

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

焦敬娟^{1,2}, 王姣娥¹, 金凤君¹, 王 涵^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 城市网络是近年来城市与区域研究的一个新方向。基于2003-2013年间8个横截面的中国铁路客运班列数据, 采用加权度中心性和社区结构模型, 探讨高速铁路建设对城市等级和集聚性空间格局及演化的影响。研究表明: ① 基于铁路客运组织的城市等级结构呈现出位序—规模分布的特征和集聚性, 且三大地带和各社区内城市也呈现出明显的位序—规模分布, 随着高速铁路网络的扩展, 加权度中心性的集聚性更明显, 并逐步呈现出较为明显的层级结构和社区结构。② 城市等级结构呈现出明显的东中西地带性、廊道效应和经济、人口的耦合性, 即基于铁路客运班列的城市等级结构与基于属性数据(人口/GDP)的结果表现出较大的相似性, 但也存在一定的差异。城市社区结构与中国高速铁路网络、城市群的空间分布格局基本一致。随着高速铁路的建设, 东中西三大地带间城市等级的差异呈扩大态势, 但各社区间城市等级的差异呈缩小态势, 部分社区核心城市已形成。

关键词: 铁路客运班列; 中心性; 社区结构; 城市网络

DOI: 10.11821/dlxb201602007

1 引言

随着全球化和信息化的快速推进, 世界经济的“地点空间”被“流动空间”所代替。世界经济体系的空间结构逐渐建立在“流”、网络和节点所构成的城市网络基础之上^[1], 而控制金融、生产性服务业、交通运输等的世界城市以及具有垂直和横向产业分工、空间结构的城市群逐渐成为全球具有核心竞争力的区域。随着相关理论体系和实证研究方法的不断完善, 城市网络被广泛应用于城市等级结构和城市群等的研究^[2]。其中, 城市等级结构的研究多侧重于全球和区域世界城市的甄别、空间结构和等级体系等^[3-4]; 基于“相近者相似”原则, 城市群被具有较强相互联系的集群或社区所替代。即同一个社区或集群的城市间具有密切的联系, 而不同集群或社区之间的联系相对较小, 这样的集群或社区(community)在经济地理学领域又被称为“功能区域”, 而城市间的距离被界定为“功能距离”^[5]。

随着“流空间”理论的发展, 表征城市间相互联系的关系矩阵取代城市间阻隔(如空间和时间)和城市属性指标(如人口和GDP)等, 成为评价城市网络结构的关键因

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171107, 41371143) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41171107, No.41371143]

作者简介: 焦敬娟(1988-), 女, 河南安阳人, 博士, 主要从事交通运输地理与区域发展研究。

E-mail: jiaojingjuan@163.com

通讯作者: 王姣娥(1981-), 女, 湖南涟源人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事交通运输地理和区域发展研究。

E-mail: wangje@igsrr.ac.cn

素。目前,国内外学者在弗里德曼世界城市假说、卡斯特尔全球流动空间理论和沙森环球城市理论^[6]的基础上,借由企业组织网络、基础设施网络和社会文化网络等^[7],对城市网络的特征和结构进行评价。其中,企业组织网络主要是依托生产性服务业和跨国公司的布局构建“城市—企业”的联系矩阵,反映城市节点的经济功能^[3-4];基础设施网络主要是基于物理网络、组织网络和客货流、信息流构成的“流网络”等构建联系矩阵,城市在网络中主要承担着区域性交通枢纽、信息枢纽和通信枢纽等作用^[8-9];社会文化网络主要是依托于政府或非政府组织、访谈数据等构建的城市关联网,反映城市节点的社会功能^[10-11]。交通基础设施网络可直接反映城市间的功能联系、交易流和连通度,揭示城市联系的空间格局及演变特征,可应用于城市等级体系和城市群发展水平的评价^[8]。目前,国内部分学者从基础设施网络视角,包括航空网络^[9]、铁路客货流^[12]、城际集装箱^[13]、信息网络数据^[14-15]等,对城市在网络中的等级和空间分布特征进行评价。如王成金和金凤君应用集中化指数,分析了中国对外联系的空间演变特征^[16];宋伟等采用优势流的方法分析了各城市在国内客运航空网络中的层级及其变化^[17];王姣娥等采用复杂网络的相关方法对中国航空网络节点等级性和结构演化特征进行评价^[18];钟业喜和陆玉麒基于铁路客运始发网络对城镇等级体系及其空间分布格局评价,发现城市在铁路网络中的等级结构与城市体系的规模等级存在较大的相似性^[19]。总体上,从铁路和网络演化视角对城市等级和集聚性的研究相对较少。尤其是近些年随着高速铁路的发展,铁路在城市等级和城市群空间重构的作用日趋重要。

高速铁路作为一种新兴的交通方式,不仅缩短了城市之间的旅行时间,同时也影响了城市间的连接性^[20]。目前,国内外关于高速铁路的研究主要是从时空收敛的视角,分析了高速铁路对可达性^[21]、区域发展^[22]、空间结构^[23]和其他交通方式^[24]等的影响,而从“流空间”视角探讨高速铁路对城市网络结构的研究相对较少。部分学者认为城市的区位优势主要依赖于其是否在交通网络上,而不仅是城市之间的距离成本^[25]。然而,城市在高速铁路网络中的连接性将会导致经济活动在核心和边缘城市的集聚或分散,从而影响城市在网络中的等级和地位^[26]。鉴于此,本文从铁路客运组织网络视角,对比分析中国高速铁路建设前后城市在网络中等级和集聚性及其空间演化特征,以期对未来高速铁路的建设、城市体系和城市群的发展提供指导和建议。

2 方法和数据

2.1 网络构建与数据

城市网络(又称城市关联网)由城市节点和城市间联系构成,反映城市间相互作用关系。本文以具有铁路站点的地级市和直辖市(不包含台湾、香港和澳门)为研究对象,采用《全国铁路旅客列车时刻表》数据,构建基于铁路列车换乘关系的城市网络:

$$G=(S, E, W) \quad (1)$$

式中: S 表示在市辖区范围内拥有火车站点的地级行政单元或直辖市; E 表示具有直达火车连接的城市对; W 表示城市对间列车联系的频数。换乘网络是指同一列车停靠的所有城市之间均具有联系,即列车A-B-C,可拆分为A-B、B-C和A-C三部分。

根据中国2014年1月1日实施的《铁路安全管理条例》规定,高速铁路是指设计开行时速250 km以上(含预留),并且初期运营时速200 km以上的客运列车专线铁路。根据上述定义,中国的“高铁”以及部分“动车”和“城际列车”都属于高速铁路,基本上涵盖了以C、G和D字头列车所运营的线路。中国高速铁路的发展可以追溯到2003年

10月(秦皇岛—沈阳客运专线的开通);2003-2008年,中国高速铁路网络以既有线路改造为主,期间先后进行了第五次和第六次“铁路大提速”。到2007年,中国拥有运行时速在200 km/h以上的铁路线路6849 km。2008年中国第一条新建高铁——京津城际铁路建成通车,随后石太、甬台温、武广、郑西、福厦、沪宁、昌九、沪杭、京沪、京石、石武、哈大等高铁相继建成运营,高速铁路网络进入快速扩张时期,该阶段中国高速铁路网以新建高铁线路为主(图1)。新建线路的运行时速和列车频次明显高于既有线路改造,两者对城市网络空间结构的影响存在一定的差异。为较全面了解高速铁路对城市网络的影响,本文结合数据的可获得性选择2003年4月(秦皇岛—沈阳客运专线开通前)、2007年3月(铁路“第六次大提速”前)、2008年5月(京津城际开通前)、2009年12月、2010年11月、2011年12月、2012年12月和2013年12月等8个时间截面,探讨高速铁路建设对城市网络结构的影响,并重点对比高铁建设前后(2003年和2013年)城市网络结构的变化情况。

2.2 研究方法

中心性和社区结构分别揭示节点在网络中的重要性和集聚性。中心性的测量指标包括度中心性、介中心性、邻近中心性、网络流中心性、特征向量中心性和子图中心性等^[27];社区结构的挖掘算法主要包括图形分割算法(Laplace谱平分法、Kernighan-Lin算法)和

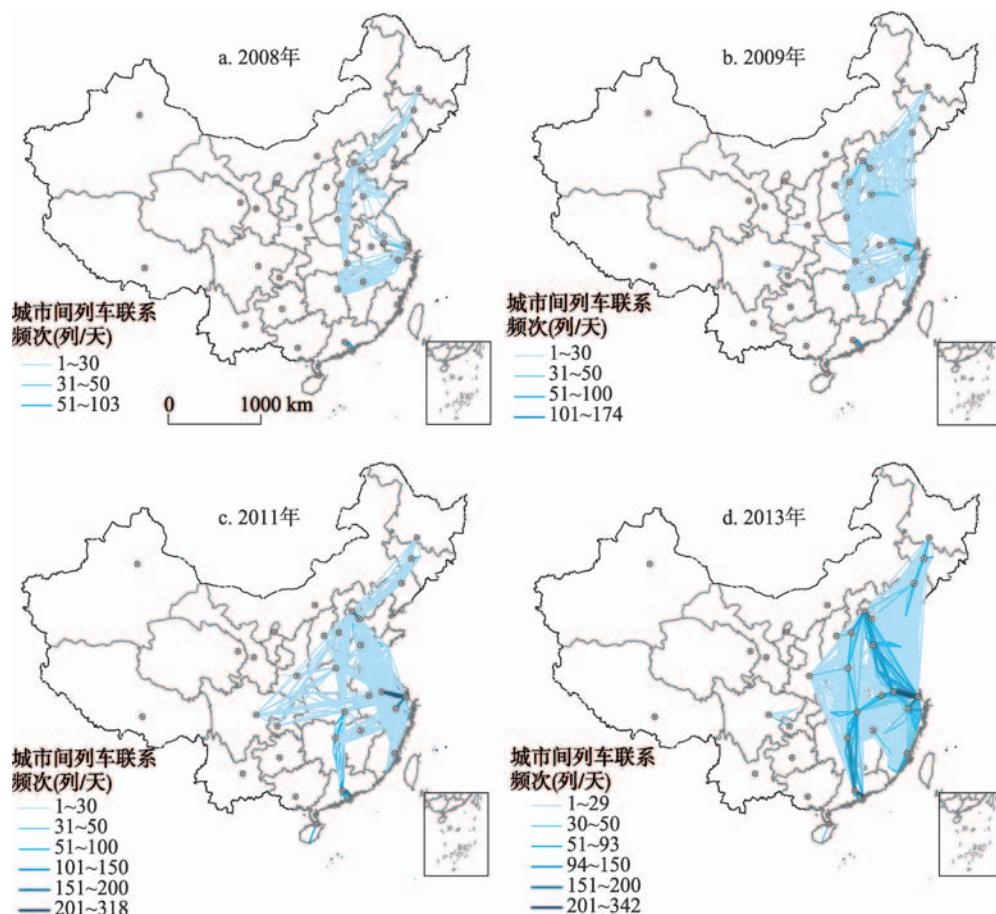


图1 中国高速铁路列车网络空间分布格局

Fig. 1 Spatial distribution of bullet train network in selected years in China

分级聚类算法 (GN 算法、Newman 快速算法、CMM 算法等)^[28]。本文将选择算法复杂度较低和计算较便捷的度中心性和改进的 CMM 算法^[29]进行分析。此外, 冲积图 (Alluvial diagram) 可直观揭示城市集聚性的演化特征。

2.2.1 加权重度中心性 度中心性常用来评价城市与网络中其它城市间联系的可能性和联系强度的大小, 揭示城市在网络中的重要性。在非加权网络中, 通常用节点的度 k_i (节点衔接边的数目) 表示, 反映城市的连通度; 在加权网络中, 通常用节点的强 (strength) S_i 表示, 反映城市与网络中其他城市间联系的强度。综合考虑城市对外的连通度及强度, 本文采用加权重度中心性对节点在网络的等级性进行评价。公式如下:

$$D_i = \sum_j^N a_{ij} \quad (2)$$

$$S_i = \sum_j^N w_{ij} \quad (3)$$

$$WDC_i = D_i^\alpha \times \left(\frac{S_i}{D_i} \right)^{(1-\alpha)} \quad (4)$$

式中: a_{ij} 表示城市间是否有列车直接联系, 有则赋值为 1, 无则赋值为 0; w_{ij} 表示城市间列车联系的频数, 即运营列车数量; D_i 表示城市 i 的度值; S_i 表示城市 i 的强值; WDC_i 表示城市 i 的加权重度中心性, 其值越高, 表示城市在网络中的等级越高; α 为赋值参数, 本文采用 0.5。

2.2.2 社区结构 社区结构 (community) 是假设整个网络由若干个“群”或“团”构成, 社区内节点之间的连接相对较紧密, 而社区之间的连接相对比较稀疏。社区结构的识别是基于韩华等改进的 CNM 算法^[29], 本文不再赘述。社区结构是基于“相似者相近”的原则进行划分, 具有较短距离的城市位于同一个社区。城市距离是指城市在网络中的拓扑距离, 而非城市间的地理距离。拓扑距离的计算综合考虑城市间连接性和联系强度, 即具有铁路列车联系的城市, 其联系频数越高, 城市间拓扑距离越小。整体上, 位于同一个社区的城市具有较强的铁路列车联系强度, 而不同社区的联系相对较小。社区模块度是由 Newman 等人提出的衡量网络社区结构明显程度的标准^[30], 是网络的一个固有属性值。公式如下:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(C_i, C_j) \quad (5)$$

式中: A_{ij} 是节点 i 和 j 之间的边权重, 代表网络中所有边的权重之和; k_i 和 k_j 代表节点 i 和节点 j 在非加权网络中的度值; C_i 和 C_j 代表节点 i 和节点 j 所在的社区; m 表示网络中可能存在的最大连接数。 Q 值介于 0~1 之间, Q 值越接近 1, 说明社区结构越明显, 在现实网络中, Q 值通常介于 0.3~0.7。

为评价不同社区在网络中的重要性, 本文引入 PageRank 算法对网络中所有节点的连接情况进行评价, 并用各社区中节点 PageRank 值的总和来反映社区对外连接性, 对外连接性越高的社区, 在网络中具有越高的地位。PageRank 具体算法参考文献[31]。

2.2.3 冲积图 冲积图是由 Rosvall 提出的一种社区演化关系分析方法^[32]。网络社区演化关系主要包括社区自身内部节点、关系和结构以及社区间关系、位置的变化, 可以通过对比不同时间截面社区的数量、大小、密度、结构等属性特征进行分析。在冲积图中, 不同颜色代表不同社区; 社区的位置表示其在网络中的重要性和地位, 位于冲积图底部的社区在网络具有较高的地位和等级; 社区的高度用 PageRank 值表示。最后图形的绘制依托 Edler 和 Rosvall 设计的 Mapequation 平台完成 (<http://www.mapequation.org>)。

3 城市网络等级结构

3.1 统计特征

采用Zipf 1949年提出的城市位序—规模法则^[33] ($\ln P_r = a - q \ln r$ ^①) 对城市网络节点等级结构进行分析, 计算结果如表1所示。2003-2013年加权重度中心性及其位序的拟合度均在0.5以上, 除2003年外均低于同年份人口规模的拟合系数, 这表明城市网络节点位序—规模分布特征较人口规模不明显。高速铁路的建设增加了第一位城市和高等级城市(加权重度中心性较高的城市)在网络中的地位, 导致高等级城市更加集聚, 但除2003年外, 其集聚程度均低于人口规模的集聚程度。具体分析, 回归曲线的截距 a 呈现出增加的态势, 表明网络中第一位城市规模不断的增加; 加权重度中心性回归曲线的斜率除2009年外, 呈现出波动上升的态势, 即少数城市的加权重度中心性明显增加, 在网络中地位有所提升。加权重度中心性回归曲线的斜率 q 仅2003年小于1, 2007-2013年均大于1, 表明城市加权重度中心性服从帕累托分布模式和首位分布, 即城市在网络中的重要性差异较大, 大城市很突出, 中小城市发育程度较低, 首位度较高; 城市加权重度中心性随高速铁路的建设呈现出向少数城市集聚的趋势。其次, 高速铁路的建设扩大了各城市加权重度中心性的空间差异, 高等级城市具有较为便捷的对外联系。2003年城市节点加权重度中心性的变异系数为0.81, 2013年增加到0.87; 首位度由1.04降低为1.02, 而前5%的城市加权重度中心性占网络节点度中心性的比重由15.74%增加为17.36%。此外, 高速铁路的建设促使基于铁路客运组织网络的城市等级结构与城市规模等级体系的相似性呈增强态势。具体表现在城市加权重度中心性和人口规模的相关系数除2008年外呈现出波动上升的态势。而部分城市, 如徐州、株洲等交通枢纽城市, 虽具有较高的加权重度中心性, 但其城市规模等级相对较低。即一些城市虽人口规模相对较小, 但由于其在铁路交通网络中占有重要的地位, 具有较强的对外连接性和较大的加权重度中心性。

根据组内差异小、组间差异大的原则, 中国城市体系形成了三个层级, 具体划分标准和结果如图2和表2所示。高速铁路的建设使第一层级和第二层级城市等级结构更加明显, 且在传统铁路网络中具有区位优势的城市地位被经济发展水平相对较高的城市取代。具体分析, 第一层级和第二层级城市加权重度中心性及其位序的拟合性均呈现增加的态势, 分别由2003年的0.77和0.98增加为2013年的0.89和0.99, 而第三层级的拟合度略

表1 2003-2013年基于铁路客运组织网络的中国城市位序—规模分布统计特征

Tab. 1 Rank-size distribution regression analysis of weighted degree centrality indicator, 2003-2013

年份	2003年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
城市个数	245	278	279	285	284	293	294	297
q	0.991	1.021	1.023	1.022	1.035	1.051	1.075	1.083
加权重度中心性								
a	3.885	4.063	4.068	4.132	4.138	4.225	4.284	4.34
R^2	0.581	0.564	0.566	0.554	0.558	0.566	0.551	0.558
q	0.795	1.061	1.06	1.064	1.067	1.041	1.038	—
人口规模								
a	9.121	10.788	10.793	10.834	10.873	10.727	10.718	—
R^2	0.518	0.686	0.69	0.694	0.691	0.663	0.663	—
相关系数	0.379	0.426	0.41	0.453	0.454	0.503	0.534	—

① 式中: r 表示城市位序; P_r 表示城市加权重度中心性; a 表示常数; q 可以用来反映节点流量和规模的结果变化。当 $q = 1$ 时, 为位序—规模分布; 当 $q > 1$ 时, 节点的规模等级差异较大, 为首位分布; 当 $q < 1$ 时, 节点的规模等级呈现出对数正态分布。

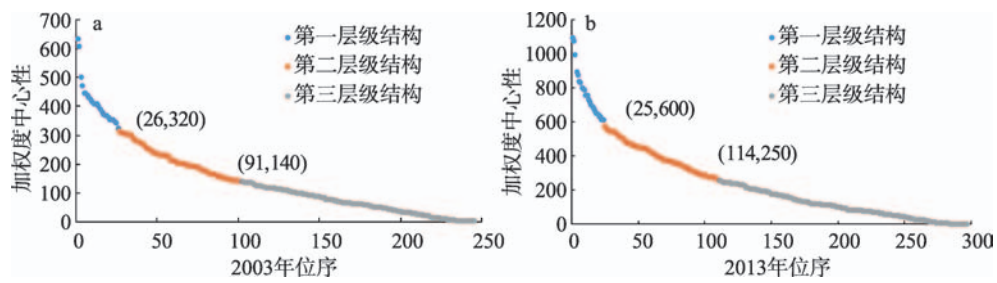


图2 2003年和2013年中国城市网络节点加权重中心性位序—规模分布

Fig. 2 Rank-size distributions of nodal centrality based on train passenger network in China, 2003 and 2013

表2 2003年和2013年基于加权重中心性的中国城市等级K-mean划分

Tab. 2 Statistical result of K-Mean clustering to the weighted degree centrality in China, 2003 and 2013

2003年	城市	2013年	城市
第一层级 (WDC > 320)	北京、郑州、上海、南京、株洲、武汉、徐州、石家庄、蚌埠、衡阳、西安、济南、无锡、广州、杭州、天津、洛阳、常州、苏州、长沙、鹰潭、沈阳、镇江、德州、郴州和三门峡等26个城市	第一层级 (WDC > 600)	上海、北京、南京、郑州、武汉、广州、徐州、杭州、苏州、无锡、石家庄、常州、济南、天津、沈阳、镇江、西安、株洲、蚌埠、洛阳、秦皇岛、商丘、唐山和长沙等24个城市
第二层级 (140 < WDC < 320)	邯郸、韶关、安阳、南昌、信阳、漯河、商丘、沧州、新乡、锦州、宿迁、金华、宝鸡、邢台、保定、许昌、嘉兴和渭南等75个城市	第二层级 (250 < WDC < 600)	南昌、成都、锦州、德州、金华、泰安、长春、衡阳、鹰潭、嘉兴、韶关、合肥、郴州、信阳、邯郸、葫芦岛、深圳和新乡等89个城市
第三层级 (WDC < 140)	武威、廊坊、金昌、九江、南平、吉安、赣州、黔南州、湘潭、张掖、临汾、深圳、菏泽、吐鲁番、福州和广安等144个城市	第三层级 (WDC < 250)	武威、张掖、包头、佛山、大连、定西、辽阳、马鞍山、荆门、安顺、哈密、德阳、金昌、吐鲁番、乌鲁木齐、阳泉和嘉峪关等185个城市

有降低，但均在0.9以上，表明各层级内城市呈现明显的等级结构。高速铁路的建设使第一层级城市数量由2003年的26个减少为2013年的24个，但同一时间段内城市加权重中心性的均值增加了86%，城市整体对外联系强度明显增强。与2003年相比，秦皇岛、唐山和商丘均由第二层级城市提升为第一层级城市，且这三个城市均有高铁站点布局；德州、郴州、三门峡、鹰潭和衡阳等传统铁路枢纽城市由第一层级降为第二层级城市；其他城市的位序也发生明显变化，其中上海、南京、杭州、苏州、无锡、常州、镇江等位于长三角地区的城市以及广州、武汉、沈阳和天津的位序明显提升，而郑州、株洲、徐州、石家庄、蚌埠、西安、济南、洛阳和长沙等在传统交通网络中具有明显区位优势的城市地位有所降低，但仍在城市网络中具有重要地位。总体上，2003年，第一层级结构城市主要为全国或区域铁路枢纽城市，而2013年54%为省会和直辖市，其他城市中50%位于人口密度较高和经济发展较好的长三角地区，即第一层级城市中，具有传统铁路区位优势的城市地位被经济发展水平相对较高的城市取代。第二层级结构城市主要为东中部地区铁路干线过境城市，在网络中的地位较第一层级城市低。城市数量和加权平均度中心性的均值分别增加了20.3%和84.5%。新增的24个城市中，除黔东南州、曲靖、六盘水、广安外均有高铁站点布局；减少的12个城市中，除商丘、唐山、秦皇岛外均无高铁站点，包括柳州、大同、晋中、桂林、乌兰察布、张家口、永州、马鞍山和德阳等。第三层级结构城市位于网络的最底层，主要分布在西部地区或东中部地区铁路干线的边缘地区，且其城市数量和加权重中心性均值分别增加了27.8%和66%。

3.2 空间分布特征

空间上, 2013年第一层级城市主要为京广线、京沪线、京哈线和郑西线(郑州—西安)沿线的省会城市或位于铁路干线交叉口处的城市; 第二层级的城市主要分布在规划“四纵四横”客运专线沿线以及西部核心城市或省会城市; 第三层级的城市主要分布在铁路网络或者中国行政区的边缘地区。具体分析, 城市等级结构及其变化幅度呈现出明显的东中西差异、廊道效应和经济、人口空间耦合性。

(1) 高速铁路的建设扩大了三大地带间以及中部地区城市的空间差异, 但缩小了东部和西部地区内部差异, 且东中西三大地带城市等级结构明显(图3)。对比分析发现, 东部地区城市加权重度中心性的均值及第一层级城市的数量明显高于中西部地区, 且差距呈扩大态势。2003年中部和西部地区城市加权重度中心性均值分别为东部地区的86.2%和60.6%, 2013年该比重进一步降低为80.6%和48.3%; 同时第一层级城市数量占东部地区比重也分别由59.9%和6.7%降低为43.7%和6.25%。从三大地带内部分析, 东部和西部地区城市加权重度中心性的变异系数分别由1.19和1.27降低为1.16和1.06, 而中部地区由1.22增加为1.31。2003年西部城市差异明显大于东中部地区, 但2013年中部地区差异首当其冲。究其原因, 高速铁路在东部地区具有较高的覆盖率(60.4%), 且以新建高铁线路为主, 导致其城市加权重度中心性均具有明显的提升; 西部地区的高速铁路覆盖率(9.2%)相对较低, 且以既有线路改造为主, 导致其城市加权重度中心性提升率均相对较低; 中部地区高速铁路覆盖率(41.9%)介于东部和西部之间, 且新建线路和既有线路均有布局, 导致加权重度中心性提升率的空间差异相对较大, 高于东部和西部地区。此外, 东部地区除梅州外其余14个新增铁路站点均为高铁站点, 而中西部地区新增38个铁路站点中除黄石外, 其余均为普通铁路站点。这表明过去十年中东中西部地区处于铁路发展的不同阶段, 东部地区以新建高铁为主, 而中西部地区仍处于传统普通铁路扩建和升级改造阶段。

(2) 城市加权重度中心性及其变化幅度呈现出以高铁站点为中心、一定距离内向外衰减的规律。总体上, 在距高铁站点0~200 km范围内, 距离衰减效应较明显; 而在大于250 km, 则变化规律不明显(图4)。具体分析, 2013年高铁站点0~50 km范围内的城市加权重度中心性均值为393, 分别为高铁站点50~100 km、100~150 km、150~200 km和200~250 km范围内城市均值的2.4倍、2.9倍、3.3倍和4.1倍; 与之对应的加权重度中心性变化幅度(与2003年比较)分别为2.1倍、2.7倍、3.2倍和5.7倍, 这表明高铁的建设对0~250 km范围内城市加权重度中心性影响较为明显。而在高铁站点250 km以外地区, 城

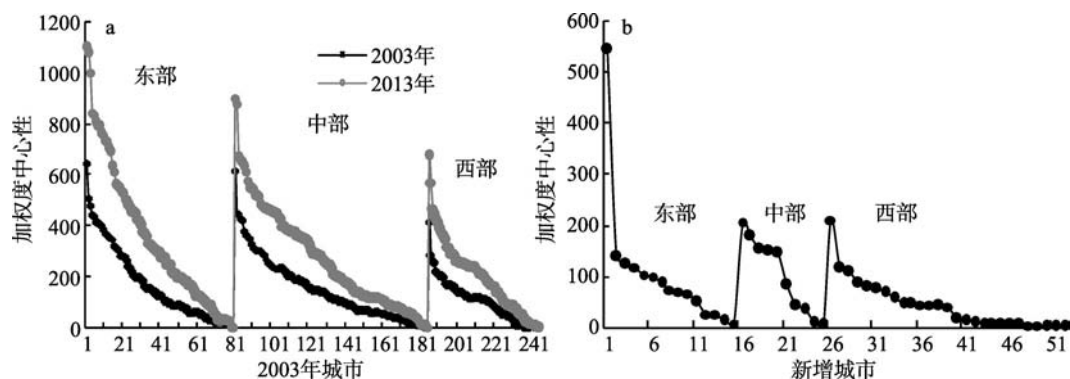


图3 2003年和2013年中国三大地带城市加权重度中心性位序—规模分布

Fig. 3 Rank-size distribution of weighted degree centrality by region in China, 2003 and 2013

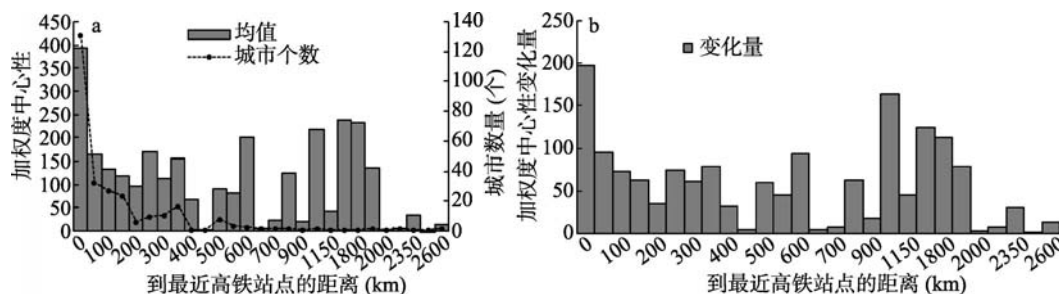


图4 加权重度中心性(2013)及其变化幅度(2003-2013)的距离衰减规律

Fig. 4 Average weighted degree centrality in 2013 and its variation during 2003-2013 by distance to the nearest HSR station

市加权重度中心性及其变化幅度的距离衰减规律不明显。这可归因于中西部地区部分传统铁路枢纽城市具有较高的加权重度中心性及变化幅度,在网络中具有较高等级,但其到高铁站点的距离较远。如乌鲁木齐其到最近高铁站点的距离1400 km左右,但2013年加权重度中心性为233.24,高于东部地区中小城市加权重度中心性的平均值。城市加权重度中心性及其变化幅度不仅受高速铁路建设的影响,同时也受限于原有铁路网络格局,但高铁仍是导致城市等级变化的重要因素。

(3) 高速铁路的建设导致加权重度中心性与人口、GDP的空间分布的耦合性有所增加,但其变化幅度的耦合性相对较低。即基于铁路客运班列的城市等级结构与基于属性数据(人口/GDP)的结果的相似性有所增加,但也存在一定的差异(图5)。所有城市加权重度中心性与GDP的相关系数由2003年的0.501增加为2013年的0.682;与此同时,城市加权重度中心性与人口的相关系数由2003年的0.379增加到2012年的0.534,到2013年略有降低,为0.516。整体上,加权重度中心性与GDP的相关性高于与人口的相关性,但其变化幅度与GDP和人口的相关系数分别仅为0.41和0.25。导致该现象的原因主要包括两个方面:一是中西部经济发展水平较高的大中城市在铁路网络中的地位提升相对较少,且部分城市呈现出负增长的态势,如2013年分别有16.2%和6.4%的城市其人口规模和GDP的变化幅度高于全国平均水平,但其加权重度中心性变化幅度低于全国平均水平;二是位于主要铁路干线沿线的中小城市具有较高的加权重度中心性和较小的GDP规模,如2013年16.2%和20.9%的城市其人口规模和GDP分别低于全国平均水平,但其加权重度中心性变化幅度高于全国平均水平。总体上,加权重度中心性及其变化幅度与GDP在空间上的耦合性要高于其与人口分布的耦合性,这表明基于铁路客运组织网络的城市等级结构更能反映GDP的空间分布特征。整体上加权重度中心性及其变化幅度较高的城市通常具有

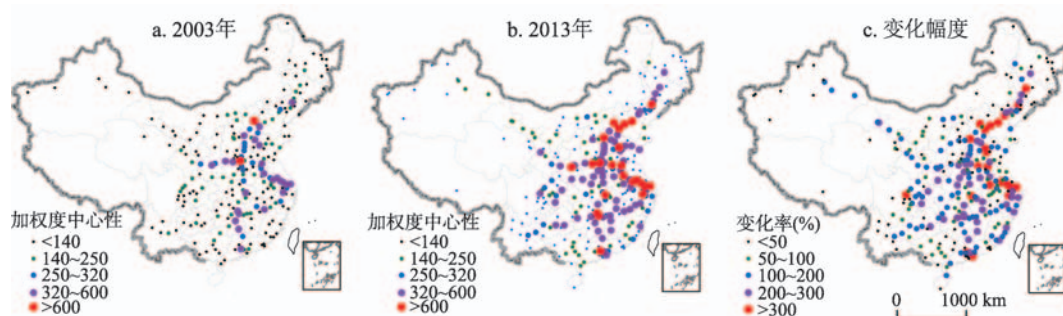


图5 2003年与2013年中国城市网络节点加权重度中心性及其变化幅度

Fig. 5 Spatial patterns of value and absolute change of weighted degree centrality in China, 2003 and 2013

较高的GDP和人口规模（表3）。具体分析，2013年第一层级城市的人口规模和GDP分别为722.3万人和6848.6亿元，分别为第二层级城市的1.4倍和3.1倍，是第三层级城市的2.2倍和5.9倍；加权重中心性变化幅度大于400的城市人口和GDP规模分别为9917亿元和800.6万人，分别为变化幅度介于200~400城市的3.1倍和1.4倍。

表3 2003年和2013年不同类型城市的社会经济统计特征

Tab. 3 Social-economic statistical characteristic by category of weighted degree centrality, 2003 and 2013										
加权重中心性	2003年均值			2013年均值			加权重中心性	变化幅度		
	城市个数	GDP (亿元)	人口规模 (万人)	城市个数	GDP (亿元)	人口规模 (万人)		城市个数	GDP (亿元)	人口规模 (万人)
> 600	2	2382.7	898.4	24	6848.6	722.3	>400	9	9917	800.6
320~600	23	1459.7	618.3	65	2291.9	549.2	200~400	59	3218	568.3
250~320	19	458.6	537.5	24	1863.7	427.8	100~200	83	1619	429.4
140~250	57	503.6	502.1	57	1296.6	353.6	0~100	132	1075	320.4
< 140	144	333	336.9	127	1105.5	317.2	< 0	14	1216	362

注：2013年城市人口和GDP规模不可获取，2013年均值和变化幅度中的GDP和人口规模为2012年数据。

4 社区结构

4.1 整体结构特征

高速铁路的建设促使城市网络的社区结构发生了明显变化，且社区结构整体上趋于明显。社区模块度由2003年的0.38增加为2013年的0.42，同一时间段社区数量由8个增加到14个。社区的PageRank值也表现出明显的位序—规模分布及首位分布特征（图6），这表明城市间列车主要集中在少数的社区。2003年，社区1的PageRank值为29.2%，约为第二位社区（23.2%）的1.26倍，分别为第三位和第四位社区的1.85倍和2.52倍。社区结构为基于城市间功能距离划分的功能区域，因而社区结构重要性及其社区成员个数的差异在一定程度上反映了城市对外联系功能的集聚性及差异性。随着高速铁路的建设，城市功能呈现出先收敛后均衡发展的态势，但其功能仍集中在少数的功能区域。具体分析，近十年社区结构的PageRank值和城市数量的变异系数呈现出先上升后降低的态势，2003年分别为0.8和0.54，2009年增加为1.41和1.24，2013年又降低为1.15和0.84。社区PageRank值的首位度呈现出波动下降的态势，由1.26降低为1.15；前三位社区PageRank值和城市个数占当年总量的比重均在60%左右，且该比重呈现出先扩大后

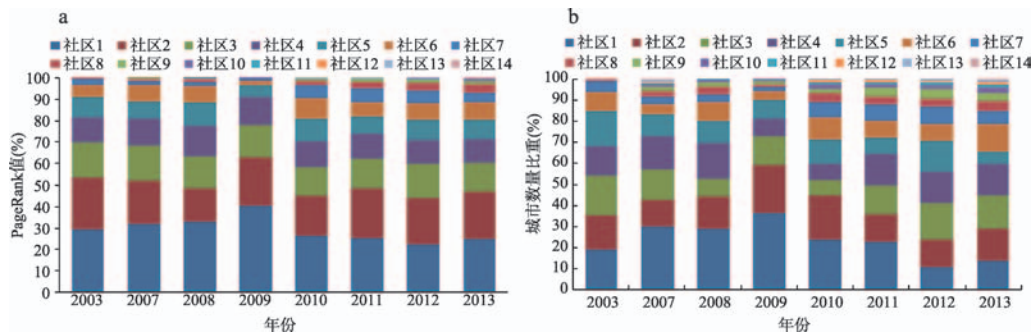


图6 2003-2013年中国社区结构PageRank值和城市数量的统计特征

Fig. 6 Statistical characteristics of the PageRank value and number of cities in each community in China, 2003-2013

缩小的态势，即前三位社区的城市基本上占有近 60% 的铁路资源。

各社区内城市加权重度中心性表现出层级分布特征，但不同社区发育程度差异较大，且高速铁路的建设使其等级结构发生明显变化（图 7，表 4）。地理学中认为，稳定的城市等级结构多呈现“金字塔”分布格局。即高等级城市地位高但其数量相对较少，而低等级的城市地位相对较低但数目较多。在城市等级结构中，位于第一层级的城市均具有较高的对外联系强度，在全国或区域网络占有较重要的地位，在不同社区中承担对外联系功能。2003 年社区 1~社区 5 均呈现出“金字塔”分布格局，且第一层级城市的数量明显低于第二层级，低于第三层级；而社区 6~社区 8 的等级结构相对较低，均无第一层级的城市。高速铁路的建设使社区的成员和区位发生明显变化，一定程度上改变了既有的各社区的等级结构。具体分析，2013 年 14 个社区中仅 4 个社区（如表 3 中的社区 1、社区 3、社区 4 和社区 6）的城市体系相对稳定，各层级结构的城市数量表现出“第一层级<

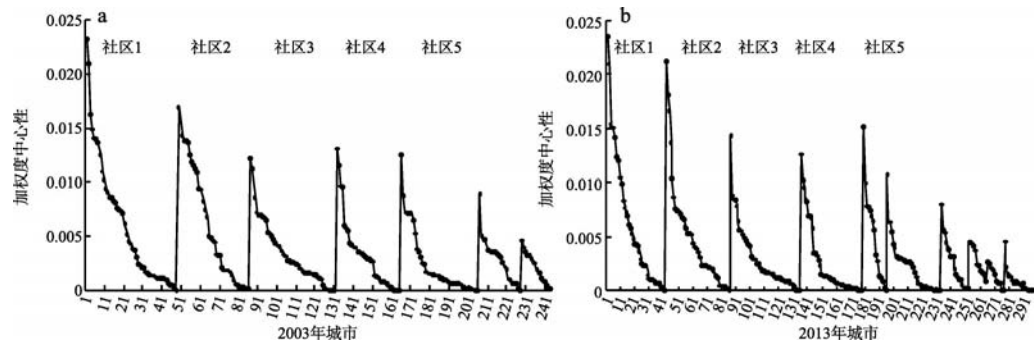


图 7 2003 和 2013 年中国不同社区结构的城市位序—规模分布
Fig. 7 Rank-size distribution of weighted degree centrality by community in China, 2003 and 2013

表 4 2003 和 2013 年中国城市网络社区结构

Tab. 4 Community based on passenger train network in China, 2003 and 2013

名称	2003 年社区 成员区位	2003 年社区成员数			2013 年社区 成员区位	2013 年社区成员数		
		第一层级	第二层级	第三层级		第一层级	第二层级	第三层级
社区 1	京广线和武汉- 宜昌铁路沿线	9	18	21	京沪线和 胶东半岛	11	13	17
社区 2	京沪沿线和 胶州半岛	11	12	15	京武线 和武城线	5	21	19
社区 3	沪昆沿线	2	15	29	南方地区(除京 广线和京九线)	1	16	31
社区 4	兰新沿线 及四川省	2	10	22	东北地区	3	8	32
社区 5	东北地区	1	9	31	武广线	3	7	7
社区 6	京九线		6	16	兰新线	1	8	30
社区 7	蒙晋地区社区		6	8	京九线		9	10
社区 8	四川省南部			2	东南沿海		5	8
社区 9					内蒙古中部		1	11
社区 10					山西省		1	7
社区 11					江苏省东部			5
社区 12					海南省			2
社区 13					云南省西部			3
社区 14					云南省西部			2

第二层级<第三层级”;而社区2的第二层级城市数量高于第三层级城市数量,社区5第二层级与第三层级城市数量相同;其他社区的发育度均相对较低,且社区11~社区14等4个社区仅含有第三层级城市。从各社区结构中第一层级城市分析,仅6个社区核心城市已凸显。其中,社区1具有核心城市11个,占总量的45.8%,这些城市主要分布在长三角城市群;社区2有5个核心城市,分别为京武沿线的省会城市和次中心城市;社区3和社区6分别仅有杭州和西安一个核心城市;社区4有3个核心城市,分别为秦沈沿线铁路枢纽城市;社区5有3个核心城市,分别为武广沿线铁路枢纽城市;而其他社区均无第一层级城市分布。

4.2 空间格局及演化

社区结构的空间格局受到铁路布局、行政区划和地理位置等影响,且与城市群空间分布具有较高的耦合性。此外,社区结构的空间演化受到交通政策和重大铁路事件的影响较明显,尤其是高速铁路的发展。

(1) 社区结构的空间格局与中国铁路干线分布相吻合,同时也受高速铁路建设、行政区划和地理位置的影响(图8)。2003年8个社区中有5个社区的城市位于铁路干线沿线。其中,社区1的城市主要分布在京广线和武汉—宜昌铁路沿线,即京广线社区;社区2的城市主要分布在京沪沿线和胶州半岛,即京沪线社区;社区3的城市主要分布在沪昆(上海—昆明)沿线,包括京九线东部的福建省和江西省的部分城市以及京广线西侧的广西省、贵州省和云南省的部分城市,即南方社区;社区4的城市主要分布在兰新(兰州—乌鲁木齐)沿线以及四川省,即兰新线社区;社区6的城市主要分布在京九沿线,即京九线社区。其他3个社区受地理位置和行政区域的影响较大,相邻位置的城市或同一行政单元内的城市位于同一社区中。其中,东北地区铁路网络发展相对较早且相对较成熟,促使其城市间联系相对较为密切,构成社区5,即东北社区;内蒙古和山西省部分城市间通过京包(北京—包头)和大湛(大同一湛江)铁路线联系,形成社区7,即蒙晋地区社区;四川省的宜宾和自贡之间铁路联系频数明显高于其对外联系强度,而形成同一个社区。随着高速铁路的建设,2013年较2003年社区结构发生了明显变化。其中,京广沿线城市被划分为两个社区,京武线(北京—武汉)沿线城市 and 武汉—成都沿线城市构成社区2(“京武+武成线”社区),而武广线沿线城市单独构成一个社区(武广线社区),究其原因是武广高铁沿线城市之间列车联系频数,明显的高于京武沿线

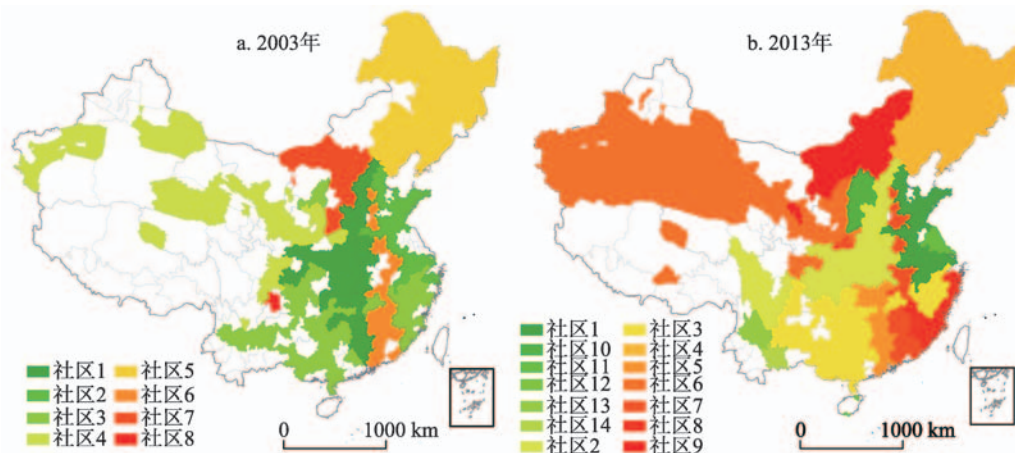


图8 2003年和2013年中国城市社区结构空间分布特征

Fig. 8 Spatial distribution of community based on passenger train network in China, 2003 and 2013

城市,武广高铁和京武高铁沿线城市间联系频数的差异较大;而京武线和武汉—成都之间列车联系频数相当,且通过武汉中转,具有相对较强的联系;京沪线社区在2003年基础上,新增了河南、安徽、江苏和江西省的部分城市,并成为2013年等级最高的社区,即“京沪+胶济线”社区;原有的内蒙古和山西省构成的蒙晋社区划分为两部分,即山西省和内蒙古两个社区;东南沿海宁波—福州—厦门高铁沿线城市构成东南沿海社区(社区8)。此外,江苏省东部的南通(2004年后承担客运)、淮安(2004年)、泰州(2004年)、盐城(2004年)和扬州(2004年)等新增铁路站点城市,以及云南省西部新增铁路站点城市,由于其开通列车班次相对较少,与其他城市联系较弱,分别构成独立的社区。

(2) 社区结构与城市群空间耦合性分析。社区是由具有较强功能联系和较短功能距离的城市所构成,同一社区内城市间具有便捷的交通联系,而不同社区的城市间联系相对较弱,这都将对城市群发展和空间结构产生影响。通过对比分析中国现有23个城市群和基于铁路客运组织划分的功能区域(2013年)发现,两者在空间上具有一定的一致性,但也存在一些差异(图9)。具体分析发现,哈大长、辽东半岛、酒嘉玉、关中、呼包鄂、晋中、海峡西岸、长株潭、山东半岛和南北钦防城城市群的所有城市均分别位于同一个社区中,这表明这些城市群具有良好的铁路基础设施相互连接。而部分城市群分布相对较破碎,即内部城市分属于不同的社区。如京津冀城市群分别位于4个社区中,即天津、沧州和廊坊被划分为京沪线社区,北京、保定、石家庄、邢台和邯郸等被划分为京武社区,北京和天津之间虽然具有较强的铁路联系,但受京广线和京沪线两条主干线的影响,被划分到不同的社区;张家口和承德分别被划分到内蒙古和东北社区,这主要是由于京津冀城市群内除京津城际外,其余城市之间的铁路联系均相对较弱,尤其是河北的南部和北部城市间。因此,未来京津冀协同发展应重点考虑增加京津城市与周围城市及环京津城市之间的铁路联系。此外,哈大长和辽东半岛城市群,中原、武汉和成渝城市群,酒嘉玉、兰白西和关中城市群,长株潭和珠三角城市群等大部分城市位于同一个功能区域内,表明这些城市群内城市间具有较为便捷的铁路联系,为城市群间的联系和融合提供可能。

(3) 社区结构的演化明显受交通政策和重大铁路事件的影响。过去10年中,中国高铁网络处于快速发展时期,促使城市网络的社区结构发生了较大的变化。目前,社区结构与中国高速铁路空间布局基本一致,相对稳定(图9)。2007年“第六次铁路大提速”促使京广线、京沪线和京哈线等部分线路增开D字头列车,沿线城市间列车频数明显增加,对

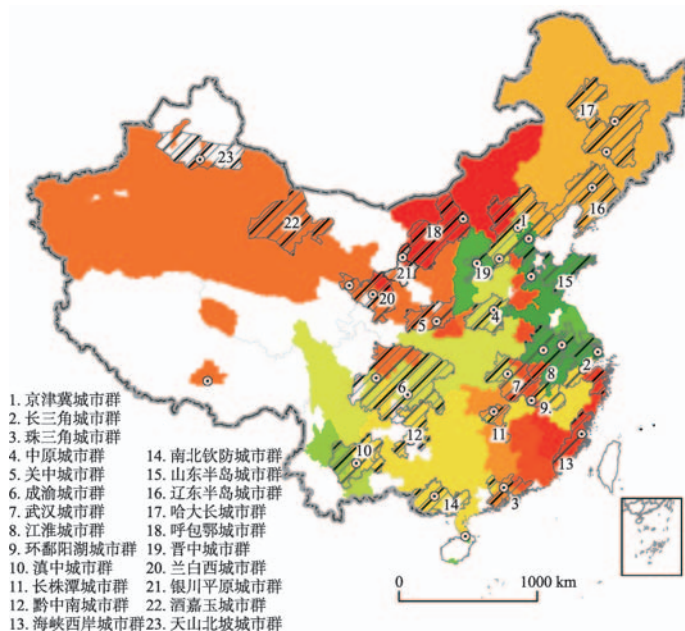


图9 2013年中国现状城市群和社区结构的分布特征

Fig. 9 Spatial distribution of metropolitans and communities in China, 2013

外联系明显增强。期间,原沪杭铁路、浙赣铁路、湘黔铁路和贵昆铁路整合为沪昆铁路,便于沿线城市间列车联系,促使其共同构成一个社区。2008年,第一条城际客运专线开通,而既有线路改造的铁路(即D字头列车运行的线路)并没有明显的变化,促使京沪沿线城市被拆分到不同的社区。武广高速铁路的开通,促使沿线城市间列车联系频数明显增加,与京武(北京—武汉)沿线城市间的差异较明显,导致京广沿线城市被划分为两个社区(图10)。温福和福厦铁路的开通,促使沿线城市共同构成“东南沿海”社区;胶济(青岛—济南)高铁的开通,京沪线与胶济沿线城市间的联系频数明显高于与其他城市的联系频数,共同构成新的社区,并成为2013年铁路联系频数规模最大的社区。中国高铁网络逐渐由“核心—核心”到“核心—网络”的扩展,随着高速铁路网络建设的不断完善,以高铁网络布局为依托的社区结构逐步趋于稳定,社区结构和高速铁路网络空间布局具有较高的耦合性,为中国未来高速铁路建设提供支撑。

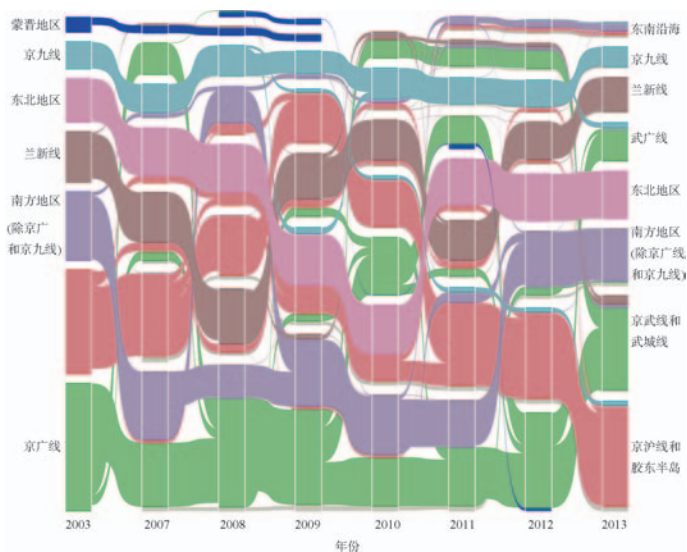


图10 2003-2013年中国城市社区结构演化图

Fig. 10 Evolution of community based on passenger train network in China in China during 2003-2013

5 结论和讨论

高速铁路作为交通运输上一次重大的技术创新,其快速发展导致了铁路运输史的“第二次革命”。交通设施作为影响经济发展和城市网络体系的重要因素,随着快速、便捷和高效的高速铁路发展,其作用日趋明显。本文从城市网络的视角,以2003-2013年8个时间截面的铁路客运班列数据为基础,探讨了高速铁路建设对城市网络等级结构和集聚性的影响,为高速铁路快速发展背景下城市和城市群的建设提供借鉴意义。

研究结果发现,城市加权重中心性呈现出明显的位序—规模分布特征,即高等级的城市具有较强的对外联系能力,且城市加权重中心性与城市规模等级具有较高的相关性。随着高速铁路的建设,高等级的城市趋于向少数城市集聚,城市等级结构与城市规模等级的相关性呈增强态势。三大地带和各社区内城市也呈现出明显的位序—规模分布,但不同地带和社区间的城市等级结构存在较大的差异;随着高速铁路的发展,三大地带间的差异呈现出扩大的态势,而不同社区结构间的差异呈现出缩小的态势。空间上,高速铁路沿线或距高铁站点较近的城市具有较高的等级及加权重中心性变化幅度,基于铁路客运组织的城市等级结构与基于属性特征(人口/GDP)的等级结构存在较大的相似性,即城市加权重中心性和城市人口、GDP规模具有较高的耦合性,但仍存在一定的差异。社区结构与中国高速铁路网络、城市群的空间格局相一致,同时也受行政区划和地理条件的影响。2013年,中国形成了依托铁路干线“京沪+胶济线”社区、“京武+

武成线”社区、“武广线”社区、“兰新线”社区、“京九线”社区和“温福高铁”社区,以及依托行政区划和地理条件的东北地区社区、山西社区和内蒙古社区等。中国23个城市群中除京津冀、成渝和武汉城市群等位于不同社区外,其他城市群均位于同一个社区,且部分城市群分属于同一个社区,这为处于同一社区内城市群间的便捷联系创造条件,将对城市群空间重构和城市群竞合机制的构建提供借鉴。同时,社区结构的空演化受主要铁路事件(尤其是高速铁路)的影响较大,如何在高铁快速发展背景下合理组织铁路资源,以满足城市群发展需求,需进一步深入的探讨。

随着流动空间的发展,时间(速度)、流和信息在经济发展和城镇系统中扮演着越来越重要的作用。高速铁路则通过改变城市间的旅行时间、连接性和联系强度影响经济发展和城镇化。目前,中国仍处于快速的城镇化和工业化时期,其空间结构仍处于不断的更新和调整中,作为拥有世界上最大规模运营和规划高铁网的国家,其高速铁路的建设对城镇系统的影响不可估量。本文的研究也在一定程度上对此现象进行了解释。其次,不同交通方式对城市等级结构和集聚性的影响存在较大的差异。基于航空网络的研究发现,城市等级在空间上分布相对较均衡,基本上形成了以北京、上海和广州为主的鼎形结构^[34];而基于铁路网络的研究分布相对较为集中,尤其是在东中部地区,而西部地区受自然环境条件的影响,铁路网络布局相对较少。此外,受交通技术经济特征的影响,铁路更多承担中长距离的运输,随着高速铁路的发展,其服务半径不断外拓,但与航空相比,在长距离运输上的竞争优势仍较低。虽然基于铁路网络的城市等级结构和集聚性的研究存在一定的局限性,但60%的城市对仍分布在1500 km范围内,铁路客运组织网络仍能够较程度上反映城市等级结构和集聚性。在后续研究中,可结合航空、铁路和公路等不同交通方式的特点,对基于综合交通网络视角下,城市等级结构和集聚性进行研究,以期全面探讨交通网络与城市系统的相互作用关系。

参考文献(References)

- [1] Lu Dadao. Lu Dadao: Major regional strategies in China: The orientation of three major agglomerations. *China Science Daily*, 2015-03-06(2). [陆大道. 陆大道: 中国重大区域战略: 三大城市群的明确定位. *中国科学报*, 2015-03-06(2).]
- [2] Beaverstock J V, Taylor P J, Smith R G. A roster of world cities. *Cities*, 1999, 16(6): 445-458.
- [3] Taylor P J, Catalano G, Walker D R F. Measurement of the world city network. *Urban Studies*, 2002, 39(13): 2367-2376.
- [4] Taylor P J, Walker D R F, Catalano G, et al. Diversity and power in the world city network. *Cities*, 2002, 19(4): 231-241.
- [5] Liu X, Ben D, Taylor P J. Mapping the evolution of hierarchical and regional tendencies in the world city network, 2000-2010. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2014, 43: 51-66.
- [6] Yao Yongling, Dong Yue, Wang Yunhan. City interlock connectivity in World City Network and their dynamic factors: Case study of Beijing and Seoul. *Economic Geography*, 2012, 32(8): 36-42. [姚永玲, 董月, 王韞涵. 北京和首尔全球城市网络联系能级及其动力因素比较. *经济地理*, 2012, 32(8): 36-42.]
- [7] Ma Xueguang, Li Guicai. Research methods for World City Network and relevant inspirations. *Progress in Geography*, 2012, 31(2): 255-263. [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.]
- [8] Wang J, Mo H, Wang F, et al. Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19: 712-721.
- [9] Wang Jiao'e, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(8): 899-910. [王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性. *地理学报*, 2009, 64(8): 899-910.]
- [10] Newman M E J. Scientific collaboration networks. II. Shortest paths, weighted networks, and centrality *Physical Review E*, 2001, 64: 016132.
- [11] Taylor P J. New political geographies: Global civil society and global governance through world city networks. *Political Geography*, 2005, 24(6): 703-730.
- [12] Dai Teqi, Jin Fengjun, Wang Jiao'e. Spatial interaction and network structure evolvement of cities in term of China's

- railway passenger flow in 1990s. *Progress in Geography*, 2005, 24(2): 80-89. [戴特奇, 金凤君, 王姣娥. 空间相互作用与城市关联网络演进: 以中国20世纪90年代城际铁路客流为例. *地理科学进展*, 2005, 24(2): 80-89.]
- [13] Wang Chengjin. Identification of inter-urban container transport hubs and their spatial characteristics: A case study of railway transportation in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(10): 1275-1286. [王成金. 城际集装箱交流枢纽的识别及其物流特征: 以中国铁路运输为例. *地理学报*, 2010, 65(10): 1275-1286.]
- [14] 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. [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.]
- [15] Xiong Lifang, Zhen Feng, Wang Bo, et al. The research of the Yangtze River Delta core area's city network characteristics based on Baiduindex. *Economic Geography*, 2013, 33(7): 67-73. [熊丽芳, 甄峰, 王波, 等. 基于百度指数的长三角核心区城市网络特征研究. *经济地理*, 2013, 33(7): 67-73.]
- [16] Wang Chengjin, Jin Fengjun. Spatial evolvement of China international region through analyzing aviation international networks. *Economic Geography*, 2005, 25(5): 667-672. [王成金, 金凤君. 从航空国际网络看中国对外联系的空间演变. *经济地理*, 2005, 25(5): 667-672.]
- [17] Song Wei, Li xiuwei, Xiu Chunliang. Patterns of spatial interaction and hierarchical structure of Chinese cities based on intercity air passenger flows. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 917-926. [宋伟, 李秀伟, 修春亮. 基于航空客流的中国城市层级结构分析. *地理研究*, 2008, 27(4): 917-926.]
- [18] Wang J, Mo H, Wang F. Evolution of air transport network of China 1930-2012. *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 145-158.
- [19] ZhongYexi, Lu Yuqi. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on railway network. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 785-794. [钟业喜, 陆玉麒. 基于铁路网络的中国城市等级结构与分布格局. *地理研究*, 2011, 30(5): 785-794.]
- [20] Plassard F. Le train à grandevitesseet le réseau des villes. *Transports*, 1991, 345: 14-23.
- [21] Jiao J, Wang J, Jin F, et al. Impacts on accessibility of China's present and future HSR network. *Journal of Transport Geography*, 2014, 40: 123-132.
- [22] Chen C. Reshaping Chinese space-economy through high-speed trains: Opportunities and challenges. *Journal of Transport Geography*, 2012, 22: 312-316.
- [23] Kim K S. High-speed rail developments and spatial restructuring: A case study of the Capital region in South Korea. *Cities*, 2000, 17(4): 251-262.
- [24] Wang Jiao'e, Hu Hao. Competition and cooperation of high-speed rail and air transport in China: A perspective from spatial service market view. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(2): 175-185. [王姣娥, 胡浩. 中国高铁与民航的空间服务市场竞争分析与模拟. *地理学报*, 2013, 68(2): 175-185.]
- [25] Dupuy G. *L'urbanisme des Réseaux: Théoriesetméthodes*. Paris: Armand Colin, 1991.
- [26] Urena J, Menerault P, Garmendia M. The high-speed rail challenge for big intermediate cities: A national, regional and local perspective. *Cities*, 2009, 26: 266-279.
- [27] Jiao Jingjuan, Wang Jiao'e. Spatial structure and evolution of Hainan Airlines network: An analysis of complex network. *Geographical Research*, 2014, 33(5): 926-936. [焦敬娟, 王姣娥. 海航航空网络空间复杂性及演化研究. *地理研究*, 2014, 33(5): 926-936.]
- [28] ChenYu, XuJun. A distance-based method of community detection in complex networks. *Journal of Geo-information Sciences*, 2013, 15(3): 338-344. [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.]
- [29] Han Hua, Wang Juan, Wang Hui. Improving CNM algorithm to detect community structures of weighted network. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(35): 86-89. [韩华, 王娟, 王慧. 改进的CNM算法对加权网络社区结构的划分. *计算机工程与应用*, 2010, 46(35): 86-89.]
- [30] Newman M E J. Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical Review*, 2004, 69(6): 066133(1-5).
- [31] Zhong Binqing, Liu Xiangnan. A spatialized PageRank algorithm for migration spatial agglomeration analysis. *Geography and Geo-Information Science*, 2011, 27(5): 82-86. [钟斌青, 刘湘南. 基于空间化PageRank算法的人口流动空间集聚性分析. *地理与地理信息科学*, 2011, 27(5): 82-86.]
- [32] Rosvall M, Bergstrom C T. Mapping change in large networks. *PloS One*, 2010, 5(1): e8694.
- [33] ZifG K. *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. Cambridge, Mass.: Addison-Wesley, 1949.
- [34] Wang Jiao'e, Jin Fengjun, Sun Wei, et al. Research on spatial distribution and service level of Chinese airport system.

Acta Geographica Sinica, 2006, 61(8): 829-838. [王姣娥, 金凤君, 孙伟, 等. 中国机场体系的空间格局及其服务水平. 地理学报, 2006, 61(8): 829-838.]

Impact of high-speed rail on inter-city network based on the passenger train network in China, 2003-2013

JIAO Jingjuan^{1,2}, WANG Jiao'e¹, JIN Fengjun¹, WANG Han^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China;

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

Abstract: The evolution of inter-city network influenced by globalization and information technology has become a hot topic in city and urban research. This study tries to explore the evolution of nodal hierarchy and communities in inter-city network based on passenger train network during the rapid development period of High-speed Railway (HSR) in China since 2003. Results indicate that: (1) the evolved HSR network in China enlarged the disparities of weighted degree centrality between regions, but decreased the disparities of that between communities, and led to an increasing concentrated city hierarchy with fewer cities having high centrality value, and a growing similarity between the city hierarchies measured by the passenger train network and by city attributes (such as population and GDP); (2) the city hierarchy measured by passenger train network followed a rank-size distribution in the national and regional levels, as well as in some communities. (3) Spatially, cities with higher hierarchy in passenger train network and larger improvement in weighted centrality indicator were mostly located in the eastern region or the areas with the distance to the nearest HSR stations below 50 km, developed economy and high population density; the cities in 2013 could be divided into 14 communities, including the communities with cities mainly located along Beijing-Shanghai, Beijing-Wuhan and Wuhan-Chengdu, Wuhan-Guangzhou, Beijing-Jiujiang, Hangzhou-Xiamen, Lanzhou-Urumqi trunk rail lines, and located in Northeast China, Shanxi Province, Inner Mongolia. (4) The evolution of communities was mostly influenced by the natural environment and administrative areas, especially by the development of HSR network.

Keywords: passenger train network; centrality; community; inter-city network