

中国城市空间关联网络结构的时空演变

武文杰^{1,2,3}, 董正斌^{4,5}, 张文忠^{1,2}, 金凤君^{1,2}, 马修军⁵, 谢昆青⁵

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 英国伦敦政治经济学院, 伦敦 WC2A 2AE; 4. 北京大学机器感知与智能教育部重点实验室, 北京 100871;

5. 国家开发银行信息科技局, 北京 1000379)

摘要: 使用复杂网络的分析方法, 研究了1983-2006年中国城际航空网络的空间结构特征和格局变迁。主要结论有: ① 城际航空网络作为典型的小世界网络, 网络的稠密化趋势显著; ② “轴—辐”空间组织模式已成为我国城际航空网络发展的基本模式。已形成以北京、上海、广州和深圳为轴心, 以其他城市与轴心的空间联系为“辐网”的多轴心网络。同时, 以乌鲁木齐和昆明为单轴心的两个相对独立的局部“轴—辐”网络日益完善; ③ 城际航空网络演进效果具有明显的区域差异性, 呈现出“鞍型”模式。东部比中西部地区航空的网络结构更加完善; ④ 城际航空网络城市之间的空间关联表现出社群结构特征。枢纽性城市、地域邻近的城市以及城市职能相近的城市之间具有相似的空间关联特征; ⑤ 随着城际航空网络的演进, 35个大中城市在网络中的枢纽性地位表现出差异化趋势。此外, 黄山、丽江等旅游城市、大连、青岛等沿海城市以及拉萨等西部城市航空联系的空间指向性特征明显。

关键词: 空间关联网络; 航空网络; 复杂网络模型; 中国

1 引言

城市间通过不断进行的物质、能量、信息的交换而产生的空间关联网络承载了城市社会经济活动所产生的空间移动和潜在移动。城际航空网络 (Airport Network, AN) 作为一种快速发展的带有复杂性质的城市空间关联网络, 在促进社会经济发展中具有越来越重要的地位^[1-4]。复杂网络模型能够较好的分析和模拟城际航空网络的发展形态与结构演变。因而, 近年来, 基于复杂网络 (Complex Network) 方法对城际航空网络空间组织特征和模式的研究已经成为国际交通规划、交通地理学关注的热点问题^[5-9]。目前, 国外学者已从网络拓扑结构和城际航空网络的动态演变角度对城际航空网络进行了研究: Amaral等^[5]研究了世界城际航空网络 (World Airport Network, WAN) 的性质, 发现WAN是一个小世界网络。Guimera等^[6]得出了同样的结论, 同时他们发现在WAN中, 度数最大的结点并不一定是最中心的结点, 这是由于WAN中存在多个社群。另外, 他们对WAN中的社群进行了识别和研究, 发现WAN的社群结构并不完全取决于地理的因素, 还取决于地理政治的因素。除了对拓扑结构的研究, Barrat等^[7]第一次研究了WAN中权重的性质以及权重对拓扑结构的影响。Guimera等^[8]提出了一个基于地理政治因素的模型来解释WAN的演化和发展。Bagler^[9]研究了印度城际航空网络 (Airport Network in India, ANI), 发现ANI是一个具有指数截断型幂律度分布特征的小世界网络。

目前, 使用复杂网络方法对发展中国家城际航空网络结构特征进行分析的研究仍比较

收稿日期: 2010-07-09; 修订日期: 2010-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971077); 国家自然科学基金重点项目 (40635026) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40971077; Key National Natural Science Foundation of China, No.40635026]

作者简介: 武文杰, 男, 安徽淮北人, 博士研究生, 中国地理学会会员 (S110007092A), 主要研究方向为城市和房地产。

通讯作者: 张文忠, 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 研究员。主要从事城市和区域发展研究。

E-mail: zhangwz@igsrr.ac.cn

缺乏。国内学者对城际航空网络的研究主要侧重于对城际航空网络地理空间的描述和总结,如金凤君等^[10-12]、王姣娥等^[13-14]从经济体制改革、区域发展非均衡性、城际航空网络自身发展的角度探讨了改革开放以来中国城际交通网络的地理形态变化;王法辉等^[15]则对枢纽服务范围、航空地域系统、网络演化等进行了研究。

通过总结以往国内关于城际空间关联网络结构的研究进展,可以发现,目前国内对城际航空网络的研究综合性较强,尽管国内学者尝试进行了结合计量模型的现实分析,但仍缺乏基于长时间序列数据对中国城际航空网络空间组织模式演变规律的系统分析。因此,本文以复杂网络方法和GIS为研究手段,试图通过对我国城市间航线、飞行班次等数据的分析,揭示改革开放以来我国城际航空网络结构的演变特征和规律。

2 数据与模型

2.1 结点与数据

在网络分析中,结点的选择是非常重要的。由于城际航空网络是指由一定地域范围内的城市按航线方式联结而成的网络系统^[10],因而本文选取了有航线连通的城市(包含省会、自治区首府、直辖市和地级市)作为网络中的结点。1978年改革开放后,中国航空运输业得到快速发展。为了客观反映我国城际航空网络结构的时空演变情况,选取了1983年(60个城市)、1993年(82个城市)和2006年(91个城市)的航空统计数据^①作为时间断面进行数据分析。

2.2 复杂网络模型

用一个无向加权网络来表示城际航空网络: $G = \{(V, E, W) | V \text{ 是结点的集合}, E \text{ 是边的集合}, W \text{ 是边的权重集合}; E \subseteq V \times V \times W, \text{ 边 } e = (i, j, w_{ij}) \text{ 连接 } i \text{ 和 } j \text{ 两个结点, 边的权重为 } w_{ij}, \text{ 并且 } i, j \in V, w_{ij} \in W, e \in E\}$ 。城际航空网络中的城市对应网络中的结点。如果两个城市之间有航线,则网络中对应的两个结点之间存在一条边,边的权重为两个城市之间的飞行班次。复杂网络模型的应用研究中,网络的拓扑结构是决定研究对象中产生不同现象的关键。网络的拓扑结构4个基本参数为:度数、直径、聚集系数和中间中心度。

2.2.1 度数与直径 网络中 $N(v)$ 表示结点 v 的邻居结点集合,即与 v 直接相连接的结点集合: $N(v) = \{u | e = (u, v) \in E \& u, v \in V\}$ 。结点 v 的度数是指与该结点直接连接的结点数,用 $d(v)$ 表示,也即集合 $N(v)$ 的规模: $d(v) = |N(v)|$ 。在城际航空网络中,度数大的城市,表明其连接的城市数量较多,被称做“hub”城市^[16]。

直径是网络中所有点对最短路径^②的最大值。在城际航空网络中,直径代表两个城市通过转机方式进行航空飞行时所需要的最大转机次数。

2.2.2 聚集系数 聚集系数用来表征一个网络是否为小世界网络^[17]。网络中结点 v 的聚集系数,用 C_v 表示。计算公式如下:

$$C_v = \frac{2|\bigcup_{i,j \in N(v)} e(i,j)|}{d(v)(d(v)-1)} : e(i,j) \in E \quad (1)$$

式中: $d(v)$ 是结点 v 的度数; $N(v)$ 是结点 v 的邻居结点集合。网络的聚集系数等于所有结点的聚集系数的平均值: $\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i$ 。网络的聚集系数表示了网络的稠密程度,值越

① 本文所涉及的城市主要机场航空段之间的交通流数据均来自各年中国民航总局发布的《中国民航统计年鉴》和《从统计看民航》。

② 网络中的路径被定义为一组结点的序列 $(n_1, \dots, n_k)$,这个序列满足任一结点都和它的前驱结点直接相连,路径的长度是这个结点序列中边的个数。结点对的最短路径是指两个结点之间所有路径长度最短的路径,也叫做测地线。

大，则网络越稠密。

2.2.3 中间中心度 网络结点的中间中心度，用 $C_B(v)$ 表示^[18-19]。公式如下：

$$C_B(v)=\sum_{s,t\in V}\frac{\sigma(s,t|v)}{\sigma(s,t)} \tag{2}$$

式中： $\sigma(s,t)$ 是结点 s 和 t 之间的最短路径个数； $\sigma(s,t|v)$ 是 s 与 t 之间经过结点 v 的最短路径的个数。中间中心度高的结点处于其他结点组的最短路径上，具有掮客 (Broker) 作用^[20]。

3 实证分析

3.1 城际航空网络结构的整体演进

1978年改革开放后，随着中国航空运输业的快速发展，城市间的航线越来越多 (图 1-3)，城际航空网络变得越来越稠密和复杂。本文从以下 4 个方面进行分析：

(1) 城际航空网络具有小世界效应，是一个典型的小世界网络^[17]。中国城际航空网络的直径相对于其网络规模来说较小，且 2006 年与 1983 年相比，网络直径缩短了 20%；另一方面，网络的聚集系数明显大于一般的随机网络^[21]。故而，中国城际航空网络具备了其作为小世界网络的两个基本特征，即网络拥有较小的直径和较大的聚集系数。

(2) 城际航空网络演进呈现出稠密化趋势。2006 年网络的平均度数与 1983 年相比增加了 123.5%，反映出城际航空网络中各城市之间的航线在不断增多，整个网络变得更加稠密。2006 年网络的直径与 1983 年相比缩短了 12.5%，平均聚集系数比 1983 年增加了 42.6%，不仅反映了各城市可以用较短的距离去联系那些曾经是遥远的地方，城市间的航空联系得到加强，而且揭示出城际航空网络具有稠密化发展态势，空间系统得到整体优化。

(3) 城际航空网络结构具有明显的“长尾分布”特征^[22]。1983 年、1993 年和 2006 年城际航空网络的度数分布均符合长尾分布，并具有明显的右倾趋势 (图 4a)。这表明中国城际

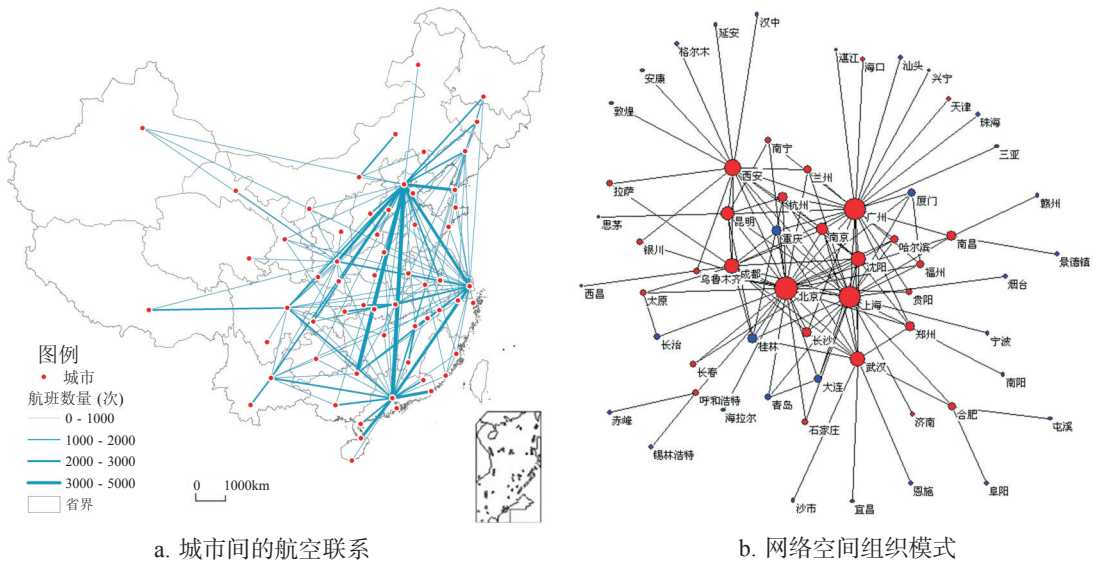


图 1 1983 年中国城际航空网络结构

Fig. 1 The structure of the aviation network of China in 1983

③ 图 1b、图 2b、图 3b 中红点表示直辖市和省会城市，蓝点表示非省会城市，结点的大小与其度数成正比关系。

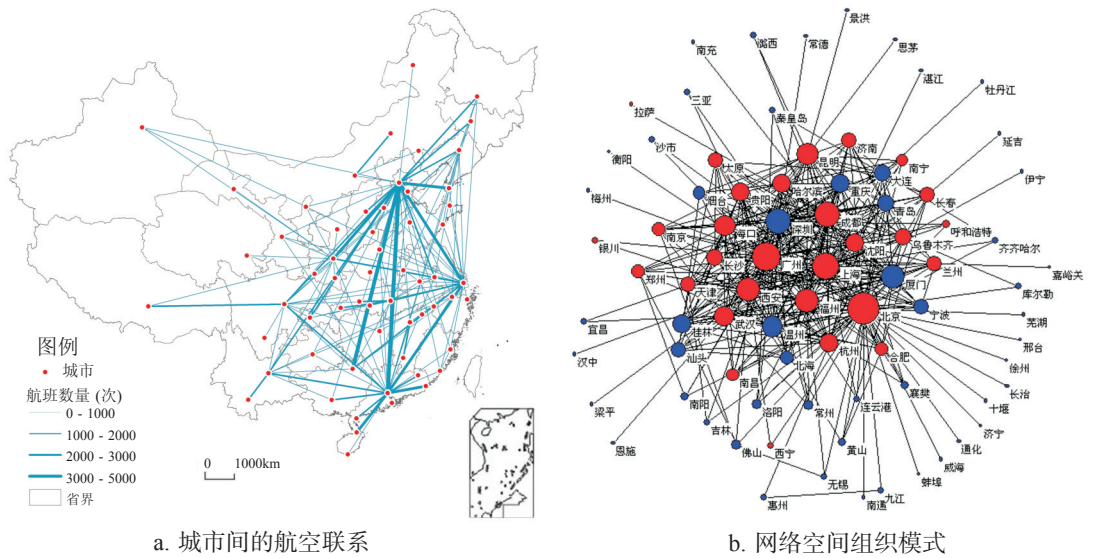


图 2 1993 年中国城际航空网络结构

Fig. 2 The structure of the aviation network of China in 1993

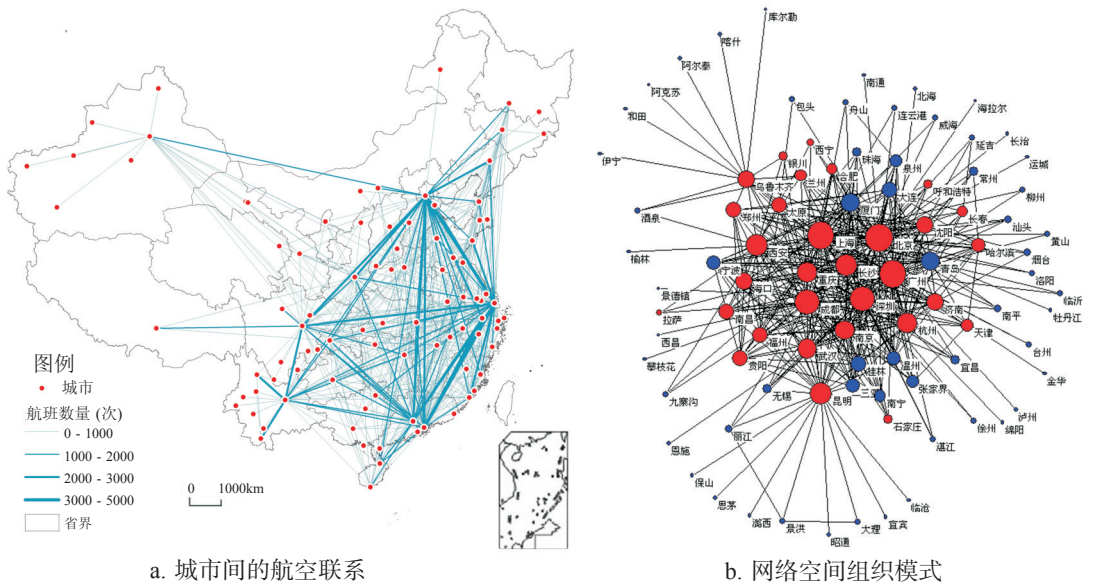


图 3 2006 年中国城际航空网络结构

Fig. 3 The structure of the aviation network of China in 2006

航空网络中大多数城市的度数很小，位于网络的边缘地位，少数城市的度数很大，位于网络的中心地位；同时，1983 年、1993 年和 2006 年网络的聚集系数分布亦符合长尾分布，但具有左倾趋势 (图 4b)，表明城际航空网络中城市数量与聚集系数大小呈正比关系。这种网络的“长尾分布”特征揭示出中国城际航空网络是以少数大城市为核心，城市间具有紧密关联特征的复杂网络。

(4) “轴—辐” (Hub-Spoke System) 网络空间组织模式逐步形成和完善。在改革开放初期，中国城际航空网络中的城市数量较少，空间组织模式主要以“城市对”和“城市串”相互交错的形式出现^[23]。随着城际航空网络中城市数量和航班线路的增加，城际航空

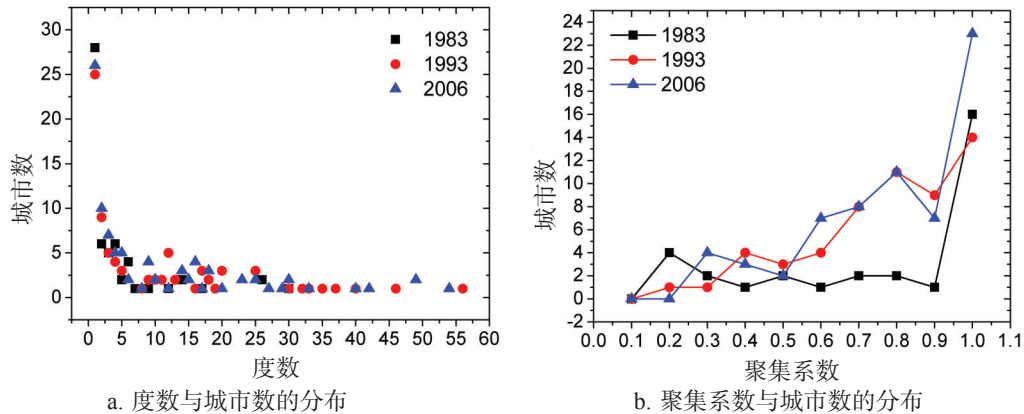


图4 城市数与度数、聚集系数的分布

Fig. 4 The distribution of the number of nodes v.s. degree & clustering coefficient

网络联系更为紧密和复杂，在全国范围内形成了以北京、上海、广州、深圳等城市为轴心，层级关系复杂的“轴—辐”网络空间组织模式(图3)，并在新疆、云南等局部范围内形成了以乌鲁木齐、昆明为单一轴心的“轴—辐”网络空间组织模式。这种城际航空网络的空间组织模式通过轴心城市联结其他城市，提高城际航空网络的覆盖能力和通达性，提高航班频率，从而降低运输成本或提高运输效率，是发达城际航空网络形成的标志之一。

3.2 城际航空网络结构的区域性特征

3.2.1 3大区域在城际航空网络演变中的时空特征 选取城际航空网络演进过程中各城市度数、中间中心度、聚集系数这3个指标值^④，按照东部、中部和西部3大区域^⑤进行分类统计，并将其度数、中间中心度和聚集系数的平均值分别与全国平均值相比，以此来衡量各区域在网络演进中的地位和作用变化情况。

从图中可以看出(图5)，3大区域在网络演进过程中的空间受益分配不均衡，东部和西部地区的城际航空网络发展较快，而中部地区发展相对滞后，呈现出“鞍型”发展模式，具体表现以下3个方面：

(1) 3大区域的平均度数差异明显。区域的平均度数越大，说明该区域内城市的平均航线数量越多，区域内城市的航空运输能力相对越强；东部地区的平均度数是全国平均值的1.2倍左右，且1983-2006年的变化相对稳定(图5a)；而与全国平均水平相比，中部地区的平均度数呈现快速下降趋势。此外，西部地区城际航空网络有着较快的发展，平均度数呈现出稳定上升态势。

(2) 东部地区的平均中间中心度明显大于中西部地区。平均中间中心度能够充分反映出不同区域在城际航空网络中的枢纽性作用。从图5b可以看出，在1983-2006年间，东部地区的平均中间中心度是全国平均值的1.3倍左右，并保持了稳定的发展态势；2006年西部地区城际航空网络的平均中间中心度(0.98)本与全国平均水平一致，与1983年相比增长了近1倍，呈现快速增长趋势。而中部地区的平均中间中心度下降幅度明显(从1983年的0.82降至2006年的0.36左右)。由此看来，整个城际航空网络组织服务能力的提升，主要是由于东部、西部地区城际航空网络的稳定发展和完善，中部地区城际航空网络发展较慢，成为城际航空网络演进过程中的相对最小受益者。

④ 将1983年、1993年和2006年网络结点的度数、中间中心度、聚集系数分别进行归一化，使得不同年份的指标之间具有可比性。

⑤ 中东部地区包括黑龙江、吉林、辽宁、河北、山东、江苏、浙江、北京、天津、上海、福建、广东、海南；中部地区包括山西、安徽、江西、河南、湖北、湖南；西部地区包括重庆、四川、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广西、内蒙古。

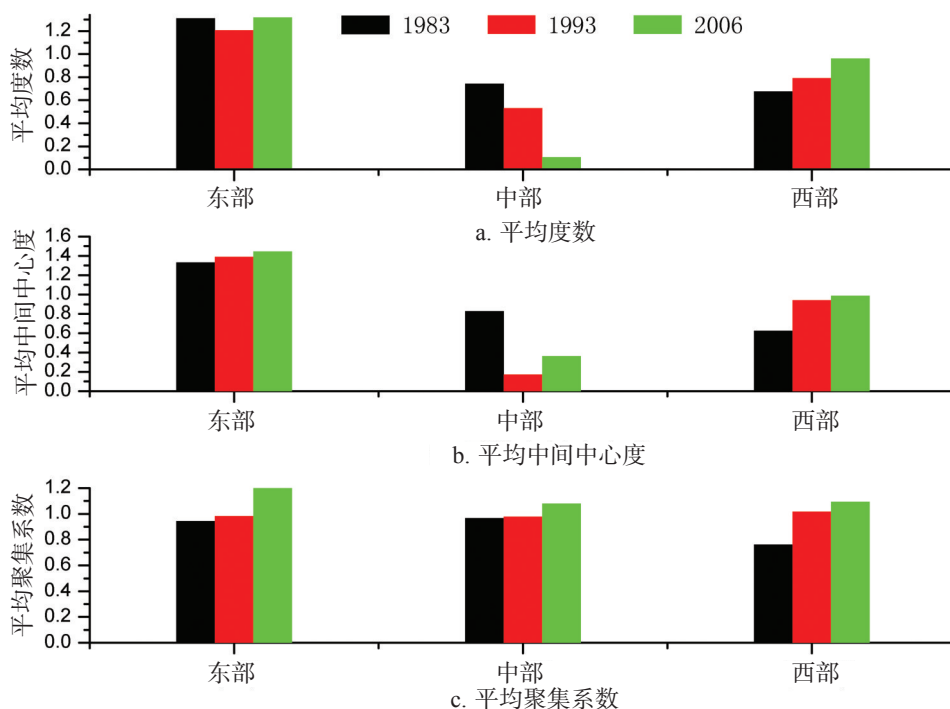


图5 大区域城际航空网络结构特征

Fig. 5 Regional air network structure features

(3) 东部、西部地区城际航空网络的稠密性优于中部地区。平均聚集系数越大,说明该区域内城际航空网络越稠密,区域内部城际航空网络越发达。从图5c可以看出,三大区域的平均聚集系数均呈现上升趋势。东部、西部地区的增长态势较为显著(东部地区增长31.5%,西部地区增长43.6%),而中部地区平均聚集系数呈现相对稳定的增长趋势(增长幅度为11.7%),这表明三大区域城际航空网络均表现出越来越稠密的特性。但东部、西部的城际航空网络相对于中部地区具有更为明显的稠密化趋势。

3.2.2 航空网络的社群结构特征 网络社群是指网络的一组结点,这些结点与组内结点之间的相似度较高,而与组外的其他结点相似度较低。社群识别本质上属于网络的聚类问题。因而,本文采用基于相似性度量的K-means聚类方法^[24],根据不同城市的邻居结点集合之间的相似性来刻画两个城市之间的相似性,即两个城市飞行航班的目的地相同的越多,则两个城市越相似。社群集合的相似性用Jaccard系数^[25]进行计算。城市间相似度的计算公式为:

$$Sim(u, v) = Jaccard(N(u), N(v)) = \frac{N(u) \cap N(v)}{N(u) \cup N(v)} \quad (3)$$

式中: u 和 v 代表两个城市结点; $N(v)$, $N(u)$ 为 v 和 u 的邻居结点集合。

为了便于分析,选取2006年城际航空网络中,度数大于10的城市进行聚类(表1),从而得到城市间的社群结构具有以下特征:

(1) 重要的枢纽性城市呈现出明显的空间关联相似性。随着城际航空网络的发展和完善,北京、上海、广州和深圳等城际航空网络中最为重要的枢纽性城市,连接了几乎整个城际航空网络中的其他城市,因而其空间关联具有明显的相似性。

(2) 地域邻近城市间的航空联系相似度较高。西安、兰州、乌鲁木齐、昆明等西部航空枢纽性城市之间存在较强的相似度,郑州、太原、武汉、长沙等中部航空枢纽性城市具

有明显的相似性，南京、杭州、福州等东部航空枢纽性城市之间也构成一个社群集合。哈尔滨、沈阳、长春等东北地区的主要城市飞行线路也具有一定的相似性特征，但城际航空网络的稠密化趋势使得这种带有明显地域性特征的社群集合弱化。华北与东北地区重要空港城市之间的相似度增强。同时，张家界、晋江等新兴空港城市在网络中地位的提升也打破了原有城市之间相似性的地域分异格局。

得这种带有明显地域性特征的社群集合弱化。华北与东北地区重要空港城市之间的相似度增强。同时，张家界、晋江等新兴空港城市在网络中地位的提升也打破了原有城市之间相似性的地域分异格局。

(3) 职能相似的城市亦具有一定的社群结构特征。桂林、三亚、张家界等旅游性城市，以及温州、晋江等改革开放后新兴的商贸城市均呈现出显著的城市间航空联系相似性，形成了具有城市职能相似性特征的城市“社群”。

3.3 重点城市分析

北京、上海、广州、深圳等城市作为重要的交通枢纽城市，同时又是全国或地区性的经济集聚中心，在中国城际航空网络演变过程中具有重要作用。此外，在城际航空网络的快速发展过程中，一些城市的空间关联表现出较强的空间指向性，具有特质性。本小节着重对枢纽性城市和特质性城市进行分析。

3.3.1 枢纽性城市 选取各城市度数、中间中心度的变化幅度以及度数与中间中心度、聚集系数的变化关系这几个指标值来衡量城市在网络演变中的地位变化特征和规律。体现以下3个方面(图6)：

(1) 枢纽性城市连接了网络中绝大多数城市并表现出较强的掇客作用。由于度数较大的“hub”城市总是与很多度数较小的城市相连，因而度数大的城市聚集系数较小(图6a)。度数与中间中心度(图6b)的分布关系则表明，在中国城际航空网络中，度数高的城市往往中间中心度也比较高，两者呈现正比关系。这反映出枢纽性城市不仅连接了网络中的其他城市，而且掇客作用也较为明显。

(2) 北京、上海、广州等城市一直以来作为我国城际航空网络最重要的“hub”结点，

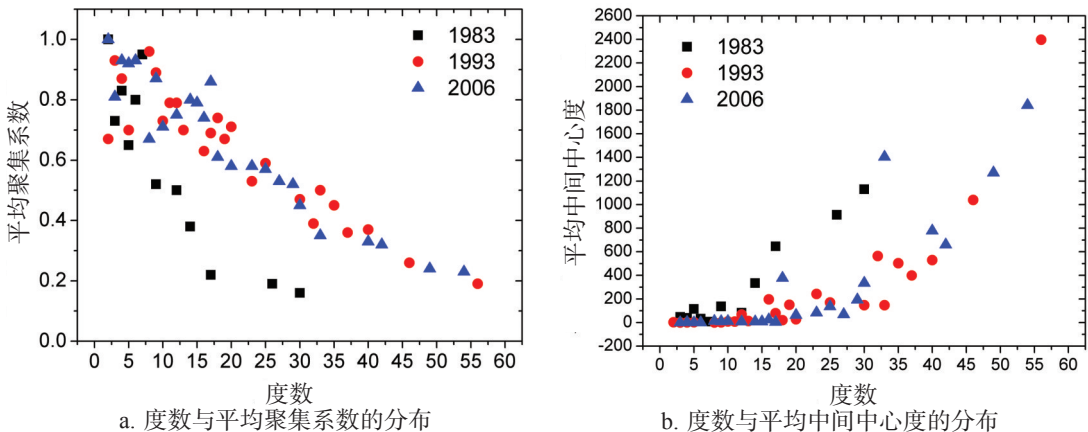


图6 度数和平均聚集系数与平均中间中心度的分布^⑥

Fig. 6 The distribution of degree v.s. average clustering coefficient and average betweenness

⑥ 图6中，平均聚集系数和平均中间中心度，分别是指具有相同度数城市的聚集系数和中间中心度的平均值。

表 2 1983–2006 年主要城市中间中心度与度数的变化分类表

Tab. 2 Classification of major cities by the change of degree and betweenness centrality from 1983 to 2006

		中间中心度	
		变化幅度大于平均值	变化幅度小于平均值
度数	变化幅度	北京、上海、广州、成都、	沈阳、重庆、长沙、武汉、厦门、青岛、杭州、南京
	大于平均值	西安、深圳	
	变化幅度	昆明、乌鲁木齐	合肥、呼和浩特、无锡、三亚、天津、贵阳、福州、哈尔滨、桂林、
	小于平均值		郑州、大连、宁波、海口、济南、太原、长春、南昌、兰州、温州

位于网络的中心位置 (图 1b、图 2b、图 3b), 在连接整个网络孤立结点中具有重要的枢纽性作用。同时, 由于中国城市间社会经济发展水平的不均衡, 一些城市在网络中的枢纽性地位也在发生着变化。1983-2006 年深圳等城市在网络中的地位发生了变化, 由原来的边缘结点成长为中国城际航空网络中重要的“hub”结点, 而兰州等原先“hub”结点在网络中的位置正逐步被边缘化 (图 3b)。

(3) 选取 1983-2006 年中间中心度和度数变化幅度排名前 35 位的城市, 计算其变化幅度与全国平均变化幅度的比值, 将被评价的城市分为 4 类 (表 2)。

① 中间中心度变化幅度大于平均值且度数的变化幅度也高于平均幅度的城市, 这类城市连接了城际航空网络中绝大多数城市, 并且对这些城市具有掇客 (Broker) 作用。这一类城市属于城际航空网络最为重要的枢纽性城市, 主要包括北京、上海、广州、深圳、成都和西安。在网络整体演进过程中它们的枢纽性地位愈发明显。

② 中间中心度变化幅度小于平均值但度数的变化幅度高于平均幅度的城市。这类城市虽然连接了较多的城市, 但它们对这些城市不具有掇客作用。这类城市属于整个网络的次级枢纽性城市, 主要是位于东部和中部地区的省会城市和一些副省级城市。城际航空网络结构的演变对其交通区位的改善亦较为明显。

③ 中间中心度变化幅度大于平均值但度数的变化幅度低于平均幅度的城市。这类城市虽然没有连接太多新建立机场的城市, 但是它们的掇客作用非常明显。这类城市属于局部网络的枢纽性城市。主要是位于西部地区的昆明和乌鲁木齐。虽然它们所连接的城市数量增长幅度低于平均值, 但昆明、乌鲁木齐在其所在的局部网络中的枢纽性地位愈发显著。

④ 中间中心度变化幅度小于平均值且度数的变化幅度低于平均幅度的城市。这类城市所连接的城市数量增长幅度较低, 且掇客作用也不明显。主要是位于华中、华南和东北地区的一些大中城市。这类城市的枢纽性地位在网络演变过程中有所下降。

3.3.2 特质性城市 一些城市在网络演进过程中表现出明显的“分异”特征, 即在特定时期内, 这些城市与某些枢纽性城市具有较强的空间联系, 而与其他城市的空间关联非常弱, 呈现出较为显著的空间指向性。本文选取分异系数^[26]来对这些城市的分异特征进行评价。分异系数的计算公式为:

$$Y(v)=\sum_{j\in N(v)}\left[\frac{w_{vj}}{s_v}\right]^2 \tag{4}$$

式中: $Y(v)$ 表示结点 v 的分异系数, s_v 为结点 v 的强度^⑦, $N(v)$ 为结点 v 的邻居结点集合, w_{ij} 为边的权重。这里, 作者选取 1983 年、1993 年和 2006 年城际航空网络中分异系数大于 0.5 且度数大于 2 的结点进行了分析。

从表 3 中可以看出, 在城际航空网络演进过程中, 分异特征明显的城市具有以下空间关联特征:

(1) 新兴旅游城市的空间指向性明显。1983-2006 年, 黄山、九寨沟、西双版纳、丽江等城市因旅游业而兴起, 并通过机场的建立推动了当地旅游业快速发展。如黄山机场设立

⑦ 强度 (s_v) 是对结点数的一种加权扩展。计算公式为: $s_v = \sum_{j\in N(v)} w_{vj}$

表 3 1983–2006 年分异特征明显的城市
Tab. 3 Cities with clear disparity characteristics from 1983 to 2006

1983 年			1993 年			2006 年		
特质性城市	Disparity 系数	主要连接城市	特质性城市	Disparity 系数	主要连接城市	特质性城市	Disparity 系数	主要连接城市
大连	0.884	北京	呼和浩特	0.539	北京	九寨沟	0.753	成都
青岛	0.724	北京	黄山	0.503	北京	西双版纳	0.723	昆明
南宁	0.615	广州				拉萨	0.614	成都
兰州	0.521	北京				丽江	0.539	昆明
厦门	0.517	上海						

初期，最多的航班是与北京相联系，具有较强的空间指向性，而 2006 年，九寨沟、西双版纳、丽江等新建机场航空运输联系的空间指向性也较为明显。

(2) 对外开放较早的沿海城市具有较为显著的空间分异特征。青岛、大连、厦门等城市作为我国首批沿海开放性城市，在改革开放初期，这些城市在城际航空网络中主要是与北京、上海等轴心枢纽城市相联系，而与其他城市的航空联系极少，呈现出显著的空间指向性。随着这些城市社会经济的发展，它们与其他城市航空运输联系不断增加，这种分异性特征已逐步弱化。

(3) 一些西部城市的空间分异特征较为明显。1983 年网络中的兰州、南宁，1993 年网络中的呼和浩特和 2006 年网络中的拉萨分异系数均大于 0.5，揭示出在一定时期内这些西部省会城市的航空运输联系指向性明显，空间分异特征明显，与之存在航空联系的城市非常欠缺。

4 结论与讨论

本文采用 1983-2006 年的航空统计数据，基于复杂网络模型，分析了中国城际航空网络结构特征，得到以下结论：

(1) 中国城际航空网络结构呈现出明显的小世界效应、稠密化趋势和“长尾分布特征”。这反映出改革开放以来，随着航空机场等基础设施的建设，中国城际航空网络规模得到快速扩展，城市之间的航空运输联系越来越紧密。

(2) “轴—辐”网络 (Hub-Spoke System) 空间组织模式逐步完善。以 1983-2006 年间城际航空网络的演进过程来看，北京、上海、广州和深圳是中国城际航空网络中的一级枢纽城市，以其为核心形成了 3 个“轴—辐”地域系统。昆明和乌鲁木齐是两个局部的航空枢纽，在连接云南、新疆地区内部城市中具有枢纽作用。

(3) 城际航空网络的发展存在较为明显的区域性差异，呈现出“鞍型”模式。东部地区的城际航空网络比中西部地区更加完善，西部地区城际航空网络在发展潜力、发展速度方面优于中部地区，这可能是由于其区位、经济发展水平以及航空运输业的自身特征等因素共同决定的。此外，城际航空网络结点之间表现出明显的社群结构特征，这种复杂关联特征对整个城际航空网络结构的形成和演化亦具有重要影响。

(4) 枢纽性城市对于城际航空网络结构的构筑和完善具有支撑性作用。在中国城际航空网络演变过程中，不同枢纽性城市在网络中的地位变化具有差异性。一些特质性城市的空间分异特征从一个侧面反映了网络内部各城市之间空间关联的不均衡性。

总之，基于城际航班、航线等航空流数据的城际航空网络结构演化在一定程度上反映了城市之间的空间关联特征，其关联所形成的地域体系，一方面表明了各个城市在整个网络中的地位和作用，另一方面也反映出在高速交通网络支撑下社会经济活动在自然空间中的扩散与极化过程^[27-29]。中国城际航空网络目前仍处于成长阶段^[30]，未来的发展重点不仅在城际航空网络的规模扩展上，而应在优化网络结构上，即如何完善网络等级的结构，构建高效合理的、有层次性的城际航空网络。当然，本文的分析主要是以城际航空网络的拓

扑结构为主,对网络的加权性质研究相对较少,今后将从城际航空网络的客货运量等权重信息对城际航空网络结构特征进行更加深入的分析研究。

参考文献 (References)

- [1] Burghouwt B, Hakfoort G. The evolution of the European aviation network, 1990-1998. *Journal of Air Transport Management*, 2001, (7): 311-318.
- [2] Fleming D K, Hayuth Y. Spatial characteristics of transportation hubs: Centrality and intermediacy. *Journal of Transport Geography*, 1994, 2(3): 3-18.
- [3] Goetz A R. Deregulation, competition and antitrust implications in the US airline industry. *Journal of Transport Geography*, 2002, 10(1): 1-19.
- [4] Vowles T M. The geographic effects of US airline alliances. *Journal of Transport Geography*, 2000, 8(4): 277-285.
- [5] Amaral L A N, Scala A, Barthelemy M. Classes of small-world networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2000, 97: 11149-11152.
- [6] Guimera R, Mossa S, Turtshi A. The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2005, 102: 7794-7799.
- [7] Barrat A, Barthelemy M, Pastor-Satorras R. The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2004, 101: 3747-3752.
- [8] Guimera R, Amaral L A N. Modeling the world-wide airport network. *The European Physical Journal B*, 2004, 38: 381-385.
- [9] Bagler G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network. *Physica A*, 2008, 387: 2972-2980.
- [10] Jin Fengjun. A study on network of domestic air passenger flow in China. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 31-39. [金凤君. 我国航空客流网络发展及其地域系统研究. *地理研究*, 2001, 20(1): 31-39.]
- [11] Jin Fengjun, Wang Fahui, Liu Yi. Geographic pattern of air passenger transport in China 1980-1998: Imprints of economic growth, regional inequality, and network development. *The Professional Geographer*, 2004, 56(4): 471-487.
- [12] Jin Fengjun, Wu Wenjie. The spatial economic impact of upgrade of railway passenger traffic system in China. *Economic Geography*, 2007, 27(6): 888-895. [金凤君, 武文杰. 中国铁路客运系统提速的空间经济影响. *经济地理*, 2007, 27(6): 888-895.]
- [13] Wang Jiao'e, Mo Huihui, Jin Fengjun. Spatial pattern of the worldwide airports and its enlightenment. *World Regional Studies*, 2008, 17(3): 8-18. [王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 世界机场空间格局及对中国的启示. *世界地理研究*, 2008, 17(3): 8-18.]
- [14] Wang Jiao'e, Jin Fengjun, Sun Wei et al. Research on spatial distribution and service level of Chinese airport system. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 829-838. [王姣娥, 金凤君, 孙炜 等. 中国机场体系的空间格局及其服务水平. *地理学报*, 2006, 61(8): 829-838.]
- [15] Wang Fahui, Jin Fengjun, Zeng Guang. Geographic patterns of air passenger transport in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(5): 519-526. [王法辉, 金凤君, 曾光. 中国航空客运网络的空间演化模式研究. *地理科学*, 2003, 23(5): 519-526.]
- [16] O'Kelly M. Geography's analysis of hub-and-spoke networks. *Journal of Transport Geography*, 1998, 6(3): 171-186.
- [17] Watts D J, Steven S. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 1998, 393: 440-442.
- [18] Graham B. *Geography and Air Transport*. Chichester: John Wiley & Sons, 1995.
- [19] Freeman L C. A set of measures of centrality based upon betweenness. *Sociometry*, 1977, 40: 35-41.
- [20] Barthelemy M, Barrat A, Pastor-Satorras R. Characterization and modelling of weighted networks. *Physica A*, 2005, 346: 34-43.
- [21] Erdos P, Renyi A. On random graphs. *Publ. Math. (Debrecen)*, 1959, 6: 290-297.
- [22] Asmussen Søren. *Applied Probability and Queues*. Berlin: Springer, 2003.
- [23] Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub and spoke system and China aviation network organization. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 775-784. [金凤君, 王成金. 轴—辐侍服务理念下的中国航空网络模式构筑. *地理研究*, 2005, 24(5): 775-784.]
- [24] Hartigan J A, Wong M A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Applied Statistics*, 1979, 28(1): 100-108.
- [25] Pang-Ning T, Michael S, Vipin K. *Introduction to Data Mining*. Boston: Addison-Wesley, 2005.
- [26] Borgatti S P, Everett M G. A graph-theoretic perspective on centrality. *Social Networks*, 2006, 28: 466-484.
- [27] Pannell C W. China's continuing urban transition. *Environment and Planning A*, 2002, 34(9): 1571-1589.
- [28] Shaw S L, Ivy R L. Airline mergers and their effect on network structure. *Journal of Transport Geography*, 1994, 2(4): 234-246.
- [29] Dai Teqi, Jin Fengjun, Wang Jiao'e. Spatial interaction and network structure evolvement of cities in terms of China's railway passenger flow in 1990s. *Progress in Geography*, 2005, 24(2): 80-89. [戴特奇, 金凤君, 王姣娥. 空间相互作用

与城市关联网络演进: 以我国 20 世纪 90 年代城际铁路客流为例. 地理科学进展, 2005, 24(2): 80-89.]

- [30] Peng Yubing. A probing study on developing the hub-and-spoke air networks in China. Journal of Civil Aviation University of China, 2000, 18(5): 1-8. [彭语冰. 关于在中国发展中枢辐射航线的探讨. 中国民航学院学报, 2000, 18(5): 1-8.]

Spatio-temporal Evolution of the China's Inter-urban Organization Network Structure: Based on Aviation Data from 1983 to 2006

WU Wenjie^{1,2,3}, DONG Zhengbin^{4,5}, ZHANG Wenzhong^{1,2},
JIN Fengjun^{1,2}, MA Xiujun⁵, XIE Kunqing⁵

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

2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. London School of Economics and Political Science, London WC2A 2AE, UK;

4. Key Laboratory of Machine Perception, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China;

5. Bureau of Information and Technology, China Development Bank, Beijing, 100037)

Abstract: Spatial-temporal distribution pattern of inter-urban organization network and its interaction process with aviation development has always been a hot issue in regional economy and transport geography. Civil aviation is the fastest growing travel mode in China. Nonetheless, research on this issue have been limited by the lack of systematic data--especially spatial data--as well as other related data sources, and by the limitation of the quantitative methods in exploring the organization and efficiency of the inter-urban organization network in transitional China. This paper is a general process evaluation and actual description of the spatio-temporal structural characteristics of the Inter-urban Aviation Network in China (IANC) from 1983 to 2006 based on complex network methods. The conclusions can be drawn as follows. 1) The IANC exhibits the densification trends featured by a small-world network. 2) It follows the "hub-and-spoke" network organization model. Beijing, Shanghai, Guangzhou, and Shenzhen act as the multi-hubs, and the spatial connections among them act as the spokes. Urumqi and Kunming are particularly important local hubs; around them have formed two relatively independent local hub-and-spoke networks. 3) A "saddle-type" model has formed in the evolution of the IANC. Specifically, the structures of the eastern and western regions' aviation networks are better formed than that of the central region. 4) The cities in the IANC show a "community network" effect. To be more specific, hub cities, geographical neighboring cities, and cities with similar urban functions have similar urban spatial interaction characteristics. 5) The hub status of 35 important cities in the network varied with the development of the IANC. Moreover, there are great spatial disparities among tourist cities such as Huangshan and Lijiang, coastal cities such as Dalian and Qingdao, and western cities such as Lhasa.

Key words: aviation network; network structure; complex network; China