

不同交通方式下居民城际出行网络结构特征 ——以“春运”为例

张 蓉, 潘竟虎*, 赖建波

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘 要:基于多元视角下的居民城际出行网络空间结构测度可以较为全面地刻画出城市间的复杂联系特征。论文利用春运期间腾讯迁徙平台中的人口流动数据,采用复杂网络分析方法以及转变中心性和转变控制力等指标,对比分析了航空、铁路和公路3种交通方式下的中国居民城际出行网络结构特征。结果表明:3种出行方式下,航空联系的线路最少,平均出行距离最长;铁路出行人数最多,其次是公路,航空最少。最大优势流中,北京和上海在国内航空出行联系中起着最重要的控制作用,其次是成都和重庆;铁路出行中,北京和成都占据绝对优势;公路多表现为省级行政中心与周边城市的关联。根据转变中心性和转变控制力划分城市类型,在航空和铁路出行网络中,高中心性—高控制力城市较多;公路出行网络中以高中心性—低控制力城市为主。不同出行方式下的城市聚类得到的网络集群“社区”数量有一定差异,航空、铁路和公路出行依次聚类为7、8和10个“社区”。不同类型出行方式透视的城市网络特征存在较明显的差异:航空出行的城际人口流体现出以全国性枢纽城市为核心分布的核心—边缘结构;铁路表现出以国家铁路大动脉沿线城市为核心,向腹地城市逐渐递减的核心—边缘结构;公路出行的城际人口流则表现为与人口规模匹配的局域强聚集的空间格局。

关键词:城际出行网络;城市网络结构;人口流动;春运;腾讯迁徙;中国

网络是由抽象的节点和连接节点的边所共同组成的可以抽象描述复杂联系、相互交织的客观世界的一种载体^[1]。城市绝非孤立地分布于地域空间上,而是彼此之间存在复杂的交互联系,从而构成了城市网络,这种网络具有特定的空间结构以及功能组织^[2]。城市间通过物资、信息、金融、人流等交流,强化了区域间、城市间、城市与区域间的关联互动和优势互补,从而演化出不同尺度和层级的复杂网络^[2]。这种网络以城市为中心,以要素流通为媒介,在一定区域上构成了节点—轴带—域面的空间结构^[3]。在全球化加速推进的背景下,西方发达国家的城市体系逐渐呈现出从等级规模模式向网络模式的转化趋势^[4],促使学者们开始转换视角,重新

检视城市间的新型空间结构,其关注的重点也由城市的规模等级、空间形态和职能演化,转为城市网络化的结构和关联关系^[5]。Castells^[6]提出了“流空间”(space of flows)概念并总结出“流空间”的基本要素是流、网络和网络节点,其中,信息流、人流、资金流等可以作为流要素,公司、企业、城市和国家等均可以作为网络节点。“流”要素的不同,产生的网络节点也不尽相同,当然,对于不同的网络节点属性也会影响“流”要素的运动以及整个网络格局^[7]。城市等级体系和职能分工体系的变革是由“流空间”和传统的“场所空间”共同推动的,“流空间”的出现使得以等级规模为理论核心的传统中心地模式逐步转向开放、流动、多中心的网络化模式^[2]。

收稿日期:2020-05-23;修订日期:2020-10-14。

基金项目:国家自然科学基金项目(42071216, 41661025)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42071216 and 41661025.]

第一作者简介:张蓉(1995—),女,甘肃华池人,硕士生,主要从事空间分析与感知研究。E-mail: zr420728@163.com

*通信作者简介:潘竟虎(1974—),男,甘肃嘉峪关人,教授,博士生导师,中国地理学会会员(S110011899M),主要从事空间分析与感知研究。E-mail: panjh_nwnu@nwnu.edu.cn

引用格式:张蓉,潘竟虎,赖建波. 不同交通方式下居民城际出行网络结构特征:以“春运”为例[J]. 地理科学进展, 2021, 40(5): 759-773.
[Zhang Rong, Pan Jinghu, Lai Jianbo. Characteristics of intercity trip network structure of residents under different traffic modes: A case study of Spring Festival travel rush. Progress in Geography, 2021, 40(5): 759-773.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.05.004

人口的出行、迁徙与流动被认为是生产要素重新在空间上进行配置的一种活动,推动了社会、经济要素的重新集聚与扩散^[8]。人口出行具有明确的起点和终点,这些起点、终点以及出行期间的人口一起构成了人口出行网络。人口出行网络依托于城市网络,以城市为网络节点,以人口的流向及流量表征节点间的关系结构。在全球化和信息化的快速推进下,传统研究中采用的静态数据已经无法满足当今世界“流空间”分析的要求,更难准确地探寻出城市间日益复杂的关系结构。伴随着物联网技术以及智能终端的发展,居民出行数据的采集与分析趋于多样化,大数据的时代使个体粒度的海量时空轨迹获取居民移动模式成为可能,具有定位功能的移动计算设备可跟踪个体空间移动,长时间、高精度地记录时空大数据(公交车刷卡记录、社交网站签到数据、出租车运动轨迹等)^[9]。同时,地理信息技术的不断发展使得地理学从数据采集、存储、分析到可视化等整个过程都获得了极大的便利^[10],为研究居民出行网络结构特征提供更大的支持。

人口迁徙是城际相互联系与相互作用的直接表征,一直以来都是地理学者关注的热点问题,目前的研究集中在以航空为代表的长距离城际出行网络、以高铁为代表的日常城际通勤网络以及以微博签到、网络关注度等为代表的基于时间依赖性的城际出行网络特征研究与出行模式等方面。居民城际出行依托的交通线路是城市内外联系的重要工具,体现了城市联系和交流的能力和程度^[11],交通线路在一定程度上可以视为城市网络空间结构的基础支撑和关键环节^[12]。钟业喜等^[13]基于铁路网数据将中国城市划分为4个等级;马学广等^[14]利用中国航空客运的O-D数据揭示了城际出行网络整体联系和局部联系特征;孟德友等^[15]基于2005、2010和2015年铁路客运班列数据,分析了东北地区城际出行网络结构演变特征;王姣娥等^[16]通过比较铁路和航空流探索了中国城市网络等级结构特征。上述研究均在一定程度上丰富了不同尺度城市网络体系的研究,但仍是单一类型的交通流视角透视当前城市间相互作用关系的空间关联,对于不同交通运输方式对城际出行网络形成与发展所起的不同功能与作用认识不足。基于位置服务的人口移动高精度时空信息为居民出行与人口流动研究提供了足量、足精度的关键实测流数据支撑,

如赵梓渝等^[17]、Li等^[18]借助百度迁徙数据分析了春节期间人口的流动特征;魏冶等^[19]分析了转型期中国城市网络特征。借助大数据分析个体/群体行为,反映其背后蕴藏的空间行为、空间认知以及联系模式,从而服务于个体/群体的时空行为决策,正成为居民出行与人口流动研究的热点前沿^[20]。

随着社会经济的发展,高铁、飞机等高速出行方式所引发的“时空压缩”效应大大提升了居民可移动性,城际出行随之表现出网络化、综合化、动态化和个性化的特征。城际出行具有时间和方式的依赖性,不同时间尺度、不同出行方式的城际出行网络具有相异性,反映的出行模式及其表达的地理空间联系规律也具有差异性。春运是转型期中国特有的社会经济现象,隐匿在大量居民出行背后的是深层次的人口与区域经济发展不均衡。据官方统计,2018年春运期间全国旅客发送量约29.7亿人次,不仅时间长,规模大,而且出行目的多样(返乡、旅游、务工)。本文利用腾讯位置服务网站中获取的2018年春运期间人口流动数据,基于不同出行方式建立居民出行关系网络,深入剖析不同出行方式下的中国城市网络空间结构,为研究城市网络结构提供新的视角。通过不同交通方式研究居民城际出行网络的空间结构,可从不同视角揭示人口迁徙、居民出行乃至城市网络的多重空间特征,弥补现有研究仅从单一出行方式得出结论的片面性,丰富对中国城市间空间关系的区域认知。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

目前多个互联网公司都会提供定位服务,如百度、腾讯和新浪等等,本文采用的数据来自“腾讯位置大数据”平台中的人口迁徙数据(heat.qq.com/qianxi.php),借助Python软件进行爬取,该数据主要是第三方用户利用腾讯位置服务提供的定位数据统计得到,以d为统计单位,精确到居民个人,可覆盖大部分用户长、短途完整出行行为,在一定程度上避免了因长途和短途出行而导致数据的低估和虚增。该数据包含航空、铁路、公路3种交通方式。为了详细、全面地考察中国居民城际出行网络体系的空间结构特征,选取全国可获取到的346个城市为研究对象(包括4个直辖市、294个地级市、30个自治州、7个地区、3个盟、2个特别行政区以及新疆

石河子市,河南济源市,湖北仙桃市、天门市、潜江市等省直管县级市和神农架林区),其中,台湾省和海南省三沙市数据缺测,未包含在内。考虑到研究时段的代表性及与同类研究的对比,选择春运时段进行分析,时间节点为2018年2月1日到3月12日,选取40 d的居民城际出行数据作为构建网络的依据。爬取346个城市间的居民乘坐飞机、火车和汽车出行的数据,分别表征基于航空、铁路和公路视角下的中国城市网络空间关联强度。城市位置等数据来自1:100万全国基础地理信息数据库(图1)。

1.2 研究方法

采用复杂网络分析方法,利用优势流、转变中心性与转变控制力、聚类系数和“社区发现”等指标,对中国居民城际出行网络结构特征进行识别分析。

1.2.1 优势流

1961年Nystuen和Dacey首次提出优势流的概念,它的原理是根据某城市的主要要素流向将其归属到对其最具控制力的中心,这是大多数学者采用的简化分析城市网络的成熟方法之一^[12,21]。本文借用该方法表征某城市在宏观尺度下的网络地位。要素流选取的是春运各出行方式下的人口流强度^[22]。

1.2.2 转变中心性与转变控制力

Zachary在研究世界城市网络中提出了递归中心性(recursive centrality, RC)和递归控制力(recursive power, RP)的概念,随后更改为转变中心性(alter-based centrality, AC)与转变控制力(alter-based power, AP)^[23-24]。他认为中心性是指资源集聚与扩散,资源要素(劳动力、资本和信息等)向世界城市的集聚以及资源要素由世界城市向外扩散都是中心性的表现,而控制力表征在资源流通过程中城市的影响力和支配力,某个城市控制力的大小则由所处网络的位置和扮演的角色所决定。

基于腾讯迁徙数据构建人口在1 d内流动的双向矩阵 $L=(L_{ij})_{n \times n}$:

$$L = \begin{bmatrix} 0 & L_{12} & \cdots & L_{1(n-1)} & L_{1n} \\ L_{21} & 0 & \cdots & L_{2(n-1)} & L_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ L_{(n-1)1} & L_{(n-1)2} & \cdots & 0 & L_{(n-1)n} \\ L_{n1} & L_{n2} & \cdots & L_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: L_{ij} 为城市 i ($i=1,2,\dots,n$)到城市 j ($j=1,2,\dots,n$)的人口流动强度。因此, L 是由 L_{ij} 组成的 346×346 的有向加权非对称矩阵。

计算城市 i 与城市 j 之间的流动人口流权重 R_{ij} ,并将其作为计算转变中心性与控制力指标,则:

$$R_{ij} = \frac{L_{ij} + L_{ji}}{2} \quad (2)$$

在测度城市中心性(控制力)时,需要考虑关联城市对于测度城市的影响。从大数据来看,会出现某些城市与卫星城之间存在大量人口流动的情况,例如廊坊的人口流动中与北京相关联的占绝大多数,北京作为全国经济文化中心,其度中心性是相对较高的,这就导致在计算时会间接地提升廊坊的中心性。因此,加入依存度参数 d_{ij} ,可以对中心性结果难以真实描述城市网络地位的现象进行修正,整个网络城市的中心性和控制力结果趋于收敛。相较而言,资源关联均衡的城市地位将提高,而卫星城的地位将显著下降,这更符合城市的实际发展情况^[17]。公式为:

$$d_{ij} = R_{ij} / WDC_i \quad (3)$$

式中: WDC_i 为城市 i 的加权重中心性。

修正后转变中心性和控制力公式为:

$$AC_i = \sum_j (1 - d_{ij}) \times R_{ij} \times DC_j \quad (4)$$

$$AP_i = \sum_j (1 - d_{ij}) \times \frac{R_{ij}}{DC_j} \quad (5)$$

式中: AC_i 为城市 i 的转变中心性; AP_i 为城市 i 的转变控制力; DC_j 为城市 j 的度中心性。

1.2.3 聚类系数与网络簇

当某些节点关系特别紧密时,即可结成一个网络簇。

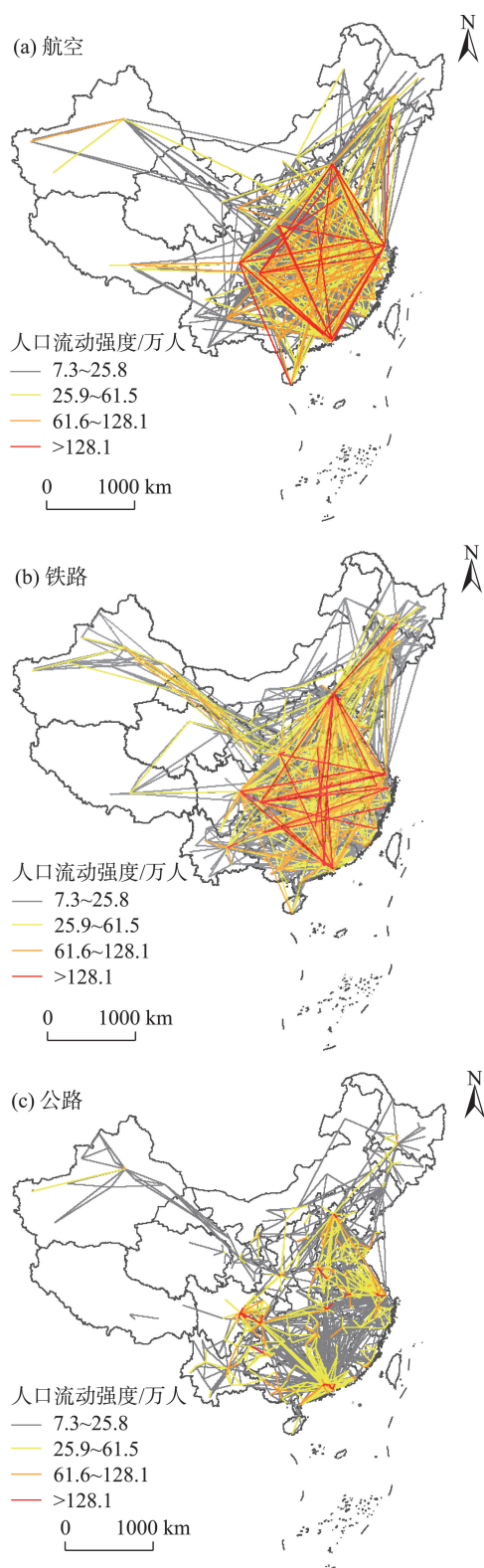
$$C_i = \frac{2B_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (6)$$

式中: C_i 为聚类系数; B_i 为节点到其 k_i 个相邻节点间的路径条数。

2 结果分析

2.1 居民城际出行线路和强度

采用ArcGIS可视化绘制不同出行方式下的人口流动路线和强度(图1,依据铁路划分标准采取自然断裂法分级)。为了更加清楚地呈现人口流动层级特征,图中不展示第一层级的线路。整体来看,3种出行方式下的人口流动线路均呈现出西疏东密的格局,高人口流动线路集中在“胡焕庸线”的东侧^[25],出现这种现象与经济发展程度和地理区位密切相关。从全国整体来看,各地级城市的居民出行在空



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(2020)4630号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图1 不同出行方式下的中国居民出行路线和强度

Fig.1 Routes and strengths of population flow under different travel modes in China

间联系强度和空间联系模式上均存在程度不同的空间分异性和空间依赖性,其层级特征也存在明显的交互性^[26]。

具体而言:就航空流来看(图1a),居民出行网络形成了以北京、上海、广州—深圳和成都—重庆为核心的“菱形”结构,东部跨区域交织现象显著,远距离联系路线较多,且多与经济基础好的城市相连接,如上海—重庆、重庆—北京、上海—北京、深圳—上海等,这些线路所承载的人口数均在128.1万人以上。除此之外,承载人数在61.6万~128.1万人的线路中还出现了与西安、贵阳、武汉、南京等相联系的城市,围绕“菱形”结构向外扩展。西南、西北和东北地区航空联系路线少,多是省会城市与东部经济发达城市的联系,承载旅客人数多在61.6万人以下。东北3省与北京联系密切,内蒙古、新疆、西藏、青海、甘肃5省区虽地域广阔,但相互之间的连接线路很少,需要进一步提升网络关联^[26]。居民航空出行网络中,所连接的线路平均直线距离为1232.73 km(表1),距离远、所用时间短是其最大特点。航空流清楚地反映了全国尺度的空间联系以及核心—外围的组合关系,对于反映宏观尺度上的全国城镇体系结构具有显著作用。

从铁路流来看(图1b),除“菱形”结构更加明显外,菱形内部的“丰”字型骨架也较为清晰,各个层级上的路线都有所增加,涵盖范围广,密度大。3种出行方式中,铁路承载的出行人数最多,占全国居民总出行人数的49%,所连接的线路平均直线距离为842.99 km,不仅包括喀什—上海这样的长距离线路,也存在以北京、成都、贵阳、郑州为中心的中长距离线路,甚至有珠海—澳门仅8 km的短线路,是最灵活居民出行方式。与航空不同的是,西北和东北地区铁路方式线路较之航空明显增多。铁路流主要反映了京九、兰新、京沪、京广、陇海、京哈、京包、襄渝等国家铁路大动脉沿线腹地城市的居民出行格局特征,交通基础设施对于居民出行空间关联的引导作用明显,尤其是高铁覆盖的区域“沿途效应”已经显现。

就公路流来看(图1c),线路和人流量主要表现为由区域中心城市向外辐射的格局,因为公路受到速度、设施等的约束,多连接的是近距离城市,所连接的线路平均直线距离为580.26 km。承载人数在7.3万~25.8万人的线路数量最多,达1642条,而大于128.1万人的线路仅有32条。相比较而言,在公

表1 不同出行方式下的网络规模统计

Tab.1 Statistics of network scale under different travel modes

出行方式	线路/条	联系总值/人	线路客流平均值/人	线路最大客流/人	线路最小客流/人	平均出行距离/km
航空	8451	395906143	46852.80	5619745	2	1232.73
铁路	13746	1151459633	83772.98	3989590	1	842.99
公路	10222	802326637	78497.86	3774504	11	580.26

路出行线路中,西部地区受自然条件制约,线路偏长,东部线路较短。公路流主要反映了居民出行对城市群内层级的空间依赖性和核心—外围组合关系,较清晰地展示了各城市群的发育程度。京津冀、长三角、珠三角、成渝、中原城市群的层级关系明显,哈长、山东半岛、关中、武汉、北部湾城市群的层级关系已有所显现,其余城市群则发育较弱。

在不同出行方式下的人口集散规模与流动路线的展示中,由于数据量大,无法全部展现,为更好地强调重要城市以及路线在整个人口流动中的作用,仅选取前10位城市和流动线路做分析处理(表2)。统计发现,居民出行呈现以下特征:从集散规模来看,3种出行方式下,集散规模均进入前10名的城市仅包括上海、北京、广州、重庆、深圳和成都,这6个城市是全国性居民出行集散中心。集散人数前10位城市承载集散人数占该方式下总集散人数最高的出行方式是航空,高达49.72%,其次是铁路(29.71%),占比最低的是公路(21.07%)。但从承载的人数来看,铁路最多,达公路的2倍多,航空居于两者之间。从出行路线来看,春运期间,航空承载的旅客数共计39590.6万人,仅前10位路线就承载了10.54%的旅客,这些路线所联系的城市恰恰都位

于“菱形”结构的4个顶点。铁路在春运期间承载的旅客数量最多,达115146万人,在前10位的路线中,除作为菱形内部十字骨架交叉中心位置的武汉市以外,依旧是以“菱形”结构为中心所展开的路线,但前10位路线承载人数仅占比2.60%。春运期间有80232.7万人选择了公路作为出行方式,前10位的线路恰好代表着京津冀(北京与廊坊)、长三角(上海与苏州)、珠三角(深圳与东莞和惠州、广州与佛山)3大城市群内部核心城市与次核心城市间的紧密联系。西部关中城市群的西安和咸阳双向出行路线均进入了前10位,而西部最大的城市群成渝之间的人口流动在3种出行方式下均未进入全国前10位,值得进一步关注。

图2为不同出行方式下的人口流动集散规模及类型图(依据铁路划分标准采用自然断裂分级),从集聚规模可以看出,航空和铁路分别有4个和6个城市处于最高集散层级(>4567.47万人),公路未有城市在第一层级。第二层级(1718.72万~4567.47万人)中,航空、铁路和公路的城市数量分别为4、16和10个。第三层级(554.50万~1718.71万人)中,航空方式下共有21个城市,多呈条状分布在东部地区,且多是省会城市;铁路则有81个城市,主要沿铁路

表2 不同出行方式下的人口流动集散层级排名前10位的城市和流动线路

Tab.2 Top 10 cities and flow routes by the level of population flow distribution under different travel modes

方式	集散规模前10名城市(人数/万人)	集散人数占比	出行前10位路线(承载人数/万人)	承载人口占比
航空	上海(7189.50)、重庆(6774.25)、北京(5769.37)、深圳(4682.73)、成都(4456.12)、广州(3540.94)、杭州(1969.88)、南京(1875.26)、西安(1566.18)、贵阳(1541.59)	总计39365.82万人,占航空集散总人数的49.72%	上海至重庆(561.97)、重庆至上海(561.79)、重庆至北京(531.66)、北京至重庆(495.89)、深圳至成都(391.39)、成都至深圳(353.64)、上海至北京(335.05)、北京至上海(330.75)、深圳至上海(326.07)、广州至上海(286.53)	总计4174.76万人,占航空承载总量的10.54%
铁路	北京(13411.76)广州(8839.29)、上海(8239.52)、重庆(7946.69)、深圳(7470.20)、成都(6847.17)、武汉(4567.47)、西安(4170.78)、郑州(3553.10)、南京(3377.23)	总计68423.22万人,占铁路集散总人数的29.71%	上海至重庆(398.96)、重庆至上海(384.79)、佛山至广州(309.32)、广州至佛山(307.67)、重庆至北京(296.40)、长沙至北京(296.39)、北京至重庆(260.11)、武汉至北京(246.53)、北京至上海(244.27)、成都至南京(238.58)	总计2983.01万人,占铁路承载总量的2.60%
公路	广州(4524.70)、深圳(4298.90)、重庆(3947.29)、北京(3685.43)、成都(3496.08)、东莞(3490.96)、上海(3489.91)、苏州(2917.86)、佛山(2101.89)、郑州(1858.93)	总计33811.94万人,占公路集散总人数的21.07%	深圳至东莞(377.45)、东莞至深圳(374.35)、上海至苏州(270.93)、苏州至上海(263.99)、佛山至广州(256.25)、广州至佛山(250.17)、咸阳至西安(203.18)、北京至廊坊(202.05)、西安至咸阳(201.19)、深圳至惠州(188.14)	总计2587.72万人,占公路承载总量的3.23%

线分布;公路有85个城市,集中在东部呈块状分布。对比来看,基于航空出行的城际人口“流空间”分异最为明显,表现为高度极化以及点状离散嵌入的特征,体现出以全国性枢纽城市为核心分布的核心—边缘结构。基于铁路出行的城际人口流格局基本表现出以国家铁路大动脉沿线城市为核心,向腹地城市逐渐递减的核心—边缘结构。基于公路出行的城际人口流则表现为与人口规模匹配的局域强聚集的空间格局,在空间上形成了京津冀—长三角—中原、四川盆地、珠三角3个强聚集区域。

不同的出行方式所呈现的城市流入/流出类型有所不同(图2)。航空出行方式下,有118个城市属于人口高度流入城市,其中,净流入人口30万以上的城市既包括南京、天津、济南、南昌、武汉、香港、长春等大区域中心城市,也包括三亚、毕节、桂林、丽江、林芝等旅游城市。南京流入的线路有115条,流出的线路仅有86条。高度流出城市有深圳、重庆、成都、贵阳、广州、杭州等,净流出人口30万以上的城市除咸阳外,均是省会及以上城市。整体来看,人口净流入的城市数量较多,而净流出的城市占比较少。铁路出行方式下,高度流入城市只有北京和南京,较高流出城市、较高流入城市、出入持平城市以及高度流出城市交叉分布,其中高度流出城市有重庆、贵阳、昆明、深圳等,较高流出城市和较高流入城市数量相当。净流出人口超过60万的16个城市中,有9个位于西部地区;净流入人口超过60万的23个城市中,则只有乌鲁木齐和黔南州2个西部城市。公路出行方式下,流入流出持平的城市多分布在西北和东北地区,流出城市数量多于流入城市。人口流出最多的城市(超过40万)是周口、邵阳、上饶、赣州、宜春、玉林、邯郸、怀化和昭通,均为中西部地区劳务输出大市。重庆在公路方式下表现为较高人口流入,2月1日至2月14日,重庆每天流入的人数是其他时间的2倍。仅2月11日这天重庆通过公路流入人口高达76.18万,而在3月1日仅仅有25万人口流入重庆,流入线路也由原来的163条缩短至102条。尽管如此,春运期间,重庆在航空和铁路出行方式中均属于高度流出城市,且输出的旅客量远超过公路,这与赵梓渝等^[27]的研究结果一致。

图3展现的是最大优势流下的城市出行网络关联结构。从优势流线路来看,航空、铁路、公路最大优势流线路整体呈现由长到短、由繁到简的空间分布格局。航空优势流(图3a)中,“菱形”结构框架十

分突出,并向东北和西北延伸,航空多承担远距离运输的职能,受地理空间的约束影响小。由于关联了全国不同地域的重要城市,航空流刻画出了中国城市关联格局的骨架以及经济发达区域。铁路优势流(图3b)以点—轴系统格局为表现形式,主要承担中长途的运输,不仅为连接中心城市和核心骨架提供支撑,也因为涉及区域广和灵活性高带动了沿线城市发展。公路优势流(图3c)呈星型发散辐射模式,是对整体骨架和支撑轴带的有效填充。公路主要承担短距离运输的职能,受不同省区间行政力量作用造成的地区分割影响,公路出行多局限在省区内部或周围省区的行政单元,它是地域系统联系的完善和填充。航空、铁路和公路3个优势流所覆盖的城市网络联系地域有所重合但各有侧重,分别刻画了全国、区域和省区空间尺度的网络特征,形成了区域间相互依赖、不可或缺的要素关联和空间关系,这与陈伟等^[25]基于城市间公路、铁路和航空班次数据对中国城市网络空间关联进行特征提取的结果基本一致。由优势流线路关联的城市个数可知,航空优势流(图3a)中北京和上海关联的最大优势流城市分别为70个和69个,占据主导地位。深圳、成都、重庆的关联城市分别为36、36和27个,处于第二层次;有5个以上关联城市的还包括广州、乌鲁木齐、武汉、昆明、哈尔滨、西安和长沙。铁路优势流(图3b)中北京和成都占据主导地位,其所关联的最大优势流城市均为21个,远小于航空优势流第一层级城市所关联的数量。关联城市数量在10个以上的有武汉、乌鲁木齐、郑州、广州等11个城市。公路优势流(图3c)中成都排名首位,其所关联的最大优势流城市为15个,其次是郑州、广州、西安和长沙。关联城市前30位中,除了佛山和东莞,其余都是省会及以上城市。

2.2 居民城际出行网络结构特征

2.2.1 转变中心性和转变控制力

从转变中心性(AC)与转变控制力(AP)的计算结果来看(表3),3种出行方式下,北京、上海、重庆、广州、深圳、成都6个城市排名均靠前。就航空方式而言,重庆的中心性最强,赖建波等^[24]也在研究中强调了它的集散作用,并指出该城市在节前主要以高强度流入为主,节中节后主要流出为主。转变控制力最强的是上海,证明在整个航空客运网络中,上海的支配力和影响力是最大的。对于铁路而言,北京拥有最大的转变中心性和控制力,在整个铁路

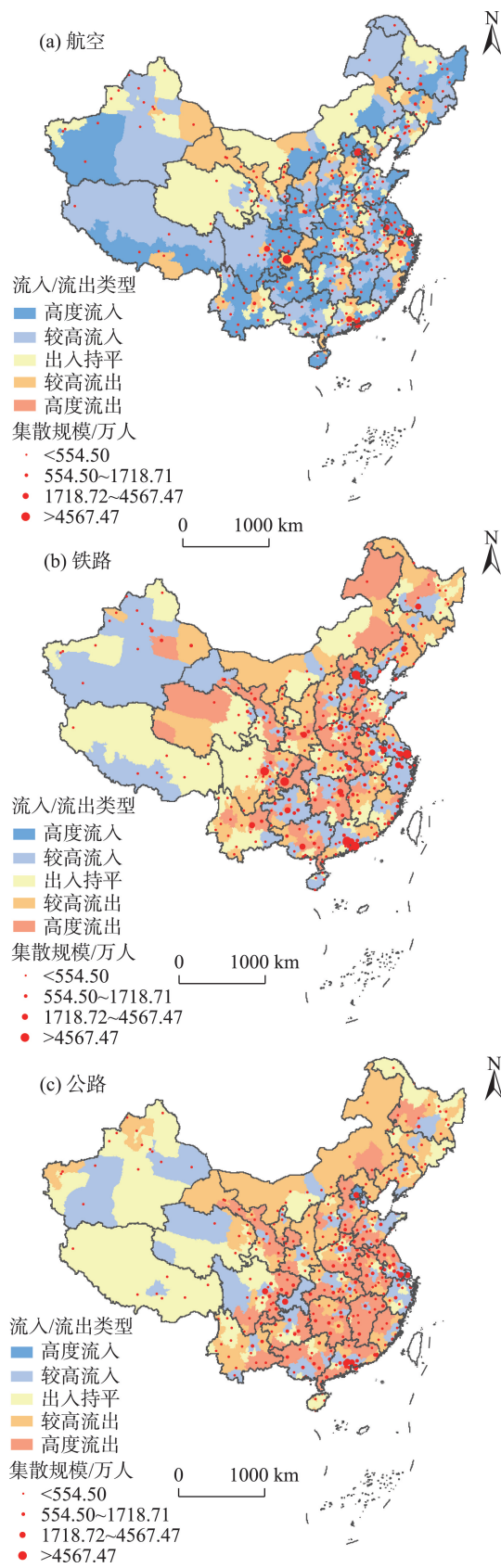


图2 不同出行方式下的人口出行集散规模及类型
Fig.2 Distribution scale and type of population flow under different travel modes

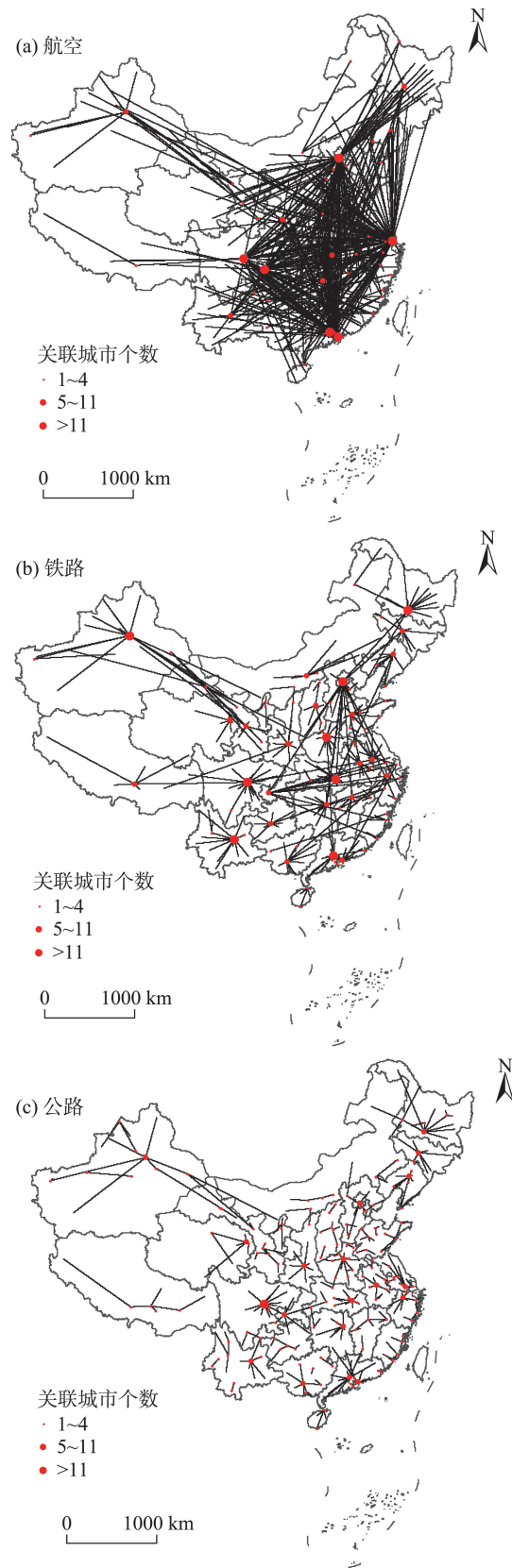


图3 不同出行方式下基于最大优势流的
中国城市出行关联特征

Fig.3 Characteristics of urban trip association based on the maximum dominant flow under different travel modes in China

表3 不同出行方式下转变中心性(AC)、转变控制力(AP)前10名和后10名城市

Tab.3 Top 10 and bottom 10 cities of alter-based centrality (AC) and alter-based power (AP) under different travel modes

位序	航空			铁路			公路		
	城市	AC	AP	城市	AC	AP	城市	AC	AP
1	重庆	1.000	0.808	北京	1.000	1.000	深圳	1.000	0.932
2	上海	0.938	1.000	重庆	0.941	0.481	广州	0.977	0.951
3	北京	0.656	0.778	上海	0.801	0.559	东莞	0.960	0.644
4	深圳	0.630	0.716	广州	0.720	0.643	重庆	0.812	0.891
5	广州	0.464	0.545	深圳	0.645	0.564	上海	0.774	0.733
6	成都	0.443	0.741	成都	0.633	0.564	苏州	0.717	0.680
7	杭州	0.270	0.261	武汉	0.486	0.286	北京	0.697	0.856
8	西安	0.241	0.118	西安	0.441	0.273	成都	0.597	1.000
9	南京	0.203	0.163	郑州	0.329	0.261	佛山	0.566	0.390
10	咸阳	0.185	0.085	杭州	0.324	0.209	惠州	0.419	0.155
...
337	淮北	<0.001	<0.001	大兴安岭	0.001	0.002	果洛	0.002	0.006
338	郴州	<0.001	<0.001	克州	0.001	0.004	山南	0.002	0.004
339	玉树州	<0.001	<0.001	怒江	0.001	0.001	玉树州	0.002	0.005
340	云浮	<0.001	<0.001	和田	0.001	0.002	阿勒泰	0.002	0.011
341	韶关	<0.001	<0.001	黄南州	0.001	0.001	琼海	0.002	0.017
342	贺州	<0.001	<0.001	神农架	0.001	0.001	克州	0.002	0.013
343	亳州	<0.001	<0.001	昌都	0.001	<0.001	大兴安岭	0.001	0.002
344	神农架	<0.001	<0.001	阿勒泰	<0.001	0.001	那曲	0.001	0.003
345	果洛	<0.001	<0.001	果洛	<0.001	0.001	日喀则	0.001	0.005
346	梧州	<0.001	<0.001	阿里	<0.001	<0.001	阿里	<0.001	0.002

客运中,北京作为全国行政中心,占有绝对的优势,不仅连接的线路多,范围广,而且对于其所联系的线路具有很强的影响力。从公路来看,深圳占有最高的转变中心性,深圳的公路运输网非常密集,南方务工人员回乡多在深圳中转,此外,深圳通过多条公路线路直连上海、成都、北京等城市,可以说集散能力非常强大。就转变控制力来看,成都占据第一,在整个公路网络中,成都刚好处于网络中间,是东西部交流的重要承载地,在整个公路网中占据重要的地位。

借助 ArcGIS 软件对转变中心性结果进行自然断裂分级,不同出行方式下的 AC 值所呈现的城市层级均呈金字塔结构,即 AC 值高,城市数量少。航空方式下(图 4a),等级结构最明显且高等级的城市数量最少,分布分散,仅有北京、上海、重庆和深圳 4 个城市。公路方式下(图 4c),AC 值高的第一、二层级明显增加。就铁路而言(图 4b),AC 值第一、二层级数量介于公路和航空之间。

从春运不同出行方式下的城市 AP 图(图 5)可以

发现,航空方式下(图 5a),上海、重庆、北京、成都、深圳和广州 6 个城市处于最高层级,对所连接的线路以及周边城市都有很强的支配力。在铁路出行的 AP 分级图中(图 5b),除西藏、青海、内蒙古、海南 4 个省区仅存在最低层级城市外,其他省份都有较高的 AP 城市出现。公路方式下(图 5c),最高层级(0.287~1.000)增加了苏州、郑州、佛山、西安、东莞、昆明、南京、南宁以及杭州等城市。整体来看,高转变控制力的城市分布相对均衡,与高转变中心性不同的是,银川、兰州、乌鲁木齐、西宁等城市作为西部地区人口向东部流动的桥接点,AP 值较之 AC 值明显提高。部分城市在人口流动过程中承担的中介与集散职能可以通过转变控制力得到更好的反映^[22]。

在城市网络分析中,转变中心性与转变控制力共同决定了城市的地位^[20]。一般而言,城市的 AC 值与 AP 值呈现正比例关系,AC 值高的城市 AP 值相应也高,对于资源的集聚和扩散能力越强的城市对资源的支配能力也越强,当然,某些城市也存在差异。本文参考 Neal 等^[28]测度世界城市信息网络

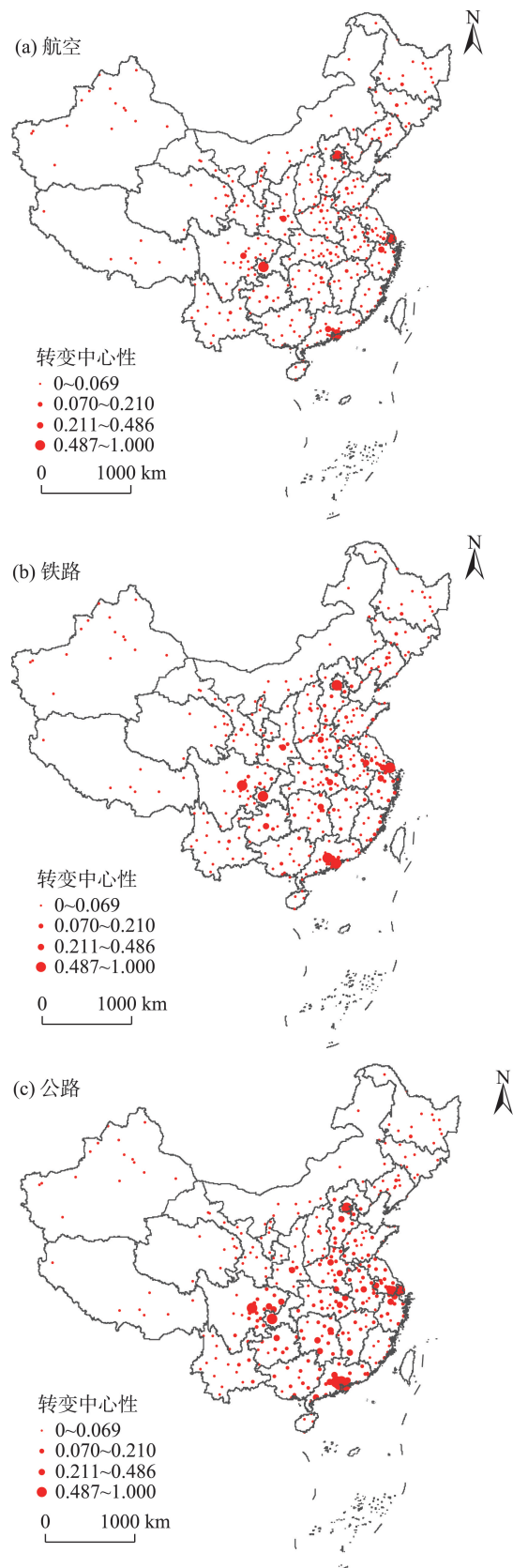


图4 不同出行方式下的中国城市转变中心性分级

Fig.4 Classification of alter-based centrality under different travel modes in China

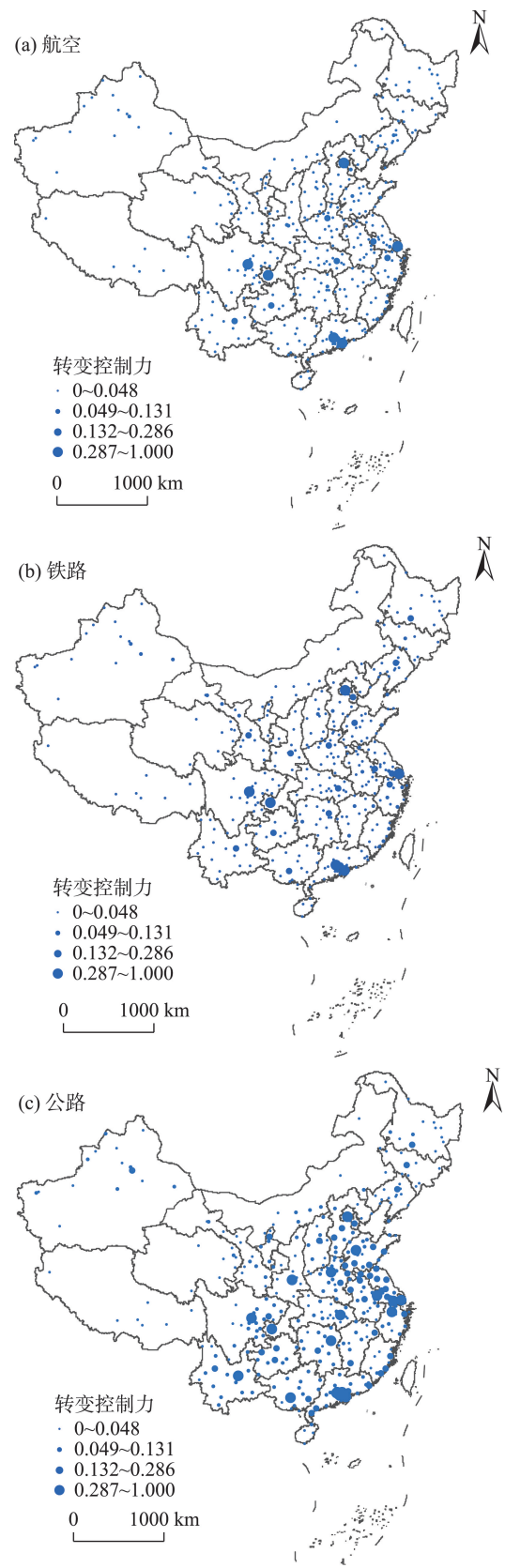


图5 不同出行方式下的中国城市转变控制力分级

Fig.5 Classification of alter-based power under different travel modes in China

的方法,依据中心性和控制力分值的组合,将不同出行网络中的城市划分为高中心性—高控制力(高一高)、高中心性—低控制力(高一低)、低中心性—高控制力(低一高)以及低中心性—低控制力(低一低)4种类型,依据中心性和控制力划分的城市类型,可以更好地识别城市的地位与属性特征^[23]。同时,采用 geometrical interval 分类法分别将3种出行网络中的转变中心性和控制力进行分级,并基于二者在不同等级的匹配关系划分城市类型(图6)。

在航空出行网络城市等级结构中,一、二、三级城市数量比分别为34:190:122。高一高、高一低、低一高和低一低4种城市类型数量之比则为171:49:28:98。在铁路城市等级结构中,3个等级城市数量比为22:177:147,4种类型城市数量之比为160:35:32:119。较航空出行而言,铁路出行高一高和高一低城市的数量有所减少,低一低城市的数量则呈增多趋势。通过对公路出行网络的城市等级结构进行统计,发现一、二、三级等级城市数量比为95:183:68,4种城市类型数量之比为100:176:5:65,高一高、低一高以及低一低城市的数量减少明显,低一高类型的城市仅有5个。综合3种出行网络来看,同一个城市在不同的出行网络中所处的等级结构有一定差异,例如贵港在航空出行网络中被划分为低一低城市,铁路出行网络中又属于二级高一高类型,而在公路出行网络中则变成了一级高一低类型城市。从图6可知,随着出行方式由航空到铁路再到公路,低一高类型城市数量减少,高一低类型城市数量增多;西部低一高类型城市数量减少明显,东部则多由低一高类型城市转化为高一低类型城市。铁路出行网络中以二级为主的高一高类型城市最多,且多沿铁路线分布。航空出行网络中高一高类型城市分布较为分散。公路出行网络中的高一高类型城市数量相对较少,呈分散分布状态,高一低类型城市数量众多。相较于其他出行网络,公路出行网络中城市的中心性和控制力差异较大,不匹配现象较为显著,反映出中心城市对邻近区域的强控制和中心城市间的弱联系特征。

在计算转变中心性和控制力时发现,当度中心性相同时,随着加权重中心性的增加,城市节点地位也将被提高^[22]。例如,北京、上海、广州等城市都关联了高强度的人口,其转变中心性和控制力数值及位序被推高。安庆、青岛、南昌等区域中心城市由于高关联度和均匀流分布使得其网络地位有所

提升。加入依存度参数后,存在路径依赖的城市中心性趋于收敛^[22],例如在公路出行网络中,咸阳有71.9%的人口流动关联着西安,导致其排名相对加权重中心性下降了60位。转变中心性和转变控制力也表现出一定的反向性,在关联权重相同的情况下,拥有较多关联机会的城市联系的可能性大,但存在路径依赖的城市更容易被控制。如兰州多关联天水、西宁、中卫等度中心性低的城市,这些城市缺乏交流机会使得对兰州的依赖性强,兰州西部门户的地位随之被提升。门户城市往往是区域网络资源分配的枢纽,对于邻近城市具有高控制力,在某种程度上压缩了区域内居民出行的机会与可能性,表现出对区域资源流通的垄断性^[23]。这就使得大量小规模城市(通过门户城市才能进行网络资源交换)存在路径缺乏与路径依赖的弊端。

2.2.2 城市出行网络“社区发现”

“社区发现(community detection)”作为一种网络聚类的方法,是用来揭示网络聚集行为的一种技术^[29]。目前主要的“社区发现”算法包括 Girvan-Newman^[30]、Infomap^[31]和 Fast Unfolding^[7]算法等。综合考虑数据类型和出行时间等多方面因素,本文选择 Blondel 等^[7]提出的 Fast Unfolding 聚类算法来划分中国春运不同出行方式下的城市类型,即内部联系紧密、区域间联系相对少的小团体。Fast Unfolding 聚类的原理是通过迭代运算不断划分,使得划分后网络的整体模块度持续增大至网络结构不再改变为止。借助 Gephi 软件,保证模块度达到最大,模块度值越大,则“社区”划分效果越好^[31]。通过计算得到春运期间不同出行方式下的城市“社区发现”统计表(表4),为区分社区结构类型,按数字标号。不同出行方式下划分的“社区”数量具有差异,航空出行方式下城市“社区”类型最少,只有7个,并且每个结构间所包含的城市数量差距也是最大的。例如,标号为0的“社区”所包含的城市数量最多,达到113个,而标号为4的“社区”和标号为6的“社区”均仅包含2个城市。铁路出行方式下所划分的“社区”有8个,各个“社区”所包含的城市数量差距也有所缩小。公路出行方式下“社区”数量最多,为10个,不仅如此,每个“社区”所含的城市数量也是最均衡的。

将不同出行方式下所划分出的“社区”进行空间可视化(图7),可以看出,不同出行方式所呈现的“社区”结构明显不同,其中平均聚类系数值表现为

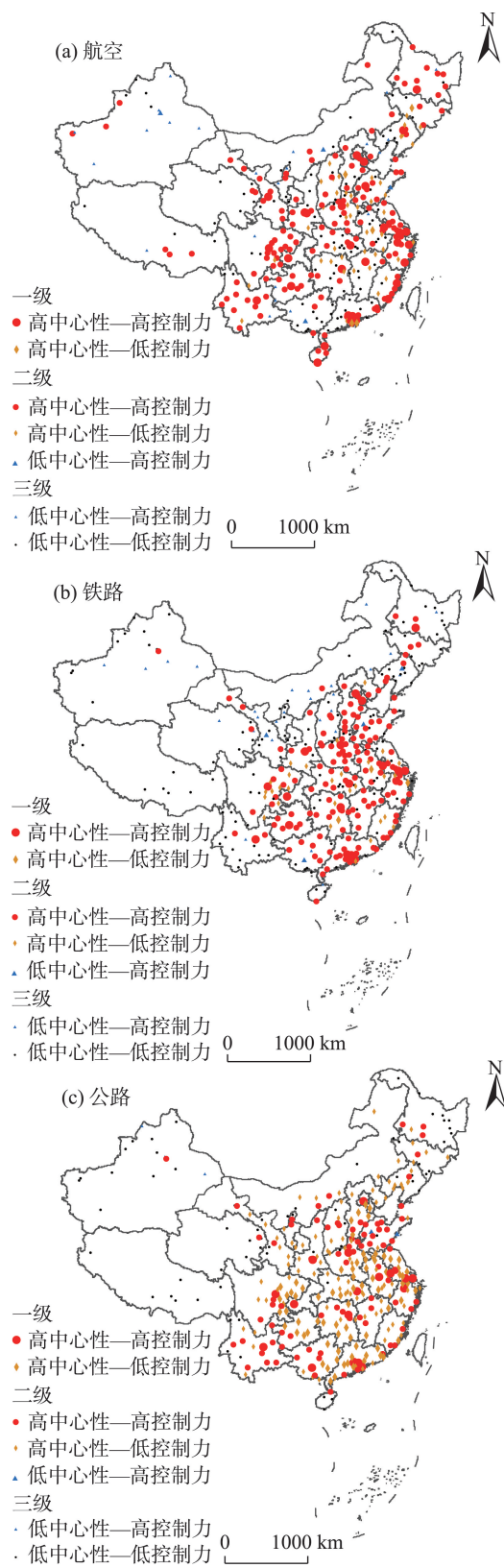


图6 不同出行方式下的中国城市等级结构

Fig.6 City hierarchical structure under different travel modes in China

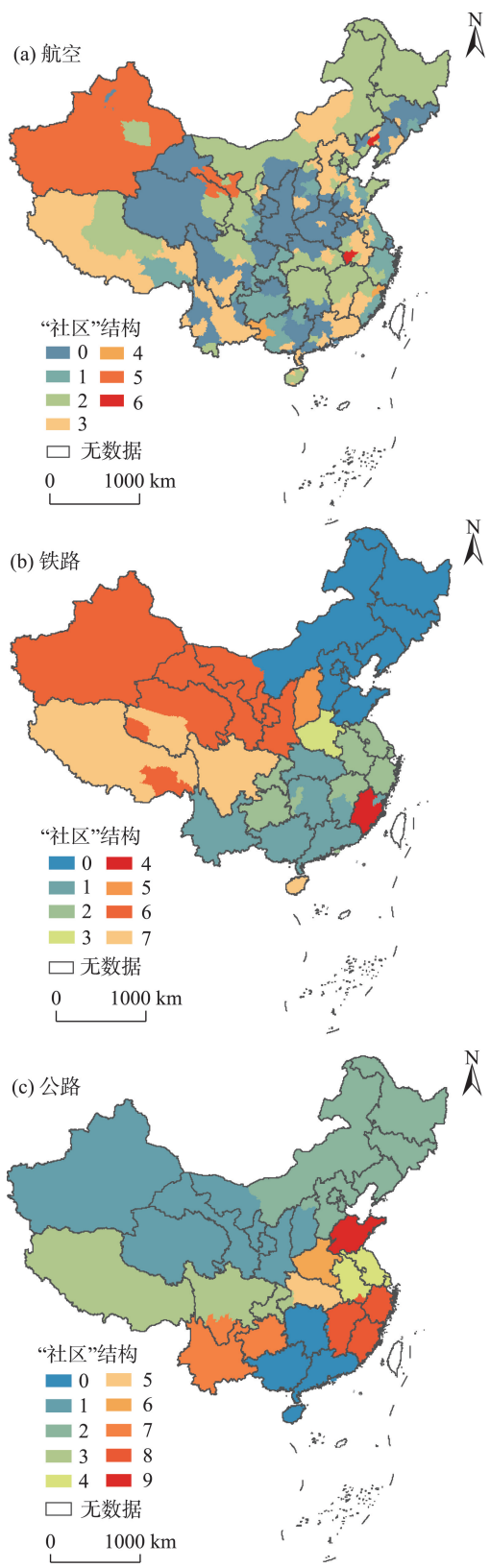


图7 不同出行方式下的中国城市网络“社区发现”

Fig.7 City network community detection under different travel modes in China

表4 不同出行方式下的城市“社区发现”统计
Tab.4 Statistical table of urban community detection
under different travel modes

航空		铁路		公路	
“社区”	数量/个	“社区”	数量/个	“社区”	数量/个
0	113	0	77	0	56
1	44	1	84	1	62
2	98	2	63	2	62
3	72	3	18	3	28
4	2	4	8	4	29
5	15	5	11	5	16
6	2	6	53	6	18
		7	32	7	27
				8	31
				9	17

航空<铁路<公路,“社区”结构特征则呈现公路最为显著,铁路次之,航空最弱。航空出行方式下表现为类别少、“社区”之间不连续、空间跨度大、受地理位置约束少、呈现跳跃式分布的特征。铁路出行方式下的“社区”结构出现明显的抱团聚集状态,空间连接度高,但也存在如标号为2的“社区”(苏皖浙赣—渝贵)的不连续跳跃型。公路出行方式下出现明显的块状分布,总体与铁路的“社区”结构类似,但边界与省界重合度更高。普遍来讲,城市居民出行受到地理空间效应的制约,导致同一“社区”的城市在空间上相邻或邻近^[28]。

3 结论与讨论

现有对城际出行的研究多限于某种单一交通方式,缺少不同交通运输方式对于城市网络形成与发展的比较研究,数据源多为汽车、火车和航班次数等静态数据。城际高速交通网络化发展引发居民出行空间与模式变化,城际出行呈现多样化趋势。人口迁徙大数据记录的人口实时移动状态为进行基于时间依赖的城际出行网络研究提供了可能和便利。本文基于腾讯迁徙大数据提供的城市之间人口流动轨迹数据,采用空间分析方法探讨了春运期间不同出行方式下中国居民城际出行网络结构特征,并借助转变中心性和转变控制力指标测度了不同出行方式下城市网络层级与聚集空间格局。主要结论如下:

2018年春运期间,中国居民城际出行采用航空、铁路和公路3种方式的联系线路依次为航空<

铁路<公路;出行距离则为航空>铁路>公路;承载人数上,铁路>公路>航空。不同类型出行方式透视的城市网络特征存在较明显的差异,基于航空出行的城际人口流表现为高度极化以及点状离散嵌入的特征,体现出以全国性枢纽城市为核心分布的核心—边缘结构;基于铁路出行的城际人口流呈现出菱形内部的“丰”字型骨架结构,表现出以国家铁路大动脉沿线城市为核心,向腹地城市逐渐递减的核心—边缘结构;基于公路出行的城际人口流则表现为与人口规模匹配的局域强聚集的空间格局。根据转变中心性和控制力将城市划分为4种类型:高中心性—高控制力城市、高中心性—低控制力城市、低中心性—高控制力城市以及低中心性—低控制力城市。出行方式不同,每个类型的城市数量不同,同一个城市在不同的出行网络中所处的等级结构也有一定的差异。春运期间不同出行方式下的“社区”结构数量不同,航空、铁路和公路出行依次聚类为7、8和10个社区。“社区”空间上,航空方式下表现为类别少、“社区”间不连续、受地理位置约束少、呈现跳跃式分布的特征;铁路方式下出现明显的抱团聚集状态,空间连接度高;公路方式下出现明显的块状分布,边界与省界重合度高。

本文对比分析了多种交通方式下的城际出行网络结构特征,改进了已有研究依靠单一类型出行方式导致的结果片面化和属性化缺陷。采用网络分析方法,多角度揭示了中国居民城际出行网络层级结构。人口迁徙大数据相较于以往采用的交通班次数据,更加符合真实的个体人口流动状况。基于转变中心性和转变控制力划分的城市等级和类型,可清晰地识别城市在网络中的地位与属性特征。腾讯迁徙数据突破了传统统计数据所带来的滞后性影响,为大尺度上研究居民城际出行提供了新的数据源。相较于其他居民出行数据,腾讯因其用户更多,精度更高。然而,受到数据本身生成和获取的限制,无法获取到出行人的职业、性别、年龄、出行目的等社会属性,除此之外,部分的出行路径可能被拆解,无法将始发地和目的地作为网络节点进行研究,过分强调了中转城市的地位,不能完全地识别用户的出行特征,这些都不可避免地会对研究结果产生误差。此外,春运作为节假日的代表时段具有特殊性,未来应在获取连续性时间序列数据的基础上,深入研究居民城际日常出行网络演化的过程及形成机理。

参考文献(References)

- [1] Berry B J L. Cities as systems within systems of cities [J]. *Papers in Regional Science*, 1964, 13(1): 147-163.
- [2] 陈伟. 多元客流视角下的中国城市网络格局 [D]. 长春: 东北师范大学, 2015. [Chen Wei. Spatial patterns of China's urban network from the perspective of multiple passenger flows. Changchun, China: Northeast Normal University, 2015.]
- [3] 钟业喜, 冯兴华, 文玉钊. 长江经济带经济网络结构演变及其驱动机制研究 [J]. *地理科学*, 2016, 36(1): 10-19. [Zhong Yexi, Feng Xinghua, Wen Yuzhao. The evolution and driving mechanism of economic network structure in the Changjiang River Economic Zone. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(1): 10-19.]
- [4] Neal Z P. From central places to network bases: A transition in the US urban hierarchy, 1900-2000 [J]. *City & Community*, 2011, 10(1): 49-75.
- [5] 郭倩倩, 张志斌, 师晶, 等. 中国西北地区城市网络结构的时空演变: 基于铁路客运流视角的分析 [J]. *城市问题*, 2019(9): 19-27. [Guo Qianqian, Zhang Zhibin, Shi Jing, et al. Spatial and temporal evolution of urban network structure of northwest China: Based on the perspective. *Urban Problems*, 2019(9): 19-27.]
- [6] Castells M. The informational city: Information technology, economic restructuring, and the urban-regional process [M]. Oxford, UK: Blackwell, 1989.
- [7] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, et al. Fast unfolding of communities in large networks [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, 2008(10): P10008. doi: 10.1088/1742-5468/2008/10/P10008.
- [8] De Haas H. Migration and development: A theoretical perspective [J]. *International Migration Review*, 2010, 44(1): 227-264.
- [9] Lu Y M, Liu Y. Pervasive location acquisition technologies: Opportunities and challenges for geospatial studies [J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2012, 36(2): 105-108.
- [10] Shaw S L, Yu H B. A GIS-based time-geographic approach of studying individual activities and interactions in a hybrid physical-virtual space [J]. *Journal of Transport Geography*, 2009, 17(2): 141-149.
- [11] 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, 242. [Xue Junfei. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on aviation network. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 23-32, 242.]
- [12] 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 [J]. *地理研究*, 2008, 27(4): 917-926. [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.]
- [13] 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 [J]. *地理研究*, 2011, 30(5): 785-794. [Zhong Yexi, Lu Yuqi. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on railway network. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 785-794.]
- [14] 马学广, 鹿宇. 基于航空客运流的中国城市空间格局与空间联系 [J]. *经济地理*, 2018, 38(8): 47-57. [Ma Xueguang, Lu Yu. Spatial structure and connection of cities in China based on air passenger transport flow. *Economic Geography*, 2018, 38(8): 47-57.]
- [15] 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.]
- [16] 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 Jiao'e, 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.]
- [17] 赵梓渝, 魏冶, 庞瑞秋, 等. 中国春运人口省际流动的时空与结构特征 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 952-964. [Zhao Ziyu, Wei Ye, Pang Ruiqiu, et al. Spatiotemporal and structural characteristics of interprovincial population flow during the 2015 Spring Festival travel rush. *Progress in Geography*, 2017, 36(8): 952-964.]
- [18] Li J W, Ye Q Q, Deng X K, et al. Spatial-temporal analysis on Spring Festival travel rush in China based on multisource big data [J]. *Sustainability* 2016, 8(11): 1184. doi: 10.3390/su8111184.
- [19] 魏冶, 修春亮, 刘志敏, 等. 春运人口流动透视的转型期中国城市网络结构 [J]. *地理科学*, 2016, 36(11): 1654-1660. [Wei Ye, Xiu Chunliang, Liu Zhimin, et al. Spatial pattern of city network in transitional China based on the population flows in "Chunyun" period. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(11): 1654-1660.]

- [20] 尹宏玲, 吴志强, 杨婷. 扎克瑞·尼尔世界城市网络测度方法评述及其启示 [J]. 国际城市规划, 2014, 29(6): 110-113. [Yin Hongling, Wu Zhiqiang, Yang Ting. Review and enlightenment of the method to measure the world city network of Zachary Neal. Urban Planning International, 2014, 29(6): 110-113.]
- [21] Nystuen J D, Dacey M F. A graph theory interpretation of nodal regions [J]. Papers of the Regional Science Association, 1961, 7(1): 29-42.
- [22] 赵梓渝, 魏冶, 庞瑞秋, 等. 基于人口省际流动的中国城市网络转变中心性与控制力研究: 兼论递归理论用于城市网络研究的条件性 [J]. 地理学报, 2017, 72(6): 1032-1048. [Zhao Ziyu, Wei Ye, Pang Ruiqiu, et al. Alter-based centrality and power of Chinese city network using inter-provincial population flow. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(6): 1032-1048.]
- [23] 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 [J]. 地理研究, 2017, 36(4): 647-660. [Zhao Ziyu, Wei Ye, 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 [J]. Geographical Research, 2017, 36(4): 647-660.]
- [24] Zachary N. Does world city network research need eigenvectors? [J]. Urban Studies, 2013, 50(8): 1648-1659.
- [25] 赖建波, 潘竞虎. 基于腾讯迁徙数据的中国“春运”城市间人口流动空间格局 [J]. 人文地理, 2019, 34(3): 108-117. [Lai Jianbo, Pan Jinghu. Spatial pattern of population flow among cities in China during the Spring Festival travel rush based on "tencent migration" data. Human Geography, 2019, 34(3): 108-117.]
- [26] 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.]
- [27] 赵梓渝, 王士君. 2015年我国春运人口省际流动的时空格局 [J]. 人口研究, 2017, 41(3): 101-112. [Zhao Ziyu, Wang Shijun. A spatial-temporal study of inter-provincial migration pattern during Chinese Spring Festival travel rush. Population Research, 2017, 41(3): 101-112.]
- [28] Neal Z. Differentiating centrality and power in the world city network [J]. Urban Studies, 2011, 48(13): 2733-2748.
- [29] 周强. 复杂网络社区发现算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020. [Zhou Qiang. Research on community discovery algorithms in complex networks. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.]
- [30] Girvan M, Newman M E J. Community structure in social and biological networks [J]. PNAS, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [31] Rosvall M, Bergstrom C T. Maps of random walks on complex networks reveal community structure [J]. PNAS, 2008, 105(4): 1118-1123.
- [32] Meo P D, Ferrara E, Fiumara G, et al. Generalized Louvain method for community detection in large networks [R]. The 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Cordoba, Spain, 2011.

Characteristics of intercity trip network structure of residents under different traffic modes: A case study of Spring Festival travel rush

ZHANG Rong, PAN Jinghu*, LAI Jianbo

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Spatial structure measurement of residents' intercity trip network based on multiple perspectives can be used to comprehensively describe the complex connection between cities. Based on the data of population flow from Tencent migration platform in 2018 during the Spring Festival in China and using the complex network analysis method and taking alter-based centrality and alter-based power as indicators, the structural characteristics of Chinese intercity trip network under the three traffic modes of aviation, railway, and highway were compared and analyzed. The results show that: 1) The number of routes connected by aviation is the smallest among the three modes of travel, and the average trip distance is the longest; the number of passengers by railway is the largest, followed by highway and aviation. 2) With regard to the maximum dominant flow, Beijing and Shanghai play the most important controlling role in the domestic aviation trip connection, followed by Chengdu and Chongqing. With regard to the railway trips, Beijing and Chengdu occupy absolute advantageous positions, and the highways mostly connect provincial administrative centers and the surrounding cities. 3) There are four types of cities based on the alter-based centrality and alter-based power: high alter-based centrality-high alter-based power cities, high alter-based centrality-low alter-based power cities, low alter-based centrality-high alter-based power cities, and low alter-based centrality-low alter-based power cities. The number of high alter-based centrality-high alter-based power cities is the largest in the aviation and railway travel network. The number of high alter-based centrality-low alter-based power cities is dominant in the highway travel network. 4) There are differences in the number of urban community detection clustering structures under different travel modes. Aviation, railway, and highway were clustered into 7, 8 and 10 urban communities respectively. Under the aviation travel mode, discontinuity between "communities" is clear. Under the mode of railway travel, agglomeration appears, and an obvious block distribution appears under the mode of highway travel. From the perspective of travel modes, the characteristics of urban network are also significantly different. The intercity flow of aviation travel showed a core-periphery structure with national hub cities as the core; train travel showed a core-periphery structure with the cities along the national railway artery as the core, and gradually decreasing to the hinterland cities; and the intercity flow of highway travel indicates the spatial pattern of local strong aggregation matching the population scale. The study of spatial structure of residents' intercity trip network under different travel modes can reveal the multiple spatial characteristics of population migration, residents' trip, and urban network from different perspectives, complement the results of existing studies based on single travel modes, and enrich the regional understanding of spatial relationships of Chinese cities.

Keywords: intercity trip network; urban network structure; population flow; Spring Festival travel rush; Tencent migration platform; China