基于人口省际流动的中国城市网络转变中心性与控制力研究
——兼论递归理论用于城市网络研究的条件性

赵梓渝[1],魏 冶[2],庞瑞秋[2],王士君[2],冯章献[2]
(1. 吉林大学地球科学学院,长春 130061; 2. 东北师范大学地理科学学院,长春 130024)

摘要: 转变中心性和控制力是近年来城市网络研究的重要方法。本文首先从网络拓扑结构角度讨论递归理论用于城市网络研究的条件性;其次,基于百度迁徙数据构建城市网络,利用复杂网络方法、改进后的转变中心性和控制力方法对城市网络进行测度。结论指出:① 递归理论用于城市网络分析有其特定的数据结构要求,其适用于树形结构、而不适用于局部存在完整图的网络结构的测度;② 基于人口省际流动的中国城市网络存在小世界现象,人口流动空间格局在全国和区域尺度下均呈现出明显的核心—边缘结构,国家城市化发展战略与重要交通设施对人口流动网络产生框架性的导向作用。哈尔滨—北京—西安—成都—大理一线是关联结构与强度空间差异的明显界限。③ 转变中心性与控制力更能揭示中国城市网络节点的属性特征,和辨识资源流通对网络城市产生的不同影响与空间效应。城市网络中既包括北京、上海、重庆、广州等以高中心性高控制力为特征的典型城市,也包括武汉、太原、贵阳、福州等高中心性低控制力的枢纽城市,和兰州、银川等低中心性高控制力的门户城市。因此,转变中心性和控制力概念对加深城市复杂多样化内涵的认识具有重要的意义。

关键词: 转变中心性和控制力;城市网络;人口流动;递归;中国
DOI: 10.11821/dlxb201706007

1 引言

信息化作用下地方空间与流空间的共存促使地域空间结构从等级化转向网络化[1]。作为一种新的地理空间现象和研究范式，网络通过代理人将城市联系在一起，组织其中要素的流动、互动、生产，为城市研究提供了新的视角和解释力。以高级生产者服务（Advanced producer services, APS）的企业空间组织为城市联系的代理人，连锁模型（Interlocking network model）是近年来国内外城市网络研究的主要方法之一[2-3]。经济联系显然不足以全面揭示城市网络的特征和内涵，基于交通运输流[4-5]、知识网络[6-7]、非政府组织[8]等视角的研究，弥补了APS数据过于强调企业组织的垂直关系、难以涉略现实中边缘城市的不足。

城市地理学者认为世界城市和全球城市是指挥和控制全球资本的基点和中心[9]，网络分析方法得以大量用于世界城市网络（World city network, WCN）研究中[10-11]。网络节的

收稿日期: 2016-05-10; **修订日期:** 2017-03-15
基金项目: 国家自然科学基金项目(41630749, 41401172, 41571150) [**Foundation:** National Natural Science Foundation of China, No.41630749, No.41401172, No.41571150]
作者简介: 赵梓渝(1986-), 男, 吉林长春人, 博士生, 主要从事城市网络及人口流动研究。E-mail: 171462539@qq.com
通讯作者: 冯章献(1982-), 男, 安徽合肥人, 博士, 讲师, 中国地理学会会员(S110006756M), 主要研究方向为城市与区域发展。E-mail: fengzx092@nenu.edu.cn

重要性体现在其连通性、控制性和不可或缺性等诸多方面，度中心性、中介中心性、紧密中心性等一系列指标则是揭开这些特性的有效手段。度中心性类方法通常用于布尔矩阵数据构建的无权网络，测度的是网络拓扑结构，这极大弱化了流的权重差异。加权网络不对矩阵数据进行二值化处理，保留了权值。因此加权度中心性、特征向量中心性（eigenvector centrality）、测试中心性（beta centrality）等方法在评价网络城市的地位与位置研究中日益受到重视[12-13]。

不仅在网络权重角度，现有研究依然缺乏对于网络城市属性的辨析和界定[14]。多数WCN研究认为，处于网络中心位置的城市有利于其对资源、信息的集聚或扩散，促进与其他城市经济、政治和社会的互动，也意味中心城市在网络中拥有更强的控制力，对资源要素的流动施加影响力[15]。然而，网络拓扑结构赋予城市节点属性与能力的高低差异却被低估和忽视。Cook对行动者网络分析时指出，当关注经济交换时，交换中处于主导地位的交换者（控制力更强），要比拥有大量潜在机会的交换者（中心性更高）更容易控制和影响交换行为[16]。另一方面，Emerson从社会交换理论出发，认为控制力不是仅仅简单地来自于一个人的直接联系，而且依赖于联系对象的直接联系[17]。

作为对网络城市中心性认识与测度方法的深化，Zachary提出了递归中心性（recursive centrality, RC）和递归控制力（recursive power, RP）理论[18]，后更名为转变中心性（alter-based centrality, AC）与转变控制力（alter-based power, AP）[19]。Neal认为，在世界城市网络中，中心性包含了两个联系紧密又相反的过程：一方面是信息、资本、劳动力等资源要素向世界城市集聚，另一方面是资源要素由世界城市向外扩散。因此，中心性是资源集聚与扩散的统一。控制力是城市在世界资源流动中的影响力和支配力，一个城市的控制力是由其在网络中的位置和功能所决定。在Neal绘制的两种假设的世界城市网络结构中（图1），他认为相比较之下，较大网络（图1a）的中心节点是“中心的，但缺乏控制力”，较小网络（图1b）的中心节点是“有控制力的，但相对缺乏中心性”。Neal通过递归（recursion）解释了城市中心性和控制力不仅依赖于可以有效调动的联系网络的规模，同时依赖于其拥有的、有联系的那些分支中的资本容量（如经济、文化及其他类似表征）。这一方法引起了国外学者的广泛关注与讨论[20-21]，中国学者近年来也进行了理论引入[22]与实证研究[23-24]。

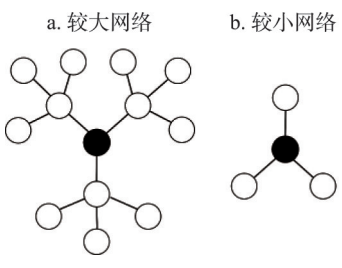


图1　两种假设的世界城市网络结构

Fig. 1　Two hypothetical world city networks

全球经济重构过程中高技能职业人员和管理阶层的全球迁移已经成为当前世界经济的重要侧面并引起了地理学者的高度关注[25]。不仅是国际劳工，次级市场的密集型劳动力，对城市产业及区域经济的影响同样举足轻重。基于人口流动研究城市网络的意义在于：首先，人口要素是城市间资源流的重要组成部分。人口流动是一种生产要素的空间再配置过程，其发生和发展是推动经济社会发展的重要动力[26]。单个城市自身社会分层的流动性有限，社会成员的流动往往通过地理空间上的流动来实现；其次，人口流间接反映了城市的经济联系。在城市网络中，各种企业及组织间以价值创造为导向的横向、纵向的正式与非正式的联系构成了人口流动网络存在的基础[27]。因此，以业务往来为目的的人口流动在一定程度上反映了城市的经济联系；再次，人口流动通常附带着社会、经济价值。无论目的是工作、旅行、探访或迁居，人口流动意味着消费能力的增加，间接反映了城市间的资本流。因此，人口流是城市网络关联性的重要表征。

区域与城市体系研究通常采用属性数据，其虽揭示了城市的重要性，但突出强调城市发展的静态结果。应用关系型数据的网络研究关注于城市发展的动态过程和交互效应。然而官方往往无法提供研究所需的关系型数据[28]，关系型数据的缺失也被称为城市研究的“阿克琉斯之踵”[29]。进一步，传统普查数据已难以反映当前中国快速城镇化下流空间的变化特征与城市间日益复杂的交互关系[30]。例如在以往人口流动相关研究中，数据多来源于普查和年鉴。受统计口径限制，研究以大尺度的静态分布特征、长期演化规律为主，同时在时效上存在滞后性。信息化时代下，GPS、LBS（Location based service）、LSS（Location sharing services）等技术的发展，使包括地理位置、社会属性、移动轨迹、迁移过程和交互模式等信息的人类时空行为数据的综合、连续观测成为可能[31]。人口流动的时空特征通过大量且复杂的移动智能设备数据的形式表现出来，为城市网络研究提供了足量、足精度的实测流数据支持。

尽管在现实发展中，中国已经成为全球城市网络塑造的重要组成部分[32]，但在研究进展上仍与西方学者存在一定距离，以方法沿用的实证研究为主，缺乏针对中国特殊发展背景的理论框架构建与方法创新，同时对沿用方法的理解与反思也依旧不足。本文首先将基于转变中心性与控制力理论提出研究方法的疑问，并进一步论证，对递归理论应用于城市网络研究的条件性进行讨论。以上工作旨在厘清这两个在城市网络研究中具有前景、并受到国内外学者日益关注的概念的内涵，为中国城市网络研究方法的深入与创新抛砖引玉；其次，基于百度迁徙中国人口省际流动大数据构建城市网络，通过复杂网络分析方法分析网络的关联性，利用转变中心性与控制力方法对城市的属性特征和等级差异进行辨识。从研究视角上，弥补了以往城市网络研究重企业组织、轻社会关系的不足；在研究对象的空间尺度上，覆盖中国地级行政区，将以往基于高级服务业的城市网络研究中，难以涉及的一般城市、边缘城市纳入测度中，以求对转型期的中国城市网络进行更为全面和多角度的解析。

2 递归理论用于城市网络研究的条件性

2.1 问题的提出

转变中心性（AC）和控制力（AP）的公式为：

$$AC_i = \sum_j R_{ij} \times DC_j \tag{1}$$

$$AP_i = \sum_j \frac{R_{ij}}{DC_j} \tag{2}$$

式中：R_{ij}是城市i和城市j的连接强度；DC_j是城市j的度中心性。

Neal在2011年提出该理论时，使用的是递归中心性和控制力名称[18]，随后Boyd等指出，“Neal基于理论推理的方法论创新用于世界城市网络研究中仍存在不确定性，让人疑惑。主要问题是他的递归中心性和控制力根本不是递归，因此实用性非常有限”[20]。对此，Neal在2013年将名称改为转变中心性和控制力，但公式不变，并针对自身方法存在的局限性做了解释[19]：首先，尽管在计算公式上并未使用递归的数学方法，但递归突出在概念意义上，因其每个点的中心性（控制力）作为其他与其相连接点的中心性（控制力）的一个基础影响因素；其次，递归的一个关键意义在于其实现了一个概念上的递归同时，避免了在数学上计算递归的复杂性。

然而，Neal的测度方法是否真的如最初名称一样基于递归理论引申而来，并如其所

说实现了一个概念上的递归？其公式与递归到底有何种关系？Neal或质疑者均未深入论证。基础问题没有厘清的结果是，尽管作者在2013年已经更换了名称（或者说通过更换名称回避了其递归所引起的异议），而此后国内外实证研究中仍主要是沿用着递归中心性、控制力的名称。显然作为一个有价值的研究方法，中心性与控制力的后续理论深入显得匮乏，多专注于实证应用，而对于概念问题的模糊处理造成了理论应用的模棱两可。

第二，递归是目前多学科探索网络结构的有效方法，相关研究如递归神经网络、递归机制[33]、递归均值聚类方法[34]、二进制递归网络[35]，并应用于全球网络节点重要性评价[36]、城市交通网络测度等方面[37]。城市网络是一个巨量的复杂网络，而递归作为一种将大型复杂问题层层转化为一个个与原问题相似的简单问题来求解的有效方法，在网络研究中有其优势之处，那么递归算法是否适用于城市网络的测度？进一步，正如Neal的方法考虑了关联城市对于测度城市影响，那么是否可以延伸至下一层、再下一层关联，继而完全遵循递归，对整个城市网络进行遍历求解？

基于以上两个问题，本文将对递归在城市网络研究中的条件性和Neal理论中的“递归成分”进行讨论。

2.2 论证

递归一般用于解决3类问题：① 数学公式、数列等的定义是递归的，如Fibonacci函数；② 问题解法按递归实现，如回溯；③ 数据结构形式是按递归定义的，如树的遍历，链表。

应用递归来解决的问题必须同时满足两个条件：① 可以通过递归调用来缩小问题规模，且新问题与原问题有着相同的形式。② 存在一种简单情境作为边界条件，可以使递归在简单情境下退出。

递归适用于树形结构网络的测度：在图2a中，存在如C与H的互为父子的节点关系。而A是根结点（root），是树中唯一没有父节点的节点，D、E、F、G、I、K是整个结构中没有子节点的叶节点。因此该树形数据可用框形图表示其所属关系（图2b）。在使用递归计算A的参考值时：

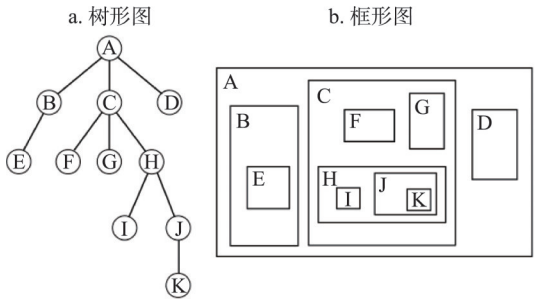


图2　树形数据的树形图和框形图

Fig. 2　Dendrogram and frame of tree-data

$$\begin{aligned} value(A) &= value(B)+value(C)+value(D) \\ &= [value(E)]+[value(F)+value(G)+value(H)]+[value(D)] \\ &= \{value(E)\}+\{[value(F)]+[value(G)]+[value(I)+value(J)]\}+\{value(D)\} \\ &= \{value(E)\}+\{[value(F)]+[value(G)]+[value(I)+(value(K))]\}+\{value(D)\} \end{aligned} \tag{3}$$

可见，根节点A的值是使用叶的值递归而来。通过子来求父的计算过程是典型的递归算法。然而以人口流、信息流表征的城市网络，都存在大量局部完整网络。例如百度迁徙数据中，北京、天津、上海、杭州任意两城市间均存在人口流动，构成了一个完全图（图3a）。这种局部完整网络是非线性而不是树状结构，利用框形图来表示可以看见网络是复杂交叠的（图3b）。

如果依然利用递归计算A的参考值：

$$value(A)=value(B)+value(C)+value(D) \tag{4}$$

$$value(B)=value(A)+value(C)+value(D) \tag{5}$$

根据递归的循环调用将式（5）带入式（4），由于C、D两点与A、B均直接关联而

重复计算了 *value*(*C*) 和 *value*(*D*)，一级关联中存在的 *value*(*C*) 和 *value*(*D*) 在二级关联计算中又由 *value*(*B*) 重复代入，最终计算无限循环。可见递归并不适用完整网络的测度，其原因是：递归需要有边界条件、递归前进段和递归返回段。当边界条件不满足时，递归前进；当边界条件满足时，递归返回。而在节点都互相连通的完整网络中，并不是所有的点都能找到边界条件，因而会导致递归的无限循环。

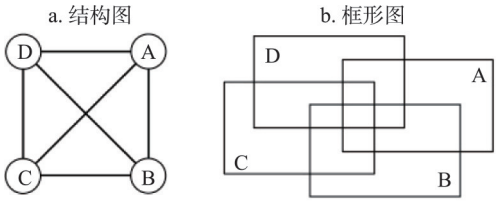


图3 无向完全图的结构图和框形图

Fig. 3 Architecture and frame diagram of undirected complete graph

其次，讨论Neal中心性及控制力理论中的“递归成分”。公式中涉及的参数如图4a展示，城市 *i* 与 *j* 的度中心性及二者的关联强度。递归的根本是一种调用的循环—调用函数自身来解得自身，这亦不同于递推（中国有学者将Neal的recursive翻译为递推[24]），递推是循环调用一个可重复的简运算（规律）来描述和解决复杂问题。由于在Neal的方法中城市 *j* 关联城市的权重不被考虑，而 *j* 的度中心性只是其自身的一个属性，因此Neal的公式计算了城市 *i* 的一步关联结构，其原理与特征向量中心性、PageRank、Katz中心性是一致的。但Neal的理论及公式与递归（或递推）无关，更达不到其“实现了一个概念上的递归”的解释。在图4b所示的二级关联网络结构中，若 *k* 作为网络的叶节点，且计算过程中涉及了算法的调用，则可称为递归。

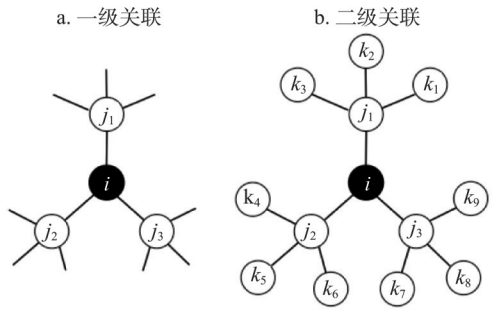


图4 一级和二级关联结构网络

Fig. 4 One level and two levels interconnection structure network

最后，若Neal的方法遵循递归进行计算，即严格意义上的递归中心性与控制力是否合理？为了解决无限循环的问题，可以对完整网络进行遍历计算。遍历算法是指沿着结构中的某条搜索路线，依次对树中每个结点均做一次且仅做一次访问。在一个无向加权完整网络中（图5），节点的递归中心性（*RC*）计算过程为：

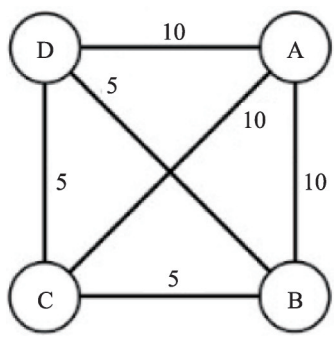


图5 无向加权完全图

Fig. 5 Undirected weighted complete graph

$$\begin{aligned} \text{对于}A：RC_A &= R_{AB}DC_B + R_{AC}DC_C + R_{AD}DC_D + R_{DB}DC_B + R_{BD}DC_D + R_{DC}DC_C \\ &= 10\times3 + 10\times3 + 10\times3 + 5\times3 + 5\times3 + 5\times3 \\ &= 135 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \text{对于}C：RC_C &= R_{CA}DC_A + R_{CB}DC_B + R_{CD}DC_D + R_{DA}DC_A + R_{AB}DC_B + R_{CD}DC_B \\ &= 5\times3 + 5\times3 + 5\times3 + 10\times3 + 10\times3 + 10\times3 \\ &= 135 \end{aligned} \tag{7}$$

计算结果 $RC_A = RC_C$。显然遍历递归同普通递归一样也不适用于完整网络的测度。遍历算法解决了无限循环的问题，但由于网络的连通性，使得计算时遍历整个网络而导致结果没有区分度。可见递归应用于城市网络的测度是有其特定的数据结构要求的，其适

用于树形结构数据而不适用于完整网络的测度。

使用Neal的方法只考虑一级关联结构计算图5时，可见这一方法具有一定的优势性：

$$\begin{aligned}\text{对于}A：AC_A &= R_{AB}DC_B + R_{AC}DC_C + R_{AD}DC_D \\ &= 10\times 3 + 10\times 3 + 10\times 3 \\ &= 90\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}\text{对于}C：AC_C &= R_{AC}DC_A + R_{BC}DC_B + R_{CD}DC_D \\ &= 10\times 3 + 5\times 3 + 5\times 3 \\ &= 60\end{aligned} \tag{9}$$

2.3 小结

首先，完全意义的递归概念用于测度城市网络有其特定的数据结构要求，适用于如企业组织中垂直关系的树形网络。在包含局部完整网络的城市网络中，由于存在大量的局部节点间相互连通的情况，递归将导致计算过程的无限循环，因此其不适用于人口流、交通流、信息流为代理人的城市网络的测度。这篇文章利用较大篇幅梳理递归用于城市网络的条件性的目的是，本文认为递归可能将成为城市网络研究的前进方向之一，同时目前国外也展开了相关研究。前文中Neal指出其“递归”避免了在数学上计算递归的复杂性，但事实上，递归的优势在于用有限的语句来定义对象的无限集合，只需少量程序就可描述出解题过程所需要的多次重复计算，是一种大大减少计算复杂性的算法；

其次，Neal的“递归理论”与数学上的递归概念不存在任何关系。其中心性与控制力公式中，既不包括遍历求解的过程，也不存在相同解法的调用。厘清这一概念，将对今后使用此方法的学者起到指示作用。梳理中心性与控制力概念的内涵，不难发现，其理论依据基本源于前文所提Cook和Emerson的理论[16-17]，计算方法借鉴了测试中心性。同时，尽管Neal并未解释其表述的“递归中心性与控制力并非基于一个全球城市的测定方法所提出的，其显然是一个局部的测度方法（local measure）”[19]中“局部”所限定的目标，但这个局部显然不是地域范围的界定，而是网络拓扑结构关联层级的限定；

最后，通过式（8）和式（9）的计算结果，可以发现由于转变中心性和控制力考虑了关联城市对于测度城市结果的影响，因此较以往研究方法对于网络关联特征的考虑更加深入。由于Neal的方法并非递归，同时在城市网络研究中具有一定优势，故下文将利用转变中心性和控制力对基于中国人口省际流动的城市网络进行测度，这与递归算法不适于人口流动网络研究不存在矛盾关系。

3　数据来源及研究方法

3.1 数据来源与研究对象

数据来源于百度地图迁徙。百度迁徙基于定位服务技术、通过手机用户的定位信息映射人口流动轨迹，塑造出人口流动过程的路径与强度。其数据有效性在于：通讯是人类出行中的最基本需求之一。工信部数据显示，截止2015年12月底，中国手机用户数达13.06亿户，手机用户普及率达95.5部/百人[38]；Google发布的消费者网络行为报告显示，2015年上半年中国大陆智能手机使用率已达74%[39]，可见智能手机与人口契合度极高。百度LBS开放平台为数十万款APP提供定位服务，覆盖数亿手机用户。在数据精度上，达到了个人层级，同时能够摒弃公路、铁路、航空等单一运输模式造成的数据片面性，从而获得城市间人口流动的综合判断，对中国城市网络的指示意义更为明显。

尽管人类的社会活动存在显著的不确定性，但这种随机性和不可预见性的范围是有限的。当累积足量的个体空间行为轨迹，并通过叠加、过滤后，数据中的群体特征即显

现出来。利用百度迁徙数据，魏冶等选取对外联系度、优势流、城市位序—规模分析等方法对转型期中国城市网络特征进行分析[40]，刘望保等从人流集散层级、人口流动与“胡焕庸线”之间的关系等方面对人口流动的空间格局进行了研究[41]。

研究时间为2015年3月19日-4月30日，共计46天。原始数据为中国367个空间单元之间逐日人口流动的起止城市和强度，除地级以上行政区划外也包含港、澳、台北及部分县级市。同时，除新疆、西藏、青海三省外均不包含同省份城市间的人口流动，仅限异省（直辖市）城市之间的人口流。为规范研究对象，只保留大陆地区地级及以上行政区划的人口流，并将新疆、西藏、青海三省省内流数据剔除。因此研究对象为中国大陆4个直辖市和333个地级行政区划（包括292个地级市、30个自治州、8个地区和3个盟，截至2016年9月中国大陆地级行政区共计334个，本文研究中仅不含三沙市），共计337个空间对象。处理后数据为31820条基于人口省级流动的城市关系流，承载了46天内3853.5万人次的人口流动。

基于百度迁徙数据构建加权对称矩阵表征城市网络，$T=(T_{ij})$，T_{ij}为城市i到城市j的人口流权重。

$$T=\begin{array}{c} \\ i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_{n-1} \\ i_n \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} j_1 & j_2 & \cdots & j_{n-1} & j_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} 0 & T_{12} & \cdots & T_{1(n-1)} & T_{1n} \\ T_{21} & 0 & \cdots & T_{2(n-1)} & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{(n-1)1} & T_{(n-1)2} & \cdots & 0 & T_{(n-1)n} \\ T_{n1} & T_{n2} & \cdots & T_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \end{array} \tag{10}$$

以城市i与j之间动人口流权重R_{ij}计算转变中心性与控制力式中城市连接强度参数，则：

$$R_{ij}=\frac{T_{ij}^{T}+T_{ij}}{2} \tag{11}$$

需要指出的是，应用百度迁徙数据研究也存在一定缺陷。首先，移动数据只记录了特定人群的时空轨迹（如百度迁徙只采集了使用百度定位服务APP的手机用户数据），因此识别出的人口流强度与实际情况有一定差距；其次，百度迁徙数据不含流动个体的社会经济属性、流动目的等个人信息，也无法辨识多次移动的空间特征，但正如刘望保学者指出的，其全面的刻画出人口流动的动态过程，其中蕴含的丰富时空行为信息也是传统数据难以企及的[41]。因此，大数据一方面为城市地理学、规划学、社会学等学科研究提供了宝贵的数据基础，另一方面其自身存在的缺陷、不确定性导致的研究结果中可能存在的误差，也需要随着研究的深入进一步论证和检验。

3.2 城市间的依存关系

特大城市及其卫星城之间往往存在大量通勤人口，由于百度数据提供的是人口省际流动，因此这一现象主要发生在直辖市与其周边城市之间。研究期内，廊坊与北京人口流强度占廊坊人口流关联总量的高达74.5%，而北京作为首都和超大城市，其度中心性高于一般城市。因此在廊坊的转变中心性结果中，仅北京—廊坊的关联权重与北京度中心性的乘积，就得到一个非常大的廊坊中心性因子。不可否认，现实中卫星城较其相同规模、空间相对独立的城市更容易获得发展资源，但从廊坊计算过程来看，显然这一中心性因子与其现实中受惠的优势不对等。对此类中心性结果难以真实描述城市网络地位的现象进行修正，加入依存度参数d_{ij}：

$$d_{ij}=R_{ij}/WDC_i \tag{12}$$

式中：WDC_i为城市i的加权度中心性，即关联人口流的总权重。修正后转变中心性和控

制力公式为：

$$AC_i = \sum_j (1 - d_{ij}) \times R_{ij} \times DC_j \tag{13}$$

$$AP_i = \sum_j \left(1 - d_{ij}\right) \times \frac{R_{ij}}{DC_j} \tag{14}$$

加入依存度参数是针对本文数据中个别直辖市与卫星城之间存在大规模潮汐流、绝大多数城市在现实中几乎不存在省际潮汐流现象而导致的计算结果“失真”进行的改进，但研究方法的本质及模型主体仍沿用了转变中心性与控制力理论。在测度城市中心性（控制力）时，由于考虑了关联城市对于测度城市的影响，因此也需要考虑二者之间的地位差异、关系特征对于测度城市计算结果的影响，不加区别的直接将原公式应用于本文数据显然是不合理的。由于原始数据中缺失出行目的等属性信息，所以无法在数据处理步骤上解决潮汐流导致的强度统计口径不统一的问题。加入依存度后，尽管仍无法完全规避这一现象，但使得整个网络城市的中心性和控制力结果趋于收敛。相比较而言，资源关联均衡的城市的地位将提高，而卫星城的地位将显著下降，这显然更符合城市的实际发展情况。

4　基于人口流动的中国城市网络空间关联结构

4.1 网络概述

基于人口流动的中国城市网络平均度中心性为189.5，加权度中心性为228717.6，即每个城市平均直接关联城市数为190个，关联人口流22.9万人次。度中心性前十位城市分别为北京（331）、重庆（330）、上海（327）、天津（316）、西安（316）、杭州（310）、成都（309）、郑州（305）、武汉（304）和深圳（303）。前十位城市平均度中心性为315，即与全国九成以上（93.5%）的城市均存在直接关联。加权度中心性前十位城市分别为北京（753.4万人次，后同）、上海（509.3）、天津（283.4）、苏州（235.5）、重庆（222.4）、廊坊（219.1）、广州（150.4）、南京（129.3）、深圳（127.8）和杭州（123.5），最小值城市克孜勒苏仅为91人次，可见人口流动的空间异质性显著。

小世界具有大部分结点可以从任意其他点经少数关联就可到达的特性。聚类系数和平均最短路径可以共同揭示小世界效应的存在。如果一个图的平均聚类系数显著高于相同数量节点生成的随机图，且平均最短路径与之相近，那么这个图被认为具有小世界的特性。其中平均聚类系数给出关于一个节点抱团的总体迹象，衡量节点嵌入临近点的程度；平均最短路径是两点之间的平均图距离。基于人口省际流动的城市网络平均聚类系数为0.710，远高于同节点数量下随机网络系数（0.048）；平均最短路径为1.436，略低于随机网络（1.455）。可见，城市网络存在小世界现象，表明网络局部具有较明显的簇结构特征。

4.2 城市网络的簇结构

簇结构网络是指聚类按照一定的规则与其他聚类相互联系而构成的更加复杂的系统，高平均聚类系数的网络具有簇结构特征。模块化（modularity class）是一个基本的聚类算法[42]，通过计算，基于人口省际流动的中国城市网络中共包括7个簇结构。按照城市数量可以分为国家级、区域级和地区级3个等级。3个国家级簇结构包括（表1）：由广州、深圳、武汉、东莞、郑州、长沙等82个城市构成的华南簇；由北京、天津、沈阳、哈尔滨、长春、济南、太原等74个城市构成的华北东北簇；由重庆、成都、昆明、贵

表1 城市网络簇结构统计表

Tab. 1 Statistical table of clusters in city network

簇	覆盖省份	主要城市	数量(个)
0	四川 西藏 新疆 贵州 青海 云南	重庆 成都 昆明 贵阳 乌鲁木齐 拉萨	70
1	河北 黑龙江 吉林 辽宁 内蒙古 山东 山西 河南	北京 天津 沈阳 哈尔滨 长春 济南 太原	74
2	黑龙江西北	齐齐哈尔 呼伦贝尔 兴安盟 大兴安岭	6
3	广东 福建 湖南 湖北 江西 海南 河南	广州 深圳 武汉 东莞 郑州 长沙 赣州 南昌 厦门	82
4	江苏 上海 浙江 安徽 河南	上海 苏州 南京 杭州 合肥 宁波 温州 上饶 常州	44
5	山西 陕西 河南 内蒙古 甘肃 宁夏 青海	西安 玉林 鄂尔多斯 兰州 银川	49
6	山东	徐州 宿州 临沂 菏泽	12

阳、乌鲁木齐、拉萨等70个城市构成的西南簇。两个区域级簇结构分别为主要覆盖长三角地区的、由上海、苏州、南京、杭州、合肥、宁波等44个城市构成的华东簇，和由西安、鄂尔多斯、兰州、银川等49个城市构成的西北簇。

同簇节点之间具有关系更为密切的特性。从图6来看，普遍上同一簇的城市在地理上相邻或临近，说明基于人口流动的城市紧密性仍遵循地理空间效应的制约。但华南城市簇在空间上呈现出跳跃性，同时分布在4个独立空间内，可见流空间背景下，人口流动存在部分克服空间摩擦的趋势。

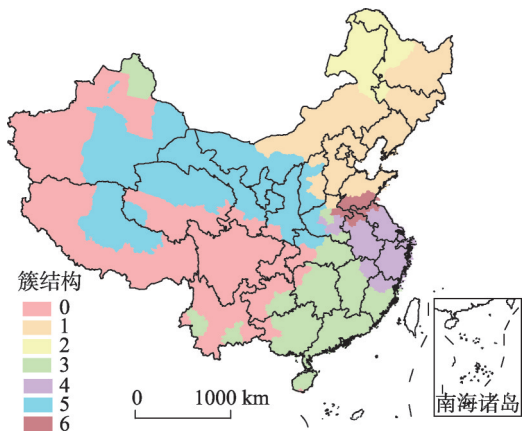


图6 中国城市网络簇结构图

Fig. 6 City network cluster structure in China

4.3 城市网络关联特征

以“流”表征的空间联系，可以直观的识别城市的网络特征。基于人口省际流动的中国城市网络中有3053条流权重超过1000人次，占总条数的9.6%，而其承载的人口流权重占网络总量的高达94.6%，即中国九成以上的人口省际流动发生在一成的城市关联路径上。分别以1万以上、0.1~1万、100~1000人次人口流绘制城市网络关联强度分级图（图7），3个权重等级分别包括683条、2370条、4905条流，占全网络关联路径数量的2.1%、7.4%和15.4%，并分别承载全网络中74.1%、20.5%、4.4%的人口流权重。

① 中国大规模人口流动主要发生在以京津冀、长三角、珠三角、成渝共同构成的菱形结构内[43-44]，尤以核心城市及其近域的城市之间，反应了地理邻近性的特征，全国和区

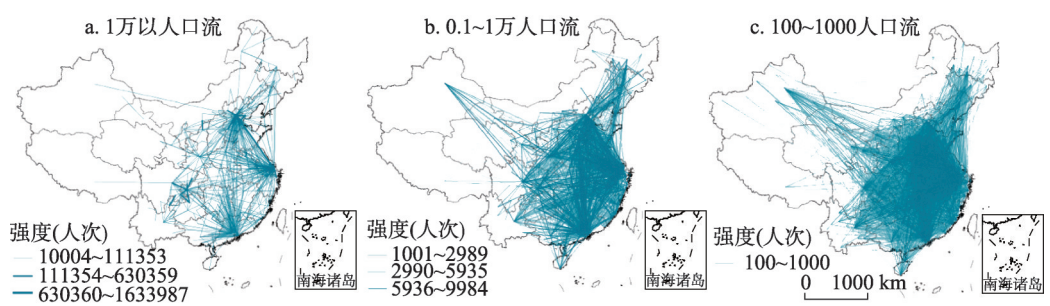


图7 中国城市网络关联强度分级图

Fig. 7 Classification maps of city network connection strength in China

域尺度下均呈现出明显的核心—边缘结构。以哈尔滨—北京—西安—成都一线为人口流动强度空间差异的分割界线，城市网络密度东密西疏、流权重东高西低。分界线以西城市网络关联趋于串联结构，即大量城市依赖于特定门户城市与城市网络进行关联。如北京是东北的重要门户，西安、成都分别是西北、西南地区门户；分界线以东网络更趋于并联结构，城市间的互通性更高。

② 国家城市化发展战略与重要交通设施对人口流动网络产生框架性的导向作用。京津、长三角城市群以中部腹地武汉为指向，珠三角城市群以重庆为指向，形成了3个人口高强度高密度关联的扇形结构，并存在明确的辐射范围，且影响范围大体与城市群覆盖地域相吻合。同时，京广铁路、北京—上海两条横向轴线，上海—西安、长江经济带两条纵向轴线上的空间强度远高于其他区域。

4.4 网络关联的导向特征

优势流是对城市网络简化分析的一种方法[40]，基于人口省际流动的城市网络的优势流分析，强调了一个城市在宏观尺度下的地位。通过各城市第一、二、三优势流的关联特征绘制图8，并将关联数量前三位城市的流标红，以凸显核心城市的主导作用。可见京、沪、渝、广、深5个城市呈现出全局的控制力量，其控制力与关联性显然已经克服了地理空间距离的制约。其中，北京主要关联了东北、华北大部分城市的优势流，同时也远触及新疆、海南；上海主要体现在对近域城市的控制上，以江苏、浙江、安徽为主；重庆控制范围主要位于新疆、广西、四川，且关联第一优势流的数量（31条）远高于同为西部门户城市的成都（7条）；广州、深圳主要体现在第二、第三优势流的关联上。

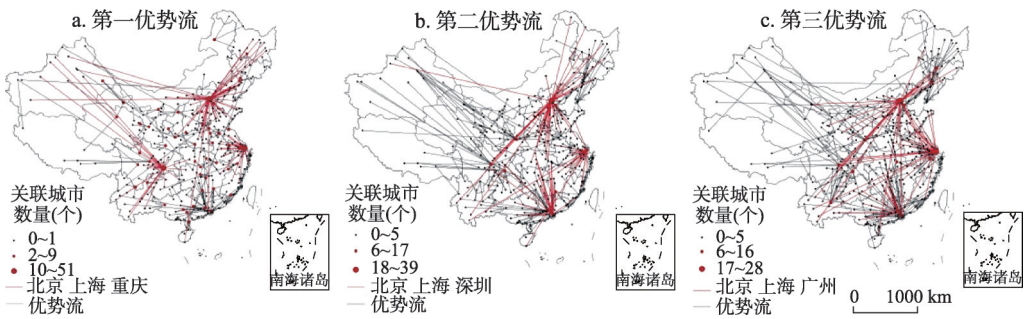


图8　基于优势流的中国城市关联特征

Fig. 8　Association feature map based on dominant flow in China

作为中国的首都和多种权力、功能最集中城市，北京在整个网络中处于绝对支配地位。从第一、第二、第三优势流来看，关联北京的城市数量远高于其他城市（表2），且辐射空间尺度大，显示出一种集权导向下的人口省际流动组织特征。可见，中国超大城市的作用强度与联系广度或已跨越行政界线，全国成为了空间虹吸效应的落脚点。另一方面，一些城市的关联数量并未展现出与实际发展和以往研究结论中地位相匹配的重要性，如西北门户城市西安、中部中心城市武汉。

表2　城市关联优势流数量位序表

Tab. 2　Table of cities associated with dominant flows

	第一优势流		第二优势流		第三优势流	
位序	城市	数量(个)	城市	数量(个)	城市	数量(个)
1	北京	51	北京	39	北京	28
2	重庆	31	上海	17	上海	21
3	上海	26	深圳	17	广州	16
4	广州	9	广州	13	深圳	14
5	深圳	8	天津	12	东莞	13
6	成都	7	重庆	12	天津	13
7	赣州	5	西安	9	西安	11
8	南京	5	成都	8	长春	11
9	南阳	5	赣州	8	苏州	10
10	徐州	5	东莞	6	成都	9

5 转变中心性与转变控制力

5.1 计算结果与二维特征

从转变中心性与控制力的计算结果来看，尽管位序有所变化，但二者前十名城市均为北京、上海、天津、重庆、苏州、广州、杭州、深圳、南京、廊坊（表3）。首先，转变中心性和控制力共同衡量了城市在网络中交换和支配资源集聚与扩散的结构性优势位置。在相同数量的资源交换路径条件下，加权度中心性更高的城市节点凸显了核心地位，因此，北京、上海、天津、苏州、廊坊、保定等城市所关联的高强度人口潮汐流推高了其中心性与控制力的结果数值及位序，部分城市的地位等级也明显要高于实际发展情况和以往研究结论。

其次，转变中心性和控制力考虑了关联城市对于测度城市的影响，使三亚、烟台、安庆、南昌、青岛等人口流大多关联了度中心性高的城市、且流分布相对均衡的城市在网络地位上比其他测度方法有所提升。这5个城市转变中心性位序较其加权度中心性位序均至少提升20位。这是一种择优路径选择的乘法效应。另一方面，依存度参数的加入使在资源交换过程中存在路径依赖的城市的中心性显著收敛。广安的转变中心性位序较其加权度中心性下降了116位，主要原因是广安高达90.8%的人口流权重是关联重庆一个城市。

再次，在城市网络中，关联路径的增加，一方面增加了资源交换机会，同时也将减少与其他节点的关系强度。中心性和控制力的相反机制在于，在同样关联权重下，一个拥有大量潜在关联机会的城市将给测度城市带来给多的交易可能性，而一个存在路径依赖的城市显然要更容易被测度城市施加控制力。因此在计算公式中，测度城市关联了高度中心性城市，得到了一个高中心性因子，相对应也得到了一个低控制力因子。如呼伦贝尔—齐齐哈尔权重占呼伦贝尔加权度中心性的47.7%，齐齐哈尔的度中心性为154，排在337个城市中第239位，二者相乘得到一个较低的呼伦贝尔中心性因子，相除得到一个较高的呼伦贝尔控制力因子。又如兰州人口流的主要关联城市中，多为海东、西宁、银川、中卫等低度中心性城市，这些城市由于交换机会的缺乏导致了对现存路径的依赖，最终提升了兰州作为区域门户的城市地位。

以往研究认为度中心性最高的城市，即同城市节点存在最多直接关联的城市，能够直接调动的潜在网络资源的能力最高[45]。中介中心性是一个节点出现在网络中最短路径上的频率，以观察城市在网络关联中的结构性位置，因此桥接点往往拥有较高的中介中

表3 转变中心性(AC)、转变控制力(AP)统计表

Tab. 3 Directed centrality and power for selected cities

位序	城市	AC	AP	位序	城市	AC	AP	位序	城市	AC	AP
1	北京	1.000	1.000	11	武汉	0.139	0.123	21	嘉兴	0.078	0.060
2	上海	0.698	0.650	12	西安	0.124	0.128	22	邯郸	0.078	0.073
3	天津	0.379	0.344	13	成都	0.114	0.095	23	无锡	0.073	0.067
4	重庆	0.281	0.332	14	徐州	0.109	0.123	24	合肥	0.072	0.058
5	苏州	0.265	0.229	15	郑州	0.096	0.083	25	唐山	0.063	0.045
6	广州	0.196	0.235	16	东莞	0.091	0.131	26	宁波	0.061	0.055
7	杭州	0.173	0.160	17	沧州	0.085	0.071	27	哈尔滨	0.057	0.069
8	深圳	0.167	0.199	18	石家庄	0.085	0.077	28	赣州	0.057	0.062
9	南京	0.159	0.192	19	长沙	0.084	0.080	29	沈阳	0.056	0.079
10	廊坊	0.153	0.100	20	保定	0.080	0.062	30	佛山	0.054	0.092

心性。从图9来看，度中心性（图9a）和中介中心性（图9c）位序散点呈线性分布，城市间差异较为均衡。而转变中心性（图9b）和控制力（图9d）位序为幂率分布，呈现“长尾”特征，表明城市网络的极化效应显著。少量城市位于高值区，大部分城市数值低，且低值区城市间差异很小，这是一种资源集聚的累积效应的结果。对比中国城市化发展现状、人口分布特征和以往研究结论，显然转变中心性与控制力更能揭示中国城市发展的差异情况，较度中心性和中介中心性，对于城市在网络中的地位和位置的测度也更加合理。

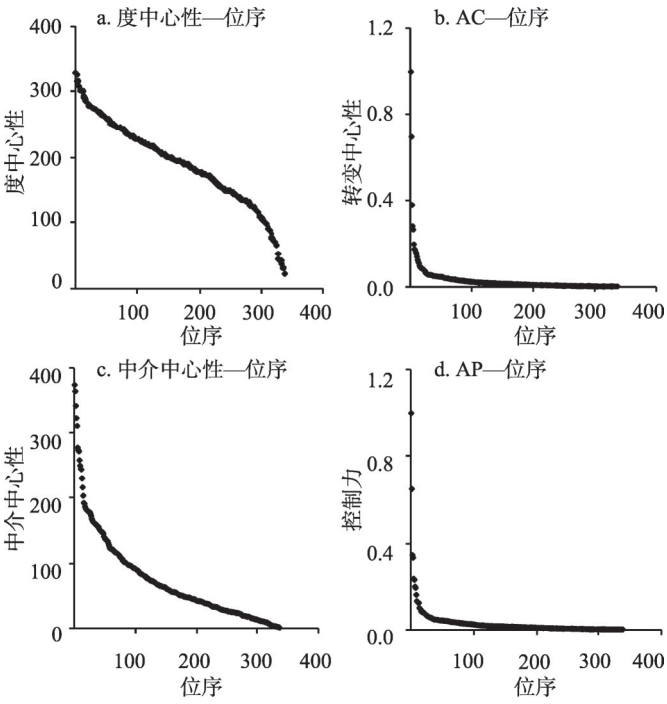


图9　度中心性、中心性、中介中心性、控制力—位序散点图

Fig. 9　Rank scatter diagram of degree centrality, alter-based centrality, and power, betweenness centrality

5.2 等级结构与空间分布特征

使用自然分裂法 Natural Breaks（Jenks）对中心性和控制力进行分级（表4），并基于二者在不同等级的匹配关系对城市划分类型。首先，城市网络等级呈金字塔结构，4个等级城市数量比约为1:5:35:178；其次，普遍上城市的中心性与控制力呈正比例关系（图10），高中心性城市的控制力相对也高，即能够良好集聚、扩散资源的城市对于资源的控制和支配能力也强。反映在城市类型上，是以北京、上海、天津、重庆、苏州、广州、杭州、深圳、南京为代表的高中心性高控制力的典型城市。同时，也存在以武汉、廊坊、太原、贵阳、福州为代表的高中心性低控制力的枢纽型城市，和以兰州、中山、呼伦贝尔、通辽、鄂尔多斯为代表的低中心性高控制力的门户型城市。

在城市等级结构中，除了占绝大比例的地方型城市，地方级典型城市的数量远高于其他等级类别。这54个地方级典型城市在网络的资源流动中起到了重要的承上启下作

表4　城市等级结构表

Tab. 4　City hierarchy table

等级	类别	中心性值域	控制力值域	城市(数量/个)
国家级	典型城市	0.380~1.000	0.345~1.000	北京 上海(2)
区域级	典型城市	0.125~0.379	0.132~0.344	天津 重庆 苏州 广州 杭州 深圳 南京(7)
	枢纽城市	0.125~0.379	0~0.131	武汉 廊坊(2)
	门户城市	0~0.124	0.132~0.344	
地方级	典型城市	0.032~0.124	0.034~0.131	成都 西安 徐州 郑州 东莞 佛山 长沙 石家庄 无锡 合肥 哈尔滨 沈阳 南宁 济南 昆明 青岛 长春 张家口 大连等(52)
	枢纽城市	0.032~0.124	0~0.033	宣城 邢台 泸州 洛阳 贵阳 南通 福州 泉州 衡阳 九江(10)
	门户城市	0~0.031	0.034~0.131	兰州 中山 邵通 呼伦贝尔 通辽 银川(6)
地方性	边缘城市	0~0.031	0~0.033	银川 四平 梧州 秦皇岛 湛江 郴州 连云港 济宁 扬州等(258)

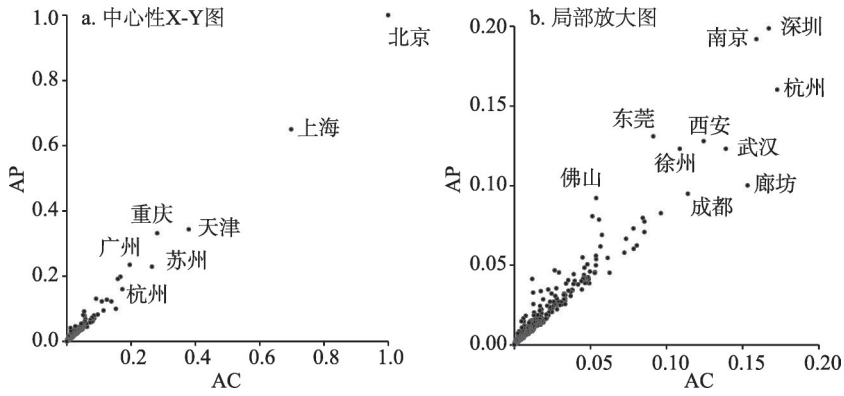


图10 转变控制力—中心性X-Y和局部放大图

Fig. 10 Scatter map of alter-based power-centrality and local enlarging graph

用，有效地防止了城市网络位序—规模曲线过早收敛，避免了资源向顶层城市的过度集中。

利用表4的等级结构绘制转变中心性和控制力分级图（图11）。首先，典型城市与城市行政等级存在明显的正相关关系，并在一定程度上反映了其行政职能。行政级别越高的城市越容易获取各类政治、经济、社会等稀缺资源，因此直辖市、副省级城市、省会城市是典型城市的主要构成。在空间上，前文提到的哈尔滨—北京—西安—成都人口流动强度分割界线以东的省份，均拥有1~3个典型城市。典型城市不仅在转变中心性上地位突出，同时也在控制力上表现突出，与其周边、甚至全国的其他城市都存在较为密切的联系，和产生较大的影响力。从目前的经济发展趋势上看，典型城市对于资源集聚与垄断的力量要远高于其他城市，并且预计未来这种框架性的力量将越发明显。

其次，受到空间外溢效应的影响，城市网络中的核心节点城市对其周边城市具有强引导和等级的提升作用，因此高中心性城市的空间分布相对集中，尤以在北京、西安、武汉、上海四市围合的矩形空间中。相比之下，高控制力城市的空间分布相对均衡。与高中心性城市的东部沿海地区集聚不同，在分界线以西，内蒙古、甘肃、宁夏三省中，也存在银川、兰州、鄂尔多斯、昭通等高作用力的门户城市，作为西部地区人口向东部流动的桥接点。可见，控制力的测度结果良好的反映了现实中部分门户城市在人口流动过程中承担的中介与集散职能。

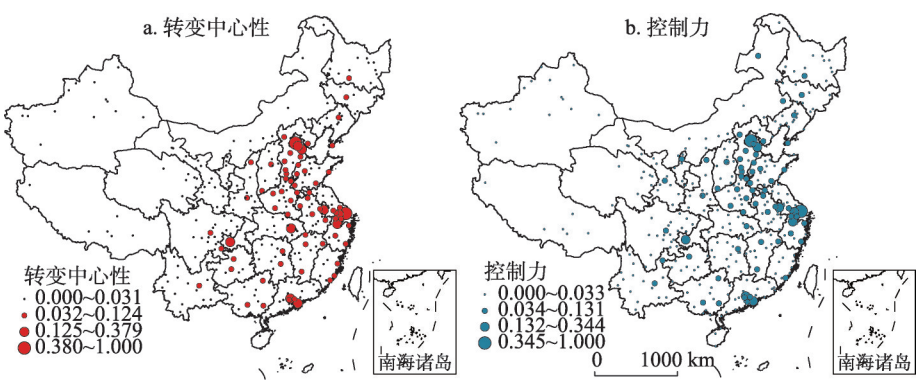


图11 转变中心性、控制力分级图

Fig. 11 Classification map of alter-based centrality and power

6 结论与讨论

6.1 结论

① 转变中心性和控制力是近年来城市网络研究的重要方法。在以往研究中，仍存在对这一理论辨识与应用的模糊性。本文基于网络拓扑结构的分析指出，递归概念用于城市网络的研究有其特定的数据结构要求，其适用于树形结构而不适用于局部存在完整图的网络测度。转变中心性与控制力与递归概念并无关系。由于考虑了间接关联对于测度城市的影响，因此较传统度中心性类测度方法，转变中心性与控制力更符合地理空间的非均衡的普遍规律。

② 移动数据日益成为表征居民社会活动的重要载体。基于百度迁徙数据发现，中国人口省际流动的空间异质性显著，九成以上的人口流发生在一成的城市关联路径上。大规模人口流动主要发生在以京津冀、长三角、珠三角、成渝共同构成的菱形结构内，其中京津、长三角、珠三角形成了三个人口流动高强度、高密度的扇形结构，并存在明确的辐射范围。全国和区域尺度下均呈现出明显的核心—边缘结构。哈尔滨–北京–西安–成都一线是人口流动强度空间分布的显著分割界线。以此为界，城市网络呈现东部并联、西部串联的关联结构。

③ 通过中心性与控制力的匹配特征，发现网络资源对城市产生了截然不同的影响与空间效应。城市网络中，既包括北京、上海、天津、重庆、苏州、广州、杭州、深圳、南京等以高中心性高控制力为特征的典型城市，也包括武汉、太原、贵阳、福州等以高中心性低控制力为特征的枢纽型城市，和兰州、银川、鄂尔多斯、昭通等以低中心性高控制力为特征的门户型城市，而后两者仅凭传统度中心性类测度方法是无法被辨识出来的。因此在城市网络研究中，区别中心性和控制力概念，对加深城市复杂多样化内涵的认识具有重要的意义。

④ 城市的网络结构将极大加速资源的集聚。改革开放、户籍制度宽松背景下，以劳动力为代表的自由流通要素，受外部条件吸引及自身利益最大化的驱动，在传统行政界线的制约将被逐渐打破。首先，具备中心性与控制力双重优势的典型城市，不仅与其近域、甚至全国城市都产生较为密切的联系，同时承担着区域人口流动的门户角色，而这些城市多为行政权力突出的直辖市和省会。在城市结构的重塑过程中，可以预见，典型城市在网络中将形成广泛的集聚、垄断效应和强劲的网络管制。

⑤ 门户城市现象亟需重视。受到如交通基础设施建设等因素的影响，地域和城市网络中的边缘城市直接关联中心城市的机会较低，成本相应更高，一般是首先关联区域门户城市，继而与网络中心城市进行资源交换。门户城市桥接了所在区域的资源交换行为，对于资源流通的控制具有明显的垄断特征。这一现象的结果是，一方面低等级城市存在路径缺乏与路径依赖的弊端，限制了自身的发展；另一方面，缺乏门户城市的区域将难以形成有序的城市发展体系，并导致资源向高位城市关联集聚的过早收敛。

6.2 讨论

在一段时间内，以人口或GDP等属性量化指标衡量的首位城市，对城市等级认知存在指向作用。网络为城镇体系研究提供了新的视角和解释力，不仅本地规模集聚，城市的外向交互关系也已经日益受到重视。城市网络是复杂的、多重的。网络资源交换作为城市规模累积的发展过程，网络地位和位置成为了城市功能的映射，而城市等级也将成为中心性与控制力在网络中空间分配的结果。因此，将城市网络研究置于一维的等级分层的视角下，将难以与以往基于属性数据构建的城市体系研究区别开来。

很多学者已经认识到城市网络中控制力的研究意义与急切性。尽管Neal为城市控制力研究提供了一个视角，但实际上，当前研究尚不能为这一理论提供一个具备说服力的测度方法。在Neal绘制的中心性与控制力区别图中，较大网络的中心节点是“中心的，但缺乏控制力”，较小网络的中心节点是“有控制力的，但缺乏中心性”。然而，网络的中心节点显然也是网络的最中心。而这一条件性的结果必然是，中心性与控制力存在普遍的结果相关联。因此，Neal的研究方法也无法解释一个非中心位置的节点能够产生更强的控制力。另一方面，本文基于人口流动对于中心性与控制力测度结果显示，普遍上城市的中心性与控制力成正比例关系（图8），其根本原因是不同等级城市关联的人口流强度存在显著差异。即便是作为的门户城市的西安、成都、乌鲁木齐、兰州，控制了中国广袤西部地区的人口流动，其控制力也无法与关联了极大近域通勤人流的廊坊、苏州相提并论。然而，控制力的本质是支配[46]，体现为支配资源、信息等在城市网络中有效流通的能力。正如Derudder等、Hesse指出，控制力是城市在其腹地范围内的统治其他城市的力量[47-48]。基于这一思路，本文认为才是理解城市控制力的真正视角。

参考文献(References)

[1] 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.

[2] Jacobs W, Koster H, Hall P. The Location and Global Network Structure of Maritime Advanced Producer Services. Urban Studies, 2011, 48(13): 2749-2769.

[3] Zhao Miaoxi, Liu Zheng. Research on China's city network based on production service industry. City Planning Review, 2012, 36(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, 36(9): 23-28, 38.]

[4] Derudder B, Witlox F, Faulconbridge J, et al. Airline data for global city network research: reviewing and refining existing approaches. Geojournal, 2008, 71(1): 5-18.

[5] Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoxi, 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.]

[6] Matthiessen C W, Schwarz A W, Find S. World Cities of Scientific Knowledge: Systems, Networks and Potential Dynamics. An Analysis Based on Bibliometric Indicators. Urban Studies, 2010, 47(9): 1879-1897.

[7] Li Dandan, Wang Tao, Yehua Dennis WEI, et al. Spatial and temporal complexity of scientific knowledge network and technological knowledge network on China's urban scale. Geographical Research, 2015, 34(3): 525-540. [李丹丹, 汪涛, 魏也华, 等. 中国城市尺度科学知识网络与技术知识网络结构的时空复杂性. 地理研究, 2015, 34(3): 525-540.]

[8] Taylor P J. The new geography of global civil society: NGOs in the world city network. Globalizations, 2004, 1(2): 265-277.

[9] Friedmann J. The world city hypothesis. Development and Change, 1986, 17: 69-84.

[10] Alderson A, Beckfield J. Power and position in the world city system, American Journal of Sociology, 2004, 109(4): 811-851.

[11] Taylor P. World City Network: A Global Urban Analysis. London: Routledge. 2004

[12] Bonacich P. Power and Centrality: A Family of Measures. American Journal of Sociology, 1987, 92(5): 1170-1182.

[13] Mahutga M C, Ma X, Smith D A, et al. Economic globalisation and the structure of the world city system: The case of airline passenger data. Urban Studies, 2010, 47(9): 1925-1947.

[14] Taylor P J, Walker D R F, Catalano G, et al. Diversity and power in the world city network. Cities, 2002, 19(4): 231-241.

[15] Ma Xiulian, Michael F Timberlake. Identifying China's leading world city: A network approach. GeoJournal, 2008, 71 (1): 19-35.

[16] Cook K S, Yamagishi T. The distribution of power in exchange networks: Theory and experimental results. American Journal of Sociology, 1983, 89(2): 275-305.

[17] Emerson R M. Power-dependence relations. American Sociological Review, 1962, 27(1): 31-41.

[18] Zachary Neal. Differentiating centrality and power in the world city network. Urban Studies, 2011, 48(13): 2733-2748.

[19] Zachary Neal. Does world city network research need eigenvectors? Urban Studies, 2013, 3(12): 1-12.

[20] Boyd J P, Mahutga M C, Smith D A. Measuring centrality and power recursively in the world city network: A reply to

Neal. Urban Studies, 2013, 50(8): 1641-1647.

[21] Cihák M, Scuzzarella R, Muñoz S. The bright and the dark side of cross-border banking linkages. Czech Journal of Economics & Finance, 2011, 11(186): 200-225.

[22] Yin Hongling, Wu Zhiqiang, Yang Ting. Review and enlightenment of the method to measure the world city network of Zachary Neal. Urban Planning International, 2014, 29(6): 110-113. [尹宏玲, 吴志强, 杨婷. 扎克瑞尼尔世界城市网络测度方法评述及其启示. 国际城市规划, 2014, 29(6): 110-113.]

[23] Zhu Chasong, Wang De, Luo Zhendong. Centrality and power: A method of analyzing city network spatial structure. Urban Planning Forum, 2014(4): 24-30. [朱查松, 王德, 罗震东. 中心性与控制力: 长三角城市网络结构的组织特征及演化: 企业联系的视角. 城市规划学刊, 2014(4): 24-30.]

[24] Wang Cheng, Wang Maojun, Chai Qing. The relationship between centrality and power in the city network. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(12): 1953-1972. [王成, 王茂军, 柴箐. 城市网络地位与网络权力的关系: 以中国汽车零部件交易链接网络为例. 地理学报, 2015, 70(12): 1953-1972.]

[25] Haas H D. Migration and development: A theoretical perspective. International Migration Review, 2010, 44(1):227-264.

[26] Zhu Yu, Lin Liyue. Studies on the temporal processes of migration and their spatial effects in China: Progress and Prospect. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 820-828. [朱宇, 林李月. 中国人口迁移流动的时间过程及其空间效应研究: 回顾与展望. 地理科学, 2016, 36(6): 820-828.]

[27] Chi Renyong. The formation, structure and function of regional innovative network of small and medium-sized enterprises: A case study of Zhejiang province. Management World, 2005(10): 102-112. [池仁勇. 区域中小企业创新网络形成、结构属性与功能提升: 浙江省市政考察. 管理世界, 2005(10): 102-112.]

[28] Ma Xueguang, Li Guicai. Study on world city network theory within global space of flow. Economic Geography, 2011, 31(10): 1630-1637. [马学广, 李贵才. 全球流动空间中的当代世界城市网络理论研究. 经济地理, 2011, 31(10): 1630-1637.]

[29] Beaverstock J V, Smith R G, Taylor P J. World-city network: A new metageography? Annals of the American Association of Geographers, 2000, 90(1): 123-134.

[30] Liu X, Neal Z, Derudder B. Featured graphic: City networks in the United States: A comparison of four models. Environment and PlanningA, 2012, 44(2): 255-256.

[31] Ke Wenqian, Yu Zhaoyuan, Chen Wei, et al. Architecture and key issues for human space-time behavior data observation. Geographical Research, 2015, 34(2): 373-383. [柯文前, 俞肇元, 陈伟, 等. 人类时空行为数据观测体系架构及其关键问题. 地理研究. 2015, 34(2): 373-383.]

[32] Timberlake M, Wei Y D, Ma X, et al. Global cities with Chinese characteristics. Cities, 2014, 41: 162-170.

[33] Chen S, Zhou S. Recursive mechanism: Towards node differential privacy and unrestricted joins. Computer Science, 2013: 653-664.

[34] Wang Cheng, Guan Rong, Wang Huiwen. Coverage-rate-based recursive K-means clustering method: An application of location problem in emergency system. Mathematics in Practice and Theory, 2016.

[35] Sun Y, Li Z, Wang D. Hamiltonicity and Pancyclicity of binary recursive networks//International Symposium on Parallel and Distributed Processing and Applications. Berlin and Heidelberg: Springer, 2007: 786-796.

[36] Lu Zhao, Li Xiong, Shan Xue. Global recursive based node importance evaluation. Advanced Data Mining and Applications, 2016.

[37] Norman M. A recursive method for traffic management through a complex path network. Simulation Conference, 2003, 1: 537-541.

[38] http://news.youth.cn/kj/201511/t20151120_7329789.htm.

[39] http://www.techweb.com.cn/data/2015-06-12/2163284.shtml.

[40] Wei Ye, Xiu Chunliang, Liu Zhimin, et al. Spatial pattern of city network in transitional China based on the population flows in "Chunyun" period. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(1): 1-7. [魏冶, 修春亮, 刘志敏, 等. 春运人口流动透视的转型期中国城市网络结构. 地理科学, 2016, 36(1): 1-7.]

[41] Liu Wangbao, Shi Enming. Spatial pattern of population daily flow among cities based on ICT: A case study of "Baidu Migration". Acta Geographica Sinica, 2016, 71(10): 1667-1679. [刘望保, 石恩名. 基于ICT的中国城市间人口日常流动空间格局: 以百度迁徙为例. 地理学报, 2016, 71(10): 1667-1679.]

[42] Meo P D, Ferrara E, Fiumara G, et al. Fast unfolding of communities in large networks. Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment, 2008(10): 155-168.

[43] Chen Wei, Xiu Chunliang, Ke Wenqian, et al. Hierarchical structures of China's city network from the perspective of multiple traffic flows. Geographical Research, 2015, 34(11): 2073-2083. [陈伟, 修春亮, 柯文前, 等. 多元交通流视角

下的中国城市网络层级特征. 地理研究, 2015, 34(11): 2073-2083.]
[44] Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoxi. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks. Geographical Research, 2015, 34(4): 711-728. [吴康, 方创琳, 赵渺希. 中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征. 地理研究, 2015, 34(4): 711-728.]
[45] Zachary Neal. Structural determinism in the interlocking world city network. Geographical Analysis, 2012, 44: 162-170.
[46] Knoke D. Political Networks: The Structural Perspective. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
[47] Derudder B, Timberlake M, Witlox F. Introduction: Mapping changes in urban systems. Urban Studies, 2010, 47(9): 1835-1841.
[48] Hesse M. Cities, material flows and the geography of spatial interaction: Urban places in the system of chains. Global Networks, 2010, 10(1): 75-91.

Alter-based centrality and power of Chinese city network using inter-provincial population flow

ZHAO Ziyu[1], WEI Ye[2], PANG Ruiqiu[2], WANG Shijun[2], FENG Zhangxian[2]
(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. School of Geographical Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: Application of the concepts of alter-based centrality and power has become a focus in the research on city networks in recent years. In this paper, the conditionality of recursive theory utilization to city networks is analyzed from the perspective of network topology structures. In addition, an urban network is constructed on the basis of Baidu migration data and measured using the complex network method, improved alter-based centrality, and the power method. The results show, in the first place, that the use of recursive theory for the analysis of urban networks has specific data structure requirements, suitable for tree structure, but not for the local existence of complete network structure measurements. Secondly, small world phenomena and spatial patterns of population mobility exhibit obvious core-periphery structures at national and regional scales. This means that the national urbanization development strategy and important transport facilities play key roles in enabling the population mobility network. In this context, the Harbin-Beijing-Xi'an-Chengdu-Dali line exhibits a significant network of spatial differences in terms of boundary divisions. Thirdly, the use of alter-based centrality and power reveal hierarchical characteristics, differences in the urban network, and the influence of different effects, including spatial ones, on the identification of network city resources. In this case, the network includes not just Beijing, Shanghai, Chongqing, and Guangzhou, high power quintessential cities with high centrality, but also a number of smaller lower power hub cities, including Wuhan, Taiyuan, Guiyang, and Fuzhou, as well as gateway cities that exhibit both low centrality and high power, such as Lanzhou and Yinchuan. Thus, the concepts of centrality and power are of great significance in broadening our understanding of complex urban diversification.

Keywords: alter-based centrality and power; city network; population flow; recursion; China