基于综合引力模型的中国城镇体系再探索

韩瑞波^{1†}, 曹沪华^{2*}, 刘紫葳²

1. Department of Geographical Sciences, University of Maryland, College Park, Maryland 20740, USA;

2. Department of Geography, University of Ottawa, Ottawa K1N 6N5, Canada

* 通讯作者, E-mail: caohuhua@uottawa.ca

† 同等贡献, E-mail: ruibo@umd.edu

收稿日期: 2017-03-06; 收修改稿日期: 2017-12-14; 接受日期: 2018-03-14; 网络版发表日期: 2018-10-31

摘要 自20世纪90年代中期以来, 以传统引力模型为基础的综合引力模型被更广泛的应用到对中国城市分级的研究中. 在相关文献中, 城市间相互作用的研究, 大多采用单因素(如人口规模、经济规模(GDP)、城市间物理距离)应用引力模型进行计算, 实际上对于实际城市间的影响力存在较大偏差. 本文中的综合引力模型对传统引力模型进行了改良, 新的模型用整合了诸多社会经济因子的影响因子来代替单因子, 并引入功能距离来代替物理距离对城市进行基于多元交通方式的网络分析. 作为传统引力模型的改良, 综合引力模型能够更准确地表达中国城市系统的节点结构、演变以及节点结构与社会经济发展的相关性. 本文采用综合引力模型对1995年与2005年中国城市分级和空间结构进行研究. 研究将中国所有城市视为一个功能性地域系统, 旨在运用改进的引力模型解读中国城市系统的时空演变过程. 研究结果表明, 自20世纪90年代以来, 中国城市的结构特征表现为具有很强关联的城市之间的聚集. 然而, 从整体来看城市之间的差距在缩小. 现阶段处于相同城市群的城市发展并不平衡. 从空间上看, 城市群中高层级城市大多分布在东部, 但中西部高层级城市增长显著. 本文旨在探讨对传统引力模型的改进方法, 而中国城市的城镇体系被做为实例来验证改进后模型的实用性.

关键词 中国城市系统, 综合引力模型, 主成分分析, 网络分析

1 引言

近年来, 中国政府将城市群发展作为国家城镇化的主体形态. 然而, 学术界与决策层对中国究竟有多少城市群观点不一. 自顾朝林(1991)首次提出中国城市群概念, 近20多年来学术界从不同视角提出了中国城市群的空间格局方案(方创琳等, 2015), 如徐匡迪院士提出了中国未来城市群建设的“5+6+11”的格局, 根据城市群识别的基本定量标准, 方创琳等(2005)提出

了中国未来城市群建设的“5+9+6”的格局, 顾朝林等(2008)在中国城市体系空间格局中, 将全国划分为3大都市连绵区、3大城市密集区、7大城市群和17个城市发育区. 然而, 中国城市群的空间识别范围标准一直存在着争论, 城市群的概念和界定缺乏一个相对科学的识别标准.

人类发展进程中的任何空间运动都可以用“空间相互作用”这一术语来概括(Haynes和Fotheringham, 1984). 空间相互作用通过评估地理空间中人力资本、

中文引用格式: 韩瑞波, 曹沪华, 刘紫葳. 2018. 基于综合引力模型的中国城镇体系再探索. 中国科学: 地球科学, 48: 1670–1684, doi: 10.1360/N072016-00336
英文引用格式: Han R B, Cao H H, Liu Z W. 2018. Studying the urban hierarchical pattern and spatial structure of China using a synthesized gravity model. Science China Earth Sciences, 61: 1818–1831, <https://doi.org/10.1007/s11430-016-9191-5>

资源或信息的流动确定各个场所之间的联系和相互影响力. 引力模型(Gravity Model)是研究空间相互作用最知名的方法且被广泛采用(Ashtakala和Murthy, 1988; Haynes和Fotheringham, 1984; Isard, 1998). 引力模型源自牛顿定律的引力公式. 从本质上说, 两个物体之间的吸引力与它们各自的质量成正比, 与它们之间的距离成反比, 正如Stewart(1948)提出用来定义两个地方之间的“人口力量”方程一样.

引力模型在理论与实践方面均具有通用性(Haynes和Fotheringham, 1984). 改良的引力模型适用于不同领域的研究, 譬如运输、市场营销、零售、迁移和城市分析等(Chen, 2009; Davies, 1979; Isard, 1998; Karemera等, 2000). 另外, 引力模型也被广泛应用于对人口流动(如移民和旅游等)的研究(Hua和Porell, 1979). 例如, Ashtakala和Murthy(1988)开发了一套引力模型用于表达加拿大各省间大宗商品的流动, 模型利用幂函数和回归分析进行校准优化. Karemera等(2000)根据移民法规使用引力模型研究政治、经济和人口因素是怎样影响移民流向美国北部的. 此外, Chen(2009)融合时间维度优化了传统的引力模型, 采用时间延迟参数和时间函数研究城市的空间发展过程.

引力模型在研究地理现象中的广泛应用(Chen, 2009; 杜国庆, 2006; Jin等, 2004)促进了其在城市之间的空间相互作用的研究方面的可用性. 尽管如此, 在国内外相关文献中, 城市间相互作用的研究, 大多采用单因素(如人口规模、经济规模(GDP)、城市间物理距离)应用引力模型进行计算, 实际上对于实际城市间的影响力存在较大偏差. 很多批评者还是认为该模型过于简化, 无法充分表达现实问题的复杂性: 如人口等单因素不足以表示城市的“规模”, 直接距离不能正确反映出距离衰减效应(Ewing, 1974; Haynes和Fotheringham, 1984; Hua和Porell, 1979; Isard, 1998). 为弥补以上不足, 本文将社会经济和空间因素进行融合, 并引入综合引力模型来对传统引用模型进行改进. 本文将“城市综合实力”代替单因子, 将“功能距离”代替物理距离, 进行科学研究尝试, 力图研究成果更接近实际. 对于综合引力模型的实用性, 本文选用了中国城市的历史数据来进行验证, 并进一步探讨此模型在研究中国城市分级和空间结构的新的发现.

中国城市的研究与城市及城市间形态的演变密不

可分. 20世纪90年代初, “城市群”的概念在中国城市化研究中悄然兴起. 姚士谋和朱英明(2001)将城市群定义为“在特定的地域范围内具有相当数量的不同性质、类型和等级规模的城市, 依托一定的自然环境条件, 以一个或两个超大或特大城市作为地区经济的核心, 借助于现代化的交通工具和综合运输网的通达性, 以及高度发达的信息网络, 发生与发展着城市个体之间的内在联系, 共同构成一个相对完整的城市‘综合体’”(方创琳等, 2015). 20世纪90年代以来, 中国经济发展迅速, 城市化步伐加快, 城市格局的剧烈变化吸引了中外学者对中国城市群研究的关注(Cao和Bergeron, 2010). 例如, 周一星等(2003)认为“都市连绵区”是城市群发展的高级形态; 顾朝林等(2008)研究中国城市化与城市群发展之间的联系并深入探讨其影响机制. 此外, 通过对定量模型的开发和应用, 大量研究试图解释个别城市在一个特定城市系统中的规模和作用(Leung等, 2000; Skinner和Henderson, 1999; Tian等, 2005; Wu和Martin, 2002). 顾朝林(1991)选取33个指标对中国城市进行了综合实力评价, 提出了中国两大经济发展地带、三条经济开发轴线、九大城市经济区和33个二级城市经济区的城市经济区空间格局. 周一星等(2003)用实证的方法, 对中国城市经济区进行了新的等级体系划分, 确定京津唐、长江三角洲和珠江三角洲为全国的经济核心区, 并在此基础上, 把中国经济地域划分为北方区、东中区和南方区3个一级城市经济区和11个二级区. 方创琳等(2005)提出了城市群形成发育的定量判断标准, 以此标准将中国城市划分为23个城市群. 沈建法等对城市竞争力及区域人口迁徙模型的进行研究(Shen和Yang, 2014), 为城市群形成及演变的机制研究提供了定性参考.

但是, 有关中国城市群的研究对一些问题仍然存在普遍争议. 首先, 中国城市体系节点的层次结构鲜为人知. 现有研究多集中在城市的功能结构和城市布局方面(Lin, 2002; Song和Zhang, 2002; Tian等, 2005; Shen和Yang, 2014), 但忽视了城市之间的联系与相互作用. 另外, 现有研究更注重城市分类而不是研究城市系统的社会经济因素和机制(Ma, 2002; Yeh和Xu, 1996). 此外, 从政治或经济角度对城市进行研究的大量模型已被开发出来, 但这些模型中的大多数缺乏一种时空维度和对城市之间层次关系的深入分析(Logan和Molotch, 1987; Stone, 1989, 1993; Shen, 2012, 2016).

因此, 基于时空维度集中地分析城市体系的功能结构和城市之间的相互作用机制是非常有必要的。

从定量研究的角度出发, 本文采用综合引力模型对1995年、2005年城市分级和空间结构进行研究, 进一步探讨基于实体空间的城市群概念及边界划定。本文中综合引力模型被用来研究20世纪90年代中期以来中国城市体系的空间相互作用与演变。研究中采用主成分分析和网络分析来确定各城市的影响力和及被其影响的城市。为更好地了解中国城市体系的演化模式, 本文根据综合引力模型的分析结果, 利用图论¹⁾建立了中国城市体系的层次结构。本文特别关注了城市之间的空间相互作用、中国城市体系的节点结构及其层次结构的演变。

2 研究方法

本研究的框架如图1所示。首先, 综合引力模型的研究融合了主成分分析和网络分析两种研究方法来确定各城市的影响力及功能距离。然后, 文中运用图论和累计聚集的方法来确定城市体系的节点和层次结构。最后, 将这些步骤应用到1995年和2005年的城市体系中, 来阐明城市结构和城市转型模式。

2.1 建立综合引力模型

经典引力方程存在两个方面的限制。首先, 虽然人口做为一个变量被广泛用来表示一个城市大小规模, 但它不是一个能够充分反映出城市影响力的变量。一个城市的“规模”需要一个更全面的变量来准确地衡量。例如, 在用来研究人类迁移的经济引力模型中, 诸如失业率、房地产市场和相对工资这样的综合因素往往被用来取代传统的人口“规模”变量(Lowry, 1966; 尹虹潘, 2005)。

本文尝试用一个更全面更具代表城市实力的“影响因子”来替代传统引力模型中的单因子, 如人口变量等。影响因子的计算包括了城市的大量社会经济变量。它是一个单一的指数, 代表了这些变量的浓缩, 来全面地描述一个城市的竞争力和影响力。影响因子的计算方法如下:

(1) 通过去除无关或多重共线性变量来选出每个城市的一组变量。变量的选择是基于它们代表一个城市竞争力的能力和该城市与其他城市的联系(Dou等, 2000; Hair等, 2005; 王桂新和沈建法, 2002)。

(2) 运用主成分分析(PCA)来减少所选变量的维度。然后基于特征值(大于1)来提取主成分。通过乘以标准化的数据矩阵和因子负荷矩阵可算出每个城市的因子得分。因为第一主成分尽可能多地包含了数据的可变性, 所以第一主成分的归一化因子被用来作为影响因子, 来代表了一个城市的综合“规模”。

传统引力模型的第二个缺点是两个城市之间简单的直接距离并不能准确地反映现实空间中的距离衰减效应。城市通过彼此间相互作用的各种各样的网络相连接。交通运输和通信技术的发展极大地改变了城镇的相对位置。“时空收缩”或“时空收敛”描述了两个地点之间的行程时间的逐步减少(Bretagnolle等, 2003)。由于更加快捷的交通方式, 人们可以明显地感受到城市空间距离的相对收缩; 同时, 由于不断增加的通信速度, 城市间的联系距离越来越远。因此, 需要更加准确的行程时间, 来正确反映城市之间的相对距离。为了获得更符合实际的测算结果, 必须考虑时间、旅行成本、空间因素等(Chen, 2009; Hua和Porell, 1979)。本文提出采用基于多交通模式行程时间的“功能距离”来代替传统引力模型中的直线距离变量。

为了确定在复杂运输网络中两个城市之间的最短行程时间, 本文通过将时间设为阻尼, 利用GIS网络分析找到最快的路线。由于城市是由不同的交通网络连接起来的节点, 不同网络内部的相互作用取决于功能距离。换言之, 两个城市之间存在三种不同的引力作用, 主要基于三种可用的交通方式: 道路、铁路和航空。虽然水路也是在沿主要河流和海岸的地区的一种重要的交通方式, 但因为水路在中国并不普遍, 且缺乏相关数据, 故水路交通不包括在此模型中。本文运用ArcObjects和ESRI ArcInfo环境下的网络分析模块来计算城市间的功能距离。功能距离的计算公式如下:

$$T_i = \frac{S_i}{V_i}, \quad (1)$$

式中, T_i 代表功能距离(行程时间), S_i 代表使用 i th运输

1) 图论是指运用数学方法对图进行研究, 在城市研究中, 城际流动可通过阐明城市间关系的某些性质并接受图论的点线抽象关系进行分析(Nystuen和Dacey, 1961)。

图1 研究框架

方法的最短距离, V_i 代表使用 i th运输方法的平均速度。

交通工具的选择取决于其在国家交通中的使用比例, 其使用比例代表了聚集相互作用所产生的引力变量。假如道路运输占总交通量的53%, 则道路的引力代表了总引力的53%。综合引力模型就可以表示为

$$G_{mn} = R \cdot \frac{I_m \cdot I_n}{T_R^b} + W \cdot \frac{I_m \cdot I_n}{T_W^b} + A \cdot \frac{I_m \cdot I_n}{T_A^b} \\ = I_m \cdot I_n \left(\frac{R}{T_R^b} + \frac{W}{T_W^b} + \frac{A}{T_A^b} \right), \quad (2)$$

式中, G_{mn} 是城市 m 和城市 n 之间的引力作用力; I_m 和 I_n 分别是城市 m 和城市 n 的影响因子; R 、 W 和 A 代表不同运输方法(道路、铁路和航空)的引力; T_R 、 T_W 和 T_A 是不同运输方式的功能距离; b 是距离指数(b 的数值越大, 距离的摩擦力就越大), 基于多次实验及文献, 1.5为 b 的最佳值(Ewing, 1974; Olsson, 1970)。

2.2 节点和层次结构的描述

引力模型解决了量化空间相互作用的问题, 为中央地方理论和核心外围理论未能解决的各种经济部门的空间行为提供了诠释(Hua和Porell, 1979)。尽管引力模型有这些优势, 但它在识别城市层次结构方面仍有欠缺。虽然Camagni和Salone(1993)认为由于通信和交通网络的发展, 城市层次研究的价值被弱化, 但传统

层次结构仍然是城市系统结构的最佳抽象代表(Camagni和Salone, 1993; Huff和Lutz, 1995)。在这种情况下, 基于引力模型的城市层次识别成为城市体系研究中的一个挑战。

图论可以准确体现和描绘一个层次系统的节点关系(Davies, 1979; Dematteis, 1997; Du, 2000; 顾朝林和庞海峰, 2008; Nystuen和Dacey, 1961; Tinkler, 1979)。这一理论是一种从经验现实到点线图的适当转移, 及从定量统计到可视化图表的转移(Tinkler, 1979)。这一理论与引力模型相结合, 提供了一个城市系统层次结构的抽象表现(Du, 2000; Huff和Lutz, 1995)。

无论城市的大小如何, 每个城市都对其周围城市具有“引力”。图论通过将一个城市和对它最具引力的城市连接在一起, 即采用连线表达城市之间最强的相互作用力, 进而准确描绘出城市结构。因此, 对于一个具体的城市 m 来说, 第一步是确定其具有最大引力的另一个城市, 并用线将这些城市连接到一起。本文借助ESRI ArcInfo环境下的VBA ArcObjects, 通过编写程序可实现下列方程:

$$G_m^{\max} = \text{Max}(G_{m1}, G_{m2}, G_{m3}, \dots, G_{mn}), \quad (3)$$

式中, $G_m^{\max}$ 是城市 m 发挥的最大(最强)引力; 函数Max()可算出城市 m 和所有其他城市之间的最大引力。

为了描绘出一个城市系统的内在层次, 还必须确定基于影响因子的城市规模大小. 本文定义“影响力”为一个城市对其他城市所有引力的累加. 计算公式如下:

$$G_m^P = \sum_{i=1}^n (G_{mi}), \quad (4)$$

式中, G_m^P 是城市 m 的影响力, G_{mi} 是城市 m 对城市 i 的引力.

城市的层次结构是由城市影响力和与其他城市最强连接的数量决定的. 根据经验和以前的文献(Demateis, 1997; Du, 2000; 杜国庆, 2006; 顾朝林和庞海峰, 2008), 本文将城市分为四个等级(表1).

3 将综合引力模型应用于中国城市体系

国家一级城市功能的主要特征表现为城市间的空间相互作用(Du, 2000). 将综合引力模型应用于中国城市体系可以阐明中国城市层次结构的演变以及城市空间结构与社会经济因素之间的关系.

基于之前关于充足样本的研究(Hair等, 2005)和数据理论(Dou等, 2000; Sit, 1999; 王桂新和沈建法, 2002), 再结合中国所有城市(1995年的640个城市和2005年的661个城市)的统计年鉴, 本文选取了涵盖人口、经济和城市基础设施这些领域中的13个变量来计算城市影响力. 这13个变量是在多次相关分析实验及考虑自变量的多重共线性后从32个变量中筛得出. 1995年的主成分分析(表2)中, 本文确定了3个主成分, 这3个主成分可以解释13个变量中总方差的72.05%(表3). 2005年的主成分分析(表2)中的3个主成分解释了13个变量中总方差的69.57%(表3). 在这两次的分析中, 3个主成分中的每个主成分在总方差中所占的比例都不同(表2).

主成分1包括尽可能多的数据变化(1995年的39.1%和2005年的36.9%), 它主要根据城市的经济实力、人口规模和就业率解释了一个城市的影响力. 这些是用来衡量一个城市的竞争力和活力的最重要的变量, 占了主成分1最大的比例. 成分1得分高的城市是最大的城市, 它们也是最具经济竞争力的城市(表4). 由于主成分1主要因素所占比例在1995年和2005年都相对稳定, 这些因素在整个分析中提供了一致的信息. 因

此, 主成分1的因子得分可作为综合指数替代传统引力模型的人口因素(表2).

在1995年的分析中, 主成分2和主成分3描述了工业部门的城市. 占总方差的17.22%的主成分2说明了第二产业的信息, 也就是说, 主成分2得分较高的城市主要是制造业城市, 主要进行煤炭、石油、矿产和电子产品的生产. 城市可利用这些行业的所得利润投资基础设施建设, 包括铺设公路或城市绿化. 主成分3所占方差比例最小(15.71%), 主成分3得分较高的城市是那些以第三产业为主的城市, 如海口和珠海的旅游胜地. 由于20世纪90年代中期中国第三产业的发展, 主成分3得分较高的大多数城市在当时不为人们所知.

在2005年的分析中, 主成分2的分数包括了第二和第三产业的信息. 分析表明, 主成分2得分较高的城市(正值)是那些严重依赖于第二产业的城市, 而主成分2得分较低的城市(负值)是那些依靠第三产业的城市. 主成分3在2005年的分析中提供了关于城市基础设施建设的参考, 主成分3得分较高的大多数城市是那些重视自然环境维护和城市景观的旅游城市(表4).

当完成确定城市层次结构的步骤后, 根据城市影响力和一个城市最强引力连接的数量, 可将中国在1995年和2005年的城市分为四个层次(从最高到最低的排列顺序为3~0)(图2和3).

4 研究结果

本文采用综合引力模型对1995年与2005年中国城市分级和空间结构进行了研究. 结果表明, 中国城市体系的节点和层次结构在1995年和2005年期间变化巨大: (1) 自1995年起, 更多城市群开始出现; (2) 城市群中城市间的相互作用各有不同, 不良的相互作用导致了京津冀城市群中城市的发展不平衡; (3) 中国城市在空间上发展的不平衡, 即中西部发展滞后, 但内陆和沿海城市之间的差距已明显缩小.

4.1 城市集群的发展

受到特大城市支配和影响的低层级城市通常会由于地理及社会经济的相互作用而聚集到一起, 从而形成区域城市群. 像珠江三角洲(PRD)、长江三角洲(YRD)这样的繁华地区一直是中国现代史上的知名城市群. 这些地区的城市化水平较高. 自20世纪80年代以

表 1 城市分级^{a)}

城市分级	影响力
3	$\{L^T \geq 20\}, \{L^T \geq 10 \& G^P \geq (G_M^P + 3G_S^P)\}$
2	$\{20 > L^T \geq 10\}, \{10 > L^T \geq 5 \& (G_M^P + 3G_S^P) > G^P \geq G_M^P + 2G_S^P\}$
1	$10 > L^T \geq 5 \& G^P < G_M^P + 2G_S^P$
0	$L^T < 5$

a) L^T 是一个城市最大连接的总和; G_M^P 是每个城市影响力的中间值; G_S^P 是这些影响力值的标准误差

表 2 1995和2005年旋转指标矩阵^{a)}

1995年指标	成分			2005年指标	成分		
	1	2	3		1	2	3
GDP	0.948	-0.190	-0.081	GDP	0.961	0.010	0.043
非农人口	0.931	-0.211	0.001	在职人口	0.951	-0.025	0.013
投资	0.905	-0.201	-0.061	非农人口	0.937	-0.035	0.016
城市建成区	0.886	-0.084	0.000	城市建成区	0.910	-0.022	0.033
外资使用	0.857	-0.170	-0.018	外资使用	0.902	0.022	0.085
在职人口	0.846	-0.348	-0.132	平均工资	0.533	0.282	0.144
平均工资	0.532	0.449	-0.138	二产GDP比重	0.077	0.857	0.086
二产从业人员比重	0.437	0.689	-0.258	二产从业人员比重	0.174	0.832	0.138
二产GDP比重	0.275	0.640	-0.604	三产从业人员比重	-0.068	-0.774	-0.118
人均道路占有	0.256	0.547	0.360	三产GDP比重	0.279	-0.641	0.012
森林覆盖率	0.222	0.294	0.090	人均绿化率	0.057	-0.003	0.819
三产GDP比重	0.305	0.112	0.822	森林覆盖率	0.203	0.205	0.687
三产从业人员比重	0.353	0.333	0.704	人均道路占有	-0.063	0.083	0.681

a) 分析方法: 主成分分析; 旋转方法: 正交旋转; 数据来源: 中国城市统计年鉴, 1996, 2006

表 3 1995及2005年主成分分析结果

主成分	1995年			2005年		
	特征值	变异方差(%)	累积方差(%)	特征值	变异方差(%)	累积方差(%)
主成分 1	5.09	39.12	39.12	4.80	36.91	36.91
主成分2	2.24	17.22	56.34	2.57	19.76	56.67
主成分3	2.04	15.71	72.05	1.68	12.91	69.57
KMO准确度		0.809			0.796	

来, 中国的经济改革和开放政策加速了城市群的发展, 新的城市群也陆续出现(Skinner和Henderson, 1999; Yeh和Xu, 1996)(图2). 此外, 高层级(3级和2级)城市数量大幅增加, 加强了城市间的相互作用, 形成了新的空间连接.

本文结果显示, 城市体系的层级结构通过其显著的“轴辐式”相互作用和节点连接清晰地展示了城市群的模式和发展(图2和3). 1995年的模型计算结果中, 北京、天津、上海、武汉和广州被确定为第一层级城市. 另外5个大城市, 沈阳、西安、南京、重庆和深圳,

表 4 1995及2005年主成分分析得分最高城市

排名	1995年						2005年					
	主成分 1		主成分2		主成分3		主成分1		主成分2		主成分3	
	城市	得分	城市	得分	城市	得分	城市	得分	城市	得分	城市	得分
1	上海	1.00	克拉玛依	1.00	绥芬河	1.00	上海	1.00	义马	1.00	廉江	1.00
2	北京	0.55	大庆	0.99	二连浩特	0.99	北京	0.89	克拉玛依	0.94	三亚	0.90
3	天津	0.51	东营	0.89	珠海	0.77	广州	0.53	金昌	0.92	威海	0.85
4	广州	0.41	珠海	0.82	海口	0.74	天津	0.47	嘉峪关	0.89	常熟	0.81
5	武汉	0.35	马鞍山	0.82	畹町	0.72	深圳	0.47	霍州	0.87	高密	0.74
6	沈阳	0.31	嘉峪关	0.80	济宁	0.68	南京	0.33	大庆	0.87	曲阜	0.72
7	重庆	0.29	盘锦	0.79	喀什	0.64	武汉	0.33	东营	0.85	日照	0.68
8	深圳	0.27	十堰	0.78	海拉尔	0.63	东莞	0.31	晋江	0.85	安丘	0.67
9	大连	0.24	深圳	0.78	鹰潭	0.58	重庆	0.31	介休	0.85	莱西	0.67
10	南京	0.22	佛山	0.77	黑河	0.57	沈阳	0.30	盘锦	0.85	中卫	0.66

数据：中国城市统计年鉴1996；中国城市建筑统计年鉴1996；台湾因数据缺失未列入分析

图 2 1995年中国城市分级

图3 2005年中国城市分级

被划定为第二层级城市，另有13个城市被划为第三层级。显然，1995年城市体系的内部联系相对较弱，所以“轴辐式”模式只存在于几个区域中。因此，具有较高影响力的城市只能在很小的空间范围内影响其他城市，大都市甚至只能在相对较小的范围内有少量的最强连接。然而，作为节点的大多数城市总体促进了城市群的发展，并已开始出现在北京、上海和广州等周边地区。

1995年之后，中国的城市化进入一个新的发展阶段(图4)：城市的数量趋于稳定，城市的规模扩张主要是源自城乡人口的迁移。随着中国城市体系内流动性的增强，城市之间的联系持续增加。大城市吸引了物资、资本和劳动力的流入，在区域城市发展中发挥着主导作用。例如，2005年的模型计算结果中，南京和重庆升级节点城市，而在1995年的分析中，它们并不是节点城市。另外6个城市(哈尔滨、郑州、杭州、长沙、成都和乌鲁木齐)也升级为第二层级的城市。主要受第

一级节点城市和第二级城市支配的城市群或城市带已初具规模，可以清楚地看到这些地区的“轴辐”模式。

为验证综合引力模型研究城市群演变成果，本文采用遥感图像来解读城市发展。研究使用的是Defense Meteorological Satellite Program的Operational Linescan System(DMSP OLS)系统在夜间采集的影像，而非传统的遥感传感器在白天拍摄的影像。由于其在夜间出色捕捉城市光线的能力，DMSP OLS影像已被广泛用于探测和分析城市住宅区的广度和密度(Ellis等, 2001; He等, 2006; Henderson等, 2003)。相比GIS网络分析法来说，夜间灯光影像能更准确地刻画出城市的密度和界线(图5)。

图2和3的对比揭示了中国2005年城市群的演变模式，而这些主要城市群有：(1) 东北城市带(哈尔滨-长春-沈阳-大连)，(2) 京津冀城市群(北京-天津-唐山)，(3) 山东半岛城市群，(4) 长江三角洲(YRD)城市群(南京-

图4 1978年后中国城市发展

上海-杭州), (5) 珠江三角洲城市群, (6) 西南城市群. 其他四个新兴的城市群分别是福建沿海城市群、武汉城市群、中原城市群和关中城市群. 这些新兴城市群大部分仍在发展中, 处于初步形成阶段. 人类历史上的城市群通常位于平原、三角洲和工业区(Yeh和Xu, 1996). 中国的十个城市群中大多数坐落在三角洲或有着丰富自然资源和悠久发展历史的平原地区. 这些城市群的人口密度很高, 并以从事不同的农业或工业产品的生产而闻名. 这些城市群在经济改革和开放政策时期蓬勃发展, 与它们的地理区位密不可分. 除了现有城市的进一步发展, 这些城市群内部也开始涌现出了一批新的城市, 像珠江三角洲的东莞、深圳和珠海以及长江三角洲的常州(Song和Zhang, 2002; Yeh和Xu, 1996; Zhao等, 2003; Zheng等, 2009). 此外, 新的城市群也将陆续萌芽; 例如, 像济南、郑州、长沙、乌鲁木齐和昆明这样的省会城市的发展为新城市群的出现创造了可能.

4.2 城市群内的不平衡发展

城市体系的时空结构随着社会、经济、技术和地理条件的变化而演变(Du, 2000; Huff和Lutz, 1995). 城市体系的演变由内部城市的社会经济发展所驱动. 城

市体系空间结构模式的更新是由个体城市发展及城市之间相互关联共同作用的结果. 换言之, 一个快速发展的城市可以吸收周边竞争对手的资源, 从而阻碍其竞争对手的发展. 同时, 快速发展的经济提供了一个让周边城市受益的“生态位”. 生态位在城市系统中指的是某个城市在时间空间上所占据的位置及其与相关城市之间的功能关系与作用.

本文基于1995及2005两年的模型计算, 发现长江三角洲城市群和京津冀城市群就是两个典型的城市群均衡及不均衡发展的例子.

上海作为中国最大的城市, 占据着长江三角洲城市群的主导地位, 与南京和杭州等主要城市协同发展. 上海的制造业已经被转移到了其他城市, 因此上海的发展既取决于周边城市的发展, 高速发展的上海也可以促进周边城市的发展. 此外, 上海和其他城市之间的便捷交通使得城市群紧凑且具有活力. 因此, 长江三角洲城市群中的互补发展机制促进了城市的可持续发展. 从1995~2005年, 南京发展成为一个顶级节点城市, 它的最强连接城市数量由8个增加到了11个; 杭州则发展为第二级节点城市, 它的最强连接城市数量由3个增加到了6个(表5). 随着最强连接城市数量和影响因子值的持续增加, 南京和杭州在城市子系统中已

图5 DMSP夜间灯光图显示的城市聚类

经获得了至关重要的地位(图6)。

然而,京津冀城市群的发展与长江三角洲的发展形成了鲜明的对比。北京作为城市群中的主导城市,由于其作为中国首都的政治地位而被优先发展。北京的特权地位不允许其他城市与之竞争,北京及其周边城市的协同发展关系被其特权所取代。虽然北京和上海之间的差距已经缩小(1995年的影响因子值分别为1与0.55; 2005年的影响因子值分别为1与0.89),但自1995年起,北京和天津之间的差异继续拉大(1995年的影响因子值分别为0.55与0.22; 2005年的影响因子值分别为0.89与0.33)(表5)。天津的发展很大程度上受到了北京快速发展形成的“影子效应”的阻碍,因此天津的最强连接数量已经减少(图7)。由于北京在京津冀城市群中的主导地位,北京的最强连接城市数量从1995年的18个增加到了2005年的45个;而与天津有着最强联

系的城市数量从1995年的11个减少到了2005年的5个(表5)。

4.3 城市系统内空间的不平衡发展

图2和3中城市空间分布和联系的变化揭示了另一个重要的现象:中部和西部地区的城市在过去的20年中一直以较快的速度发展。

在20世纪80年代以前,由于考虑国防等因素,中部和西部内陆省份的城市得到了优先发展。通过行政措施,将大量的沿海产业转移到了内陆地区,形成了一种相对平衡的城市化模式。然而,改革开放之后,中央政府开始优先发展东部海岸地区,促进了不对称城市化模式的形成。城市的空间分布因大小和区域不同(图2和3)。中国东部城市在1995年和2005年占据了层次结构的顶端位置,该阶段也伴随着东部地区第三层级城

图6 长江三角洲城市群演变

表5 最大连接及影响因子方差

城市群	城市	链接值		影响因子	
		1995年	2005年	1995年	2005年
长江三角洲	上海	43	44	1.00	1.00
	南京	8	11	0.51	0.47
	杭州	3	6	0.15	0.27
京津冀	北京	18	45	0.55	0.89
	天津	11	5	0.22	0.33

市的快速发展(1995年的青岛和烟台, 2005年的青岛、烟台、济南、大连、石家庄和福州), 华中地区的二级城市发展类似(2005年的郑州、哈尔滨和长沙)(表6).

同时, 各城市之间的优势差距已逐步减小. 综合引力模型中的影响因子变量已被证明是比人口变量更全面的因素, 它反映了城市结构的复杂性和多维性、城市绩效和城市活力. 例如, 深圳的非农业人口数量在1995年排名全国第十, 是南京非农业人口数量的1/3; 然而, 当考虑国内生产总值、外国投资和平均工资这些因素时, 深圳在2005年排名全国第八(表7). 中国东南部另一座城市东莞在2005年排名全国前十. 至2005年, 东莞的非农业人口数量居全国第八位, 而深圳则继续攀升, 排名第五. 中国东南沿海优越的地理位置

吸引了国内外的资本, 为城市、经济和社会发展创造了良好的环境. 例如, 2005年排名前十的三个城市都位于中国东南沿海地区, 即广州、深圳和东莞. 这三个城市的排名以不同的速度再提高(表7). 另一个明显的现象就是, 从1995年到2005年期间, 影响因子之间的差距减小了. 标准化的影响因子(以最大值1作为参考)可以帮助解读城市之间影响因子数值的相对差异.

5 结论

本文运用的综合引力模型是基于优化传统引力模型的优化. 该优化包括: (1) 引入影响因子衡量一个城市的准确“规模”. 这一个改进是为了证明有较大影响

图 7 京津冀城市群演变

表 6 1995及2005年中国城市地区分级

分级	东部		中部		西部	
	1995年	2005年	1995年	2005年	1995年	2005年
3	4	4	1	1	0	1
2	3	4	0	3	2	3
1	2	6	5	4	4	3
0	264	249	209	219	146	164
总和	273	263	215	227	152	171

因子或“规模”的城市，往往会比有较小影响因子或“规模”的城市更具吸引力。(2) 引入基于网络分析的相对距离揭示城市之间的“距离衰减”效应。在第二个改进中，综合引力模型分析引入了一个事实，即城市间的相对距离越远，城市间的相互作用就越小(Haynes和Fotheringham, 1984)。

本文运用综合引力模型对1995年及2005年的中国城市进行了研究，城市体系的层级结构通过其显著的“轴辐式”相互作用和节点连接清晰地展示了城市群的模式和发展。模型结果显示1995年城市体系的内部联系相对较弱，所以“轴辐式”模式只存在于几个区域中。因此，具有较高影响力的城市只能在很小的空间范围内影响其他城市，大都市甚至只能在相对较小的范围

内有少量的最强连接。然而，作为节点的大多数城市总体促进了城市群的发展，并已开始出现在北京、上海和广州等周边地区。1995年之后，中国的城市化进入一个新的发展阶段：城市的数量趋于稳定，城市的规模扩张主要是源自城乡人口的迁移。随着中国城市体系内流动性的增强，城市之间的联系持续增加。大城市吸引了物资、资本和劳动力的流入，在区域城市发展中发挥着主导作用。例如，2005年的模型计算结果中，南京和重庆升级节点城市，另外6个城市(哈尔滨、郑州、杭州、长沙、成都和乌鲁木齐)也升级为第二层级的城市。主要受第一级节点城市和第二级城市支配的城市群或城市带已初具规模，可以清楚地看到这些地区的“轴辐”模式。

表 7 影响因子排名及非农人口对比^{a)}

排名	1995年			2005年		
	城市	影响因子	非农人口(排名)	城市	影响因子	非农人口(排名)
1	上海	1.000	8338(1)	上海	1.000	11284(1)
2	北京	0.545	6194(2)	北京	0.887	8554(2)
3	天津	0.507	4743(3)	广州	0.532	4826(5)
4	广州	0.414	3167(6)	天津	0.473	5324(3)
5	武汉	0.348	3758(5)	深圳	0.467	1819(10)
6	沈阳	0.312	3800(4)	南京	0.329	4105(8)
7	重庆	0.286	2753(7)	武汉	0.326	5031(4)
8	深圳	0.272	748(10)	东莞	0.311	4595(7)
9	大连	0.244	1881(9)	重庆	0.307	4776(6)
10	南京	0.218	2260(8)	沈阳	0.304	4101(9)

a) 数据来源: 中国城市年鉴, 1996, 2006

20世纪80年代以来, 中国城市的空间结构和层次格局发生了显著转变。市场化和全球化背景下中国城市的发展, 反映了发展中国家城市的转型过程(Wu, 2005)。本文中的研究数据选用了1995年和2005年的数据来反映中国城市的体系演变, 但数据的确存在老旧问题。但本文旨在探讨对传统引力模型的改进方法, 而中国城市的城镇体系只是被做为实例来验证改进后模型的实用性, 从这方面考虑, 数据的新鲜感就显得不太重要。另外现今的中国城市在高速发展的经济及科技影响下, 电子化的物流及交通、虚拟化的空间作用让城市的结构研究更加复杂化。而1995年和2005年的历史数据更能削弱其他因素的影响, 从而验证综合引力模型的实用性。对于近年的城市间相互作用力, 更多的因素在起着重用的影响, 如信息流动, 电子媒体社交, 虚拟空间等, 而这些因素却缺少相适的统计变量, 引入近年的数据可能会带来更大的计算误差, 这也是本文的后续研究正在致力解决的问题。

结合主成分分析和网络分析, 本文中改良后的综合引力模型克服了传统引力模型过于简化且无法准确反映一个城市影响力的问题。城市之间的引力关系有助于区分城市群的层次结构和节点分布, 解释城市系统演变的相互作用机制。本文的综合引力模型采用城市间的空间距离解释城市间的相互作用, 但这一方法也存在一定局限性, 如能综合城市间的人口、资源、信息等的实际流动将会提供更有效的模型验证。由于两年中社会经济统计变量的不尽匹配, 两次分析中所

选用的变量也不尽相同, 所以本文只做横向的层级分析(城市在系统中的排名变化), 而避开了具体的定量分析(同一城市的具体影响力值的变化)。另外, 中国城市群的空间识别范围缺乏一个相对定量的识别标准, 本文基于此, 旨在综合运用统计、地理信息、及遥感技术对城市群的空间界定进行探讨。本文把中国城市作为一个功能性区域系统, 对城市体系的发展与时空演变进行了定量研究。基于研究结果, 本文进一步展开分析了3个城市群发展中存在的现象和问题: 城市集群的发展, 城市集群内的发展不平衡, 城市系统内空间的不平衡发展。

参考文献

方创琳, 宋吉涛, 张蕾, 李铭. 2005. 中国城市群结构体系的组成与空间分异格局. 地理学报, 60: 827-840

方创琳, 毛其智, 倪鹏飞. 2015. 中国城市群科学选择与分级发展的争鸣及探索. 地理学报, 70: 515-527

杜国庆. 2006. 发展中国家的城市体系空间结构研究——以中国为例. 南京大学学报(自然科学版), 42: 225-241

顾朝林. 1991. 中国城市经济区划分的初步研究. 地理学报, 46: 129-141

顾朝林, 庞海峰. 2008. 基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分. 地理研究, 27: 1-12

顾朝林, 于涛方, 李王鸣. 2008. 中国城市化格局、过程与机理. 北京: 科学出版社. 708-711

王桂新, 沈建法. 2002. 中国地级以上城市综合竞争力研究. 复旦学

- 报(社会科学版), 3: 69–77
- 姚士谋, 朱英明. 2001. 中国城市群. 北京: 中国科学技术大学出版社
- 尹虹潘. 2005. 对城市吸引区范围界定的理论分析. 财经研究, 11: 108–114
- 周一星, 张莉. 2003. 改革开放条件下的中国城市经济区. 地理学报, 58: 271–284
- Ashtakala B, Murthy A S N. 1988. Optimized gravity models for commodity transportation. *J Trans Eng*, 114: 393–408
- Bretagnolle A, Daudé E, Pumain D. 2003. From theory to modelling: Urban systems as complex systems. In: 13th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography. Lucca
- Camagni R P, Salone C. 1993. Network urban structures in Northern Italy: Elements for a theoretical framework. *Urban Studies*, 30: 1053–1064
- Cao H, Bergeron S. 2010. Disparités régionales et inclusion des minorités: Les défis de la Chine de l'après Jeux Olympiques de Beijing. Québec: Presses de l'Université du Québec
- Chen Y. 2009. Urban gravity model based on cross-correlation function and Fourier analyses of spatio-temporal process. *Chaos Solitons Fractals*, 41: 603–614
- Chen Z. 2008. Urbanization and Spatial Structure Evolution of Urban System in China. IDE-JETRO, available online at <http://www.ide.go.jp/>
- Davies W K D. 1979. Urban connectivity in Montana. *Ann Region Sci*, 13: 29–46
- Dematteis G. 1997. Globalisation and regional integration: the case of the Italian urban system. *GeoJournal*, 43: 331–338
- Dou W, Li G, Gan Y, Wang L, Yang K. 2000. Urban competitive pattern and its changes in China. *Chin Geograph Sci*, 10: 105–112
- Du G. 2000. Using GIS for analysis of urban systems. *GeoJournal*, 52: 213–221
- Elvidge C D, Imhoff M L, Baugh K E, Hobson V R, Nelson I, Safran J, Dietz J B, Tuttle B T. 2001. Night-time lights of the world: 1994–1995. *Isprs-J Photogramm Remote Sens*, 56: 81–99
- Ewing G O. 1974. Gravity and linear regression models of spatial interaction: A cautionary note. *Econ Geogr*, 50: 83
- Hair J F, Black B, Babin B, Anderson R E, Tatham R L. 2005. *Multivariate Data Analysis*. 6th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall
- Haynes K E, Fotheringham A S. 1984. *Gravity and Spatial Interaction Models*. NewburyPark: Sage Publications
- He C, Li J, Chen J, Shi P, Chen J, Pan Y, Li J, Zhuo L, Toshiaki I. 2006. The urbanization process of Bohai Rim in the 1990s by using DMSP/OLS data. *J Geogr Sci*, 16: 174–182
- Henderson M, Yeh E T, Gong P, Elvidge C, Baugh K. 2003. Validation of urban boundaries derived from global night-time satellite imagery. *Int J Remote Sens*, 24: 595–609
- Hua C, Porell F. 1979. A critical review of the development of the gravity model. *Int Regional Sci Rev*, 4: 97–126
- Huff D L, Lutz J M. 1995. Change and Continuity in the Irish urban system, 1966–81. *Urban Studies*, 32: 155–173
- Isard W. 1998. Gravity and spatial interaction models. In: Isard W, Azis I, Drennan M, Miller R, Saltzman S, Thorbecke E, eds. *Methods of Interregional and Regional Analysis*. Vermont: Ashgate Publishing Company. 243–279
- Jin F, Wang F, Liu Y. 2004. Geographic patterns of air passenger transport in China 1980–1998: Imprints of economic growth, regional inequality, and network development. *Prof Geogr*, 56: 471–487
- Karemera D, Oguledo V I, Davis B. 2000. A gravity model analysis of international migration to North America. *Appl Econ*, 32: 1745–1755
- Leung Y, Mei C L, Zhang W X. 2000. Statistical tests for spatial nonstationarity based on the geographically weighted regression model. *Environ Plan A*, 32: 9–32
- Lin G C S. 2002. The growth and structural change of Chinese cities: A contextual and geographic analysis. *Cities*, 19: 299–316
- Logan J R, Molotch H L. 1987. *Urban Fortunes: The Political Economy of Place*. Berkeley: University of California Press
- Lowry I. 1966. *Migration and Metropolitan Growth: Two Analytical Models*. San Francisco: Chandler Publ
- Ma L J C. 2002. Urban transformation in China, 1949–2000: A review and research agenda. *Environ Plan A*, 34: 1545–1569
- Nystuen J D, Dacey M F. 1961. A graph theory interpretation of nodal regions. *Papers Regional Sci Association*, 7: 29–42
- Olsson G. 1970. Explanation, prediction, and meaning variance: An assessment of distance interaction models. *Econ Geogr*, 46: 223
- Shen J. 2012. Changing patterns and determinants of interprovincial migration in China 1985–2000. *Popul Space Place*, 18: 384–402
- Shen J. 2016. Error analysis of regional migration modeling. *Ann Am Assoc Geogr*, 106: 1–16
- Shen J, Yang X. 2014. Analyzing urban competitiveness changes in major Chinese cities 1995–2008. *Appl Spatial Anal*, 7: 361–379
- Sit V F. 1999. Social areas in Beijing. *Geogr Ann Ser A-Phys Geogr*, 81: 203–221
- Skinner G W, Henderson M. 1999. A hierarchical regional space model for contemporary China: Analyzing the urban hierarchy. In: *Geoinformatics' 99 Conference*. China Data Center, University of Michigan
- Song S, Zhang H. 2002. Urbanisation and city size distribution in China. *Urban Studies*, 39: 2317–2327
- Stewart J Q. 1948. *Demographic gravitation: Evidence and applica-*

- tions. *Sociometry*, 11: 31
- Stone C. 1989. *Regime Politics: Governing Atlanta, 1946–1988*. Lawrence: University Press of Kansas
- Stone C N. 1993. Urban regimes and the capacity to govern: A political economy approach. *J Urban Affairs*, 15: 1–28
- Tian G, Liu J, Xie Y, Yang Z, Zhuang D, Niu Z. 2005. Analysis of spatio-temporal dynamic pattern and driving forces of urban land in China in 1990s using TM images and GIS. *Cities*, 22: 400–410
- Tinkler K J. 1979. Graph theory. *Prog Geogr*, 3: 85–116
- Wu F. 2005. Guest editorial—The city of transition and the transition of cities. *Urban Geogr*, 26: 100–106
- Wu F, Martin D. 2002. Urban expansion simulation of Southeast England using population surface modelling and cellular automata. *Environ Plan A*, 34: 1855–1876
- Yeh A G O, Xu X. 1996. Urbanization and urban system development in China. In: Lo F, Yeung Y, eds. *Emerging World Cities in Pacific Asia*. Tokyo: United Nations University Press
- Zhao S X B, Chan R C K, Sit K T O. 2003. Globalization and the dominance of large cities in contemporary China. *Cities*, 20: 265–278
- Zheng Y, Chen T, Cai J, Liu S. 2009. Regional concentration and region-based urban transition: China's mega-urban region formation in the 1990s. *Urban Geogr*, 30: 312–333

(责任编辑: 顾朝林)