

中国航空网络空间结构的复杂性

王姣娥^{1,2}, 莫辉辉^{1,3}, 金凤君¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 美国路易斯安那州立大学, 巴吞鲁日, 70803; 3. 中国交通运输协会, 北京 100053)

摘要: 航空运输是现代交通运输的重要组成部分, 以机场和航线构建的网络是其提供运输服务的空间载体。基于复杂网络理论, 借助度分布、平均路径长度、簇系数、度度相关性、簇度相关性等指标对以城市为节点的中国航空网络空间结构进行分析, 发现其度累计概率分布表现为具有置信度较高的指数分布, 且具有较小的平均路径长度 (2.23) 和较大的簇系数 (0.69), 整体结构呈现“小世界网络”的特点。由于中国航空网络规模较小, 且新建机场倾向于直接与最高级枢纽机场建立航线联系, 不利于区域枢纽机场的形成。因而除顶层结构 (北京—上海—广州) 外, 中国航空网络的其它层级结构并不十分明显。从节点的度、簇系数、可达性等指标及其相关性分析, 中国航空网络空间结构特征差异明显, 表现出较强的集聚性, 且可达性与城市体系上层结构在空间分布上较为吻合。随着中国航空运输需求的快速增加, 未来航空网络在市场经济的推动下, 将进一步表现出向具有“无标度”特征的“小世界网络”演变的趋势, 航空网络的空间结构将日趋复杂化。

关键词: 航空网络; 空间结构; 复杂性; 小世界网络; 无标度网络; 中国

1 引言

航空运输是现代交通运输的重要组成部分, 以其时效强、服务优等特点在中长距离运输中占有优势, 且在自然地理条件特殊地区以及国际运输中更显其优越性。随着近年来经济全球化和区域经济一体化进程的加速, 航空运输在区际 (城市) 交流中扮演着愈为重要的角色, 也成为近年来国内外多学科领域“涌现性”的研究焦点, 对航空网络的空间结构特征等研究方兴未艾。目前, 国内对航空网络的研究主要集中在三个方面: 拓扑特征、空间结构以及基于航空网络的城镇体系研究。在空间结构方面, 顾朝林研究了中国航空网络的首位联系结构^[1]。金凤君研究了航空客流网络发展及其地域系统特征, 提出了中国航空网络的“轴辐 (Hub-and -Spoke)”体系结构^[2]; 并基于轴辐理念构建了中国未来航空网络的发展模式, 确立了未来中国 10 个枢纽机场的布局及国内主干线、国内干线和一般干线三个空间层次^[3]。王法辉等利用位序规模模型分析了 1980 年和 1998 年中国航空网络, 发现枢纽机场的主导地位下降^[4]。王姣娥等利用航空流数据, 基于 GIS 的研究表明中国航空网络不仅同时具有“点—点”结构和“轴辐”结构的复合模式, 还具有以“京沪穗”为核心的“鼎形”空间系统^[5]; 宋伟等的研究表明中国航空客运网络层级体系中的顶层结构已经清晰, 而以下各层次的结构尚处于分化发展之中^[6]。上述传统研究方法对中国航空网络空间结构的复杂性辨识仍显不足。

20 世纪末, 基于图论和统计物理学而兴起的复杂网络理论为网络系统的结构复杂性探讨提供了理论基础。借助复杂网络分析方法, 有学者从全球^[7, 8]或国家^[9-13]的空间尺度探

收稿日期: 2009-02-10; 修订日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40635026); 中国博士后科学基金项目 (20080440065) [Foundation: Key Project of National Natural Science Foundation of China, No.40635026; Project of China Postdoctoral Science Foundation, No.20080440065]

作者简介: 王姣娥 (1981-), 女, 博士后, 湖南涟源人, 主要从事交通运输、城市交通、区域发展等研究。

E-mail: jiaowang@163.com

析航空网络结构的统计属性和结构。研究结果表明, 航空网络规模小到几十个节点, 大到几千个节点, 均具有一定程度的“小世界”(SW, Small World)效应。此外, 有学者还探究了航空网络的组团结构^[14]。复杂网络理论为航空运输系统网络结构的辨识提供了一个崭新的视角, 也为本文尝试揭示中国航空网络的空间结构奠定基础。

2 数据与方法

2.1 数据

本文研究的中国航空网络由 2007-2008 年冬春季经营的 152 个机场及 1570 条国内航线组成, 其中直飞航线 785 条, 由中国国际航空公司、东方航空公司、南方航空公司、上海航空公司、山东航空公司、四川航空公司、海南航空公司和厦门航空公司经营; 并将航空网络处理为对称(无向、非平面)网络, 即如有从城市 A 飞往城市 B 的航班, 相应地就有从城市 B 飞往城市 A 的航班。具体数据情况如下:

(1) 采用的数据不包括香港、澳门和台湾。

(2) 以通航的城市作为节点, 对于拥有两个及以上机场的城市, 将其数据进行合并, 如将上海的浦东和虹桥机场的数据进行合并。此外, 不经营定期航线的机场未纳入本研究中。经处理后, 共获得 144 个城市节点(图 1)。

(3) 将国内直飞航线与经停机场的航线进行合并, 有经停机场的航线则分解为出港城市—经停城市和经停城市—到港城市两条。将各家航空公司的航线网络进行叠加, 去除重合的航线, 最终共有 1018 条航线纳入研究范围。

2.2 网络复杂性的测度方法

网络是系统抽象的节点及节点间关系的集合, 图论是网络数学描述及其分析的重要理论基础。网络一般被抽象地描述为一个由点集 V 和边集 E 构成的连通图 $G = (V, E)$, 其中 $V = \{v_i; i = 1, 2, \dots, n\}$, $n = |V|$ 为网络节点数; $E = \{e_i; i = 1, 2, \dots, m\}$ 或 $E = \{e_{ij}; v_i, v_j \in V\}$, $m = |E|$ 为网络边数。从复杂网络研究伊始, 大多数的研究均基于拓扑网络, 因而定义直接相连的两节点 $e_{ij} = 1$, 反之则为 0, 且一般定义 $e_{ij} = 0$ 。

2.2.1 度及相关指标 定义度(Degree)为节点衔接的边数目, 即节点 v_i 的度值记为 k_i 。网络中所有节点的度的平均值称为网络(节点)的平均度, 记为 $\langle k \rangle$ 。网络中节点度的分布情况用概率分布函数 $p(k)$ 来描述^[15]。为避免网络规模较小引起的误差, 常用 $P(k)$ 表示 $p(k)$ 的度分布累积分布函数(Cumulative Degree Distribution), 即:

$$P(k) = \sum_{k'=k}^{\infty} p(k') \quad (1)$$

当 $P(k)$ 或 $p(k)$ 为幂函数时, 称其结构具有“无标度(SF, Scale-Free)”性质。度是描述网络节点结构特性的基本参数, 度分布则反映了网络系统的宏观统计特征。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

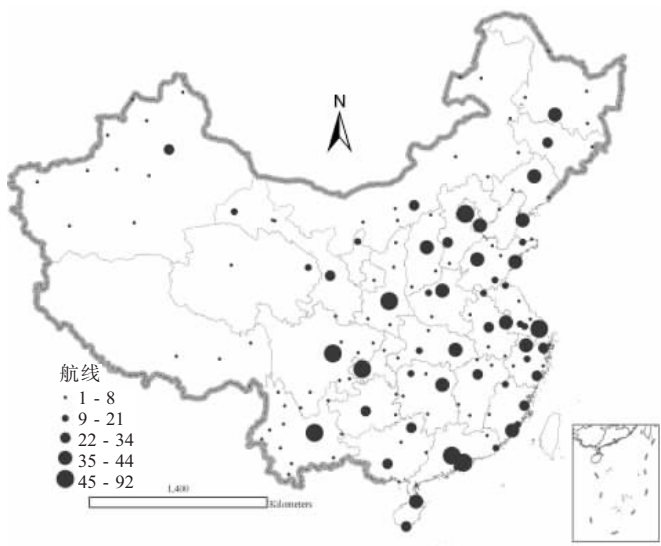


图 1 中国航空网络节点及各节点的航线分布
Fig. 1 Distribution of nodes and airlines in Chinese aviation network

有幂率分布特征 $p(k) \propto k^{-\lambda}$ ($2 \leq \lambda \leq 3$) 的“无标度”网络^[16, 17]。

考虑节点 v_i 其相邻节点的集合 N_i , 定义一个节点所有邻节点的平均度为 $K(i) = \frac{1}{k_i}$

$\sum_{v_j \in N_i} k_j$, 则度为 k 的所有节点的邻节点平均度 $\overline{K(k)} = \frac{1}{N(k)} \sum_{v \in \mathbb{N}_k} K(k)$, $N(k)$ 表示度为 k 节点的数量。度度相关性 (Degree-degree Correlation) 分析节点度与其邻节点平均度之间的相关性^[21, 22], 即考察节点之间相互选择的偏好性: 如果度大的节点优先连接其它度大的节点, 则认为网络是正相关的; 反之, 如果度大的节点优先连接度小的节点, 则意味着网络是负相关的。

2.2.2 平均路径长度及相关指标 平均路径长度 (Average Path Length) 也称为特征路径长度。定义网络中两节点之间的距离 d_{ij} 为连接这两个节点的最短路径的边数 (拓扑最短距离), 网络的平均路径长度 L 定义为任意两个节点之间距离的平均值^[18], 即:

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

定义网络中任意两个节点之间距离的最大值称为网络的直径 D ; 平均路径长度和直径衡量整个网络的传输性能与效率, 可作为现实网络中“网络空间组织效率”的重要测度指标之一。

定义节点 v_i 的可达性为 $L_i = (n-1) \left/ \sum_{v_j \in V} d_{ij} \right.$, 即该节点到其它所有节点距离平均值的倒数, 其值越大, 该点的网络区位条件越好, 可达性越高。

2.2.3 簇系数及相关指标 簇系数^[18] (Clustering Coefficient, 也称为集聚系数) 是用于衡量网络节点集聚情况的参数, 一般定义一个节点 v_i 的簇系数是指其所有邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比值。对于节点 v_i , 其邻节点集合 N_i 中实际存在边的数

量为 $E_i = \sum_{j,k \in N_i} e_{jk} e_{ki}$, 则节点 v_i 的簇系数为:

$$C_i = \frac{E_i}{k_i(k_i-1)/2} \quad (3)$$

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。在完全图 (网络) 中, 所有节点的簇系数都等于 1。定义度为 0 和 1 的节点其簇系数为 0, 网络的簇系数定义为所有节点簇系数的平均值, 即

$$C = \frac{1}{n} \sum_{v_i \in V} C_i \quad (4)$$

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。

簇度相关性 (Clustering-degree Correlation) 考察度为 k 的节点的平均簇系数 ($C(k) =$

$\frac{1}{N(k)} \sum_{v \in \mathbb{N}_k} C_i$) 与度之间的关系^[16, 17], 以用于分析网络结构的集聚性、层次性等。

3 网络结构模型

考虑现实网络的稀疏特征, 从复杂网络的视角分析^[15, 18-20], 网络的结构模型主要有规则网络 (最邻近耦合网络)、随机网络和复杂网络三类。一般规则网络的特点是所有节点

的几何参数，如度、簇系数、平均路径长度等都是相同的，其特征是网络的簇系数大，平均路径长度也大。随机网络的度分布具有近似的泊松分布或二项分布，且网络簇系数小和平均路径长度均较小。复杂网络模型主要包括小世界网络和无标度网络。

3.1 小世界网络

1998 年 Watts 和 Strogatz 在其发表于《Nature》的论文中，采用平均路径长度和簇系数双指标来分析介于拓扑化的随机网络和规则网络之间的网络结构特征，并首次建立了一种小世界网络的演化模型 (WS 模型)^[18]：规则网络中节点的边随机选择与其非相连的节点进行重连的概率 (p) 自 0 变化至 1，网络拓扑结构从规则网络→小世界网络→随机网络进行演变。在此演变过程中，网络具有初始的簇系数变化较少，而网络平均路径长度显著变小 ($C(0)$ 和 $L(0)$ 分别为规则网络的簇系数和平均路径长度)。其后，平均路径长度和簇系数成为网络具有小世界结构的测度指标。小世界网络同时具有较大的簇系数和较小的平均路径长度^①。小世界网络现实涵义表明：尽管现实网络的规模可能很大，即节点数目大而各点的度有限 (一般远远小于节点数目)，但任意两个节点间却仍可通过一条相对短的路径而获得联系。近年的实证研究发现，大量现实网络的结构具有“小世界”效应^[19, 20]。

3.2 无标度网络

1999 年 Barabási 和 Albert 在其发表于《Science》的论文中，采用度分布来分析网络的结构属性，提出度分布具有幂率特征的网络为无标度网络 (根据数学分析可知，有且仅有幂函数具有“标度不变性”^[19])，并建立了首个无标度网络的演化模型 (BA 模型)^[15]，随后度分布成为复杂网络分析方法中的重要测度指标。现实无标度网络特征为网络的大部分节点只有少数连接，而少数节点则拥有大量的连接，即网络由少数高连接的节点控制，这些高连接节点大多具有枢纽性质。各网络模型的特征比较详见表 1。

3.3 航空网络空间结构

从空间组织角度分析，航空网络结构一般被分为“点—点”结构与“轴辐”结构；前者也被称为城市对结构或“点对”结构，后者又被称为中枢辐射结构、枢纽辐射结构、轮辐结构、集中星型结构等。轴辐网络成为近年航空网络构筑及结构量化甄别的研究焦点^[2-5]，有学者认为构建轴辐网络是中国航空网络发展的必然选择^[21]。轴辐结构的三个重要前提：轴心城市间的高密度航班、发达且具有竞争力的支线航班和代码共享^[22]。一般在航空网络形成的初期，基本为城市对结构，随着网络的成熟，逐渐向轴辐结构转变。目前，中国的航空网络为城市对结构与轴辐结构并存^[5]，但其复杂的空间结构并未得到全面的剖析。

4 中国航空网络结构的复杂性

4.1 度和度分布空间差异明显

对中国航空网络节点的度分布进行分析发现 (图 2)，大部分节点对外连接的航线较

表 1 各网络模型的三大特征指标比较情况

Tab. 1 The comparison of three indices in various network models

网络	平均路径长度	簇系数	度分布
规则网络	大	大	单点分布
随机网络	小	小	二项分布或泊松分布
小世界网络	小	大	指数、幂率等分布
无标度网络	小	-	幂率分布
大量现实网络	小	大	近似幂率分布

注：表中“-”表示依赖具体网络，结论不统一。

① 较大的簇系数指网络的簇系数远远大于同等规模的随机网络的簇系数，而较小的平均路径长度指平均路径长度随着网络规模 (节点数) 的增加呈对数或者更小增长，一般略大于同等规模的随机网络。

少，其中 50.9% 的节点对外连接的航线小于 7 条。度为 1 和 2 的节点比例最高，分别达到了 16%，即中国现有航空网络中分别有 16% 的节点仅对外连接了 1 个节点和 2 个节点。度值 6 形成一个“割点”，即对外连接 6 条航线的节点占总节点的比例为 5.56% (8 条)，而当节点度为 7，其比例下降到 2.08% (3 条)。从整个航空网络分析，节点的平均度为 14.14，即每个节点平均与其它 14 个节点有直接的航线联系。因此，本文界定度小于等于 14 的节点称为低度 (Low Degree) 节点，度大于 14 的节点称为高度 (High Degree) 节点；从节点的经济地理特征分析，绝大部分节点度少于 14 的节点年旅客吞吐量低于 100 万人，而少数吞吐量略高于 100 万人的节点属于旅游机场或位于自然条件比较复杂的地区。因此，低度节点缺乏自我发展的能力，在整个网络中处于边缘群体中，依附于枢纽机场。

对节点度的分布进行空间插值后分析发现，其空间分布仍呈点状特征，且高度节点数量并不多，度值分布在空间上具有间断性。从空间上分析，表现出明显的跳跃性和不连续性 (图 3)，节点的度分布表现出较大的东西差异，度值较大的节点主要集中在京津冀、长三角和珠三角地区及各省会城市，如北京是网络中度最大的节点 (92)，其次是上海 (82)、广州 (79)、深圳 (65)、成都 (58)、昆明 (58)、西安 (57) 和重庆 (56)。东北地区度最高的城市为哈尔滨 (36) 和沈阳 (35)，分别排名全国第 20 和 22 位，落后于其在全国的经济和城镇结构中的地位。在新疆、西藏、青海和甘肃等省区，除乌鲁木齐 (30) 和兰州 (26) 具有较高的度值外，其它均为低度节点。总体而言，低度节点在各省区均有分布。

从度累计分布分析，整体呈现出指数分布 ($P(k) = 0.705e^{-0.047k}$, $R^2 = 0.977$) (图 4)，且具有较高的置信水平。

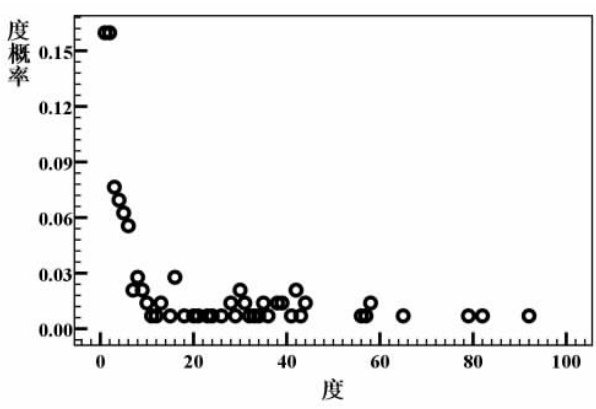


图 2 节点度分布
Fig. 2 Distribution of nodal degree

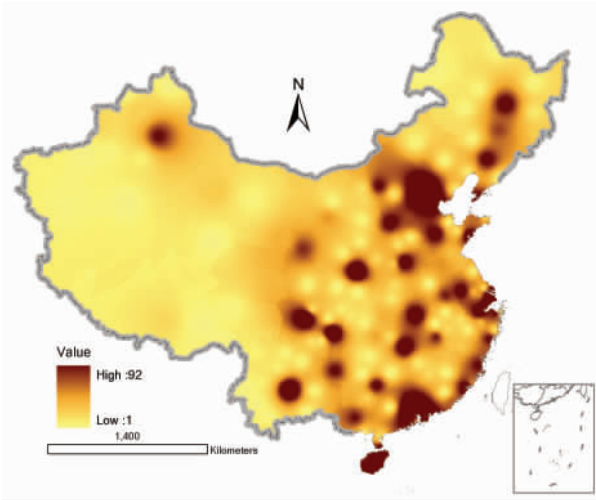


图 3 度累计概率分布
Fig. 3 The accumulative degree distribution

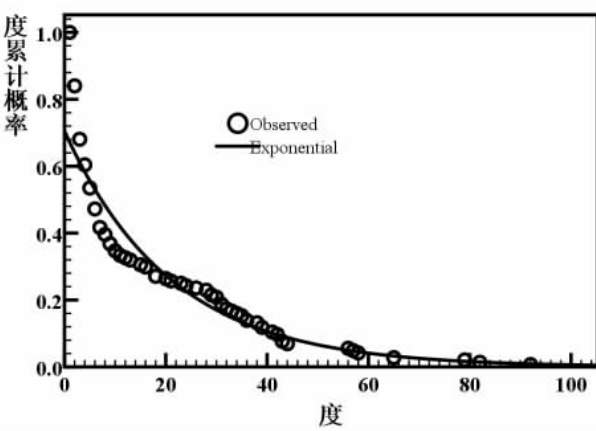


图 4 中国航空网络节点度值的空间分布示意图
Fig. 4 Spatial distribution of nodal degree in Chinese aviation network

多数节点只连接了较少航线，2/3 以上的城市对外联系的航线少于 10 条。少数节点连接了较多的航线，其中 1/3 的节点 (48 个) 对外联系 10 个以上节点，连接的边总数达到了 1701 条，占总量的 83.5%，呈现出较为明显的“二八”规律，这与中国城镇的人口规模序列及机场旅客吞吐量分布具有类似的特征 (排名前 20 名的城市旅客吞吐量占到了总量的 81.4%)^[9]，并表现出较强的相关性 (0.84)。究其原因，节点度越大，越可能与更多的节点发生联系，航空服务能力越强。因此，中国航空网络的航线分布主要集中在北京、上海、广州、深圳等少数节点的周围，众多支线机场仅有 1 至 2 条航线衔接上一级节点。

4.2 高可达性节点与区域中心城市基本吻合

网络中节点的可达性用该节点到其它所有节点的平均距离来衡量，平均距离越短，可达性越好。表 2 对中国航空网络最短路径进行了统计分析，即两节点间联系最少

表 2 中国航空网络城市间航线最短路径统计
Tab. 2 Percentage of flight routes among different number of shortest paths in China

最短路长度	路径数量	需中转的航段数量	占全部路径比例 (%)	累计百分比 (%)
1	2036	0	9.89	9.89
2	12200	1	59.25	69.14
3	5976	2	29.02	98.16
4	362	3	1.76	99.92
5	18	4	0.09	100.00

需要通过多少个航段、中转的次数及它们的比例。结果表明，98%以上的节点对之间最多只需要中转两次航班即可以联系，约 70%的节点对最多只需要中转一次航班，10%的节点对之间有直飞航班。根据式 (2) 计算分析，中国航空网络的平均路径长度为 2.23，即任一节点到另外一节点平均需要经过 2.23 条边，略高于同等规模的随机网络 ($L_{ER} \propto \ln N / \ln \langle k \rangle \approx 1.88$)，呈现典型的小世界网络特征，这表明中国航空网络中节点之间的分离程度较小。此外，中国航空网络的网络直径为 5，存在于黑河—且末、保山—且末、德宏—且末、阜阳—且末、黎平—且末、临沧—且末等节点对之间，这主要是因为且末对外仅连接了库尔勒，位于整个航空网络结构的最底层，需要通过库尔勒—乌鲁木齐才能到达上层节点 (如北京、上海)，并联系其它边缘节点。从消费者的角度出发，点对式航空网络结构能通过尽可能少的航段来到达目的地，实现消费者效益最大化；然而，这对于航空公司而言并非经济有效。小世界航空网络能够利用整体较低的成本来较好地满足消费者的需求，因此成为航空网络演化的趋势。

从空间分布分析 (图 5)，节点可达性仍存在较大空间差异，但其非均衡性不如度值的空间分布明显。从全局分析，东部和中部城市的可达性高于西部和东北地区，网络中可达性最大的节点是北京，其次是上海、广州、深圳、成都、西安、重庆和昆明，可达性最差的节点依次为且末、格尔木、阜阳、黎平、阿克苏、阿勒泰、塔城，究其原因，主要由以下两点决定：①节点的对外联系少，度均仅为 1。②节点唯一对外联系的航线终点并非中国航空网络的顶层节点，仅为区域性的节点城市或其它节点，如库尔勒、西宁、合肥、贵阳、乌鲁木齐。因此，从可达性分析，北京、上海和广州构

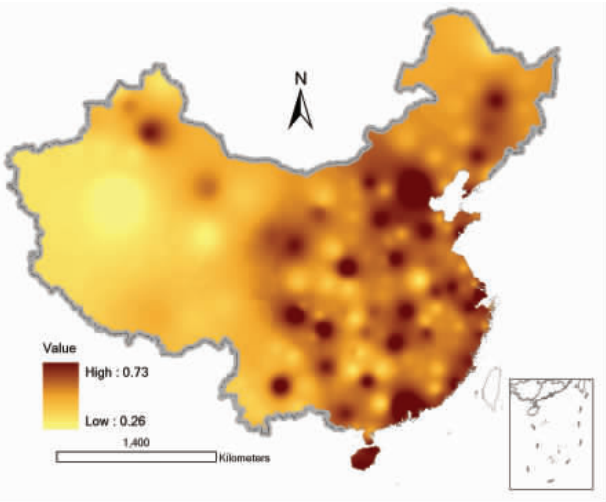


图 5 中国航空网络的可达性空间分布

Fig. 5 Spatial pattern of accessibility in Chinese aviation network

成了中国航空网络的中心，深圳、成都、西安、重庆和昆明在航空网络的可达性方面具有领先地位，除东北缺乏高可达性城市外（东北可达性最好的城市为哈尔滨，排名全国第22位），可达性高的节点与区域中心城市基本吻合。

4.3 网络结构表现出较强的集聚性

根据式 (3) 计算得出，中国航空网络的簇系数为 0.69，表现出较强的集聚性，这表明中国航空网络各节点之间形成短距离联系的可能性较大。其中，簇系数达到 1 的节点共有 54 个，占总数的 37.5%，统计分析得出这些节点的度值平均值在 2-10 之间，全部为低度节点。此外，有 22 个节点的簇系数为 0，占总数的 15.3%，这些节点的度值全部为 1 或 2。因此，低度节点的簇系数有两类：很大或很小。而高度节点均表现出较小的簇系数，如北京 (0.18)、上海 (0.23) 和广州 (0.25)，这主要归结于航空网络中的新建节点都倾向于与它们建立直接联系，即它们连接的城市中相当一部分为低度或边缘节点。

利用分析空间集聚的全局 Moran 指数 $I(d)$ 对此进行计算，发现“全局空间聚类为随机分布的可能性小于 1%”，Moran 指数为 0.2 ($Z = 2.9$)，也就是说，节点的簇系数在空间分布上存在集聚性，其统计显著性高于 1% (百分比越低越显著)，且是簇系数较高的节点倾向于集聚在一起。图 6 为对中国航空网络节点簇系数进行空间插值以后转换成的面状图，从中分析可知，其表现出与度分布和可达性分布不一样的特征，其中簇系数大的节点主要集中在东北及中部地区，在内蒙古、陕西、山西、河南、湖北交界处有集聚的趋势，但在西北地区、京津冀、长三角、珠三角等地区，簇系数均较小。对航空网络集聚特征研究表明，集聚不仅取决于节点间联系与否，还取决于节点间空间上的近邻性 (空间自相关性)，并与节点某一属性值强度的分布密切相关。总体而言，中国航空网络的簇系数在空间分布上具有一定的连续性，节点间的差异不如度值和可达性值差异明显。

4.4 航空网络的关联性质

分别对中国航空网络中各节点的度、可达性、簇系数之间进行相关性分析发现，其相互之间表现出一定的相关性 (表 3)。对旅客吞吐量与其它属性进行相关性分析，发现其与度值的相关性最高 (0.84)，即度值高的节点其旅客吞吐量也相对较大。此外，节点旅客吞吐量与可达性值也表现出较强的正相关性 (0.71)，即可达性越好的节点，旅客吞吐量越大。但旅客吞吐量与簇系数则表现为较弱的负相关 (-0.24)，即簇系数越大的节点其旅客吞吐量反而越小。

4.4.1 度度相关性 中国航空网络各节点的度度相关性为 -0.43，即各节点的度与其所

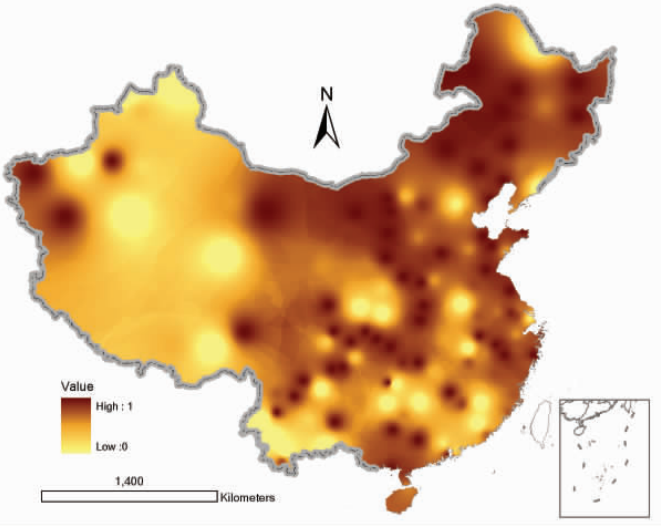


图 6 中国航空网络节点的簇系数分布示意图
Fig. 6 Spatial pattern of the clustering coefficient in Chinese aviation network

表 3 中国航空网络各指标之间的
相关系数

Tab. 3 Correlative coefficient of indices in
Chinese aviation network

指标	度	簇系数	可达性指数
度	-0.43		
簇系数	-0.15		
可达性	0.92	0.09	
旅客吞吐量	0.84	-0.24	0.71

有直接联系的邻节点的平均度整体表现为负相关。度值越高的节点,其邻节点的平均度值反而越低,这种特征随着度值的增加表现更加明显(图 7)。如网络中度值最高的节点为北京(92),其邻节点的平均度值为最小值 19.4。上海的度值为 82,其邻节点的平均度值也仅为 21.7。广州的度值为 79,其邻节点的平均度值为 23.6。相反地,度值为 4 的所有节点,其邻节点的平均度值最大(62.2),其次分别是度值为 5、6 和 2 的节点。从单个节点来看,其中度值仅为 2 的节点—东营、佳木斯、齐齐哈尔等的邻节点平均度值最高(均为 87)。究其原因,在于这些节点的航线对外仅联系航空网络的顶层节点北京和上海,故其邻节点的平均度值高。因此,北京、上海、广州和深圳是全国性的中心城市,不仅因为它们度最大和可达性最好的城市,更因为这四个城市和度小的城市连接的比例更高,表明它们强大的城市功能具有很强的吸引力。在云南和新疆,由于地理条件的限制,度小的节点在各自的省区内,与省会城市连接;此外,至多再在相互之间建立联系,很少与区外的节点建立直接的航线联系。

由于中国航空网络的规模远小于世界航空网络,所以与世界航空网络度度相关性的特征完全不同。对世界航空网络而言,当度较小时($k < 10$),它是正相关的;而当度较大($k \geq 10$)时,其邻节点的平均度几乎为一个常值^[23]。而对于中国航空网络,当度值小于网络平均值时(14),未表现出度度相关性;而当度值大于网络平均值时(14),表现出负相关,其邻节点的平均度出现递减趋势。而且中国航空网络与北美航空网络也不一样,Barra 等人对北美航空网络的研究结果显示^[24],当 $k < 30$ 时,其邻节点的平均度表现为递增趋势,当 $k \geq 30$ 时其邻节点的平均度却出现递减趋势。根据本文分析,中国航空网络节点的度度相关性表现为负相关的原因有:(1)受网络规模较小的影响。(2)未考虑到航空网络的开放性,即许多大型枢纽机场的国际航线在本航空网络中未列入考虑,因此当度大时航空网络可能呈现出负相关趋势。(3)由于受经济、行政和人口等因素的影响,且航空网络具有“超平面”的特性,当航空网络中度较小的节点或新出现的节点建立航线时,它们更倾向于连接到已经有较多连接的节点,这是由网络规模和自身特点所决定的。因此,随着时间的推移,这些节点就拥有比其它节点更多的连接数目,这也就解释了中国航空网络节点度值“马太效应”的过程。

4.4.2 簇度相关性 中国航空网络的簇系数与度之间的关系较为复杂(图 8),其相关系数为 -0.15,表现为弱程度的负相关,即节点之间是否集聚成团与度值成反比。进一步分析发现,当节点度小于网络平均值时,簇度之间表现为正相关(0.41),当节点度大于网络平

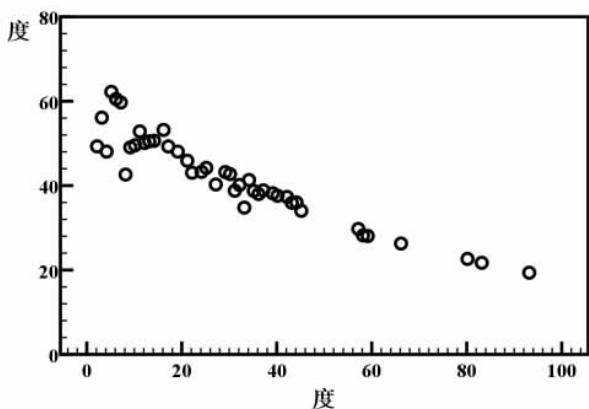


图 7 度度相关性关系

Fig. 7 Distribution of degree-degree correlation

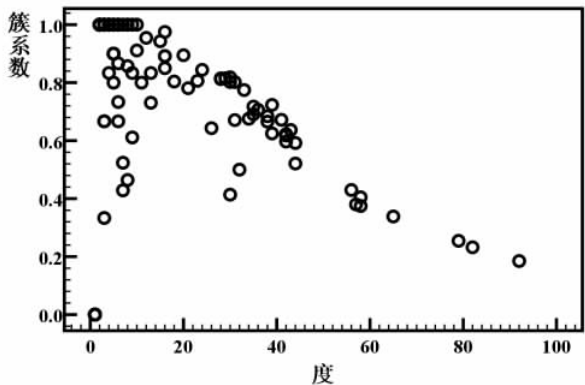


图 8 节点度值和簇系数的相关关系

Fig. 8 Distribution of clustering-degree correlation

均值时，簇度之间表现为负相关 (-0.92)。如度小于 2 的节点，簇系数均为 0。随着度的增大，簇系数也逐渐增大，并达到 1。整个网络中共有 54 个节点的簇系数为 1，且这些节点的度集中在 2-10 之间，均属于低度节点。包括临沂、洛阳、柳州、威海、鄂尔多斯、黄岩、运城、常德、黄山、绵阳、南阳、包头、潍坊、宜宾、北海、锦州、井冈山、泸州、牡丹江、秦皇岛、铜仁、万州、襄樊、盐城、达州、大理、邯郸、酒泉、喀什、延安、攀枝花、安庆、昌都、赤峰、东营、恩施、海拉尔、和田、佳木斯、嘉峪关、九寨沟、库车、满洲里、南充、齐齐哈尔、衢州、通辽、乌海、乌兰浩特、梧州、西昌、锡林浩特、兴义和榆林。究其原因，主要为：① 这些节点的度并不高，其邻节点连接成网更容易。② 这些节点的共同特点是基本上都直接与全国航空网络中的枢纽节点如北京、上海、广州、深圳连接。其中有 36 个节点连接了北京 (66.7%)，25 个节点连接了上海 (46.3%)，23 个节点连接了广州 (42.6%)，15 个节点连接了深圳 (27.8%)；且其中有 15 个节点 (27.8%) 同时连接了北京、上海和广州 3 个城市，而这些主要枢纽节点之间是相互连接的。由此分析得知：簇系数较大的节点，对外联系的节点数目普遍较少，且均具有与顶层节点北京、上海和广州直接联系的特点。这表明低度节点比高度节点更倾向于集聚成团，并在一定程度上导致了我国航空网络结构除顶层结构外的其它层级结构不明显。

4.4.3 度与可达性的相关性 对节点度与可达性值进行相关分析发现其相关系数为 0.92，表现为极强的正相关。总体而言，度越小的节点，可达性越差，这在度值小的节点中表现得非常明显 (图 9)。但随着节点度值的增加，决定可达性的因素增加，度值成为影响节点可达性的重要但并非唯一因素。如昆明的度为 58，与成都相等，居全国第 6 位，其度值高于西安 (57) 和重庆 (56)。但昆明的可达性为 0.60，居全国第 8 位，落后于成都 (0.624，排名第 5)、西安 (0.622，排名第 6) 和重庆 (0.619，排名第 7)。究其原因，可达性的高低与两个因素有关：① 节点的度值。② 与该节点相连的其它节点的航线对外联系情况。

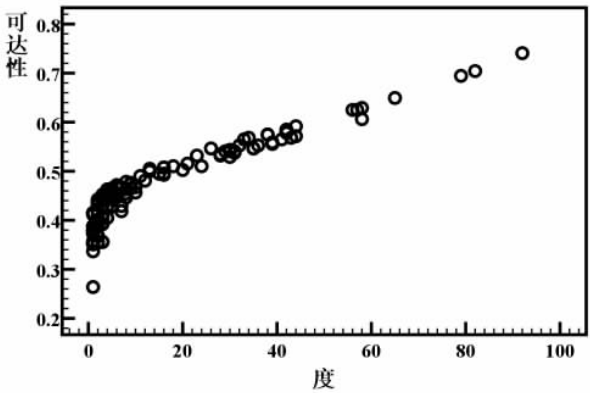


图 9 节点度值与可达性相关关系

Fig. 9 Distribution of degree-accessibility correlation

4.4.4 簇系数与可达性的相关性 节点簇系数与可达性的相关系数为 0.09，基本上表现为不相关。即整体而言，可达性的大小与其簇系数的大小无关。进一步分析发现，在节点的可达性低于网络平均值时 (0.46)，表现为正相关 (0.61)，即随着节点可达性的增加，其簇系数也相应增加 (图 10)。但当可达性超过平均值时，表现为负相关 (-0.92)，即随着节点可达性的继续增加，其簇系数反而降低。从地理学的角度分析，可达性较好的节点，表现为网络的枢纽，与其联系的节点数量相对较多，但相邻节点内部之间相互联系的难度加大，其簇系数反而较低。

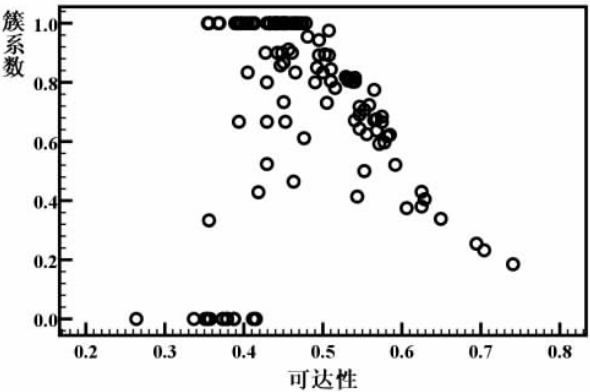


图 10 节点簇系数与可达性相关关系

Fig. 10 Distribution of clustering -accessibility correlation

而可达性较差的节点,空间上一般分布在网络边缘,其簇系数也较低。因此,从中国航空网络节点的可达性与簇系数的相关性分析,当可达性处于网络平均值附近时,其邻节点更倾向于集聚成团。

5 结论

5.1 航空网络整体结构呈现为小世界网络

对于航空网络而言,两个最能直接反映网络特征的重要参数是平均路径长度和簇系数。其中,平均路径长度代表航空运输的深度,簇系数代表航空运输的广度。航空运输快速便捷的特点必须要求运输的深度小,即航空网络中两点要通过尽量少的连接就能够到达。而簇系数在航空运输网络中代表通航机场与邻接机场节点所构成网络的平均聚集程度,代表网络的完备性指标。由于以城市为节点的中国航空网络具有较短的平均路径长度和较大的簇系数,网络中节点的度累计概率呈现出指数分布(显著度为 0.9772)。尽管节点的度累计概率对数也呈现出双段幂律分布特征(断点处 $k = 29$,显著性为 0.9728),且网络中的少数节点拥有了众多的航线,而多数节点拥有的航线则较少,表现出一定的“无标度”特征。但受节点规模的限制,采用指数函数比幂函数拟合的结果更好,因而中国航空网络的整体结构仍表现为小世界网络,但已具有向无标度网络演化的特征。

5.2 航空网络结构的层级结构尚不明显

根据节点度、簇系数和可达性的相关性分析,中国航空网络的顶层结构北京—上海—广州(深圳)已经形成,但其下一层级的航空网络结构仍在继续分化之中。这主要由两方面的原因造成:一是中国航空网络总体规模较小,发展时间较短,不足以形成层级结构明显的航空网络。二是中国航空网络的新建节点都倾向于与最高层级节点进行连接,而忽略区域枢纽节点,导致航空网络的第二层级结构不能获得很好的发展。如航空网络中簇系数为 1 的 54 个城市中,除酒泉、喀什、攀枝花、昌都、恩施、和田、嘉峪关、九寨沟、库车、乌海、梧州、西昌和兴义 13 个城市外,都无一例外的选择了北京、上海或广州作为它们的直接连接点。目前,在中国航空网络节点中,由于受自然地理条件 and 政治环境的影响,除昆明、乌鲁木齐能较好地组织其所在的区域航空网络外,其它区域枢纽节点的作用仍没有得到较好的发挥。为促进航空网络结构向具有较高效率的轴辐网络演化,未来航线网络优化是关键问题之一。

5.3 航空网络的空间组织结构演变日趋复杂化

目前,中国航空网络整体还处于比较低的发展水平,网络完备性、连接性以及可达性都表现较差。与世界航空网络相比,中国航空网络的平均度值与世界航空网络^[1](13.93)基本相等。鉴于中国航空网络规模远小于世界航空网络,因此其平均路径长度较世界航空网络(4.4)短,集聚程度略高于世界航空网络(0.62)。与美国航空网络相比^[9],中国航空网络的平均路径长度略低于美国航空网络(2.4),而集聚程度高于美国航空网络(0.62)。目前,中国机场的航线布局较为分散,且支线机场都倾向于与顶层节点直接联系,不利于区域枢纽机场的形成,在空间组织结构上表现为城市对结构与轴辐结构相结合,且多数表现为城市对结构,这种布局不仅不能实现客流密度经济和机场的规模经济,而且客观上也不利于轴辐结构的形成。在完全市场化条件下,航空网络表现为自组织系统,即推动其朝更高层次和更高位序发展的动力来自于网络内部。因而,随着航空放松管制和航空运输需求的持续增长,中国航空网络演化日趋呈现为复杂网络结构,网络经济和密度经济将成为引导网络优化的主导因素。

参考文献 (References)

- [1] Gu Chaolin. Chinese Urban System: History, Current Situation and Prospect. Beijing: The Commercial Press, 1992. [顾朝林. 中国城镇体系: 历史·现状·展望. 北京: 商务印书馆, 1992.]
- [2] 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.]
- [3] Jin Fengjun, Wang Chengjin. Hub-and-spoke system and China aviation network organization. Geographical Research, 2005, 24(5): 774-784. [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): 774-784.]
- [4] 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): 519-525.]
- [5] 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.]
- [6] Song Wei, Li Xiuwei, Xiu Chunliang. Patterns of spatial interaction and hierarchical structure of Chinese cities based on intercity air passenger flows. Geographical Research, 2008, 27(4): 917-926. [宋伟, 李秀伟, 修春亮. 基于航空客流的中国城市层级结构分析. 地理研究, 2008, 27(4): 917-926.]
- [7] Amaral L A N, Scala A, Barthé lé my M, et al. Classes of small-world networks. PNAS, 2000, 97(21): 11149-11152.
- [8] Guimerá R, Amaral L A N. Modeling the world-wide airport network. Eur. Phys. J. B, 2004, 38: 381-385.
- [9] Chi Liping, Wang Ru, Su Hang et al. Structural properties of US freight network. Chin. Phys. Lett, 2003, 20(8): 1393-1396.
- [10] Bagler G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network. Physica A, 2008, 387: 2972-2980.
- [11] Liu Hongkun, Zhou Tao. Empirical study of Chinese city airline network. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 106-112. [刘宏鲲, 周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析. 物理学报, 2007, 56(1): 106-112.]
- [12] Ramasco J. Transport on weighted networks: when the correlations are independent of the degree. Physical Review E, 2007, 76(6): 1539-3755.
- [13] Guida M, Maria F. Topology of the Italian airport network: A scale-free small-world network with a fractal structure? Chaos, Solitons and Fractals, 2007, 31: 527-536.
- [14] Guimerá R, Mossa S, Turtschi A et al. The worldwide air transportation network anomalous centrality, community structure, and cities global roles. PNAS, 2005, 102(22): 7794-7799.
- [15] Barabási A, Albert R. Emergence of Scaling in random networks. Science, 1999, 286: 509-512.
- [16] Barabási A, Albert R. Statistical mechanics of complex networks. Reviews of Modern Physics, 2002, 74(1): 47-91.
- [17] Newman M E J. The structure and function of complex networks. Siam Review, 2003, 45(2):167-256.
- [18] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [19] Wang Xiaofan, Li Xiang, Chen Guanrong. Complex Network: Theory and Application. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. [汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2006.]
- [20] Mo Huihui, Wang Jiaoe, Jin Fengjun. Complexity perspectives on transportation network. Progress in Geography, 2008, 27(6): 112-120. [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.]
- [21] Zhou Yixing, Hu Zhiyong. Looking into the network structure of Chinese urban system from the perspective of air transportation. Geographical Research, 2002, 21(3): 276-286. [周一星, 胡智勇. 从航空运输看中国城市体系的空间网络结构. 地理研究, 2002, 21(3): 276-286.]
- [22] Zhang Huaiming. Prerequisite of hub-and-spoke airline network. Flight International, 2000, (6): 37-39. [张怀明. 中枢辐射航线网络的运行条件. 国际航空, 2000, (6): 37-39.]
- [23] Barrat A, Barthé lemy M, Pastor-Satorras R et al. The architecture of complex weighted networks. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2004, 101(11): 3747-3752.
- [24] Barrat A, Barthé lemy M, Vespignani A. The effects of spatial constraints on the evolution of weighted complex networks. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, J. Stat. Mech., 2005, (5): P05003.

Spatial Structural Properties of Chinese Aviation Network Based on Complex Network Theory

WANG Jiao'e^{1,2}, MO Huihui^{1,3}, JIN Fengjun¹

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

2. *Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 70803, USA;*

3. *China Communications and Transportation Association, Beijing 100053, China)*

Abstract: Today, air transport plays an important role in transportation systems, especially for middle and long distance. Based on complex network theory, Chinese aviation network is abstracted as a set of edges (linkages) connecting a set of nodes (cities), and 144 cities and 1018 air routes was chosen for this research operated from 2007 winter to 2008 spring. Then, this paper analyzes the spatial structure of Chinese aviation network using indices of degree distribution, the average path length, the clustering coefficient, degree-degree correlation, and clustering-degree correlation. Degree is measured by the number of edges that a node has to others and it is one of the most effective measures to evaluate the relative centrality of a node. Degree distribution is used to reflect the cumulative distribution function of degree and donates the statistic character of a network. Average path length is defined as the average number of edges along the shortest paths for all possible node-pairs in the network and it is a measure of the efficiency of transportation. The clustering coefficient of a node is the ratio of actual edges to maximal edges between nodes which are connected with the node directly. The clustering coefficient of the whole network is the average of all individuals. As for an airport network, the average path length and the clustering coefficient are the two most important parameters to reflect network properties and configurations. The results show that Chinese aviation network has a relatively small average path length of 2.23 and a relatively large cluster coefficient of 0.69. More importantly, the accumulative degree distribution follows an exponential expression, with significance of 0.977. Therefore, Chinese aviation network shows the characteristic of a "Small World". Due to most new airports' preferences for direct connections with the three top-level national hubs: Beijing, Shanghai, and Guangzhou, the network hierarchy is not very distinct with the exception of the top one. Also, the spatial distribution of Chinese aviation network is imbalanced according to the indices of degree, clustering coefficient and accessibility index. Then, the correlation coefficients of these indices mentioned above are analyzed. The results show negative degree correlation, nonlinear clustering-degree correlation, positive accessibility-degree correlation, and positive clustering-accessibility correlation. In conclusion, with the rapid development of air transport demand and the drive from the market economy, Chinese aviation network will further evolve to a combined model of "Scale Free" and "Small World" networks, and its spatial structure will be more complex.

Key words: aviation network; spatial structure; complexity; small world network; scale free network; China