

海航航空网络空间复杂性及演化研究

焦敬娟^{1,2}, 王姣娥¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着民航业市场改革的推进, 航空企业逐渐成为影响我国航空网络最为活跃的主体。海航航空是我国最大的股份制航空企业, 其网络的空间结构和演化具有一定的典型性。因此, 本文以海航航空为例, 采用拓扑网络和复杂网络的相关指标, 分析海航航空网络的空间结构及其演化特征。研究发现: 海航航空网络仍处在不断的发展中, 并逐渐呈现出小世界和无标度的特征; 节点的中心性间具有较高的相关性, 且介中心性位序-规模的变化速率要明显快于度中心性和邻近中心性; 网络的中心性处于下降趋势, 即网络内部节点的差异逐步减小; 海航航空的枢纽选择从地方逐渐扩展到全国, 并已基本形成了以北京、西安和海口为核心的网络结构, 而其他层级结构尚不明显。

关键词: 海航航空; 网络结构; 中心性

DOI: 10.11821/dlyj201405011

1 前言

对地理现象空间结构的探讨一直是人文地理学研究的热点。目前, 较为成熟的空间分布结构模式主要有增长极、点轴理论、核心—边缘结构、圈层结构理论、网络结构等^[1]。这些理论模式多从定性的角度进行分析, 从定量角度分析相对较少。从定量的角度对地理现象空间结构进行评判成为当前研究的热点。航空运输地理学作为人文地理学的重要分支学科和交通运输地理学的重要组成部分, 对其空间结构的研究具有十分重要的意义^[2]。目前, 国内外对于航空网络空间结构的研究主要是集中在探讨航空网络的轴-辐模式^[3-10]和复杂网络特征^[11-15]。航空运输管理的自由化, 促使航空机场空间布局的“轴辐”模式的发展。1987年, O'Kelly以1970年美国民用航空局公布的25个城市之间的航空乘客数据, 结合“轴辐”模式, 对美国航空网络空间模式进行探讨^[3-4]。2001年, 国内学者金凤君等首次运用轴辐网络模式对中国航空网络的空间结构进行分析^[10]。目前, 国内外对“轴辐”模式的研究主要集中在轴辐网络的竞争优势、空间等级结构、空间组织模式等方面的研究^[3-10, 16-20]。复杂网络对航空网络可达性服务水平、直接交流能力和控制网络交流能力等方面的研究, 为航空运输地理学的研究提供了新的研究视角^[23]。国内学者莫辉辉等在系统介绍复杂网络在交通运输地理学中的应用的基础上^[21], 探讨了中国航空体系中心性空间分布特征^[22]; 王姣娥利用复杂网络相关指标系统地评价了我国航空客运网络空间复杂性^[14], 等等。但这些研究多是基于对不同区域范围内航空网络的研究, 并没有考虑到企业行为对航空网络空间结构和空间组织模式的影响。为此, 本文将以海南航空股份有限公司(下文简称为海航)为例, 采用复杂理论的相关评价指标, 探讨企业行为对航空网络空间结构的影响。

收稿日期: 2013-05-30; 修订日期: 2013-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371143, 41001082); 中科院地理资源所兼维优秀青年人才基金项目(2011RC201)

作者简介: 焦敬娟(1988-), 女, 河南安阳市人, 博士生, 研究方向是交通运输地理与区域发展。

E-mail: jiaojj.11s@igsnr.ac.cn

通讯作者: 王姣娥(1981-), 女, 湖南涟源人, 副研究员, 研究方向为交通运输地理与区域发展。

E-mail: wangje@igsnr.ac.cn

2 研究方法和研究对象

2.1 研究方法

目前,国内外对网络结构的评价主要采用图论和复杂网络所包含的相关评价指标。其中,图论多是针对规则网络和随机网络进行分析和评价,而复杂网络则多侧重于小世界网络和无标度网络。本文主要采用图论的相关评价指标,对航空网络的拓扑结构进行评价;采用复杂网络的相关指标对海航航空网络的小世界、无标度和中心性等进行评价分析。

2.1.1 网络拓扑结构评价 航空网络的拓扑结构可以用于反映网络的发育程度和演化特征,评价网络的结构效率。常见的评价指标有环路数、成环率、结合度、连接率等。

①环路数 μ :表示网络中存在的环路个数。其值越大,表示网络越发达,网络冗余性也越大。计算公式:

$$\mu = m - n + g \quad (1)$$

式中: m 表示航线数量, n 表示节点数量, g 表示不连通的子图的个数,通常取值为1。

②成环率 α :表示环路数与最大可能环路数的比值,反映成环的水平,一定程度上体现了网络的复杂程度。航空网络的成环率计算公式为:

$$\alpha = 2(m - n + 1) / [(n - 1)(n - 2)] \quad (2)$$

③结合度 γ :指网络中的实际连线数与最大可能连线数的比率,常用于分析网络的内聚性或紧密程度。航空网络的结合度计算公式为:

$$\gamma = 2m / [n(n - 1)] \quad (3)$$

④连接率 β :也称线点率,表示每个节点的平均连接线路数(边数)。其计算式为:

$$\beta = m / n \quad (4)$$

2.1.2 网络结构模型判定 网络结构模型可以反映网络整体连接的模式。学者一般用度分布形态对无标度网络进行界定,采用平均最短路径和簇系数对小世界模型进行标度。

①度及度分布:节点的度 k_i 是指该节点衔接边的数目。网络所有节点的度平均值称为网络的平均度,记为 $\langle k \rangle$ 。网络中节点的度分布情况用概率分布函数 $p(k)$ 和累计概率分布函数 $P(k)$ 表示。当 $p(k)$ 和 $P(k)$ 为幂函数时,称其结构具有“无标度”性质^[2]。其中:

$$P(k) = \sum_{k=k}^{\infty} p(k) \quad (5)$$

研究表明完全随机网络的 $p(k)$ 具有近似的泊松分布,不少研究将现实网络的拓扑结构归结为具有幂率分布特征 $p(k) \propto k^{-\lambda}$ ($2 \leq \lambda \leq 3$) 的“无标度”网络^[24]。度中心性用节点度的大小进行衡量,直观反映了该节点与网络中其他节点发生直接联系的可能性大小^[24]。

②平均路径长度:航空网络中最短路径长度 d_{ij} 表示任意两个节点之间最短路径的边数,直接反映航空网络的连通性。网络的平均路径长度 L 定义为任意两个节点之间的距离的平均值^[24],常用来反映网络整体可达性强弱。即

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}n(n-1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (6)$$

③簇系数 C_i :定义为一个节点与其所有邻接点之间连边的数目与可能的最大连接边的数目的比值,用以反映网络节点集聚情况的参数^[24]。对于节点 v_i ,其邻节点集合 N_i 中实际存在边的数量为

$$E_i = \sum_{v_j, v_k, v_n \in N_i} e_{jk} e_{kh} \quad (7)$$

则节点 v_i 的簇系数为:

$$C_i = \frac{E_i}{k_i(k_i - 1)/2} \quad (8)$$

C_i 值越大,表示与该节点直接相连的其它节点(即该节点的周边节点)之间相互联系越紧密。定义度为0和1的节点的簇系数为0,网络的簇系数 C 定义为所有节点簇系数的平均值,即

$$C = \frac{1}{n} \sum_{v_i \in V} C_i \quad (9)$$

C 值越大,表示整个网络中各节点之间形成短距离联系的程度越大。

2.1.3 节点中心性分析 中心性可以反映节点在网络中的重要性。中心性的测量指标主要包括度中心性、介中心性、邻近中心性、网络流中心性、特征向量中心性和子图中心性等。本文将采用度中心性、邻近中心性和介中心性分别探讨海航航空网络节点直接可达性、相对可达性和中转、衔接功能等。

(1) 度及度中心性

度中心性用节点度的大小进行衡量,可以直观反映该节点与网络中其他节点发生直接联系的可能性大小^[24]。节点的度中心性值越大,则与其他节点联系的可能性越大。公式为:

$$DC_i = \frac{1}{n-1} k_i \quad (10)$$

(2) 邻近中心性

邻近中心性用给定节点到所有节点的最短距离和的大小衡量,反映该节点在网络中的相对可达性大小^[24]。公式为:

$$CC_i = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^n d_{ij} \right]^{-1} \quad (11)$$

(3) 介中心性

介中心性用所有节点对间的最短路径经过给定节点的次数和衡量,反映节点在网络中的中转和衔接功能^[24]。公式为:

$$BC_k = \frac{2}{n^2 - 3n + 2} \sum_{i=1, j \neq k}^n \sum_{j \neq k}^n \frac{\delta_{ij}^k}{\delta_{ij}} \quad (12)$$

式中: δ_{ij}^k 表示从节点 v_i 到节点 v_j 的最短路径 d_{ij} 的总条数。 BC_k 值越大,节点介中心性越强。介中心性在一定程度上,可以反映“轴辐”结构中轴心作用的强弱,并对其进行较为合理的划分。

2.2 研究对象

本文以海航航空为研究对象。1993年,海南航空以海口为基地正式投入运营,这是国内首家采纳股份制的航空公司。2002年海南航空新华航空、长安航空及山西航空等合并组成海航合并四家,并统一使用“HU”航空代码。到2004年海航合并四家的航空网络已经基本上趋于稳定。自2006年,海航航空又先后合并了多家航空公司,如祥鹏航空(2006年)、香港航空(2006年)、大华航空(2007年)、西部航空(2007年)、天津航空(2009年)和首都航空(2010年)。到2012年,海航航空网络已经基本上趋于稳定。2004年和2012年分别代表了海航航空发展的不同阶段,可以很好的反映海航在重组过程中,航空网络结构演化的特征。为此,本文以2004年(10月31日-2005年3月26日)和2012年(3月25日-10月27日)海航官方网站上公布的航班时刻表为数据来源,以通航城市作为节点,对于拥有两个及以上机场的城市,将其数据进行合并。对于经停航线A-B-C,分解为A-B和B-C两条航段,不区分航线方向。所有数据经处理后共得到2004年通航城市78个、航线315条,2012年通航城市111个、航线415条。

3 网络结构

3.1 网络拓扑结构

随着海航航空网络规模的扩大，新增节点的加入，导致航空网络整体效率的降低（图1，表1）。节点数由2004年的78个增加到2012年的111个，增长了1.42倍；航段数则由2004年的315条增长到2008年的415条，增长了1.32倍。但2012年节点总量仅为全国（2008年）的77.08%；航段数仅为全国的40.77%，较全国航空网络，海航航空网络的规模仍较小。2004年和2012年海航航空网络的成环率均低于全国航空网络（0.086），且呈现下降趋势，由2004年的0.081下降为2012年的0.051，网络的复杂程度呈现出下降趋势；结合率由2004年的0.105，下降为2012年的0.068，略低于全国航空网络（0.099），即网络的内聚性和紧密程度呈现出下降趋势；海航航空网络的连接率低于全国网络（7.069），且呈现下降趋势，由2004年的4.038下降为2012年的3.739，即节点的平均连接线路数呈现出下降趋势。航空网络的成环率、结合率和连接率呈现下降趋势，表明海航航空网络处在向外扩张阶段，节点数量的变化，对航线数量的变化影响不大，即新增节点仅仅与2004年已有航空节点中的少数联系，从而导致网络整体效率的降低。此外，海航航空网络的平均度值远低于全国航空网络（14.1），表明海航航空网络整体对外联系较低，仍存在较大的发展空间。

3.2 网络结构模型

海航航空网络表现出一定小世界的特点。2004年海航航空网络的平均路径长度（L）为2.20，2012年增至2.53，均略大于随机网络的平均路径长度（L'）的理论值。而

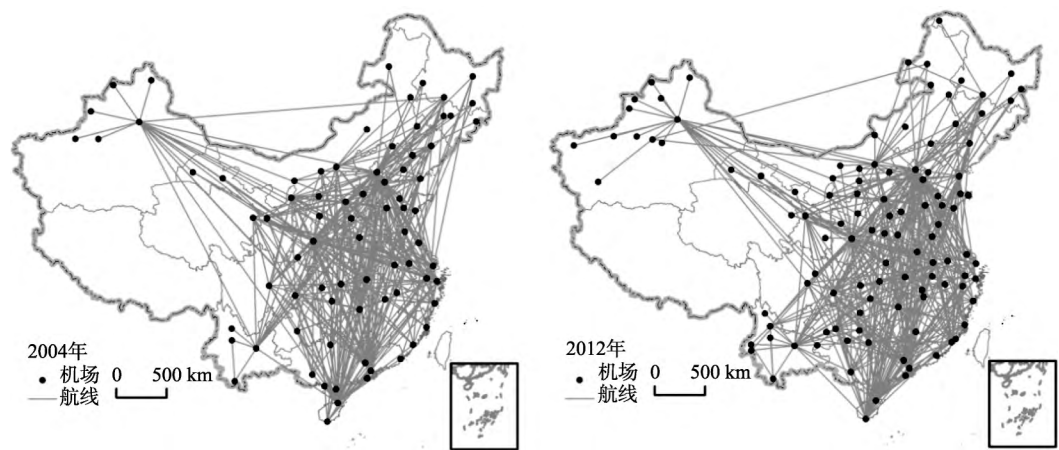


图1 2004年和2012年海航航线网络空间分布图
Fig.1 Spatial distribution of Hainan Airlines in 2004 and 2012

表1 海航航空网络及全国航空网络结构特征

Tab. 1 Structural characteristics of the air network of Hainan Airlines and China

指标	节点数 n	航段数 M	成环率 α	结合度 γ	连接率 n/M	直径 D	平均度 <k>	平均路 径长度L	簇系数 C	随机网络理论值	
										L'	C'
2004年海航	78	315	0.081	0.105	4.038	4	8.07	2.20	0.320	2.086	0.103
2012年海航	111	415	0.051	0.068	3.739	5	7.48	2.53	0.319	2.340	0.067
2008年国内航空	144	1018	0.086	0.099	7.069	5	14.1	2.229	0.694	1.876	0.098

备注：2008年数据中国国内航空数据来源参考文献[24]

2004年和2012年网络的簇系数分别为0.320和0.319,虽低于全国航空网络值(0.694),但仍远高于随机网络的理论值($C \gg C'$),并呈现出差距扩大的趋势,由2004年的3.11倍扩大到2012年的4.76倍。因此,相对于随机网络而言,海航航空网络具有相当的平均路径长度和较大的簇系数,表现出一定的“小世界”网络特征。但2004年和2012年的网络簇系数即海航航空网络的演化正逐步向结构效率较高的“小世界”网络发展。

海航航空网络服从无标度特征,但该特征呈现减弱趋势。从度累计概率函数来看,海航航空整体上呈现幂分布和指数分布的特征(图2)。且指数特征较为明显,即多数节点连接了较少数量的航线,与全国航空网络2008年的度累计概率分布($P(k)=70.5 \times e^{-0.047k}$, $R^2=0.977$)分布特征相似。2004年,海航20%的城市拥有57.6%的航线,2012年该比例上升至62.7%,且度值小于2的节点的比重分别从2004年的37.2%上升至2012年的50.5%。与此同时,度值在平均值以上的节点比重分别从34.7%下降至31.5%。整体上,海航节点的度分布服从“二八”规律,即2012年近1/3的节点对外联系的边数占总量的78%。即少数的节点占有较大比重的航线数量,表明海航航空网络在少数节点中的连接度相对较高,而部分支线机场仅与少数的枢纽城市直接联系。

4 节点中心性

4.1 节点中心性呈位序-规模递减,度中心性和邻近中心性具有较高的相关性

节点中心性呈现出位序—规模递减的趋势(图3),其中,介中心性的变化速率要明显快于度中心性,并远快于邻近中心性,该变化趋势与全国航空网络相似^[13]。2004年介中心性的变化速率为-0.416,为度中心性变化速率(-0.04)的10.4倍左右,为邻近中心性变化速率(-0.0067)的62.1倍。2012年与2004年相比,节点中心性的变化速率趋缓,其中以介中心性最为明显。具体分析,2012年节点介中心性的变化速率(-0.137),约为2004年的32.93%,度中心性的变化速率(-0.032)为2004年的80%,而邻近中心性的变化速率基本没有变化,这表明节点介中心性的差异趋于缩小趋势。此外,网络整体的中心性呈下降的趋势。其中,网络的度中心性从2004年的0.105下降至2012年的0.068,下降了35.2%,网络的邻近中心性对应的从0.469下降至0.406,下降幅度相对较小,而网络的介中心性从0.016下降至0.014,下降幅度最小。这表明,随着海航航空网络的扩张,网络的中心性整体下降,即网络内部节点的地位差异在缩小,枢纽的垄断性地位减弱。

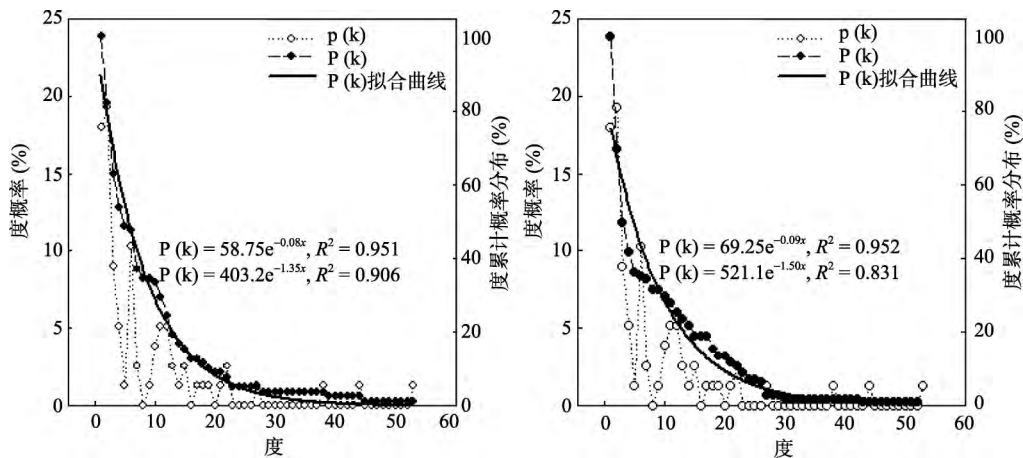


图2 2004年和2012年海航航空网络度分布及累计概率分布图
Fig.2 Cumulative degree distribution of Hainan Airlines' air network in 2004 and 2012

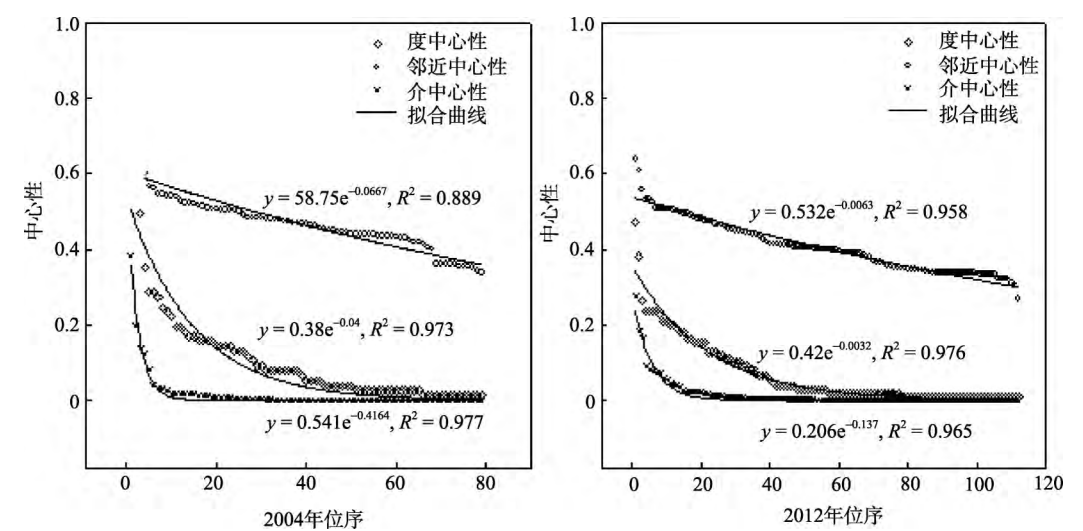


图3 节点中心性位序-规模示意图

Fig.3 Statistical distributions of degree, closeness and betweenness of Hainan Airlines in 2004 and 2012

节点度中心性和邻近中心性具有较高的相关性，度中心性和介中心性的相关性次之，邻近中心性和介中心性的相关性最小（图4）。且随着时间的推移，其中心性的相关性呈减弱趋势。具体分析，2004年节点度中心性和邻近中心性的相关系数为0.82，2012年下降至0.81；且度中心性和介中心性的相关性也略呈下降趋势，从0.68下降至0.61，且远低于度中心性和邻近中心性的相关性；而邻近中心性和介中心性的相关性最弱，均在0.5左右。由此表明，节点同时具有较高直接可达性、相对可达性和中转、衔接功能的可能性呈现降低趋势，且具有较高可达性的节点更有可能具有较高的相对可达性，而具有较高中转和衔接功能的可能性相对较低。此外，节点的中心性的强弱具有明显的差异。如北京和西安均具有较高的度中心性、邻近中心性和介中心性；天津和海口具有较

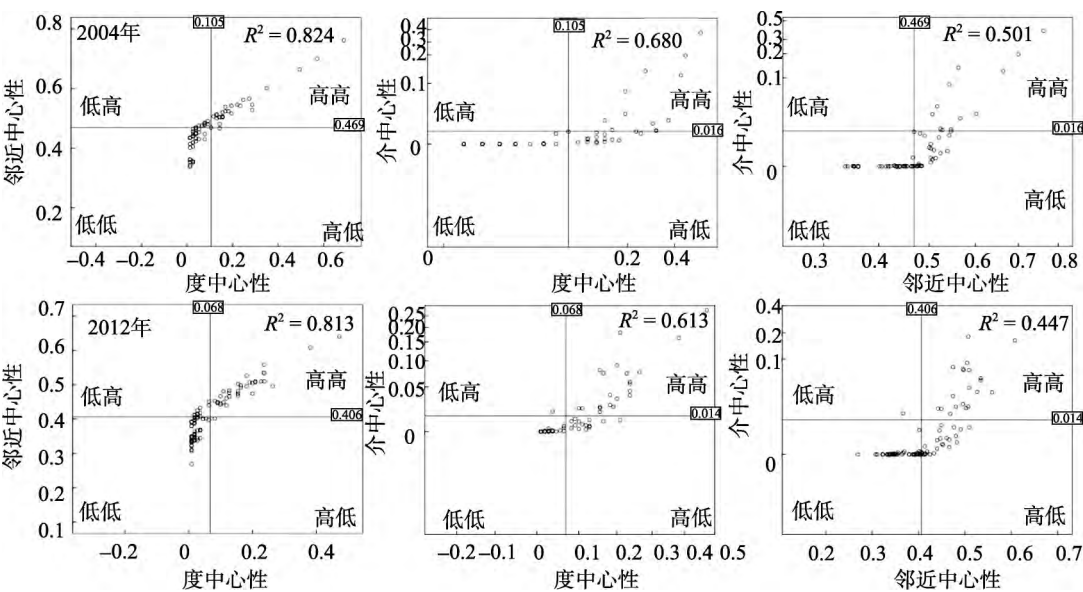


图4 节点度中心性、邻近中心性及介中心性的相关性（2004年和2012年）

Fig.4 Correlation of degree centrality, closeness centrality and betweenness centrality in 2004 and 2012

高的度中心性和邻近中心性，而介中心性相对较弱；乌鲁木齐具有较高的介中心性和度中心性，而邻近中心性相对较弱。因此，无论从哪方面评价，北京和西安均是海航航空网络的核心枢纽节点。

4.2 节点中心性空间分异明显,且高值节点主要为区域中心城市

节点度中心性空间分布不均衡，度中心性和介中心性呈现“中部凹陷”的格局，而邻近中心性呈现梯度递减的趋势（表2）。2004年东部地区节点度中心性为0.142，约为中部地区（0.074）的1.92倍和西部地区（0.097）的1.78倍，中部地区略低于西部地区，与全国东中西递减的格局相异；东部地区节点邻近中心性为0.493，约为中部地区（0.460）的1.07倍和西部地区（0.453）的1.08倍，与全国类似，呈现出东中西递减的趋势；东部地区的介中心性为0.024，约为中部地区（0.004）的6倍和西部地区（0.018）的1.33倍，中部地区节点介中心性明显低于东部和西部地区。表明东部地区节点具有较好的绝对可达性、相对可达性和中转、衔接功能，西部地区节点的绝对可达性和中转、衔接功能相对较强，而中部地区的节点相对较弱。从表2可知，2012年海航东中西节点的中心性表现出相同的分布规律，但较2004年有所降低。其中，2012年东中西的度中心性较2004年的变化比较明显，分别为2004年的0.754、0.689和0.588，其中西部地区降低的比较明显；2012年东中西节点的邻近中心性略有降低，分别为2004年的0.862、0.887和0.863；2012年东部和西部节点的介中心性也略有降低，分别为2004年的0.875和0.889，而中部地区介中心性呈现增加的趋势，约为2004年的1.25倍，但这并没有改变介中心性从东一中一西的递减趋势。

中心性高值区域主要集中在直辖市、省会城市和副中心城市。从度中心性来看（图4），2004年度中心性较高的节点主要集中在京津冀、长三角和珠三角地区，以及中国西部的西安、乌鲁木齐和重庆；而长三角地区节点的度中心性较2004年有明显的下降，而呼和浩特和大连的度中心性明显增强，但整体上度中心性较高的节点位于中国经济发展地区和省会城市。从介中心性来看（图5），2004年中国介中心性较高的节点主要分布在北京、西安、昆明和海口等省会城市；2012年较2004年大部分省会城市和直辖市的介中心性明显提升，如重庆、贵阳、兰州和哈尔滨等，逐渐成为区域对外联系的中转枢纽。从邻近中心性来看（图3），邻近中心性高值点的分布较度中心性和介中心性的分布分

表2 三大地带节点中心性均值比较
Tab. 2 Centralities of Hainan Airlines by region in 2004 and 2012

	城市个数	度中心性	邻近中心性	介中心性
2004年海航				
东部	27	0.142	0.493	0.024
中部	30	0.074	0.460	0.004
西部	21	0.097	0.453	0.018
2012年海航				
东部	30	0.107	0.425	0.021
中部	38	0.051	0.408	0.007
西部	43	0.057	0.391	0.016
2008年全国				
东部	49	0.158	0.500	0.012
中部	42	0.075	0.460	0.003
西部	53	0.061	0.430	0.009

备注:2008年数据中国航空数据来源于参考文献[23]

散,2004年邻近中心性较高的节点主要有北京、天津、乌鲁木齐、西安、上海、南京、广州和昆明等;而2012年较2004年有明显的提升,其中以东中部地区节点提升较为明显,而西部尤其是新疆地区,仅省会城市一个高值节点,其他节点的邻近中心性都较低。

4.3 枢纽节点已经基本形成,但层次仍不明显

2012年海航航空中心性前十位节点较2004年有一定的变化,且较全国有明显的差异(表3)。从度中心性分析,度中心性的首位度呈减少趋势,由2004年的1.24降低为2012年的1.20。北京和西安一直位于领先地位,成为海航航空网络中拥有最多航段的空港。这与全国航空网络以北京、上海和广州为拥有航段最多的空港是不同的,表明地方航空公司在枢纽选择上与全国航空网络有错位。此外,2004年和2012年海航航空网络前十位节点中有7个节点相同,而分别有4个和5个与2008年全国航空网络前10位节点相同。

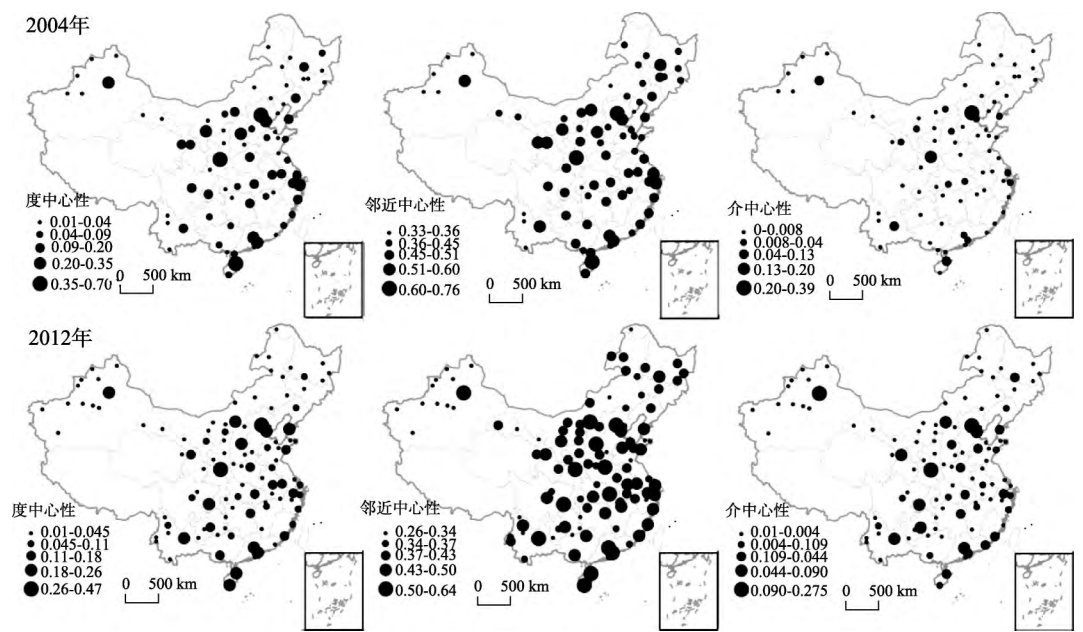


图5 2004年和2012年海航航空节点中心性分布图

Fig.5 Spatial distribution of degree, closeness and betweenness of Hainan Airlines in 2004 and 2012

表3 海航与国内航空网络中心性前10位比较

Tab. 3 Comparison of the air network of Hainan Airlines and China by centrality index									
排序	海航国内航空网络(2004)			海航国内航空网络(2012)			中国国内航空网络(2008)		
	度中心性	邻近中心性	介中心性	度中心性	邻近中心性	介中心性	度中心性	邻近中心性	介中心性
1	北京	北京	北京	北京	北京	北京	北京	北京	北京
2	西安	西安	西安	西安	西安	乌鲁木齐	上海	上海	上海
3	海口	海口	乌鲁木齐	天津	太原	西安	广州	广州	昆明
4	太原	太原	海口	重庆	重庆	呼和浩特	深圳	深圳	广州
5	宁波	深圳	昆明	广州	广州	贵阳	成都	成都	乌鲁木齐
6	天津	乌鲁木齐	呼和浩特	海口	武汉	天津	昆明	西安	西安
7	深圳	宁波	太原	太原	海口	兰州	西安	重庆	成都
8	乌鲁木齐	广州	大连	昆明	昆明	昆明	重庆	昆明	深圳
9	银川	银川	深圳	乌鲁木齐	三亚	重庆	青岛	长沙	重庆
10	广州	昆明	上海	三亚	乌鲁木齐	广州	长沙	厦门	长沙

备注:2008年数据中国航空数据来源参考文献[23]

从邻近中心性分析，邻近中心性的首位度略有增加，由2004年的1.05上升为2012年的1.08。北京和西安一直位居前列，这与20世纪80年代以前全国航空网络相同，这得益于西安较好的区位条件^[24]。此外，海口、太原、广州、乌鲁木齐和昆明也具有较好的邻近中心性，且太原和广州的邻近中心性呈现增加趋势。从介中心性来看，其首位度明显增加，由2004年的1.52上升为2012年的1.94。与邻近中心性和度中心性相比，介中心性的排序有明显的变化。北京、西安和乌鲁木齐的介中心性仍位居前列，这与全国航空网络以北京、上海和昆明为中转枢纽相异。此外，海口、太原、大连和深圳的介中心性位序明显的降低，而贵阳、天津、兰州和重庆的介中心性位序明显提升，这与海航航空网络对外扩张的政策相一致。总体来看，航空网络的扩张，导致航空网络枢纽节点处于动态变化中，但基本上已经基本形成了以北京和西安为枢纽节点的航空网络。

海航航空网络节点的等级结构基本形成，但层次尚不清晰。本文利用K-均值聚类（组间联系、平方欧氏距离）方法，基于三种中心性指标，对城市进行了聚类。聚类结果表明（表4），海航航空网络的节点可以划分为三类。2004年第一类节点包括北京、海口和西安，而2012年第一类节点包括北京和西安两个城市，北京和西安均具有较高的中心性，为海航航空网络的全国性中心，而海口2012年的地位相对2004年有所降低。2004年和2012年海航航空网络第二类节点共包含7个节点，其中，共有节点有乌鲁木齐、太原和天津等，其中乌鲁木齐作为新疆地区的区域性中心，具有较高的度中心性和介中心性，而太原和天津作为比邻北京的次中心，具有较高的邻近中心性。2012年较2004年第二类节点新增了海口、重庆和广州等城市，这些城市均具有较高的度中心性和介中心性，为海航航空网络区域的中心城市。第二类节点尚处于动态变化中。第三类节点的数量比较多，这类节点主要包括两类性质的节点：一类是某一中心性的值比较高，而其他中心性的值相对较低；另一类为处于网络的边缘地区，通常仅与区域的中心城市有直接联系。究其原因主要包括两个方面：一是海航航空网络重组历史较短，网络规模较网络的第二层级结构不能获得较好的发展。

表4 中心性K-均值聚类统计表
Tab. 4 Statistical result of K-Mean clustering to the three centrality indices

类别	2004		2012	
	城市	数量	城市	数量
第一类	北京、海口、西安	3	北京、西安	2
第二类	成都、太原、乌鲁木齐、宁波、深圳、天津和包头	7	乌鲁木齐、太原、天津、重庆、广州、海口、昆明	7
第三类	银川、广州、昆明、秦皇岛等	68	呼和浩特、武汉、深圳、三亚、大连等	102

5 结论与讨论

本文采用拓扑网络和复杂网络的相关指标，分析了海航航空网络的空间结构及演化特征。研究发现：

（1）海航航空网络大规模的扩张在一定程度上降低了网络的成环率、结合率、连接率以及网络的簇系数，增加了网络的平均路径长度，表明海航航空网络效率呈现降低的趋势。究其原因是海航航空网络的扩张，新增节点倾向于与少数节点联系，即新增节点并没有带来相应的航线数量的相应比例的增加，2012年较2004年节点增加了48%，而航线数量仅增加了31.7%，这在一定程度上降低了航空网络的复杂程度、内聚性和紧密程度、和网络结构效率等。但与随机网络相比，海航航空网络具有与之相当的平均路径长

度和较高的簇系数,度累计分布拟合为指数分布和幂分布,这表明海航航空网络整体服从小世界模型,并具有无标度特征。

(2) 海航航空网络度中心性、介中心性和邻近中心性均呈现出下降的趋势,表明网络整体的直接可达性、间接可达性和中转、衔接功能呈现出下降的趋势。且节点中心性的变化速率和相关性均呈现下降的趋势,即节点同时具有较高的直接可达性、间接可达性和中转、衔接功能的可能性下降。海航航空网络在扩张的过程中,新增节点更多的是与少量的枢纽节点联系,而导致网络中心性呈现降低趋势。海航航空网络的这一变化趋势是与海航集团自1995年实行的以发展支线为主的“毛细血管战略”是分不开的,此外,2009年海航对以中短程旅行为主的天津航空也表明海航航空网络扩张是以支线扩张为主,且这些支线建设多是以北京、西安、天津和海口等运营基地为主要枢纽。

(3) 网络整体上形成了以北京、西安和海口为枢纽的航空网络,与以北京、上海和广州为枢纽的全国航空网络不同。虽然上海和广州在海航航空网络中的地位有所提升,但仍低于在全国航空网络中的地位。究其原因,受到国航、南航和东航三大航空公司的影响,其中,南航航班和联系城市分别占广州白云机场的38.9%和79.3%;东航航班和联系城市分别占上海浦东和虹桥机场的29.23%和89.01%;国航通航航班在上海(4.15%)和广州(12.88%)也占有较大的比重,即东航和南航分别控制了上海浦东机场、虹桥机场和广州白云机场的主要航线网络。此外,受到海航航空扩张的影响,天津(天津航空主运营基地)和昆明(祥鹏航空主运营基地)在海航航空网络中的地位有所提升。由此可知,海航航空网络的空间结构受到企业决策和市场共同作用。

另外,航空网络的扩张和重组是一个动态变化的过程,受到市场和企业政策、行为的综合影响。而本文主要对比分析了海航航空网络演化对网络拓扑结构和中心性的研究,而对航空网络空间结构形成的机理与企业行为、政策的探讨较少,将在后续研究中完善。

参考文献(References)

- [1] 李小建 等. 经济地理学. 北京: 高等教育出版社, 2006. [Li Xiaojian et al. Economy Geography. Beijing: Higher Education Press, 2006]
- [2] 崔功豪. 航空运输地理//中国大百科全书(地理学卷). 北京: 中国大百科全书出版社, 1995. [Cui Gonghao. Geography of Air Transport// Encyclopedia of China (Volume of Geography). Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1995.]
- [3] O'Kelly M E. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 1987, 32(3): 393-404.
- [4] O'Kelly M E. A geographer's analysis of hub-and-spoke networks. *Journal of Transport of Geography*, 1998, 6(3): 171-186.
- [5] Paul Hooper. Airline competition and deregulation in developed and developing country contexts: Australia and India. *Journal of Transport Geography*, 1998, 6(2): 105-116.
- [6] Morton E O'Kelly. A geographer's analysis of hub-and-spoke networks. *Journal of Transport of Geography*, 1998, 6(3): 171-186.
- [7] Piet Rietveld, Martijn Brons. Quality of hub-and-spoke networks: The effects of timetable coordination on waiting time and rescheduling time. *Journal of Air Transport Management*, 2001, 7: 241-249.
- [8] Marco Alderighia, Alessandro Centob, Peter Nijkampc et al. Network competition: The coexistence of hub-and-spoke and point-to-point systems. *Journal of Air Transport Management*, 2005, 11: 328-334.
- [9] Zheng Lei, John F O'Connell. The evolving landscape of Chinese aviation policies and impact of a deregulating environment on Chinese carriers. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19: 829-839.
- [10] 金凤君, 王成金. 轴-辐侍服理念下的中国航空网络模式构筑. *地理研究*, 2005, 24(5): 774-782. [Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub-and-spoke system and China aviation network organization. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 774-782.]
- [11] Katherine Faust. Centrality in affiliation networks. *Social Networks*, 1997, 19: 157-191.
- [12] Margaret Deery, Leo K Jago. The core and the periphery: An examination of the flexible workforce model in the hotel industry. *Hospitality Management*, 2002, 21: 339-351.

- [13] Wang Jiao'e, Mo Huihui, Wang Fahui et al. Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 712-721.
- [14] 王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性. *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.]
- [15] Guimerà R, Mossa S, Turtshi A, et al. The world-wide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102(22): 7794-7799.
- [16] 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(3): 31-39. [Jin Fengjun. A study on network of domestic air passenger flow in China. *Geographical Research*, 2001, 20(3): 31-39.]
- [17] Patrick Jaillet, Gao Song, Gang Yu. Airline network design and hub location problems. *Location Science*, 1996, 4(3): 195-212.
- [18] Lin Cheng-Chang. The integrated secondary route network design model in the hierarchical hub-and-spoke network for dual express services. *Production Economics*, 2010, 123(1): 20-30.
- [19] David Gillen, William G Morrison. Regulation, competition and network evolution in aviation. *Journal of Air Transport Management*, 2005, 11(3): 161-174.
- [20] 金凤君, 王成金. 轴-辐待服务理念下的中国航空网络模式构筑. *地理研究*, 2005, 24(5): 774-784. [Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub and spoke system and China aviation network organization. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 774-784.]
- [21] 莫辉辉, 王姣娥, 金凤君. 交通运输网络的复杂性研究. *地理科学进展*, 2008, 27(6): 112-120. [Mo Huihui, Wang Jiao'e, Jin Fengjun. Complexity perspectives on transportation network. *Progress in Geography*, 2008, 27(6): 112-120.]
- [22] 莫辉辉, 金凤君, 刘毅, 等. 机场体系中心性的网络分析方法与实证. *地理科学*, 2010, 30(2): 204-212. [Mo Huihui, Jin Fengjun, Liu Yi, et al. Network analysis on centrality of airport system. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(2): 204-212.]
- [23] Wang Jiao'e, Mo Huihui, Wang Fahui et al. Exploring the network structure and nodal centrality of China's air transport network: A complex network approach. *Journal of Transport Geography*, 2011, 19(4): 712-721.
- [24] 莫辉辉, 王姣娥. 复杂交通网络: 结构、过程与机理. 北京: 经济管理出版社, 2012. [Mo Huihui, Wang Jiao'e. *Complex Transport Network: Structure, Process & Mechanism*. Beijing: Economy & Management Publishing House, 2012.]

Spatial structure and evolution of Hainan Airlines Network: An analysis of complex network

JIAO Jingjuan^{1,2}, WANG Jiao'e¹

(1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Along with the reforms of civil aviation market, aviation enterprises have more autonomy in the tariff, route selection, flight planning and joint restructuring of aviation enterprises, and become the most active part of the China's aviation network. Therefore, it is of great significance to the spatial structure and complexity of aviation enterprises. Hainan Airlines is the largest joint-stock aviation company in China and the structure of Hainan Airlines network has certain uniqueness. So this paper, taking Hainan Airlines as an example, analyzes its spatial characteristics and complexity and compare it with China's aviation network. As a result, we find that: (1) the network of Hainan Airlines is still in the developing stage, and shows the characteristics of small-world and scale-free; (2) the correlation coefficient between degree centrality and closeness centrality is higher than that between degree centrality and betweenness centrality, and is much higher than that between closeness centrality and betweenness centrality; (3) the slope of the rank-size curve decreases by sequence from betweenness centrality, to degree centrality, and then to closeness centrality; (4) the network centrality is gradually decreasing, and the difference of nodes is reduced; (5) Beijing, Xi'an and Hainan are the cores of the air network of Hainan Airlines, but other hierarchies are unclear yet.

Key words: Hainan Airlines; network structure; centrality