

基于高铁流的中国城市网络结构特征演变研究

孙娜, 张梅青

(北京交通大学, 北京 100044)

摘要: 高铁的网络化发展促进了资源要素的快速流动与重新整合, 对城市关系产生了显著的影响, 基于高铁流逐渐成为探索城市和区域空间结构的重要视角。论文使用2014—2019年高铁客运班次数据和社会网络分析法, 对中国城市网络结构特征演变进行探讨。研究表明: ① 伴随高铁线网的不断延伸和加密, 城市网络整体上由东向西拓展, 网络规模扩大、密度提升; ② 节点功能和地位的时序变动重塑了网络的空间格局, 改变了由少数东部城市主导的网络格局, 呈现出多中心、均衡化的发展趋势; ③ 从关联形态看, 全国尺度上的复杂网络结构取代了区域尺度上的轴带式联系形态, 整体上与“八纵八横”网络相对应; ④ 城市网络的关联强度逐年提升, 形成了4个联系层级, 城市间的关系复杂而多样。

关键词: 高铁客流; 城市网络; 社会网络分析法; 结构特征; 演化; 中国

交通与信息技术的发展极大地弱化了地理距离和行政力量对要素流动的束缚, 推动着人员、信息、资金等在更广的空间上快速流动与交换, 场所空间逐渐被流空间所融合^[1-2]。新空间组织的出现和多元化的发展趋势导致孤立、静态的等级范式研究面临挑战, 开放与动态关联的城市网络成为研究的热点话题^[3-5]。交通基础设施承载着城市间的要素流动, 是城市网络形成的物质基础与必要前提^[6]。Lee^[7]、孟德友等^[8]、Chen等^[9]分别从航空、铁路和公路网视角探讨了不同空间尺度上城市网络的结构特征与组织模式, 王姣娥等^[2]、陈伟等^[10]、Yang等^[11]则主要基于多元交通流对城市网络的关联特征进行了刻画和比较。

随着3次《中长期铁路网规划》(下文简称《规划》)的提出与实施, 中国高铁运营里程迅速增长, 网络形态逐步凸显, 在交通系统中越来越处于主导地位。高铁的网络化发展促进了要素资源的流动与重新整合, 对城市关系产生了显著的影响, 逐渐成为探索中国城市和区域空间结构的重要视角^[12-13]。在城市群层面, 长三角城市群是研究的热点

区域, 孙阳等^[14]、Wang等^[15]、Xu等^[16]运用高铁客运班次数据对城市群网络的层级与功能结构进行了揭示。在国家尺度上, 王姣娥等^[17]、焦敬娟等^[18]、Jiao等^[19]主要围绕高铁建设不同时期中国城市网络特征进行了较为系统的研究, Diao^[20]、方大春等^[21]、马学广等^[22]则集中探讨了高铁流视角下城市网络的空间与联系格局。上述研究从多个视角剖析了高铁对城市网络结构的影响, 但还存在以下不足: 第一, 总体而言, 已有研究多聚焦于城市群层面, 大尺度的宏观格局认识相对较少; 第二, 由于数据复杂、不易获取, 大部分学者侧重于揭示网络的静态结构特征, 样本量、连续性和时效性方面的局限性导致研究无法准确判断网络的关联动向, 研究深度与广度有待提升。

鉴于此, 本文将以全国地级市及以上城市(下文简称为城市)为研究单元, 使用2014—2019年高铁客运班次数据, 采用社会网络分析法和ArcGIS可视化工具, 从网络规模与密度、节点中心性时序变动、网络关联形态与强度几个方面研究中国城市网络的结构特征及时空演变, 以期丰富城市体系的

收稿日期: 2019-09-09; 修订日期: 2020-01-19。

基金项目: 铁路总公司研究项目(N2018Z010)。[Foundation: Research Program of the China Railway Corporation, No. N2018Z010.]

第一作者简介: 孙娜(1988—), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 博士生, 主要从事区域经济、运输经济研究。E-mail: sunna2020@yeah.net

引用格式: 孙娜, 张梅青. 基于高铁流的中国城市网络结构特征演变研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(5): 727-737. [Sun Na, Zhang Meiqing. Network structure and evolution characteristics of cities in China based on high-speed railway transport flow. Progress in Geography, 2020, 39(5): 727-737.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.05.003

相关研究,并为高铁线网规划和城镇布局优化提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

客、货流汇集而成的交通流是城市间要素流动的重要载体和表现形式,也是城市关系最有效的反映^[23-24],但该数据复杂而难以获取,研究中常使用参量替代法进行表征。本文使用高铁客运班次表征基于高铁流视角下的城市网络关联强度,数据来源于《全国铁路旅客列车时刻表》(2014—2019年),这是铁路部门编制的城市间联系的计划班次,数据丰富、来源真实可查,且能够依据城市发展和对外联系需求的变化进行周期性的调整。其中,2014—2017年数据来自中国铁道出版社授权的极品列车时刻表,2018、2019年数据通过编制爬虫程序从中国铁路客户服务中心采集^①。依据2014年1月1日起实施的《铁路安全管理条例》对高铁的定义,研究涉及G、D、C三种车型。

由于列车时刻表中提供的是站点间列车的开行信息(如发车情况、停靠时间和票价等),而本文的研究单元是城市,故首先依据站点地理位置将其匹配到所在的城市^②,相应地,高铁城市即为城市网络的节点。按照研究需要,分别提取和整理了以下数据:1)城市经停列车数,是指一个城市所有的始发和过路列车,用于体现城市整体的对外联系情况;若一个城市设有多个站点,则进行站点数据的累加,这是因为高铁站点的设置对于城市自身发展和对外联系都有显著的积极影响。2)直达城市,是指从一个城市出发在不换乘车次的情况下可以到达的城市,直达城市对与城市网络中的联系相对应。3)依据直达城市的概念对城市间的开行列车数进行统计用于体现城市间的联系强度,对于往返列车数不一的情况选择较大的数值。

1.2 研究方法

社会网络分析法适合于不同类型的网络分析,

本文主要使用网络密度、中心度、中介度和中心势对城市网络联系与节点属性进行分析。

(1) 网络密度

网络密度用于度量节点间联系的紧密程度和网络整体的集聚力,被定义为网络中各节点间实际拥有的联系数与可能拥有的最大联系数之比,计算公式为:

$$ND = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_i(c_i, c_j)}{n(n-1)} \quad (1)$$

式中:ND表示网络密度; n 表示网络中的节点数^③; $d_i(c_i, c_j)$ 依据节点*i*与节点*j*之间的直达情况取值,如果能够直达,则 $d_i(c_i, c_j)=1$,若无法直达,则 $d_i(c_i, c_j)=0$ 。网络密度介于0~1之间,越接近1,表示网络密度越高。

(2) 网络中心性

网络中心性分析包括2个视角:一是对节点自身权力的量化,使用中心度和中介度2个指标衡量;二是对群体权力的量化,用于描述网络的整体结构,使用网络中心势进行分析。

1)中心度。中心度是考虑节点与其他节点的直接联系情况来分析其在网络中的权力,计算公式为:

$$C_D(c_i) = d(c_i) / (n-1) \quad (2)$$

式中: $C_D(c_i)$ 表示节点*i*的中心度; $d(c_i)$ 为节点*i*与网络中其他节点取得直接联系的数量,本文使用节点*i*的直达城市数表示。中心度介于0~1之间,越接近1,表示该节点越处于网络中的核心位置。

2)中介度。中介度考察的是一个节点对于其他节点间信息传播的控制力,计算公式为:

$$C_B(i) = \frac{\sum_{t=1}^n \sum_{s=1}^n G_{ts}(i) / G_{ts}}{(n-1)(n-2)} \quad (t \neq s \neq i, \text{且 } t < s) \quad (3)$$

式中: $C_B(i)$ 表示节点*i*的中介度; G_{ts} 表示节点*t*与节点*s*产生联系的最短路径总数; $G_{ts}(i)$ 是指节点*t*对节点*s*产生联系的最短路径经过节点*i*的数量。中介度介于0~1之间,越接近1,表明该节点对网络中其他节点资源的控制力越强。

① 2014—2017年的数据版本分别为2014年5月23日、2015年9月26日、2016年6月12日、2017年11月26日;2018年数据获取时间为7月5日,2019年为3月12日。

② 考虑数据的可得性和完整性,研究未考虑中国台湾、香港和澳门地区;同时,各年所包含的高铁城市数以高铁客运列车时刻表为依据,而非年底实际开通运营的高铁线路连接的所有城市。

③ 为了更好地体现高铁建设对全国城市联系的影响,在计算网络密度和中心度、中介度时均以全国城市数作为网络节点数(n);其中,2014、2015年分别为292、295个,2016—2019年以298个计算,数据来源为国家统计局。

3) 网络中心势。网络中心势与网络密度都用来考察整个网络的紧凑性程度,但二者的侧重点不同,相互补充,中心势度量的是整个网络的中心化、一致性程度,计算公式为:

$$C_D = \sum_{i=1}^n [C_D(c_i)_{\max} - C_D(c_i)] / (n-2) \quad (4)$$

式中: C_D 表示网络中心势; $C_D(c_i)_{\max}$ 是中心度最高的值。中心势介于 0~1 之间,数值越大,表明节点的连接程度越高,网络分布越平坦、等级越少。

2 网络规模、密度与节点中心性的时序变动

2.1 网络规模与密度

2014—2019 年是中国高铁建设的黄金期,高铁运营里程由 1.65 万 km 增加到 2.90 万 km,在全国铁路总里程中的占比从 14.70% 提升至 22.14%^④,成为世界上运营里程最长、密度最大的高铁客运网络。按照“八纵八横”网络规划的 4.5 万 km 总里程计算,当前已经完成了 64.44% 的建设任务并投入运营,网络由“四纵四横”向“八纵八横”拓展。

伴随高铁线网的扩张,城市网络规模不断扩大,网络密度逐年提升。统计数据显示(如表 1 所示),高铁城市由 2014 年的 133 个增加到 2019 年的 226 个,在全国城市总数中的占比由 45.55% 上升到 76.09%,除拉萨、银川外,其余省会城市均已获得高铁连接。从城市联系看,直达城市对在 5 a 内增长了 2.28 倍,由 2268 个增加到 7448 个,这意味着依靠高铁平均每个城市可直达的城市数由 34 个增加到了 66 个。城市联系的加强显著地提升了网络密度,

表 1 城市网络的规模与密度
Tab.1 Scale and density of city network

| 年份 | 高铁城市数/个 | 高铁城市在全国的占比/% | 直达城市对/个 | 网络密度 |
|------|---------|--------------|---------|------|
| 2014 | 133 | 45.55 | 2268 | 0.05 |
| 2015 | 170 | 57.63 | 3820 | 0.09 |
| 2016 | 197 | 66.11 | 5316 | 0.12 |
| 2017 | 199 | 66.78 | 5640 | 0.13 |
| 2018 | 213 | 71.48 | 6726 | 0.15 |
| 2019 | 226 | 76.09 | 7448 | 0.17 |

④ 数据来源:《铁道统计公报》(2014—2018 年)。

⑤ 截至 2019 年底,中国已有 29 个省会城市开通了高铁,但由于呼和浩特基于高铁仅能够与自治区内的几个城市取得联系,而海口位置独特,对外联系较少,故未包含在内。

计算结果显示,由 2014 年的 0.05 上升到 0.17,城市间联系越来越紧密。

2.2 节点中心性的时序变动

依据公式(2)、(3),分别计算了 2014—2019 年各节点城市的中心度与中介度。整体而言,中心度呈逐年上升的趋势,与上文分析结果相一致,显示出城市联系的不断加强;中介度的变化则较为复杂,存在 2 种不同的趋势。由于本文涉及城市众多、时间跨度较大,限于篇幅无法在文中展示全部结果,最终选择了 27 个省会城市作为重点对中心度、中介度的分布特征及变化趋势进行分析^⑤。

(1) 中心度分析

从图 1 可以看出,2014 年省会城市的中心度呈现出由东向西递减的趋势,东部几个中心城市主导着网络。按照中心度的排序,前 5 位城市分别为北京、上海、南京、武汉和杭州,中心度介于 0.23~0.29 之间;除武汉外,其余 4 个城市均位于东部地区,这些城市凭借良好的区位条件和交通优势处于网络的核心地位。

近年来,随着网络规模的扩大和城市联系的加强,网络越来越呈现出多中心、均衡化的发展趋势。一方面,东部省会城市的中心度得到了进一步的提升,核心地位持续强化。到 2018 年,上海超越北京成为中心度最高的城市(为 0.51),直达城市数为 154 个;南京是 5 个城市中心度提升最为明显的城市,由 2014 年的 0.26 上升到 2019 年的 0.51,排在全国第 3 的位置,直达城市数为 152 个,仅次于上海和北京,与网络中的城市形成了良好的联系与互动。另一方面,中、西部省会城市的中心度也出现了较大幅度的提升。西部的重庆和成都分别由 2014 年 0.01 和 0.14 提升至 2019 年的 0.41、0.38,在全国省会城市中的排名分别由第 22 位、21 位上升至第 9 位和第 14 位;中部地区以郑州的中心度增加最为明显,由 2014 年的第 7 位提升到 2019 年的第 4 位;此外,西安、南宁、长沙和南昌等市的中心度也有显著增长。

(2) 中介度分析

中介度的变化反映着网络连接对于某些节点的依赖程度。从图 2 可以看出,2014 年东部城市的中介度普遍较高,对网络中的资源具有绝对的控制

力,如北京、广州和上海,中介度介于0.03~0.09之间。而中、西部地区,除武汉和长沙外,绝大多数城市的中介度偏低,与东部城市差距较大。

从变化趋势看,伴随节点城市地位和功能的重塑,网络联系降低了对原有东部中心城市的依赖性,提高了中、西部城市在网络连接中的作用,并由此改变了少数东部城市主导的网络格局。首先,2014年中介度较高的城市在近几年出现了下降,以北京、武汉的下降最为明显,分别由0.08、0.06下降至2019年的0.03、0.02,但这些城市仍具有较高的中介度,对网络中的资源有一定的控制力。其次,西部的大部分省会城市经历了中介度的大幅增长,如西安、成都、重庆和昆明等城市,这些城市多处于

高铁网络南北、东西联系通道的交汇处,在网络连接中发挥着越来越重要的作用。可以预期,通过这些城市的“中介”作用,东部沿海的社会经济要素将更多地向内陆腹地快速扩展,东、中、西部的互动将进一步加深,并最终促进区域融合与均衡发展。

3 网络关联形态及变动

使用ArcGIS软件对城市网络关联形态进行可视化表达(图3),相关说明如下:第一,使用研究期的始、末点即高铁网络的建设期(2014年)和成型期(2019年)作为代表,对高铁建设不同阶段的网络关联形态特征进行分析;第二,参考陈伟等^[10]、马

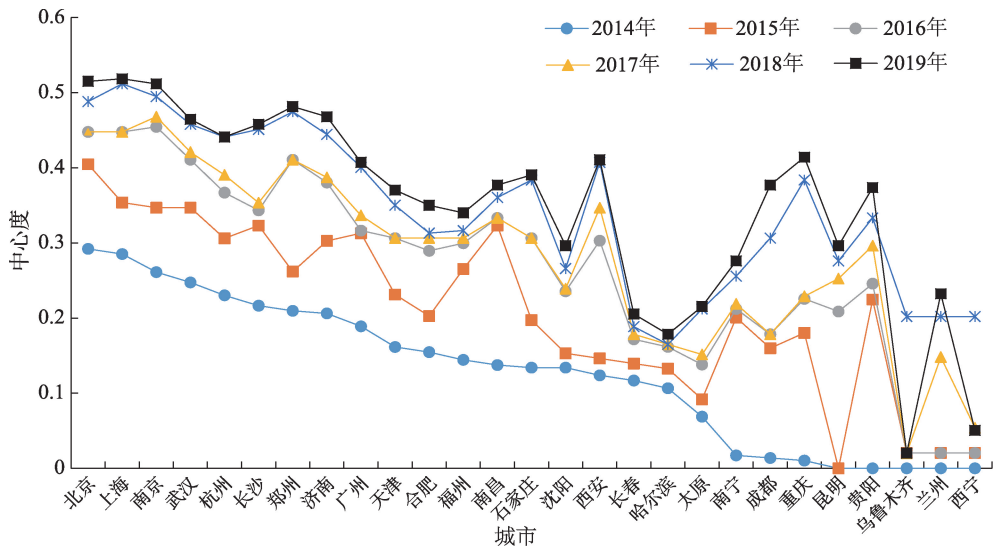


图1 省会城市中心度

Fig.1 Degree centrality of provincial capital cities

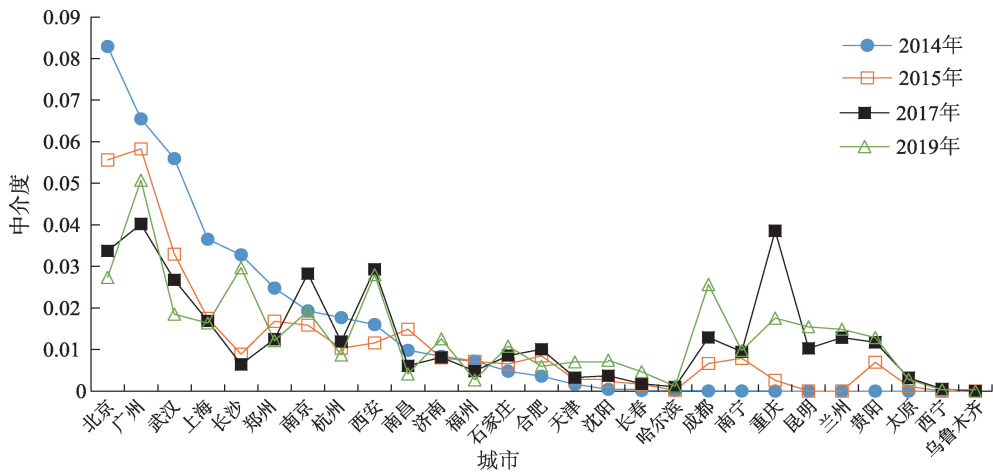
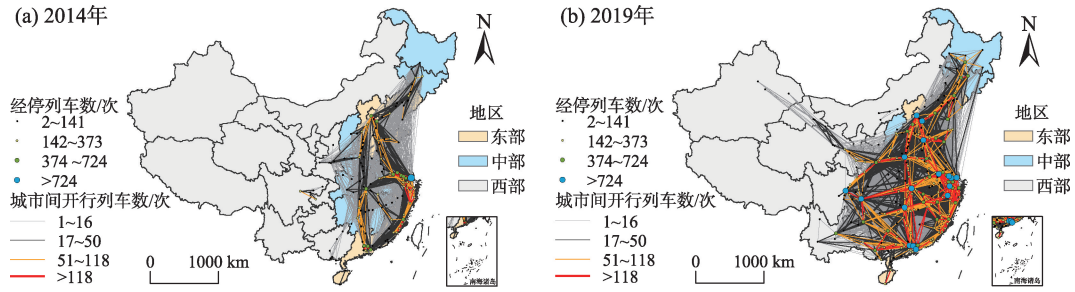


图2 省会城市中介度

Fig.2 Betweenness centrality of provincial capital cities



注：本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2885号的标准地图制作，底图无修改。下同。

图3 基于高铁联系的中国城市网络关联特征

Fig.3 Structure and characteristics of city network based on high-speed railway (HSR) linkage in China

学广等^[22]的研究,使用自然断裂点法基于城市经停列车数和城市间的开行列车数进行网络等级与层级的划分,考虑到该方法基于不同基础信息构建的多个图之间无法比较,统一以2019年作为划分依据;第三,按照常规的三大经济地带划分法将城市分为东、中、西部,对网络关联的空间分异特征进行揭示。

3.1 高铁建设期的城市网络关联形态

自2008年调整《规划》,提出重点规划“四纵四横”网络到2014年,中国高铁网络尚处于建设期,运营线路少、运距短。相应地,城市网络主要表现为区域尺度上的空间关系,东、中部地区集中了全国87.97%的高铁城市和94.09%的城市联系^⑥。从地区内部看,东部成为全国城市联系最为密切的地区,已有65.69%的城市开通了高铁,形成的区内城市联系占全国总量的41.44%。与此同时,中部地区的高铁城市也超过了一半,为51.02%;而西部地区仅有16个高铁城市^⑦,且由于布局分散和地理位置偏远,区域内外部的城市联系均比较少,城市多处于孤立状态。具体来看,西部地区有5个城市存在跨区域的联系,分别是陕西的西安、宝鸡、渭南、咸阳和广西的桂林,与东、中部城市形成了106个直达城市对;比较而言,区内城市联系更少,仅包含29个直达城市对。

受制于地理距离的阻隔,绝大多数城市对外联系较少,城市联系沿主要高铁干线布局,因此,城市

网络的轴带式联系特点突出,“沿途效应”显著(如图3a)。基于城市经停列车数的等级划分显示,2014年的城市网络形成了由少数东部城市主导的“金字塔”结构,顶层城市少而底层城市多,网络整体沟通不畅。具体来看,第一、二层级中分别包含1个全国性的中心城市(上海)和12个区域性的中心城市,在全国的占比合计为9.77%,除武汉外,其他城市均位于东部地区;而第四等级覆盖了全国63.91%的高铁城市,规模庞大。在关联形态上,以上海、北京和广州3个城市为顶点,在东、中部地区形成了“三角形”的稳定联系格局,密切的城市联系主要位于京沪、京广、杭福深和沪汉蓉等高铁干线附近。

3.2 高铁成网期的城市网络关联形态

随着2008年修订《规划》的全面实施和2016年《规划》对现代高铁网络建设的指示,近年来,中国高铁运营里程大幅增长,全国尺度上的网络格局逐步形成。资料显示,2014—2018年,新投入运营的高铁线路(包括区段)共计45条^⑧。从连接的地区看,西部地区在广西、陕西、四川和重庆4省份的基础上,新增甘肃、贵州、云南、新疆、青海和内蒙古6个省份(43个高铁城市),截至2019年,高铁已经覆盖了西部地区62.11%的城市。跨区域高铁干线的增加进一步弱化了地理距离对城市联系的制约性,城市网络规模进一步扩大,整体上由东向西拓展。

在关联形态上,随着节点对外联系的加强,点

⑥ 城市联系的统计以起点城市和目的地均位于东、中部为准,即包含了东—东、中—中以及东—中城市联系,合计为2134个直达城市对。

⑦ 2014年西部开通高铁的城市分别是重庆,四川的成都、达州、南充、遂宁,陕西的宝鸡、渭南、西安、咸阳、延安和广西的北海、防城港、桂林、柳州、南宁、钦州16个城市。

⑧ 各年新增运营线路数为:2014年9条、2015年11条、2016年8条、2017年6条、2018年11条,数据来源为<https://www.qian-zhan.com/analyser/detail/220/190215-28479cb6.html>。

对点的复杂网络格局显现,整体上与“八纵八横”网络相对应(图3b)。一方面,网络中心势的计算结果显示,由2014年的0.24上升到2019年的0.36^⑨,表明网络等级性减弱,整体分布趋于平坦,城市间的联系更加便捷。另一方面,从节点等级分布看,到2019年,第一等级中的城市占比由2014年的0.75%提升到7.52%,包含了12个东部城市、3个中部城市(武汉、长沙和郑州)和2个西部城市(成都、重庆);第二等级中的城市增加到31个,较上一阶段,中、西部分别增加了6个(哈尔滨、吉林、长春、合肥、南昌和上饶)和5个城市(桂林、贵阳、昆明、南宁和西安)。可见,中、西部的中心城市在网络中的地位得到了进一步的提升,是区域内外联系的纽带和桥梁。

4 网络层级特征演化

依据联系层级的划分,对2014—2019年各层级中的相关数据进行统计(表2);同时,使用ArcGIS软件对2014、2019年网络层级特征进行可视化表达(图4)。结合图3可以看出,总体上,伴随高铁网络的扩大与公交化运营特点的显现,城市网络关联强度不断提升,全国城市间的开行列车数均值由2014年的14次增加到2019年的18次,城市联系更加便捷;与此同时,网络形成了4个联系层级,城市联系复杂而多样。

4.1 第一层级联系

第一层级显示的是网络中关联强度最大、最为紧密的结构。2014年,第一层级联系整体规模较小,在空间上表现为封闭、独立的地域系统,高强度的城市联系零散分布于沿海的4个城市群内。具体地,在长三角城市群内,上海、苏州、南京、无锡、常州和镇江等城市之间联系密切,一体化程度较高,形成了2014年城市网络中联系强度最大的城市对,分别是上海—苏州、南京—苏州、苏州—无锡、南京—无锡、南京—上海等,城市间开行列车数介于183~284次之间。其他几个城市群内,包含的城市和联系相对较少,珠三角城市群内的高强度联系集中在广州、深圳、中山、佛山和东莞5个城市之间,海西城市群主要在福州、泉州、厦门、温州和莆田等城市之间,而京津冀城市群内则仅包含北京与天津的联系。

近年来,基于跨省、跨区域高铁干线的开通,第一层级联系在规模和空间范围上有了显著的扩张,基本实现了全国大、中型城市的高强度联系。第一层级中包含的城市数在全国的占比由2014年的17.29%上升到2019年41.15%,城市联系数增加了139个,郑州、武汉、长沙、成都、重庆等中、西部城市进入第一层级。与此同时,随着高铁公交化运营特点的显现,城市间的联系与互动加强。统计数据显示,第一层级中城市间开行的列车数均值由2014年

表2 网络层级特征

Tab.2 Hierarchical characteristics of city network

| 项目 | 2014年 | 2015年 | 2016年 | 2017年 | 2018年 | 2019年 | |
|------------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 高铁城市/个 | 第一层级 | 23(17.29) | 27(15.88) | 39(19.80) | 45(22.61) | 91(42.72) | 93(41.15) |
| | 第二层级 | 59(44.36) | 90(52.94) | 133(67.51) | 141(70.85) | 164(77.00) | 172(76.11) |
| | 第三层级 | 109(81.95) | 156(91.76) | 183(92.89) | 182(91.46) | 201(94.37) | 211(93.36) |
| | 第四层级 | 127(95.49) | 165(97.06) | 193(97.97) | 197(98.99) | 209(98.12) | 221(97.79) |
| 直达城对/个 | 第一层级 | 29(1.28) | 37(0.97) | 54(1.02) | 63(1.12) | 149(2.22) | 168(2.26) |
| | 第二层级 | 95(4.19) | 161(4.21) | 284(5.34) | 280(4.96) | 459(6.82) | 503(6.75) |
| | 第三层级 | 407(17.95) | 635(16.62) | 877(16.50) | 887(15.73) | 1186(17.63) | 1256(16.86) |
| | 第四层级 | 1737(76.59) | 2987(78.19) | 4101(77.14) | 4410(78.19) | 4932(73.33) | 5521(74.13) |
| 城市间开行列车数均值/(次/d) | 全国 | 14 | 13 | 14 | 14 | 18 | 18 |
| | 第一层级 | 158 | 162 | 166 | 172 | 185 | 199 |
| | 第二层级 | 73 | 72 | 73 | 72 | 75 | 75 |
| | 第三层级 | 28 | 28 | 28 | 29 | 29 | 29 |
| | 第四层级 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 |

注:括号中数据为占比(%)。

⑨ 2015—2019年网络中心势计算结果分别为0.26、0.34、0.35、0.36、0.36。

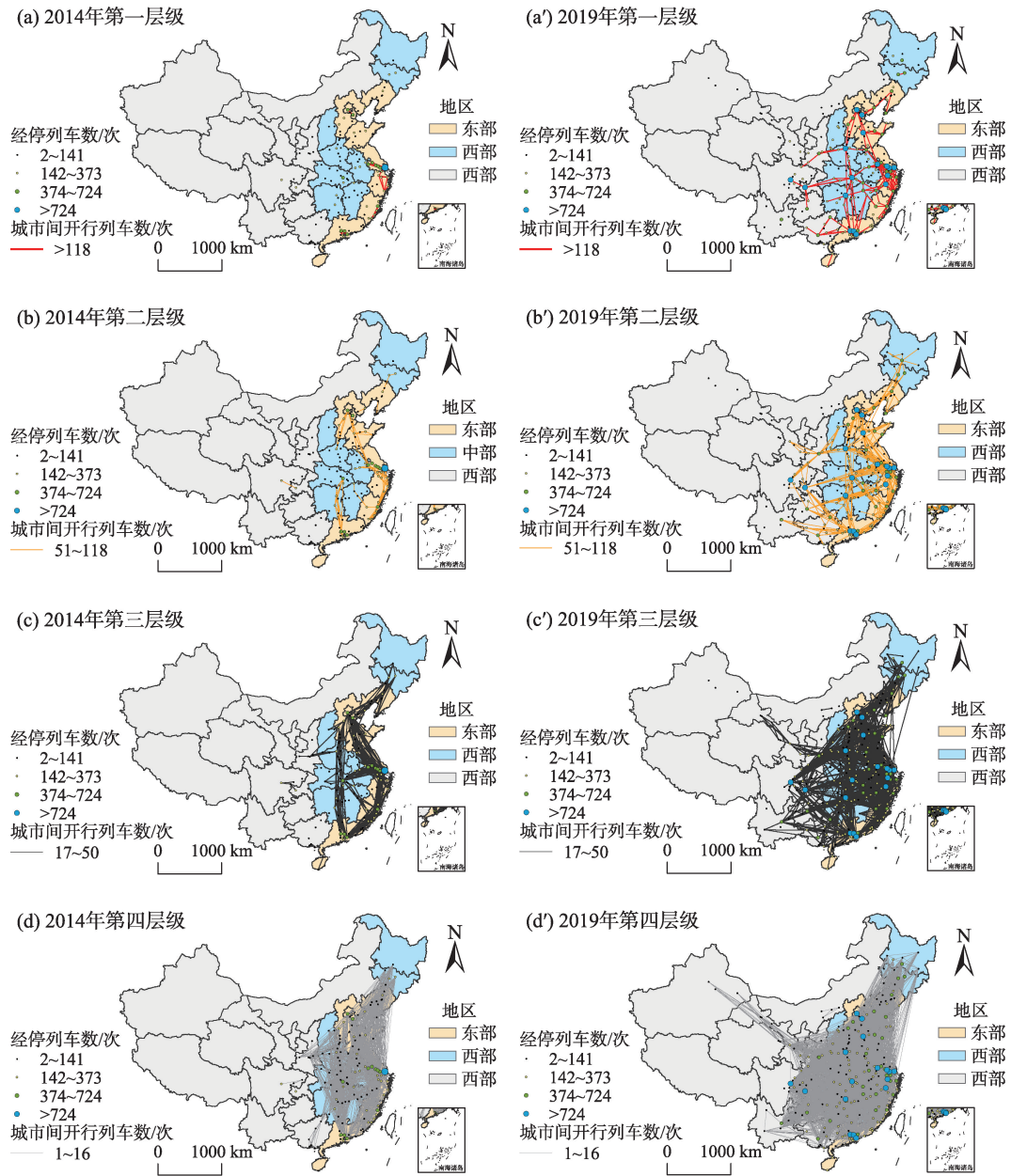


图4 城市网络联系强度与层级

Fig.4 Intensity and hierarchy of city network

的158次增加到了199次；上海—苏州、苏州—南京、上海—无锡和广州—深圳成为网络中联系强度最大城市对，日间开行列车数介于529~598次之间。

4.2 第二层级联系

第二层级依然属于网络中的高强度联系。2014年的第二层级在原有联系基础上向中、西部扩展，包含了15个中部城市和2个西部城市(成都和重庆)。上海、北京和广州的空间影响范围进一步扩大，成为全国城市联系的汇集点；其中，广州是该层级中对外联系强度最大的城市，与9个直达城市

的日均开行列车数为80次。从城市联系看，第二层级形成了区域性的关联形态，轴带式联系开始发育，但呈现出独立的“断线”分布形态。东部沿海地区的京沪、杭福深高铁沿线城市联系相对密切，中部地区分别形成了北京—郑州、武汉—广州2个联系轴，而西部地区仅包含成都—重庆之间的城际联系，缺乏高强度的对外联系。

2019年，第二层级覆盖了全国76.11%的高铁城市和6.75%的城市联系，同时，随着原有联系轴辐射范围的扩大和更多联系轴的形成，基于全国尺度的

网络骨架开始形成,巩固并加强了原有联系格局。具体表现在以下几个方面:第一,依托京哈线和哈大线,东北地区的内外部联系进一步提升;第二,以西安为中心形成的2个交叉联系轴促进了西北、西南与东、中部地区联系格局的形成;第三,西南地区主要以重庆、云南、广西和贵州4省份与长三角城市群联系的加强为主要特点。

4.3 第三层级联系

2014年的第三层级在第二层级联系的基础上进一步分化,城市联系表现出总体分散、局部集聚的形态,轴带式联系构成了2014年全国城市网络的骨架,“沿途效应”凸显。第三层级包含407个直达城市对、覆盖全国81.95%的高铁城市,中部地区较上一层级增加了22个城市,西部地区增加了6个(分别是四川省的南充和遂宁市,陕西省的渭南、西安、宝鸡和咸阳市)。随着沿线城市联系的进一步加强,京沪、杭福深沿线形成了全国城市联系最为密切的2个联系轴,串联起东部沿海的五大城市群。中部地区则依托京广高铁和更多区域、城际线路实现了北京—郑州—武汉—长沙—广州联系轴的全面贯通,该联系轴的形成与发展不仅有助于改变南北联系对于东部沿海交通线路的过度依赖,对于东、中、西部城市社会经济联系的加强和区域均衡发展同样具有重要的现实意义——通过核心城市的辐射将吸引更多的中、西城市融入网络,从而更好地参与区域分工和合作。此外,东北和长江中游的2个联系轴也初具规模,但西部地区大多数城市仍缺乏对外联系渠道,城市间联系松散,网络结构尚未显现。

2019年的第三层级联系在空间格局上大体与第二层级相似,但沿兰新高铁、沪昆高铁分别向西北、西南2个方向有了进一步的延伸,甘肃、陕西、广西、云南和贵州等省份的高铁城市明显增加,中国城市网络的关联形态从区域性的轴带式联系转变为全国尺度上的复杂网络形态。与此同时,随着网络关联模式的变化,地理位置对城市联系的制约性减弱,城市地位被重塑,中、西部的一些城市开始在网络中承担重要角色。

4.4 第四层级联系

第四层级是关联强度最低的层级,但规模最为庞大,是城市网络的基础。2014年,第四层级几乎覆盖了全国所有的高铁城市,包含1737个直达城市对,在全国的占比达76.59%。从对外联系强度看,

北京排在首位,能够与全国44.36%的高铁城市实现直达,其次为常州、上海、孝感和长沙等城市。与网络关联形态的分析结论相一致,2014年城市网络主要为区域尺度上的空间关系,几乎覆盖了东、中部的绝大多数城市。

到2019年,依托高铁线网,全国尺度上的复杂网络形态形成,直达城市对较2014年增长了2.18倍,在全国的占比为74.13%,规模更大、空间范围更广。以胡焕庸线为界形成了2个较为分明的区域,以东地区城市联系成片状绵延,以西部地区分布松散,但是由于西部地区地广城稀,按照城市数统计,全国性的城市网络已经形成。与2014年相比,西部地区主要在西南和西北2个方向有了明显的扩张,西南地区更多城市融入全国城市网络,西北地区则沿兰新线、徐兰高铁(西安—兰州段)形成陕西—甘肃—青海—新疆的城市联系轴带。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文使用2014—2019年高铁客运班次数据,采用社会网络分析法和ArcGIS可视化工具,揭示了高铁建设黄金期中国城市网络结构特征及其演变过程。相比于已有研究,本文的贡献在于:第一,从多个视角考察了高铁对中国城市、区域空间结构的影响,为大尺度宏观格局的城市体系研究提供了实证案例;第二,挖掘了更充分的数据信息,基于高铁流大数据对城市网络的关联动向进行了更具时效性的判断,研究更加丰富、完整。获得如下结论:

(1) 高铁线网的延伸与加密扩大了城市网络规模,提升了网络密度。伴随高铁网络由“四纵四横”向“八纵八横”拓展,高铁城市在全国的占比由2014年的45.55%上升到2019年76.09%,依靠高铁每个城市平均可与66个城市实现直达,城市间的联系与互动加强,网络整体集聚力提升。

(2) 节点城市地位和功能的变化重塑了网络的空间格局,改变了由少数东部城市主导的网络格局,呈现出多中心、均衡化的发展趋势。节点中心性的时序变动表明,伴随中心度的提升,东部中心城市在网络中的核心地位得到了进一步强化;与此同时,中、西部一些城市的中心度和中介度在近年出现了大幅增长,成为东、中、西部城市联系的纽带和桥梁,在网络中发挥着越来越重要的作用。

(3) 城市网络整体上由东向西拓展, 全国尺度上的复杂网络格局取代了区域尺度上的轴带式联系形态, 整体上与“八纵八横”网络相对应。跨区域高铁干线的贯通和更多区域、城际线路的增加弱化了地理距离对网络连接的制约性, 点对点的密集联系形态逐渐形成。

(4) 城市网络关联强度不断提升, 形成了4个联系层级, 城市联系复杂而多样。在高铁线网建设期, 城市网络整体关联强度较低, 高强度的城市联系零散分布于东部的几个城市群内部, 整体上表现为独立、封闭的地域系统, 或“断线”状态; 伴随高铁网络扩张与公交化运营特点的显现, 网络关联程度得到提升, 城市联系在巩固原有联系格局的基础上进一步扩散、分化。

5.2 讨论

高铁的大规模建设及网络化发展推动了要素资源的快速流动与重新整合, 促进了城市关系的网络化发展。从引导空间布局优化和促进区域均衡发展的视角出发, 高铁建设是一个可行的方案, 但如何科学地确定高铁建设规模与布局仍是一个需要继续探讨的问题。对于偏远地区, 要综合考虑地区发展情况与高铁建设的成本收益, 因地制宜、分类建设。在基于高铁、航空等现代化交通基础设施建设提升偏远地区交通供给质量的同时, 可通过传统铁路、公路等设施的建设快速弥补地区发展的交通短板, 发挥交通对经济增长的基础性和先导性作用, 促进区域联动与均衡发展。最后, 各交通方式在不同的尺度上发挥联系作用^[10-11], 服务于城市内外的要素流通。随着高铁线网逐渐成型, 它们在综合交通系统中越来越处于主导地位, 受到交通线网规划和研究的重视, 然而综合交通系统效率的提升有赖于各交通方式之间的有效衔接。因此, 在大力发展高铁的同时, 要注重改善高铁与航空、公路、城市公共交通系统之间的衔接性, 促进各方式的融合发展, 为支持城镇化建设、区域均衡发展提供支撑。

在后续研究中, 可进一步探讨在中国高铁网络化发展的背景下, 城市关系的网络化发展、城市功能与地位的转变会对社会经济带来怎样的影响, 这将有助于我们更全面地认识高铁建设的影响, 完善城市体系的相关研究, 并为城市、区域发展政策的制定提供科学依据。

参考文献(References)

[1] Castells M. Grassrooting the space of flows [J]. *Urban Ge-*

- ography, 1999, 20(4): 294-302.
- [2] 王姣娥, 景悦. 中国城市网络等级结构特征及组织模式: 基于铁路和航空流的比较 [J]. *地理学报*, 2017, 72(8): 1508-1519. [Wang Jiaoe, Jing Yue. Comparison of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1508-1519.]
- [3] 胡国建, 陈传明, 金星星, 等. 中国城市体系网络化研究 [J]. *地理学报*, 2019, 74(4): 681-693. [Hu Guojian, Chen Chuanming, Jin Xingxing, et al. Research progress of networking of urban systems in China. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(4): 681-693.]
- [4] 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. [Wang Shaojian, Gao Shuang, Wang Yuqu. Spatial structure of the urban agglomeration based on space of flows: The study of the Pearl River Delta. *Geographical Research*, 2019, 38(8): 1849-1861.]
- [5] 王士君, 廉超, 赵梓渝. 从中心地到城市网络: 中国城镇体系研究的理论转变 [J]. *地理研究*, 2019, 38(1): 64-74. [Wang Shijun, Lian Chao, Zhao Ziyu. From central place to city network: A theoretical change in China's urban system study. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 64-74.]
- [6] 薛俊菲. 基于航空网络的中国城市体系等级结构与分布格局 [J]. *地理研究*, 2008, 27(1): 23-32. [Xue Junfei. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on aviation network. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 23-32.]
- [7] Lee H S. The networkability of cities in the international air passenger flows 1992-2004 [J]. *Journal of Transport Geography*, 2009, 17: 166-175.
- [8] 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. [Meng Deyou, Feng Xinghua, Wen Yuzhao. Urban network structure evolution and organizational pattern in Northeast China from the perspective of railway passenger transport. *Geographical Research*, 2017, 36(7): 1339-1352.]
- [9] Chen W, Liu W D, Ke W Q, et al. Understanding spatial structures and organizational patterns of city networks in China: A highway passenger flow perspective [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(4): 477-494.
- [10] 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 [J]. *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.]

- [11] Yang H R, Dobruszkes D, Wang J, et al. Comparing China's urban systems in high-speed railway and airtline networks [J]. *Journal of Transport Geography*, 2018, 68: 233-244.
- [12] Xu W T, Zhou J P, Yang L C, et al. The implications of high-speed rail for Chinese cities: Connectivity and accessibility [J]. *Transportation Research Part A*, 2018, 116: 308-326.
- [13] 李永奎, 常诚, 郭英, 等. 高铁网络与城市关联的时空演化与相关性分析 [J]. *华东经济管理*, 2019, 33(3): 5-11. [Li Yongkui, Chang Cheng, Guo Ying, et al. Spatial evolution characteristics and correlation analysis of the linkage between high speed rail networks and city clusters. *East China Economic Management*, 2019, 33(3): 5-11.]
- [14] 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 Yang, Yao Shimou, Zhang Luocheng. Functional structure of spatial flow in the Yangtze River Delta: Analysis of passenger based data for the high speed railway. *Progress in Geography*, 2016, 35(11): 1381-1387.]
- [15] Wang S J, Wang J Y, Liu X P. How do urban spatial structures evolution in the high-speed rail era? Case study of Yangtze River Delta, China [J]. *Habitat International*, 2019, 93: 102051. doi: 10.1016/j.habitatint.2019.102051.
- [16] Xu J, Zhang M, Zhang X L, et al. How does city-cluster high-speed rail facilitate regional integration? Evidence from the Shanghai-Nanjing corridor [J]. *Cities*, 2019, 85: 83-97.
- [17] 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 [J]. *地理学报*, 2014, 69(12): 1833-1846. [Wang Jiao'e, Jiao Jingjuan, Jin Fengjun. Spatial effects of high-speed rails on interurban economic linkage in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(12): 1833-1846.]
- [18] 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: 基于铁路客运班列分析 [J]. *地理学报*, 2016, 71(2): 265-280. [Jiao Jingjuan, Wang Jiao'e, Jin Fengjun, et al. Impact of high-speed rail on inter-city network based on the passenger train network in China, 2003-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 265-280.]
- [19] Jiao J J, Wang J, Jin F J. Impacts of high-speed rail lines on the city network in China [J]. *Journal of Transport Geography*, 2017, 60: 257-266.
- [20] Diao M. Does growth follow the rail? The potential impact of high-speed rail on the economic geography of China [J]. *Transportation Research Part A*, 2018, 113: 279-290.
- [21] 方大春, 马为彪. 全面高铁时代省域中心城市空间关联网络特征研究 [J]. *区域经济评论*, 2018(3): 105-113. [Fang Dachun, Ma Weibiao. Study on the characterizations of the spatial correlation network structure of China's provincial center cities in the era of comprehensive high-speed rail. *Regional Economic Review*, 2018(3): 105-113.]
- [22] 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. [Ma Xueguang, Tang Chenghui. Urban network spatial connection and structure in China based on big data analysis of high-speed railway transport flow. *Economic Geography*, 2018, 38(4): 55-64.]
- [23] 陈永林, 谢炳庚, 张爱明, 等. 不同尺度下交通对空间流动性的影响 [J]. *地理学报*, 2018, 73(6): 1162-1172. [Chen Yonglin, Xie Binggen, Zhang Aiming, et al. The impact of traffic on spatial mobility at different scales. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1162-1172.]
- [24] 陈卓, 金凤君, 杨宇, 等. 高速公路流的距离衰减模式与空间分异特征: 基于福建省高速公路收费站数据的实证研究 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(8): 1086-1095. [Chen Zhuo, Jin Fengjun, Yang Yu, et al. Distance-decay pattern and spatial differentiation of expressway flow: An empirical study using data of expressway toll station in Fujian Province. *Progress in Geography*, 2018, 37(8): 1086-1095.]

Network structure and evolution characteristics of cities in China based on high-speed railway transport flow

SUN Na, ZHANG Meiqing

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In recent years, with the gradual implementation of the Medium and Long-term Railway Network Plan, China has entered the era of high-speed railway (HSR) network, and the impact of HSR on urban and regional spatial structure has become a hot topic of human geography research. In this study, the network structure and evolution characteristics of cities in China was analyzed from various aspects, including overall scale, network density, timing variation of node centrality, and network connection mode and strength, by using social network analysis and the ArcGIS visualization tool based on the HSR passenger flow data from 2014 to 2019. The results are presented as follows: 1) City network density has increased with the increase of HSR cities and their connections. Statistics show that 76.09% of the cities in China had been opened to high-speed trains by 2019, and each city can reach 66 cities by high-speed trains without transfer. 2) Changes in the status and functions of nodal cities have reshaped the spatial pattern of the network. The network pattern dominated by a few eastern cities in the past has changed, showing a trend of multi-center and balanced development. The core position of cities from the eastern part in the network has been further strengthened. At the same time, some cities in central and western China begin to play a more important role in the network connection, which is the link and bridge of trans-regional connection. 3) In terms of spatial pattern, the city network expands from east to west as a whole, and an interlocking and complex network-like structure on the country scale has replaced the banded structure at the regional scale, which is similar to the eight vertical and eight horizontal HSR network. High-speed railway has weakened the constraint of geographical distance on city connections, and the corridor effect has diminished. 4) During the construction period of HSR network, the correlation strength of city network was low, and the high-intensity city connection was scattered in several city clusters in the east, which was shown as an independent and closed regional system on the whole. With the formation and expansion of the HSR network, the original pattern of city connections has been consolidated, and continued to spread and divide, forming four distinct levels of connections.

Keywords: high-speed railway passenger flow; city network; social network analysis; structure and characteristics; evolution; China