

浩飞龙, 吴潇然, 关皓明, 等. 基于百度迁徙数据的东北地区城市“层级-网络”结构[J]. 地理科学, 2023, 43(2): 251-261. [Hao Feilong, Wu Xiaoran, Guan Haoming et al. "Hierarchy-network" structure of cities in Northeast China based on Baidu migration data. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(2): 251-261.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.02.007

# 基于百度迁徙数据的东北地区城市“层级-网络”结构

浩飞龙<sup>1,2</sup>, 吴潇然<sup>3,4</sup>, 关皓明<sup>1,2</sup>, 王士君<sup>1,2</sup>

(1. 东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024; 2. 长白山地理过程与生态安全教育部重点实验室, 吉林 长春 130024; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 基于 2021 年 3 月 9 日至 4 月 28 日百度迁徙大数据, 应用分形理论、城市标度律、社会网络分析和 SOM(Self-organizing Map) 神经网络方法, 从人口迁徙的视角探究了东北地区城市体系的“层级-网络”结构。研究结论如下: ① 以迁徙规模为基础的城市体系首位度较低, 高位序城市分布集中、低位序城市分布松散, 与迁徙路线的规模分形特征总体一致; 沈阳、长春与哈尔滨位于第一层级, 迁徙规模与城市人口呈超线性增长关系; ② 基于迁徙规模构建的网络中, 沈阳、长春、四平、铁岭和哈尔滨处于网络核心位置, 哈尔滨、沈阳、长春和大连为网络的关键枢纽城市; ③ 城市间有向迁徙流动与净迁徙流动网络在结构上存在明显差异, 沈阳与长春迁徙规模较大, 而哈尔滨净流入量较高; ④ 迁徙行为存在空间集聚现象, 核心区域在东北地区东部、中部与南部, 区域内迁徙行为以省内迁徙为主, 根据迁徙偏好可分为 4 个次级组团; ⑤ 人口迁徙视角下, 哈长城市群内部联系较弱, 辽中南城市群已经显现集聚发展态势; ⑥ 东北地区城市根据自身迁徙规模和网络位置分为高流入型核心城市、低流入型核心城市、高流出型半边缘城市等六大类型; 研究表明“层级-网络”结合视角相比单一规模层级划分更能揭示城市的内在特质。

**关键词:** 城市体系; 人口流动; 社会网络分析; 城市标度律; 百度迁徙数据

**中图分类号:** K901   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-0690(2023)02-0251-11

人口流动被认为是生产要素在空间上的重新配置, 特定空间范围内的迁徙和移动在一定程度上推动了社会、经济要素的重新集聚与扩散<sup>[1]</sup>, 探索人口流动格局有助于深入探析城市体系和城市间联系规律<sup>[2-4]</sup>。城市体系是指在一个相对完整的区域中, 由一系列不同职能分工、不同等级规模、空间分布有序的城市所组成的联系密切、相互依存的城市群体<sup>[5]</sup>。囿于理想化的假设条件和忽视人文地理学的社会学属性与城镇体系发展动态性等种种局限, 城市体系相关研究长期聚焦于中心地思想下的理论与实证探讨<sup>[6-7]</sup>。20 世纪 90 年代以后, 在全球化和信息化、流空间理论、交通革命等多重发展背景不断推动下, 城市通过各种基础设施和信息网络的高速

联系, 打破传统中心地理论边界限定, 形成在多空间尺度下和多等级城市间时空共享的网络关系<sup>[8]</sup>。

在这样的背景下, 城市体系的研究从传统中心地理论的层级分布逐渐向基于城市间关系的现代城市网络转变。层级研究是城市体系研究的传统范式, 其关注的核心是以城市自身的某种属性进行层级划分, 以及城市规模分布形态; 而城市网络研究将“邻近”概念抽象为社会行为与关系的接近、时间与过程的共享<sup>[9]</sup>, 重点关注城市之间某种有向或无向联系, 以及节点城市根据联系权值计算的网路地位。可以看出, 城市体系的演化具有垂直和水平方向, 虽然网络结构也兼具网络层级, 但这并不能完全取代层级体系, 城市地域系统类型、结构、组织形式的

**收稿日期:** 2021-10-15; **修订日期:** 2022-02-05

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (42171198, 42001117)、中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2412020FZ001) 资助。  
[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42171198, 42001117), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2412020FZ001).]

**作者简介:** 浩飞龙(1989—), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 副教授, 硕导, 主要从事城市地理与城乡规划研究。E-mail: haofl587@nenu.edu.cn

**通讯作者:** 关皓明。E-mail: guanhm410@nenu.edu.cn

深刻变化应是在层级体系和网络结构两个过程共同作用下的结果。层级和网络是从属性和联系两个视角对城市体系的不同理解,已有研究分别从层级、网络两个层面做了较多探索,但将两者进行结合探讨的研究较为鲜见,以“层级-网络”结合的视角来看城市地域系统的变化,有助于形成对中心城市、都市圈、城市群等城市组织形式的新认识。

地理大数据的出现为城市研究提供了新的视角<sup>[10-13]</sup>,迁徙大数据自 2014 年上线后就引起了学术界的广泛关注,此后使用百度迁徙或腾讯迁徙数据的研究论文涌现<sup>[14-16]</sup>。相比于传统的人口流动普查数据,百度迁徙大数据庞大的用户规模极大地增加了数据样本,使其有一定的代表性;同时,其有向和量化的属性,有助于精细刻画人口流动的规模、方向等特征。近年来广泛的实证研究也表明,和交通流、信息流等相比,迁徙流同时具备了覆盖人群广、交通方式全、具备“有向”流动等特征,是交通流、资本流、物质流、知识流、信息流的重要载体<sup>[14]</sup>,是一种富有代表性的新型地理空间大数据。

第七次全国人口普查数据显示<sup>①</sup>,东北地区人口在 10 a 约减少了 1 100 万,除长春、沈阳、大连外,其他主要城市人口均出现明显萎缩,绥化、齐齐哈尔、通化等城市人口流失均在百万以上。人口流失已成为阻碍东北振兴的关键问题,而区域内人口向中心城市集聚化趋势明显,也严重制约着东北地区的均衡化发展。当前东北地区经济正处于结构调整与转型的攻坚期,人口流动格局与城市体系等研究为现实所需,而新情势下基于时空大数据的东北区域内人口流动研究仍较少。基于以上背景,本文着重思考以下问题:从人口流动的视角来看,东北地区传统的城市层级结构体系是否发生了明显改变?层级结构中居于高等级的城市是否依然占据网络结构的核心地位?基于人口流动的区域城市层级网络结构特征如何?基于此,本文使用百度迁徙大数据与第七次人口普查数据,应用社会网络分析、首位度、分形理论、城市标度律和 SOM 神经网络方法,以人口流动的视角研究了东北地区城市体系的层级与网络结构特征,探讨了二者的关系,并对区域内城市体系进行了组团分区与类型分类。一方面为城市体系的研究提供新的思考视角与方法;同时,也为后疫情时期的常态化防控和区域人口流动问题

研究提供科学借鉴。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据获取与处理

百度地图迁徙大数据(<https://qianxi.baidu.com/>)是百度系应用在向用户提供基于位置信息的增值服务时,所记录的用户移动设备的实时位置,经关联和脱敏处理形成的有向和量化的人口迁徙数据集。目前可获的原始数据为每日城市迁徙规模与城市间迁徙比例(均包括流入和流出),两者的乘积即为城市间每日迁徙的量化可比指数,能够指示城市间人口流动的方向和体量,反映城市间联系强度,形成城市体系网络结构。考虑到新冠肺炎疫情的影响,本研究选取 2021 年春节结束后(3 月 9 日)至“五一”国际劳动节前(4 月 28 日)的时间范围,该时限范围内全国疫情基本趋于稳定,东北地区内部无疫情管控区域。研究获取了东北三省及蒙东 5 盟市共 41 个地级行政单元(包括市、州、地区、盟,下文皆以城市统称)间每日迁徙规模数据。有学者对春运和国庆假期的城市联系进行了分析<sup>[17-19]</sup>,本研究为避免节假日影响,清明节和五一劳动节期间及其起止的前后 2 d 记录均舍弃;考虑到双休日与工作日的出行动机和规律可能不同,两者需作单独计算;假期调体的双休日(4 月 25 日)被记为工作日。最终筛选获得工作日 33 d,双休日 11 d,本文的结论均基于工作日数据。城市人口规模数据来源为第七次全国人口普查公报,统计口径为 2020 年 11 月 1 日零时各地级市的常住人口数量。百度迁徙数据统计单元为地级市,为与其统计口径一致,根据所在地和代管原则,常住人口数据将吉林省的梅河口市划入通化市、长白山管委会划入白山市,辽宁省的沈抚示范区划入沈阳市。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 分形理论

分形理论是非线性科学的重要分支,Batty 等人率先开启了城市形态的分形研究<sup>[20]</sup>。之后,国内外学者应用分形理论对城市相关体系做了一系列探索<sup>[21-22]</sup>,证明了城市体系中无标度区的普遍存在。本研究使用 Pareto 公式测度人口迁徙规模视角下城市体系无标度区间的自相似性,公式如下:

$$N(P) = AP^{-D} \quad (1)$$

① [http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/202106/t20210628\\_1818822.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/rkpcgb/qgrkpcgb/202106/t20210628_1818822.html)

式中,  $N(P)$ 表示大于迁徙规模门槛的城市数量,  $A$ 为比例系数,  $P$ 为城市迁徙规模门槛,  $D$ 为分形维数。当  $D>1$ , 城市规模分布较为集中, 人口分布均匀;  $D<1$  时, 城市规模分布较为分散, 人口分布差异程度大, 本研究主要应用分形理论分析城市体系的层级结构特征。

### 1.2.2 城市标度律

城市标度律(Urban Scaling Law)是指城市体系内城市指标与人口规模的缩放关系, 能反映城市体系的状态和特征<sup>[22-24]</sup>。本研究使用城市标度律分析城市常住人口与迁徙规模间的标度关系, 标度关系通常使用幂函数形式, 公式如下:

$$Y = Y_0 N^\beta \quad (2)$$

式中,  $Y$ 为城市迁徙规模,  $Y_0$ 为标准化常量,  $N$ 为城市人口规模, 幂的次数  $\beta$ 为标度律系数, 根据  $\beta$ 与1的大小关系有以下3种情况<sup>[25]</sup>:  $\beta>1$ 表明城市迁徙规模随城市人口规模呈超线性增长;  $\beta=1$ 表明城市迁徙规模随城市人口规模呈线性增长;  $0<\beta<1$ 表明城市迁徙规模随城市人口规模呈次线性增长。

### 1.2.3 社会网络分析

社会网络分析方法(Social Network Analysis)在城市网络研究中已经非常成熟<sup>[1,26-28]</sup>, 它从点、线角度出发对城市关系的特征进行描述, 具有定位城市等级、发现联系规律、划分城市组团等功能, 其分析方法包括中心性分析和区块化分析两方面。本研究中选择了总度、入度、出度、度差(入度-出度)、特征向量中心性和介数中心性进行中心性分析, 以衡量各城市在网络中所处的地位、层级、重要性等特征。总度表示城市的人流集散总规模, 反映对外联系强度; 城市节点在人口流动网络中具有各自不同的入度与出度, 入度表示流入总量, 反映了该城市对其他城市的吸引力; 出度表示流出总量, 反映了该城市对其他城市的辐射力。

中心性可以反映人口迁移网络中某城市在与其他城市互动中的影响力与控制力。特征向量中心性高意味着该城市的相邻节点城市具有较大的迁徙规模, 而介数中心性反映了该城市在多大频率上为网络中的最短路径的连接节点, 介数中心性越高的城市在网络中的地位越重要<sup>[26]</sup>。此外, 研究还选择核心-边缘结构<sup>[28]</sup>、CONCOR凝聚子群<sup>[28]</sup>、整体集聚系数<sup>[28]</sup>作为区块化分析方法, 研究网络的子群凝聚特征、识别核心边缘区域和判断区域联系紧密度, 三者均以城市间迁徙规模为基础进行测度。

### 1.2.4 SOM神经网络

自组织映射(Self-organizing Map, SOM)<sup>[29]</sup>通过无监督竞争学习使不同的神经元对不同的输入模式敏感, 借此对输入的多维数据进行特征提取, 形成一个低维、离散的映射, 具有降维或聚类功能<sup>[30]</sup>。其基本原理是计算输入特征量映射至输出层每一处理单元的距离(通常为欧式距离), 通过迭代不断调整和优化权向量, 直到收敛。自组织映射网络具有较好的拓扑保持能力和容错性<sup>[31]</sup>。本研究使用R语言中的Kohonen包, 对度中心性等变量进行迭代式无监督训练, 根据残差平方和的大小选择合适的分类数量, 以实现综合城市层级和网络属性特征的城市聚类与类型划分。

## 2 结果分析

### 2.1 城市层级结构特征

#### 2.1.1 省会及主要地级市占据迁徙规模较高层级

基于城市人口迁徙总规模, 采用自然断点法, 将所有城市划分为6个层级(表1)。可以看出, 沈阳、长春与哈尔滨的迁徙规模最大, 对外联系强度最大, 位于第一层级; 四平、绥化、鞍山和大连位于第二层级; 以此类推。从迁徙规模的层级特征来看, 东北地区人口迁徙主要集中在各省会城市及主要地

表1 迁徙规模的自然断点法层级划分

Table 1 Hierarchical classification of migration size based on nature breaks classification

层级划分	城市迁徙规模	城市
第一层级	117.631~370.504	沈阳市、长春市、哈尔滨市
第二层级	93.255~117.630	四平市、绥化市、鞍山市、大连市
第三层级	60.617~93.254	锦州市、营口市、铁岭市、大庆市、吉林市、齐齐哈尔市、辽阳市、松原市、抚顺市、盘锦市
第四层级	35.415~60.616	通辽市、朝阳市、葫芦岛市、赤峰市、佳木斯市、丹东市、本溪市、阜新市、白城市、通化市
第五层级	20.363~35.414	兴安盟、呼伦贝尔市、牡丹江市、辽源市、黑河市、延边朝鲜族自治州、双鸭山市
第六层级	6.622~20.362	白山市、鸡西市、伊春市、鹤岗市、锡林郭勒盟、七台河市、大兴安岭地区

级市, 高层级的迁徙城市多集中在辽宁省、吉林省, 低层级的城市多分布在黑龙江省。但从迁徙规模角度考虑的层级划分使层级内部的一些重要特征尤其是承担的人口迁徙功能与地位无法被体现。如第一层级中, 沈阳与长春的网络核心度要明显大于哈尔滨, 但净流入量远小于哈尔滨; 第二层级中, 绥化与鞍山均为流出型城市, 而四平与大连为流入型城市等等。另外, 各层级内部城市的网络地位的差异也非常明显, 因此有必要进一步结合城市的网络结构特征进行综合分类。

### 2.1.2 迁徙规模高位序城市与路线垄断性较弱

首位度在一定程度上代表了城镇体系中的城市发展要素在最大城市的集中程度, 通过城市人口迁徙规模(流入+流出)计算出东北地区的两城市指数、四城市指数和十一城市指数分别为: 1.38、0.60和 0.54, 这表明东北地区的迁徙行为并没有明显集聚于首位城市沈阳, 沈阳相对于第二位序城市长春以及之后的哈尔滨和四平没有形成明显的领先优势, 人口迁徙视角下的城市体系首位度尚弱, 首位城市的对外联系强度还有待提升。从城市迁徙规模来看城市位序结构特征, 构建东北地区城市迁徙规模门槛与符合门槛规模城市个数的双对数坐标图, 由图 1a 可知, 整体的拟合曲线分形维数  $D=0.98$ ,  $R^2=0.86$ , 存在两段拟合优度较高的无标度区间: 当迁徙规模指数为 [26.03, 60.62] 时, 分形维数  $D=0.69 < 1$ ,  $R^2=0.97$ ; 当迁徙规模指数为 [66.46, 117.63] 时, 分形维数  $D=2.28 > 1$ ,  $R^2=0.97$ , 这表明随着城市人口迁

徙规模门槛增大, 城市迁徙规模分布趋于集中, 相对高位序的城市垄断性减弱, 中间位序城市的集聚规模较大, 低位序的城市迁徙规模分布松散, 差异程度较大。

进一步来看城市间迁徙路线规模的层级分形特征, 建立东北地区城市间迁徙路线规模分布的双对数坐标图(图 1b), 研究结果显示: 东北地区城市间的迁徙路线规模存在多段无标度区间。迁徙路线规模指数为 [0.01, 0.18] 时, 则  $D=0.22 < 1$ ,  $R^2=0.98$ ; 迁徙路线规模指数为 [0.19, 10.50] 时, 则  $D=0.55 < 1$ ,  $R^2=0.99$ ; 迁徙路线规模指数为 [11.11, 75.21] 时,  $D=1.68 > 1$ ,  $R^2=0.98$ 。整体而言, 迁徙路线规模分布的双对数函数大约呈一条导数减小的递减曲线, 低位序的路线规模分维值  $D < 1$ , 规模松散, 路线间迁徙规模差异较大, 随着迁徙路线规模门槛升高, 体系中的分维值  $D$  增大, 最终分维值  $D > 1$ , 路线规模的分布状态趋于集中, 其规律与基于人口迁徙规模的城市层级体系具有相似性, 表明人口迁徙规模高位序的城市与迁徙路线的分布相对比较集中, 垄断性较弱。

### 2.1.3 城市人口与迁徙规模存超线性增长关系

城市的人口规模往往影响着城市的对外吸引与辐射能力, 对城市间的人口迁徙有显著的作用。为探究二者关系, 采用城市标度律方法, 以城市常住人口的对数为横坐标, 人口迁徙规模的对数为纵坐标, 线性回归获得标度因子  $\beta=1.05 > 1$  (图 2), 这表明城市人口迁徙规模属于超线性指标, 与城市常

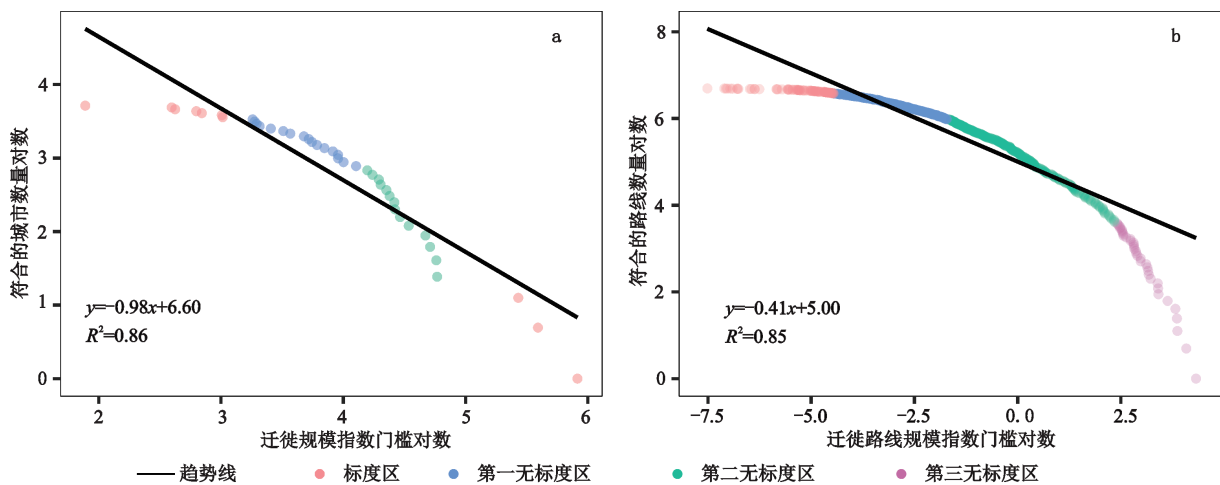


图 1 东北地区城市迁徙规模与迁徙路线规模分布双对数坐标

Fig.1 Double-logarithmic coordinate of urban migration scale and migration route scale distribution in Northeast China

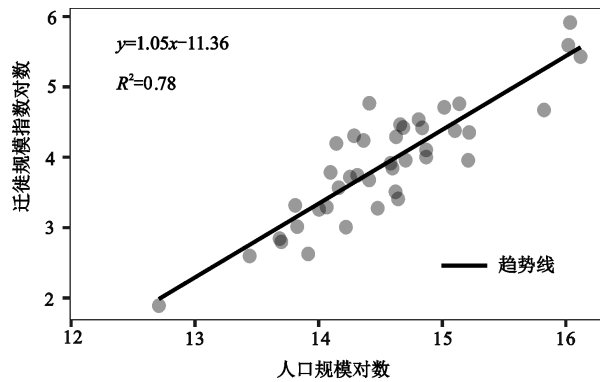


图2 东北地区城市迁徙规模和常住人口的标度关系

Fig.2 Scalar relationship between urban migration size and resident population in Northeast China

住人口存在超线性增长关系( $R^2=0.78$ ), 即随着城市常住人口的增加, 城市人口迁徙规模呈现超线性增长, 体现出规模报酬递增效应。龚健雅等<sup>[22]</sup>认为超线性指标存在于与社会交互相关的城市指标, 因为社会交互行为随人口规模增加呈超线性增加, 出现规模报酬递增效应。而人口迁徙正是一种与人际交流、社会交互息息相关的行为, 因此对于该指标可能的解释是城市人口规模更大的城市, 城市各项基础设施尤其是交通设施更加完善, 自身吸引力提高的同时对外联系的需求和能力也迅速增强; 城市间的梯度差异导致了不同群体的迁徙行为, 主要表现为劳动力向发达城市迁移, 因此大城市易于成为区域的人口汇集地、人口集散地。

### 2.2 城市网络结构特征

#### 2.2.1 节点城市对外吸引力与辐射力差异显著

基于社会网络分析方法, 计算东北地区各城市迁徙规模的中心性指数(图3)。研究发现东北地区城市的总度、入度和出度三者高度相关, 三者间的相关系数均在 0.99 以上, 与潘竞虎等<sup>[1]</sup>对全国城市的出入度分析结论相似, 这表明对外吸引力强的城市往往也具有很强的对外辐射能力, 因此成为区域内人流的高级集散中心, 如沈阳、长春和哈尔滨的 3 项指标均明显高于其他城市。入度与出度的度差为城市的净流入量, 是城市自身吸引力超越对外辐射能力的相对程度。从结果来看, 哈尔滨、沈阳、锦州、四平 and 大连是净流入量最高的城市, 表明这些城市的对外吸引力与对外辐射能力相比有更大优势, 成为人口净流入的汇; 大庆、盘锦、绥化、呼伦贝尔和双鸭山则是净流出量最高的城市, 这些城市以向外输出人口为主, 辐射资源能力大于自身吸引力, 是东北地区人口净流出的源。

进一步来看表征各城市在迁徙网络中地位的介数中心性, 发现哈尔滨、沈阳、长春和大连的介数中心性明显高于其他城市, 表明这些城市是网络中的关键连接节点, 为东北地区人口流动网络的重要枢纽城市; 而特征向量中心性较高的城市包括沈阳、长春、四平、铁岭、哈尔滨和抚顺等, 表明这些城市是迁徙网络中高迁徙量节点城市的重要邻近节点, 也具有重要的网络地位。

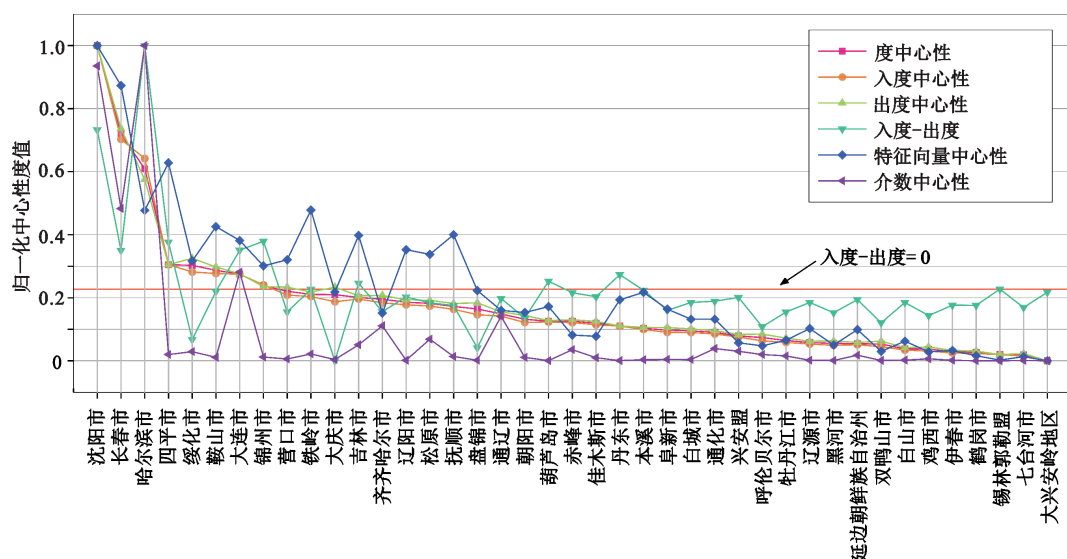


图3 东北地区城市迁徙规模的中心性

Fig.3 Centrality of urban migration scale in Northeast China



### 2.2.2 迁徙行为集中于哈长、辽中南城市群内部

将两城市的双向迁徙量相加作为城市间总的迁徙强度并可视化(图 4), 图中有色线条为迁徙强度经自然断点法分类的前 3 层级。可以看出:① 东北地区主要的迁徙行为发生在哈尔滨-绥化、哈尔滨-大庆、绥化-大庆、长春-吉林(市)、长春-松原、长春-四平、沈阳-铁岭、沈阳-抚顺、沈阳-本溪、沈

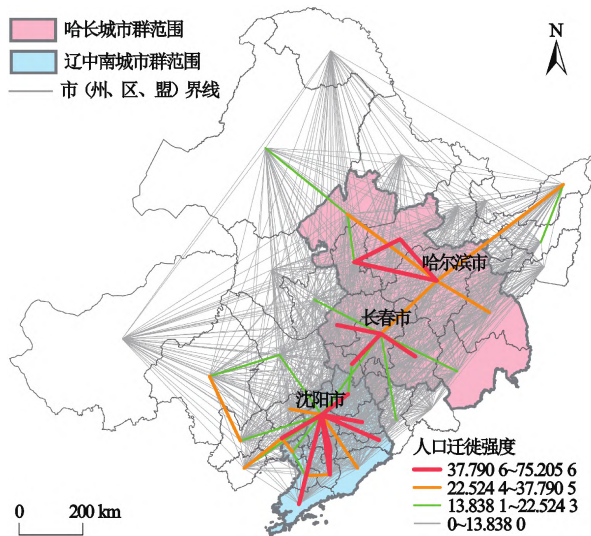


图 4 东北地区城市间人口迁徙路线和强度

Fig.4 Inter-city population migration routes and intensity in Northeast China

阳-锦州、沈阳-大连、沈阳-鞍山、沈阳-辽阳以及辽阳-鞍山;② 第一层级(共 14 条)中除沈阳-锦州外, 主要的迁徙行为全部发生在哈长城市群和辽中南城市群内部, 其中哈长城市群 6 条, 辽中南城市群 7 条; 但哈长城市群的双核心城市, 哈尔滨与长春间的迁徙强度并未进入第一层级; 辽中南城市群间迁徙强度相对较强, 且分布均衡;③ 前 3 层级中 86% 的迁徙路线包含沈阳、哈尔滨和长春 3 个城市, 迁徙强度较大的路线多为省会城市与周边地级市的联系。④ 东北三省主要的迁徙行为仍然以省域内部迁徙为主, 三省间的迁徙相对较弱, 内蒙古东部五盟市更倾向于与东三省主要城市联系。

### 2.2.3 有向迁徙流动与净迁徙流动网络存在结构差异

人口迁徙的方向性特征分析中, 本文分别选取人口有向迁徙和净迁徙强度的前 20 条路线进行可视化, 前者数量约占整体 1.19%, 迁徙量约占 29.58%, 后者数量约占整体 2.44%, 迁徙量约占 43.50%, 均能反映区域内主要的迁徙方向(图 5)。结果显示:① 长春-四平、四平-长春、绥化-哈尔滨、哈尔滨-绥化是东北地区最主要的人口迁徙方向;② 沈阳和长春是最大的人口流出地和流入地, 参与了多条高强度的迁徙路线;③ 绥化-哈尔滨、长春-四平、大庆-哈尔滨、佳木斯-哈尔滨是最主要的净迁徙方向;④ 在前 20 条人口净迁徙流动中, 哈尔滨

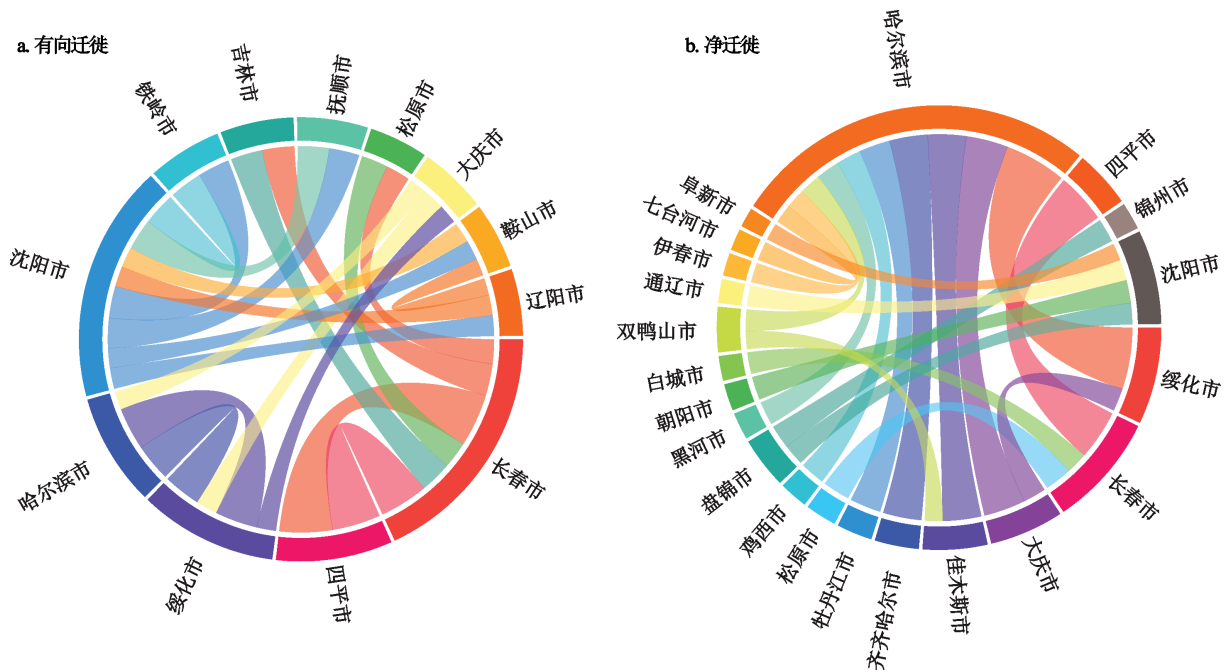


图 5 东北地区城市间人口迁徙前 20 条路线方向及强度

Fig.5 Top 20 of direction and intensity of urban migration of population in Northeast China

为承接城市的占据 10 条, 是净流入量最大的城市; ⑤ 对比发现, 单向迁徙流动和净迁徙流动网络在结构上存在差异, 如沈阳与长春参与了更多迁徙强度大的迁徙路线, 对外吸引力和向外辐射能力都很强, 且较为均衡; 而哈尔滨为多条净迁徙路线的承接城市, 是最大的净流入城市, 其对周边城市的吸引力明显大于辐射能力。

### 2.3 基于“层级-网络”的城市分区与类型分类

#### 2.3.1 城市网络的核心-边缘结构与子群分区

以城市间迁徙强度为基础, 采用核心-边缘结构对东北地区的城市网络进行结构划区, 两者均根据网络中结点之间联系的紧密程度进行评价, 核心-边缘结构将网络分为核心位置与边缘位置(图 6a)。可以看出, 除大兴安岭地区、鹤岗、黑河、呼伦贝尔、鸡西、七台河、双鸭山、锡林郭勒盟、兴安盟、伊春等地区处于边缘位置外, 其他城市均处于核心位置。核心城市在东北地区的中部、东部及南部出现集聚, 边缘城市分布在东北地区西部与北部边缘, 表明人口迁徙行为在空间上出现了明显的集聚现象, 存在核心-边缘的空间分布, 两大城市群区域均位于网络核心区内, 说明城市群内部城市相较区域内其他城市, 具有较高的人口迁徙联系强度。

使用 CONCOR 凝聚子群方法进一步对东北地区的城市网络进行组团划区, 以揭示区域内部联系较为紧密的次级组团。图 6a 显示在网络中所处位置相同的板块轮廓大致与东北三省边界吻合, 其中

内蒙古的各地级市(盟)分别与自身最邻近的省结为一个板块, 而锡林郭勒盟则与吉林省南部的白山、通化、辽源、四平划为一类, 表明他们与其他城市的联系强度结构具有相似性。以城市群为观察对象, 辽中南城市群被包含在子群四中, 而哈长城市群内包含了 3 种子群类型。凝聚子群的结果表明东北地区已经形成了明显的类省域次级网络, 黑、吉、辽三省内迁徙仍是主流, 省际迁徙强度相对较低, 而内蒙古自治区的五市(盟)更倾向于与此三省进行联系, 内部联系较低; 辽中南城市群的内部联系格局相似程度高, 一体化成效明显, 哈长城市群内部联系还相对较弱, 这也支撑了前文迁徙强度与迁徙行为的相关特征。进一步以整体集聚系数对各城市网络集聚程度进行评估(图 6b), 结果发现哈长城市群与辽中南城市群的整体集聚系数分别为 0.465、0.613, 东北地区的整体集聚系数为 0.588。以迁徙强度角度而言, 辽中南城市群已事实上形成明显的集团发展态势; 哈长城市群虽已经历多年发展, 实际内部联系紧密度仍然相对较低, 且低于区域平均水平。

#### 2.3.2 综合“层级-网络”的城市类型分类

相比于城市人口迁徙规模的单一级别分类, 其迁徙网络特征拥有更为丰富的内涵, 综合城市的层级结构特征与网络结构特征, 采用 SOM 神经网络方法, 将总度、度差、特征向量中心性和介数中心性纳入城市类型划分, 东北地区城市体系的人口迁徙类型划分结果见表 2。从净迁徙规模角度将城市分

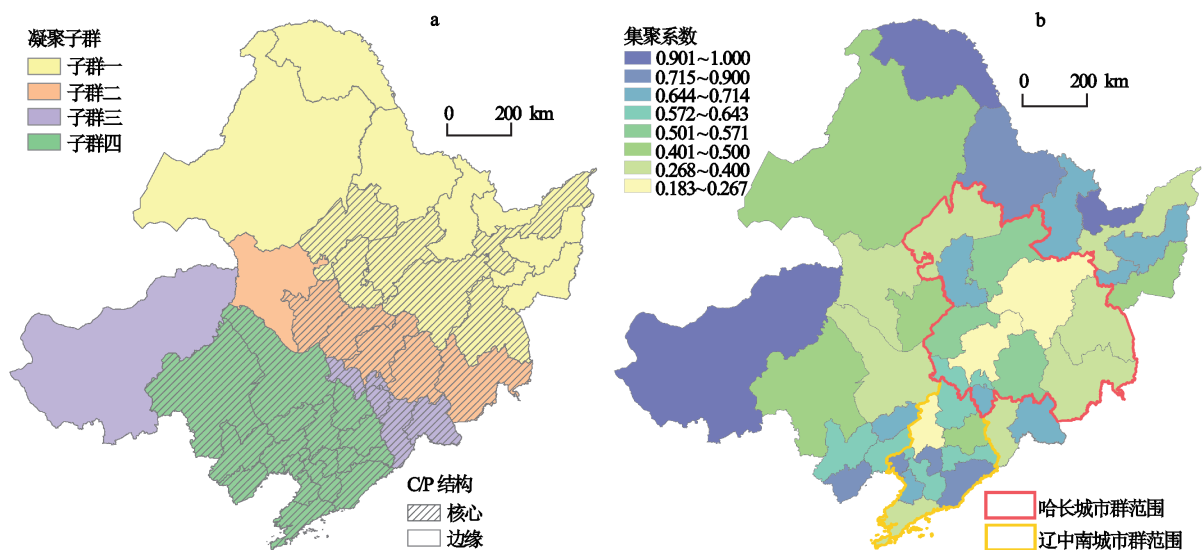


图 6 东北地区城市人口迁徙规模的网络分区与集聚系数

Fig.6 Network partitioning and agglomeration coefficients of urban migration scale in Northeast China

表 2 迁徙视角下基于 SOM 网络的东北地区城市类型分类

Table 2 Classification of cities in Northeast China based on SOM network from migration perspective

城市类型	净迁徙规模	总度	特征向量中心性	介数中心性	城市
高流入型核心城市	高流入	高	高	高	哈尔滨、沈阳
低流入型核心城市	低流入	高	高	高	长春
低流入型次核心城市	低流入	中	中	中	大连、四平
高流出型半边缘城市	高流出	中	低	低	大庆、盘锦、绥化
均衡型半边缘城市	均衡	中	中	低	锦州、鞍山、抚顺、吉林、辽阳、松原、铁岭、营口
低流出型边缘城市	低流出	低	低	低	丹东、葫芦岛、通辽、白城、白山、本溪、朝阳、赤峰、大兴安岭地区、 阜新、鹤岗、黑河、呼伦贝尔、鸡西、佳木斯、辽源、 牡丹江、七台河、齐齐哈尔、双鸭山、通化、 锡林郭勒盟、兴安盟、延边朝鲜族自治州、伊春

为高流入、低流入、高流出、低流出和均衡型；从迁徙规模和网络位置角度将城市按综合中心性从高到低分为核心、次核心、半边缘和边缘城市，综合中心性是总度、特征向量中心性和介数中心性的综合评估，反映了城市在区域内地位的综合重要程度。

分类结果显示，哈尔滨与沈阳的类型特征为流入规模大，集散规模大，特征向量中心性高，介数中心性高，为高流入型核心城市；长春被单划为一类，特征是流入规模适中，集散规模大，特征向量中心性和介数中心性高，为低流入型核心城市；大连与四平流入规模适中，集散规模中等，特征向量中心性和介数中心性中等，属于低流入型次核心城市。而大庆、盘锦和绥化流出规模大，集散规模中等，特征向量中心性和介数中心性低，属于高流出型半边缘城市；锦州等 8 市人口流入流出规模平衡，集散规模中等，特征向量中心性中等，介数中心性低，属于均衡型半边缘城市；其余城市为低流出型边缘城市，集散规模、特征向量中心性和介数中心性均在低水平，人口呈现小规模流出。可以看出，在人口迁徙视角下，层级结构中第一层级三大核心城市仍然占据网络的核心地位，但其迁徙类型略有差异；第二层级四大城市占据网络次核心及半边缘地位，但迁徙类型多样；其他低层级城市依然是网络结构中的边缘城市。总体来看，考虑了网络特征的城市类型分类与层级体系分类整体结构特征相似，但内涵更为丰富，也说明在人口迁徙网络视角下，传统的城市层级等级体系依然发挥着重要的作用。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

基于百度迁徙大数据，采用社会网络分析、首

位度、分形理论、城市标度律和 SOM 神经网络方法，以人口迁徙的视角研究了东北地区城市体系的层级与网络结构，研究发现以下结论：①东北地区城市体系首位度较弱，规模分布存在双分形现象，高位序城市规模集中度高，低位序城市规模相对松散；人口迁徙规模随城市人口呈超线性增长，存在规模报酬递增效应。②沈阳、长春和哈尔滨的集散规模最高，流入与流出量最高的城市分别为哈尔滨、沈阳、锦州和大庆、盘锦、绥化；沈阳、长春和四平处于城市网络中迁徙规模的核心位置，哈尔滨、沈阳、长春和大连是网络中的关键枢纽城市。③东北地区主要的迁徙路线为省会城市与周边一定规模的地级市，路线迁徙规模存在多分形现象，高位序路线规模分布状态趋于集中；此外，人口迁徙的主要流向与净迁徙方向结构存在明显差异。④黑龙江、吉林和辽宁的迁徙偏好以省内迁徙为主，内蒙古自治区下辖五市(盟)更倾向于与黑、吉、辽三省联系；人口迁徙的核心区域在东部、中部与南部，存在空间集聚现象；辽中南城市群已经显现集聚发展态势，而哈长城市群内部联系度较弱。⑤根据流入、流出及中心性特征将东北地区城市分为了高流入型核心城市、高流出型半边缘城市等六大类型；考虑了网络特征的城市类型分类与层级体系分类整体结构特征相似，但内涵更为丰富，也说明在人口迁徙网络视角下，传统的城市层级等级体系依然发挥着重要的作用。

#### 3.2 讨论

随着城市的快速发展，以城市等级体系为核心的中心地理论已无法解释当今世界的新城市体系<sup>[32-33]</sup>，而城市网络侧重于联系和网络位置的描述，难以从层级角度对体系进行纵向描述。本文从“层级-网络”



结合视角的研究表明,使用迁徙规模和网络位置属性的城市分类结果要比单一的迁徙规模层级划分更为合理;现今城市特性十分复杂,各城市的主体迁徙偏好、城市功能、城市优势度等均有着明显差异,将自身的绝对属性与网络中的相对位置结合才能更好地进行城市功能定位。

在传统的城市层级体系下,沈阳、长春和哈尔滨被认为是东北地区的三大核心城市,本研究的结果也支持了这一结论,结合网络分析还发现沈阳处于人口迁徙网络的核心,人口迁徙规模也最大,优于长春和哈尔滨;而哈尔滨的介数中心性和净流入人口高于沈阳与长春,是东北地区最重要的联系枢纽,也是区域内人口的最大汇集地。层级研究认为四平、绥化、鞍山和大连是区域内的第二梯队城市,而本研究根据其网络位置属性进一步指出了大连与四平是地区中的次核心城市,净迁徙模式为低流入型;而绥化市和鞍山为半边缘城市,人口呈高流出和均衡态势,两者虽在迁徙总规模上差异不大,但具有完全不同的净迁徙模式和网络位置属性。层级研究也补充了网络视角在体系研究上的薄弱点,通过首位度、分形理论,研究结果表明东北地区城市体系整体迁徙规模首位度不高,迁徙规模分布在高位序城市集中度高,梯度差异较小,发育不完善。整体来看,通过层级与网络视角的结合,区域内城市体系的多方面特征被更好地揭示,从人口流动视角明确的城市层级与网络结构特征,以及发现的多个凝聚子群及主要的人口迁徙方向与路线等结论,有助于对区域内城市体系的多方位动态观察,对区域人口、交通和疫情防控等政策的制定也有一定的参考价值。

论文从层级和网络结合的视角透视了东北地区的城市体系结构,得到一些有意义的结论,但仍存在一定的不足:首先,百度迁徙数据自身存在迁徙主体的有偏采样问题,并非所有迁徙主体都使用百度系应用或授权百度系应用获取其设备位置,这导致仍有一部分人口被忽略。其次,研究仅获取了50余天的百度迁徙数据,且仅包括区域内部的人口流动,不能反映东北地区以外流入与流出的人口情况,对区域内部人口流动的时空变化性特征,特别是人群迁徙的季节性差异等仍值得进一步深入探讨。此外,本研究也使用双休日数据复刻了研究流程,发现双休日迁徙规模略小于工作日,在城市体系结构与网络结构上差异较小,但部分城市的净流入量

存在明显差异,如长春市双休日的日均净流入量为工作日的3.3倍;四平市净流入量工作日为正,而双休日为负,其空间差异现象和原因都有待进一步探索。

## 参考文献(References):

- [1] 潘竞虎, 赖建波. 中国城市间人口流动空间格局的网络分析——以国庆-中秋长假和腾讯迁徙数据为例[J]. 地理研究, 2019, 38(7): 1678-1693. [Pan Jinghu, Lai Jianbo. Research on spatial pattern of population mobility among cities: A case study of "Tencent Migration" big data in "National Day-Mid-Autumn Festival" vacation. Geographical Research, 2019, 38(7): 1678-1693.]
- [2] 叶强, 张丽璇, 彭鹏, 等. 基于百度迁徙数据的长江中游城市群网络特征研究[J]. 经济地理, 2017, 37(8): 53-59. [Ye Qiang, Zhang Lixuan, Peng Peng. The network characteristics of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River based on Baidu Migration data. Economic Geography, 2017, 37(8): 53-59.]
- [3] Wei Sheng, Wang Lei. Examining the population flow network in China and its implications for epidemic control based on Baidu Migration data[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2020, 7(1): 145.
- [4] 童昀, 马勇, 刘海猛. COVID-19疫情对中国城市人口迁徙的短期影响及城市恢复力评价[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2505-2520. [Tong Yun, Ma Yong, Liu Haimeng. The short-term impact of COVID-19 epidemic on the migration of Chinese urban population and the evaluation of Chinese urban resilience. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11): 2505-2520.]
- [5] 顾朝林. 中国城镇体系: 历史、现状、展望[M]. 北京: 商务印书馆, 1992: 219-226. [Gu Chaolin. Urban system in China: History, present situation and prospect. Beijing: The Commercial Press, 1992: 219-226.]
- [6] Derudder B, Taylor P J. Central flow theory: Comparative connectivities in the world-city network[J]. Regional Studies, 2018, 52(8): 1029-1040.
- [7] 张闯. 从层级到网络: 城市间关系研究的演进[J]. 财经问题研究, 2009(3): 22-27. [Zhang Chuang. From hierarchies to networks: The evolution of intercity relations research. Research on Financial and Economic Issues, 2009(3): 22-27.]
- [8] 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.]
- [9] 黄洁, 钟业喜, 李建新, 等. 基于高铁网络的中国省会城市经济可达性[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 757-769. [Huang Jie, Zhong Yexi, Li Jianxin et al. Economic accessibility of provincial capital cities in China based on the presence of high-speed rails. Geographical Research, 2016, 35(4): 757-769.]
- [10] 魏治, 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.]
- [11] 浩飞龙, 王士君, 冯章献, 等. 基于POI数据的长春市商业空间格局及行业分布[J]. *地理研究*, 2018, 37(2): 366-378. [Hao Feilong, Wang Shijun, Feng Zhangxian et al. Spatial pattern and its industrial distribution of commercial space in Changchun based on POI data. *Geographical Research*, 2018, 37(2): 366-378.]
- [12] 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[J]. *地理学报*, 2021, 76(4): 853-869. [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.]
- [13] 张小东, 韩昊英, 唐拥军, 等. 基于百度迁徙数据的中国城市网络结构特征研究[J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(10): 1798-1808 [Zhang Xiaodong, Han Hanying, Tang Yongjun et al. Research on the characteristics of urban network structure in China based on Baidu Migration data. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(10): 1798-1808.]
- [14] 刘望保, 石恩名. 基于ICT的中国城市间人口日常流动空间格局——以百度迁徙为例[J]. *地理学报*, 2016, 71(10): 1667-1679. [Liu Wangbao, Shi Enming. Spatial pattern of population daily flow among cities based on ICT: A case study of "Baidu Migration". *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(10): 1667-1679.]
- [15] 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.]
- [16] 赵落涛, 曹卫东, 魏冶, 等. 泛长三角人口流动网络及其特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(4): 705-714. [Zhao Luotao, Cao Weidong, Wei Ye et al. A study on population flow network and its characteristics in Pan-Yangtze River Delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(4): 705-714.]
- [17] 陈双, 周锐, 高峻. 基于腾讯迁徙大数据的长三角城市群春运人口流动时空特征[J]. *人文地理*, 2020, 35(4): 130-138. [Chen Shuang, Zhou Rui, Gao Jun. Spatial-temporal characteristics of population flow during Spring Festival travel rush in Yangtze River Delta urban agglomeration based on Tencent Migration data. *Human Geography*, 2020, 35(4): 130-138.]
- [18] 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.]
- [19] 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[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(6): 1240-1253. [Li Tao, Wang Jiao'e, Huang Jie. Research on travel pattern and network characteristics of inter-city travel in China's urban agglomeration during the National Day Week based on Tencent Migration data. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(6): 1240-1253.]
- [20] Batty M, Longley P A. *Fractal cities: A geometry of form and function*[M]. London: Academic Press, 1994: 101-123.
- [21] Mori T, Smith T E, Hsu W-T. Common power laws for cities and spatial fractal structures[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(12): 6469-6475.
- [22] 龚健雅, 许刚, 焦利民, 等. 城市标度律及应用[J]. *地理学报*, 2021, 76(2): 251-260. [Gong Jianya, Xu Gang, Jiao Limin et al. Urban scaling law and its application. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(2): 251-260.]
- [23] 徐智邦, 焦利民, 贾琦琪, 等. 标度律视角的城市效能测度及中国城市多维要素效能分析[J]. *地理研究*, 2021, 40(6): 1596-1609. [Xu Zhibang, Jiao Limin, Jia Qiqi et al. Assessment of multidimensional performance for Chinese cities based on urban scaling law. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1596-1609.]
- [24] 焦利民, 雷玮倩, 许刚, 等. 中国城市标度律及标度因子时空特征[J]. *地理学报*, 2020, 75(12): 2744-2758. [Jiao Limin, Lei Weiqian, Xu Gang et al. Urban scaling and the spatio-temporal characteristics of scaling exponents in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(12): 2744-2758.]
- [25] Bettencourt L M A, Lobo J, Helbing D et al. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(17): 7301-7306.
- [26] 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.]
- [27] 王珏, 陈雯, 袁丰. 基于社会网络分析的长三角地区人口迁移及演化[J]. *地理研究*, 2014, 33(2): 385-400. [Wang Yu, Chen Wen, Yuan Feng. Human mobility and evolution based on social network: an empirical analysis of Yangtze River Delta. *Geographical Research*, 2014, 33(2): 385-400.]
- [28] 陆天华, 于涛. 基于社会网络分析的旅游地乡村社会空间重构研究——以南京世凹“美丽乡村”为例[J]. *地理科学*, 2020, 40(9): 1522-1531. [Lu Tianhua, Yu Tao. Reconstruction of rural social space in tourist destinations based on social network analysis: A case study of Shiwa beautiful village, Nanjing City. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(9): 1522-1531.]
- [29] Kohonen T. *The Self-Organizing Map*[J]. *Neurocomputing*, 1998, 21(1-3): 1-6.
- [30] Dong Weihua, Wang Shengkai, Liu Yu. Mapping relationships between mobile phone call activity and regional function using Self-Organizing Map[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 87: 101624.
- [31] Ribeiro F L, Meirelles J, Ferreira F F et al. A model of urban

- scaling laws based on distance dependent interactions[J]. Royal Society Open Science, 2017, 4(3): 160926.
- [32] Farrell K, Nijkamp P. The evolution of national urban systems in China, Nigeria and India[J]. Journal of Urban Management, 2019, 8(3): 408-419.
- [33] Ioannides Y M, Overman H G. Spatial evolution of the US urban system[J]. Journal of Economic Geography, 2004, 4(2): 131-156.

## "Hierarchy-network" structure of cities in Northeast China based on Baidu migration data

Hao Feilong<sup>1,2</sup>, Wu Xiaoran<sup>3,4</sup>, Guan Haoming<sup>1,2</sup>, Wang Shijun<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, Jilin, China; 2. Key Laboratory of Geographical Processes and Ecological Security of Changbai Mountains, Ministry of Education, Changchun 130024, Jilin, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To explore the pattern of population flow will help reveal the law of urban systems and connections between cities. Based on Baidu migration data from March 9 to April 28, 2021, the "hierarchical-network" structure of cities in Northeast China was studied from the perspective of population migration by using fractal theory, urban scaling law, social network analysis and self-organizing maps method. The results are as follows: 1) The primacy ratio of urban system based on migration scale is low, and the distribution of high-order cities is concentrated. The scale fractal characteristics of migration routes are concentrated in the high-order and loose in the low order. The relationship between migration scale and urban population is super linear, and Shenyang, Changchun and Harbin are at the first level. 2) In the network based on migration scale, Shenyang, Changchun, Siping, Tieling and Harbin are at the core of the network, while Harbin, Shenyang, Changchun and Dalian are the key hub cities of the network. 3) There are obvious differences in the structure of the network between the directed migration flow and the net migration flow. The migration scale of Shenyang and Changchun is larger, while the net migration volume of Harbin is higher. 4) There is a spatial agglomeration phenomenon of migration behaviors, and the core regions are in the east, central and southern regions. The migration behaviors within the region are mainly intra-provincial migration, which can be divided into 4 sub-groups according to migration preferences. 5) The internal connection of the Harbin-Changchun metropolitan area is weak, and the central-and-southern Liaoning has shown a trend of agglomeration development. 6) Cities in northeast China can be divided into 6 types according to their migration scale and network location, such as high-migration core city and high-migration semi-marginal city, which can better reveal the inner characteristics of cities than a single scale hierarchy division.

**Key words:** urban system; population migration; social network analysis; city scaling law; Baidu migration data