

# 基于复杂网络的 航空货运枢纽城市研究

党亚茹<sup>1</sup> 孟彩红<sup>2</sup>

1. 中国民航大学, 民航科教评估中心, 天津 300300

2. 中国民航大学, 经济与管理学院, 天津 300300

**摘要:**采用复杂网络分析方法,通过对2004—2009年航空货运枢纽网络结构的实证研究,呈现我国航空货运的整体发展趋势,建立了核心-边缘模型,筛选出核心货运枢纽城市并论证了航空货运网络的无标度特性。进而采取蓄意攻击方式对网络抗毁性进行分析,分别移除航空货运系统中1个、3个枢纽城市,对货运系统的网络平均路径长度、凝聚力指数、节点度等统计指标进行对比,结果表明对枢纽城市的攻击,将严重影响整个航空货运网的连通性和集聚性。

**关键词:**航空货运;枢纽城市;无标度网络

中图分类号:F560.3

文献标识码:A

文章编号:1672-4747(2012)02-0012-07

## Research on Hub City of Air Cargo Based on Complex Network

DANG Ya-ru<sup>1</sup> MENG Cai-hong<sup>2</sup>

1. Civil Aviation Sci-Tech Educational Evaluation Research Center,  
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

2. College of Economics and Management,  
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

**Abstract:** Adopted the complex network analysis method, by studying the aviation cargo network structures from 2004-2009, the general development trend of the domestic cargo network was

收稿日期:2011-05-03.

基金项目:中国民用航空局科技基金项目(RKXZY0820).

作者简介:党亚茹(1956-),女,汉族,陕西武功人,中国民航大学科教评估中心,理学学士,教授。主要研究方向:管理科学与评价。

presented. A core-periphery model was constructed to select the core hub cities and the scale-free characteristics of the air cargo network was proved. Then a purposeful attack way was taken to discuss the network survivability, in which one and three hub cities were respectively removed and the network statistical indexes of the cargo system, such as average route length, cohesive power index, node degree, etc., were comparatively analyzed. The results showed that attacking the hub city would seriously affect the connectivity and cohesion of the whole cargo network.

Key words : Air cargo , hub city , scale-free network

## 0 引言

打造枢纽机场是民航发展的新趋势。现如今,大多数航空发达国家都实现了由城市对为主的航线布局逐步向中枢辐射式航线网布局的转变,枢纽机场、二线机场、支线机场的格局日益凸现,枢纽机场的重要性也越来越明显。一个功能完备的枢纽机场可以带动整个地区支线机场的发展,进而促进地区经济的繁荣。目前世界上货邮吞吐量排名前30位的机场无一例外都是航空枢纽城市机场,由此可见枢纽机场的重要性。2010年民航行业发展统计公告显示,北京、上海和广州三大城市机场货邮吞吐量占我国全部机场货邮吞吐量的56.7%,其中上海浦东机场完成货邮吞吐量322.8万t,位列世界第三,由此可以看出我国枢纽发挥了极大的货运流转功能<sup>[1]</sup>。而与我国的枢纽机场有着较大竞争的东京成田、东京羽田、新加坡机场等周边国家的机场在世界货邮吞吐量排名中也跻身前30名,可见周边国家的枢纽机场已经开始分流我国内地的国际货运资源。来自周边国家和地区枢纽机场的威胁,迫使我国必须加快建设航空枢纽机场的步伐。本文针对枢纽机场在航空货运网络中发挥的核心作用,对我国航空货运网络系统的复杂结构进行实证分析,揭示航空货运网络的结构特征和变化趋势,为今后我国航空货运枢纽的发展提供量化参考和理论支持。

## 1 航空货运网络结构分析

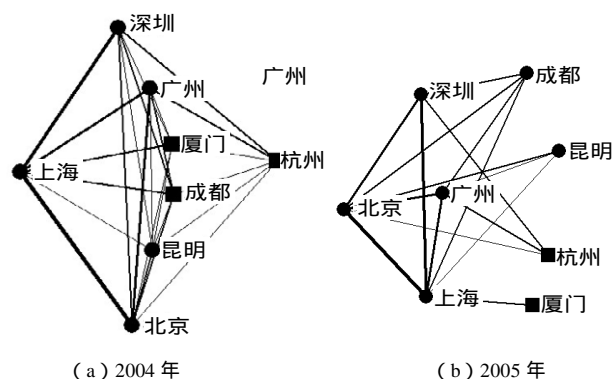
本文以我国机场所在城市航段间的货邮运输量所构成的航空货运网络为研究对象,将其抽象为以城市为节点,城市间的货运关系为边的复杂网络系统。

首先收集了2005—2010年度《从统计看民航》<sup>[2]</sup>中的航段数据,经整理形成2004—2009年起讫地—目的地的航空货邮流量数据库。而后采用邻接矩阵 $(k_{ij})_{n \times n}$ ( $n$ 为节点数)来表征航空货运网络,矩阵中的元素 $k_{ij}$ 表示城市 $i$ 到城市 $j$ 的航空货运量,运用网络理论和可视化方法,对2004—2009年我国航空货运网络的结构进行实证分析。

### 1.1 航空货运网络拓扑结构

为清晰地呈现航空货运网络拓扑结构,采用阈值法对数据进行基本处理(分别采用统一阈值20000t和40000t)<sup>[3]</sup>。利用Ucinet绘制出部分主要城市间航空货运网络的拓扑结构图,如图1所示,图中的方块和圆点分别为该年度20000t阈值和40000t阈值处理后的城市,节点间边的粗细表示城市间航空货运量的大小。

图1客观地呈现出2004—2009年主要城市航空货运网络整体和各节点的结构变化。由图1可以发现,我国航空货运网络中货邮运输量在20000t以上的城市数量和航段数量呈现出逐年增长趋势。从其增长的形势和数量来看,货运量达到40000t的城市逐步形成网络的核心枢纽。



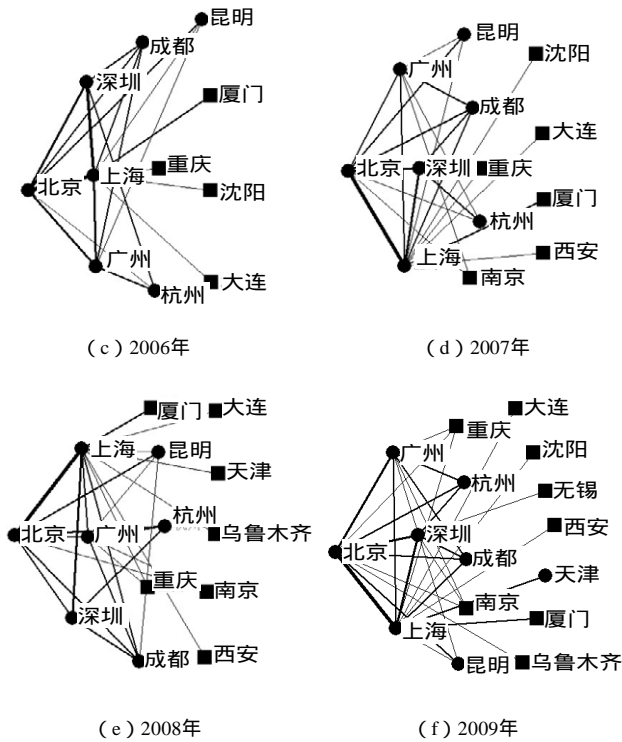


图1 2004—2009年主要城市航空货运网络结构  
Fig.1 Air cargo network structure of the main cities from 2004 to 2009

从图1中可以看出,2004—2009年我国航空货运逐渐形成以北京、上海、广州、深圳为核心复合枢纽,以昆明、成都、杭州、沈阳、重庆、南京、西安等地为区域枢纽的航空货运网络。同时,其枢纽作用正在日益加强,以上海为例,2004年仅与北京、深圳、广州、厦门、成都、昆明连接,但随着枢纽效用的影响,到2009年,增加了与沈阳、重庆、西安、大连等5大城市的连接,逐渐发展成为高度核心的货运枢纽中心,在促进运输网络完善的同时,也进一步增强了自身作为枢纽的优势地位。从增长形式来看,枢纽城市(如上海、北京等)一直在我国航空货运的

发展中担当主要角色,规模逐渐扩大且连接强度日益加强。一些城市(如昆明、成都)在其地区优势的影响下逐渐发展形成了区域枢纽,在我国航空货运的发展中逐渐发挥了重要作用,成为我国航空货运网络的重要节点。

1.2 航空货运网络核心-边缘结构

根据关系数据的类型,采用核心-边缘全关联的模型,此模型可将航空货运网络中的城市节点分为两组:一组是两城市间航空货运联系紧密,可以看成是一个凝聚子群(核心);另外一组是城市之间没有直接货运联系,但该组城市与核心组中的城市之间都存在关联<sup>[4]</sup>。其测度由以下两个等式构成:

$$\text{等式 1: } \rho = \sum_{i,j} \alpha_{ij} \delta_{ij}$$

$$\text{等式 2: } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & c_i = \text{核心} \text{ or } c_j = \text{核心} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases}$$

在等式中,  $\alpha_{ij}$  表示在观测数据中关系的存在与否,如果  $i$  和  $j$  之间存在关系,则  $\alpha_{ij} = 1$ , 否则为 0。  $c_i$  指的是城市节点  $i$  所隶属的类型(核心或者边缘),  $\delta_{ij}$  指的是一种关系在理想状况下的存在与否。如果各个值有固定的分布,那么当且仅当由各个  $\alpha_{ij}$  组成的矩阵  $A$  和由各个  $\delta_{ij}$  组成的  $\Delta$  矩阵相等的时候,  $\rho$  这个测度才会达到最大值。这样对  $\rho$  达到最大值而言,这种结构就是一个核心-边缘结构。

利用航空货运网络关系矩阵,分析航空货运网络中各城市的核心、边缘地位。2004—2009年在由约90个城市组成的网络中,处于核心地位的城市如表1所示,其余为边缘城市。由表1可以发现,核心城市大都是在航空货运网络中发挥核心枢纽与区域枢纽作用的城市。

表1 2004—2009年核心城市  
Tab.1 The core cities from 2004 to 2009

年份/年	核 心 城 市											
2004	北京	成都	广州	杭州	昆明	上海	深圳	西安	长沙	厦门		
2005	北京	成都	广州	杭州	昆明	上海	深圳	西安	长沙	南京		
2006	北京	成都	广州	杭州	昆明	上海	深圳	西安	长沙	南京	重庆	
2007	北京	成都	广州	杭州	昆明	上海	深圳	西安	长沙	南京	重庆	武汉
2008	北京	成都	广州	杭州	昆明	上海	深圳	西安	长沙	南京	重庆	武汉
2009	北京	成都	广州	杭州	昆明	上海	深圳	西安	长沙	南京	重庆	武汉

核心城市即中心城市形成的一个凝聚子群,而另一些城市作为边缘城市形成一个群体。由表 1 可知,北京、成都、广州、上海等 9 大城市一直处于航空货运网络的核心地位,随后逐渐增加了南京、重庆、武汉 3 大核心城市,由此可见,发挥枢纽作用的城市日益增加。由其关系矩阵得出其密度矩阵,两个群体之间的关系密度值分布如图 2 所示。可以发现,核心城市之间的关系密度远远大于核心-边缘城市之间及边缘城市之间的关系密度,由此可见核心城市在整个航

空货运网络中发挥着枢纽作用,并且边缘城市也在核心城市的辐射下逐年发展自身的网络连接。核心城市之间的关系密度保持在 0.9 以上,呈稳定的发展状态,而核心-边缘城市间的关系密度在 2005 年后逐年降低,表明随着核心城市的逐步发展,核心城市在整个货运网络中占有越来越重要的地位。但针对边缘城市之间的关系密度一直处于低谷的状态,也需要着力发展边缘城市间的货运网络构建,从而形成以枢纽城市为核心,加强边缘城市建设的发展形态。

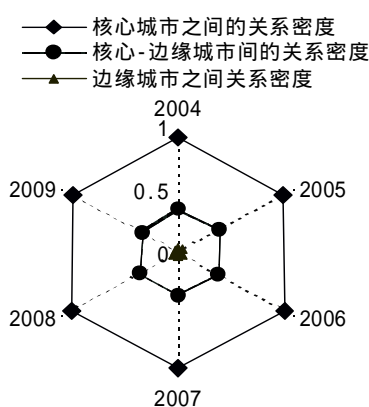


图2 2004—2009年核心-边缘城市关系密度值  
Fig.2 Relationship density of the core-edge cities from 2004 to 2009

### 1.3 航空货运网络无标度特性

网络中节点度的分布情况可以用分布函数  $p(k)$  进行描述,近年来的大量研究表明,许多实际网络的度分布可以用幂律形式来更好地描述。幂律分布也称为无标度分布,具有幂律分布的网络也称为无标度网络。在双对数坐标系下,若网络节点的度分布呈现一条负斜率直线,则节点度数服从幂律分布,即

$$p(k) \sim k^{-\gamma}$$

式中,  $\gamma$  表示该直线斜率的绝对值。如果  $\gamma$  很小,则该网络具有无标度性<sup>[5]</sup>。

在双对数坐标下,2004—2009 年我国航空货运网络节点度分布的特征值如表 2 所示。

表2 2004—2009年航空货运网络度分布的幂指数

Tab.2 Power indexes of the air cargo network degree distribution from 2004 to 2009

年度	城市数 $N$	连通度 $d$	整体数据拟合		第一段拟合[1, 18]		第二段拟合[18, —]	
			幂指数 ( $ \gamma $ )	相关系数 ( $ ACC $ )	幂指数 ( $ \gamma $ )	相关系数 ( $ ACC $ )	幂指数 ( $ \gamma $ )	相关系数 ( $ ACC $ )
2004	83	746	1.291	0.915	0.424	0.972	2.254	0.973
2005	87	814	1.279	0.917	0.425	0.963	2.237	0.978
2006	92	908	1.287	0.917	0.427	0.957	2.214	0.981
2007	98	1 034	1.282	0.917	0.430	0.968	2.252	0.984
2008	102	1 076	1.314	0.918	0.379	0.991	2.203	0.983
2009	116	1 200	1.341	0.924	0.399	0.991	2.141	0.981

由表 2 可知,整体数据的拟合虽然满足幂律分布,但拟合程度不高。为此,采用分段幂律分布的方法,进行分段拟合。为了分析的统一性,采用  $k=18$ ,得第一段拟合、第二段拟合数值,由其幂指数值和相

关系数值可知我国航空货运网络具有无标度特性。同时,观测图 3 可以看到 5 个子图具有良好的幂律特性,其极高的相关系数表明拟合直线与实际货运数据拟合程度较好。

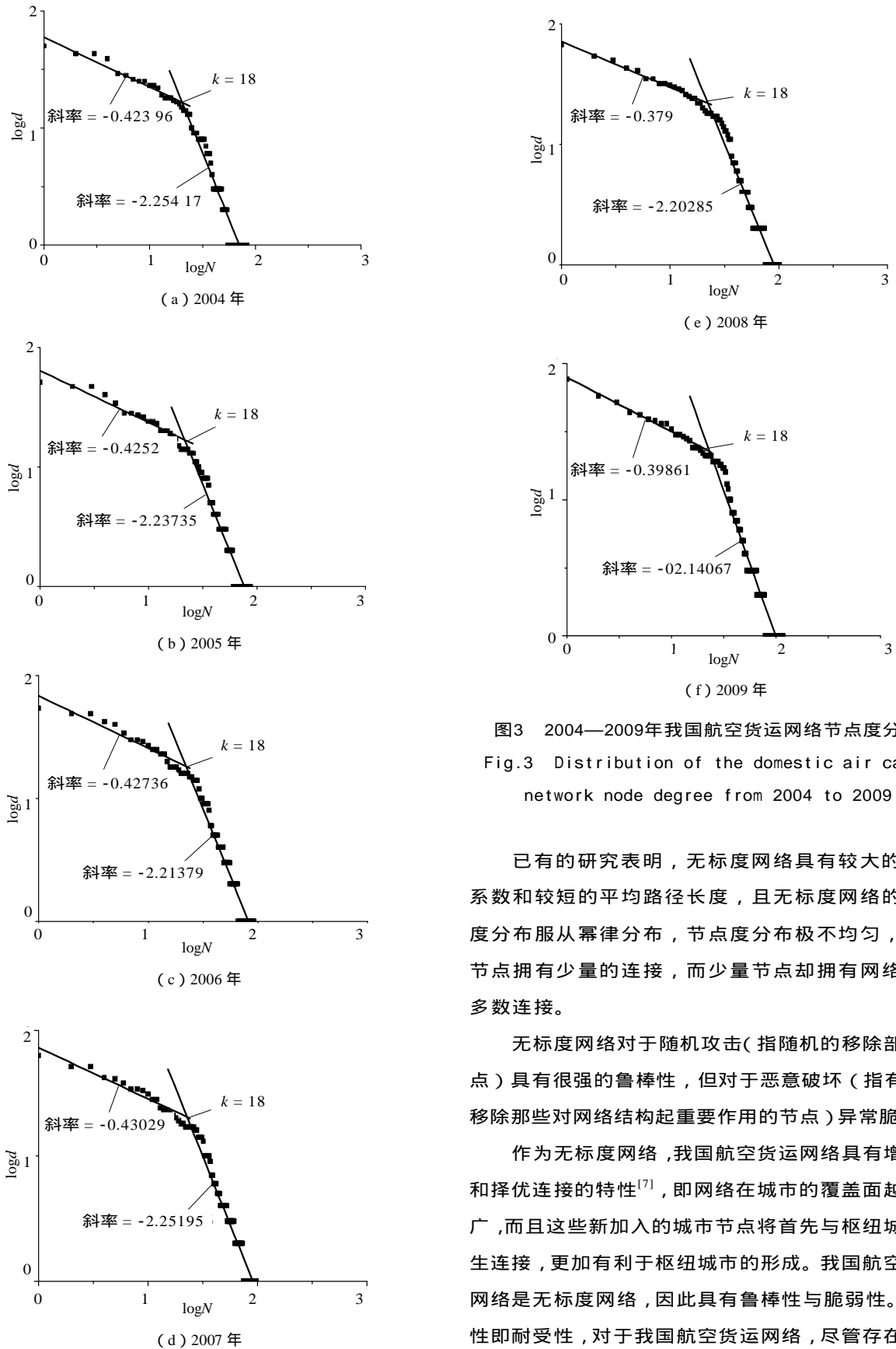


图3 2004—2009年我国航空货运网络节点度分布  
Fig.3 Distribution of the domestic air cargo network node degree from 2004 to 2009

已有的研究表明，无标度网络具有较大的聚类系数和较短的平均路径长度，且无标度网络的节点度分布服从幂律分布，节点度分布极不均匀，大量节点拥有少量的连接，而少量节点却拥有网络的大多数连接。

无标度网络对于随机攻击(指随机的移除部分节点)具有很强的鲁棒性，但对于恶意破坏(指有意的移除那些对网络结构起重要作用的节点)异常脆弱<sup>[6]</sup>。

作为无标度网络，我国航空货运网络具有增长性和择优连接的特性<sup>[7]</sup>，即网络在城市的覆盖面越来越广，而且这些新加入的城市节点将首先与枢纽城市产生连接，更加有利于枢纽城市的形成。我国航空货运网络是无标度网络，因此具有鲁棒性与脆弱性。鲁棒性即耐受性，对于我国航空货运网络，尽管存在着激

烈的竞争对手和各种环境的干涉,但是由于其自身具有稳定的网络构建基础和整体网络的耐受性,因此仍然可以不断发展、完善。因此,除了网络中枢纽城市外,边缘城市很难对整个航空货运网络的运行产生冲击。但在航空货运网络中,枢纽城市的节点数要比边缘城市的节点数少得多,这种结构使得具有无标度特性的航空货运网络在面对蓄意攻击时变得很脆弱,因为只要移除任一枢纽城市,都将会对整个网络产生巨大的影响,即无标度网络的脆弱性。

## 2 航空货运枢纽城市的作用分析

根据航空货运网络的分析,我国航空货运网络属于无标度网络,意味着网络具有节点增长和节点择优连接的特性,同时网络也将受到随机性攻击和蓄意攻

击两种破坏方式而使其可靠性降低。蓄意攻击是最主要也是破坏力最强的网络破坏,对于航空货运网络,研究其蓄意攻击可以为预防航空网络遭受恶意攻击进而瘫痪提供科学的预防措施。在航空货运网络中,航空枢纽城市对整个网络的特性起着主导和支配作用,枢纽城市的运行效率和可靠性对整个网络的正常运行具有重要意义。以此,以整个航空货运网络和移除枢纽城市后的航空货运网络为研究对象,运用网络理论中用于刻画网络结构统计特征的指标对其进行对比分析。网络结构统计指标主要有节点的度、平均度、平均路径长度、密度和聚类系数等<sup>[6]</sup>。通过构建航空货运网络的关系矩阵,计算出2004—2009年整个航空货运网络、移除1个枢纽城市(上海)和移除3个枢纽城市(上海、北京、广州)后的航空货运网络的静态统计特征值,其对比如表3所示。

表3 航空货运网络统计特征值

Tab.3 Statistical eigenvalues of the air cargo network

统计特征	2004			2005			2006			2007			2008			2009		
	整体	移除1个	移除3个	整体	移除1个	移除3个	整体	移除1个	移除3个	整体	移除1个	移除3个	整体	移除1个	移除3个	整体	移除1个	移除3个
平均路径长度	2.25	2.27	2.38	2.23	2.24	2.36	2.23	2.27	2.33	2.22	2.25	2.40	2.23	2.26	2.39	2.26	2.28	2.42
凝聚力指数	0.50	0.47	0.33	0.50	0.45	0.33	0.50	0.48	0.34	0.50	0.49	0.35	0.50	0.49	0.32	0.49	0.48	0.30
平均度	8.99	8.05	6.00	9.36	8.37	6.31	9.87	8.90	6.85	10.55	9.61	7.47	10.55	9.66	7.48	10.35	9.53	7.36
节点度	746	660	480	814	720	530	908	810	610	1034	932	710	1076	976	740	1200	1096	832
聚类系数	0.73	0.70	0.63	0.73	0.71	0.66	0.76	0.72	0.68	0.75	0.71	0.64	0.76	0.73	0.63	0.76	0.73	0.62

平均路径长度说明的是航空货运网络中所有节点对之间的平均最短距离,代表航空运输的深度。路径是指从某一城市*i*通向其他城市*j*所需要经过的边的条数 $d_{ij}$ ,将*N*定义为网络的节点数,则平均路径长度即为 $L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j} d_{ij}$ <sup>[7]</sup>。由表3中所列示的各年度平均路径长度可以看出,各年度航空货运整体网络平均路径长度集中于2.23左右,建立在距离基础上的凝聚力指数集中于0.49左右。在整体网络的基础上,移除1个枢纽城市(上海)进行网络蓄意攻击试验,其平均路径长度增长到2.26左右,在此基础上的凝聚力指数也在下降,其中以2005年降幅最为

严重。当对3个枢纽城市(上海、北京、广州)进行蓄意攻击试验时,其平均路径长度增长较为明显,都升高到2.3以上,凝聚力指数也迅速下降,降低到0.3。从平均路径长度和凝聚力指数的变化可以发现,当蓄意破坏网络中的枢纽城市时,网络中城市之间需要经过的中转次数增多,通达性下降,并呈现出较低的凝聚力。

网络节点度是衡量节点属性最直接的概念。节点*i*的度 $k_i$ 定义为与该节点相连接的其他节点的数目。在航空网络中,某节点的度是与该城市有直接航空联系的城市数目,度越大就意味着航空服务能力越强、越重要。表3中列出的节点度是各年度网络中所有节

点的度数之和,可以发现,节点度呈逐年上升的趋势,当移除1个枢纽城市时,其网络的节点度缺失约占网络整体的10%~20%;当移除3个枢纽城市时,其网络节点度缺失约占整体网络的30%~40%。平均度表示网络中所有节点的度的平均值。我国各年航空货运网络的平均度在9左右,表明平均每个城市与其他9个城市有直接的航空联系。但移除枢纽城市后的货运网络平均度集中于6左右,表明平均每个城市与其他6个城市直接相连。由此可知枢纽城市的移除降低了网络的连通性。

聚类系数反映航空货运网络的聚集程度,是某个节点与所有相邻节点之间连边的数目占可能的最大连边数目的比例<sup>[8]</sup>,代表航空运输的广度。Barrat等对聚类系数所定义的公式为  $C = \frac{1}{N} \sum_i C_i$ 。整个网络的聚类系数  $C$  就是所有城市的聚类系数的平均值。如表3所示,2004—2009年网络的平均聚类系数在0.73~0.76,逐年上升,表明在2004—2009年航空货运网络的集团化程度已稳定保持在较高的水平。但当移除枢纽城市节点时,网络的聚类系数出现下降趋势,由此可见枢纽城市对网络的集团化程度存在影响,一个

枢纽城市发生故障将会引起与其相连接的其他节点运行效率的低下。

### 3 结 论

通过对2004—2009年我国航空货运网络结构的实证分析可以发现其网络具有无标度特性,是一个复杂网络。我国航空货运网络属于无标度网络,意味着网络具有增长性和择优连接两种机制,有利于枢纽的形成。同时,无标度货运网络的形成也意味着当面对随机攻击时,网络具有较强的承受能力,但当面对蓄意攻击时,由于其对枢纽节点的依赖,将会使鲁棒性大大降低甚至完全丧失。我国航空货运网络的连通性和聚集性在受到蓄意攻击试验时都存在明显的降低趋势,平均每个城市与其他城市的连接数从9个降低到6个,聚类系数也在原有基础上降低了10%~20%,由此可见我国航空货运网络的脆弱性及枢纽城市在整个航空货运网络中的重要地位。因此,在发展建设我国航空货运网络的进程中,需加强对枢纽城市的管理,增强其他节点的连通性,逐步完善航空货运网络枢纽型的建设,从而提高整个网络系统的运行效率。

#### 参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2010年民航行业发展统计公报 [DB/OL]. [http://www.caac.gov.cn/C1/201105/t20110504\\_39462.html](http://www.caac.gov.cn/C1/201105/t20110504_39462.html).
- [2] 中国民用航空局发展计划司. 从统计看民航(2005—2010)[M]. 北京:中国民航出版社.
- [3] 高峰,党亚茹. 世界航空客运网络的节点度分布特征[J]. 科学学与科学技术管理, 2009, 7(7): 75-79.
- [4] 刘军. 社会网络分析导编[M]. 北京:社会科学文献出版社, 2004.
- [5] Newman M. E. J. The structure and function of complex networks [J]. SIAM Review, 2003, 45: 167-256.
- [6] 党亚茹,李雯静. 基于网络视角的航空客流结构分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 5(10): 169-174.
- [7] 王纯. 基于无标度网络模型的企业销售网络特征分析[J]. 商业研究, 2009, (3): 39-40.
- [8] 赵月,杜文,陈爽. 复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用[J]. 城市交通, 2009, 1(7): 57-63.

(中文编辑:刘娉婷)