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

王姣娥[1,2],景 悦[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. 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049）

摘要： 交通流是反映城市间社会经济联系的重要表征,被广泛应用于城市网络研究中。基于2010年中国城际铁路与航空客流OD数据,本文从城市节点、流量、子网络视角对中国城市网络的结构特征与组织模式进行了比较研究,发现:① 铁路与航空流视角下的中国城市网络均呈现出以北上广为顶层节点的空间等级结构体系,但除顶层结构外两种网络结构差异较大。② 城市网络体系中的铁路流联系表现出空间邻近性特征,而航空流联系则主要受到城市节点的规模大小与职能属性的影响。③ 铁路流的首位联系受省级行政区划的制约,航空流的首位联系空间跨度大,形成了若干具有垂直层间联系的地域子系统。④ 铁路网络拥有具有显著地域特征的7个子网络,而航空网络中则不存在明显的子网络。技术经济特征与管理体制是造成铁路与航空两种网络特征差异的主要原因。

关键词： 城市网络;交通流;空间结构;社区结构;地域系统;中国
DOI: 10.11821/dlxb201708013

1 引言

城市并非空间中孤立存在的个体，具备不同职能分工与规模等级的城市通过多种形式的联系彼此依存，并形成了分布有序的城市体系[1]。长久以来，城市体系一直是人文地理学领域的重要议题。随着全球化、信息化和后工业化的推进，人员、货物、资金、信息在全球范围内的快速流动加深了地区之间的联系，传统的“地方空间”被“流空间”所融合。城市体系研究领域也产生了系列“网络范式”转型，研究视野逐步由城市规模等级、城市属性、腹地范围转向由交通流、资金流和信息流等所建构的城市网络结构、功能和关系等方面。在多元全球化的浪潮下，城市网络研究立足于不同层面的空间相互作用过程，利用刻画联系的“流”数据从多种维度对城市关系进行诠释。目前，企业组织[2-6]、基础设施[7-10]与社会文化机制[11]等是国内外实证研究构建城市关联网络的主要途径[12]。其中，铁路、航空等交通网络承载的客货流位移作为社会经济联系的外在表征，在不同空间尺度下的城市网络研究中获得了广泛的应用。由于航空网络数据易获取且能够表达较大空间范围内的城市联系，因而成为了研究全球与国家层面城市关系的主要手段。Taaffe、Smith等基于客流联系对美国及世界的城市体系格局进行了研究[13-14]，国内周一星、金凤君、王姣娥等学者也从航空网络视角对中国城市体系展开了一系列讨论[15-19]。由于受数据获取难度的限制，铁路在城市网络研究中的应用相对较少，戴特奇、钟业喜

收稿日期： 2016-06-23; **修订日期：** 2017-02-21
基金项目： 国家自然科学基金项目(41371143); 中国科学院青年创新促进会项目 [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41371143; Funded by the Youth Innovation Promotion Association CAS]
作者简介： 王姣娥(1981-), 女, 湖南涟源人, 博士, 研究员, 从事交通地理与区域发展研究。E-mail: wangje@igsnrr.ac.cn

等学者采用铁路客流和铁路列车时刻表进行了一些初步的研究[16-23]。

铁路与航空运输是中国综合交通运输体系的重要组成部分，对中国城市关联体系的形成起着不同的作用。两者承载的人员流动过程表征了不同的经济内涵，基于不同交通流视角的比较研究为解析复杂的城市流空间提供了更客观的视角。目前，国内外城市网络相关研究主要从单一交通流视角出发，针对两种及以上交通流的城市网络比较研究并不多见。其中，仅陈伟等利用公路、铁路、航空3种交通方式的班次数据，对不同交通流视角下的城市联系格局进行了对比[24]。然而，对于中国城市网络体系而言，同一城市在不同交通流视角下的城市网络中的地位如何？不同交通运输方式的客流运输是否遵循同样的组织模式？这些问题仍有待进一步解答。此外，在研究数据方面，既有研究多采取时刻表数据或不完整的客流样本数据（如航空5万以上流量），通过交通组织网络透视城市关联体系，但仍难以反映城市之间的真实联系过程。

鉴于此，本文采用铁路与航空城际客流的全样本数据，构建无向加权客运联系矩阵，基于网络分析的研究范式从节点、流量、子网络层面对两种客流视角下的城市网络体系进行比较研究，拟重点分析城市网络的等级结构特征与反映社会经济要素空间配置秩序的客流组织模式，旨在从多种交通流视角来对中国的城市关系网络进行解读。

2　数据与研究方法

2.1　数据与研究对象

本文收集了2011年的《中国交通年鉴》[25]、《全国铁路统计年鉴》[26]、《从统计看民航》[27]和《中国民航统计年鉴》[28]，各地交通统计公报，以及来源于铁路售票系统的城际客流数据。研究中处理的原始数据为2010年全国各个铁路站点之间与机场之间的OD客流数据。研究中以地级行政单元为基本对象，并重点关注铁路和航空的旅客运输流量。为简化表达，在下文中对存在铁路站点或机场的城市分别称之为铁路节点城市或航空节点城市。对于存在多个铁路站点或机场的城市，将属于同一城市的站点数据进行合并，在此基础上构建无向量的城际OD流量矩阵。2010年全国总共有279个铁路节点城市与145个航空节点城市，分别覆盖了中国83.8%与43.5%的地级行政单元（图1）。客流方面，在中国279×279的铁路客流关系矩阵中，共有19530对城市对间存在铁路客流联系；而在145×145的航空客流关系矩阵中，存在1026个客流关系数值。其中，108个城市节点，776对客流联系同时存在于铁路和航空两个城市网络中。

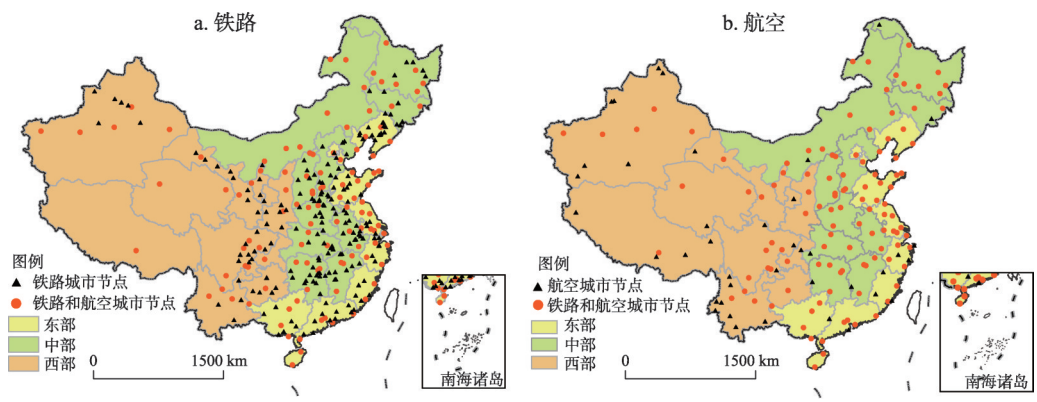


图1　基于铁路与航空网络的中国城市节点分布

Fig. 1　The distribution of city nodes in the railway and aviation networks in China

2.2 研究方法

2.2.1 客流组织系数 为刻画城市节点在网络中地位，本文借鉴空港组织系数指标[29]，将城市组织客流的能力作为判断其重要程度的依据，构建客流组织系数（PI）探讨铁路和航空网络中的城市节点等级分布规律，并对同一城市在不同交通流网络中的地位差异进行对比。计算公式如下：

$$PI_i = \frac{\sum_{j=1,j\neq i}^{n} \alpha_{ij}}{\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1,j\neq i}^{n} \alpha_{ij}}{n}\right]} \tag{1}$$

客流组织系数反映了城市节点组织客流能力对平均水平的偏离程度，值越大，表明节点在网络中的地位越高。

2.2.2 社区结构 社区结构（community）刻画了网络的局部集聚特性。基于节点间的拓扑距离远近，网络可被划分为若干社区。同一个社区内的节点间联系强度大，形成了一个有机的功能区域；而分属不同社区节点之间的联系活动相对较少，并主要通过各社区的中心进行联系。识别基于交通流的网络社区结构，旨在通过客流的集散特征透视城市间内在的空间经济联系，揭示网络结构与功能之间的关系。在方法上，本文采取Louvain算法挖掘社区结构[30]，并利用Newman等提出的“模块度”（modularity）[31]指标对网络划分结果进行定量评价。该指标比较了社团内部联系密度与社团间联系密度的相对大小。模块度值越高，表示网络划分结果越好；模块度值越低，表示当前网络的社区结构特征不突出。具体公式如下：

$$Q = \sum_{m=1}^{n}\left[\frac{l_m}{L} - \left(\frac{d_m}{2L}\right)^2\right], \quad m \leqslant n \tag{2}$$

式中：n代表计算出的社区数量；L为网络中客流联系总数；l_s为第m个社区内部的客流联系数量；d_m为社区m中与各节点相关联的联系数量之和。

3 中国城市网络结构特征

3.1 城市节点

3.1.1 空间分布格局 在中国城市节点空间分布上，铁路和航空呈现出明显的地带性分布差异（图2）。从三大地带分析，铁路城市节点呈中、东、西递减格局。其中，中部地区城市节点占总量的39.07%；其次为东部，占32.62%；西部地区最少，仅占28.32%。航空城市节点则呈现出西部 > 东部≈中部的分布格局，与10年前的东中西递减格局相异[19]。截至2010年，西部地区共有55个城市开通航线，占航空城市节点总量的37.93%；东部、中部地区通航城市数量相当，各占总量的30%左右。其中，铁路和航空城市的空间分布差异主要是由于航空运输受地面自然条件制约小，能够满足中国西北、西南边缘地形复杂地区的运输要求。从客运量分析，铁路和航空客流仍主要集中在东部地区，且航空的空间集聚性更为明显。2010年，东部地区不足1/3的城市（铁路，33%；航空，32%）分别集聚了全国近一半的铁路客流量（49%）和60%的航空客流量。

3.1.2 空间等级结构 客流组织能力是判定城市网络地位高低的依据之一。为梳理城市的空间等级结构体系，根据客流组织系数组间差异大，组内差异小的分类原则将其分为4种类型：① 强中心（PI≧10）。两个网络均由北京、上海和广州三大城市组成（图3）。

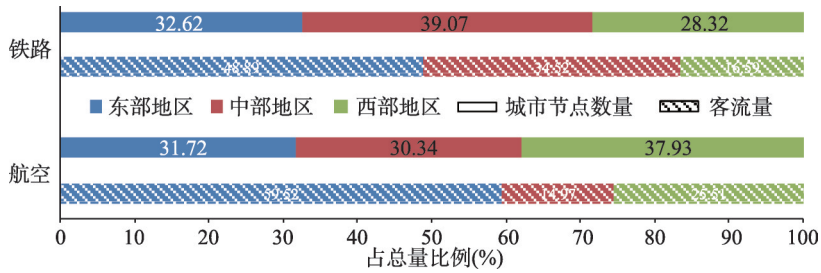


图2　中国城市节点及客流量的地带性分布规律

Fig. 2　The comparison of nodes number and passenger flow between two networks in three regions of China

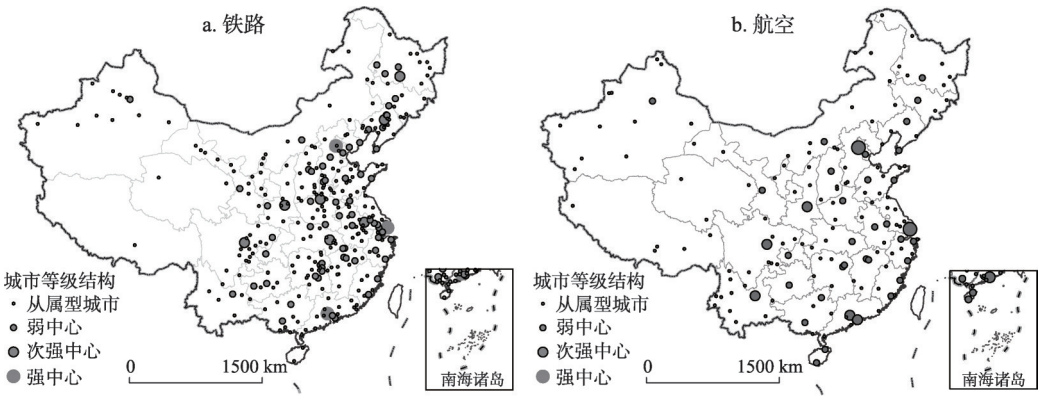


图3　“流空间”下的中国城市等级结构分布

Fig. 3　The hierarchical structure of cities by railway and air transport flows in China

② 次强中心（5 ≦ PI < 10）。铁路网络中共有7个，包括沈阳、郑州、西安、武汉、哈尔滨、成都和南京等传统铁路枢纽型城市，主要在省级行政区内组织客流运输。航空网络中的次强中心城市相对较少，仅包括深圳、成都、昆明和西安等经济实力较为突出的区域型中心城市。从空间上分析，航空网络次强中心主要分布在中国东南、西南和西北地区，而东北、华中地区尚缺乏次级航空枢纽支撑。③ 弱中心（1 ≦ PI < 5）。铁路网络中共有该类城市58个，集中分布在京广、京九、京沪等铁路干线。相比之下，航空网络中仅有28个弱中心城市，且以各省省会城市及部分旅游型城市为主。④ 从属型城市（PI<< 1）。该类城市的数量在铁路和航空网络中均占据主导地位，分别占两类城市总量的75.6%和75.9%。总体而言，铁路和航空网络的强中心城市在空间上表现一致，而次强中心、弱中心以及从属型城市在空间和等级上表现出较大的差异。

为定量比较同一城市在铁路与航空网络中的地位差异，本文对两个网络中共有的108个城市的客流组织系数等级进行比较分析。若某一城市在铁路网络的等级高于其在航空网络的等级，则将其定义为铁路优势城市；反之，则称其为航空优势城市。经统计，全国共有24个城市节点在两个网络中发生了次强中心与弱中心、弱中心与从属型城市间的层级变动（图4）。其中19个（17.6%）为铁路优势城市，包括齐齐哈尔、哈尔滨、大连、沈阳、锦州、秦皇岛、石家庄、徐州、郑州、武汉等，此类城市集中分布在中国东北、华北和华东中地区，呈现出一定的集聚特征；而航空优势城市仅为5个，分别为桂林、深圳、昆明、海口、三亚，主要分布在西南和华南地区，且具备相对突出的旅游、休闲职能。

3.2 城际客流联系

3.2.1 距离衰减规律　距离衰减规律是对客流统计特征的抽象概括。铁路客流具有明显的

距离衰减效应，而航空客流对距离变化的敏感性相对较低（图5）。在距离上，80%的铁路客流集中在0~700 km范围内，而航空客流则主要集中在100~1500 km范围内。总体上，铁路适宜于中短途出行旅客，航空则主要为中长途旅客出行提供服务。客流分配率曲线反映了客流比重与距离区段的空间关系，是客流衰减规律的直观体现[31]。铁路客流分配率曲线呈现先快速增长后快速下降的变化趋势，客流量在100~200 km区段内出现峰值，此段运距内的旅客占总客流量的25.7%（图5）。当距离大于200 km以上时，铁路客流量随距离增大而呈现出稳定连续的下降态势。与铁路不同，航空客流分配率曲线在1000~1200 km范围内达到峰值后表现出了跳跃的非连续下降特征，整体上未呈现出明显的距离衰减规律。

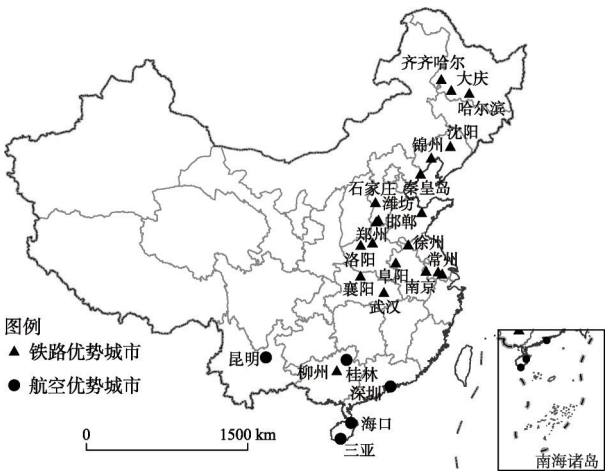


图4 单一交通流优势中国城市识别

Fig. 4 Cities with advantage of certain mode in China

3.2.3 空间层级结构 从城市对间客流分布规律分析，铁路与航空客流均倾向于向少数城市对间集聚（图6）。其中，铁路城市对的集聚能力更为突出，90%的客流量集中在12%的城市对间。根据组间差异大、组内差异小的分类原则，本文将城市对客流联系划分为

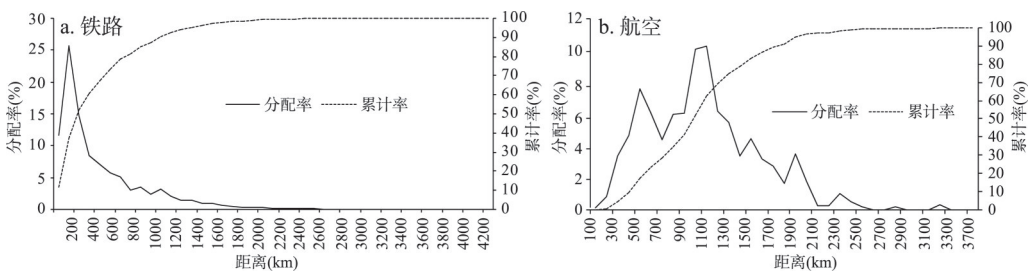


图5 铁路和航空客流距离衰减规律比较

Fig. 5 Distribution of passengers by distance in China

以下5个级别（图7）。

（1）I级联系：铁路网络中的I级联系包括广州—深圳，北京—天津，上海—苏州与上海—杭州4对城市，形成了由北上广与邻近区域次级中心城市构成的双核结构体系。航空网络中的I级联系包括6对城市，形成了分别以北京、上海、深圳，及北京、上海、广州为顶点的两大三角联系网络。此外，成都与北京的航空客运量大，与北上广深共同构建中国航空联系的核心网络。

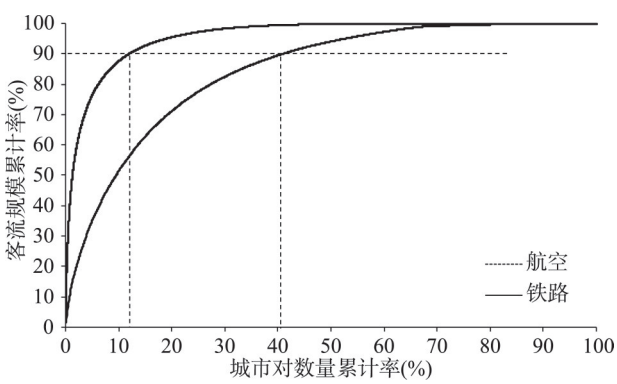


图6 城市对间客流累计规律比较

Fig. 6 Distribution of passengers by city pair in China

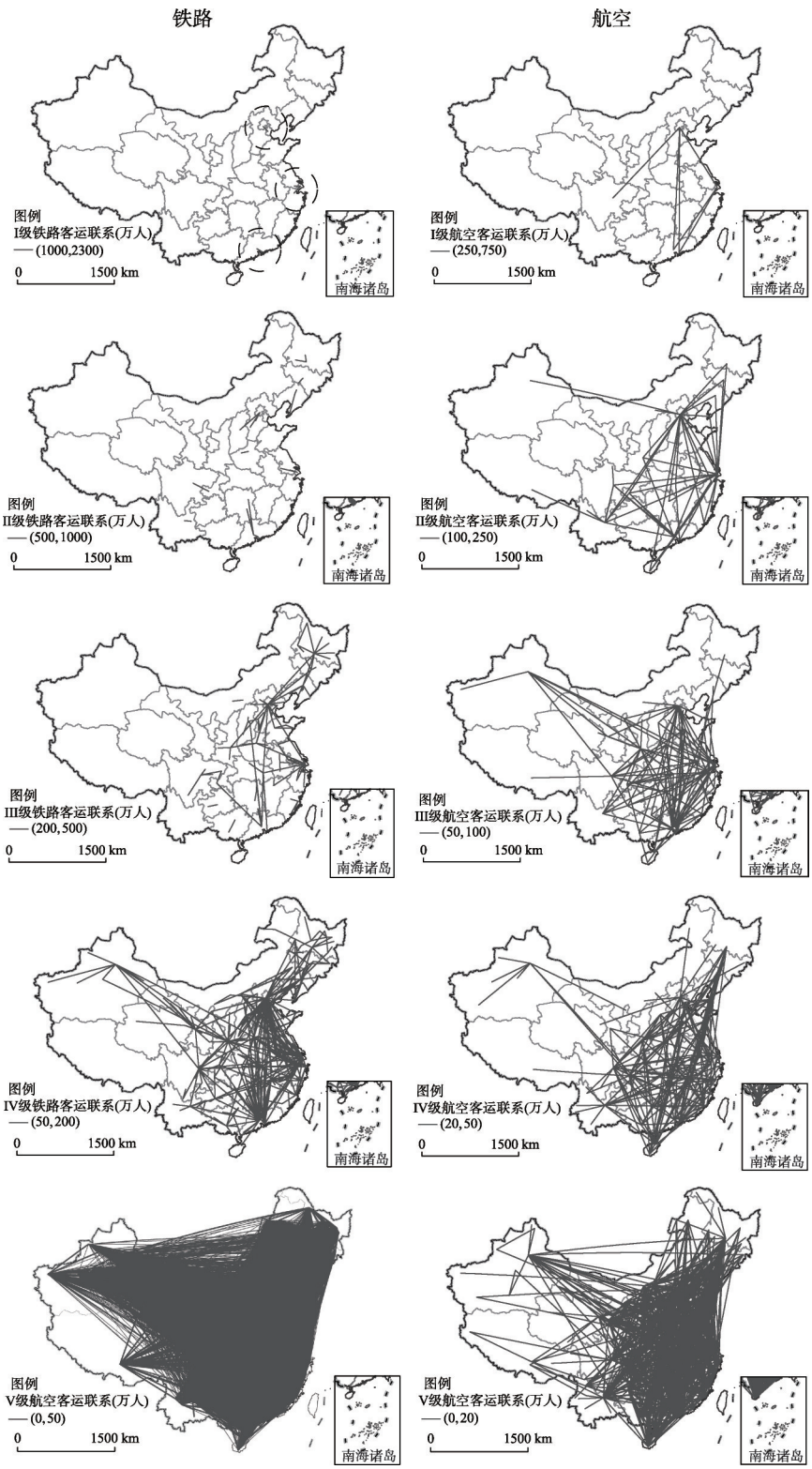


图7 中国铁路和航空运输的空间联系格局比较

Fig. 7 The comparison of spatial distribution of passenger flow linkages in China' railway and aviation networks

（2）II级联系：铁路网络中II级城市对17个，占总量的0.09%；航空网络48对，占总量的4.7%。在铁路网络中，II级联系在I级联系的基础上略有扩张，北上广的空间影响势力范围扩大。此外，在京津、广深、沪苏系统的基础上，网络新增成渝、东北、河南省区域关联体系。在空间邻近效应的影响下，铁路II级网络中的城市对依然呈现相互独立的“断线”状分布形态。由于铁路OD流是城市引力大小的真实反映，受线路布局形态、沿途城市的影响相对较小，因而II级网络并未表现出明显的沿线效应。这一结论与基于铁路列车时刻表[24]研究的城市网络层级特征存在差异。在航空网络中，II级联系主要在北上广与西安、乌鲁木齐、哈尔滨、长春、沈阳、武汉、长沙、三亚、厦门等省会城市及旅游城市之间。

（3）III级联系：铁路网络中III级城市对101个，占总量的0.52%；航空网络中98个，占总量的9.6%。在铁路网络中，北京辐射能力增强，建立了与上海、广州两大中心及与哈尔滨、长春、沈阳、西安、郑州等区域性铁路枢纽的联系。京广、京沪、京哈等铁路干线初具雏形，成网趋势显现。航空III级城市网络基本覆盖各省省会城市，并新增宁波、温州、烟台等经济发展水平较高的城市。此外，航空网络中点对式联系增多，出现了多条贯通南北的航线，巩固并加强了原有联系格局。

（4）IV级联系：铁路网络中IV级城市对402个，占总量的2.1%；航空网络中176个，占总量的17.2%。铁路IV级联系网络新增多条跨区域联系，兰新铁路作用凸显，成网密度迅速提高。航空IV级网络密度东西差异显著，东部具有密集、贯通南北的客流联系，城市网络体系发育程度较好；西部则以新疆、云南两省的省内航空联系拓展过程为主。

（5）V级联系：铁路网络中IV级城市对19006个，占总量的97.3%，航空网络中698个，占总量的68%。铁路V级联系网络规模庞大，新增了大量中小城市节点，网络连通性大幅提升，形成了铁路城市网络的底层关联格局。在航空V级网络中，东部地区内的点对式运输联系增多，呈现复杂密集的网络化形态。西部地区在上层网络联系基础之上，继续吸纳新城市节点融入网络，此外则通过乌鲁木齐、昆明、成都等区域枢纽拓展到东部的航线网络，加强了网络整体的东西关联强度。

4 中国城市网络地域组织模式

4.1 首位联系

首位联系是指研究对象中与某城市交互客流量最大的城市间的联系，构成了城市关联体系的主干网络[20]。分析发现，铁路网络中共有77个首位城市，呈现出多中心分布格局（图8）。首位联系受省界制约明显，在空间上形成若干相对封闭的独立地域系统；其中，广州、北京两市分别集合了21对与20对首位联系，是南北两大区域的主要首位联系汇合点。此外，多数省会城市承担了首位联系城市职能，但影响能力有限，辐射范围具有鲜明的属地特征与邻近性腹地结构特征。对比已有研究发现[20]，经过10年的发展，行政边界对铁路首位客流联系的制约效应逐渐强化，并较大程度地削弱了广州、北京对于其他地区的整合能力。与铁路不同，航空网络中首位联系仅指向北京、上海、广州、乌鲁木齐、西安、成都等22个城市，且辐射范围不受行政边界制约，空间跨度较大，形成了若干彼此重叠的放射状子网络。其中，北上广三大城市集合了65%以上节点的首位联系，空间范围基本覆盖了胡焕庸线以东的区域。西部地区的首位联系主要汇集于成都、昆明、乌鲁木齐、西安4个区域性中心城市，而其自身的首位联系均指向北京，形成了有序的层级关联体系。

首位联系强度被定义为某城市的首位联系客流量与其旅客吞吐总量之比，反映了各

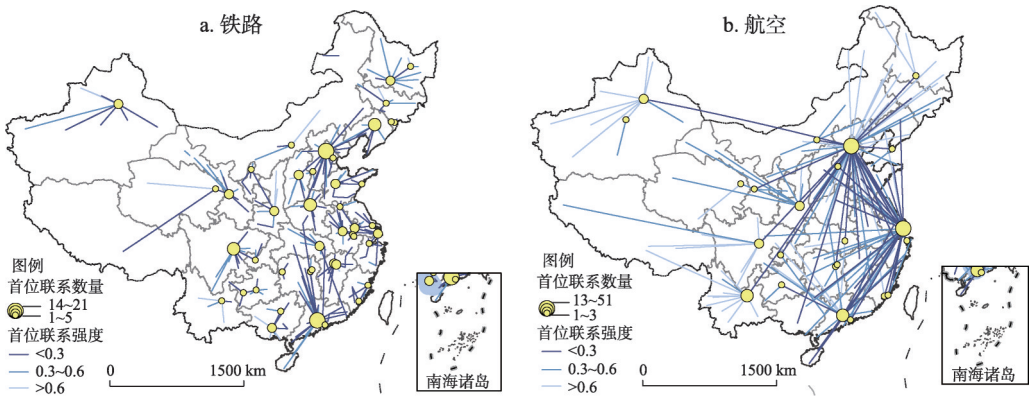


图8　中国铁路和航空城市网络的空间组织格局

Fig. 8　The dominant flow network of China's railway and aviation cities

城市对其首位城市的依赖程度。采用首位联系强度指标将所有城市对划分为4种类型[19]（图8，表1），比较铁路和航空网络发现：① 铁路网络中强联系数量少，以弱联系与次强联系为主体，平均首位联系强度为0.32。表明各城市对其首位联系城市的依赖程度不高，旅客流动方向不具有明显的集中趋势。② 航空网络以强联系为主，平均首位联系强度为0.52，表明各地域系统内的核心城市对于其他城市节点具有较强的控制作用。其中，北京的强联系数量最多（18个），占网络中强联系总量的33.96%，且主要向东北地区呈扇状展开。此外，乌鲁木齐、成都、昆明三市共汇集了22对强联系，这些城市不仅为次区域地域系统内部的枢纽节点，也是衔接西部地区与东部城市的桥梁，在网络中发挥中介功能。相比之下，东北地区由于缺乏具有中转功能的次级航空枢纽，尚未形成区域性的地域系统。哈尔滨、长春、大连等城市直接与北京发生强首位联系，并对其产生了较强的依赖性。③ 耦合联系定义为城市对的两端彼此互为首位城市，具有相互依赖的共生关系。中国铁路网络中存在成都—重庆、北京—天津、福州—厦门、济南—青岛、哈尔滨—大庆等44对耦合联系，形成了区域中心城市对应次级中心城市的双核联系模式；而航空网络仅存在北京—上海一对耦合联系，其余城市对间的首位联系具有较为明显的方向性，多为低等级城市向高等级城市的单向流动，由此形成了不同等级城市节点间的垂直关联体系，体现了轴—辐组织模式的运营特征（图9）。

4.2 社区结构

城市网络的地域组织模式受到首位联系和其余客流联系的共同作用[32]，社区结构刻画了网络内部的集聚模式与功能结构，为研究提供了较好的方法。研究发现，中国铁路网络可划分成7个城市组团，模块度为0.53；航空网络可划分成了4个城市组团，模块度仅为0.12，表明其网络内部不存在明显的社区结构。在空间上，由于铁路客流对距离变化较为敏感，因而其在拓扑网络中的集聚特征受到城市节点空间位置的显著影响，导致其社区划分结果具有一定的地理特征，并与中国七大经济地理分区相吻合，形成了以北京为核心，覆盖内蒙古、河北、山西、山东的华北社区；以沈阳为核心，覆盖辽吉黑三

表1　城市对间首位联系强度统计

Tab. 1　Statistical results of dominant flow by city pair

	强联系(个) (≥ 0.6)	次强联系(个) (< 0.6, ≥ 0.3)	弱联系(个) (< 0.3)	耦合联系(个) (互为首位联系)	平均首位 联系度
铁路	19(6.81%)	91(32.62%)	125(44.80%)	44(15.77%)	0.32
航空	53(36.55%)	50(34.48%)	41(28.28%)	1(0.69%)	0.52

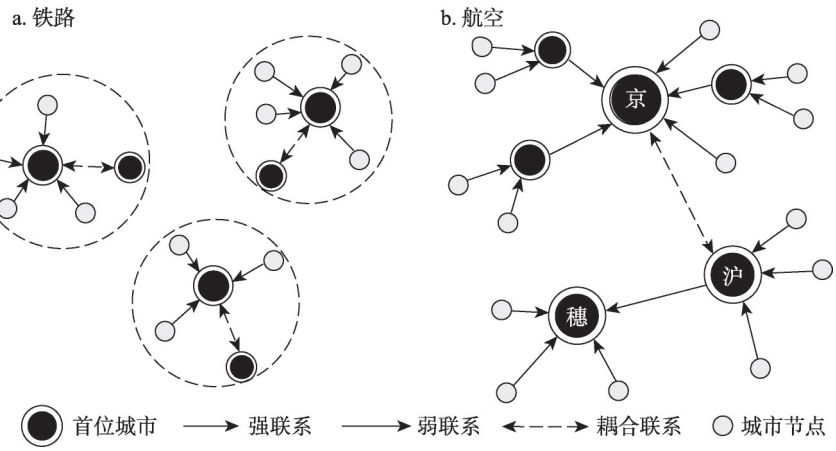


图9 铁路和航空网络的空间组织模式比较

Fig. 9 The comparison of spatial passenger organization by railway and by air

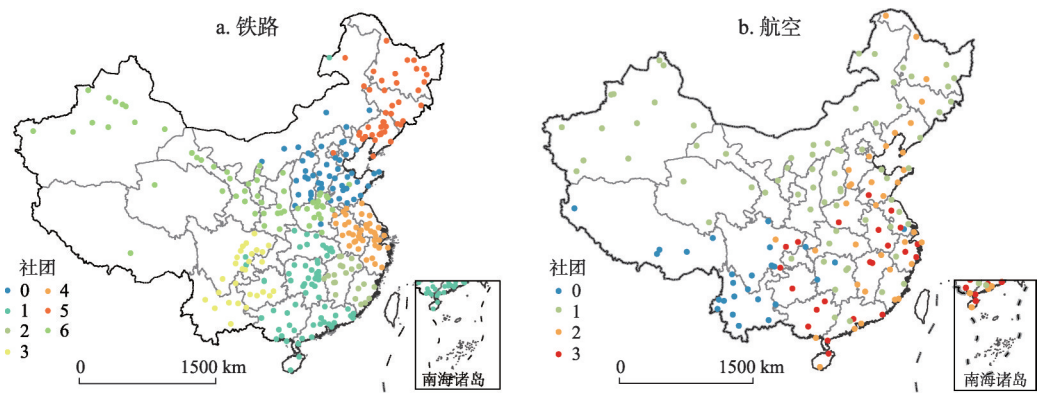


图10 中国铁路和航空社区结构空间分布

Fig. 10 The spatial distribution of communities by railway and by air in China

省的东北社区；以上海为核心，覆盖江苏、安徽、浙江三省的华东社区；以成都为核心的西南社区；以兰新铁路沿线城市为主体的西北社区。社区结构挖掘结果揭示了铁路客流组织模式在区域层面的集聚特征。在中国铁路客流组织体系中，存在着由相邻省份重组形成的区域性功能组团，与中国当前地区铁路监管局的空间管辖范围的耦合程度较高（图11），同时组团内部又嵌套着以省会城市为核心、受省界制约明显、由首位联系主导的中心—腹地结构。相比之下，航空网络社区结构相对混杂，社区边界模糊，不具备明显的地理特征，仅在西南地区形成相对独立的云南组团。

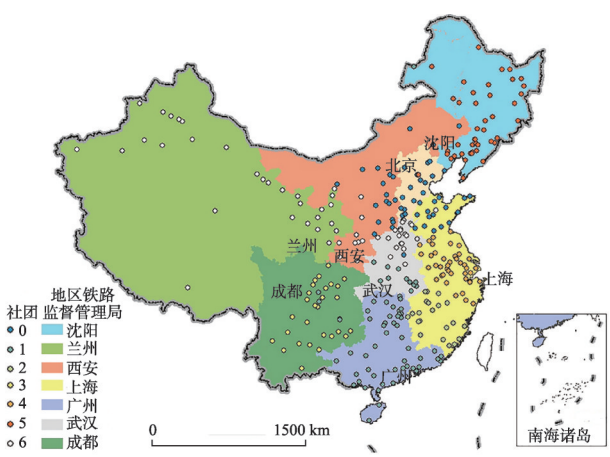


图11 中国地区铁路监督管理局管辖范围与铁路社区结构的空间耦合

Fig. 11 The spatial coupling relationship between the community structure of railway network and the area under the jurisdiction of regional railway administrations in China

5 结论与讨论

本文从节点、流量、子网络3个层面对中国铁路与航空客流视角下的城市网络体系进行了对比研究，重点关注二者在网络结构特征与地域组织模式方面的异同。研究发现：① 中国铁路与航空城市网络的顶层结构表现一致，均以北上广为中心；但其他层级的等级结构与空间分布表现差异较大。同一城市在不同网络中的地位差异主要受城市所在的区位、自然地理条件、城市职能的影响。铁路优势城市以东北、华北及华中地区的传统铁路枢纽为主，而航空优势城市则普遍为具有较高经济发展水平的新兴城市和旅游城市。② 铁路客流联系强度受距离因子主导，表现出显著的空间邻近性特征；而航空客流联系强度则主要受城市的社会经济属性特征及旅游职能的影响。③ 铁路与航空城市网络的等级结构特征差异以及客流组织中体现出的对距离、行政边界等约束因子的敏感性差异主要受二者的技术经济特征与管理体制影响。铁路城市网络在空间上形成了7个与铁路公司管辖范围相耦合的区域性功能组团，各组团内部又嵌套着若干由首位联系主导的省域客流子系统。而航空网络内部不存在地理特征明显的社区结构，形成了以北上广及少数区域性中心为核心的地域系统，各地域系统通过不同首位城市之间的客流联系形成了垂直方向的层间关联体系。究其原因，人员流动主要受社会经济联系的影响，但由于基础设施网络的建设和运营受行政管理制约明显，因此人员流动轨迹与交通网络的管理体系也具有一定的耦合性，该特征在铁路系统中表现尤为显著。铁路网络在地区铁路公司的运营、管理和监督下，形成了封闭性的区域运输系统。而自民航放松管制以来，在市场因素的驱动下，航空公司着力于构建具有竞争力的运输网络，使得航空流受行政边界因素的影响程度相对较小，形成了具有较强开放性的网络系统[33]。

交通网络是认识城市关系的主要途径之一，在基础设施视角下的城市网络研究中占据重要地位。本文对比分析了两种交通流视角下的城市关联体系，与当前基于企业组织网络，信息网络开展的城市网络研究互为补充，丰富了对城市关系的解读视角。然而，受数据获取难度的限制，本文暂未能考察近年来高速铁路兴建对城市网络结构产生的影响。在后续研究中可利用更新年份的长时间序列交通数据，探讨高速铁路的快速发展对城市关联体系带来的影响，并分析城市网络发展的动态演变过程与动力机制。

参考文献(References)

[1] Gu Chaolin. Chinese Urban System: History, Current Situation and Prospect. Beijing: The Commercial Press, 1992. [顾朝林. 中国城镇体系: 历史·现状·展望. 北京: 商务印书馆, 1992.]

[2] Taylor P J Derudder B, Witlox F. Comparing airline passenger destinations with global service connectivities: A worldwide empirical study of 214 cities. Urban Geography, 2007, 28(3): 232-248.

[3] Wall R S, van der Knaap G A. Sectoral differentiation and network structure within contemporary worldwide corporate networks. Economic Geography, 2011, 87(3): 267-308.

[4] Lu Xu, Ma Xueguang, Li Guicai. Spatial pattern of regional city network based on international advanced producer services' layout in Pearl River Delta. Economic Geography, 2012, 32(4): 50-54. [路旭, 马学广, 李贵才. 基于国际高级生产者服务业布局的珠三角城市网络空间格局研究. 经济地理, 2012, 32(4): 50-54.]

[5] Zhao Miaoxi, Liu Zheng. Research on China's city network based on production service industry. City Planning Review, 2012(9): 23-28. [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(9): 23-28.]

[6] Wang Cong, Cao Youhui, Song Wei, et al. Research progress in urban network construction from the perspective of producer services industry. Progress in Geography, 2013, 32(7): 1051-1059. [王聪, 曹有挥, 宋伟轩, 等. 生产性服务业视角下的 城市网络构建研究进展. 地理科学进展, 2013, 32(7): 1051-1059.]

[7] Devriendt L, Derudder B, Witlox F. Conceptualizing digital and physical connectivity: The position of European cities in Internet backbone and air traffic flows. Telecommun Policy, 2010, 34(8): 417-429.

[8] Zhen Feng, Liu Xiaoxia, Liu Hui. Regional urban network influenced by information technology: New directions of urban studies. Human Geography, 2007, 22(2): 76-80. [甄峰, 刘晓霞, 刘慧. 信息技术影响下的区域城市网络: 城市研究的新方向. 人文地理, 2007, 22(2): 76-80.]

[9] Zheng 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.]

[10] Matsumoto H. International urban systems and air passenger and cargo flows: Some calculations. Journal of Air Transport Management, 2004, 10(4): 239-247.

[11] Kratke S, Taylor P J. A world geography of global media cities. European Planning Studies, 2004, 12(4): 459-477.

[12] 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.]

[13] Taaffe E J. The urban hierarchy: An air passenger definition. Economic Geography, 1962, 38(1): 1-14.

[14] Smith D A, Timberlake M F. World city networks and hierarchies, 1977-1997: An empirical analysis of global air travel links. American Behavioral Scientist, 2001, 44(10): 1656-1678.

[15] Xue Junfei. Hierarchical structure and distribution pattern of chinese urban system based on aviation network. Geographical Research, 2008, 27(1): 23-32. [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. 地理研究, 2008, 27(1): 23-32.]

[16] Yu Taofang, Gu Chaolin, Li Zhigang. Chinese urban systems in terms of domestic air flows since 1995. Geographical Research, 2008, 27(6): 1407-1418. [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.]

[17] Zhou Yixing, Hu Zhiyong. Looking into the network structure of Chinese urban system from the perspective of air transportation. Geographical Research, 2002, 21(3): 276-286. [周一星, 胡智勇. 从航空运输看中国城市体系的空间网络结构. 地理研究, 2002, 21(3): 276-286.]

[18] Jin Fengjun. A study on network of domestic air passenger flow in China. Geographical Research, 2001, 20(1): 31-39. [金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究. 地理研究, 2001, 20(1): 31-39.]

[19] 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, 孙炜, 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.]

[20] 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: 以我国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.]

[21] Zhong Yexi, Lu Yulin. 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体系与分布格局. 地理研究, 2011, 30(5): 785-794.]

[22] Chen Chen, Xiu Chunliang. Research on city network of northeast china based on space of flows. Areal Research and Development, 2014, 33(4): 82-89. [陈晨, 修春亮. 流空间视角的东北地区城市网络研究. 地域研究与开发, 2014, 33(4): 82-89.]

[23] Luo Zhendong, He Heming. Study on development characteristics and trends of small towns in the global city-region: A case study on Yangtze River Delta. City Planning Review, 2013(1): 9-16. [罗震东, 何鹤鸣. 全球城市区域中的小城镇发展特征与趋势研究: 以长江三角洲为例. 城市规划, 2013(1): 9-16.]

[24] Chen Wei, Xiu Chunling, Ke Weiqian, et al. Hierarchical structures of China's city network from the perspective of multiple traffic flows. Geographical Research, 2015, 34(11): 2073-2083. [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.]

[25] Year Book House of China Transportation & Communications. Yearbook of China Transportation & Communications. Beijing: Yearbook House of China Transportation & Communications, 2011. [中国交通年鉴出版社. 中国交通年鉴. 北京: 中国交通年鉴出版社, 2011.]

[26] Statistics Center of Chinese Ministry of Railway. China Railway Statistical Yearbook. Beijing: China Railway Publishing House, 2011. [铁道部统计中心. 全国铁路统计年鉴. 北京: 中国铁道出版社, 2011.]

[27] Civil Aviation Administration of China. 2011 Statistical Data of Civil Aviation of China. Beijing: China Civil Aviation Press, 2011. [中国民用航空局发展计划司. 2011从统计看民航. 北京: 中国民航出版社, 2011.]

[28] Civil Aviation Administration of China. China Civil Aviation Statistical Yearbook 2011. Beijing: China Civil Aviation

Press, 2011. [中国民用航空局发展计划司. 中国民航统计年鉴2011. 北京: 中国民航出版社, 2011.]

[29] Pan Kunyou, Cao Youhui, Wei Hongyan, et al. The study on distributing pattern and network structure of air freight airports in China. Economic Geography, 2007, 27(4): 653-657. [潘坤友, 曹有挥, 魏鸿雁, 等. 我国航空货运网络结构研究. 经济地理, 2007, 27(4): 653-657.]

[30] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in large networks. Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment, 2008, 30(2): 155-168.

[31] Newman M E J, Girvan M. Finding and evaluating community structure in networks. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2004, 69(2 Pt 2): 26113.

[32] Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoxi. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks. Geographical Research, 2015, 34(4): 711-728. [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.]

[33] Jin Fengjun, Sun Wei, Xiao Shilun. China's airline reorganization and its effect on network structure. Progress in Geography, 2005, 24(2): 59-68. [金凤君, 孙炜, 萧世伦. 我国航空公司重组及其对航空网络结构的影响. 地理科学进展, 2005, 24(2): 59-68.]

Comparison of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow

WANG Jiaoe[1, 2], JING Yue[1, 2]

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As traffic flow reflects the socio- economic relations between cities, it is widely applied as a key factor in studies on city networks. Based on the inter- city railway and air passenger flow in 2010, this article made a comparison of the spatial structure and passenger flow organization of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow, in terms of node, linkage, and community. The results are as follows: (1) Both city networks based on railway and air passenger flow present a hierarchical structure with Beijing, Shanghai and Guangzhou being the top three, while the nodes in the lower classes of two networks are different. (2) The spatial structure of linkages between cities based on railway passenger flow displays strong neighborhood effect. In contrast, the cities' own characteristics play a dominant role in the organization of air passenger flow. (3) Most of the dominant railway passenger flow is directed to the capital city in each province, forming several disperse regional systems separated by the provincial boundaries. In terms of air passenger flow, the regional systems are integrated by vertical linkages between them. (4) Although the community structure is not obvious from the perspective of air passenger flow, there are seven communities of significant geographical characteristics being detected in the railway network. The main differences between two networks are attributed to the management systems and technical characteristics of the modes of transportation.

Keywords: city network; traffic flow; spatial structure; community structure; territorial system; China