

doi: 10.3969/j.issn.1005-8141.2016.06.012

# 三大城市群的高速铁路网络特征对比分析

## ——基于复杂网络视角

李鑫<sup>a</sup> 郭进利<sup>a,b</sup> 张禹<sup>a</sup>

(上海理工大学 a. 管理学院; b. 超网络研究中心, 上海 200093)

**摘要:** 高速铁路正逐渐成为城市间联系的重要方式,我国的高速铁路也逐步由线路发展成网络。以长江三角洲、珠江三角洲、京津冀三大城市群为例,运用复杂网络理论构建高速铁路物理网络和出行网络,计算网络的平均度、集聚系数、平均最短路径、中心性、网络密度等指标。对比分析结果表明:三大城市群的高铁物理网络密度均较小,出行网络密度大,高铁出行网络呈现一定的小世界性;京津冀和珠三角城市群的物理网络和出行网络节点中心化程度差异较大,而长三角的高铁网络结构则较为均衡。城市群高速铁路网络的深入研究和结果对其他区域的铁路建设和管理具有一定的参考意义,同时也促进了对城市群交通网络的深入研究。

**关键词:** 高速铁路; 城市群; 复杂网络; 社会网络分析; 对比研究

中图分类号: F530.7 文献标志码: A 文章编号: 1005-8141(2016)06-0703-05

**Comparative Analysis on Characteristics of High-speed Railway Network by Three Major Urban Agglomerations in China**  
— Based on Complex Networks Theory

LI Xin<sup>a</sup>, GUO Jin-li<sup>a,b</sup>, ZHANG Yu<sup>a</sup>

(University of Shanghai for Science and Technology a. Business School; b. Center for Supernetwork Research, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** High-speed railway was gradually becoming an important way to link the cities, China's high-speed railway was also developed from a line to a network. Taking the three major urban agglomerations in China, Changjiang River Delta, the Pearl River Delta, Beijing, Tianjin and Hebei for example, the high-speed railway physical network and travel network were built based on complex networks theory. Some structure analysis indexes (average degree, clustering coefficient, average shortest path, centrality, network density) were computed in this paper. The results showed that the high-speed rail physical networks' density were smaller while the travel networks' density were bigger, the high-speed rail travel network obtained small world features. Beijing, Tianjin, Hebei and the Pearl River Delta high-speed rail network had network centralization features obviously, the travel network structure of Changjiang River Delta was more balanced. The research methods and results of high-speed railway network in urban agglomeration had certain reference significance for other regions of railway construction and management and it also promoted the research of urban traffic network.

**Key words:** high-speed railway; urban agglomeration; complex networks; social network analysis; comparative analysis

### 1 引言

高速铁路由于其快速、方便、运量大的特点,快速成为我国主要城市间的重要交通方式。2013年,宁杭甬高铁的开通标志着长三角地区成为我国高速铁路最早成网的地区。随着高速铁路建设步伐的加快,目前京津冀、珠三角地区的高速铁路(简称“高铁”)、城际铁路也逐步成网。为了促进城市群的发展,更好地发挥高铁带来的新福利,需要对已发展成网的城市群高铁网络结构特征进行研究。

城市交通网络是城市群发展的基础。王国明、李

夏苗等人基于复杂网络理论、社团识别理论对城市交通网络做了一系列研究,深入分析了城市群城镇道路交通网络特征、长株潭城市群交通网络的层级结构和组团结构、国内外典型的6个城市群道路交通网络特征等<sup>[1-3]</sup>。随着高速铁路技术的提升,高速铁路不断发展,高速铁路对城市空间结构<sup>[4,5]</sup>、可达性<sup>[6-10]</sup>、区域旅游结构<sup>[11-13]</sup>、与其他交通方式的竞合分析<sup>[14,15]</sup>等影响逐渐成为研究的热点。

在国外,高速铁路起步较早且发展迅速,Vicker-man、Levinson、Kim等对欧洲、韩国高铁的可达性及其对区域空间结构的影响进行了研究<sup>[4,6,7]</sup>; Oskar分析了高铁与其他交通工具的竞争关系,高铁对旅行时间和旅行方式的影响等<sup>[11,12]</sup>。然而,国内的高铁研究起步较晚,主要研究集中在某条具体线路或省际区域的研究尺度方面。蒋海兵、杨金华、冯长春等研究了高铁对区域、省际、城市圈可达性的变化和影响<sup>[8-10]</sup>; 殷平等

收稿日期: 2016-04-17; 修订日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 71571119)。

第一作者简介: 李鑫(1992-),女,福建省浦城人,硕士研究生,主要从事复杂网络理论应用研究、交通网络。

通讯作者简介: 郭进利(1960-),男,陕西省西安人,博士,教授,博士生导师,主要从事复杂网络与超网络、演化博弈、管理科学与工程、供应链等研究。

以郑西高铁为例,分析了高速铁路与区域旅游的新格局<sup>[13]</sup>。面对我国高速铁路线路网络结构的逐步形成,王娇娥等开始从全国的视角整合分析了中国高速铁路的发展过程、格局和空间效应<sup>[16]</sup>;徐凤等利用复杂网络理论研究了我国高铁与民航的复合交通网络结构特征及其鲁棒性<sup>[17,18]</sup>,但仅从拓扑结构上说明整体网络的结构特征,并没有考虑网络的微观中心性特征和实际高铁交通流对网络的影响。

以上研究多数从交通地理学、旅游学方面研究了高速铁路的影响效应,而对高速铁路线路网络结构方面的研究较少。本文从城市群的角度出发,对比分析了我国的京津冀、长三角、珠三角三大城市群的高速铁路网络结构特征。基于复杂网络理论构建高速铁路物理网络和高速铁路出行网络,本文分别从网络的基本拓扑结构和网络中心性进行了比较分析,尝试从不同的层面刻画我国现有的城市高铁网络特征,为日后的高铁建设、运营城市群交通建设规划提供有价值的参考。

## 2 研究对象与方法

### 2.1 研究对象

在我国城市化发展的进程中,城市经济发展需求上升,逐渐形成了长三角、京津冀、珠三角等城市群,各城市群成为区域人口、技术、资金的聚集地。作为城市群发展的重要支撑,交通基础设施一直在城市群的发展过程中起着重要作用,本文以长三角、京津冀、珠三角三大城市群的高速铁路为研究对象,探究三大城市群的高速铁路网络发展状况。

### 2.2 研究方法

随着近年来统计物理学领域的复杂网络研究和社会网络学派在社会学领域的兴起,网络或网络化的研究视角逐渐成为科学研究的热点。复杂网络已经成为跨学科研究的热门方法,在交通领域取得了丰富的研究成果<sup>[19]</sup>。

运用复杂网络理论构建的高铁网络模型为:  $G = (V, E, W)$ 。式中,  $V$  代表网络中的节点集  $\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$ ;  $E$  表示网络中节点  $i$  和节点  $j$  的连边  $e_{ij}$  的集合; 权重矩阵  $W(\omega_{ij})$  为边  $e_{ij}$  上的权重值  $\omega_{ij}$  的集合。网络可用邻接矩阵  $A(a_{ij})$  来描述,  $a_{ij}$  为网络邻接矩阵的元素, 如果节点  $i$  与节点  $j$  相连, 则  $a_{ij} = 1$ , 反之  $a_{ij} = 0$ ;  $\omega_{ij}$  表示网络中节点  $i$  与节点  $j$  之间的联系程度; 点权强度  $s_i$  表示所有与节点  $i$  相连的边权之和。

### 2.3 主要测度指标

网络分析参数主要有平均度、平均路径长度、集聚

系数、网络密度、介数、中心性等<sup>[20]</sup>。具体指标符号、计算公式和含义见表 1。

表 1 网络分析指标

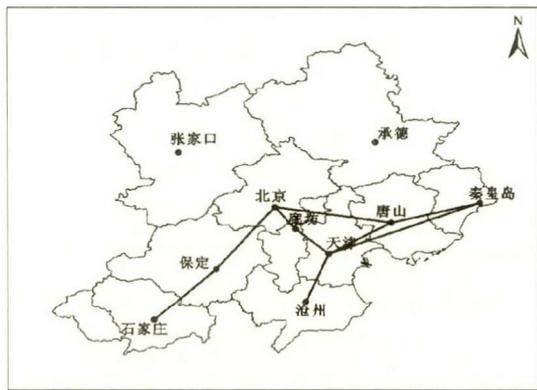
指标名称	符号	表达式	指标说明
平均度	$k$	$\langle k \rangle = \frac{\sum_i k_i}{N}$	节点的度越大,与该点直接相连的路线越多
平均路径长度	$L$	$L = \frac{2 \sum_{i \geq j} d_{ij}}{N(N-1)}$	网络中所有节点的最短路径长度平均值表示网络的连通性
集聚系数	$C_i$	$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$	表示网络集聚程度
介数	$B_i$	$B_i = \sum_{j=k} \frac{\sigma_{ik}(i)}{\sigma_{jk}}$	网络中经过节点 $i$ 的最短路径越多,表示节点 $i$ 所承受的流量越大
网络密度	$\sigma$	$\sigma = \frac{\langle k \rangle}{N-1}$	反映网络疏密程度的指标
点权强度	$s_i$	$s_i = \sum_{j \in \Omega_{ii}} w_{ij}$	根据实际网络中邻居节点的边权反映节点 $i$ 的强度
点度中心度	$C_d$	$C_d = k$	衡量节点在网络中的中心位置程度。
点度中心势	$C_d'$	$C_d' = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{dmax} - C_{di})}{N-2}$	整体上表明的是核心点集与其他节点之间的关系结构
接近中心度	$C_c$	$C_c = \frac{1}{\sum_{j=1}^N d(i, j)}$	用距离的概念来测量某一节点的中心程度,反映节点与网络中其他节点的接近程度
接近中心势	$C_c'$	$C_c' = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{cmax} - C_{ci})}{(N-2)(N-1) \times (2N-3)}$	从整体上描述网络的紧密性,交通网络中,接近中心势越高,网络通达程度越高
中介中心度	$C_b$	$C_{bi} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$	表示节点在多大程度上是网络中其他成员的中介,衡量节点对网络的控制能力
中介中心势	$C_b'$	$C_b' = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{bmax} - C_{bi})}{N-1}$	关注的是网络中中介中心度的差异程度,表示网络整体控制能力的强弱

## 3 三大城市群高铁网络模型

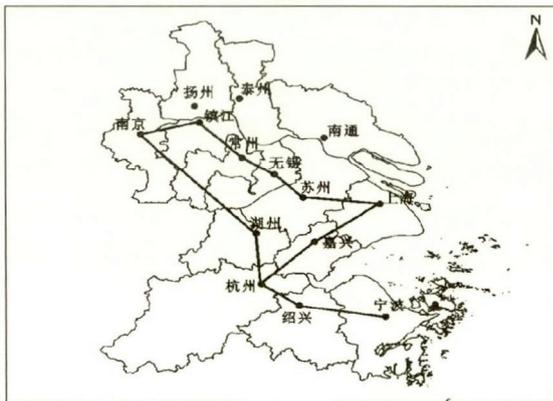
为了更好地反映高铁网络的结构和实际交通特征,我们从基础设施物理层和交通运输层两个层面来构建三大城市群的高速铁路网络模型。首先,构建三大城市群的高铁物理网络。以高铁站点所在城市为节点  $i$ , 连接节点间的高速铁路轨道线为边  $e_{ij}$ , 不考虑边的权重, 建立高铁物理网 (High-speed railway physical network), 记为 HSR-P, 见图 1。然后, 结合交通运输特征, 以站点所在城市为节点  $i$ , 若城市间有列车直接通达即存在一条边  $e_{ij}$ , 考虑边的权重  $\omega_{ij}$ , 把城市间每天的列车通达班次视为边权, 构建高铁出行网络 (High-speed railway travel network), 记为 HSR-T (图 2), 分析城市群内城市间的高铁出行联系程度。

在构建网络过程中, 需要做出几个说明: ① 节点。节点以市级行政单位为统计单位, 图 2 中的点越大, 说明节点的点权强度越大, 即该城市的高铁站点每日发车数越多。② 边。由于轨道是可双向通车的, 列车通常为对开列车组, 因此假设 HSR-P 为无向无权网络, HSR-T 为无向加权网络, 图 2 中的边连线越粗说明两城市间每天通达的班次越多。③ 数据来源。数据来源

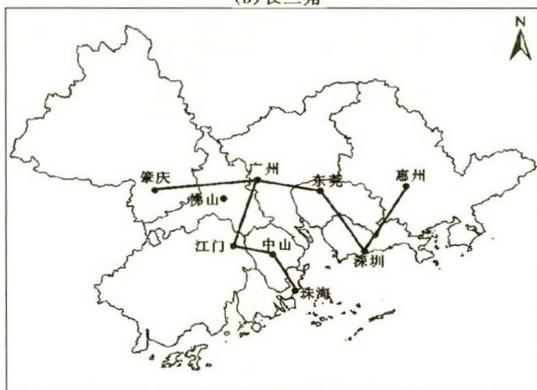
于中国铁道部网站和 12306 网站(2015 年 9 月 30 日), 权重值取 GC 高铁/城际列车日班次。



(a)京津冀

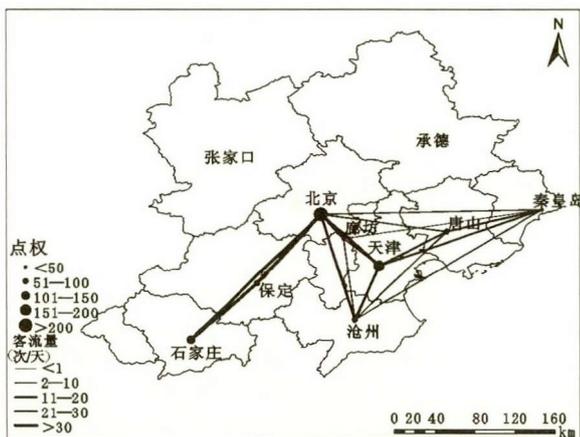


(b)长三角

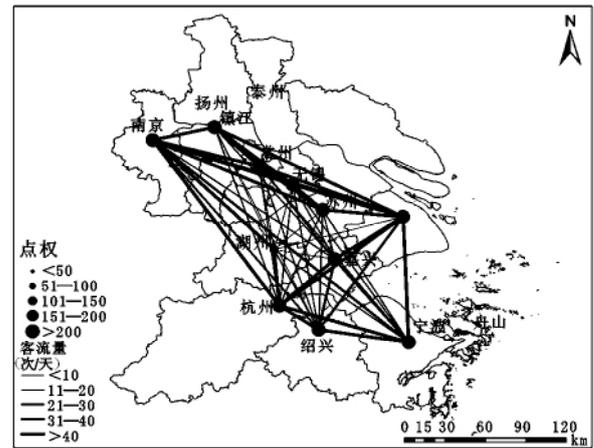


(c)珠三角

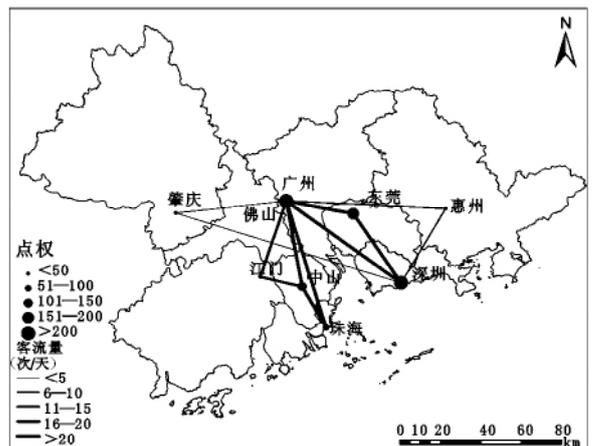
图 1 三大城市群 HSR - P 网示意图



(a)京津冀



(b)长三角



(c)珠三角

图 2 三大城市群 HSR - T 网络示意图

#### 4 结果对比分析

##### 4.1 网络基本拓扑结构分析

结合上述构建的高铁网络模型,本文计算出网络的平均度、点权强度、平均路径长度、集聚系数、网络密度等指标,对比分析了三大城市群现有的高铁网络特征。三大城市群的 HSR - P 网络的基本结构指标值见表 2。

表 2 三大城市群 HSR - P 网络结构特征值

指标	京津冀	长三角	珠三角
节点数	8	11	8
边数	10	11	7
孤立站点数	2	4	1
平均度	2.5	2	1.750
集聚系数	0.550	0	0
平均路径长度	1.964	2.873	2.679
网络密度	0.360	0.200	0.250

HSR - P 主要考察城市群内的高速铁路基础设施网络的结构。根据表 2 的结果,到 2015 年 9 月底长三角是城市群中开通高铁最多的城市,珠三角城市群中开通高铁的城市数量比例最高;网络的平均路径长度约为 2—3,京津冀相对于长三角、珠三角的平均路径长

度较小为 1.964,且京津冀的 HSR - P 网络具有相对较大的平均度,说明京津冀城市群 HSR - P 网络的连通性较好。同时,京津冀的集聚系数为 0.55,高铁基础设施建设正趋向聚集性,而长三角和珠三角地区的高铁轨道布局仍很分散。对网络的整体密度为 0.2—0.36。这是由于我国的高铁建设起步较晚,整体的基础设施布局还处于初级的主干骨架形成阶段。

在交通基础设施的基础上,考虑到实际的交通特征,针对三大城市群的高铁出行状况,分析 HSR - T 网络;考察出行网络的可达性,分析各城市群实际的高铁交通联系紧密程度。表 3 的结果显示,三大城市群的 HSR - T 网络联系均较密集。从节点数和边数来看,长三角城市群的高铁列车运行路线远比其他两大城市群多。在长三角的高铁出行网络中,平均一个城市可直接乘高铁通达城市群内的 9 个城市,平均每个城市高铁站点每天的发车班次达到 539 个班次,城市群内的城际出行非常方便。三大城市群的平均路径长度、集聚系数均表现为较大的集聚系数,相对较短的平均路径长度,基本呈现出了网络的小世界性。在网络密度方面,长三角的网络密度最大,珠三角的网络密度最小为 0.429,京津冀居中,说明长三角城市群内的高铁出行联系非常紧密,京津冀和珠江三角洲城市群内的高铁交通联系则较弱。

表 3 三大城市群 HSR - T 网络结构特征值

指标	京津冀	长三角	珠三角
节点数	8	11	8
边数	34	124	24
平均度	4.25	9.27	3.00
平均点权强度	117	539	133
平均路径长度	1.393	1.073	1.571
集聚系数	0.897	0.952	0.801
网络密度	0.607	0.927	0.429

综合比较三大城市群的高铁 HSR - P 和 HSR - T 网络,京津冀和珠三角城市群的高铁 HSR - P 网络密度比长三角

表 4 三大城市群 HSR - P 和 HSR - T 网络结构中心性对比

中心性	京津冀(HSR - P)	京津冀(HSR - T)	长三角(HSR - P)	长三角(HSR - T)	珠三角(HSR - P)	珠三角(HSR - T)
点度中心势(%)	47.6	52.4	12.2	8.9	23.8	76.2
点度中心度(前三)	天津、北京、唐山	北京、天津、沧州	杭州、上海、嘉兴	上海、杭州、(宁波、绍兴、嘉兴、南京)*	广州、深圳、(东莞、江门、中山)	广州、深圳、中山
接近中心势(%)	40.9	65.0	18.6	13.7	36.2	85.0
接近中心度(前三)	北京、天津、唐山	北京、天津、沧州	杭州、湖州、嘉兴	上海、杭州、(宁波、绍兴、嘉兴、南京)	广州、江门、东莞	广州、深圳、中山
中介中心势(%)	38.8	48.3	30.9	74.0	49.7	65.1
中介中心度(前三)	北京、天津、保定	北京、天津、沧州	杭州、湖州、嘉兴	上海、杭州、(宁波、绍兴、嘉兴、南京)	广州、江门、东莞	广州、深圳、中山

注: \* 表示宁波、绍兴、嘉兴、南京计算的节点中心度值相等。

接近中心性反映的是节点之间的通达紧密性。网络的接近中心势和各节点的接近中心度分析结果与点度中心性分析所得趋势一致。对比之下,珠三角和京

的网络密度大。在 HSR - T 网络中,长三角的网络密度明显大于京津冀和珠三角。由此可见,京津冀和珠三角城市群内的高铁建设相对较完善,但各城市间实际的高铁出行联系不及长三角,一定程度上说明京津冀和珠三角的高速铁路交通基础设施资源的利用率还不高。因此,建议增强京津冀和珠江三角洲城市群内的城市高铁交通联系,提高高铁给城市群带来的发展红利。

#### 4.2 网络中心性分析

网络的基础特征主要是从宏观上反映网络的整体特性。为了更好地研究网络的微观结构特性,网络的中心性分析是一种更为深入的分析。在交通网络中,中心化程度越高,代表着交通流更容易通达那些中心站点,或中心站点很容易控制其他站点,这样有助于识别重要站点,在实际运营当中给予保护和重视,提高交通管理效率。网络中心性的测量主要有三个指标:点度中心度、接近中心度、介数中心度,这三个指标是针对各个顶点而言的。对网络整体而言,Freeman 提出了中心势,即点度中心势、接近中心势、介数中心势<sup>[21]</sup>。表 4 是三大城市群 HSR - P 和 HSR - T 网络的中心性指标值。

点度中心性反映的是网络各节点的连通性。无论是 HSR - P 还是 HSR - T 网络,长三角的点度中心势都是最小的,说明长三角城市群的高铁网络各节点的点度分布较均匀,出现中心化节点的程度低。从具体的交通特征来说,长三角城市群内各城市高铁站点的布局较均衡,城市间的线路安排充分利用了高速铁路来提高通达性。在珠三角的 HSR - T 网络中,其点度中心势最大,为 76.2%,珠三角城市群的高铁出行网络呈现核心边缘模型特征,有的节点占据了核心位置,连接多条列车线路,若核心节点出现故障或被攻击,容易导致区域内的高铁交通联系受影响。

京津冀 HSR - P 和 HSR - T 网络的接近中心势远大于长三角。以距离计算接近程度的接近中心性表明,珠三角、京津冀的高铁网络中出现了较集中的几个节点,如

北京和天津、广州和深圳城市之间的通达程度高,城市群内其他城市之间的通达程度较低,整个网络的通达程度分布不均衡。

中介中心性反映的是网络中节点间的控制作用。在 HSR - P 网络中,三大城市群的中介中心势都不高,物理网络中没有明显的控制节点。在 HSR - T 网络中,一些具有控制性的节点开始出现,中介中心势值较高,长三角的中介中心势最大,上海和杭州两城对城市群内的高铁出行交通客流量有着一定的控制作用,是网络中最重要的两个高铁交通枢纽;珠三角的中介中心势次之,广州和深圳是城市群内中介中心度最大的两个城市。

## 5 结论与讨论

本文从网络化的视角,构建京津冀、长三角、珠三角三大城市群的 HSR - P 和 HSR - T 网络,通过对比分析发现:三大城市群的高铁基础设施建设较分散,而 HSR - T 网络具有一定的小世界性。长三角的高铁交通联系最紧密,珠三角和京津冀城市群的实际高铁资源利用率不高。对网络的中心性研究发现,长三角的高铁网络点度分布和接近中心度分布较均衡,而京津冀和珠三角出现了明显的中心化现象,具有核心边缘模型的特点;在 HSR - P 网络中,长三角拥有上海、杭州两大交通枢纽,对城市群内的高铁交通具有一定的控制作用,京津冀和珠三角则中介中心势的程度不高。总之,三大城市群的高铁网络在物理层面和实际交通流层面呈现了不同的网络特征。因此,在不断布局高铁基础设施的同时应提高高铁线网的资源利用率,均衡城市群内的高铁交通资源,增强城市间高铁的可达性和便捷性。

本研究仅对城市群内的城市高铁联系进行了实证对比,而在建的高铁站和拟建的高铁站点与线路也正逐渐融入到网络中来,同时城市群之间的高铁交通联系也是非常频繁的,因此综合分析城市群内外的高铁交通联系是下一步研究的重点。近几年来,在网络科学研究领域,继复杂网络研究的蓬勃发展以来,多层网络、网络中的网络、超网络等概念模型的提出,更真实地反映了现实网络的复杂性,这方面的研究开始成为国内外学者们讨论的学术热点<sup>[22]</sup>。多层网络、超网络等模型在实际交通网络中的应用研究,如以不同的船舶类型构建的海运交通网络模型<sup>[23]</sup>、以不同航空公司建立的多层航空网络<sup>[24]</sup>等,这些都将会给交通网络的研究带来新方法和新视角,这也将是今后重点研究的方向之一。

参考文献:

- [1] 王国明,李夏苗,胡正东. 国内外典型城市群交通网络特性对比分析[J]. 计算机应用研究, 2012 (1): 21 - 24, 31.
- [2] 李夏苗,王国明,胡正东,等. 城市群交通网络层级结构与组团结构识别[J]. 系统工程, 2012 (5): 81 - 88.
- [3] 王国明,李夏苗,杨波,等. 城市群城镇交通网络特性研究[J]. 计算机工程与科学, 2012 (12): 174 - 182.
- [4] Vickerman R W. The Regional Impacts of Trans - European Networks [J]. The Annals of Regional Science, 1995 (29): 237 - 254.
- [5] 王娇娥,丁金学. 高速铁路对中国城市空间格局影响研究[J]. 国际城市规划, 2011 26(6): 47 - 52.
- [6] Levinson D M. Accessibility Impacts of High - speed Rail [J]. Journal of Transport Geography, 2012 (22): 288 - 291.
- [7] Kim K S. High - speed Rail Developments and Spatial Restructuring: A Case Study of the Capital Region in South Korea [J]. Cities, 2000, 17(4): 251 - 262.
- [8] 蒋海兵,徐建刚,祁毅. 京沪高铁对区域中心城市陆路可达性影响[J]. 地理学报, 2010 (10): 1287 - 1298.
- [9] 杨金华,钟佩玲. 高铁背景下的湖南城市群城际可达性变化研究[J]. 资源开发与市场, 2013 29(12): 1273 - 1275.
- [10] 冯长春,丰学兵,刘思君. 高速铁路对中国省际可达性的影响[J]. 地理科学进展, 2013 (8): 1187 - 1194.
- [11] Oskar F. Markets Effects of Regional High - speed Trains on the Svealand Line [J]. Journal of Transport Geography, 2005 (13): 352 - 361.
- [12] Oskar F. Perspectives for a Future High - speed Train in the Swedish Domestic Travel Market [J]. Journal of Transport Geography, 2008, (16): 268 - 277.
- [13] 殷平. 高速铁路与区域旅游新格局构建——以郑西高铁为例[J]. 旅游学刊, 2012 (12): 47 - 53.
- [14] 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[J]. 地理学报, 2013 (2): 175 - 185.
- [15] 丁金学,金凤君,王姣娥,等. 高铁与民航的竞争博弈及其空间效应——以京沪高铁为例[J]. 经济地理, 2013 (5): 104 - 110.
- [16] 王娇娥,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[J]. 热带地理, 2014 34(3): 275 - 282.
- [17] 徐凤,朱金福,杨文东. 高铁—民航复合网络的构建及网络拓扑特性分析[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2013 (3): 1 - 11.
- [18] 徐凤,朱金福,苗建军. 基于复杂网络的空铁复合网络的鲁棒性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015 (1): 40 - 45.
- [19] 徐凤,朱金福,杨文东. 复杂网络在交通运输网络中的应用研究综述[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2013 (1): 18 - 25.
- [20] 郭进利. 复杂网络与人类行为动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 21 - 97.
- [21] 刘军. 整体网分析[M]. 上海: 格致出版社/上海人民出版社, 2014: 126 - 136.
- [22] 张欣. 多层复杂网络理论研究进展: 概念、理论和数据[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2015 (2): 103 - 107.
- [23] Cardillo A, Gomez - Gardenes J, Zanin M, et al. Emergence of Network Features from Multiplexity [J]. Scientific Reports, 2013 (3): 1 - 6.
- [24] Kaluza P, Kolzsch A, Gastner M T, et al. The Complex Network of Global Cargo Ship Movements [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2010, 7(48): 1093 - 1103.