

城市网络的一种算法及其实证比较

赵渺希¹, 吴 康², 刘行健³, 本·迪鲁德⁴

(1. 华南理工大学建筑学院/亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640;

2. 首都经济贸易大学城市经济与公共管理学院, 北京 100070;

3. 北卡罗莱纳大学夏洛特分校地理与地球科学系, 美国 夏洛特 28223;

4. 根特大学地理系, 比利时 根特市, Krijgslaan 281/S8, B9000)

摘要: 城市网络链接是考察区域空间组织的重要途径, 基于高级生产性服务业 (APS) 的城市网络算法分析更是国际上该领域方法论研究的热点。本文以区域空间和企业层级为视角, 在新近出现的分区核心算法的基础上提出了在全计算过程中对单一公司进行网络分析的改进方法, 实现了网络分析中地理和层级的特征表达, 同时规避了原算法中公司—城市的二模网络数据合并为城市—城市的一模网络数据所导致的信息损失, 并以此实现了社会网络统计工具在这一算法的拓展应用。实证研究中, 运用该算法对中国两大典型城市区域——长三角、珠三角的25个城市进行了网络检验, 结果表明: 与连锁模型算法相比, 改进后的分区核心算法不但呈现出明显的层级特征和地理空间特征, 并且邻近性、中间性、出度、入度等统计量得以运用, 拓宽了生产性服务业城市网络的研究视野; 另一方面, 也发现, 由于理论模型假说的演绎分析决定了城市网络的实际形态, 因此, 后续的生产性服务业城市网络研究的一个创新途径即在于多类型城市流的实证归纳。

关键词: 城市网络; 算法; 生产性服务业; 长三角; 珠三角; 城市区域

DOI: 10.11821/dlx201402003

1 引言

全球化和信息化正深刻影响和重构着全球城市体系, 对于地理空间而言则主要表现为不断加剧的空间差异性和不断增强的空间联系性这两种对立统一的复杂变化特征^[1-3]。因此, 城市和区域间的联系在这样的新背景下被重构, 形成了在不同空间尺度下 (可以是区域、国家甚至跨国) 相互联系的大、中、小城市间组成一种网络型空间组织结构——城市网络^[4-5]。作为新背景下对社会行动者之间复杂关系结构的最佳隐喻, “网络”也成为了近年来社会经济领域十分流行的术语^[2]。一方面, 全球化与地方化相互作用导致全球生产网络化, 另一方面则是信息化作用下的“地方空间”与“流动空间”的共存促使地域空间网络化^[6-8]。人文地理学中, 分别以全球生产网络研究和世界城市网络研究为代表, 两大分支学科经济地理和城市地理近年来也都出现了网络研究的热潮^[9-11]。对于城市网络研究而言, 按研究尺度的差异大致可分为“世界城市网络”和“多中心城市区域”两大学派, 分

收稿日期: 2013-03-13; 修订日期: 2013-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51108184); 亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题 (2013KB20); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2013ZZ0022) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.51108184; State Key Laboratory of Subtropical Building Science of China, No.2013KB20; The Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.2013ZZ0022]

作者简介: 赵渺希 (1979-), 男, 博士, 副教授, 国家注册城市规划师, 主要从事城市与区域规划研究。

E-mail: zmx0207@163.com

通讯作者: 吴康 (1985-), 男, 博士, 讲师, 中国地理学会会员 (S110008920M), 主要从事城市科学与经济地理研究。

E-mail: ruoyunyi@163.com

别研究全球尺度和区域尺度下的城市网络链接与关系^[12-13]。由于行为主体的不同,城市网络的类型也十分丰富,在实证研究方面,主要包括企业组织^[14]、基础设施^[15-16]和社会文化机制^[17]等三条实证路径,其中企业组织路径是目前的主流研究方向,而基于生产性服务业企业组织数据的城市网络研究则是目前西方城市地理研究领域中的前沿^[18]。

生产性服务业的区域重组已经成为经济全球化最重要的表现形式之一。Sassen认为,在跨国公司的生产活动越来越趋于全球扩散的同时,更加要求管理功能的空间集聚,而全球城市就是全球经济网络的管理中心,高级生产性服务业 (APS) 则是这些城市的全球主导功能的核心产业,全球城市在全球生产中的核心控制作用是通过高级生产性服务业的跨国公司来体现的。这一观点与Hall、Friedmann等学者的世界城市理论有着密切的关联^[19-21]。在世界城市研究小组 (GaWC) 基于生产性服务业的世界城市网络 (WCN) 的研究中,Taylor及其相关研究团队作了大量的实证研究,并提出了连锁模型的算法 (IWCNM,国内也有学者译作连锁模型),这一方法的提出为定量地揭示世界城市网络的特征提供了有力的分析工具^[22]。而在国内,尽管诠释性的引介在全球城市理论甫一面世就层出不穷,但是对生产性服务业网络联系的实证研究直到近几年才出现:赵渺希和刘铮、唐子来和赵渺希、谭一洛等,路旭和马学广等基于生产性服务业分别对全国、长三角、成渝地区、珠三角地区进行了城市区域层面的网络研究^[23-26];2012年Taylor、Ben、倪鹏飞等人则对中国城市网络的生产性服务业进行了实证研究^[27-29]。以上研究主要是基于GaWC的连锁网络模型开展的中国城市生产性服务业网络的探索实证研究,并没有涉及到深层次的网络模型和算法的探讨。

近两年来,对Taylor城市网络算法模型的探讨和反思成为了新的理论热点,不少学者对这一连锁模型提出了质疑:Neal率先深入剖析了Taylor关于多区位公司分析的算法模式,并指出这一算法实质上是按照社会网络的二模网络转置计算形成的一模网络^[30];Derudder和Liu系统归纳并比较了现有的相关城市网络算法^[31-32];Henanman则从可视化的角度进行了城市网络的图形表达探索^[33];Henanman和Derudder还进一步指出,连锁模型算法忽略了企业联系的地理特征,并在综合考虑了地理空间性和公司层级性两大因素后提出了一种替代算法^[34]。

基于当前西方学术界对生产性服务业城市网络研究方法的前沿性探索,本文在Henanman和Derudder的替代算法的基础上进行了算法改进,遵循着模型假设——实证比较的研究思路,以长江三角洲和珠江三角洲这两大城市群作为主要的实证研究区域,对生产性服务业城市网络的算法进行探索,力图实现社会网络分析工具在城市网络研究的拓展运用,这也是本文研究的主要创新点。

2 城市网络的主要算法

2.1 连锁模型算法

基于生产性服务业数据开展城市网络的计算最早由Taylor于2001年提出,一般称之为连锁模型 (INWCN)^[22]。Taylor关于生产性服务业网络连接的计算假设是,在 n 个城市中有 m 个生产性服务业企业,城市 a 的服务值被定义为在该城市的公司办公点在其办公网络中的重要程度,并具体地用 V_{aj} 来表示 j 公司的办公地点在 a 城市的服务值,所有服务企业

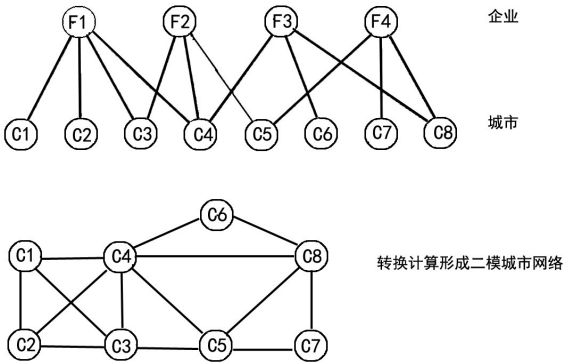


图1 二模网络到一模网络的转换过程
Fig. 1 The transformation of one-mode network from two-mode network

$n \times m$ 就构成服务值矩阵 V 。根据 Neal 等学者的研究, Taylor 的生产性服务业数据库是由城市和企业组成的一种二模网络, 若要将其映射为城市—城市的关系则必须将其转置为一模网络^[30-32, 34], Taylor 的计算过程实质上就是矩阵的转换计算 (图 1)。在 Taylor 的连锁模型中, 服务值矩阵 V 中最基本的转换计算关系表示为:

$$C_{ab,j} = V_{aj} \times V_{bj} \quad (1)$$

式中: V_{aj} 是 j 公司在 a 城市的服务价值, V_{bj} 是 j 公司在 b 城市的服务价值, $C_{ab,j}$ 是以公司 j 表示的城市 a 与城市 b 的基本连接关系量, a 、 b 间的城市联系则可以表示为:

$$C_{ab} = \sum_{j=1}^m C_{ab,j} \quad (2)$$

每个城市最多有 $n-1$ 个这样的联系。网络内每个城市 a 的点度 Ca 则可以表示为:

$$Ca = \sum_{i=1}^n Cai \quad (a \neq i) \quad (3)$$

连锁模型虽然实现了二模网络向一模网络的转换, 但是导致了城市间大量的无效联系; 更加重要的是, 这一计算过程忽略了城市联系的空间特征和企业架构的层级特征, 不可避免地对原有数据库造成了信息损失, 致使城市网络结节性的扁平化^[30-32, 34]。另外, 从网络分析的一般统计工具来看, 囿于模型假设的局限性, 连锁模型难以反映邻近性、中间性、出度、入度等网络统计量, 导致了全面、深入分析生产性服务业城市网络的技术缺失。

2.2 分区核心算法

鉴于连锁模型算法的缺陷, Henanman 和 Derudder 于 2012 年提出了一种新的模型算法, 相较于连锁模型, 该方法具有明显的层级特征和地理空间特征, 根据其特征可以命名为分区核心 (城市) 计算模型。

分区核心计算模型主要在两方面尝试做出了改进: 首先, 在计算过程中纳入了企业在全球布局的层级信息, 即考虑到 APS 企业办公网络的空间组织性, 通过对 APS 企业在全局办公组织的区域划分, 在每一个区域中选取区位价值最大的城市作为对外联系的门户, 低区位价值的生产性服务业企业依靠门户城市链接更高等级的城市, 这一方法体现了网络链接中公司层级和地理邻近的重要性, 且与现实中的生产性服务业网络链接更为贴近。其次, 两位研究者构建了一个网络链接的基准模型, 以保持网络基本结构的参数分布特征 (如度分布)。为此, Henanman 和 Derudder 采用“洗牌”的方式 (shuffling approach) 对节点链接进行数次随机置换迭代 (社会网络中谓之 permutation 或 bootstrapping), 经过这种“门户指向” (upper-level directed) 的随机变化, 网络节点间链接的路径方向得以保存, 进而可以进行节点中介性的计算分析。分区核心算法的基本过程可以简略表述为: 对于任意 j 公司, 先找出该企业所属的第 k 个区域中的区位价值最大值所在城市 a , 并考虑两种情形: (1) 若 j 公司在同一区域的两个城市 a 、 b 的区位价值均大于 0 且互不相等, 其中一个的区位价值为区域最大值, 那么将 j 公司网络在 a 、 b 之间的“报告”型链接值 $C'_{ab,j}$ 记为 1, 否则为 0; (2) 若 a 、 b 不属于同一个区域, 但都为各自区域中的最大区位价值所在城市, 将城市区域之间“报告”型链接值 $C'_{ab,j}$ 可以记为 1, 否则为 0。

对于单向的 $C'_{ab,j}$ 计算公式可以表示为:

$$C'_{ab} = \sum_{j=1}^m C'_{ab,j} \quad (4)$$

通过上述公式还可以计算每个节点城市的点度 (入度、出度), 其中入度可理解为某一城市分支机构受到外地总部控制的全部联系, 出度为其总部发往分支机构的全部联系。进一步地, 基于 C'_{ab} 的向量型特征, $(C'_{ab} + C'_{ba})$ 可以用来表示城市 a 、 b 之间链接的全部联系, 而以城市 a 为考察对象、对 C'_{ab} 、 C'_{ba} 分别对符合链接方向的 b 求和, 则其结果分别表

示了节点 *a* 的出度和入度, 根据 Alderson 和 Beckfield 的研究, 出度反映了总部所在城市的控制地位, 入度则反映了城市吸引投资的声望^[35], 而分区核心算法得到的出度、入度两者之和则为城市 *a* 的节点度。

3 分区核心城市算法的主要不足及其改进

如前文所述, 连锁模型对网络结构往往很难进行更深层次的探索性分析, 如社会网络分析中接近性 (Closeness)、中间性 (Betweenness) 等重要的分析指标无法在连锁模型中计算。中间性的计算最早是由 Freeman 提出来的^[36], Henanman 和 Derudder 用其来分析节点城市在网络中的重要性。就城市网络而言, 理论上应先计算城市之间的所有最短路径数量, 再分析其中节点城市被不同城市之间最短路径穿越时所包含的次数。Henanman 采用了随机网络的间接度量方法, 但是这种计算方法仍然是一种近似方法, 并不是完全的路径搜索计算。更重要的是, 由于这一算法并不逐一对企业的可能路径进行计算, 而采用了全部企业合并后形成的关系型城市联系矩阵的路径分析, 因而其实际的测试计算公式为:

$$B_i = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n Gab(i)/Gab \tag{5}$$

上述公式中 Henanman 和 Derudder 的算法规避了社会网络链接的真实性问题。根据 Rozenblat 对城市链接的机理的深入考察^[37], 采用公司链接来分析城市联系必须注意企业链接与城市链接的层次关系, 这是因为两个在同一地点的公司之间并不一定存在业务关系 (社会网络链接)。如图 2 所示, 分析 3 个公司 (1、2、3) 在 4 个城市 (a、b、c、d) 间的网络链接过程, 假若有公司 1 拥有 a-b 城市链接, 公司 2 拥有 b-c 城市链接, 公司 3 拥有 d-b、d-c 城市链接, 简单将 3 个公司进行叠加后将形成 1 个三角形另加 1 条边的拓扑结构, 仅看叠加后所形成的结构图, b 充当了 a、c 和 a、d 之间的中间点, 似乎 Freeman 所提的路径、步长、中间性等统计量在数学上都是可行的, 但是就链接的实际含义来说, 这一计算过程混淆了公司 1、2、3 在城市 a、b、c、d 之间的链接问题, 分析结果忽视了存在假性链接的风险, 因为从社会网络的角度来看, 若公司 1、2 以及公司 1、3 之间没有联系时, 则最右侧叠合图中城市 b 不能视为 a、c 和 a、d 之间的中间节点。事实上 Neal, Alderson 和 Beckfield 的研究^[30, 35]也并没有注意到企业链接与城市链接的区别, 因此其企业合并后计算的中间性同样面临着假性链接的风险。

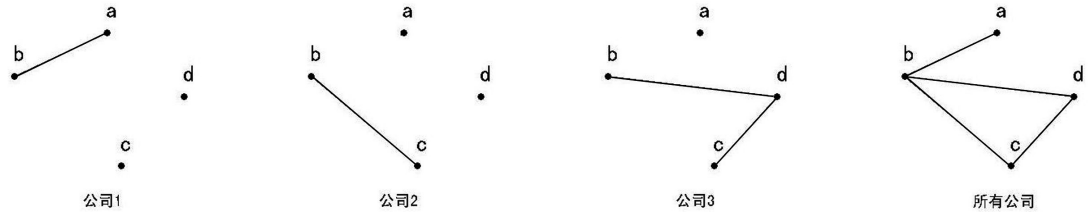


图 2 公司链接在城市间的叠加过程

Fig. 2 The overlaying process of enterprise's network in cities

鉴于将全部企业合并转制形成城市网络在计算中间性过程中的假性链接问题, 本文将对中间性的计算做出改进, 按照每一个公司 *j* 的链接情况先以 $G_{ab,j}(i)$ 、 $G_{ab,j}$ 的形式予以分别计算, 即在公司—城市的二模网络中对各个企业逐一进行中间性的度量, 最后再将各个企业在网络中的中间性进行平均值计算, 由此通过全过程的单一企业计算, 能有效地避免中间性计算的真实性问题, 其相应的计算公式为:

$$B_i = \sum_{j=1}^m \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n Gab_j(j)/Gab_j \tag{6}$$

式中： B_i 表示任一节点城市*i*的中间性指数， G_{abj} 为*j*公司网络中*a*、*b*两个城市之间所有可能的最短链接路径数量， $G_{abj}(i)$ 则为城市*a*、*b*在*j*公司网络中所有最短的链接路径中穿越和经过节点城市*i*的路径数。

类似地，研究还进一步引入邻近性的计算方法。邻近性同样来自于Freeman的研究，起初始定义是节点*i*与网络中其余所有节点最短路径的步数之和的倒数，相对于企业网络其计算公式可以表述为：

$$C_i = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{a=1}^n dai_{ij} \right]^{-1} \tag{7}$$

式中： C_i 表示任意一个节点城市*i*的邻近性指数， dai_{ij} 为*j*公司网络中*a*、*i*之间的最短步数，邻近性公式刻画了网络节点对信息流动的影响力，在城市网络中则反映了一个城市连接其他城市的便捷性程度。需要指出的是，部分节点在某一企业网络中与其他节点的链接可能不存在，因此对这种情况特别定义其邻近性为0。

4 实证比较研究

4.1 研究数据与研究区

任何理论模型的算法改进需要在实证案例中接受检验。城市网络链接是考察区域空间组织的重要途径，同时考虑到数据处理的可行性，本文的实证案例参照了欧洲多中心城市区域的网络研究。在相关研究中，Hall和Pain采用了GaWC关于生产性服务业的关联网络分析方法(Interlocking model)，以生产性服务业跨国公司的相关数据为基础，对欧洲巨型城市区域的空间联系加以测度，揭示了高级生产性服务业(APS)网络在巨型城市区域这一高级空间形态的组织过程^[13]。

基于西方学术同行的经典性研究，本文选择了我国东部沿海发育水平较高的长江三角洲、珠江三角洲的地级以上城市为研究对象，其中长三角地区包括上海、南京、镇江、苏州、南通、扬州、常州、无锡、泰州、杭州、湖州、嘉兴、宁波、绍兴、台州、舟山等16个城市；珠三角地区包括广州、深圳、佛山、珠海、东莞、江门、惠州、中山、肇庆等9个城市。

具体的生产性服务业的企业数据方面，在参照我国相应的行业企业排名的基础上，对在2个或2个以上的城市有分支机构的生产性服务业企业的网站进行登录访问(数据收集时间为2010年5月，校核时间为2012年8月)。研究选取了48家银行、38家保险公司、30家律师事务所、33家会计师事务所、31家管理咨询和建筑设计公司、25家广告公司、85家证券公司，总共290家企业进行数据采集，并借鉴GaWC的APS企业服务值赋值方法，按照公司的等级分别赋值为0，1，2，3，4，5等6个数量级别。0代表该公司未在该城市设立办事处或机构网点，5为设立公司总部的所在城市，2为设立标准(一般典型意义上的)办事处或机构网点，次一级或高一级的办事处和机构网点分别为1和3，区域性总部为4。在此基础上，以在290家企业中至少拥有2家跨地级城市分支机构为甄选标准，由此得到189家生产性服务业企业，最终形成了189×25的矩阵作为研究的数据库。

4.2 结果分析

4.2.1 城市网络的链接值分布 鉴于连锁模型在分析生产性服务业网络方面的权威性，研究先按照这一方法计算25个城市的链接值(图3)，并重点分析连锁模型点度在前10位的城市之间的网络特征(表1)。可以发现，连锁模型得到的结果是一个对称矩阵，其中上海—广州、上海—深圳的链接值均超过了1000，且明显高于上海与长三角区域内其余两个省会城市杭州、南京的链接(上海—杭州为677，上海—南京为576)。同时，连锁模型的计算结果在空间层面更加突出了非核心城市跨地域之间的联系。这种忽略层级特征的分

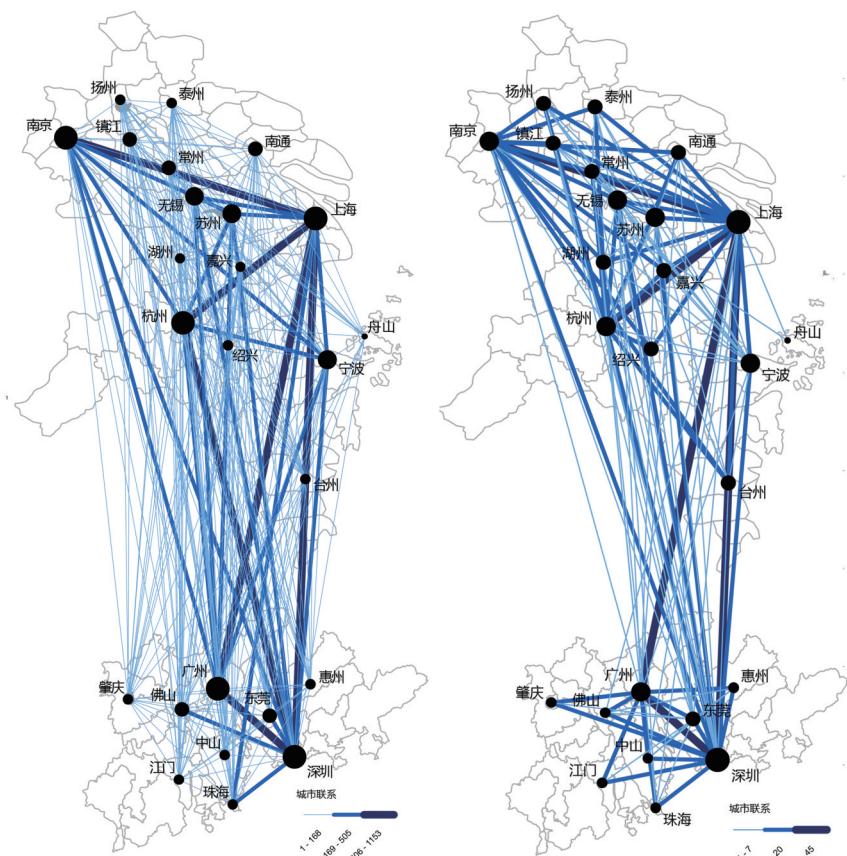


图3 连锁模型、分区核心算法对长三角、珠三角生产性服务业城市网络的计算结果

Fig. 3 Results of intercity producer servicing network in YRD and PRD by interlocking network method and regional core cities calculating method

表 1 连锁模型算法的网络表

Tab. 1 Network matrix based on the interlocking network method

	上海	南京	苏州	无锡	杭州	宁波	广州	深圳	东莞	佛山
上海		576	374	222	677	336	1153	1046	161	165
南京	576		264	180	416	225	387	505	125	138
苏州	374	264		123	243	163	266	305	94	77
无锡	222	180	123		163	132	177	207	97	90
杭州	677	416	243	163		260	482	563	133	134
宁波	336	225	163	132	260		255	277	115	119
广州	1153	387	266	177	482	255		720	168	159
深圳	1046	505	305	207	563	277	720		186	178
东莞	161	125	94	97	133	115	168	186		101
佛山	165	138	77	90	134	119	159	178	101	

析视角甚至可能出现奇异现象，例如两大城市群中经济实力最弱的城市浙江舟山与江苏、广东部分城市也有着明显的网络联系，甚至超过其与浙江省内城市的联系数量。

继续运用分区核心算法，分析长三角、珠三角城市区域的总体链接 (表2)，可以看出，计算结果是一个不对称的表，这一点与连锁模型结果有着本质的区别，当然这也源自于分区核心算法的下级企业机构向上级机构“报告”的链接假设。在具体的链接分布中，前三位的链接依次是：上海→杭州 (25)、上海→广州 (23)、上海→深圳 (23)、深圳→上

海 (22)、上海 → 南京 (20), 这同样显示出上海、深圳、广州、南京、杭州在两大城市区域生产性服务业网络的强势地位。另外, 分区核心算法的不对称表更加反映了生产性服务业区位分布不对等的情况: 观察数据表的每一列可以发现, 上海、深圳的生产性服务业总部

表 2 区域核心城市算法的网络表
Tab. 2 Network matrix based on the regional core cities calculating method

	上海	南京	苏州	无锡	杭州	宁波	广州	深圳	东莞	佛山
上海		4	1	3	2	1	6	22	1	0
南京	20		1	2	1	0	2	14	1	0
苏州	19	8		2	3	3	0	7	0	0
无锡	16	10	5		9	6	3	11	1	0
杭州	25	3	1	2		1	3	14	1	0
宁波	14	3	1	0	3		2	8	0	0
广州	23	3	0	2	1	0		17	0	0
深圳	23	4	1	2	2	0	6		1	0
东莞	5	0	1	0	0	0	12	15		0
佛山	5	0	0	0	0	0	13	17	2	

(或者区域型总部) 数量全部大于0, 而最右一列中佛山生产性服务业的总部数量为0, 这一方面反映了Hall、Friedmann关于世界城市假说的总部集聚特征, 也与Sassen的全球城市理论相吻合, 即在生产活动趋于区域扩散的同时, 管理、控制功能的集中反而会得到强化; 另外, 由于研究的企业数据采用的是Taylor分类企业排行的抽样方法, 分区核心算法针对的则是生产性服务业的区域性总部, 因此这一情况在最后两列数据中得到了反映, 说明以制造业为主的城市东莞、佛山其外向型的生产性服务业控制能力明显较弱。

通过图3的直观比较可以观察到, 分区核心算法的计算结果将连锁模型中部分城市间的生产性服务业联系进行了“擦除”, 这一结果使得城市联系的空间格局更为清晰, 也避免了连锁模型计算过程中忽略地理特征导致的不足 (如舟山的链接就更为符合常理)。从企业内部网络的联系过程来说, 低等级的分支机构在联系区域外部的其他机构时, 通常会先与所在区域的高等级管理机构进行沟通, 毕竟高等级的办公机构掌握了更多的内部信息, 能指导下级企业机构更便捷地联系当地的目标机构, 由此高等级企业机构更有可能充当跨区域低等级分支机构之间的网络桥节点。

在城市联系的内、外部关系中, Taylor、Hoyler、Verbruggen提出了Town-ness和City-ness两种城市联系模式^[38-39]。其中前者是以内部的腹地联系为表征, 并与传统的中心地理论密切相关, 后者则是与区域腹地之外的城市联系, 经济全球化即属于这种跨地域的外部联系。Taylor还详细引述了Jacobs的观点来说明城市与区域腹地外部联系的重要性^[40], 一个城市若仅仅依靠与区域内部腹地的联系是无法支撑其地区经济发展的。具体到本文中, 考虑到分区核心算法其出发点即在于对区域进行划分, 因此有必要研究城市连接区域内、外部其他城市的强度。按照地理范围分割出区域内部的节点集合, 则节点*i*与其所在区域内的城市节点的连接情况可以用平均连接度 k_{si} 进行度量, 对应地 k_{ii} 则用来表示*i*节点在全部网络中的平均连接度, 由此可以简便地计算节点*i*的区域内联系相对于整体网络的区内联系比值:

$$r_i = \frac{k_{si}/(n_{si} - 1)}{k_{ii}/(n_{ii} - 1)}$$

(8)

式中: n_{si} 、 n_{ii} 分别表示节点*i*所在区域内部、整体网络的节点数量, 若 r_i 大于1表明节点*i*的联系主要体现为区域内部的联系, r_i 小于1则表明其联系体现为区域外部。

运用上述公式分别计算两种网络模型算法中长三角、珠三角各个城市的区内联系强度 (表3)。可以看出, 在长三角区域的生产性服务业联系中, 连锁模型算法中上海、南京、杭州、宁波均是长三角区域中内部联系比值较低的城市, 反映了这一算法中4个城市在两大城市区域功能联系的去地化趋势; 但是在分区核心城市算法中, 所有城市的内部联系比值均大于1, 且南京的内部联系比值相对于杭州更低, 说明南京的外部联系强度更为

突出。总体来看，算法结果的差异实质上是分区核心算法更为强调生产性服务业区域总部的必然结果。

类似地，连锁模型算法中珠三角的广州、深圳、佛山、中山均是内部联系比值低于1的城市，但是在分区核心算法中，深圳的外部联系作用更为明显并超过了广州，这从一个侧面说明了分区核心算法的区域性本质：广州在珠三角区域中更多地承担着省会城市的职

能，因此表现为分区核心算法中内部联系比值高于深圳的格局，也反映了深圳在生产性服务业城市网络中具有更强的外部链接功能。

另外一个值得关注的现象是，在分区核心算法中，长三角的城市相对于珠三角区域有着明显的较低的内部联系比值，而连锁模型则不显著。运用独立样本的*t*检验进行分析(表4)，在考察Levene检验值的基础上观察双尾检验的显著性水平，可以看到分区核心算法显著性达到了 $p < 0.01$ 的检验水平，而连锁模型算法的显著性则没有通过 $p < 0.05$ 的检验。这说明，在分区核心算法中，长三角区域的城市其生产性服务业联系具有更加突出的跨区域特征，在城市群外部联系的发育方面略胜珠三角一筹。

表4 长三角、珠三角城市内部连接比值的独立样本检验
Tab. 4 Independent samples test of ratio of regional internal link for YRD and PRD

算法模型		Levene's Test for Equality		t-test for Equality		
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)
分区核心算法	方差齐性	13.856	0.001	-8.25	22	0.000
	方差不齐			-6.494	8.567	0.000
连锁模型算法	方差齐性	1.251	0.275	1.914	22	0.069
	方差不齐			1.765	13.111	0.101

4.2.2 网络的结节性 结节性是网络研究的一个重要议题,但学术界对点度的数值处理方法并没有统一的标准。因此，本文采用了标准值化的处理方式，即将各类型的结节性计算值以其相应类型最大值为1，通过比值换算得到0~1的数组分布。先比较两种算法中点度的分布。两种算法中，上海的点度原始数值都最高，因此无论哪种算法上海的点度都为1。

根据图4，可以直观地发现，连锁模型的点度递减相对缓慢，图4中仅珠三角的肇庆、江门和长三角的舟山其点度在0.2以下；而在分区核心算法形成的点度图中，长三角的扬州、泰州、常州、南通、湖州、嘉兴和珠三角的中山、肇庆、江门、珠海、东莞、惠州、佛山等地其点度均在0.2以下。

进一步地，将两种算法得到的点度均改写为*P*并分析其位序规模分布特征，根据

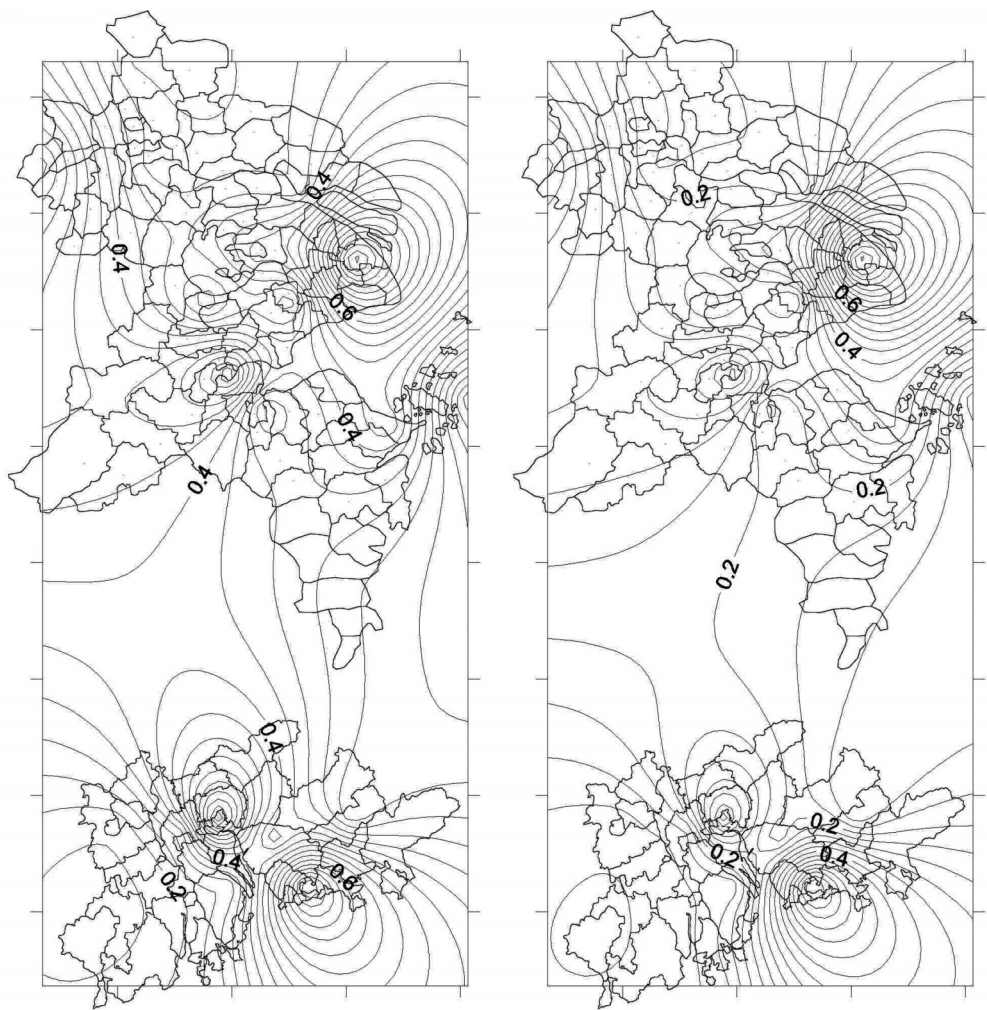


图4 连锁模型、分区核心算法对长三角、珠三角生产性服务业点度的计算结果

Fig. 4 Results of degree for advanced producer service of YRD and PRD by interlocking network method and regional core cities calculating method

Newman、Clauset、Boccaletti 等学者的研究^[41-43]，在实际的地理空间网络可以观察到点度的分布曲线符合幂律分布的无标度特征，且网络的节点幂律分布可以表示如下：

$$Pk = \sum_{k'=k}^{\infty} p_{k'}^i \sim k^{-\alpha}$$

(9)

在长三角15个城市（长三角的末尾城市舟山数据过低，进行“截尾”处理）、珠三角9个城市点度的规模位序曲线中（图5），无论是分区核心算法还是连锁模型算法，两种算法得到的点度分布都呈现出明显的幂律分布特征，回归方程的决定系数均超过了0.9（表5）。在回归方程曲线的斜率分布方面，分区核心算法的分布曲线更陡（图5），其点度位序规模回归方程中 α 值为0.859，高于连锁模型算法中点度的 α 值（0.609）。结合图4可以观察到分区核心算法有着更为突出的层级特征，联系到全球城市的地理空间

表5 点度的规模位序拟合方程

Tab. 5 Regression equations of rank-size of degree

	算法	回归方程	决定系数
长三角	连锁模型算法	$\text{Ln}(P_i) = -0.613\text{ln}(k) + 0.088$	$R^2 = 0.966$
	分区核心算法	$\text{Ln}(P_i) = -0.751\text{ln}(k) + 0.043$	$R^2 = 0.966$
珠三角	连锁模型算法	$\text{Ln}(P_i) = -0.792\text{ln}(k) + 0.026$	$R^2 = 0.925$
	分区核心算法	$\text{Ln}(P_i) = -1.176\text{ln}(k) + 0.271$	$R^2 = 0.956$

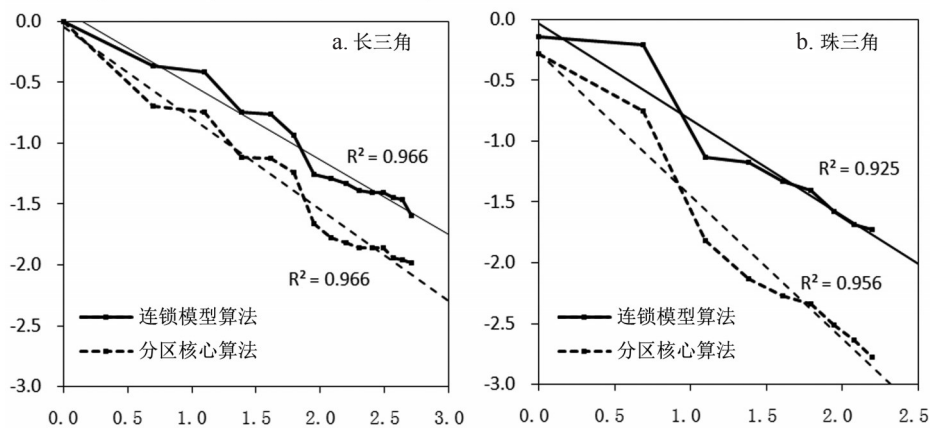


图5 连锁模型、分区核心算法的点度分布

Fig. 5 Distribution of degree by interlocking network method and regional core cities calculating method

极化观点，可以判断，分区核心算法体现了长三角、珠三角区域中少数城市的控制性地位。

若参照Hall、Pain、Burger、Knaap、Wall和Meijers、Burger等学者对巨型城市区域的多中心测度方法^[13, 44-45]，利用本文两种算法计算出来的结节性，以点度的规模位序方程度量长三角、珠三角的空间结构。可以看出，两种算法在点度的无标度分布方面均呈现出优越的高拟合性，且通过方程拟合则可以进一步观察到长三角和珠三角在生产性服务业空间集聚方面的差异性，即长三角区域的城市网络呈现出更为扁平的结构特征，而珠三角区域尚存在一定的空间极化现象。这一点尤其在分区核心算法的节点拟合方面更为突出，珠三角区域相应的系数达到了1.176，呈现出较弱的首位型分布特征。

继续考察分区核心算法得到的分项结节性指标(入度、出度、邻近性、中间性)与连锁模型点度的相关关系(表6，图6)。可以看到，连锁模型点度与分区核心算法的出度、邻近性、中间性的相关性均超过了0.7(决定系数

表6 分区核心算法与连锁模型算法在结节性方面的比较
Tab. 6 Comparison of nodasity between interlocking network method and regional core cities calculating method

城市	连锁模型点度	分区核心算法点度	入度	出度	邻近性	中间性
上海	1.000	1.000	0.672	1.000	1.000	1.000
南京	0.659	0.500	0.689	0.423	0.349	0.270
镇江	0.265	0.156	0.820	0.000	0.017	0.000
苏州	0.467	0.325	0.705	0.219	0.122	0.068
南通	0.284	0.169	0.885	0.000	0.032	0.005
扬州	0.236	0.163	0.852	0.000	0.023	0.000
常州	0.276	0.191	0.836	0.036	0.061	0.016
无锡	0.392	0.291	1.000	0.115	0.213	0.080
泰州	0.246	0.156	0.820	0.000	0.012	0.000
杭州	0.697	0.475	0.836	0.362	0.340	0.176
湖州	0.203	0.138	0.721	0.000	0.012	0.000
嘉兴	0.246	0.156	0.820	0.000	0.019	0.000
宁波	0.476	0.328	0.508	0.265	0.140	0.080
绍兴	0.231	0.144	0.754	0.000	0.051	0.000
台州	0.250	0.141	0.738	0.000	0.011	0.000
舟山	0.005	0.006	0.033	0.000	0.005	0.000
广州	0.813	0.472	0.770	0.373	0.443	0.257
深圳	0.868	0.756	0.656	0.724	0.624	0.644
东莞	0.323	0.163	0.557	0.065	0.047	0.048
珠海	0.264	0.103	0.541	0.000	0.042	0.000
佛山	0.309	0.119	0.623	0.000	0.036	0.000
肇庆	0.178	0.063	0.328	0.000	0.004	0.000
中山	0.245	0.097	0.508	0.000	0.021	0.000
江门	0.185	0.072	0.377	0.000	0.010	0.000
惠州	0.207	0.081	0.377	0.011	0.020	0.019

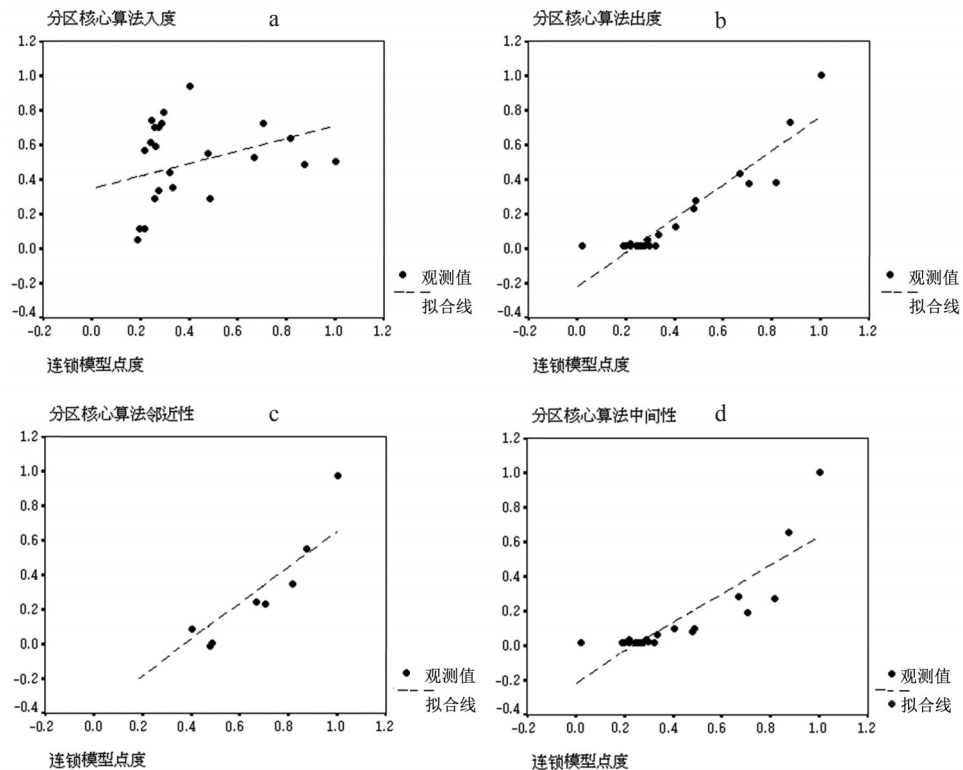


图6 连锁模型、分区核心算法对生产性服务业城市网络结节性的比较

Fig. 6 Comparison of nodasity of advanced producer service city network by interlocking network method and regional core cities calculating method

R^2 值分别为0.881、0.870、0.752),但是与入度的相关性不高(R^2 值为0.097),说明了分区核心算法虽然对连锁算法具有很好的拟合性,但是分区核心算法的出、入度分布较连锁模型更能反映真实的层级特征(表4)。由于生产性服务业的企业总部或高等级办公地点集中于少数核心城市(出度),因此从分区核心算法中可以观察到城市间功能关系的不对称性,这实际上是由于总部和分支机构区位分布不对等所造成的必然结果,体现了Friedman、Sassen关于世界城市或者全球城市的总部控制功能的空间集中特征。进一步地,Diken对跨国公司生产网络的不均等性进行研究后认为,在不同公司控制的生产系统各部分之间,有控制与被控制之别^[46];Massey也提出了“所有权关系决定社会关系”的观点,认为空间上的所有权关系,便变成了权力关系地理、控制与被控制地理、影响与被影响地理^[47]。因此,分区核心算法中出度、入度表征了双三角区域济联系的非对称性特征,也是价值链在巨型城市区域内部的一种地理映射关系。

深入分析核心算法得到的邻近性和中间性(表6),可以发现,两类指标中上海都处于绝对的优势地位,第二位城市深圳的地位也没有发生变化,但是在中间性方面,南京替代广州成为了第三位城市,说明南京相对于广州能够更有效地承担“中间人”的角色,而广州链接其他城市的邻近性方面则更胜一筹;另外有13个城市中间性得分为0,反映了两大大区域中城市网络链接的层级现象。

若进一步对分区核心算法得到的点度、邻近性、中间性等3类结节性进行深入的分析,通过每一个城市分项结节性偏离相应数组平均值的0.5标准差为划分标准,并对个别的单个类型城市适当归并,一共可以得到5组城市:上海、深圳、广州、南京、杭州属于3类结节性均非常突出的城市,即不但点度突出,而且具有链接其他节点便捷、位于关键

位置的特征，当然上海是属于最顶端的城市；苏州、南通、无锡、常州、宁波、绍兴、东莞属于3类结节性均处于区域中游的城市；珠海、佛山属于点度较低、其余结节性指标一般的城市；镇江、扬州、泰州、湖州、嘉兴、台州是邻近性较低的城市；而肇庆、中山、江门、惠州、舟山等城市的点度和邻近性均显著低于区域平均值(表7)。

总体而言，由于分区核心算法有效地改进了社会网络的分析指标，从而能更为全面、深入地表征生产性服务业的城市网络关系。反观连锁模型算法，由于其假定所有的异地分支机构具有联系，在忽略权重的情况下即形成正则式的网络，因而对这种网络形态进行社会网络分析就不大适合，这也是西方从事世界城市网络研究的学者一般不对连锁模型得出的数据进行社会网络分析的一个重要原因。

5 讨论

基于生产性服务业企业数据的城市网络链接是考察城市区域空间组织的重要途径，但是如何恰当地对城市联系进行度量是重要的方法论问题。本文认为，鉴于城市联系中的实际社会网络状况，为避免公司—城市数据库简并后的信息损失，有必要在全过程实行单一公司的遍历式计算，并采用地理空间结合企业层级的方法进行探索性研究。在长三角、珠三角两大城市区域的演绎实证中，研究改进后的分区核心算法具有明显的层级特征和地理空间特征，更能完整地反映生产性服务业连接的社会网络特征。更为重要的是，邻近性、中间性、出度、入度等统计量得以展开，从而拓宽了生产性服务业城市网络的研究视角。

需要指出的是，本文的实证研究只针对两个城市区域进行展开，但在理论上，对3个区域生产性服务业城市网络的计算才能代表这一算法的全部过程。这是因为：当事先假定城市区域的区间网络连接只通过区域各自首位城市与全部网络中区位价值最高的核心城市进行链接时，任意两个城市之间最短路径最多发生于3个区域之间：即在任意一个公司网络*j*中，若两个区域的核心城市*a*、*b*之间没有链接，而必须通过第三方的最高区位价值城市*i*中转，最长的路径步数为4、包含了5个节点城市(图7)。以长三角、珠三角、京津冀三大城市群为例，采用分区核心算法得出的总点度中，上海(615)高于北京(580)，但是北京的出度(486)略高于上海(480)，这从一个侧面反映了北京在高级服务业方面的总部控制力。当然，实际计算过程中，中间性的实际运用会受到海量数据的制约，需要运用更为先进的计算工具和软件系统，限于篇幅，本文仅仅指出这一方法需要考虑的因素，而不再进行具体的推演。

进一步，分区核心算法仍旧有缺陷，其不足首先来自于模型假设的限制，正如本文一开始即提出的分区核心算法的空间尺度问题，为了达到结果中更大的垂直差异性(hierarchy)，这一算法在模型中加入了区域的概念(region)，致使地理单元的选取在

表7 基于分区核心算法结节性指标的城市类型划分
Tab. 7 Classification of cities based by regional core cities calculating method

特征	城市
点度、邻近性、中间性均显著较高	上海、深圳、广州、南京、杭州
点度、邻近性均显著较高	苏州、南通、常州、无锡、宁波、绍兴、东莞
仅点度显著较低	珠海、佛山
仅邻近性显著较低	镇江、扬州、泰州、湖州、嘉兴、台州
点度、邻近性均显著较低	肇庆、中山、江门、惠州、舟山

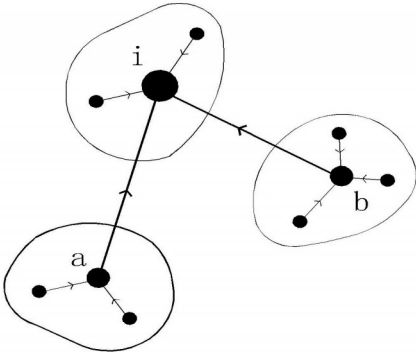


图7 三个区域的分区核心算法图示
Fig. 7 Model map of regional core cities calculating method for three regions

很大程度上就决定了模型的结果;另外,在链接路径的分析中,除了邻近性、中间性以外,分区核心算法仍有其限制,典型的统计量如网络分析中通用的群集性(即图1中三角形闭合路径的比重)同样无法计算。这表明,分区核心算法虽然对区域空间和层级有较好的反映,但在具体的分析方法上还有待改进。

当然,任何理论模型的演绎分析决定于假说前提,城市网络的结构同样受制于基础数据的计算模型,本文只不过揭开了冰山一角而已。就巨型城市区域的空间联系而言,Burger等人针对兰斯塔德地区城市联系的实证研究表明,巨型城市区域的功能联系是一种多元化的格局,城市网络的外在空间表征取决于实际的样本类型^[44-45],这也说明城市区域作为巨型复杂系统,其内、外部的空间关系远非一两种理论模型即可概括。虽然理论界对于生产性服务业城市网络的算法仍处于争议之中,但否定之否定的辩理过程在学术研究中弥足珍贵,毕竟,科学的进步往往蕴含于这种生生不息的探索和求知过程。笔者认为,后续的生产性服务业城市网络研究的一个创新途径即在于对生产性服务业企业进行田野式的调查,进一步明确城市联系发生的内在机理,在此基础上对算法进行归纳性的改进,这也是未来相关研究值得关注的方向。

参考文献 (References)

- [1] Sheppard E. The spaces and times of globalization: Place, scale, networks, and positionality. *Economic Geography*, 2002, 78(3): 307-330.
- [2] Dicken P, Kelly P, Olds K et al. Chains and networks, territories and scales: Towards a relational framework for analysing the global economy. *Global Networks*, 2001, 1(2): 89-112.
- [3] Florida R. *Cities and the Creative Class*. New York: Routledge, 2005.
- [4] Camagni R, Capello R. *The City Network Paradigm: Theory and Empirical Evidence*. Netherlands: Elsevier B V, 2004.
- [5] Lu Minghua. The development of urban networks in Randstad Holland. *Urban Planning International*, 2010, 25(6): 53-58. [卢明华. 荷兰兰斯塔德地区城市网络的形成与发展. *国际城市规划*, 2010, 25(6): 53-58.]
- [6] Henderson J, Dicken P, Martin H et al. Global production networks and the analysis of economic development. *Review of International Political Economy*, 2002, 9(3): 436-464.
- [7] Castells M. *The Rise of Network Society*. Oxford: Blackwell, 1996.
- [8] Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoqi et al. The intercity space of flow influenced by high-speed rail: A case study for the rail transit passenger behavior between Beijing and Tianjin. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(2): 159-174. [吴康, 方创琳, 赵渺希 等. 京津城际高速铁路影响下的跨城流动空间特征. *地理学报*, 2013, 68(2): 159-174.]
- [9] Mans U. Revisiting city connectivity. *Journal of Economic Geography*, 2013, 13(2): 1-23.
- [10] Taylor P J. *World City Network: A Global Urban Analysis*. London and New York: Routledge, 2004.
- [11] Gregory Derek et al. *The Dictionary of Human Geography*. 5th ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2009.
- [12] Taylor P J. Measurement of the world city network. *Urban Studies*, 2002, 39(13): 2367-2376.
- [13] Hall P G, Pain K. *The Polycentric Metropolis: Learning from Mega-City Regions in Europe*. London: Earthscan, 2006.
- [14] Wall R S, Knaap G A. Sectoral differentiation and network structure within contemporary worldwide corporate network. *Economic Geography*, 2011, 87(3): 267-308.
- [15] Choi J H, Barnett G A, Chon B-S. Comparing world city networks: A network analysis of Internet backbone and air transport intercity linkage. *Global Networks*, 2006, 6(1): 81-89.
- [16] Derudder B, Witlox F. An appraisal of the use of airline data in assessing the world city network: A research note on data. *Urban Studies*, 2005, 42(13): 2371-2388.
- [17] Taylor P J. New political geographies: Global civil society and global governance through world city networks. *Political Geography*, 2005, 24(6): 703-730.
- [18] Taylor P J, Evans D M, Pain K. The UK space economy as practised by advanced producer service firms: Identifying two distinctive polycentric city-regional processes in contemporary Britain. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2009, 33(3): 700-718.
- [19] Sassen S. *Global City: New York, London, Tokyo*. New Jersey: Princeton University Press, 2001.
- [20] Hall P. *The World Cities*. London: Heinemann, 1966.
- [21] Friedmann J. The world city hypothesis. *Development and Change*, 1986, 17(1): 69-83.
- [22] Taylor P. Specification of the world city network. *Geographical Analysis*, 2001, 33: 181-194.

- [23] Zhao Miaoxi, Liu Zheng. Research on China's city network based on production service industry. *City Planning Review*, 2012, (9): 23-28, 38. [赵渺希, 刘铮. 基于生产性服务业的中国网络研究. *城市规划*, 2012, (9): 23-28, 38.]
- [24] Tang Zilai, Zhao Miaoxi. Economic globalization and transformation of urban system in the Yangtze River Delta Region: Interlocking network and value-added hierarchy. *Urban Planning Forum*, 2010, (1): 29-34. [唐子来, 赵渺希. 经济全球化视角下长三角区域的城市体系演化: 关联网络和价值区段的分析方法. *城市规划学刊*, 2010, (1): 29-34.]
- [25] Tan Yiming, Yang Yongchun, Leng Bingrong et al. Urban network system in Chengdu-Chongqing region in the perspective of advanced producer service. *Progress in Geography*, 2011, 30(6): 724-732. [谭一洛, 杨永春, 冷炳荣 等. 基于高级生产者服务业视角的成渝地区城市网络体系. *地理科学进展*, 2011, 30(6): 724-732.]
- [26] Lu Xu, Ma Xueguang, Li Guicai. Spatial pattern of regional city network based on international advanced producer services' layout in Pearl River Delta. *Economic Geography*, 2012, 32(4): 50-54. [路旭, 马学广, 李贵才. 基于国际高级生产者服务业布局的珠三角城市网络空间格局研究. *经济地理*, 2012, 32(4): 50-54.]
- [27] Taylor P, Derudder B, Hoyler M et al. City-dyad analyses of China's integration into the world city network. *Urban Studies*, 2013, 50(7): 1-15.
- [28] Derudder B, Taylor P, Hoyler M et al. Measurement and interpretation of the connectivity of Chinese cities in the world city network, 2010. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(3): 261-273.
- [29] Ni Pengfei, Liu Kai, Taylor P. Linkage of Chinese cities based on the interlocking model. *Comparative Economic & Social Systems*, 2011, (6): 96-103. [倪鹏飞, 刘凯, 彼得·泰勒. 中国城市联系度: 基于联锁网络模型的测度. *经济社会体制比较*, 2011, (6): 96-103.]
- [30] Neal Z. Structural determinism in the interlocking world city network. *Geographical Analysis*, 2012, 44(2): 162-170.
- [31] Liu X J, Derudder B. Two-mode networks and the interlocking world city network model: A reply to Neal. *Geographical Analysis*, 2012, 44(2): 171-173.
- [32] Derudder B, Liu X J. Analyzing urban networks through the lens of corporate networks: A critical review. *Cities*, 2013, 31: 430-437.
- [33] Hennemann S. Information-rich visualisation of dense geographical networks. *Journal of Maps*, 2013, 9(1): 68-75.
- [34] Hennemann S, Derudder B. An alternative approach to the calculation and analysis of connectivity in the world city network. *Environment and Planning B*, 2014. (In press)
- [35] Alderson S, Beckfield J. Power and position in the world city system. *American Journal of Sociology*, 2004, 109(4): 811-851.
- [36] Freeman L. Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Social Networks*, 1979, (1): 215-239.
- [37] Rozenblat C. Opening the black box of agglomeration economies for measuring cities' competitiveness through international firms networks. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2841-2865.
- [38] Taylor P. Cities within spaces of flows: Theses for a materialist understanding of the external relations of cities//Taylor P, Derudder B, Saey P et al. *Cities in Globalization: Practices, Policies and Theories* London: Routledge, 2007: 287-297.
- [39] Taylor P, Hoyler M, Verbruggen R. External urban relational process: Introducing central flow theory to complement central place theory. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2803-2818.
- [40] Jacobs J. *The Economy of Cities*. New York: Vintage, 1969
- [41] Newman M. The structure and function of complex networks. *SIAM Rev.*, 2003, 45: 167-256.
- [42] Clauset A, Moore C, Newman M. Hierarchical structure and the prediction of missing links in networks. *Nature*, 2008, 453: 98-101.
- [43] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y et al. Complex networks: structure and dynamics. *Physics Reports*, 2006, 424: 175-308.
- [44] Burger M J, van der Knaap B, Wall R S. Polycentricity and the multiplexity of urban networks. *European Planning Studies*, 2013, doi: 10.1080/09654313.2013.771619.
- [45] Meijers E, Burger M. Spatial structure and productivity in U.S. metropolitan areas. *Environment and Planning A*, 2010, 42 (6): 1383-1402.
- [46] Dicken P. *Global Shift: Mapping the Changing Contours of the World Economy*. Sage Publications Ltd., 2007.
- [47] Massey D B. *Spatial Divisions of Labor: Social Structures and the Geography of Production*. New York: Routledge, 1995.

A novel method to approximate intercity networks and its empirical validation

ZHAO Miaoxi¹, WU Kang², LIU Xingjian³, Ben DERUDDER⁴

(1. *College of Architecture/State Key laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;*

2. *College of Urban Economics and Public Management, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China;*

3. *Department of Geography and Earth Sciences, University of North Carolina at Charlotte, Charlotte, NC, 28223, USA;*

4. *Department of Geography, Ghent University, Krijgslaan 281/S8, B9000 Gent, Belgium)*

Abstract: A network perspective has increasingly become an organizing paradigm for understanding regional spatial structure. This paper begins with a critical overview of existing empirical models for estimating intercity networks based on corporate linkages. Extending a recently proposed primary linkage algorithm by Hennemann and Derudder, this paper advances a new method for approximating urban network with locational strategies of firms. The new method considers both regional and hierarchical network features, and avoids information loss that is typical for the conversion between two-mode intercity corporate networks and one-mode intercity networks. In addition, networks estimated by the new method are suitable to be used with social network analytics. The newly proposed method is empirically validated with intercity corporate networks formed by advanced producer service (APS) firms in China's two largest metropolitan regions: Yangtze River Delta (YRD) and Pearl River Delta (PRD). The empirical analysis suggests that (1) in contrast with conventional methods (e.g., the interlocking city network model), our new method would produce regional and hierarchical urban networks that more closely resemble the reality; and (2) the new method allows the effective use of social network analytics such as betweenness and closeness centralities. Nevertheless, the authors note that the validity of any approximation methods for urban networks depends on the soundness of underlying assumptions about how network actors (firms, in our case) interact with each other.

Key words: city network; network measurement; advanced producer service; Yangtze River Delta; Pearl River Delta