

中国城市网络化物流联系空间格局与结构 ——基于快递网点数据的研究

唐承辉¹, 马学广^{2*}

(1. 上海财经大学城市与区域科学学院, 上海 200433;

2. 中国海洋大学国际事务与公共管理学院, 山东 青岛 266100)

摘要:作为城市关系的重要形式, 快递物流直接涉及城市间物质流动。基于快递网点数据, 论文以中国336个地级以上城市为研究单元, 综合运用GIS空间分析、社会网络分析以及位序—规模法则等方法对中国城市网络的空间格局、特征与结构进行分析。研究表明: ①城市间物流联系的空间格局具有层级性与不均衡性, 并受区位条件影响呈现出东中西地带性递减特征; ②整体联系中, 快递网络的密度较低且具有明显的核心—边缘结构, 核心区凭借良好的通达性而呈现出小世界性; ③局部联系中, 广东、浙江以及江苏等省区间形成高等级网络联系与集群规模, 并促进了资源的跨区域流动; ④个体网络中, 城市联通度大致服从幂律分布, 并且其规模分布符合Zipf法则而呈现出双分形结构。此外, 快递网络中城市地位除了与经济以及人口规模密切相关外, 行政等级也起着较为重要的作用。

关键词:城市网络; 快递网点; 链锁模型; 空间联系; 中国

随着全球化和知识经济快速发展, 不相连的空间可以发生各种物质与非物质的流动, 并导致传统的地方空间向流动空间的转变^[1]。尤其是20世纪90年代以来, 经济地理学的“关系转向”使学者们从关注城市内部属性转移到城市外部联系^[2], 从而引入城市网络的探讨^[3]。作为当代社会行动者之间复杂互动的隐喻, 网络不仅重塑了全球与地方关系^[4], 也创造了基于联系的新型地理空间^[5]。尤其是在经济全球化背景下, 分析城市网络特征与结构对于制定城镇体系规划、实施区域发展战略以及布局基础设施等具有十分重大的意义。在城市网络研究中, 航空^[6]、铁路^[7]与公路^[8]等基础设施网络直接表征了城市间人员等要素流动, 受到了研究者的广泛关注。基于企业组织的空间联系构建网络以反映资金等要素流动, 也成为了该研究的重要视角。

其中, 以全球化与世界级城市研究小组(Globalization and World Cities Study Group and Network, GaWC)基于高级生产性服务业(Advanced Produce Service, APS)的跨区域布局, 分析世界城市网络特征及其形成机制最为典型^[9]。此外, 也有部分学者利用科研合作^[10]、媒体网络^[11]以及非政府组织^[12]等社会要素流动揭示多样化的城市联系。近年来, 随着信息化和网络化的深入发展, 基于微博^[13]、百度贴吧^[14]以及手机信令^[15]等互联网大数据, 探讨全球化背景下中国城市网络格局与形成机理成为了新热点。这些流数据从不同层面测度了城市联系及其复杂经济活动, 从而为城市网络研究提供了充实的数据基础。由于城市间的经济联系主要表现为企业间人才、信息以及资金等资源的流动, 企业间关系仍是城市网络研究的主要方向^[16]。近期研究

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2020-02-22。

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(18BJL092)。[Foundation: National Social Science Foundation of China, No. 18BJL092.]

第一作者简介: 唐承辉(1993—), 男, 江西赣州人, 博士生, 主要从事区域经济与城市地理研究。

E-mail: chenghuitang@outlook.com

*通信作者简介: 马学广(1979—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师, 主要从事城乡规划与区域空间治理、海洋国土空间规划与治理、住房政策与土地资源开发管理研究。E-mail: hugeomaxg@163.com

引用格式: 唐承辉, 马学广. 中国城市网络化物流联系空间格局与结构: 基于快递网点数据的研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(11): 1809-1821. [Tang Chenghui, Ma Xueguang. Spatial pattern and structure of networked logistics connection of cities in China based on express logistics branch data. Progress in Geography, 2020, 39(11): 1809-1821.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.11.003

中,也逐渐引入更多元的视角和方法,探讨特定经济活动的城市网络与结构^[17],如能源网络^[18]、银行网络^[19]以及物流网络^[20]等。

快递业作为一种特殊的物流行业,包含了网络交易的虚拟流和现实配送的交通流,直接涉及城市间物质流动^[21]。尤其是随着电子商务业的快速发展,快递业获得了急剧增长并通过大量网点的空间布局进行业务配送^[22],从而促进城市间物质等要素流动^[23]。因此,基于快递网点空间布局的物流联系也成为了解读中国城市网络的崭新视角与工具。然而,由于数据难以获取,学者们主要通过静态属性数据对物流联系进行间接测度。如建立物流综合水平指标体系,并基于引力模型进行衡量^[24]。一些学者也借鉴APS企业测度城市联系的方法,如基于链锁模型^[25]和总部分支数据等^[26]。此外,部分学者通过获取快递流量或运单等微观数据分析城市联系的特征^[27]。其中,基于引力模型的方法虽能反映城市物流发展程度,但难以揭示城市间物流联系^[28]。快递流量或运单数据虽较为直接表征快件的空间移动,但数据量大且难以获取。同时,主要关注单一快递企业,难以全面反映物流联系的整体格局^[29]。作为市场资源配置的主体,快递网点的跨区域布局与组织机构网络化发展不仅反映了城市间制造与流通等经济活动发生与往来^[30],而且其产生的社会与经济效益重塑着城市与区域经济格局^[31],从而对人类社会生产与生活方式带来深刻的影响。

在快递服务系统中,大型快递企业主要有总部、区域集散(转运)中心、城市中转(分拨)站以及服务门店(营业点)等不同级别的网点,从而实现快件集中、分拨与收寄等功能^[32-33]。因此,本文将借鉴链锁模型并运用GIS空间分析、社会网络分析以及位序—规模法则等方法,探讨中国城市间快递网络的空间格局、特征与结构等,以期为全球背景下理解新时代中国城镇体系重组以及城市与区域发展提供参考与借鉴。以往虽对快递网络进行了研究,但主要集中于区域尺度^[34],并且多关注单一快递企业的网络布局与结构优化^[28],而对全国尺度的实证研究相对不足。此外,部分研究中往往仅考虑级别或数量等单一因素对快递业务量的影响,而非对不同级别的网点进行赋值后加总^[35]。因此,本文爬取了多家大型快递企业的全国网点数量与级别等数据,并对不同级别的快递网点进行分别赋值后加总,从而更全面衡量快递业务总量及其对城市网络的影响。

1 研究方法 with 数据来源

为反映城市网络的宏观格局,分别从空间形态与首位联系揭示物流联系的地域特征。由于网络在整体、局部与个体等尺度下具有不同的结构,因此采用连通度分析、集聚强度分析、社会网络分析、主干网络分析、空间自相关分析以及位序—规模法则等方法进行测度。

1.1 研究方法

1.1.1 基于链锁模型的联通度分析

作为企业在不同地区的分支机构,快递网点通过集中与分散功能实现了快件的空间移动。为反映快递网点所在城市的经济联系,借鉴GaWC提出的链锁模型构建8家大型快递企业与336个城市的二模矩阵,从而计算城市间连通度。具体计算公式如下:

$$V_{ij} = \sum_h w_h \cdot n_{ij,h} \quad (h=2, \dots, 5) \quad (1)$$

式中: V_{ij} 表示快递公司 j 在城市 i 的得分; h 为快递网点的级别,分别为总部、区域集散中心、城市分拨站以及服务门店等; w_h 为某一级别快递网点所对应的权重值,参照国内外研究依次从总部到服务门店赋值 5~2 分; $n_{ij,h}$ 表示快递企业 j 在城市 i 所拥有 h 级别网点的数量。

将快递与城市的二模矩阵转换为城市联系矩阵,用 $R_{ab,j}$ 表示快递企业 j 在城市 a 与城市 b 之间的连通度, V_{aj} 与 V_{bj} 分别表示快递企业 j 在城市 a 与城市 b 的得分,则有:

$$R_{ab,j} = V_{aj} \cdot V_{bj} \quad (j=1, 2, \dots, 8) \quad (2)$$

城市 a 与城市 b 之间的总体连通度 R_{ab} 为:

$$R_{ab} = \sum_j R_{ab,j} \quad (j=1, 2, \dots, 8) \quad (3)$$

单一城市 a 在快递网络中的连通度 N_a 为:

$$N_a = \sum_i R_{ai} \quad (i=1, 2, \dots, n; \text{且 } i \neq a) \quad (4)$$

由于连通度数值较大,将 R_{ab} 与 N_a 分别通过取各值与最大值的比值进行标准化,以便于分析与比较。由于链锁模型会产生大量的冗余连接,不利于城市网络空间格局与结构的识别^[36]。同时,社会网络分析中对这些冗余连接也要进行二值化处理,易导致成网密度过高,降低结果的准确性^[37]。因此,下文选取城市间连通度前 10000 条数据进行可视化与构建 0-1 矩阵,以提高分析结果的准确性。

1.1.2 集聚强度分析

集聚性(S_m)指某一个城市与其他城市联系强度之和,可表征城市在网络的集聚强度^[26],计算公式为:

$$S_m = \sum_{i=1}^n (S_{mi} + S_{im}) \quad (5)$$

式中: S_{mi} 表示城市 m 与城市 i 的联系强度, S_{im} 表示城市 i 与城市 m 的联系强度。

1.1.3 社会网络分析

利用Ucinet软件,将快递网络拓扑化并测度网络密度、聚集系数以及平均最短路径等指标,从而揭示快递网络的整体特征。其中,网络密度指节点间联系的紧密程度,而聚集系数表示节点间联系的聚集程度^[38]。平均最短路径表示任意2个节点相互到达所必须经过的路径数目,往往用于反映网络节点的通达效率。核心—边缘模型依据节点的重要性,往往用于识别处于核心与边缘位置的节点。其中,位于核心区的节点间联系更密切且协调能力更强,而处于边缘区的节点间联系更为稀疏且协调能力更差。度数中心度表示与某节点直接相连其他节点的个数总和,其数值越大表示某节点的联系能力越强,从而可表征节点在网络的影响力与地位。中间中心度表示网络中所有最短路径中经过该节点的数量比例,可用于识别中转节点与中介效应。因此,利用Ucinet软件分别测度节点的度数中心度与中间中心度,前者基于节点的影响力分析城市辐射效应及其相互作用模式,后者基于节点中转能力识别快递网络的枢纽及其轴辐结构。

1.1.4 空间自相关分析

作为节点属性的重要内容之一,度数中心度反映了节点间联系情况及其在网络中影响力,也被用于城市中心性的表征。通过GIS软件的空间探索性数据分析功能,对节点度数中心度在整体与局部的空间相互作用模式进行测度,从而分析快递网点空间布局的整体与区域集聚性。具体而言,分别计算节点度数中心度的全局Moran's I 指数和局部Moran's I 指数(Local Moran's I),并利用LISA(local indicator of spatial association)图对城市间相互作用模式进行分类。全局Moran's I 指数取值在 $[-1, 1]$ 。该指数介于 $0 \sim 1$ 之间表示度数中心度存在空间正相关,且越近于1空间相关性越明显;若介于 $-1 \sim 0$ 之间则表示度数中心度呈空间负相关,且越接近-1空间差异性越大;若该指数等于0则表示不存在空间

自相关。局部Moran's I 指数是度数中心度在区域空间相互关联程度的表征,有助于识别局部热点地区。局部Moran's I 指数也是全局Moran's I 指数分解到各研究单元的具体数值,其取值也在 $-1 \sim 1$ 之间。计算公式如下:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij} Z_i Z_j}{(\sigma^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n W_{ij})} \quad (6)$$

$$Z_i = (X_i - x) / \sigma, \quad \sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x)$$

$$\text{Local Moran's } I = Z_i \sum_j W_{ij} Z_j \quad (7)$$

式中: W_{ij} 为空间权重; X_i 为在节点 i 的中心性值; x 为节点中心性的均值。

1.1.5 位序—规模分析

为分析城市体系的分布规律,以总体连通度表征网络中城市规模,并利用Zipf法则对城市规模及其位序关系进行测度。常用公式与对数变换公式如下:

$$P_i = P_1 R_i^{-q} \quad (8)$$

$$\lg P_i = \lg P_1 - q \lg R_i \quad (R_i = 1, 2, \dots, 336) \quad (9)$$

式中: P_i 为 i 城市的连通度 N_i , P_1 为首位城市的连通度, R_i 为城市 i 在所有城市连通度的位序, q 为Zipf指数。若指数 $q=1$ 表示城市分布相对均衡,城市体系处于协调发展;若指数 $q>1$,则城市规模分布较集中;若指数 $q<1$,则城市规模分布较为分散。

1.2 数据来源

目前,中国快递行业排名前10的企业主要有顺丰速运、圆通快递、京东快递、申通快递、韵达快递、百世汇通、中通快递、宅急送、邮政EMS以及天天快递,其中京东快递为电商自营快递,邮政EMS为国营快递企业,其他8家为民营快递企业。在快递行业中,民营快递企业主要依据市场原则进行网点布局与快件派送,更能真实反映出全球化背景下城市本身的“经济联系”以及城市网络的演化。因此,考虑数据的代表性与可获取性,本文选取这8家民营快递企业为研究对象,并通过集搜客软件爬取快递查询网址快递100(<http://www.kuaidi100.com/>)、爱查快递(<http://www.ickd.cn/>)中这些快递企业全国网点分布信息,包括各个网点名称、地址与级别等。同时,利用这些快递企业官网对网点数量与级别信息进行补充与完善,并剔除无效数据,最后得到有效网点数据68415条。这些大型快递企业网点已形成较完整的服务网络,并基本上覆盖中国336个地级

以上城市,因此将336个地级以上城市作为研究单元。由于中国香港、澳门及台湾地区快递网点数据难以获取,暂不将这些地区纳入研究范围。此外,通过《中国统计年鉴2017》和《中国城市统计年鉴2017》获取各城市地区生产总值、人口总数、土地面积以及三次产业比重等数据,并利用各地区发布的统计公报与国家统计局网站进行补充。

2 快递网络下空间联系格局

通过节点与线路的空间布局,快递企业进行快件派送与物流服务,并推动城市间经济联系的形成与发展。因此,本文分别从城市联系的空间形态与首位联系的方向与强度分析快递物流网络的空间格局。

2.1 快递网络的空间形态

基于链锁模型构建城市间联系矩阵,选取连通度排名前10000条数据,并运用GIS软件自然间断点法进行分级与可视化表达,发现城市网络具有层级性与不均衡性特征(图1)。具体而言,主要有以下3个方面:

(1) 第一等级的城市联系主要集中在北京、上海、广州、武汉以及成都等核心城市,并大致形成了“菱形”的空间结构。这些城市间连通度均在0.5以上,城市间联系密切并奠定了国内城市网络的基础。尤其是北京、上海以及广州等城市经济发达且人口密集,快件派送的需求量大,吸引了众多快递网点空间布局,从而推动人员、信息以及物质等资源在这些城市间快速流动与集聚。此外,西安、成都分别与其他核心城市也形成了高等级联系,并分别成为西北和西南地区重要的快递物流集散中心。

(2) 第二与第三等级的城市联系主要集中于胡焕庸线东侧,西侧地区联系较缺乏且成网密度较低。其中,第二等级主要为东部与中部城市间联系,西部地区联系较缺乏。尽管第三等级中乌鲁木齐、南宁以及昆明等城市凭借省会城市地位,成为了省域性快递物流集散中心,从而与东部以及中部城市形成一定的联系,但由于西部地区整体经济较为落后,人口分布也较少,导致快递需求不足以及网络体系发育水平较低。尤其是青海、西藏以及宁夏等地区的部分城市甚至成为了空间联系的孤岛,缺乏与东部以及中部地区的资源流通渠道,进而反映出城市网络的核心—边缘结构。

(3) 低等级城市间联系数量较多,但连通度却较低。在第四与第五等级中,城市间联系数量大幅度增加,并且形成全国尺度的城市网络。这表明快递企业通过网点空间布局与扩张形成覆盖中国大多数城市的快递物流网络,促进了地域间物质的流通与交换。然而,高连通度的城市连线数量较少但联系规模较大,而低连通度的城市连线数量较多但联系规模普遍较小。在快递网络中,这些不同联系规模的城市,一方面通过集聚与扩散作用促进城市网络体系的形成与发展,但另一方面也加剧了全国与区域地理格局的不均衡性。

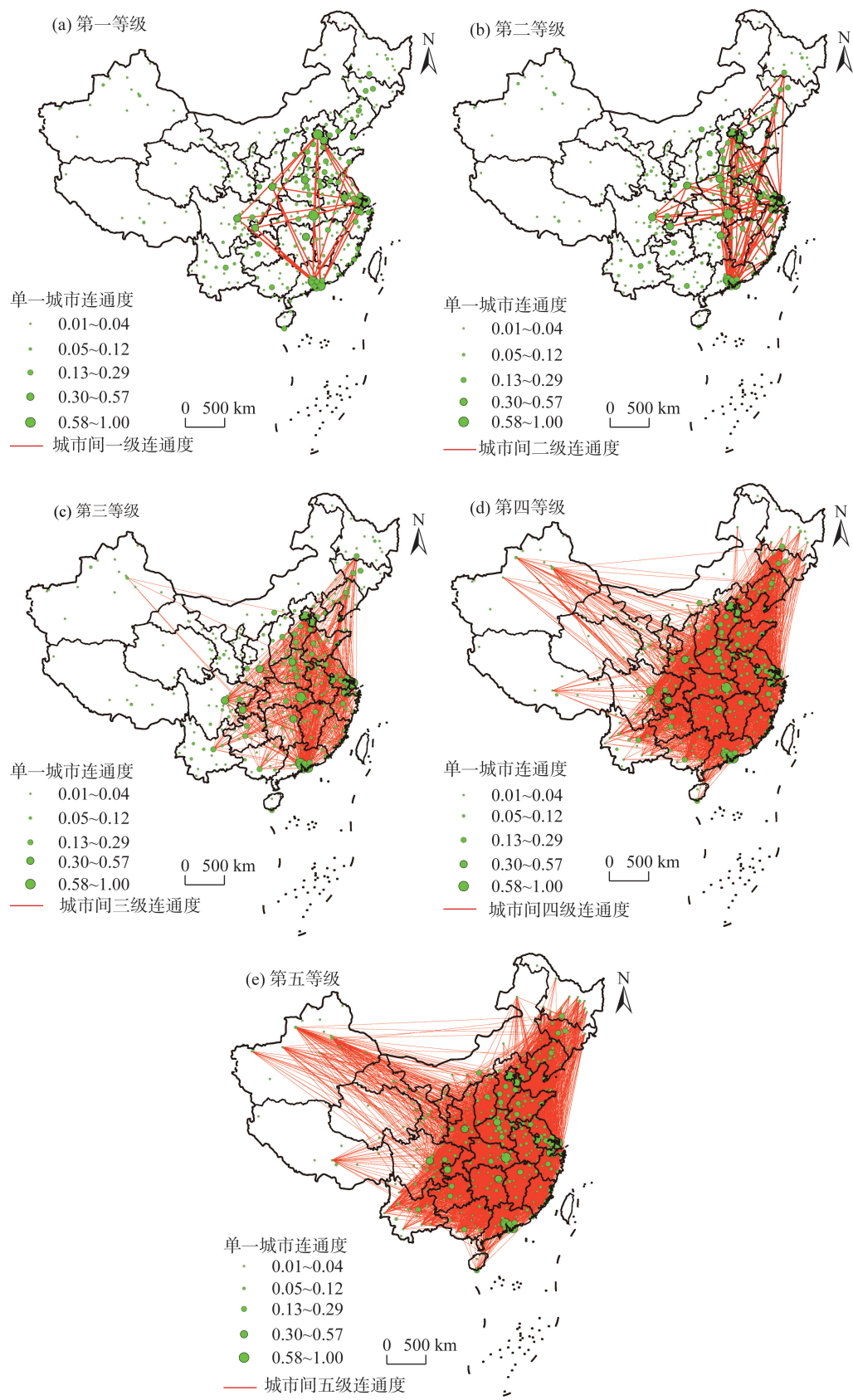
2.2 快递网络的首位联系格局

基于首位联系方向与强度进一步识别快递网络空间格局,并利用GIS软件自然间断点法对其进行分级与展示(图2)。首位联系指某城市与其他城市形成的最密切联系,而首位联系规模指某城市拥有首位联系的数量。首位联系格局反映了中国城市网络的大城市指向性与等级规模分布等特征。具体而言,北京成为华北与东北等城市主要首位联系对象,上海成为华东与华中等城市的主要首位联系对象,而广州成为华南与西南等城市的主要首位联系对象。

北京、上海与广州等核心城市凭借着强大的经济与人口规模集聚着大量的快递网点,并形成较多跨越行政边界的长距离首位联系,反映出在经济全球化背景下,行政边界与地理距离对城市间物流联系的限制作用在逐渐降低。这些全国性核心城市成为了资源流动的优先集散地,主导着城市联系的方向与强度,从而表现出强烈的巨型空间溢出效应。同时,也反映出基于链锁模型构建的快递网络具有一定“马太效应”,即某城市的分支机构数量越多且级别越高,与其他城市间的连通度也越高,从而导致网络出现首位联系极化而联系广度分散的特征。此外,成都、武汉以及郑州等城市首位联系对象主要集中省域范围内,表明这些城市辐射能力较为有限并具有邻近属地特征。从首位联系规模来看,北京与上海等全国性核心城市处于第一等级,其次是武汉与成都等区域性核心城市,再次是南宁与昆明等更次一级的省域内核心城市,从而使城市体系呈现出一定的等级规模特征。

3 快递网络整体联系特征与结构

空间形态与首位联系揭示了快递物流网络的



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(2019)1697号的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 快递网络下中国城市间联系的空间格局

Fig.1 Spatial pattern of urban connection considering the express logistics network in China

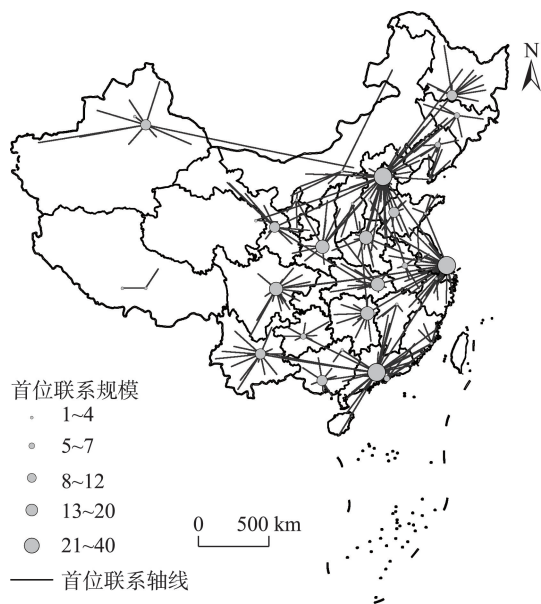


图2 中国快递网络的首位联系格局
Fig.2 Pattern of primary connections of express logistics network in China

宏观格局,但主要为定性描述而缺乏定量测度整体联系强度与集聚性。因此,利用社会网络指标与空间自相关分析等方法对整体联系特征与结构进行揭示。

3.1 整体联系的核心—边缘结构

利用Ucinet软件将连通度矩阵进行二值化,并对网络密度、聚集系数以及平均最短路径等指标进行测度(表1)。计算得出,全国快递网络的密度仅为0.51,平均最短路径为1.71,即任意2节点间需通过1.71条线才能相连,低于ER随机网络的理论值(聚集系数为0.660,平均最短路径为1.314)^[39],表明网络整体关联性水平相对较低,并且城市间联系有待提高。同时,对整体网络的核心—边缘程度进行分析,发现拟合系数为0.59,核心区密度为0.73而边缘区密度仅为0.41,反映出快递网络具有明显的核心—边缘结构,并且城市间联系在核心区与边缘区呈现出较大不平衡性。从聚集系数来看,全国快递

网络因城市数量较多且联系较分散,网络聚集系数为0.51,而核心区网络因城市数量较少且节点更密集,聚集系数高达0.68且节点间具有较好的互惠性。然而,边缘区因城市数量众多且节点间联系较缺乏,平均最短路径高达2.53且聚集系数仅为0.39,反映出边缘区网络节点间传输性与互惠性均较差,不利于城市间物质资源流动与集聚,并额外增加物流运输与扩散的成本。综合来看,相比于全国与边缘区快递网络,核心区快递网络具有较高的聚集系数和较小的平均最短路径,即节点更为密集且具有良好的通达性,从而使得快件在实际运输中仅需通过更少的节点进行中转,反映出核心区具有较显著的小世界性。

3.2 整体联系的集聚程度

作为城市间联系强度之和,集聚性系数可用于识别城市联系的集聚程度。利用GIS软件的自然间断点分级法对快递网络集聚性进行分级展示,以揭示城市的流集聚能力。同时,通过Ucinet软件测度节点的度数中心度表征城市的辐射能力,并进行探索性空间数据分析,从而探讨节点在区域的相互作用模式。

集聚性刻画了不同城市群发展态势以及核心城市的辐射效应。其中,长三角、珠三角以及京津冀等城市群形成了多个集聚中心,并呈现出高水平网络化发展态势,表明这些地区快递网络发育较为成熟,并对周围地区产生了强烈的辐射效应。尽管长江中游城市群也形成了武汉、长沙以及南昌多个集聚高地,但规模较小且相互间未形成连续脊带,网络化发展水平较低,并且亟待强化核心城市间物流联系。同时,西安、太原以及南宁等省会城市凭借独特的行政地位与信息资源,也成为省域内联系的集聚高地。这些城市也是重要的区域集散中心,并通过中转功能与省内外其他城市形成较密切的联系。此外,快递网络的集聚高地主要集中在东部与中部地区,而西部大部分城市处于空间联系的低谷,进一步反映出东西部地区经济联系的不均衡性。

城市度数中心度的空间分布呈现出空间正相关特征,并在长三角、京津冀以及珠三角等城市群地区形成高一高集聚区。快递网络全局Moran's I指数是0.106,Z值为11.14($P=0.001$),表明在显著性水平为1%下城市的度数中心度具有一定的空间正相关性。采用LISA图对城市度数中心度的局部作用模式进行深入分析,并依据GIS软件将集聚模式

表1 中国快递网络整体联系指标与属性
Tab.1 Overall connection indicators and attributes of express logistics network in China

地区	网络规模	网络密度	平均最短路径	聚集系数	互惠性
全国	336	0.51	1.71	0.51	0.36
核心区	62	0.73	1.43	0.68	0.65
边缘区	274	0.41	2.53	0.39	0.22

划分为高一高集聚、高一低集聚、低一高集聚以及低一低集聚4种类型。总体来看,大多数城市因度数中心度较小而导致集聚与辐射能力有限,并未形成明显的局部空间集聚现象,成为了集聚不显著的地区。然而,京津冀、长三角和珠三角凭借着高度发达的经济与密集的人口吸引着大量快递网点的集聚,从而分别形成了以北京、上海及广州等城市为核心的高一高集聚区。此外,泉州和厦门作为海峡西岸城市群的核心城市,民营经济较为发达且人口较多,也形成一定的高一高集聚区。这些城市群地区不仅物流联系十分密切,而且对周围地区产生了明显的辐射带动作用。同时,哈尔滨、成都、武汉及西安等城市作为区域物流的枢纽,相比于周围地区度数中心度更高,形成高一低集聚模式。然而,低一高集聚与低一低集聚模式的城市较少,仅零星分布在兰州、乌鲁木齐和呼和浩特等少部分西部省会城市,说明这些城市虽凭借行政与信息等资源吸引了部分快递网点集聚,但因数量与规模有限,难以对周围地区产生明显的辐射带动作用(图3)。

4 快递网络局部联系与功能组织

前文依据社会网络指标对整体网络联系进行了分析,但对快递物流联系的局部特征尚缺乏刻

画。因此,将城市间联系分类汇总到省级行政区并分析省际间联系与格局。同时,利用中间中心度与主干网络等方法分析快递网络枢纽及其功能组织。

4.1 快递网络省区间联系

作为理解区域空间作用模式的重要视角,省级行政边界对城市间资源流动产生较大影响,甚至成为了不同地域系统的重要分界线。为分析快递网络区域联系格局,将城市间联系分类汇总到省级行政区,并进行标准化以利于比较。在该格局中,广东作为中国经济第一大省,经济基础雄厚、基础设施发达并且人口众多,吸引了大量快递网点的集聚。因此,广东与北京、上海、浙江、江苏、湖北以及四川等多个省级行政区形成第一等级的跨地域物流联系,表明这些经济发达的省区在物流网络中具有独特的区位优势,并促使物流联系逐渐突破行政区划与地理距离的限制而呈现出跳跃式发展。然而,江西、广西以及湖南等与广东地域邻近的省份主要与其形成较低等级的物流联系,说明快递网点布局及其网络联系受到地方经济发展水平的影响较大。此外,在长三角城市群,上海、浙江与江苏等多个省区间均形成第一等级的快递物流联系,表明这些地区快递网点密集并形成较发达省区间网络,从而促进城市群内部联系与综合实力提升。

弦图作为拓扑网络可视化的新型方法,可利用

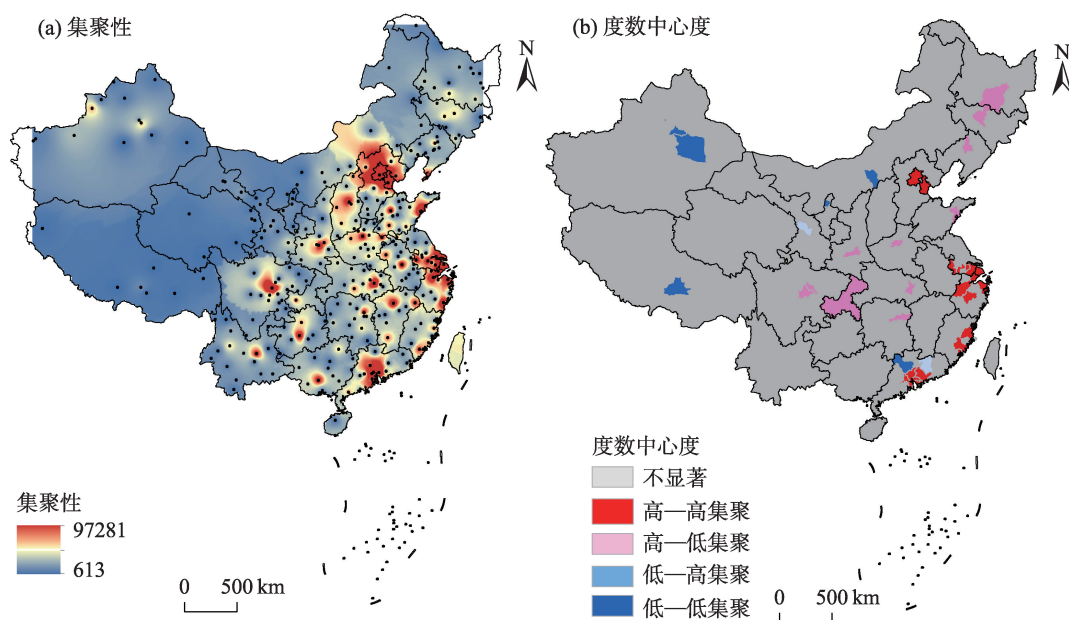


图3 中国快递网络的集聚强度与度数中心度LISA分布模式

Fig.3 Intensity of agglomeration and degree centrality LISA distribution pattern of express logistics network in China

圆弧与连线反映节点属性与联系,即圆弧越长表示节点属性值越大,而圆弧间连线数量越多且宽度越大则说明节点间联系越密切。基于省区间的弦图更为直观地识别了快递网络特征与结构,其结果与地理网络具有较高的相似性,广东、江苏以及浙江等东部省级行政区物流联系广泛且集群规模更高,而陕西与甘肃等中西部地区省区间物流联系更缺乏且规模更小,从而反映出省区尺度下快递物流联系也受到区位条件影响而呈现出地域不均衡性。尽管北京与上海等直辖市享有省级行政管理权限并在城市尺度处于网络核心位置,但在省区网络中由于经济与人口总体规模更小,导致其联系数量与集群规模小于广东、浙江与江苏等省份。此外,河南与山东等人口众多省份快递物流网络也较为密切,并形成较大的集群规模,说明快递物流联系与人口规模也具有较高相关性(图4)。

4.2 核心枢纽与主干网络

作为节点中转与衔接能力的重要体现,中间中心度往往用于识别快递网络的枢纽及其轴辐式结构。因此,利用Ucinet软件测度节点的中间中心度并形成拓扑网络。与连通度类似,北京、上海、广州以及深圳4个城市的中间中心度处于最高等级,表明这些城市具有强大桥梁的中转作用,从而成为全国资源流动与集聚的轴心,并对大部分城市产生明显的辐射作用。作为次级核心城市,武汉、成都以及西安等城市的中间中心度也较高,成为了区域性快递物流的中转枢纽,并担当着衔接区域内外外部物

流联系的重任。东北地区仅沈阳、大连以及哈尔滨等中间中心度相对较高,其他城市因民营企业发展不足而难以吸引快递网点的布局,从而导致快递网络轴辐式结构发育水平较低。此外,西部地区因经济与人口规模相对较低,仅形成了乌鲁木齐、太原以及兰州等省域性物流枢纽,其他大部分城市中间中心度也较小,并缺乏对物流资源控制与协调能力,从而处于网络的边缘地带并拉大与东部地区城市的发展差距。通过全国性、区域性以及省域性物流枢纽,快递网络形成了密集的干线通道以及轴辐式结构,从而实现物质的集中与分散并降低中转时间与运输费用。

依据联系的稀疏性与保留核心节点,选取连通度高于0.25的城市及其联系绘制弦图,从而更为直观地识别快递网络的主干及其拓扑关系。主干网络中,北京、上海、广州以及深圳等全国性物流枢纽不仅相互间产生了联系,而且与其他城市也形成了较多联系,从而呈现出明显的集中化趋势并形成较高的集聚规模。然而,相比于北上广深等一线城市,武汉、成都以及重庆等城市高等级联系数量较少且联系规模较低,导致其在主干网络的连通度与影响力与北京等城市仍有较大差距。同时,主干网络剔除了较多中西部地区的城市,而保留较多东部地区城市,反映出东部地区凭借发达的经济与密集的人口成为了物品生产与消费的集中地,从而吸引着众多快递网点的布局并成为主干网络的组成部分(图5)。

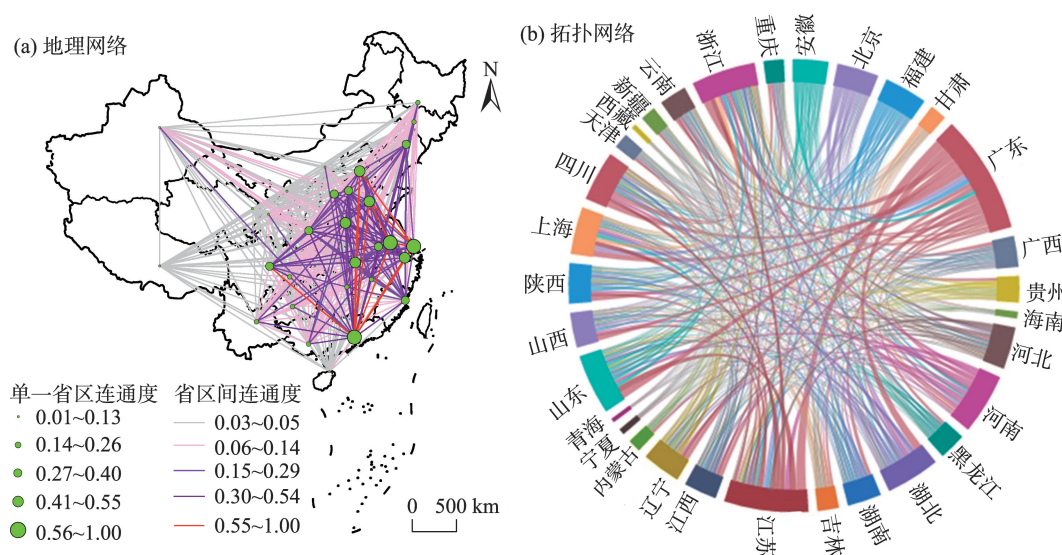


图4 中国省区间快递网络及其拓扑图

Fig.4 Patterns of interprovincial express logistics network and topological diagram in China

5 快递网络的节点属性

尽管前文对快递网络空间格局等内容进行了分析,但对节点属性及其分布特征缺乏探讨。因此,利用位序—规模法则与多元线性回归对节点连通度及其影响因素进行分析,从而揭示城市连通度与其规模之间的关系。

5.1 城市节点的位序—规模分布

为分析节点在空间与位序上的分布特征,将城市连通度进行排序并对其进行位序与连通度进行双对数拟合,发现城市连通度呈现出明显的幂律分布特征(图6)。上海、北京、成都、广州以及武汉处于连通度的前5位,而大部分中西部地区的城市由于基础设施、经济发展水平与人口规模等条件不足,导致

其连通度排序处于末尾,从而使得城市连通度规模分布也呈现出均衡性。在双对数分布图(图6b),点列若能拟合成直线则符合 Zipf 定律,并且若拟合成1条直线则为单分形结构,而拟合成2条直线则为双分形结构^[40]。结果显示,城市连通度的位序—规模分布符合 Zipf 定律,并呈现出典型的双分形结构。通过双标度区的线性拟合,发现拟合相关系数均在0.8以上,具有较好的拟合效果。从拟合的直线方程来看,转折点左侧直线的 Zipf 指数 q 为0.94,表明大多数城市连通度规模的变差较小,中间位序节点较多,即城市联通度规模具有正态分布特征并较分散。然而,位于转折点右侧直线 Zipf 的指数 q 高达15.19,表明这些城市(多为中西部的城市)连通度规模的变差较大,高位序城市的连通度规模远高

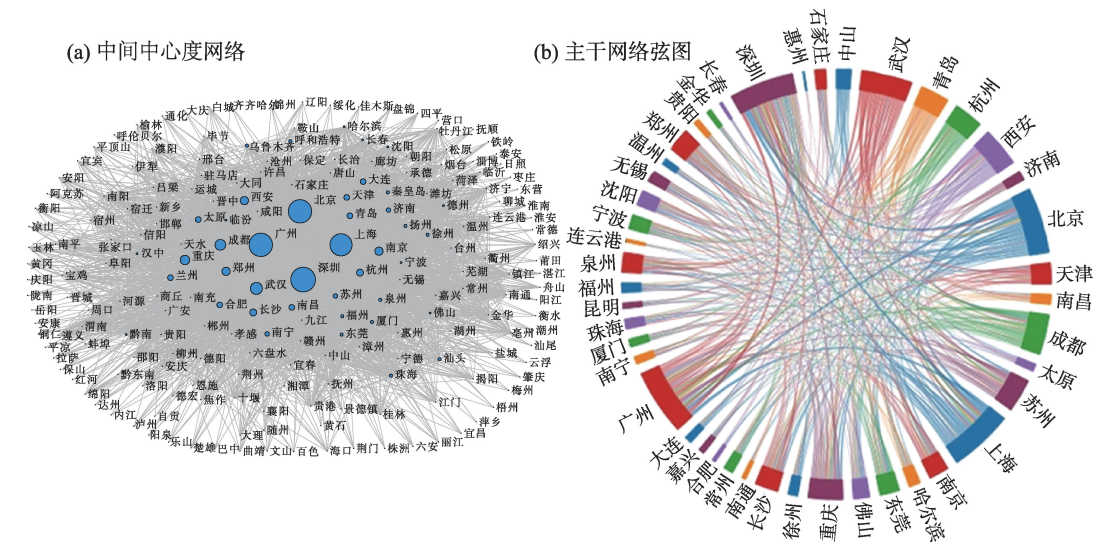


图5 中国快递网络的中间中心度与主干网络弦图
Fig.5 Center centrality of express logistics network and the backbone network string diagram in China

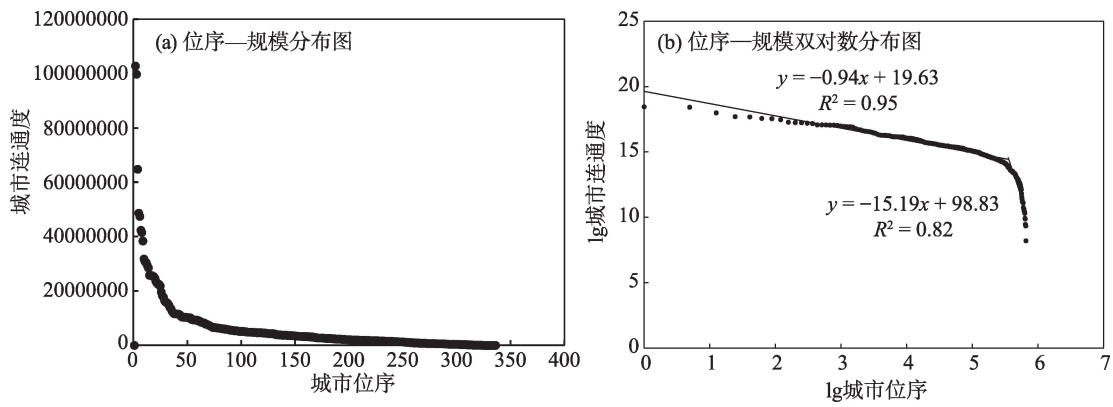


图6 中国城市连通度位序—规模分布
Fig.6 Rank-size distribution of cities' connectivity in China

于低位序城市,即城市连通度规模较为集中并呈现出不规则的帕累托分布模式。

5.2 城市节点的影响因素分析

选取地区生产总值(GDP)、总人口数、行政等级、人口密度、土地面积、三次产业比重等指标与城市连通度进行 Pearson 相关分析,发现 GDP 与连通度的相关系数高达 0.902,人口总数、行政等级与连通度的相关系数分别为 0.778 与 0.730,而人口密度和土地面积等其他指标与连通度的相关系数则普遍低于 0.5,说明城市连通度主要与经济规模、人口规模以及行政等级有较强的相关性。尤其是随着经济全球化的快速发展,快递网点空间布局及其联系网络受到市场指向性的强烈影响,进而在全国尺度上呈现出向胡焕庸线的东侧集聚趋势,而区域尺度呈现出向经济发达与人口密集的城市群及其中心城市集聚特征。此外,直辖市、副省级城市以及省会城市等凭借较高的行政等级掌握着良好政策与信息资源,影响着快递网络中城市网络的等级体系分布。这些城市通过向企业提供优惠的政策扶持等条件,也成为了快递网点空间集聚的重要地区,而北京、上海、广州以及深圳等较高行政等级城市成为了全国及区域物流联系的枢纽与影响源。

进一步以标准化的 GDP_i 、总人口数 (P_i)、行政等级 (S_i) 为自变量,城市连通度 (N_i) 为因变量进行多元线性回归分析,得到以下回归模型:

$$N_i = 0.919GDP_i + 0.079P_i + 0.013S_i + 0.038 + \varepsilon_i \quad (10)$$

式中: ε_i 为残差项。

经过残差项与自变量的检验,该模型得以成立并较好地反映了城市连通度与城市规模之间的关系。标准化残差项分布的直方图呈随机正态分布,并且 D-W 值 1.215,说明残差项通过正态性与独立性假设。GDP、人口总数以及行政等级 3 个自变量的 VIF 值均小于 10,说明自变量间不存在多重共线性,进一步说明了该模型可成立性。同时,判定系数 R^2 为 0.815 ($P < 0.001$),反映出该回归模型拟合效果较好,并表明城市的经济规模、人口规模以及行政等级对城市连通度存在显著性影响。连通度作为城市联系能力的反映,会随其经济规模、人口规模以及行政等级等因素的提升而相应改善。尤其是经济规模逐渐成为了网络中城市地位与实力的决定性因素,并引导着资源向全国性与区域性中心城市集中,从而重塑着城市网络体系以及经济地理格局的不均衡性。

6 结论与讨论

本文以快递网点数据为基础,运用链锁模型构建城市间物流联系矩阵,并综合运用 GIS 空间分析、社会网络分析以及位序—规模法则等方法,从空间形态、整体与局部联系以及节点属性等方面揭示了中国快递物流网络的特征与结构。研究表明:

(1) 宏观格局中,中国快递物流网络呈现出层级性与不均衡性。第一等级的城市联系主要分布在北京、上海、广州、武汉以及成都等核心城市间,并大致形成了“菱形”的空间结构。同时,胡焕庸线东侧的城市间联系更为密集且规模更大,而西侧地区城市间物流联系较为缺乏且网络密度更低。在首位联系格局中,城市间联系表现出大城市指向性以及巨型空间溢出效应,并且城市联系规模具有一定的等级规模分布特征。

(2) 在整体联系中,全国快递网络整体密度仍较低且具有明显的核心—边缘结构。相比于边缘区,核心区网络规模更小但节点间具有良好的通达性与互惠性,从而呈现出显著的小世界性特征。此外,集聚强度识别了不同城市群的发展态势与核心城市的辐射效应,其中长三角、珠三角以及京津冀城市群多中心发展水平较为成熟,并成为区域快递物流联系热点集聚区。

(3) 在省区网络中,广东与北京、四川以及浙江等多个省份形成了高等级的快递物流联系,而上海、浙江与江苏等省区间也形成高等级物流联系并促进长三角城市群要素流动与集聚。

(4) 通过不同级别的物流枢纽,快递网络形成密集的干线通道和轴辐式结构。北京、上海与广州等核心城市凭借强大的中转效应,成为全国快递物流联系的轴心。同时,武汉与成都等城市也成为区域物流枢纽,并发挥着区域内外部联系中转功能。

(5) 在个体网络中,城市节点的联通度具有幂律分布特征,并且连通度规模符合 Zipf 法则而呈现出典型的双分形结构。此外,城市的联通度主要由城市的经济与人口规模所决定,但一定程度上也受到城市行政等级的影响。

相比于以往研究,本文通过网络爬虫技术获取多家大型快递企业的全国快递网点数量与级别等信息,综合考虑了网节点级别与数量对城市物流网络的影响,从而更精确地刻画了城市实际快递业务总量及其联系。在此基础上,从空间形态、整体与局

部联系以及个体属性等多个层面,对中国快递物流网络的格局、特征以及结构等方面进行了揭示,发现城市间快递物流联系具有不均衡性并形成了轴辐式结构。然而,快递企业需加强高等级节点与中转节点等核心枢纽服务能力的建设,并提高主干网络运输能力以优化轴辐式网络结构,从而提高快件派送效率并减少物流高峰期货物积压与爆仓的风险。由于数据获取困难,本文虽通过链锁模型构建了城市间快递网络,但与现实中的客货等物质流动仍存在一定的差距,并且缺乏对快递网络形成与演化机制的深入探讨。因此,未来研究可通过长时间序列的多元快递物流数据,对比分析基于企业间联系与客货流联系等不同数据构建的快递网络,从而更全面地揭示全球化背景下快递网络的演变过程与动力机制。

参考文献(References)

- [1] Castells M. The rise of the network society [M]. Oxford, UK: Basil Blackwell, 1996: 294-302.
- [2] Beaverstock J V, Smith R G, Taylor P J. World-city network: A new metageography? [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2000, 90(1): 123-134.
- [3] Yeung W C. Rethinking relational economic geography [J]. Transactions of the Institute of British Geographers, 2005, 30(1): 37-51.
- [4] 马学广. 全球城市区域的空间生产与跨界治理研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 25-45. [Ma Xueguang. Research on spatial production and cross-border governance in global city regions. Beijing, China: Science Press, 2016: 25-45.]
- [5] 马学广, 李贵才. 世界城市网络研究方法论 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(2): 255-263. [Ma Xueguang, Li Guicai. Research methods for world city network and relevant inspirations. Progress in Geography, 2012, 31(2): 255-263.]
- [6] Mahutga M C, Ma X, Smith D A, et al. Economic globalization and the structure of the world city system: The case of airline passenger data [J]. Urban Studies, 2010, 47(9): 1925-1947.
- [7] 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 [J]. 地理学报, 2016, 71(2): 265-280. [Jiao Jingjuan, Wang Jiao'e, 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.]
- [8] 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.]
- [9] Van Meeteren M, Bassens D. World cities and the uneven geographies of financialization: Unveiling stratification and hierarchy in the world city archipelago [J]. International Journal of Urban and Regional Research, 2016, 40(1): 62-81.
- [10] 刘承良, 桂钦昌, 段德忠, 等. 全球科研论文合作网络的结构异质性及其邻近性机理 [J]. 地理学报, 2017, 72(4): 737-752. [Liu Chengliang, Gui Qinchang, Duan Dezhong, et al. Structural heterogeneity and proximity mechanism of global scientific collaboration network based on co-authored papers. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(4): 737-752.]
- [11] Hoyler M, Watson A. Global media cities in transnational media networks [J]. Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie, 2013, 36(1): 90-108.
- [12] Taylor P. The new geography of global civil society: NGOs in the world city network [J]. Globalizations, 2004, 1(2): 265-277.
- [13] 甄峰, 王波, 陈映雪. 基于网络社会空间的中国城市网络特征: 以新浪微博为例 [J]. 地理学报, 2012, 67(8): 1031-1043. [Zhen Feng, Wang Bo, Chen Yingxue. China's city network characteristics based on social network space: An empirical analysis of Sina Micro-blog. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(8): 1031-1043.]
- [14] 邓楚雄, 宋雄伟, 谢炳庚, 等. 基于百度贴吧数据的长江中游城市群城市网络联系分析 [J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1181-1192. [Deng Chuxiong, Song Xiongwei, Xie Binggeng, et al. City network link analysis of urban agglomeration in the middle Yangtze River Basin based on the Baidu Post Bar data. Geographical Research, 2018, 37(6): 1181-1192.]
- [15] 王垚, 钮心毅, 宋小冬, 等. 人流联系和经济联系视角下区域城市关联比较: 基于手机信令数据和企业关联数据的研究 [J]. 人文地理, 2018, 33(2): 84-91. [Wang Yao, Niu Xinyi, Song Xiaodong, et al. The comparison of regional urban relations between people flow and capital flow: A study based on mobile phone signaling data and firm interlook data. Human Geography, 2018, 33(2): 84-91.]
- [16] 潘峰华, 方成, 李仙德. 中国城市网络研究评述与展望 [J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1093-1101. [Pan Fenghua, Fang Cheng, Li Xiande. The progress and prospect of city network research on China. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(7): 1093-1101.]

- [17] Xu Z, Li Y J, Yuan Y B. Behind the scenes: The evolving urban networks of film production in China [J]. *Urban Geography*, 2018, 39(1): 1-18.
- [18] Martinus K, Sigler T J, Searle G, et al. Strategic globalizing centers and sub-network geometries: A social network analysis of multi-scalar energy networks [J]. *Geoforum*, 2015, 64(6): 78-89.
- [19] 马学广, 李鲁奇. 中国城市网络化空间联系结构: 基于银行网点数据的研究 [J]. *地理科学进展*, 2017, 36(4): 393-403. [Ma Xueguang, Li Luqi. Network spatial connection structure of Chinese cities based on bank branches data. *Progress in Geography*, 2017, 36(4): 393-403.]
- [20] 王成金. 中国物流企业的空间组织网络 [J]. *地理学报*, 2008, 63(2): 135-146. [Wang Chengjin. Spatial organizational network of logistics company in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(2): 135-146.]
- [21] 叶磊, 段学军. 基于物流企业的长三角地区城市网络结构 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 622-631. [Ye Lei, Duan Xuejun. City network structure of the Yangtze River Delta region based on logistics enterprise network. *Progress in Geography*, 2016, 35(5): 622-631.]
- [22] 李钢, 陈未雨, 杨兰, 等. 武汉市快递自提点的空间格局与集聚模式研究 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(3): 407-416. [Li Gang, Chen Weiyu, Yang Lan, et al. Spatial pattern and agglomeration mode of parcel collection and delivery points in Wuhan City. *Progress in Geography*, 2019, 38(3): 407-416.]
- [23] 倪玲霖, 王姣娥, 胡浩. 中国快递企业的空间组织研究: 以顺丰速运为例 [J]. *经济地理*, 2012, 32(2): 82-88. [Ni Linglin, Wang Jiao'e, Hu Hao. Spatial organization of express delivery enterprise in China: A case study of Shunfeng Express. *Economic Geography*, 2012, 32(2): 82-88.]
- [24] 刘荷, 王健. 基于轴辐理论的区域物流网络构建及实证研究 [J]. *经济地理*, 2014, 34(2): 108-113. [Liu He, Wang Jian. The construction of regional logistics networks and its empirical research based on Hub-and-Spoke theory. *Economic Geography*, 2014, 34(2): 108-113.]
- [25] Taylor P, Derudder B, Hoyler M, et al. City-dyad analyses of China's integration into the world city network [J]. *Urban Studies*, 2012, 51(5): 868-882.]
- [26] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于快递企业总—分机构的中国城市网络空间结构 [J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(5): 591-597. [Sun Yang, Zhang Luocheng, Yao Shimou. Spatial structure of urban network in China based on the headquarters and branches of express enterprises. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 34(5): 591-597.]
- [27] 李鲁奇, 马学广. 基于运单数据的中国快递型物流网络格局、结构与功能: 以宅急送为例 [J]. *地理科学*, 2019, 39(1): 89-97. [Li Luqi, Ma Xueguang. Pattern, structure and function of China's Express logistics network based on waybill data: A case study of ZJS express. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(1): 89-97.]
- [28] Thill J C, Lim H. Intermodal containerized shipping in foreign trade and regional accessibility advantages [J]. *Journal of Transport Geography*, 2010, 18(4): 530-547.
- [29] Yang H, Nie Y C, Zhang H B, et al. Insight to the express transport network [J]. *Computer Physics Communications*, 2009, 18(9): 1511-1515.
- [30] 王克强, 万宁娜. 长三角地区城市城际联系度测度: 基于物流数据视角的分析 [J]. *城市问题*, 2017 (10): 25-37. [Wang Keqiang, Wan Ningna. Measurement of urban intercity connections in the Yangtze River Delta region: Based on the perspective of logistics data. *Urban Problems*, 2017(10): 25-37.]
- [31] 董琦, 甄峰. 基于物流企业网络的中国城市网络空间结构特征研究 [J]. *人文地理*, 2013, 28(4): 71-76. [Dong Qi, Zhen Feng. The study on spatial structure characteristics of China's city network based on the logistics enterprise network. *Human Geography*, 2013, 28(4): 71-76.]
- [32] 龚梦, 祁春节. 城市物流网络空间布局规划研究: 以江苏省为例 [J]. *城市发展研究*, 2013, 20(1): 42-48. [Gong Meng, Qi Chunjie. Design on logistics network and nodes layout of cities in Jiangsu Province. *Urban Development Studies*, 2013, 20(1): 42-48.]
- [33] 林涛, 谢夏成. 快递网络的要素、结构与上海节点的空间格局 [J]. *交通运输研究*, 2017, 3(5): 39-49. [Lin Tao, Xie Xiacheng. Elements, structure of express delivery network and their spatial pattern in Shanghai. *Transportation Research*, 2017, 3(5): 39-49.]
- [34] 沈丽珍, 席广亮, 秦萧, 等. 基于快递物流测度的区域流动空间特征: 以江苏省为例 [J]. *人文地理*, 2018, 33(1): 102-108. [Shen Lizhen, Xi Guangliang, Qin Xiao, et al. The research on the characteristics of the regional space of flows based on measurement of the express logistic of flows: A case study of Jiangsu Province. *Human Geography*, 2018, 33(1): 102-108.]
- [35] 聂晶鑫, 黄亚平, 刘合林, 等. 基于社会网络分析的武汉城市圈城镇生活性关联特征 [J]. *经济地理*, 2017, 37 (3): 63-70. [Nie Jingxin, Huang Yaping, Liu Helin, et al. The associated features of urban life in Wuhan metropolitan area based on social network analysis. *Economic Geography*, 2017, 37(3): 63-70.]
- [36] Hennemann S, Derudder B. An alternative approach to the calculation and analysis of connectivity in the world city network [J]. *Environment and Planning B*, 2014, 41

- (3): 392-412.
- [37] Zhao M X, Wu K, Liu X J, et al. A novel method for approximating intercity networks: An empirical comparison for validating the city networks in two Chinese city-regions [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25 (3): 337-354.
- [38] 刘军. 整体网分析讲义: Ucinet 软件实用指南 [M]. 上海: 上海人民出版社, 2009: 30-42. [Liu Jun. Handouts of overall network: Ucinet software practical guide. Shanghai, China: Shanghai People's Press. 2009: 30-42.]
- [39] 杨文龙, 杜德斌, 马亚华, 等. “一带一路”沿线国家贸易网络空间结构与邻近性 [J]. *地理研究*, 2018, 37(11): 96-113. [Yang Wenlong, Du Debin, Ma Yahua, et al. Network structure and proximity of the trade network in the Belt and Road region. *Geographical Research*, 2018, 37 (11): 96-113.]
- [40] 段七零, 胡章鸿, 毛建明. 基于齐夫法则的江苏省旅游收入规模结构变化研究 [J]. *人文地理*, 2012, 27(3): 86-92. [Duan Qiling, Hu Zhanghong, Mao Jianming. Study on the variation of scale structure of tourism income in Jiangsu Province based on Zipf law. *Human Geography*, 2012, 27(3): 86-92.]

Spatial pattern and structure of networked logistics connection of cities in China based on express logistics branch data

TANG Chenghui¹, MA Xueguang^{2*}

(1. School of Urban and Regional Science, Shanghai University of Finance and Economics, Shanghai 200433, China;

2. School of International Affairs and Public Administration, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract: As an important form of city relations, express logistics directly involves interurban material flows. Based on the data of multiple express logistics branches in 2019, this study analyzed the spatial pattern, characteristics, and structure of urban networks covering 336 urban administrative regions in China. The data were analyzed using GIS spatial analysis, social network analysis, Zipf law, and so on to reveal the features of China's urban system and regional development under globalization. The conclusions are as follows: 1) The spatial pattern of interurban logistics connection is hierarchical and imbalanced, and it shows the characteristics of westward decline due to the location conditions. 2) With regard to the overall connection, the density of the express logistics network is low and has a core-periphery structure, and the core area presents a small world characteristic with good accessibility and reciprocity. In addition, the intensity of agglomeration indicates the development trend of different urban agglomerations and reflects the radiation effect of core cities. 3) With regard to the local connection, provinces such as Guangdong, Zhejiang, and Jiangsu have formed high-level network connection and clusters, and promoted cross-regional flow of resources. 4) With regard to the individual networks, the degree of urban connectivity conforms to the Zipf law with a double fractal. In addition, economic and population scales have a strong correlation with urban connectivity, and city administrative level also plays an important role. However, express logistics companies still need to strengthen their service capabilities to reduce the risk of under capacity during the peak period.

Keywords: urban network; express logistics branches; interlocking world city network model; spatial connection; China