比有较大差距,不衔接或距离较远社区间列车班次处于较低水平甚至无连接,城市群尚未通过铁路客运形成有机整体。高内部联系社区具有较高外部社区间联系强度,铁路枢纽城市多发生跨社区高联系,支配着社区间交流过程,形成不依赖于铁路可达性的“核心-边缘”结构。

(4) 将城市群内部各社区按空间特征划分为单核心社区、双核心社区、多核心社区和无核心社区,同类型社区可能衍生出多种内部关联模式。研究时段内中心城市数量持续降低,较高联系通道轴线不断发育,串连社区内主要城市并向外扩张,但铁路客运通道与中心城市存在不匹配可能,同时出现中心城市的转移。

(5) 跨社区联系存在于各类型社区间,中心枢纽城市间能产生较高联系,而因城市相对位置、铁路基础设施布局等表现出不同特征。社区间联系网络呈扩张态势,较高联系由少量通道沿线或距离较近城市扩展到整个区域,高速铁路在增强跨社区交流过程中起到重要作用,并由通道指向转变为中枢指向。

在进一步研究中,应深入分析不同列车种类与不同运行区间特别是普速列车与高速列车、管内列车与跨局列车在城市群铁路客运组织中发挥的作用差异。由于高速动车组列车、动车组列车、普速列车不同班次的运输能力和核载人数等存在差异,本文利用列车班次数据代表客流,尽管该数据是在铁路公司运营过程中通过市场客流数据精准估计而形成的,但不同型号列车与编组载荷能力差距较大,同时由于客票系统中不同班次在不同区间的票额分配差异,全程运行于城市群内部及上海铁路局管内的列车相比连接城市群内外的中长距离跨局列车能够提供更多座位数量用于城市群内部交流。需更精确描述各城市间铁路客运联系,并尝试将时间成本与列车班次有机结合起来,从而更真实的反映城市群铁路客运组织的空间过程、凝练模式规律。

致谢: 真诚感谢匿名评审专家在论文评审中所付出的时间与精力,评审专家对本文研究背景、结果分析、结论梳理、研究不足及展望等方面的修改意见,使本文获益匪浅。

参考文献(References)

- [1] Castells M. Globalisation, networking, urbanisation: Reflections on the spatial dynamics of the information age. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2737-2745.
- [2] 高鑫, 修春亮, 魏冶. 城市地理学的“流空间”视角及其中国化研究. *人文地理*, 2012, 27(4): 32-36, 160. [Gao Xin, Xiu Chunliang, Wei Zhi. Study on the sinicization of "space of flows" basing on the visual angle of urban geography. *Human*

- Geography, 2012, 27(4): 32-36, 160.]
- [3] Taylor P J. World City Network: A Global Urban Analysis. London: Routledge, 2004.
- [4] 马学广, 李贵才. 世界城市网络研究方法论. 地理科学进展, 2012, 31(2): 255-263. [Ma Xueguang, Li Guicai. Research methods for world city network and relevant inspirations. Progress in Geography, 2012, 31(2): 255-263.]
- [5] 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. 地理研究, 2015, 34(4): 711-728. [Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoxi. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks. Geographical Research, 2015, 34(4): 711-728.]
- [6] 陈伟, 修春亮, 柯文前, 等. 多元交通流视角下的中国城市网络层级特征. 地理研究, 2015, 34(11): 2073-2083. [Chen Wei, Xiu Chunliang, Ke Wenqian, et al. Hierarchical structures of China's city network from the perspective of multiple traffic flows. Geographical Research, 2015, 34(11): 2073-2083.]
- [7] 于涛方, 顾朝林, 李志刚. 1995年以来中国城市体系格局与演变: 基于航空流视角. 地理研究, 2008, 27(6): 1407-1418. [Yu Fangtao, Gu Chaolin, Li Zhigang. China's urban systems in terms of air passenger and cargo flows since 1995. Geographical Research, 2008, 27(6): 1407-1418.]
- [8] 吴威, 曹有挥, 梁双波, 等. 民用机场区域服务能力的结构与空间格局: 以长江经济带民用机场体系为例. 地理研究, 2019, 38(6): 1512-1526. [Wu Wei, Cao Youhui, Liang Shuangbo, et al. Regional service capability structure and spatial pattern of civil airports: A case study of Yangtze River Economic Belt. Geographical Research, 2019, 38(6): 1512-1526.]
- [9] 董超, 修春亮, 魏冶. 基于通信流的吉林省流空间网络格局. 地理学报, 2014, 69(4): 510-519. [Dong Chao, Xiu Chunliang, Weizhi. Network structure of 'space of flows' in Jilin province based on telecommunication flows. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(4): 510-519.]
- [10] 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. 地理学报, 2012, 67(8): 1031-1043. [Zhen Feng, Wang Bo, Chen Yingxue. China's city network characteristics based on social network space: An empirical analysis of Sina micro-blog. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(8): 1031-1043.]
- [11] Zhou Meng, Yue Yang, Li Qingquan, et al. Portraying temporal dynamics of urban spatial divisions with mobile phone positioning data: A complex network approach. International Journal of Geo-Information, 2016, 5(240): 1-21.
- [12] Taylor P J, Catalano G, Walker D R F. Measurement of the world city network. Urban Studies, 2002, 39(13): 2367-2376.
- [13] 王成, 王茂军, 柴箐. 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. 地理学报, 2015, 70(12): 1953-1972. [Wang Cheng, Wang Maojun, Chai Qing. The relationship between centrality and power in the city network. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(12): 1953-1972.]
- [14] 金彪, 颜丽玲, 沙晋明, 等. 中国省域信息流、资金流强度的空间差异: 以2015年京东手机交易为例. 地理科学, 2018, 38(2): 223-232. [Jin Biao, Yan Liling, Sha Jinming, et al. The spatial difference of the intensity of information and capital flow in Chinese provincial region: A case study of mobile phone transactions in Jingdong Mall in 2015. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(2): 223-232.]
- [15] Taylor P J. The new geography of global civil society: NGOs in the world city network. Globalizations, 2004, 1(2): 265-277.
- [16] 沈建法. 中国人口迁移, 流动人口与城市化: 现实, 理论与对策. 地理研究, 2019, 38(1): 33-44. [Shen Jianfa. Migration, floating population and urbanization in China: Realities, theories, and strategies. Geographical Research, 2019, 38(1): 33-44.]
- [17] 赵梓渝, 魏冶, 王士君, 等. 有向加权城市网络的转变中心性与控制力测度: 以中国春运人口流动网络为例. 地理研究, 2017, 36(4): 647-660. [Zhao Ziyu, Wei Zhi, Wang Shijun, et al. Measurement of directed alternative centrality and power of directed weighted urban network: A case of population flow network of China during "Chunyun" period. Geographical Research, 2017, 36(4): 647-660.]
- [18] 赵渺希, 刘铮. 基于生产性服务业的中国城市网络研究. 城市规划, 2012, 36(9): 23-28, 38. [Zhao Miaoxi, Liu Zheng. Research on China's city network based on production service industry. City Planning Review, 2012, 36(9): 23-28, 38.]
- [19] 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. 地理研究, 2017, 36(11): 2156-2170. [Liang Shuangbo, Cao Youhui, Wu Wei. Spatial-temporal evolution and influencing factors of logistics supply chain in the Yangtze River Delta: Based on international freight forwarding enterprises data. Geographical Research, 2017, 36(11): 2156-2170.]
- [20] 王海军, 翟丽君, 刘艳芳, 等. 基于多维城市要素流的武汉城市圈城市联系与功能分析. 经济地理, 2018, 38(7): 50-58. [Wang Haijun, Zhai Lijun, Liu Yanfang, et al. Urban connection and function in Wuhan urban agglomeration based on multi-dimensional urban factor flows. Economic Geography, 2018, 38(7): 50-58.]
- [21] Wall R S, Knaap G A. Sectoral differentiation and network structure within contemporary worldwide corporate network.

- Economic Geography, 2011, 87(3): 267-308.
- [22] 盛科荣, 张红霞, 赵超越. 中国城市网络关联格局的影响因素分析: 基于电子信息企业网络的视角. 地理研究, 2019, 38(5): 1030-1044. [Shen Kerong, Zhang Hongxia, Zhao Chaoyue. Determinants of the urban spatial network in China: An analysis through the lens of corporate networks within electronic information industry. Geographical Research, 2019, 38(5): 1030-1044.]
- [23] 王姣娥, 焦敬娟, 金凤君. 高速铁路对中国城市空间相互作用强度的影响. 地理学报, 2014, 69(12): 1833-1846. [Wang Jiaoe, Jiao Jingjuan, Jin Fengjun. Spatial effects of high-speed rails on interurban economic linkages in China. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(12): 1833-1846.]
- [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. 地理学报, 2017, 72(2): 224-241. [Chen Wei, Liu Weidong, Ke Wenqian, et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks based on the highway passenger flows. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(2): 224-241.]
- [25] 柯文前, 陈伟, 杨青. 基于高速公路流的区域城市网络空间组织模式: 以江苏省为例. 地理研究, 2018, 37(9): 1832-1847. [Ke Wenqian, Chen Wei, Yang Qing. Uncovering spatial organization patterns of regional city networks from expressway traffic flow data: A case study of Jiangsu province, China. Geographical Research, 2018, 37(9): 1832-1847.]
- [26] Yang H, Frédéric D, Wang J, et al. Comparing China's urban systems in high-speed railway and airline networks. Journal of Transport Geography, 2018, 68: 233-244.
- [27] Wang Y, Hao C, Liu D. The spatial and temporal dimensions of the interdependence between the airline industry and the Chinese economy. Journal of Transport Geography, 2019, 74: 201-210.
- [28] 王姣娥, 焦敬娟. 中国高速铁路网络的发展过程、格局及空间效应评价. 热带地理, 2014, 34(3): 275-282. [Wang Jiaoe, Jiao Jingjuan. Development process, spatial pattern and effects of high-speed rail network in China. Tropical Geography, 2014, 34(3): 275-282.]
- [29] Hu Hao, Wang Jiaoe, Jin Fengjun, et al. Evolution of regional transport dominance in China 1910-2012. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(6): 723-738.
- [30] 刘玮辰, 曹有挥, 吴威, 等. 长江经济带铁路客运通达能力空间格局及第三产业发展效应分析. 地理科学, 2019, 39(4): 626-635. [Liu Weichen, Cao Youhui, Wu Wei, et al. Spatial patterns and the tertiary industry effects of railway passenger accessibility in the Yangtze River Economic Belt. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(4): 626-635.]
- [31] 甄峰, 朱传耿, 赵勇. 信息时代空间结构影响要素分析. 地理与地理信息科学, 2004, 20(5): 98-103. [Zhen Feng, Zhu Chuangeng, Zhao Yong. New influencing factors of regional spatial structure in information era. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(5): 98-103.]
- [32] Taylor P J, Hoyler M, Verbruggen R. External urban relational process: Introducing central flow theory to complement central place theory. Urban Studies, 2010, 47(13): 2803-2818.
- [33] 金凤君. 基础设施与经济社会空间组织. 北京: 科学出版社, 2012. [Jin Fengjun. Infrastructure and Economic and Social Space Organizations, Beijing: Science Press, 2012.]
- [34] Wang Lei. High-speed rail services development and regional accessibility restructuring in megaregions: A case of the Yangtze River Delta, China. Transport Policy, 2018, 72: 34-44.
- [35] Pons P, Latapy M. Computing communities in large networks using random walks. Journal of Graph Algorithms and Applications, 2006, 10(2): 191-218.
- [36] 陈娱, 许珺. 考虑地理距离的复杂网络社区挖掘算法. 地球信息科学学报, 2013, 15(3): 338-344. [Chen Yu, Xu Jun. A Distance-based method of community detection in complex networks. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(3): 338-344.]
- [37] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [38] Hamilton R, Rae A. Regions from the ground up: a network partitioning approach to regional delineation. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, 2018, (10): 1-15.
- [39] Sobolevsky S, Campari R, Belyi A, et al. General optimization technique for high-quality community detection in complex networks. Physical Review E, 2014, 90(1): 1-19.

Spatial organization evolution of railway passenger transportation in the perspective of "space of flow": A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration

CHEN Weixiao^{1,2,3}, LIU Weichen^{1,2}, DUAN Xuejun^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

2. Key Laboratory of Watershed Geographic Science, CAS, Nanjing 210008, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Explaining the role of modern transport in realizing regional integration from the perspective of "space of flow" can provide scientific support for the interactive development of transport and urban system. Based on this, this paper uses the railway passenger data since 2000, and applies community detection algorithm to analyze the spatial organization of railway passenger transportation of the Yangtze River Delta urban agglomeration, in order to provide a new perspective for regional studies represented by transportation, and a guarantee for the study of regional integration through the rational use of railway passenger service. The conclusions can be drawn as follows: (1) We use combo community detection algorithm to divide the railway links of the Yangtze River Delta urban agglomeration into sub-groups, such as the Jinghu Community, the Zhejiang Community, the Wanjiang Community, and the Suzhongbei Community. These communities present different spatial linkage patterns and the main scope and direction of urban passenger rail links are concentrated within the community. (2) In general, the inter-community linkage is lower than the internal linkage of the community. The high internal contact community has a high degree of connection between the external communities. There is a high cross-community relationship between the railway hub cities, which forms a "core-edge" structure that does not depend on the accessibility of the railway. (3) According to the spatial characteristics, communities are divided into the single-core community, dual-core community, multi-core community, and non-core community. Different types of associations may be derived from the same type of community. During the study period, the core continued to decrease, while the higher communication channels continued to develop, connecting the main cities in each community and expanding continuously, but the channels did not match the core cities, and the transfer of core cities may occur. (4) There is a high connection between the cross-community hub cities, and the contact network is transformed from a channel point to a hub point. High-speed rails play an important role in enhancing cross-community communication and its spatial pattern changes from channel orientation to hub orientation. In the future study, it is necessary to analyze the role of different types of trains and trains in different operations. And we should combine the time cost with the number of trains, so as to more truly reflect the spatial process of urban agglomeration railway passenger transport organization.

Keywords: space of flow; railway passenger transportation; community detection; Yangtze River Delta urban agglomeration