

国际航空网络的空间结构特征

韩悦然

(民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100020)

摘要: 航空运输具有快速、高效益和长距离运输的特点,可打破地理限制,促进人员、技术、资金和商品等经济要素的跨国流动,能将单个城市串联为城市网络,降低往来成本,推动世界经济发展。通过分析 2010—2020 年的航空客运班次数据所构建的航空网络,并运用复杂网络理论和社会网络分析法研究航空网络的空间结构和演化规律。结果表明,2010—2013 年欧美地区占据航空网络霸主地位,芝加哥、纽约一直霸榜;2013 年中东地区由于地理位置优势开始崛起为航空枢纽;2018 年得益于旅游政策与经济崛起,东亚、东南亚和东非地区航空地位不断提升,而欧美发达国家的航空地位下降,全球航空布局趋于均衡。2020 年全球航空布局更加均衡,中国在全球航空网络中的地位逐渐提升。航空网络具有小世界和无标度网络的特点,可以促进城市间的互动和连接,打破地理和距离的限制。这些研究结果有助于优化我国航空网络,提升航空客货流的通达性和可靠性,实现民航强国的目标。

关键词: 国际航线; 通达性; 世界城市网络; 航线网络分析

中图分类号: V56 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)06-0160-13

《“十四五”现代综合交通体系发展规划》中明确提出,构建现代综合交通运输体系,完善和优化现代综合交通运输网络。坚持服务大局、创新和深化改革、绿色转型,构建综合立体交通网络;加强交通运输支撑能力建设;强化互联互通,实现城市群和都市圈交通现代化。二十大报告聚焦于现代化治理推进交通强国。民航是交通的一种,建设民航强国呼应建设交通强国。

随着城市研究的范式由“等级”变为“网络”,网络研究作为交叉学科开始兴起。

在世界城市网络中,城市的连通性是一个重要的指标,其对网络整体的稳定性和网络的连通结构产生重要影响。通过构建全球航线数据下世界城市网络的连接性模型,分析了世界航空城市网络中节点度和四种中心性特征,以及对航线往来通达的影响。

交通运输是城市间交换物质、人员的载体,而这一产业是国民经济的先行产业。航空大都市概念认为,交通运输对城市发展产生冲击:海港兴起促进世界上第一批商业中心的发展;工业革命的支柱产生于河流运输。铁路的联通使得内陆经济、工业快速发展,产生第三轮冲击。第四次冲击是郊区的高速公路使得城市发展范围扩张。最后的冲击来自航空运输,不仅打破了地理区位的限制,机场

和临空经济还成为经济增长和全球化、城市化的催化剂,航空运输业经历了高速发展,对城市间相互联系的格局产生深远影响。当前城市体系愈加复杂,需要一个全新的视角来观察全球城市空间分布与组织规律,而航空运输网络可以在城市间直接发生关系,是重要的研究资料。本文从 OAG(Official Airlin Guide,是一家航空信息数据公司)数据的 2010—2020 年常态航空流联系出发,通过网络概念完成尺度整合和类型整合,揭示全球航线网络的规律。研究全球航线网络演化规律有助于提升安排航线科学性,促进物质、人员流动,辅助智慧民航的建设,推进民航业发展。

1 理论基础及文献综述

1.1 复杂网络分析法

本文立足于研究航空网络节点间关系网络结构,运用社会网络分析法分析国际航线组成的航空网络空间结构,从微观层面探寻节点(城市)本身的流通性和交通的重要程度。选取社会网络分析中的中心度,中心性(度)能反映节点在网络中的重要程度,用于分析、衡量航空网络中的枢纽城市地位。从宏观层面研究航空网络的度、平均最短路径、簇系数、整体网络密度。

1.1.1 宏观层面

研究整体网络,即宏观层面的网络特性采用中

收稿日期: 2023-10-26

作者简介: 韩悦然(1990—),女,内蒙古呼和浩特人,工程师,研究方向为机场规划设计。

心度、入度、出度、范围、邻近度、中介度等指标。

高磊^[1]研究了复杂网络中信息的有效传播,发现网络的局域结构和局域信息密度都能够影响信息扩散的速度。偏好接触小度数的节点对于信息扩散的速度有促进作用,适度的正关联对信息的扩散有利。无标度网络:现实世界的大多数网络都不是随机网络,节点的分布符合马太定律也就是 20/80 齐普夫定律,少量节点(枢纽)拥有海量路径,大部分节点有少数路径。

社会网络的“度”:一个节点的相邻点个数就是关联度。度数为零周围无点相邻,即为“孤立点”(isolate)。入度和出度的概念只存于有向网络中,入度指的是流向一个点的数目;出度指的是该点流向其他点的数目。中介度能衡量节点的重要程度。幂指数在 1~2 时为无标度网络。一般用来衡量复杂网络整体的指标有整体网络密度、平均最短路径、网络关联度等。

平均最短路径,是指在一个复杂网络中的所有节点联系需要的路径最小值的均值。能代表网络的连通性,最短路径越小连通性越高,呈负相关。计算公式为

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

簇系数,又名聚类系数,用于衡量网络中节点的聚集度,是评价网络中节点之间结集成团程度的指标,也是反映网络拓扑结构的连通性和传递性的重要标准。计算公式为

$$C_i = 2E_i/k(k-1) \quad (2)$$

整体网络密度可以度量节点之间联系的紧密程度,网络密度和节点间的联系基本正相关。计算公式为

$$D_i = \frac{N}{M(N-1)} \quad (3)$$

1.1.2 微观层面(个体节点)

用于衡量单个节点在网络中的位置、权重,微观(个体)的中心性有四种,如表 1 所示。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 我国航空网络的演变

(1)我国航空网络的演变过程和特点。我国航空网络经历了从最简单的点对点^[2]城市对模式到中途加客、货源的城市串模式,最后演变为轴-辐网络模式。轴-辐网络模式由轴心枢纽机场和支线机场构成,是目前仍然沿用的模式。

(2)传统架构的特点。城市对和城市串式两种模式属于传统架构,城市对模式^[3]适用于短距离机场间,易于安排航班,但效率低,无法带动规模经济;城市串式模式在城市对基础上增加了中转机场,适用于支线机场,客货率提升但不稳定,也没有带动规模经济。

中国航空网络的演化^[4]基本上由点及线(城市对)及面,枢纽(中心城市)向干线辐射。

(3)城市网络格局^[5]。分析中国 176 个城市航空客运数据,发现中国航空网络的核心区主要集中在东部地区,包括北京、上海等发达城市,但城市地位与政治、经济因素不完全正相关。同时,中国形成了几大机场群^[6],如京津冀机场群、成渝机场群、长/珠三角群、大湾区机场群。五大机场群布局稳定^[7];航线网络规模增长迅速。粤港澳大湾区航空网络^[15],资源配置效率不够合理,表现出在空间结构上的层级性和不均衡性。

(4)航空流网络特征^[8]。根据航空流视角的研究,中国航空流网络存在平行、交叉、全覆盖和半覆盖四种构型,同时存在空间高峰和时空交互高峰。

(5)航空货运的空间演化。航空货运受经济格局影响,重心由沿海向内陆移动^[9],倾向于在机场和航段上分散。

(6)城市航空网络结构特征。中国城市航空网络是一个无标度网络^[10],节点度值和边权值分布具有异质性。

综上所述,我国航空网络经历了不断演变和发展,形成了特定的网络格局和特征。随着民航业和

表 1 四种中心度

名称	度中心度(DC)	接近中心度(CC)	中介中心度(BC)	特征向量中心度(EC)
含义	重要的节点就是拥有许多连接的节点。关系越多,影响力就越强	代表节点的连接数目,约等于几何拓扑上的中心位置	节点具有较大的中介中心性即为该点处于其他点的多条最短路径上,该点属于核心节点	重点观察相邻节点的中心性,相邻点权重越高,此节点也就越重要
公式	$C_D(Ni) = \sum_{j=1}^N x_{ij} (i \neq j)$	$C_v = \frac{ V -1}{\sum_{j=1}^N d_{vi}}$	$C(v) = \sum \frac{ast(v)}{ast}$	$X_i = c \sum_{j=1}^N a_{ij} x_j$

城市临空经济的不断发展,航空网络将继续调整和优化,以适应未来的需求。

1.2.2 国外航空网络现状

全球国际航空网络呈现无标度网络^[11]和小世界网络的特点,少数高度值城市起主导作用,具有聚集性强和全局效率高的特点。

全球城市网络联系强度对空间距离具有波动性^[12],总体呈上升态势,但在某些年份可能会有回落。

欧洲和北美在国际航权方面占据主导地位^[13],但也有一些新兴的方便中转的枢纽城市崛起,如欧洲莫斯科、西亚的迪拜和北美的安克雷奇。

全球城市网络可以被划分为多个社团,其中八个大型社团^[14]基本覆盖全球并超越了国家界线。

核心城市在空间方面相对稳定^[14],具有地理优势有利于城市地位的提升^[18],如迪拜因位于亚欧非三洲地理中心,显出优越的中转优势使得航空地位提升。

不同的全球城市^[17]对全球的政治、经济能产生巨大影响的城市。在城市品牌^[16]关注度、积极性和影响力方面存在差异,形成不同的层次和聚类。

美国的航空网络连接最协调^[19],欧盟的航空网络提供了最均匀的服务水平,而中国的航空网络发展速度最快,但单个城市的机场数量较少。

综上所述,国外航空网络呈现一定的特点和趋势,这些研究对于了解全球航空网络的结构和发展具有重要意义。

2 全球前50城市航空网络空间特征

2.1 数据选择

本文重点分析全球航空城市前50组成的网络中心度,进而形成全球城市网络整体结构分析。节点的中心性在社会网络分析中可以反映控制资源流动的能力和权重,用航空网络视角来衡量世界城市网络的空间结构特征。中心度非常重要,航空网和社会网络理论对应,节点和连接线所构成的复杂网络在航空中对应航空港和航线组成航空网络,能够超越空间地理区域限制,衡量城市的空间可达性和连通度。

首先用OAG计算2010—2020年期间的国际航空容量排名前50城市组成的航空网络,再用Ucinet软件算出每年航空节点的中心度,最后用EXCEL软件Vlookup函数回溯出前50城市的中心度,借此观察每个节点(城市)的权重以及节点通过航线互相关联交织成的全球网络通达性、可达性。

2.2 实证结果

2.2.1 欧美发达国家制霸航权

2010—2013年,欧美老牌经济发达地区、国家乘着工业革命和经济全球化东风率先起步,占据航空网络霸主地位,尤其是美国联系的国家、地区最多,芝加哥、纽约一直占据榜首地位,首位联系能力一直很强。其次是德国、俄罗斯、南非、英国、印度和澳大利亚等国家。如图1所示。

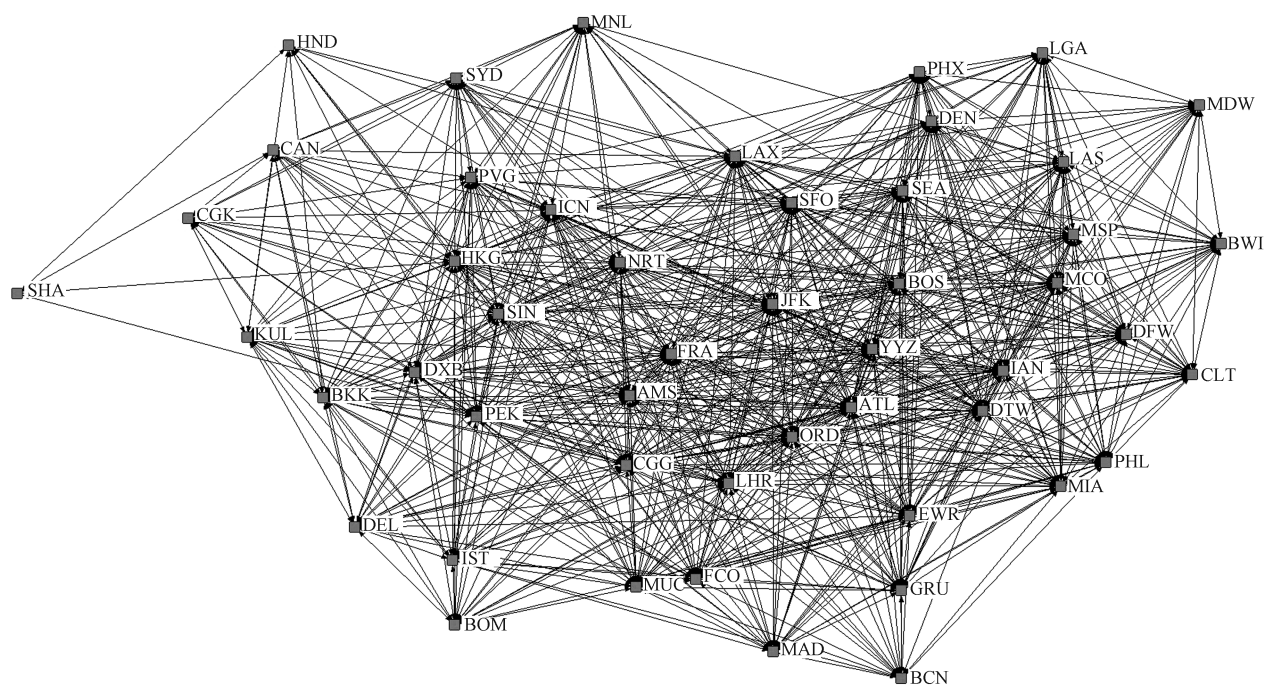


图1 2010年全球前50城市航线网络密度

如表 2 所示,2010 年航线通达性比较高的前 10 位城市分别是芝加哥、纽约、亚特兰大、伦敦、达拉斯/沃斯堡、丹佛、休斯敦、巴黎、华盛顿、洛杉矶,证明这些城市在全球航空网络中处于中心地位,空间可达性和连通度比较高,美国占据国际航线的绝对优势地位,芝加哥、纽约、亚特兰大、丹

佛、休斯敦、华盛顿、洛杉矶 7 个城市都来自美国,证明它们的中转地位举足轻重,与全球大部分地区有直接的航空关联,是全球运输网络的核心枢纽,形成了择优连接和强者恒强的俱乐部效益,带动物质、人员运输,促进经济发展,同时了发展了临空经济。

表 2 2010 年国际前 50 城市的航空网络中心度

排名	城市	度中心度(DC)	接近中心度(CC)	中介中心度(BC)	特征中心度(EC)
1	芝加哥	25.99	57.05	6.55	26.78
2	纽约	7.81	49.25	0.38	14.42
3	亚特兰大	5.79	44.91	0.36	6.30
4	伦敦	13.31	50.28	1.17	17.74
5	达拉斯/沃斯堡	12.76	47.99	0.98	17.31
6	丹佛	9.37	50.94	1.46	11.85
7	休斯敦	11.57	49.48	3.36	12.61
8	巴黎	20.66	51.34	3.37	22.42
9	华盛顿	7.62	45.70	0.76	13.34
10	洛杉矶	4.87	45.11	1.31	5.57
11	北京	8.54	48.64	1.91	12.96
12	夏洛特	7.90	49.50	1.63	10.16
13	费城	13.68	51.49	2.46	19.22
14	圣保罗	9.27	49.23	0.99	12.59
15	上海	12.30	48.16	1.79	16.14
16	东京	17.91	50.98	2.54	19.89
17	凤凰城	18.55	53.78	8.58	17.22
18	法兰克福	29.75	58.14	7.95	27.77
19	底特律	11.48	47.41	1.04	16.43
20	旧金山	7.99	50.14	0.63	14.75
21	西雅图	12.67	51.01	4.62	10.49
22	多伦多	7.81	48.97	3.10	7.26
23	拉斯维加斯内华达州	15.79	52.94	3.37	19.40
24	明尼阿波利斯	10.10	47.39	2.46	8.49
25	马德里	7.62	50.37	2.74	9.69
26	莫斯科	8.36	47.12	1.17	13.02
27	波士顿	35.81	60.87	13.84	29.98
28	奥兰多	15.15	52.41	2.32	18.97
29	阿姆斯特丹	14.78	49.93	1.70	17.31
30	慕尼黑	6.24	45.30	1.16	5.92
31	巴尔的摩	9.55	47.16	3.40	8.72
32	墨西哥城	17.81	53.88	2.61	21.45
33	罗马	17.45	54.07	7.48	19.27
34	广州	19.93	54.40	3.48	22.86
35	盐湖城	7.62	45.41	0.41	12.84
36	米兰	14.51	52.56	3.54	16.79
37	雅加达	11.02	47.58	0.83	15.98
38	伊斯坦布尔	28.74	58.08	10.95	27.00
39	迈阿密	11.75	48.27	0.99	16.70
40	新德里	18.37	54.64	2.65	22.48
41	悉尼	13.13	51.32	5.73	11.03
42	墨尔本	7.44	49.70	1.82	8.65
43	曼谷	13.41	49.84	5.70	11.37
44	巴塞罗那	6.15	42.23	1.98	4.14
45	孟买	11.48	48.06	1.98	16.67
46	吉隆坡	8.45	47.37	1.60	6.34
47	新加坡	10.28	51.30	2.46	11.09
48	迪拜	15.52	52.31	2.17	19.78
49	温哥华	19.83	53.78	15.40	14.74
50	劳德代尔堡	17.81	54.10	3.49	21.74

注:数据来源于 OAG 网站。

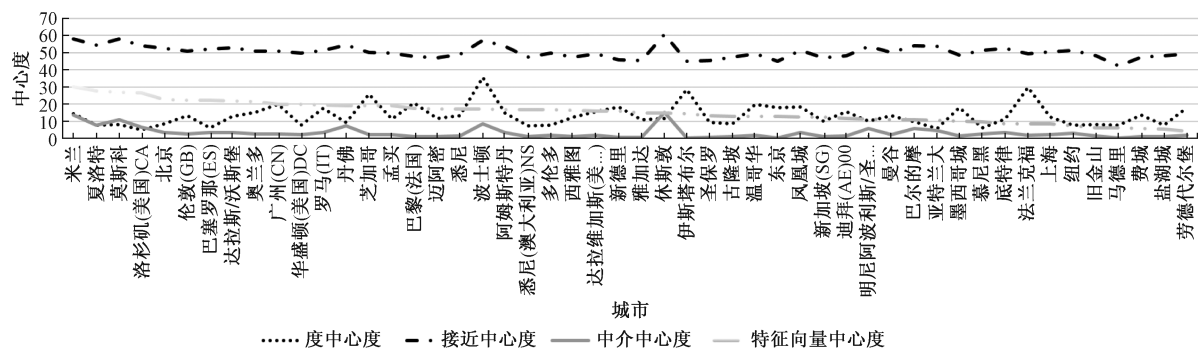


图2 2010年中心度

2.2.2 中东崛起

2013年中东地区经济发展,占据亚欧非三洲地理拓扑中心的区位优势开始体现,凭借优越的地理条件成为新的航空枢纽,全球航线布局趋于均衡。伦敦整体地位提升,这一年成为航空榜首,和GaWC评选的世界城市Alpha++的头部地位相吻合,从这一年开始伦敦一直占据航空网络和GaWC双榜首,打破了美国芝加哥和纽约的榜首地位。欧洲、北美的制霸航权地位正逐渐下降,中东航空枢纽地位崛起,中国、澳洲的航空地位也慢慢上涨,有均衡布局趋势。2013年阿布扎比航空和卡塔尔航空不断扩大其飞机和路线网络,以满足不断增长的客流需求;联合阿拉伯航空公司在2013年9月举行了第46届年会,主题为“突破边界、实现梦想”,来自中东地区各个国家的航空公司代表出席此次会议,探讨

了该地区航空业的未来和发展方向;迪拜国际机场在2013年开通了新的航站楼和跑道,以进一步提高其运营能力和服务水平。2013年全球前50城市航线网络密度如图3所示。

由于2011年、2012年延续了2010年空间格局,本文展示变化幅度较大的2013年份。这年欧洲一些城市中心度提升,成为新的全球航空客运网络的主体支撑点,打破了美国占据航空榜首的格局,伦敦航空地位崛起,从第四名来到了世界首位,同时这一年开始伦敦也居GaWC排名榜首,经济发展与航空地位的发展呈正相关。

中东热度持续上升,迪拜、土耳其的伊斯坦布尔都冲进了前十的枢纽地位,埃及、阿联酋和沙特阿拉伯也开始在航线上崛起,中东地区位于美洲、欧洲、非洲三大洲的拓扑几何中心上,有很明显

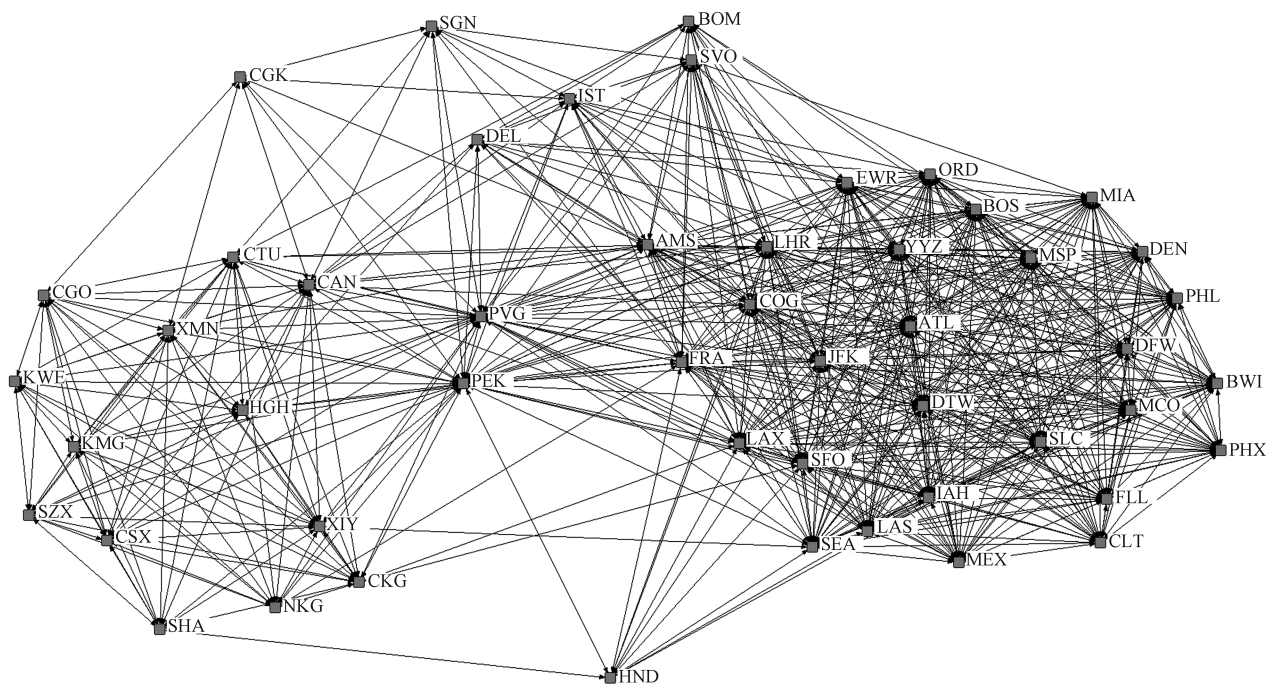


图3 2013年全球前50城市航线网络密度

的地理优势,中转优势开始突显。中国的香港也冲进了前十的位置。巴林退出世界枢纽城市行列,法国、德国的城市冲进了前四名,中东国家和地区打破了欧美的制霸成为全球航空客运网络的核心,航班集中在欧洲、中东和北美地区,这一年亚洲航空

开始崭露头角,航空布局开始走向均衡。表 3 是四种中心度。

由表 3 可知,2013 年世界 50 个城市网络 4 种中心度的计算结果变化比较明显,世界航空格局有了变化,如图 4 所示。

表 3 2013 年国际前 50 城市的航空网络中心度

排名	城市	度中心度(DC)	接近中心度(CC)	中介中心度(BC)	特征中心度(EC)
1	伦敦	34.08	27.28	12.96	29.49
2	巴黎	27.34	26.77	8.73	26.76
3	阿姆斯特丹	24.31	26.48	5.74	26.04
4	法兰克福	27.25	26.81	7.02	26.92
5	新加坡	13.24	25.02	5.52	10.81
6	迪拜	20.42	26.05	8.17	18.39
7	香港	13.24	25.27	4.52	10.47
8	纽约	13.67	25.60	3.45	16.23
9	伊斯坦布尔	20.16	26.02	5.40	21.19
10	慕尼黑	18.60	25.88	2.71	22.28
11	莫斯科	19.29	25.94	8.61	20.63
12	曼谷	12.98	24.86	3.50	12.09
13	首尔	14.36	25.38	6.37	11.48
14	多伦多	18.17	25.87	12.64	14.37
15	布鲁塞尔	20.07	25.31	3.05	22.22
16	苏黎世	15.31	25.62	2.08	20.64
17	吉隆坡	9.52	24.18	1.95	7.44
18	罗马	17.73	25.90	2.45	22.18
19	维也纳	14.88	25.30	1.71	19.59
20	哥本哈根	14.27	25.30	2.82	19.17
21	马德里	12.54	25.41	1.56	17.46
22	米兰	17.13	25.37	2.45	21.22
23	东京	8.74	25.19	1.96	10.31
24	台北	10.03	24.27	2.69	6.39
25	巴塞罗那	14.88	25.26	1.62	18.86
26	多哈	11.94	24.94	1.59	14.76
27	迈阿密	8.91	24.29	2.72	8.11
28	杜塞尔多夫	16.09	24.92	2.13	18.92
29	上海	8.04	24.98	1.88	9.19
30	斯德哥尔摩	12.28	24.51	1.42	17.33
31	都柏林	13.15	24.65	1.47	17.16
32	柏林	12.37	24.15	0.56	17.41
33	奥斯陆	11.51	24.33	0.94	16.58
34	日内瓦	11.07	24.59	0.94	16.81
35	曼彻斯特	14.62	25.08	1.66	18.60
36	里斯本	8.48	24.29	0.98	13.65
37	北京	10.21	25.23	2.07	13.05
38	圣胡安	8.30	23.20	2.98	4.57
39	巴拿马城	8.13	23.21	2.11	5.29
40	阿布扎比	8.82	24.89	1.19	11.59
41	洛杉矶	7.87	25.03	2.92	8.97
42	赫尔辛基	9.26	25.11	1.32	15.35
43	芝加哥	7.70	24.77	2.04	10.39
44	开罗	8.13	24.87	1.11	11.99
45	布拉格	10.73	24.37	1.04	15.83
46	墨西哥城	8.39	23.80	2.93	6.07
47	尼斯	7.09	23.75	0.37	12.77
48	马略卡岛帕尔马	10.38	23.45	1.94	12.23
49	休斯敦	7.35	24.50	3.05	6.00
50	吉达	12.28	24.81	4.34	10.23

注:数据来源于 OAG 网站。

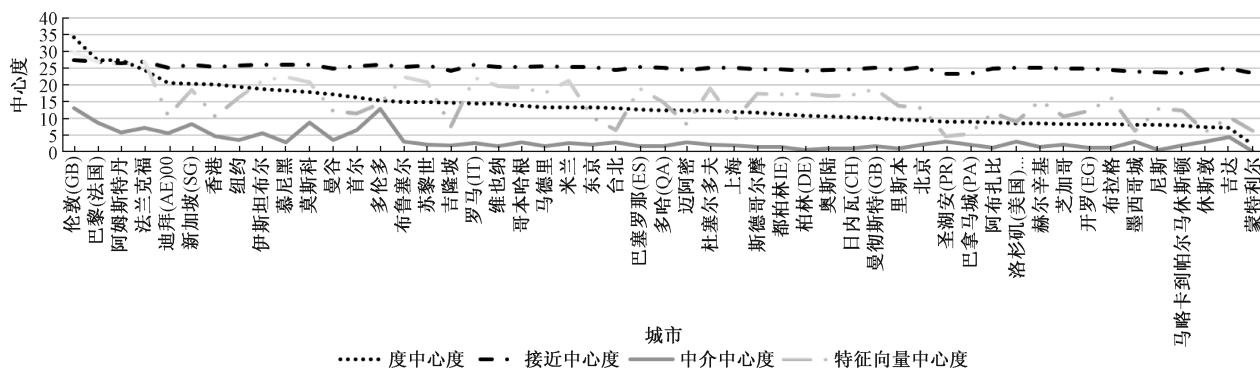


图4 2013年中心度

2.2.3 亚非航空地位上升

2018年涌现新的全球性航空枢纽,东亚、东南亚和东非地区部分国家,得益于经济崛起和旅游政策的发布,航空运输地位不断提升,全球航空运输布局更加均衡化。这期间,部分欧洲发达国家的中心度值下滑明显,美国、英国、德国的中心度下降幅度均超过10,航空覆盖范围持续下降。而部分亚洲和非洲国家凭借快速的经济增长,如中国、印度和南非和良好的旅游业条件(如泰国、马来西亚等)和区位优势(如埃及、埃塞俄比亚、中东位于三大洲中心),对外航空运输发展迅速,国际通航能力持续提升,国际航空市场规模不断增长,与欧洲和北美的航空市场形成明显的竞争,2018年全球前50城市航线网络密度如图5所示。

2018年北美和一些欧洲的中心度呈现下降趋

势,英国、德国的中心度下降均超过10,北美的中心度也下降明显,航空覆盖范围持续下降。前10位城市 and 上一年没有太大变化,分别是伦敦、巴黎、阿姆斯特丹、迪拜、法兰克福、伊斯坦布尔、香港、新加坡、曼谷、首尔,伦敦自从成为世界城市榜首之后,凭借希斯罗机场的高中转性和通达性也占据了航空榜首。

新上榜的城市是东亚、东南亚地区部分国家,泰国、马来西亚凭借良好的旅游条件入围,埃及、中东、埃塞俄比亚有区位优势,而中国和印度和南非的经济快速发展也使其航线地位上升,成为新的全球性航空枢纽,全球航空运输布局愈加均衡化。中国香港的热度仍然很高,泰国旅游的热度仍然不减,韩国旅游热度也居高不下(表4)。

2018年中心度的变化如图6所示。

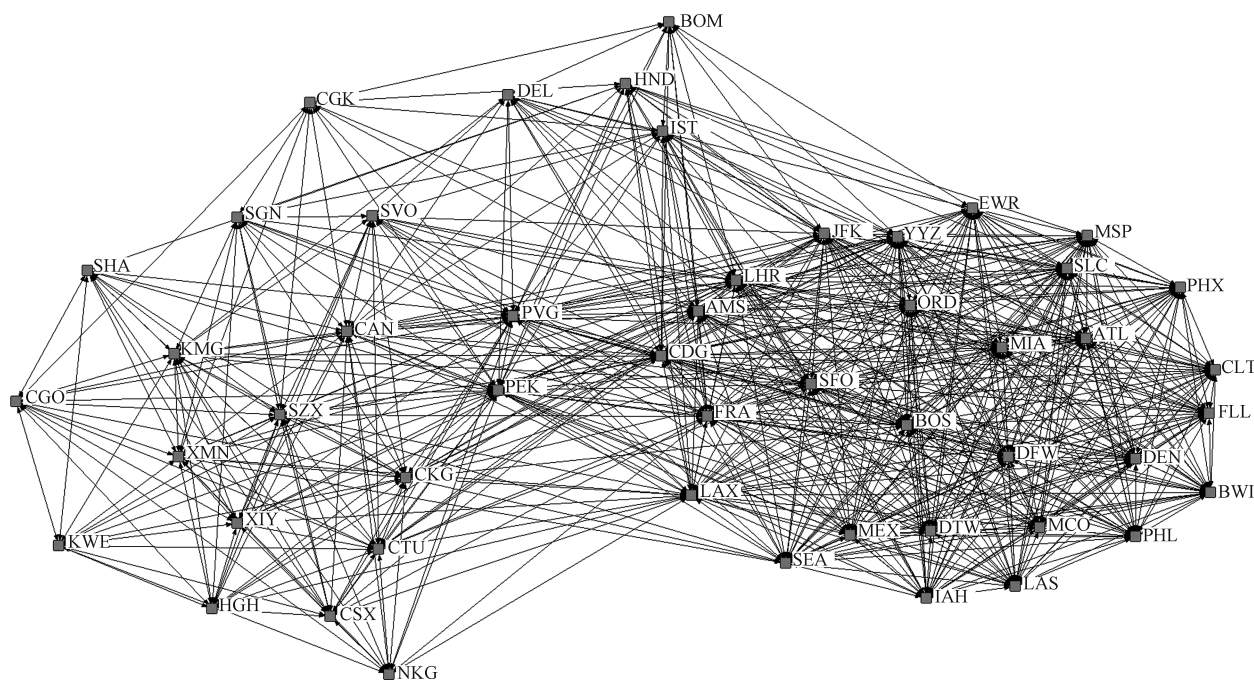


图5 2018年全球前50城市航线网络密度

表 4 2018 年世界城市 4 种中心度

排名	城市	度中心度(DC)	接近中心度(CC)	中介中心度(BC)	特征中心度(EC)
1	伦敦	36.54	60.85	11.63	27.37
2	巴黎	28.48	58.13	7.62	24.62
3	阿姆斯特丹	24.42	55.99	4.48	23.59
4	法兰克福	28.74	58.22	6.15	24.79
5	迪拜	23.72	55.61	8.74	18.54
6	新加坡	14.72	51.08	5.02	10.53
7	伊斯坦布尔	21.99	55.77	6.01	19.77
8	香港	15.50	52.14	4.79	11.87
9	曼谷	16.28	50.84	5.79	10.75
10	首尔	14.89	51.54	4.50	11.11
11	纽约	13.68	52.55	2.88	14.59
12	莫斯科	20.69	54.00	7.04	19.05
13	慕尼黑	21.13	55.13	2.82	21.63
14	吉隆坡	11.17	47.34	2.15	6.39
15	多伦多	18.27	52.79	11.42	13.16
16	东京	11.34	51.26	2.16	11.48
17	慕尼黑	22.68	53.50	3.16	21.93
18	马德里	16.10	52.88	1.94	18.36
19	米兰	20.35	54.97	3.07	20.84
20	苏黎世	12.29	49.83	3.39	6.84
21	苏黎世	17.23	53.03	1.37	20.10
22	罗马	17.75	54.46	1.92	20.13
23	巴塞罗那	15.93	51.98	1.59	18.44
24	维也纳	17.49	53.87	1.82	20.44
25	哥本哈根	17.32	53.70	2.30	19.90
26	上海	10.04	50.59	1.68	10.34
27	都柏林	14.81	50.68	1.32	17.35
28	多哈	14.37	50.20	2.03	14.71
29	柏林	16.19	50.00	1.06	17.99
30	斯德哥尔摩	16.80	51.36	2.13	19.17
31	里斯本	11.60	48.92	1.49	14.72
32	杜塞尔多夫	18.96	51.24	2.66	18.66
33	迈阿密	10.82	47.53	3.55	8.80
34	曼彻斯特	17.66	51.72	1.63	18.58
35	北京	12.03	52.91	2.20	13.75
36	洛杉矶	8.66	51.04	2.79	10.01
37	巴拿马城	8.05	43.80	2.20	4.57
38	日内瓦	13.07	49.70	1.14	16.42
39	赫尔辛基	13.25	50.44	1.38	16.89
40	奥斯陆	11.52	49.27	0.53	15.44
41	华沙	13.25	50.57	0.88	16.62
42	大阪	6.84	45.38	0.49	5.21
43	尼斯	8.23	45.80	0.39	12.62
44	马略卡岛的帕尔马	12.73	44.84	2.65	11.97
45	墨西哥城	7.01	45.92	1.49	6.07
46	布拉格	14.11	49.89	0.82	17.39
47	特拉维夫-雅法	14.11	50.64	1.24	17.12
48	吉达	16.10	51.17	9.01	9.70
49	阿布扎比	9.00	50.22	1.01	10.49
50	马尼拉	5.19	47.81	0.32	5.33

注:数据来源于 OAG 网站。

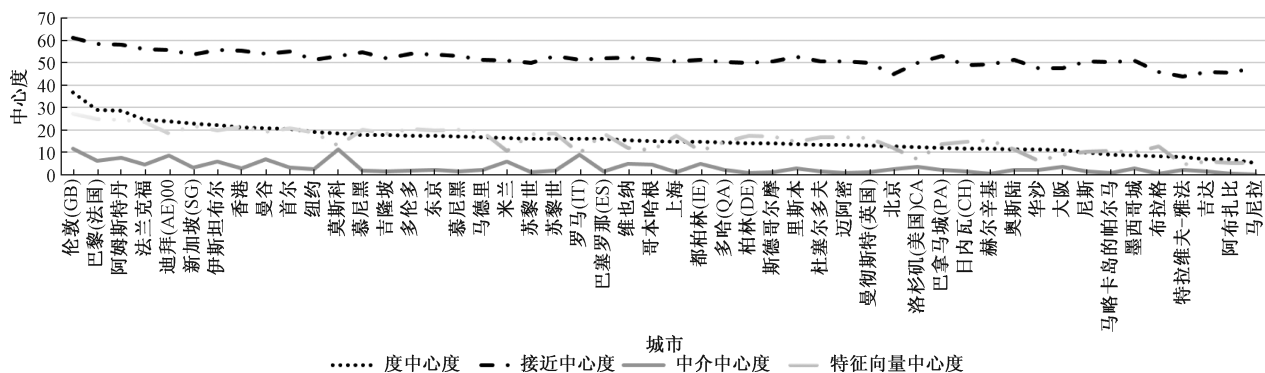


图 6 2018 年中心度

2.2.4 全球航空布局均衡

2020 年全球航空布局更加均衡,极化下降,去中心化趋势,多个枢纽中心崛起。中国在全球航空网络中的地位不断攀升,与多个国家产生最多的航空联系,说明中国成为更多地区的最大航班输出或流入地,北京、上海进入全球运力前 50 排名,亚洲、中东等地区在航线网络中地位上升,网络枢纽趋于分散,结构趋于均衡。联系紧密的节点数量变化不大,较稳定。其次,俄罗斯、阿联酋、南非、印度、英国、澳大利亚等国家的联系度排名较高,证明这些国家在与其他国家的航空关联中在某些区域占据一定的优势。受新冠肺炎疫情影响多个航线熔断整体网络趋于稀疏。这一年航空事业受到重创,经

济也受到影响,如图 7 所示。

2020 年整体航空网络变稀疏。全球航空客运网络的核心枢纽城市仍然在北美、欧洲。中东、东亚、东南亚和东非地区部分国家航空运输地位不断提升,与欧洲和北美的航空市场形成犄角之势,持续竞争。部分发达国家如美国、英国、德国三者的度中心性持续下降,航空覆盖范围持续下降。全球航空运输布局去中心化、均衡化,打破了北美、欧洲一枝独秀的局面。

排名前 10 位的城市分别是伦敦、巴黎、阿姆斯特丹、伊斯坦布尔、法兰克福、迪拜、首尔、纽约、多哈、莫斯科,由于新冠肺炎的高传染性,旅游业发展受阻,南亚地区的曼谷、新加坡等地区的航线通达性

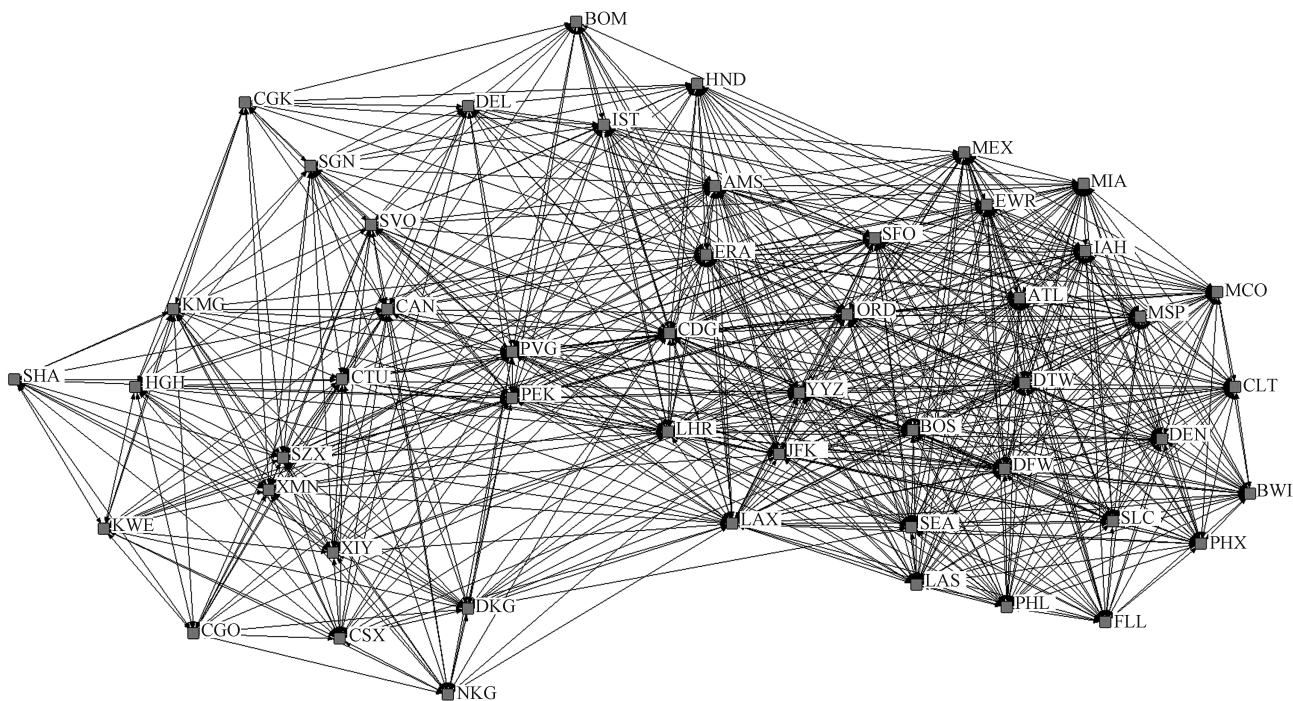


图 7 2020 年全球前 50 城市航线网络密度

下降,东亚、南亚、东南亚地区高涨的势头遇到了阻碍。前几名没有太大变化,仍在集中在欧洲和北美等发达经济地区,纽约、多哈、莫斯科进入了前10名。欧洲和北美的垄断地位逐渐回升,航空运输往来密切,这两个经济发达体之间的航空关联甚

密,航空中心度均很高,欧洲的中心度最高、其次是北美,航空网络均衡的局面被打破,中东地区位于欧亚非大陆的地理中心处,持续发挥区位优势(表5)。

如图8所示为2020年中心度的变化。

表5 2020年世界城市4种中心度

排名	城市	度中心度(DC)	接近中心度(CC)	中介中心度(BC)	特征中心度(EC)
1	伦敦	37.83	27.49	12.82	28.38
2	巴黎	28.84	26.78	7.41	25.33
3	阿姆斯特丹	26.15	26.63	5.56	24.59
4	伊斯坦布尔	23.36	26.44	5.54	22.03
5	法兰克福	27.85	26.88	6.42	25.12
6	迪拜	26.15	26.46	10.00	20.54
7	首尔	15.90	25.66	5.18	12.50
8	纽约	13.48	25.68	2.73	14.83
9	多哈	17.79	25.55	3.45	17.32
10	莫斯科	21.83	26.03	7.46	19.92
11	曼谷	16.35	25.18	4.42	12.61
12	维也纳	18.15	25.69	2.26	20.42
13	新加坡	14.91	25.19	4.24	11.85
14	布鲁塞斯	22.73	25.79	3.56	21.87
15	慕尼黑	18.42	25.99	1.90	20.67
16	米兰	19.14	25.75	2.25	20.69
17	马德里	14.82	25.80	2.87	17.71
18	圣胡安	7.64	22.54	3.93	2.80
19	东京	11.77	25.25	2.03	11.61
20	苏黎世	15.81	25.58	1.42	19.67
21	香港	14.20	25.33	3.60	11.77
22	多伦多	18.06	25.75	9.90	12.85
23	罗马	18.33	26.03	2.00	21.00
24	都柏林	15.72	25.08	1.91	17.99
25	吉隆坡	12.94	24.67	2.92	8.41
26	哥本哈根	14.65	25.47	1.85	18.29
27	巴塞罗那	14.20	25.37	0.91	17.65
28	台北	12.13	24.82	2.97	7.68
29	里斯本	11.05	24.85	1.86	14.47
30	柏林	15.27	24.62	0.90	17.10
31	迈阿密	9.88	24.37	3.42	8.78
32	斯德哥尔摩	12.94	25.01	1.24	16.76
33	杜塞尔多夫	15.90	24.92	1.17	17.48
34	华沙	14.29	25.63	1.45	17.93
35	马斯喀特	8.45	24.26	0.86	8.29
36	沙迦	9.07	22.77	0.59	5.05
37	曼彻斯特	17.25	25.39	1.61	18.16
38	开罗	12.40	25.27	2.66	13.52
39	科威特	8.81	24.42	1.22	8.78
40	尼斯	7.28	23.86	0.27	12.11
41	墨西哥城	5.93	24.12	1.04	6.26
42	坎昆	9.52	24.08	3.16	8.71
43	洛杉矶	8.89	25.27	2.91	9.72
44	上海	10.78	25.14	2.02	10.94
45	吉达	15.09	25.31	6.88	11.17
46	奥斯陆	8.81	24.54	0.34	13.32
47	雅典	9.97	24.83	0.39	15.08
48	布加勒斯特	9.61	24.09	0.24	14.02
49	赫尔辛基	11.32	25.07	1.65	15.49
50	布达佩斯	12.49	24.66	0.62	16.36

注:数据来源于 OAG 网站。

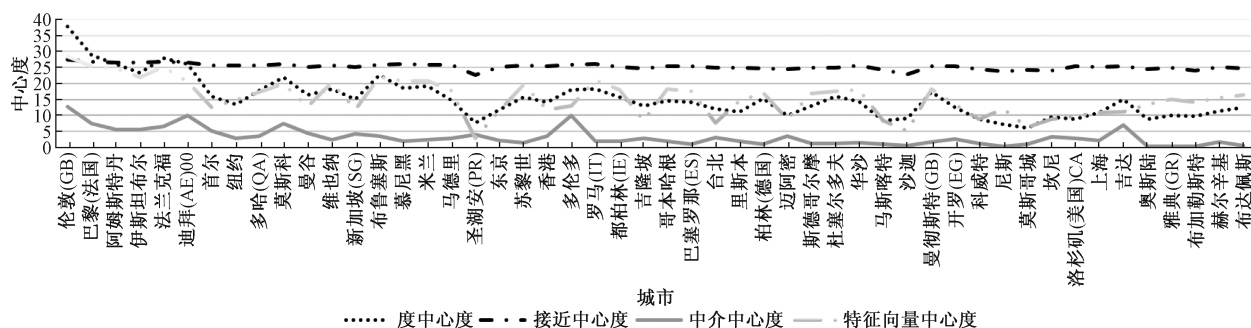


图8 2020年中心度

3 结论

3.1 全球航空网络的空间结构特点

根据全球 2010—2020 年国际航路 frequency 前 50 的国际航线形成的网络数据样本,在复杂网络理论的基础上,进行实证研究,得出全球航空网络有小世界、无标度网络等特性。

3.1.1 小世界网络

航空网络的平均最短路径小于同等规模下随机网络,且全局集聚系数大于同等规模下随机网络,得出航空网络为小世界网络。小世界网络,等于相邻的城市间有互动,不相邻甚至较远距离的城市也可以互动,因为航空运输可以打破地理、距离的限制。

3.1.2 无标度网络

无标度网络显示,个体与个体之间的差异不大。正态分布描述类似这样群体特性大致相同的情况。其中幂指数 γ 是描述网络结构特性的一个参数,取值通常为 2~3。航空网络一般一次即可联系,最多 2 或者 3 即可联系上,节点度呈幂律分布的直观表现是,大多数节点的度较小,而少数枢纽节点的度很大。符合枢纽机场轴-辐模式,大多数国家航空枢纽城市也是经济发展较好的地区,以此为核心再转机形成干线-支线机场群格局,效率比过去点对点城市对要高。

3.1.3 航空网络中的节点地位与其经济发展水平息息相关

比如伦敦进 GaWC 的 Alpha 城市榜首后也占据了航空流首位。中东、亚洲等地区随着经济发展也逐渐开始崛起,这些地区、城市的中心性提高,逐渐起到全球航空网络中的枢纽作用和欧美相互抗衡。

全球前 50 城市航空网络关联分析特征,由集聚在北美、欧洲等发达国家和地区到分布逐渐平衡,由中东异军突起占领中转市场到亚洲、非

洲等地区也逐渐崛起成为新的航空枢纽,而北美、欧洲等地的中转率下降,全球航线网络排布趋于均衡。

3.2 全球航空网络的变化

3.2.1 欧美国家和地区制霸航路

2010—2013 年经济发达地区的欧美国家在工业革命和经济全球化中率先崛起,占据了航空网络的霸主地位,尤其是连接国家和地区最多的美国,芝加哥和纽约占据了榜首,连接能力一直很强;其次是德国、俄罗斯、南非、英国、印度和澳大利亚等国家。

3.2.2 新航空枢纽的出现

伦敦在 2013 年全球航空地位提升、成为航空公司榜首,同时也成为 GaWC 的 Alpha++ 世界城市榜首,从此,伦敦在航空网络和 GaWC 双榜单中占据主导地位,打破了美国芝加哥和纽约的统治地位。

中东地区因其占据亚欧非地理几何中心位置逐渐崛起,以优越的地理条件成为新的航空枢纽,中国和澳大利亚的航空地位也在慢慢上升,呈现均衡布局的趋势。欧洲和北美的航空优势地位正在丧失,在航空领域的制霸被打破。

3.2.3 全球新航空枢纽地位持续上升

2018 年全球航空运输布局越来越均衡。欧洲一些发达国家的度中心性数值明显下降,其中美国、英国和德国的度中心性下降幅度超过 10,航空覆盖率持续下降。相比之下,东亚、东南亚、东非一些国家的航空地位崛起。一有经济发展迅速,如中国、印度、南非等;二是旅游条件好,如泰国、马来西亚等推出旅游政策,使得航空运输地位上升;三是地区发挥区位优势,如埃及、埃塞俄比亚、中东等,地处三大洲中心,对外航空运输发展迅速,国际通航能力不断提高,国际航空市场不断壮大,与欧洲、北美的航空市场形成明显竞争。

3.2.4 全球航空布局趋于均衡

2020年,中国在全球航空网络中的地位持续上升,与多个国家产生了更多的航空联系,表明中国可能成为更多地区的最大输出国或流入国,北京和上海进入全球运力排名前50,亚洲、中东和其他地区的航线网络不断上升,枢纽趋于稀疏、分散。

观察2010—2020年进入全球前10的城市频

次,可以发现高频的城市几乎和GaWC城市Alpha级别的城市吻合(图9)。

3.3 展望

中国航空网布局起步晚,希望能借鉴国际航空网线布局,探讨世界城市的发展与航空运输间的关系,科学高效排布航线网络,从而高效输送物质和人员,降本增效,促进经济社会的发展。

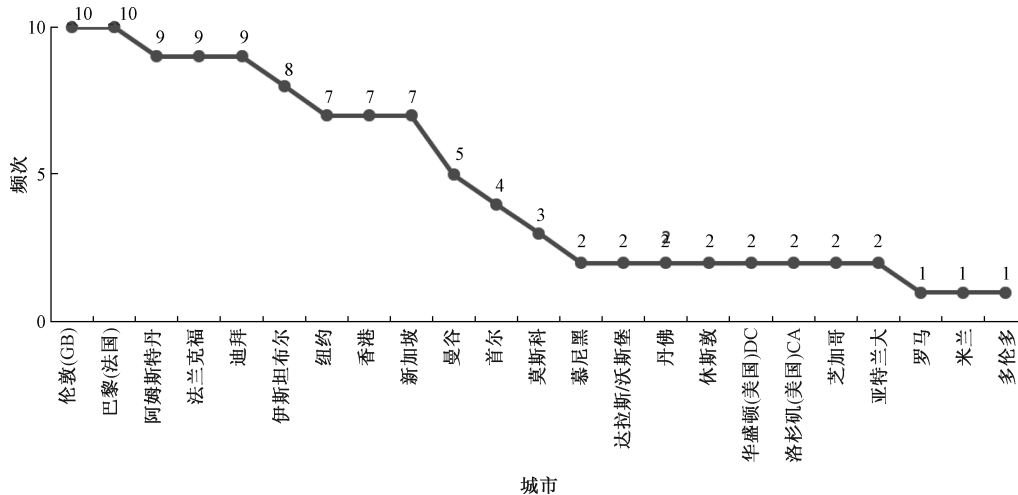


图9 2010—2020年进入全球前10的城市频次

参考文献

- [1] 高磊. 复杂网络上的信息有效传播研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [2] 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[J]. 地理学报, 2006, 61(8): 10.
- [3] 王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性[J]. 地理学报, 2009, 64(8): 12.
- [4] 陈俊晖. 中国航空网络的演化及其拓扑结构分析[J]. 信息通信, 2013(3): 3.
- [5] 马学广, 赵彩霞. 中国城市网络格局阶层与布局: 航空客运流的实证[J]. 城市发展研究, 2020, 27(9): 8.
- [6] 陈欣, 李心茹, 戴靓, 等. 基于复杂网络的机场群航线网络动态特征分析[J]. 交通科技与经济, 2020, 22(3): 8.
- [7] 张培文, 杜福民, 王雪, 等. 近十年中国客运航空网络空间结构演化及分析研究[J]. 世界地理研究, 2021, 30(6): 1253-1264.
- [8] 董雅晴, 路紫, 张一诺, 等. 航空流网络解构与空域资源动态配置研究——以京-成空中廊道为例[J]. 地理与地理信息科学, 2022, 38(1): 116-125.
- [9] 褚艳玲, 宫之光, 杨忠振. 21世纪以来中国航空货运空间变化研究[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 7-17.
- [10] 徐开俊, 肖成坤, 杨泳, 等. 基于复杂网络理论的中国城市航空网络有向加权分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15669-15673.
- [11] 吴宜耽. 全球国际航空网络结构复杂性及社团特征研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2022.
- [12] 李恩康, 陆玉麒, 杨星, 等. 全球城市网络联系强度的时空演化研究——基于2014—2018年航空客运数据[J]. 地理科学, 2020, 40(1): 32-39.
- [13] 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(1): 8-15.
- [14] 曹湛, 戴靓, 吴康, 等. 全球城市知识合作网络演化的结构特征与驱动因素[J]. 地理研究, 2022, 41(4): 20-26.
- [15] 唐承辉, 张衍春. 全球城市区域合作网络结构演变——以粤港澳大湾区为例[J]. 经济地理, 2022(2): 26-30.
- [16] 黄璜. 全球化视角下的世界城市网络理论[J]. 人文地理, 2010(4): 7-17.
- [17] 姜炎鹏, 陈固桦, 马仁峰. 全球城市的研究脉络——理论论争与前沿领域[J]. 人文地理, 2021, 36(5): 11-16.
- [18] 汪波, 叶振, 张业楠. 迪拜拓展城市网络连通性的模式——成效与启示[J]. 全球城市研究(中英文), 2021, 2(2): 148-159.
- [19] PALEARI S, REDONDI R, MALIGHETTI P. A comparative study of airport connectivity in China, Europe and US: which network provides the best service to passengers[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2010, 46(2): 198-210.

Characterization of the Spatial Structure of International Aviation Networks

HAN Yueran

(China Airport Construction Group Co. Ltd. , Beijing 100020, China)

Abstract: Air transportation is characterized by fast, efficient and long-distance transportation, which can break the geographical limitations, promote the transnational flow of economic factors such as people, technology, capital and commodities, link individual cities into a city network, reduce the cost of travel and promote the development of the world economy. The aviation network constructed from the data of air passenger flights from 2010 to 2020 was analyzed, and the spatial structure and evolution law of the aviation network were studied by using complex network theory and social network analysis. The research results show that from 2010 to 2013, Europe and the United States occupy the dominant position in the aviation network, and Chicago and New York have been dominating the list. The Middle East began to rise as an aviation hub due to its geographic location advantage in 2013. In 2018, thanks to the tourism policy and the economic rise, the aviation position of East Asia, Southeast Asia and East Africa is increasing, while the aviation position of the developed countries in Europe and the United States is declining, and the global aviation layout is tending to be balanced. In 2020, the global aviation layout will be more balanced, and China's position in the global aviation network will gradually increase. Aviation network has the characteristics of small world and scale-free network, which can promote the interaction and connection between cities and break the limitations of geography and distance. These findings help optimize China's aviation network, improve the accessibility and reliability of air passenger and cargo flows, and achieve the goal of a strong civil aviation nation.

Keywords: international routes; accessibility; world city networks; route network analysis