

# 全球国际航空网络结构的复杂性及其社团特征\*

吴宜耽<sup>1</sup>, 孙宏<sup>2</sup>, 张培文<sup>1</sup>, 杜福民<sup>1</sup>

1. 中国民用航空飞行学院机场工程与运输管理学院, 四川 广汉 618307
2. 中国民用航空飞行学院科研基地, 四川 广汉 618307

**摘要:** 运用复杂网络理论分析全球国际航空网络的结构复杂性, 以Newman快速算法对网络中的城市进行社团识别和划分, 并结合社团结构理论深入分析其内部结构特性。研究发现: 全球国际航空网络的度和度分布空间差异明显, 平均路径长度较短且聚类系数较大, 紧密中心度绝对差距和相对差距较小, 中介中心度分布函数呈幂函数形态。网络中的城市被划分为18个社团, 规模差异大, 地理位置相邻的城市更容易形成同一社团, 但也有部分城市表现出远距离相互作用。各大洲的社团边界清晰且种类分明, 唯独欧洲的社团边界模糊且种类过多。结果表明: 全球国际航空网络具有“无标度网络”和“小世界网络”特征, 网络由少量高度值城市主导, 网络聚集性较强且全局效率高。少部分城市承担了主要中介功能, 大部分城市几乎没有中介能力。网络的社团规模存在显著异质性, 分布具有明显的地理集群特征, 但地理位置邻近的城市航空联系未必紧密。大规模社团内部连通性更好, 小规模社团内部网络密度更大。各大洲的国际航空市场结构稳定, 而欧洲尚未形成稳定的航空联系。

**关键词:** 复杂网络; 全球国际航空网络; 社团划分; Newman快速算法

**中图分类号:** U8; F512.99 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2022)05-0022-09

## On the structural complexity and community characteristics of global international aviation network

WU Yidan<sup>1</sup>, SUN Hong<sup>2</sup>, ZHANG Peiwen<sup>1</sup>, DU Fumin<sup>1</sup>

1. School of Airport Engineering and Transportation Management, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China
2. Scientific Base, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China

**Abstract:** The complex network theory is used to analyze the structural complexity of the global international aviation network, and the internal structural characteristics of the global international aviation network are analyzed with the community structure theory by using the Newman fast algorithm to identify and divide cities in the network. The results show that the degree and the distribution of the global international aviation network have spatial differences; the average path length is short and the clustering coefficient is large; the absolute and relative gaps of tight centrality are small; the intermediate centrality distribution function is a power function. Cities in the network are divided into 18 communities with great scale differences. Cities with close geographical locations are more likely to form the same community, but some cities also show long-distance interaction. The boundaries of communities on all continents are distinct, while many boundaries are fuzzy and various inside Europe. It indicates that

\* 收稿日期: 2021-07-01

录用日期: 2021-08-05

网络首发日期: 2022-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1733127, U2033213); 中国民用航空飞行学院研究所计划项目(JG2019-32)

作者简介: 吴宜耽(1996年生), 女; 研究方向: 交通运输系统优化; E-mail: wuyidan513@163.com

通信作者: 孙宏(1966年生), 男; 研究方向: 航空规划与管理; E-mail: hanksun@263.net

the global international aviation network has the characteristics of "scale-free network" and "small-world network", and the network is dominated by a small number of high degree value cities, with strong aggregation and high global efficiency. A few cities assume the main intermediary function, and most cities have almost no transit capacity. There is significant heterogeneity in the scale of community networks, and the distribution of community networks has obvious characteristics of geographical clusters, but the geographical proximity of cities may not be closely connected. Large groups have better internal connectivity, while small groups have higher internal network density. The international aviation market structure on all continents is stable, while Europe has not yet formed a stable aviation connection.

**Key words:** complex network; global international aviation network; community division; Newman fast algorithm

航空网络作为航空运输基础设施的重要载体,其质量影响着航空运输的运行和发展,对城市间的文化交流和社会经济发展影响重大。对全球国际航空网络的结构特性进行分析,有助于加深对国际航空网络和国家间航空联系的理解,也有助于为我国国际航空网络优化布局决策提供理论依据。早期的学者们基于度分布、平均路径长度、簇系数等典型复杂网络指标研究了不同区域航空网络的结构特征,发现各区域航空网络均存在“小世界网络”、“无标度网络”特征<sup>[1-2]</sup>;莫辉辉等<sup>[3]</sup>在此基础上引入网络中心性指标,分析节点在网络中的重要程度。随后,基于网络基本特性,学者们将复杂网络与其他学科理论相结合,开展了多方面的应用研究。例如,卓志强等<sup>[4]</sup>通过构建随机攻击、蓄意攻击仿真系统,分析了航空网络的鲁棒性;Barrat等<sup>[5]</sup>建立包含地理属性、拓扑属性的加权网络模型,研究了空间约束对加权航空网络演化的影响。研究层面通常集中在洲际层面、国家层面、地区层面,在洲际层面,Barrat等<sup>[5]</sup>、Matsumoto<sup>[6]</sup>研究了北美洲、亚洲等区域的航空网络结构;在国家层面,Lin & Ban<sup>[7]</sup>、Bagler<sup>[8]</sup>、Holsman<sup>[9]</sup>分别分析了美国、印度、澳大利亚等国的航空网络结构,关于中国的航空网络结构研究成果也较为丰富<sup>[10-11]</sup>;在地区层面,蒲亚琼<sup>[12]</sup>、陈欣等<sup>[13]</sup>分别以我国西部地区、长三角地区等地区为案例进行了实证研究;全球层面的航空网络结构研究尚待进一步拓展,例如,党亚茹等<sup>[14]</sup>以国家为节点构建全球国际航空网络模型,但节点范围过大会影响结构分析的准确性;Woolley-Meza等<sup>[15]</sup>将全球航空网络和货船运输网络的拓扑结构进行了对比分析,但没有深入剖析网络结构中的节点联系。

目前的航空网络结构研究聚焦于网络的整体结构特征分析,对网络的内部结构和内部节点之间的联系关注较少。针对现有研究的不足,本文引入社团结构理论,分析航空网络的内部结构复杂性及内部节点之间的航空联系强度。社团结构是网络的一种特殊结构属性,社团划分是指基于网络结构数据将网络中的节点划分为具有相似属性的节点集合,划分出的各个社团内部的节点联系密切,社团之间的联系则相对稀疏<sup>[16]</sup>。航空网络的形成是世界贸易需求、地理因素和航空公司运行模式等多重因素复合作用的结果,通过网络社团划分,可以准确地分析复合因素作用下,全球国际航空网络的内部结构特征和各国之间的航空联系。鉴于此,本文采用2019年全球国际航线数据,综合运用复杂网络理论和社团结构理论,从网络整体结构和内部结构方面,全面分析全球国际航空网络的结构特征。首先,对全球国际航线数据进行处理,以机场所在城市为节点,城市之间的航线为边,构建全球国际航空网络模型;其次,通过复杂网络理论分析全球国际航空网络的整体结构复杂性;最后,运用Newman快速算法对全球国际航空网络进行社团识别和划分,并结合社团结构理论对划分出的社团进行空间分布分析和结构层次研究,以此分析全球国际航空网络的内部结构和内部板块之间的航空联系。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 数据来源及处理

本文的全球国际航线数据来源于“开放航线机场数据库”(https://openflights.org/data.html),时间范围为2019年1~12月。再以机场所在城市为节点,城市之间的航线为边,构建无向非加权的全

球国际航空网络模型。数据处理方法如下:

1) 为构建无向对称的航线网络, 将经停航线进行拆分处理, 与直飞航线合并分析。例如, 将经停航线“吉大国际机场-哈利德国王国际机场-希思罗机场”, 拆分为“吉大国际机场-哈利德国王国际机场”和“哈利德国王国际机场-希思罗机场”。

2) 某些城市含有两个或以上数量的国际机场, 将其国际航线数据合并, 最终形成以城市为节点的航空网络模型。

经过处理, 最终得到 9 387 条无向对称的全球国际航线数据, 涵盖了 1 223 个城市。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 网络结构指标** 利用复杂网络基本指标分析网络的整体连接模式, 根据度分布形态定义“无标度网络”, 以平均路径长度和簇系数界定“小世界网络”<sup>[17]</sup>。

1) 度和度分布。节点的度等于与该节点相连的边的数量<sup>[18]</sup>, 记为  $k_i$ 。网络的度通常以网络中所有节点度值的平均值表示, 记为  $\langle k \rangle$ 。网络中节点的度的累积概率分布函数表示为

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

式中  $P(k)$  为累积概率分布函数,  $p(k)$  为概率分布函数。若  $P(k)$  为幂函数, 则网络具有“无标度网络”特征<sup>[19]</sup>。

2) 平均路径长度 ( $L$ )。该指标反映网络的通达性, 数值越小表明网络通达性越好<sup>[20]</sup>。网络的平均路径长度定义为两个节点之间测地路径的倒数, 即

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

式中  $d_{ij}$  为从节点  $i$  到  $j$  的测地路径长度。

3) 聚类系数。聚类系数反映一个点的相邻节点间的相互连接程度, 可用于描述图中各顶点间的聚集程度<sup>[21]</sup>。网络的聚类系数定义为网络中全部节点的聚类系数的平均值, 将节点  $i$  的聚类系数记为  $C_i$ , 网络的聚类系数记为  $C$ ,

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

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i, \quad (4)$$

式中  $E_i$  为节点  $i$  的相邻节点间实际存在的节点对数量,  $k_i$  为节点  $i$  可能存在的节点数。

**1.2.2 中心性指标** 网络中节点的重要程度与其

中心性成正比, 不同的网络节点中心性指标从不同方面反映节点在网络中的重要性, 本文以紧密中心度和中介中心度分析全球国际航空网络中各城市的通达效率和中介能力。

1) 紧密中心度。紧密中心度反映网络中一个节点到其他节点的效率高, 数值越大表明该节点的通达效率越高, 能更快速到达其他节点<sup>[22]</sup>。记节点  $i$  的接近中心度为  $D_i$ , 其数值等于节点  $i$  到其他节点的最短路径长度之和的倒数, 即

$$D_i = n / \sum_{j=1}^n d_{ij}, \quad (5)$$

式中  $n$  为网络的节点总数。

2) 中介中心度。中介中心度反映网络中节点对网络中其他节点的中介能力, 节点的中介中心度越高, 表明节点在网络中的中介能力越好, 对其他节点的传播控制能力也更强<sup>[22]</sup>。将节点  $i$  的中介中心度记为  $E_i$ , 其数值与经过节点  $i$  的最短路径数量成正比, 即

$$E_i = \frac{1}{(n-2)(n-1)} \sum_{j=1, j \neq i}^n \sum_{k=1, k \neq i, j}^n \frac{\delta_{ij}^k}{\delta_{ij}^k}, \quad (6)$$

式中  $\delta_{ij}^k$  为由节点  $i$  到节点  $j$  的最短路径数,  $\delta_{ij}^k$  为从节点  $i$  到节点  $j$  的所有最短路径经过节点  $k$  的次数。

**1.2.3 社团划分** 早期的社团划分算法无法判断在哪一步停止划分能得到最好的结果, 为了对社团划分的结果进行优劣评判, Newman 和 Girvan 于 2003 年提出了模块度的概念, 并设计了基于模块度最优化的 Newman 快速算法。模块度  $Q$  的定义为: 社团内部节点间的总边数和网络的总边数之比减去一个期望值, 该期望值是在另一个随机网络中, 同样的社团划分所形成的社团内部的总边数和网络中总边数的比例<sup>[23]</sup>, 即

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[ A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j), \quad (7)$$

式中  $A_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的邻接矩阵,  $k_i$  和  $k_j$  为节点  $i$  和节点  $j$  在网络中的度值,  $c_i$  和  $c_j$  为节点  $i$  和节点  $j$  所在社团,  $\delta(c_i, c_j)$  是 0-1 函数, 其取值定义为: 若节点  $i$  和节点  $j$  处于相同社团, 即  $c_i=c_j$ , 则函数值取 1, 否则取 0。  $m$  为网络的边数。模块度的值越大, 表明社团划分结果的精确度越高, 通常其范围为  $[-0.5, 1)$ , 当  $Q$  值处于  $[0.3, 0.7]$  之间时, 表明社团划分结果较显著。

Newman 快速算法将网络中的每个节点设为一个独立社团, 每次迭代选择产生最大  $Q$  值的两个社团合并, 直至所有节点都在一个社团中。设网络有  $n$  个节点,  $m$  条边, 每一步合并对应的社团数

目为  $r$ , 组成一个  $r \times r$  矩阵  $e$ , 矩阵  $e$  的元素  $e_{ij}$  表示社团  $i$  与社团  $j$  之间连边数量与网络中边的总数量的比值,  $a_i$  表示社团  $i$  中节点的连边数量与网络中边的总数量的比值。具体步骤如下:

① 将网络中的  $n$  个节点视为  $n$  个独立社团, 初始化网络, 设  $Q=0$ , 初始化的  $e_{ij}$  和  $a_i$  满足

$$e_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2m}, & \text{如果节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 存在连边} \\ 0, & \text{其他;} \end{cases} \quad (8)$$

$$a_i = \frac{k_i}{2m}. \quad (9)$$

② 根据贪婪算法的最优化思想, 将相连的社团按照使  $Q$  的增量最大化或减量最小化的方向进行合并, 合并后的模块度增量为

$$\Delta Q_{ij} = e_{ij} + e_{ji} - 2a_i a_j = 2(e_{ij} - a_i a_j). \quad (10)$$

③ 将社团对进行合并后, 修改社团对称矩阵  $e$  和社团  $i$  和  $j$  对应的行列。

④ 重复执行步骤②和③, 不断进行社团合并, 直至将整个网络中的节点合并成一个社团, 则停止合并过程。

## 2 全球国际航空网络结构复杂性

### 2.1 度和度分布空间差异明显, 网络由少量高度值城市主导

度和度分布能体现全球国际航空网络中城市间的连接规模, 通过 Gephi 软件计算得到全球国际航空网络的平均度值为 15.258, 即平均每个城市与 15 个城市直接相连, 网络整体连接规模较好。进一步分析发现, 最高度值为 185, 最低度值仅为 1, 且对应城市数量为 241, 表明全球国际航空网络中有近五分之一的城市仅与 1 个城市直接连接。度的累积概率分布如图 1 所示, 拟合得到其累积分布函数  $f(x) = 1.211x^{-0.629}$ ,  $R^2=0.959$ , 符合幂律分布特征。表明全球国际航空网络是标准的“无标度网络”, 具体表现为网络由少量高度值城市主导, 这些高度值城市一般都拥有大型国际枢纽机场, 并与大量小规模城市相连。

### 2.2 网络全局效率高, 聚集性强

平均路径长度能衡量网络的连通性和全局效率。通过 Gephi 软件计算得到全球国际航空网络的测地路径长度 (见表 1), 占比最大的测地路径长度为 3, 共有 706 616 条对应路径, 占总路径的 50.1%。最长测地路径长度为 7, 对应中转次数为 6, 占比为 0.1%, 表明有部分落后地区城市的连通性较差, 需要经过多次中转才能到达其他城市。

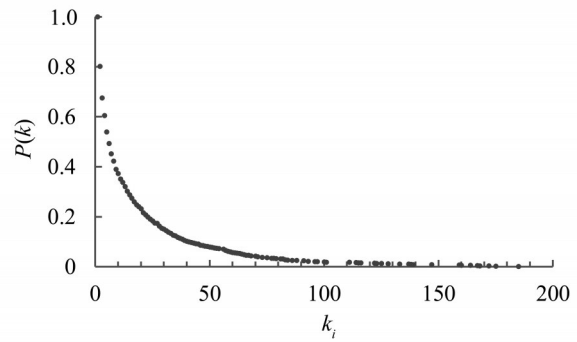


图 1 全球国际航空网络度累积概率分布

Fig. 1 Cumulative probability distribution of global international aviation network degree

表 1 全球国际航空网络测地路径

Table 1 Geodesic path of global international aviation network

测地路径长度	路径数目/条	中转次数	路径占比/%	路径占比累积/%
1	18 172	0	1.3	1.3
2	301 242	1	21.4	22.7
3	706 616	2	50.1	72.8
4	324 884	3	23.0	95.8
5	47 414	4	3.4	99.2
6	10 416	5	0.7	99.9
7	1 350	6	0.1	100

计算得到网络的平均路径长度为 3.084, 表明网络的全局效率较高, 大部分城市经过 3 条航段, 即 2 次中转, 就可以到达任意一个国际城市。

聚类系数是每个顶点邻域的平均互连率, 通过 Gephi 计算得到全球国际航空网络的平均聚类系数为 0.302, 表明全球国际航空网络聚集性较强, 各城市之间形成短距离联系的概率较大。较短的平均路径长度和较大的平均聚类系数, 证实了全球国际航空网络的“小世界网络”特征, 表明尽管全球国际航空网络规模庞大, 仍具有较强的网络聚集性, 大部分城市之间可以通过 2 次中转取得联系。

### 2.3 节点的接近程度落差小, 少数节点承担主要中介功能

网络的结构特征不能提供节点在网络中位置的完整信息, 利用紧密中心度和中介中心度进一步研究各节点在网络中的重要性。对全球国际航空网络的紧密中心度进行分析, 最大值为 0.472, 最小值为 0.165, 由图 2 可知全球国际航空网络的

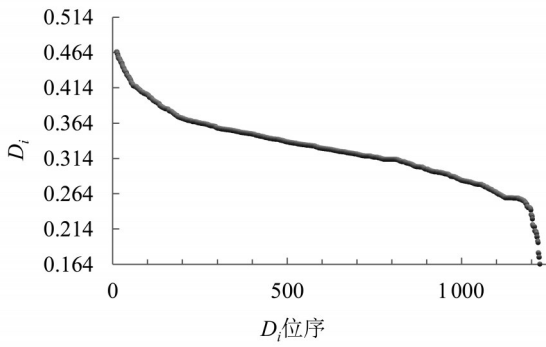


图2 紧密中心度 $D_i$ 位序-规模分布示意图

Fig. 2 Sequence size distribution of compact centrality

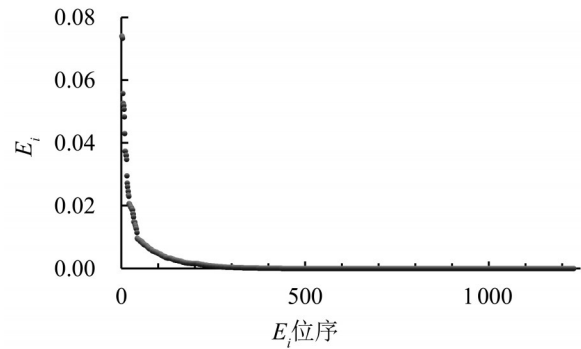


图3 中介中心度 $E_i$ 位序-规模分布示意图

Fig. 3 Rank-size distribution of intermediary centrality

紧密中心度绝对差距和相对差距较小, 可见“小世界网络”特征下的全球国际航空网络整体通达效率高, 各节点的接近程度落差小。

中介中心度能体现节点的中介能力, 在全球国际航空网络中, 巴黎的中介中心度最高, 为0.074 1, 表明巴黎在全球国际航空网络中最活跃, 城市间的中转对其依赖性较强。有323个城市中介中心度为0, 表明近1/4的城市在网络中极不活跃, 完全不承担中介功能, 这些城市对应的度值也较低。由图3可知, 网络的中介中心度绝对差距小, 但相对差距大, 其位序-规模分布函数呈幂函数形态。有19.2%的城市中介中心度为0.01~0.074 1, 另外80.8%的城市中介中心度为0~0.01, 表明在全球国际航空网络中, 少部分城市承担主要中介

功能, 大部分城市几乎没有中介能力, 在航空网络中处于边缘位置。

### 3 全球国际航空网络社团结构特征

#### 3.1 社团规模存在显著异质性, 可分为大型、中型和小型社团

全球国际航空网络所覆盖城市可划分为18个社团, 最优模块度 $Q=0.467$ , 表明社团结构显著, 社团划分结果准确度高。18个社团中, 规模最大的社团1包含306个城市, 规模最小的社团18仅包含6个城市, 社团规模存在显著异质性。根据18个社团所包含城市数量, 划分为大型社团(城市数量 $\geq 100$ )、中型社团(城市数量为100~30)和小型社团(城市数量 $\leq 30$ ), 各社团具体信息见表2, 地理空间分布见图4。

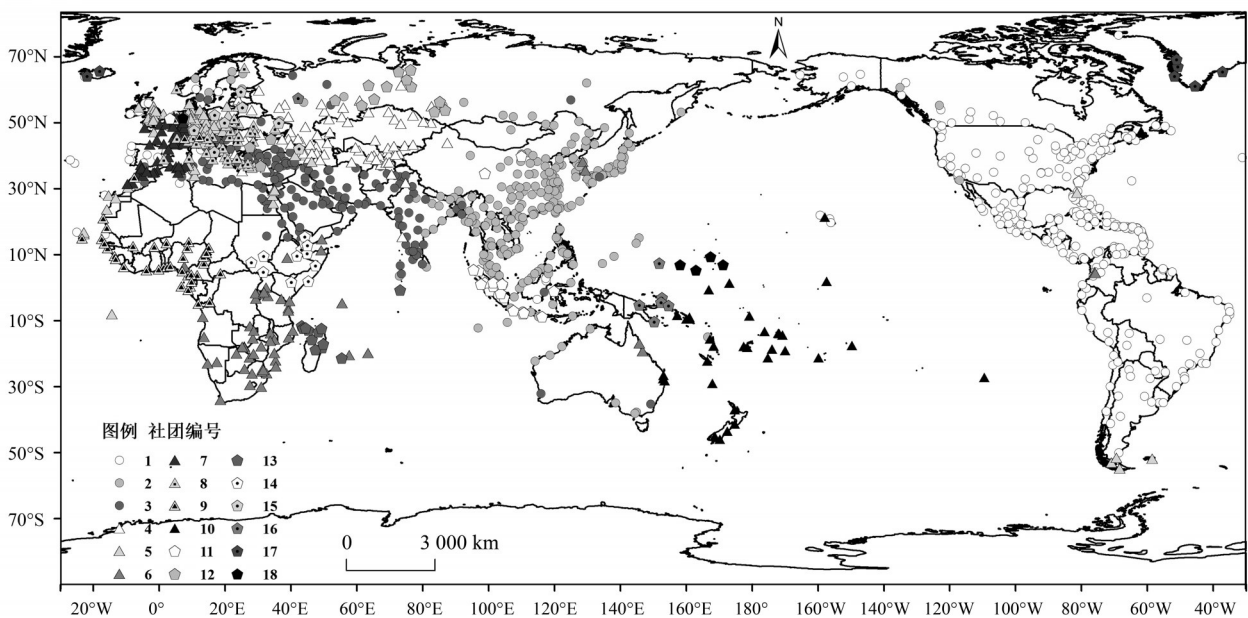


图4 全球国际航空网络社团空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of global international aviation network communities

由表2可知,3个大型社团共包含726个城市,占网络节点总数的59.36%,主要分布在北美洲、南美洲和亚洲。规模最大的社团1包含306个城市,覆盖了整个北美洲和南美洲,也跨越大西洋吸收了欧洲西部的一些城市;社团2包含255个城市,分布面积较广,大量节点集中于亚洲东部、亚洲东南部地区,也有少量节点分布在亚洲北部和欧洲西部;社团3包含165个城市,横跨南亚、西亚以及非洲北部和欧洲南部的交界处,汇集了亚洲南部和亚洲西部大部分国家。7个中型社团共包含401个城市,占节点总数的32.79%,其中社团4包含85个城市,主要遍布在欧洲东部和亚洲北部、亚洲中部;社团5包含78个城市,主要分布在欧洲西部,少量分布在非洲的西部边界。社

团6包含59个城市,主要在非洲南部,少量散布于印度洋西部;社团7包含53个节点,主要在欧洲西部和非洲北部;社团8包含47个城市,主要在欧洲中南部和巴尔干半岛的西北部;社团9包含43个城市,主要在非洲的西部和中西部,城市之间分布较集中;社团10包含36个城市,主要在大洋洲东部,受地理位置限制,社团成员间分布较分散,分别属于斐济、汤加、新西兰、智利、法属波利尼西亚等国家。8个小型社团共包含96个城市,仅占节点总数的7.85%,最大的社团11包含21个城市,最小的社团18仅包含6个城市。在空间分布上,社团11处于亚洲东南部,社团15处于欧洲西部,其余小型社团分散于大洋洲北部、非洲东部、印度洋西部等地区,在网络中处于边缘位置。

表2 全球国际航空网络社团识别与划分

Table 2 Identification and division of global international aviation network societies

类型	编号	城市数量/个	主要城市举例	分布区域
	1	306	美国: 纽约、波士顿、新奥尔良、西雅图 加拿大: 多伦多、维多利亚、卡尔加里、蒙特利尔 墨西哥: 墨西哥城、梅里达、蒙特雷、巴亚尔塔港 巴西: 圣保罗、里约热内卢、累西腓、福塔莱萨 阿根廷: 圣克鲁斯、萨尔塔、图库曼等	北美洲、南美洲
大型	2	255	中国: 北京、深圳、广州、上海、成都、重庆 日本: 大阪、东京、名古屋、福冈、冲绳、高松 马来西亚: 吉隆坡、柔佛、古晋、斯布、哥打巴鲁 泰国: 曼谷、普吉岛、清迈、芭堤雅、苏梅岛 印度尼西亚: 雅加达、泗水、三宝垄、坤甸	亚洲东部和东南部
	3	165	印度: 德里、孟买、那格浦尔、苏拉特、金奈 伊朗: 德黑兰、马什哈德、设拉子、伊斯法罕 沙特阿拉伯: 吉达、达曼、利雅得、麦地那 土耳其: 伊斯坦布尔、桑孙、伊兹密尔、辛诺普 巴基斯坦: 卡拉奇、伊斯兰堡、拉合尔、白沙瓦、锡亚尔科特	亚洲南部和西部、 非洲北部
	4	85	俄罗斯: 莫斯科、圣彼得堡、喀山、萨马拉、叶卡捷琳堡 乌兹别克斯坦: 塔什干、撒马尔罕、特尔梅兹、乌尔根奇 哈萨克斯坦: 乌拉尔斯克、巴甫洛达尔、阿拉木图、切利诺格勒 阿塞拜疆: 巴库、纳希切万、卡巴拉、连科兰	欧洲东部、 亚洲北部和中部
中型	5	78	德国: 杜塞尔多夫、纽伦堡、莱比锡、德累斯顿、帕德伯恩 英国: 埃克塞特、伯明翰、纽卡斯尔、利兹、诺里奇 波兰: 卡托维兹、华沙、弗罗茨瓦夫	欧洲西部
	6	59	莫桑比克: 马普托、楠普拉、太特、彭巴、维兰库鲁 南非: 约翰内斯堡、开普敦、姆普马兰加、斯库库扎 坦桑尼亚: 桑给巴尔、乞力马扎罗、达累斯萨拉姆、姆万扎	非洲南部
	7	53	法国: 里昂、蒙彼利埃、图卢兹、马赛、波尔多、梅茨 阿尔及利亚: 奥兰、塞提夫、君士坦丁、安纳巴 摩洛哥: 马拉喀什、拉巴特、乌伊达、菲斯	欧洲西部、 非洲北部

续表

类型	编号	城市数量/个	主要城市举例	分布区域
	8	47	希腊: 米科诺斯、扎金托斯、萨莫斯、普雷韦扎 意大利: 那不勒斯、热那亚、卡利亚里、佛罗伦萨 罗马尼亚: 蒂米什瓦拉、雅西、克雷奥瓦、西比乌	欧洲中南部
	9	43	喀麦隆: 雅温得、杜阿拉、加鲁阿、马鲁阿 尼日利亚: 拉各斯、卡诺、阿布贾 布基纳法索: 博博迪乌拉索、瓦加杜古	非洲中西部和西部
	10	36	新西兰: 惠灵顿、奥克兰、克赖斯特彻奇、达尼丁 所罗门群岛: 霍尼亚拉、蒙达、阿托伊菲 澳大利亚: 布里斯班、库兰加塔、马鲁奇多尔	大洋洲东部
	11	21	印度尼西亚: 日惹、普拉亚、巴东、苏门答腊岛、万隆、帕鲁、 索洛、巨港、占碑	亚洲东南部
	12	16	俄罗斯: 鄂木斯克、秋门、诺沃库兹涅茨克、托木斯克、车里雅 宾斯克、诺亚布尔斯克 保加利亚: 布尔加斯	欧洲东部、亚洲北部
	13	13	马达加斯加: 塔那那利佛、圣玛丽、安齐拉纳纳 科摩罗: 莫埃利岛、昂儒昂岛、莫罗尼	非洲东南部
小型	14	13	索马里: 哈尔格萨、摩加迪沙、加尔卡约 也门: 亚丁、塔伊兹	非洲东部
	15	11	波兰: 克拉科夫、波兹南、格但斯克 德国: 马克特奥伯多夫、梅明根、多特蒙德	欧洲西部
	16	8	巴布亚新几内亚: 莫尔兹比港、朗多洛维特、布卡 密克罗尼西亚: 楚克	大洋洲北部
	17	8	格陵兰岛: 尼尔利特·伊纳特、伊卢利萨特 冰岛: 阿库雷里	北美洲东北部
	18	6	密克罗尼西亚: 波恩佩、科斯雷 马绍尔群岛: 马朱罗	大洋洲东北部

### 3.2 社团分布具有明显的地理集群特征,部分城市表现出远距离相互作用

由图4可知,全球国际航空网络中的城市社团分布具有显著的地理位置相关性,地理位置相邻近的城市更容易形成同一社团,但社团的形成不完全取决于地理因素,也有部分城市表现出远距离相互作用。例如,社团1的大部分城市分布在北美洲、南美洲,也有部分城市分布在欧洲西部,横跨大西洋与北美洲、南美洲的城市保持密切的航空联系;欧洲西部有大量密集的城市,这些城市地理位置接近,但分属于社团1~5、社团7~8等;中国的大部分城市都包含在社团2中,也有部分城市属于社团4(乌鲁木齐)和社团11(西宁、鄂尔多斯、格尔木)。由此可见,全球国际航空网络的形成是多种要素的复合作用结果,受到政治、经济、航空公司运营模式等因素影响,地理位置

邻近的城市航空联系未必紧密。

### 3.3 大规模社团内部连通性更好,小规模社团内部网络密度更大

以社团内部节点之间的航线构建独立的社团航空网络,计算18个社团的网络结构指标,结果如表3所示。由表3可知,规模大的社团平均度值高,3个大型社团的平均度值均 $>11$ ,内部连接水平极好,表明3个大型社团中包含了很多枢纽机场,枢纽机场又连接了很多小机场,以枢纽机场群为中心形成大型社团群。7个中型社团的平均度值为4.286~8.765,内部连接水平较好。而7个小型社团的平均度值为1.5~3.0,内部连接水平较差。平均度值较小的7个小社团的平均聚类系数呈现两极分化现象,存在极大值和极小值两个极端,社团13的平均聚类系数最大,为0.665,而社团14~18的平均聚类系数均为0,表明平均度值较小

的社团内部聚集程度两极分化明显。大型社团和中型社团的平均路径长度均 $>2.1$ , 最高为2.756, 小型社团的平均路径长度相较于大型社团和中型社团更短, 为1.625~2.229, 表明小型社团虽然内部连接规模较小, 但网络密度更大, 即使平均度值较低, 也能通过少数中转到达其他节点。

表3 全球国际航空网络社团的网络结构指标  
Table 3 Index of community network structure of global international aviation network

类型	编号	$\langle k \rangle$	$L$	$C$
大型	1	14.974	2.532	0.420
	2	14.683	2.368	0.483
	3	11.064	2.281	0.531
中型	4	6.949	2.324	0.256
	5	5.342	2.756	0.092
	6	5.412	2.398	0.558
	7	4.286	2.536	0.289
	8	6.423	2.347	0.417
	9	7.707	2.139	0.551
	10	8.765	2.278	0.398
小型	11	1.789	2.073	0.337
	12	2.750	1.958	0.044
	13	3.000	1.924	0.665
	14	1.846	2.229	0.000
	15	1.800	1.800	0.000
	16	1.600	1.800	0.000
	17	1.500	1.625	0.000
	18	2.000	1.933	0.000

### 3.4 欧洲的社团种类多且边界模糊, 其他洲社团种类分明且边界清晰

由网络的社团结构性质可知, 社团结构的形成表明社团成员内部交互效率高, 航空出行集中, 不同社团间的航空联系则较稀疏。分析发现, 北美洲与南美洲的大部分城市共同形成了社团1, 边界清晰。非洲、亚洲、大洋洲的社团边界较清晰, 基本不存在重叠现象。非洲大部分城市分属于社团6、社团9和社团14。亚洲的城市中, 东亚和东南亚地区属于社团2, 南亚和西亚属于社团3, 中亚属于社团4, 边界分明。大洋洲面积大且城市少, 分属于社团10、社团16和社团18。各大洲的社团边界清晰, 且同一地区社团种类分明, 表明

各大洲的国际航空市场结构稳定。而欧洲的城市分属于社团1~5、社团7~8等多个社团, 且社团边界模糊、区域重叠, 表明欧洲尚未形成完整的航空联系, 航空网络结构稳定性有待进一步加强。

## 4 结论

采用2019年全球国际航班数据, 以机场所在城市为节点, 城市之间的航线为边, 构建全球国际航空网络模型。运用复杂网络理论分析全球国际航空网络的整体结构特征, 在此基础上运用Newman快速算法对网络中的城市进行社团划分, 进而分析其空间分布和结构层次, 得到结论:

1) 全球国际航空网络中, 城市的度和度分布空间差异明显, 呈现“无标度网络”特征。全球国际航空网络由少量高度值城市主导, 这些高度值城市与大量小规模城市相连。此外, 全球国际航空网络具有较短的平均路径长度和较大的聚类系数, “小世界网络”特征明显。网络的平均路径长度为3.084, 表明尽管全球国际航空网络的规模庞大, 大部分国际城市之间仍然可以通过2次中转取得联系。

2) 网络中各节点的紧密中心度绝对差距和相对差距小, 网络整体通达效率较好。有19.2%的城市中介中心度为0.01~0.0741, 另外80.8%的城市中介中心度为0~0.01, 表明少部分城市承担了主要中介功能, 大部分城市几乎没有中介能力, 在航空网络中处于端点位置。

3) 全球国际航空网络中的城市可划分为18个社团, 社团规模差异较大, 可分为大型社团、中型社团、小型社团, 城市数量占比分别为59.36%、32.79%、7.85%。社团分布具有明显的地理集群特征, 但由于航空网络的形成是多种要素的复合作用结果, 受到政治、经济、航空公司运营模式等因素影响, 地理位置邻近的城市间航空联系未必紧密, 也有部分城市跨越距离障碍表现出远距离相互作用。分析18个社团的内部网络结构, 发现大型社团和中型社团的度值较高, 节点的内部连通性更好。小型社团的度值较低, 但内部网络密度大, 能通过少数中转到达其他节点。

4) 各大洲的社团边界清晰且种类分明, 国际航空市场结构稳定。而欧洲的城市分属于多个社团且边界模糊, 存在板块重叠现象, 尚形成完整的航空联系。

## 参考文献:

- [1] HOSSAIN M, ALAM S. A complex network approach towards modeling and analysis of the Australian Airport Network [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2017, 60: 1-9.
- [2] GUIDA M, MARIA F. Topology of the Italian airport network: A scale-free small-world network with a fractal structure [J]. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2007 (31): 527-536.
- [3] 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 [J]. *地理科学*, 2010, 30 (2): 204-212.
- [4] 卓志强, 姚红光. “一带一路”沿线航空网络结构及其鲁棒性研究 [J]. *物流科技*, 2018, 41(5): 78-84.
- [5] BARRAT A, BARTHELEMY M, VESPIGNANI A. The effects of spatial constraints on the evolution of weighted complex networks [J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory & Experiment*, 2005(5): 1-20.
- [6] MATSUMOTO H. International air network structures and air traffic density of world cities [J]. *Transportation Research Part E*, 2007(43): 269-282.
- [7] LIN J, BAN Y. The evolving network structure of US airline system during 1990-2010 [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 410: 302-312.
- [8] BAGLER G. Analysis of the airport network of India as a complex weighted network [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2008, 387: 2972-2980.
- [9] HOLSMAN A J. The structure of Australian air networks [J]. *Geographical Research*, 1977, 15: 53-65.
- [10] 王姣娥, 莫辉辉. 中国航空网络演化过程的复杂性研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(1): 71-80.
- [11] 张翼, 黄伟刚, 郑兴无. 中国航空枢纽城市的国际连通性研究 [J]. *世界地理研究*, 2020, 29(3): 491-502.
- [12] 蒲亚琼. 我国西部地区航空网络结构研究 [J]. *综合运输*, 2019, 41(3): 18-22+53.
- [13] 陈欣, 李心茹, 盛寅. 基于复杂网络的长三角航线网络结构特征分析 [J]. *交通信息与安全*, 2020, 38(4): 139-146.
- [14] 党亚茹, 周莹莹, 王莉亚, 等. 基于复杂网络的国际航空客运网络结构分析 [J]. *中国民航大学学报*, 2009, 27(6): 41-44.
- [15] WOOLEY-MEZA O, THIEMANN C, GRADY D, et al. Complexity in human transportation networks: A comparative analysis of worldwide air transportation and global cargo-ship movements [J]. *European Physical Journal B*, 2011, 84: 589-600.
- [16] 戈佳威, 王学锋, 万征, 等. 世界集装箱海运网络社团结构研究 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(6): 231-236.
- [17] WATTS DJ, STROGATZ SH. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. *Nature*, 1998, 393: 440-442.
- [18] 焦敬娟, 王姣娥. 海航航空网络空间复杂性及演化研究 [J]. *地理研究*, 2014, 33(5): 926-936.
- [19] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 1999, 286: 509-512.
- [20] 刘望保, 韩茂凡, 谢智豪. 全球航线数据下世界城市网络的连接性特征与社团识别 [J]. *经济地理*, 2020, 40(1): 34-40+49.
- [21] 刘宏鲲, 周涛. 中国城市航空网络的实证研究与分析 [J]. *物理学报*, 2007, 56(1): 106-112.
- [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 [J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 204-212.
- [23] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. *Physical Review E*, 2003, 69: 1-16.

(责任编辑 秦社彩)