

周晓芳,产健.基于无尺度网络的中国城市医疗网络分析[J].地理科学,2019,39(2):195-203.[Zhou Xiaofang, Chan Jian.Urban Medical Network in China Based on Scale-free Network. Scientia Geographica Sinica,2019,39(2):195-203.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2019.02.003

# 基于无尺度网络的中国城市医疗网络分析

周晓芳<sup>1</sup>,产健<sup>2</sup>

(1.华南师范大学旅游管理学院,广东 广州 510631;2.中共中央党校(国家行政学院)国际战略研究院,北京 100091)

**摘要:**根据城市统计中存在大量属性数据的特点,基于无尺度网络方法,根据2002~2014年中国城市医疗统计数据变化的相似性来建立城市之间的联系,得到中国城市医疗软件网络和硬件网络。在对两个网络对比和测试分析后得到:① 中国城市医疗网络是由20%高度城市代表的具有圈层聚类结构的无尺度复杂网络。② 中国城市医疗硬件网络比软件网络复杂和稳定。③ 中国城市医疗网络的结构和功能主要由强关系城市决定,弱关系城市对网络没有实质影响。可见,以无尺度网络方法来分析城市网络可以发现很多隐藏的问题。

**关键词:**无尺度网络;城市医疗网络;中国

**中图分类号:**K928      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2019)02-0195-09

伴随着现代信息技术和交通网络的发展,城市间逐渐突破空间距离限制,以多种方式产生联系形成城市网络,相应地在西方学术界形成了“世界城市”研究流派<sup>[1-3]</sup>,近年来国内也出现大量城市网络研究。归纳起来主要表现在3个方面:城市从中心性向节点性转变<sup>[4]</sup>、城市关系从地方空间向流空间转变<sup>[5]</sup>、城市组织模式从等级体系向网络体系转变或中心地模式向网络化模式转变<sup>[6]</sup>。点、关系和结构这3个方面在城市网络中是递推的,也是相辅相成的,城市节点的动态功能要视其间的连接关系而定,不同的联系形成了丰富的城市网络类型<sup>[7]</sup>,中国这些城市网络类型包括基础设施网络且以航空网络<sup>[8]</sup>和高铁网络较多<sup>[9]</sup>,以及经济网络<sup>[10]</sup>、企业组织网络<sup>[11]</sup>、生产网络<sup>[12,13]</sup>、服务业网络<sup>[14]</sup>、知识网络<sup>[15]</sup>、创新网络<sup>[16]</sup>、旅游网络<sup>[17]</sup>、社会网络<sup>[18]</sup>甚至是汽车零部件交易网络<sup>[19]</sup>。在这些不同类型的城市网络中,距离因素对城市联系的制约作用下降<sup>[6]</sup>甚至是丧失,但城市间联系的关系矩阵仍然是研究和评价城市网络结构的关键因素<sup>[9]</sup>。然而,城市关系的识别和建立并不容易,从世界城市网络研究中心GaWC的7种城市关系数据获取思路<sup>[3]</sup>来看,目前的城市网络研究是局限、片面和有尺度的,且静态的

居多。如电信、因特网、高铁等物理链接形成的城市基础设施网络,其流数据的获取和动态监测仍然很有难度。因此很多学者转向通过城市功能联系去解读城市间的网络联系<sup>[18]</sup>,但这种城市功能联系代替城市真实的连接关系需要实现转换<sup>[3]</sup>,这类研究<sup>[11,20,21]</sup>和一些新的城市功能联系如知识合作<sup>[15]</sup>和创新<sup>[16]</sup>、互联网社交联系<sup>[18]</sup>等在建立网络的思路方面一致,也体现这些关系数据的人文性并加剧了城市网络社会空间分异<sup>[22]</sup>,使得在网络关系建立的过程中因视城市不同功能联系而人工过滤了大多数城市,也造成某种类型城市网络研究不能推及其他类型城市网络,即无法进行尺度演绎。

既然城市网络研究认为城市之间发生联系是城市功能分化的结果<sup>[23]</sup>,而城市功能由大量的属性数据呈现,因此城市网络中城市节点的属性数据不应该被忽视。本研究基于体现城市功能的属性数据寻找城市关系的思路进行,突破点是根据城市统计指标在某时间段内变化曲线的相似性来获得城市两两关系和连接,以点代表城市,相似性代表城市联系,依此构建城市网络。由于城市统计属性数据丰富、类型多样,本文选取医疗统计数据,一方面医疗网络是城市网络研究中较罕见的

**收稿日期:**2018-02-08;**修订日期:**2018-06-15

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41401189)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China(41401189).]

**作者简介:**周晓芳(1978-),女,贵州织金人,副教授,博士,硕导,主要从事人居环境及地理传统文化研究。E-mail: zhouxiaofang@m.scnu.edu.cn

**通讯作者:**产健。E-mail: 71025385@qq.com

类型,研究结果可以丰富城市网络类型,另一方面医疗关系的城市网络研究与现有其他类型城市网络研究结果如差异大也利于解释。

## 1 数据来源和复杂网络构建

研究数据来源于《中国城市统计年鉴》<sup>[24]</sup>公布的2002~2014年全国地级市以上291个城市统计数据(不含港澳台地区),受统计指标限制只选取医生人数(含执业医师、执业助理医师)和医院床位张数(含卫生院)这两个有关医疗资源的指标,分别代表城市医疗软件和硬件网络。

鉴于属性数据之间的关系很难发现,本文抽取各城市统计指标在2002~2014年变化曲线的相似性来表达城市之间的联系。这一理念来自于计算机网络原理,即计算机之间通过网线连接产生网络,网络连接的本质是数据传输和交流,而数据传输和交流的方式是可复制,即连接和复制产生了数据的相似性,相似性表明数据的可复制和连接。因此,使用相似性研究实质是把城市节点的各种人文、经济属性还原为网络节点间可连接性。由于得到的网络符合无尺度网络的基本特征,本研究以无尺度网络分析方法进行,如研究方法可行,则意味着城市网络研究可以实现尺度类型变换和尺度演绎。

无尺度网络(Scale-free Network)由Barabási和Albert提出<sup>[25]</sup>,一般翻译为无标度网络,本研究根据地理学特有尺度研究传统对应翻译为无尺度网络。无尺度网络已成为复杂系统研究的主流工具<sup>[26]</sup>。本研究主要运用无尺度网络中度(Degree)分布服从幂率(Power Law)分布的现象,通过相似性构建复杂网络。幂律分布广泛存在,服从幂律分布的网络一直是文献研究关注的焦点<sup>[27]</sup>,很多类型的城市网络也属于无尺度网络<sup>[28,29]</sup>。

使用无尺度网络方法构建复杂网络在金融领域有大量研究<sup>[30-32]</sup>,具体构建过程如下。

### 1.1 关系构建

选取291个城市作为网络节点,设 $p_i^a(t)$ 为城市 $i$ 在第 $t$ 年内某个属性 $a$ 的值,则城市 $i$ 在属性 $a$ 的对数返回值记为 $r_i^a(t)$ 为:

$$r_i^a(t) = \ln \left[ \frac{p_i^a(t)}{p_i^a(t-1)} \right] \quad (1)$$

Cohen认为<sup>[33]</sup>,如果没有属性数据 $a$ ,城市 $i$ 和 $j$ 之间是没有任何关系的。为研究全国各城市13 a

时间段上医疗数据变化的互相关(Cross Correlation)程度,参照Chi等对皮尔森相关系数(Pearson Correlation Coefficient)的引用<sup>[32]</sup>,使用公式(2)构建相关性:

$$C_{ij} = \frac{\sum_i [r_i^a(t) - \bar{r}_i^a] [r_j^a(t) - \bar{r}_j^a]}{\sqrt{\sum_i (r_i^a(t) - \bar{r}_i^a)^2} \sqrt{\sum_i (r_j^a(t) - \bar{r}_j^a)^2}} \quad (2)$$

式中, $r_i^a(t)$ 和 $r_j^a(t)$ 表示城市 $i$ 或 $j$ 的第 $t$ 年第 $a$ 个属性值的对数返回值, $\bar{r}_i^a$ 和 $\bar{r}_j^a$ 体现了 $i$ 城市和 $j$ 城市的属性 $a$ 在 $t$ 到 $t-1$ 时间段的连续变化。

式(1)和式(2)可以得到城市之间的同期相关系数矩阵 $C=[C_{ij}]$ ,城市 $i$ 和 $j$ 之间的 $C_{ij}$ 值介于-1和1之间,当 $C_{ij}$ 为0的时候两个城市没有关系,随着其绝对值的增大,其关系逐渐增强,根据这种矩阵关系构建中国城市无尺度网络。

基于相关系数矩阵构造复杂网络是一种检测、分析和可视化相关系数矩阵中的重要信息的有效工具<sup>[34]</sup>。由于构建的城市网络关系取决于数据在时间序列上的相关性,相关系数的取值则显得非常重要,因此对复杂网络模型的分析还应首先考虑阈值问题,即在不同相关系数值下对构建的复杂网络进行分析后选取稳定的、适合分析的网络。

### 1.2 定义阈值

假设阈值为 $\rho$ ,则有 $C_{ij} > \rho$ 。对 $\rho$ 取值进行阈值切割,例如 $\rho$ 取到0.9,也就是说当 $C_{ij} \geq 0.9$ 的时候将矩阵转化为1否者为0。如果 $\rho$ 取值低于一定程度,则网络的幂率分布就不清楚,网络结构没有明显的无尺度特征, $\rho=0$ 时则意味着网络全部连通。随着 $\rho$ 的逐渐增大,网络的边和相应的度分布增加,当 $\rho$ 增加到某个值附近时,最大连通子图的节点个数和相应的加权聚类系数值趋于平稳,当 $\rho$ 取值足够大的时候度分布仍旧显示无尺度特征<sup>[32]</sup>,因此选取适合的阈值使得网络的度分布接近幂率分布的时候才具有无尺度网络研究的意义。幂率分布公式为:

$$P(k) = ce^{-rk} \quad (3)$$

$P(k)$ 为对应城市节点 $k$ 的数据集, $c$ 和 $r$ 为大于零的常数, $\ln P(k)$ 与 $\ln e$ 与满足线性关系 $\ln P(k) = \ln c - r \ln e$ ,即前文所述在用对数方法时,双对数坐标下幂律分布表现为一条斜率为幂指数的负数的直线。

除了使用幂率分布来定义阈值以外,Chi等人<sup>[32]</sup>

还使用平均拟合误差来检测阈值的取值是否符合网络数据集的幂率分布,公式为:

$$\in_{fitting} = \sum_k |P(k) - ce^{-rk}| \quad (4)$$

当  $\rho$  低于某一值时,幂率分布就会变混乱,平均拟合误差增大,网络无明显的无尺度网络特征。

### 1.3 网络构建

由于城市属性时间序列数据有限以及在测量相关系数的过程中存在误差,使得相关系数矩阵  $C$  存在信息冗余,需要逐步消除这些弱连接以使网络的强连通结构就逐渐呈现出来。根据图论的原理和方法,相关系数不满足度量空间的条件,需将相关系数  $[C_{ij}]$  转化为对应的  $N \times N$  距离矩阵  $[D_{ij}]$ :

$$D_{ij} = \sqrt{2(1 - C_{ij})} \quad (5)$$

$D_{ij}$  满足3条性质,即 ①  $D_{ij}=0$ , 当且仅当  $i=j$ ; ②  $D_{ij}=D_{ji}$ ; ③  $D_{ij} \leq D_{ik} + D_{kj}$ ,  $k \neq i \neq j$ ,  $k$  为不同于  $i$  和  $j$  的任意其他城市,其中  $0 \leq D_{ij} \leq 2$ 。

通过以上方法,构建得到研究所需的城市医疗软件网络和硬件网络。

## 2 中国城市医疗网络结构

### 2.1 高度城市

无尺度网络的一个特点是大多数节点只有少量的连接(每个节点的连接关系连接数量就是度),度分布服从幂率分布,即可以基于度高的少量城市来反映中国城市医疗网络整体情况。根据无尺度网络符合二八定律<sup>[35]</sup>,选取前20%的高度城市,采用公式(6)使用医生人数和医院床位数两个指标进行全国和前20%高度城市的医疗指数计算,得到图2,可明显看出20%的高度城市医疗指数在2002~2014年间增长曲线(即度指数)和全国(即全国指数)非常相似。再计算度排位前10%、

20%城市的医疗指数变化和全国指数变化间相关系数,得到医生人数这一指标的前10%城市度指数与全国指数相关系数为0.931 7,前20%为0.967 4,医院床位数指标的前10%城市与全国相关系数为0.970 5,前20%为0.983 6。进一步说明,前20%的高度城市可代表整个中国医疗网络。

$$Index = \frac{\sum_i [r_i^a(t)]}{\text{基期数值}} \quad (6)$$

### 2.2 城市医疗网络等级

城市网络研究习惯得出等级结构<sup>[3,23]</sup>,为延续研究连贯性,根据前述选取前20%的高度城市可代表全国城市网络的结果,主要对高度城市进行网络等级分析:医疗软件网络共有145个城市节点有度(即其他城市无关系连接),考虑并列情况,前20%高度城市共选32个;硬件网络有220个,前20%即44个。借鉴相关研究<sup>[18]</sup>,将医疗软件网络的145个城市划分为4个层级:前20%的32个城市可分为第一到第三层级:第一层级是度大于40的2个城市,第二层级度在31~40之间,共14个,第三层级度在23~30,共16个;将硬件网络的220个城市划分为6个层级:前20%的44个城市可分为第一到五层级:第一层级度大于130的4个城市,第二层级度在121~130之间的9个城市,第三层级度在111~120之间的9个城市,第四层级度在101~110之间14个城市,第五层级度在96~100之间的8个城市。剩余的176个城市,度小于96,为第六层级。两个网络的最后一个层级虽然城市数量多,但对网络整体影响不大。为使得上述层次更加清晰,借鉴Beaverstock的方法<sup>[36]</sup>,将两种医疗网络的等级以圈层结构表达出来(图2)。从这个结果可以看到,城市在网络体系中的地位高低并非完全由经济发展水平所决定<sup>[18]</sup>。

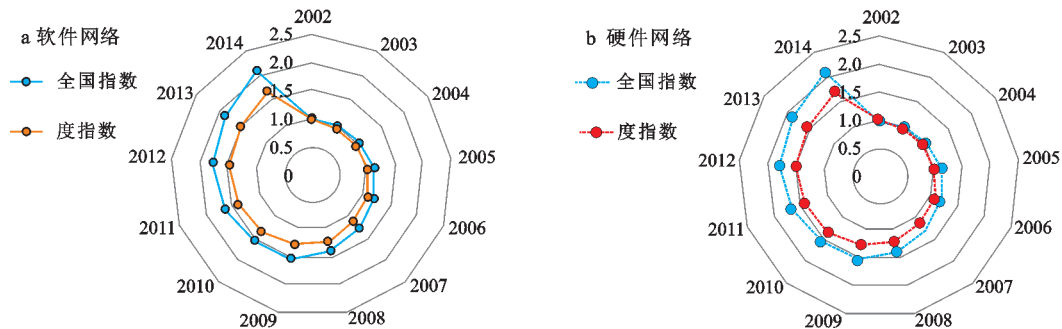


图1 中国城市医疗指数变化

Fig.1 The changes of urban medical index in China



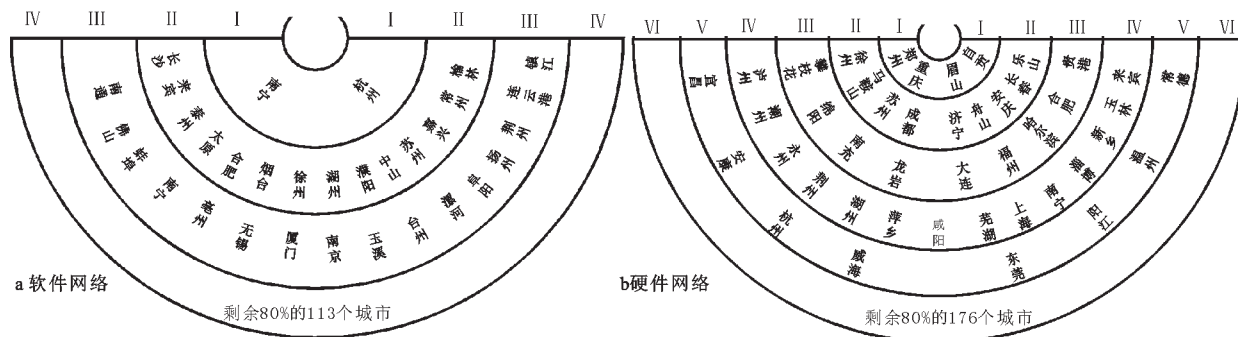


图2 中国城市医疗网络圈层

Fig.2 The urban medical network circle of cities in China

同时根据上述高度城市和城市连接以及城市网络的等级特点,将城市节点的空间位置属性代入,借助ArcGIS制作全国医疗网络地图(图3)。

从图3可发现高度的重要节点城市确能基本反应中国医疗网络的大体情况,如将胡焕庸线叠加,可明显看出医疗资源的分布与人口和经济分布的规律相似,即东南部和西北部存在巨大差异。同样,还可叠加节点其他空间属性例如交通、互联网,社会经济属性例如移民网络、区域合作等进一步分析,限于篇幅,本文不就此展开。另外,对比分析两个网络可明显发现,中国医疗网络的硬件网络比软件网络复杂。

### 2.3 城市医疗网络圈层聚类结构

在复杂网络中,除了简单强弱关系度量以外,还可根据节点和关系进一步的层次关系聚类,这种分层次的关系以及关系结构所对应的节点是网络信息传递的主要途径,可使网络结构和功能更

加明显。基于图论的复杂网络聚类方法和计算机算法很多,本研究针对所采用的无尺度网络方法以及得到的无向无权网络特征,使用基于介数的层次聚类方法进行,介数 $[C_B(V_i)]$ 反映除两个节点间直接连接外还存在的通过其他点连接的情况,即中介作用,公式为<sup>[37]</sup>:

$$C_B(V_i) = \sum_{s \neq i \neq t} \frac{\lambda_{st}(V_i)}{\lambda_{st}} \quad (7)$$

式中,  $\lambda_{st}$  指从顶点  $s \in V$  到顶点  $t \in V$  的最短路径的条数,  $\lambda_{st}(V_i)$  是从  $s$  到  $t$  经过某顶点的最短路径的条数。对于本研究的无尺度网络关系下的无向图来说,  $C_B(V_i)$  就是  $2/(n-1)(n-2)$ <sup>[38]</sup>。

根据公式(7)测量中国医疗城市网络中节点的介数,在医疗软件网络中106个城市有值,硬件网络中192个城市有值。然后通过比较各个节点的介数值来识别重要的类,可以看出节点的值越大,依赖性越强,分类特征越明显。再根据前述圈

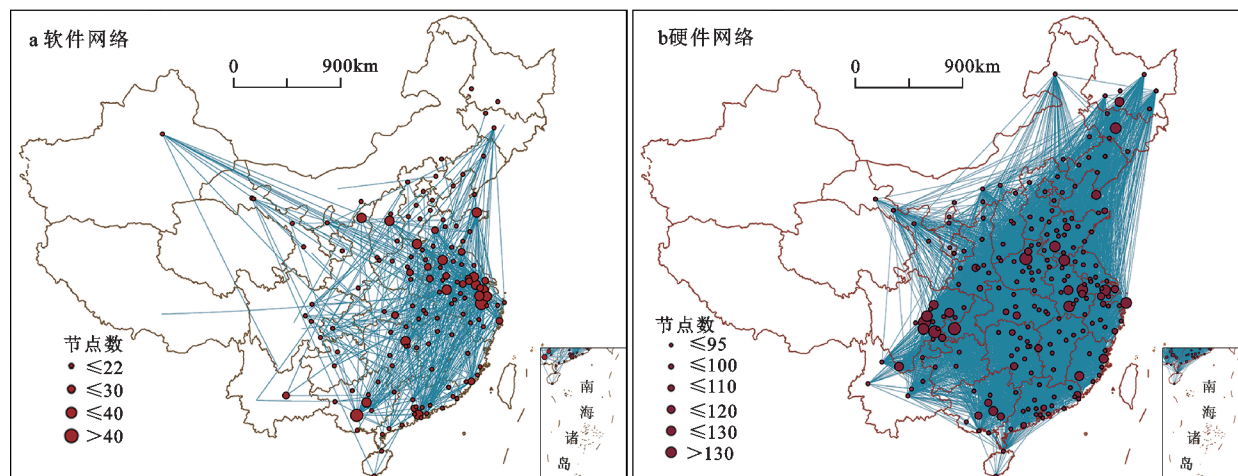


图3 中国城市医疗网络地图

Fig.3 The urban medical network map in China

层结构使用层次聚类主要是凝聚式层次聚类方法进行聚类,得到自上而下的城市网络关系层次结构(图4)。由于城市众多、数据量大,计算结果和出图非常复杂且图示不清楚或不能完全展现,此处简化表达,并在前述圈层结构基础上得到医疗网络前20%高度城市的圈层聚类结构。

### 3 中国城市医疗网络功能

#### 3.1 重点城市

现实世界的复杂网络中,节点和边通常是不均匀分布,这种分布方式呈现的网络结构和相应功能各不相同。就本研究的无尺度网络来说,节点符合幂率分布,重要的节点会呈现出集聚特性,这种集聚特性除了用作聚类,即前述实现的城市医疗网络圈层聚类结构研究成果外,还可进行集群(Clustering)或社区(Community)研究,探索网络的功能。

一般来说,不论是在网络的全局还是局部,节点及其边的分布都可能存在不同程度的集聚,形成集群或社区,在这些集群或社区的内部边分布非常密集,而集群或社区之间边的分布较为稀疏,表现出特有的结构<sup>[39]</sup>。集群或社区结构的算法有很多种,针对本研究无尺度网络设计方法的特点,适合采用快速展开(Fast Unfolding)算法<sup>[40]</sup>。快速展开算法是基于模块度划分的一种迭代的算法,主要目标是不断划分集群或社区,使得整个网络的模块度不断增大<sup>[41]</sup>。通过计算迭代,得到医疗软件网络模块度最大值为3.28时有16个集群或社区,硬件网络模块度最大值为0.163时有10个集群或社区。

集群或社区结构使得网络反映两种功能,一是强关系功能,一种是弱关系功能,强弱关系功能

视网络类型和结构不同而不同,但总体来说都存在积极和消极两方面的作用。就强关系功能来说,强关系的节点具有成长性和优先连结这两种机制并经历“富者越富”的过程集聚形成特征社区<sup>[42]</sup>,如富人俱乐部<sup>[43]</sup>,并产生网络信息传递的快速效应,如小世界<sup>[44]</sup>。但是,对强关系功能的依赖也存在严重问题,即这些集聚程度高的节点受攻击时网络可能会很快崩溃和瘫痪,或者由于内部过于集聚导致对外联系缺乏,较难获得外界的风险与信息而导致组织行动的“失灵”<sup>[45]</sup>。而“强关系的劣势”的对立面是“弱关系的力量”<sup>[6]</sup>,即集群或社区之间的弱连接对于整个网络连通性有关键作用,如去掉则很可能将整个网络断开成几个互不相连的成分<sup>[46]</sup>。就这网络关系两方面功能特性,有必要对影响网络关系的重要节点城市进行分析,在此基础上探讨网络结构表现的功能。因此第一步是重要节点城市的提取,以下简称为重点城市。

重点城市 and 前述高度城市有所区别和继承,首先高度城市属于重点城市,但复杂网络中重要的节点不止度高的,还存在一种普遍情况,如图5所示,如果顶点A与顶点B相连,并且顶点B与顶点C相连,那么顶点A、B和C就形成三角点阵,影响网络的连通性和稳定性。三角点阵还体现了节点的中介作用,可根据公式7计算节点介数,就本研究的城市网络来说,显然度和介数两个指标都反映了网络强关系的功能。

在弱关系功能上,同样根据三角点阵计算,结合网络集聚或社区结构来寻找这些弱关系的节点,发现在软件网络中形成三角形数量为0的城市有40个,硬件网络中有17个。选取医疗网络中度和介数前20%的城市作为强关系功能重点城市,与弱关系功能的重点城市一起绘制到地图上,如

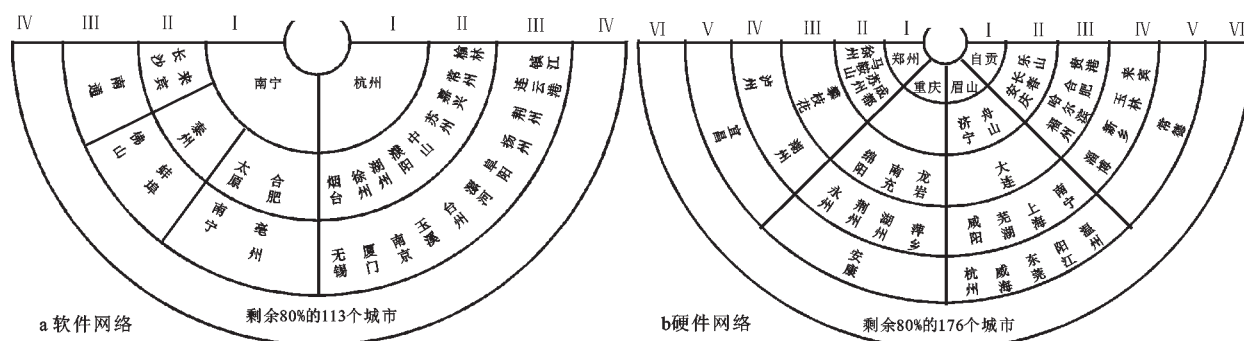


图4 中国城市医疗网络重点城市圈层聚类体系

Fig. 4 The urban medical network circle and hierarchical clustering structure of major cities in China

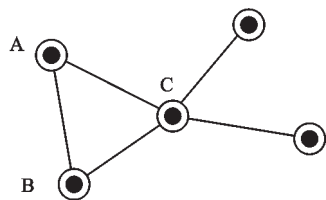


图5 复杂网络中的三角点阵

Fig.5 Triangular lattice in complex network

图6所示。

### 3.2 网络稳定性

重点城市对网络的结构和功能都有很大影响,限于篇幅,本文不能就网络局部功能进行详细分析,主要研究整体功能。稳定性是网络的重要整体功能,本文采取逆向思维,就这些重点城市对网络稳定性的影响进行分析,即通过逐步去除这些节点来观察网络的反应。

高度节点被删<sup>[47]</sup>和高介数节点被删<sup>[48]</sup>的研究表明,去除一两个关键节点并不一定能引起网络崩溃,并使得观测网络稳定性不容易。由于复杂网络的稳定性受三角形的密度决定<sup>[49]</sup>,且城市网络研究中有通过测量三角点阵来分析网络稳定性的案例<sup>[28]</sup>,我们通过寻找三角点阵构成的三角形个数来测量网络稳定性,又称群聚系数(Clustering Coefficient)<sup>[50]</sup>,公式为:

$$C_c = \frac{3 \times \text{网络中三角形的个数}}{\text{顶点关联三点组的个数}} \quad (8)$$

依据度和介数指标的强关系重点城市排序逐步去除这些节点后再测量网络的群聚系数后发现

网络的稳定性逐渐降低,其中度体现的群聚系数曲线变化较为和缓,可见度在衡量城市在网络的结构和功能方面比介数直观,但介数指标则能发掘更多隐藏的变化。并且,两个网络对比可见医疗软件网络没有硬件网络稳定,不仅体现在群聚系数较小,还体现在群聚系数曲线的变化更陡峭。

我们在去除弱关系重点城市后测量网络的群聚系数时发现指标基本不变,显示网络依然稳定,由此和一些文献所述<sup>[6,46]</sup>并不相符。仔细思考这一原因,在于对集群或社区概念的理解,即集群或社区之间,并不存在所谓的弱关系连接,集群或社区研究的目的是根据关系进行聚类,即从 $n$ 个两两之间无边相关联的顶点出发,按顶点到顶点的关联强度的递减顺序添加边,可在此过程中的任意点上停止,并对所添加的边形成的组元结构进行观察,这些组元即构成了此过程阶段上的聚类<sup>[41]</sup>。当所有的边都已添加,所有的顶点都相互关联时,则仅有一个群落存在。因此,根据这种方法,复杂网络聚类过程中不可能得出类似Beaverstock的伦敦为世界城市网络顶点的研究<sup>[36]</sup>。

## 4 结论和讨论

本研究根据城市统计中存在大量属性数据的特点,使用无尺度网络方法,通过中国各城市医疗属性统计指标在2002~2014年的时间序列相关性来构建城市间的联系,得到医疗软件网络和硬件网络,进行对比分析测试后得到以下结论:① 中国城市医疗网络是由20%的高度城市代表的具有

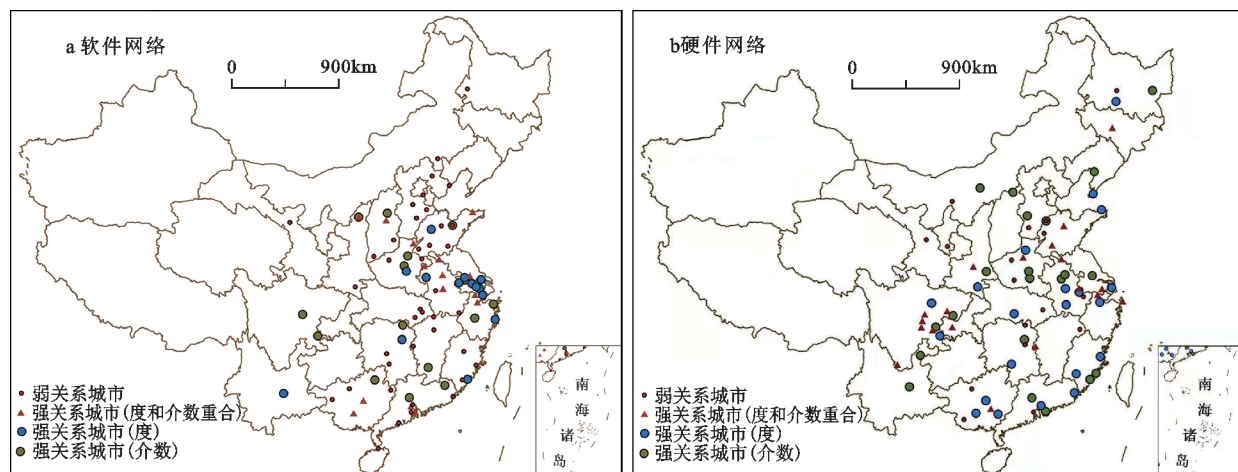


图6 中国城市医疗网络重点城市分布

Fig.6 The urban medical network of major cities distributing in China



圈层聚类结构的无尺度复杂网络。② 中国城市医疗硬件网络比软件网络复杂和稳定。③ 中国城市医疗网络的结构和功能主要由强关系城市决定,弱关系城市对网络稳定性没有实质影响。

在研究的过程中,有几个问题一直在思考,在此提出讨论。首先,国内城市网络研究主要还是集中在对城市关系的寻找和以此关系构建网络并分析某一时间点的网络格局,城市网络类型丰富多样,动态网络分析研究少见,可见国内城市网络研究在复杂网络领域还处于基础阶段。而世界城市网络研究也存在类似问题。再次,有关无尺度网络稳定性还需讨论,例如根据一些研究表明,只要有5%~10%的节点同时失效,就足以搞垮系统<sup>[41]</sup>,而当本研究按照二八定律去除度和介数前20%的重点城市后,网络仍然没有崩溃。在软件网络中按度逐步删除节点直到去掉第114个城市、按介数指标直到第115个城市,在硬件网络中按度逐步删除节点直到去掉第206个城市、按介数指标直到第206个城市时,网络才会崩溃,足见城市医疗网络的崩溃并非是一件容易的事情。之后又查阅了相关文献,发现也有不同的研究结果出现,例如对万维网的研究表明万维网符合幂率分布,虽然Albert等人<sup>[47]</sup>和Watts等人<sup>[51]</sup>的研究表明网络的高度节点受故意攻击时网络极易被破坏,但Broder等人<sup>[52]</sup>的结论却刚好相反,他们认为万维网对有目标的攻击具有很强的弹性。第三,研究城市网络会受到城市实体特征<sup>[53]</sup>的影响,但城市网络的复杂性和无尺度特点<sup>[54]</sup>却应该要用复杂网络的方法,在这种矛盾下,复杂网络方法研究城市网络会出现和实体特征可能不一致的研究成果。因此,需要研究者以复杂网络的视角来重新理解城市网络,并清楚无尺度拓扑结构,这种结构存在这样一些特点<sup>[55]</sup>:呈现幂率分布、遵循成长网络的典型模式、节点在产生连接的时候距离不是首要考虑的因素以及不规则碎片结构。只有通过复杂网络点、关系、结构的不断测试,才能找到复杂城市网络中隐藏的问题,尽管很多问题有可能是突破常识的,但这才是科学研究最重要的目的。

## 参考文献(References):

- [1] Castells M. Rise of the network society [M]//In: The rise of the network society, Blackwell Publishers, 2000:389-414.
- [2] Taylor P J, Derudder B. World city network: A global urban analysis [M]. Routledge, 2015.
- [3] 杨永春,冷炳荣,谭一泓,等.世界城市网络研究理论及其对城市体系研究的启示[J].地理研究,2011,30(6):1009-1020.[Yang Yongchun, Leng Bingrong, Tan Yiming et al. Review on world city studies and their implications in urban systems. Geographical Research, 2011, 30(6): 1009-1020.]
- [4] 王聪,曹有挥,陈国伟.基于生产性服务业的长江三角洲城市网络[J].地理研究,2014,2(2):323-335.[Wang Cong, Cao Youhui, Chen Guowei. Study on world urban network of Yangtze River Delta region based on producer services. Geographical Research, 2014, 2(2): 323-335.]
- [5] 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[J].经济地理,2011,31(10):1630-1637.[Ma Xueguang, Li Guicai. Study on world city network theory within global space of flow. Economic Geography, 2011, 31(10): 1630-1637.]
- [6] 冷炳荣,杨永春,谭一泓,等.城市网络研究:由等级到网络[J].国际城市规划,2014,29(1):1-7.[Leng Bingrong, Yang Yongchun, Tan Yiming. City network studies: the transformation of research perspective from hierarchy to network. Urban Planning International, 2014, 29(1): 1-7.]
- [7] 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[J].地理研究,2015,34(4):711-728.[Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoxi. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks. Geographical Research, 2015, 34(4): 711-728.]
- [8] 王姣娥,莫辉辉,金凤君.中国航空网络空间结构的复杂性[J].地理学报,2009,64(8):899-910.[Wang Jiao'e, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial structural characteristics of Chinese aviation network based on complex network theory. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(8): 899-910.]
- [9] 焦敬娟,王姣娥,金凤君,等.高速铁路对城市网络结构的影响研究——基于铁路客运班列分析[J].地理学报,2016,71(2):265-280.[Jiao Jingjuan, Wang Jiao'e, Jin Fengjun et al. Impact of high-speed rail on inter-city network based on the passenger train network in China. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(2): 265-280.]
- [10] 冷炳荣,杨永春,李英杰,等.中国城市经济网络空间特征及其复杂性分析[J].地理学报,2011,66(2):199-211.[Leng Bingrong, Yang Yongchun, Li Yingjie et al. Spatial characteristics and complex analysis: A perspective from basic activities of urban networks in China. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(2): 199-211.]
- [11] 王成金.中国物流企业的空间组织网络[J].地理学报,2008,63(2):135-146.[Wang Chengjin. Spatial organizational network of logistics company in China. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(2): 135-146.]
- [12] 李健,宁越敏,汪明峰.计算机产业全球生产网络分析:兼论其在中国大陆的发展[J].地理学报,2008,63(4):437-448.[Li Jian, Ning Yuemin, Wang Mingfeng. Global production networks of computer industry and its development in Mainland China. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(4): 437-448.]
- [13] 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[J]. 地理研究, 2012, 31(2): 207-219.[Wu Qianbo, Ning Yuemin. China's urban network based on spatial organization of electronic information enterprises. *Geographical Research*, 2012, 31(2): 207-219.]
- [14] 王聪, 曹有挥, 陈国伟. 基于生产性服务业的长江三角洲城市网络[J]. 地理研究, 2014, 33(2): 323-335. [Wang Cong, Cao Youhui, Chen Guowei. Study on urban network of Yangtze River Delta region based on producer services. *Geographical Research*, 2014, 33(2): 323-335.]
- [15] 汪涛, Stefan Hennemann, Ingo Liefner, 等. 知识网络空间结构演化及对NIS建设的启示: 以中国生物技术知识为例[J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1861-1872. [Wang Tao, Stefan Hennemann, Ingo Liefner et al. Spatial structure evolution of knowledge network and its impact on the NIS: Case study of biotechnology in China. *Geographical Research*[J], 2011, 30(10): 1861-1872.]
- [16] 吕拉昌, 李勇. 基于城市创新职能的中国创新城市空间体系[J]. 地理学报, 2010, 65(2): 177-190. [Lyu Lachang, Li Yong. A research on Chinese renovation urban system based on urban renovation function. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(2): 177-190.]
- [17] 陈浩, 陆林, 郑婷婷. 基于旅游流的城市群旅游地旅游空间网络结构分析: 以珠江三角洲城市群为例[J]. 地理学报, 2011, 66(2): 257-266. [Chen Hao, Lu Lin, Zheng Shanting. The spatial network structure of the tourism destinations in urban agglomerations based on tourist flow: A case study of the Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2): 257-266.]
- [18] 甄峰, 王波, 陈映雪. 基于网络社会空间的中国城市网络特征: 以新浪微博为例[J]. 地理学报, 2012, 67(8): 1031-1043. [Zhen Feng, Wang Bo, Chen Yingxue. China's city network characteristics based on social network space: An empirical of sina micro-blog. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(8): 1031-1043.]
- [19] 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[J]. 地理学报, 2015, 70(12): 1953-1972. [Wang Cheng, Wang Maojun, Chai Qing. The relationship between centrality and power in the city network. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1953-1972.]
- [20] 王成金. 中国物流企业的空间组织网络[J]. 地理学报, 2008, 63(2): 135-146. [Wang Chengjin. Spatial organizational network of logistics company in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(2): 135-146.]
- [21] 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[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1670-1682. [Jin Zhongfan. On structural properties of transnational urban network based on multinational enterprises network in China: As the case of link with South Korea. *Geographical Research*, 2010, 29(9): 1670-1682.]
- [22] 赵渺希, 吴康, 刘行健, 等. 城市网络的一种算法及其实证比较[J]. 地理学报, 2014, 69(2): 169-183. [Zhao Miaoqi, Wu Kang, Liu Xingjian et al. A novel method to approximate intercity networks and its empirical validation. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(2): 169-183.]
- [23] 冷炳荣, 杨永春, 谭一洺, 等. 结构动力机制视角下的城市网络解释框架[J]. 地理研究, 2013, 32(7): 1243-1252. [Leng Bingrong, Yang Yongchun, Tan Yiming et al. City network studies: A conceptual explanatory framework. *Geographical Research*, 2013, 32(7): 1243-1252.]
- [24] 国家统计局. 中国城市统计年鉴2002-2014 [M]. 北京: 中国统计出版社. [National Bureau of Statistics. *China City Statistical Yearbook 2002-2014*. Beijing: China Statistics Press].
- [25] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science* 1990, 286(5439): 509 - 512.
- [26] Wang J, Xu J, Liu Y et al. AST: Activity-Security-Trust driven modeling of time varying networks[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21352.
- [27] Strogatz S H. Exploring complex networks[J]. *Nature*, 2001, 410(6825): 268.
- [28] 陈彦光, 周一星. 基于三角点阵模型的自组织城市网络探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(2): 258-264. [Chen Yanguang, Zhou Yixing. Modeling Self-Organized Network of Cities Based on the Urban Triangular Lattice Model. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2005, 41(2): 258-264.]
- [29] 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[J]. 地理研究, 2015, 34(3): 525-540. [Li Dandan, Wang Tao, Wei Yehua Dennis 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.]
- [30] Stepney R. Asynchronous discussion groups as small world and scale free networks[J]. 2004, 9(9): e101.
- [31] Garlaschelli D, Battiston S, Castri M et al. The scale-free topology of market investments[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2005, 350(2-4): 491-499.
- [32] Chi K T, Liu J, Lau F C M et al. A network perspective of the stock market[J]. *Journal of Empirical Finance*, 2010, 17(4): 659-667.
- [33] Cohen J, Cohen P, West S G et al. Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences (3rd ed) [M]// In: *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*. L. Erlbaum Associates, 2003: 227-229.
- [34] Tumminello M, Lillo F, Mantegna R N. Correlation, hierarchies, and networks in financial markets[J]. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2010, 75(1): 40-58.
- [35] Albert R, Jeong H, Barabási A L. Internet: diameter of the world-wide web[J]. *Nature*, 1999, 401(6): 130-131.
- [36] Beaverstock J V, Smith R G, Taylor P J. World-city network: a new metageography[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2000, 90(1): 123-134.
- [37] 成小芹, 王一莉. 基于中介中心性的类重要性度量的研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(7): 2391-2394. [Cheng Xiaoqin, Wang Yili. Research of importance measurement of classes



- based on betweenness centrality. *Computer Engineering and Design*, 2011, 32(7):2391-2394.]
- [38] 郭世泽, 陆哲明. 复杂网络基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012, 6. [Guo Shize, Lu Zheming. *Complex network theory*. Beijing: Science Press, 2012, 6.]
- [39] Scott J. *Social Network Analysis: A Handbook*[M]. Sage Publications, London, 2000.
- [40] Fortunato S. Community detection in graphs[J]. *Physics Reports*, 2009, 486(3):75-174.
- [41] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R et al. Fast unfolding of communities in large networks[J]. *Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment*, 2008(10):155-168.
- [42] Barabási A L, Bonabeau E. Scale-free networks[J]. *Scientific American*, 2003, 288(5):60-69.
- [43] Colizza V, Flammini A, Serrano M A et al. Detecting rich-club ordering in complex networks[J]. *Nature Physics*, 2006, 2(2):110-115.
- [44] Watts, D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998 (393):440-442.
- [45] Essletzbichler J, Rigby D L. Exploring evolutionary economic geographies[J]. *Journal of Economic Geography*, 2007, 7(5):549-571.
- [46] Granovetter M S. The strength of weak ties[J]. *The American Journal of Sociology*, 1973, 78(6):1360-1378.
- [47] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794):378-382.
- [48] Holme P, Kim B J, Yoon C N et al. Attack vulnerability of complex networks[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2002, 65(5 Pt 2):056109.
- [49] Bianconi G, Capocci A. Number of loops of size in growing scale-free networks[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(7):078701.
- [50] Fronczak A, Fronczak P, Holyst J A. Higher order clustering coefficients in Barabasi-Albert networks[J]. *Physica A Statistical Mechanics & Its Applications*, 2002, 316(1):688-694.
- [51] Watt D J, Dodds P S, Newman M E J. Identity and search in social networks[J]. *Science*, 2002, 296(5571), 1302-1305.
- [52] Broder A, Kumar R, Maghoul F et al. Graph structure in the Web[J]. *Computer Networks*, 2000, 33(1):309-320.
- [53] 王波, 甄峰. 城市实体特征对城市网络空间影响力的作用机制——基于互联网新闻媒体的分析[J]. *地理科学*, 2017, 37(8):1127-1134. [Wang bo, Zhen feng. Impacts of city's characteristics on city's importance in the virtual world: An empirical analysis based on internet news media. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(8):1127-1134.]
- [54] 陈艳华, 韦素琼, 陈松林. 大陆台资跨界生产网络的空间组织模式及其复杂性研究——基于大陆台商千大企业数据[J]. *地理科学*, 2017, 37(10):1517-1526. [Chen Yanhua, Wei Suqiong, Chen Songlin. The spatial organization pattern and its complexity characteristics of cross-border production networks of Taiwan-funded Enterprises in Mainland China: Based on Top 1 000 Taiwan-funded enterprises in mainland China. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(10):1517-1526.]
- [55] Desjardins G, Simonyan K, Pascanu R et al. Natural Neural Networks[J]. *Computer Science*, 2015, 22(8):847-856.

## Urban Medical Network in China Based on Scale-free Network

Zhou Xiaofang<sup>1</sup>, Chan Jian<sup>2</sup>

(1. *School of Tourism Management, South-China Normal University, Guangzhou 510631, Guangdong, China*; 2. *The Institute of International Strategic Studies, Party School of Central Committee of CPC (National Academy of Governance), Beijing 100091, China*)

**Abstract:** According to the characteristic of large amounts of attribute data in urban statistics, this paper uses the scale-free network method to get the networks of urban medical software and hardware in China, which is based on the similarity of changes in medical statistics from 2002 to 2014. After comparing and analyzing the two networks, the conclusions can be drawn: 1) China's urban medical networks are scale-free complex networks with circle cluster structure represented by 20% of high-degree cities. 2) Chinese urban medical hardware networks are more complex and stable than software networks. 3) The structure and function of China's urban medical networks are mainly determined by strong relationship cities, and weakly related cities have no real impact on it. It can be seen that analyzing the urban network by the scale-free network method can find many hidden problems.

**Key words:** scale-free networks; urban medical network; China