

# 东北地区人口流动与多元交通网络格局的 偏离和关联

李卓伟<sup>1</sup>, 王士君<sup>1\*</sup>, 程利莎<sup>2</sup>, 施响<sup>3</sup>, 关皓明<sup>1</sup>, 舒畅<sup>4</sup>

(1. 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024; 2. 河南大学地理与环境学院, 河南 开封 475004;  
3. 吉林大学东北亚学院, 长春 130015; 4. 东北师范大学数学与统计学院, 长春 130024)

**摘要:** 受限于个体流动数据的获取制约, 以往人口流动研究多采用交通网络强度来模拟城市间的人口流动强度, 忽视了二者之间的偏离。论文以铁路、公路车次构建交通网络, 以腾讯位置大数据的铁路出行、公路出行数据构建人口流动网络, 运用社会网络分析法、QAP模型, 对比分析两者之间的偏离和关联。研究发现: ①东北地区铁路人口流动和其交通网络格局均呈现出以“哈大”走廊为轴的南密北疏、东众西寡的特征。铁路人口流动网络结构较为分散, 铁路交通网络的极化效应明显。②公路人口流动和其交通网络的偏离较大。公路和铁路之间存在竞争和互补关系, 在铁路交通不太发达的地区, 公路人口流动强度和其交通网络强度较高。③人口流动与交通网络存在一定关联, 但人口流动受多方面因素影响, 综合联系网络模型则能更准确地模拟城市间人口流动。其他影响因素中, 经济联系、人口规模等因素对人口流动的影响不够明显, 而城市间的邻接关系对人口流动有显著影响。④铁路人口流动与其交通网络的关联程度较公路人口与其交通网络的关联程度高。论文定量说明了人口流动与其交通网络的相关程度, 为交通网络模拟人口流动提供了理论和实际操作层面的参考。

**关键词:** 人口流动; 交通网络; 偏离和关联; 社会网络分析法; QAP模型; 东北地区

交通基础设施作为经济、社会活动的基础, 承载着城市间大量人口和物质要素流动。人口在城市间的流动影响着地区间资源和劳动力的配置, 进而影响城市之间的等级关系和相互联系<sup>[1]</sup>。人口流动作为城市间要素转移的重要载体, 一直是学者们研究的重点。但城市间的日常人口流动数据获取难度较高, 而交通基础设施是人口流动的基础且结构相对固定, 交通基础设施流量就成为模拟城市间人口流动的理想替代。随着交通基础设施的革新, 城市间的人口流动变得更加频繁, 两者之间的偏离和关联情况越发复杂, 探究两者之间的关系对于深

入了解城市地域系统, 解构地区城市网络结构具有重要的理论与现实意义。

城市地域系统作为人类活动重要的载体, 一直是城市地理学研究的核心对象。随着全球化、信息化的推进和交通出行方式的进步, 城市间的相互联系加强, 城市间各要素的流动激增, 城市体系和城市空间联系系统开始变化, 流空间与地方空间的共存促使城市空间结构从等级化转向网络化<sup>[2-6]</sup>。众多中外学者利用基础设施、企业组织、人口流动、互联网联系等要素流刻画了不同地区、类型、尺度的城市网络<sup>[7-12]</sup>。随着网络研究的不断加深, 研究者们

收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2022-02-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171198, 42001117, 41801153); 中央高校基本科研业务费项目(2412020FZ001)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42171198, 42001117 and 41801153; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2412020FZ001.]

第一作者简介: 李卓伟(1994—), 男, 辽宁辽阳人, 博士生, 主要研究方向为城市地理学和城市网络。

E-mail: lizw198@nenu.edu.cn

\*通信作者简介: 王士君(1963—), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为经济地理学和城市地理学。

E-mail: wangsj@nenu.edu.cn

引用格式: 李卓伟, 王士君, 程利莎, 等. 东北地区人口流动与多元交通网络格局的偏离和关联 [J]. 地理科学进展, 2022, 41(6): 985-998. [Li Zhuowei, Wang Shijun, Cheng Lisha, et al. Differences and relationship between population flow and transportation networks in North-east China. Progress in Geography, 2022, 41(6): 985-998.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.06.004

逐步发现单一要素流城市空间联系所表现出的局限性,多元要素流研究开始兴起<sup>[13-18]</sup>。多元要素流的组成极富多样化,不同要素流所蕴含的内涵不尽相同,“轻重缓急”程度也会有所差异,其中人口流动被部分学者认为是生产要素在空间上重新配置的重要表现形式,同时其在特定空间范围内的移动一定程度上导致了社会、经济要素的重新集聚与扩散,导致资本、知识、信息等要素通过人口流动进而实现网络化的区域组织模式<sup>[19-20]</sup>,故人口流动在城市网络研究中具有重要意义。交通网络是连接城市的重要纽带,是区域发展的重要条件,对优化区域发展的空间秩序具有重要意义,交通网络也是城市间人流、物流的重要通道,是人口能够产生流动的基础条件<sup>[21]</sup>。

人口流动网络与交通网络间存在紧密关联和不可忽视的偏离。关联在于人口流动依托于交通网络而存在,良好的交通基础设施是人口流动的充分条件。偏离在于交通基础设施同时存在前瞻性和滞后性,实际承载人数和设定承载人数往往并不同期。以往研究中,受限于人口流动数据的获取难度,人文地理学者们对人口流动研究常赋予理想化假设,多采用交通网络强度来模拟地区间的人口流动网络<sup>[22]</sup>,如王姣娥等<sup>[23]</sup>在比较分析不同交通方式的空联系系统时,利用总载客量与班次相除的方法拟定航空、高铁和长途汽车的单次运量。但长途汽车存在“经停”“拼客”和“拼车”等现象,长途汽车的实际满载、半车、空车等情况难以预测,客运火车更是受大站小站、停靠时间、城市人口流动性等客观因素影响,理想化的假设必然与实际情况存在一定偏离。

近些年由于大数据的兴起,个体移动数据缺乏的障碍被跨越,部分学者开始聚焦于人口流动方面的研究,基于百度迁徙大数据的春运人口研究<sup>[24-25]</sup>、基于手机信令数据的大都市区范围划定<sup>[26]</sup>、基于微博签到数据的长三角人口移动网络研究等大数据研究为人口流动网络研究提供了思路和方法<sup>[27-28]</sup>。传统的统计检验方法难以对复杂的城市网络关系的矩阵数据进行检测,但随着QAP(quadratic assignment procedure)方法的引入,矩阵与矩阵之间的回归关系也可被深入探究。本文结合学者们对人口流动网络和交通网络的研究基础,依托大数据时代背景,借助新兴城市网络研究方法,对人口流动与其多元交通网络偏离和关联进行分析,测度二者间

偏离和关联程度,并尝试构建交通基础设施模拟日常人口流动的回归模型,为相关领域研究提供新的研究视角。

东北地区是中国重要的老工业基地、生态功能区,在中国经济社会发展的各个方面扮演重要角色。东北地区偏居一隅,内外部联系相对独立,铁路交通发达,高速公路网络密集,且高速铁路架构初步成型,交通网络特征鲜明。近30多年来,由“东北现象”到东北振兴,由“新东北现象”到东北再振兴,东北地区经济社会发展经历了多次转型过程<sup>[29]</sup>。在此过程中人口流动和交通网络起着重要的驱动作用,对其人口流动和交通网络进行解构,探讨其中的偏离和关联对于东北振兴具有重要意义。综上,本文以东北地区为研究区域,基于腾讯位置大数据和铁路、公路交通时刻表分别构建东北地区人口流动和多元交通网络,利用社会网络分析法,从城市节点、联系和整体网络解构东北地区城市网络格局,借助QAP模型,阐述人口流动和交通网络间的定量关系,深入探讨东北地区人口流动和多元交通网络的偏离和关联,以为相关研究提供理论和实际操作指导,为城市网络研究提供新的思路与方法。

## 1 数据来源与研究方法

### 1.1 数据来源

#### 1.1.1 人口流动数据来源

人口流动数据来源于腾讯位置大数据。腾讯位置大数据依托智能手机中的QQ、微信在内的众多腾讯APP,通过手机定位的方式,采用高精度算法获取用户行为轨迹。2018年平均每日定位次数超过400亿次,覆盖中国所有地区,可最大限度保障人口流动数据的真实准确。腾讯位置大数据以日为单位记录人口流动数量,对数据进行预处理后,可获得多个字段,包括city、cities、time、type、nums等有效字段。其中city表示人口流动的来源城市;cities表示目标城市;time为人口流动的时间(以d为单位);type表示人口流动的交通方式,包括air(飞机)、bus(汽车)、train(火车)3种类型;nums则表示在特定条件下,城市之间人口流动的总数。腾讯位置大数据可逐条获取人口流动过程中起始城市路径和人口流量,精度可达个人级别,并可区分人口流动过程中所使用的飞机、汽车、火车3种交通方式。

人口流动研究对时间尺度的选取极富敏感性,例如 1 d 数据会受到人口的通勤移动的误差影响,2 d 数据则受商务旅行的误差影响<sup>[30-31]</sup>。为描述常态化人口流动网络,尽可能减少误差,本文选择 2018 年 12 月 1—31 日,共计 31 d 的长序列人口流动数据。研究范围为东北地区(即黑、吉、辽三省及内蒙古东北地区的呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市和锡林郭勒盟),以地级市、盟、州(以下均称为市)为研究基本单元,共获取人口流动频次 2020.23 万人次。将 1 个月的人口流动数据除以天数,转化为 1 d 的人口流动数据,方便进一步研究(图 1)。

### 1.1.2 交通网络数据来源

交通设施是人口流动的基础,也是人口流动的载体,铁路、长途汽车、航空和轮渡是最常见的 4 种城际交通方式。就东北地区而言,只有辽宁部分城市沿海,在其内部交通联系中轮渡的人口流动承载量较小。航空在中长距离上才能提供充足的服务<sup>[32]</sup>,在东北内部交通网络中流量较低。东北内部铁路网络密度高,公路里程长,内部出行多以长途汽车和铁路为主,故本文交通网络和人口流动网络的关系探究集中于公路和铁路。选取 2018 年 12 月东北地区的铁路和长途汽车时刻表数据,以平均 1 d 内的往来班次频率表达东北地区交通城市网络。铁路数据来源于中国铁路客服服务中心 12306 网站(<https://www.12306.cn/>),长途汽车数据来源于欣欣旅游网(<http://www.cncn.com>)。针对一个城市出现多个火车站点和汽车站点的情况,将站点进行合并,进而将车站相互联系转化为城市间联系。

### 1.1.3 回归模型自变量数据来源

QAP 模型回归中的影响因素数据主要来源于 2019 年《中国城市统计年鉴》《吉林省统计年鉴》《黑龙江省统计年鉴》《辽宁省统计年鉴》和《内蒙古统计年鉴》,部分缺失数据在各市(州、盟)统计年鉴补充。

## 1.2 研究方法

将东北地区作为研究区域,以地级市(盟、州)作为基本研究单元。将城市之间相互联系的人口流、交通流作为网络关系,分别构建 41×41 的城市关系矩阵。为方便对比,将人口流动网络分为铁路人口流动网络和公路人口流动网络,交通网络则分为铁路交通网络和公路交通网络,共计 4 个城市网络矩阵。交通网络和人口流动网络均由节点、边和权重组成。节点是城市,边是城市之间的联系,权重则是城市之间联系的强度(交通流为运输频次,人口流为

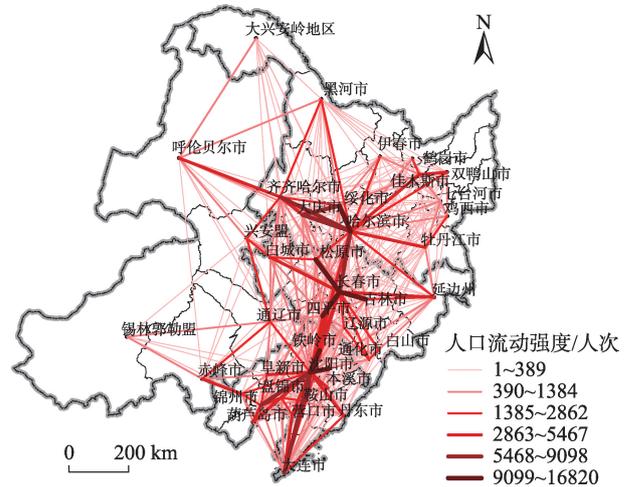


图1 东北地区日常人口流动网络

Fig.1 Daily population flow network in Northeast China

流动人次)。研究方法主要为社会网络分析法。

### 1.2.1 度中心性

度中心性是社会网络分析法中测量节点在网络中绝对地位最直接的指标。公式为:

$$D_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \tag{1}$$

式中:  $D_i$  为城市  $i$  的度中心性,其值越高,证明其在网络中的作用越明显;  $w_{ij}$  是指城市  $i$  与  $j$  之间的路径权重;  $n$  为城市网络中城市的数量。

### 1.2.2 中间中心性

中间中心性也是表达城市在网络中的地位,但与度中心性不同,中间中心度主要反映城市对资源的控制能力,如果一个城市处于网络中其他城市对的最短途径上,可认为其对资源控制能力较高,具有较高的中间中心度。公式为:

$$C_{ABi} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij(k)} \quad (j \neq k \neq i, i < j) \tag{2}$$

$$b_{ij(k)} = \frac{g_{ij(k)}}{g_{ij}} \tag{3}$$

式中:  $C_{ABi}$  表示中间中心性;  $g_{ij}$  表示城市  $i$  和  $j$  之间存在的捷径数;  $k$  为处于城市  $i$  和  $j$  最短路径上的城市;  $b_{ij(k)}$  表示  $k$  处于  $i$  与  $j$  之间的捷径上的概率。

### 1.2.3 社区结构

社区结构在社会网络研究中是用以刻画网络局部集聚体特征的研究方法,基于节点间的拓扑距离,网络可以被划分为若干社区。同一社区内部节点联系密切,社区之间联系则相对稀疏,不同社区间的城市联系相对稀疏,据此揭示东北地区交通和人口网络内部潜在结构特征。参考 White 等<sup>[33]</sup>提出

的“块模型”理论,利用 CONCOR(convergent correlations)迭代相关收敛法来区分城市网络社区结构,此过程可以通过 UCINET 6.0 软件实现。

#### 1.2.4 QAP 模型

QAP 是一种非参数检测方法,是解释交通网络和人口流动网络关联程度的理想模型。QAP 相关分析可以检测交通网络与人口流动网络的关系矩阵相关性;QAP 回归分析可以探究多个矩阵和人口流动网络矩阵间的回归关系。相关分析可佐证交通网络与人口流动的相关性,而 QAP 回归则用于探究网络与网络之间的关系及不同网络对人口流动网络的影响程度。

总结国内外关于中国人口流动格局、演变、特征和影响机制的研究成果,同时考虑回归操作的简便性和相关领域研究的可持续性,将影响因素适当简化,通过 7 类 8 个影响因素矩阵,基于 QAP 模型来综合探究交通网络与人口流动的关联程度。影响因素选择与模型构建过程详见表 1。

## 2 人口流动与多元交通网络的格局特征

### 2.1 多元交通网络格局特征

铁路交通网络整体呈现出南密北疏、东众西寡的特征,由于高铁所引发的时空收敛及廊道效应,“哈大”交通走廊也得以形成(图 2a)。辽宁、吉林铁路交通网络密度较高,而黑龙江、内蒙古东部密度较低。高速铁路对于地区铁路强度具有极化效应,铁路强度排名前 10 位的城市全部有高铁相连。“哈长沈大”4 个东北地区中心城市在网络中发挥着强烈集聚特性,枢纽位置显著,彼此联系密切,交通指向性明显。四平依托“哈大”走廊的良好“通过”位置,其铁路交通强度较高,发挥了中介作用。辽阳、葫芦岛、铁岭等一些经济发展较为缓慢的城市因交通地理位置优越,在铁路交通网络中层级较高,亦发挥着交通中介的作用。交通联系的强度与其所处的地理位置有关,处于地理位置边缘的城市铁路

表 1 QAP 回归分析研究假设

Tab.1 Assumptions of QAP regression analysis

序号	自变量选择	关系矩阵构建方法	影响因素选择原因	预期影响
1	交通基础设施因素	运用前文的方法,构建铁路交通网和公路交通网络矩阵	可达性是人口产生流动的基本要素,不同的出行方式对人口流动的促进程度有所差异。高铁的建设使得东北地区沿线城市间可达性大大提升,城市间人口流动更为频繁,故交通基础设施是人口流动的首要影响因素	正向
2	城市经济联系因素	$R_{ij} = \frac{\sqrt{P_i \times P_j}}{L_{ij}^2}$ 式中: $R_{ij}$ 表示城市 $i$ 与 $j$ 间的经济联系, $P_i$ 、 $P_j$ 分别表示城市 $i$ 、 $j$ 的 GDP 总量, $L_{ij}$ 表示城市间的空间距离	经济规模大的城市因集聚效应、规模经济等发展优势,对人的吸引力越高,发生人口流动的可能性也就越大。城市间的经济联系越高,则人口流动强度相对较高	正向
3	省际边界阻碍要素	将城市间存在省际边界阻碍的关系定义为 1,不存在定义为 0,进而将省际边界壁垒转换为城市矩阵	不同省份间的城市在联系过程中会遭遇行政边界阻碍,行政边界的制度壁垒在一定程度上限制了经济社会交流和其他跨区域要素流动,进而影响人口的自由流动	负向
4	城市邻接关系要素	将空间邻接的城市关系定义为 1,不邻接的定义为 0,转化为城市矩阵	由于全球化的快速推进,城市不再以个体形式存在,空间扩散的强度提升,空间邻近的城市接受扩散的影响,同质化加强,相互依赖性提升,人口流动更为频繁	正向
5	城市人口规模要素	将研究区内不同城市的人口两两相除,进而形成关系矩阵	城市的等级不单单可以用经济总量来衡量,城市人口总量也是表征城市级别的重要指标。人口越多的城市其公共服务设施、医疗配套设施更为完善,就业岗位越多,对其他城市人口的吸引力也越高,人口流动的可能性越高	正向
6	城市空间距离要素	城市间的空间距离	交通基础设施的革新,城市之间的人口流动逐步加强,但城市间的空间距离仍然是阻碍城市人口流动的重要影响因素,空间距离越长,则人口流动的可能性越小	负向
7	高铁交通网络因素	对铁路列车时刻表中的高速铁路列车(G/D/C 字头列车)的车次进行提取,参考铁路交通网络的构建方法,用高铁平均 1 d 内的往来班次频率构建城市间高铁交通网络矩阵	高铁对地区间的要素联系具有明显的时空压缩效应,在对比铁路人口流动和其交通网络关联时应给予关注	正向

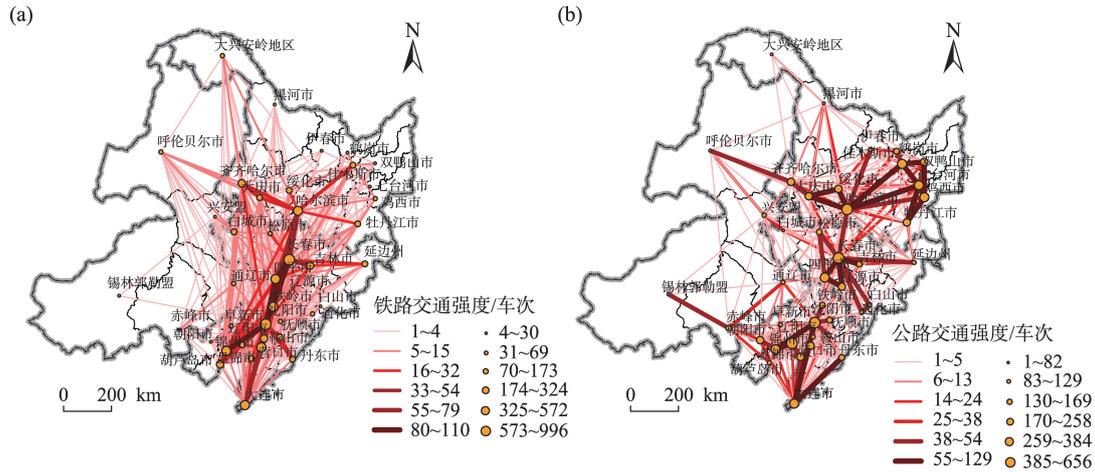


图2 东北地区多元交通网络联系拓扑图

Fig.2 Topology of multiple transportation networks in Northeast China

交通联系较少,如锡林郭勒、黑河等城市。值得注意的是,相邻的城市并不一定会产生铁路交通的强联系,例如辽西走廊地带东部的城市交通流强度较高,但与西部的城市铁路联系较低,强的交通联系在铁路流中并不能辐射落后地区,强者愈强、弱者愈弱的“马太效应”在此类走廊地区逐步体现。

公路交通网络则表现出多中心分区集聚的特征(图2b)。公路交通和铁路交通间存在明显的竞争与互补关系,铁路交通强度较弱区域的公路交通强度往往较强,如黑龙江铁路交通相对滞后,但公路交通较为发达。省会城市无论在公路交通还是铁路交通都牢牢占据前3名的位置,在省域范围内形成各自的辐射区域。东北地区4大中心城市间公路交通联系较少,公路交通更多发生于邻接城市间。公路交通会弥补铁路交通欠缺的短板,在铁路交通不太发达的地区,公路交通联系往往较强。黑龙江东北部的佳木斯、鸡西等城市铁路交通联系较少,但公路交通来往极为密切,填补了人口流动所需的交通基础设施的缺口。辽西地区亦是如此,东部和西部铁路联系稀少,但公路交通来往紧密。公路交通受空间距离和邻接因素影响,可在一定程度上克服省际壁垒,如赤峰与锦州、白城与兴安盟、齐齐哈尔与呼伦贝尔等城市之间跨省际的公路交通联系。

铁路交通和公路交通网络格局特征具有较大的差异性。铁路交通网络表现出明显的“哈大”走廊路径依赖,且东北三省各自中心城市表现出明显的聚集特征;公路交通网络则表现出明显的空间邻接依赖性,邻接的城市往往公路交通联系密切(图2)。东北地区铁路交通网络因原有轨道路线、新建高铁

线路,已形成“哈大”为轴的交通走廊。公路交通网络则依托东北地区公路基础设施和各地交通流动需求、组织运输等供需关系,形成邻接城市、短距离城市间的紧密联系。两大交通网络特征各异,公路交通在一定程度上弥补铁路交通的缺口,两者相辅相成,为东北地区的人口流动提供了基础保障。

### 2.2 相应的人口流动网络特征

铁路人口流动相较其交通网络更为均衡化,但南密北疏、东众西寡的特征依然存在(图3a)。辽宁铁路人口流动强度较其他地区频率稍高。不同城市间的人口流动强度差异较大,排名最高的沈阳日均近8.07万人次,而最低的大兴安岭则只有千余人次,除大兴安岭地区外,内蒙古东部与东北三省各市之间联系稀少,仅邻接城市间出现了人口流动的强联系。相较于铁路交通网络,铁路人口流动网络的结构更为发散,仅用交通网络强度模拟人口流动网络会造成城市间流动强度差距的放大。部分学者认为省会城市之间交通流量较高,人口流动也较强,本文研究发现,东北地区省内首位度第一与第二的城市间人口流动关系最为密切,相邻城市之间的联系其次,省会城市间的联系强度仅仅排在第三位。铁路交通强度低的区域并不意味着人口流动强度低,如黑龙江东北部地区的铁路交通联系稀少,但从铁路人口流动网络来看,其内部已经形成以佳木斯为核心的人口密切往来区域。

公路人口流动网络表现出大范围均质、小群落聚集的特征(图3b)。相邻城市间公路人口流动密切,跨区域联系较少,整体呈现出无规则连续的特征。公路与铁路的人口流动网络同样存在互补关

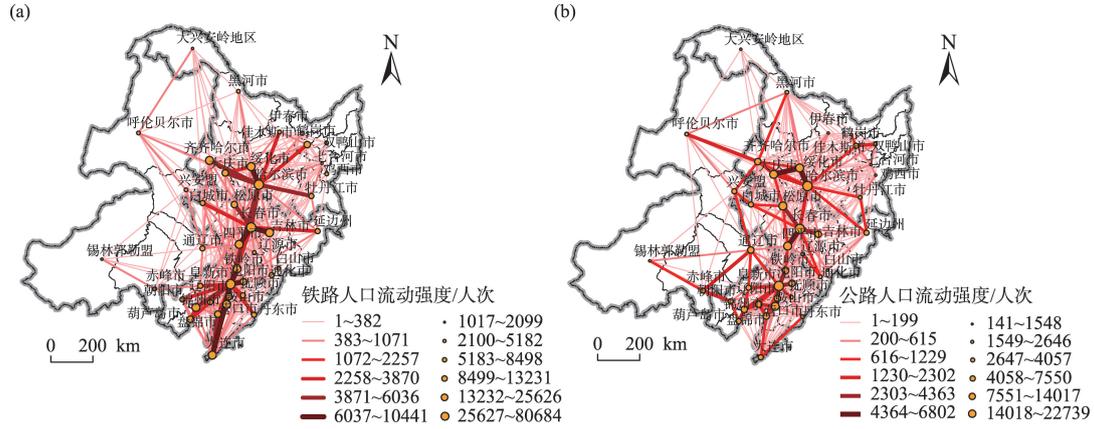


图3 东北地区人口流动拓扑图

Fig.3 Topology of population flow networks in Northeast China

系。三大省会城市的公路人口流动强度依旧最高，大连相对降低，且人口流动强度较高的城市都是紧邻省会的城市。沈阳日均人口流动达2.27万人次，最低的大兴安岭地区仅有100余人次。相对辽宁，黑龙江、吉林对于公路的依赖性更强。公路人口流动和公路交通网络结构差异较为明显，两者存在明显偏离。黑龙江东北部公路交通网络强度较高，但真实人口流动强度较交通网络明显降低。内蒙古东部地区与相邻的东北三省城市间存在公路人口流动的强联系，部分跨省城市间的公路人口流动也较为频繁，从图3b中可以看出，省际边界对公路人口流动网络存在一定制约，但城市间的相邻关系更起主导作用。

人口流动依托于交通网络，交通网络会对人口流动产生影响，但人口流动同时受个体出行意愿的影响，与交通网络格局必然存在一定偏离。总体来看，铁路人口日均流动量(44.20万人次)远高于公路(20.97万人次)，东北地区人口流动以铁路出行为主。相较于铁路交通网络，铁路人口流动网络对“哈大”走廊依赖性降低，更多是以4大中心城市为核心的中心集聚特征；相较于公路交通网络，公路人口流动网络同样表现出空间邻接依赖性，但其呈现出的无规则发散与公路交通网络结构差异较大。

### 3 人口流动与多元交通网络的偏离

#### 3.1 基于中心性的人口流动与多元交通网络的偏离

基于度中心性、中间中心性方法，可以比较人口流动与多元交通网络的偏离。人口流动不同于交通网络，人口流动需要考虑人的出行意愿，中间

中心性在人口流动研究中没有实质含义，故仅用度中心性来对其进行深入分析。

铁路交通网络度中心性排名中，由于高铁对地区的极化效应，度中心性前10名有7个城市属于辽宁(表2)，“哈长沈大”4个中心城市处于前5位置，四平依托“通过”位置，位居第4名。中间中心性排名中，辽阳、佳木斯、牡丹江的排名相较于度中心性排名有所上升，证明其在铁路交通网络中具备一定发展潜力。铁路人口流动度中心性排名与铁路交通网络排名大体相近，“哈长沈大”处于度中心性前4位置，而部分处于高铁“通过”位置的城市，如四平、辽阳、铁岭、葫芦岛等城市的排名有所下降。锡林郭勒、七台河、伊春、黑河、双鸭山等城市无论是铁路交通网络度中心性还是中间中心性排名均为倒数，且人口流动强度较低，已形成城市网络中的“孤岛”，亟需交通基础设施的投入摆脱现有困境。铁路人口流动网络与铁路交通网络的关联性较高，但因铁路交通存在极化现象，若仅从交通网络强度模拟人口流动，黑河、伊春、双鸭山、赤峰等边缘区域的铁路人口流动强度被缩小，“哈大”走廊、辽西走廊等“走廊地带”城市的人口流动强度被放大。

公路交通网络度中心性排名中，黑龙江相较其他两省，铁路交通网络稍差，对公路交通的需求也较高，度中心性排名前10的城市中黑龙江占据4个(表3)。“长沈哈大”4个中心城市在公路交通度中心性排名中牢牢霸占前4名的位置，东北地区西部城市的公路交通度中心性排名较低。中间中心性排名中，松原、大庆、阜新等城市相较于度中心性排名大幅提升，极具公路交通发展潜力，且上述城市铁路交通并不发达，发展公路交通可加强与其他城市的

表2 东北地区铁路人口流动及其交通网络中心性排名

Tab.2 Centrality rankings of railway population flow network and transportation network in Northeast China

排名	铁路交通网络		铁路人口流动 度中心性	排名	铁路交通网络		铁路人口流动 度中心性
	度中心性	中间中心性			度中心性	中间中心性	
1	沈阳	沈阳	沈阳	22	延边	丹东	延边
2	长春	大连	哈尔滨	23	通辽	鹤岗	通化
3	哈尔滨	鞍山	长春	24	呼伦贝尔	阜新	本溪
4	四平	哈尔滨	大连	25	鸡西	赤峰	朝阳
5	大连	长春	四平	26	通化	呼伦贝尔	通辽
6	锦州	辽阳	鞍山	27	松原	抚顺	丹东
7	铁岭	四平	锦州	28	抚顺	白山	阜新
8	鞍山	锦州	铁岭	29	阜新	营口	辽源
9	辽阳	葫芦岛	吉林	30	大兴安岭	盘锦	呼伦贝尔
10	葫芦岛	兴安盟	绥化	31	朝阳	大兴安岭	黑河
11	吉林	铁岭	齐齐哈尔	32	兴安盟	朝阳	赤峰
12	齐齐哈尔	佳木斯	营口	33	白山	松原	伊春
13	大庆	绥化	大庆	34	赤峰	延边	双鸭山
14	佳木斯	齐齐哈尔	辽阳	35	辽源	辽源	鸡西
15	营口	牡丹江	葫芦岛	36	鹤岗	鸡西	兴安盟
16	本溪	大庆	抚顺	37	双鸭山	双鸭山	白山
17	绥化	通辽	松原	38	黑河	七台河	鹤岗
18	丹东	本溪	佳木斯	39	伊春	黑河	七台河
19	盘锦	白城	牡丹江	40	七台河	伊春	锡林郭勒
20	牡丹江	通化	盘锦	41	锡林郭勒	锡林郭勒	大兴安岭
21	白城	吉林	白城				

联系。公路人口流动度中心性排名与其交通网络排名差异较大,3大省会城市度中心性排名依旧最高,但大连的排名降低明显,绥化、四平、松原等紧邻省会的城市公路人口流动度中心性排名明显上升。黑龙江东北部城市的公路人口流动度中心性相较公路交通度中心性有着明显的降低,可见,运用公路交通网络来模拟人口流动会产生一定偏离。

### 3.2 基于社区结构的人口流动与多元交通网络的偏离

运用社区结构方法从结构上探究不同网络中的小社区,进而揭示东北地区交通网络和人口流动网络内部联系结构的偏离。人口流动与其交通网络均具有显著的社区结构特征,为方便比对其偏离程度,将各网络分为7个社区(图4)。铁路与公路各自社区呈现出不同的状态,但各社区的构成与城市区位具有较高的拟合度,各社区均较大程度遵从省级行政边界,部分相邻城市跨越省级行政边界连为同一社区,跨区域隔空组成的社区较少。

铁路人口流动和其交通网络的社区结构形态相似。铁路交通网络由于“哈大”走廊的极化效应,

沈阳和铁岭被划分至以吉林省为主要构成的社区1当中,通化和白山被划分至以辽宁省为主要构成的社区3当中。但铁路人口流动则表现出更强的省际壁垒,社区构成更多以省内城市为主,内蒙古东部地区则更多与相邻城市间构成社区,受东北三省经济、交通辐射的影响,内蒙古东部地区内部间并未产生交通与人口流动的强联系。

公路人口流动和其交通网络的社区构成偏离程度较高。公路交通网络形成的社区结构割裂严重,但大体遵守相邻城市共同组建社区的特征,公路人口流动凝聚性相对较强,社区结构特点更为鲜明。内蒙古东部地区分属于不同的社区,不同城市与相邻的东北三省城市间形成紧密的社团。从图4d可以看出,黑龙江呈现以哈尔滨、牡丹江为界的東西侧各自组团的社区结构特征,中部地区海拔差异与生态保护限制了两側城市间的沟通发展,东西向各自联系密切但相互联系不足。从社区结构的相似与异同现象可以发现,人口流动与交通网络存在关联亦有偏离,故对两者间关系进行定量探究具有一定意义。

表3 东北地区公路人口流动及其交通网络中心性排名

Tab.3 Centrality rankings of road population flow network and transportation network in Northeast China

排名	公路交通网络		公路人口流动 度中心性	排名	公路交通网络		公路人口流动 度中心性
	度中心性	中间中心性			度中心性	中间中心性	
1	长春	哈尔滨	沈阳	22	松原	白城	白城
2	沈阳	沈阳	长春	23	抚顺	四平	兴安盟
3	哈尔滨	大连	哈尔滨	24	丹东	吉林	大连
4	大连	长春	绥化	25	鹤岗	伊春	延边
5	锦州	松原	四平	26	铁岭	锦州	葫芦岛
6	七台河	大庆	大庆	27	本溪	抚顺	呼伦贝尔
7	四平	兴安盟	鞍山	28	通化	七台河	通化
8	佳木斯	阜新	松原	29	阜新	本溪	辽源
9	鸡西	通辽	锦州	30	辽阳	辽阳	双鸭山
10	盘锦	黑河	盘锦	31	通辽	丹东	本溪
11	鞍山	赤峰	齐齐哈尔	32	伊春	佳木斯	丹东
12	大庆	朝阳	辽阳	33	葫芦岛	鸡西	黑河
13	双鸭山	呼伦贝尔	营口	34	白山	鹤岗	牡丹江
14	营口	铁岭	通辽	35	兴安盟	双鸭山	七台河
15	辽源	延边	铁岭	36	延边	白山	白山
16	朝阳	鞍山	吉林	37	白城	盘锦	鹤岗
17	绥化	齐齐哈尔	抚顺	38	呼伦贝尔	营口	锡林郭勒
18	牡丹江	通化	佳木斯	39	黑河	葫芦岛	鸡西
19	齐齐哈尔	绥化	赤峰	40	锡林郭勒	大兴安岭	伊春
20	吉林	辽源	阜新	41	大兴安岭	锡林郭勒	大兴安岭
21	赤峰	牡丹江	朝阳				

## 4 人口流动与多元交通网络的关联

### 4.1 人口流动与多元交通网络的关联

运用QAP回归分析方法,将人口流动网络矩阵作为有偏变量,将第1~6类共计7个影响因素作为无偏变量进行分析,研究人口流动与交通网络之间的联系。将随机置换次数定为2000次,计算出决定系数( $R^2$ )为0.651,调整后决定系数(Adj  $R^2$ )为0.650,即7个影响因素矩阵可以解释人口流动网络矩阵的65.0%,回归效果显著(表4)。回归拟合概率( $P$ 值) $< 0.001$ ,采用单尾检测方式,概率越趋近于0,显著水平越高<sup>[34-35]</sup>。在相同条件下,单独用铁路交通网络、公路交通网络与人口流动网络分别进行回归分析,得到的调整后决定系数(Adj  $R^2$ )分别为0.465和0.420。结果表明,人口流动与交通网络存在一定关联性,铁路交通网络模拟人口流动的效果略强于公路交通网络,但人口流动受多方面因素影响,将交通网络与多类要素网络结合构建的综合联系网络模型能更为准确地模拟城市间的人口流动。

从QAP模型的回归结果来看,各影响因素中铁

路交通网络、公路交通网络和城市邻接关系在99%置信水平上显著,城市经济联系、城市人口规模和省际边界阻碍在95%置信水平上显著。而城市空间距离未通过90%置信水平检测。这可能是因为,东北地区铁路、公路交通网络较为发达,随着高速铁路、高速公路等交通基础设施的完善,东北地区人口流动已逐步跨越城市间空间距离的障碍,故空间距离对人口流动网络的影响不够显著。剩余6个影响因素除省际边界阻碍外,对城市人口流动均为正向影响,省际边界对于人口流动仍有一定阻碍。在65.0%的可能下,城市间铁路交通网络强度增加100%,人口流动强度将会增加50.0%。同理,公路交通、邻接关系、城市经济联系、人口规模、省际边界阻碍分别增加100%,则人口流动强度将分别增加24.7%、25.1%、6.5%、4.1%、-9.8%。从上述结果来看,铁路交通网络、公路交通网络与人口流动网络之间的影响关系最为显著,城市的邻接关系会增加人口流动的可能性。城市经济联系、人口规模对东北地区人口流动也有正向促进作用,不同于人口迁徙,人口产生流动的因素较为多样,人口日常流

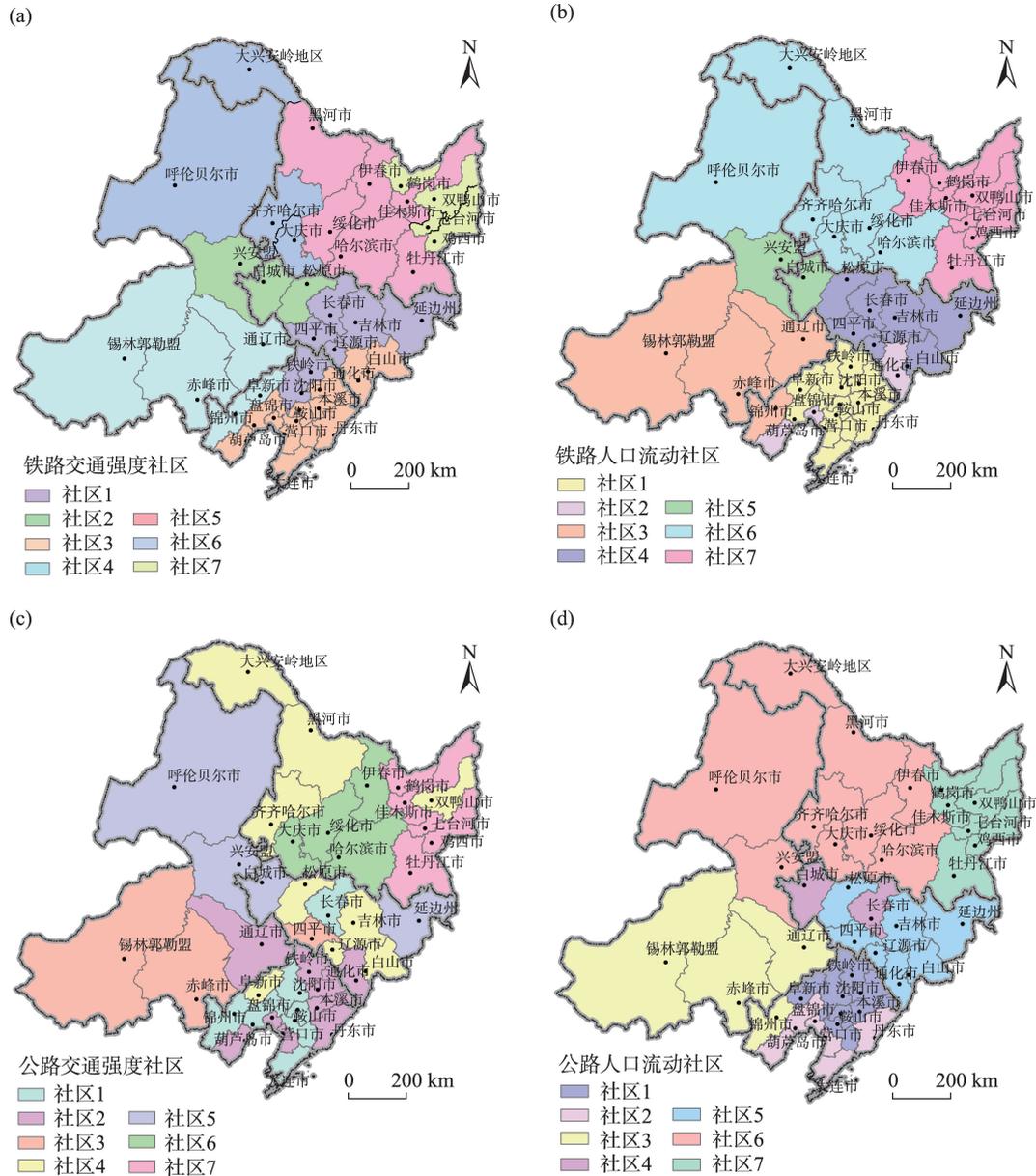


图4 人口流动与多元交通网络社区结构比较

Fig.4 Comparison of population flow network and multiple transportation network community structure

动不一定是经济原因,经济往来和人口规模对人口迁徙的意愿影响较大,但对日常的人口流动的影响效果不够明显。单一的交通网络强度难以准确表达真实的人口流动,利用QAP方法和综合网络联系模型既能相对准确地模拟城市间人口流动,又能挖掘各影响因素对人口流动网络的影响程度。

#### 4.2 铁路人口流动与其交通网络的关联

QAP 相关分析可以检验铁路人口流动和其交通网络的相关关系,选择 5000 次随机置换计算出系数为 0.742(置信度达 99%),证明两者的相关性较高。但相关并不意味着线性回归关系,还需要 QAP

回归来证实两者的线性回归关系,将铁路交通网络和第 2~6 类影响因素作为无偏变量加入模型,同时考虑到高速铁路所带来的时空压缩效应,添加第 7 类高铁交通网络因素,综合探究铁路交通网络对铁路人口流动的影响,具体见表 5。调整后决定系数为 0.644,即以上 7 个影响因素矩阵可以解释铁路人口流动的 64.4%,除城市空间距离显著性水平稍低外,6 个影响因素置信度均大于 95%。当铁路交通网络、城市经济联系、城市人口规模、省际边界阻碍、城市邻接关系和高铁交通网络 6 个影响因素分别增加 100%,则铁路人口流动强度将分别增加

表4 人口流动与多元交通网络等影响因素的  
QAP回归结果

Tab.4 QAP regression results of multiple transportation networks and other influencing factors and population flow networks

影响因素	标准化 回归系数	非标准化 回归系数	显著性 水平P
回归截距	0	-292.228	
铁路交通网络	0.500	65.846	<0.001
公路交通网络	0.247	38.732	<0.001
城市经济联系	0.065	0.046	0.011
城市人口规模	0.041	45.041	0.021
省际边界阻碍	-0.098	-320.316	0.001
城市邻接关系	0.251	1133.405	<0.001
城市空间距离	0.021	0.082	0.225
决定系数( $R^2$ )		0.651	<0.001
调整后决定系数(Adj $R^2$ )		0.650	<0.001

56.3%、3.7%、7.2%、-9.9%、27.2%和9.8%。各影响因素中,铁路交通网络强度对铁路人口流动的影响最为显著,同时高速铁路的建设也会极化人口流动网络结构,城市邻接关系对铁路人口流动强度的影响也较为显著。铁路人口流动和其交通网络的关联较强,但仅从铁路交通网络来表达其人口流动强度会造成城市间人口流动的极化效应,城市邻接关系、人口规模、省际边界等因素也应得到关注。

#### 4.3 公路人口流动与其交通网络的关联

利用QAP相关分析,同理检验公路人口流动与

其交通网络的相关关系,系数为0.624,两者也属紧密关联。两者的线性回归关系还需QAP回归来进行测度,将公路交通网络和第2~6类影响因素作为无偏变量加入模型,具体结果见表5。调整后决定系数为0.465,其中城市人口规模因素并未通过95%置信度检测。当公路交通强度、城市经济联系、省际边界阻碍、城市邻接关系和城市空间距离5个影响因素分别增加100%,公路人口流动将分别增加36.0%、13.4%、-8.7%、33.7%和-6.9%。省际边界阻碍和城市空间距离对东北地区的人口流动有着负向作用,随着空间距离的增长和省际边界的出现,人口日常出行选择公路的概率明显降低,公路人口流动强度更取决于城市间是否存在邻接关系。且公路交通存在“经停”“拼客”“拼车”等现象,故其人口流动与其交通网络回归系数偏低。

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本文利用腾讯位置大数据和铁路交通、公路交通时刻表分别构建东北地区人口流动网络和多元交通网络,运用社会网络分析法、QAP模型等研究方法,对东北地区的城市网络进行解析,同时对比分析两者的偏离和关联,测度人口流动与其交通网络的相关程度,为交通网络模拟真实人口流动网络提供了理论和实际操作层面的指导,也为后续城市网络中相关领域的研究提供一定参考。研究发现:

表5 铁路及公路人口流动与其各自交通网络等影响因素的QAP回归结果

Tab.5 QAP regression results of railway and road population flow networks and their respective transportation networks and other influencing factors

影响因素	铁路人口流动与其交通网络			公路人口流动与其交通网络		
	标准化 回归系数	非标准化 回归系数	显著性水平P	标准化 回归系数	非标准化 回归系数	显著性水平P
回归截距	0	-66.948		0	-15.567	
铁路/公路交通网络	0.563	50.288	<0.001	0.36	20.523	<0.001
城市经济联系	0.037	0.018	0.029	0.134	0.034	0.008
城市人口规模	0.072	52.929	0.002	-0.001	-0.546	0.515
省际边界阻碍	-0.099	-219.966	<0.001	-0.087	-103.679	0.002
城市邻接关系	0.272	830.856	<0.001	0.337	553.406	<0.001
城市空间距离	0.045	0.122	0.067	-0.069	-0.099	0.039
高铁交通网络	0.098	15.968	0.016			
决定系数( $R^2$ )		0.645	<0.001	0.467		<0.001
调整后决定系数 (Adj $R^2$ )		0.644	<0.001	0.465		<0.001

(1) 铁路人口流动和其交通网络偏离较小。东北地区铁路人口流动和其交通网络格局均呈现出以“哈大”走廊为轴的南密北疏、东众西寡的特征。相较而言,铁路人口流动网络更为分散,铁路交通网络的极化效应明显,若仅用铁路交通网络模拟铁路人口流动,会导致真实的人口流动差距被放大。东北地区中心城市之间铁路交通联系最为密切,但从铁路人口流动网络强度来看,最为密切的是省内首位度第一与第二城市间的联系,省会城市间的铁路人口流动强度仅排在第三位。

(2) 公路人口流动与其交通网络的偏离较大。公路交通网络呈现出多中心集聚特征,其人口流动网络则表现出大范围均质、小群落聚集的特征。公路和铁路之间既存在竞争关系,也存在互补关系,公路会弥补铁路的缺口,在铁路交通不太发达的地区,尤其是未通高速铁路的地区,公路人口流动强度和交通网络强度较高。公路人口流动更多受空间距离和邻接因素影响,省际壁垒对其阻碍效应有限。

(3) 人口流动网络和交通网络间存在关联,铁路交通网络模拟人口流动的效果略强于公路交通网络,综合联系网络模型则能更为准确地模拟城市间人口流动网络。回归结果显示,调整后决定系数(Adj  $R^2$ )可达0.650,其中铁路交通和公路交通的标准化回归系数分别为0.500和0.247,即在65.0%的可能下,铁路交通和公路交通强度分别增加100%,城市间的人口流动则会分别增加50.0%和24.7%。其他影响因素中经济联系、人口规模等因素对人口流动有促进作用,但不够明显,而城市间的邻接关系对人口流动网络有显著影响。

(4) 对比不同的交通网络与其人口流动的关联,铁路人口流动与其交通网络的关联程度较公路之间的关联程度高。将铁路交通网络与其他影响因素进行QAP回归后,调整后决定系数(Adj  $R^2$ )可达0.644。而公路人口流动网络的QAP回归调整后决定系数(Adj  $R^2$ )为0.465,由于公路交通存在“经停”“拼客”“拼车”等现象,故其人口流动与其交通网络的关联稍弱。

## 5.2 讨论

人口流动网络研究多聚焦于经济联系、产业差异、城市距离等,较少有目光凝聚在交通基础设施上,但交通基础设施作为人口产生流动的基础要素,其对人口流动的影响不言而喻。由于个体流动

数据的获取制约,人口流动和交通网络的耦合关系被学者们默认,如陈伟等<sup>[22]</sup>利用客运汽车班次数据替代人口流动数据探究中国城市客流网络结构和组织模式,还有学者在交通地理学的相关研究也常用交通流量来模拟人口流动强度<sup>[17,23]</sup>。本文对人口流动和交通网络间的偏离和关联进行测度,对两者间的结构偏离和关联程度进行解释说明,尝试性构建交通网络模拟日常人口流动的回归模型,为相关领域的研究进行了补充和完善,也提供了新的研究视角。

由于人类个体与群体间存在思维习惯、迁徙意愿等主观要素的差异性,人口流动网络与交通网络的真实关系远比模型复杂。腾讯位置大数据依托于用户的智能手机,导致其未能捕捉部分未使用智能手机的老年人和未成年人的流动轨迹,人口样本不能做到全覆盖,从而产生一定误差。人口流动具有方向性,本文将其做了无向处理,而迁入地、迁出地各个要素对人口流动网络的影响还有待探究。因此,未来研究一方面还需进一步扩充对人口流动数据的获取途径,针对不同年龄段的人口流动特征进行深入研究;另一方面,东北地区四季分明,不同时间段的人口流动与交通网络耦合关系也有强弱之分,接下来的研究应扩充时间序列长度,对不同季节、月份的人口流动特征进行分析。运用更长时间序列、更加精密完整的人口流动数据可以更好地探究不同网络间的关系,这也是未来研究应该重点关注的方向。值得注意的是,中国幅员辽阔,不同区域间的差异较大,未来的道路交通规划,尤其是高速铁路的建设势必会对不同区域的人口流动产生影响,相关领域的研究应该持续跟进,根据不同区域的特点,对人口流动和交通网络的偏离和关联进行测度,这对地区交通基础设施优化建设和促进城市间人口流动具备一定理论和现实意义。

## 参考文献(References)

- [1] 李苑君, 吴旗韬, 张玉玲, 等. “流空间”视角下高速公路交通流网络结构特征及其形成机制: 以广东省为例 [J]. 地理研究, 2021, 40(8): 2204-2219. [Li Yuanjun, Wu Qitao, Zhang Yuling, et al. Spatial structure and formation mechanism of expressway traffic flow network based on space of flows: A case study of Guangdong Province. Geographical Research, 2021, 40(8): 2204-2219. ]
- [2] Henderson J, Dicken P, Hess M, et al. Global production networks and the analysis of economic development [J].

- Review of International Political Economy, 2002, 9(3): 436-464.
- [3] Avgerou C. The informational city: Information technology economic restructuring and the urban regional process [J]. *European Journal of Information Systems*, 1991, 1(1): 76-77.
- [4] Taylor P J, Hoyler M, Verbruggen R. External urban relational process: Introducing central flow theory to complement central place theory [J]. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2803-2818.
- [5] 王士君, 廉超, 赵梓渝. 从中心地到城市网络: 中国城镇体系研究的理论转变 [J]. *地理研究*, 2019, 38(1): 64-74. [Wang Shijun, Lian Chao, Zhao Ziyu. From central place to city network: A theoretical change in China's urban system study. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 64-74. ]
- [6] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(3): 488-502. [Wei Ye, Xiu Chunliang. Study on the concept and analytical framework of city network resilience. *Progress in Geography*, 2020, 39(3): 488-502. ]
- [7] Mahutga M C, Ma X L, Smith D A, et al. Economic globalisation and the structure of the world city system: The case of airline passenger data [J]. *Urban Studies*, 2010, 47(9): 1925-1947.
- [8] Yang H R, Dobruszkes F, Wang J E, et al. Comparing China's urban systems in high-speed railway and airline networks [J]. *Journal of Transport Geography*, 2018, 68: 233-244.
- [9] 盛科荣, 杨雨, 孙威. 中国城市网络中心性的影响因素及形成机理: 基于上市公司500强企业网络视角 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 248-258. [Sheng Kerong, Yang Yu, Sun Wei. Determinants and mechanisms of degree centrality in the urban network in China: A study based on corporate networks of the largest 500 listed companies. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 248-258. ]
- [10] 蒋小荣, 汪胜兰, 杨永春. 中国城市人口流动网络研究: 基于百度LBS大数据分析 [J]. *人口与发展*, 2017, 23(1): 13-23. [Jiang Xiaorong, Wang Shenglan, Yang Yongchun. Research on China's urban population mobility network based on Baidu LBS big data. *Population and Development*, 2017, 23(1): 13-23. ]
- [11] 赖建波, 潘竟虎. 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. ]
- [12] 杨延杰, 尹丹, 刘紫玟, 等. 基于大数据的流空间研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(8): 1397-1411. [Yang Yanjie, Yin Dan, Liu Ziwen, et al. Research progress on the space of flow using big data. *Progress in Geography*, 2020, 39(8): 1397-1411. ]
- [13] 马丽亚, 修春亮, 冯兴华. 多元流视角下东北城市网络特征分析 [J]. *经济地理*, 2019, 39(8): 51-58. [Ma Liya, Xiu Chunliang, Feng Xinghua. Analysis of network characteristics of northeast cities from the perspective of multi-flow. *Economic Geography*, 2019, 39(8): 51-58. ]
- [14] 李卓伟, 王彬燕, 王士君, 等. 基于多元流的走廊地带城市网络联系分析: 以辽西走廊为例 [J]. *经济地理*, 2020, 40(10): 74-82. [Li Zhuowei, Wang Binyan, Wang Shijun, et al. Relationship of urban network in corridor area based on multiple flows: A case study of Liaoxi Corridor. *Economic Geography*, 2020, 40(10): 74-82. ]
- [15] Zhen F, Qin X, Ye X Y, et al. Analyzing urban development patterns based on the flow analysis method [J]. *Cities*, 2019, 86: 178-197.
- [16] 王海军, 翟丽君, 刘艳芳, 等. 基于多维城市要素流的武汉城市圈城市联系与功能分析 [J]. *经济地理*, 2018, 38(7): 50-58. [Wang Haijun, Zhai Lijun, Liu Yanfang, et al. Urban connection and function in Wuhan urban agglomeration based on multi-dimensional urban factor flows. *Economic Geography*, 2018, 38(7): 50-58. ]
- [17] 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. ]
- [18] 程利莎, 王士君, 杨冉. 基于交通与信息流的哈长城市群空间网络结构 [J]. *经济地理*, 2017, 37(5): 74-80. [Cheng Lisha, Wang Shijun, Yang Ran. The urban network structure of Ha-Chang urban agglomerations based on the traffic and information flow. *Economic Geography*, 2017, 37(5): 74-80. ]
- [19] 郑艳婷. 中国城市群的空间模式: 分散性区域集聚的理论背景、形成机理及最新进展 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 339-352. [Zheng Yanting. Spatial pattern of China's urban agglomerations: Theoretical background, formation mechanisms, and latest progress of research of dispersed regional concentration. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 339-352. ]
- [20] 张华, 刘哲达, 殷小冰. 中国跨省流动人口回流意愿的空间差异及影响因素 [J]. *地理科学进展*, 2021, 40(1): 73-84. [Zhang Hua, Liu Zheda, Yin Xiaobing. Spatial differences and influencing factors of inter-provincial mi-

- grant workers' backflow intention in China. *Progress in Geography*, 2021, 40(1): 73-84. ]
- [21] 王新贤, 高向东. 中国流动人口分布演变及其对城镇化的影响: 基于省际、省内流动的对比分析 [J]. *地理科学*, 2019, 39(12): 1866-1874. [Wang Xinxian, Gao Xiangdong. The evolution of China's floating population and its impact on urbanization: A comparative analysis based on inter- and intra-provincial perspectives. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(12): 1866-1874. ]
- [22] 陈伟, 刘卫东, 柯文前, 等. 基于公路客流的中国城市网络结构与空间组织模式 [J]. *地理学报*, 2017, 72(2): 224-241. [Chen Wei, Liu Weidong, Ke Wenqian, et al. The spatial structures and organization patterns of China's city networks based on the highway passenger flows. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 224-241. ]
- [23] 王姣娥, 杜德林, 金凤君. 多元交通流视角下的空间级联系统比较与地理空间约束 [J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2482-2494. [Wang Jiao'e, Du Delin, Jin Fengjun. Comparison of spatial structure and linkage systems and geographic constraints: A perspective of multiple traffic flows. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2482-2494. ]
- [24] 赵梓渝, 魏冶, 杨冉, 等. 中国人口省际流动重力模型的参数标定与误差估算 [J]. *地理学报*, 2019, 74(2): 203-221. [Zhao Ziyu, Wei Ye, Yang Ran, et al. Gravity model coefficient calibration and error estimation: Based on Chinese interprovincial population flow. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(2): 203-221. ]
- [25] 魏冶, 修春亮, 王绮, 等. 中国春运人口流动网络的富人俱乐部现象与不平衡性分析 [J]. *人文地理*, 2018, 33(2): 124-129. [Wei Ye, Xiu Chunliang, Wang Qi, et al. Rich-club phenomenon and disequilibrium of China's population flow network during spring festival travel period. *Human Geography*, 2018, 33(2): 124-129. ]
- [26] 王德, 顾家煊, 晏龙旭. 上海都市区边界划分: 基于手机信令数据的探索 [J]. *地理学报*, 2018, 73(10): 1896-1909. [Wang De, Gu Jiahuan, Yan Longxu. Delimiting the Shanghai metropolitan area using mobile phone data. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(10): 1896-1909. ]
- [27] 潘碧麟, 王江浩, 葛咏, 等. 基于微博签到数据的成渝城市群空间结构及其城际人口流动研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(1): 68-76. [Pan Bilin, Wang Jianghao, Ge Yong, et al. Spatial structure and population flow analysis in Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on Weibo check-in big data. *Journal of Geo-information Science*, 2019, 21(1): 68-76. ]
- [28] 王波, 甄峰, 张浩. 基于签到数据的城市活动时空间动态变化及区划研究 [J]. *地理科学*, 2015, 35(2): 151-160. [Wang Bo, Zhen Feng, Zhang Hao. The dynamic changes of urban space-time activity and activity zoning based on check-in data in Sina web. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(2): 151-160. ]
- [29] 田俊峰, 王彬燕, 程利莎, 等. 政策主导下的区域土地利用转型过程与机制: 以中国东北地区为例 [J]. *地理研究*, 2020, 39(4): 805-821. [Tian Junfeng, Wang Binyan, Cheng Lisha, et al. The process and mechanism of regional land use transition guided by policy: A case study of Northeast China. *Geographical Research*, 2020, 39(4): 805-821. ]
- [30] 张艳, 柴彦威. 基于居住区比较的北京城市通勤研究 [J]. *地理研究*, 2009, 28(5): 1327-1340. [Zhang Yan, Chai Yanwei. Characteristics of commuting pattern in Beijing: Based on the comparison of different urban residential areas. *Geographical Research*, 2009, 28(5): 1327-1340. ]
- [31] Zhang W Y, Derudder B, Wang J H, et al. Regionalization in the Yangtze River Delta, China, from the perspective of inter-city daily mobility [J]. *Regional Studies*, 2018, 52(4): 528-541.
- [32] 王姣娥, 景悦, 杨浩然. 中国高铁—民航竞争网络的空间演化模式及影响因素 [J]. *地理科学*, 2020, 40(5): 675-684. [Wang Jiaoe, Jing Yue, Yang Haoran. The evolution mode of China's HSR-air competitive network and its driving factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 675-684. ]
- [33] White H C, Boorman S A, Breiger R L. *Social structure from multiple networks* [M]. Beijing, China: Foreign Languages Press, 1976.
- [34] Macdonald S. Book review: *Social network analysis: A handbook* [J]. *Systemic Practice & Action Research*, 1998, 11(3): 344-346.
- [35] Wolfe A W. *Social network analysis: Methods and applications* [J]. *Contemporary Sociology*, 1995, 91: 219-220.

## Differences and relationship between population flow and transportation networks in Northeast China

LI Zhuowei<sup>1</sup>, WANG Shijun<sup>1\*</sup>, CHENG Lisha<sup>2</sup>, SHI Xiang<sup>3</sup>, GUAN Haoming<sup>1</sup>, SHU Chang<sup>4</sup>

(1. School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. College of Geography and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

3. Northeast Asian Studies College, Jilin University, Changchun 130015, China;

4. School of Mathematics and Statistics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

**Abstract:** Limited by the difficulty of obtaining individual mobility data, existing studies on population mobility mostly used strength of traffic flow to simulate population flow between cities, while ignoring the differences between them. This study constructed transportation networks based on inter-city bus and train trips in Northeast China, and built population flow networks based on Tencent location big data correspondingly. It then analyzed the differences and relationship between the two types of networks by using social network analysis and quadratic assignment procedure model. The results are as follows: 1) Both railway population network and railway transportation network in Northeast China are characterized by a spatial pattern of dense in the south and sparse in the north and numerous in the east and fewer in the west, with the Harbin-Dalian corridor as the axis. The spatial structure of railway population flow is more dispersed, while the polarization effect of railway transportation network is obvious. 2) There are great differences between road population flow network and road transportation network. There is not only competition but also complementary relationship between roads and railways. That is, road population or transportation flow is often strong in areas with less developed railways. 3) The accuracy of simulating inter-city population flow with a single transportation network is low, while the composite influencing factors can more accurately express the inter-city population flow structure. Among other influencing factors, economic ties and population size do not have significant impact on population flow, while adjacency between cities has a significant impact on the structure of population flow. 4) The fitting regression between railway population flow strength and its transportation network is better than that of roads. This study quantitatively explained the correlation between population flow and its transportation network, which provides a theoretical and practical reference for the simulation of population flow in transportation network.

**Keywords:** population flow; transportation network; differences and relationship; social network analysis; quadratic assignment procedure model; Northeast China