

基于复杂网络和乘客选择理论的长三角机场群研究^①

胡一竑 朱道立^②

(同济大学经济与管理学院, 上海 200092)

摘要: 中国航空运输业正在致力于形成合理的枢纽机场和支线航空的空间布局。本文研究航空机场布局和旅客流量分布的空间不平衡性, 以长江三角洲机场密集但整体效率不佳的情况为例, 从复杂网络和乘客出行路径选择理论出发, 建立出行路径选择优化模型, 分析乘客的航空出行路线选择, 利用复杂网络中的介数概念说明枢纽机场的中转服务对周边机场的抑制作用。我们采用实际的航空数据进行了计算和模拟, 得到了目前长三角地区各机场的介数和带权介数, 并举南京为例做了具体分析, 最后对今后机场发展和空间布局建设提出了建议。

关键词: 复杂网络 航空网络 乘客选择理论

中图分类号: F562.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9679(2011)03-0106-05

一、引言

目前中国航空运输网络的地域布局和客流量分布呈现强烈的不平衡性, 客流量集中在枢纽机场, 部分地区机场集中、密度高。如长江三角洲地区作为中国经济高度发达地区拥有众多的机场。每平方公里的机场密度为 1.09 个, 成为中国机场密度最高的地区之一。

2000 年以来, 长三角地区航空客运量逐年增加, 增长速度较快; 是中国航空客运发展最好的地区之一。但是长江三角洲的机场普遍面临亏损的问题。有资料显示, 2004 年, 我国民用航空定期航班通航机场 133 座 (不含香港、澳门), 大多数处于亏损状态, 真正实现盈利的不足 10 座, 中小型机场, 大部分处于亏损状态, 经营困难, 如浙江萧山机场、江苏的南通机场等, 都面临着航班少、客源少、亏损大的困境。为什么长江三角洲整体航空流量连续增长的情况下, 还有机场连年亏损? 航空机场应该如何科学布局? 本文试图用复杂网络理论和乘客选择理论来回答这个问题, 解释长江三角洲机场之间存在的竞争和互补的关系, 同时为将来的机场群建设提出发展方向和解决思路。

复杂网络理论近年来广泛应用在很多领域, 成为物理、生物、经济、社会学等多个学科共同关注的前沿热点。它把大量自然界和社会中存在的复杂系统抽象为由点和边组成的网络模型, 通过对网络的拓扑性质、动力学性质等研究, 揭示系统内在特性, 为研究复杂性系统提供了新的理论基础。航空网络已经被复杂网络学者研究证明为无标度网络 (scale-free networks), 适合采用复杂网络理论进行研究。

R. Guimera 在对全球航空网络的研究中用介数 (betweenness) 衡量城市在全球航空网络中的重要程度, 并说明网络内存在

^① 基金项目: 高校博士点新教师基金 (20100072120045), 同济大学青年教师计划项目 (2009KJ058)

^② 作者简介: 胡一竑, 同济大学经济与管理学院讲师、博士, 研究方向为复杂交通网络; 朱道立。同济大学经济与管理学院讲师。

社团结构 (community structure) 而引起某些节点介数特别高, 成为重要节点, 使得介数的分布具有空间上的不平衡性。国内金凤君等人对中国航空网络地域系统进行了研究, 指出了中国航空发展的规律性: (1) 机场数量、等级与吞吐量不匹配, 且空间布局不均衡, 机场空间布局与航空的吞吐量分布存在空间错位。(2) 旅客运量集中在少数枢纽机场。同时他们还指出航空网络的空间联系和拓展具有独特的规律, 呈现强烈的轴辐射网络结构。周蓓利用复杂网络理论对四川的航空网络进行了拓扑性质和演变机制的研究。

上述研究已经指出在航空网络中机场布局和旅客流量的分布存在强烈的空间不平衡性, 并且这种不平衡性和机场的重要性可以用拓扑性质来衡量。我们进一步将交通运输理论中的乘客出行路径选择理论和复杂网络拓扑性质联系起来, 用来解释这种不平衡性是如何由乘客的选择行为产生的, 并将该模型应用于中国航空网络特别是长江三角洲机场群的研究, 说明上海作为全国性枢纽机场提供的中转服务对周边机场具有强烈的抑制作用。

下文的篇章安排如下: 第二节说明选取的数据来源, 和网络构建过程。第三节分析复杂网络中的拓扑性质, 第四节建立乘客选择模型, 具体分析长江三角洲的机场之间的竞争关系, 第五节以南京为实例进行算例分析, 展示分析结果。最后是结论。

二、数据来源和描述

本文研究所用的数据包含全国所有机场的航线、流量。数据来自中国民航总局每年公布的年报和国际航空 OAG 数据库, 涵盖了 2003 年到 2006 年的国内所有航班数据。包括 136 个城市, 1701 条直飞航班。

我们用带权网络图 $G(N, V)$ 来表示航空网络, 点代表城市, 连线代表这两个城市之间有直飞航班, 每条边上带有权重 (图 1)。这样中国航空网络可以用一个 136×136 的邻接矩阵 A 来表示。如果城市节点 i 和城市节点 j 之间有直达航班, 则 $U_{ij} = 1$, 否则用 0 表示。航班邻接矩阵基本是对称的, 只有极少量的城市对之间的航班是不对称的, 它们采用环路飞行路线, 比如重庆—丽江—昆明—重庆的航班安排。为了计算方便起见, 我们令邻接矩阵为对称矩阵, 对计算结果不产生大的影响。距离矩阵 L 中每个元素 l_{ij} 代表城市 i 和城市 j 之间的航空距离。费用矩阵 W 里面的元素 w_{ij} 为每条边的费用, 具体表示如第四节中方程 2 所示。

按照目前长三角 16 城市的范围, 机场数量已达 10 个: 上海虹桥和浦东、南京禄口、杭州萧山、南通兴东、宁波栎社、无锡硕放、常州奔牛、舟山普陀山、台州黄岩。在我们建立起来的全国航空城市网络中, 我们把上海浦东机场和虹桥机场作为同一个节点处理。

三、复杂网络拓扑性质分析

(一) 点度

节点的度 (degree) 定义为和该节点所有连接的边的总数。度分布就是网络中所有点度的概率分布。Barabasi 和 Albert 发现世界上许多网络的点度分布都服从幂律分布 (power-law), 具体表现在网络中大多数的节点度都很低, 而极少数点具有很大的度。这样的网络被称为“无标度网络” (scale-free networks)。点度的计算公式如下:

$$k_i = \sum_{j \in G} a_{ij}$$

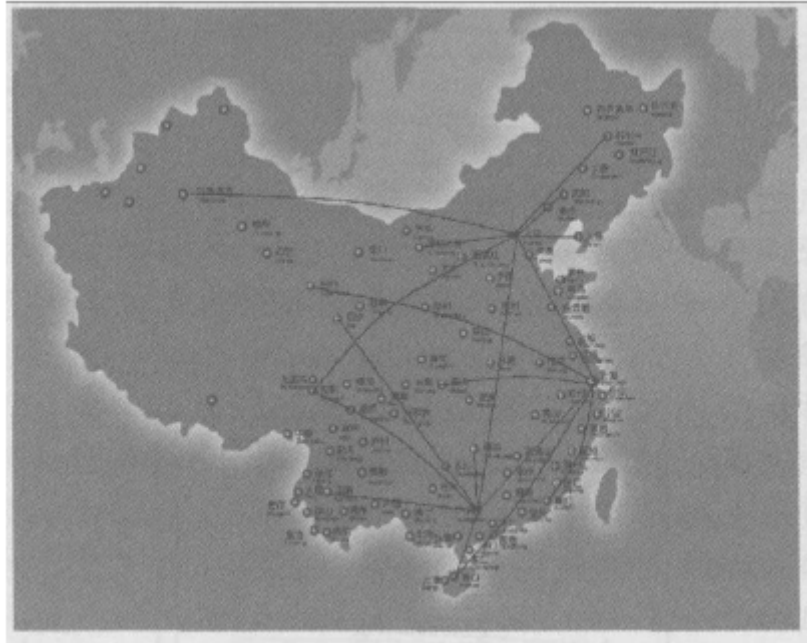


图 1 全国机场网络示意图,点代表机场,连线代表直飞航班

我们采用 06 年的数据统计后得到全国航空网络的点度分布如图 2 所示, 呈现截尾的幂律分布形式 (truncated power-law distribution), 这和世界航空网络的性质一致。

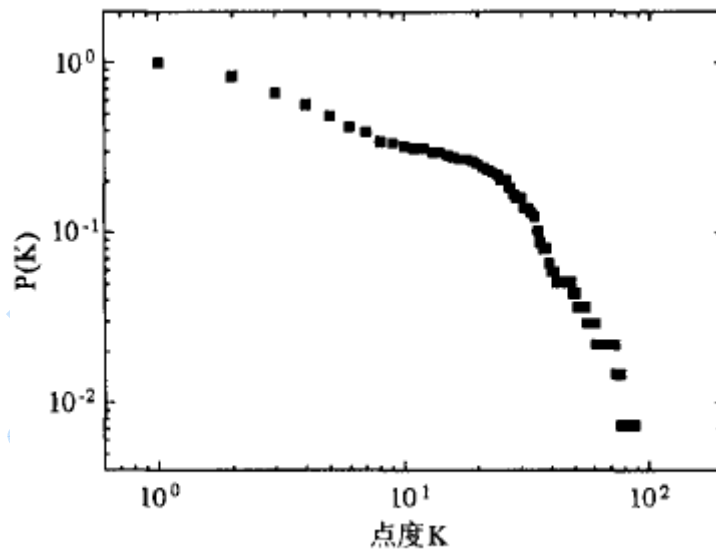


图 2 中国航空网络点度分布图

长江三角洲的机场从 2003 年到 2006 年以来, 点度基本保持稳定, 而流量普遍呈上升趋势, 见表 1 和图 3、图 4。其中上海从 2003 年的 24, 756, 008 增加到 2006 年的 46, 125, 103, 3 年里就增加了将近 1 倍, 增长幅度惊人。其他机场每年也都持续增长, 尤其无锡机场从 04 年通航以来, 每年翻一番, 说明长三角地区的确存在巨大的航空运输需求。

表 1

	点度				客流量			
	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006
上海	69	69	74	72	24756008	35910921	41462332	46125103
常州	6	5	5	8	161161	241386	316180	438442
杭州	36	33	36	36	4352301	6338042	8092641	9919532
南京	38	38	38	37	3329477	4573987	5385933	6269103
南通	2	2	2	4	64086	82077	89337	113185
宁波	16	21	20	20	1300934	1852107	2532910	2972429
无锡	/	3	8	14	/	326704	619131	924883
舟山	5	5	5	5	260331	380538	397947	320976
黄岩	6	7	6	6	135897	196710	225874	271279

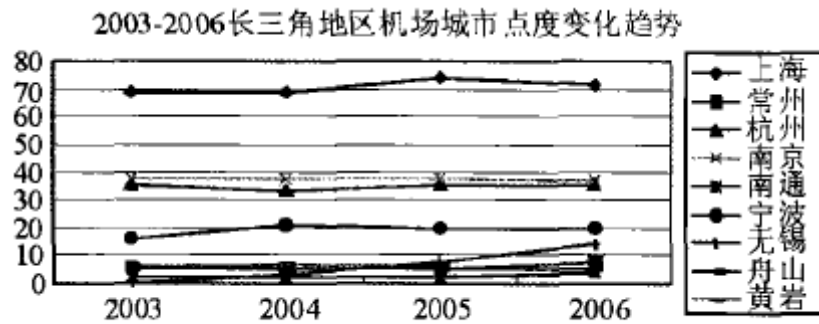


图 3 长三角各机场历年点度变化趋势

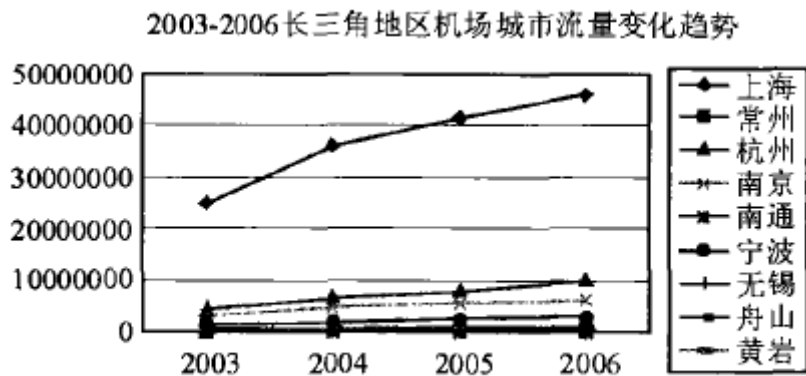


图 4 长三角各机场历年流量变化趋势

(二) 介数

介数 (Betweenness) 是指通过某一个节点的所有最短路径数量，反映了一个节点在网络中的影响力。具体的计算公式为：

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_s(v)}{\sigma_s} \frac{\sigma_t(v)}{\sigma_t}$$

公式中的 $\sigma_s = \sigma_t$ ，代表从 s 点到 t 点的所有最短路径数量， $\sigma_s(v)$ 代表所有从 s 到 t 点并且经过 v 点的最短路径数量。需要指出的是，这里的最短路径是基于无权网络来计算的。

我们根据 06 年的数据计算了长三角地区九个城市的介数，见表 2 中的第二列，2006 年介数。上海介数最大，达到了 2324.14，这在全国航空网络中也是名列前茅。

表 2 长三角地区各机场的介数和带权介数

	介数	带权重的介数
上海	2324.14	1450
常州	0.83	0
杭州	63.113	3
南京	104.8	4
南通	3.033	1
宁波	11.332	10
无锡	0.124	0
舟山	0.133	0
黄岩	1.0003	0

四、乘客出行路径选择理论模型

航空网络作为交通运输基础设施，承担了运载乘客的功能。乘客是独立的经济个体，根据成本最小化的原则进行决策。乘客根据自己对金钱和时间的综合成本考虑选择航空出行路线，最短路径选择基于带权网络来计算。公共交通运输网络中乘客的出行路径选择问题是交通科学中的热点问题，可以表述为在公交线路网络中，乘客在任意两个给定的站点之间选择一套最优出行线路组合方案的问题。

我们首先给出模型的几个假设：

1. 旅客在选择路线的时候，根据成本最小原则，可以选择直飞，也可以选择通过某个机场中转。
2. 旅客在机场转机会产生一定的时间延迟，带来时间延迟成本。根据实际情况，转机次数一般不超过两次。
3. 所有的旅客对于时间的价值成本评价一致，也就是时间价值系数 VOT (Value of time) 为统一的常数。
4. 所有 O-D 对之间的旅行需求已知。

5. 某个点如果和其他点的链接多，说明经过此点的人流多，转机机会大，根据规模经济效应，和该点相连的边上的旅行费用会降低。费用降低的程度我们假设和这条边两端的点的点度 K_i, K_j 成正比，模型中我们设为价格调整系数 α_{ij} 。比如北京和上海两个点度很大的城市之间旅客多、流量大，航空公司可以使用大飞机有效降低整体运营成本，所以每位旅客的飞行费用也能相应降低。

根据以上假设，我们规定节点 i, j 组成的边上的费用权重 w_{ij} 为飞行的费用和飞行时间成本之和：

$$w_{ij} = \frac{l_{ij}}{\alpha_{ij}} \cdot p + vot \frac{l_{ij}}{v}$$

乘客从出发地出发到目的地，根据成本最小化原则选择路线。成本包括经济费用和时间成本，而时间成本不仅包括花在航线上的飞行时间，也包括在机场转机产生的时间成本。某 OD 对 (s, t) 之间的乘客出行的决策方程为

$$C_s = \min_{P \in \Omega} \left(\sum_{(i,j) \in P} w_{ij} + VoT \times m \times T \right)$$

$$s.t. \quad w_{ij} = \frac{l_{ij}}{\alpha_{ij}} p + vot \frac{l_{ij}}{v}$$

$$\alpha_{ij} = 1 + \frac{k_i k_j}{\sum_j k_j}, i \neq j$$

其中：

P ：点对 (s, t) 之间的某条路径

Ω ：所有从 s 到 t 的路的集合

w_{ij} ：节点 i, j 组成边的权重

l_{ij} ：节点 i, j 之间的距离

α ：价格调整系数

p ：单位距离的飞行费用

v ：平均飞行速度

vot ：单位时间价值

m ：中转次数，也即路径 P 上的所有中间点数

T ：平均中转时间

C_s ：节点对 O, D 之间的最小出行费用

建立起模型后，我们还需要对一些参数进行设定：根据中国国内航空现状，取飞行速度 v 为 600 公里/小时，转机时间 T 为 2 小时。单位距离的飞行费用 P ，根据中国民航局规定的境内基准价，取 $p=0.75$ 元/公里。时间价值 VOT 为 50 元/小时。

模型中乘客根据成本最小选择自己的路线，据此可以计算出这种情况下每个节点的介数，只是这时候的介数是根据带权网络得到的：

$$C_B^w(v) = \sum_{i \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_x^{vi}(v)}{\sigma_x^{ti}}$$

我们用全国航空网络 06 年的数据计算得到乘客选择模型下长三角各机场的带权介数，见表 2 中的第三列，和第二列形成了鲜明的对比。杭州的介数从 63.3 降到了 3，南京的介数从 104.8 降到了 4，其他机场基本都降低到了 0，只有上海仍然保持很高的介数。也就是说乘客选择路线的时候，很少选择长三角地区除上海以外的机场中转。那些机场的客流量主要来自从该城市出发和到达的乘客。而这些对于一个机场要做大做强是远远不够的。

中转旅客是一个机场重要的客流量来源。据统计，美国大部分的枢纽机场 50%-80% 的客流量来自中转旅客[15]，国际上评价枢纽机场的一个标准包含中转旅客的比例。不能吸引到中转旅客，一个机场只能依靠本身腹地的经济贸易、旅游的发展，机场业务规模的扩大受到限制。

从长三角地区地理空间位置来看，客流量是不均匀分布的，大部分集中在上海这个枢纽大机场。上海吸引了绝大部分的中转旅客，在一定程度上抑制了其他周边机场的客流量。

五、算例分析：南京

本节我们举南京的例子进一步说明乘客选择模型和由此得到的带权介数概念。南京是长江三角洲机场群中的重要机场，仅次于上海，也仍然面临着诸多如流量不足航班不足的问题。南京禄口机场设计年客运量为 1200 万人次，然而 2006 年全年实际进出港人数仅有 630 万人，年平均上客率仅为 50%。这部分是由于近在咫尺的竞争对手上海机场吸引走了旅客。南京禄口国际机场到上海虹桥国际机场大约 250 公里的路程，从沪宁高速公路走用不了三小时。浦东国际机场距虹桥国际机场也只有几十公里。因此南京和上海构成了互相竞争关系。

南京点度是 35，也就是说和 35 个城市有直飞航班。南京的介数为 104，但是在我们的模型下带权介数为 4，降低了绝大部分。下面我们试着分析为什么会产生这种情况。

假设有一个旅客要从温州到乌鲁木齐，他根据成本最小选择飞行路线。因为温州和乌鲁木齐之间并没有直飞航班，所以必须选择某个机场进行中转，我们假设是在上海和南京之间进行选择。温州和乌鲁木齐都和南京，上海相连，当不考虑成本计算介数的时候，旅客选择从南京和上海中转是一样的，因为路程长度都为 2。但是当考虑旅客成本的时候，温州出发的旅客更愿意从上海转机。因为从上海转机，费用较低。南京和上海相邻，地理位置上相差不多，但是机场的航班数和航班价格却相差很多。这就是为什么在带权介数指标下南京的中转航班很少甚至为 0 的原因。在南京附近的上海吸引走了长三角大部分的中转旅客。

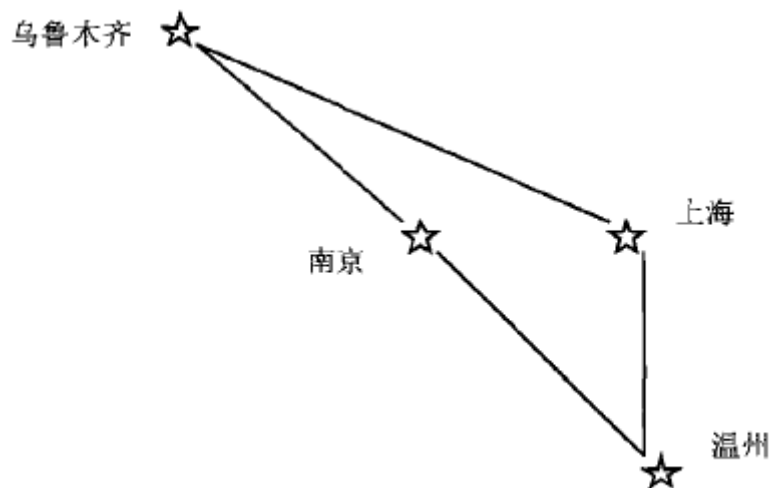


图 5 中转航班路线选择示意图

这个例子中的相关数据如距离和点度如下：

距离(km)

ij	乌鲁木齐	温州
南京	3021	489
上海	3269	372

点度

南京	乌鲁木齐	温州	上海
37	27	28	72

根据这些数据可以计算得到：

价格调整系数

α_{ij}	乌鲁木齐	温州
南京	1.555556	1.576132
上海	2.190476	2.234568

航段成本

wij	乌鲁木齐	温州
南京	1708.3	273.4
上海	1391.7	155.9

最终每条路线的费用和花费的中转时间分别如下表：

路线	两段航线上的成本	中转的时间成本	总成本
温州-上海-乌鲁木齐	$155.9 + 1391.7 = 1646.6$	100	1647.6
温州-南京-乌鲁木齐	$273.4 + 1708.3 = 2071.7$	100	2081.7

转道上海的费用比转道南京的费用小，因此旅客会选择上海中转。这在很大程度上解释了近几年来上海的客流量增长最快的原因。其他长三角的机场流量虽有增长，但速度不快，因为他们的增长主要得益于宏观经济和本地经济贸易能力的增长，没有吸引到非本地的中转旅客，无法进一步迅速扩大。

六、结 论

本文针对长三角地区的机场群过分密集、布局不合理的现象进行了研究，采用交通乘客选择理论和复杂网络分析了乘客的行为模式和原因，并采用实际全国航空数据研究了长三角各机场特别是南京的情况，说明了上海这个枢纽机场以及它的中转服务对周边机场的影响力。该研究对其他地区的机场群具有同样的借鉴意义，如文献[4]指出位于首都附近的天津机场也面临同样的问题。每年有大量的航空旅客因为航线航班服务等各种因素转至首都国际机场乘机出行。天津机场航线少、航班少、旅客少的情况一直未有改善。京津航空运输发展呈现极不平衡状况。因此探讨如何改进国内的航空布局，如何发展大枢纽和附近的机场，平衡相互之间的关系，促进航空业整体发展有很大的实际意义。

从本文的研究成果来看，旅客有自身航线选择的规律，他们的选择是影响到机场最终盈利的关键因素。并且在一个相近的地区，大的枢纽机场对周边机场有强大的影响力。在今后机场生产能力设计、航线网络规划设计的时候，不能贪大求全，盲目扩张，造成资源浪费。同一地区的机场应有不同的定位，形成差异化经营，才能促进区域经济的和谐平衡发展。

参考文献：

1. 柏刚，建机场，长三角急需加强协调！[EB/OL]，东方网，2007，[2008-1-28]，
<http://www.shjubao.cn/epublish/gb/paper240/1/classU24UUU003/hwz9166> } 1.htm.
2. 东方网，“长三角”机场密度已超美国[EB/OL]，[2008-1-28]，
<http://health.eastday.com/epublish/gb/paper494/1/classU4y4U0UU8/hwz136U0U9>，htm.
3. 新浪网，长三角各大机场纷纷进行扩建[EB/OL]（2007年05月14日）[2008-1-28]，
<http://chanye.finance.sina.com.cn/sh/2007-05-14/321107.shtml>.
4. 中国商报，长三角扩建机场强调科学定位[EB/OL]，（2007年07月03日）[2008-1-28]，

http://www.cflp.org.cn/cflp/newss/content/200707/670_8U7U1.html.

5. 浅析江苏民航发展现状[EB/OL]. (2007 年 05 月 29 日) [20081-28],
<http://bbs.feeyo.com/posts/229/topic-0011-2291326.html>.

6. NewmanMEJ. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45 (2): 167-256..

7. LiW, CaiX, Statistical analysis of airport network of China[J]. Phys Rev E, 2004, Vol 69: 046106..

8. Guimerà R, Mossa S, Turtschi A, et al. The world-wide air transportation network: anomalous centrality, community structure, and cities global roles[J]. PNAS, 2005, 102 (31): 7794-7799.

9. 王胶娥, 金凤君等, 中国机场体系的空间格局及其服务水平[J], 地理学报, 2006, 61 (8): 829-838.

10. 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[J], 地理研究, 2005, 24 (5): 774-784.

11. 王法辉, 金凤君, 中国航空客运网络的空间演化模式研究[1], 地理科学, 2003, 23 (5): 519-525.

12. 金凤君, 我国航空客流网络发展及其地域系统研究[J], 地理研究, 2001, 20 (1): 31-39.

13. 周蓓, 四川省民用航空网络的拓扑结构特征及其演化机制[J], 经济地理, 2006, 26 (4): 577-580.

14. Barabási AL, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J], Science, 1999, 208: 509-512.

15. Richard Neufville, Alexandre Barros, and Steven Belin, Journal of Transportation Engineering, 2002, 128(3): 211-217.

17. 李龙海, 天津航空旅客流失分析与研究[J], 中国民航学院学报, 2005, 23 (2): 60-64.

18. 管驰明, 50 多年来中国空港布局演变及其影响因素[J], 经济地理, 2008 年 5 月.

**Study on Airport Cluster in Yangtze River Delta
based on complex networks theory
and customer choice theory**

Hu Yihong Zhu Daoli

Abstract: This paper studies the over-crowded and low efficiency problem encountered in the airports in Yangtze River Delta. We adopt the approach of complex networks and customer choice theory to analyze the route choice of passengers and show the influence of hub airports to the airports around. Actual data are used to simulate the passenger's choice. Especially we analyze Nanjing airports. Finally we propose some suggestions to future development of airline industry and regulation. This paper also applies to other airports clusters such like Tianjin airport.

Key Words: Complex networks; Airline network; Customer Choice theory