

中国居民城际出行网络的空间结构特征

潘竞虎, 魏石梅, 张 蓉, 杨亮洁

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 利用腾讯迁徙数据构建居民城际出行网络, 分析了不同时段、不同交通方式下中国居民城际出行网络的空间结构特征以及主要城市群的对内、对外居民城际出行模式。研究发现, 2018年中国居民城际出行网络呈“东密西疏”空间分布格局, 形成以京、沪、穗—深、蓉—渝等高中心性城市为顶点的顶层跨区“钻石型”网络结构。“春运”时段城际出行的重心相较于日常出行更偏向于西南, 居民城际日均出行规模亦高于其他时段, 特殊节假日城际出行具有显著的空间邻近效应。不同出行方式下的出行人口、出行范围和出行交通网络差异显著, 航空、铁路、公路出行分别承担国家级、区域级和地市级城际出行的人口集散。主要城市群对内出行网络呈现“核心—邻近—边缘”空间格局, 以多中心双核出行模式为主, 对外出行网络则呈现“跨区—邻域—地方”的格局, 以单中心单核出行模式为主。

关键词: 城际出行; 网络结构; 出行模式; 腾讯迁徙; 中国

DOI: 10.11821/dlxb202210006

1 引言

居民城际出行是指居民为了满足某一生产、生活目的, 采用某种交通方式, 从出发城市(起点)到目的城市(迄点)完成行程的活动。居民的城际出行是生产要素在空间上重新集聚与扩散的重要推手^[1-2]。随着区域交通、信息基础设施一体化建设的不断推进, 愈发显著的“时空压缩”效应在提升居民可移动性的同时, 也使得城际出行呈现出常态化、规模化、复杂化等特征^[3]。信息流、技术流、资金流等跨越物理距离在城市间的频繁交换催生了新的空间组织逻辑——“流空间”, 其在重塑地理空间的同时, 也推动了城市空间网络的发展^[4]。在全球化和世界城市网络化的背景下, “流空间”逐渐代替“地方空间”, 成为当下区域和城市研究的热点议题, 居民出行所构成的动态网络对区域城市发展也产生了愈发深刻的影响。不同时间、地点、交通方式约束下居民出行的目的、出行的空间范围、出行的模式等有所差别, 所折射出的人口流动模式及其蕴含的地理空间关联特征也因此具有差异性。随着飞机、高铁等交通工具的全面普及, 具有目的性、时间性的居民出行不仅跨越了距离空间, 而且在特定时间、地点呈现出聚集特性, 使得城市间的联系越发紧密。尽管居民城际出行加强了区域间的交流与合作, 但由于社会发展的不稳定性 and 不确定性, 大规模的居民出行也容易加剧舆论、疫情等的爆发与扩散。尤其在新型冠状病毒肺炎疫情持续蔓延给全球经济带来巨大冲击的背景下, 认识和挖掘居

收稿日期: 2021-08-18; 修订日期: 2022-05-21

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, No.41661025]

作者简介: 潘竞虎(1974-), 男, 甘肃嘉峪关人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110011899M), 研究方向为空间分析与感知。E-mail: panjh_nwnu@nwnu.edu.cn

民出行背后的出行模式,不仅有助于摸清居民出行规律,而且对区域疫情防控决策和社会经济发展规划的制定有重要参考价值。

城市空间作为流要素的主要载体,基于人口迁徙“流数据”的居民城际出行近年来引起了国内外众多学者的关注。从研究角度来看,已有研究多从特殊的出行目的(如商务、旅游、通勤等)^[5-6]、特殊的出行时段(如日常、国庆黄金周、“春运”等)^[7-8]及特定的出行方式(如飞机、火车、汽车、私家车等)^[5,9-11]等方面展开。采用的研究数据,从早期的入户访谈、问卷调查或邮件调查等人工采集数据^[12-13]逐渐转变为基于GPS定位数据的公交刷卡、手机信令等签到数据^[14-15]。近年来,基于地理位置的服务(Location Based Services, LBS)技术记录的大规模人口迁徙足迹的多元化数据,如国外常用Twitter、Facebook等社交媒体数据^[16-17],国内常用百度、腾讯迁徙数据等,为居民出行研究提供了新的契机^[7,18]。研究的尺度涉及全球、区域、城市等^[19-22]。综合来看,多视角和多尺度的居民出行网络研究正在成为认识城市间复杂空间关系的重要途径。然而,现有的居民出行相关研究视角仍较为单一,或选取某一时段,或聚焦某一出行方式,或限于某个特定的城市群或地区,鲜见不同时段、不同交通方式、多城市群的全国性研究案例。其次,部分居民出行网络空间结构研究在分析中忽略了流的方向性,从而导致对城市节点间不对称关系的低评或高估。由于数据获取的多源性及时段选取的偏差性,使得不同研究所获得的居民出行规律及其背后的城市网络空间格局往往存在较大差异。

鉴于此,本文采用腾讯迁徙数据,从不同时段(全年、日常、特殊节假日、“春运”)、不同交通方式(航空、铁路、公路)及城市群不同出行形式(对内、对外)等多个视角出发,在构建居民城际出行网络的基础上,利用社会网络分析和GIS空间分析方法,从“点—线—网”等层面展开2018年全国居民城际出行网络空间结构特征与出行模式的挖掘,以揭示居民城际出行在不同时期、不同出行方式及不同空间尺度下的空间格局及规律,以期从区域人口集散的角度为区域一体化、扁平化协同发展提供科学参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文采用的人口迁徙大数据获取自腾讯位置大数据平台(<https://heat.qq.com/qianxi.php>),为2018年1月1日—12月31日的日迁徙数据。数据包括起(讫)点城市、迁徙规模、3种交通方式(飞机、火车和汽车)的迁徙比例等,共计214.9483万条,是通过腾讯旗下的各类用户应用软件(微信、QQ、腾讯地图、腾讯游戏、腾讯看点等)基于LBS技术获取的居民出行记录,涵盖全国346个地级行政单元(台湾省和海南省三沙市数据暂缺)。数据的抓取借助Python工具完成,对其进行了删重、重新取数及剔除0值等清洗处理。飞机、火车和汽车的人口迁徙规模通过不同交通方式下的迁徙比例和总迁徙规模获得。较百度、高德等迁徙数据,该数据具有覆盖范围广、居民出行规模精确度更高的特点,能在一定程度上避免对长、短途出行线路的低估或高估。本文采用无量纲测度的居民出行规模对居民城际出行网络进行构建与分析^[20],该数据已在揭示不同交通方式下的中国城市网络研究中得到了应用^[2,23]。不同时段包括全年(1月1日—12月31日,共365 d)、日常(选取没有任何特殊节假日的11月1日—12月10日,共40 d)、特殊节假日(元旦、清明、五一、端午、中秋、国庆等假期,1月1—2日、4月4—8日、4月28日—5月2日、6月15—19日、9月21—25日、9月30日—10月8日、12月29—31日,共34 d)及“春运”(2月1日—3月12日,共40 d);不同交通方式即航空、铁路、公路;城

城市群选取京津冀、长三角、珠三角、长江中游、中原、成渝、山东半岛、北部湾、海峡西岸、哈长、兰西及关中等12个发育较成熟的城市群，共包括204个城市。各城市群空间范围取自国家发改委批准的规划范围，并参考《2016年中国城市群发展报告》中确定的城市群空间范围^[24]。城市行政中心、行政区边界等矢量数据来自国家基础地理信息中心1:100万全国基础地理信息数据库 (<http://www.ngcc.cn/ngcc/html/1/391/392/16114.html>)。

2.2 研究方法

以中国346个城市为研究区，基于腾讯迁徙数据，从出行时段、出行方式及城市群对内、对外联系等视角构建居民城际出行网络，先从“点—线—网”层面展开网络空间结构特征的研究，再根据城市群域内城市间、城市群城市与国内城市间的居民城际出行网络对城市群对内、对外的出行模式进行挖掘，技术流程如图1所示。基于居民城际出行出发地—目的地 (Origin-Destination, OD) 矩阵对居民城际出行网络进行构建，采用社会网络分析和GIS空间分析方法对网络空间结构特征进行揭示和可视化。节点层面，通过加权重度、介数中心性、转变中心性、转变控制力等对城市节点在出行规模、中心性、城市等级等方面的特征进行刻画；联系层面，采用首位联系、城际关联优势度等对城际关联的层级结构及空间邻近效应进行反映；网络层面，选取网络密度、特征路径长度、平均集聚系数、网络重心等对居民城际出行网络的关联关系、空间集聚效应及重心迁移等进行体现。

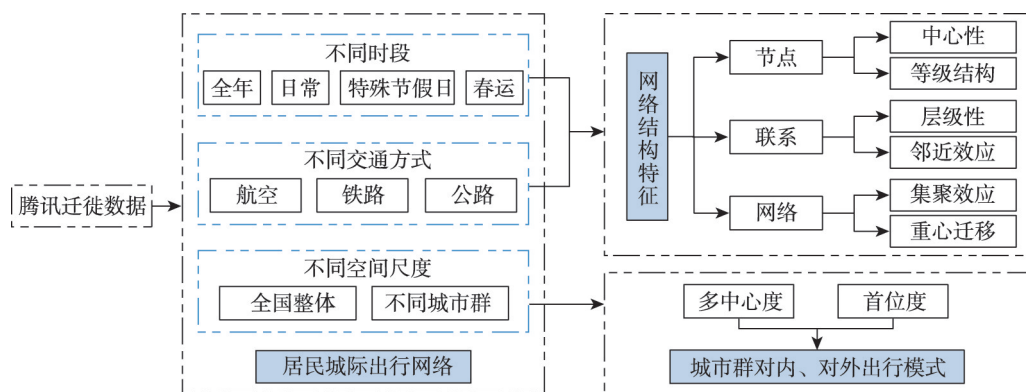


图1 技术路线

Fig. 1 Flowchart for this research

(1) 居民城际出行OD矩阵。针对全年、日常、特殊节假日、“春运”4个时段，以及飞机、火车、汽车3种交通方式，分别构建346×346居民城际出行OD矩阵，获得居民城际出行网络。另外，针对12个城市群，利用全年的居民城际出行数据，通过提取城市群对内及对外的居民城际出行OD矩阵，构建不同城市群对内、对外居民城际出行网络。

(2) 社会网络分析。从不同时段、不同交通方式和不同城市群对内、对外的居民城际出行出发，以城市作为网络中的节点，以城市节点间居民出行的方向和规模为关系来构建居民城际出行有向加权网络，采用社会网络分析中的加权重度、介数中心性、网络密度、特征路径长度和集聚系数等指标描述居民出行网络结构特征，各指标均采用Gephi网络分析工具完成。篇幅所限，具体含义和计算公式详见参考文献^[25-28]。

(3) 城际关联优势度。城际关联优势度测度的是城市关联的重要性，即任一对城市节点间的关联强度占网络总关联强度的比例，其值越大，表明城际关联优势度越高，公式为^[3, 29]：

$$RSI_{ij} = \frac{R_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R_{ij}}$$

(1)

式中： RSI_{ij} 为城际关联优势度， $0 \leq RSI_{ij} \leq 1$ ； R_{ij} 为城市*i*到城市*j*的居民出行规模。

(4) 网络重心。反映各个方向城市节点的居民出行规模处于平衡的位置，公式为^[30]：

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

(2)

式中：(*X*, *Y*)为网络重心坐标；(*x_i*, *y_i*)是节点*i*的经、纬度坐标；*w_i*是节点*i*的权重，用加权度表示。

(5) 转变中心性和转变控制力。转变中心性和控制力概念由Neal^[19, 31]提出，用以测度网络城市节点在不同功能方面的重要性。转变中心性主要体现为城市对各类资源的有效集散能力，而转变控制力主要刻画城市对各类要素有效流通的影响力^[8]。转变中心性和控制力由于在网络拓扑结构的限定上考虑了下一层级关联城市权重对于测度城市结果的影响，因此更具准确性。公式为^[21]：

$$AC_i = \sum_j (1 - d_{ij}) \times R_{ij} \times DC_j, \quad p_{ij} = R_{ij} / WDC_i$$

(3)

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

(4)

式中： AC_i 、 AP_i 分别为节点*i*的转变中心性和控制力； p_{ij} 为依存度参数； R_{ij} 为城市*i*到城市*j*的居民出行规模； WDC_i 为城市*i*的加权度。

3 结果分析

表1 不同时段居民城际出行网络的总体属性

Tab. 1 Overall attributes of residents' intercity travel network in different time periods

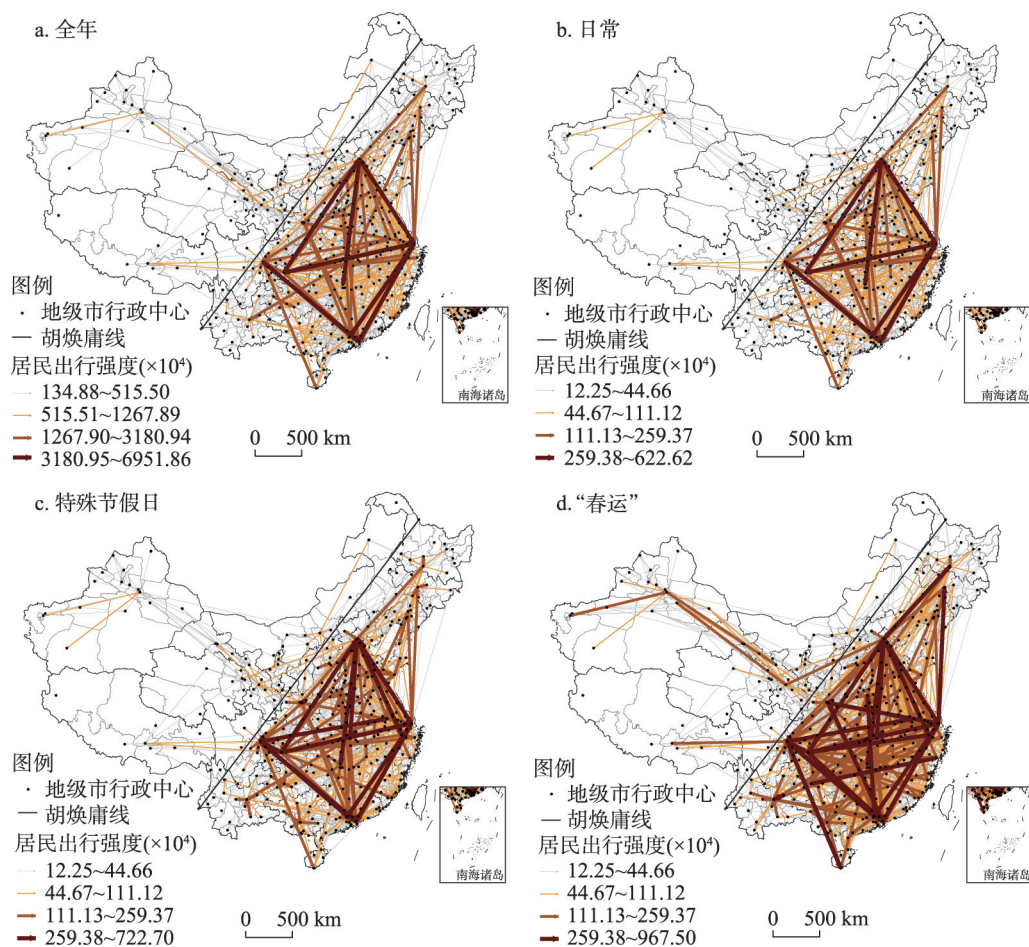
时段	线路(条)	网络密度	特征路径长度	平均集聚系数
全年	23829	0.199	1.801	0.420
日常	12540	0.105	1.908	0.401
特殊节假日	10987	0.100	1.930	0.450
“春运”	14106	0.118	1.903	0.442

3.1 居民城际出行网络的总体特征

3.1.1 不同时段的网络特征 从全年、日常、特殊节假日和“春运”4个时段居民城际出行网络的总体属性（表1）可知，“春运”、特殊节假日和日常时段的居民城际出行规模差异显著。2018

年中国居民城际出行规模中，“春运”、特殊节假日分别占15.72%、11.57%，“春运”的日均出行规模最高，其次为特殊节假日，是日常出行的2倍以上。从各时段网络的拓扑属性来看，全年居民城际出行涉及的城市区域更广，出行线路达2.38万条，网络密度最高，其次为“春运”、日常和特殊节假日。特征路径长度则呈相反趋势，说明随着居民城际出行网络中城市节点的增加，城市间的路径距离呈缩短之势，网络的通达性有所提高。特殊节假日网络的平均集聚系数高于“春运”、全年和日常时段，说明特殊节假日期间，居民的城际出行集聚程度更高，城市节点间的联系更紧密。

依据自然断裂法对全年和日常时段网络进行层级划分，特殊节假日和“春运”时段均以日常时段为准，结果如图2（共5个层级，第五层级为基座网络，由于线路众多，图中不展示，以保证显示效果）所示。就全年和日常时段网络而言，其空间格局基本相似，第一层级（深棕色线路）主要为上海↔重庆、重庆↔北京、北京↔上海、深圳↔上海、成都↔深圳、长沙↔北京、广州↔上海等跨区域以及广州↔佛山、深圳↔东莞、上海↔苏州、北京↔廊坊、西安↔咸阳等邻域的双向稳定居民出行；第二层级基本呈“梯



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作，底图边界无修改。

图2 2018年不同时段中国居民城际出行网络的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of residents' intercity travel network in different time periods in 2018

形”空间分布格局，为“钻石形”结构的扩散与填充，全年居民城际出行线路更为密集；第三层级体现为以国家级城市群核心城市为主导，辐射区域中心城市的跨区域大范围城际出行；第四层级体现的是区域中心城市对周边城市的辐射效应，“胡焕庸线”以东为高密度区，尤其在“钻石型”内部形成低流量的密集分布，西部地区仅形成以省会城市为核心、辐射邻域城市的低密度区。

相较于日常网络，特殊节假日和“春运”时段的大规模城际出行线路明显增多，且城市的人口承载压力普遍加大。第一层级的出行线路分别呈现比日常时段更为健壮的“钻石型”空间结构，尤其是“春运”时段，由于其复杂的出行目的（如返乡、求学、旅游、探亲等叠加），短、中、长途城际出行短时间内剧增，第二层级就已形成辐射省会城市的跨区网络。此外，除第五层级外，各层级的日常出行线路均低于特殊节假日和“春运”时段，如第一层级，日常、特殊节假日和“春运”时段的出行线路分别为25条、51条和69条，分别承载9.97%、11.37%、11.77%的城际出行规模。日常、特殊节假日和“春运”网络前20%的线路均达到各时段总出行规模的80%左右，换句话说，各时段的居民城际出行基本呈“帕累托分布”，也说明居民城际出行网络具有无标度特性。

3.1.2 不同交通方式的网络特征 从航空、铁路和公路居民城际出行网络的总体属性(表2)可知,铁路网络的线路密度最高,航空网络最低。铁路、公路、航空分别占出行总量的48.77%、31.38%、19.85%。特征路径长度公路>航空>铁路,而平均集聚系数公路>铁路>航空。通过与同规模的随机网络比较发现,三大网络均具备平均路径长度接近、集聚系数较高的特点,即三大网络均具有小世界特性。具体来看,公路网络尽管城市节点间的集聚程度最高,但其出行路径长度却也最长,说明公路网络更偏向短途出行,对于长途出行而言,其中转的几率最高。铁路网络的集聚程度虽不及公路网络,却具有最短的特征路径长度,是最灵活的出行方式。航空网络具有较为松散的城际连接和较短的特征路径长度,说明其侧重长途出行。此外,通过统计3种交通方式下出行距离的频数分布发现,当出行距离在1000 km以内时,公路与铁路网络存在着一定的协作与竞争关系,铁路交通虽较为稳定和便利,但公路交通对接城乡、拉动地方功不可没;当出行距离高于1000 km时,铁路与航空网络竞争激烈,主要得益于高铁的普及与提速,其对航空的旅行人数有所分流。

不同交通方式城际出行网络的空间层级结构如图3所示。航空和公路的居民城际出行强度均依据铁路的分级标准,图3中不展示第五层级线路。航空网络中(图3a),第一层级线路呈“钻石形”空间结构,其中,在京、沪、蓉—渝和穗—深等顶点城市中,重庆↔北京、重庆↔上海、上海↔北京的强人口出行在空间上形成航空“铁三角”;深圳↔上海、广州↔上海的较强人口出行体现出上海对穗、深的显著虹吸效应;成都↔深圳、广州↔成都则显现出成都作为西部城市窗口,在城际出行网络中承担的重要集散功能。在“钻石形”结构内部,长沙↔北京、成都↔南京的航空出行规模较高,长沙与北京之间的居民出行基本对称,但成都到南京的出行明显高于其逆向线路,表现为南京的较强吸引;此外,尽管长春↔上海呈现相对较弱的航空联系,但能够跻身于第一层级,说明长春作为东北地区的典型城市,承担着东部城市与东北地区重要的航空人口集散功能。第二层级线路在对“钻石形”结构进行填充的同时,分别由北京、上海、武汉、南京向东北地区扩张,由武汉、成都向西南地区扩张。第三、四层级线路均为依托东部核心城市发育的大区域范围较弱边缘航线,沿途进一步充实“钻石形”内部,尤其在西部地区形成了以乌鲁木齐为起、讫点的邻、跨区域出行。

铁路网络中(图3b),第一层级线路主要为由航空“铁三角”城市形成的“三角形”空间结构,武汉↔北京、长沙↔北京的强人口出行对其有所加固。其次,广州↔佛山、西安↔咸阳、深圳↔东莞、北京↔廊坊等近距离强出行规模也体现了城际轨道交通的强集散功能。第二层级主要呈现以“钻石型”结构为主体,由顶点城市向其周边城市较强集散的空間特征。此外,哈尔滨跻身第二层级,说明其作为区域门户城市,在东北铁路出行中承担着首要集散功能。第三、四层级线路相较于航空网络呈东北、西南、西北地区覆盖密度更高的“核心—边缘”分布特征,且其“沿途效应”明显。

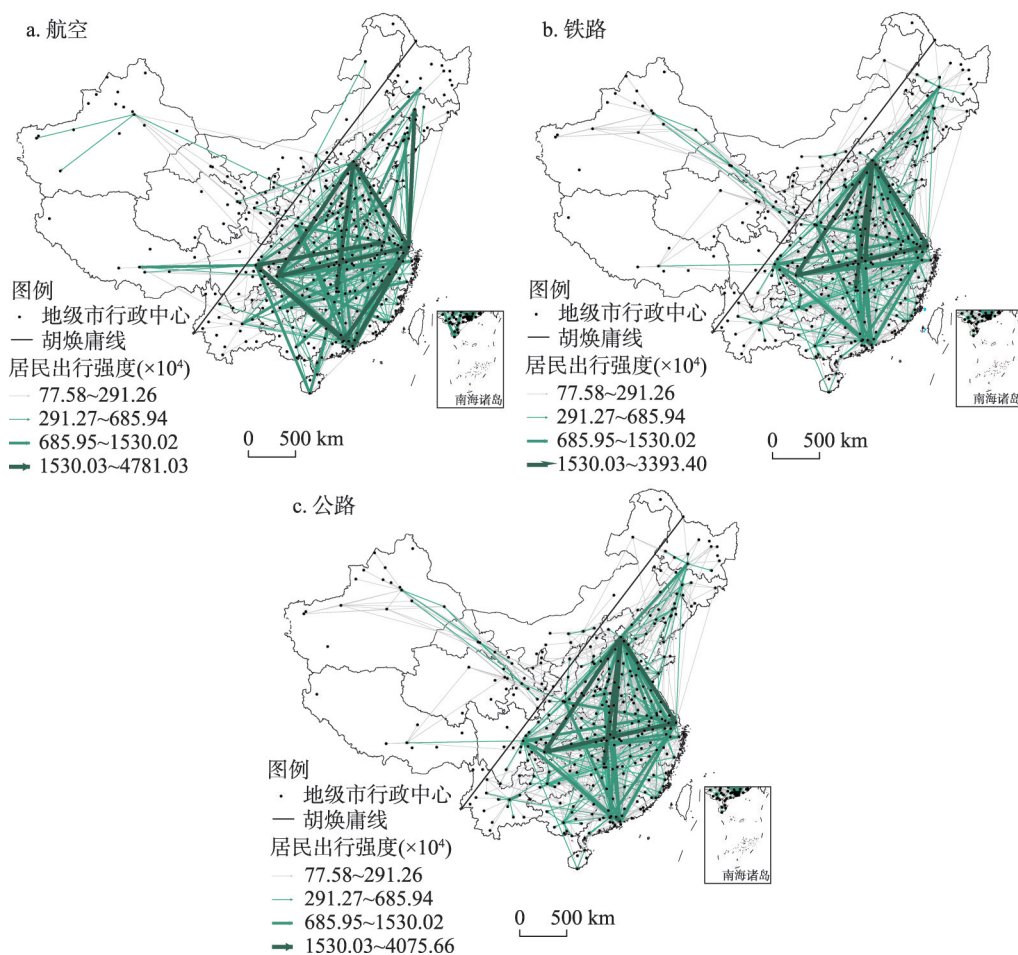
公路网络中(图3c),第一、二层级线路主要为围绕深圳、上海、广州、北京、西安、武汉、成都、郑州等国家及区域典型城市的强邻域居民出行。第三、四层级由于行政管辖边界的分割,在区域内建构起以城市群核心城市或省会城市为集散中心的居民出行网络。

表2 不同交通方式居民城际出行网络的总体属性

Tab. 2 Overall attributes of residents' intercity travel network under different traffic modes

交通方式	线路(条)	网络密度	特征路径长度	平均集聚系数
航空	16351	0.136	1.865(1.862)	0.301(0.139)
铁路	22631	0.189	1.812(1.826)	0.412(0.174)
公路	17717	0.148	1.947(1.861)	0.454(0.140)

注: 括号中的值为同规模随机网络对应的属性值。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作，底图边界无修改。

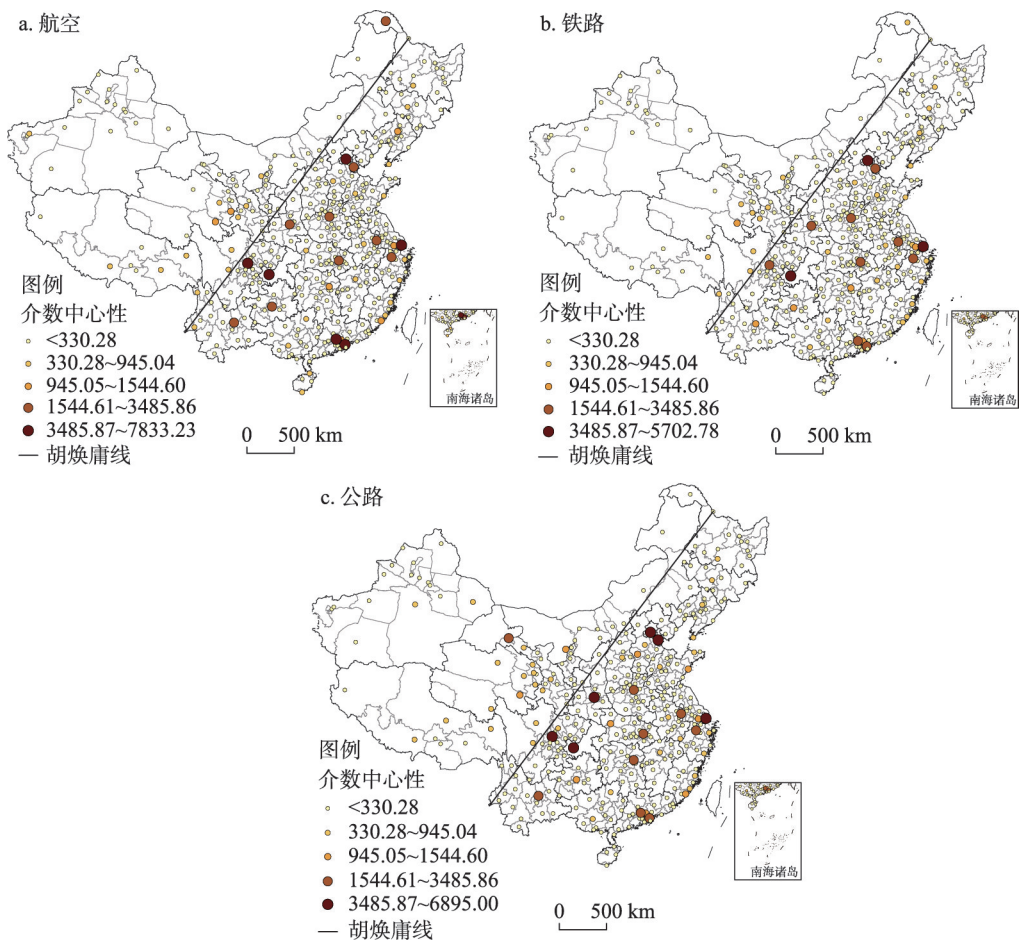
图3 2018年不同交通方式中国居民城际出行网络的空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of residents' intercity travel network under different traffic modes in 2018

3.2 居民城际出行网络空间格局

3.2.1 等级规模特征 (1) 中心性。通过介数中心性来测度不同交通方式网络中城市节点的中转和衔接能力，结果(图4)表明，航空、铁路和公路网络中，高介数中心性城市的数量较少且多为“胡焕庸线”以东城市，说明地级城市作为中介发挥“中转站”的能力在东、西部地区发展差距较大。高介数中心性(≥ 3485.87)城市，航空网络中共6个，均为“钻石型”空间结构的顶点城市；铁路网络中仅包含3个，为“三角形”结构的顶点城市上海、北京、重庆；公路网络中高介数中心性城市数量与航空网络相同，但空间分布差异明显，主要为“铁三角”及其沿线交通枢纽城市。上海是航空和铁路网络中介数中心性排名首位的城市，重庆则是公路网络中介数中心性排名首位的城市，在各自出行网络中承担着极其显著的人流集散和枢纽功能。

较高介数中心性(1544.61~3485.86)城市在三大网络中的数量相同，均为9个。航空网络中呈由东北至西南的分散分布模式；铁路网络中呈围绕“钻石型”结构的集中分布模式；公路网络中则呈由东南向西北延伸的较分散分布模式。中介数中心性(945.05~1544.60)城市在三大网络中分别呈“V”“X”“O”型空间分布，数量分别为6个、6



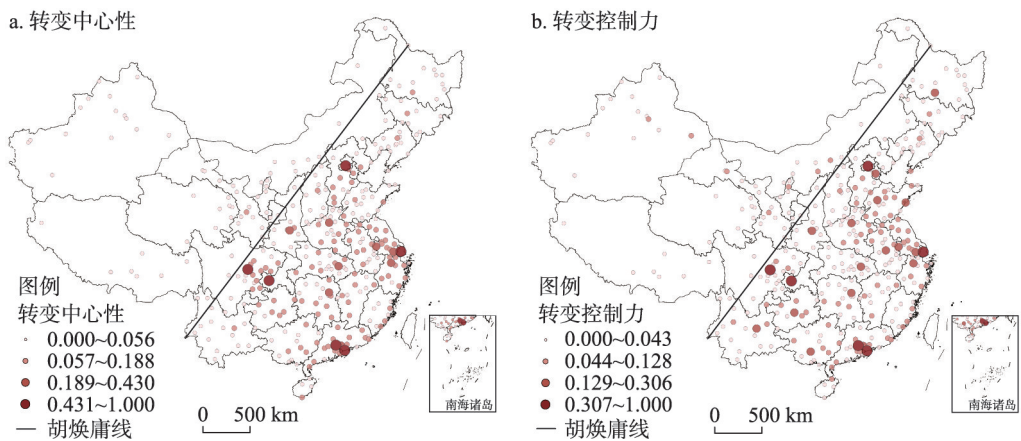
注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作,底图边界无修改。

图4 不同交通方式下中国城市节点的介数中心性
Fig. 4 Betweenness centrality of urban nodes under different traffic modes

个、9个。公路网络中，中介数中心性城市数量最多，主要是由于公路网络中城际出行距离较短、中转概率更高的缘故。较低介数中心性（330.28~945.04）城市在航空、铁路和公路网络中的数量分别为30个、32个、36个，在公路网络中具有更广的分布范围。

（2）等级结构。自 Neal^[19, 31]区分了城市中心性与控制力的差异以来，相关研究认为转变中心性与转变控制力共同决定了城市在网络中的地位^[21, 32]。为探究城际出行视角下城市的等级结构，以全年时段为例，计算网络的转变中心性（AC）及转变控制力（AP），结果如图5所示。中国地级及以上城市的AC和AP均呈金字塔型层级结构，第一至第四层级的城市数量分别为6/9/108/223、6/17/77/246。相较而言，多数城市的AC和AP处于同一层级，但也存在AC值层级高、AP值层级低的城市以及AC层级低、AP层级高的城市，如洛阳、唐山、渭南、天津等。总体而言，AC层级高的城市数量多于AP层级高的城市，且城市的AC与AP基本呈正相关关系，即对资源的集聚和扩散能力强的城市对资源的支配能力也越强。

基于AC、AP在不同等级的匹配关系将中国城市划分为高中心性—高控制力的典型城市（Quintessential Cities）、高中心性—低控制力的枢纽城市（Hub Cities）、低中心性



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作,底图边界无修改。

图5 2018年中国城市的转变中心性、控制力

Fig. 5 Alternative centrality and power of Chinese cities in 2018

一高控制力的门户城市（Gateway Cities）及低中心性—低控制力的边缘城市（Edge Cities）4种类型（表3），以识别城市在居民城际出行网络中的地位与属性特征。从居民城际出行网络的城市等级结构（图6）可知，国家级、区域级、地方级和地方性4个等级的城市数量分别为6个、17个、119个、204个，地方级枢纽及以上城市基本分布在“胡焕庸线”以东。以重庆、上海、北京、深圳、广州和成都为代表的国家级典型城市，承担着对外交流与合作、对内推动与引领的功能；区域级典型城市共9个，为东莞、佛山、杭州、南京、苏州、武汉、长沙、郑州和西安，是区域内对信息、资源等具有极强集散与支配能力的一类城市；地方级典型城市数量较多，有56个，其中，兰州是“胡焕庸线”以西唯一的地方级典型城市，反映了其在城际出行网络中的特殊地位。区域级枢纽城市0个，地方级枢纽城市共44个。区域级门户城市共8个，包括天津、济南、青岛、哈尔滨、合肥、贵阳、昆明及南宁；地方级门户城市共19个，主要包括华东、西南地区的部分城市及西北的部分省会城市。地方性边缘城市基数最大，在全国范围内呈较为均匀的分布，但由于“胡焕庸线”以东城市结构类型的多样性，东部地区的边缘城市将具有更多的关联与中转机会。此外，门户城市对邻近城市的高控制力，可能对区域内的城际出行形成一定约束，表现为对区域资源流的垄断性，即门户城市对多数小规模城市形成的路径依赖或区域锁定效应。枢纽城市作为促进或创建城际联系的关键，其数量较少，应注意提升，以增加城际要素的流动机会。

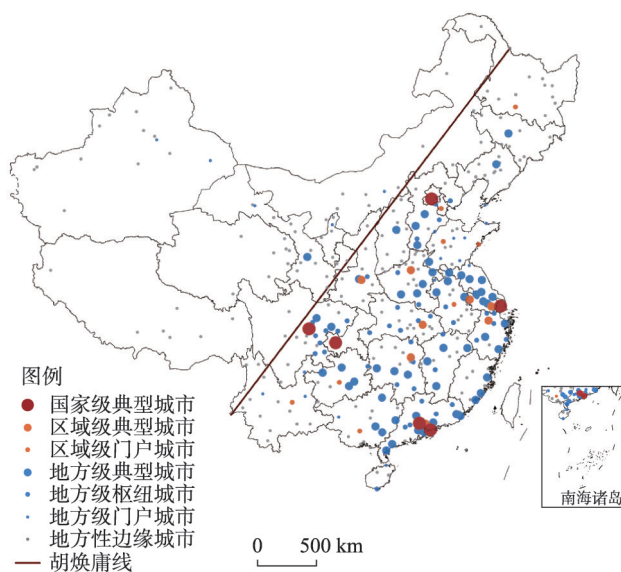
表3 城市等级结构划分标准及结果

Tab. 3 Classification standard and results of Chinese cities' hierarchical structure

城市等级	城市类别	转变中心性值域	转变控制力值域	城市数量(个)
国家级	典型城市	0.431~1.000	0.307~1.000	6
区域级	典型城市	0.189~0.430	0.129~0.306	9
	枢纽城市	0.189~0.430	0.044~0.128	0
	门户城市	0.057~0.188	0.129~0.306	8
地方级	典型城市	0.057~0.188	0.044~0.128	56
	枢纽城市	0.057~0.188	0.000~0.043	44
	门户城市	0.000~0.056	0.044~0.128	19
地方性	边缘城市	0.000~0.056	0.000~0.043	204

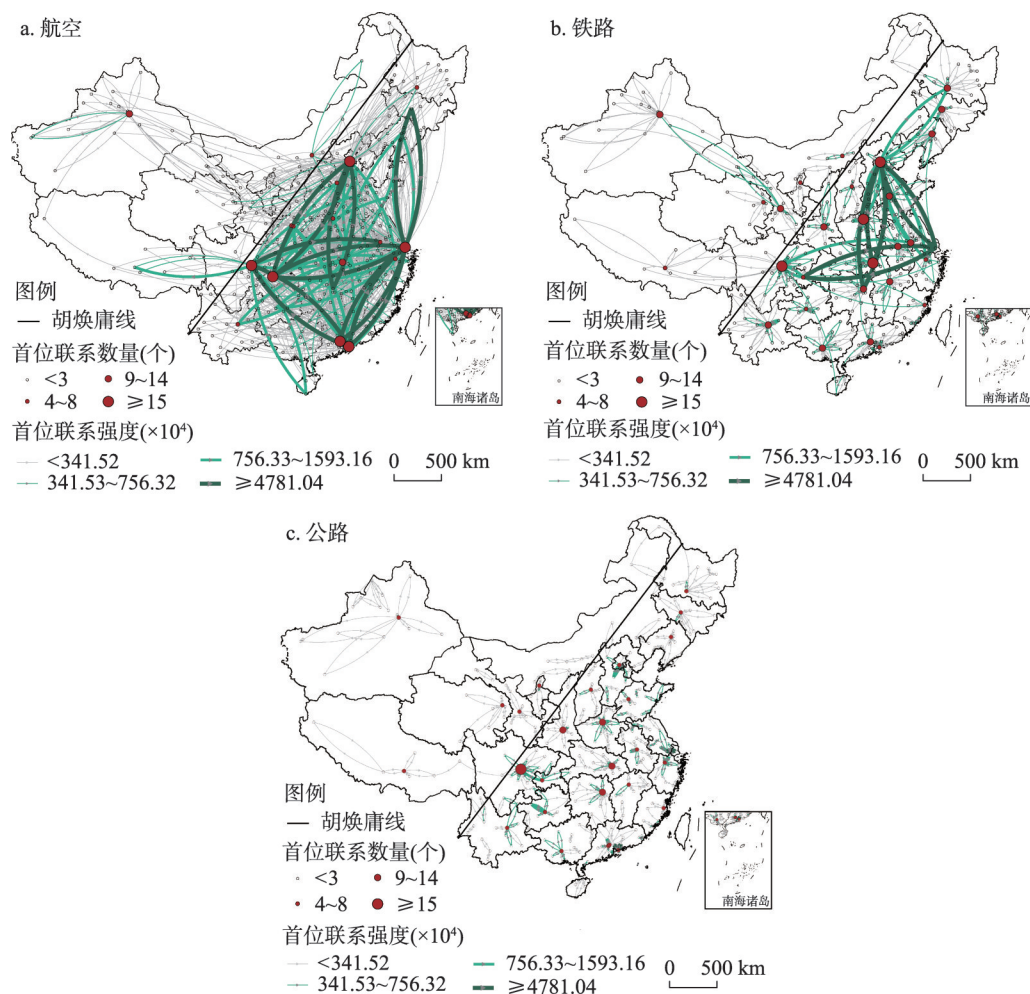
(3) 层级性。为深入挖掘中国居民城际出行的规律,对不同交通方式网络的首位联系流进行了提取,从其空间格局(图7)可以看出,航空、铁路和公路网络的首位流清晰刻画了“国家—区域—地方”的交通关联。航空在全国范围内撑起城际出行网络的骨架,铁路沿途串起区域间城市,而公路进一步向区域边缘延伸。航空首位流(图7a)多依赖中东部地区的典型城市向东北、西南和西北扩展。东北地区以长春、沈阳为首,分别与上海、武汉形成对称的人口集散格局;西南地区主要由重庆承接北京、上海的虹吸与辐射效应,成都则更多承担上海、广州的虹吸效应以及对西南区域的拉萨、三亚等形成辐射格局;西北地区由于其低人口密度和远离国家中心城市等原因,其首位流仅呈现北京对兰州、西宁,乌鲁木齐对喀什的较弱居民出行。铁路首位流(图7b)清晰勾勒出国家大动脉铁路沿线核心城市间的人口流动关联,基本呈以交通枢纽城市为核心的区域间对称出行流。以京沪、京九、京广和沪渝蓉线为首,途径的郑州、武汉、长沙等交通枢纽城市在“钻石形”内部相互交织,加强了区域的互动与交流;其次是京哈、兰新、成昆线等,沿线的省会城市不仅是区域、地方的门户和典型城市,而且是区域内“点—轴”系统的核心;山西、陕西、贵州等省份的首位流主要围绕省会,与省域内其他城市发育形成“点—轴”式集散格局。公路首位流(图7c)受空间摩擦和地区分割的影响,仅在局部省域内形成近距离“点—轴”式对称流动格局。其中,成都的首位联系城市数量最多,为16个,其次为长沙、武汉、郑州、西安和长春,均为区域典型城市。关联城市数在4~8个的主要为省会及以上城市,在首位流网络中主要发挥人口集聚作用。

3.2.2 优势关联特征 对比每条线路在全年、日常、特殊节假日和“春运”时段的城际关联优势度,选取最大值所在的时间段,得到4个时段的城际优势关联(图8),以分析不同时段城际出行的空间邻近效应。不同时段城际优势关联的空间分布各异,特殊节假日网络的空间邻近效应最为显著。其中,日常时段的优势关联线路共4885条,第一层级为由京、沪、穗—深、蓉—渝为顶点形成的“钻石形”对称优势关联结构;第二等级主要分布于“钻石形”结构内部,南部由成都向三亚延伸,北部由上海向沈阳、长春延伸;第三等级联系多分布于沿海地区,进一步向东北和西部地区扩展。特殊节假日时段共有4330条优势关联线路,近距离往返是该时段异于其他时段的最大特点。可能受假期时长、出行目的等因素的影响,各层级基本呈围绕省会城市,向省域二、三级城市往返的优势关联,空间邻近效应显著。“春运”时段共有7491条优势关联线路,高于其余时段的7119条,在空间上呈“胡焕庸线”以东的高密度不对称优势关联及由甘肃向新疆延伸



注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号
标准地图制作,底图边界无修改。

图6 2018年基于居民城际出行网络的中国城市等级结构
Fig. 6 Hierarchical structure of Chinese cities based on
intercity travel network in 2018



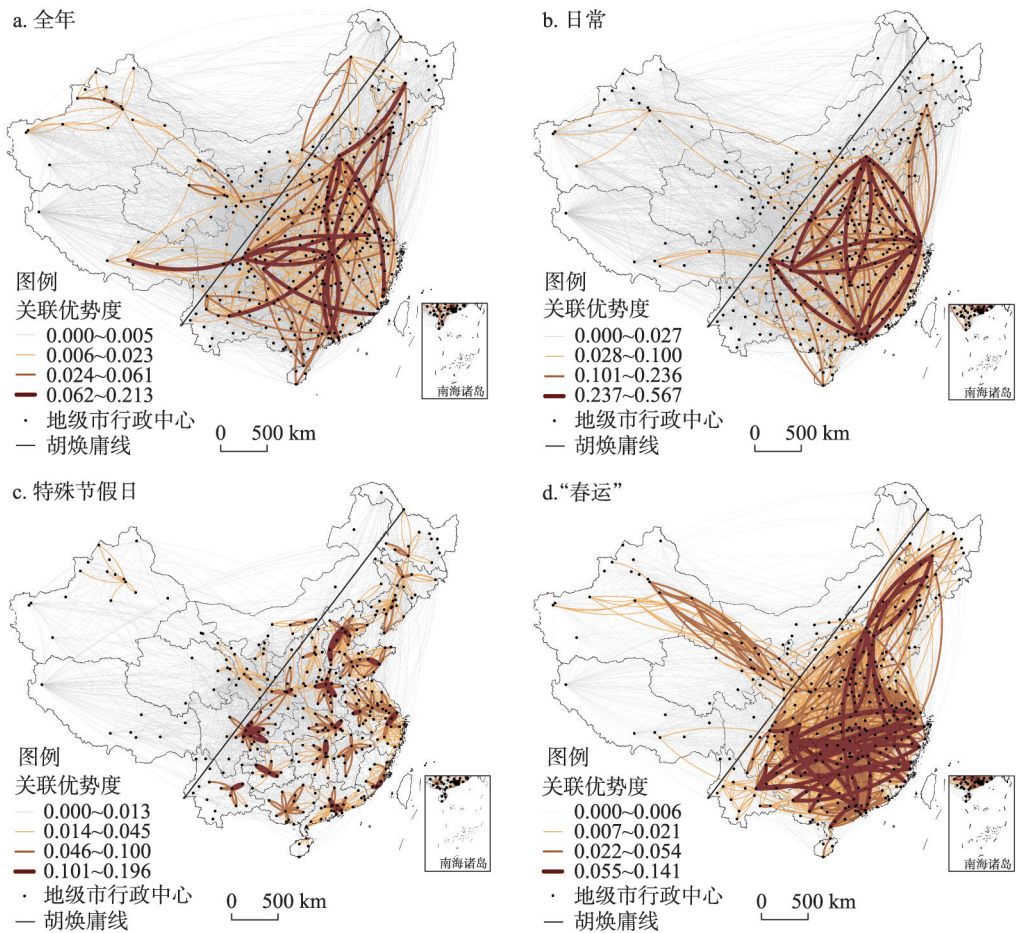
注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作,底图边界无修改。

图7 2018年不同交通方式下的首位联系格局

Fig. 7 Dominant connection pattern under different traffic modes in 2018

的较高密度优势关联。其余时段第一层级基本呈以武汉为中心,以陕—鄂为轴的对称分布,其他层级基本呈以国家中心城市为核心的大区域范围的非对称城际关联。

3.2.3 集聚效应 为反映航空、铁路和公路网络的空间集聚效应,本文采用模块度(Modularity)对城市簇结构进行划分,城市聚簇及其收缩子网如图9所示。根据城市簇所包含的城市数量和空间分布情况将其划分为跨区级簇(由空间上不相连接的省区构成)、邻区级簇(由2个及以上空间相连接的省区构成)和独立省级簇(由1个独立省份构成)^[7]。航空、铁路和公路居民城际出行网络存在极强的区域集聚效应,其城市簇结构在数量及其空间分布上差异显著,基于城市簇结构收缩的城市子网均为强连通图。航空网络的城市簇数量为7个,均为跨区级簇,在空间上呈分散跳跃式分布特征。其中,深圳、上海和北京所属的簇1、簇4和簇3,其城市数量分别为117个、80个和71个,是辐射范围最广、空间跨度最大的城市簇;铁路网络的城市簇数量为10个,包括6个跨区级簇、3个邻区级簇和1个独立省级簇,呈以区域中心城市为引领的较集聚跳跃式空间分布,其中,北京、西安和广州所属的簇1、簇2和簇4的城市数分别为63个、54个、40



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作,底图边界无修改。

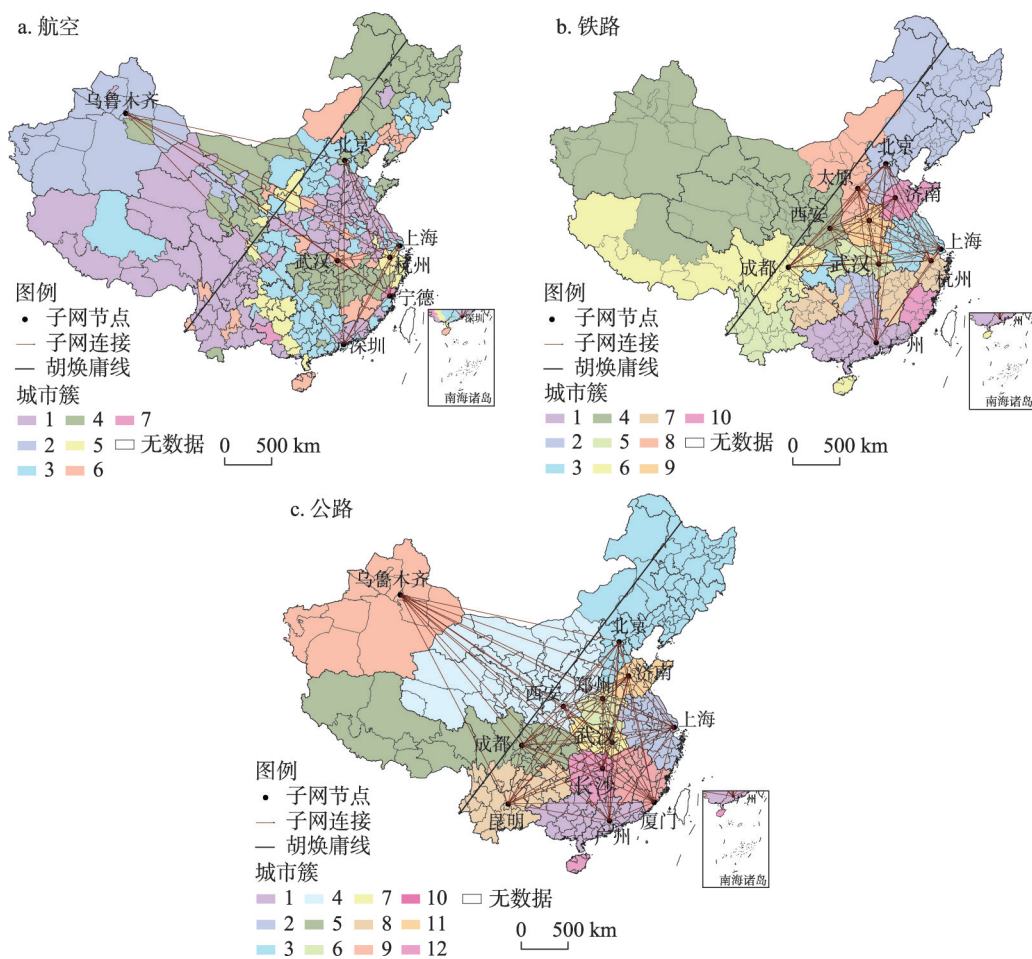
图8 2018年不同时段中国居民城际出行规模的优势关联

Fig. 8 Dominant links of residents' intercity travel scale in different time periods in 2018

个,是辐射华北—东北、华南和西北地区的3个最大城市簇;公路网络的城市簇数量为12个,包括7个邻区级簇和5个独立省级簇,呈集聚连片式空间分布特征。其中,以北京、上海、广州、成都、西安、昆明、厦门为龙头的7个邻区级簇(簇1~5,8,10)能够以区域核心城市为依托,在局部地区形成明显的集聚效应。

3.3 城市群居民城际出行网络特征

3.3.1 对内、对外出行特征 基于起、讫点均(或)在城市群内部的居民城际出行OD矩阵构建城市群对内(外)联系网络,12个主要城市群对内(外)居民城际出行网络的总体属性如表4所示。长江中游、中原和长三角是城市节点数排名前3的城市群,其居民城际出行线路也相对较多,分别含409条、384条、398条线路,但从网络密度来看,京津冀城市群高于珠三角城市群和山东半岛城市群,远高于中原和长江中游城市群。长江中游城市群域内的城际联系较为疏松,年出行规模仅高于兰西城市群。长三角城市群的年出行规模排名居首位,其次为珠三角和京津冀城市群,中原、成渝和山东半岛城市群也具有较高的出行规模。山东半岛、长三角、中原、北部湾等少数城市群的特征路径长度低于1,其他8个城市群的居民城际出行可能存在中转线路。京津冀、珠三角、山东半岛



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作，底图边界无修改。

图9 2018年不同交通方式网络的中国城市簇结构及其收缩子网

Fig. 9 Urban cluster structure and its shrinking subnet under different traffic modes in 2018

和成渝城市群的平均集聚系数均高于0.9，说明其域内城际出行网络更为紧凑，具有抱团特性。北部湾、长江中游、中原和海峡西岸4个城市群域内城际出行网络的集聚程度相对较低。

从不同城市群对外居民城际出行网络属性可知：长三角、长江中游、中原及海峡西岸等城市群具有较多对外联系。长三角城市群年出行规模稳居首位，珠三角、成渝、京津冀和长江中游等城市群居于第二等级，最低的依然是兰西城市群。城市群对外居民城际出行网络密度介于0.021~0.038，整体差别不大，12个城市群的对外连接均较稀疏，最高的是长江中游城市群，最低的是京津冀、兰西和关中城市群。珠三角、长三角、成渝及京津冀城市群的对外城际联系路径较短，说明其对外出行更为便捷。此外，仅长三角和海峡西岸城市群显现出较明显的集聚特征。

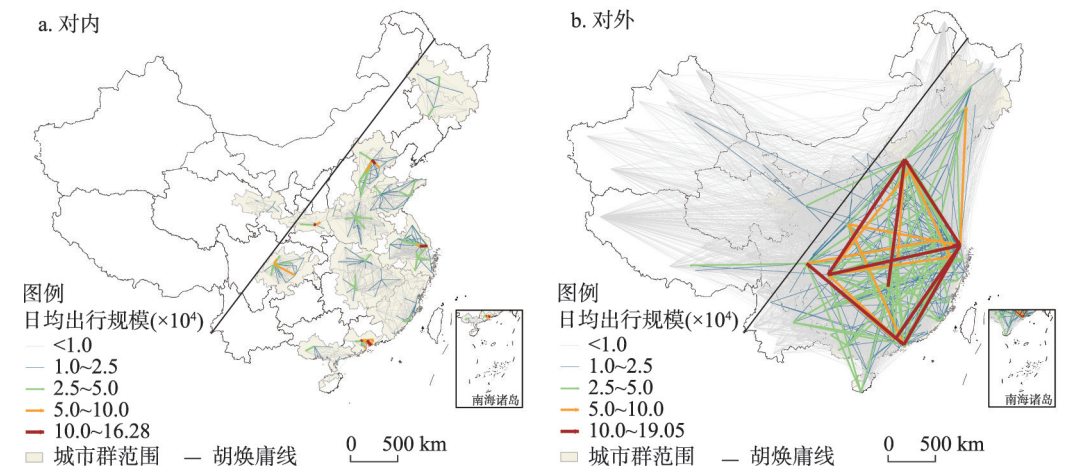
总体而言，长三角、珠三角、京津冀及成渝城市群具有较强的人口集散能力，其对内、对外城际出行均较强；中原、山东半岛及北部湾城市群域内联系紧密而对外联系较为松散；长江中游和海峡西岸城市群域内联系较松散，但对外联系较强；哈长、兰西及关中城市群对内、对外联系均较弱。

表4 不同城市群对内(外)居民城际出行网络的总体属性

Tab. 4 Overall attributes of internal (external) residents' intercity travel network of different urban agglomerations						
序号	城市群	节点(个)	线路(条)	网络密度	特征路径长度	平均集聚系数
1	京津冀	13(307)	153(2016)	0.981(0.021)	1.019(2.271)	0.981(0.003)
2	长三角	26(337)	398(4053)	0.612(0.036)	0.388(2.060)	0.802(0.717)
3	珠三角	9(265)	68(2070)	0.944(0.030)	1.056(2.043)	0.952(0.002)
4	长江中游	31(312)	409(3660)	0.440(0.038)	1.578(2.443)	0.647(0.111)
5	中原	30(310)	384(2811)	0.441(0.029)	0.585(2.621)	0.657(0.008)
6	成渝	16(305)	207(2078)	0.863(0.022)	1.137(2.140)	0.900(0.001)
7	山东半岛	17(232)	255(1456)	0.938(0.027)	0.162(2.760)	0.951(0.001)
8	北部湾	11(212)	74(992)	0.673(0.022)	0.834(2.591)	0.305(0.001)
9	海峡西岸	20(271)	186(2358)	0.489(0.032)	1.545(2.272)	0.657(0.519)
10	哈长	11(175)	82(1048)	0.745(0.034)	1.255(2.498)	0.802(0.001)
11	兰西	9(243)	56(1238)	0.778(0.021)	1.222(2.468)	0.838(0.001)
12	关中	11(273)	64(1542)	0.582(0.021)	1.418(2.403)	0.790(0.001)

注：括号中值为城市群对外居民城际出行网络对应的属性值。

12个主要城市群对内、对外日均居民城际出行网络的空间格局如图10所示。各城市群对内、对外网络分别呈“核心—邻近—边缘”“跨区—邻域—地方”的空间格局，城际出行强度从高到低依次为国家级、区域级、地方级城市群。域内网络中（图10a），第一层级共8条线路，仅出现在珠三角（广州↔佛山、深圳↔东莞）、长三角（上海↔苏州）、京津冀（北京→廊坊）和关中（西安→咸阳）城市群，呈核心发达城市到邻近城市的强城际出行特点；第二层级共23条线路，主要分布在京津冀、珠三角、成渝、长三角及关中城市群内，是域内核心城市与次级核心城市间的较强城际出行；第三层级共93条线路，分布在除兰西城市群的其他城市群内。其中，京津冀、长三角、珠三角、长江中游等城市群呈多核心辐射格局，成渝、中原、海峡西岸及关中等城市群呈“核心—边缘”辐射格局；第四层级线路较多，呈“钻石型”及其结构内部城市群内联系密集而其他城市群内联系稀疏的较弱关联特征；第五层级线路多为城市群内边缘城市间的联系。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4630号的标准地图制作，底图边界无修改。

图10 不同城市群对内(外)日均居民城际出行网络的空间格局

Fig. 10 Spatial pattern of internal (external) residents' intercity travel network of different urban agglomerations

对外网络中(图 10b), 第一层级线路共 14 条, 为长三角、京津冀、珠三角和成渝城市群核心城市间的跨区域强城际出行, 形成“菱形”空间结构, 内部由上海↔重庆、长沙→北京形成“十”字架构; 第二层级共 22 条线路, 除上海→长春的较强城际出行外, 其余线路基本分布在“菱形”内部, 关中与长三角、珠三角通过核心城市建立较强关联; 第三层级共 134 条线路, 体现为城市群核心城市间以及核心城市与周边省会城市间的城际出行; 第四层级共 463 条线路, 在“胡焕庸线”以东形成密集连接, 以西仅呈成渝、关中、兰西等城市群核心城市对周边省会及次一级城市的人口集散; 第五层级线路基本为城市群城市与国内经济较为落后以及交通不便城市间的城际出行。

3.3.2 出行模式 通过居民城际出行强度对城市群对内、对外网络的多中心度和首位度进行量化。多中心度, 即网络中排名第二至第六位城市的总加权重均值占首位城市加权度的比重, 值越高, 网络的多中心特征越明显^[33]。首位度, 常用网络中首位城市与次位城市总关联度的比值来表示, 值越高, 表明首位城市在网络中的地位越明显^[20]。然而, 在城际出行网络中, 城市关联度不足以区分首位城市的地位, 因此, 本文的首位度用城际出行的总强度来代替。城市群对内、对外居民城际出行网络的多中心度和首位度如图 11 所示, 城市群对内、对外网络的多中心度均值分别为 0.41、0.29, 首位度均值分别为 1.90、3.06, 基本呈对外网络多中心度更低而首位度更高的特点。

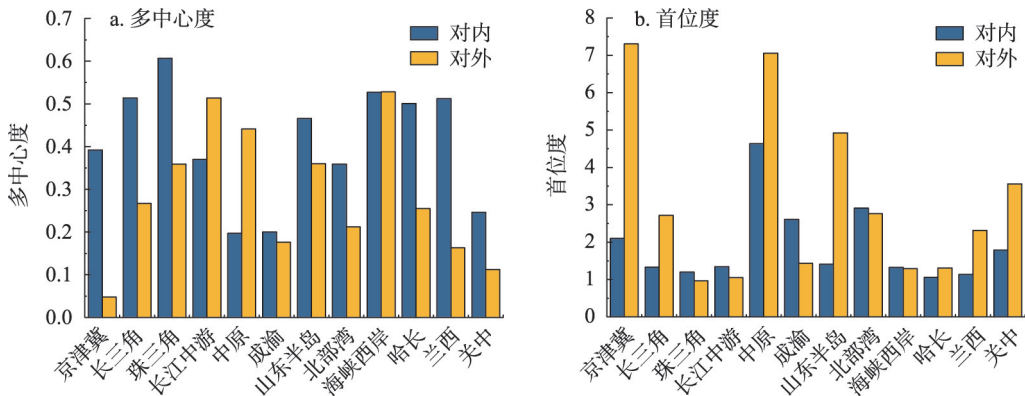


图 11 不同城市群对内(外)居民城际出行网络的多中心度和首位度

Fig. 11 Polycentricity and primacy of internal (external) residents' intercity travel network of different urban agglomerations

具体地, 城市群域内网络中, 多中心度高于均值而首位度低于均值的城市群包括珠三角、海峡西岸、长三角、兰西及哈长城市群, 由于域内城市跨省界组合及各省会城市集散能力相当等原因, 使得居民出行较难跨越省界阻隔, 因此在域内形成围绕各自省会城市的较均衡的人口流动格局。京津冀、中原、成渝及北部湾城市群的多中心度较高而首位度均高于均值, 其域内城际出行呈多中心, 但仍表现出以核心城市为引领的人口集散格局。城市群对外网络中, 海峡西岸、长江中游和珠三角城市群的多中心度高于均值而首位度低于均值, 说明其对外城际出行呈以多核心的对外关联格局, 无明显首位人口集散城市。京津冀、长三角、山东半岛、哈长、兰西和关中城市群的多中心度较域内低而首位度较域内高, 说明其对外城际出行的多中心效应并不明显, 区域核心城市承担着城市群对外的主要人口集散。

通过多中心性与首位度对城市群对内、对外出行模式进行划分。将多中心度 ≥ 0.50 的城市群视为多中心城市群, 多中心度 < 0.50 的为单中心城市群; 以首位度 ≤ 1.50 的为双

核城市群,首位度 >1.5 的为单核城市群。城市群域内居民城际出行被划分为单中心双核、单中心单核和多中心双核3种模式。单中心双核城市群包括京津冀和长江中游城市群,域内居民城际出行分别以北京、武汉为中心;单中心单核城市群包括中原、成渝、北部湾及关中城市群,分别以郑州、成都、南宁、西安为其人口集散中心,在域内形成“一家独大”的城际出行模式;多中心双核城市群数量最多,包括长三角、珠三角、山东半岛、海峡西岸、哈长和兰西城市群。

城市群对外居民城际出行亦被划分为单中心双核、单中心单核和多中心双核3种模式。单中心双核城市群包括珠三角、成渝和哈长。单中心单核城市群数量最多,除中原、北部湾及关中城市群对外网络的居民出行模式与域内网络的相同外,京津冀、长三角、山东半岛和兰西城市群分别由于其中心城市的跨区域强人口集散功能,使之呈单核心出行模式。多中心双核城市群包括长江中游和海峡西岸。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于腾讯迁徙数据,对2018年中国居民城际出行网络空间结构特征及主要城市群对内、对外出行模式进行了深入分析与挖掘,主要结论如下:

(1) 通过对比分析3种交通方式下居民城际出行的网络结构特征,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。不同类型出行方式揭示的城市网络特征存在较明显的差异,航空、铁路、公路城际出行分别形成国家级、区域级及地方级顶层网络空间结构。不同的居民城际出行方式对时空距离的响应不同,由此导致的出行人口数量、出行范围和出行交通网络也表现出显著的差异。

(2) 通过对比分析全年、日常、特殊节假日和“春运”的居民城际出行网络结构异同,从宏观尺度上揭示了不同时间段人口流动规律,并间接挖掘了节假日与日常不同出行特征所形成的城市网络特征。研究发现居民城际出行的强度重心分布在湖北省随州市境内,但“春运”的重心更偏向于西南,其居民城际日均出行规模高于其他时段。特殊节假日居民城际出行的空间邻近效应最为显著。

(3) 通过对城市群居民城际出行的分析发现,城市群对内、对外居民城际出行呈现“核心—邻近—边缘”和“跨区—邻域—地方”网络空间格局,层级性明显。主要城市群内城际出行多以省会城市为起(讫)点,呈多中心双核出行模式,对外城际出行则多呈单中心单核出行模式。

4.2 讨论

从多时段、多交通方式及不同空间尺度视角对中国居民城际出行网络空间结构进行研究,摒弃以往多从单一视角或单一流要素入手的缺陷,可综合、全面地揭示区域居民城际出行网络的空间格局及特征,为掌握区域居民城际出行规律及实现区域协同发展提供可靠支撑。通过比较全年、日常、特殊节假日和“春运”时段的居民城际出行网络发现,城际出行具有明显的时间差异特性。不同时间、特定时期居民城际出行的差异不仅体现在人口出行规模方面,还包括出行距离、出行模式等。“春运”及其他节假日时段的城际出行在短时间内会出现激增现象,但受假期时长影响,特殊节假日的城际出行更具空间邻近性。虽然与李涛等^[3]对中国2016年工作日与节假日居民出行网络的对比发现基本一致,但由于“春运”假期的特殊性,其空间邻近效应并不明显。此外,城际关联优

势流揭示出特殊节假日时段的优势出行线路基本集中在省域范围内,呈往返对称之势,进一步说明节假日居民城际出行多体现为目标单一的近域流动,回流效应明显。

本文基于同源流数据构建的不同交通方式居民城际出行网络更具系统性、可比性。航空、铁路、公路居民城际出行网络揭示出航空交通最具跨区域交织能力,在最大程度克服空间摩擦的同时,主要承担国家尺度居民城际出行的集散。铁路网络依赖京九、兰新、京沪、京广、陇海、京哈、京包、襄渝等国家铁路大动脉服务于区域城市间,最具灵活性,主要发挥区域尺度中、短途城际出行的集散。公路网络的局部地方效应最为显著,呈由区域中心城市向外辐散的格局,主要承担地方尺度城际出行的集散。区别于利用航线^[34]、铁路客运班列^[35]、汽车班次^[40]等数据构建的城市网络,由于其较难反映城际真实的客运流,相应地,网络结构的测度结果也存在一定差异。例如,由于航线、班次等对交通基础设施的高度依赖,使得区域城市网络的集簇特征与交通线路分布格局基本一致。

12个城市群对内、对外居民城际出行网络的空间结构特征在区域层面上进一步展现了居民城际出行的地理邻近性及省域边界的分割效应。如长江中游城市群,武汉、长沙和南昌虽为其域内核心城市,受行政边界的阻隔,域内城际出行基本围绕省会城市呈集散之势,核心城市间的互动并不强烈,对外城际出行亦呈多中心集散格局。此外,城市群城际出行网络的多中心度与首位度随着网络空间范围的增大而呈前者更低、后者更高的特点,说明在不同的空间尺度上,城市群核心城市所发挥的人口集散功能存在差异。

采用时空大数据分析居民出行空间特征时,数据的无量纲测度和相对指标要优于绝对数值所反映的特征^[3, 25]。本文所采用数据也是无量纲测度的人口出行规模,虽并非人口出行量的绝对数值以及出行方式的确切对应,但亦可从规模、结构、出行方式等方面反映城际出行网络的空间格局与特征。由于老人、儿童等特殊群体未使用关联APP的城际出行可能未被详细地记录,加之数据只记录了城市间的人口流动,又由于客户端的使用、中转等原因用户的行程可能被拆解,且一年的数据可能存在特殊性,上述数据缺陷会使得研究的结果不可避免地存在偏差,尤其体现在不同交通方式居民城际出行网络中,如在1400~1600 km距离范围内,选用铁路出行的人数略高于选用航空出行的人数。然而,在无法获得交通部门具体的客运量数据的情况下,基于腾讯迁徙数据从宏观层面(全国、区域)揭示的居民城际出行网络空间结构特征具有一定可靠性^[60]。本文从时段、交通方式及城市群(对内、对外)视角重点揭示了居民城际出行网络的空间结构特征,但对居民城际出行的过程、动力及影响因素等关注不足,对于各种交通方式组合出行后将出现何种综合影响,继而如何影响居民城际出行网络结构,还需深入分析。今后的研究可在获取更多年份数据的基础上,结合问卷调查、统计数据、大数据智能感知等手段,细致探究居民城际出行的时空特征及形成机制。

参考文献(References)

- [1] Hass H D. Migration and development: A theoretical perspective. *International Migration Review*, 2010, 44(1): 227-264.
- [2] 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. [张蓉, 潘竞虎, 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. *地理科学进展*, 2021, 40(5): 759-773.]
- [3] Li Tao, Wang Jiaoe, Gao Xingchuan. Comparison of inter-city travel network during weekdays and holiday in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(4): 833-848. [李涛, 王姣娥, 高兴川. 中国居民工作日与节假日的城际出行网络异同性研究. *地理学报*, 2020, 75(4): 833-848.]
- [4] Castells M. *The Informational City: Information Technology, Economic Restructuring, and the Urban-Regional Process*.

- New York: Blackwell, 1989.
- [5] Montis A, Caschili S, Chessa A. Time evolution of complex networks: Commuting systems in insular Italy. *Journal of Geographical Systems*, 2011, 13(1): 49-65.
- [6] Neal Z. The devil is in the details: Differences in air traffic networks by scale, species, and season. *Social Networks*, 2014, 38(3): 63-73.
- [7] Pan J H, Lai J B. Spatial pattern of population mobility among cities in China: Case study of the National Day plus Mid-Autumn Festival based on Tencent migration data. *Cities*, 2019, 94: 55-69.
- [8] 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. *Geographical Research*, 2017, 36(4): 647-660. [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. *地理研究*, 2017, 36(4): 647-660.]
- [9] Wang Jiaoe, Jing Yue. Comparison of spatial structure and organization mode of inter-city networks from the perspective of railway and air passenger flow. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(8): 1508-1519. [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. *地理学报*, 2017, 72(8): 1508-1519.]
- [10] Chen W, Liu W D, Ke W Q, et al. Understanding spatial structures and organizational patterns of city networks in China: A highway passenger flow perspective. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(4): 477-494.
- [11] Han Huiran, Yang Chengfeng, Song Jinping. Impact factors and differences in commuting efficiency between public transit and private automobile travel: A case study on the Beijing metropolitan area. *Geographical Research*, 2017, 36(2): 253-266. [韩会然, 杨成凤, 宋金平. 公共交通与私家车出行的通勤效率差异及影响因素: 以北京都市区为例. *地理研究*, 2017, 36(2): 253-266.]
- [12] Sun X D, Wilmot C, Kasturi T. Household travel, household characteristics, and land use: An empirical study from the 1994 Portland activity-based travel survey. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 1617(1): 10-17.
- [13] Xiao G N, Juan Z C, Zhang C Q. Travel mode detection based on GPS track data and Bayesian networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015, 54: 14-22.
- [14] Jiang B, Yin J J, Zhao S J. Characterizing the human mobility pattern in a large street network. *Physical Review E*, 2009, 80(2): 214-221.
- [15] Murakami E, Wagner D P. Can using global positioning system (GPS) improve trip reporting? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 1999, 7(2-3): 149-165.
- [16] Wong D W S, Huang Q Y. "Voting with their feet": Delineating the sphere of influence using social media data. *International Journal of Geo-information*, 2017, 6(11): 325-341.
- [17] Wei X B, Yao X A. Constructing and analyzing spatial-social networks from location-based social media data. *Cartography and Geographic Information Science*, 2021, 48(3): 258-274.
- [18] Xiang Xin, Shi Kaifang, Yang Qingyuan. Analysis of urban network structure in China based on Baidu migration data: Take the data of Spring Festival in 2015 and 2019 for example. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 46(4): 79-88. [向歆, 施开放, 杨庆媛. 基于百度迁徙的中国城市网络结构分析: 以2015年和2019年春运数据为例. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(4): 79-88.]
- [19] Neal Z P. Differentiating centrality and power in the world city network. *Urban Studies*, 2011, 48(13): 2733-2748.
- [20] Li Tao, Wang Jiaoe, Huang Jie. Research on Travel pattern and network characteristics of inter-city travel in China's urban agglomeration during National Day week based on Tencent Migration data. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(6): 1240-1253. [李涛, 王姣娥, 黄洁. 基于腾讯迁徙数据的中国城市群国庆长假城际出行模式与网络特征. *地球信息科学学报*, 2020, 22(6): 1240-1253.]
- [21] 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. [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. *地理学报*, 2017, 72(6): 1032-1048.]
- [22] Mou N X, Zheng Y H, Makkonen T, et al. Tourists' digital footprint: The spatial patterns of tourist flows in Qingdao, China. *Tourism Management*, 2020, 81: 104151. DOI: 10.1016/j.tourman.2020.104151.
- [23] Wang Lucang, Liu Haiyang, Liu Qing. China's City network based on Tencent's migration big data. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 853-869. [王录仓, 刘海洋, 刘清. 基于腾讯迁徙大数据的中国城市网络研究. *地理学报*, 2021, 76

- (4): 853-869.]
- [24] Fang Chuanglin, Bao Chao, Ma Haitao. China Urban Agglomeration Development Report in 2016. Beijing: Science Press, 2017. [方创琳, 鲍超, 马海涛. 2016 中国城市群发展报告. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [25] Mou Naixia, Ren Haonan, Zheng Yunhao, et al. Traffic inequality and relations in Maritime Silk Road: A network flow analysis. *International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(1): 40. DOI:10.3390/ijgi10010040.
- [26] Feng Ying, Hou Mengyang, Yao Shunbo. Structural characteristics and formation mechanism of spatial correlation network of grain production in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(11): 2380-2395. [冯颖, 侯孟阳, 姚顺波. 中国粮食生产空间关联网络的结构特征及其形成机制. *地理学报*, 2020, 75(11): 2380-2395.]
- [27] Wang Jiaoe, 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.]
- [28] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [29] Yang H R, Dijst M, Witte P A, et al. The spatial structure of high-speed railways and urban networks in China: A flow approach. *Tijdschrift Voor Economische en Sociale Geografie*, 2018, 109(1): 109-128.
- [30] Zheng Y H, Mou N X, Zhang L X, et al. Chinese tourists in Nordic countries: An analysis of spatio-temporal behavior using geo-located travel blog data. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101561. DOI: 10.1016/j.compenvurbysys.2020.101561.
- [31] Neal Z. Does world city network research need eigenvectors? *Urban Studies*, 2013, 3(12): 1-12. DOI: 10.1177/0042098013477702.
- [32] 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. [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. *国际城市规划*, 2014, 29(6): 110-113.]
- [33] Taylor P J, Evans D M, Pain K. Application of the interlocking network model to mega-city-regions: Measuring polycentricity within and beyond city-regions. *Regional Studies*, 2008, 42(8): 1079-1093.
- [34] Xue Junfei. Hierarchical structure and distribution pattern of Chinese urban system based on aviation network. *Geographical Research*, 2008, 27(1): 23-32, 242. [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, 242.]
- [35] Jiao Jingjuan, Wang Jiaoe, Jin Fengjun, et al. Impact of high-speed rail on inter-city network based on the passenger train network in China, 2003-2013. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(2): 265-280. [焦敬娟, 王姣娥, 金凤君, 等. 高速铁路对城市网络结构的影响研究: 基于铁路客运班列分析. *地理学报*, 2016, 71(2): 265-280.]
- [36] Wu Zhifeng, Chai Yanwei, Dang Anrong, et al. Geography interact with big data: Dialogue and reflection. *Geographical Research*, 2015, 34(12): 2207-2221. [吴志峰, 柴彦威, 党安荣, 等. 地理学碰上“大数据”: 热反应与冷思考. *地理研究*, 2015, 34(12): 2207-2221.]

Spatial structure characteristics of intercity travel network of Chinese residents: Based on Tencent migration data

PAN Jinghu, WEI Shimei, ZHANG Rong, YANG Liangjie

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

Abstract: Based on the Tencent migration data in 2018, the Chinese residents' intercity travel networks were constructed respectively from different time periods (annual, daily, special holidays, and the Spring Festival travel period), different travel modes (aviation, railway, and highway) and different urban agglomerations (inside and outside). Using the social network analysis method, the spatial structure characteristics of residents' intercity travel networks were explored and depicted from the perspective of "point-line-network", and the internal and external travel patterns of major urban agglomerations were summarized to reveal residents' intercity travel laws systematically and comprehensively. The results showed that: the residents' intercity travel network in 2018 presents a spatial pattern of "dense in the east and sparse in the west", forming a top-level cross-regional "diamond" network structure with high central cities such as Beijing, Shanghai, Guangzhou-Shenzhen and Chengdu-Chongqing as the vertexes. Residents' intercity travel in the Spring Festival travel period is quite different from that in other holidays. The weighted gravity center of the residents' intercity travel is more inclined to the southwest during the Spring Festival travel period. The daily average travel scale of the Spring Festival is higher than that of other periods. There are significant differences in residents' intercity travel population scale, travel range and travel transportation network under different travel modes. The aviation intercity travel, railway intercity travel and highway intercity travel are responsible for the population gathering and dispersion of intercity travel at national level, regional level and local level, respectively. The internal and external residents' intercity travel networks of urban agglomerations respectively show a spatial pattern of "core-hinterland-periphery" and "region crossing-neighboring-locality", with obvious significant hierarchy. Affected by administrative barriers, intercity travel within an urban agglomeration is more to the capital city as the origin or destination, showing a multi-center dual-core travel pattern, while the external intercity travel of the urban agglomeration is mostly single-center single-core travel pattern.

Keywords: intercity travel; network structure; travel pattern; Tencent migration; China