

有向加权型城市网络的探索性分析

刘 铮¹, 王世福¹, 赵渺希¹, 吴康^{2,3}

(1. 华南理工大学建筑学院城市规划系, 广州 510641;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 鉴于城市网络已成为城市与区域研究中的学术热点, 研究引介了城市联系中无向加权网络的概念、特征、计算方法, 在此基础上与无向加权网络进行比较, 并以中国36座副省级以上城市的城市间网络地图关注度为研究素材, 从实证案例的角度分析无向加权网络与有向加权网络在城市网络分析方面的差别。实证研究结果显示: 在网络的结节性方面, 互联网异地城市之间关注度与航空流量结节性具有强相关性, 异地之间的城市地图查询在一定程度上表征了城市间出行期望, 互联网关注中部分城市成为典型的流入地, 而华北、西北等地省会城市成为典型的流出地; 在多值网络的链接方面, 研究对城市网络这一复杂结构系统的流, 实现了“流向”与“流量”的同步分析, 互联网中城市间关注强度的“出”“入”反映了城市间吸引力系的非均衡性特征。总体而言, 从互联网地理学的角度为城市网络分析方法提供一个新的切入点与数据来源, 实现对有向加权网络的探索性分析, 在计算方法上有向加权网络在分析城市体系中节点城市的职能与节点间的相互关系方面有更大的优势。

关键词: 有向加权网络; 对称性; 城市网络; 互联网地理

1 引言

近年来, 城市或区域的空间交互过程正成为国内外城市地理、城市规划、区域科学等领域的重要研究方向。目前, 在西方城市网络的研究领域中, 以Taylor、Beaverstock为代表的学术群体主要是从实证的角度来测度城市之间的联系强度, 这与基于引力模型、区位商的演绎型城市联系计算有很大的区别。随着对城市网络研究的不断深入, 除了从不同类型网络分析城市联系以外, 近年来西方部分学者转至探讨城市网络研究的分析技术、甚至于对方法论的检讨。其中密歇根州立大学学者Neal就生产性服务业网络的结节性的度量, 提出了度量生产性服务业2-模网络的城市结节性方法^[1], 其研究方法在2012年2月美国地理协会的年会中成为相关研究领域的焦点。这些研究极大地拓展了城市网络研究的深度与广度。

城市联系的重要议题包括网络的结节性与链接的方向性(流的不对称性)。目前大部分已有的研究文献多属于对无向加权流的结节性研究。无向加权流所采用的数据属于对称矩阵, 其优点是易于计算, 可以便捷地分析城市等级网络, 其缺点是无法量化城市间流的不对称性。具有空间向量特征的各类地域“流”从不同角度表征了城市之间的功能关系,

收稿日期: 2012-07-11; 修订日期: 2013-03-10

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(11&ZD154), 国家自然科学基金项目(51108184), 教育部国家留学基金项目(201306150067), 华南理工大学优秀博士学位论文创新基金项目

作者简介: 刘铮(1986-), 男, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事城市与区域空间结构研究。

E-mail: urbanstudy@qq.com

通讯作者: 赵渺希(1979-), 男, 副教授, 硕士生导师。

即便是看起来属于对称关系的城市链接，其背后仍然可能蕴藏着强烈的不对称性。例如，航空出行的去程与返程、跨区域企业的总部与分支机构均可看作城市间一对一的映射关系，但就城市链接的本质而言，这种出与入的方向性却体现了城市研究中无法替代的空间向量特征。

从图论角度来看，网络图的边可以是无权的，即不考虑边（链接）的权重的网络，采用0和1分类变量表示；也可以是加权的，即考虑边的权重，采用任意大小的数值变量表示；可以有方向，也可以无方向，两两组合可组成4种网络（图1），与之对应，反映网络联系的数值矩阵也主要包括四类：无向无权矩阵、有向无权矩阵、无向加权图矩阵、有向加权矩阵^[2]。基于图论的网络类型特征，城市网络中的链接关系同样可以按照链接值和链接方向进行划分。

加权网络可以描述节点之间起着重要相互作用的链接强度的差异情况，这种差异可分为链接强度的差异^[3]与链接方向的差异性。与无向加权网络相比，有向加权网络更重视网络的对称性问题。流的对称性包括链接对称性与节点对称性：链接对称性是指在某一链接或者边之中，流的双向变化的差异性；节点对称性指进出该节点的不对称流的差异性。关于链接的对称性，早在1983年，Sinclair提出对称性是一个独立的概念，城市间的联系可以被用一个以完全对称与完全不对称为两极的对称性水平进行描述，即均值的双向联系与单一方向联系。其中，非对称性是单中心系统的重要特征之一，从次一级的城市中接收到的流远大于发送给次一级城市的流，这意味着该城市具有特别大的影响力^[4]。1988年，Dijst与Cortie提出的城市网络3S维度概念将对称性（Symmetry）纳入^[5]。关于节点的流对称性，Wasserman与Faust将某一节点的流的强度，即与该节点有关的联系的数量，定义为度（degree）。根据度的方向，又可以分为入度与出度：入度为进入节点的流强度，出度为从指定节点出去的流强度。Wasserman与Faust认为，该数据反应了指定节点与其他节点的相互关系^[6]。

目前，国外已有多位学者将有向加权网络的概念应用在城市网络领域的研究中。在关于有向加权型城市网络的探索性研究中，Taylor^[7,8]、Derudder^[9]、Smith和Timberlake^[10]等学

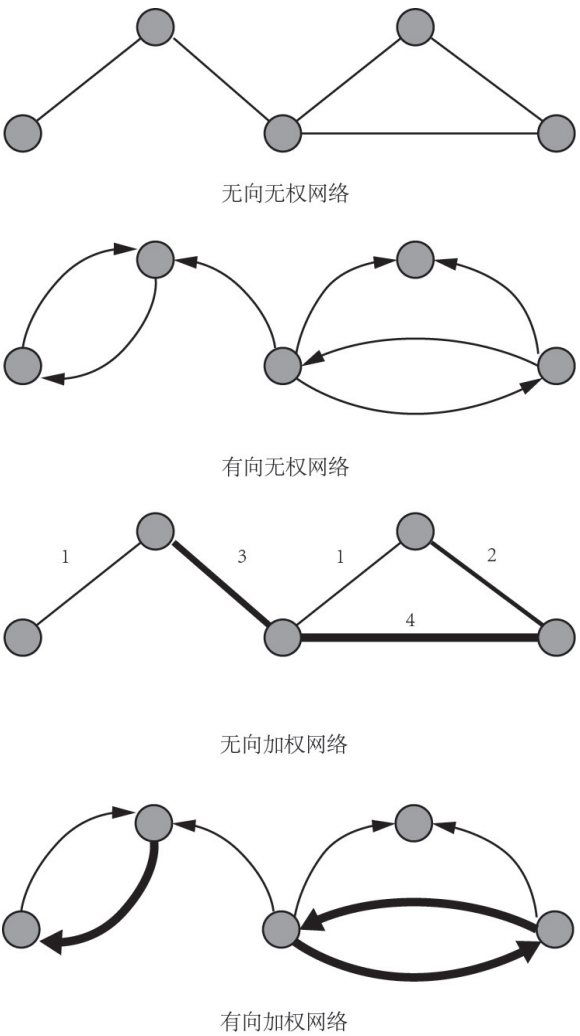


图1 有向加权网络示意
Fig. 1 Directed multivalued network
资料来源：根据文献[2]整理绘制

者在世界城市网络理论研究中提出了分析生产性服务业城市网络的不对称性问题，但并没有深入探讨流向的向量性特征。

国内的城市网络研究经历了从理论^[11]到实证的过程。实证研究对象多为无向加权网络，比如航空与动车流中的线路、班次、运量^[12-14]，企业生产网络^[15-16]，较少关注有向加权网络在城市网络研究中的应用。在与有向网络相关的零星研究中，陈彦光^[17-18]根据引力模型分析了城市间作用力所隐含的方向性，但这种研究属于演绎性的推理研究，无法替代现实世界中纷繁复杂的区域空间现象的实证检验。冷炳荣^[19]曾尝试以区位商的分析方法剥离出城市的对外服务部分，构建反映中国城市经济关系的有向加权网络，但以区位商来进行研究在本质上仍然属于假设推定，对揭示空间现象而言并非严格意义上的事实发现。

鉴于此，本研究将对描述城市网络的有向加权分析方法进行校核，研究其在测度城市网络有向加权流方面的有效性，并提出相应的修正策略，通过互联网数据挖掘，建立中国副省级以上城市间地图关注度的矩阵，以对有向加权型城市网络进行探索性的分析，这也是本研究的重要创新点。

2 有向加权网络的测度方法

在网络研究方法的探讨方面，相较于有向网络的实证描述，Narisra Limtanakool更加关注有向加权网络的分析方法。她认为，城市节点的联系可以通过节点间相互作用的平衡变化来表示，这些相互作用包括两个方面，即强度与方向，而方向是通过对称性表现出来^[20]。对称性作为城市网络中的一个维度，在表现城市体系的层级递减中具有更为重要的作用^[21]。为了量化对称性，Narisra Limtanakool提出节点对称性、节点影响力与链接对称性等概念，并进行指标公式推算^[22]。

(1) Narisra Limtanakool提出节点对称性（Node Symmetry Index）的概念，以描述有向网络中节点的入度与出度的对称性，对于节点*i*：

$$NSI_i = \frac{\sum I_i - \sum O_i}{\sum I_i + \sum O_i} \tag{1}$$

式中：*I_i*指节点*i*的入度；*O_i*指节点*i*的出度。当*NSI_i*=-1时，对于节点*i*为净流出；当*NSI_i*=1时，对于节点*i*为净流入。

(2) 基于流的有向性，对于某一节点*i*，其中心性*EI_i*：

$$EI_i = \sum_{j=1}^j \left(\frac{(x_j) \ln(x_j)}{\ln(J-1)} \right) \tag{2}$$

式中：*x_j*为从节点*j*到节点*i*的流与节点*j*到所有节点的流之比；*J*为与节点*i*相联系的节点总数。该公式的提出，是从网络聚集度公式中发展出来的，即对于网络，其中心性*EI*是可以被量化的：

$$EI = \sum_{i=1}^L \left(\frac{(z_i) \ln(z_i)}{\ln(L)} \right) \tag{3}$$

式中：0≤*EI*≤1；*Z_i*值为节点*i*所有有关的链接流量之和与网络中所有链接流量之和的比例；*L*为节点总数，由Narisra Limtanakool提出以评价城市网络中的聚集度的指标，当*EI*=0时，网络中有且只有一个最强节点，当*EI*=1时，网络中所有节点的强度相同。

Narisra Limtanakool还提出了链接对称性（Link Symmetry Index）的概念，以描述某

—链接上流的方向，对于链接*i*：

$$LSI_{ij} = \frac{(f_{ij})Ln(f_{ij}) + (f_{ji})Ln(f_{ji})}{Ln(2)} \tag{4}$$

式中： f_{ij} 指节点*i*至节点*j*的流量占节点*i*与节点*j*流量的比值； f_{ji} 指节点*j*至节点*i*的流量占节点*i*与节点*j*流量的比值，当 $LSI_{ij}=0$ 时，节点*i*与节点*j*之间的链接上为单向流，即完全不对称；当 $LSI_{ij}=1$ 时，节点*i*与节点*j*之间的链接上为等值双向流，即完全对称。

需要指出的是，在对 LSI 公式演算中，研究发现 Narisra Limtanakool 的公式对于网络链接的向量描述有不足，其原因在于 LSI 指标本身不具备方向性，仅限于对整体网络的对称性水平进行量化，并且 LSI 指标含有对数使其对双向流量差异的测度有一定的局限性，当 $T_{ij}/T_{ji}>50\%$ 时， $LSI_{ij}>0.9$ ，即 LSI 公式中的对数计算，使公式无法更加准确的描述双向流量之间的数量差别，更加适用于描述同一个链接中两个方向的流量差异明显的情况。为了解决链接中双向流对称性的量化的直观化测度，研究对该公式进行补充，链接中两方向的流量差异属于非数量级差异时：

$$LSI'_{ij} = \frac{T_{ij} - T_{ji}}{T_{ij} + T_{ji}} \tag{5}$$

式中： T_{ij} 指从节点*i*至节点*j*的流量； T_{ji} 指从节点*j*至节点*i*的流量。进一步地，如果将公式（4）中 f_{ij} 这一概念对上述公式（5）中的 T_{ij} 实行变量替换，则公式（5）进行简化为：

$$LSI'_{ij} = 2f_{ij} - 1 \tag{6}$$

当 $LSI'_{ij}=-1$ 时，为流从节点*i*净流向节点*j*；当 $LSI'_{ij}=0$ 时，链接中为双向等值流；当 $LSI'_{ij}=1$ 时，为流从节点*j*净流向节点*i*。

根据公式（6）与公式（4），分别绘制 LSI_{ij} 与 LSI'_{ij} 与向量比重 f_{ij} 的函数关系图，，以此比较两函数在度量城市链接的数值差异，得到图2。其中， $m(x)$ 代表 LSI ， $n(x)$ 代表 LSI' ， x 代表 f_{ij} 。如表所示， f_{ij} 为*x*轴。根据 f_{ij} 的定义可知，当 $f_{ij}>0.5$ 时，从节点*i*流向节点*j*的流大于从节点*j*流向节点*i*的流；当 $f_{ij}<0.5$ 时，从节点*i*流向节点*j*的流小于从节点*j*流向节点*i*的流。针对 f_{ij} 所反映出的流向， LSI 指标在0.5附近（即网络链接接近）不具备灵敏反映向量差异的能力，而 LSI' 指标则通过正负值可对流的方向性进行区分。

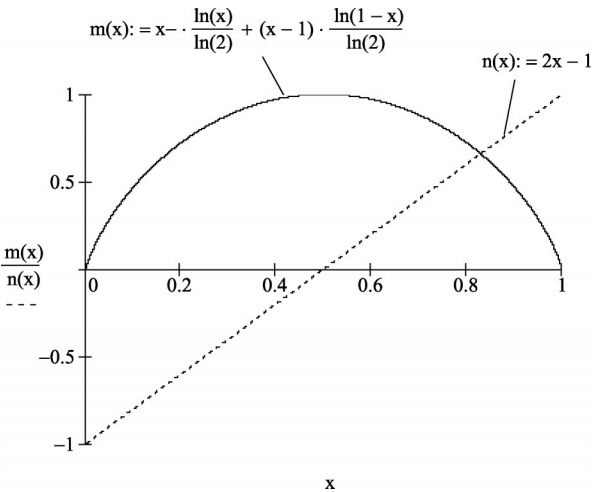


图2 LSI与LSI'指标演算对比

Fig. 2 Comparison between LSI and LSI' index

3 研究对象的选取与数据收集

随着互联网的发展，互联网成为城市间信息交换的重要平台，城市所具有的地理属性与信息交互也是区域内城市信息流的一部分,许多学者已就此领域开始研究，Zook^[23]、

Moss^[24]、Sternberg^[25]等人通过对互联网地理属性数据的分布研究，考察城市在城市体系中的地位；Derudder通过对比互联网骨干网络的地理分布与航空流的关系，得出网络数字流反映出的城市网络体系与传统城市网络研究方法得到的结果相一致的结论^[26]；汪明峰将该研究领域定义为互联网地理学，曾根据互联网注册域名、骨干网络带宽^[27]与中国互联网骨干网络结构与节点可达性^[28]等角度分析互联网对城市体系的影响^[29]；在新素材的选取上，赵渺希曾就大事件的新闻信息流在网络空间的响应程度，分析异地城市对大事件的关联程度^[30-31]。本文则以互联网中城市名称的词频共现作为研究视角，对城市联系的有向加权网络进行探索性分析。

本文的研究数据来源于全球最大的中文搜索引擎——百度搜索引擎（中国4.85亿网民中有4.07亿人为搜索引擎用户^①，而2011年百度市场份额占有率为76.1%^②，其信息的地理分布广度与信息量都有很高的分析价值）。百度搜索引擎在2006年引入谷歌公司的GOOGLE TREND搜索服务的概念,推出新的搜索统计平台——百度指数，即通过对关键词的搜索量统计，可以得出该词在特定的时间区间与地区范围内的搜索指数。该指数是基于关键词在比较期的数值与基期的关键词数值综合得出，可以反映不同关键词在不同地区的热度，越高的指数代表了该关键词的热度越高。基于该功能，笔者选取“城市名”+“地图”组合为关键词。其中，“城市名”为客体城市的城市名称，“地图”则是具有“异地关注”属性的最大搜索量象征词，该组合代表了城市间出行、交流的信息流。关键词组合的考虑是基于单地名词组（如“北京”）会受到城市组织与团体名称（如“北京大学”）的干扰。而增加“地图”的原因是，“地图”是城市具有的特殊地理标识信息，不易受其他信息干扰。另一方面地图具有较强的出行关注目的性，可以反映不同城市间出行关注的差异。

笔者将直辖市、省会、自治区首府以及深圳、宁波、青岛、大连、厦门等36座副省级以上城市作为研究对象。在数据挖掘中，研究以其中一个城市A作为地理限定，以2010年1月1日至2011年12月31日为时间限定，以“城市B地图”为搜索词进行数据搜索与统计，得到1296个具有“从城市A关注城市B的互联网地图”属性的数字矩阵。该矩阵以由行数据与列数据构成，行数据为从某城市对外的流，列数据为指向某城市的流，即由此增加方向属性，得到一个非对等的向量矩阵，以此作为研究的基础数据库。

与图论相对应的，该网络中一个城市节点的相关链接数据分为三类：入度，即某城市地图被其他城市使用者搜索量的指数，简称为该城市的入度指数；出度，即在某城市搜索其他城市地图的搜索量的指数，简称该城市的出度指数；以原节点为目标的链接，即城市中在地搜索本地地图的搜索指数简称为在地指数。此外，本文将入度指数、出度指数之和简称为异地指数，将异地指数与在地指数之和称为节点总指数。

与城市间客流、物流、信息流等数据相比，该数据的采集的工作量与成本较小。但是这种数据搜集工作量的减少与复杂性的降低，有可能导致数据的可靠性的损失,因此鉴于城市间地图关注度与交通出行的潜在关系(一般地,网民前往异地城市出行之前会对陌生地点进行查询),笔者结合相关交通数据进行验证。从全国范围来看，利用2010年中国副省级以上城市之间的航空班次数据,计算互联网城市地图关注度与城市航空流量进行相关分析(图3)。利用SPSS计算分析发现，相关系数为0.873，这说明城市间的地图关注度与航空

① 中国互联网信息中心：《第29次中国互联网络发展状况统计报告》

② 艾瑞咨询：《2011年Q4及年度中国互联网经济核心数据》

流有着较强的相关性。当然这也反映了在网络中异地之间的地图查询功能方面,异地之间的城市互联网地图关注度在一定程度上表征了相应的城市间出行期望。需要指出的是,由于无法获取航空出行中去程、返程甚至中转的出行目的,现有的航空网络研究成果难以深入到有向网络这一分析层次,互联网地图关注度的研究为今后弥补这一研究缺失提供了技术支持和知识储备。

4 实证检验

本文的研究对象是城市在一定时期内相互关注的流——城市间地图关注度。其具体量化是城市的入度指数、出度指数、在地指数与节点总指数等数据,与城市的人口、经济水平、政治文化水平等因素直接相关。其中经济水平的影响最为显著(图4),反映出我国城市发展区域不平衡的特点。

此36座城市所形成的城市网络, $EI=0.49$, 意味着具有明显的等级体系且强度差异大,城市间普遍相联系,是典型的城市网络。接下来将本数据在复杂网络的分析基础上,进行无向加权网络与有向加权网络的对比分析。

4.1 复杂网络分析

复杂网络理论认为,网络中不是所有的节点都有相同的度,大多数实际网络中的节点

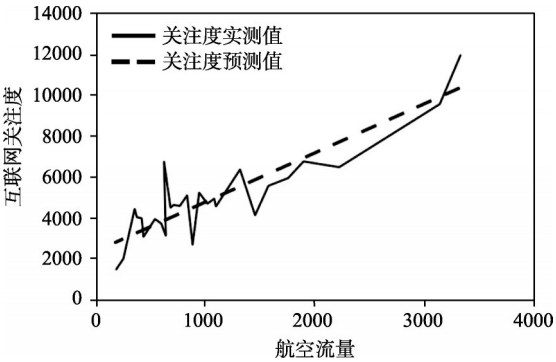


图3 互联网关注度与航空流的比较

Fig. 3 Comparison between Internet Concern Index and Air traffic flow

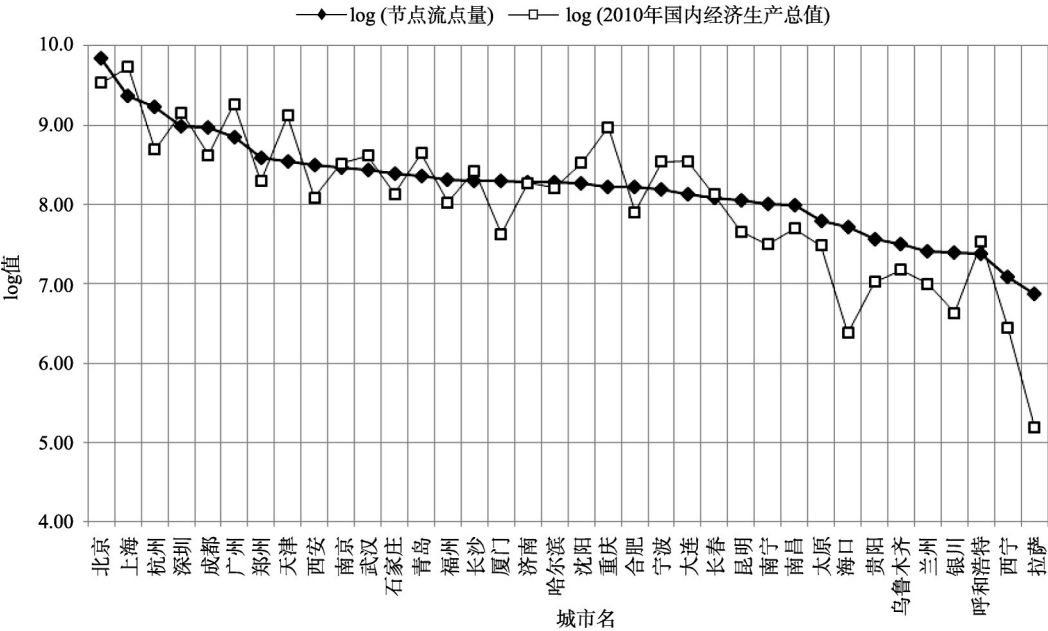


图4 城市节点流量与城市经济水平的对数分析图

Fig. 4 The logarithm of node flow and city economy

的度是满足一定概率分布的。对于非规则网络的点度分布, 一般包括 3 种模型: 幂律分布、指数分布、泊松分布。根据 Newman、Boccaletti^[32-34]等学者的研究, 在实际的地理空间网络可以观察到点度 P_k 的累积分布曲线大多符合幂律分布, 中国学者陈彦光^[35]对城市体系的研究也深入地揭示了这一特征。对于点度, 借鉴 Newman 对复杂网络的点度分布描述, 计 P_k 为点度大于 k 的累积分布。

如表 1 所示, 对每一城市分别计算出度、入度, 按照双对数进行点度的累积曲线观察。空间网络的出度和入度的累积点度分布都有较明显的指数分布与泊松分布特征, 这与王姣娥、莫辉辉、金凤君等人关于中国航空网络复杂性的研究结果类似^[36], 同样也符合于海波、周一星所提出的中国航空网络从无标度网络向随机网络演化的历史趋势判断^[37], 从另一个角度印证了网络的点度分布特征。

4.2 无向加权网络分析

根据无向加权网络的分析方法, 本文以节点出入流量与链接流量为基础数据, 借助 Ucinet 6 软件绘制 36 座城市所形成的城市网络体系空间分布的无向加权网络图 (图 5)。其中, 节点的入度在图上表现为城市节点的大小, 反映城市搜索与被搜索流量的大小; 链接的分布对应图中线的分布; 链接的流量对应图中线型的粗细。如图 5 所示, 在城市出行搜索流所反应的无向加权网络中, 以链接流量的前 2.5%、5%、10%、20% 为阈值, 对该网络进行分层拆解, 可以得到三个链接与 4 个主要区域: 三链接包括以北京为中心, 分别与成都、深圳、上海相联系的链接, 表现出北京具有明显的中心效应; 4 个主要区域以地理分布简称, 西部区域包括成都、重庆与西安, 北部区域包括北京、石家庄、郑州与天津, 东部区域为上海、南京、杭州与宁波, 南部区域为广州与深圳。

城市节点的被关注度与城市规模、城市经济水平与城市职能有直接的联系, 在传统的区域政治经济中心, 如北京、上海、广州、深圳、成都、西安、杭州等城市, 在整体网络中具有较强的吸引力, 这些城市之间产生的流的强度也较强; 而拉萨、乌鲁木齐等区域经济较为落后的城市, 其在城市网络中的吸引力也相应较弱。北京作为国家政治文化中心, 具有最强的区域吸引力, 但京津唐地区城市整体被关注度低于长三角区域城市; 长三角地区的上海、南京、杭州、宁波等城市具有较高的整体城市被关注度; 成都、西安作为西南地区的枢纽城市, 与西部地区城市链接强度高, 在周边城市有较强被关注度。

综上所述, 无向加权网络对于分析城市网络体系有重要的作用, 并且可以通过设置不同阈值来对网络进行分层, 有助于找出城市网络中的重要节点与重要组团。但是, 无向加权网络更加重视强中心的节点, 一方面对于分析非强中心的节点分析有所忽视, 另一方面也无法对节点的职能做下一步分析, 无法准确定义其在整体网络中的地位及与其他城市的关系。

4.3 有向加权网络分析

有向加权网络的分析对象可以分为节点与链接两类, 即节点的流关系与有向链接分布的情况。从图论的角度, 一个节点的相关链接, 除了入度与出度之外, 还存在一种出发与

表 1 幂律分布、指数分布与泊松分布演算结果

Tab. 1 The results of Power-law Distribution, Exponential Distribution and Poisson Distribution

名称	公式	入度		出度	
		R 方	调整 R 方	R 方	调整 R 方
幂律分布	$\ln P_k - \ln k$	0.518	0.504	0.787	0.781
指数分布	$\ln P_k - a^k$	0.739	0.731	0.968	0.967
泊松分布	$P_k = \frac{1}{k!}$	0.867	0.859	0.968	0.968

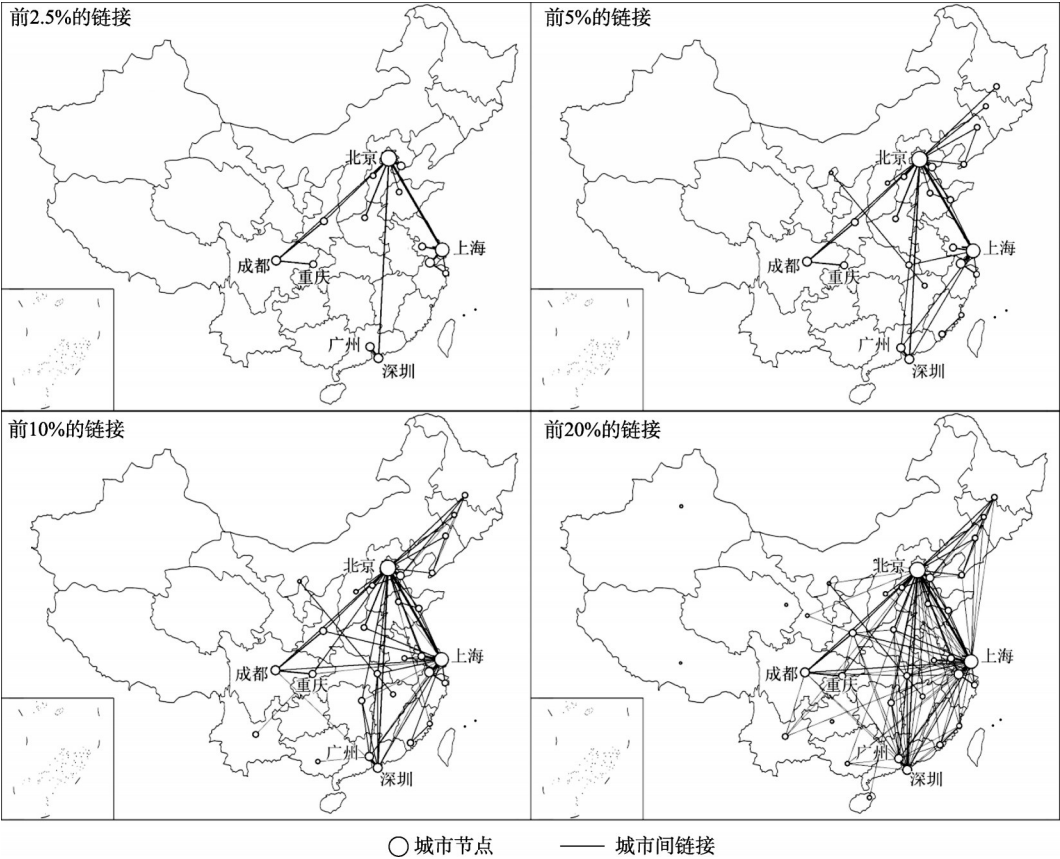


图5 无向多值网络

Fig. 5 Undirected multivalued network

到达都是同一节点的流,这种反应城市内部各要素之间联系的流,具有更强的普遍性,并且在一定程度上与城市规模相关联。在出行关注流中则体现为对本地地图的关注,即在地指数。这类数据的意义在于弥补了航空网络等无向加权网络中节点属性数据获取问题,并且使节点属性数据与链接数据可以进行在同一个描述背景下进行对比。因此为了对在地指数做进一步研究,笔者将在地指数与异地指数(即出入度指数之和)、出度与入度作为两组数据分析。

首先,从在地指数与异地指数的关系来看,入度与出度分别代表城市被关注与对外关注的度,即异地指数代表了城市与外界关系的总体强度,而在地指数则代表节点本身活跃水平。相比异地指数,在地指数与城市规模更加相关,通过加入此数据,有助于补充说明城市出入度与城市规模的关系。因此,根据在地指数与节点流指数的比例,以30%以下、30%-60%、60%以上为3个区间,可以将36个城市分为3种类型:在地活跃型,平衡型,异地活跃型。其中,上海、北京、杭州为在地活跃型,呼和浩特、兰州、银川、贵阳、西宁与拉萨为异地活跃型,其他城市为平均型。

从图6可知,3种类型的分布呈极化严重,总体来看受到城市经济发展水平或城市经济规模的影响,其中,在地活跃型为经济高度发达的城市。以上海为例,上海属于在地活跃型,并不是指上海不被异地关注,而是上海城市规模较大,所产生的本地关注本地地图

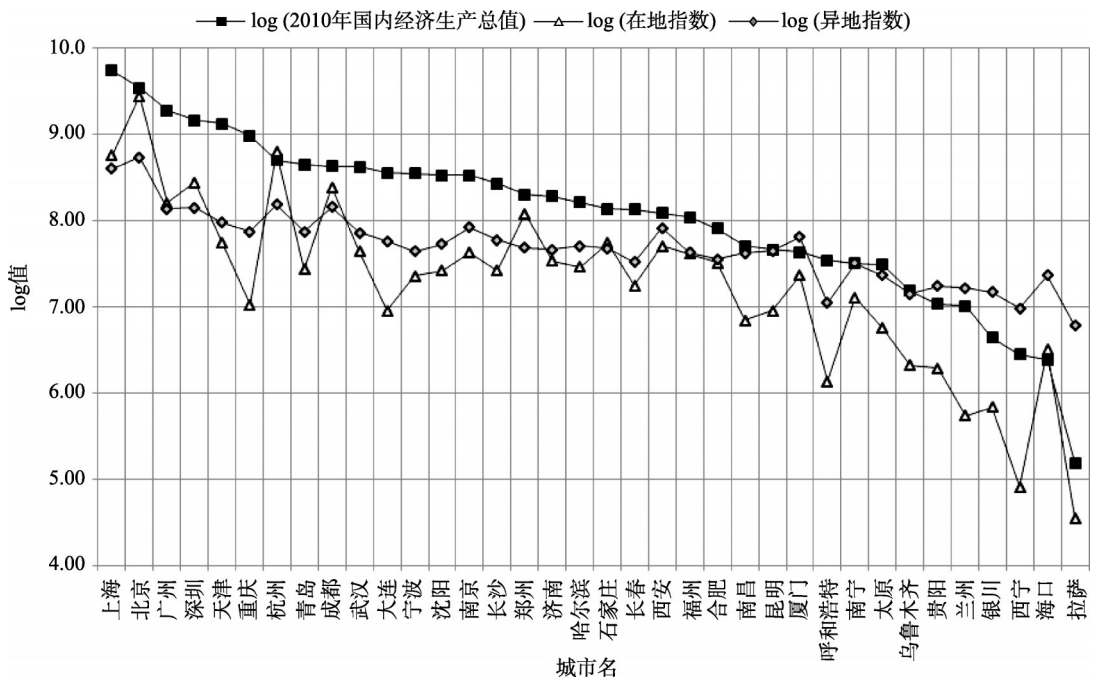


图6 在地指数、异地指数、国内经济生产总值的对数分析图

Fig. 6 The logarithm of local flow, the non-local flow and GDP

的数值大于异地被关注的数值。异地活跃型为经济水平较为落后的城市或者其城市旅游产业较为发达的城市，如拉萨等城市属于异地活跃型，一方面与其城市规模有关，即本地的地图关注度受到城市规模的限制，另一方面受到城市相关产业（如旅游业）产业规模的影响。

其次，从出度与入度的关系来看，笔者根据 *NSI* 指标、*LSF* 指标做进一步分析。*NSI* 指标是衡量城市进度与出度比例的指标，而 *LSF* 指标是衡量链接中流的方向性与流的差异程度。以 *NSI* 与 *LSF* 两类数据为基础，绘制城市网络空间分布图(图6)。图6中，节点通过颜色区分为两类，白色节点为流入型，黑色节点为流出型，节点的大小对应流入或流出水平的高低；节点之间的线以粗细示意流的不对称性水平高低，以箭头示意流的方向。

从节点来看，考虑到如上文所述，互联网地图关注度与被关注度与一个城市成为出行出发地与目的地有潜在的关系，因此根据 *NSI* 指标，可以将节点分为被关注型与对外关注型两类：被关注型节点指入度大于出度的城市，即该城市在互联网中搜索其他城市地图的数量小于该城市地图被其他城市搜索的数量；对外关注指节点的出度大于入度，即该城市在互联网中搜索其他城市地图的数量大于该城市地图被其他城市搜索的数量。

被关注型包括拉萨、上海、成都、西宁、昆明、重庆、长沙、广州、深圳、北京、南昌、厦门、南京、杭州、青岛、大连等城市，其中具有明显流入能级的是拉萨、成都与上海。对外关注型包括乌鲁木齐、兰州、银川、贵阳、南宁、海口、西安、呼和浩特、太原、郑州、武汉、石家庄、天津、济南、沈阳、哈尔滨、长春、宁波、福州等城市，其中具有明显流出能级的是呼和浩特、郑州、天津、银川。

从链接的不对称性来看，银川至乌鲁木齐，银川至武汉的流不对称水平特别高，即银

川对乌鲁木齐、银川对武汉有特别高的关注度；西藏、厦门、云南、西宁等旅游型城市，受到了较多城市的关注；比较特别的是南宁，尽管在与乌鲁木齐、银川、太原、长春、南昌等城市的链接中，被关注的流能级较大，但是从节点内总入度与出度的关系来看，仍然为流出型城市。

从区域角度看，呼和浩特、郑州、太原、银川、郑州、天津、济南、西安等城市构成了流出组团，其相互间没有形成强烈的关注（图7），而这部分城市对沿海发达城市关注较

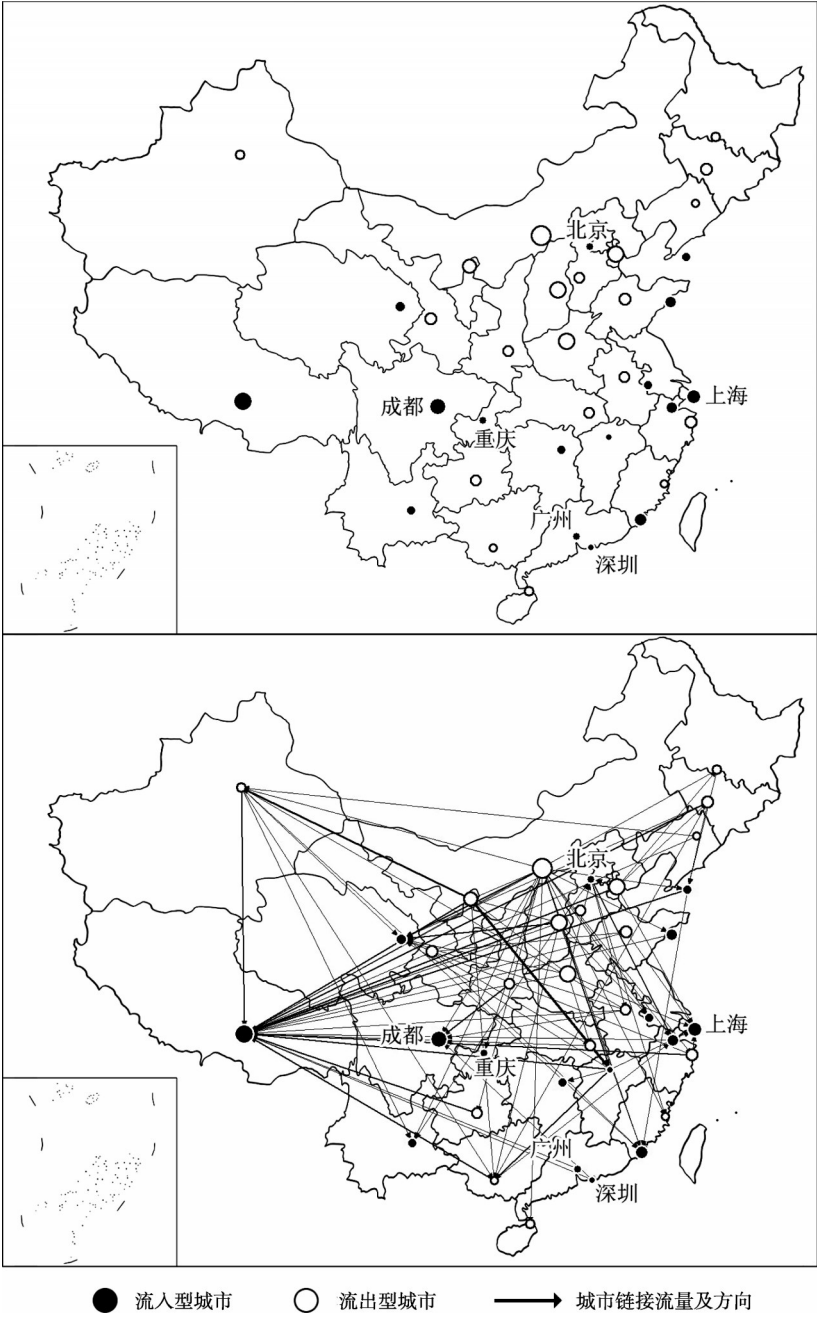


图7 有向多值网络图

Fig. 7 Directed multivalued network

多;沿海城市除福州、宁波外均具有较高的流入度,即沿海城市普遍具有较高的被关注度。

从空间距离来看,除西藏具有特别强的全国范围内的吸引力外,乌鲁木齐、呼和浩特与北京至昆明,银川、乌鲁木齐、太原、长春、武汉至南宁,呼和浩特至海口,乌鲁木齐、兰州、太原、呼和浩特与大连至厦门,这些对称性差异超过25%的链接的空间距离较大,代表这些关注具有一定特定的意义。

4.4 流向的T-检验分析

由于 LSI 公式为笔者对相关研究的修正,为了校核公式的有效性,并检验前述实证描述结论的统计学意义,笔者继续结合数据对在SPSS软件中对有向加权网络数据表形成的出度、入度进行T—检验。具体方法是每一个城市与其余的35座城市均有两列数据,分别为流入链接(地图被其他城市网民关注)、流出链接(该城市网民关注其他城市地图)的值,研究中,采用了配对检验的方法,检验每一个城市与其他35个城市之间流入、流出的趋向性,通过SPSS分析可以得表2。分析结果显示,对36个城市在有向加权网络的流出、流入链接情况进行分析,双尾检验中Sig值小于0.05的城市占全部案例城市数量的61.7%,说明这些城市的流出、流入情况具有明显的趋向性,且具有统计学意义。

表2从统计角度上对有向加权型城市网络的图形描述有着很好的补充作用。双尾检验中Sig值小于0.05的检验分析中,均值差异大于0(流入链接为主,典型的被关注城市)的城市包括了上海、重庆、拉萨、西宁、南京、杭州、长沙、广州、成都、昆明、青岛、厦门等12个城市,而均值差异小于0(流出链接为主,以关注其他城市为特征)的城市包

表2 中国各城市流入、流出链接趋势的配对检验
Tab. 2 Paired test of inflow and outflow linking among cities

城市	T	Sig. (双侧)	均值 差值	差分的 95% 置信区间		城市	T	Sig. (双侧)	均值 差值	差分的 95% 置信区间	
				下限	上限					下限	上限
北京	-0.082	0.935	-0.003	-0.065	0.060	合肥	-2.440	0.020	-0.062	-0.114	-0.010
天津	-4.136	0.000	-0.109	-0.162	-0.055	杭州	4.059	0.000	0.096	0.048	0.145
上海	6.444	0.000	0.124	0.085	0.164	福州	-0.185	0.855	-0.004	-0.048	0.040
重庆	2.971	0.005	0.046	0.014	0.077	南昌	-1.237	0.224	-0.053	-0.140	0.034
拉萨	7.130	0.000	0.303	0.217	0.390	长沙	2.725	0.010	0.048	0.012	0.084
乌鲁木齐	-0.910	0.369	-0.036	-0.115	0.044	武汉	-1.305	0.201	-0.032	-0.082	0.018
银川	-0.504	0.618	-0.024	-0.122	0.074	广州	2.846	0.007	0.042	0.012	0.073
呼和浩特	-10.026	0.000	-0.254	-0.306	-0.203	海口	-0.470	0.641	-0.010	-0.053	0.033
南宁	0.288	0.775	0.009	-0.056	0.074	兰州	-3.473	0.001	-0.081	-0.128	-0.034
哈尔滨	-1.374	0.178	-0.032	-0.081	0.016	西安	-0.436	0.666	-0.009	-0.053	0.034
长春	-3.737	0.001	-0.098	-0.151	-0.045	成都	8.775	0.000	0.157	0.121	0.194
沈阳	-1.199	0.239	-0.027	-0.072	0.019	贵阳	-1.750	0.089	-0.046	-0.100	0.007
石家庄	-2.199	0.035	-0.043	-0.083	-0.003	昆明	3.226	0.003	0.074	0.027	0.120
太原	-7.300	0.000	-0.167	-0.213	-0.120	深圳	0.681	0.500	0.013	-0.026	0.052
西宁	3.406	0.002	0.115	0.046	0.183	宁波	-1.680	0.102	-0.046	-0.101	0.010
济南	-2.146	0.039	-0.049	-0.095	-0.003	青岛	4.051	0.000	0.080	0.040	0.120
郑州	-8.540	0.000	-0.148	-0.183	-0.112	大连	0.899	0.375	0.027	-0.034	0.087
南京	4.125	0.000	0.072	0.036	0.107	厦门	5.834	0.000	0.126	0.082	0.171

括了天津、呼和浩特、长春、石家庄、太原、济南、合肥、兰州等城市。一般地,从城市之间交通出行的有向性体现在去程、返程的目的的不同,而这种向量性的差异在一定程度上表征了城市间的功能关系,当然,由于城市区域关系的复杂性,对互联网地图关注度的配对检验仍然无法直接测度城市之间全部“流”的向量性特征,但是这一探索性的分析为传统的无向型城市网络研究提供了有益的补充。

4.5 无向加权网络与有向加权网络分析结果对比

本文的研究对象是城市间出行关注流所体现的城市网络,通过无向加权网络与有向加权网络的分析对比,可以更加清晰地表现出两种分析方法的特点,即从节点属性与链接分布两方面对比。

首先,在无向加权网络网络分析中,节点的大小或强度多代表原始数据值的大小,需要通过统计学分类,无法直接定性。与无向加权网络相比,有向加权网络在反映了城市对城市网络的影响力(EI 值)与节点流的等级结构的同时,可对节点做进一步分析,将节点入度与出度的关系量化。在本文中,可以反映出城市被关注的程度,与无向加权网络分析方法相互补充。

根据 EI 、 NSI 指标与节点异地指数绘制图8。如图所示:节点的纵向关系为根据节点中心性(EI 值)由高至低排列,即上方的城市的中心性大于下方的城市中心性;节点所在线通过长度表示节点异地指数的大小,即线形越长,节点的异地指数越高;节点的横坐标为 NSI 值, NSI 负值时为对外关注型,由白色节点表示, NSI 正值时为被关注型,由黑色节点表示。

其中,北京、上海、杭州、成都、深圳、广州、南京、重庆、青岛、厦门、长沙、大连等异地指数高的城市为被关注型的城市,哈尔滨、郑州、石家庄、济南、宁波、合肥、长春、海口、太原、贵阳、兰州、银川、乌鲁木齐、呼和浩特等异地指数低的城市为对外关注型的城市。但这无法普遍适用,在有向加权网络分析中,突出表现出昆明、拉萨、西宁等具有特殊资源(旅游资源)的城市具有的较高的入度。

其次,无向加权网络的链接属性为链接中流的总强度,而有向加权网络的链接属性则根据方向属性细分,总的方向为较强度的方向,大小则是双向流之差占双向流之和的比例,即无向加权网络中的链接代表流的大小,有向加权网络中的链接表现流的差异性的方向。综合图2、图3可知,在无向加权网络中,通过对链接分布的识别可以分析城市体系的构成;而在有向加权网络中,可以通过链接的方向,进一步深入分析两两城市间的相互关系。对本文而言,通过互联网中城市间关注强度的分析揭示了城市间功能联系的非均衡性特征。

4.6 基于互联网出行关注流的有向加权网络分析的意义

在实证研究中,通过对互网络中城市之间地图关注度所构成的网络分析,如果将关注度视作潜在的出行期望,则可以进一步以中国副省级以上城市为分析对象,从出行关注的角度予以细分,分别划分出以出行比例、目的地比例较高为特征的城市,并结合网络结节性将城市之间的相互关系进行图示化。研究发现,通过对互联网关注度这一有向加权网络的分析,不但可以揭示传统网络的结节性,还可以相对准确地判断城市两两之间的吸引关系。

就分析方法而言,有向加权网络分析方法是对城市网络研究方法的重要补充,即通过研究流的不对称性,对城市网络这一复杂结构系统的流进行“流向”与“流量”的同步分

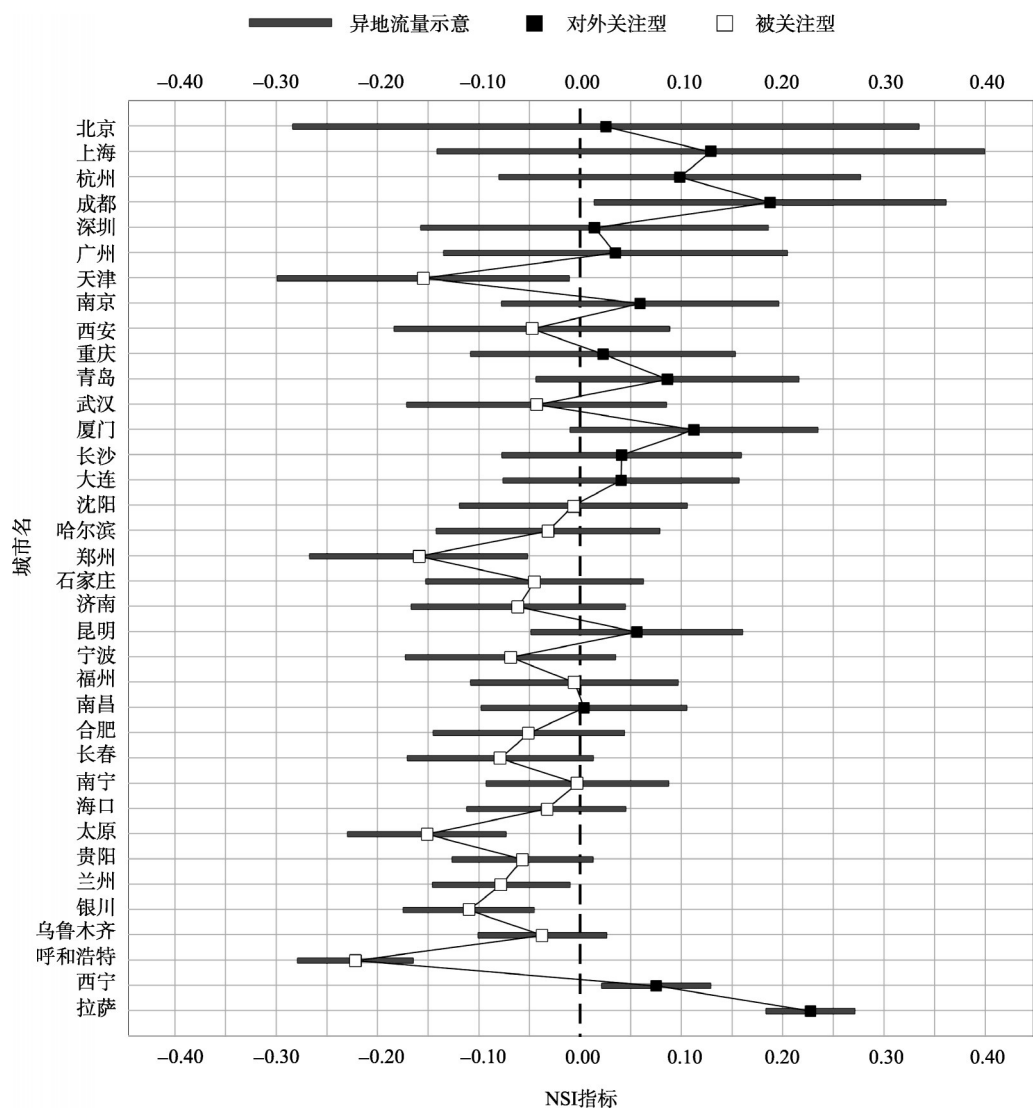


图8 城市EI、NSI 指标与节点流对比分析表

Fig. 8 The comparison of the EI Index, NSI Index and the node flow

析，以深入剖析城市体系中城市间功能关系的非对称性，有助于更加准确地对各个城市在网络中的真实地位做出判断。

本文中，多值网络的向量性差异在一定程度上表征了城市间的功能关系，这一探索性的分析为传统的无向型城市网络研究提供了有益的补充。

就分析素材而言，本文所采用的基于网络搜索引擎的统计数据具有创新性，借助网络搜索引擎中的将关键词与地理属性相结合的新功能，为解读互联网搜索引擎中的大量数据提供可能性，丰富了原有网络信息空间的城市地理学研究对象的范围。当然，随着研究的不断深入，若能采用其他合适的研究素材进行有向加权网络的研究，则能突破本研究的局限性，更深层次地认识城市之间的不对等关系，这也有助于对城市基本服务职能这一本体属性进行再认识的理论升华。

5 结论

互联网地图关注流作为潜在出行意愿的表征,反应了城市间潜在的空间交互关系。结合数据本身所具有的向量属性,通过有向加权网络分析方法,研究两城市之间的流的不对称性将有助于分析城市功能性的非均衡空间交互关系。目前国内对于城市体系的中不对称性尚未全面展开,零星的研究例如关于广州、佛山之间不同出行目的的客流的方向性都有其自身特征,而广州、佛山在同城化进程中的空间交互表现出特定的非均衡特征,也表现出城市间流的不对称性的复杂相关与普遍存在。

基于互联网地图关注度的加权网络作为一种区域性总体分析方法具有其必然的优势与劣势。其优势在于具备全面地对多个城市进行链接不对称分析的能力的同时,在采集数据与数据处理环节中节省了大量的人力与时间。但必须承认的是这种分析存在着一定的要求与缺陷,一方面其数据有效性未得到普遍认同,需要与其他代表城市间相互联系流的数据验证(在本文中已结合航空流与累计度进行对比分析),另一方面则是难以深究两城市之间流的不对称性的具体原因。然而,传统的航空流或铁路流所构成的无向加权网络所需要的数据采集大多来源于完整的信息公示,如果需通过交通出行调查以指向构筑一个有向加权网络,必然需要投入大量的人力与时间,而在全局层面进行类似的研究则要求更高。这是因为,按照严格的方向性研究,若要对36个城市之间的航空联系的方向性进行深入研究,需要对近40个机场(北京、上海等城市有两个机场)进行客流调研,显然这种同步性的调研对于科研院所来说难度十分大。本文的研究对象作为一种可测度的城市间双向联系的数据源,与城市间客流、物流、信息流等数据相比,其搜集难度与工作量都大为减少。作为有向加权网络分析方法的实证应用,其微观的城市关系固然也需要更加准确的数据检验进行深入的分析验证,但仍然不失为一个独特的研究对象以供与其他数据进行对比分析。随着互联网数据的丰富程度(例如分项的关注如商务、求学、旅游等各种数据)的提高,这种方法有可能不断增强其自身的适应性,这也是本文在后续研究中将继续深入的一个着眼点。

总体来看,笔者运用社会网络的分析方法,结合已有的国内外相关研究进行研究综述,从有向加权型网络的角度,结合城市网络联系的基本特性,在对Narisra Limtanakool所提出的 NSI 公式进行修正的基础上,以互联网络中城市之间地图关注度中为例,分析了中国大陆地区36个副省级以上城市的有向网络链接。本文所采用数据,是基于互联网平台的数据挖掘所得出的城市间互联网地图关注度,与常见的航空、铁路等研究对象相比,这种关注属于网络空间内的出行意向,而不是具有实际空间转换的出行统计,但在一定程度上也反映出了城市间相互关注的水平。作为以出行关注流所体现的城市网络,避免了不同交通出行方式本身的局限性,具有更加整体的能力来描述以城市为节点所构成的出行关注流网络。在此数据的基础上,所运用的有向加权网络研究方法,是本文研究的重点。在传统的区域城市研究中,大多通过人口与经济规模等属性数据或通过结节性来分析城市体系,指向城市体系内的排序,但这种方法在测度城市之间的联系有所欠缺,特别是在分析城市职能与城市分工时,无法更加具体的描述城市之间的相互关系。与无向加权网络不同,有向加权网络分析更有利于分析流的不对称性,通过量化流的不对称程度,使不对称程度较高的链接与节点可被识别并可进一步进行分类。这是在以往仅对链接强度进行量化的基础上,通过对城市间不对称性流的分析进而得到城市相互关系的差异性,也将为我国

现有的城市网络研究提供新的方法。

参考文献(References)

- [1] Neal Z P. Differentiating Centrality and Power in the World City Network. *Urban Studies*, 2011, 48(13) 2733-2748.
- [2] 刘军. 整体网分析讲义: UCINET软件实用指南. 上海: 格致出版社. 2009.
- [3] Barrat A, Barthélemy M, Vespignani A. Modeling the Evolution of Weighted Networks. *Physical Review E*, 2004, 70 (6): 1-13.
- [4] Sinclair, R. Changing spatial trends at the national, regional, and metropolitan levels of the settlement system in developed western countries. *Geographia Polonica*, 1983, 47: 101-113.
- [5] Limtanakool Narisra, Dijst Martin and Schwanen Tim. A Theoretical Framework and Methodology for Characterising National Urban Systems on the Basis of Flows of People: Empirical Evidence for France and Germany. *Urban Studies*, 2007, 44(11), 2123-2145.
- [6] Wasserman S, Faust K (1999). *Social Network Analysis - Methods and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge.
- [7] Beaverstock JV, Smith RG, and Taylor PJ. World-City Network: A New Metageography? *Annals of American Geographers*, 2000, 90(1): 123-134.
- [8] Beaverstock JV, et al. Globalization and world cities: some measurement methodologies. *Applied Geography*, 2000, 20 (1): 43-63.
- [9] Pearce Jamie, et al. Tackling global health inequalities: closing the health gap in a generation 1-6. *Environment and Planning A*, 2009, 41(1), 1-6.
- [10] Smith D A, Timberlake M, Conceptualising and mapping the structure of the world system's city system. *Urban Studies*, 1995, 32(2): 287-302.
- [11] 杨永春, 冷炳荣, 谭一洺等. 世界城市网络研究理论与方法及其对城市体系研究的启示. *地理研究*, 2011, 30(6): 1009-1020.
- [12] 金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究. *地理研究*, 2001, 20(1): 31-39.
- [13] 周一星, 胡智勇. 从航空运输看中国城市体系的空间网络结构. *地理研究*, 2003, 22(3): 277-286.
- [14] 罗震东. 长江三角洲功能多中心程度初探. *国际城市规划*, 2010, 25(1): 60-65.
- [15] 武前波, 宁越敏. 中国城市空间网络分析: 基于电子信息企业生产网络视角. *地理研究*, 2012, 31(2): 207-219.
- [16] 金钟范. 基于企业母子联系的中国跨国城市网络结构: 以中韩城市之间联系为例. *地理研究*, 2010, 29(9): 1670-1682.
- [17] 刘继生, 陈彦光. 分形城市引力模型的一般形式和应用方法: 关于城市体系空间作用的引力理论探讨. *地理科学*, 2000, 20(6): 528-533.
- [18] 陈彦光, 刘继生. 基于引力模型的城市空间互相关和功率谱分析: 引力模型的理论证明、函数推广及应用实例. *地理科学*, 2002, 21(6): 742-752.
- [19] 冷炳荣. 中国城市经济网络结构空间特征及其复杂性分析. *地理学报*, 2011, 66(2): 199-211.
- [20] Limtanakool Narisra, Schwanen Tim, and Dijst Martin. Development in hierarchy in the Dutch urban system. *Bijdrage voor het Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk* 2005. 24-25.
- [21] Limtanakool Narisra, Schwanen Tim, and Dijst Martin. Developments in the Dutch Urban Systems on the Basis of Flows. *Regional Studies*, 2009, 43(2), 179-196.
- [22] Limtanakool Narisra, Dijst Martin, and Schwanen Tim. A Theoretical Framework and Methodology for Characterising National Urban Systems on the Basis of Flows of People: Empirical Evidence for France and Germany. *Urban Studies*, 2007, 44(11), 2123-2145.
- [23] Zook M A. Old hierarchies or new networks of centrality: The global geography of the Internet content market. *American Behavioral Scientist*, 2001, 44(10): 1679-1696.
- [24] Moss M L, Townsend A M. *Manhattan Leads the Net Nation*. New York: Taub Urban Research Center, New York University, November, 1997.
- [25] Sternberg R, Krymalowski M. Internet domains and the innovativeness of cities/regions—Evidence from Germany and Munich[J]. *European Planning Studies*, 2002, 10(2): 251-274.

- [26] Devriendt Lomme, Derudder Ben, Witlox Frank. Conceptualizing digital and physical connectivity: The position of European cities in Internet backbone and air traffic flows. *Telecommunications Policy*, 34(8): 417-429. 2010.
- [27] 汪明峰. 浮现中的网络城市的网络: 互联网对全球城市体系的影响. *城市规划*, 2004, 28(8): 26-32.
- [28] 汪明峰, 宁越敏. 城市的网络优势: 中国互联网骨干网络结构与节点可达性分析. *地理研究*, 2006, 25(2): 193-203.
- [29] 汪明峰, 高丰. 网络的空间逻辑: 解释信息时代的世界城市体系变动. *国际城市规划*, 2007, 22(2): 36-41.
- [30] 赵渺希. 全球化语境中城市重大事件的区域关联响应: 基于北京奥运会新闻信息流的实证研究. *世界地理研究*, 2011, 20(1): 117-128.
- [31] 赵渺希, 陈晨. 上海世博会作为大事件的区域关联响应: 基于长三角地区新闻信息流的实证研究. *南方建筑*, 2010, 4: 12-15.
- [32] Newman M. The Structure and Function of Complex Networks. *SIAM Rev.* 2003, 45: 167-256.
- [33] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex Networks: Structure and Dynamics. *Physics Reports*, 2006, 424: 175-308.
- [34] Clauset A, Moore C, Newman M. Hierarchical Structure and the Prediction of Missing Links in Networks. *Nature*, 2008, 453: 98-101.
- [35] 陈彦光, 周一星. 基于三角点阵模型的自组织城市网络探讨. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(2): 258-264.
- [36] 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.
- [37] 于海波. 中国航空网络拓扑结构及其演化特征[D]. 北京大学, 2005.

Exploratory analysis of directed weighted network of city

LIU Zheng¹, WANG Shifu¹, ZHAO Miaoqi¹, WU Kang^{2,3}

(1. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As city network has become one of the academic focuses, this paper summarizes concept, characteristics, index and calculation of directed weighted network, focusing on empirical research of the internet map searching flows among 36 cities in China. The result shows that directed weighted network and undirected weighted network play different roles in the study of city network. In demonstration, internet map searching flow has strong correlation with airline flows in network nodular, which implies internet map searching flow represents the anticipation of travel. For nodes, out-flow type and in-flow type are found with regional distribution features, of which cities in North China and Northwest China represent strong flow out features. For links, this paper analyzes city network in both direction dimension and strength dimension, showing the non-symmetry relationship among cities. Overall, this paper provides new data source and viewpoint for city network research, and demonstrates the analysis in the method of directed weighted network. This method has a greater advantage in describing the function of nodes and the relationship among cities.

Key words: directed weighted network; symmetry; city network; internet geography